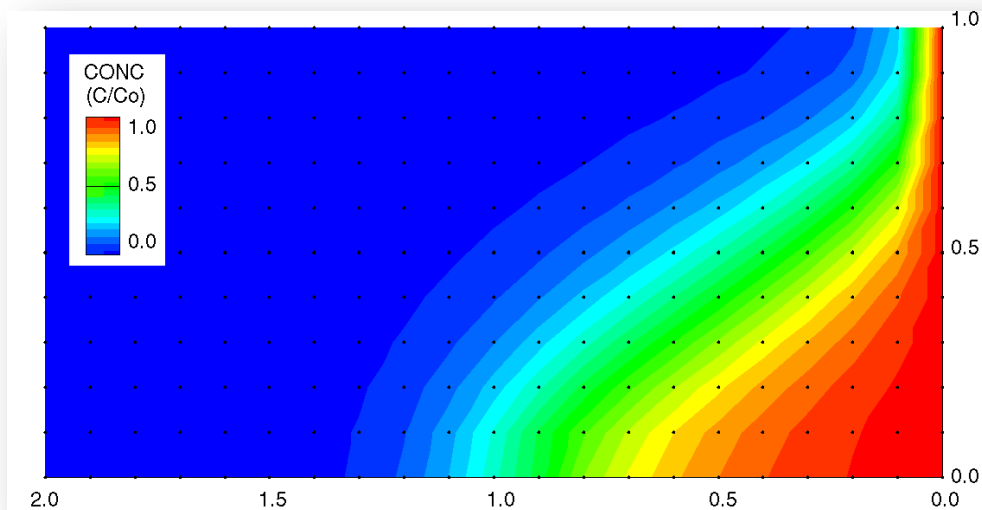




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

## ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ FEFLOW



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
Ευταξίας Κώστας

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ:  
Αικατερίνη Νάνου  
Λέκτορας ΕΜΠ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

# ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ FEFLOW

---

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
Ευταξίας Κώστας

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ:  
Αικατερίνη Νάνου  
Λέκτορας ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΪΟΣ 2014

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερως την επιβλέπουσα καθηγήτρια κ. Αικ. Νάνου για την επιστημονική της καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής αυτής εργασίας και όχι μόνο. Επίσης ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα Ιωάννη Νικηφοράκη για τον χρόνο που αφιέρωσε και την καθοριστική βοήθεια του.

Θέλω να ευχαριστήσω τους πολύτιμους φίλους, εντός και εκτός της σχολής αυτής, που συνέβαλαν με κάθε τρόπο ώστε τόσο η εργασία αυτή όσο και ολόκληρη η πορεία μου μέχρι σήμερα να αποτελεί μια ευχάριστη εμπειρία.

Τέλος, τίποτα από όλα αυτά δεν θα είχε συμβεί χωρίς την απεριόριστη στήριξη των γονιών μου, σε κάθε επίπεδο, τους οποίους και ευχαριστώ ιδιαίτερως.



## Περίληψη Διπλωματικής Εργασίας

Το φαινόμενο της υφαλμύρωσης αποτελεί ένα ιδιαίτερα έντονο πρόβλημα σε πολλές παράκτιες χώρες, και ιδιαίτερα στην Ελλάδα. Μια μικρή μόνο ποσότητα υφάλμυρου νερού αρκεί να εισχωρήσει σε έναν υδροφορέα ώστε να τον καταστήσει ακατάλληλο για κάθε χρήση. Γίνεται προσπάθεια σε παγκόσμιο και εγχώριο επίπεδο να διερευνηθούν περαιτέρω οι τρόποι αντιμετώπισης του φαινομένου.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τη μαθηματική προσομοίωση του φαινομένου της υφαλμύρωσης σε συγκεκριμένα μοντέλα υδροφορέων, κάτω από φυσικές συνθήκες (χωρίς επίδραση ανθρώπινου παράγοντα) και υπό συνθήκες επίδρασης του ανθρώπου (ύπαρξη φρεάτων άντλησης).

Επίσης γίνεται προσπάθεια μελέτης των μεθόδων αντιμετώπισης του φαινομένου της υφαλμύρωσης και πιο συγκεκριμένα της μεθόδου του τεχνητού εμπλουτισμού, με μελέτη συγκεκριμένων διατάξεων φρεάτων εμπλουτισμού στα μοντέλα υδροφορέων που προηγούνται.

Η μαθηματική προσομοίωση του προβλήματος έγινε με βάση τις εξισώσεις διατήρησης μάζας του ρευστού, τις εξισώσεις διατήρησης μάζας ρύπου (που στη συγκεκριμένη περίπτωση σαν ρύπος θεωρείτε το υφάλμυρο νερό που εισχωρεί στον υδροφορέα) και οι εξισώσεις Darcy.

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την προσομοίωση ήταν αυτή της θεώρησης των πεπερασμένων στοιχείων και οι επιλύσεις έγιναν με τη βοήθεια του λογισμικού FeFlow έκδοσης 6.1.

Στην εργασία αυτή έγινε προσπάθεια να εξαχθούν όσο το δυνατόν ασφαλέστερα συμπεράσματα για την επίδραση των φρεάτων άντλησης και εμπλουτισμού στο φαινόμενο της υφαλμύρωσης. Γι αυτό και επιλέχθηκε πλήθος διαφορετικών μοντέλων για να καλυφθούν όλες οι περιπτώσεις. Επιλέχθηκαν τέσσερις διαφορετικές γεωμετρίες υδροφορέων, σε συνδυασμούς είτε μεμονωμένης άντλησης είτε παράλληλης λειτουργίας φρεάτων άντλησης και εμπλουτισμού σε διάφορες διατάξεις.

Επίσης εξετάστηκαν και συγκρίθηκαν και περιπτώσεις εμπλουτισμού με διαφορετικές παροχές, στην ίδια διάταξη.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις μαθηματικές επιλύσεις συναντούν σε μεγάλο βαθμό τη θεωρητική προσέγγιση που αναμενόταν και συμβάλλουν στην εξαγωγή σημαντικών πληροφοριών.

## **Abstract**

Seawater intrusion constitutes a phenomenon of rising concern in coastal areas of many countries, especially in Greece. A small quantity of salty water that intrudes a waterbed is sufficient to render it improper of almost every use. Thus, an effort is conducted nation- and worldwide to gain valuable knowledge towards the abatement of this phenomenon.

The aim of the present diploma thesis is the simulation of the seawater intrusion phenomenon in specific waterbed models, under natural conditions (no anthropogenic influence is considered) and also under anthropogenic influence conditions (contribution of pumping wells).

Furthermore, several methods towards the abatement of the seawater intrusion are investigated and more specifically the method of technical enrichment.

The simulation of the problem was based on the fluid's mass conservation equations, the pollutant's mass conservation equations (in this occasion the seawater is considered as the pollutant) and the Darcy equations.

The finite element method was adopted for simulating the problem. More specifically, all the proposed analyses were performed using the FeFlow version 6.1 software.

In order to draw safe conclusions concerning the influence of the pumping wells and the technical enrichment on the seawater intrusion, different models that investigated all scenarios were examined. More specifically, four different waterbed geometries were chosen, in combination with either isolated pumping or parallel pumping well's function and technical enrichment in different set-ups.

Moreover, the scenarios of technical enrichment with different flow rates were also examined and compared with each other.

The conclusions extracted by the simulation results are in almost perfect agreement with the theoretical approach, as more or less expected, and contribute to the extraction of important and interesting information.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες.....	iii
Περίληψη Διπλωματικής Εργασίας .....	v
Abstract.....	vi
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ .....	1
1.2. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	2
1.3. ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	3
<b>2. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ.....</b>	<b>5</b>
2.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ .....	5
2.2. ΦΥΣΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ .....	7
2.2.1. Θεώρηση απότομης διεπιφάνειας.....	9
2.2.2. Θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους.....	12
2.3. ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ.....	12
2.3.1. Πρακτικές μέθοδοι αντιμετώπιση του φαινομένου .....	12
2.3.2. Υφιστάμενα προβλήματα και τρόποι αντιμετώπισης της υφαλμύρωσης	
16	
<b>3. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ .....</b>	<b>21</b>
3.1. ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ .....	21
3.1.1. Εξισώσεις διατήρησης μάζας του ρευστού .....	21
3.1.2. Εξίσωση Darcy.....	21
3.1.3. Εξίσωση διατήρησης μάζας ρύπου .....	22
3.2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ – ΤΟ	
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ FeFLOW.....	23
3.2.1. Ορισμός της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων .....	23

3.2.2.	Το λογισμικό FeFlow 6.1 .....	23
3.3.	ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΛΥΚΟΥ – ΑΛΜΥΡΟΥ ΝΕΡΟΥ .....	24
<b>4.</b>	<b>ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....</b>	<b>27</b>
4.1.	ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ .....	27
4.2.	ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	28
4.2.1.	Διαστάσεις και γεωμετρία υδροφορέων .....	28
4.2.2.	Θέσεις τομών μελέτης .....	31
4.2.3.	Συνοριακές συνθήκες ανάντη και κατόντη των υδροφορέων.....	33
4.2.4.	Θέσεις φρεάτων άντλησης και εμπλουτισμού.....	35
4.2.5.	Εδαφικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων μελέτης .....	43
4.2.6.	Κατόψεις υδροφορέων – Υψόμετρα .....	47
<b>5.</b>	<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΕΩΝ.....</b>	<b>51</b>
5.1.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΕΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ.....	51
5.1.1.	Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού .....	51
5.1.2.	Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού .....	57
5.1.3.	Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού.....	63
5.2.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΕΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΜΕ ΚΛΙΣΗ 5% ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ .....	68
5.2.1.	Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού .....	68
5.2.2.	Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού .....	74
5.2.3.	Ένα (1) φρέαρ άντλησης - Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού.....	79
5.3.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΕΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΜΕ ΚΛΙΣΗ 5% ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗΣ ΣΕ ΣΧΗΜΑ “V” .....	86
5.3.1.	Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού .....	88
5.3.2.	Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού .....	94



5.3.3.	Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ άντλησης στα $\frac{3}{4}$ του μήκους του υδροφορέα – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού .....	100
5.3.4.	Διάταξη τεσσάρων (4) φρεάτων άντλησης σε σχηματισμό ρόμβου στο μέσον του υδροφορέα – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού.....	106
5.3.5.	Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού.....	112
5.3.6.	Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ άντλησης στα $\frac{3}{4}$ του μήκους του υδροφορέα και αντίστοιχα ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού στο ίδιο μήκος, ενδιάμεσα με την ακτογραμμή .....	118
5.3.7.	Διάταξη τεσσάρων (4) φρεάτων άντλησης σε σχηματισμό ρόμβου στο μέσον του υδροφορέα – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού .....	124
5.4.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΕΩΝ ΣΤΡΕΒΛΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ (WRAPPED) ΜΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΚΑΙ ΚΑΘΕΤΗ ΚΛΙΣΗ ΣΤΗΝ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗ .....	130
5.4.1.	Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού .....	130
5.4.2.	Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού .....	136
5.4.3.	Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού με παροχή 50% της άντλησης (750 m <sup>3</sup> /day).....	142
5.4.4.	Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού με παροχή 20% της άντλησης (300 m <sup>3</sup> /day).....	148
<b>6.</b>	<b>ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΕΩΝ.....</b>	<b>154</b>
6.1.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΣΗΣ ΜΕΤΩΠΟΥ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΦΡΕΑΡ ΑΝΤΛΗΣΗΣ – ΤΟΜΗ 1 .....	156
6.1.1.	Οριζόντιος υδροφορέας – Ισογραμμές συγκέντρωσης 0,5.....	156
6.1.2.	Υδροφορέας με κλίση 5% - Ισογραμμές συγκέντρωσης 0,5 .....	156
6.1.3.	Στρεβλός υδροφορέας (wrapped) - Ισογραμμές συγκέντρωσης 0,5 ..	157
6.1.4.	Συμπεράσματα.....	157
6.2.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΣΗΣ ΜΕΤΩΠΟΥ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΦΡΕΑΤΟΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ.....	158

6.2.1.	Οριζόντιος υδροφορέας – Ισογραμμές συγκέντρωσης 0,5.....	158
6.2.2.	Υδροφορέας με κλίση 5% - Ισογραμμές συγκέντρωσης 0,5 .....	159
6.2.3.	Στρεβλός υδροφορέας (wrapped) – Ισογραμμές συγκέντρωσης 0,5 .	159
6.2.4.	Συμπεράσματα.....	159
6.3.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΣΗΣ ΜΕΤΩΠΟΥ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΣΕ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΣΧΗΜΑΤΟΣ V	
	161	
6.3.1.	Σύγκριση διαφορετικών διατάξεων άντλησης και εμπλουτισμού -	
	Ισογραμμές συγκέντρωσης 0,5.....	161
6.3.2.	Σύγκριση μοντέλων άντλησης μεταξύ τους .....	162
6.3.3.	Σύγκριση μοντέλων εμπλουτισμού μεταξύ τους .....	162
6.3.4.	Συμπεράσματα.....	163
6.4.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΣΗΣ ΜΕΤΩΠΟΥ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΣΕ ΣΤΡΕΒΛΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ	
	(WRAPPED) ΓΙΑ ΦΡΕΑΡ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΦΡΕΑΤΟΣ	
	ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΠΑΡΟΧΕΣ .....	164
6.4.1.	Φρέαρ εμπλουτισμού παροχής 20% της άντλησης .....	164
6.4.2.	Φρέαρ εμπλουτισμού παροχής 50% της άντλησης .....	165
6.4.3.	Συμπεράσματα.....	165
<b>7.</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....</b>	<b>166</b>
<b>8.</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>168</b>

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1. Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Το νερό μπορεί να θεωρηθεί ως φυσικός πόρος, ως οικονομικό αγαθό και ως περιβαλλοντικό στοιχείο, ανάλογα με το κύριο κριτήριο και το είδος της διαχείρισης του. Τόσο σαν φυσικός πόρος όσο και σαν οικονομικό στοιχείο έχει την ιδιαιτερότητα ότι είναι αναντικατάστατο στις ανάγκες που καλύπτει. Αποτελεί προϋπόθεση της ανάπτυξης οποιασδήποτε ζωής στο πλανήτη, και άρα είναι αναντικατάστατο και στην ανάπτυξη της ανθρώπινης φύσης. Η βιώσιμη (αειφόρος) διαχείριση των υδατικών πόρων είναι βασική παράμετρος της βιώσιμης ανάπτυξης. Αυτό διότι:

1. Οι υδατικοί πόροι δεν είναι απεριόριστοι και μάλιστα σε πολλές περιοχές του κόσμου δεν είναι επαρκείς και η ανεπάρκεια τους αυτή συνιστά μεγάλο εμπόδιο στην ανάπτυξη
2. Η κατανάλωση νερού για διάφορες χρήσεις (οικιακή-αστική, αρδευτική-αγροτική, βιοτεχνική, βιομηχανική) αυξάνεται με ραγδαίους ρυθμούς σε παγκόσμιο επίπεδο. Η προσφορά όμως είναι δεδομένη και δεν μπορεί να ακολουθήσει την αυξανόμενη ζήτηση.
3. Σε πολλές χώρες του κόσμου, όπου μια από αυτές είναι και η Ελλάδα, σε ετήσιο κύκλο, η ζήτηση του νερού μεγιστοποιείται όταν η προσφορά του ελαχιστοποιείται (για παράδειγμα στην Ελλάδα η χρήση μεγιστοποιείται το καλοκαίρι, όπου η προσφορά είναι ελάχιστη).
4. Η κατανομή διαθεσιμότητας και ζήτησης δεν συμπίπτει πάντα. Μπορεί ακόμη και σε χώρες που το ισοζύγιο είναι ικανοποιητικό, να υπάρχουν σε μικρότερη κλίμακα ανισομετρίες (για παράδειγμα περιοχές με πλούσιο υδατικό δυναμικό να είναι ακατοίκητες και περιοχές με πληθυσμιακή πυκνότητα να έχουν μικρή διαθεσιμότητα υδάτων).

Για αυτούς αλλά και άλλους και απρόβλεπτους λόγους (όπως μετεωρολογικές συνθήκες, έκτακτες χρήσεις και άλλα) πολλές φορές η κατανομή προσφοράς και ζήτησης είναι δυσανάλογη. Αυτός είναι και ο λόγος που η επίλυση στο πρόβλημα της διαχείρισης των υδατικών πόρων είναι επιτακτική.

Ιδιαίτερα όσον αφορά τους υπόγειους υδροφορείς, υπάρχουν περισσότερες ιδιαιτερότητες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Τα υπόγεια νερά αποτελούν σημαντική συνιστώσα στην διαχείριση των υδατικών πόρων και η προστασία από την ρύπανση και γενικότερα την υποβάθμιση τους αποτελεί πρωταρχικό στόχο. Σαν υποβάθμιση μπορούμε να ορίσουμε την οποιαδήποτε διαδικασία αλλοιώνει την ποιότητα του νερού σε τέτοιο βαθμό, ώστε να καθίσταται αδύνατη η χρήση του.

Χαρακτηριστικό στοιχείο των υπόγειων υδροφορέων είναι η δυσκολία στη μεταβολή της ποιότητας των υδάτων τους. Αυτό περιγράφεται πιο απλά ως δυσκολία στην ρύπανση των υδάτων των υπόγειων υδροφορέων αλλά και το αντίστροφο, δηλαδή υδροφορείς που έχουν ρυπανθεί είναι πολύ δύσκολο να επανέλθουν.

Οι τρόποι ρύπανσης των υπόγειων υδροφορέων είναι πολλοί και ποικίλουν ανάλογα με το είδος της δραστηριότητας που αναπτύσσεται σε κάθε περιοχή, αλλά και τα γεωλογικά και γεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Κυρίως η ρύπανση προέρχεται από χρήση λιπασμάτων, από αποπλύσεις λυμάτων από χώρους υγειονομικής ταφής καθώς και από τη διείσδυση θαλάσσιου νερού στον υδροφορέα, λόγω υπεραντλήσεων. Η τελευταία περίπτωση αποτελεί αυτήν της υφαλμύρωσης του υδροφορέα, κατά την οποία το γλυκό νερό μετατρέπεται σε υφάλμυρο και άρα ακατάλληλο για χρήση. (Ε. Χατζούλη, 2005)

## **1.2. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Στη παρούσα διπλωματική εργασία διερευνώνται διάφορα σενάρια άντλησης και εμπλουτισμού με στόχο τη μελέτη της επίδρασης του φαινομένου της υφαλμύρωσης στους παράκτιους υδροφορείς. Για κάθε σενάριο διατυπώνονται οι εξισώσεις διατήρησης μάζας για το νερό, κίνησης (Νόμος του Darcy) και υδροδυναμικής διασποράς, δηλαδή διατήρησης μάζας ρύπου ή διαλυμένης ουσίας, θεωρώντας μεταξύ γλυκού και θαλάσσιου νερού διεπιφάνεια πεπερασμένου πάχους.

Για την επίλυση των εξισώσεων της ροής εφαρμόζονται υπολογιστικές μέθοδοι και συγκεκριμένα η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων και το λογισμικό Feflow. Τα

αποτελέσματα των επιλύσεων εξετάζονται τόσο μεμονωμένα όσο και σε σύγκριση μεταξύ τους. Διερευνούνται διάφορα σενάρια που διαφοροποιούνται στη γεωμετρία του υδροφορέα, στις παροχές άντλησης και εμπλουτισμού της μεθόδου τεχνητού εμπλουτισμού που εφαρμόζεται, στη διάταξη των φρεάτων άντλησης καθώς επίσης και στα φυσικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα μελέτης.

### 1.3. ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η διπλωματική εργασία περιλαμβάνει τα εξής κεφάλαια:

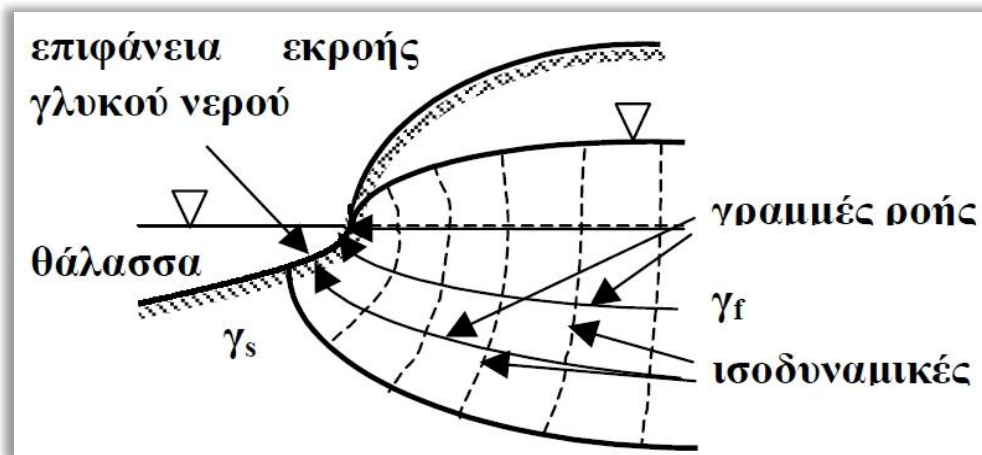
- ❖ Το πρώτο εισαγωγικό κεφάλαιο, όπου γίνεται μια γενική περιγραφή της σημασίας των υδάτινων πόρων, του προβλήματος της υφαλμύρωσης καθώς και μια περιγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας.
- ❖ Το δεύτερο κεφάλαιο, όπου ακολουθεί πιο αναλυτικά η παρουσίαση του φαινομένου της *υφαλμύρωσης*, βασικές φυσικές αρχές που το διέπουν καθώς και οι συνηθέστεροι τρόποι αντιμετώπισης του, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο –σε υφιστάμενα εγχώρια και διεθνή προβλήματα.
- ❖ Ακολουθεί το τρίτο κεφάλαιο με την μαθηματική περιγραφή του προβλήματος, τις εξισώσεις περιγραφής του καθώς και παρουσίαση του λογισμικού *FeFlow 6.1*, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση των σεναρίων.
- ❖ Το τέταρτο κεφάλαιο, στο οποίο γίνεται η λεπτομερής περιγραφή του προβλήματος και η παρουσίαση των υδροφορέων μελέτης με όλα τα χαρακτηριστικά τους (γεωμετρικές, παροχές άντλησης και εμπλουτισμού, διαστάσεις, εδαφικά χαρακτηριστικά, συνοριακές συνθήκες).
- ❖ Το πέμπτο κεφάλαιο, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των επιλύσεων για οριζόντιο υδροφορέα, υδροφορέα με κλίση προς τη θάλασσα, υδροφορέα σχήματος V και στρεβλού υδροφορέα. Ιδιαίτερα διερευνήθηκε η περίπτωση του υδροφορέα σχήματος V για 7 διαφορετικά σενάρια άντλησης και εμπλουτισμού.

- ❖ Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα των διαφορετικών επιλύσεων. Πρόκειται για συγκριτικά διαγράμματα που βοηθούν να εξαχθούν ευκολότερα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των διαφόρων σεναρίων άντλησης και εμπλουτισμού στο μέτωπο της υφαλμύρωσης.
- ❖ Τέλος, στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, αναλύουμε τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις επιλύσεις και γενικά από τη διπλωματική αυτή.

## 2. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ

### 2.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

Ως Υφαλμύρωση στα υπόγεια νερά ορίζεται η εισροή υφάλμυρου νερού στο σύστημα του υπόγειου υδροφορέα<sup>1</sup>. Με τη πάροδο του χρόνου το εισερχόμενο υφάλμυρο νερό αντικαθιστά το υπόγειο γλυκό νερό, με ρυθμό εκροής του γλυκού νερού ίσο με αυτόν εισροής του θαλασσινού νερού. Αποτέλεσμα είναι η αύξηση του ποσοστού που καταλαμβάνει ο όγκος του αλμυρού νερού σε σχέση με αυτόν του γλυκού νερού και έτσι η αχρήστευση του υδροφορέα και του νερού του.



Σχήμα 1 – Γραμμές Ροής και Ισοδυναμικές κατά το φαινόμενο της υφαλμύρωσης

(Αικ. Νάνου, 2001)

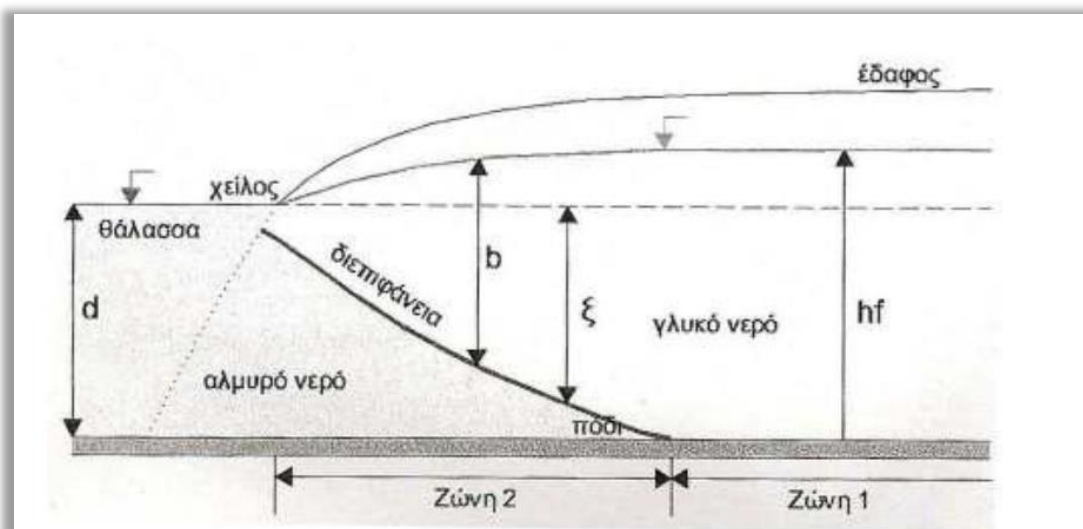
Χαρακτηριστικό του μεγέθους της ρύπανσης που μπορεί να προκαλέσει η Υφαλμύρωση ενός υπόγειου υδροφορέα είναι ότι, εισροή μόλις 2% κατ' όγκο ποσότητας υφάλμυρου νερού είναι ικανή να αχρηστεύσει όλη τη ποσότητα του γλυκού νερού του. Αυτό, πιο συγκεκριμένα, σημαίνει πως ένα λίτρο γλυκού νερού καθίσταται ανίκανο για χρήση με τη προσθήκη μόλις 20 ml θαλάσσιου νερού.

Αιτία της υφαλμύρωσης μπορούν να είναι πολλοί παράγοντες, όπως γεωλογικοί, και πολλές φορές στους υπόγειους υδροφορείς συνυπάρχει γλυκό και υφάλμυρο νερό για γεωλογικούς λόγους. Συνήθως όμως το φαινόμενο παρατηρείται εντονότερα

<sup>1</sup> Ορισμός van Dam, 1999

κατά τη διείσδυση του θαλάσσιου νερού στους υδροφορείς. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που το φαινόμενο συναντάται κυρίως σε παράκτιους υδροφορείς. Σε τέτοιες περιπτώσεις η υφαλμύρωση μπορεί να οφείλεται τόσο σε φυσικούς παράγοντες (ανύψωση στάθμης θάλασσας) όσο και σε ανθρωπογενείς (υπεραντλήσεις).

Το είδος και η πυκνότητα της ανθρώπινης δραστηριότητας επηρεάζει έντονα το μέγεθος του προβλήματος σε κάθε υδροφορέα. Στην Ελλάδα, που οι περισσότερες πεδιάδες τόσο στην ηπειρωτική χώρα όσο και στα νησιά είναι παραθαλάσσιες, εμφανίζεται πολύ έντονα το φαινόμενο της υφαλμύρωσης στους εκεί υδροφορείς. Αυτό διότι έχει αναπτυχθεί αρδευόμενη γεωργία που οι ανάγκες της σε νερό εξασφαλίζονται από υπόγειες αντλήσεις. Έτσι το μεγαλύτερο μέρος των παράκτιων υδροφορέων της χώρας μας, σε ποσοστό περίπου 85%, είναι πλέον ακατάλληλοι για χρήση. Κάτι τέτοιο δεν θα είχε συμβεί αν δεν είχε αναπτυχθεί έντονη αγροτική δραστηριότητα. Κάτω από φυσικές συνθήκες, και χωρίς καθεστώς υπεραντλήσεων, η φυσιολογική ροή θα ήταν αυτή του γλυκού νερού προς τη θάλασσα. (Ε. Χατζούλη, 2005)



Σχήμα 2 – Διατομή υδροφορέα με φαινόμενο υφαλμύρωσης (Κ. Σωτηροπούλου, 2010)

Βασικό πρόβλημα στην αντιμετώπιση της υφαλμύρωσης είναι η έλλειψη στοιχείων για το προσδιορισμό της έκτασης του προβλήματος. Δεν είναι δηλαδή εύκολη η ποσοτικοποίηση του προβλήματος. Επίσης δεν είναι εύκολη η αποκατάσταση του



υδροφορέα σε σύντομο χρονικό διάστημα. Τέλος, διάφοροι κοινωνικοί, οικονομικοί και νομικοί λόγοι καθυστερούν την λήψη μέτρων, με αποτέλεσμα το πρόβλημα –με το πέρασμα του χρόνου- να γίνεται μη αναστρέψιμο.

Η χρήση και αποκατάσταση των παράκτιων υδροφορέων πρέπει να αποτελεί μέρος ενός γενικότερου πλαισίου ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδατικών πόρων μιας παράκτιας περιοχής. Η διαχείριση αυτή αφορά τα επιφανειακά αλλά και τα υπόγεια ύδατα.

## **2.2. ΦΥΣΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ**

Από φυσικής απόψεως όταν υπάρχει διφασική ροή σχηματίζεται όριο εκεί που τα δύο υγρά έρχονται σε επαφή. Αυτό το όριο ονομάζεται *διεπιφάνεια*. Η μορφή και η κίνηση της διεπιφάνειας αυτής εξαρτώνται από την υδροδυναμική ισορροπία μεταξύ των υγρών αυτών. Θεωρητικά η διεπιφάνεια αυτή αποτελεί μια επιφάνεια χωρίς δυνατότητα ανάμιξης. Πρακτικά όμως έχει αποδειχτεί πως αποτελείται από μικρού πάχους ζώνες ανάμιξης που προκύπτουν λόγω της ροής σε πορώδη μέσα.

Για να αντιμετωπιστεί επαρκώς το πρόβλημα πρέπει να κατανοηθεί καλά η λειτουργία του φυσικού συστήματος και να περιγραφεί με μαθηματικά μοντέλα επαρκώς, ώστε να είναι πλήρως κατανοητό τόσο το πρόβλημα όσο και οι πιθανές λύσεις του.

Η πολυπλοκότητα της μελέτης του φαινομένου της υφαλμύρωσης οφείλεται σε παράγοντες όπως:

- (α) Ύπαρξη δύο φάσεων ρευστών καθώς και μιας ευρείας ζώνης ανάμιξης (ζώνη υφαλμύρωσης) μεταξύ των δύο υγρών
- (β) Η κίνηση και η διασπορά του ενός ρευστού στο άλλο εξαρτάται από την πυκνότητα των ρευστών στη ζώνη υφαλμύρωσης η οποία μεταβάλλεται σαν συνάρτηση του χώρου και του χρόνου και εξαρτάται από τις συνθήκες ροής. Αυτή η αλληλεξάρτηση κάνει τις αντίστοιχες εξισώσεις μη γραμμικές και καθιστά εξαιρετικά δύσκολη την επίλυση τους με αριθμητικές μεθόδους.

- (γ) Η περιγραφή του φαινομένου περιπλέκεται ακόμη περισσότερο λόγω της ανομοιογένειας των υδραυλικών παραμέτρων του υδροφορέα. Για παράδειγμα, σε καρστικούς υδροφορείς η ανάμιξη γλυκού και αλμυρού νερού συμβαίνει με τελείως διαφορετικό μηχανισμό από αυτόν σε υδροφορείς οι οποίοι μπορούν να θεωρηθούν πορώδη μέσα.

Το πάχος της μεταβατικής ζώνης δεν είναι σταθερό αλλά ποικίλει, εξαρτώμενο άμεσα από τις φυσικές ιδιότητες του υδροφόρου σχηματισμού, το ιστορικό των αντλήσεων, την χρονική εξέλιξη και κατανομή της επιφανειακής τροφοδοσίας, τη δράση της παλίρροιας. Σε γενικές γραμμές έχει αποδειχθεί ότι συνθήκες μόνιμης ροής ελαχιστοποιούν το πλάτος της ζώνης. Αντίθετα, αυξανόμενης της μεταβλητότητας των παραγόντων που προαναφέρθηκαν αυξάνεται το πλάτος της ζώνης, το μέγεθος της οποίας ποικίλει από μερικά μέτρα μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρων.

Στην πραγματικότητα κατά την επαφή των δύο ρευστών λαμβάνουν χώρα δύο ταυτόχρονες διαδικασίες στους παράκτιους υδροφορείς:

(α) Η αντικατάσταση του γλυκού νερού από το πυκνότερο θαλάσσιο

(β) Η κίνηση των χλωριόντων εντός της ζώνης ανάμειξης των δύο υγρών.

Οι δύο αυτές πράξεις προκύπτουν με συνδυασμένη δράση των διαδικασιών της μηχανικής διασποράς και της μοριακής διάχυσης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μεν διαδικασία της υδροδυναμικής διασποράς οφείλεται στην πολυπλοκότητα του πεδίου των τοπικών (μικροσκοπικών) ταχυτήτων και κατ' επέκταση στην ετερογένεια του πορώδους μέσου, η δε διάχυση στην τυχαία κίνηση των μορίων μέσα σε ένα ρευστό, η οποία δημιουργεί μια πρόσθετη μεταφορά μάζας από τις περιοχές υψηλής συγκέντρωσης προς εκείνες χαμηλής συγκέντρωσης. Είναι σαφές από τα παραπάνω ότι η κίνηση της διαλυμένης ουσίας είναι πολύπλοκη και δεν πραγματοποιείται μόνο κατά την κατεύθυνση της ροής. Η μεταβολή της αλατότητας σε διεύθυνση κάθετη προς την ταχύτητα ροής, που καταλήγει σε μια ανάλογης κατεύθυνσης μεταβολή της πυκνότητας, είναι υπεύθυνη για μια προς την επιφάνεια κίνηση των χλωριόντων, στο κατώτερο όριο της διεπιφάνειας. Εντός της

μεταβατικής ζώνης η ταχύτητα ροής δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται. Στο μεν ανώτερο όριο της η ταχύτητα ροής ταυτίζεται με εκείνη του σώματος του γλυκού νερού, στο δε κατώτερο όριο σχεδόν μηδενίζεται. Το πεδίο ροής στη μεταβατική ζώνη είναι υπεύθυνο για την επιστροφή διαλυμένης ουσίας στη θάλασσα και ουσιαστικά για την ανακύκλωση του θαλάσσιου νερού. Οι μέθοδοι προσέγγισης και μελέτης του φαινομένου της υφαλμύρωσης ομαδοποιούνται στις εξής κατηγορίες, ανάλογα με τη θεώρηση της μορφής της διεπιφάνειας:

- (α) Θεώρηση της απότομης διεπιφάνειας, εάν το πάχος της διεπιφάνειας είναι μικρό σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα
- (β) Θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους, λόγω υδροδυναμικής διασποράς

Στη παρούσα εργασία γίνεται επίλυση με τις συνήθεις εξισώσεις με διαφορά πυκνότητας, καθότι πρόκειται για τρισδιάστατη θεώρηση των προβλημάτων. Το λογισμικό FeFlow χρησιμοποιεί την θεώρηση της απότομης διεπιφάνειας μόνο στα δισδιάστατα προβλήματα (2D Vertical).

### **2.2.1. Θεώρηση απότομης διεπιφάνειας**

Η θεώρηση αυτή ακολουθείται στην περίπτωση που το πάχος της διεπιφάνειας είναι μικρό σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα. 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. Υπό προϋποθέσεις μπορεί να γίνει η παραδοχή της οριζόντιας ροής. Οι εξισώσεις γράφονται για κάθε μια φάση χωριστά, για το γλυκό και για το θαλάσσιο νερό. Και στις δύο φάσεις λαμβάνουμε την *εξίσωση συνέχειας* και την *εξίσωση κίνησης (Νόμος Darcy)*. (Νικηφοράκης Ι., 2008)

Άγνωστα μεγέθη θεωρούμε την *πίεση* ( $p$ ), το *βάθος της διεπιφάνειας* ( $z$ ) και τις *ειδικές παροχές γλυκού και θαλασσινού νερού*  $q_f$  και  $q_s$  αντίστοιχα.

Μια πρώτη προσέγγιση της του φαινομένου της υφαλμύρωσης με βάση τη θεώρηση της απότομης διεπιφάνειας γίνεται με τη μέθοδο *Ghyben–Herzberg*.

### 2.2.1.1. Η προσέγγιση *Ghyben – Herzberg*

Το 1888 οι Badon και Ghyben και το 1901 ο Herzberg, ανεξάρτητα μεταξύ τους, βρήκαν ότι η στάθμη του θαλάσσιου νερού στο έδαφος δεν βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας, αλλά κάτω από αυτό, 40 φορές περίπου τη διαφορά της στάθμης του γλυκού νερού από το επίπεδο της θάλασσας.

Η σχέση αυτή, γνωστή με το όνομα Ghyben-Herzberg, προκύπτει από 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. Ορίζοντας  $h_f$  το ύψος γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας και  $h_s$  τη θέση της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού κάτω από αυτήν και  $\gamma_f$ ,  $\gamma_s$  τα ειδικά βάρη γλυκού και αλμυρού νερού αντίστοιχα και  $\delta$  το λόγο  $\frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f}$ , ισχύει:

$$h_s \gamma_s = (h_f + h_s) \gamma_f \Rightarrow h_s = \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} h_f = \delta h_f$$

Η σχέση αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό της θέσης της διεπιφάνειας μόνο από τη στάθμη του γλυκού νερού στα φρέατα παρατήρησης. Για  $\rho_f = 1,000 \text{ gr/cm}^3$  και  $\rho_s = 1,025 \text{ gr/cm}^3$ , υπολογίζεται ότι:  $h_s = 40h_f$ . Στην βιβλιογραφία έχουν διατυπωθεί αντίστοιχες γενικότερες εκφράσεις για δυναμική και όχι υδροστατική ισορροπία, δεν αναφέρονται όμως στην παρούσα ανάπτυξη επειδή έχουν μικρότερο πρακτικό ενδιαφέρον.

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 περιορισμένους και φρεάτιους υδροφορείς.

Η προσέγγιση Ghyben-Herzberg αποτελεί μια ικανοποιητική μέθοδο για μια πρώτη ερμηνεία του φαινομένου, παρόλα αυτά δεν αντικατοπτρίζει την πραγματική εικόνα της διεπιφάνειας, και αυτό γιατί:

- Δεν ισχύει η παραδοχή της οριζόντιας ροής. Υπάρχουν σημαντικές κατακόρυφες συνιστώσες ταχυτήτων, ιδίως στις περιοχές πλησιέστερα προς τη θάλασσα.
- Η προσέγγιση Ghyben - Herzberg δεν επιτρέπει τον υπολογισμό της επιφάνειας από την οποία πραγματοποιείται εκροή 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 την επιφάνεια διήθησης στην περίπτωση των φρεάτων υδροφορέων.

Παρόλα αυτά, η χρήση αυτής της προσέγγισης ενδείκνυται για τον κατά προσέγγιση προσδιορισμό της θέσης της διεπιφάνειας θαλασσινού – γλυκού νερού. Εφόσον είναι γνωστές οι στάθμες της ελεύθερης επιφάνειας ή τα πιεζομετρικά φορτία, μπορεί να εκτιμηθεί το κάτω όριο της ροής και να ελεγχθεί εάν συμπίπτει με το αδιαπέρατο όριο του υδροφορέα ή εάν υπάρχει διείσδυση της θάλασσας σε αυτόν. Αντίστροφα, με δοκιμές και επιλογή κατάλληλου πάχους του υδροφορέα στην περιοχή της αλάτινης σφήνας, μπορεί να προσδιοριστεί το μήκος της.

### 2.2.2. Θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους

Με βάση αυτή τη θεώρηση, η διείδυση του θαλάσσιου νερού στον υπόγειο υδροφόρα αντιμετωπίζεται σαν ένα είδος ρύπανσης περιβαλλοντικής προέλευσης. Υπάρχουν δύο αναμίξιμα υγρά, οπότε επιλύεται πρόβλημα υδροδυναμικής διασποράς με συγκέντρωση  $c$  εξαρτώμενη από τη πυκνότητα  $\rho$ . Οι άγνωστοι του προβλήματος σε διάφορες θέσεις του πεδίου ροής και για διάφορους χρόνους είναι: η συγκέντρωση  $c$ , η ταχύτητα  $V$ , η πίεση  $p$  και η πυκνότητα  $\rho$ .

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι:

- Εξίσωση διατήρησης μάζας
- Εξίσωση υδροδυναμικής διασποράς
- Εξίσωση κίνησης (*Darcy*)
- $\rho = \rho(c)$  (γραμμική σχέση)

### 2.3. ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ

Οι ολοένα αυξανόμενες ανάγκες σε νερό σε συνδυασμό με την αλόγιστη χρήση και κατασπατάληση του σε νησιωτικές και παράκτιες περιοχές καθιστούν το φαινόμενο της υφαλμύρωσης πρωτεύον πρόβλημα. Η φύση του προβλήματος είναι τέτοια που καθιστά αναγκαία την εφαρμογή διαχειριστικών μεθόδων για τη βέλτιστη χρήση του εναπομείναντος δυναμικού. Πέραν όμως της ορθολογικής διαχείρισης έχουν προταθεί και έχουν εφαρμοστεί κατά καιρούς διάφορες τεχνικές μέθοδοι περιορισμού της υφαλμύρωσης.

#### 2.3.1. Πρακτικές μέθοδοι αντιμετώπιση του φαινομένου

##### Μέθοδος τεχνητού εμπλουτισμού

Ο τεχνητός εμπλουτισμός έχει στόχο την υποχώρηση του μετώπου της υφαλμύρωσης. Πραγματοποιείται με παροχέτευση γλυκού επιφανειακού νερού σε εκτεταμένες λεκάνες, τάφρους, κοίτες παλαιών ποταμών, φρέατα, από όπου και

διηθείται στη συνέχεια στο έδαφος. Στην ουσία η διαδικασία του τεχνητού εμπλουτισμού αποτελεί μια «επιτάχυνση» της φυσικής διαδικασίας του εμπλουτισμού που πραγματοποιείται λόγω μετεωρολογικών φαινομένων. (Νικηφοράκης Ι., 2008)

Σκοποί του τεχνητού εμπλουτισμού είναι:

- Αύξηση της εκμεταλλεύσιμης ποσότητας υπόγειου νερού ή η δημιουργία προσωρινής υπόγειας αποθήκης για εκμετάλλευση
- Η αποκατάσταση της υδρολογικής ισορροπίας υδροφόρων στρωμάτων ή συστημάτων που διαταράχθηκε η ισορροπία τους λόγω υπερεκμετάλλευσης τους
- Η πρόκληση ανόδου της στάθμης σε παράκτια υδροφόρα στρώματα για την αποφυγή ή την αναχαίτιση της διείσδυσης της θάλασσας και της υφαλμύρωσης των υδάτων
- Η πρόκληση ανόδου ή διατήρησης της στάθμης της θάλασσας για την αποφυγή καθίζησης εδαφικών σχηματισμών
- Η τροποποίηση της ποιότητας των υπογείων νερών με εμπλουτισμό από άλλα καταλληλότερα.
- Η διατήρηση της περιοχής που απειλείται με μείωση ή στέρευση
- Χρήση των γεωθερμικών πεδίων των περιοχών με παροχή κρύου νερού και άντληση ζεστού
- Η αντιμετώπιση πλημμυρικών παροχών με διοχέτευση μέρους τους στον εμπλουτισμό.

Προϋποθέσεις της σωστής εφαρμογής του τεχνητού εμπλουτισμού είναι:

- Να υπάρχει επιφανειακό νερό σε αρκετή ποσότητα
- Η ποιότητα του επιφανειακού νερού να είναι κατάλληλη και χημικά συμβατή με αυτή του υπογείου
- Να υπάρχουν κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες (περατότητα, υδραυλική αγωγιμότητα και διασύνδεση και άλλα)
- Να εμφανίζεται κατάλληλη γεωμορφολογία
- Να είναι συμφέρον το λειτουργικό και κατασκευαστικό κόστος του έργου.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι εφαρμογής του τεχνητού εμπλουτισμού. Η διάκριση τους γίνεται με βάση τις συνθήκες όπου εφαρμόζεται το μέτρο, το βάθος του προβλήματος, τα γεωμορφολογικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής καθώς και το κόστος λειτουργίας και κατασκευής. Συνηθέστεροι από αυτούς είναι:

- Με επιφανειακή κατάκλυση ολόκληρων περιοχών
- Με κατάκλυση περιορισμένων σχετικά περιοχών, μετά από την κατασκευή ορισμένων έργων (λεκάνες κατάκλυσης).
- Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού από τάφρους ή άντληση πλησίον τάφρου ή σε ποτάμι
- Με σημειακή παροχέτευση των επιφανειακών υδάτων στους υδροφορείς μέσω γεωτρήσεων ή φρεάτων, που είτε προϋπάρχουν είτε κατασκευάζονται για το σκοπό αυτό.
- Με υπόγεια μετωπική παροχέτευση μέσω σηράγγων

Ο τεχνητός εμπλουτισμός είναι μια πολύ διαδεδομένη μέθοδος αντιμετώπισης της υφαλμύρωσης, με αρκετά πλεονεκτήματα. Προστατεύεται η ύπαρξη και λειτουργία πηγών και υγροτόπων, αποφεύγεται η συνίζηση και άρα η ποσοτική υποβάθμιση των υδροφορέων, δεν διατρέχονται κίνδυνοι φυσικών καταστροφών, μειώνονται οι απώλειες από εξάτμιση και πολλά άλλα.

Μοναδικό μεγάλο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η ελάττωση του ενεργούς πορώδους εξαιτίας της έμφραξης των πόρων του υδροφορέα. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα με διάφορους μηχανισμούς, οπότε και απαιτείται συστηματική παρακολούθηση των συστημάτων τεχνητού εμπλουτισμού για την αποφυγή του.

Ο τεχνητός εμπλουτισμός είναι μακράν η πιο διαδεδομένη μέθοδος αντιμετώπισης της υφαλμύρωσης. Άλλες προσεγγίσεις που συναντώνται είναι:

1. Μέθοδος της κρυσταλλοποίησης. Πρόκειται για μια φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογία που βασίζεται σε διαδικασίες όμοιες με αυτές που συναντώνται στη φύση. Μέσω διαφόρων κρυσταλλικών σχηματισμών δημιουργούνται φραγμοί στον υδροφορέα που εμποδίζουν τη διέλευση του θαλάσσιου νερού



2. Δημιουργία τεχνητών φραγμών – φραγμάτων για τη παρεμπόδιση της ελεύθερης διέλευσης του αλμυρού νερού. Συνήθως χρησιμοποιούνται ειδικές οικολογικές μεμβράνες
3. Απομάκρυνση του αλμυρού νερού από την περιοχή που εντοπίζεται το πρόβλημα, με σκοπό τον περιορισμό της επιβάρυνσης του υδροφορέα
4. Τεχνητή προέλαση της ξηράς προς τη πλευρά της θάλασσας με σκοπό την μετατόπιση της αλάτινης σφήνας

Οι προαναφερθείσες μέθοδοι ή παραλλαγές αυτών εφαρμόζονται, πολλές φορές και συνδυαστικά, προκειμένου να διακοπεί επέκταση του φαινομένου της υφαλμύρωσης και όπου είναι αυτό δυνατόν, να αντιστραφεί. Η γενική αρχή όλων αυτών των μεθόδων είναι η διατήρηση ενός ελάχιστου πιεζομετρικού φορτίου, ικανού να παρεμποδίσει την προέλαση του μετώπου της υφαλμύρωσης. Η τελική επιλογή της μεθόδου εξαρτάται άμεσα από τις ιδιαιτερότητες της περιοχής αλλά και από το κόστος εφαρμογής.

Η πλέον διαδομένη μέθοδος αντιμετώπισης της υφαλμύρωσης είναι αυτή του τεχνητού εμπλουτισμού. Η εφαρμογή της απαιτεί ενδελεχή μελέτη του συστήματος των υπογείων νερών από υδραυλική, υδρογεωλογική και υδρολογική άποψη. Καθοριστικός στην περίπτωση αυτή είναι ο ρόλος της υδραυλικής επικοινωνίας, αφ' ενός μεν μεταξύ επιφανειακών και υπόγειων νερών, αφ' ετέρου δε μεταξύ των διαφόρων επάλληλων στρωμάτων του υπόγειου νερού. Κατακόρυφες ρηγματώσεις και λοιπές γεωλογικές ασυνέχειες δημιουργούν πρόσθετα προβλήματα.

Μπορεί να ενταχθεί στις μεθόδους αντιμετώπισης του φαινομένου και η *επαναχρησιμοποίηση των υφάλμυρων νερών*. Τα υφάλμυρα νερά δεν πρέπει να θεωρούνται εξ ορισμού ακατάλληλα για κάθε χρήση. Με συγκεκριμένη υδροχημική επεξεργασία μπορούν να αξιοποιηθούν σε τομείς όπως η κάλυψη αναγκών του αγροτικού τομέα ή ακόμα και για την ύδρευση. Μια ακόμα χρήση των υφάλμυρων υδάτων είναι για ψυκτικούς σκοπούς. Όσο οι μέθοδοι αφαλάτωσης και χημικής επεξεργασίας των υφάλμυρων νερών βελτιώνονται, τόσο περισσότερο θα αξιοποιούνται τέτοιες μέθοδοι. (Ε. Χατζούλη, 2005)

Τέλος, μια από τις πιο επωφελείς μεθόδους αντιμετώπισης της υφαλμύρωσης είναι η χρήση επεξεργασμένων λυμάτων για τον τεχνητό εμπλουτισμό υδροφορέων. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται ήδη σε Η.Π.Α. και Ισραήλ τα τελευταία 25 χρόνια με παροχές εμπλουτισμού της τάξης των 300.000 m<sup>3</sup>/day. (Κ. Βουδουρης, 2009)

### **2.3.2. Υφιστάμενα προβλήματα και τρόποι αντιμετώπισης της υφαλμύρωσης**

#### **A. Προβλήματα υφαλμύρωσης στον Ελλαδικό χώρο**

Είναι διαπιστωμένο πρόβλημα πως τα υπόγεια νερά σε μεγάλο μέρος της Ελλάδας έχουν υποβαθμιστεί και μολυνθεί επικίνδυνα και ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας σε πολλά γεωγραφικά διαμερίσματα παρουσιάζει δραματική πτώση. Η υφαλμύρωση των υδάτων εμφανίζει ιδιαίτερα αυξημένους ρυθμούς και σε συνδυασμό με την υποβάθμιση της ποιότητας τους από διάφορους ρύπους, καθίστανται αυτά τα νερά όχι μόνο μη πόσιμα, αλλά ακατάλληλα και για άρδευση.

Ενδεικτικά, στην περιοχή της Αττικής λειτουργούν πάνω από 5.000 γεωτρήσεις, ενώ η δυναμικότητα της περιοχής βρίσκεται περίπου στις 500. Πολλές δε από τις ήδη υπάρχουσες είναι παράνομες, χωρίς να έχει υπάρξει μελέτη πριν την λειτουργία τους. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρονται έντονα προβλήματα υφαλμύρωσης στα υπόγεια ύδατα της Αττικής (παραλιακή ζώνη Σουνίου, Πειραιάς, Καλλιθέα, Φάληρο, Δραπετσώνα, Κερασίни, Βουλιαγμένη, Βάρη, Κορωπί και άλλα), στην Πελοπόννησο (Κορινθία, Αχαΐα, Πόρτο Χέλι, Καλαμάτα), στη Μακεδονία (Νέα Πέραμος, Νέα Καρβάλη, Δέλτα Νέστου), στη Θεσσαλία (Κάρλα), στη Δυτική Ελλάδα (Σάμη Κεφαλονιάς) και στη Βόρειο Κρήτη.

Στον Πίνακα που ακολουθεί, καταγράφονται περιοχές με εξακριβωμένο το πρόβλημα της υφαλμύρωσης, καθώς και με στοιχεία σχετικά με την ένταση του προβλήματος, στην περιοχή της Βόρειας Ελλάδας.

ΠΕΡΙΟΧΗ	ΝΟΜΟΣ	ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ( $\mu\text{S}$ στους $25^{\circ}\text{C}$ )
Μακρυγιαλός	Πιερίας	Ακατάλληλο
Καλλικράτεια	Χαλκιδικής	3100
Ποτείδα	Χαλκιδικής	3300
Πευκοχώρι	Χαλκιδικής	3500
Νήσος Αμουλιανή	Χαλκιδικής	6000
Οφρίνιο – Καριανή	Καβάλας	Ακατάλληλο
Φωλέα – Ελαιωχώρι	Καβάλας	Ακατάλληλο
Γιακκάδες	Καβάλας	Ακατάλληλο
Νέα Κάρβαλη	Καβάλας	2000
Νέα Πέραμος	Καβάλας	1300
Θάσος	Καβάλας	2800
Πότος – Αστρίδα	Καβάλας	Ακατάλληλο
Σκάλα Σωτήρος	Καβάλας	5000-15000
Πρίνος	Καβάλας	1000-7000
Σκάλα Γαχωνίου	Καβάλας	1250
Λιμενάρια	Καβάλας	3000
Μαριές	Καβάλας	1600
Νέστος	Ξάνθης	2000
Βιστωνίδα	Ξάνθης	7500
Νέα Κεσάνη – Ποταμιά	Ξάνθης	5000-9000
Λεύκη	Ξάνθης	Ακατάλληλο
Φανάρι – Νέα Καλλίστη	Ροδόπης	Ακατάλληλο
Αλεξανδρούπολη – Λυκόφως	Έβρου	Ακατάλληλο
Έβρος	Έβρου	Ακατάλληλο

*Σχήμα 3 – Διαπιστωμένα προβλήματα υφαλμύρωσης στον Ελλαδικό χώρο (Ε. Χατζούλη, 2005)*

## **Β. Προβλήματα υφαλμύρωσης σε παγκόσμιο επίπεδο**

Οι παράκτιες ζώνες σε όλο τον κόσμο χαρακτηρίζονται από συχνά από υψηλές πυκνότητες πληθυσμού και έντονες ανθρώπινες δραστηριότητες. Είναι χαρακτηριστικό πως στα 89.000 χιλιόμετρα ακτογραμμών της Ευρώπης, σε πλάτος 50 χιλιομέτρων, κατοικεί ο μισός πληθυσμός της (190.000.000 άτομα). Η γεωργία και ο τουρισμός είναι οι δραστηριότητες που κυρίως συναντώνται, ειδικά σε τέτοιες περιοχές, πράγμα που σημαίνει έντονη επίδραση των δραστηριοτήτων αυτών στο περιβάλλον, και στους υπόγειους υδροφορείς. Ιδιαίτερα προβλήματα συναντώνται σε περιοχές με έντονες εποχιακές απαιτήσεις (τουριστικές περιοχές, γεωργικές

περιοχές) καθώς επίσης και σε μικρά και απομακρυσμένα από την ενδοχώρα νησιά, που η μεταφορά νερού είναι δύσκολη.

Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης έχει πάρει μεγάλες διαστάσεις σε παγκόσμιο επίπεδο. Χώρες όπως η Ισπανία, η Αλγερία, η Κύπρος, η Τυνησία, η Αίγυπτος και η Τουρκία είναι μεταξύ των χωρών όπου η αυξημένη αλατότητα στους υδροφορείς τους και οι μεταβαλλόμενες στάθμες ύδατος οδηγούν στις αλλαγές των ειδών βλάστησης στους υγρότοπος τους.

Υπάρχουν περιοχές της *Ινδίας* όπου το βάθος του προβλήματος έχει αναγκάσει να εγκαταλειφτούν φρέατα άρδευσης μέχρι και 10 χιλιόμετρα από τη θάλασσα στο εσωτερικό. Στη Βόρεια Ινδία η πτώση του υδροφόρου ορίζοντα έχει φτάσει μέχρι και τα 40 μέτρα, καθιστώντας τα υπάρχοντα φρέατα βάθους 10 μέτρων άκατάλληλα για χρήση. Σε μια χώρα σαν την Ινδία, όπου το 75% των υδάτων άρδευσης προέρχεται από γεωτρήσεις, κάτι τέτοιο είναι καταστροφικό για τις καλλιέργειες.

Στη *Κίνα*, και πιο συγκεκριμένα στο Πεκίνο, η υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων έφερε πτώση του υδροφόρου ορίζοντα κατά 4 μέτρα σε ένα χρόνο. Σύμφωνα με τις κινεζικές αρχές, εκτός από τα προφανή προβλήματα της κατάπτωσης του υδροφόρου ορίζοντα που έχουν να κάνουν με την άντληση νερού, ήδη σε 45 πόλεις εμφανίζονται και προβλήματα καθιζήσεων του εδάφους. Αντίστοιχο πρόβλημα ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα και καθιζήσεων εμφανίστηκε και στις *Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής*, στην Αριζόνα. Εκεί λόγω αποστράγγισης του εδάφους σχηματίστηκαν σχισμές στο έδαφος και υποχώρησαν οδικά έργα σε μήκος εκατοντάδων μέτρων.

Έντονο πρόβλημα εντοπίζεται και στη *Κύπρο*. Στην περιοχή του Ακρωτηρίου παρατηρήθηκε πτώση της πιεζομετρικής επιφάνειας και διείσδυση της θάλασσας. Αυτό διότι μεγάλο μέρος των υπογείων υδάτων αντλείται και χρησιμοποιείται για την υδροδότηση της Λεμεσού, των Βρετανικών βάσεων αλλά και για γεωργικές καλλιέργειες. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην εγκατάλειψη πολλών φρεάτων άντλησης, ενώ παράλληλα μειώθηκε η χρήση κατά 25%. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με *τεχνητή επαναφόρτιση του υδροφόρου στρώματος* από εγκατεστημένες δεξαμενές έξω από τη λεκάνη. Υπάρχει πρόβλεψη για χρήση και αφαλατωμένου θαλάσσιου νερού. (Ε. Ευαγόρας, 2012, Κ. Κωνσταντινίου, 2007)

Αντίστοιχη κατάσταση εμφανίζεσαι και στη περιοχή του *Ισραήλ* και της Λωρίδας της Γάζας. Περίπου 3000 φρέατα λειτουργούν στην περιοχή και εξάγουν νερό προς χρήση και άρδευση. Η μορφολογία του εδάφους επιτρέπει την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων νερού στους υπόγειους υδροφορείς. Παρόλα αυτά, η ετήσια άντληση υδάτων είναι κατά 40% μεγαλύτερη της συνιστώμενης ετήσιας άντλησης (280 εκατομμύρια κυβικά μέτρα) και ως αποτέλεσμα υπήρξε διείδυση της θάλασσας στις αποθήκες νερού. Το *Ισραήλ* έχει ενσωματώσει την επαναχρησιμοποίηση του απόβλητου ύδατος σε βαθμό που αγγίζει το 70% των αποβλήτων. Το εθνικό σύστημα διανομής υδάτων της χώρας διαθέτει δύο δίκτυα, ένα για καθαρό νερό και ένα για επεξεργασμένα λύματα. Το περιεχόμενο του δευτέρου δικτύου χρησιμοποιείται σταθερά για την επαναφόρτιση του παράκτιου υδροφόρου ορίζοντα από το 1960. Η παροχή που χρησιμοποιείται εκτιμάται περίπου στα 90.000.000 m<sup>3</sup>/year.

Οι ιδιαίτεροι γεωλογικοί σχηματισμοί, σε συνδυασμό με τα τεχνητά έργα που έλαβαν χώρα τα τελευταία χρόνια στην *Ολλανδία*, έκαναν εμφανές το πρόβλημα της υφαλμύρωσης και εκεί. Παρόλα αυτά με προσεκτικούς χειρισμούς στις αντλήσεις και με μέτρα αντιμετώπισης, δεν υπήρξε ποτέ έντονη εκδήλωση του. Από το 1990 είναι σε λειτουργία ένα σύστημα εμπλουτισμού φρεάτων, η δυναμικότητα του οποίου φτάνει τα 5.000.000 m<sup>3</sup>/year. Αποτελείται από 20 σημεία που γίνονται διηθήσεις και 12 φρέατα παραγωγής που τοποθετούνται σε διαφορετικά επίπεδα. Η τοποθέτηση των φρεάτων γίνεται σε σχήμα ρόμβου με τα φρέατα εμπλουτισμού στο κέντρο. Με αυτό τον τρόπο εφαρμόζεται ένα 10% του εμπλουτισμού. Με τη συγκεκριμένη μέθοδο δεν μπορεί να ανακτηθεί το νερό που είναι απαραίτητο αλλά επιτρέπεται η συνέχιση των αντλήσεων χωρίς εμπλουτισμό για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Παρόμοια προβλήματα συναντιόνται στις παράκτιες πολιτείες των *Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής* (Καλιφόρνια, Φλόριντα, Χαβάη). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η πεδιάδα *Oxnard* στη παραλία του Ειρηνικού στη Κεντρική Καλιφόρνια. Οι ιδιαίτερα υψηλές αρδευτικές ανάγκες της περιοχής καλύπτονταν από την πλούσια υπόγεια υδροφορία η οποία αναπτύσσεται υπό πίεση κάτω από τα επιφανειακά αργιλικά στρώματα. Η αρτεσιανή ροή έφτανε μέχρι και τα 60 μέτρα.

Από το 1940 και μετά η στάθμη των υπογείων υδάτων μειωνόταν και η διήθηση του υφάλμυρου νερού στα φρέατα ήταν εμφανής.

Για να αντιμετωπισθεί η κατάσταση αυτή, άρχισαν από το 1955 να λαμβάνονται μια σειρά από μέτρα όπως η κατασκευή φράγματος με ταμιευτήρα χωρητικότητας 10 000 km<sup>3</sup> με ελεγχόμενη διάθεση του νερού αυτού για τον τεχνητό εμπλουτισμό των υπογείων υδροφορέων μέσω γειτονικών ποταμών. Σε συνδυασμό με προληπτικά μέτρα που λήφθηκαν, όπως μείωση των αντλήσεων, απαγόρευση δημιουργίας νέων γεωτρήσεων και ελεγχόμενη χρήση των υπογείων νερών, το αποτέλεσμα ήταν να υπάρξει σημαντική ανύψωση της στάθμης και εντός 40 ετών υπήρξε πλήρης αποκατάσταση.

### 3. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ

#### 3.1. ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ

##### 3.1.1. Εξισώσεις διατήρησης μάζας του ρευστού

Η εξίσωση συνέχειας για το ρευστό έχει την ακόλουθη γενική μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho q_i) = \rho Q_\rho \quad (3.1)$$

Όπου

$q_i$  : η ειδική παροχή [LT-1]

$\rho$  : η πυκνότητα του ρευστού [ML-3]

$n$  : το πορώδες του εδάφους

$Q_\rho$  : ο ρυθμός ροής (εκφρασμένος σε μονάδες όγκου που εισέρχεται στη μονάδα του χρόνου), ανά μονάδα όγκου του υδροφόρου ορίζοντα [T-1]. Αυτός ο όρος περιλαμβάνει το σύνολο των εισροών και εκροών από την επιφάνεια και τη βάση του υδροφόρου σχηματισμού.

