



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Πτυχιακή Εργασία

**“Παρουσίαση των φυσικών αρχών Darcy και εφαρμογή στα
τεχνικά έργα”**

ΚΩΝΣΤΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Α.Μ. 7248

ΜΑΝΘΟΣ ΗΛΙΑΣ Α.Μ. 7235

ΜΟΥΡΓΕΛΑΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ Α.Μ. 7307

Επιβλέποντες καθηγητές:

Δρ. Ειρήνη Βγενοπούλου, Καθηγήτρια

Δρ. Νικόλαος Φουρνιώτης, Επίκουρος Καθηγητής

ΠΑΤΡΑ 2021

**“ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΑΡΧΩΝ DARCY ΚΑΙ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΑ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ”**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Α.Μ. 7248

ΜΑΝΘΟΣ ΗΛΙΑΣ Α.Μ. 7235

ΜΟΥΡΓΕΛΑΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ Α.Μ. 7307

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΣΠΟΥΔΑΣΤΩΝ.....	6
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	8
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	10
1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	25
2.1 Ο Νόμος του Darcy.....	25
2.2 Παρουσίαση του νόμου του Darcy	26
2.3 Υδραυλική Αγωγιμότητα Κορεσμένου Εδάφους	28
2.4 Υδραυλική Αγωγιμότητα Ακόρεστου Εδάφους.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	31
3.1 Υπόγεια Νερά	31
3.2 Υπόγεια νερά και υδροφορείς	32
3.3 Το μαθηματικό πρόβλημα των υπόγειων νερών	35
3.5 Εξισώσεις γραμμών ροής και δυναμικού.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	38
4.1 Αναχώματα.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	39
5.1 Υδραυλική των πηγαδιών.....	39
5.2 Μόνιμη ροή από άντληση πηγαδιού σε περιορισμένο υδροφορέα	39
5.3 Μόνιμη ροή από άντληση πηγαδιού σε φρεάτιο υδροφορέα	40
5.4 Μόνιμη ροή από άντληση πηγαδιού σε περιορισμένο υδροφορέα με διαρροή	40
5.5 Μη μόνιμη ροή από άντληση πηγαδιού σε περιορισμένο υδροφορέα.....	40
5.6 Συστήματα πηγαδιών και η μέθοδος των εικόνων	41
5.7 Μοντέλα προσομοίωσης των υπόγειων ροών.....	42
5.8 Κατασκευή και εφαρμογή αριθμητικών μοντέλων	42
5.9 Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών	43
5.10 Χαρτογράφηση των υπόγειων ροών.....	43
5.11 Χάρτες υπόγειων ροών	43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	45
6.1 Γεώτρηση.....	45
6.1.1: Είδη Γεωτρήσεων	45
6.2 Ιστορία.....	46
6.3 Περιστροφική Εξέδρα Γεώτρησης.....	46
6.4 Γεωτρητική Ιλύς.....	47
6.5 Προστατευτική Σωλήνωση και σκυροδέτηση	48
6.5.1 Προστατευτική Σωλήνωση.....	48
6.5.2 Σωλήνωση Παραγωγής.....	48
6.5.3 Σκυροδέτηση	49
6.5.4 Μηχανική Παραγωγής.....	49
6.5.5 Ολοκλήρωση.....	49
6.6 Διάτρηση	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	51
7.1 Είδη γεωτρύπανου	51
7.2 Τα μέρη του μηχανικού, περιστροφικού γεωτρύπανου.....	52
7.2.1 Πύργος.....	53
7.2.2 Κινητήρας	53
7.2.3 Πηλαντλία και αεροσυμπιεστής.....	53
7.2.4 Περιστρεπτός τροφοδότης νερού ή πολφού	53
7.2.5 Στέλεχος Kelly και περιστροφική τράπεζα	53
7.2.6 Διατρητική στήλη	54
7.2.6.1 Κολάρα και σταθεροποιητές.....	55
7.2.6.2 Περικοπτήρας ή αποξεστήρας	55
7.2.6.3 Κοπτικό άκρο.....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	57
8.1 Εισαγωγή στις γεωτρητικές παραμέτρους.....	57
8.1.1. Επίδραση του εφαρμοζόμενου βάρους στο κοπτικό.....	57
8.1.2. Επίδραση της ταχύτητας περιστροφής της στήλης	58
8.1.3. Επίδραση του κοπτικού άκρου	58
8.1.4. Επίδραση γεωτρητικού ρευστού.....	59
8.1.5. Όργανα επί τόπου μέτρησης των ιδιοτήτων του πολφού	60
8.2. Συστήματα καταγραφής των γεωτρητικών παραμέτρων	61
8.3. Βελτιστοποίηση της διατρητικής διαδικασίας μέσω προγραμμάτων εξομοίωσης	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9	62
9.1 Κατασκευή υδρογεωτρήσεων	62
9.2. Ερευνητική υδρογεώτρηση	63
9.2.1. Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων στην επιφάνεια του εδάφους	63
9.2.2. Εφαρμογή διασκοπήσεων	63
9.2.2.1. Διασκόπηση ηλεκτρικής αντίστασης	64
9.2.2.2. Διασκόπηση ακτινοβολίας γ	64
9.2.2.3. Διασκόπηση δυναμικού	64
9.2.2.4. Διασκόπηση νετρονίων	64
9.2.2.5. Ηχητική διασκόπηση	65
9.2.2.6. Διασκόπηση θερμοκρασίας	65
9.2.2.7. Μελέτη χαρτών	65
9.2.2.8 Γεωτρητικές τομές	65
9.3. Παραγωγική υδρογεώτρηση	65
9.3.1. Εργασίες συμπλήρωσης των παραγωγικών υδρογεωτρήσεων	66
9.3.1.1. Απόπλυση υδρογεώτρησης	66
9.3.1.2. Σωλήνωση υδρογεώτρησης	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10	68
10.1 Δειγματοληπτικές γεωτρήσεις	68
10.2 Σκοπός	68
10.3 Μέθοδοι γεωτρήσεις	68
10.4 Μέθοδοι διάτρησης	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11	70
11.1 Καθαρισμός γεώτρησης	70
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	72
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	73

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΣΠΟΥΔΑΣΤΩΝ

Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολόκληρου του κειμένου εξίσου, έχουμε δε αναφέρει στη Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε, επίσης, ότι οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

ΚΩΝΣΤΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΜΑΝΘΟΣ ΗΛΙΑΣ

ΜΟΥΡΓΕΛΑΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τους καθηγητές μας, κυρία Βγενοπούλου Ειρήνη, Καθηγήτρια και Πρόεδρο του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και τον κ. Φουρνιώτη Νικόλαο επίκουρο καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου που με τις υποδείξεις και συμβουλές τους αλλά και με την αμέριστη καθοδήγησή τους συνέβαλαν στην εκπόνηση της παρακάτω πτυχιακής εργασίας.

ΚΩΝΣΤΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΜΑΝΘΟΣ ΗΛΙΑΣ

ΜΟΥΡΓΕΛΑΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2021

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρακάτω πτυχιακή εργασία μελετήθηκαν οι νόμοι-αρχές του Darcy. Διερευνήθηκαν οι εφαρμογές του στα σύγχρονα τεχνικά έργα. Παρουσιάσαμε βιογραφικά στοιχεία του Darcy. Μελετήθηκε ο νόμος του για τη ροή κάτω από την επιφάνεια του εδάφους καθώς και την σημασία των αρχών του Darcy των αναχωμάτων των αντιπλημμυρικών έργων. Στην συνέχεια αναφερθήκαμε στην άντληση νερού από τον υπόγειο υδροφόρα (πηγάδι). Τέλος μελετήσαμε τις μεθόδους διανοίξεις γεωτρήσεων και τα μέσα που μας βοηθούν να πραγματοποιηθεί αυτό το εγχείρημα.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι δημοσιεύσεις του Darcy

- Darcy, Henry (1856). Les Fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris: Dalmont.
- Darcy, Henry (1857). Recherches Experimentales Relatives au Mouvement de L'Eau dans les Tuyaux. Paris: Mallet-Bachelier.
- Henry Darcy, Henri Bazin, " Recherches hydrauliques entreprises par M. Henry Darcy continuées par M. Henri Bazin. Première partie. Recherches expérimentales sur l'écoulement de l'eau dans les canaux découverts," Paris, Imprimerie impériale, 1865.
- Henry Darcy, Henri Bazin, "Recherches hydrauliques entreprises par M. Henry Darcy continuées par M. Henri Bazin. Deuxième partie. Recherches expérimentales relatives au remous et à la propagation des ondes," Paris, Imprimerie impériale, 1865.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Ο Henry Darcy (1803-1858) γεννήθηκε, μεγάλωσε και εδραιώθηκε στην πόλη Dijon της Γαλλίας. Ο πατέρας του, Jacques Lazare Gaspard, ήταν φοροεισπράκτορας και η μητέρα του ήταν η Aqathe Angeliqne Serdet. Ήταν ένας διακεκριμένος μηχανικός, επιστήμονας και πολίτης που έχει μείνει στην ιστορία για τις πολλές συνεισφορές του στην υδραυλική, με τον γνωστό στον τομέα μας Νόμο του Darcy, συμπεριλαμβανομένου και τον νόμο για την ροή σε πορώδη υλικά, τον οποίον θα την συζητήσουμε εκτενώς παρακάτω. Ενώ του δόθηκε πλήρης πίστωση για τα ευρήματά του, δεν έχουν βρεθεί, ακόμα, επαρκείς πληροφορίες για την διαδικασία με την οποία τα ανακάλυψε. Αποδεικνύεται, ότι η ανακάλυψη τους ήταν ένα λογικό αποτέλεσμα της εκπαίδευσής του, της επαγγελματικής πρακτικής άσκησης του και της έρευνάς του. Ο Darcy ήταν και από τους πρώτους που απέδειξε ότι υπάρχει σημαντική αντίσταση ροής εντός των υδροφόρων αξόνων και ο πρώτος που συνδύασε τον νόμο του με τον νόμο της συνέχειας για να βρει λύση για την μη σταθερή ροή.

Η αρχή της μαθητικής του ζωής δεν άρχισε και με τον καλύτερο τρόπο. Όταν ήταν 14 χρονών έχασε τον πατέρα του. Αυτό όμως δεν εμπόδισε την μητέρα του, η οποία δανείστηκε χρήματα από τον κουνιάδο της, ο οποίος ήταν και ο δάσκαλος του Darcy, και διεκδίκησε μια υποτροφία για το κολλέγιο. Το 1821 εισήλθε στο πολυτεχνική σχολή του Παρισιού (L'École Polytechnique). Το συγκεκριμένο πολυτεχνείο δημιουργήθηκε κατά την διάρκεια της Γαλλικής επανάστασης με σκοπό να αντικαταστήσει πολλά μικρά Βασιλικά σχολεία που είχαν δημιουργηθεί τα προηγούμενα χρόνια. Το πρόγραμμα σπουδών ήταν τριετές και έδινε ιδιαίτερη προσοχή στα μαθηματικά, τις επιστήμες, την μηχανική και υπήρχαν πρακτικά εργαστήρια, τα οποία θεωρήθηκαν καινοτόμα για την εποχή τους. Όλοι οι μαθητές εκπαιδευόντουσαν στην στρατιωτική τέχνη και αυτό είχε ως αποτέλεσμα να είναι η πρωταρχική πηγή αξιωματικών για τον Ναπολέοντα. Ο Gaspard-Marie Riche de Prony (1755-1839) ήταν ο διευθυντής (1800-1839) και βοήθησε το σχολείο να αναλάβει κεντρικό ρόλο σε όλους του τομείς της Γαλλικής εκπαίδευσης. Επιπλέον, εκείνη την περίοδο στην διοίκηση του σχολείου ήταν και ο Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) ο οποίος εκείνη την περίοδο δημοσίευσε την Théorie analytique de la chaleur δηλαδή την αναλυτική θεωρία της θερμότητας. Πιθανολογείται πως ο Fourier δίδαξε αυτή την θεωρία στον Darcy και έτσι τον βοήθησε για την μετέπειτα πορεία του προς τον Νόμο του Darcy. Μέσα από τα αρχεία του σχολείου μπορούμε να αντλήσουμε μερικές πληροφορίες για την εξωτερική εμφάνιση του Darcy. Σύμφωνα με τα σχολικά έγγραφα το ύψος του ήταν 1.69 μέτρα, είχε ανοιχτά καφέ μαλλιά, μπλε μάτια και σχιστόλιθο πηγούνι.

Σε ηλικία 20 ετών (1823) ο Darcy έγινε δεκτός στο L'École des Ponts et Chaussées δηλαδή Σχολή Γεφυρών και δρόμων. Το βήμα από L'École Polytechnique σε μια "École d'application" ήταν η φυσιολογική εξέλιξη για τους αριστούχους και καλύτερους μαθητές εκείνης της εποχής. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι αυτή η κίνηση θα καθόριζε όλη του την ζωή.

Το Σώμα Pontset Chaussée, δηλαδή το σώμα Γεφυρών και δρόμων ιδρύθηκε το 1716 και είχε σκοπό να υποστηρίξει την κατασκευή υποδομών στην χώρα. Με βασιλικό διάταγμα, το 1747, ιδρύθηκε το παραπάνω σχολείο για να εξασκήσει νέους μαθητές αλλά και ήδη μηχανικούς για να επανδρώσουν αυτό το σώμα. Ως το πρώτο σχολείο για μηχανικούς, αναθεώρησε τον τίτλο του Μηχανικού στην Γαλλία. Μερικοί από τους μαθητές και εκπαιδευτές που πέρασαν από αυτό το σχολείο είναι οι εξής :

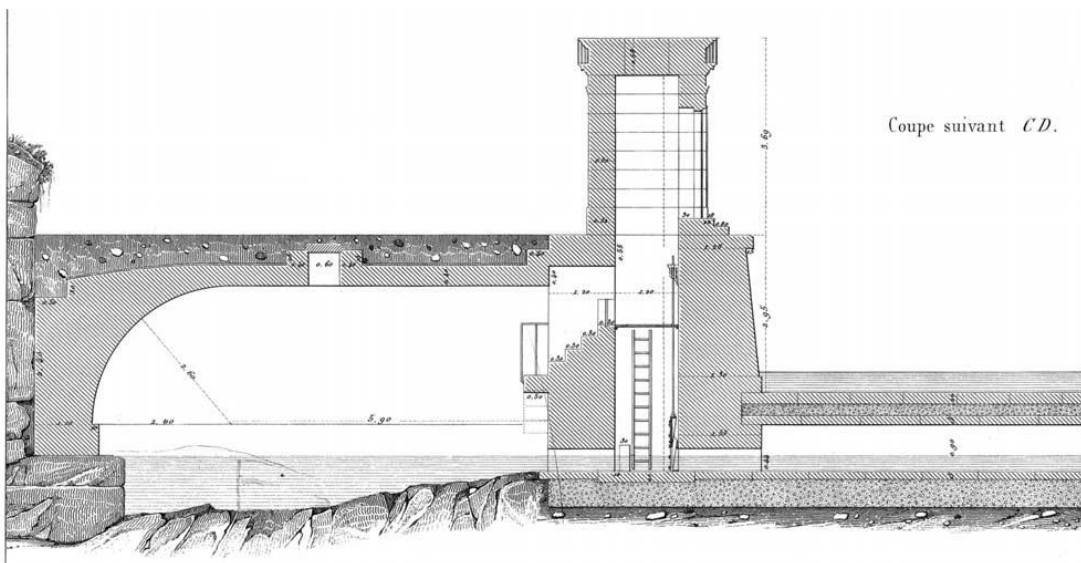
- Henri de Pitot (1696-1771)
- Antoine Chézy(1718-1798)
- Louis Marie Henri Navier (1785-1836)
- Augustin Louis Cauchy (1789-1857)
- Jean-Baptiste Bélanger (1790-1874)
- Gaspard Gustave de Coriolis (1792-1843)
- Jean Claude Barre de Saint-Venant (1797-1886)
- Arsene Jules Emile Juvenal Dupuit (1804-1866)
- Henri Emile Bazin (1829-1917)

Ο Coriolis δίδαξε στο L'École Polytechnique κατά την διάρκεια που ήταν μαθητής ο Darcy. Όταν ο Darcy εισήχθει στην σχολή, ήταν ανοιχτή για άνδρες από όλη την Γαλλία, η εισαγωγή στην σχολή γινόταν με εξετάσεις, οι οποίες ήταν πολύ ανταγωνιστικές αν σκεφτούμε το κύρος που διέθετε η σχολή. Τα δίδακτρα ήταν δωρεάν και οι μαθητές λάμβαναν ένα μικρό επίδομα. Οι μαθητές ήταν περίπου εξήντα πέντε και οι καθηγητές ήταν επτά. Μάλιστα, μερικοί εκπαιδευτές ήταν απόφοιτοι του συγκεκριμένου σχολείου, οι οποίοι μετά από μια περίοδο εξάσκησης, γύρισαν στο σχολείο για να συνεχίσουν παραπάνω τις σπουδές τους. Οι μαθητές του σχολείου, όπως είναι φανερό και από το όνομα, εκπαιδευόντουσαν στην μηχανική του στερεού, σχεδιασμό γεφυρών και στην κατασκευή υποδομών, η οποία θεωρείται αρκετά εξελιγμένη για την εποχή της.

Ο Darcy αποφοίτησε το 1826 με πτυχίο στους Πολιτικούς Μηχανικούς. Αμέσως ανατέθηκε από το Σώμα στο τμήμα Jura της Γαλλίας αλλά σύντομα μεταφέρθηκε στο σπίτι του, στην Ντιζόν. Η πόλη της Ντιζόν είχε κακής ποιότητας νερό, κάτι που ο Darcy ήθελε να βρεθεί λύση και για αυτό τον λόγο δεν έχασε χρόνο και άρχισε τις διατρήσεις σε περιοχές. Τον Μάρτιο του 1829 άρχισαν να τρυπάνε κοντά στην περιοχή Saint-Michel. Τον Αύγουστο του 1830, ενώ η έρευνα είχε φτάσει τα 150.72 μέτρα, βρήκαν υπόγεια νερά τα οποία όμως δεν μπορούσαν να φτάσουν μόνα τους ως την επιφάνεια. Ακόμη και αν μπορούσαν με κάποιο τρόπο να αντλήσουν το νερό, η παροχή θα έφτανε τα 500 λίτρα το λεπτό, μια τιμή που θεωρήθηκε μικρή για την πόλη της Ντιζόν. Μετά από αυτή την απογοήτευση, ο Darcy, με δικιά του πρωτοβουλία ξεκίνησε να σκέφτεται πως θα παρέχει στην πόλη δίκτυο νερού και η προσοχή του στράφηκε σε σημεία πιο συμβατικά. Ορισμένες από τις προτάσεις που είχε, υπήρχαν και στο παρελθόν αλλά η κάθε μια είχε και τα ελαττώματά της.

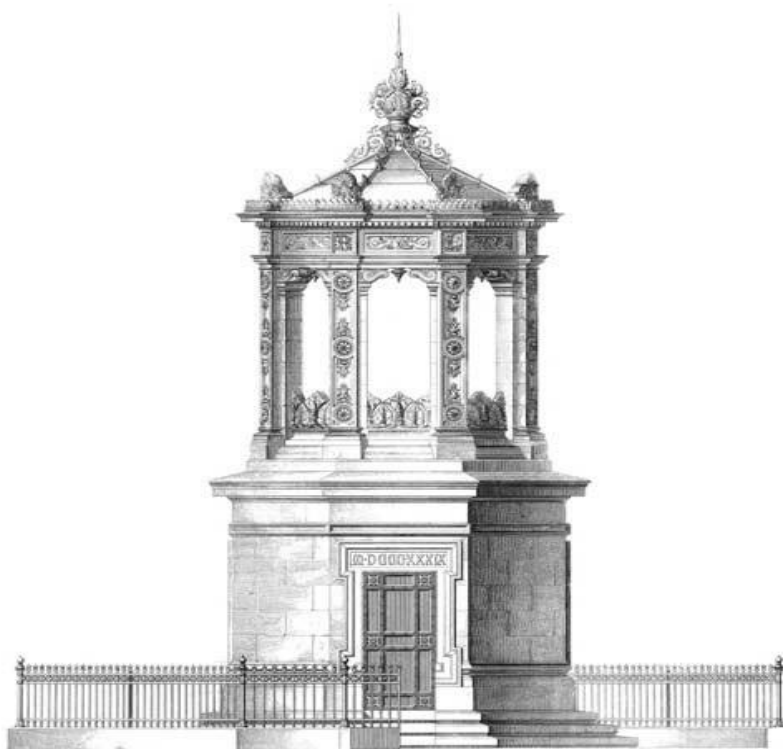
Μελετώντας τα προηγούμενα σχέδια που υπήρχαν, προχώρησε στην δημιουργία μιας νέας καλύτερης λύσης. Το 1834 δημοσίευσε την αναφορά με τίτλο <<Rapporta` M. Le Maire et au Conseil Municipal de Dijon sur les Moyens de Fournir l'Eau Ne`cessaire a` cette Ville>> δηλαδή την Αναφορά στον Δήμαρχο και Δημοτικό Συμβούλιο της Ντιζόν σχετικά με τα μέσα παροχής νερού που απαιτούνται για την πόλη. Η πρόταση του είχε να κάνει με την συλλογή

8 m³ νερού το λεπτό στην πηγή Rosoir, η οποία για να πραγματοποιηθεί έπρεπε να σκαφτεί περαιτέρω η πηγή για να βελτιωθεί η ροή της (**Εικόνα 1**).



Εικόνα 1: Τομή της πηγής Rosoir με το κλειστό υδραγωγείο στα δεξιά. (πηγή: <https://appurl.io/BcTwRaEbaE>).

Το νερό μεταφερόταν, στην συνέχεια, 12.7 χιλιόμετρα με την βοήθεια κλειστού υδραγωγείου σε κλειστή δεξαμενή 5,700 m³ η οποία βρισκόταν κοντά στο Porte Guillaume και σε μια άλλη δεξαμενή στο Montmusard (**Εικόνα 2**).



Εικόνα 2: Chateaud'Eau, είσοδος στην δεξαμενή του Porte Guillaume (πηγή: <https://appurl.io/GE7CJQN2LX>).

Από τις πιο κομψές εισόδους δεξαμενών, κάτι που υποδεικνύει τον υψηλό αντίκτυπο του έργου στην τοπική κοινότητα, τον σημαντικό χαρακτήρα του έργου και φυσικά τονίζει την αίσθηση των Γάλλων για την μνημειακή αρχιτεκτονική. Στο δίκτυο τοποθετήθηκαν γραμμές διανομής υπό πίεση, συνολικού μήκους 28,000 μέτρων, κάτω από το έδαφος και μετέφεραν νερό σε κύρια κτίρια της πόλης και σε 142 δημόσιους πυροσβεστικούς κρουνοί οι οποίοι υπήρχαν σε απόσταση 100 μέτρων ο ένας από τον άλλον διάσπαρτα μέσα στην πόλη. Οι συγκεκριμένοι κρουνοί δημιουργήθηκαν για οικιακή χρήση (1 κρουνοί για 200 άτομα) όπως το πλύσιμο δρόμων, υπονόμων και για την καταπολέμηση των πυρκαγιών. Το συγκεκριμένο σύστημα λειτουργούσε με την βαρύτητα και δεν χρειάστηκε να τοποθετηθούν αντλίες που θα βοηθούσαν το νερό να κινηθεί καλύτερα μέσα στο δίκτυο. Επίσης, η πηγή είχε κλειστεί εξωτερικά έτσι ώστε το νερό να διανέμεται χωρίς φιλτράρισμα ή κάποιου είδους επεξεργασία.

Με αυτό το έργο ο Darcy έδειξε μια μικρή όψη από τις ικανότητές του και τις γνώσεις του. Στο πρώτο μέρος της αναφοράς ο αναγνώστης θα καταλάβει ο μέγεθος της λεπτομέρειας, πληρότητας και επιμέλειας που υπήρχαν για τις προηγούμενες προτάσεις που του είχαν προταθεί για το συγκεκριμένο έργο αλλά για τα υπάρχοντα, στην εποχή, δίκτυα.

Επιπροσθέτως, υπάρχουν αναφορές από τον 15^ο αιώνα, κάτι που υποδεικνύει την σοβαρότητα της μελέτης του και την σφαιρικότητα των γνώσεών του. Επίσης, ανέφερε ότι είχε επαφές με Άγγλους κι άλλους Γάλλους συναδέλφους του που τον βοήθησαν να αποφασίσει τις ανάγκες και τον σχεδιασμό του συστήματος. Στο δεύτερο μέρος, παρέχει μια ολοκληρωμένη αναφορά για 4 εναλλακτικές λύσεις με εκτίμηση για τον προϋπολογισμό τους όσον αφορά στην κατασκευή και την λειτουργία τους. Δύο επιλογές χρησιμοποιούσαν φυσικές πηγές, η τρίτη αφορούσε την χρήση φιλτραρισμένο νερό από το Ouche και η τέταρτη επιλογή αφορούσε το πηγάδι του Saint-Michel. Η εξίσωση του Prony χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη των σωλήνων και τον καναλιών.

$$h_L = \frac{L}{D} (aV + bV^2) \quad (1)$$

Όπου: h_L εκφράζει τις απώλειες που δημιουργούνται μέσα στον σωλήνα, L είναι το μήκος του σωλήνα, D είναι η διάμετρος του σωλήνα, a και b εμπειρικοί συντελεστές τριβής και V η ταχύτητα ροής του νερού. Ο Darcy χρησιμοποίησε μια ροή σχεδιασμού μεγαλύτερη κατά 50% για να είναι από την μεριά της ασφάλειας στους σχεδιασμούς του.

Ο Darcy είχε κατανοήσει την ροή του νερού μέσα από πορώδη μέσα. Φυσικά και τεχνητά φίλτρα χρησιμοποιήθηκαν για τον καθαρισμό του νερού σε πολλά έργα της εποχής. Φυσικά φίλτρα χρησιμοποιήθηκαν σε μεγάλα κανάλια δίπλα στις προσχώσεις των ποταμών ενώ τα τεχνητά φίλτρα ήταν πιο μικρά κατασκευασμένα σε κλειστές λεκάνες διάφορων σχεδίων. Και οι δύο τύποι φίλτρων αναγκαζόντουσαν να χρησιμοποιήσουν μηχανές και αντλίες για να υπερνικήσουν την υψομετρική διαφορά ανάμεσα στην πηγή νερού και τα σημεία διανομής του νερού. Τα σύγχρονα φίλτρα της εποχής είχαν πρόβλημα με το φράξιμο και για αυτό ο Darcy ήταν διστακτικός απέναντι τους. Όπως είχε πει αναλυτικά στην αναφορά του «Έπρεπε να υποβάλω την διαδικασία με κάθε λεπτομέρεια για να αποδείξω πόσο ευαίσθητη είναι η λειτουργία καθαρισμού του νερού. Άγγλοι μηχανικοί, ήταν τόσο πεπεισμένοι στα σύγχρονα φίλτρα που συμβούλευαν τις εταιρείες να τα χρησιμοποιούν, όταν επρόκειτο για πηγές, ακόμη και αν γνώριζαν ότι το κόστος της κατασκευής θα μεγάλωνε.»

