



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

**Τμήμα Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος (Χη.Μη.Περ.)**

**Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος**

**ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΖΩΝΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ  
ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ *WhAEM* ΓΙΑ ΤΗΝ  
ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΤΥΜΠΑΚΙΟΥ ΣΤΟ ΗΡΑΚΛΕΙΟ  
ΚΡΗΤΗΣ**

**Διπλωματική εργασία του**

**Οικονόμου Ιωάννη**

Χανιά

Μάης, 2025

**Τμήμα Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος (Χη.Μη.Περ.)**

**Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος**

**ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΖΩΝΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ  
ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ *WhAEM* ΓΙΑ ΤΗΝ  
ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΤΥΜΠΑΚΙΟΥ ΣΤΟ ΗΡΑΚΛΕΙΟ  
ΚΡΗΤΗΣ**

**Διπλωματική εργασία του**

**Οικονόμου Ιωάννη**

**Τριμελής εξεταστική επιτροπή**

**Καρατζάς Γεώργιος (επιβλέπων)**

**Νικολαΐδης Νικόλαος**

**Παρανυχιανάκης Νικόλαος**

**Κουτρούλης Αριστείδης (αναπληρωματικός)**

“Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης”.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ραγδαία τεχνολογική και βιομηχανική ανάπτυξη των τελευταίων δεκαετιών δεν σταματά να εντυπωσιάζει την κοινή γνώμη. Μέσω αυτής, στον αντίποδα, τόσο η οικουμενική οικολογική υποβάθμιση όσο και η κερδοφορία των λίγων και ισχυρών εις βάρος των πολλών και πτωχών, δείχνει να μην έχουν τέλος. Μοιραία, και ο εκφυλισμός των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων είναι αναπόφευκτος. Έχει παρατηρηθεί, ειδικά τα τελευταία χρόνια, άνοδος της παγκόσμιας θερμοκρασίας και μείωση των ποσοστών κατακρημνίσεων. Την ίδια στιγμή, αυξάνεται και η ζήτηση υδατικών πόρων, είτε για ύδρευση είτε για άρδευση, ενώ η κείμενη περιβαλλοντική νομοθεσία σε πολλές περιπτώσεις δεν τηρείται. Δίνεται η ευκαιρία, μέσω αυτής της διπλωματικής εργασίας, να υπάρξει, τουλάχιστον στον τομέα των υπόγειων υδάτων, μια πρόταση για διατήρηση της καλής ποιότητας του υπόγειου νερού, ή ακόμα και βελτίωσή του, αλλά και ορθής διαχείρισης αυτού, μέσω προληπτικών μέτρων όπως ο καθορισμός ζωνών προστασίας πηγαδιών άντλησης. Ως περιοχή μελέτης ορίζεται η ευρύτερη περιοχή του Τυμπακίου στο Ηράκλειο Κρήτης. Κύριες ασχολίες του τόπου αποτελούν η ελαιοκομία και λοιπές γεωργικές δραστηριότητες. Συνεπώς, πιθανοί ρυπογόνοι παράγοντες που απειλούν τον υπόγειο υδροφορέα είναι τα νιτρικά άλατα, τα φυτοφάρμακα, τα οργανικά απόβλητα, οι μικροβιακοί ρύποι κ.α. Ο υδροφορέας, αλουβιακός – πλειστοκαινικός, καταλαμβάνει το παράκτιο – κεντρικό τμήμα της λεκάνης απορροής της Μεσσαράς, έχει έκταση περίπου 50km<sup>2</sup> και δέχεται μέσο ύψος βροχής 474mm. Εργαλείο για την μοντελοποίηση του υδροφορέα ορίζεται το WhAEM (Wellhead Analytic Element Model), ένα ντετερμινιστικό, αναλυτικό παραμετρικό μοντέλο. Ο καθορισμός των ζωνών προστασίας βασίζεται στον χρόνο διάνυσης  $\bar{T}$  ενός πιθανού ρύπου με κατεύθυνση προς τα πηγάδια άντλησης. Το WhAEM επιλύει ροή υπόγειων υδάτων σταθερής κατάστασης για ένα συγκεκριμένο υδροφορέα. Για τον σχεδιασμό των ζωνών προστασίας, που αφορούν χρόνους διάνυσης 6 μηνών, 1 έτους, 2 ετών, 5 ετών και 10 ετών, για τα υδρολογικά έτη 2004-05, 2005-06, 2006-07, 2007-08, απαιτούνται παράμετροι εισόδου. Τέτοιες είναι: χάρτης της περιοχής μελέτης, πηγάδια άντλησης και παρατήρησης, παροχές πηγαδιών άντλησης (σταθερές όλα τα έτη), ποσοστά βροχόπτωσης ανά υδρολογικό έτος, υδραυλικά ύψη πηγαδιών παρατήρησης ανά υδρολογικό έτος, οριακές συνθήκες (linesinks, inhomogeneities, horizontal barriers), που οι τελευταίες ορίζουν και την βαθμονόμηση του μοντέλου για την βέλτιστη προσομοίωση της μοντελοποίησης σε σχέση με την πραγματικότητα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δηλώνουν αρκετά καλή σύγκλιση των μοντελοποιημένων τιμών των υδραυλικών υψών προς τις αντίστοιχες παρατηρούμενες τιμές. Τα σφάλματα λαμβάνονται ως αποδεκτά και έτσι οι ζώνες προστασίας που ανακύπτουν για κάθε υδρολογικό έτος έχουν νόημα και μπορούν να προσομοιάσουν σε ικανοποιητικό βαθμό την πραγματικότητα. Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα αποτελούν ισχυρό εφόδιο για την πρόληψη και προστασία των γεωτρήσεων της περιοχής μελέτης.

## ABSTRACT

The rapid technological and industrial development of recent decades continues to impress the public. On the other hand, both the global destruction of the environment and the growing profits made by the powerful few through technological achievements at the expense of the many poor seem to have no end in sight. The deterioration of surface and groundwater quality is also unavoidable. In recent years, an increase in global temperatures and a decrease in precipitation levels have been observed. At the same time, demand for water resources, whether for drinking or irrigation, is increasing, while environmental regulations are often not respected. This work offers the opportunity — at least in the area of groundwater — to propose measures to preserve or even improve groundwater quality and its proper management through preventive measures such as the designation of wellhead protection areas. The study area is defined as the greater Tympaki area in Heraklion, Crete. This area is mainly used for olive cultivation and other agricultural activities. The potential pollutants threatening the groundwater reservoir therefore include nitrates, pesticides, organic waste, microbial contamination and more. The Alluvial-Pleistocene aquifer in question is located in the —central coastal area of the Messara Basin and covers an area of approximately 50 km<sup>2</sup> with an average annual rainfall of 474 mm. The WhAEM (Wellhead Analytic Element Model), a deterministic, analytical parametric model, was chosen to model the aquifer. The delineation of protection zones is based on the travel time  $\tilde{T}$  of a potential pollutant to the pumping wells. WhAEM simulates the steady-state groundwater flow for a given aquifer. Various input parameters are required to design protection zones corresponding to 6-month, 1-year, 2-year, 5-year and 10-year travel times for the hydrologic years 2004–05, 2005–06, 2006–07 and 2007–08. These include: a map of the study area, pumping and observation wells, constant pumping rates for each year, annual precipitation rates, hydraulic heads from observation wells for each hydrological year and boundary conditions (sinks, inhomogeneities, horizontal barriers), the latter also defining the model calibration for optimal simulation fidelity. The resulting data show a fairly good convergence of the modeled hydraulic pressure values with the observed values. The errors are considered acceptable, so that the protection zones determined for each hydrological year are meaningful and provide a satisfactory approximation to reality. In summary, the results provide a solid basis for the prevention and protection of boreholes in the study area.

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

*Στον Κώστα και την Σοφία,*

*Ψυχῆσιν θάνατος ὕδωρ γενέσθαι,  
ὕδατι δὲ θάνατος γῆν γενέσθαι,  
ἐκ γῆς δὲ ὕδωρ γίνεται, ἐξ ὕδατος δὲ ψυχή.*

*Ηράκλειτος*

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Υπήρξε τεράστια πρόκληση η υλοποίηση αυτής της διπλωματικής, και με το πέρας αυτής, δε θα μπορούσα να αναλογιστώ πώς θα τα κατάφερνα χωρίς την συμβολή συγκεκριμένων ανθρώπων. Ευχαριστώ θερμά τον κ. Καρατζά για τις γνώσεις και τις καίριες παρεμβάσεις του κατά τη διάρκεια τόσο της μοντελοποίησης όσο και της συγγραφής της εργασίας καθώς και για την υπομονή του. Την Ιωάννα Ανυφαντή για την συνεχή βοήθειά της και τις ορθές κατευθυντήριες προτάσεις. Τους γονείς μου, Γιώτα και Ντίνο και την κοπέλα μου Αλκμήνη, που δεν με άφησαν λεπτό, ήταν πάντα δίπλα-φοβερή υπομονή και αυτοί, τέρατα ψυχραιμίας (τις περισσότερες φορές) και θετικής ενέργειας για να ξεπεράσω τους δαίμονες που έστεκαν εμπόδιο για καιρό. Τέλος τους φίλους μου στα Χανιά, στην Αθήνα, στην Θεσσαλονίκη, στο Ρότερνταμ-γενικά είναι παντού οι άτιμοι, που κι αυτοί με τη σειρά τους, ο καθένας με τον τρόπο του, έδειχναν την υποστήριξη τους.

## Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	3
ABSTRACT .....	4
ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	6
Κατάλογος Πινάκων .....	9
Κατάλογος Διαγραμμάτων και Εικόνων .....	9
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	11
1.1 Το νερό και οι υπόγειοι υδροφορείς .....	11
1.1.1 Γενικά .....	11
1.1.2 Ο Υδρολογικός κύκλος.....	11
1.1.3 Ανάλυση των υπόγειων υδροφορέων .....	12
1.2 Πηγές ρύπανσης των υδάτων και κλιματική αλλαγή .....	16
1.2.1 Κλιματική αλλαγή .....	16
1.2.2 Προέλευση ρύπανσης στα (επιφανειακά και) υπόγεια ύδατα .....	17
1.3 Ισχύουσα περιβαλλοντική Νομοθεσία .....	21
1.4 Περί Γεωτρήσεων.....	24
1.5 Αντικείμενο μελέτης και σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	25
2. ΣΚΙΑΓΡΑΦΗΣΗ ΤΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ	26
2.1 Διαχείριση των υπόγειων υδάτων .....	26
2.2 Ζώνες προστασίας γεωτρήσεων .....	27
2.3 Περιβαλλοντικά μοντέλα.....	29
2.4 Το WhAEM (Wellhead Analytic Element Model) .....	31
2.4.1 Ιστορικά στοιχεία.....	33
2.4.2 Χαρακτηριστικά του μοντέλου και σενάρια επιλογής μεθόδου για τον καθορισμό ζώνης προστασίας.....	34
3. Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	42
3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά .....	42
3.2 Γεωμορφολογία της περιοχής μελέτης .....	44
3.2.1 Πορώδεις υδροφορείς της Κρήτης .....	44
3.2.2 Καρστικοί και ρωγμώδεις υδροφορείς της Κρήτης.....	44
3.2.3 Ο υδροφορέας της περιοχής μελέτης.....	44
3.3 Μετεωρολογικά στοιχεία .....	45
3.4 Γεωλογία της περιοχής .....	45
4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ.....	48



4.1	Εισαγωγή και ανάλυση δεδομένων .....	48
4.2	Το περιβάλλον του WhAEM .....	50
4.3	Καθορισμός των αναλυτικών στοιχείων .....	52
4.3.1	Τα πηγάδια άντλησης .....	52
4.3.2	Τα πηγάδια παρατήρησης (test points) .....	53
4.3.3	Περιοχές ανομοιογένειας (inhomogeneities).....	54
4.3.4.	Linesinks .....	55
4.3.5	Horizontal Barriers .....	57
4.4	Ρυθμίσεις του μοντέλου .....	58
4.5	Βαθμονόμηση .....	61
5.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	62
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	73
6.1	Συμπεράσματα .....	73
6.2	Προτάσεις .....	74
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	77

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Σύγκριση των WhAEM, MODFLOW, FEFLOW βάσει ορισμένων κριτηρίων

.....	32
Πίνακας 2.2 Wellhead protection area delineation criteria & methods.....	34
Πίνακας 3.1 Οι πιθανοί ρύποι, οι πηγές προέλευσής τους και οι επιπτώσεις που προκαλούν [FAO]	
.....	43
Πίνακας 4.1 Οι ετήσιες παροχές αντλήσεων των πηγαδιών 1-20 .....	53
Πίνακας 5.1 Mean Absolute Difference & Root Mean Square Difference ανά υδρολογικό έτος .....	66
Πίνακας 5.2 Ποσοστά σφαλμάτων.....	69
Πίνακας 6.1 Areal recharge .....	73

## Κατάλογος Διαγραμμάτων και Εικόνων

Εικόνα 1.1 Διαγραμματική αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου [Καρατζάς, 2025].....	12
Εικόνα 1.2 Το πείραμα του Darcy [Pengki Irawan, et al, 2025] .....	14
Εικόνα 1.3 Οι 5 εταιρείες με τις υψηλότερες εκπομπές σε CO <sub>2</sub> .....	16
Εικόνα 1.4 Υδατικοί πόροι και εκμετάλλευση του νερού .....	23
Εικόνα 2.1 Ισορροπία υδάτων για ραδιοκατευθυνόμενη ροή προς μια γεώτρηση σε ένα πεδίο.....	37
Εικόνα 2.2 Simple WhPA .....	38
Εικόνα 2.3 Το μέγεθος του διανύσματος εκροής του πεδίου ομοιόμορφης ροής υπολογίζεται γνωρίζοντας την υδραυλική αγωγιμότητα (k), την υδραυλική κλίση (i) και το κορεσμένο πάχος (H). Η απλοποιημένη περίπτωση αφορά ένα πηγάδι που αντλεί με ρυθμό Q. Το μέγιστο πλάτος του φακέλου ζώνης σύλληψης είναι w. Η διατομή A είναι το γινόμενο w επί H. Το υδραυλικό ύψος είναι φ.....	40
Εικόνα 2.4 Απλοποιημένες τεχνικές οριοθέτησης για ένα πηγάδι που αντλεί με ρυθμό Q, σε ένα πεδίο περιβάλλουσας ροής Q <sub>0</sub> , με κορεσμένο πάχος υδροφορέα H και πορώδες n, και ζώνες σύλληψης χρόνου διάνυσσης $\bar{T}$ , σύμφωνα με [Haitjema, 2002].	
.....	41
Εικόνα 3.1 Η περιοχή μελέτης [GIS ArcMap 2018] .....	42
Εικόνα 3.2 Κρήτη [gaia.igme.gr] .....	47
Εικόνα 4.1 GIS Πηγάδια άντλησης και παρατήρησης .....	49
Εικόνα 4.2 Graphical User Interface of WhAEM .....	50
Εικόνα 4.3 Νέο ή υπάρχων project.....	50
Εικόνα 4.4 Καθορισμός μονάδων και ονομασία project .....	51
Εικόνα 4.5 Προσθήκη χαρτών .....	51
Εικόνα 4.6 1 <sup>η</sup> μορφή του χάρτη της περιοχής μελέτης στο περιβάλλον του WhAEM	51
Εικόνα 4.7 Στοιχεία των πηγαδιών άντλησης.....	52
Εικόνα 4.8 Στοιχεία των πηγαδιών άντλησης για την κατασκευή των αντίστοιχων ζωνών προστασίας .....	53

Εικόνα 4.9 Στοιχεία των πηγαδιών παρατήρησης.....	53
Εικόνα 4.10 Η περιοχή μελέτης διαχωρισμένη βάσει των διαφορετικών inhomogeneities .....	54
Εικόνα 4.11 Στοιχεία ανομοιογένειας.....	55
Εικόνα 4.12 Στοιχεία των linesinks .....	57
Εικόνα 4.13 Στοιχεία οριζόντιων φραγών .....	57
Εικόνα 4.14 Στοιχεία υδροφορέα .....	58
Εικόνα 4.15 Στοιχεία ισοπιεζομετρικών γραμμών .....	59
Εικόνα 4.16 Χρόνος διάνυσης .....	60
Εικόνα 4.17 Όριο επαναλήψεων για την επίλυση του μοντέλου.....	60
Εικόνα 5.1 Υδραυλικό ύψος συναρτήσει του χρόνου για το πηγάδι παρατήρησης M1 .....	62
Εικόνα 5.2 Υδραυλικό ύψος συναρτήσει του χρόνου για το πηγάδι παρατήρησης M2 .....	63
Εικόνα 5.3 Υδραυλικό ύψος συναρτήσει του χρόνου για το πηγάδι παρατήρησης M25 .....	63
Εικόνα 5.4 Υδραυλικό ύψος συναρτήσει του χρόνου για το πηγάδι παρατήρησης NH14.....	64
Εικόνα 5.5 Υδραυλικό ύψος συναρτήσει του χρόνου για το πηγάδι παρατήρησης C46 .....	64
Εικόνα 5.6 Μέσο ετήσιο παρατηρούμενο υδραυλικό ύψος συναρτήσει του χρόνου όλων των πηγαδιών παρατήρησης .....	65
Εικόνα 5.7 Παροχές άντλησης των αντίστοιχων πηγαδιών.....	65
Εικόνα 5.8 Αποτελέσματα βαθμονόμησης υδραυλικού ύψους για το υδρολογικό έτος 2004-05.....	67
Εικόνα 5.9 Αποτελέσματα βαθμονόμησης υδραυλικού ύψους για το υδρολογικό έτος 2005-06.....	67
Εικόνα 5.10 Αποτελέσματα βαθμονόμησης υδραυλικού ύψους για το υδρολογικό έτος 2006-07 .....	68
Εικόνα 5.11 Αποτελέσματα βαθμονόμησης υδραυλικού ύψους για το υδρολογικό έτος 2007-08 .....	68
Εικόνα 5.12 Ζώνες προστασίας για το υδρολογικό έτος 2004-05 .....	70
Εικόνα 5.13 Ζώνες προστασίας για το υδρολογικό έτος 2005-06 .....	71
Εικόνα 5.14 Ζώνες προστασίας για το υδρολογικό έτος 2006-07 .....	71
Εικόνα 5.15 Ζώνες προστασίας για το υδρολογικό έτος 2007-08 .....	72

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Το νερό και οι υπόγειοι υδροφορείς

### 1.1.1 Γενικά

Το νερό αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο της ύπαρξης κάθε έμβιου όντος, είτε γιατί βρίσκεται σε πλειονότητα στον πλανήτη (71% περίπου της συνολικής του επιφάνειας και με όγκο  $1.4 \times 10^{18} \text{ m}^3$ ), είτε γιατί κατέχει περίπου το 60% του ανθρώπινου οργανισμού, είτε για οποιονδήποτε άλλο λόγο. Από το σύνολο της ποσότητας του νερού, το 96.5% είναι αλμυρό και βρίσκεται στους ωκεανούς και τις θάλασσες, 2.5% περίπου είναι γλυκό, εκ του οποίου μόνο το 0.3% είναι άμεσα προσβάσιμο πόσιμο νερό, δηλαδή βρίσκεται σε επιφανειακά ύδατα (ποτάμια, λίμνες κτλ), καθώς το μεγαλύτερο μέρος του βρίσκεται στους παγετώνες, και το υπόλοιπο 1% είναι ή υφάλμυρο, ή παγιδευμένο μεταξύ ορυκτών ή ιζημάτων στον φλοιό της Γης, ή βρίσκεται σε βαθείς υπόγειους υδροφορείς (άνω των 800m), όπου δεν μπορεί να καταταχθεί ούτε ως γλυκό ούτε ως ωκεάνιο λόγω της υψηλής αλμυρότητας ή στην ατμόσφαιρα ως υδρατμοί, η τέλος στην βιόσφαιρα. [USGS,2019]

Το ποσοστό όντως φαίνεται μικρό, όμως είναι αυτό, που επί χιλιετίες διατηρεί την ζωή στην Γη. Παρ' όλα αυτά, ερχόμενοι στο σήμερα, και κατά προσέγγιση από το δεύτερο μισό του 20<sup>ου</sup> αιώνα και μετά, οι αυξημένες ανθρώπινες δραστηριότητες (συσσωρευτικά, με την πάροδο των χρόνων) έχουν συντελέσει σε τεράστιο υδρολογικό πρόβλημα – μεταξύ άλλων.

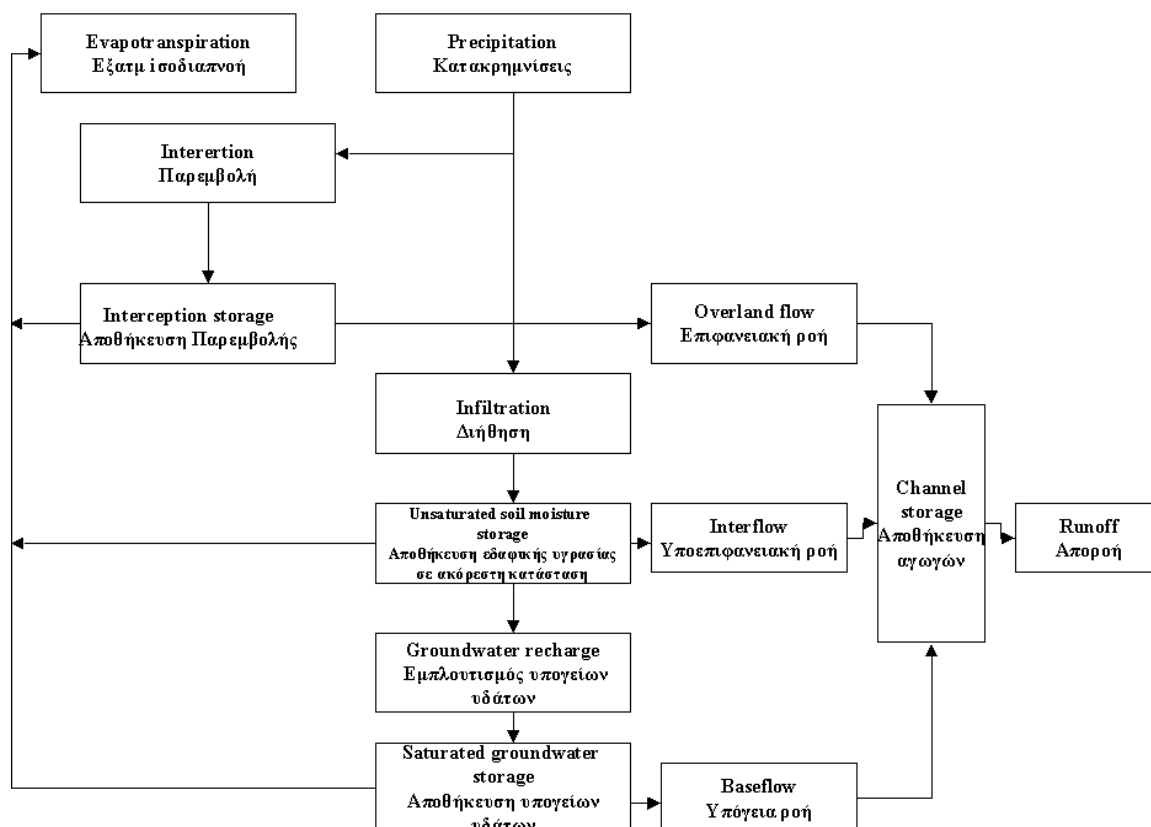
### 1.1.2 Ο Υδρολογικός κύκλος

Υπάρχουν μελέτες, όπως για παράδειγμα αυτή μιας ομάδας διεθνών ερευνητών, οι οποίοι, χρησιμοποιώντας παρατηρήσεις από δορυφόρους, συγκεκριμένα τους GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), που λειτουργούν υπό τη διαχείριση του Γερμανικού Κέντρου Αεροδιαστημικής, του Γερμανικού Κέντρου Ερευνών για τις Γεωεπιστήμες και της NASA, βρήκαν στοιχεία που δείχνουν ότι η συνολική ποσότητα γλυκού νερού (το 0.3%) στη Γη μειώθηκε απότομα από τον Μάιο του 2014 και έκτοτε παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Οι ερευνητές δήλωσαν ότι αυτή η αλλαγή, θα μπορούσε να σηματοδοτεί την είσοδο των ηπείρων της Γης σε μια διαρκώς πιο ξηρή φάση.

Κατά τη διάρκεια περιόδων ξηρασίας, σε συνδυασμό με τη σύγχρονη επέκταση της αρδευόμενης γεωργίας, οι αγροτικές και αστικές περιοχές αναγκάζονται να βασίζονται περισσότερο στα υπόγεια ύδατα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε έναν φαύλο κύκλο μείωσης των υπόγειων αποθεμάτων νερού. Κατά συνέπεια, τα αποθέματα γλυκού νερού εξαντλούνται, οι βροχοπτώσεις και το χιόνι αδυνατούν να τα αναπληρώσουν ενώ αντλείται ακόμα περισσότερο υπόγειο νερό. Ταυτόχρονα, η παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί την ατμόσφαιρα να συγκρατεί περισσότερους υδρατμούς, με αποτέλεσμα να συμβαίνουν πιο ακραία φαινόμενα βροχόπτωσης, σύμφωνα με τον μετεωρολόγο της NASA Goddard, Michael Bosilovich. Αν και τα συνολικά ετήσια επίπεδα βροχής και χιονόπτωσης μπορεί να μην αλλάζουν δραματικά, τα μεγάλα διαστήματα μεταξύ έντονων επεισοδίων βροχόπτωσης επιτρέπουν στο έδαφος να στεγνώσει και να γίνει πιο συμπαγές. Αυτό μειώνει την ποσότητα του νερού που μπορεί να απορροφήσει το έδαφος όταν βρέχει.

«Το πρόβλημα με την ακραία βροχόπτωση», ανέφερε ο Bosilovich, «είναι ότι το νερό καταλήγει να απορρέει», αντί να διαπερνά το έδαφος και να αναπληρώνει τα υπόγεια αποθέματα νερού [Rodell, M., et al, 2024].

Συμπερασματικά, τα γεγονότα στην φύση αλληλοεπηρεάζονται και ο υδρολογικός κύκλος δεν είναι τίποτε άλλο παρά καταστάσεις (φάσεις) και διεργασίες που η μια συνδέεται ή και εξαρτάται από την άλλη, όπως περιγράφεται και στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 1.1 Διαγραμματική αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου [Καρατζάς, 2025]

### 1.1.3 Ανάλυση των υπόγειων υδροφορέων

Κύριο γνώρισμα της φύσης είναι η ισορροπία, την οποία ο άνθρωπος διακαώς διαταράσσει. Συνεπάγεται ότι ο κύκλος του νερού περιγράφει στην ουσία ένα υδρολογικό ισοζύγιο, το οποίο δίνεται με την παρακάτω εξίσωση:

- Υπεράνω της επιφάνειας  

$$P + (R_{in} - R_{out}) - E_{ab} - T_{ab} - I = \Delta S_{ab} \quad (1.1)$$

- Υποκάτω της επιφάνειας  

$$I - (G_{in} - G_{out}) - E_{gr} - T_{gr} = \Delta S_{gr} \quad (1.2)$$

όπου

P: ρυθμός κατακρήμνισης

$\Delta R = (R_{in} - R_{out})$ : μεταβολή του ρυθμού επιφανειακής ροής

E: ρυθμός εξάτμισης

T: ρυθμός διαπνοής

I: ρυθμός διήθησης

$\Delta S$ : μεταβολή του ρυθμού αποθήκευσης

$\Delta G = (G_{in} - G_{out})$ : ρυθμός υπόγειας ροής

ab: above ground, gr: below ground

- Γενικό Ισοζύγιο

$$P - \Delta R - \Delta G - E - T = \Delta S \quad (1.3)$$

Μέρος λοιπόν του ισοζυγίου αποτελούν και τα υπόγεια ύδατα. Αυτά, διαμορφώνουν δύο διακριτές ζώνες, την ακόρεστη (unsaturated ή vadose) και την κορεσμένη (saturated). Με τον όρο ακόρεστη χαρακτηρίζεται η ζώνη, που στους πόρους του εδάφους υπάρχει παρουσία τόσο αέρα όσο και νερού. Με τον όρο κορεσμένη δε, χαρακτηρίζεται εκείνη η ζώνη που όλοι οι πόροι του εδάφους είναι πλήρεις ύδατος και υπόκεινται σε υδροστατική πίεση. Η άνω επιφάνεια της κορεσμένης ζώνης είναι ο υδροφόρος ορίζοντας, όπου η υδροστατική πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική.

Εκεί, στην κορεσμένη ζώνη δηλαδή, η υπόγεια ροή των υδάτων φέρεται από τους υπόγειους υδροφορείς, σχηματισμοί (στρώματα) οι οποίοι περιέχουν σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών. Προκύπτουν δύο είδη υδροφορέων:

- i) ελεύθεροι υδροφορείς (unconfined aquifers), στους οποίους η ανώτερη επιφάνειά τους είναι ο υδροφόρος ορίζοντας
- ii) περιορισμένοι ή αρτεσιανοί υδροφορείς (confined aquifers), οι οποίοι περιορίζονται και στην άνω και στην κάτω επιφάνεια τους από αδιαπέρατα στρώματα, και το νερό βρίσκεται υπό υδροστατική πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής.

Δεν μένει τώρα παρά να οριστούν οι παράμετροι οι οποίες χαρακτηρίζουν τους υδροφορείς καθώς και οι εξισώσεις που διέπουν την κίνηση (ή και συγκράτηση) των υπόγειων υδάτων [Καρατζάς, 2025]:

- i) πορώδες (porosity)  $[n, \epsilon]$ , το ποσοστό του συνολικού όγκου του εδάφους που καταλαμβάνεται από τους πόρους (κενά). [Nimmo, 2004]

$$n = \frac{V_V}{V_0} \quad (1.4)$$

όπου  $V_V$ : όγκος των κενών

$V_0$ : συνολικός όγκος του δείγματος

- ii) ενεργό πορώδες (effective porosity) [ $n_e$ ], το ποσοστό του συνολικού κενού χώρου ενός πορώδους υλικού που είναι ικανό να μεταφέρει ένα ρευστό. [James P Gibb, et al, 1984]

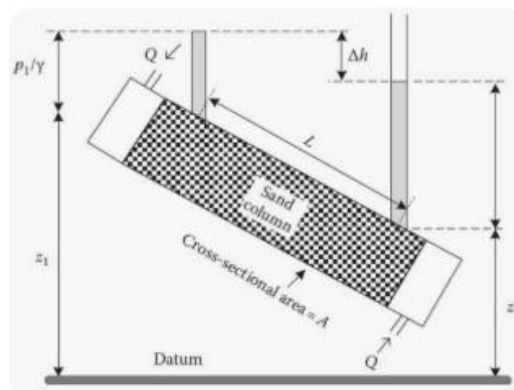
$$n_e = \frac{V_r}{V_0} \quad (1.5)$$

όπου  $V_r$ : ο όγκος νερού που μπορεί να στραγγιστεί κάτω από την επίδραση της βαρύτητας, δηλαδή ο όγκος νερού που περιέχεται εντός των ενεργών πόρων

- iii) ειδική συγκράτηση:  $S_r = n - n_e$

Οι κυρίαρχες εξισώσεις για τη ροή των υπόγειων υδάτων βασίζονται σε δύο θεμελιώδεις αρχές: στον νόμο του Darcy και στη διατήρηση της μάζας [H. Hatijema, 1995]

Το 1856, ο Γάλλος μηχανικός Henry P.G. Darcy μελέτησε την ροή του ύδατος διαμέσου οριζοντίων στρωμάτων άμμου. Το συμπέρασμα της μελέτης του ήταν ότι ο ρυθμός ροής ( $Q/A$ ) διαμέσου πορώδους, είναι ανάλογος των απωλειών φορτίου, ανάλογος ενός συντελεστή  $K$  που χαρακτηρίζει το πορώδες υλικό και αντιστρόφως ανάλογος του μήκους πορείας της ροής. Η ανωτέρω διατύπωση είναι γνωστή ως ο Νόμος του Darcy (Darcy's Law).