Εισάγοντας, για τη μεταβλητή κατάσταση πυκνότητα ( $\rho$ ), μία συνάρτηση  $\rho(C)$ , η παραπάνω εξίσωση παίρνει την μορφή:

$$S_o \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} = Q_\rho + Q_{EB}(C) \quad (3.2)$$

$S_o$  : η ειδική αποθηκευτικότητα του υδροφορέα, η οποία εκφράζει τον όγκο του νερού που απελευθερώνεται ή προσλαμβάνεται ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα πτώσης ή αύξησης του πιεζομετρικού φορτίου [L-1]

$Q_{EB}(C)$  : είναι ο όρος εκείνος στον οποίο ενσωματώνονται οι επιδράσεις της μεταβαλλόμενης πυκνότητας

##### 3.1.2. Εξίσωση Darcy

Η εξίσωση του Darcy περιγράφει την κίνηση ενός ρευστού σε ένα πορώδες μέσο σε μακροσκοπικό επίπεδο και επομένως αποτελεί την εξίσωση κίνησης. Η εξίσωση του Darcy σε περιπτώσεις συνδυασμού της κίνησης ενός ρευστού με μεταφορά μάζας ρύπου, όπου μπορεί να μεταβάλλεται η πυκνότητα συναρτήσει της συγκέντρωσης, διατυπώνεται ως εξής:

$$q_i = -K_{ij} \left( \frac{\partial h}{\partial x_i} + \frac{\rho - \rho_o}{\rho_o} e_j \right) \quad (3.3)$$

$q_i$  : η ειδική παροχή [LT-1]

$K_{ij}$  : η υδραυλική αγωγιμότητα [LT-1]

$\rho$  : η πυκνότητα του ρευστού [ML-3]

$e_j$  : το μοναδιαίο κατακόρυφο διάνυσμα

### 3.1.3. Εξίσωση διατήρησης μάζας ρύπου

$$\frac{\partial}{\partial t} (nC) + \frac{\partial}{\partial x_i} (q_i C - D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_i}) = Q_c \quad (3.4)$$

με

$$D_{ij} = D_{ij}^{mol} + D_{ij}^{disp} = D_{ij}^{mol} + (D_{Lij}^{disp} + D_{Tij}^{disp}) = D_{ij}^{mol} + (\beta_L \nu + \beta_T \nu) \quad (3.5)$$

$D_{ij}^{disp}$  : ο τανυστής της μηχανικής διασποράς [ $L^2T^{-1}$ ]

$D_{ij}^{mol}$  : ο τανυστής της μοριακής διάχυσης [ $L^2T^{-1}$ ]

$D_{Lij}^{disp}$  : ο επιμήκης συντελεστής μηχανικής διασποράς [ $L^2T^{-1}$ ]

$D_{Tij}^{disp}$  : ο εγκάρσιος συντελεστής μηχανικής διασποράς [ $L^2T^{-1}$ ]

$\beta_L$  : ο ανηγμένος επιμήκης συντελεστής μηχανικής διασποράς [L]

$\beta_T$  : ο ανηγμένος εγκάρσιος συντελεστής μηχανικής διασποράς [L]

$\nu$  : η μέση ταχύτητα ροής [ $LT^{-1}$ ]



$Q_c$  : το αλγεβρικό άθροισμα όλων των δυνατών μηχανισμών απώλειας ή προσθήκης διαλυμένης ουσίας [ $ML^{-3}T^{-1}$ ]. (Αικ. Νάνου, 2006)

## **3.2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ – ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ FeFLOW**

### **3.2.1. Ορισμός της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων**

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων.

Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Όμως, υπήρχε η ανάγκη να λυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα και γι' αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι.

Μία τέτοια μέθοδος είναι και η μέθοδος των *πεπερασμένων στοιχείων*. Αυτή η μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Αυτό όμως το μειονέκτημα ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου ήταν τόσο μεγάλη, που ακόμα και σήμερα χρησιμοποιείται στην έρευνα και στην βιομηχανία για τον υπολογισμό και τη μελέτη διάφορων κατασκευών. (Ι. Νικηφοράκης, 2008)

### **3.2.2. Το λογισμικό FeFlow 6.1**

Στη παρούσα διπλωματική εργασία έχει γίνει χρήση του λογισμικού *FeFlow* έκδοσης 6.1, που κυκλοφόρησε το Φεβρουάριο του 2013. Πρόκειται για τη νεότερη έκδοση ενός λογισμικού που προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια υδραυλικά προβλήματα κάθε είδους σε υδροφορείς με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

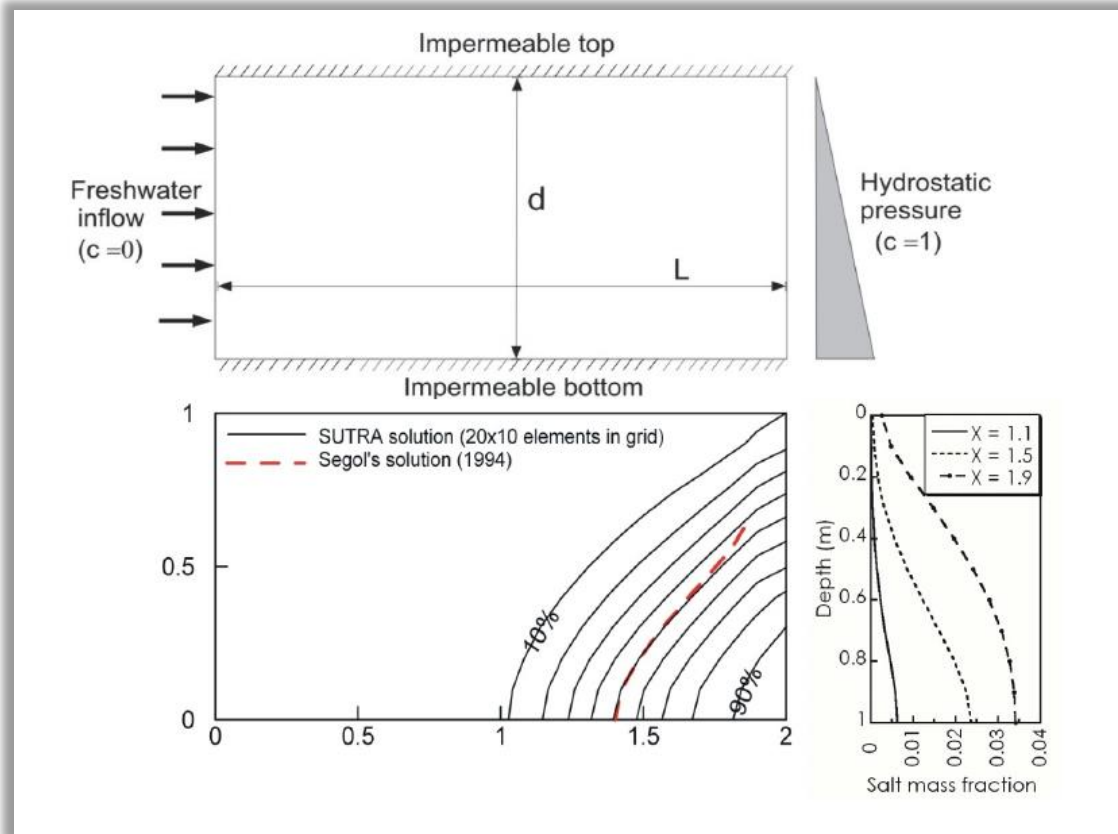
Πιο συγκεκριμένα, το FeFLOW είναι ένα διαδραστικό (σε αλληλεπίδραση με το χρήστη), υποστηρίζοντας γραφικά και παραθυρικό περιβάλλον, σύστημα προσομοίωσης των διαδικασιών της ροής, της μεταφοράς μάζας και της θερμότητας στα υπόγεια νερά, βασισμένο στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Πιο αναλυτικά, έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης προβλημάτων δύο ή τριών διαστάσεων, κορεσμένης ή ακόρεστης ζώνης, μόνιμης ή μη μόνιμης ροής, μεταβλητής πυκνότητας ρευστού, ροής και μεταφοράς μάζας, ροής και μεταφοράς θερμότητας, συστημάτων υπόγειων υδάτων με ή χωρίς ελεύθερη επιφάνεια. Τα πρωταρχικά αποτελέσματα που προκύπτουν από το συγκεκριμένο υπολογιστικό κώδικα είναι πιεζομετρικά φορτία, παράμετροι ροής και στοιχεία συγκέντρωσης διαλυμένων ουσιών-ρύπου και θερμότητας, όπως μεταβάλλονται με το χρόνο, σε όλο το προσομοιωμένο υπόγειο σύστημα.

Η πρώτη έκδοση του προγράμματος αναπτύχθηκε το 1979 από την WASY GmbH, πλέον μετονομασμένη σε DHI – WASY GmbH, με έδρα τη Γερμανία. Μέσα σε 35 χρόνια έχει εξελιχθεί, μετά από 6 βασικές εκδόσεις, σε ένα από τα πληρέστερα προγράμματα εξομοιώσεων με βάση τα πεπερασμένα στοιχεία.

### **3.3. ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΛΥΚΟΥ – ΑΛΜΥΡΟΥ ΝΕΡΟΥ**

Στα υπό μελέτη προβλήματα της παρούσας διπλωματικής προκύπτει το ζήτημα της επιλογής των κατάλληλων τιμών υδραυλικού φορτίου για τις συνοριακές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα στα μοντέλα υφαλμύρωσης που μελετάμε συναντάμε το πρόβλημα τις διαφορετικής πυκνότητας των δύο υγρών στο ανάντη και κατάντη όριο άρα και στην ανάγκη διαμόρφωσης ισοδυναμίας μεταξύ των δύο φορτίων γλυκού και αλμυρού νερού.

Με αυτό το πρόβλημα είχε ασχοληθεί ο Henry με τη χαρακτηριστική περίπτωση επίλυσης (benchmark case) που περιγράφεται και στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 4 - Σκαρίφημα του χαρακτηριστικού προβλήματος του Henry (Abarca PhD thesis, 2006)

Συγκεκριμένα, το υδραυλικό φορτίο  $h$  πρέπει να ορίζεται σε μία πυκνότητα αναφοράς του ρευστού  $\rho_0$ .

$$h = \frac{P}{\rho_0 g} + z \quad (3.6)$$

$h$ : το υδραυλικό φορτίο [L]

$P$ : η πίεση [ $ML^{-1}T^{-2}$ ]

$\rho_0$ : η πυκνότητα αναφοράς [ $ML^{-3}$ ]

$g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας [ $MLT^{-2}$ ]

$z$ : το υψόμετρο [L]

Συνήθως για τα προβλήματα υφαλμύρωσης ως πυκνότητα αναφοράς επιλέγεται η πυκνότητα του γλυκού νερού ( $\rho_0 = 1 \text{ kg/lit}$ ).

Η μέτρηση του πιεζομετρικού φορτίου με ένα πιεζόμετρο κανονικά συσχετίζεται με την πραγματική πυκνότητα του νερού (διαλύματος) στο σημείο αυτό . Το υδραυλικό φορτίο δίνεται από τη σχέση :

$$h_s = \frac{p}{\rho_s g} + z \quad (3.7)$$

$\rho_s$ : η πυκνότητα του νερού (διαλύματος) για μία συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας C :  $\rho_s = \rho_s(C)$

Στο λογισμικό FeFlow γίνεται χρήση συνοριακών συνθηκών για να περιγράψουν τις πραγματικές συνθήκες που υφίστανται στον υδροφορέα μελέτης. Παρόλα αυτά, δεν είναι δυνατή η χρήση δύο διαφορετικών επιπέδων πιεζομετρικού φορτίου, ανάλογα με το είδος του υγρού (αλμυρό ή γλυκό).

Σε αυτή τη περίπτωση γίνεται χρήση ενός μόνο επιπέδου υδραυλικού φορτίου και μετατροπή του άλλου είδους σε ισοδύναμο. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται μετατροπή του φορτίου του αλμυρού νερού σε ισοδύναμο φορτίο γλυκού νερού με τον τύπο:

$$h_s = \frac{1}{1+a} h + \frac{a}{1+a} z \quad (3.8)$$

Αυτό αντιπροσωπεύει το φορτίο που θα υπήρχε, αν στη θέση της συνοριακής συνθήκης υπήρχε γλυκό και όχι θαλάσσιο νερό. (Α. Τσάνης, 2010)

## 4. ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

### 4.1. ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία μελετάμε τις επιπτώσεις του προβλήματος της υφαλμύρωσης σε υδροφορείς συγκεκριμένων γεωμετριών, παχών και χαρακτηριστικών για υδραυλικά φορτία που προκύπτουν από θαλάσσιο μέτωπο κατάντη του υδροφορέα.

Στο λογισμικό FeFlow έχουν προσομοιωθεί συνθήκες που προκαλούν υφαλμύρωση και για διάφορες τιμές των παραμέτρων προκύπτουν διαφορετικά αποτελέσματα, ικανά να εξάγουν χρήσιμα αποτελέσματα.

Οι συνθήκες αυτές εφαρμόζονται σε τέσσερα διαφορετικά μοντέλα πρότυπων υδροφορέων δίνοντας μας πληροφορίες για κάθε περίπτωση χωριστά σχετικά με το μέγεθος του προβλήματος και πιο χαρακτηριστικά για το βάθος πέλματος του μετώπου υφαλμύρωσης, τις τιμές συγκεντρώσεων που συναντώνται στο μέτωπο καθώς και τη κατεύθυνση των πεδίων ταχύτητας και των γραμμών ροής. Τέλος, βγαίνει συνοπτικά ένα συμπέρασμα για το ποιος συνδυασμός προκύπτει πιο δυσμενής για να αναπτυχθεί το φαινόμενο της υφαλμύρωσης.

Σε επόμενο στάδιο εφαρμόζονται προσομοιώσεις της αντιμετώπισης του προβλήματος με τη μέθοδο του τεχνητού εμπλουτισμού για διαφορετικό αριθμό φρεάτων εμπλουτισμού, σε διαφορετικές διατάξεις και διαφορετικές παροχές εμπλουτισμού.

Η μελέτη του προβλήματος με αυτόν τον τρόπο βοήθησε στο να συσχετιστούν διαφορετικοί παράγοντες και να βγουν ενδεικτικά συμπεράσματα σχετικά με το πώς μεταβάλλονται τα αποτελέσματα όταν αλλάζουν οι τιμές συγκεκριμένων συντελεστών και παραγόντων. Παρόλα αυτά, και όντας ένα εξαιρετικά δύσκολο πρόβλημα με ροή σε τρεις διαστάσεις, δεν μπορούν να βγουν ασφαλή συμπεράσματα για κάθε περίπτωση. Σε αυτό συμβάλλει και η πληθώρα παραμέτρων που χρειάζεται να διερευνηθούν στο λογισμικό FeFlow.

Κάθε πρακτικό πρόβλημα που συναντάται στη πραγματικότητα έχει τις δικές του παραμέτρους και ιδιαιτερότητες και απαιτεί μοναδική λύση ανάλογα με τα

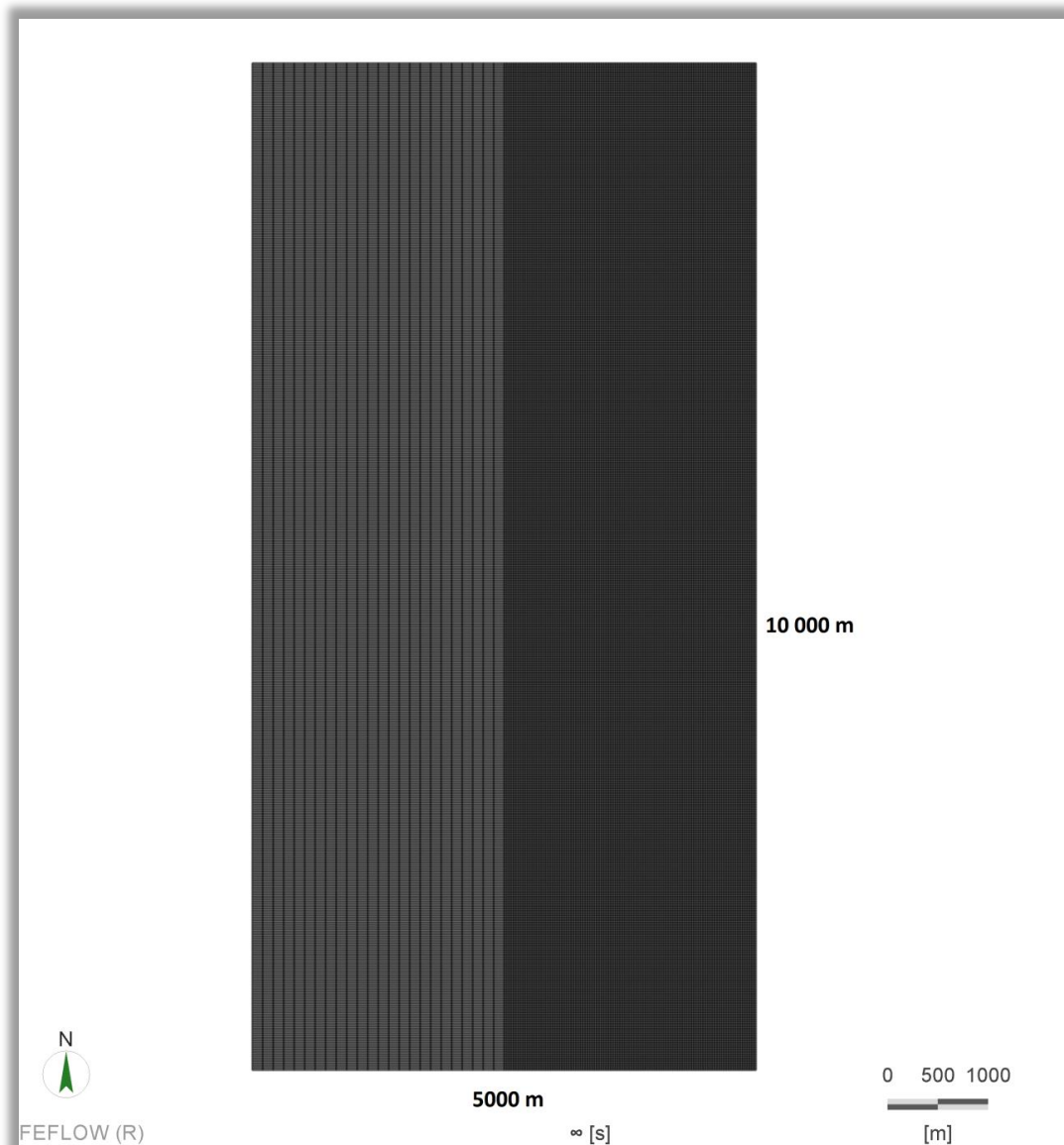
χαρακτηριστικά του. Γι αυτό και το πρόβλημα της υφαλμύρωσης απαιτεί βελτιστοποίηση των λύσεων, λαμβάνοντας υπόψη και οικονομικούς παράγοντες.

Παρόλα αυτά, τα συμπεράσματα της διερεύνησης είναι εξαιρετικά χρήσιμα και ενδιαφέροντα για περαιτέρω μελέτη.

## **4.2. ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ ΜΕΛΕΤΗΣ**

### **4.2.1. Διαστάσεις και γεωμετρία υδροφορέων**

Στη διπλωματική αυτή μελετώνται υδροφορείς σταθερού πάχους  $B = 100$  m και διαστάσεων 5,0 km σε βάθος από τη θάλασσα προς την ενδοχώρα και 10,0 km διαμήκως της ακτογραμμής.

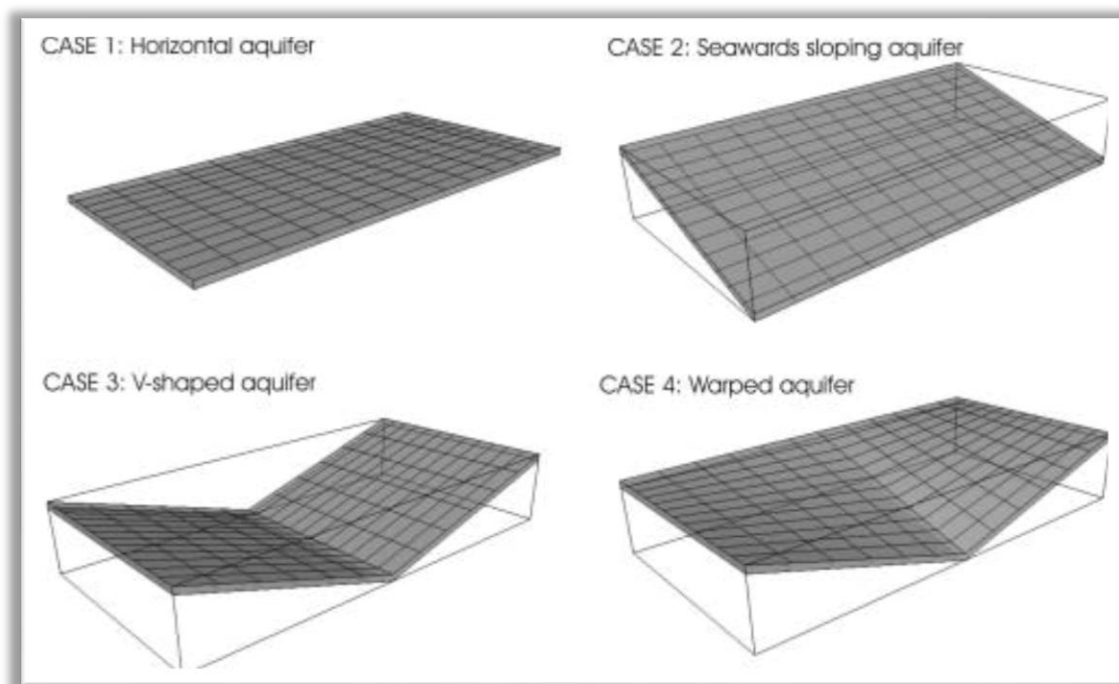


**Σχήμα 5 - Διαστάσεις υδροφορέων μελέτης**

Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικές γεωμετρίες υδροφορέων σε αυτές τις διαστάσεις:

- Οριζόντιος υδροφορέας
- Υδροφορέας με κλίση 5% κατά τη διεύθυνση της ακτογραμμής (Seaslope aquifer)
- Υδροφορέας με κλίση 5% κάθετη στη διεύθυνση της ακτογραμμής σε σχήμα V (V-shaped aquifer)
- Υδροφορέας στρεβλός με κλίση τόσο κάθετα όσο και παράλληλα στην ακτογραμμή (wrapped aquifer)

Οι παραπάνω γεωμετρίες συνοψίζονται στο σχήμα που ακολουθεί<sup>2</sup>:



*Σχήμα 6 – Γεωμετρία υδροφορέων μελέτης (E. Abarca, 2006)*

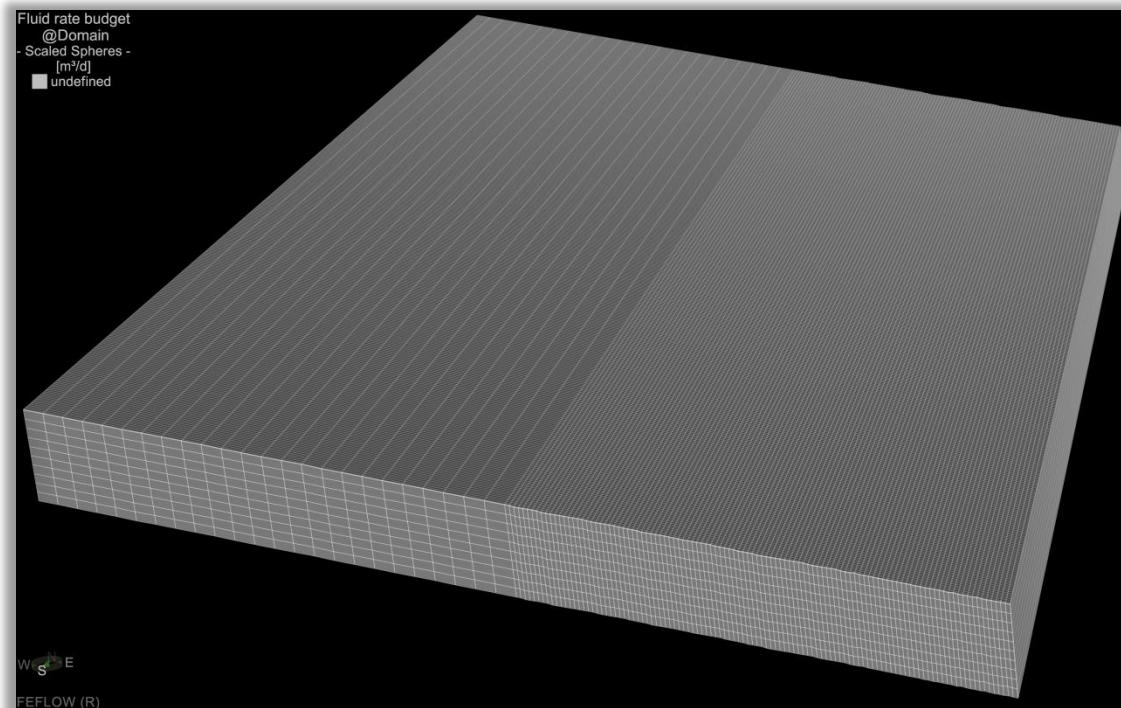
Η πύκνωση κανάβου που ακολουθήθηκε ήταν κανάβος κυβικών στοιχείων διαστάσεων περίπου 25 x 25 x 10 m κοντά στην ακτογραμμή και 50 x 25 x 10 m στο τμήμα από τη μέση και προς τα ανάντη, όπου οι λεπτομέρειες δεν ήταν τόσο σημαντικές. Η απροσδιοριστία στις ακριβείς διαστάσεις των κυβικών στοιχείων του κανάβου προκύπτει στη διαφορετική γεωμετρία από υδροφορέα σε υδροφορέα. Η αρχική διαμόρφωση του κανάβου στον οριζόντιο υδροφορέα είναι κυβικά στοιχεία 25 m, αλλά λόγω κλίσεως και μετακίνησης των σημείων, έχουν υποστεί ανεπαίσθητες μεταβολές.

Η πύκνωση του κανάβου σε βάθος 100 m γίνεται με 10 layers πάχους 10 m. Η απόσταση των layers παραμένει σταθερή στον οριζόντιο υδροφορέα, αλλά στους υπόλοιπους υδροφορείς λόγω της κλίσης τους, εμφανίζονται μικρές διαφοροποιήσεις που δεν επηρεάζουν τη μορφή των αποτελεσμάτων.

---

<sup>2</sup> “Effective dispersion in seawater intrusion through heterogeneous aquifers”, E. Abarca, J. Carrera





*Σχήμα 7 – Προοπτική τρισδιάστατη απεικόνιση τουοριζόντιου υδροφορέα*

#### **4.2.2. Θέσεις τομών μελέτης**

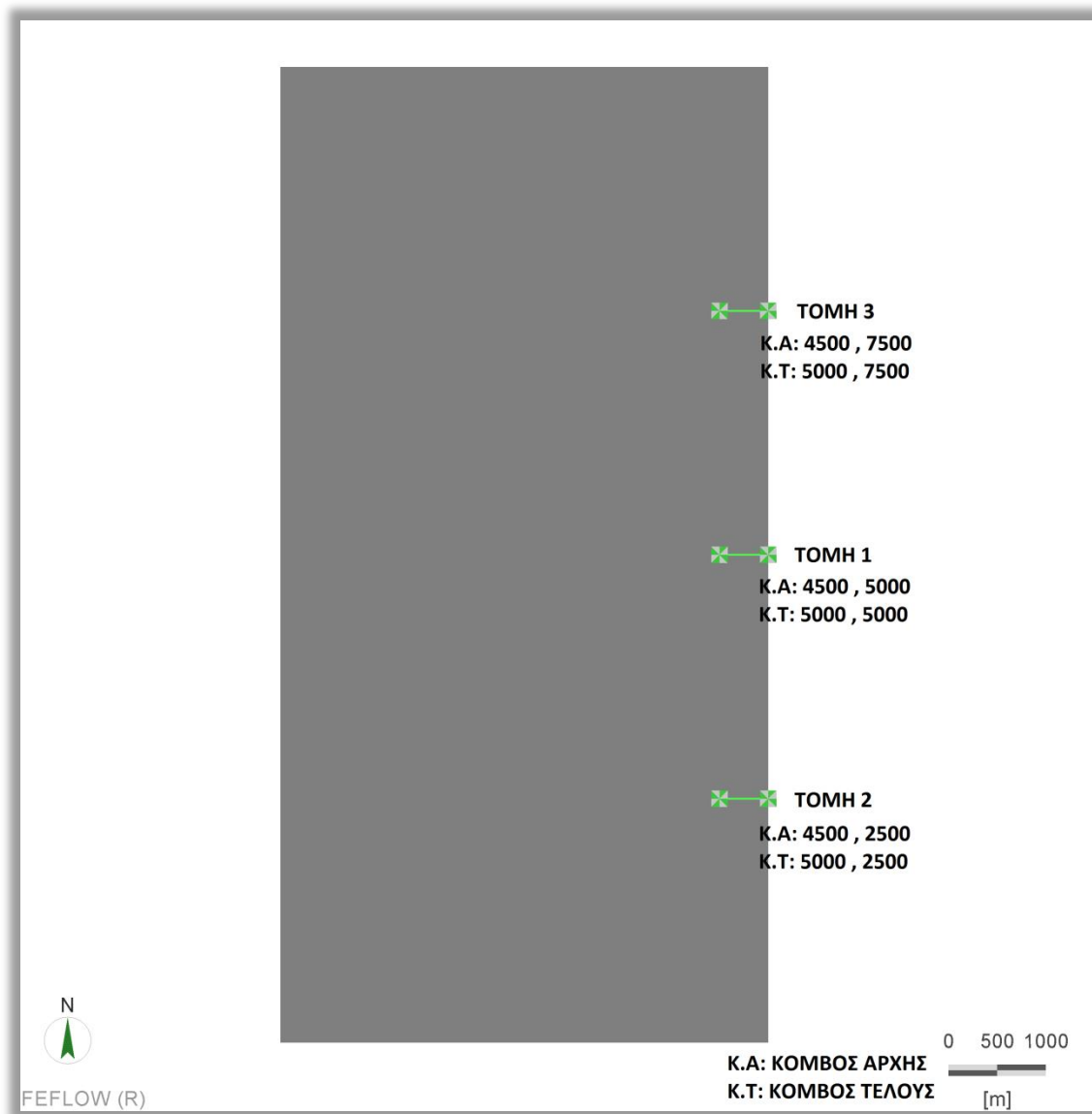
Τα αποτελέσματα επιλέχθηκε να εμφανιστούν σε συγκεκριμένες τομές των υδροφορέων. Όλες οι τομές είναι στα ίδια σημεία, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων τόσο μεταξύ των επιλύσεων στον ίδιο υδροφορέα όσο και μεταξύ των υδροφορέων.

Επιλέχθηκαν 3 τομές κάθετα στην ακτογραμμή και με απόσταση 2500 m μεταξύ τους ώστε να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που αφορούσαν τη συγκέντρωση αλμυρού νερού κοντά στο κατάντη όριο. Οι τομές αυτές έχουν μήκος 500 m. Οι θέσεις των τομών αυτών είναι (Θέση [0,0] η κάτω αριστερά θέση του υδροφορέα):

**ΤΟΜΗ 1:** [4500,5000] : [5000,5000]

**ΤΟΜΗ 2:** [4500,2500] : [5000,2500]

**ΤΟΜΗ 3:** [4500,7500] : [5000,7500]

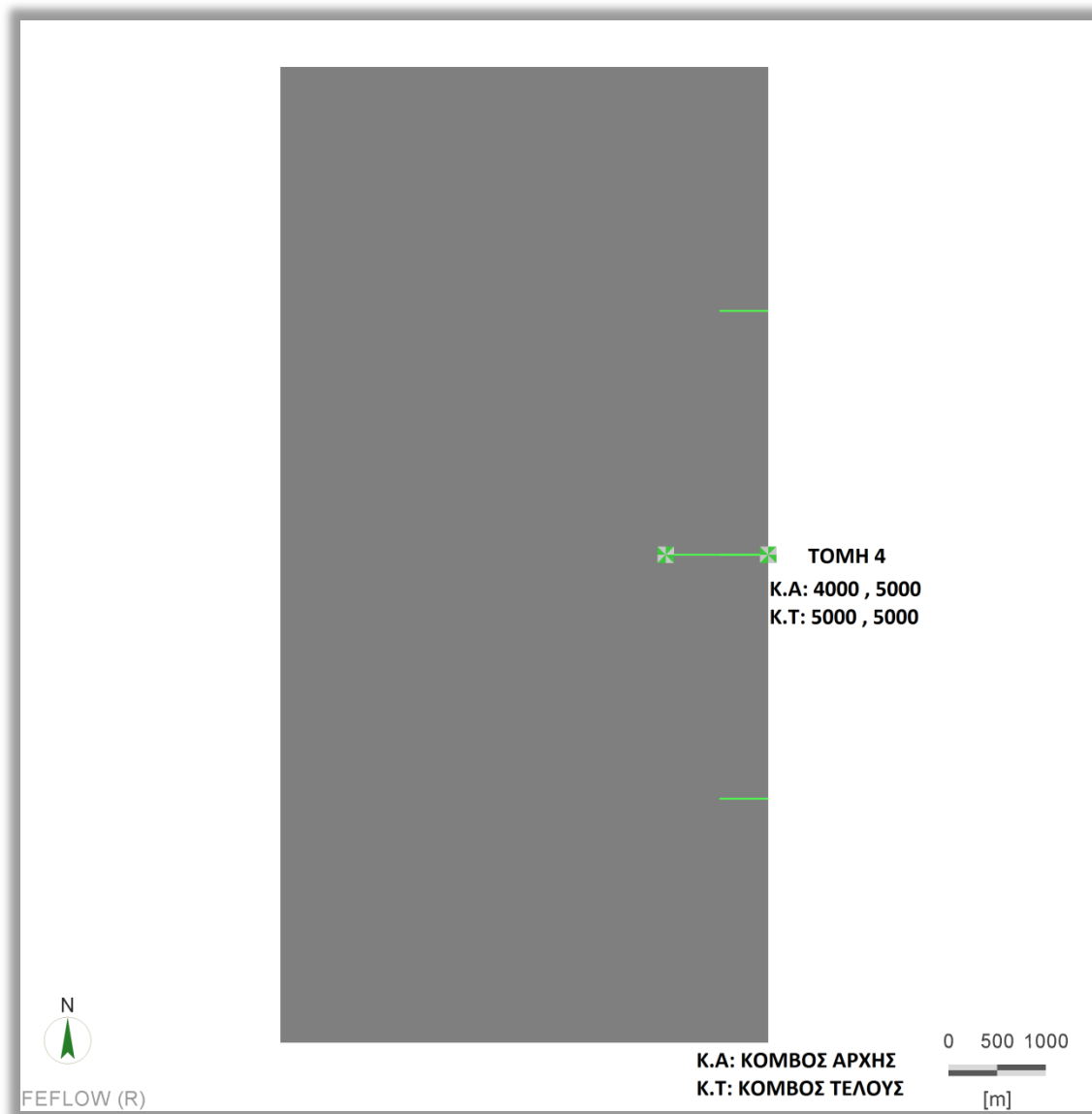


*Σχήμα 8 – Θέσεις τομών μελέτης [1], [2] και [3] στον πρότυπο υδροφορέα*

Επίσης επιλέχθηκε μία τομή στη μέση του υδροφορέα μήκους 1000 m για να εμφανιστούν τα αποτελέσματα ταχυτήτων και ισοδυναμικών γραμμών, καθώς και πιο γενικά αποτελέσματα κατά τον εμπλουτισμό. Η θέση της τομής αυτής είναι

**TOMH 4:** [4000,5000] : [5000,5000]

και είναι κάθετη στο κατάντη όριο, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



*Σχήμα 9 – Θέση τομής [4] στον υδροφορέα μελέτης*

Επίσης για τη μελέτη της υφάλμυρης ζώνης έχουν επιλεχθεί δύο τομές παράλληλες στο επίπεδο του υδροφορέα. Η πρώτη τομή (*Κάτοψη 1*) έχει επιλεχθεί σε βάθος 10 m από την επιφάνεια του υδροφορέα και η δεύτερη (*Κάτοψη 2*) έχει επιλεχθεί στα 90 m από την επιφάνεια του υδροφορέα

#### **4.2.3. Συνοριακές συνθήκες ανάντη και κατόντη των υδροφορέων**

Σε όλους τους υδροφορείς χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες συνοριακές συνθήκες ροής, έτσι ώστε να μπορούν να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα όταν άλλαζε η

γεωμετρία του υδροφορέα. Οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν ήταν οι εξής:

- Εισροή γλυκού νερού στον υδροφορέα από το ανάντη όριο με ταχύτητα  $3 \cdot 10^{-7}$  m/s
- Συνοριακή συνθήκη πίεσης ίση με αυτή των υδροστατικών πιέσεων της θάλασσας στο κατάντη όριο – ακτογραμμή. Η επιλογή των μεγεθών έχει γίνει με βάση την ισοδυναμία υδραυλικού φορτίου γλυκού – αλμυρού νερού (κεφάλαιο 3.3)
- Συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας (στη περίπτωση μας άλατος) στο ανάντη και στο κατάντη όριο. Στο ανάντη όριο η συγκέντρωση είναι μηδενική ενώ στο όριο της ακτογραμμής η συγκέντρωση είναι αυτή του θαλάσσιου νερού  $22 \text{ kg/m}^3$ . Με στόχο την απλούστερη και πιο εποπτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται συγκέντρωση με την μορφή «ποσοστό διαλυμένης ουσίας επί %», ίση με 0 για το ανάντη όριο και 1 για το θαλάσσιο νερό. Οπότε, για παράδειγμα, στη περίπτωση που συναντάται συγκέντρωση  $11 \text{ kg/m}^3$  στο πρόβλημα μας, θα εμφανίζεται εποπτικά σαν «συγκέντρωση 50% της αρχικής» ή *–όπως θα συμβολίζουμε από δω και πέρα– «συγκέντρωση 0,50»*.
- Περιορισμός συγκέντρωσης για ροή από τον υδροφορέα προς τη θάλασσα (*minimum mass-flow constraint*). Αξιοποιούμε την συγκεκριμένη συνοριακή συνθήκη στο κατάντη όριο του υδροφορέα, στο όριο της ακτογραμμής, με μηδενική τιμή ( $0 \text{ kg/m}^3$ ). Αυτός ο περιορισμός σημαίνει πρακτικά πως όσο η ροή στο κατάντη όριο είναι από τη θάλασσα προς τον υδροφορέα, τότε η συνοριακή συνθήκη της συγκέντρωσης παραμένει στο 1,0. Όταν όμως η ροή είναι από τον υδροφορέα προς την θάλασσα (περίπτωση διαφυγής γλυκού νερού στα ανώτερα στρώματα του υδροφορέα), τότε η συνοριακή συνθήκη συγκέντρωσης απαλείφεται και το σημείο θεωρείται ελεύθερο.

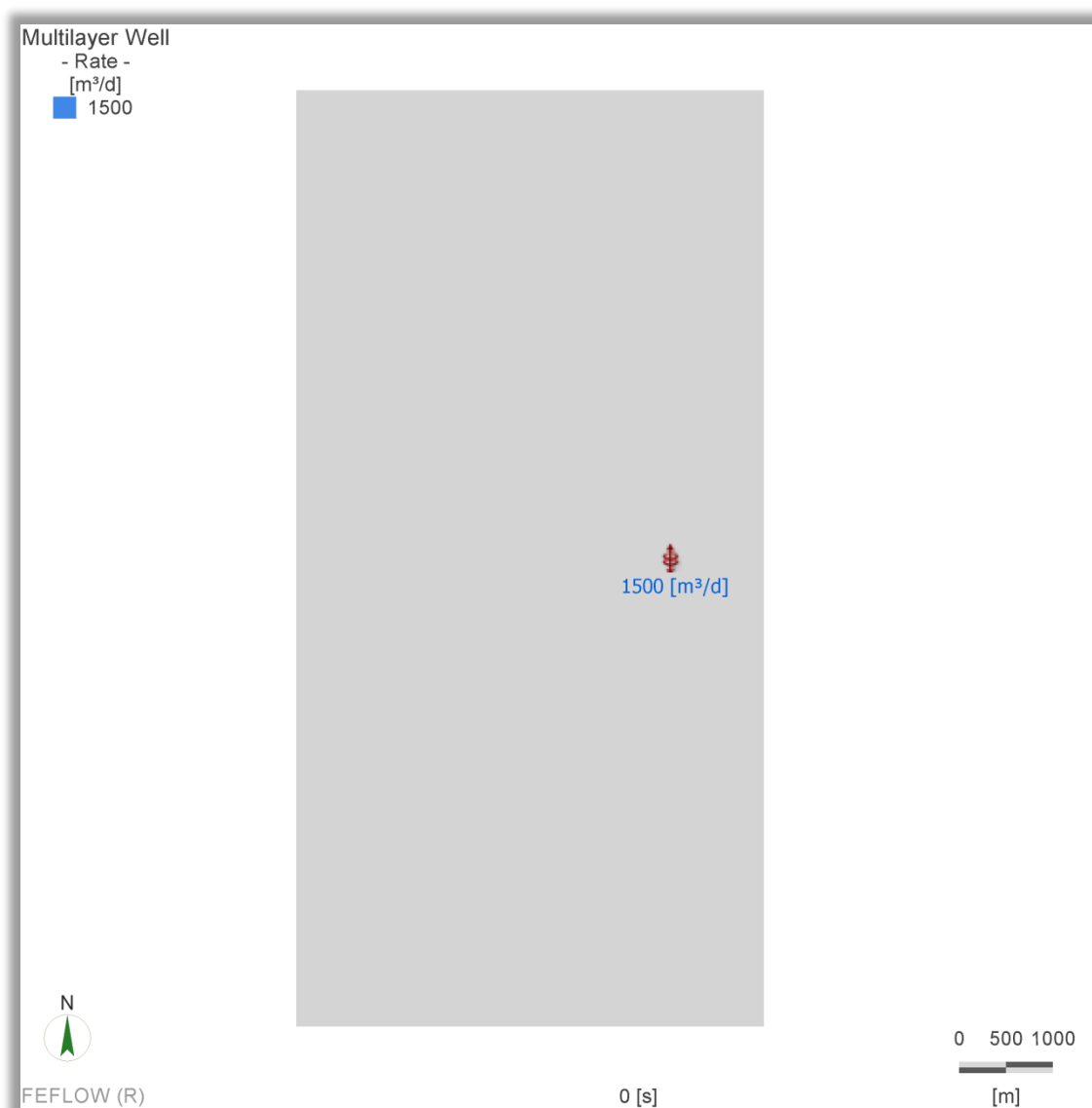
Αυτή η παραδοχή αποδίδει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την πραγματική συμπεριφορά στο όριο του υδροφορέα όπου γίνεται η κίνηση γλυκού και αλμυρού νερού. Μια άλλη λύση αντιμετώπισης, λιγότερο ακριβής, είναι η παραδοχή που χρησιμοποιείται στην επίλυση του προβλήματος του Henry

ότι εφαρμόζουμε τις συνθήκες συγκέντρωσης στο κάτω μισό του κατόντη ορίου, προσεγγίζοντας έτσι κατά κάποιο τρόπο το επιθυμητό αποτέλεσμα.

#### 4.2.4. Θέσεις φρεάτων άντλησης και εμπλουτισμού

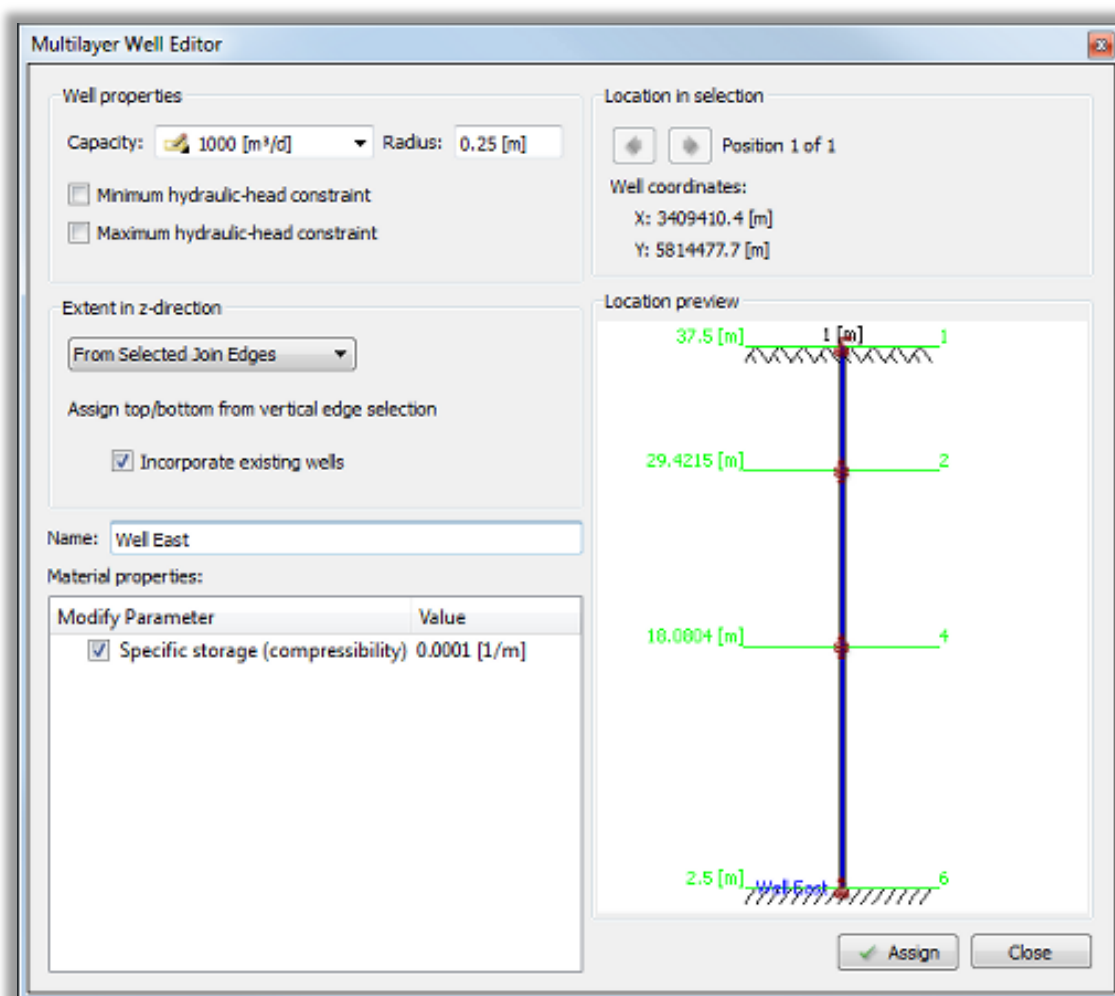
##### 4.2.4.1. Φρέατα άντλησης

Σε όλους τους υδροφορείς της εργασίας έχει εφαρμοστεί ένα φρέαρ άντλησης στη θέση  $\Phi$  [4000,5000] m διαμέτρου **0,25 m** (όπως φαίνεται και στη παρακάτω κάτοψη):



**Σχήμα 10**–Θέση φρέατος άντλησης δυναμικότητας  $1500 \text{ m}^3/\text{day}$  σε θέση 1000 m από την ακτογραμμή

Η συνθήκη που έχει εφαρμοστεί σε κάθε περίπτωση είναι αυτή του *Multilayer Well*, δηλαδή φρέαρ συνολικής δυναμικότητας 1500 m<sup>3</sup>/day. Αυτό σημαίνει πως αθροιστικά η παροχή από κάθε ένα από τα 10 επίπεδα (layers) του υδροφορέα μας είναι 1500 m<sup>3</sup>/day καταμερισμένη ομοιόμορφα.

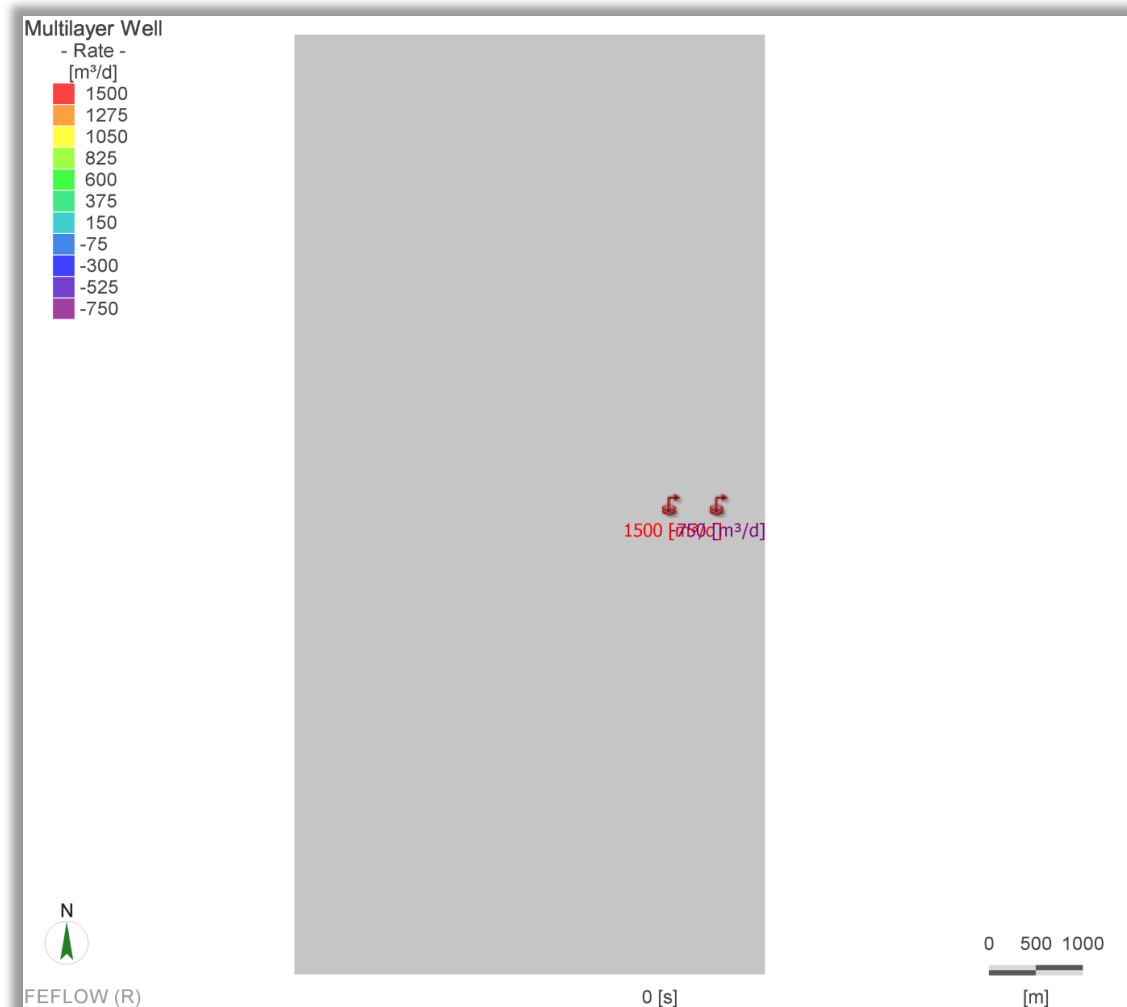


Εικόνα 11 – Περιβάλλον επεξεργασίας φρέατος άντλησης (*Multilayer well editor*)

#### 4.2.4.2. Φρέατα εμπλουτισμού

Σε όλους τους υδροφορείς μελέτης έχει εφαρμοστεί το σενάριο ενός (1) φρέατος εμπλουτισμού σε παράλληλη λειτουργία με το φρέαρ άντλησης, στα 500 m από την ακτογραμμή, στη μισή δηλαδή απόσταση ανάμεσα από την ακτογραμμή και το φρέαρ άντλησης, και με διάμετρο **0,25 m**. Η παροχή που δίνεται είναι στο 50% της

παροχής άντλησεως ( $750 \text{ m}^3/\text{day}$ ) και είναι μια ικανοποιητική παροχή λαμβάνοντας υπόψη συνθήκες σε επιστητά προβλήματα (*Jacob Bear, Seawater intrusion in Coastal Aquifers, 1999*).



Σχήμα 12 - Θέση φρεάτων εμπλουτισμού

Ειδικά στον στρεβλό υδροφορέα (warped aquifer) εφαρμόστηκαν 2 διαφορετικά σενάρια εμπλουτισμού που αφορούσαν την ίδια θέση φρέατος εμπλουτισμού, αλλά διαφορετικές παροχές:

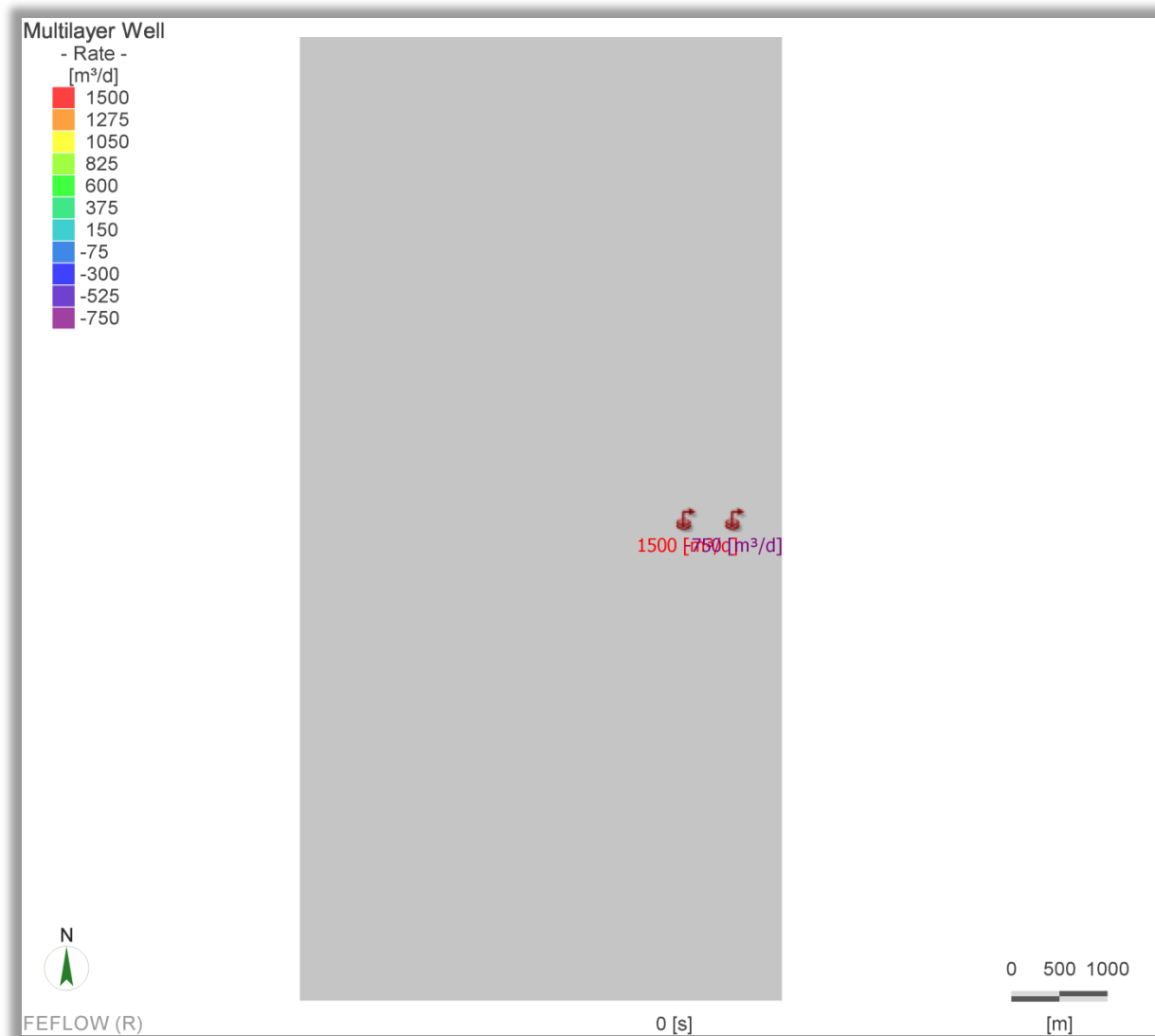
- Φρέαρ εμπλουτισμού παροχής 50% αυτής της άντλησης ( $750 \text{ m}^3/\text{day}$ )
- Φρέαρ εμπλουτισμού παροχής 20% αυτής της άντλησης ( $300 \text{ m}^3/\text{day}$ )

Η επιλογή αυτή έγινε ώστε να υπάρξουν συγκριτικά αποτελέσματα στο κατά πόσο η παροχή εμπλουτισμού επηρεάζει το φαινόμενο της υφαλμύρωσης σε υδροφορέα που συμβαίνει άντληση –κυρίως δε ποια η συμπεριφορά του μετώπου της υφαλμύρωσης στις διαφορετικές αυτές τιμές παροχής εμπλουτισμού.

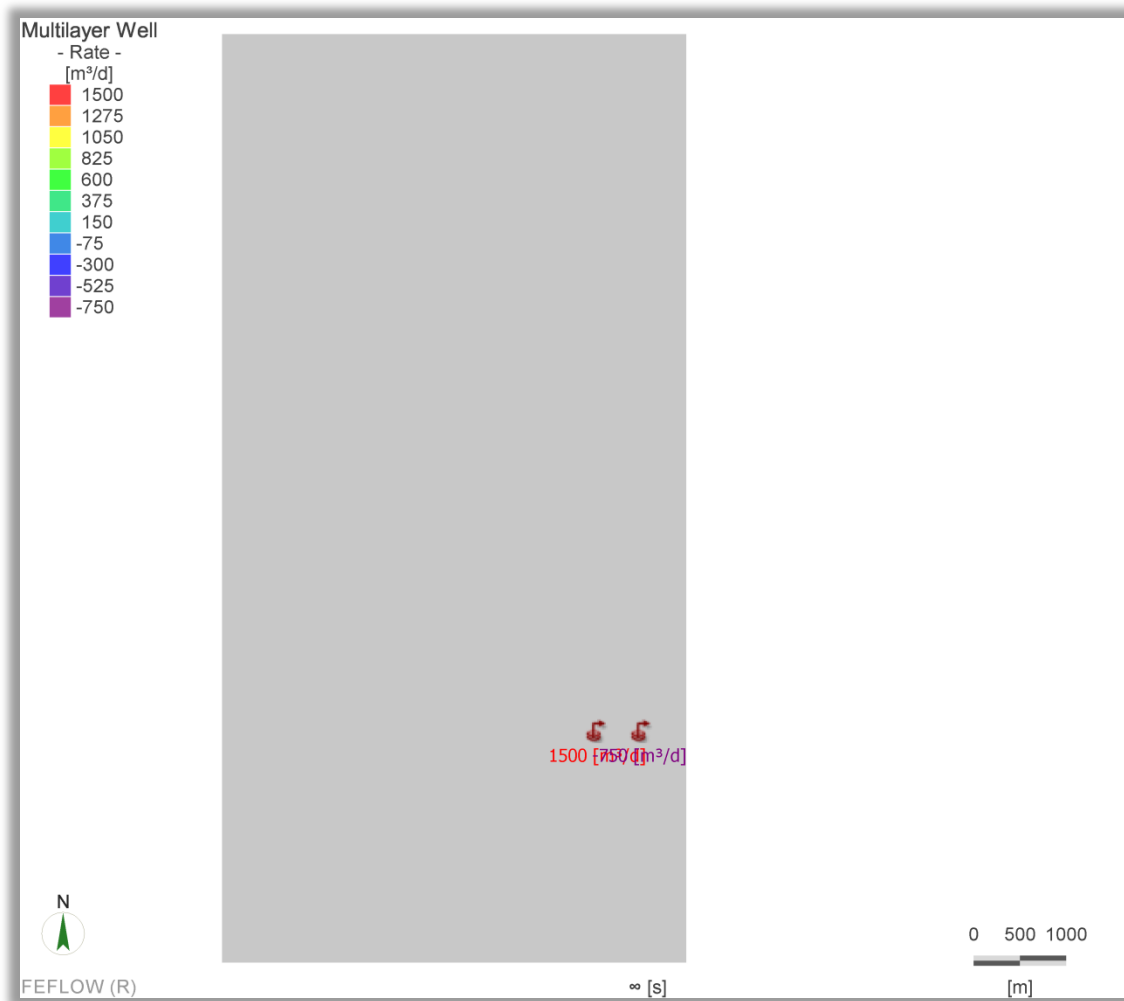
Τα φρέατα εμπλουτισμού εφαρμόζονται στον υδροφορέα σχήματος V (V-shaped aquifer) σε τρεις (3) διαφορετικές διατάξεις ίδιας παροχής  $750 \text{ m}^3/\text{day}$ , δηλαδή στο 50% της παροχής άντλησης και με διάμετρο **0,25 m**:



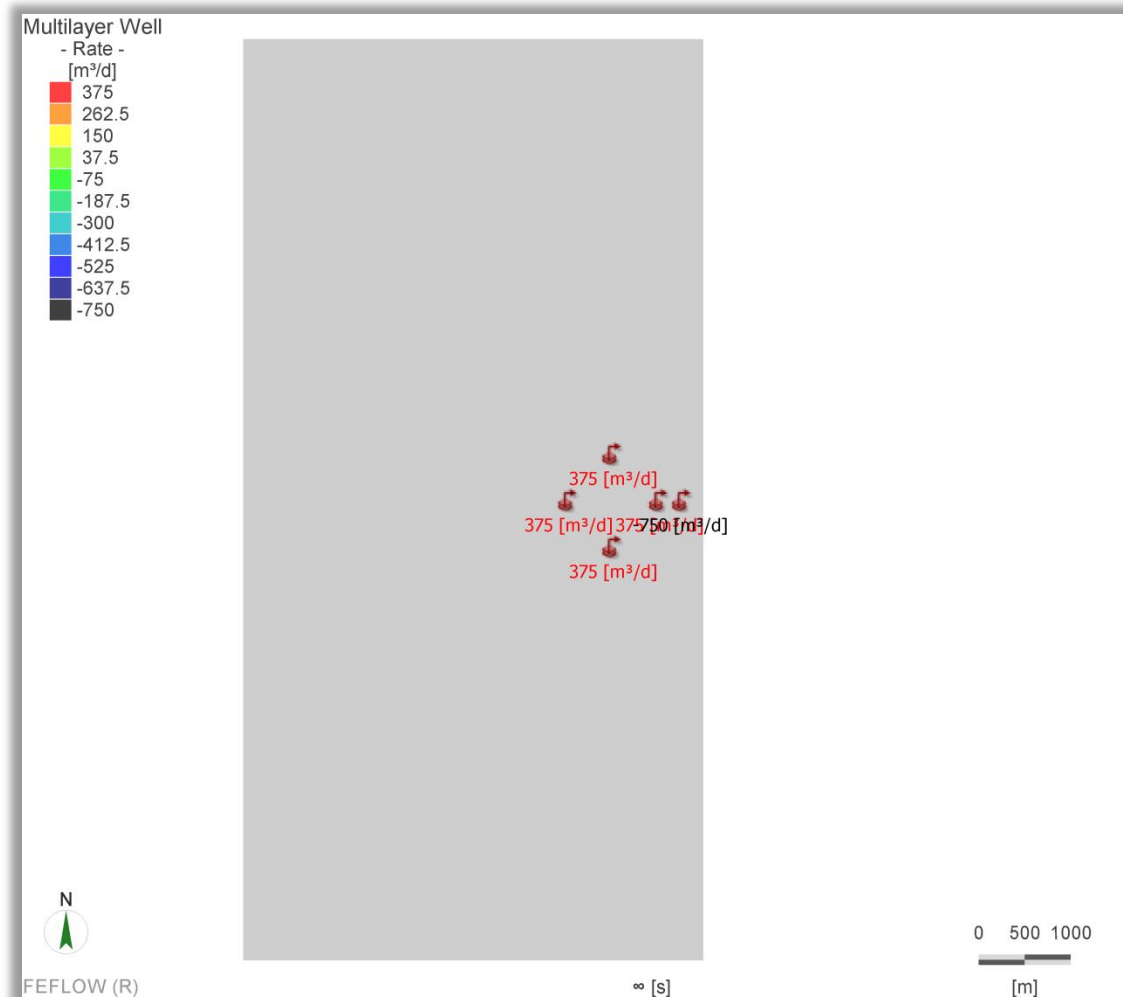
- Φρέαρ εμπλουτισμού στα 500 m από την ακτογραμμή, ενδιάμεσα του φρέατος άντλησης και της ακτογραμμής



- Ασύμμετρο φρέαρ άντλησης και εμπλουτισμού, σε θέση στα  $\frac{3}{4}$  του υδροφορέα.



- Διάταξη τεσσάρων (4) φρεάτων άντλησης σε σχηματισμό ρόμβου, με αθροιστική παροχή 1500 m<sup>3</sup>/day και ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού, με στοίχιση στη μέση του υδροφορέα



Συνοπτικά, όλες τα σενάρια που επιλύθηκαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

<b><u>ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗ</u></b>
<b>ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ &amp; ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ ΜΕ ΚΛΙΣΗ 5%</b>
<i>Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού</i>
<i>Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού</i>
<i>Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού</i>
<b>ΣΤΡΕΒΛΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ (WRAPPED)</b>
<i>Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού</i>
<i>Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού</i>
<i>Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού παροχής 20% της άντλησης</i>
<i>Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού παροχής 50% της άντλησης</i>
<b>ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ “V”</b>
<i>Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού</i>
<i>Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού</i>
<i>Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού</i>
<i>Διάταξη τεσσάρων (4) φρεάτων άντλησης σε σχηματισμό ρόμβου – Κανένα φρ. εμπλ.</i>
<i>Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού</i>
<i>Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ άντλησης – Ένα(1) ασύμμετρο φρέαρ εμπλουτισμού</i>
<i>Διάταξη τεσσάρων (4) φρεάτων άντλησης σε σχηματισμό ρόμβου – Ένα (1) φρ. εμπλ.</i>

#### 4.2.5. Εδαφικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων μελέτης

Για να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά των υδροφορέων που μελετήθηκαν στο παρόν πρόβλημα, προηγήθηκαν αρκετά σενάρια διερεύνησης. Αυτό διότι έπρεπε να επιλεγούν τέτοια χαρακτηριστικά ώστε:

- Ο υδροφορέας μελέτης να είναι όσο το δυνατόν χαρακτηριστικός, έχοντας εδαφικά χαρακτηριστικά που συνήθως συναντώνται στον Ελλαδικό χώρο
- Τα χαρακτηριστικά του να είναι τέτοια ώστε τα αποτελέσματα να μπορούν να είναι συγκρίσιμα και περεταίρω αξιοποιήσιμα.

