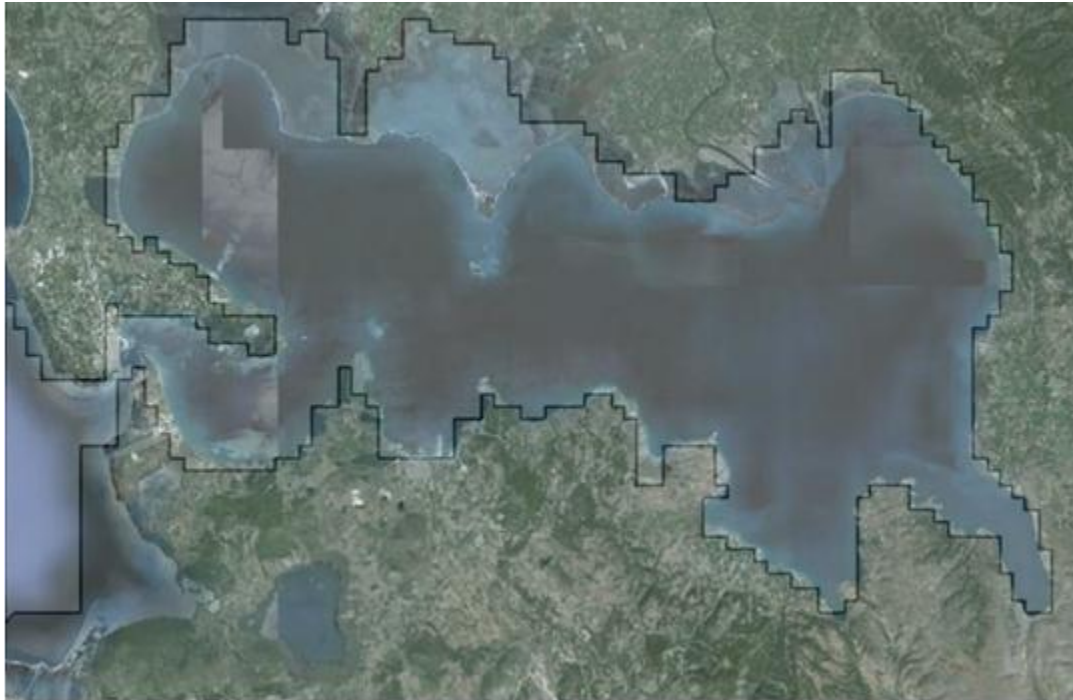




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
ΑΝΑΝΕΩΣΗΣ ΥΔΑΤΩΝ
ΣΤΟΝ ΑΜΒΡΑΚΙΚΟ ΚΟΛΠΟ**



Λευκή Βικτωρία Λοβέρδου

Επιβλέπων: Α. Ι. Στάμου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2011

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	i
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vi
ABSTRACT.....	vii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. Γενικά.....	1
1.2. Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας	2
1.3. Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας.....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	1
2.1. Εισαγωγή.....	1
2.1.1. Bolin and Rodhe.....	1
2.1.2. Zimmerman.....	2
2.1.3. Takeoka.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	7
3.1. Εισαγωγή.....	7
3.2. Ποταμός Λούρος.....	8
3.3. Ποταμός Άραχθος.....	8
3.4. Στοιχεία περιοχής μελέτης	9
3.5. Βαθυμετρία περιοχής μελέτης	11
3.6. Μετεωρολογικά στοιχεία	11
3.6.1. Στοιχεία μετεωρολογικού σταθμού Πρεβέζης.....	11
3.7. Στοιχεία παλίρροιας.....	13
3.8. Χαρακτηριστικά του κόλπου	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ.....	16
4.1. Όρια περιοχών της περιοχής μελέτης	16
4.2. Μεθοδολογία υπολογισμών.....	18

4.3. Θεωρητικοί υπολογισμοί.....	18
4.3.1. Υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT).....	18
4.3.2. Χρόνος παραμονής (RT).....	19
4.4. Έλεγχος του όγκου εξόδου Vout	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ FLOW-3DL.....	21
5.1. Εισαγωγή.....	21
5.2. Διαφορικές εξισώσεις πεδίου ροής.....	21
5.3. Διαφορικές εξισώσεις συμπεριφοράς ποιοτικών παραμέτρων	22
5.3.1. Γενικά.....	22
5.3.2. Εξίσωση ποιοτικής παραμέτρου	23
5.4. Οριακές συνθήκες.....	23
5.4.1. Γενικά.....	23
5.4.2. Ελεύθερη επιφάνεια	23
5.4.3. Πυθμένας.....	23
5.4.4. Διεπιφάνειες μεταξύ των στρωμάτων	24
5.4.5. Στερεά όρια.....	24
5.4.6. Όρια ανοικτής θάλασσας.....	24
5.5. Αριθμητική επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής και της συμπεριφοράς ποιοτικών παραμέτρων	25
5.5.1. Γενικά.....	25
5.5.2. Διακριτοποίηση του πεδίου	25
5.5.3. Διαδικασία Επίλυσης.....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΛΕΓΜΑΤΩΝ	29
6.1. Γενικά.....	29
6.2. Χαρακτηριστικά αραιού πλέγματος.....	29
6.3. Χαρακτηριστικά πυκνού αριθμητικού πλέγματος	30
6.3.1. Κύρια χαρακτηριστικά του αριθμητικού πλέγματος	30

6.3.2. Όρια και χαρακτηριστικά στρωμάτων της περιοχής μελέτης	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	33
7.1. Ανεμογενή ρεύματα	33
7.2. Σενάρια και παραδοχές υπολογισμών	35
7.2.1. Χαρακτηριστικά βασικών σεναρίων αραιού πλέγματος	35
7.2.2. Χαρακτηριστικά βασικών σεναρίων υδροδυναμικών υπολογισμών πυκνού πλέγματος .	37
7.3. Υδροδυναμικοί υπολογισμοί αραιού πλέγματος	39
7.3.1. Υδροδυναμικοί υπολογισμοί βασικών σεναρίων	39
7.3.2. Σχολιασμός βασικών σεναρίων	42
7.3.3. Υδροδυναμικοί υπολογισμοί ανάλυσης ευαισθησίας	43
7.3.4. Σχολιασμός ανάλυσης ευαισθησίας	45
7.4. Υδροδυναμικοί υπολογισμοί πυκνού πλέγματος	46
7.4.1. Υδροδυναμικοί υπολογισμοί βασικών σεναρίων	46
7.4.2. Σχολιασμός βασικών σεναρίων	53
7.4.3. Υδροδυναμικοί υπολογισμοί ανάλυσης ευαισθησίας	56
7.4.4. Σχολιασμός ανάλυσης ευαισθησίας	58
7.5. Σύγκριση αποτελεσμάτων	59
7.5.1. Σύγκριση αποτελεσμάτων βασικών σεναρίων	59
7.5.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης ευαισθησίας	60
7.5.3. Σχολιασμός αποτελεσμάτων σύγκρισης	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ	62
8.1. Χαρακτηριστικά βασικών σεναρίων των υπολογισμών ποιότητας	62
8.2. Υπολογισμοί ποιότητας νερών	63
8.2.1. Υπολογισμοί ποιότητας νερών βασικών σεναρίων	63
8.2.2. Υπολογισμοί ποιότητας νερών σεναρίων ανάλυσης ευαισθησίας	66
8.2.3. Σχολιασμός αποτελεσμάτων ποιότητας	67
8.3. Υπολογισμοί ποιότητας πυκνού πλέγματος	69

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	70
9.1. Δεδομένα και παραδοχές.....	70
9.2. Συμπεράσματα.....	70
9.3. Προτάσεις.....	72
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	73
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	75

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την παρουσία του επιβλέποντος Καθηγητή Ε.Μ.Π. Α. Ι. Στάμου, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την πολύτιμη καθοδήγηση και συμπαράστασή του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου.

Επίσης ευχαριστώ την Β. Τσουκαλά, Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π., για την παροχή πολύτιμων στοιχείων.

Ιδιαίτερως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Τ. Αλμπάνη, Καθηγητή στο Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων για την παροχή χρήσιμων πληροφοριών σχετικά με την περιοχή μελέτης.

Θερμά ευχαριστώ τον Κ. Ματσούκη, τον Υ.Δ. κ. Π. Δημητριάδη, την Υ.Δ. κα. Α. Γκεσούλη και τον Υ.Δ. κ. Ι. Νικηφοράκη για τη βοήθειά τους όλους αυτούς τους μήνες αλλά και για τις χρήσιμες συμβουλές που μου παρείχαν σε κρίσιμα ζητήματα. Ευχαριστώ ακόμα την Υ.Δ. κα. Γ. Παπαδονικολάκη για τη βοήθεια και τη συμπαράσταση που μου παρείχε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο Αμβρακικός Κόλπος βρίσκεται στην βορειοδυτική περιοχή της Ελλάδας και είναι ένας από τους μεγαλύτερους ημίκλειστους κόλπους της και έχει περίπου 40 km μήκος και 15 km πλάτος. Χαρακτηρίζεται ως «Εθνικός Δρυμός» από την ελληνική νομοθεσία και ένα τμήμα του υγρότοπου του Αμβρακικού έχει οριστεί ως προστατευόμενο οικοσύστημα από τις εθνικές και διεθνείς οδηγίες (Ramsar). Ο υγρότοπος είναι ένα σύνθετο οικοσύστημα που αποτελείται από λιμνοθάλασσες, από τα δέλτα των ποταμών Λούρου και Αράχθου που εκρέουν στον κόλπο, δημιουργώντας ένα περίπλοκο λιμνοθαλάσσιο σύστημα που αποτελείται από 3 μεγάλες, και περισσότερες από 20 μικρότερες λιμνοθάλασσες.

Η ανανέωση του νερού στον Αμβρακικό κόλπο είναι μείζονος σημασίας για την ποιότητα του νερού κυρίως για την οξυγόνωση των υδάτων και τον αυτοκαθαρισμό του κόλπου. Η ανανέωση των υδάτων πραγματοποιείται αποκλειστικά μέσω ενός στενού διαύλου που συνδέει τον κόλπο με το Ιόνιο Πέλαγος, το οποίο έχει 3,0 km μήκος, πλάτος που κυμαίνεται από 0,6 έως 2,0 km και βάθος από 2,0 έως 13,0 m. Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται προκειμένου να υπολογιστεί η ταχύτητα με την οποία ανανεώνεται το νερό ενός ημίκλειστου κόλπου. Οι πιο κοινοί όροι που χρησιμοποιούνται είναι: ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT) και ο χρόνος παραμονής (RT).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μια προκαταρκτική εκτίμηση της HRT και RT στον Αμβρακικό κόλπο. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με τον υπολογιστικό κώδικα FLOW-3DL, που έχει δομηθεί στο ΕΜΠ, για τον υπολογισμό του πεδίου ροής, ο οποίος περιλαμβάνει το υπομοντέλο QUAL-3DL για τους υπολογισμούς ποιότητας. Η βασική δομή του κώδικα στηρίζεται στις εξισώσεις τριών διαστάσεων συνέχειας και διατήρησης της ορμής για μη μόνιμη ροή, διατυπωμένες για στρώματα νερού σταθερού πάχους, στα οποία υποδιαιρείται το εξεταζόμενο πεδίο. Οι διαφορικές εξισώσεις επιλύονται αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Το συνεχές πεδίο υπολογισμού διακριτοποιείται σε μικρές ορθογωνικές περιοχές (διαφορικοί όγκοι), στους οποίους γίνεται η ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων κατά βάθος και προκύπτουν οι αριθμητικές λύσεις. Ο κώδικας FLOW-3DL χρησιμοποιεί ρητό (explicit) σχήμα επίλυσης με έκκεντρο κάνναβο στο χώρο και με εμπρόσθιες διαφορές στο χρόνο. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για δύο πλέγματα, τα οποία καλύπτουν την περιοχή του Αμβρακικού Κόλπου και ένα μικρό μέρος του Ιονίου. Ο σκοπός της εξέτασης των δύο πλεγμάτων ήταν η διερεύνηση της επίδρασης του χωρικού βήματος στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Το αραιό πλέγμα αποτελείται από 19x10 διαφορικούς όγκους με βήμα ίσο με 2500 m και 7 στρώματα στην οριζόντια διεύθυνση. Το πυκνό πλέγμα αποτελείται από 83x49 διαφορικούς όγκους (με βήμα ίσο με 500 m και 7 στρώματα στην z-διεύθυνση). Από την εφαρμογή του μοντέλου είναι τα εξής συμπεράσματα: (1) το HRT προκύπτει ίσο με 2,1 χρόνια. (2) Η επίδραση των παροχών των ποταμών Λούρου και Αράχθου στο HRT είναι σημαντική και προκαλεί μείωση του HRT κατά 0,3 χρόνια ή 12,5% για το μέσο εύρος παλίρροιας. (3) Η επίδραση του ανέμου στην HRT είναι ήσσονος σημασίας (<2%), λόγω του μικρού μεγέθους του στομίου του κόλπου που απαγορεύει την ανταλλαγή σημαντικών υδάτινων μαζών με το Ιόνιο Πέλαγος. (4) Η τιμή του RT στον Κόλπο είναι ίση με 3,7 χρόνια, δηλαδή σχεδόν το διπλάσιο του HRT (1,7 φορές μεγαλύτερη).

ABSTRACT

The Amvrakikos Gulf is located in the north-western coast of Greece and is one of the largest semi-enclosed embayments in Greece being about 40 km long and 15 km wide. It is characterized as “National Park” by the Greek legislation and is a part of the wetland of Amvrakikos that is a preserved ecosystem by national and international directives (Ramsar). The wetland is a complex ecosystem consisting of the shallow marine waters of the Gulf, the deltas of Louros and Arachthos rivers that gush into the Gulf and a lagoon system composed of 3 large and over 20 smaller lagoons.

Water renewal of the Amvrakikos Gulf is of major importance for its water quality mainly through the supply of oxygen and the removal of pollution; the renewal of the waters of the Gulf is made exclusively via a narrow channel connecting the Gulf with the Ionian Sea that has a 3,0 km length, width ranging from 0,6 to 2,0 km and depth from 2,0 to 13,0 m. There are various indicators of how fast the water of a semi-enclosed coastal embayment is renewed via transport and mixing; the most common terms being used are hydraulic retention time (HRT) and residence time (RT).

In the present work a preliminary estimation of the HRT and RT in the Amvrakikos Gulf is performed via the application of a 3-D integrated model that consists of the hydrodynamic sub-model FLOW-3DL and the water quality sub-model QUAL-3DL. These models, that have been developed in the NTUA, involve the 3-D non-steady state flow (continuity and momentum) equations and the convection-diffusion equation for the concentration of a conservative pollutant expressed in layer formulation. Two space-staggered computational grids were used, which cover the area of Amvrakikos Gulf and a small part of the Ionian sea. The purpose of the examination of two grids was to investigate the effect of the space step on the results. The coarse grid consisted of 19x10 control volumes with constant resolution equal to 2500 m and 7 layers in the direction of the depth. The fine grid consisted of 83x49 control volumes (space step is equal to 500m and 7 layers in z-direction). From the application of the model the following conclusions are drawn: (1) The HRT in the Gulf is equal to 2,1 years. (2) The effect of the flow rates originating from the rivers Louros and Arachthos on HRT is relatively important and contributes to the reduction of the HRT by 0,3 years or 12,5% for the mean tidal range. (3) The effect of the wind on HRT is minor (<2%) due to the small size of the entrance to the Gulf that prohibits the exchange of significant water masses with the Ionian Sea. (4) The theoretical RT in the Gulf is equal to 3,7 years, i.e. almost twice the HRT (1,7 times).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενικά

Η προστασία των παράκτιων ζωνών έχει εξελιχθεί σε ένα από τα μείζονα ζητήματα για την περιβαλλοντική διαχείριση, καθώς οι παράκτιες περιοχές αποτελούν μία ζώνη αλληλεπίδρασης μεταξύ θάλασσας και ξηράς. Η έντονη ανθρωπογενής δραστηριότητα στις παράκτιες ζώνες αποτελεί επιβαρυντικό παράγοντα για το υδάτινο περιβάλλον. Προϊόντα αυτής της δραστηριότητας (π.χ. οργανικής προέλευσης, θρεπτικά, βαρέα μέταλλα κ.α) καταλήγουν στην παράκτια ζώνη και από εκεί μεταφέρονται στη συνέχεια στην ανοικτή θάλασσα. Ιδιαίτερα οι ημίκλειστες παράκτιες περιοχές είναι ακόμη περισσότερο ευαίσθητες στην ρύπανση καθώς η επικοινωνία τους με την ανοιχτή θάλασσα είναι εξαιρετικά δύσκολη. Για τον λόγο αυτό, ο υπολογισμός του χρόνου ανανέωσης των υδάτων των περιοχών αυτών, βρίσκεται στο επίκεντρο της επιστημονικής έρευνας προκειμένου να αποφεύγεται η ποιοτική τους υποβάθμιση. Με βάση και τις επιταγές της Ευρωπαϊκής οδηγίας πλαίσιο EC2000/60 η χώρα μας καλείται να διαχειριστεί τους εθνικούς υδατικούς πόρους με στόχο την αποτροπή της περεταίρω υποβάθμισης τους.

Η περιοχή του Αμβρακικού κόλπου η οποία μελετήθηκε στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, έχει πολύ μεγάλη περιβαλλοντική αξία καθώς φιλοξενεί πολλά σπάνια είδη χλωρίδας και πανίδας. Επίσης, η οικονομία της περιοχής είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το υδάτινο περιβάλλον (αλιεία, τουρισμός). Ο Αμβρακικός κόλπος δεν προστατεύεται μόνο από την εθνική νομοθεσία, σύμφωνα με την οποία έχει χαρακτηριστεί ως εθνικός δρυμός, αλλά και από διεθνείς συνθήκες. Συγκεκριμένα, έχει οριστεί προστατευόμενη περιοχή και από τη συνθήκη του "Ramsar".

Ωστόσο, ο Αμβρακικός είναι μια από τις πιο επιβαρυνμένες περιβαλλοντικά περιοχές καθώς δέχεται μεγάλα ρυπαντικά φορτία εξαιτίας της εντατικής καλλιέργειας στην γεινιάζουσα πεδιάδα της Άρτας. Ακόμη δέχεται τα ανεπεξέργαστα λύματα των γύρω νομών και άλλα ρυπαντικά φορτία από βιομηχανικές δραστηριότητες. Ένα ακόμη αποτέλεσμα της ρύπανσης που δέχεται ο κόλπος, και εξαιτίας του μικρού χρόνου ανανέωσης των υδάτων, είναι ο ευτροφισμός που αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για την πλούσια ιχθυοπανίδα. Η μελέτη επομένως του χρόνου ανανέωσης έχει ιδιαίτερη περιβαλλοντική αξία για τον Αμβρακικό.

Η μελέτη της κατάστασης ενός υδάτινου πεδίου μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους όπως με επιτόπου μετρήσεις, με κατασκευή ομοιώματος στο εργαστήριο ή με δημιουργία μαθηματικού ομοιώματος. Η χρησιμοποίηση μαθηματικών μοντέλων, εδώ και αρκετά χρόνια έχει καθιερωθεί ως η πλέον προχωρημένη μέθοδος πρόβλεψης των υδροδυναμικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών των παράκτιων περιοχών.

Τα μαθηματικά ομοιώματα, στα οποία επιλύονται οι βασικές εξισώσεις ροής (συνέχειας και ποσότητας κίνησης) και μεταφοράς-διάχυσης των ποιοτικών χαρακτηριστικών των νερών ενός αποδέκτη, δίνουν τη δυνατότητα προσομοίωσης της κυκλοφορίας των νερών καθώς και της ποιοτικής τους κατάστασης (ρύπανση). Τα μοντέλα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τη μαθηματική προσομοίωση της ανανέωσης των υδάτων σε παράκτιες περιοχές.

1.2. Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μαθηματική προσομοίωση του χρόνου ανανέωσης των υδάτων στον Αμβρακικό Κόλπο. Συγκεκριμένα μελετήθηκε η υδροδυναμική συμπεριφορά του κόλπου και η χρονική εξέλιξη του φαινομένου της μεταφοράς και διάχυσης ενός συντηρητικού ρύπου μέσα στο σώμα του κόλπου. Επίσης διερευνήθηκε η επίδραση διαφόρων παραγόντων όπως η παλίρροια, ο άνεμος αλλά και οι εισροές των ποταμών Λούρου και Άραχθου.

1.3. Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 9 Κεφάλαια.

Στο **1ο Κεφάλαιο** γίνεται μια εισαγωγή για την σημασία της μελέτης του χρόνου ανανέωσης ημίκλειστων παράκτιων περιοχών και συγκεκριμένα της περίπτωσης του Αμβρακικού κόλπου καθώς παρατίθεται και ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο **2ο Κεφάλαιο** γίνεται μια σύντομη βιβλιογραφική διερεύνηση των θεωρητικών ορισμών που έχουν δοθεί για τον χρόνο παραμονής ρύπου σε υδάτινο σώμα.

Στο **3ο Κεφάλαιο** γίνεται μια γενική περιγραφή της παράκτιας περιοχής του Αμβρακικού Κόλπου, με ιδιαίτερη αναφορά στην περιβαλλοντική σημασία του, στα μετεωρολογικά στοιχεία και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του..

Στο **4ο Κεφάλαιο** αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά τους υπολογισμούς αλλά και οι μέθοδοι υπολογισμού των υδραυλικών και των ποιοτικών χρόνων παραμονής.

Στο **5ο Κεφάλαιο** περιγράφεται το μαθηματικό μοντέλο FLOW-3DL που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς του πεδίου.

Στο **6ο Κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των δύο αριθμητικών πλεγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο **7ο Κεφάλαιο** αφού πρώτα γίνεται εκτενής αναφορά στην γένεση ανεμογενών ρευμάτων, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που προέκυψαν από το αραιό και το πυκνό πλέγμα υπολογισμών τόσο για τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του κόλπου καθώς και ο υπολογισμός των υδραυλικών χρόνων παραμονής. Ακολουθεί ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων για μια σειρά από παράγοντες που υπεισέρχονται στο μοντέλο.

Στο **8ο Κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που προέκυψαν και από τα δυο πλέγματα για τον ποιοτικό υπολογισμό των χρόνων παραμονής συντηρητικού ρύπου στον κόλπο.

Στο **9ο Κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση, και προτείνονται κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα.

Στο **10ο Κεφάλαιο** παρατίθεται η χρησιμοποιηθείσα βιβλιογραφία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

2.1. Εισαγωγή

Στο παρελθόν έχουν χρησιμοποιηθεί πολλοί διαφορετικοί όροι για να περιγράψουν την διαδικασία ανταλλαγής νερού μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών υδάτινων σωμάτων. Πολλές φορές οι έννοιες αυτές είναι εξαιρετικά συγκεχυμένες ενώ ενίοτε χρησιμοποιήθηκε διαφορετικός όρος για να περιγράψει την ίδια ακριβώς διαδικασία. Παρακάτω γίνεται μια προσπάθεια να συγκεντρωθούν όλες οι μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί.

2.1.1. Bolin and Rodhe

Εισήγαγαν τον όρο της «ηλικίας» (“age”) ενός ρευστού σωματιδίου που παραμένει στο υδάτινο σώμα.

Οι παραπάνω περιόρισαν τη μελέτη τους σε μόνιμες συνθήκες ροής (steady state conditions) δηλαδή θεώρησαν ότι η συνολική μάζα και οι στατιστικές κατανομές παραμένουν αμετάβλητες στο χρόνο.

Κάθε στοιχειώδες ρευστό σωματίδιο μέσα σε ένα υδάτινο σώμα χαρακτηρίζεται από τον χρόνο τ που έχει περάσει από τη στιγμή που εισήλθε μέσα στο σώμα. Αυτός χρόνος ορίζεται ως η ηλικία του σωματιδίου. Για το σύνολο των σωματιδίων ορίζεται η αθροιστική συνάρτηση $M(\tau)$ ως η μάζα που έχει μικρότερο ή ίσο χρόνο με τ στο κλειστό υδάτινο σώμα.

Αν η συνολική μάζα του κλειστού σώματος είναι M_0 τότε:

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} M(\tau) = M_0 \quad (2.1-1)$$

Ακόμη ορίζεται η συνάρτηση συχνότητας $\psi(\tau)$ που απεικονίζει τη συχνότητα με την οποία οι στοιχειώδεις μάζες φτάνουν στη ηλικία τ (“age distribution” function of the particles in the fluid):

$$\int_0^{\infty} \psi(\tau) d\tau = 1 \quad (2.1-2)$$

και

$$\psi(\tau) = \frac{1}{M_0} \frac{dM(\tau)}{d\tau} \quad (2.1-3)$$

Στη συνέχεια όρισαν την παροχή εισόδου και εξόδου από το ημίκλειστο υδάτινο σώμα F_0 η οποία, επειδή έχουν θεωρήσει μόνιμες συνθήκες ροής, είναι σταθερή με το χρόνο. Κάθε στοιχειώδης μάζα που εξέρχεται από το σώμα μπορεί να χαρακτηριστεί από το χρόνο που πέρασε από την στιγμή που εισήλθε σε αυτήν. Για το σύνολο των σωματιδίων ορίζεται η αθροιστική συνάρτηση της $F(\tau)$ ως η μάζα που εξέρχεται από το σώμα και έχει περάσει μικρότερο ή ίσο χρόνο με τ μέσα στο υδάτινο σώμα. Η συνάρτηση αυτή ονομάζεται χρόνος διέλευσης (transit time ή residence time). Προφανώς,

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} F(\tau) = F_0 \quad (2.1-4)$$

και

$$\phi(\tau) = \frac{1}{F_0} \frac{dF(\tau)}{d\tau} \quad (2.1-5)$$

Η συνάρτηση συχνότητας του χρόνου διέλευσης δηλαδή η κατανομή των σωματιδίων που εξέρχονται από τα σώμα σε ηλικία τ .

Για μόνιμες συνθήκες ροής ισχύει :

$$F_0 - F(\tau) = M_0 \psi(\tau) = \frac{dM(\tau)}{d\tau} \quad (2.1-6)$$

Η διαφορά $F_0 - F(\tau)$ είναι η παροχή εξόδου στην μονάδα του χρόνου των ρευστών σωματιδίων με ηλικία μεγαλύτερη από τ . Για μόνιμες συνθήκες ροής αυτή η απώλεια εξισορροπείται από των αριθμό των στοιχειωδών σωματιδίων που φτάνουν την ηλικία τ στη μονάδα του χρόνου ($M_0 \psi(\tau)$). Από τις εξισώσεις 2.1-5 και 2.7-6 προκύπτει η εξίσωση 2.1-7:

$$\phi(\tau) = -\frac{M_0}{F_0} \frac{d\psi(\tau)}{d\tau} \quad (2.1-7)$$

Οι Bolin and Rodhe παρομοιάζουν την πορεία των ρευστών σωματιδίων με έναν ανθρώπινο πληθυσμό όπου $M(\tau)$ είναι ο αριθμός των ανθρώπων με ηλικία μικρότερη ή ίση από τ και $M_0 \psi(\tau)$ η κατανομή της ηλικίας σε τάξεις. $F(\tau)$ είναι ο ετήσιος αριθμός ατόμων που πεθαίνουν πριν φτάσουν τη ηλικία τ . Η εξίσωση (2.1-7) εκφράζει στην παραπάνω αναλογία ότι ο αριθμός των θανάτων ατόμων ηλικίας μεγαλύτερης του τ εξισορροπείται από των αριθμό των ατόμων που φτάνουν την ηλικία των τ (Bolin et al, 1972).

2.1.2. Zimmerman

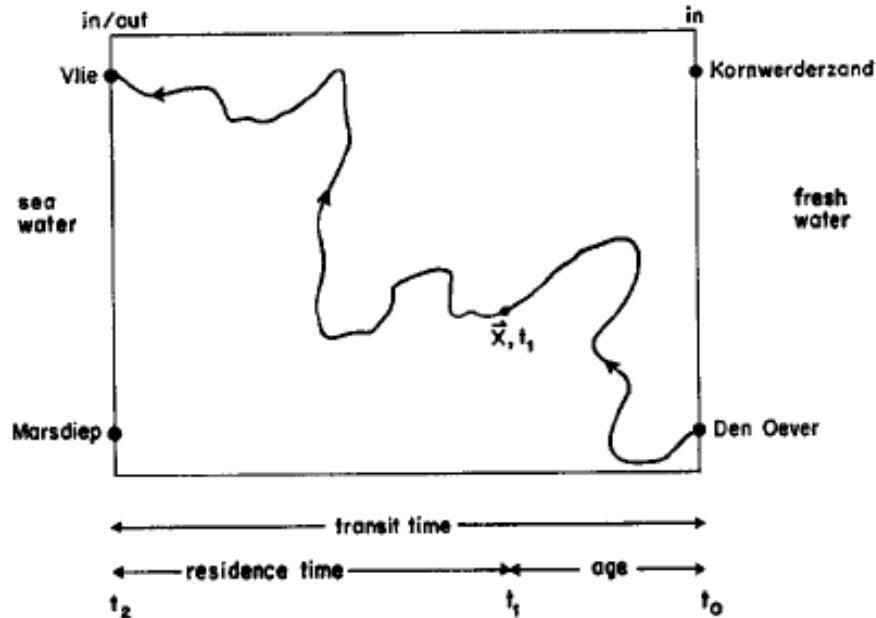
Όρισε έναν διαφορετικό χρόνο διελεύσεως (“transit time”) και χρόνο παραμονής “residence time” (Zimmerman, 1976).

Θεώρησε μια φυσική λεκάνη η οποία αποτελείτο από πεπερασμένο αριθμό «ρευστών πακέτων» (“water parcels”) τα οποία χαρακτηρίζονται από (a,i) όπου a η θέση εισόδου στη λεκάνη και i ο αριθμός του «ρευστού πακέτου». Αφού εισέλθουν στην λεκάνη τα «πακέτα» εξέρχονται από αυτήν μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Οι συντεταγμένες που περιγράφουν την ακολουθία των θέσεων του «πακέτου» απεικονίζουν την τροχιά του πακέτου (trajectory path) και είναι συνάρτηση χρόνου.

Ο χρόνος που απαιτείται για να διανύσει το ρευστό πακέτο (a,i) από την είσοδο μέχρι την έξοδο της λεκάνης ονομάζεται χρόνος διέλευσης (transit time) $\tau t(a,i)$ και ο συνολικός μέσος χρόνος διέλευσης για όλα τα πακέτα δίνεται από τον τύπο 2.1-8:

$$\langle \tau t \rangle (a) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \frac{\tau t(a,i)}{N} \quad (2.1-8)$$

όπου N ο συνολικός αριθμός των πακέτων. Όπως φαίνεται από την παραπάνω εξίσωση ο συνολικός μέσος χρόνος εξαρτάται από τις συντεταγμένες της εισόδου. Ακόμη, είναι συνάρτηση και του χρόνου αλλά αν θεωρηθούν μόνιμες συνθήκες ροής ο χρόνος μπορεί να αγνοηθεί.



Σχήμα 2.1-1. Τροχιά ενός ρευστού πακέτου από την είσοδο μέχρι την έξοδο της λεκάνης (Πηγή: *Nederlands journal of Sea Research*)

Στο Σχήμα 2.1-1 απεικονίζεται η τροχιά ενός ρευστού πακέτου από την είσοδο μέχρι την έξοδο της λεκάνης.

Στη συνέχεια ο Zimmerman αντί να υπολογίζει το χρονικό διάστημα που χρειάζεται το πακέτο να φτάσει από την είσοδο στην έξοδο, χρησιμοποίησε μια χρονική κλίμακα για να υπολογίζει τον χρόνο που απομένει για να φτάσει το πακέτο στην έξοδο αφού πρώτα έχει φτάσει στην θέση x (αυστηρά την πρώτη φορά που φτάνει στην θέση αυτή καθώς ενδέχεται να φτάσει εκεί παραπάνω από μία φορά). Αυτή την χρονική κλίμακα την ονόμασε χρόνο παραμονής (residence time) $\tau(x, a, i)$. Έτσι, όπως στην περίπτωση του χρόνου διελεύσεως, και αναφερόμενος στο σύνολο των ρευστών πακέτων, όρισε τον συνολικό μέσο χρόνο παραμονής:

$$\langle \tau \rangle (x, a) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \frac{\tau(x, a, i)}{N} \quad (2.1-9)$$

Επειδή ο χρόνος παραμονής δεν εξαρτάται, με βάση τον παραπάνω ορισμό, από την τροχιά που έχει διανύσει το πακέτο μέχρι να φτάσει στην θέση x , η παραπάνω εξίσωση δεν εξαρτάται από τις συντεταγμένες της εισόδου.

Ακόμη, ο Zimmerman όρισε σαν ηλικία $age \tau_a(x, a, i)$ το συμπλήρωμα του χρόνου που απομένει για να φτάσει το πακέτο από την θέση εισόδου a μέχρι την θέση x . Η συνάρτηση της ηλικίας σε αντίθεση με τη συνάρτηση του χρόνου παραμονής εξαρτάται από τις συντεταγμένες της εισόδου.

Επιπλέον, τροποποίησε τις συναρτήσεις των Bolin and Rodhe.

Η συνολική μάζα που ξεκινάει από την είσοδο της λεκάνης και έχει ηλικία μικρότερη ή ίση με τ δίνεται από τη σχέση 2.1-10:

$$M_o(a) = \lim_{\tau \rightarrow \infty} M(a, \tau) \quad (2.1-10)$$

Η κανονικοποιημένη κατανομή της ηλικίας ορίζεται από τη σχέση 2.1-11:

$$\psi(\alpha, \tau) = \frac{1}{M_o(\alpha)} \frac{dM(\alpha, \tau)}{d\tau} \quad (2.1-11)$$

Η μέση ηλικία των πακέτων που εισήλθαν στην λεκάνη στο σημείο α δίνεται από τη σχέση 2.1-12:

$$\tau\alpha(\alpha) = \int_0^{\infty} \tau \psi(\alpha, \tau) d\tau = \int_0^{M_o} \frac{\tau}{M_o(\alpha)} dM(\alpha, \tau) \quad (2.1-12)$$

και κατανομή του χρόνου διελεύσεως είναι:

$$F_o(\alpha) = \lim_{\tau \rightarrow \infty} F(\alpha, \tau) \quad (2.1-13)$$

όπου $F_o(\alpha)$ είναι η συνολική μάζα των πακέτων που εισέρχονται στην λεκάνη στη μονάδα του χρόνου και $F(\alpha, \tau)$ η μάζα που εξέρχεται από την περιοχή.

Η κανονικοποιημένη κατανομή του χρόνου διελεύσεως $\phi(\alpha, \tau)$ δίνεται από τη σχέση 2.1-14:

$$\phi(\alpha, \tau) = \frac{1}{F_o(\alpha)} \frac{dF(\alpha, \tau)}{d\tau} \quad (2.1-14)$$

Σύμφωνα πάλι με τις σχέσεις των Bolin and Rodhe για μόνιμες συνθήκες ροής ορίζονται οι σχέσεις 2.1-15 και 2.1-16:

$$F_o(\alpha) - F(\alpha, \tau) = \frac{dM(\alpha, \tau)}{d\tau} \quad (2.1-15)$$

ή ολοκληρώνοντας,

$$\phi(\alpha, \tau) = -\frac{M_o(\alpha)}{F_o(\alpha)} \frac{d\psi(\alpha, \tau)}{d\tau} \quad (2.1-16)$$

Ο μέσος χρόνος διελεύσεως $\tau t(\alpha)$ είναι ίσος με τον συνολικό μέσο χρόνο διελεύσεως που δίνεται από την εξίσωση (2.1-17),

$$\tau t(\alpha) = \int_0^{\infty} \tau \phi(\alpha, \tau) d\tau \quad (2.1-17)$$

Ο Zimmerman ακόμη εισήγαγε την έννοια του χρόνου εκπλύσεως (flushing time) τf :

$$\tau f(\alpha) = \frac{M_o(\alpha)}{F_o(\alpha)} \quad (2.1-18)$$

Από τις σχέσεις 2.1-16, 2.1-17 και 2.1-18 προκύπτει η εξίσωση 2.1-19:

$$\tau f(\alpha) = \tau t(a) \quad (2.1-19)$$

Τέλος, ο Zimmerman όρισε το χρόνο αναστροφής (turn over time) τ_e της φυσικής λεκάνης. Έστω ότι μία χρονική στιγμή όλα τα πακέτα μέσα στη λεκάνη έχουν σημανθεί. Στη συνέχεια μετράμε τον χρόνο που απαιτείται ώστε να μειωθεί η μάζα των σεσημασμένων πακέτων σε ένα κλάσμα της αρχικής τους ποσότητας (μια βολική τιμή είναι το κλάσμα e^{-1}). Αν τώρα θεωρήσουμε ότι συντελείται μεταφορά μάζας από μια δεξαμενή απεριόριστου όγκου και της λεκάνης, αυτή χαρακτηρίζεται από έναν συντελεστή k ο οποίος δίνει τον ανταλλασσόμενο όγκο στη μονάδα του χρόνου. Θεωρώντας ότι η συγκέντρωση ενός ιχνηθέτη c είναι αρχικά c_0 μέσα στην λεκάνη και 0 έξω από την λεκάνη μέσα στην δεξαμενή, η μεταβολή της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη μέσα στη λεκάνη δίνεται από τον τύπο 2.1-20:

$$V \frac{dc}{dt} = -kc \quad (2.1-20)$$

και

$$c = c_0 e^{-\frac{k}{V}t} \quad (2.1-21)$$

όπου ο χρόνος αναστροφής (τ_e -turn over time) είναι ίσος με τον χρόνο εκπλύσεως (τ_f –flushing time) και ισχύει η σχέση 2.1-22:

$$\tau_e = V k^{-1} \quad (2.1-22)$$

όπου V ο όγκος της λεκάνης και k ο όγκος που εισέρχεται σε αυτήν στη μονάδα του χρόνου.

2.1.3. Takeoka

Ήταν ο πρώτος ο οποίος εισήγαγε την υπολειμματική συνάρτηση (“remnant function”). Θεώρησε μία αρχική ποσότητα υλικού (έστω ρύπου) R_0 μέσα σε μία δεξαμενή και $R(t)$, την ποσότητα του ρύπου που παραμένει στην δεξαμενή μετά από χρόνο t . Η ποσότητα $R(t)$ έχει χρόνο παραμονής μέσα στην δεξαμενή μεγαλύτερο από t .

Έτσι, η συνάρτηση του χρόνου παραμονής μέσα στην δεξαμενή δίνεται από τη σχέση 2.1-23:

$$\psi'(t) = -\frac{1}{R_0} \frac{dR(t)}{dt} \quad (2.1-23)$$

και η μέση κατανομή του χρόνου παραμονής για όλη την δεξαμενή είναι:

$$\tau_r' = \int_0^{\infty} t \psi'(t) dt \quad (2.1-24)$$

ολοκληρώνοντας τη σχέση 2.1-25 προκύπτει :

$$\tau_r' = -t \frac{R}{R_0} \Big|_0^{\infty} + \frac{1}{R_0} \int_0^{\infty} R dt \quad (2.1-25)$$

και απλοποιητικά ο μέσος χρόνος παραμονής (residence time) σε όλη την δεξαμενή είναι:

$$\tau_r = \int_0^{\infty} r(t) dt \quad (2.1-26)$$

όπου

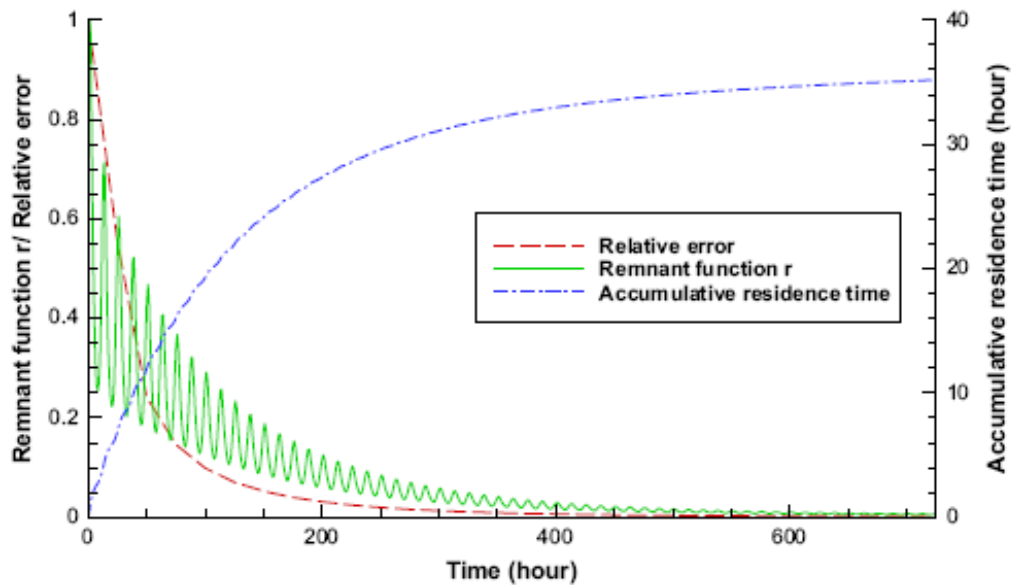
$$r(t) = \frac{R(t)}{R_0} \quad (2.1-27)$$

η υπολειμματική συνάρτηση (remnant function), η οποία δίνει το ρυθμό μείωσης της ουσίας μέσα στη δεξαμενή.