Εικόνα 1.2 Το πείραμα του Darcy [Pengki Irawan, et al, 2025]

Μαθηματικά περιγράφεται ως

$$\frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta h}{L} \quad (1.6)$$

ή

$$q = -K \frac{\Delta h}{L} \quad (1.7)$$

όπου  $Q$ : παροχή ( $L^3/T$ )

$A$ : επιφάνεια ( $L^2$ )

$K$ : υδραυλική αγωγιμότητα ( $L/T$ )

$\Delta h$ : απώλεια φορτίου που εκφράζεται ως:

$$\left(\frac{p_1}{\gamma} + z_1\right) - \left(\frac{p_2}{\gamma} + z_2\right) (L) \quad (\text{βλ. εικόνα 1.2})$$

L: το μήκος της στήλης (L)

q: η ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή (L/T)

Σημειωτέον, το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η ταχύτητα της ροής είναι προς την κατεύθυνση που ελαττώνεται το φορτίο και η έκφραση  $\Delta h/L$  συνήθως εμφανίζεται στην γενική της μορφή ως  $\Delta h/dl$  και ονομάζεται υδραυλική κλίση (hydraulic gradient). [Καρατζάς, 2025]

Υπάρχει μια ειδοποιός διαφορά μεταξύ των ελεύθερων και των περιορισμένων υδροφορέων κι αυτή είναι πως οι ελεύθεροι δεν μπορούν θεωρηθούν οριζόντιοι μιας και ο υδροφόρος ορίζοντας εκ των πραγμάτων δεν είναι οριζόντιος. Συνεπώς υπάρχει πιθανότητα, σωματίδια ύδατος να κινηθούν από υψηλότερη θέση σε χαμηλότερη. Εντούτοις, έχει παρατηρηθεί, ότι στις περισσότερες των περιπτώσεων η συνιστώσα της κάθετης ροής είναι πολύ μικρότερη των οριζόντιων συνιστωσών και μάλιστα με διαφορά δύο τάξεις μεγέθους. Επομένως, η μεταβολή του υδραυλικού ύψους συναρτήσει του βάθους, αγνοείται πλήρως. Η συνθήκη αυτή είναι γνωστή και ως υπόθεση Dupuit (Dupuit assumption). Η φυσική σημασία είναι, ότι σε οποιοδήποτε σημείο του ελεύθερου υδροφορέα κατά μήκος μιας κάθετης γραμμής, το υδραυλικό ύψος παραμένει σταθερό. Έτσι λοιπόν η εξίσωση (1.7) παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$q' = \frac{1}{2} K \left( \frac{h_1^2 - h_2^2}{L} \right) \quad (1.8)$$

Επιπρόσθετα, ορίζεται η ταχύτητα διήθησης,  $q_p$  που σε αντίθεση με την ταχύτητα Darcy, περιορίζεται μόνο στο χώρο που καταλαμβάνουν οι πόροι:

$$q_p = \frac{Q}{nA} = \frac{q}{n} \quad (1.9)$$

και τέλος ορίζεται ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας (T) σαν ο ρυθμός με τον οποίο ύδωρ δεδομένου κινητικού ιξώδους μεταβιβάζεται δια μέσου μοναδιαίου πλάτους ενός υδροφορέα με μοναδιαία υδραυλική κλίση και εκφράζεται μαθηματικά ως:

$$T = Kb \quad (1.10)$$

Όπου b: το κορεσμένο βάθος του υδροφορέα [Καρατζάς, 2025]



## 1.2 Πηγές ρύπανσης των υδάτων και κλιματική αλλαγή

### 1.2.1 Κλιματική αλλαγή

Οι ρυθμοί ζωής γίνονται ολοένα και πιο γρήγοροι, ιδίως στα μεγάλα αστικά κέντρα. Σε αντιστοιχία, και ο ρυθμός μεταβολής της παγκόσμιας περιβαλλοντικής κατάστασης, προς μια πιο υποβαθμισμένη, αυξάνεται ταχέως.

Το προφίλ της κλιματικής αλλαγής, που αδιαμφισβήτητα είναι παρούσα, διαμορφώνεται βασιζόμενο, κατά κύριο λόγο, αν όχι εξ' ολοκλήρου, σε πολυεπίπεδες δραστηριότητες του ανθρώπου.

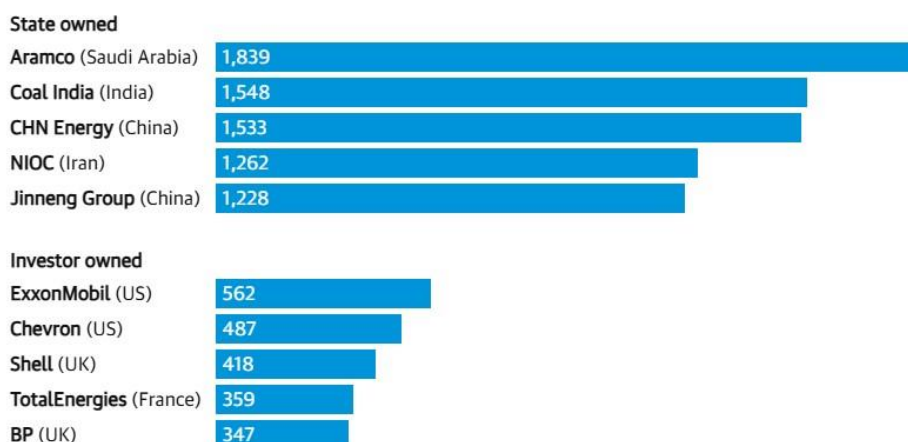
Οι τομείς αν και πολυάριθμοι, συγκεκριμένοι είναι εκείνοι που έχουν, και συνεχίζουν να επιφέρουν την μεγαλύτερη ζημιά.

Τα ορυκτά καύσιμα – άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο – είναι μακράν ο μεγαλύτερος παράγοντας που συμβάλλει στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή, καθώς ευθύνονται για πάνω από το 75% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και σχεδόν το 90% όλων των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, σύμφωνα με τον ΟΗΕ.

Μια έρευνα του the Guardian, αναφέρει πως οι μισές εκπομπές CO<sub>2</sub> (πάνω από 20δισ τόνοι) παγκοσμίως για το 2023, προέρχονται από μόλις 36 εταιρείες ορυκτών καυσίμων.

#### The biggest fossil fuel emitters in 2023

Top five emitting companies by ownership type, million tonnes CO<sub>2</sub> equivalent



Guardian graphic. Source: Carbon Majors/InfluenceMap

Εικόνα 1.3 Οι 5 εταιρείες με τις υψηλότερες εκπομπές σε CO<sub>2</sub>

Επιπλέον, οι βιομηχανικές χώρες του παγκόσμιου βορρά είναι υπεύθυνες για το 92% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. [Hickel Jason, 2021]

Το πλουσιότερο 1% του παγκόσμιου πληθυσμού παρήγαγε το 2019 τόσο μεγάλη ποσότητα εκπομπών άνθρακα όσο τα πέντε δις άνθρωποι που αποτελούν τα φτωχότερα 2/3 της ανθρωπότητας. [Oxfam, et al, 2023]

Οι τρεις αυτές έρευνες έχουν πολύ νόημα και συνδέονται άρρηκτα μεταξύ τους, υπό το πρίσμα του σύγχρονου καπιταλιστικού μοντέλου. Η δυσμενής αυτή ισχύουσα κατάσταση, ενισχύεται και από την έρευνα του Transnational Institute, η οποία καταγράφει πως οι στρατοί ανά των κόσμο είναι οι μεγαλύτεροι ρυπαντές. [TNI, SGR,

2023] Μάλιστα, τα κράτη αντί να προσπαθούν για την συμμόρφωση σε περιβαλλοντικούς όρους (π.χ. συμφωνία του Παρισιού του 2015 για μείωση των εκπομπών έως και 45% μέχρι το 2030 και net zero ως το 2050) και άλλες δράσεις, αυξάνουν τις στρατιωτικές δαπάνες (πάνω από 2.2 τρις \$ το 2022). Το παζλ της καταστροφής συμπληρώνουν η αποψίλωση των δασών, η εκτεταμένη κτηνοτροφία, και κάθε είδος εκμετάλλευσης φυσικών πόρων.

### 1.2.2 Προέλευση ρύπανσης στα (επιφανειακά και) υπόγεια ύδατα

Όπως είναι λογικό, αλλά και όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1.1.2, οι υδάτινοι ταμιευτήρες, είτε μιλάμε για ωκεανούς, είτε μιλάμε για ποταμούς και λίμνες, δηλαδή επιφανειακά ύδατα, είτε για υπόγεια, επηρεάζονται και υποβαθμίζονται εξίσου λόγω της ανθρώπινης παρέμβασης.

Ιστορικά, η πετρελαιοκηλίδα του Deepwater Horizon (Κόλπος του Μεξικού, 2010) [el.wikipedia.org] απελευθέρωσε περίπου 4,9 εκατομμύρια βαρέλια πετρελαίου στον ωκεανό. Προκάλεσε εκτεταμένες ζημιές στη θαλάσσια ζωή, σκοτώνοντας χιλιάδες πουλιά, ψάρια και θαλάσσια θηλαστικά.

Η λεύκανση του μεγάλου κοραλλιογενούς υφάλου στην Αυστραλία [el.wikipedia.org]. Η αύξηση της θερμοκρασίας της θάλασσας και η όξυνσή των ωκεανών έχουν προκαλέσει επαναλαμβανόμενα φαινόμενα λεύκανσης των κοραλλιών, προκαλώντας σοβαρές ζημιές στο μεγαλύτερο κοραλλιογενές σύστημα του κόσμου. Πάνω από 50% της επιφάνειας των κοραλλιών έχει χαθεί τις τελευταίες δεκαετίες.

Ο υδροφορέας Ogallala [el.wikipedia.org] στις ΗΠΑ. Ένας από τους μεγαλύτερους υδροφορείς στον κόσμο, εκτείνεται σε οκτώ πολιτείες στο κεντρικό τμήμα των Ηνωμένων Πολιτειών. Δεκαετίες υπερβολικής άντλησης για άρδευση έχουν οδηγήσει σε σημαντική μείωση των επιπέδων του νερού, με ορισμένες περιοχές να έχουν χάσει πάνω από 30m νερού.

Η υπερβολική άντληση υπόγειων υδάτων στην Τζακάρτα της Ινδονησίας [el.wikipedia.org], έχει προκαλέσει την ταχεία καθίζηση τμημάτων της πόλης, με ορισμένες περιοχές να βυθίζονται έως και 25cm ετησίως. Σαν αποτέλεσμα έχουν επιδεινωθεί οι παράκτιες πλημμύρες, γεγονός που έχει οδηγήσει σε σχέδια μετεγκατάστασης της πρωτεύουσας.

Τα παραπάνω, είναι μόνο μερικά από τα εκατοντάδες καταστροφικά γεγονότα που συνέβησαν ανά την υφήλιο, καθώς οι επιπτώσεις αυτών παραμένουν.

Έτσι, πέραν της ποσότητας των υδάτων που πλήττεται, εκφυλίζεται και η ποιότητά τους.

Ρύπανση λοιπόν, παρατηρείται, όταν μία ή περισσότερες ουσίες, διαλυμένες ή αδιάλυτες στο νερό, βρίσκονται σε συγκέντρωση ικανή να δημιουργήσουν βραχυπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα προβλήματα υγείας στον άνθρωπο, να αναπτύξουν αρρώστιες σε ζώα και να υποβαθμίσουν γενικά το οικοσύστημα. Τέτοια δείγματα φυσικού νερού θεωρούνται ακάθαρτα ή χαμηλής ποιότητας, όπως χαμηλής ποιότητας και μολυσμένα, που απαγορεύονται για ύδρευση αλλά και άρδευση, θεωρούνται και τα δείγματα που υπάρχει κάποια συγκέντρωση παθογόνων μικροοργανισμών. [Λατινόπουλος, 1993]

Δίνεται έτσι η ευκαιρία να κατηγοριοποιηθούν οι πηγές ρύπανσης, συγκεκριμένα πια, των υπόγειων υδάτων.

Αρχικά, πρέπει να αναγνωριστεί η άμεση σύνδεση των επιφανειακών υδάτων και του υπόγειου υδροφορέα. Αυτό αποτελεί το πρώτο βήμα για την αποτροπή μιας ρύπανσης αλλά και την εξυγίανση των υδάτων – προσπάθεια που είναι αρκετά δύσκολη και δαπανηρή σε πολλές περιπτώσεις.

Ανάλογα με τις φυσικές, χημικές και βιολογικές του ιδιότητες, ένας ρύπος που έχει απελευθερωθεί στο περιβάλλον μπορεί να κινηθεί μέσα σε έναν υδροφορέα με τον ίδιο τρόπο που κινείται το υπόγειο νερό (ορισμένοι ρύποι, λόγω των φυσικών ή χημικών τους χαρακτηριστικών, δεν ακολουθούν πάντα τη ροή των υπόγειων υδάτων). Για παράδειγμα, τόσο το νερό όσο και ορισμένοι ρύποι ρέουν προς την κατεύθυνση της τοπογραφίας, από περιοχές τροφοδοσίας (recharge) προς περιοχές εκφόρτωσης (discharge). Τα εδάφη που είναι πορώδη και διαπερατά τείνουν να μεταδίδουν το νερό και συγκεκριμένους τύπους ρύπων με σχετική ευκολία προς τον υποκείμενο υδροφορέα. Όπως ακριβώς τα υπόγεια ύδατα κινούνται γενικά αργά, το ίδιο συμβαίνει και με τους ρύπους που βρίσκονται σε αυτά. Λόγω αυτής της αργής κίνησης, οι ρύποι τείνουν να παραμένουν συγκεντρωμένοι υπό τη μορφή μιας ζώνης ρύπανσης ή ενός «πλουμίου» (plume) που ρέει κατά μήκος της ίδιας διαδρομής με το υπόγειο νερό. Το μέγεθος και η ταχύτητα του πλουμίου, εξαρτώνται από την ποσότητα και τον τύπο του ρύπου, τη διαλυτότητα και την πυκνότητά του, καθώς και από την ταχύτητα του περιβάλλοντος υπόγειου νερού.

Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ μιας πηγής ρύπανσης και μιας πηγής υπόγειου νερού, τόσο πιο πιθανό είναι οι φυσικές διεργασίες να μειώσουν τις επιπτώσεις της ρύπανσης. Διεργασίες όπως η οξειδωση, η βιολογική αποδόμηση (η οποία μερικές φορές καθιστά τους ρύπους λιγότερο τοξικούς) και η προσρόφηση (η πρόσδεση ουσιών στα σωματίδια του εδάφους) μπορεί να συμβούν στα εδαφικά στρώματα της ακόρεστης ζώνης, μειώνοντας έτσι την συγκέντρωση ενός ρύπου πριν αυτός φτάσει στα υπόγεια ύδατα.

Ακόμη και οι ρύποι που φτάνουν απευθείας στα υπόγεια ύδατα, χωρίς να περάσουν από την ακόρεστη ζώνη (π.χ. εμπλουτισμός υδροφορέα με ρυπασμένο νερό από γεώτρηση), μπορούν να γίνουν λιγότερο συγκεντρωμένοι μέσω της αραίωσης (ανάμειξης) με το υπόγειο νερό. Ωστόσο, επειδή τα υπόγεια ύδατα συνήθως κινούνται αργά, οι ρύποι υφίστανται γενικά μικρότερη αραίωση σε σχέση με το επιφανειακό νερό.

Τα υπόγεια ύδατα μπορεί να ρυπανθούν από φυσικές πηγές ή από διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες. Οι αστικές-οικιακές, εμπορικές-τουριστικές, βιομηχανικές και γεωργικές δραστηριότητες μπορούν όλες να επηρεάσουν την ποιότητα των υπόγειων υδάτων.

Οι ρύποι μπορεί να φτάσουν στα υπόγεια ύδατα από δραστηριότητες στην επιφάνεια του εδάφους, όπως διαρροές ή διασκορπισμός αποθηκευμένων βιομηχανικών αποβλήτων· από πηγές κάτω από την επιφάνεια του εδάφους αλλά πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, όπως σηπτικά συστήματα ή υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης πετρελαίου που παρουσιάζουν διαρροή· από κατασκευές κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, όπως γεωτρήσεις· ή από μολυσμένο νερό που τροφοδοτεί τον υδροφορέα.

- Φυσικές πηγές ρύπανσης
  - i) Ορισμένες ουσίες που απαντώνται φυσικά σε πετρώματα ή εδάφη, όπως ο σίδηρος, το μαγγάνιο, το αρσενικό, τα χλωρίδια, τα φθορίδια,

τα θειικά άλατα ή τα ραδιονουκλίδια, μπορούν να διαλυθούν στα υπόγεια ύδατα. Άλλες, όπως η αποσυντιθέμενη οργανική ύλη, μπορούν να μετακινηθούν στα υπόγεια ύδατα υπό μορφή σωματιδίων. Μερικές, αν καταναλωθούν σε υπερβολικές ποσότητες μπορεί να αποτελέσουν κίνδυνο για την δημόσια υγεία, ενώ άλλες μπορεί να προκαλέσουν ανεπιθύμητη οσμή, γεύση ή χρώμα στο νερό. Σε κάθε περίπτωση, τα υπόγεια ύδατα που περιέχουν μη αποδεκτές συγκεντρώσεις αυτών των ουσιών δεν χρησιμοποιούνται για πόσιμο νερό ή άλλες οικιακές χρήσεις νερού.

- ii) Υφαλμύριση. Η υφαλμύριση είναι ένα φαινόμενο κατά το οποίο το υφάλμυρο νερό διεισδύει σε παράκτιο υδροφορέα, συνήθως λόγω υπεράντλησης γλυκού νερού και αδυναμίας ανανέωσης του. [Δεπτοράκη, 2012]
- iii) Εμπλουτισμός υπόγειων υδάτων από επιφανειακές ακάθαρτες πηγές (φυσικές διαρροές)
- iv) Θερμοκρασιακές μεταβολές
- Βιομηχανικές δραστηριότητες – έργα δόμησης
  - i) Ασφαλοβιομηχανίες
  - ii) Εκσκαφές δομικών έργων
  - iii) Παραγωγή/αποθήκευση/μεταφορά χημικών ουσιών
  - iv) Κατασκευή ηλεκτρονικών συσκευών
  - v) Ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση
  - vi) Εργαστήρια κατεργασίας μηχανών/μετάλλων
  - vii) Εξόρυξη και αποστράγγιση ορυχείων
  - viii) Παραγωγή/αποθήκευση/μεταφορά πετρελαίου
  - ix) Τοξικές και επικίνδυνες διαρροές (π.χ. βαρέα μέταλλα όπως μόλυβδος, αρσενικό, κάδμιο, χαλκός, νικέλιο, υδράργυρος, ψευδάργυρος, χρώμιο που απαντώνται και στη βιομηχανία αλλά και σε γεωργικά λιπάσματα, μπαταρίες και σωλήνες ύδρευσης)
- Αγροτικές δραστηριότητες
  - i) Περιοχές ταφής ζώων
  - ii) Μονάδες εκτροφής ζώων
  - iii) Αρδευτικά δίκτυα
  - iv) Περιοχές/λάκκοι διάθεσης κοπριάς
  - v) Αποθήκευση/χρήση φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων
  - vi) Η λίστα είναι μεγάλη, αλλά αξίζει να αναφερθούν τα ζιζανιοκτόνα, εντομοκτόνα, τρωκτικοκτόνα, μυκητοκτόνα, πτηνοκτόνα
  - vii) (που περιέχουν οργανικές, όπως BOD, COD και ανόργανες ουσίες, όπως νάτριο, φώσφορος, TSS). Ο λόγος είναι ότι οι αγροτικές δραστηριότητες έχουν μεγάλη επιφάνεια εξάπλωσης μιας και δεν αποτελούν σημειακές πηγές ρύπανσης.
- Αστικές – οικιακές πηγές ρύπανσης
  - i) Αεροδρόμια
  - ii) Ναυπηγοεπισκευαστικές ζώνες

- iii) Περιοχές κατασκευών
  - iv) Νοσοκομεία
  - v) Πρατήρια καυσίμων
  - vi) Νεκροταφεία
  - vii) Πετρέλαιο θέρμανσης
  - viii) Οικιακά επικίνδυνα προϊόντα
  - ix) Σηπτικά συστήματα
  - x) Πισίνες (αποθήκευση χημικών) [USEPA,1993]
- Πηγές που έχουν σχεδιαστεί για απόρριψη διαφόρων ουσιών
    - i) Υπόγειες δεξαμενές αποχετεύσεων
    - ii) Αποχετευτικοί αγωγοί και φρέατα
    - iii) Χρήσεις γαιών
  - Πηγές που έχουν σχεδιαστεί για την αποθήκευση, κατεργασία και ίσως και απόρριψη ουσιών
    - i) ΧΥΤΑ
    - ii) Χώροι εναπόθεσης αποβλήτων
    - iii) Επιφανειακές κοιλότητες
    - iv) Χώροι ανοιχτής καύσης
    - v) Χώροι ραδιενεργών αποβλήτων
  - Πηγές που γίνονται δίοδοι ρυπασμένου ύδατος προς υδροφορείς
    - i) Πηγάδια παραγωγής
    - ii) Πηγάδια μετρήσεων και παρατηρήσεων [Καρατζάς, 2025]
    - iii) Αποστραγγιστικές γεωτρήσεις (drainage wells), όπου χρησιμοποιούνται σε υγρές περιοχές για τη διευκόλυνση της αποστράγγισης του νερού και τη μεταφορά του σε βαθύτερα εδαφικά στρώματα. Αυτές οι γεωτρήσεις ενδέχεται να περιέχουν γεωργικά χημικά και βακτήρια.
    - iv) Πηγάδια έγχυσης (injection wells), όπου χρησιμοποιούνται για τη συλλογή όμβριων υδάτων, τη συλλογή διαρρεόντων υγρών, τη διάθεση λυμάτων, καθώς και για τη διάθεση βιομηχανικών, εμπορικών και ενεργειακών αποβλήτων. Πολλοί επαγγελματίες μηχανικοί περιβάλλοντος θεωρούν ότι η επεξεργασία λυμάτων, ακολουθούμενη από διάθεση μέσω πηγαδιών έγχυσης είναι η πιο οικονομικά αποδοτική και περιβαλλοντικά υπεύθυνη μέθοδος επεξεργασίας λυμάτων. Εναλλακτικές λύσεις μπορεί να περιλαμβάνουν:
      - α) άμεση απόρριψη των επεξεργασμένων λυμάτων σε αποδέκτες υδάτων
      - β) χρήση του επεξεργασμένου νερού για άρδευση.
 Μια άλλη χρήση των πηγαδιών έγχυσης είναι η περιβαλλοντική αποκατάσταση, για τον καθαρισμό είτε εδαφικής είτε υπόγειας ρύπανσης. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται για την αναπλήρωση φυσικών υδροφορέων. [USEPA,1993], [USEPA, 2024]

### 1.3 Ισχύουσα περιβαλλοντική Νομοθεσία

Η φύση διέπεται από τους δικούς της νόμους και παράλληλα ο άνθρωπος έχει θεσπίσει νόμους για την προστασία της.

Παγκοσμίως, η υπάρχουσα νομοθεσία, στοχεύει στην αντιμετώπιση του μείζονος ζητήματος της κλιματικής αλλαγής, στην βιώσιμη διαχείριση των φυσικών πόρων, στην μείωση της ρύπανσης σε όλα τα επίπεδα και στην προστασία και αποκατάσταση των οικοσυστημάτων.

Πιο συγκεκριμένα, για την πρόληψη και προστασία των υπόγειων υδάτων τόσο σε παγκόσμιο επίπεδο όσο και εντός Ελλάδας έχουν συνταχθεί μεταξύ άλλων:

A) Σε διεθνές επίπεδο:

- Η Οδηγία 2000/60/EK [ypen.gov.gr], του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης που συνδυάζει ποιοτικούς, οικολογικούς και ποσοτικούς στόχους για την προστασία υδάτινων οικοσυστημάτων και την καλή κατάσταση όλων των υδατικών πόρων και θέτει ως κεντρική ιδέα την ολοκληρωμένη διαχείριση τους στη γεωγραφική κλίμακα των Λεκανών Απορροής Ποταμών. Επιπλέον, επαναπροσδιορίζει την έννοια της Λεκάνης Απορροής, η οποία περιλαμβάνει τα εσωτερικά επιφανειακά (ποταμοί, λίμνες), τα υπόγεια ύδατα, τα μεταβατικά (δέλτα, εκβολές ποταμών) και τα παράκτια οικοσυστήματα. [ypen.gov.gr]
- Η Οδηγία 2006/118/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικά με την προστασία των υπόγειων υδάτων από την ρύπανση και την υποβάθμιση. Η παρούσα οδηγία θεσπίζει ειδικά μέτρα, κατά τα προβλεπόμενα στο άρθρο 17, παράγραφοι 1 και 2, της οδηγίας 2000/60/EK, για την πρόληψη και τον έλεγχο της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων. Τα μέτρα αυτά περιλαμβάνουν ιδίως: α) κριτήρια για την αξιολόγηση της καλής χημικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων, και β) κριτήρια για τον εντοπισμό και την αναστροφή σημαντικών και διατηρούμενων ανοδικών τάσεων και κριτήρια για τον καθορισμό σημείων εκκίνησης για την αναστροφή των τάσεων.

B) Εντός Ελλάδας:

- Ο Νόμος 1650/1986 – ΦΕΚ Α- 160, για την προστασία του περιβάλλοντος
- Ο Νόμος 1739/1987 – ΦΕΚ 201/Α, για την διαχείριση των υδατικών πόρων και άλλες διατάξεις
- Ο Νόμος 3199/2003 – ΦΕΚ 280, για την προστασία και διαχείριση των υδάτων - Εναρμόνιση Οδηγίας 2000/60/EK
- Η Κ.Υ.Α. Υ2/2600/2001 – ΦΕΚ 892/Β, για την ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης, σε συμμόρφωση προς την οδηγία 98/83/EK του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης
- Το Π.Δ. 51/2007, για τον καθορισμό μέτρων και διαδικασιών για την ολοκληρωμένη προστασία και διαχείριση των υδάτων σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2000/60/EK «για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων» του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου

Επίσης, με την 145026/10.01.2014 Κ.Υ.Α. συστάθηκε το Εθνικό Μητρώο Σημείων Υδροληψίας (ΕΜΣΥ). Το ΕΜΣΥ είναι ηλεκτρονικό μητρώο, το οποίο αναπτύσσεται και τηρείται στο ΥΠΕΝ με τη μορφή συστήματος βάσης γεωχωρικών δεδομένων και υπηρεσιών. Το σύστημα βάσης γεωχωρικών δεδομένων και υπηρεσιών του ΕΜΣΥ οργανώνεται σύμφωνα με τους όρους και τις απαιτήσεις του ν.3882/2010 και αποτελείται τουλάχιστον από:

- i) το Γενικό Ευρετήριο σημείων υδροληψίας στο οποίο καταχωρίζονται τα ονόματα ή οι επωνυμίες των χρηστών των νερών και τα στοιχεία που ορίζουν τα σημεία υδροληψίας
- ii) τον Ηλεκτρονικό Φάκελο, στον οποίο καταχωρίζονται και αρχειοθετούνται οι άδειες χρήσης νερού, οι αιτήσεις χορήγησης αδειών χρήσης καθώς και οι αιτήσεις εγγραφής στο ΕΜΣΥ
- iii) τον Ψηφιακό Χάρτη, στον οποίο αποτυπώνονται οι συντεταγμένες των σημείων υδροληψίας ανά λεκάνη απορροής.

Το ΕΜΣΥ τροφοδοτείται από τις Διευθύνσεις Υδάτων των Αποκεντρωμένων Διοικήσεων, που συνδέονται υποχρεωτικά με το σύστημα βάσης γεωχωρικών δεδομένων, και εντάσσεται στην Εθνική Υποδομή Γεωχωρικών Πληροφοριών, σύμφωνα με τις προβλέψεις του άρθρου 23 του ν.3882/2010. Για την επίτευξη των σκοπών του ΕΜΣΥ, μπορεί με κανονιστικές πράξεις του υπουργού ΠΕΚΑ και του κατά περίπτωση αρμόδιου Υπουργού, να διασφαλίζεται η διασύνδεσή του με άλλα ειδικά μητρώα και δημόσια αρχεία. [ypen.gov.gr]

Τέλος, μέσω της Αποκεντρωμένης Διοίκησης της Κρήτης, ώστε να προσεγγιστεί σιγά-σιγά η περιοχή μελέτης της τρέχουσας διπλωματικής εργασίας, ορίζεται:

- Η απόφαση 5656/15, για περιοριστικά, απαγορευτικά και άλλα ρυθμιστικά μέτρα που αφορούν στη χρήση των επιφανειακών, υπόγειων - πηγαίων και παράκτιων υδατικών πόρων και στην εκτέλεση και λειτουργία των έργων αξιοποίησής τους, με στόχο την προστασία και την διατήρηση του υδατικού δυναμικού του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης

### Water resources and water exploitation

	Total fresh water resources, long term annual average, thousand m <sup>3</sup> per capita*	Water exploitation index**, %
Belgium	1.9	32
Bulgaria	14.1	6
Czech Republic	1.5	12
Denmark	3.0	4
Germany	2.3	19
Estonia	9.2	15
Ireland	10.7	2
Greece	6.4	13
Spain	2.4	30
France	2.9	17
Italy	2.9	:
Cyprus	0.4	64
Latvia	14.9	1
Lithuania	7.3	9
Luxembourg	3.3	:
Hungary	11.6	5
Malta	0.1	21
Netherlands	5.4	11
Austria	10.1	:
Poland	1.7	18
Portugal	6.9	:
Romania	10.5	3
Slovenia	15.8	3
Slovakia	14.8	1
Finland	20.7	:
Sweden	19.8	1
United Kingdom***	2.9	13
Iceland	532.3	0
Norway	81.1	:
Switzerland	6.9	5
Turkey	3.3	:

\* Long term annual average: a minimum 20 years of latest available data. For Malta average based on 1995-2007. Population data: 2008.

\*\* The water exploitation index represents total water abstracted as a percentage of total freshwater resources. Reference period varies between countries: 2002 data: Hungary, 2004 data: Denmark, Germany; 2005 data: Belgium, Poland, Iceland; 2006 data: Spain, France, the Netherlands, the United Kingdom and Switzerland. 2007 data: other countries.

\*\*\* Includes England and Wales for the water exploitation index  
: Data not available

Εικόνα 1.4 Υδατικοί πόροι και εκμετάλλευση του νερού [Eurostat, 2010]

Ο δείκτης εκμετάλλευσης νερού αντιπροσωπεύει τον συνολικό όγκο νερού που αντλείται σε ένα δεδομένο έτος ως ποσοστό των συνολικών διαθέσιμων αποθεμάτων γλυκού νερού. Αυτός ο δείκτης εξαρτάται από τα φυσικά διαθέσιμα αποθέματα γλυκού νερού καθώς και από το επίπεδο χρήσης του νερού από τα νοικοκυριά, τη βιομηχανία, τους προμηθευτές ενέργειας και τη γεωργία. Ο δείκτης διαφέρει σημαντικά μεταξύ των Κρατών Μελών, με τα χαμηλότερα ποσοστά να παρατηρούνται στη Λετονία, τη Σλοβακία και τη Σουηδία (όλα 1%) και την Ιρλανδία (2%), και τα υψηλότερα στην Κύπρο (64%), το Βέλγιο (32%), την Ισπανία (30%) και τη Μάλτα (21%). [Eurostat, 2010]

Συνοψίζοντας, ο άνθρωπος γεννά τους νόμους που προστατεύουν τα υπόγεια (και επιφανειακά) ύδατα από τις επιπτώσεις των δραστηριοτήτων που ο ίδιος ο άνθρωπος πάλι, δημιουργεί. Οι τρόποι εκμετάλλευσης των υπόγειων υδάτων είναι ευρέως γνωστοί. Υπάρχουν φυσικές πηγές όπου το υπόγειο νερό αναβλύζει έως την επιφάνεια, χρήση αντλιών νερού επιφάνειας (στην περίπτωση που το νερό βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους) και ασφαλώς, γεωτρήσεις (πηγάδια), για τις οποίες γίνεται λόγος στο κεφάλαιο που ακολουθεί.



## 1.4 Περί Γεωτρήσεων

Ως γεώτρηση ορίζεται η διάνοιξη τρύπας (οπής), μικρής διαμέτρου ( $<1\text{m}$ ) και μεγάλου μήκους ( $>20\text{m}$ ), η οποία ορύσσεται με ειδικό μηχανισμό, το γεωτρύπανο. [el.wiktionary.org]

Για την ανόρυξη μιας γεώτρησης, αν και εφόσον έχει συνταχθεί προμελέτη και μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων βάσει και της ανάλυσης της υφιστάμενης ποιοτικής κατάστασης του υπόγειου υδροφορέα, αν έχει δοθεί άδεια από την αρμόδια υπηρεσία, αν έχει νομιμοποιηθεί στο ΕΜΣΥ (βλ. Κεφ. 1.3), τότε θα πρέπει να πληρούνται τα εξής κριτήρια:

- Κατάλληλα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα και συνθήκες τροφοδοσίας του
- Η περιεκτικότητα σε άμμο ή λάσπη στο εσωτερικό της γεώτρησης, η θερμοκρασία και η οξύτητα των υπόγειων υδάτων θα επηρεάζαν την διαδικασία άντλησης
- Ευκολία πρόσβασης και μορφολογία του εδάφους
- Κόστος ανόρυξης και απόσταση από υφιστάμενα έργα υδρομάστευσης ή πηγές

Κάθε γεώτρηση θα πρέπει να διαθέτει μη μηδενιζόμενο υδρόμετρο για τον έλεγχο της χρησιμοποιούμενης ποσότητας νερού σύμφωνα με την κείμενη νομοθεσία. Ακόμα, οι γεωτρήσεις θα πρέπει να απέχουν συγκεκριμένες αποστάσεις από άλλες ή και από άλλα σημεία υδροληψίας γενικά (καταγράφονται στο άρθρο 2: Περιοριστικά μέτρα στα Υπόγεια Υδατικά Συστήματα των λεκανών απορροής Κρήτης της απόφασης 5656/15). Σαν ενδεικτικοί στόχοι, ορίζονται η επίτευξη μέγιστης παροχής με την ελάχιστη πτώση στάθμης και διεύρυνση της διάρκειας ζωής της γεώτρησης ( $>25\text{έτη}$ ). [opengon.gr], [gaiadrill.gr]

## 1.5 Αντικείμενο μελέτης και σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η Κρήτη παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον από άποψη γεωμορφολογίας. Στενή ως προς τους μεσημβρινούς, με υψηλούς ορεινούς όγκους, συνδυάζει (ή τουλάχιστον συνήθιζε να συνδυάζει) ήπιους χειμώνες με σχετικά δροσερά καλοκαίρια και έντονη την παρουσία βροχοπτώσεων (και χιονοπτώσεων) τους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες. Αυτό πια, έχει αλλάξει. Τα καλοκαίρια είναι συνεχώς και μεγαλύτερα, ξηρότερα, θερμότερα. Οι βροχοπτώσεις και οι χιονοπτώσεις έχουν μειωθεί αισθητά. Ταυτόχρονα, η Κρήτη αποτελεί πόλο έλξης εκατοντάδων χιλιάδων τουριστών κάθε χρόνο (κυρίως από Απρίλη μέχρι Οκτώβρη), με αυξητική τάση. Οι αγροτικές και γεωργικές δραστηριότητες έχουν αυξησει επίσης σε μεγάλο βαθμό την απαίτηση σε αρδευτικό νερό (ανεξέλεγκτοι και μη ορθολογικοί ρυθμοί άντλησης υπόγειου ύδατος από γεωτρήσεις). Γίνεται αντιληπτό πως τα γεγονότα αυτά δεν μπορούν να συνυπάρχουν. Η περιοχή μελέτης, που είναι η ευρύτερη περιοχή του υπόγειου υδροφορέα του Τυμπακίου, με τον κάμπο της Μεσαράς στα ανατολικά της πόλης, καθίσταται χαρακτηριστικό παράδειγμα των δυσμενών αποτελεσμάτων των τριών ανωτέρω γεγονότων.