Ενώ ο Darcy υπολόγιζε την απαιτούμενη ιπποδύναμη της αντλίας και την ποσότητα του άνθρακα που χρειαζόταν για έναν εναλλακτικό σχεδιασμό με φυσικό φίλτρο, δεν έκανε καμία εκτίμηση για τις απώλειες στην κεφαλή του φίλτρου. Η απαιτούμενη περιοχή φιλτραρίσματος υπολογιζόταν με έναν εμπειρικό κανόνα με σταθερή κεφαλή τροφοδοσίας. Η λειτουργία του φίλτρου δεν αποσυντέθηκε στα επιμέρους κομμάτια της και για αυτό τον λόγο δεν υπήρχε ακριβής γνώση της τριβής ανάμεσα στο ρευστό και την άμμο.

Λεπτομέρειες για την κατασκευή του πηγαδιού Saint-Michel δεν αναφέρονται ρητά, σύμφωνα όμως από διάφορες πηγές, πιθανολογείται ότι το πηγάδι είχε συμπαγές περίβλημα με μια μικρού μήκους τρύπας στο βάθος του. Ένας σωλήνας εσωτερικής διαμέτρου 11 εκατοστών δημιουργήθηκε για να φτάσει μέχρι τον πάτο του πηγαδιού, στα 152 μέτρα, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί για την εισαγωγή του νερού με την βοήθεια μιας ατμοκίνητης αντλίας. Ο Darcy αναφέρει ότι η πτώση της στάθμης ήταν 1.8, 3.8, 5.8 μέτρα για ροές 125, 272 και 575 λίτρων το λεπτό αντίστοιχα. Δεν έχει γίνει κάποια αναφορά στην διάρκεια άντλησης, για αυτό τον λόγο πιθανολογείται ότι πίστευε οι τιμές ήταν σταθερές.

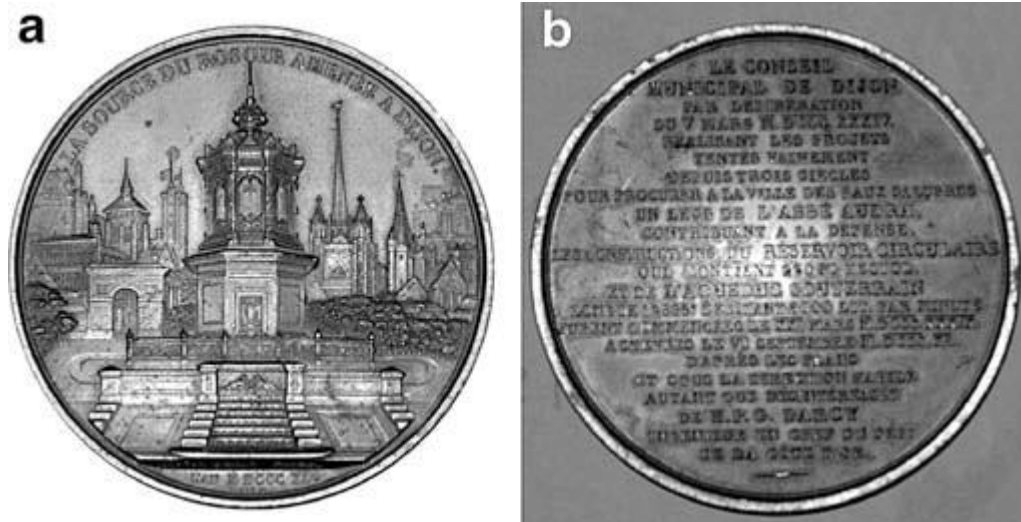
Ο Darcy ανακάλυψε πως μέσα στον υδροφορέα δημιουργούταν τριβή, ένα φαινόμενο νέο για εκείνον. Απέδειξε αυτή την θεωρία, ποσοτικοποιώντας το ποιός θα ήταν ο ρυθμός ροής άμα η πτώση της στάθμης ήταν το αποτέλεσμα μόνο τριβής μέσα στην σωλήνα εισαγωγής, χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση.

$$Q = 20.73 \sqrt{\frac{HD^5}{L}} \quad (2)$$

Όπου: $H = h_L$ δηλαδή οι απώλειες που παρατηρούνται, η αριθμητική τιμή ισούται με $\pi / 4 \sqrt{b}$, και το L ισούται ως η διαφορά του μήκους του σωλήνα και της μείωσης της στάθμης του εδάφους ($152.3 - H$). Οι υπολογισμοί είναι λογικοί όταν τους συγκρίνουμε με την εξίσωση Darcy-Weisbach και δείχνουν ότι περίπου η μισή τιμή της πτώσης της στάθμης οφείλεται στην τριβή μέσα στην σωλήνα. Τέλος, από αυτή την αναφορά δημιουργήθηκαν 400 αντίτυπα εκ των οποίων πολλά δόθηκαν σε μηχανικούς.

Από το 1834 μέχρι το 1848 ο Darcy μελέτησε και εκπόνησε πολλά σημαντικά έργα. Το σχέδιο του για την παροχή νερού στην Ντιζόν εγκρίθηκε από το Δημοτικό Συμβούλιο χωρίς καμία αναθεώρηση στις 5 Μαρτίου του 1835. Στις 31 Δεκεμβρίου 1835, με Βασιλικό διάταγμα το έργο κηρύχθηκε υψίστης δημοτικής σημασίας και άρχισαν οι πλειστηριασμοί των κατάλληλων κομματιών γης. Οι εργασίες άρχισαν τον Μάρτιο του 1838 και στις 6 Σεπτεμβρίου του 1840, 535 μέρες αργότερα, το νερό παραδόθηκε στην δεξαμενή Porte Guillaume. Η κατασκευή του κλειστού υδραγωγείου γινόταν με τον ρυθμό των 24 μέτρων την ημέρα, εντυπωσιακός ρυθμός για τα δεδομένα της εποχής. Εργασίες για την διανομή του νερού έγιναν μέχρι το 1844 όπου και το έργο ουσιαστικά ολοκληρώθηκε.

Σε όλα τα χρόνια της ζωής του τιμήθηκε για τις προσφορές του. Το 1836, η δουλειά του τιμήθηκε από τον Υπουργό Εξωτερικών και Δημόσιων Έργων. Στις 7 Μαΐου του 1840, σε ηλικία 37 χρονών, ο Darcy διορίστηκε αρχιμηχανικός του τμήματος Co[^] te-d'Or, που του εξασφάλιζε και μια θέση στο Δημοτικό Συμβούλιο. Μετά από σύσταση του νομάρχη της περιοχής και από τον Υπουργό των Εσωτερικών, στις 31 Αυγούστου του 1842 του απονεμήθηκε ο τίτλος Legion Z[^] of Honor (Λεγεώνα της Τιμής) από τον Βασιλιά Louis Philippe. Επιπροσθέτως, δέχτηκε ένα χρυσό μετάλλιο από το Δημοτικό Συμβούλιο και ένα στεφάνι δάφνης από τους εργάτες του έργου. Το μετάλλιο απεικονίζεται στην **Εικόνα 3**.



Εικόνα 3: (α) Η μπροστά όψη και (β) η πίσω όψη. Ο πύργος στο Porte Guillaume έχει σχεδιαστεί στην μπροστά όψη. Φωτογραφία του Pierre Darcy de Moltke Huitfeldt. (πηγή: <https://appurl.io/ggZ8Hiojv6>).

Το 1845 έγινε δεκτός στον σύλλογο της Ντιζόνγια την επιστήμη, την τέχνη και τα γράμματα (Dijon Society of Science, Art and Letters). Εκείνη την εποχή, ο Darcy, επέτρεπε την κατασκευή οδικών έργων, εργασιών πλοήγησης και πολλές γέφυρες, συμπεριλαμβανομένων δύο μεγάλων κατασκευών στον ποταμό Saône (Σον). Ένα άλλο δημοφιλές έργο του ήταν η κάλυψη 1.3 χιλιομέτρων του ρέματος Suzon, ενός μικρού ρέματος το οποίο λειτουργούσε σαν ανοιχτός υπόνομος μέσω του κέντρου της Ντιζόν. Το πιο δύσκολο και αμφιλεγόμενο έργο του, όμως, ήταν ο σχεδιασμός, έγκριση και έναρξη εργασιών του σιδηροδρομικού τμήματος της γραμμής Παρίσι-Λυών το οποίο περνά μέσα από το Côte-d'Or. Όπως είχε κάνει και προηγουμένως, ο Darcy εξέτασε προηγούμενες προτάσεις και κατάστρωσε τον δικό του βελτιωμένο σχεδιασμό ο οποίος βασίστηκε στην κατασκευή μιας σήραγγας 4 χιλιομέτρων στο Blaisy. Η οπή ήταν ίση με την μεγαλύτερη υπάρχουσα σήραγγα εκείνη την εποχή, με πρόταση της γνωστής γεωλόγου Elie de Beaumont (1798-1874) μετά από ανασκαφές στην περιοχή. Μετά από μια δύσκολη και πολιτικά φορτισμένη διαδικασία έγκρισης ο Darcy ξεκίνησε τις εργασίες τον Ιανουάριο του 1845 και ολοκλήρωσε περίπου το 1/3 της σήραγγας πριν αναλάβει το έργο ιδιωτική εταιρεία τον Απρίλιο του 1846. Η συγκεκριμένη σήραγγα χρησιμοποιείται ακόμα από το υψηλής ταχύτητας τρένο TGV το οποίο ενώνει το Παρίσι και την Ντιζόν. Ο Darcy δεν άφησε κάποιο αρχείο από την μελέτη του έργου αλλά η σήραγγα πρέπει να του έδωσε άμεσες παρατηρήσεις για τον συσχετισμό της γεωλογίας και της διαρροής του νερού στο υπέδαφος, πληροφορίες που λίγοι είχαν επεξεργαστεί τότε.

Αρκετοί ερευνητές της εποχής εξέλιξαν την υδραυλική θεωρία. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει το έργο του Jean Louis Poiseuille (1799-1869). Μέτρησε τις απώλειες λόγω τριβής σε τριχοειδείς σωλήνες μεγέθους 0.029 έως 0.142 χιλιοστών, πάνω σε ένα εύρος συνθηκών και με αυτό τον τρόπο ανέπτυξε μια εμπειρική σχέση για την ροή:

$$Q = kD^4 \frac{hL}{L} \quad (3)$$

όπου: k είναι ένας εμπειρικός συντελεστής για την τιμή του ιξώδες ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του νερού. Το πιο σημαντικό κατόρθωμα της παραπάνω εξίσωσης ήταν η

ακρίβεια με την οποία έβγαζε αποτελέσματα. Ενώ υπήρχε περιορισμός στο μέγεθος των σωλήνων και στις χαμηλές ταχύτητες, ήταν η πρώτη εξίσωση που η ακρίβεια της συγκρίνεται με αυτές του σήμερα.

Τον Φεβρουάριο του 1848, η κυβέρνηση του Louis Phillippe κατέρρευσε υπό την πίεση μιας οικονομικής αποτυχίας. Η συνταγματική μοναρχία αντικαταστάθηκε προσωρινά από μια κυβέρνηση Ρεπουμπλικάνων. Με την νέα κυβέρνηση ο Darcy τέθηκε σε αναστολή διότι θεωρήθηκε «επικίνδυνος για την νέα κατάσταση των πραγμάτων». Το Δημοτικό Συμβούλιο της Ντιζόν, το Σώμα και η L' Ecole Polytechnique διαμαρτυρήθηκαν για την κατάσταση αυτή, αλλά το μόνο που κατάφεραν ήταν ένα ραντεβού για να εργαστεί στο κανάλι Berry. Σε αυτή την νέα αποστολή του ο Darcy προετοίμασε μια μελέτη για ένα έργο το οποίο θα προσέφερε αποστράγγιση και ύδρευση στην περιοχή της Sologne. Ωστόσο, μετά τον επανασχηματισμό της Κυβέρνησης και την εκλογή του Louis Napoleon, ο Darcy επέστρεψε στο Παρίσι και διορίστηκε Διευθυντής στο τμήμα υδάτων και πεζοδρομίων (Chief Director for Water and Pavements).

Σύντομα ταξίδεψε στην Αγγλία για να συνομιλήσει με μηχανικούς και να συλλέξει πληροφορίες για τα πεζοδρόμια, όπως την κατασκευή πεζοδρομίων με στρώματα τριμμένων πετρών (Macadam), έναν τομέα που δούλευε τουλάχιστον από το 1847. Ο Darcy γνώριζε αρκετά την αγγλική γλώσσα αφού είχε μαθήματα αγγλικών στο L' Ecole des Ponts et Chausse'es και η γυναίκα του ήταν από την Αγγλία. Επιπροσθέτως, είχε τον χρόνο να συνομιλήσει με παλιούς του συναδέλφους και να επισκεφθεί τις εγκαταστάσεις τους. Με την επιστροφή του, δημοσίευσε μια σημαντική εργασία για την Αγγλική μεθοδολογία κατασκευής δρόμων. Με αυτή του την έρευνα προήχθη στην θέση του Γενικού Επιθεωρητή, 2^{ης} τάξης, τον Απρίλιο του 1850. Οι αρμοδιότητες του ως Γενικός Επιθεωρητής ήταν η εξέταση και αναφορά έργων που γίνονταν από το Σώμα σε όλη την χώρα. Επίσης, μέσα σε αυτό το διάστημα, έδωσε την γνώμη του και για το δημοτικό σύστημα ύδατος στο Βέλγιο. Για την συμβολή του στο έργο τιμήθηκε με το Order of Leopold. Ο Darcy με την νέα του θέση είχε τον πρώτο λόγο στην μεγάλη υδραυλική εγκατάσταση στο Chaillot, μια ευκαιρία για σημαντική έρευνα. Επιπλέον, ξεκίνησε και ολοκλήρωσε ένα πειραματικό πρόγραμμα με σκοπό την περαιτέρω εκτίμηση των συντελεστών τριβής στους σωλήνες του Prony. Το ενδιαφέρον του για την ροή σε σωλήνα πηγάζει από την κατασκευή του συστήματος νερού στην Ντιζόν. Ουσιαστικά, πραγματοποίησε δοκιμές σε διαφορετικούς τύπους σωλήνων, που η διάμετρός τους κυμαίνονταν από 0.012 έως 0.50 μέτρα, και με διαφορετικές ταχύτητες. Τα αποτελέσματα βελτίωσαν σημαντικά τις εκτιμήσεις για τις τιμές της τριβής δείχνοντας πως η τραχύτητα του τοιχώματος επηρέαζε τις απώλειες λόγω τριβής. Επίσης, κατέγραψε την πρώτη ακριβή μέτρηση για την κατανομή της ταχύτητας σε τυρβώδη ροή και εισήγαγε τα πρώτα στοιχεία για την ύπαρξη του υγρού οριακού στρώματος. Με αυτή του την έρευνα, δημιουργήθηκε ο τύπος με το όνομα "Darcy-Weisbach" :

$$h_L = \frac{fL V^2}{D 2g} \quad (4)$$

όπου: f ονομάζεται ο συντελεστής τριβής του Darcy, ένας συντελεστής που εξαρτάται από την σχετική τραχύτητα και τον αριθμό Reynolds. Πολλοί αναφέρονται στην παραπάνω εξίσωση απλά ως <<Εξίσωση του Darcy>> αλλά πρέπει να σημειωθεί ότι ο Julius Weisbach (1806-1871) ήταν ο πρώτος που εισήγαγε την παραπάνω εξίσωση.

Ο Darcy ολοκλήρωσε την έρευνα για την ροή σε αγωγό το 1854. Από την στιγμή που περιείχε σημαντικό νέο θεωρητικό υλικό, υποβλήθηκε στην Γαλλική Ακαδημία Επιστημών για έρευνα και δημοσίευση, μια υπόθεση που κράτησε 3 χρόνια. Η έρευνα έδειξε ότι ο Darcy κατανόησε πως το μέγεθος της τριβής του υγρού είναι συνάρτηση της ταχύτητας του ρευστού και του μεγέθους του αγωγού. Ακόμη μεγαλύτερη σημασία είχε η παρατήρηση του ότι σε μικρούς σωλήνες και με χαμηλές ταχύτητες η υδραυλική κλίση (h_L/L) είναι ανάλογη με τον ρυθμό ροής. Όπως ο ίδιος σημείωσε "Πριν αναζητήσουμε τον νόμο στις σωλήνες που συνδέει την κλίση με την ταχύτητα πρέπει να κάνουμε μια παρατήρηση: φαίνεται πως σε αρκετά μικρές ταχύτητες, σε σωλήνες μικρής διαμέτρου, ότι η ταχύτητα αυξάνεται αναλογικά με την κλίση. " Ύστερα, έδειξε πως η νέα του εξίσωση θα μετατρεπόταν στην εξίσωση για συνθήκες με μικρή ροή και μικρή διάμετρο.

$$Q = kD^4 \frac{h_L}{L} \quad (5)$$

Εκείνη την περίοδο ο Darcy έχανε σιγά σιγά τις δυνάμεις του λόγω χρόνιων προβλημάτων υγείας. Νευρικές διαταραχές μαζί με συμπτώματα μηνιγγίτιδας τον ταλαιπωρούσαν από το 1842. Η κατάσταση της υγείας του επιδεινώθηκε στα έργα στο Blaisy, πιθανών λόγω ενός τροχαίου ατυχήματος που είχε κατά την διάρκεια κατασκευής σηράγγων. Το 1855, έμεινε ελεύθερος από όλα τα καθήκοντά του εκτός από την έρευνα. Ύστερα, επέστρεψε στην Ντιζόν για ανάρρωση, συγγραφή και την έναρξη υδραυλικής μελέτης για ένα σύστημα ανοιχτού αγωγού.

Στον χρόνο που μεσολάβησε ανάμεσα στην υποβολή της έρευνας για την ροή σε αγωγό και την δημοσίευσής της, ο Darcy ολοκλήρωσε τον πιο διάσημο κείμενό του, Les Fontaines de la Ville de Dijon (Τα σιντριβάνια της πόλης της Ντιζόν). **(Εικόνα 4)**

LES
FONTAINES PUBLIQUES
DE LA VILLE DE DIJON

EXPOSITION ET APPLICATION
DES PRINCIPES A SUIVRE ET DES FORMULES A EMPLOYER

DANS LES QUESTIONS
DE
DISTRIBUTION D'EAU

OUVRAGE TERMINÉ
PAR UN APPENDICE RELATIF AUX FOURNITURES D'EAU DE PLUSIEURS VILLES
AU FILTRAGE DES EAUX

ET
A LA FABRICATION DES TUYAUX DE FONTE, DE PLOMB, DE TOLE ET DE BITUME

PAR

HENRY DARCY

INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES.

La bonne qualité des eaux étant une des choses qui contribuent le plus à la santé des citoyens d'une ville, il n'y a rien à quoi les magistrats aient plus d'intérêt qu'à entretenir la salubrité de celles qui servent à la boisson commune des hommes et des animaux, et à remédier aux accidents par lesquels ces eaux pourraient être altérées, soit dans le lit des fontaines, des rivières, des ruisseaux où elles coulent, soit dans les lieux où sont conservées celles qu'on en dérive, soit enfin dans les puits d'où naissent des sources.

(De Jussieu, *Hist. de l'Académie royale des sciences*, 1733, p. 351.)

PARIS

VICTOR DALMONT, ÉDITEUR,

Successeur de Carilian-Gœury et V^{te} Dalmont,

LIBRAIRE DES CORPS IMPÉRIAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES,
Quai des Augustins, 49.

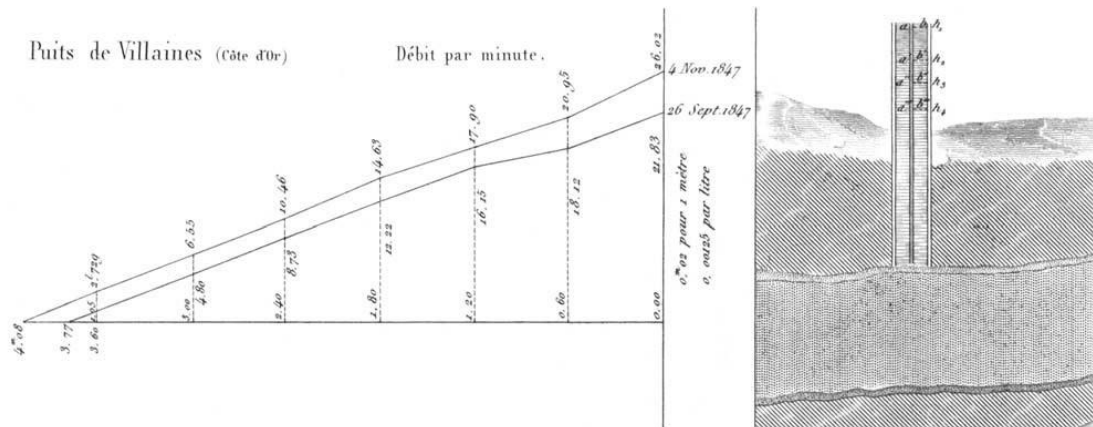
1856

Εικόνα 4: Το εξώφυλλο του κειμένου. (πηγή: <https://appurl.io/qMyuJlCkuS>).

Περιείχε 680 σελίδες και 28 εικονογραφημένες πλάκες, μια δουλειά χρόνων. Το κείμενο αρχίζει με την εισαγωγή του Darcy σχετικά με την ανάγκη για μια καλή πηγή νερού, οι απαιτήσεις για την επίτευξη αυτής της πηγής και την οργάνωση του βιβλίου σε 4 μέρη.

- ❖ Μέρος 1: Η ιστορία της παροχής νερού στην Ντιζόν, έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τον δέκατο πέμπτο μέχρι τον δέκατο ένατο αιώνα, ένας μικρός λόγος για τις πηγές και την λογική για την επιλογή της πηγής Rosoir.
- ❖ Μέρος 2: Ο σχεδιασμός του υδραγωγείου της Rosoir και του συστήματος διανομής, συμπεριλαμβανομένων τον σχεδιασμό των σωλήνων, σιντριβάνια και για προμήθεια και για δημόσια έκθεση, βαλβίδες, τις δύο δεξαμενές και οικονομική ανάλυση του έργου.
- ❖ Μέρος 3: Ροή του νερού σε υδραγωγεία και συστήματα αγωγών.
- ❖ Μέρος 4: Διοικητικά και δικαστικά θέματα. Το τέταρτο μέρος είχε τα εξής παραρτήματα:
 - Πηγές στην περιοχή της Ντιζόν.
 - Ο σχεδιασμός του πύργου στην δεξαμενή Port Guillaume. **(Εικόνα 6)**
 - Συστήματα ύδρευσης διάφορων πόλεων, συμπεριλαμβανομένων του Παρισιού και της Γαλλίας.
 - Διήθηση.
 - Μετρητής Weir.
 - Εξαγωγή νερού, σε σταθερές ποσότητες, από ρεύμα με διαφορετικά υψόμετρα.
 - Μέθοδοι κατασκευής σωλήνων.
 - Ροή στο υδραγωγείο Rosoir.

Ενώ μεγάλο μέρος του υλικού απευθύνεται στην παροχή νερού της Ντιζόν, ο Darcy αναφέρει και άλλα θέματα, όπως υπόγεια ύδατα, φίλτρα άμμου και κατασκευή σωλήνων. Λογικά λόγω της επιβαρυσμένης υγείας του ήθελε αυτή να είναι η τελευταία διατριβή του στην παροχή νερού. Στο κεφάλαιο τρία του πρώτου μέρους αναλύονται τα αρτεσιανά πηγάδια, κάτι που δείχνει, ξανά, πως ο Darcy συμβούλευε Γάλλους και Άγγλους έμπειρους μηχανικούς σε αυτό τον τομέα και ως αντάλλαγμα σύλλεξε δεδομένα για τις έρευνές του. Άλλα θέματα συζήτησης ήταν η γεωλογία, η ποιότητα του νερού, κατασκευή πηγαδιών, παραγωγή άμμου. Με βάση την έκθεση του το 1834, προέβλεψε την πτώση στάθμης του νερού στα πηγάδια ως συνάρτηση την τριβής ανάμεσα στο πηγάδι και την σωλήνα και τις απώλειες λόγω διήθησης του υπόγειου υδροφορέα, και έδειξε πως ποικίλει αναλόγως μια διαδικασία κυριαρχεί. Αυτή την φορά όμως οι υποθέσεις του, που είχε στην αρχή, συνοδεύονταν από ακριβή δεδομένα μέσα από το πεδίο. Η **Εικόνα 5** απεικονίζει το σχηματικό μέρος των μετρήσεων και τα δεδομένα που είχε το 1847. Στο γράφημα, η ροή σε λίτρα ανά λεπτό απεικονίζεται κατακόρυφα και το υψόμετρο οριζόντια (οι τιμές του υψομέτρου αυξάνουν προς τα αριστερά).



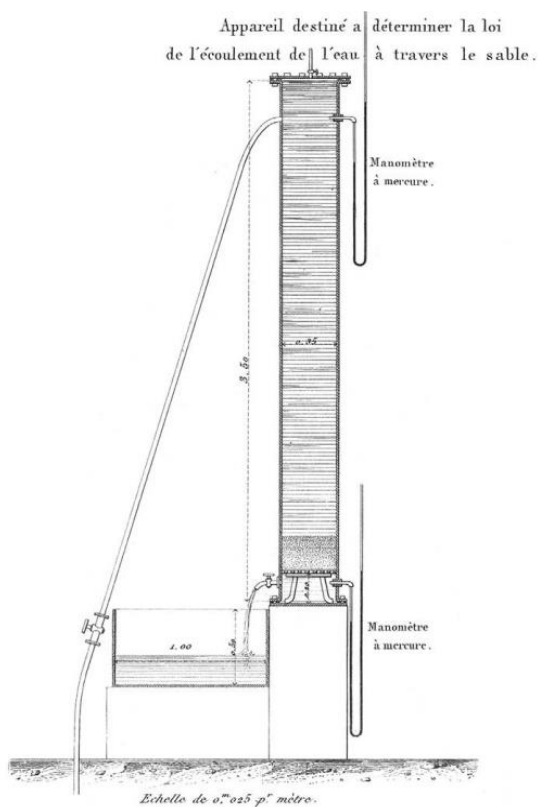
Εικόνα 5: Μετρήσεις και τα δεδομένα. (πηγή: <https://appurl.io/52697d-3xp>).

Όπως παρατηρείται, φαίνονται δύο διαφορετικές ημερομηνίες μέτρησης στο σχήμα. Επίσης, παρατηρείται ότι οι τιμές έχουν μια γραμμική τάση, ένα λογικό φαινόμενο σύμφωνα με τον Darcy.