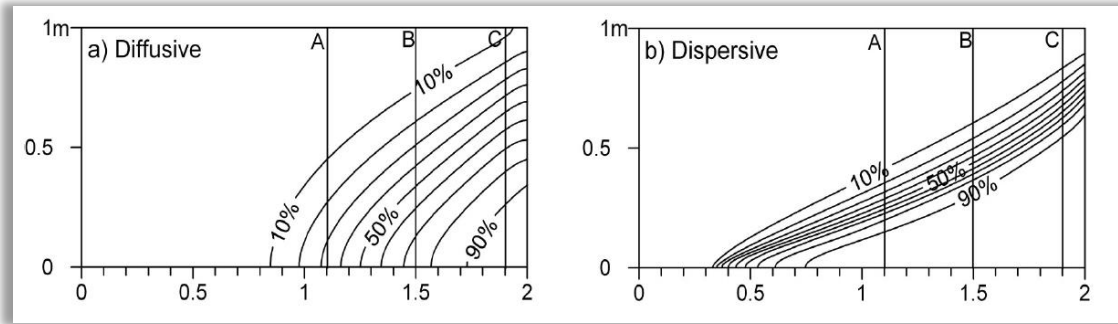
Υπήρξε έλεγχος κάθε δυνατής παραμέτρου και πως αυτή επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα, καθώς επίσης έγινε προσπάθεια να εξαχθούν –όσο το δυνατόν– συμπεράσματα για το μέγεθος της επιρροής αυτής. Σημαντικότερα συμπεράσματα ήταν αυτά που αφορούσαν την διερεύνηση για μεταβολές των *συντελεστών διαμήκους ( $\alpha_L$ ) και εγκάρσιας ( $\alpha_T$ ) διασποράς*, καθώς επίσης και των *παροχών άντλησης ενός φρέατος* στη περίπτωση του οριζόντιου υδροφορέα.

##### Συντελεστές διαμήκους ( $\alpha_L$ ) και εγκάρσιας ( $\alpha_T$ ) διασποράς

Οι τιμές που επιλέχθηκαν για τους υδροφορείς μελέτης μας ήταν

- Συντελεστής διαμήκους διασποράς  $\alpha_L$ : 2,0 m
- Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς  $\alpha_T$  : 0,2 m

Για την επιλογή των τιμών αυτών προηγήθηκε διερεύνηση σχετικά με το πώς επηρεάζουν το φαινόμενο. Πιο συγκεκριμένα διαπιστώθηκε και πρακτικά η επίδραση των συντελεστών διασποράς τόσο στο μήκος του πόδα του μετώπου της υφαλμύρωσης όσο και στο πάχος της ζώνης ανάμειξης.



Σχήμα 13 – Επίδραση συντελεστών διασποράς σε (α) πάχος ζώνης ανάμειξης και (β) μήκος πόδα (E. Abarca, 2006)

Για την μελέτη της επίδρασης των συντελεστών διασποράς γίνεται χρήση των αδιάστατων αριθμών Peclet που ορίζονται ως (E. Abarca, 2006):

$$b_m = \frac{\varphi \cdot D_m}{d \cdot q_b}$$

$$b_L = \frac{a_L}{d}$$

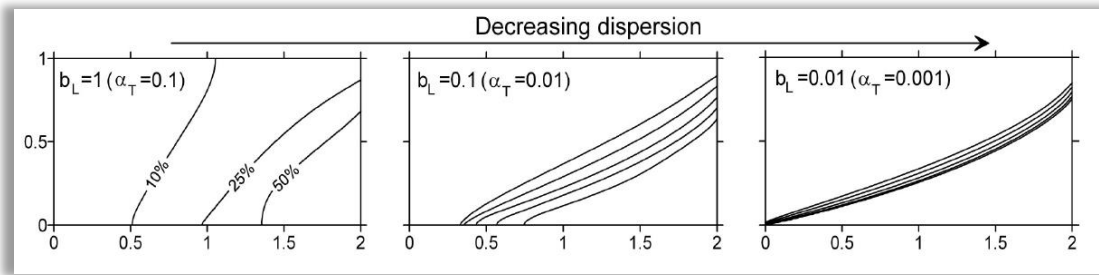
και εκφράζουν την σχέση των συντελεστών διασποράς με τη μορφή του υδροφορέα μελέτης.

Η σχέση μεταξύ του  $\alpha_L$  και  $\alpha_T$  δεν είναι συγκεκριμένη και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα, παρόλα αυτά μια ασφαλής προσέγγιση μας δίνει πως: (O. Essink, 1996)

$$\frac{\alpha_L}{\alpha_T} \approx 10$$

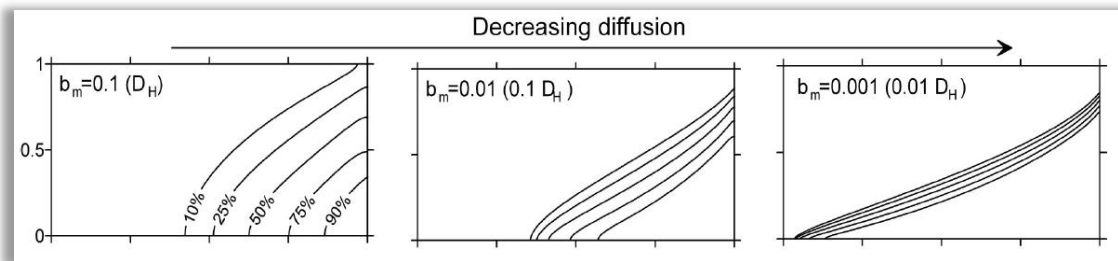
Διερευνώντας διάφορες τιμές για τους συντελεστές αυτούς και διατηρώντας τις προϋποθέσεις που τέθηκαν, καταλήξαμε στα εξής συμπεράσματα:

- Η μεταβολή των συντελεστών διασποράς επηρεάζει το μήκος του πόδα του μετώπου της υφαλμύρωσης. Πιο συγκεκριμένα, όσο μειώνεται ο συντελεστής εγκάρσιας διασποράς  $\alpha_T$  τόσο ο πόδας του μετώπου μετατοπίζεται πιο βαθιά στον υδροφορέα.



**Σχήμα 14 – Η μείωση του  $\alpha_T$  προκαλεί εισχώρηση του πόδα του μετώπου υφαλμύρωσης (E. Abarca 2006)**

- Η μεταβολή των συντελεστών διασποράς επηρεάζει το πάχος της ζώνης ανάμειξης. Πιο συγκεκριμένα όσο μειώνεται ο συντελεστής εγκάρσιας διασποράς  $\alpha_T$  τόσο «στενεύει» και η ζώνη ανάμειξης. Επίσης όσο μειώνεται ο συντελεστής διαμήκους διασποράς  $\alpha_L$  τόσο στενεύει επίσης η ζώνη

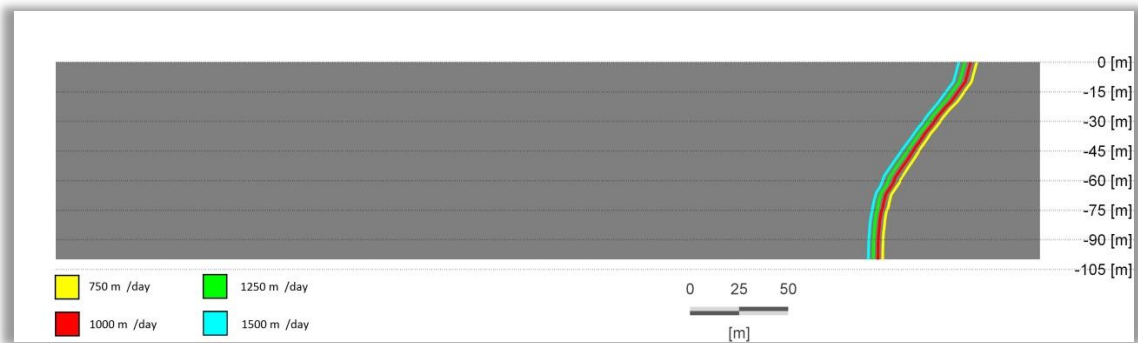


**Σχήμα 15 – Η μείωση του  $\alpha_L$  προκαλεί περιορισμό της ζώνης ανάμειξης (E. Abarca, 2006)**

### Παροχές άντλησης ενός φρέατος σε οριζόντιο υδροφορέα

Διερεύνηση έγινε και για την επίδραση των μεταβολών των παροχών άντλησης του φρέατος του προβλήματος μας. Οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν ήταν αναμενόμενες, δεδομένου του ότι όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του υδροφορέα μελέτης διατηρούνταν σταθερά.

Τα αποτελέσματα της διερεύνησης αυτής εποπτικά παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα. Οι παροχές που εμφανίζονται είναι 750, 1000, 1250 και 1500 m<sup>3</sup>/day:



**Σχήμα 16 – Διερεύνηση παροχών άντλησης ενός φρέατος σε οριζόντιο υδροφορέα**

Η παροχή που επιλέχθηκε για την επίλυση των προβλημάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν  $1500 \text{ m}^3/\text{day}$ . Πρόκειται για την υψηλότερη τιμή και μπορεί να θεωρηθεί ακραία για φρέαρ απλής χρήσεως ( $400 - 1000 \text{ m}^3/\text{day}$ ). Επιλέχθηκε όμως αυτή η τιμή τόσο για πρακτικούς όσο και για θεωρητικούς λόγους:

- Το φαινόμενο της υφαλμύρωσης εμφανίζεται ιδιαίτερα έντονα και συχνά σε περιοχές όπου υπάρχει έντονη δραστηριότητα άντλησης, κυρίως λόγω βιομηχανικής και τουριστικής χρήσης. Οπότε μια παροχή τέτοιας τιμής θα μπορούσε να ταυτιστεί με την χρήση –για παράδειγμα– μιας τουριστικής παραθαλάσσιας περιοχής σε περίοδο καλοκαιρινής αιχμής.
- Σε πρακτικό επίπεδο, μια μεγάλη τιμή παροχής άντλησης κάνει το φαινόμενο ιδιαίτερα έντονο και τις επιπτώσεις του περισσότερο εμφανείς. Στους υπολογισμούς μας με το FeFlow εμφανίζεται πολύ καλύτερα τόσο η επίδραση της άντλησης όσο και, αργότερα, η αντιμετώπιση του φαινομένου με την μέθοδο του τεχνητού εμπλουτισμού. Δίνεται έτσι στον αναγνώστη πιο εποπτική εικόνα του αντικείμενου μελέτης της εργασίας.

#### Υπόλοιπα εδαφικά χαρακτηριστικά

Η επιλογή των υπολοίπων χαρακτηριστικών έγινε με βάση τη ρεαλιστικότητα του υδροφορέα και την όσο το δυνατόν καλύτερη εξαγωγή αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα οι υδροφορείς μελέτης μας είχαν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Υδραυλική αγωγιμότητα (K):  $10^{-4} \text{ m/s}$
- Πορώδες (n): 0,2



- Συντελεστής μοριακής διάχυσης ( $D_{diff}$ ):  $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/sec
- Συντελεστής διαμήκους διασποράς ( $\alpha_L$ ): 2 m
- Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς ( $\alpha_T$ ): 0,2 m
- Πυκνότητα αλμυρού νερού ( $\rho_s$ ): 1,024 kg/l
- Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό ( $C_s$ ): 1 kg/m<sup>3</sup>

#### **4.2.6. Κατόψεις υδροφορέων – Υψόμετρα**

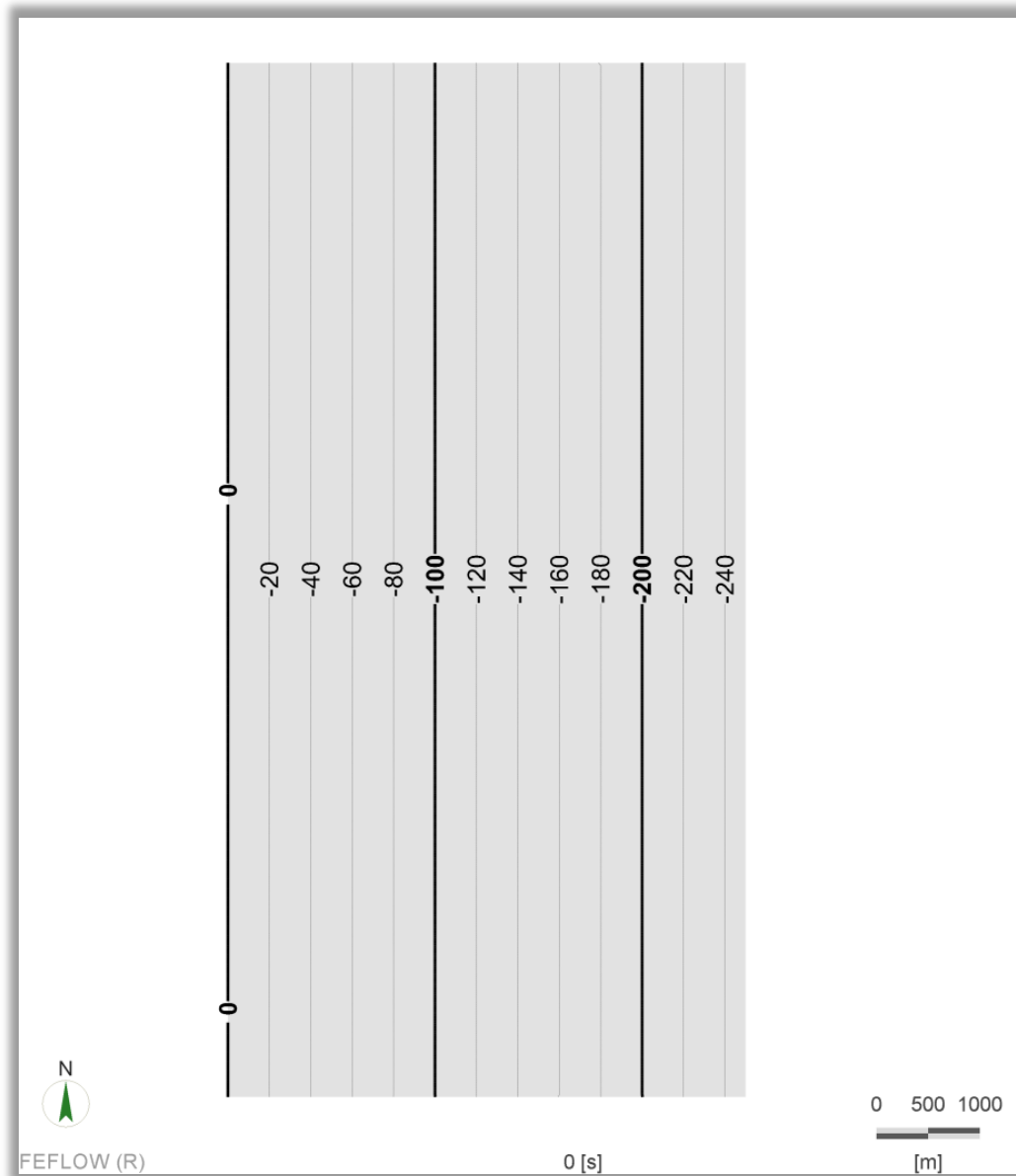
Ακολουθούν κατόψεις των τεσσάρων υδροφορέων μελέτης, με ισοϋψείς γραμμές ενδεικτικές της γεωμετρίας τους.

Οι κατόψεις που εμφανίζονται προκύπτουν από την επιφάνεια του υδροφορέα (Layer 1) με υψόμετρο αναφοράς τα μηδέν (0) m.

- Οριζόντιος υδροφορέας

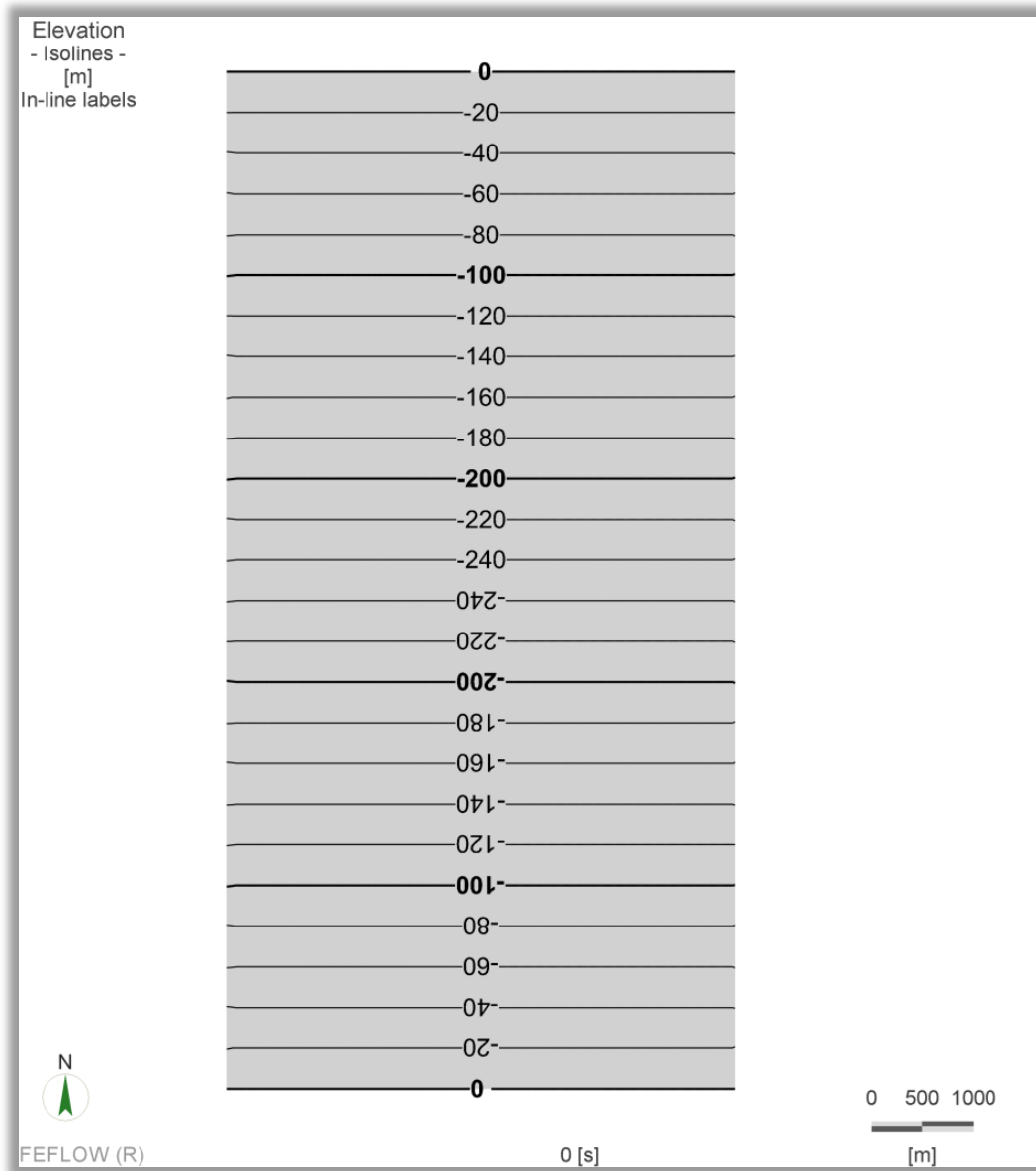
Δεν παρουσιάζεται η κάτοψη του οριζόντιου υδροφορέα, διότι δεν υπάρχουν ισοψείς.

- Υδροφορέας με κλίση 5% κατά τη διεύθυνση της ακτογραμμής (Seaslope aquifer)



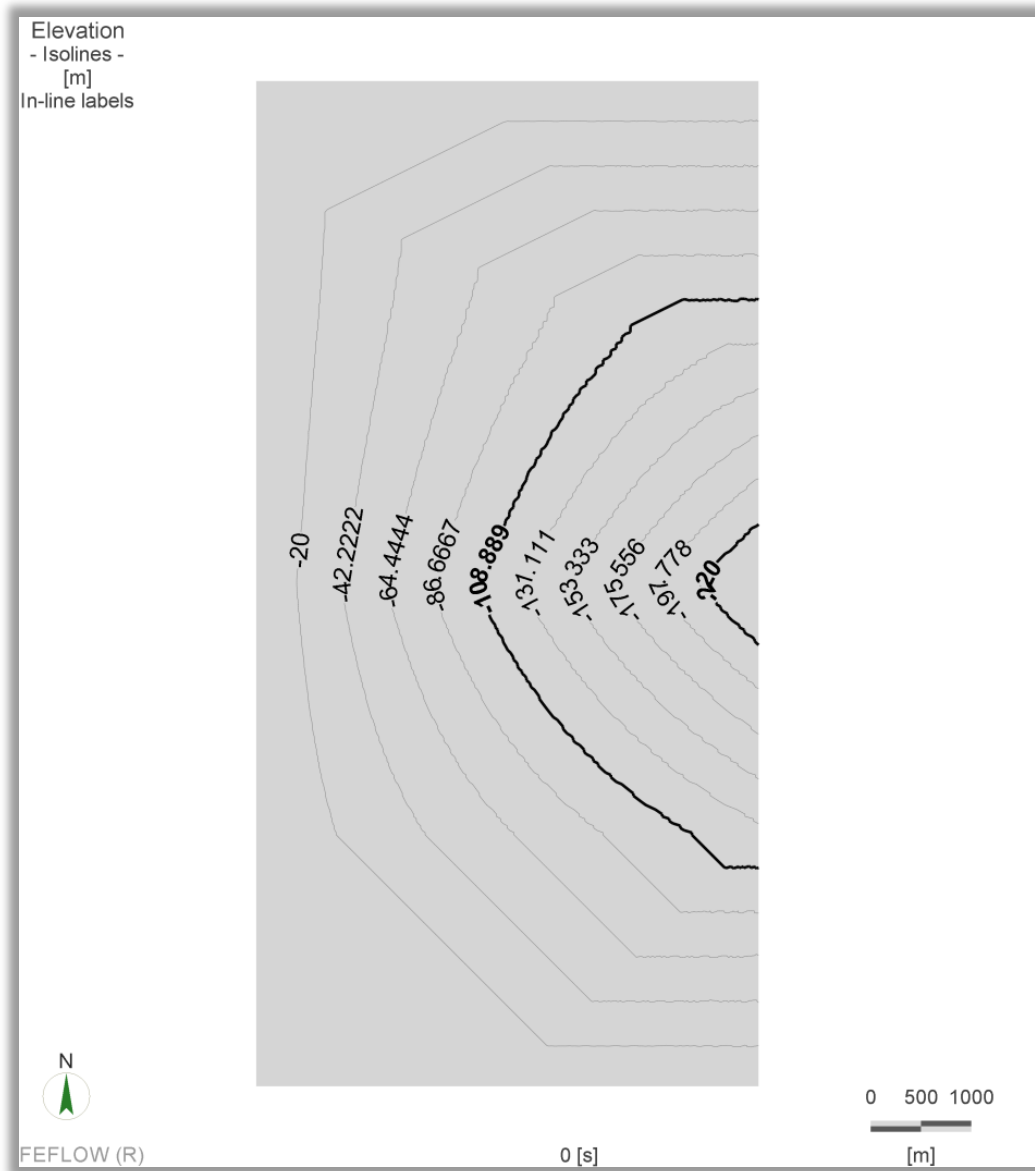
Σχήμα 17 - Ισοψείς υδροφορέα κλίσης 5%

- Υδροφορέας με κλίση 5% κάθετη στη διεύθυνση της ακτογραμμής σε σχήμα V (V-shaped aquifer)



**Σχήμα 18 - Ισοϋψείς υδροφορέα σχήματος V**

- Υδροφορέας στρεβλός με κλίση κάθετα και παράλληλα στην ακτογραμμή (wrapped aquifer)



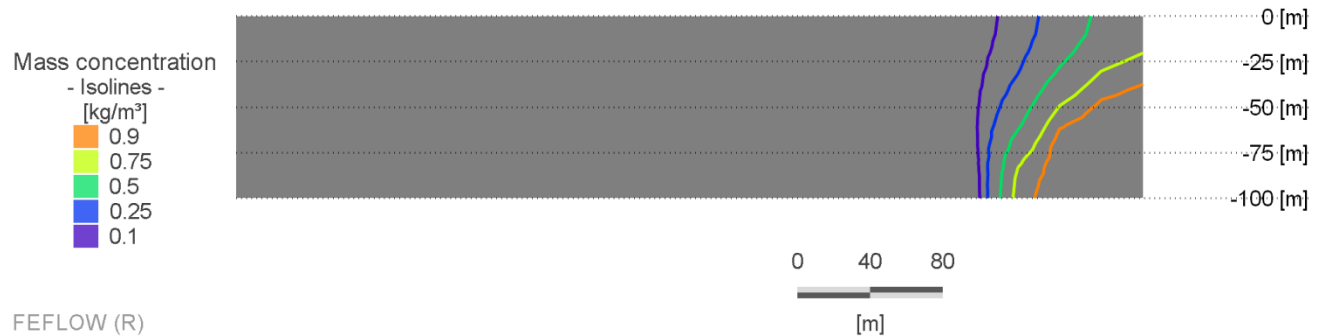
Σχήμα 19 - Ισοϋψείς στρεβλού υδροφορέα (wrapped)

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΕΩΝ

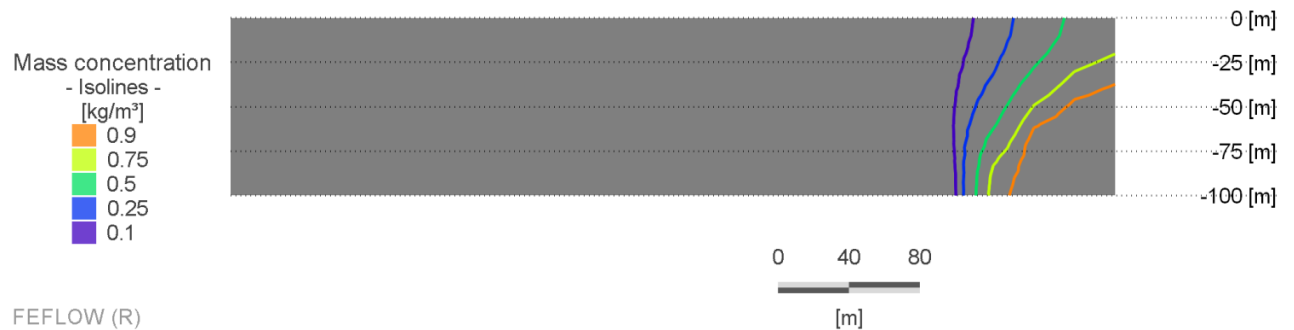
### 5.1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΕΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

#### 5.1.1. Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

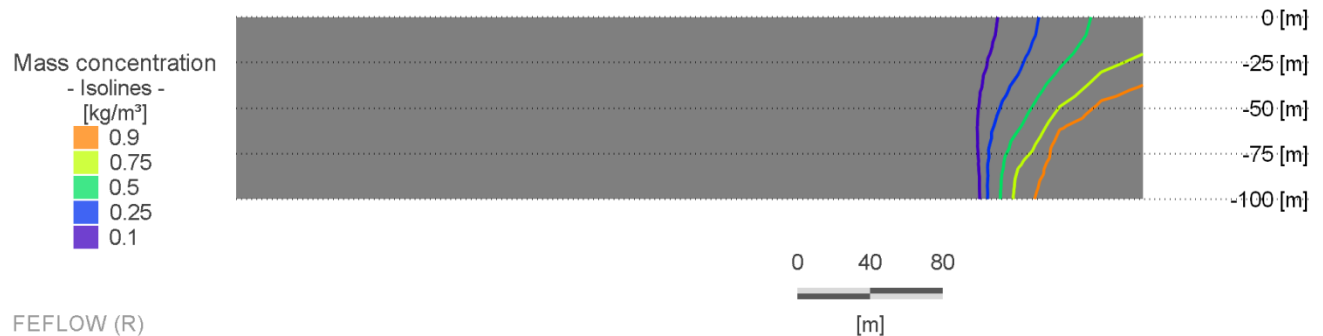
Τομή 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 3: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη

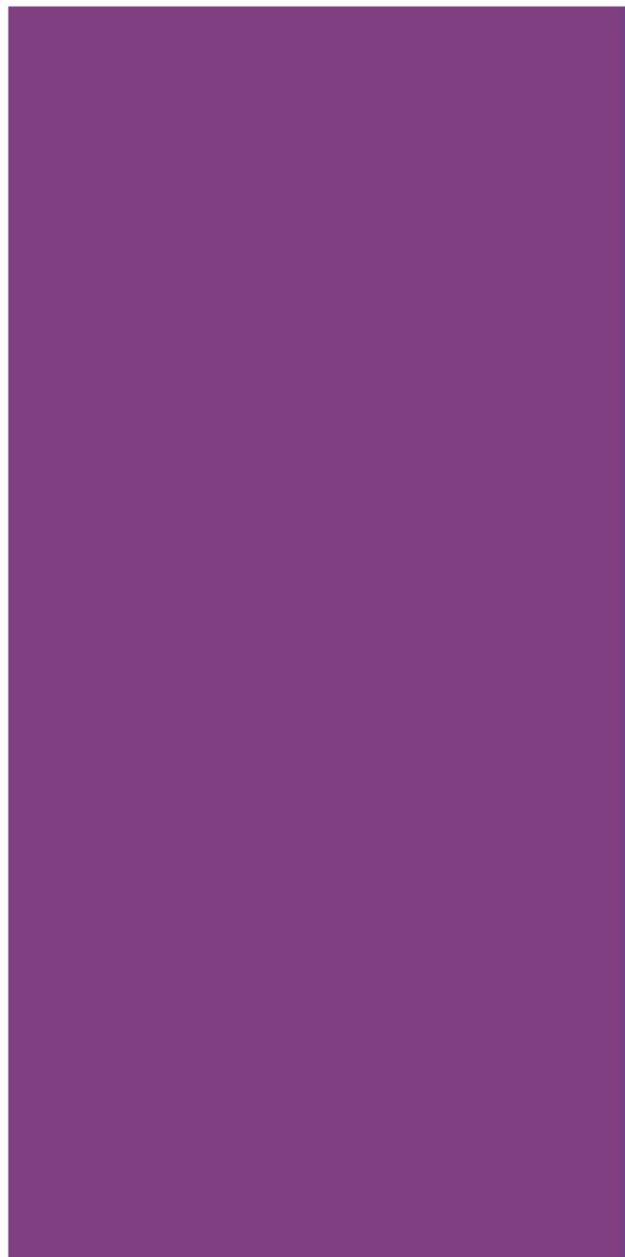
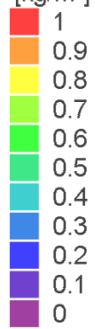


## Οριζόντιος υδροφόρας

Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Κάτοψη 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration  
- Continuous -  
[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000



[m]

## Οριζόντιος υδροφόρας

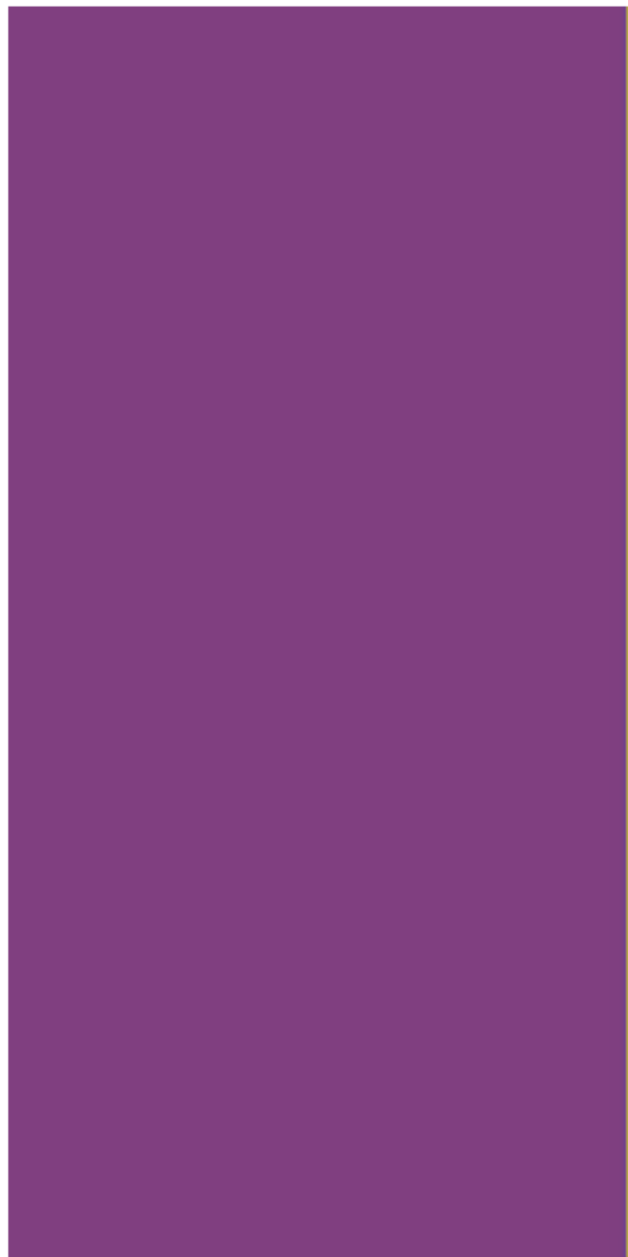
Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Κάτοψη 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration

- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000



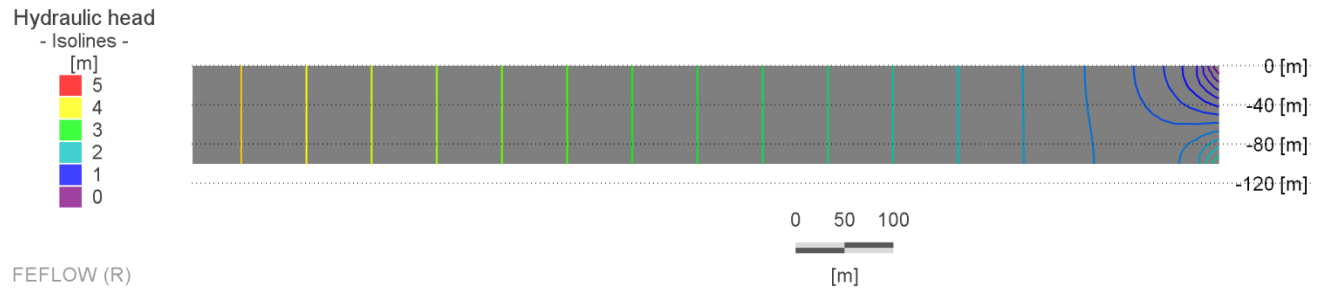
[m]

Σχήμα 20 - Κάτοψη 2

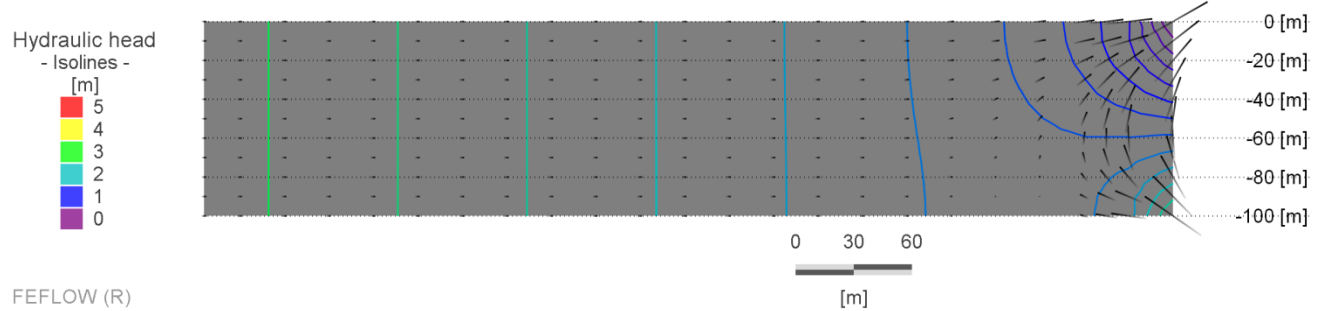
## Οριζόντιος υδροφόρας

Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Τομή 4: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου



### Τομή 1: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου – Διανύσματα ταχυτήτων

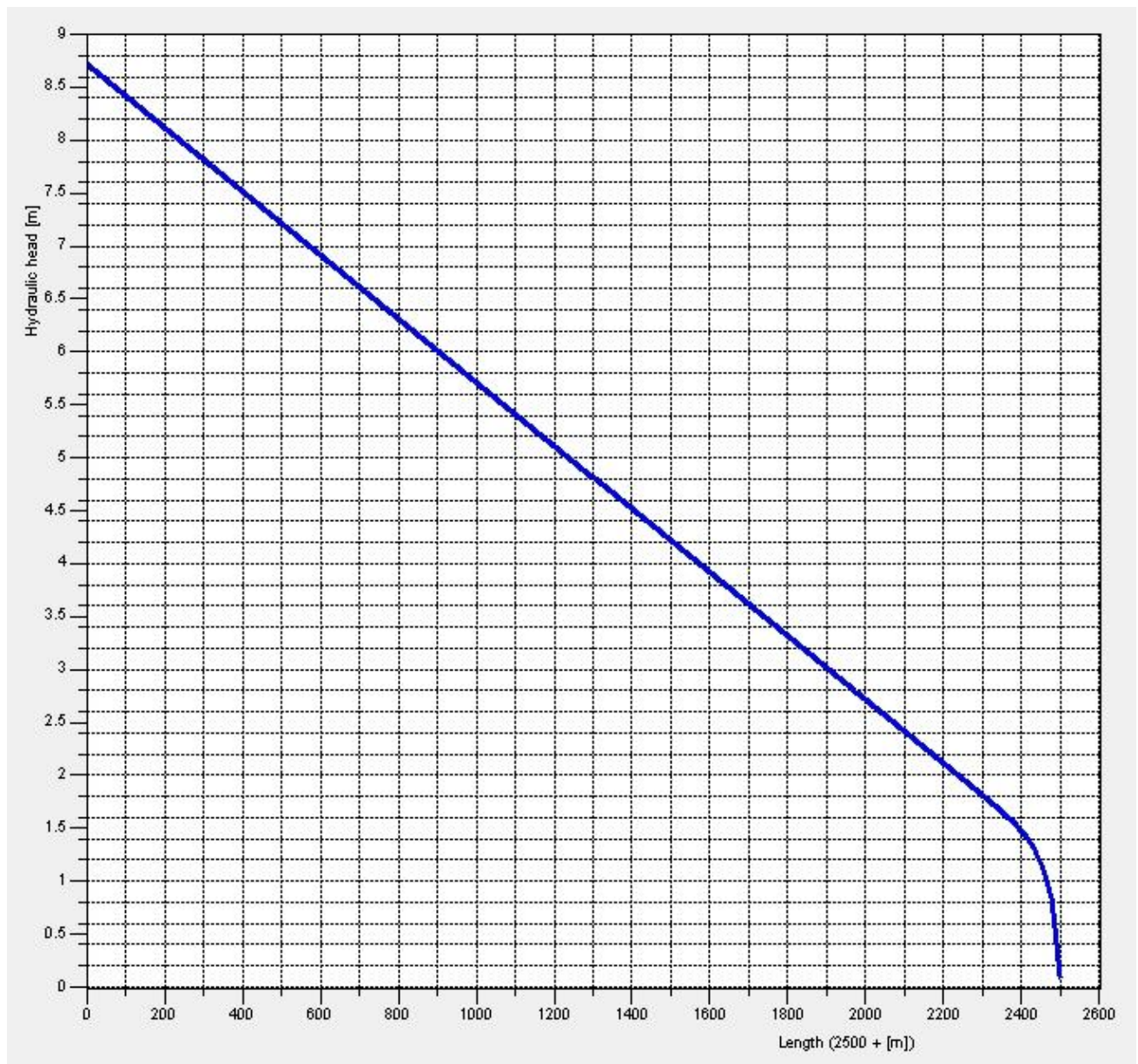




## Οριζόντιος υδροφόρας

Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

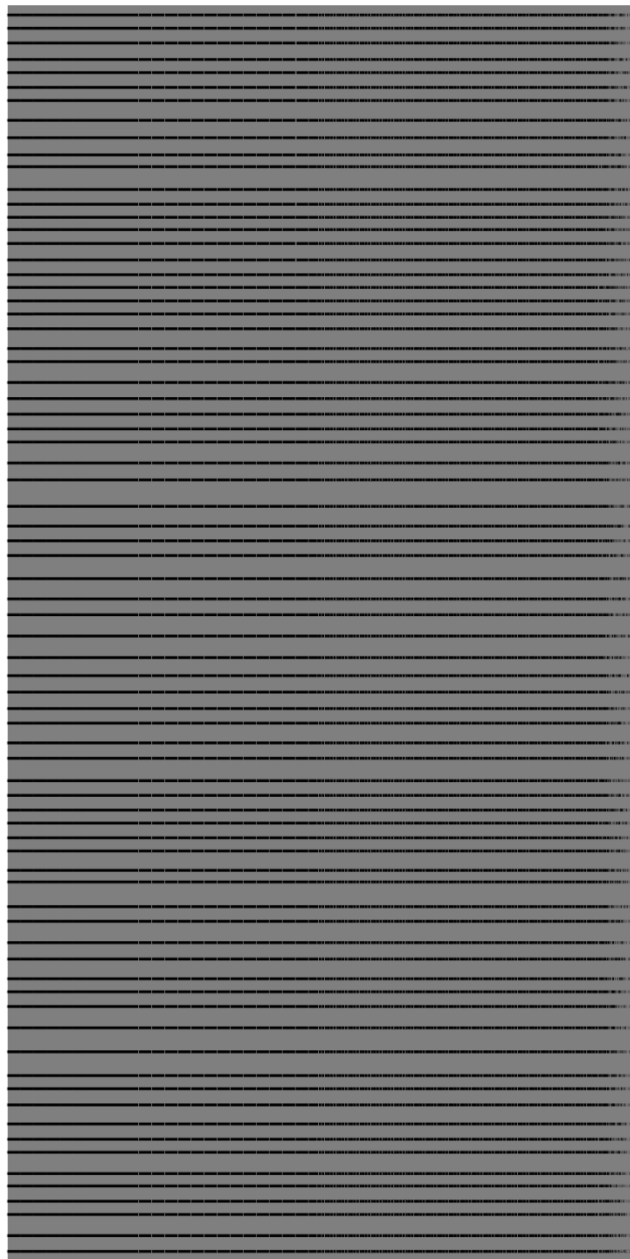
Τομή 4: Πιεζομετρικό φορτίο συναρτήσει μήκους



## Οριζόντιος υδροφορέας

Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Κάτοψη 1: Γραμμές ροής



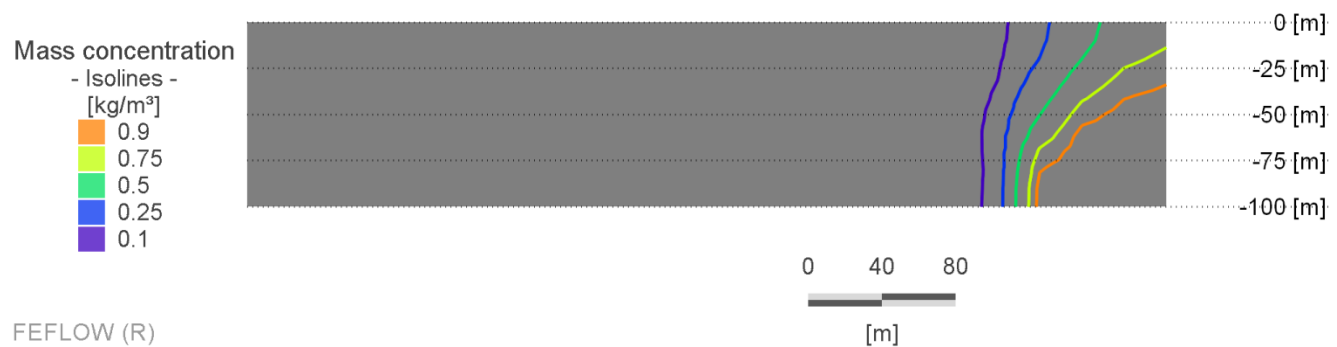
FEFLOW (R)

0 500 1000  
[m]

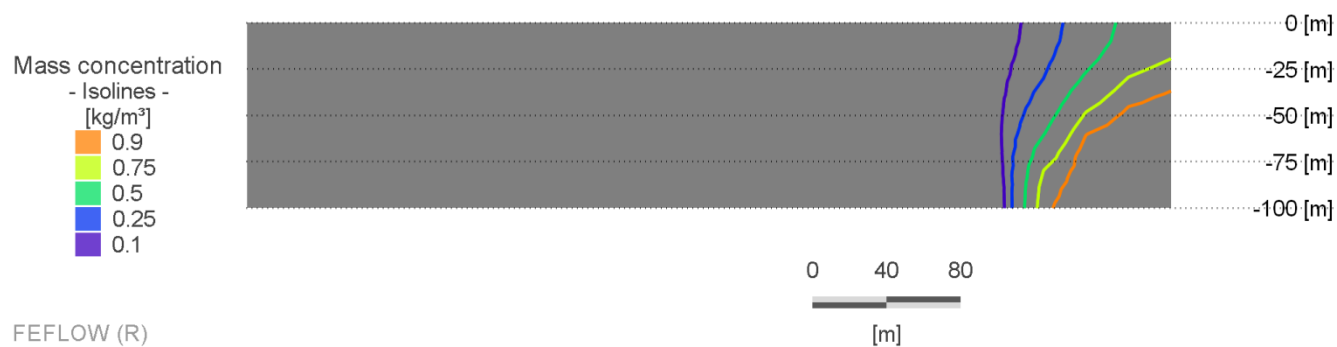
Σχήμα 21 - Κάτοψη 1

### 5.1.2. Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

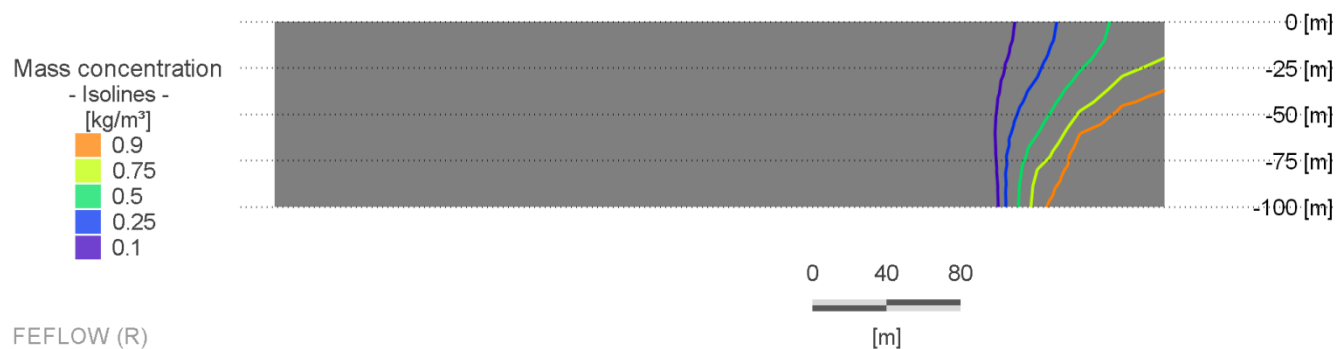
Τομή 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 3: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



## Οριζόντιος υδροφορέας

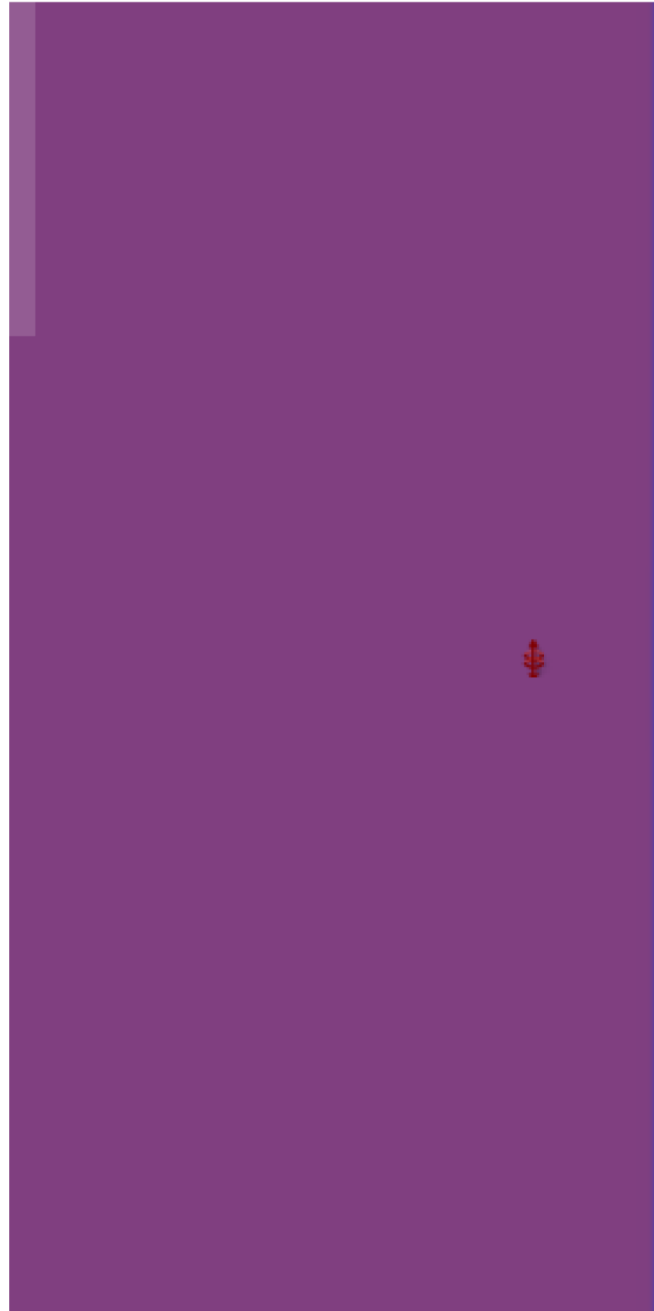
Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Κάτοψη 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration

- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000



[m]

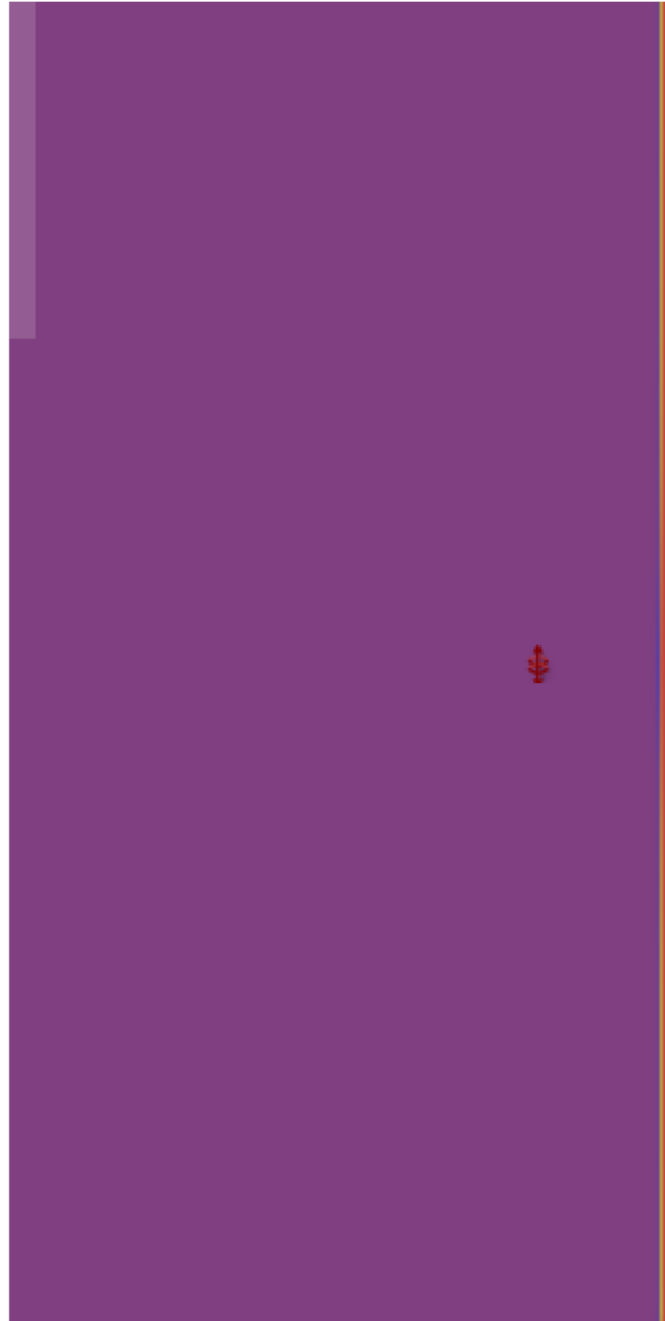
## Οριζόντιος υδροφορέας

Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Κάτοψη 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration  
- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000

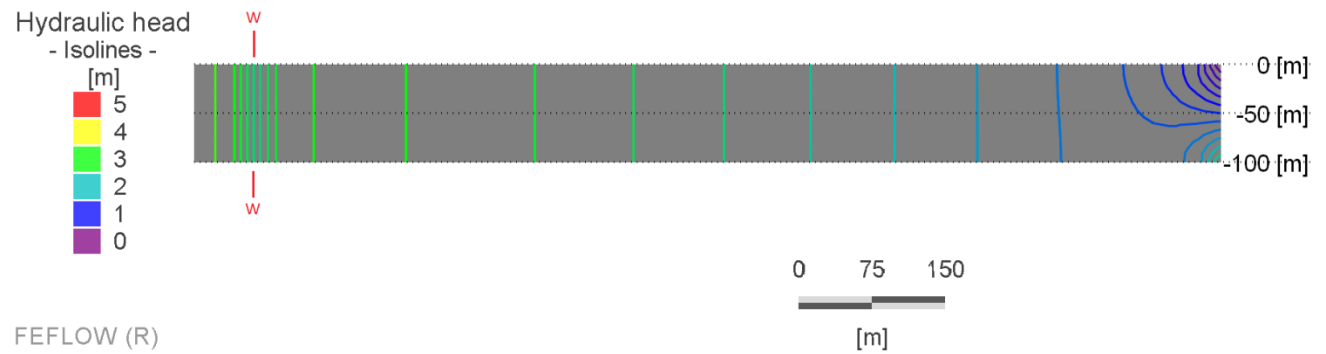


[m]

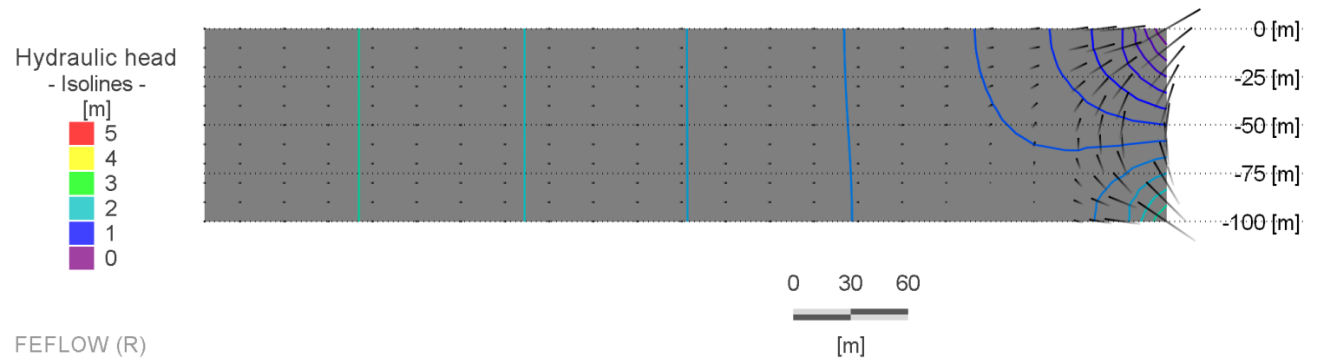
## Οριζόντιος υδροφόρας

Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Τομή 4: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου



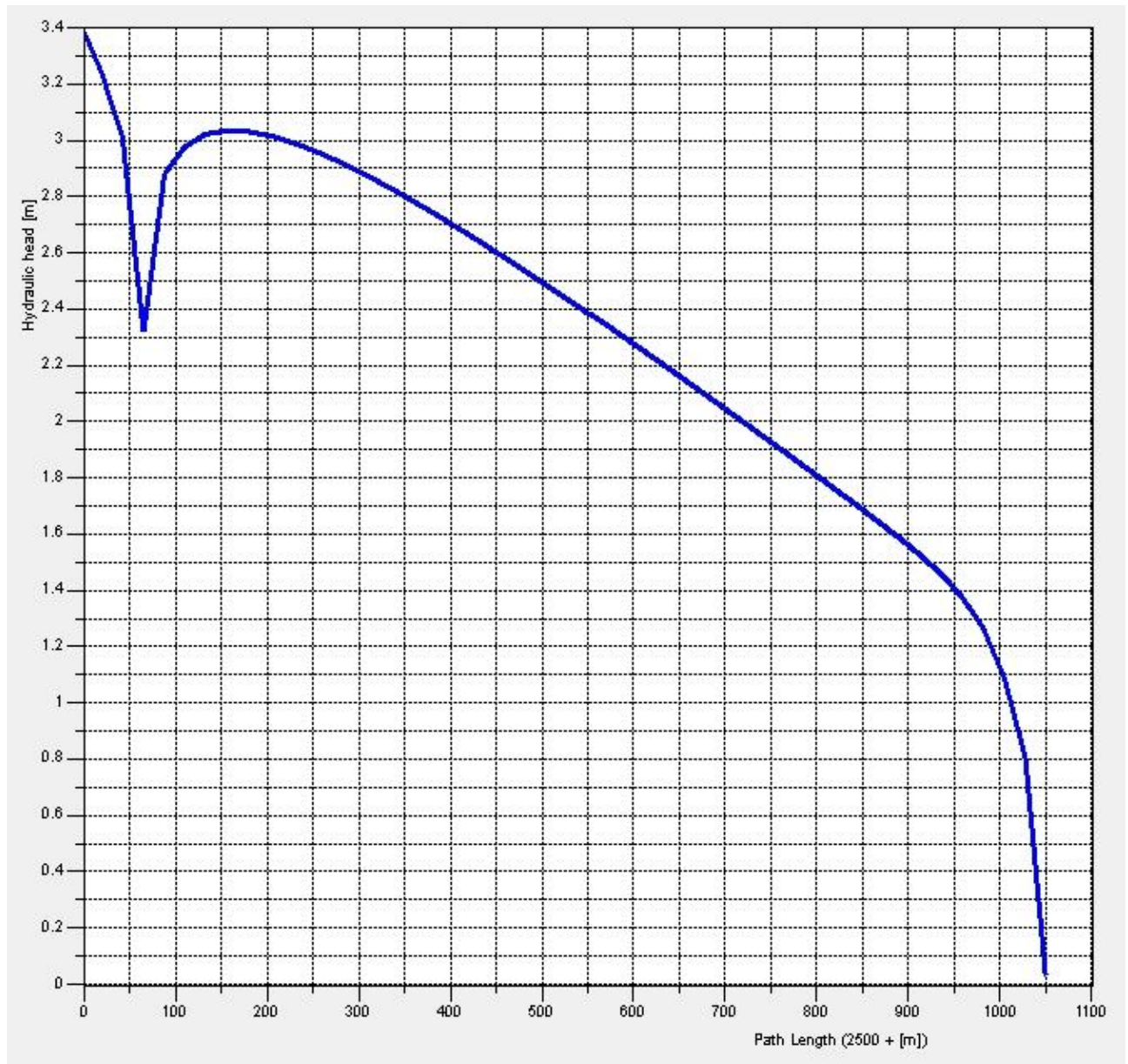
### Τομή 1: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου – Διανύσματα ταχυτήτων



## Οριζόντιος υδροφόρας

Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

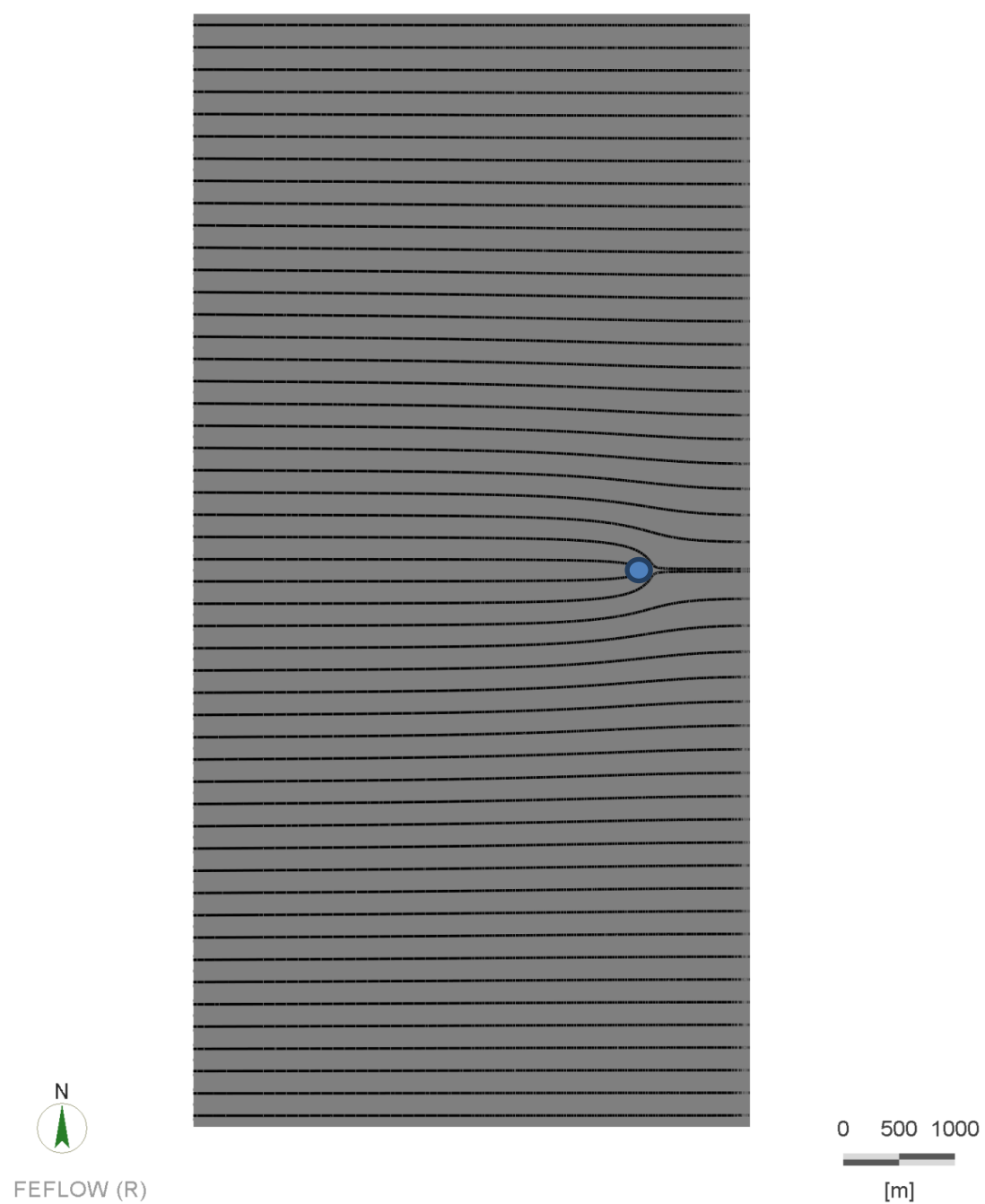
### Τομή 4: Πιεζομετρικό φορτίο συναρτήσει μήκους



## Οριζόντιος υδροφόρας

Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

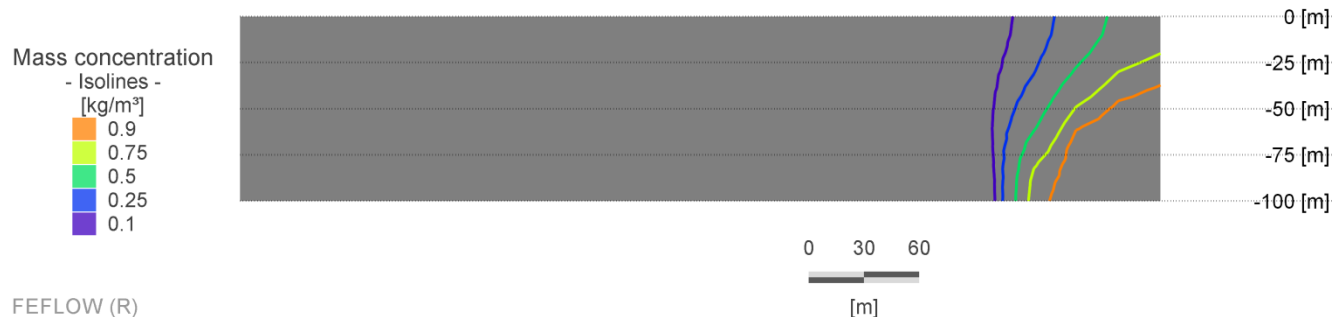
Κάτοψη 1: Γραμμές ροής



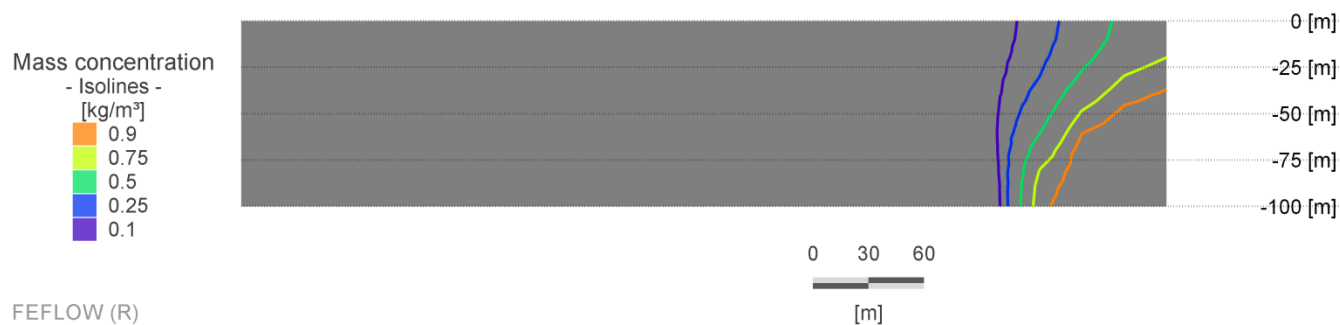


### 5.1.3. Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

Τομή 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 3: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



