



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΕΚΤΟΝΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΤΗΝ  
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ  
ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ**

**Στίκα Μαρίνα**

**Επιβλέπων: Α. Καλλιώρας,**

**Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ»**

**Αθήνα, Οκτώβριος 2020**



# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	vi
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	ix
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	x
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	xi
EXTENDED ABSTRACT .....	xii
INTRODUCTION .....	xii
STUDY AREA.....	xiii
METHODOLOGY.....	xv
RESULTS.....	xvii
CONCLUSIONS .....	xxi
SELECTED REFERENCES.....	xxi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΤΟ ΝΕΡΟ ΩΣ ΦΥΣΙΚΟΣ ΠΟΡΟΣ .....	1
1.2 ΥΠΟΓΕΙΟΙ ΚΑΡΣΤΙΚΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΟΙ ΟΡΙΖΟΝΤΕΣ ΚΑΙ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥΣ .....	1
1.2.1 ΟΡΙΣΜΟΙ .....	1
1.2.2 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ ΤΟΥ ΚΑΡΣΤ .....	3
1.2.3 ΤΥΠΟΙ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΣΤΑ ΚΑΡΣΤΙΚΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ .....	4
1.2.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΤΑ ΚΑΡΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	5
1.2.4.1 Η ροή στους κόκκους (matrix flow).....	5
1.2.4.2 Η ροή στις διακλάσεις (fracture flow).....	6
1.2.4.3 Η ροή στους αγωγούς (conduit flow).....	6
1.3 ΘΡΑΥΣΙΓΕΝΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΤΥΠΟΙ ΔΙΑΡΡΗΞΩΝ .....	8
1.3.1 ΟΡΙΣΜΟΙ .....	8
1.3.2 ΤΥΠΟΙ ΔΙΑΡΡΗΞΩΝ.....	9
1.4 Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΙΓΕΝΟΥΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΑ ΚΑΡΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	12
1.4.1 ΤΑ ΡΗΓΜΑΤΑ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΚΑΡΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	12
1.4.2 ΟΙ ΔΙΑΚΛΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΚΑΡΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	13
1.5 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ .....	14
1.5.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ .....	15
1.5 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	17
1.6 ΔΙΑΡΘΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	19
2.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΛΑΥΡΙΟΥ.....	19
2.2 ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ .....	20
2.3 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	22

2.4 ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ .....	25
2.4.1 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΔΑΤΩΝ .....	25
2.4.2 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΟΡΙΑ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ .....	27
2.4.3 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΣΗΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ .....	28
2.4.4 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ .....	30
2.4.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ .....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ .....	33
3.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	33
3.1.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ MODFLOW .....	33
3.1.1.1 Αρχή του κώδικα MODFLOW .....	33
3.1.1.2 Διακριτοποίηση του πεδίου ορισμού του μοντέλου .....	33
3.1.1.3 Εξίσωση πεπερασμένης διαφοράς της υπόγειας ροής .....	34
3.1.1.4 Υδραυλική αγωγιμότητα .....	35
3.1.1.5 Υδατικό ισοζύγιο .....	36
3.1.1.6 Οριακές συνθήκες .....	36
3.1.1.7 Απαιτήσεις δεδομένων .....	36
3.1.1.8 Διακριτοποίηση χρονικού παράγοντα .....	36
3.1.1.9 Μαθηματική περιγραφή .....	37
3.1.1.10 Πακέτα προσομοίωσης ροής .....	37
3.1.2 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MODEL MUSE .....	38
3.1.3 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ MODEL MATE ΚΑΙ UCODE .....	39
3.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΤΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	39
3.2.1 ΧΩΡΙΚΗ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ .....	40
3.2.2 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ .....	40
3.2.3 ΑΝΑΦΟΡΑ ΠΑΚΕΤΩΝ MODFLOW-2005 ΚΑΙ MODFLOW-CFP .....	41
3.2.4 ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ .....	41
3.3 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΥΠΑΙΘΡΟΥ .....	42
3.3.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΕΩΝ .....	42
3.3.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΥΠΑΙΘΡΟΥ .....	45
3.3.3 ΣΥΝΔΕΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΥΠΑΙΘΡΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ .....	46
3.4 ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ MODFLOW-2005 .....	48
3.4.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	48
3.4.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΙΑΡΡΗΞΕΩΝ ΜΕΣΑ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ .....	52
3.5 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ .	55
3.5.1 ΔΕΙΚΤΕΣ ΣΤΗΝ ΚΛΙΜΑΚΟΥΜΕΝΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ (SCALED SENSITIVITIES) .....	55

3.5.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ (PARAMETER CORRELATION COEFFICIENT).....	56
3.5.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ (PARAMETER ESTIMATION) .....	57
3.5.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΕ ΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ UCODE .....	57
3.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	58
3.6.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	58
3.6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ .....	60
3.6.2.1 Αποτελέσματα Δείκτη DSS (Dimensionless Scaled Sensitivity) .....	60
3.6.2.2 Αποτελέσματα Δείκτη CSS (Composite Scaled Sensitivity) .....	62
3.6.2.3 Αποτελέσματα Συντελεστή Συσχέτισης PCC (Parameter Correlation Coefficient) .....	64
3.6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΙΜΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ (PARAMETER VALUE ESTIMATION) .....	65
3.6.4 ΟΛΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	68
4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	68
4.2 ΕΙΔΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	69
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	73

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Εννοιολογικό μοντέλο για τους καρστικούς υδροφορείς (Ghasemizadeh et al., 2012).....	2
Σχήμα 1.2: Υπό πίεση, ελεύθεροι και επικρεμάμενοι υδροφορείς (Dunne et al., 1978). .....	3
Σχήμα 1.3: Υδρολογικές ζώνες παράκτιου καρστικού συστήματος (Milanovic, 2004). .....	4
Σχήμα 1.4: Οι τρεις τύποι καρστικού πορώδους (Grimes, 1999). .....	4
Σχήμα 1.5: Απόκριση του υδραυλικού φορτίου σε γεωτρήσεις με διαφορετικό τύπο ροής μέσα στον ίδιο καρστικό υδροφόρο.(Α) Υψηλή ταχύτητα ροής έπειτα από σημαντικά επεισόδια τροφοδοσίας, χωρίς όμως να παρατηρείται ιδιαίτερη αποθηκευτικότητα στην κύρια μάζα (matrix).(Β) Καθυστερημένη και φθίνουσα απόκριση στην κύρια μάζα του υδροφόρου (Kresic, 2007). .....	5
Σχήμα 1.5: Εννοιολογικό μοντέλο φυσικού εμπλουτισμού και υπόγειας ροής σε παράκτιο καρστικό υδροφόρο (Binet et al., 2017). .....	8
Σχήμα 1.6: (a) Η ροή των κόκκων είναι συνήθης σε παραμόρφωση ελάχιστου βάθους πορωδών πετρωμάτων και ιζημάτων, (b) σε αντίθεση με την κατακλαστική ροή που λαμβάνει χώρα κατά την παραμόρφωση συνεκτικών ιζηματογενών πετρωμάτων ή μη-πορωδών πετρωμάτων (Fossen, 2010).....	9
Σχήμα 1.7: Σχηματική απεικόνιση των διαρρήξεων με βάση τον τύπο της μετατόπισης και τα κινηματικά τους χαρακτηριστικά(Fossen., 2010). .....	10
Σχήμα 1.8: Οι Τύποι I, II, III, IV των διαρρήξεων (Fossen, 2010). .....	11
Σχήμα 1.9: Υδραυλική επικοινωνία ασβεστολίθων-μαργών διαμέσου κανονικών ρηγμάτων. Ανάλογα από την μετατόπιση, τα “κλειστά” ρήγματα μπορούν (Α) να δημιουργήσουν υδραυλικό φραγμό ή (Β) να συνδέσουν διαφορετικούς υδροφορείς. Η παρουσία και η περατότητα του υλικού πλήρωσης στα “ανοιχτά” ρήγματα λειτουργεί (Γ) ως υδραυλικός φραγμός ή (Δ) συνδέει αρκετούς υδροφορείς. Παρόμοια σχήματα μπορούν να κατασκευαστούν και για άλλους τύπους ρηγμάτων (Goldscheider & Drew D, 2007, ίδια επεξεργασία). .....	13
Σχήμα 2.1: Γεωγραφική τοποθεσία της περιοχής μελέτης, σε περιβάλλον ArcGIS (πηγή χάρτη: <a href="http://www.esri.com/">www.esri.com/</a> , ίδια επεξεργασία). .....	20
Σχήμα 2.2: Συνδυαστικό διάγραμμα μηνιαίων ελάχιστων και μέγιστων θερμοκρασιών για την περιοχή του Λαυρίου (πηγή δεδομένων: <a href="http://meteo.gr">meteo.gr</a> , ίδια επεξεργασία). .....	21
Σχήμα 2.3: Μηνιαίες βροχοπτώσεις για την περιοχή του Λαυρίου (δεδομένα από <a href="http://meteo.gr">meteo.gr</a> , ίδια επεξεργασία).....	21
Σχήμα 2.4: Γεωλογικός χάρτης της ΝΑ Αττικής (Lekkas et al.,2020), το σκουρόχρωμο πλαίσιο περικλείει την περιοχή μελέτης. ....	24
Σχήμα 2.5: Εστιασμένος γεωλογικός χάρτης (Lekkas et al., 2020) της περιοχής ενδιαφέροντος (προβολή σε Transverse Mercator Greek_Grid) και τροποποιημένη στρωματογραφική στήλη (Coleman et al., 2019). .....	25
Σχήμα 2.6: Πιεζομετρικοί χάρτες στον αλλουβιακό υδροφόρο (Μάϊος 2014 – Σεπτέμβριος 2016), απεικόνιση των υγρών και ξηρών περιόδων του υδρολογικού έτους (Pouliaris, 2019). .....	26
Σχήμα 2.7: Όρια της υδρογεωλογικής λεκάνης στην περιοχή μελέτης στα Νότια (a) και στα Βόρεια (b) τμήματα (φωτογραφίες από Pouliaris, 2019) (χάρτης Lekkas et al., 2020). .....	28

Σχήμα 2.8: Διακυμάνσεις υδραυλικού φορτίου σε γεώτρηση του καρστικού υδροφόρου (K1) (Pouliaris, 2019).....	29
Σχήμα 2.9: Δεδομένα δοκιμαστικής άντλησης (α) που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των υδραυλικών ιδιοτήτων στον καρστικό υδροφόρο και (β) τα αποτελέσματα που δείχνουν την συνεισφορά του αδρανούς νερού κατά την είσοδό του στο σύστημα (Pouliaris, 2019).....	30
Σχήμα 2.10: Σύγκριση των υδραυλικών φορτίων στον καρστικό (D8) και στον αλλουβιακό υδροφόρο (MSW11) (Pouliaris, 2019).....	31
Σχήμα 2.11: Υδρογεωλογική τομή στο παράκτιο κομμάτι του υδροσυστήματος του Λαυρίου σε διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ (τροποποιημένη εικόνα από Pouliaris,2019). ....	31
Σχήμα 3.1: Διακριτοποιημένο σύστημα υδροφορέα (Harbaugh, 2005).....	34
Σχήμα 3.3: Προσανατολισμός του τρισδιάστατου υπολογιστικού κώδικα MODFLOW: NCOL= αριθμός στηλών, NROW= αριθμός γραμμών, NLAY= αριθμός στρωμάτων (Oude Essink, 2000). ....	35
Σχήμα 3.2: (α) Το block [i,j,k] με τα περιβάλλοντα blocks, (β) Η ροή μεταξύ των block [i,j,k] και [i,j+1,k] (Oude Essink, 2000).....	35
Σχήμα 3.4: Κεντρικό παράθυρο εργασίας του λογισμικού ModelMuse (Winston, 2009). ....	39
Σχήμα 3.5: Γεωλογικός Χάρτης (Lekkas et al., 2020) με τα σημεία που έγιναν οι μετρήσεις. ....	42
Σχήμα 3.6: Διάρρηξη μέσα στο Ανώτερο Μάρμαρο Καμάριζας, ευδιάκριτη και πιθανά συνεχίζεται υπεδαφικά. ....	43
Σχήμα 3.7: Οριζόντιες διαρρήξεις στο Ανώτερο Μάρμαρο Καμάριζας, οι οποίες παρουσιάζουν μία συστηματικότητα. ....	44
Σχήμα 3.8: Συνδυασμός διαρρήξεων μεγάλης και μικρής κλίσης. ....	44
Σχήμα 3.9: Στερεογραφική προβολή των επιπέδων διαρρήξεων, κατώτερο ημισφαίριο. ...	45
Σχήμα 3.10: Ροδόγραμμα με τις γενικές διευθύνσεις όλων των μετρήσεων.....	46
Σχήμα 3.11: Στερεογραφική προβολή (equal angle, Wulf net) κατώτερου ημισφαιρίου της σχιστότητας, του άξονα των πτυχών και των γραμμώσεων στην οροφή του detachment (μπλε χρώμα) και στο δάπεδο (πράσινο χρώμα), η είναι ο αριθμός των μετρήσεων (Scheffer et al., 2016), ίδια επεξεργασία.....	47
Σχήμα 3.12: Τα επιμέρους στρώματα του μοντέλου από τα ανώτερα στα κατώτερα, σε περιβάλλον ModelMuse (ιδία επεξεργασία).....	48
Σχήμα 3.13: Γεωμορφολογικός χάρτης με τις περιοχές τροφοδοσίας των καρστικών και των αλλουβιακών, όπως ορίζονται από το πακέτο WEL, σε περιβάλλον ArcGIS. Το μπλε χρώμα αντιστοιχεί στην τροφοδοσία των καρστικών και το κίτρινο στην τροφοδοσία του αλλουβιακού υδροφόρου (ιδία επεξεργασία). ....	50
Σχήμα 3.14: Γεωμορφολογικός χάρτη με τα σημεία παρατήρησης στον αλλουβιακό και καρστικό υδροφόρο αντίστοιχα, όπως ορίζονται από το πακέτο HOB, σε περιβάλλον ArcGIS (ιδία επεξεργασία). ....	51
Σχήμα 3.15: Σχηματική απεικόνιση των σταδίων καταγραφή μίας διάρρηξης στο μοντέλο και της τελικής της υπόστασης στο χώρο, στο παράδειγμα χρησιμοποιείται η fracture 1 (ιδία επεξεργασία). ....	54
Σχήμα 3.16: Απεικόνιση όλων των διαρρήξεων στο μοντέλο και οριζόντια τομή στον καρστικό υδροφόρο, σε περιβάλλον ModelMuse (ιδία επεξεργασία). ....	55

Σχήμα 3.17: Διάγραμμα συσχέτισης προσομοιωμένων και παρατηρημένων τιμών υδραυλικού φορτίου με το πέρας της εκτέλεσης του μοντέλου.....	58
Σχήμα 3.18: Διάγραμμα με τις καταγεγραμμένες διαφορές στην αντίστοιχη θέση παρατήρησης. ....	59
Σχήμα 3.19: Υδατικό Ισοζύγιο όπως προέκυψε από την εκτέλεση του μοντέλου. ....	59
Σχήμα 3.20: Διάγραμμα αποτελεσμάτων του δείκτη DSS για τις πρώτες επτά παραμέτρους. ....	61
Σχήμα 3.21: Διάγραμμα αποτελεσμάτων του δείκτη DSS για τις τελευταίες επτά παραμέτρους.....	62
Σχήμα 3.22: Διάγραμμα ευαισθησίας του δείκτη CSS για κάθε εξεταζόμενη παράμετρο. ...	63
Σχήμα 3.23: (Α) Η διάρρηξη 5, (Β) η διάρρηξη 7 και (Γ) η διάρρηξη 3 με τις αντίστοιχες στερεογραφικές τους προβολές. Τα κόκκινα σημεία δηλώνουν τις θέσεις των παρατηρήσεων (HOB),σε περιβάλλον ArcGIS.....	64
Σχήμα 3.24: Διάγραμμα της μεταβολής του αθροίσματος των τετραγώνων σταθμισμένων διαφορών σε κάθε επανάληψη. ....	65
Σχήμα 3.25: Διάγραμμα συσχέτισης προσομοιωμένων και παρατηρημένων τιμών υδραυλικού φορτίου με το πέρας της δεύτερης εκτέλεσης του μοντέλου.....	66
Σχήμα 3.26: Διάγραμμα με τις νέες καταγεγραμμένες διαφορές στην αντίστοιχη θέση παρατήρησης. ....	67



## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Διαφορετικές ονομασίες για τις προσεγγίσεις ενιαίων και κατανεμημένων μοντέλων (Ghasemizadeh et al., 2012).....	16
Πίνακας 2.1: Αποτελέσματα από την ερμηνεία των υδραυλικών δεδομένων του καρστικού συστήματος (Ρουλιάρης 2019), ιδία επεξεργασία.....	29
Πίνακας 3.1: Πακέτα προσομοίωσης του υπόγειου νερού (Harbaugh, 2005), ιδία επεξεργασία.....	37
Πίνακας 3.2: Περιγραφή των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στο παρόν μοντέλο σε κώδικα MODFLOW –2005, Πακέτο LPF.....	49
Πίνακας 3.3: Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο πακέτο WEL.....	50
Πίνακας 3.4: Προσδιορισμός του γεωλογικού σχηματισμού στον οποίο βρίσκονται οι παρατηρήσεις.....	51
Πίνακας 3.5: Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο πακέτο GHB.....	52
Πίνακας 3.6: Οι επιλεγμένες διαρρήξεις με τις αντίστοιχες συντεταγμένες (Χο, Υο), τα υψομετρικά σημεία (Ζ), τα στοιχεία των μετρήσεων και η ομάδα στην οποία ανήκουν. Οι συντεταγμένες έχουν προσαρμοστεί στο προβολικό σύστημα Greek_Grid.....	53
Πίνακας 3.7: Αρχικές τιμές παραμέτρων για την ανάλυση ευαισθησίας.....	60
Πίνακας 3.8: Καταγραφή αποτελεσμάτων των δύο πρώτων μέγιστων τιμών του δείκτη DSS.....	61
Πίνακας 3.9: Φθίνουσα κατανομή αποτελεσμάτων της τιμής του δείκτη CSS. ....	62
Πίνακας 3.10: Αποτελέσματα από την εκτίμηση παραμέτρων που αφορούν τις μεταβολές των τιμών στις παραμέτρους και στο άθροισμα των τετραγώνων σταθμισμένων διαφορών. ....	66

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

*Με την ολοκλήρωση της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω κατ' αρχάς τον κ. Ανδρέα Καλλιώρα, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών Ε.Μ.Π. για την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής εργασίας, την καθοδήγησή του, τις επισημάνσεις σε καίρια σημεία της εργασίας, αλλά και για όλη τη γνώση που μου μετέδωσε συνολικά μέσω αυτού του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών.*

*Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ηλία Παπακωνσταντή, Λέκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και τον κ. Κωνσταντίνο Αθανασά, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών Ε.Μ.Π. για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της παρούσας εργασίας.*

*Θερμές ευχαριστίες οφείλω στον κ. Χρήστο Πουλιάρη, Μεταδιδακτορικό Ερευνητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών Ε.Μ.Π., για τη συνεχή υποστήριξη στα θέματα του υδρολογικού μοντέλου αλλά και για την αδιάκοπη υποστήριξή του και το χρόνο που διέθεσε στο γραφείο και στο πεδίο, ο οποίος ήταν καθοριστικός για την ολοκλήρωση της εργασίας.*

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμη, τον κ. Κωνσταντίνο Σούκη, μέλος ΕΔΙΠ της σχολής Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος ΕΚΠΑ, ο οποίος με συμβουλεύει από τις Προπτυχιακές Σπουδές μου και η βοήθειά του σε θέματα τεκτονικής και γεωλογίας της περιοχής μελέτης ήταν άκρως διαφωτιστική.*

*Τέλος, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια και τους φίλους μου, οι οποίοι μου στάθηκαν και με υπέμειναν σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου.*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αβεβαιότητα για τον ρυθμό αναπλήρωσης των υπόγειων νερών καθώς και η ικανότητά τους να εξασφαλίσουν πόσιμο νερό σε περιόδους λειψυδρίας, αποτελούν πρόκληση μείζονος σημασίας για την διαχείριση των αποθεμάτων νερού, σε παγκόσμιο επίπεδο. Πολλές περιοχές στον πλανήτη τροφοδοτούνται από ένα καρστικό σύστημα, με το 20 – 25% του παγκόσμιου πληθυσμού να εξαρτάται από τα υπόγεια νερά των καρστικών υδροφορέων (Ford, 2007).

Τα επιφανειακά και υπόγεια χαρακτηριστικά του καρστ προκύπτουν από τη φυσική διάλυση των πετρωμάτων μέσω “μονοπατιών” του υπόγειου υδατικού συστήματος, δημιουργώντας καταβόθρες, σπήλαια, αγωγούς. Τα “μονοπάτια” σχετίζονται άμεσα με τη θραυσιγενή παραμόρφωση της εκάστοτε περιοχής και αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι στην ανάπτυξη και εξάπλωση του καρστικού συστήματος.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η εκτίμηση της επίδρασης των θραυσιγενών τεκτονικών δομών, στο υδρογεωλογικό καρστικό μοντέλο που αντιστοιχεί στην περιοχή μελέτης. Το παρόν μοντέλο αποτελεί μία επέκταση του πρότυπου μοντέλου που ανέπτυξε ο Rouliaris (2019), συνοδευόμενο από πλήθος στοχευμένων τεκτονικών μετρήσεων υπαίθρου. Η περιοχή μελέτης εκτείνεται στα 60 km<sup>2</sup>, στην νοτιοανατολική ακτή της Αττικής χερσονήσου και ειδικότερα στην περιοχή του Λαυρίου. Χαρακτηρίζεται από δύο υδροφόρα στρώματα, με υπερκείμενο των κοκκώδη υδροφόρο των Τεταρτογενών αποθέσεων και τον υποκείμενο καρστικό, ο οποίος αναπτύσσεται στο Ανώτερο Μάρμαρο της κατώτερης Ενότητας Καμάριζας. Για τις ανάγκες της εργασίας έγινε επίσκεψη στη περιοχή μελέτης για την συλλογή δεδομένων πεδίου, τα οποία αφορούν σε στοιχεία των θραυσιγενών επιπέδων (διαρρήξεων) στο Ανώτερο Μάρμαρο, όπου αναπτύσσεται ο υπό εξέταση καρστικός υδροφορέας. Οι διαρρήξεις που συγκεντρώνονται, κατατάσσονται σε ομάδες βάσει διευθύνσεως και κλίσης και συγχρόνως συνδέονται με το τεκτονικό καθεστώς της περιοχής. Με το πέρας της ανάλυσής τους εισάγονται στο μοντέλο και ψηφιοποιούνται.

Η προσομοίωση την υπόγειας καρστικής ροής πραγματοποιείται με το λογισμικό ModelMuse, το οποίο ενσωματώνει τον αριθμητικό κώδικα προσομοίωσης υπόγειων νερών MODFLOW – 2005. Η αναπαράσταση του εννοιολογικού μοντέλου επιτυγχάνεται με τη χρήση διαφόρων πακέτων (packages) όπως τα LPF, WEL, HOB και GHB. Η χρονική διακριτοποίηση αφορά διάστημα 2 ετών ( Ιανουάριος 2014 έως Δεκέμβριος 2015), με αντίστοιχες περιόδους φόρτισης μηνιαίας διάρκειας και ημερήσιο χρονικό βήμα. Μετά την πρώτη εκτέλεση του μοντέλου εφαρμόζεται ο κώδικας UCODE για τη διαδικασία ανάλυσης της ευαισθησίας του μοντέλου, οι εξεταζόμενες παράμετροι είναι οι τιμές οριζόντιας υδραυλικής αγωγιμότητας των 12 διαρρήξεων, της κύριας μάζας (matrix) του ανθρακικού σχηματισμού και του αλλουβιακού σχηματισμού. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται με τη μέθοδο Fit independent statistics (Dimensionless Scaled Sensitivity, Composite Scales Sensitivity, Parameter Correlation Coefficient).

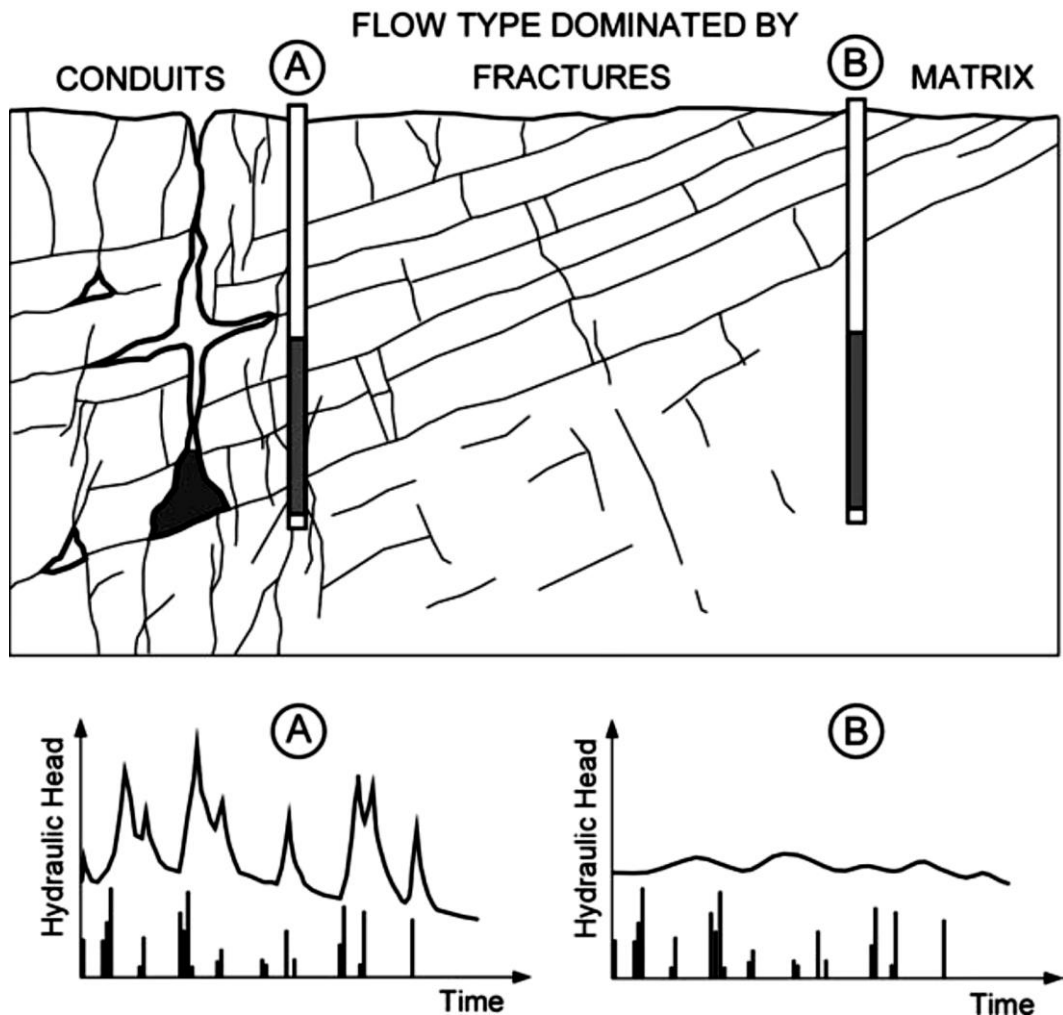
Η μεγαλύτερη ευαισθησία του μοντέλου αποτυπώνεται στις οριζόντιες υδραυλικές αγωγιμότητες της διάρρηξης 5 (HK\_FR5), της διάρρηξης 7 (HK\_FR7), της διάρρηξης (HK\_FR3) και της οριζόντιας υδραυλικής αγωγιμότητας στην κύρια μάζα (matrix) του ανθρακικού σχηματισμού (HK\_Kgen). Μετά την βελτιστοποίηση των παραπάνω παραμέτρων η διαφορά προσομοιωμένων και μετρημένων υδραυλικών φορτίων φαίνεται να μειώνεται. Βασικός στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι να εξασφαλίζονται αντιπροσωπευτικές τιμές σε κάθε βήμα της προσομοίωσης για την διεξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων του συνολικού διερρηγμένου καρστικού συστήματος.

## EXTENDED ABSTRACT

### INTRODUCTION

Groundwater resources management poses a challenge, as there is an uncertainty about their recharge rate and their ability to sustain drinking water in periods of water scarcity. Large areas of the Earth's surface are covered by karst aquifers developed within carbonate rocks and roughly 20–25% of the global population depends largely or entirely on groundwaters obtained from them (Ford, 2007).

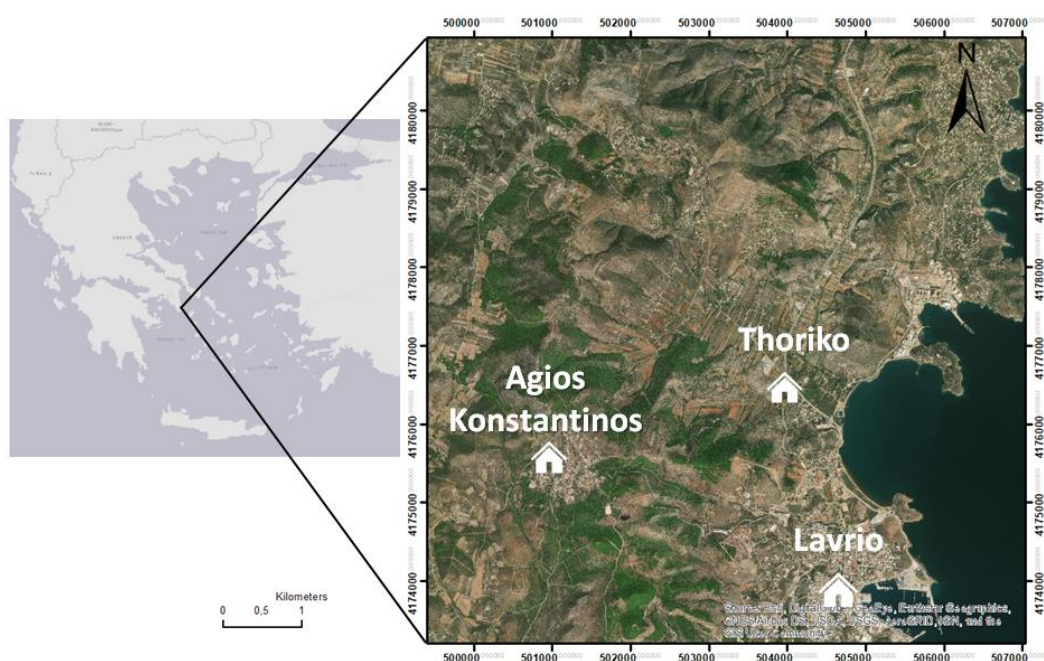
The karst surface and underground characteristics result from the natural dissolution of the rocks through "paths" of the underground water system, creating sinkholes, caves and conduits. Those "paths" are directly related to the brittle deformation of each area and also composing an integral part of the development and spreading of the karst system (Figure 1).



**Figure 1:** Response of the hydraulic head measured in monitoring wells to different types of flow in karst aquifers. A: Rapid conduit flow after major recharge events and no significant storage in the matrix. B: Delayed and dampened response of aquifer matrix. Flow dominated by fractures may include any combination of these two extremes (Kresic 2007).

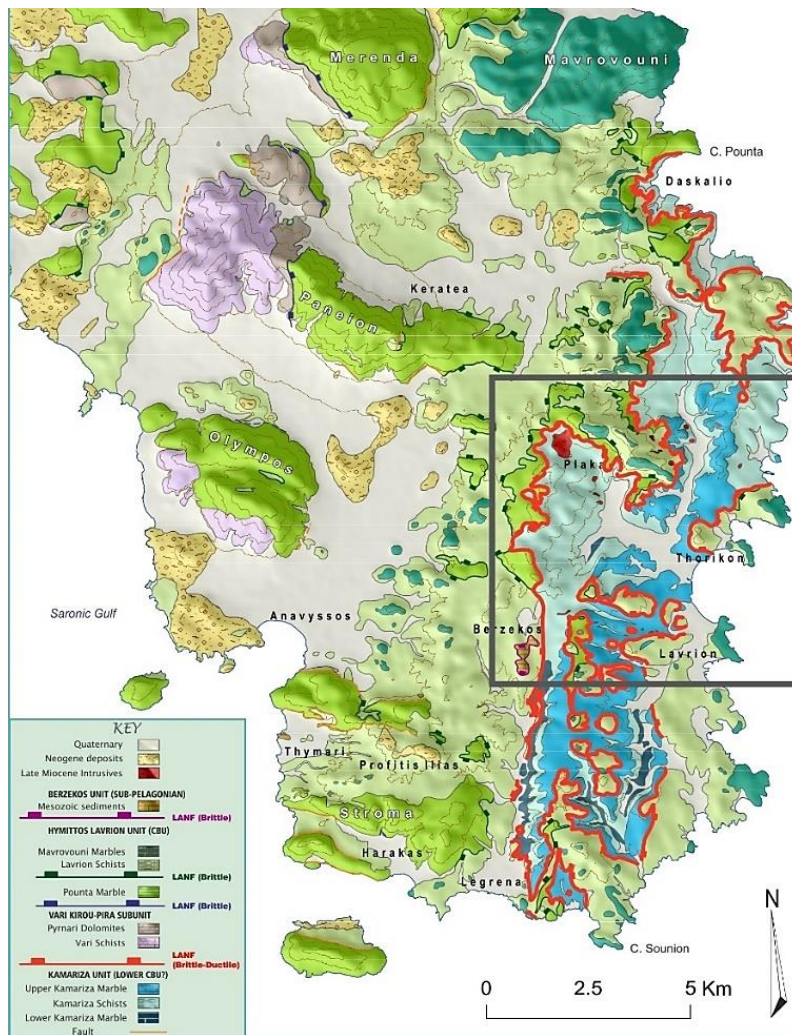
## STUDY AREA

The study area is extended up to 60km<sup>2</sup>, located on the southeast coast of the Attica peninsula and belongs to the Municipality of Lavreotiki (Figure 2). The city of Lavrio has been known since antiquity for the conducted silver mining activities. The climate is considered as semi-arid, with mild winters and hot summers. The hydroclimatic data are collected by the National Observatory of Athens, for the period May 2010 to May 2020. After an extensive study, the average monthly minimum temperature of 10 years values 11.6°C and the average monthly maximum temperature of 10 years at 27.1°C. For precipitations, the average monthly value for 10 years is app 34.4 mm and the average annually value is 378,1 mm.



**Figure 2:** Geographical location of the study area, ArcGIS interface (map source: [www.esri.com/](http://www.esri.com/)).

From a geological point of view, the study area belongs to the northwestern part of the Attic-Cycladic metamorphic core complex. The dominant structure in SE Attica, observed for several tens of km<sup>2</sup>, is a sub-horizontal, crustal-scale detachment fault that juxtaposes the two primary tectono-stratigraphic units (Figure 3). The footwall of the detachment comprises the Kamariza Unit, which includes the Lower Kamariza Marble, the Kamariza Schists and the Upper Kamariza Marble. Kamariza Unit exhibits a NNE-SSW stretching lineation parallel to fold axis. The Lavrion (Ymittos) Unit, situated in the hanging wall, consists of Pounta Marble and Maurovouni Marble. Structurally higher is located the Bertzekos Unit (Lekkas et al, 2011,2020; Coleman, 2019). In the Late Miocene, a relatively undeformed granite intruded the Kamariza Unit, in the area of Plaka (Liati, 2009). Finally, a large part in the study area is covered by Neogene and Quaternary deposits.



**Figure 3:** Geological map of SE Attica (Lekkas et al., 2020), the dark frame encloses the study area.

Two underground aquifers are developing in the study area. The upper one is placed in the Quaternary deposits and its thickness varies from 0 to 20 m. The lower aquifer is developed in the Upper Marble of Kamariza Unit its thickness reaches up to 50 m. Hydraulic connection between the two aquifers is governed by a complex regime, but the general trend is that the karstic aquifer contributes to the alluvial one, with only a few exceptions mostly in the southern part. The main supply of both aquifers is done through the precipitations with the alluvial one holding 15.53% and the karstic 38% of the rainfall rate (Pouliaris 2019).

## METHODOLOGY

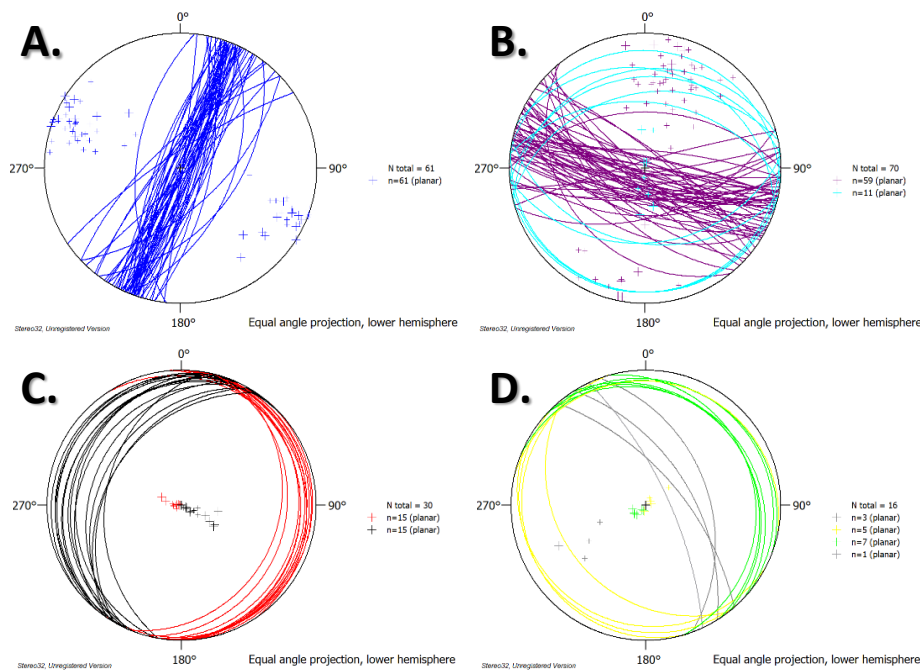
The purpose of this postgraduate dissertation is to assess the impact of brittle tectonic structures on the hydrogeological model corresponding to the study area. This model is an expansion of the a hydrologic model developed by Pouliaris (2019) using the MODFLOW - CFP code, for the same study area, accompanied by a variety of tectonic field measurements. The majority of parameters and packages are retained from the initial model. The main difference between the two models, apart from the approximation of the results, is that the present model incorporates MODFLOW-2005 as the numerical code for the groundwater flow simulations. The study area has an extent of approximately 60 km<sup>2</sup>, in the southeast coast of Attica peninsula, in the vicinity of Lavrio. Prior any simulation attempt, field measurements are collected during the field trip to the study area, which concern exclusively the Upper Marble of the Kamariza Unit (Figure 4). At this point it should be mentioned that in hydrogeology, all planar discontinuities like bedding planes, joints and faults are often collectively referred to as fractures (Goldscheider & Drew D, 2007). The measurements are taken from fractured surfaces, with (or not) kinematic elements along with the observance of certain criteria that must be set for the reliability of the data.



**Figure 4:** Measurements taken from field, that combine fracture planes of low and high angle slope.

The editing process of the fractures results in four separate groups with different directions and slopes (Figure 5). Group A contains 61 planes of fractures with almost vertical angle slopes and NNE-SSW direction. Group B includes 70 fractures with two groups of high and medium angle slopes, but with the same WNW-ESE direction. Group C is characterized by medium to low angle slope fractures and NNE-SSW direction, with a total of 30 measurements. Finally, the smallest group D consisting of 16 measurements is oriented NW-SE and its slopes vary from low to high values. Based on the tectonic regime of the study area, the above groups are defined compared with the geometry of stretching lineation or the fold axis. Those that are parallel or diagonal at the direction of the lineation, for example the group A, C and D, are characterized as shear fractures. While those that are oriented vertically to the stretching lineation are characterized as extension fractures.

The current model is simulated with MODFLOW-2005 code (Harbaugh, 2005), which is considered as an international standard for simulating and predicting groundwater conditions and groundwater/surface-water interactions. Additionally, the graphical interface of the model is achieved by the software ModelMuse, a really useful tool for spatial management of model parameters (Winston, 2009). The conceptual model of the area is captured on a 50 x 69 grid, with a resolution of 100 x 100 m. The model is divided into eight layers: first is the alluvial formation, with a minimum thickness of 3 m. Downwards they lay 6 individual layers of the karstic aquifer, this discretization is made due to the optimal simulation and behavior of karst's natural processes, with a thickness 10 m each. Finally, the impermeable base of the aquifer is defined corresponding to the Schists formation.

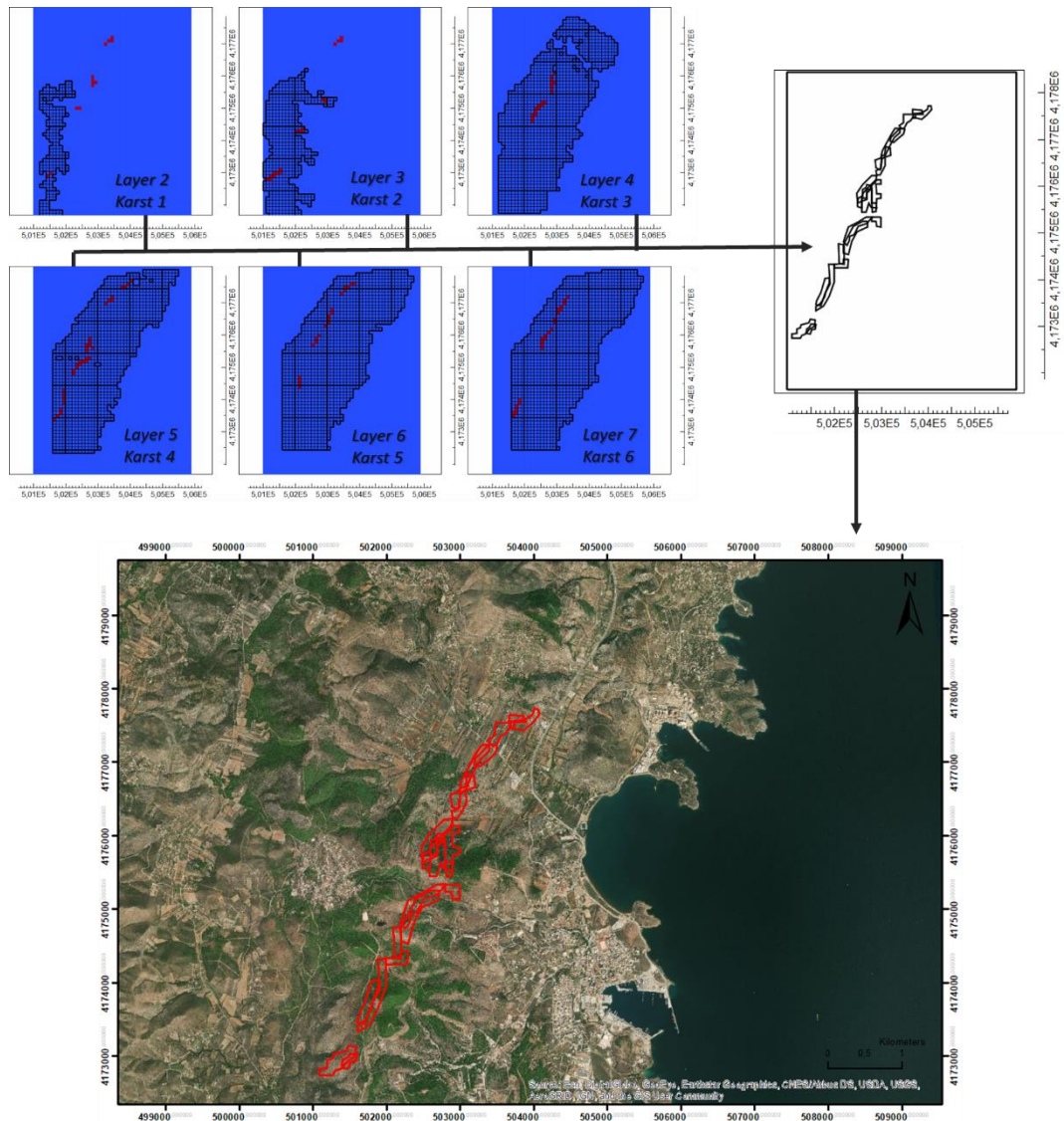


**Figure 5:** Stereographic projection of fracture planes, lower hemisphere.

The packages used in the model simulation are LPF, is used to set up the hydraulic parameters of the model, WEL for the inflow from precipitation in each aquifer, HOB for the importing and exporting of hydraulic head observations and simulated heads of the model and finally the GHB for the constant inflows of the sea with the groundwater system, using a conductance factor. The above packages are the boundary conditions, which achieve the adjustment of the model. The time factor of the simulation is defined for two years from January 2014 to December 2015. Each stress period corresponds to one month with a daily time step.