Αντικείμενο μελέτης, ενορχηστρώνεται ο συνδυασμός των περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών παραγόντων, σε άμεση σχέση με την ποιότητα και την ποσότητα των αποθεμάτων των υδάτων του υπόγειου υδροφορέα. Συμπερασματικά, η επιβάρυνση του οικοσυστήματος λόγω τουριστικών (ξενοδοχεία, εστιατόρια, πλοία κλπ), και αγροτικών δραστηριοτήτων (λιπάσματα, μυκητοκτόνα κλπ αλλά και παρουσία παράνομων γεωτρήσεων) και άρα η υποβάθμιση του υπόγειου υδροφορέα (μείωση των αποθεμάτων νερού, πιθανοί ρύποι) και κατ' επέκταση του βιοτικού επιπέδου ζωής, οδήγησε στην ανάγκη για αντιστροφή ή καλύτερευση της κατάστασης.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ορίζεται ο καθορισμός ζωνών προστασίας των γεωτρήσεων που αντλούν από τον υπόγειο υδροφορέα, έναντι πιθανών ρυπογόνων παραγόντων, ως μέτρο πρόληψης για την διαφύλαξη της ποιότητας των υδάτων.

Σαν απώτερος στόχος τίθεται η αναβάθμιση του υπόγειου υδροφορέα μέσω πρακτικών που αφορούν τις ίδιες τις γεωτρήσεις, τα μοντέλα πρόληψης, όπως το συγκεκριμένο κ.α. Προσθετικά, γίνονται προτάσεις και σχόλια για επαναπροσδιορισμό των ανθρωπίνων αναγκών και προτεραιοτήτων όπως και των μέσων υλοποίησής τους. Αναλυτικότερα παρακάτω.

## 2. ΣΚΙΑΓΡΑΦΗΣΗ ΤΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

### 2.1 Διαχείριση των υπόγειων υδάτων

Από την οπτική της περιβαλλοντικής μηχανικής, το νερό είναι ένας πόρος που βελτιστοποιείται με βάση το τι δεν περιέχει. Όσο πιο κοντά βρίσκεται το νερό στην καθαρή του μορφή, τόσο πιο κοντά είναι στην επιθυμητή κατάσταση. Γενικά, η διαφορά μεταξύ αποδεκτής και μη, ποιότητας νερού, έγκειται στη συγκέντρωση ουσιών πέραν του μοριακού  $H_2O$ . Μάλιστα, ακόμη και οι συγκεντρώσεις ιόντων υδρογόνου και υδροξυλίου στο φυσικό νερό, δηλαδή το pH και το pOH αντίστοιχα, μπορούν να το καταστήσουν ρυπασμένο. Οι ρυπαντικές ουσίες κατατάσσονται σε δύο γενικές κατηγορίες: διαλυμένες και αιωρούμενες. Επομένως, ο πρώτος καθορισμός της ποιότητας του νερού βασίζεται σε κάποιο όριο συγκέντρωσης των ουσιών που βρίσκονται σε υδατικό διάλυμα ή είναι αιωρούμενες. Οι ρυθμιστικές αρχές καθορίζουν τα κριτήρια ποιότητας του νερού βάσει μιας λίστας ουσιών που αντιστοιχίζονται με μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις. Τα οριακά επίπεδα συγκέντρωσης ισχύουν για τα εκροήματα, δηλαδή το νερό που απορρίπτεται σε έναν αποδέκτη. Εφαρμόζονται επίσης στην παροχή νερού, όπως τα μέγιστα επιτρεπτά επίπεδα ρύπων (MCLs) στο εξερχόμενο νερό μιας μονάδας επεξεργασίας, πριν από την είσοδό του στο δίκτυο διανομής που το μεταφέρει στους χρήστες. Επιπλέον, τα οριακά κριτήρια ισχύουν και για περιπτώσεις τελικής χρήσης, όπως το νερό στη βρύση μιας κατοικίας ή το εμφιαλωμένο νερό που πωλείται από καταστήματα. [Vallero,2022]

Το υπόγειο ή υπεδάφιο νερό αποτελεί πρωταρχική πηγή του δημόσιου πόσιμου νερού. Αν εκμεταλλευτεί κατάλληλα κατατάσσεται ως ανανεώσιμος πόρος και η ποιότητα του καθίσταται εξαιρετική, ως αποτέλεσμα φυσικού καθαρισμού από τα υλικά του υδροφορέα και τη βιολογικά ενεργή εδαφοκάλυψη {soil cover, το στρώμα του εδάφους που καλύπτει την επιφάνεια της Γης και παίζει ζωτικό ρόλο στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ πετρωμάτων, εδάφους, νερού και ζωντανών οργανισμών στην Κρίσιμη Ζώνη (το λεπτό στρώμα εδάφους το οποίο εκτείνεται από το ανώτατο όριο της βλάστησης έως το κατώτατο όριο των υδροφορέων πόσιμου νερού [Banwart, SoilTrEC Team, 2011])}. Όσον αφορά την εδαφοκάλυψη, αποτελεί έναν μη ανανεώσιμο πόρο που απαιτεί σωστή διαχείριση για να διατηρηθεί για τις μελλοντικές γενιές, καθώς συμβάλλει στη δυναμική του οικοσυστήματος και είναι απαραίτητος για την αντιμετώπιση προκλήσεων όπως η κλιματική αλλαγή και η αύξηση του πληθυσμού. [JordanovaN.,2017] Τις τελευταίες δεκαετίες ειδικά, όπως προαναφέρθηκε, έχει πέσει στην δημόσια αντίληψη, ότι πηγάδια (και γεωτρήσεις) υπόγειων νερών έχουν πιθανότητες να απειλούνται από υπεράντληση και ρύπανση. Η προστασία των υδάτινων πηγών βασίζεται στην ακόλουθη ιδέα: (1) προστασία των δημόσιων πηγαδιών από διάφορες μολύνσεις-ρυπάνσεις και (2) εργασίες για τη διατήρηση της ποιότητας του πόρου. Η προστασία των υδάτινων πηγών σημαίνει πραγματοποίηση θετικών βημάτων στη διαχείριση πιθανών ρυπογόνων εστιών καθώς και σχεδιασμός έκτακτης ανάγκης για το μέλλον με τον καθορισμό εναλλακτικών πηγών πόσιμου νερού (αφαλάτωση, ανακύκλωση ή επαναχρησιμοποίηση νερού κ.α.).

Τα κύρια βήματα της διαδικασίας για την προστασία των υδάτινων πηγών περιλαμβάνουν: i) εκτίμηση της περιοχής που συνεισφέρει νερό σε ένα πηγάδι ή σε

ένα σύνολο πηγαδιών, ii) έρευνα για πιθανές ρυπογόνες πηγές εντός αυτής της περιοχής και iii) αξιολόγηση της ευαισθησίας του/των πηγαδιών σε αυτούς τους ρύπους. Η αξιολόγηση ευαισθησίας εμπεριέχει την εκτίμηση της απελευθέρωσης ρύπων και την πιθανότητα οι ρύποι αυτοί να μεταφερθούν μέσω του εδάφους και του υδροφορέα στο κατώτατο τμήμα του πηγαδιού που υπάρχει το φίλτρο νερού (well screen). Η παρούσα διπλωματική θα εστιάσει στο πρώτο βήμα, την ανάπτυξη ζωνών προστασίας. Ο καθορισμός μιας περιοχής προστασίας πηγαδιών λοιπόν, αντιστοιχεί σε δέσμευση της κάθε κοινότητας για την διαχείριση αυτής της περιοχής. Συνεπώς η προαναφερθείσα οριοθέτηση αποτελεί συχνά, από την μια πλευρά, συμβιβαστική πράξη μεταξύ της επιστημονικής και τεχνικής κατανόησης της υδρογεωλογίας και της μεταφοράς ρύπων, και της πρακτικής εφαρμογής για την δημόσια ασφάλεια και υγιεινή από την άλλη.

## 2.2 Ζώνες προστασίας γεωτρήσεων

Η προστασία της περιοχής έργων υδροληψίας πόσιμου νερού ειδικά, και η αποτροπή οποιασδήποτε επιβάρυνσης των υπόγειων υδάτων με ανεπιθύμητους οργανικούς ή ανόργανους ρύπους, συνήθως επιφανειακής προέλευσης, γενικότερα, αποτελούν κοινή συνισταμένη των χωρών του κόσμου. Απ' άκρη σ άκρη, αλλού πιο μεθοδευμένα και επιτακτικά και αλλού όχι τόσο, εφαρμόζονται περιβαλλοντικές νομοθεσίες με όμοια ή παρεμφερή μέτρα και οδηγίες. Ειδικότερα, πρωτότυπο πλαίσιο αποτελεί η δράση Safe Drinking Water Act (SDWA), που είναι ομοσπονδιακή νομοθεσία, που καθιέρωσε τη βασική δομή για την εποπτεία των προτύπων της ποιότητας του πόσιμου νερού, σύμφωνα με τη νομοθεσία που ψηφίστηκε από το Κογκρέσο το 1974, με σκοπό την προστασία της δημόσιας υγείας μέσω της ρύθμισης της δημόσιας παροχής πόσιμου νερού στις ΗΠΑ. Άλλα προγράμματα είναι το Pollution Prevention Act of 1990 [epa.gov] και τα source water assessment programs που ορίζουν:

- Προσδιορισμό της χερσαίας περιοχής που παρέχει νερό σε κάθε δημόσια πηγή πόσιμου νερού στην πολιτεία
- Καταγραφή των υφιστάμενων και πιθανών πηγών ρύπανσης σε αυτές τις περιοχές
- Προσδιορισμό της ευαισθησίας κάθε συστήματος πόσιμου νερού σε ρύπανση
- Διανομή των αποτελεσμάτων της αξιολόγησης στους χρήστες του νερού και σε άλλους ενδιαφερόμενους φορείς [epa.gov]

Σύμφωνα με την SDWA, ως ζώνη προστασίας γεωτρήσεων (Wellhead Protection Area – WHPA) ορίζεται η επιφανειακή και υπόγεια περιοχή γύρω από μια γεώτρηση ή ένα πεδίο γεωτρήσεων, που τροφοδοτεί ένα δημόσιο σύστημα ύδρευσης, μέσω της οποίας είναι λογικό να μετακινηθούν ρύποι και να φτάσουν σε αυτή τη γεώτρηση ή τα πεδία γεωτρήσεων.

Στην Ελλάδα, και συγκεκριμένα αναφερόμενοι στο υδατικό διαμέρισμα της Κρήτης, με βάση την Αποκεντρωμένη Διοίκηση της Κρήτης, αναλύεται η λεπτομερής οριοθέτηση ζωνών προστασίας σημείων υδροληψίας για απολήψεις νερού ύδρευσης.

Για την προστασία των υπόγειων υδάτων, στις προηγμένες χώρες, έχουν ενσωματωθεί, από τις αρχές του περασμένου αιώνα, διαδικασίες σχεδιασμού, έρευνας, ανάπτυξης, χρήσης και διαχείριση υπόγειων υδάτων. Στη χώρα μας, όπως έχει σημειωθεί στο κεφάλαιο 1.3, με τον ν. 1739/87 θεσπίστηκαν διατάξεις για την

προστασία των υδάτων και σήμερα ισχύουν οι διατάξεις του ν. 3199/2003, ο οποίος είναι σε εναρμόνιση με την οδηγία πλαίσιο για τα νερά 2000/60/ΕΚ. Επιπλέον, στην 1η Αναθεώρηση του Σχεδίου Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών (ΣΔΛΑΠ) του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης (ΦΕΚ Β'4666/2017) στο μέτρο Μ13Β0401 θεσπίστηκε ο "Καθορισμός και οριοθέτηση ζωνών ή/και μέτρων προστασίας σημείων υδροληψίας ύδατος, που προορίζεται για ανθρώπινη κατανάλωση από υπόγεια υδατικά συστήματα".

Ορίζονται:

- Ζώνη προστασίας I (άμεσης προστασίας). Η ζώνη αυτή προστατεύει το άμεσο περιβάλλον της υδροληψίας από ρύπανση και χαρακτηρίζεται ως ζώνη πλήρους απαγόρευσης
- Ζώνη προστασίας II (ελεγχόμενη). Η ζώνη αυτή προστατεύει την υδροληψία από μικροβιολογική κυρίως ρύπανση (ζώνη 50 ημερών) και από ρύπανση που προέρχεται από ανθρώπινες δραστηριότητες ή έργα που είναι επικίνδυνα λόγω γειτνίασης με την υδροληψία
- Ζώνη προστασίας III (επιτηρούμενη). Η ζώνη αυτή περιβάλλει την I και τη II ζώνη και αναπτύσσεται σε όση απόσταση φθάνει η λεκάνη τροφοδοσίας της υπόγειας υδροφορίας από την οποία τροφοδοτείται το υδροληπτικό έργο

Στην συνέχεια ορίζονται οι δραστηριότητες που απαγορεύονται ανά ζώνη:

- Ζώνη προστασίας I (άμεσης προστασίας). Στη ζώνη αυτή απαγορεύεται αυστηρά η οποιαδήποτε δραστηριότητα εκτός των απαραίτητων εργασιών για τη λειτουργία και συντήρηση των υδροληπτικών έργων. Ορίζεται στα 10m περιμετρικά του έργου υδροληψίας
- Ζώνη προστασίας II (ελεγχόμενη). Στη ζώνη αυτή δεν επιτρέπονται η εγκατάσταση και λειτουργία δραστηριοτήτων που συνδέονται με ρυπαντικά φορτία, που δύνανται να επηρεάσουν τα ΥΥΣ και δραστηριότητες για τις οποίες ακόμη και μετά την επεξεργασία των αποβλήτων τους υπάρχει κίνδυνος για μικροβιακή μόλυνση ή/και για ρύπανση από άλλες κατηγορίες ρυπαντικών φορτίων. Ορίζεται στα 1000m περιμετρικά του έργου υδροληψίας

Βασικές έννοιες σχετικά με τις Ζώνες Προστασίας Υδροληψιών και τα όριά τους

- Ζώνη επιρροής. Υπό φυσικές συνθήκες, τα υπόγεια ύδατα βρίσκονται σε δυναμική ισορροπία και η ροή τους κατευθύνεται από περιοχές υψηλότερης υδροστατικής στάθμης σε περιοχές χαμηλότερης. Η άντληση υπόγειου νερού από ένα έργο υδροληψίας (π.χ. γεώτρηση, πηγάδι κλπ) διαταράσσει την ισορροπία και προκαλεί την πτώση της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα γύρω από το έργο άντλησης. Η πτώση προσιδιάζει σε σχήμα κώνου που ονομάζεται κώνος πτώσης - "cone of depression", η δε ακτίνα του κώνου ονομάζεται «ζώνη επιρροής». Η πτώση της στάθμης είναι μηδενική στην περίμετρο της ζώνης επιρροής και μεγαλώνει όσο πλησιάζουμε προς το σημείο της υδροληψίας, λαμβάνοντας την μέγιστη τιμή της ακριβώς στις παρειές του έργου υδροληψίας. Η ζώνη επιρροής μελετάται σε σχέση με τη θέση των

υδροληψιών της περιοχής, την παροχή άντλησης του συνόλου των υδροληψιών και τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου υδροφορέα.

- Ζώνη συνεισφοράς ή ζώνη σύλληψης (zone of contribution). Η ζώνη συνεισφοράς, περιλαμβάνει όλες τις περιοχές που επαναφορτίζουν ή συνεισφέρουν νερό σε μία υδροληψία ή σε πεδία υδροληψιών. Η ζώνη Συνεισφοράς περιέχει νερό αλλά και ρύπους που τελικά θα καταλήξουν στο έργο υδροληψίας και θα αντληθούν απ' αυτό. Αναλόγως των περιπτώσεων η ζώνη συνεισφοράς μπορεί να συμπίπτει με τον κώνο πτώσης στάθμης ή να είναι μεγαλύτερη από αυτόν.
- Ζώνη προστασίας ορίζεται όλη η περιοχή που πρέπει να προστατευτεί ούτως ώστε να μη φτάνουν ρύποι σε επικίνδυνες συγκεντρώσεις σε ένα έργο υδροληψίας. Η ζώνη προστασίας, που έχει ως μέγιστη τιμή τη ζώνη σύλληψης, διακρίνεται από αυτή λόγω κάποιων κριτηρίων που καθορίζουν ουσιαστικά το βαθμό επικινδυνότητας και την κατάσταση στην οποία βρίσκονται οι ρύποι κατά τη χρονική στιγμή που φτάνουν στο έργο υδροληψίας. Τέτοια κριτήρια είναι η απόσταση, ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το νερό στη γεώτρηση/πηγή, ο χρόνος ζωής τυχόν μικροβίων κλπ.

## 2.3 Περιβαλλοντικά μοντέλα

Χρησιμοποιούμε επιστημονικά μοντέλα σε διάφορα επιστημονικά πεδία για να αναπαραστήσουμε ένα σύστημα ώστε να κατανοήσουμε τις διάφορες διεργασίες, διαδικασίες, συσχετισμούς με άλλα συστήματα κλπ, που συμβαίνουν σε αυτό, γύρω από αυτό ή αναφορικά με αυτό. Στην προκειμένη περίπτωση, για να αναλύσουμε, εμβαθύνουμε και να εξάγουμε συμπεράσματα όσον αφορά τον υπόγειο υδροφορέα και τα πηγάδια άντλησης εντός αυτού, σχετικά με τους πιθανούς ρύπους και τους κινδύνους να εισχωρήσουν στα υπό μελέτη πηγάδια, η επιλογή ενός μαθηματικού μοντέλου φαίνεται αναγκαία. Η μαθηματική μοντελοποίηση της ροής υπόγειων υδάτων επικεντρώνεται στην εύρεση λύσεων μιας κυρίαρχης διαφορικής εξίσωσης η οποία υπόκειται σ' ένα σύνολο οριακών συνθηκών. Η διαδικασία αυτή μπορεί είτε να είναι απλή είτε πολύπλοκη, ανάλογα με τις διεργασίες ροής των υπόγειων υδάτων που περιλαμβάνονται στη διαφορική εξίσωση και την πολυπλοκότητα των οριακών συνθηκών. Αυτός ο συνδυασμός διεργασιών και οριακών συνθηκών αναφέρεται ως εννοιολογικό μοντέλο (conceptual model). Ένα παράδειγμα ενός πολύ απλού εννοιολογικού μοντέλου είναι αυτό ενός μεμονωμένου πηγαδιού σ' έναν ομογενή, περιορισμένο υδροφορέα, κοντά σε μια ευθεία και απείρως μακριά ισοδυναμική γραμμή (γραμμή σταθερού ύψους). Ένα τέτοιο εννοιολογικό μοντέλο αποτελεί αφηρημένη έννοια ενός πηγαδιού κοντά σε κάποιο όριο ρέματος ή λίμνης. Το πραγματικό ελικοειδές όριο των επιφανειακών υδάτων αντικαθίσταται από μια απείρως μεγάλη ευθεία, τα διάφορα ύψη, απ' το επίπεδο αυτής και κάτω θεωρούνται ίσα με το υψόμετρο του επιφανειακού νερού, οι ιδιότητες του υδροφορέα θεωρούνται ομοιόμορφες και ομογενείς σε όλη την έκταση της ροής και τέλος η ροή υπόγειων υδάτων θεωρείται αυστηρά οριζόντια. Προτέρημα αυτού του εννοιολογικού μοντέλου είναι η ευκολία με την οποία μπορεί να φτάσει σε μια λύση. Φυσικά, το τίμημα είναι η έλλειψη ρεαλισμού αν συγκριθεί με μια πολύπλοκη πραγματική περίπτωση, για παράδειγμα ενός μερικώς διαπεραστικού πηγαδιού σε κοντινή απόσταση από ένα ελικοειδές ρέμα με λασπώδη πυθμένα σ' έναν ετερογενή υδροφορέα ποικίλου πάχους.

Ένα ρεαλιστικό εννοιολογικό μοντέλο συχνά λογίζεται ως αναπαράσταση της πραγματικότητας, η οποία εσωκλείει την πλειονότητα των γεωλογικών και υδρολογικών πολυπλοκοτήτων, αν όχι όλων, ενός υδροφορέα ή ενός συστήματος υδροφορέων. Όσο πιο ρεαλιστικό το μοντέλο, τόσο πιο περίπλοκη γίνεται η μοντελοποίηση, κυρίως για τους εξής λόγους:

- Όταν γίνεται μεγάλη προσπάθεια για επίτευξη μοντελοποίησης πολύ κοντά στην πραγματικότητα, τα δεδομένα πεδίου αυξάνονται ακολούθως.
- Οι κώδικες (υπολογιστών) που χρησιμοποιούνται για την επίλυση σύνθετων μοντέλων είναι δύσκολο να λειτουργήσουν
- Πολλά διαφορετικά σύνολα παραμέτρων και οριακών συνθηκών δύναται να αντιπροσωπεύουν τα ίδια παρατηρούμενα επίπεδα νερού και τις ίδιες παρατηρούμενες ροές, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει μοναδικότητα.

Καθώς η ένταξη ολοένα και περισσότερου 'ρεαλισμού' στο μοντέλο υποδηλώνει μια αυξανόμενη επακριβή αναπαράσταση της ροής των υπόγειων υδάτων, η πραγματικότητα μπορεί να είναι αρκετά διαφορετική. Αυξημένες απαιτήσεις σε δεδομένα, η σχετική "αβεβαιότητα δεδομένων" αλλά και η δυσκολία ερμηνείας των αποτελεσμάτων σύνθετων (πολυπαραμετρικών) μοντέλων, αποτελούν τροχοπέδη, θεωρητικά, στην βελτίωση του 'ρεαλισμού' στο μοντέλο. Ορισμένες παράμετροι παραμένουν αβέβαιες σε κάθε περίπτωση (π.χ. οι χωρικές κατανομές των υδραυλικών αγωγιμοτήτων και οι ρυθμοί επαναφόρτισης).

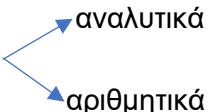
Αυτό είναι κάτι αληθές και όχι μόνο για μοντελοποιήσεις ροής υπόγειων υδάτων. Ο Albert Einstein έχει δώσει την ακόλουθη συμβουλή, αναφερόμενος σε μοντέλα του σύμπαντος: << Τα πράγματα θα πρέπει να γίνονται όσο το δυνατόν πιο απλά, αλλά όχι απλούστερα >>. Με άλλα λόγια, η ορθή μοντελοποίηση απαιτεί μια ισορροπία μεταξύ του ρεαλισμού του εννοιολογικού μοντέλου και του συνεπαγόμενου μοντέλου ροής υπόγειων υδάτων που έγκειται σε πρακτικούς περιορισμούς λόγω των παραμέτρων. Όταν πρόκειται να αποφασιστεί η καταλληλότητα ενός εννοιολογικού μοντέλου, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη τόσο η πολυπλοκότητα της υδρογεωλογίας όσο και η σκοποθεσία της εργασίας προς μοντελοποίηση. Στα πλαίσια της προστασίας πηγαδιών, ο σκοπός της μοντελοποίησης είναι να σχεδιαστεί μια ζώνη σύλληψης του χρόνου διάνυσης ( $\text{time of travel} - \tilde{T}$ ) των (πιθανών) ρύπων, οι οποίοι έχουν κατεύθυνση προς τα πηγάδια άντλησης πόσιμου νερού. Οι πιθανοί αυτοί ρύποι, μπορεί να προέρχονται από διάφορες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή μελέτης ή γύρω από αυτή, και κατ' επέκταση μπορεί να θεωρηθούν επικίνδυνοι. Αυτός ο καθορισμός της ζώνης σύλληψης βασίζεται στην υπόθεση α) σταθερής κατάστασης ροής υπόγειων υδάτων και β) μέσου χρόνου διαδρομής υπόγειων υδάτων. Μια ζώνη σύλληψης χρόνου διάνυσης ενδεχομένως να μην είναι για πολλούς το πιο σχετικό μέτρο πρόληψης όταν πρόκειται για προστασία πηγαδιών πόσιμου νερού από πιθανές τοξικές ουσίες. Η μεταφορά ρύπων προς ένα πηγάδι άντλησης πόσιμου νερού αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα, όπου διεργασίες, όπως διασπορά, προσρόφηση και (βιο)-χημικές αντιδράσεις μπορούν να επηρεάσουν αισθητά τον βαθμό στον οποίο ένα πηγάδι εκτίθεται πραγματικά στους ρύπους που υπάρχουν στον υδροφορέα. Η ενσωμάτωση όλων των ανωτέρω, στο τι ουσιαστικά ορίζεται ως ζώνη προστασίας γεωτρήσεων, θα απαιτούσε προηγμένα μοντέλα μεταφοράς για ένα σύνολο διαφορετικών ρύπων. Οι απαιτήσεις σε δεδομένα πεδίου για μια τέτοια προσπάθεια



θα ήταν συγκλονιστικές ενώ η τεχνολογία για να περιγράψει αξιόπιστα αυτές τις διεργασίες μεταφοράς ρύπων δεν έχει αναπτυχθεί πλήρως. Σε κάθε περίπτωση, ο ορισμός πολλαπλών ζωνών προστασίας γεωτρήσεων, μια για κάθε έναν πιθανό ρύπο, είναι μη εφαρμόσιμος και γι' αυτόν τον λόγο η οριοθέτηση των ζωνών προστασίας βασίζεται στα δύο παραπάνω σημεία.

## 2.4 To WhAEM (Wellhead Analytic Element Model)

Υπάρχουν γενικές κατηγορίες μοντέλων. Αυτές είναι:

- Εμπειρικά
  - Καθορισμένα
  - Στοχαστικά
- 
- ```
graph LR; A[Καθορισμένα] --> B[αναλυτικά]; A --> C[αριθμητικά]
```

Το κύριο χαρακτηριστικό των καθορισμένων μοντέλων είναι ότι προσπαθούν να μοντελοποιήσουν τον άγνωστο αλλά συστηματικό χαρακτήρα ενός φαινομένου μέσω κάποιας αναλυτικής συνάρτησης και γίνονται ευκολότερα κατανοητά συγκριτικά με τα στοχαστικά (κατά κανόνα θεωρείται ότι ακολουθείται η κατανομή Gauss), γιατί δεν εμπλέκουν πολύπλοκους στατιστικούς ορισμούς.

Όσον αφορά τα αναλυτικά μοντέλα:

- Βασίζονται σε μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν ακριβώς ένα φαινόμενο
- Παράγουν κλειστές λύσεις (explicit solutions) μέσω αλγεβρικών, διαφορικών ή ολοκληρωτικών εξισώσεων
- Χρησιμοποιούνται συχνά σε φυσικά και μηχανικά συστήματα, όπου υπάρχουν θεμελιώδεις νόμοι που περιγράφουν τη συμπεριφορά του συστήματος [Kreyszig E., 2011]  
Τα αριθμητικά μοντέλα όμως:
- Βασίζονται σε διακριτές προσεγγίσεις για την επίλυση προβλημάτων όπου οι αναλυτικές λύσεις δεν είναι εφικτές
- Χρησιμοποιούν υπολογιστικές μεθόδους, όπως πεπερασμένες διαφορές (Finite Difference Method - FDM) και πεπερασμένα στοιχεία (Finite Element Method - FEM)
- Μπορούν να εφαρμοστούν σε πολύπλοκες γεωμετρίες και δυναμικά προβλήματα όπου οι αναλυτικές λύσεις δεν είναι διαθέσιμες [Roache P. J., 1998]

Το WhAEM [Kraemer, S. R., Haitjema, H. M., 2018], όπως δηλώνει και ο τίτλος του, είναι ένα μοντέλο αναλυτικού στοιχείου (Wellhead Analytic Element Model), δηλαδή δέχεται τιμές για διαφορετικά στοιχεία (παραμέτρους). Η ακολουθία του WhAEM (από το γενικό στο ειδικό) είναι η εξής: Μαθηματικό → Εννοιολογικό → Καθορισμένο → Αναλυτικό. Το WhAEM επιλύει ροή υπόγειων υδάτων σταθερής κατάστασης σ' έναν συγκεκριμένο, ενιαίο υδροφορέα. Υποστηρίζει ανίχνευση τρισδιάστατων σωματιδίων (WhAEM supports three-dimensional particle tracking) αλλά χρησιμοποιεί την προσέγγιση Dupuit-Forchheimer και ως εκ τούτου αγνοεί την αντίσταση στην κατακόρυφη ροή. Συνεπώς το μοντέλο δίνει αποτελέσματα σε 2-D. Με άλλα λόγια, το WhAEM δεν προσομοιώνει την κατακόρυφη διασπορά ή τη στρωματοποίηση. Το



WhAEM, στην τρέχουσα έκδοσή του, υστερεί σε λειτουργίες όπως συνεχώς μεταβαλλόμενα κατώτατα ύψη υδροφορέων, 3-D στοιχεία, ροή πολλαπλών υδροφορέων και παροδική ροή (transient flow), οι οποίες είναι διαθέσιμες σε επαγγελματικά μοντέλα υπόγειων υδάτων. Ενώ αυτές οι παραλείψεις περιορίζουν την εφαρμογή του WhAEM, ταυτόχρονα κάνουν τον κώδικα να λειτουργήσει ευκολότερα και έτσι να είναι πιο εύκολος στην εκμάθησή του.

Επιπρόσθετα, το WhAEM απαιτεί λιγότερα δεδομένα εισόδου. Ο καθορισμός λοιπόν, της ζώνης σύλληψης βάσει του χρόνου διάνυσης με τη βοήθεια του WhAEM, είναι ιδιαίτερα φθηνότερος απ' όταν πραγματοποιείται μέσω ενός μοντέλου υπόγειων υδάτων πλήρους λειτουργικότητας, όπως είναι το U.S. Geological Survey MODFLOW [McDonald and Harbaugh, 1988].

Παρακάτω παρατίθεται μια σύγκριση του WhAEM με άλλα περιβαλλοντικά μοντέλα όπως το MODFLOW και το FEFLOW καθώς και μερικές έρευνες με χρήση αυτών.

Πίνακας 2.1 Σύγκριση των WhAEM, MODFLOW, FEFLOW βάσει ορισμένων κριτηρίων

| Παράγοντες                   | WhAEM<br>(Wellhead Analytic<br>Element Model)                    | MODFLOW<br>(Modular Finite-<br>Difference Flow<br>Model)     | FEFLOW (Finite<br>Element<br>Subsurface Flow<br>Model) |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Προσέγγιση<br>Μοντελοποίησης | Αναλυτική<br>Μέθοδος<br>Στοιχείων (AEM)                          | Μέθοδος<br>Πεπερασμένων<br>Διαφορών (FDM)                    | Μέθοδος<br>Πεπερασμένων<br>Στοιχείων (FEM)             |
| Διαστατικότητα               | 2D με κάποιες 3D<br>δυνατότητες<br>παρακολούθησης<br>στοιχείων   | 3D                                                           | 2D/3D                                                  |
| Εστίαση<br>Εφαρμογών         | Προστασία<br>υδρομαστευτικών<br>έργων και ροή<br>υπόγειων υδάτων | Περιφερειακή ροή<br>υπόγειων υδάτων<br>και μεταφορά<br>ρύπων | Προηγμένες<br>υδρογεωλογικές<br>προσομοιώσεις          |
| Υπολογιστική<br>Απαίτηση     | Χαμηλή                                                           | Μέτρια έως υψηλή                                             | Υψηλή                                                  |
| Ευκολία Χρήσης               | Απλό περιβάλλον                                                  | Μέτριας δυσκολίας                                            | Πολύπλοκο αλλά<br>ιδιαίτερα ευέλικτο                   |
| Μοντελοποίηση<br>Μεταφοράς   | Παρακολούθηση<br>σωματιδίων                                      | Υποστηρίζει<br>μεταφορά<br>διαλυτών μέσω<br>MT3DMS           | Θερμική ροή<br>εξαρτώμενη της<br>πυκνότητας            |
| Ανάπτυξη<br>Λογισμικού       | USEPA                                                            | USGS                                                         | DHI – WASY                                             |

- "Simulation of Groundwater Flow in the Edwards-Trinity and Related Aquifers in Texas Using MODFLOW." [Kuniansky, E.L., & Ardis, A.F., 2004]
- "Simulation of Nitrate Transport in Groundwater Using MODFLOW and MT3DMS." [Konikow, L.F., & Hornberger, G.Z., 2006]
- "Numerical Modeling of Geothermal Reservoirs Using FEFLOW." [DHI-WASY Software., 2015]
- "Modeling Seawater Intrusion in Coastal Aquifers Using FEFLOW." [Schlumberger Water Services., 2012]

### 2.4.1 Ιστορικά στοιχεία

Η κυκλοφορία του μοντέλου αναλυτικού στοιχείου ζώνης σύλληψης, CZAEM (Capture Zone Analytic Element Model) για μοντελοποίηση ροής υπόγειων υδάτων [Strack et al., 1994], εισήγαγε στην επιστημονική κοινότητα, που ασχολείται με την προστασία γεωτρήσεων, μια νέα τεχνική αναλυτικής λύσης, την μέθοδο του αναλυτικού στοιχείου. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην αρχή της υπέρθεσης (superposition) πολλών αναλυτικών συναρτήσεων κλειστής μορφής, καθεμία από τις οποίες αντιπροσωπεύει ένα υδρολογικό χαρακτηριστικό, όπως σημειακές πηγές (point-sinks) για πηγάδια, γραμμικές πηγές (line-sinks) για ποταμούς λίμνες κλπ., στοιχεία περιοχής για ζώνες αποτελεσματικής επαναφόρτισης (εμπλουτισμού) (recharge) και γραμμικά διπλά στοιχεία (line doublets) ή αλλιώς διπλές στρώσεις (double layers) για γεωλογικές επαφές [Strack, 1989], [Haitjema, 1995], [Strack, 2017]. Τα στοιχεία αυτά περιγράφονται στην συνέχεια. Τα δισδιάστατα μοντέλα αναλυτικού στοιχείου επικαλούνται την υπόθεση του Dupuit [Dupuit, 1863], που σημαίνει ότι η αντίσταση στην κατακόρυφη ροή θεωρείται αμελητέα, όπως έχει προαναφερθεί, και ότι τα υδραυλικά ύψη είναι σταθερά ως προς το βάθος (μηδενική κατακόρυφη υδραυλική κλίση). Η υπόθεση του Dupuit, για τον καθορισμό της ζώνης σύλληψης, έχει νόημα όταν η τελευταία έχει πλάτος κατά μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερο από το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα. Η σημασία αυτής της υπόθεσης είναι ότι επιτρέπει την προσέγγιση ενός τρισδιάστατου πεδίου ροής από ένα δισδιάστατο. [Bakker and Strack, 1996] Όταν η πλήρης τρισδιάστατη προσομοίωση είναι υπολογιστικά ακριβή ή δύσκολη, τότε η εφαρμογή των δισδιάστατων μοντέλων επιτρέπει την αποτελεσματική προσέγγιση της ροής σε περιοχές όπου η κατακόρυφη μεταβλητότητα μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα ή να προσεγγιστεί με προσαρμοσμένα σχέδια.