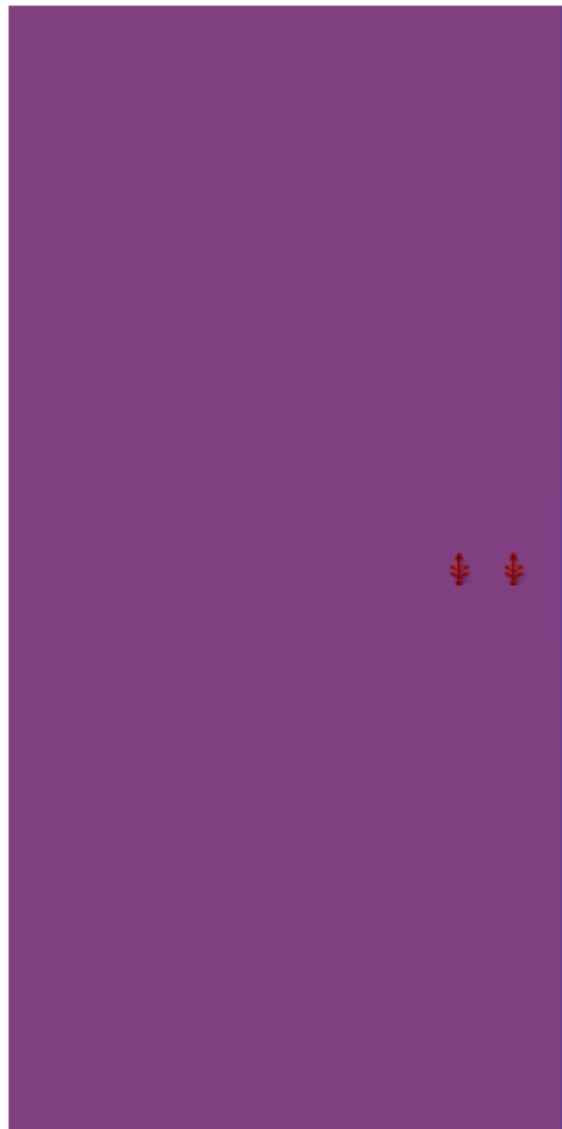
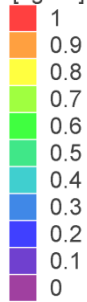
## Οριζόντιος υδροφορέας

Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

### Κάτοψη 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration  
- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000



[m]

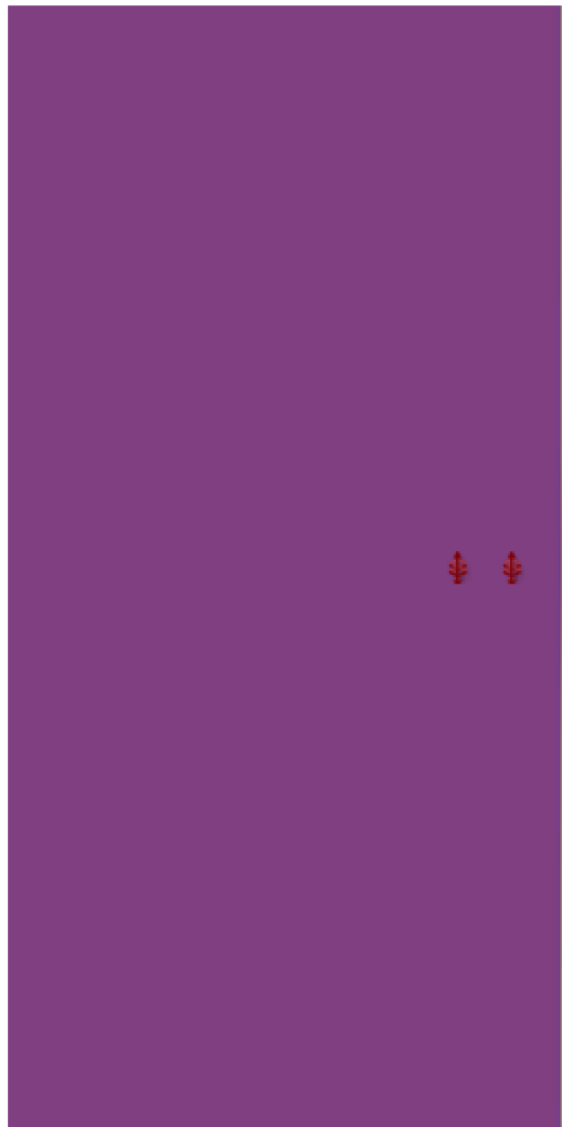
## Οριζόντιος υδροφόρας

Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

### Κάτοψη 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration  
- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000

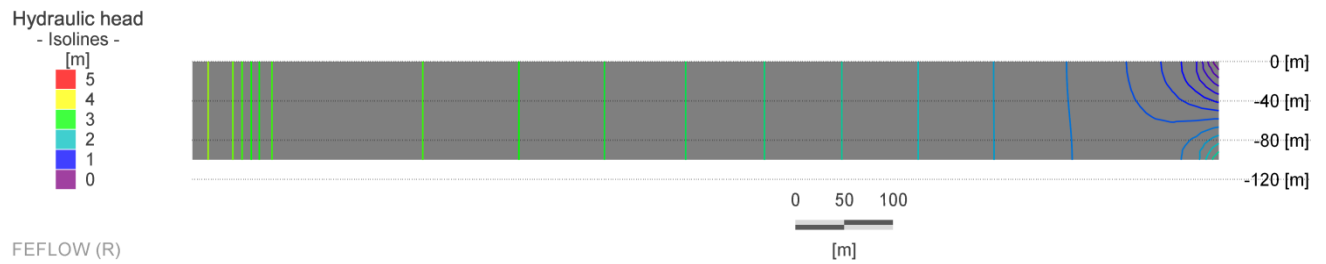


[m]

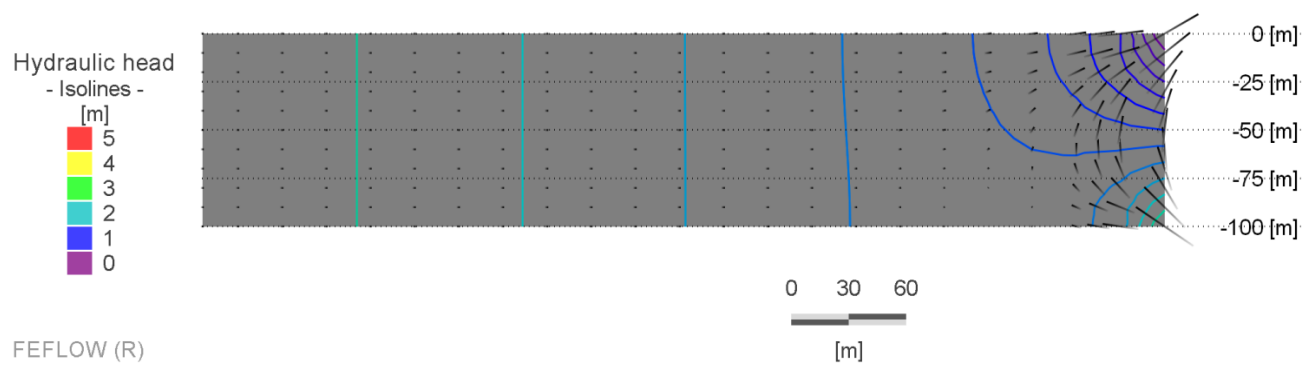
## Οριζόντιος υδροφορέας

Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

### Τομή 4: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου



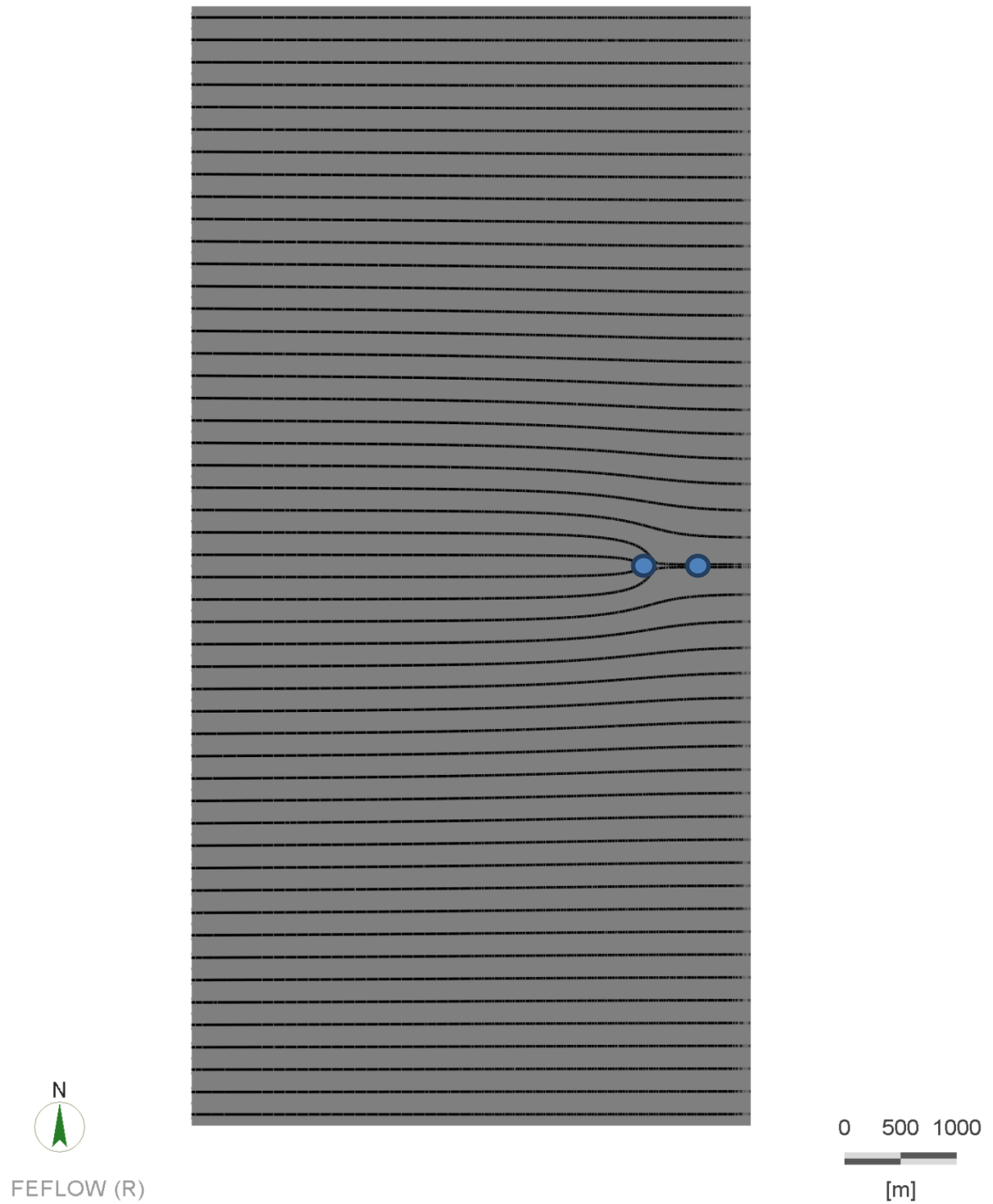
### Τομή 1: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου – Διανύσματα ταχυτήτων



## Οριζόντιος υδροφόρας

Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

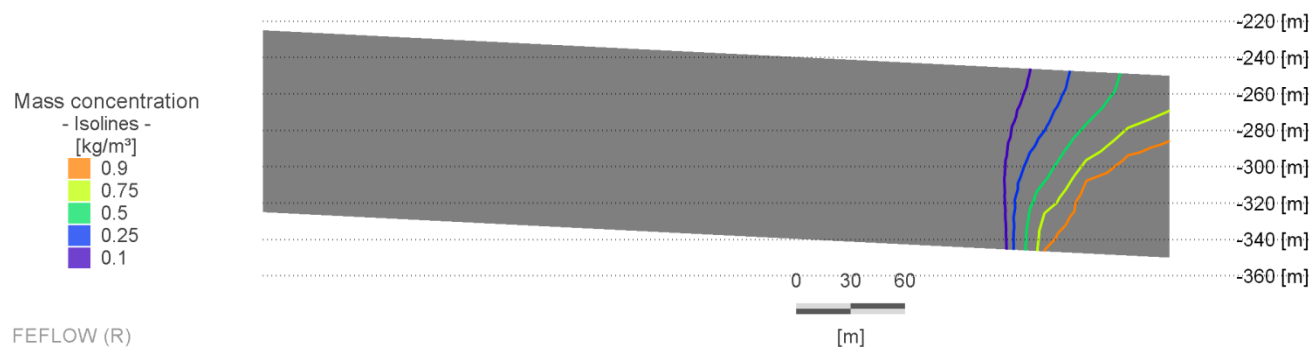
Κάτοψη 1: Γραμμές ροής



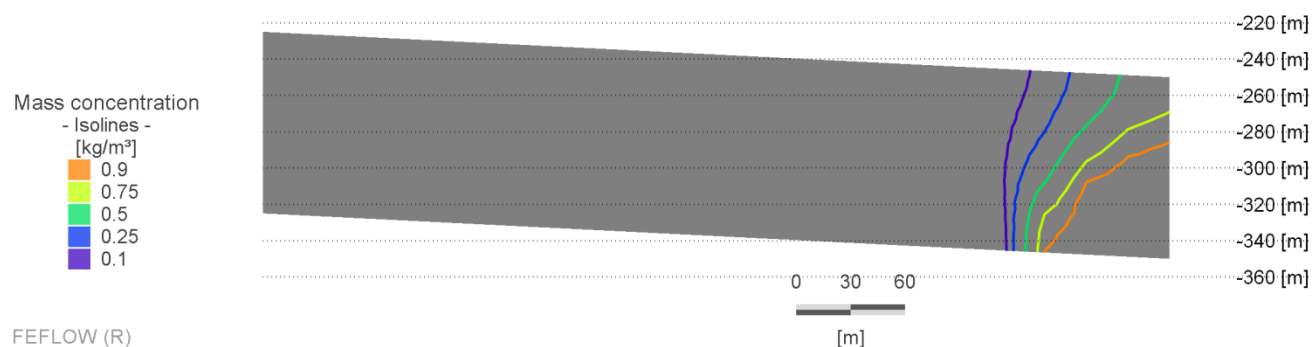
## 5.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΕΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΜΕ ΚΛΙΣΗ 5% ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ

### 5.2.1. Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

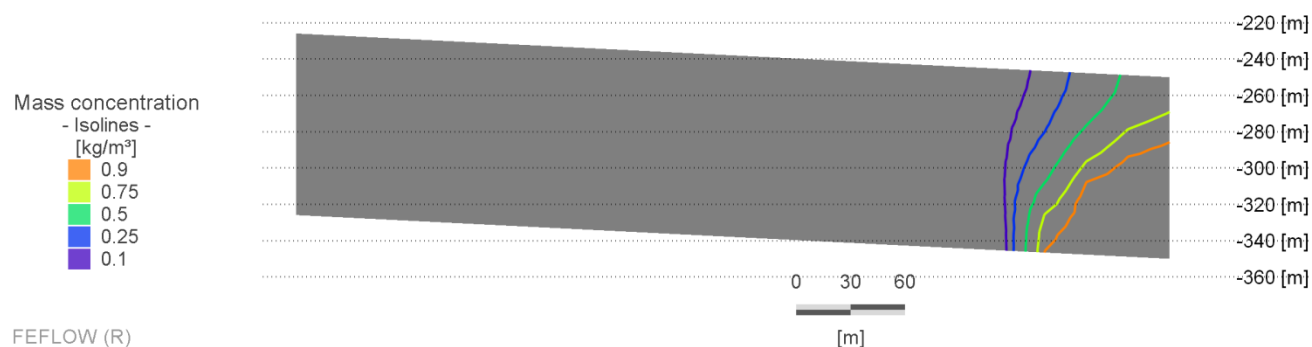
Τομή 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 3: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη

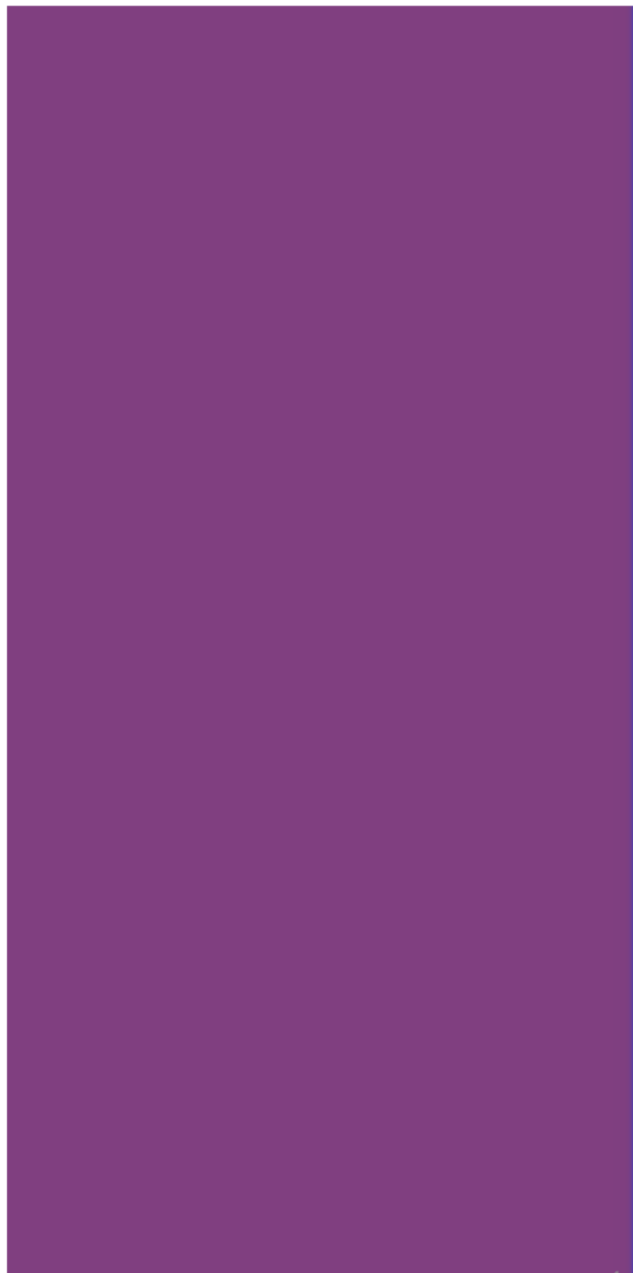
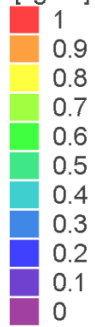


**Υδροφορέας με κλίση (5%)**

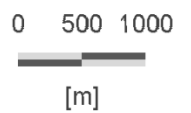
Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

**Κάτοψη 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού**

Mass concentration  
- Continuous -  
[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)



**Υδροφορέας με κλίση (5%)**

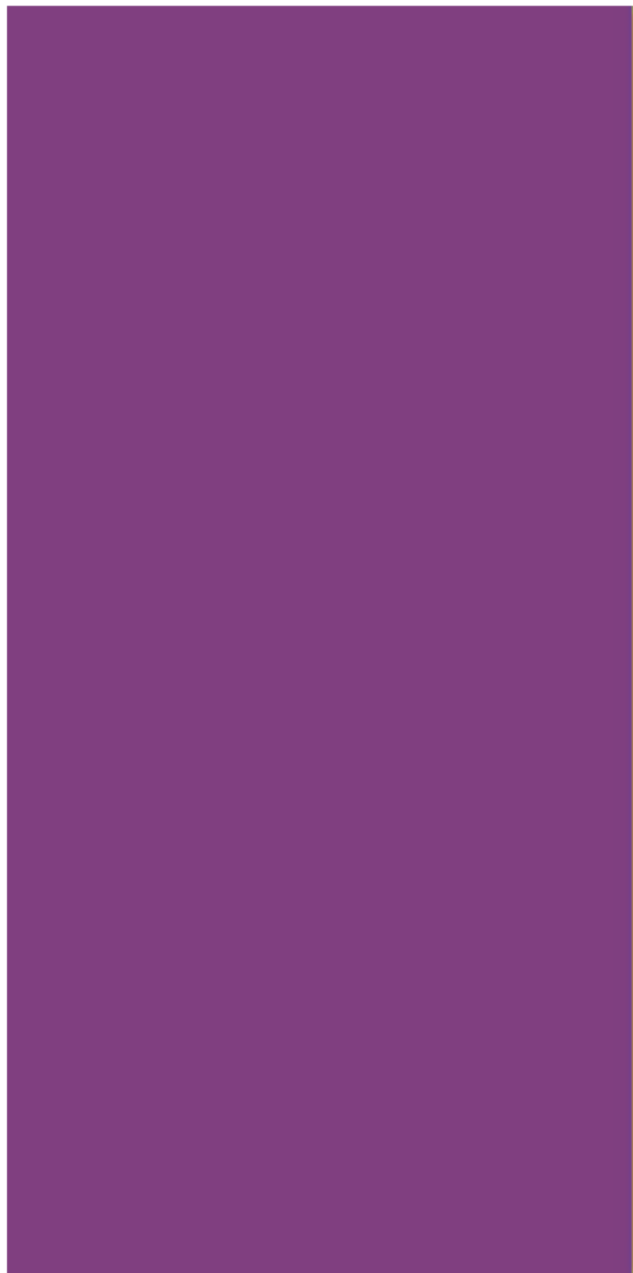
Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

**Κάτοψη 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού**

Mass concentration

- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000



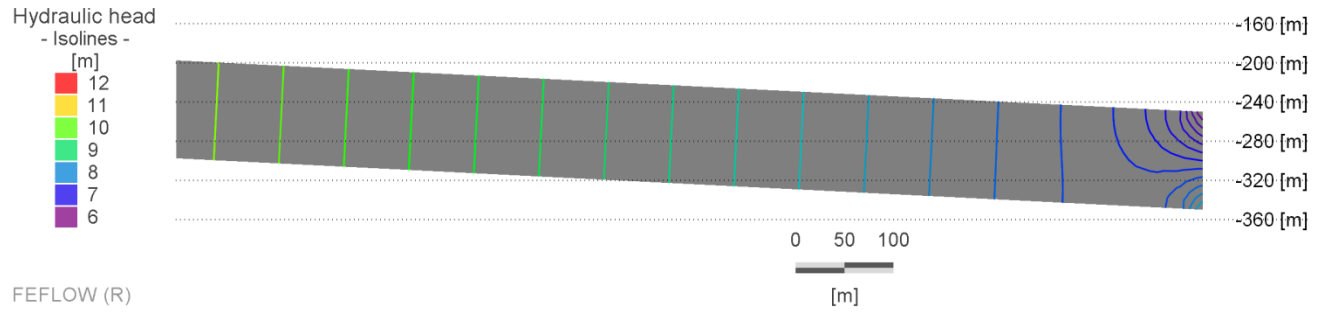
[m]



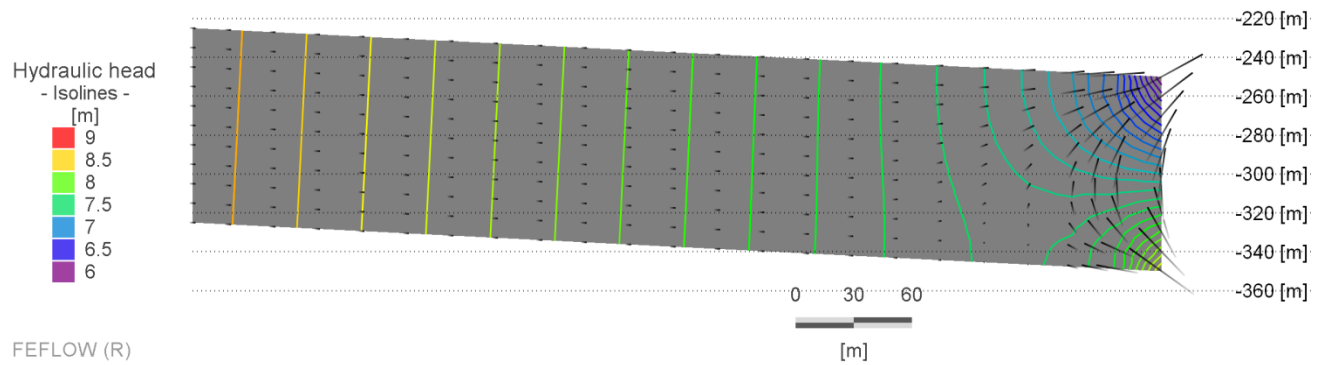
## Υδροφόρας με κλίση (5%)

Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Τομή 4: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου



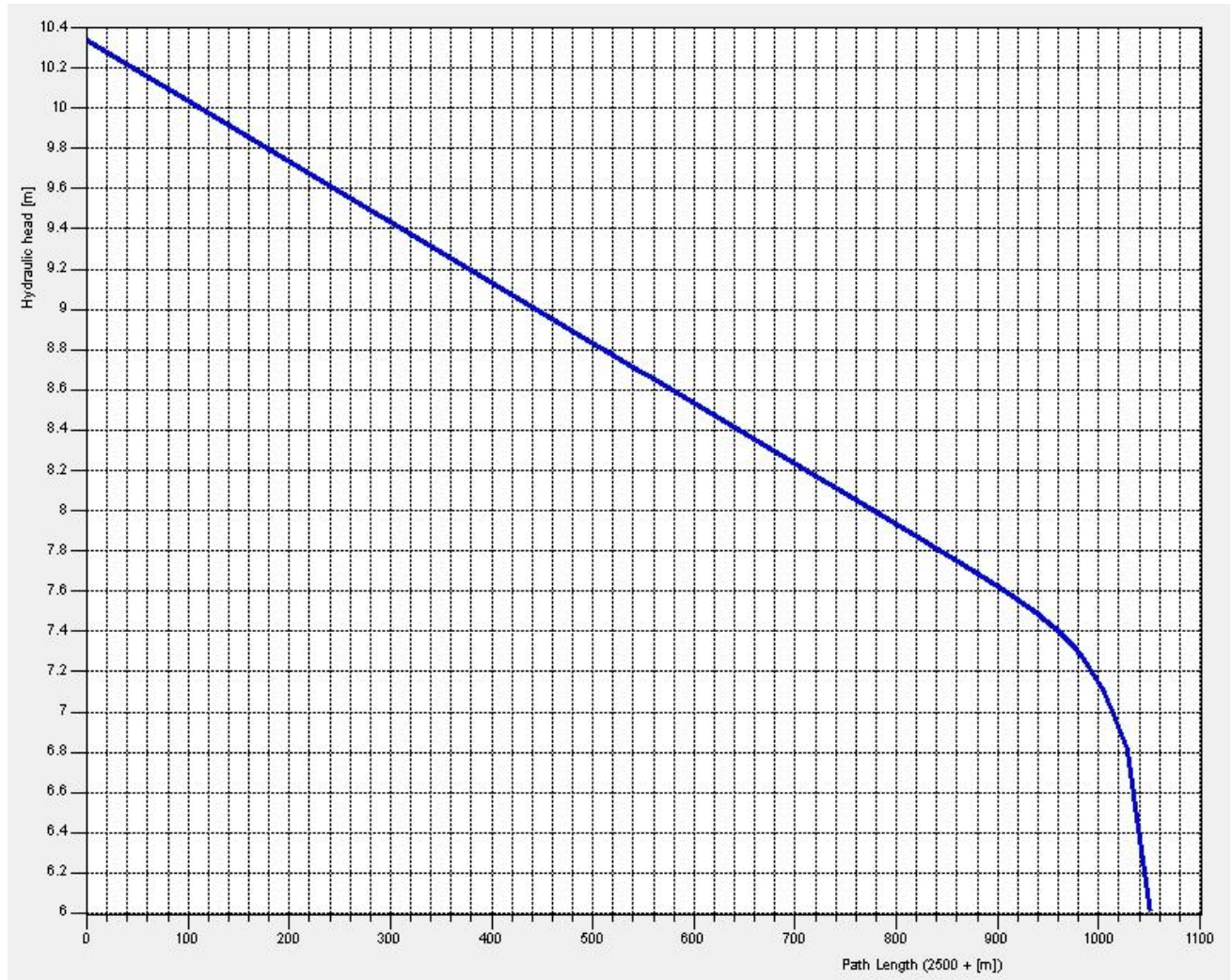
### Τομή 1: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου – Διανύσματα ταχυτήτων



## Υδροφορέας με κλίση (5%)

Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

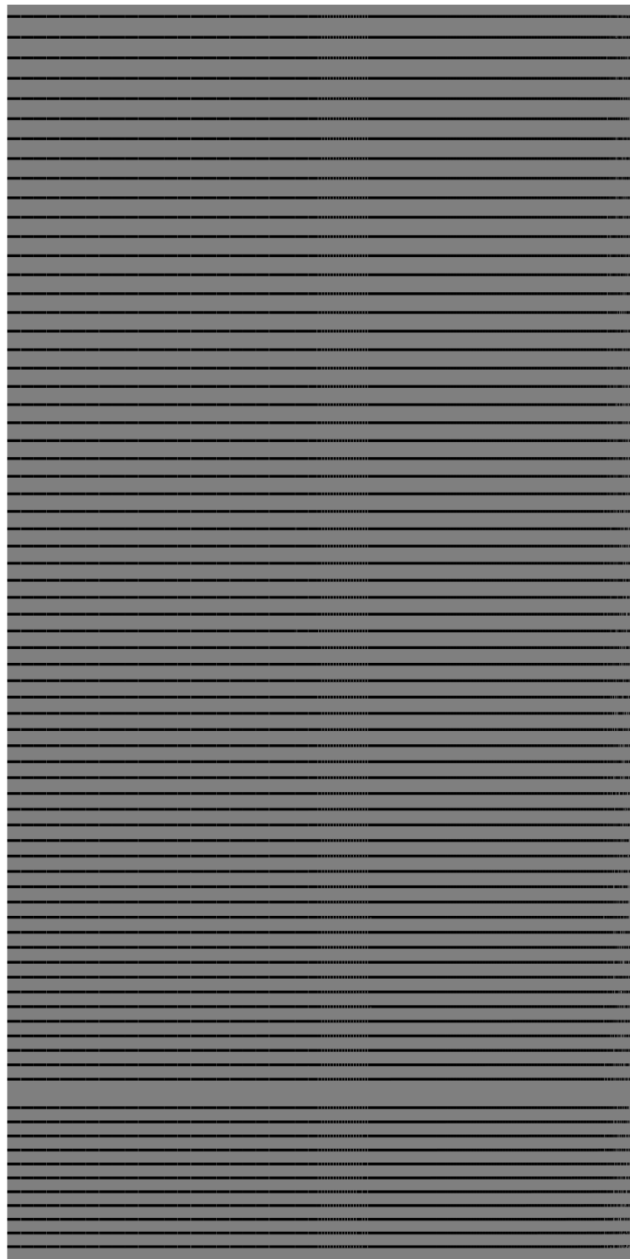
### Τομή 4: Πιεζομετρικό φορτίο συναρτήσει μήκους



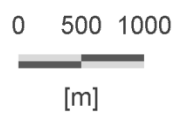
**Υδροφορέας με κλίση (5%)**

Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

**Κάτοψη 1: Γραμμές ροής**

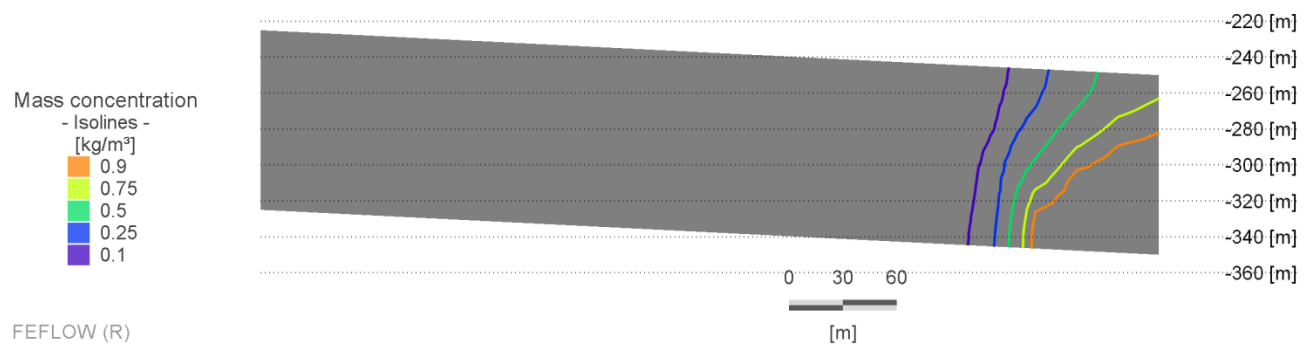


FEFLOW (R)

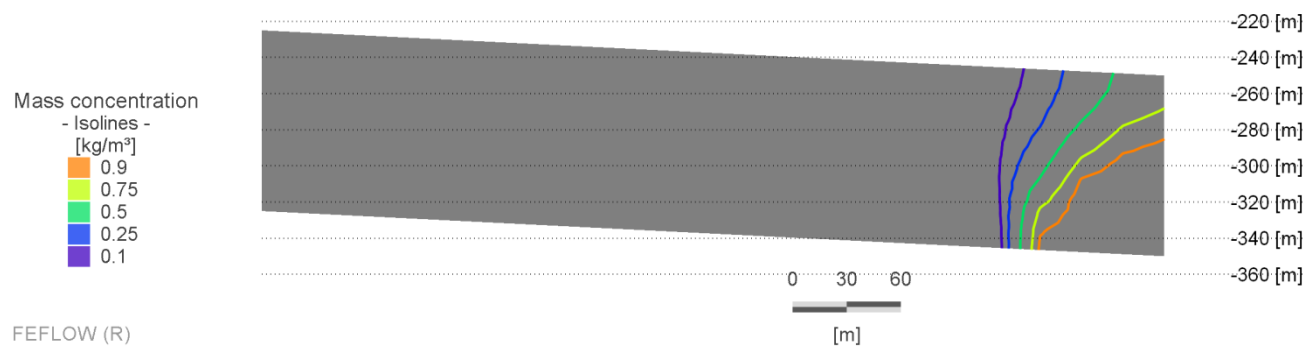


## 5.2.2. Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

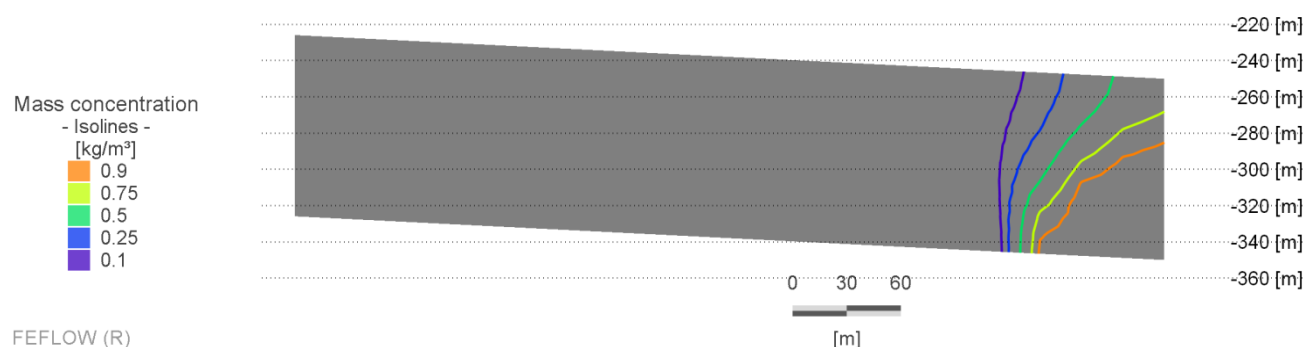
Τομή 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 3: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



**Υδροφορέας με κλίση (5%)**

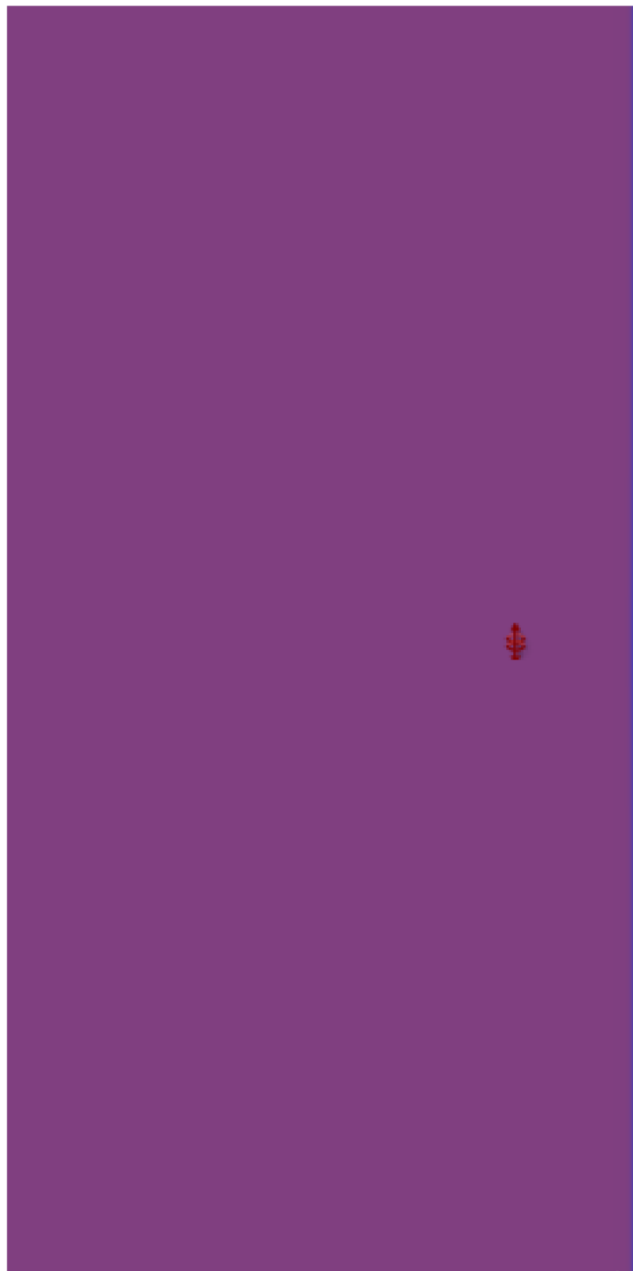
Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

**Κάτοψη 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού**

Mass concentration

- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000



[m]

**Υδροφορέας με κλίση (5%)**

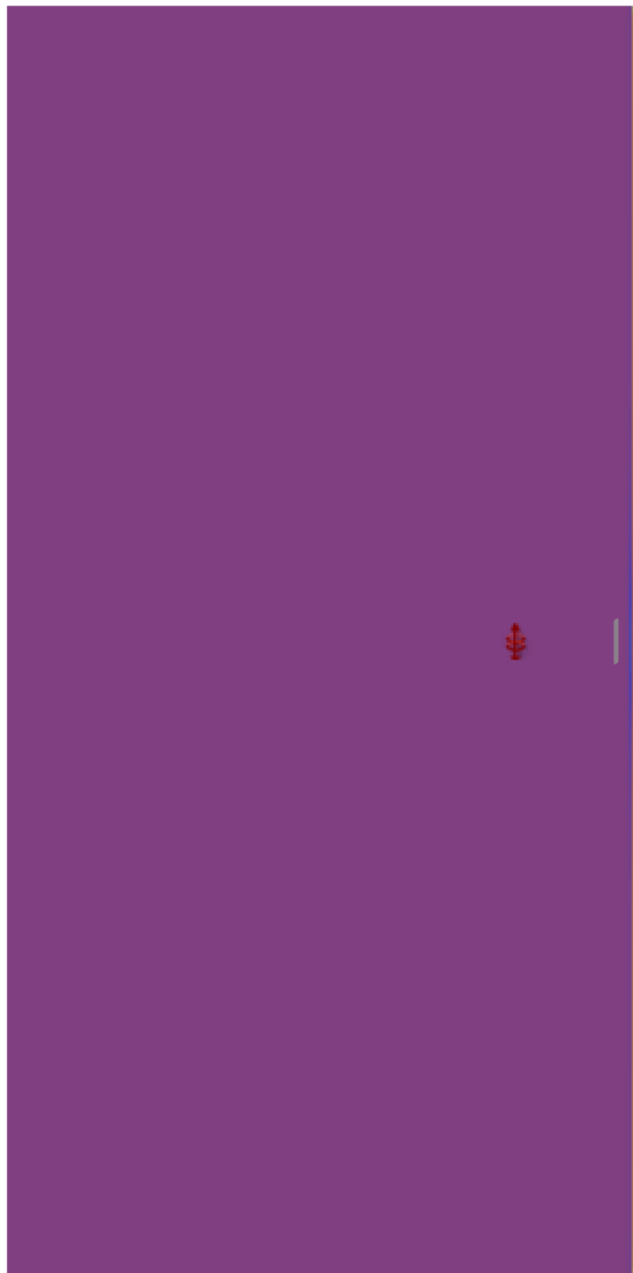
Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

**Κάτοψη 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού**

Mass concentration

- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000

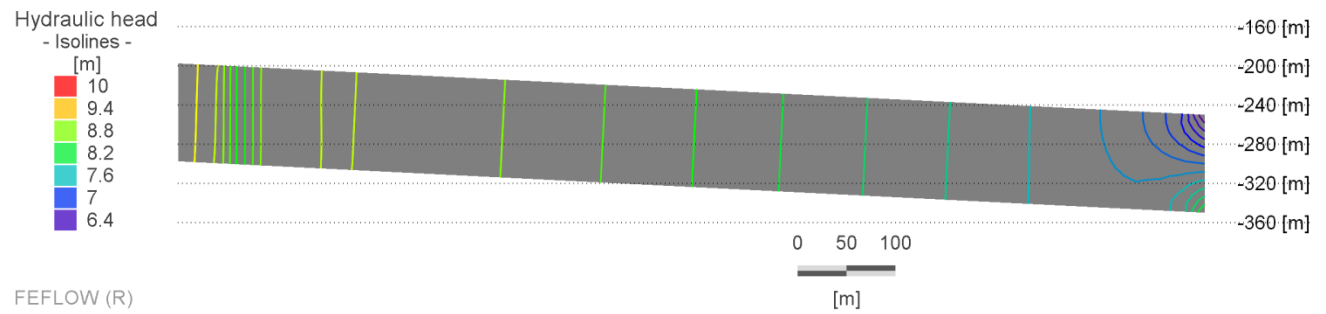


[m]

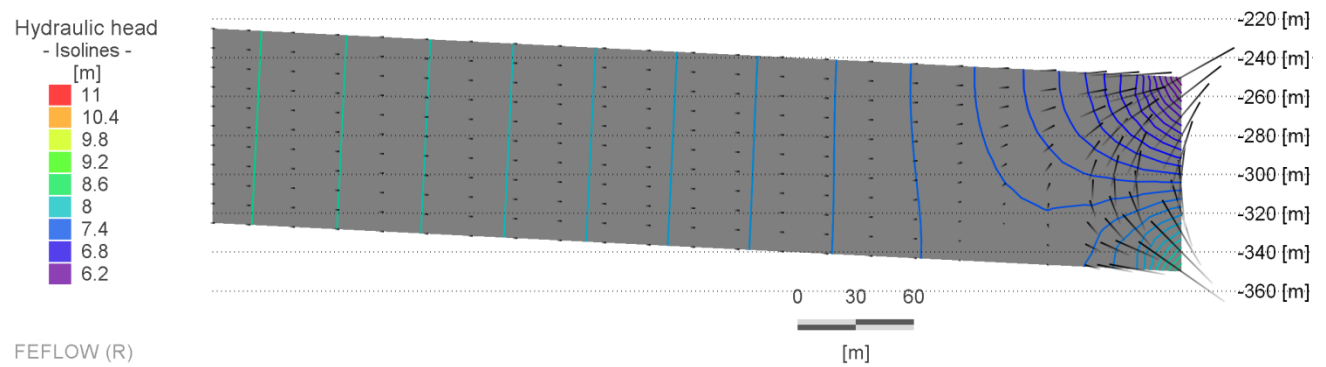
## Υδροφορέας με κλίση (5%)

Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Τομή 4: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου



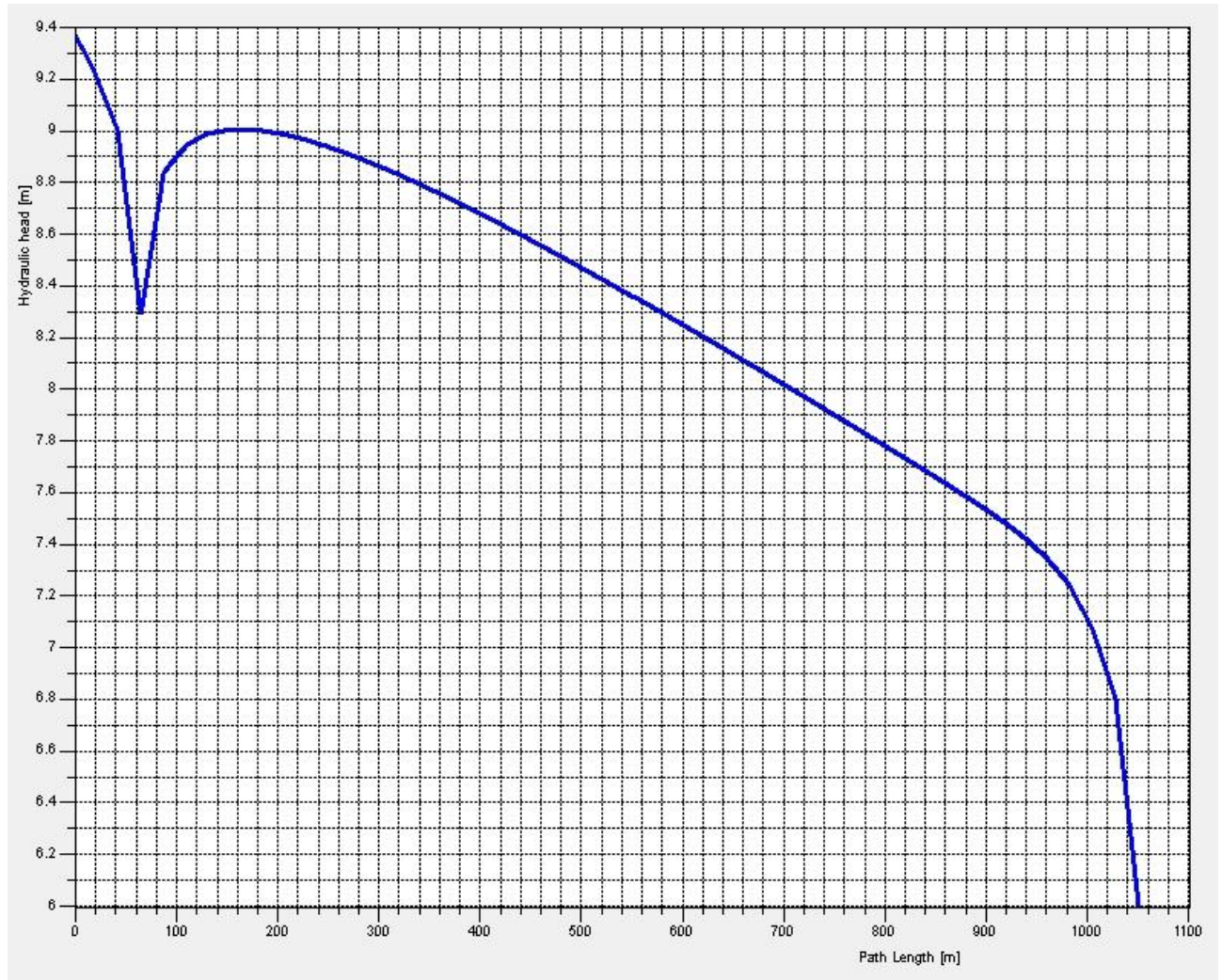
### Τομή 1: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου – Διανύσματα ταχυτήτων



## Υδροφορέας με κλίση (5%)

Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Τομή 4: Πιεζομετρικό φορτίο συναρτήσει μήκους

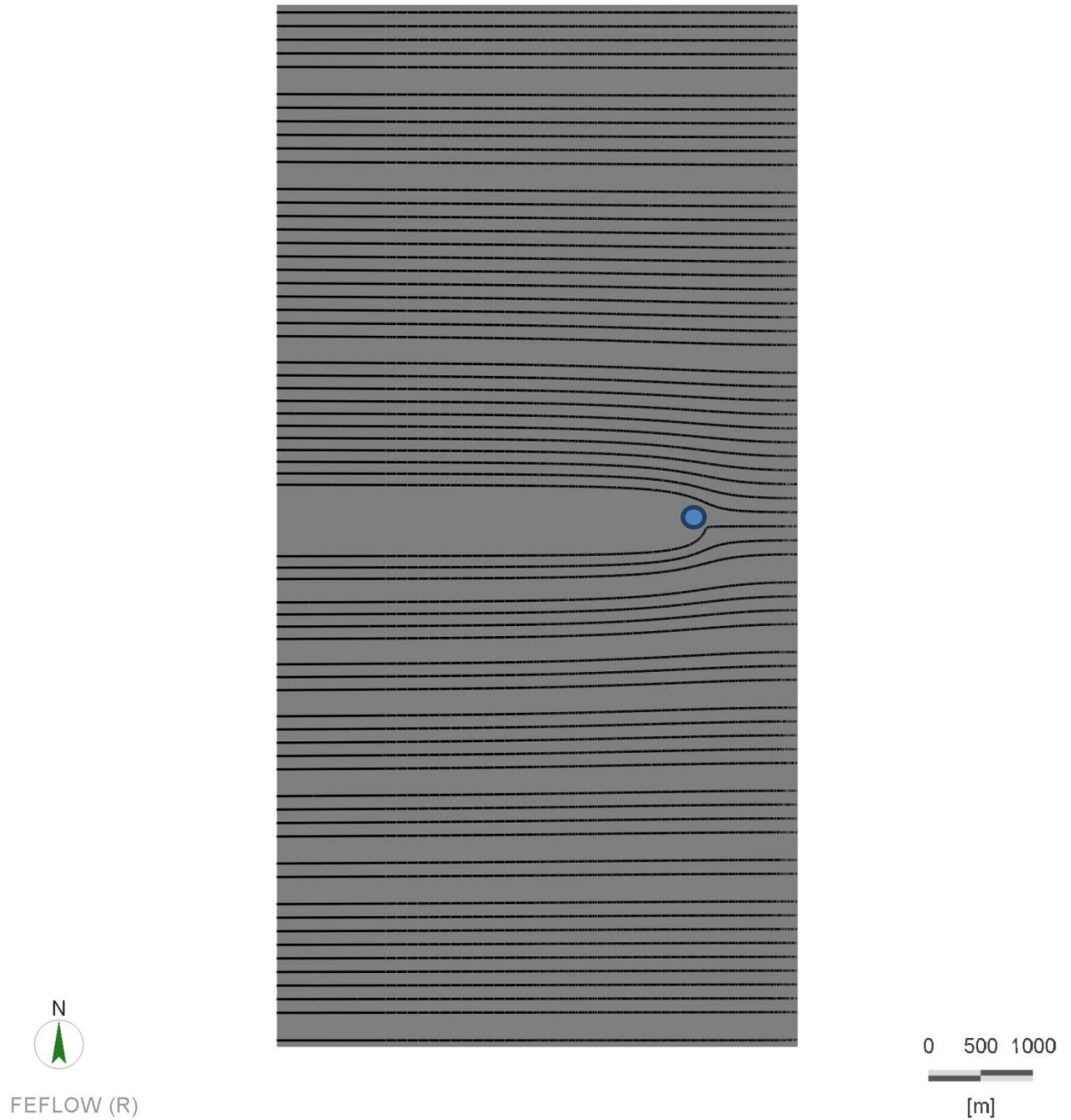




## Υδροφορέας με κλίση (5%)

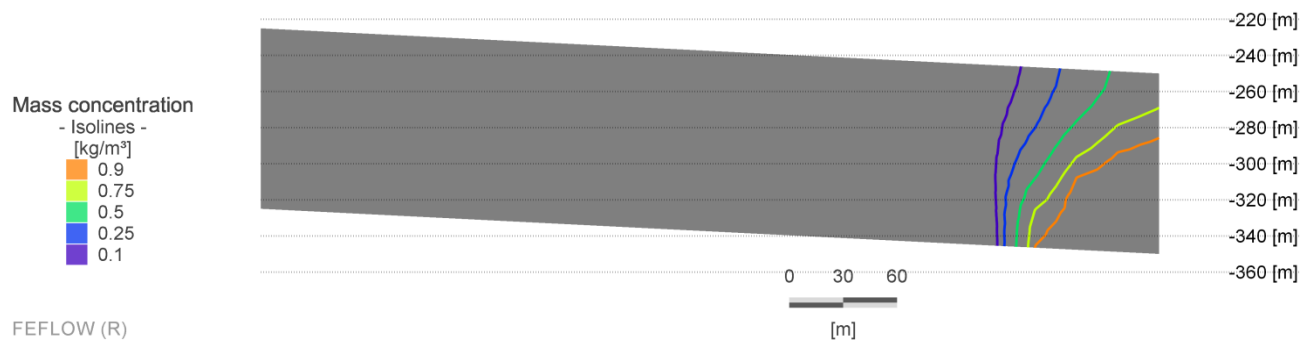
Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

Κάτοψη 1: Γραμμές ροής

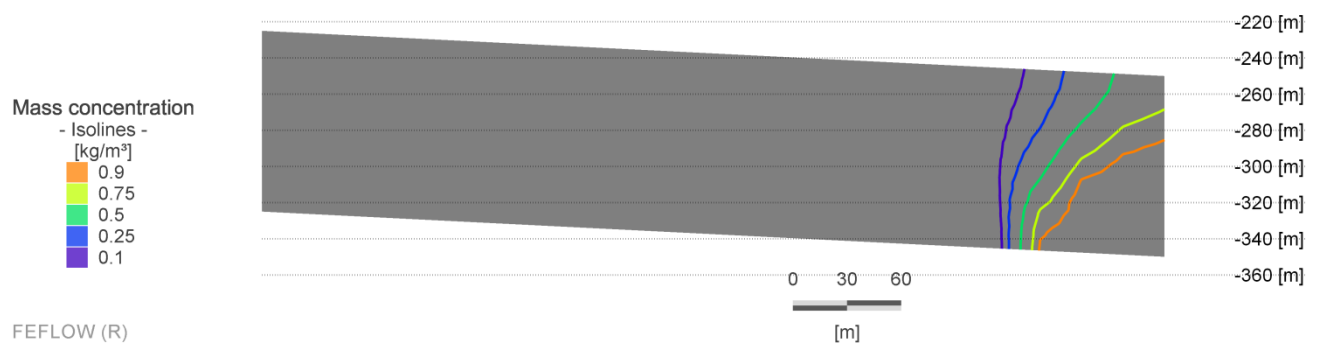


### 5.2.3. Ένα (1) φρέαρ άντλησης - Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

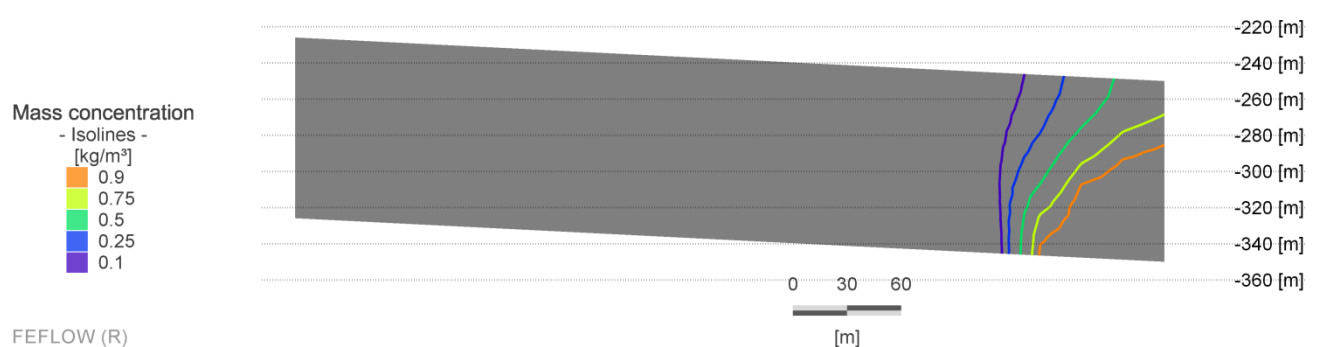
### Τομή 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



### Τομή 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



### Τομή 3: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



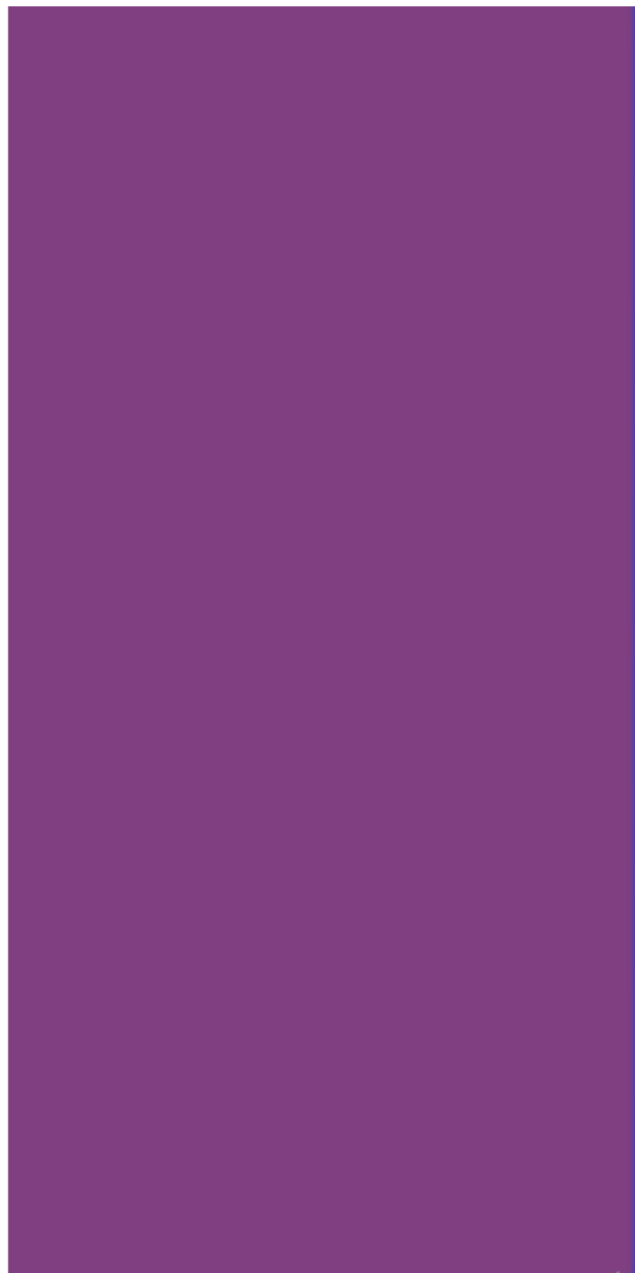
**Υδροφορέας με κλίση (5%)**

Ένα (1) φρέαρ άντλησης - Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

**Κάτοψη 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού**

Mass concentration  
- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000



[m]

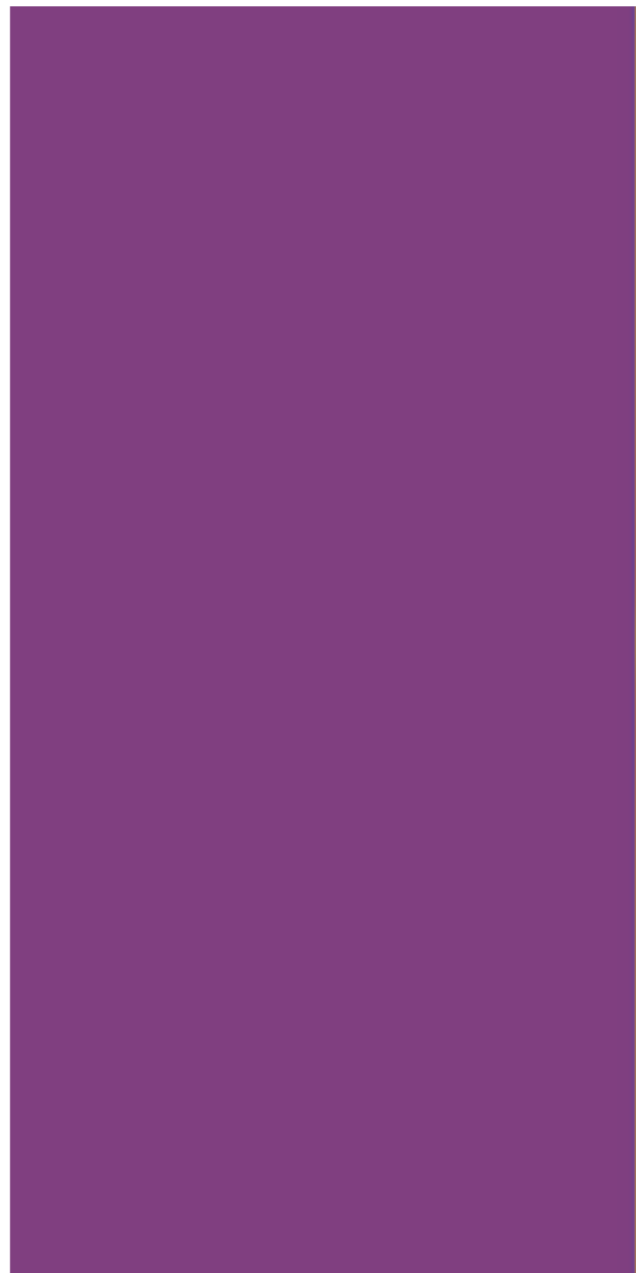
**Υδροφορέας με κλίση (5%)**

Ένα (1) φρέαρ άντλησης - Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

**Κάτοψη 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού**

Mass concentration  
- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000

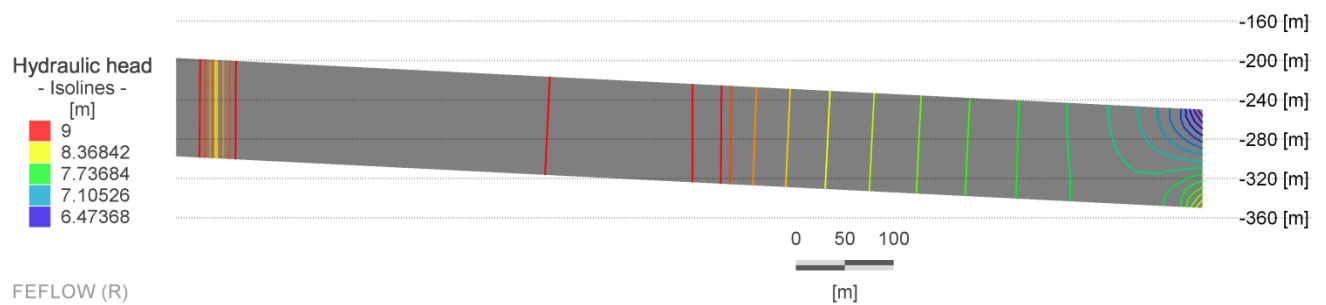


[m]

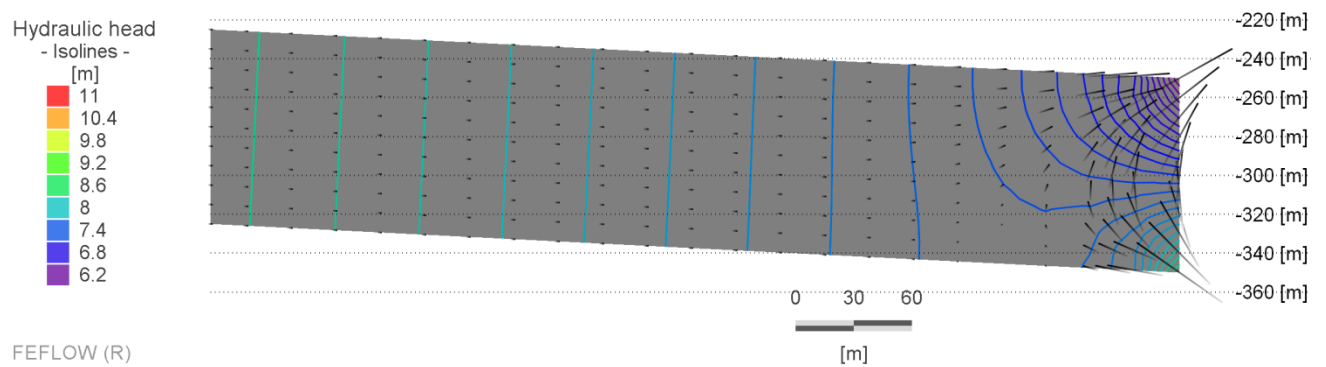
## Υδροφορέας με κλίση (5%)

Ένα (1) φρέαρ άντλησης - Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

### Τομή 4: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου



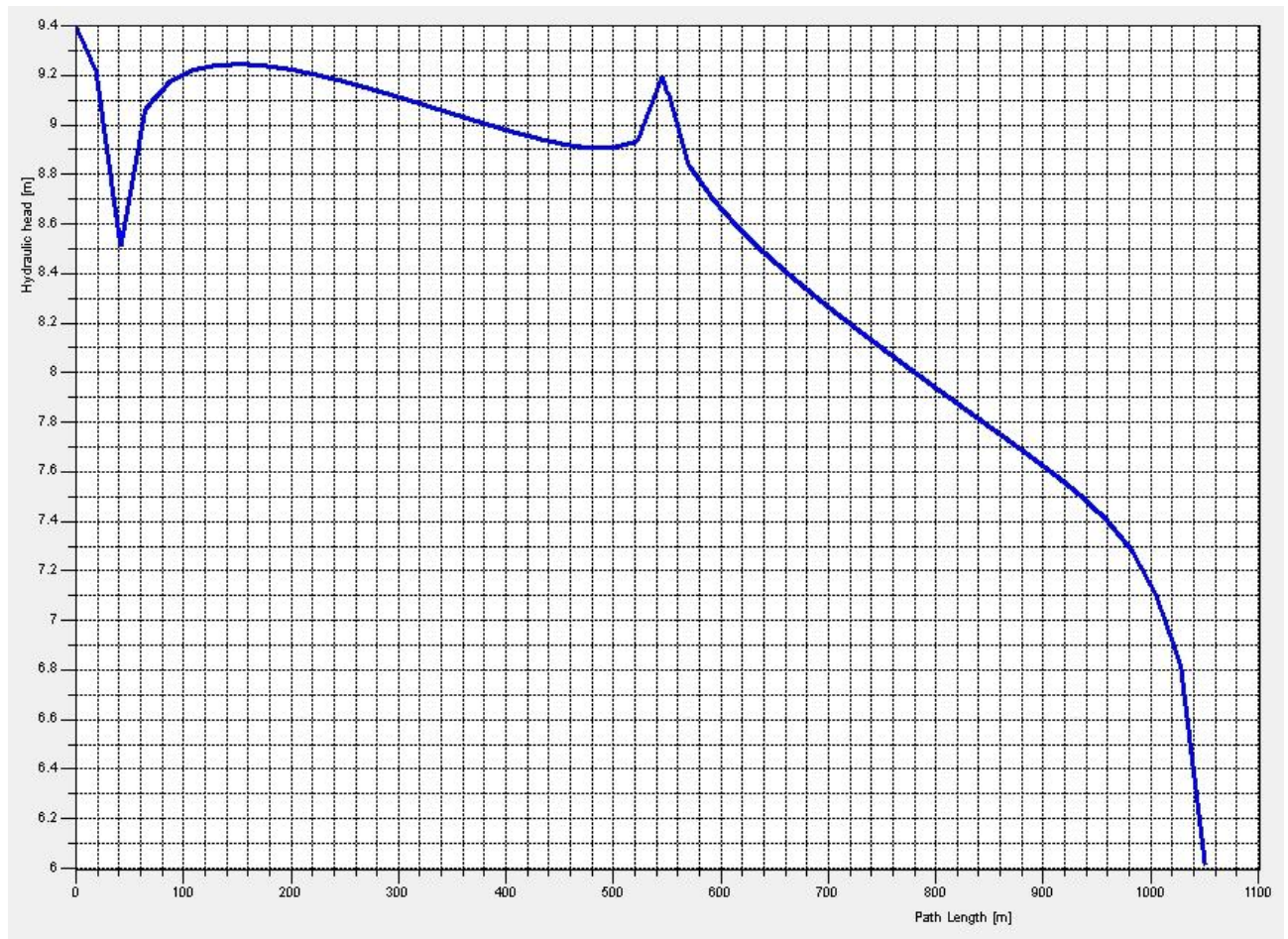
### Τομή 1: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου – Διανύσματα ταχυτήτων



## Υδροφορέας με κλίση (5%)

Ένα (1) φρέαρ άντλησης - Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

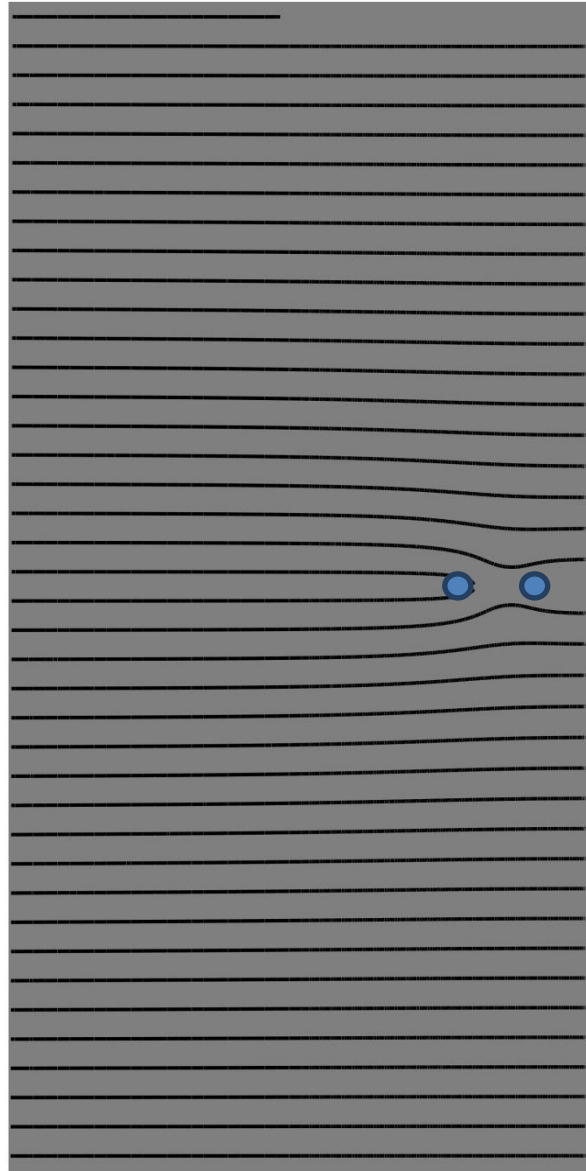
### Τομή 4: Πιεζομετρικό φορτίο συναρτήσει μήκους



**Υδροφορέας με κλίση (5%)**

Ένα (1) φρέαρ άντλησης - Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

**Κάτοψη 1: Γραμμές ροής**



FEFLOW (R)

0 500 1000



[m]

### **5.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΕΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΜΕ ΚΛΙΣΗ 5% ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗΣ ΣΕ ΣΧΗΜΑ “V”**

Στη συγκεκριμένη περίπτωση ακολουθήθηκε εκτενής μελέτη διάφορων περιπτώσεων άντλησης και εμπλουτισμού.