Το κεφάλαιο τέσσερα είναι όμως αυτό που μας ενδιαφέρει ιδιαίτερω, τα πειράματα με τις στήλες. Στα τέλη του 1855, ο Darcy με την βοήθεια του Charles Ritter, ολοκλήρωσαν δύο σετ δοκιμών. Το πρώτο σετ αποτελούνταν από τέσσερις σειρές, με την κάθε μια να έχει διαφορετική άμμο. Για κάθε σειρά, πραγματοποιούνταν τρεις με δέκα διαφορετικές πειραματικές δοκιμές με αυξανόμενο ρυθμό ροής. Η εσωτερική πίεση ποίκιλλε από πείραμα σε πείραμα ενώ η εξωτερική πίεση ήταν σε ατμοσφαιρικά επίπεδα. Το δεύτερο σετ έγινε στις αρχές του 1856 από τον Ritter μόνο με ένα είδος άμμου και με διαφορετικές εσωτερικές και εξωτερικές πιέσεις. Στο σύνολο πραγματοποιήθηκαν 35 δοκιμές.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η συσκευή του Darcy. Η συσκευή αυτή ήταν ένας κάθετος χαλύβδινος σωλήνας με εσωτερική διάμετρο 0.35 μέτρα και στα δύο του άκρα ήταν σφραγισμένος με βιδωτές πλάκες τύπου φλάντζας. Το συνολικό του ύψος, όπως αναφέρεται από τον Darcy, ήταν τα 2.5 μέτρα αλλά στην παρακάτω εικόνα το ύψος του είναι τα 3.5 μέτρα. Στο κάτω μέρος του υπήρχε μια δεξαμενή εξόδου χρησιμοποιώντας 2 παραβάν 0.2 μέτρα πάνω από το έδαφος. Μια δεξαμενή εισόδου δημιουργήθηκε αφήνοντας ένα κενό ανάμεσα στην άμμο και στην κορυφή του σωλήνα. Επίσης υπήρχε μια τρύπα στην κορυφή για την εξαέρωση αέρα. Το νερό ερχόταν από την παροχή του νοσοκομείου και για αυτό τον λόγο υπήρχαν διάφορες ταλαντώσεις λόγω της ενεργοποίησης και απενεργοποίησης βρυσών. Η ροή ήταν από πάνω προς τα κάτω και η τιμή της απορροής υπολογιζόταν από τον χρόνο που έπαιρνε για να γεμίσει ένα τετραγωνικό ογκομετρικό κουτί ενός μέτρου. Μανόμετρα υδραργύρου τύπου U ήταν τοποθετημένα στα δεξιά επιτρέποντας τον υπολογισμό του υδραυλικού φορτίου.

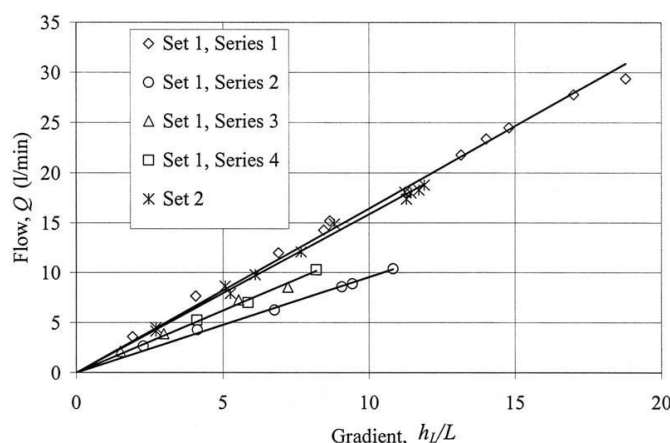
Και η γραμμή τροφοδοσίας όσο και η γραμμή απορροής είχαν βαλβίδες για να επιτρέπουν περαιτέρω ελέγχους.



Εικόνα 6: Ο σχεδιασμός του πύργου στην δεξαμενή Port Guillaume. (πηγή: <https://appurl.io/Lurcjwj7ig>).

Σε κάθε δοκιμή χρησιμοποιήθηκε άμμος από τον ποταμό Sao^{ne} με διάφορους βαθμούς πλυσίματος. Σύμφωνα με τον Darcy ο σωλήνας ήταν γεμάτος με νερό και μετά τοποθετούνταν η άμμος έτσι ώστε να μην υπάρχουν κενά αέρος στην άμμο. Επιπρόσθετα, αυτό βοηθούσε στο να διαχωριστεί η άμμος κατά βάρος, έτσι τα πιο βαριά σωματίδια ήταν στο πάτο του σωλήνα. Το ύψος της άμμο μετριόταν στο τέλος κάθε δοκιμής. Δοκιμαστικά τεστ γινόντουσαν πριν από κάθε δοκιμή, γεμίζοντας τον σωλήνα με νερό μέχρι να έρθει σε ισορροπία και διαβάζοντας τις τιμές των μανομέτρων για τυχόν λάθη, μια διαδικασία που έπαιρνε από δέκα μέχρι είκοσι πέντε λεπτά. Η σοβαρή ανησυχία του Darcy ήταν αυτή της μη συνεχούς ροής, ένα πρόβλημα που δεν μπορούσε να λύσει. Το πρόβλημα της συμπίεσης της άμμου το είχε λύσει αφού πριν λάβει κάποια μέτρηση περίμενε να έρθει ο σωλήνας σε ισορροπία και μετρούσε το ύψος της άμμου στο πέρας του πειράματος.

Στο πρώτο σετ, η παροχή κυμαινόταν από 2.13 μέχρι 29.4 λίτρα το λεπτό ενώ οι απώλειες που μετρήθηκαν κυμαίνονταν από 1.11 έως 13.93 m. Αυτά τα αποτελέσματα οδήγησαν τον Darcy να παρατηρήσει ότι «Φαίνεται πως για άμμο ίδιας ποιότητας, συμπεραίνουμε ότι ο όγκος της παροχής είναι ανάλογος με τις απώλειες και αντιστρόφως ανάλογος με το πάχος στρώματος της άμμου». Για το δεύτερο σετ, ο Darcy παρατήρησε ξανά την σχεδόν σταθερή διαφορά του Q/h_L . Με αυτόν τον τρόπο, απέδειξε πως η ροή έχει γραμμικές απώλειες κατά μήκος του στρώματος του φίλτρου. Το Σχήμα 1 απεικονίζει την παροχή Q έναντι της κλίσης h_L/L .



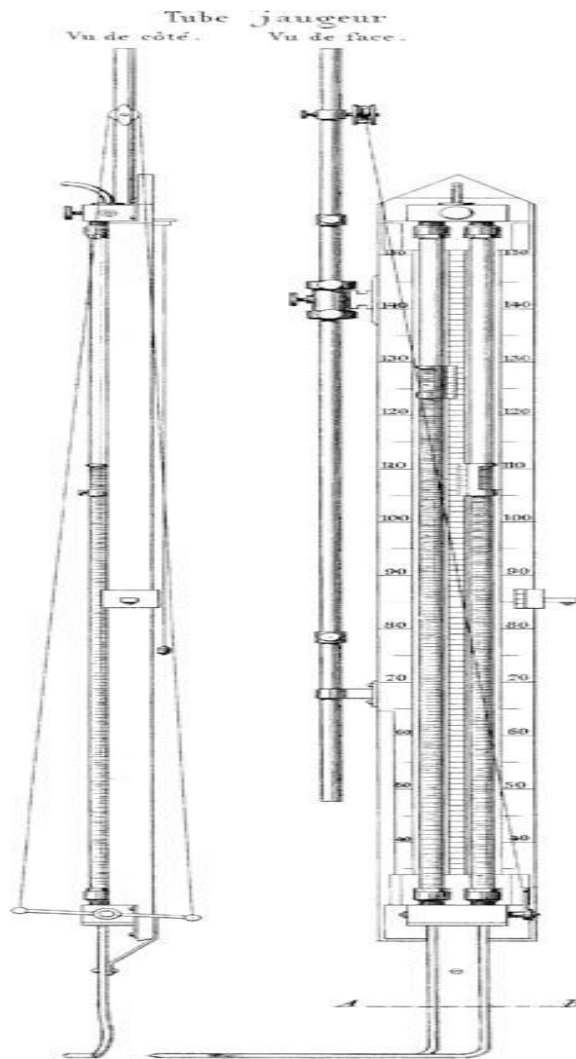
Σχήμα 1: Τα αποτελέσματα από τα πειράματα του Darcy. (πηγή: <https://appurl.io/D7u9ZmAlh4>)

Από το σχήμα μπορούμε να δούμε την γραμμική μεταβολή για κάθε σετ. Επιπρόσθετα, ο Darcy παρατήρησε ότι όταν η συσκευή λειτουργούσε υπό δυνατή πίεση, τυχαίες αλλά μεγάλες διακυμάνσεις οδηγούσαν τον υδράργυρο στην τιμή των πέντε χιλιοστών, κάτι που επέτρεψε να μετρηθεί η πίεση του νερού στα 13 εκατοστά.

Ο Darcy ολοκλήρωσε το κείμενο του με μια λύση για ασταθής ροή με φίλτρο, σε επικλινές βάθος νερού στην πάνω μεριά και σταθερή ατμοσφαιρική πίεση στο κάτω μέρος. Χρησιμοποίησε αυτή την λύση στην προσπάθειά του να εξηγήσει τα αρτεσιανά πηγάδια.

Στις 3 Ιανουαρίου του 1858, ο Darcy πέθανε από πνευμονία ενώ βρισκόταν σε ταξίδι για το Παρίσι. Μόλις εξελέγη για την Έδρα στην Γαλλική Ακαδημία Επιστημών μια έδρα που κρατούσε ο σπουδαίος μαθηματικός Cauchy, και το τελευταίο του έργο ήταν η παρουσίαση ενός πρώτου μοντέρνου μοντέλου για τον σωλήνα Pitot (**Εικόνα 7**), ένα έργο που δημοσιεύθηκε μετά τον θάνατο του. Η κηδεία του έγινε φυσικά στην πόλη της Dijon, μια πόλη στην οποία είχε μεγαλώσει και είχε βοηθήσει όσο τίποτε άλλο. Μια μέρα μετά τον θάνατο του, η πλατεία Châteaud'Eau, η τοποθεσία δηλαδή που τα νερά από την πηγή Rosoir εισέρχονται στην Dijon, μετονομάστηκε σε Place Darcy, σε απλή μετάφραση δηλαδή, το μέρος του Darcy, μια απόφαση που πέρασε παμφηφεί από το Δημοτικό Συμβούλιο της

Ντιζόν. Η έρευνα του, μετά τον θάνατο του συνεχίστηκε και εμπλουτίστηκε από άλλα μέλη του Σώματος. Ο «protégé» Bazin επέκτεινε και ολοκλήρωσε τις έρευνες για τα ανοιχτά κανάλια. Το 1861, ο Dupuit, συνεργάτης και διάδοχος Διευθυντής Υδάτων και Πεζοδρομίων, υπέβαλε την πρωτοποριακή έρευνά του. Τα ευρήματά του ήταν η λύση για την ακτινωτή ροή σε πηγάδια, χρησιμοποιώντας τον νόμο του Darcy. Και ο Dupuit και η Ακαδημία Επιστημών ανέφεραν την συμβολή του Darcy για την λύση αυτού του προβλήματος.



Εικόνα 7: Μοντέλο για τον σωλήνα Pitot. (πηγή: <https://appurl.io/uNFGHxvQKT>).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 Ο Νόμος του Darcy

Η κίνηση του νερού μέσα στο έδαφος, το οποίο χαρακτηρίζεται ως πορώδες μέσο, είναι πολύπλοκη. Στο πεδίο ροής επιδρά η βαρύτητα και η υδροστατική πίεση που αναπτύσσονται μεταξύ δύο διατομών ροής. Οι παραπάνω δυνάμεις διαμορφώνουν το υδραυλικό φορτίο το οποίο μπορεί να είναι σταθερό ή μεταβαλλόμενο. Η κίνηση του νερού μέσα στο έδαφος γίνεται κατά τις τρεις διαστάσεις αλλά στη μελέτη ειδικών περιπτώσεων μπορεί να εξετάζεται κατά μία (μονοδιάστατη ροή), κατά δύο (επίπεδη ροή) ή και κατά τις τρεις διαστάσεις (τριδιάστατη ροή).

Οι βασικές αρχές της κίνησης του νερού στο έδαφος για την εξαγωγή των θεμελιωδών τύπων, οι οποίοι διέπουν την κίνηση των ρευστών εφαρμόζονται οι βασικές αρχές της υδραυλικής, οι αναφερόμενες στο έργο και την ενέργεια. Η ενέργεια ορίζεται ως η ικανότητα για παραγωγή έργου. Στα ρευστά η ενέργεια υπάρχει σε τρεις μορφές τη δυναμική, την κινητική και την ενέργεια πίεσης.

Η δυναμική ενέργεια της μονάδας βάρους νερού που ρέει, ισούται με z , όπου z η υψομετρική διαφορά της.

Η ενέργεια πίεσης της μονάδας βάρους νερού (ή φορτίο πίεσης) που ρέει ισούται με $\frac{p}{\rho * g}$, όπου p είναι η πίεση του νερού στην υπόψη θέση και ρ είναι η πυκνότητα του νερού.

Η κινητική ενέργεια της μονάδας βάρους νερού (ή φορτίο ταχύτητας) που ρέει με ταχύτητα V ισούται με $\frac{V^2}{2 * g}$, όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας. Στην πραγματικότητα, σε τυχούσα μονάδα βάρους νερού είναι δυνατό να υπάρχουν και οι τρεις μορφές ενέργειας. Το σύνολο επομένως της ενέργειας της μονάδας βάρους του νερού εκφράζεται με την εξίσωση και καλείται υδραυλικό φορτίο :

$$h = z + \frac{p}{\rho * g} + \frac{V^2}{2 * g} \quad (6)$$

Αυτή η διατύπωση της ενέργειας, στην περίπτωση της ροής του νερού μέσα στο έδαφος, απλουστεύεται καθώς η κινητική ενέργεια είναι αμελητέα δεδομένης της πολύ μικρής ταχύτητας ροής και μπορεί να παραλείπεται στους υπολογισμούς.

Επομένως, η έκφραση του υδραυλικού φορτίου λαμβάνει τη μορφή:

$$h = z + \frac{p}{\rho * g} \quad (7)$$

Η συνολική ενέργεια, h , ορίζεται ως το υδραυλικό φορτίο. Αυτό μετράται στα εδάφη που είναι κορεσμένα με νερό με ένα απλό πιεζόμετρο, και στα μη κορεσμένα με ένα τασίμετρο. Η ροή πραγματοποιείται πάντοτε προς τα σημεία, στα οποία το υδραυλικό φορτίο βρίσκεται σε μικρότερη τιμή. Συγκεκριμένα, επειδή το συνολικό υδραυλικό φορτίο απλοποιείται λαμβάνοντας την έκφραση του πιεζομετρικού φορτίου, $z + \frac{p}{\rho * g}$, το νερό κινείται από υψηλό σε χαμηλό πιεζομετρικό φορτίο.

Οι γενικές εξισώσεις κίνησης των ρευστών, δηλαδή οι εξισώσεις Navier-Stokes, δεν παρουσιάζουν κανένα ενδιαφέρον στη μικροκλίμακα του διάκενου, γιατί εξαιτίας του πολύπλοκου σχήματος των ορίων, είναι αδύνατη η επίλυση ακόμα και των στοιχειωδών περιπτώσεων ροής. Φανερόνεται αναγκαία η αντικατάσταση της πολύπλοκης μορφής της πραγματικής επιφάνειας των διάκενων με μια άλλη συμβατική μορφή, που η αναλυτική εξίσωσή της επιτρέπει την ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης στις συνήθεις απλές περιπτώσεις. Η μακροσκοπική εξέταση των προβλημάτων της υπόγειας υδραυλικής επιτυγχάνεται με τον εμπειρικό νόμο του Darcy, που διατυπώθηκε το 1854 και αποτελεί το θεμελιώδη νόμο κίνησης της υπόγειας υδραυλικής.

2.2 Παρουσίαση του νόμου του Darcy

Ο νόμος του Darcy αποτελεί έναν από τους πλέον γνωστούς νόμους της υδραυλικής μηχανικής. Το 1856 προτάθηκε από το Γάλλο μηχανικό Henry Darcy σε μια μελέτη επέκτασης και βελτίωσης του συστήματος ύδρευσης της γενέτειράς του πόλης Ντιζόν (Τερζίδης και Καραμούζης, 1985). Με το πείραμά του έδειξε ότι ο όγκος του νερού που περνά στη μονάδα του χρόνου μέσα από μια στρώση άμμου ορισμένης σύστασης μπορεί να εκφραστεί από τέσσερις παραμέτρους:

1. Από το εμβαδό της επιφάνειας της διατομής της στρώσης
2. Από το πάχος της στρώσης
3. Από τη διαφορά του υδραυλικού φορτίου ανάντη και κατόντη της στρώσης και
4. Από μια σταθερά, που λέγεται συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας (hydraulic conductivity)

Ο νόμος του Darcy με μαθηματικό τύπο εκφράζεται ως εξής:

$$\frac{Q}{A} = V = K * \frac{\Delta H}{L} \quad (8)$$

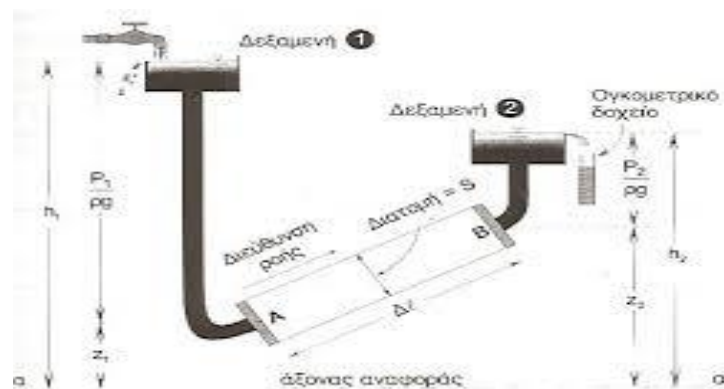
Όπου: $\Delta H = H_0 - H_i$, Q :παροχή(L^3/t), A = εμβαδό επιφάνειας της διατομής (L^2), K = συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας (L/t), H_0 και H_i είναι το υδραυλικό φορτίο κατόντη και ανάντη της ροής και L = το πάχος της εδαφικής στρώσης.

Η μείωση (πτώση) του υδραυλικού φορτίου ($\Delta H/L$) ανά μονάδα μήκους εκφράζει την κλίση του υδραυλικού φορτίου και αποτελεί την κινητήρια δύναμη για τη ροή του νερού ενώ η ειδική παροχή (Q/A) έχει διαστάσεις ταχύτητας και λέγεται μακροσκοπική ή φαινομενική ταχύτητα ή ταχύτητα Darcy.

Αν θεωρήσουμε ότι το έδαφος περιέχεται από λεπτούς σωλήνες που ο κάθε σωλήνας έχει σταθερή διάμετρο, θα υποθέταμε ότι η συνολική παροχή είναι το άθροισμα των επιμέρους παροχών όλων των σωλήνων. Αν ξέραμε τις διαμέτρους των σωλήνων θα υπολογίζαμε τη συνολική παροχή δια μέσου της δέσμης των σωλήνων καθώς ξέραμε και τη διαφορά του υδραυλικού φορτίου μεταξύ των δυο άκρων τους. Όμως, οι σωλήνες δια μέσου των οποίων κινείται το νερό στο έδαφος είναι πολύπλοκοι από τη προηγούμενη δέσμη σωλήνων καθώς συγκρούονται από τους πόρους του εδάφους που είναι σε ακανόνιστο σχήμα, συνεστραμμένοι και συνδεδεμένοι με ένα πολύπλοκο τρόπο. Η ροή του νερού στους πόρους συναπαντά στενώσεις, διευρύνσεις αλλά και 'τυφλά' σημεία.

Η ταχύτητα κίνησης του ρευστού διαφοροποιείται από σημείο σε σημείο του ίδιου του σωλήνα και αρκετά περισσότερο από σωλήνα σε σωλήνα. Ως εκ τούτου η ροή διαμέσου του πορώδους μέσου, που είναι αρκετά πολύπλοκο όπως το έδαφος, αναλύεται από την μακροσκοπική ταχύτητα V , που είναι η μέση τιμή όλων των μακροσκοπικών ταχυτήτων στο μελετούμενο όγκο του εδάφους.

Στο **Σχήμα 1** παρουσιάζεται μια απλή εφαρμογή του νόμου Darcy στην κατά την σταθερή ροή μέσω μιας εδαφικής στήλης μήκους L . Το βάθος του νερού στις δυο δεξαμενές παραμένει σταθερό και η ροή του νερού πραγματοποιείται προς τα δεξιά λόγω της διαφοράς του πιεζομετρικού φορτίου H_1-H_0 όπου: $H_1=z_1+h_1$ και $H_0=z_0+h_0$



Σχήμα 2: Ροή σε κορεσμένη εδαφική στήλη(πηγή: <https://appurl.io/e-M3DXaHvF>).

Όταν η ροή είναι ασταθής ή το έδαφος ανομοιογενές τότε το υδραυλικό φορτίο δεν μειώνεται γραμμικά κατά την διεύθυνση της ροής. Η υδραυλική αγωγιμότητα δεν είναι σταθερή καθώς μεταβάλλεται από θέση σε θέση. Έτσι είναι προτιμότερο να μην χρησιμοποιούνται μέσες τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και της υδραυλικής κλίσης αλλά οι στιγμιαίες τιμές. Ως αποτέλεσμα, ο νόμος του Darcy θα πρέπει να δοθεί σε διαφορική μορφή, που σε γενική τρισδιάστατη ροή σε ισότροπο μέσο γράφεται:

$$V = -K \nabla H$$

Όπου ο τελεστής ∇ (ανάδελτα) ορίζεται από:

$$\nabla \delta = i \frac{\delta}{\delta x} + j \frac{\delta}{\delta y} + k \frac{\delta}{\delta z} \quad (9)$$

Επομένως ∇H είναι ένα διάνυσμα που ορίζει την κλίση του υδραυλικού φορτίου σε τρισδιάστατο χώρο. Η $V = -K \cdot \text{grad} \cdot H = -K \cdot \nabla \cdot H$ γράφεται:

$$V = -K \left(i \frac{\delta H}{\delta x} + j \frac{\delta H}{\delta y} + k \frac{\delta H}{\delta z} \right) \quad (10)$$

Όπου i, j, k είναι τα μοναδιαία διανύσματα κατά τη x -, y - και z - διεύθυνση αντίστοιχα.

Οι συνιστώσες δηλαδή της μακροσκοπικής ταχύτητας στις τρεις διευθύνσεις είναι:

$$V_x = -K \frac{\partial H}{\partial x} \quad (11)$$

$$V_y = -K \frac{\partial H}{\partial y} \quad (12)$$

$$V_z = -K \frac{\partial H}{\partial z} \quad (13)$$

Σε ανισότροπα πορώδη η υδραυλική αγωγιμότητα K στις παραπάνω τρεις εξισώσεις θα πρέπει να αντικατασταθεί από K_x , K_y και K_z .

Ο νόμος του Darcy δεν ισχύει για όλες τις ροές σε πορώδη μέσα και έτσι έχει βρεθεί ότι η γραμμικότητα μεταξύ της παροχής και της κλίσης του υδραυλικού φορτίου χάνεται σε υψηλές ταχύτητες ροής, με αποτέλεσμα οι δυνάμεις αδράνειας να γίνονται σημαντικές σε σχέση με τις δυνάμεις ιξώδους. Κατά συνέπεια ορίζεται ένας αδιάστατος αριθμός Reynolds ως:

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (14)$$

Όπου V είναι η μέση ταχύτητα ροής, δείναι μια μέση διάμετρος των πόρων του εδάφους και ν είναι το κινηματικό ιξώδες. Έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι ο νόμος Darcy είναι ασφαλές να χρησιμοποιείται για τιμές του αριθμού $Re < 1$.

2.3 Υδραυλική Αγωγιμότητα Κορεσμένου Εδάφους

Ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας ή διαπερατότητας K του νόμου του Darcy κάτω από συνθήκες κορεσμού ονομάζεται κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα, που θεωρείται σταθερός. Ισχύει όταν το ρευστό είναι αμετάβλητο με σταθερή θερμοκρασία και χωρίς φυσικοχημικές παρεμβολές. Υπάρχει μια διαστατική ανάλυση (Guyton, 1994, Τερζίδης και Καραμούζης, 1986) ότι η υδραυλική αγωγιμότητα είναι συνάρτηση ιδιοτήτων του ρευστού και του πορώδους μέσου με βάση τη σχέση:

$$K = k \frac{\rho g}{\mu} \quad (15)$$

Όπου: ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, μ ο συντελεστής δυναμικού ιξώδους και k γεωμετρική διαπερατότητα του μέσου.

Όμως για την γεωμετρική διαπερατότητα του μέσου δίνεται σχέση η οποία είναι:

$$k = C d^2$$

Όπου: C ο παράγων σχήματος που εξαρτάται από το σχήμα και τη διάστρωση των κόκκων και τις αποκλίσεις του μεγέθους αυτών από μια μέση διάμετρο αλλά και τη μορφή του πορώδους και d είναι ένας δείκτης μεγέθους των κόκκων.

Με την μετατροπή του συντελεστή κινηματικού δυναμικού ιξώδους μ με το κινηματικό ιξώδες ν , η σχέση $K = k \frac{\rho g}{\mu}$ έχει τη μορφή:

$$K = k \frac{g}{\nu} \quad (16)$$

Οι μονάδες μέτρησης της απόλυτης διαπερατότητας του μέσου, k είναι L^2 . Αρκετές φορές χρησιμοποιείται η μονάδα Darcy που σε θερμοκρασία 20.2°C έχουμε:

$$1 \text{Darcy} = 1.062 \times 10^{-8} \text{cm}^2$$

Επίσης, ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας K μετράται σε μονάδες όπως για παράδειγμα cm/s , m/s κλπ.

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ	Ks(cm/day)
Άμμος	712.80
Πηλώδης άμμος	350.16
Αμμώδης πηλός	106.08
Πηλός	6.00
Ιλύς	10.80
Ιλοσηλός	31.44
Αμμοαργιλώδης πηλός	6.24
Ιλοαργιλώδης πηλός	1.68
Αμμώδης άργιλος	2.88
Ιλυώδης άργιλος	0.48
Άργιλος	4.80

Πίνακας 1: Αντιπροσωπευτικές τιμές της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας (Guymon, 1994)

2.4 Υδραυλική Αγωγιμότητα Ακόρεστου Εδάφους

Ο νόμος του Darcy, όπως μελετήθηκε και από τον ίδιο, αναλύει τη ροή σε πορώδη μέσα τα οποία είναι κορεσμένα με νερό. Όμως το 1907 ο Buckingham (Selker κ.α., 1999) διαπίστωσε ότι ο νόμος αυτός μπορεί να διευρυνθεί ώστε να αναλύσει τη ροή σε ακόρεστα με νερό πορώδη μέσα. Η εξίσωση είναι παρόμοια με την έκφραση $V = -K \nabla H$ και έχει τη μορφή:

$$V = -K(h) \nabla H \quad \text{ή} \quad V = -K(\theta) \nabla H \quad (17)$$

Όπου: $K(\theta)$ είναι η υδραυλική αγωγιμότητα σε πορώδες μέσο που δεν είναι κορεσμένο με νερό. Ονομάζεται τριχοειδής αγωγιμότητα ή ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα.