Το WhAEM για τα Windows 95 κυκλοφόρησε το 1997. Η κυκλοφορία της πρώτης έκδοσης του WhAEM (Απρίλιος 2000) περιλάμβανε ένα βελτιωμένο γραφικό περιβάλλον για τον χρήστη, Windows GUI (Graphical User Interface), την αξιοποίηση της Γεωλογικής Υπηρεσίας των Η.Π.Α. (U.S. Geological Survey USGS), γραφήματα ψηφιακών γραμμών (digital line graphs DLGs) ως υπόβαθρο χάρτη (base map) και μια νέα μηχανή παραγωγής λύσεων (solution engine) την ModAEM [Kelson, 2000] η οποία συμπεριλάμβανε αυθαίρετα διαμορφωμένα όρια μηδενικής ροής (no-flow boundaries). Η 1<sup>η</sup> έκδοση υποστήριζε επίσης οριοθέτηση με σταθερή ακτίνα, υπολογισμένη ακτίνα, πηγάδι σε ομοιόμορφη ροή και μόνιμη ροή σε περιορισμένους ή ελεύθερους υδροφορείς με σταθερές ιδιότητες υδροφορέα καθώς και εμπλουτισμό. Η 2<sup>η</sup> έκδοση ενσωμάτωσε την μηχανή επίλυσης GFLOW1 [Haitjema, 1995] και περιλάμβανε νέα στοιχεία όπως inhomogeneities και resistance line-sinks. Η τρέχουσα 3<sup>η</sup> έκδοση, παρέχει επιπλέον υποστήριξη για raster υπόβαθρα χαρτών (base maps) όπως τα ψηφιακά raster γραφικά, digital raster graphics (DRG) της USGS και τα shapefiles (shp).

## 2.4.2 Χαρακτηριστικά του μοντέλου και σενάρια επιλογής μεθόδου για τον καθορισμό ζώνης προστασίας

Το γραφείο υπόγειων υδάτων και πόσιμου νερού (OGWDW) της Αμερικανικής Υπηρεσίας Περιβαλλοντικής Προστασίας (EPA) έχει θεσπίσει οδηγίες αναφορικά με τα κριτήρια και τις μεθόδους που θα χρησιμοποιούνται για την οριοθέτηση των περιοχών προστασίας, όπως αντίστοιχα έχει θεσπιστεί και στην ελληνική νομοθεσία. [USEPA,1993], [USEPA,1994] Τα κριτήρια περιλαμβάνουν (1) απόσταση, (2) πτώση στάθμης, (3) χρόνος παραμονής, (4) όρια ροής, (5) απορροφητική ικανότητα. Οι μέθοδοι για την εφαρμογή των κριτηρίων κυμαίνονται από τις απλές έως και τις σύνθετες, συμπεριλαμβανομένης της χαρτογράφησης αναφορικά με αποστάσεις από οικοδομικές γραμμές, της μεθόδου υπολογισμένης ακτίνας και της υδρογεωλογικής μοντελοποίησης. (βλ Πίνακα 2.2)

Πίνακας 2.2 Wellhead protection area delineation criteria & methods [Working with WhAEM, 2018]

| Methods                  | Arbitrary fixed radius | Calculated fixed radius | Well in uniform flow field | Geohydrologic mapping | Geohydrologic modeling | Transport/ transformation modeling |
|--------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------------------|
| Criteria                 |                        |                         |                            |                       |                        |                                    |
| Distance                 | X                      | x                       |                            |                       |                        |                                    |
| Draw down                |                        | x                       | X                          |                       | x                      | x                                  |
| Residence time           |                        | x                       | X                          |                       | x                      | x                                  |
| Geohydrologic boundaries |                        |                         |                            | x                     | x                      | x                                  |
| Assimilative capability  |                        |                         |                            |                       |                        | x                                  |

- i) Πρώτη γραμμή άμυνας γεωτρήσεων
- Ένα από τα βασικά κριτήρια που αφορούν τις ζώνες προστασίας που περιβάλλουν ένα ή πολλαπλά πηγάδια άντλησης είναι η απόσταση (distance). Η μέθοδος καθορισμού μιας ζώνης απομάκρυνσης (setback) με βάση μιας σταθερή ακτίνα χρησιμοποιείται συνήθως σε κρατικά προγράμματα προστασίας υδάτων [Merkle et al., 1996]. Για παράδειγμα, κάποτε η πολιτεία της Ιντιάνα όριζε απόσταση ασφαλείας 200 ποδιών μεταξύ πιθανών πηγών ρύπανσης και δημόσιων πηγαδιών πόσιμου νερού. Η σταθερή ακτίνα αποτελεί την πρώτη γραμμή άμυνας έναντι επιφανειακών ρύπων που θα μπορούσαν να φτάσουν στην γεώτρηση καταλήγοντας στα υπόγεια ύδατα κοντά στα φίλτρα νερού (well screen). Μια ζώνη προστασίας γεωτρήσεων με σταθερή ακτίνα χρησιμοποιείται επίσης ως απόσταση ασφαλείας ή διαφορετικά ζώνη απομάκρυνσης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, από πιθανές πηγές μικροβιακών παθογόνων. Η υπόθεση είναι ότι τα παθογόνα που εισέρχονται στα υπόγεια ύδατα εκτός της ζώνης απομάκρυνσης θα καταστούν ανενεργά πριν φτάσουν στο φρέαρ. Ωστόσο,

ο πραγματικός χρόνος επιβίωσης των παθογόνων στα υπόγεια ύδατα παραμένει αντικείμενο συνεχιζόμενων ερευνών. Παρόλα αυτά, μια τέτοια απόσταση ασφαλείας δεν είναι πιθανό να προστατεύσει από μια διαρροή βενζίνης ή από ένα ρυπαντικό νέφος που περιέχει το πρόσθετο μεθυλοτριτογενής βουτυλαιθέρας (MTBE). Το MTBE αντιστέκεται στη διάσπαση σε πολλά υποεπιφανειακά περιβάλλοντα.

- ii) Κριτήρια χρόνου παραμονής (residence time criteria)  
Η δικαιολόγηση των κριτηρίων χρόνου παραμονής ως μέτρου προστασίας των υπόγειων υδάτων βασίζεται στην υπόθεση ότι:
1. Οι μη συντηρητικοί ρύποι (που υπόκεινται σε διαδικασίες προσρόφησης ή μετασχηματισμού) θα έχουν τη δυνατότητα να αφομοιωθούν μετά από έναν συγκεκριμένο μέσο χρόνο παραμονής στο υπέδαφος.
  2. Η ανίχνευση συντηρητικών ρύπων (που δεν υφίστανται προσρόφηση ή μετασχηματισμό) κατά την είσοδό τους στην προστατευόμενη περιοχή θα παρέχει επαρκή χρόνο προειδοποίησης στην κοινότητα ύδρευσης, ώστε είτε να αναπτύξει μια νέα πηγή υδροδότησης είτε να λάβει άμεσα μέτρα αποκατάστασης.

Δύο απλές μέθοδοι που χρησιμοποιούν τα κριτήρια χρόνου παραμονής και εφαρμόζονται στη μελέτη της περίπτωσης μας είναι η υπολογισμένη σταθερή ακτίνα και το πηγάδι σε ομοιόμορφη ροή.

#### A) Υπολογισμένη σταθερή ακτίνα

Η σταθερή ακτίνα υπολογίζεται με βάση μια απλή, δισδιάστατη, στατική ανάλυση υδατικού ισοζυγίου, υποθέτοντας αμελητέα περιβάλλουσα ροή στον υδροφορέα σε σύγκριση με τον ρυθμό άντλησης του πηγαδιού.

Αν θεωρήσουμε ακτινική ροή προς ένα πηγάδι σε έναν υδροφορέα με σταθερό κορεσμένο πάχος  $H$  (m), το κυλινδρικό όριο ακτίνας  $R$  (m) ορίζεται από μια ισόχρονη επιφάνεια με χρόνο παραμονής  $t$  (days). Αυτό σημαίνει ότι οποιοδήποτε σωματίδιο νερού εισέρχεται στον κύλινδρο ή ήδη βρίσκεται μέσα σε αυτόν δεν θα ταξιδύσει για περισσότερο από  $t$  ημέρες πριν αντληθεί από το πηγάδι. Αν ο ρυθμός άντλησης του φρέατος είναι  $Q$  (m<sup>3</sup>/day), ο ρυθμός ανατροφοδότησης του υδροφόρου ορίζοντα λόγω βροχόπτωσης είναι  $N$  (m/day), και το πορώδες του υδροφορέα είναι  $n$  (-), τότε το ισοζύγιο νερού για την περίοδο  $t$  δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{1}{2} N \pi R^2 t + n \pi R^2 H \approx Q t \quad (2.1)$$

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης αντιπροσωπεύει την εισροή λόγω της τροφοδοσίας (recharge) του υδροφορέα. Δεδομένου ότι η περιοχή μεταβάλλεται από 0 έως  $\pi R^2$  κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος  $t$ , μόνο το ήμισυ της περιοχής περιλαμβάνεται (η μέση περιοχή κατά το χρονικό διάστημα  $t$ ). Ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει την ποσότητα νερού που περιέχεται μέσα στον κυλινδρικό υδροφορέα, ενώ ο όρος στη δεξιά πλευρά της εξίσωσης είναι η συνολική ποσότητα νερού που αφαιρείται από το πηγάδι.

Η ακτίνα R μπορεί επομένως να εκφραστεί ως:

$$R \approx \sqrt{\frac{Qt}{\frac{1}{2}N\pi t + n\pi H}} \quad (2.2)$$

Αυτή η προσεγγιστική εξίσωση είναι επαρκής μέχρι μια ακτίνα R, που αντιστοιχεί περίπου στο 80% της ακτίνας  $R_{divide}$ , η οποία ορίζει το συνολικό περίβλημα της ζώνης σύλληψης σχετικά με το διαχωριστικό των υδάτων [Haitjema, 2011].

Η τελευταία μπορεί να ληφθεί από ένα απλό υδατικό ισοζύγιο:

$$t\pi R_{divide}^2 N = Qt \quad (2.3)$$

ώστε:

$$R_{divide} = \sqrt{\frac{Q}{\pi N}} \quad (2.4)$$

Η χρήση αυτής της εξίσωσης είναι γνωστή ως η "μέθοδος ανατροφοδότησης" (recharge method) [USEPA, 1993].

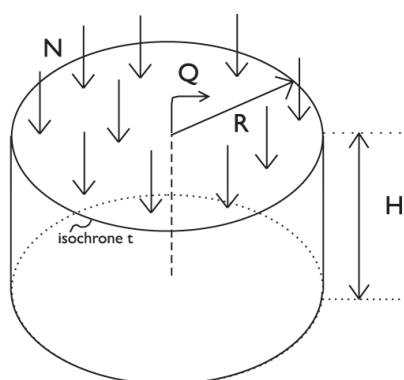
Αν οι παράμετροι t ή N είναι σχετικά μικρές, ο όρος της τροφοδοσίας στις εξισώσεις (2.1) και (2.2) μπορεί να αγνοηθεί:

$$R \approx \sqrt{\frac{Qt}{n\pi H}} \quad (2.5)$$

Η χρήση αυτής της εξίσωσης είναι γνωστή ως η "ογκομετρική μέθοδος" (volumetric method) [USEPA, 1993]. Η εξίσωση (2.5) αντιπροσωπεύει μια υπερεκτίμηση της ακτίνας R για την ισόχρονη επιφάνεια, κάτι που είναι συντηρητικό αναφορικά με την προστασία των πηγαδιών. Το πλεονέκτημα αυτής της απλοποίησης είναι ότι δεν απαιτείται ο προσδιορισμός της (τοπικής) ανατροφοδότησης, μια παράμετρος που συχνά είναι δύσκολο να προσδιοριστεί.

Οι εξισώσεις (2.2) – (2.5) ισχύουν μόνο αν πληρείται η παραδοχή του Dupuit, δηλαδή αν υπάρχει ρηχή και οριζόντια ροή. Αν η ζώνη σύλληψης ή η ακτίνα της ισόχρονης (επιφάνειας) είναι μικρότερη από περίπου το διπλάσιο του κορεσμένου πάχους του υδροφορέα και το πηγάδι είναι μερικώς διαπερατό, τότε οι τρισδιάστατες επιδράσεις(φαινόμενα) μπορεί να γίνουν σημαντικές, οδηγώντας σε υποεκτίμηση της ακτίνας R της ισόχρονης [Haitjema, 2006]. Για να αποφευχθεί αυτό το μη συντηρητικό αποτέλεσμα, το κορεσμένο πάχος H στην εξίσωση (2.5) μπορεί να αντικατασταθεί από το μήκος του φίλτρου του πηγαδιού. Η κυκλικά συμμετρική ισόχρονη που φαίνεται στην Εικόνα 2.1, θα εμφανίζεται μόνο απουσία περιβάλλουσας ροής ή αν το πηγάδι κυριαρχεί στη ροή εντός της ισόχρονης. Για χρονική περίοδο t που φτάνει το 1 ή 2 χρόνια και υψηλής απόδοσης γεωτρήσεις, η υπόθεση της ακτινικής ροής είναι συχνά εύλογη. Ωστόσο, ένα πηγάδι χαμηλής απόδοσης σε ένα ισχυρό περιβάλλον ροής θα εμφανίσει μια επιμηκυμένη ισόχρονη που εκτείνεται πολύ πέρα από την κυκλική αναπαράσταση που υπολογίζεται από την εξίσωση (2.2). Σε τέτοιες συνθήκες, η κατεύθυνση και το μέγεθος της περιβάλλουσας ροής πρέπει να προσδιοριστούν και οι ισόχρονες πρέπει να κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας τη λύση για πηγάδι σε ομοιόμορφο πεδίο ροής.

Οι υπολογισμοί των ισόχρονων, είτε με είτε χωρίς περιβάλλουσα ροή, βασίζονται σε μέσες ιδιότητες υδροφορέων. Στην πραγματικότητα, ένας υδροφορέας είναι συχνά στρωματοποιημένος, εμφανίζοντας διαφορετικά στρώματα με διαφορετικές υδραυλικές αγωγιμότητες και πορώδεις αναλογίες. Ένα σταθερό κορεσμένο πάχος  $H$  μπορεί να υπάρχει σε έναν περιορισμένο υδροφορέα σταθερού πάχους, αλλά σε έναν ελεύθερο υδροφορέα το κορεσμένο πάχος δεν θα είναι σταθερό, ακόμη και αν υποθέσουμε οριζόντια βάση, λόγω της υποχώρησης της υδροστατικής στάθμης. Μια συντηρητική (προστατευτική) ζώνη σύλληψης μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας το μικρότερο κορεσμένο πάχος  $H$  στην εξίσωση (2.5).



Εικόνα 2.1 Ισορροπία υδάτων για ραδιοκατευθυνόμενη ροή προς μια γεώτρηση σε ένα πεδίο [Working with WhAEM, 2018]

## B) Φρέαρ σε Ομοιόμορφη Ροή

Η περιβάλλουσα ροή, η οποία προκύπτει από την ανατροφοδότηση του υδροφορέα λόγω βροχοπτώσεων και ανταλλαγών υπόγειων υδάτων με ρέματα και λίμνες, προσεγγίζεται ως ομοιόμορφο πεδίο ροής (ευθύγραμμες ροϊκές γραμμές- straight streamlines) στην άμεση περιοχή γύρω από το φρέαρ.

Η ζώνη σύλληψης για ένα πηγάδι σε ομοιόμορφο πεδίο ροής δεν θα είναι πλέον κυκλική και κεντραρισμένη γύρω από αυτό, αλλά θα έχει σχήμα επιμηκυμένης έλλειψης προς την κατεύθυνση της ομοιόμορφης ροής.

Για τον προσδιορισμό αυτής της ζώνης σύλληψης (π.χ. μέσω του WhAEM), απαιτείται ο καθορισμός των εξής παραμέτρων:

- Κατεύθυνση της περιβάλλουσας ροής
- Υδραυλική κλίση
- Μεταβιβασιμότητα του υδροφορέα
- Ρυθμός άντλησης του πηγαδιού
- Επιθυμητός μέγιστος χρόνος παραμονής

Η λύση για πηγάδι σε ομοιόμορφη ροή είναι δύσκολο να παραμετροποιηθεί στην πράξη. Είναι δύσκολο να προβλεφθεί η μέση υδραυλική κλίση και η κατεύθυνση ροής δεδομένων περιορισμένων συνοπτικών παρατηρήσεων ενός μεταβαλλόμενου

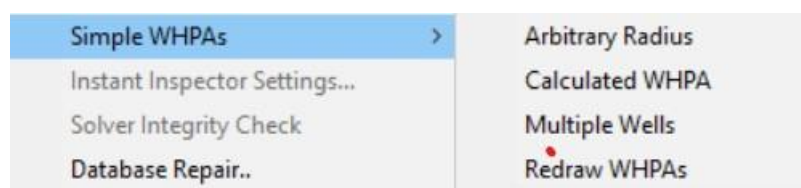
φαινομένου. Είναι επίσης δύσκολο να απομονωθούν οι τοπικές επιδράσεις του πηγαδιού, εκτός εάν παραμείνει εκτός λειτουργίας για κάποιο χρονικό διάστημα.

Για αυτούς τους λόγους, συνιστάται προσοχή στη χρήση της μεθόδου του πηγαδιού σε ομοιόμορφη ροή. Ο μοντελιστής ενθαρρύνεται να ανταποκριθεί στην αβεβαιότητα δημιουργώντας πολλαπλές εύλογες λύσεις και περικλείοντας την ένωση αυτών των λύσεων σε μια προστατευόμενη περιοχή.

Με άλλα λόγια, η περιοχή προστασίας των γεωτρήσεων μπορεί να σχεδιαστεί ως ένα περίβλημα γύρω από το σύνολο των υπολογισμένων ζωνών σύλληψης.

- iii) Simple WHPAs και περιοριστικοί παράγοντες της ροής (linesinks, inhomogeneities κλπ που αναλύονται στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο)
- Ένα Simple WHPA είναι μια προσέγγιση της περιοχής προστασίας γεωτρήσεων (wellhead protection area) που βασίζεται σε μια αναλυτική λύση για τη ζώνη σύλληψης (capture zone) ενός ή περισσότερων πηγαδιών άντλησης. Η Υπηρεσία Περιβαλλοντικής Προστασίας των ΗΠΑ (USEPA) αναγνωρίζει αρκετές απλές προσεγγίσεις για ζώνες σύλληψης, μεταξύ των οποίων η αυθαίρετη ζώνη σύλληψης σταθερής ακτίνας (arbitrary fixed radius capture zone) και η υπολογισμένη ζώνη σύλληψης σταθερής ακτίνας (calculated fixed radius capture zone). Ο Ceric [Ceric, 2000] εισήγαγε μια βελτιωμένη μέθοδο υπολογισμένης σταθερής ακτίνας βασισμένη σε μια αδιάστατη παράμετρο χρόνου διάνυσης (time travel).

Αν και το Simple WHPA μπορεί να υπολογιστεί και να σχεδιαστεί με το χέρι [Haitjema, 2006], τόσο η αυθαίρετη σταθερή ακτίνα όσο και η βελτιωμένη μέθοδος υπολογισμένης ακτίνας περιλαμβάνονται στην επιλογή Simple WHPAs στο μενού Tools του λογισμικού WhAEM, καθώς και ως έξυπνα εικονίδια στη γραμμή εργαλείων αυτού.



Εικόνα 2.2 Simple WhPA [WhAEM version 3.3.2, 2018]

Η επιλογή Simple WHPA μπορεί να απαιτεί μια λύση πεδίου ροής πηγαδιού σε ομοιόμορφη ροή. Ο χρήστης μπορεί προαιρετικά να συμπεριλάβει ένα όριο ροής (μια άπειρα μακριά ευθεία γραμμή) κοντά στο πηγάδι.

Σε όλες τις περιπτώσεις, το όριο ροής προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας εικονικά πηγάδια επανατροφοδότησης.

Κατά την επιλογή των Simple WHPAs, προσφέρονται τρεις επιλογές:

α) Αυθαίρετη ακτίνα – Σχεδιάζει έναν κύκλο με καθορισμένη ακτίνα γύρω από το επιλεγμένο πηγάδι ή πηγάδια.

β) Υπολογισμένη WHPA – Σχεδιάζει μια κεντρική ή εκκεντρική ακτίνα γύρω από το πηγάδι ή σχεδιάζει ρεύματα ροής για ένα πηγάδι σε ομοιόμορφο πεδίο ροής, ανάλογα με την αδιάστατη παράμετρο χρόνου διάνυσης  $\tilde{T}$ , η οποία θα συζητηθεί παρακάτω. Στην περίπτωση πηγαδιού σε ομοιόμορφο πεδίο ροής, μπορεί να καθοριστεί όριο ροής (stream boundary).

γ) Πολλαπλά πηγάδια – Χρησιμοποιείται όταν πρέπει να δημιουργηθούν υπολογισμένες ζώνες σύλληψης για περισσότερα από ένα πηγάδια. Επιτρέπει την αλληλεπίδραση μεταξύ κοντινών πηγαδιών (παρεμβολή πηγαδιών).

Ο τρόπος λειτουργίας των Simple WHPAs περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω. Οι υπολογισμοί βασίζονται σε διάφορες παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους και της διεύθυνσης της περιβάλλουσας ροής κοντά στο πηγάδι ή στο πεδίο πηγαδιών, η οποία είναι δύσκολο να χαρακτηριστεί. Το μέγεθος της ομοιόμορφης ροής συμβολίζεται ως  $Q_0$  [ $L^2/T$ ] και μπορεί να εκτιμηθεί από την υδραυλική κλίση  $i$  [-], τη διαπερατότητα του υδροφορέα  $k$  και το κορεσμένο πάχος  $H$  [ $L^2/T$ ].

Το μέγεθος της ομοιόμορφης ροής υπολογίζεται ως:

$$Q_0 = kiH \quad (2.6)$$

Η ροή  $Q_0$  είναι η συνολική ποσότητα νερού στον υδροφορέα, ολοκληρωμένη κατά το κορεσμένο πάχος, ανά μονάδα πλάτους του υδροφορέα. Το σχήμα και το μέγεθος μιας απλοποιημένης ζώνης σύλληψης χρόνου διάνυσης μπορούν να σχετίζονται με μια αδιάστατη παράμετρο χρόνου διάνυσης,  $\tilde{T}$ , που ορίζεται ως:

$$\tilde{T} = \frac{T}{T_0} \quad (2.7)$$

όπου  $T$  [T] είναι ο χρόνος διάνυσης και  $T_0$  [T] είναι ένας χρόνος αναφοράς που ορίζεται ως:

$$T_0 = \frac{nHQ}{2\pi Q_0^2} \quad (2.8)$$

Όπου  $n$  το πορώδες του υδροφορέα [-] και  $Q$  [ $L^3/T$ ] ο ρυθμός άντλησης του πηγαδιού.

- Όταν  $\tilde{T} \leq 0.1$ , η υπολογισμένη σταθερή ακτίνα (CFR) με κέντρο το πηγάδι, συμπεριλαμβανομένου ενός συντελεστή ασφαλείας για μη μηδενική περιβάλλουσα ροή, δίνεται από:

$$R = 1.1543 \sqrt{\frac{QT}{\pi H n}} \quad (2.9)$$



- Όταν  $0.1 < \tilde{T} \leq 1$  η CFR δίνεται από :

$$R = L_s [1.161 + \ln(0.39 + \tilde{T})] \quad (2.10)$$

όπου  $L_s$  είναι η απόσταση από το πηγάδι μέχρι το σημείο στασιμότητας κατάντη του πηγαδιού, που δίνεται από:

$$L_s = \frac{Q}{2\pi Q_0} \quad (2.11)$$

και όπου η εκκεντρότητα  $\delta$  δίνεται από:

$$\delta = L_s [0.00278 + 0.65\tilde{T}] \quad (2.12)$$

- Όταν  $\tilde{T} > 1$  υπάρχει ομοιόμορφη ροή και η λεγόμενη ζώνη σύλληψης σε σχήμα βάρκας μπορεί να οριστεί ως:

$$x = \frac{y}{\tan\left(\frac{y}{L_s}\right)} \quad (2.13)$$

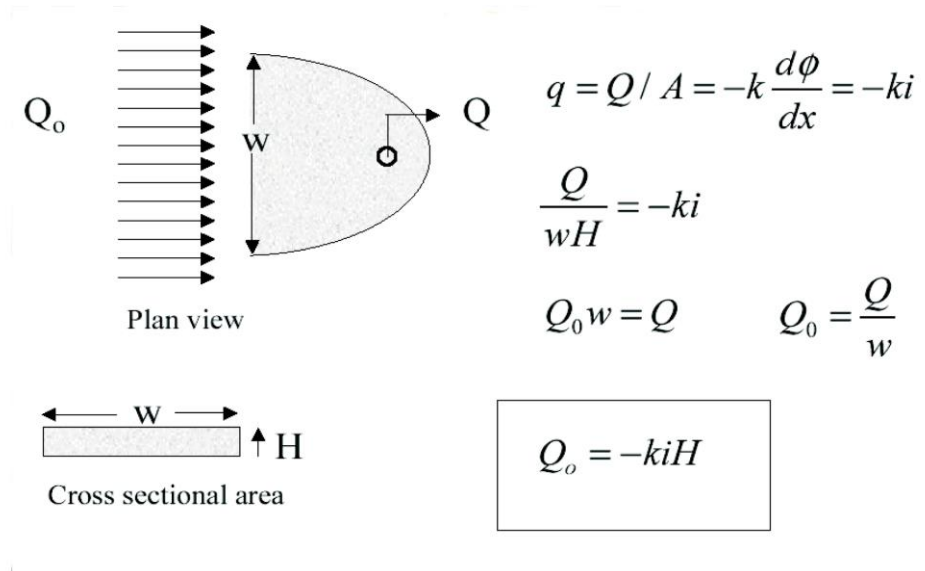
όπου το  $y$  περιορίζεται από:

$$-\frac{Q}{2Q_0} < y < +\frac{Q}{2Q_0} \quad (2.14)$$

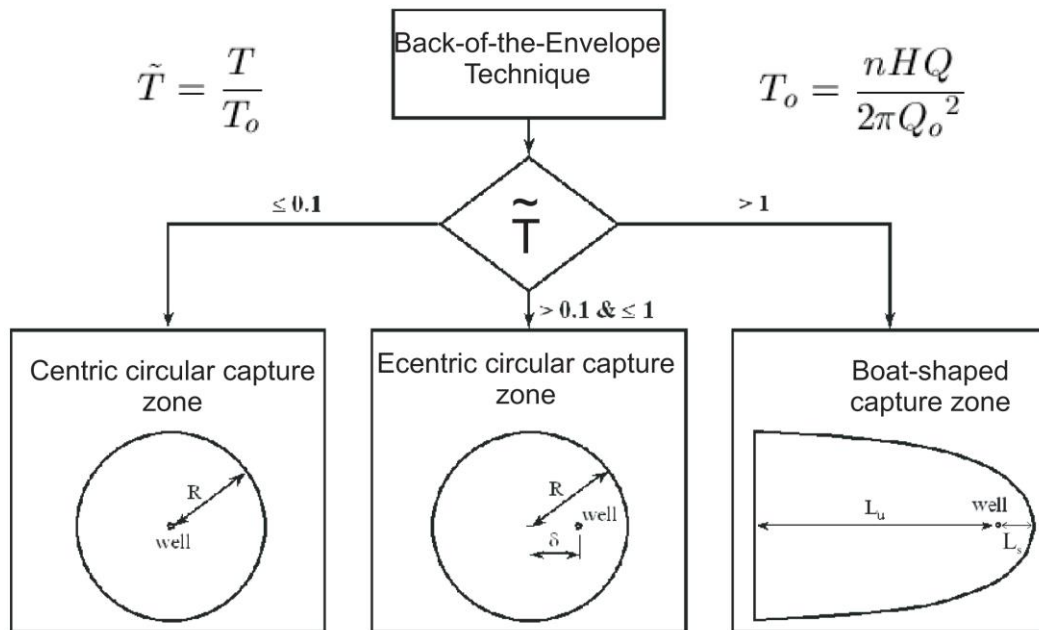
έως μια απόσταση  $L_u$  στα ανάντη, όπου

$$L_u = L_s [\tilde{T} + \ln(e + \tilde{T})] \quad (2.15)$$

όπου  $e=2.718$



Εικόνα 2.3 Το μέγεθος του διανύσματος εκροής του πεδίου ομοιόμορφης ροής υπολογίζεται γνωρίζοντας την υδραυλική αγωγιμότητα ( $k$ ), την υδραυλική κλίση ( $i$ ) και το κορεσμένο πάχος ( $H$ ). Η απλοποιημένη περίπτωση αφορά ένα πηγάδι που αντλεί με ρυθμό  $Q$ . Το μέγιστο πλάτος του φακέλου ζώνης σύλληψης είναι  $w$ . Η διατομή  $A$  είναι το γινόμενο  $w$  επί  $H$ . Το υδραυλικό ύψος είναι  $\phi$ . [Working with WhAEM, 2018]



Εικόνα 2.4 Απλοποιημένες τεχνικές οριοθέτησης για ένα πηγάδι που αντλεί με ρυθμό  $Q$ , σε ένα πεδίο περιβάλλουσας ροής  $Q_o$ , με κορεσμένο πάχος υδροφορέα  $H$  και πορώδες  $n$ , και ζώνες σύλληψης χρόνου διάνυσσης  $\tilde{T}$ , σύμφωνα με [Haitjema, 2002].

Ακολουθούν κάποιες βασικές ιδιότητες του μοντέλου

- Δεν υπάρχει επιλογή αποθήκευσης, επομένως για να αποθηκευτεί κάτι στο μοντέλο επιλέγεται η εντολή `duplicate database`
- Καθορισμός near field και far field
- Data uncertainty
- Παραγωγή DXF or Shapefile Χαρτών και ύστερα χρήση αυτών ως base maps

### 3. Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ



Εικόνα 3.1 Η περιοχή μελέτης [GIS ArcMap 2018]

#### 3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Το Τυμπάκι, επισήμως γνωστό ως Τυμπάκιον, είναι κωμόπολη, ιστορική έδρα του δήμου Φαιστού (μετά το πρόγραμμα Καλλικράτης), καθώς και της κοινότητας του Τυμπακίου στην Περιφερειακή ενότητα του Ηρακλείου της Κρήτης. Παλαιότερα ήταν έδρα της επαρχίας Πυργιωτίσσης του νομού Ηρακλείου. Βρίσκεται 65km νοτιοδυτικά του Ηρακλείου. Σύμφωνα με την απογραφή του 2011 η κοινότητα του Τυμπακίου είχε συνολικά 5.746 κατοίκους. Πρόκειται για πεδινό και παραθαλάσσιο δήμο, το μεγαλύτερο μέρος του οποίου βρίσκεται στον κάμπο της Μεσσαράς, ενώ βρέχεται από το Λιβυκό πέλαγος.