Η συνάρτηση 2.1-27 είναι χρήσιμη σε περίπτωση που πραγματοποιείται απότομη εισροή ουσίας- ρύπου στη δεξαμενή, όπως, παραδείγματος χάριν, όταν ένα ποτάμι μεταφέρει λόγω έκπλυσης και με την πλυμμηρική παροχή μεγάλη ποσότητα ρύπου ξαφνικά. Στην περίπτωση αυτή δεν ορίζεται συνάρτηση ηλικίας αλλά μπορούμε να ορίσουμε συνάρτηση χρόνου παραμονής.

Με βάση την συνάρτηση του μέσου χρόνου παραμονής μετά από θεωρητικά άπειρο χρόνο θα τείνει να αποκτήσει μια σταθερή τιμή (Takeoka 1987).

D. Yuan et al. / Estuarine, Coastal and Shelf Science 71 (2007) 401–411



Σχήμα 2.1-2. Αθροιστικός χρόνος παραμονής ρύπου για τον κόλπο του Mersey στην Αγγλία.
(Πηγή: *A modelling study of residence time in a macro-tidal estuary D. Yuan, B. Lin, R.A. Falconer*)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1. Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται ο χρόνος ανανέωσης των υδάτων του Αμβρακικού κόλπου ο οποίος αποτελεί ένα σημαντικότερο κριτήριο για την οικολογική υποβάθμιση ενός ημίκλειστου υδάτινου σώματος. Για τον λόγο αυτό γίνεται αρχική εκτίμηση του χρόνου ανανέωσης καθώς και μια προσπάθεια εντοπισμού των φυσικών παραμέτρων που επιβραδύνουν την ανανέωση των υδάτων.

Ο Αμβρακικός κόλπος βρίσκεται μεταξύ των νομών Αιτωλοακαρνανίας, Άρτας και Πρέβεζας. Είναι ένας ποταμόκολπος, δηλαδή ένα απομονωμένο υδάτινο σώμα που βρίσκεται σε επαφή με τη θάλασσα μέσω ενός στενού και ρηχού στομίου, μέσα στο οποίο γίνεται ανάμειξη του αλμυρού με το γλυκό νερό που προέρχεται από την επιφανειακή απορροή των λεκανών των ποταμών Λούρου και Άραχθου. Έχει ανατολικό του όριο το όρος Μακρυνόρος, βόρειο την προσχωσιγενή πεδιάδα της Άρτας, που σχηματίστηκε από τους ποταμούς Λούρο και Άραχθο, νότιο τους βόρειους πρόποδες των Ακαρνανικών Όρεων και δυτικό το Ιόνιο πέλαγος με το οποίο χωρίζεται από μία λωρίδα πάχους 3000 m. Έχει συνολική επιφάνεια 404 km² και συνολικό όγκο 10,19 km³. Οι διαστάσεις του στομίου εισόδου είναι 600 m πλάτος, 3 km μήκος και βάθος από 2 m (εξαιρετικά μικρό) μέχρι και 13 m. Το συνολικό μήκος των ακτών είναι, χωρίς τις λιμνοθάλασσες 180 km, και το μεγαλύτερο μήκος του τα 33 km. Το πλάτος κυμαίνεται από τα 6 μέχρι τα 21 km, ενώ το μέσο βάθος του είναι 26 m. Τα μεγαλύτερα βάθη του κυμαίνονται στη βαθυμετρική ζώνη των 60-65 m και παρατηρούνται στην Ανατολική πλευρά του κόλπου (Kapsimalis et al, 2005). Τα βάθη από 0 μέχρι 5 m καταλαμβάνουν την μεγαλύτερη έκταση του κόλπου, ιδιαίτερα στο βορειότερο τμήμα του κόλπου που εκβάλλουν τα δύο ποτάμια, ο Λούρος και ο Άραχθος και σχηματίζονται οι σημαντικότερες σε έκταση λιμνοθάλασσες. Η συνολική έκταση των λιμνοθαλασσών είναι 60 km², ενώ τα ακριβή τους όρια είναι ασαφή και εξαρτώνται από την εποχή του έτους, τις κλιματικές συνθήκες, τις εποχές του έτους και άλλες παραμέτρους που έχουν σαν αποτέλεσμα να συρρικνώνονται ή να επεκτείνονται ανάλογα (Τσαμαρδά, 2006).

Στο σύνολο τους οι ακτές του Αμβρακικού, παρουσιάζουν ήπιες σχετικά μορφολογίες με εξαίρεση το νότιο και το βορειοανατολικό τμήμα, όπου είναι πιο απότομες.

Οι σημαντικότερες Δελταϊκές μορφές που εμφανίζονται στο βόρειο τμήμα είναι αυτές που έχουν δημιουργηθεί από τους ποταμούς Λούρο και Άραχθο. Τα δέλτα των δύο ποταμών έχουν έντονες μορφολογικές διαφορές. Ο Άραχθος εμφανίζει εκβολές τύπου πέλματος πτηνού ενώ ο Λούρος εμφανίζει εκβολές λοβοειδούς σχήματος. Η μορφολογική διαφορά οφείλεται στη διαφορετική προσχωματική ιδιότητα των δύο ποταμών.

Ο Αμβρακικός κόλπος δέχεται επιφανειακά νερά της τάξης των 3 δις m³/έτος. Οι απορροές αυτές προέρχονται από λεκάνες συνολικής έκτασης 3.669,992 km². Διακρίνονται 3 υδρομορφολογικές ενότητες εντός της λεκάνης: η βόρεια με έκταση 3.139,598 km², η ανατολική με έκταση 260,275 km², και η νότια η οποία καταλαμβάνει έκταση 270,119 km². Επομένως παρατηρούμε ότι η λεκάνη απορροής εκτείνεται κυρίως προς το Βορρά. Τα δύο σημαντικότερα ποτάμια είναι ο Άραχθος και ο Λούρος με εκτάσεις λεκανών απορροής 1890 km² και 785 km² αντίστοιχα. Το μήκος τους 107 km και 66 km και οι μέσες ετήσιες παροχές τους : 66,4 m³/s και 19,4 m³/s .

Δεν υπάρχουν συστηματικές παρατηρήσεις για την παροχή των υδατορευμάτων, με εξαίρεση τους ποταμούς Λούρο και Άραχθο. Έχει πραγματοποιηθεί ωστόσο εκτίμηση της τάξης μεγέθους της απορροής των κύριων υδατορευμάτων και σε συνδυασμό με επί τόπου διαπιστώσεις και μετά από επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε ότι δεν υπάρχουν υδατορεύματα συνεχούς ροής (με εξαίρεση τους: Λούρο και Άραχθο που εκφορτίζουν στον Αμβρακικό 2500*10⁶ m³ ετησίως) αλλά τα περισσότερα υδατορεύματα εμφανίζουν υψηλή χειμαρρικότητα δηλαδή

λειτουργούν περιστασιακά κατά τους ομβροφόρους μήνες, με εξαίρεση ορισμένα που τροφοδοτούνται από πηγαία νερά και συντηρούν παροχή πέραν της υγρής περιόδου. Στη συγκεκριμένη εργασία λήφθηκαν υπ' όψιν στους υπολογισμούς μόνο τα δύο κύρια ποτάμια που χύνονται στον Αμβρακικό. (Ειδική περιβαλλοντική μελέτη της προστατευόμενης περιοχής του Αμβρακικού-ΥΠΕΧΩΔΕ, Φεβρουάριος 2004).

3.2. Ποταμός Λούρος

Ο ποταμός Λούρος στο κατώτερο τμήμα της ροής του διασχίζει πεδινές εκτάσεις και τα νερά του κατά ένα μεγάλο μέρος τους χρησιμοποιούνται μέσω του υπάρχοντος αρδευτικού δικτύου, για την άρδευση της περιοχής.

Τα 47.000 περίπου στρέμματα καλλιεργήσιμων εδαφών στην λεκάνη απορροής του ποταμού καλλιεργούνται εντατικά. Η εντατική καλλιέργεια δημιουργεί την ανάγκη χρησιμοποίησης περισσότερων λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων. Από επιτόπια έρευνα υπολογίστηκε ότι κάθε χρόνο χρησιμοποιούνται περίπου 12.000 τόνοι λιπασμάτων και 14 τόνοι ζιζανιοκτόνων και παρασιτοκτόνων. Σημαντικές ακόμη πηγές ρύπανσης με τελικό αποδέκτη το Λούρο είναι τα λύματα από ποικίλες γεωκτηνοτροφικές δραστηριότητες, τα οικιακά λύματα των κοινοτήτων της Φιλιππιάδας και Ωρωπού και απορροές από τα λιπάσματα και φυτοφάρμακα που εισέρχονται στον ποταμό με την απόπλυση των εδαφών από τα νερά της βροχής, από τα αποστραγγιστικά και τα αρδευτικά κανάλια της περιοχής και από υπόγειες διηθήσεις (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., 1989).

3.3. Ποταμός Άραχθος

Όπως και ο Λούρος, έτσι και ο Άραχθος διατρέχει στο κατώτερο τμήμα του πεδινές εκτάσεις όπου κυρίως καλλιεργούνται εσπεριδοειδή και τα νερά του χρησιμοποιούνται για άρδευση, εκτός από την υδροηλεκτρική ενέργεια που προσφέρει το φράγμα στο Πουρνάρι.

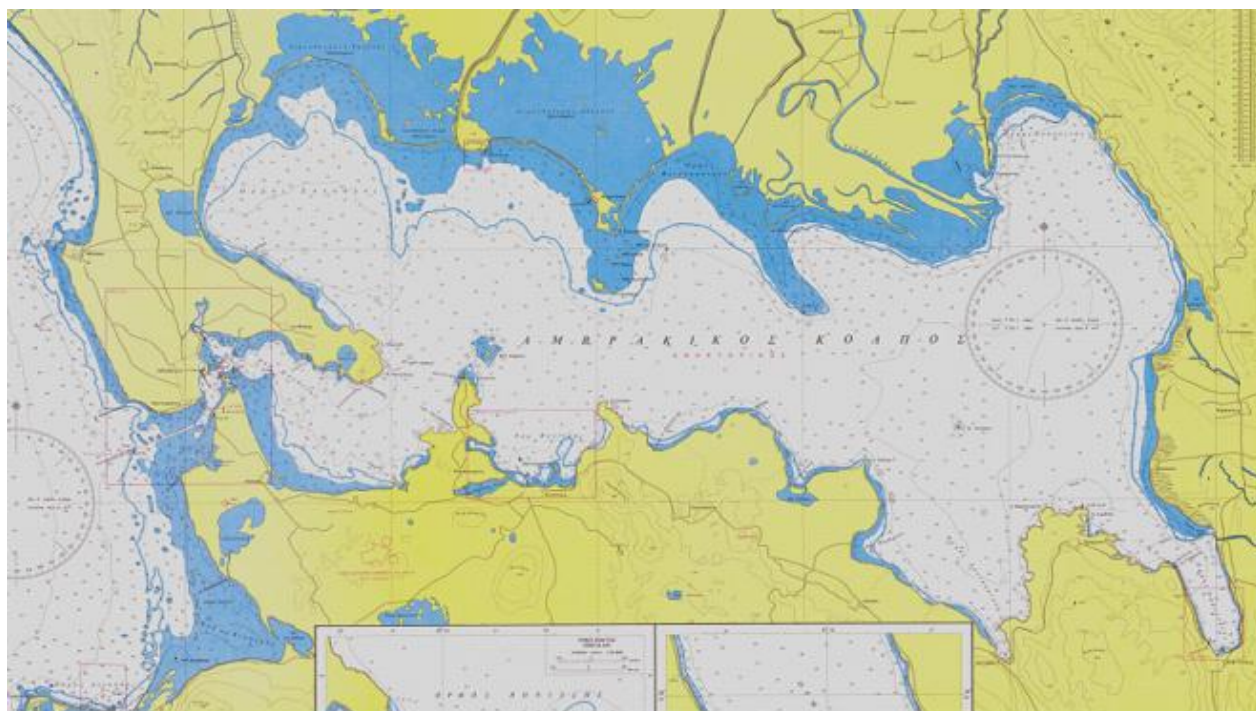
Η μέση ετήσια παροχή του Άραχθου είναι 66,4 m³/s αλλά οι διακυμάνσεις στην παροχή του είναι τεράστιες από απουσία ροής μέχρι χειμαρρώδη ροή. Τα νερά του Άραχθου ρέουν ταχύτερα από του Λούρου και αυτό επιτρέπει στον ποταμό να μεταφέρει μεγαλύτερων διαστάσεων ιζηματογενές υλικό και να το αποθέτει βαθύτερα στον Αμβρακικό κόλπο. Στην περιοχή της λεκάνης απορροής του Άραχθου υπάρχουν βουνά που τα πρηνή τους έχουν μεγάλες κλίσεις, λίγη βλάστηση και παρουσιάζουν φαινόμενα διάβρωσης. Διαβρωσιγενείς είναι και οι όχθες του ποταμού στο κάτω τμήμα του μετά το φράγμα στο Πουρνάρι, στην πεδιάδα της Άρας.

Λόγω του φράγματος της ΔΕΗ στο Πουρνάρι, έχουμε συνήθως ασυνέχεια στη ροή του ποταμού. Όταν το νερό ρέει από το φράγμα, είτε λόγω της λειτουργίας του υδροηλεκτρικού σταθμού είτε λόγω της άρδευσης των καλλιεργειών, έχουμε σημαντική αύξηση της ροής. Όταν το νερό διακόπτεται, έχουμε σημαντική πτώση ή απουσία της ροής με αποτέλεσμα να εισρέει θαλασσινό νερό πολύ βαθιά μέσα στην κοίτη του ποταμού (υφαλμύρωση) (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., 1989).

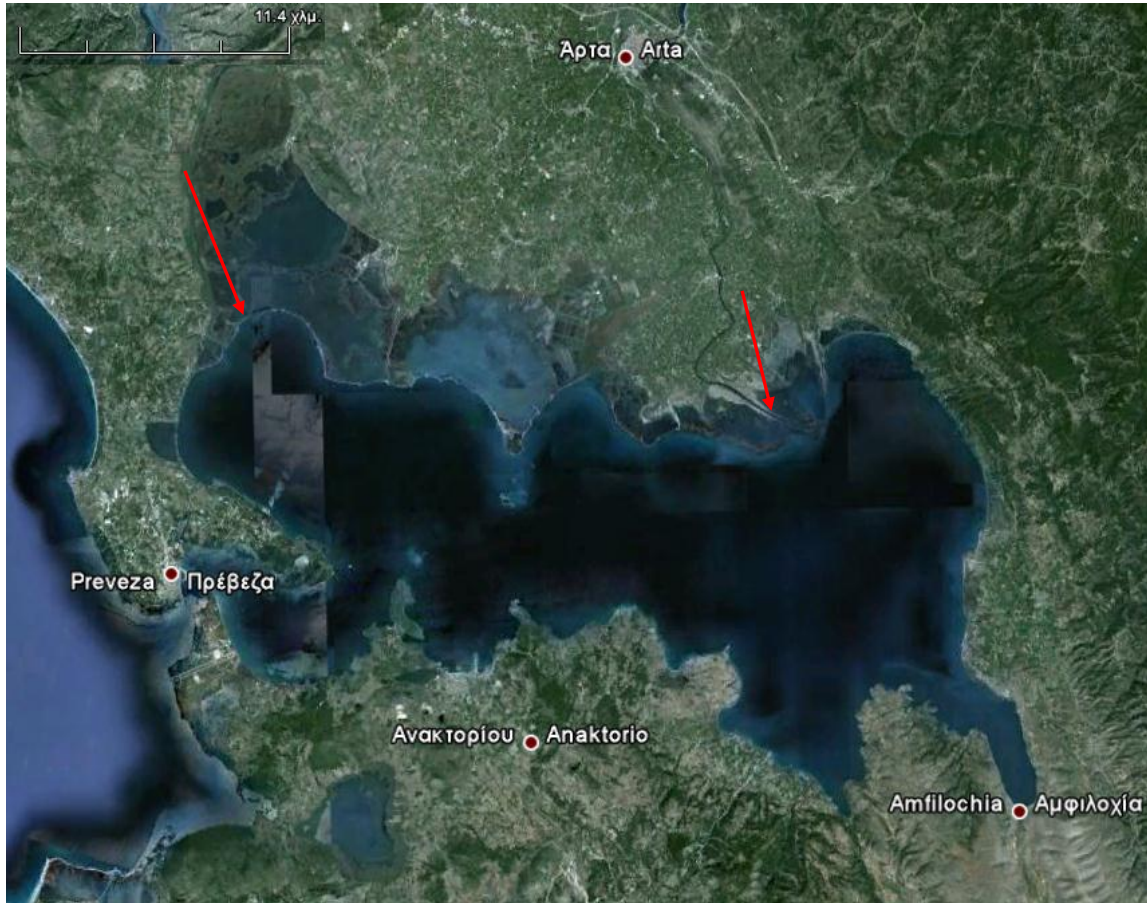
3.4. Στοιχεία περιοχής μελέτης

Τα στοιχεία της περιοχής μελέτης περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- 1) Βαθυμετρία της περιοχής μελέτης.
- 2) Μετεωρολογικά στοιχεία.
- 3) Χαρακτηριστικά του αποδέκτη (θερμοκρασία, αλατότητα και πυκνότητα).



Εικόνα 3.4-1. Ευρύτερη περιοχή – Αμβρακικός Κόλπος
(Πηγή: Υδρογραφική υπηρεσία Ελληνικού Ναυτικού)



Εικόνα 3.4-2. Ευρύτερη περιοχή μελέτης (Πηγή: www.google.com/earth)

3.5. Βαθυμετρία περιοχής μελέτης

Για τον προσδιορισμό της βαθυμετρίας της περιοχής χρησιμοποιήθηκε χάρτης βαθυμετρικής αποτύπωσης που ελήφθησαν από την Υδρογραφική Υπηρεσία Ελληνικού Ναυτικού. Στην Εικόνα 3.4-1 φαίνεται ενδεικτικά η περιοχή της βαθυμετρίας.

3.6. Μετεωρολογικά στοιχεία

3.6.1. Στοιχεία μετεωρολογικού σταθμού Πρεβέζης

Τα μετεωρολογικά στοιχεία (ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου), που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, προέρχονται από τις καταγραφές του μετεωρολογικού σταθμού Πρέβεζας εγκατεστημένος από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία.

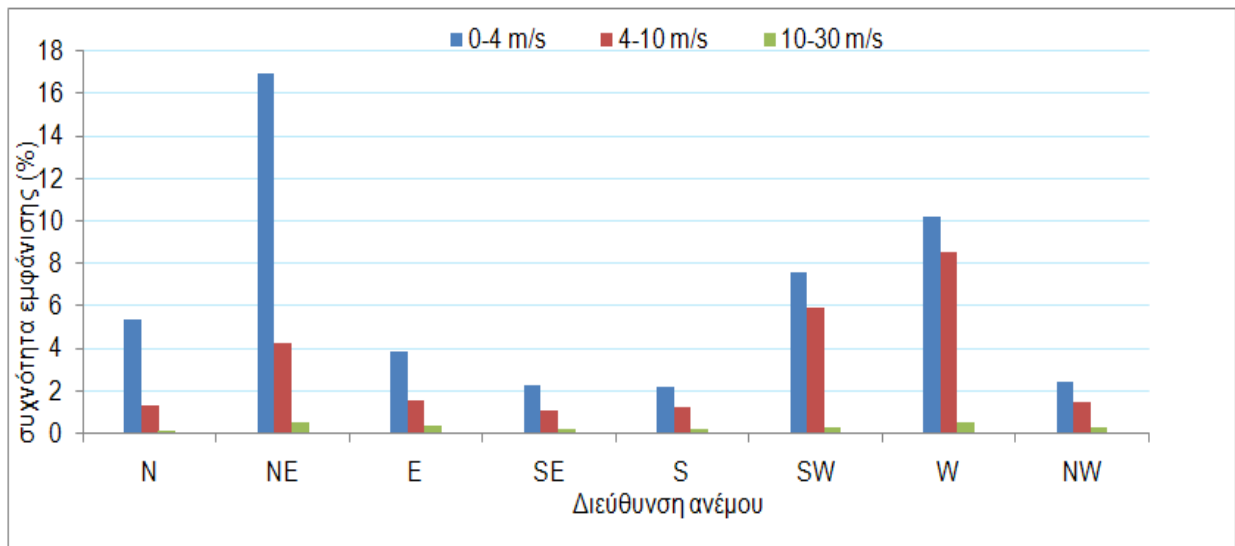
Στον Πίνακα 3.6-1 παρουσιάζονται οι τιμές των συχνοτήτων παρατήρησης των διευθύνσεων του ανέμου βάσει του μετεωρολογικού σταθμού Πρεβέζης, κατά τη χρονική περίοδο 1956 έως και το 1997 και σε υψόμετρο 10 m από την επιφάνεια της θάλασσας. Οι συχνότητες αυτές έχουν υπολογιστεί για τρεις περιοχές παρατήρησης ταχυτήτων ανέμου (α) 0.0-4.0 m/s, (β) 4.0-10.0 m/s, και (γ) 10.0-30.0 m/s.

Πίνακας 3.6-1. Τιμές ετήσιων συχνοτήτων παρατήρησης (%) διευθύνσεων ανέμου, κατά την περίοδο 1956-1997, στο μετεωρολογικό σταθμό Πρεβέζης

Beaufort	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
1	0,09	0,15	0,07	0,07	0,03	0,02	0,07	0,04
2	2,56	8,16	2,14	1,24	0,96	2,37	3,18	1,11
3	2,69	8,62	1,62	0,95	1,21	5,17	6,99	1,29
4	1	3,31	1,1	0,82	0,92	4,96	7,12	1,14
5	0,27	0,92	0,48	0,24	0,3	0,95	1,39	0,35
6	0,12	0,38	0,22	0,12	0,1	0,19	0,34	0,16
7	0,01	0,1	0,07	0,06	0,06	0,07	0,1	0,04
8	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01
9	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0,01	0,01
10	0,00	0,00	0	0	0	0	0,01	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 3.6-2. Τιμές ετήσιων συχνοτήτων παρατήρησης (%) διευθύνσεων ανέμου, κατά την περίοδο 1956-1997, στο μετεωρολογικό σταθμό Πρεβέζης

Ταχύτητα /Ανεμος	0,0-4,0 (m/s)	4,0-10,0 (m/s)	10,0-15,0 (m/s)	Άθροισμα
N	5,35	1,27	0,14	6,76
NE	16,93	4,23	0,52	21,68
E	3,82	1,58	0,32	5,72
SE	2,26	1,06	0,21	3,53
W	2,2	1,22	0,18	3,59
SW	7,56	5,92	0,27	13,75
W	10,23	8,51	0,47	19,21
NW	2,44	1,49	0,23	4,16
Σύνολο	50,79	25,27	2,34	100



Σχήμα 3.6-1. Ιστόγραμμα συχνοτήτων παρατήρησης (%) διευθύνσεων ανέμου, κατά την περίοδο 1956 έως και το 1997, στο μετεωρολογικό σταθμό Πρεβέζης

Από τα στοιχεία του Πίνακα 3.6-2 και το Σχήμα 3.6-1 διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

- 1) Οι επικρατούντες άνεμοι είναι NE (BA), με συνολική συχνότητα εμφάνισης ίση με 21,68%. Οι άνεμοι αυτοί είναι κυρίως μικρής έντασης (συχνότητα εμφάνισης ίση με 16,38% για ταχύτητες 0,0-4,0 m/s) και μέτριας έντασης (συχνότητα εμφάνισης ίση με 4,23% για ταχύτητες 4,0-10,0 m/s).
- 2) Οι W & SW άνεμοι (Δ & ΝΔ) έχουν συνολική συχνότητα εμφάνισης ίση με 19,212% και 13,747% αντιστοίχως (σύνολο 32,96%) είναι κυρίως μικρής έντασης (συχνότητα εμφάνισης 10,23% και 7,56% αντιστοίχως για ταχύτητες 0,0-4,0 m/s). Επίσης, σε ποσοστά, 8,51%, 5,92% εμφανίζονται άνεμοι μέτριας (4,0-10,0 m/s) έντασης, μεγάλης έντασης (10,0-30,0 m/s) εμφανίζονται σε πολύ μικρά ποσοστά (0,47% & 0,27%). Μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης έχουν οι άνεμοι αυτών των διευθύνσεων κατά τους εαρινούς μήνες (Μάιος, Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος).

- 3) Στις υπόλοιπες διευθύνσεις εμφανίζονται άνεμοι με πολύ μικρή συχνότητα (μέχρι 6,8%), οι οποίοι στο μεγαλύτερό τους ποσοστό έχουν μικρή ένταση.
- 4) Η άπνοια είναι το επικρατές ανεμολογικό καθεστώς καθώς έχει συχνότητα εμφάνισης 21,61%.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και επειδή στην περίπτωση του υπολογισμού του χρόνου ανανέωσης μας ενδιαφέρουν οι επικρατείς άνεμοι, δηλαδή αυτοί με την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης και όχι αυτοί με την μεγαλύτερη ένταση, οι υπολογισμοί θα πραγματοποιήθηκαν για άνεμο NE (BA) διευθύνσεως και ταχύτητας (3 Beaufort – 4,31 m/s) ο οποίος παρουσιάζει τη συνολικά μέγιστη συχνότητα ανέμου σε σύγκριση με οποιοδήποτε άλλο.

3.7. Στοιχεία παλίρροιας

Κύριο χαρακτηριστικό που επιδρά στον χρόνο ανανέωσης του κόλπου είναι η στάθμη της παλίρροιας. Αν και οι παρατηρούμενες τιμές του εύρους της παλίρροιας στην περιοχή της εισόδου είναι μικρές, παρ' όλα αυτά αποτελούν την κυριότερη αιτία εισόδου καθαρού νερού διαμέσου του στομίου.

Στον πίνακα 3.7-1 παρουσιάζονται οι τιμές των κύριων χαρακτηριστικών της παλίρροιας, με βάση τα στοιχεία της Υδρογραφικής Υπηρεσίας του Π.Ν (έκδοση «Καταγραφή παλιρροιακών διακυμάνσεων στους ελληνικούς λιμένες»). Τα στοιχεία αυτά έχουν προκύψει από μετρήσεις στον παλιρροιογράφο που είναι εγκατεστημένος στο λιμάνι της Πρεβέζης και διεξήχθησαν την περίοδο 1955-1988.

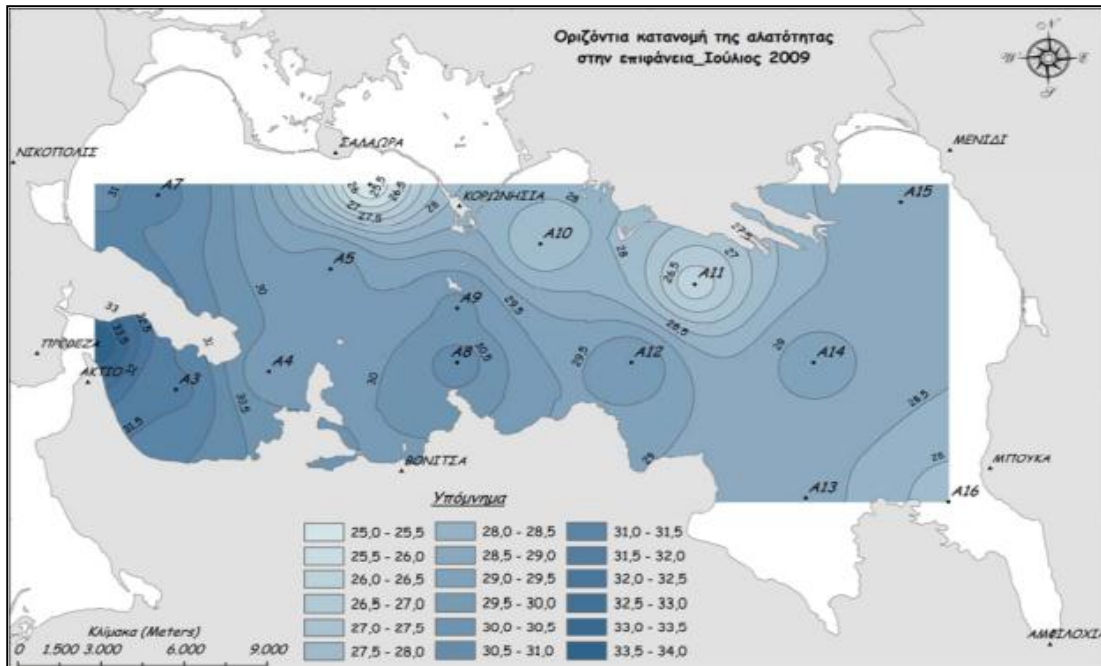
Πίνακας 3.7-1. Κύρια χαρακτηριστικά της παλίρροιας στην περιοχή μελέτης

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Μέγιστο εύρος	0,29 m
Μέσο εύρος	0,05 m
Ελάχιστο εύρος	0,01 m
Επάλλαξη	0.80 m

3.8. Χαρακτηριστικά του κόλπου

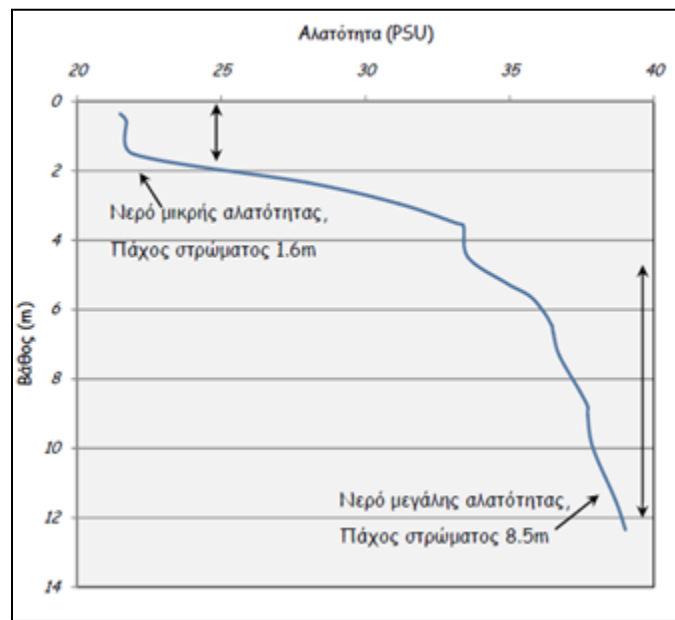
Τα στοιχεία για την αλατότητα του κόλπου προέκυψαν από μετρήσεις που έχουν διεξαχθεί από διάφορες ομάδες κατά το παρελθόν (Αλμπάνης, 2010)

Στο Σχήμα 3.8-1 παρουσιάζονται ενδεικτικές θέσεις των σημείων που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις της αλατότητας .



Σχήμα 3.8-1. Ενδεικτικές θέσεις των σημείων πραγματοποίησης των μετρήσεων αλατότητας σε μονάδες PSU (Πηγή: Προβλήματα Ρύπανσης Αμβρακικού Κόλπου Τριαντάφυλλος Αλμπάνης Τμήμα Χημείας, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιερόθεος Ζαχαρίας, ΤΔΠΦΠ, 2009-10)

Η κατανομή της αλατότητας στο στόμιο του κόλπου φαίνεται στο Σχήμα 3.5-1.



Σχήμα 3.8-2. Κατανομή της αλατότητας συναρτήσει του βάθους στο στόμιο του κόλπου (Πηγή: Προβλήματα Ρύπανσης Αμβρακικού Κόλπου Τριαντάφυλλος Αλμπάνης Τμήμα Χημείας, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιερόθεος Ζαχαρίας, ΤΔΠΦΠ, 2009-10)

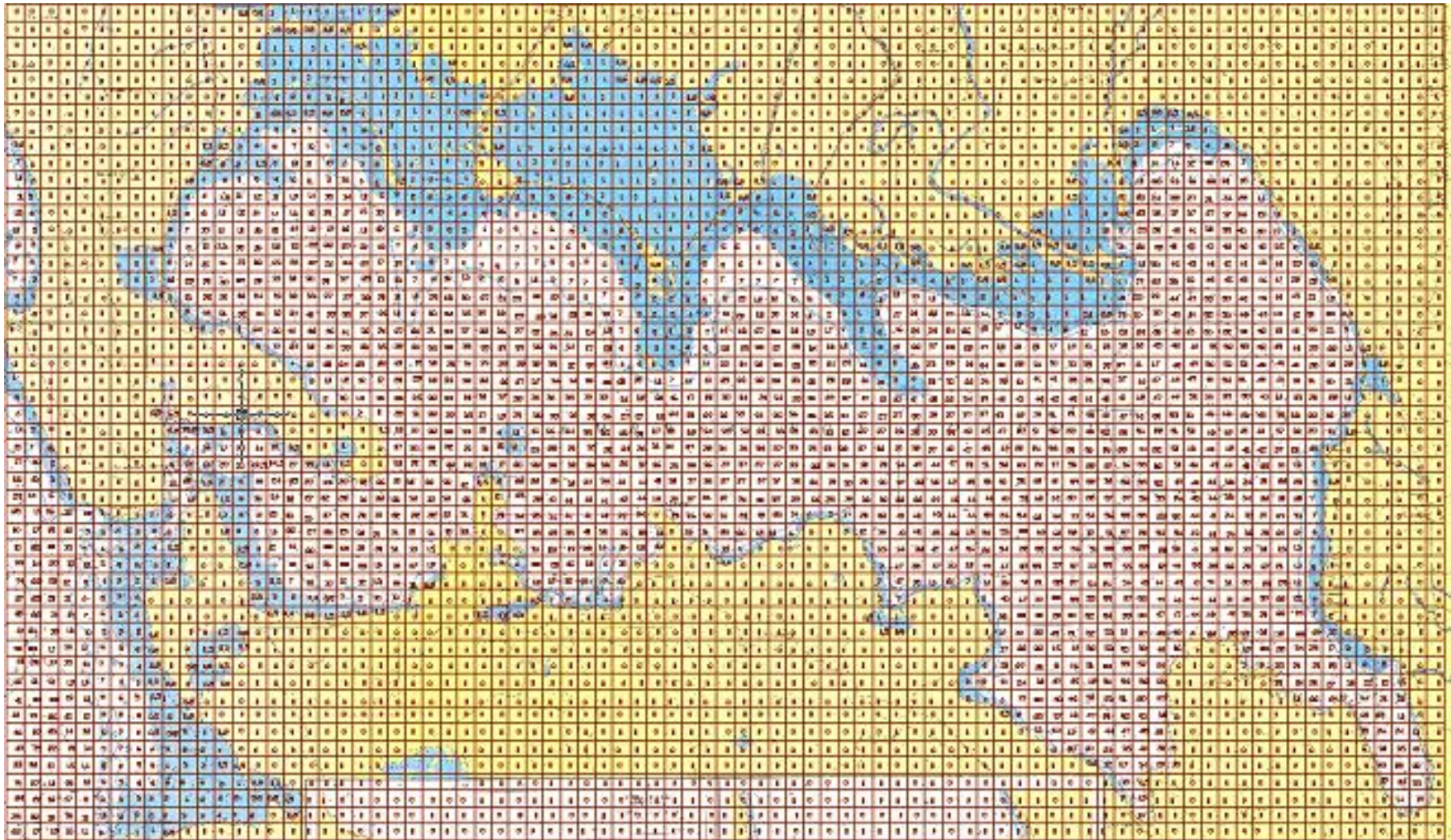
Από τις μετρήσεις διαπιστώθηκε ότι οι τιμές της αλατότητας στην οριζόντια διεύθυνση λαμβάνουν μέγιστη τιμή κοντά στο στόμιο του κόλπου απ' όπου γίνεται η επικοινωνία με το Ιόνιο πέλαγος, και μικρότερες τιμές κοντά στις εκβολές του Άραχθου, την κύρια εισροή γλυκού νερού στον κόλπο. Κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, η αλατότητα αυξάνεται σημαντικά με το βάθος. Διαπιστώνεται έντονη στρωμάτωση λόγω αλοκλινούς (έντονης μεταβολής αλατότητας κατά την κατακόρυφη διεύθυνση) και επομένως ανεπάρκειας ανανέωσης των υδάτων των βαθύτερων στρωμάτων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία οι διαφορές πυκνότητας θερμοκρασίας αλατότητας αμελήθηκαν χάριν απλότητας και ο κόλπος θεωρήθηκε πλήρως αναμειγμένος με ίση πυκνότητα και θερμοκρασία σε όλα τα στρώματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

4.1. Όρια περιοχών της περιοχής μελέτης

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται η παρουσίαση της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε.

Η περιοχή μελέτης, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 4.1-1, έχει διαστάσεις 41,5 km X 24,5 km και περιορίζεται κατά το οριζόντιο επίπεδο Οxy από τα φυσικά στερεά όρια των ακτών και τα "νοητά" όρια της ανοικτής θάλασσας που αποτελούν και τις οριακές συνθήκες των εξισώσεων του μαθηματικού μοντέλου FLOW-3DL.



Εικόνα 4.1-1. Περιοχή μελέτης (Πηγή: Υδρογραφική Υπηρεσία Ελληνικού Ναυτικού)

4.2. Μεθοδολογία υπολογισμών

Πριν από την πραγματοποίηση των υπολογισμών έλαβαν χώρα οι ακόλουθες προκαταρκτικές εργασίες:

- 1) Δομήθηκε η βαθυμετρία της περιοχής μελέτης.
- 2) Δομήθηκε το αριθμητικό πλέγμα στην περιοχή μελέτης (Κεφάλαιο 6).
- 3) Καθορίστηκαν τα σενάρια υπολογισμών με βάση το επικρατέστερο ανεμολογικό και παλιρροιακό καθεστώς στην περιοχή του Αμβρακικού Κόλπου αλλά και η επιλογή των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος ευαισθησίας του μοντέλου. Τα σενάρια αυτά περιγράφονται στο Κεφάλαιο 7.1-1.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε το ολοκληρωμένο μαθηματικό μοντέλο.

4.3. Θεωρητικοί υπολογισμοί

4.3.1. Υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT)

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής εκφράζει τον χρόνο που απαιτείται ώστε να αδειάσει ο κόλπος αν το νερό εξέρχεται με σταθερή παροχή ίση με Q_{out} . Ο υδραυλικός χρόνος αποτελεί την ευμενέστερη περίπτωση για την ανανέωση των υδάτων του κόλπου. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η μεθοδολογία υπολογισμού του θεωρητικού υδραυλικού χρόνου $HRT_{o,theor}$ δηλαδή του χρόνου που θα χρειαζόταν για να εξέλθει το νερό από μια ορθογωνική δεξαμενή με εμβαδόν και όγκο ίσο με αυτόν του κόλπου αν η παροχή εξόδου ήταν σταθερή και ίση με Q_{out} . Στο Κεφάλαιο 7 υπολογίζεται ο υδραυλικός χρόνος με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις παροχές από το μοντέλο (λαμβάνοντας δηλαδή υπόψη την γεωμετρία του κόλπου) και έγινε μεταξύ τους σύγκριση.