Όμως η υδραυλική αγωγιμότητα γράφεται ως συνάρτηση της υγρασίας (θ) και όχι του ύψους πίεσης h . Η αιτία είναι ότι η $K(\theta)$ επηρεάζεται από το φαινόμενο της υστέρησης πολύ λιγότερο από τη $K(h)$.

Αν η $K(\theta)$ σχεδιαστεί ως συνάρτηση της θ , το φαινόμενο της υστέρησης κατά τη φάση της διύγρυνσης και της στράγγισης θα παρατηρηθεί σε μικρό βαθμό. Αυτό οφείλεται διότι η υδραυλική αγωγιμότητα μειώνεται πολύ γρήγορα μόλις η υγρασία αρχίζει να μειώνεται σε

σχέση με την υγρασία κορεσμού. Η μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας οφείλεται στους παρακάτω λόγους:

- Οι πρώτοι πόροι που αδειάζουν κατά τη μετάβαση της ροής από κορεσμένη σε ακόρεστη είναι οι μεγάλοι πόροι.
- Με το άδειασμα των μεγάλων πόρων οι γραμμές ροής γίνονται πολύ μεγαλύτερες με αποτέλεσμα η πορεία του ρευστού να είναι ελικοειδή και πολύπλοκη.
- Με το άδειασμα των πόρων σε κάθε δεδομένη επιφάνεια κάθετη προς τη ροή, το ρευστό πρέπει να περάσει μέσω ενός μικρότερου τμήματος αυτής της επιφάνειας.

Η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα μπορεί να εκτιμηθεί απευθείας με εργαστηριακές μεθόδους ή μεθόδους πεδίου (Stephens, 1995, Hillel, 1998). Οι μέθοδοι πεδίου είναι περισσότερο αξιόπιστες καθώς με αυτές εκτιμώνται καλύτερα οι μέσες τιμές ανομοιογενών εδαφών. Επιπροσθέτως, πολλές φορές στις εργαστηριακές μελέτες, το μείγμα διαταράσσεται με συνέπεια η μετρούμενη υδραυλική αγωγιμότητα να είναι άλλη από αυτή του εδάφους από το οποίο ελήφθη το δείγμα. Λόγω της δυσκολίας των μεθόδων έχει πραγματοποιηθεί μεγάλη έρευνα για την εκτίμηση της ακόρεστης υδραυλικής αγωγιμότητας με μαθηματικό τρόπο. Υπάρχουν δύο γενικές προσεγγίσεις προς την κατεύθυνση αυτή. Η πρώτη είναι εμπειρική και συσχετίζεται η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα με την υγρασία εδάφους ή το ύψος πίεσης ενώ η δεύτερη είναι θεωρητική και υπολογίζεται η υδραυλική αγωγιμότητα με αναλυτικό τρόπο από την εξίσωση που περιγράφει τη χαρακτηριστική καμπύλη του εδάφους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 Υπόγεια Νερά

Το νερό που υπάρχει στη φύση και που χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο για διάφορες χρήσεις διακρίνεται σε επιφανειακό και υπόγειο.

Επιφανειακό νερό είναι το νερό των λιμνών και των ποταμών ενώ υπόγειο είναι αυτό που είναι αποθηκευμένο ή κινείται στο έδαφος. Έτσι λοιπόν και ο γενικός όρος υδατικοί πόροι, που αφορά τους εκμεταλλεύσιμους όγκους νερού, διαχωρίζεται σε επιφανειακούς και υπόγειους υδατικούς πόρους.

Επειδή η ζήτηση για νερό συνεχώς αυξάνεται σε παγκόσμια κλίμακα ενώ ταυτόχρονα η κατανομή των υδατικών πόρων είναι γενικά ανομοιόμορφη, τόσο χωρικά όσο και χρονικά, η μελέτη όλων των σχετικών προβλημάτων αποτελεί ένα τεράστιο επιστημονικό αντικείμενο.

Συνέπεια του γεγονότος αυτού είναι η ανάπτυξη και η ραγδαία εξέλιξη ενός ιδιαίτερου κλάδου των τεχνικών κυρίως επιστημών που αναφέρεται ως διαχειριστής των υδατικών πόρων.

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τους υπόγειους από τους επιφανειακούς πόρους μπορούν να συνοψίσουν ως εξής:

- Κατανομή στον χώρο: Ενώ για τα επιφανειακά νερά εμφανίζονται τοπικά (λίμνες) ή ακολουθούν συγκεκριμένη πορεία (ποτάμια), τα υπόγεια νερά καταλαμβάνουν τεράστιες εκτάσεις. Από άποψη λοιπόν εγκαταστάσεων για την εκμετάλλευσή τους τα επιφανειακά νερά απαιτούν πολλές φορές ιδιαίτερα δαπανηρά συστήματα μεταφοράς ενώ τα υπόγεια ικανοποιούν σχετικά εύκολα την τοπική ζήτηση με απευθείας αντλήσεις.
- Χρονική μεταβλητότητα: Σε αντίθεση με τα επιφανειακά, τα υπόγεια νερά παρουσιάζουν πολύ μικρή μεταβλητότητα στη διάρκεια του χρόνου. Έτσι τα υδάτινα αποθέματα που αποθηκεύονται στο έδαφος είναι συνήθως μεγάλα και μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες σε διάφορες χρονικές περιόδους.
- Κόστος εγκαταστάσεων και λειτουργίας: Ενώ τα έργα συλλογής επιφανειακών νερών έχουν τεράστιο κόστος (φράγματα, ταμιευτήρες, αγωγοί μεταφοράς κλπ.) το κόστος λειτουργίας τους είναι συνήθως μικρό. Αντίθετα το κόστος των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης υπόγειων νερών (γεωτρήσεις, αντλιοστάσια κλπ.) είναι πολύ χαμηλό, ενώ το κόστος της λειτουργίας και της συντήρησης τους είναι σημαντικό, ιδιαίτερα όταν η άντληση γίνεται από βαθιά υδροφόρα στρώματα.
- Ποιότητα του νερού: Πρόκειται για πολύ σημαντικό θέμα στην εκμετάλλευση και διαχείριση των υδατικών πόρων. Ειδικά για τα υπόγεια νερά, που κατ' αρχήν είναι λιγότερο εκτεθειμένα στη ρύπανση από τα επιφανειακά, η διαδικασία εξυγίανσης, εφόσον διαπιστωθεί κάποιο φαινόμενο ρύπανσης, είναι πολύ δύσκολη και εξαιρετικά δαπανηρή.

Τέλος, θα πρέπει να τονισθεί ότι τα υδροφόρα στρώματα στο έδαφος δεν αποτελούν μόνο πηγές παροχής νερού αλλά εξυπηρετούν πολλαπλούς στόχους (Bear,1979):

- Αποτελούν πηγές παροχής νερού: Είναι η πιο βασική βεβαίως λειτουργία. Λόγω της επαναπλήρωσης των αποθεμάτων με τις κατακρημνίσεις τα υπόγεια νερά θεωρούνται ανανεώσιμοι πόροι.
- Συνιστούν δεξαμενές αποθήκευσης: Ιδιαίτερα τα επιφανειακά υδροφόρα στρώματα λόγω της άμεσης δυνατότητας ανανέωσης των αποθεμάτων αλλά και των τεράστιων όγκων τους μπορούν να αποθηκεύσουν εξαιρετικά μεγάλες ποσότητες. Η αποθηκευτική ικανότητα των στρωμάτων αυτών μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο με την τεχνική του τεχνητού εμπλουτισμού (Huisman and Olsthoorn, 1983).
- Λειτουργούν ως αγωγοί μεταφοράς: Η λειτουργία αυτή μπορεί να ενεργοποιηθεί μόνο με την παρέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα.
- Μπορούν να λειτουργήσουν ως φίλτρα καθαρισμού: Με διάφορες τεχνικές τεχνητού εμπλουτισμού ακάθαρτα επιφανειακά νερά μπορούν να διηθηθούν στο έδαφος για μερικό ή πλήρη καθαρισμό τους.
- Μπορούν να ρυθμίσουν παροχές επιφανειακών νερών: Η λειτουργία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο στα ποτάμια όσο και στις πηγές με τη ρύθμιση της στάθμης των υπόγειων νερών στα υδροφόρα στρώματα που επικοινωνούν υδραυλικά με επιφανειακά νερά.

3.2 Υπόγεια νερά και υδροφορείς

Το νερό είναι ένα από τα μεγαλύτερα αγαθά που προσφέρει η φύση καθώς είναι απαραίτητο στοιχείο ζωής στους ανθρώπους, τα ζώα και τα φυτά.

Ο συνολικός όγκος νερού που υπάρχει στη γη εκτιμάται γύρω στα 1360 εκατομμύρια κυβικά χιλιόμετρα.

Από το σύνολο αυτό τα υπόγεια νερά, που ο όγκος τους είναι περίπου 8×10^6 Km³, αποτελούν ένα μικρό ποσοστό ίσο με 0.6%.

Ο όγκος όμως αυτός των υπόγειων νερών αντιστοιχεί στο 98% του εκμεταλλεύσιμου πόρου σε υγρή κατάσταση καθώς το νερό των ποταμών και των λιμνών είναι μικρότερο από 0.03% του συνολικού όγκου.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι το ήμισυ περίπου των υπόγειων νερών βρίσκεται σε τόσο μεγάλα βάθη που δεν επιτρέπουν τη χρήση τους, τόσο εξαιτίας της χαμηλής ποιότητας τους όσο και της εξαιρετικά μεγάλης απαιτούμενης δαπάνης άντλησης.

Η ανανέωση σημαντικού μέρους του συνολικού όγκου των εκμεταλλεύσιμων υπόγειων νερών γίνεται με τη διήθηση των νερών των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων, ενώ από την άλλη μεριά ένα μεγάλο τμήμα τους χάνεται καθώς εκφορτίζεται στους ωκεανούς και τις θάλασσες.



Εικόνα 8: Ο υδρολογικός κύκλος. (πηγή: <https://appurl.io/C-xxvKT-Ed>).

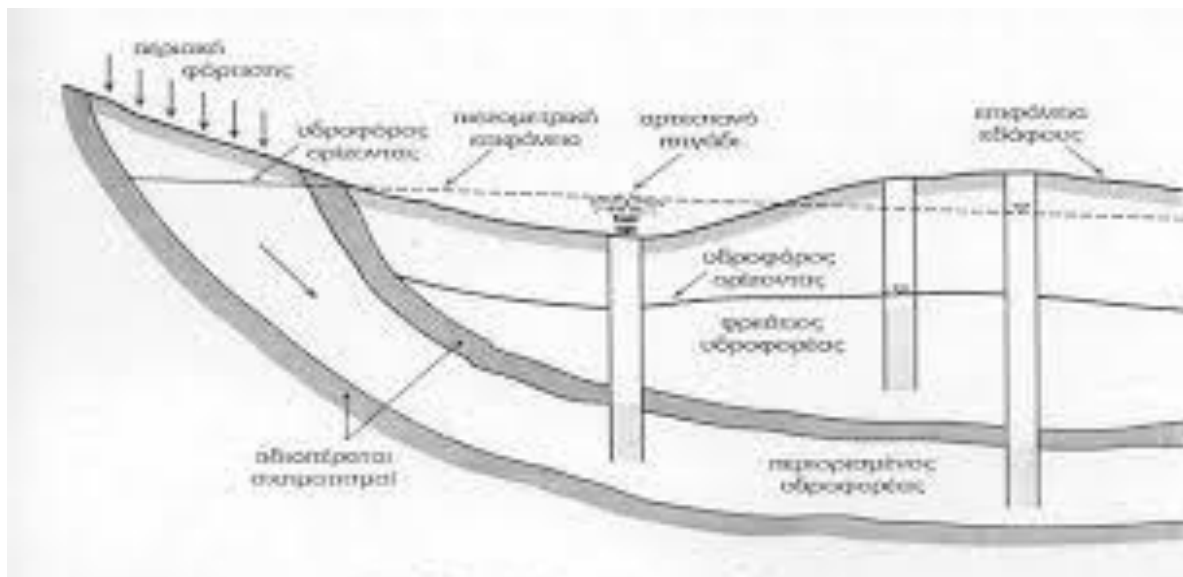
Το βασικό κριτήριο για μια γενική ταξινόμηση των υδροφορέων αποτελεί θέση της ανώτατης στάθμης του νερού στο έδαφος.

Θεωρώντας μια τυχαία κατακόρυφη τομή του εδάφους παρατηρούνται δυο ζώνες στις οποίες η κίνηση του νερού γίνεται με τελείως διαφορετικό τρόπο:

- Η ζώνη αερισμού (ή ακόρεστη ζώνη) και
- Η ζώνη κορεσμού (ή κορεσμένη ζώνη)

Εφόσον υπάρχει το άνω όριο της ζώνης κορεσμού, αυτό καλείται υδροφόρος(ή φρεάπος) ορίζοντας ενώ όταν μελετώνται ειδικά προβλήματα κίνησης των υπόγειων νερών χρησιμοποιείται και ο συνώνυμος όρος ελεύθερη επιφάνεια.

Η κλασική ταξινόμηση των υδροφορέων γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη γεωλογική δομή όσο και τις τοπικές υδραυλικές συνθήκες αλλά κυρίως το γεγονός του αν υπάρχει ελεύθερη επιφάνεια του νερού ή όχι.



Εικόνα 9: Τύποι υπόγειων υδροφορέων (πηγή: <https://appurl.io/nV5SokR4QU>).

3.3 Το μαθηματικό πρόβλημα των υπόγειων νερών

Η κίνηση του νερού στους υδροφορείς εξαρτάται τόσο από τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά τους όσο και από τις τοπικές συνθήκες ροής. Ο πιο θεμελιώδης νόμος της υδραυλικής των υπόγειων ροών, που διατυπώθηκε από τον Γάλλο μηχανικό Darcy και φέρει και το όνομα του, αφορά στις εξισώσεις κίνησης των υπόγειων νερών και στη γενική του μορφή γράφεται ως εξής:

$$Q = K A J$$

Όπου: Q είναι η παροχή οποιασδήποτε υπόγειας ροής, K είναι παράμετρος του πορώδους μέσου που χαρακτηρίζει τη διαπερατότητα του και καλείται υδραυλική αγωγιμότητα, A είναι το εμβαδόν της διατομής του υδροφορέα μέσα από την οποία γίνεται η ροή και J είναι η υδραυλική κλίση της ελεύθερης ή πιεζομετρικής επιφάνειας.

Στο τρισδιάστατο φαινόμενο η υδραυλική αγωγιμότητα αποτελεί τανυστή. Έτσι οι εξισώσεις κίνησης στις τρεις διευθύνσεις x_i ($i = 1, 2, 3$) που χαρακτηρίζει ένα γενικά ανισότροπο και ετερογενές μέσο ενός καρτεσιανού συστήματος:

$$Q_i = - K_{ij} \frac{\delta \varphi}{\delta x_j} = n V_i \quad (18)$$

Στις παραπάνω σχέσεις οι συνιστώσες της παροχής Q στις τρεις διευθύνσεις έχουν αντικατασταθεί από τις συνιστώσες της ειδικής παροχής ή ταχύτητας διήθησης, $q = Q/A$, που εξ ορισμού ισούται με $q = nV$, όπου V η ταχύτητα ροής και η το πορώδες του εδάφους. Το τελευταίο αποτελεί χαρακτηριστική παράμετρο που εκφράζει το ποσοστό των διακένων (πόρων) που υπάρχουν στον συνολικό εδαφικό όγκο. Πέραν των παραπάνω παραμέτρων, στο μαθηματικό πρόβλημα των υπόγειων ροών συμμετέχουν - όπως θα φανεί και παρακάτω - δύο ακόμα υδροδυναμικές παράμετροι ενός υδροφορέα:

α) η μεταφορικότητα, T, που χαρακτηρίζει την ικανότητα ενός υδροφορέα να μεταφέρει νερό και που ισούται με το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας του υδροφορέα, K, επί το πάχος του, b, και

β) η αποθηκευτικότητα, S, που εκφράζει την ποσότητα του νερού που απομακρύνεται ή προστίθεται στον αποθηκευμένο όγκο νερού ανά μονάδα επιφανείας του υδροφορέα εξαιτίας μιας μοναδιαίας αύξησης στο υδραυλικό φορτίο.

Η εξίσωση ροής σε υδροφορείς στη γενική της μορφή βασίζεται στην αρχή της διατήρησης της μάζας του ρευστού (νερού) στο πορώδες μέσο (έδαφος). Συνδυάζοντας λοιπόν τη σχέση που προκύπτει από την αρχή αυτή με τον νόμο του Darcy καταλήγουμε στην εξής διαφορική εξίσωση που ισχύει για ετερογενές και ανισότροπο μέσο (Bear, 1979):

$$\frac{\delta}{\delta x_i} \left(K_{ij} \frac{\delta \varphi}{\delta x_j} \right) = S_i \frac{\delta \varphi}{\delta t} \quad (19)$$

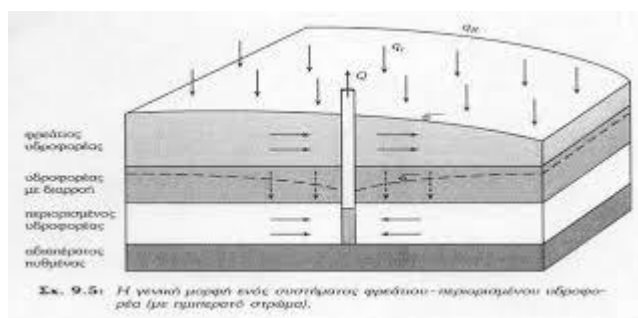
όπου t ο χρόνος και S_i παράμετρος που ονομάζεται ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους μέσου. Υπάρχουν όμως και ειδικές περιπτώσεις όπου απαιτείται η επίλυση προβλημάτων, κυρίως για φρεάτιους υδροφορείς, στο κατακόρυφο επίπεδο.

Για τον λόγο αυτό η περιγραφή των μαθηματικών μοντέλων που επιλύουν τους διάφορους τύπους μαθηματικών προβλημάτων διαχωρίζεται στις δύο αυτές κατηγορίες.

3.4 Εξισώσεις ροής σε οριζόντιους υδροφορείς

Εφόσον η ροή σ' έναν υδροφορέα γίνεται κατά την οριζόντια διεύθυνση η παραπάνω γενική εξίσωση μπορεί να ολοκληρωθεί κατά την κατακόρυφη διεύθυνση στο πάχος ενός περιορισμένου υδροφορέα (Bear, 1979). Για ισότροπο μέσο η διαφορική εξίσωση που περιγράφει τη ροή αυτή είναι:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(T \frac{\delta \phi}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(T \frac{\delta \phi}{\delta y} \right) - \frac{Kl}{b'} (\phi - \phi') + Q = S \frac{\delta \phi}{\delta t} \quad (20)$$



Εικόνα 10: Η γενική μορφή ενός συστήματος φρεατίου – περιορισμένου υδροφορέα (με ημιπερατό στρώμα). (πηγή: <https://appurl.io/4zxruxTB2A>).

Οι τύποι των οριακών συνθηκών που συνήθως χρησιμοποιούνται σε προβλήματα υπόγειων ροών είναι τρεις:

α) συνθήκες γνωστού φορτίου, $\phi = f_1(x, y, t)$,

β) συνθήκες γνωστής παροχής, $Q' n = f_2(x, y, t)$, όπου $Q' n$ η ανά μονάδα μήκους και κάθετα στην οριακή καμπύλη διηθούμενη παροχή και

γ) συνθήκες ημιπερατού ορίου.

Η πιο συνηθισμένη εφαρμογή της συνθήκης γνωστού φορτίου αφορά όρια υδραυλικής επικοινωνίας του υδροφορέα με επιφανειακά νερά (ποτάμια, λίμνες, θάλασσες), η αντίστοιχη γνωστής παροχής χρησιμοποιείται για αδιαπέρατα όρια (μηδενική διηθούμενη παροχή), ενώ η οριακή συνθήκη ημιπερατού ορίου εφαρμόζεται σε περιπτώσεις μερικά φραγμένης κοίτης ποταμού ή λίμνης λόγω απόθεσης λεπτόκοκκων υλικών που μειώνει την υδραυλική επικοινωνία υδροφορέα - αποδέκτη.

3.5 Εξισώσεις γραμμών ροής και δυναμικού

Πρόκειται για την πιο διαδεδομένη μεθοδολογία μόρφωσης του μαθηματικού προβλήματος όταν η ροή που μελετάται επιβάλλεται να επιλυθεί σε μια κατακόρυφη τομή του υδροφορέα.

Η επίλυση αυτή γίνεται χρησιμοποιώντας ως άγνωστες μεταβλητές τη συνάρτηση δυναμικού, $\Phi = K_{\phi}$, και τη συνάρτηση ροής ή ροϊκή συνάρτηση, Ψ . Η συνάρτηση δυναμικού είναι αρμονική για ομογενή και ισότροπα μέσα, όμως η χρήση της επεκτείνεται και σε πιο σύνθετα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω ένα τυπικό πρόβλημα μόνιμης ροής, το οποίο μπορεί να σχηματιστεί έτσι ώστε οι άξονες συντεταγμένων να συμπίπτουν με τις κύριες διευθύνσεις της ροής, μπορεί να περιγραφεί από οποιαδήποτε από τις δύο παρακάτω εξισώσεις:

$$1. \frac{\delta}{\delta x} \left(K_{xx} \frac{\delta \phi}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(K_{yy} \frac{\delta \phi}{\delta y} \right) = 0 \quad (21)$$

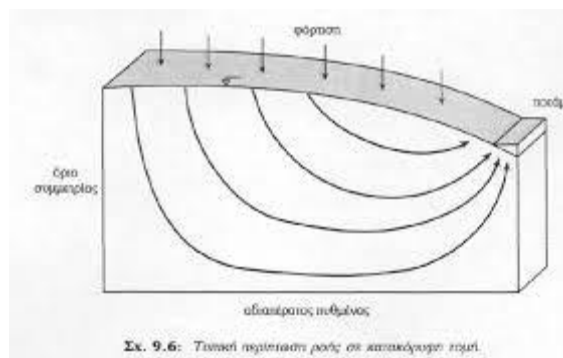
$$2. \frac{\delta}{\delta x} \left(\frac{1}{K_{yy}} \frac{\delta \psi}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(\frac{1}{K_{xx}} \frac{\delta \psi}{\delta y} \right) = 0 \quad (22)$$

όπου K_{xx} και K_{yy} είναι οι συνιστώσες του τανυστή υδραυλικής αγωγιμότητας κατά τις κύριες διευθύνσεις x και y αντίστοιχα. Οι τιμές της ειδικής παροχής (ταχύτητας Darcy) υπολογίζονται για την περίπτωση αυτή για τις δύο κύριες διευθύνσεις και είναι:

$$1. q_x = -K_{xx} \frac{\delta \phi}{\delta x} - K_{xy} \frac{\delta \phi}{\delta y} = -\frac{\delta \Psi}{\delta y} \quad (23)$$

$$2. q_y = -K_{yx} \frac{\delta \phi}{\delta x} - K_{yy} \frac{\delta \phi}{\delta y} = -\frac{\delta \Psi}{\delta x} \quad (24)$$

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, με τη μεθοδολογία αυτή οι ταχύτητες της ροής μπορούν να υπολογισθούν χωρίς να επιλυθεί η εξίσωση ροής. Επιπλέον, για υδροφορείς με μεγάλο μήκος και μικρό πάχος ο αριθμητικός υπολογισμός των ταχυτήτων με τον τρόπο αυτό είναι πολύ ακριβής (Frind and Matanga, 1985). Έτσι λοιπόν η μέθοδος εφαρμόζεται σχεδόν αποκλειστικά σε προβλήματα κατακόρυφων τομών.



Εικόνα 11: Τυπική περίπτωση ροής σε κατακόρυφη τομή. (πηγή: <https://appurl.io/1gqv1cwqs0>)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 Αναχώματα

Η κατασκευή αναχωμάτων ίσως να είναι ο αρχαιότερος τρόπος αντιπλημμυρικής προστασίας. Το προστατευτικό ανάχωμα είναι συνήθως κατασκευασμένο από γαιώδες υλικό. Κατασκευάζεται παράλληλα προς τον ποταμό και έχει ως σκοπό να περιορίσει την ροή των πλημμυρικών υδάτων, προστατεύοντας έτσι τις περιοχές εκατέρωθεν του φράγματος. Άλλες κατηγορίες αναχωμάτων είναι οι εξής:

- Κλειστά αναχώματα.
- Ανοιχτά αναχώματα.
- Αναχώματα συγκράτησης.
- Καθοδηγητικά αναχώματα.
- Εσωτερικά αναχώματα.
- Αναχώματα με μορφή δακτυλίου.
- Αναχώματα πηγών.
- Αναχώματα “ύπνου”.

Τα αναχώματα κατασκευάζονται από γαιώδες υλικό το οποίο λαμβάνεται επί τόπου από ορύγματα, που ονομάζονται δανειοθάλαμοι, παράλληλα προς το ανάχωμα. Η διατομή του αναχώματος είναι τραπεζοειδής με πλάτος στέψεως 1 με 3 μέτρα. Η κλίση των πρανών εξαρτάται από το υλικό της κατασκευής, το ύψος του αναχώματος και την διάρκεια της πλημμύρας. Το ύψος των αναχωμάτων συνδέεται με την μεταξύ τους απόσταση από την στιγμή που ο αρχικός σκοπός του έργου είναι η δημιουργία μιας κοίτης πλημμύρων ικανής να ανταπεξέλθει στην παροχή αιχμής της πλημμύρας μελέτης. Το ύψος των αναχωμάτων καθορίζεται με βάση οικονομικά κριτήρια, μέσα στα όρια που επιτρέπονται από τεχνικά κριτήρια.

Κατά την κατασκευή του αναχώματος, και πριν τοποθετηθεί το υλικό της κατασκευής, αφαιρείται το επιφανειακό στρώμα εδάφους στην βάση του αναχώματος. Ακόμη, ανοίγεται και μια τάφος υποθεμελιώσεως η οποία στην συνέχεια γεμίζει με γαιώδες υλικό. Η κατασκευή του αναχώματος πρέπει να σέβεται τους κανόνες της εδαφομηχανικής, συνήθως όμως αυτή απλοποιείται λόγω της μικρής σπουδαιότητας του τεχνικού έργου.