Οι περιπτώσεις αυτές αφορούν:

#### **(Α) Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού**

#### **(Β) ΣΕΝΑΡΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗΣ**

- I. Ένα (1) φρέαρ άντλησης στο μέσον του υδροφορέα
- II. Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ άντλησης στα  $\frac{3}{4}$  του μήκους του υδροφορέα
- III. Διάταξη τεσσάρων (4) φρεάτων άντλησης σε σχηματισμό ρόμβου στο μέσον του υδροφορέα

#### **(Γ) ΣΕΝΑΡΙΑ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ**

- I. Ένα (1) φρέαρ άντλησης στο μέσον του υδροφορέα και ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού ενδιάμεσα με την ακτογραμμή
- II. Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ άντλησης στα  $\frac{3}{4}$  του μήκους του υδροφορέα και αντίστοιχα ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού στο ίδιο μήκος, ενδιάμεσα με την ακτογραμμή
- III. Διάταξη τεσσάρων (4) φρεάτων άντλησης σε σχηματισμό ρόμβου στο μέσον του υδροφορέα και ένα (1) φρέαρ άντλησης ενδιάμεσα με την ακτογραμμή.

Η συγκεκριμένη γεωμετρία υδροφορέα επιλέχθηκε να εξεταστεί πιο αναλυτικά διότι κρίθηκε πιο χαρακτηριστική να εξαχθούν κάποια συγκριτικά αποτελέσματα σε σχέση με πιο περίπλοκες διατάξεις άντλησης και εμπλουτισμού.

Πιο συγκεκριμένα ο υδροφορέας σχήματος “V”, λόγω των αυξημένων πιεζομετρικών φορτίων που εμφανίζονται στα χαμηλότερου υψομέτρου σημεία του, δίνει μια πιο χαρακτηριστική εικόνα του φαινομένου της υφαλμύρωσης. Η



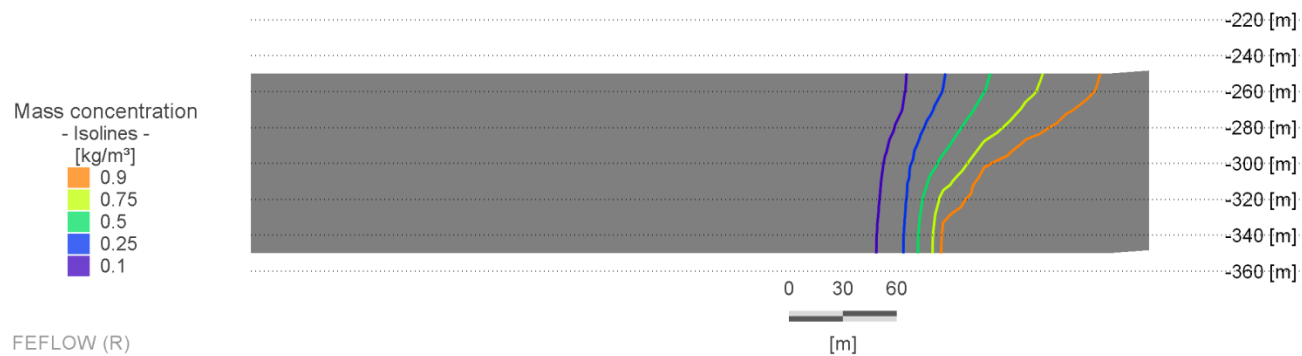
συγκεκριμένη γεωμετρία του υδροφορέα (χαμηλότερα φορτία στα «άκρα» του και υψηλότερα στη μέση –όπου το υψόμετρο είναι χαμηλό) δίνουν επίσης και πιο συγκρίσιμα αποτελέσματα σε περιπτώσεις όπου τα φρέατα άντλησης και εμπλουτισμού δεν είναι συμμετρικά διαταγμένα στη μέση του υδροφορέα (αυτή η περίπτωση μελετάται στο 5.3.3. που εξετάζονται ασύμμετρα φρέατα στα  $\frac{3}{4}$  του υδροφορέα).

Τέλος, επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος υδροφορέας για περαιτέρω διερεύνηση όντας πιο συναφής στο να προσομοιώσει έναν πραγματικό υδροφορέα σε επιστητό πρόβλημα, περισσότερο από έναν τελείως οριζόντιο ή τελείως κεκλιμένο υδροφορέα. Το τελευταίο αυτό κριτήριο θα μπορούσε να το πληροί και ο στρεβλός υδροφορέας (warped aquifer), αλλά η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του, σε συνδυασμό με ανωμαλίες που εμφάνιζε ο συγκεκριμένος υδροφορέας στο πρόγραμμα κατέστησαν τον υδροφορέα σχήματος V καλύτερο.

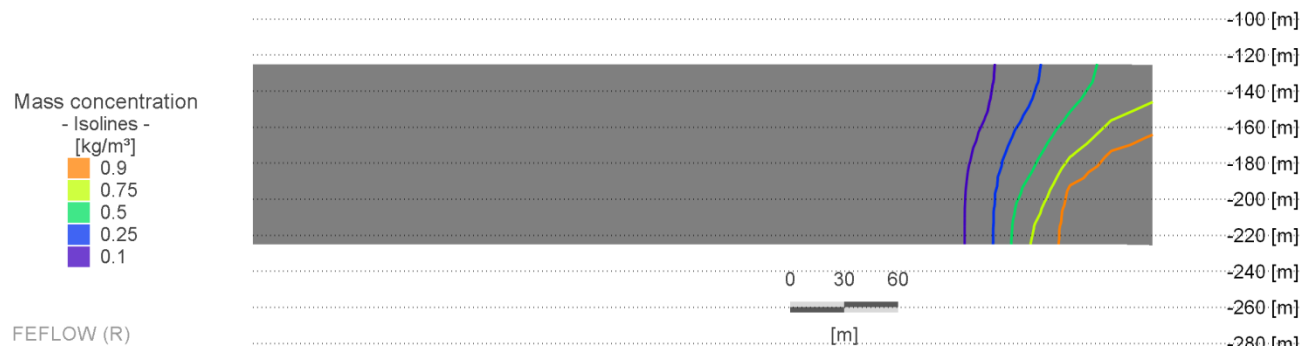
Τα σκαριφήματα των παραπάνω διατάξεων βρίσκονται στο κεφάλαιο 4.2.4 – *Θέσεις φρεάτων άντλησης και εμπλουτισμού* της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

### 5.3.1. Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

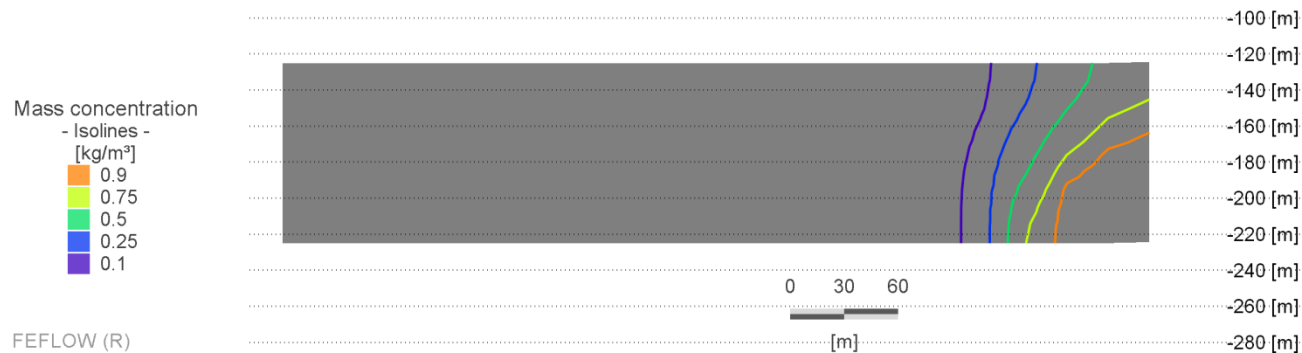
Τομή 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 3: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη

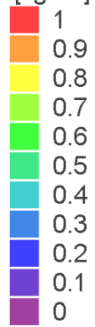


## Υδροφορέας σχήματος V

Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Κάτοψη 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration  
- Continuous -  
[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000

[m]

## Υδροφορέας σχήματος V

Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Κάτοψη 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration  
- Continuous -  
[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

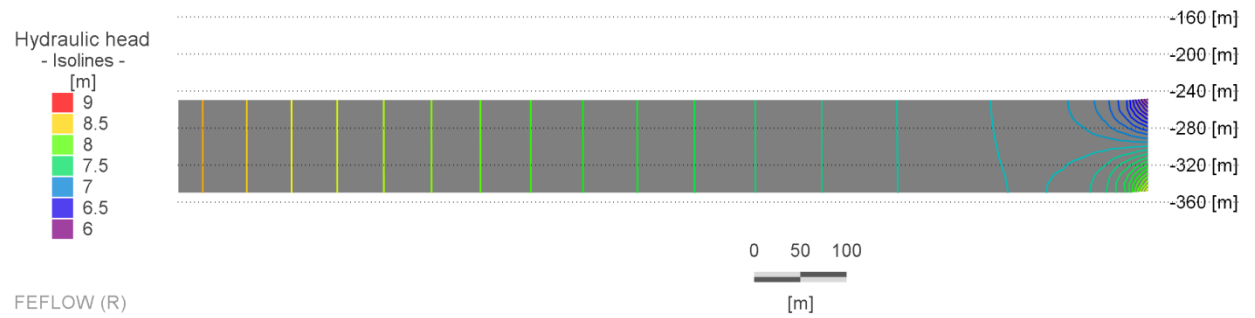
0 500 1000

[m]

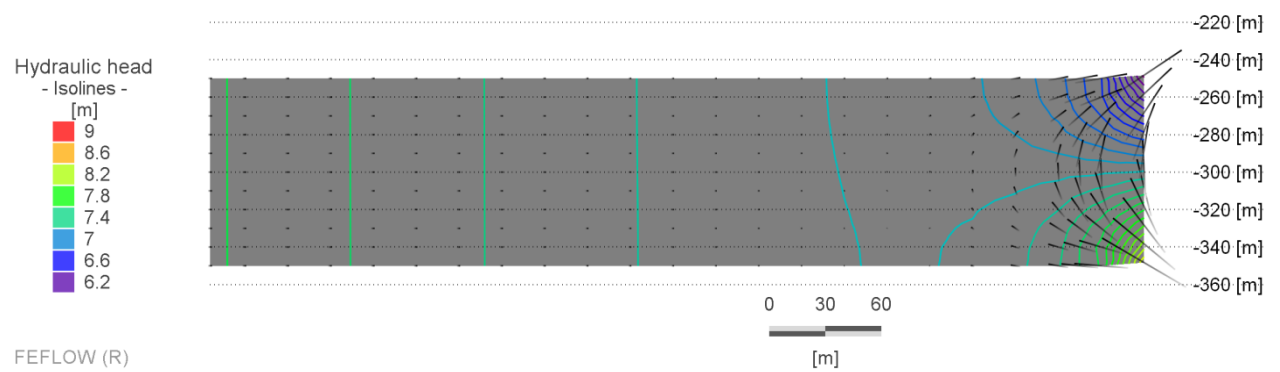
## Υδροφόρας σχήματος V

Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Τομή 4: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου



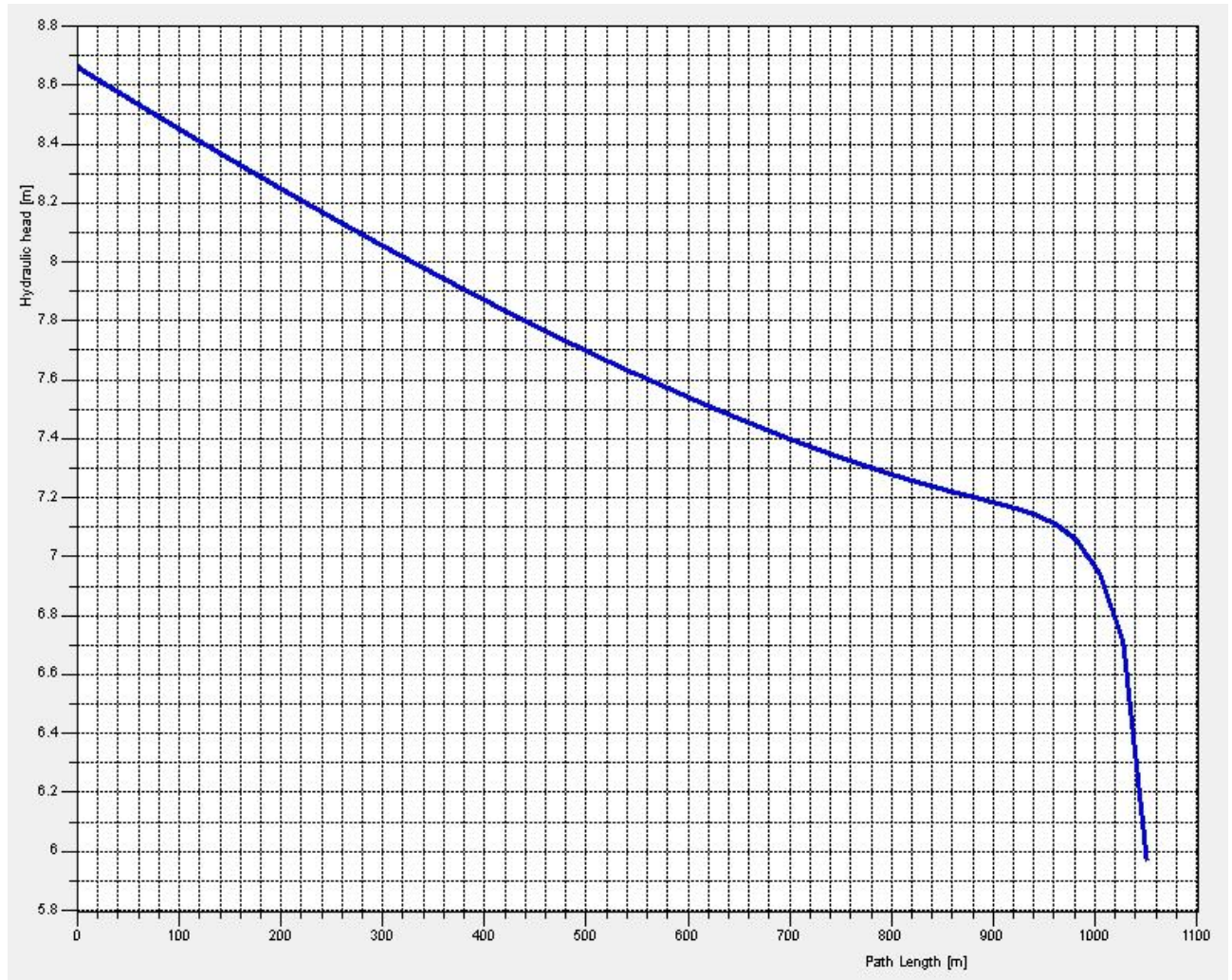
### Τομή 1: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου – Διανύσματα ταχυτήτων



## Υδροφόρας σχήματος V

Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

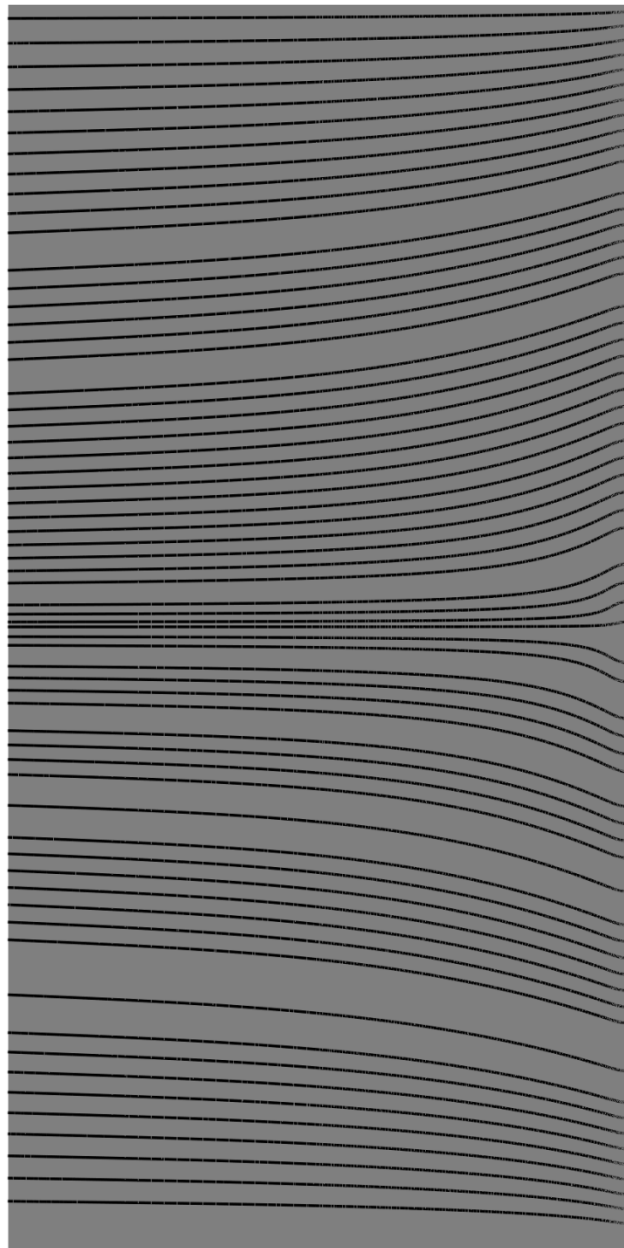
### Τομή 4: Πιεζομετρικό φορτίο συναρτήσει μήκους



## Υδροφόρας σχήματος V

Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

Κάτοψη 2: Γραμμές ροής

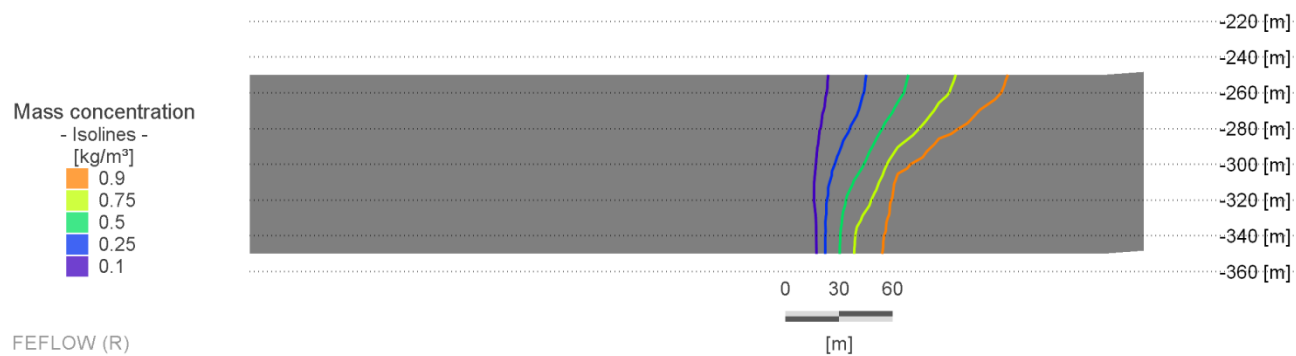


FEFLOW (R)

0 500 1000  
[m]

### 5.3.2. Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

Τομή 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 3: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη





## Υδροφορέας σχήματος V

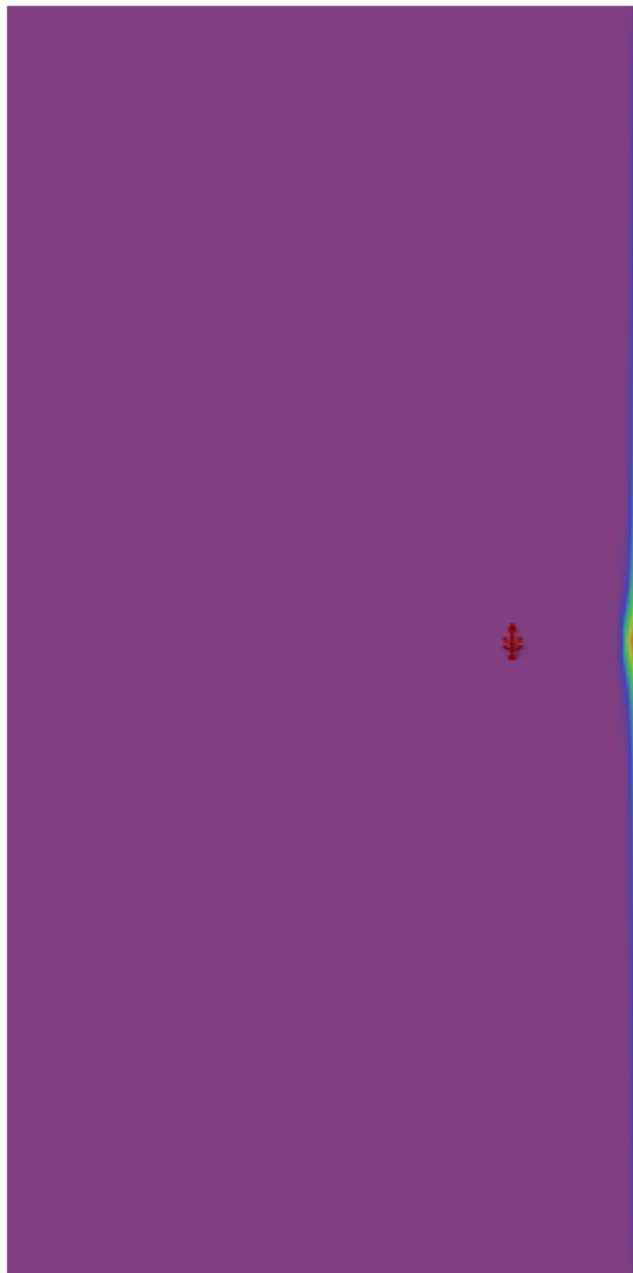
Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Κάτοψη 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration

- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000

[m]

## Υδροφορέας σχήματος V

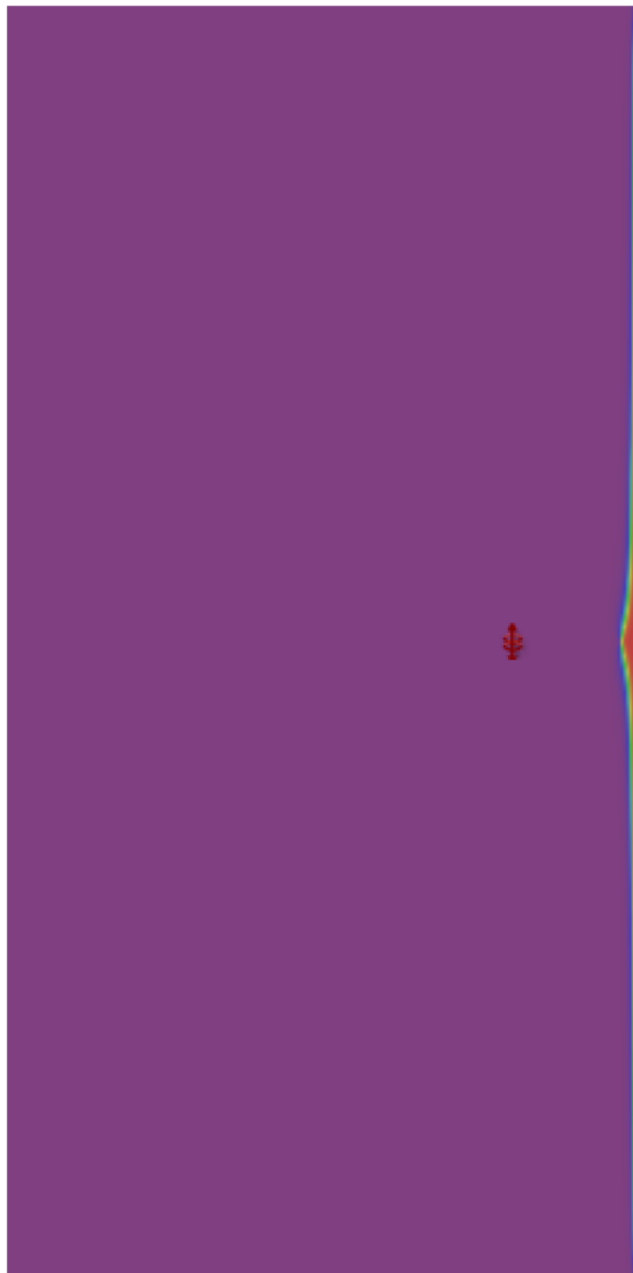
Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Κάτοψη 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration

- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

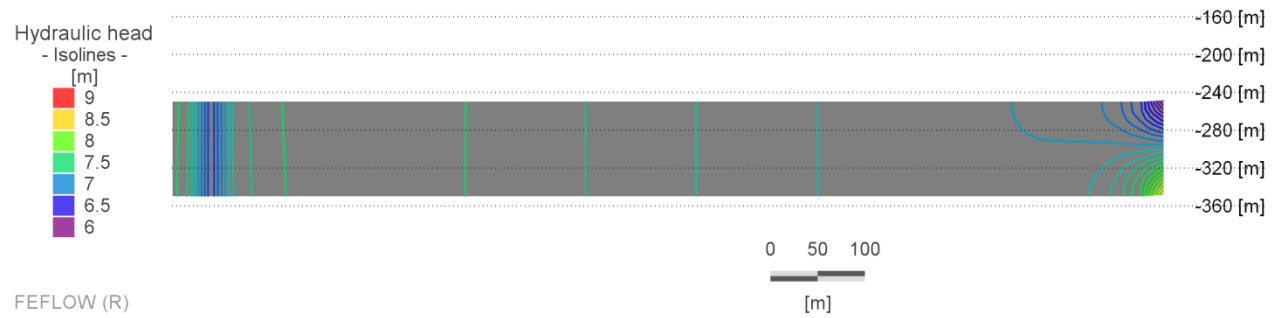
0 500 1000

[m]

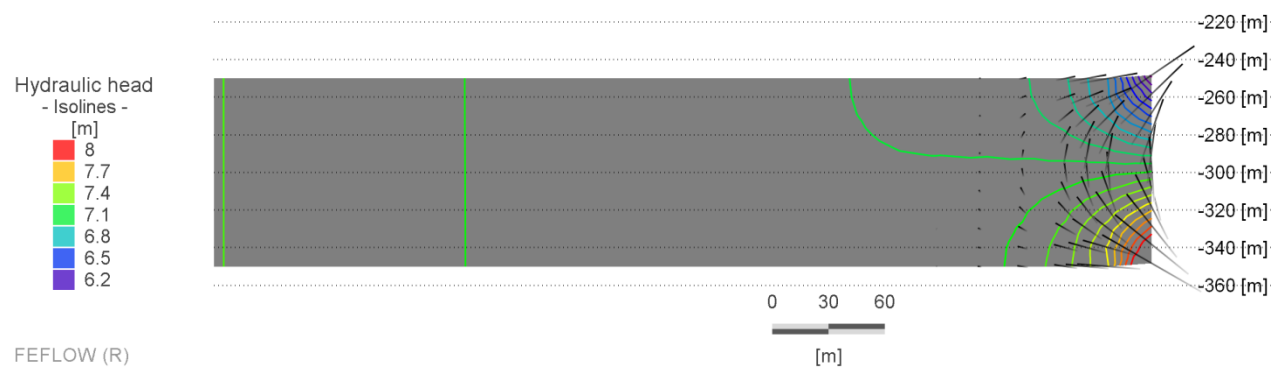
## Υδροφόρας σχήματος V

Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Τομή 4: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου



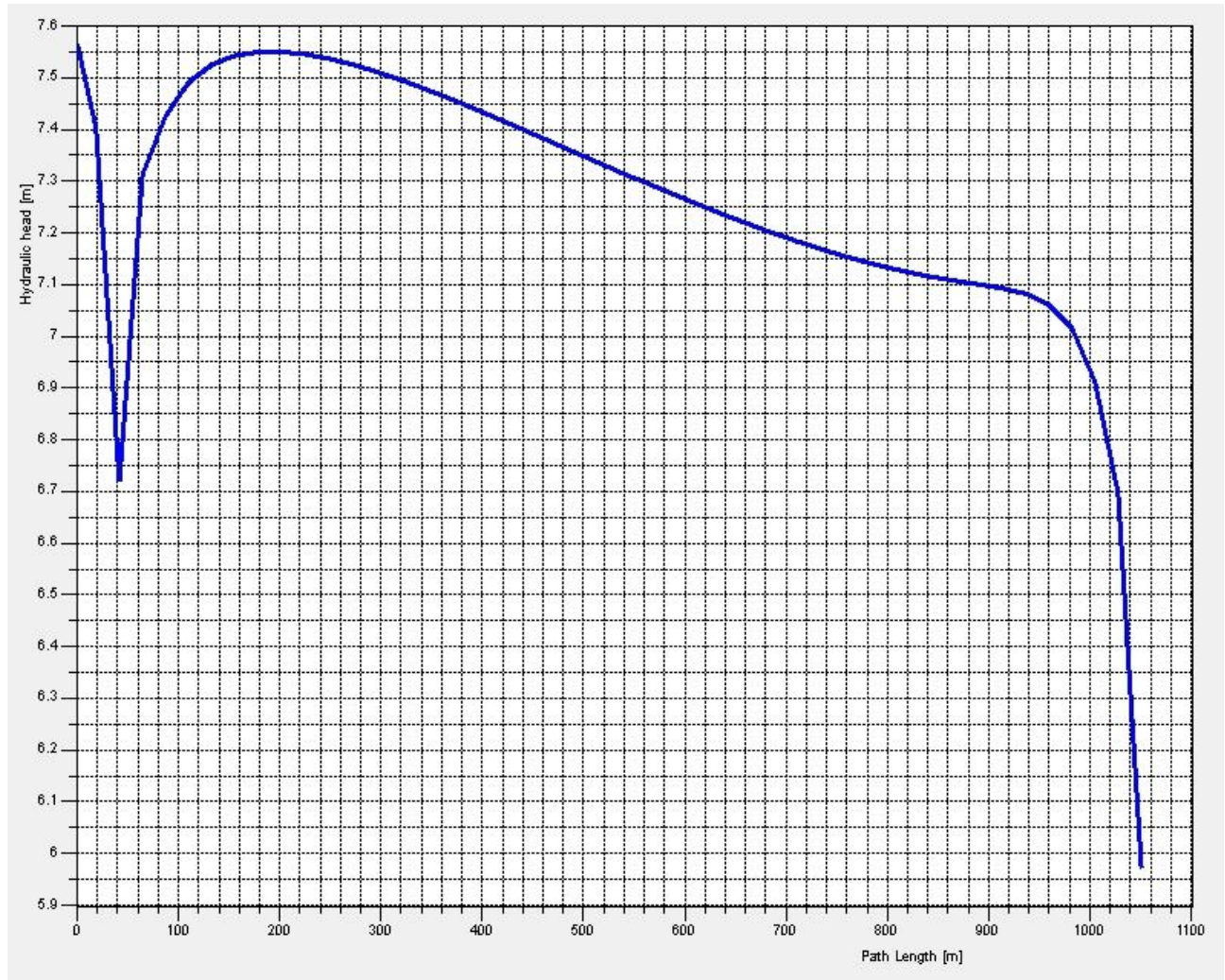
### Τομή 1: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου – Διανύσματα ταχυτήτων



## Υδροφορέας σχήματος V

Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

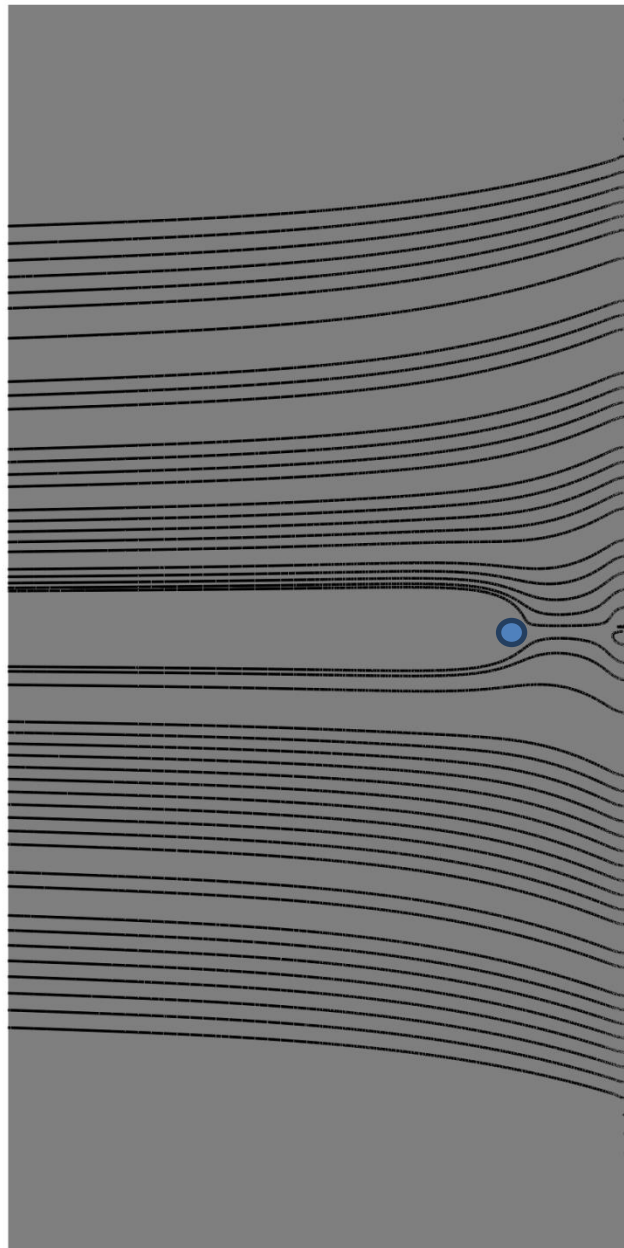
### Τομή 4: Πιεζομετρικό φορτίο συναρτήσει μήκους



## Υδροφόρας σχήματος V

Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

Κάτοψη 3: Γραμμές ροής

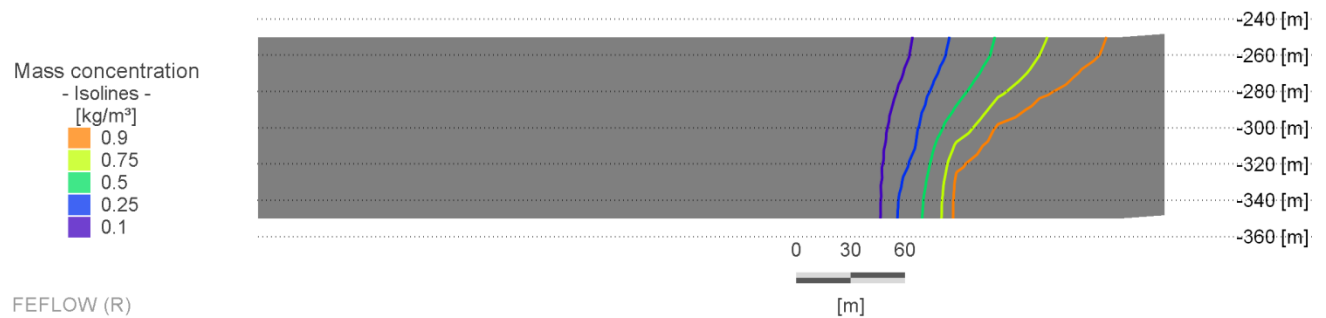


FEFLOW (R)

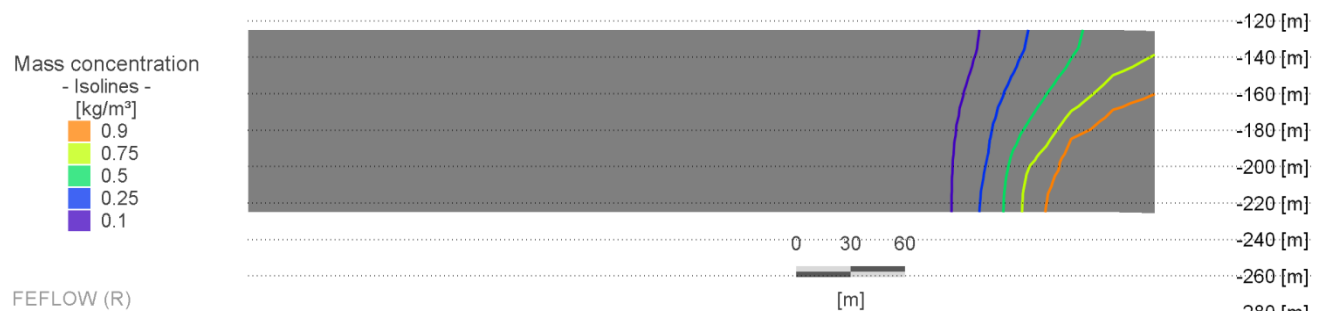
0 500 1000  
[m]

### 5.3.3. Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ άντλησης στα $\frac{3}{4}$ του μήκους του υδροφορέα – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

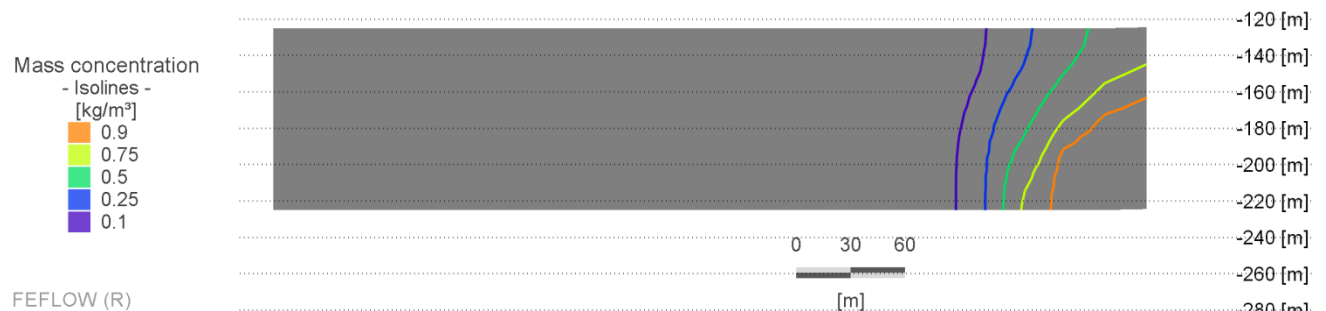
Τομή 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 3: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



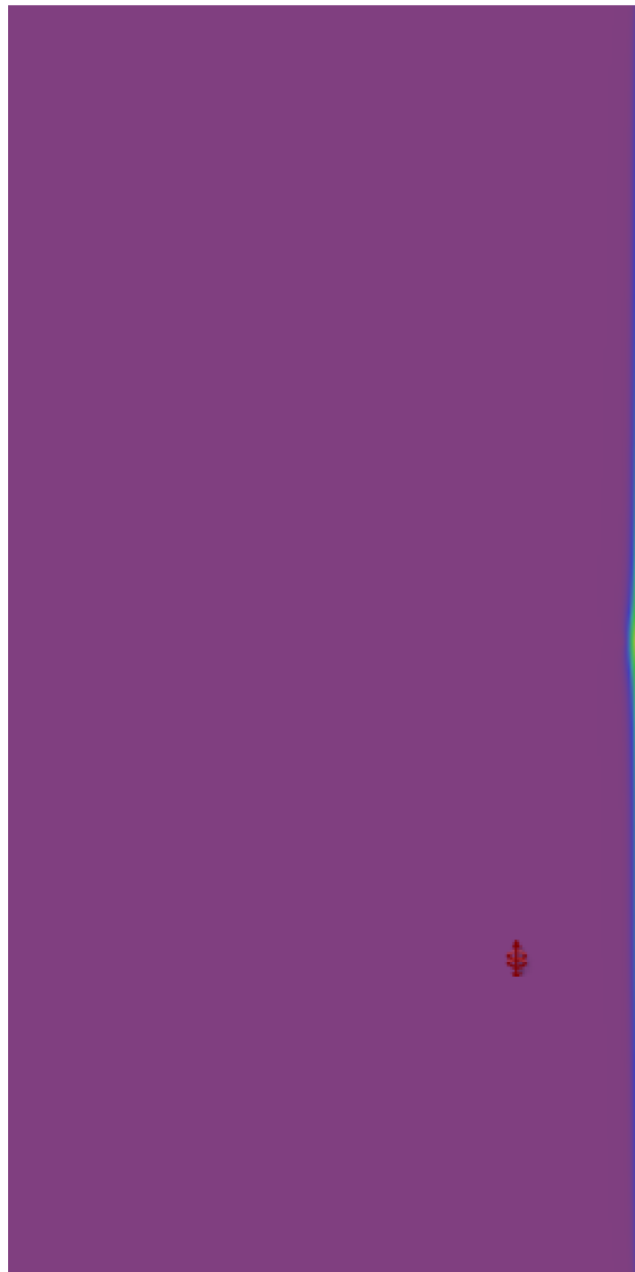
## Υδροφορέας σχήματος V

Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Κάτοψη 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration  
- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000



[m]

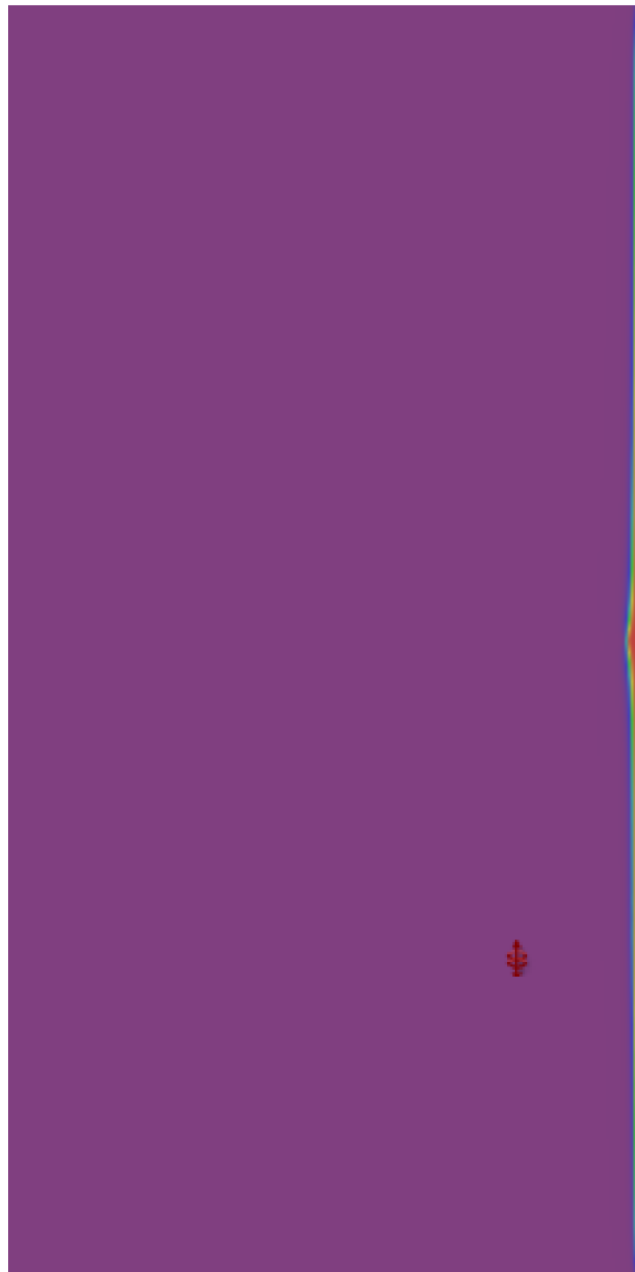
## Υδροφορέας σχήματος V

Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Κάτοψη 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration  
- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000



[m]



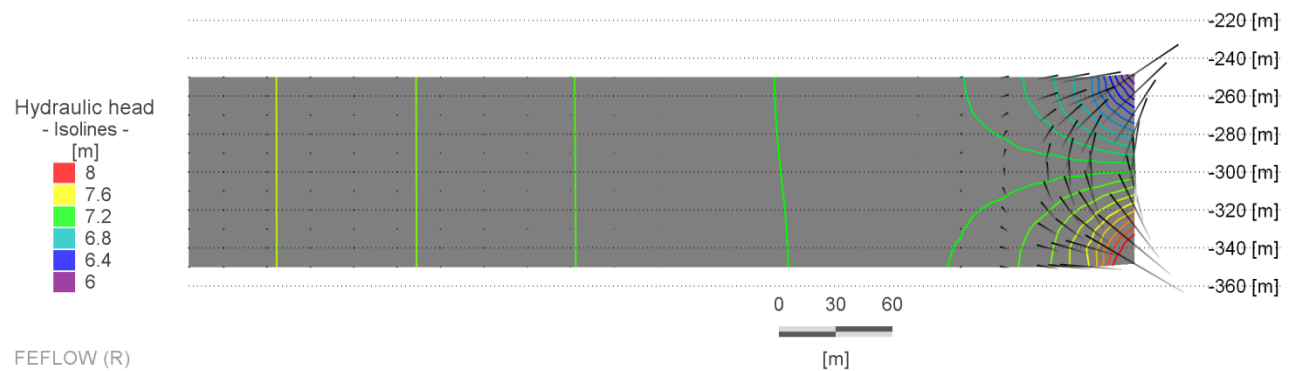
## Υδροφόρας σχήματος V

Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Τομή 4: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου



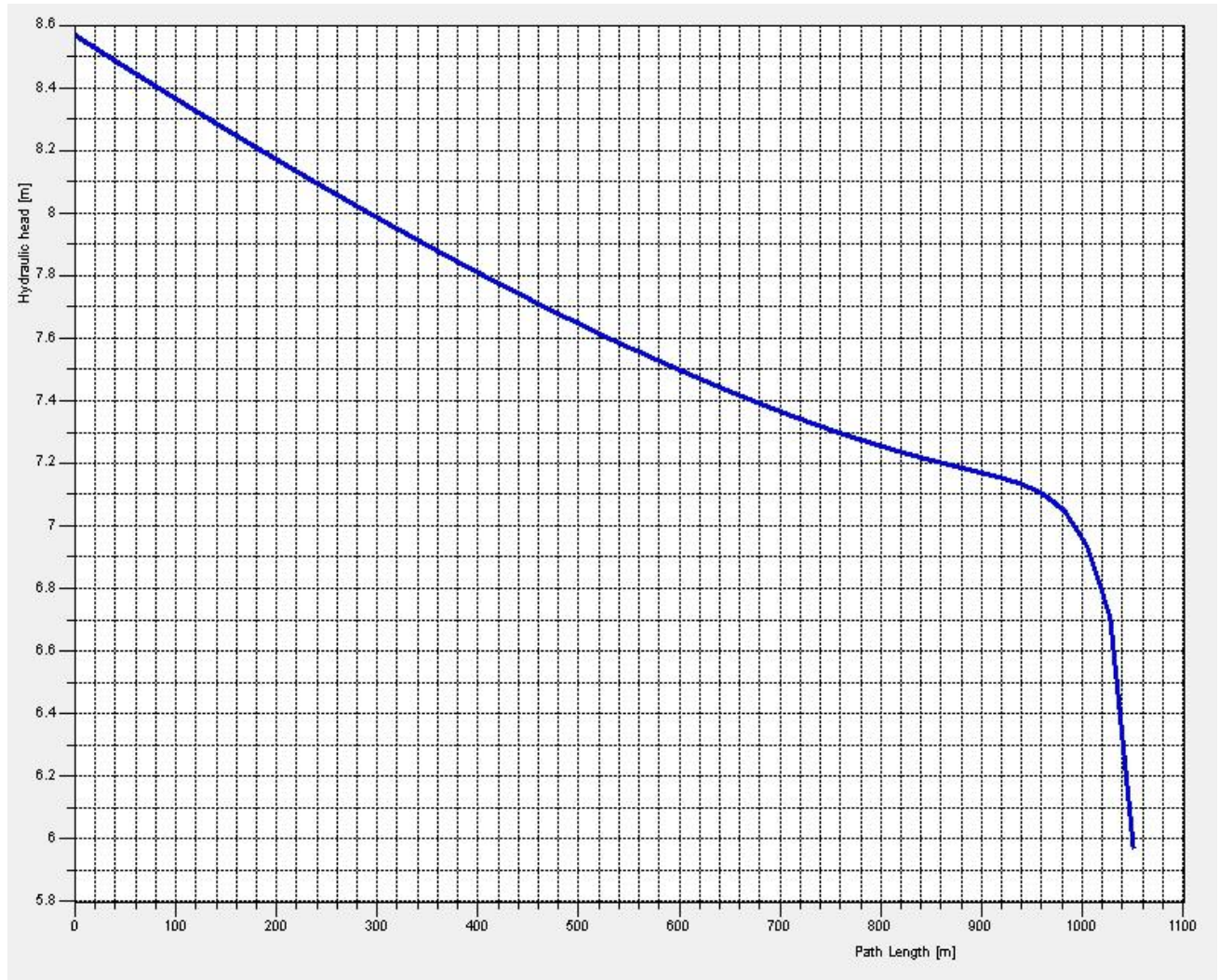
### Τομή 1: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου – Διανύσματα ταχυτήτων



## Υδροφόρας σχήματος V

Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

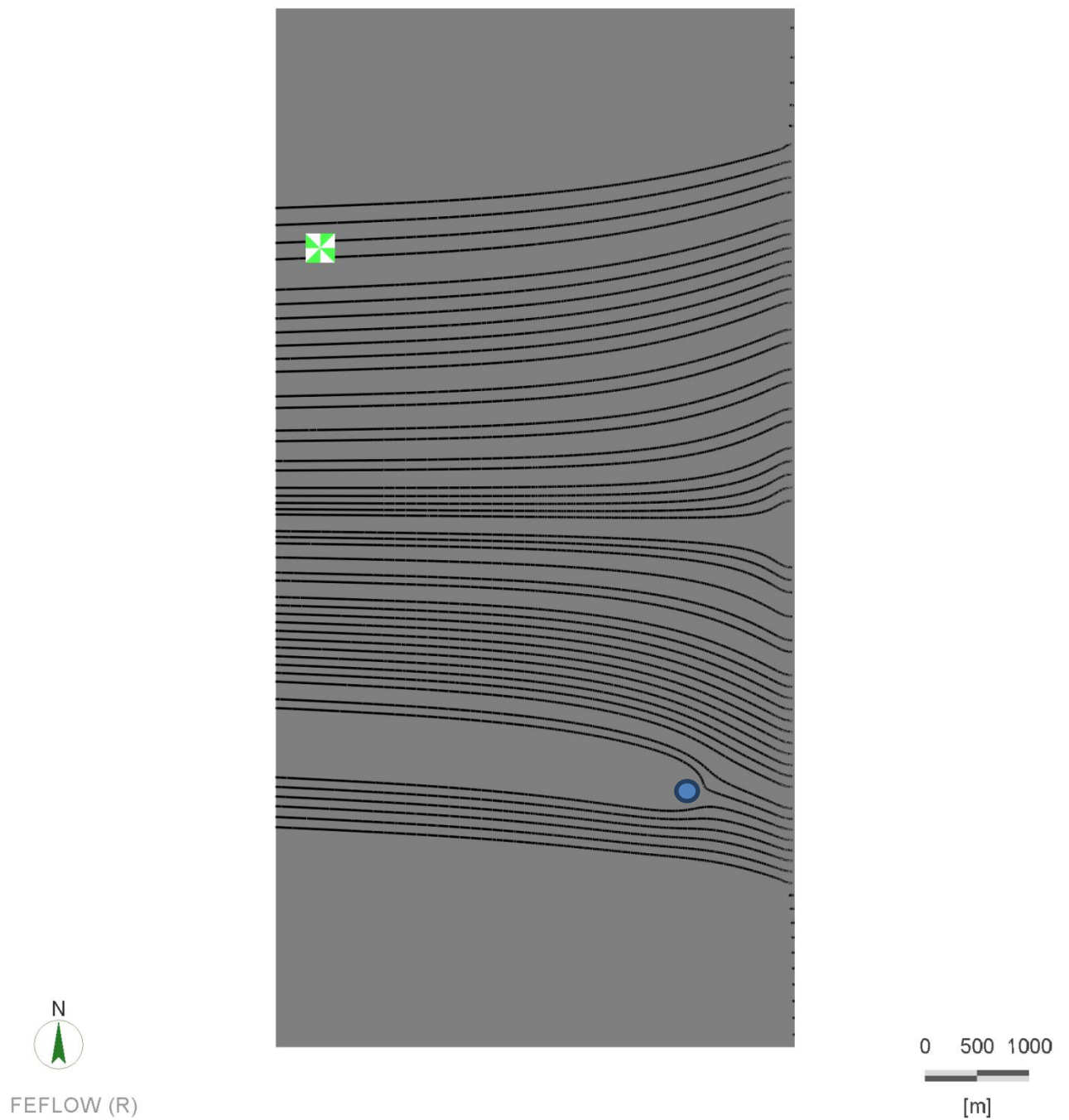
### Τομή 4: Πιεζομετρικό φορτίο συναρτήσει μήκους



## Υδροφόρας σχήματος V

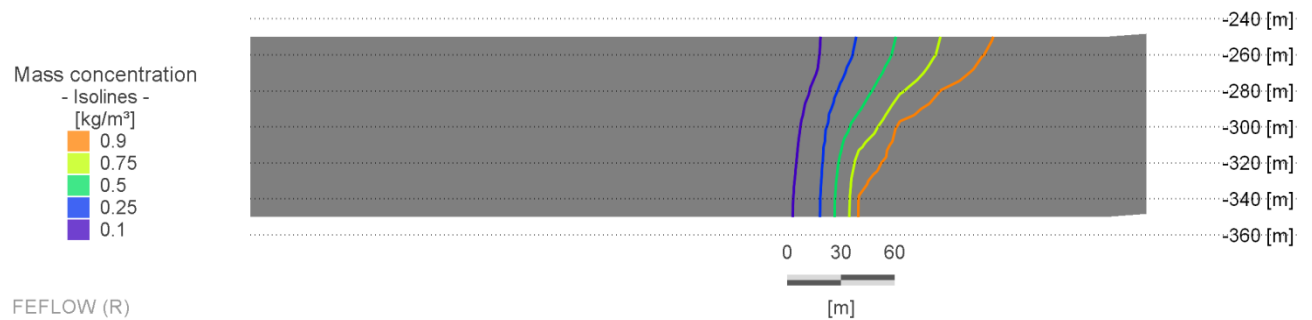
Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

Κάτοψη 3: Γραμμές ροής

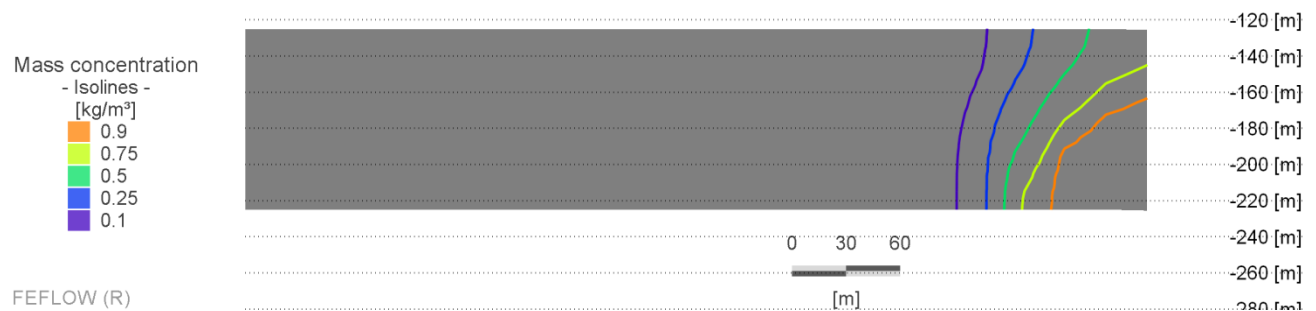


### 5.3.4. Διάταξη τεσσάρων (4) φρεάτων άντλησης σε σχηματισμό ρόμβου στο μέσον του υδροφορέα – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

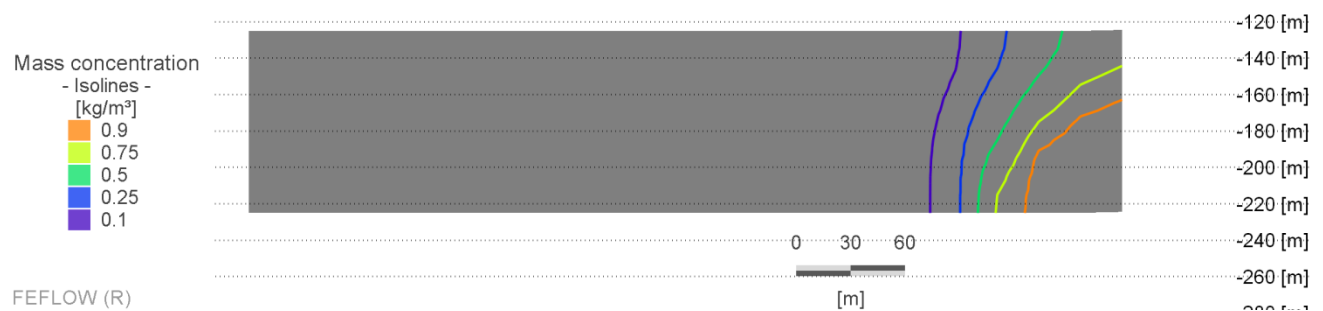
Τομή 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 3: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