Για παλιρροιακή κυκλοφορία με περίοδο T , και ημιεύρος παλίρροιας ζ_o η εξίσωση που δίνει την ανύψωση ή την πτώση της ελεύθερης επιφάνειας ακολουθεί ημιτονοειδή μορφή:

$$\zeta = \zeta_o \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (4.3-1)$$

Αντίστοιχα, η παροχή εισόδου-εξόδου από το στόμιο του κόλπου (Q) υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{d(A_o\zeta)}{dt} = \frac{2\pi A_o\zeta_o}{T} \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) = Q_o \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (4.3-2)$$

όπου A_o η συνολική επιφάνεια του κόλπου, V ο όγκος εισόδου εξόδου σε συνάρτηση με τον χρόνο t και

$$Q_o = \frac{2\pi A_o\zeta_o}{T} \quad (4.3-3)$$

και ο υδραυλικός χρόνος παραμονής υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$HRT_o = \frac{V_o}{Q_{out}} = \frac{V_o T}{V_{out}} \quad (4.3-4)$$

όπου V_{out} ο όγκος που εισέρχεται μέσα στον κόλπο κατά τη διάρκεια της πλήμμης, αναμιγνύεται πλήρως και εξέρχεται κατά την διάρκεια της άμπωτης. Αυτός ο ορισμός αναφέρεται συνήθως ως «μέθοδος οριζόντιας μεταφοράς όγκου» (“volume advection method”) (Yin et al., 1998). Ο όγκος V_{out} προκύπτει από την εξίσωση:

$$V_{out} = \int_{T/4}^{3T/4} \frac{\partial V}{\partial t} dt = -2A_o \zeta_o \quad (4.3-5)$$

όπου V_o ο συνολικός όγκος του κόλπου και Q_{out} η παροχή εξόδου από τον κόλπο μέσα σε μία περίοδο της παλίρροιας T . Για την περίπτωση που ο κόλπος θεωρείται αρχικά πλήρως αναμεμιγμένος $Q_{out}=Q/\pi$, και ο θεωρητικός χρόνος παραμονής HRT (HRT_o) δίνεται από την εξίσωση:

$$HRT_o = \frac{V_o}{Q_{out}} = \frac{V_o \pi}{Q_o} = \frac{V_o}{2A_o \zeta_o} T \quad (4.3-6)$$

Οι θεωρητικές τιμές των μέγιστων θεωρητικών παροχών και υδραυλικών χρόνων ανανέωσης για τα 3 διαφορετικά σενάρια της παλίρροιας όπως προκύπτουν από την εξίσωση (4.3-6) δίνονται στον Πίνακα 4.3-1.

Πίνακας 4.3-1. Θεωρητικοί χρόνοι παραμονής για όλα τα εύρη παλίρροιας

Ημιέυρος παλίρροιας (m)	$Q_{o,theor}$ (m^3/s)	HRT_o (years)
0,025	1746,2	0,62
0,145	10128,2	0,11
0,005	349,2	3,09

4.3.2. Χρόνος παραμονής (RT)

Η συμπεριφορά μιας ρυπαντικής ουσίας σε ένα υδάτινο σώμα εξαρτάται από μια ποικιλία φαινομένων. Τέτοια είναι η μετάθεση, λόγω της ροής του αποδέκτη, η διάχυση, η καθίζηση στον πυθμένα, η εξάτμιση καθώς και διάφορες άλλες φυσικές ή χημικές διεργασίες.

Κατά την εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων λαμβάνουμε υπ' όψιν:

- Την μεταφορά της μάζας της ουσίας η οποία οφείλεται στην κυκλοφορία του νερού
- Την διάχυση της μάζας της ουσίας που αποτελεί φαινόμενο μεταφοράς κατά τη διεύθυνση της μικρότερης συγκέντρωσης με τέτοιο τρόπο ώστε να εξομαλύνει την κατανομή των συγκεντρώσεων και να οδηγήσει στην πλήρη ομογενοποίηση του υδάτινου χώρου.

Βασιζόμενοι στις διαδικασίες μεταφοράς και διάχυσης, υπολογίζουμε τον χρόνο παραμονής συντηρητικού ρύπου (για τον οποίο δεν συντελούνται φυσικές ή χημικές διεργασίες) στον κόλπο. Θεωρούμε αρχικά ότι ο κόλπος είναι γεμάτος με συντηρητικό ρύπο με αρχική συγκέντρωση $C_0 = 1 \text{ ppm}$. Η μεταβολή της συγκέντρωσης μέσα στον κόλπο δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\partial(CV)}{\partial t} = Q_{in} C_{in} - Q_{out} C_{out} \quad (4.3-7)$$

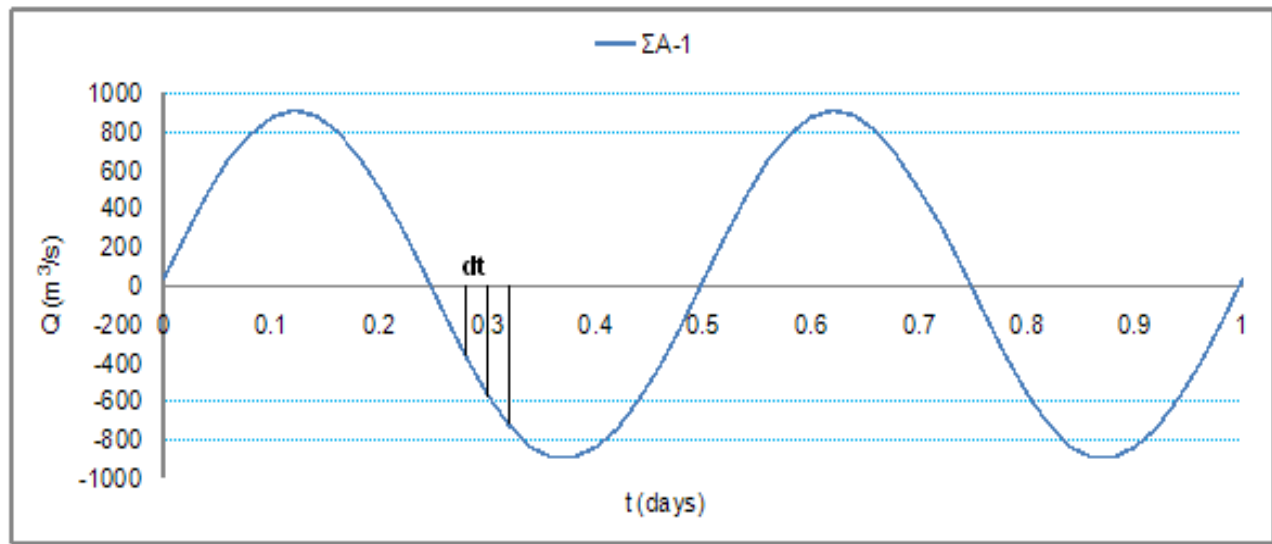
θεωρώντας ότι το νερό που εισέρχεται μέσα στον κόλπο είναι καθαρό, ο όρος C_{in} στην παραπάνω εξίσωση είναι μηδενικός.

Η σχέση 4.3-6 γίνεται απλοποιητικά με ολοκλήρωση ως προς το χρόνο:

$$C = C_0 e^{-\frac{t}{RT}} \quad (4.3-8)$$

όπου RT είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε να μειωθεί η συγκέντρωση στο $1/e$ ($\approx 36,8\%$) της αρχικής συγκέντρωσης του ρύπου (Stamou et al, 2011).

4.4. Έλεγχος του όγκου εξόδου V_{out}



Σχήμα 4.4-1. Ολοκλήρωση καμπύλης παροχών εξόδου

Προκειμένου να υπολογιστεί ο όγκος που εξέρχεται σε μία περίοδο ολοκληρώνουμε την καμπύλη των παροχών σαν άθροισμα στοιχειωδών τραπεζίων με πλευρές τις τιμές των παροχών και ύψος το χρονικό βήμα. Ολοκληρώνοντας το τμήμα της καμπύλης σε μία περίοδο, που βρίσκεται κάτω από τον άξονα προκύπτει ο όγκος εξόδου.

Με βάση τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4.3-1, από την υπολογισθείσα παροχή βρίσκουμε την μέση τιμή της μέγιστης παροχής εισόδου και εξόδου. Η παροχή που εξέρχεται σε μία χρονική περίοδο είναι $Q_{out} = Q_{max}/\pi$ και ο αντίστοιχος όγκος εξόδου $V_{out} = Q_{out} T$. Η τιμή αυτή συγκρίνεται με την τιμή που προέκυψε από την ολοκλήρωση της καμπύλης των παροχών όπως περιγράφηκε προηγουμένως και το σφάλμα που προκύπτει είναι της τάξης του 0,03%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ FLOW-3DL

5.1. Εισαγωγή

Το μαθηματικό μοντέλο FLOW-3DL (Stamou et al., 1999a) έχει δομηθεί στο Υπολογιστικό Κέντρο του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ με την επιστημονική ευθύνη του Καθηγητή Αναστάσιου Ι. Στάμου.

Το FLOW-3DL είναι ένας κώδικας γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN και έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει την τρισδιάστατη υδροδυναμική συμπεριφορά και τις βασικές διεργασίες (μεταφορά, διάχυση, φυσικοχημικές και βιολογικές αντιδράσεις), οι οποίες καθορίζουν την ποιότητα των νερών στους υδάτινους αποδέκτες. Αποτελείται από επτά υπολογιστικές διαδικασίες (υπορουτίνες boundaries.FOR, fishes.FOR, main.FOR, print.FOR, rest.FOR, sand.FOR και temp.FOR) στις οποίες ο χρήστης μπορεί να επέμβει κάνοντας τις απαραίτητες τροποποιήσεις ανάλογα με την εξεταζόμενη περίπτωση.

Ο κώδικας στηρίζεται στις εξισώσεις του πεδίου ροής και των ποιοτικών παραμέτρων, περιλαμβανομένης της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης ρύπου που εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία, οι οποίες επιλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

5.2. Διαφορικές εξισώσεις πεδίου ροής

Οι θεμελιώδεις εξισώσεις που επιλύει το μοντέλο FLOW-3DL για τον υπολογισμό του πεδίου ροής είναι οι τρισδιάστατες διαφορικές εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας κίνησης σε μη μόνιμη κατάσταση, διατυπωμένες για στρώματα σταθερού πάχους, στα οποία διαιρείται το εξεταζόμενο πεδίο.

Θεωρώντας σταθερές διαπερατές διεπιφάνειες μεταξύ των στρωμάτων, οι εξισώσεις του μοντέλου ολοκληρώνονται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση στο βάθος h , που αντιστοιχεί σε ένα υπολογιστικό στρώμα με το ίδιο πάχος.

Για την κατανομή της πίεσης γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

- 1) η κατανομή της πίεσης είναι υδροστατική,
- 2) η πίεση στην επιφάνεια είναι ίση με την ατμοσφαιρική (σχετική πίεση ίση με μηδέν).

Οι μεταβλητές του υδροδυναμικού μοντέλου είναι:

- 1) οι μέσες κατά βάθος συνιστώσες της ταχύτητας u , v και w [L/T] κάθε στρώματος κατά τους άξονες x , y και z , αντίστοιχα, ενός καρτεσιανού συστήματος αξόνων, και
- 2) η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας (ζ).

Ο άξονας z θεωρείται θετικός κάτω από τη στάθμη ηρεμίας της ελεύθερης επιφάνειας.

Οι εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας κίνησης γράφονται ως εξής:

Εξίσωση συνέχειας

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5.2-1)$$

Εξισώσεις ποσότητας κίνησηςΚατά τη διεύθυνση x

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (5.2-2)$$

Κατά τη διεύθυνση y

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (5.2-3)$$

Κατά τη διεύθυνση z

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (5.2-4)$$

όπου: t [T] είναι ο χρόνος, u , v και w [L/T] είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας κατά τις διευθύνσεις x , y και z , αντίστοιχα, p [F/A] είναι η πίεση, v_h και v_v [L²/T] είναι ο οριζόντιος και ο κατακόρυφος συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας, αντίστοιχα, f είναι η παράμετρος Coriolis, g [L/T²] είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και ρ [ML³] είναι η πυκνότητα του νερού, η οποία υπολογίζεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και της αλατότητας.

Για δεδομένη κατά βάθος κατανομή της πυκνότητας, η πίεση p μπορεί να προσδιορισθεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση 5.2-4.

Στη συνέχεια οι οριζόντιες συνιστώσες της ταχύτητας (u και v) υπολογίζονται από τις εξισώσεις 5.2-2 και 5.2-3.

Οι κάθετες ταχύτητες (w) υπολογίζονται από την εξίσωση συνέχειας 5.2-1 για κάθε στρώμα αρχίζοντας από τον πυθμένα, όπου ισχύει η οριακή συνθήκη $w = 0$.

Στην ελεύθερη επιφάνεια, η εξίσωση συνέχειας (5.2-1) γράφεται ως μια γραμμικοποιημένη οριακή κινηματική συνθήκη για τον προσδιορισμό της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} u_\zeta + \frac{\partial \zeta}{\partial y} v_\zeta = w_\zeta \quad (5.2-5)$$

όπου ο δείκτης «ζ» συμβολίζει τις τιμές των ταχυτήτων στην ελεύθερη επιφάνεια.

5.3. Διαφορικές εξισώσεις συμπεριφοράς ποιοτικών παραμέτρων**5.3.1. Γενικά**

Στην παρούσα διπλωματική μελετάται σαν ποιοτική παράμετρος, ρύπος με γνώση αρχική συγκέντρωση ο οποίος δεν υφίσταται καμία χημική ή βιοχημική διεργασία (συντηρητικός ρύπος).

Οι παραπάνω ποιοτικές παράμετροι υπολογίζονται στο μοντέλο FLOW-3DL από εξισώσεις μεταφοράς-διάχυσης.

5.3.2. Εξίσωση ποιοτικής παραμέτρου

Η συγκέντρωση του ρύπου υπολογίζεται από την εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης, η οποία γράφεται με την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5.3-1)$$

όπου: T είναι συγκέντρωση συντηρητικού ρύπου,

D_h [L^2/T] είναι ο συντελεστής τυρβώδους διάχυσης κατά τις οριζόντιες διευθύνσεις x και y, και

D_v [L^2/T] είναι ο συντελεστής τυρβώδους διάχυσης κατά την κατακόρυφη διεύθυνση z.

Το υπομοντέλο ποιότητας TEMPE-3DL (Stamou et al., 1999b) στηρίζεται στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης για συντηρητικούς ρύπους.

5.4. Οριακές συνθήκες

5.4.1. Γενικά

Για να επιλυθούν οι εξισώσεις του πεδίου ροής και των ποιοτικών παραμέτρων χρειάζεται να ορισθούν οριακές συνθήκες στα ακόλουθα όρια:

- (1) στην ελεύθερη επιφάνεια,
- (2) στον πυθμένα,
- (3) στα στερεά όρια, και
- (4) στα όρια ανοικτής θάλασσας.

5.4.2. Ελεύθερη επιφάνεια

Στην ελεύθερη επιφάνεια η διατμητική τάση που οφείλεται στον άνεμο υπολογίζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{\tau_{sx}}{\rho} = \nu_v \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=-\zeta} = C_s u_{10} \sqrt{u_{10}^2 + v_{10}^2} \quad (5.4-1)$$

$$\frac{\tau_{sy}}{\rho} = \nu_v \left. \frac{\partial v}{\partial z} \right|_{z=-\zeta} = C_s v_{10} \sqrt{u_{10}^2 + v_{10}^2} \quad (5.4-2)$$

όπου: τ_{sx} και τ_{sy} [MLT^{-2}] είναι οι οριζόντιες συνιστώσες της διατμητικής τάσης κατά τις διευθύνσεις x και y, αντίστοιχα, στην ελεύθερη επιφάνεια,

u_{10} και v_{10} [L/T] είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 10 m από την ελεύθερη επιφάνεια, κατά μήκος των αξόνων x και y, αντίστοιχα, και

C_s είναι ο συντελεστής (αδιάστατος) διατμητικής τάσης στην ελεύθερη επιφάνεια, ο οποίος εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου.

5.4.3. Πυθμένας

Στον πυθμένα η διατμητική τάση υπολογίζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \nu_v \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=H} = C_b u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad (5.4-3)$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho} = \nu_v \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=H} = C_b v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad (5.4-4)$$

όπου: τ_{bx} και τ_{by} [MLT^{-2}] είναι οι οριζόντιες συνιστώσες της διατμητικής τάσης που δρα στον πυθμένα κατά τις διευθύνσεις x και y , αντίστοιχα,
 C_b είναι ο (αδιάστατος) συντελεστής διατμητικής τάσης στον πυθμένα,
 u_b και v_b [L/T] είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας ροής στον πυθμένα κατά μήκος των αξόνων x και y , αντίστοιχα, και
 H είναι το συνολικό βάθος.

5.4.4. Διεπιφάνειες μεταξύ των στρωμάτων

Στις διεπιφάνειες μεταξύ των οριζοντίων στρωμάτων του νερού η επιβαλλόμενη διατμητική τάση υπολογίζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{\tau_{ix}}{\rho} = \nu_v \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=h_i} = C_i (u_u - u_d) \sqrt{(u_u - u_d)^2 + (v_u - v_d)^2} \quad (5.4-5)$$

$$\frac{\tau_{iy}}{\rho} = \nu_v \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=h_i} = C_i (v_u - v_d) \sqrt{(u_u - u_d)^2 + (v_u - v_d)^2} \quad (5.4-6)$$

όπου: τ_{ix} και τ_{iy} είναι οι οριζόντιες συνιστώσες της διατμητικής τάσης κατά τις διευθύνσεις x και y , αντίστοιχα, στη διεπιφάνεια μεταξύ των στρωμάτων,
 C_i είναι ο (αδιάστατος) συντελεστής διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια,
 u_u και v_u είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας στο υπερκείμενο στρώμα κατά τις διευθύνσεις x και y , αντίστοιχα,
 u_d και v_d είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας στο υποκείμενο στρώμα κατά τις διευθύνσεις x και y , αντίστοιχα, και
 h_i είναι το βάθος της διεπιφάνειας.

5.4.5. Στερεά όρια

Οι εγκάρσιες προς τα στερεά όρια συνιστώσες της ταχύτητας τίθενται ίσες με μηδέν. Η συνθήκη αυτή προϋποθέτει μη κατακλυσμό των χερσαίων ζωνών πέρα από την αρχική ακτογραμμή.

5.4.6. Όρια ανοικτής θάλασσας

Μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες συνθήκες:

- 1) Ελεύθερη (χωρίς ανάκλαση) διάβαση (για τις εγκάρσιες στα όρια ανοικτής θάλασσας συνιστώσες της ταχύτητας).
- 2) Γνωστή διακύμανση της ελεύθερης επιφάνειας ή των ταχυτήτων ροής (π.χ. περιοδική διακύμανση στάθμης, εξαιτίας παλίρροιας).
- 3) Συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων (π.χ. της ελεύθερης επιφάνειας, των ταχυτήτων ροής ή των ποιοτικών παραμέτρων), από μετρήσεις πεδίου.

5.5. Αριθμητική επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής και της συμπεριφοράς ποιοτικών παραμέτρων

5.5.1. Γενικά

Οι διαφορικές εξισώσεις του πεδίου ροής και της συμπεριφοράς των παραμέτρων ποιότητας, οι οποίες παρουσιάστηκαν στα Κεφάλαια 5.2.2 και 5.2.3, αντίστοιχα, γράφονται με την ακόλουθη γενική διαφορική μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \text{div}(\rho U\Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S_{\Phi} \quad (5.5-1)$$

Θέτοντας

- 1) $\Phi=1$ προκύπτει η εξίσωση συνέχειας,
- 2) $\Phi =u, v$ ή w προκύπτουν οι εξισώσεις ποσότητας κίνησης και
- 3) $\Phi=T$ ή S προκύπτει η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης της ποιοτικής παραμέτρου συγκέντρωσης C .

Στη συντριπτική πλειοψηφία των πρακτικών εφαρμογών οι διαφορικές εξισώσεις της μορφής 5.5-1 δεν επιλύονται αναλυτικά. Η επίλυσή τους γίνεται με αριθμητικές μεθόδους, οι σημαντικότερες εκ των οποίων είναι:

- 1) Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών ή διαφορικών όγκων.
- 2) Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.
- 3) Η μέθοδος των οριακών στοιχείων.

Στο μοντέλο FLOW-3DL χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών ή διαφορικών όγκων. Στη μέθοδο αυτή το συνεχές πεδίο υπολογισμού των διαφορικών εξισώσεων αντικαθιστάται από μικρές περιοχές υπολογισμού, οι οποίες καλούνται «διαφορικοί όγκοι (δ.ο.)». Στους δ.ο. γίνεται η ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων και προκύπτουν οι αριθμητικές εξισώσεις. Στη συνέχεια οι αριθμητικές εξισώσεις επιλύονται άμεσα με ρητό (explicit) σχήμα επίλυσης.

Σημειώνεται, ότι οι αριθμητικές εξισώσεις που προκύπτουν δεν είναι απόλυτα ακριβείς, όπως οι διαφορικές εξισώσεις, γιατί (α) ο καθορισμός της μορφής μεταβολής των πιμών των συναρτήσεων μεταξύ των δ.ο. (σχήμα μεταβολής) ή (β) η αντικατάσταση των όρων των διαφορικών εξισώσεων από προσεγγιστικές εκφράσεις εισάγουν σφάλματα υπολογισμού.

5.5.2. Διακριτοποίηση του πεδίου

Στο FLOW-3DL για την αριθμητική επίλυση γίνεται διακριτοποίηση του πεδίου κατά τις οριζόντιες, αλλά και κατά την κατακόρυφη διάσταση, με ορθογωνικό πλέγμα διαστάσεων Δx , Δy και Δz , αντίστοιχα.

Τα πλευρικά όρια των ακτών και της ανοικτής θάλασσας προσεγγίζονται τμηματικά με πλευρές δ.ο, οι οποίες είναι παράλληλες προς τις διευθύνσεις Ox ή Oy .

Το πλέγμα στο FLOW-3DL είναι έκκεντρο. Οι ταχύτητες (u, v και w) και τα βαθμωτά μεγέθη (η ανύψωση ζ της ελεύθερης επιφάνειας και οι ποιοτικές παράμετροι, Φ), υπολογίζονται σε χαρακτηριστικές θέσεις του έκκεντρου πλέγματος. Πιο συγκεκριμένα:

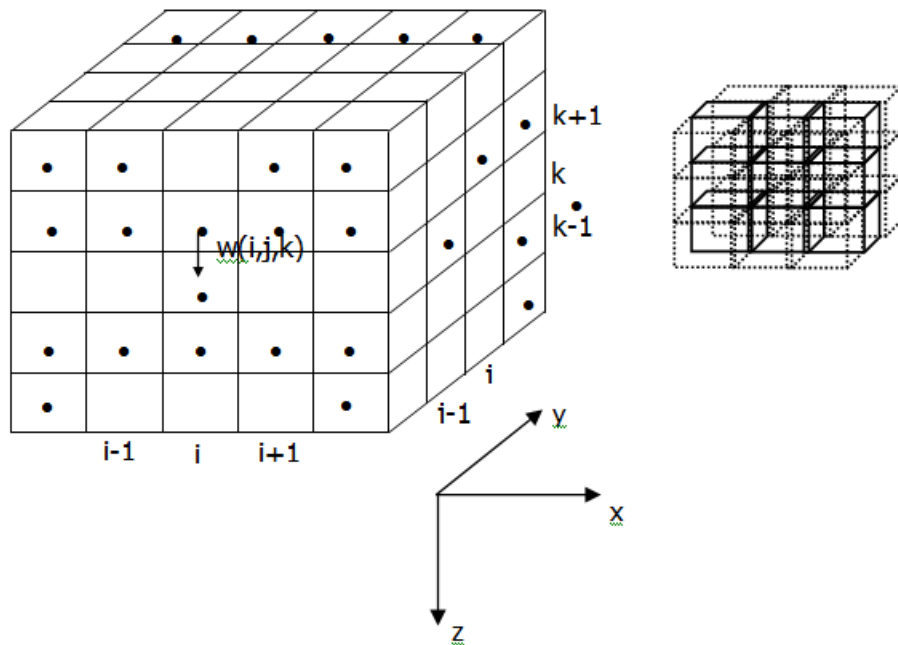
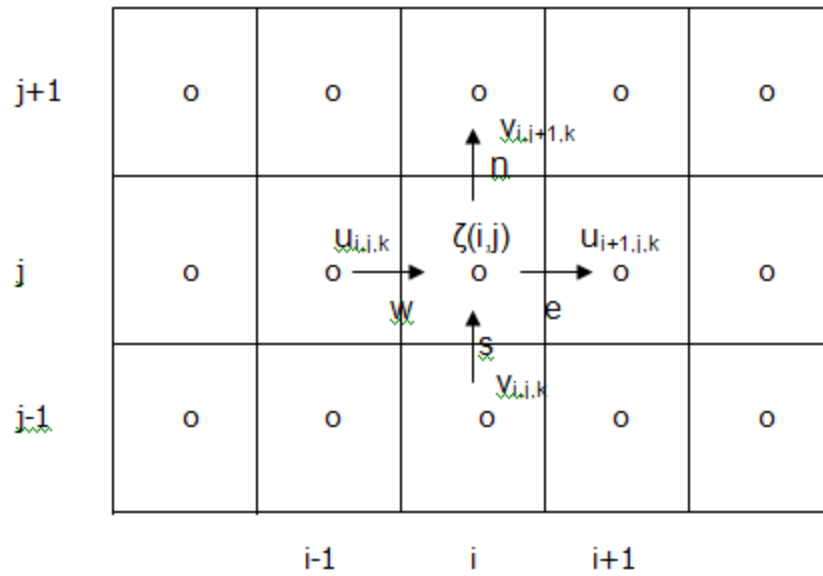
- 1) οι ταχύτητες u, v και w υπολογίζονται στις πλευρές των δ.ο. που είναι παράλληλες προς τις διευθύνσεις Ox, Oy και Oz , αντίστοιχα, και

- 2) η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας ζ και οι ποιοτικές παράμετροι Φ υπολογίζονται στο κέντρο των δ.ο.

Επίσης, χαρακτηρίζονται με δείκτες ή εκθέτες που αντιστοιχούν στις τιμές των μεταβλητών x , y , z και t . Πιο συγκεκριμένα:

- 1) ο δείκτης i αναφέρεται στην τετμημένη Ox ($x_i=i\Delta x$),
- 2) ο δείκτης j αναφέρεται στην τετμημένη Oy ($y_j=j\Delta y$),
- 3) ο δείκτης k αναφέρεται στην τεταγμένη Oz ($z_k=k\Delta z$), και
- 4) ο εκθέτης n αναφέρεται στο χρόνο ($t^n=n\Delta t$).

Οι θέσεις υπολογισμού των u , v , w και ζ στο Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων $Oxyz$ και οι επισήμανσεις τους με δείκτες φαίνονται στο Σχήμα 5.5-1. Τα σύμβολα n , s , w και e χρησιμοποιούνται για την επισήμανση της βόρειας, νότιας, δυτικής και ανατολικής πλευράς των διαφορικών όγκων, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.5-1. Σκαρίφημα αριθμητικού πλέγματος για τη διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων

5.5.3. Διαδικασία Επίλυσης

Η διαδικασία επίλυσης με το μοντέλο FLOW-3DL (που περιλαμβάνει το TEMPE-3DL) είναι η εξής:

- 1) Για τις αρχικές συνθήκες και για δεδομένη κατανομή πυκνότητας ρ , η πίεση P υπολογίζεται από την εξίσωση 5.2-4 μέσω της υπολογιστικής διαδικασίας (υπορουτίνας) CALCP.
- 2) Οι οριακές συνθήκες για τις ταχύτητες U , V , W , την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας ζ και η συγκέντρωση του συντηρητικού ρύπου T καθορίζονται στην υπολογιστική διαδικασία (υπορουτίνα) BOUND.
- 3) Οι οριζόντιες ταχύτητες U και V υπολογίζονται από τις εξισώσεις ποσότητας κίνησης (5.2-2 και 5.2-3) μέσω των υπολογιστικών διαδικασιών (υπορουτινών) CALCU και CALCV, αντίστοιχα. Η κατακόρυφη ταχύτητα W προκύπτει από την υπολογιστική διαδικασία (υπορουτίνα) CALCW λύνοντας την εξίσωση 5.2-1 για κάθε στρώμα αρχίζοντας από τον πυθμένα, όπου ισχύει η οριακή συνθήκη $W=0$. Στην επιφάνεια η εξίσωση 5.2-1 λύνεται για να υπολογιστεί η τιμή της ανύψωσης ζ μέσω της υπολογιστικής διαδικασίας (υπορουτίνας) CALCZ.
- 4) Η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης του ρύπου επιλύεται με την υπολογιστική διαδικασία (υπορουτίνα) TEMPE για τον υπολογισμό της τιμής του ρύπου T .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΛΕΓΜΑΤΩΝ

6.1. Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των δύο αριθμητικών πλεγμάτων για τα οποία πραγματοποιήθηκαν οι υδραυλικοί και οι ποιοτικοί υπολογισμοί. Ο σκοπός αυτής της διερεύνησης σε δύο πλέγματα διαφορετικού χωρικού βήματος, ήταν να ελεγχθεί η επίδραση του πλέγματος στην ακρίβεια των υπολογισμών.

6.2. Χαρακτηριστικά αραιού πλέγματος

Στους υπολογισμούς εφαρμόζεται αριθμητικό πλέγμα με χωρικό βήμα κατά τις οριζόντιες διαστάσεις X και Y ίσο με 2500,0 m. Κατά την κατακόρυφη διάσταση ο αποδέκτης χωρίζεται σε 7 στρώματα. Συνεπώς, ο αριθμός των διαφορικών όγκων προκύπτει ίσος με $19 \times 10 \times 7 = 1330$. Τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης και του αριθμητικού πλέγματος φαίνονται στον Πίνακα 6.2-1. και στον Πίνακα 6.2-2 τα χαρακτηριστικά των στρωμάτων του αραιού πλέγματος. Ακόμη στο Σχήμα 6.2-1 απεικονίζεται το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς.

Πίνακας 6.2-1. Χαρακτηριστικά αραιού αριθμητικού πλέγματος

Πλέγμα	Διαστάσεις εφαρμοζόμενης περιοχής (km X km)	Αριθμός διαφορικών όγκων (-)	Οριζόντιες διαστάσεις πλέγματος (m X m)	Ανοικτά όρια
1	47,5 X 25,0	$19 \times 10 \times 7 = 1330$	2500 X 2500	1- Ανοιχτή θάλασσα

Πίνακας 6.2-2. Χαρακτηριστικά στρωμάτων αραιού πλέγματος

Στρώμα (-)	Πάχος στρώματος (m)	Βάθος (m)	Χαρακτηριστική θέση (-)
1	1	0,0-1,0	Εκβολές Άραχθου
2	2	1,0-3,0	Εκβολές Λούρου
3	3	3,0-6,0	-
4	7	6,0-13,0	-
5	11	13,0-24,0	-
6	16	24,0-40,0	-
7	17	40,0-57,0	-

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	4.0	4.0	4.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	16.0	17.0	10.0	7.0	4.0	4.0	4.0	0.0	0.0	4.0	31.0	21.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	18.0	30.0	22.0	24.0	16.0	13.0	12.0	9.0	9.0	6.0	5.0	40.0	44.0	7.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.0	36.0	34.0	30.0	27.0	26.0	22.0	35.0	37.0	48.0	45.0	15.0	0.0
5.0	5.0	5.0	0.0	12.0	13.0	23.0	23.0	35.0	36.0	36.0	31.0	37.0	51.0	57.0	50.0	35.0	0.0	0.0
16.0	16.0	5.0	5.0	6.0	0.0	23.0	23.0	23.0	13.0	9.0	0.0	32.0	47.0	56.0	46.0	26.0	0.0	0.0
18.0	18.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0	51.0	31.0	22.0	7.0	0.0
22.0	22.0	22.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.0	21.0	18.0	0.0	16.0	0.0
25.0	25.0	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Σχήμα 6.2-1. Αραιό πλέγμα

6.3. Χαρακτηριστικά πυκνού αριθμητικού πλέγματος

6.3.1. Κύρια χαρακτηριστικά του αριθμητικού πλέγματος

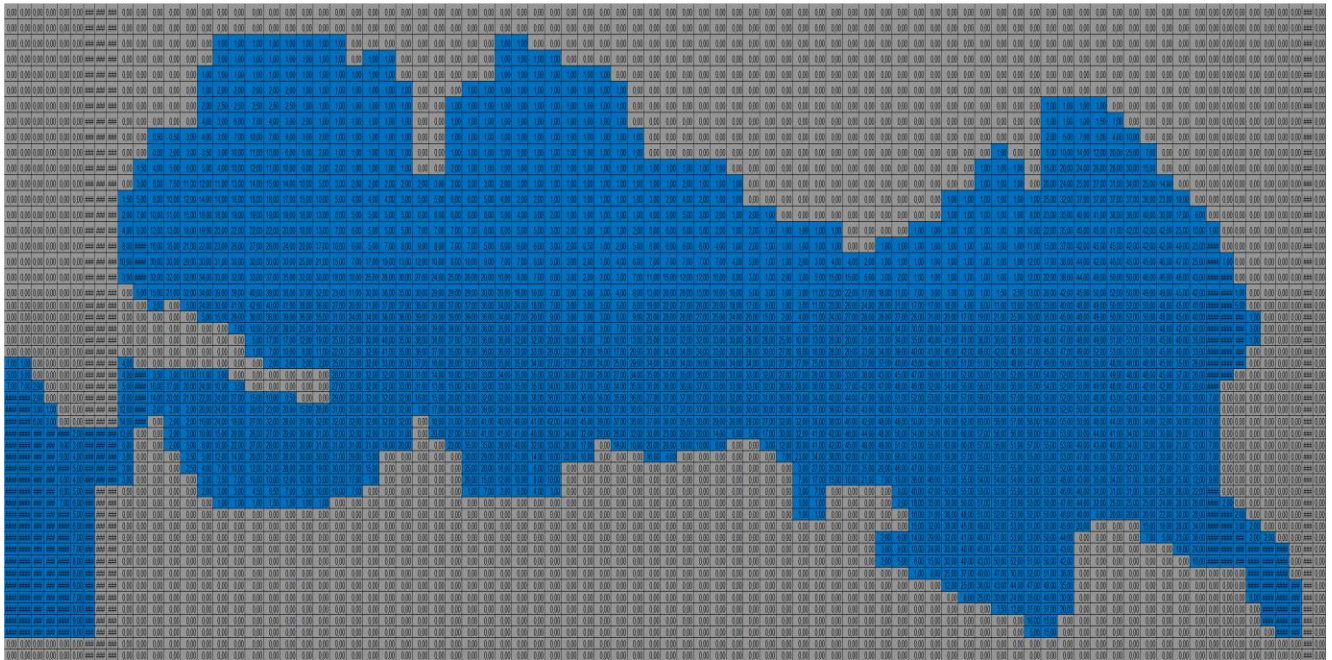
Στους υπολογισμούς με το πυκνό πλέγμα, επιλέγεται χωρικό βήμα κατά τις οριζόντιες διαστάσεις X και Y ίσο με 500,0 m. Κατά την κατακόρυφη διάσταση ο αποδέκτης χωρίζεται σε 7 στρώματα. Συνεπώς, ο αριθμός των διαφορικών όγκων προκύπτει ίσος με $83 \times 49 \times 7 = 28469$.

Τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης και του πυκνού αριθμητικού πλέγματος φαίνονται και στον Πίνακα 6.3-1.

Πίνακας 6.3-1. Χαρακτηριστικά πυκνού αριθμητικού πλέγματος

Πλέγμα	Διαστάσεις εφαρμοζόμενης περιοχής (km X km)	Αριθμός διαφορικών όγκων (-)	Οριζόντιες διαστάσεις πλέγματος (m X m)	Ανοικτά όρια
2	41,5 X 24,5	$83 \times 49 \times 7$ = 28469	500 X 500	1- Ανοιχτή θάλασσα

Τα δύο πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν ομοιόμορφα σε οριζόντιο επίπεδο, δηλαδή ίδιων διαστάσεων κατά τους άξονες x και y. Ακόμη, στο Σχήμα 6.3-1 απεικονίζεται το πυκνό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς.



Σχήμα 6.3-1. Πυκνό πλέγμα

6.3.2. Όρια και χαρακτηριστικά στρωμάτων της περιοχής μελέτης

Οι υπολογισμοί με το μοντέλο FLOW-3DL γίνονται στο αριθμητικό πλέγμα που εφαρμόζεται στην περιοχή μελέτης και έχει 7 στρώματα κατά την κατακόρυφη διεύθυνσή του με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 6.3-2.

Πίνακας 6.3-2. Χαρακτηριστικά στρωμάτων πυκνού πλέγματος

Στρώμα (-)	Πάχος στρώματος (m)	Βάθος (m)	Χαρακτηριστική θέση (-)
1	1	0,0-1,0	Εκβολές Άραχθου
2	2	1,0-3,0	Εκβολές Λούρου
3	3	3,0-6,0	-
4	7	6,0-13,0	-
5	11	13,0-24,0	-
6	16	24,0-40,0	-
7	22	40,0-62,0	-

Τα όρια της εξεταζόμενης περιοχής μελέτης καθορίζονται ως εξής:

- 1) Κατά την κατακόρυφη διεύθυνση η περιοχή περιορίζεται από τον πυθμένα και την ελεύθερη επιφάνεια.
- 2) Το ανατολικό όριο, το νότιο και το βόρειο όριο της εξεταζόμενης περιοχής είναι στερεά όρια (ακτές).
- 3) Το τμήμα ανάντη του στομίου εισόδου στο νότιο όριο είναι «ανοιχτό όριο».

- 4) Στο Βόρειο-ανατολικό τμήμα της περιοχής είναι όριο «εισροής» του Άραχθου.
- 5) Στο Βόρειο-δυτικό τμήμα της περιοχής είναι όριο «εισροής» του Λούρου.

Συνοπτικά, η εξεταζόμενη περιοχή του Αμβρακικού έχει 3 στερεά όρια ακτών, 1 όριο ανοικτής θάλασσας και 2 όρια «εισροής».

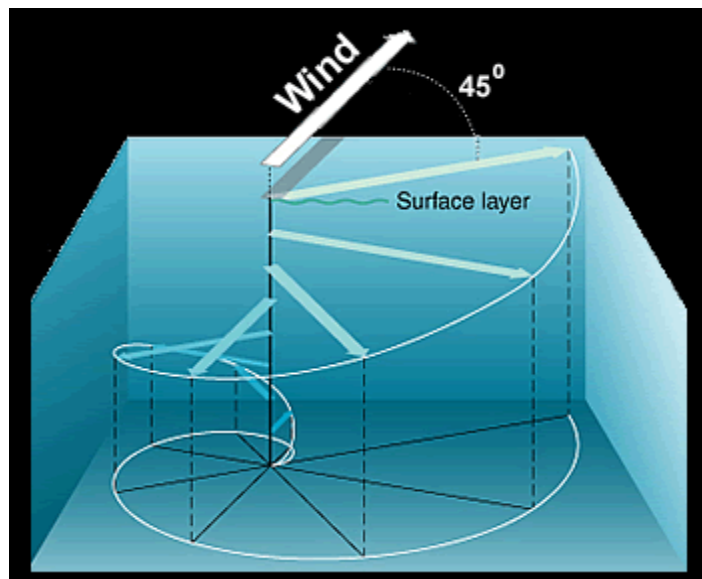
Σημειώνεται ότι ο συνδυασμός του χρησιμοποιούμενου ρητού σχήματος επίλυσης των εξισώσεων (βλ. Κεφάλαιο 5) και των διαστάσεων των πλεγμάτων οδήγησε στην εφαρμογή χρονικού βήματος για το αραιό πλέγμα της τάξης 80 s και 10 s για το πυκνό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

7.1. Ανεμογενή ρεύματα

Μια από τις κύριες αιτίες γένεσης ρευμάτων στο υδάτινο σώμα είναι η τριβή που ασκείται στην επιφάνεια λόγω της διατμητικής τάσης στην διεπιφάνεια των δύο σωμάτων. Το φαινόμενο του ανέμου εξαιτίας της πολυπλοκότητας του αναλύεται διεξοδικά στο παρόν κεφάλαιο.