Σε ρεύματα τα οποία διέρχονται δια μέσου οικισμών κατασκευάζονται συνήθως τοίχοι για την αντιπλημμυρική προστασία διότι δεν διατίθεται έκταση για την κατασκευή αναχωμάτων ή αυτή είναι πολύ δαπανηρή.

Μετά την κατασκευή του έργου, διαμορφώνεται η λεία επιφάνεια του, για την μείωση του συντελεστή τραχύτητας και αύξηση της ταχύτητας ροής αλλά και για την αισθητική διαμόρφωση του χώρου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5.1 Υδραυλική των πηγαδιών

Οι διάφορες περιπτώσεις των ροών που προκαλούνται από αντλήσεις υπόγειου νερού μέσα από πηγάδια μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα:

- με το αν η ροή είναι μόνιμη ή μη μόνιμη και
- με το αν η ροή γίνεται σε περιορισμένο ή σε φρεάτιο υδροφορέα.

Σε οποιαδήποτε περίπτωση πάντως η μελέτη του προβλήματος ξεκινά θεωρώντας την (αρχική) θέση της πιεζομετρικής ή της ελεύθερης επιφάνειας πριν αρχίσει η διαδικασία της άντλησης. Στη συνέχεια το πρόβλημα λύνεται με άγνωστη μεταβλητή την πτώση στάθμης, $s(x, y, t)$, της πιεζομετρικής ή ελεύθερης επιφάνειας. Το μέγεθος αυτό ορίζεται σε κάθε σημείο (x, y) του υδροφορέα και για κάθε χρονική στιγμή, t , ως η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της αρχικής και της υπόψη θέσης της αντίστοιχης επιφάνειας.

Η βασική υπόθεση που γίνεται σε όλα τα προβλήματα άντλησης με πηγάδια που παρουσιάζονται παρακάτω είναι ότι η ροή γίνεται κατά την οριζόντια διεύθυνση και ότι το πηγάδι διανοίγεται και κατά συνέπεια αντλεί μέχρι τον αδιαπέρατο πυθμένα του υδροφορέα. Το σφάλμα πάντως στην τιμή της πτώσης στάθμης που μπορεί να παρουσιασθεί σε παρεκκλίσεις των παραπάνω υποθέσεων εκτείνεται σε απόσταση όχι μεγαλύτερη του διπλάσιου πάχους του υδροφορέα (Huisman, 1972).

5.2 Μόνιμη ροή από άντληση πηγαδιού σε περιορισμένο υδροφορέα

Η αντίστοιχη σχέση υπολογισμού της πτώσης στάθμης είναι:

$$s = \frac{Q_0}{2\pi T} \ln \frac{R}{r} \quad (25)$$

Η παραπάνω σχέση ονομάζεται και σχέση του Dupuit ενώ παραλλαγή της, γνωστή ως σχέση του Thiem, συνδέει τις πτώσεις στάθμης σε δύο θέσεις του υδροφορέα:

$$s_1 - s_2 = \frac{Q_0}{2\pi T} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (26)$$

Τέλος αν είναι γνωστή η πτώση στάθμης, s_0 , στην παρειά του πηγαδιού, r_0 , τότε μπορούμε να υπολογίσουμε την πτώση στάθμης, s , σε οποιαδήποτε απόσταση, r , από το κέντρο του πηγαδιού με τη σχέση:

$$s - s_0 = \frac{Q_0}{2\pi T} \ln \frac{r_0}{r} \quad (27)$$

5.3 Μόνιμη ροή από άντληση πηγαδιού σε φρεάτιο υδροφορέα

Με την αποδοχή της υπόθεσης Dupuit για οριζόντια ροή η πτώση στάθμης μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$H^2 - h^2 = \frac{Q_0}{\pi K} \ln \frac{R}{r} \quad (28)$$

Αν και πάλι χρησιμοποιηθούν τα στοιχεία του πηγαδιού καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση που είναι γνωστή ως σχέση Dupuit – Forchheimer:

$$H^2 - h_0^2 = \frac{Q_0}{\pi K} \ln \frac{R}{r_0} \quad (29)$$

Αν τέλος υποτεθεί ότι το μέγεθος της πτώσης στάθμης είναι μικρό σε σχέση με το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς σημαντικό λάθος οι γραμμικές σχέσεις του περιορισμένου υδροφορέα.

5.4 Μόνιμη ροή από άντληση πηγαδιού σε περιορισμένο υδροφορέα με διαρροή

Από τις πολλές δυνατές παραλλαγές ενός προβλήματος στο οποίο το ένα όριο του υδροφορέα είναι ημιπερατό δίνεται παρακάτω η πιο απλή περίπτωση που φαίνεται. Να σημειωθεί ότι η αντίσταση του ημιπερατού στρώματος, c , ισούται με το γινόμενο $b' K'$ ενώ ο παράγοντας διαρροής, 2 , που εμφανίζεται στις παρακάτω σχέσεις ισούται με $(T_c)1/2$. Η σχέση υπολογισμού της πτώσης στάθμης είναι λοιπόν:

$$S = \frac{Q_0}{2\pi T} K_0 \left(\frac{r}{\lambda} \right) \quad (30)$$

Όπου: K_0 είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel δευτέρου είδους. Γ_k σημεία κοντά στο πηγάδι και γενικά για $r/A < 0.2$ η πιο εύχρηστη σχέση δίνει εκτιμήσεις της πτώσης στάθμης με σφάλμα μικρότερο του 1%.

$$S = \frac{Q_0}{2\pi T} \ln \frac{1.123\lambda}{r} \quad (31)$$

5.5 Μη μόνιμη ροή από άντληση πηγαδιού σε περιορισμένο υδροφορέα

Η σχηματική παράσταση του προβλήματος δίνεται παρακάτω ενώ η γενική λύση για την πτώση στάθμης είναι:

$$S(r,t) = \frac{Q_0}{4\pi T} W(u) \quad (32)$$

όπου $W(u)$ είναι η συνάρτηση πηγαδιού για περιορισμένο υδροφορέα και $u = Sr^2 / 4Tt$. Η $W(u)$ δεν έχει αναλυτική σχέση υπολογισμού, όμως τιμές της μπορούν να βρεθούν είτε άμεσα μέσω μιας προσεγγιστικής σειράς είτε με παρεμβολή από σχετικούς πίνακες. Για μικρές τιμές της u , π.χ. για $u < 0.01$, η πτώση της στάθμης μπορεί να δοθεί επίσης από τον προσεγγιστικό τύπο:

$$S(r,t) = \frac{Q_0}{4\pi T} \ln \frac{2.25Tt}{r^2 S} \quad (33)$$

5.6 Συστήματα πηγαδιών και η μέθοδος των εικόνων

Στο σημείο αυτό θα αναφερθούμε σε δύο κατηγορίες ροών που συναντώνται πολύ συχνά σε πρακτικά προβλήματα αντλήσεων:

- συστήματα πηγαδιών σε άπειρης έκτασης υδροφορείς και
- πηγάδια κοντά σε υδρολογικά όρια.

Όταν δύο ή περισσότερα πηγάδια λειτουργούν στον ίδιο υδροφορέα και βρίσκονται σε αμοιβαίες αποστάσεις μεταξύ τους μικρότερες από τις ακτίνες επιρροής τους τότε οι πτώσεις στάθμης και οι αντλούμενες παροχές αλληλοεπηρεάζονται.

Έτσι αν έχουμε ένα σύστημα M πηγαδιών τότε η πτώση στάθμης σ' ένα τυχαίο σημείο, του πεδίου υπολογίζεται από το άθροισμα των επιδράσεων όλων των M πηγαδιών. Η εφαρμογή αυτή της αρχής της επαλληλίας ισχύει απόλυτα για τις περιπτώσεις γραμμικών προβλημάτων.

Έτσι π.χ. για την περίπτωση άντλησης από περιορισμένο υδροφορέα σε μόνιμη ροή θα ισχύει η σχέση:

$$Si = \sum_{j=1}^M \frac{Q_j}{2\pi T} \ln \frac{R_j}{r_{ij}} \quad (34)$$

Με κατάλληλες παραδοχές η παραπάνω μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοσθεί και σε φρεάτιους υδροφορείς, ενώ ανάλογες σχέσεις μπορούν να εφαρμοσθούν και για μη μόνιμες ροές.

Η μέθοδος των εικόνων στηρίζεται κι αυτή στην αρχή της επαλληλίας και εφαρμόζεται σε προβλήματα όπου υπάρχουν ένα ή περισσότερα ευθύγραμμα όρια, π.χ. ποτάμια, λίμνες, αδιαπέρατα όρια, κοντά στα οποία γίνονται αντλήσεις από ένα ή περισσότερα πηγάδια. Η βασική αρχή της μεθόδου είναι να αντικατασταθεί το πεδίο ροής από ένα μεγαλύτερο (άπειρης έκτασης) υποθετικό πεδίο με απλούστερες οριακές συνθήκες στο οποίο, εκτός από τα πραγματικά σε λειτουργία πηγάδια, θεωρείται ότι λειτουργούν και επιπλέον φανταστικά πηγάδια σε κατάλληλες θέσεις (Bear, 1979, Λατινόπουλος, 1986).

Οι δύο πιο τυπικές περιπτώσεις εφαρμογής της μεθόδου των εικόνων αφορούν τις ροές που προκαλούνται από άντληση ενός μεμονωμένου πηγαδιού κοντά σε όριο δεξαμενής και κοντά σε αδιαπέρατο όριο. Τα αντίστοιχα προβλήματα φαίνονται σχηματικά ενώ οι σχέσεις υπολογισμού της πτώσης στάθμης για μόνιμη ροή (ανάλογες είναι και για μη μόνιμη) σε περιορισμένο υδροφορέα είναι:

$$1. \quad S = \frac{Q_0}{4\pi T} \ln \frac{y^2 + (x+x_0)^2}{y^2 + (x-x_0)^2} \quad (35)$$

$$2. \quad S = \frac{Q_0}{4\pi T} \ln \frac{R^4}{\{y^2 + (x-x_0)^2\}\{y^2 + (x+x_0)^2\}} \quad (36)$$

5.7 Μοντέλα προσομοίωσης των υπόγειων ροών

Η περιγραφή των κύριων μεθοδολογιών επίλυσης των μοντέλων αυτών που ακολουθεί περιλαμβάνει τα απαραίτητα μόνο στοιχεία για την κατανόηση των αρχών τους καθώς και τα ιδιαίτερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους. Η ανάγκη χρήσης αριθμητικών μεθόδων για την προσομοίωση των φυσικών φαινομένων στα οποία κυριαρχούν οι υπόγειες ροές προκύπτει από την αδυναμία των αναλυτικών λύσεων να καλύψουν με αξιοπιστία τα πρακτικά προβλήματα διάφορων εφαρμογών.

Οι λόγοι της αδυναμίας αυτής μπορούν να συνοψισθούν στα εξής:

- Δεν είναι δυνατό να βρεθούν αναλυτικές λύσεις για τις γενικές μορφές των εξισώσεων ιδίως για δισδιάστατα και τρισδιάστατα προβλήματα,
- Δεν είναι δυνατό να περιγραφούν πεδία ροής με σύνθετη ή ακανόνιστη γεωμετρία ορίων,
- Είναι πολύ δύσκολο να επιλυθούν σύνθετα προβλήματα, όπως έντονη ετερογένεια των παραμέτρων, λειτουργία συστημάτων πηγαδιών.

Σύμφωνα με τα παραπάνω σκοπός των αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης είναι η μελέτη και η πρόγνωση της εξέλιξης σύνθετων φαινομένων σχετικών με υπόγειες ροές (π.χ. εκμετάλλευση και διαχείριση υπόγειων πόρων, προστασία από την υφαλμύρωση παράκτιων υδροφορέων, υποβιβασμός στάθμης για αποστράγγιση εδαφών κλπ.).

5.8 Κατασκευή και εφαρμογή αριθμητικών μοντέλων

Για την κατασκευή ενός αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης των φυσικών φαινομένων σ' ένα σύστημα υπόγειων νερών πρέπει κατ' αρχήν να καθορισθούν όσο πιο αξιόπιστα γίνεται οι γεωλογικές του ενότητες και οι υδρογεωλογικές παράμετροι του υπό μελέτη πεδίου.

Στη συνέχεια πρέπει να προσδιορισθούν οι κύριες φυσικές διεργασίες που επικρατούν και να επιλεγούν ανάλογα οι φυσικοί νόμοι που τις διέπουν.

Οι νόμοι αυτοί συνήθως εκφράζονται με μαθηματικό τρόπο μέσω διαφορικών εξισώσεων, όπως αυτές που παρουσιάσθηκαν στα προηγούμενα.

Η σύγχρονη αντίληψη για τη ρύθμιση των αριθμητικών μοντέλων επικεντρώνεται στην αυτοματοποιημένη τροποποίηση και προσαρμογή των τιμών των φυσικών παραμέτρων με διάφορες μεθόδους που συνιστούν το λεγόμενο πρόβλημα ταυτοποίησης ή αντίστροφο πρόβλημα.

5.9 Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών

Η πιο παλιά μέθοδος διαφοροποίησης των διαφορικών εξισώσεων είναι αυτή των πεπερασμένων διαφορών. Στόχος της μεθόδου είναι να μετατραπεί η διαφορική εξίσωση σε εξίσωση διαφορών, δηλαδή αλγεβρική, πράγμα που επιτυγχάνεται με την προσέγγιση των μερικών παραγώγων με όρους διαφορών.

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών μπορεί να εφαρμοσθεί με επιτυχία και σε προβλήματα δύο ή και τριών διαστάσεων. Γενικά όμως δεν θεωρείται η καλύτερη εξαιτίας της δέσμησης από τον κόναβο που πρέπει να είναι ορθογωνικής μορφής, αλλά και σε ορισμένες περιπτώσεις, από τη δυσκολία στην ακριβή αριθμητική διακριτοποίηση των εξισώσεων.

5.10 Χαρτογράφηση των υπόγειων ροών

Ένα από τα βασικά στοιχεία μιας μελέτης υπόγειων ροών είναι η παρουσίαση των μεταβολών στον χώρο των διάφορων μεγεθών, διαδικασία που υλοποιείται με την κατασκευή χαρτών. Ειδικά στην περίπτωση που μελετάται ένα σύνθετο πρόβλημα για το οποίο απαιτείται η εφαρμογή ενός αριθμητικού μοντέλου πρόγνωσης πρέπει να κατασκευασθούν οι εξής χάρτες:

- Των ισοσταθμικών καμπυλών της ελεύθερης ή πιεζομετρικής επιφάνειας,
- Της χωρικής μεταβολής βασικών παραμέτρων, π.χ. της υδραυλικής αγωγιμότητας,
- Της ανώτατης και κατώτατης επιφάνειας των υδροφορέων και
- Της χωρικής μεταβολής της επαναπλήρωσης των υδροφορέων.

Οι παραπάνω χάρτες κατασκευάζονται από στοιχεία επιτόπου μετρήσεων. Με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών η αυτόματη (ή ηλεκτρονική) χαρτογράφηση των υδρολογικών μεταβλητών έχει γίνει κοινή πρακτική.

Έτσι λοιπόν στα παρακάτω γίνεται αναφορά στα βασικά χαρακτηριστικά της χαρτογράφησης των υπόγειων νερών με ιδιαίτερη έμφαση στις αριθμητικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται

5.11 Χάρτες υπόγειων ροών

Η χαρτογράφηση των επιφανειών των υπόγειων νερών περιλαμβάνει τις εξής κατηγορίες χαρτών:

- Ισοσταθμικών καμπυλών, που ενώνουν σημεία στάθμης της ελεύθερης ή πιεζομετρικής επιφάνειας που έχουν το ίδιο απόλυτο υψόμετρο,
- Ισοβαθών καμπυλών, που ενώνουν σημεία που έχουν το ίδιο βάθος στάθμης του υπόγειου νερού σε σχέση με την επιφάνεια του εδάφους,
- Διακύμανσης της στάθμης των υπόγειων νερών σε διάφορες χρονικές περιόδους.

Οι χάρτες των υπόγειων νερών μπορούν να δώσουν πολύ χρήσιμες πληροφορίες για τις τοπικές συνθήκες ροής. Από μια ανάλυση λοιπόν ενός χάρτη ισοπιεζομετρικών καμπυλών μπορούμε να αποκτήσουμε τις εξής πληροφορίες (Bear, 1979):

- Η παροχή της υπόγειας ροής, που για ομογενή υδροφορέα δίνεται από τη σχέση $q = -TV\phi$, μπορεί να εκτιμηθεί σε τοπικό επίπεδο με τρώντας στον χάρτη την κλίση $\Delta\phi/\Delta\eta$ του υδραυλικού φορτίου.
- Η αύξηση ή μείωση της κλίσης του φορτίου κατά τη διεύθυνση της ροής δείχνει την ανάλογη μεταβολή στις τοπικές τιμές της μεταφορικότητας.
- Η μορφή των καμπυλών στη γειτονιά ενός ποταμού δείχνει κατά πόσο αυτός τροφοδοτεί ή τροφοδοτείται από τον υποκείμενο υδροφορέα.

Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι στη διαδικασία ρύθμισης αλλά και εφαρμογής των αριθμητικών μοντέλων πρόγνωσης ιδιαίτερα χρήσιμοι είναι οι χάρτες της μεταφορικότητας των υδροφορέων. Οι χάρτες αυτοί συνήθως κατασκευάζονται έμμεσα, αφού συγκεντρωθούν δηλαδή στοιχεία και μετρήσεις τόσο για την υδραυλική αγωγιμότητα όσο και για το πάχος των υδροφόρων στρωμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Γεωτρήσεις

6.1 Γεώτρηση

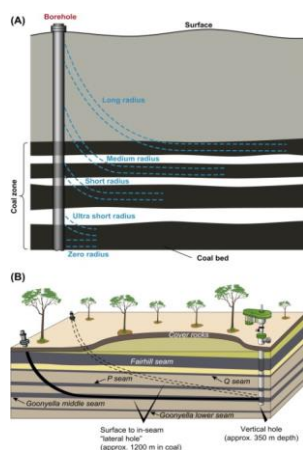
Για την έρευνα και παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου, απαιτείται η διάνοιξη γεωτρήσεων σε μεγάλα βάθη. Οι διανοίξεις για τον εντοπισμό και την εξερεύνηση των κοιτασμάτων είναι γνωστές ως ερευνητικά φρέατα (exploratory wells), ενώ οι διανοίξεις που χρησιμοποιούνται για παραγωγή από τα κοιτάσματα είναι γνωστές ως παραγωγικά φρέατα (production wells). Τα επιτυχημένα ερευνητικά φρέατα μετατρέπονται σε παραγωγικά με την προσθήκη του κατάλληλου εξοπλισμού. Τα ερευνητικά φρέατα πρέπει να διανοιχτούν με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχουν ακριβείς πληροφορίες για το πέτρωμα και το προς εξερεύνηση κοίτασμα. Αυτό γίνεται με δειγματοληψία πετρωμάτων, π.χ. με τη μορφή καρότων, δειγματοληψία υλικών που βρίσκονται στο πέτρωμα (π.χ., νερό, πετρέλαιο, αέριο), συλλογή δεδομένων από μεγάλο αριθμό γεωφυσικών μετρήσεων, διεξαγωγή δοκιμών παραγωγικότητας και μέτρηση της προκύπτουσας συμπεριφοράς του κοιτάσματος. Τα παραγωγικά φρέατα πρέπει να διανοίγονται και να ολοκληρώνονται με τέτοιο τρόπο ώστε το κόστος της προκύπτουσας παραγωγής να είναι το ελάχιστο δυνατό, να μπορεί να παραχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ποσότητα από τα αποθέματα με οικονομικό τρόπο, να γίνει βέλτιστη χρήση της παραγωγικής δυναμικότητας, να απαιτηθεί η διάνοιξη του ελάχιστου αριθμού φρεάτων για την ανάπτυξη του κοιτάσματος, και να επιτευχθεί παραγωγή χωρίς προβλήματα καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του κοιτάσματος.

6.1.1: Είδη Γεωτρήσεων

Υπάρχουν δύο είδη γεωτρήσεων:

- Κατακόρυφες Γεωτρήσεις
- Οριζόντιες Γεωτρήσεις

Οι κατακόρυφες γεωτρήσεις χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για την άντληση νερού. Όσον αφορά τις οριζόντιες χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για άντληση πετρελαίου και φυσικού αερίου.



Εικόνα 12: Σχηματική απεικόνιση οριζόντιας γεώτρησης για εξαγωγή πετρελαίου (πηγή:

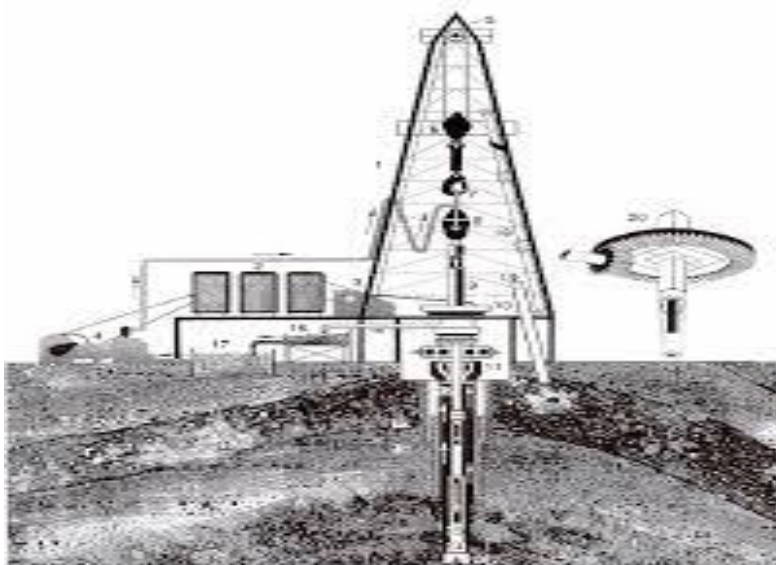
<https://appurl.io/-ne94zy19t>).

6.2 Ιστορία

Οι γεωτρήσεις σε μεγάλα βάθη δεν αποτελούν κάτι το νέο στην εξέλιξη της τεχνολογίας. Έχει αναφερθεί από τον Κομφούκιο η διάνοιξη φρεάτων σε αλατωρυχεία βάθους 500 m το 600 π.Χ. Στην Ευρώπη πραγματοποιούνταν διάνοιξη φρεάτων για την εύρεση νερού τόσο στους αρχαίους χρόνους όσο και στο Μεσαίωνα. Η μηχανική διάνοιξης φρεάτων και τα βάθη στα οποία μπορούσε να φτάσει είχε μείνει στάσιμη για πάρα πολλούς αιώνες. Η έρευνα για πρώτες ύλες (ποτάσα, σιδηρομετάλλευμα, άνθρακας) στα πλαίσια της βιομηχανοποίησης το 19ο αιώνα, έδωσε ώθηση στην εξέλιξη της μηχανικής γεωτρήσεων. Σε αυτό το διάστημα, το βάθος των γεωτρήσεων έφτασε τα 2000 m. Στην Ευρώπη κατά το δεύτερο μισό του 19ου αιώνα και το ξεκίνημα του 20ου αιώνα πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη έρευνα για πρώτες ύλες. Στο διάστημα αυτό αναπτύχθηκε η τεχνική της περιστροφικής γεώτρησης με επανακυκλοφορία γεωτρητικής ιλύος. Με αυτόν τον τρόπο έγινε δυνατή η διάνοιξη οπών σε μεγαλύτερα βάθη για την παραγωγή άνθρακα, ποτάσας και ορυκτού αλατιού. Η χρήση της μεθόδου της περιστροφικής γεώτρησης αναπτύχθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες στο τέλος του 19ου αιώνα για την έρευνα και ανάπτυξη κοιτασμάτων πετρελαίου ήταν ένα σημαντικό βήμα προς τα εμπρός. Από τότε, η τεχνική έχει βελτιωθεί σημαντικά και παραμένει μέχρι και σήμερα η κυρίαρχη μέθοδος γεώτρησης, σε βάθη που έχουν φτάσει μέχρι τα 9000 m. Η βαθύτερη γεώτρηση έχει πραγματοποιηθεί στο φρέαρ Kola SG 3 της πρώην Σοβιετικής Ένωσης, που έχει φτάσει σε βάθος 12261 m.

6.3 Περιστροφική Εξέδρα Γεώτρησης

Τα κύρια χαρακτηριστικά της περιστροφικής γεώτρησης είναι η επανακυκλοφορούσα θιξοτροπική γεωτρητική ιλύς και χρήση ισχυρών κεφαλών γεωτρήπανων. Αυτά, σε συνδυασμό με άλλα τυπικά χαρακτηριστικά λειτουργίας έχουν συμβάλει στην καθιέρωση της μεθόδου ως της σημαντικότερης για την εξερεύνηση και ανάπτυξη βαθέων κοιτασμάτων υδρογονανθράκων. Οι απότομες εκτονώσεις και οι πίδακες που κάποτε ήταν πολυάριθμες, σήμερα αποτελούν σπανιότατο γεγονός. Τα βασικά μέρη και η λειτουργία μιας περιστροφικής εξέδρας γεώτρησης δίνονται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 13).



ΕΙΚΟΝΑ 13: Διάγραμμα περιστροφικής εξέδρας γεώτρησης (πηγή: https://appurl.io/C_28gJf110).

Μέσω της περιστρεφόμενης τράπεζας (rotary table), εφαρμόζεται ροπή στο γεωτρύπανο, το οποίο αποτελείται από ανεξάρτητους σωλήνες. Οι σωλήνες αναρτώνται στον πυλώνα (derrick) μέσω του άγκιστρου (hook) που είναι προσαρτημένο στην κινητή τροχαλία (traveling block). Το άγκιστρο αυτό, που επιτρέπει στο γεωτρύπανο να περιστρέφεται, μπορεί να κινείται κατακόρυφα με τη βοήθεια κατάλληλου συστήματος στο δάπεδο της εξέδρας. Το γεωτρύπανο μεταφέρει τη ροπή στην κεφαλή (drilling bit), η ισχύς πρόσκρουσης στο (Εικόνα 13 Διάγραμμα περιστροφικής εξέδρας γεώτρησης) πέτρωμα εξαρτάται από το βάρος του γεωτρύπανου και των γεωτρητικών σωλήνων (drill collar) (μεγάλου πάχους σωλήνες τοποθετημένοι πάνω από την κεφαλή), που δεν αναλαμβάνεται από το άγκιστρο. Η περιστρεφόμενη τράπεζα, η οποία είναι ένας "οδηγός επιφανείας", μπορεί να αντικατασταθεί από έναν υδραυλικό κινητήρα γεώτρησης ακριβώς πάνω από την κεφαλή του γεωτρύπανου. Αυτός ο μηχανισμός που μπορεί να είναι μηχανή θετικής εκτόπισης βασισμένη στην αρχή του Moineau ή μια πολυβάθμια τουρμπίνα, εγκαθίσταται στον αγωγό γεώτρησης και παίρνει κίνηση από τη γεωτρητική ιλύ. (Κεφαλές Γεώτρησης). Η κεφαλή της γεώτρησης, είναι το μέρος του γεωτρύπανου μέσω του οποίου γίνεται η προσβολή του βράχου και η διάνοιξη της οπής του φρέατος. Αυτό μπορεί να γίνει με μηχανική διάνοιξη (κοπτική κεφαλή), θρυμματισμό, ή αποξεστική διάτρηση.