## Υδροφορέας σχήματος V

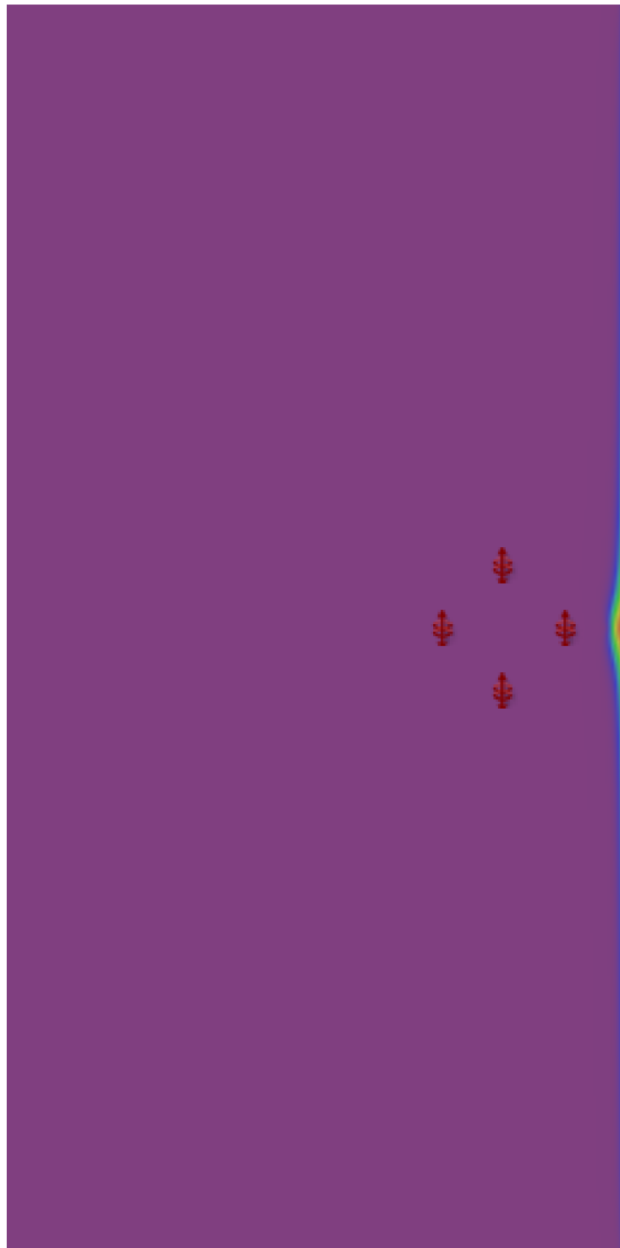
Τέσσερα (4) φρέατα άντλησης σε διάταξη ρόμβου – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Κάτοψη 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration

- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000

[m]

## Υδροφορέας σχήματος V

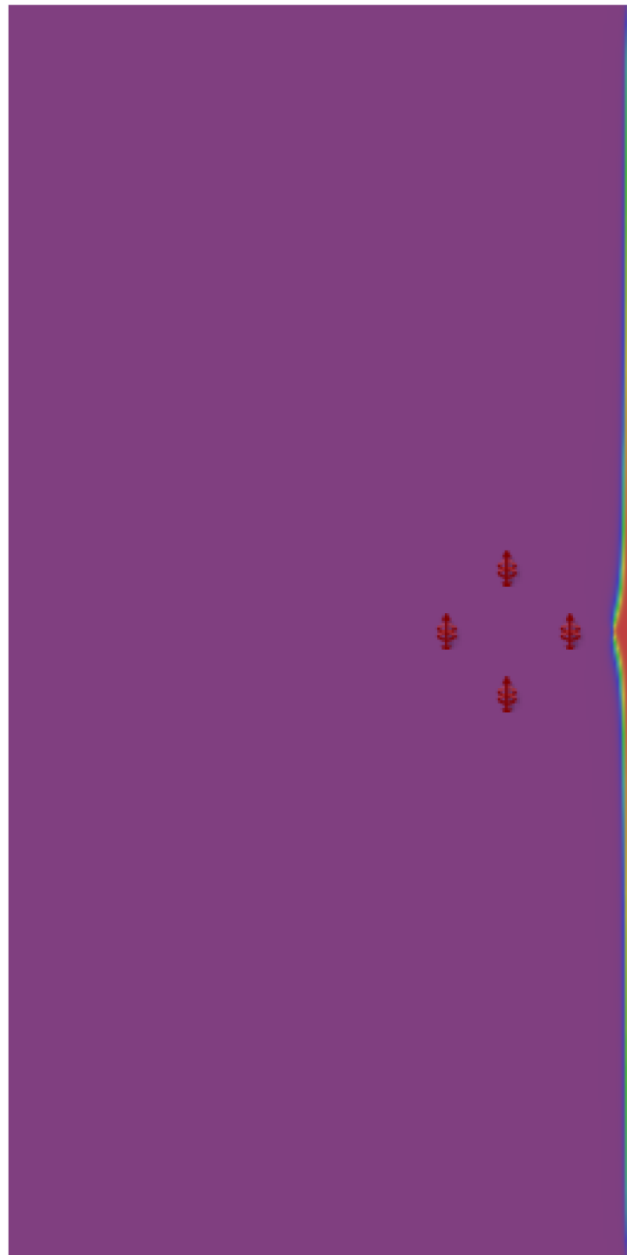
Τέσσερα (4) φρέατα άντλησης σε διάταξη ρόμβου – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Κάτοψη 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration

- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

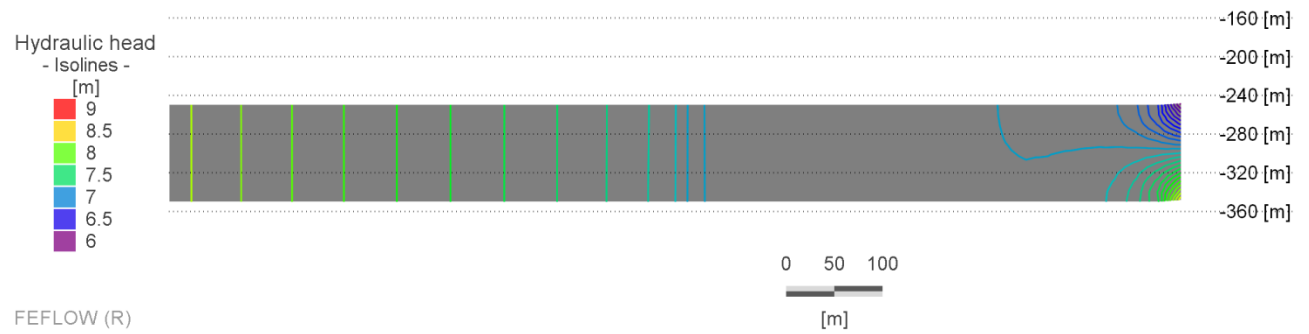
0 500 1000

[m]

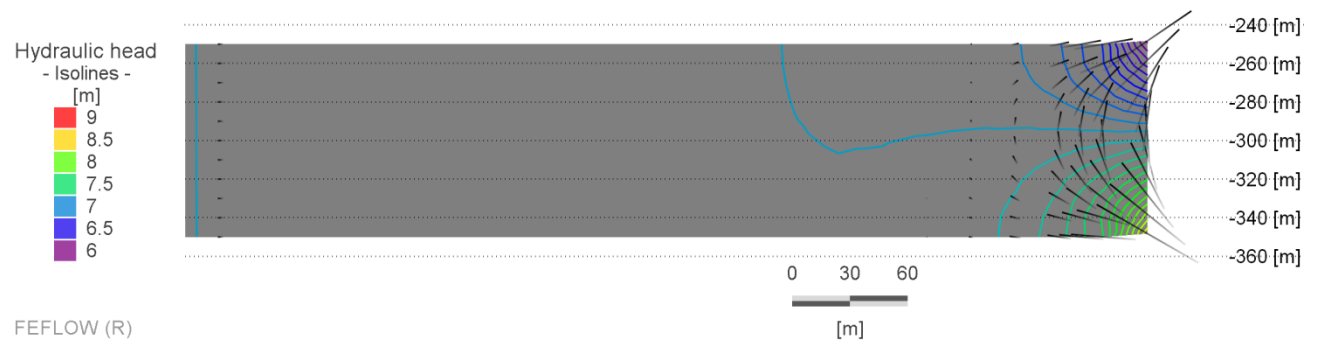
## Υδροφορέας σχήματος V

Τέσσερα (4) φρέατα άντλησης σε διάταξη ρόμβου – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Τομή 4: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου



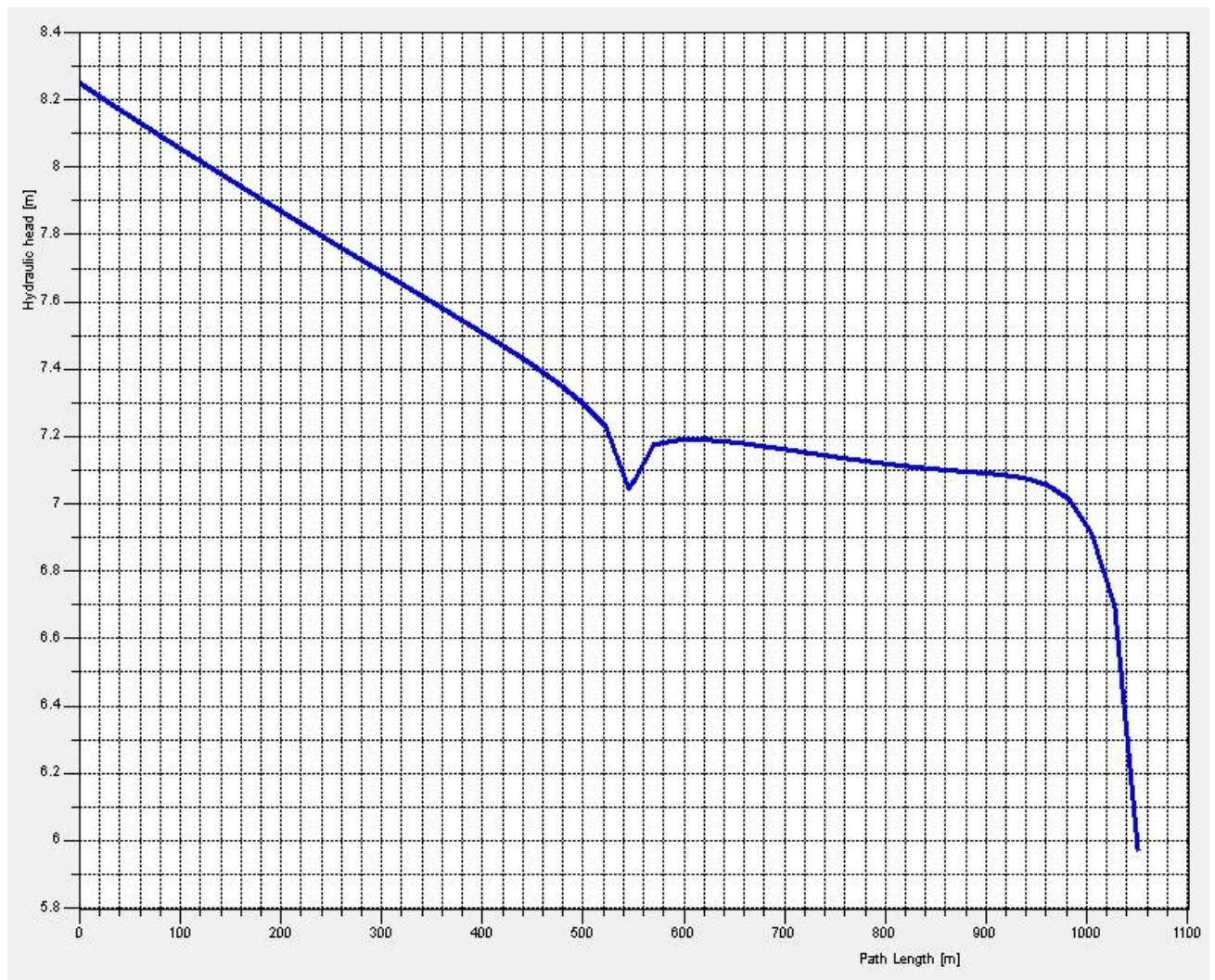
### Τομή 1: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου – Διανύσματα ταχυτήτων



## Υδροφορέας σχήματος V

Τέσσερα (4) φρέατα άντλησης σε διάταξη ρόμβου – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Τομή 4: Πιεζομετρικό φορτίο συναρτήσει μήκους

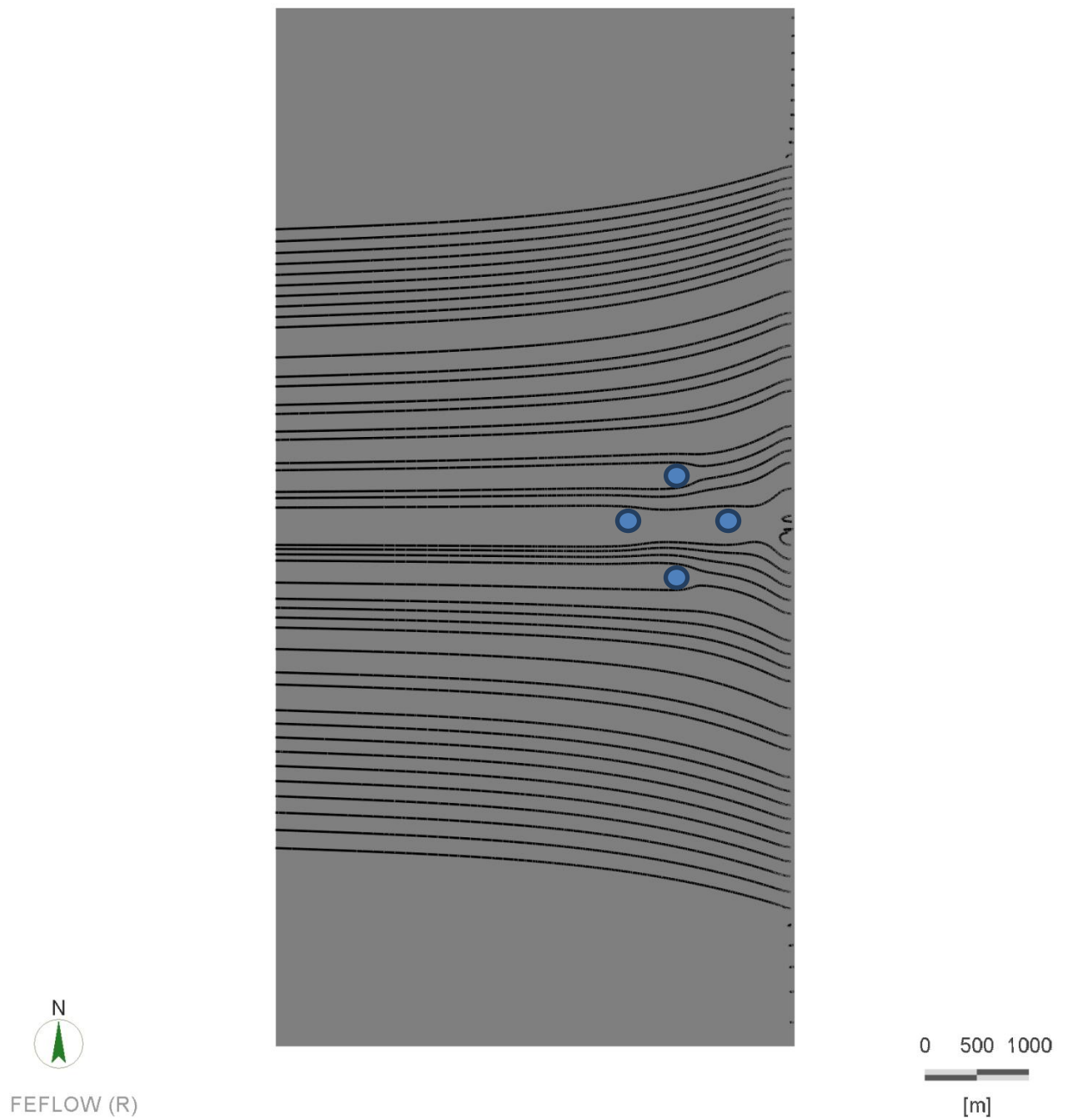




## Υδροφόρας σχήματος V

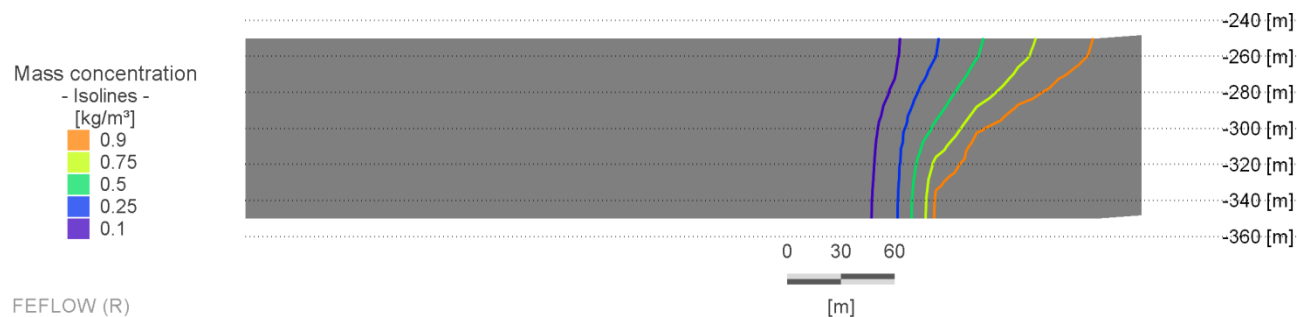
Τέσσερα (4) φρέατα άντλησης σε διάταξη ρόμβου – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

Κάτοψη 3: Γραμμές ροής

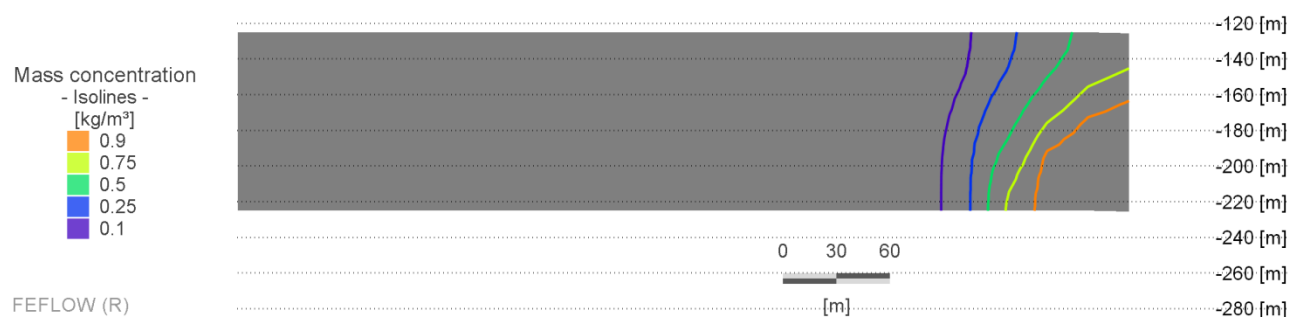


### 5.3.5. Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

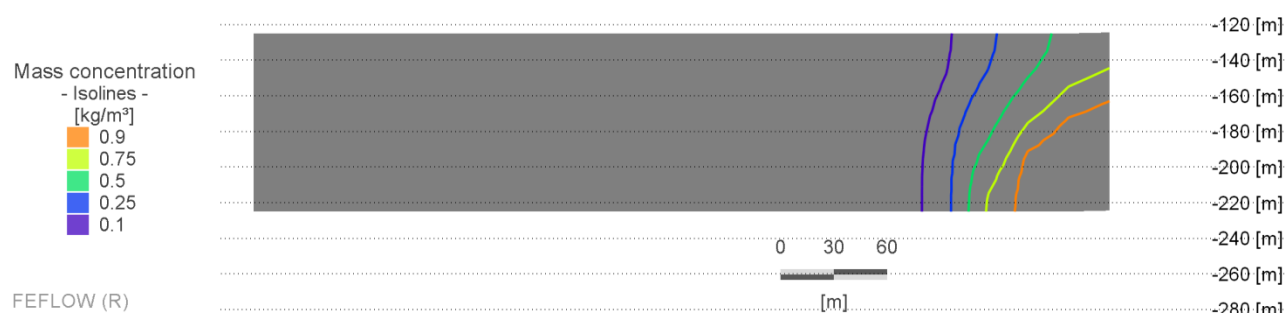
Τομή 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 3: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



## Υδροφορέας σχήματος V

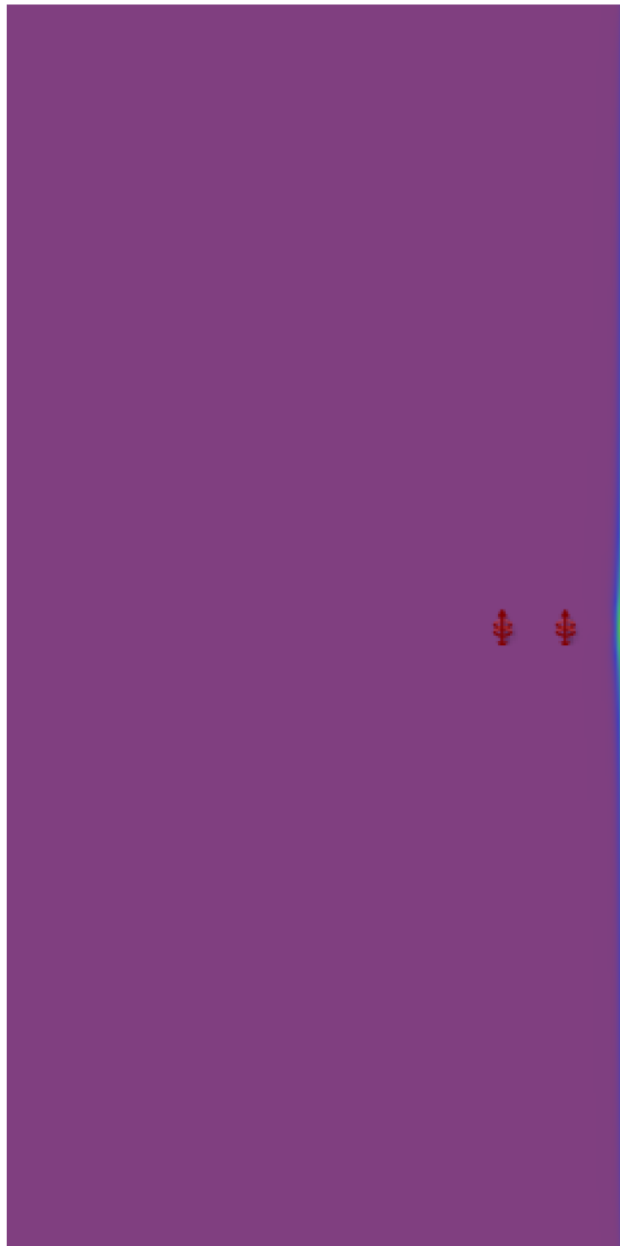
Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

### Κάτοψη 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration

- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000

[m]

## Υδροφορέας σχήματος V

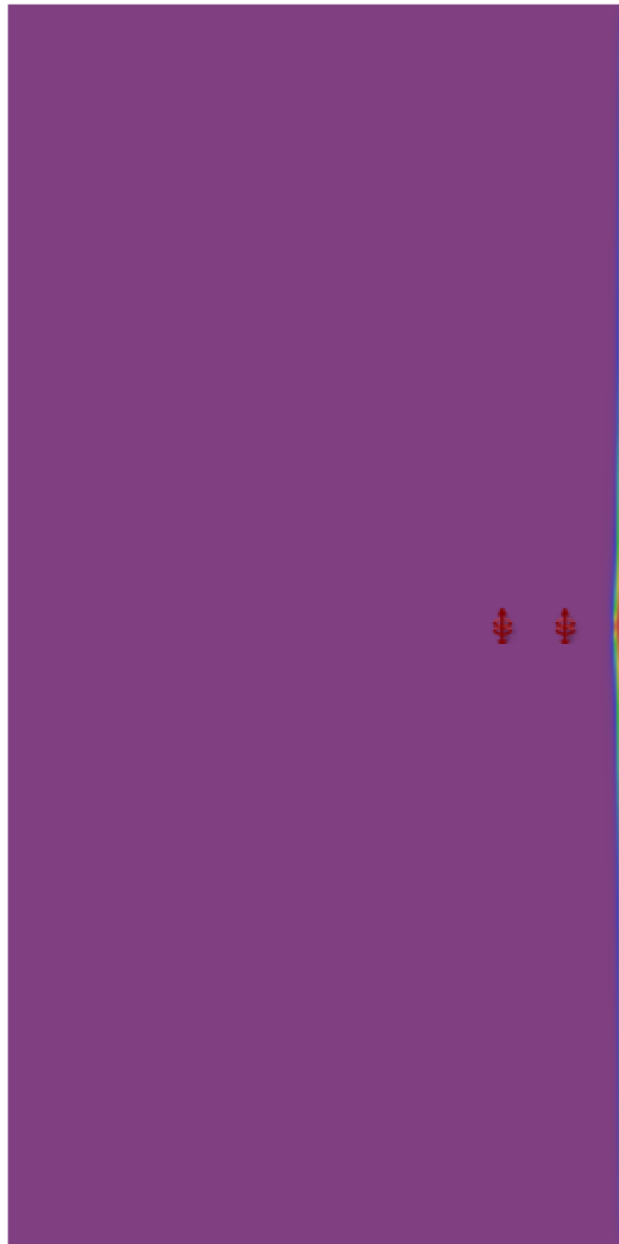
Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

### Κάτοψη 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration

- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

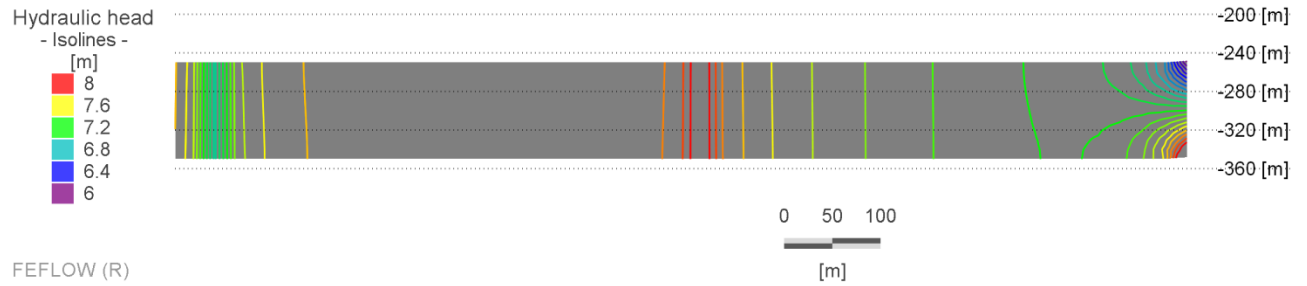
0 500 1000

[m]

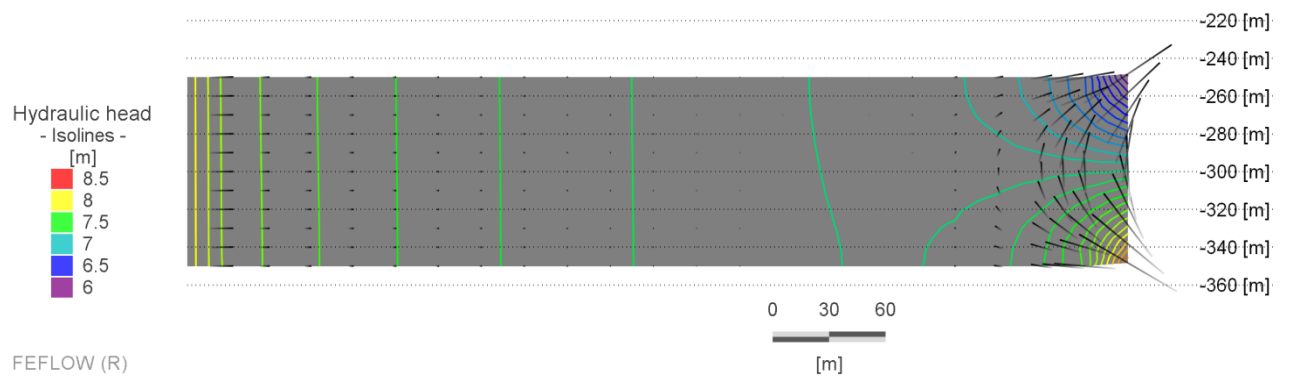
## Υδροφόρας σχήματος V

Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

### Τομή 4: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου



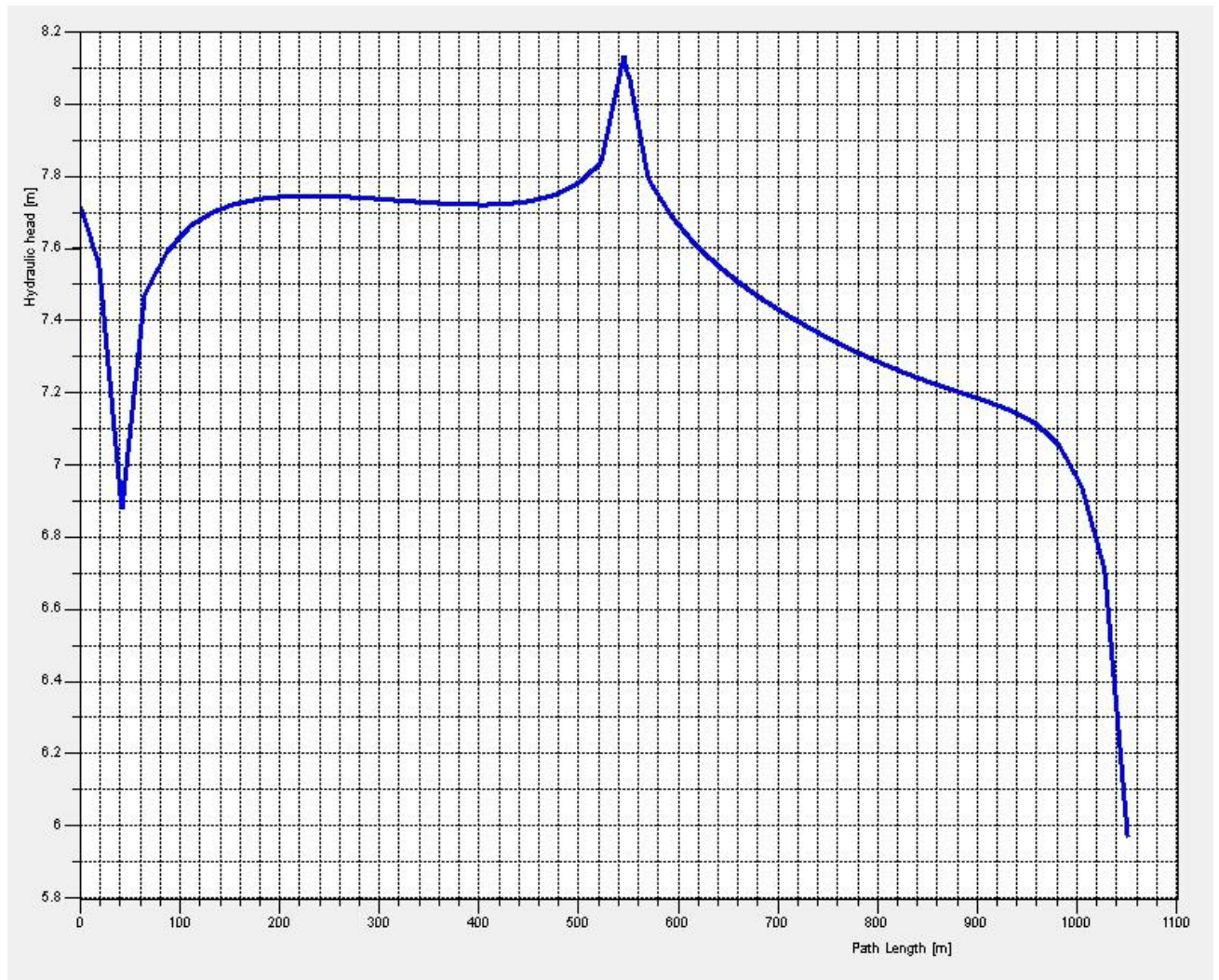
### Τομή 1: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου – Διανύσματα ταχυτήτων



## Υδροφόρας σχήματος V

Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

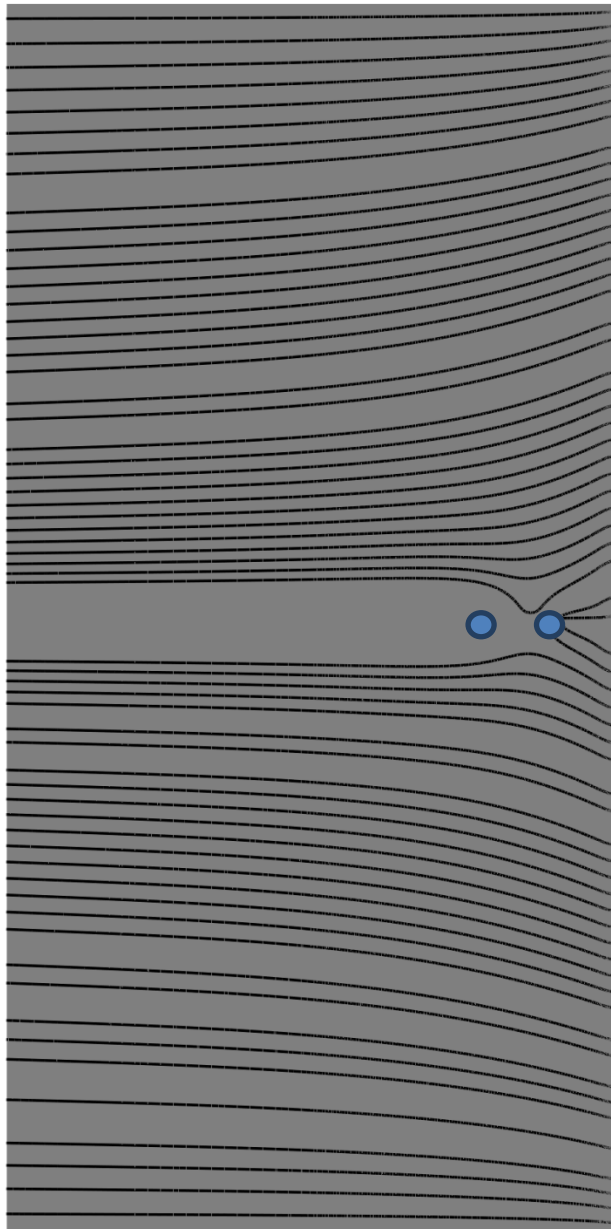
### Τομή 4: Πιεζομετρικό φορτίο συναρτήσει μήκους



## Υδροφόρας σχήματος V

Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

Κάτοψη 3: Γραμμές ροής



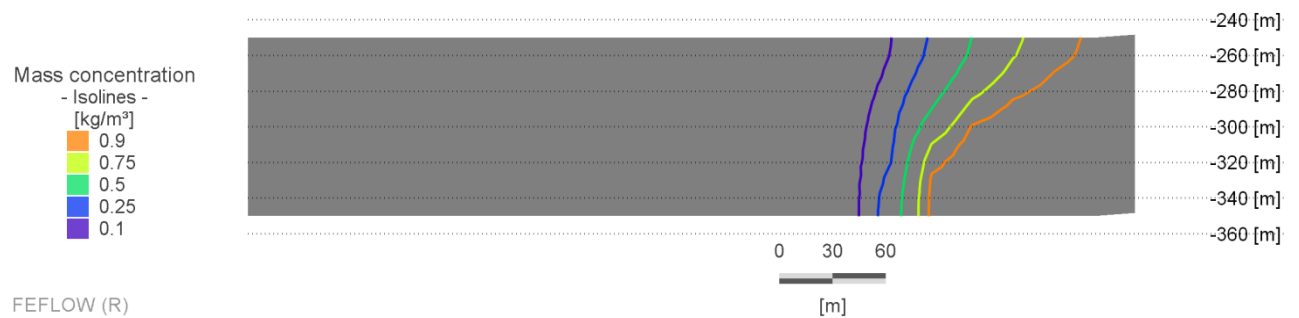
FEFLOW (R)

0 500 1000

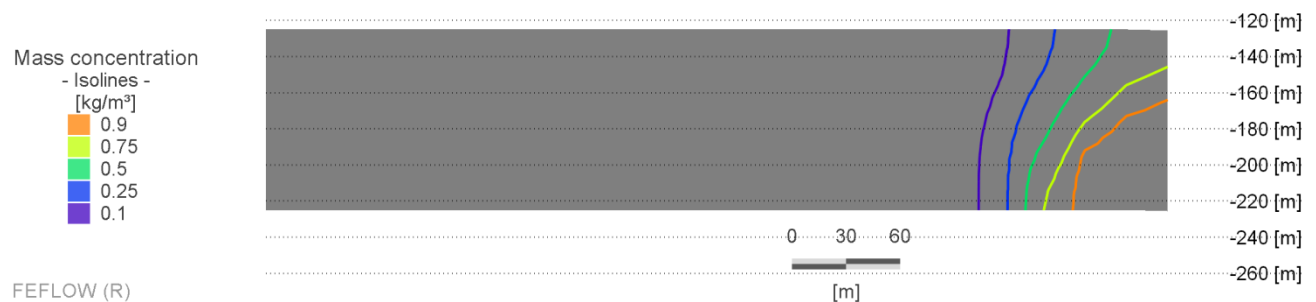
[m]

### 5.3.6. Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ άντλησης στα $\frac{3}{4}$ του μήκους του υδροφορέα και αντίστοιχα ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού στο ίδιο μήκος, ενδιάμεσα με την ακτογραμμή

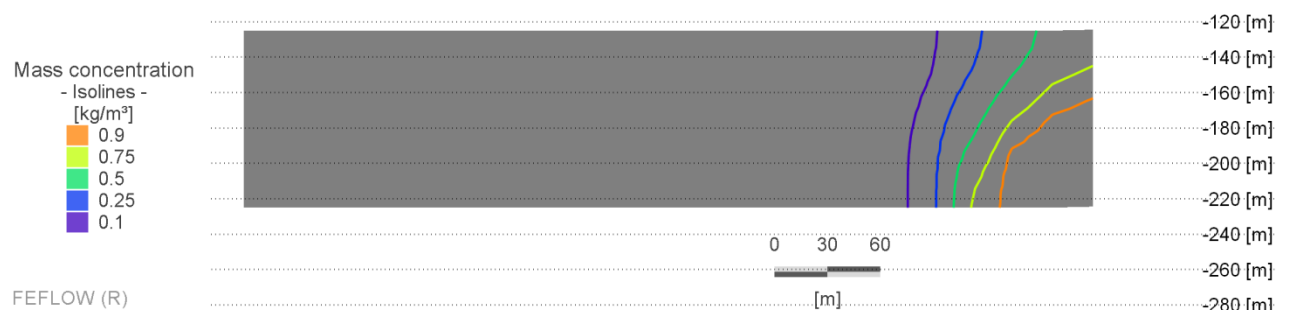
Τομή 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 3: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη





## Υδροφορέας σχήματος V

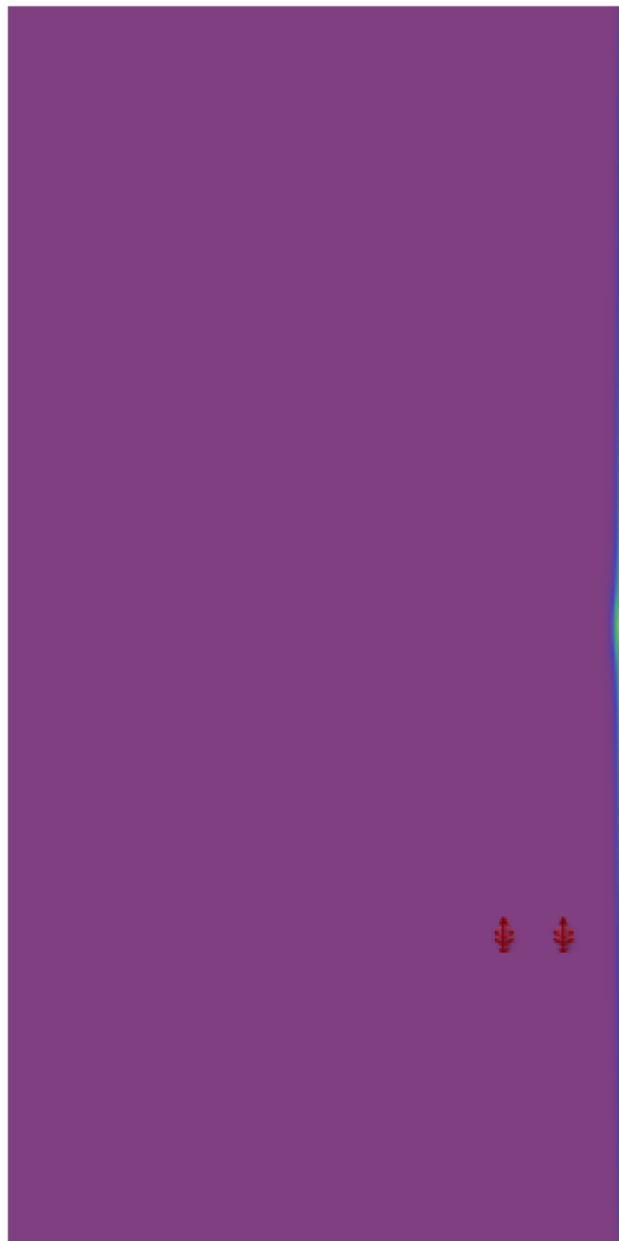
Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ άντλησης – Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ εμπλουτισμού

### Κάτοψη 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration

- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000

[m]

## Υδροφορέας σχήματος V

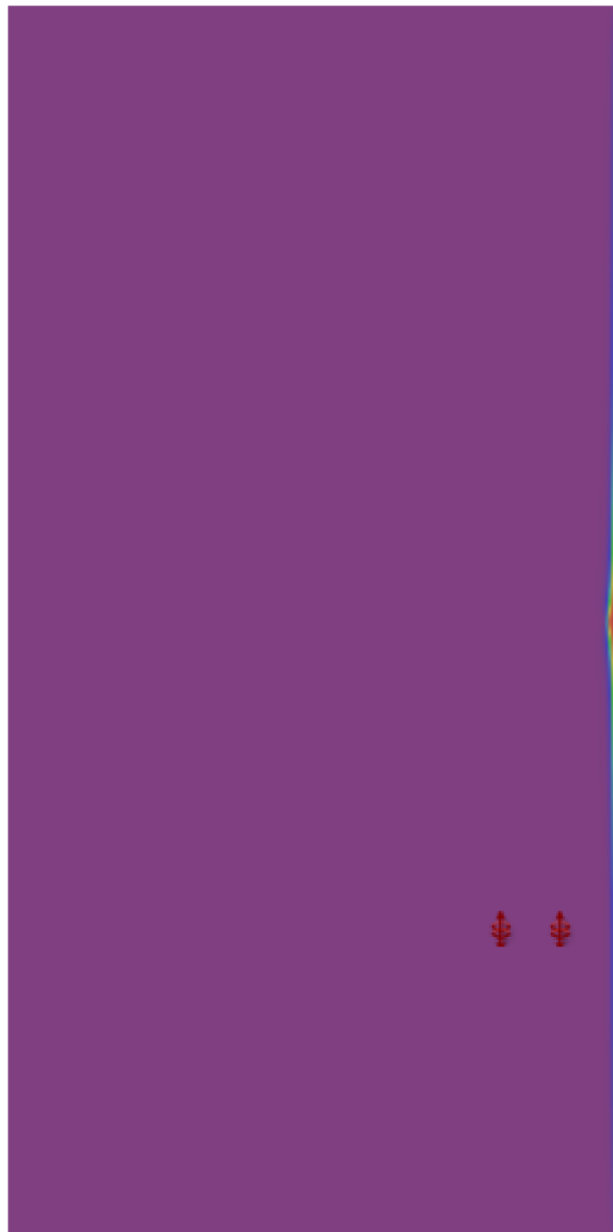
Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ άντλησης – Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ εμπλουτισμού

### Κάτοψη 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration

- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

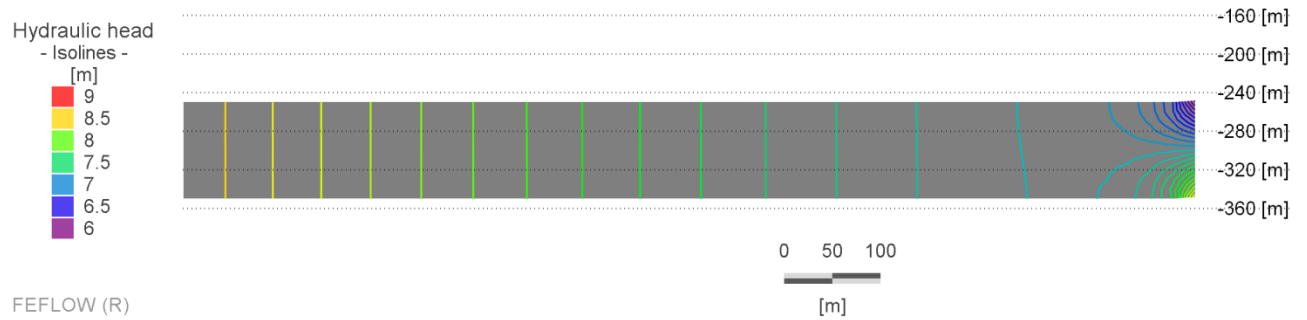
0 500 1000

[m]

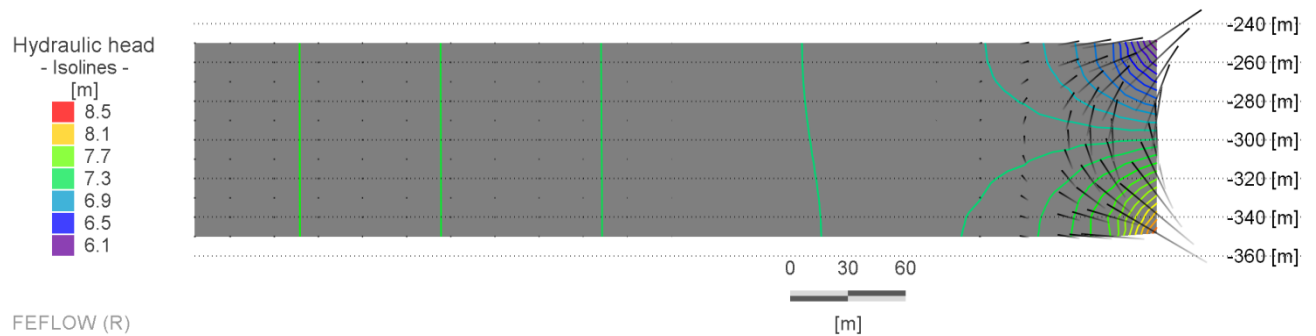
## Υδροφόρας σχήματος V

Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ άντλησης – Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ εμπλουτισμού

### Τομή 4: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου



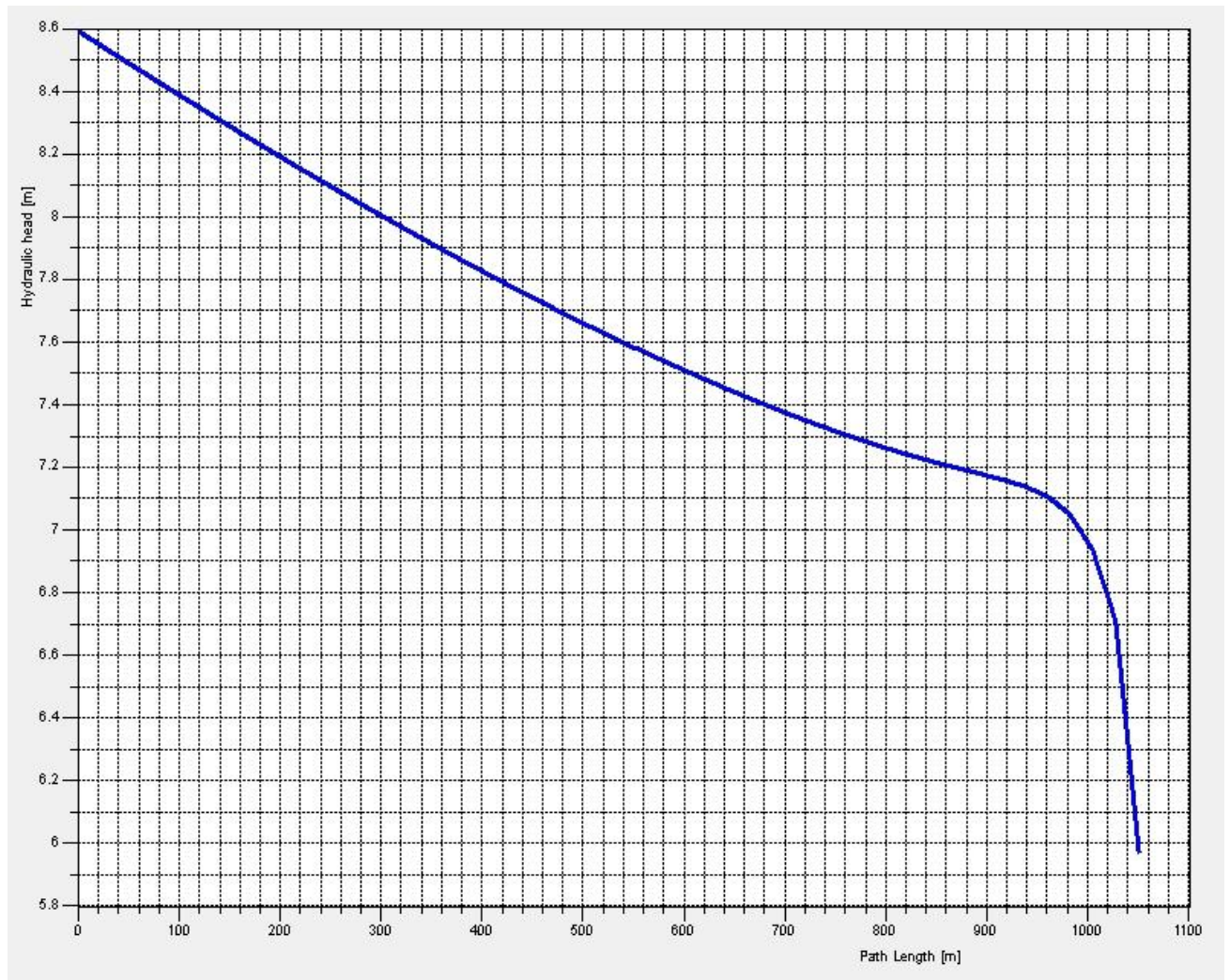
### Τομή 1: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου – Διανύσματα ταχυτήτων



## Υδροφόρας σχήματος V

Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ άντλησης – Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ εμπλουτισμού

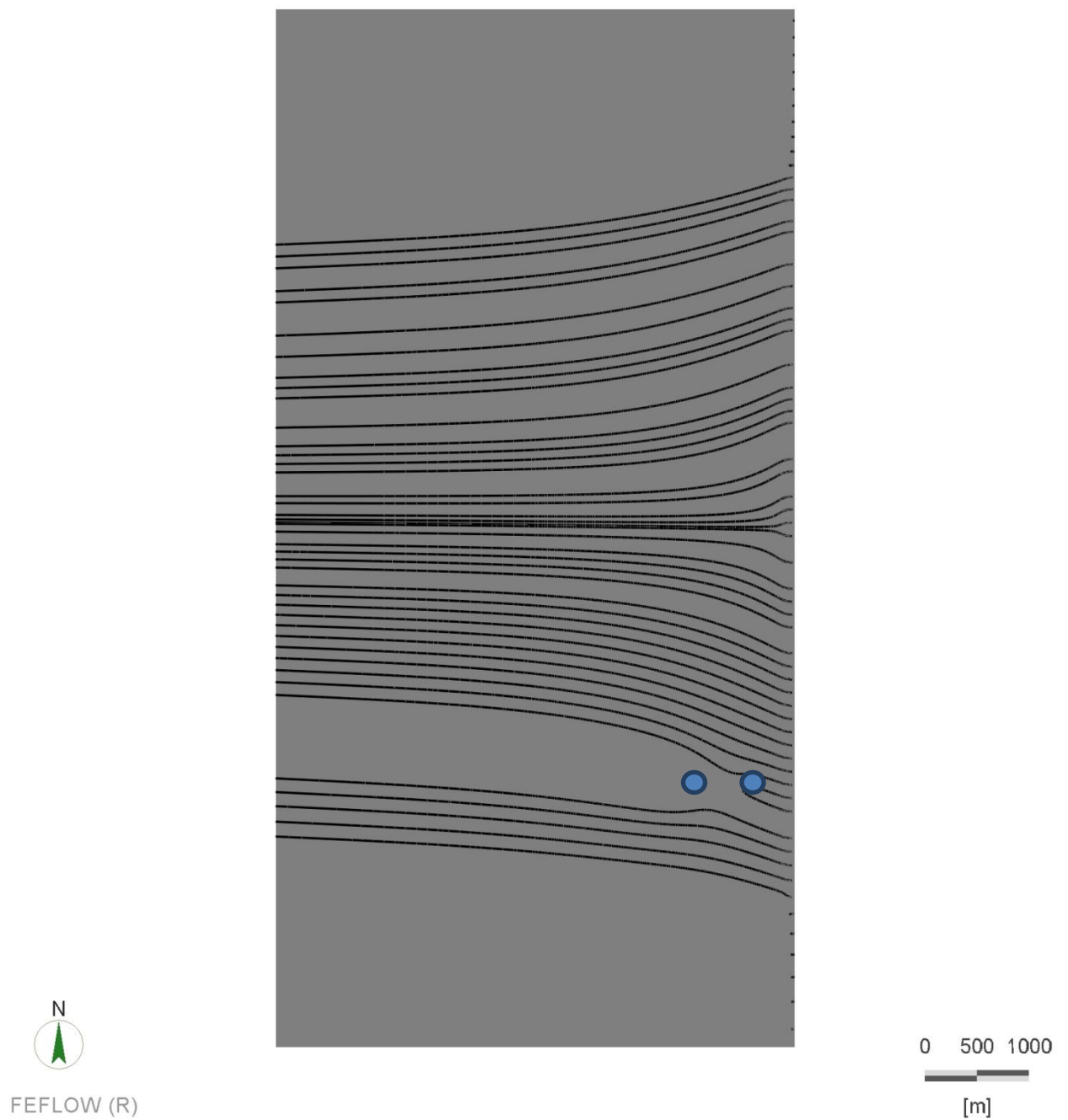
### Τομή 4: Πιεζομετρικό φορτίο συναρτήσει μήκους



## Υδροφόρας σχήματος V

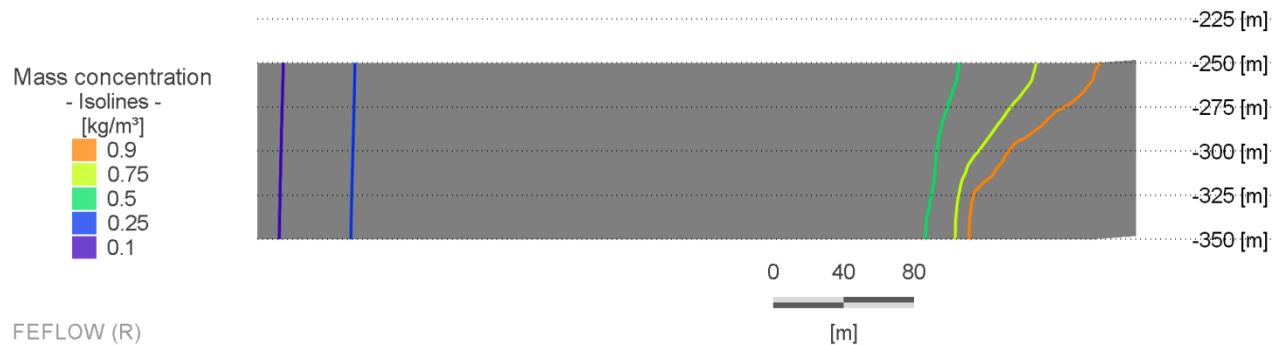
Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ άντλησης – Ένα (1) ασύμμετρο φρέαρ εμπλουτισμού

### Κάτοψη 3: Γραμμές ροής

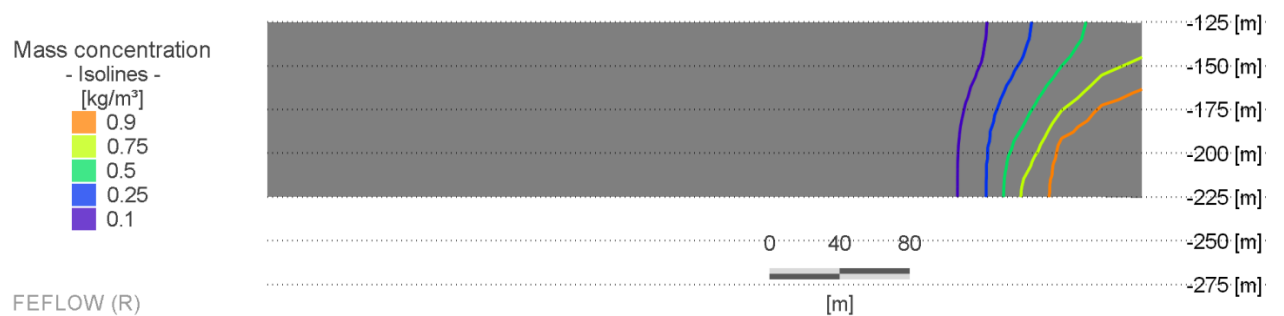


### 5.3.7. Διάταξη τεσσάρων (4) φρεάτων άντλησης σε σχηματισμό ρόμβου στο μέσον του υδροφορέα – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

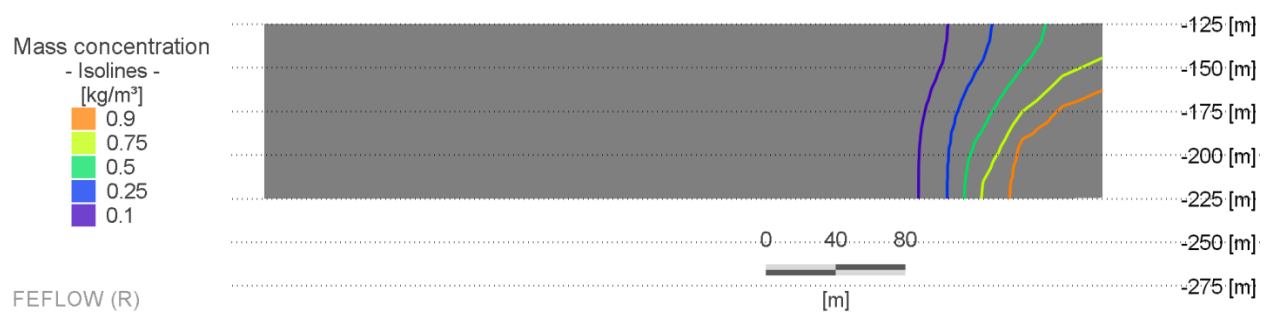
Τομή 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 3: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



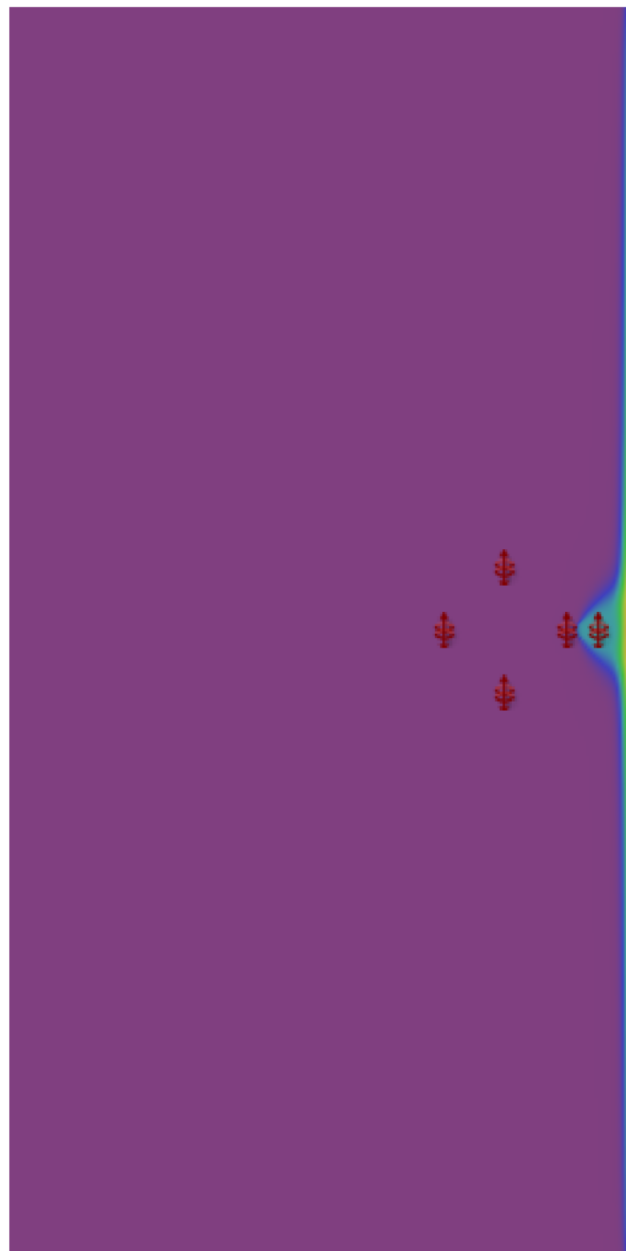
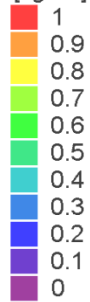
## Υδροφορέας σχήματος V

Τέσσερα (4) φρέατα άντλησης σε διάταξη ρόμβου – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

### Κάτοψη 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration  
- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000

[m]

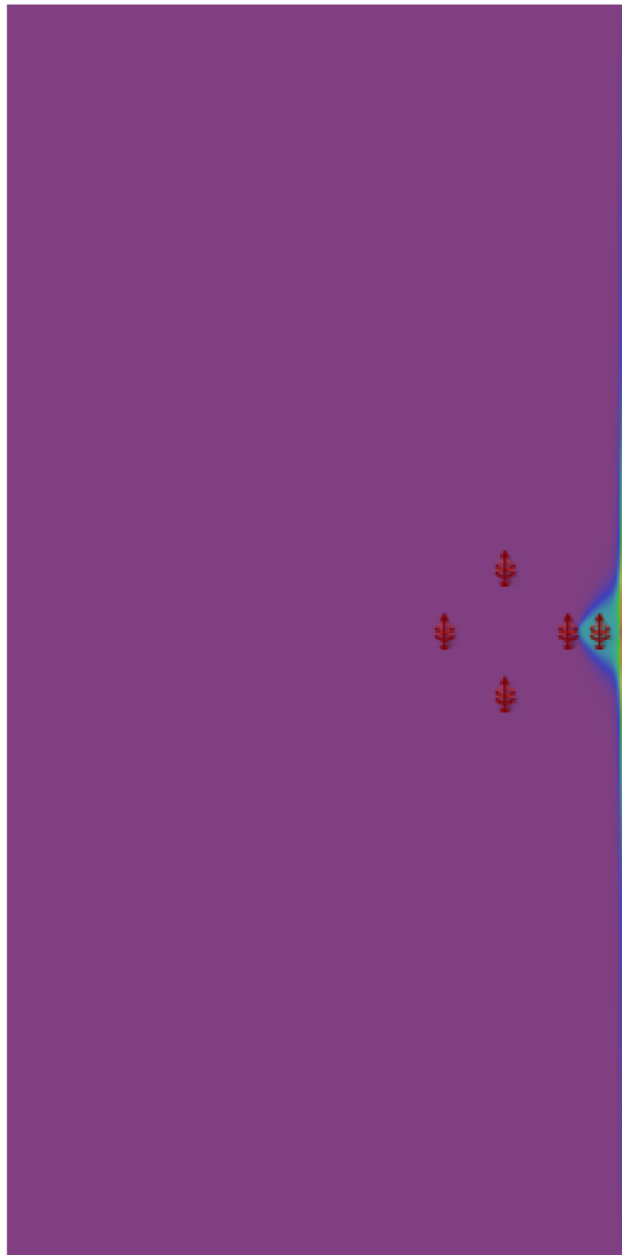
## Υδροφορέας σχήματος V

Τέσσερα (4) φρέατα άντλησης σε διάταξη ρόμβου – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

### Κάτοψη 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration  
- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000

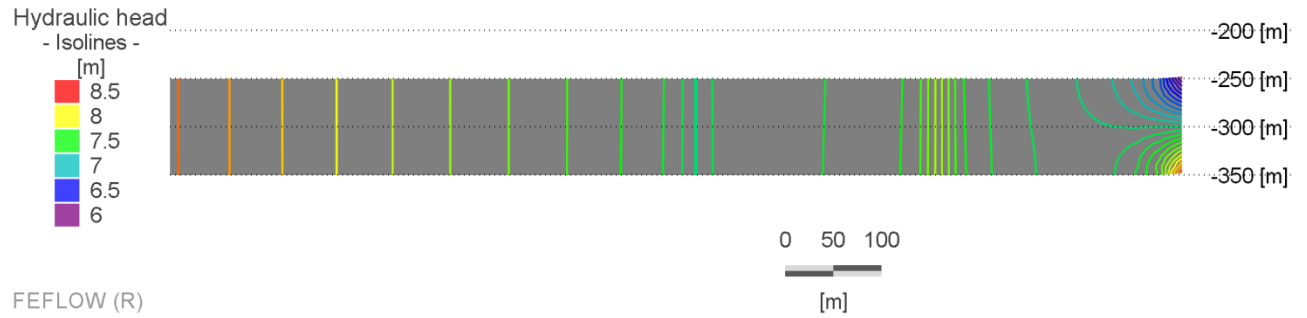
[m]