Ο άνεμος λόγω τριβής με την επιφάνεια του νερού δημιουργεί ρεύματα σε μία υδάτινη μάζα. Η διεύθυνση της κίνησης του νερού δεν ταυτίζεται με την διεύθυνση του ανέμου. Η τριβή του ανέμου σε συνδυασμό με την δύναμη Coriolis παρασύρουν τα νερά και τα εκτρέπουν προς τα δυτικά στο βόρειο ημισφαίριο και ανατολικά στο νότιο. Αυτή η κίνηση μεταδίδεται σε βάθος, και το κάθε στρώμα παρασύρει με τριβή το επόμενο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την συνεχή εκτροπή προς τα δεξιά την κίνηση των βαθύτερων στρωμάτων. Το φαινόμενο αυτό μελετήθηκε από τον Ekman ο οποίος προσδιόρισε την κίνηση κάθε στρώματος σε σχέση με το βάθος. Αν τα διανύσματα της ταχύτητας απεικονιστούν σε ένα τρισδιάστατο σχήμα, για διάφορα βάθη τότε προκύπτει ένα σπειροειδές σχήμα με αρχικά μειούμενες τιμές το οποίο «σβήνει» με το βάθος. Το σπειροειδές αυτό ονομάζεται σπείρα Ekman. Στη σπείρα Ekman, το επιφανειακό στρώμα του νερού έχει απόκλιση 45° από την διεύθυνση του ανέμου.

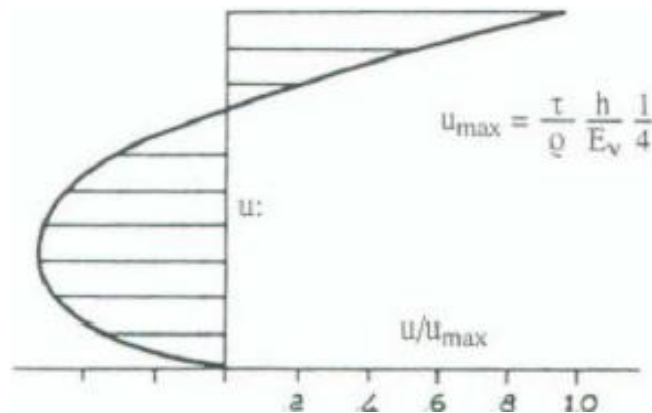


Σχήμα 7.1-1 Σπείρα Ekman (Πηγή: www.windows2universe.org)

Η σπείρα Ekman εκτείνεται σε βάθος περί τα 100 m και οι ταχύτητες των ρευμάτων που εμφανίζονται στην επιφάνεια του νερού είναι της τάξεως του 3% της ταχύτητας του ανέμου. Αν υπολογιστεί μια μέση διεύθυνση της ταχύτητας μεταφοράς των υδάτων, αυτή θα ήταν 90° δεξιόστροφη από την διεύθυνση του ανέμου (αριστερόστροφη στο Νότιο ημισφαίριο). Αν, για παράδειγμα, η διεύθυνση του ανέμου ήταν βόρεια (N) ο μέσος όρος της διεύθυνσης κίνησης στα διάφορα στρώματα ως το μέγιστο βάθος θα ήταν προς τα δυτικά.

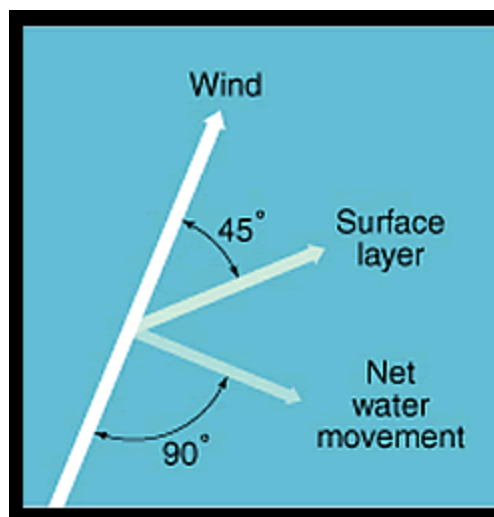
Ωστόσο η συμπεριφορά αυτή μεταβάλλεται για βάθη μικρότερα των 100 m καθώς δεν προλαβαίνει να αναπτυχθεί η σπείρα του Ekman. Η τριβή του νερού στον πυθμένα προκαλεί επιβράδυνση, με αποτέλεσμα την αναστροφή (δηλαδή, την προς τα αριστερά κίνηση της

σπείρας, για το βόρειο ημισφαίριο). Στην περίπτωση βαθών <100 m θεωρούμε παραβολική κατανομή των ταχυτήτων σε σχέση με το βάθος [2].



Σχήμα 7.1-2 Παραβολική κατανομή των ταχυτήτων στην κατακόρυφη διεύθυνση (Πηγή: <http://www.arnos.gr>)

Όπου το σημείο μηδενισμού των ταχυτήτων βρίσκεται στο 1/3 του συνολικού βάθους.



Σχήμα 7.1-3 Διεύθυνση ταχυτήτων ανέμου, επιφανειακού ρεύματος και μέσης ταχύτητας μεταφοράς υδάτων (Πηγή: www.windows2universe.org)

Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε δεν λαμβάνει υπόψη τα στρώματα του αέρα που βρίσκονται από το υψόμετρο των δέκα μέτρων (δεδομένα σταθμού Πρεβέζης) μέχρι την στάθμη της επιφάνειας του νερού άρα ούτε την δύναμη Coriolis που εκτρέπει την διεύθυνση του ανέμου κατά 45°. Για τον λόγο αυτό, όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 7, η διεύθυνση των επιφανειακών ρευμάτων ταυτίζεται με τη διεύθυνση του ανέμου. Λαμβάνει όμως υπόψη την τριβή που προκαλεί ο άνεμος με συντελεστή τριβής $3,1 \cdot 10^{-6}$.

7.2. Σενάρια και παραδοχές υπολογισμών

7.2.1. Χαρακτηριστικά βασικών σεναρίων αραιού πλέγματος

Για την πλήρη διερεύνηση του θέματος πραγματοποιήθηκαν 12 βασικά σενάρια υπολογισμών, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2-1. Ως τυπικό σενάριο (σενάριο βάσης) υπολογισμών θεωρείται το σενάριο Σ-2, και 31 σενάρια για την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου.

Πίνακας 7.2-1. Χαρακτηριστικά των βασικών σεναρίων και υδραυλικοί χρόνοι παραμονής αραιού πλέγματος

Σενάριο	ζ_0 (m)	Άνεμος (m/s)	Παροχές Λούρου και Άραχθου (m^3/s)	N_h (m^2/s)	N_v (m^2/s)	Βάθος (m)	HRT ₀
Σ-1	0,005	-	-	1	0,005	5	5,74
Σ-2	0,025	-	-	1	0,005	5	1,20
Σ-3	0,145	-	-	1	0,005	5	0,25
Σ-4	0,005	4,31	-	1	0,005	5	5,79
Σ-5	0,025	4,31	-	1	0,005	5	1,20
Σ-6	0,145	4,31	-	1	0,005	5	0,25
Σ-7	0,005	-	85,8	1	0,005	5	3,96
Σ-8	0,025	-	85,8	1	0,005	5	1,10
Σ-9	0,145	-	85,8	1	0,005	5	0,24
Σ-10	0,005	4,31	85,8	1	0,005	5	3,99
Σ-11	0,025	4,31	85,8	1	0,005	5	1,10
Σ-12	0,145	4,31	85,8	1	0,005	5	0,24

Στα σενάρια αυτά διερευνήθηκε η επίδραση των ακόλουθων παραγόντων:

- 1) Του ημιέυρους της παλίρροιας (ζ_0)
- 2) Του επικρατούντος ανέμου
- 3) Των παροχών των ποταμών Λούρου (Q_L) και Άραχθου (Q_A)

Πίνακας 7.2-2. Χαρακτηριστικά των σεναρίων ανάλυσης ευαισθησίας και υδραυλικοί χρόνοι παραμονής

Σενάριο	ζ_0 (m)	Άνεμος (m/s)	Παροχές Λούρου και Άραχθου (m ³ /s)	N_h (m ² /s)	N_v (m ² /s)	Βάθος (m)	HRT ₀
ΣΑ-1	0,025	-	-	0,1	0,001	5	0,40
ΣΑ-2	0,025	-	-	0,1	0,002	5	0,60
ΣΑ-3	0,025	-	-	0,1	0,005	5	1,20
ΣΑ-4	0,025	-	-	0,1	0,01	5	2,30
ΣΑ-5	0,025	-	-	1	0,001	5	0,41
ΣΑ-6	0,025	-	-	1	0,002	5	0,58
ΣΑ-7	0,025	-	-	1	0,005	5	1,20
ΣΑ-8	0,025	-	-	1	0,01	5	2,29
ΣΑ-9	0,025	-	-	5	0,001	5	0,41
ΣΑ-10	0,025	-	-	5	0,002	5	0,58
ΣΑ-11	0,025	-	-	5	0,005	5	1,20
ΣΑ-12	0,025	-	-	5	0,01	5	2,30
ΣΑ-13	0,025	-	-	10	0,001	5	0,40
ΣΑ-14	0,025	-	-	10	0,002	5	0,58
ΣΑ-15	0,025	-	-	10	0,005	5	1,20
ΣΑ-16	0,025	-	-	10	0,01	5	2,30
ΣΑ-17	0,025	-	-	100	0,001	5	0,43
ΣΑ-18	0,025	-	-	100	0,002	5	0,61
ΣΑ-19	0,025	-	-	100	0,005	5	1,24
ΣΑ-20	0,025	-	-	100	0,01	5	2,33
ΣΑ-21	0,025	-	-	300	0,001	5	0,49
ΣΑ-22	0,025	-	-	300	0,002	5	0,68
ΣΑ-23	0,025	-	-	300	0,005	5	1,31
ΣΑ-24	0,025	-	-	300	0,01	5	2,42
ΣΑ-25	0,025	-	-	500	0,001	5	0,55
ΣΑ-26	0,025	-	-	500	0,002	5	0,75
ΣΑ-27	0,025	-	-	500	0,005	5	1,39
ΣΑ-28	0,025	-	-	500	0,01	5	2,50
ΣΑ-29	0,025	-	-	0,1	0,001	3	0,70
ΣΑ-30	0,025	-	-	0,1	0,001	8	0,30
ΣΑ-31	0,025	-	-	0,1	0,001	10	0,30

Έγινε ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου των παρακάτω παραγόντων:

- 4) Του οριζόντιου συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας (N_h)
- 5) Του κατακόρυφου συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας (N_v)
- 6) Το βάθος στο στόμιο εισόδου.

7.2.2. Χαρακτηριστικά βασικών σεναρίων υδροδυναμικών υπολογισμών πυκνού πλέγματος

Πίνακας 7.2-1. Χαρακτηριστικά των βασικών σεναρίων και υδραυλικοί χρόνοι παραμονής πυκνού πλέγματος

Σενάριο	ζ_0 (m)	Άνεμος (m/s)	Παροχές Λούρου και Άραχθου (m^3/s)	N_h (m^2/s)	N_v (m^2/s)	Βάθος (m)	HRT ₀
ΣΠ-1	0,005	-	-	1	0,005	3	11,3
ΣΠ-2	0,025	-	-	1	0,005	3	2,4
ΣΠ-3	0,145	-	-	1	0,005	3	0,5
ΣΠ-4	0,005	4,31	-	1	0,005	3	11,5
ΣΠ-5	0,025	4,31	-	1	0,005	3	2,4
ΣΠ-6	0,145	4,31	-	1	0,005	3	0,5
ΣΠ-7	0,005	-	85,8	1	0,005	3	6,0
ΣΠ-8	0,025	-	85,8	1	0,005	3	2,1
ΣΠ-9	0,145	-	85,8	1	0,005	3	0,5
ΣΠ-10	0,005	4,31	85,8	1	0,005	3	6,1
ΣΠ-11	0,025	4,31	85,8	1	0,005	3	2,1
ΣΠ-12	0,145	4,31	85,8	1	0,005	3	0,5

Στα σεναρία αυτά διερευνήθηκε η επίδραση των ακόλουθων παραγόντων:

- 1) Του ημιέρους της παλίρροιας (ζ_0)
- 2) Του επικρατούντος ανέμου
- 3) Των παροχών των ποταμών Λούρου (Q_L) και Άραχθου (Q_A)

Πίνακας 7.2-2. Χαρακτηριστικά σεναρίων ανάλυσης ευαισθησίας και υδραυλικοί χρόνοι παραμονής

Σενάριο	ζ_0 (m)	Άνεμος (m/s)	Παροχές Λούρου και Άραχθου (m^3/s)	N_h (m^2/s)	N_v (m^2/s)	Βάθος (m)	HRT ₀
ΣΠΕ-1	0,025	-	-	0,1	0,001	3	0,91
ΣΠΕ-2	0,025	-	-	0,1	0,002	3	1,24
ΣΠΕ-3	0,025	-	-	0,1	0,005	3	2,41
ΣΠΕ-4	0,025	-	-	0,1	0,01	3	4,50
ΣΠΕ-5	0,025	-	-	1,0	0,001	3	0,91
ΣΠΕ-6	0,025	-	-	5,0	0,001	3	0,92
ΣΠΕ-7	0,025	-	-	10,0	0,001	3	0,94
ΣΠΕ-8	0,025	-	-	100	0,001	3	1,27
ΣΠΕ-9	0,025	-	-	100	0,002	3	1,67
ΣΠΕ-10	0,025	-	-	100	0,005	3	2,95
ΣΠΕ-11	0,025	-	-	100	0,01	3	5,12
ΣΠΕ-12	0,025	-	-	300	0,001	3	2,05
ΣΠΕ-13	0,025	-	-	300	0,002	3	2,52
ΣΠΕ-14	0,025	-	-	300	0,005	3	3,89
ΣΠΕ-15	0,025	-	-	300	0,01	3	6,15
ΣΠΕ-16	0,025	-	-	500	0,001	3	2,86
ΣΠΕ-17	0,025	-	-	500	0,002	3	3,36
ΣΠΕ-18	0,025	-	-	500	0,005	3	4,80
ΣΠΕ-19	0,025	-	-	500	0,01	3	7,12
ΣΠΕ-20	0,025	-	-	0,1	0,001	5	0,86
ΣΠΕ-21	0,025	-	-	0,1	0,001	8	0,85
ΣΠΕ-22	0,025	-	-	0,1	0,001	10	0,85

Έγινε ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου των παρακάτω παραγόντων:

- 1) Του οριζόντιου συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας (N_h)
- 2) Του κατακόρυφου συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας (N_v)
- 3) Το βάθος στο στόμιο εισόδου

Στους υπολογισμούς θεωρήθηκαν τα ακόλουθα:

- Οι τιμές των συντελεστών οριζόντιας και κατακόρυφης τυρβώδους συνεκτικότητας ελήφθησαν αρχικά ίσες με $v_h=1,0 m^2/s$ και $v_v=0,005 m^2/s$ και οι συντελεστές τυρβώδους διάχυσης $D_h=0,5 m^2/s$ και $D_v=0,005 m^2/s$ με βάση αποτελέσματα που έχουν προκύψει από παλιότερη μελέτη στην περιοχή του Salman Bay (Stamou et al., 2007b).
- Ο συντελεστής τριβής πυθμένα Manning ελήφθη ίσος με 0,02 καθώς τα ιζήματα στον κόλπο είναι λεπτόκοκκα (πηλός και ιλύς) [1].
- Η ταχύτητα του ανέμου λαμβάνεται συμβατικά 10 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.

- Οι υδροδυναμικοί και οι ποιοτικοί υπολογισμοί εκτελέστηκαν από το πρόγραμμα ταυτόχρονα.

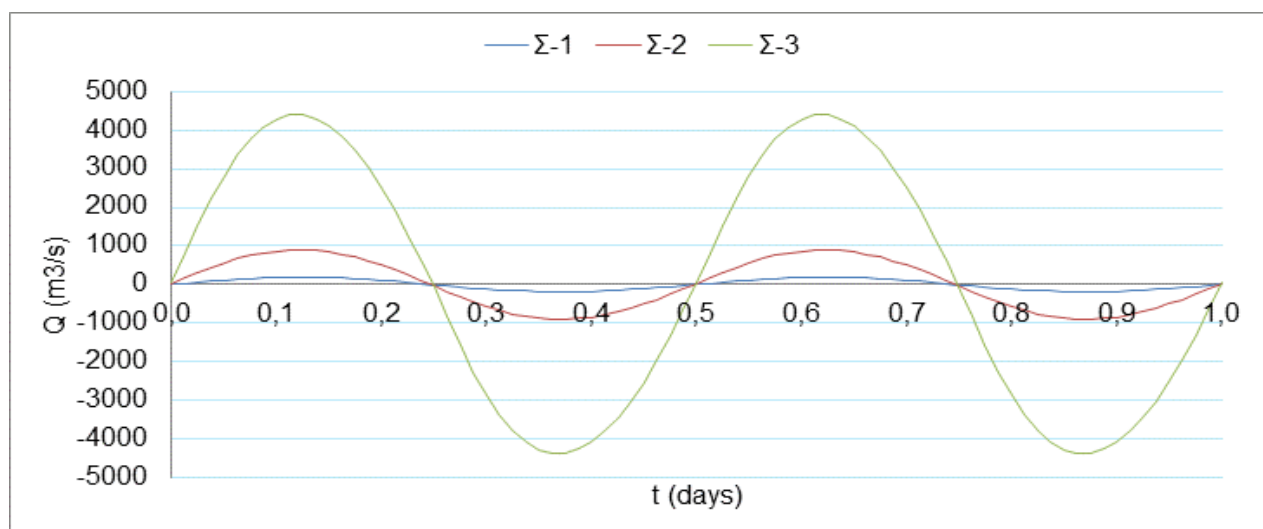
7.3. Υδροδυναμικοί υπολογισμοί αραιού πλέγματος

7.3.1. Υδροδυναμικοί υπολογισμοί βασικών σεναρίων

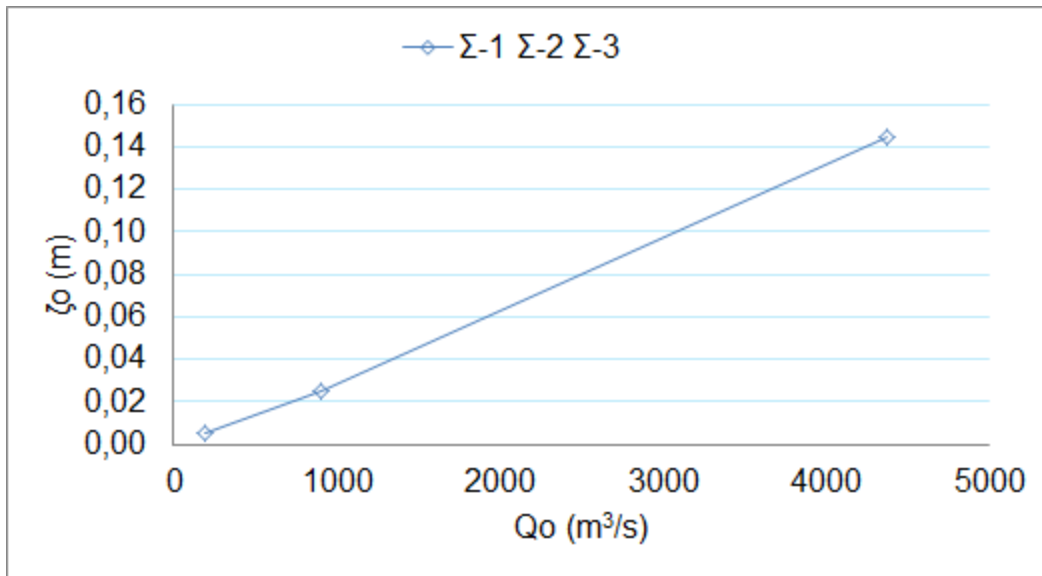
Στον Πινάκα 7.2-1 απεικονίζονται οι τιμές των μέγιστων παροχών στην είσοδο του κόλπου Q_o , οι παροχές εξόδου ανά περίοδο Q_{out} (με βάση τις εξισώσεις που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4.3) και οι υδραυλικοί χρόνοι παραμονής HRT_o για όλα τα σενάρια υπολογισμών.

Πίνακας 7.3-1. Παροχές εξόδου και υδραυλικοί χρόνοι παραμονής

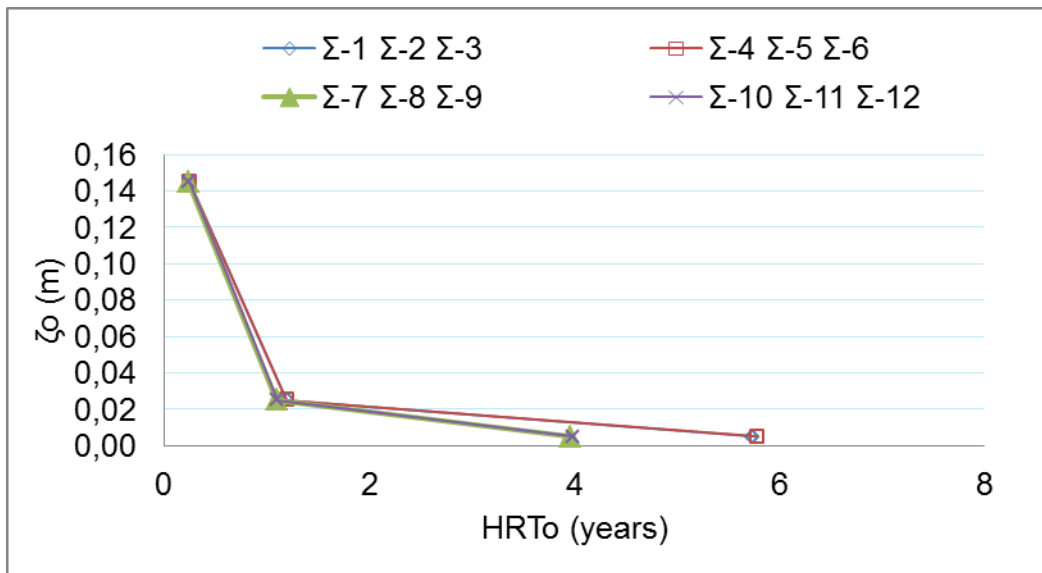
Σενάριο	Q_o (m^3/s)	Q_{out} (m^3/s)	HRT_o
Σ-1	188,0	59,8	5,74
Σ-2	901,7	287,0	1,20
Σ-3	4375,0	1392,6	0,25
Σ-4	186,3	59,3	5,79
Σ-5	897,1	285,6	1,20
Σ-6	4368,8	1390,6	0,25
Σ-7	272,6	86,8	3,96
Σ-8	983,1	312,9	1,10
Σ-9	4436,5	1412,2	0,24
Σ-10	270,5	86,1	3,99
Σ-11	977,2	311,1	1,10
Σ-12	4427,0	1409,2	0,24



Σχήμα 7.3-1. Διαγράμματα παροχών για τα τρία εύρη παλίρροιας



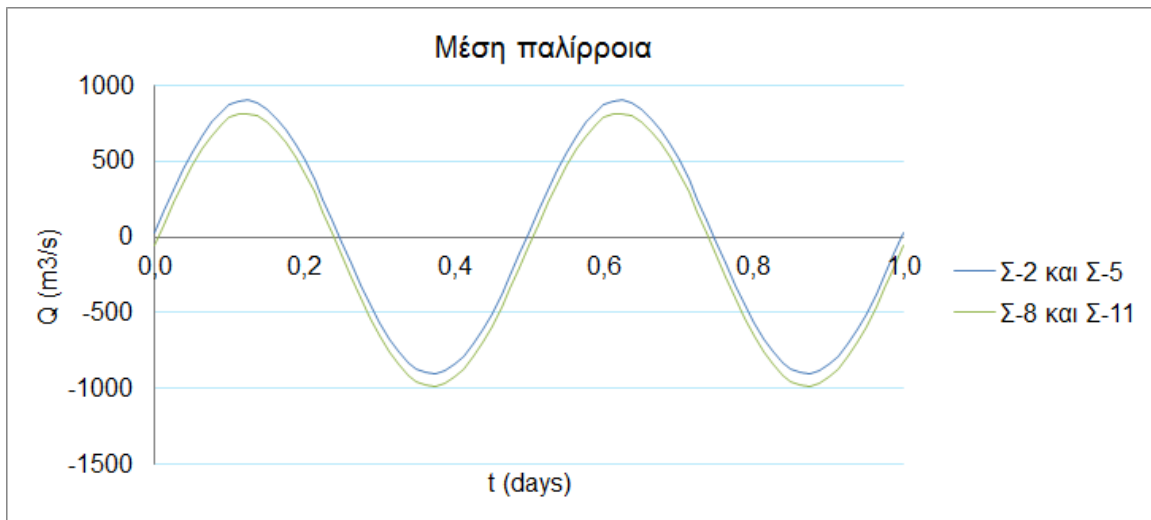
Σχήμα 7.3-2. Μέγιστες τιμές παροχών για τα τρία εύρη της παλίρροιας



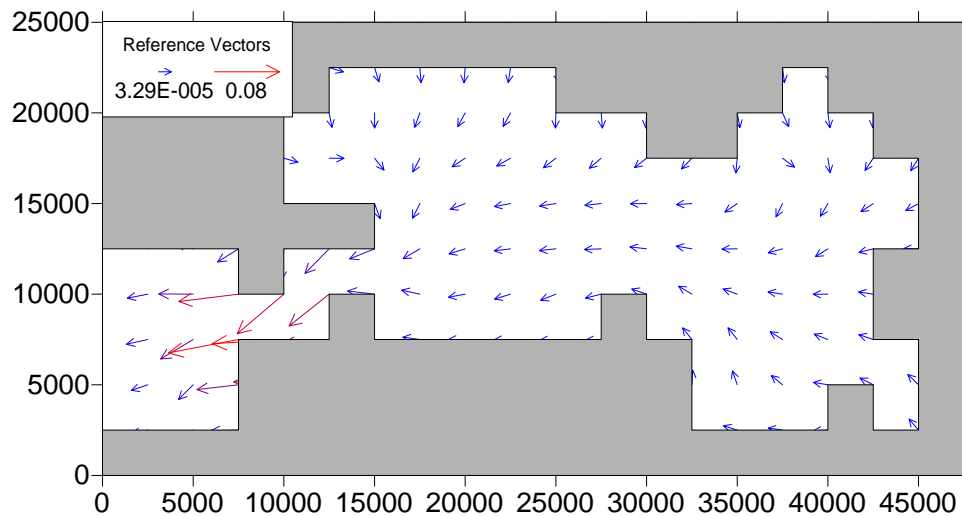
Σχήμα 7.3-3. Θεωρητικοί υδραυλικοί χρόνοι για τα τρία εύρη παλίρροιας υπό την επίδραση ανέμου και ποταμών



Σχήμα 7.3-4. Παροχές για το ελάχιστο εύρος παλίρροιας



Σχήμα 7.3-5. Παροχές για το μέσο εύρος παλίρροιας



Σχήμα 7.3-6. Υδροδυναμικό πεδίο σενάριο Σ-2 ($t=2,875$ ημέρες)

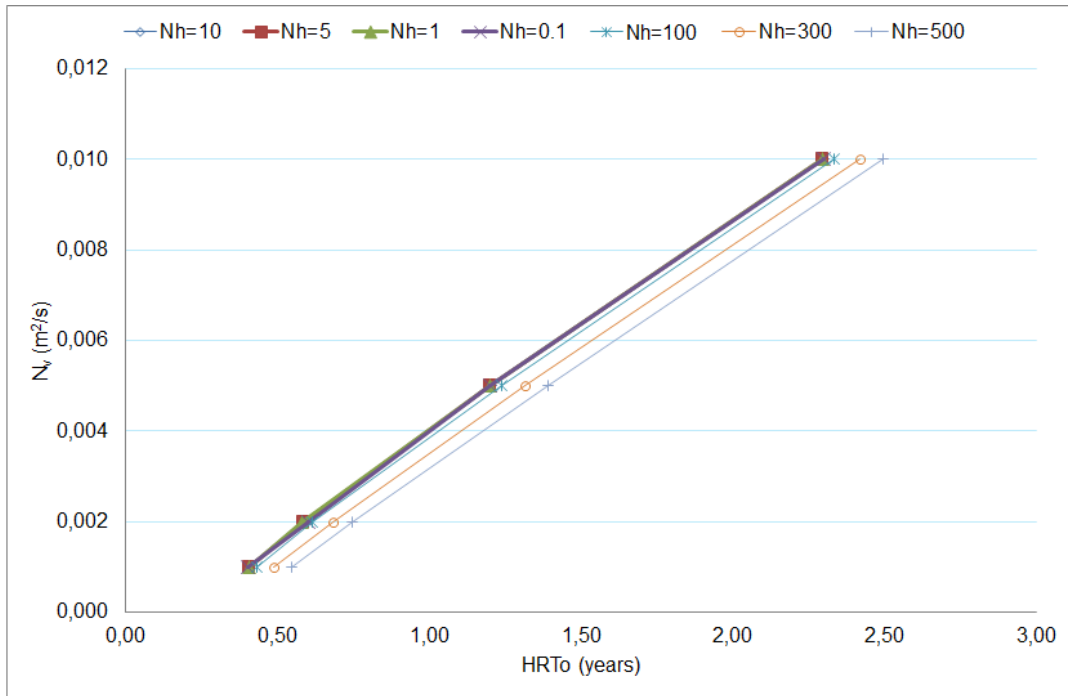
7.3.2. Σχολιασμός βασικών σεναρίων

- 1) Η αύξηση των παροχών, όπως φαίνεται στα Σχήματα 7.3-1 και 7.3-2. γίνεται αναλογικά με την αύξηση του εύρους της παλίρροιας.
- 2) Η επίδραση του ανέμου είναι αμελητέα για την μέση και την μέγιστη τιμή της παλίρροιας ενώ για την ελάχιστη παλίρροια προκαλεί αύξηση του υδραυλικού χρόνου παραμονής κατά 0,8% (πολύ μικρή).
- 3) Η επίδραση της εισροής των ποταμών είναι σημαντική και για τις τρεις τιμές της παλίρροιας. Μεγαλύτερη είναι η επίδραση των ποταμών όσο μικρότερο είναι το εύρος της παλίρροιας. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι τα ποτάμια συνεισφέρουν πολύ μεγαλύτερο ποσοστό όταν είναι μικρότερη η παροχή από το στόμιο του κόλπου. Συγκεκριμένα, για την μικρή παλίρροια η παροχή εξόδου Q_{out} είναι ίση με $59,8 \text{ m}^3/\text{s}$ όταν δεν λαμβάνονται υπ' όψιν τα ποτάμια, και $86,8 \text{ m}^3/\text{s}$ με τα ποτάμια αντιστοίχως. Συνεπώς, η ποσοστιαία αύξηση είναι 45%. Για την μέση και την μέγιστη παλίρροια τα ποσοστά επίδρασης των ποταμών στην παροχή είναι αντιστοίχως 9,02% και 1,4%. Η επίδραση αυτή φαίνεται και στα διαγράμματα των παροχών που απεικονίζονται στα Σχήματα 7.3-4. και 7.3-5. τα οποία είναι μετατοπισμένα προς τα κάτω για τα σενάρια που εμπεριέχουν τα ποτάμια. Η μετατόπιση αυτή είναι μεγαλύτερη για το μικρό εύρος παλίρροιας.
- 4) Ο λόγος των υδραυλικών χρόνων παραμονής προς τους αντίστοιχους θεωρητικούς για τα τρία εύρη παλίρροιας $Q_o/Q_{o,theor}$ είναι 53,83%, 51,63% και 43,19% αντιστοίχως.

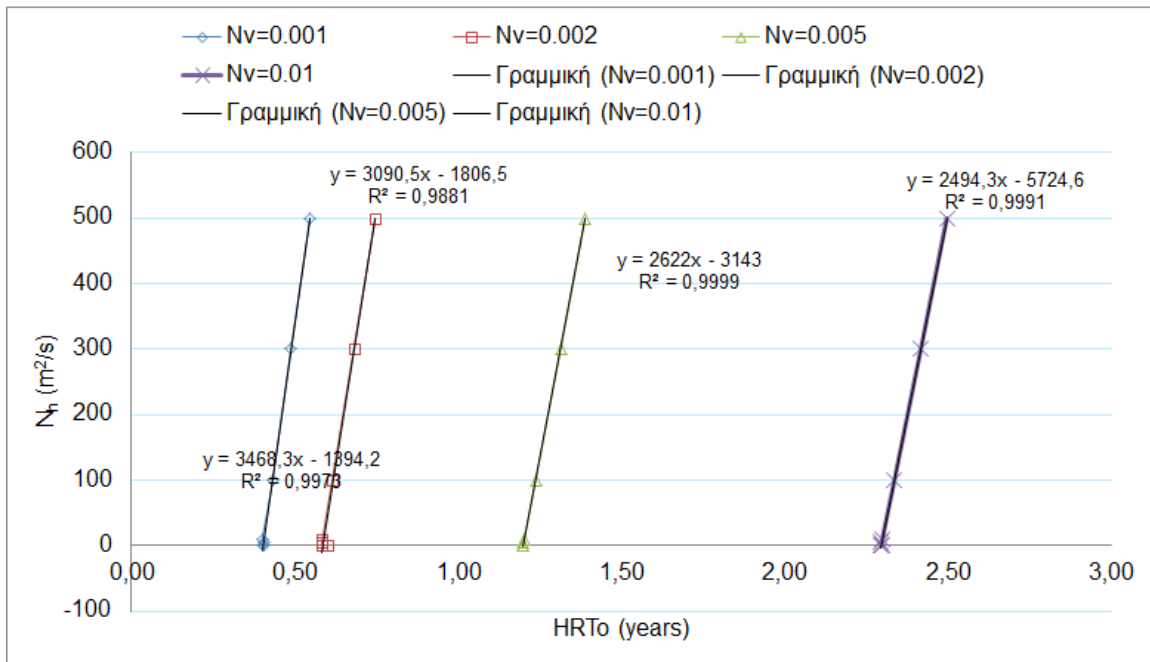
7.3.3. Υδροδυναμικοί υπολογισμοί ανάλυσης ευαισθησίας

Πίνακας 7.3-2. Παροχές εξόδου και υδραυλικοί χρόνοι παραμονής

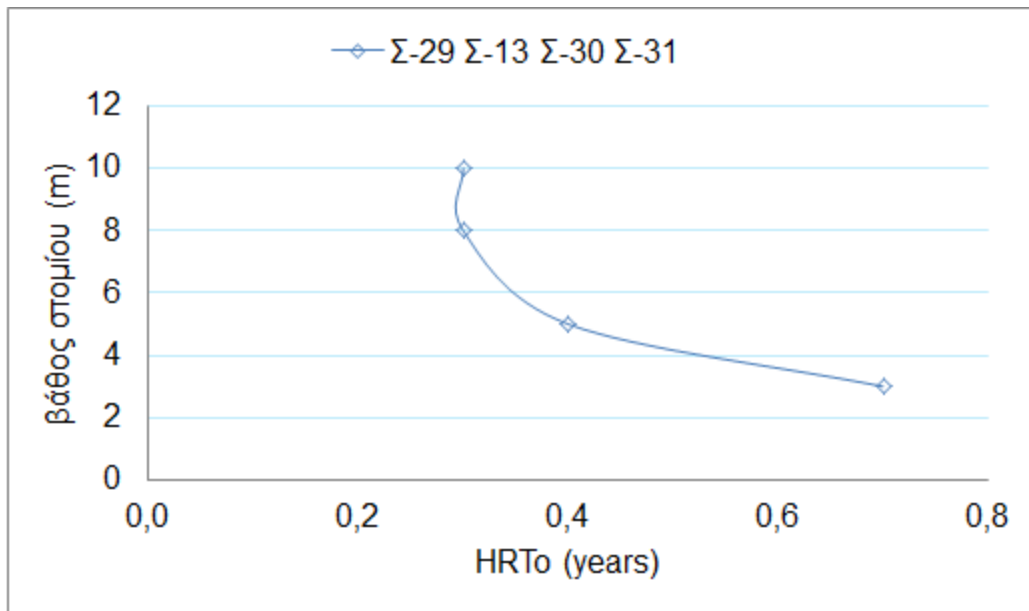
Σενάριο	Q_o (m^3/s)	Q_{out} (m^3/s)	HRT _o
ΣΑ-1	2658,3	846,2	0,40
ΣΑ-2	1856,0	590,8	0,60
ΣΑ-3	900,1	286,5	1,20
ΣΑ-4	470,2	149,7	2,30
ΣΑ-5	2658,3	846,2	0,41
ΣΑ-6	1855,1	590,5	0,58
ΣΑ-7	899,9	286,4	1,20
ΣΑ-8	470,1	149,6	2,29
ΣΑ-9	2651,1	843,9	0,41
ΣΑ-10	1851,0	589,2	0,58
ΣΑ-11	898,7	286,1	1,20
ΣΑ-12	469,8	149,5	2,30
ΣΑ-13	2642,9	841,3	0,40
ΣΑ-14	1845,8	587,5	0,58
ΣΑ-15	897,2	285,6	1,20
ΣΑ-16	469,3	149,4	2,30
ΣΑ-17	2497,5	795,0	0,43
ΣΑ-18	1756,7	559,2	0,61
ΣΑ-19	871,6	277,4	1,24
ΣΑ-20	461,9	147,0	2,33
ΣΑ-21	2211,3	703,9	0,49
ΣΑ-22	1586,0	1586,0	0,68
ΣΑ-23	820,8	261,3	1,31
ΣΑ-24	446,4	142,1	2,42
ΣΑ-25	1974,6	628,5	0,55
ΣΑ-26	1445,0	460,0	0,75
ΣΑ-27	776,4	247,2	1,39
ΣΑ-28	432,2	137,6	2,50
ΣΑ-29	1497,4	476,6	0,70
ΣΑ-30	3200,2	1018,6	0,30
ΣΑ-31	3316,4	1055,6	0,30



Σχήμα 7.3-6. Επίδραση συντελεστών τυρβώδους συνεκτικότητας στον υδραυλικό χρόνο παραμονής



Σχήμα 7.3-7. Επίδραση συντελεστών τυρβώδους συνεκτικότητας στον υδραυλικό χρόνο παραμονής



Σχήμα 7.3-8. Επίδραση του βάθους στομίου στον υδραυλικό χρόνο παραμονής

7.3.4. Σχολιασμός ανάλυσης ευαισθησίας

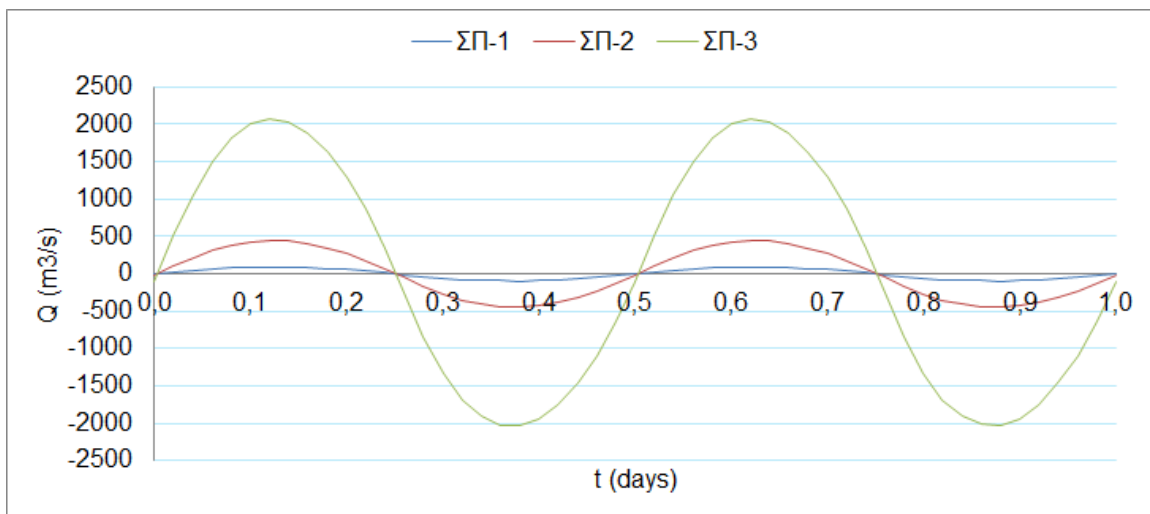
- 1) Γενικά η αύξηση των συντελεστών τυρβώδους συνεκτικότητας διευκολύνει την ανάμειξη και εμποδίζει την διαδικασία της μεταφοράς. Συνεπώς, προκαλεί μείωση των ταχυτήτων και αντίστοιχη μείωση των παροχών εξόδου. Η μείωση αυτή των παροχών, συνεπάγεται την αύξηση των υδραυλικών χρόνων παραμονής.
- 2) Η αύξηση του συντελεστή v_v προκαλεί σημαντική αύξηση των υδραυλικών χρόνων παραμονής. Συγκεκριμένα, διπλασιασμός του κατακόρυφου συντελεστή v_v επιφέρει αύξηση του HRT κατά 50%.
- 3) Η αύξηση του συντελεστή v_h αρχίζει να επιδρά σημαντικά στο HRT πέρα από μια συγκεκριμένη τιμή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.2-6 για v_h από 0,1 m²/s μέχρι 10 m²/s η επίδραση του συντελεστή είναι αμελητέα. Για τιμές όμως, μεγαλύτερες των 10 m²/s (100 m²/s, 300 m²/s, 500 m²/s) η επίδραση στους υδραυλικούς χρόνους είναι υπολογίσιμη. Η παρατήρηση αυτή δικαιολογείται από το γεγονός ότι η αριθμητική διάχυση του μοντέλου είναι ίση με $V_0 \cdot D_x / \pi$, όπου $D_x = 2500$ m το βήμα του πλέγματος και V_0 η μέση τιμή της ταχύτητας. Στην περίπτωση του αραιού πλέγματος και θεωρώντας μία μέση τιμή της ταχύτητας περίπου ίση με 0,07 m/s η αριθμητική διάχυση είναι ίση με 56 m²/s. Επομένως, τιμές της φυσικής διάχυσης μικρότερες από αυτήν δεν αναμένεται να επηρεάσουν τα αποτελέσματα του μοντέλου. Όταν, ωστόσο, η τιμή του συντελεστή v_h τριπλασιαστεί (από 100 m²/s γίνει 300 m²/s) ο υδραυλικός χρόνος παραμονής υφίσταται αύξηση κατά 14%.
- 4) Η αύξηση του βάθους στο στόμιο εισόδου προκαλεί μείωση του HRT. Συγκεκριμένα, η αύξηση από τα 3 στα 8m βάθος προκαλεί μείωση του HRT κατά 57%.