The selected fractures are introduced into the model by the scalar equation that converts, through interpolation methods, the elevation coordinates and the measurement data into spatial information. Each fracture that occurs in each layer is digitized with a polygon of a specific horizontal hydraulic conductivity (Figure 6). The choice of polygons versus the choice of conduits is interpreted as a scattered distribution of an extensive discontinuity zones within the karstic aquifer, that is able to diversify the matrix flow and to unify the flow in the fractures and conduits.

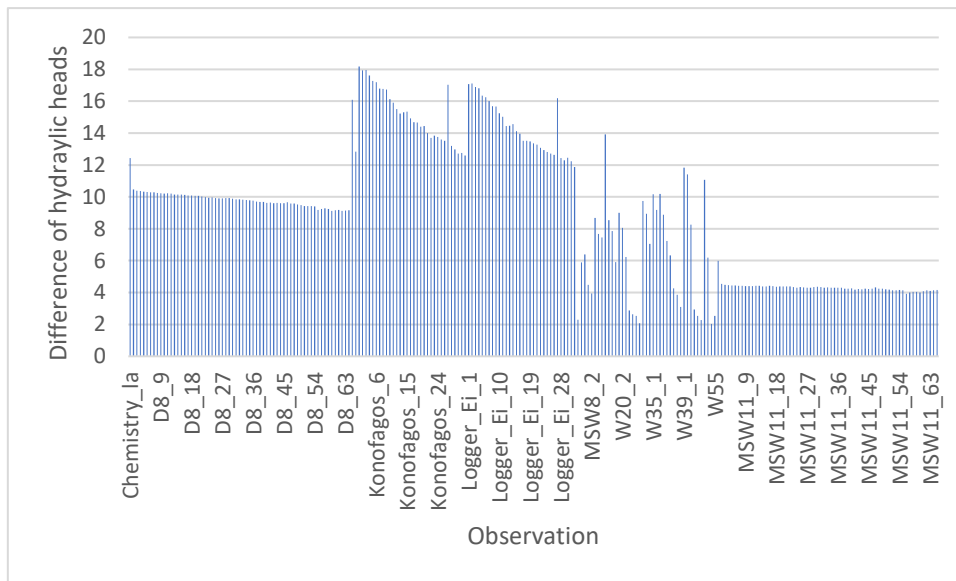




**Figure 6:** Schematic representation of the stages of introducing a fracture in the model and its final state in space, for the example fracture 1 is used.

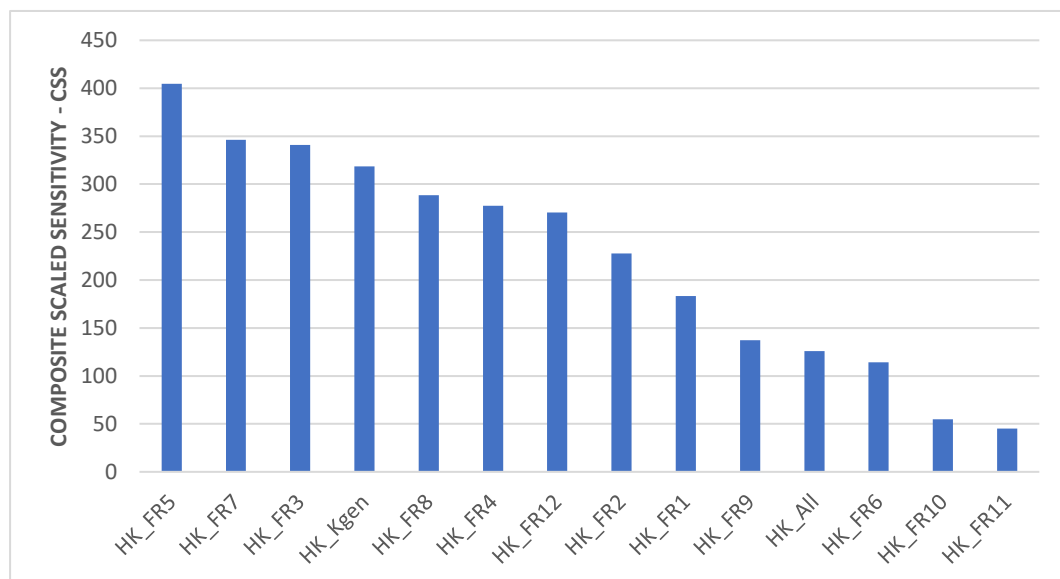
## RESULTS

The results of model run are compared with the measured field values. The average difference between the simulated and observed hydraulic heads is estimated at 9.1 m, while the sum of squared difference is 24,222.6 m<sup>2</sup>. The highest deviations in hydraulic heads are imprinted on the observations of the karstic aquifer, Konofagos and Logger\_Ei.

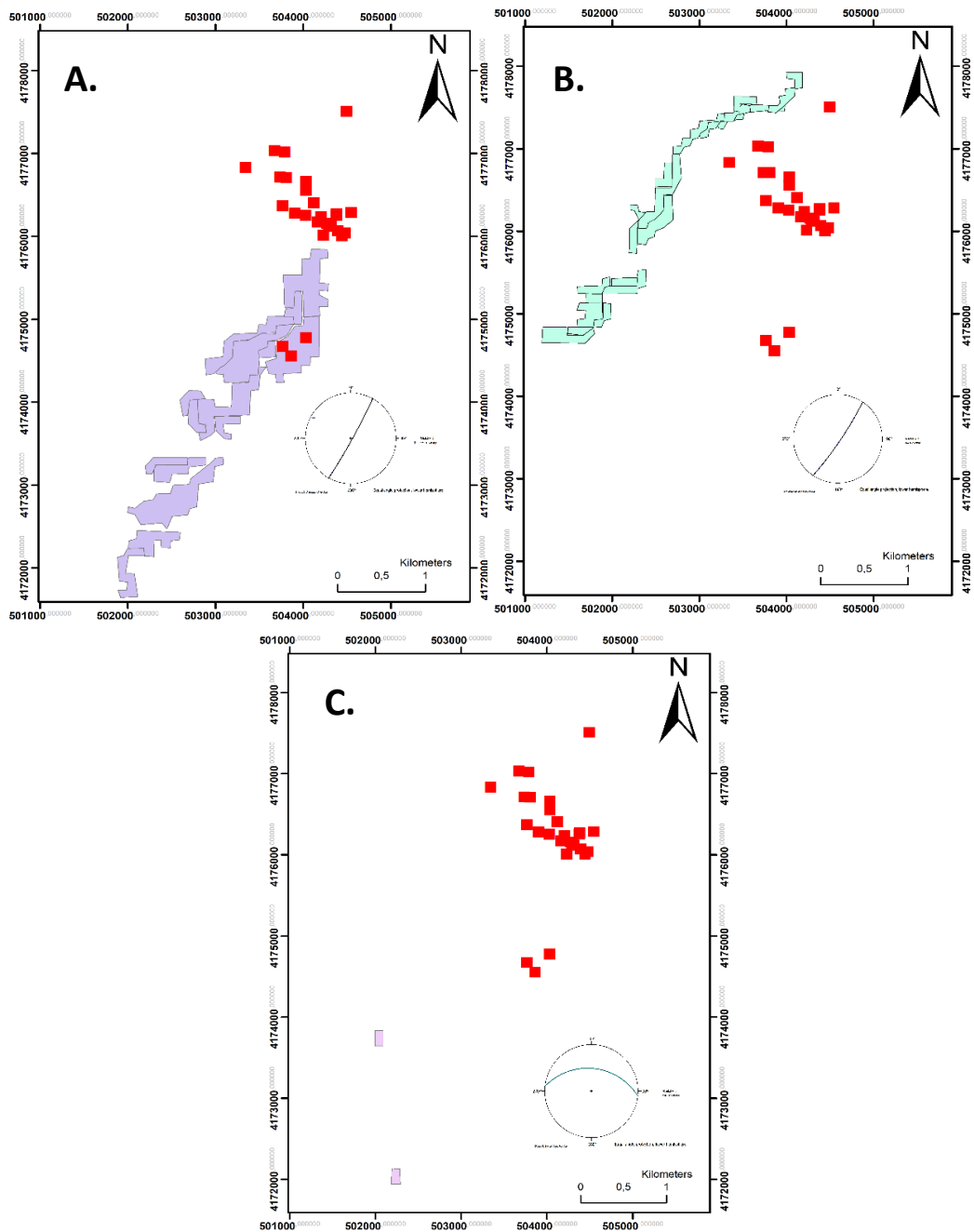


**Figure 7:** Chart with the recorded differences corresponding to each observation.

For sensitivity analysis and parameter estimation the UCODE (Poeter et al., 2005) code is used through the software ModelMate (Banta, 2011). The method of fit independent statistics is applied to determine the scaled sensitivities and the parameter correlation coefficient. The parameters tested in the sensitivity analysis are the horizontal hydraulic conductivities of 12 fractures (HK\_FR1-12), the horizontal hydraulic conductivity in the matrix (HK\_Kgen) and the hydraulic conductivity of the alluvial formation (HK\_All). Finally, based on the CSS index the most important parameters for the model are HK\_FR5, HK\_FR7, HK\_FR3 and HK\_Kgen. The value of the correlation coefficient is very low, which makes the parameters completely independent. Figure 9 visualize three out of four parameters with the highest CSS values.



**Figure 8:** Sensitivity analysis results of the parameters, using CSS index.



**Figure 9:** Spatial distribution of (A) fracture 5, (B) fracture 7 and (C) fracture 3 along with their stereographic projections. The red rectangles represent the observations (HOB), in ArcGIS interface.

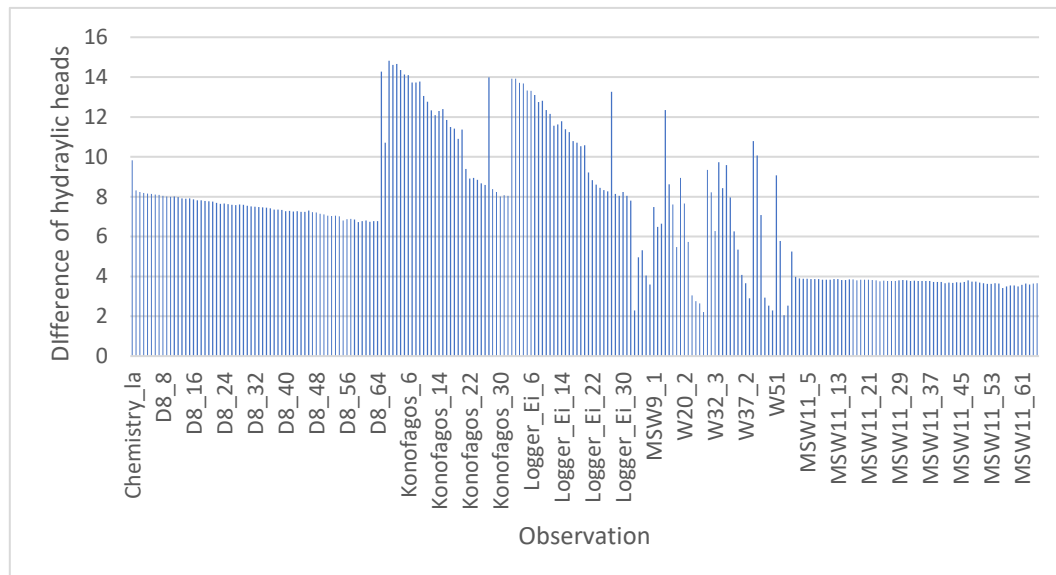
To improve the results on the hydraulic heads of the model, but mainly to minimize the sum of the weighted square residuals, the parameter estimation process is performed. The parameters with the highest value of the CSS index are defined (HK\_FR5, HK\_FR7, HK\_FR3 and HK\_Kgen), while the rest of parameters are chosen not to be included. At this step the parameters HK\_FR3 and HK\_Kgen are evaluated as partially dependent, because of their correlation coefficient points a value at 0.96. Table 1 presents the results that are taking place in each iteration through the parameter estimation process. Iteration no.0 shows the initial

parameter values of the model, while iteration no.2 was selected as the most suitable one, for its low sum of squared weighted residuals.

**Table 1:** Parameter estimation results regarding the alterations of the parameter values and the sum of squared weighted residuals.

ITERATION	HK_Kgen (m/day)	HK_FR3 (m/day)	HK_FR5 (m/day)	HK_FR7 (m/day)	SUM OF SQUARED WEIGHTED RESIDUALS
0	15,00	50,00	50,00	50,00	2,42E+06
1	18,41	50,91	46,93	44,27	1,50E+06
2	22,62	44,63	38,43	53,41	1,11E+06
3	22,79	40,90	32,73	66,30	1,56E+06
4	22,91	42,83	29,43	103,60	1,35E+06
5	23,22	50,84	27,13	87,26	1,14E+06

The model then, runs with the new set of parameter values and reduce the average difference between the simulated and observed hydraulic loads to 7.26 m, while the sum of the squared differences decreases to 15,1005.2 m<sup>2</sup> (Figure 10). The largest discrepancies still occur at the Konafagos and Logger\_Ei observation spots.



**Figure 8:** Chart with the new recorded differences corresponding to each observation.

## CONCLUSIONS

- During the data processing of the fractures through the ModelMuse interface, the planes with extremely high and low angle of slope could not be visualized. As far as it concerns the low angle fractures, their structure coincides on the horizontal plane, therefore its visualization is nearly impossible, especially in top view (i.e. fracture 3). The high angle fractures, which tend to be almost vertical, appear in individual cells and may not continue its development downwards. For the reasons above those fractures should be unified to the matrix horizontal hydraulic conductivity.
- Sensitivity analysis points out the most important parameters to the model HK\_FR5, HK\_FR7, which pertain to group A of shear fractures and HK\_FR3 to group B of extension fractures. Hence, the high angle shear fractures of seems to affect the model, despite the fact that the model is tested for its horizontal hydraulic conductivity. On the contrary, the parameter HK\_FR3, although it extends in a small area, its slope rates the lower value favoring the horizontal hydraulic conductivity.
- The minimization of the sum of square differences did not achieve the maximum goal. This choice is fully conscious, because should the continuation of the optimizing iterations proceeded the results would have inclined from the original goal of this dissertation, the simulation of the physical system. Any value of hydraulic conductivity that is converted and minimized may end up in an overall even model, however the resulting individual points would be completely notional.
- To sum up, groundwater model and especially those which simulate the groundwater karstic flow should be evaluated in every step, in order meet the natural criteria and finally to simulated the physical groundwater system.

## SELECTED REFERENCES

Banta E. R. (2011): ModelMate—A graphical user interface for model analysis, U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–E4, 31 p

Coleman M., Dubosq R., Schneider D.A., Grasemann B., Soukis K. (2019): Along-strike consistency of an extensional detachment system, West Cyclades, Greece. *Terra Nova*. 2019;00:1–14. <https://doi.org/10.1111/ter.12388>

ESRI, ArcGIS, [www.esri.com/](http://www.esri.com/)

Ford D., Williams P. (2007): *Karst hydrogeology and geomorphology*. Wiley, Chichester

Goldscheider N., Drew D. (2007): *Methods in Karst Hydrogeology*, International Contributions to Hydrogeology 26, International Association of Hydrogeologists, Taylor & Francis, London, 264 pp. ISBN 978-0-415-42873-6.

Harbaugh, A. W. (2005): MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model -- the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16.

Kresic N. (2007): *Hydrogeology and Groundwater Modeling*, Second Edition. Boca Raton/London/New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 806 p.

Lekkas S., Soukis K., Skourtsos E., Kranis H., Lozios S., Alexopoulos A., Stouraiti Ch. and Koutsovitsis P. (2020): Geological map of SE Attica Greece: the West Cycladic Detachment System in Lavrion peninsula. (Submitted to the Journal of Maps Taylor and Francis)

Lekkas S., Skourtsos, E., Soukis, K., Kranis, H., Lozios, S., Alexopoulos, A., & Koutsovitsis, P. (2011). Late Miocene detachment faulting and crustal extension in SE Attica (Greece). Geophysical Research Abstracts, 13, EGU2011–456.

Liati A., Skarpelis N., & Pe-Piper G. (2009). Late Miocene magmatic activity in the Attic-Cycladic belt of the Aegean (Lavrion Se Attica Greece): Implications for the geodynamic evolution and timing of ore deposition. Geological Magazine, 146, 732–742. <https://doi.org/10.1017/S0016756809006438>

National Observatory of Athens, <http://meteosearch.meteo.gr/>

Poeter E. P., Hill M. C., Banta E. R., Mehl S., and Christensen S. (2005): UCODE\_2005 and six other computer codes for universal sensitivity analysis, calibration, and uncertainty evaluation constructed using the JUPITER API: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, bk. 6, chap. A11, revision of Feb. 10, 2008, 283 p., available at <http://pubs.er.usgs.gov/usgspubs/tm/tm6A11>.

Pouliaris C. (2019): Groundwater modelling of a coastal semi-arid hydrogeological system, PhD Dissertation, Technische Universität Darmstadt

Winston R.B. (2009): ModelMuse—A graphical user interface for MODFLOW–2005 and PHAST: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A29, 52 p., available only online at <http://pubs.usgs.gov/tm/tm6A29>.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΤΟ ΝΕΡΟ ΩΣ ΦΥΣΙΚΟΣ ΠΟΡΟΣ

Η επαρκής ποσότητα πόσιμου νερού, μαζί την εξασφάλιση γης, τροφής αλλά και ορυκτών πόρων αποτελούν κρίσιμα ζητήματα του σύγχρονου κόσμου, καθώς ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξάνεται ραγδαία. Την διόγκωση των εν λόγω βιοποριστικών ζητημάτων, καλείται να επιλύσει η επιστημονική κοινότητα με έρευνες και στρατηγικές που διατηρούν την περιβαλλοντική βιωσιμότητα σε αρμονία με την πληθυσμιακή αύξηση.

Το πόσιμο νερό αποτελεί καίριο πρόβλημα, αφού από τα  $1.387 \times 10^6$  km<sup>3</sup> των παγκοσμίων αποθεμάτων νερού, μόλις το 2,5% είναι γλυκό. Επιπλέον, μόνο ένα μικρό μέρος αυτού του γλυκού νερού είναι πόσιμο, διότι το 68.7% είναι δεσμευμένο σε πάγους και χιόνι, το 1,2% βρίσκεται σε άλλες γεωγραφικές ενότητες (πχ. λίμνες 0,26%, ποτάμια 0,006%, υγρότοποι 0,03%, πολικές περιοχές 0,86%) αφήνοντας ένα υπόλοιπο 30,1% στο υπόγειο γλυκό νερό (Hölting. et al, 1980).

Τα υπόγεια νερά παρέχουν νερό ύδρευσης τουλάχιστον στο 50% του παγκόσμιου πληθυσμού ενώ, για τις αρδευτικές δραστηριότητες χρησιμοποιείται το 43%. Τροφοδοτούν επίσης, τις βασικές ροές των ποταμών και ελέγχουν σημαντικά υδατικά συστήματα. Ωστόσο, το 20% των υπόγειων υδάτινων προμηθειών εκτιμάται ότι υπερ-εκμεταλλεύονται. Τα επίπεδα των υπόγειων νερών μειώνονται δραματικά, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονη γεωργική δραστηριότητα και αστική ανάπτυξη.

Η διαθεσιμότητα του νερού επηρεάζεται και από την ρύπανση. Προβλήματα που αφορούν την ποιότητα των υπόγειων υδάτων προκαλούνται κυρίως από την εκτεταμένη γεωργία, βιομηχανία, εξόρυξη και φυσικά τα αστικά λύματα και την αστική απορροή.

Η διαχείριση των υπόγειων αποθεμάτων αποτελεί πρόκληση, καθώς υπάρχει μία αβεβαιότητα για τον ρυθμό αναπλήρωσής τους και για την ικανότητά τους να εξασφαλίσουν πόσιμο νερό σε περιόδους λειψυδρίας.

Συνεπώς η δραστηριοποίηση σε θέματα υπόγειων υδάτων (διαχείριση, εξυγίανση, προστασία) αποκτά καθημερινά σημαντική θέση στην οικονομική και κοινωνική συνείδηση του πλανήτη.

## 1.2 ΥΠΟΓΕΙΟΙ ΚΑΡΣΤΙΚΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΟΙ ΟΡΙΖΟΝΤΕΣ ΚΑΙ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥΣ

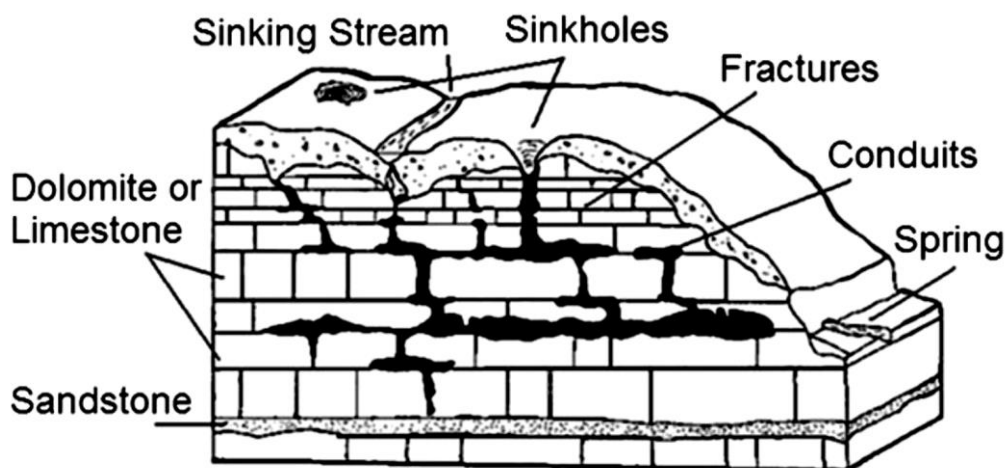
### 1.2.1 ΟΡΙΣΜΟΙ

Ο όρος “υδροφορέας” (aquifer) δόθηκε από την Αμερικανική Γεωλογική Υπηρεσία (U.S. Geological Survey, Lohman et al. 1972) ως:

*ένας σχηματισμός, ομάδα σχηματισμών ή ένα μέρος σχηματισμού ο οποίος περιέχει επαρκή ποσότητα κορεσμένου περατού υλικού, ώστε να αποδίδει ικανοποιητικές ποσότητες νερού από πηγάδια και πηγές.*

Ο όρος καρστ χρησιμοποιείται για να περιγράψει έναν ιδιαίτερο γεωμορφολογικό σχηματισμό, ο οποίος σχηματίζει σπήλαια και εκτεταμένα υπόγεια υδατικά συστήματα σε πετρώματα όπως ο ασβεστόλιθος, το μάρμαρο και η γύψος. Πολλές περιοχές στον πλανήτη βρίσκονται πάνω από ένα καρστικό σύστημα και δεν είναι τυχαίο πως το 20 – 25% του παγκόσμιου πληθυσμού εξαρτάται από τα υπόγεια ύδατα των καρστικών υδροφόρων (Ford, 2007). Τα καρστ μπορούν να θεωρηθούν ως ένα ανοιχτό σύστημα που απαρτίζεται από δύο ολοκληρωμένα υδρολογικά και γεωχημικά υποσυστήματα, τα οποία χειρίζονται τα καρστικά πετρώματα.

Το κλειδί για την εμφάνιση ενός καρστ είναι η ανάπτυξη της ιδιόμορφης υδρολογίας του, η οποία είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τον υδρολογικό κύκλο. Τα επιφανειακά και υπόγεια χαρακτηριστικά του καρστ προκύπτουν από την φυσική διάλυση των πετρωμάτων μέσω “μονοπατιών” του υπόγειου υδατικού συστήματος, δημιουργώντας καταβόθρες, σπήλαια, αγωγούς (Σχήμα 1.1).

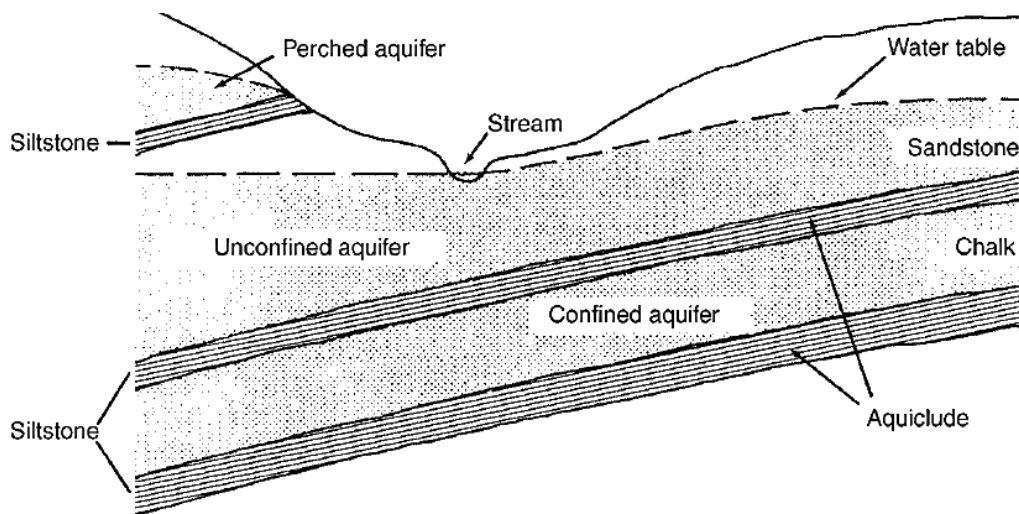


**Σχήμα 1.1:** Εννοιολογικό μοντέλο για τους καρστικούς υδροφορείς (Ghasemizadeh et al., 2012).

Τα υπόγεια νερά στους καρστικούς ορίζοντες έχουν πολλά από τα χαρακτηριστικά των υπόγειων υδάτων σε άλλα πετρώματα, γι' αυτό το λόγο πολλές έννοιες, αρχές και εφαρμογές παραμένουν ίδιες. Ωστόσο, τα υπόγεια καρστικά συστήματα έχουν κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που τα ξεχωρίζουν από τα υπόλοιπα.

Οι καρστικοί υδροφορείς διαχωρίζονται σε ελεύθερους, υπό πίεση και επικρεμάμενους. Οι υπό πίεση υδροφόροι είναι περιορισμένοι ανάμεσα σε δύο σχετικά αδιαπέρατους σχηματισμούς. Στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει διαχωρισμός στον όρο αδιαπέρατος σχηματισμός, ως aquifuge ορίζονται οι χαμηλής περατότητας σχηματισμοί που δεν έχουν την ικανότητα ούτε να αποθηκεύσουν ούτε να μεταφέρουν νερό, ενώ ως aquicludes ορίζονται οι σχηματισμοί που έχουν την ικανότητα να απορροφούν νερό αλλά κατά τον κορεσμό τους δεν μπορούν να το μεταφέρουν (π.χ. ιλύς, άργιλος). Ένα στρώμα σχετικά μικρής περατότητας μέσα σ' ένα υψηλής αναφέρεται ως ημιπερατός υδροφορέας (aquitard) (Σχήμα 1.2).





**Σχήμα 1.2:** Υπό πίεση, ελεύθεροι και επικρεμάμενοι υδροφορείς (Dunne et al., 1978).

### 1.2.2 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ ΤΟΥ ΚΑΡΣΤ

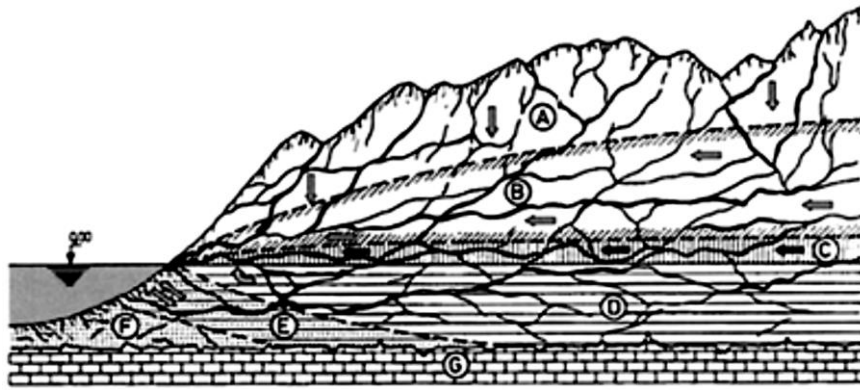
Το καρστ ανάλογα με τον τύπο και τη θέση της βάσης του διακρίνεται σε τέσσερις υδρολογικές ζώνες (Milanovic, 1981):

*Ζώνη Α*, η ανώτερη αυτή ζώνη χαρακτηρίζεται από την καθοδική κίνηση του νερού μέσα από το πρωτογενές και δευτερογενές πορώδες με τη βοήθεια διακριτών αγωγών.

*Υποζώνες Β, C, D*, στις περιοχές αυτές γίνεται η αποθήκευση του νερού και ο σχηματισμός του υδροφόρου, μέσω της βαρυτικής κίνησης του νερού. Η δημιουργία και ο εμπλουτισμός της *υποζώνης Β* γίνεται κατά την υγρή περίοδο, το βάθος της όμως είναι σχετικά περιορισμένο. Η *υποζώνη C* αναπτύσσεται σε μεγάλης έκτασης καρστικές λεκάνες και, μόνο όταν υπάρχουν αρνητικά τοπικά σύνορα (στεγανά διαφράγματα). Συνήθως εκφορτίζεται από μεγάλη καρστική πηγή, με συνεχή τροφοδοσία του υδροφόρου που την συντηρεί. Η *υποζώνη D* χωρίζεται από την *C* με το επίπεδο μηδενικού υψομέτρου (Καλλέργης, 2001).

*Υποζώνες Ε, F*, αποτελούν τις ζώνες που βρίσκονται σε υδραυλική επικοινωνία με τη θάλασσα. Στην *υποζώνη Ε* βρίσκεται σε μόνιμη ανάμιξη με το θαλασσινό και το γλυκό νερό με την περιεκτικότητα σε χλωριόντα να μεταβάλλεται ανάλογα με το υδραυλικό φορτίο. Στην *υποζώνη F* το γλυκό νερό έχει αντικατασταθεί πλήρως από το θαλασσινό (Μαρκαντώνης, 2012).

*Ζώνη G*, αποτελεί την κατώτερη ζώνη του ανθρακικό πετρώματος χωρίς όμως να περιέχει υπόγειο νερό, λόγω της απουσίας καρστικοποίησης.



Σχήμα 1.3: Υδρολογικές ζώνες παράκτιου καρστικού συστήματος (Milanovic, 2004).

### 1.2.3 ΤΥΠΟΙ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΣΤΑ ΚΑΡΣΤΙΚΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

Το νερό μέσα στο πέτρωμα βρίσκεται στα κενά των πόρων, χαρακτηρίζεται από διαφορετικό μέγεθος, σχήμα και προέλευση (Σχήμα 1.4). Γίνεται μία διαφοροποίηση μεταξύ του πορώδους  $n$  και του ενεργού πορώδους  $n_e$ . Το πορώδες ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού όγκου των διάκενων  $V_p$  ως προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος  $V_b$ . Το ενεργό πορώδες αναφέρεται μόνο στα διάκενα που επικοινωνούν μεταξύ τους. Δηλαδή, για ένα κορεσμένο πέτρωμα, εκφράζεται ως ο λόγος του συνολικού όγκου νερού που αποστραγγίζεται φυσικά  $V_a$  ως προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος  $V_b$ . Ωστόσο, στα καρστικά πετρώματα η έννοια του πορώδους παίρνει μία διαφορετική διάσταση. Οι ιζηματολόγοι θεωρούν ως πρωτογενές πορώδες, αυτό που δημιουργήθηκε κατά την ανθρακική ιζηματογένεση και ως δευτερογενές, αυτό που προέκυψε αργότερα μέσω της λιθοποίησης και διαγένεσης. Ωστόσο, οι υδρογεωλόγοι ορίζουν ως πρωτογενές πορώδες (matrix porosity) το ολικό πορώδες το πετρώματος και ως δευτερογενές αυτό που προκύπτει μόνο από την πτύχωση και ρηγματώση του πετρώματος. Καθώς το υπόγειο νερό κυκλοφορεί στο σύστημα, μέσω διαπερατών αγωγών, αναπτύσσονται σωλήνες (φλέβες, σπήλαια) δημιουργώντας ένα τριτογενές πορώδες. Τα κενά αυτά εξακολουθούν να μεγαλώνουν όσο κυκλοφορούν τα υπόγεια νερά. Το πρωτογενές πορώδες είναι πολύ σημαντικό για την ικανότητα της εναποθήκευσης νερού, αλλά τελικώς για να γίνει διάνοιξη των αγωγών και μεγάλη κυκλοφορία νερού είναι υπεύθυνο το τριτογενές πορώδες (Grimes, 1999).



**Κενά μεταξύ  
των κόκκων**



**Σχισμές**

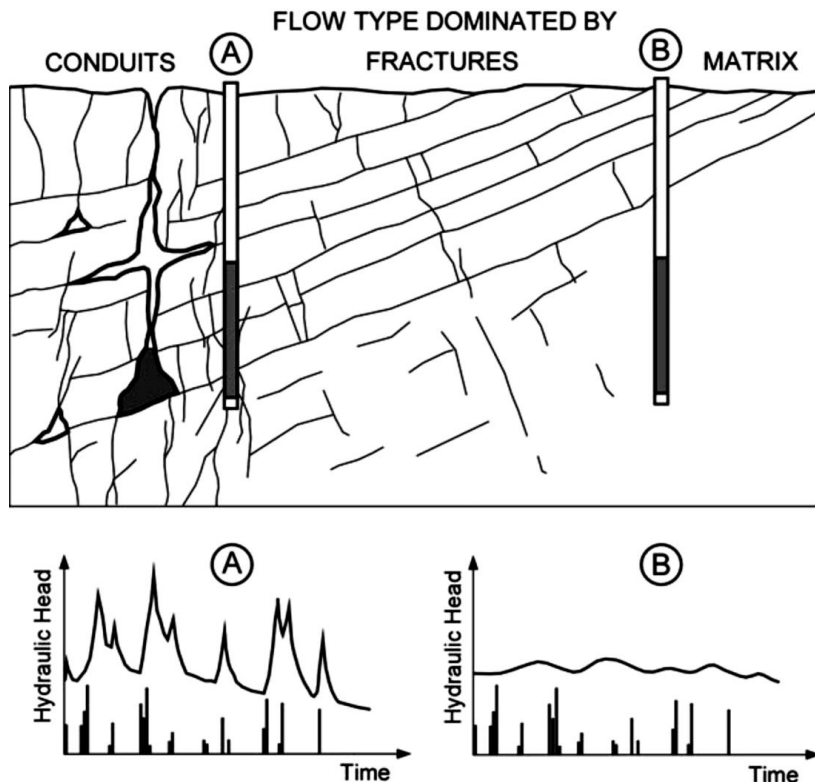


**Αγωγοί**

Σχήμα 1.4: Οι τρεις τύποι καρστικού πορώδους (Grimes, 1999).

#### 1.2.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΤΑ ΚΑΡΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Η ροή και η μεταφορά στα καρστικά συστήματα είναι διαφορετική για τους κόκκους, τις διακλάσεις και τους αγωγούς (Σχήμα 1.5), για το λόγο αυτό είναι ορθό πρώτα να κατασκευάζεται ένα εννοιολογικό μοντέλο και έπειτα να περιγράφεται η ροή μαθηματικά. Όμως, για να περιγραφεί ολόκληρο το καρστικό σύστημα πρέπει να ενοποιηθούν οι ροές στους κόκκους, στις διακλάσεις και στους αγωγούς, εκφρασμένη μαθηματικά από ένα γραμμικό όρο ανταλλαγής και την διαφορά στο υδραυλικό δυναμικό (Liedl et al. 2003).



**Σχήμα 1.5:** Απόκριση του υδραυλικού φορτίου σε γεωτρήσεις με διαφορετικό τύπο ροής μέσα στον ίδιο καρστικό υδροφόρο. (Α) Υψηλή ταχύτητα ροής έπειτα από σημαντικά επεισόδια τροφοδοσίας, χωρίς όμως να παρατηρείται ιδιαίτερη αποθηκευτικότητα στην κύρια μάζα (matrix). (Β) Καθυστερημένη και φθίνουσα απόκριση στην κύρια μάζα του υδροφόρου (Kresic, 2007).

##### 1.2.4.1 Η ροή στους κόκκους (matrix flow)

Η υπόγεια ροή μέσα από τα κενά της κύριας μάζας του πετρώματος, περιγράφεται από την εξίσωση ροής του Darcy:

$$Q = -KiA \quad (1.1)$$

όπου  $K$  [ $LT^{-1}$ ] είναι η υδραυλική αγωγιμότητα,  $i$  η υδραυλική κλίση και  $A$  η επιφάνεια εγκάρσιας διατομής [ $L^2$ ].

#### 1.2.4.2 Η ροή στις διακλάσεις (fracture flow)

Ο συλλογισμός πίσω από την εξίσωση είναι να απλοποιηθούν θεωρητικά οι διακλάσεις, θεωρώντας πως έχουν παράλληλα τοιχώματα και ομοιόμορφο άνοιγμα  $b$  (Delleur, 1999). Υποθέτοντας αδιαπέρατα τοιχώματα στις διακλάσεις, ο βαθμός σταθερής ροής περιγράφεται από τον κυβικό νόμο της εξίσωσης Navier-Stokes για ιζώδη και ασυμπιεστα ρευστά:

$$Q = \left( \frac{-w\rho gb^3}{12\mu} \right) i \quad (1.2)$$

όπου  $w$  το πάχος της διάκλασης [ $L$ ],  $b$  το άνοιγμα της διάκλασης [ $L$ ],  $\mu$  το ιζώδες του νερού [ $ML^{-1}T^{-1}$ ],  $\rho$  η πυκνότητα του νερού [ $ML^{-3}$ ],  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας [ $LT^{-2}$ ] και  $i$  η υδραυλική κλίση. Ο κυβικός νόμος ισχύει για στρωτή ροή σε ανοιχτές ή κλειστές διακλάσεις (Witherspoon et al. 1980).

Η μέση ταχύτητα ροής στις διακλάσεις εκφράζεται:

$$v' = \left( \frac{\rho gb^2}{12\mu} \right) i \quad (1.3)$$

Όπου  $v'$  είναι η μέση ταχύτητα του αγωγού. Από πειραματικές διαδικασίες ο κυβικός νόμος ( $Q \sim b^3$ ) έδειξε να ισχύει για “ιδανικές” παράλληλες πλάκες από γρανίτη, βασάλτη και μάρμαρο. Όλες οι σταθερές παράμετροι της εξίσωσης (1.2) ορίζονται ως μία:  $C = -w\rho g/12\mu$ , και έπειτα ορίζεται ένας εμπειρικός συντελεστής τριβής,  $f$ , με τιμές από 1.04 έως 1.65, για να υπολογιστούν οι τυχόν διαφοροποιήσεις μεταξύ των “ιδανικών” παράλληλων πλακών και πλακών από κοινά πετρώματα (Witherspoon et al., 1980):

$$Q = \frac{C}{f} b^3 i \quad (1.4)$$

#### 1.2.4.3 Η ροή στους αγωγούς (conduit flow)

Το κύριο χαρακτηριστικό που ξεχωρίζει τους καρστικούς υδροφόρους είναι το σύστημα αγωγών τους, το οποίο διέπεται από υψηλής ταχύτητας ροή και χαμηλό συντελεστή αποθηκευτικότητας. Το δίκτυο των αγωγών λειτουργεί ορισμένες φορές ως οριακή συνθήκη για τους κόκκους (matrix) και τις διακλάσεις (fractures) του πετρώματος. Το νερό μπορεί να ρέει στους αγωγούς είτε μέσω αγωγών σε ελεύθερη επιφάνεια ενός ανοικτού καναλιού λόγω βαρύτητας, είτε μέσω σωλήνων υπό πίεση. Και οι δύο ροές ενδέχεται να συμβαίνουν σε διαφορετικές απολήξεις ενός αγωγού. Η σταθερή ροή του ανοικτού αγωγού περιγράφεται από την εξίσωση Manning:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (1.5)$$

Όπου  $n$  είναι ο συντελεστής τραχύτητας Manning,  $R$  είναι η υδραυλική ακτίνα του αγωγού [L] και  $S$  είναι η κλίση του καναλιού [L/L]. Στον ανοιχτό αγωγό το νερό κινείται είτε σε καθεστώς στρωτής ροής είτε σε καθεστώς τυρβώδους ροής. Για τυρβώδη ροή μέσω αγωγού η εξίσωση Darcy-Weisbach χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η σταθερή ροή (Thraillkill, 1968):

$$Q = \frac{2\pi g^{0.5} r^{2.5}}{f^{0.5}} (i)^{0.5} = K' A_c \sqrt{i} \quad (1.6)$$

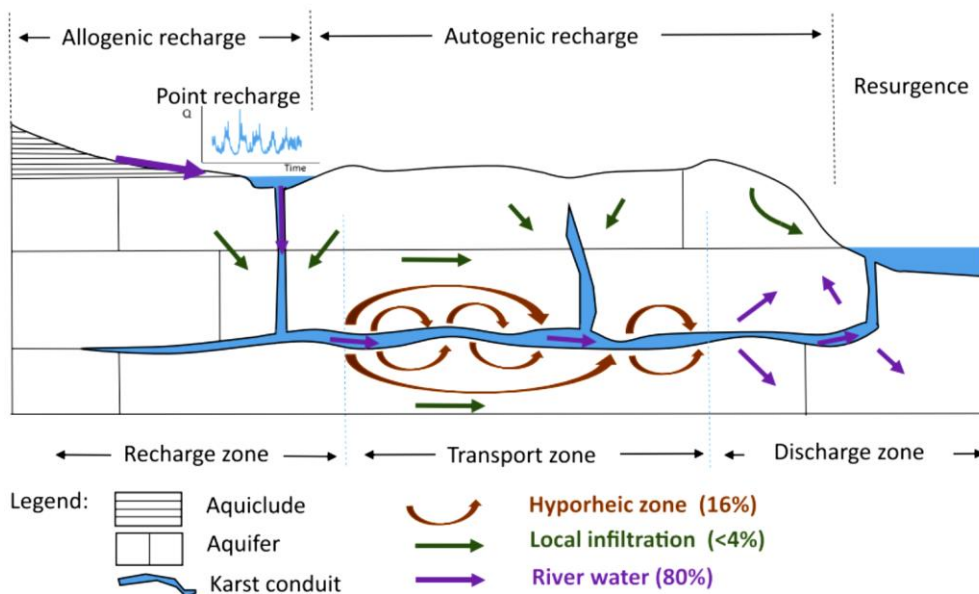
Όπου  $f$  είναι ο εμπειρικός συντελεστής τριβής Darcy-Weisbach,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας [ $L T^{-2}$ ],  $r$  η ακτίνα [L],  $i$  η υδραυλική κλίση,  $A_c$  η επιφάνεια εγκάρσιας διατομής [ $L^2$ ] και  $K' = 2g^{0.5} r^{0.5} / f^{0.5}$  είναι η ενεργή υδραυλική αγωγιμότητα της τυρβώδους ροής [ $L T^{-1}$ ], με τυπικές τιμές από 1 έως 10 m/s (Sauter et al., 2006). Υπό συνθήκες τυρβώδους ροής, η ροή στους αγωγούς είναι μία συνάρτηση της τετραγωνικής ρίζας της υδραυλικής κλίσης (σε αντίθεση με τις στρωτές ροές στους κόκκους και τις διακλάσεις, όπου η ροή ήταν ανάλογη της κλίσης).

