



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΤΩΠΟΥ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ –
FEFLOW

ΔΕΤΤΟΡΑΚΗ ΜΑΡΙΑ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (Επιβλέπων)
ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ
ΠΑΡΑΝΥΧΙΑΝΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Χανιά
Σεπτέμβριος 2010

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εργασία αυτή έχει σαν αντικείμενο μελέτης την περιοχή της Χερσονήσου στο Ηράκλειο Κρήτης και το έντονο πρόβλημα της υφαλμύρισης που αντιμετωπίζει. Πρόκειται για το φαινόμενο κατά το οποίο η θάλασσα έχει διεισδύσει στο εσωτερικό τμήμα της περιοχής, δημιουργώντας προβλήματα με την ποιότητα του νερού που χρησιμοποιείται για κάθε είδους ανάγκη.

Σκοπός της εργασίας είναι να μελετηθεί το μέγεθος, η έκταση και ο ρυθμός εξάπλωσης του φαινομένου και για το λόγο αυτό έγινε χρήση του μοντέλου FEFLOW, το οποίο είναι ένα μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής με χρήσεις GIS. Τα αποτελέσματα που συγκεντρώθηκαν θα βοηθήσουν στην εκτίμηση της υπάρχουσας κατάστασης καθώς επίσης και στην κατάσταση που θα επικρατήσει μετά από ένα μεγάλο χρονικό διάστημα (40 χρόνια) αν δεν γίνει κανενός είδους παρέμβασης. Μέσω σεναρίων που δημιουργήθηκαν, έγινε προσπάθεια για την εύρεση λύσεων στην αντιμετώπιση του προβλήματος και την επαναφορά του οικοσυστήματος στη βέλτιστη δυνατή κατάσταση, εφόσον αυτό είναι δυνατό.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η πραγματοποίηση της εργασίας αυτής, δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την πολύτιμη βοήθεια του επιβλέποντος καθηγητή μου κ. Γεώργιου Καρατζά. Σημαντική ωστόσο ήταν και η συνεισφορά της κ. Ζωής Δόκου για τη βοήθεια και τη συνεχή προσπάθεια της. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής Καθηγητή Νικόλαο Νικολαΐδη και Λέκτορα Νικόλαο Παρανυχιανάκη.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1- ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ.....	7
1.1 Το νερό.....	7
1.2 Ρύπανση των υδάτινων πόρων.....	8
1.3 Βασικές έννοιες υπόγειας υδρολογίας.....	10
Υδροφορέας.....	10
Πορώδες.....	10
Υδραυλική Αγωγιμότητα.....	11
Συντελεστής Μεταβιβασιμότητας.....	13
Ομοιογένεια και Ισοτροπία.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ.....	14
2.1 Ορισμός υφαλμύρισης.....	14
1. Θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (Sharp-Interface Conceptualization).....	17
2. Θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους (Two-fluid flow),.....	20
3. Θεώρηση μεταβλητής πυκνότητας (Variable-Density Conceptualization), 20	
2.3 Η υφαλμύριση στην Ελλάδα.....	21
2.4 Η υφαλμύριση στην Κρήτη.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	24
3.1 Γενικά χαρακτηριστικά περιοχής.....	24
3.2 Μετεωρολογικά στοιχεία.....	25
3.3 Χλωρίδα – Πανίδα.....	28
3.4 Έδαφος.....	28
Γεωλογία – Υδρογεωλογία.....	29
Υδατοπερατοί Σχηματισμοί.....	30
Υδατοστεγείς Σχηματισμοί.....	31
Διαμόρφωση υδροφορέων και υδρογεωλογικών ενοτήτων.....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΧΡΗΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ.....	33
1. Η θεώρηση υδροφορέα (Aquifer viewpoint).....	34
2. Η θεώρηση συστήματος ροής (Flow system viewpoint).....	35
Αριθμητικές Μέθοδοι.....	37
Το Θεμελιώδες μοντέλο και η κατασκευή του πλέγματος.....	39
Δισδιάστατα επιφανειακά μοντέλα.....	39

Ημι-τρισδιάστατα μοντέλα	41
Δισδιάστατα profile και τρισδιάστατα μοντέλα.....	41
Οριακές συνθήκες	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ FEFLOW	43
5.1 Οι θεμελιώδεις εξισώσεις.....	43
5.2 Οριακές συνθήκες:	46
Συνθήκη 1 ^{ης} τάξης (τύπος Dirichlet)	46
Συνθήκη 2 ^{ης} τάξης (τύπος Neumann)	46
Συνθήκη 3 ^{ης} τάξης	47
Συνθήκη 4 ^{ης} τάξης	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	48
6.1 Προετοιμασία του μοντέλου	48
6.2 Αποτελέσματα.....	58
Σύγκριση με τη μέθοδο Ghyben-Herzberg.....	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΣΕΝΑΡΙΑ.....	64
7.1 Σενάριο 1 ^ο – Διπλασιασμός των παροχών άντλησης.....	64
7.2 Σενάριο 2 ^ο – Υποδιπλασιασμός των παροχών άντλησης	68
7.3 Σενάριο 3 ^ο – Μηδενισμός των παροχών άντλησης	72
7.4 Σενάριο 4 ^ο – Μελλοντική κατάσταση στα επόμενα 40 χρόνια	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	80
8.1 Συμπεράσματα.....	80
8.2 Προτάσεις.....	81
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	83

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει ένα σχετικά σύγχρονο πρόβλημα, το πρόβλημα της υφαλμύρισης. Η αναφορά ως σύγχρονο πρόβλημα γίνεται λόγω της σύγχρονης δράσης του ανθρώπου και της παρέμβασης αυτού, μέσω της υπερεκμετάλλευσης των φυσικών πόρων. Η υφαλμύριση, δηλαδή η διείσδυση αλμυρών υδάτων στο εσωτερικό μιας περιοχής, παρατηρείται σε όλους σχεδόν τους παράκτιους υδροφορείς, λόγω της συνεχής επικοινωνίας με το θαλασσινό νερό και της διατάραξης της ισορροπίας του συστήματος γλυκού/αλμυρού νερού κάτω από συνθήκες άντλησης μεγάλων ποσοτήτων υπόγειου νερού. Συγκεκριμένα η εργασία εστιάζει στην περιοχή του Δήμου Χερσονήσου, στο Νομό Ηρακλείου όπου το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο. Η κύρια πηγή εσόδων είναι ο τουρισμός, οπότε στην περιοχή αυτή οι ανάγκες του νερού, κυρίως την καλοκαιρινή περίοδο, αυξάνονται ραγδαία. Σε συνδυασμό και με την γεωργία, που αποτελεί την δεύτερη ενασχόληση των κατοίκων, παρατηρείται υποχώρηση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και διείσδυση της θάλασσας στο εσωτερικό της περιοχής.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι ο προσδιορισμός του μετώπου της υφαλμύρισης στην παρούσα κατάσταση καθώς επίσης και η μελλοντική εκτίμηση αυτού με τη μέθοδο σεναρίων. Για να μελετηθεί το μέγεθος, η έκταση και ο ρυθμός εξάπλωσης του φαινομένου της υφαλμύρισης στην περιοχή της Χερσονήσου, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο FEFLOW, το οποίο είναι ένα μαθηματικό μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας για την προσομοίωση της υπόγειας ροής με χρήσεις GIS.

Στο 1^ο Κεφάλαιο έγινε μια σύντομη αναφορά για το περιβάλλον και την επιβάρυνση που δέχεται καθώς επίσης και μια πρώτη εισαγωγή στην υπόγεια ροή (είδη των υδροφορέων, κίνηση του υπογείου νερού μέσα από θεμελιώδες εξισώσεις). Έπειτα στο 2^ο Κεφάλαιο εξετάστηκε το φαινόμενο της υφαλμύρισης με τις εξισώσεις που διέπουν την κίνηση αυτής και έγινε αναφορά για την υφαλμύριση στον ελλαδικό χώρο γενικά, αλλά και σε τοπικό επίπεδο. Στη συνέχεια, στο 3^ο Κεφάλαιο έγινε μια σύντομη περιγραφή στην περιοχή μελέτης καθώς επίσης και των μορφολογικών, γεωλογικών, και κλιματολογικών στοιχείων αυτής. Στο 4^ο Κεφάλαιο έγινε περιγραφή των μαθηματικών μοντέλων που προσομοιώνουν την κίνηση του υπόγειου νερού, από τα οποία επιλέχθηκε το FEFLOW. Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει την κίνηση του νερού στον υπόγειο υδροφορέα ενώ έχει τη δυνατότητα να περιγράψει και τη μεταφορά ρύπων μεταβλητής πυκνότητας. Η ανάλυση των εξισώσεων που χρησιμοποιεί και επιλύει έγινε στο 5^ο Κεφάλαιο. Τέλος στο 6^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα στοιχεία και ο τρόπος εισαγωγής αυτών στο μοντέλο (χάρτες, αρχικές συνθήκες, οριακές συνθήκες, βροχόπτωση) αλλά και η βαθμονόμηση αυτού. Γίνεται παρουσίαση της υφιστάμενης κατάστασης η οποία κρίνεται δυσμενής και είναι απαραίτητο να παρθούν μέτρα για την αντιμετώπιση του φαινομένου. Για το λόγο αυτό στο 7^ο Κεφάλαιο εξετάστηκαν 4 σενάρια: ο διπλασιασμός, υποδιπλασιασμός και μηδενισμός των παροχών στα πηγάδια άντλησης όλης της περιοχής που μελετάμε καθώς επίσης και η πρόβλεψη της κατάστασης σε 40 χρόνια με βάση τα δεδομένα άντλησης του παρόντος.

SUMMARY

This thesis examines a modern problem, the problem of seawater intrusion. The reference to a modern problem is due to human action nowadays, through over-exploitation of natural resources. The saltwater intrusion within a region, occurs in virtually all coastal aquifers due to the constant contact with the seawater and the imbalance of the system of freshwater / saltwater, under conditions of pumping large quantities of ground water. Specifically, this study focuses on the Municipality of Hersonissos in Heraklion, where the phenomenon is particularly intense. The main source of income is tourism, so the region needs great amounts of water, especially during the summer, when the water demand, increases rapidly. In conjunction with agriculture, which is the second occupation of the inhabitants, the level of the aquifer decreases and the seawater intrusion phenomenon occurs.

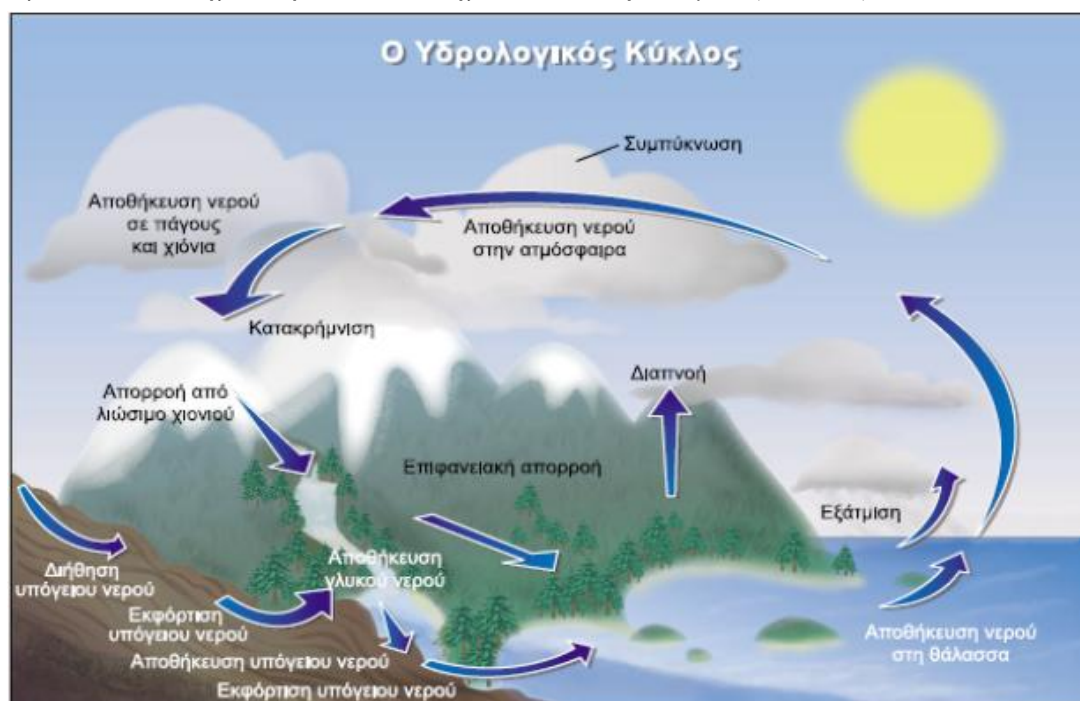
The purpose of this study is to investigate the extent of seawater intrusion currently as well as to predict its future extension. In order to study the size, extent and rate of the expand of the phenomenon of seawater intrusion, the model FEFLOW is used. FEFLOW is a mathematical model of variable density conceptualization for the simulation of subsurface flow. In Chapter 1 there current environmental problems are discussed and a first introduction to groundwater flow (types of aquifers, the underground movement of water through the fundamental equations) is made. Further more, in Chapter 2, the phenomenon of seawater intrusion and the equations that prescribe it are presented. In Chapter 3, the study area and its morphological, geological and climatic characteristics are described. In Chapter 4, there was a description of the mathematical models that simulate the movement of ground water, of which FEFLOW was chosen. This model simulates the movement of groundwater, and is also able to describe the transport of mass-pollutants. The flow and transport equations that the model employs are mentioned in Chapter 5. In Chapter 6, the model input data (maps, initial conditions, boundary conditions, precipitation etc) and the model calibration procedure and results are described. Finally, in Chapter 7 the impact of altered pumping activity in the area was investigated through the use of 4 scenarios: 1) doubling the pumping rates of all wells in the area, 2) reducing the pumping rates in half, 3) closing all the pumping well activity, 4) predicting the future extent of the seawater intrusion front after 40 years without changing the current pumping rates.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1- ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

1.1 Το νερό

Το νερό αποτελεί το βασικότερο αγαθό για την ύπαρξη ζωής πάνω στη γη, σαν φυσική πρώτη ύλη υπάρχει στη διατροφή όλων των οργανισμών αλλά συμμετέχει και σε κάθε σχεδόν παραγωγική διαδικασία.

Το νερό ακολουθεί έναν ορισμένο κύκλο στη φύση, εισρέει με τα κατακρημνίσματα στο έδαφος και από εκεί ένα μέρος εξατμίζεται, ένα τμήμα χρησιμοποιείται από τα φυτά και ένα τμήμα συγκρατείται ως υγρασία στο έδαφος. Μέρος από το νερό των κατακρημνισμάτων ρέει επιφανειακά χωρίς να εισχωρήσει στο έδαφος με κατεύθυνση προς τη θάλασσα. Τα νερά που διηθούνται στο έδαφος είτε εμπλουτίζουν τα υπόγεια στρώματα είτε ξαναβγαίνουν στην επιφάνεια με τη μορφή πηγών και τροφοδοτούν με νερό τα ρέματα. Στο Σχήμα 1 φαίνεται σχηματικά ο υδρολογικός κύκλος:



Σχήμα 0. Ο κύκλος του νερού [Κ. Βουδούρης 20/3/2009]

Και συνοψίζονται με το ισοζύγιο μάζας:

$$P - E - R - I = S$$

P: ο ρυθμός κατακρήμνισης

E: ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής

R: ο ρυθμός επιφανειακής ροής

I: ο ρυθμός της διήθησης

S: ο ρυθμός αποθήκευσης

Το γενικότερο υδατικό ισοζύγιο του πλανήτη, που δείχνει την κατανομή του νερού στη γη είναι: [1]

- Νερό θαλασσών 97.2%
- Νερό πάγων 2%

- Υπόγειο νερό 0.65%
- Επιφανειακό νερό 0.01%
- Νερό ατμόσφαιρας 0.001%

Το νερό είτε αντιμετωπίζεται ως «φυσικός πόρος», είτε ως «οικονομικό αγαθό», είτε ως «κοινωνικό αγαθό», είτε ως «περιβαλλοντικό στοιχείο» είναι βασικό και αναντικατάστατο στοιχείο, απαραίτητο όχι μόνο για την ανάπτυξη, αλλά και για την επιβίωση της ανθρωπότητας. Όμως είναι το πλέον «ευαίσθητο» και το πρώτο «θιγόμενο» περιβαλλοντικό συστατικό από τα δύο φαινόμενα της σύγχρονης κοινωνίας: την υπερκατανάλωση και τη ρύπανση.

Κατά τη διάρκεια της χρήσης του νερού γίνεται παρέμβαση σε δυο κύρια χαρακτηριστικά του, την ποιότητα και την ποσότητα, γεγονός που οδηγεί σε πολυάριθμα περιβαλλοντικά προβλήματα. Οι τρεις μεγάλες κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται τα προβλήματα αυτά είναι οι παρακάτω:

- Προβλήματα λόγω άνισης κατανομής στο χώρο και στο χρόνο της φυσικής προσφοράς και ζήτησης του νερού
- Προβλήματα από την ταχύτατη ανάπτυξη, σε συνδυασμό με την έλλειψη συντονισμού και ενιαίας πολιτικής
- Προβλήματα λόγω έλλειψης παιδείας αλλά και ευαισθησίας σχετικά με τη διαχείριση, τη χρήση και την προστασία αυτού του αγαθού [6]

1.2 Ρύπανση των υδάτινων πόρων

Η αστική και βιομηχανική ανάπτυξη των τελευταίων δεκαετιών, σε συνδυασμό με την αύξηση του καταναλωτισμού, υπήρξε η κύρια αιτία δημιουργίας των σύγχρονων περιβαλλοντικών προβλημάτων. Η μεγάλη αύξηση του πληθυσμού, η έντονη αστικοποίηση, η μηχανοποίηση της γεωργίας, η συνεχής εκμετάλλευση των φυσικών πόρων και η παραγωγή όλο και περισσότερων αγαθών αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα, τα οποία συμβάλλουν στην αύξηση των παραγόμενων αποβλήτων αλλά και στην υπερκατανάλωση των φυσικών πόρων (π.χ. υδάτινοι αποδέκτες). Γενικά μπορούμε να αναφέρουμε ότι κοινό παράγοντα σε όλα τα παραπάνω αποτελεί η μη ορθολογική διαχείριση των υδάτων, με αποτέλεσμα την ποσοτική μείωση αλλά και την ποιοτική υποβάθμιση των υδάτων λόγω υφαλμύρισης, ευτροφισμού, νιτρορύπανσης κλπ.

Οι πηγές ρύπανσης των υπόγειων υδάτων είναι αρκετές και γι' αυτό το πρόβλημα που έχουμε να αντιμετωπίσουμε παίρνει όλο και μεγαλύτερες διαστάσεις. Συνοψίζοντας έχουμε τις παρακάτω περιπτώσεις:

- Πηγές που έχουν σχεδιαστεί για την αποθήκευση, επεξεργασία και απόρριψη ουσιών: Χ.Υ.Τ.Α, χωματερές, απόβλητα ορυχείων, υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης πετρελαίου, νεκροταφεία, χώροι ανοικτής καύσης, υπόγειες δεξαμενές και φρέατα αποχέτευσης
- Πηγές που γίνονται δίοδοι ρυπασμένου ύδατος προς τους υδροφορείς: φρέατα παραγωγής, φρέατα μετρήσεων και παρατηρήσεων, εκσκαφές δομικών έργων

- Πηγές που δημιουργούνται από το αποτέλεσμα άλλων δραστηριοτήτων: χρήση λιπασμάτων και μυκητοκτόνων, απόβλητα από περιοχές εκτροφής ζώων, χρήση αλατιού για αποπαγοποίηση, διείδυση από ατμοσφαιρικούς ρυπαντές
- Φυσικές πηγές από αποτέλεσμα ανθρώπινων δραστηριοτήτων: φυσικές διαρροές αλληλοεπιδράσεις υπόγειων και επιφανειακών υδάτων, εισροή θαλασσινού νερού σε υδροφορείς με γλυκό νερό [1]

Στο Σχήμα 2 που ακολουθεί συνοψίζονται τα κύρια προβλήματα περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος που αντιμετωπίζει η Ελλάδα:



Σχήμα 2. Προβλήματα ρύπανσης στην Ελλάδα

Η κατάσταση αυτή οδηγεί σε μονοπάτια με ανεξέλεγκτες συνέπειες αν δεν ληφθούν άμεσα και αποτελεσματικά μέτρα. Τα μέτρα αυτά θα επιβάλλουν καλύτερη διαχείριση με θεώρηση μεθόδων ελέγχου στην πηγή για τον περιορισμό του προβλήματος σε τοπικό επίπεδο, επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση προκειμένου να εξοικονομηθεί νερό για άλλες χρήσεις, αποφυγή της ρύπανσης των αποδεκτών αλλά και την επιτακτική ανάγκη για διόρθωση των υφιστάμενων προβλημάτων.

1.3 Βασικές έννοιες υπόγειας υδρολογίας

Σε αυτή την παράγραφο ακολουθούν κάποιες βασικές έννοιες που αναφέρονται σε όλη την έκταση της εργασίας και είναι χαρακτηριστικές όταν μιλάμε για υπόγεια ροή.

Ο όρος υπόγεια ύδατα αναφέρεται στις υδάτινες ποσότητες που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ανάμεσα στους πόρους καθώς και στα ρήγματα των γεωλογικών σχηματισμών. Έχουν μεγάλη οικολογική σημασία γιατί αποτελούν τρόπο τροφοδοσίας των ποταμών, των πηγών και άλλων υδάτινων σχηματισμών ενώ αποτελούν ένα είδος μακροχρόνιας δεξαμενής του φυσικού κύκλου του νερού. Συχνά καταναλώνονται για γεωργική, αστική και βιομηχανική χρήση με την κατασκευή και τη λειτουργία γεωτρήσεων. Τα υπόγεια ύδατα περιλαμβάνουν την ακόρεστη και την κορεσμένη ζώνη. Ακόρεστη ζώνη χαρακτηρίζεται η ζώνη του υπεδάφους όπου οι πόροι του εδάφους καταλαμβάνονται από αέρα και νερό. Κορεσμένη είναι η ζώνη όπου όλοι οι πόροι του εδάφους είναι πλήρεις από νερό και υπό συνθήκες υδροστατικής πίεσης, ενώ η άνω επιφάνεια της είναι ο υδροφόρος ορίζοντας όπου η υδροστατική πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική. [1, 13]

Υδροφορέας είναι ένας υπεδάφιος σχηματισμός που περιέχει σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών κορεσμένων με νερό και τα οποία τροφοδοτούν φρέατα και πηγές με υδατικές ποσότητες. Παραδείγματα τέτοιων σχηματισμών αποτελούν η άμμος και οι χάλικες. Τα χαρακτηριστικά των υδροφορέων ποικίλλουν ανάλογα με τη γεωλογία, τη δομή του υποστρώματος και την τοπογραφία. Οι κατηγορίες των υδροφορέων είναι δυο: οι ελεύθεροι και οι περιορισμένοι και ο διαχωρισμός αυτός γίνεται με βάση τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα. Ο ελεύθερος υδροφορέας έχει σαν ανώτερη επιφάνεια τον υδροφόρο ορίζοντα, ενώ ο περιορισμένος περιέχει νερό υπό πίεση μεγαλύτερης της ατμοσφαιρικής και περιορίζεται στην άνω και κάτω επιφάνεια από αδιαπέρατα στρώματα. [1, 13]

Πορώδες είναι το ποσοστό του εδάφους που δεν καταλαμβάνεται από στερεά υλικά, δηλαδή οι κενοί πόροι. Η έννοια του πορώδους σχετίζεται και με την διαπερατότητα που αναφέρεται στην συνεκτικότητα των πόρων. Το πορώδες ασκεί μεγάλη επίδραση στη μεταφορά των ρύπων καθώς επηρεάζει τις ταχύτητες ροής των υπόγειων υδάτων μέσω αντιστρόφως ανάλογης σχέσης. Τέλος έχει την μαθηματική έκφραση:

και παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το πορώδες είναι :

- Η κοκκομετρική σύνθεση
- Η διάταξη των κόκκων
- Το σχήμα των κόκκων [1]

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται μερικές χαρακτηριστικές τιμές για το πορώδες σε ορισμένα είδη πετρωμάτων.

Υλικά	Πορώδες (%)	Ειδική απόδοση (%)
Μη Διαστρωματοποιημένα Υλικά		
Χαλίκια	25 - 35	15 - 30
Άμμος	25 - 45	10 - 30
Ιλύς	35 - 50	5 - 10
Πηλός	45 - 55	1 - 5
Άμμος και Χαλίκια	20 - 30	10 - 20
Διαστρωματοποιημένα Υλικά		
Αμμόλιθος	5 - 30	3 - 15
Δολομιτικοί Ασβεστόλιθοι	1 - 20	0.5 - 10
Καρστικοί Ασβεστόλιθοι	5 - 30	2 - 15
Σχιστόλιθος	1 - 10	0.5 - 5
Κυστοειδής Βασάλτης	10 - 40	5 - 15
Αποσαθρωμένος Βασάλτης	5 - 30	2 - 10
Πορώδης Βράχος	10 - 60	5 - 20
Φρέσκος Γρανίτης και Γνευσίτης	0.01 - 2	< 0.1
Αποσαθρωμένος Γρανίτης και Γνευσίτης	1 - 15	0.5 - 5

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικές τιμές πορώδους [Freeze and Cherry, 1979]

Υδραυλική Αγωγιμότητα

Ο Henry Darcy, μελέτησε τη ροή του νερού διαμέσου οριζόντιων στρωμάτων άμμου που συνήθως χρησιμοποιούνται σαν υδατικά φίλτρα. Το συμπέρασμα της μελέτης του ήταν ότι ο ρυθμός ροής (Q/A) διαμέσου πορώδους μέσου είναι ανάλογος των απωλειών φορτίου, ανάλογος ενός συντελεστή K που χαρακτηρίζει το πορώδες υλικό και αντιστρόφως ανάλογος του μήκους πορείας της ροής. Τα παραπάνω συνοψίζονται στην μαθηματική έκφραση του νόμου του Darcy, όπου το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η ταχύτητα της ροής είναι προς την κατεύθυνση που ελαττώνεται το φορτίο [1]:

Όπου Q : παροχή, m^3/s

A : η επιφάνεια, m^2

K : η υδραυλική αγωγιμότητα, m/s

Δh : η απώλεια φορτίου, m

L : το μήκος της στήλης, m

q : η ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή, m/s

Η έκφραση $\Delta h/L$ συνήθως εμφανίζεται στην γενική της μορφή ως $\Delta h/dL$ και ονομάζεται υδραυλική κλίση.

Ο νόμος του Darcy ισχύει για αριθμούς Reynolds < 1 , όπως δηλαδή και στην περίπτωση της υπόγειας ροής. Σε περιπτώσεις όπου υπάρχει μεγάλη υδραυλική κλίση, όπως κοντά σε φρεάτιο άντλησης ή σε περιπτώσεις που υπάρχει τυρβώδης ροής όπως κοντά σε βασάλτη ή ασβεστόλιθο με μεγάλα ανοίγματα, τότε η εφαρμογή του νόμου δεν είναι δυνατή. Ωστόσο και σε συνθήκες μέχρι $Re = 10$ έχει παρατηρηθεί ότι ο νόμος του Darcy μπορεί να εφαρμοστεί. [1]

Η ταχύτητα του Darcy δε λαμβάνει υπόψη το στερεό υλικό και τους πόρους. Ουσιαστικά όμως σε ένα πορώδες υλικό η ροή περιορίζεται μόνο εντός του χώρου των πόρων και η πραγματική ταχύτητα (ταχύτητα διήθησης) ορίζεται ως εξής

όπου q_p : η ταχύτητα διήθησης, m/s

n : το πορώδες

Σε μια σειρά πειραμάτων που έγιναν σε ένα ομοιόμορφο, ιδεώδες, πορώδες μέσο το οποίο αποτελείται από γυάλινες σφαίρες διαμέτρου d , ομοιόμορφα καταναμημένες, μελετήθηκε η ροή διάφορων ρευστών πυκνότητας ρ , ιξώδους μ και σταθερής υδραυλικής κλίσης dh/dL . Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι για την υδραυλική αγωγιμότητα ισχύει [1] :

όπου $k = Cd^2$ και ορίζεται ως η ειδική διαπερατότητα του πορώδους μέσου

C : ο συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την ταξινόμηση μεγέθους των κόκκων

d : μέσο μέγεθος πόρων

Χαρακτηριστικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας παρατίθενται στον πίνακα 2

Τύπος Εδάφους	Υδραυλική Αγωγιμότητα K (cm/s)
Άργιλος	$10^{-9} - 10^{-6}$
Ιλύς	$10^{-7} - 10^{-3}$
Άμμος	$10^{-5} - 10^{-1}$
Χαλίκι	$10^{-1} - 10^2$

Πίνακας 2 Χαρακτηριστικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας [1]

Συντελεστής Μεταβιβασιμότητας

Ο όρος της μεταβιβασιμότητας (T) χρησιμοποιείται ευρύτατα στην υπόγεια υδραυλική και ορίζεται ως ο ρυθμός με τον οποίο το νερό μεταβιβάζεται δια μέσου

μοναδιαίου πλάτους ενός υδροφορέα με μοναδιαία υδραυλική κλίση. [1]

όπου K : είναι η υδραυλική αγωγιμότητα, m/s

b : το κορεσμένο βάθος του υδροφορέα, m

Ομοιογένεια και Ισοτροπία

Η υδραυλική αγωγιμότητα ενός υδροφορέα συνήθως μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο. Επίσης ακόμα και σε ένα δεδομένο σημείο είναι δυνατόν να μεταβάλλεται ανάλογα με την κατεύθυνση. Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται στην ιδιότητα της ομοιογένειας ή ετερογένειας και η δεύτερη της ισοτροπίας ή ανισοτροπίας.

- Ομοιογενής (homogeneous) χαρακτηρίζεται ένας υδροφορέας που έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε σημείο του.
- Ετερογενής (heterogeneous) χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας του οποίου οι υδραυλικές ιδιότητες αλλάζουν χωρικά.
- Ισότροπος (Isotropic) χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας ο οποίος σε οποιοδήποτε ορισμένο σημείο του έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις.
- Ανισότροπος (Anisotropic) χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας με διαφορετικές υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε κατεύθυνση. [1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ

2.1 Ορισμός υφαλμύρισης

Η υφαλμύριση είναι ένα φαινόμενο κατά το οποίο το υφάλμυρο νερό διεισδύει στο εσωτερικό τμήμα μιας περιοχής, δημιουργώντας προβλήματα στην ποιότητα του υπόγειου νερού που χρησιμοποιείται για κάθε είδους ανάγκη. Τις περισσότερες φορές αυτό οφείλεται στην άντληση του υπόγειου νερού από τις παράκτιες γεωτρήσεις, ωστόσο όμως μπορεί να γίνει και από γεωλογικούς παράγοντες. Τα υπόγεια κανάλια που υπάρχουν στο έδαφος λειτουργούν σαν αγωγοί για την κίνηση του θαλασσινού νερού και την επαφή του με το γλυκό νερό. Ωστόσο η αύξηση της συγκέντρωσης των χλωριόντων στα υπόγεια ύδατα μιας περιοχής μπορεί να προκύψει ως αποτέλεσμα μιας φυσικής διαδικασίας, όπως είναι:

- Οι κλιματικές αλλαγές
- Η ανύψωση της στάθμης της θάλασσας
- Το θαλασσινό νερό που διείσδυσε σε υδροφορείς κατά το παρελθόν
- Το αλάτι, από δόμους αλατιού ή λεπτές στρώσεις αλατιού ή από διασπορά σε γεωλογικούς σχηματισμούς
- Τα υπολείμματα εξάτμισης νερού σε παλιρροιακές λίμνες, κοιλάδες
- Το νερό από αρδευόμενη γη που καταλήγει σε ρυάκια

Αλλά και ως αποτέλεσμα παρέμβασης του ανθρώπου, μέσω:

- Των υπεραντλήσεων υδροφορέων
- Των λυμάτων υψηλής αλατότητας ανθρώπινης προέλευσης [9]

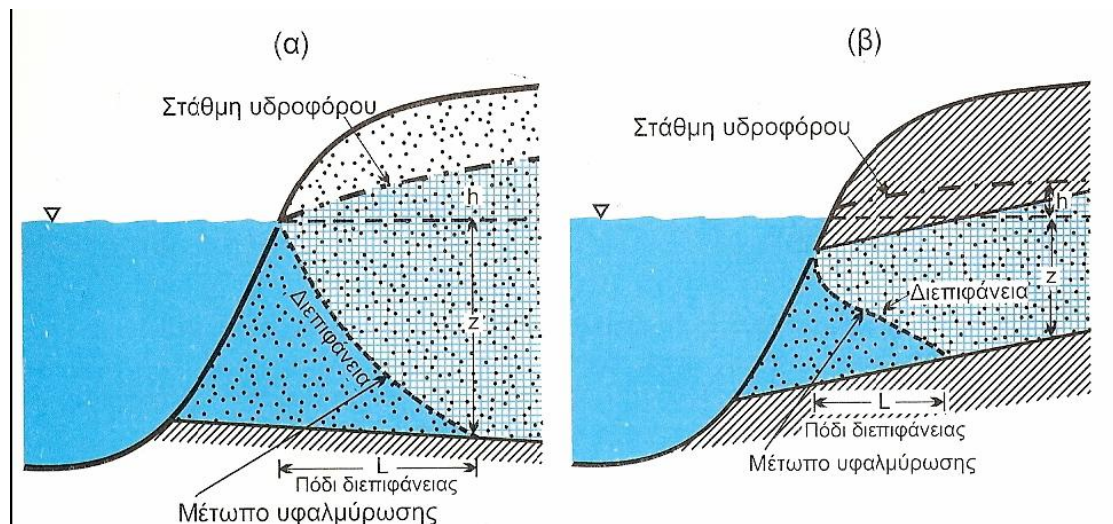
Η διείσδυση αλμυρών υδάτων παρατηρείται σε πολλούς παράκτιους υδροφορείς, λόγω της συνεχούς επικοινωνίας με το θαλασσινό νερό και λόγω της διατάραξης της ισορροπίας του συστήματος γλυκού/αλμυρού νερού κάτω από συνθήκες άντλησης μεγάλων ποσοτήτων υπόγειου νερού για άρδευση. Αποτέλεσμα αυτών των πρακτικών είναι η μείωση της ροής του γλυκού νερού και κατά συνέπεια η υφαλμύριση των υπόγειων νερών.