7.4. Υδροδυναμικοί υπολογισμοί πυκνού πλέγματος

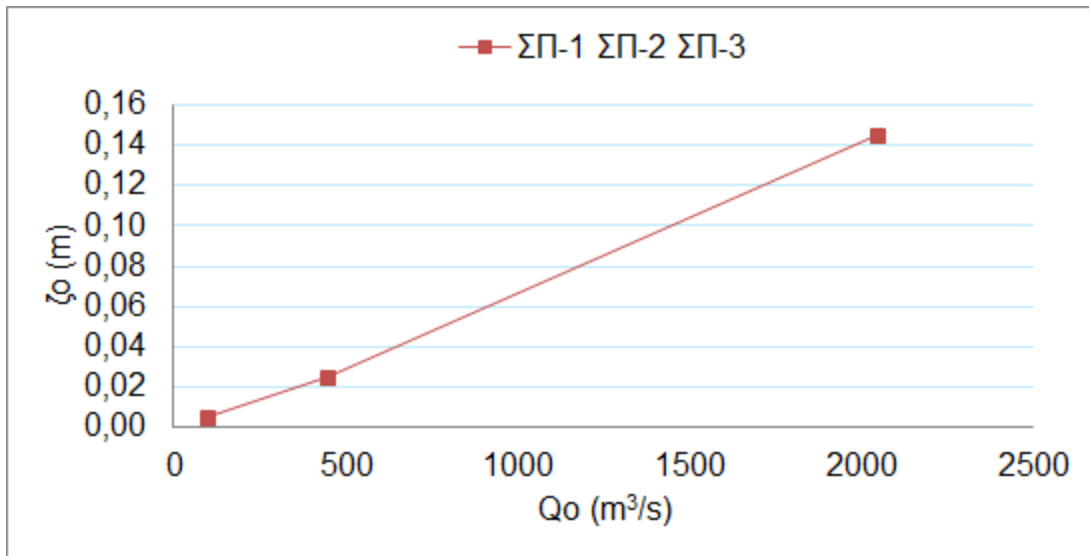
7.4.1. Υδροδυναμικοί υπολογισμοί βασικών σεναρίων

Πίνακας 7.4-1. Παροχές εξόδου και υδραυλικοί χρόνοι παραμονής

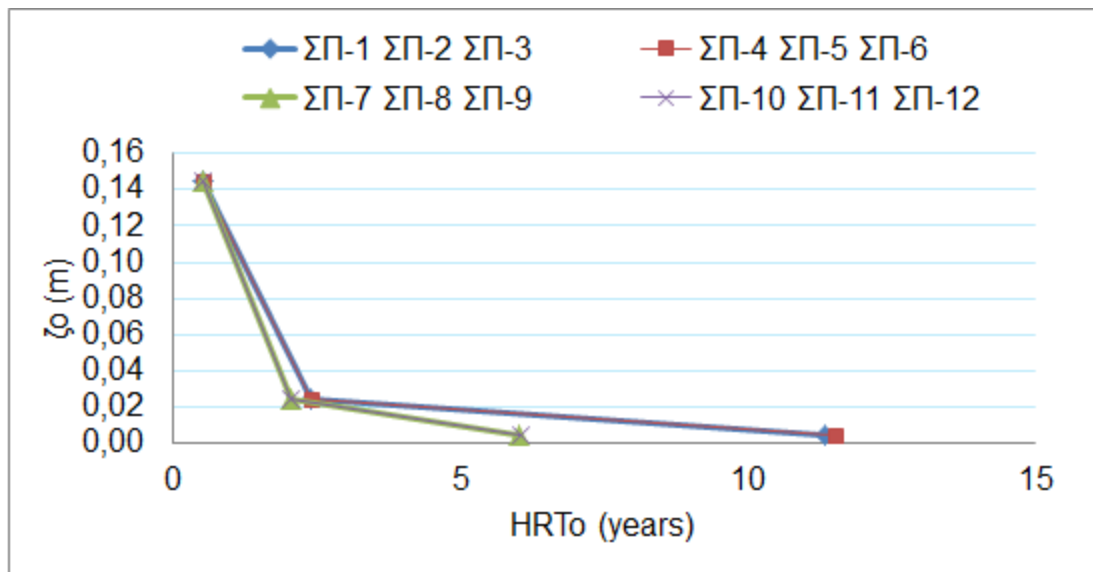
Σενάριο	Q_o (m ³ /s)	Q_{out} (m ³ /s)	HRT _o
ΣΠ-1	95,1	30,3	11,3
ΣΠ-2	446,8	142,2	2,4
ΣΠ-3	2047,4	651,7	0,5
ΣΠ-4	93,7	29,8	11,5
ΣΠ-5	444,5	141,5	2,4
ΣΠ-6	2047,4	651,7	0,5
ΣΠ-7	178,5	56,8	6,0
ΣΠ-8	525,0	167,1	2,1
ΣΠ-9	2095,3	666,9	0,5
ΣΠ-10	178,0	56,7	6,1
ΣΠ-11	524,1	166,8	2,1
ΣΠ-12	2094,5	666,7	0,5



Σχήμα 7.4-1. Διαγράμματα παροχών για τα τρία εύρη παλίρροιας



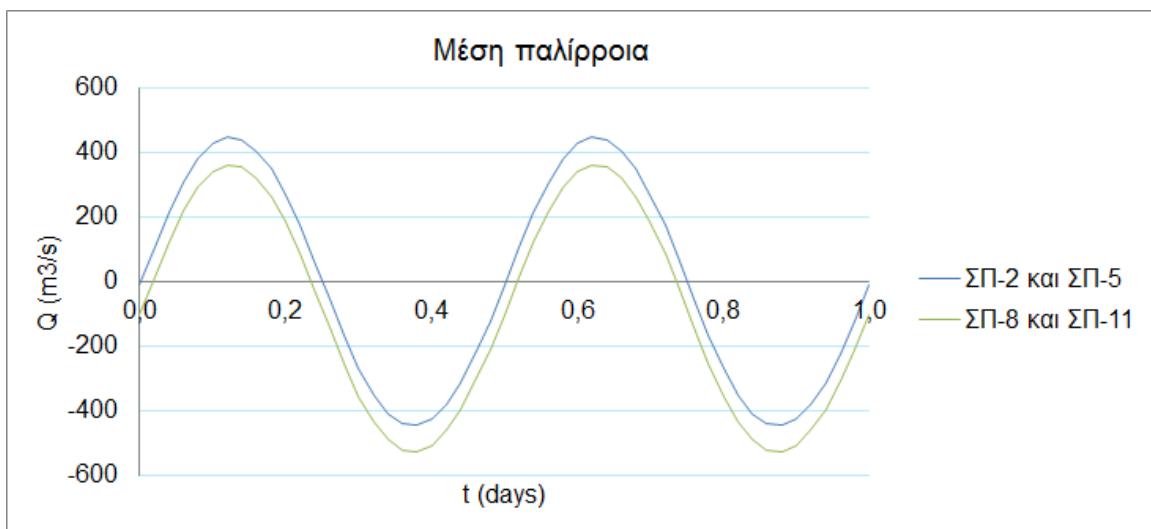
Σχήμα 7.4-2. Μέγιστες τιμές παροχών για τα τρία εύρη της παλίρροιας



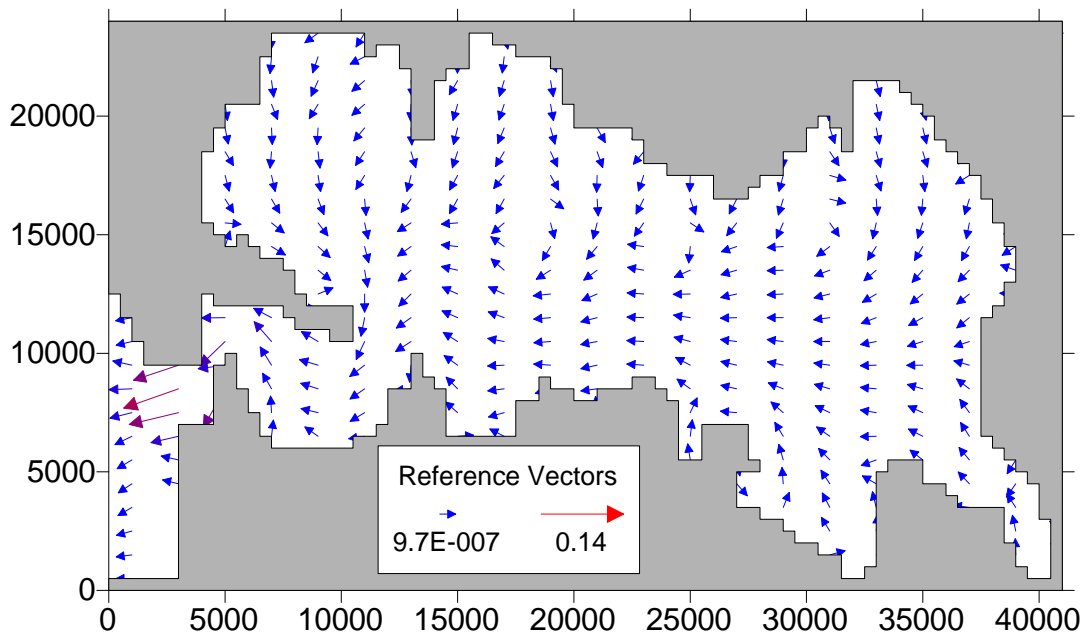
Σχήμα 7.4-3. Θεωρητικοί υδραυλικοί χρόνοι για τα τρία εύρη παλίρροιας υπό την επίδραση ανέμου και ποταμών



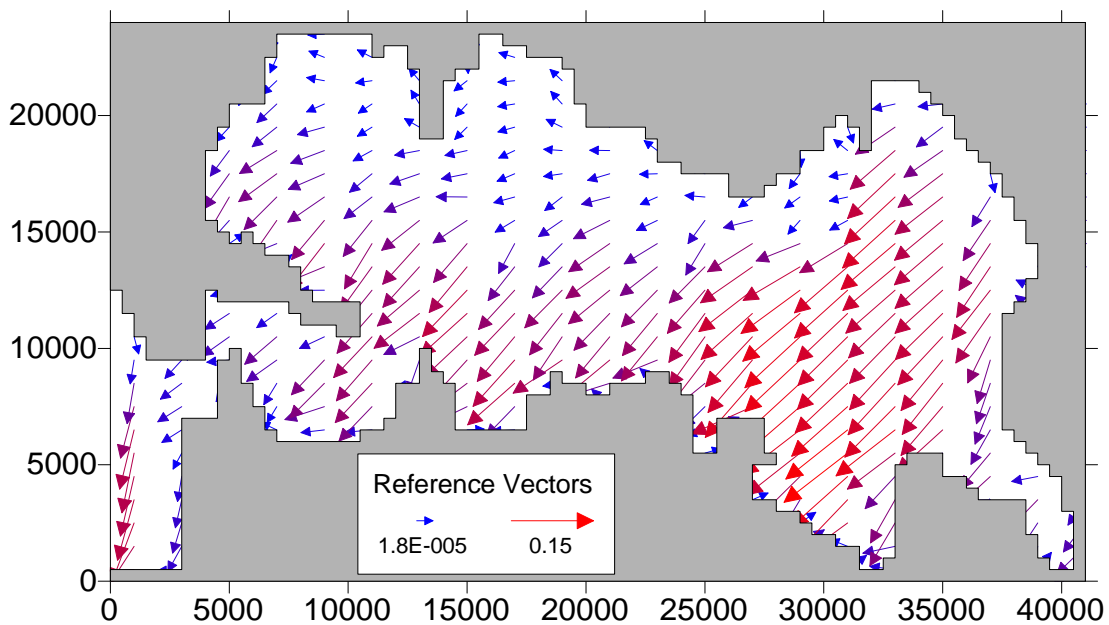
Σχήμα 7.4-4. Παροχές για το ελάχιστο εύρος παλίρροιας



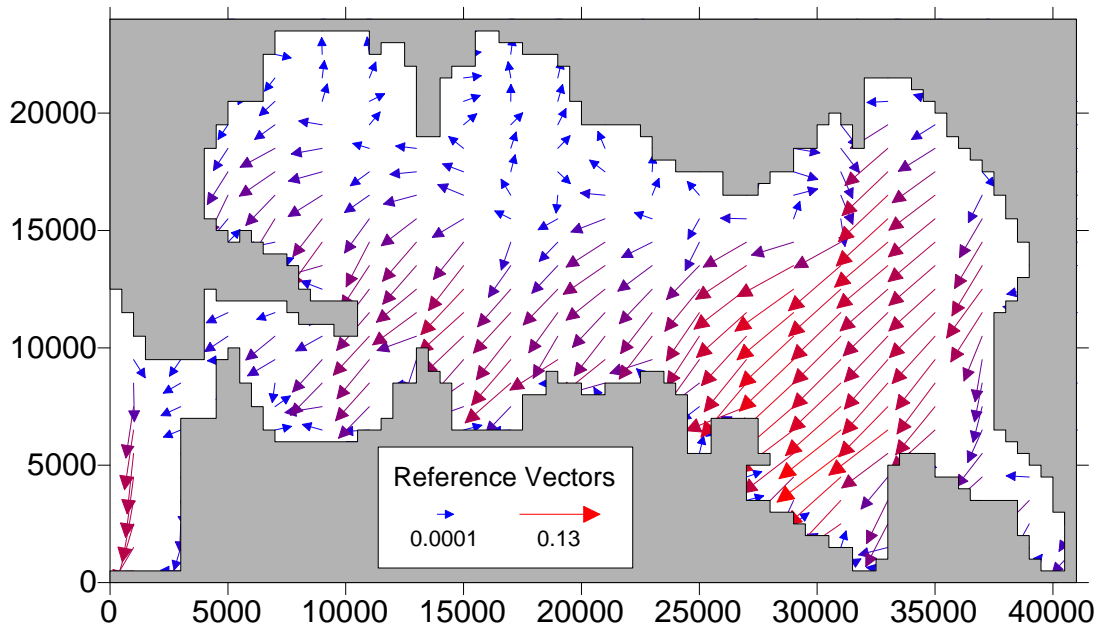
Σχήμα 7.4-5. Παροχές για το μέσο εύρος παλίρροιας



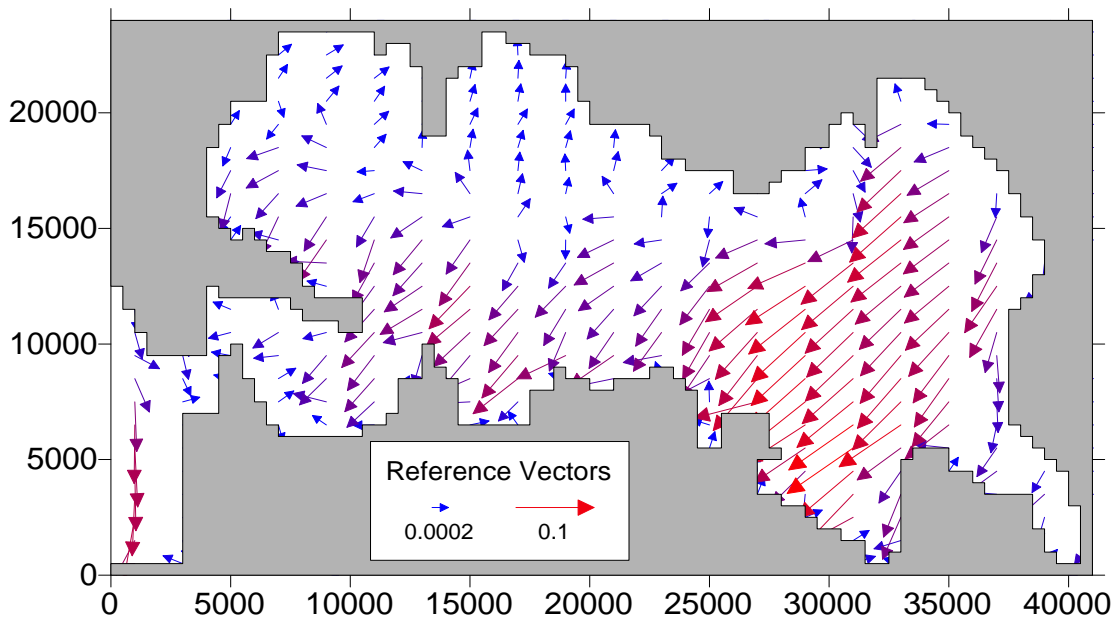
Σχήμα 7.4-6. Υδροδυναμικό πεδίο ΣΠ-2 επιφανειακού στρώματος (t=2,875 ημέρες)



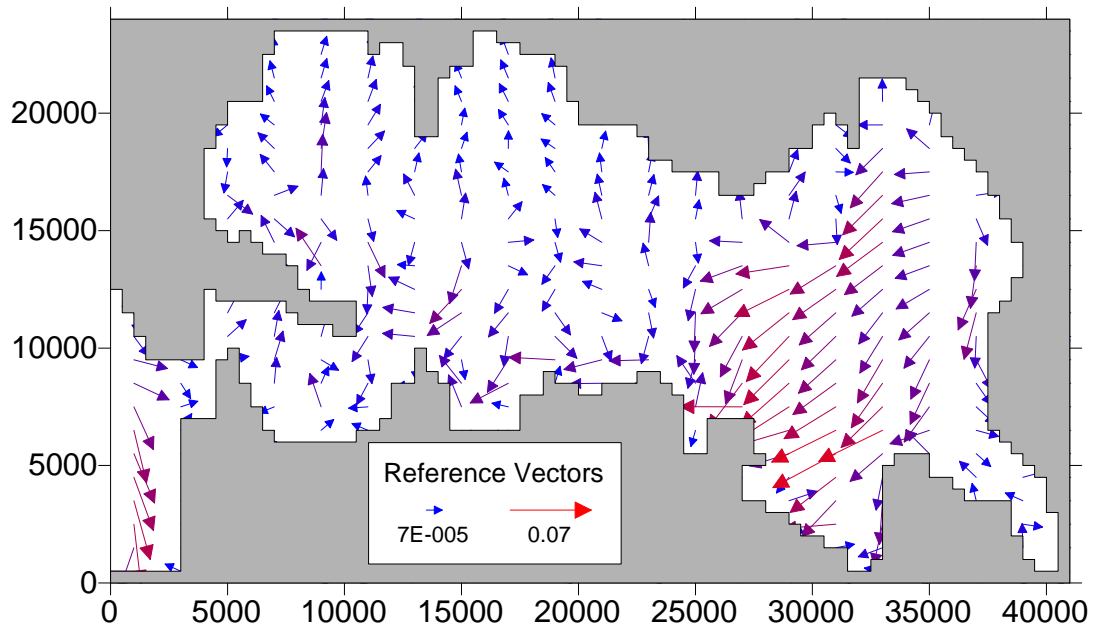
Σχήμα 7.4-7. Υδροδυναμικό πεδίο ΣΠ-4 επιφανειακού στρώματος (t=2,875 ημέρες)



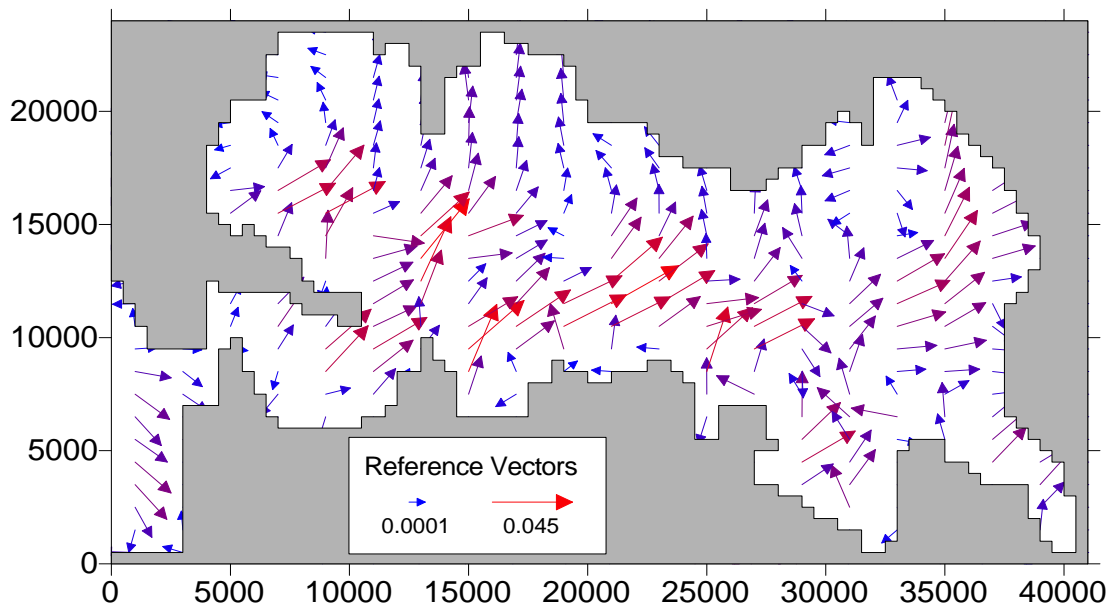
Σχήμα 7.4-8. Υδροδυναμικό πεδίο ΣΠ-4 δευτέρου στρώματος ($t=2,875$ ημέρες)



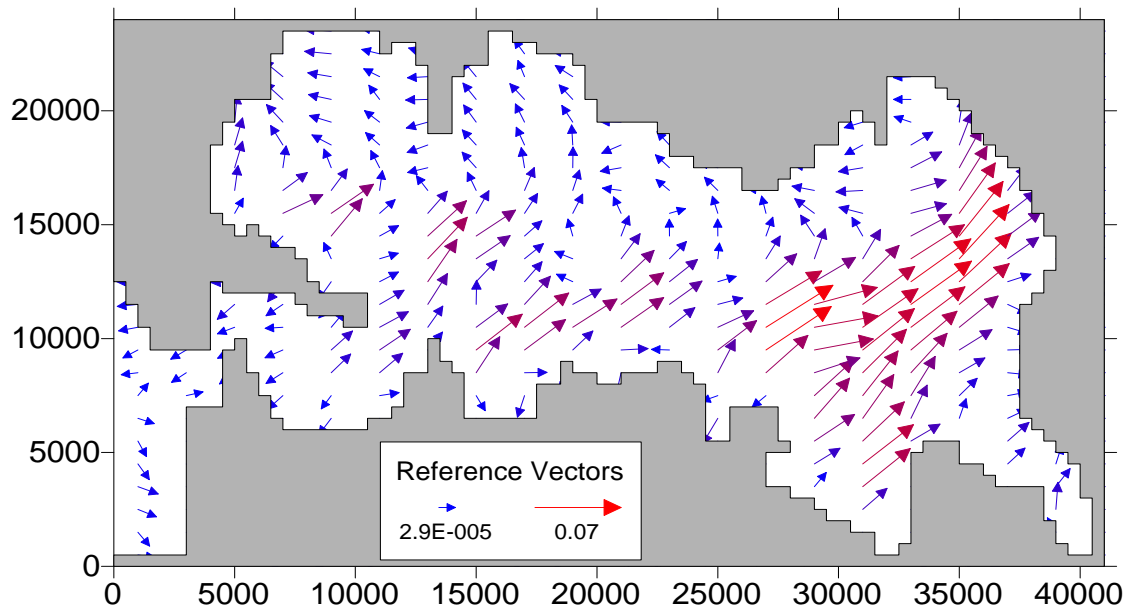
Σχήμα 7.4-9. Υδροδυναμικό πεδίο ΣΠ-4 τρίτου στρώματος ($t=2,875$ ημέρες)



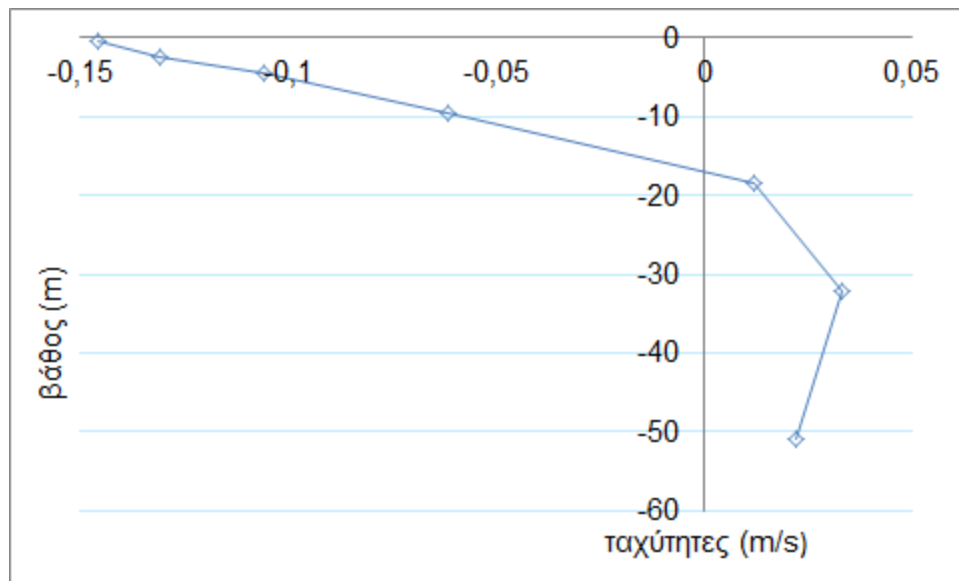
Σχήμα 7.4-10. Υδροδυναμικό πεδίο ΣΠ-4 τέταρτου στρώματος ($t=2,875$ ημέρες)



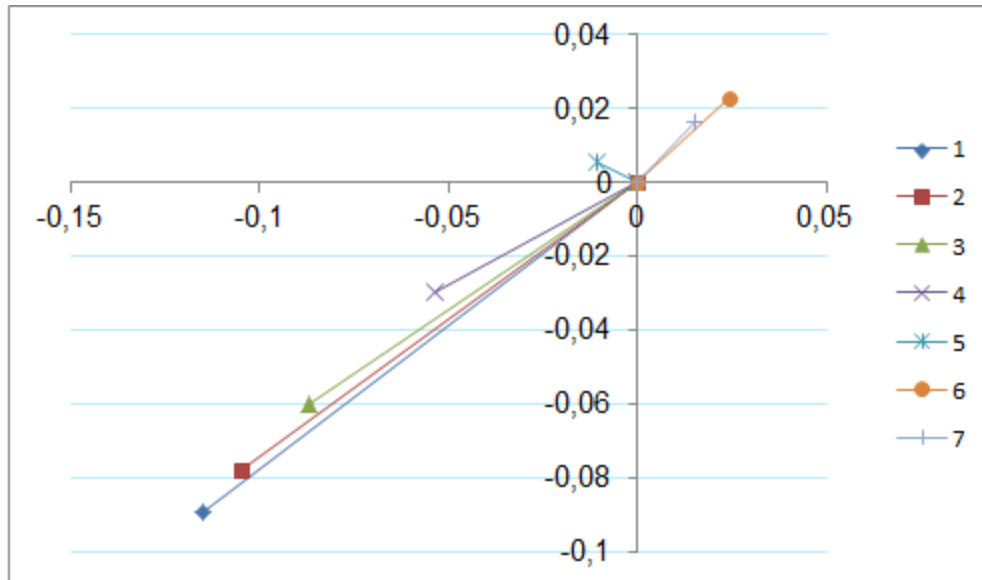
Σχήμα 7.4-11. Υδροδυναμικό πεδίο ΣΠ-4 πέμπτου στρώματος ($t=2,875$ ημέρες)



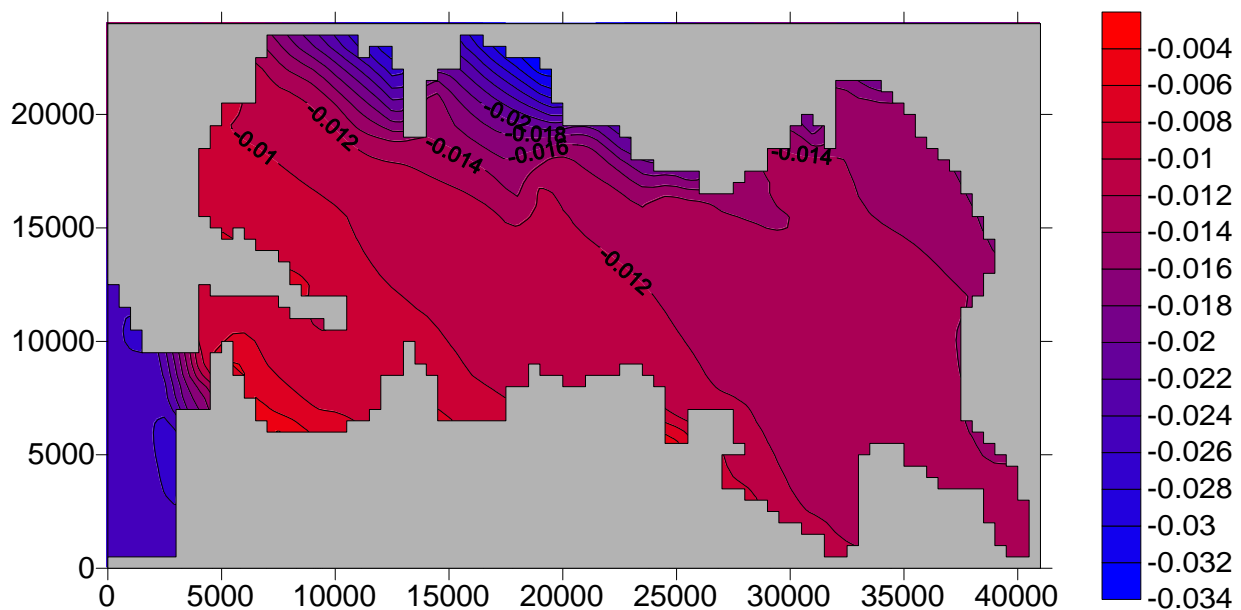
Σχήμα 7.4-12. Υδροδυναμικό πεδίο ΣΠ-4 έκτου στρώματος ($t=2,875$ ημέρες)



Σχήμα 7.4-13. Κατανομή ταχυτήτων σε σχέση με το βάθος στο σημείο (63,11)



Σχήμα 7.4-14. Κάτοψη τιμών ταχυτήτων για κάθε βάθος στο σημείο (63,11)



Σχήμα 7.4-15. Διάγραμμα ελεύθερης επιφάνειας ΣΠ-5 ($t=2,875$ ημέρες)

7.4.2. Σχολιασμός βασικών σεναρίων

Από τους υδροδυναμικούς υπολογισμούς των βασικών σεναρίων διαπιστώθηκε ότι:

- 1) Οι παροχές εισόδου-εξόδου δεν επηρεάζονται σημαντικά από την ύπαρξη ανέμου. Συγκεκριμένα, η επίδραση του ανέμου, για το ελάχιστο εύρος παλίρροιας, προκαλεί μείωση της τάξης του 1,5% της παροχής εξόδου Q_{out} και αύξηση του HRT της τάξης του 1,7% (σχεδόν μηδενική για τα υπόλοιπα εύρη όπου επηρεάζει πιο έντονα το φαινόμενο της παλίρροιας). Αυτή η μικρή μείωση οφείλεται στο γεγονός ότι, ενώ στα επιφανειακά στρώματα οι ταχύτητες ακολουθούν την φορά του ανέμου, τη διεύθυνση αυτή δεν ακολουθούν όλα τα στρώματα των υδάτων. Τα υποκείμενα στρώματα υφίστανται

αναστροφή (όπως φαίνεται στα Σχήματα 7.4-7 έως 7.4-12). Αν ίσχυαν πλήρως οι θεωρητικές παραδοχές που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 7.1 της ανεμογενούς κυκλοφορίας (δηλαδή πλήρης ανάπτυξη της σπείρας Ekman, τότε η μάζα των υδάτων θα έπρεπε να μετακινείται λόγω του ανέμου με διεύθυνση προς των Βορρά). Ωστόσο, στην συγκεκριμένη περίπτωση, τα βάθη είναι πολύ μικρότερα των 100 m και η επίδραση της τριβής του πυθμένα σημαντική, οπότε η φορά της μέσης ταχύτητας της μάζας του νερού δεν μπορεί να προβλεφθεί πλήρως.

- 2) Οι παροχές εισόδου-εξόδου επηρεάζονται σημαντικά από τις παροχές των δύο ποταμών Λούρου και Άραχθου. Η επίδραση των ποταμών προκαλεί αύξηση των παροχών εξόδου στο στόμιο η οποία είναι μεγαλύτερη στα μικρά εύρη παλίρροιας 87,5% ,17,5% και 2,3% για τα ημιεύρη 0,005 m, 0,025 m και 0,145 m. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όσο μικρότερο είναι το εύρος της παλίρροιας τόσο μικρότερες είναι οι παροχές εξόδου στο στόμιο του κόλπου επομένως η εκροή των ποταμών, η οποία είναι ίδια και για τα τρία εύρη παλίρροιας, αποτελεί μεγαλύτερο ποσοστό στα μικρά εύρη από ότι στα μεγάλα. Όπως φαίνεται και στα Σχήματα 7.4-4 και 7.4-5, η επίδραση των ποταμών προκαλεί μετατόπιση των δύο διαγραμμάτων προς τα κάτω, δηλαδή αύξηση των παροχών εξόδου ή οποία είναι εντονότερη στην περίπτωση της ελάχιστης παλίρροιας.
- 3) Οι τιμές των μέγιστων παροχών για τα ημιεύρη παλίρροιας 0,005 m, 0,025 m και 0,145 m είναι αντιστοίχως: 95,1 m³/s, 446,8 m³/s και 2047,4 m³/s, ενώ οι αντίστοιχες τιμές των θεωρητικών παροχών είναι 349,97 m³/s ,1749,84 m³/s και 10184,87 m³/s (Πίνακας 4.3-1). Εξαιτίας των μικρών διαστάσεων του στομίου του κόλπου, οι μέγιστες τιμές των παροχών είναι ίσες με το 27,2%, 25,5% και 20,7% των αντίστοιχων θεωρητικών τους τιμών. Ο λόγος $Q_o/Q_{o,theor}$ μειώνεται με την αύξηση του εύρους της παλίρροιας. Αυτή η παρατήρηση είναι σύμφωνη με τα ευρήματα Τσουκαλά και Μουτζούρη (2009) οι οποίοι παρατήρησαν ότι η μεταφορά ημιτονοειδούς κύματος μέσω αγωγών ανανέωσης (flushing culvert) μειώνεται με την αύξηση του ύψους του κύματος.
- 4) Στο σενάριο ΣΠ-5 η φορά της ταχύτητας των ρευμάτων στην επιφάνεια ταυτίζεται με την φορά της ταχύτητας του ανέμου η οποία όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3.4 είναι ΒΑ (Σχήμα 7.4-6).
- 5) Στο σενάριο ΣΑ-5, όπου υπεισέρχεται η παράμετρος του ανέμου, παρατηρείται, όπως ήταν αναμενόμενο αναστροφή των υδάτων στο 5^ο και στο 6^ο στρώμα (Σχήματα 7.4-11 και 7.4-12).
- 6) Η μέγιστη τιμή της ταχύτητας που εμφανίζεται στο πεδίο ταχυτήτων είναι 15 cm/s. Με βάση τα θεωρητικά δεδομένα που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο της ανεμογενούς κυκλοφορίας η ταχύτητα των επιφανειακών ρευμάτων αναμένεται να είναι ίση με το 3% της ταχύτητας του ανέμου. Η ταχύτητα του ανέμου είναι 4,31 m/s και επομένως η τιμή των επιφανειακών ρευμάτων αναμένεται να είναι ίση με 13 cm/s. Η απόκλιση ανάμεσα στην θεωρητική τιμή και στα αποτελέσματα του μοντέλου είναι 13%.
- 7) Στο το σενάριο ΣΠ-5, όπου υπεισέρχεται ο άνεμος, εμφανίζονται μεγαλύτερης εντάσεως ρεύματα στο νοτιοδυτικό τμήμα του κόλπου, όπου διατίθεται και μεγαλύτερο ανάπτυγμα πελάγους (Σχήμα 7.4-7).
- 8) Ελάχιστος υδραυλικός χρόνος παραμονής παρατηρείται στο σενάριο ΣΠ-3 (0,5 χρόνια), με το μέγιστο εύρος παλίρροιας, ενώ μέγιστος, στο ΣΠ-1, με το ελάχιστο εύρος

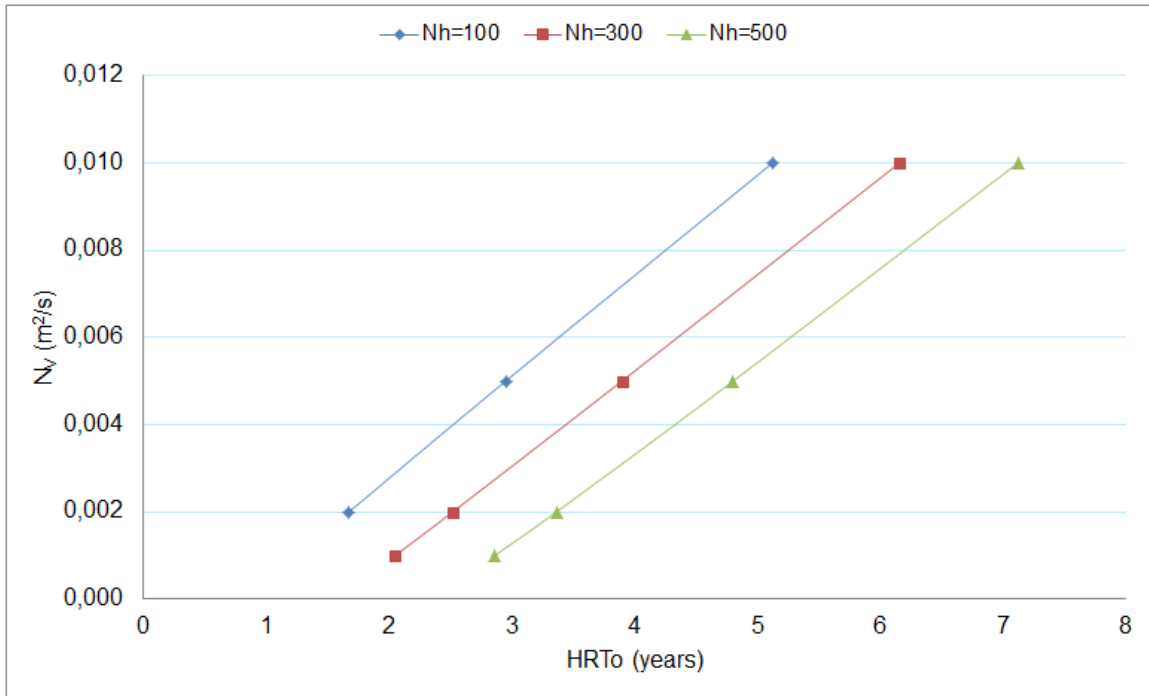
παλίρροιας (11,3 χρόνια) (Πίνακας 7.4-1). Η επίδραση του ανέμου είναι αμελητέα, ενώ η επίδραση της εισροής των ποταμών είναι σημαντική.