Η πεδιάδα του Τυμπακίου αποτελεί μια από τις σημαντικότερες αγροτικές περιοχές της Κρήτης με την καλλιέργεια πρώιμων κηπευτικών σε θερμοκήπια καθώς και ελαιοδέντρων. Ως εκ τούτου, οι κύριες ασχολίες των κατοίκων αφορούν την ελαιοκομία (43%), τις αρόσιμες καλλιέργειες (39%) και την καλλιέργεια οπωροκηπευτικών και ανθέων (18%). Το γεγονός αυτό είχε σαν αποτέλεσμα και την αύξηση του πληθυσμού της περιοχής. Η αρδευόμενη έκταση είναι 40.000 στρέμματα και το σύνολο του αρδευτικού νερού που χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα προέρχεται κατά βάση από το υπόγειο δυναμικό. Η στάγδην άρδευση χρησιμοποιείται ευρέως για τους ελαιώνες και τις δενδρώδεις καλλιέργειες, οι μικροεκτοξευτήρες (micro-sprinklers) για τις πατάτες και η στάγδην άρδευση για τα υπόλοιπα λαχανικά. Κατά την τελευταία δεκαετία έχουν χρησιμοποιηθεί σύγχρονα συστήματα άρδευσης, τα οποία έχουν αυξήσει την αποδοτικότητα στη χρήση του νερού. Η ποσότητα του νερού που εφαρμόζεται, καθορίζεται συνήθως εμπειρικά και προέρχεται από γεωτρήσεις. Ωστόσο, οι Τοπικοί Οργανισμοί Εγγείων Βελτιώσεων (ΤΟΕΒ), σε συνεργασία με τις τοπικές αρχές, έχουν εκδώσει προτεινόμενες ανάγκες άρδευσης ανά καλλιέργεια. Η τιμή του νερού

κυμαίνεται από 0,10 έως 0,13 €/m<sup>3</sup>. Οι ανάγκες άρδευσης ανέρχονται σε 7.000.000 m<sup>3</sup> ετησίως. Το τοπικό συμβούλιο διαχείρισης υδάτων έχει θέσει όρια στη χρήση νερού για κάθε καλλιέργεια και οποιαδήποτε υπέρβαση αυτού του ορίου επιφέρει οικονομική ποινή για τον αγρότη [ADAPT2CLIMA, 2017· Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017].

Ο αλουβιακός - πλειστοκαινικός υδροφορέας καταλαμβάνει το παράκτιο - κεντρικό τμήμα της λεκάνης απορροής, έχει έκταση περίπου 50km<sup>2</sup> και δέχεται μέσο ύψος βροχής 474mm. Λόγω της γειννιάσής του με τη θάλασσα, ο υδροφορέας στο νοτιοδυτικό παράκτιο τμήμα του (περιοχή Κόκκινου Πύργου) έχει υποστεί υφαλμύριση.

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό της περιοχής είναι πως τα επιφανειακά ύδατα χάνουν νερό προς τον υδροφορέα. Οι επιφανειακές ροές συμβάλλουν περίπου κατά 57% στις συνολικές εισροές προς τον υδροφορέα. Πρόσφατη μελέτη εκτίμησε ότι το ποσοστό ανατροφοδότησης στη λεκάνη του Τυμπακίου είναι 22,5% (75% των αποτελεσματικών κατακρημνίσεων) και 24% της συνολικής επιφανειακής βροχόπτωσης (25% των αποτελεσματικών κατακρημνίσεων) στη λεκάνη για τον Πλειο-Πλειστόκαινο και τον Πλειόκαινο υδροφορέα αντίστοιχα (Dokou et al., 2016; Paritsis, 2005; Varouchakis, 2016·;Vozinaki et al., 2018).

Σύμφωνα με τις παραπάνω δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή μελέτης μπορεί να κατασκευαστεί ο ακόλουθος πίνακας όπου παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα στοιχεία σχετικά με τους πιθανούς ρύπους, την πηγή προέλευσής τους αλλά και τις συνέπειες που έπονται.

Πίνακας 3.1 Οι πιθανοί ρύποι, οι πηγές προέλευσής τους και οι επιπτώσεις που προκαλούν [FAO]

| Ρύπος                                         | Πηγή                                                | Επιπτώσεις                                                                 |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Νιτρικά άλατα (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) | Λιπάσματα, διαρροές από ταφή, κοπριά                | Ρύπανση υπόγειων υδάτων, κίνδυνος για την υγεία (π.χ. μεθαιμοσφαιριναιμία) |
| Φυτοφάρμακα                                   | Ψεκασμοί καλλιεργειών                               | Ρύπανση νερών, επιπτώσεις σε χλωρίδα/πανίδα                                |
| Αλάτι (Na <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> )    | Εντατική άρδευση                                    | Υφαλμύριση, υποβάθμιση εδάφους                                             |
| Οργανικά απόβλητα                             | Κοπριά, φυτικά υπολείμματα, αποσύνθεση σορών        | Ρύπανση εδαφών και υδάτων, δυσοσμία, παθογόνα                              |
| Μικροπλαστικά / Πλαστικά                      | Υλικά θερμοκηπίου, συστήματα άρδευσης               | Μακροχρόνια ρύπανση, επίπτωση σε χλωρίδα/πανίδα                            |
| Αέρια θερμοκηπίου                             | Θέρμανση θερμοκηπίων, εκπομπές από ζώα (μεθάνιο)    | Συμβολή στην κλιματική αλλαγή                                              |
| Μικροβιακοί ρύποι (E. coli, παθογόνα)         | Νεκροταφεία (αποσύνθεση), μονάδες εκτροφής (κοπριά) | Μόλυνση νερών, κίνδυνοι για τη δημόσια υγεία                               |
| Φαρμακευτικά υπολείμματα                      | Από την ταφή σορών (φαρμακευτική αγωγή)             | Δυσνητικά τοξικά για μικροοργανισμούς και τον υδροφορέα                    |
| Αμμωνία (NH <sub>3</sub> )                    | Εκτροφή ζώων (ουρία στα ούρα, κοπριά)               | Όξινη βροχή, ρύπανση αέρα και εδάφους                                      |

## 3.2 Γεωμορφολογία της περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης οριοθετείται στα δυτικά από την θάλασσα, όπου βρίσκεται και ο οικισμός Κόκκινος Πύργος, βόρεια από το χωριό Κλήμα, στα ανατολικά – βορειοανατολικά τον οικισμό Καλοχωραφίτης, ανατολικά το χωριό Κισσοί, όπου συνεχίζοντας ανατολικά – νοτιοανατολικά βρίσκεται το φράγμα της Φανερωμένης, και νότια από τα χωριά Φανερωμένη και Βώροι (με κατεύθυνση ανατολικά προς δυτικά). Τέλος, η πόλη του Τυμπακίου, καθώς και το ανενεργό πια αεροδρόμιο βρίσκονται στο νοτιοδυτικό άκρο της περιοχής μελέτης. Εντός αυτής, και πέραν των προαναφερθέντων κατοικήσιμων σημείων, τα θερμοκήπια είναι αυτά που καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη έκταση, ενώ παράλληλα υπάρχουν και άλλες καλλιεργήσιμες εκτάσεις που έχουν αναφερθεί προηγουμένως.

### 3.2.1 Πορώδεις υδροφορείς της Κρήτης

Σημαντική έκταση στην υδρογεωλογική δομή της Κρήτης καταλαμβάνουν οι νεογενείς - προσχωσιγενείς λεκάνες (Πορώδη Υδροφόρα), στις οποίες αναπτύσσονται σημαντικοί υδροφορείς μικρού βάθους, οι οποίοι κατά κανόνα τυγχάνουν εντατικής εκμετάλλευσης. Η συνολική τους έκταση υπολογίζεται σε περίπου 2.990 km<sup>2</sup> (35,8% Κρήτης) και δέχονται ένα μέσο ετήσιο ύψος βροχής 690 χιλιοστά που αντιστοιχεί σε μέσο ετήσιο όγκο κατακρημνισμάτων περίπου 2,1 δισεκατομμύρια m<sup>3</sup>. Από αυτά, ο όγκος του κατεισδύοντος νερού, το οποίο τροφοδοτεί τους υπόγειους υδροφορείς, υπολογίζεται ότι ανέρχεται στα 0,364 δισ. m<sup>3</sup> ανά έτος. [Κρίσωτάκης & Παυλίδου, 2013]

### 3.2.2 Καρστικοί και ρωγμώδεις υδροφορείς της Κρήτης

Οι καρστικοί και οι ρωγμώδεις υδροφορείς, που απαντώνται στην Κρήτη, μπορεί να έχουν πολύ υψηλή ροή (άρα και μεταφορά ρύπων) υπό συνθήκες ταχείας επαναφόρτισης, όπως συμβαίνει για παράδειγμα στα γεγονότα καταιγίδας. Επιπλέον η τρωτότητα των καρστικών υδροφόρων στρωμάτων σε ρύπανση είναι σημαντικά υψηλή, ιδίως όταν το υπερκείμενο έδαφος είναι λεπτό. Οι χρόνοι μεταφοράς των ρύπων σε ολόκληρο το σύστημα ενός καρστικού ή ρωγμώδους υδροφορέα μπορεί να είναι πολύ μικροί (από ώρες έως εβδομάδες) και κατά πολύ βραχύτεροι από ότι σε πορώδεις και κοκκώδεις υδροφορείς. Για το λόγο αυτό, οι ευαίσθητοι υδροφορείς θα πρέπει να αξιολογούνται διαφορετικά από τους πορώδεις και κοκκώδεις. Οι ρωγμώδεις υδροφορείς μοιράζονται πολλά χαρακτηριστικά με τους καρστικούς και έχουν σχετικώς μικρή χωρητικότητα αποθήκευσης.

### 3.2.3 Ο υδροφορέας της περιοχής μελέτης

Ο υδροφορέας στο Τυμπάκι, όπως αναφέρθηκε, περιλαμβάνει 50km<sup>2</sup> προσχωματικών αποθέσεων της αντίστοιχης λεκάνης απορροής. Η λεκάνη αυτή διαφοροποιήθηκε μορφολογικά λόγω μεταγενέστερων τεκτονικών ρηγμάτων σε παράκτιες πεδιάδες (κάμπους) στα δυτικά και σε λοφώδη περιοχή ανατολικά. Η λεκάνη βρίσκεται στο νοτιοδυτικό άκρο του νομού Ηρακλείου στην κεντρική Κρήτη και αντιπροσωπεύει την δυτικής κατευθύνσεως τεκτονική προέκταση της μεγαλύτερης αλλουβιακής πεδιάδας του τεκτονικού βυθίσματος της Μεσαράς. [Paritsis., S., 2005]



### 3.3 Μετεωρολογικά στοιχεία

Το κλίμα της Κρήτης χαρακτηρίζεται εύκρατο μεσογειακό, στους ορεινούς όγκους της όμως τείνει προς τον ηπειρωτικό τύπο με μέση ετήσια θερμοκρασία 14 με 15 °C. Η πεδινή Κρήτη και ιδιαίτερα οι νοτιοανατολικές περιοχές είναι από τις θερμότερες της Ελλάδας. Ο χειμώνας είναι ήπιος με τον Ιανουάριο και το Φεβρουάριο να παρουσιάζουν τις χαμηλότερες θερμοκρασίες. Η ηλιοφάνεια διαρκεί όλους τους μήνες του έτους ενώ οι θερμότεροι μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος, αν και λόγω της θαλάσσιας αύρας και των ετήσιων ανέμων το καλοκαίρι είναι σχετικά δροσερό. Η εμφάνιση νεφώσεων είναι μικρή και μειώνεται από τα ανατολικά προς τα δυτικά, ενώ οι βροχές αυξάνονται από τα ανατολικά στα δυτικά και από την παράκτια ζώνη στην ορεινή. Το κλίμα της περιοχής του Τυμπακίου είναι τυπικά μεσογειακό με μέση ετήσια θερμοκρασία 18°C, η οποία όμως παρουσιάζει σημαντική διακύμανση ανάλογα με την εποχή. Έτσι κατά τη διάρκεια του Ιανουαρίου σημειώνονται οι χαμηλότερες θερμοκρασίες, που φτάνουν τους -0.2°C, ενώ κατά τη διάρκεια του Ιουλίου έχουμε τις υψηλότερες τιμές που αγγίζουν τους 44°C. Οι βροχοπτώσεις μπορεί να θεωρηθούν ικανοποιητικές κατά την διάρκεια του έτους, με βροχερή περίοδο, την περίοδο Οκτωβρίου – Μαρτίου και με ετήσιο ύψος βροχής 474mm. [www.emy.gr]

### 3.4 Γεωλογία της περιοχής

Η γεωλογία της περιοχής χαρακτηρίζεται από μια αλληλουχία φάσεων διαφορετικής ηλικίας και σχηματισμών που συμμετέχουν στη δομή της περιοχής αλλά και σε ολόκληρη τη γεωλογική δομή της νήσου της Κρήτης. Η ευρύτερη περιοχή της λεκάνης της Μεσσαράς αποτελείται από ένα αυτόχθονο και ένα αλλόχθονο σύστημα πετρωμάτων (σχηματισμοί του αλπικού υποβάθρου). Η στρωματογραφική στήλη ολοκληρώνεται με την παρουσία νεογενών, Πλειοπλειστοκαινικών και τεταρτογενών ιζημάτων [ΙΓΜΕ, 1987; Μουντράκης, 1985; Περλέρος, 2004]. Το αυτόχθονο σύστημα περιλαμβάνει την ημιμεταμορφωμένη σειρά πλακωδών ασβεστολίθων (Plattenkalk) της ενότητας Κρήτης - Μάνης ηλικίας Μέσου Ιουρασικού – Ηωκαίνου. Πρόκειται για ανακρυσταλλωμένους ασβεστολίθους και μάρμαρα τεφρού χρώματος με ενστρώσεις πυριτολίθων που έχουν μεταμορφωθεί σε συνθήκες υψηλής πίεσης – χαμηλής θερμοκρασίας. Πάνω στο αυτόχθονο υπέρκειται εναπωθημένο ένα αλλόχθονο σύστημα πετρωμάτων που αποτελείται από αλληπαλά τεκτονικά καλύμματα εναπωθημένα το ένα πάνω στο άλλο με την ακόλουθη σειρά από το υποκείμενο προς το υπερκείμενο:

- Τεκτονικό κάλυμμα φυλλιτών – χαλαζιτών. Αποτελείται από φυλλίτες, χαλαζίτες, σερικιτικούς - μαρμαρυγιακούς - ανθρακικούς σχιστολίθους και χαλαζιακούς μεταψαμμίτες. Η σειρά είναι ηλικίας Περμίου – Ανωτέρου Τριαδικού και έχει υποστεί πολύ χαμηλού έως χαμηλού βαθμού μεταμόρφωση σε συνθήκες υψηλής πίεσης – χαμηλής θερμοκρασίας.
- Ζώνη Γαβρόβου – Τριπόλεως. Οι σχηματισμοί που περιλαμβάνει από τους υποκείμενους προς τους υπερκείμενους είναι οι εξής:
  - Τεφρόμαυροι παχυστρωματώδεις έως άστρωτοι ημικρυσταλλικοί δολομίτες και μεσοστρωματώδεις τεφρόλευκοι έως τεφρόμαυροι δολομιτικοί

- ασβεστόλιθοι και ασβεστόλιθοι ηλικίας Ανωτέρου Τριαδικού – Ανωτέρου Ιουρασικού.
- Ασβεστόλιθοι μαύροι με ρουδιστές ηλικίας Ανωτέρου Κρητιδικού.
  - Ασβεστόλιθοι τεφρόμαυροι με πλούσια νηριτική πανίδα Παλαιοκαινικής – ΜεσοΗωκαινικής. ηλικίας.
  - Φλύσχης ψαμμιτοπηλτικός, ψαμμιτολυολιθικός, με εναλλαγές καστανών αργιλικών σχιστολίθων και ψαμμιτών ηλικίας Ανωτέρου Ηωκαίνου – Ολιγοκαίνου.
- Ζώνη Πίνδου. Οι σχηματισμοί που περιλαμβάνει από τους υποκείμενους προς τους υπερκείμενους είναι οι εξής :
    - Κλαστική σειρά με εναλλαγές μαργών – ψαμμιτών και ασβεστιτικές ενστρώσεις ηλικίας Ανωτέρου Τριαδικού.
    - Ασβεστόλιθοι ροδόχροοι με ιάσπιδες, ραδιολαρίτες, ψαμμίτες και ψαμμιτικοί ασβεστόλιθοι (πρώτος φλύσχης) ηλικίας Ανωτέρου Τριαδικού – Κατωτέρου Ιουρασικού.
    - Πλακώδεις ασβεστόλιθοι λεπτοστρωματώδεις και λατυποπαγείς ηλικίας Ανωτέρου Κρητιδικού – Κατωτέρου Ηωκαίνου.
    - Φλύσχης ψαμμιτοπηλτικός, ψαμμιτολυολιθικός, με ενστρώσεις ασβεστολιθικών τουρβιδιτών και ολισθόλιθους πάσης φύσεως Μεσο- Ανω- Ηωκαινικής ηλικίας.
  - Κάλυμμα Εσωτερικών Ελληνίδων. Αποτελεί ένα σύνθετο πολύμεικτο τεκτονικό κάλυμμα με ποικιλία λιθολογικών φάσεων. Τα διάφορα καλύμματα τα οποία είναι εναπλωμένα το ένα επάνω στο άλλο από το υπερκείμενο προς το υποκείμενο είναι τα εξής :
    - Οφειολιθικό κάλυμμα με σερπεντινιωμένους περιδοτίτες, γάββρους, διορίτες, δολερίτες και διαβάσεις ηλικίας Κατώτατου Ιουρασικού – Ανώτατου Κρητιδικού.
    - Καλυμμα Αστερούσιων με μετα-ιλυολιθικούς, διμαρμαρυγιακούς, χλωριτικούς, επιδοιτικούς γνευσίους και σχιστολίθους, αμφιβολίτες και μάρμαρα ηλικίας Κατώτατου Ιουρασικού – Ανώτατου Κρητιδικού.
- [Perleros, 2004]



Εικόνα 3.2 Κρήτη [gaia.igme.gr]



## 4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

### 4.1 Εισαγωγή και ανάλυση δεδομένων

Επρόκειτο να απεικονιστούν οι ζώνες προστασίας γύρω από τα πηγάδια άντλησης στην περιοχή μελέτης για τέσσερα διαδοχικά υδρολογικά έτη (2004-05, 2005-06, 2006-07, 2007-08) και για κάθε ένα από αυτά να οριστούν πέντε περιπτώσεις, βάσει του χρόνου διανύσεως ( $\tilde{T}$ ). Οι ζώνες προστασίας διαχωρίζονται σε ζώνες των έξι μηνών (182days), σε ζώνες του ενός έτους (365days), σε ζώνες των δύο ετών (730days), σε ζώνες των πέντε ετών (1826days) και σε ζώνες των δέκα ετών (3652days).

Μετά την μελέτη και ανάλυση των δεδομένων, δεδομένα τα οποία λήφθηκαν από το εργαστήριο Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής (υπεύθυνος: Καρατζάς Γεώργιος) του τμήματος ΧΗΜΗΠΕΡ, επιλέχθηκε το γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (εφεξής GIS) ως το εργαλείο προβολής των αποτελεσμάτων. Το ζήτημα που προέκυψε και κατέστησε αναγκαία τη χρήση του GIS είναι το γεγονός ότι στο πρόγραμμα αυτό η περιοχή μελέτης μπορεί να αποτυπωθεί με ευκρίνεια και ακρίβεια καθότι είναι γεωαναφερμένη, βασιζόμενη στο ελληνικό γεωγραφικό σύστημα συντεταγμένων (GCS\_GGRS\_1987) ώστε να υπάρχει μια κοινή συνισταμένη των στοιχείων που απεικονίζονται {υφίσταται συνδυασμός επιπέδων (layers), τα οποία είναι η γεωλογία (geology), ο παγκόσμιος χάρτης (world map as a basemap), τα πηγάδια παρατήρησης (observation wells) και τα πηγάδια άντλησης (pumping wells)} .

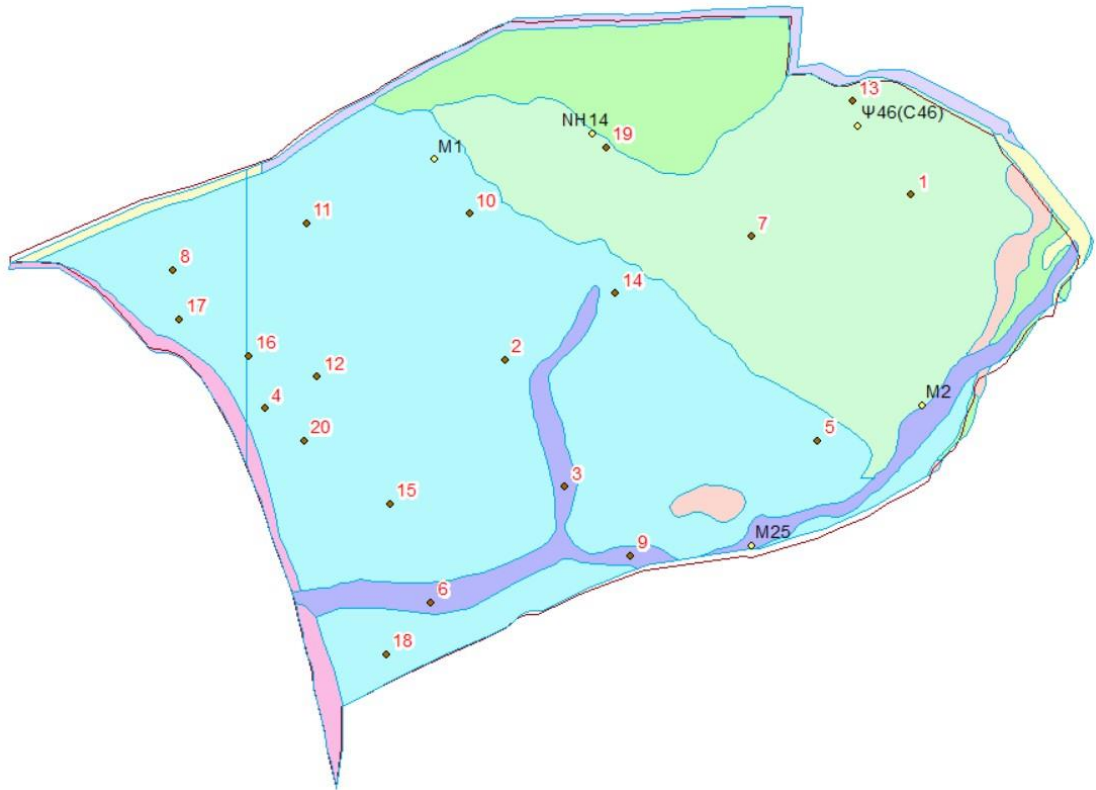
Κύριος όμως μοχλός και πρωταγωνιστής αυτής της διπλωματικής, όπως δηλώνει και ο τίτλος άλλωστε, ήταν το WhAEM, μοντέλο στο οποίο εισήχθησαν όλες οι απαιτούμενες παράμετροι με απώτερο σκοπό να παραχθούν τα ανωτέρω αποτελέσματα.

Ένας δεύτερος αλλά επίσης σημαντικός λόγος είναι ότι το WhAEM, σε σύγκριση με το GIS, δεν μπορεί να δημιουργήσει από μόνο του βάση δεδομένων εικόνας. Πρέπει να 'περαστούν' στο μοντέλο όλα τα απαραίτητα στοιχεία και οι απαραίτητες παράμετροι. Ένας τύπος μορφής αρχείων με τον οποίον είναι συμβατό το μοντέλο (WhAEM) είναι τα shapefile αρχεία (shp), αρχεία με τα οποία εναρμονίζεται και το GIS.

Συγκεκριμένα, ως δεδομένα καταγράφονται τα εξής στοιχεία:

- Χάρτης (γεωλογικός) της περιοχής μελέτης, γεωαναφέρθηκε (georeferenced) με βάση το ελληνικό γεωγραφικό σύστημα συντεταγμένων GCS\_GGRS\_1987, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, ώστε να μπορεί να υποστηριχθεί από το WhAEM. Το WhAEM διαθέτει μια λειτουργία για την εισαγωγή χαρτών στο περιβάλλον του και αυτή ονομάζεται Binary Base Map (BBM).
- Συντεταγμένες των γεωτρήσεων (πηγάδια άντλησης) αλλά και των πηγαδιών παρατήρησης (test points) ενταγμένες εξίσου στο γεωγραφικό σύστημα συντεταγμένων GCS\_GGRS\_1987 και στο προβολικό σύστημα συντεταγμένων Greek grid. Για να εισαχθούν οι γεωγραφικές συντεταγμένες των υδροσημείων στο περιβάλλον του GIS, έγινε χρήση της λειτουργίας του

εργαλείου editor και διαχωρίστηκαν χρωματικά οι δυο κατηγορίες των πηγαδιών (κίτρινο χρώμα για τα πηγάδια παρατήρησης και κόκκινο χρώμα για τα άντλησης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1 GIS Πηγάδια άντλησης και παρατήρησης

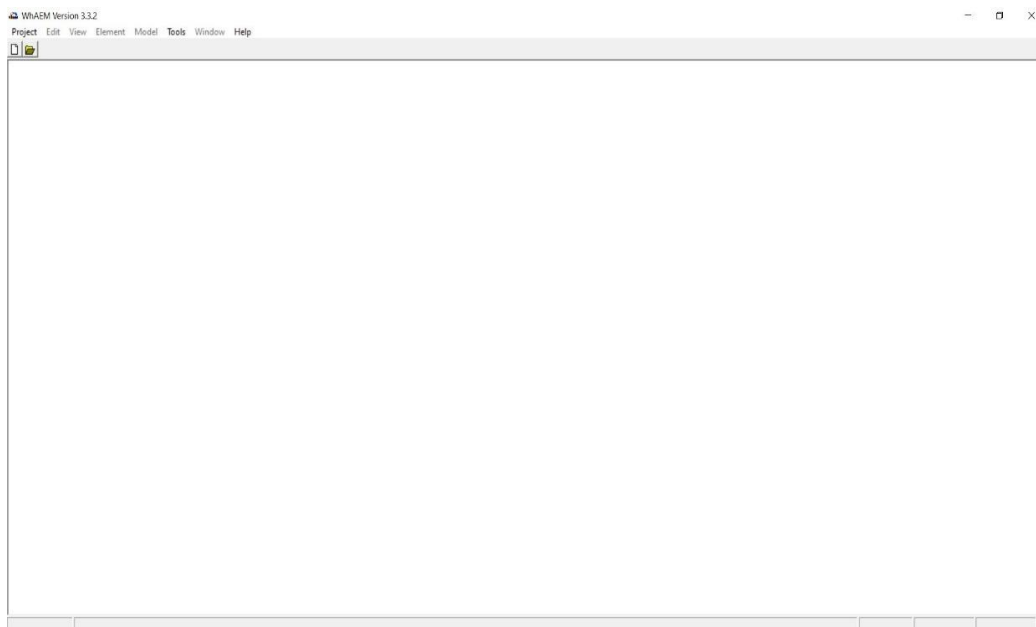
Προβλήματα που παρουσιάστηκαν, όπως η ασυμφωνία των διάφορων layers (στο περιβάλλον του GIS) σχετικά με το σύστημα συντεταγμένων στο οποίο βρίσκονταν, ξεπεράστηκαν μέσω των ακόλουθων κινήσεων:

arc toolbox→data management tools→projections & transformations→project

- Ποσοστά βροχόπτωσης (mm/yr) για κάθε ένα απ' τα τέσσερα υδρολογικά έτη.
- Δεδομένα για τα πηγάδια άντλησης όπως παροχές άντλησης (τιμές που υπολογίστηκαν και αναφέρονται σε όλα τα υδρολογικά έτη).
- Δεδομένα για τα πηγάδια παρατήρησης, όπως υδραυλικό ύψος,  $H(m)$  ανά πηγάδι παρατήρησης ανά έτος, βάθος διάτρησης (σωλήνα),  $b$ .
- Υδραυλική αγωγιμότητα  $K(m/d)$
- Αρχικό ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας έως και το κατώτατο τμήμα του πηγαδιού (άντλησης), όπου βρίσκονται τα φίλτρα νερού που υπολογίστηκε από την αριθμητική σχέση  $z-b$ , όπου  $z$ : υψόμετρο(m) μετρούμενο από την επιφάνεια της θάλασσας και  $b$ : βάθος σωλήνα.

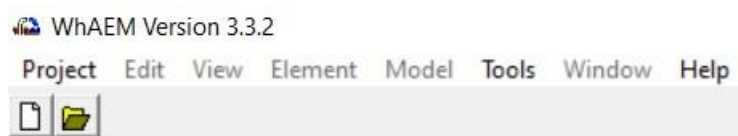
## 4.2 Το περιβάλλον του WhAEM

Αφού ορίστηκαν τα δεδομένα, επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή τους στο περιβάλλον του WhAEM. Το γραφικό περιβάλλον του χρήστη (Graphical User Interface), στο WhAEM, εκ πρώτης είναι ένα κενό (λευκό) παράθυρο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2



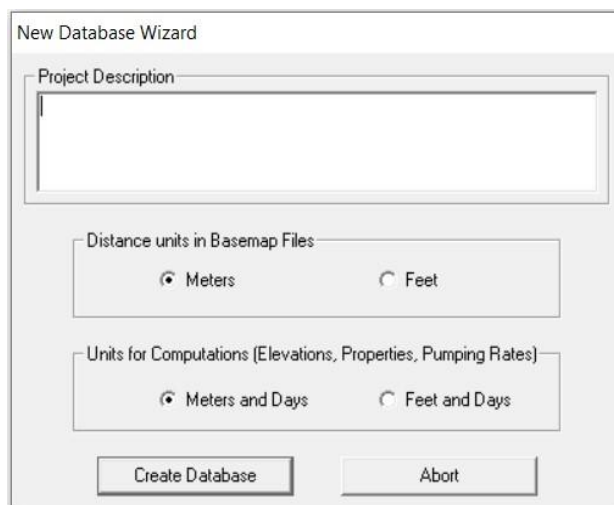
Εικόνα 4.2 Graphical User Interface of WhAEM

Επιλέγοντας όμως στην γραμμή εργασιών τη λέξη project, ανοίγει ένα νέο παράθυρο εντολών (Εικόνα 4.3), που δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας νέου project με νέα βάση δεδομένων (new database) ή μεταφοράς του χρήστη σε ήδη υπάρχων project με γνωστά δεδομένα (open database). Επιπλέον τα δύο εικονίδια που βρίσκονται ακριβώς από κάτω της γραμμής εργασιών εκτελούν τις ίδιες ενέργειες αντίστοιχα (χάριν συντόμευσης).

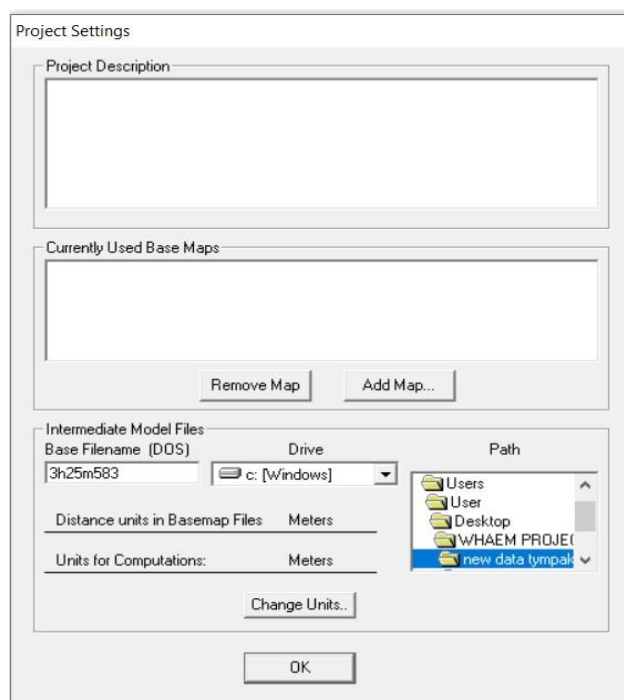


Εικόνα 4.3 Νέο ή υπάρχον project

Καθ' αυτόν τον τρόπο, ξεκινώντας ένα νέο project, προκύπτει ένα παράθυρο στο οποίο πρέπει να δοθεί μια περιγραφή αυτού (ακόμα και ένα γράμμα) για να καταλάβει το μοντέλο ότι ένα νέο project πρόκειται να υλοποιηθεί. Στη συνέχεια πρέπει να οριστεί σε ποια μονάδα μέτρησης θα χρησιμοποιηθεί (Εικόνα 4.4). Ακολουθεί νέο παράθυρο (Εικόνα 4.5), όπου γίνεται η αποτύπωση όλων των στοιχείων (χάρτης περιοχής μελέτης, πηγάδια άντλησης και πηγάδια παρατήρησης). Τα αρχεία είναι σε μορφή shapefile (.shp), ήδη από το GIS, γεωαναφερμένα και πατώντας το εικονίδιο «Add Map...» προστίθενται στο μοντέλο. Έπειτα, γίνεται έλεγχος, έτσι ώστε όλα τα στοιχεία να έχουν τις ίδιες μονάδες μέτρησης.