Η στάθμη των υδροφόρων στρωμάτων βρίσκεται σε δυναμική και όχι στατική ισορροπία και μεταβάλλεται συνεχώς με το χρόνο. Η πορεία της μπορεί να είναι ανοδική σαν αποτέλεσμα της κατείσδυσης, της διήθησης και των πλευρικών εισροών αλλά μπορεί να είναι και καθοδική λόγω απωλειών όπως είναι η εκφόρτιση από πηγές ή αντλήσεις καθώς επίσης και από την εκροή προς τα γειτονικά στρώματα. Έτσι αν η ποσότητα που εκρέει εντός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος (π.χ. ενός έτους) είναι μικρότερη ή έστω στα όρια της φυσικής ανανέωσης η στάθμη του γλυκού νερού δεν υποχωρεί. Αντίθετα αν η ποσότητα που εκρέει ξεπερνά τη δυνατότητα για ανανέωση του γλυκού νερού, γίνεται δηλαδή υπεράντληση των υδάτων, τότε η στάθμη αυτού υποχωρεί.

Πρακτικά λοιπόν, όταν το γλυκό νερό αποσύρεται με ταχύτερο ρυθμό από ό τι χρειάζεται για να ανανεωθεί, τότε η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα μειώνεται με αποτέλεσμα και τη μείωση της υδροστατικής πίεσης. Όταν αυτό συμβαίνει κοντά σε μια παράκτια περιοχή, το θαλασσινό νερό μέσα στον υδροφόρο ορίζοντα προσπαθεί να πάρει τη θέση του φρέσκου-γλυκού νερού με αποτέλεσμα ο υδροφόρος ορίζοντας να ρυπανθεί με το αλμυρό νερό. Η συμπεριφορά αυτή προκαλείται επειδή το θαλασσινό νερό έχει μεγαλύτερη

πυκνότητα (εξαιτίας των περισσότερων διαλυμένων ουσιών) από το γλυκό νερό. Η διαφορά πυκνότητας μεταξύ των δύο υδατικών μαζών έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία δύο επάλληλων υδατικών στρωμάτων, όπου το αλμυρό νερό ως πυκνότερο διεισδύει κάτω από το γλυκό νερό, ενώ ανάμεσα στις δύο ακραίες συνθήκες δημιουργείται μια υφάλμυρη ζώνη ενδιάμεση πυκνότητας. Το πάχος και η θέση αυτής της ζώνης ανάμειξης εξαρτάται από την υδραυλική ισορροπία μεταξύ του γλυκού και του αλμυρού νερού. Αυτή η διαφορά πυκνότητας προκαλεί την πίεση στο πλαίσιο μιας στήλης του αλμυρού νερού να είναι μεγαλύτερη από την πίεση μιας στήλης γλυκού νερού ίδιου ύψους. Αν αυτές οι δύο στήλες συνδέονται στο κάτω μέρος, τότε η διαφορά πίεσης θα προκαλέσει ροή αλμυρού νερού στη στήλη του γλυκού νερού μέχρις ότου υπάρξει εξισορρόπηση στην πίεση (γεγονός που συμβαίνει στις παράκτιες περιοχές). Στο εσωτερικό της περιοχής, η στήλη του γλυκού νερού είναι μεγαλύτερη λόγω της αύξησης του υψόμετρου της γης και είναι σε θέση να εξισώσει την πίεση από το αλμυρό νερό, σταματώντας έτσι τη διείσδυση του αλμυρού νερού. Στην περίπτωση που έχουμε διείσδυση αλμυρού νερού, αυτό γίνεται με τη μορφή σφήνας. Επίσης η άντληση γλυκού νερού από τα υδροφόρα στρώματα μειώνει την πίεση του νερού με αποτέλεσμα την οδήγηση του αλμυρού νερού στα πηγάδια άντλησης, καθιστώντας το νερό (αλμυρό πλέον) ακατάλληλο για πόση ή άρδευση. [13]

Ανάλογα λοιπόν με τον υδροφορέα που έχουμε, ελεύθερο ή περιορισμένο, το φαινόμενο που της υφαλμύρισης παίρνει και διαφορετική μορφή. Στον ελεύθερο υδροφορέα η στάθμη της θάλασσας συμπίπτει με αυτή της υφαλμύρισης, ενώ στην περίπτωση του περιορισμένου υδροφορέα, όπου το νερό είναι υπό πίεση, η υφαλμύριση φαίνεται από πιο χαμηλό σημείο. Η διαφορά αυτή στους δυο υδροφορείς φαίνεται στο Σχήμα 3:



Σχήμα 3. Η υφαλμύριση σε α) ελεύθερο και β) περιορισμένο υδροφορέα [4]

Η μελέτη και μοντελοποίηση του φαινομένου της υφαλμύρισης αποτελεί μια πολύπλοκη διεργασία κυρίως για τους εξής λόγους:

- Η ύπαρξη δύο φάσεων ρευστών και μιας ευρείας ζώνης ανάμειξης μεταξύ των δύο υγρών φάσεων.
- Η κίνηση και η διασπορά του ενός ρευστού προς το άλλο εξαρτάται από την πυκνότητα των ρευστών στη ζώνη υφαλμύρισης η οποία μεταβάλλεται σε συνάρτηση του χώρου και του χρόνου και εξαρτάται από τις συνθήκες ροής. Αυτή η αλληλεξάρτηση κάνει τις αντίστοιχες εξισώσεις μη γραμμικές και είναι πολύ δύσκολο να επιλυθούν με αναλυτικές μεθόδους αφού απαιτούνται διαδοχικές προσεγγίσεις και επαναλήψεις.
- Η πιθανή παρουσία ρωγμών στα υδροφόρα στρώματα, των οποίων οι ακριβείς θέσεις είναι άγνωστες, αλλά οι οποίες έχουν μεγάλη επίδραση στην διείσδυση του αλμυρού νερού
- Η πιθανή παρουσία μικρών αλλαγών στις υδραυλικές ιδιότητες του υδροφορέα, οι οποίες είναι πολύ μικρές για να ληφθούν υπόψη από το μοντέλο, αλλά μπορεί επίσης να έχουν μεγάλη επίδραση στην ανάπτυξη της διείσδυσης αλμυρού νερού
- Η ανταλλαγή κατιόντων, η οποία επιβραδύνει τόσο την διείσδυση αλμυρού νερού όσο και την αποκατάσταση αυτού
- Η δυναμική του υδροφόρου ορίζοντα είναι αργή και παίρνει πολύ χρόνο στον κώνο πτώσης στάθμης να προσαρμοστεί στις αλλαγές που προκύπτουν π.χ. από τα αντλητικά συστήματα ή από τις βροχοπτώσεις. Έτσι η κατάσταση στο πεδίο μπορεί να είναι σημαντικά διαφορετική από εκείνη που θα αναμενόταν με βάση το επίπεδο της θάλασσας και την ποσότητα άντλησης
- Για μακροπρόθεσμα μοντέλα, η αλλαγή του κλίματος δεν μπορεί να προβλεφτεί. Τα αποτελέσματα συχνά εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το επίπεδο της θάλασσας και το ποσοστό αναπλήρωσης, δύο παράγοντες που αναμένεται να αλλάξουν στο μέλλον
- Η περιγραφή του φυσικού φαινομένου περιπλέκεται ακόμη περισσότερο λόγω της ανομοιογένειας των υδραυλικών παραμέτρων του υδροφορέα. Ιδιαίτερα σε καρστικούς υδροφορείς η ανάμιξη γλυκού και αλμυρού νερού είναι εντελώς διαφορετικής φύσης από αυτή σε ομοιογενείς και ισοτροπικούς πορώδεις υδροφορείς. Η ροή σε καρστ συχνά δεν ακολουθεί το νόμο του Darcy αφού γίνεται σε κοιλότητες και σε ανοίγματα που είναι συχνά μεγάλων διαστάσεων με αποτέλεσμα να είναι πολύπλοκη και να μην μπορεί περιγραφεί με γενικές διαφορικές εξισώσεις ροής.[13]

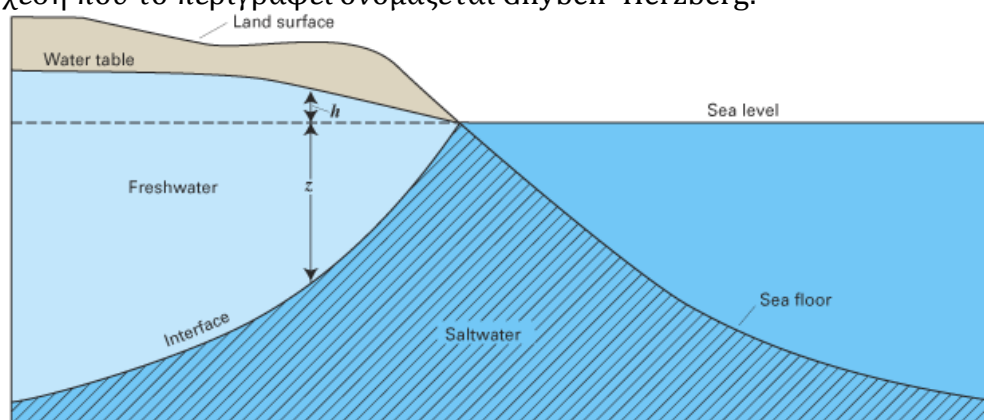
Για την ανάπτυξη μεθόδων ελέγχου της διείσδυσης της θάλασσας σε έναν υφάλμυρο υδροφορέα, ιδιαίτερη σημασία έχουν η γνώση της θέσης, των ορίων και των γεωλογικών και υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών του συστήματος υπόγειων νερών, η σχέση του συστήματος με τα επιφανειακά νερά και γειτονικά οικοσυστήματα, η χημική του σύνθεση και οι επιπτώσεις λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων.

Τρεις είναι οι τρόποι προσέγγισης των προβλημάτων υφαλμύρισης παράκτιων υδροφορέων:

- Θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (Sharp-Interface Conceptualization)
- Θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους (Two-fluid flow)
- Θεώρηση μεταβλητής πυκνότητας (Variable-Density Conceptualization)

1. Θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (Sharp-Interface Conceptualization), εάν το πάχος της διεπιφάνειας είναι μικρό σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα (Ghyben – Herzberg). Γίνεται η παραδοχή ότι υπάρχουν δύο μη αναμίξιμα υγρά (δύο διαφορετικές φάσεις). Για αδιατάρακτες συνθήκες ροής θεωρείται κατάσταση ισορροπίας, δηλαδή μόνιμη ροή και ακίνητη διεπιφάνεια, με ταυτόχρονη εκροή γλυκού νερού προς τη θάλασσα πάνω από αυτήν. Λόγω άντλησης παρατηρείται κινούμενη διεπιφάνεια, επομένως μη μόνιμη ροή. [3]

Η πρώτη προσπάθεια μελέτης του φαινομένου της υφαλμύρισης έγινε από τον W. Badon-Ghyben (1888, 1889) και A. Herzberg (1901) και γι' αυτό και η σχέση που το περιγράφει ονομάζεται Ghyben–Herzberg.



Σχήμα 4. Μοντέλο Ghyben - Herzberg [13]

Το πάχος της ζώνης του γλυκού νερού πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας συμβολίζεται με h , και κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας ως z , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4. Τα δύο πάχη h και z , σχετίζονται με το ρ_f και ρ_s όπου ρ_f είναι η πυκνότητα του γλυκού νερού και ρ_s είναι η πυκνότητα του αλμυρού νερού. Το γλυκό νερό έχει μια πυκνότητα της τάξης του $1,000 \text{ gr/cm}^3$ στους 20°C , ενώ αυτή του θαλασσινού νερού είναι περίπου $1,024 \text{ gr/cm}^3$. Η μαθηματική έκφραση αυτών είναι:

Η σχέση προέκυψε λαμβάνοντας υπόψη την υδροστατική ισορροπία μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού. Η αλάτινη σφήνα θεωρείται ακίνητη, η πίεση στη διεπιφάνεια είναι κοινή και για τις δύο περιοχές και θεωρείται ότι ισχύει η γνωστή παραδοχή Dupuit.

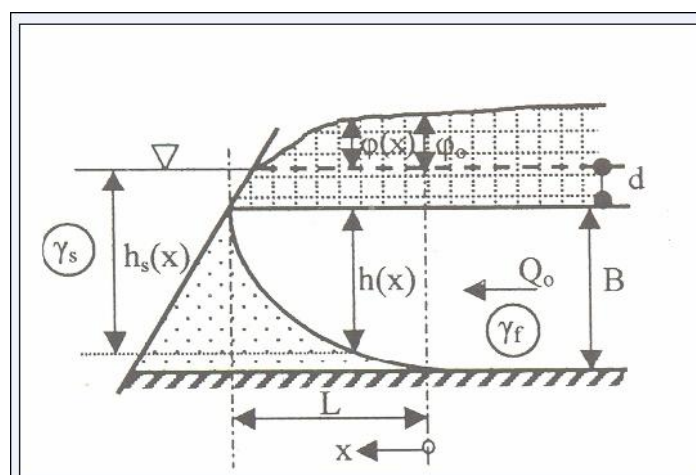
Για την απλοποίηση της σχέσης Ghyben-Herzberg, θεωρείται ότι για κάθε μέτρο του γλυκού νερού σε ένα υδροφορέα από επάλληλα στρώματα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, θα υπάρχουν σαράντα μέτρα του γλυκού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα κάτω από τη στάθμη της θάλασσας.

Η χρήση της εξίσωσης Ghyben - Herzberg επιτρέπει την εύρεση της θέσης της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού, ως εξής:

- Με βάση παρατηρήσεις από φρέατα της περιοχής, κατασκευάζεται ο πιεζομετρικός χάρτης του υδροφορέα για το γλυκό νερό.
- Τα πιθανά βάθη της διεπιφάνειας υπολογίζονται από την προαναφερθείσα εξίσωση, άρα ισχύει ο ίδιος πιεζομετρικός χάρτης πολλαπλασιασμένος με διαφορετικό συντελεστή.
- Από τη γεωλογική μελέτη είναι γνωστή η θέση του πυθμένα του υδροφορέα.
- Η τομή των δύο επιφανειών, της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού και της βάσης του υδροφορέα, αποτελεί τον πόδα της αλάτινης σφήνας.
- Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοσθεί για περιοσμένους και φρεάτιους υδροφορείς. [13]

Περιορισμένος Υδροφορέας

Για τον περιορισμένο υδροφορέα υδραυλικής αγωγιμότητας K , πάχους B , βάθους κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας d και λαμβάνοντας υπόψη το νόμο Darcy και την προσέγγιση Ghyben - Herzberg προκύπτουν οι σχέσεις μεταξύ του μήκους L της υφάλμυρης σφήνας, της παροχής γλυκού νερού προς τη θάλασσα Q_0 και του πιεζομετρικού φορτίου στην άκρη της διεπιφάνειας ϕ_0 , σύμφωνα με το Σχήμα 5. Επίπεδο αναφοράς θεωρείται η επιφάνεια της θάλασσας. [3]



Σχήμα 5. Η απεικόνιση της διεπιφάνειας σε περιορισμένο υδροφορέα [3]

Ελεύθερος Υδροφορέας

Αντίστοιχα στους ελεύθερους υδροφορείς και λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη την κατακόρυφη διήθηση $N=\sigma\alpha\theta$. ή $N=N(x)$ και με βάση το νόμο Darcy και την προσέγγιση Ghyben – Herzberg προκύπτει μετά από ολοκλήρωση η αντίστοιχη σχέση της διεπιφάνειας. Επίπεδο αναφοράς των h_f και h θεωρείται η επιφάνεια της θάλασσας. [3]

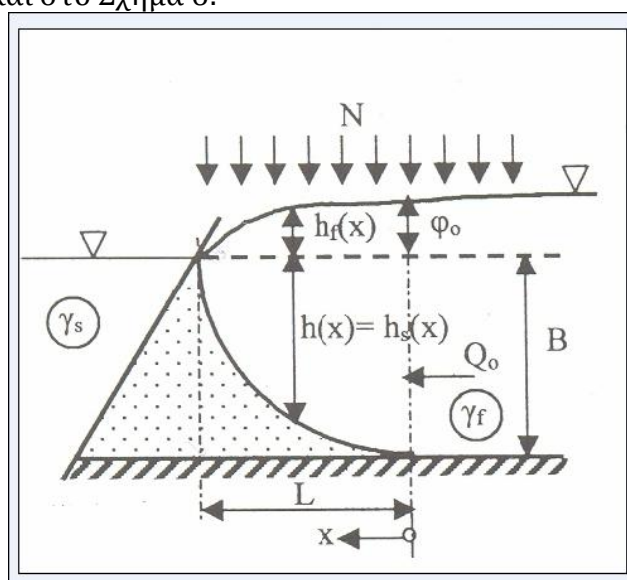
όπου Q_0 : η παροχή του γλυκού νερού στην άκρη της διεπιφάνειας

K : η υδραυλική αγωγιμότητα

B : απόσταση της βάσης του υδροφορέα από την επιφάνεια της θάλασσας

ϕ_0 : το πιεζομετρικό φορτίο στην άκρη του υδροφορέα.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6:



Σχήμα 6. Η απεικόνιση της διεπιφάνειας σε ελεύθερο υδροφορέα [3]

Στην πραγματικότητα όμως η εικόνα της διεπιφάνειας διαφέρει από αυτή που αναφέραμε παραπάνω και αυτό γιατί:

- Δεν ισχύει η παραδοχή της οριζόντιας ροής. Υπάρχουν σημαντικές κατακόρυφες συνιστώσες ταχυτήτων.
- Η προσέγγιση Ghyben-Herzberg δεν επιτρέπει τον υπολογισμό επιφάνειας από την οποία πραγματοποιείται διέξοδος γλυκού νερού προς τη θάλασσα.
- Η διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού συνήθως δεν είναι ακίνητη, αλλά κινείται προς το εσωτερικό του υδροφορέα.
- Η προσέγγιση Ghyben-Herzberg δεν μπορεί να προβλέψει στην περίπτωση φρεατίων υδροφορέων την επιφάνεια διήθησης. [3]

2. Θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους (Two-fluid flow), λόγω υδροδυναμικής διασποράς (Pinder and Cooper, Henry). Η διεξόδωση αλμυρού νερού σε υπόγειους υδροφορείς αντιμετωπίζεται σαν ένα είδος ρύπανσης περιβαλλοντικής προέλευσης. Θεωρείται ότι υπάρχουν δύο αναμίγματα υγρά (δύο συνιστώσες μιας φάσης) και το πρόβλημα αντιμετωπίζεται σαν πρόβλημα υδροδυναμικής διασποράς με συγκέντρωση εξαρτώμενη από την πυκνότητα (για κορεσμένη ροή). [3]

3. Θεώρηση μεταβλητής πυκνότητας (Variable-Density Conceptualization), θεωρείται πως υπάρχουν δυο αναμίγματα υλικά, το νερό και ένα είδος ρυπαντή (αλάτι), που επηρεάζουν την πυκνότητα και το ιξώδες του υγρού. Για την ανάλυση αυτού του είδους ροής, όπου δηλαδή υπάρχει εξάρτηση με την πυκνότητα, χρησιμοποιούνται δυο μη γραμμικές εξισώσεις ταυτοχρόνως, η αρχή διατήρησης της μάζας του νερού και η αρχή διατήρησης της μάζας του αλατιού.

Στην πρώτη εξίσωση, αυτή της αρχής διατήρησης της μάζας του νερού, έχουμε την μαθηματική έκφραση:

— — — — —

Και στην δεύτερη εξίσωση, αυτή της αρχής διατήρησης της μάζας του αλατιού, έχουμε την μαθηματική έκφραση:

—————

όπου C: συγκέντρωση του υγρού

ρ : πυκνότητα

P: η πίεση

: συντελεστής αποθηκευτικότητας

: ιξώδες του νερού

v : μέση ταχύτητα του υγρού

D: συντελεστής διασποράς

: μοριακή διάχυση

ϵ : το πορώδες

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η τελευταία θεώρηση της διαφοράς πυκνότητας, τις οποίες η προσέγγιση είναι πιο ολοκληρωμένη και δίνει αποτελέσματα με μεγαλύτερη ακρίβεια.

2.3 Η υφαλμύριση στην Ελλάδα

Οι ανάγκες σε νερό συνεχώς αυξάνονται εξαιτίας του επιπέδου ζωής, της έντονης αστικοποίησης, της εντατικής γεωργίας και της αύξησης του πληθυσμού. Αυτός ο έντονος ρυθμός ανάπτυξης και αλλαγής οδηγεί σε μια σειρά επιπτώσεων με μεγάλη ή μικρή κλίμακα επιρροής σε αρκετούς τομείς, τόσο ανθρωπογενείς όσο και περιβαλλοντικούς που δεν αφήνουν ανεπηρέαστη την Ελλάδα.

Η Ελλάδα έχει συνολική έκταση 131.944 Km², από την οποία 106.777 Km² αποτελούν το ηπειρωτικό τμήμα και 25.166 Km² το νησιωτικό τμήμα της χώρας. Η ακτογραμμή στη συνολική της έκταση φτάνει τα 15.000 Km οπότε εύκολα αντιλαμβανόμαστε ότι η Ελλάδα σε ένα μεγάλο μέρος της είναι σε συνεχή επαφή με τη θάλασσα. Αυτό το γεγονός σε συνδυασμό με την έλλειψη προγράμματος παρακολούθησης και διαχείρισης των υδατικών πόρων, συμβάλλουν στο πρόβλημα της υφαλμύρισης στον ελλαδικό χώρο. Το πρόβλημα γίνεται εντονότερο από τον ανεξέλεγκτο αριθμό παλαιών και νέων γεωτρήσεων στην χώρα. Ο πρόχειρος τρόπος με τον οποίο γίνεται η αδειοδότηση από τις περιφέρειες σε συνδυασμό με την έλλειψη ελεγκτικών μηχανισμών έχουν οδηγήσει σε κατασπατάληση των υπόγειων υδάτων: « τα υπόγεια νερά είναι το υποζύγιο για την κάλυψη των υδάτινων αναγκών της χώρας. Ο πραγματικός αριθμός των γεωτρήσεων παραμένει άγνωστος, ενώ οι νόμιμες ξεπερνούν τις 190.000, σύμφωνα με το «Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών» (ΙΓΜΕ), ενώ οι χιλιάδες ιδιωτικές γεωτρήσεις, παράνομες ή μη, επιβαρύνουν τους υδροφορείς για άρδευση, τροφοδότηση πισινών κ.ά., στερώντας το νερό από τα δίκτυα των τοπικών δήμων.

Ο ελλαδικός χώρος διαθέτει πολλές παραθαλάσσιες περιοχές που αποτελούν πόλο έλξης για τους ανθρώπους τόσο για μόνιμη κατοικία όσο και για εποχιακή. Η ενασχόληση των κατοίκων κατά πλειοψηφία είναι η γεωργία, η κτηνοτροφία, η βιομηχανία και η αλιεία. Οι εργασίες αυτές απαιτούν αρκετές ποσότητες νερού και η αλόγιστη χρήση του νερού επιβαρύνει την υπάρχουσα κατάσταση. Οι ανάγκες του νερού, κυρίως στις παραθαλάσσιες περιοχές και ιδιαίτερα την καλοκαιρινή περίοδο, αυξάνονται ραγδαία λόγω του τουρισμού που αποτελεί κύρια πηγή εσόδων στις περιοχές αυτές. Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι η υφαλμύριση των υδροφορέων, η οποία είναι ορατή σε πολλούς νομούς, με τη θάλασσα να έχει διεισδύσει σε περίπου 2.400.000 στρέμματα. Οι συγκεντρώσεις δηλαδή, των ιόντων χλωρίου και νατρίου ξεπερνούν τα ανώτατα επιτρεπτά όρια, 250 mg/lit και 200 mg/lit αντιστοίχως, που θέτει η οδηγία ΚΥΑ Υ2/2600/2001. [10]

Ωστόσο το φαινόμενο της υφαλμύρισης είναι δύσκολα αναστρέψιμο και πολυδάπανο, γι' αυτό η αντιμετώπισή του συνδέεται πρακτικά με πρόβλεψη και ορθή διαχείριση των υδατικών πόρων της κάθε εκμεταλλευόμενης περιοχής. Η εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων που έχουν εφαρμοστεί, για παράδειγμα, δίνουν μια περίοδο πάνω από 20 χρόνια για τη φυσική απορρύπανση των υπόγειων νερών, με τη συμβολή του φυσικού εμπλουτισμού τους, φυσικά υπό την προϋπόθεση ότι σήμερα θα σταματούσε η εκμετάλλευση των γεωτρήσεων στην επιβαρυνόμενη περιοχή. [10]

Γενικότερα λοιπόν, στον ελλαδικό χώρο εντοπίζονται αρκετές περιοχές με το πρόβλημα της υφαλμύρισης:

- Στην παραλιακή ζώνη προς Σούνιο στις περιοχές του Φαλήρου, της Καλλιθέας, του Πειραιά, της Δραπετσώνας και του Κερατσινίου, της Βουλιαγμένης, της Βάρης, της Αγίας Μαρίνας και του Κορωπίου.
- Κακής ποιότητας είναι τα νερά στο Θριάσιο Πεδίο, στις περιοχές των Αγίων Αποστόλων, του Καλάμου, της Ριτσώνας, ως και τα νότια τμήματα της πεδιάδας της Θήβας. Πολλά τα προβλήματα στο Πόρτο Ράφτη και στον κάμπο της Αταλάντης.
- Στην Πελοπόννησο, η παραλιακή ζώνη από την Κορινθία ως και την Αχαΐα, το Αργολικό πεδίο και το Πόρτο Χέλι. Στην Καλαμάτα και σε άλλες παράκτιες περιοχές το πρόβλημα είναι υπαρκτό αλλά όχι τόσο έντονο.
- Στη Μακεδονία και στη Θράκη, η Νέα Πέραμος, η Νέα Καρβάλη και το Δέλτα του Νέστου.
- Στη Θεσσαλία υπάρχει σε παράκτιες περιοχές διείσδυση της θάλασσας ως το ύψος της Κάρλας.
- Στη Δυτική Ελλάδα τα μεγαλύτερα προβλήματα υπάρχουν στις περιοχές του Αργοστολίου και της Σάμης στην Κεφαλονιά.
- Κατά μήκος της Κρήτης , τόσο στο βόρειο όσο και στο νότιο τμήμα αυτής

Οι περιοχές αυτές φαίνονται στο Σχήμα 7 που ακολουθεί.



Σχήμα 7. Το Πρόβλημα της υφαλμύρισης στην Ελλάδα [9]

2.4. Η υφαλμύριση στην Κρήτη

Η Κρήτη αποτελεί το νοτιότερο νησί της Ελλάδας με συνολική έκταση 14.000 Km². Βρέχεται περιμετρικά από το Κρητικό και το Λιβυκό Πέλαγος, είναι δηλαδή σε συνεχή επαφή με το αλμυρό νερό της θάλασσας. Οι κάτοικοι της έχουν σαν κύρια ενασχόληση την γεωργία ενώ ο τουρισμός κατά τη θερινή περίοδο αποτελεί βιοτικής σημασίας παράγοντα για την βιώσιμη αειφορία του νησιού. Η Κρήτη διαθέτει επαρκείς επιφανειακούς και υπόγειους υδατικούς πόρους, όμως υπάρχουν διάφοροι λόγοι οι οποίοι μειώνουν σημαντικά την πραγματική διαθέσιμη ποσότητα των υδατικών πόρων και ευνοούν το έδαφος για την εμφάνιση της υφαλμύρισης. Οι κυριότεροι από αυτούς τους λόγους είναι:

- Η άνιση κατανομή των υδατικών πόρων στο χώρο, καθώς η δυτική Κρήτη δέχεται μεγαλύτερα ύψη βροχών από την ανατολική.
- Η ανομοιόμορφη κατανομή των υδατικών πόρων στο χρόνο, καθώς παρατηρείται συγκέντρωση βροχοπτώσεων κατά τη χειμερινή περίοδο.
- Η άνιση κατανομή της ζήτησης ύδατος στο χώρο, καθώς οι κυριότερες χρήσεις νερού καταγράφονται σε περιοχές ελλειμματικές (Μεσσαρά, Ιεράπετρα κ.α.).
- Η ανομοιόμορφη κατανομή της ζήτησης ύδατος στο χρόνο, καθώς ο μεγαλύτερος καταναλωτής νερού που είναι η γεωργία σε ποσοστό 84%, καταναλώνει το νερό την ξηρή περίοδο. Την ίδια περίοδο, ιδιαίτερα το δίμηνο Ιουλίου - Αυγούστου, διπλασιάζεται και η κατανάλωση του νερού ύδρευσης λόγω τουρισμού.
- Η γεωμορφολογία της Κρήτης, η οποία χαρακτηρίζεται από πολλά μικρά υδατορέματα, χειμάρρους και επιφανειακή απορροή μικρής διάρκειας.
- Η γεωλογική δομή της Κρήτης που ευνοεί την κατείσδυση και αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων νερού στους υπόγειους καρστικούς υδροφορείς.
- Η υφαλμύριση από φυσικά αίτια των μεγάλων καρστικών πηγών της ανατολικής ακτής (Αλμυρός Ηρακλείου, Αλμυρός Αγίου Νικολάου, πηγές Μαλαύρας κλπ).
- Το μεγάλο ανάπτυγμα ακτών, με αποτέλεσμα η εντατική εκμετάλλευση των παράκτιων υπόγειων υδροφορέων να οδηγεί στην υφαλμύρωσή τους.
- Η ρύπανση των υπόγειων υδροφορέων από διάφορους ανθρωπογενείς παράγοντες (γεωργία, βιομηχανία κ.α.)
- Η αλόγιστη χρήση και η υπεράντληση των υπόγειων υδάτων έχουν αναγκάσει τη στάθμη του υπόγειου υδροφορέα να υποχωρήσει και τη θάλασσα να διεισδύει στο εσωτερικό τμήμα του νησιού. [Περιφέρεια Κρήτης, 2009]

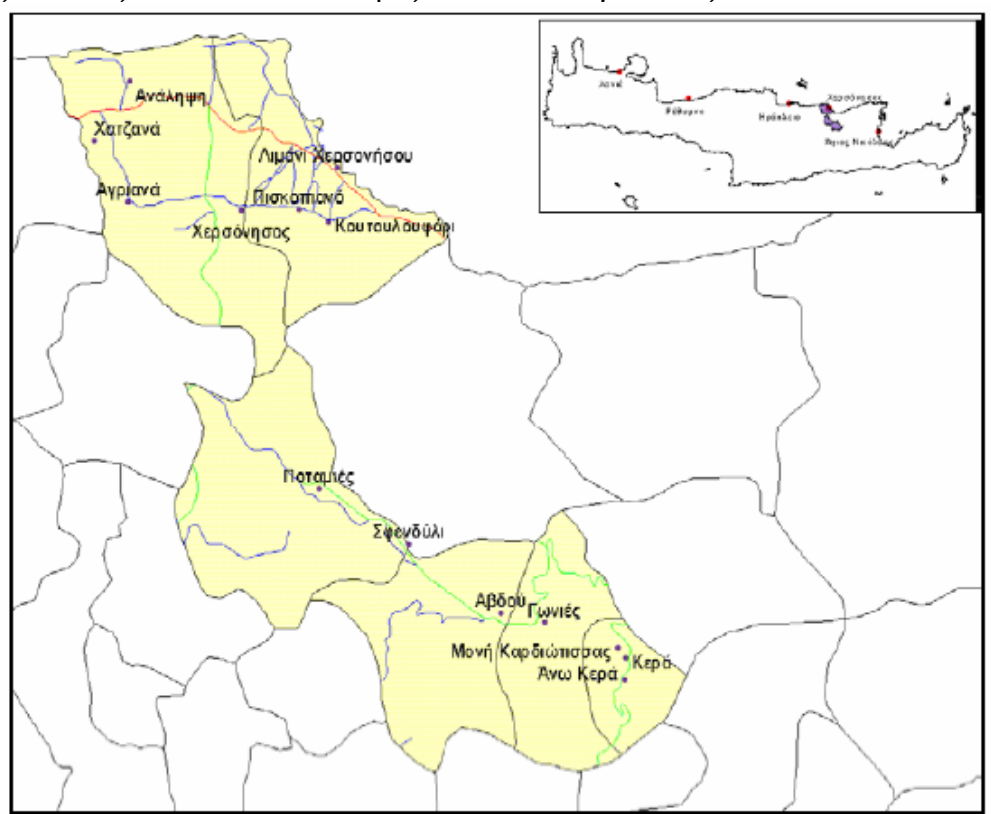
Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι η σταδιακή εμφάνιση της υφαλμύρισης, ενός προβλήματος το οποίο είναι αισθητό και η έλλειψη μέτρων για την αντιμετώπιση του κάνει την κατάσταση όλο και πιο δύσκολη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η εργασία αυτή έχει σαν αντικείμενο μελέτης την περιοχή της Χερσονήσου στο Ηράκλειο Κρήτης και το έντονο πρόβλημα της υφαλμύρισης που αντιμετωπίζει. Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται τα χαρακτηριστικά της περιοχής της Χερσονήσου για την καλύτερη δυνατή προσέγγιση του προβλήματος.