- 9) Από όλα τα σενάρια που μελετήθηκαν μπορούμε να εξάγουμε σαν γενικό συμπέρασμα ότι η κύρια δημιουργία γένεσης ρευμάτων στο στόμιο του κόλπου οφείλεται στο φαινόμενο της παλίρροιας.
- 10) Στο σενάριο ΣΠ-2, όπου υπάρχει μόνο παλίρροια, μεγαλύτερες ταχύτητες στο υδροδυναμικό πεδίο εμφανίζονται στο στόμιο του κόλπου καθώς στενεύει η διατομή (της τάξεως των 14 cm/s) (Σχήμα 7.4-6). Οι ταχύτητες αυτές οφείλονται στην διαφορά στάθμης λόγω παλίρροιας μεταξύ Ιόνιου Πελάγους και Αμβρακικού.
- 11) Οι τιμές των ταχυτήτων είναι μειούμενες σε σχέση με τα βάθος, και τα διανύσματα των διευθύνσεών τους κατευθύνονται δεξιόστροφα (Σχήμα 7.4-14) όπως αναμενόταν από τα θεωρητικά δεδομένα που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4.
- 12) Με βάση τα θεωρητικά δεδομένα, προσομοιώνοντας την κατανομή ταχυτήτων κατά την κατακόρυφη διεύθυνση με παραβολή, το σημείο μηδενισμού των ταχυτήτων εντοπίζεται στο 1/3 του συνολικού βάθους. Το συγκεκριμένο σημείο που εξετάστηκε (63,11) έχει βάθος 51 m επομένως το διάγραμμα έπρεπε να μηδενίζεται στα 17 m. Με βάση το διάγραμμα του Σχήματος 7.4-13, παρατηρούμε ότι το διάγραμμα μηδενίζεται πράγματι στα 17 περίπου μέτρα βάθος.
- 13) Το μαθηματικό μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη την αλλαγή της διεύθυνσης του ανέμου των στρωμάτων του αέρα που βρίσκονται ανάμεσα στο σημείο μέτρησης του ανέμου (δηλαδή στα 10m από την επιφάνεια) και για το λόγο αυτό η φορά του ρεύματος που εμφανίζεται στο μέσο του πρώτου στρώματος είναι ίδια με την διεύθυνση του ανέμου.
- 14) Η δράση του ΒΑ ανέμου, έχει σαν αποτέλεσμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.4-15. την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στο νοτιοδυτικό τμήμα του κόλπου και αντιστοίχως την πτώση της στάθμης στο βορειοανατολικό του τμήμα.

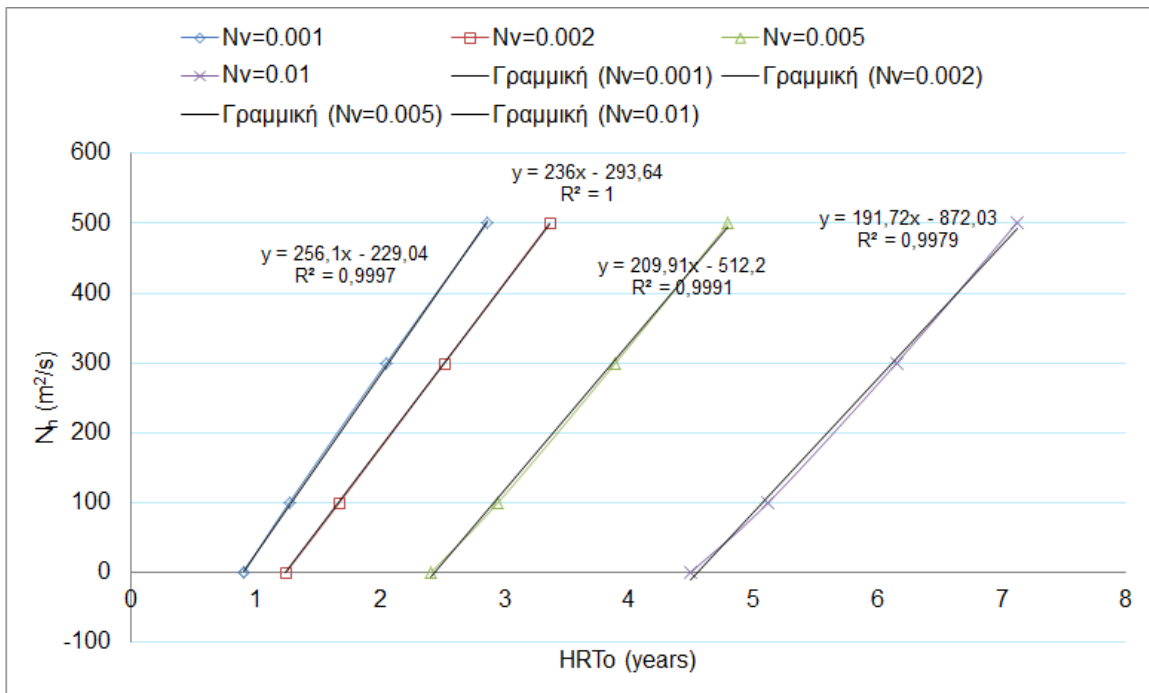
7.4.3. Υδροδυναμικοί υπολογισμοί ανάλυσης ευαισθησίας

Πίνακας 7.4-2. Παροχές εξόδου και υδραυλικοί χρόνοι παραμονής

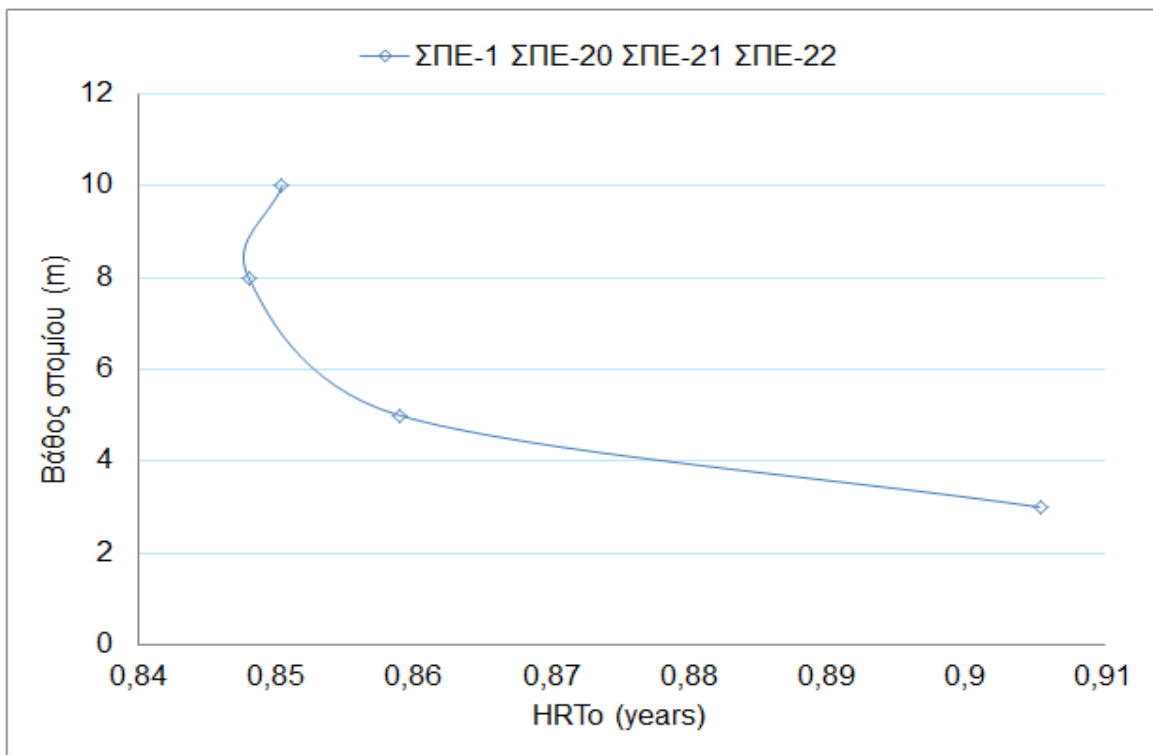
Σενάριο	Q_o (m ³ /s)	Q_{out} (m ³ /s)	HRT _o
ΣΠΕ-1	1190,8	379,0	0,91
ΣΠΕ-2	868,6	276,5	1,24
ΣΠΕ-3	447,8	142,5	2,41
ΣΠΕ-4	239,8	76,3	4,50
ΣΠΕ-5	1187,2	377,9	0,91
ΣΠΕ-6	1170,6	372,6	0,92
ΣΠΕ-7	1149,5	365,9	0,94
ΣΠΕ-8	850,2	270,6	1,27
ΣΠΕ-9	644,9	205,3	1,67
ΣΠΕ-10	365,8	116,4	2,95
ΣΠΕ-11	210,6	67,0	5,12
ΣΠΕ-12	526,2	167,5	2,05
ΣΠΕ-13	428,4	136,4	2,52
ΣΠΕ-14	276,9	88,1	3,89
ΣΠΕ-15	175,2	55,8	6,15
ΣΠΕ-16	377,0	120,0	2,86
ΣΠΕ-17	320,7	102,1	3,36
ΣΠΕ-18	224,6	71,5	4,80
ΣΠΕ-19	151,4	48,2	7,12
ΣΠΕ-20	199,8	63,6	0,86
ΣΠΕ-21	207,9	66,2	0,85
ΣΠΕ-22	208,6	66,4	0,85



Σχήμα 7.4-16. Επίδραση συντελεστών τυρβώδους συνεκτικότητας στον υδραυλικό χρόνο παραμονής



Σχήμα 7.4-17. Επίδραση συντελεστών τυρβώδους συνεκτικότητας στον υδραυλικό χρόνο παραμονής



Σχήμα 7.4-18. Επίδραση βάθους στομίου στον υδραυλικό χρόνο παραμονής

7.4.4. Σχολιασμός ανάλυσης ευαισθησίας

Από την ανάλυση ευαισθησίας διαπιστώθηκε ότι:

- Οι συντελεστές τυρβώδους συνεκτικότητας επηρεάζουν την ανάμειξη της μάζας του ρευστού. Η διαδικασία της ανάμειξης είναι «ανταγωνιστική» με τη διαδικασία της μεταφοράς και συνεπώς η αύξηση της ανάμειξης προκαλεί ανάσχεση του ρυθμού μεταφοράς. Κατ' επέκταση, προκαλείται μείωση των παροχών εξόδου και αύξηση του υδραυλικού χρόνου παραμονής.
- Η αύξηση του κατακόρυφου συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας ν_v προκαλεί σημαντική μείωση της παροχής εξόδου και επομένως αύξηση του υδραυλικού χρόνου παραμονής HRT. Συγκεκριμένα, διπλασιασμός του κατακόρυφου συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας προκαλεί αύξηση του HRT κατά 36,2%.
- Η επίδραση του οριζόντιου συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας ν_h στο HRT δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα μέχρι την τιμή των 10,0 cm/s. Η αριθμητική διάχυση του μοντέλου για το πυκνό πλέγμα είναι $V_o \cdot \Delta x / \pi$ και είναι περίπου 11 cm/s. Επομένως για τιμές μικρότερες από αυτήν η επίδραση της αύξησης του ν_h είναι αμελητέα. Για μεταβολή του ν_h από 100 cm/s σε 300 cm/s η μεταβολή του HRT είναι ίση με 61,4%.
- Η αύξηση του βάθους στο στόμιο εισόδου διευκολύνει την έξοδο του νερού από τον κόλπο με συνέπεια την μείωση του χρόνου παραμονής. Συγκεκριμένα, αύξηση κατά 1,6 φορές (από 3 m σε 8 m) επιφέρει μείωση του υδραυλικού χρόνου παραμονής κατά 6,5%.

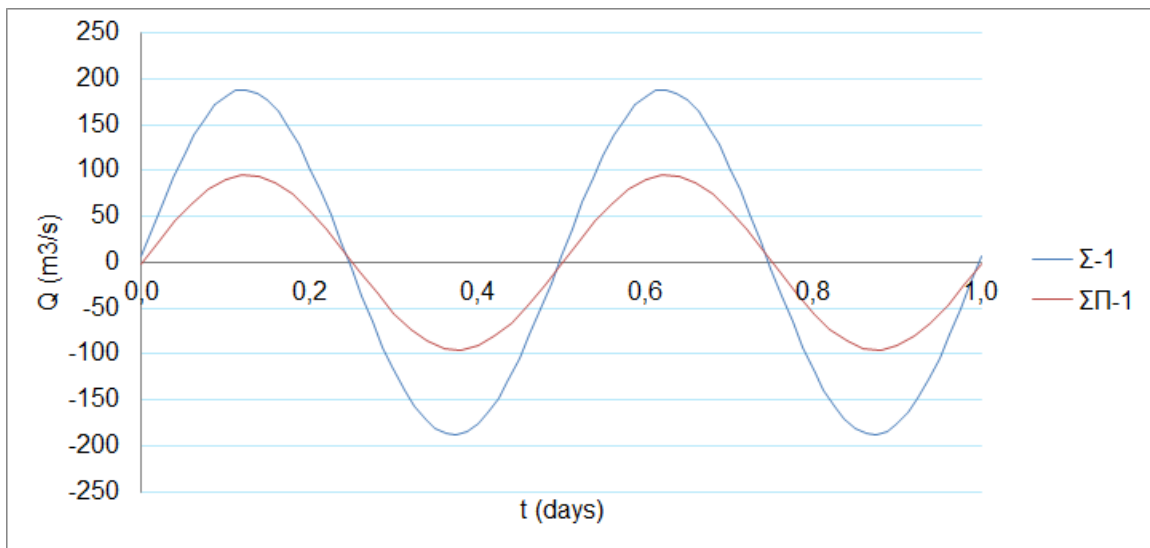
Για βάθη μεγαλύτερα από 8 m η επίδραση του βάθους εξόδου είναι αμελητέα και τείνει να αποκτήσει μια σταθερή τιμή.

7.5. Σύγκριση αποτελεσμάτων

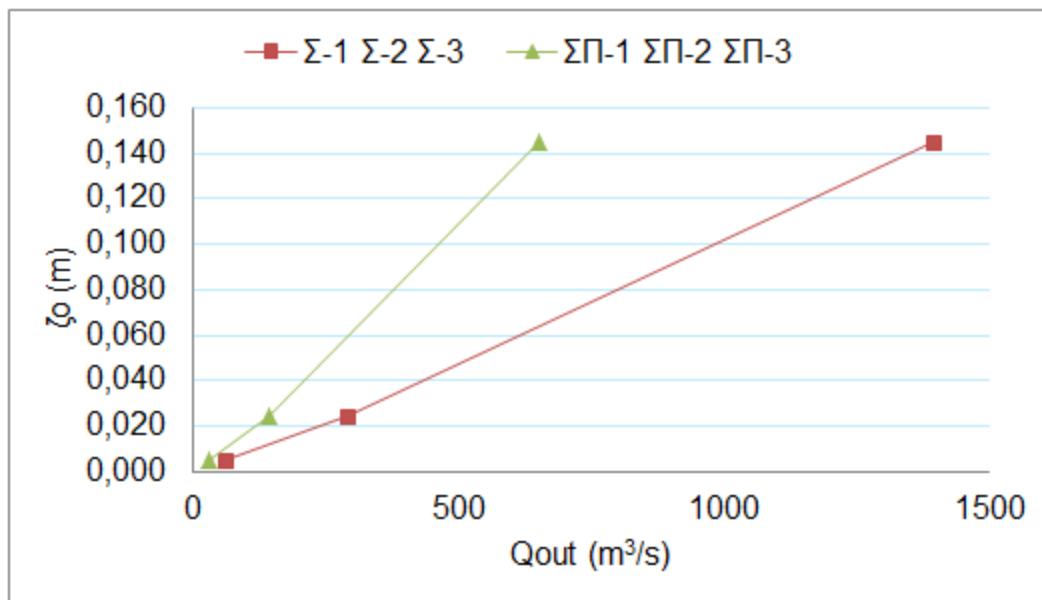
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται σύγκριση των υπολογισμών για τα σενάρια που πραγματοποιήθηκαν στα Κεφάλαια 7.3 και 7.4, για το αραιό και το πυκνό πλέγμα αντιστοίχως.

7.5.1. Σύγκριση αποτελεσμάτων βασικών σεναρίων

Έγινε σύγκριση των παροχών για το αραιό και το πυκνό πλέγμα για την μέση παλίρροια. Ακόμη, από τους υπολογισμούς έγινε σύγκριση των παροχών εξόδου για τα 3 εύρη παλίρροιας και για τα δύο πλέγματα Σχήμα 7.5-2.



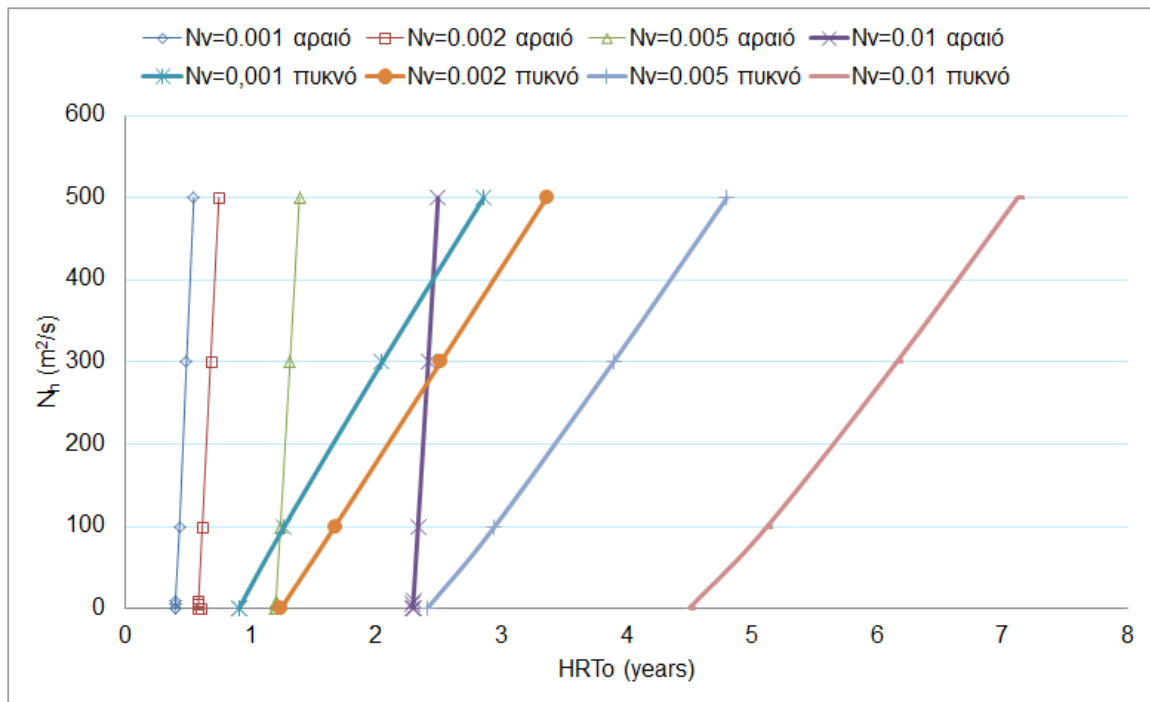
Σχήμα 7.5-1. Παροχές για την ελάχιστη στάθμη παλίρροιας για το αραιό και το πυκνό πλέγμα



Σχήμα 7.5-2. Τιμές παροχών για τα τρία εύρη παλίρροιας για το πυκνό και το αραιό πλέγμα

7.5.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης ευαισθησίας

Από την ανάλυση ευαισθησίας που διεξήχθη προέκυψε το διάγραμμα του Σχήματος 7.5-3 στο οποίο φαίνεται η επίδραση των συντελεστών τυρβώδους συνεκτικότητας στο HRT.



Σχήμα 7.5-3. Επίδραση των συντελεστών τυρβώδους συνεκτικότητας για το αραιό και το πυκνό πλέγμα

7.5.3. Σχολιασμός αποτελεσμάτων σύγκρισης

- 1) Οι παροχές στο στόμιο του κόλπου για το αραιό πλέγμα είναι περίπου διπλάσιες από αυτές που προκύπτουν από τους υπολογισμούς του πυκνού για όλα τα βασικά σενάρια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το εμβαδόν της διατομής εισόδου του αραιού πλέγματος είναι ίσο με 12500 m^2 , ενώ στο πυκνό είναι ίσο με 7500 m^2 , δηλαδή 1,67 φορές μικρότερο.
- 2) Και στα δύο πλέγματα, η παροχή εξόδου αυξάνεται αναλογικά με το εύρος της παλίρροιας.
- 3) Οι συντελεστές τυρβώδους συνεκτικότητας επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τα αποτελέσματα του πυκνού πλέγματος. Το συμπέρασμα αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι η αριθμητική διάχυση του μοντέλου είναι σημαντικά μικρότερη στο πυκνό πλέγμα με αποτέλεσμα η φυσική διάχυση να επηρεάζει εντονότερα τα αποτελέσματα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.5-3 η κλίση των ευθειών του πυκνού πλέγματος είναι πολύ μεγαλύτερη. Το γεγονός αυτός υποδηλώνει σημαντικότερη μεταβολή των υδραυλικών χρόνων παραμονής με την αύξηση των συντελεστών τυρβώδους συνεκτικότητας.
- 4) Και τα δύο πλέγματα παρουσιάζουν το ίδιο γενικό πεδίο ρευμάτων σε ότι αφορά τις βασικές κατευθύνσεις της ροής.

- 5) Το λεπτομερές πλέγμα παρουσιάζει μια πιο καλή προσαρμογή στην γεωμετρία της ακτής, με αποτέλεσμα να περιγράφει πιο πιστά τις φορές των ταχυτήτων κοντά στο στερεό όριο.
- 6) Τα στερεά όρια επιδρούν με δυσμενέστερο τρόπο στην κίνηση του νερού στο αραιό πλέγμα από ότι στο πυκνό. Γενικά η εικόνα των πεδίων ροής των δύο πλεγμάτων προσεγγίζει η μια την άλλη όσο απομακρυνόμαστε από τα στερεά όρια.
- 7) Το σφάλμα των υπολογισμών στο αραιό πλέγμα αναμένεται να είναι μεγαλύτερο καθώς το μεγάλο χωρικό βήμα δεν δίνει επαρκή πληροφορία για το τι συμβαίνει στον υποχώρο του. Επομένως, τα αποτελέσματα του πυκνού πλέγματος είναι περισσότερο ακριβή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ**8.1. Χαρακτηριστικά βασικών σεναρίων των υπολογισμών ποιότητας**

Στην ενότητα αυτή διεξήχθησαν 20 σεναρία υπολογισμών προκειμένου να υπολογιστεί ο χρόνος παραμονής συντηρητικού ρύπου μέσα στον Αμβρακικό κόλπο.

Πίνακας 8.1-1. Χαρακτηριστικά των σεναρίων υπολογισμών και χρόνοι παραμονής

Σενάριο	ζ_0 (m)	Άνεμος (m/s)	Παροχές Λούρου και Άραχθου (m ³ /s)	D_h (m ² /s)	D_v (m ² /s)	Βάθος (m)	RT (years)
ΣΠ-1	0,005	-	-	0,5	0,005	5	62,50
ΣΠ-2	0,025	-	-	0,5	0,005	5	15,15
ΣΠ-3	0,145	-	-	0,5	0,005	5	3,47
ΣΠ-4	0,025	-	85,8	0,5	0,005	5	4,18
ΣΠ-5	0,025	4,31	-	0,5	0,005	5	6,94
ΣΠ-6	0,025	4,31	85,8	0,5	0,005	5	3,33
ΣΠ-7	0,005	4,31	85,8	0,5	0,005	5	3,89
ΣΠ-8	0,005	-	85,8	0,5	0,005	5	4,41
ΣΠ-9	0,145	4,31	85,8	0,5	0,005	5	1,62
ΣΠ-10	0,145	-	85,8	0,5	0,005	5	2,55
ΣΠ-11	0,025	4,31	85,8	0,5	0,005	5	3,38
ΣΠ-12	0,025	4,31	85,8	0,5	0,003	5	3,38
ΣΠ-13	0,025	4,31	85,8	0,5	0,01	5	3,38
ΣΠ-14	0,025	4,31	85,8	0,3	0,005	5	3,38
ΣΠ-15	0,025	4,31	85,8	0,75	0,005	5	3,38
ΣΠ-16	0,025	4,31	85,8	1,0	0,005	5	3,38
ΣΠ-17	0,025	4,31	85,8	5,0	0,005	5	2,55
ΣΠ-18	0,025	4,31	85,8	10,0	0,005	5	2,04
ΣΠ-19	0,025	4,31	85,8	0,5	0,005	3	3,86
ΣΠ-20	0,025	4,31	85,8	0,5	0,005	8	2,99

Στα σεναρία αυτά διερευνήθηκε η επίδραση των ακόλουθων παραγόντων:

- 1) Του ημιεύρους της παλίρροιας (ζ_0).
- 2) Του επικρατούντος ανέμου.
- 3) Των παροχών των ποταμών Λούρου (Q_L) και Άραχθου (Q_A).

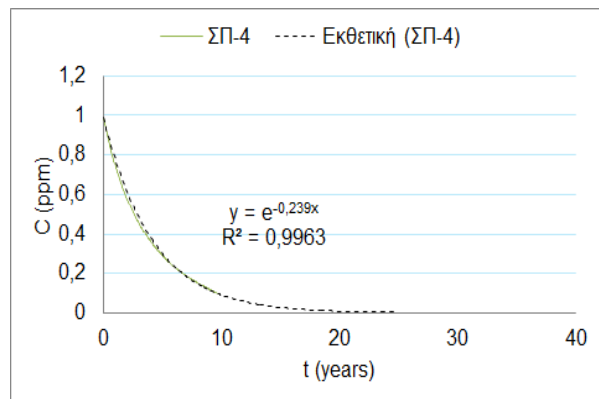
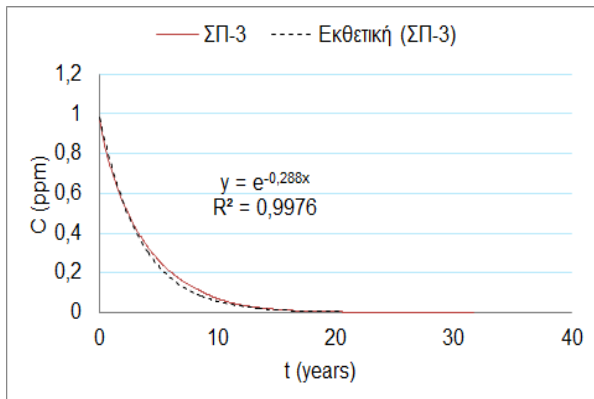
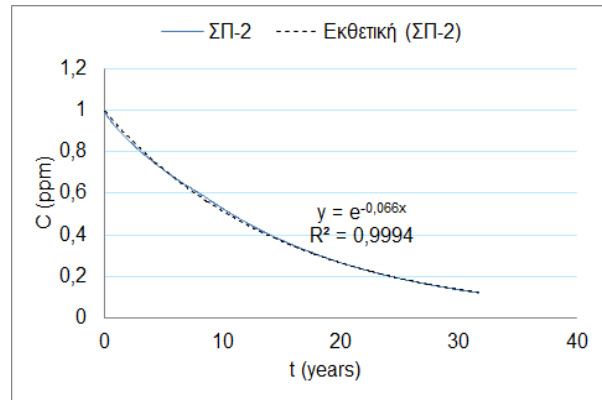
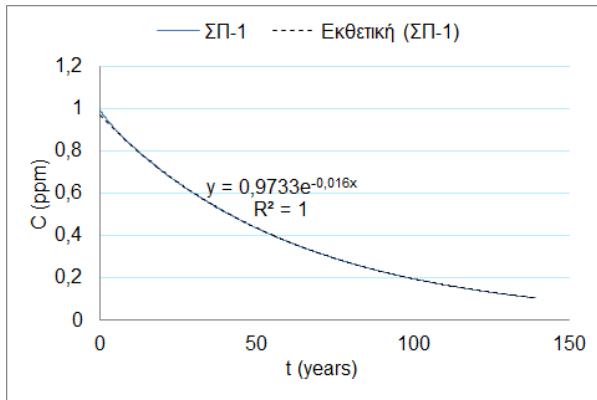
Έγινε ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου στους παρακάτω παράγοντες:

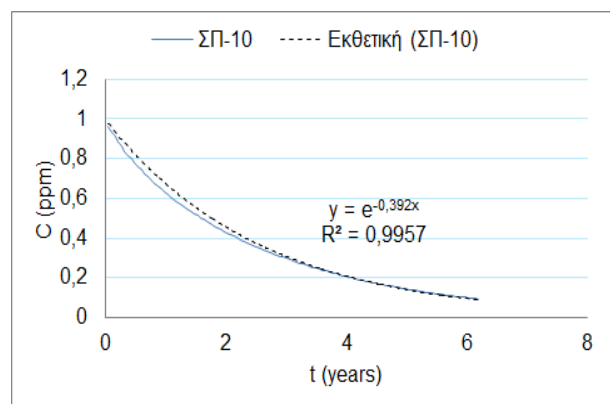
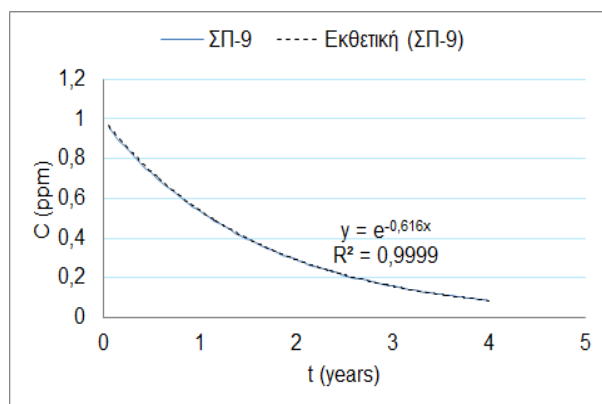
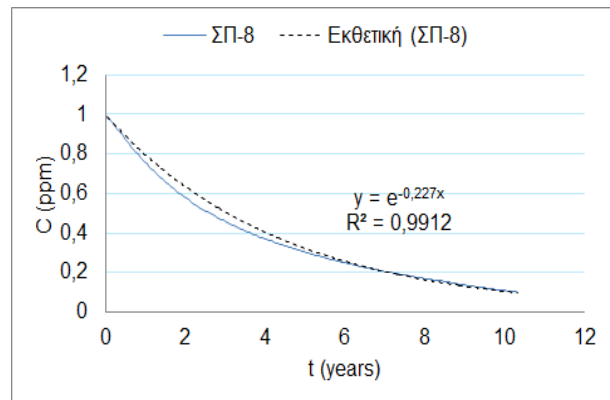
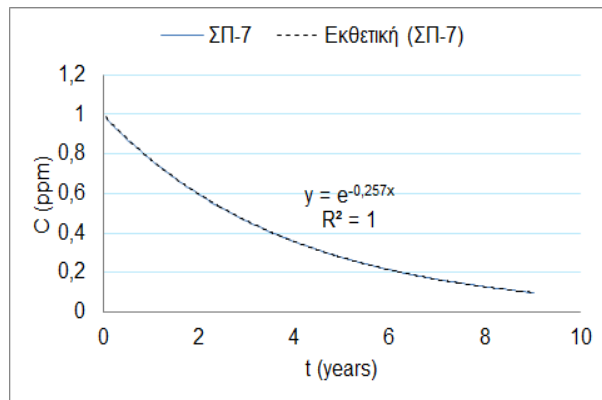
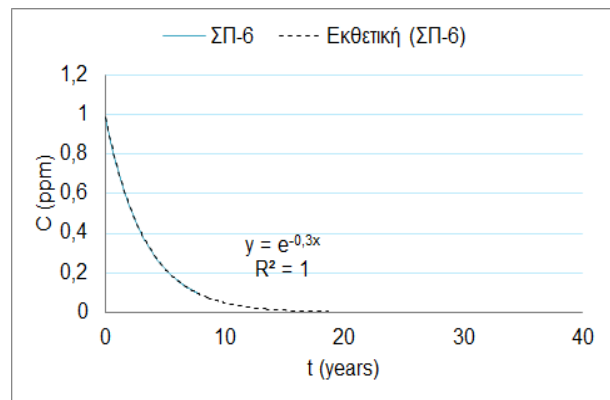
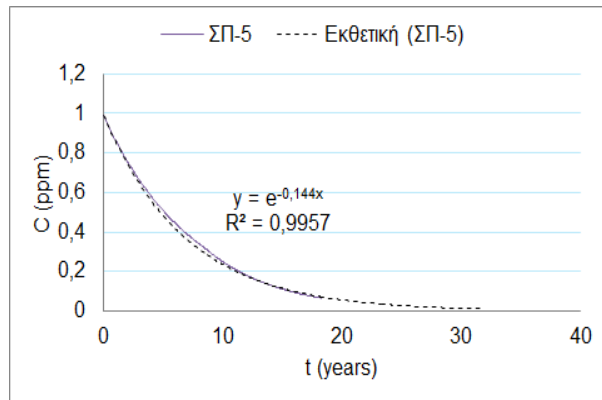
- 4) Ο οριζόντιος συντελεστής διασποράς (D_h).
- 5) Ο κατακόρυφος συντελεστής διασποράς (D_v).
- 6) Το βάθος στο στόμιο εισόδου (m).

8.2. Υπολογισμοί ποιότητας νερών

8.2.1. Υπολογισμοί ποιότητας νερών βασικών σεναρίων

Για τα σεναρία υπολογισμών του πίνακα Πίνακας 8.1-1 υπολογίστηκαν οι χρόνοι παραμονής RT ενός υποθετικού συντηρητικού ρύπου με αρχική ($t=0$) συγκέντρωση $C_0=1\text{ppm}$ μέσα στον κόλπο και έξω από αυτόν μηδενική συγκέντρωση. Στο Σχήμα 8.2-1 παρουσιάζονται οι καμπύλες μείωσης της μέσης τιμής του ρύπου μέσα στον κόλπο για κάθε σεναριο υπολογισμών. Ο ποιοτικός χρόνος RT, όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4.4, είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε να μειωθεί η αρχική συγκέντρωση του ρύπου στο ($1/e=36.8\%$).

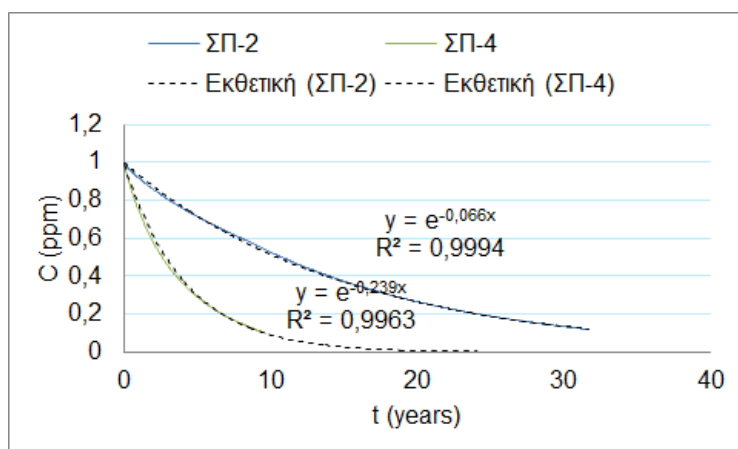




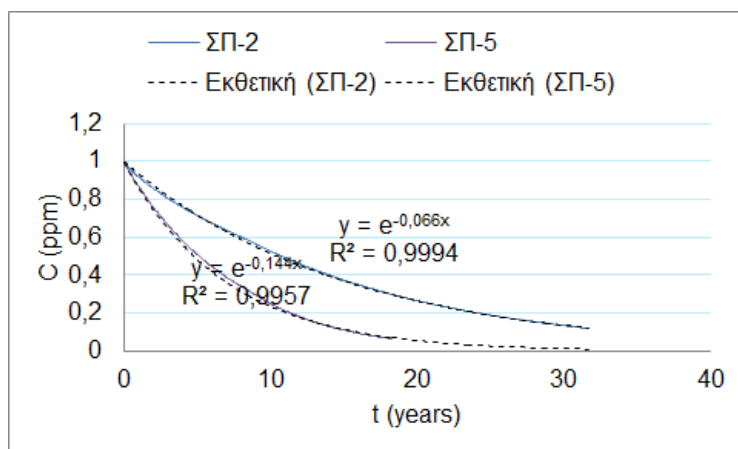
Σχήμα 8.2-1 .Διάγραμμα C-t για όλα τα βασικά σενάρια

Πίνακας 8.2-1. Χρόνοι παραμονής για κάθε βασικό σενάριο

Σενάριο	RT (years)
ΣΠ-1	62,5
ΣΠ-2	15,15
ΣΠ-3	3,47
ΣΠ-4	4,18
ΣΠ-5	6,94
ΣΠ-6	3,33
ΣΠ-7	3,89
ΣΠ-8	4,41
ΣΠ-9	1,62
ΣΠ-10	2,55

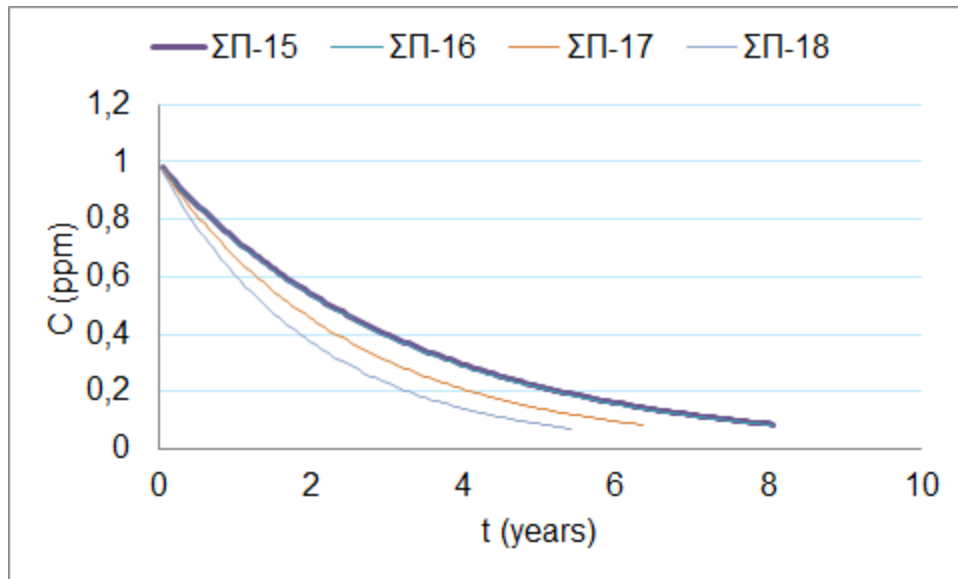


Σχήμα 8.2-2 .Διάγραμμα C-t επίδρασης παροχής ποταμών στον χρόνο παραμονής RT

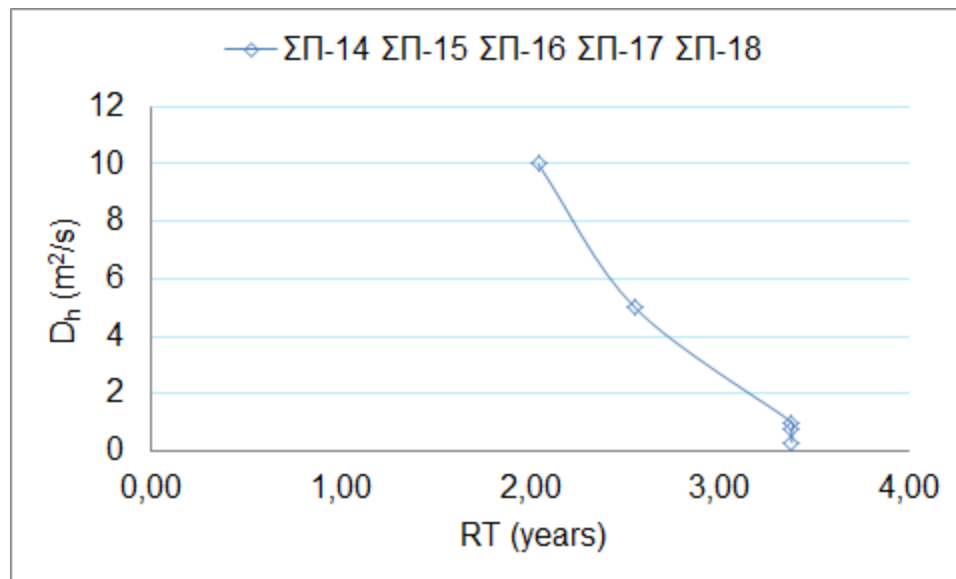


Σχήμα 8.2-3 .Διάγραμμα C-t επίδρασης ανέμου στον χρόνο παραμονής RT

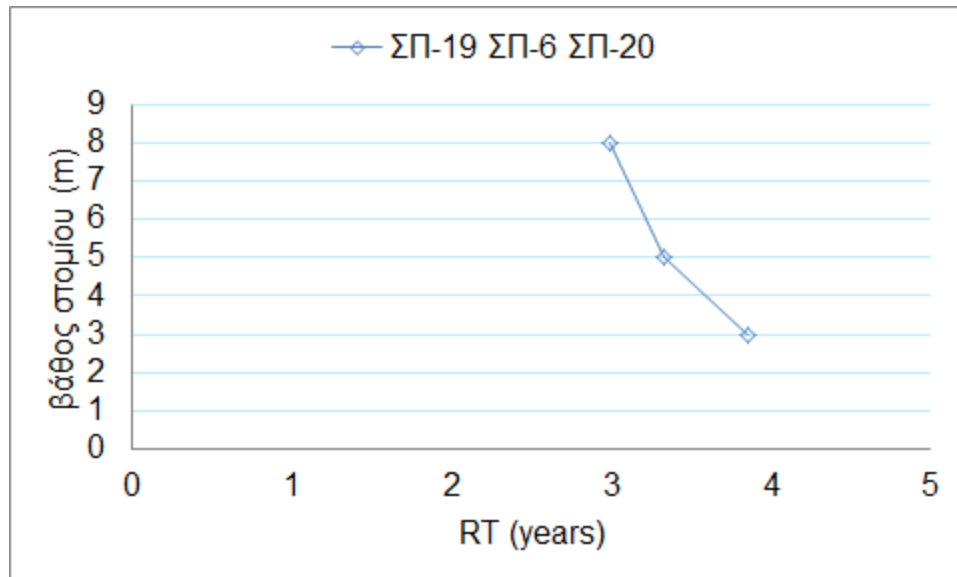
8.2.2. Υπολογισμοί ποιότητας νερών σεναρίων ανάλυσης ευαισθησίας



Σχήμα 8.2-4. Καμπύλες C-t για ΣΠ-15, ΣΠ-16, ΣΠ-17 και ΣΠ-18



Σχήμα 8.2-5. Επίδραση συντελεστή D_h στο RT



Σχήμα 8.2-6. Επίδραση βάθους στομιού εισόδου στο RT

Πίνακας 8.2-2. Χρόνοι παραμονής για κάθε σενάριο ευαισθησίας

Σενάριο	RT (years)
ΣΠ-11	3,38
ΣΠ-12	3,38
ΣΠ-13	3,38
ΣΠ-14	3,38
ΣΠ-15	3,38
ΣΠ-16	3,38
ΣΠ-17	2,55
ΣΠ-18	2,04
ΣΠ-19	3,86
ΣΠ-20	2,99

8.2.3. Σχολιασμός αποτελεσμάτων ποιότητας

Από τους υπολογισμούς ποιότητας διαπιστώθηκε ότι:

- Η μείωση του υποθετικού ρύπου, όπως αυτή υπολογίστηκε από το μαθηματικό μοντέλο, μειώνεται με εκθετική συνάρτηση.