6.4 Γεωτρητική Ιλύς.

Τα θραύσματα από τη γεώτρηση μεταφέρονται στο δακτύλιο μεταξύ του τοιχώματος του φρέατος και του γεωτρύπανου από την ιλύ. Ως γεωτρητική ιλύς χρησιμοποιείται ένα θιξοτροπικό ρευστό που περιέχει μπεντονίτη και κυτταρίνη για παράδειγμα. Λειτουργίες της ιλύος περιλαμβάνουν την ψύξη και λίπανση του γεωτρύπανου, τον καθαρισμό του πυθμένα του φρέατος, την απομάκρυνση των θραυσμάτων, και την υποστήριξη των τοιχωμάτων της γεώτρησης (υδραυλική επίχριση). Η ιλύς αντλείται με εμβολοφόρες αντλίες μέσω των γεωτρητικών σωλήνων προς την κεφαλή του γεωτρύπανου, μέσω της οποίας εξέρχεται με μεγάλη ταχύτητα για να εξασφαλίσει τη μέγιστη δυνατή απομάκρυνση των θραυσμάτων. Τα θραύσματα και τα μικρά κομμάτια στερεών απομακρύνονται από την ιλύ στην επιφάνεια (μέσω των δονούμενων κόσκινων, φυγοκέντρων και υδροκυκλώνων) και η ιλύς επανακυκλοφορεί προς την οπή μέσω της αντλίας. Οι παράμετροι της ιλύος (π.χ. ρεολογικές ιδιότητες, μηχανική και θερμική κατάσταση του κολλοειδούς συστήματος) ρυθμίζονται ανάλογα με την ταχύτητα γεώτρησης, την ισχύ της αντλίας, τον τύπο κεφαλής του γεωτρύπανου, τη διάμετρο γεώτρησης, την πίεση στους πόρους του πετρώματος, τη θερμοκρασία, τη φύση του διανοιγόμενου πετρώματος (περιοχές απώλειας ιλύος στους διανοιγόμενους γεωλογικούς σχηματισμούς), τις εισροές στην οπή της γεώτρησης, και την περιεκτικότητα σε στερεά. Πυκνότητα της ιλύος κυμαινόμενη μεταξύ 1.10 και 1.40 g/cm³ είναι συνήθως αποτελεσματική για να ανταποκριθεί στην πίεση του κοιτάσματος, και σε οριακές καταστάσεις όπως η επίδραση του εμβολισμού και οι αδρανειακές δυνάμεις κατά την έλξη της συστοιχίας των σωλήνων της γεώτρησης. Σε ειδικές περιπτώσεις μπορεί να απαιτηθεί πυκνότητα χαμηλότερη από 1 g/cm³ ή πάνω από 2.5 g/cm³. Η διήθηση του νερού από την ιλύ στα πορώδη πετρώματα, προς σχηματισμό διηθητού πλακούντα εξελίσσεται σύμφωνα με το νόμο διήθησης του Darcy. Η ποσότητα του διηθήματος είναι ανάλογη της διαπερατότητας του πλακούντα, της εφαρμοζόμενης διαφοράς πίεσης και της ενεργού επιφάνειας διήθησης, και αντιστρόφως ανάλογη του ιξώδους του διηθήματος και του πάχους του πλακούντα. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα της ιλύος, το pH και η περιεκτικότητα σε χλωριόντα, θειικά, ασβέστιο και όξινα ανθρακικά είναι παράμετροι που βρίσκονται υπό συνεχή παρακολούθηση. Τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία του κολλοειδούς συστήματος της ιλύος είναι:

1. Αργιλούχα υλικά (π.χ., μπεντονίτης)
2. Βαρέα υλικά (π.χ., βαρίτης, αιματίτης)
3. Συστατικά μείωσης ιξώδους, διασπαρτικά, υλικά διατήρησης του κολλοειδούς
4. Γαλακτωματοποιητές, λιπαντικά
5. Παρεμποδιστές: Υπάρχουν γεωτρητικές ιλύς υδατικής ή ελαιώδους βάσης. Η οπή της γεώτρησης χωρίζεται σε τμήματα από την κορυφή προς τον πυθμένα. Καθένα από αυτά τα τμήματα σταθεροποιείται με τη βοήθεια κατάλληλου υποστηρίγματος που στερεώνεται στα τοιχώματα με ειδικό σκυρόδεμα.

6.5 Προστατευτική Σωλήνωση και σκυροδέτηση

6.5.1 Προστατευτική Σωλήνωση.

Η προστατευτική σωλήνωση της οπής αποτελείται από πολλά ομόκεντρα τμήματα, τα οποία τοποθετούνται ανάλογα με τις γεωλογικές μηχανικές απαιτήσεις σε διάφορα βάθη (Εικόνα 13). Με αυτόν τον τρόπο προστατεύονται τα τοιχώματα της γεώτρησης από αποθέσεις και απότομες εκτονώσεις, σφραγίζονται τα διαπερατά στρώματα για να προληφθούν ανεπιθύμητες εισροές ή εκροές, και να αποφεύγεται ο σχηματισμός τελμάτων εντός στο φρέαρ. Η σωλήνωση υποστήριξη τοποθετείται εν μέρει κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της γεώτρησης, για να προστατευτούν τα προβληματικά τμήματα του φρέατος. Αντιστοιχεί σε σημαντικό μέρος του όλου κόστους του φρέατος. Η προστατευτική σωλήνωση δέχεται διάφορες φορτίσεις, οι οποίες οφείλονται συνήθως σε συνδυασμό:

- 1) Διαφορική πίεση μεταξύ της εξωτερικής και της εσωτερικής πλευράς λόγω της υδροστατικής πίεσης και της πίεσης των ρευστών στο πορώδες πέτρωμα
- 2) Ακτινική συνιστώσα της πίεσης σχηματισμού
- 3) Ελαστική τάση από το βάρος των τμημάτων της υποστήριξης, ιδίως κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης. Καμπτική τάση στις οπές με αλλαγή διεύθυνσης, ιδίως στις οριζόντιες οπές.
- 4) Θερμικές τάσεις: Από τη στιγμή που οι διάφορες τάσεις υπερθέτονται η μία στην άλλη, είναι απαραίτητη η σωστή αξιολόγησή τους και η σωστή τοποθέτηση των απαιτούμενων τμημάτων. Υπάρχει διαθέσιμη πλήρης σειρά τυποποιημένων υλικών και συνδέσμων, που καλύπτουν όλες τις απαιτήσεις.

6.5.2 Σωλήνωση Παραγωγής

Η σωλήνωση παραγωγής μεταφέρει το παραγόμενο ρευστό στην επιφάνεια. Η σωλήνωση στερεώνεται στην επιφάνεια του φρέατος, και ακυρώνεται εάν απαιτείται και στον πυθμένα. Ο δακτύλιος μεταξύ της υποστήριξης και της σωλήνωσης παραγωγής μπορεί να σφραγιστεί με κατάλληλο σκέπασμα, εάν το απαιτούν οι συνθήκες του φρέατος. Τα σκεπάσματα είναι συνήθως ελαστικά παραμορφώσιμα υλικά, που συνδυάζονται με περιφερειακά ολισθαίνουσες αρπάγες με τέτοιο τόπο, ώστε κατά τις προς τα πάνω ή κάτω κινήσεις οι αρπάγες σφίγγουν, η φραγή παραμορφώνεται, και σφραγίζεται ο δακτύλιος μεταξύ σωλήνωσης υποστήριξης και σωλήνωσης παραγωγής. Η σωλήνωση κατασκευάζεται από τυποποιημένα υλικά συγκεκριμένων διαστάσεων.

6.5.3 Σκυροδέτηση

Η σκυροδέτηση της σωλήνωσης υποστήριξης εξυπηρετεί τους εξής σκοπούς:

- 1) Εκτεταμένη συγκόλληση της σωλήνωσης υποστήριξης και του σχηματισμού, ώστε να διευθετήσει τις δυνάμεις που προκύπτουν από το βάρος της σωλήνωσης υποστήριξης στο σχηματισμό, π.χ. απορρόφηση των αξονικών και ακτινικών τάσεων που επιβάλλονται στη σωλήνωση υποστήριξης
- 2) Απομόνωση των διαπερατών σχηματισμών, για να αποφευχθεί η ροή μεταξύ διαφορετικών στρωμάτων, και συγκεκριμένα η ρύπανση υπογείων υδάτων.
- 3) Αντιδιαβρωτική προστασία της σωλήνωσης υποστήριξης Το τσιμέντο αναμιγνύεται με νερό, ώστε να σχηματίσει τον τσιμεντοπολτό στον οποίο προστίθενται διάφορα σημεία ελέγχου των ρεολογικών ιδιοτήτων, του χρόνου πήξης, της τελικής αντοχής, κλπ. Ο πολτός εγχέεται με αντλίες υψηλής πίεσης στο δακτύλιο μεταξύ της σωλήνωσης υποστήριξης και του σχηματισμού. Τα τσιμέντα που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία πετρελαίου είναι τυποποιημένα κατά API. Πέρα από την ποιότητα του τσιμέντου, η σωστή εκτέλεση της σκυροδέτησης έχει πολύ μεγάλη σημασία για την ποιότητα του τσιμεντένιου περιβλήματος.

6.5.4 Μηχανική Παραγωγή

Ο όρος μηχανική παραγωγής (production engineering) περιγράφει πλήρωση, έναρξη της παραγωγής, διάτρηση, χειρισμό του φρέατος και του κοιτάσματος, τεχνική θραύσεων, προεργασία, σχέση εισροής – απόδοσης, μονοφασική και διφασική ροή μέσω των σωληνώσεων και των αγωγών, μηχανική ασφαλείας, προστασία περιβάλλοντος, και τέλος κλείσιμο και εγκατάλειψη των φρεάτων.

6.5.5 Ολοκλήρωση

Εάν μετά τις απαραίτητες μετρήσεις και δοκιμές, ένα φρέαρ θεωρηθεί ως αξιόλογο για παραγωγή, τότε ολοκληρώνεται, δηλαδή εγκαθίσταται όλος ο απαραίτητος για την παραγωγή εξοπλισμός. Τα απαραίτητα μέρη για τη συμπλήρωση είναι η κεφαλή, με τις απαιτούμενες φλάντζες, η σωλήνωση υποστήριξης, η σκυροδέτηση, η τοποθέτηση των σωληνώσεων παραγωγής, και η “συμπλήρωση της οπής πυθμένα”. Η τελευταία παράμετρος περιλαμβάνει τον ειδικό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται στη ζώνη του κοιτάσματος, π.χ. ευθυγραμμιστές, στηρίγματα ευθυγραμμιστών, αμμόφιλτρα, πληρωτικά και όλον τον "καλωδιωμένο εξοπλισμό", ο οποίος μπορεί να λειτουργηθεί μέσω καλωδίωσης.

6.5.6 Ολοκλήρωση Οπής Πυθμένα.

Υπάρχουν δύο τύποι ολοκλήρωσης φρέατος στη ζώνη παραγωγής, ανοιχτής οπής και διάτρητης σωλήνωσης υποστήριξης. Η ολοκλήρωση ανοιχτής οπής, στην οποία δεν ενισχύεται ο παραγωγικός σχηματισμός, χρησιμοποιείται σπάνια. Σε περιπτώσεις σχηματισμών με αρκετό πάχος, μικρή συγκέντρωση και υψηλούς ρυθμούς παραγωγής προκύπτουν προβλήματα από τη διείδυση άμμου από το σχηματισμό στο φρέαρ. Γι' αυτό το λόγο η σωλήνωση υποστήριξης τοποθετείται είτε επάνω είτε κάτω από τον παραγωγικό σχηματισμό και σκυροδετείται. Για να τρέξει το προς παραγωγή ρευστό μέσα στο φρέαρ, τρυπιούνται η σωλήνωση υποστήριξης και η σκυροδέτηστη ζώνη του ταμιευτήριου πετρώματος.

6.6 Διάτρηση

Με τη διάτρηση της σωλήνωσης υποστήριξης και της σκυροδέτησης, το φρέαρ συνδέεται υδραυλικά με το κοίτασμα, ώστε το ρευστό να μπορεί να εισέλθει στο φρέαρ με τη μικρότερη δυνατή πτώση πίεσης. Για τη διάτρηση χρησιμοποιούνται εκρηκτικά τοποθετημένα σε κατάλληλες θέσεις, ώστε να δώσουν το επιθυμητό σχήμα. Εισάγονται στην οπή του φρέατος με καλώδιο, και πυροδοτούνται όταν φτάσουν στο επιθυμητό σημείο. Ο αριθμός των διατρήσεων, η διάταξή τους και το μέγεθος των οπών τους εξαρτάται από τη σκληρότητα του πετρώματος και της συνθήκης του φρέατος. Το βάθος διείσδυσης στο βράχο λόγω της έκρηξης διάτρησης είναι από 10 έως 40 cm, ανάλογα με την αντοχή του πετρώματος. Η επεξεργασία του φρέατος και του κοιτάσματος πραγματοποιούνται για την αύξηση της παραγωγικότητας του φρέατος. Η μείωση της παραγωγικότητας μπορεί να οφείλεται στη διεργασία της γεώτρησης ή να επέλθει κατά τη διάρκεια της παραγωγής. Η επεξεργασία του φρέατος προορίζεται για να επαναφέρει την αρχική κατάσταση, ή με άλλα λόγια, να επαναφέρει μια εισροή προς το φρέαρ χωρίς περιορισμούς. Η επεξεργασία του κοιτάσματος αποσκοπεί στην αδιάλειπτη αύξηση της ροής μέσω του ταμιευτήριου πετρώματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

7.1 Είδη γεωτρύπανου

Το γεωτρύπανο χρησιμοποιείται για την ανόρυξη των γεωτρήσεων, συνεπώς και των υδρογεωτρήσεων. Μπορεί να αναπτύσσεται σε κατακόρυφη διεύθυνση με την συνεχή προσθήκη διατρητικών στελεχών μέχρι την επίτευξη του επιθυμητού βάθους.

Γενικά για τη διάνοιξη αβαθών γεωτρήσεων (πχ: υδρογεωτρήσεις) χρησιμοποιούνται γεωτρύπανα με ισχύ από 50 - 150 HP, ενώ για τη διάνοιξη βαθύτερων γεωτρήσεων (πχ: υδρογονανθράκων) η υποδύναμη μπορεί να φτάσει τα 2000 HP ή παραπάνω.

Ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς τους υπάρχουν οι εξής κατηγορίες υδρογεωτρυπάνων:

1. Τροχοφόρα αυτοκινούμενα.
2. Ερπυστριοφόρα αυτοκινούμενα.
3. Τροχοφόρα ρυμουλκούμενα.
4. Συρόμενα επί ελκίθρου.

Στην πράξη για την ανόρυξη των υδρογεωτρήσεων χρησιμοποιούνται κυρίως δύο τύποι γεωτρυπάνων, τα περιστροφικά και τα κρουστικά. Τα περιστροφικά έχουν το πλεονέκτημα ότι αποδίδουν υψηλές ταχύτητες διάτρησης σε μεγάλο εύρος σκληρότητας πετρωμάτων (από μεσαίας μέχρι υψηλής σκληρότητας) και έχουν ικανότητα δημιουργίας μεγάλης διαμέτρου οπής. Αντίθετα, τα κρουστικά αποδίδουν καλύτερα σε βραχώδεις σχηματισμούς παρά σε προσχωσιγενή ιζήματα και μαλακά εδάφη και έχουν περιορισμένη διάμετρο (Κάπος, 1994).

Σχετικά με τα περιστροφικά γεωτρύπανα και τον τρόπο περιστροφής της διατρητικής στήλης, υπάρχουν δυο βασικές κατηγορίες:

1. Μηχανικά γεωτρύπανα.
2. Υδραυλικά γεωτρύπανα.

Στην ανόρυξη των υδρογεωτρήσεων τα υδραυλικά γεωτρύπανα κερδίζουν συνεχώς έδαφος έναντι των μηχανικών γεωτρυπάνων. Τα υδραυλικά γεωτρύπανα σε σχέση με τα μηχανικά παρουσιάζουν τις εξής διαφορές:

- Επιτυγχάνουν υψηλότερες ταχύτητες διάτρησης συγκριτικά με τα μηχανικού τύπου γεωτρύπανα.
- Απαιτούν καταρτισμένο προσωπικό.
- Είναι ακριβότερα.



Εικόνα 14: Τροχοφόρο αυτοκινούμενο μηχάνημα γεώτρησης (πηγή: <https://appurl.io/Fo0HxHγOIH>).

7.2 Τα μέρη του μηχανικού, περιστροφικού γεωτρήπανου

Όπως παρουσιάζεται αναλυτικά τα μέρη του κλασικού μηχανικού, περιστροφικού γεωτρήπανου είναι τα ακόλουθα:

1. Πύργος.
2. Κινητήρας.
3. Σύστημα περιστροφής και προώθησης της στήλης.
4. Σύστημα ανέλκυσης και καθέλκυσης της στήλης.
5. Διατρητική στήλη με τα παρελκόμενα της (στελέχη, κολάρο, σταθεροποιητές κ.ά.).
6. Κοπτικό άκρο.
7. Σωλήνας πολφού και πλαστικός σωλήνας διοχέτευσης του γεωτρητικού ρευστού στη στήλη.
8. Περιστρεπτός τροφοδότης.
9. Πηλαντλία και αεροσυμπιεστής.

7.2.1 Πύργος

Ο πύργος του υδρογεωτρύπανου βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους και συντελεί στην αιώρηση της διατρητικής στήλης στο φρέαρ. Η δυναμικότητα του γεωτρύπανου καθορίζει το ύψος του πύργου και την αντοχή του. Ο πύργος μπορεί να είναι και ενσωματωμένος στο γεωτρύπανο ή να είναι μεμονωμένος.

7.2.2 Κινητήρας

Τα κοινά υδρογεωτρύπανα διαθέτουν κινητήρα diesel. Ο κινητήρας παράγει την απαιτούμενη ενέργεια για την περιστροφή της στήλης.

7.2.3 Πηλαντλία και αεροσυμπιεστής

Η πηλαντλία χρησιμοποιείται για την άντληση του πολφού από τον λάκκο αναρρόφησης (όρυγμα για την παρασκευή του πολφού) και την διοχέτευσή του στο εσωτερικό της γεώτρησης. Αντίθετα όταν το γεωτρητικό ρευστό είναι αέρας ή αφρός απαιτείται η χρήση αεροσυμπιεστή.

7.2.4 Περιστρεπτός τροφοδότης νερού ή πολφού

Ο περιστρεπτός τροφοδότης νερού ή πολφού βρίσκεται στο ανώτερο σημείο της διατρητικής στήλης και συνδέεται με το στέλεχος Kelly το οποίο προσαρμόζεται με τη σειρά του στο ανώτερο διατρητικό στέλεχος. Χρησιμοποιείται για την διοχέτευση του γεωτρητικού ρευστού στη γεώτρηση. Ο τροφοδότης αποτελείται από δυο τμήματα. Το ανώτερο τμήμα που παραμένει ακίνητο και συνδέεται με σωλήνα απ' όπου διέρχεται το ρευστό υψηλής πίεσης (9 - 12 atm) και το κατώτερο τμήμα που περιστρέφεται σε πλήρη συγχρονισμό με τη στήλη (Κάπος, 1994).

7.2.5 Στέλεχος Kelly και περιστροφική τράπεζα

Πρόκειται για ένα κοίλο, τριγωνικής ή τετραγωνικής διατομής στέλεχος από χάλυβα, το οποίο μεσολαβεί για την μετάδοση της περιστροφικής κίνησης στη στήλη στα μηχανικά γεωτρύπανα. Για την περιστροφή του Kelly εφαρμόζεται ροπή μέσω του τριβέα της περιστροφικής τράπεζας. Το Kelly ταυτόχρονα μπορεί και ολισθαίνει προς τα κάτω, ωθώντας τη στήλη σε μεγαλύτερο βάθος

7.2.6 Διατρητική στήλη

Η διατρητική στήλη αποτελείται από ένα σύνολο κοίλων σωληνοειδών σωλήνων, καθώς και άλλων εξαρτημάτων (πχ: κολάρο, σταθεροποιητές και αποξεστήρες, κοπτικό άκρο), τα οποία αναφέρονται στη συνέχεια. Τα παραπάνω εξαρτήματα στο σύνολο τους συνδέουν την επιφάνεια του εδάφους με το υπό διάτρηση πέτρωμα και η σωστή επιλογή αυτών συμβάλλει τα μέγιστα στην αποτελεσματική θράυση του πετρώματος.

Σύμφωνα με την Σταματάκη (2007), η διατρητική στήλη χρησιμεύει:

1. Στην μετάδοση της ενέργειας που προορίζεται για την θράυση των πετρωμάτων.
2. Στην διοχέτευση του γεωτρητικού ρευστού στο φρέαρ.
3. Στην εγκατάσταση ειδικών οργάνων μέτρησης των γεωτρητικών παραμέτρων επί της στήλης (Measurements while Drilling, MWD).

Τη διατρητική στήλη την αποτελούν στο μεγαλύτερο μέρος της τα διατρητικά στελέχη. Τα διατρητικά στελέχη είναι χαλυβδοσωλήνες με αρσενικό και θηλυκό σπειρώμα στα άκρα τους, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους ενώ βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους με περιστροφή.

Η επιλογή των διατρητικών στελεχών γίνεται βάσει των παρακάτω κριτηρίων:

- Αντοχή σε εφελκυσμό.
- Αντοχή σε θλίψη.
- Αντοχή σε κρούση.
- Αντοχή σε στρέψη.
- Αντοχή σε διάρρηξη.

Η διατρητική στήλη εξαιτίας του βάρους των στελεχών και της κατώτερης συνδεσμολογίας βρίσκεται συνεχώς σε εφελκυσμό, ως εκ τούτου τείνει να αυξήσει το μήκος της (επιμήκυνση). Η αντοχή των στελεχών σε εφελκυσμό προκύπτει από το όριο ελαστικότητας του υλικού κατασκευής τους. Το όριο ελαστικότητας εκφράζει το σημείο εκείνο πέραν του οποίου ο χαλυβδοσωλήνας υφίσταται μόνιμη παραμόρφωση. Η μόνιμη παραμόρφωση είναι ένας παράγοντας που μειώνει την αντοχή του στελέχους και μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία με ότι αυτό συνεπάγεται.

Η διατρητική στήλη μπορεί ακόμη να αστοχήσει σε θλίψη, η οποία σχετίζεται με την εφαρμογή υπερβολικά μεγάλου αξονικού φορτίου (Σταματάκη, 2007).

Η ροπή στρέψης είναι αποτέλεσμα της επαφής του κοπτικού με το πέτρωμα. Προκειμένου να μην εμφανιστεί αστοχία, πρέπει η τιμή της ροπής στρέψης να είναι μικρότερη από την μέγιστη τιμή της επιτρεπόμενη ροπής των διατρητικών στελεχών

Αναφέρεται ότι πάνω από το 50% των προβλημάτων που εμφανίζονται κατά την ανόρυξη των γεωτρήσεων σχετίζονται με την κακή συνδεσμολογία των διατρητικών στελεχών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μη ικανοποιητική περιστροφή του συστήματος στήλης – κοπτικού, την απόκλιση από την κατακορυφότητα και την πιθανή διάσπαση της στήλης.

Η σύνθεση της διατρητικής στήλης γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

- Αρχικά, επιλέγεται το κατάλληλο γεωτρύπανο και το κοπτικό άκρο (είδος, διάμετρος, τύπος) που θα χρησιμοποιηθούν.
- Το κοπτικό άκρο συνδέεται με τον περικοπτήρα, τον σταθεροποιητή και το κολάρο και όλα αυτά ενώνονται με το πρώτο κατά σειρά διατρητικό στέλεχος. Το σύστημα παίρνει κατακόρυφη θέση.
- Αρχίζει η περιστροφή ενώ η στήλη προωθείται στο έδαφος.
- Όταν το κοπτικό διανύσει απόσταση περίπου ίση με ένα διατρητικό στέλεχος σταματά η περιστροφή και αποσυνδέεται ο περιστρεπτός τροφοδότης από την στήλη.
- Το σύστημα βαρούλκο - τροχαλία αναλαμβάνει τη μεταφορά του νέου στελέχους και το φέρνει σε επαφή με την υπόλοιπη διατρητική στήλη.
- Η διατρητική στήλη που βρίσκεται ήδη στη γεώτρηση, συγκρατείται με ποδόφρενο καθ' όλη τη διάρκεια της προσθήκης νέου στελέχους.
- Με την περιστροφή της τράπεζας το νέο στέλεχος βιδώνεται στη στήλη.
- Συνδέεται ο περιστρεπτός τροφοδότης και αρχίζει η παροχή γεωτρητικού ρευστού
- Ελευθερώνεται το ποδόφρενο.
- Παράλληλα με την προώθηση της διατρητικής στήλης ξεκινά η περιστροφή της μέσω της περιστροφικής τράπεζας.

7.2.6.1 Κολάρα και σταθεροποιητές

Τα κολάρα και οι σταθεροποιητές βρίσκονται στο κατώτερο τμήμα της διατρητικής στήλης και αποσκοπούν στον καλύτερο έλεγχο της τροχιάς του κοπτικού, παρέχοντας ακαμψία στο σύστημα. Παράλληλα ασκούν επιπρόσθετο βάρος το οποίο συμβάλλει στην αποδοτικότερη θραύση των πετρωμάτων.

7.2.6.2 Περικοπτήρας ή αποξεστήρας

Ο περικοπτήρας ή αλλιώς αποξεστήρας τοποθετείται ακριβώς πάνω από το κοπτικό. Χρησιμεύει στη διάνοιξη σταθερής διαμέτρου οπής. Το μήκος των περικοπτήρων ποικίλλει από 3 έως 6,1 m (10 – 20 ft). Η διάμετρος τους πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρο του κοπτικού, ώστε να εξασφαλίζεται η συνεχής επαφή με τα τοιχώματα του φρέατος. Στην επιφάνεια τους φέρουν οπλισμό από διαμάντια. Όπως φαίνεται υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι περικοπτήρων ανάλογα με τον τύπο των πετρωμάτων που απαντώνται.

7.2.6.3 Κοπτικό άκρο

Το κοπτικό άκρο βρίσκεται στο κάτω άκρο της διατρητικής στήλης και εξυπηρετεί στην θραύση των πετρωμάτων. Τα κοπτικά άκρα που χρησιμοποιούνται στην ανόρυξη των υδρογεωτρήσεων είναι τυφλά (δεν διαθέτουν άνοιγμα στο κέντρο) και διατίθενται σε συγκεκριμένες διαμέτρους (πχ: 7^{5/8}, 10^{5/8}, 11^{5/8}, 12,5, 13.5, 15.6, 17.5, 19.5, 22 in).