3.1 Γενικά χαρακτηριστικά περιοχής

Ο Δήμος Χερσονήσου βρίσκεται στα Βόρεια παράλια του Νομού Ηρακλείου , όπως φαίνεται και στο σχήμα 8, σε απόσταση 25 Km από την πόλη του Ηρακλείου. Είναι πολύ κοντά στις κυριότερες πύλες εισόδου του νησιού που είναι το λιμάνι και το αεροδρόμιο του Ηρακλείου. Από το 1998 περιλαμβάνει τα δημοτικά διαμερίσματα Λιμένας Χερσονήσου, Χερσόνησος, Ποταμιές, Αβδού, Γωνιές και Κερά με τους επιμέρους οικισμούς που περιλαμβάνει καθένα από αυτά. Ο πληθυσμός του δήμου Χερσονήσου φτάνει τους 10.491 κατοίκους από τους οποίους 5.727 είναι οι άνδρες και 4.764 οι γυναίκες.



Σχήμα 8. Ο Δήμος Χερσονήσου και τα δημοτικά διαμερίσματα που περιλαμβάνει[7]

Η κύρια ανάπτυξη του τουρισμού γίνεται στο παραθαλάσσιο τμήμα του δήμου ενώ όσο κατευθυνόμαστε προς την ενδοχώρα η τουριστική ανάπτυξη ελαχιστοποιείται και τη θέση της καταλαμβάνουν η γεωργία και η κτηνοτροφία, με κύρια οικονομική δραστηριότητα την πρώτη. Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '60 η κύρια απασχόληση του πληθυσμού ήταν η γεωργία και η κτηνοτροφία (90-95%), ενώ οι υπόλοιπες δραστηριότητες κάλυπταν το 4-5% [ΥΠ.ΕΣ.Δ.Δ.Α., 2000]. Σήμερα παρατηρείται μία πλήρης αντιστροφή των δεδομένων με τη συντριπτική πλειοψηφία των κατοίκων να απασχολείται στον τριτογενή τομέα.

Η περιοχή της Χερσονήσου είναι ένας από τους πλέον δημοφιλείς και ανεπτυγμένους τουριστικούς προορισμούς της Κρήτης αλλά και ολόκληρης της χώρας. Σύμφωνα με καταμέτρηση που έγινε το 1999, στην ευρύτερη περιοχή υπάρχουν 118 ξενοδοχεία και 19.566 κρεβάτια κύριων τουριστικών καταλυμάτων, τα οποία αντιστοιχούν στο 17,7% των κλινών της Κρήτης και στο 3,3% της Ελλάδας. Είναι λοιπόν, εύκολα αντιληπτό ότι ο τουρισμός στην περιοχή λειτουργεί τόσο σαν οικονομική δραστηριότητα όσο και σαν φορέας κοινωνικών και περιβαλλοντικών αλλαγών. [7]

3.2 Μετεωρολογικά στοιχεία

Το κλίμα της Κρήτης χαρακτηρίζεται εύκρατο μεσογειακό, στους ορεινούς όγκους της όμως τείνει προς τον ηπειρωτικό τύπο με μέση ετήσια θερμοκρασία 14-15°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 της Χερσονήσου είναι τυπικά μεσογειακό με μέση ετήσια θερμοκρασία 19°C, η οποία όμως παρουσιάζει σημαντική διακύμανση ανάλογα με την εποχή. Έτσι κατά τη διάρκεια του Ιανουαρίου σημειώνονται οι χαμηλότερες θερμοκρασίες, ενώ κατά τη διάρκεια του Ιουλίου έχουμε τις υψηλότερες. Οι βροχοπτώσεις μπορεί να θεωρηθούν ικανοποιητικές κατά την διάρκεια του έτους, με βροχερή περίοδο, την περίοδο Οκτωβρίου – Μαρτίου και με ετήσιο ύψος βροχής 483.2 mm.

Στον πίνακα 3 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα μετεωρολογικά στοιχεία της περιοχής μελέτης κατά τη διάρκεια του έτους.

Σταθμός Ηρακλείου Κρήτης 754											
Γεωγραφικό μήκος 25,11 / Γεωγραφικό πλάτος 35,2											
Ύψος σταθμού 38 m											
Μήνας	Ώρες ηλιοφάνειας (h)	Βαρομετρική πίεση (mm Hg)	Μέση θερμοκρασία αέρα (°C)	Απόλυτη μέγιστη θερμοκρασία (°C)	Απόλυτη ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	% Σχετική υγρασία	Μέση νέφωση	Βροχόπτωση (mm)	Ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο	Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο	Ταχύτητα ανέμου (m/s)
1	108.8	1017.1	12.2	24.8	0.2	71	5.3	90.1	67.33	35.22	3.8
2	128.4	1016	12.5	29.2	-0.5	69	5.1	67.6	82.54	40.67	4
3	170.3	1014.9	13.8	34.8	1.7	66	4.8	58.2	124.87	58.28	4
4	234.5	1013.3	16.8	36	4.4	64	3.7	28.5	161.88	62.74	3.4
5	314.3	1013.6	20.8	39	7	64	2.9	14.2	213.96	62.15	2.3
6	353.3	1012.6	24.4	45.7	8.7	59	1.4	3.5	230.23	56.20	3
7	384.7	1011	26.4	41	15	59	0.6	1.0	248.99	54.12	4
8	356.7	1011.4	26.3	40.7	14	60	0.7	0.6	221.15	51.13	4
9	285.2	1014.6	23.7	38.5	10.6	63	1.8	17.7	174.12	42.92	3.4
10	197.2	1016.7	20.3	36.2	7.9	67	3.6	64.9	114.20	44.54	3.2
11	161.5	1017.5	17.1	31.9	1.9	70	4.7	59.0	81.54	33.62	3
12	121.1	1016.8	13.9	26.7	2	70	5.1	77.9	64.60	39.79	4
Σύνολο	2816								1785.43	572.39	

Πίνακας 3. Μετεωρολογικά στοιχεία περιοχής Χερσονήσου [14]

Ανεμολογικά στοιχεία

Από επεξεργασία των στοιχείων από το μετεωρολογικό σταθμό του Ηρακλείου για

την περίοδο 1955 έως 1998, φαίνονται στον πίνακα 4 τα ανεμολογικά στοιχεία της περιοχής της Χερσονήσου:

Σταθμός Ηρακλείου Κρήτης 754										
Γεωγραφικό μήκος 25,11 / Γεωγραφικό πλάτος 35,2										
Ύψος σταθμού 38 m										
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CALM	SUM
0									17.527	17.527
1	0.855	0.537	0.372	0.613	1.468	0.603	0.307	0.646		5.401
2	4.360	2.279	0.9653	2.312	5.149	1.884	1.183	3.725		21.845
3	4.941	1.435	0.603	1.183	2.695	0.865	1.490	9.082		22.294
4	4.229	0.438	0.142	0.657	2.241	0.679	1.326	10.649		20.541
5	1.665	0.142	0.033	0.351	1.589	0.449	0.362	3.571		8.162
6	0.690	0.033	0.011	0.208	0.898	0.208	0.088	1.019		3.155
7	0.164	0.011	0.011	0.066	0.274	0.055	0.022	0.142		0.745
8	0.055			0.033	0.11	0.011	0.011	0.044		0.264
9	0.011			0.011	0.011			0.011		0.044
10				0.011	0.011					0.022
11										
SUM	16.970	4.875	2.125	5.445	14.626	4.754	4.789	28.885	17.527	100.000

Πίνακας 4. Ανεμολογικά στοιχεία περιοχής Χερσονήσου [14]

Προέκυψε λοιπόν, ότι :

- Η συχνότητα των ανέμων είναι κυρίως Βόρειοι και Βορειοδυτικοί με ποσοστά 16,9% και 28.9% αντίστοιχα ενώ σημαντική είναι και η συχνότητα των Νότιων ανέμων με 14.6% καθώς και της νηνεμίας με ποσοστό 17.5%.
- Η ένταση των ανέμων είναι κυρίως της τάξης 2, 3 και 4 Beaufour με συνολικό ποσοστό 64.68% ενώ τη μεγαλύτερη συχνότητα έχουν οι άνεμοι των 3 Beaufour με ποσοστό 22.3%.
- Ακραία καιρικά φαινόμενα με ανέμους της τάξης των 10 Beaufour είναι σπάνια αλλά όταν συμβαίνουν είναι νότιας και νοτιοδυτικής κυρίως διεύθυνσης.

3.3 Χλωρίδα – Πανίδα

Η περιοχή έχει τα χαρακτηριστικά μιας πεδινής και ημιορεινής ζώνης. Η σημασία της χλωρίδας της φυσικής βλάστησης και γενικά των φυτών είναι πρωταρχικής και καθοριστικής σημασίας, αφού τα φυτά είναι οι μόνοι αυτότροφοι οργανισμοί, παράγουν από ανόργανα στοιχεία οργανική ουσία, είναι η βάση της τροφικής αλυσίδας και χωρίς τα φυτά η ζωή στη γη είναι αδύνατη. Η χλωρίδα της υπό μελέτης περιοχής αναπτύσσεται από δέντρα, θάμνους και από ποώδη βλάστηση. Αναλυτικότερα αποτελείται από:

- Φρύγανα
- Αστιβίδες
- Θυμάρια
- Αφάνες
- Ασπαλάθους
- Θρύμνα

στην βλάστηση της περιοχής πρέπει να προστεθούν κάποια εγκαταλελειμμένα ελαιόδεντρα που παλαιότερα καλλιεργούνταν στην περιοχή καθώς και οι αραιές στοιβάδες από ξυλώδη βλάστηση σκληρόφυλλων και αείφυλλων:

- Σχοίνος
- Ερείκη
- Χαρουπιά
- Πρίνος

Η πληθυσμιακή ισορροπία των άλλοτε ευρέως διαδεδομένων ειδών πανίδας της περιοχής σήμερα έχει διαταραχθεί. Οι οικοκλιματικές συνθήκες της Κρήτης, είναι μεν ευνοϊκές για την ανάπτυξη της πανίδας (ζωοκοινότητας) ιδιαίτερα στα αρθρόποδα, τα έντομα, τα αραχνοειδή και τα μαλάκια (σαλιγκάρια), όμως λόγω της αλόγιστης εκμετάλλευσης των οικοσυστημάτων από τον άνθρωπο, της σημαντικής υποβάθμισης της φυτικής βλάστησης, της παράνομης θήρευσης και της τουριστικής ανάπτυξης της περιοχής ο αριθμός των ζώων στις ανώτερες τάξεις, πτηνά και θηλαστικά, είναι περιορισμένος. Επίσης δεν υπάρχουν σπάνια ή προστατευόμενα είδη ενώ τα κύρια είδη της πανίδας είναι :

- Λαγός
- Ζουρίδα ή κουνάβι
- Κουκουβάγια
- Σαύρες
- Διάφορα είδη πουλιών

3.4 Έδαφος

Η μορφολογία της Κρήτης είναι αποτέλεσμα σειράς γεωλογικών γεγονότων, όπως καταβυθίσεις μεγάλων τμημάτων της αρχικής χέρσου που καταλάμβανε μεγάλη έκταση, συνιζήσεις και εξάρσεις τμημάτων ξηράς, αποθέσεις νεότερων ιζημάτων και εκ νέου κατακόρυφες μετακινήσεις. Η σειρά των γεωλογικών στρωμάτων που συνιστούν το έδαφος του νησιού, από τα αρχαιότερα προς τα νεότερα είναι η παρακάτω:

Ημιμεταμορφωμένα πετρώματα του υποβάθρου: α) δολομίτες, φυλλίτες, σπογγώδεις και λατυποπαγείς ασβεστόλιθοι (πάχος σειράς 1200m), β) σχιστόλιθοι – φυλλίτες, γύψοι και χαλαζίτες που εξελίσσονται σε

σκοτεινόχρωμους πλακώδεις ασβεστόλιθους με ενστρώσεις πυριτικού υλικού και κερατολιθικούς κονδύλους (πάχος σειράς 2200m).

Ιζηματογενή πετρώματα: έχουν αποτεθεί ασύμφωνα πάνω στα προηγούμενα του υποβάθρου και ανάλογα των συνθηκών ιζηματογένεσης υπάρχουν σήμερα σε διάφορα επίπεδα και καλύπτουν διάφορους ορίζοντες των παλαιότερων μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Τα πετρώματα αυτά είναι: α) της σειράς Πίνδου: ασβεστόλιθοι τριαδικού με αλοβίες, ιουρασικού με ραδιολαρίτες, κρητιδικού και ηώκαινου με νουμουλίτες, ψαμμίτες και αργιλικά πετρώματα, β) της σειράς Γαβρόβου- Τρίπολης: επικλυσιγενείς σχηματισμοί, όπως ασβεστόλιθοι, άνω ιουρασικού με κλαδοκορόψεις, άνω κρητιδικού με ρουδιστές και νουμελίτες, ηώκαινου και τα λοιπά μέλη της ομάδας του φλύσχου. Μεταξύ των δυο αυτών σειρών, που αποτελούν δυο διαφορετικές γεωτεκτονικές ζώνες ιζηματογένεσης, γ) σχηματισμοί του τριτογενούς: κυρίως πετρώματα του νεογενούς, μάργες, ψαμμίτες, άμμοι του κατώτερου μειόκαινου, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι κροκαλολατυποπαγή και ασβεστόλιθοι του μέσου και ανώτερου μειόκαινου, μάργες κυανές ψαμμούχοι ασβεστόλιθοι και κροκαλοπαγή του πλειόκαινου. Πολλές φορές οι σχηματισμοί του πλειόκαινου βρίσκονται στα ίδια επίπεδα με νεότερα τεταρτογενή θαλάσσια ιζήματα, τα οποία οι κατακόρυφες κινήσεις κατά τις νεότερες γεωλογικές περιόδους έφεραν πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, δ) νεότεροι τεταρτογενείς σχηματισμοί: αντιπροσωπεύονται κυρίως από τα μαλακά υλικά που καλύπτουν τους προηγούμενους σχηματισμούς και είναι άργιλοι, άμμοι, κορήματα και γενικά υλικά αποσάθρωσης και αποσύνδεσης πετρωμάτων. Επίσης από αδρομερή, κροκαλοπαγή ή ψαμμιτικούς σχηματισμούς των παράκτιων κυρίως περιοχών, που χαρακτηρίζουν το θαλάσσιο πλειστόκαινο. [15]

Γεωλογία – Υδρογεωλογία

Οι υδρολιθολογικοί σχηματισμοί που καλύπτουν την ευρύτερη περιοχή της Χερσονήσου χωρίζονται:

1. Στους υδατοπερατούς σχηματισμούς στους οποίους ανήκουν τα προνεογενή ανθρακικά πετρώματα, οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, γύψοι, κροκαλοπαγή, άμμοι και ψαμμίτες του νεογενούς καθώς και τα κροκαλοπαγή, κορήματα του τεταρτογενούς.

2. Στους υδατοστεγείς σχηματισμούς στους οποίους αναφέρονται οι ψυλλίτες χαλαζίτες και φλύσχης του προνεοογούς καθώς και μάργες, άργιλοι του νεογενούς.

Οι υδατοπερατοί σχηματισμοί έχουν ιδιαίτερη σημασία για την υδρογεωλογική έρευνα καθώς εντός αυτών αναπτύσσονται οι υπόγειοι υδροφορείς. Παρ' όλα αυτά όμως για την διαμόρφωση, την διακίνηση και την κατανομή τόσο του υπόγειου όσο και του επιφανειακού νερού ιδιαίτερο ρόλο παρουσιάζουν και οι υδατοστεγείς σχηματισμοί. [2]

Υδατοπερατοί Σχηματισμοί

1. Προνεογενείς Υδροπερατοί Σχηματισμοί

Η ομάδα αυτή των πετρωμάτων αποτελείται κυρίως από πλακώδεις ασβεστόλιθους καθώς και από ανθρακικά πετρώματα, τα οποία παρουσιάζουν υψηλό ποσοστό υδροπερατότητας, κυρίως στις ζώνες διαρρήξεων και αποκάρσωσης, όπου τελικοί αποδέκτες του νερού της κατείσδυσης είναι οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι. Τα πετρώματα που δομούν τους δύο κύριους ορεινούς όγκους Δίκη και Ψηλορείτη είναι τα ανθρακικά που λόγω του μεγάλου υψομέτρου που τα χαρακτηρίζει δέχονται μεγάλες ποσότητες νερού από τη βροχή και το χιόνι. Επίσης λόγω της μεγάλης περατότητας που παρουσιάζουν αυτοί οι σχηματισμοί (μέχρι και 50.73% των ετήσιων βροχοπτώσεων) έχει σαν αποτέλεσμα να διαμορφώνονται εντός αυτών υπόγειοι υδροφόροι ορίζοντες με πλούσια αποθέματα νερού όπως διαφαίνεται από τις πολλές πηγές (Ζαρού, πηγές Μαλίων). Επιπλέον από τις υπόγειες υδροφορίες των ανθρακικών πετρωμάτων τροφοδοτούνται με σημαντικό ποσοστό νερού τα υπόγεια και πλευρικά υδροφόρα στρώματα των νεογενών αποθέσεων που έρχονται σε άμεση επαφή, κυρίως στις παρυφές των ορεινών όγκων. [2]

Η ποιότητα του νερού στους ανθρακικούς σχηματισμούς είναι συνήθως καλή, προβλήματα μόνο υπάρχουν σε περίπτωση που οι σχηματισμοί αυτοί έρχονται σε επαφή με την θάλασσα οπότε και δημιουργείται το μέτωπο της υφαλμύρισης όπως συμβαίνει στην περιοχή της Χερσονήσου. Στην περιοχή των Μαλίων και Χερσονήσου μικρό πρόβλημα παρατηρείται και στο τέλος της ξηράς περιόδου, αλλά με τις πρώτες βροχές το ποσοστό σε χλωριόντα επανέρχεται σε φυσιολογικά επίπεδα.

2. Νεογενείς Υδατοπερατοί Σχηματισμοί

Στους υδατοπερατούς σχηματισμούς του νεογενούς κατατάσσονται κυρίως οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, τα κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, άμμος καθώς και πετρώματα γύψων. Η περατότητα στους σχηματισμούς αυτούς οφείλεται στο δευτερογενές πορώδες που δημιουργείται λόγω διάβρωσης ή τεκτονισμού (μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, γύψος) ή στο πρωτογενές πορώδες που εξαρτάται από τη σύσταση και την κοκκομετρία του πετρώματος (κροκαλοπαγή, ψαμμίτες άμμοι). Η διαμόρφωση των υπόγειων υδροφορέων εντός των σχηματισμών εξαρτάται άμεσα από τον συντελεστή κατείσδυσης, από τον όγκο που καταλαμβάνουν και από την δυνατότητα τροφοδοσίας τους με νερό, είτε απευθείας από τη βροχή είτε πλευρικά από υδροφόρους προνεογενείς σχηματισμούς με τους οποίους έρχονται σε άμεση επαφή. Σε αρκετές περιπτώσεις διαμορφώνονται αξιόλογοι υπόγειοι υδροφορείς κυρίως σε μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, κροκαλοπαγή και γύψους. Τα γυψούχα νερά είναι βέβαια ακατάλληλα προς χρήση ύδρευσης αλλά καλύπτουν σημαντικές αρδευτικές ανάγκες.

3. Τεταρτογενείς Υδατοπερατοί Σχηματισμοί

Αναφέρονται κυρίως σε ποτάμιες αποθέσεις, ψαμμίτες άμμου και κορήματα που λόγω της σύστασης και της κοκκομετρίας τους είναι υδροπερατοί σχηματισμοί. Συνήθως επειδή παρουσιάζουν μικρό πάχος αναπτύσσεται εντός αυτών ελεύθερος υδροφορέας, όπου όμως έχουν σημαντικό πάχος αναπτύσσεται και περιορισμένος υδροφορέας. [2]

Υδατοστεγείς Σχηματισμοί

1.Προνεογενείς Υδατοστεγείς Σχηματισμοί

Στους υδατοστεγείς προνεογενείς σχηματισμούς αναφέρονται τα πετρώματα της φυλλιτικής-χαλαζιτικής σειράς, ο φλύσχης και οι σχηματισμοί των οφιολίθων – κρυσταλλοσχιστόδων. Οι σχηματισμοί αυτοί στο σύνολό τους χαρακτηρίζονται σαν υδατοστεγείς, εξαίρεση όμως αποτελεί το σαθρό κάλυμμα τους καθώς και κάποιο δευτερογενές πορώδες που είναι συνέπεια από τεκτονικά αίτια. Η στεγανότητα των πετρωμάτων αυτών, σε συνδυασμό με την τεκτονική της περιοχής εκπληρώνει σοβαρό ρόλο στη διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου, τη διακίνηση του υπόγειου νερού, το διαχωρισμό της περιοχής σε υδρογεωλογικές ενότητες και σαν στεγανό διάφραγμα επιτρέπει τη διαμόρφωση υπόγειων υδροφορέων σε διάφορα υψόμετρα. Η ποιότητα του νερού που εντοπίζεται στους σχηματισμούς αυτούς είναι καλή και καλύπτει τοπικές υδρευτικές ανάγκες.

2.Νεογενείς Υδατοστεγείς Σχηματισμοί

Στους υδατοστεγείς σχηματισμούς του νεογενούς ανήκουν οι μάργες και οι άργιλοι που λόγω της σύστασης και της κοκκομετρίας τους είναι αδιαπέρατοι, πράγμα που αποκλείει τη διαμόρφωση υπόγειων υδροφορέων πρακτικής σημασίας. Οι σχηματισμοί αυτοί καλύπτουν αρκετά μεγάλη έκταση με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αρκετά προβλήματα ανεπάρκειας νερού σε πολλές περιοχές. Επίσης λόγω της υδατοστεγανότητας αυτών των σχηματισμών παρατηρείται αυξημένη επιφανειακή απορροή στις περιοχές όπου εμφανίζονται με αποτέλεσμα μεγάλες ποσότητες νερού να καταλήγουν στη θάλασσα και να μένει ανεκμετάλλευτη αυτή η ποσότητα. [2]

Διαμόρφωση υδροφορέων και υδρογεωλογικών ενοτήτων

Η διαμόρφωση υδροφορέων οριζόντων και υδρογεωλογικών ενοτήτων εξαρτάται από τρεις βασικούς παράγοντες: την βροχόπτωση, το γεωλογικό σχηματισμό που είναι περατός στο νερό και το στεγανό υπόβαθρο με κατάλληλη τεκτονική μορφή, ή το επίπεδο της θάλασσας όταν πρόκειται για υπόβαθρο ανθρακικών πετρωμάτων. Κάτω από την συνύπαρξη αυτών των προϋποθέσεων, τα νερά της βροχής κατεισδύουν στα πετρώματα, συγκεντρώνονται στους πόρους, τα καρστικά και τεκτονικά διάκενα διαμορφώνοντας, υδρογεωλογικές ενότητες και λεκάνες υδρογεωλογικών ενοτήτων.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι δύο ορεινοί όγκοι Ψηλορείτης και Δίκτη είναι οι κύριοι τροφοδότες των υπόγειων υδροφορέων της ευρύτερης περιοχής, χωρίζονται οι εξής υδρογεωλογικές ενότητες:

- Υδρογεωλογική ενότητα καρστικού υδροσυστήματος Ψηλορείτη
- Υδρογεωλογική ενότητα καρστικού υδροσυστήματος Δίκτη
- Υδρογεωλογική ενότητα Ταλλαίων ορέων
- Υδρογεωλογική ενότητα λεκάνης Ηρακλείου

Η υδρογεωλογική ενότητα όμως που επηρεάζει άμεσα την περιοχή της Χερσονήσου είναι η υδρογεωλογική ενότητα του καρστικού υδροσυστήματος Δίκτη, η οποία περιλαμβάνει τις γεωλογικές ενότητες και υπόγειες υδροφορίες που τροφοδοτούνται από τον ορεινό όγκο, άσχετα αν οι γεωλογικοί σχηματισμοί ανήκουν ή όχι στον βασικό κορμό του. [2]

Γενικά ο ορεινός όγκος Δίκτη ανήκει στο μεγαλύτερο μέρος του στο Νομό Λασιθίου, ενώ στο νομό Ηρακλείου ανήκει το Δυτικό τμήμα. Δομείται κυρίως από ανθρακικούς σχηματισμούς του προνεογενούς και είναι ένα από τα κυριότερα καρστικά υδροσυστήματα της Κρήτης μετά τα Λευκά Όρη και τον Ψηλορείτη. Τον κύριο κορμό του ορεινού όγκου αποτελούν οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι της αυτόχθονης γεωλογικής ενότητας πάνω στην οποία έχουν απωθηθεί οι αλλόχθονες γεωλογικές ενότητες της φυλλιτικής – χαλαζιτικής σειράς και των οφιολίθων – κρυσταλλοσχιστοδών, ενώ το γεωλογικό υπόβαθρο αποτελούν πλακώδεις ασβεστόλιθοι της αυτόχθονης ενότητας Κρήτης πάνω στην οποία έχουν επωπηθεί οι αλλόχθονες γεωλογικές ενότητες. Η ενότητα των οφιολίθων – κρυσταλλοσχιστοδών στην περιοχή μελέτης δεν εμφανίζεται.

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής δεν είναι εντελώς ανεξάρτητες από αυτές που επικρατούν στο σύνολο του ορεινού όγκου της Δίκτη, ωστόσο η περιοχή χωρίζεται στις εξής ενότητες:

- Υπόγειες υδροφορίες των ανθρακικών σχηματισμών της γεωλογικής ενότητας Πίνδου.
- Υπόγειες υδροφορίες των ανθρακικών σχηματισμών της γεωλογικής ενότητας Τρίπολης.
- Στους ανθρακικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται στην περιοχή Ανώπολης – Γουρνών και νοτιότερα μέχρι τις κοινότητες Γαλιπέ – Σκοτεινό.
- Στους ανθρακικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται νότια της Χερσονήσου – Χαρασό – Κόξαρης – Καλού Χωριού.
- Στους ανθρακικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται στην περιοχή της κοινότητας Χερσονήσου.
- Στους ανθρακικούς σχηματισμούς της περιοχής Μαλίων.

Από αυτούς τους σχηματισμούς η μελέτη αφορά άμεσα τους ανθρακικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται στην περιοχή της κοινότητας Χερσονήσου. Πιο συγκεκριμένα όλες οι ερευνητικές γεωτρήσεις που έχουν γίνει στην προσπάθεια της κοινότητας για εντοπισμό υπόγειων υδροφορέων για κάλυψη των υδρευτικών αναγκών, έδωσαν υφάλμυρο νερό. Αυτό οφείλεται στο ότι οι ασβεστόλιθοι του Ιουρασικού της Ζώνης Τρίπολης που έρχονται σε άμεση επαφή με τη θάλασσα, καθώς και το ρήγμα στην επαφή των ασβεστολιθικών του Ιουρασικού και των ασβεστόλιθων του Κρητιδικού λειτουργούν θετικά για την είσοδο του θαλάσσιου νερού στα καρστικά και τεκτονικά διάκενα των ανθρακικών σχηματισμών της ευρύτερης περιοχής. [2]

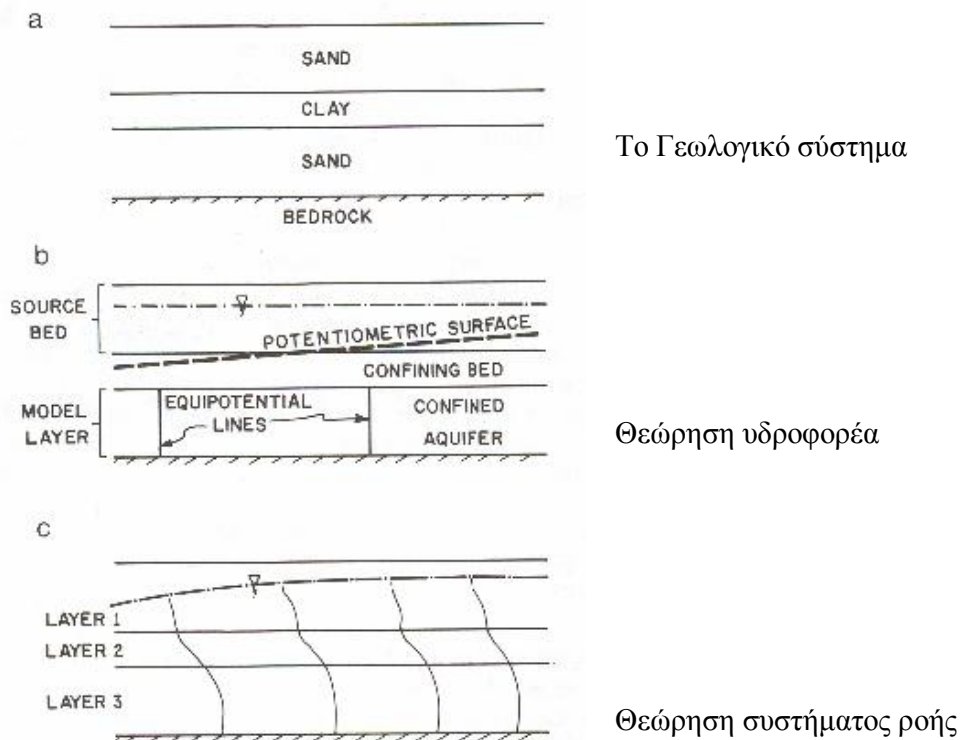
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΧΡΗΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ

Το φαινόμενο της ροής των υπόγειων υδάτων και της μεταφοράς ρύπων είναι ιδιαίτερα σύνθετα και δεν είναι απλός ο τρόπος προσέγγισής τους. Μία τεχνική η οποία ακολουθείται είναι η εφαρμογή μεθόδων μαθηματικής προσομοίωσης. Επομένως για την αντιμετώπισή τους απαιτούνται αφενός εξειδικευμένες γνώσεις και αφετέρου δυνατότητα χρήσης μεθόδων εφαρμοσμένων μαθηματικών προσομοιώσεων και προσαρμογής των τεχνικών αυτών στις απαιτήσεις του υπό εξέταση προβλήματος. Η μαθηματική προσομοίωση αποτελεί για το μελετητή ένα δυναμικό εργαλείο που διευκολύνει την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ορθή διαχείριση υπόγειων υδροφορέων και επιτρέπει την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους για διάφορες υποθετικές καταστάσεις (σενάρια). Οι εφαρμοσμένες αυτές μαθηματικές προσομοιώσεις είναι χρήσιμες επίσης στις αναγνωριστικές έρευνες, σε φάσεις προκαταρκτικής μελέτης ή προμελέτης ενός έργου, για την ερμηνεία της συμπεριφοράς υδροφορέα μετά από μετρήσεις πεδίου. Βασική προϋπόθεση όμως για τα ανωτέρω είναι τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μαθηματική προσομοίωση και την εφαρμογή ενός συγκεκριμένου υπολογιστικού προγράμματος να είναι «ορθά», δηλαδή να αντιπροσωπεύουν πράγματι τον υπό μελέτη υδροφορέα. Η εκπόνηση συνεπώς αξιόπιστων εφαρμοσμένων μαθηματικών προσομοιώσεων είναι αναγκαία. Ιδιαίτερη σημασία στις εφαρμοσμένες μαθηματικές προσομοιώσεις έχουν οι μετρήσεις πεδίου, οι οποίες έχουν διπλό ρόλο, επιτρέπουν την βαθμονόμηση του μοντέλου και χρησιμεύουν για την επαλήθευσή του και συνεπώς την αύξηση της αξιοπιστίας του. Σε συνδυασμό με την οικονομική δαπάνη που συνεπάγεται η πραγματοποίηση μετρήσεων πεδίου, είναι αντιληπτή η σημασία που έχει ο σωστός σχεδιασμός τους.