Ο αριθμός Froude ( $Fr$ , ο λόγος της δύναμης αδράνειας προς τη βαρυτική) μικρότερος της μονάδας υποδεικνύει υποκρίσιμο καθεστώς (subcritical regime) και ο αριθμός Reynolds ( $Re$ , ο λόγος της δύναμης αδράνειας προς τη δύναμη ιξώδους) μικρότερος από 2.000 υποδεικνύει στρωτή ροή (De Marsily, 1986):

$$Fr = \frac{v}{g y_h} \quad (1.7)$$

$$Re = \frac{v D}{\nu} \quad (1.8)$$

Όπου  $v$  είναι η υπόγεια ταχύτητα του νερού [ $L T^{-1}$ ],  $y_h$  το υδραυλικό βάθος [L],  $D$  η υδραυλική διάμετρος [L] και  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες [ $L^2 T^{-1}$ ].



**Σχήμα 1.5:** Εννοιολογικό μοντέλο φυσικού εμπλουτισμού και υπόγειας ροής σε παράκτιο καρστικό υδροφόρο (Binet et al., 2017).

### 1.3 ΘΡΑΥΣΙΓΕΝΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΤΥΠΟΙ ΔΙΑΡΡΗΞΩΝ

#### 1.3.1 ΟΡΙΣΜΟΙ

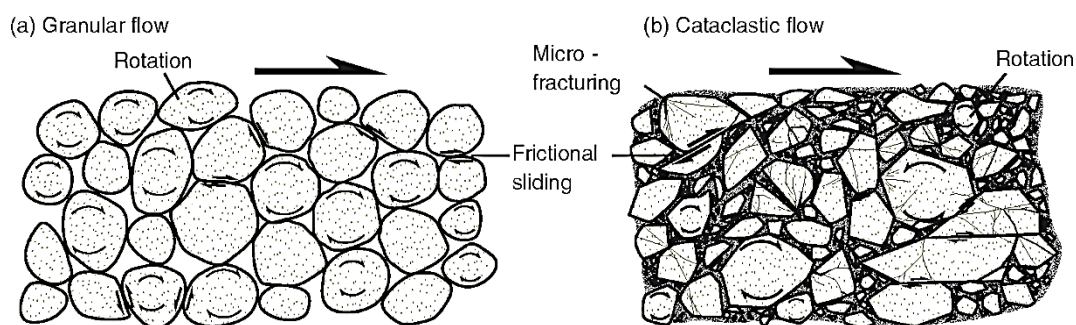
Οι θραυσιγενείς δομές, (δηλαδή οι διαρρήξεις, όπως και οι διακλάσεις και τα ρήγματα) απαντώνται σχεδόν παντού στην επιφάνεια της γης, αποτελούν κύριο χαρακτηριστικό της παραμόρφωσης του ανώτερου φλοιού και σχηματίζονται σε περιοχές όπου οι τάσεις που εξασκούνται στα πετρώματα υπερβαίνουν το όριο αντοχής τους (Παπανικολάου et al., 2012).

Από τη στιγμή που οι τάσεις (differential stress) σε αδιάρρηκτο πέτρωμα υπερβούν ένα συγκεκριμένο όριο, το πέτρωμα συσσωρεύει μόνιμη παραμόρφωση. Αν βρισκόμαστε στο θραυσιγενές καθεστώς παραμόρφωσης –αποκαλείται και καθεστώς τριβής- (brittle or frictional regime) το πέτρωμα θα παραμορφωθεί με διαρρήξεις (fractures), δεδομένου ότι έχει φθάσει το όριο αντοχής του. Κατά τη διάρκεια της θραύσης και της δημιουργίας των διαρρήξεων, οι κόκκοι σπάνε και αναδιοργανώνονται και η παραμόρφωση (με την έννοια της μετατόπισης) περιορίζεται σε συγκεκριμένες επιφάνειες ή ζώνες. Άρα λοιπόν (Παπανικολάου et al., 2012):

*Το θραυσιγενές καθεστώς χαρακτηρίζει τις περιπτώσεις εκείνες όπου οι φυσικές συνθήκες προάγουν θραυσιγενείς μηχανισμούς παραμόρφωσης, όπως ολίσθηση τριβής ανάμεσα στις επιφάνειες των κόκκων, περιστροφή των κόκκων και διάρρηξη των κόκκων.*

Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι σημαντικό να καθορίσουμε το βαθμό διάρρηξης ενός παραμορφωμένου πετρώματος, οπότε απαιτείται μια διάκριση ανάμεσα στη θραυσιγενή παραμόρφωση που περιλαμβάνει ή όχι διάρρηξη του πετρώματος. Θραυσιγενής παραμόρφωση (ή αλλιώς παραμόρφωση τριβής), χωρίς τη δημιουργία διαρρήξεων λαμβάνει χώρα σε χαμηλής συνοχής πορώδη πετρώματα και ιζήματα (εδάφη). Σε τέτοια πετρώματα

και ιζήματα η ολίσθηση τριβής λαμβάνει χώρα ανάμεσα στα όρια των κόκκων και το κενό των πόρων επιτρέπει στους κόκκους να κινούνται ο ένας σε σχέση με τον άλλον (με μετάθεση ή περιστροφή). Η διαδικασία αυτή αποκαλείται ροή κόκκων ή σωματιδίων (granular or particular flow). Καθώς βρισκόμαστε πάντα στο πεδίο της θραυσιγενούς παραμόρφωσης, η ολίσθηση ανάμεσα στα όρια των κόκκων χαρακτηρίζεται από τριβή και έτσι ο μηχανισμός αποκαλείται ολίσθηση τριβής (frictional sliding) (Παπανικολάου et al., 2012).



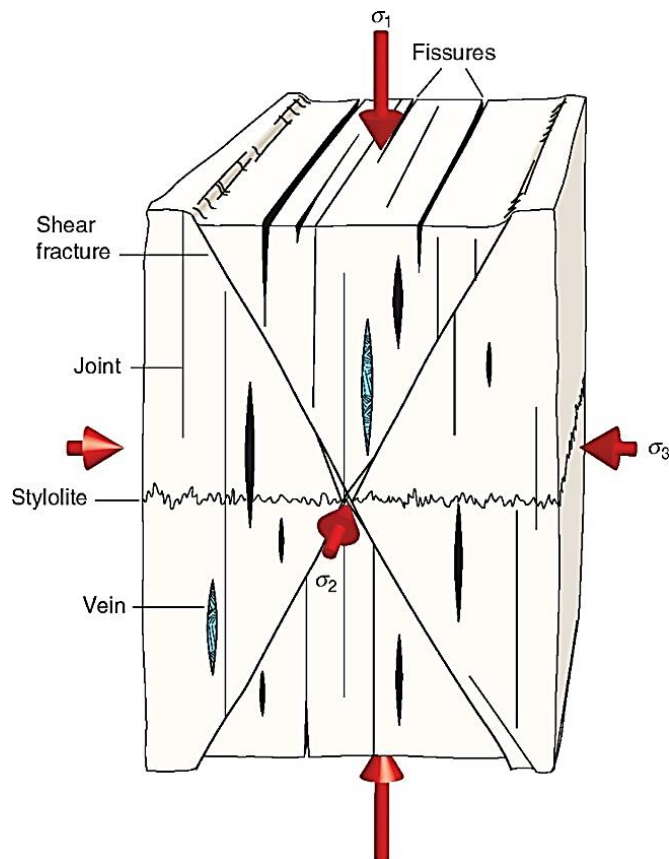
**Σχήμα 1.6:** (a) Η ροή των κόκκων είναι συνήθης σε παραμόρφωση ελάχιστου βάθους πορωδών πετρωμάτων και ιζημάτων, (b) σε αντίθεση με την κατακλαστική ροή που λαμβάνει χώρα κατά την παραμόρφωση συνεκτικών ιζηματογενών πετρωμάτων ή μη-πορωδών πετρωμάτων (Fossen, 2010).

Η διάρρηξη και ο θρυμματισμός των κόκκων, σε συνδυασμό με την ολίσθηση τριβής ανάμεσα στους κόκκους, αποκαλείται κατάκλαση. Έντονη κατάκλαση λαμβάνει συνήθως, χώρα σε λεπτές ζώνες, που αναπτύσσονται παράλληλα με τις επιφάνειες ολίσθησης όπου εντοπίζεται έντονη μείωση του μεγέθους των κόκκων. Πιο ήπια κατακλαστική παραμόρφωση παρατηρείται σε πιο εκτεταμένες θραυσιγενείς ζώνες. Επειδή στην περίπτωση αυτή τα θραύσματα που προέρχονται από τον θρυμματισμό των κόκκων του πετρώματος “ρέουν” κατά τη διάρκεια της διάτμησης, η διαδικασία αυτή αποκαλείται κατακλαστική ροή (Παπανικολάου et al., 2012).

### 1.3.2 ΤΥΠΟΙ ΔΙΑΡΡΗΞΕΩΝ

Διάρρηξη αποκαλείται κάθε επίπεδη (ή σχεδόν επίπεδη) ασυνέχεια η οποία είναι πολύ στενή στη μία της διάσταση, σε σχέση με τις άλλες δύο και σχηματίζεται από την επιβολή εξωτερικών (π.χ. τεκτονικών) ή εσωτερικών (π.χ. θερμικών ή παραμενουσών) τάσεων (Παπανικολάου et al., 2012). Οι διαρρήξεις αντιπροσωπεύουν ασυνέχειες τόσο ως προς το ρυθμό ή τη φορά της μετακίνησης, όσο και ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά. Κατά μήκος των ασυνεχειών αυτών τα πετρώματα ή τα ορυκτά θραύονται με αποτέλεσμα την μείωση ή την ολοκληρωτική απώλεια της συνοχής. Συχνά περιγράφονται ως επιφάνειες, αλλά ανάλογα με την κλίμακα εμφάνισης υπεισέρχεται και η έννοια του πάχους της ζώνης διάρρηξης. Οι διαρρήξεις μπορούν να διακριθούν σε (Fossen, 2010):

- Διατμητικές διαρρήξεις, όπου αντιπροσωπεύουν επιφάνειες ολίσθησης (slip surfaces), με κύριους αντιπροσώπους τα ρήγματα.
- Εφελκυστικές ή ανοικτές διαρρήξεις (extension or opening fractures), με κύριους αντιπροσώπους τις διακλάσεις (joints), στις σχισμές ή ρωγμές (fissures) και τις φλέβες (veins).
- Τις συμπιεστικές από βράχυνση ή κλειστές διαρρήξεις (contraction or closing fractures), με κύριο αντιπρόσωπο τους στυλόλιθους.



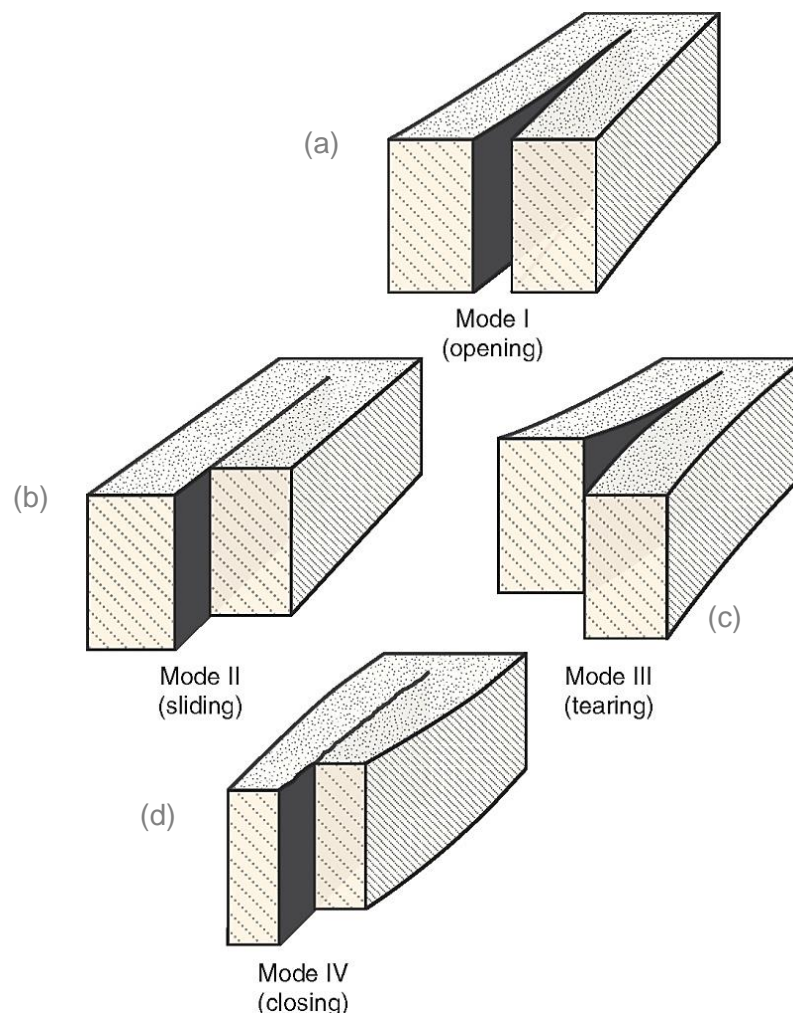
**Σχήμα 1.7:** Σχηματική απεικόνιση των διαρρήξεων με βάση τον τύπο της μετατόπισης και τα κινηματικά τους χαρακτηριστικά (Fossen., 2010).

Η εκτεταμένη έρευνα με πειραματικά μοντέλα παραμόρφωσης των πετρωμάτων εργαστηριακά, αλλά και η ανάπτυξη αριθμητικών μοντέλων οδήγησε στην περαιτέρω ταξινόμηση της μηχανικής των διαρρήξεων, με βάση την μετατόπισή τους, σε τέσσερις βασικές κατηγορίες (Fossen, 2010) (Σχήμα 1.8):

- Ρωγμές Τύπου I (Mode I), αντιπροσωπεύουν τις εκτατικές ανοικτές ρωγμές με μετατόπιση εγκάρσια ως προς αυτές (extension cracks).



- Ρωγμές Τύπου II (Mode II), αντιπροσωπεύουν διατμητικές ρωγμές με ολίσθηση παράλληλα με αυτές αλλά εγκάρσια στο όριο απόληξής τους (shear cracks). Στην ουσία τα δύο επιμέρους τεμάχια κινούνται αντίθετα μεταξύ τους χωρίς να περιστρέφονται.
- Ρωγμές Τύπου III (Mode III), αντιπροσωπεύουν διατμητικές ρωγμές με ολίσθηση παράλληλα με αυτές αλλά και παράλληλα στο όριο απόληξής τους (tear cracks). Στην περίπτωση αυτή τα δύο τεμάχια κινούνται αντίθετα και περιστρέφονται με τρόπο που θυμίζει το άνοιγμα ενός ψαλιδιού. Ενίοτε στην βιβλιογραφία αναφέρονται και ως ψαλιδωτά ρήγματα (scissor-like faults). Ο τύπος αυτός αποκαλείται και τύπος απόσχισης (tearing mode).
- Ρωγμές Τύπου IV (Mode IV), ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις κλειστές διαρρήξεις (closing cracks/anticracks), όπως π.χ. οι στυλόλιθοι.



Σχήμα 1.8: Οι Τύποι I, II, III, IV των διαρρήξεων (Fossen, 2010).

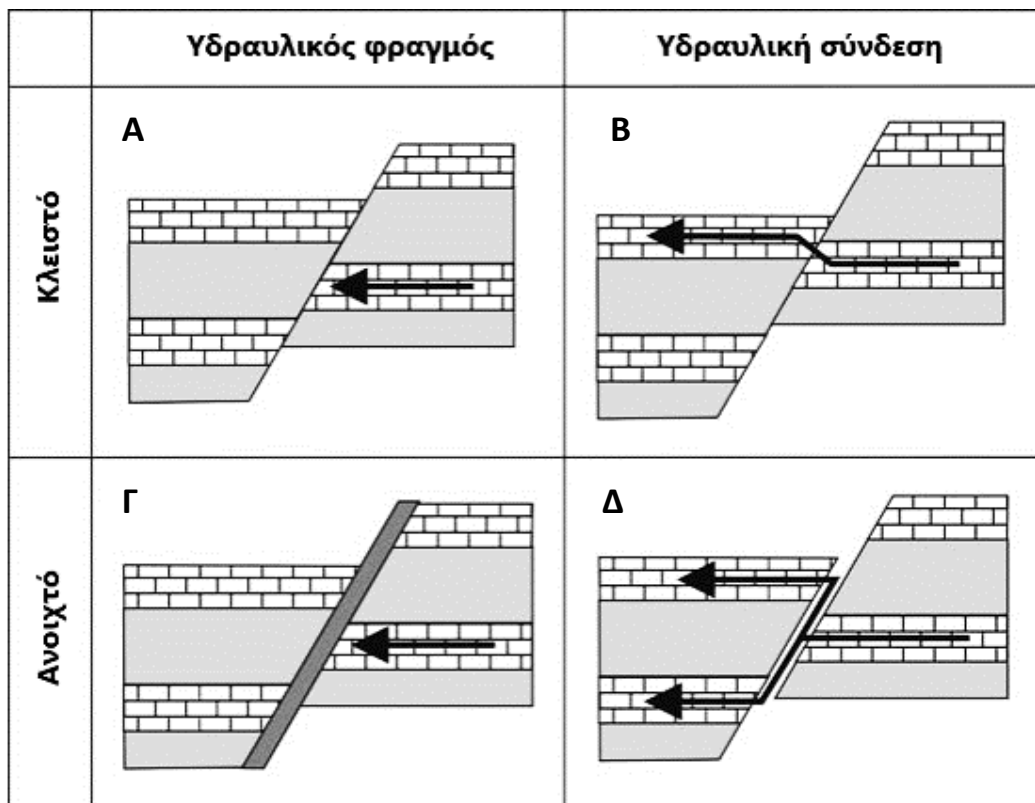
## 1.4 Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΙΓΕΝΟΥΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΑ ΚΑΡΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

### 1.4.1 ΤΑ ΡΗΓΜΑΤΑ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΚΑΡΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Τα ρήγματα αποτελούν στοιχεία υψίστης σημασίας για την καρστική υδρογεωλογία. Στην τεκτονική γεωλογία, περιγράφονται ως διαρρήξεις στα πετρώματα του φλοιού της Γης τα οποία χαρακτηρίζονται από μία κινηματική (Davis et al., 1996). Τα μικρής κλίμακας ρήγματα συμβάλλουν στο δευτερογενές πορώδες του υδροφορέα, μαζί με τις διακλάσεις, τις φλέβες και την στρωματογραφική στρώση. Οι καρστικοί αγωγοί και τα συστήματα σπηλαιών πολύ συχνά ταυτίζονται με το δίκτυο των παραπάνω θραυσιγενών δομών. Τα ρήγματα μεγάλης μετατόπισης είναι ικανά να καθορίσουν τα εξωτερικά όρια και την εσωτερική γεωμετρία του καρστικού συστήματος (Audra 1994, Häuselmann et al. 1999, Toussaint 1971). Η υδρογεωλογική επιρροή των ρηγμάτων εξαρτάται από τρεις παράγοντες: (1) το άνοιγμα του επιπέδου, (2) την ύπαρξη και διαπερατότητα του υλικού πλήρωσης του ανοίγματος και (3) την μετατόπιση του επιπέδου (Herold et al. 2000).

- Τα «κλειστά» (μικρό άνοιγμα) ρήγματα είναι ικανά να δημιουργήσουν ένα υδραυλικό φραγμό ανάμεσα σε ένα υδροπερατό και αδιαπέρτο σχηματισμό (Σχήμα 1.10Α).
- Ωστόσο δύναται να συνδέσουν ακόμη διαφορετικούς υδροφόρους εάν το άλμα του ρήγματος καταφέρει να ξεπεράσει το πάχος του ενδιάμεσου στεγανού πετρώματος (Σχήμα 1.10Β).
- Τα «ανοιχτά» ρήγματα λειτουργούν συχνά ως ένας υδραυλικός φραγμός εφόσον το υλικό πλήρωσης αποτελείται από υδατοστεγανούς σχηματισμούς (π.χ. άργιλος, κρυσταλλικές φλέβες ή τεκτονικά λατυποπαγή και επανακρυσταλλωμένα πετρώματα)(Σχήμα 1.10Γ).
- Αντιθέτως, εάν το υλικό πλήρωσης του ανοίγματος δεν υφίσταται ή αποτελείται από υψηλής περατότητας σχηματισμούς τότε, δημιουργείται μία υδραυλική κυκλοφορία του ρευστού κατά μήκος όλη της υδροστρωματογραφικής ακολουθίας (Σχήμα 1.10Δ) (Goldscheider & Drew D, 2007).

Τα κανονικά ρήγματα μικρής κλίσης (detachment) δημιουργούν τεκτονικά καλύμματα τα οποία είναι ικανά να οδηγήσουν σε πολλαπλασιασμό της υδροστρωματογραφικής ακολουθίας (Wildberger, 1996).



**Σχήμα 1.9:** Υδραυλική επικοινωνία ασβεστολίθων-μαργών διαμέσου κανονικών ρηγματών. Ανάλογα από την μετατόπιση, τα “κλειστά” ρήγματα μπορούν (A) να δημιουργήσουν υδραυλικό φραγμό ή (B) να συνδέσουν διαφορετικούς υδροφορείς. Η παρουσία και η περατότητα του υλικού πλήρωσης στα “ανοιχτά” ρήγματα λειτουργεί (Γ) ως υδραυλικός φραγμός ή (Δ) συνδέει αρκετούς υδροφορείς. Παρόμοια σχήματα μπορούν να κατασκευαστούν και για άλλους τύπους ρηγματών (Goldscheider & Drew D, 2007, ίδια επεξεργασία).

#### 1.4.2 ΟΙ ΔΙΑΚΛΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΚΑΡΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Οι διακλάσεις είναι διαρρήξεις χωρίς ιδιαίτερη κινηματική και είναι αποτέλεσμα της θραυσιγενούς παραμόρφωσης των πετρωμάτων, λόγω των τεκτονικών τάσεων, ενώ τα επίπεδα της στρώσης (bedding planes) διαχωρίζονται σε επιμέρους στρώματα ιζηματογενών πετρωμάτων (Pollard et al., 2005). Ο τεκτονικός και στρωματογραφικός διαχωρισμός των επιφανειών είναι υψίστης σημασίας για την υπόγεια ροή και την ανάπτυξη του καρστ στα ανθρακικά πετρώματα. Οι συστηματικές τεκτονικές διακλάσεις συχνά παρουσιάζονται κάθετες ή κεκλιμένες στα επίπεδα στρώσης και έχουν την τάση να διαμορφώνουν ένα σιγμοειδές σχήμα. Όσο αυξάνει το βάθος οι διακλάσεις και η στρώση τείνουν να γίνουν ολοένα και πιο κλειστές (Goldscheider & Drew D, 2007). Ωστόσο, η παρουσία ανοιχτών διαρρήξεων μπορεί να υπάρξει και σε μεγάλα βάθη κυρίως σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από εφελκυστικές τάσεις, οι οποίες ευνοούν την εις βάθος ανάπτυξη των υπόγειων καρστικών συστημάτων (Van Der Pluijm et al., 2003) και προσδιορίζουν την ανισοτροπία και την υψηλή ετερογένεια των καρστικών συστημάτων (Goldscheider & Drew D, 2007).

Στην υδρογεωλογία, όλα τα επίπεδα ασυνέχειας όπως τα επίπεδα στρώσης, οι διακλάσεις και τα ρήγματα συχνά ομαδοποιούνται με τον όρο *διαρρήξεις*. Η υδρολογική λειτουργία μίας

τρισδιάστατης διάρρηξης εξαρτάται από παράγοντες όπως: ο προσανατολισμός στον χώρο και η έκταση των επιπέδων διαχωρισμού, η πυκνότητά τους, ο βαθμός της διασύνδεσης μεταξύ γειτονικών διαρρήξεων, το πλάτος του ανοίγματος, την τραχύτητα και την παρουσία υλικού πληρώσεως (Witthüser. 2002).

Η συχνότητα, η έκταση και το άνοιγμα των διακλάσεων στα ανθρακικά πετρώματα μπορεί να διαφέρει αρκετές τάξεις μεγέθους και φαίνεται να σχετίζεται με το πάχος των στρωμάτων. Οι λεπτοστρωματώδεις ανθρακικοί σχηματισμοί τείνουν να παρουσιάζουν πυκνό δίκτυο διαρρήξεων, το οποίο όμως χαρακτηρίζεται από μικρή έκταση και άνοιγμα, γι' αυτό το λόγω δεν παρουσιάζουν έντονα φαινόμενα διάλυσης. Στους παχυστρωματώδεις ανθρακικούς σχηματισμούς, οι διαρρήξεις είναι διασκορπισμένες, συνεχείς και χαρακτηρίζονται από μεγάλα ανοίγματα, γεγονός που ευνοεί την υπόγεια κυκλοφορία του νερού και κατ' επέκταση της καρστικοποίησης (Goldscheider & Drew D, 2007).

## 1.5 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Το μοντέλο αποτελεί ένα εξειδικευμένο εργαλείο έρευνας, παρέχοντας τη δυνατότητα της προσέγγισης ενός φυσικού φαινομένου που μεταβάλλεται στο χώρο και στον χρόνο. Είναι χρήσιμα σε μελέτες πρόβλεψης, αναγνώρισης αλλά και ερμηνείας (Faust R. et al, 1980).

Στα αρχικά στάδια τα μοντέλα βασίζονταν σε αναλυτικές επιλύσεις εξισώσεων και ήταν απαραίτητο να γίνουν ορισμένες πολύ απλουστευμένες παραδοχές. Τα σύγχρονα μοντέλα βασίζονται σε αριθμητικές επιλύσεις, επωφελούμενα της προόδου της υπολογιστικής θεωρίας. Η βέλτιστη προσέγγιση για να την επίλυση των εξισώσεων ροής ή μεταφοράς βασίζεται κυρίως στα διαθέσιμα δεδομένα, τον κύριο μηχανισμό ροής (κοκκώδης, διακλάσεων, αγωγών) και τον στόχο μοντελοποίησης (διαχείριση πόσιμου νερού, υπόγεια ροή ή μεταφορά ρύπων) (Teutsch G. et al, 1998).

Τα κύρια χαρακτηριστικά των μοντέλων είναι (Prickett A., 1979) τα εξής:

- η δυνατότητά τους να λύνουν υπερβολικά σύνθετα προβλήματα ροής των υπόγειων νερών,
- η ευκολία διάθεσής τους σε οποιονδήποτε, που ασχολείται με τα υπόγεια νερά, χωρίς κανένα περιορισμό,
- η δυνατότητα μεταβίβασης, με πολύ απλό τρόπο μέσω των Η/Υ, της εμπειρίας που έχει αποκτηθεί σε ένα ευρύ φάσμα ανθρώπων, συμβάλλοντας έτσι στην επίλυση των ιδιαίτερων προβλημάτων που αντιμετωπίζουν.

Για την εφαρμογή ενός αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης των υπόγειων νερών ακολουθούνται τα στάδια (Anderson et al. 1992, National Research Council 1990, Ράπτη 1995, από Καλλιώρας, 2015):

- καθορισμός του σκοπού εφαρμογής του μοντέλου,
- προσδιορισμός του εννοιολογικού μοντέλου, που αναφέρεται στον καθορισμό, με βάση τα δεδομένα υπαίθρου, των υδρογεωλογικών ενοτήτων, του τύπου των

υδροφόρων στρωμάτων, των υδραυλικών παραμέτρων, των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του υδροφορέα, των οριακών συνθηκών,

- επιλογή της κυρίαρχης εξίσωσης και του υπολογιστικού προγράμματος,
- σχεδιασμός του μοντέλου, που περιλαμβάνει το σχεδιασμό του κανάβου, την επιλογή των βημάτων χρόνου, τον προσδιορισμό των αρχικών και οριακών συνθηκών και την εισαγωγή στον αριθμητικό κώδικα των υδρολογικών δεδομένων και υδρογεωλογικών παραμέτρων,
- ρύθμιση του μοντέλου, με την οποία γίνεται επεξεργασία των δεδομένων υπαίθρου που έχουν εισαχθεί στον αριθμητικό κώδικα, ενώ χρησιμοποιούνται κυρίως δύο τεχνικές: (i) η τεχνική δοκιμής και σφάλματος που αποτελεί μια διαδικασία επαναληπτικού τύπου με διαδοχικές τροποποιήσεις των παραμέτρων του μοντέλου και κατά περίπτωση και των αρχικών συνθηκών μετά από κάθε επίλυση του προγράμματος (Freyberg 1988, Maclay et al. 1988, Peters 1987), (ii) η αυτόματη αντιστροφή με τη χρήση των μοντέλων αντιστροφής που μπορούν να προσδιορίσουν και τροποποιήσουν τις υδραυλικές παραμέτρους με αυτόματες διαδικασίες (Carrera J., 1988, Carrera J. et al., 1986a, Peck A. et al. 1988),
- επαλήθευση του μοντέλου, όπου προσδιορίζεται η δυνατότητα του μοντέλου να προσομοιάσει την υδροδυναμική κατάσταση του συστήματος μελέτης,
- εφαρμογή του μοντέλου, με σκοπό την ερμηνεία και την πρόβλεψη της εξέλιξης του συστήματος στο χρόνο και στο χώρο ή την ανάλυση των υπόγειων ροών στην περιοχή μελέτης,
- παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

### 1.5.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ

Λόγω της μεγάλης ετερογένειας και ανισοτροπίας των υδραυλικών παραμέτρων στα καρστικά συστήματα, ο προσδιορισμός της κατανομής τους στο σύστημα προσεγγίζεται πάντα με εννοιολογικά και αριθμητικά μοντέλα (Ghasemizadeh R. et al, 2012). Υπάρχουν δύο τρόποι προσέγγισης των καρστικών συστημάτων: τα ενιαία χωρικά μοντέλα (spatially lumped models) και τα κατανεμημένα χωρικά (spatially distributive models).

Τα ενιαία χωρικά μοντέλα προσομοιώνουν την καθολική υδραυλική, την φυσική ή χημική απόκριση εξόδου του υδροφόρου (π.χ. εκφόρτιση πηγής, συγκεντρώσεις στα ύδατα εξόδου) σε σχέση με την τροφοδοσία της υπόγεια λεκάνης απορροής (Sauter et al. 2006). Οι χωρικές διαφοροποιήσεις στα μοτίβα ροής των υπόγειων υδροφόρων δεν λαμβάνονται υπόψιν, αφού το μοντέλο αντιλαμβάνεται τον υδροφόρο σαν μία ενότητα. Τα ενιαία παραμετρικά μοντέλα (lumped-parameter models) περιλαμβάνουν μαθηματικές αναλύσεις των χρονικών ή χημικών μεταβολών στις πηγές εκφόρτισης για την καλύτερη κατανόηση του συνολικού υπόγειου υδατικού ισοζυγίου καθώς και θεμελιώδεις πληροφορίες για την υδραυλική συμπεριφορά ολόκληρου του καρστικού συστήματος. Τα ενιαία παραμετρικά μοντέλα περιλαμβάνουν λίγες ρυθμιστικές παραμέτρους και αγνοούν την ετερογένεια (κάνοντας την διαδικασία της βαθμονόμησης γρηγορότερη), μη μπορώντας να δώσουν πληροφορίες για

τις υδραυλικές παραμέτρους του καρστ, τη διεύθυνση ροής και την ταχύτητα. Χρησιμοποιούνται, κατά βάση, για την μετατροπή των στοιχείων εισόδου (εισροές) σε στοιχεία εξόδου (εκφορτίσεις) επιλύοντας γραμμικές διαφορικές εξισώσεις, αφού η ροή και η μεταφορά μέσα στα κελιά δεν υπολογίζεται. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι η μικρή απαίτηση για δεδομένα, διότι οι πραγματικές υδραυλικές παράμετροι και η κατανομή των υδραυλικών φορτίων δεν χρειάζεται να έχουν καθοριστεί πειραματικά (Ghasemizadeh R. et al, 2012).

Τα καταναμημένα μοντέλα διακρίνονται στην περιοχή του μοντέλου με ένα κλάσμα που αποτελείται από ομοιογενείς υποενότητες. Στην κάθε υποενότητα ορίζεται μία συγκεκριμένη υδραυλική ιδιότητα (παράμετρος) και προσδιορίζονται οι οριακές συνθήκες του μοντέλου, οι οποίες μπορεί να μεταβάλλονται χρονικά. Τα καταναμημένα μοντέλα χειρίζονται και επιλύουν αριθμητικές διαφορικές εξισώσεις ροής και μεταφοράς. Η μεγάλη πρόκληση που μπορεί να αντιμετωπίσει κάποιος στα καταναμημένα μοντέλα είναι ο τρόπος που θα προσεγγίσει την υψηλή χωρική ετερογένεια (κόκκοι, διακλάσεις, αγωγοί) των καρστικών υδροφορέων. Βάσει βιβλιογραφίας υπάρχουν αρκετοί τρόποι προσέγγισης του παραπάνω προβλήματος κάποιες από τις οποίες συνοψίζονται παρακάτω Πίνακα 1.1.

**Πίνακας 1.1:** Διαφορετικές ονομασίες για τις προσεγγίσεις ενιαίων και καταναμημένων μοντέλων (Ghasemizadeh et al., 2012).

<b>Modeling approach</b>	<b>Other names</b>	<b>Type</b>
Equivalent porous medium approach (EPM)	Single continuum porous equivalent approach (SCPE)	Distributed
	Heterogeneous continuum approach	
	Distributed parameter approach	
	Smeared conduit approach	
	Single continuum approach	
Double porosity model (DPM)	Double continuum approach (DC)	Distributed
	Double Continuum porous equivalent approach (DCPE)	
Discrete fracture network approach (DFN)	Parallel plate model	Distributed
	Two types:	
	Discrete singular fracture set approach (DSFS)	
	Discrete multiple fracture set approach (DMFS)	
Discrete channel network approach (DCN)	Discrete conduit network approach (DCN)	Distributed
Hybrid model (HM)	Combined discrete-continuum approach (CDC)	Distributed
	Combined single continuum-discrete fracture set approach (SCPE-DSFS)	
Hydrograph-chemograph analyses	Single event methods	Lumped
Linear storage models	Rainfall-discharge models	Lumped
	Time series analyses	
	Box models	
Soft computing methods	Computationally intelligence methods	Lumped

## 1.5 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η εκτίμηση της επίδρασης των τεκτονικών συνθηκών, με τη μορφή διαρρήξεων, στο προσομοιωμένο καρστικό μοντέλο της περιοχής μελέτης. Χρησιμοποιείται το υπάρχον μοντέλο από τον Rouliaris (2019) το οποίο αφορά τον καρστικό υδροφόρο, και προσαρμόζεται στις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής. Για την εγκυρότητα των παραμέτρων (διαρρήξεων) συλλέχθηκαν δεδομένα υπαίθρου της τεκτονικής αλλά και βιβλιογραφικά δεδομένα, τα οποία ταξινομήθηκαν με βάση τα γεωδυναμικά στοιχεία της περιοχής μελέτης. Ακολούθως, το μητρικό μοντέλο αναδιαμορφώνεται σε κώδικα MODFLOW – 2005 και εισάγονται οι επιλεγμένες διαρρήξεις σε περιβάλλον ModelMuse. Τα αποτελέσματα του μοντέλου αξιολογούνται και πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας με τη μέθοδο fit independent statistics (Hill and Tiedman, 2007) σε 14 παραμέτρους του μοντέλου, οι οποίες σχετίζονται με την οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα των διαρρήξεων και των σχηματισμών. Στην ανάλυση ευαισθησίας εφαρμόζεται ο κώδικας UCODE (Poeter et al., 2014) με την βοήθεια του λογισμικού ModelMate (Banta, 2011). Οι παράμετροι (διαρρήξεις) με την υψηλότερη ευαισθησία επιλέχθηκαν για τη διαδικασία της εκτίμησης παραμέτρων, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης και διανομή νέων τιμών. Οι νέες τιμές συγκρίνονται με τις αρχικές και αξιολογούνται στο πλαίσιο μίας ρεαλιστικής προσέγγισης του εν λόγω καρστικού συστήματος.

## 1.6 ΔΙΑΡΘΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία διαρθρώνεται στα εξής Κεφάλαια:

- Στο **Πρώτο Κεφάλαιο** γίνεται μία εισαγωγή στο νερό ως φυσικό πόρο και αναλύονται τα χαρακτηριστικά των καρστικών υδροφόρων, οι οποίοι αφορούν το βασικό αντικείμενο μελέτης στην παρούσα εργασία. Στη συνέχεια αποσαφηνίζονται οι όροι της θραυσιγενούς παραμόρφωσης, οι οποίοι αποτελούν τη βάση για την κατάσταση των διαρρήξεων στο μοντέλο και σημειώνεται η σύνδεση αυτής με τα καρστικά συστήματα. Τέλος, αναλύονται τα υδρολογικά μοντέλα με έμφαση σε αυτά των καρστικών υδροφόρων.
- Στο **Δεύτερο Κεφάλαιο** περιγράφεται η περιοχή μελέτης. Αναφέρονται γενικές πληροφορίες για την ιστορική πόλη του Λαυρίου. Ενώ, στη συνέχεια αναλύονται το κλιματικά δεδομένα, η γεωλογία και η υδρολογία της περιοχής μελέτης.
- Στο **Τρίτο Κεφάλαιο** αναλύεται εκτενώς η μεθοδολογία η οποία εφαρμόστηκε στη συγκεκριμένη εργασία. Αρχικά περιγράφονται τα περιβάλλοντα τα οποία υποστήριξαν την εφαρμογή της μεθοδολογίας, δηλαδή οι κώδικες MODFLOW και UCODE και τα λογισμικά ModelMuse και ModelMate. Στη συνέχεια αναλύεται το μητρικό μοντέλο, το οποίο αναπτύχθηκε από τον Rouliaris (2019). Ακολουθεί η περιγραφή των δεδομένων υπαίθρου και η επεξεργασία του μοντέλου. Ακόμη

αναφέρονται ορισμένες βασικές έννοιες πάνω στην ανάλυση ευαισθησίας και την εκτίμηση παραμέτρων. Το κεφάλαιο κλείνει με τα αποτελέσματα του μοντέλου στα αντίστοιχα προαναφερθέντα στάδια.

- Στο **Τέταρτο Κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα, βάσει των πληροφοριών που διατίθενται για την περιοχή μελέτης. Εν συνεχεία παραβάλλονται τα ειδικά συμπεράσματα, τα οποία αφορούν τη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται και τις παραδοχές που οφείλουν να γίνουν, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

### 2.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΛΑΥΡΙΟΥ

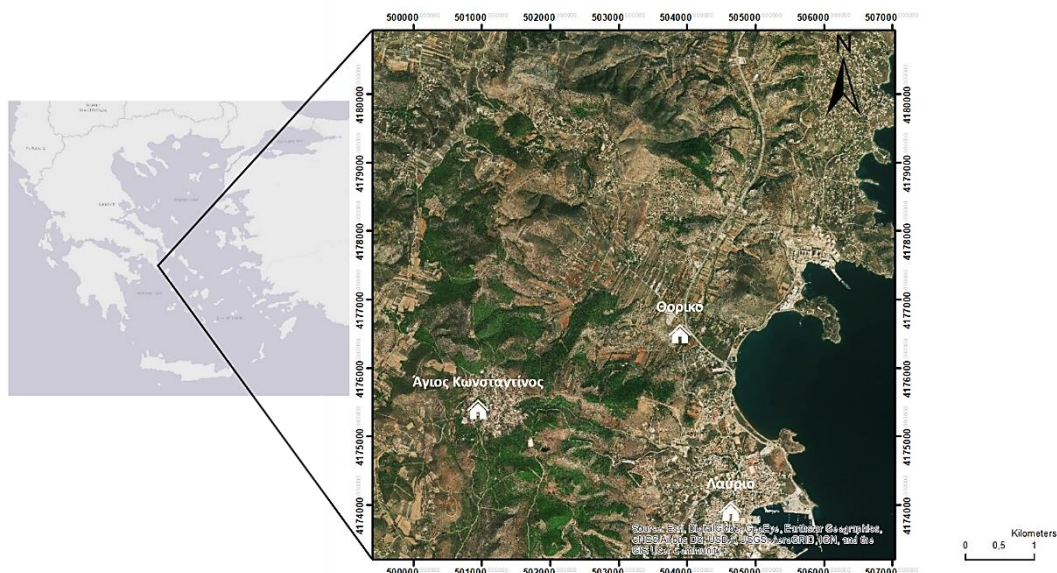
Η πόλη του Λαυρίου βρίσκεται στη νοτιοανατολική ακτή της Αττικής χερσονήσου και ανήκει στον Δήμο Λαυρεωτικής. Η περιοχή μελέτης έχει έκταση περί τα 60 km<sup>2</sup> και χαρακτηρίζεται από ήπιο ανάγλυφο. Το Λαύριο, το οποίο κατά την αρχαιότητα (πριν το 1000 π.Χ.) ήταν γνωστό με την ονομασία Θορικό. Ο δήμος του Λαυρίου έχει έκταση περίπου 42.000 στρεμμάτων και πληθυσμό 7.078, σύμφωνα με την απογραφή του 2011.

Από την αρχαιότητα το Λαύριο ήταν γνωστό για τα ορυχεία μεταλλευμάτων αργύρου για κατασκευή νομισμάτων και τις Λαυρεωτικές Γλαύκες, που βοήθησαν στην ανάπτυξη του εμπορίου και των άλλων κλάδων της εθνικής οικονομίας. Κατά τον 19<sup>ο</sup> αιώνα το Λαύριο αποτέλεσε ένα από τα σημαντικότερα βιομηχανικά κέντρα του σύγχρονου ελληνικού κράτους. Το 1865 ιδρύεται η ιταλο-γαλλική μεταλλουργική εταιρία Serpieri-Roux Fressynet C.E., η οποία σύντομα έρχεται σε σύγκρουση με την ελληνική κυβέρνηση, μια σύγκρουση η οποία έγινε γνωστή ως «Λαυρεωτικό ζήτημα». Ο πληθυσμός του Λαυρίου ήταν διαφόρων κοινωνικών στρωμάτων και δημιουργήθηκε με την εισροή εργατών και άλλου προσωπικού των εταιριών από διάφορες περιοχές της Ελλάδας. Η νέα εκμετάλλευση του ορυκτού πλούτου του Λαυρίου το 19<sup>ο</sup> αιώνα άνοιξε το δρόμο για την δημιουργία μίας νέας πόλης, η οποία μέχρι τότε ήταν αδύμητη. Η κρίση στο Λαύριο επήλθε με το κλείσιμο των μεγάλων παραγωγικών μονάδων στα τέλη της δεκαετίας του '80. Αποτέλεσμα αυτού ήταν η αύξηση της ανεργίας, η οποία με την σειρά της οδήγησε τους βιομηχανικούς εργάτες να εγκαταλείψουν την πόλη, με αποτέλεσμα τη ραγδαία μείωση του πληθυσμού της περιοχής. Μέσα σε λίγα μόνο χρόνια τέθηκε πρόβλημα ύπαρξης της ίδιας της πόλης του Λαυρίου, ενώ τοπικοί και κεντρικοί φορείς στράφηκαν στην ανάπτυξη του λιμανιού το οποίο θα συνέβαλλε τόσο στην ανάπτυξη της περιοχής αλλά και στην αύξηση των θέσεων εργασιακής απασχόλησης. Το 1991 αποφασίστηκε η ανακατασκευή του λιμανιού ως εθνικής εμβέλειας έργου για την εξυπηρέτηση των επιβατών (επιβατικό λιμάνι) και εμπορευμάτων (εμπορικό λιμάνι) από και προς τις Κυκλάδες και το Ανατολικό Αιγαίο (Πάνου Ι. Χ., 2015).