Υπάρχουν διάφοροι τύποι κοπτικών άκρων. Ο τύπος του κοπτικού οργάνου που θα επιλεγεί κάθε φορά εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το είδος των πετρωμάτων και την τεχνική διάτρησης που θα εφαρμοστεί. Συνήθεις τύποι κοπτικών άκρων για περιστροφικά γεωτρήματα είναι:

- Τρίκωνα οδοντωτά.
- Τρίκωνα χαλύβδινα.
- Κοπτικά τριβής.
- Κοπτικά σφύρας.

Για μαλακά πετρώματα ενδείκνυται η χρήση των κοπτικών τριβής, ενώ για σκληρότερους σχηματισμούς επιλέγεται το κοπτικό με περιστρεφόμενους κώνους ή η σφύρα. Τα τρίκωνα περιστροφικά διακρίνονται σε τρίκωνα οδοντωτά χαλύβδινα και σε τρίκωνα με ένθετα καρβίδια βολφραμίου. Το καρβίδιο του βολφραμίου αποτελεί ένα υλικό τρεις φορές πιο σκληρό από τον χάλυβα με υψηλό σημείο τήξης 2870 °C, το οποίο παρατείνει την φθορά του εξαιτίας των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά τη διάτρηση.

Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες, ο αριθμός, το μέγεθος και η διάταξη των ακροφυσίων στο κοπτικό συμβάλλουν στη διαδικασία κοπής των πετρωμάτων και στην διαμόρφωση του ρυθμού διάτρησης, όπως αναλύεται και στο κεφάλαιο "Γεωτρητικές παράμετροι".

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Γεωτρητικές παράμετροι

8.1 Εισαγωγή στις γεωτρητικές παραμέτρους

Υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω μείωση του κόστους και του χρόνου ανόρυξης των υδρογεωτρήσεων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την κατάλληλη ρύθμιση των γεωτρητικών παραμέτρων, ώστε να επιτυγχάνεται κάθε φορά η βέλτιστη τιμή του ρυθμού προχώρησης με το μικρότερο δυνατό κόστος.

Επιπροσθέτως η μελέτη των γεωτρητικών παραμέτρων είναι μείζονος σημασίας, γιατί από αυτές εξαρτάται ο χρόνος ολοκλήρωσης των εργασιών ανόρυξης, η ευστάθεια του έργου κ.ά. (Thuro, 1996, Bilim, 2011).

Ως γεωτρητικοί παράμετροι αναφέρονται τα μεγέθη εκείνα που υπεισέρχονται στη διαδικασία κοπής των πετρωμάτων και συμβάλλουν στην διαμόρφωση του ρυθμού διάτρησης. Σύμφωνα με τους Κελεσίδη και Δαλαμαρίνη (2009) οι γεωτρητικές παράμετροι είναι:

1. Βάρος επί του κοπτικού (Weight On Bit, WOB).
2. Ταχύτητα περιστροφής της στήλης (Rotations Per Minute, RPM).
3. Ταχύτητα του γεωτρητικού ρευστού στο φρεαρ.
4. Κοπτικό άκρο.

8.1.1. Επίδραση του εφαρμοζόμενου βάρους στο κοπτικό

Το βάρος αφενός προκαλεί την ρωγμάτωση της εκτιθέμενης επιφάνειας του πετρώματος, αφετέρου μέσω αυτού ασκείται ροπή στο πέτρωμα η οποία είναι σημαντική για τη διείδυση του κοπτικού και κατ' επέκταση τη θραύση των σχηματισμών (Κελεσίδης, 2012).

Στα μηχανικού τύπου περιστροφικά γεωτρήματα, το βάρος που εφαρμόζεται στο κοπτικό άκρο προκύπτει από το βάρος των επιμέρους μονάδων της διατρητικής στήλης (κοπτικό άκρο, κολάρο, διατρητικά στελέχη κλπ.). Με την αύξηση του βάθους διάτρησης και την πρόσθεση περισσότερων στελεχών στην στήλη, το συνολικό βάρος αυξάνεται οδηγώντας έτσι σε υψηλότερους ρυθμούς προχώρησης.

Παρ' όλα αυτά, η υπερβολική πίεση στο κοπτικό επιφέρει μειωμένες ταχύτητες προχώρησης, πρόωρη φθορά του κοπτικού και των στελεχών, παραγωγή μεγάλου όγκου τριμμάτων και σημαντικές αποκλίσεις από την κατακορυφότητα (Βουδούρης και Μαρίνος, 2010). Για τους παραπάνω λόγους το βάρος πρέπει να μειώνεται ανυψώνοντας τη διατρητική στήλη μέσω του συστήματος ανέλκυσης.

Η διείδυση του κοπτικού στο πέτρωμα, ξεκινά αφού πρώτα εφαρμοστεί ορισμένη τιμή βάρους στον υπό διάτρηση γεωλογικό σχηματισμό, η οποία εξαρτάται από τις μηχανικές

του ιδιότητες, το είδος του κοπτικού κ.ά. (Σταματάκη, 2007). Συνεχιζόμενη αύξηση του βάρους προκαλεί αύξηση του ρυθμούδιάτρησης μέχρι την επίτευξη μιας μέγιστης τιμής μετά την οποία ο ρυθμός διάτρησης παρουσιάζει μείωση. Αυτή η μείωση οφείλεται στην δημιουργία μεγάλου όγκου τριμμάτων, τα οποία είναι αδύνατο να απομακρυνθούν με την κυκλοφορία του γεωτρητικού ρευστού και προκαλούν αδυναμία περιστροφής του κοπτικού (Κελεσίδης, 2012).

Η ροπή προκαλείται από την επιβολή βάρους στο πέτρωμα σε συνδυασμό με την περιστροφή της στήλης. Η τιμή της ροπής εξαρτάται από τον συντελεστή τριβής του πετρώματος (Black et al., 2008). Η ροπή συνδέεται με το βάρος στο κοπτικό (W) και τον συντελεστή τριβής (μ) βάσει της παρακάτω σχέσης:

$$\tau = \frac{\mu W D}{36} \quad (37)$$

Όπου: τ = ροπή (lb · in) , μ = συντελεστής τριβής , W= βάρος στο κοπτικό (lb) , D= διάμετρος κοπτικού (in)

8.1.2. Επίδραση της ταχύτητας περιστροφής της στήλης

Αρχικά η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής της στήλης επιφέρει αύξηση του ρυθμού διάνοιξης. Ωστόσο, σε πολύ υψηλές στροφές η περαιτέρω αύξηση της τιμής της ταχύτητας περιστροφής δεν συμβάλλει ανάλογα στην αύξηση του ρυθμού διάνοιξης. Η παύση αυτή οφείλεται στην παρουσία μεγάλης ποσότητας τριμμάτων στον πυθμένα του φρέατος, τα οποία απορροφούν μέρος της ενέργειας και δεν επιτρέπουν την προχώρηση της στήλης σε μεγαλύτερο βάθος (Κελεσίδης, 2012).

Σε γενικές γραμμές προτείνεται η αύξηση του βάρους να συνοδεύεται από αύξηση της ταχύτητας περιστροφής. Παρ' όλα αυτά, οι γεωτρυπανιστές οφείλουν να πειραματιστούν στις εκάστοτε συνθήκες πετρώματος και εξοπλισμού, ώστε να επιτύχουν τον κατάλληλο συνδυασμό των παραμέτρων αυτών προς επίτευξη της βέλτιστης ταχύτητας προχώρησης.

8.1.3. Επίδραση του κοπτικού άκρου

Ο τύπος, η γεωμετρία του κοπτικού, η ποιότητα του υλικού κατασκευής του σπλισμού και τέλος ο αριθμός και η θέση των ακροφυσίων καθορίζουν την ταχύτητα προχώρησης του κοπτικού (Thuro, 1996).

Στα χαρακτηριστικά του τρίκωνου περιστροφικού άκρου περιλαμβάνονται:

1. Ο τύπος (χαλύβδινα δόντια, ένθετα καρβιδίου, κοπτικό τριβής κ.ά.).
2. Η εκκεντρότητα των κώνων.
3. Ο αριθμός, το μέγεθος, η απόσταση και το σχήμα των δοντιών ή ενθέτων.
4. Το υλικό κατασκευής των δοντιών ή ενθέτων.
5. Ο αριθμός, το μέγεθος και η θέση των ακροφυσίων.

Γίνονται συνεχώς έρευνες σχετικά με την βελτιστοποίηση των κοπτικών άκρων. Η σύνθεση νέων βελτιωμένων κραμάτων που θα χρησιμοποιηθούν ως υλικά κατασκευής και η βελτιωμένη γεωμετρία των κοπτικών, προσφέρουν την δυνατότητα λειτουργίας κάτω από δύσκολες συνθήκες (υψηλές θερμοκρασίες, ταχύτητα πολφού κ.ά.) παρέχοντας παράλληλα υψηλότερες ταχύτητες διάτρησης.

Φυσικό επακόλουθο της συνεχούς χρήσης του κοπτικού άκρου είναι η φθορά του. Η φθορά συνήθως εκδηλώνεται με την αλλοίωση της γεωμετρίας του κοπτικού, την αποκόλληση τμήματος ή τέλος με την εμφάνιση ρωγμών εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών. Η κατάσταση στην οποία βρίσκεται το κοπτικό έχει άμεση επίπτωση στον ρυθμό διάτρησης, όσο και στην κατανάλωση ενέργειας.

Οι βασικοί παράγοντες φθοράς των πετρωμάτων είναι οι εξής:

1. Βάρος στο κοπτικό.
2. Ταχύτητα περιστροφής.
3. Ποιότητα υλικών κατασκευής του κοπτικού άκρου.
4. Σκληρότητα πετρωμάτων.
5. Τύπος γεωτρητικού ρευστού.
6. Φθοροποιός ικανότητα πετρωμάτων.

8.1.4. Επίδραση γεωτρητικού ρευστού

Έχει παρατηρηθεί ότι ο ρυθμός απομάκρυνσης των τριμμάτων από τον πυθμένα της γεώτρησης συνδέεται με την ταχύτητα προχώρησης του κοπτικού. Αυτό αποδίδεται στην απορρόφηση ενέργειας από τα τρίμματα, τα οποία δεν επιτρέπουν την περαιτέρω προχώρηση του κοπτικού σε μεγαλύτερο βάθος, όταν δεν επιτυγχάνεται άμεση απομάκρυνση των τριμμάτων.

Ανάλογα με το γεωτρητικό ρευστό που θα χρησιμοποιηθεί μεταβάλλεται ο ρυθμός απομάκρυνσης των τριμμάτων.

Στην περίπτωση του πολφού ο ρυθμός απομάκρυνσης του θρυμματισμένου υλικού εξαρτάται από την ταχύτητα του κατά την άνοδο, το ιξώδες του και την ταχύτητα καθίζησης των τριμμάτων (Σταματάκη, 2007).

Η ταχύτητα ρευστού στον δακτύλιο δίνεται από την σχέση:

$$V_r = \frac{Q}{A} \quad (38)$$

Όπου: v_r = ταχύτητα ρευστού στο δακτύλιο (m/min), Q = παροχή (m^3/h), A = εμβαδό διατομής μεταξύ διατρητικών στελεχών και τοιχωμάτων φρέατος (m^2)

Επίσης η ταχύτητα καθίζησης των τριμμάτων υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση:

$$V_k = \frac{175 d_\sigma (\rho_\sigma - \rho_\lambda)^{0.667}}{\rho_\lambda^{0.333} - \mu_e^{0.333}} \quad (39)$$

Όπου: v_k = ταχύτητα καθίζησης τριμμάτων (ft/min), d_σ = διάμετρος τριμμάτων (in), ρ_σ = πυκνότητα τριμμάτων (lb/gal), ρ_λ = πυκνότητα ρευστού (lb/gal), μ_e = ιξώδες ρευστού (cP)

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι για να γίνεται αποτελεσματική απομάκρυνση των τριμμάτων η v_r (ταχύτητα γεωτρητικού ρευστού) πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την v_k (ταχύτητα καθίζησης τριμμάτων). Εκτιμάται ότι μια μέση ταχύτητα πολφού 53 m/min είναι ικανοποιητική για την απομάκρυνση των τριμμάτων στην ανόρυξη των υδρογεωτρήσεων (Βαφειάδης, 1998).

Όσον αφορά στις ιδιότητες του πολφού (πχ: ιξώδες, πυκνότητα), αυτές εξαρτώνται από τις εκάστοτε συνθήκες διάτρησης. Αντίθετα σε εδάφη με μεγάλο πορώδες ή σχηματισμούς με 44 έντονο βαθμό ρωγμάτωσης, απαιτείται η χρήση πολφού υψηλού ιξώδους. Σε κάθε περίπτωση οι ιδιότητες του πολφού πρέπει να ελέγχονται συστηματικά, ώστε να διατηρούνται ίδιες καθ' όλη τη διάρκεια των εργασιών της ανόρυξης.

8.1.5. Όργανα επί τόπου μέτρησης των ιδιοτήτων του πολφού

Το API (American Petroleum Institute) προτείνει τα παρακάτω όργανα μέτρησης των ιδιοτήτων του πολφού.

1. Ζυγός πολφού. Πρόκειται για ένα ζυγό, ο οποίος φέρει ένα δοχείο μέσα στο οποίο τοποθετείται το δείγμα. Το σημείο που θα ισοροπήσει ο ζυγός υποδεικνύει την πυκνότητα του πολφού. Εκτός του ζυγού για την μέτρηση της πυκνότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και πυκνόμετρο.
2. Περιστροφικό ιξωδόμετρο. Υπολογίζει με μεγάλη ακρίβεια το ιξώδες του πολφού. Δείγμα του πολφού τοποθετείται μεταξύ ενός περιστρεφόμενου και ενός ακίνητου στοιχείου και υποβάλλεται σε διατμητικές τάσεις. Τα σύγχρονα ιξωδόμετρα είναι διαφόρων περιστροφικών ταχυτήτων (πχ: 300,600 rpm).
3. Όργανα μέτρησης των χημικών ιδιοτήτων του πολφού. Περιλαμβάνει σερ οργάνων τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα προσδιορισμού των συγκεντρώσεων διαφόρων στοιχείων στον πολφό.
4. Φιλτροπρέσσα. Υπολογίζει το ρυθμό διήθησης του πολφού μέσω του χρησιμοποιούμενου φίλτρου.

8.2. Συστήματα καταγραφής των γεωτρητικών παραμέτρων

Τα συστήματα (Measurements While Drilling, MWD) και (Diagnostics While Drilling, DWD) αποτελούν συστήματα παρακολούθησης τόσο των συνθηκών του πυθμένα της γεώτρησης, όσο και των γεωτρητικών παραμέτρων.

Συγκεκριμένα, συλλέγονται δεδομένα με χρήση ειδικών αισθητήρων που είναι προσαρτημένοι επί της διατρητικής στήλης στο πυθμένα της γεώτρησης και έπειτα αποστέλλονται στο καταγραφικό που βρίσκεται στην επιφάνεια (Mansure, 2000). Ο γεωτρυπανιστής παρακολουθεί την εξέλιξη της διάτρησης και επεμβαίνει σε πραγματικό χρόνο τροποποιώντας κατάλληλα τις γεωτρητικές παραμέτρους.

Όπως αναφέρει ο Mansure (2000), τα συστήματα MWD και DWD συντελούν στην:

- Παρακολούθηση και έλεγχο όλων των γεωτρητικών παραμέτρων της διάτρησης (WOB, ROP, RPM, ροπή κ.ά.).
- Επιμήκυνση του χρόνου ζωής του κοπτικού άκρου και των διατρητικών στελεχών.
- Άμεση γνώση των συνθηκών του πυθμένα (πχ: θερμοκρασία).
- Άμεση γνώση των εναλλαγών των γεωλογικών σχηματισμών.
- Εύκολη ανίχνευση εισόδου – εξόδου ρευστών στο φρέαρ.

8.3. Βελτιστοποίηση της διατρητικής διαδικασίας μέσω προγραμμάτων εξομοίωσης

Η βελτιστοποίηση της κατασκευής των γεωτρήσεων αφορά στην οικονομικότερη, ταχύτερη και ασφαλέστερη διάνοιξη τους μέσω της ορθότερης επιλογής των γεωτρητικών παραμέτρων. Μπορεί δε να επιτευχθεί με χρήση συστημάτων παρακολούθησης MWD αλλά και μέσω της ανάπτυξης και χρήσης λογισμικών εφαρμογών εξομοίωσης /-βελτιστοποίησης (Mannon, 2001, Sadkowski 2009).

Σχετικά με τα προγράμματα εξομοίωσης της διατρητικής διαδικασίας, αυτά είναι πολυάριθμα. Οι εξομοιωτές δέχονται πραγματικά δεδομένα γεωτρήσεων (πχ: είδος και πάχος των γεωλογικών σχηματισμών, είδος του κοπτικού άκρου, αντοχή των πετρωμάτων σε μονοαξονική θλίψη (UCS) κ.ά.) και υπολογίζουν το ρυθμό διάτρησης (Κελεσίδης και Δαλαμαρίνης, 2009). Με αυτόν τον τρόπο προσφέρεται η δυνατότητα στον χρήστη, να αλλάξει μια ή περισσότερες εκ των γεωτρητικών παραμέτρων και να παρακολουθήσει την εξέλιξη της διάτρησης. Αυτό είναι σημαντικό γιατί τα αποτελέσματα μπορεί να χρησιμοποιηθούν στην βελτιστοποίηση της ανόρυξης μελλοντικών υδρογεωτρήσεων στην ευρύτερη περιοχή, όπου εκτιμάται ότι θα απαντηθούν τα ίδια πετρώματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

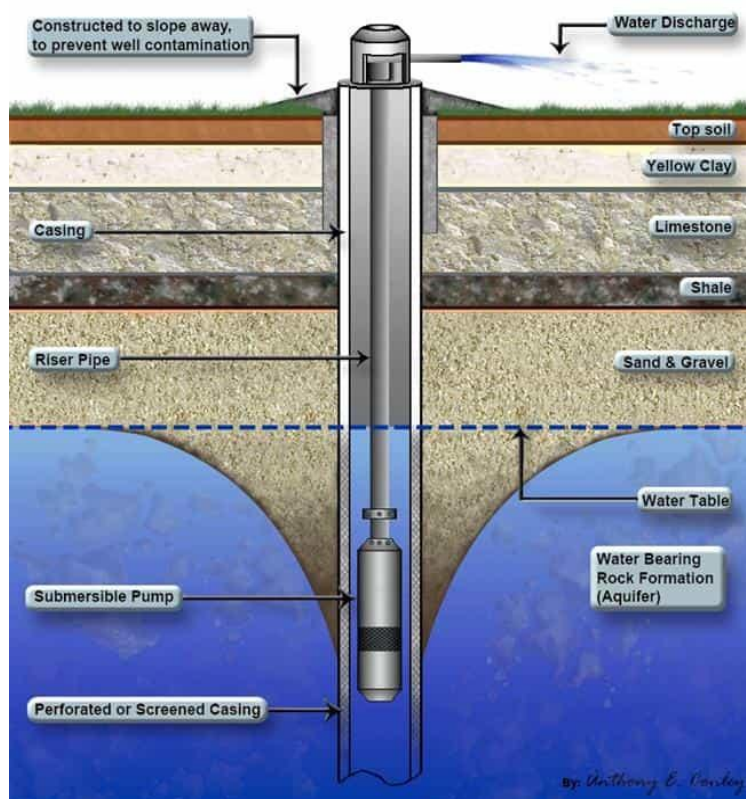
Υδρογεωτρήσεις

9.1 Κατασκευή υδρογεωτρήσεων

Οι υδρογεωτρήσεις αποτελούν τεχνικά έργα, τα οποία επιτρέπουν την ανεύρεση και εκμετάλλευση του υπόγειου νερού. Ανήκουν στην κατηγορία των αβαθών γεωτρήσεων, δεδομένου ότι το βάθος τους δεν ξεπερνά τα 600 - 650 m. Η διάμετρος τους ποικίλλει μεταξύ 0,30 - 0,60 m.

Η κατασκευή οποιασδήποτε υδρογεώτρησης αποτελείται από δύο στάδια:

1. Ανόρυξη της ερευνητικής υδρογεώτρησης.
2. Ανόρυξη παραγωγικής υδρογεώτρησης.



Εικόνα 15: Τυπική μορφή υδρογεωτρήσεις. (πηγή: <https://appurl.io/fjiJT4PjZQ>)

9.2. Ερευνητική υδρογεώτρηση

Η ερευνητική υδρογεώτρηση έχει σχετικά μικρή διάμετρο (9 5/8 in) και το βάθος τους εξαρτάται από τη θέση και τον αριθμό των υδροφόρων στρωμάτων. Στόχος των ερευνητικών γεωτρήσεων είναι η διασταύρωση των δεδομένων που προέκυψαν από την μελέτη που συνέταξε ο υδρογεωλόγος, καθώς και ο προσδιορισμός της λιθοστρωματογραφίας της περιοχής.

Σύμφωνα με τον Κάπο (1994), η ανόρυξη της ερευνητικής γεώτρησης έπεται:

1. Της εφαρμογής γεωφυσικής έρευνας στην επιφάνεια του εδάφους και στο εσωτερικό της γεώτρησης.
2. Της μελέτης χαρτών (πιεζομετρικών, χημικής σύστασης νερού, υδρογεωλογικών).
3. Της εξέτασης γεωτρητικών τομών κοντινών υδρογεωτρήσεων ή άλλων γεωτρήσεων.

9.2.1. Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων στην επιφάνεια του εδάφους

Η γεωφυσική έρευνα πραγματοποιείται στην επιφάνεια του εδάφους με σκοπό τη διερεύνηση του υπεδάφους, γρήγορα, οικονομικά και σε μεγάλη έκταση. Σύμφωνα με τον, οι γεωφυσικές μέθοδοι αποσκοπούν στον προσδιορισμό της στρωματογραφίας του πάχους και της κλίσης των στρωμάτων, της ύπαρξης ρηγμάτων ή εγκοίλων, αλλά και των ιδιοτήτων των γεωλογικών σχηματισμών (πορώδες, περιεκτικότητα σε αργίλους, θερμοκρασία κ.ά.).

Γενικά για τον καθορισμό του σημείου διάνοιξης των υδρογεωτρήσεων εφαρμόζονται σεισμικές, βαρυτομετρικές και ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι (Driscoll, 1987). Σημαντικό είναι να γίνει συνδυασμός των αποτελεσμάτων των παραπάνω γεωφυσικών μεθόδων για μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις.

9.2.2. Εφαρμογή διασκοπήσεων

Οι διασκοπήσεις υδρογεωτρήσεων πραγματοποιούνται στο εσωτερικό του φρέατος και όταν υπάρχει ακόμη πολφός με σκοπό τη λήψη χρήσιμων πληροφοριών σχετικά με τους υπό διάτρηση σχηματισμούς. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η επιλογή των κατάλληλων υδροφορέων, αλλά και η τοποθέτηση των φιλτροσωλήνων στο κατάλληλο βάθος. Ακόμη μέσω των διασκοπήσεων πιστοποιείται νομικά, ότι η υδρογεώτρηση είναι κατασκευασμένη σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζονται από την κείμενη νομοθεσία, ώστε να μπορεί να εκδοθεί η άδεια λειτουργίας της.

Οι διασκοπήσεις πραγματοποιούνται με ειδικά όργανα τις λεγόμενες οβίδες μέτρησης. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία οβίδων ανάλογα με την λειτουργία και το είδος των πληροφοριών που συλλέγουν. Οι οβίδες τοποθετούνται στο κάτω άκρο της γεωτρητικής στήλης ή αναρτώνται από συρματόσχοινο και καταγράφουν τις αντίστοιχες πληροφορίες, οι οποίες στη συνέχεια αποστέλλονται στο καταγραφικό επιφανείας προς ανάλυση.

Σύμφωνα με τον Βαφειάδη (1998), υπάρχουν τρεις κατηγορίες μεθόδων διασκοπήσεων:

1. Ηλεκτρικές
2. Ακτινοβολίας
3. Ακουστικές

9.2.2.1. Διασκόπηση ηλεκτρικής αντίστασης

Η αντίσταση που προβάλλουν τα πετρώματα εξαρτάται από το πορώδες, την παρουσία νερού στο εσωτερικό τους, τη συγκέντρωση αλάτων κ.ά. Η διαγραφή της ηλεκτρικής αντίστασης εκμεταλλεύεται τις ιδιότητες αυτές των γεωλογικών σχηματισμών και εντοπίζει πιθανά υδροφόρα στρώματα, τη διαπερατότητά τους, την επιφάνεια μεταξύ των γεωλογικών σχηματισμών, την αλατότητα του νερού κ.ά.

9.2.2.2. Διασκόπηση ακτινοβολίας γ

Η αρχή λειτουργίας της διαγραφίας ακτινοβολίας γ στηρίζεται στη μέτρηση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ραδιενεργά στοιχεία, όπως το Κάλιο (^{40}K), το Ουράνιο (^{238}U), το Θόριο (^{232}Th) που περιέχονται στους γεωλογικούς σχηματισμούς κλπ. Η ανίχνευση πραγματοποιείται από απεριθμητή κρούσεων, ο οποίος έχει την ικανότητα να ενεργοποιείται με την ακτινοβολία γ . Αργυλικοί σχηματισμοί εκπέμπουν υψηλότερη ακτινοβολία γ , έναντι ανθρακικών πετρωμάτων.

9.2.2.3. Διασκόπηση δυναμικού

Η καμπύλη του φυσικού δυναμικού (SP) δείχνει διαφορές δυναμικού μεταξύ ηλεκτροδίου στην επιφάνεια του εδάφους και ενός άλλου στο εσωτερικό της γεώτρησης. Θετικές τιμές δυναμικού καταγράφονται όταν σημειώνεται εισροή ρευστού από τους περιβάλλοντες σχηματισμούς στο φρέαρ και αντίστροφα.

9.2.2.4. Διασκόπηση νετρονίων

Η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται στην εκπομπή νετρονίων από ραδιενεργή πηγή, τα οποία προσκρούουν σε μόρια υδρογόνου (H_2) και απορροφώνται από αυτά εκπέμποντας παράλληλα ακτίνες γ . Έτσι, σε σχηματισμούς με μεγάλη περιεκτικότητα σε νερό, παρατηρείται μεγαλύτερη απορρόφηση νετρονίων. Η διαγραφή νετρονίων συνεπώς εξυπηρετεί στην ανίχνευση υδροφόρων στρωμάτων .