Ένα μαθηματικό μοντέλο προσομοιώνει την υπόγεια ροή έμμεσα με τη χρήση θεμελιωδών εξισώσεων, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τη φυσική διαδικασία η οποία λαμβάνει χώρα στο σύστημα, σε συνδυασμό με πληροφορίες για την περιγραφή των υδραυλικών υψών ή των παροχών κατά μήκος των ορίων του μοντέλου (οριακές συνθήκες). Για προβλήματα που εξαρτώνται από το χρόνο, η γνώση της αρχικής κατάστασης για τα υδραυλικά ύψη του συστήματος είναι εξίσου απαραίτητη (αρχικές συνθήκες). Τα βασικά βήματα για την εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει την υπόγεια ροή και την μεταφορά ρύπων είναι καταρχάς η ανάπτυξη του μοντέλου και στη συνέχεια ακολουθούν και άλλες διαδικασίες όπως η επιλογή του κώδικα του μοντέλου και η επαλήθευση του, ο σχεδιασμός του μοντέλου, η βαθμονόμηση, η ανάλυση ευαισθησίας και η πρόβλεψη.

Μια ολοκληρωμένη περιγραφή ενός μαθηματικού μοντέλου περιλαμβάνει τις οριακές συνθήκες, τις αρχικές συνθήκες και τις θεμελιώδεις εξισώσεις εάν το μοντέλο εξαρτάται από το χρόνο. Πριν όμως εξαχθούν οι θεμελιώδεις εξισώσεις για την περιγραφή της υπόγειας ροής είναι απαραίτητο ένα θεμελιώδες μοντέλο του συστήματος (conceptual model). Υπάρχουν δυο προσεγγίσεις για το σύστημα υπόγειας ροής, σύμφωνα και με το σχήμα 9:

1. Η προσέγγιση υδροφορέα (Aquifer viewpoint)
2. Η προσέγγιση συστήματος ροής (Flow system viewpoint), [11]



Σχήμα 9. Οι δυο προσεγγίσεις για το σύστημα υπόγειας ροής [10]

1.Η θεώρηση υδροφορέα (Aquifer viewpoint)

Με την προσέγγιση αυτή, μπορούμε να αναφερθούμε τόσο σε ελεύθερο (unconfined), όσο και σε περιορισμένο (confined) υδροφορέα. Στον περιορισμένο υδροφορέα το επάνω μέρος του καλύπτεται από ένα αδιαπέραστο στρώμα, το οποίο αποτελείται από πορώδες υλικό που επιβραδύνει την κίνηση του νερού, ενώ στον ελεύθερο υδροφορέα το ανώτερο στρώμα είναι ο υδροφόρος ορίζοντας. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται κυρίως για την ανάλυση της ροής στα πηγάδια άντλησης και αποτελεί τη βάση για αρκετές αναλυτικές λύσεις περιλαμβάνοντας και αυτές των Thiem, Theis και Jacob. Επίσης η υπόγεια ροή θεωρείται ότι είναι οριζόντια μέσα στον υδροφορέα και κάθετη μέσα από τα στρώματα χαμηλής διαπερατότητας. Η ικανότητα του υδροφορέα να μεταφέρει νερό περιγράφεται από την υδραυλική αγωγιμότητα (hydraulic conductivity) ή τη μεταβιβασιμότητα (transmissivity). Η μεταβιβασιμότητα ενός περιορισμένου υδροφορέα είναι σταθερή εάν ο υδροφορέας είναι ομοιογενής και με σταθερό πάχος ενώ σε έναν ελεύθερο ποικίλει χωροταξικά και εξαρτάται από το κορεσμένο στρώμα και την ανύψωση του νερού.

Η προσέγγιση υδροφορέα χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει δισδιάστατη ροή τόσο για περιορισμένο όσο και ελεύθερο υδροφορέα. Εάν έχουμε διαρροή μπορεί να προσομοιωθεί θεωρώντας προσέγγιση τρισδιάστατης ροής δια της οποίας η κάθετη ροή μέσα στον υδροφορέα θα αντιπροσωπεύει τον όρο της διαρροής που προσθέτει ή αφαιρεί νερό από αυτόν. Το ποσό της διαρροής εξαρτάται από την εγκάρσια υδραυλική μεταβολή του αδιαπέρατου στρώματος, από το πάχος και από την υδραυλική αγωγιμότητα. [11]

2.Η θεωρήση συστήματος ροής (Flow system viewpoint)

Σ' αυτή τη προσέγγιση δεν μας απασχολεί το είδος των υδροφορέων και των αδιαπέρατων στρωμάτων, αλλά η δημιουργία της τρισδιάστατης κατανομής των υδραυλικών υψών, των υδραυλικών αγωγιμοτήτων και των αποθηκευτικών ιδιοτήτων σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος. Η προσέγγιση αυτή είναι τόσο για κάθετη όσο και για οριζόντια ροή σε δισδιάστατο ή τρισδιάστατο προφίλ. Μια γενική μορφή της θεμελιώδους εξίσωσης είναι :

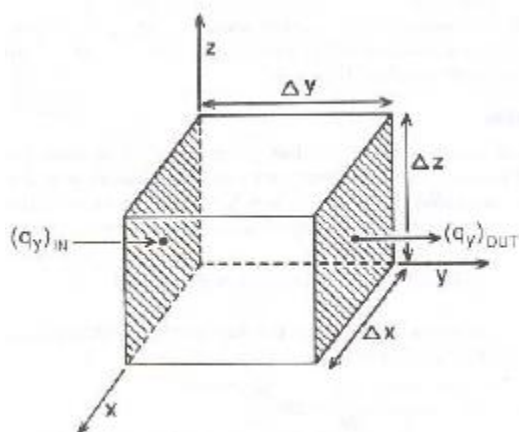
— — — — —

όπου K_x, K_y, K_z : οι συντελεστές της υδραυλικής αγωγιμότητας σε κάθε άξονα

S_s : η ειδική αποθηκευτικότητα

R : ένας θετικός όρος που αντιπροσωπεύει τον όγκο του νερού που εισρέει στο σύστημα ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα χρόνου.

Η εξίσωση είναι αποτέλεσμα της εξίσωσης της ισορροπίας του νερού και του νόμου του Darcy. Γίνεται δηλαδή θεωρήση ενός κύβου από πορώδες υλικό αρκετά μεγάλου έτσι ώστε να αντιπροσωπεύσει τις ιδιότητες του πορώδους μέσου αλλά και αρκετά μικρού έτσι ώστε να μην παρατηρούνται αλλαγές στα υδραυλικά ύψη.



Ο όγκος του κύβου ισούται με το γινόμενο $\Delta x \Delta y \Delta z$ και η ροή του νερού εκφράζεται με το ρυθμό εκφόρτωσης q : [11]

Το υδατικό ισοζύγιο (αρχή διατήρησης της μάζας) δηλώνει ότι:

$$\text{Έξοδος} - \text{Είσοδος} = \text{Αλλαγή στην Αποθήκευση}$$

Θεωρώντας τη ροή κατά μήκος του άξονα y του όγκου ελέγχου, η εισροή διέρχεται από επιφάνεια $\Delta x \Delta z$ και ισούται με q_y^{IN} ενώ η εκροή με q_y^{OUT} . Ο ογκομετρικός ρυθμός εκροής μείον τον ογκομετρικό ρυθμό εισροής ισούται με:

—

και μετατρέποντας την εξίσωση σε μερική διαφορική η αλλαγή του ρυθμού ροής κατά μήκος του άξονα y είναι:

—

Αντίστοιχες είναι και οι εξισώσεις της αλλαγής του ρυθμού ροής κατά μήκος των αξόνων x και z . Η ολική μεταβολή του ρυθμού ροής ισούται με την αλλαγή στην αποθήκευση και εκφράζεται ως:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -\frac{\partial S}{\partial t}$$

για να επιτραπεί επίσης η ύπαρξη μιας καταβόθρας (πηγάδι άντλησης) ή μιας πηγής (πηγάδι εμπλουτισμού) μέσα στον όγκο ελέγχου προστίθεται και ένας όρος ο οποίος θεωρείται θετικός όταν πρόκειται για πηγή.

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -\frac{\partial S}{\partial t} + Q$$

Η παραδοχή που γίνεται είναι ότι το ΔV είναι θετικό όταν το Δh είναι αρνητικό, ή αλλιώς ότι νερό απελευθερώνεται όταν το υδραυλικό ύψος μειώνεται. Ο ρυθμός αλλαγής της αποθήκευσης στον όγκο ελέγχου είναι:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{Με} \quad \frac{\partial S}{\partial h} = M$$

Άρα προκύπτει:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = M \frac{\partial h}{\partial t}$$

Η εξίσωση όμως αυτή έχει πολύ περιορισμένη χρήση αφού το q δεν είναι άμεσα μετρήσιμο. Όμως ο νόμος του Darcy δίνει μια σχέση μεταξύ των q και h και το υδραυλικό ύψος h είναι φυσικά άμεσα μετρήσιμο. Για τις τρεις διαστάσεις ο νόμος του Darcy γράφεται:

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

Και προκύπτει η εξίσωση

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = -M \frac{\partial h}{\partial t} + Q$$

Με τα K_x , K_y και K_z να είναι συγγραμμικά με τους άξονες x , y και z . Αν η γεωλογία είναι τέτοια που να μην επιτρέπει την ευθυγράμμιση των κύριων διευθύνσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας με ένα ορθογωνικό σύστημα συντεταγμένων, χρησιμοποιείται μια τροποποιημένη μορφή της εξίσωσης του συστήματος που

χρησιμοποιεί όλα τα στοιχεία του τανυστή της υδραυλικής αγωγιμότητας (K) που γράφεται ως εξής:

Τα στοιχεία του τανυστή μπορούν να μετρηθούν κατά τη διάρκεια ενός τεστ άντλησης, αλλά όταν οι κύριες διευθύνσεις είναι γνωστές, γίνεται στροφή των συντεταγμένων με τέτοιο τρόπο ώστε να μηδενίζονται τα στοιχεία του τανυστή που βρίσκονται εκτός της κύριας διαγωνίου. Αυτό επιτυγχάνεται ορίζοντας ένα καθολικό σύστημα συντεταγμένων για ολόκληρη της περιοχή μελέτης και τοπικά συστήματα συντεταγμένων για κάθε κελί ή στοιχείο του πλέγματος. Στα τοπικά συστήματα τα στοιχεία εκτός της κύριας διαγωνίου είναι μηδενικά. [10]

Αριθμητικές Μέθοδοι

Στις αριθμητικές μεθόδους απαιτείται μεγάλη προσοχή ώστε να αποφεύγεται το αριθμητικό σφάλμα και να προσεγγίζονται όσο το δυνατό οι πραγματικές τιμές. Αποτελούν χρήσιμο εργαλείο όταν η επίλυση των προβλημάτων γίνεται μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών. Έτσι για την επίλυση των εξισώσεων που απαιτούνται στα μοντέλα υπόγειας ροής χρησιμοποιούνται οι εξής:

- Πεπερασμένες διαφορές
- Πεπερασμένα στοιχεία
- Ολοκληρωμένες πεπερασμένες διαφορές
- Οριακή ολοκληρωτική μέθοδος (the boundary integral equation method)
- Αναλυτικά στοιχεία

Με τις δυο πρώτες να είναι πιο εφαρμόσιμες, μετατρέποντας το μαθηματικό μοντέλο σε μια μορφή η οποία εύκολα μπορεί να επιλυθεί με τη χρήση του υπολογιστή. Το σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων που παράγεται με αυτόν τον τρόπο μπορεί να εκφραστεί ως ένας πίνακας αλγεβρικών εξισώσεων. Έτσι η διαδικασία της επίλυσης αποτελείται από δύο βήματα:

1. την προσέγγιση των πεπερασμένων διαφορών ή των πεπερασμένων στοιχείων σε ένα μαθηματικό μοντέλο και

2. την επίλυση των αποτελεσμάτων με τον πίνακα των αλγεβρικών εξισώσεων

Η διαφορά μεταξύ των δύο είναι πως η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών δημιουργεί το πλέγμα και υπολογίζει μια τιμή για το υδραυλικό ύψος σε έναν κόμβο η οποία είναι η μέση τιμή σε όλο το τμήμα που περιβάλλει τον κόμβο αυτόν. Αντίθετα η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων καθορίζει ακριβώς την τιμή του υδραυλικού ύψους σε έναν κόμβο και προσδιορίζει την διακύμανση του ανάμεσα σε δύο κόμβους με διαφορετικές τιμές. Επίσης προσεγγίζει καλύτερα ακανόνιστα σχήματα και όρια και προσομοιώνει τα σημεία εμπλουτισμού και άντλησης όπως και τη μεταβαλλόμενη στάθμη του κινούμενου ύδατος πολύ καλύτερα. [11]

Πλέγματα Πεπερασμένων Διαφορών

Στα πλέγματα πεπερασμένων διαφορών οι κόμβοι ονομάζονται με τη χρήση δεικτών, i , j και k , οι οποίοι δείχνουν τη θέση τους σε μία γραμμή, στήλη και στρώμα του πλέγματος. Οι κόμβοι χωρίζονται έτσι ώστε τα διαστήματα Δx , Δy και Δz να είναι σταθερά αλλά όχι και απαραίτητα ίσα. Τις περισσότερες φορές πλέγμα με μικρές αποστάσεις των κόμβων χρησιμοποιείται σε περιοχές όπου συναντάται το κύριο πρόβλημα (π.χ. πηγάδια άντλησης) ή παρουσιάζονται άλλα σημαντικά υδρολογικά γνωρίσματα. Όταν στο εσωτερικό της περιοχής χρησιμοποιηθεί μικρό πλέγμα μπορεί να είναι απαραίτητο να αυξηθούν οι αποστάσεις των κόμβων του πλέγματος και έτσι να διογκωθεί, και να βγει έξω από τα όρια. Γι' αυτό το λόγο ίσως χρειαστεί να αραιωθούν λίγο και ο κανόνας που χρησιμοποιείται στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών είναι ότι το διάστημα ενός κόμβου δεν θα πρέπει να υπερβαίνει κατά 1.5 φορές την απόσταση του προηγούμενου κόμβου. [11]

Πλέγματα Πεπερασμένων Στοιχείων

Το βασικότερο μειονέκτημα στα πλέγματα των πεπερασμένων στοιχείων είναι ότι η εισαγωγή των στοιχείων που απαιτούνται για την κατασκευή του πλέγματος είναι πολύ χρονοβόρα και δύσκολη. Κάθε κόμβος αλλά και στοιχείο πρέπει να είναι αριθμημένο και η συντεταγμένη θέση (x , y , z) κάθε κόμβου και ο αριθμός αυτού θα πρέπει να είναι στενά συνδεδεμένος με κάθε στοιχείο πριν αυτό εισαχθεί στο μοντέλο. Η αρίθμηση γίνεται από κάτω προς τα πάνω ή από πάνω προς τα κάτω και από αριστερά προς τα δεξιά ανάλογα με το που είναι η μικρότερη διάσταση από το κύριο πρόβλημα. Η μέθοδος αυτή επεξεργάζεται ξεχωριστά κάθε στοιχείο και στη συνέχεια συναρμολογεί τις εξισώσεις κάθε στοιχείου σε έναν μαθηματικό πίνακα. Η αρίθμηση των κόμβων θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο, από τη μικρότερη διάσταση του πλέγματος, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το εύρος φάσματος των δεδομένων που εισάγονται στο μοντέλο. Κατά το σχεδιασμό του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων για ισοτροπικά υλικά θα πρέπει η αναλογία της μικρότερης και της μεγαλύτερης διάστασης να είναι κοντά στη μονάδα. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται τα σφάλματα και πετυχαίνεται καλύτερη μείωση με τη χρήση κανονικών τριγωνικών στοιχείων. Όταν χρησιμοποιούνται γραμμικά τριγωνικά στοιχεία, τότε μπορεί να είναι πιο εύκολο να προσδιοριστούν οι ιδιότητες στους κόμβους λόγω του ότι θα υπάρχουν πάντα λιγότεροι κόμβοι απ' ό,τι στοιχεία σ' αυτό το είδος πλέγματος.

Είναι δύσκολο να προσδιοριστούν οι τιμές των παραμέτρων που θα εισαχθούν στο πλέγμα επειδή το μοντέλο απαιτεί δεδομένα για κάθε κόμβο, στοιχείο και κελί και γενικά τα στοιχεία του πεδίου είναι πενιχρά. Όταν δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία για κάθε κόμβο μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρεμβολή. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος γι' αυτό το σκοπό είναι η παρεμβολή 'kriging', σύμφωνα με την οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί η καλύτερη γραμμική απροκάλυπτη εκτίμηση. Η μεταβλητή προσδιορίζεται ως μία τυχαία συνάρτηση, της οποίας η χωρική συσχέτιση προκύπτει από αλλαγές της απόστασης. Η μέθοδος του 'kriging' διαφέρει από άλλες μεθόδους παρεμβολής διότι υπολογίζει τη χωρική δομή της μεταβλητής και προωθεί μία εκτίμηση του σφάλματος της παρεμβολής ως τυπική απόκλιση των τιμών. Η εκτίμηση του λάθους είναι απαραίτητη όταν οι τιμές των παραμέτρων χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση του μοντέλου [11].

Το Θεμελιώδες μοντέλο και η κατασκευή του πλέγματος

Ο σκοπός της κατασκευής ενός θεμελιώδους μοντέλου είναι να απλοποιηθεί το πρόβλημα του πεδίου και να οργανωθούν τα πολύπλοκα δεδομένα του έτσι ώστε όλο το σύστημα να μπορεί να αναλυθεί άμεσα. Για την κατασκευή του θεμελιώδους μοντέλου είναι απαραίτητα τρία βήματα:

- Ο καθορισμός των υδρογραφικών μονάδων

Σε αυτό το στάδιο είναι απαραίτητη η χρήση γεωλογικών χαρτών, σε συνδυασμό με την υδρογεωλογία, για τον καθορισμό των υδρογραφικών μονάδων που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο.

- Ο καθορισμός του υδατικού ισοζυγίου

Εδώ καθορίζονται οι εισροές (βροχόπτωση, επιφανειακή ροή ή εναπόθεση από επιφανειακά νερά), οι εκροές (ανεξάντλητες πηγές, εναπόθεση σε ρέματα, εξατμισοδιαπνοή και άντληση), οι πηγές και οι αναμενόμενες κατευθύνσεις ροής.

- Ο καθορισμός του συστήματος της ροής

Τα υδρογραφικά στοιχεία αποτελούν τη βάση του θεμελιώδους μοντέλου. Οι υδρολογικές πληροφορίες χρησιμοποιούνται για να θεμελιώσουν την κίνηση του υπόγειου νερού του συστήματος ενώ οι πληροφορίες για τη βροχόπτωση, την εξάτμιση και την επιφανειακή απορροή όπως επίσης και τα δεδομένα για το υδραυλικό ύψος και τη γεωχημεία χρησιμοποιούνται περισσότερο για την ανάλυση.

Η διάσταση των επιπέδων του νερού χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η γενική διεύθυνση της υπόγειας ροής και ο συσχετισμός των υπόγειων υδροφορέων με τα επιφανειακά υδατικά συστήματα. Ο καθορισμός της ροής μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά και μόνο σε φυσικά υδρολογικά δεδομένα αλλά είναι επιθυμητό να περιέχει και πληροφορίες από τη γεωχημεία, για να εδραιωθεί η κίνηση του, να εκτιμηθεί ο ρυθμός της υπόγειας ροής και να αναγνωριστούν οι πηγές όπως επίσης και το ποσό της ανταλλαγής. [11]

Για την κατασκευή του πλέγματος του αριθμητικού μοντέλου πρέπει να γίνει κατάταξη του μοντέλου σε μια από τις κατηγορίες που ακολουθούν και αφορούν τη χωρική του διάταξη.

- Δισδιάστατα επιφανειακά (aquifer viewpoint)
- Δισδιάστατες τομές (flow system viewpoint)
- Ήμι-τρισδιάστατα (aquifer viewpoint)
- Τρισδιάστατα (flow system viewpoint)

Δισδιάστατα επιφανειακά μοντέλα

Σε αυτή την κατηγορία μπορούν να ανήκουν οι περιορισμένοι υδροφορείς, οι περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροή, οι ελεύθεροι και οι μεικτοί.

Περιορισμένοι υδροφορείς

Χρειάζεται να καθοριστεί η μεταβιβασιμότητα και ο συντελεστής αποθηκευτικότητας για κάθε κόμβο, κελί ή στοιχείο. Η μεταβολή στην μεταβιβασιμότητα μπορεί να αντιπροσωπεύει τις αλλαγές στην υδραυλική αγωγιμότητα ή το πάχος του υδροφορέα. Η υδραυλική αγωγιμότητα μπορεί να εκτιμηθεί από τη βιβλιογραφία. Οι τιμές της μεταβιβασιμότητας και του συντελεστή αποθηκευτικότητας μπορούν να εκτιμηθούν από τεστ άντλησης, εάν έχουν πραγματοποιηθεί, αλλιώς από τη βιβλιογραφία.[11]

Περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροή

Σε ένα σύστημα περιορισμένου υδροφορέα με διαρροή, το αδιαπέρατο στρώμα και ο παρακείμενος υδροφορέας που τροφοδοτεί τον περιορισμένο υδροφορέα δεν απεικονίζεται σαφώς στο μοντέλο αλλά εκπροσωπείται από έναν όρο διαρροής (leakage) ο οποίος ισούται με το λόγο της κάθετης υδραυλικής αγωγιμότητας (K_z) του αδιαπέρατου στρώματος ως προς το πάχος (b) αυτού.

Η πηγή του νερού σε έναν περιορισμένο υδροφορέα με διαρροή μπορεί να είναι είτε ένας άλλος περιορισμένος υδροφορέας είτε ένας ελεύθερος ή ακόμη και επιφανειακά νερά. Το μοντέλο γενικά όποια κι αν είναι η πηγή του νερού υποθέτει ότι το υδραυλικό ύψος σε αυτή είναι σταθερό με το χρόνο. Επίσης υποθέτει ότι δεν υπάρχει αποδέσμευση νερού εντός του αδιαπέραστου στρώματος. Η διαρροή του νερού από το αδιαπέραστο στρώμα πραγματοποιείται σε χρόνο t_s ο οποίος εξαρτάται από την ειδική αποθηκευτικότητα, την κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα και το πάχος του αδιαπέρατου στρώματος. [11]

Ελεύθεροι υδροφορείς

Στους ελεύθερους υδροφορείς γίνονται πολλές παραδοχές, γνωστές ως οι παραδοχές του Dupuit, με τις οποίες εξασφαλίζουμε οριζόντια ροή και σταθερό υδραυλικό ύψος σε σχέση με το βάθος. Οι παραδοχές αυτές είναι:

1. Ο υδροφορέας είναι ομογενής και ισότροπος
2. Ο υδροφορέας όπως και το νερό είναι πρακτικά ασυμπίεστα
3. Η επιφάνεια του νερού βρίσκεται σε ηρεμία (δεν υπάρχει ροή)
4. Ο υδροφορέας κατά το χρονικό διάστημα που αντλείται, δεν επανατροφοδοτείται είτε από άμεση κατείσδυση, είτε από υπερκείμενο ή υποκείμενο υδροφόρο στρώμα
5. Ισχύει ο νόμος του Darcy
6. Υπάρχει μόνιμη ροή του νερού με τα συνεπακόλουθα όπως σταθερή πιεζομετρική επιφάνεια, σταθερή ακτίνα επίδρασης, σταθερές ταχύτητες ροής
7. Υπάρχει συναρμογή της επιφάνειας πτώσης στάθμης με τις εκατέρωθεν επιφάνειες του υπόγειου νερού και ειδικά με την επιφάνεια του νερού μέσα στο πηγάδι
8. Η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας ροής είναι μηδενική ή αμελητέα σε σχέση με την οριζόντια και σαν συνέπεια αυτού σε όλα τα σημεία της κατακόρυφου η ταχύτητα είναι η ίδια

Χρησιμοποιώντας αυτές τις παραδοχές ένα τρισδιάστατο πρόβλημα μετατρέπεται σε δισδιάστατο ή ακόμη και σε μονοδιάστατο. Το μοντέλο υπολογίζει τη στάθμη του υπόγειου νερού για κάθε κόμβο. Η προσομοίωση απαιτεί πίνακες με τιμές από υδραυλική αγωγιμότητα, ενεργό πορώδες και το ύψος από ένα επίπεδο αναφοράς. Τόσο η υδραυλική αγωγιμότητα όσο και το ενεργό πορώδες υπολογίζονται από τεστ άντλησης. [11]

Μεικτοί υδροφορείς

Σε αυτά τα συστήματα υδροφορέα περιέχονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί που περιέχονται στις τρεις παραπάνω περιπτώσεις.

Ημι-τρισδιάστατα μοντέλα

Ένα ημι-τρισδιάστατο μοντέλο αποτελεί χρήσιμο εργαλείο στην προσομοίωση υδροφορέων στους οποίους παρεμβαίνουν αδιαπέρατα στρώματα. Τα αδιαπέρατα στρώματα δεν απεικονίζονται σε ένα ημι-τρισδιάστατο μοντέλο ούτε και το υδραυλικό ύψος. Η επίδραση των αδιαπέραστων στρωμάτων προσομοιώνεται από έναν όρο διαρροής L ο οποίος παρουσιάζει την κάθετη ροή ανάμεσα σε δυο υδροφορείς και είναι συνάρτηση της διαρροής leakage και της διαφοράς του υδραυλικού ύψους κατά μήκος του αδιαπέραστου στρώματος. Όταν υπάρχει διαφορά τάξης μεγέθους μικρότερη από δυο ανάμεσα στην υδραυλική αγωγιμότητα του αδιαπέραστου στρώματος και του υδροφορέα τότε προτιμάται η χρήση του ημι- τρισδιάστατου μοντέλου. [11]

Δισδιάστατα profile και τρισδιάστατα μοντέλα

Οι δισδιάστατες τομές (profiles) και τα τρισδιάστατα μοντέλα έχουν τα ίδια δεδομένα με ένα δισδιάστατο επιφανειακό μοντέλο με τη μόνη διαφορά ότι οι παράμετροι πρέπει να είναι ξεχωριστοί για κάθε στρώμα του μοντέλου. Αυτή η κατηγορία των μοντέλων χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει ελεύθερους υδροφορείς όταν η κάθετη κλίση του υδραυλικού ύψους είναι αρκετά μεγάλη. Τόσο οι πεπερασμένες διαφορές όσο και τα πεπερασμένα στοιχεία είναι αποτελεσματικά για να χρησιμοποιηθούν αλλά στην περίπτωση όπου έχουμε κίνηση της στάθμης του νερού τότε τα πεπερασμένα στοιχεία προτιμούνται. Επίσης τα τρισδιάστατα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναπαραστήσουν παροδική απελευθέρωση νερού στα περιορισμένα στρώματα, στα οποία θεωρείται μια τιμή της ειδικής αποθηκευτικότητας.

Για την κατασκευή του πλέγματος το κυριότερο πρόβλημα έγκειται στη συχνότητα των κόμβων σε συνδυασμό με τις πεπερασμένες διαφορές ή τα πεπερασμένα στοιχεία. Το κομβικό πλέγμα θα διευθετήσει τη δομή του μοντέλου ενώ η επιλογή του κατάλληλου τύπου θα καθορίσει τις γενικές διαστάσεις του πλέγματος. Υπάρχουν δυο τύποι πλεγμάτων με πεπερασμένες διαφορές. Το block-centered πλέγμα, που χρησιμοποιείται και περισσότερο, και το mesh-centered. Η μόνη διαφορά μεταξύ των δύο είναι στον τρόπο με τον οποίο οι οριακές διακυμάνσεις αντεπεξέρχονται. Η επιλογή του τύπου του μοντέλου θα καθορίσει τον αριθμό των στρωμάτων που απαιτούνται. Εάν μόνο ένα στρώμα χρειάζεται, αυτό θα αντιπροσωπεύει μία απλή υδρογραφική μονάδα. Η χρήση του θεμελιώδους μοντέλου επιτρέπει, τον καθορισμό του αριθμού των στρωμάτων που θα χρησιμοποιηθούν. [11]

Ένας παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι το μέγεθος της απόστασης των κόμβων στην οριζόντια κατεύθυνση που είναι συνάρτηση της αναμενόμενης καμπυλότητας του ύψους του νερού ή της ποτενσιομετρικής επιφάνειας. Οι αλλαγές του υδραυλικού ύψους στην κάθετη κατεύθυνση θα επιδράσουν στην επιλογή της κάθετης απόστασης των κόμβων. Ένας ακόμη παράγοντας είναι μεταβλητότητα των ιδιοτήτων του υδροφορέα. Τυπικά τα στρώματα των μοντέλων αντιστοιχούν σε μια υδρογραφική μονάδα, παρόλα αυτά όμως εάν υπάρχουν σημαντικές κάθετες κλίσεις στο υδραυλικό ύψος τότε δύο ή και περισσότερα στρώματα μπορούν να αναπαρασταθούν από μια απλή υδρογραφική μονάδα. Γενικά οι αλλαγές στην οριζόντια κατεύθυνση πραγματοποιούνται σε μεγαλύτερη απόσταση απ' ότι στην κάθετη απόσταση. Τέλος ένας ακόμη παράγοντας που θα επηρεάσει στην επιλογή της απόστασης

των κόμβων είναι και η έκταση της περιοχής. Ένα πλέγμα με μικρό αριθμό κόμβων είναι προτιμότερο, με απώτερο σκοπό την ελαχιστοποίηση του αριθμού των δεδομένων και των υπολογισμών για λόγους πρακτικότητας. Ακόμη είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθεί ένας μεγάλος αριθμός από κόμβους ούτως ώστε η αναπαράσταση του συστήματος να είναι ακριβής. [11]

Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες αποτελούν τη μαθηματική δήλωση που καθορίζει την εξαρτημένη μεταβλητή (υδραυλικό ύψος) ή την παράγωγό της (ροή) στα όρια της περιοχής του προβλήματος.

Για τη σωστή δόμηση ενός μοντέλου, που καλείται να προσομοιώσει ένα πραγματικό πρόβλημα, οι οριακές συνθήκες είναι απαραίτητες. Σε προσομοιώσεις σταθερής κατάστασης, τα όρια καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη μορφή της ροής.