Την σημερινή εποχή στο Λαύριο ο χώρος των μεταλλείων παραμένει ανεκμετάλλευτος ενώ δέχεται κατά καιρούς επισκέψεις από διάφορους συλλέκτες ορυκτών, σπηλαιολόγους και άλλους επιστήμονες. Το ήπιο ξηρό κλίμα που επικρατεί στην περιοχή μελέτης, είναι η αιτία της ανάπτυξης στην περιοχή παραδοσιακών γεωργικών καλλιεργειών, όπως αμπελώνες και δημητριακά, καθώς και την παραγωγή άλατος στις αλυκές της Αναβύσσου. Ταυτόχρονα η μικρή απόσταση από τις συνοικίες της πρωτεύουσας, η πολυμορφία των ακτών της – εναλλαγές ομαλών αμμωδών κολπίσκων, με απόκρημνες ακτές- και η καθαρότητα των νερών της θάλασσας, καθιστούν ανέκαθεν την περιοχή τουριστικό και παραθεριστικό πόλο έλξης. Οι σύγχρονες αυτές ανάγκες, κυρίως για δεύτερη παραθεριστική κατοικία και για τουριστικές εγκαταστάσεις οδήγησαν στην αλλαγή χρήσης της γης (Πάνου Ι. Χ., 2015).

Η συνολική ανάπτυξη της περιοχής, λοιπόν, μαζί με την επέκταση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, αύξησαν τις απαιτήσεις για πόσιμο νερό. Οι εξαντλητικές αντλήσεις των υπόγειων αποθεμάτων νερού οδήγησε στην διείδυση θαλασσινού νερού και στον αλλουβιακό υδροφόρο αλλά και στον καρστικό. Σήμερα η περιοχή υδροδοτείται από εξωτερικά αποθέματα νερού, κατά συνέπεια μέρος αυτών αποσκοπεί και στις γεωργικές

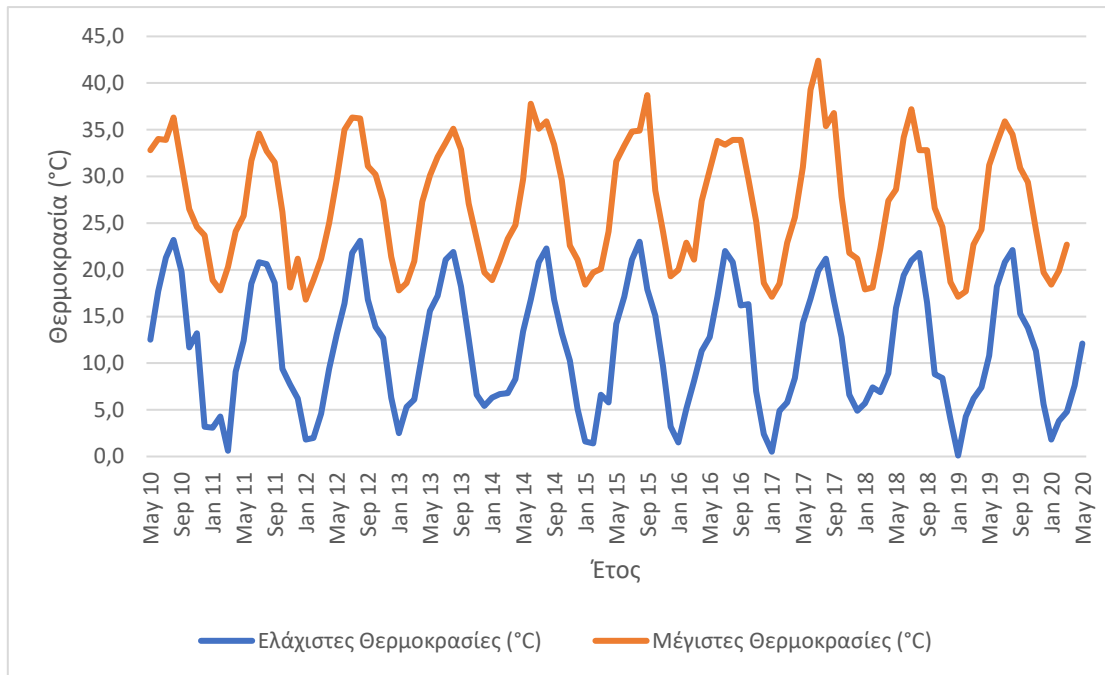
δραστηριότητες με αποτέλεσμα το τελικό προϊόν να είναι σαφώς πιο ακριβό για τον μέσο καταναλωτή (Δ.Ε.Υ.Α.ΤΗ.Λ). Συνεπώς η βελτίωση της ποσοτικής αλλά και ποιοτικής κατάστασης των υδροφόρων θα λειτουργούσε ευεργετικά, όχι μόνο, στο οικοσύστημα αλλά και στην οικονομική ανάπτυξη της περιοχής.



**Σχήμα 2.1:** Γεωγραφική τοποθεσία της περιοχής μελέτης, σε περιβάλλον ArcGIS (πηγή χάρτη: [www.esri.com/](http://www.esri.com/), ίδια επεξεργασία).

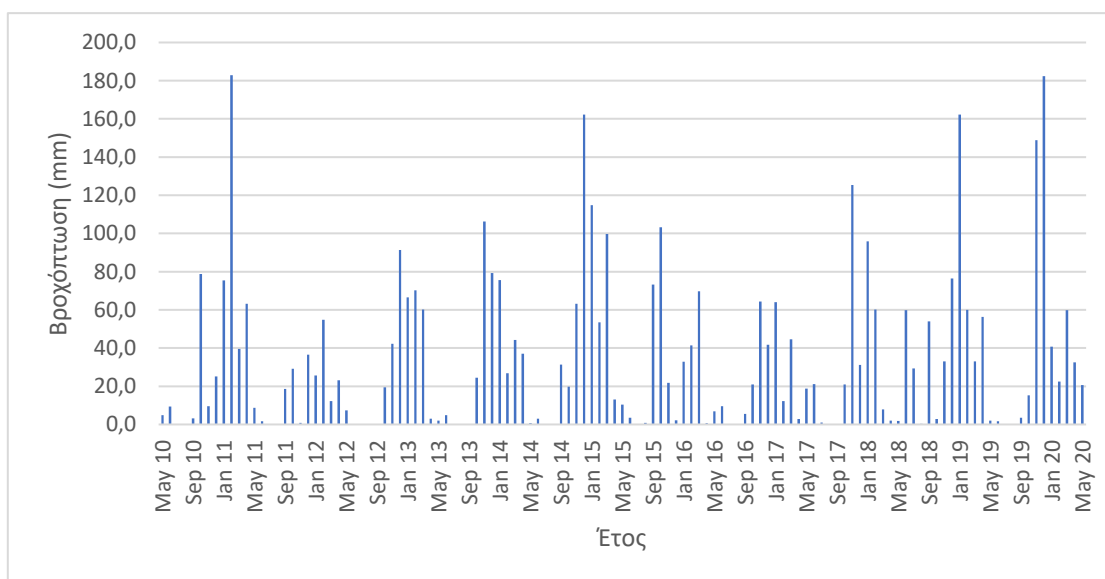
## 2.2 ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Τα κλιματικά δεδομένα συλλέγονται από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, το οποίο διαθέτει ημερήσια μετεωρολογικά δεδομένα από 01/05/2010 έως 31/05/2020. Από την ανάλυση των δεδομένων, προκύπτει μία μέση μηνιαία ελάχιστη θερμοκρασία της 10ετίας στους 11,6° C και μία μέση μηνιαία μέγιστη θερμοκρασία της 10ετίας στους 27,1° C, με τις ακραίες τιμές να καταγράφουν από 42.4° C έως 0.1° C. Τα παραπάνω στοιχεία υποδηλώνουν μεσογειακό κλίμα, με ήπιους χειμώνες και πολύ ζεστά καλοκαίρια. (Σχήμα 2.2)



**Σχήμα 2.2:** Συνδυαστικό διάγραμμα μηνιαίων ελάχιστων και μέγιστων θερμοκρασιών για την περιοχή του Λαυρίου (πηγή δεδομένων: meteo.gr, ίδια επεξεργασία).

Η μέση μηνιαία βροχόπτωση της 10ετίας είναι περί τα 34,4 mm και η μέση ετήσια 378,1 mm, αλλά η κατανομή τους είναι ανομοιόμορφη μέσα στο χρόνο με τον κύριο όγκο των βροχών να γίνεται μεταξύ του Οκτωβρίου και του Απριλίου. Αναλύοντας τα δεδομένα των βροχομετρικών γραφημάτων παρατηρείται μία μειωτική τάση μέχρι το έτος 2018, γεγονός που επιδεινώνει την υφιστάμενη ποιοτική και ποσοτική κατάσταση των υπόγειων νερών, αφού τα κατακρημνήσματα αποτελούν την κύρια πηγή τροφοδοσίας τους. Μία αισιόδοξη οπτική είναι το έτος 2019, όπου το ύψος βροχής ξεπέρασε κάθε προηγούμενη καταγραφή (Σχήμα 2.3).



**Σχήμα 2.3:** Μηνιαίες βροχοπτώσεις για την περιοχή του Λαυρίου (δεδομένα από meteo.gr, ίδια επεξεργασία).

Η εξατμισοδιαπνοή φτάνει στο μέγιστο τους μήνες Μάϊο και Σεπτέμβριο, όπως σε όλες τις περιοχές της Ελλάδας (Pararrizos et al., 2014), την ίδια περίοδο δηλαδή που οι απαιτήσεις για νερό είναι πολύ υψηλές. Η εξατμισοδιαπνοή ενισχύεται λόγω των ισχυρών ανέμων (Allen et al. 1998), όπου στην περίπτωση του Λαυρίου φθάνουν τα 40km/h (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών). Διάφορες έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί στην χερσόνησο της Αττικής (Bajocco et al. 2012; Kargas et al. 2012; Nastos et al. 2013; Moussoulis et al. 2015) για το κλίμα της, οι οποίες το κατατάσσουν ως ημίξηρο (semi-arid), μετατρέποντας το θέμα της διαχείρισης των υπόγειων υδάτων ως υψίστης σημασίας.

### 2.3 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η γεωλογία της ευρύτερης περιοχής του Λαυρίου είναι ιδιαίτερης σημασίας για πολλούς ερευνητές, οι οποίοι την μελετούν αρκετές δεκαετίες. Παρά τις προσπάθειες αυτών, δεν υπάρχει μια γενικά αποδεκτή θεωρία για την γεωλογική εξέλιξη του Λαυρίου, συνεπώς η αποτύπωσή της έγκειται στην αντίληψη του εκάστοτε μελετητή και πως αυτός προτίθεται να την προσεγγίσει. Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται μία σύνοψη της γεωλογικής και τεκτονικής δομής του Λαυρίου.

Η Νοτιοανατολική Αττική (περιοχή του Λαυρίου) βρίσκεται στο βορειοδυτικό κομμάτι του μεταμορφικού πυρήνα της Αττικο-Κυκλαδικής. Η κύρια δομή στην Νοτιοανατολική Αττική, που παρατηρείται για αρκετά τετραγωνικά χιλιόμετρα, είναι ένα σχεδόν οριζόντιο (σε κλίμακα φλοιού) όγκιμο προς θραυσιγενές (ductile-to-brittle) ρήγμα αποκόλλησης (detachment), το οποίο πιθανώς ανήκει σε ένα εσωτερικό τμήμα του Συστήματος Μετασχηματισμού των Δυτικών Κυκλάδων (West Cyclades Detachment System – WCDS) (Berger et al., 2013, Grasmann et al., 2012, Lekkas et al., 2011, Scheffer et al., 2016) και διαχωρίζει τις βασικές τεκτονοστωματογραφικές ενότητες.

Το δάπεδο (footwall) του ρήγματος αποκόλλησης (detachment) αποτελείται από την Ενότητα Καμάριζας η οποία υπέστη δύο τεκτονομεταμορφικά επεισόδια, ένα αρχικό κυανοσχιστολιθικής φάσης Υψηλής πίεσης/ Χαμηλής θερμοκρασίας (8-11kbar, 300-370°C) (Baziotis et al., 2009, Scheffer et al., 2016) και μία ανάδρομη πρασινοσχιστολιθική παραμόρφωση (4-8.5kbar, 300-450°C), με κύριες γραμμώσεις BBA-NNΔ λόγω του εφελκυσμού.

Η οποία χαρακτηρίζεται από:

- Κατώτερο Μάρμαρο Καμάριζας, με κύριες εμφανίσεις στα Νότια της Αττικής χερσονήσου ηλικίας Τριαδικού – Κάτω Ιουρασικού (Liati, 2009, Marinis & Petrascheck, 1956, Seman et al., 2017).
- Σχιστόλιθοι Καμάριζας, οι οποίοι καταλαμβάνουν ένα σημαντικό κομμάτι της Λαυρεωτικής και το πάχος τους φτάνει τα 200m (Photiades A., & Carras N. 2001). Αποτελούνται από συγκεντρώσεις χαλαζία, αλβίτη, λευκού μαρμαρυγία, χλωρίτη, επιδότου, γραφίτη, σερικήτη και λιγότερο απατίτη, ζirkονίου και ρουτιλίου (Coleman et al., 2019).

- Ανώτερο Μάρμαρο Καμάριζας, ηλικίας Τριαδικού – Κάτω Ιουρασικού (Katsikatsos 1977).

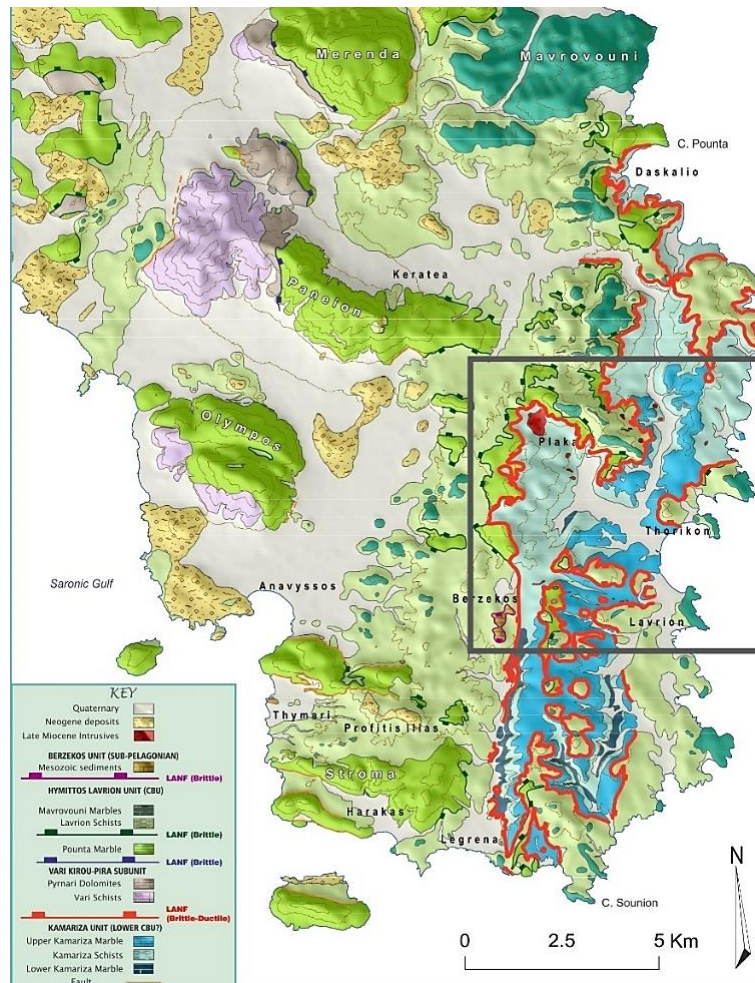
Η Ενότητα Λαυρίου (Υμηττού), βρίσκεται στην οροφή (hanging wall) του ρήγματος αποκόλλησης. Έχει υποβληθεί σε δύο τεκτονομεταμορφικά επεισόδια, ένα αρχικό Υψηλής πίεσης/ Χαμηλής θερμοκρασίας (9-13kbar, 315-370°C) κατά την συν-ορογενετική υποβύθιση και μία ανάδορμη μεταμόρφωση (6-9kbar, 280-315°C) κατά την συν-ορογενετική εκταφή (Baziotis & Mroskos, 2011, Baziotis et al., 2009; Scheffer et al., 2016) κατά το Ολιγόκαινο (Coleman et al., 2019), με γραμμώσεις κυρίως ΒΑ-ΝΔ έως Α-Δ και κοντά στον γρανοδιορίτη της Πλάκας οι ΑΒΑ-ΔΝΔ γραμμώσεις περιστράφηκαν σε Β-Ν λόγω του συν-ορογενετικού εφελκυσμού. Χαρακτηρίζεται από ένα συνονθύλευμα σχηματισμών (mélange) κυρίως μεταμορφωμένων βασικών και υπερβασικών πετρωμάτων:

- Μάρμαρο Πούντας, πρόκειται για συμπαγείς παχυστρωματώδη μάρμαρα που εμφανίζονται σε αρκετά σημεία της ΝΑ Αττικής, η επαφή τους με τα υπερκείμενα είναι είτε κανονική είτε με μικρής κλίσης κανονικά ρήγματα (LANF). Τα μάρμαρα αυτά συγκαταλέγονταν στην Ενότητα Καμάριζας, αλλά κατά Lekkas et al., 2011 τοποθετούνται στην οροφή του ρήγματος αποκόλλησης (detachment).
- Σχιστόλιθοι Λαυρίου, καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη έκταση στην ευρύτερη περιοχή του Λαυρίου και αποτελείται από μετα-ηφαιστειακά, χαλαζίτες και ασβεστιτικά μετα-ιζήματα με συγκεντρώσεις χαλαζία, αλβίτη, λευκού μαρμαρυγία, ασβεσίτη, χλωρίτη, επίδοτου, σερικήτη, γραφίτη καθώς και απατίτη, ζirkονίου και ρουτιλίου (Coleman et al., 2019).
- Μάρμαρα Μαυροβουνίου, η χαρακτηριστική τους τοποθεσία είναι στον λόφο Μαυροβούνι και βρίσκονται σε κανονική επαφή με τα υποκείμενα στρώματα της Ενότητας Λαυρίου. Είναι παχυστρωματώδη στο κατώτερο μέρος τους και λεπτοστρωματώδη στο ανώτερο, το πάχος τους δεν ξεπερνά τα 40 m.

Η τεκτονικά ανώτερη Ενότητα είναι αυτή του Μπερτζέκου, η οποία αποτελείται από Άνω Κρητιδικούς ασβεστόλιθους, πυριτόλιθους, σερπεντινίτες και συνοδά ιζήματα, πάχους 50 m. Η ενότητα αυτή μπορεί να σχετίζεται με την Υπο-Πελαγονική Ενότητα (Lekkas et al., 2011).

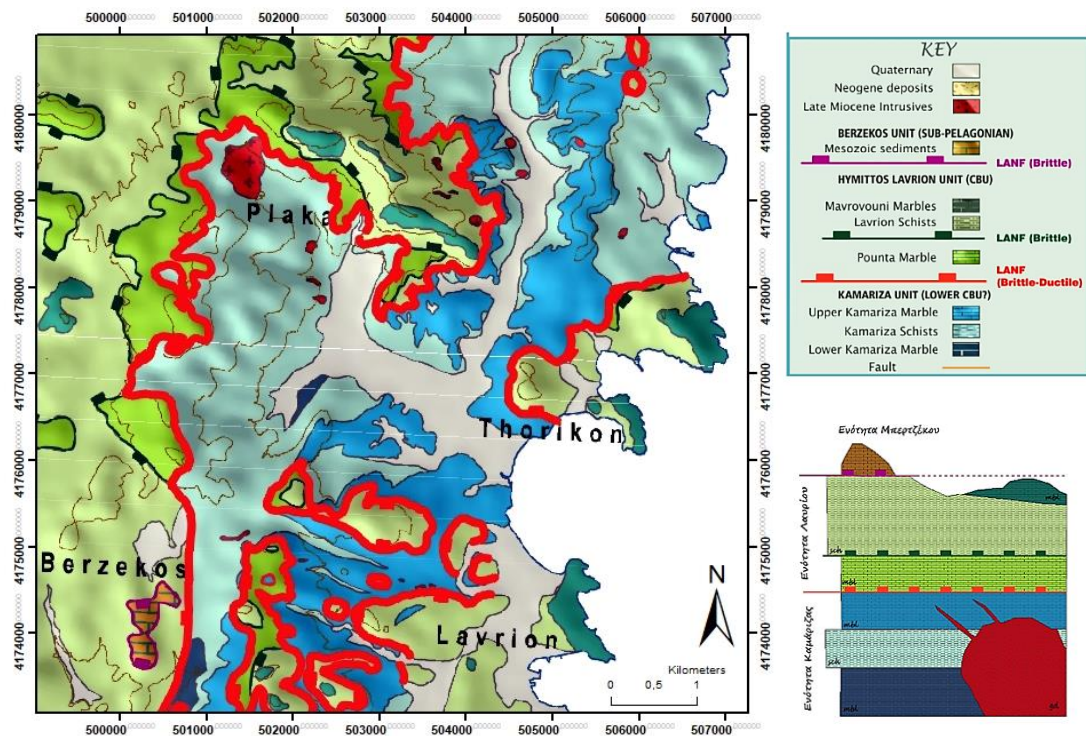
Στην περιοχή της Πλάκας, κατά το Ανώτερο Μειόκαινο υπήρξε διείσδυση μαγματικού υλικού (γρανιτικής έως γρανοδιοριτικής σύστασης) στην Ενότητας Καμάριζας. Ο γρανοδιορίτης αποτελείται κυρίως από πλαγιόκλαστο, ορθόκλαστο, βιοτίτη, χαλαζία, κεροσίλβη καθώς και απατίτη, τιτανίτη και ζirkόνιο. Η μαγματική διείσδυση είναι πηγή μεταλλοφορίας Μολύβδου-Ψευδαργύρου-Αργύρου με κύρια ορυκτά τον σιδηροπυρίτη, τον σφαλερίτη, τον γαληνίτη κ.α. (Voudouris et al., 2008; Skarpelis & Argyraki, 2009). Η ηλικία κρυστάλλωσης κατά Liati et al., 2009 είναι  $8.34 \pm 0.2$  Ma.

Τέλος, ανώτερα από όλους τους παραπάνω σχηματισμούς τοποθετούνται οι Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις.



**Σχήμα 2.4:** Γεωλογικός χάρτης της ΝΑ Αττικής (Lekkas et al., 2020), το σκουρόχρωμο πλαίσιο περικλείει την περιοχή μελέτης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η τεκτονική και παραμορφωτική εξέλιξη του ρήγματος αποκόλλησης (detachment) ή LANF (Low-Angle Normal Fault) διότι συνοδεύεται από μία μυλονιτική παραμόρφωση στους σχηματισμούς δαπέδου του, που επωθήθηκαν στις προϋπάρχουσες δομές, αλλά και τη δημιουργία ενός υπερ-μυλονίτη πάχους αρκετών δεκάμετρων. Παρουσιάζει μία γραμμωση διατομής BBA-NNA και φορά διάτμησης NNA. Σε περιοχές απομακρυσμένες από το ρήγμα αποκόλλησης, παρατηρείται γραμμωση εφελκυσμού ή/και συμπίεσης (ABA-ΔNA) και στα πετρώματα οροφής αλλά και του δαπέδου. Οι δομές αυτές δημιουργήθηκαν κατά την πρασινοσχιστολιθική φάση στην όλκιμη ζώνη διάτμησης (ductile shear zone). Βάσει θερμοχρονολογικών αναλύσεων φαίνεται ότι το ρήγμα αποκόλλησης (detachment) ήταν ενεργό κατά το Μειόκαινο, ενώ η αλλαγή του σε θραυσιγενές καθεστώς έγινε πιθανά στο Ανώτερο Μειόκαινο (Coleman et al., 2019), με παραμόρφωση συνοδευόμενη από υψηλής και χαμηλής κλίσης οριζόντια ρήγματα. Σε αυτό το στάδιο αναπτύχθηκε ένα υψηλότερο τεκτονικά ρήγμα αποκόλλησης ανάμεσα στην επαφή των Σχιστόλιθων Λαυρίου και των Μαρμάρων Πούντας (Lekkas et al, 2011).



**Σχήμα 2.5:** Εστιασμένος γεωλογικός χάρτης (Lekkas et al., 2020) της περιοχής ενδιαφέροντος (προβολή σε Transverse Mercator Greek\_Grid) και τροποποιημένη στρωματογραφική στήλη (Coleman et al., 2019).

## 2.4 ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

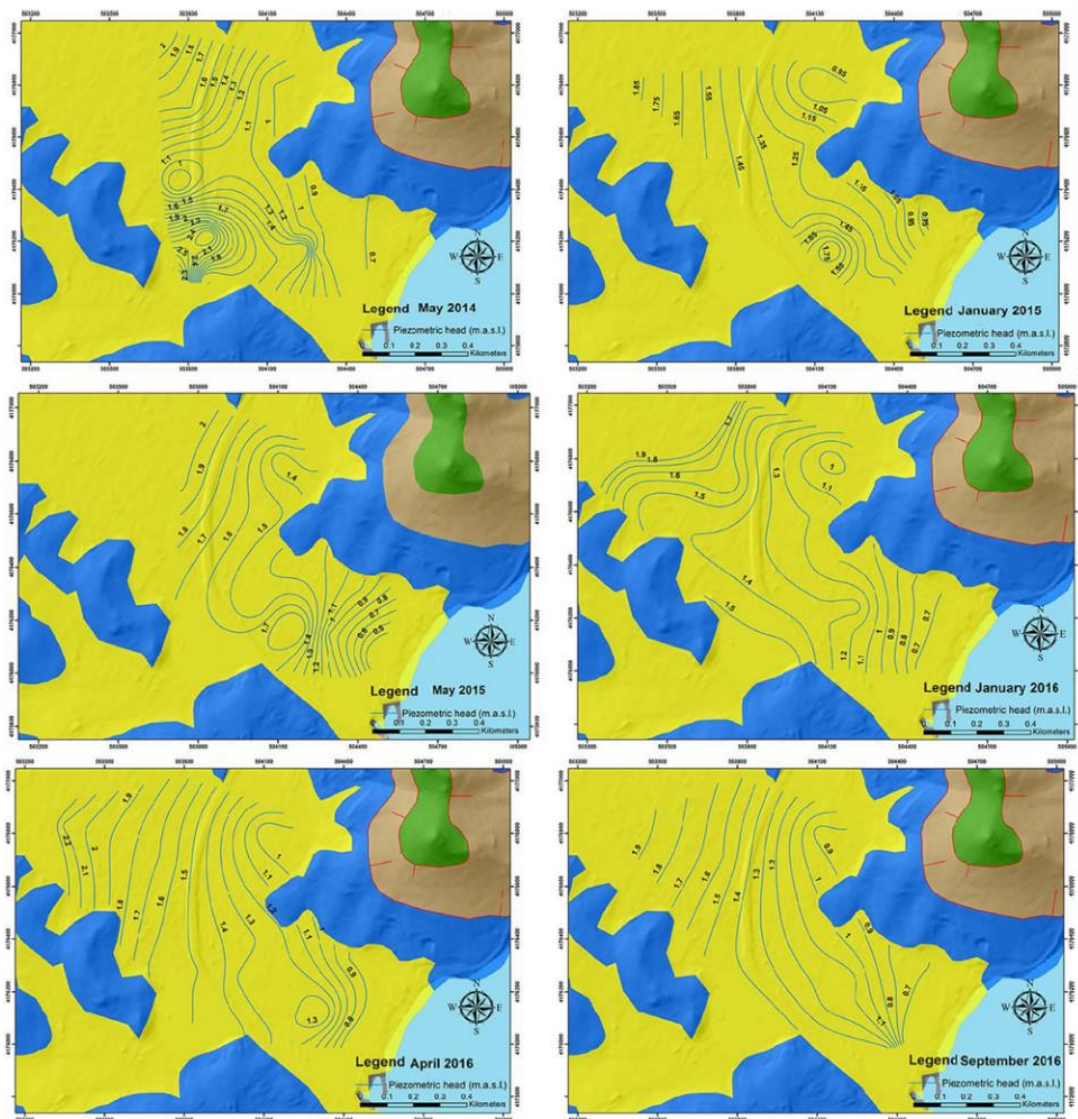
Η αναγνώριση των υδρολογικών διαδικασιών που συμβαίνει σ' ένα σύστημα, μαζί με την αλληλεξάρτηση των επιμέρους συνιστωσών του, είναι ζωτικής σημασίας για κάθε έρευνα. Έχοντας δομήσει τις βάσεις με την περιγραφή της γεωλογίας της περιοχή, οφείλουν να προσδιοριστούν και τα χαρακτηριστικά των υπόγειων υδροφόρων, για την περαιτέρω ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου που θα περιγράφει επαρκώς το φυσικό σύστημα.

### 2.4.1 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΔΑΤΩΝ

Αρχικά, δεν παρατηρείται ιδιαίτερη ανάπτυξη υδρογραφικού δικτύου στην εν λόγω περιοχή. Το κύριο ρέμα ξεκινάει από την περιοχή της Κερατέας από Βορρά κατευθυνόμενο ανατολικά, στην πορεία όμως αλλάζει κατεύθυνση ρέοντας νότια με τελικό προορισμό τον Κόλπο του Θορικού (Alexakis, 2011). Ο λόγος αυτής της αλλαγής οφείλεται πιθανά στην τεκτονική της περιοχής (Παυλόπουλος, 1997). Το ρέμα έχει εφήμερο χαρακτήρα, με περιοδικές πλημμύρες σε ισχυρές βροχοπτώσεις, αλλά κατά κύριο λόγο η ροή είναι ελάχιστη και για το λόγο αυτό δεν υπάρχουν μετρήσεις και αξιόλογες πληροφορίες.

Στην περιοχή μελέτης αναπτύσσονται δύο υπόγειοι υδροφόροι ορίζοντες, οι οποίοι αναπτύσσονται σε διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Τα χαρακτηριστικά καθώς και η υδραυλική επικοινωνία μεταξύ των υδροφορέων παρατίθενται παρακάτω.

Ο ανώτερος υδροφόρος, τοποθετείται μέσα στις Τεταρτογενείς αποθέσεις και είναι κοκκώδης. Η γενική διεύθυνση ροής είναι νοτιοανατολικά και εκφορτίζεται στον Κόλπο του Θορικού στα ανατολικά. Το πάχος του αλλοβίου σχηματισμού που φιλοξενεί τον υδροφόρο είναι σχεδόν μηδενικό στα πλάγια της κοιλάδας (όπου βρίσκεται και το γεωλογικό όριο) και μέχρι 20 m στο κέντρο. Το νερό από τις προσχώσεις υδροδοτεί ένα πολύ μικρό ποσοστό της περιοχής. Η περίοδος άντλησης είναι από τον Απρίλιο έως τον Σεπτέμβριο, ωστόσο οι ρυθμοί άντλησης αναμένεται να είναι μειωμένοι λόγω της υποβάθμισης των υπόγειων νερών (Pouliaris, 2019).



**Σχήμα 2.6:** Πιεζομετρικοί χάρτες στον αλλουβιακό υδροφόρο (Μάιος 2014 – Σεπτέμβριος 2016), απεικόνιση των υγρών και ξηρών περιόδων του υδρολογικού έτους (Pouliaris, 2019).

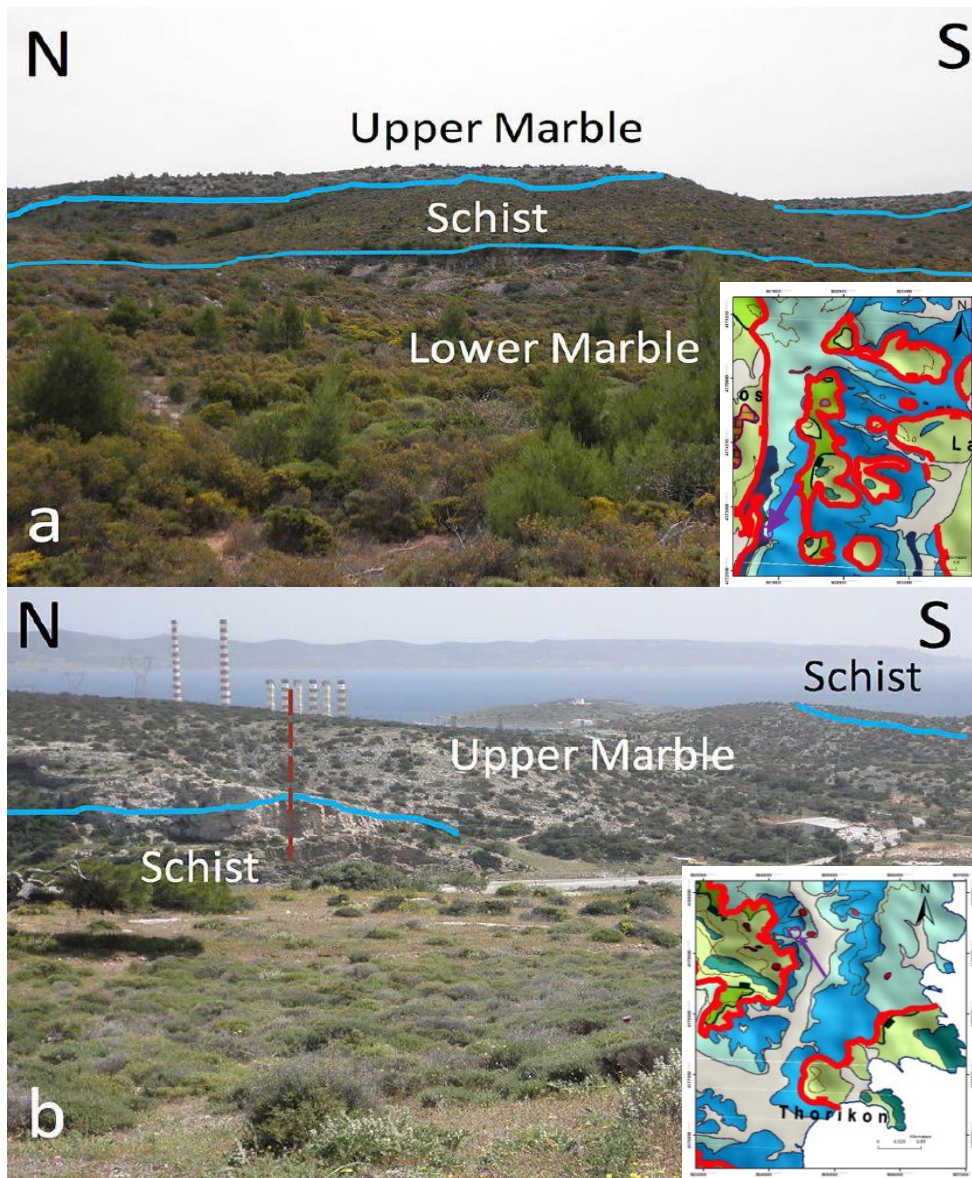


Ο κατώτερος υδροφόρος αναπτύσσεται στο Ανώτερο Μάρμαρο της Ενότητας Καμάριζας και είναι καρστικός. Υπήρξε εκτεταμένη χρήση των καρστικών νερών στο παρελθόν, αλλά η θαλάσσια διείσδυση υποβάθμισε την ποιότητά τους και πλέον χρησιμοποιείται ένα μικρό ποσοστό για άλλες χρήσεις (π.χ. άρδευση πρασίνου). Το πάχος του σχηματισμού ποικίλει, με κάποιες βιβλιογραφίες να αναφέρουν 150 – 200 m (ΙΓΜΕ, 2003, 2007). Συγκεκριμένα στην περιοχή του Λαυρίου το πάχος του υπό διερεύνηση σχηματισμού θεωρείται τουλάχιστον 50 m, από ερευνητικές γεωτρήσεις χωρίς να διεισδύσουν σε όλο το πάχος του σχηματισμού (Κουμαντάκης, 2000). Η κύρια τροφοδοσία του καρστικού υδροφόρου γίνεται από τις βροχοπτώσεις και εκφορτίζεται στην θάλασσα είτε ως διάχυτη ροή είτε σημειακά, με μικρό ρυθμό εκφόρτισης (Ρουλιάρης, 2019).

#### 2.4.2 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΟΡΙΑ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΩΡΩΝ

Τα υδρογεωλογικά όρια των υπόγειων υδροφόρων οφείλουν να είναι σαφώς ορισμένα για την καλύτερη κατανόηση των υδρολογικών συστημάτων. Στην περίπτωση του αλλουβιακού υδροφόρου τα υδρογεωλογικά όρια ταυτίζονται με τα γεωλογικά. Στην περίπτωση του καρστικού υδροφόρου τα υδρογεωλογικά όρια είναι δύσκολο να αποσαφηνιστούν. Μία προσέγγιση θεωρεί το υδρογεωλογικό (υπόγειο) όριο ίδιο με το υδρολογικό (επιφανειακό), κάποιες φορές μπορεί να ισχύει αλλά συνήθως οδηγεί σε απλοποιήσεις της υπόγειας ροής και υποτίμηση στους όγκους νερού που ανταλλάσσονται μεταξύ καρστικών και παρακείμενων συστημάτων.

Στην περίπτωση του καρστικού συστήματος του Λαυρίου, το γεγονός ότι το μάρμαρο βρίσκεται πάνω από τους σχιστόλιθους, αποτελεί ένα κυρίαρχο χαρακτηριστικό, διότι απομονώνεται υδραυλικά από τους υπόλοιπους δυνητικά υδροπερατούς σχηματισμούς (π.χ. Κατώτερο Μάρμαρο Καμάριζας). Εξίσου καθοριστικό ρόλο διαδραματίζουν οι πτυχώσεις μεγάλης κλίμακας λόγω του έντονου τεκτονισμού τις περιοχής. Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω χαρακτηριστικών συμβάλει στον καθορισμό την υδρογεωλογικής λεκάνης του καρστικού υδροφόρου. Στο βόρειο κομμάτι της περιοχής μελέτης, το όριο είναι πολύ κοντά στην είσοδο των προσχώσεων (Σχήμα 2.7). Δυτικά ο καρστικός υδροφόρος απομονώνεται σε πολλά σημεία από τους σχιστόλιθους. Στο νότιο όμως κομμάτι είναι σχεδόν αδύνατο να ακολουθηθούν οι δομές των πτυχώσεων και ο σχηματισμός εμφανίζεται σε μεγαλύτερα υψόμετρα και με μικρότερο πάχος, συνεπώς γίνεται η παραδοχή ότι το νότιο υδρολογικό όριο βρίσκεται στο κομμάτι με το ελάχιστο πάχος (Σχήμα 2.7) (Ρουλιάρης, 2019).

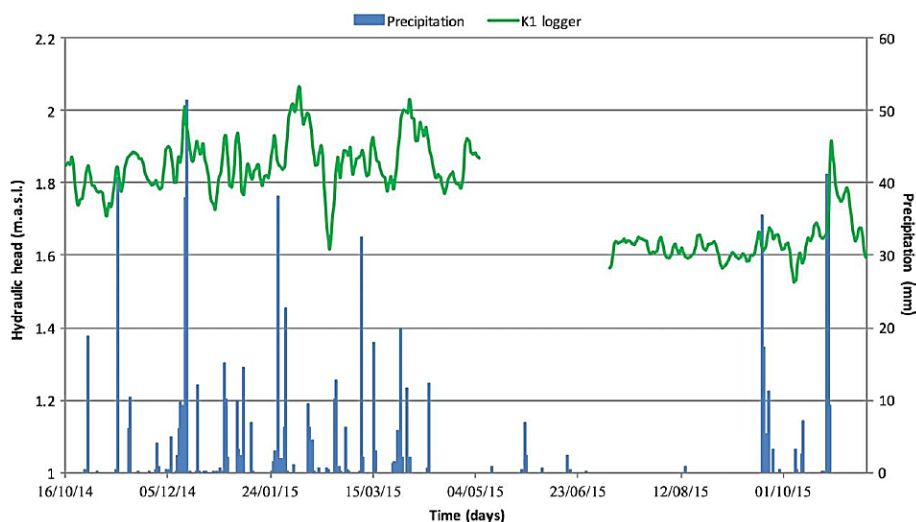


**Σχήμα 2.7:** Όρια της υδρογεωλογικής λεκάνης στην περιοχή μελέτης στα Νότια (a) και στα Βόρεια (b) τμήματα (φωτογραφίες από Rouliaris, 2019) (χάρτης Lekkas et al., 2020).

#### 2.4.3 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΣΗΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ

Η αυξομείωση της στάθμης του καρστικού υδροφόρου σε σχέση με τα επεισόδια βροχόπτωσης δείχνει άμεση απόκριση στα εν λόγω γεγονότα (Σχήμα 2.8). Η γεώτρηση παρατήρησης K1, βρίσκεται σε επιφανειακή εμφάνιση του σχηματισμού μαρμάρων και απέχει 1.5 km από τον μετεωρολογικό σταθμό. Παρατηρώντας το γράφημα είναι ευκρινές ότι για ύψος βροχής μεγαλύτερο από τα 40 mm η απόκριση του συστήματος είναι σχεδόν ακαριαία, ενώ για μικρότερα ύψη βροχής η απόκριση της στάθμης του υπόγειου νερού είναι λιγότερο ευδιάκριτη. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8 υπάρχει μία υστέρηση στο χρόνο απόκρισης από 2 έως 10 ημέρες μέχρι την συνολική συσσώρευση του νερού. Δυστυχώς, ούτε η θερμοκρασία του νερού μπορεί να δείξει αν η βροχόπτωση συμβάλλει στην τροφοδοσία

των καρστικών υδάτων, αφού η μέση θερμοκρασία τους κυμαίνεται από 21.7°C τον χειμώνα έως 22.3°C (Ρουλιάρης, 2019).