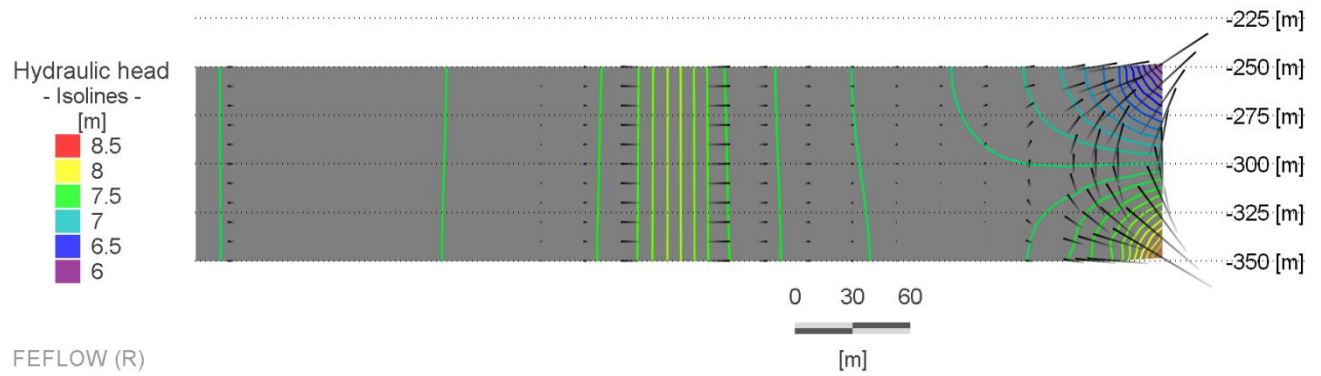
## Υδροφόρας σχήματος V

Τέσσερα (4) φρέατα άντλησης σε διάταξη ρόμβου – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

### Τομή 4: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου



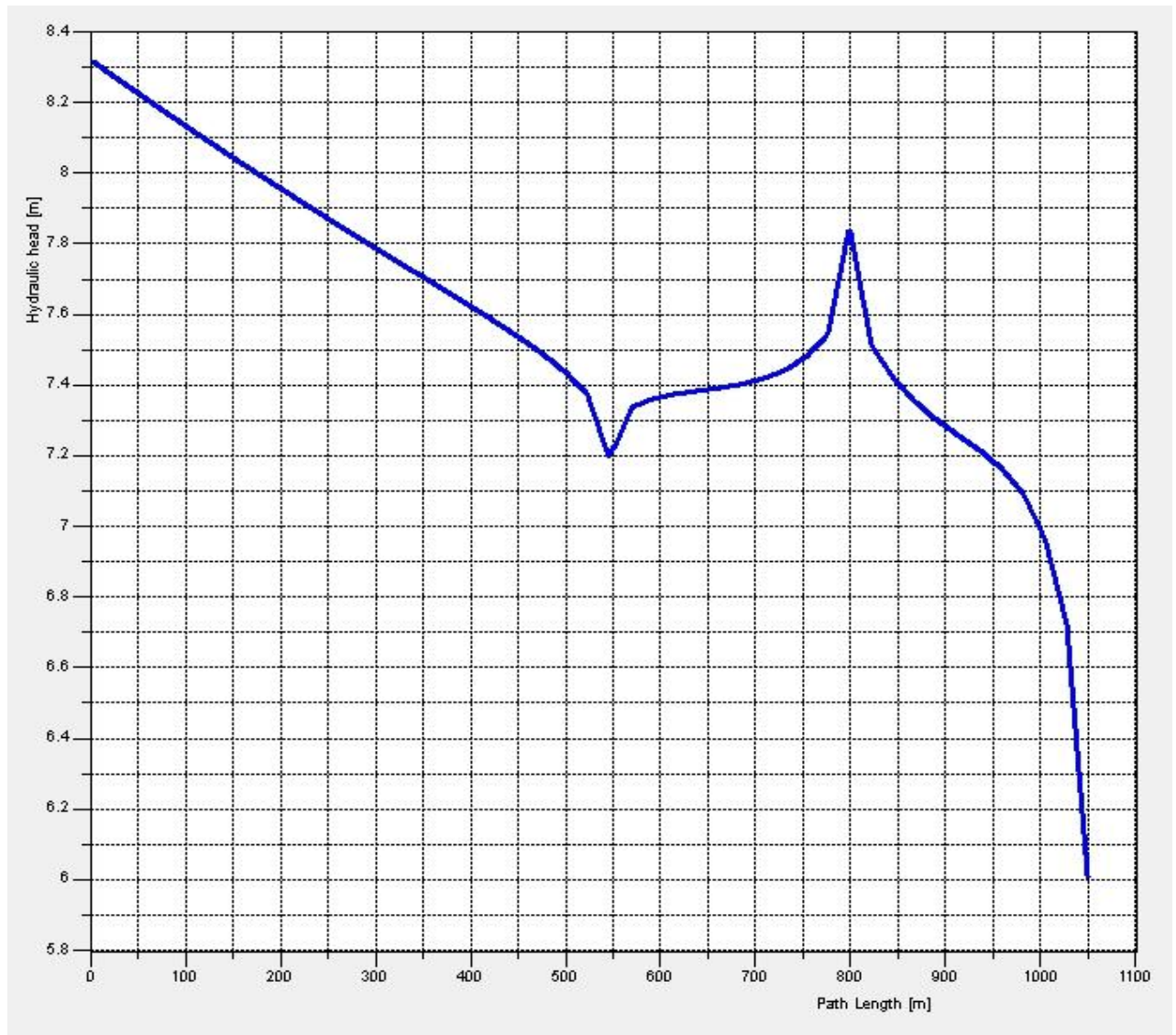
### Τομή 1: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου – Διανύσματα ταχυτήτων



## Υδροφόρας σχήματος V

Τέσσερα (4) φρέατα άντλησης σε διάταξη ρόμβου – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

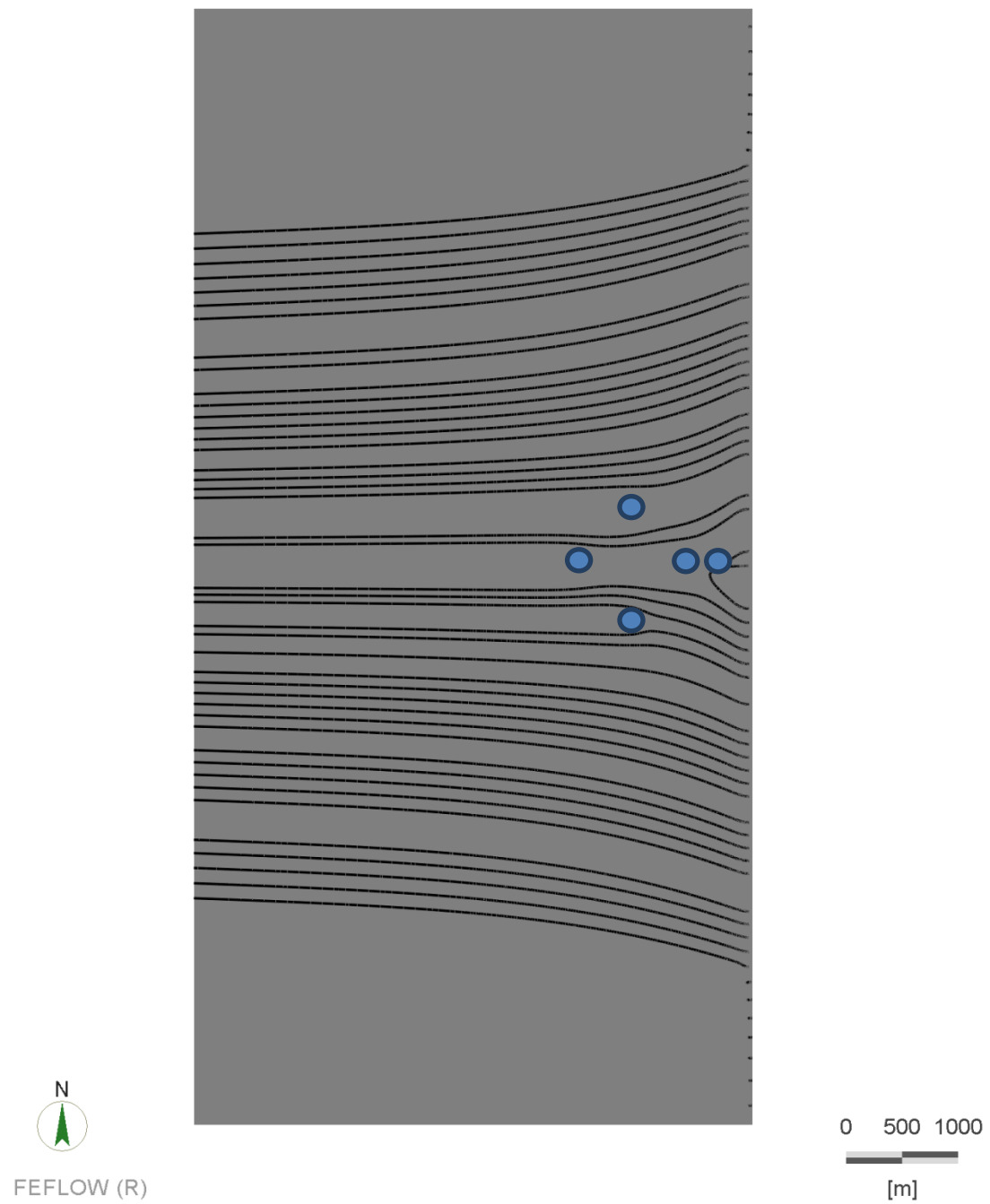
### Τομή 4: Πιεζομετρικό φορτίο συναρτήσει μήκους



## Υδροφόρας σχήματος V

Τέσσερα (4) φρέατα άντλησης σε διάταξη ρόμβου – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού

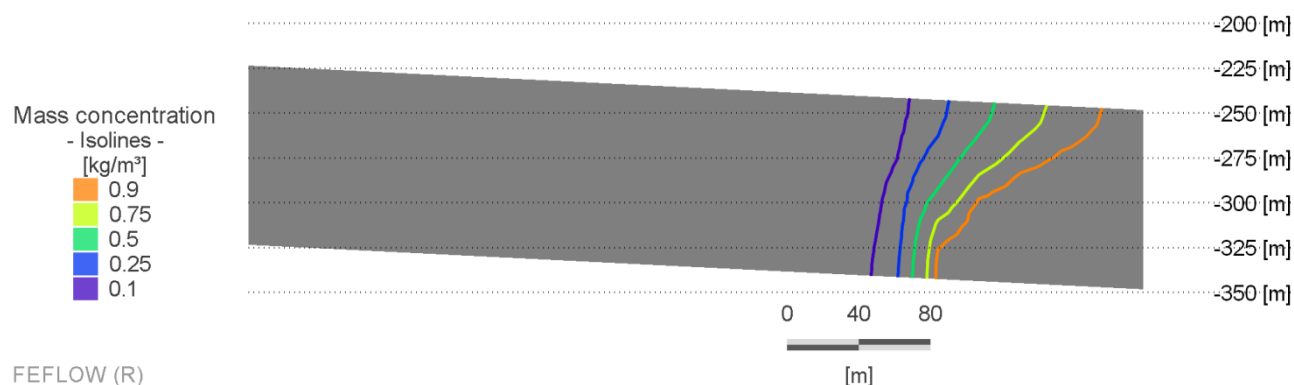
Κάτοψη 3: Γραμμές ροής



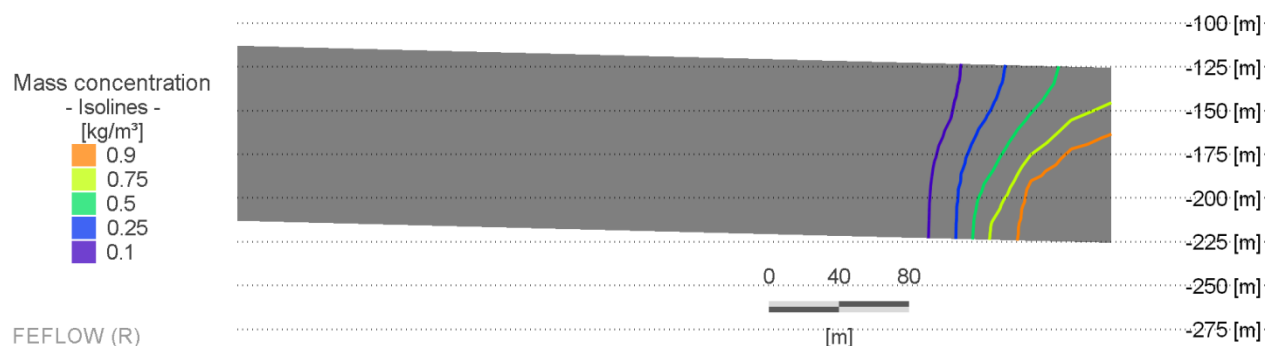
## 5.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΕΩΝ ΣΤΡΕΒΛΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ (WRAPPED) ΜΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΚΑΙ ΚΑΘΕΤΗ ΚΛΙΣΗ ΣΤΗΝ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗ

### 5.4.1. Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

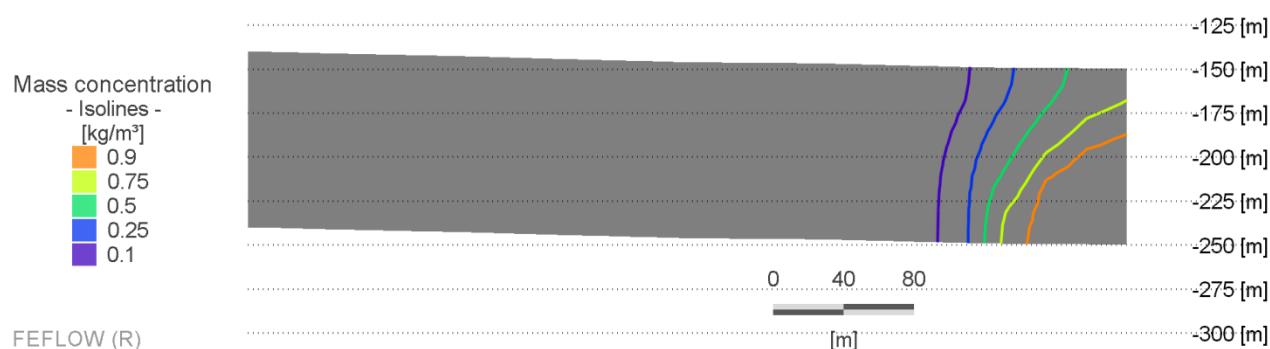
Τομή 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 3: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



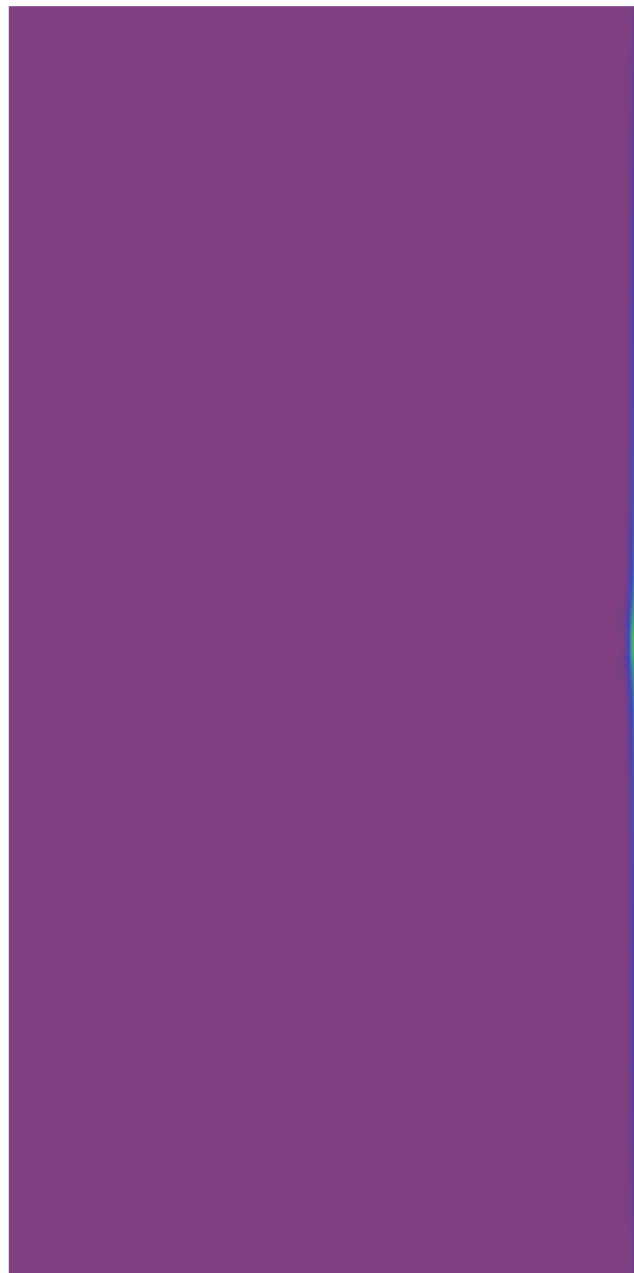
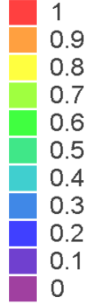
**Υδροφόρας στρεβλός με κλίση 5%**

Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

**Κάτοψη 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού**

Mass concentration  
- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000

[m]

Υδροφόρας στρεβλός με κλίση 5%

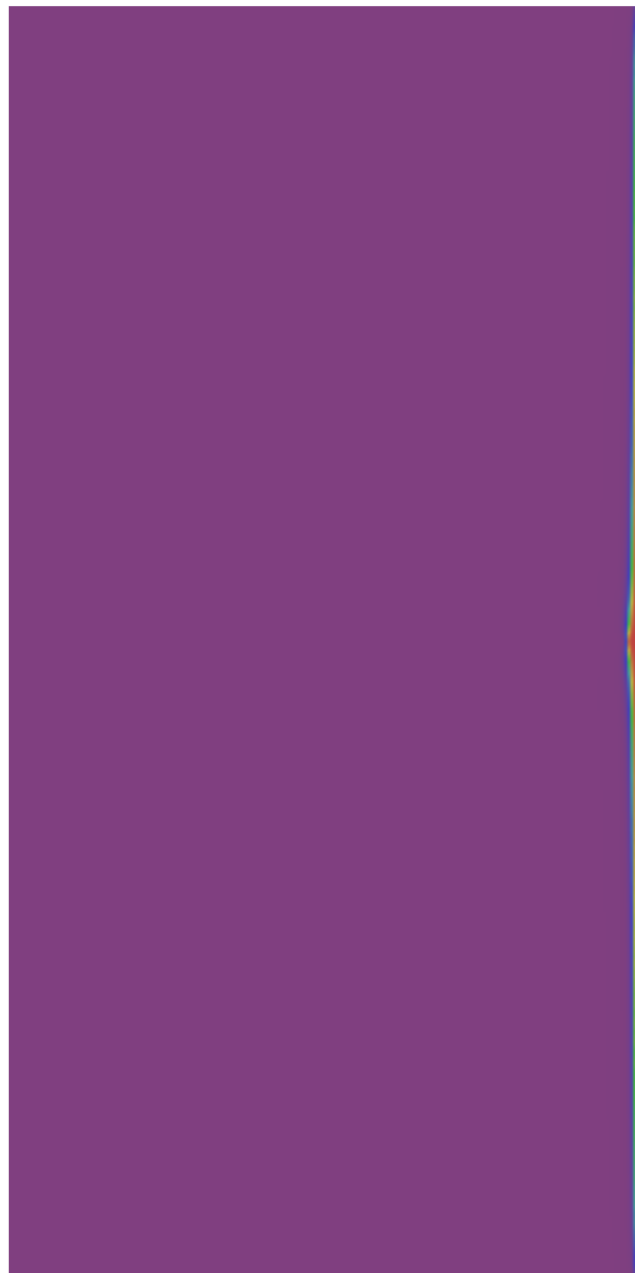
Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

Κάτοψη 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration

- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

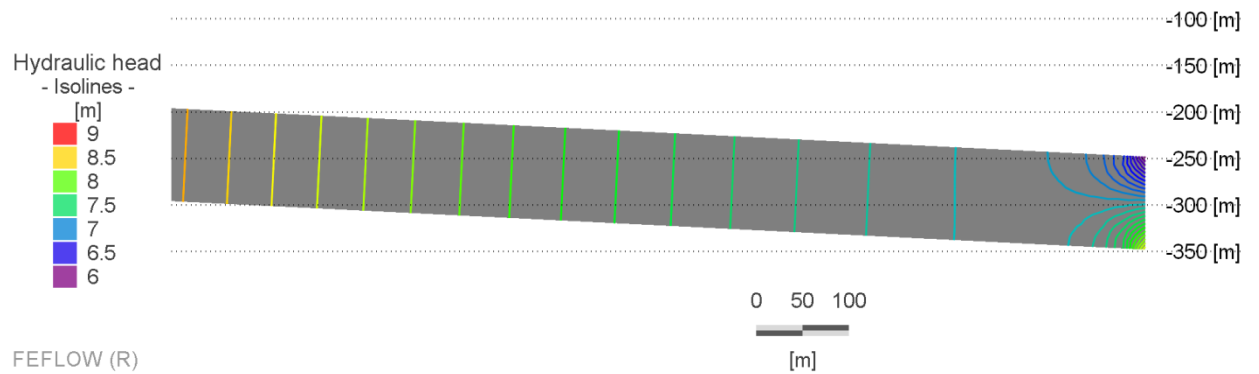
0 500 1000

[m]

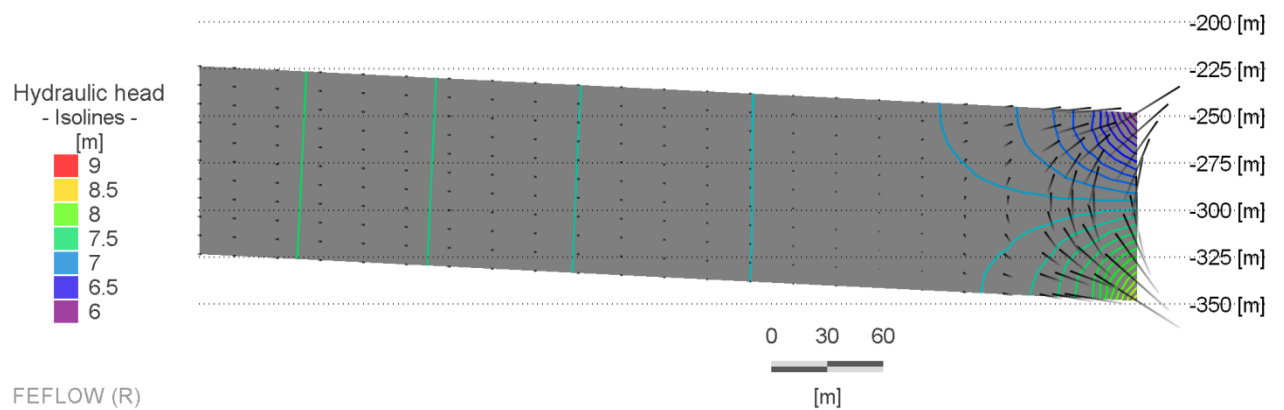
## Υδροφόρας στρεβλός με κλίση 5%

Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Τομή 4: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου



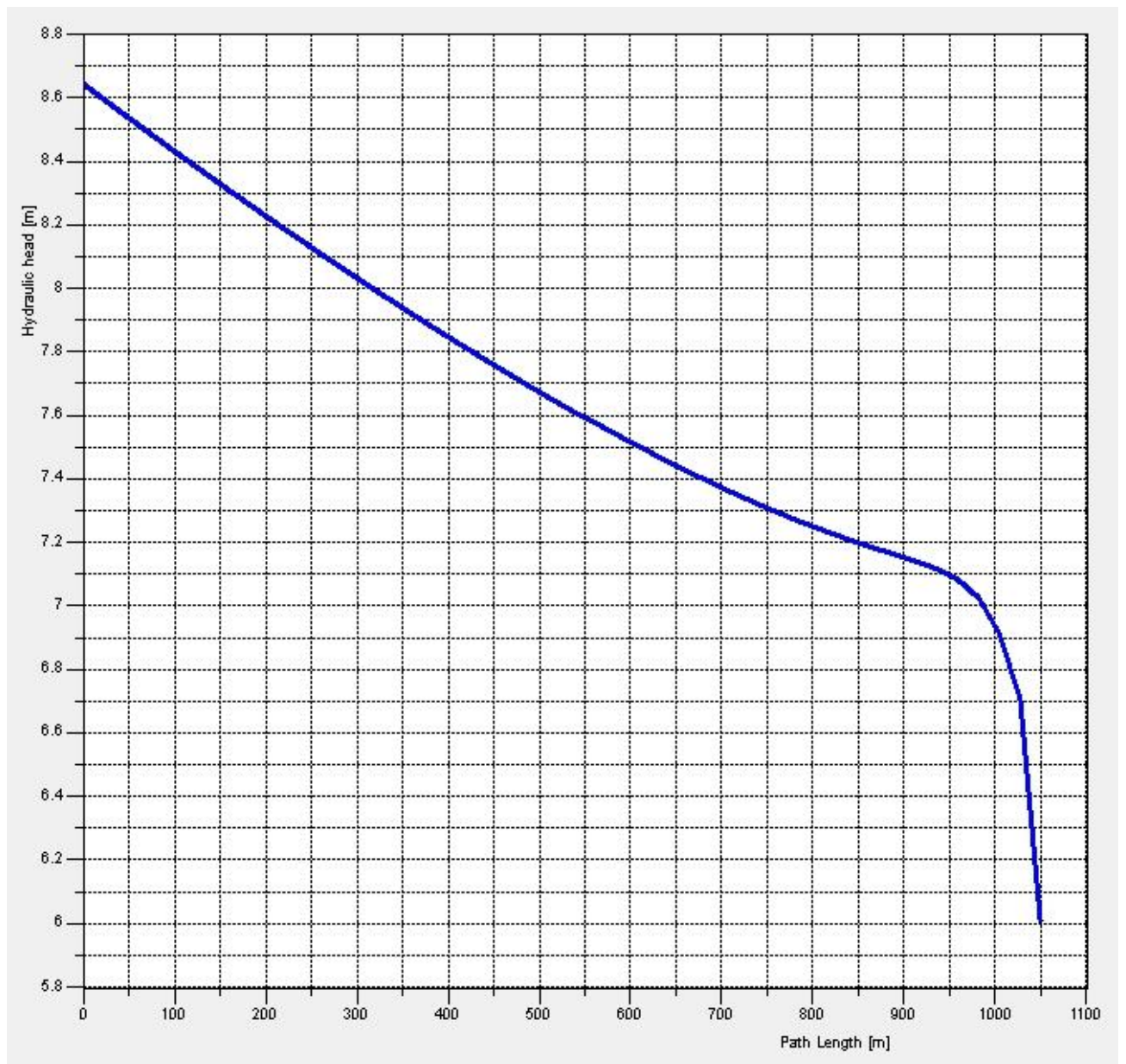
### Τομή 1: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου – Διανύσματα ταχυτήτων



## Υδροφόρας στρεβλός με κλίση 5%

Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Τομή 4: Πιεζομετρικό φορτίο συναρτήσει μήκους

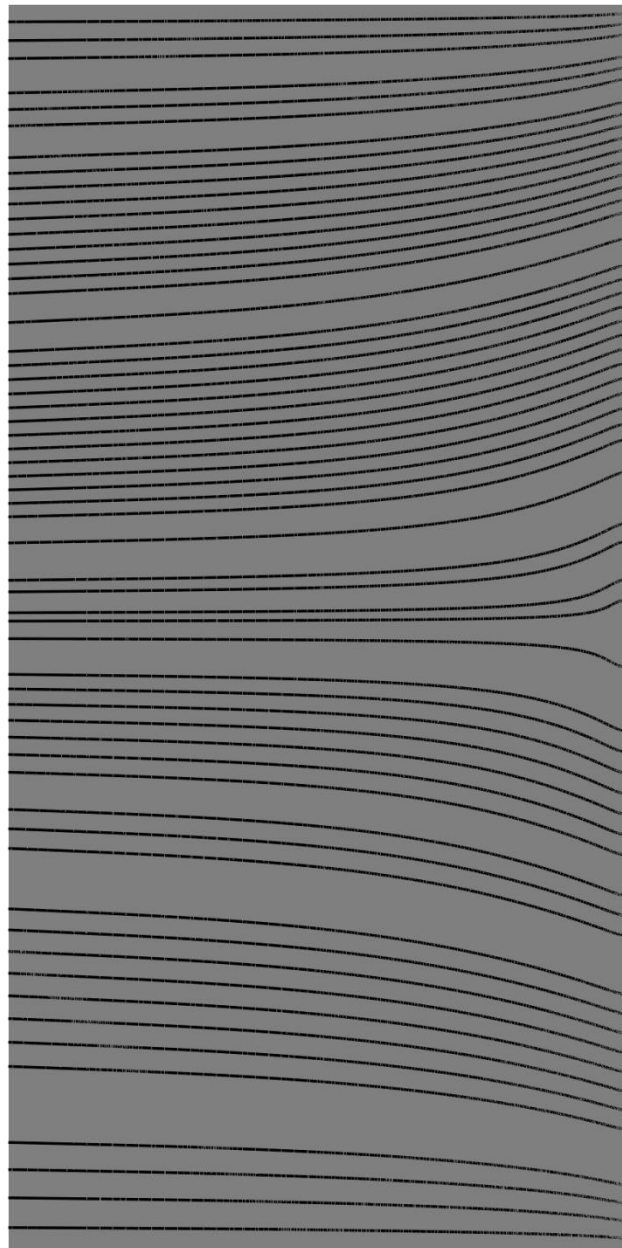




Υδροφορέας στρεβλός με κλίση 5%

Κανένα φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

Κάτοψη 3: Γραμμές ροής

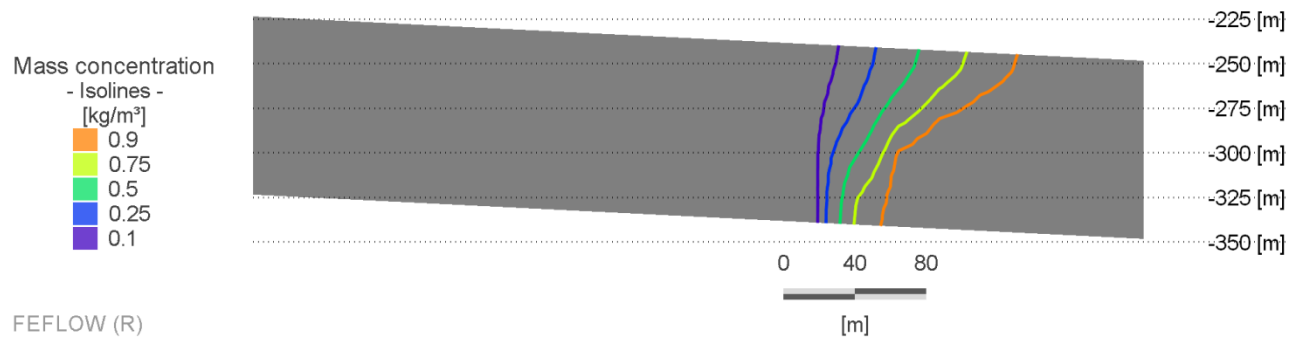


FEFLOW (R)

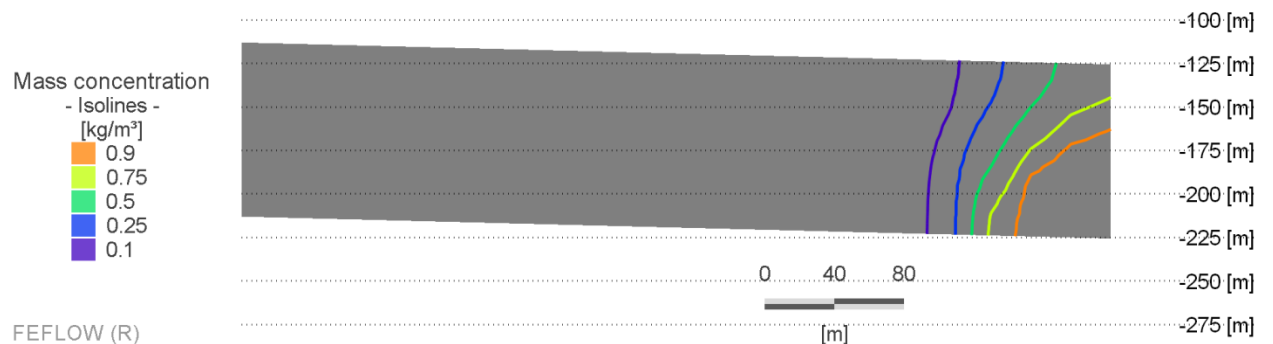
0 500 1000  
[m]

## 5.4.2. Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

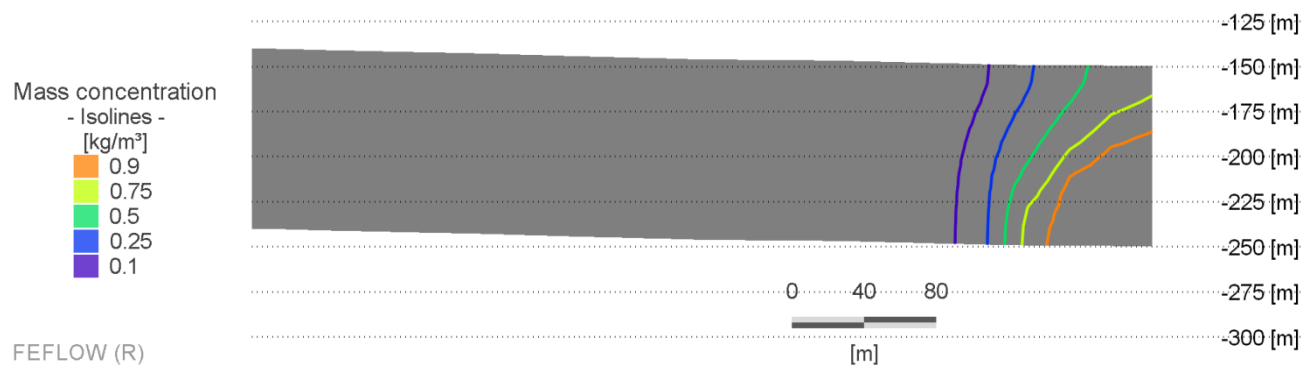
Τομή 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 3: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



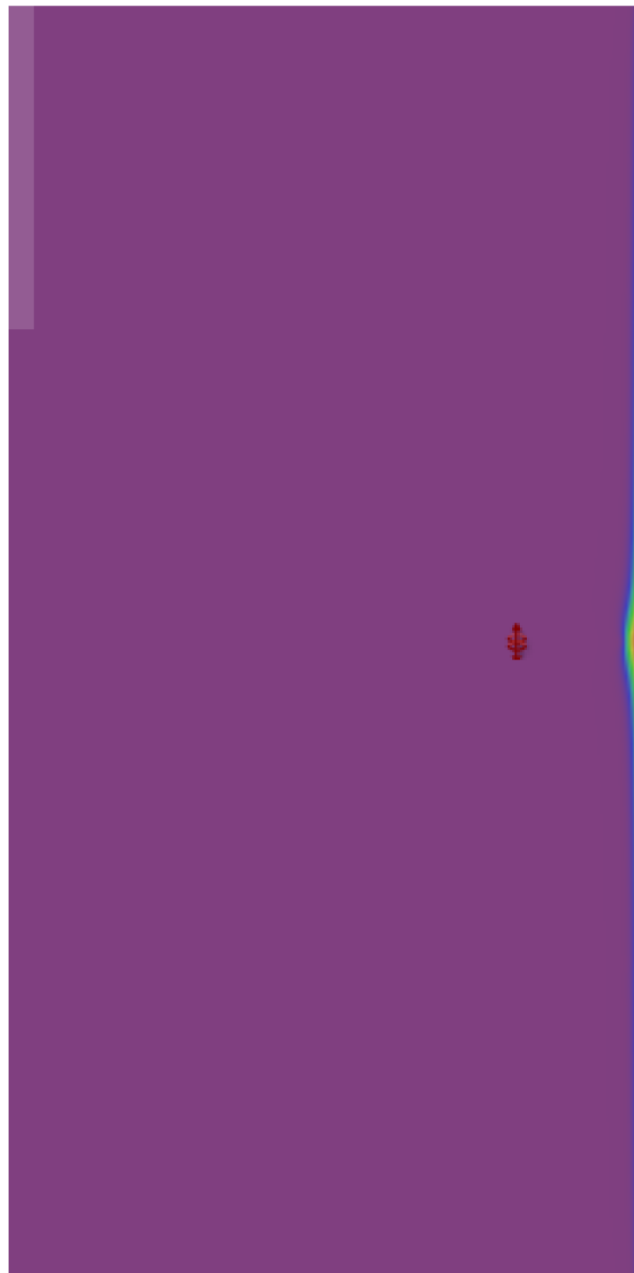
Υδροφόρας στρεβλός με κλίση 5%

Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

Κάτοψη 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration  
- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000



[m]

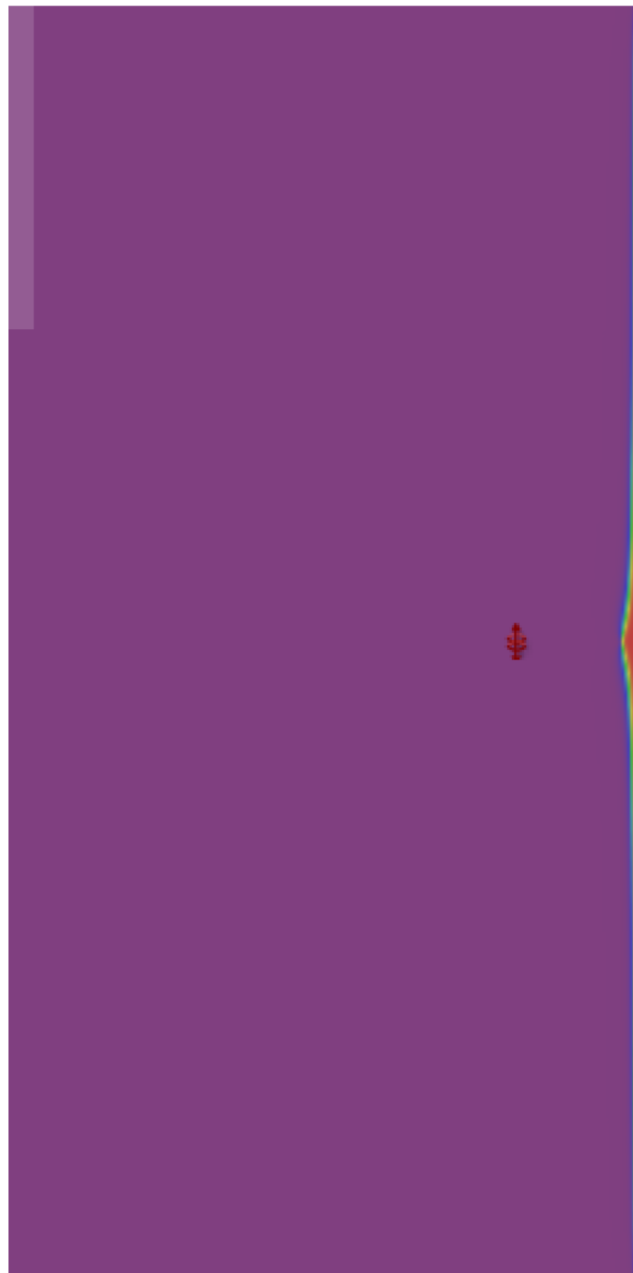
Υδροφόρας στρεβλός με κλίση 5%

Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

Κάτοψη 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration  
- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000

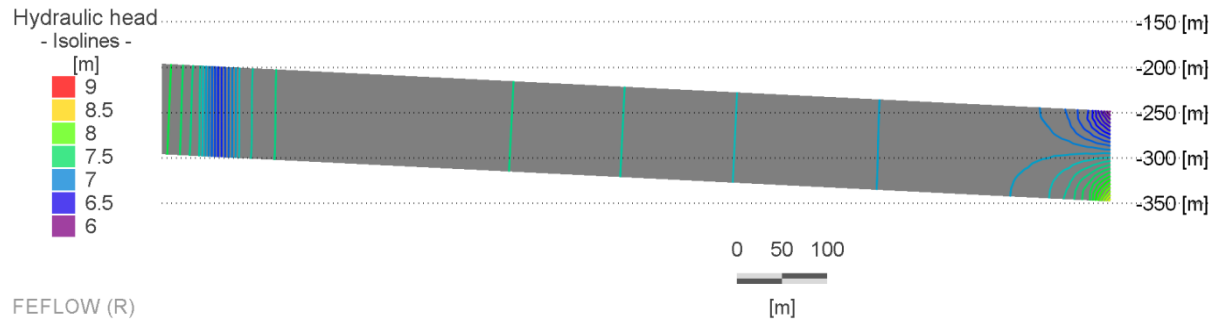


[m]

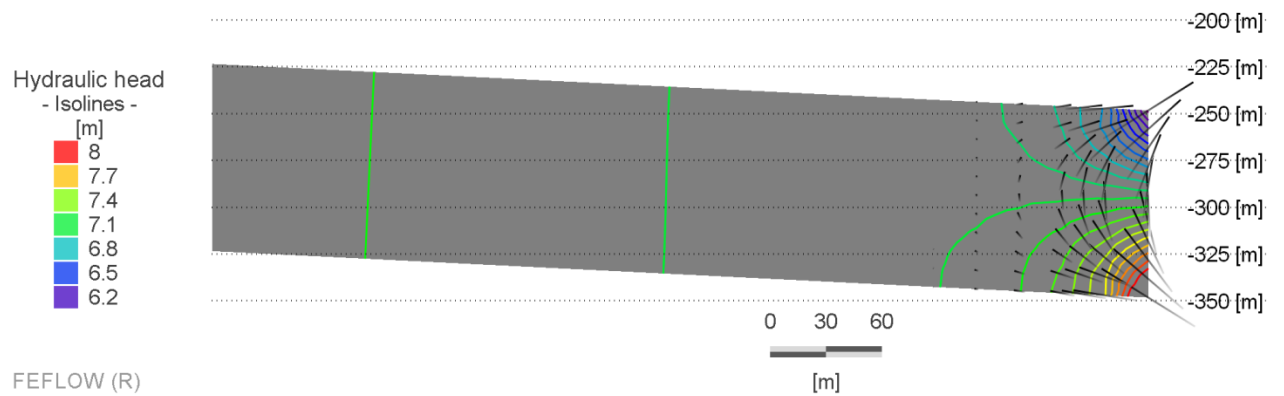
## Υδροφόρας στρεβλός με κλίση 5%

Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

### Τομή 4: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου



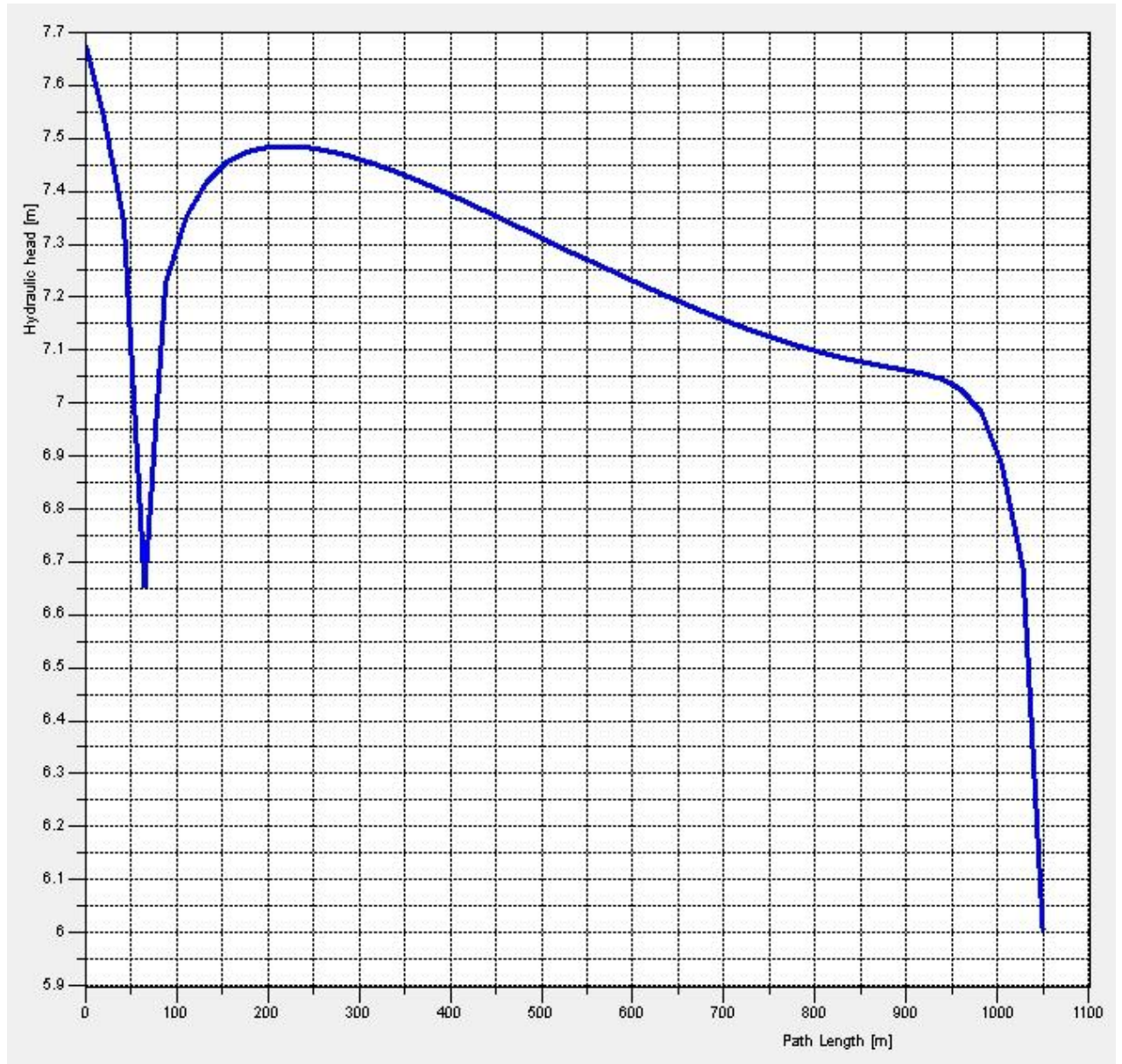
### Τομή 1: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου – Διανύσματα ταχυτήτων



## Υδροφόρας στρεβλός με κλίση 5%

Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

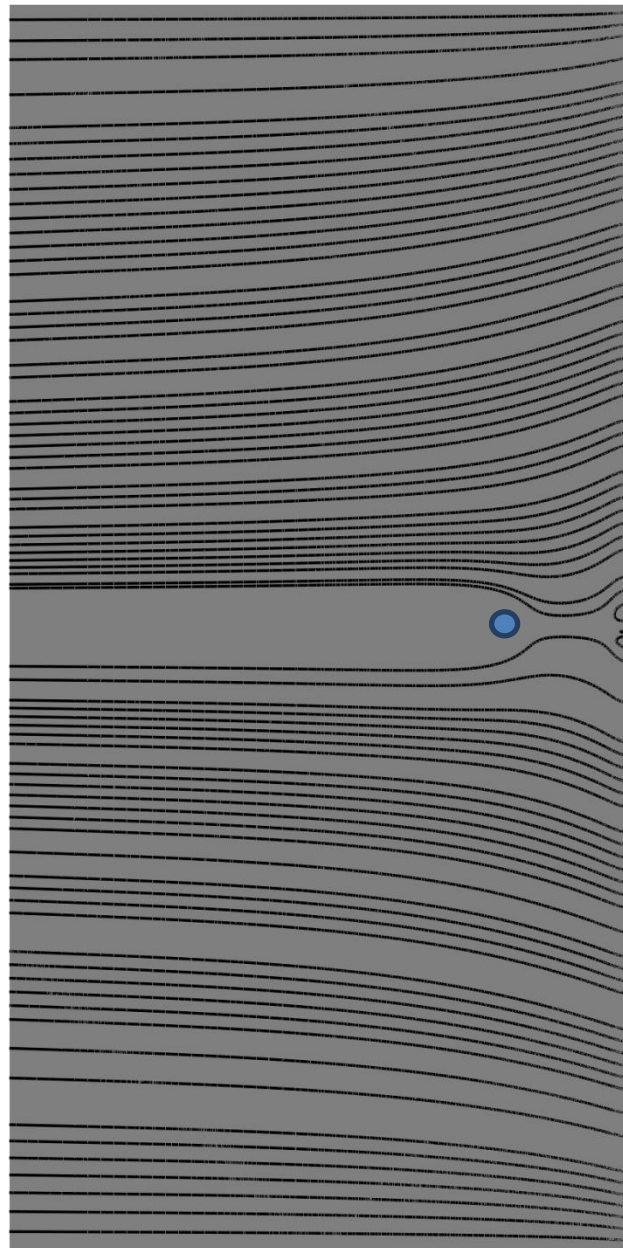
### Τομή 4: Πιεζομετρικό φορτίο συναρτήσει μήκους



Υδροφόρας στρεβλός με κλίση 5%

Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Κανένα φρέαρ εμπλουτισμού

Κάτοψη 3: Γραμμές ροής

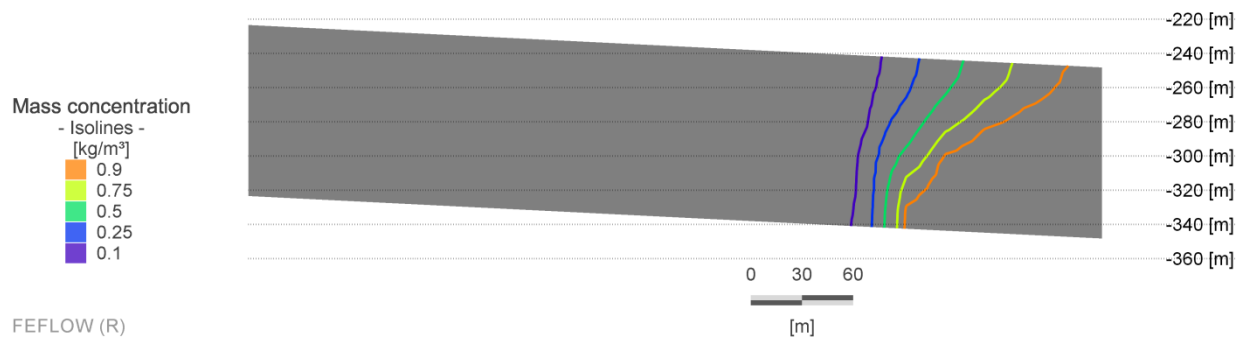


N  
FEFLOW (R)

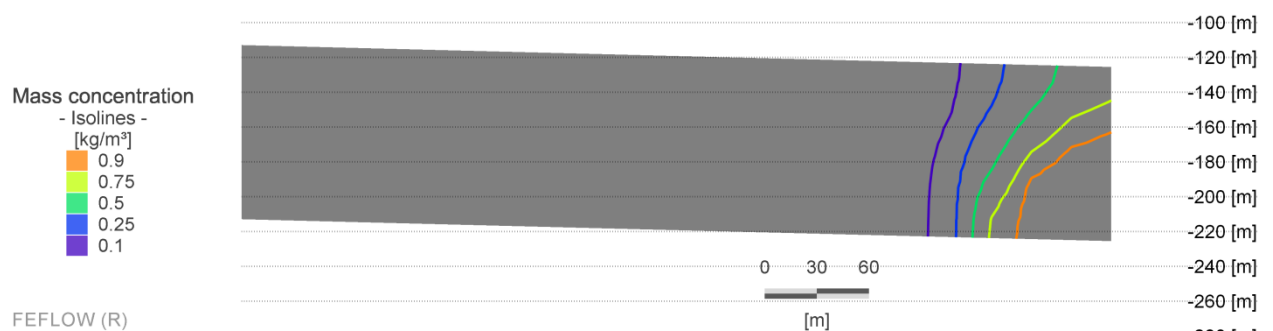
0 500 1000  
[m]

### 5.4.3. Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού με παροχή 50% της άντλησης ( $750 \text{ m}^3/\text{day}$ )

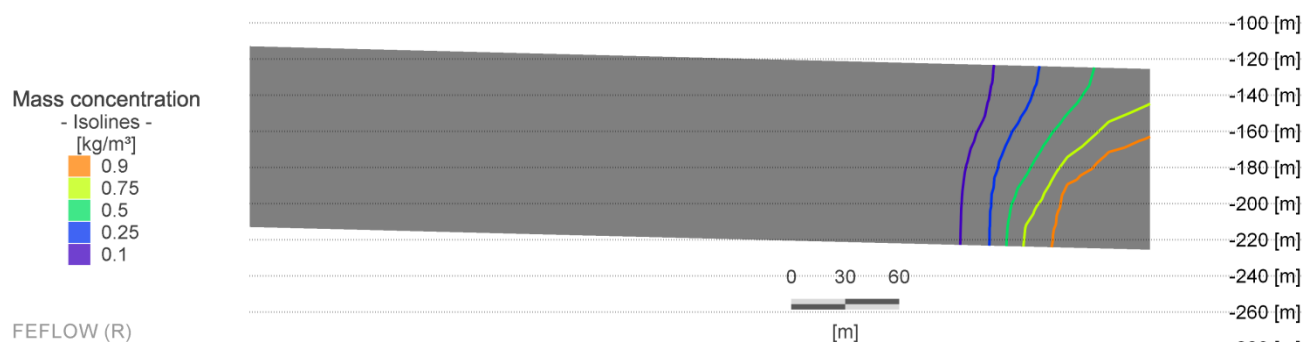
Τομή 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 3: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη





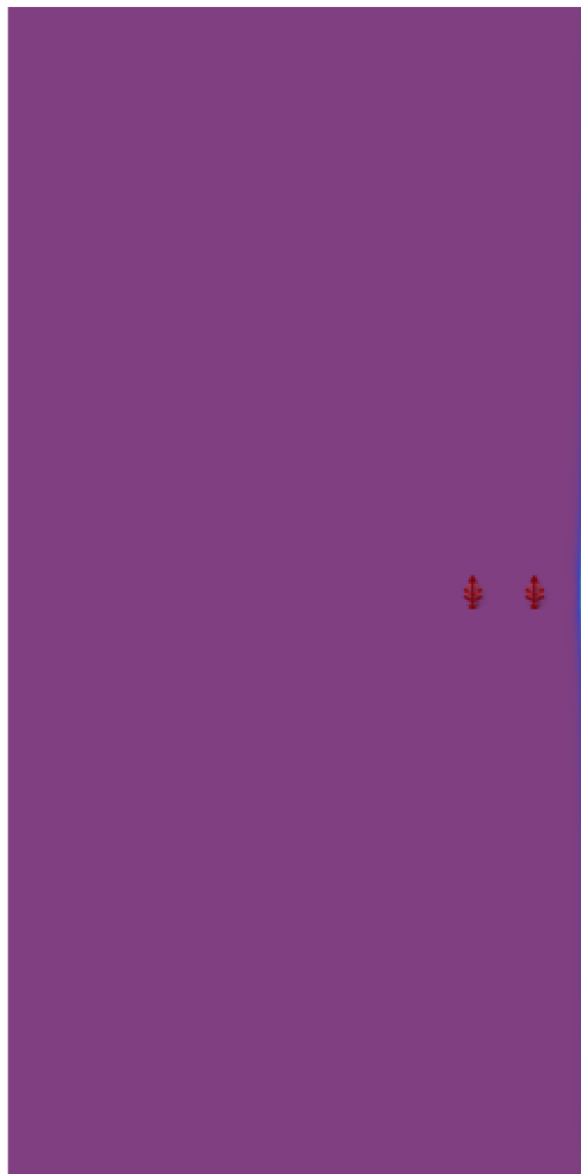
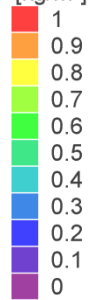
## Υδροφορέας στρεβλός με κλίση 5%

Ένα (1) φρέαρ άντλησης - Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού (παροχής 50% του εμπλουτισμού)

### Κάτοψη 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration  
- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000

[m]

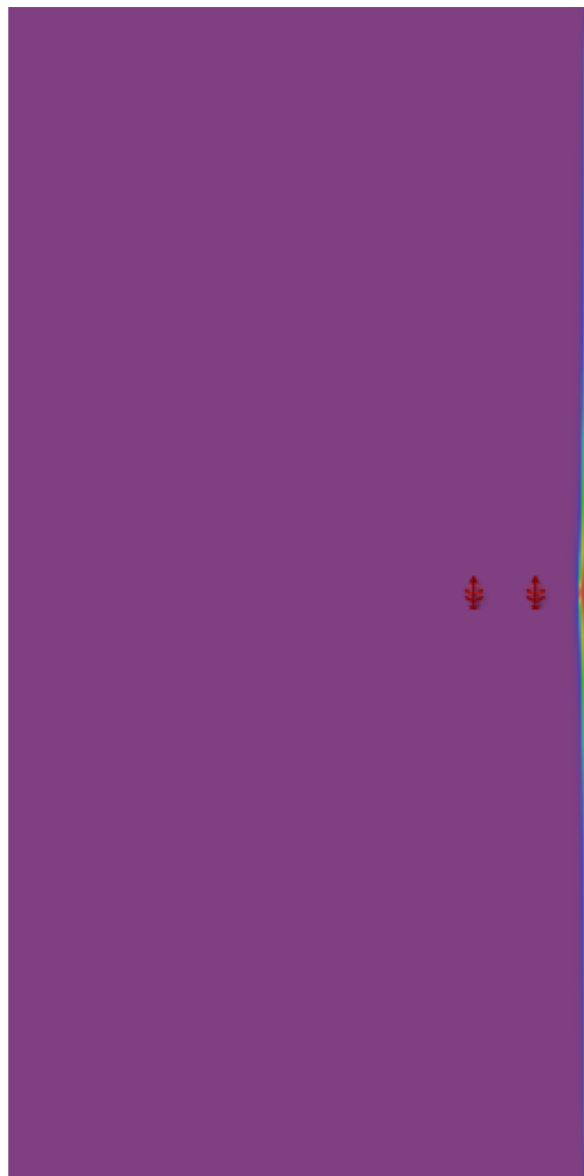
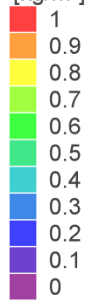
## Υδροφορέας στρεβλός με κλίση 5%

Ένα (1) φρέαρ άντλησης - Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού (παροχής 50% του εμπλουτισμού)

### Κάτοψη 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration  
- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

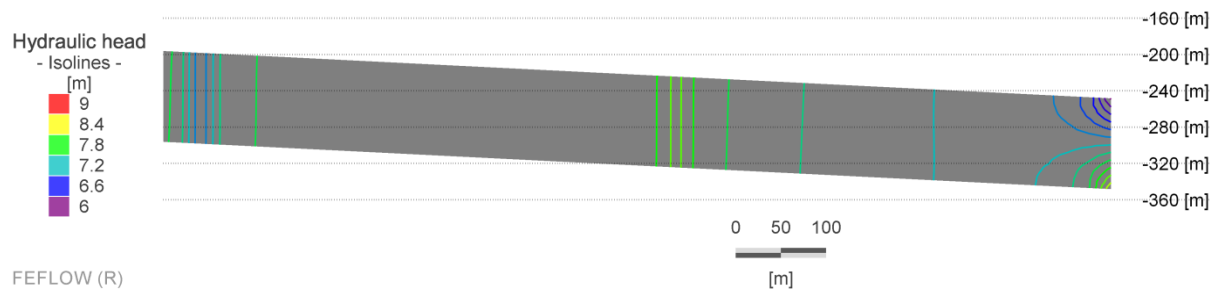
0 500 1000

[m]

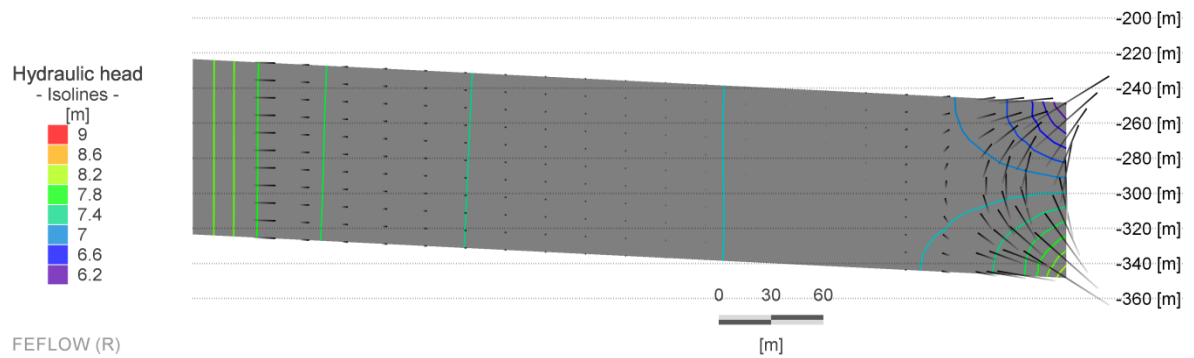
## Υδροφορέας στρεβλός με κλίση 5%

Ένα (1) φρέαρ άντλησης - Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού (παροχής 50% του εμπλουτισμού)

### Τομή 4: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου



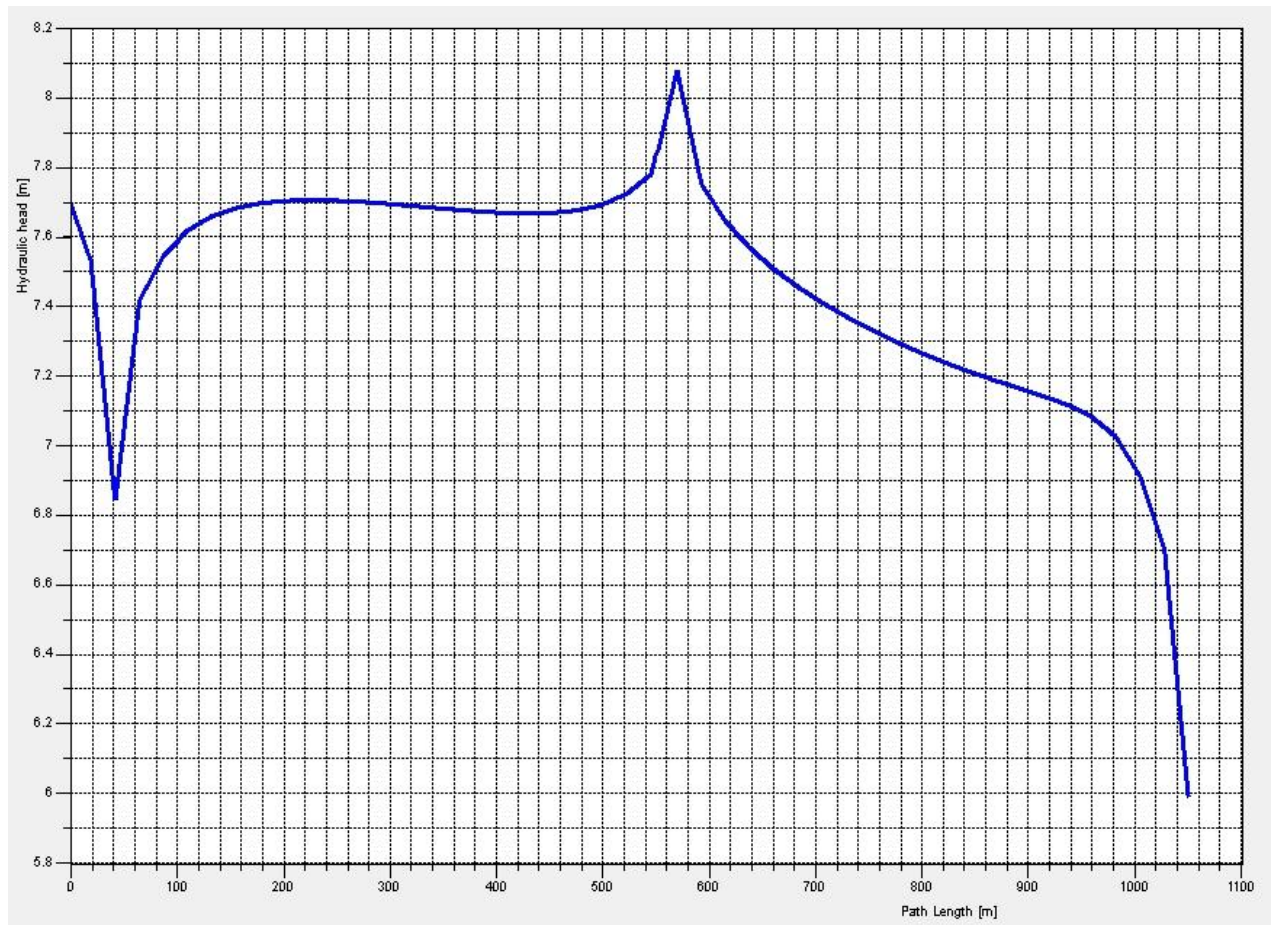
### Τομή 1: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου – Διανύσματα ταχυτήτων