Τα όρια μπορεί να οφείλονται στην πράξη σε διάφορες αιτίες. Ενδεικτικά, τα φυσικά όρια των συστημάτων ροής υπογείων υδάτων σχηματίζονται από τη φυσική παρουσία ενός αδιαπέρατου στρώματος βράχου ή από ένα στρώμα επιφανειακού ύδατος, ενώ διαφορετικού τύπου όρια σχηματίζονται ως αποτέλεσμα υδρολογικών συνθηκών, όπως η ύπαρξη υπόγειων χωρισμάτων και ποταμών. [11]

Τα υδρογεωλογικά όρια εκφράζονται από τους ακόλουθους τρεις τύπους μαθηματικών συνθηκών:

- Τύπος 1: Όρια καθορισμένου υδραυλικού ύψους (Συνθήκες Dirichlet), για τα οποία το υδραυλικό ύψος είναι σταθερό.
- Τύπος 2: Όρια καθορισμένης ροής (Συνθήκες Neumann), για τα οποία η ροή κατά μήκος του ορίου είναι σταθερή.
- Τύπος 3: Όρια εξαρτημένα από το υδραυλικό ύψος ροής (Συνθήκες Cauchy ή μικτού ορίου), για τα οποία η ροή κατά μήκος του ορίου υπολογίζεται με δεδομένη μία τιμή του υδραυλικού ύψους στο όριο. Αυτός ο τύπος οριακής συνθήκης καλείται μερικές φορές συνθήκη μικτού ορίου επειδή συσχετίζει τις οριακές τιμές της στάθμης με τη ροή. [11]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ FEFLOW

Για την μελέτη του προβλήματος της υφαλμύρισης στην περιοχή της Χερσονήσου, θα χρησιμοποιηθεί το μαθηματικό μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας, FEFLOW. Πρόκειται για ένα λογισμικό μοντελοποίησης το οποίο είναι ικανό για την προσομοίωση της ροής των υπόγειων υδάτων, τη μεταφορά μάζας και τη μεταφορά θερμότητας σε πορώδη υλικά. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση της εξίσωσης της ροής των υπογείων υδάτων σε κορεσμένες και ακόρεστες συνθήκες, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταφορά μάζας και θερμότητας, της επίδρασης της πυκνότητας και της χημικής κινητικής για πολυμερή συστήματα. Το λογισμικό αυτό εφαρμόστηκε για πρώτη φορά από τον Δρ Hans-Jörg G. Diersch το 1979. Για να γίνει εφαρμογή όλων των παραπάνω το μαθηματικό μοντέλο επιλύει μια σειρά εξισώσεων, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω. [14]

5.1 Οι θεμελιώδεις εξισώσεις

Ένα μαθηματικό μοντέλο προσομοιώνει την υπόγεια ροή έμμεσα με τη χρήση θεμελιωδών εξισώσεων, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τη φυσική διαδικασία η οποία λαμβάνει χώρα στο σύστημα. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιεί το συγκεκριμένο μοντέλο είναι οι εξής:

Για τον υπολογισμό της εξίσωσης ροής

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) = \nabla \cdot (K \nabla \phi)$$

Για την αρχή διατήρησης της μάζας

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) = \nabla \cdot (K \nabla \phi)$$

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας Darcy

$$\mathbf{v} = -K \nabla \phi$$

Για το υδραυλικό ύψος

$$\phi = \frac{p}{\rho g} + z$$

Και για την υδραυλική αγωγιμότητα

Όπου h : το υδραυλικό ύψος

: ταχύτητα Darcy του υγρού μέσου

C : συγκέντρωση του υγρού

T : η θερμοκρασία

: η πυκνότητα του υγρού

: πυκνότητα του στερεού

: συντελεστής αποθηκευτικότητας

: υδραυλική αγωγιμότητα

: μοναδιαίο διάνυσμα της βαρύτητας

: ιξώδες του υγρού

R : ο συντελεστής επιβράδυνσης

: υδροδυναμική διασπορά

ε : το πορώδες

Το μοντέλο χρησιμοποιεί την προσέγγιση κατά Boussinesq, η λαμβάνει υπόψη την πυκνότητα σε συνθήκες όπου αλλάζει τόσο η συγκέντρωση όσο και η θερμοκρασία

— —

— — — —

— —

Όπως πολύ εύκολα μπορούμε να παρατηρήσουμε η εξίσωση Boussinesq διαφέρει από τη γενική περίπτωση κατά ένα μόνο όρο, τον

Όπου — — — — —

με : κλάσμα διαφοράς πυκνότητας των δυο υγρών

και : συντελεστής διόγκωσης του υγρού

Το πρώτο μέρος της εξίσωσης μηδενίζεται όταν οι αλλαγές στη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση είναι αμελητέες, ενώ το δεύτερο μέρος όταν η πυκνότητα είναι κάθετη με τη ροή. Στην περίπτωση που μελετήθηκε η θερμοκρασία παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης ενώ παρατηρούνται αλλαγές στη συγκέντρωση.

Για να προκύψει η εξίσωση του Darcy που χρησιμοποιεί το μοντέλο για την επίλυση της ροής, χρησιμοποιούνται οι μαθηματικές σχέσεις που ακολουθούν:

Η εξίσωση του Darcy

Και λαμβάνοντας υπόψη το υδραυλικό ύψος h και την πυκνότητα ρ προκύπτει:

Όπου σε συνδυασμό με την εξίσωση _____

έχουμε τη σχέση _____

: η πίεση του υγρού

: το υψόμετρο

στη συνέχεια για την πυκνότητα του υγρού γνωρίζουμε ότι:

Όπου : συμπιεστότητα υγρού

: κλάσμα διαφοράς πυκνότητας των δυο υγρών

: συντελεστής διόγκωσης του υγρού

5.2 Οριακές συνθήκες:

Συνθήκη 1ης τάξης (τύπος Dirichlet)

Τα όρια καθορισμένου υδραυλικού ύψους ορίζονται δηλώνοντας τους κόμβους και τη σταθερή τιμή υδραυλικού ύψους σε καθένα από αυτούς. Το πρόγραμμα αυτόματα ορίζει ως σταθερούς όρους τις γραμμές και στήλες του πίνακα των συντελεστών, που σχετίζονται με αυτούς τους κόμβους. Η εξίσωση που αντιπροσωπεύει αυτή την συνθήκη είναι:

και λαμβάνει υπόψη την κάθετη μεταβολή του υδραυλικού ύψους ανάλογα με το βάθος. Το πιεζομετρικό ύψος στη θάλασσα σχετίζεται με την πυκνότητα του αλμυρού νερού στην πραγματικότητα και με τις παρακάτω εξισώσεις γίνεται μετατροπή του αλμυρού νερού (σε ισοδύναμο υδραυλικό ύψος φρέσκου νερού (h).

$$\begin{aligned} & \frac{\rho_{\text{αλμ}}}{\rho_{\text{φρ}}} h_{\text{αλμ}} = h_{\text{φρ}} \\ & \frac{\rho_{\text{αλμ}}}{\rho_{\text{φρ}}} h_{\text{αλμ}} = h_{\text{φρ}} \end{aligned}$$

όπου $\frac{\rho_{\text{αλμ}}}{\rho_{\text{φρ}}}$ το κλάσμα διαφοράς πυκνότητας των δυο υγρών και z το υψόμετρο οπότε προκύπτει η παρακάτω εξίσωση μετατροπής:

Συνθήκη 2ης τάξης (τύπος Neumann)

Όταν η ροή θεωρείται σταθερή κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους L η ολοκλήρωση των σχέσεων θα δίνει τις κομβικές κατανομές. Έτσι ο χρήστης αρκεί να ορίσει την ογκομετρική ροή σε ένα κόμβο για να αναπαραστήσει τη ροή κατά μήκος ενός ορίου. Οι εξισώσεις που αντιστοιχούν σε αυτό το είδος οριακής συνθήκης ακολουθούν:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \\ & \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \end{aligned}$$

Όπου : η ταχύτητα Darcy

: κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας Darcy

: οριακή τιμή πλευρικών εισροών για δισδιάστατο και τρισδιάστατο υδροφορέα

: κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα

Συνθήκη 3ης τάξης

Οι οριακές συνθήκες διαρροής εισάγονται με μια μετατροπή των εξισώσεων του συστήματος. Έτσι εισάγεται ένας όρος αγωγιμότητας διαρροής (υδραυλική αγωγιμότητα προς την απόσταση). Ο όρος αυτός ολοκληρώνεται στην περιοχή και αναπαριστά την κάθετη διαρροή.

: παράμετρος διαρροής

: τα υδραυλικά ύψη

Συνθήκη 4ης τάξης

Με αυτή τη συνθήκη μπορεί ο χρήστης να εισάγει πληροφορίες σε συγκεκριμένα σημεία στην περιοχή μελέτης. Συγκεκριμένα σε αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκε για την εισαγωγή δεδομένων άντλησης στα πέντε πηγάδια της περιοχής.

Όπου : η συνάρτηση της παροχής του πηγαδιού σε σχέση με το χρόνο και το χώρο

: παροχή άντλησης του πηγαδιού

: οι συντεταγμένες του κάθε πηγαδιού

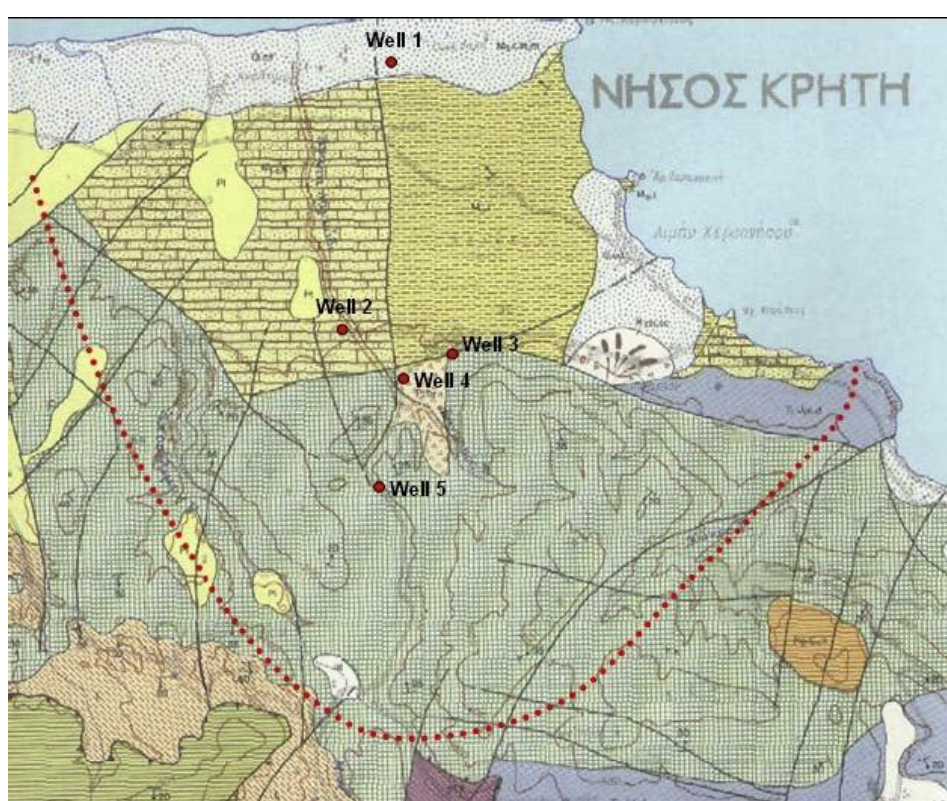
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 Προετοιμασία του μοντέλου

Για την μελέτη του μεγέθους, της έκτασης και του ρυθμού εξάπλωσης του φαινομένου της υφαλμύρισης στην περιοχή της Χερσονήσου, έγινε χρήση του μοντέλου FEFLOW, το οποίο είναι ένα μαθηματικό μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας προσομοίωσης της υπόγειας ροής με χρήσεις GIS.

Για τη μελέτη της περιοχής και του μετώπου της υφαλμύρισης θα πρέπει να εισαχθούν τα δεδομένα στο μοντέλο και να αρχίσει η επεξεργασία αυτών.

Στο φύλλο εργασίας, γίνεται εισαγωγή των χαρτών της περιοχής (τοπογραφικός χάρτης και χάρτης με την ακριβή τοποθεσία των πηγαδιών άντλησης) από το περιβάλλον του γρήγορου μενού πρόσβασης.



Σχήμα 10. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης

	ασβεστόλιθοι - δομολίτες		άργιλοι
	βιοκλαστικοί λατυποπαγείς ασβεστόλιθοι		άμμος - θαλάσσιες αποθέσεις
	μάργες - μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι		

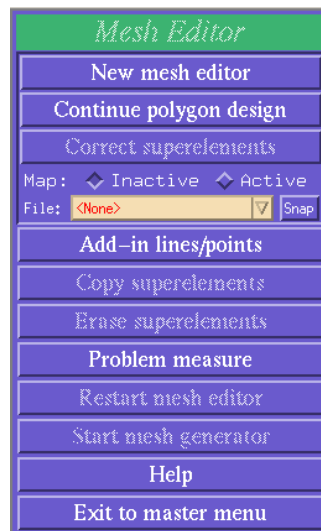
Υπόμνημα Οι γεωλογικοί σχηματισμοί

Ο πίνακας 5 αναφέρει τις υδραυλικές αγωγιμότητες που εμφανίζονται στους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής μελέτης:

Γεωλογικοί Σχηματισμοί	Υδραυλική Αγωγιμότητα (m/d)
Ασβεστόλιθοι-δολομίτες	12.96
Βιοκλαστικοί λατυποπαγείς ασβεστόλιθοι	5.2
Μάργες-μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι	0.15
Άργιλοι	0.6048
Άμμος	430

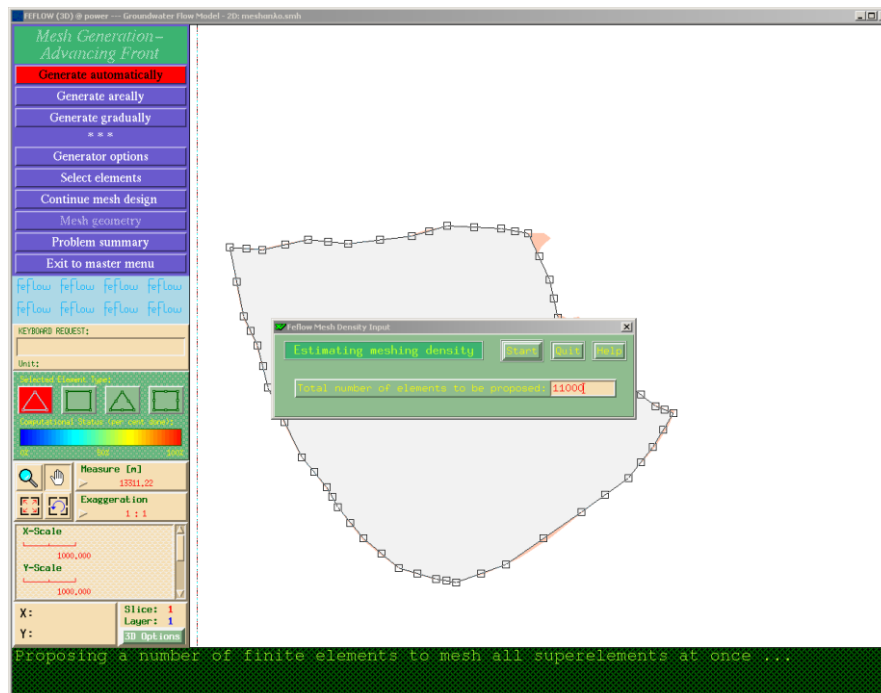
Πίνακας 5. Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας για τους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής

Πρωταρχικό ρόλο για τη σωστή και όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτική της πραγματικότητας λύση, είναι η δημιουργία σωστού κάναβου, μέσω της εντολής mesh editor που ακολουθεί στο σχήμα 11:



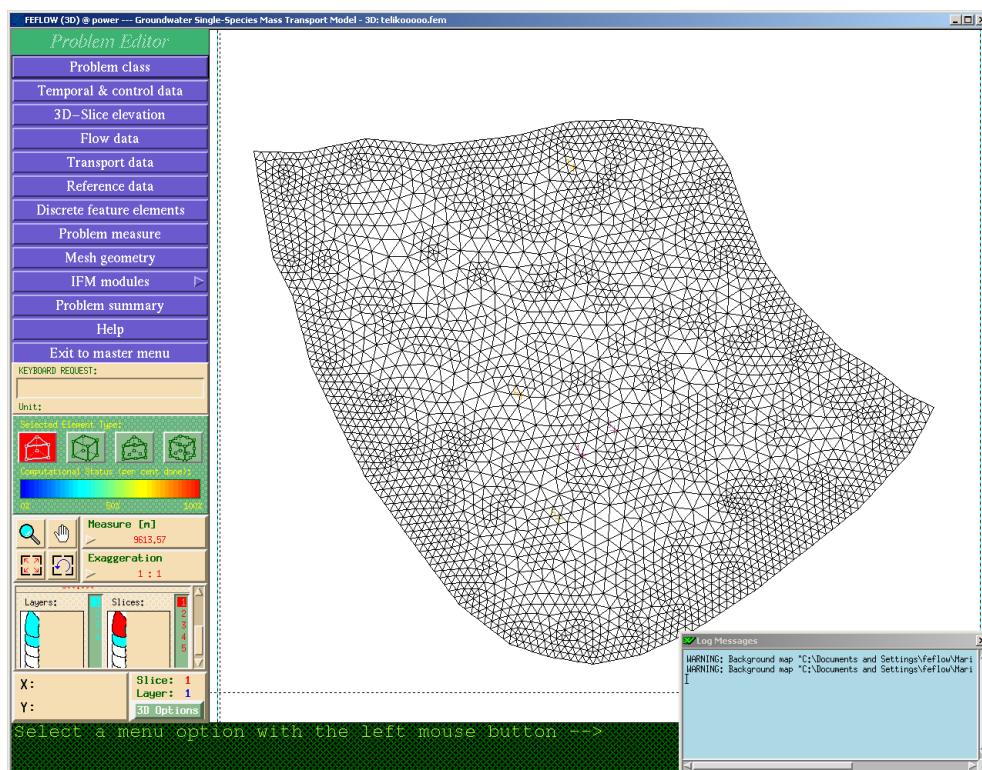
Σχήμα 11. Τρόπος δημιουργίας του κάναβου μέσω εντολής mesh editor

Έγινε επιλογή 11000 πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία θα ενωθούν, δημιουργώντας τον επιθυμητό κάναβο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 12.



Σχήμα 12. Η οριοθέτηση της περιοχής για την δημιουργία του κάναβου

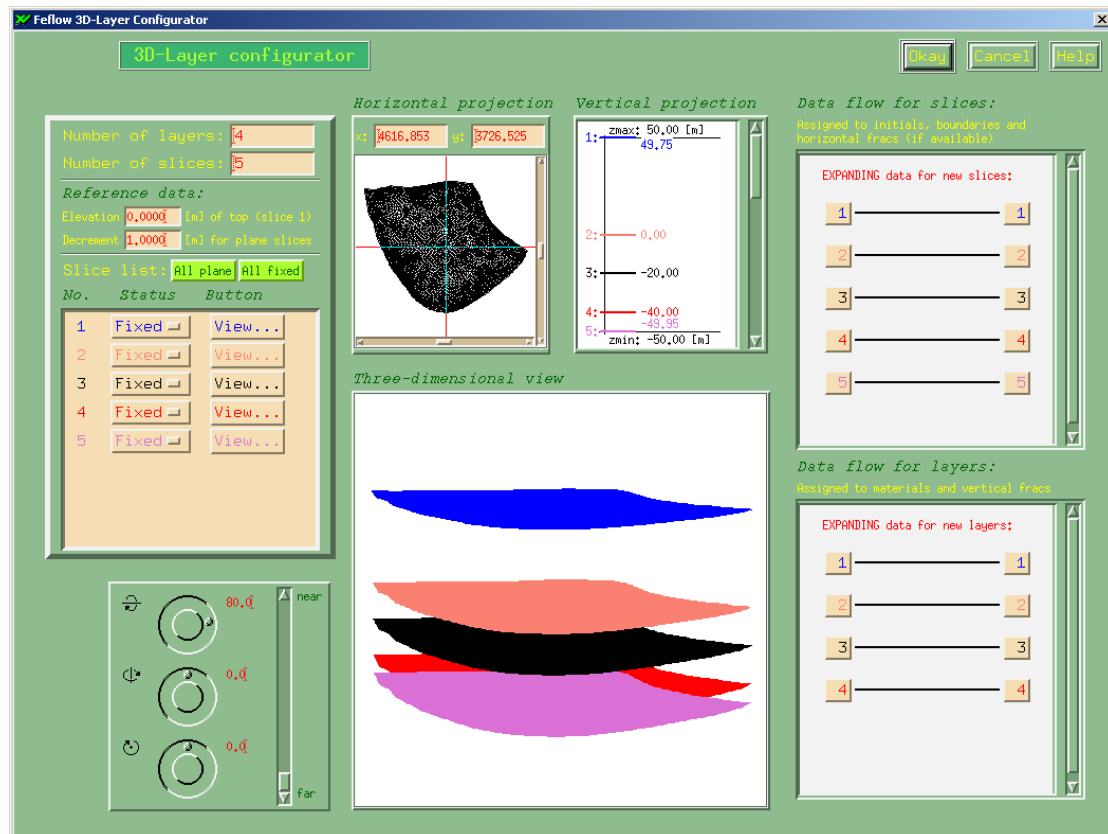
Έτσι δημιουργείται το νέο περιβάλλον εργασίας, το οποίο έχει τη μορφή του Σχήματος 13 που ακολουθεί. Το επόμενο βήμα είναι η αποθήκευση του κάναβου που δημιουργήθηκε ώστε οι όποιες αλλαγές ακολουθήσουν να μην επηρεάσουν τη μορφή του.



Σχήμα 13. Ο κάναβος που δημιουργήθηκε

Ακολουθεί η εισαγωγή των δεδομένων για επεξεργασία και η περιοχή χωρίζεται σε επίπεδα με βάση το χαμηλό υψόμετρο της τάξης των 50 m, από την γραμμή

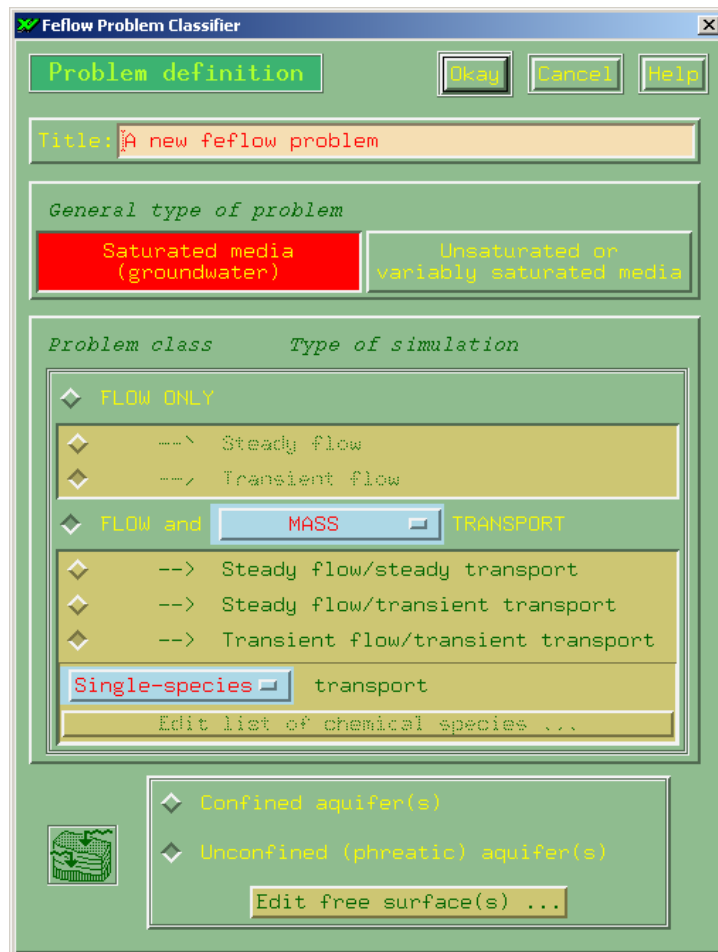
εργαλείων και την εντολή dimension. Έτσι στο Σχήμα 14 φαίνεται ο αριθμός των στρωμάτων και των επιπέδων:



Σχήμα 14. Δημιουργία των επιπέδων και των στρωμάτων

Το πρώτο επίπεδο είναι ανεξάρτητο, ενώ τα υπόλοιπα που ακολουθούν συνδέονται μεταξύ τους. Ο διαχωρισμός αυτός βοηθάει να γίνει καλύτερη επίλυση από το μοντέλο χωρίς να υπάρχουν μεγάλες αποστάσεις που δεν μπορεί να επιλύσει και να υπολογίσει άμεσα τις αλλαγές από σημείο σε σημείο.

Με την εντολή problem class ορίζεται η υπόγεια ροή και η μεταφορά μάζας, σε μη σταθερές συνθήκες. Πρόκειται για κορεσμένη ζώνη και ελεύθερο υδροφορέα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 15.



Σχήμα 15. Εισαγωγή δεδομένων για το είδος της ροής

Τα υδρολογικά στοιχεία για την περιοχή εισάγονται με την εντολή flow data που με τη σειρά της έχει τρεις υποεντολές: flow initials, flow boundaries και flow materials, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 16.

Flow initials: ορίζεται το μέσο υδραυλικό ύψος ίσο με 5 m. Η τιμή αυτή προέκυψε σαν τη μέση τιμή από τις ισοϋψείς, με την μέγιστη να είναι κοντά στα 10 m και την ελάχιστη στο όριο της θάλασσας, στα 0 m.

Flow boundaries:



Σχήμα 16. Τρόπος εισαγωγής υδρολογικών στοιχείων

Ο χάρτης που ήδη υπάρχει σαν δεδομένο στο μοντέλο, δείχνει την τοποθεσία των πηγαδιών άντλησης και την ακριβή τοποθεσία για να γίνει εισαγωγή των αντίστοιχων παροχών άντλησης με την εντολή well (Συνθήκη 4^{ου} είδους):

Πηγάδι 1: 1800m³/d

Πηγάδι 2: 2520 m³/d

Πηγάδι 3: 456 m³/d

Πηγάδι 4: 2520 m³/d

Πηγάδι 5: 146 m³/d

Η βαθμονόμηση του μοντέλου έγινε μεταβάλλοντας, τις πλευρικές εισροές (Συνθήκη 2^{ου} είδους) στα σημεία των ορίων της περιοχής όπου υπάρχουν διαπερατά πετρώματα, χρησιμοποιώντας την εντολή flux, και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου με το χάρτη υδραυλικών υψών από προηγούμενη μελέτη για την συγκεκριμένη περιοχή [8]. Ο χάρτης αυτός παρουσιάζεται στο Σχήμα 17.

Μετά από αρκετές δοκιμές τόσο για την χειμερινή όσο και για τη θερινή περίοδο προέκυψαν οι παρακάτω τιμές:

Χειμερινή περίοδο: 0.15 - 0.07 - 0.04 - 0.156 - 0.02 m/d

Θερινή περίοδο: 0.15 - 0.04 - 0.03 - 0.15 - 0.01 m/d

Οι παραπάνω τιμές πολλαπλασιάζονται αυτόματα από το μοντέλο με την επιφάνεια εισροής, ώστε να υπολογίζεται ο σταθερός όγκος νερού ανά μονάδα χρόνου (σε m³/d) που εισέρχεται στους κόμβους, όπου εφαρμόζεται η οριακή αυτή συνθήκη.

Κατά μήκος της ακτογραμμής εισάγεται με την εντολή head το υδραυλικό ύψος (Συνθήκη 1^{ου} είδους) το οποίο μεταβάλλεται ανάλογα με το βάθος και λόγω διαφοράς πυκνότητας σύμφωνα με την εξίσωση:

—

1^ο επίπεδο:

2^ο επίπεδο:

3^ο επίπεδο:

4^ο επίπεδο:

Το μαθηματικό μοντέλο δέχεται δεδομένα για όλο το χρόνο, γεγονός που σημαίνει ότι ανάλογα με την εποχή, πρέπει να υπάρχουν τα αντίστοιχα δεδομένα και με αυτόματο τρόπο να εναλλάσσονται καθ' όλη τη διάρκεια των ετών που προσομοιώνει το μοντέλο. Για παράδειγμα, στη διάρκεια του καλοκαιριού όλες οι γεωτρήσεις είναι ανοιχτές και αντλούν με δεδομένη παροχή, ενώ στη διάρκεια του χειμώνα οι παροχές άντλησης είναι μηδενικές. Έτσι λοιπόν, κάθε δεδομένο που εισάγεται (π.χ. παροχή πηγαδιών, πλευρικές εισροές, βροχόπτωση), πρέπει να έχει άμεση αντιστοιχία με το χρόνο. Από την εντολή in(+)/out(-) flow on top δημιουργούνται πίνακες που θα εξυπηρετούν στην αντιστοιχία των δεδομένων παροχής με το χρόνο.

Τα δεδομένα της βροχόπτωσης προκύπτουν από την υδρολογική μελέτη του νομού Ηρακλείου, όπου το ποσοστό του όγκου της βροχόπτωσης που διηθείται

είναι 11% για αδιαπέρατους σχηματισμούς και 23% για διαπερατούς. Από την συνολική έκταση που καταλαμβάνει η περιοχή μελέτης (17.729.185 m²), το 77.77% αποτελούν οι υδατοπερατοί σχηματισμοί (13.788.415 m²), ενώ το υπόλοιπο 22.23% οι αδιαπέρατοι (3.941.070 m²). Αν από το τμήμα των υδατοπερατών αφαιρεθεί των κατοικημένων εκτάσεων, όπου ουσιαστικά η διήθηση είναι μηδενική, υπολείπεται το 46.7% (10.637.511 m²). Οπότε η διήθηση θα είναι σύμφωνα με τον πίνακα 5:

ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ					
m/d	m/d διηθούμενης ποσότητας σε υδατοπερατούς σχηματισμούς	m/d διηθούμενης ποσότητας σε αδιαπέρατους σχηματισμούς	Σύνολο m/d	ημερομηνία	Ημέρες (days)
9,5	1,02	0,23	1,25	04/01/00	0
4,73	0,51	0,115	0,62	05/01/00	30
1,17	0,125	0,028	0,15	06/01/00	61
0,33	0,035	0,008	0,04	07/01/00	91
0,2	0,02	0,005	0,03	08/01/00	122
5,9	0,63	0,14	0,78	09/01/00	153
21,63	2,32	0,529	2,85	10/01/00	183
19,67	2,11	0,481	2,59	11/01/00	214
25,97	2,789	0,635	3,42	12/01/00	244
30,03	3,225	0,73	3,96	13/01/00	275
22,53	2,42	0,551	2,97	14/01/00	306
19,4	2,08	0,47	2,56	15/01/00	334
9,5	1,02	0,23	1,25	16/01/00	365

Πίνακας 5. Στοιχεία βροχόπτωσης της περιοχής μελέτης

Ακολουθούν στον πίνακα 6 και 7, δυο παραδείγματα για την εισαγωγή δεδομένων στο πηγάδι 1 αλλά και των πλευρικών εισροών.