**Σχήμα 2.8:** Διακυμάνσεις υδραυλικού φορτίου σε γεώτρηση του καρστικού υδρόφωρου (K1) (Ρουλιάρης, 2019).

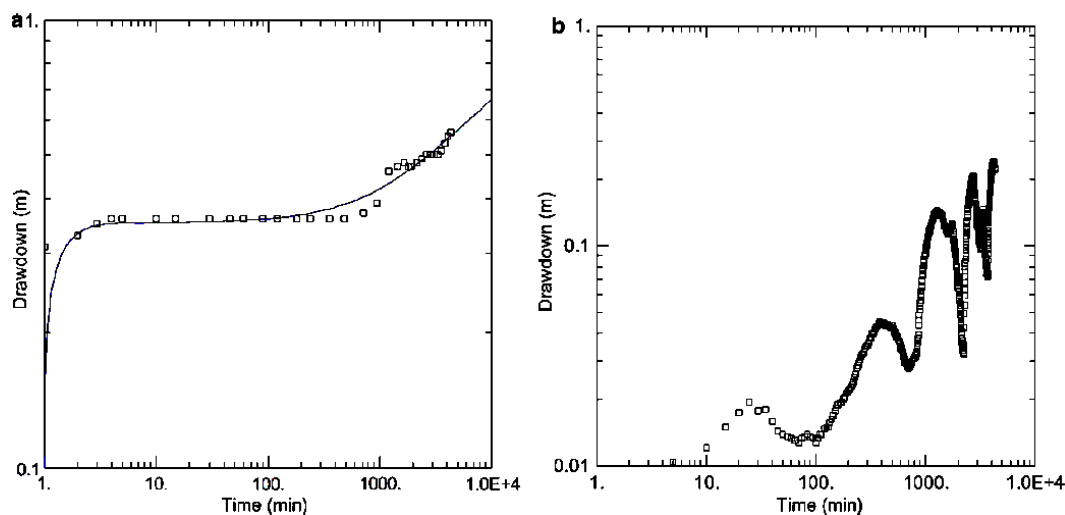
Η παραπάνω υδρολογική συμπεριφορά συνδέεται άμεσα με την υδραυλική αγωγιμότητα και την αποθηκευτικότητα του καρστικού συστήματος, γι' αυτό και οι τιμές των συγκεκριμένων παραμέτρων συμβάλλουν στην συνολική κατανόηση της συμπεριφοράς των υπόγειων καρστικών υδάτων και κατ' επέκταση στη δημιουργία ενός αξιόπιστου εννοιολογικού μοντέλου. Κατά τον Ρουλιάρης (2019) η βέλτιστη προσέγγιση του συγκεκριμένου καρστικού συστήματος είναι αυτή που εξετάζει το διπλό πορώδες των υδροφόρων (για τη ροή στην κύρια μάζα και στις διακλάσεις), οι τιμές των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

**Πίνακας 2.1:** Αποτελέσματα από την ερμηνεία των υδραυλικών δεδομένων του καρστικού συστήματος (Ρουλιάρης 2019), ίδια επεξεργασία.

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΚΑΡΣΤΙΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ	
Υδραυλική αγωγιμότητα (m/day)	$1.2 \times 10^{-5}$ έως 0.46	Matrix
	30 έως 310	Διακλάσεις
Συντελεστής Αποθηκευτικότητας	$1.8 \times 10^{-4}$ έως 0.0581	Matrix
	$2.29 \times 10^{-7}$ έως $7.598 \times 10^{-5}$	Διακλάσεις

Μία ακόμη ενδιαφέρουσα παρατήρηση, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 2.9, σχετίζεται με την δοκιμαστική άντληση που έγινε στον καρστικό υδροφόρο. Μετά από ορισμένα μέτρα πτώσης του υδραυλικού φορτίου εμφανίζεται μία γρήγορη ανάκτηση του υπόγειου νερού. Το συγκεκριμένο φαινόμενο προκύπτει κατά την πτώση στο υδραυλικό φορτίο, στη διάρκεια της άντλησης, με συνοδή μετακίνηση νερού που ήταν αδρανές μέσα σε διαρρήξεις ή μικρές κοιλότητες. Το καθεστώς ροής του “εγκλωβισμένου” νερού δεν μπορεί να εκτιμηθεί ή να προβλεφθεί, αλλά η γνώση και η κατανόηση της ύπαρξής του παραμένουν εξίσου σημαντικές. Οι εκροές στα καρστικά συστήματα αποτελούν πρόκληση για τους ερευνητές,

αφού, όπως προαναφέρθηκε, μεγάλο ποσοστό του συνολικού υπόγειου νερού βρίσκεται στις διακλάσεις, μία εκτίμηση όμως της ενεργούς κατείσδυσης του συγκεκριμένου καρστικού υδροφορέα είναι περίπου στο 38% (Ρουλιάρης, 2019).

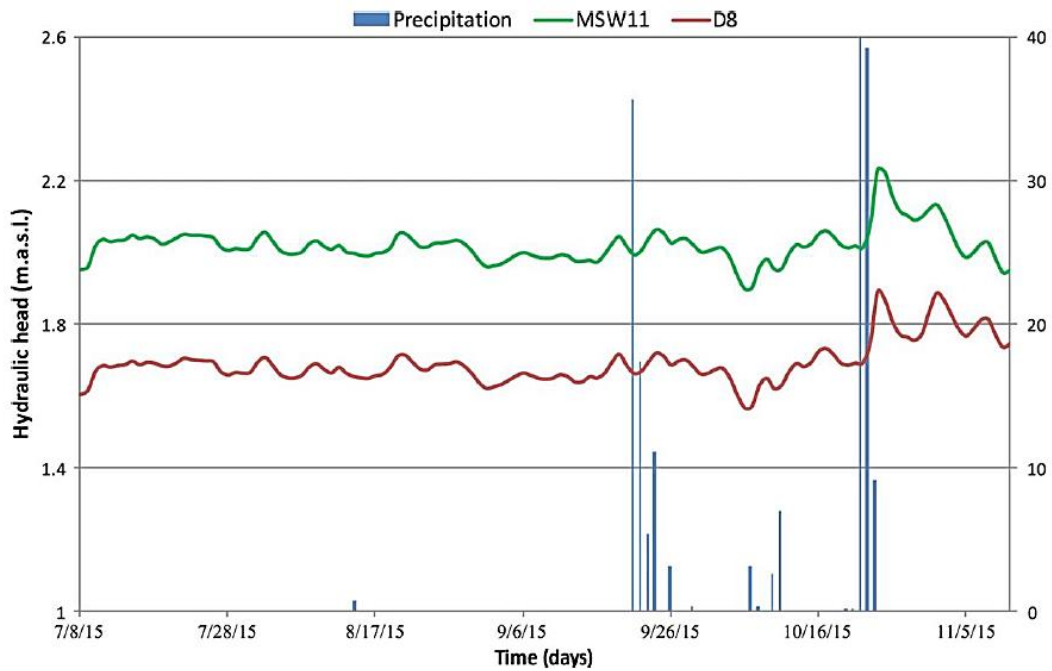


**Σχήμα 2.9:** Δεδομένα δοκιμαστικής άντλησης (α) που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των υδραυλικών ιδιοτήτων στον καρστικό υδροφόρο και (β) τα αποτελέσματα που δείχνουν την συνεισφορά του αδρανούς νερού κατά την είσοδό του στο σύστημα (Ρουλιάρης, 2019).

#### 2.4.4 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

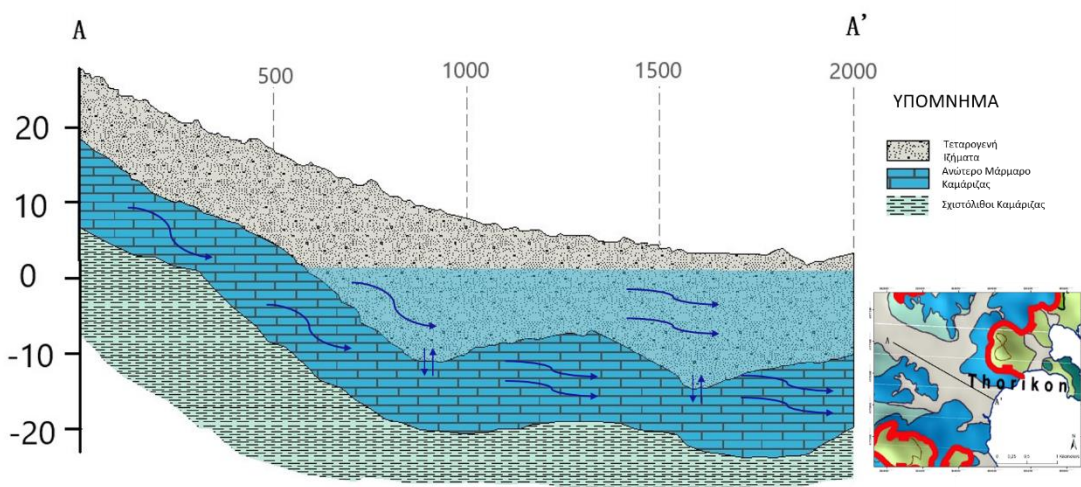
Η υδραυλική επικοινωνία μεταξύ των υδροφορέων και του κύριου ρέματος στην περιοχή μελέτης, αποτελεί βασικό στοιχείο για την προσέγγιση του φυσικού υδροφόρου συστήματος. Στο νότιο κομμάτι ο καρστικός υδροφόρος τροφοδοτεί τον αλλουβιακό, ενώ στο βόρειο κομμάτι το καθεστώς ροής διέπεται από μία πολυπλοκότητα διότι οι υδρολογικές ενότητες (αλλουβιακός και καρστικός υδροφόρος, επιφανειακά νερά και θάλασσα) βρίσκονται σε άμεση επαφή σε πολύ περιορισμένη έκταση.

Με βάση τα δεδομένα πιεζομετρίας φαίνεται ότι ο καρστικός υδροφορέας τροφοδοτεί τον αλλουβιακό. Βέβαια υπάρχουν και περιπτώσεις που μπορεί να συμβαίνει το αντίθετο, όπως στο παρακάτω Σχήμα 2.11, στην οποία συγκρίνονται τα υδραυλικά φορτία δύο σημείων που αντιστοιχούν σε διαφορετικούς υδροφόρους (το MSW11 βρίσκεται στον προσχωματικό, ενώ το D8 στον καρστικό). Η διαφορά του υδραυλικού φορτίου είναι περί τα 0.34 m με υψηλότερο φορτίο στον αλλουβιακό, τουλάχιστον για την ξηρή περίοδο όπου συλλέχθηκαν τα δεδομένα, ο καρστικός τροφοδοτείται από τον αλλουβιακό (Ρουλιάρης, 2019).



**Σχήμα 2.10:** Σύγκριση των υδραυλικών φορτίων στον καρστικό (D8) και στον αλλουβιακό υδροφόρο (MSW11) (Pouliaris, 2019).

Έπειτα, από την συλλογή όλων των παραπάνω πληροφοριών για τους υπόγειους υδροφόρους και το καθεστώς ροής, κατασκευάστηκε το εννοιολογικό μοντέλο της περιοχής μελέτης (Σχήμα 2.12). Το υπόβαθρο και των δύο υδροφόρων είναι η Σχιστόλιθος Καμάριζας, παρόλες τις τοπικές διαβρώσεις που έχουν υποστεί. Ανάλογα την περιοχή, η ακολουθία των σχιστόλιθων μπορεί να διακόπτεται από την παρουσία του μαρμάρου (όπου σχηματίζεται ο καρστικός υδροφόρος) και η υδραυλική τους “σχέση” είναι άρρηκτα συνδεδεμένη καθ’ όλο το υδρολογικό έτος.



**Σχήμα 2.11:** Υδρογεωλογική τομή στο παράκτιο κομμάτι του υδροσυστήματος του Λαυρίου σε διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ (τροποποιημένη εικόνα από Pouliaris, 2019).

#### 2.4.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ

Όπως αναφέρεται και παραπάνω, οι βασικές εισροές στα συγκεκριμένα υπόγεια συστήματα προέρχονται από τις βροχοπτώσεις. Συνεπώς, είναι σημαντικό να εκτιμηθεί η ποσότητα νερού που εισέρχεται στους υπόγειους υδροφόρους, για την εισαγωγή αξιόπιστων δεδομένων στις μετέπειτα διαδικασίες της μοντελοποίησης. Ο Rouliaris (2019) αξιοποιώντας την μέθοδο της διακύμανσης του επιπέδου του νερού (water level fluctuation method) (Healy & Cook, 2002, Scanlon et al., 2002) εκτίμησε τα ποσοστά εισροής στα δύο υπόγεια συστήματα.

Στην περίπτωση του αλλουβιακού υδροφόρου, ο οποίος αποτελείται κυρίως από ιλύ, η τιμή που προτείνεται για την ειδική απόδοση βάσει βιβλιογραφίας είναι 0,19. Η μέση διαφορά στα υδραυλικά φορτία είναι περί τα 0,32 m με τις βροχοπτώσεις να καταγράφουν 391 mm ύψους βροχής, την ίδια περίοδο. Επομένως η τροφοδοσία του αλλουβιακού υδροφόρου είναι 15,53% του ρυθμού βροχόπτωσης.

Για τον καρστικό υδροφόρο η παραπάνω μέθοδος είναι ιδιαίτερα επισφαλής, αφού το υπόγειο νερό δεν κινείται μόνο ανάμεσα στους κόκκους αλλά και στους καρστικούς αγωγούς. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί και για τα καρστικά συστήματα για μία πρώτη προσέγγιση της τροφοδοσίας τους, εφόσον λαμβάνει υπόψη το ποσό του νερού που φθάνει στον υπόγειο υδροφόρο. Η ειδική αποθηκευτικότητα για την κύρια μάζα του καρστικού υδροφόρου είναι  $0,001661 \text{ m}^{-1}$ , με ελάχιστο πάχος 50 m και ειδική απόδοση 5% (Ford D. & Williams P., 2007), η τροφοδοσία ανέρχεται στο 38% της συνολικής βροχόπτωσης. Η τιμή πιθανώς φαίνεται υψηλή, αλλά σε περιοχές όπου δεν υπάρχει επιφανειακή απορροή και η καρστικοποίηση είναι έντονη, δημιουργούνται μονοπάτια εις βάθος διείσδυσης προς τα υπόγεια ύδατα, καθιστώντας την βροχόπτωση ως την κυρίαρχη πηγή τροφοδοσίας στο συγκεκριμένο καρστικό σύστημα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 3.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

#### 3.1.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ MODFLOW

Το MODFLOW αποτελεί έναν από τους πιο ευρέως χρησιμοποιημένους υπολογιστικούς κώδικες στη διερεύνηση και ερμηνεία της ροής του υπόγειου νερού στα πλαίσια της επιστήμης της υδρογεωλογίας. Με τη χρήση του παραπάνω κώδικα, το υπό εξέταση υδρογεωλογικό σύστημα προσομοιώνεται με ένα σύνολο μαθηματικών εκφράσεων οι οποίες αναπαριστούν τόσο το φαινόμενο της ροής, όσο και τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά του υδρογεωλογικού συστήματος. Με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών εφαρμόζεται συνδυασμός της εξίσωσης ροής του Darcy και της εξίσωσης συνέχειας. Ο κώδικας MODFLOW δύναται να προσομοιώσει ροή σταθερής κατάστασης όπως επίσης και συνθήκες τριδιάστατης μεταβαλλόμενης ροής (Καλλιώρας Α., 2015).

##### 3.1.1.1 Αρχή του κώδικα MODFLOW

Η αρχή του κώδικα MODFLOW εμπεριέχει μία πληθώρα απλοποιήσεων και υποθέσεων για την μετατροπή των φυσικού υπόγειου υδατικού συστήματος σε μαθηματικό ψηφιοποιημένο υδατικό σύστημα. Κάποιες από τις αρχές του μοντέλου είναι (Oude Essink, 2000):

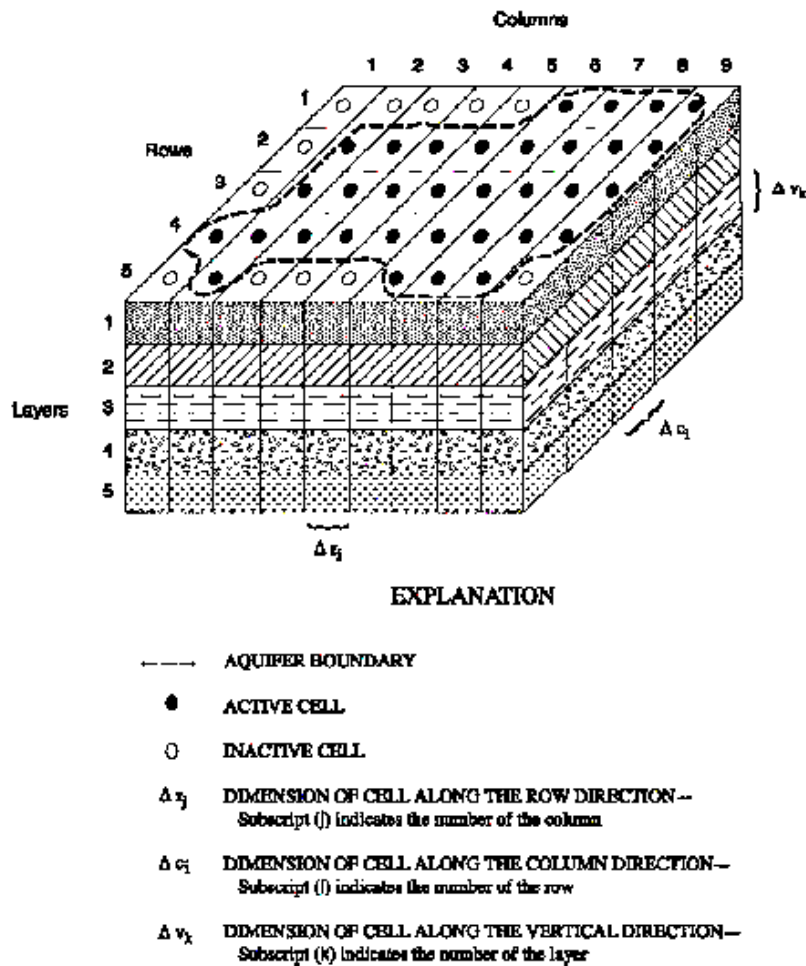
- Το υδρογεωλογικό σύστημα δύναται να προσομοιωθεί για σταθερή κατάσταση και συνθήκες μεταβαλλόμενης ροής,
- Το μαθηματικό υδρογεωλογικό σύστημα εφαρμόζει και αξιοποιεί την αρχή των πεπερασμένων διαφορών για το κέντρο κάθε κύβου (block-centered),
- Δεν υφίσταται ροή πέρα από τα όρια του μοντέλου,
- Το μέσο (κατά πρώτιστα πορώδες) το οποίο πρόκειται να προσομοιωθεί δύναται να είναι ομοιογενές,
- Το μέσο (κατά πρώτιστα πορώδες) το οποίο πρόκειται να προσομοιωθεί δύναται να είναι ανισότροπο,
- Το σύστημα ροής ενδέχεται να έχει ακανόνιστο σχήμα, περικλείοντας ελεύθερο, μερικώς υπό-πίεση ή υπό-πίεση υδροφόρο καθώς και συνδυασμό των παραπάνω,
- Η ροή μπορεί να προσομοιωθεί πλήρως σε τριδιάστατη μορφή.

Μερικές από τις υποθέσεις του κώδικα MODFLOW, παρατίθενται παρακάτω:

- Η πυκνότητα του υπόγειου νερού θεωρείται σταθερή,
- Η κίνηση του υπόγειου νερού λαμβάνει χώρα σε τρεις διαστάσεις (x,y,z) (ορθογωνικά),
- Οι ιδιότητες κάθε κύβου κατανέμονται ομοιόμορφα και ομοιογενώς.

##### 3.1.1.2 Διακριτοποίηση του πεδίου ορισμού του μοντέλου

Ο υπολογιστικός κώδικας MODFLOW, και συγκεκριμένα το πεδίο ορισμού του μοντέλου (model domain) διακριτοποιείται κατ' απόλυτο διάστημα υποδιαίρωντας τη συνολική επιφάνεια σε σειρές (i), στήλες (j) και επίπεδα (k), δημιουργώντας έτσι οι επιμέρους κύβους (blocks) που αποκαλούνται κελιά (cells). Για παράδειγμα στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται ένα σύστημα με  $NROW = 5$ ,  $NCOL = 9$  και  $NLAY = 5$ . Σε κάθε κελί υπάρχει ένα σημείο που αποκαλείται "κόμβος" (node), στο οποίο υπολογίζεται το υδραυλικό φορτίο και το σημείο που θα τοποθετηθεί έγκειται στις απαιτήσεις του χρήστη (Harbaugh, 2005). Το μέγεθος κάθε κελιού, στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση, θεωρείται ομοιογενές τόσο κατά σειρά όσο και κατά στήλη, και ορίζονται από το χειριστή πριν αρχίσει η διαδικασία της επεξεργασίας. Με τον παραπάνω τρόπο παρέχεται η δυνατότητα μιας πολυποίκιλης χωρικής ανάλυσης για την περιοχή έρευνας. Τα στοιχεία του μοντέλου μπορούν να διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το μέγεθος και τον όγκο τους, αλλά η κατανομή των υδραυλικών παραμέτρων καθενός από αυτά θεωρείται ομοιογενής (Καλλιώρας Α., 2015).



Σχήμα 3.1: Διακριτοποιημένο σύστημα υδροφορέα (Harbaugh, 2005).

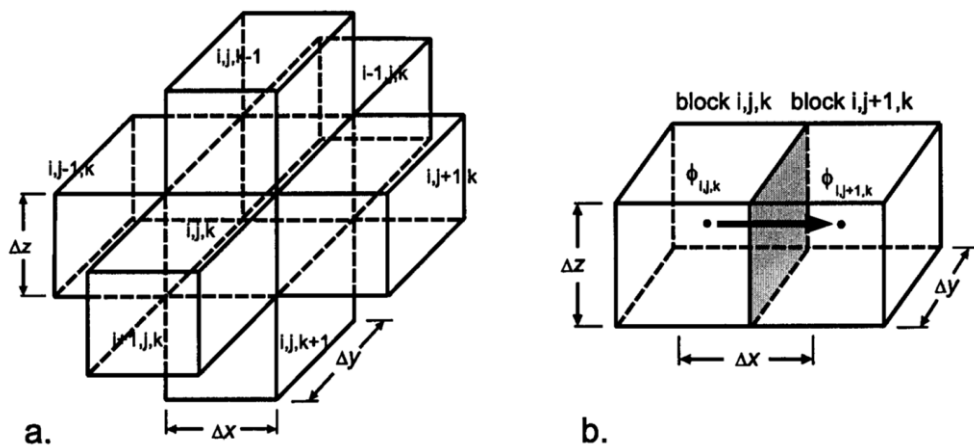
### 3.1.1.3 Εξίσωση πεπερασμένης διαφοράς της υπόγειας ροής



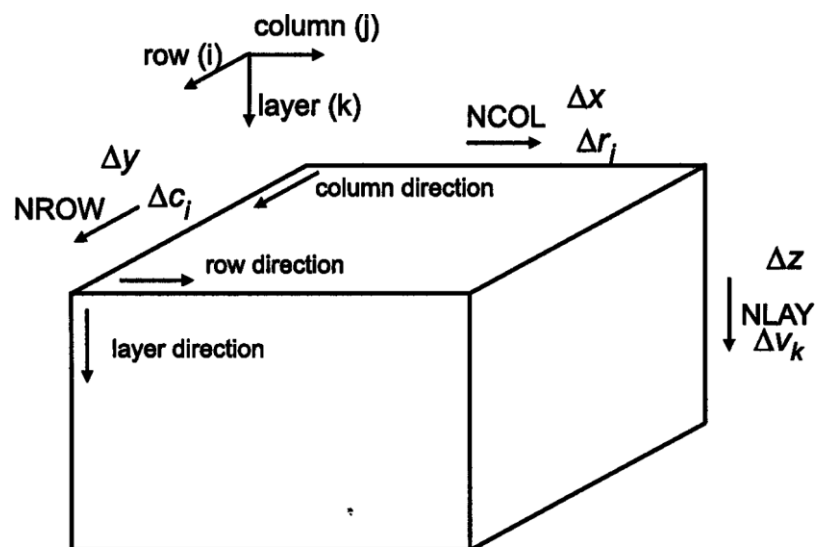
Η παρακάτω εξίσωση περιγράφει την προσομοιωμένη υπόγεια ροή. Αν η πυκνότητα του ρευστού είναι σταθερή, η υδατική ισορροπία του κελιού, εκφράζεται από το σύνολο των ροών μέσα και έξω από το κελί και αλλάζει σε αποθηκευτικότητα (Oude Essink, 2000):

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \Delta V \quad (3.1)$$

Όπου,  $S_s$  είναι η ειδική αποθηκευτικότητα του πορωδους υλικού [ $L^{-1}$ ],  $Q_i$  ο συνολικός ρυθμός παροχής σε κάθε block [ $L^3T^{-1}$ ],  $\Delta V$  ο όγκος του συγκεκριμένου block [ $L^3$ ] και  $\Delta\varphi$  η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου [ $L$ ] για χρονικό διάστημα  $\Delta t$ .



Σχήμα 3.2: (a) Το block  $[i,j,k]$  με τα περιβάλλοντα blocks, (b) Η ροή μεταξύ των block  $[i,j,k]$  και  $[i,j+1,k]$  (Oude Essink, 2000).



Σχήμα 3.3: Προσανατολισμός του τρισδιάστατου υπολογιστικού κώδικα MODFLOW: NCOL= αριθμός στηλών, NROW= αριθμός γραμμών, NLAY= αριθμός στρωμάτων (Oude Essink, 2000).

#### 3.1.1.4 Υδραυλική αγωγιμότητα

Η μαθηματική έκφραση που περιγράφει ποσοτικά το μέγεθος της υδραυλικής αγωγιμότητας ορίζεται ως εξής (Oude Essink, 2000):

$$CR_{I,J+1/2,K} = \frac{k_{i,j+1/2,k}\Delta y\Delta z}{\Delta x} \quad (3.2)$$

Όπου  $CR_{I,J+1/2,K}$  η υδραυλική αγωγιμότητα μεταξύ των κομβικών σημείων (ή κόμβων)  $[i, j, k]$  και  $[i, j+1, k]$  στην κατεύθυνση της γραμμής. Παρόμοια μαθηματική διαδικασία ακολουθείται και κατά τη διεύθυνση των στηλών και των στρωμάτων.

#### 3.1.1.5 Υδατικό ισοζύγιο

Το υδατικό ισοζύγιο είναι το σύνολο εισροών και εκροών σε μία περιοχή. Το MODFLOW υπολογίζει το υδατικό ισοζύγιο για όλο το πεδίο ορισμού του μοντέλου για να επιβεβαιώσει την εγκυρότητα της επίλυσης αλλά και για να παρέχει μία συνολική απεικόνιση του συστήματος ροής (Oude Essink, 2000).

#### 3.1.1.6 Οριακές συνθήκες

Ο υπολογιστικός κώδικας MODFLOW, ορίζει ένα σταθερό όριο του πιεζομετρικού φορτίου, το λεγόμενο Πρόβλημα Dirichlet. Παρ' όλα αυτά, παρέχεται η δυνατότητα προσομοίωσης των οριακών συνθηκών για υδρογεωλογικά συστήματα με σταθερή ροή ή ακόμα και στην περίπτωση του Προβλήματος Neumann, χρησιμοποιώντας εξωτερικές πηγές στο εσωτερικό των ορίων (Oude Essink, 2000).

#### 3.1.1.7 Απαιτήσεις δεδομένων

Δεδομένα όπως η μεταβιβαστικότητα και η υδραυλική αγωγιμότητα θεωρούνται ως τα πλέον απαραίτητα στοιχεία κάθε κελί του κανάβου, για μια εμπειριστατωμένη απεικόνιση του υδρογεωλογικού συστήματος. Εκτός από τις παραπάνω παραμέτρους του εδαφικού ή του υδροφόρου στρώματος, θεωρείται επίσης αναγκαία η εισαγωγή του πάχους του υδροφόρου στρώματος ή των γεωλογικών στρωμάτων της υπό εξέταση περιοχής. Στην περίπτωση που αναλύεται και κατ' επέκταση προσομοιώνεται η μεταβατική ροή του συστήματος, τότε υπεισέρχεται ο υπολογισμός του συντελεστή μεταβιβαστικότητας  $S$  και/ή η ειδική απόδοση  $\mu$ , ανάλογα με το είδος του υδροφόρου (υπό-πίεση και ελεύθερος αντίστοιχα) (Oude Essink, 2000).

#### 3.1.1.8 Διακριτοποίηση χρονικού παράγοντα

Όσον αφορά στην προσομοίωση σταθερής κατάστασης, τόσο οι εισαγόμενες όσο και οι εξαγόμενες τιμές του μοντέλου παραμένουν σταθερές. Στην περίπτωση της μεταβατικής

ροής, τα εισαγόμενα στοιχεία του μοντέλου, οι εξαγόμενες πηγές καθώς επίσης και τα εξαγόμενα στοιχεία του μοντέλου μεταβάλλονται με το χρόνο. Για παράδειγμα, ο υπολογισμός της τιμής του υδραυλικού φορτίου για το τέλος του βήματος, αρχίζει με την ανάθεση μίας τυχαίας (ή εκτιμώμενης) τιμής σε κάθε κόμβο με το πέρας του βήματος. Έπειτα ξεκινάει μία διαδικασία υπολογισμού, η οποία αλλάζει τις τυχαίες τιμές, παράγοντας ένα νέο ζεύγος τιμών που προσεγγίζουν καλύτερα το σύστημα εξισώσεων. Οι νέες, ή ενδιάμεσες, τιμές αντικαθιστούν τις αρχικές και η διαδικασία του υπολογισμού επαναλαμβάνεται σε κάθε στάδιο μέχρι να ικανοποιηθούν τα κριτήρια του μοντέλου, βάσει του συστήματος των εξισώσεων (Harbaugh, 2005).

### 3.1.1.9 Μαθηματική περιγραφή

Ο υπολογιστικός κώδικας MODFLOW, εξισώνει και επεξεργάζεται μαθηματικά τις εξωτερικές πηγές σε κελιά, τους τύπους στρωμάτων, τις οριακές συνθήκες (Καλλιώρας Α., 2015). Η κίνηση του υπόγειου νερού, με σταθερή πυκνότητα του πορώδους και στις τρεις διαστάσεις, περιγράφεται από την μερική διαφορική εξίσωση:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.3)$$

Όπου  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$  είναι οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας για τους άξονες  $x$ ,  $y$  και  $z$  [ $L/T$ ],  $h$  είναι πιεζομετρικό φορτίο [ $L$ ],  $W$  είναι η ογκομετρική ροή για κάθε μονάδα όγκου που αντιπροσωπεύει είσοδο ( $W > 0.0$ ) και/ή έξοδο από το σύστημα ( $W < 0.0$ ) [ $T^{-1}$ ],  $S_s$  η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους μέσου [ $L^{-1}$ ] και  $t$  ο χρόνος [ $T$ ] (Harbaugh, 2005).

### 3.1.1.10 Πακέτα προσομοίωσης ροής

Η διεργασία της ροής του υπόγειου νερού (Ground Water Flow- GWF) στο MODFLOW διαχωρίζεται σε επιμέρους υδρολογικά “πακέτα” (packages) τα οποία ασχολούνται κάθε οριακή συνθήκη της προσομοίωσης. Υπάρχουν δύο τύποι πακέτων (Harbaugh, 2005):

- Εσωτερικής ροής (Internal flow package), το οποίο προσομοιώνει την ροή μεταξύ γειτονικών κελιών, όπως το LPF (Layer-property Flow Package) και
- Φόρτισης (Stress package), το οποίο ασχολείται με τα ξεχωριστά είδη φορτίσεων στο σύστημα, όπως ποτάμια, πηγάδια και τροφοδοσία.

*Πίνακας 3.1: Πακέτα προσομοίωσης του υπόγειου νερού (Harbaugh, 2005), ίδια επεξεργασία.*

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΠΑΚΕΤΟΥ	ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΑΚΕΤΟΥ
Basic	BAS	Έλεγχος Προγράμματος
Block-Centered Flow	BCF	Υδρολογικό/Εσωτερικό
Layer-Property Flow	LPF	Υδρολογικό/Εσωτερικό
Horizontal Flow Barrier	HFB	Υδρολογικό/Εσωτερικό

Well	WEL	Υδρολογικό/Φόρτισης
Recharge	RCH	Υδρολογικό/Φόρτισης
River	RIV	Υδρολογικό/Φόρτισης
General-Head Boundary	GHB	Υδρολογικό/Φόρτισης
Drain	DRN	Υδρολογικό/Φόρτισης
Evapotranspiration	EVT	Υδρολογικό/Φόρτισης
Strongly Implicit Procedure	SIP	Επίλυσης
Preconditioned Conjugate Gradient	PCG	Επίλυσης
Direct Solution	DE4	Επίλυσης

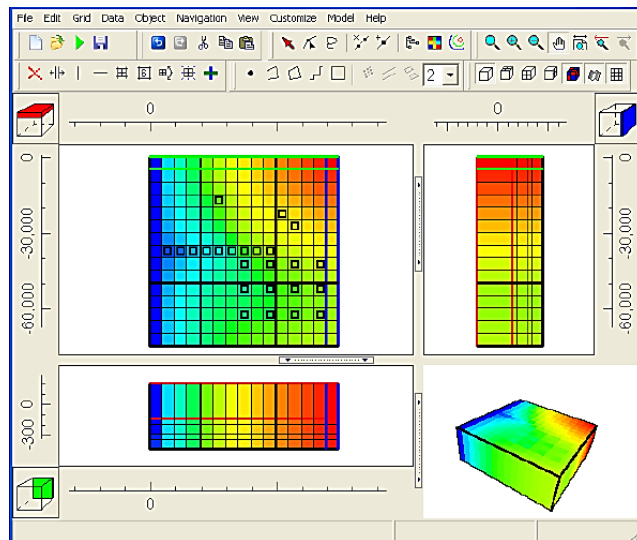
Το MODFLOW ενσωματώνει διάφορες μεθόδους επίλυσης και κάθε μία ορίζεται από ένα πακέτο επίλυσης (solver package) και συνδυαστικά με τα υδρολογικά πακέτα εκπροσωπούν τις συνολικές λειτουργίες του προγράμματος. Ωστόσο, χρειάζεται ένα επιπλέον πακέτο, το οποίο είναι ικανό να διαχειρίζεται το πρόγραμμα χωρίς να εμπίπτει στις δύο παραπάνω κατηγορίες πακέτων. Το πακέτο αυτό αποκαλείται Βασικό (Basic Package).

### 3.1.2 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ (πλατφόρμα) MODEL MUSE

Το ModelMuse ορίζεται ως ένα γραφικό περιβάλλον διεπαφής με τον χρήστη (GUI) για την δημιουργία ροής και μεταφοράς αρχείων MODFLOW και PHAST. Χειρίζεται αντικείμενα (σημεία, γραμμές και πολύγωνα) και τύπους για τον προσδιορισμό της χωρικής κατανομής των ιδιοτήτων του υδροφόρου με τον κατάλληλο τρόπο. Η χρήση των τύπων παρέχει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως:

- Τα αντικείμενα αποκτούν τρεις διαστάσεις (Σχήμα 3.4),
- Οι περίπλοκες κατανομές των τιμών στα δεδομένα μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν και
- Οι αλλαγές στην διακριτοποίηση είναι εφικτές χωρίς την επανεισαγωγή δεδομένων.

Η χωρική κατανομή των δεδομένων δεν εξαρτάται από τη διακριτοποίηση, ομοίως και η χρονική κατανομή των οριακών συνθηκών είναι ανεξάρτητη από την χρονική κατανομή του μοντέλου. Το λογισμικό συνδυάζει όλους του χρόνους που ορίστηκαν στο μοντέλο για να προσδιορίσει την κατάλληλη χρονική κατανομή. Το ModelMuse επιτρέπει στον χρήστη να εισάγει τα χωρικά δεδομένα χειροκίνητα, για την αποφυγή και εύρεση σφαλμάτων. Διαθέτει αρκετές μεθόδους παρεμβολής οι οποίες προσδιορίζουν πόσες τιμές πρέπει αν παρεμβάλλονται σε ένα σύνολο αντικειμένων, ακόμα και στο τρισδιάστατο πεδίο (Winston, 2009).



**Σχήμα 3.4:** Κεντρικό παράθυρο εργασίας του λογισμικού ModelMuse (Winston, 2009).

### 3.1.3 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ MODEL MATE ΚΑΙ UCODE

Το ModelMate είναι μοντέλο ανάλυσης σε γραφικό περιβάλλον διεπαφής με τον χρήστη (GUI). Το GUI παρέχει μία κατανοητή διάταξη των λειτουργιών που χρησιμοποιούνται συνήθως σ' ένα πρόγραμμα ανάλυσης μοντέλου. Αφού εισαχθούν τα κατάλληλα δεδομένα για το μοντέλο και την ανάλυσή του, το ModelMate χρησιμεύει στην προετοιμασία τους, στην εκτέλεσή τους, στην εισαγωγή αποτελεσμάτων από το μοντέλο και σε άλλες σχετικές διεργασίες. Οι αναλύσεις όμως, εκτελούνται από τον κώδικα ανάλυσης μοντέλων UCODE, ο οποίος διαχωρίζεται από το ModelMate (Banta, 2011). Το UCODE πραγματοποιεί αναλύσεις ευαισθησίας, εκτίμηση παραμέτρων, δοκιμές γραμμικότητας μοντέλου, πρόβλεψη ευαισθησίας, μη γραμμική αβεβαιότητα και έρευνα για μία αντικειμενική συνάρτηση (Poeter et al., 2005). Συνεπώς, το ModelMate χρησιμεύει ως ένα μέσο επικοινωνίας με το UCODE, για την προετοιμασία εισόδου των παραμέτρων.

### 3.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΤΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το μοντέλο που προτείνεται από την παρούσα εργασία, βασίζεται σε δύο πρότυπα υδρογεωλογικά μοντέλα τα οποία αφορούν στην ίδια περιοχή μελέτης από τον Ρουλιάρης (2019). Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας έγινε προσαρμογή, στα καθόλα άρτια μοντέλα, για την παρατήρηση του καρστικού υδροφόρου υπό το καθεστώς της τεκτονικής, πως αυτός μπορεί να προσομοιωθεί σε ένα ψηφιακό περιβάλλον καθώς και τα αποτελέσματα του μοντέλου με τα νέα στοιχεία. Κατά τον Ρουλιάρης (2019) αρχικά αναπτύσσεται ένα γενικό μοντέλο της περιοχής (MODFLOW 2005) για την αλληλεπίδραση μεταξύ των υδροφορέων και την διασύνδεσή τους με την ακτή και μετέπειτα κατασκευάζεται

ένα δεύτερο μοντέλο (MODFLOW CFP), διατηρώντας πολλά από τα χαρακτηριστικά του πρώτου, ωστόσο εστιάζει κυρίως στην πολυπλοκότητα της ροής στα καρστικά συστήματα. Επομένως, οφείλει να περιγραφεί, συντόμως, η διαδικασία υλοποίησης των μητρικών μοντέλων, βάσει του κώδικα MODFLOW-2005 και MODFLOW CFP.

### 3.2.1 ΧΩΡΙΚΗ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

Η περιοχή που καλύπτει το μοντέλο είναι περί το 60 km<sup>2</sup> και διακριτοποιείται από ένα κάναβο 50×50 m για τον κώδικα MODFLOW-2005 και 100×100m για τον κώδικα MODFLOW-CFP. Τα κελιά (cells) του κάθε επιπέδου είναι 23661, με τα ενεργά να φθάνουν 14460 συνολικά. Το μέγεθος των κελιών θεωρείται ικανοποιητικό, ιδιαίτερα για το παράκτιο κομμάτι της περιοχής έρευνας όπου βρίσκονται τα σημεία παρατήρησης.

### 3.2.2 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

Αρχικά στο μοντέλο, που αναπτύχθηκε με τον κώδικα MODFLOW 2005, υπάρχουν τρία στρώμα, τα οποία περιγράφουν ένα συγκεκριμένο γεωλογικό σχηματισμό. Στην κορυφή βρίσκονται οι αλλουβιακοί σχηματισμοί, έπειτα τοποθετείται το Ανώτερο Μάρμαρο Καμάριζας και τέλος οι Σχιστόλιθοι Καμάριζας. Στα δύο στρώματα αναπτύσσονται υπόγειοι υδροφόροι ορίζοντες, ενώ το κατώτερο στρώμα αντιστοιχεί στο αδιαπέρατο υπόβαθρο. Πιο αναλυτικά:

- Αλλουβιακό υδροφόρο στρώμα, ο υδροφόρος που αναπτύσσεται στον αλλουβιακό σχηματισμό είναι κοκκώδης και η χωρική έκταση του υδροφορέα συμπίπτει με το γεωλογικό όριο του σχηματισμού. Το πάχος του υδροφόρου θεωρείται ίδιο με το πάχος του σχηματισμού έπειτα από διάφορες ερευνητικές γεωτρήσεις, εκτός από τα όρια στα οποία ορίστηκε η ελάχιστη τιμή των 3m για την αποφυγή αριθμητικών προβλημάτων κατά την προσομοίωση. Ο υδροφόρος προσομοιώνεται ως ελεύθερος.
- Καρστικό υδροφόρο στρώμα, το οποίο αναπτύσσεται μέσα στο Ανώτερο Μάρμαρο, χαρακτηρίζεται από υψηλή ετερογένεια με αποτέλεσμα το καθεστώς ροής να διέπεται από μία πολυπλοκότητα που αντιστοιχεί σε συνθήκες διάχυτης αλλά και καρστικής ροής. Το πάχος του στρώματος είναι 60 m και στην προσομοίωση ορίστηκε ως ελεύθερο.
- Αδιαπέρατο υπόβαθρο σχιστολίθων, αποτελεί το υπόβαθρο για τους δύο παραπάνω υδροφόρους, με εξαίρεση τις περιοχές όπου τα δύο υδροφόρα στρώματα έρχονται σε επαφή. Το πάχος των σχιστολίθων είναι 40 m και προσομοιώνεται στο μοντέλο ως υπό πίεση, με εξαιρετικά χαμηλές υδραυλικές ιδιότητες.

Το δεύτερο μοντέλο, το οποίο αναπτύχθηκε με τον κώδικα MODFLOW CFP, εστιάζει στις διεργασίες που λαμβάνουν μέρος στον καρστικό υδροφορέα με σκοπό την καλύτερη κατανόηση του καθεστώτος ροής μέσα στο σύστημα, ωστόσο διατηρεί την κατακόρυφη δομή

του προηγούμενου μοντέλου. Συνεπώς, το καρστικό υδροφόρο στρώμα διαχωρίζεται σε 6 επιμέρους στρώματα, πάχους 10 m το καθένα, λαμβάνοντας υπόψη και την τοπογραφία της περιοχής.