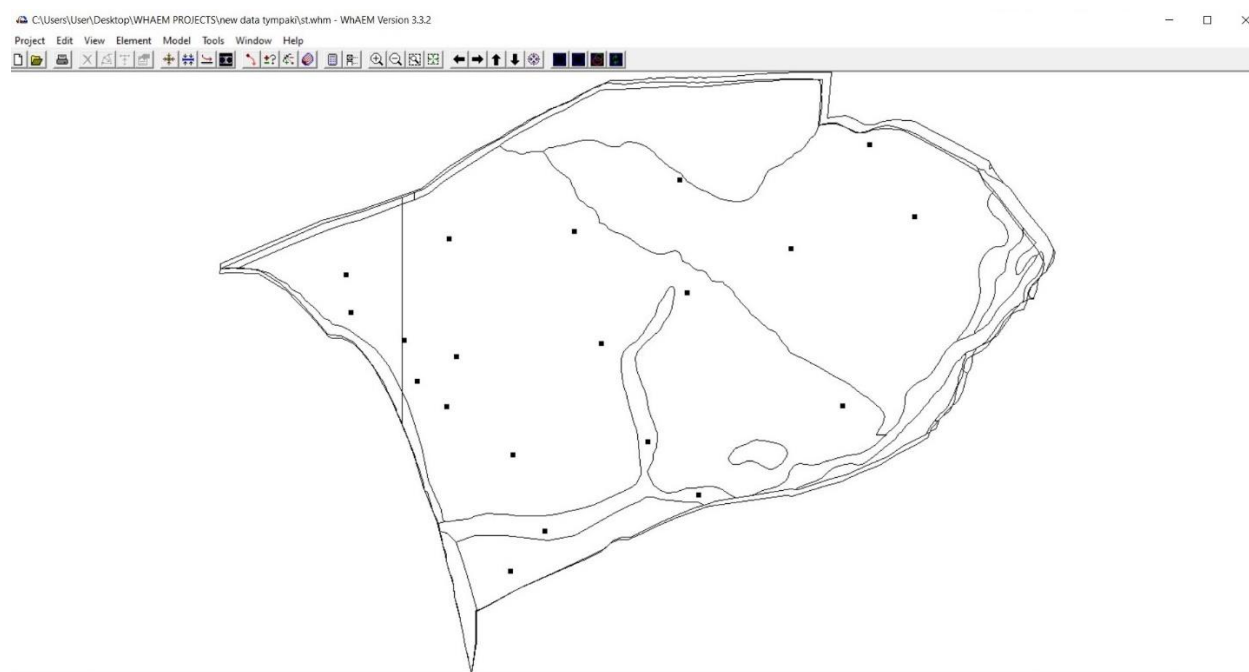


Εικόνα 4.4 Καθορισμός μονάδων και ονομασία του project



Εικόνα 4.5 Προσθήκη χαρτών

Η επόμενη εικόνα, (Εικόνα 4.6) δείχνει την κατάσταση στην οποία βρισκόταν το μοντέλο αμέσως μετά την εισαγωγή του χάρτη και των πηγαδιών άντλησης.



Εικόνα 4.6 1<sup>η</sup> μορφή του χάρτη της περιοχής μελέτης στο περιβάλλον του WhAEM

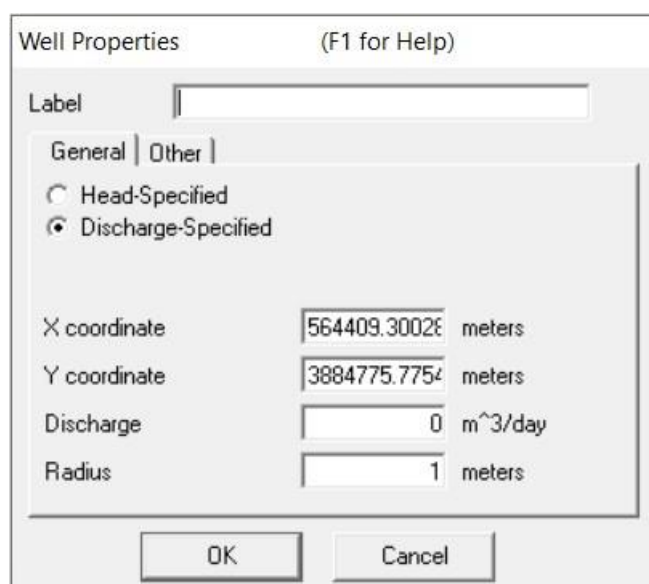
## 4.3 Καθορισμός των αναλυτικών στοιχείων

### 4.3.1 Τα πηγάδια άντλησης

Οι μαύρες κουκίδες αποτελούν τα πηγάδια άντλησης, μόνο που ακόμα δεν έχουν οριστεί ως τέτοια μέσα στο μοντέλο. Αυτό γίνεται με την ακόλουθη σειρά εργασιών: Element→New→Well ή από το αντίστοιχο εικονίδιο στην γραμμή εργαλείων (toolbar).

Στη συνέχεια ανοίγει ένα παράθυρο με τις ιδιότητες του πηγαδιού. Υπάρχουν δύο καρτέλες, η μια με την ονομασία general (Εικόνα 4.7) και η άλλη other (Εικόνα 4.8).

Στην πρώτη ορίζεται αν το πηγάδι θα οριστεί βάσει του υδραυλικού ύψους ή της παροχής άντλησης επομένως η μοντελοποίηση προχωρά σύμφωνα με το τελευταίο. Επιπλέον συμπληρώνονται οι γεωγραφικές του συντεταγμένες και δίνεται μια ακτίνα R(m) του πηγαδιού καθώς και η παροχή άντλησης του. Η ακτίνα θα πρέπει να οριστεί αρκετά μεγάλη ώστε να διασφαλιστεί ότι το υδραυλικό ύψος θα παραμείνει πάνω από την βάση του υδροφορέα. Εδώ τέθηκε R=0.3 m. Όσον αφορά την παροχή άντλησης είναι αυτή που έχει δοθεί από τα δεδομένα για κάθε ένα πηγάδι (1-20) και θεωρείται σταθερή για όλο το χρόνο και για κάθε υπό μελέτη υδρολογικό έτος.



Well Properties (F1 for Help)

Label

General | Other

☐ Head-Specified

☒ Discharge-Specified

X coordinate 564409.30028 meters

Y coordinate 3884775.7754 meters

Discharge 0 m<sup>3</sup>/day

Radius 1 meters

OK Cancel

Εικόνα 4.7 Στοιχεία των πηγαδιών άντλησης

Στην δεύτερη καρτέλα ορίζεται μια ακτίνα της λεγόμενης ζώνης απομάκρυνσης (setback radius), όπως έχει αναφερθεί στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, εδώ ορίζεται στα 100m, και μια παράμετρος, από τις σημαντικότερες για την έκβαση της μοντελοποίησης, τα pathline traces, που ουσιαστικά είναι τα ίχνη πιθανών ρύπων. Τα pathlines καθορίζουν την ζώνη σύλληψης και η ανίχνευση γίνεται αντίστροφα στο χρόνο (traces backward in time). Εξηγώντας, ενώ ο σκοπός είναι ο καθορισμός ζώνης προστασίας βάσει του χρόνου διανύσεως του ρύπου έως το σημείο που αντλείται το νερό στο πηγάδι (well screen), γραφικά αναπαρίσταται από το πηγάδι προς το απέναντι όριο της ζώνης σύλληψης, αντίθετα της κατεύθυνσης της υπόγειας ροής (αν θεωρήσουμε ότι το άλλο όριο είναι το ίδιο το πηγάδι). Έτσι λοιπόν ορίζεται το πλήθος αυτών (δέκα ή και παραπάνω για ακριβέστερη απεικόνιση της ζώνης σύλληψης) καθώς και το αρχικό ύψος που είναι το ελάχιστο υδραυλικό ύψος κάθε πηγαδιού.

Εικόνα 4.8 Στοιχεία των πηγαδιών άντλησης για την κατασκευή των αντίστοιχων ζωνών προστασίας

Κάθε πηγάδι έχει την δική του ονομασία (label). Η παραπάνω διαδικασία γίνεται για όλα τα πηγάδια άντλησης 1-20.

Πίνακας 4.1 Οι ετήσιες παροχές αντλήσεων των πηγαδιών 1-20

| Πηγάδι | Παροχή (m <sup>3</sup> /d) | Πηγάδι | Παροχή (m <sup>3</sup> /d) | Πηγάδι | Παροχή (m <sup>3</sup> /d) | Πηγάδι | Παροχή (m <sup>3</sup> /d) |
|--------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|----------------------------|
| 1      | 318.70                     | 6      | 920.55                     | 11     | 3542.74                    | 16     | 534.86                     |
| 2      | 8698.63                    | 7      | 158.65                     | 12     | 1037.65                    | 17     | 301.67                     |
| 3      | 9607.61                    | 8      | 435.69                     | 13     | 545.69                     | 18     | 386.80                     |
| 4      | 130.31                     | 9      | 1215.55                    | 14     | 2729.78                    | 19     | 1025.73                    |
| 5      | 3452                       | 10     | 1318.33                    | 15     | 394.54                     | 20     | 133.84                     |

### 4.3.2 Τα πηγάδια παρατήρησης (test points)

Εν συνεχεία, καθορίζονται τα πηγάδια παρατήρησης (observation wells ή test points). Από την γραμμή εργασιών: Model→Add test point ή από το αντίστοιχο εικονίδιο. Εμφανίζεται όμως σταυρός αντί του κέρσρα και πατώντας αριστερό κλικ οπουδήποτε πάνω στο γραφικό περιβάλλον ανοίγει ένα παράθυρο (Εικόνα 4.9).

Εικόνα 4.9 Στοιχεία των πηγαδιών παρατήρησης

Δίνεται το όνομα του πηγαδιού παρατήρησης, οι γεωγραφικές του συντεταγμένες και το παρατηρούμενο υδραυλικό ύψος (observed head).

Για κάθε υδρολογικό έτος, (Σεπτέμβριος του ενός έτους έως τον Αύγουστο του επόμενου π.χ. Σεπτέμβριος του 2004 έως τον Αύγουστο του 2005 είναι το υδρολογικό έτος 2004-05 κ.ο.κ. ) έχει υπολογιστεί και το αντίστοιχο παρατηρούμενο υδραυλικό ύψος για κάθε ένα από τα πέντε test points (M1, M2, NH14, C46, M25).

### 4.3.3 Περιοχές ανομοιογένειας (inhomogeneities)

Λόγω της διαφορετικότητας των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής μελέτης, επόμενο είναι να υπάρχουν και υποπεριοχές με διαφορετική υδραυλική αγωγιμότητα και συνεπώς πορώδες και επίπεδα διαπερατότητας (permeability). Στο WhAEM, περιοχές διαφορετικής υδραυλικής αγωγιμότητας μπορούν να απεικονιστούν με την λειτουργία inhomogeneities (Εικόνα 4.10) που στην ουσία είναι ένα πολύγωνο (το σχήμα είναι καθαρά στην ευχέρεια του χρήστη και τί ακριβώς θέλει να δείξει). Προκύπτουν περιοχές εντός της περιοχής μελέτης με τρεις διαφορετικές τιμές αναφορικά με την υδραυλική αγωγιμότητα. Η λειτουργία inhomogeneities αποδεικνύεται πολύ βοηθητική. Έτσι λοιπόν σχεδιάστηκε η περιοχή μελέτης, όπως απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.10 Η περιοχή μελέτης διαχωρισμένη βάσει των διαφορετικών inhomogeneities

Τα βήματα είναι τα ακόλουθα: είτε από την γραμμή εργασιών: Element→New→Inhomogeneity ή από το αντίστοιχο εικονίδιο ανακύπτει ένα νέο παράθυρο (Εικόνα 4.11).



Εικόνα 4.11 Στοιχεία ανομοιογένειας

Δίνεται ένας τίτλος και οι εντολές αμέσως μετά αποκτούν ένα επιπρόσθετο ενδιαφέρον. Υπάρχουν δύο είδη της λειτουργίας inhomogeneities. Το πρώτο αναφέρεται σε περιοχές με διαφορετικές ιδιότητες σχετικά με τον υδροφόρα (π.χ. υδραυλική αγωγιμότητα) ενώ το δεύτερο αφορά τον εμπλουτισμό του υπόγειου υδροφόρα λόγω βροχόπτωσης. Προσθετικά λοιπόν στις τρεις προαναφερθείσες περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία inhomogeneities, δημιουργήθηκε ακόμα μια, που εσωκλείει ολόκληρη την περιοχή μελέτης και έχει να κάνει με τον εμπλουτισμό (areal recharge rate) λόγω βροχόπτωσης. Αναλυτικότερα, με μαύρο χρώμα απεικονίζεται όλη η περιοχή (2<sup>ο</sup> είδος), με κόκκινο η περιοχή με υδραυλική αγωγιμότητα  $K=50$  m/d, με κίτρινο η περιοχή με  $K=5$  m/d, και τέλος με πράσινο η περιοχή με  $K=1$  m/d.

#### 4.3.4. Linesinks

Το WhAEM λοιπόν, όπως διαφαίνεται ως τώρα, χρησιμοποιεί τη μέθοδο αναλυτικών στοιχείων για την επίλυση της ροής υπόγειων υδάτων, η οποία υπόκειται σε υδρολογικά όρια. Τα αναλυτικά στοιχεία είναι μαθηματικές συναρτήσεις που αναπαριστούν υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά σε ένα μοντέλο ροής υπόγειων υδάτων. Για παράδειγμα, ένα ελικοειδές ρέμα ή ένας ποταμός μπορεί να αναπαρασταθούν από μια σειρά ευθύγραμμων στοιχείων που προσεγγίζουν συλλογικά τη γεωμετρία του ρεύματος. Στο WhAEM, κάθε ένα από αυτά τα γραμμικά στοιχεία συνδέεται με μια συνάρτηση "γραμμικού φρέατος" ή "γραμμικής πηγής" (linesink) που αναπαριστά μαθηματικά την εισροή ή εκροή υπόγειων υδάτων για εκείνο το τμήμα του ρεύματος. Το linesink αποτελεί βασικότατο παράγοντα στην διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος αυτής της διπλωματικής εργασίας, καθώς είναι η παράμετρος που έπαιξε καθοριστικό ρόλο κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης. Το linesink μπορεί κανείς να το φανταστεί ως έναν άπειρο αριθμό σημειακών φρεάτων ή πηγαδιών ολοκληρωμένων κατά μήκος μιας πεπερασμένης γραμμής.



Επιπλέον παραδείγματα αναλυτικών στοιχείων στο WhAEM είναι όλα τα ανωτέρω, δηλαδή τα πηγάδια (σημειακά φρέατα-point sinks), οι γραμμικοί διπλοί πόλοι (line doublets ή double layers) για την αναπαράσταση ανομοιογενειών (inhomogeneities) του υδροφορέα και τα χωρικά στοιχεία για τη μοντελοποίηση του εμπλουτισμού λόγω βροχοπτώσεων. Τα γραμμικά φρέατα χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση ρευμάτων (ποταμών, τάφρων, ρεμάτων) και των ορίων λιμνών και ακτών.

Ένα linesink έχει μια σταθερή πυκνότητα αποστράγγισης (δηλαδή έναν σταθερό ρυθμό άντλησης υπόγειων υδάτων κατά μήκος του γραμμικού στοιχείου), η οποία αντιπροσωπεύει ένα τμήμα ροής (όπως ένα ρυάκι ή την ακτογραμμή μιας λίμνης) και συνήθως δεν είναι γνωστή. Στο WhAEM, αυτό αντιμετωπίζεται καθορίζοντας ένα πιεζομετρικό φορτίο (ύψος) στο κέντρο του linesink, το οποίο θεωρείται ίσο με τη μέση στάθμη του νερού στο αντίστοιχο τμήμα στο ρυάκι ή στην λίμνη. Για κάθε άγνωστη τιμή ισχύος ενός linesink, υπάρχει ένα καθορισμένο πιεζομετρικό φορτίο. Αυτό οδηγεί σε ένα σύστημα εξισώσεων, το οποίο επιλύεται για να προσδιορίσει τις άγνωστες παραμέτρους ισχύος αυτών. Συνεπώς, κάθε αλλαγή στα δεδομένα του μοντέλου, απαιτεί μια νέα διαδικασία επίλυσης για τον επανυπολογισμό των τιμών ισχύος. Οι τελευταίες αντιπροσωπεύουν τους ρυθμούς άντλησης των υπόγειων υδάτων κατά μήκος των linesinks, εκφρασμένους ως όγκος νερού ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα μήκους του linesink.

Η χρήση των linesinks κατά μήκος των ορίων της ροής (stream boundaries) υποδηλώνει ότι ο υδροφορέας είτε δέχεται (recharge) είτε χάνει (discharge) υπόγεια νερά μόνο κατά μήκος των ανωτέρω αυτών ορίων.

Ο αριθμός των linesinks που απαιτούνται για να αναπαραστήσουν ένα stream boundary εξαρτάται από δύο βασικούς παράγοντες:

1. Την ανάγκη να ακολουθηθεί η λεπτομερής γεωμετρία της ροής.
2. Την ανάγκη να επιτρέπονται μεταβολές στην υπόγεια εκφόρτιση (discharge) ή επαναφόρτιση (recharge) κατά μήκος του ορίου ροής (along stream boundary).

Η αναπαράσταση της γεωμετρίας της ροής είναι πιο σημαντική στην εγγύς περιοχή (near field), δηλαδή την περιοχή άμεσου ενδιαφέροντος παρά στην πιο απομακρυσμένη περιοχή (far field) όπου οι επιφανειακές υδάτινες μάζες δεν επηρεάζουν άμεσα το μοντέλο. Σύμφωνα με αυτήν την συλλογιστική, η ανάγκη για χρήση πολλών μικρών linesinks που θα ακολουθούν τις μεταβολές (discharge ή recharge) κατά μήκος της ροής είναι περισσότερο επιτακτική στην εγγύς περιοχή και πιο συγκεκριμένα κοντά σε κάποιο αντλητικό πηγάδι (με υψηλό ρυθμό άντλησης).

Στο WhAEM, τα linesinks ορίζονται μέσω του μενού Element→New → Linesinks. Ανακύπτει ένα νέο παράθυρο (Εικόνα 4.12), όπου δίδεται η ονομασία (label) του linesink και επιλέγεται αν θα συγκεκριμενοποιηθεί βάσει του υδραυλικού ύψους (head specified) ή της εισροής ή εκροής (discharge specified), ανάλογα με το πρόσημο. Αν το πρόσημο είναι πλην τότε εισέρχεται νερό στον υδροφορέα μέσω του linesink, ενώ αν το πρόσημο είναι συν, τότε εξέρχεται νερό από τον υδροφορέα μέσω του linesink. Ορισμένα linesinks, τα οποία είναι head specified, λαμβάνουν τιμές για την αντίσταση του πυθμένα (resistance), το πλάτος (width) του linesink, και το βάθος (depth). Η

αντίσταση ορίζεται ως  $c = \frac{\delta}{K_c}$ , όπου  $c$ : αντίσταση,  $\delta$ : πάχος και  $K_c$ : υδραυλική αγωγιμότητα (κάθετη).

Εικόνα 4.12 Στοιχεία των linesinks

#### 4.3.5 Horizontal Barriers

Τελευταίο όρισμα αποτελούν οι οριζόντιες φραγές (horizontal barriers) (Εικόνα 4.13) που αποτελούν όρια μηδενικής ροής (no flow boundaries) και δημιουργούνται ακολούθως: Element→New→Horizontal Barrier ή από το αντίστοιχο εικονίδιο στο toolbar.

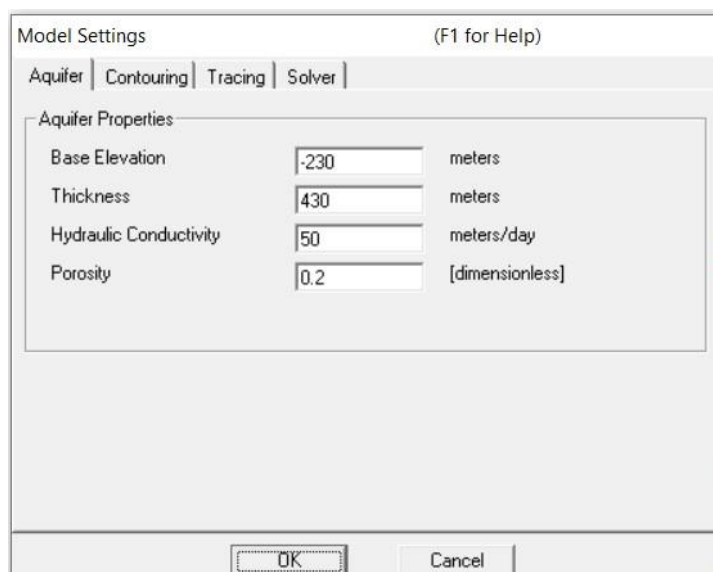
Εικόνα 4.13 Στοιχεία οριζόντιων φραγών

Ένα πολύ χαμηλής διαπερατότητας πεδίο μπορεί συχνά να αναπαρασταθεί καλύτερα με ένα κλειστό όριο μηδενικής ροής (no flow boundary), ώστε να αποκλείεται πλήρως η ροή, καθώς χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας περιοχή τείνει να παράγει ανακριβείς λύσεις.

Περιστασιακά, μετά από μια λύση, μπορεί να εμφανιστούν ακανόνιστες ισοπιεζομετρικές καμπύλες. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε: (1) μια γεώτρηση που αντλεί περισσότερο νερό από ό,τι μπορεί να παρέχει ο υδροφορέας, (2) παρουσία ενός οριζόντιου φράγματος ή (3) ανακριβή λύση λόγω πολύ απομακρυσμένων (αόρατων) γεωτρήσεων ή σημείων δοκιμής. Συγκεκριμένα, ένα οριζόντιο φράγμα δημιουργεί μια απότομη μεταβολή στην πιεζομετρική στάθμη κατά μήκος αυτού του ορίου. Ως αποτέλεσμα, οι ισοπιεζομετρικές καμπύλες συμπυκνώνονται ή ακόμα και περιπλέκονται, και συχνά εμφανίζονται ακανόνιστες κοντά σε αυτά τα φράγματα. Αυτό είναι ένα σφάλμα της διαδικασίας αποτύπωσης των ισοϋψών αυτών, κατά την οποία γίνεται προσπάθεια εξομάλυνσης της επιφάνεια της πιεζομετρικής στάθμης παρά τη μεταβολή. Ωστόσο, αυτό δεν επηρεάζει καθόλου την εγκυρότητα της λύσης της ροής των υπόγειων υδάτων.

#### 4.4 Ρυθμίσεις του μοντέλου

Στην συνέχεια ορίζονται οι ρυθμίσεις του μοντέλου. Από την γραμμή εργασιών, Model→ Settings ανοίγει ένα παράθυρο με τέσσερις καρτέλες. Η πρώτη (aquifer tab), (Εικόνα 4.14) αφορά τις παραμέτρους του υδροφορέα.



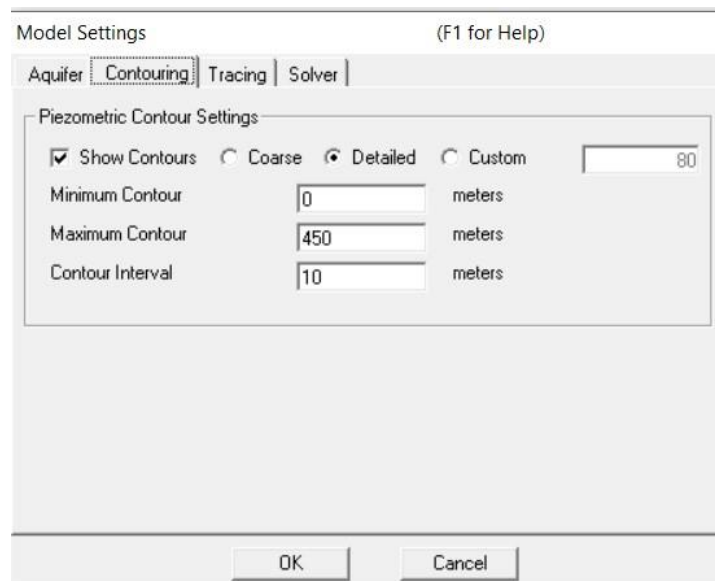
| Model Settings (F1 for Help)            |                     |
|-----------------------------------------|---------------------|
| Aquifer   Contouring   Tracing   Solver |                     |
| Aquifer Properties                      |                     |
| Base Elevation                          | -230 meters         |
| Thickness                               | 430 meters          |
| Hydraulic Conductivity                  | 50 meters/day       |
| Porosity                                | 0.2 [dimensionless] |
| OK Cancel                               |                     |

Εικόνα 4.14 Στοιχεία υδροφορέα

Ορίζεται α) αρχικό ύψος (base elevation) της βάσης του υδροφορέα (aquifer base) με σημείο αναφοράς την μέση στάθμη της θάλασσας στα -230m. Η αρχική στάθμη, θα πρέπει να βρίσκεται αρκετά κάτω από το ανώτατο σημείο του υδροφορέα ή τον υδροφόρο ορίζοντα, ώστε να αποφευχθεί η πρόωρη διακοπή ενός ίχνους (trace particle) λόγω εισόδου της ροής στον υδροφορέα σε σημείο πολύ κοντά στο πηγάδι. β) πάχος (thickness) υδροφορέα, το ολικό πάχος του υδροφορέα είτε είναι κορεσμένο είτε όχι, στα 430m, όπου να σημειωθεί ότι όταν το αρχικό ύψος του υδροφορέα συν το πάχος του ξεπεράσουν το πιεζομετρικό ύψος στον υδροφορέα, το μοντέλο αυτομάτως

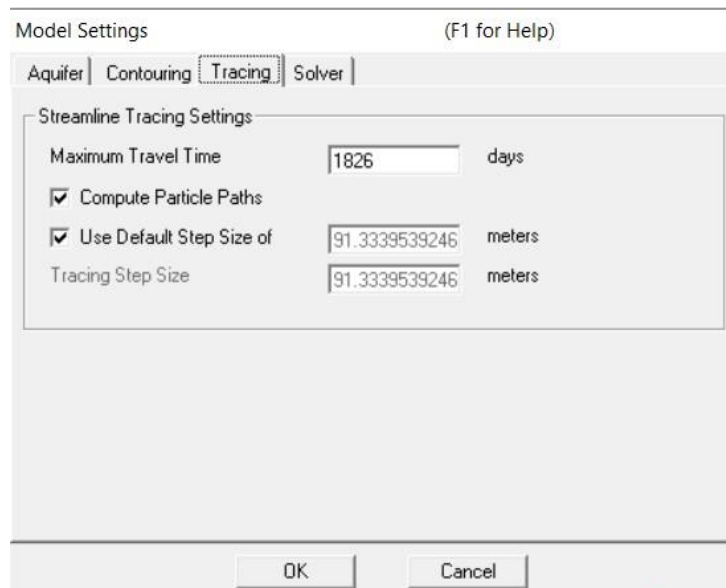
συμπεραίνει ότι ισχύουν συνθήκες ελεύθερης ροής. Ακόμα, το πάχος του υδροφορέα επηρεάζει τον χρόνο διάνυσης  $\gamma$ ) υδραυλική αγωγιμότητα (hydraulic conductivity) που αφορά τα τμήματα περιοχών τα οποία δεν υπόκεινται σε κάποιο άλλο inhomogeneity domain στα 50m/d, και τέλος  $\delta$ ) πορώδες ( $n$ ) που είναι το ενεργό πορώδες (effective porosity) με τιμή  $n=0.2$  και χρησιμοποιείται για την ανίχνευση των path lines και για τον υπολογισμό των χρόνων παραμονής (χρόνοι διάνυσης).

Στην δεύτερη καρτέλα (contouring tab), (Εικόνα 4.15) διαμορφώνεται το πλέγμα με τις ισοπιεζομετρικές γραμμές (contours of equal potentiometric heads) και ορίζονται η ελάχιστη και η μέγιστη επιθυμητή τιμή αυτών (0m και 450m αντίστοιχα). Επίσης ορίζεται το βήμα (υπολογισμένο σε μέτρα) βάσει του οποίου θα αυξάνεται το ύψος (ανά 10m).



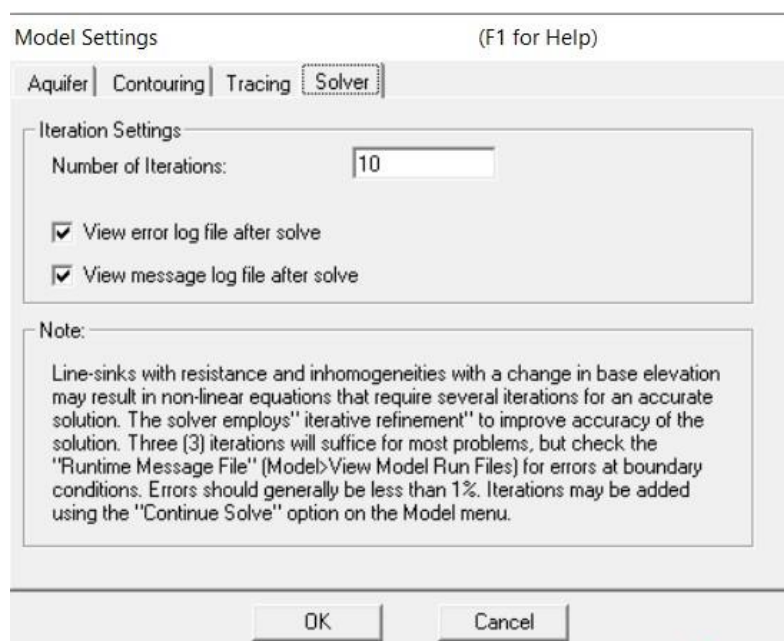
Εικόνα 4.15 Στοιχεία ισοπιεζομετρικών γραμμών

Στην τρίτη καρτέλα (tracing tab), (Εικόνα 4.16) ορίζεται ο μέγιστος χρόνος διάνυσης (maximum travel time) ο οποίος και θα καθορίσει τις ζώνες προστασίας. Οι πέντε περιπτώσεις, όπως έχει αναφερθεί, είναι για  $\tilde{T}=182d$ ,  $\tilde{T}=365d$ ,  $\tilde{T}=730d$ ,  $\tilde{T}=1826d$  και  $\tilde{T}=3652d$ .



Εικόνα 4.16 Χρόνος διάνυσης

Τέλος, στην τέταρτη καρτέλα (solver tab), (Εικόνα 4.17) καθορίζεται το πλήθος των επαναλήψεων κατά την επίλυση του μοντέλου για καλύτερα αποτελέσματα. Στο μοντέλο κρίθηκε επαρκές το όριο των δέκα επαναλήψεων (iterations).



Εικόνα 4.17 Όριο επαναλήψεων για την επίλυση του μοντέλου

## 4.5 Βαθμονόμηση

Εφόσον ορίστηκαν όλες οι παράμετροι που απαιτούνται για την ορθή χρήση του μοντέλου και με γνώμονα την σκιαγράφιση ζωνών προστασίας βάσει του χρόνου διανύσεως ενός πιθανού ρυπογόνου παράγοντα, το επόμενο βήμα είναι η βαθμονόμηση (calibration) του μοντέλου για την όσο το δυνατόν βέλτιστη προσομοίωση στην πραγματικότητα. Ουσιαστικά η βαθμονόμηση στοχεύει στο αποτέλεσμα μιας λύσης (run) του μοντέλου με το ελάχιστο δυνατό σφάλμα. Σημεία αναφοράς της βαθμονόμησης αποτελούν τα υπολογισμένα υδραυλικά ύψη των test points (πηγαδιών παρατήρησης). Επίσης, η βαθμονόμηση έγινε σύμφωνα με την μέση ετήσια τιμή των παραπάνω υδραυλικών υψών για κάθε υδρολογικό έτος.

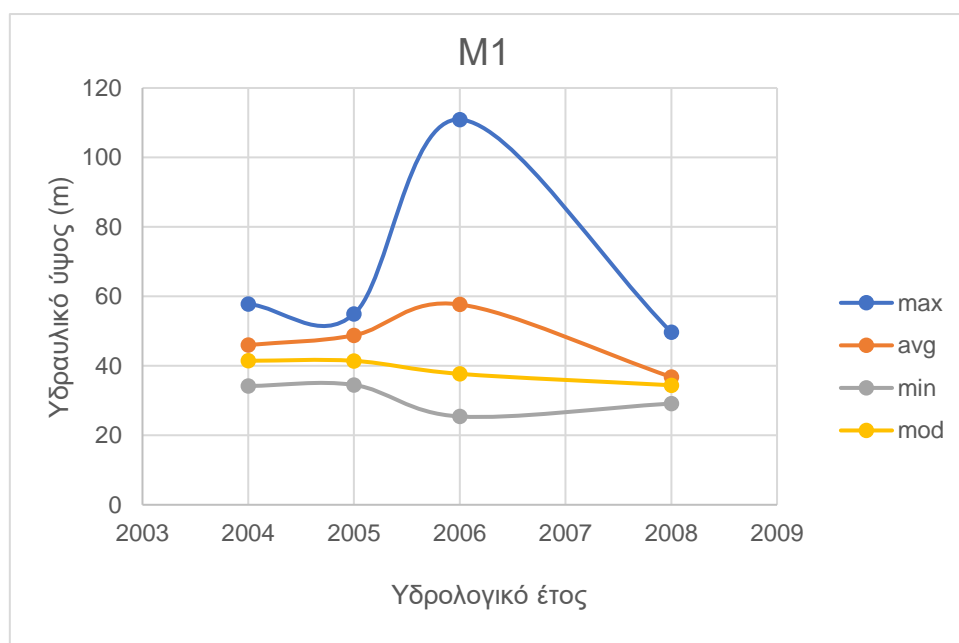
Η βαθμονόμηση έγινε, μεταβάλλοντας τις πλευρικές εισροές ή εκροές σε οριακά σημεία της περιοχής μελέτης (linesinks, no flow boundaries). Ύστερα από κάθε "τρέξιμο", εμφανίζονται κάποια τρίγωνα, διαφορετικού μεγέθους και χρώματος στα σημεία που βρίσκονται τα test points. Τα τρίγωνα αυτά δηλώνουν την απόκλιση της παρατηρούμενης τιμής του υδραυλικού ύψους από την μοντελοποιημένη τιμή (αυτή που μόλις προέκυψε μετά το αντίστοιχο run και για το κάθε ένα από τα πέντε test points). Πρακτικά, είναι η διαφορά του παρατηρούμενου υδραυλικού ύψους από την πιεζομετρική ισοϋψή (contour) στην οποία βρίσκεται το συγκεκριμένο test point. Όσο μικρότερο το μέγεθος του τριγώνου τόσο μικρότερο και το σφάλμα. Με πράσινο χρώμα δηλώνεται υπερεκτίμηση ενώ με κόκκινο χρώμα υποεκτίμηση.