Πηγάδι1:

t	f value
0	1800
180	1800
180	0
365	0

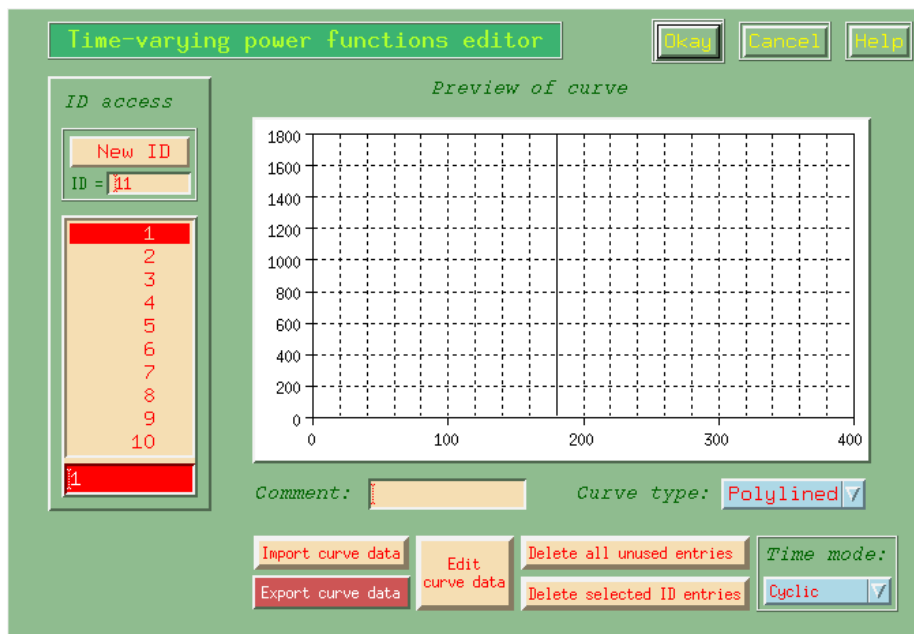
Πίνακας 6. Τρόπος εισαγωγής παροχής άντλησης

Flux:

t	f value
0	0.04
180	0.04
180	0.07
365	0.07

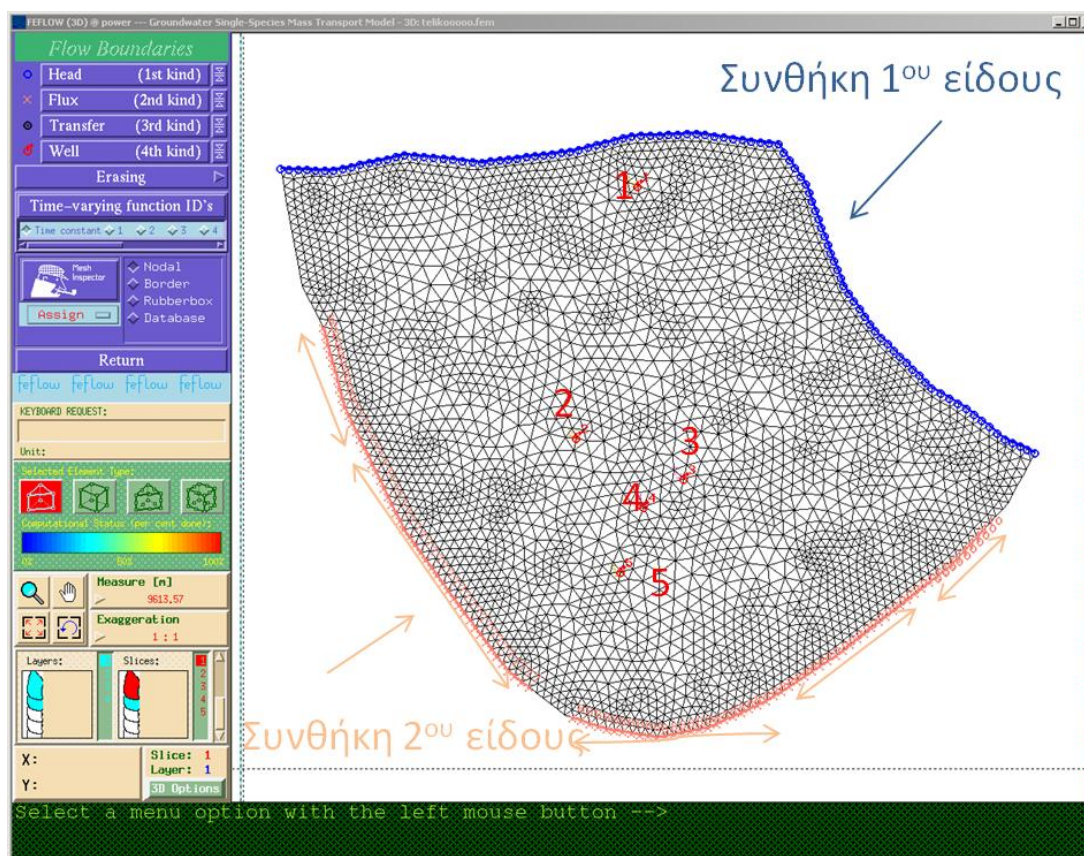
Πίνακας 7. Τρόπος εισαγωγής πλευρικών εισροών

Η εισαγωγή των παραπάνω γίνεται όπως φαίνεται στο σχήμα 17:



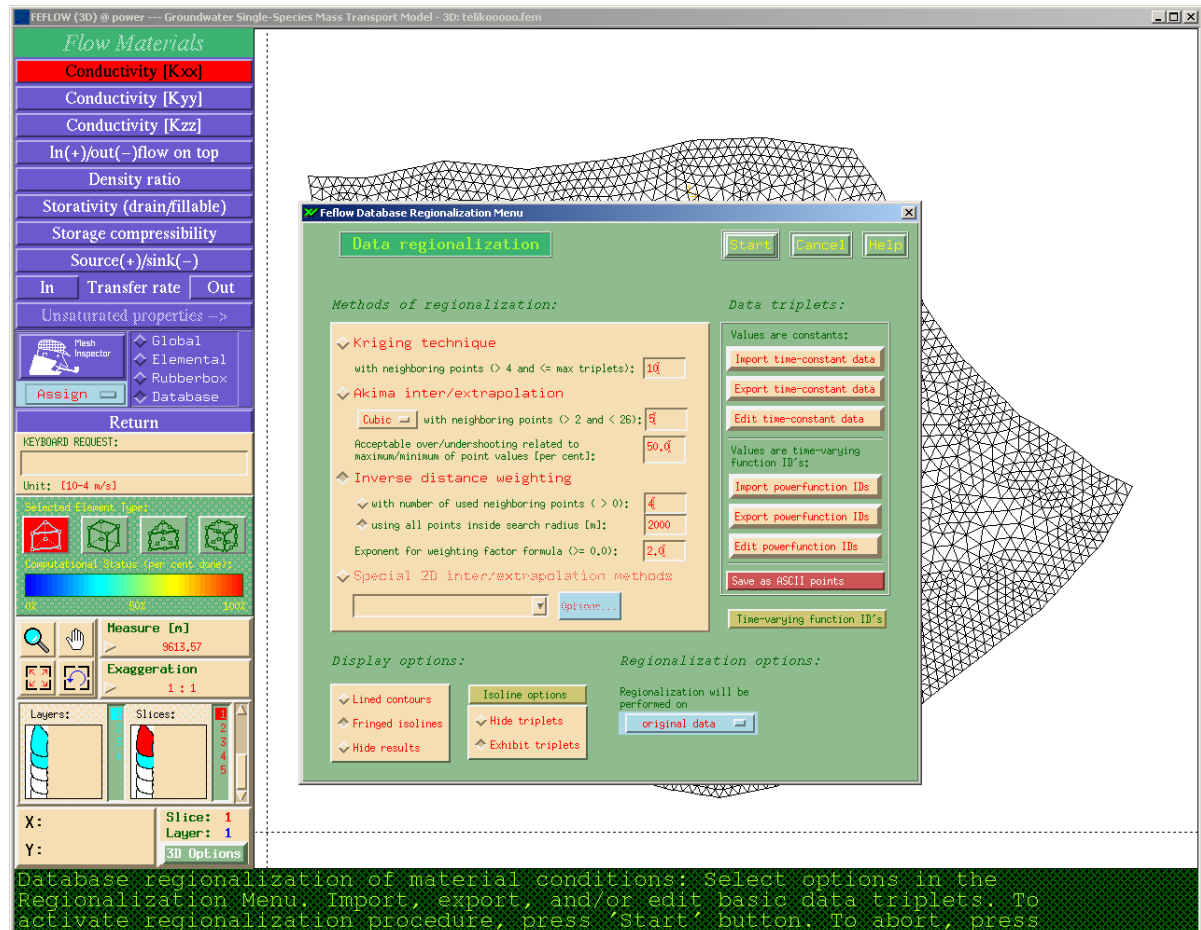
Σχήμα 17. Εισαγωγή δεδομένων βροχόπτωσης

Με την ολοκλήρωση της εισαγωγής δεδομένων για το flow boundaries, εμφανίζεται στην οθόνη ό,τι έχει εισαχθεί και το αποτέλεσμα είναι αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 18:



Σχήμα 18. Ολοκλήρωση εισαγωγής υδρολογικών στοιχείων

Flow materials: Για τις υδραυλικές αγωγιμότητες οι τιμές και για τις τρεις κατευθύνσεις x, y, z, εισάγονται από αρχείο (import time constant data), ενώ για την καλύτερη επίλυση του προβλήματος γίνεται επιλογή της μεθόδου παρεμβολής inverse distance με ακτίνα επιρροής 2000 m, όπως φαίνεται στο Σχήμα 19.



Σχήμα 19. Εισαγωγή της υδραυλικής αγωγιμότητας

Τέλος για την μεταφορά της μάζας και την απεικόνιση του μετώπου υφαλμύρισης χρησιμοποιήθηκε από το αρχικό μενού η εντολή transport data, σχήμα 20, και mass transport boundaries, σχήμα 21.

Σχήμα 20. Τρόπος εισαγωγής μεταφοράς μάζας

Σχήμα 21. Τρόπος εισαγωγής αρχικής συγκέντρωσης χλωριόντων στην ακτογραμμή

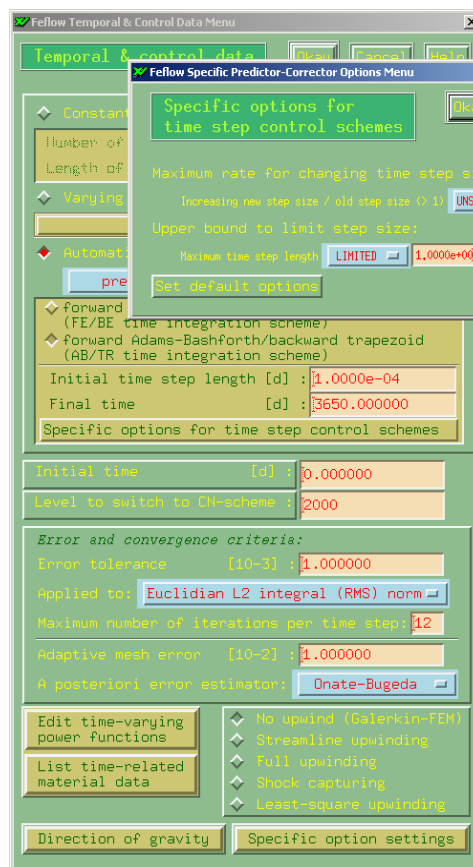
Μέσω της υποεντολής mass, εισάγεται η οριακή συγκέντρωση μάζας κατά μήκος της ακτογραμμής και χρησιμοποιείται η συγκέντρωση χλωριόντων στη θάλασσα που είναι ίση με 18980 mg/L.

Στη συνέχεια, μέσω της εντολής mass materials, για porosity εισήχθη η τιμή 0.3, για Longitudinal dispersivity η τιμή 30 και για Transverse dispersivity η τιμή 0.3, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 22:

Σχήμα 22. Τρόπος εισαγωγής παραγόντων

Ανάλογα με την περίπτωση – σενάριο που προσομοιώνει το μοντέλο, επιλέγεται και η χρονική διάρκεια επίλυσης και το χρονικό βήμα αυτής. Έτσι με την εντολή temporal & control data εισάγονται τα χρονικά δεδομένα του προβλήματος κάθε φορά και επιλέγεται, από το μενού του specific option settings, η εξίσωση Boussinesq για την καλύτερη επίλυση του προβλήματος της υφαλμύρισης. Ωστόσο οι περισσότερες περιπτώσεις που μελετήθηκαν σε αυτή την εργασία,

έγιναν για 10 χρόνια = 3650 ημέρες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 23, εκτός του τελευταίου σεναρίου που έγινε για 40 χρόνια.



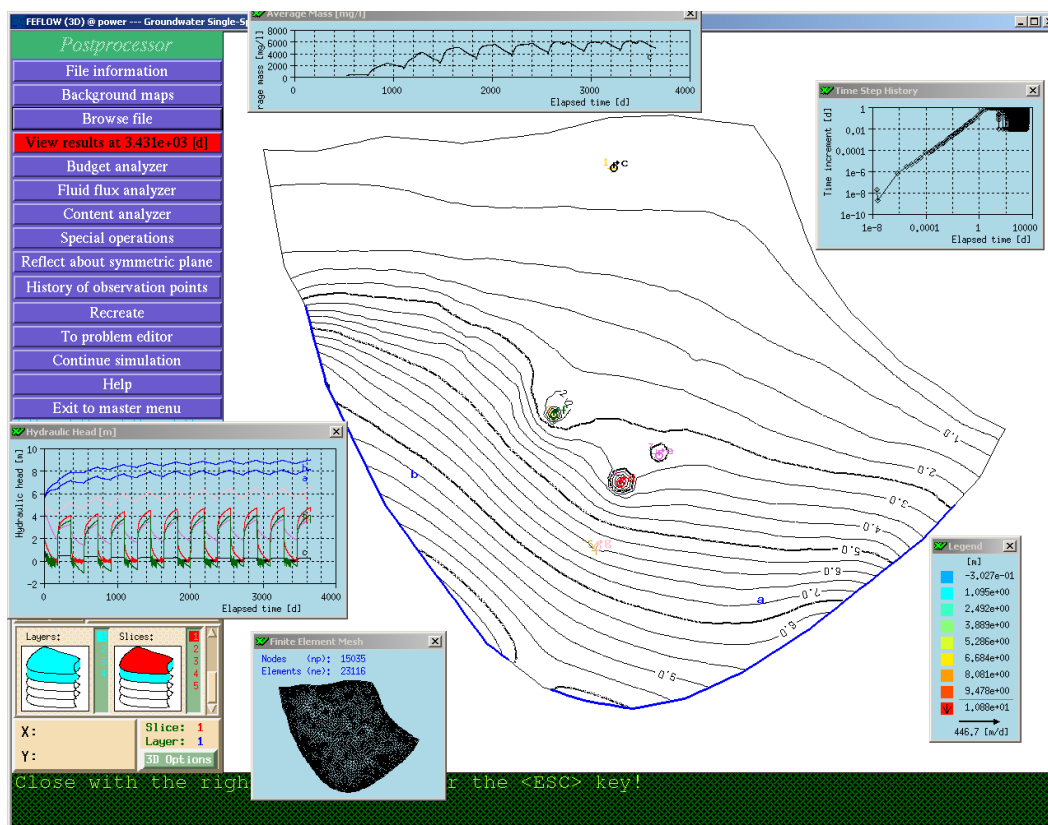
Σχήμα 23. Εισαγωγή δεδομένων για το χρόνο

6.2 Αποτελέσματα

Μετά την εισαγωγή όλων των απαραίτητων δεδομένων και την επίλυση των εξισώσεων από το μοντέλο, γίνεται η επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Όλα τα αποτελέσματα μπορούν να εξεταστούν για κάθε επίπεδο ξεχωριστά και να εξακριβωθεί το βάθος του προβλήματος της υφαλμύρισης, ανά περίοδο (χειμερινή – θερινή) αλλά και να παρατηρηθούν ταυτόχρονα τα υδραυλικά ύψη που επικρατούν στην περιοχή.

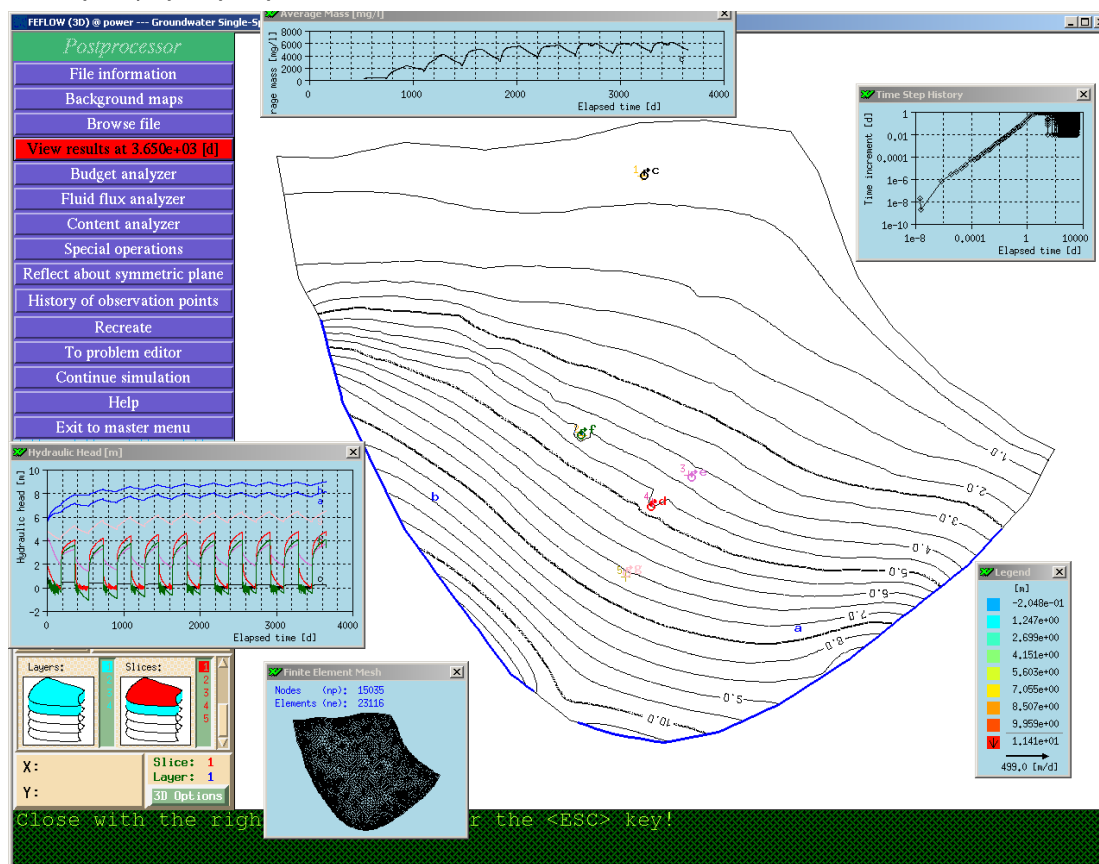
Τα πρώτα αποτελέσματα αφορούν την τωρινή κατάσταση που επικρατεί στην περιοχή της Χερσονήσου και παρουσιάζονται στο σχήμα 24 και 25. Τα αποτελέσματα αφορούν την υπόγεια ροή και τα υδραυλικά ύψη κατά

- Τη θερινή περίοδο



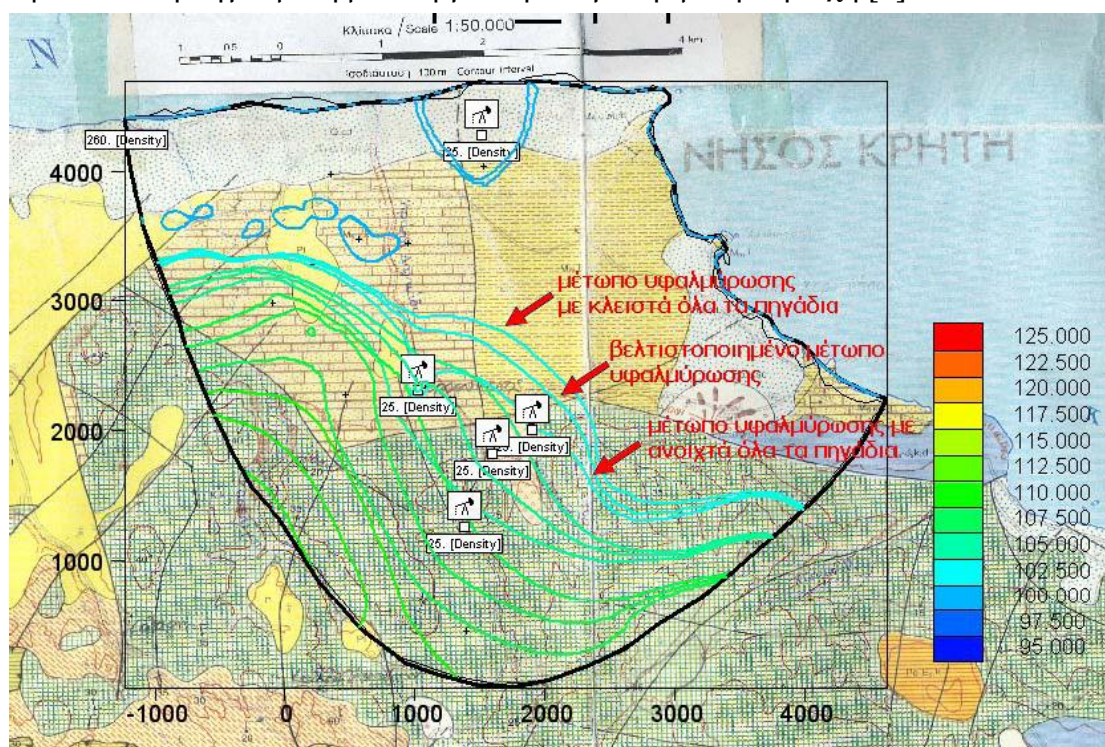
Σχήμα 24. Τα υδραυλικά ύψη στη διάρκεια του καλοκαιριού

- Τη χειμερινή περίοδο



Σχήμα 25. Τα υδραυλικά ύψη στη διάρκεια του χειμώνα

Τα υδραυλικά ύψη που προέκυψαν είναι σύμφωνα με το χάρτη των υδραυλικών υψών από προηγούμενη μελέτη για την συγκεκριμένη περιοχή [8].



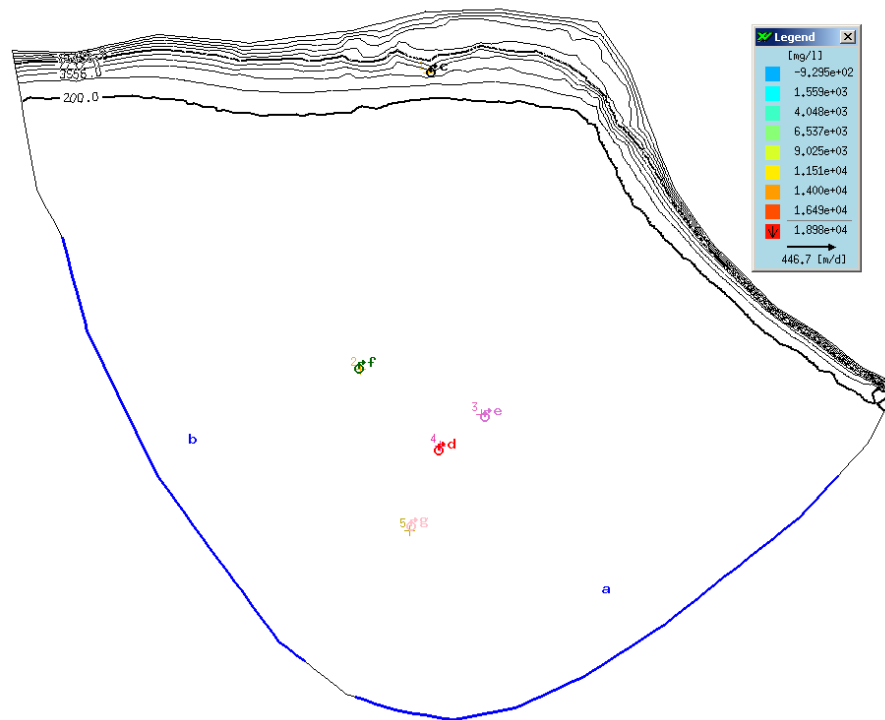
Σχήμα 26. Αποτελέσματα προηγούμενης μελέτης [8]

Οι τιμές που εμφανίζονται είναι από 0 έως 10 m και προσεγγίζουν αρκετά τις τιμές αναφοράς που είναι ήδη γνωστές. Η ισοϋψής των 2.5 m βρίσκεται σε σωστή θέση αν λάβουμε υπόψη το σχήμα 26 αλλά και τα αποτελέσματα από τα πηγάδια παρατήρησης που υπάρχουν σε άλλες αναφορές. Ωστόσο στην περιοχή γύρω από τα πηγάδια άντλησης παρατηρείται μια κυκλική κίνηση της ροής που προσομοιώνεται. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στις σχετικά μεγάλες παροχές άντλησης για τα πηγάδια 2 και 4, όπου ο κώνος άντλησης που δημιουργείται έχει μεγάλη ακτίνα επιρροής και αναγκάζει τον υπόγειο υδροφόρα να υποχωρήσει αισθητά.

Για την παρατήρηση του φαινομένου της υφαλμύρισης, παρουσιάζεται στα Σχήματα 27 και 28 ο χάρτης κατανομής της συγκέντρωσης των χλωριόντων για τη θερινή και χειμερινή περίοδο αντίστοιχα. Ως κατώτερο όριο τέθηκε η καμπύλη των 200 mg/L. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε ως μια ενδιάμεση τιμή, λαμβάνοντας υπόψη ότι, στην περίπτωση επιφανειακής άρδευσης, το εύρος τιμών συγκέντρωσης χλωριόντων από 140 - 350 mg/L θεωρείται επιτρεπτό για την αποφυγή ή τον περιορισμό των ζημιών στα φυτά από την συσσώρευση αλάτων στο έδαφος. Σε περίπτωση δε άρδευσης με καταιονισμό, το όριο αυτό είναι ακόμα μικρότερο και φτάνει τα 100 mg/L [13]. Στην συγκεκριμένη περιοχή το όριο των 200 mg/L επιλέχθηκε θεωρώντας ότι η άρδευση γίνεται επιφανειακά. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα παραπάνω όρια είναι ενδεικτικά και εξαρτώνται πάντα από το είδος της καλλιέργειας.

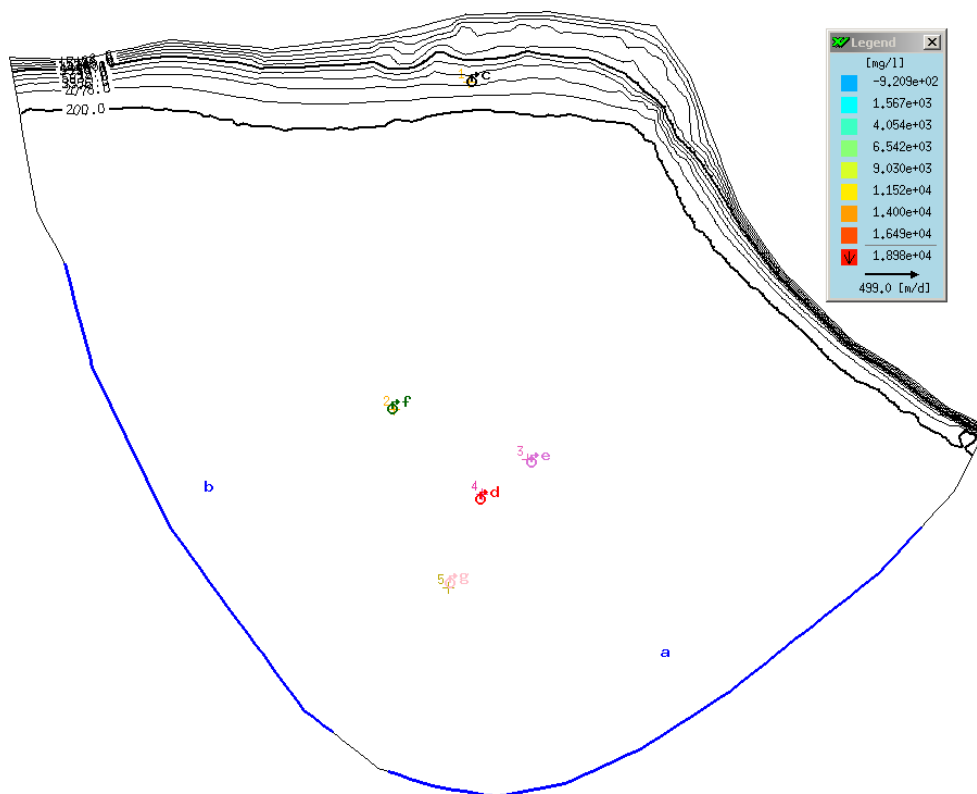
Επίπεδο 1

- θερινή περίοδος



Σχήμα 27. Η εισχώρηση του υφάλμυρου νερού το καλοκαίρι, σύμφωνα με το όριο των 200 mg/L

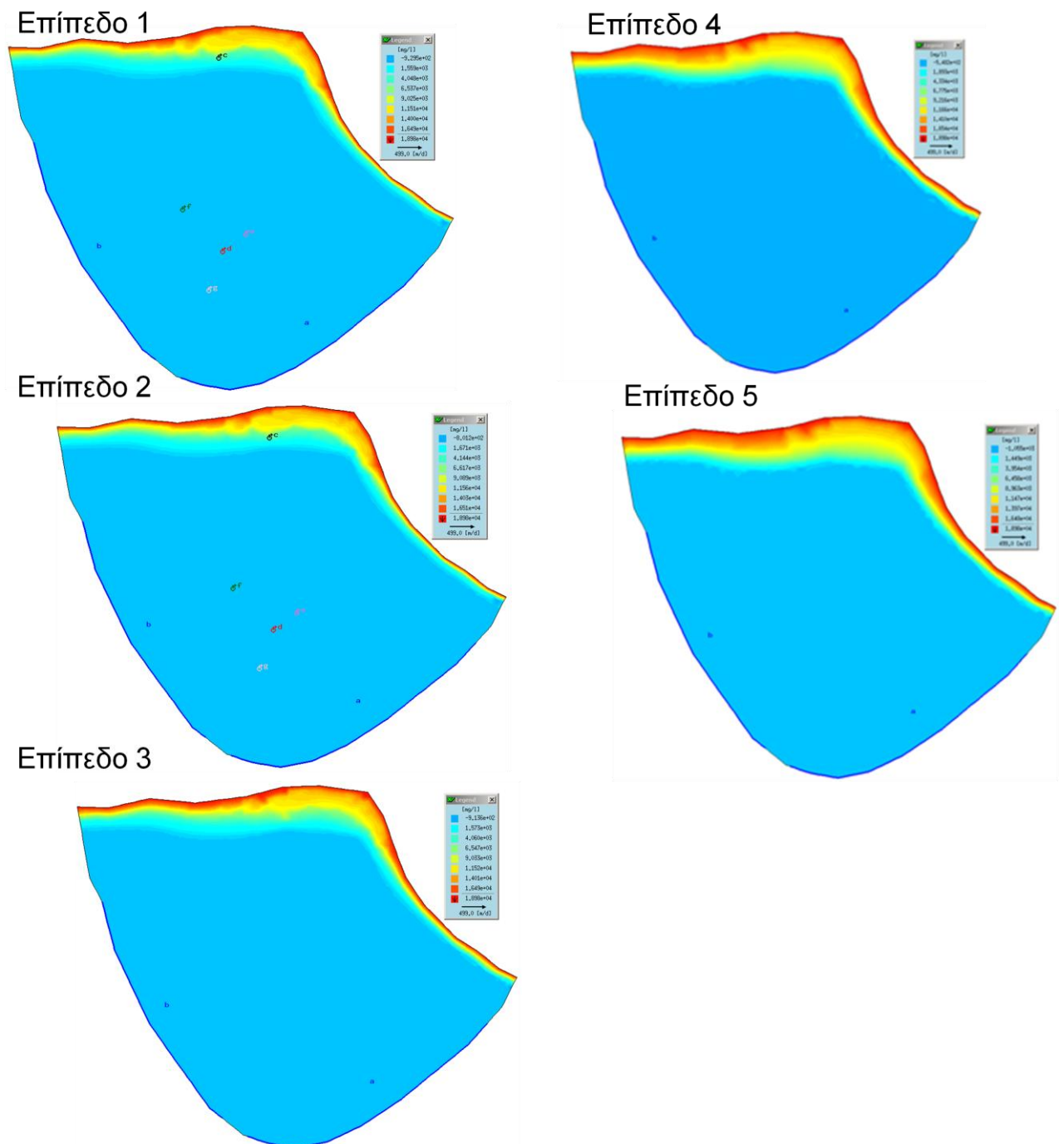
- χειμερινή περίοδο



Σχήμα 28. . Η εισχώρηση του υφάλμυρου νερού το χειμώνα, σύμφωνα με το όριο των 200 mg/L

Η γραμμή της συγκέντρωσης του επιτρεπτού ορίου χλωριόντων (200 mg/L) στη διάρκεια του καλοκαιριού έχει μετατοπιστεί αρκετά μέτρα προς την ενδοχώρα, κυρίως στο βόρειο τμήμα της περιοχής, σε σχέση με τα επίπεδα της το χειμώνα.

Για την καλύτερη μελέτη και απεικόνιση της χαρακτηριστικής σφήνας ακολουθούν στο Σχήμα 28, άλλα αποτελέσματα με κλίμακα χρωμάτων για την παρατήρηση της υφαλμύρισης:



Σχήμα 29. Η εισχώρηση του υφαλμυρου νερού ανά επίπεδα, στη διάρκεια του καλοκαιριού

Στο Σχήμα 29 φαίνεται πως το φαινόμενο της υφαλμύρισης είναι πιο έντονο στο κατώτερο επίπεδο του υδροφορέα, γεγονός αναμενόμενο λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας του αλμυρού νερού που το καθιστά βαρύτερο και το αναγκάζει να υπόκειται του γλυκού. Από την σύγκριση του μετώπου υφαλμύρισης σε όλα τα επίπεδα φαίνεται η σταδιακή εξάπλωση του φαινομένου.

Σύγκριση με τη μέθοδο Ghyben-Herzberg

Το μοντέλο FEFLOW που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της υφαλμύρισης στον υπόγειο υδροφορέα της περιοχής της Χερσονήσου χρησιμοποιεί τη θεώρηση μεταβλητής πυκνότητας (Variable-Density Conceptualization), εν' αντιθέσει με τη μέθοδο θεώρησης απότομης διεπιφάνειας (Sharp-Interface Conceptualization) των Ghyben-Herzberg, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές προηγούμενες μελέτες. Η μέθοδος της απότομης διεπιφάνειας είναι αρκετά απλοϊκή και έχει στηριχθεί σε πολλές παραδοχές, όπως η παραδοχή της οριζόντιας ροής και η παραδοχή μιας ακίνητης διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού. Στην πραγματικότητα όμως, πολλές από αυτές τις παραδοχές δεν ισχύουν.