### 3.2.3 ΑΝΑΦΟΡΑ ΠΑΚΕΤΩΝ MODFLOW-2005 ΚΑΙ MODFLOW-CFP

Όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 3.1.1 το MODFLOW-2005 και το MODFLOW CFP χρησιμοποιεί πακέτα (packages) για να προσομοιώσει διαφορετικές παραμέτρους. Στο μητρικό μοντέλο του Rouliaris (2019) χρησιμοποιούνται διάφορα πακέτα, ορισμένα από τα οποία διατηρήθηκαν για τον σκοπό της παρούσας εργασίας:

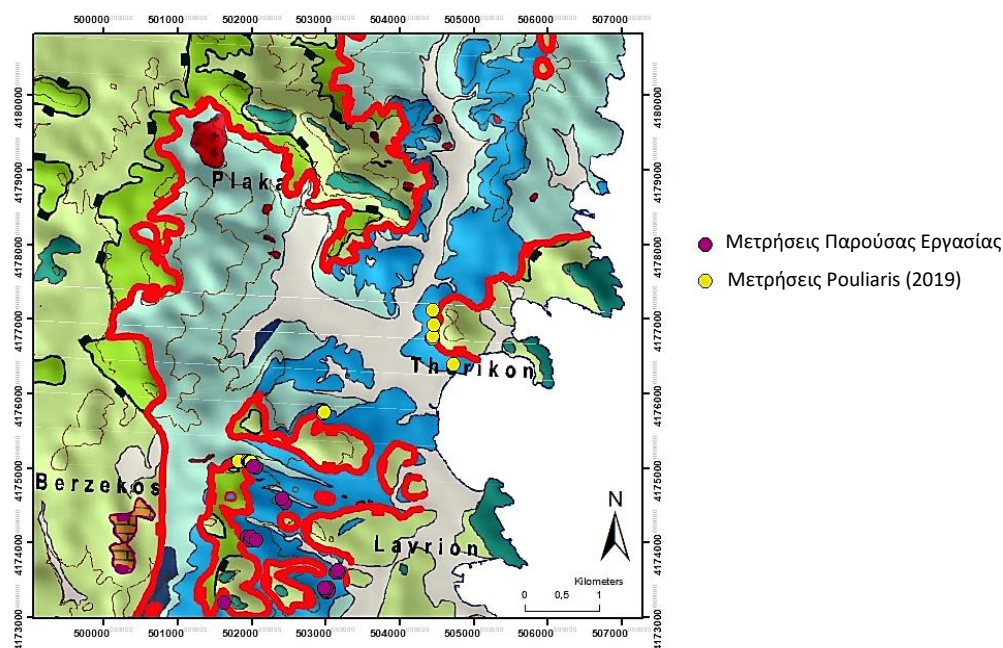
- Πακέτο LPF (Layer Property Flow): Στο συγκεκριμένο πακέτο ορίζονται οι υδραυλικές παράμετροι των στρωμάτων του μοντέλου. Στο CFP μοντέλο κάθε στρώμα ορίζεται με νέα ζώνη αγωγιμότητας, οι οποίες συνολικά συμφωνούν με το αρχικό μοντέλο, εκτός από μερικά στρώματα που είναι μικρότερα σε έκταση. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες τιμές των ζωνών για τις κατακόρυφες υδραυλικές αγωγιμότητες, λεπτομέρεια η οποία διαφοροποιεί δραματικά το δεύτερο από το πρώτο μοντέλο, στο οποίο οι κάθετες υδραυλικές αγωγιμότητες ορίζονται μία τάξη μεγέθους μικρότερες από τις οριζόντιες υδραυλικές αγωγιμότητες σε κάθε ζώνη. Η αλλαγή αυτή είναι απαραίτητη διότι η κατακόρυφη υδραυλική αγωγιμότητα αναμένεται να επηρεάζει σημαντικά το καθεστώς ροής.
- Πακέτο WEL (Well): Χρησιμοποιείται έναντι του πακέτου RCH (Recharge) για την τροφοδοσία από τις βροχοπτώσεις σε κάθε υδροφόρο. Χρησιμοποιείται ακόμα για την προσομοίωση των αρδευτικών αντλήσεων του αλλουβιακού υδροφόρου. Οι τιμές προήλθαν από την εκτίμηση της τροφοδοσίας που αναλύεται στο Κεφάλαιο 2.4.5.
- Πακέτο HOB (Head observation package): Είναι πολύ χρήσιμο για την εισαγωγή και εξαγωγή στα μετρημένα και στα προσομοιωμένα από το μοντέλο υδραυλικά φορτία.
- Πακέτο GHB (General head boundary): Αναπαριστά τη σχέση μεταξύ της θάλασσας και του υπόγειου υδροφόρου συστήματος, χρησιμοποιώντας ένα συντελεστή αγωγιμότητας ο οποίος ρυθμίζει την ποσότητα του νερού που μπορεί να ανταλλάξει το υδραυλικό όριο με τους υδροφορείς. Η αρχική τιμή που επιλέχθηκε είναι δύο τάξεις μεγέθους χαμηλότερη από τις υδραυλικές αγωγιμότητες των παρακείμενων υδροφορέων.

### 3.2.4 ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

Η χρονική περίοδος για την προσομοίωση του μοντέλου ορίζεται στα δύο έτη, ξεκινώντας από τον Ιανουάριο του 2014 έως τον Δεκέμβριο του 2015, με ημερήσιο χρονικό βήμα κυρίως για τις απότομες υδραυλικές αλλαγές στους υδροφορείς. Κάθε περίοδος φόρτισης (stress period) αντιστοιχεί σε ένα μήνα. Κατά την έναρξη της προσομοίωσης προστέθηκε στο μοντέλο μία ακόμη περίοδος φόρτισης, πιο σταθερή, στοχεύοντας στην σταθεροποίηση των αρχικών συνθηκών για την ομαλή λειτουργία της προσομοίωσης.

### 3.3 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΥΠΑΙΘΡΟΥ

Για την ανάπτυξη καρστικού υδρολογικού μοντέλου, σπουδαίο ρόλο έχουν τα δεδομένα που σχετίζονται με την τεκτονική της περιοχής, εστιασμένα στη μεσοσκοπική κλίμακα των διαρρήξεων εντός του καρστικού συστήματος. Συνήθως, δεν είναι διαθέσιμα τα στοιχεία των μετρήσεων των διαρρήξεων στην αναλυτική τους μορφή, αλλά προτιμάται η ποιοτική περιγραφή τους. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές επί τόπου μετρήσεις και γεωλογικές παρατηρήσεις στην περιοχή μελέτης για τη συλλογή δεδομένων πεδίου. Τα δεδομένα αυτά, αποτελούν μετρήσεις κλίσεων και διευθύνσεων πάνω σε επιφανειακά επίπεδα διακλάσεων και διαρρήξεων του Ανώτερου Μαρμάρου της Ενότητας Καμάριζας (όπου αναπτύσσεται ο καρστικός υδροφορέας). Όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σχήμα 3.5 οι μετρήσεις έγιναν σε κρίσιμα σημεία, με έντονη κατάκλαση για την καταγραφή πληθώρας έγκυρων μετρήσεων. Για την συλλογή περισσότερων δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον οι μετρήσεις του Ρουλιάρη (2019), δημιουργώντας μία πιο αντιπροσωπευτική εικόνα αλλά και ομοιομορφία στις μετρήσεις.



Σχήμα 3.5: Γεωλογικός Χάρτης (Lekkas et al., 2020) με τα σημεία που έγιναν οι μετρήσεις.

#### 3.3.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΕΩΝ

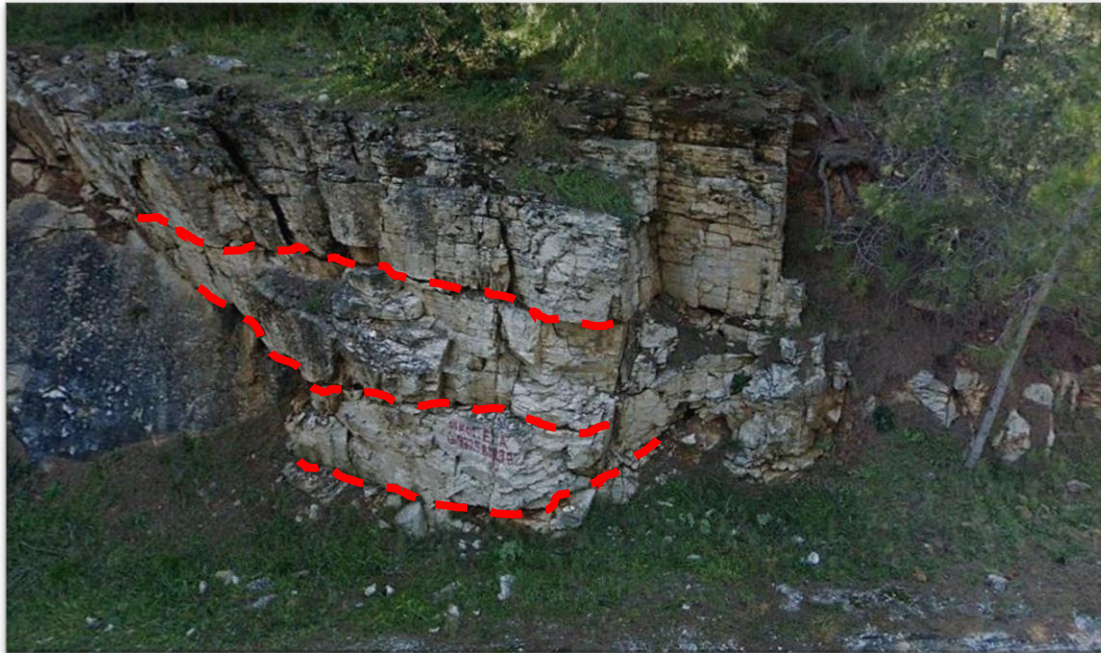
Επειδή όμως οι διαρρήξεις, ως μεμονωμένα στοιχεία, μπορούν θεωρητικά να είναι άπειρες, ορίζονται συγκεκριμένα κριτήρια κατά τη βούληση του ερευνητή. Για την παρούσα εργασία τα κριτήρια που τηρούνται είναι τα εξής:



- Οι διαρρήξεις να είναι ευδιάκριτες, για την αποφυγή εσφαλμένων μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, μια ευδιάκριτη διάρρηξη χαρακτηρίζεται από: άνοιγμα ανάμεσα στα δύο τεμάχια, υλικό πλήρωσης και κινηματικούς δείκτες.
- Το πέτρωμα να μην είναι κονιοποιημένο, οι χαλαροί και ασύνδετοι σχηματισμοί που προκύπτουν από τη διάβρωση και τη μηχανική αποσάθρωση του αρχικού πετρώματος δεν είναι ενδεικτικοί για τις μετρήσεις διαρρήξεων, καθώς πολλές φορές οι διαρρήξεις/διακλάσεις που παρατηρούνται σχετίζονται με επιτόπιες αστοχίες και όχι με την εν γένει τεκτονική της περιοχής.
- Η υπό εξέταση διάκλαση φαίνεται ότι συνεχίζεται και κάτω από το υπέδαφος, το κριτήριο αυτό συμβάλλει σημαντικά στην αξιοπιστία του τελικού μοντέλου διότι, όπως γίνεται σαφές δημιουργείται ένας συγκεκριμένος βαθμός βεβαιότητας πως η διάρρηξη συνεχίζει να αναπτύσσεται μέσα στο καρστικό σύστημα (άγνωστο για πόσα μέτρα) (Σχήμα 3.6). Ωστόσο εάν δεν μπορεί να τηρηθεί το συγκεκριμένο κριτήριο, λόγω της γεωμετρίας αρκετών επαφών, οφείλει να τηρηθεί το επόμενο.
- Το επίπεδο της διάρρηξης είναι επαναλαμβανόμενο και ισχύει κυρίως για τις σχεδόν οριζόντιες διακλάσεις, οι οποίες αρκετές φορές συμπίπτουν με την στρώση των μαρμάρων. Η οριζόντια κλίση τους, τις εμποδίζει συχνά από το να φθάσουν στο υπέδαφος. Το γεγονός όμως, ότι η δομή της οριζόντιας διάρρηξης επαναλαμβάνεται επιφανειακά συντελεί στο συλλογισμό και της περαιτέρω εις βάθος επανάληψης (Σχήμα 3.7).



**Σχήμα 3.6:** Διάρρηξη μέσα στο Ανώτερο Μάρμαρο Καμάριζας, ευδιάκριτη και πιθανά συνεχίζεται υπεδαφικά.



**Σχήμα 3.7:** Οριζόντιες διαρρήξεις στο Ανώτερο Μάρμαρο Καμάριζας, οι οποίες παρουσιάζουν μία συστηματικότητα.

Είναι γνωστό πως η φύση χαρακτηρίζεται από πολύπλοκα συστήματα, για το λόγο αυτό τα παραπάνω κριτήρια μπορούν να συνυπάρχουν σε ορισμένες περιοχές (Σχήμα 3.8). Οι ασαφείς δομές είναι προτιμότερο να παραλείπονται, διότι ενδέχεται να οδηγήσουν σε επισφαλή συμπεράσματα.



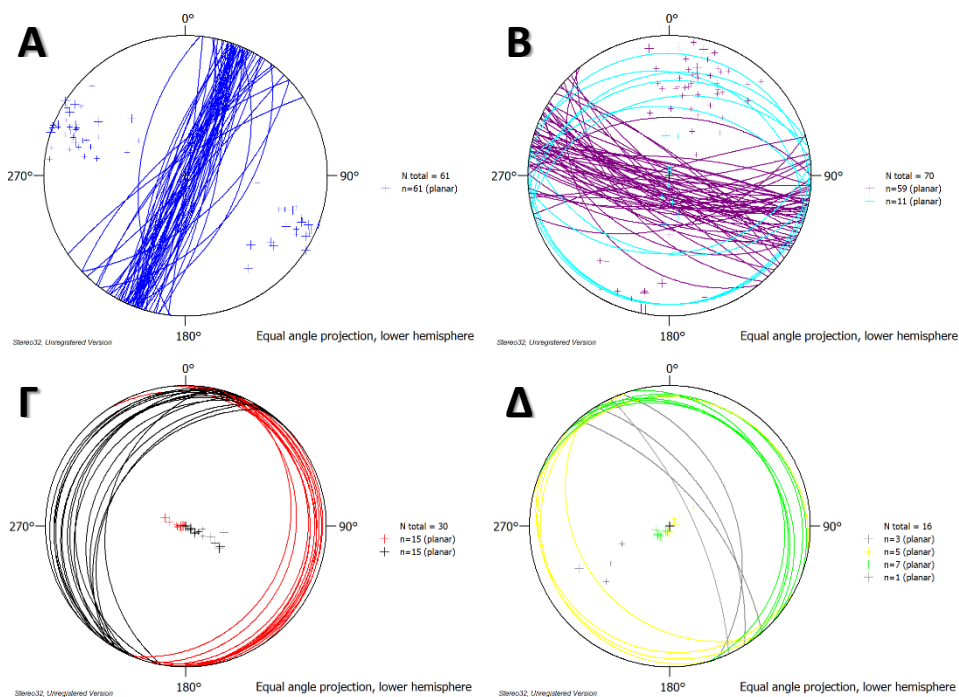
**Σχήμα 3.8:** Συνδυασμός διαρρήξεων μεγάλης και μικρής κλίσης.

### 3.3.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΥΠΑΙΘΡΟΥ

Οι μετρήσεις που συγκεντρώθηκαν, κατά την επίσκεψη της περιοχής μελέτης, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι 60, ενώ συμπεριλαμβανομένων των μετρήσεων του Rouliaris (2019) φθάνουν συνολικά τις 177. Για την προβολή των επιπέδων χρησιμοποιείται το πρόγραμμα Stereo32, στο οποίο εισάγεται η φορά μέγιστης κλίσης και η κλίση του επιπέδου της διάρρηξης. Αρχικά, η εικόνα που δίνεται είναι χαοτική, ωστόσο αν ληφθεί υπόψη η ήδη γνωστή τεκτονική της περιοχής τα επίπεδα ταξινομούνται αναλόγως και αρχίζουν να παρουσιάζουν μία συστηματικότητα.

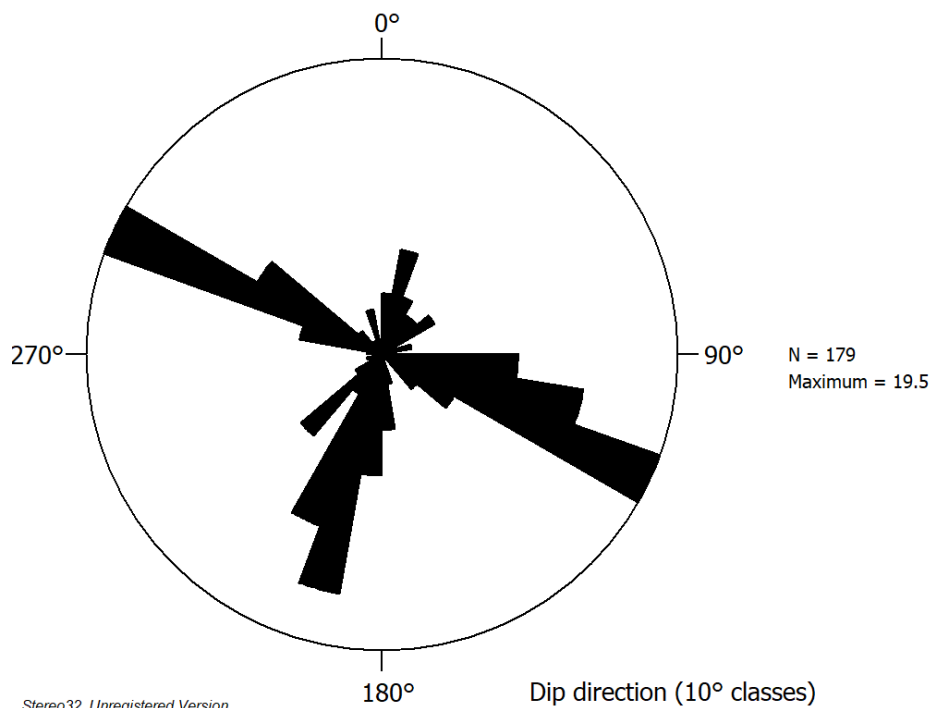
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.9 οι διακλάσεις ταξινομήθηκαν κυρίως βάσει της διευθύνσεώς τους σε τέσσερις ομάδες:

- Η **ομάδα Α** αποτελείται από επίπεδα διαρρήξεων με διεύθυνση  $BBA-NNΔ$  και κλίσεις από  $45-90^\circ$  (61 επίπεδα διαρρήξεων).
- Η **ομάδα Β** περιέχει δύο ομάδες διαρρήξεων, με κοινή συνιστώσα τη διεύθυνσή τους  $\Delta BΔ-ANA$ , αλλά ειδοποιό διαφορά τις κλίσεις τους. Με τη βασική ομάδα διαρρήξεων (μωβ) να είναι σχεδόν κατακόρυφες και τη δευτερεύουσα από μικρής έως μέτρια κλίσης διαρρήξεις (70 επίπεδα διαρρήξεων).
- Η **ομάδα Γ** αποτελείται από μία ομάδα διαρρήξεων ίδιας διεύθυνσης  $BBA-NNΔ$  και παρόμοιας μικρής κλίσης  $2-32^\circ$  (30 επίπεδα διαρρήξεων).
- Η **ομάδα Δ** έχει τις λιγότερες διαρρήξεις με διεύθυνση  $BΔ-NA$  και μικρές έως μέτριες κλίσεις (16 επίπεδα διαρρήξεων).



Σχήμα 3.9: Στερεογραφική προβολή των επιπέδων διαρρήξεων, κατώτερο ημισφαίριο.

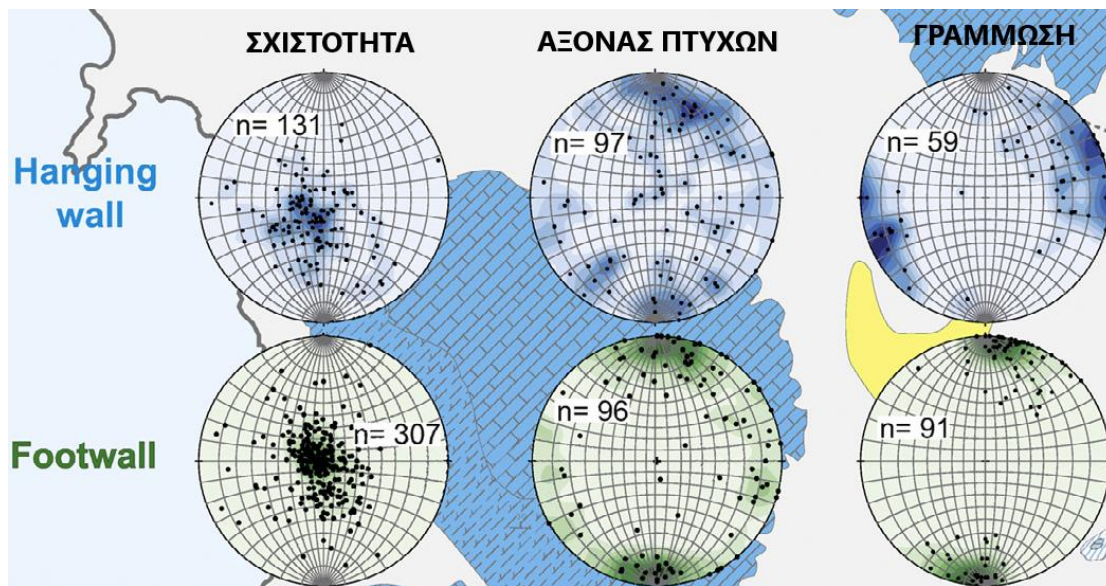
Συνεπώς, όπως φαίνεται και στο παρακάτω ροδόγραμμα (Σχήμα 3.10), οι κύριες διευθύνσεις της περιοχής μελέτης, όπως προκύπτουν από τα πρωτογενή δεδομένα των μετρήσεων στις διαρρήξεις, είναι ΔΒΔ-ΑΝΑ και ΝΝΔ.



**Σχήμα 3.10:** Ροδόγραμμα με τις γενικές διευθύνσεις όλων των μετρήσεων.

### 3.3.3 ΣΥΝΔΕΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΥΠΑΙΘΡΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Οι διαρρήξεις στη μεσοσκοπική κλίμακα που μελετά η παρούσα διπλωματική έχουν άμεση συγγένεια με το εφελκυστικό καθεστώς σε κλίμακα φλοιού που διέπει την περιοχή (detachment). Η γεωμετρία τους είναι συγκεκριμένη είτε ως προς τον άξονα των πτυχών είτε ως προς την γράμμωση έκτασης της κατώτερης Ενότητας Καμάριζας (footwall), τα οποία προκύπτουν έπειτα από εκτεταμένη έρευνα στην βιβλιογραφία (Lekkas et al., 2011; Berger et al., 2013; Scheffer et al., 2016; Coleman et al., 2019), όπως αναφέρονται και σε προηγούμενο Κεφάλαιο. Στο παρακάτω Σχήμα 3.11 παρουσιάζονται οι διευθύνσεις των επιθυμητών στοιχείων για την Ενότητα Καμάριζας (footwall). Οι διευθύνσεις του άξονα των πτυχών και της γράμμωσης έκτασης είναι μεταξύ τους παράλληλες, με ένα γενικότερο προσανατολισμό Β-Ν.



**Σχήμα 3.11:** Στερεογραφική προβολή (equal angle, Wulf net) κατώτερου ημισφαιρίου της σχιστότητας, του άξονα των πτυχών και των γραμμώσεων στην οροφή του detachment (μπλε χρώμα) και στο δάπεδο (πράσινο χρώμα),  $n$  είναι ο αριθμός των μετρήσεων (Scheffer et al., 2016), ίδια επεξεργασία.

Συνεπώς, βάσει της διάκρισης των διαρρήξεων που έγινε στο εισαγωγικό Κεφάλαιο 1.3.2, οι ομάδες που δημιουργήθηκαν στα πλαίσια του προηγούμενου Κεφαλαίου διαμορφώνονται ως εξής:

- Η **ομάδα Α** με διεύθυνση διαρρήξεων σχεδόν Β-Ν είναι παράλληλες με την γράμμωση έκτασης και τους άξονες των πτυχών, θεωρούνται διατμητικές διαρρήξεις (shear fractures), κατά Fossen (2010) αντιστοιχούν στην κατηγορία *Mode II*.
- Η **ομάδα Β** με διεύθυνση σχεδόν Α-Δ παρουσιάζουν μία σχέση καθετότητας με την γράμμωση έκτασης και τους άξονες των πτυχών, συμπεριλαμβάνονται στις εφελκυστικές διαρρήξεις και κατά Fossen (2010) υπάγονται στην κατηγορία *Mode I*.
- Η **ομάδα Γ** με διεύθυνση ΒΒΑ-ΝΝΔ συγκαταλέγεται στις διατμητικές διαρρήξεις, κατά Fossen (2010) *Mode II*, διότι είναι παράλληλη με την γράμμωση έκτασης και τους άξονες των πτυχών.
- Η **ομάδα Δ** με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ είναι διαγώνια με την γράμμωση έκτασης και τους άξονες των πτυχών και οι διαρρήξεις της συμπεριλαμβάνονται στις διατμητικές, κατά Fossen (2010) *Mode II*.

Στο φυσικό περιβάλλον η διατομή των εφελκυστικών και διατμητικών διαρρήξεων θεωρητικά ενισχύει τα φαινόμενα καρστικοποίησης.

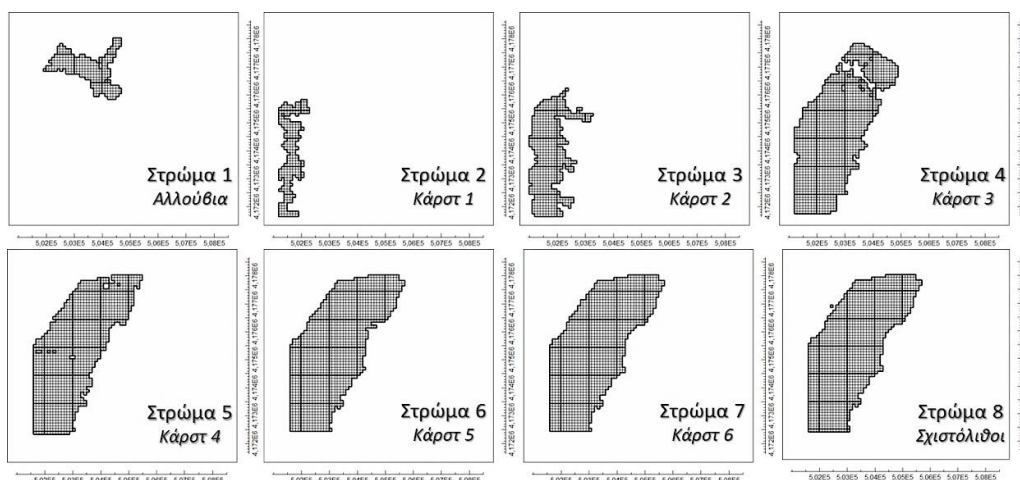
### 3.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ MODFLOW-2005

Το αρχικό μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι αυτό που αναπτύσσεται σε κώδικα MODFLOW – CFP για τον καρστικό υδροφόρο, το οποίο με τη σειρά του βασίζεται στο αρχικό μοντέλο σε κώδικα MODFLOW – 2005 για τις οριακές συνθήκες που αντιπροσωπεύουν την ακτή (Rouliaris, 2019). Παρόλο που το αρχικό μοντέλο για το καρστικό σύστημα αναπτύχθηκε με τον κώδικα MODFLOW – CFP, για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας το καρστικό σύστημα προσομοιώνεται με τη χρήση του κώδικα MODFLOW – 2005. Η επεξεργασία του μοντέλου γίνεται με τη βοήθεια του λογισμικού ModelMuse.

#### 3.4.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η περιοχή που καλύπτει το πεδίο ορισμού του μοντέλου είναι περίπου 60 km<sup>2</sup> και η διακριτοποίησή του περιλαμβάνει κελιά των 100×100 m, δημιουργώντας κάναβο με 50×69 σειρές και στήλες αντίστοιχα. Η κατακόρυφη διακριτοποίηση περιλαμβάνει 8 επιμέρους στρώματα (Σχήμα 3.12):

- Αλλουβιακός υδροφορέας, με ελάχιστο πάχος 3 m. Κατά την προσομοίωση ορίζεται ως ελεύθερος.
- Καρστικός υδροφορέας, με το υπό εξέταση καρστικό σύστημα. Το συνολικό πάχος του είναι 60 m, παρόλα αυτά αναπτύσσεται μία εκ νέου διακριτοποίηση στον καρστικό υδροφορέα με 6 ακόμη στρώματα, πάχους 10 m το καθένα. Αυτό πραγματοποιείται λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος με σκοπό την βέλτιστη απόδοσή του. Κατά την προσομοίωση όλα τα υδροφόρα στρώματα ορίζονται ως ελεύθερα.
- Στη βάση του υδροφόρου συστήματος βρίσκονται οι σχιστόλιθοι με πάχος 40 m. Κατά την προσομοίωση ορίζονται ως υπό πίεση αλλά με εξαιρετικά χαμηλές υδραυλικές ιδιότητες, διότι αποτελούν το αδιαπέρατο υπόβαθρο των υπερκείμενων υδροφόρων στρωμάτων.



**Σχήμα 3.12:** Τα επιμέρους στρώματα του μοντέλου από τα ανώτερα στα κατώτερα, σε περιβάλλον ModelMuse.

Για την προσομοίωση του μοντέλου χρησιμοποιούνται ορισμένα πακέτα, για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης ροής:

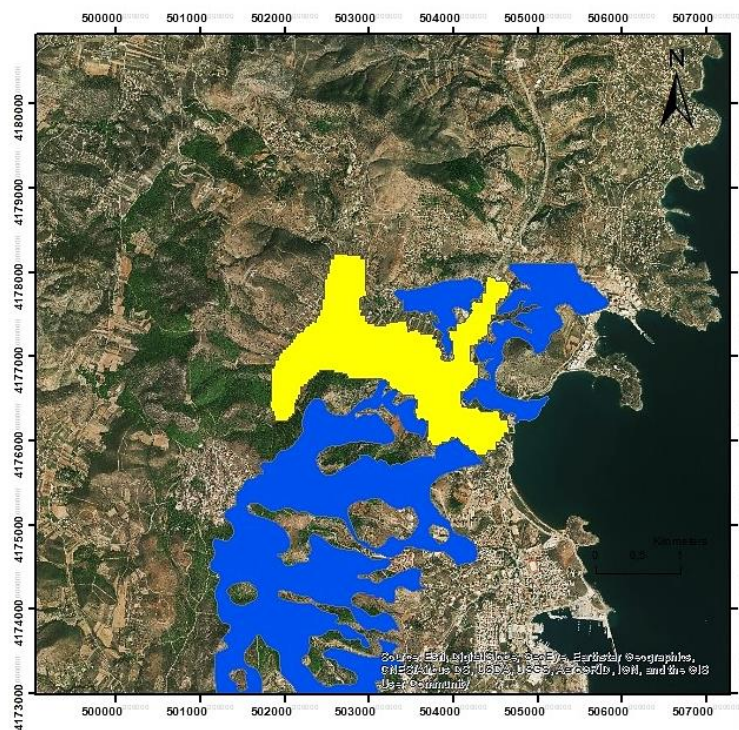
- Πακέτο LPF (Layer Property Flow ): Στο συγκεκριμένο πακέτο ορίζονται οι υδραυλικές παράμετροι των στρωμάτων του μοντέλου (Πίνακας 3.2). Σε αντίθεση με το μητρικό μοντέλο CPF, στο οποίο κάθε στρώμα ορίζεται με νέα ζώνη αγωγιμότητας, στο παρόν μοντέλο δίνεται μία ενιαία τιμή οριζόντιας υδραυλικής αγωγιμότητας για τον καρστικό υδροφορέα και διαφορετική τιμή στις διαρρήξεις.

**Πίνακας 3.2:** Περιγραφή των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στο παρόν μοντέλο σε κώδικα MODFLOW –2005, Πακέτο LPF.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ	ΤΙΜΕΣ	ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ
<u>Οριζόντια Υδραυλική Αγωγιμότητα</u>	HK_All	5	Στρώμα Αλλούβιων Σχηματισμών.
	HK_Kgen	15	Στρώμα Καρστικού Σχηματισμού. Περιλαμβάνονται και τα 6 συνολικά επιμέρους στρώματα.
	HK_FR1-12	50	Οι διακλάσεις που εισήχθησαν στο σύστημα.
	HK_Sch	0,001	Στρώμα Σχιστολίθων.
<u>Ειδική Αποθηκευτικότητα</u>	SS_All	Προκαθορισμένες	Στρώμα Αλλούβιων Σχηματισμών. Χρησιμοποιούνται οι προκαθορισμένες τιμές από το πρόγραμμα, λόγω της μικρής της σημασίας στην επίλυση.
	SS_K	Προκαθορισμένες	Στρώμα Καρστικού Σχηματισμού. Χρησιμοποιούνται οι προκαθορισμένες τιμές από το πρόγραμμα, λόγω της μικρής της σημασίας στην επίλυση.
	SS_Sch	Προκαθορισμένες	Στρώμα Σχιστολίθων. Χρησιμοποιούνται οι προκαθορισμένες τιμές από το πρόγραμμα, λόγω της μικρής της σημασίας στην επίλυση.
<u>Ειδική Απόδοση</u>	SY_All	0,15	Στρώμα Αλλούβιων Σχηματισμών.
	SY_K_north	0,08	Η ζώνη του καρστικού υδροφόρου που βρίσκεται βόρεια από την αλλουβιακή πεδιάδα
	SY_K_mid	0,08	Η ζώνη του καρστικού υδροφόρου που καλύπτεται από την αλλουβιακή πεδιάδα.
	SY_K_south	0,1328	Η ζώνη του καρστικού υδροφόρου που βρίσκεται νότια από την αλλουβιακή πεδιάδα.

- Πακέτο WEL (Well): Χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του φυσικού εμπλουτισμού στον καρστικό αλλά και στον αλλουβιακό υδροφορέα. Οι τιμές που

δίνονται (Rouliaris, 2019) στις επιμέρους μεταβλητές που παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 3.3:



**Σχήμα 3.13:** Γεωμορφολογικός χάρτης με τις περιοχές τροφοδοσίας των καρστικών και των αλλουβιακών, όπως ορίζονται από το πακέτο WEL, σε περιβάλλον ArcGIS. Το μπλε χρώμα αντιστοιχεί στην τροφοδοσία των καρστικών και το κίτρινο στην τροφοδοσία του αλλουβιακού υδροφόρου (ιδία επεξεργασία).

**Πίνακας 3.3:** Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο πακέτο WEL.

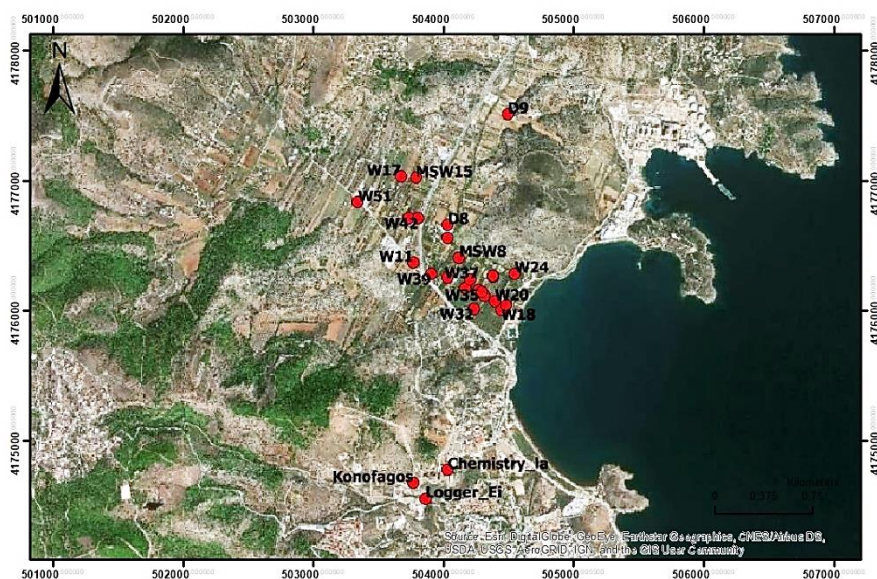
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ	ΤΙΜΕΣ	ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ
<u>Τροφοδοσία</u>	Q_All	0,38	Ομοιογενώς κατανεμημένη τροφοδοσία στον αλλουβιακό υδροφόρο.
<u>Τροφοδοσία</u>	Q_K	0,15	Ομοιογενώς κατανεμημένη τροφοδοσία στην επιφάνεια ανάδυσσης του καρστικού υδροφορέα.

- Πακέτο HOB (Head observation package): Χρησιμεύει στην εισαγωγή δεδομένων από μετρήσεις υπαίθρου και συγχρόνως εξάγει τα προσομοιωμένα υδραυλικά φορτία του μοντέλου. Στο Σχήμα 3.14 διαφαίνονται οι θέσεις των παρατηρήσεων και στον Πίνακα 3.4 σε ποιόν σχηματισμό βρίσκονται.



**Πίνακας 3.4:** Προσδιορισμός του γεωλογικού σχηματισμού στον οποίο βρίσκονται οι παρατηρήσεις.

ΟΝΟΜΑ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ	ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ	ΟΝΟΜΑ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ	ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ
Chemistry_la	Καρστικός	W20	Αλλουβιακός
Konofagos	Καρστικός	W24	Αλλουβιακός
Logger_Ei	Καρστικός	W332	Αλλουβιακός
D9	Καρστικός	W35	Αλλουβιακός
D8	Καρστικός	W36	Αλλουβιακός
MSW_5	Αλλουβιακός	W37	Αλλουβιακός
MSW14	Αλλουβιακός	W39	Αλλουβιακός
MSW15	Αλλουβιακός	W42	Αλλουβιακός
MSW8	Αλλουβιακός	W48	Αλλουβιακός
MSW9	Αλλουβιακός	W51	Αλλουβιακός
MSW11	Αλλουβιακός	W53	Αλλουβιακός
W11	Αλλουβιακός	W54	Αλλουβιακός
W17	Αλλουβιακός	W55	Αλλουβιακός
W18	Αλλουβιακός		



**Σχήμα 3.14:** Γεωμορφολογικός χάρτη με τα σημεία παρατήρησης στον αλλουβιακό και καρστικό υδροφόρο αντίστοιχα, όπως ορίζονται από το πακέτο HOB, σε περιβάλλον ArcGIS (ιδία επεξεργασία).

- Πακέτο GHB (General head boundary): Ορίζει τη σχέση ανάμεσα στη θάλασσα και στα υπόγεια υδροφόρα συστήματα. Στον εν λόγω μοντέλο, ρυθμίζει το πόσο του νερού που μπορεί να ανταλλάξει το θαλασσινό νερό με τον αλλουβιακό υδροφόρο, καθώς και με το παράκτιο καρστικό σύστημα (Πίνακας 3.5).

**Πίνακας 3.5:** Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο πακέτο GHB.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ	ΤΙΜΕΣ	ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ
<u>Οριακή Αγωγιμότητα</u>	GHB_All	1,5	Σύνδεση μεταξύ αλλουβιακού υδροφόρου και θάλασσας.
<u>Οριακή Αγωγιμότητα</u>	GHB_K	25	Σύνδεση μεταξύ καρστικού υδροφόρου και θάλασσας.

Τέλος, η χρονική διακριτοποίηση ορίζεται, όπως στο μητρικό μοντέλο (Κεφάλαιο 3.2.4), για δύο χρόνια από τον Ιανουάριο του 2014 έως το Δεκέμβριο του 2015, με ημερήσιο βήμα και περίοδο εκφόρτισης μηνιαία. Για την σταθεροποίηση των αρχικών συνθηκών προστίθεται μία επιπλέον περίοδος εκφόρτισης.

### 3.4.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΙΑΡΡΗΞΕΩΝ ΜΕΣΑ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η διαδικασία εισαγωγής των διαρρήξεων στο μοντέλο διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην προσομοίωση του καρστικού συστήματος. Υπό την σκοπιά της ομαλής διεκπεραίωσης όλων των λειτουργιών του μοντέλου και φυσικά ενός περιβάλλοντος φιλικό προς στο χρήστη, γίνεται σαφές πως η εισαγωγή και των 177 μετρήσεων θα ήταν ανώφελη. Συνεπώς, γίνεται η επιλογή συγκεκριμένου αριθμού διαρρήξεων, οι οποίες εκπροσωπούν τις αντίστοιχες ομάδες όπως καταστρώθηκαν στο Κεφάλαιο 3.3.2 και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6.

Για την είσοδο των διαρρήξεων στο λογισμικό, χρησιμοποιείται η βαθμωτή εξίσωση για να μετατρέψει τις τρισδιάστατες μετρήσεις πεδίου σε χωροταξικές πληροφορίες κατανοητές από το πρόγραμμα. Η εξίσωση αυτή ορίζεται ως:

$$Z = Z_0 - \left( \frac{1}{\sin Dip} \right) * (\sin Azimuth * \cos Dip * (X - X_0) + \cos Azimuth * \cos Dip * (Y - Y_0)) \quad (3.4)$$

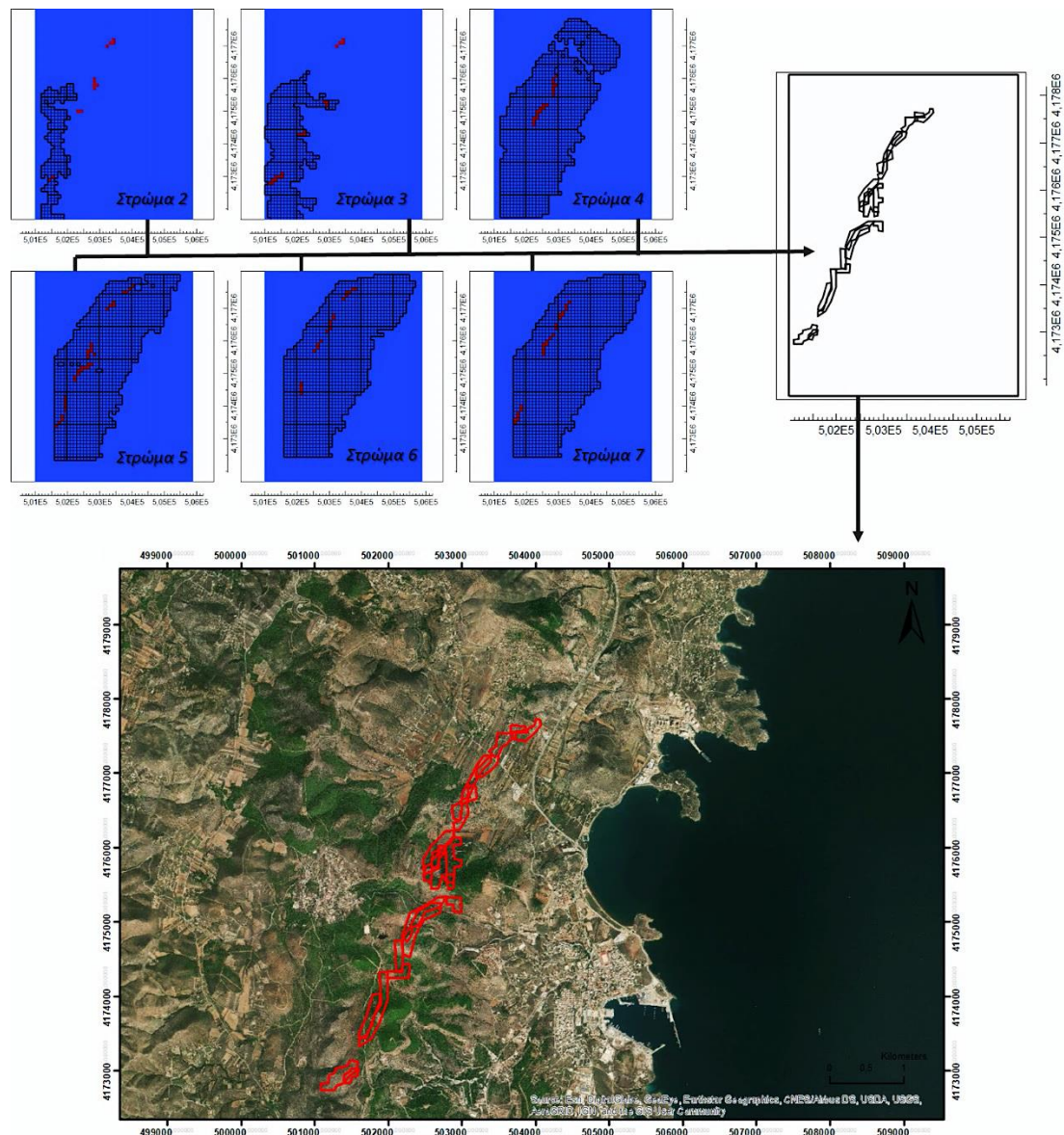
Όπου  $Z$  το τελικό υψόμετρο της διάρρηξης,  $Dip$  η κλίση της διάρρηξης,  $Azimuth$  το αζιμούθιο της διάρρηξης και  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$  οι συντεταγμένες και το υψόμετρο του σημείου που έγινε η μέτρηση (Ρουλιάρης, 2019).