Το WhAEM παρέχει ένα διάγραμμα που απεικονίζει την συσχέτιση μεταξύ παρατηρούμενου και μοντελοποιημένου υδραυλικού ύψους. Επιπλέον δίνει τις τιμές που ορίζουν την μέση απόλυτη διαφορά (Mean Absolute Difference, MAD) αλλά και την τετραγωνική ρίζα του μέσου αθροίσματος των τετραγώνων της διαφοράς του μοντελοποιημένου υδραυλικού ύψους απ' το αντίστοιχο παρατηρημένο (Root Mean Square Difference, RMSD). Η επίτευξη ορθού αποτελέσματος επιτυγχάνεται όταν τα σημεία εμπίπτουν στην ευθεία  $y=x$ . Επιπρόσθετα, αν το σφάλμα σε καθένα από τα πέντε test points, είναι μικρότερο από το ήμισυ της ετήσιας διακύμανσης, τότε λαμβάνεται ως αποδεκτή λύση [Paritsis, 2005]. Η ετήσια διακύμανση υπολογίζεται από τη διαφορά της ελάχιστης από την μέγιστη τιμή του υδραυλικού ύψους για κάθε υδρολογικό έτος.

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

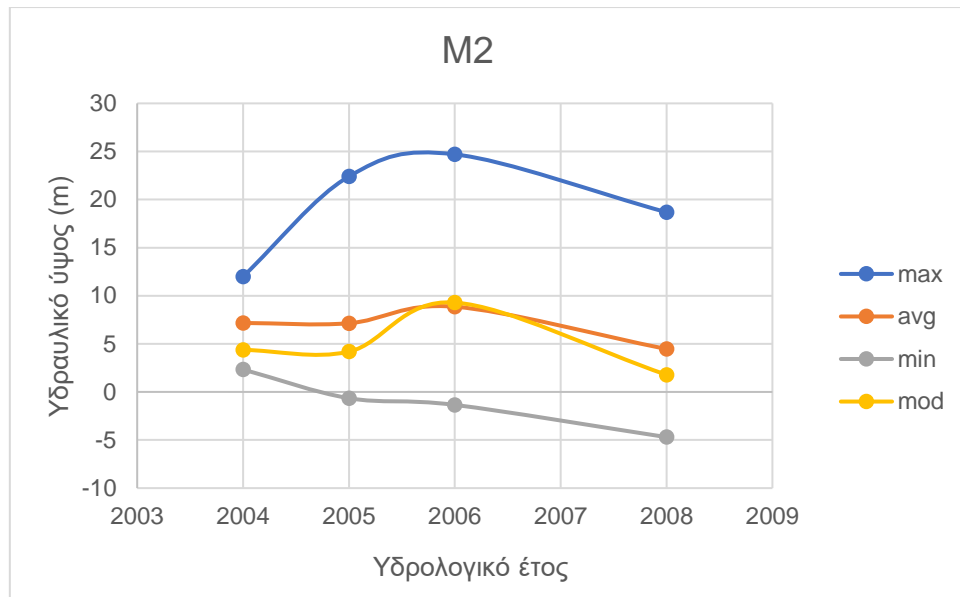
Δίδονται διαγραμματικές απεικονίσεις των υδραυλικών υψών των πηγαδιών παρατήρησης συναρτήσει του χρόνου (Εικόνες 5.1 έως 5.6) καθώς και διαγράμματα που παράγει το ίδιο το μοντέλο σχετικά με την βαθμονόμηση και το πόσο συμπίπτουν οι παρατηρούμενες με τις μοντελοποιημένες τιμές (Εικόνες 5.8 Έως 5.11). Πάνω σ' αυτό βασίζεται και ο Πίνακας 5.1, ο οποίος αναφέρεται στο MAD και στο RMSD (βλ. κεφάλαιο 4.5). Ακόμα, παρουσιάζονται σε διάγραμμα (Εικόνα 5.7) οι παροχές άντλησης των αντίστοιχων πηγαδιών άντλησης. Τέλος, σκιαγραφούνται οι ζώνες προστασίας (Εικόνες 5.12 έως 5.15) όλων των πηγαδιών άντλησης και για τις πέντε περιπτώσεις βάσει του χρόνου διάνυσης, για κάθε ένα από τα τέσσερα υδρολογικά έτη που εξετάζονται. Τα αποτελέσματα εξάχθηκαν από το WhAEM σε shapefile, και τοποθετήθηκαν στο GIS, γεωαναφερμένα και αυτά, ώστε να παρουσιαστεί η τελική μορφή τους.

Παρατίθενται τα διαγράμματα των test points.



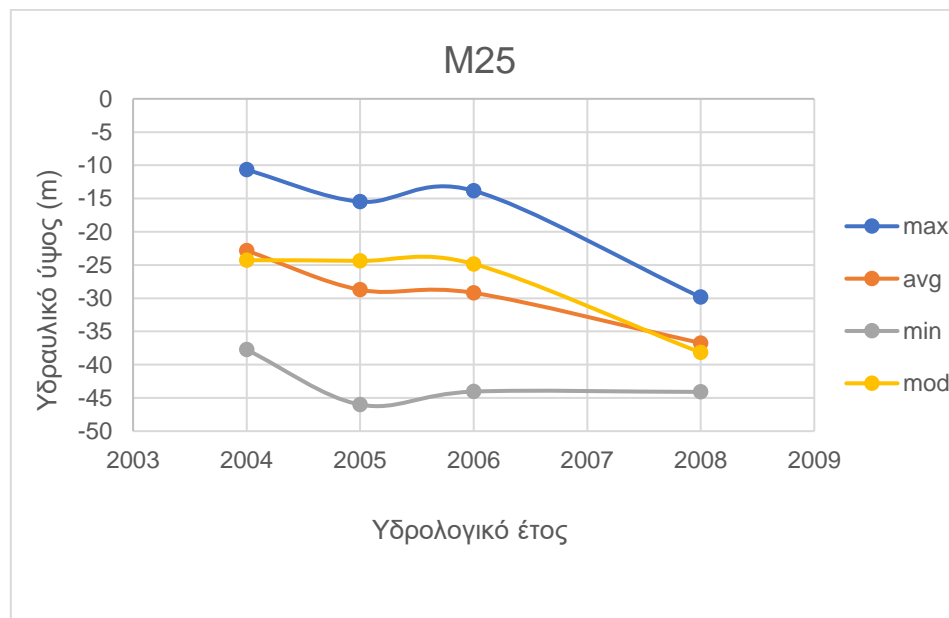
Εικόνα 5.1 Υδραυλικό ύψος συναρτήσει του χρόνου για το πηγάδι παρατήρησης M1

Για το πηγάδι παρατήρησης M1 παρατηρείται υψηλή διακύμανση στις τιμές, (από τις ελάχιστες έως και τις μέγιστες), όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1. Το ανώτατο σημείο είναι στα 110.92m που αναφέρεται στο υδρολογικό έτος 2006-07. Το μέγιστο εύρος είναι στα 85.49m και διαμορφώθηκε επίσης την περίοδο 2006-07. Η καμπύλη με την ονομασία mod αναφέρεται στις μοντελοποιημένες τιμές (modeled).



Εικόνα 5.2 Υδραυλικό ύψος συναρτήσει του χρόνου για το πηγάδι παρατήρησης M2

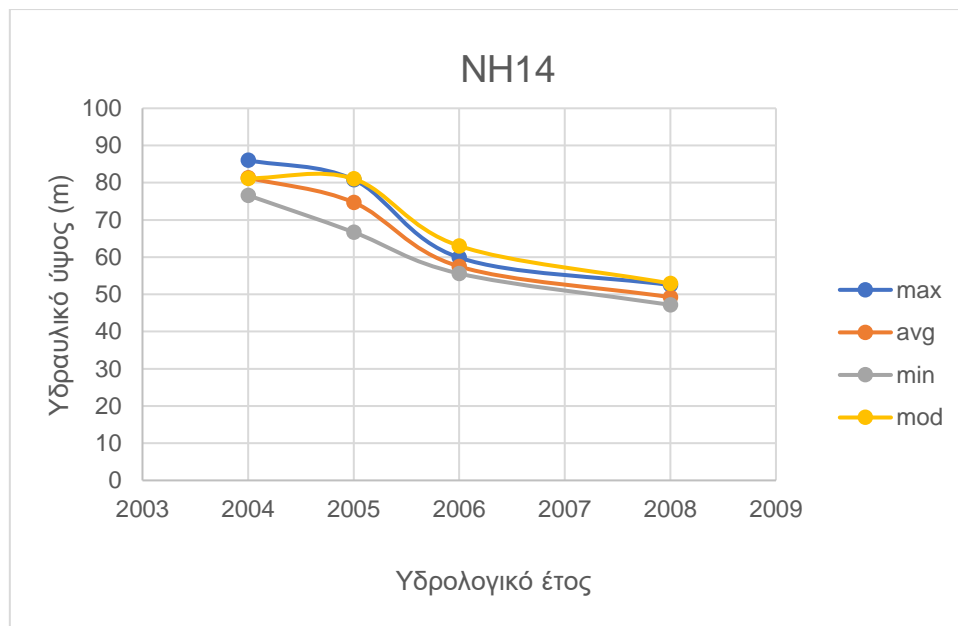
Για το πηγάδι παρατήρησης M2, παρόλο που σημειώθηκαν τα μεγαλύτερα σφάλματα συγκριτικά με τα υπόλοιπα test points, στο διάγραμμα αυτό (Εικόνα 5.2) φαίνεται πως μοντελοποιημένες και μέσες παρατηρούμενες τιμές σχεδόν ταυτίζονται στο υδρολογικό έτος 2006-07 (5% σφάλμα), ενώ λόγω μικρής διακύμανσης, οι μέγιστες και οι ελάχιστες παρατηρούμενες τιμές δεν αποτελούν πρόβλημα στα αποτελέσματα.



Εικόνα 5.3 Υδραυλικό ύψος συναρτήσει του χρόνου για το πηγάδι παρατήρησης M25

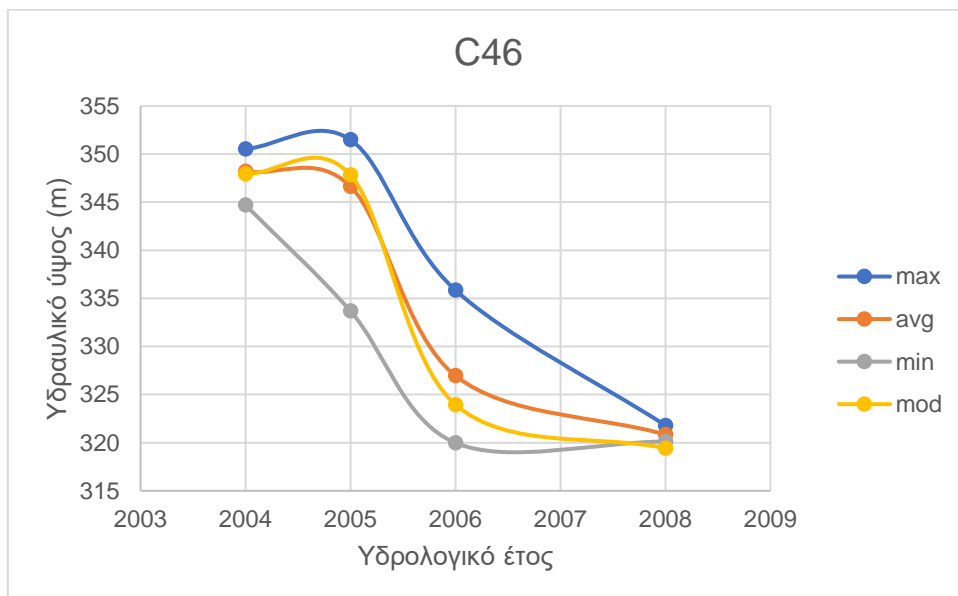
Στο διάγραμμα (Εικόνα 5.3) για το πηγάδι παρατήρησης M25, το εύρος τιμών είναι σχετικά μικρό και οι τιμές που προέκυψαν από το μοντέλο αρκετά κοντά σε αυτές που παρατηρήθηκαν από τις μετρήσεις στο πεδίο.





Εικόνα 5.4 Υδραυλικό ύψος συναρτήσει του χρόνου για το πηγάδι παρατήρησης NH14

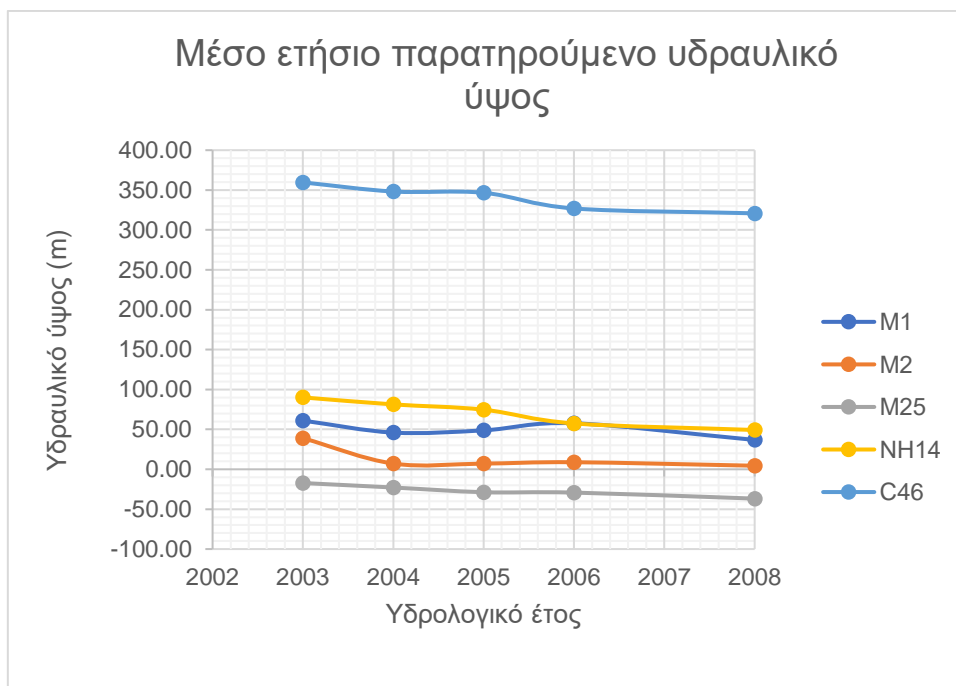
Για το πηγάδι παρατήρησης NH14, παρατηρούνται αρκετά μικρά σφάλματα (Εικόνα 5.4) και οι τιμές είναι παραπλήσιες, είτε γίνεται λόγος για μέγιστες είτε για μοντελοποιημένες, είτε ακόμα για τις ελάχιστες.



Εικόνα 5.5 Υδραυλικό ύψος συναρτήσει του χρόνου για το πηγάδι παρατήρησης C46

Για το πηγάδι παρατήρησης C46, η πορεία που διαγράφουν οι τιμές του υδραυλικού ύψους στην πάροδο των ετών χαρακτηρίζεται από μια πτωτική τάση ενώ παράλληλα οι αποκλίσεις των μοντελοποιημένων από τις παρατηρούμενες τιμές είναι αμελητέες.

Γενικά, τα ποσοστά σφαλμάτων είναι σχετικά και όχι απόλυτα. Επιπλέον, τα ανωτέρω διαγράμματα δηλώνουν ότι οι μοντελοποιημένες και οι παρατηρούμενες τιμές των υδραυλικών υψών των test points δεν έχουν μεγάλες αποκλίσεις. Συνεπώς, συμπεραίνεται πως υψηλά ποσοστά σφαλμάτων (π.χ. 60% για το M2 το έτος 2007-08) δεν αποτελούν πρόβλημα στην μοντελοποίηση του υδροφορέα μιας και η συνθήκη περί αποδοχής των σφαλμάτων που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4.5 επαληθεύεται.



Εικόνα 5.6 Μέσο ετήσιο παρατηρούμενο υδραυλικό ύψος συναρτήσει του χρόνου όλων των πηγαδιών παρατήρησης

Στην Εικόνα 5.6, φαίνονται τα μέσα ετήσια υδραυλικά ύψη των test points στην περιοχή μελέτης όπως παρατηρήθηκαν στο πεδίο. Το C46 διαφοροποιείται καθότι βρίσκεται σε μεγαλύτερο υψόμετρο απ' τα υπόλοιπα.



Εικόνα 5.7 Παροχές άντλησης των αντίστοιχων πηγαδιών

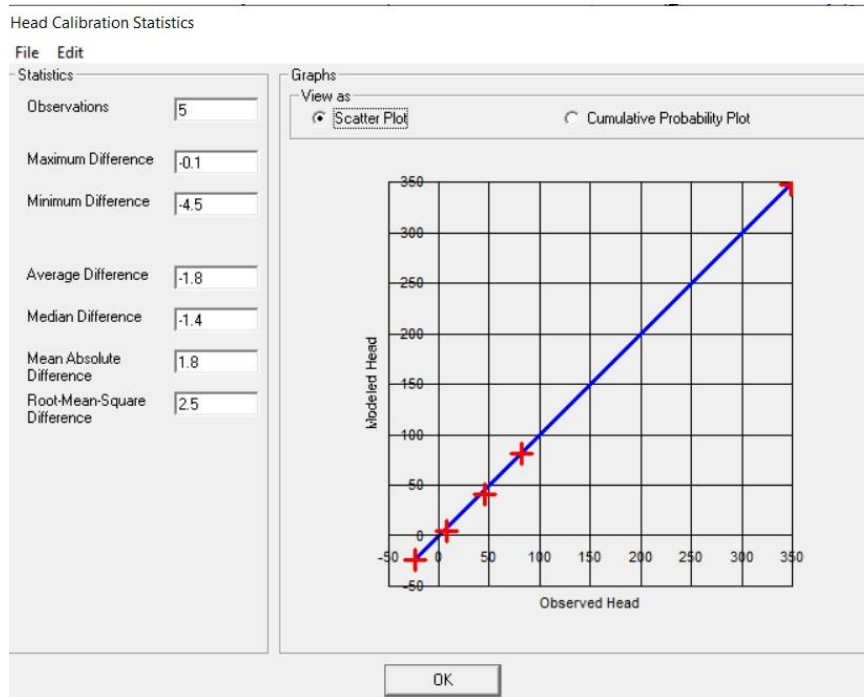
Στην Εικόνα 5.7, παρατηρείται υψηλότερη παροχή στα πηγάδια 2 και 3 ενώ ακολουθούν τα 5, 11 και 14 με επίσης υψηλές παροχές. Τα πηγάδια 9 και 10 είναι τα μόνα ύδρευσης. Αυτό δηλώνει την προτεραιότητα που έχει η άρδευση έναντι της δημόσιας υδροδότησης για πόση και πόσο σημαντική είναι η συνεισφορά του υπόγειου υδροφορέα.

Ακολουθεί ο Πίνακας 5.1 με τις τιμές που δηλώνουν αξιοπιστία της μοντελοποίησης σύμφωνα με το WhAEM.

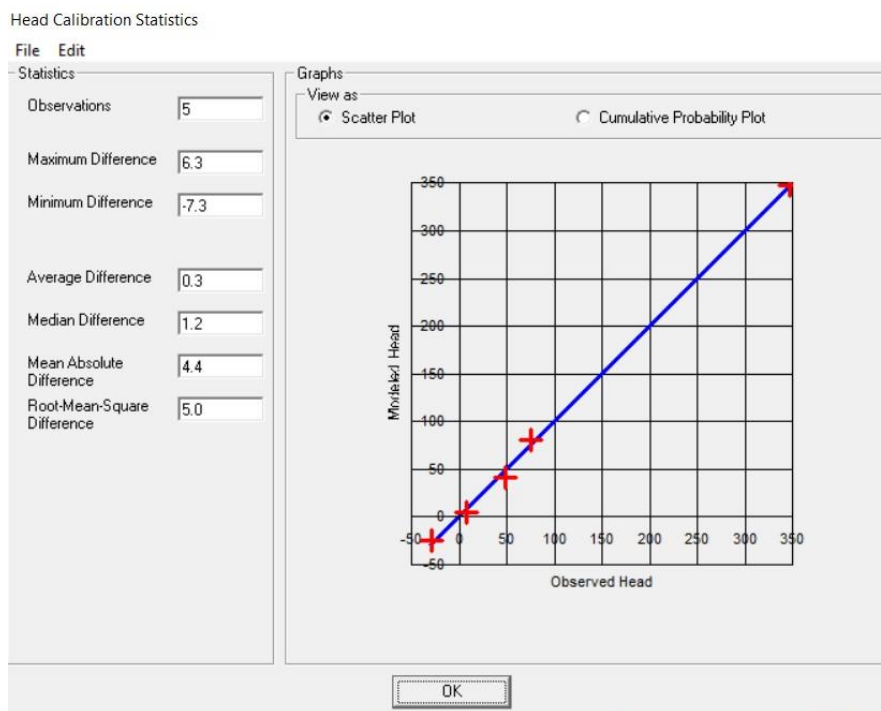
*Πίνακας 5.1 Mean Absolute Difference & Root Mean Square Difference ανά υδρολογικό έτος*

| Υδρολογικό έτος | MAD      | RMSD     |
|-----------------|----------|----------|
| 2004-05         | 1.836837 | 2.472591 |
| 2005-06         | 4.435855 | 4.966323 |
| 2006-07         | 6.661368 | 9.570756 |
| 2007-08         | 2.314315 | 2.462451 |

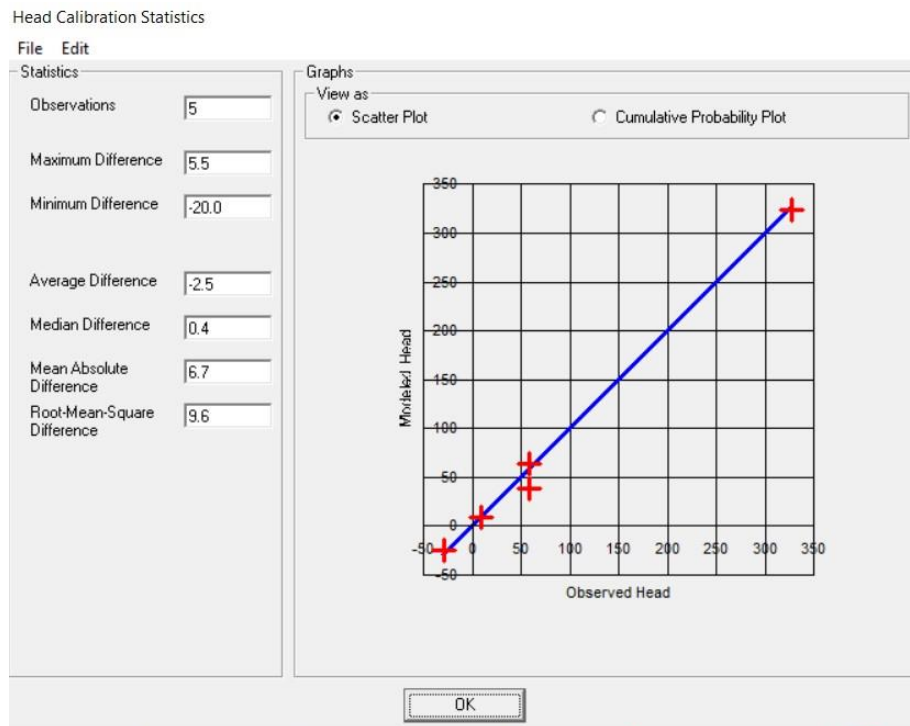
Όσο μικρότερες οι τιμές των MAD και RMSD τόσο μικρότερη η απόκλιση των μοντελοποιημένων από τις παρατηρούμενες τιμές. Οι Εικόνες 5.8 έως 5.11 δηλώνουν ακριβώς αυτό. Οι λύσεις που αντιπροσωπεύουν είναι αποδεκτές για όλα τα έτη, καθώς στα διαγράμματα διασποράς, όλα τα σημεία είναι κοντά στην  $y=x$ . Οι κόκκινοι σταυροί αναπαριστούν ουσιαστικά την σύγκλιση των δύο αυτών τιμών. Θα ήταν ανεπιθύμητο αν όλοι οι σταυροί συγκεντρώνονταν είτε πάνω είτε κάτω τις ευθείας  $y=x$ . Αντίθετα, ο καταμερισμός πάνω και κάτω της ευθείας σημαίνει μεγαλύτερη αξιοπιστία της μοντελοποίησης.



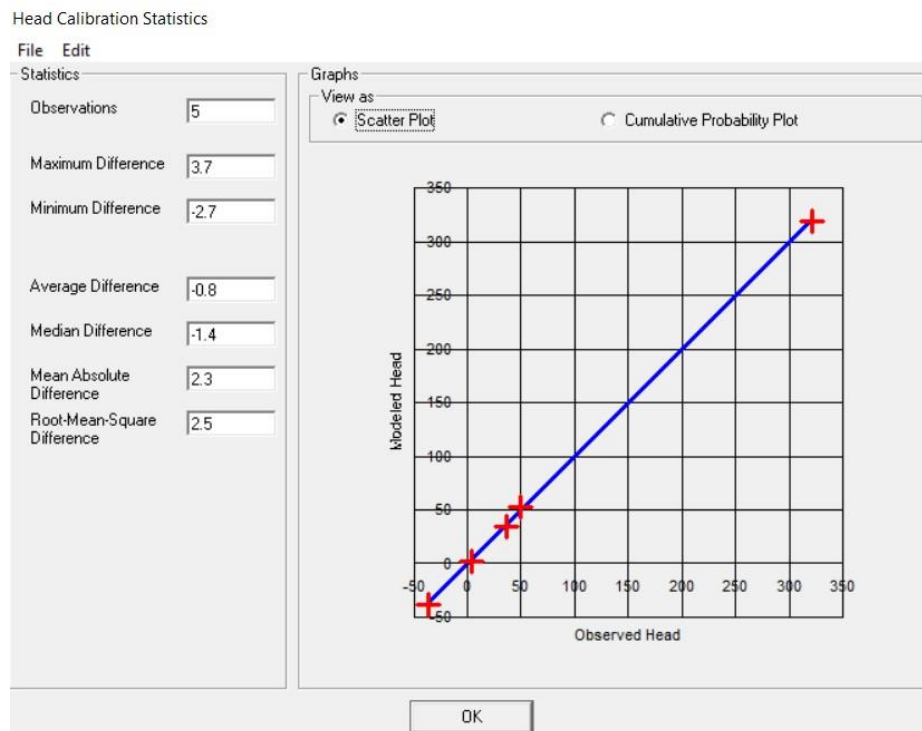
Εικόνα 5.8 Αποτελέσματα βαθμονόμησης υδραυλικού ύψους για το υδρολογικό έτος 2004-05



Εικόνα 5.9 Αποτελέσματα βαθμονόμησης υδραυλικού ύψους για το υδρολογικό έτος 2005-06



Εικόνα 5.10 Αποτελέσματα βαθμονόμησης υδραυλικού ύψους για το υδρολογικό έτος 2006-07



Εικόνα 5.11 Αποτελέσματα βαθμονόμησης υδραυλικού ύψους για το υδρολογικό έτος 2007-08

Συγκεντρωτικά τα σφάλματα των test points ανά τα υδρολογικά έτη, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2. Το πηγάδι παρατήρησης M2 βρίσκεται πάνω σε ρήγματα και σε πιο μακρινή απόσταση από το πεδίο ορισμού, γεγονός που δικαιολογεί τα σχετικά υψηλά σφάλματα.

Πίνακας 5.2 Ποσοστά σφαλμάτων

| Υδρολογικό έτος | Test points |      |      |      |     |
|-----------------|-------------|------|------|------|-----|
|                 | M1          | M2   | M25  | NH14 | C46 |
| 2004-05         | -10%        | -39% | 6%   | 0%   | 0%  |
| 2005-06         | -15%        | -41% | -15% | 8%   | 0%  |
| 2006-07         | -35%        | 5%   | -15% | 10%  | -1% |
| 2007-08         | -6%         | -60% | 4%   | 7%   | 0%  |

Τα σφάλματα προκύπτουν απ' τον εξής τύπο:

$$\text{Ποσοστιαίο σφάλμα} = \frac{\text{Μοντελοποιημένη} - \text{Παρατηρούμενη}}{\text{Παρατηρούμενη}} \times 100$$

Το πρόσημο, αν είναι αρνητικό, υποδηλώνει ότι η μοντελοποιημένη τιμή του υδραυλικού ύψους βρίσκεται χ μέτρα κάτω από την παρατηρούμενη (υποεκτίμηση), ενώ αν είναι θετικό το αντίθετο (υπερεκτίμηση).

Παρουσιάζονται οι ζώνες προστασίας από πιθανούς ρύπους των πηγαδιών άντλησης για τέσσερα διαφορετικά υδρολογικά έτη (Εικόνα 5.12-5.15).

Η βαθμονόμηση του μοντέλου ανέδειξε την ανάγκη της παραμετροποίησης των οριακών συνθηκών, που τέθηκαν ως βάση, για την αποπεράτωση της μοντελοποίησης της περιοχής μελέτης. Κυρίαρχο ρόλο διαδραμάτισαν τα linesinks και τα no flow boundaries με στόχο να ορίσουν τις οριακές συνθήκες για την περιοχή μελέτης και να εξαχθεί ένα συμπέρασμα για τις ζώνες προστασίας των αντλητικών πηγαδιών.

Το σκεπτικό της βαθμονόμησης ήταν η αλλαγή των τιμών των οριακών συνθηκών αλλά και των θέσεων τους, μέχρι το χαμηλότερο δυνατό σφάλμα, ή έως ότου το σφάλμα θα μπορούσε να θεωρηθεί αποδεκτό. Ξεκινώντας από το σενάριο για το υδρολογικό έτος 2004-05, οι καλύτερες τιμές που έφεραν καλά αποτελέσματα, δηλαδή μικρές αποκλίσεις μεταξύ μοντελοποιημένων και παρατηρούμενων υδραυλικών υψών, καθόρισαν και τα επόμενα υδρολογικά έτη. Εξ ου και το αποτέλεσμα των ζωνών προστασίας να μην έχει κραυγαλέες διαφορές μεταξύ των ετών.

Ως εκ τούτου, η υπόγεια ροή ελέγχεται από τις οριακές συνθήκες.

Η ζώνη των 6 μηνών παρουσιάζεται με κόκκινο χρώμα λόγω του χρονικού περιορισμού και έτσι θα πρέπει να ληφθούν άμεσα μέτρα απομάκρυνσης ή εξασθένησης των πιθανών ρύπων.

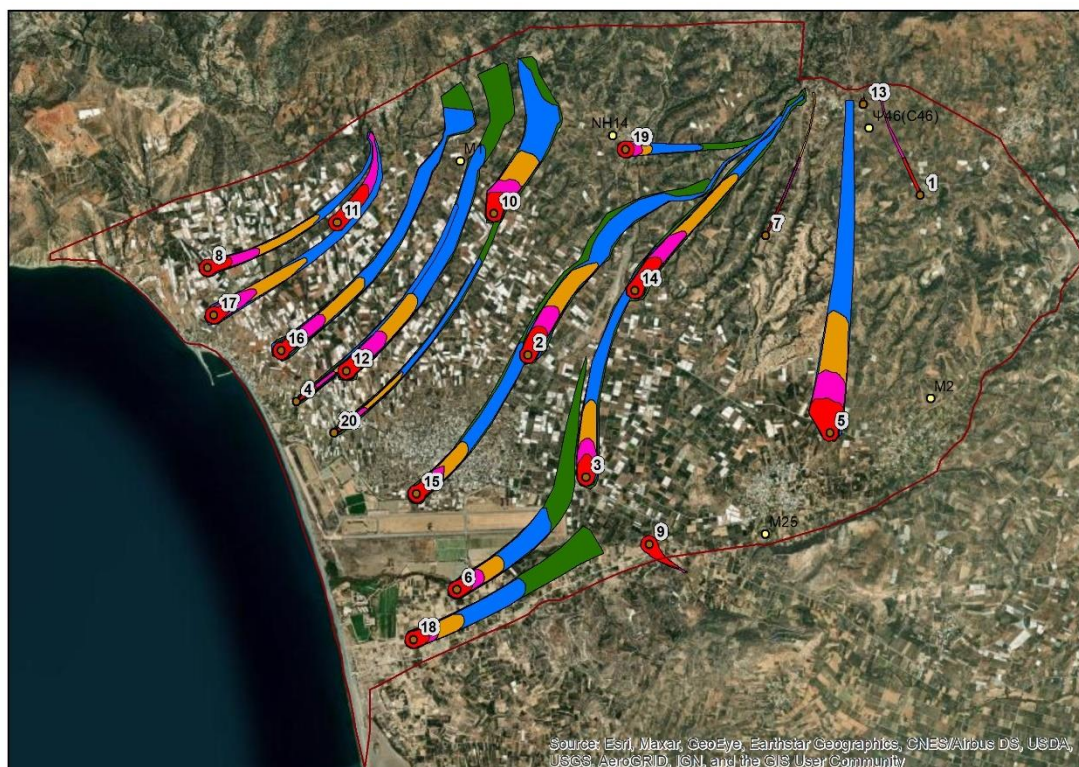
Η ζώνη του 1 έτους παρουσιάζεται με μωβ χρώμα, η ζώνη των 2 ετών με πορτοκαλί, η ζώνη των 5 ετών με μπλε και η ζώνη των 10 ετών με πράσινο.