Σύμφωνα με την προσέγγιση Ghyben-Herzberg, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενη μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρισης στην περιοχή [8], υπολογίζεται η θέση της απότομης διεπιφάνειας μέσω της εξίσωσης:

Η ισοϋψής των 2.5 m αποτελεί το όριο εισχώρησης της υφαλμύρισης στη μελέτη αυτή. Σύμφωνα όμως με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία, η υφαλμύριση δεν έχει προχωρήσει τόσο πολύ στην περιοχή με ορατή διαφορά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΣΕΝΑΡΙΑ

7.1 Σενάριο1^ο – Διπλασιασμός των παροχών άντλησης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δημιουργηθούν κάποια σενάρια για να παρατηρηθεί το πρόβλημα της υφαλμύρισης υπό άλλες παροχές άντλησης και να μελετηθεί η επίδραση που μπορεί να έχουν σε αυτό. Τα σενάρια που επιλέχθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας είναι: ο διπλασιασμός, υποδιπλασιασμός και μηδενισμός των παροχών στα πηγάδια άντλησης όλης της περιοχής που μελετάμε καθώς επίσης και η πρόβλεψη της κατάστασης σε 40 χρόνια με βάση τα δεδομένα άντλησης του παρόντος.

Στο πρώτο αυτό σενάριο έχουμε το διπλασιασμό των παροχών στα πηγάδια άντλησης σε συνθήκες ίδιες με τις αρχικές που έχουμε ήδη εισάγει στα δεδομένα του μοντέλου. Η άντληση από τα πηγάδια έχει πάλι εποχιακό χαρακτήρα με τα πηγάδια να παραμένουν κλειστά όλη τη διάρκεια του χειμώνα. Οι νέες τιμές των παροχών άντλησης είναι οι ακόλουθες:

Πηγάδι 1: 3600m³/d

Πηγάδι 2: 5040 m³/d

Πηγάδι 3: 912 m³/d

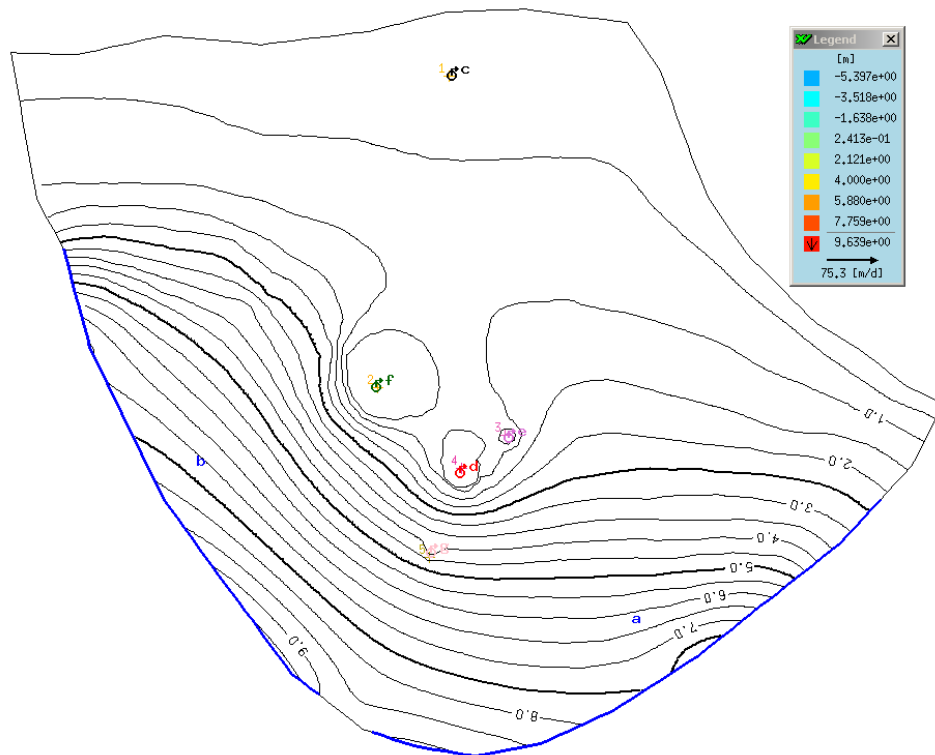
Πηγάδι 4: 5040 m³/d

Πηγάδι 5: 292 m³/d

Με αυτή την περίπτωση που επιλέχθηκε, του διπλασιασμού, μελετήθηκε η περίπτωση της αύξησης της ζήτησης του νερού, σενάριο πιθανό αν συνεχιστεί η αλόγιστη χρήση του νερού τόσο από τους μόνιμους όσο και από τους εποχιακούς κατοίκους. Τα αποτελέσματα, λοιπόν που συγκεντρώθηκαν:

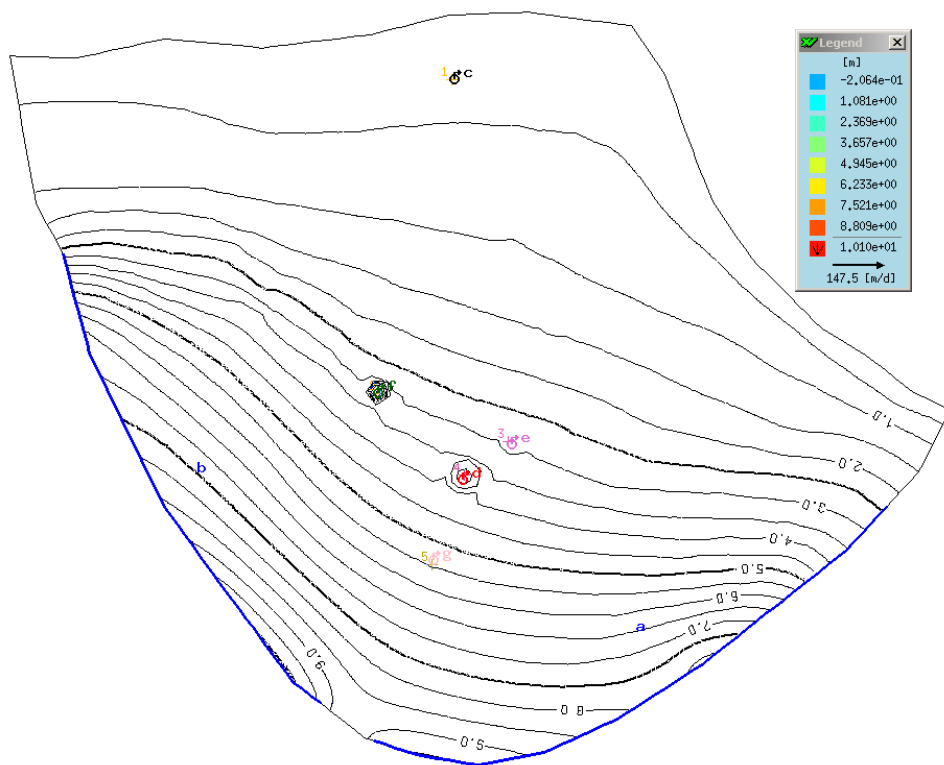
➤ Για τα υδραυλικά ύψη παρουσιάζονται στο σχήμα 30 και 31

- κατά τη θερινή περίοδο



Σχήμα 30. Τα υδραυλικά ύψη στη διάρκεια του καλοκαιριού με υπερδιπλασιασμό των παροχών άντλησης

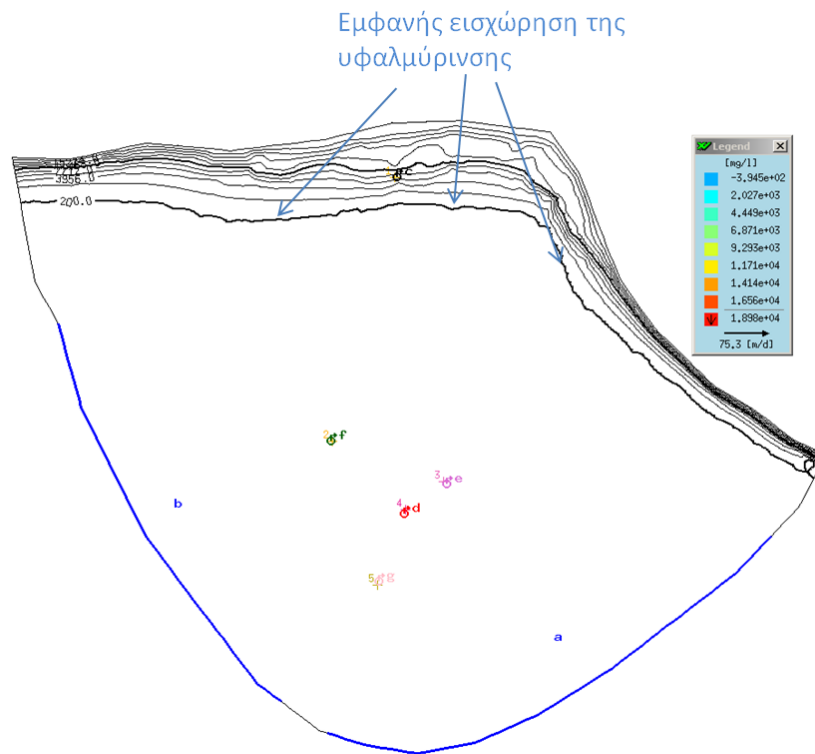
- Κατά τη χειμερινή



Σχήμα 31. Τα υδραυλικά ύψη στη διάρκεια του χειμώνα με υπερδιπλασιασμό των παροχών άντλησης

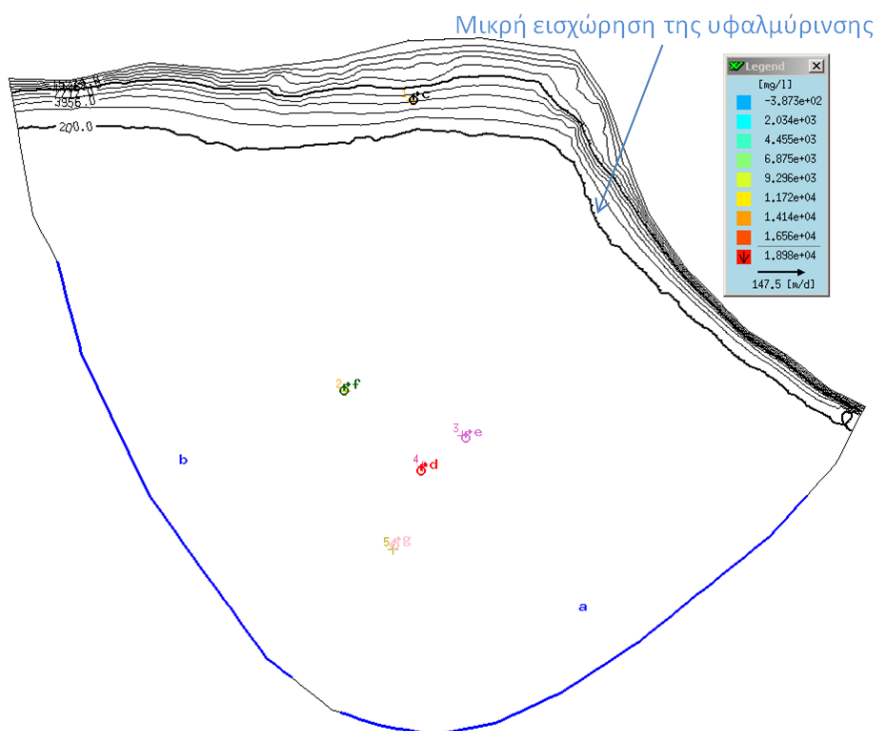
Τα αποτελέσματα του μετώπου υφαλμύρισης ακολουθούν στο σχήμα 32 και 33:

- στη διάρκεια του καλοκαιριού



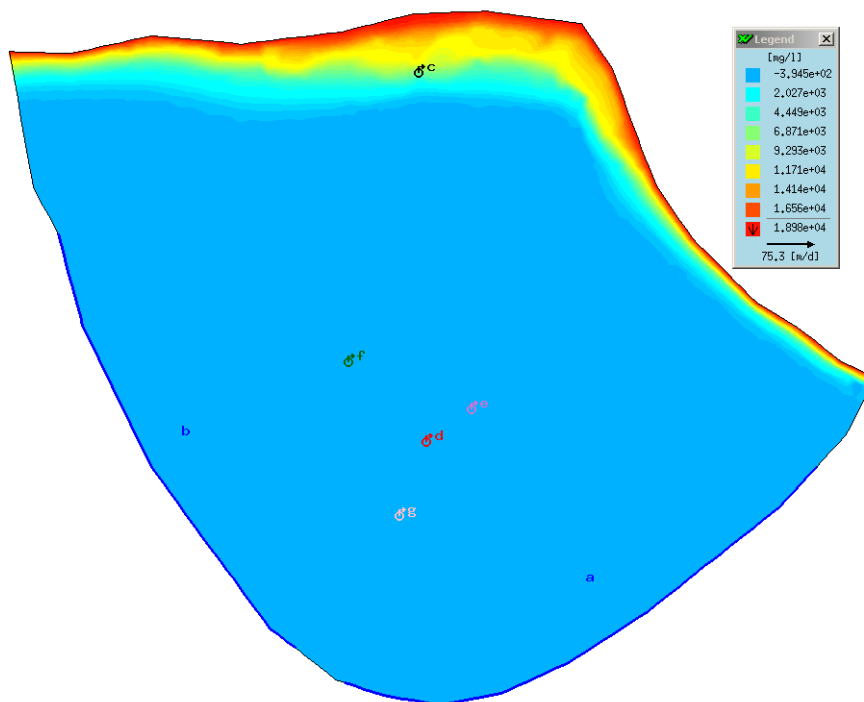
Σχήμα 32. Η εισχώρηση του υφάλμυρου νερού το καλοκαίρι, σύμφωνα με το όριο των 200 mg/L, στον διπλασιασμό των παροχών

- στη διάρκεια του χειμώνα



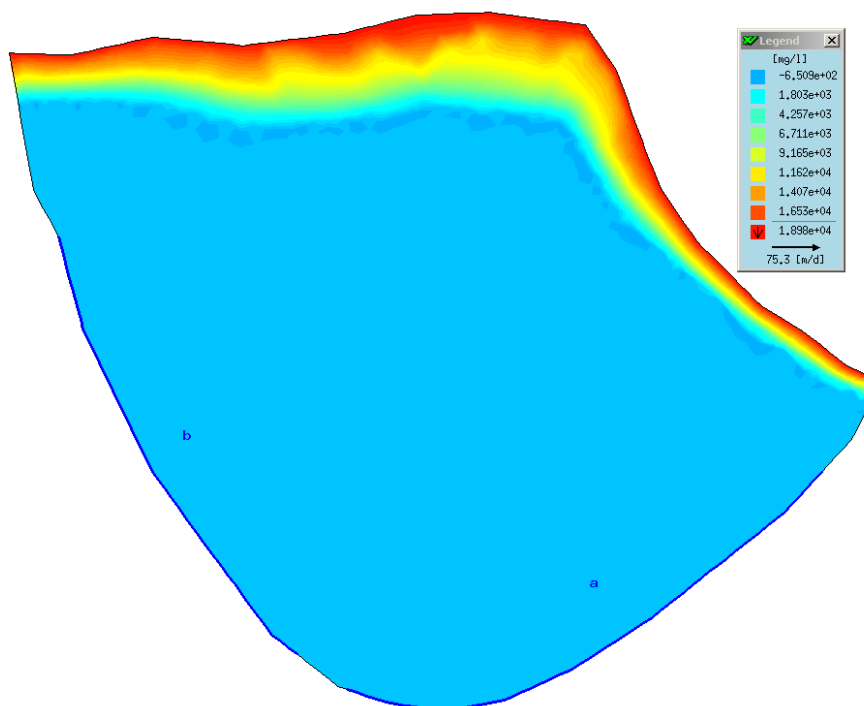
Σχήμα 33. Η εισχώρηση του υφάλμυρου νερού το χειμώνα, σύμφωνα με το όριο των 200 mg/L, στον διπλασιασμό των παροχών

Ενώ για τη σφήνα τα νέα αποτελέσματα είναι στο σχήμα 34 και 35:
Επίπεδο 1



Σχήμα 34. Η σφήνα στο 1^ο επίπεδο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού

Επίπεδο 5



Σχήμα 35. Η σφήνα στο 5^ο επίπεδο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού

Όπως είναι αντιληπτό τα νέα δεδομένα άντλησης επιβαρύνουν αρκετά την περιοχή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους με την χειρότερη κατάσταση να εμφανίζεται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, αναγκάζοντας τα υδραυλικά

ύψη να υποχωρήσουν αισθητά. Το μέτωπο της υφαλμύρισης έχει εισχωρήσει λίγο περισσότερο στην ενδοχώρα και αυτό φαίνεται από την κίνηση της σφήνας στο τελευταίο επίπεδο συγκρίνοντας την τωρινή κατάσταση και την κατάσταση του διπλασιασμού των αντλήσεων. Αλλαγές παρατηρήθηκαν κυρίως στο βόρειο τμήμα της περιοχής κοντά στο πηγάδι 1 κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (Σχήμα 32), ενώ κατά τη διάρκεια του χειμώνα υπήρξε μια μικρή μετατόπιση της υφαλμύρισης στο βορειοανατολικό τμήμα (Σχήμα 33). Γενικά ο διπλασιασμός των αντλήσεων δεν φαίνεται να επιφέρει μεγάλες διαφορές στο ποσοστό εισχώρησης της υφαλμύρισης στην ενδοχώρα. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι τα πηγάδια άντλησης με τις μεγάλες παροχές (πηγάδια 2 και 4) βρίσκονται αρκετά μακριά από την ακτογραμμή.

7.2 Σενάριο 2^ο – Υποδιπλασιασμός των παροχών άντλησης

Στο δεύτερο σενάριο έχουμε τον υποδιπλασιασμό των παροχών στα πηγάδια άντλησης σε συνθήκες ίδιες με τις αρχικές που έχουμε ήδη εισάγει στα δεδομένα του μοντέλου. Η άντληση από τα πηγάδια έχει πάλι εποχιακό χαρακτήρα με τα πηγάδια να παραμένουν κλειστά όλη τη διάρκεια του χειμώνα. Οι νέες τιμές των παροχών άντλησης είναι οι ακόλουθες:

Πηγάδι 1: 900m³/d

Πηγάδι 2: 1260 m³/d

Πηγάδι 3: 228 m³/d

Πηγάδι 4: 1260 m³/d

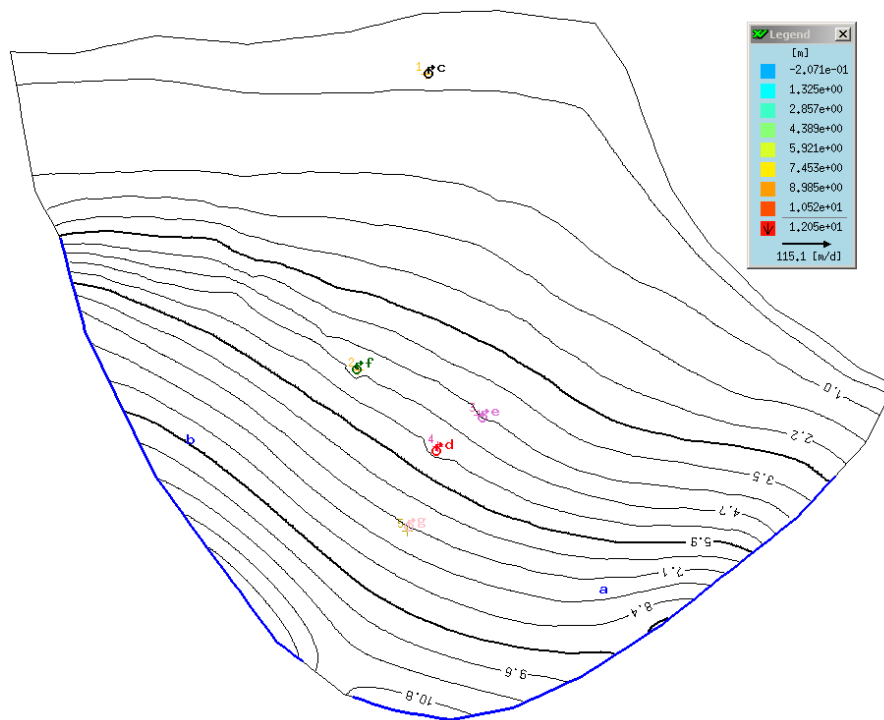
Πηγάδι 5: 73 m³/d

Με το σενάριο του υποδιπλασιασμού, μελετήθηκε η περίπτωση ενός πιθανού μέτρου αντιμετώπισης του ήδη υπάρχοντος προβλήματος. Η χρήση του νερού που γίνεται τώρα δεν αντιστοιχεί στις πραγματικές ανάγκες των κατοίκων και είναι γνωστή η υπερεκμετάλλευση του φυσικού αυτού πόρου. Με τη δημιουργία και τη χρήση ενός διαχειριστικού προγράμματος για το νερό το σενάριο αυτό μπορεί να γίνει εφικτό.

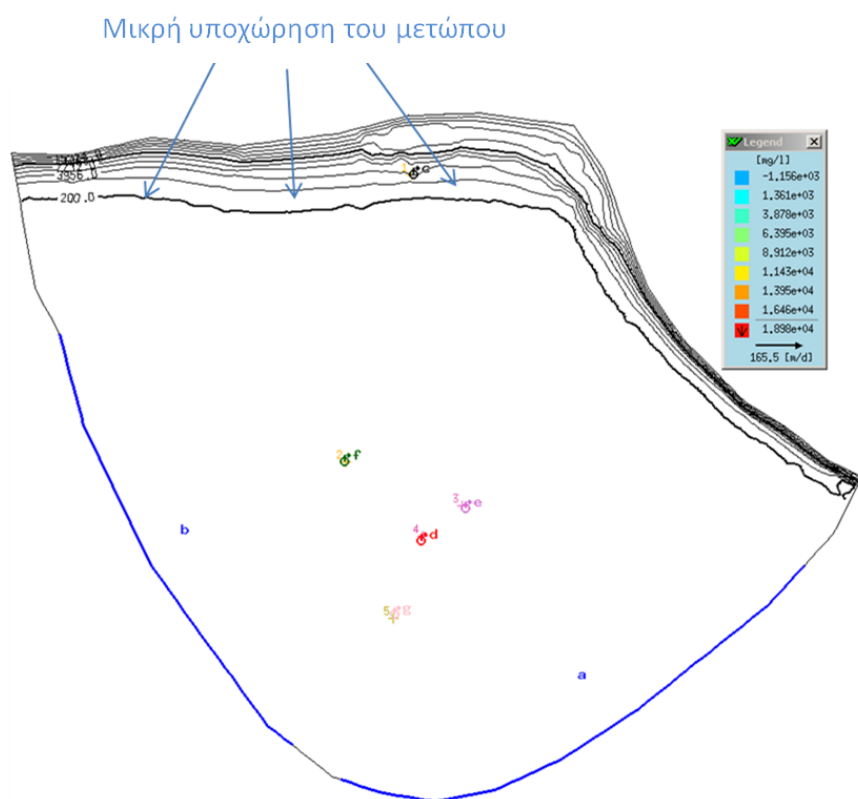
Τα αποτελέσματα, λοιπόν που συγκεντρώθηκαν:

- Για τα υδραυλικά ύψη φαίνονται στο σχήμα 36 και 37

- κατά τη θερινή περίοδο

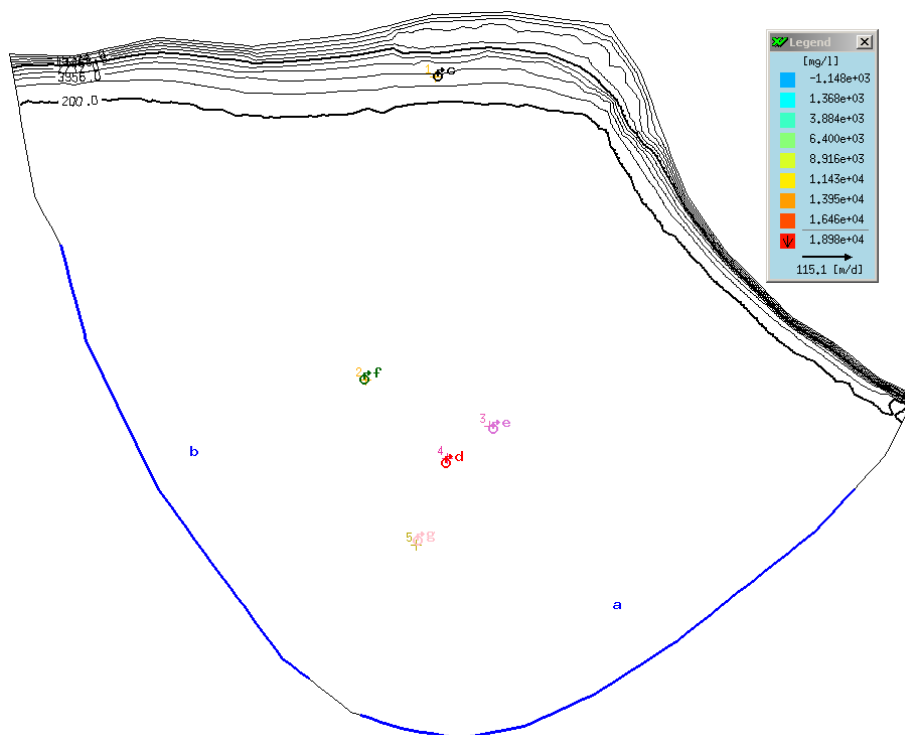


- στη διάρκεια του καλοκαιριού



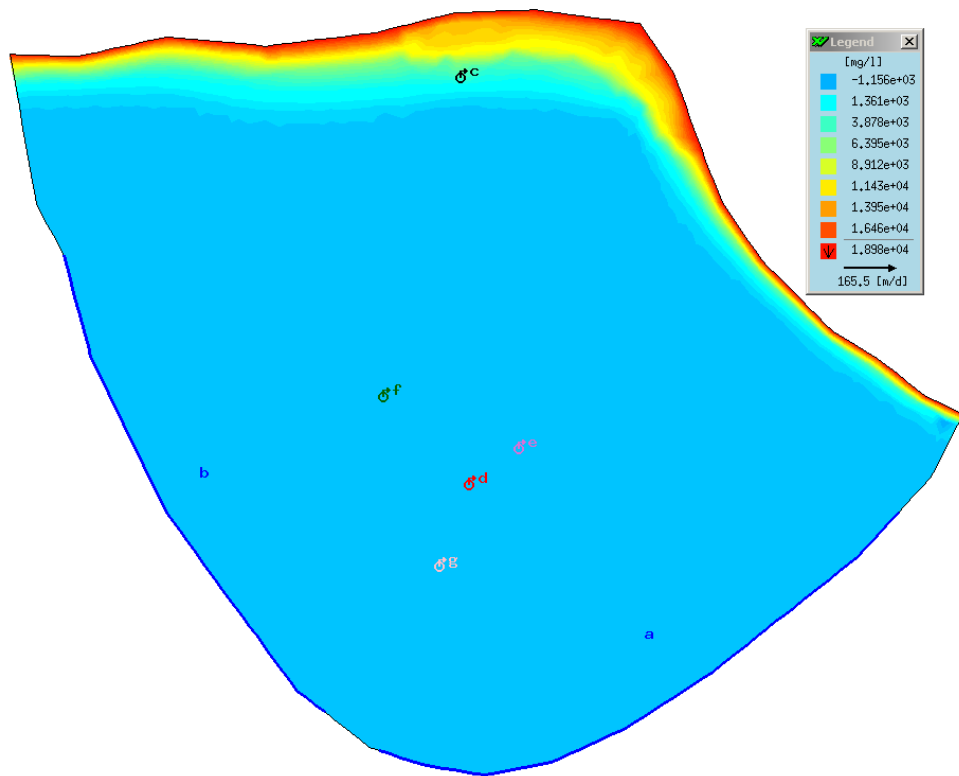
Σχήμα 38. Η εισχώρηση του υφάλμυρου νερού το καλοκαίρι, σύμφωνα με το όριο των 200 mg/L, στον υποδιπλασιασμό των παροχών

- στη διάρκεια του χειμώνα



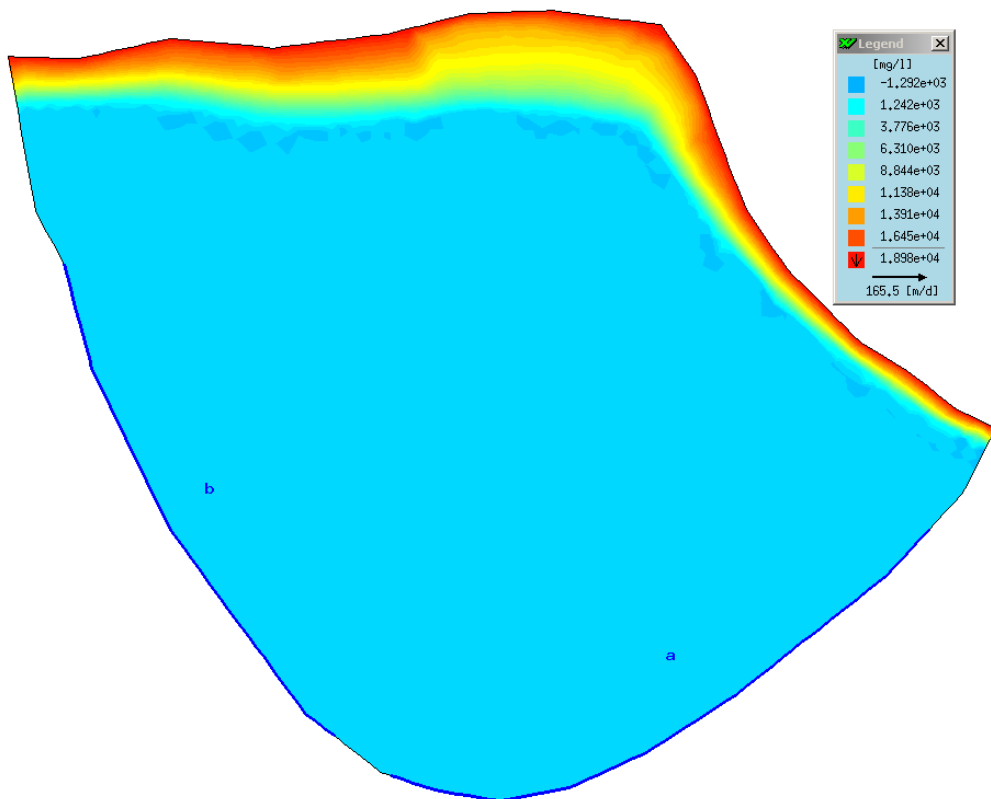
Σχήμα 39. Η εισχώρηση του υφάλμυρου νερού το χειμώνα, σύμφωνα με το όριο των 200 mg/L, στον υποδιπλασιασμό των παροχών

Ενώ για τη σφήνα τα νέα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 40 και 41:
Επίπεδο 1



Σχήμα 40. Η σφήνα στο 1^ο επίπεδο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού

Επίπεδο 5



Σχήμα 41. Η σφήνα στο 5^ο επίπεδο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού

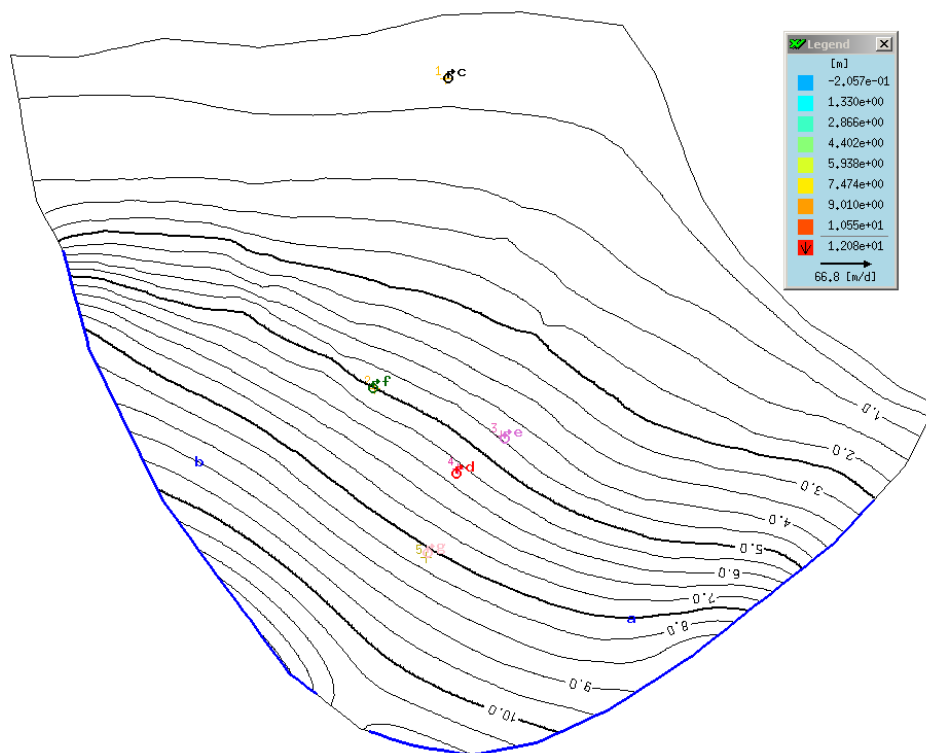
Από τα αποτελέσματα του 2^{ου} σεναρίου είναι φανερό ότι επειδή οι παροχές άντλησης μειώθηκαν τα υδραυλικά ύψη αυξήθηκαν και ο υπόγειος υδροφορέας δεν επιβαρύνεται τόσο έντονα. Ωστόσο το θαλασσινό νερό στη διάρκεια του χειμώνα δεν φαίνεται να υποχωρεί προς την ακτή, με την γραμμή των 200 mg/L να βρίσκεται σχεδόν στο ίδιο σημείο, εν αντιθέσει με το καλοκαίρι που υπάρχει μια μικρή υποχώρηση του μετώπου κατά μήκος όλου του βορείου τμήματος. Ως εκ τούτου, γίνεται αντιληπτό ότι ένα τέτοιο σενάριο δεν αποτελεί τη λύση του προβλήματος, παρά μόνο ένα πρώτο βήμα για την αναχαίτιση του μετώπου της υφαλμύρισης.