**Πίνακας 3.6:** Οι επιλεγμένες διαρρήξεις με τις αντίστοιχες συντεταγμένες ( $X_0$ ,  $Y_0$ ), τα υψομετρικά σημεία ( $Z$ ), τα στοιχεία των μετρήσεων και η ομάδα στην οποία ανήκουν. Οι συντεταγμένες έχουν προσαρμοστεί στο προβολικό σύστημα *Greek\_Grid*.

ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΚΛΙΣΗ/Φ.Μ.Κ	ΚΛΙΣΗ/ΑΖΙΜΟΥΘΙΟ	$X_0$	$Y_0$	$Z$	Ομάδα Stereo
fracture1	77/326	77/236	501628	4173191	171	A
fracture2	82/198	82/288	502986	4176743	66	B
fracture3	38/006	38/096	501990	4174048	152	B
fracture4	72/122	72/212	503165	4173615	50	A
fracture5	86/119	86/209	503007	4173372	74	A
fracture6	77/297	77/207	502437	4174552	139	A
fracture7	83/124	83/214	501824	4175084	142	A
fracture8	62/049	62/139	501864	4175089	141	Δ
fracture9	71/065	71/155	503004	4173373	74	Δ
fracture10	53/058	53/148	501968	4175082	138	Δ
fracture11	75/202	75/292	504440	4176736	34	B
fracture12	80/012	80/102	504443	4176743	36	B

Οι διαρρήξεις που εισάγονται στο πρόγραμμα, μέσω της εξίσωσης, σε κώδικα MODFLOW - 2005, δεν αποτελούν γραμμικά στοιχεία (όπως γίνεται στον κώδικα MODFLOW – CFP), και δεν εμφανίζονται αυτόματα. Ακολουθείται μία σειρά ενεργειών για την απόδοση των υδραυλικών ιδιοτήτων της καθεμίας (π.χ. οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα, ανισοτροπία), έτσι ώστε να γίνει ορατή στο περιβάλλον εργασίας. Οι υδραυλικές ιδιότητες της εκάστοτε διάρρηξης οφείλουν να είναι αρκετά μεγαλύτερες από το περιβάλλον πέτρωμα.

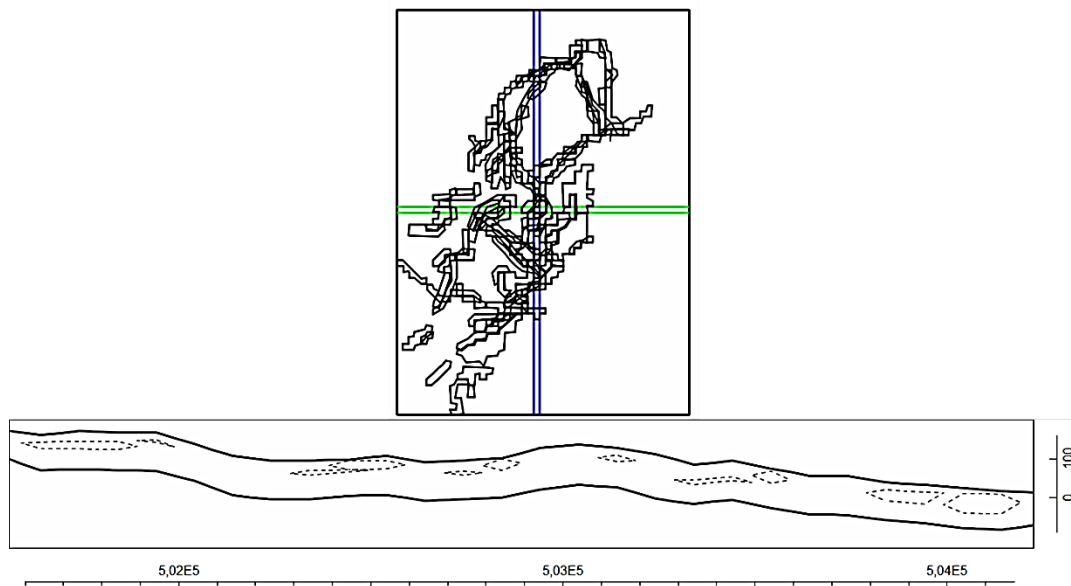
Για παράδειγμα, στην εκάστοτε διάρρηξη που έχει εισαχθεί στο πρόγραμμα μέσω της παραπάνω εξίσωσης ορίζεται μία τιμή ανισοτροπίας πολύ μεγαλύτερη από τον περιβάλλοντα ανθρακικό σχηματισμό (matrix). Η οπτικοποίησή της διαφαίνεται στο πεδίο ορισμού ως χρωματική διαφοροποίηση. Στη συνέχεια, δημιουργούνται σε κάθε στρώμα πολύγωνα που περικλείουν την συγκεκριμένη διαφοροποίηση, συνθέτοντας μ' αυτόν τον τρόπο τη δομή της διάρρηξης από το πρώτο στρώμα του καρστικού συστήματος προς τα κατώτερα (Σχήμα 3.15). Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι οι διαρρήξεις αρχίζουν από το δεύτερο στρώμα του μοντέλου και σταματούν στο έβδομο, διότι αφορούν αποκλειστικά τον καρστικό υδροφόρο.



**Σχήμα 3.15:** Σχηματική απεικόνιση των σταδίων καταγραφή μίας διάρρηξης στο μοντέλο και της τελικής της υπόστασης στο χώρο, στο παράδειγμα χρησιμοποιείται η fracture 1 (ιδία επεξεργασία).

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι σχεδόν οριζόντιες διαρρήξεις, από την ομάδα Γ και Δ της κατηγοριοποίησης. Το οριζόντιο επίπεδό τους είναι παράλληλο με τα στρώματα του μοντέλου, γεγονός που δυσχεραίνει την ψηφιοποίησή τους παρόλο που έχουν εισαχθεί στο μοντέλο.

Με το πέρας των ενεργειών προκύπτουν όλα τα πολύγωνα που προσδιορίζουν τις 12 διαρρήξεις. Πίσω από τα ψηφιοποιημένα πολύγωνα των διαρρήξεων κρύβεται ο συλλογισμός των εκτεταμένων ζωνών ασυνέχειας, σε αντίθεση με το μοντέλο του Rouliaris (2019) στο οποίο η διαρρήξεις προσομοιώνονται ως αγωγοί με χρήση του κώδικα MODFLOW – CFP. Στο Σχήμα 3.16 αποτυπώνεται το σύνολο των διαρρήξεων στο πεδίο ορισμού, με τη σύνθεση όλων των ψηφιοποιημένων πολυγώνων στα έξι καρστικά στρώματα του μοντέλου. Ακόμη στο Σχήμα 3.16 απεικονίζεται η τομή που προκύπτει από τον πράσινο οριζόντιο άξονα.



**Σχήμα 3.16:** Απεικόνιση όλων των διαρρήξεων στο μοντέλο και οριζόντια τομή στον καρστικό υδροφόρο, σε περιβάλλον ModelMuse (ιδία επεξεργασία).

### 3.5 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Η μέθοδος που επιλέγεται για την ανάλυση ευαισθησίας είναι οι fit independent statistics (Hill and Tiedeman, 2007). Η συγκεκριμένη μέθοδος δεν απαιτεί ακρίβεια στα αποτελέσματα του αρχικού μοντέλου και μπορούν να εισαχθούν απευθείας στην εκτίμηση παραμέτρων. Σε αντίθεση με τις fit dependent statistics οι οποίες χρησιμοποιούνται μόνο σε μοντέλα που έχουν ρυθμιστεί.

#### 3.5.1 ΔΕΙΚΤΕΣ ΣΤΗΝ ΚΛΙΜΑΚΟΥΜΕΝΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ (SCALED SENSITIVITIES)

Ένας από τους βασικούς δείκτες που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση ευαισθησίας είναι ο δείκτης αδιάστατης κλιμακούμενης ευαισθησίας (Dimensionless Scaled Sensitivity – DSS), ο οποίος εκφράζει πόσο δραστική είναι, για το μοντέλο, μία αλλαγή σε μία συγκεκριμένη παράμετρο και σε ποια παρατήρηση γίνεται ορατή. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του DSS τόσο μεγαλύτερη είναι η σημασία της παρατήρησης. Η σύγκριση γίνεται με την αρχική τιμή της παραμέτρου και της τροποποιημένης τιμής η οποία προέκυψε από την συγκεκριμένη επανάληψη. Ο DSS ορίζεται ως:

$$DSS_{ij} = \left( \frac{\partial y_i}{\partial b_j} \right) |b| b_i | \omega_{ii}^{1/2} \quad (3.5)$$

Όπου το  $y'_i$  είναι η προσομοιωμένη τιμή που αντιστοιχεί σε κάθε παρατήρηση,  $b_i$  η  $j^{\text{η}}$  παράμετρος, ο λόγος  $\left(\frac{\partial y'_i}{\partial b_j}\right)$  είναι η ευαισθησίας της  $i^{\text{ης}}$  παρατήρησης στην  $j^{\text{η}}$  παράμετρο,  $b$  είναι διάνυσμα που περιλαμβάνει τις τιμές της παραμέτρου και  $\omega_{ij}$  είναι το βάρος που εκχωρείται στην  $i^{\text{η}}$  παρατήρηση (Hill and Tiedman, 2007).

Όταν αθροιστούν όλοι οι DSS μίας μόνο παραμέτρου υπολογίζεται και ο δείκτης σύνθετης κλιμακούμενης ευαισθησίας (Composite Scaled Sensitivity – CSS), ο οποίος χρησιμοποιείται κυρίως για την επιλογή των πιο ευαίσθητων στο μοντέλο παραμέτρων. Συνεπώς τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του μοντέλου είναι πιο ευαίσθητα σε παραμέτρους με μεγάλη τιμή CSS. Υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$CSS_j = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (DSS_{i,j})^2 \omega_{ij}}{n} \right)^{1/2} \quad (3.6)$$

Όπου, ο όρος  $DSS_{i,j}$  προκύπτει από την παραπάνω εξίσωση.

### 3.5.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ (PARAMETER CORRELATION COEFFICIENT)

Η συσχέτιση μεταξύ διαφορετικών παραμέτρων είναι υψίστης σημασίας στην ανάλυση ευαισθησίας διότι παράμετροι με υψηλή συσχέτιση δεν μπορούν να εκτιμηθούν ανεξάρτητα. Σε αυτή την περίπτωση, όταν χρησιμοποιείται και στην εκτίμηση παραμέτρων, μία εξ αυτών πρέπει να μείνει σταθερή ενώ η άλλη εκτιμάται και αντιστρόφως. Η επιλογή για το ποια παράμετρος θα παραμείνει σταθερή σχετίζεται άμεσα με τον δείκτη CSS. Για παράδειγμα, εάν δύο παράμετροι έχουν υψηλό συντελεστή συσχέτισης, η παράμετρος με την χαμηλότερη ευαισθησία παραμένει σταθερή ενώ αυτή με τη υψηλότερη εκτιμάται. Ο συντελεστής συσχέτισης των παραμέτρων (Parameter Correlation Coefficient – PCC) δίνεται από τη σχέση:

$$PCC_{j,k} = Cov\{b\}_{jk} / [Var\{b\}_{jj} Var\{b\}_{kk}] \quad (3.7)$$

Όπου  $Cov\{b\}_{jk}$  είναι η συνδιακύμανση μεταξύ δύο παραμέτρων και  $Var\{b\}_{jj}$ ,  $Var\{b\}_{kk}$  οι διακυμάνσεις της κάθε παραμέτρου (Hill and Tiedman, 2007).

Ο συντελεστής συσχέτισης κυμαίνεται από -1.0 έως 1.0. Όσον αφορά τον κώδικα UCODE προτείνεται ο PCC να είναι μικρότερος από την απόλυτη τιμή 0.95, για να θεωρείται ένα ζεύγος τιμών ανεξάρτητο (Hill and Tiedman, 2007). Όταν χρησιμοποιούνται παράμετροι με υψηλό συντελεστή συσχέτισης, θα ήταν φρόνιμο να ακολουθείται από μία αιτιολογία (Pouliaris, 2019).

### 3.5.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ (PARAMETER ESTIMATION)

Η εκτίμηση παραμέτρων στοχεύει στην βελτιστοποίηση ενός συνόλου παραμέτρων. Ορίζεται ως το άθροισμα των τετραγώνων των σταθμισμένων διαφορών των παρατηρημένων και προσομοιωμένων τιμών (residuals) και δίνεται από τη σχέση (Hill and Tiedman, 2007):

$$S_{(b)} = \sum_{i=1}^{nh} \omega_i (h_i - h'_i(b))^2 + \sum_{i=1}^{nq} \omega_i (q_i - q'_i(b))^2 + \sum_{i=1}^{npr} \omega_i (P_i - P'_i(b))^2 \quad (3.8)$$

Όπου  $S_{(b)}$  η αντικειμενική συνάρτηση,  $b$  η εξεταζόμενη παράμετρος,  $\omega_i$  το βάρος που εκχωρείται στην παρατήρηση,  $h_i$  η παρατηρημένη τιμή υδραυλικού φορτίου,  $h'_i$  η προσομοιωμένη τιμή υδραυλικού φορτίου,  $q_i$  η παρατηρημένη τιμή παροχής,  $q'_i$  η προσομοιωμένη τιμή παροχής,  $P_i$  η παρατηρημένη τιμή της αρχικής πληροφορίας και  $P'_i$  η προσομοιωμένη τιμή της αρχικής πληροφορίας.

### 3.5.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΕ ΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ UCODE

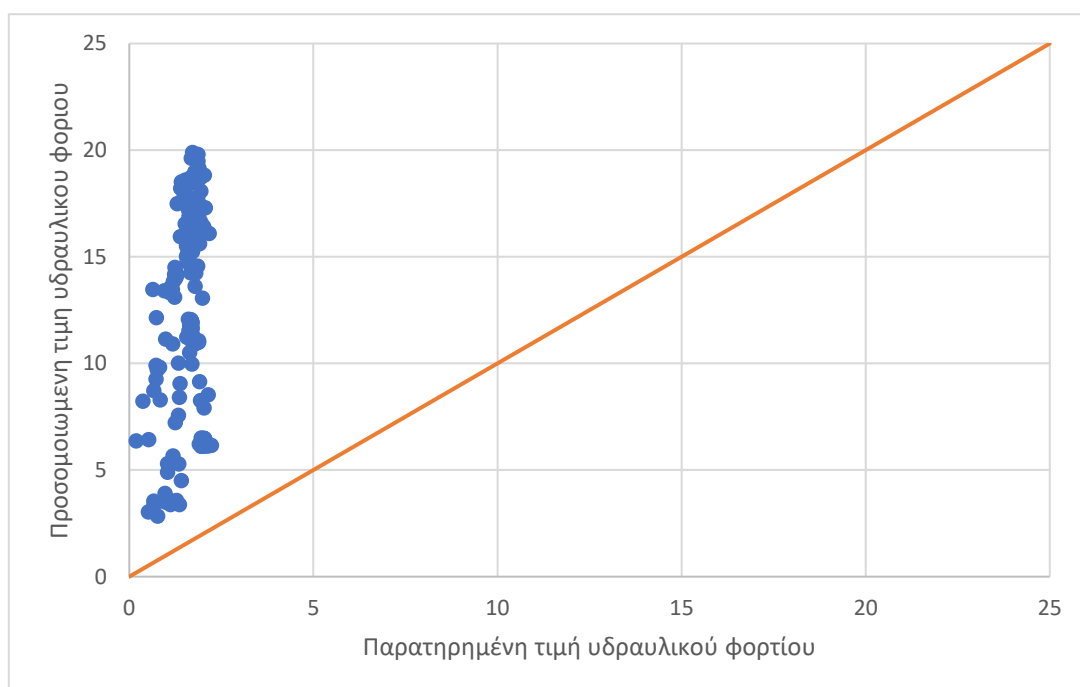
Η ανάλυση ευαισθησίας αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του μοντέλου. Όπως αναφέρθηκε, επιγραμματικά στο Κεφάλαιο 3.1.2 ο κώδικας που επιλέγεται για την ανάλυση είναι ο UCODE. Η χρήση του κώδικα δεν περιορίζεται μόνο στα μοντέλα των υπόγειων υδάτων αλλά επεκτείνεται και σε άλλους τύπους μοντέλων. Το UCODE χειρίζεται έναν αριθμό στατιστικών δεικτών για να ποσοτικοποιήσει την ευαισθησία της κάθε παραμέτρου στο μοντέλο, συγκρίνοντας τις αλλαγές στα υδραυλικά φορτία και των ογκομετρικών ροών που προσομοιώνονται με ένα διαφορετικό ζεύγος παραμέτρων. Κάθε φορά, τα υδραυλικά φορτία και οι ογκομετρικές ροές συγκρίνονται με τις αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές που εισάγονται στο μοντέλο. Κάθε χειρισμός οφείλει να είναι προσεκτικός, έτσι ώστε να αποφεύγονται παρερμηνείες των αποτελεσμάτων και μη ρεαλιστικές προσεγγίσεις του φυσικού συστήματος (Poeter et al., 2005; 2014; Hill and Tiedman, 2007).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του UCODE είναι η εισαγωγή πολλών παραμέτρων κατά την ανάλυση ευαισθησίας. Σε αντίθεση με την πιο παραδοσιακή μέθοδο δοκιμής και σφάλματος, όπου ο χρήστης πρέπει να επιλέξει εξ αρχής τις παραμέτρους οι οποίες αναμένεται να έχουν υψηλή ευαισθησία για να συνεχιστεί η ανάλυση. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτή η σπουδαιότητα του παραπάνω χαρακτηριστικού, ιδίως σε πολύπλοκα μοντέλα με μεγάλο αριθμό παραμέτρων. Επιπρόσθετα, οι παράμετροι που μπορεί αρχικώς να θεωρούνται χαμηλής σημασίας μπορούν να παραλειφθούν από τον χρήστη, για να υπερτονισθούν αυτές με την μεγαλύτερη σημασία για το μοντέλο. Εν τέλει, με το πέρας της διαδικασίας οι κυριότερες παράμετροι χρησιμοποιούνται και στη διαδικασία της εκτίμησης των παραμέτρων.

## 3.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

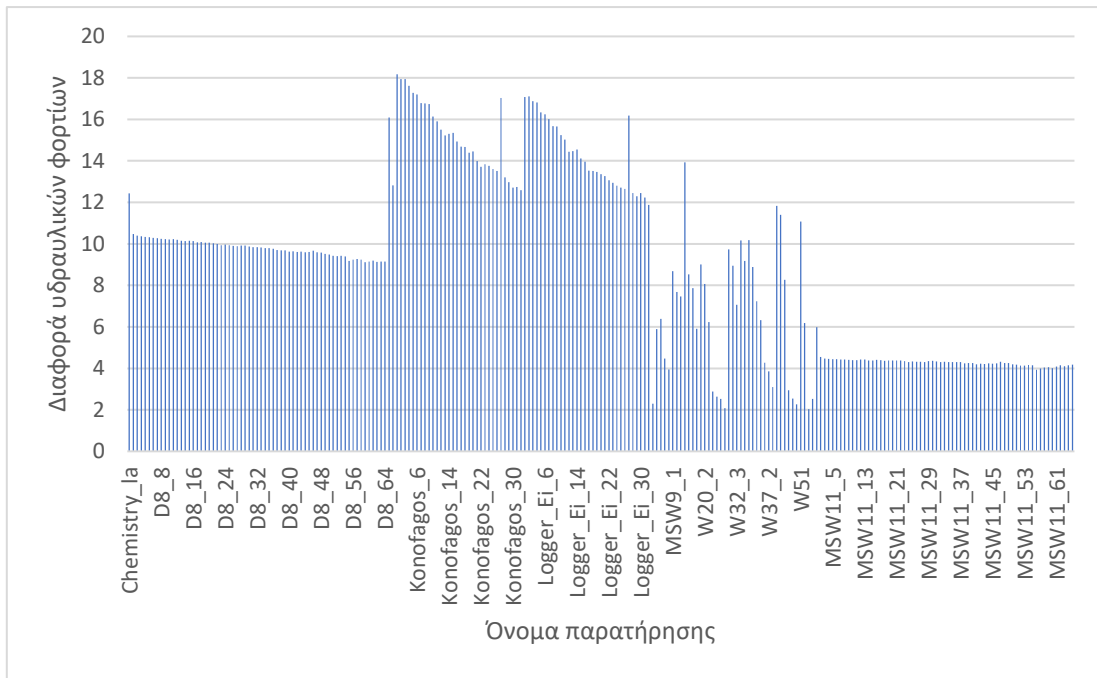
### 3.6.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Όπως αναφέρεται και σε παραπάνω Κεφάλαια το μοντέλο αναπτύχθηκε σε κώδικα MODFLOW – 2005 με τη χρήση του λογισμικού ModelMuse. Στο Σχήμα 3.17 αποδίδονται σχηματικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στα υδραυλικά φορτία. Ο μέσος όρος της διαφοράς μεταξύ προσομοιωμένης και μετρημένης τιμής (Σχήμα 3.18) είναι 9,1 m και το άθροισμα της τετραγωνικής διαφοράς είναι 24222,6 m<sup>2</sup>. Στο Σχήμα 3.19 παρατίθεται το υδατικό ισοζύγιο του μοντέλου.

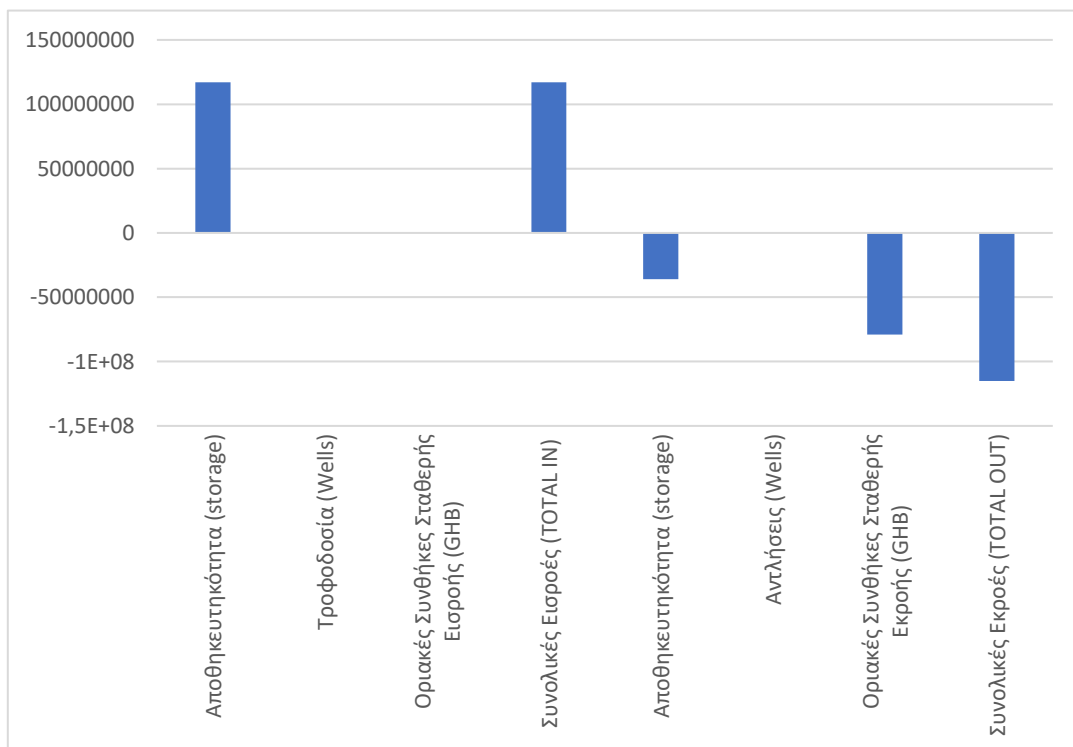


**Σχήμα 3.17:** Διάγραμμα συσχέτισης προσομοιωμένων και παρατηρημένων τιμών υδραυλικού φορτίου με το πέρας της εκτέλεσης του μοντέλου.





**Σχήμα 3.18:** Διάγραμμα με τις καταγεγραμμένες διαφορές στην αντίστοιχη θέση παρατήρησης.



**Σχήμα 3.19:** Υδατικό Ισοζύγιο όπως προέκυψε από την εκτέλεση του μοντέλου.

### 3.6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Η ανάλυση ευαισθησίας στοχεύει στον προσδιορισμό των παραμέτρων στις οποίες είναι πιο ευαίσθητο το μοντέλο. Με άλλα λόγια, εντοπίζονται οι παράμετροι στις οποίες, εάν γίνουν αλλαγές στις τιμές αυτών, παρατηρείται η μεγαλύτερη επιρροή στα αποτελέσματα του μοντέλου. Ως εκ τούτου, οι πιο ευαίσθητες παράμετροι είναι και αυτές οι οποίες χρησιμοποιούνται στο επόμενο βήμα, την προσπάθεια δηλαδή της βελτιστοποίησης των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν αναφέρονται στις οριζόντιες υδραυλικές αγωγιμότητες του μοντέλου, όπως ορίζονται από τον Πίνακα 3.7. Οι οριζόντιες υδραυλικές αγωγιμότητες σχετίζονται με τον αλλουβιακό σχηματισμό (HK\_ALL), την κύρια μάζα (matrix) του ανθρακικού/καρστικού σχηματισμού (HK\_Kgen) και τις αντίστοιχες διαρρήξεις (HK\_FR1, HK\_FR2, HK\_FR3, HK\_FR4, HK\_FR5, HK\_FR6, HK\_FR7, HK\_FR8, HK\_FR9, HK\_FR10, HK\_FR11, HK\_FR12).

*Πίνακας 3.7: Αρχικές τιμές παραμέτρων για την ανάλυση ευαισθησίας.*

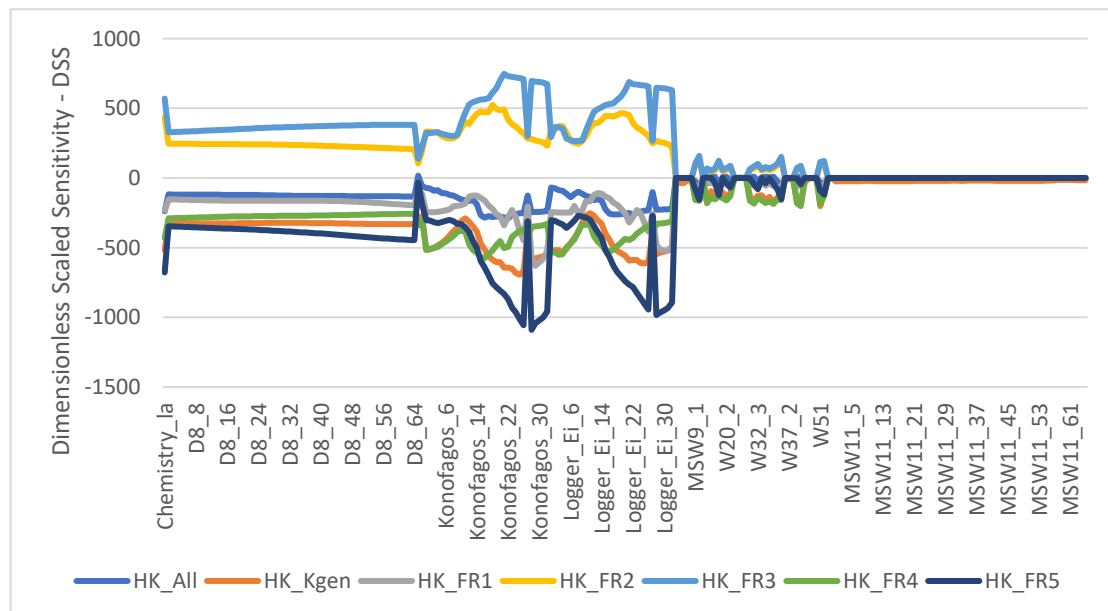
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΑΡΧΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΑΡΧΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ
HK_All	5	HK_FR6	50
HK_Kgen	15	HK_FR7	50
HK_FR1	50	HK_FR8	50
HK_FR2	50	HK_FR9	50
HK_FR3	50	HK_FR10	50
HK_FR4	50	HK_FR11	50
HK_FR5	50	HK_FR12	50

#### 3.6.2.1 Αποτελέσματα Δείκτη DSS (Dimensionless Scaled Sensitivity)

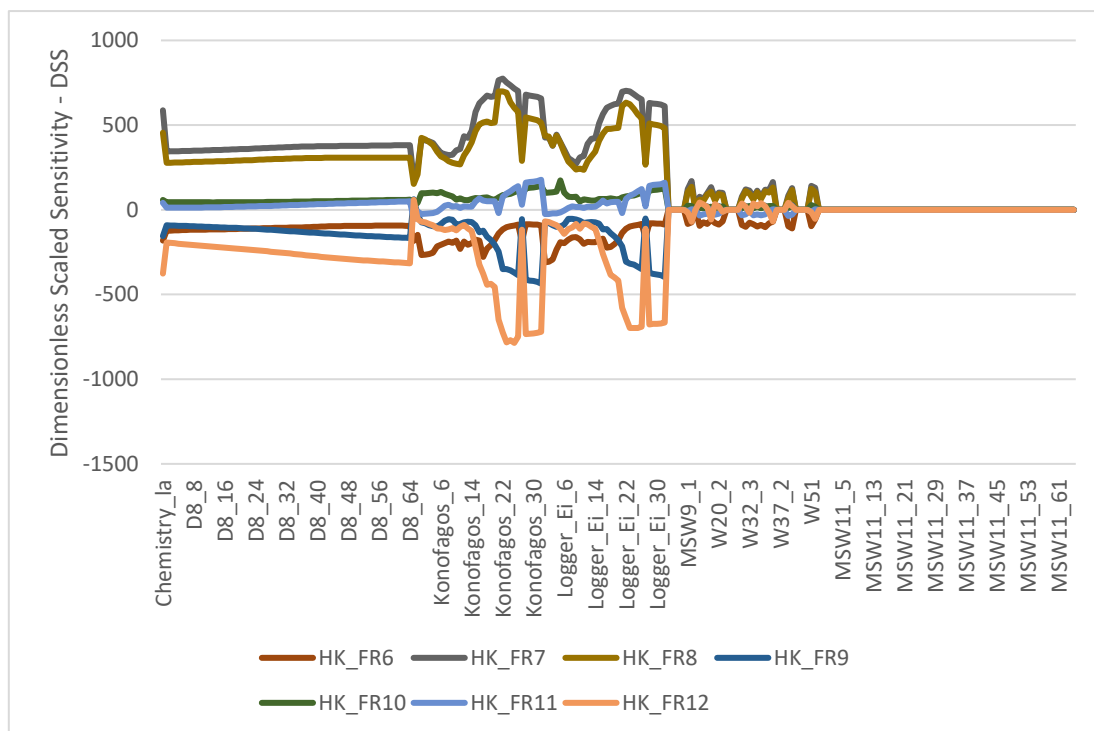
Όπως αναφέρεται ο δείκτης DSS εκφράζει την ευαισθησία μίας παραμέτρου και την θέση παρατήρησης η οποία παρέχει τις περισσότερες πληροφορίες για την συγκεκριμένη παράμετρο. Στον Πίνακα 3.8 παρουσιάζονται οι δύο μεγαλύτερες τιμές του δείκτη DSS της κάθε παραμέτρου και η αντίστοιχη θέση παρατήρησης. Από το Σχήμα 3.20 και Σχήμα 3.21 εντοπίζονται οι θέσεις παρατήρησης Chemistry\_La, Konofagos και Logger\_Ei οι οποίες ανιχνεύουν τις περισσότερες “ανωμαλίες”/ ευαισθησίες για τις παραμέτρους HK\_FR5, HK\_FR7, HK\_FR3 και HK\_Kgen, αλλά και στο σύνολο των παρατηρήσεων. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι θέσεις παρατήρησης που αναφέρονται παραπάνω βρίσκονται εντός του καρστικού υδροφόρου.

**Πίνακας 3.8:** Καταγραφή αποτελεσμάτων των δύο πρώτων μέγιστων τιμών του δείκτη DSS.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΠΡΩΤΗ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΤΙΜΗ DSS	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ	ΔΕΥΤΕΡΗ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΤΙΜΗ DSS	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ
HK_FR5	-1089,53	Konofagos_28	-1055,74	Konofagos_26
HK_FR7	774,77	Konofagos_22	764,80	Konofagos_21
HK_FR3	747,04	Konofagos_21	730,75	Konofagos_22
HK_Kgen	-694,35	Konofagos_25	-682,94	Konofagos_24
HK_FR9	699,03	Konofagos_21	698,56	Konofagos_22
HK_FR4	-575,83	Konofagos_16	-566,77	Konofagos_15
HK_FR13	-785,85	Konofagos_25	-782,01	Konofagos_23
HK_FR2	523,95	Konofagos_18	496,39	Konofagos_19
HK_FR1	-630,52	Konofagos_29	-605,42	Konofagos_30
HK_FR10	-435,69	Konofagos_32	-425,15	Konofagos_31
HK_All	-289,49	Konofagos_22	-284,74	Konofagos_16
HK_FR6	-310,32	Logger_Ei_1	-306,11	Logger_Ei_2
HK_FR11	173,68	Logger_Ei_5	142,53	Konofagos_32
HK_FR12	177,42	Konofagos_32	169,61	Konofagos_31



**Σχήμα 3.20:** Διάγραμμα αποτελεσμάτων του δείκτη DSS για τις πρώτες επτά παραμέτρους.



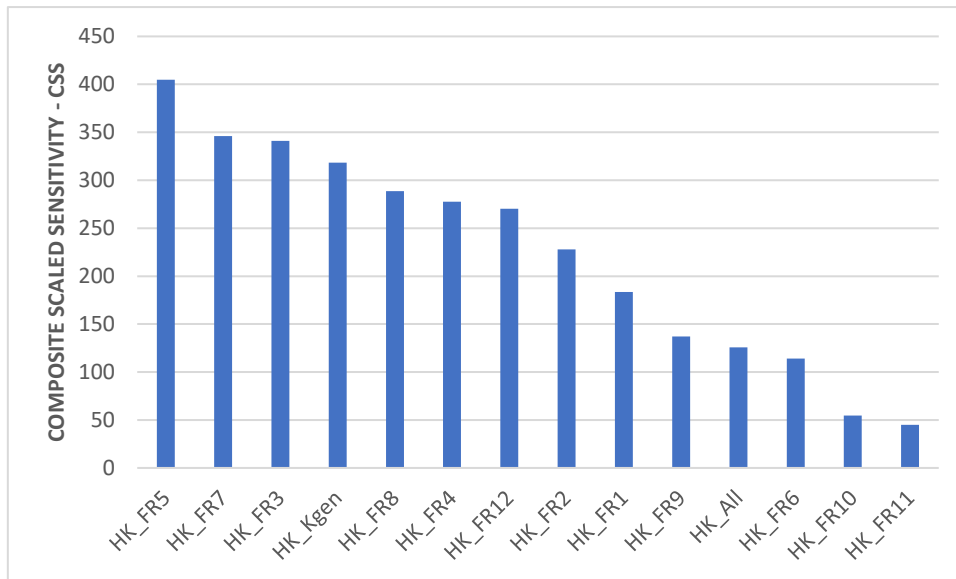
Σχήμα 3.21: Διάγραμμα αποτελεσμάτων του δείκτη DSS για τις τελευταίες επτά παραμέτρους.

### 3.6.2.2 Αποτελέσματα Δείκτη CSS (Composite Scaled Sensitivity)

Όπως αναφέρθηκε ο δείκτης CSS ποσοτικοποιεί την ευαισθησία μίας παραμέτρου με βάση το σύνολο των παρατηρήσεων. Στον Πίνακα 3.9 παρατίθενται οι υπολογισμένες τιμές για τον δείκτη CSS, με τις παραμέτρους HK\_FR5, HK\_FR7, HK\_FR3 και HK\_Kgen να ξεχωρίζουν σημαντικά. Το Σχήμα 3.22 αποδίδει γραφικά τις τιμές των παραμέτρων του δείκτη CSS σε φθίνουσα σειρά.

Πίνακας 3.9: Φθίνουσα κατανομή αποτελεσμάτων της τιμής του δείκτη CSS.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ CSS	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ CSS
HK_FR5	404,81	HK_FR2	227,83
HK_FR7	346,11	HK_FR1	183,33
HK_FR3	340,94	HK_FR9	137,24
HK_Kgen	318,46	HK_All	125,80
HK_FR8	288,62	HK_FR6	114,12
HK_FR4	277,57	HK_FR10	54,75
HK_FR12	270,31	HK_FR11	45,01

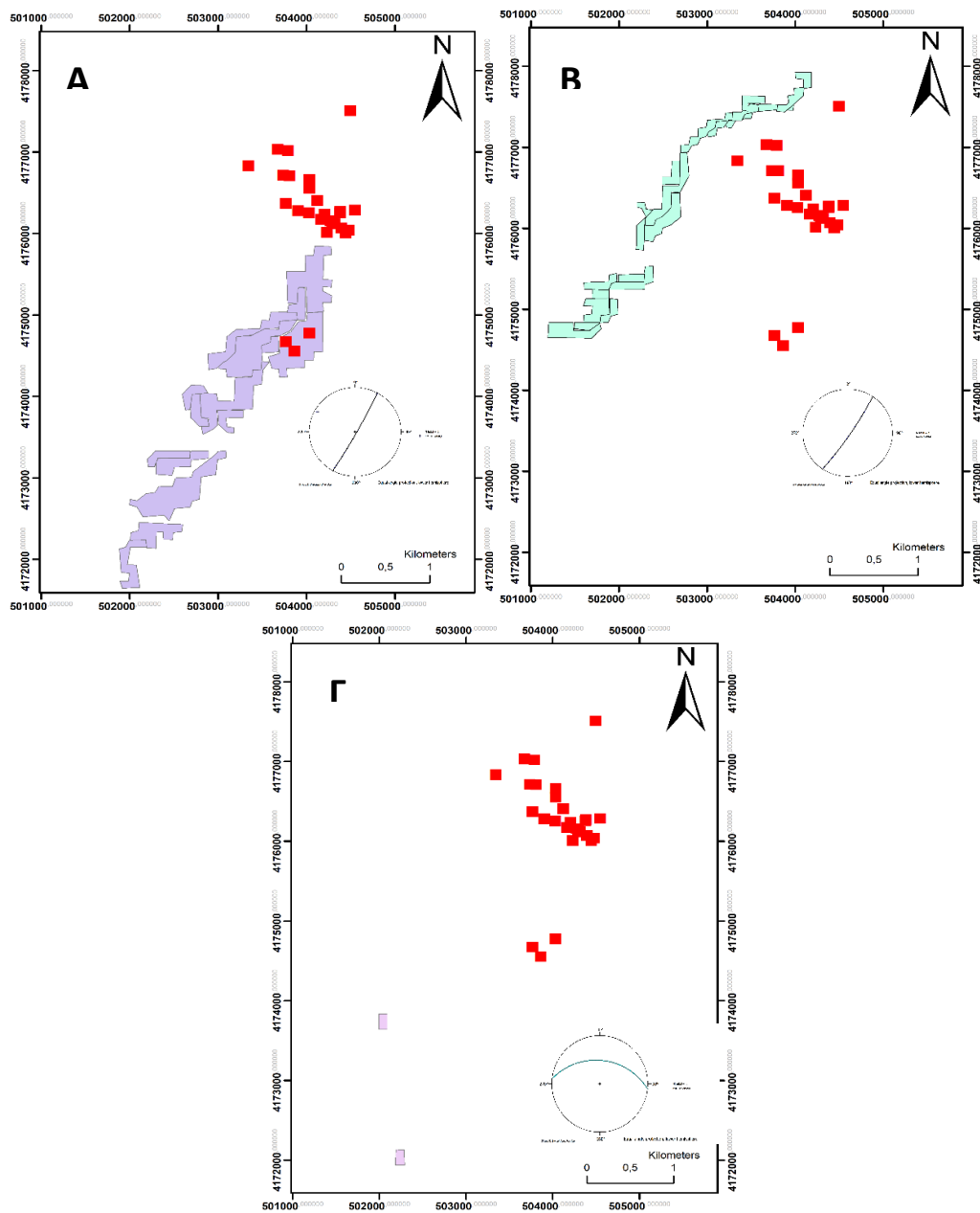


**Σχήμα 3.22:** Διάγραμμα ευαισθησίας του δείκτη CSS για κάθε εξεταζόμενη παράμετρο.

Για την καλύτερη κατανόηση του αποτελέσματος της υψηλής ευαισθησίας των παραμέτρων παρατίθεται το Σχήμα 3.23, που αποδίδει χωρικά τις διαρρήξεις και τις θέσεις των παρατηρήσεων (HOB), με την συνολική απεικόνιση των πολυγώνων σε όλα τα στρώματα:

- Η **διάρρηξη 5** (HK\_FR5) (Σχήμα 3.23A) διασχίζει τις παρατηρήσεις Chemistry\_Ia, Κοποφαγος και Logger\_Ei, οι οποίες όπως αναφέρεται σε παραπάνω Κεφάλαιο βρίσκονται στον καρστικό υδροφόρο. Εκτείνεται σε ένα μεγάλο μέρος του πεδίου ορισμού του μοντέλου με συνολικά 14 πολύγωνα ασυνέχειας.
- Η **διάρρηξη 7** (HK\_FR7) φαίνεται να μην διασχίζει τις παρατηρήσεις, ωστόσο καταλαμβάνει σημαντικό μέρος του πεδίου ορισμού με 15 επιμέρους πολύγωνα (Σχήμα 3.23B).
- Η **διάρρηξη 3** (HK\_FR3) εμφανίζεται σε ένα πολύ μικρό κομμάτι του μοντέλου, με συνολικά 2 πολύγωνα να την ορίζουν (Σχήμα 3.23Γ). Η υψηλή ευαισθησία της διάρρηξης fracture 3 σε συνδυασμό με την περιορισμένη εμφάνισή της εγείρουν προβληματισμούς, οι οποίοι όμως απαντώνται στη συνέχεια των Κεφαλαίων.

Τέλος, η τέταρτη πιο σημαντική παράμετρος είναι η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα της συνολικής κύριας μάζας (matrix) του ανθρακικού/καρστικού σχηματισμού. Η απεικόνισή της δεν κρίνεται αναγκαία, διότι καταλαμβάνει το σύνολο του πεδίου ορισμού εξαιρώντας τις επιμέρους διαρρήξεις.



**Σχήμα 3.23:** (Α) Η διάρρηξη 5, (Β) η διάρρηξη 7 και (Γ) η διάρρηξη 3 με τις αντίστοιχες στερεογραφικές τους προβολές. Τα κόκκινα σημεία δηλώνουν τις θέσεις των παρατηρήσεων (HOB), σε περιβάλλον ArcGIS.