Η επιλογή της διαβάθμισης των χρωμάτων ενέχει και φυσική σημασία. Όσο πιο έντονο το χρώμα, τόσο υψηλότερη είναι η επικινδυνότητα να ρυπανθεί ένα πηγάδι και άρα τα προληπτικά μέτρα ή τα μέτρα εξυγίανσης του υπόγειου υδροφορέα θα πρέπει να είναι αμεσότερα.

Πιο συγκεκριμένα το πηγάδι 13 βρίσκεται πολύ κοντά σε linesink με αποτέλεσμα να σκιαγραφείται μόνο η ζώνη των 6 μηνών καθώς δεν παρουσιάζεται καμία μεταβολή των pathline traces κατά τα 'τρέξιμα' για χρόνους παραμονής μεγαλύτερων των 6 μηνών. Αντίστοιχα, το πηγάδι 9 που πρόκειται για ένα εκ των δύο πηγαδιών ύδρευσης, παρουσιάζει ζώνες προστασίας (εκτός των 6 μηνών και του 1 έτους) για 2, 5, 10 έτη μόνο κατά το υδρολογικό έτος 2007-08.

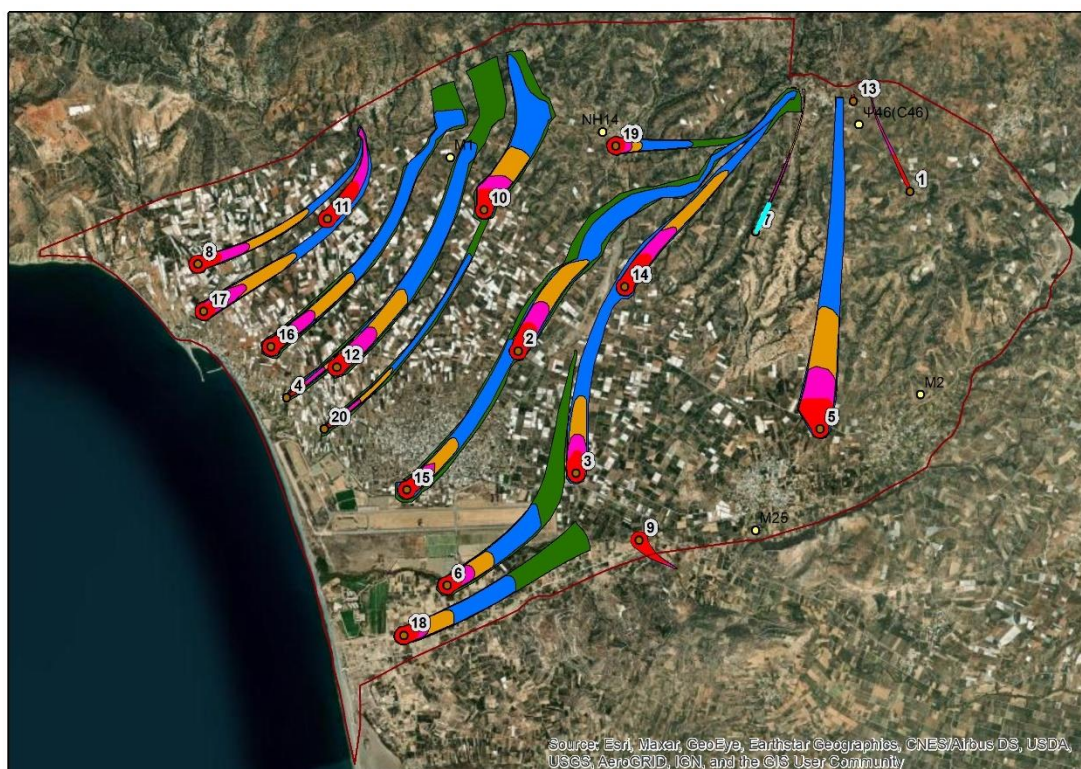
Προς γενίκευση αυτής της παρατήρησης, ζώνες προστασίας για  $\tilde{T} \geq 2 \text{ years}$  που βρίσκονται κοντά σε οριακές συνθήκες δεν διαφοροποιούνται περαιτέρω από τις ζώνες που ήδη έχουν σχεδιαστεί, και συγκεκριμένα απ' την αμέσως προηγούμενη, δηλαδή την ζώνη του 1 έτους.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, τόσο για το υδρολογικό έτος 2006-07 όσο και για το υδρολογικό έτος 2007-08, παρατηρείται το 'φαινόμενο' της ομαδοποίησης ζωνών προστασίας για συγκεκριμένες γεωτρήσεις (π.χ. [8, 11, 17], [3, 14], [2, 15, 19], [4, 12]. Αυτό συμβαίνει γιατί πολλές ζώνες εμπίπτουν πάνω σε άλλες ή και εμπεριέχονται, μιας και η κατεύθυνση ροής είναι κοινή για όλες και το υπόγειο νερό προέρχεται από συγκεκριμένες γραμμές ροής.

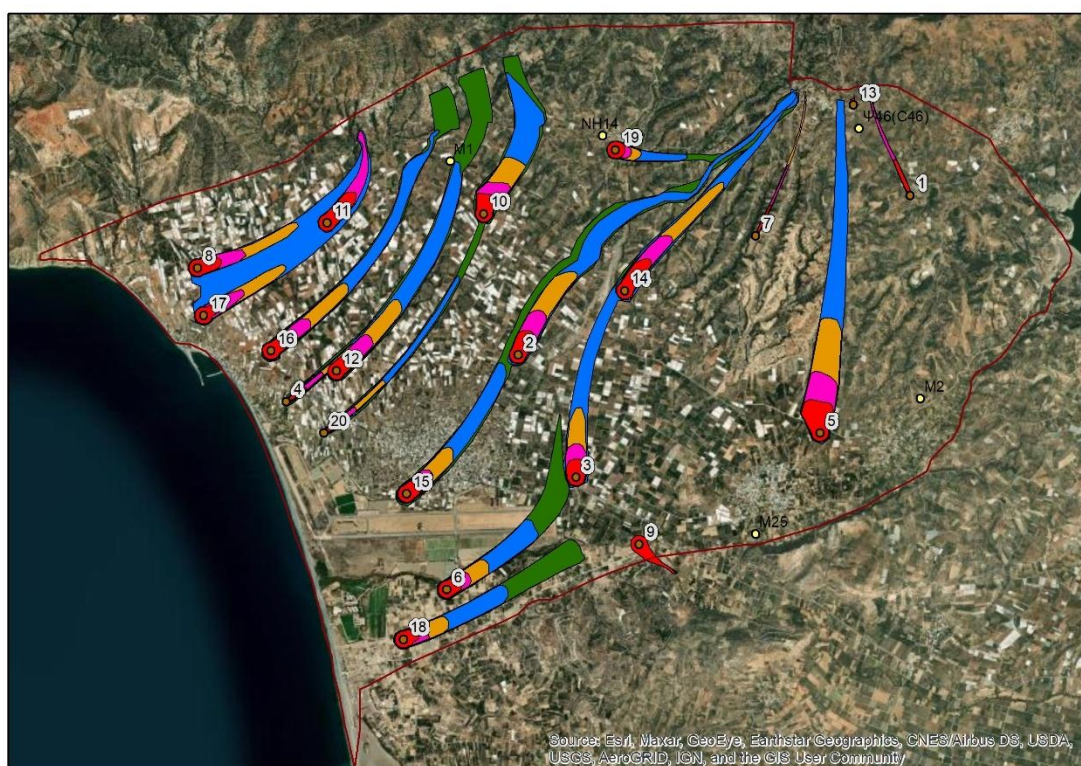


Εικόνα 5.12 Ζώνες προστασίας για το υδρολογικό έτος 2004-05



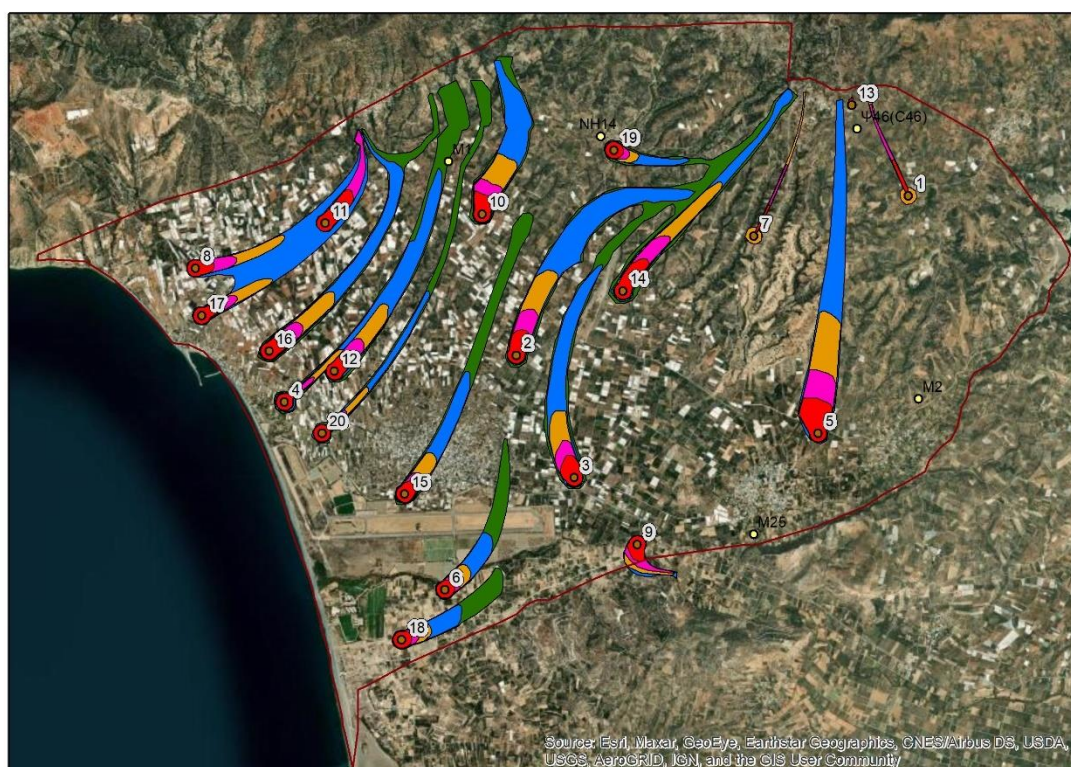


Εικόνα 5.13 Ζώνες προστασίας για το υδρολογικό έτος 2005-06



Εικόνα 5.14 Ζώνες προστασίας για το υδρολογικό έτος 2006-07





Εικόνα 5.15 Ζώνες προστασίας για το υδρολογικό έτος 2007-08

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 6.1 Συμπεράσματα

Είναι σημαντικό για τον εκάστοτε επιστήμονα που προσπαθεί να φέρει εις πέρας μια μοντελοποίηση ζωνών προστασίας γεωτρήσεων για μια περιοχή, να γνωρίζει ποια μεθοδολογία θα ακολουθήσει εν μέσω των χρονικών και οικονομικών περιορισμών που τίθενται από τους φορείς του έργου, αλλά και σε απόλυτη εναρμόνιση με την τρέχουσα εθνική και διεθνή σχετική νομοθεσία (αν, π.χ., έγκειται σε κάποιο πρόγραμμα).

Έτσι λοιπόν, σε ορισμένες περιπτώσεις —αν όχι στις περισσότερες— είναι προτιμότερο να υπάρχει μια χαμηλότερου επιπέδου μοντελοποίηση, ανάλυση ή έρευνα, παρά να μην υπάρχει καμία. Σαφώς, εννοώντας χαμηλού επιπέδου, νοείται να έχει προηγηθεί εκτίμηση των σφαλμάτων, ώστε να καταστεί γνωστό το πόσο απέχει η προσομοίωση της μοντελοποίησης για παράδειγμα, από την πραγματικότητα. Με άλλα λόγια, να υπάρχει λύση του μοντέλου αλλά η λύση αυτή να έχει νόημα και να αιτιολογείται.

Για την επίτευξη και κατ' επέκταση την ολοκλήρωσή της, χρειάζεται να λαμβάνονται υπόψη πιθανές εναλλακτικές προσεγγίσεις (π.χ. πιθανή χρήση άλλου μοντέλου με περισσότερες δυνατότητες) και πόσο αξιοποιήσιμες μπορεί να είναι, καθώς και οι πρακτικές απαιτήσεις για την έγκαιρη εφαρμογή του προγράμματος προστασίας πηγαδιών.

Έχει ήδη γίνει αναφορά στις διάφορες μεθόδους που είναι διαθέσιμες στο WhAEM (setback radius, residence time criteria, οριακές συνθήκες). Στην διπλωματική αυτή χρησιμοποιήθηκε ως κριτήριο ο χρόνος που απαιτείται ώστε να φτάσει ένας ρύπος στο πηγάδι απ' όπου αντλείται υπόγειο νερό και καθ' αυτόν τον τρόπο καθορίστηκαν οι ζώνες προστασίας των πηγαδιών άντλησης.

Κοινό χαρακτηριστικό και για τα τέσσερα υδρολογικά έτη είναι το γεγονός πως η παροχή των αντλήσεων για κάθε ένα πηγάδι παραμένει σταθερή για όλα τα έτη. Παρατηρείται μείωση του μήκους των ζωνών προστασίας των 10 ετών για τα πηγάδια 6 και 18 κατά το υδρολογικό έτος 2007-08 και ταυτόχρονα, στο ίδιο έτος, η βροχόπτωση είναι αυξημένη συγκριτικά με τις άλλες χρονιές. Έτσι η αύξηση της βροχόπτωσης επηρεάζει το σχήμα των ζωνών προστασίας (βλ. Πίνακα 6.1).

Πίνακας 6.1 Areal recharge

| Υδρολογικό έτος | Βροχόπτωση (m/d) |
|-----------------|------------------|
| 2004-05         | 0.000393         |
| 2005-06         | 0.000329         |
| 2006-07         | 0.000347         |
| 2007-08         | 0.000479         |

Τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα, δηλαδή το πάχος (H), η υδραυλική αγωγιμότητα (K), το πορώδες (n), συναρτήσει του χρόνου δεν αλλάζουν. Η παροχή (Q), και συνεπώς η ταχύτητα ροής (q) παραμένουν επίσης σταθερές. Για αυτόν τον λόγο, επειδή ουσιαστικά οι γραμμές ροής είναι κάθετες στις ισοπιεζομετρικές γραμμές

(contours), οι ζώνες προστασίας διαμορφώνονται με αυτόν τον τρόπο. Αν υπήρχαν διαφορετικές κατευθύνσεις ροής - τις οποίες ακολουθούν οι ρύποι (pathline traces) - ίσως η μορφή των ζωνών να ήταν διαφορετική, για παράδειγμα πιο πλατιές.

Συνεπώς, σημαντικότερο ρόλο παίζει το σημείο από το οποίο θα 'αλιευθεί' ένας ρύπος. Αν βρίσκεται πιο κοντά στην γεώτρηση θα χρειαστεί λιγότερο χρόνο ενώ αν βρίσκεται μακρύτερα, περισσότερο.

Άλλος παράγοντας που καθορίζει τις διαφορές των ζωνών προστασίας μεταξύ των υδρολογικών ετών, είναι η εναλλαγές στις τιμές των οριακών συνθηκών. Η ποσότητα νερού που εισέρχεται ή εξέρχεται από τον υδροφορέα οδηγεί σε διαφοροποίηση των contours, κάτι το οποίο παρατηρείται από το υδρολογικό έτος 2006-07 και μετά και δικαιολογεί την διαφοροποιημένη μορφή των ζωνών, κυρίως για το υδρολογικό έτος 2007-08.

Η παροχή είναι σταθερή. Οι γραμμές ροής έχουν κατεύθυνση από περιοχές χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας, ( $K=1$  m/d και  $K=5$  m/d) προς περιοχή υψηλής ( $K=50$  m/d). Συνεπώς η υδραυλική κλίση μειώνεται και βάσει του νόμου του Darcy, μειώνεται και η ταχύτητα ροής. Αυτό το συμπέρασμα είναι ενθαρρυντικό για την μελέτη πρόληψης των πηγαδιών άντλησης, μιας και δίνεται το χρονικό περιθώριο αντίδρασης στην πιθανή ρύπανσή τους από κάποιον ρύπο. Αυτό αποτελεί και έναν ακόμη λόγο που τα πηγάδια άντλησης 1, 7, 13 δεν έχουν σκιαγραφημένες όλες τις ζώνες, παρά μόνο αυτές που αφορούν τα μικρότερα χρονικά όρια (6 μηνών, 1 έτους).

## 6.2 Προτάσεις

Το WhAEM είναι ένα αναλυτικό μοντέλο βελτιστοποίησης του υπόγειου υδροφορέα βασιζόμενο στον χρόνο διάνυσης ενός ρύπου που πιθανόν ρέει εντός του. Το πλεονέκτημά του, είναι η απλότητά του. Ταυτόχρονα όμως, κάποιες λειτουργίες, όπως ο σχεδιασμός των ζωνών προστασίας των γεωτρήσεων και ο σχεδιασμός των περιοχών ανομοιογένειας, χρειάζεται να αναβαθμιστούν καθότι βασίζονται μονάχα στην ικανότητα του χρήστη για το πόσο επαρκώς και λεπτομερώς θα αποτυπωθούν. Για παράδειγμα, να μπορεί ο χρήστης να κάνει zoom-in και zoom-out κατά τη διάρκεια που βρίσκεται σε λειτουργία το εργαλείο draw wellhead protection areas.

Μια ακόμα σημαντική προσθήκη θα ήταν η ανάλυση ευαισθησίας που λόγω όμως ανεπαρκών δεδομένων δεν παρουσιάζεται. Η ανάλυση ευαισθησίας αποτελεί μια παραδοσιακή προσέγγιση της αβεβαιότητας στα μοντέλα βελτιστοποίησης. Εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό της επίδρασης μικρών αλλαγών στα δεδομένα του μοντέλου. Η αβεβαιότητα στην διαχείριση των υδάτων προκύπτει από μη επαρκή γνώση του συστήματος του υδροφορέα, από την μεταβλητότητα των ίδιων των παραμέτρων του συστήματος ροής αλλά και από οικονομικούς παράγοντες. [Das & Datta, 2001]

Η κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο υπόγειος υδροφορέας της ευρύτερης περιοχής του Τυμπακίου, αλλά και γενικότερα η κατάσταση των υπόγειων υδροφορέων της Κρήτης είναι υποβαθμισμένη εδώ και δεκαετίες, λόγω της εκτεταμένης άντλησης για αρδευτικούς σκοπούς κατά κύριο λόγο, και δευτερευόντως για κάλυψη δημόσιας υδροδότησης.

Τρόποι αντιμετώπισης και προτάσεις εξυγίανσης των υδροφορέων υπάρχουν και παρουσιάζονται παρακάτω.

- Μείωση του αρδευτικού υπόγειου νερού
- Έλεγχος λιπασμάτων
- Ανακύκλωση λυμάτων
- Διεύρυνση του δικτύου των επιφανειακών υδάτων
- Υπεράντληση από γειτονικό πηγάδι με στόχο την πτώση της υδραυλικής κλίσης που θα έχει σαν αποτέλεσμα ο ρύπος, λόγω υψομετρικής διαφοράς δη, να μην φτάσει στη γεώτρηση, ή να φτάσει πολύ αργότερα (λόγω διάχυσης, αν δεν υπάρχει πιθανότητα συμμεταφοράς)
- Ένταξη εναλλακτικών πηγών υδατικών πόρων, πχ συνδυασμένη χρήση υπόγειων , επιφανειακών και επεξεργασμένων/εξυγιασμένων υδάτων

Οι κύριες δράσεις της υδατικής πολιτικής περιλαμβάνουν προγράμματα παρακολούθησης των υδάτων, άδειες χρήσης νερού και υδραυλικών έργων, κατασκευή ταμιευτήρων και εποχιακά περιοριστικά μέτρα. Η τακτική ποσοτική και ποιοτική δειγματοληψία εφαρμόζεται από το Εθνικό Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών και από τους οργανισμούς εγγείων βελτιώσεων, με σκοπό την παρακολούθηση της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα και την πρόληψη της ρύπανσης από νιτρικά, σύμφωνα με το εγκεκριμένο σχέδιο διαχείρισης υδάτων για την Κρήτη (ADAPT2CLIMA, 2017· Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017).

Η κλιματική αλλαγή που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια επηρεάζει και τους υπόγειους υδροφορείς. Είναι επιτακτικό λοιπόν να αναλυθούν κάποια κλιματικά σενάρια. Πρώτον, αν μελλοντικά μειωθούν τα ποσοστά βροχοπτώσεων (περαιτέρω), ξεδιπλώνεται μια σειρά δυσμενών συνεπειών όπως :

- Μείωση του εμπλουτισμού του υδροφορέα. Μικρότερη ποσότητα βρόχινου νερού κατεισδύει στο έδαφος άρα είναι λιγότερη η φυσική ανανέωση του υδροφορέα
- Απειλούνται τα οικοσυστήματα αλλά και οι καλλιέργειες
- Αν η παροχή άντλησης παραμένει στο ίδιο επίπεδο, και μειώνεται η φυσική αναπλήρωση, τότε θα υπάρξει πτώση της στάθμης του υδροφορέα, γεγονός που μπορεί να επιφέρει και οικονομικές δυσχέρειες λόγω της ανάγκης ανόρυξης βαθύτερων γεωτρήσεων αλλά και της παύσης λειτουργίας άλλων.
- Κίνδυνος υφαλμύρισης όταν η στάθμη του υδροφορέα πέσει κάτω από αυτή της θάλασσας με φόβο την μόνιμη υποβάθμιση της ποιότητας του νερού (λόγω αλατότητας).

Δεύτερον, αν αυξηθεί η θερμοκρασία (επιπρόσθετα) τότε:

- Αυξάνονται οι ανθρώπινες ανάγκες. Περισσότερη κατανάλωση νερού για πόση αλλά και αρδευτικού νερού, με αποτέλεσμα να αυξηθεί και η άντληση από τις γεωτρήσεις.
- Υψηλότερα ποσοστά εξάτμισης από επιφανειακά ύδατα και το έδαφος που οδηγεί στην μείωση του φυσικού εμπλουτισμού.
- Κίνδυνος να στερέψουν φυσικές πηγές.

Συνδυαστικά, τα δύο παραπάνω σενάρια καθιστούν φοβερά δύσκολη την διαβίωση τόσο των ανθρώπων όσο και των υπόλοιπων ζωντανών οργανισμών. Το μοντέλο WhAEM έχει την δυνατότητα να συμβάλλει ως ένα βαθμό στην αξιολόγηση τέτοιων σεναρίων, κάνοντας τις απαραίτητες προσομοιώσεις, προκειμένου να προσδιοριστεί ο αντίκτυπός τους αναφορικά με τις ζώνες προστασίας. Προφανώς και δεν αλλάζει η κατάσταση εν μία νυκτί σε παγκόσμια κλίμακα (από όποια σκοπιά και αν το κοιτάξει κανείς), δυστυχώς όμως είναι πολλές οι περιοχές και οι πληθυσμοί που ήδη δεινοπαθούν. Είναι αναγκαιότητα να περιοριστούν οι ενέργειες που ευθύνονται για την παρακμή των οικοσυστημάτων, ώστε σε βάθος χρόνου να υπάρξει μια καλύτερευση, διότι οι πράξεις των λίγων και ισχυρών που συμβάλλουν (στο μεγαλύτερο ποσοστό) σε αυτήν την οικολογική καταστροφή δεν ορίζουν ή δεν θα έπρεπε να ορίζουν την πορεία της ανθρωπότητας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### A) Βιβλία

Dupuit, J. É. J. (1863). *Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables: avec des considérations relatives au régime des grandes eaux, au débouché à leur donner, et à la marche des alluvions dans les rivières à fond mobile*. Dunod, éditeur.

Fitts, C. R. (1985). *Modeling Aquifer Inhomogeneties with Analytic Elements* (Doctoral dissertation, University of Minnesota)

Haitjema, H. M. (1995). *Analytic element modeling of groundwater flow*. Elsevier.

Kelson, V. A. (2000). *Practical advances in groundwater modeling with analytic elements*. Indiana University

McDonald, M. G., & Harbaugh, A. W. (1988). *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*. US Geological Survey

Roache, P. J. (1998). *Verification and validation in computational science and engineering* (Vol. 895, p. 895). Albuquerque, NM: Hermosa

Strack, O. D. (1989). *Groundwater Mechanics*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. out of press

Strack, O. D. (2017). *Analytical groundwater mechanics*. Cambridge University Press

Καρατζάς Γ., (2025). *Ροή Υπόγειων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

### B) Άρθρα σε περιοδικά/ Αναφορές/ Διπλωματικές/ Διατριβές

ADAPT2CLIMA, L. I. F. E. (2017). *Deliverable C3: Future Projections on Climatic Indices with Particular Relevance to Agriculture for the Three Islands (Coarse Resolution) and for Each Agricultural Pilot Area (Fine Resolution) Project ADAPT2CLIMA LIFE14 CCA/GR/000928*. 2017

Staboultzidis, A., Dokou, Z., & Karatzas, G. P. (2016). *Delineation of wellhead protection areas in Crete, Greece using an analytic element model*. Procedia Engineering, 162, 324-331

Bakker, M., & Strack, O. D. L., (1996). *Capture zone delineation in two-dimensional groundwater flow models*. Water Resources Research, 32(5), 1309–1315  
<https://doi.org/10.1029/96WR00198>

Banwart, S. A., Menon, M., & the SoilTrEC Team., (2011). *Soil processes and functions across an international network of critical zone observatories: Research hypotheses and experimental design*. Vadose Zone Journal, 10(4), 974–987.  
<https://doi.org/10.2136/vzj2010.0136>



Ceric, A. (2000). *Assessment of the applicability of simplified capture zone delineation techniques for groundwater public water supply systems*. Master's thesis, School of Public and Environmental Affairs, Indiana University-Bloomington.

Das, S., & Datta, B. (2001). *Design of groundwater quality monitoring network using a probabilistic optimization approach*. **Journal of Hydrology**, **246(1–4)**, 25–43.

Detorakis, M. (2012). *Συνδυασμός του μοντέλου προσομοίωσης ροής υπόγειων υδάτων Visual Modflow με το μοντέλο βελτιστοποίησης GWM για τη βέλτιστη διαχείριση του παράκτιου υδροφορέα Τυμπακίου* (Master's thesis, Technical University of Crete (Greece)).

Dokou, Z., Detoraki, M., Karatzas, G.P., Varouchakis, E.A., Pappa, A., (2016). *Utilizing Successive Linearization Optimization to Control the Saltwater Intrusion Phenomenon in Unconfined Coastal Aquifers in Crete, Greece*. Environmental Modeling & Assessment, 1-14. DOI:10.1007/s10666-016-9529-z

Gibb, J. P., Barcelona, M. J., Schock, S. C., & Hampton, M. W. (1984). *Hazardous Wastes in Ogle and Winnebago Counties: Potential Risk Via Groundwater Due to Past and Present Activities*. ISWS Contract Report CR 336.

Haitjema, H. M. (2002). *Time of travel capture zone delineation for wellhead protection*. Environmental Science Research Center, Indiana University, Bloomington. Prepared for Drinking Water Branch, Indiana Department of Environmental Management, Indianapolis, Indiana.

Haitjema, H. M., Hunt, R. J., Jankovic, I., & de Lange, W. J., (2006). *Foreword: Ground Water Flow Modeling with the Analytic Element Method*. Ground Water, 44(1), 1–2 <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00144.x>

Haitjema, H. M., Kuzin, S., Kelson, V., & Abrams, D., (2011). *Modeling flow into horizontal wells in a Dupuit–Forchheimer model*. Ground Water, 49(6), 823–830 <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2010.00694.x>

Hatzidimitriou, P. M., Papadimitriou, E. E., Mountrakis, D. M., & Papazachos, B. C. (1985). *The seismic parameter b of the frequency-magnitude relation and its association with the geological zones in the area of Greece*. *Tectonophysics*, 120(1-2), 141-151.

Hickel, J. (2021). *The anti-colonial politics of degrowth*. Political Geography, 88.

Irawan, P., & Setiawan, J. (2025). Forecasting the long-term impacts of land use and cover changes on runoff coefficient and flood hydrograph: a case study of the Upper Citanduy Basin, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 12(3), 7417-7429.

Jordanova, N., (2017). *Mineral Magnetic Properties of Urban Forest Soils Tailored to Soil Quality Assessment*

- Kraemer, S. R., Haitjema, H. M., (2018). *Working with WhAEM. Demonstration of Capture Zone Delineation for a City Wellfield in a Valley Fill Glacial Outwash Aquifer for Wellhead Protection*. U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development Los Angeles, CA 90017
- Kraemer, S. R., Haitjema, H. M., & Strack, O. D. L., (1994). *Capture Zone Analytic Element Model (CZAEM) for Modeling Ground-Water Flow*
- Kreyszig, E. (2011). *Advanced engineering mathematics-pdf*
- Merkle, J. C., Macler, B., Kurth, L., Bekdash, F., Solomon, L., & Wooten, H. (1996). *Ground water disinfection and protective practices in the united states*. US Environmental Protection Agency Office of Ground Water and Drinking Water and Science Applications International Corporation Report
- Nimmo, J. R. (2004). *Porosity and pore size distribution*. Encyclopedia of Soils in the Environment, 3(1), 295-303
- Rodell, M., Barnoud, A., Robertson, F. R., Allan, R. P., Bellas-Manley, A., Bosilovich, M. G., ... & Seneviratne, S. I. (2024). *An abrupt decline in global terrestrial water storage and its relationship with sea level change*. Surveys in Geophysics, 45(6), 1875-1902
- Paritsis, S. N. (2005). *Simulation of seawater intrusion into the Tymbaki aquifer, South Central Crete, Greece*. Report within MEDIS project, Study implemented on behalf of the Department of Management of Water Resources of the Region of Crete, Heraklion, Crete, Greece
- Perleros, B. (2004). *The main coastal karstic aquifers of southern Europe*. In COST Action (Vol. 621, pp. 77-79).
- Stephen R. Kraemer, H. M. Haitjema, (2018). *Working with WhAEM, Demonstration of Capture Zone Delineation for a City Wellfield in a Valley Fill Glacial Outwash Aquifer for Wellhead Protection*
- Strack, O. D. L., & Haitjema, H. M., (1981) (a). *Modeling double aquifer flow using a comprehensive potential and distributed singularities: 1. Solution for homogeneous permeability*. Water Resources Research, 17(5), 1535–1549  
<https://doi.org/10.1029/WR017i005p01535>
- Strack, O. D. L., & Haitjema, H. M., (1981) (b). *Modeling double aquifer flow using a comprehensive potential and distributed singularities: 2. Solution for inhomogeneous permeabilities*. Water Resources Research, 17(5), 1551–1560  
<https://doi.org/10.1029/WR017i005p01551>
- USEPA (1993). *Guidelines for delineation of wellhead protection areas*. Technical Report EPA/440/5-93-001, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water Office of Ground Water Protection, Washington, DC.



USEPA (1994). *Handbook: ground water and wellhead protection*. Technical Report EPA/625/R-94-001, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Cincinnati, OH.

Vallero, D. A. (2022). *Hazardous wastes and the environment*. In *Hazardous Waste Management* (pp. 3-32). Elsevier.

Varouchakis, E. A. (2016). *Integrated water resources analysis at basin scale: a case study in Greece*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 142(3), 05015012

Vozinaki, A. E., Tapoglou, E., & Tsanis, I. K. (2018). *Hydrometeorological impact of climate change in two Mediterranean basins*. International Journal of River Basin Management, 16(2), 245-257

Zacharioudakis, G., Paramastorakis, D., (2004). *Conceptual Model and Model Idealisation Report of Tibaki Basin in south Crete*

Zacharioudakis, G., Paramastorakis, D., (2004). *Tibaki Basin Steady State Groundwater Flow and Model Calibration Report*

Λατινόπουλος Π., (1993). "Συνδυασμένη χρήση μεθόδων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης για το σχεδιασμό έργων αναβάθμισης της ποιότητας των υπόγειων νερών", Τελική Έκθεση Ερευνητικού Προγράμματος, ΠΕΝΕΔ 89, ΥΒΕΤ, 1993

Κριτσωτάκης, Μ., & Παυλίδου, Σ. (2013). *Κατάσταση υπόγειων υδροφορέων Κρήτης*. Διεύθυνση Υδάτων Κρήτης & ΙΓΜΕΜ

Γ) Ιστοσελίδες

el.wiktionary.org

epa.gov

gaiadrill.gr

gaia.igme.gr

<https://earthobservatory.nasa.gov/>

<https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/>

<https://www.apdkritis.gov.gr/el>

<https://www.fao.org>

<https://www.gov.uk/guidance/groundwater-source-protection-zones-spzs>

[http://www.nomoskopio.gr/a\\_5656\\_15.php?toc=0&printWindow&](http://www.nomoskopio.gr/a_5656_15.php?toc=0&printWindow&)

<https://www.oxfam.org.uk/media/press-releases/richest-1-emit-as-much-planet-heating-pollution-as-two-thirds-of-humanity-oxfam/>

<https://www.tni.org/en/publication/climate-collateral-COP28>

<http://www.ypeka.gr/el-gr/>

<https://ypen.gov.gr/perivallon/ydatikoi-poroi/odigia-plaisio-gia-ta-nera/>

[open.gov.gr](https://open.gov.gr)

[Wikipedia.org](https://Wikipedia.org)

[www.emy.gr](http://www.emy.gr)

[www.theguardian.com](http://www.theguardian.com)

[ypen.gov.gr](https://ypen.gov.gr)