7.3 Σενάριο 3^ο - Μηδενισμός των παροχών άντλησης

Για την κατανόηση της παρούσας κατάσταση σε σχέση με την ευθύνη που μπορεί να έχει ο άνθρωπος, κρίνεται σκόπιμο να εξεταστεί και το ακραίο σενάριο να κλείσουν όλα τα πηγάδια της περιοχής για να φανεί η συμπεριφορά του υδροφορέα και να εξεταστεί έτσι το ενδεχόμενο της υποχώρησης του μετώπου της υφαλμύρισης.

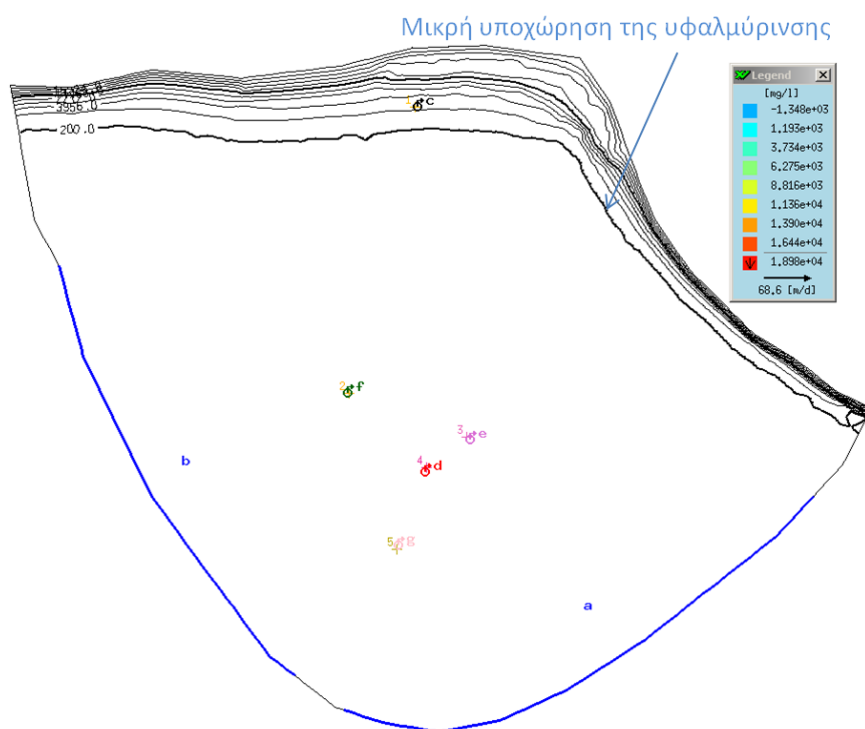
Τα αποτελέσματα, λοιπόν που συγκεντρώθηκαν:

- Για τα υδραυλικά ύψη φαίνονται στο σχήμα 42 και 43
 - κατά τη θερινή περίοδο



Σχήμα 42. Τα υδραυλικά ύψη στη διάρκεια του καλοκαιριού με μηδενισμό των παροχών άντλησης

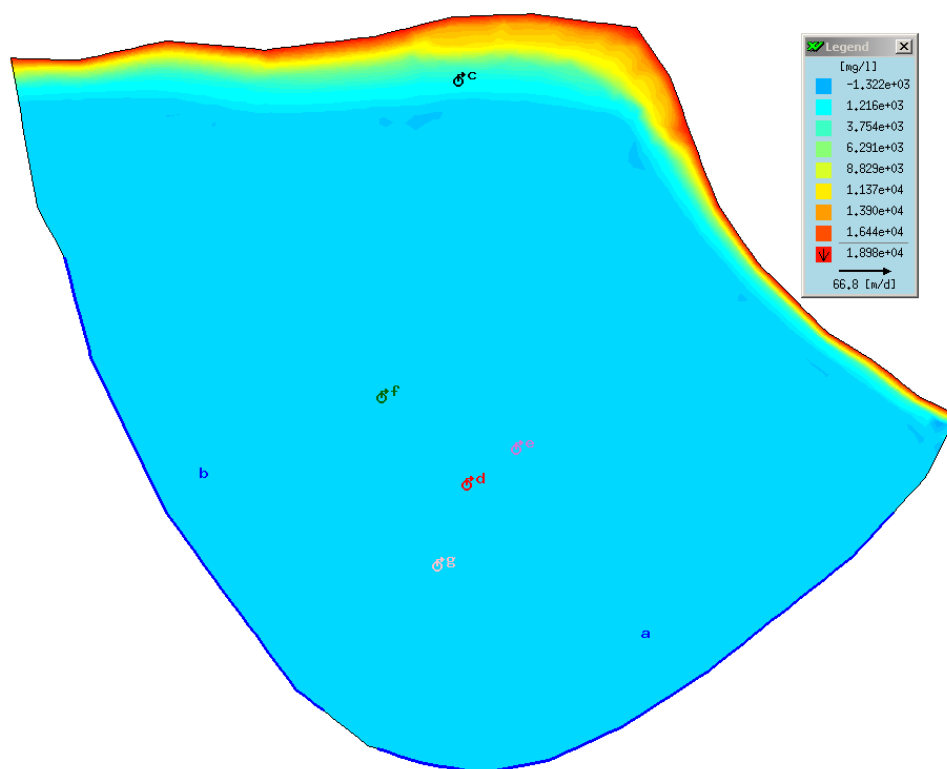
- στη διάρκεια του χειμώνα



Σχήμα 45. Η εισχώρηση του υφάλμυρου νερού το χειμώνα, σύμφωνα με το όριο των 200 mg/L, στο μηδενισμό των παροχών

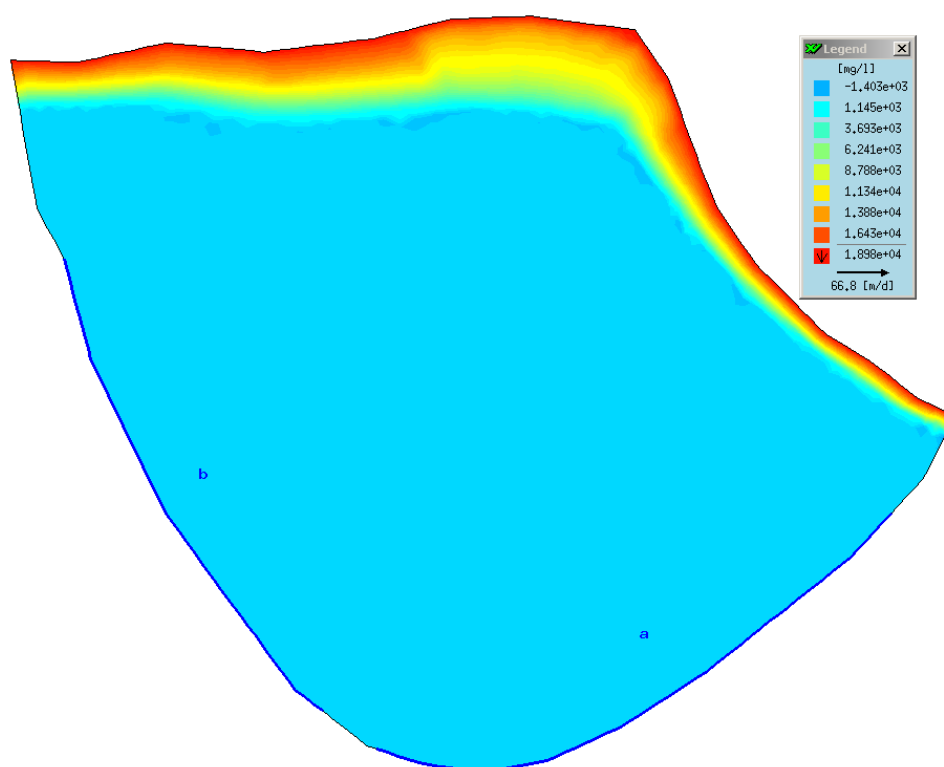
Ενώ για τη σφήνα τα νέα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 46 και 47:

Επίπεδο 1



Σχήμα 46. Η σφήνα στο 1^ο επίπεδο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού

Επίπεδο 5



Σχήμα 47. Η σφήνα στο 5^ο επίπεδο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού

Από τα αποτελέσματα του σεναρίου αυτού παρατηρείται ότι ο υδροφορέας λόγω της υπερεκμετάλλευσης των τελευταίων ετών έχει επιβαρυνθεί σημαντικά και είναι αρκετά δύσκολο να αντιστραφεί η κατάσταση από μόνη της. Ωστόσο το θαλασσινό νερό φαίνεται να υποχωρεί προς την ακτή στο τελευταίο επίπεδο παρουσιάζοντας μια μικρή αλλαγή, η οποία στη διάρκεια του καλοκαιριού είναι ορατή στο βόρειο και το βορειοανατολικό τμήμα, ενώ το χειμώνα φαίνεται μια μικρή μετατόπιση μόνο στο βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι για την αποτελεσματική αντιμετώπιση του φαινομένου χρειάζεται να παρέλθουν περισσότερα από 10 χρόνια μηδενικής άντλησης, όμως κάτι τέτοιο δεν θεωρείται εφικτό λόγω των αυξημένων αναγκών των κατοίκων της περιοχής σε πόσιμο νερό και νερό που περιορίζεται για αρδευτικούς σκοπούς.

7.4 Σενάριο 4^ο – Μελλοντική κατάσταση στα επόμενα 40 χρόνια

Στο 4^ο και τελευταίο σενάριο, οι παροχές άντλησης έχουν τις ίδιες τιμές σε συνθήκες ίδιες με αυτές της τωρινής κατάστασης. Η άντληση από τα πηγάδια έχει πάλι εποχιακό χαρακτήρα με τα πηγάδια να παραμένουν κλειστά όλη τη διάρκεια του χειμώνα. Οι τιμές των παροχών άντληση είναι οι ακόλουθες:

Πηγάδι 1: 1800m³/d

Πηγάδι 2: 2520 m³/d

Πηγάδι 3: 456 m³/d

Πηγάδι 4: 2520 m³/d

Πηγάδι 5: 146 m³/d

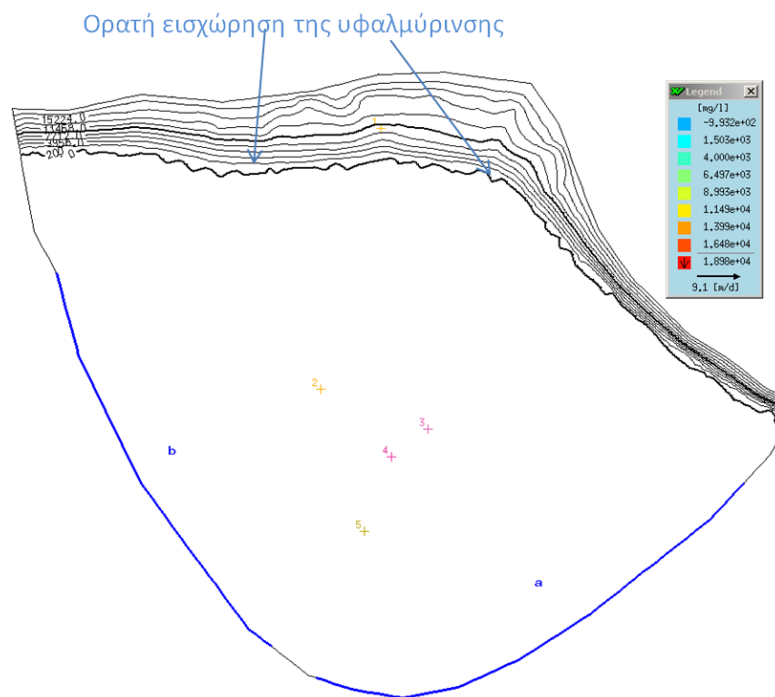
- Για τα υδραυλικά ύψη ακολουθούν στο σχήμα 48 και 49
 - κατά τη θερινή περίοδο



76

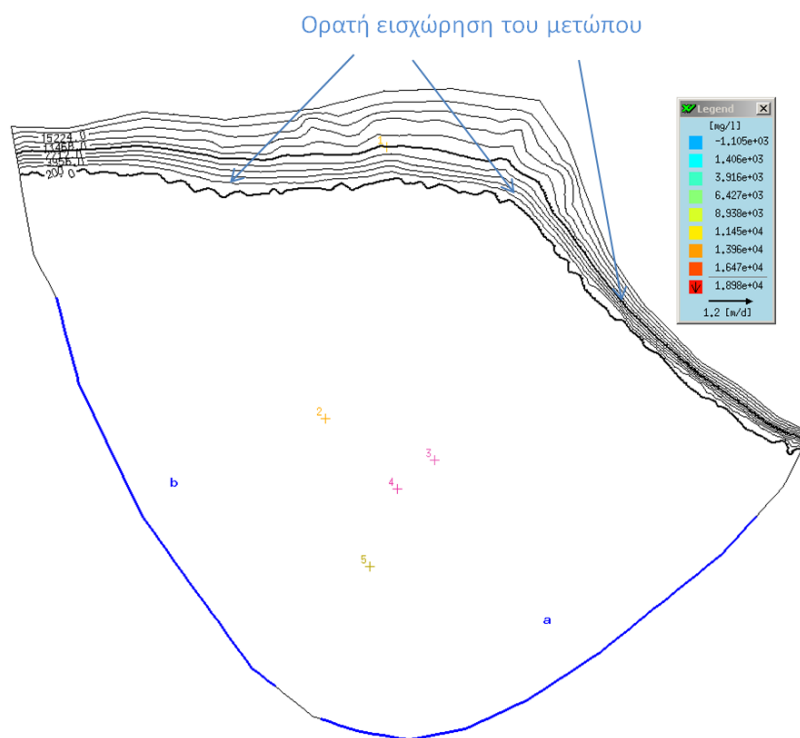
Τα αποτελέσματα του μετώπου υφαλμύρισης ακολουθούν στο σχήμα 50 και 51:

- στη διάρκεια του καλοκαιριού



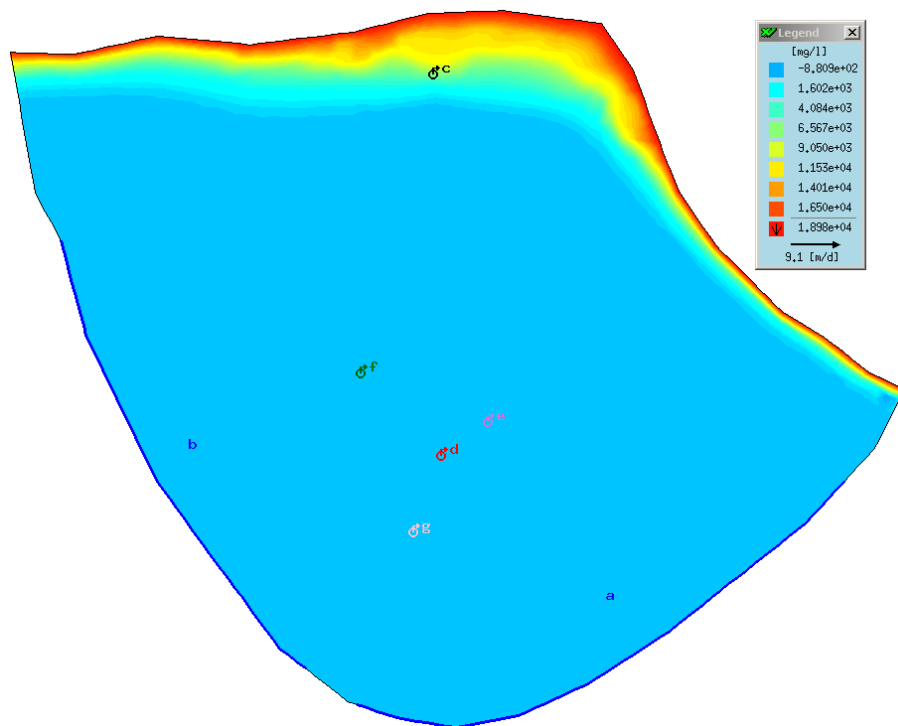
Σχήμα 50. Η εισχώρηση του υφάλμυρου νερού το καλοκαίρι, σύμφωνα με το όριο των 200 mg/L, σε 40 έτη

- στη διάρκεια του χειμώνα



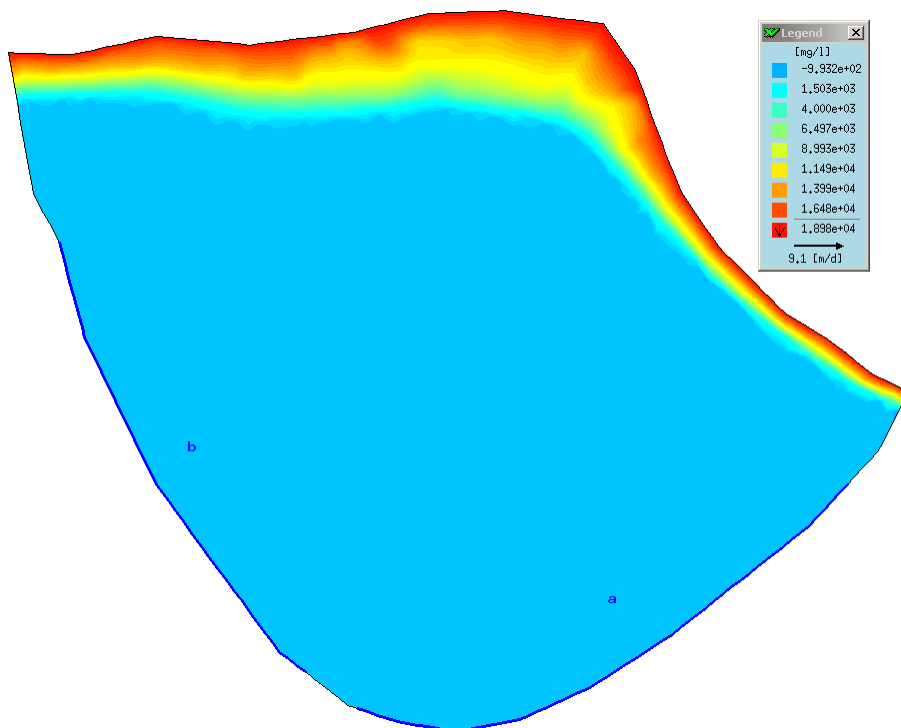
Σχήμα 51. Η εισχώρηση του υφάλμυρου νερού το χειμώνα, σύμφωνα με το όριο των 200 mg/L, σε 40 έτη

Ενώ για τη σφήνα τα νέα αποτελέσματα είναι στο σχήμα 52 και 53:
Επίπεδο 1



Σχήμα 52. Η σφήνα στο 1^ο επίπεδο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού

Επίπεδο 5



Σχήμα 53. Η σφήνα στο 5^ο επίπεδο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού

Από τα νέα αποτελέσματα προκύπτει ότι η περιοχή επιβαρύνεται αρκετά και με την χειρότερη κατάσταση να εμφανίζεται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, αναγκάζοντας τον υδροφορέα να υποχωρήσει αρκετά. Το μέτωπο της υφαλμύρισης έχει εισχωρήσει ακόμα περισσότερο στην ενδοχώρα κυρίως στην περιοχή όπου το θαλασσινό νερό έρχεται από δυο κατευθύνσεις. Στο γεγονός αυτό βέβαια, συμβάλλει και το πηγάδι 1 που υπάρχει σε εκείνη την περιοχή και αντλεί με σχετικά μεγάλο ρυθμό καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης κατά τη θερινή περίοδο, αναγκάζοντας τον υδροφορέα να υποχωρεί ακόμα περισσότερο, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στο θαλασσινό νερό να εισχωρήσει. Η κίνηση της σφήνας στο τελευταίο επίπεδο συγκρίνοντας την τωρινή κατάσταση και στην κατάσταση που προβλέπεται ότι θα δημιουργηθεί μετά από 40 χρόνια, επιβεβαιώνει όσα αναφέρθηκαν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

8.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το φαινόμενο της υφαλμύρισης στον παράκτιο υδροφορέα της περιοχής της Χερσονήσου με τη χρήση του μοντέλου FEFLOW. Για την επίλυση των εξισώσεων που διέπουν το φαινόμενο της υφαλμύρισης το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιεί τη θεώρηση μεταβλητής πυκνότητας, η οποία είναι μια γενική και ολοκληρωμένη μέθοδος που δεν απαιτεί τη χρήση πολλών παραδοχών όπως στην περίπτωση θεώρησης απότομης διεπιφάνειας των Ghyben-Herzberg, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές προηγούμενες μελέτες. Ως εκ τούτου τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης με τη χρήση του μοντέλου αυτού μπορούν να θεωρηθούν πιο ακριβή και αξιόπιστα.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία αυτή τόσο από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του προγράμματος FEFLOW, όσο και από τα τέσσερα σενάρια που δημιουργήθηκαν, συνοψίζονται στις προτάσεις που ακολουθούν.

- Από τα αποτελέσματα του μοντέλου προκύπτει ότι το φαινόμενο της υφαλμύρισης στον υπόγειο υδροφορέα της Χερσονήσου έχει προχωρήσει αρκετά κυρίως στο βόρειο τμήμα της περιοχής λόγω της μεγάλης υδραυλικής αγωγιμότητας στη βόρεια παράκτια ζώνη και της ύπαρξης ενός πηγαδιού άντλησης πολύ κοντά στην ακτογραμμή. Γενικά όμως παρατηρείται ότι το φαινόμενο δεν παρουσιάζει πολύ μεγάλη έκταση σε σχέση με το μέγεθος της περιοχής μελέτης.
- Γενικά ο διπλασιασμός των αντλήσεων (1^ο Σενάριο) δεν φαίνεται να επιφέρει μεγάλες διαφορές στο ποσοστό εισχώρησης της υφαλμύρισης στην ενδοχώρα. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι τα πηγάδια άντλησης με τις μεγαλύτερες παροχές (Πηγάδια 2 και 4) βρίσκονται αρκετά μακριά από την ακτογραμμή.
- Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του 2^{ου} σεναρίου, όπου μειώθηκαν οι παροχές άντλησης στο μισό, τα υδραυλικά ύψη αυξήθηκαν και ο υπόγειος υδροφορέας δεν επιβαρύνεται τόσο έντονα. Ωστόσο το θαλασσινό νερό στη διάρκεια του χειμώνα δεν φαίνεται να υποχωρεί προς την ακτή, με την γραμμή των 200 mg/L να βρίσκεται σχεδόν στο ίδιο σημείο, εν αντιθέσει με το καλοκαίρι που υπάρχει μια μικρή υποχώρηση του μετώπου κατά μήκος όλου του βορείου τμήματος. Ως εκ τούτου, γίνεται αντιληπτό ότι ένα τέτοιο σενάριο δεν αποτελεί τη λύση του προβλήματος, παρά μόνο ένα πρώτο βήμα για την αναχαίτιση του μετώπου της υφαλμύρισης,
- Από τα αποτελέσματα του 3^{ου} Σεναρίου παρατηρείται ότι ο υδροφορέας λόγω της υπερεκμετάλλευσης των τελευταίων ετών έχει επιβαρυνθεί σημαντικά και είναι αρκετά δύσκολο να αντιστραφεί η κατάσταση από

μόνη της. Ωστόσο το θαλασσινό νερό φαίνεται να υποχωρεί προς την ακτή στο τελευταίο επίπεδο παρουσιάζοντας μια μικρή αλλαγή, η οποία στη διάρκεια του καλοκαιριού είναι ορατή στο βόρειο και το βορειοανατολικό τμήμα, ενώ το χειμώνα φαίνεται μια μικρή μετατόπιση μόνο στο βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής.

- Από τα αποτελέσματα του σεναρίου αυτού γίνεται αντιληπτό, ότι για να μπορέσει να υποχωρήσει η υφαλμύριση, μειώνοντας το μέτωπο αυτής, πρέπει να περάσουν τουλάχιστον 10 έτη για να φανεί αισθητή διαφορά.
- Από το 4^ο και τελευταίο σενάριο, στο οποίο προβλέπεται η κατάσταση που θα δημιουργηθεί μετά από 40 χρόνια, παρατηρείται πως το μέτωπο της υφαλμύρισης έχει εισχωρήσει ακόμα περισσότερο στην ενδοχώρα κυρίως στην περιοχή όπου το θαλασσινό νερό έρχεται από δυο κατευθύνσεις. Σημαντικό ρόλο σε αυτό παίζει το πηγάδι 1 που υπάρχει σε εκείνη την περιοχή και αντλεί με σχετικά μεγάλο ρυθμό, αναγκάζοντας τον υδροφορέα να υποχωρεί ακόμα περισσότερο, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στο θαλασσινό νερό να μπορεί να εισχωρήσει.

Συμπερασματικά, από τη μελέτη των παραπάνω σεναρίων προκύπτει ότι η ανθρώπινη παρέμβαση στο φαινόμενο της υφαλμύρισης δεν είναι πολύ έντονη λόγω του γεγονότος ότι τα πηγάδια για τα οποία υπάρχουν δεδομένα άντλησης στην ευρύτερη περιοχή της Χερσονήσου απέχουν αρκετή απόσταση από την ακτογραμμή. Για το λόγο αυτό, το μέτωπο της υφαλμύρισης δεν παρουσιάζει τεράστια αλλαγή ανάλογα με την εποχή, όπου το χειμώνα οι αντλήσεις σταματούν ενώ το καλοκαίρι είναι όλες ανοικτές. Εξάιρεση σε αυτό αποτελεί το πηγάδι 1 το οποίο βρίσκεται πολύ κοντά στην ακτογραμμή. Όμως, η ανεξέλεγκτη εμφάνιση παράνομων «ιδιωτικών» γεωτρήσεων για τις οποίες δεν υπάρχουν δεδομένα άντλησης ίσως αποτελεί την αιτία του υπάρχοντος προβλήματος και της επιδείνωσης της παρούσας κατάστασης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η παρουσία γεωτρήσεων σε μεγάλες ξενοδοχειακές μονάδες κοντά στην παράκτια ζώνη οι οποίες δεν ελέγχονται από τη ΔΕΥΑΧ.

8.2 Προτάσεις

- Η αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρισης αποτελεί μια αρκετά χρονοβόρα και ακριβή διαδικασία, και πολλές φορές το επιθυμητό αποτέλεσμα δεν είναι εφικτό όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που παρουσιάστηκε στην εργασία αυτή. Γι' αυτό καλύτερη θα ήταν η πρόβλεψη του φαινομένου, έτσι ώστε να αποφευχθεί η εισροή της θάλασσας στην ενδοχώρα με μια σωστή υδρολογική μελέτη για τη διαχείριση των υπογείων υδάτων, παρά η αντιμετώπιση του φαινομένου.
- Η ολοκλήρωση-ωρίμανση νέων υδροληπτικών έργων όπως τα φράγματα και ο εμπλουτισμός των υδροφορέων θα μπορούσαν να αποτελέσουν μια

λύση. Όπως επίσης και ο εμπλουτισμός των υδροφορέων με τις εκροές του βιολογικού καθαρισμού μετά από κατάλληλη επεξεργασία. Η ολοκλήρωση των υπό κατασκευή έργων θα αμβλύνει το αρνητικό ισοζύγιο μεταξύ προσφοράς και ζήτησης των υδατικών πόρων και θα περιορίσει το πρόβλημα της υφαλμύρισης που αντιμετωπίζουμε σε εθνικό επίπεδο.

- Σε ένα μεγάλο ποσοστό το πρόβλημα έχει δημιουργηθεί από την προσπάθεια των ανθρώπων να καλύψουν τις καθημερινές ανάγκες σε άρδευση. Αυτό σημαίνει ότι μεγάλες ποσότητες νερού κατασπαταλώνται μέσω της γεωργίας στην περιοχή. Αν λοιπόν, επιβαλλόταν η άρδευση να γίνεται κατά τις νυκτερινές ώρες ή νωρίς το πρωί και αργά το απόγευμα για την αποφυγή μεγάλης εξάτμισης καθώς και όταν η ένταση του ανέμου δεν είναι μεγάλη, τότε το πρόβλημα θα μπορούσε να περιοριστεί. Επίσης ο τρόπος άρδευσης επηρεάζει και το ανώτατο όριο χλωριόντων θεωρείται επιτρεπτό για την αποφυγή ή περιορισμό των ζημιών στα φυτά από την συσσώρευση αλάτων στο έδαφος. Στην περίπτωση επιφανειακής άρδευσης, το εύρος τιμών συγκέντρωσης χλωριόντων από 140-350 mg/L, ενώ σε περίπτωση άρδευσης με καταιονισμό το όριο αυτό είναι ακόμα μικρότερο και φτάνει τα 100 mg/L. Τα παραπάνω όρια βέβαια είναι ενδεικτικά και εξαρτώνται πάντα από το είδος της καλλιέργειας
- Επίσης ο έλεγχος και η συντήρηση τόσο των δικτύων μεταφοράς, όσο και των δικτύων διανομής, πρέπει να γίνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα για την αποφυγή διαρροών που οδηγούν σε άσκοπη κατανάλωση νερού.
- Για μια ικανοποιητική προσέγγιση του προβλήματος της υφαλμύρισης, θα πρέπει κύριο μέλημα να είναι η εύρεση μιας βέλτιστης δυνατής λύσης, γεγονός που οδηγεί στη συνεχή ενημέρωση, ευαισθητοποίηση αλλά και στην αξιολόγηση των δυνατοτήτων που υπάρχουν κάθε φορά, κυρίως σε οικονομικό επίπεδο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Γεώργιος Π. Καρατζάς, Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης, 2009
2. Υδρογεωλογική Μελέτη Βόρειου Νομού Ηρακλείου. Έργο ΥΠΕΧΩΔΕ, Ι.Γ.Μ.Ε. Παράρτημα Κρήτης
3. Πρακτικά 9^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003
4. Γεώργιος Χ. Σούλιος, Γενική Υδρογεωλογία, University Studio Press, 1986
5. Υδρογεωλογική Μελέτη Βόρειου Νομού Ηρακλείου. Έργο ΥΠΕΧΩΔΕ, Ι.Γ.Μ.Ε. Παράρτημα Κρήτης .
6. Αλέξανδρος Οικονομόπουλος, Έλεγχος ρύπανσης και ποιότητας υδάτων, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης, 1998
7. Γιάννα Φαρσάρη, Πουλίκος Πραστάκος, Δείκτες, ένα εργαλείο για την αιφόρο τουριστική ανάπτυξη. Πιλοτική εφαρμογή στο Δήμο Χερσονήσου Κρήτης. Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας, Ηράκλειο Κρήτης
8. Στέφανος Καρτεράκης, Διαχείριση των υπόγειων υδάτων με χρήση συνδυασμού μεθόδων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, 2005
9. Ελένη Αβραμίδου, Το φαινόμενο της υπαλμύρισης στον ελλαδικό χώρο, 2007
10. Mary P. Anderson, William W. Woessner, Applied Groundwater Modeling, Academic Press, 1992
11. Hans-Jörg G. Diersch, WASY Software Feflow - White Papers τόμος 1, 1979
12. Hans-Jörg G. Diersch, WASY Software Feflow – Reference Manual, 1979

Ηλεκτρονικές Διευθύνσεις

13. www.wikipedia.gr
14. www.emy.gr
15. www.igme.gr
16. www.waterinfo.gr