### 3.6.2.3 Αποτελέσματα Συντελεστή Συσχέτισης PCC (Parameter Correlation Coefficient)

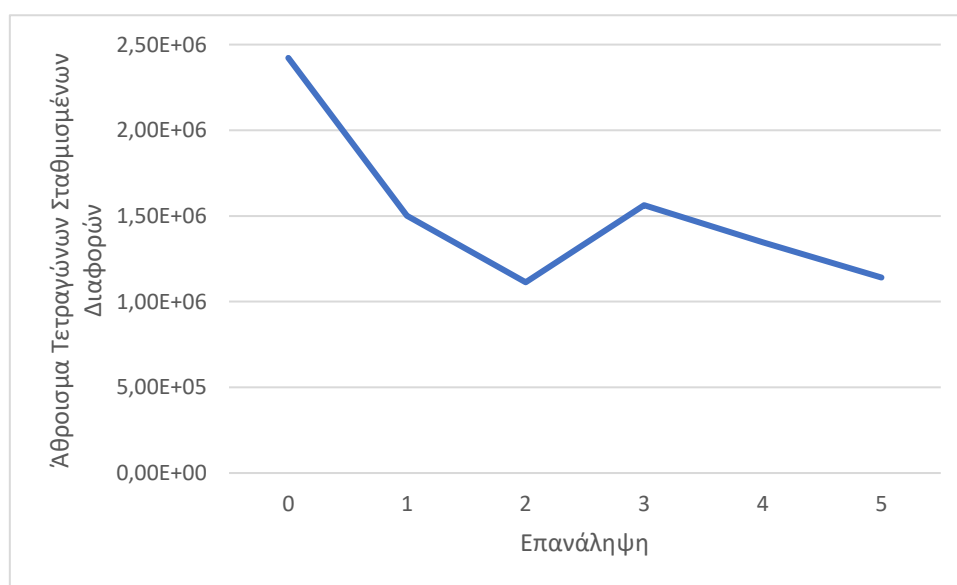
Ο συντελεστής συσχέτισης PCC ορίζει το βαθμό συσχέτισης ανάμεσα στα ζεύγη των παραμέτρων και κατά πόσο η δράση της μίας επιφέρει αλλαγές στην άλλη παράμετρο. Στην παρούσα περίπτωση όπου εξετάζονται 14 παράμετροι υδραυλικής αγωγιμότητας ο συντελεστής PCC είναι εξαιρετικά μικρός. Συνεπώς, καμία από τις μεταβλητές δεν σχετίζονται και μπορούν να εκτιμηθούν ανεξάρτητα.

### 3.6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΙΜΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ (PARAMETER VALUE ESTIMATION)

Για την διαδικασία εκτίμησης των τιμών των παραμέτρων χρησιμοποιείται ο κώδικας UCODE και το γραφικό περιβάλλον ModelMate (όπως και στην ανάλυση ευαισθησίας). Βασικό γνώρισμα της διαδικασίας είναι ο αριθμός επαναλήψεων που ορίζει ο χρήστης, με στόχο την μείωση του αθροίσματος των τετραγώνων των σταθμισμένων διαφορών (sum of squared weighted residuals) και την βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Στην διαδικασία εκτίμησης παραμέτρων επιλέγονται οι πιο ευαίσθητες παράμετροι (υψηλός δείκτης CSS), δηλαδή η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα των διαρρήξεων 5, 7 και 3 (HK\_FR5, HK\_FR7 HK\_FR3) καθώς και την οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα της κύριας μάζας (matrix) του πετρώματος (HK\_Kgen).

Στον Πίνακα 3.10 και το Σχήμα 3.24 παρατίθενται οι μεταβολές στις τιμές των παραμέτρων σε κάθε επανάληψη καθώς και το αντίστοιχο άθροισμα των τετραγώνων των σταθμισμένων διαφορών. Το ελάχιστο άθροισμα των τετραγώνων των σταθμισμένων διαφορών επιτυγχάνεται από τη δεύτερης κιάλας επανάληψη.

Ο συντελεστής συσχέτισης PCC για τις παραμέτρους HK\_Kgen και HK\_FR3 είναι 0,96, ξεπερνάει το όριο των 0,95 και τις καθιστά συσχετιζόμενες. Το γεγονός αυτό εξηγεί εν μέρει την εμφάνιση της μικρής διάρρηξης 3 (HK\_FR3) ως μία ευαίσθητη παράμετρο, καθώς προκύπτει ότι έχει άμεση σχέση με την συνολική αγωγιμότητα της κύριας μάζας (HK\_Kgen) και ίσως θα έπρεπε να συμπεριληφθεί σε αυτή.

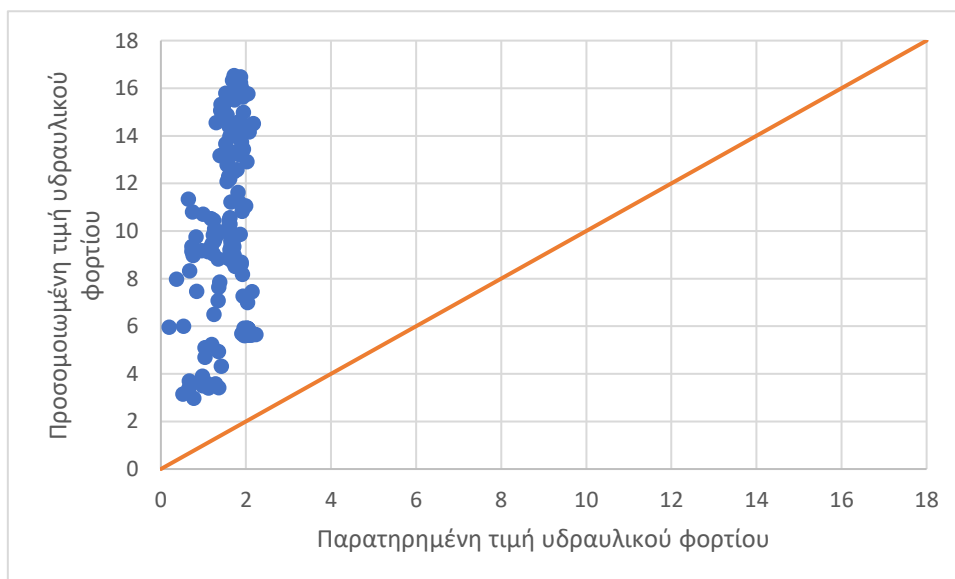


**Σχήμα 3.24:** Διάγραμμα της μεταβολής του αθροίσματος των τετραγώνων σταθμισμένων διαφορών σε κάθε επανάληψη.

**Πίνακας 3.10:** Αποτελέσματα από την εκτίμηση παραμέτρων που αφορούν τις μεταβολές των τιμών στις παραμέτρους και στο άθροισμα των τετραγώνων σταθμισμένων διαφορών.

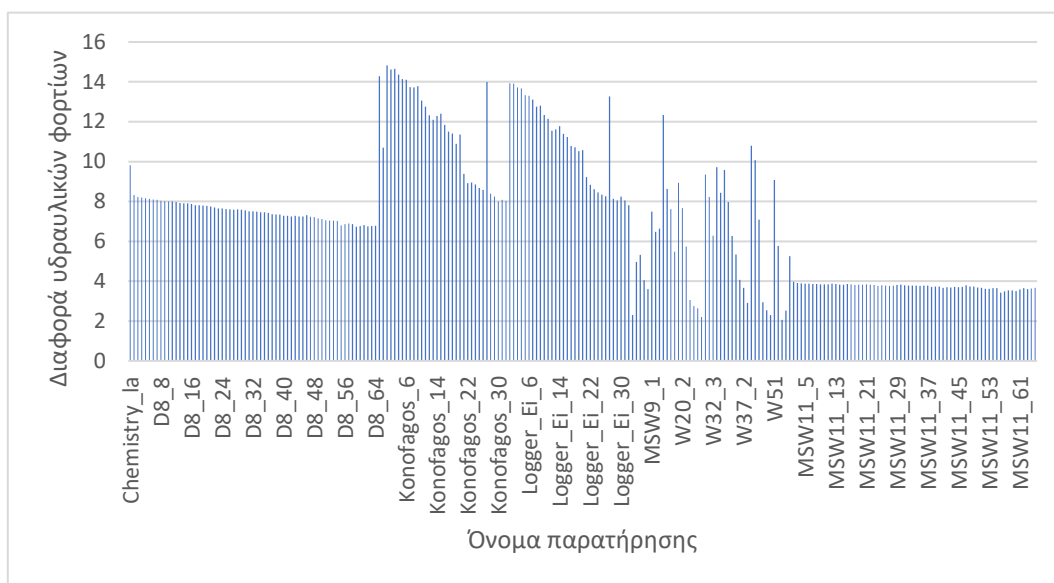
ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ	HK_Kgen (m/day)	HK_FR3 (m/day)	HK_FR5 (m/day)	HK_FR7 (m/day)	ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΤΕΤΡΑΓΩΝΩΝ ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ
0	15,00	50,00	50,00	50,00	2,42E+06
1	18,41	50,91	46,93	44,27	1,50E+06
2	22,62	44,63	38,43	53,41	1,11E+06
3	22,79	40,90	32,73	66,30	1,56E+06
4	22,91	42,83	29,43	103,60	1,35E+06
5	23,22	50,84	27,13	87,26	1,14E+06

Τελικώς, γίνεται η επιλογή του ελάχιστου αθροίσματος των τετραγώνων των σταθμισμένων διαφορών (επανάληψη no.2) με τις αντίστοιχες τιμές παραμέτρων  $HK\_Kgen = 22,62$  m/day,  $HK\_FR3 = 44,63$  m/day,  $HK\_FR5 = 38,43$  m/day και  $HK\_FR12 = 53,41$  m/day για την εκ νέου εισαγωγή τους στο μοντέλο. Τα αποτελέσματα της δεύτερης εκτέλεσης του μοντέλου με τις νέες τιμές φαίνονται στο Σχήμα 3.25. Ο μέσος όρος της διαφοράς μεταξύ προσομοιωμένης και παρατηρημένης τιμή είναι 7,26 m και το άθροισμα της τετραγωνικής διαφοράς είναι 15.105,2 m<sup>2</sup>.



**Σχήμα 3.25:** Διάγραμμα συσχέτισης προσομοιωμένων και παρατηρημένων τιμών υδραυλικού φορτίου με το πέρας της δεύτερης εκτέλεσης του μοντέλου.





**Σχήμα 3.26:** Διάγραμμα με τις νέες καταγεγραμμένες διαφορές στην αντίστοιχη θέση παρατήρησης.

### 3.6.4 ΟΛΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Από την παρατήρηση του Σχήματος 3.23 και τις πληροφορίες του Κεφαλαίου 3.3 γίνεται αντιληπτό ότι οι δύο πρώτες ευαίσθητες παράμετροι (διαρρήξεις 5 και 7) ανήκουν στην ομάδα Α, των διατμητικών διαρρήξεων, με στοιχεία επιπέδου  $86^{\circ}/119^{\circ}$  και  $83^{\circ}/124^{\circ}$  (κλίση/φορά μέγιστης κλίσης) αντίστοιχα. Συνεπώς, το μοντέλο παρουσιάζει ευαισθησία όχι μόνο στην έκταση της εκάστοτε διάρρηξης αλλά και στην κλίση, με τις διατμητικές διαρρήξεις να κατέχουν τις πρώτες θέσεις στο μοντέλο.

Η επόμενη παράμετρος με αξιόλογη ευαισθησία είναι η KH\_FR3 (διάρρηξη fracture 3) με στοιχεία μέτρησης  $38^{\circ}/006^{\circ}$ , η οποία ανήκει στην ομάδα Β των εφελκυστικών διαρρήξεων και παρουσιάζει την μικρότερη κλίση από όλες τις επιλεγμένες διαρρήξεις. Για το λόγο αυτό η εμφάνισή της είναι πολύ περιορισμένη και θα ήταν ωφέλιμο να συμπεριληφθεί και αυτή μελλοντικά στην συνολική οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα της κύριας μάζας (matrix), όπως αποδείχθηκε από τον υψηλό συντελεστή συσχέτισης στη διαδικασία της εκτίμησης παραμέτρων. Η υψηλή ευαισθησία της παραμέτρου πιθανά σχετίζεται με την οριζόντια δομή της, καθώς στην ανάλυση ευαισθησίας εξετάζονταν οι οριζόντιες υδραυλικές αγωγιμότητες των επιμέρους παραμέτρων. Στο ίδιο πλαίσιο με την παράμετρο HK\_FR3 ερμηνεύεται και η υψηλή ευαισθησία της οριζόντιας υδραυλικής αγωγιμότητας της συνολικής κύριας μάζας (matrix) του ανθρακικού σχηματισμού (HK\_Kgen).

Σε αυτό το σημείο οφείλουν να παρατηρηθούν οι συνολικές τιμές του δείκτη CSS για κάθε παράμετρο. Ο Πίνακας 3.9 καταγράφει ιδιαίτερα υψηλές τιμές, γεγονός που υποδεικνύει τη αξιοσημείωτη σημασία σχεδόν όλων των εξεταζόμενων παραμέτρων στο μοντέλο που καταστρώθηκε για το καρστικό σύστημα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας επιχειρήθηκε αρχικά μία ολοκληρωμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση, ικανή να περιγράψει τα γενικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης:

- Η έκταση της περιοχής μελέτης ανέρχεται στα 60km<sup>2</sup>, βρίσκεται στη νοτιοανατολική ακτή της Αττικής χερσονήσου και ανήκει στον Δήμο Λαυρεωτικής. Ο δήμος του Λαυρίου έχει έκταση περίπου 42.000 στρεμμάτων και πληθυσμό 7.078. Η πόλη του Λαυρίου ήταν γνωστή από την αρχαιότητα για τα ορυχεία μεταλλευμάτων αργύρου για κατασκευή νομισμάτων και τις Λαυρεωτικές Γλαύκες.
- Η περιοχή χαρακτηρίζεται από ήπιο ανάγλυφο, κατά περιοχές λοφώδεις. Η αποστράγγιση της περιοχής γίνεται από Βορρά προς τα Ανατολικά.
- Το κλίμα θεωρείται ημίξηρο, με ήπιο χειμώνα και ζεστό θέρος. Τα υδροκλιματικά δεδομένα συλλέχθηκαν από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, για την περίοδο Μάιος 2010 έως Μάιος 2020. Έπειτα από εκτενή μελέτη προέκυψε η μέση μηνιαία ελάχιστη θερμοκρασία της 10ετίας στους 11,6° C και η μέση μηνιαία μέγιστη θερμοκρασία της 10ετίας στους 27,1° C. Για τα κατακρημνίσματα η μέση μηνιαία τιμή της 10ετίας είναι περί τα 34,4 mm και η μέση ετήσια 378,1 mm. Η εξατμισοδιαπνοή φτάνει στο μέγιστο τους μήνες Μάιο και Σεπτέμβριο.
- Από γεωλογικής σκοπιάς η περιοχή μελέτης ανήκει στο βορειοδυτικό κομμάτι του μεταμορφικού πυρήνα της Αττικο-Κυκλαδικής. Η κύρια δομή, που παρατηρείται είναι ένα σχεδόν οριζόντιο όγκιμο προς θραυσιγενές (ductile-to-brittle) ρήγμα αποκόλλησης (detachment), το οποίο διαχωρίζει τις βασικές τεκτονοστρωματογραφικές ενότητες. Το δάπεδο του ρήγματος αποκόλλησης απαρτίζεται από την Ενότητα Καμάριζας, η οποία αποτελείται από το Κατώτερο Μάρμαρο Καμάριζας, τους Σχιστόλιθους Καμάριζας και το Ανώτερο Μάρμαρο Καμάριζας. Ενώ στην οροφή τοποθετείται η Ενότητα Λαυρίου (Υμηττού), αποτελούμενη από το Μάρμαρο Πούντας, τους Σχιστόλιθους Λαυρίου και τα Μάρμαρα Μαυροβουνίου. Τεκτονικά ανώτερη ενότητα είναι αυτή του Μπερτζέκου. Στη περιοχή της Πλάκας βρίσκεται ο γρανοδιορίτης, του οποίου η διείδυση έγινε κατά το Ανώτερο Μειόκαινο. Τέλος, μεγάλη έκταση στη περιοχή μελέτης καταλαμβάνουν οι Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις.
- Από άποψη τεκτονικής των σχηματισμών η κατώτερη ενότητα Καμάριζας, η οποία αποτελεί το δάπεδο (footwall) του ρήγματος αποκόλλησης, χαρακτηρίζεται από γράμμωση έκτασης με διεύθυνση ΒΒΑ-ΝΝΔ παράλληλες με τους άξονες των πτυχών και φορά κίνησης ΝΝΔ. Σε περιοχές απομακρυσμένες από το detachment

παρουσιάζονται γραμμώσεις διεύθυνσης ABA-ΔΝΔ, οι οποίες όμως είναι σπανιότερες.

- Δεν υπάρχει ιδιαίτερη ανάπτυξη υδρογραφικού δικτύου στην εξεταζόμενη περιοχή. Με εξαίρεση ένα χείμαρρο εφήμερης ροής με διεύθυνση από βόρεια της Κερατέας προς το Νότο κατευθυνόμενο στον Κόλπο του Θορικού.
- Στην περιοχή μελέτης αναπτύσσονται δύο υπόγειοι υδροφορείς. Ο ανώτερος τοποθετείται στις τεταρτογενείς αποθέσεις και το πάχος του ποικίλει από 0 – 20 m. Ο κατώτερος υδροφόρος ορίζοντας αναπτύσσεται στο Ανώτερο Μάρμαρο της Ενότητας Καμάριζας με το πάχος του υδροφόρου στρώματος να φθάνει τα 50 m. Η κύρια τροφοδοσία και των δύο υδροφόρων γίνεται μέσω των κατακρημνισμάτων με τον αλλουβιακό να κατέχει το 15,53% και τον καρστικό το 38% του ρυθμού βροχόπτωσης.
- Η υδραυλική επικοινωνία των υδροφόρων διέπεται από ένα πολύπλοκο καθεστώς, η κύρια τάση όμως είναι η τροφοδοσία του αλλουβιακού κοκκώδη υδροφόρου από τον καρστικό, με μερικές μόνο σημειακές εξαιρέσεις.

#### 4.2 ΕΙΔΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μεθοδολογία που ακολουθείται στην περιοχή μελέτης καταλήγει στα παρακάτω ειδικότερα σημεία:

- Το παρόν μοντέλο βασίζεται σε ένα πρότυπο μοντέλο που αναπτύσσεται από τον Rouliaris (2019) με τη χρήση του κώδικα MODFLOW – CFP, για την ίδια περιοχή μελέτης. Από το μητρικό μοντέλο διατηρείται η πλειοψηφία των παραμέτρων και των πακέτων. Η βασική διαφοροποίηση, πέραν της προσέγγισης των αποτελεσμάτων, είναι η ανάπτυξη του παρόντος μοντέλου με τον κώδικα MODFLOW 2005.
- Πριν από κάθε απόπειρα προσομοίωσης, γίνεται επίσκεψη στη περιοχή μελέτης για την συλλογή μετρήσεων υπαίθρου του καρστικού σχηματισμού, οι οποίες αφορούν αποκλειστικά το Ανώτερο Μάρμαρο της Ενότητας Καμάριζας. Οι μετρήσεις έγιναν σε επιφάνειες διαρρήξεων, με εμφανή ή και όχι κινηματική και με την τήρηση ορισμένων κριτηρίων που οφείλουν να τίθενται για την αξιοπιστία των δεδομένων.
- Η παραχώρηση αρχείου από τον Rouliaris (2019) πάνω σε συμπληρωματικές μετρήσεις διαρρήξεων αποτελεί εξαιρετική συμβολή για την σύνθεση και ομαδοποίηση όλων των δεδομένων. Η διαδικασία επεξεργασίας καταλήγει σε τέσσερις ξεχωριστές ομάδες με διαφορετικές διευθύνσεις και κλίσεις. Η ομάδα Α περιέχει 61 επίπεδα διαρρήξεων με σχεδόν κατακόρυφες κλίσεις και διεύθυνση BBA-ΝΝΔ. Η ομάδα Β περιλαμβάνει 70 διαρρήξεις με δύο ομάδες κλίσεων, υψηλής και

μέτριας, αλλά με την ίδια διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ. Η ομάδα Γ χαρακτηρίζεται από διαρρήξεις μέτριας έως μικρής κλίσης και διεύθυνσης ΒΒΑ-ΝΝΔ, με 30 συνολικά μετρήσεις. Τέλος, η μικρότερη ομάδα Δ η οποία αποτελείται από 16 μετρήσεις προσανατολίζεται ΒΔ-ΝΑ και οι κλίσεις της ποικίλουν από χαμηλές έως υψηλές τιμές.

- Βάσει της τεκτονικής της περιοχής μελέτης η παραπάνω ομάδες χαρακτηρίζονται σε σχέση με τη γεωμετρία τους ως προς την γράμμωση έκτασης ή των άξονα των πτυχών. Εκείνες που είναι παράλληλες ή διαγώνιες στην διεύθυνση της γράμμωσης, δηλαδή η ομάδα Α, Γ και Δ, χαρακτηρίζονται ως διατμητικές. Ενώ αυτές που παρουσιάζουν μία σχέση καθετότητας με την γράμμωση έκτασης χαρακτηρίζονται εφελκυστικές. Από άποψη τεκτονικής στην διατομή διατμητικών και εφελκυστικών διαρρήξεων, θεωρητικά γίνεται ενίσχυσης της καρστικοποίησης.
- Το μοντέλο αναπτύσσεται στον κώδικα MODFLOW-2005, έναν από τους πιο διαδεδομένους υπολογιστικούς κώδικες για την προσομοίωση ροής των υπόγειων νερών. Το γραφικό περιβάλλον που αποτυπώνεται το μοντέλο είναι το ModelMuse, ένα πραγματικά χρήσιμο εργαλείο για την χωρική διαχείριση των παραμέτρων του μοντέλου.
- Το πεδίο ορισμού του μοντέλου της περιοχής διακριτοποιείται χωρικά σε κάρναβο 50×69, με κελιά διαστάσεων 100×100 m. Το μοντέλο διαχωρίζεται σε οκτώ επιμέρους στρώματα με πρώτο τον αλλουβιακό σχηματισμό, ελάχιστου πάχους 3 m. Έπονται 6 στρώματα για τον υπό εξέταση καρστικό υδροφόρο για την βέλτιστη προσομοίωση και συμπεριφορά των υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών του, πάχους 10 m το καθένα. Τέλος ορίζεται το αδιαπέρατο υπόβαθρο του υδροφόρου συστήματος που αντιστοιχεί στο σχιστολιθικό σχηματισμό.
- Τα πακέτα (packages) που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση του υδροφόρου συστήματος είναι το LPF, για την εισαγωγή των υδραυλικών αγωγιμοτήτων των παραμέτρων, το WEL για την τροφοδοσία του καρστικού συστήματος, το HOB για την εισαγωγή και εξαγωγή των δεδομένων των υδραυλικών φορτίων στις αντίστοιχες θέσης παρατήρησης και τέλος το GHB για τις σταθερές εισροές της θάλασσας με το υπόγειο σύστημα. Τα παραπάνω πακέτα αποτελούν τις οριακές συνθήκες, οι οποίες επιτυγχάνουν τη ρύθμιση του μοντέλου.
- Η προσομοίωση του συστήματος διακριτοποιείται χρονικά για διάστημα 2 ετών-από τον Ιανουάριο 2014 έως τον Δεκέμβριο 2015- ενώ η κάθε περίοδος φόρτισης αντιστοιχεί σε ένα μήνα και το βήμα είναι ημερήσιο.
- Οι επιλεγμένες διαρρήξεις εισάγονται στο μοντέλο μέσω εξίσωσης που μετατρέπει, μέσω μεθόδων παρεμβολής, τις συντεταγμένες το υψόμετρο και τα στοιχεία της μέτρησης σε γεωχωρική πληροφορία. Κάθε διάρρηξη που εμφανίζεται σε κάθε στρώμα, ψηφιοποιείται με ένα πολύγωνο συγκεκριμένης οριζόντιας υδραυλική αγωγιμότητας. Η επιλογή των πολυγώνων έναντι της επιλογής των αγωγών ερμηνεύεται ως μία διάσπαρτη κατανομή εκτεταμένων ζωνών ασυνέχειας μέσα στον

καρστικό υδροφορέα που διαφοροποιεί τη ροή Darcy στους κόκκους (matrix) και ενοποιεί την ροή στις διακλάσεις και τους αγωγούς.

- Από την επεξεργασία των διαρρήξεων στο λογισμικό παρατηρείται η ανεπάρκεια συγκεκριμένης δομής σε πολύ μικρής κλίσης αλλά και σχεδόν κατακόρυφα επίπεδα. Οι πρώτες ταυτίζονται με το οριζόντιο επίπεδο και οι δεύτερες εμφανίζονται μόνο σε επιλεγμένα κελιά στην κάτοψη του πεδίου ορισμού. Για το λόγο αυτό συμπεριλαμβάνονται ως τιμές στη συνολική υδραυλική αγωγιμότητα της κύριας μάζας (matrix).
- Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του μοντέλου συγκρίνονται με τις μετρημένες τιμές πεδίου. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις στα υδραυλικά φορτία παρατηρούνται με πιο ευδιάκριτα στις θέσεις παρατήρησης του καρστικού υδροφορέα «Konofagos» και «Logger\_Ei».
- Για την ανάλυση ευαισθησίας και την εκτίμηση παραμέτρων χρησιμοποιείται ο κώδικας UCODE μέσω του λογισμικού ModelMate και εφαρμόζεται η μέθοδος των fit independent statistics για τον προσδιορισμό της κλιμακούμενης ευαισθησίας (scaled sensitivities) και το συντελεστή συσχέτισης παραμέτρων.
- Οι παράμετροι που ελέγχονται στην ανάλυση ευαισθησίας είναι οι οριζόντιες υδραυλικές αγωγιμότητες 12 διαρρήξεων (HK\_FR1-12), η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα στην κύρια μάζα (matrix) του ανθρακικού πετρώματος (HK\_Kgen) και η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα του αλλουβιακού σχηματισμού (HK\_All). Τελικώς, βάσει του δείκτη CSS οι πιο σημαντικές παράμετροι για το μοντέλο είναι η HK\_FR5, HK\_FR7, HK\_FR3 και HK\_Kgen και η τιμή του συντελεστή συσχέτισης ορίζει τις παραμέτρους πλήρως ανεξάρτητες.
- Για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων στα υδραυλικά φορτία του μοντέλου, αλλά κυρίως για την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των σταθμισμένων τετραγωνικών διαφορών, πραγματοποιείται η διαδικασία της εκτίμησης παραμέτρων. Οι υπό εξέταση παράμετροι ορίζονται αυτές με την μεγαλύτερη τιμή του δείκτη CSS, δηλαδή οι HK\_FR5, HK\_FR7, HK\_FR3 και HK\_Kgen ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι επιλέχθηκαν να μην συμπεριληφθούν. Στο στάδιο αυτό οι παράμετροι HK\_FR3 και HK\_Kgen αξιολογούνται ως μερικώς εξαρτώμενες, διότι ο συντελεστής συσχέτισής τους είναι 0,96.
- Οι παράμετροι με την υψηλότερη ευαισθησία (HK\_FR5, HK\_FR7) ανήκουν στην ομάδα Α των διατμητικών διαρρήξεων ενώ η παράμετρος HK\_FR3 στην ομάδα Β των εφελκυστικών. Συνεπώς, το μοντέλο φαίνεται να διέπεται από μία συγκεκριμένη ευαισθησία στις διατμητικές διαρρήξεις μεγάλων κλίσεων, παρά το γεγονός ότι εξετάζεται η οριζόντια και όχι η κατακόρυφη υδραυλική αγωγιμότητα. Αντιθέτως, η παράμετρος HK\_FR3, παρόλο που καταλαμβάνει μικρή έκταση η κλίσης της είναι μικρότερη από όλες τις παραμέτρους ευνοώντας την οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα.

- Η εκτέλεση του μοντέλου με τις νέες τιμές παραμέτρων επιτυγχάνει τη μείωση του μέσου όρου της διαφοράς μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρημένων υδραυλικών φορτίων, ενώ οι μεγαλύτερες αποκλίσεις εξακολουθούν να εμφανίζονται στις θέσεις παρατήρησης Konaifagos και Logger\_Ei.
- Η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγωνικών διαφορών φαίνεται να μην επιτεύχθηκε στο μέγιστο. Η επιλογή αυτή είναι απόλυτα συνειδητή, διότι η συνέχιση των επαναλήψεων βελτιστοποίησης επιφέρει επισφαλή αποτελέσματα στον αρχικό στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, δηλαδή την προσομοίωση του φυσικού συστήματος. Κάθε τιμή των υδραυλικών αγωγιμοτήτων που μετατρέπεται και ελαχιστοποιείται μπορεί μεν να καταλήγει σε ένα συνολικά άρτιο μοντέλο αλλά τα επιμέρους σημεία που προκύπτουν είναι εντελώς πλασματικά.
- Συνοψίζοντας, επισημαίνεται ότι τα μοντέλα υπόγειων νερών και ιδιαίτερα των καρστικών συστημάτων οφείλουν να αξιολογούνται σε κάθε βήμα για την τήρηση των φυσικών διεργασιών και εν τέλει την προσομοίωση του πραγματικού υπόγειου συστήματος.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

### ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Anderson M.P., Woessner W.W. (1992). "Applied Groundwater modelling; Simulation of flow and advective transport". Academic Press, Inc. San Diego. California, 381p.

Audra P. (1994): Karsts alpins. Genèse de grands réseaux souterrains: Exemples le Tennengebirge (Autriche), l'île de Crémieux, la Chartreuse et le Vercors (France). *Karstologia Mémoires*, 5, 1–280.

Bajocco S., De Angelis A., Salvati L. (2012): A satellite-based green index as a proxy for vegetation cover quality in a Mediterranean region. *Ecol Ind* 23:578–587

Banta E. R. (2011): ModelMate—A graphical user interface for model analysis, *U.S. Geological Survey Techniques and Methods* 6–E4, 31 p

Baziotis I., & Mposkos E. (2011). Origin of metabasites from upper tectonic unit of the Lavrion area (SE Attica Greece): Geochemical implications for dual origin with distinct provenance of blueschist and greenschist's protoliths. *Lithos*, 126, 161–173. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.07.014>

Baziotis, I., Proyer, A., & Mposkos, E. (2009). High-pressure/Low-temperature metamorphism of metabasites in Lavrion area (SE Attica Greece): Implications for the preservation of peak metamorphic assemblages in blueschists and greenschists. *European Journal of Mineralogy*, 21, 133–148. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2008/0020-1853>

Berger A., Schneider D. A., Grasemann B., & Stockli D. (2013). Footwall mineralization during Late Miocene extension along the West Cycladic Detachment System, Lavrion Greece. *Terra Nova*, 25, 181–191. <https://doi.org/10.1111/ter.12016>

Binet S., Joigneaux E., Pauwels H., Albéric P., Fléhoc C., Bruand A. (2017): Water exchange, mixing and transient storage between a saturated karstic conduit and the surrounding aquifer: Groundwater flow modeling and inputs from stable water isotopes, *Journal of Hydrology*, 544, pp. 278–289, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.042>

Carrera J. (1988). " State of the art of the inverse problem applied to the flow and solute transport equations". *Groundwater flow and quality modelling* (E. Custodio et al., eds), D. Reidel Publ. Co., pp. 549-583.

Carrera J. and Neuman S.P. (1986). "Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions. 1. Maximum likelihood method incorporating prior information". *Water Resources Research*, V. 22 (2), pp.199-210.

Coleman M., Dubosq R., Schneider D.A., Grasemann B., Soukis K. (2019): Along-strike consistency of an extensional detachment system, West Cyclades, Greece. *Terra Nova*. 2019;00:1–14. <https://doi.org/10.1111/ter.12388>

Davis G. H., Reynolds S. J. (1996): *Structural geology of rocks and regions*, 2nd edition. Wiley, 800 p.

- De Marsily G. (1986) Quantitative hydrogeology-groundwater hydrology for engineers. Academic, Orlando, FL
- Delleur J.W. (1999): The handbook of groundwater engineering. CRC, Boca Raton, FL
- Dunne T.R. and Leopold L.B. (1978): Water in Environmental Planning, Freeman, San Francisco
- Faust C. R., Mercer J. W. (1980). "Ground-Water Modeling: Numerical Models". Ground water, V. 18(4), pp.395-407.
- Ford D., Williams P. (2007): Karst hydrogeology and geomorphology. Wiley, Chichester
- Fossen H. (2010): Structural Geology, Cambridge University Press, ch07
- Freyberg D.L. (1988): An exercise in ground-water model calibration and prediction, Ground Water V. 26(3), pp.350-360.
- Ghasemizadeh R., Hellweger F., Butscher C., Padilla I., Vesper D., Field M., Alshawabkeh A. 2012: Review: Groundwater flow and transport modeling of karst aquifers, with particular reference to the North Coast Limestone aquifer system, Hydrogeology Journal (2012) 20: 1441–1461, DOI 10.1007/s10040-012-0897-4
- Goldscheider N., Drew D. (2007): Methods in Karst Hydrogeology, International Contributions to Hydrogeology 26, International Association of Hydrogeologists, Taylor & Francis, London, 264 pp. ISBN 978-0-415-42873-6.
- Grasemann B., Schneider D. A., Stockli D. F., & Iglseder C. (2012): Miocene bivergent crustal extension in the Aegean: Evidence from the western Cyclades (Greece). Lithosphere, 4, 23–39. <https://doi.org/10.1130/L164.1>
- Grimes G. K. (1999): The Water Below: An introduction to karst hydrology and the hydrological setting of the Australian karsts, Modified reprint of an article published in Proceedings of the 13<sup>th</sup> Australasian Conference on Cave and Karst Management, pp 24-31
- Harbaugh A. W. (2005): MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model -- the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16.
- Häuselmann P., Jeannin P.-Y., Bitterli T. (1999): Relationships between karst and tectonics: case-study of the cave system north of Lake Thun (Bern, Switzerland). Geodinamica Acta, 12, 377–387.
- Healy R.W., Cook P.G. (2002): Using groundwater levels to estimate recharge. Hydrogeol J 10:91–109. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>
- Herold T., Jordan P. & Zwahlen F. (2000): The influence of tectonic structures on karst flow patterns in karstified limestones and aquitards in the Jura Mountains, Switzerland. Eclogae Geologicae Helvetiae, 93, 349–362.
- Hill M. C., Tiedman C. R. (2007): Effective groundwater model calibration, 978 John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey
- Hölting B., Coldewey W. (1980): Hydrogeology, Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment, [https://doi.org/10.1007/978-3-662-56375-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-56375-5_1)



- Kargas G., Kerkides P., Poulouvasilis A. (2012): Infiltration of rain water in semi-arid areas under three land surface treatments. *Soil Tillage Res* 120:15–24
- Kresic N. (2007): *Hydrogeology and Groundwater Modeling*, Second Edition. Boca Raton/London/New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 806 p.
- Lekkas S., Skourtsos, E., Soukis, K., Kranis, H., Lozios, S., Alexopoulos, A., & Koutsovitsis, P. (2011). Late Miocene detachment faulting and crustal extension in SE Attica (Greece). *Geophysical Research Abstracts*, 13, EGU2011–456.
- Lekkas S., Soukis K., Skourtsos E., Kranis H., Lozios S., Alexopoulos A., Stouraiti Ch. and Koutsovitsis P. (2020): Geological map of SE Attica Greece: the West Cycladic Detachment System in Lavrion peninsula. (Submitted to the *Journal of Maps Taylor and Francis*)
- Liati A., Skarpelis N., & Pe-Piper G. (2009). Late Miocene magmatic activity in the Attic-Cycladic belt of the Aegean (Lavrion Se Attica Greece): Implications for the geodynamic evolution and timing of ore deposition. *Geological Magazine*, 146, 732–742. <https://doi.org/10.1017/S0016756809006438>
- Liedl R., Sauter M., Hückinghaus D., Clemens T., Teutsch G. (2003): Simulation of the development of karst aquifers using a coupled continuum pipe flow model. *Water Resour Res* 39(3):1057
- Lohman S. W. et al. (1972): Definition of selected ground-water terms – revisions and conceptual refinements. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1988.
- Maclay R.W., Land L.F. (1988). "Simulation of groundwater flow in the Edwards aquifer, San Antonio region, Texas, and refinement of storage and flow concepts". USGS, Water Supply Paper 2336-A, pp. A1-A48.
- Marinos G., & Petrascheck W. E. (1956). Laurium. *Geological and Geophysical Research*, 4, 1–247
- Milanovic P. (2004): *Water Resources Engineering in Karst*, CRC PRESS, Boca Raton London New York Washington, D.C.
- Moussoulis E., Mallinis G., Koutsias N., Zacharias I. (2015): Modelling surface runoff to evaluate the effects of wildfires in multiple semi-arid, shrubland-dominated catchments, *Hydrol. Process.* 29, pp. 4427–4441, DOI: 10.1002/hyp.10509
- Nastos P.T., Politi N., Kapsomenakis J. (2013): Spatial and temporal variability of the Aridity Index in Greece. *Atmos Res* 119:140–152
- National Research Council, (1990). "Ground water models: scientific and regulatory applications". National Academy Press, 303 p.
- Oude Essink J.H.P. (2000). *Groundwater Modelling*. L 4018/GWM 1, Utrecht University, Interfaculty, Centre of Hydrology, Utrecht, Institute of Earth Sciences, Dept., of Geophysics, 193 p.
- Paparrizos S., Maris F., Matzarakis A. (2014): Estimation and comparison of potential evapotranspiration based on daily and monthly data from Sperchios valley in central Greece, *Global NEST Journal*, Vol 16, No 2, pp 204-217

Peck A., Gorelick S.M., De Marsily G., Foster S. and Kovalevsky V. (1988). "Consequences of spatial variability in aquifer properties and data limitation for groundwater modelling practice". International Association of Hydrological Sciences, Publication 175, 272 p.

Peters J.G., (1987). "Description and comparison of selected models for hydrologic analysis of ground-water flow, St. Joseph River Basin, Indiana". USGS, Water-Resources Investigations Report 86-4199, 125 p.

Photiades A., & Carras N. (2001). Stratigraphy and geological structure of the Lavrion area (Attica Greece). Bulletin of the Geological Society of Greece, 34, 103–109. <https://doi.org/10.12681/bgsg.16949>

Poeter E. P., Hill M. C., Banta E. R., Mehl S., and Christensen S. (2005): UCODE\_2005 and six other computer codes for universal sensitivity analysis, calibration, and uncertainty evaluation constructed using the JUPITER API: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, bk. 6, chap. A11, revision of Feb. 10, 2008, 283 p., available at <http://pubs.er.usgs.gov/usgspubs/tm/tm6A11>.

Poeter E.P., Hill M.C., Lu D., Tiedeman C.R., Mehl S. (2014): UCODE\_2014, with new capabilities to define parameters unique to predictions, calculate weights using simulated values, estimate parameters with SVD, evaluate uncertainty with MCMC, and more: Integrated Groundwater Modeling Center Report Number GWMI 2014-02

Pollard D. D. & Fletcher R. C. (2005). Fundamentals of structural geology, Cambridge University Press.

Pouliaris C. (2019): Groundwater modelling of a coastal semi-arid hydrogeological system, PhD Dissertation, Technische Universität Darmstadt

Pouliaris C., Perdikaki M., Foglia L., Schüth C., Kallioras A. (2018): Hydrodynamic analysis of a Mediterranean aquifer system with the use of hydrochemical and isotopical analysis as supporting tools, Environmental Earth Sciences, 77:237, <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7418-2>

Prickett T. A. (1979). "Ground-water computer models-State of the art". Ground Water, V. 17(2), pp.167-173.

Sauter M., Kovacs A., Geyer T., Teutsch G. (2006) Modellierung der hydraulik von karst grundwasserleiter: eine übersicht [Modeling of the hydraulics of karst aquifers: an overview]. Grundwasser 11(3):143–156

Scanlon B.R., Healy R.W., Cook P.G. (2002): Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge, Hydrogeol J, 10:18–39, <https://doi.org/10.1007/s10040-0010176-2>

Scheffer C., Vanderhaeghe O., Lanari P., Tarantola A., Ponthus L., Photiades A., & France L. (2016). Syn-to post-orogenic exhumation of metamorphic nappes: Structure and thermobarometry of the western Attic-Cycladic metamorphic complex (Lavrion, Greece). Journal of Geodynamics, 96, 174–193. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2015.08.005>

Seman S., Stocklie D. F., & Soukis K. (2017). The provenance and internal structure of the Cycladic Blueschist Unit revealed by detrital zircon geochronology, Western Cyclades, Greece. Tectonics, 36, 1–22.

- Skarpelis N., Argyraki A. (2009): Geology and origin of the supergene ore at the Lavrion Pb–Ag–Zn deposit, Attica, Greece. *Resour Geol* 59(1):1–14
- Teutsch G., Sauter M. (1998) Distributed parameter modeling approaches in karst hydrological investigations. *Bull Hydrogéol* 16:99–109
- Thraillkill J.V. (1968) Chemical and hydrologic factor in the excavation of limestone caves. *Geol Soc Am Bull* 79(1):19–46
- Toussaint B. (1971): Hydrogeologie und Karstgenese des Tennengebirges (Salzburger Kalkalpen). *Steir. Beitr. z. Hydrogeologie*, 23, 5–115.
- Van Der Pluijm B. A. & Marshak S. (2003): *Earth structure: an introduction to structural geology and tectonics*, 2nd edition. WW Norton & Company, 656 pp.
- Voudouris P., Melfos V., Spry P.G., Bonsall T., Tarkian M., Economou-Eliopoulos M. (2008): Mineralogical and fluid intrusion constraints on the evolution of the Plaka intrusion related ore system, Lavrion, Greece. *Mineral Petrol* 93:79–110
- Wildberger A. (1996): Zur Geologie und Hydrogeologie des Karstes der Sulzfluhhöhlen (St. Antönien, Graubünden). *Stalactite*, 46, 112–118.
- Winston R.B. (2009): ModelMuse—A graphical user interface for MODFLOW–2005 and PHAST: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A29, 52 p., available only online at <http://pubs.usgs.gov/tm/tm6A29>.
- Witherspoon P.A., Wang J.S.-Y, Iwai K., Gale J.E. (1980) Validity of the cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture. *Water Resour Res* 16:1016–1024
- Witthüser K. (2002): Untersuchungen zum Stofftransport in geklüfteten Festgesteinen unter besonderer Berücksichtigung der Matrixdiffusion, *Schr. Angew. Geol. Karlsruhe*, 64, 145 p.

## ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ΓΓΜΕ (2003): Koropi-Plaka sheet, Geological map of Greece, 1:50.000, Athens
- ΓΓΜΕ (2007): Lavrio sheet, Geological map of Greece, 1:50.000, Athens
- Καλλέργης Γ. (2001): Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία. Έκδοση ΤΕΕ. Τρεις τόμοι
- Καλλιώρας Α. (2015): ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΙ ΚΩΔΙΚΕΣ, Εκπαιδευτικό Υλικό ΕΜΠ, Αθήνα
- Κουμαντάκης Ι., Παναγόπουλος Α., Μαρκαντώνης Κ., Παπαιωάννου Ν., Βασιλείου Ε., Τσούτσος Ι. (2000): Τεχνική έκθεση για τις υδρογεωλογικές συνθήκες: Περιβαλλοντική αποκατάσταση του Τεχνολογικού Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ελλάδα
- Μαρκαντώνης Κ. (2012): Υδρογεωλογικό Καθεστώς Ανατολικής Κορινθίας και Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα
- Πάνου Ι. Χ. (2015): ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα

Παπανικολάου Δ., Λόζιος Σ., Καροτσιέρης Ζ. (2012): Τεκτονική Γεωλογία, Εκπαιδευτικό Υλικό ΕΚΠΑ, Αθήνα

Παυλόπουλος Κ. (1997): Γεωμορφολογική εξέλιξη της Νότιας Αττικής, ΓΑΙΑ Νο 2, Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα, Ελλάδα.

Ράπτη Δ., (1995). "Υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής Σκύδρας-Επισκοπής (Μακεδονία). Εφαρμογή μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης των υδροφόρων στρωμάτων". Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ. Θεσσαλονίκη.

#### ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

Δ.Ε.Υ.Α.ΤΗ.Λ, Δημοτική Επιχείρηση Υδρευσης Αποχέτευσης Τηλεθέρμανσης Λαυρεωτικής, <https://www.deyalavreotikis.gr/> , Τελευταία προσπέλαση: 2/5/2020

Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, <http://meteosearch.meteo.gr/>, Τελευταία προσπέλαση: 17/6/2020

ESRI, ArcGIS, [www.esri.com/](http://www.esri.com/) , Τελευταία προσπέλαση: 3/9/2020