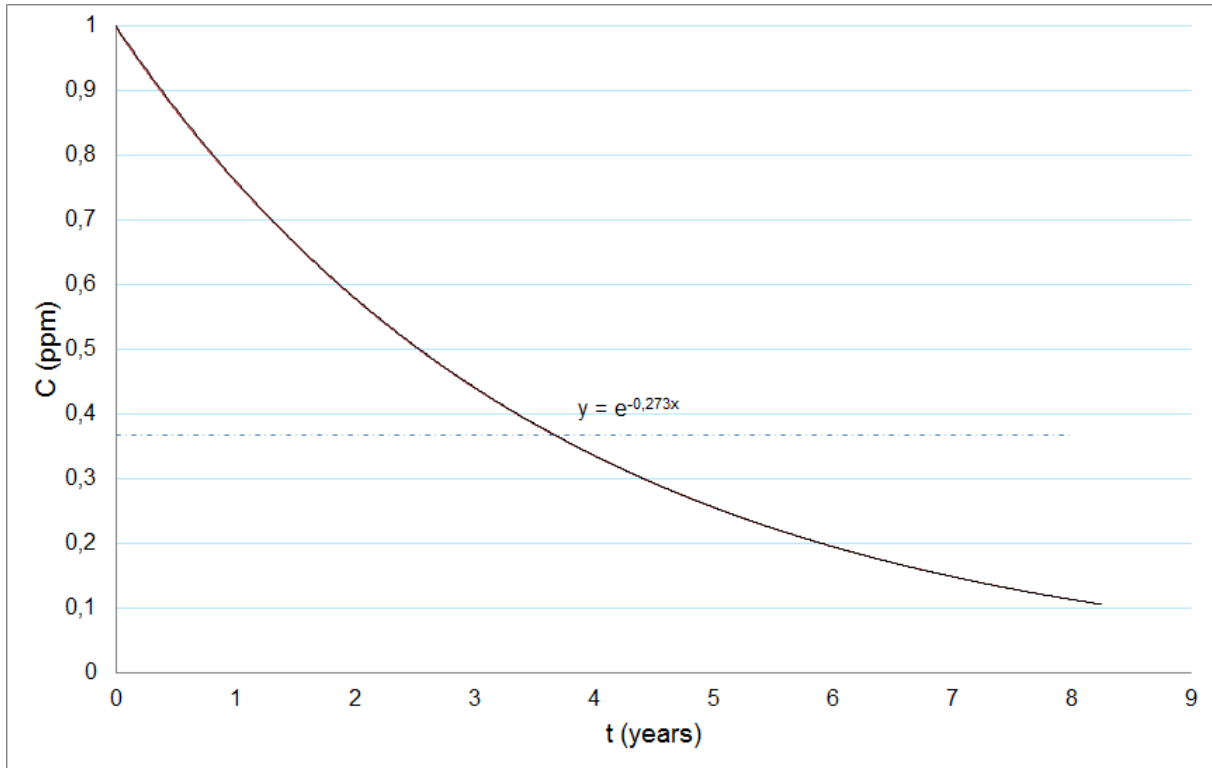
- Μικρότερος χρόνος παραμονής ($RT=1,62$ χρόνια) υπολογίστηκε για το σενάριο ΣΠ-9, στο οποίο υπεισέρχονται όλες οι παράμετροι για τη μέγιστη παλίρροια, και ο μέγιστος για την ελάχιστη παλίρροια ($RT=62,5$ χρόνια)- σενάριο ΣΠ-1.
- Η επίδραση του ανέμου, αν και, όπως αναφέρθηκε στο σχολιασμό των υδραυλικών υπολογισμών, δεν μείωσε σημαντικά την παροχή εισόδου και εξόδου (αμελητέα επίδραση στον υδραυλικό χρόνο παραμονής), είχε σημαντική επίδραση στο χρόνο παραμονής του ρύπου. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στο γεγονός ότι ο άνεμος προκαλεί αναστροφή των υδάτων, διευκολύνοντας έτσι τη μεταφορά και διάχυση του ρύπου κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Συγκεκριμένα, ο άνεμος προκάλεσε μείωση του χρόνου παραμονής για την μέση παλίρροια 54%.
- Οι εκροές των ποταμών προκάλεσαν μείωση των χρόνων παραμονής κατά 92%, 72% και 26% για την ελάχιστη, την μέση και την μέγιστη παλίρροια αντίστοιχα. Η μείωση αυτή, μειώνεται όσο αυξάνεται το εύρος της παλίρροιας, όπως συνέβη και για τους υδραυλικούς χρόνους με αντίστοιχα ποσοστά (45%, 9,02% και 1,4%) (Κεφάλαιο 7.3-2).
- Οι υδραυλικοί χρόνοι παραμονής είναι σημαντικά μικρότεροι από τους χρόνους παραμονής RT που έχουν προκύψει από την ποιοτική ανάλυση. Συγκεκριμένα, ο λόγος του RT προς το HRT είναι 10,8, 12,6 και 13,8 για την ελάχιστη την μέση και την μέγιστη παλίρροια αντιστοίχως. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο υδραυλικός χρόνος εκφράζει τον χρόνο που θα χρειαζόταν για να αδειάσει όλος ο κόλπος αν η παροχή εξόδου ήταν συνεχής και ίση με Q_{out} . Ωστόσο, επειδή το φαινόμενο της παλίρροιας είναι παλινδρομικό, η παροχή εξόδου δεν είναι σταθερή, και έτσι ο HRT τείνει να υπερεκτιμήσει την ανανέωση των υδάτων.

Από την ανάλυση ευαισθησίας διαπιστώθηκε ότι:

- Η αύξηση του συντελεστή οριζόντιας διασποράς D_h προκαλεί μείωση του χρόνου παραμονής RT . Ειδικότερα, ο διπλασιασμός του συντελεστή D_h προκαλεί μείωση του RT κατά 20%. Η αύξηση αυτή, είναι αποτέλεσμα της καλύτερης ανάμειξης που πραγματοποιείται στην οριζόντια διεύθυνση όταν αυξάνεται ο συντελεστής διάχυσης.
- Η μεταβολή του συντελεστή κατακόρυφης διασποράς D_v προκαλεί αμελητέα επίδραση στο RT .
- Η μείωση του βάθους στο στόμιο εισόδου προκαλεί αύξηση του RT , καθώς όπως προαναφέρθηκε η παροχή εισόδου-εξόδου μειώνεται και έτσι δυσχεραίνεται η είσοδος καθαρού νερού και η έξοδος του ρύπου. Συγκεκριμένα, αύξηση του βάθους του στομίου κατά 5 μέτρα προκαλεί μείωση κατά 38% του RT .

8.3. Υπολογισμοί ποιότητας πυκνού πλέγματος

Για την περίπτωση του πυκνού πλέγματος εκτιμήθηκε ο χρόνος παραμονής συντηρητικού ρύπου για το αντιπροσωπευτικότερο σενάριο, δηλαδή λαμβάνοντας υπόψη όλες τις χαρακτηριστικότερες παραμέτρους (μέση στάθμη παλίρροιας, εισροές ποταμών, μέση ταχύτητα και επικρατέστερη διεύθυνση ανέμου).



Σχήμα 8.3-1. Διάγραμμα C-t για χαρακτηριστικό σενάριο.

Για το χαρακτηριστικό σενάριο ο χρόνος παραμονής του Αμβρακικού προκύπτει 3,7 χρόνια ($=1/0,273$).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

9.1. Δεδομένα και παραδοχές

Για την περιοχή του Αμβρακικού κόλπου, έγινε αρχικά διερεύνηση των επικρατούντων συνθηκών. Οι τιμές του ημιέυρους παλίρροιας ελήφθησαν ίσες με 0,005 m, 0,025 m και 0,145 m. Η διεύθυνση του ανέμου ήταν ΒΑ με ταχύτητα 4,31 m/s, και οι παροχές των δύο σημαντικότερων ποταμών της περιοχής μελέτης, Λούρου και Άραχθου, ίσες με 19,4 m³/s και 66,4 m³/s αντιστοίχως. Με βάση τα δεδομένα αυτά καταστρώθηκαν τα βασικά σενάρια υπολογισμών για δύο αριθμητικά πλέγματα, ένα αραιό και ένα πυκνό με ομοιόμορφο τετραγωνικό χωρικό βήμα και στις δύο διαστάσεις (δηλαδή $D_x=D_y$).

Στη συνέχεια διεξήχθη εκτενής ανάλυση ευαισθησίας μία σειράς παραγόντων που υπεισέρχονται στο μαθηματικό μοντέλο (FIOW-3DL). Οι τιμές των συντελεστών οριζόντιας και κατακόρυφης τυρβώδους συνεκτικότητας ελήφθησαν αρχικά ίσες με $\nu_h=1,0$ m²/s και $\nu_v=0,005$ m²/s και οι συντελεστές τυρβώδους διάχυσης $D_h=0,5$ m²/s και $D_v=0,005$ m²/s. Ο συντελεστής τριβής πυθμένα *manning* ελήφθη ίσος με 0,02 καθώς τα ιζήματα στον κόλπο είναι λεπτόκοκκα (πηλός και ιλύς).

9.2. Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τους υδροδυναμικούς υπολογισμούς ως προς τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT) ήταν τα εξής:

- Ο υδραυλικός χρόνος HRT για το χαρακτηριστικό σενάριο (δηλαδή για μέση παλίρροια, άνεμο και ποτάμια) προέκυψε ίσος με 1,1 χρόνια και 2,1 χρόνια για το αραιό και για το πυκνό πλέγμα αντιστοίχως.
- Οι χρόνοι HRT προέκυψαν σημαντικά μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους θεωρητικούς χρόνους παραμονής $HRT_{o,theor}$. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς ο $HRT_{o,theor}$ δεν λαμβάνει υπόψη την γεωμετρία του κόλπου και επομένως ούτε τις διαστάσεις του στομίου εισόδου. Για το αραιό πλέγμα ο λόγος $Q_o/Q_{o,theor}$ είναι 53,8%, 51,6% και 43,1% για την ελάχιστη, μέση και μέγιστη παλίρροια, αντιστοίχως. Οι αντίστοιχοι λόγοι για το πυκνό πλέγμα είναι: 27,2%, 25,5% και 20,7%. Ο λόγος φαίνεται να μειώνεται με την αύξηση του εύρους της παλίρροιας.
- Οι παροχές των ποταμών Λούρου και Άραχθου επιδρούν σημαντικά στο HRT. Συγκεκριμένα, για το αραιό πλέγμα προκαλούν μείωση του HRT κατά 45,0%, 9,0% και 1,4% για την ελάχιστη, τη μέση και τη μέγιστη παλίρροια. Η αντίστοιχη επίδραση για το πυκνό πλέγμα είναι: 87,5% 17,5% και 2,3%. Προκύπτει ότι η εκροή αυτή έχει σημαντικότερη επίδραση όσο μικρότερο είναι το εύρος της παλίρροιας. Τα ποτάμια επηρεάζουν σημαντικότερα τους υπολογισμούς του πυκνού πλέγματος.
- Ο ΒΑ άνεμος, δηλαδή ο συχνότερα εμφανιζόμενος άνεμος στην περιοχή του Αμβρακικού, προκαλεί αμελητέα μεταβολή του HRT (<2%). Ο άνεμος προκαλεί αναστροφή των υδάτων στα κατώτερα στρώματα, δηλαδή προς το εσωτερικό του κόλπου.

Από την ανάλυση ευαισθησίας για τους υδροδυναμικούς υπολογισμούς προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Οι συντελεστές τυρβώδους συνεκπικότητας v_h και v_v φαίνεται να έχουν σημαντική επιρροή στα αποτελέσματα του μοντέλου. Η αύξηση των τιμών των συντελεστών συνεπάγεται πιο έντονη διάχυση και άρα η συνεισφορά της μεταφοράς στην κίνηση μειώνεται. Επομένως, οι παροχές εξόδου Q_{out} μειώνονται και αντιστοίχως αυξάνεται η τιμή του HRT. Συγκεκριμένα, τριπλασιασμός του v_h από $100 \text{ m}^2/\text{s}$ σε $300 \text{ m}^2/\text{s}$ προκαλεί αύξηση του υδραυλικού χρόνου παραμονής κατά 14,0% για το αραιό πλέγμα και 61,4% για το πυκνό. Παρατηρείται δηλαδή πολύ μεγαλύτερη αύξηση για το πυκνό πλέγμα. Το αποτέλεσμα αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι η αριθμητική διάχυση του μαθηματικού μοντέλου είναι σημαντικότερη στο αραιό πλέγμα και έτσι η φυσική διάχυση επηρεάζει λιγότερο έντονα τα αποτελέσματα.
- Η αύξηση του βάθους στο στόμιο εισόδου προκαλεί μείωση του HRT διότι διευκολύνεται η έξοδος του νερού από τον κόλπο. Όταν το βάθος στο στόμιο αυξάνεται από τα 3 m στα 8 m η μείωση του υδραυλικού χρόνου παραμονής είναι 57% για το αραιό πλέγμα ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για το πυκνό είναι πολύ μικρότερο (6,5%).

Τα συμπεράσματα που διεξήχθησαν από τους υπολογισμούς ποιότητας, που πραγματοποιήθηκαν ώστε να υπολογιστεί ο χρόνος παραμονής RT είναι τα εξής:

- Ο χρόνος RT για το χαρακτηριστικό σενάριο (δηλαδή για μέση παλίρροια, άνεμο και παροχές ποταμών) προέκυψε 3,3 χρόνια για το αραιό και 3,7 χρόνια για το πυκνό πλέγμα.
- Η ύπαρξη του ανέμου μειώνει το RT κατά 54%. Ο άνεμος, μέσω της αναστροφής των υδάτων, προκαλεί ανάμειξη μέσα στον κόλπο με αποτέλεσμα την εντονότερη διάχυση του ρύπου κατά την κατακόρυφη διεύθυνση.
- Η εκροή των ποταμών μέσα στον κόλπο μειώνει το RT κατά 92%, 72% και 26% για την ελάχιστη, μέση και μέγιστη τιμή της παλίρροιας αντιστοίχως.

Από την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε διαπιστώθηκαν τα παρακάτω:

- Η αύξηση των τιμών συντελεστών τυρβώδους διάχυσης, διευκολύνει τη διάχυση του ρύπου με αποτέλεσμα να μειώνει το RT, και να διευκολύνει την έξοδο του από τον κόλπο. Συγκεκριμένα ο διπλασιασμός του D_h προκαλεί μείωση του RT κατά 20%.
- Η μεταβολή του D_v φαίνεται να έχει αμελητέα επίδραση στο RT.
- Η αύξηση του βάθους στο στόμιο εισόδου διευκολύνει την έξοδο του ρύπου από τον κόλπο με αποτέλεσμα να προκαλεί μείωση στο RT. Η μεταβολή του βάθους στο στόμιο από 3 m σε 5 m προκαλεί μείωση του ρύπου κατά 38% (η αντίστοιχη μεταβολή για τον υδραυλικό χρόνο HRT ήταν 57%).

9.3. Προτάσεις

Προτείνεται να ληφθούν υπόψη οι διαφορές θερμοκρασίας, πυκνότητας και αλατότητας μέσα στον κόλπο κατά τη διαδικασία υπολογισμού του χρόνου παραμονής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Αλμπάνης Τ. (2010). “Προβλήματα Ρύπανσης Αμβρακικού Κόλπου”. Τμήμα Χημείας, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων (http://library.tee.gr/digital/m2516/m2516_albanis.pdf)
- 2) Bolin B., Rodhe H. (1972). “A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs”, *Institute of Meteorology*, Stockholm, Sweden
- 3) Yuan D., Lin B., Falconer R.A. (2007). “A modelling study of residence time in a macro-tidal estuary”. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. Vol.71, issues 3-4.
- 4) Ειδική περιβαλλοντική μελέτη της προστατευόμενης περιοχής του Αμβρακικού-ΥΠΕΧΩΔΕ, Φεβρουάριος (2004).
- 5) ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. (1989). Ωκεανογραφική μελέτη Αμβρακικού, Τεχνική μελέτη, Αθήνα.
- 6) Takeoka H. (1987). “Water Exchange in a Time-Varying Transport”, *J. of Oceanographical Society of Japan*, Vol.43, pp.21 to 27.
- 7) Zimmerman J.T.F. (1976). “Mixing and Flushing of tidal embayments in the western sea. Part I: Distribution of salinity and calculation of mixing time scales”, *Netherlands Journal of Sea Research*, Volume 10, Issue 2 , 149-191
- 8) Kapsimalis V., Pavlakis P., Poulos S. E., Alexandri S., Tziavos C., Sioulas A., Filippas D. and Lykousis V. (2005). Internal structure and evolution of the late quaternary sequence in a shallow embayment: The Amvrakikos Gulf, NW Greece, *Marine Geology*, 222-223, 339-418.
- 9) Τσαμαρδά Κ. (2006). “Τυπολογία των λιμνοθαλασσών του Αμβρακικού Κόλπου διαχείριση του υδάτινου οικοσυστήματος”. Μεταπτυχιακή εργασία, Χαροκόπειο πανεπιστήμιο, Αθήνα.
- 10) Stamou, A.I., Noutsopoulos, C., Pipilis, K.G., Gavalaki, E. and Andreadakis, A. (1999a). “Hydrodynamic and Water Quality Modeling of Southern Evoikos Gulf – Greece”, *The International Journal of Global Nest*, 1, No. 2, 131-141.
- 11) Stamou A.I., Memos K. and Pipilis K. (1999b). “Mathematical Modelling of Thermal Discharges in Coastal Regions”, 28th IAHR Congress, Graz, Austria.
- 12) Stamou, A.I, Loverdou L., C. Matsoukis, T. Albanis A. Gesouli (2011). Modelling Renewal Times in Amvrakikos Gulf, Athens, Greece. 12th International Conference on Environmental science and technology (accepted)
- 13) Yin J., Falconer R.A., Pipilis K., and Stamou A.I. (1998). “Flow characteristics and flushing processes in marinas and coastal embayments”, *Proceedings of the 1st Int. Conf. on Maritime Engineering and Ports*, Genoa, 87-98.
- 14) Tsoukala V.K., Moutzouris C.I. (2009). “Wave transmission through flushing culverts”. *Ocean Engineering* Volume 36, Issues 6-7.
- 15) Ωκεανογραφική μελέτη του Αμβρακικού Κόλπου (1989). “Φυσική Ωκεανογραφία. Τεχνική έκθεση”, Τόμος 2, Εθνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών, Αθήνα.

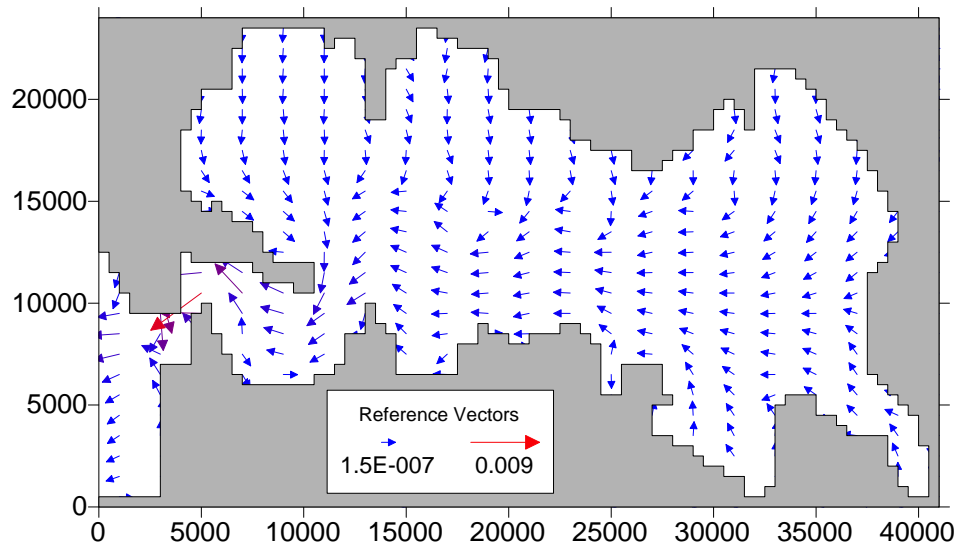
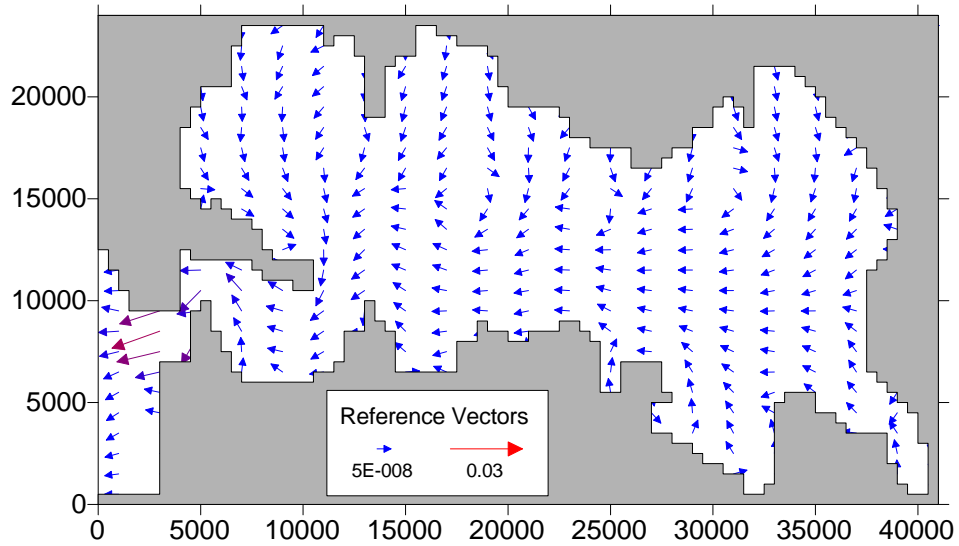
Διαδικτυακές Πηγές:

- 1) <http://www.google.com/earth>
- 2) <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/wsp2339.pdf> (Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains United States Geological Survey Water-supply Paper 2339 Metric Version [1])
- 3) <http://www.geo.auth.gr> [2]

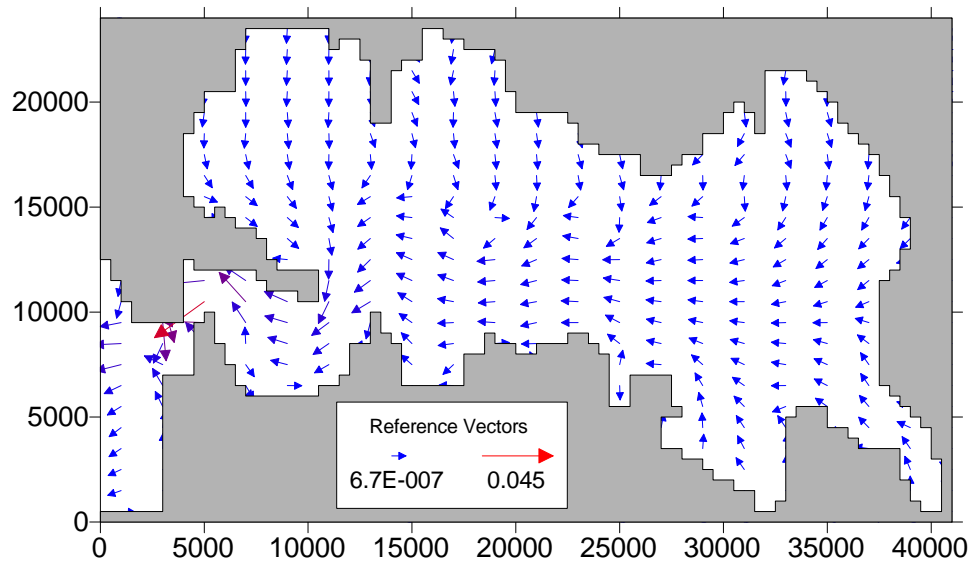
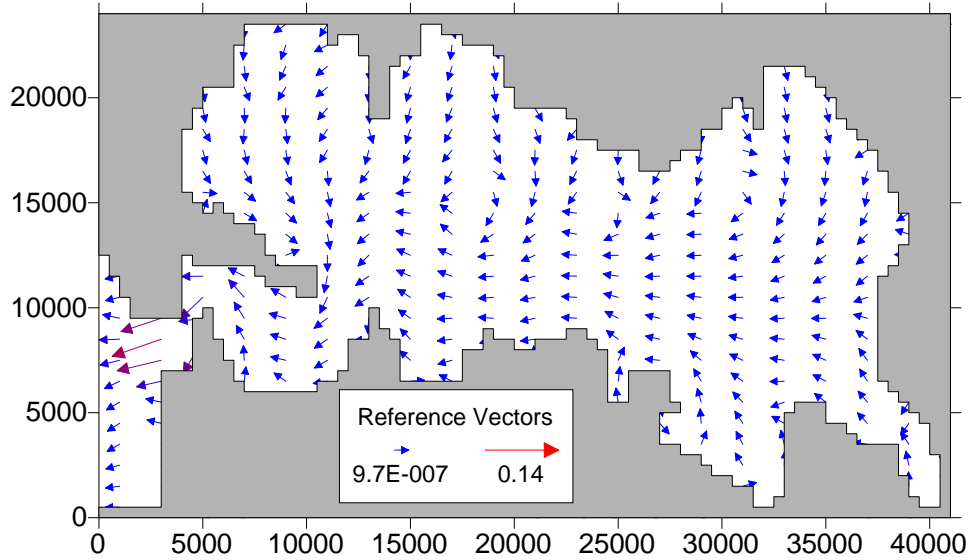
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται τα πεδία ροής για το αραιό και το πυκνό πλέγμα για το πρώτο και το τέταρτο στρώμα

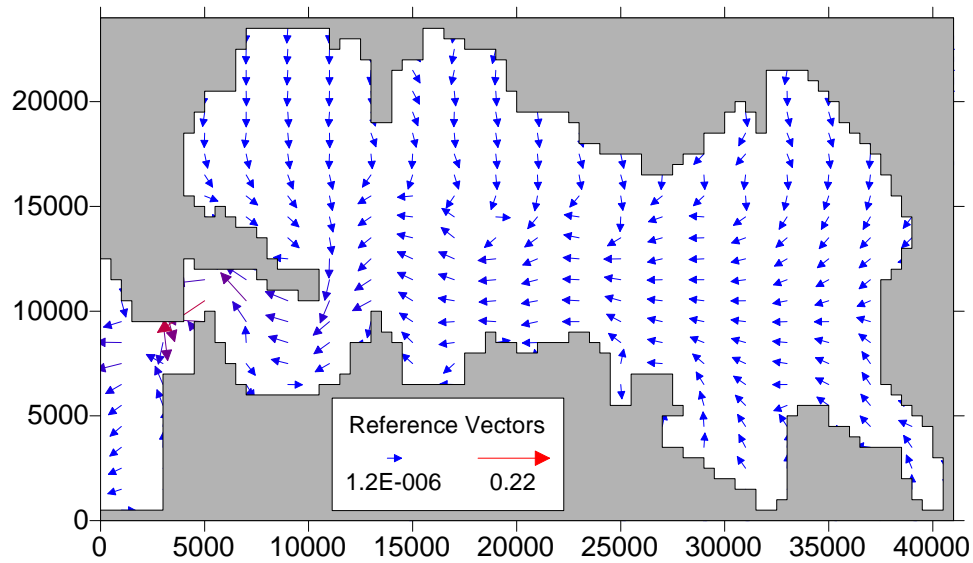
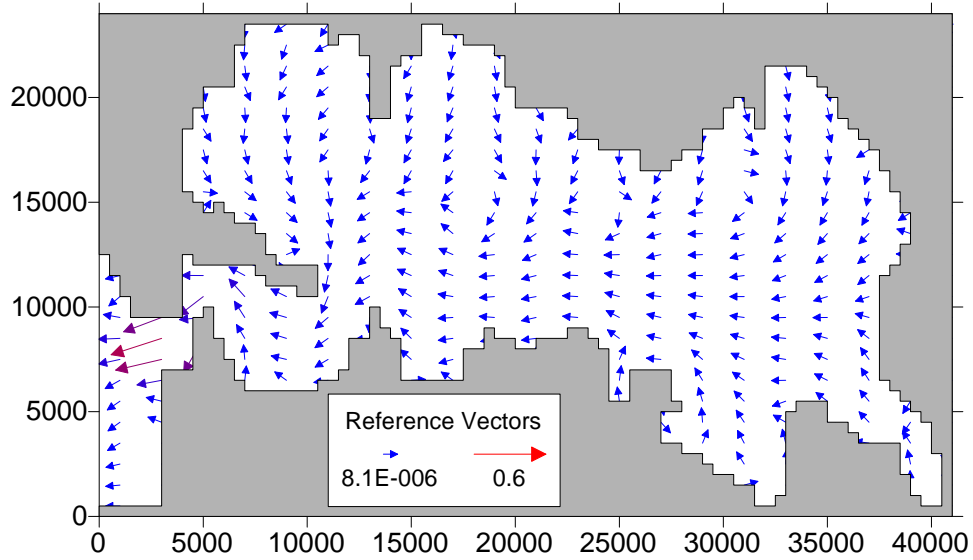
Στα Σχήματα Π-1 έως Π-12 φαίνονται τα πεδία ροής για όλα τα βασικά σενάρια υπολογισμών στο 1ο και στο 4^ο στρώμα του κόλπου.



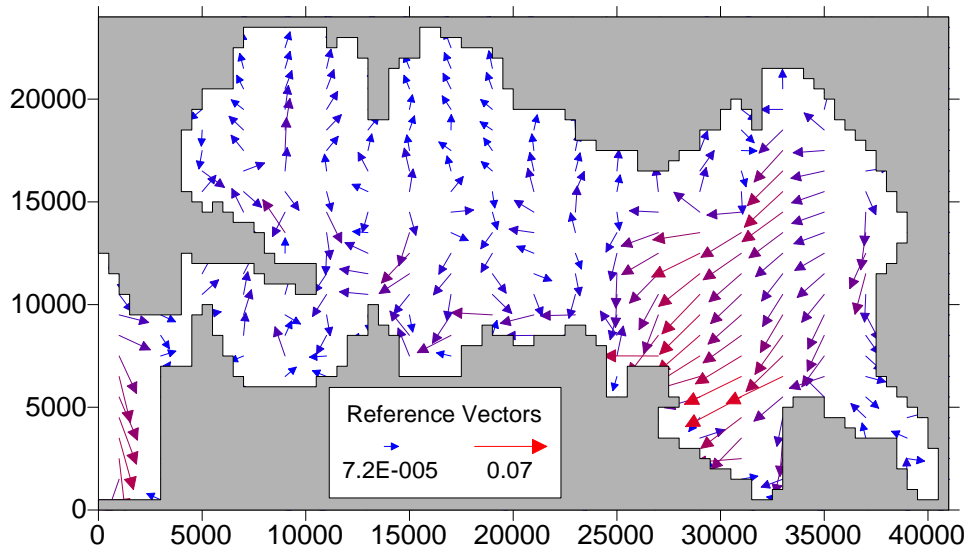
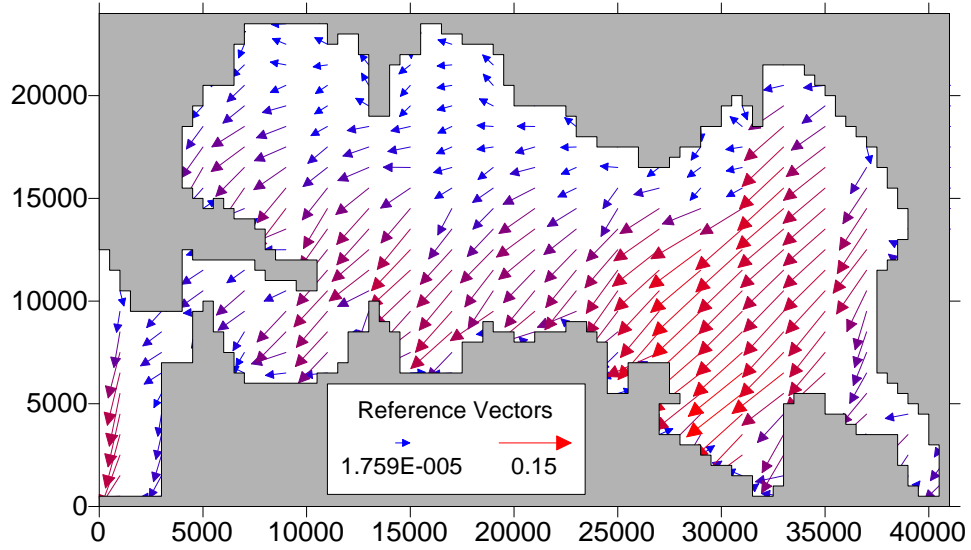
Σχήμα Π-1 .Σενάριο ΣΠ-1 για 1^ο και 4^ο στρώμα ($t=2,875$ days)



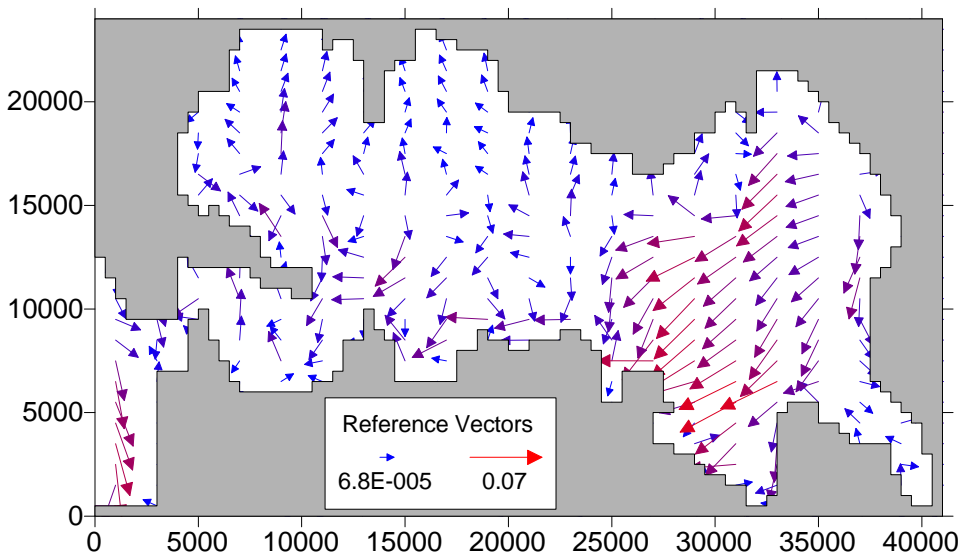
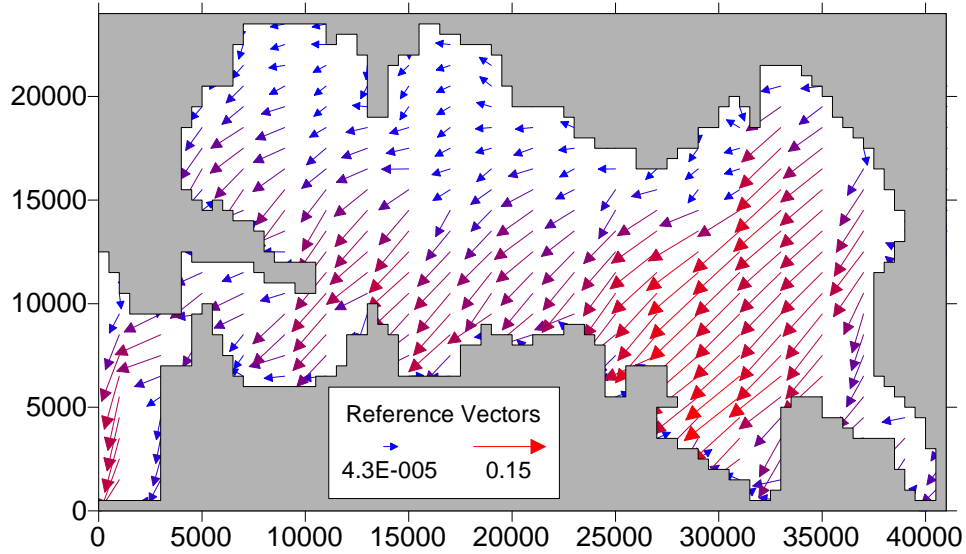
Σχήμα Π-2 .Σενάριο ΣΠ-2 για 1^ο και 4^ο στρώμα (t=2,875 days)