9.2.2.5. Ηχητική διασκόπηση

Πραγματοποιούνται μετρήσεις ταχύτητας των υπερήχων. Ο χρόνος που απαιτείται για την διέλευση των υπερήχων από σχηματισμούς του υπεδάφους είναι συνάρτηση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων τους. Η εφαρμογή της ακουστικής διαγραφίας είναι σημαντική, γιατί μέσω αυτής προκύπτουν πληροφορίες σχετικά με το πορώδες και την κατάσταση της βραχομάζας (ύπαρξη ρηγμάτων, εγκοίλων κλπ.).

9.2.2.6. Διασκόπηση θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία στο υπέδαφος αυξάνεται με την αύξηση του βάθους. Αποκλίσεις από τον κανόνα αυτόν υποδεικνύουν την ύπαρξη υδροφόρων στρωμάτων. Η οβίδα φέρει θερμομέτρο καταγράφει τη διακύμανση των θερμοκρασιών συναρτήσει του βάθους.

9.2.2.7. Μελέτη χαρτών

Στα πλαίσια της έρευνας του υπεδάφους για την αναζήτηση πιθανών υδροφόρων στρωμάτων περιλαμβάνεται και η μελέτη χαρτών. Οι γεωλογικοί, υδρογεωλογικοί, πιεζομετρικοί, τοπογραφικοί και λοιποί χάρτες συντελούν στην γεωλογική χαρτογράφηση ή παρέχουν πληροφορίες για το είδος των γεωλογικών στρωμάτων, την κατανομή τους στο χώρο, την ύπαρξη ρηγμάτων στην περιοχή, την κίνηση του νερού στο υπέδαφος, την στάθμη του υπόγειου νερού, την ποιότητά του, τον τρόπο πρόσβασης του γεωτρυπάνου στην επιθυμητή θέση διάνοιξης κ.ά.

9.2.2.8 Γεωτρητικές τομές

Γειτονικές υδρογεωτρήσεις μπορούν να δώσουν επίσης στοιχεία σχετικά με τα βάθος των υδροφόρων στρωμάτων (Driscoll, 1987). Ωστόσο οι γεωτρητικές τομές δεν δίνουν παρά γραμμική πληροφορία για τους σχηματισμούς (είδος και πάχος στρωμάτων), οπότε υπάρχει πάντα η γεωλογική αβεβαιότητα λόγω της απόστασης που χωρίζει τις δύο γεωτρήσεις.

9.3. Παραγωγική υδρογεώτρηση

Η παραγωγική υδρογεώτρηση προκύπτει μετά τη διεύρυνση της διαμέτρου της ερευνητικής και την διεκπεραίωση ορισμένων εργασιών (εργασίες συμπλήρωσης), όπως αναφέρονται παρακάτω.

Η διάμετρος των παραγωγικών υδρογεωτρήσεων είναι συνήθως 8,5 , 11 ½ , 12 ¼ , 15 ½ , 17,5 in. Γενικά η διάμετρος της υδρογεώτρησης καθορίζει τη διάμετρο της σωλήνωσης και

τη διάμετρο της αντλίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι αύξηση της διαμέτρου δεν συνεπάγεται αντίστοιχη αύξηση της παροχής .

Από την άλλη, αύξηση της διαμέτρου της παραγωγικής υδρογεώτρησης συνεπάγεται και μεγαλύτερο κόστος κατασκευής. Αυτό οφείλεται στη χρήση μεγαλύτερης διαμέτρου κοπτικού άκρου, διατρητικών στελεχών, σωληνώσεων και όγκου χαλκικόφιλτρου. Επιπροσθέτως όσο αυξάνεται η διάμετρος του φρέατος, τόσο μεγαλύτερες είναι οι πιθανότητες κατάρρευσης των τοιχωμάτων.

9.3.1. Εργασίες συμπλήρωσης των παραγωγικών υδρογεωτρήσεων

Οι εργασίες συμπλήρωσης των παραγωγικών υδρογεωτρήσεων είναι οι εξής:

1. Απόπλυση.
2. Σωλήνωση - εγκατάσταση πιεζομέτρου.
3. Χαλίκωση.
4. Ανάπτυξη.
5. Δοκιμαστικές αντλήσεις.
6. Τοποθέτησης αντλίας.
7. Δημιουργία τσιμεντένιας βάσης στην επιφάνεια του εδάφους.

9.3.1.1. Απόπλυση υδρογεώτρησης

Το στάδιο της απόπλυσης περιγράφει τον καθαρισμό της υδρογεώτρησης με καθαρό νερό. Αυτό εξυπηρετεί στην απομάκρυνση ποσότητας μπετονίτη που έχει επικαθίσει στα τοιχώματα του φρέατος και των τριμμάτων από τον πυθμένα.

9.3.1.2. Σωλήνωση υδρογεώτρησης

Ακολούθως της απόπλυσης πραγματοποιείται η σωλήνωση της υδρογεώτρησης. Σύμφωνα με τον Σούλιο (2008), η σωλήνωση εξυπηρετεί τους παρακάτω σκοπούς:

1. Παρέχει σταθερότητα στη γεώτρηση από τις καταπτώσεις.
2. Επιτρέπει τον καθαρισμό του αντλούμενου νερού.
3. Στο εσωτερικό της σωλήνωσης εγκαθίσταται η αντλία.

Η σωλήνωση των υδρογεωτρήσεων διακρίνεται σε δύο είδη:

- Φιλτροσωλήνες.
- Τυφλοί σωλήνες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

10.1 Δειγματοληπτικές γεωτρήσεις

Αποτελούν την κυριότερη μέθοδο της γεωτεχνικής διερευνήσεως του υπεδάφους και θα πρέπει να διασφαλίζουν τη λήψη δειγμάτων εδαφών – βράχων πολύ καλής ποιότητας.

Στις γεωτρήσεις αυτές λαμβάνεται δείγμα (πυρήνας) κυλινδρικής μορφής (καρότο) και μικρής διαμέτρου (4-8 cm για πετρώματα και 12,5 cm για εδάφη). Με τη διερεύνηση αυτή συμπληρώνονται τα στοιχεία που προέκυψαν από τα προηγούμενα στάδια των μελετών και αποκτούνται νέα που είναι απαραίτητα για την οικονομική και ασφαλή κατασκευή έργου.

Με τη γεωτρητική διερεύνηση του υπεδάφους παίρνουμε τις πληροφορίες εκείνες που βοηθούν στον εντοπισμό πιθανών προβλημάτων ή κινδύνων για την ασφάλεια του έργου.

Το είδος του έργου, η σπουδαιότητα του και η έκταση που καταλαμβάνει καθορίζουν το πρόγραμμα των απαραίτητων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων.

10.2 Σκοπός

- Η συγκέντρωση στοιχείων σχετικά με τη σύσταση και τη δομή των γεωλογικών σχηματισμών καθώς και του εντοπισμού του βραχώδους υπόβαθρου.
- Λήψη διαταραγμένων και αδιατάρακτων δειγμάτων από διάφορα βάθη για τη γεωτεχνική ταξινόμηση τους και την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών.
- Εκτέλεση ειδικών επί τόπου δοκιμών για τον προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των σχηματισμών στο φυσικό περιβάλλον.
- Προσδιορισμός του προσανατολισμού των στρώσεων, διακλάσεων, ρηγμάτων και άλλων δομών των γεωλογικών σχηματισμών.
- Εντοπισμός υδροφόρων στρωμάτων και προσδιορισμός των υδραυλικών χαρακτηριστικών.
- Εγκατάσταση οργάνων παρακολούθησης μέσα σε γεωτρήσεις.

10.3 Μέθοδοι γεωτρήσεις

- Ελικοειδής διάτρηση
- Υδραυλική διάτρηση
 1. Η προσχώρηση γίνεται με ειδική διάταξη κοπτικών που διεισδύουν στο έδαφος και το κερματίζουν
 2. Με συμπίεση νερού απομακρύνονται τα θραύσματα και τα εδαφικά τεμάχια
 3. Η μέθοδος αυτή δεν είναι κατάλληλη για μικτά εδάφη
- Κρουστική διάτρηση
 1. Η προσχώρηση στο έδαφος γίνεται με κρούσεις.
 2. Στους συνεκτικούς εδαφικούς σχηματισμούς είναι δυνατή η λήψη αδιατάρακτων δειγμάτων.
 3. Στους βραχώδεις σχηματισμούς η προσχώρηση της γεώτρησης γίνεται με θρυμματισμό του πετρώματος, οπότε λαμβάνονται μόνο θραύσματα.
- Περιστροφική διάτρηση

1. Η διάνοιξη γίνεται με περιστροφή της γεωτρητικής στήλης, και τη χρήση κοπτικών κεφαλών καθώς και ειδικών δειγματοληπτών.
2. Είναι δυνατή η διάνοιξη γεωτρήσεων είτε δειγματοληπτικών, με τη λήψη πυρήνων, είτε χωρίς λήψη πυρήνων.

Στην Ελλάδα χρησιμοποιείται, σχεδόν αποκλειστικά, η μέθοδος της περιστροφικής διάτρησης με την οποία είναι δυνατή η λήψη:

- Διαταραγμένων και αδιατάρακτων εδαφικών δειγμάτων
- Πολύ καλής ποιότητας πυρήνων βράχων.

10.4 Μέθοδοι διάτρησης

Περιστροφικές δειγματοληπτικές γεωτρήσεις

Εξοπλισμός διατρητικής στήλης:

1. Κοπτικό άκρο
2. Περικοπτήρας: σωλήνας με οπλισμό στην εξωτερική επιφάνεια για την ενίσχυση του πλευρικού οπλισμού του κοπτικού άκρου, τη διάτρηση σταθερής διαμέτρου διάτρησης.
3. Δειγματολήπτης: χαλύβδινος σωλήνας όπου αποθηκεύεται το κυλινδρικής μορφής δείγμα μήκους 1,5-3,0 μέτρων
4. Διατρητικά στελέχη: χαλύβδινοι σωλήνες μήκους 1,5 ή 3,0 m και διαμέτρου (>50mm) τα οποία συνδέονται με τα παραπάνω
5. Περίστρεπτος τροφοδότης νερού: που συνδέεται στο άνω τμήμα του στελέχους της ατράκτου και μέσω αυτού διοχετεύεται εσωτερικά το νερό υπό πίεση από την αντλία προς το κοπτικό άκρο

Βασική αρχή της περιστροφικής διάτρησης

1. Κάθε τμήμα σωλήνωσης επένδυσης της γεώτρησης φιλοξενεί μέσα του το επόμενο μικρότερο σε διάμετρο τμήμα της σωλήνωσης επένδυσης
2. Μέσα από το εσωτερικό της επένδυσης κατέρχεται η καροταρία με το κοπτικό άκρο, μικρότερης φυσικά διαμέτρου, από τη σωλήνωση επένδυσης.
 - Σωλήνωση: χρησιμοποιείται βασικά για την προστασία της οπής της γεώτρησης και του διατρητικού εξοπλισμού από καταπτώσεις των τοιχωμάτων της οπής ή από πιθανή διόγκωση ή συρρίκνωσή τους.
 - Διάμετρος οπής γεώτρησης: ανάλογα με το βάθος διαλέγουμε και τη διάμετρο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11

11.1 Καθαρισμός γεώτρησης

Εκτός από την κατάλληλη τοποθεσία, το σωστό βάθος και τα κατάλληλα εργαλεία, η ακριβής τήρηση της διαδικασίας για την ανόρυξη μιας γεώτρησης νερού, είναι ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία που συμβάλουν στην επιτυχία της. Μερικές φορές δηλαδή, οι λεπτομέρειες είναι εξίσου σημαντικές με τα πιο βασικά. Μέσα στις λεπτομέρειες αυτές, ανήκει και ο καθαρισμός γεώτρησης.

Ο καθαρισμός γεώτρησης αφενός αποτελεί μέρος της διαδικασίας ανόρυξης μιας γεώτρησης νερού και αφετέρου είναι η βασική εργασία για τη συντήρηση μιας υπάρχουσας γεώτρησης.

Σε κάθε διάνοιξη γεώτρησης νερού και με το πέρας της εργασίας, είναι απαραίτητο να γίνουν τα σωστά βήματα για τον καθορισμό της δυναμικότητας άντλησης νερού της γεώτρησης, ώστε να τοποθετηθεί η κατάλληλη αντλία και οι ανάλογης παροχής σωληνώσεις. Η διαδικασία αυτή ξεκινάει με έναν πρωταρχικό καθαρισμό από λάσπη άμμο και πέτρες που έχουν παραμείνει στον πυθμένα, κατά την διάτρηση με το γεωτρύπανο. Στη συνέχεια γίνεται δοκιμαστική άντληση νερού για να βρεθεί το μέτρο της παροχής νερού της γεώτρησης, η στάθμη ηρεμίας και η στάθμη άντλησης με σκοπό τον υπολογισμό του μεγέθους της αντλίας νερού.

Είναι προφανές ότι στην περίπτωση της διάνοιξης νέας γεώτρησης, ο καθαρισμός της είναι αποφασιστικής σημασίας, για να διαπιστωθεί η σωστή λειτουργία της γεώτρησης αλλά και για να γίνει η σωστή διαστασιολόγησή της. Χωρίς τον προηγούμενο καθαρισμό της γεώτρησης νερού, όλα τα επόμενα βήματα είναι αδύνατο να πραγματοποιηθούν.

Εκτός αυτού όμως, ο καθαρισμός της γεώτρησης νερού είναι μείζονος σημασίας και για τη συντήρηση ή την επαναλειτουργία μιας γεώτρησης όπως σε διάφορες περιπτώσεις προκύπτει.

Μια περίπτωση κατά την οποία απαιτείται ο καθαρισμός ή επανακαθαρισμός μιας γεώτρησης, είναι όταν έχει πραγματοποιηθεί η ανόρυξή της και έχουν γίνει οι απαραίτητες διαδικασίες καθαρισμού και δοκιμαστικής άντλησης, αλλά δεν έχει τοποθετηθεί η αντλία νερού στη γεώτρηση αυτή. Όταν χρειαστεί να τοποθετηθεί πλέον η αντλία, πρέπει οπωσδήποτε να προηγηθεί εκ νέου καθαρισμός της γεώτρησης.

Άλλη περίπτωση ανάγκης καθαρισμού μιας γεώτρησης νερού είναι όταν έχει παραμείνει ανενεργή για πολλή καιρό και προκύπτει η ανάγκη επαναλειτουργίας της. Η επαναλειτουργία χωρίς να προηγηθεί καθαρισμός εγκυμονεί κινδύνους καταστροφής του αντλητικού μηχανισμού της γεώτρησης από τη συσσωρευμένη λάσπη και άμμο. Οπότε ο καθαρισμός κρίνεται επιβεβλημένος και στην περίπτωση αυτή.

Σε κάποιες περιπτώσεις δε, μετά την παρέλευση κάποιου χρόνου σε μια γεώτρηση νερού, μπορεί να εμφανιστεί μείωση στην ποσότητα νερού που αντλείται ή να βγαίνει θολό και κακής ποιότητας νερό, που να περιέχει λάσπη, άμμο και πέτρες. Στην περίπτωση αυτή, το αποτέλεσμα είναι να χρειάζεται μεγαλύτερος χρόνος για την άντληση της αναγκαίας ποσότητας νερού, η αντλία να καταβάλει μεγαλύτερη προσπάθεια για την άντληση του νερού με σπατάλη περισσότερης ενέργειας και τέλος να υπάρχει σημαντική φθορά στα εξαρτήματα άντλησης της γεώτρησης νερού και παροχής του νερού (λάστιχα, μπεκ κλπ) με πιθανότητα καταστροφής τους. Είναι προφανές λοιπόν ότι και στην περίπτωση αυτή επιβάλλεται καθαρισμός γεώτρησης.

Ο καθαρισμός γεώτρησης λοιπόν απαιτείται όταν ισχύει κάποια από τις παραπάνω περιπτώσεις. Πως όμως γίνεται ο καθαρισμός μιας γεώτρησης νερού; Ο καθαρισμός της γεώτρησης γίνεται με δύο βασικούς τρόπους.

- Ο ένας τρόπος είναι με τη χρήση δυνατού αεροσυμπιεστή (κομπρεσέρ) ο οποίος εκτοξεύει αέρα μέσα στη στήλη της γεώτρησης, αναδεύοντας τα συσσωρευμένα υλικά τα οποία στη συνέχεια απομακρύνονται με αναρρόφησή της αφήνοντας καθαρή τη στήλη της γεώτρησης νερού.
- Ο άλλος τρόπος είναι με την εκ νέου χρήση γεωτρήπανου το οποίο αφαιρεί ξανά τα συσσωρευμένα στον πυθμένα της γεώτρησης, υλικά ή και εκβαθύνοντάς την, θωρακίζοντας ταυτόχρονα εκ νέου τη σωλήνωση της γεώτρησης.

Παράλληλα με τον καθαρισμό της γεώτρησης, απαιτείται και ο καθαρισμός των φίλτρων του εξοπλισμού άντλησης της γεώτρησης νερού, ώστε η γεώτρηση να είναι ανοιχτή και η δυναμικότητα της να επανέλθει στα αναμενόμενα επίπεδα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Ο νόμος του Darcy χρησιμοποιείται ως η βασική αρχή της υδραυλικής.
- Κατά την μελέτη των γεωτρήσεων λαμβάνονται βασικές αρχές του νόμου του Darcy.
- Ο νόμος του Darcy παρατηρείται και σε εφαρμογές που αφορούν το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο.
- Την σημαντικότητα του νόμου Darcy στα αναχώματα για την αποφυγή αστοχίας λόγω του κορεσμού του εδάφους περιμετρικά του αναχώματος.
- Το κάθε πηγάδι χρήζει διαφορετική μελέτη ανάλογα τον τύπο του.
- Ο υδροφόρος ορίζοντας κατέχει πρωταρχικό ρόλο στην μελέτη μας.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξένη:

- Vadose Zone Hydrology By ***Daniel B. Stephens***
- Environmental Soil Physics, Daniel Hillel
- **Hydraulics of Groundwater, Jacob Bear**
- [https://www.scirp.org/\(S\(i43dyn45teexjx455qlt3d2g\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1768488&fbclid=IwAR3bZDXDflyL3X1DZSvfE5e5ShBnvXs3Ut4V9r6-elybZZczl54DzQJQo7Q](https://www.scirp.org/(S(i43dyn45teexjx455qlt3d2g))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1768488&fbclid=IwAR3bZDXDflyL3X1DZSvfE5e5ShBnvXs3Ut4V9r6-elybZZczl54DzQJQo7Q)
- [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1301803&fbclid=IwAR2L-lfO_z9kSAesslUCU-bRuuw_HUvkxy_3UES8ai6pdsyN2JTNd13tZks](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1301803&fbclid=IwAR2L-lfO_z9kSAesslUCU-bRuuw_HUvkxy_3UES8ai6pdsyN2JTNd13tZks)
- Daugerty – Franzini. Υδραυλική, Τόμοι Ι, ΙΙ, ΙΙΙ
- G. O. Brown. Henry Darcy and the making of a law
- Craig T. Simmons. Henry Darcy (1803–1858): Immortalised by his scientific legacy
- Thuro K. (1996). Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengorttrieb. Geologisch-felsmechanische Untersuchungen anhand sieben ausgewahlter Tunnelprojekte, Munchner Geologische Hefte Reine B Angewandte Geologie B1
- Mansure A., Finger J., Prairie M., Glowka D., Livesay B. (2002). Advanced drilling through diagnostics-while-drilling, Proceedings World Geothermal Congress 2000
- Mannon D.C. (2001), Reducing well cost by increasing grilling efficiency
- Sadkowski S.S et al. (2004). Fracture characterization at a bedrock bioremediation site in New Hampshire
- Driscoll F.G. (1987). Groundwater & Wells
- Watershed Hydrology, Second Edition 2nd Edition by Peter E. Black

Ελληνική:

- Βασίλης Μαρίνος, 1^ο Μάθημα ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΠΤΙΚΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΥΣ ΣΚΟΠΟΥΣ, Λέκτορας Τμήματος Γεωλογίας
- Μενέλαος Θεοχάρης, 2015. Στραγγίσεις(Θεωρία), Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Ηπείρου Άρτας
- Τερζίδης Γ.- Καραμούζης Δ., 1985. Υδραυλική Υπογείων Νερών
- Τερζίδης Γ., 1986. Μαθήματα Υδραυλικής, Τόμοι Ι, ΙΙ, ΙΙΙ
- Τσακίρης Γ., 2006. Υδραυλικά Έργα, Σχεδιασμός και Διαχείριση, Τόμος ΙΙ: Εγγειοβελτιωτικά Έργα
- Ιωάννου Γ. Σακκάς, 2007. Τεχνική Υδρολογία, Τόμος Ι: Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων.

- Φώτιος Π. Μάρης. Καθηγητής Εργαστηρίου Υδρολογίας και Υδραυλικών Έργων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνικής Σχολής Θράκης.
- https://www.geotriseis.com/katharismos-geotrasis.php?fbclid=IwAR2JIW02TjNa9Wz_fUIUphsfbBarg9FuSciDO-9OASNqNB1V7Wd31swufac
- ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε. Πτυχιακή Εργασία, Βυθούλκας Βασίλειος, Πετρέλαιο- Εξόρυξη & Δύλιση ,2016
- https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/OPE02162/9%CE%BF%20%CE%9A%CE%B5%CF%86%CE%AC%CE%BB%CE%B1%CE%B9%CE%BF_%CE%A5%CF%80%CF%8C%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%20%CE%9D%CE%B5%CF%81%CE%AC.pdf
- Υπόγεια νερά, υδροέρευνες, γεωτρήσεις, Μιλτιάδης Μ. Κάπος
- Σταματάκη Σ. (2007). Τεχνολογία Γεωτρήσεων. Πανεπιστημιακές παραδόσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μηχανικοί Μεταλλειολόγοι – Μεταλλουργοί, Αθήνα
- Κελεσίδης Β. Χ. (2012). Αβαθείς και ειδικές γεωτρήσεις

Εικόνες URL:

Εικόνα 1:

https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQeN2aXGbmJWgrOHslpLkiLy45SrSZxYyh96JUBpdrak_RR8u50u6vxmgC2xohwXfOLPy8&usqp=CAU

Εικόνα 2:

https://media.springernature.com/lw685/springer-static/image/art%3A10.1007%2Fs10040-008-0304-3/MediaObjects/10040_2008_304_Fig4_HTML.jpg

Εικόνα 3:

https://www.researchgate.net/profile/Craig-Simmons/publication/226867468/figure/fig2/AS:302188002856980@1449058642986/Photographs-a-front-and-b-reverse-of-the-original-medal-awarded-to-Darcy-by-the_Q320.jpg

Εικόνα 4:

https://media.springernature.com/lw685/springer-static/image/art%3A10.1007%2Fs10040-008-0304-3/MediaObjects/10040_2008_304_Fig2_HTML.gif

Εικόνα 5:

https://www.researchgate.net/profile/Craig-Simmons/publication/226867468/figure/fig5/AS:302188007051266@1449058643339/figure-fig5_Q320.jpg

Εικόνα 6:

https://media.springernature.com/lw685/springer-static/image/art%3A10.1007%2Fs10040-008-0304-3/MediaObjects/10040_2008_304_Fig5_HTML.gif

Εικόνα 7:

https://media.springernature.com/lw685/springer-static/image/art%3A10.1007%2Fs10040-008-0304-3/MediaObjects/10040_2008_304_Fig7_HTML.gif

Εικόνα 8:

<https://2.bp.blogspot.com/-ehMhd5FYEQs/Wc4NJTy0y2I/AAAAAAAAALzA/dPDKDbCCu6QZPkHEtbKCXKBwY3XUr5g2wCEwYBhgL/s1600/image01.png>

Εικόνα 9:

https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/OPE02162/9%CE%BF%20%CE%9A%CE%B5%CF%86%CE%AC%CE%BB%CE%B1%CE%B9%CE%BF_%CE%A5%CF%80%CF%8C%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%20%CE%9D%CE%B5%CF%81%CE%AC.pdf

Εικόνα 10:

https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/OPE02162/9%CE%BF%20%CE%9A%CE%B5%CF%86%CE%AC%CE%BB%CE%B1%CE%B9%CE%BF_%CE%A5%CF%80%CF%8C%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%20%CE%9D%CE%B5%CF%81%CE%AC.pdf

Εικόνα 11:

https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/OPE02162/9%CE%BF%20%CE%9A%CE%B5%CF%86%CE%AC%CE%BB%CE%B1%CE%B9%CE%BF_%CE%A5%CF%80%CF%8C%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%20%CE%9D%CE%B5%CF%81%CE%AC.pdf

Εικόνα 12:

<https://ars.els-cdn.com/content/image/3-s2.0-B9780123969729000070-f07-09-9780123969729.jpg>

Εικόνα 13:

<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTUFFXGM24rZpFwiN0KICI9gekfZtCh4DhkHA&usqp=CAU>

Εικόνα 14:

https://previews.dropbox.com/p/thumb/ABVALx8UBpnZPR7Y3Hg1bc1jkHWR5goGY1b7sUDSoOYmYTL5zd7SasYMC9bht4YO2v7Nfkq6kPnt2k1VB7UbswNMa4Yu_RyHE1uG-7UNhXclr77z2w-qC0X09ZEMc1vSzkDhb5qWZD5KTGEwxfJEGdXH1yeqqeYRMjYFA_DVvmJHAzV4_KzcDh7mKEpQzRwFLUZaN_2QsbYJeHuM4PjnwWNZuw4MKKut8wpxOmhLyW4Tdd-pruw43YUxhq2U93lzf3Dw0xiVmq3od-ZryTKc1YAsj4Ocnind4Jj95KLeidTxM-

GiSEgtCNgepTdXYV4OqXn56N8oSZ5NvtolG7z_M2maFeGgWHDFCszJQLBLmKZw/p.jpeg?fv_content=true&size_mode=5

Εικόνα 15:

<https://i.pinimg.com/originals/0f/6f/cd/0f6fcd1cbd0eab112106c3b6ae98bc40.gif>

Σχήμα 1:

https://previews.dropbox.com/p/thumb/ABXzmpexA58qrpY2mODZ8wiMP58etOVGyqs6YnivpxH2PK56XERqHnlezPHpj4OhIjKfqeJ_whWvMsR3pGbaf0gocnUeFPGjXPDibUW0vUg0Ps56CHEXJMRtoUaqVCeYkoWD_WFlYcRmHdsokYn7gOhr_SqRzxll_hozhsfqF6jnn3cjb3znGGHjEqorAetq9Ym_QH1ZFN08V-eqMxrHaLfkPbBnmbO3B7ilswvacAiikI8la-kU_p54jXrjRh3acJ_h3iKsOhV7GEuKVrG5SVJB_5ZkYixuFQODBxeqX14kd3MOGDm4bQ5iNECfvWPkuiqGBkmdwgk5R9aqonn22IjjBikNeoj1cqU2Cg4vWCmw/p.jpeg?fv_content=true&size_mode=5

Σχήμα 2:

https://lh3.googleusercontent.com/RB-Tn7LG8_uYCYyjbBsqr77AF0BI8S3gMzi0-Sjr2zmZ-hZsVNYSa3kzEQTRoesRvM8CiA=s132