### Υδροφόρας στρεβλός με κλίση 5%

Ένα (1) φρέαρ άντλησης - Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού (παροχής 50% του εμπλουτισμού)

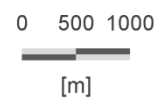
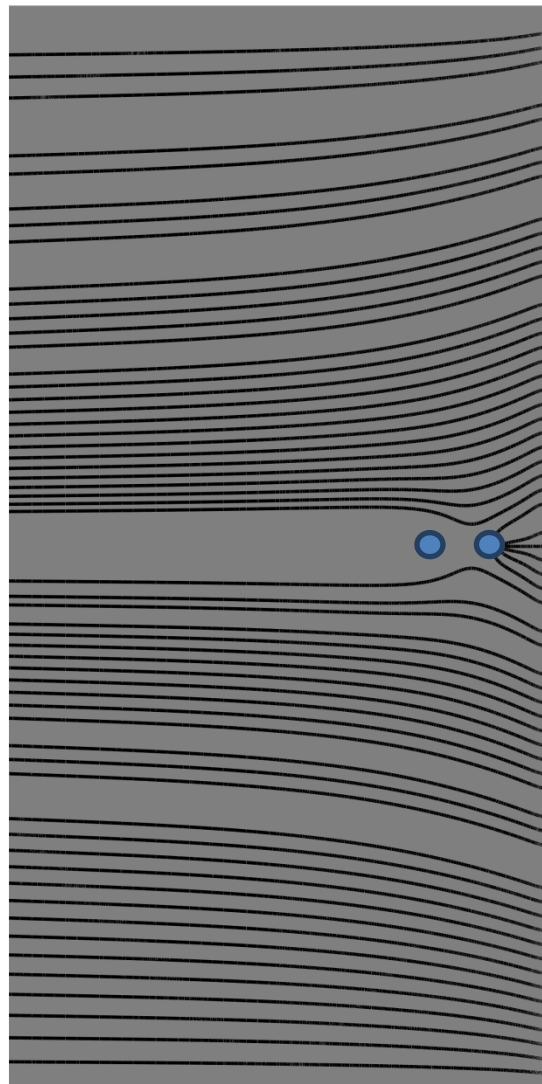
#### Τομή 4: Πιεζομετρικό φορτίο συναρτήσει μήκους



**Υδροφόρας στρεβλός με κλίση 5%**

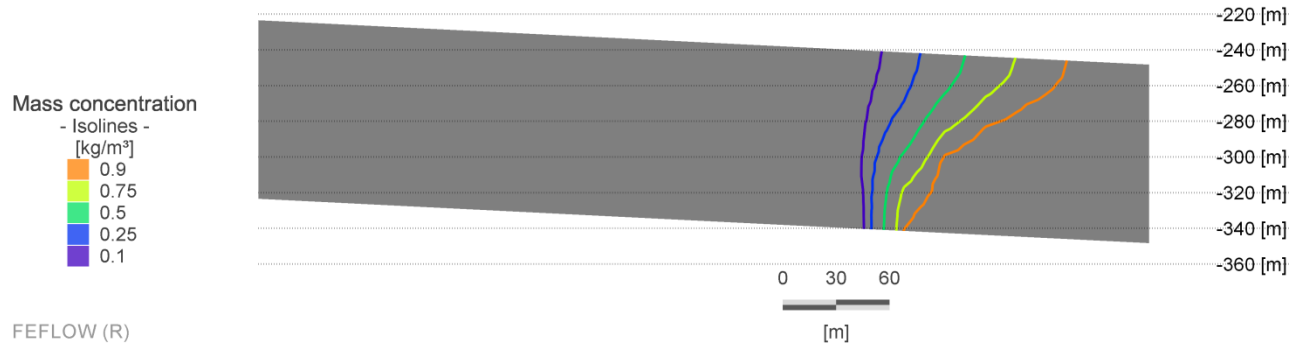
Ένα (1) φρέαρ άντλησης - Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού (παροχής 50% του εμπλουτισμού)

**Κάτοψη 1: Γραμμές ροής**

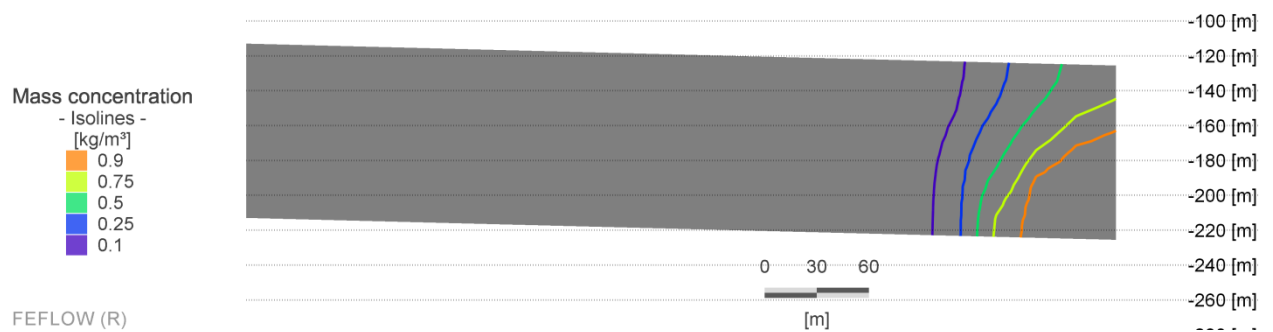


### 5.4.4. Ένα (1) φρέαρ άντλησης – Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού με παροχή 20% της άντλησης (300 m<sup>3</sup>/day)

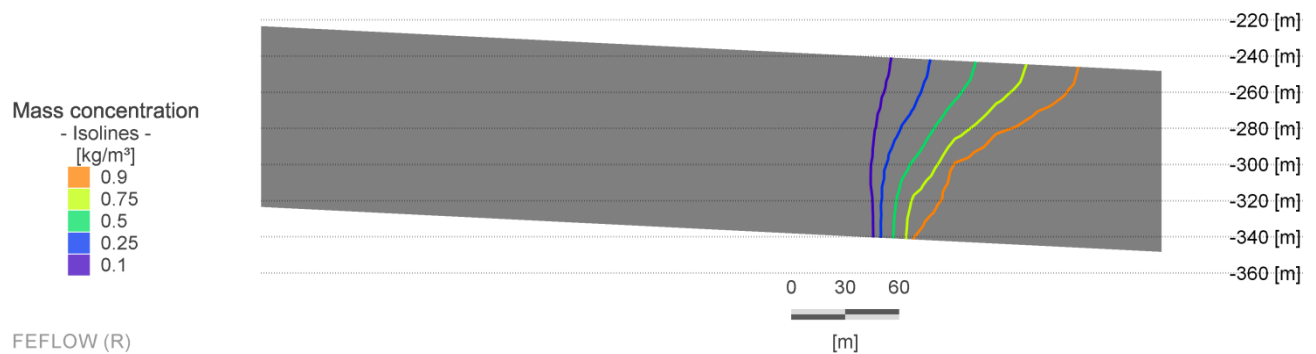
Τομή 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



Τομή 3: Συγκέντρωση αλμυρού νερού στην υφάλμυρη ζώνη



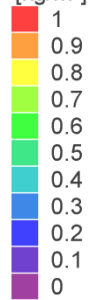
## Υδροφορέας στρεβλός με κλίση 5%

Ένα (1) φρέαρ άντλησης - Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού (παροχής 20% του εμπλουτισμού)

### Κάτοψη 1: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration  
- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000

[m]

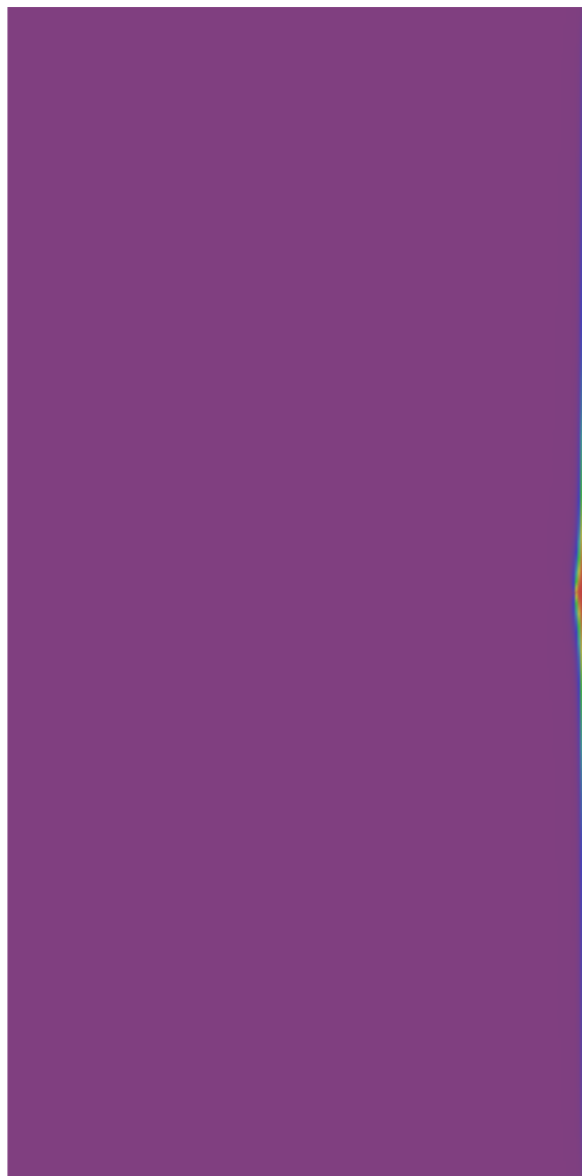
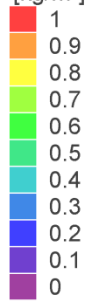
## Υδροφορέας στρεβλός με κλίση 5%

Ένα (1) φρέαρ άντλησης - Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού (παροχής 20% του εμπλουτισμού)

### Κάτοψη 2: Συγκέντρωση αλμυρού νερού

Mass concentration  
- Continuous -

[kg/m<sup>3</sup>]



FEFLOW (R)

0 500 1000



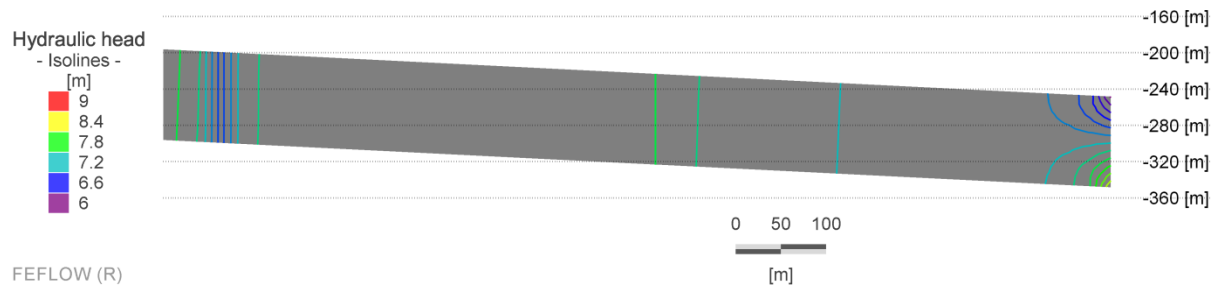
[m]



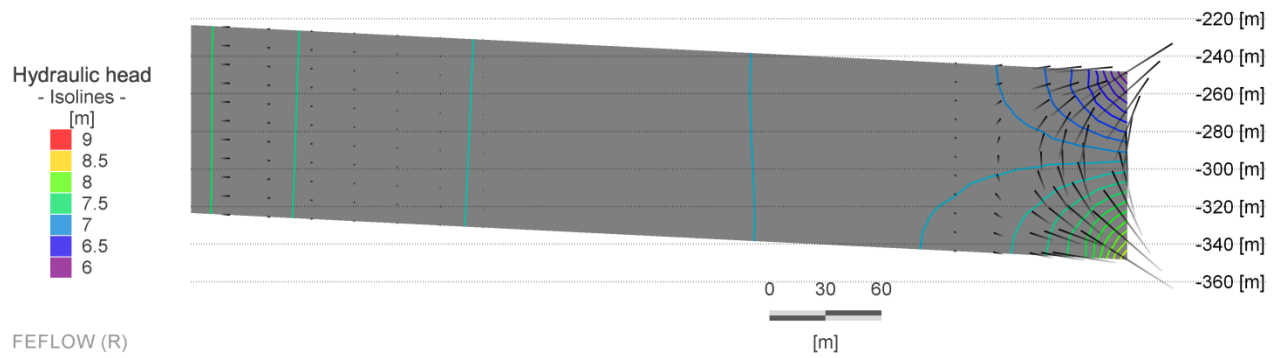
## Υδροφορέας στρεβλός με κλίση 5%

Ένα (1) φρέαρ άντλησης - Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού (παροχής 20% του εμπλουτισμού)

### Τομή 4: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου



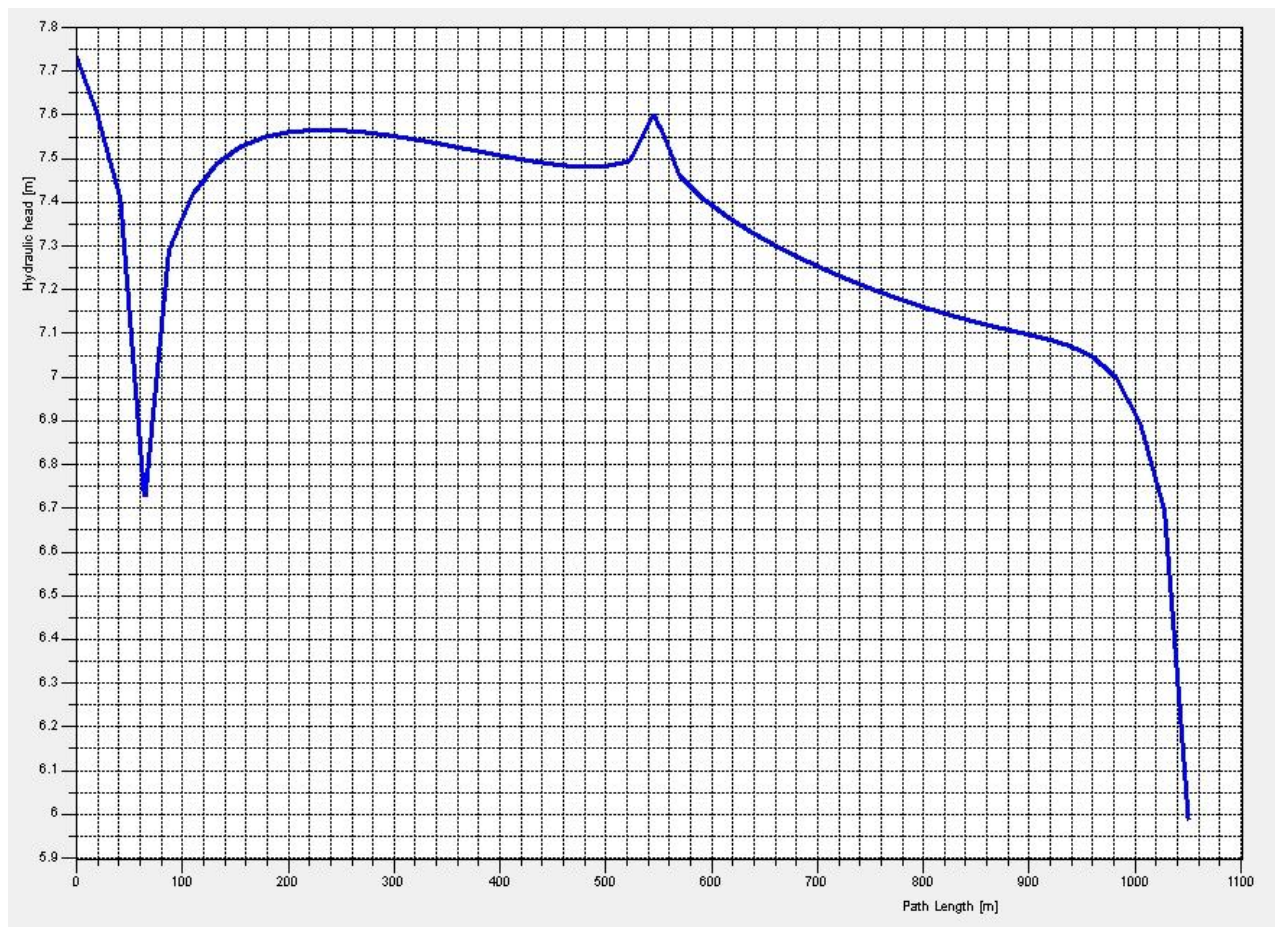
### Τομή 1: Ισογραμμές πιεζομετρικού φορτίου – Διανύσματα ταχυτήτων



### Υδροφόρας στρεβλός με κλίση 5%

Ένα (1) φρέαρ άντλησης - Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού (παροχής 20% του εμπλουτισμού)

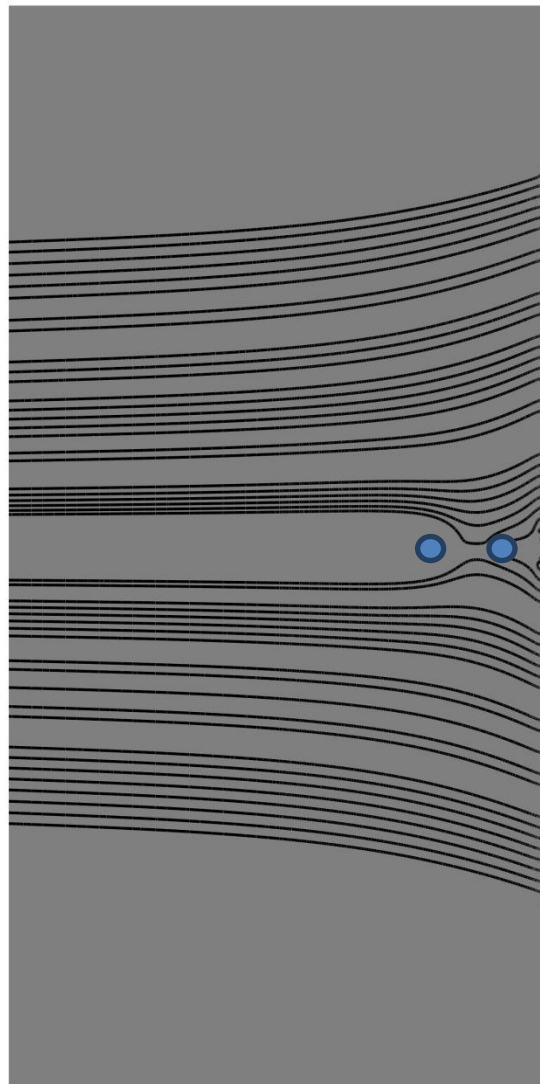
#### Τομή 4: Πιεζομετρικό φορτίο συναρτήσει μήκους



## Υδροφόρας στρεβλός με κλίση 5%

Ένα (1) φρέαρ άντλησης - Ένα (1) φρέαρ εμπλουτισμού (παροχής 20% του εμπλουτισμού)

### Κάτοψη 1: Γραμμές ροής



FEFLOW (R)

0 500 1000  
[m]

## 6. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΕΩΝ

Στο παρακάτω κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποια συγκριτικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προηγούμενες επιλύσεις.

Παρουσιάζονται συγκριτικά οι θέσεις του μετώπου υφαλμύρωσης ανάλογα με το σενάριο άντλησης και εμπλουτισμού που εφαρμόστηκε σε κάθε υδροφορέα. Πιο συγκεκριμένα συγκρίνουμε τη μετατόπιση του μετώπου της υφαλμύρωσης από τη κατάσταση χωρίς κανένα φρέαρ με αυτή της άντλησης ενός φρέατος.

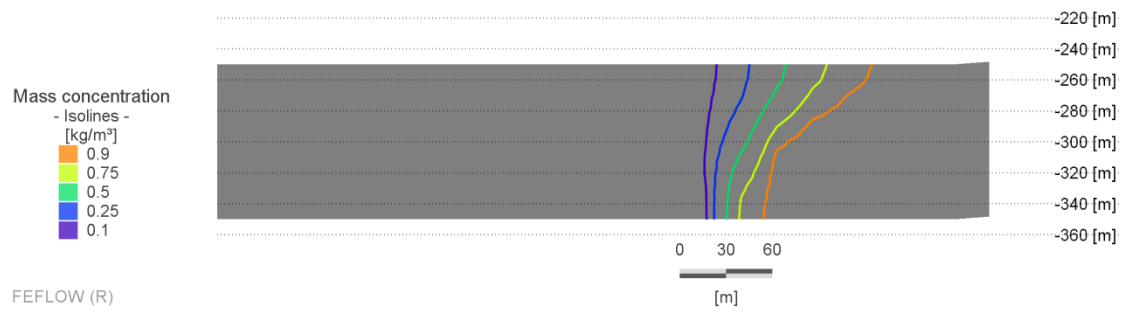
Επίσης μελετάται το κατά πόσο υποχωρεί το μέτωπο της υφαλμύρωσης από τα περιπτώση άντλησης στη περίπτωση παράλληλης εφαρμογής φρέατος εμπλουτισμού.

Τέλος, στο υποκεφάλαιο 6.2 παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα του μετώπου υφαλμύρωσης στον υδροφορέα σχήματος V ανάλογα με τις διαφορετικές διατάξεις άντλησης και εμπλουτισμού που εφαρμόστηκαν.

Η ισογραμμές μάζας που εμφανίζονται στα παρακάτω διαγράμματα αφορούν όλες **συγκέντρωση 0,5**. Επιλέχθηκε η συγκεκριμένη ισογραμμή μάζας ως η πιο χαρακτηριστική να εκφράσει τόσο τη θέση όσο και τη μορφή του μετώπου.

Η επιλογή της ισογραμμής μάζας συγκέντρωσης 0,1 μπορούσε να μας παρουσιάσει με μεγαλύτερη ακρίβεια το μήκος του πόδα του μετώπου, το βάθος διείσδυσης δηλαδή μέσα στον υδροφορέα. Όμως οι συγκεκριμένες ισογραμμές στη πλειοψηφία των υδροφορέων δεν εξέφραζαν την πραγματική μορφή του μετώπου, πιο συγκεκριμένα στις περισσότερες περιπτώσεις οι ισογραμμές αυτές είχαν μια γενική μορφή κάθετη στον υδροφορέα.

Γι αυτό το λόγω επιλέχθηκε η ισογραμμή συγκέντρωσης 0,5 ως πιο χαρακτηριστική.



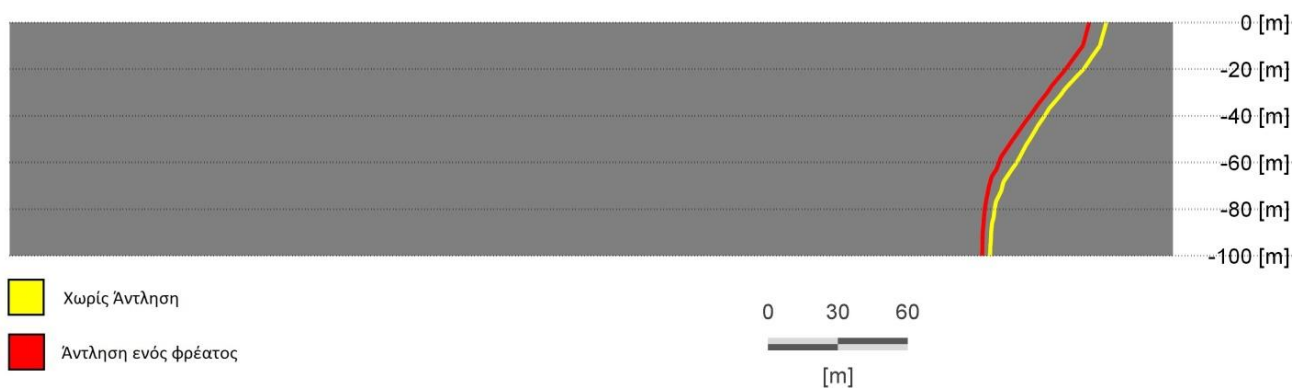
**Σχήμα 22- Τομή 1 υδροφορέα σχήματος V : όπως σε κάθε περίπτωση έτσι και εδώ, οι ισογραμμές συγκέντρωσης 0,1 παρουσιάζουν λιγότερο χαρακτηριστική εικόνα από αυτές συγκέντρωσης 0,5**

Όλες οι συγκρίσεις έχουν γίνει στη θέση της **Τομής 1** για κάθε περίπτωση και σε κάθε υδροφορέα, ώστε τα αποτελέσματα να μπορούν να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους.

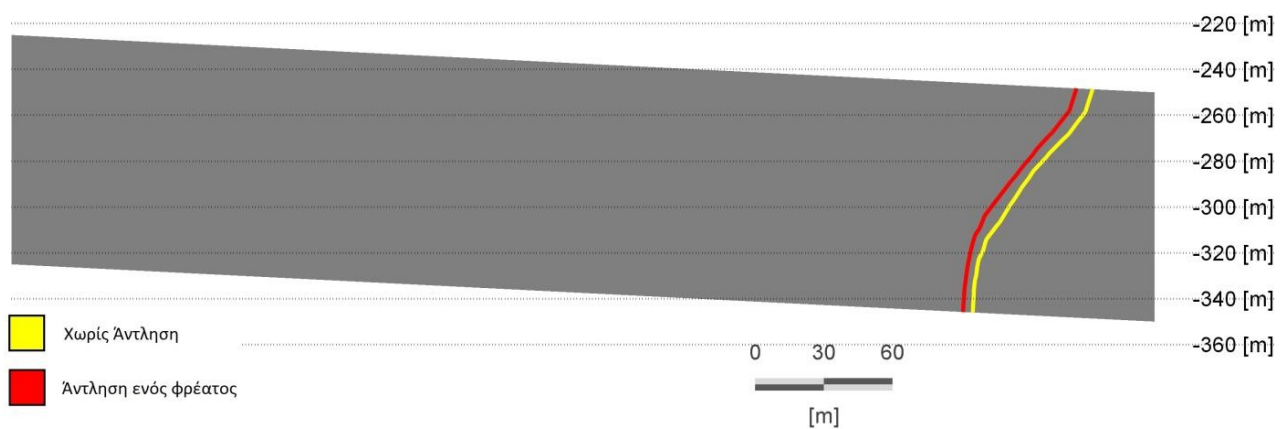
## 6.1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΣΗΣ ΜΕΤΩΠΟΥ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΦΡΕΑΡ ΑΝΤΛΗΣΗΣ – ΤΟΜΗ 1

Συγκρίνουμε τη θέση της ισογραμμής συγκέντρωσης 0,5 στην περίπτωση μη άντλησης και στη περίπτωση εφαρμογής φρέατος άντλησης παροχής 1500 m<sup>3</sup>/day. Το φρέαρ βρίσκεται στη μέση του υδροφορέα σε απόσταση 1000 m από την ακτογραμμή και επιλέγουμε την **Τομή 1** (Κεφάλαιο 4.2.2., Θέσεις τομών μελέτης) για να παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα.

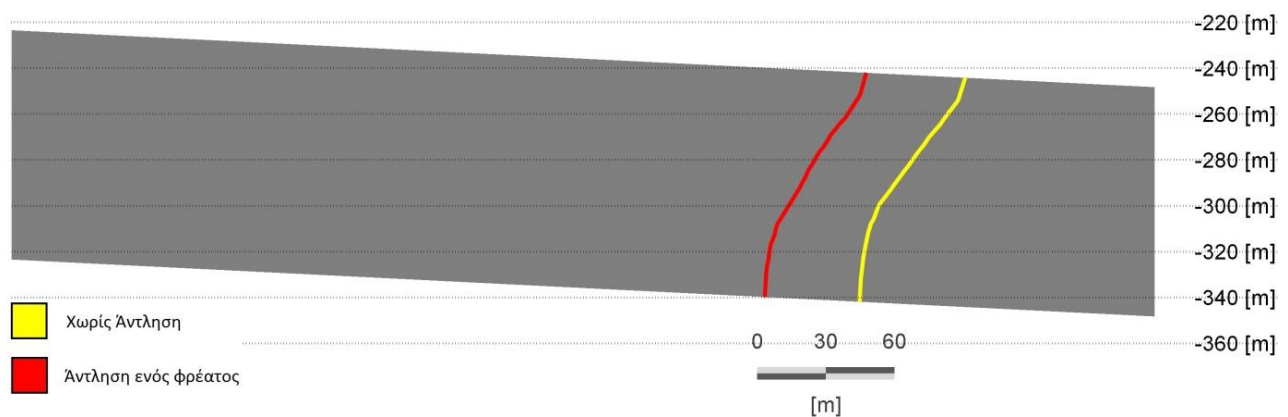
### 6.1.1. Οριζόντιος υδροφορέας – Ισογραμμές συγκέντρωσης 0,5



### 6.1.2. Υδροφορέας με κλίση 5% - Ισογραμμές συγκέντρωσης 0,5



### 6.1.3. Στρεβλός υδροφορέας (wrapped) - Ισογραμμές συγκέντρωσης 0,5



### 6.1.4. Συμπεράσματα

Από την εικόνα των παραπάνω διαγραμμάτων εξάγουμε το συμπέρασμα πως το φαινόμενο της υφαλμύρωσης, όπως ήταν αναμενόμενο άλλωστε, παρουσιάζεται πολύ πιο έντονα όταν εφαρμόζεται στον υδροφορέα άντληση από φρέαρ. Στη συγκεκριμένη περίπτωση για την παροχή που εφαρμόστηκε ( $1500 \text{ m}^3/\text{day}$ ) φαίνεται πως το μέτωπο της υφαλμύρωσης για τις δύο πρώτες γεωμετρίες δεν παρουσιάζει τόσο μεγάλη μετακίνηση όσο για την τρίτη περίπτωση, αυτή του στρεβλού υδροφορέα. Ο έντονος χαρακτήρας του φαινομένου στον στρεβλό υδροφορέα είναι αποτέλεσμα της ιδιαίτερης γεωμετρίας του που προκαλεί μεγαλύτερα πιεζομετρικά φορτία στο όριο με τη θάλασσα.

Στον οριζόντιο υδροφορέα και στον υδροφορέα με κλίση 5% παρατηρούμε πως ναι μεν επηρεάζεται η θέση της ισογραμμής κατά την άντληση, όμως η μετατόπιση της δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική (3-5 m μετατόπιση). Η παροχή άντλησης είναι μεν αντιπροσωπευτική μιας κοινής χρήσης μη βιομηχανικής περιοχής (Seawater Intrusion in coastal aquifers, 1999) αλλά το πλήθος των φρεάτων (ένα) είναι ίσως πολύ μικρό για να εκφράσει σοβαρή μεταβολή.

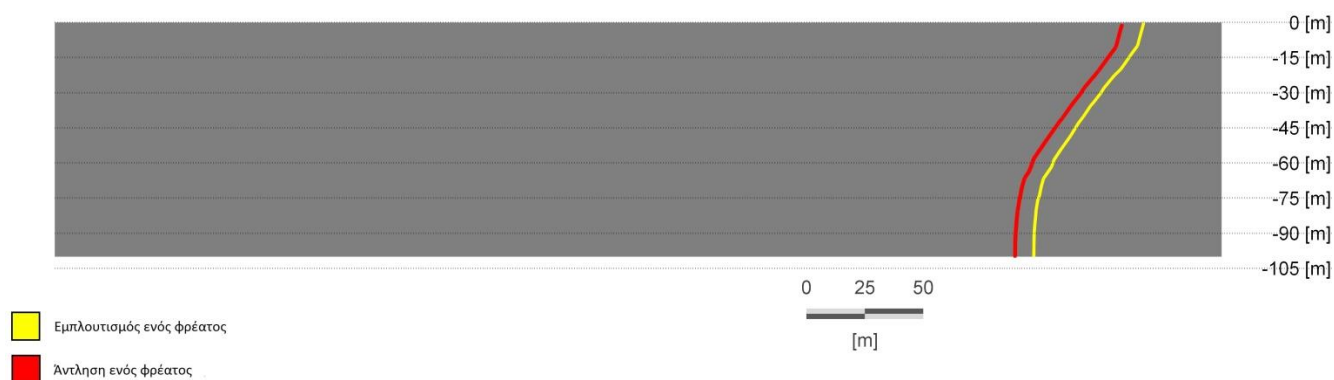
## 6.2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΣΗΣ ΜΕΤΩΠΟΥ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΦΡΕΑΤΟΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο συγκρίνουμε τις δυο εξής περιπτώσεις:

- Άντληση ενός φρέατος παροχής  $1500 \text{ m}^3/\text{day}$  στη μέση του υδροφορέα σε απόσταση 1000 m από την ακτογραμμή
- Παράλληλη λειτουργία άντλησης και ενός φρέατος εμπλουτισμού παροχής 50% της παροχής άντλησης ( $750 \text{ m}^3/\text{day}$ ) στη μέση του υδροφορέα σε απόσταση 500 m από την ακτογραμμή –ακριβώς ανάμεσα στην ακτογραμμή και το φρέαρ άντλησης.

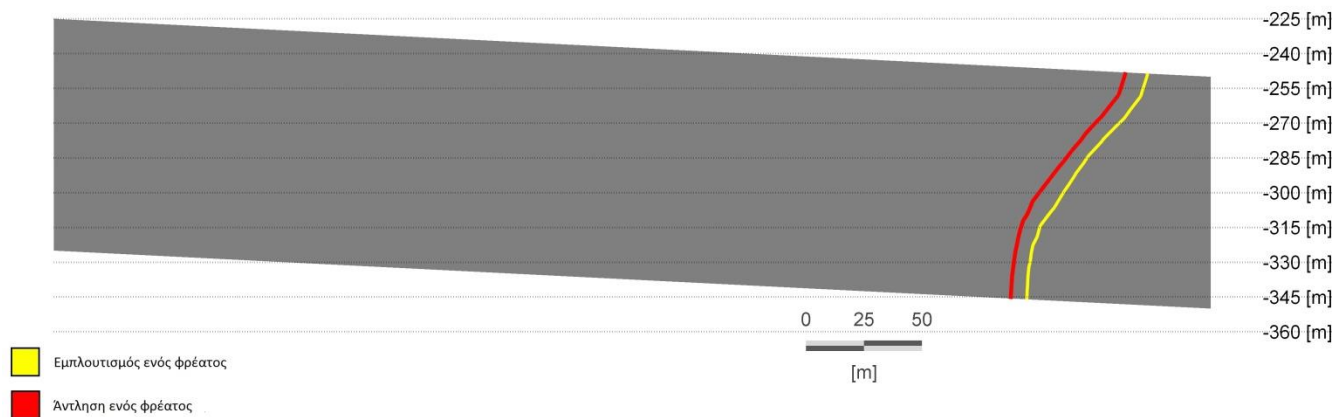
Επιλέγεται η **Τομή 1** για να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα (Κεφάλαιο 4.2.2., Θέσεις τομών μελέτης)

### 6.2.1. Οριζόντιος υδροφορέας – Ισογραμμές συγκέντρωσης 0,5

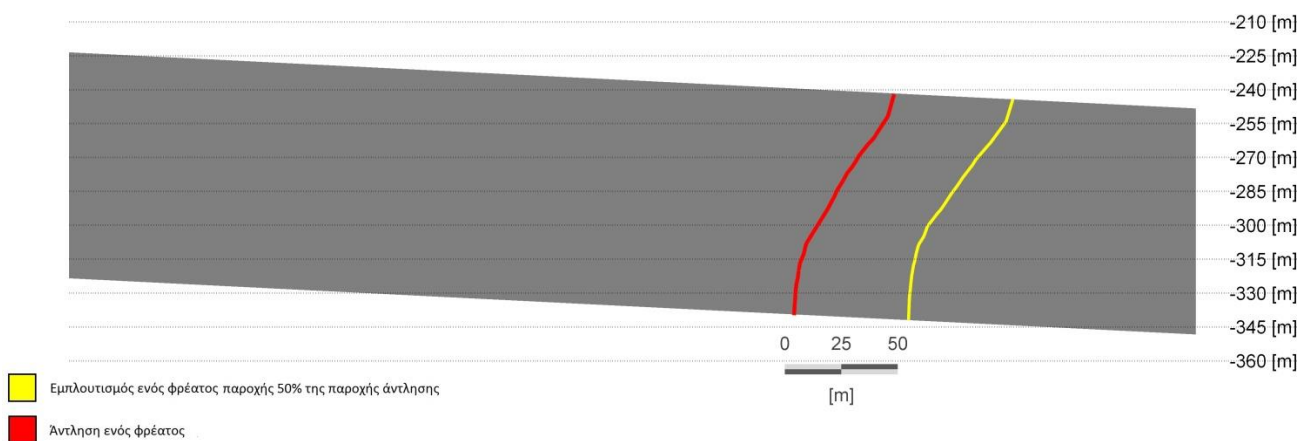




### 6.2.2. Υδροφορέας με κλίση 5% - Ισογραμμές συγκέντρωσης 0,5



### 6.2.3. Στρεβλός υδροφορέας (wrapped) – Ισογραμμές συγκέντρωσης 0,5



### 6.2.4. Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που εξάγονται για τον εμπλουτισμό ενός φρέατος είναι παρόμοια με αυτά της περίπτωσης άντλησης στο Κεφάλαιο 6.1.4.

Παρατηρούμε πάλι πιο έντονη επίδραση τόσο του φαινομένου της άντλησης όσο και του εμπλουτισμού στον στρεβλό υδροφορέα. Παρατηρούμε μια μετατόπιση του μετώπου της υφαλμύρωσης κατά 50 περίπου μέτρα λόγω του εμπλουτισμού.

Στους άλλους δύο υδροφορείς οι μετατοπίσεις είναι μικρότερες. Είναι όμως άξιο παρατήρησης το ότι το μέτωπο της υφαλμύρωσης, κατά την παράλληλη λειτουργία των δύο φρεάτων υποχωρεί σε θέση *κοντότερα* στην ακτογραμμή από ότι χωρίς την εφαρμογή κανενός φρέατος. Αυτό σημαίνει πως ακόμη και μια μικρή παροχή εμπλουτισμού της τάξης του 50% αυτής της άντλησης μπορεί όχι μόνο να αναιρέσει

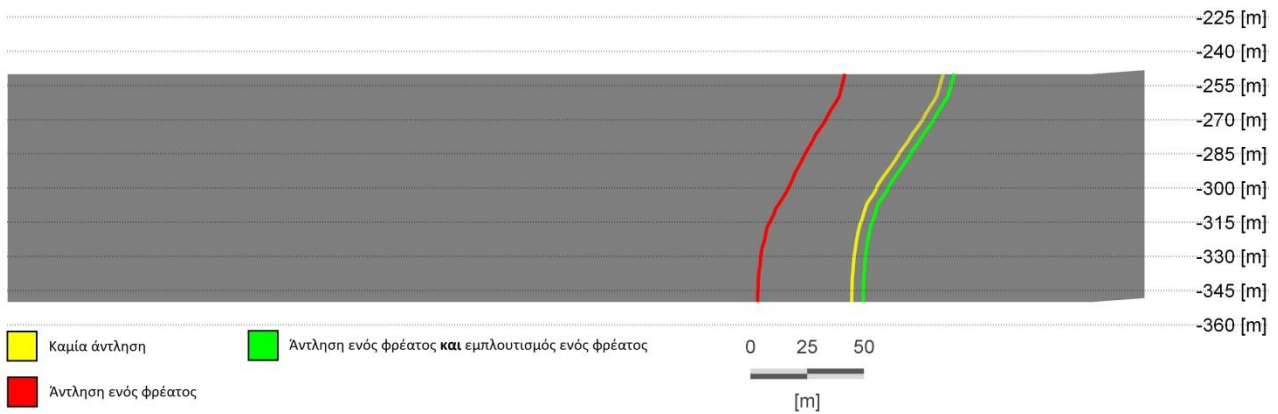
τα συμπτώματα ενός φρέατος άντλησης, αλλά μπορεί ακόμη και να βελτιώσει την εικόνα του υδροφορέα σε βαθμό καλύτερο από ότι θα ήταν από μόνος του χωρίς καμία ανθρώπινη παρέμβαση. Όλα αυτά τα συμπεράσματα προκύπτουν σε καθεστώς μόνιμης ροής (όπου επιλύθηκαν τα σενάρια) που πρακτικά μεν δεν υφίσταται αλλά αποτελεί ενδεικτικό σενάριο.

Θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο περαιτέρω μελέτης η επίδραση φρεάτων εμπλουτισμού σε υδροφορείς χωρίς φρέατα άντλησης καθώς επίσης και ποιες παροχές θα ήταν βέλτιστες.

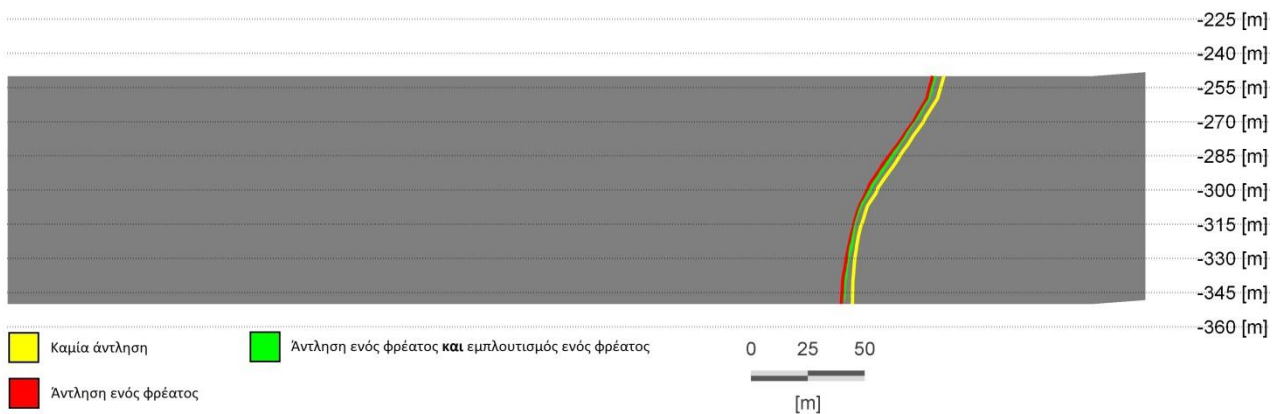
### 6.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΣΗΣ ΜΕΤΩΠΟΥ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΣΕ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΣΧΗΜΑΤΟΣ V

#### 6.3.1. Σύγκριση διαφορετικών διατάξεων άντλησης και εμπλουτισμού - Ισογραμμές συγκέντρωσης 0,5

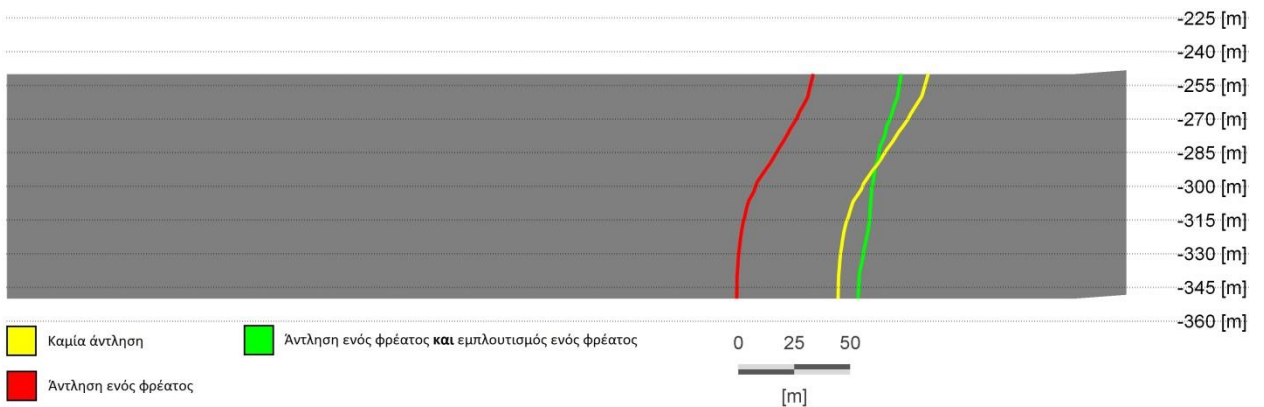
Ένα (1) φρέαρ άντλησης στο μέσο του υδροφορέα



Ένα (1) φρέαρ άντλησης στα ¾ του υδροφορέα



Τέσσερα (4) φρέατα άντλησης σε διάταξη ρόμβου

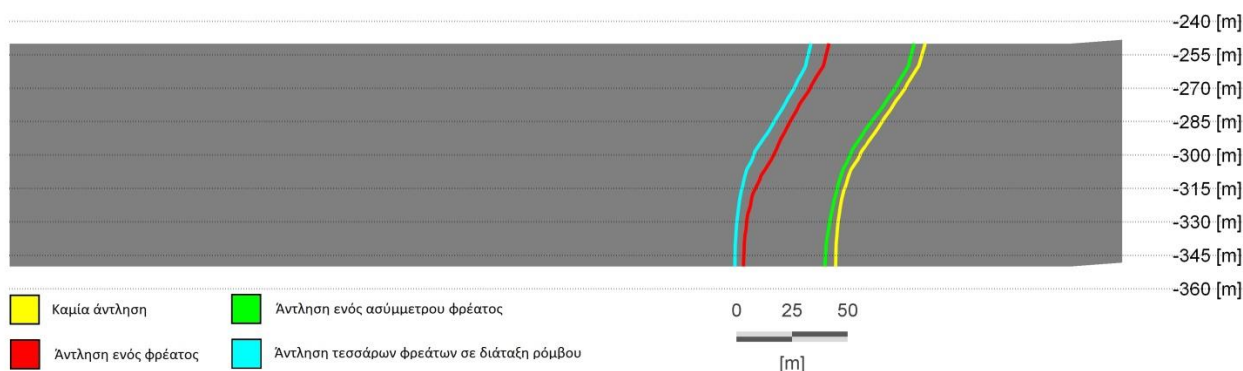


### 6.3.2. Σύγκριση μοντέλων άντλησης μεταξύ τους

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η επίδραση των διάφορων σεναρίων άντλησης που εφαρμόστηκαν στον υδροφορέα σχήματος V όσον αφορά το μέτωπο της υφαλμύρωσης.

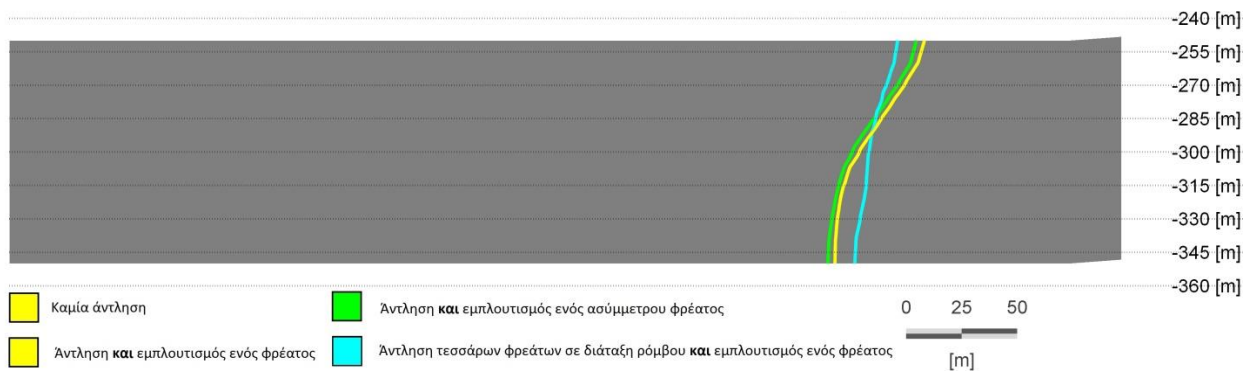
Και τα τέσσερα σενάρια αφορούν άντληση με την ίδια συνολική παροχή **1500 m<sup>3</sup>/day**, γεγονός που καθιστά ξεκάθαρο πως η επίδραση που φαίνεται στο σχήμα είναι αποκλειστικά αποτέλεσμα των διατάξεων των φρεάτων άντλησης.

Επιλέγεται η **Τομή 1** για την σύγκριση των αποτελεσμάτων (Κεφάλαιο 4.2.2., Θέσεις τομών μελέτης)



### 6.3.3. Σύγκριση μοντέλων εμπλουτισμού μεταξύ τους

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η επίδραση των σεναρίων εμπλουτισμού που εφαρμόστηκαν στο μέτωπο της υφαλμύρωσης. Σε κάθε σενάριο εφαρμόστηκε η ίδια παροχή στο 50% της παροχής άντλησης (**750 m<sup>3</sup>/day**). Οπότε κάθε επίδραση στο μέτωπο της υφαλμύρωσης εξαρτάται μόνο από τις διαφορετικές διατάξεις φρεάτων. Επιλέγεται η **Τομή 1** για την σύγκριση των αποτελεσμάτων (Κεφάλαιο 4.2.2., Θέσεις τομών μελέτης)



### 6.3.4. Συμπεράσματα

Στον υδροφορέα σχήματος V έγινε η εκτενέστερη μελέτη και τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

1. Όπως και στους υδροφορείς των προηγούμενων κεφαλαίων, έτσι και εδώ παρατηρούμε πως κατά την εφαρμογή φρέατος εμπλουτισμού παροχής 50% αυτής της άντλησης, το μέτωπο της υφαλμύρωσης όχι απλά επανέρχεται στην φυσική του θέση αλλά βελτιώνεται ελάχιστα. Αυτό σημαίνει πως μια σχετικά μικρή παροχή εμπλουτισμού μπορεί όχι μόνο να αναιρέσει τις επιπτώσεις της άντλησης αλλά να βελτιώσει και τη συνολική εικόνα του υδροφορέα
2. Στη περίπτωση του ασύμμετρου φρέατος στα  $\frac{3}{4}$  του υδροφορέα, βλέπουμε πως η επίδραση του στη θέση της **Τομής 1** είναι ανεπαίσθητη μεν, παρόλα αυτά υπαρκτή. Το ίδιο ισχύει και για το φρέαρ εμπλουτισμού στην αντίστοιχη θέση. Η απόσταση της τομής από το φρέαρ είναι 2500 m, αρκετά μεγαλύτερη από το πλάτος επίδρασης του φρέατος που υπολογίζεται από τις γραμμές ροής στα 750 m.
3. Στις περιπτώσεις άντλησης ενός φρέατος και διάταξης τεσσάρων φρεάτων σε διάταξη ρόμβου βλέπουμε πως το μέτωπο της υφαλμύρωσης ακολουθεί την ίδια σχεδόν συμπεριφορά. Τόσο στο ένα φρέαρ όσο και στην διάταξη τεσσάρων φρεάτων, η **συνολική** παροχή άντλησης είναι ίση. Συμπεραίνουμε λοιπόν πως οι διαφορές που προκύπτουν ανάλογα με τη διάταξη είναι μικρές όσον αφορά το μέτωπο της υφαλμύρωσης. Δεν ισχύει το ίδιο στη κατανομή του πιεζομετρικού φορτίου.
4. Στην περίπτωση εφαρμογής τεσσάρων φρεάτων άντλησης και ενός φρέατος εμπλουτισμού, βλέπουμε την ισογραμμή 0,5 να παίρνει μια διαφορετική μορφή και να τέμνει τις άλλες ισογραμμές. Κάτι τέτοιο δεν δικαιολογείται και είναι πιθανό να είναι αποτέλεσμα της πύκνωσης του καννάβου που στο σημείο θα χρειαζόταν να ήταν πιο πυκνός. Κάτι τέτοιο θα ανέβαζε εξαιρετικά τον υπολογιστικό φόρτο και έτσι απορρίφθηκε.

#### 6.4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΣΗΣ ΜΕΤΩΠΟΥ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΣΕ ΣΤΡΕΒΛΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ (WRAPPED) ΓΙΑ ΦΡΕΑΡ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΦΡΕΑΤΟΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΠΑΡΟΧΕΣ

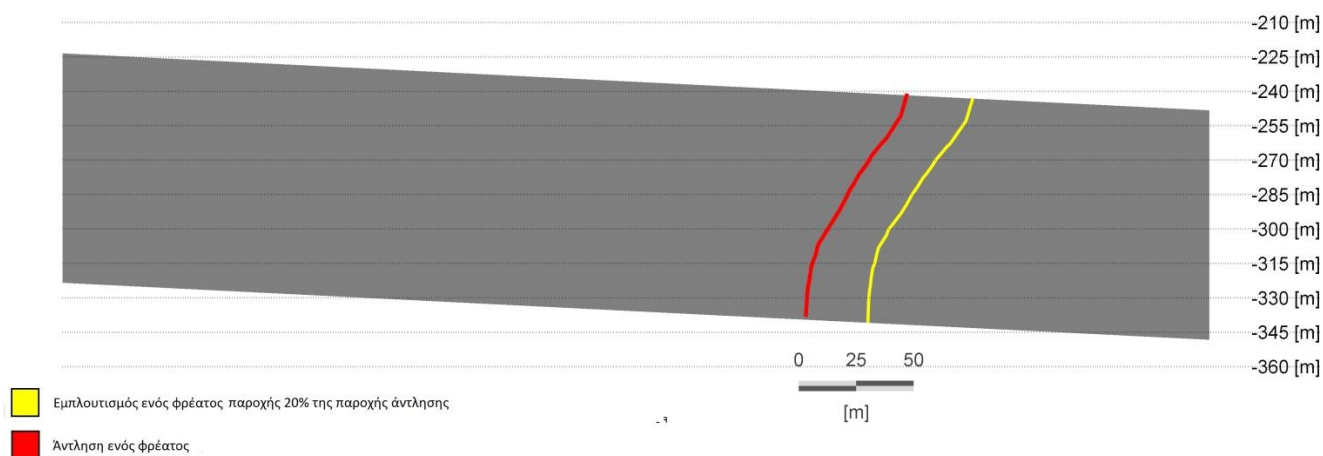
Διερευνήθηκε επίσης η περίπτωση χρήσης φρεάτων εμπλουτισμού διαφορετικών παροχών σε παράλληλη λειτουργία με αυτά της άντλησης.

Πιο συγκεκριμένα στον στρεβλό υδροφορέα έγινε δοκιμή για λειτουργία φρέατος άντλησης παροχής  $1500 \text{ m}^3/\text{day}$  σε απόσταση  $1000 \text{ m}$  από την ακτογραμμή στο μέσο του υδροφορέα και δύο διαφορετικά σενάρια εμπλουτισμού:

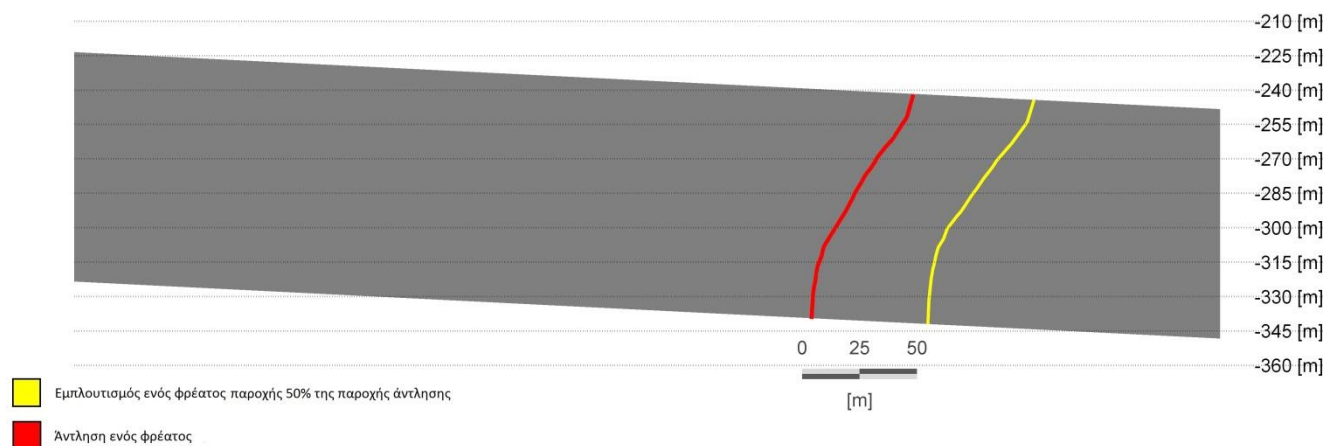
- ✓ Φρέαρ εμπλουτισμού παροχής 20% αυτής της άντλησης ( $300 \text{ m}^3/\text{day}$ ) στα  $500 \text{ m}$  από την ακτογραμμή, στο μέσο του υδροφορέα
- ✓ Φρέαρ εμπλουτισμού παροχής 50% αυτής της άντλησης ( $750 \text{ m}^3/\text{day}$ ) στα  $500 \text{ m}$  από την ακτογραμμή, στο μέσο του υδροφορέα

Και στις δύο περιπτώσεις, επιλέχθηκε η **Τομή 1** (Κεφάλαιο 4.2.2., Θέσεις τομών μελέτης) για την παρουσίαση των συγκριτικών αποτελεσμάτων.

##### 6.4.1. Φρέαρ εμπλουτισμού παροχής 20% της άντλησης



### 6.4.2. Φρέαρ εμπλουτισμού παροχής 50% της άντλησης



### 6.4.3. Συμπεράσματα

Εξάγεται με ασφάλεια το συμπέρασμα πως η θέση του μετώπου της υφαλμύρωσης μετατοπίζεται εντονότερα σε μεγαλύτερες παροχές εμπλουτισμού σε σχέση με μικρότερες.

Επίσης, όπως προέκυψε και από τις επιλύσεις και τα συγκριτικά των προηγούμενων κεφαλαίων, μια παροχή εμπλουτισμού της τάξης 50% αυτής της άντλησης είναι ικανή να φέρει τον υδροφορέα στην πρότερη –και σε καλύτερη- κατάσταση.

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στη παρούσα εργασία έγινε μια διερεύνηση του φαινομένου της υφαλμύρωσης σε τέσσερις γεωμετρικές υδροφορέων και για σενάρια άντλησης και παράλληλης λειτουργίας άντλησης και εμπλουτισμού.

Τα συμπεράσματα που εξάγονται παρουσιάζονται και πιο ειδικά ανά κεφάλαιο συγκρίσεων, παρόλα αυτά με ασφάλεια και σε γενικότερο επίπεδο μπορούμε να καταλήξουμε σε γενικά συμπεράσματα που αφορούν κάθε περίπτωση.

Η εφαρμογή παροχής εμπλουτισμού στο 50% αυτής της άντλησης σε κάθε περίπτωση έδειξε πως μπορεί να αναιρέσει τις επιπτώσεις της άντλησης που αφορούν τη θέση του μετώπου της υφαλμύρωσης. Μικρές διαφορές εμφανίζονται ανάλογα με τη διάταξη των φρεάτων, χωρίς να επηρεάζουν το συμπέρασμα αυτό.

Σημαντική επίδραση στο φαινόμενο της υφαλμύρωσης έχει η γεωμετρία των υδροφορέων. Παρατηρούμε πως τις εντονότερες μετατοπίσεις τις συναντάμε στον στρεβλό υδροφορέα (wrapped) ενώ στον οριζόντιο υδροφορέα τις λιγότερο έντονες. Αυτό οφείλεται στον ιδιαίτερα έντονο τρισδιάστατο χαρακτήρα του προβλήματος, που στη περίπτωση του στρεβλού (wrapped) υδροφορέα γίνεται πιο αντιληπτό. Η επιλογή των χαρακτηριστικών των υδροφορέων (διαστάσεις, λόγοι μήκους, πλάτους και πάχους, πυκνωση καννάβου και άλλα) έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να αναδεικνύεται η τρισδιάστατη φύση του προβλήματος.

Επίσης φάνηκε από τις επιλύσεις με διαφορετικές διατάξεις φρεάτων άντλησης πως όσο η συνολική παροχή άντλησης παρέμενε ίδια το μέτωπο της υφαλμύρωσης δεν έδειχνε σημαντικές διαφορές από διάταξη σε διάταξη. Οι διαφορές εντοπίζονταν κυρίως στη κατανομή του πιεζομετρικού φορτίου, όπου στη διάταξη των τεσσάρων φρεάτων παρατηρήθηκε μια συνολική πτώση του πιεζομετρικού φορτίου σε μεγαλύτερη έκταση αλλά μικρότερο ποσό σε σχέση με το ένα φρέαρ.

Αντικείμενα περαιτέρω μελέτης θα μπορούσαν να είναι:



- Επίδραση φρεάτων εμπλουτισμού *χωρίς* την ύπαρξη φρεάτων άντλησης, σαν μέθοδος αντιμετώπισης της υφαλμύρωσης σε υδροφορείς που δεν επιδρά ο ανθρώπινος παράγοντας
- Ευρύτερη διερεύνηση στην επίδραση διαφορετικών παροχών και διατάξεων φρεάτων εμπλουτισμού. Ποιες διατάξεις και ποιες παροχές είναι βέλτιστες για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων προβλημάτων
- Ευρύτερη διερεύνηση υδροφορέων διάφορων γεωμετριών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε και η μελέτη φυσικού υδροφορέα με διαστάσεις και γεωμετρία από επιστητό πρόβλημα
- Με δεδομένη μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ, θα παρουσίαζε ενδιαφέρον και μια μελέτη των ίδιων προβλημάτων με μεγαλύτερη πύκνωση καννάβου, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι παρεκκλίσεις λόγω πύκνωσης.
- Στην περίπτωση της άντλησης με διάταξη φρεάτων σε σχηματισμό ρόμβου, θα παρουσίαζε ιδιαίτερο ενδιαφέρον να μελετηθεί η θέση του φρέατος εμπλουτισμού και στο *εσωτερικό* της διάταξης (εντός του ρόμβου)
- Τέλος, θέμα για περεταίρω διερεύνηση θα μπορούσε να είναι και η μελέτη του φαινομένου σε συνθήκες μη μόνιμης ροής, παράμετρο που το λογισμικό Feflow υποστηρίζει.

## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- E. Abarca, "EFFECTIVE DISPERSION IN SEAWATER INTRUSION THROUGH HETEROGENEOUS AQUIFERS", Spain 2004
- E. Abarca, PhD Thesis "SEAWATER INTRUSION IN COMPLEX GEOLOGICAL ENVIRONMENTS", Spain 2006
- E. Abarca, J. Carrera, Xavier Sanchez-Vila, Marco Dentz, "Anisotropic dispersive Henry problem", Spain 2006
- E. Ευαγόρας, "ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΑΚΡΩΤΗΡΙΟΥ", Αθήνα 2012
- Κ. Σωτηροπούλου, "ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΜΕΣΑΡΙΑΣ ΣΤΗ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ", Αθήνα 2010
- Α. Λύκου, "Μέθοδοι και τεχνολογίες Στεγανοποίησης προσχωματικών λεκανών». Αθήνα 2011
- Ι. Νικηφοράκης, "Μαθηματική προσομοίωση υπόγειου υδροφορέα βόρειας παραλιακής και ημιλοφώδους ζώνης Νομού Κορινθίας", Αθήνα 2008
- Α. Τσάνης, "Τρισδιάστατη προσομοίωση υπόγειου υδροφορέα με το λογισμικό FEFLOW και μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρωσης", Αθήνα 2010
- O. Essink, "Problems with large scale modeling of saltwater intrusion in 3D, Sweden 1996
- Α. Νάνου, "Υφαλμύρωση Παράκτιων υδροφορέων, Συμπόσιο «ΑΙΓΑΙΟ, ΝΕΡΟ, ΒΙΩΣΙΜΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ»", Πάρος 2001
- Κ. Κωνσταντινίου, "Έρευνες για τεχνητό εμπλουτισμό των υπόγειων νερών της Κύπρου με νερό τριτοβάθμιας επεξεργασίας", Λάρνακα 2007
- Κ. Βουδούρης, "ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ", Αθήνα 2009
- Α. Νάνου, "Εισαγωγή στα υπόγεια Νερά», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2006

- J. Bear, "Seawater intrusion in coastal aquifers : concepts, methods and practices", Dordrecht, Kluwer 1999
- H. Diersch, O. Kolditz, "Variable-density flow and transport in porous media: Approaches and challenges", Tubingen 2002
- Α. Νάνου, "Υδραυλική των Υπογείων νερών", Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2008
- Ε. Χατζούλη, "Υφαλμύρωση παράκτιων υδροφορέων, διερεύνηση παράκτιου υδροφορέα στη περιοχή «ΙΡΙΑ» Αργολίδας", Αθήνα 2005
- <http://www.feflow.info/documentation.html>
- Σταμάτης Γεώργιος, «Υφαλμύρωση των παράκτιων υδροφορέων και κλιματική αλλαγή. Ειδικές και γενικές επιπτώσεις»  
<http://www.blod.gr/lectures/Pages/viewlecture.aspx?LectureID=416>