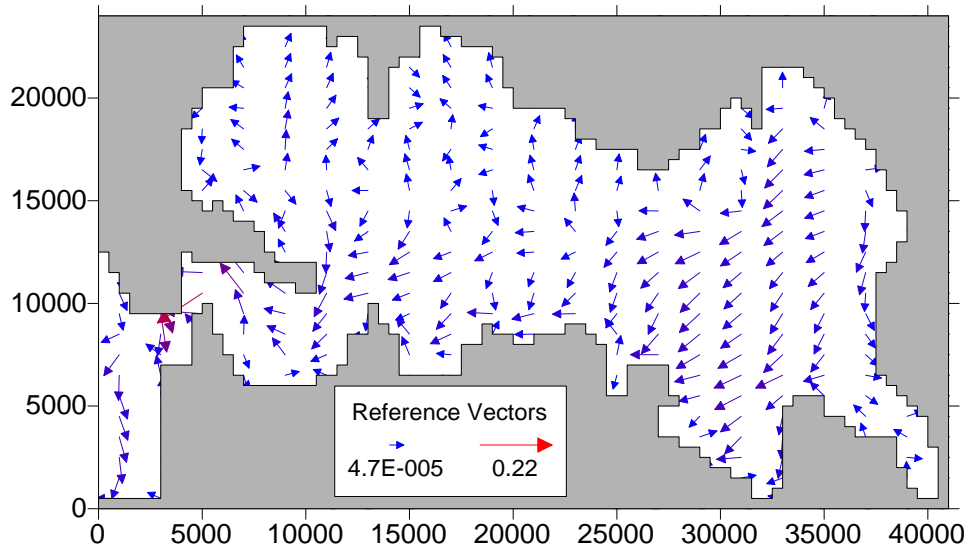
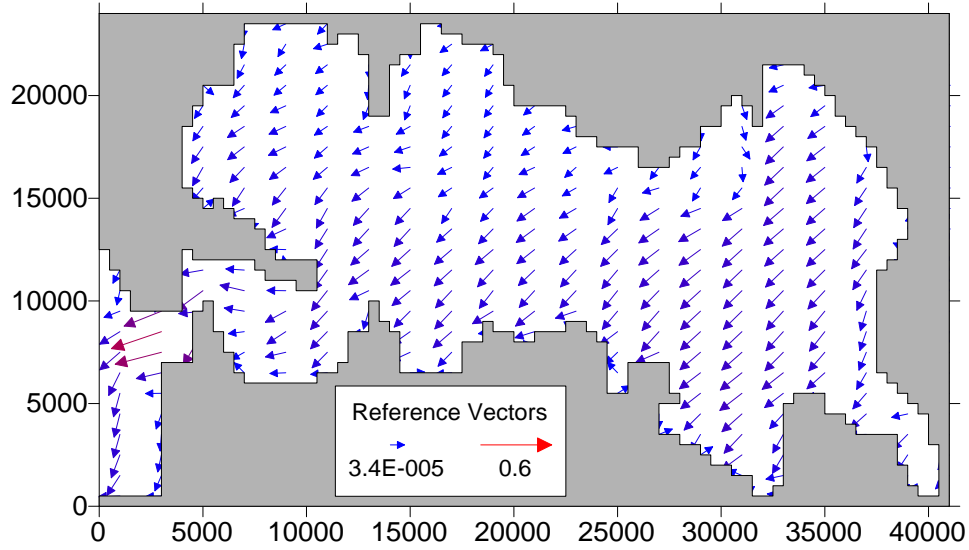
Σχήμα Π-3. Σενάριο ΣΠ-3 για 1^ο και 4^ο στρώμα (t=2,875 days)



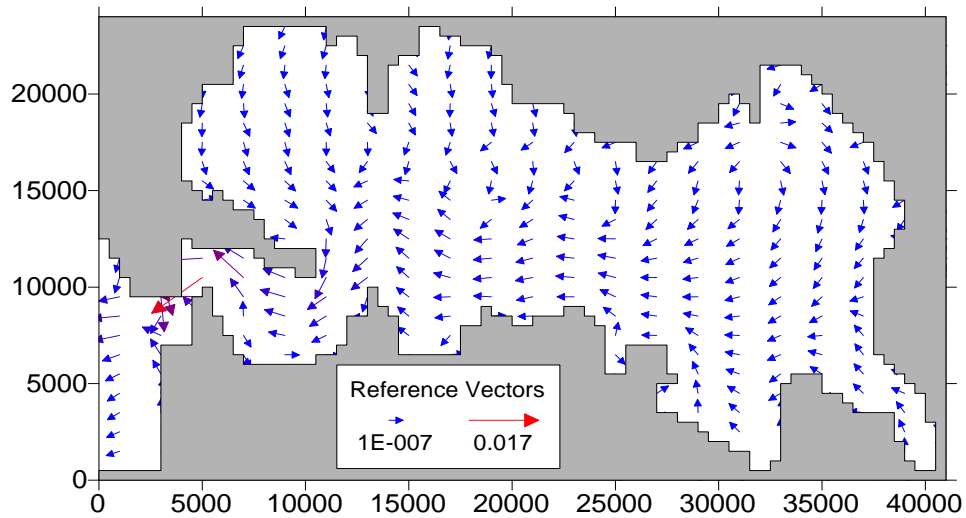
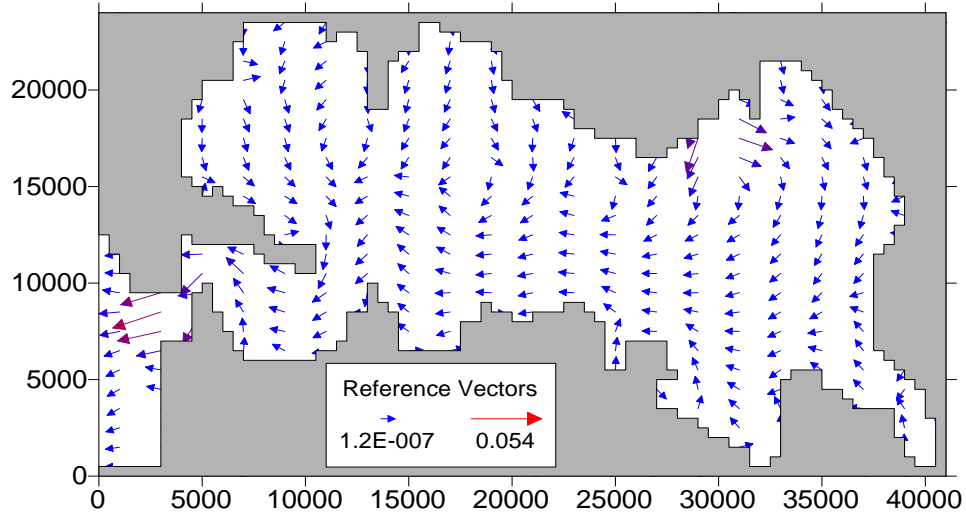
Σχήμα Π-4 .Σενάριο ΣΠ-4 για 1^ο και 4^ο στρώμα (t=2,875 days)



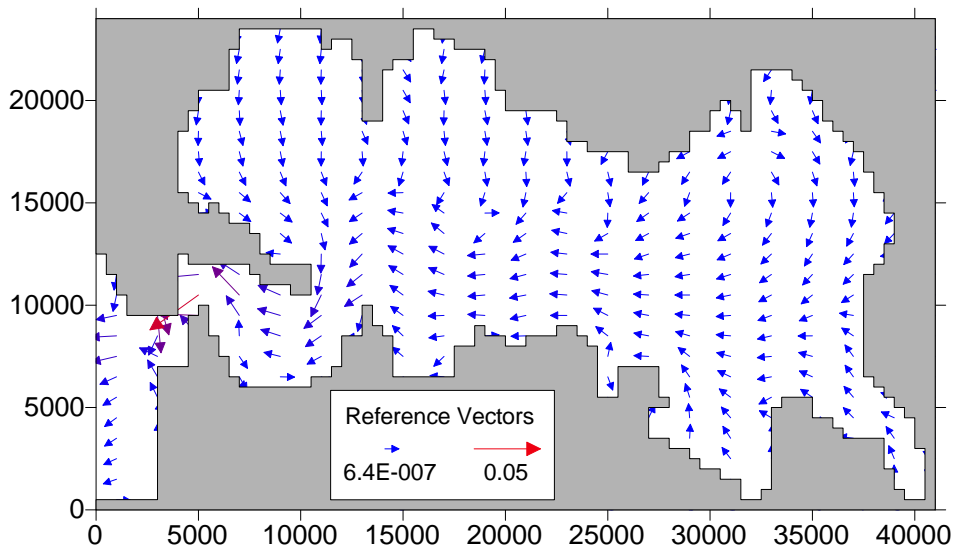
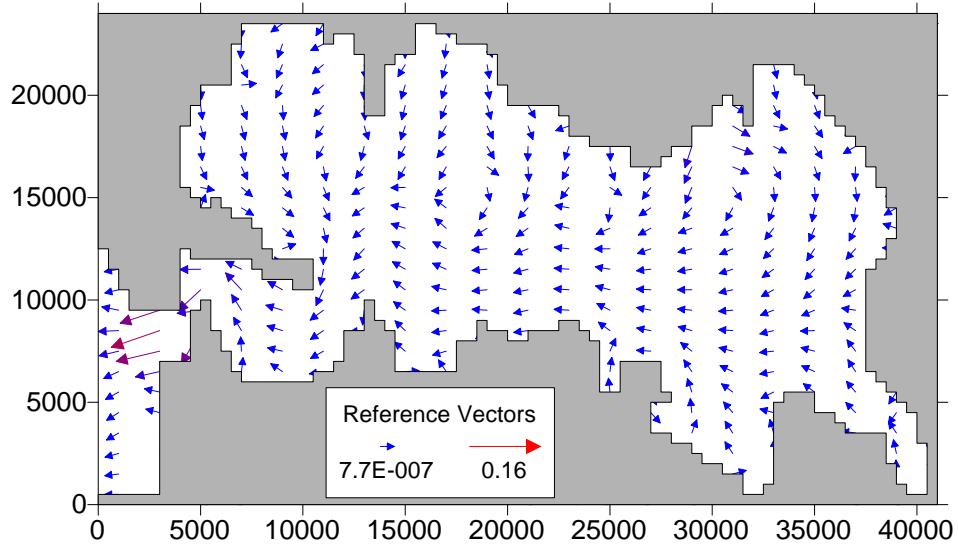
Σχήμα Π-5 .Σενάριο ΣΠ-5 για 1^ο και 4^ο στρώμα (t=2,875 days)



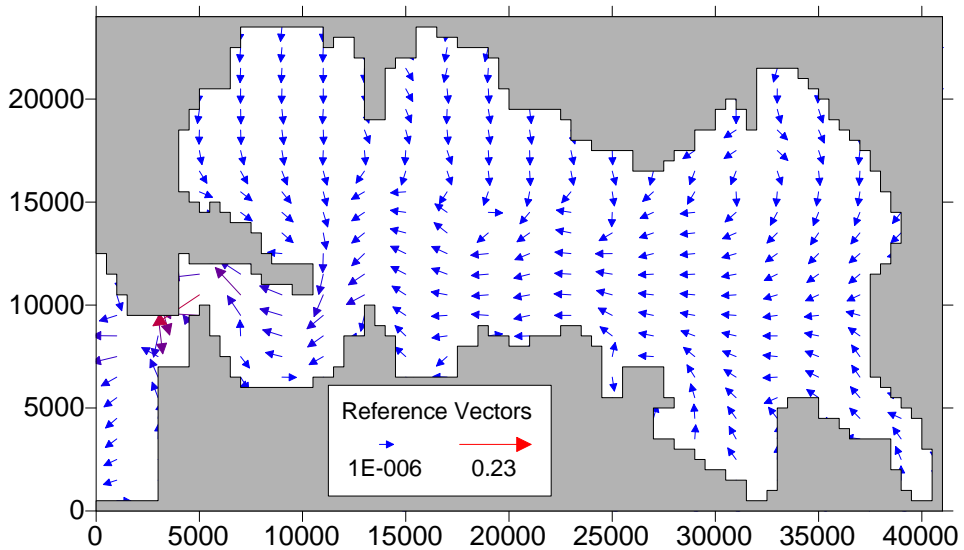
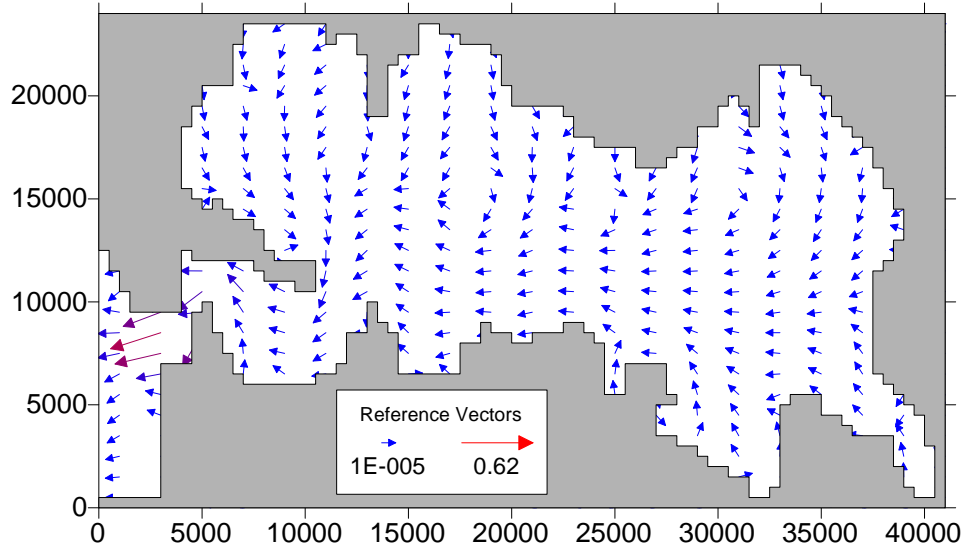
Σχήμα Π-6 .Σενάριο ΣΠ-6 για 1^ο και 4^ο στρώμα (t=2,875 days)



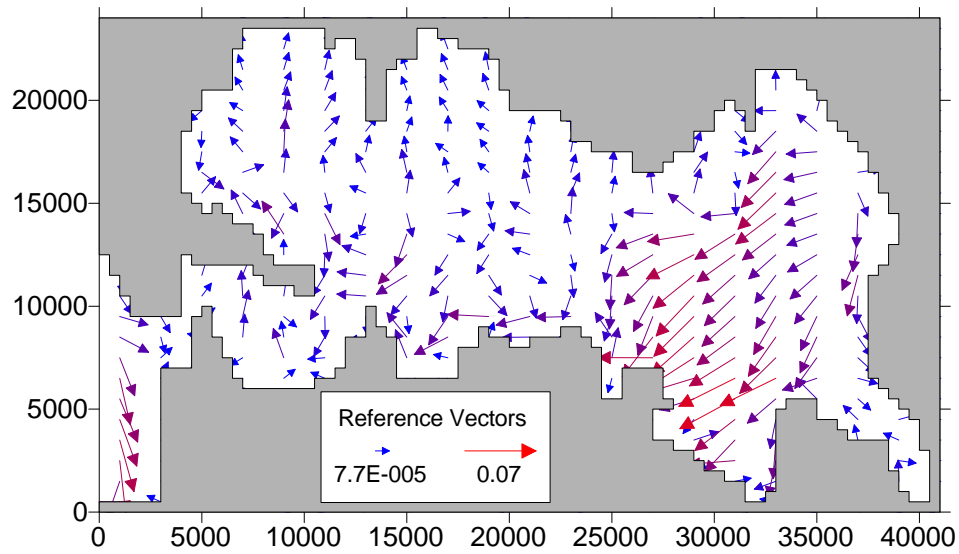
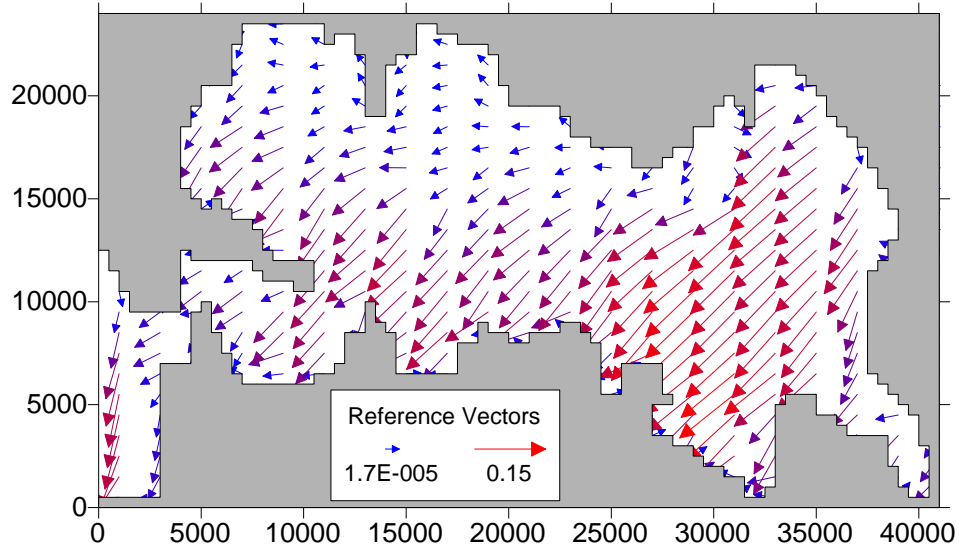
Σχήμα Π-7 .Σενάριο ΣΠ-7 για 1^ο και 4^ο στρώμα (t=2,875 days)



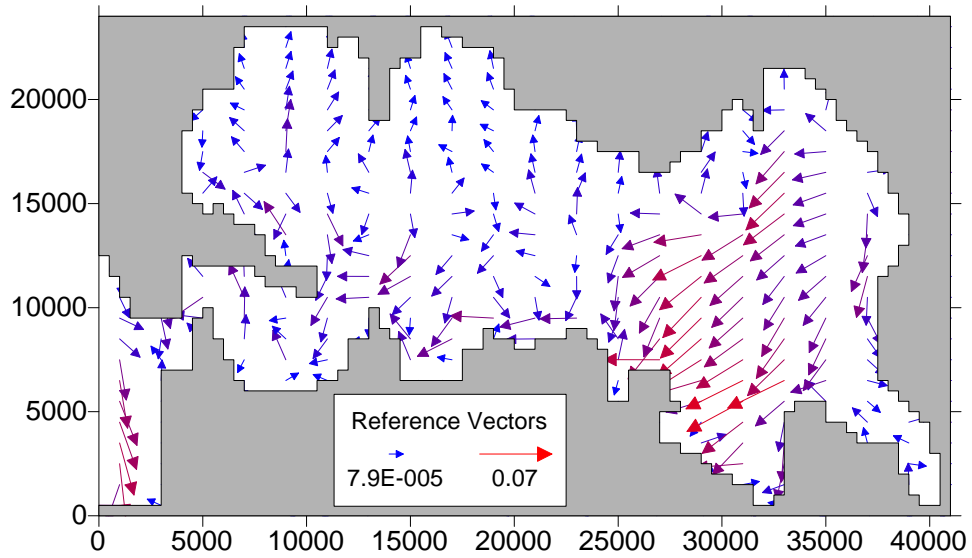
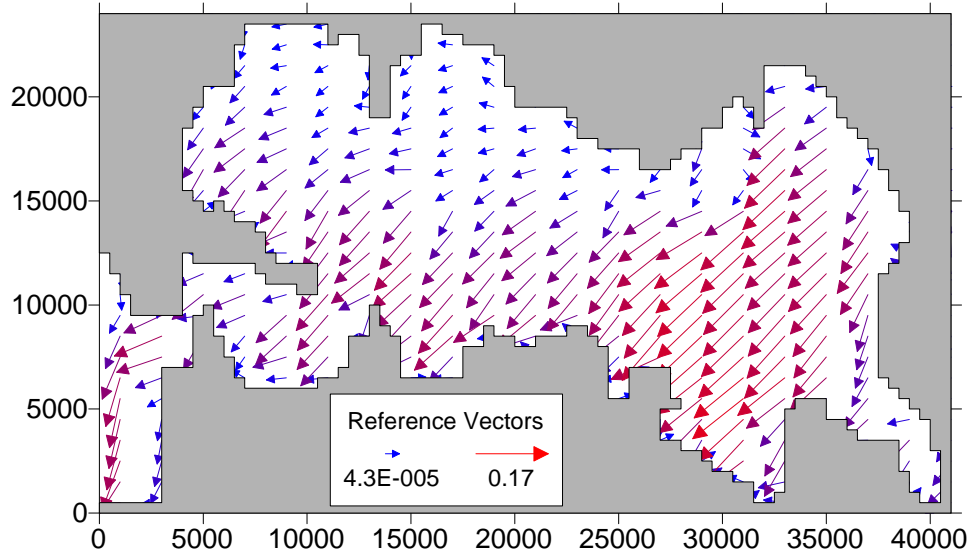
Σχήμα Π-8 .Σενάριο ΣΠ-8 για 1^ο και 4^ο στρώμα (t=2,875 days)



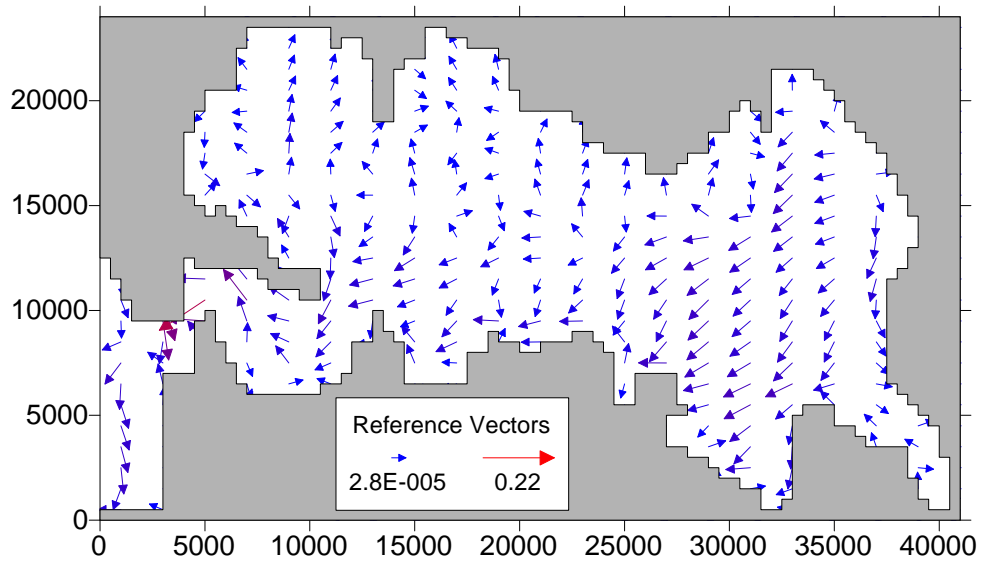
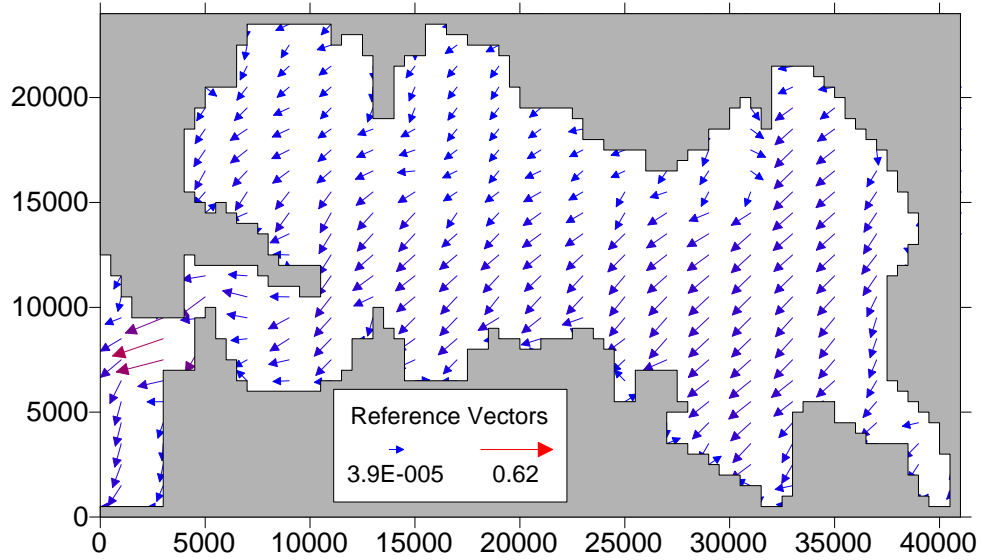
Σχήμα Π-9 .Σενάριο ΣΠ-9 για 1^ο και 4^ο στρώμα (t=2,875 days)



Σχήμα Π-10 .Σενάριο ΣΠ-10 για 1^ο και 4^ο στρώμα (t=2,875 days)

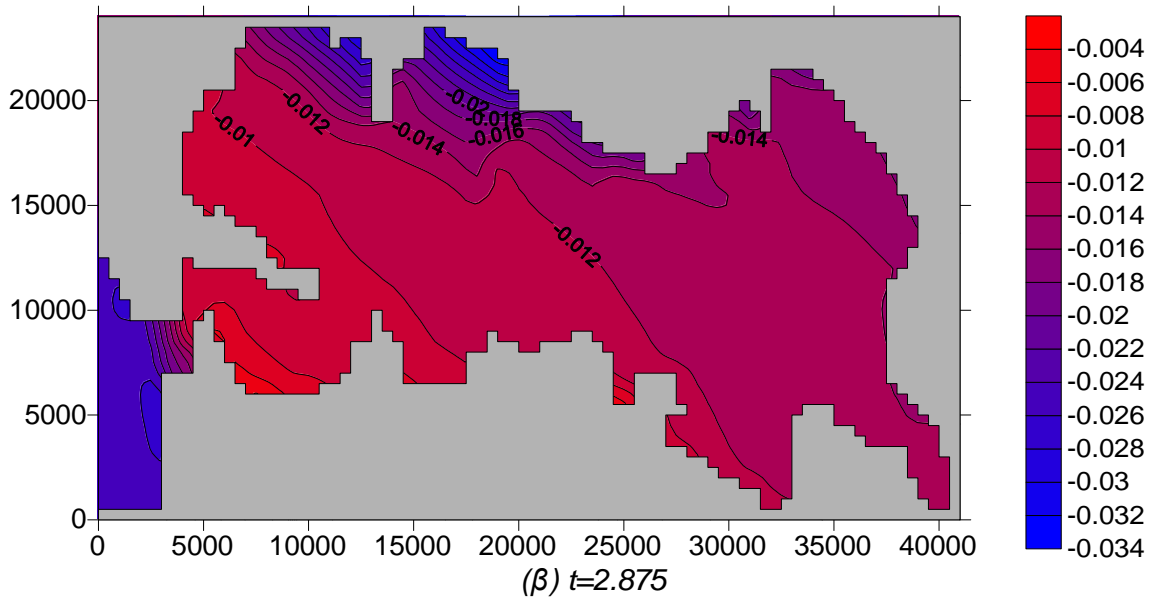
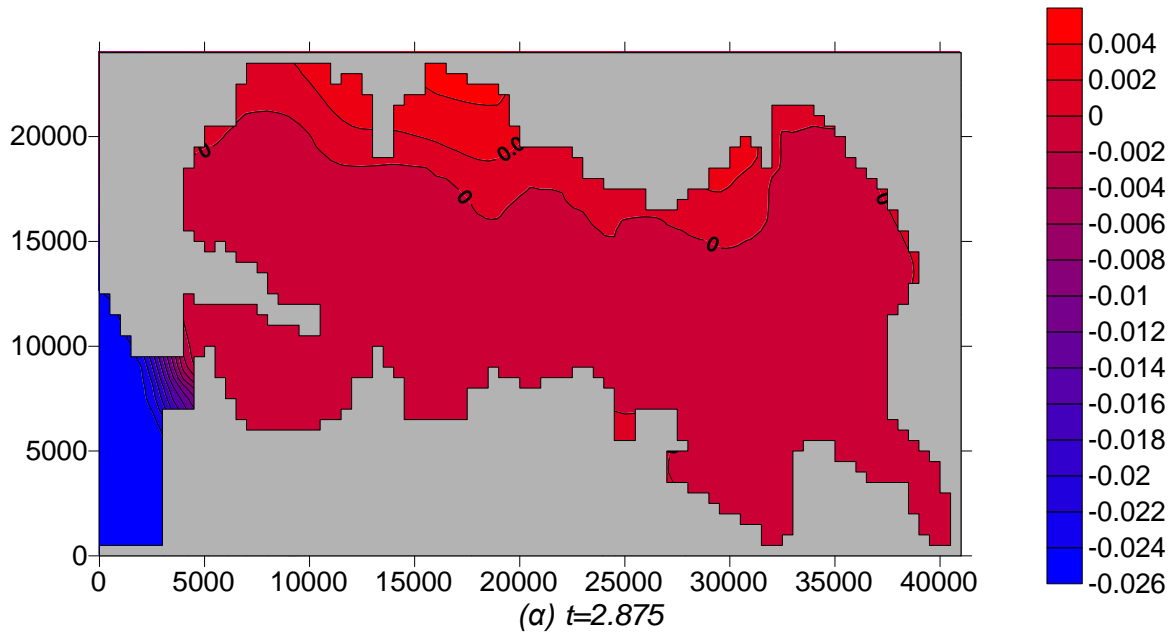


Σχήμα Π-11 .Σενάριο ΣΠ-11 για 1^ο και 4^ο στρώμα (t=2,875 days)

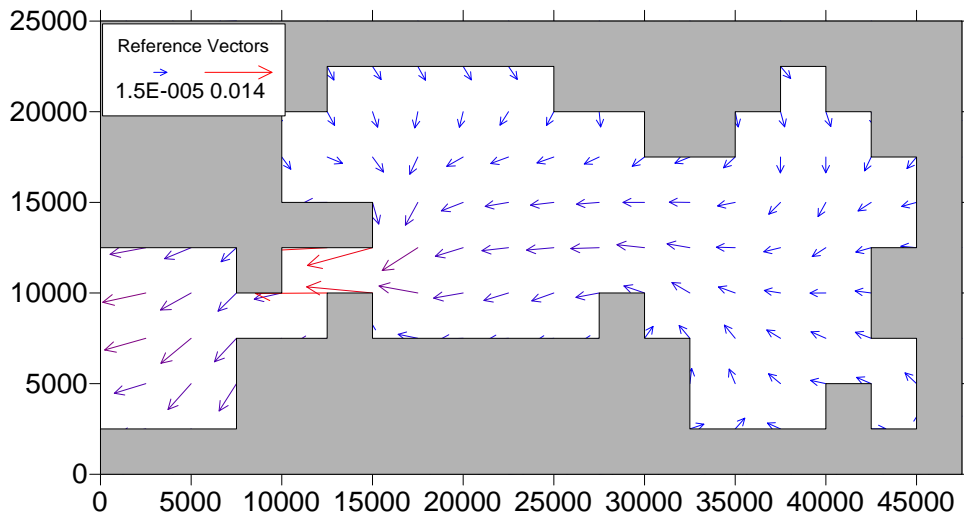
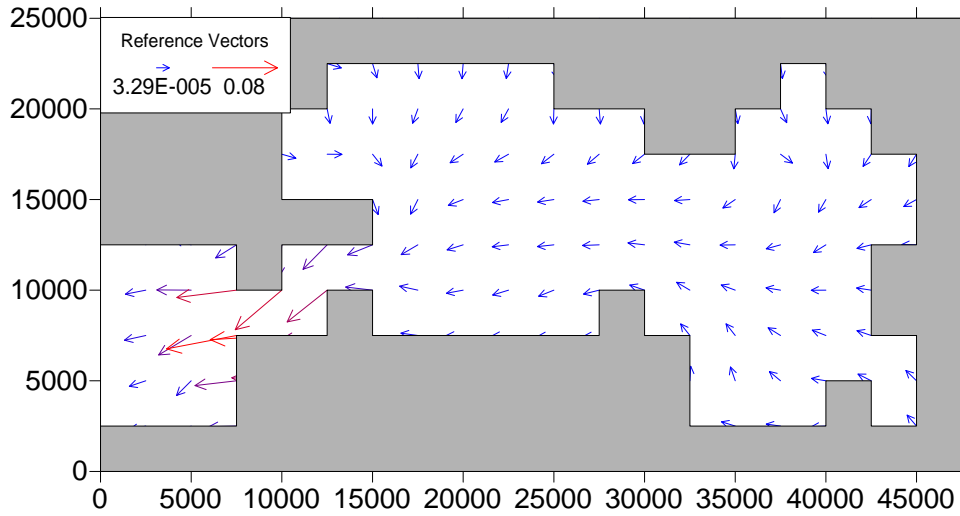


Σχήμα Π-12 .Σενάριο ΣΠ-12 για 1^ο και 4^ο στρώμα (t=2,875 days)

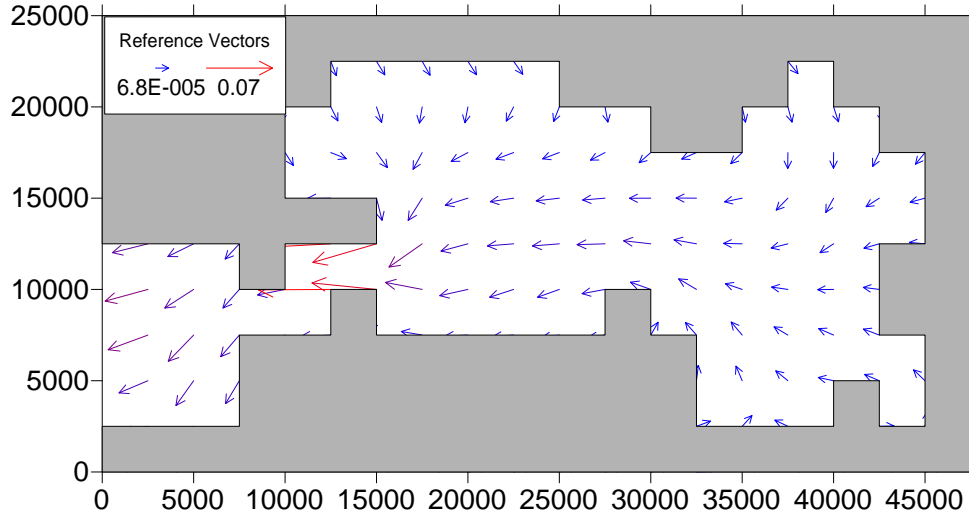
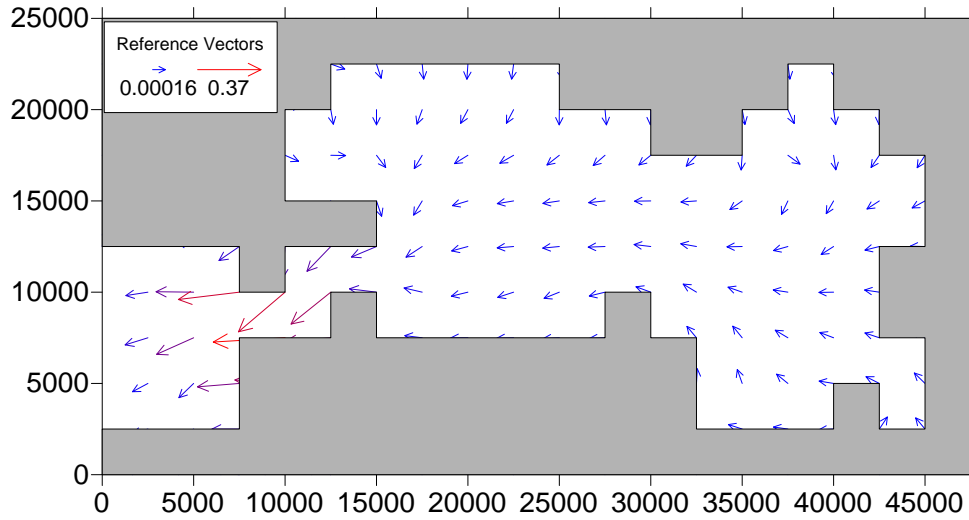
Η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας απεικονίζεται στο Σχήμα ΣΠ-13 για την περίπτωση της μέσης στάθμης παλίρροιας (ΣΠ-2) και για το σενάριο που υπεισέρχεται η παράμετρος του ανέμου (ΣΠ-4) την χρονική στιγμή $t=2,875$ ημέρες (3Τ/4) δηλαδή όταν εμφανίζεται η μέγιστη παροχή εξόδου.



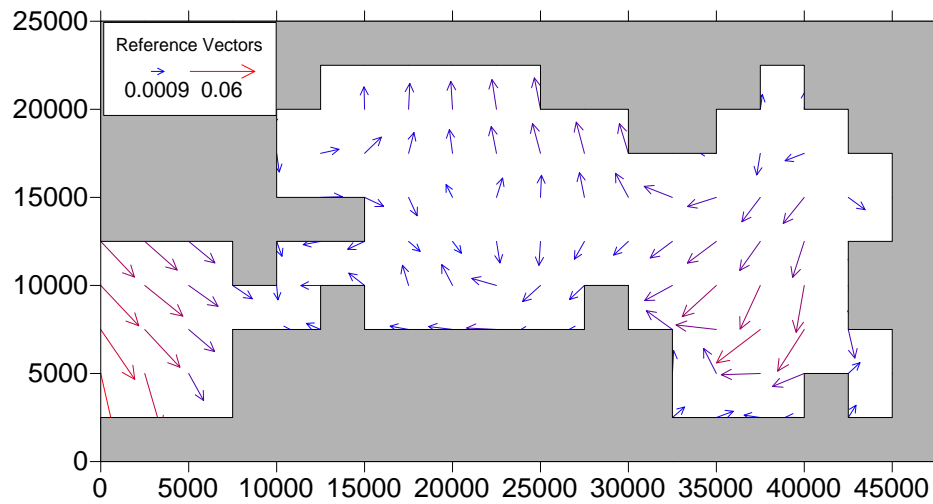
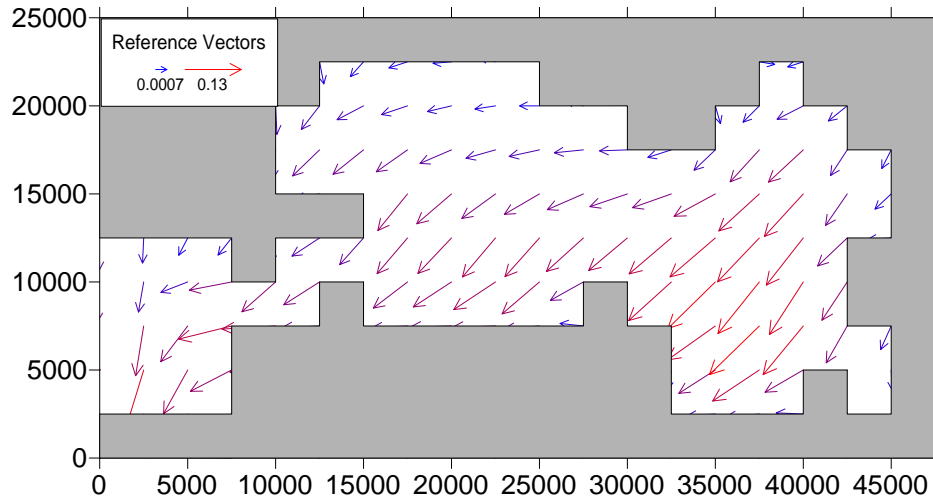
Σχήμα Π-13. Μορφή ελεύθερης επιφάνειας για το σενάριο ΣΠ-2 και ΣΠ-4



Σχήμα Π-14. Σενάριο (Σ-2) μέση παλίρροια για 1^ο και 4^ο στρώμα



Σχήμα Π-14. Σενάριο (Σ-3) μέγιστη παλίρροια για 1^ο και 4^ο στρώμα



Σχήμα Π-14. Σενάριο (Σ-3) μέγιστη παλίρροια για 1^ο και 4^ο στρώμα