

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΣΤΟΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΑΣΤΡΑΚΙΟΥ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ Η/Υ



ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: Αθανασπούλου Ελένη
Μπαρά Πολυξένη

ΕΠΟΠΤΕΥΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ: Δρ. Διονυσία- Πηνελόπη Ν. Κοντονή
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός
Αναπλ. Καθηγήτρια Τ.Ε.Ι

Δρ. Νικόλαος Θ. Φουρνιώτης
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός
Επιστημονικός Συνεργάτης Τ.Ε.Ι

ΠΑΤΡΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2011

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα.....	σελ.2
Πρόλογος.....	σελ.5
Περίληψη.....	σελ.5
Εισαγωγή.....	σελ.5
Κεφάλαιο 1	σελ.7
1.1 Γενικά Στοιχεία Φραγμάτων.....	σελ.7
1.1.1 Επιλογή θέσης, διάταξης και τύπου φράγματος.....	σελ.8
1.1.2 Φράγματα από σκυρόδεμα	σελ.9
1.1.3 Χωμάτινα φράγματα.....	σελ.9
1.2 Στοιχεία για το Φράγμα Καστρακίου.....	σελ.11
1.2.1 Γενικότητες.....	σελ.11
1.2.2 Στοιχεία για τον ποταμό Αχελώο.....	σελ.13
1.2.3 Στοιχεία για τη βιοποικιλότητα του Φράγματος Καστρακίου.....	σελ.15
Κεφάλαιο 2	σελ.16
2.1 Γενικά στοιχεία για την Επιφανειακή Υδροδυναμική Κυκλοφορία των Υδάτινων Σωμάτων.....	σελ.16
2.1.1 Η Υδροδυναμική Μελέτη των Υδάτινων Σωμάτων.....	σελ.16
2.1.2 Υδροδυναμική μελέτη της παράκτιας κυκλοφορίας.....	σελ.17
2.2 Ανεμογενή Ρεύματα-Βασικές Αρχές.....	σελ.18
2.2.1 Γένεση ανεμογενών ρευμάτων.....	σελ.18
2.2.2 Η προσομοίωση του Ekman.....	σελ.18
2.2.3 Μεταφορά Ekman.....	σελ.20
2.3 Άνεμοι.....	σελ.21
2.4 Οριακή στοιβάδα του ανέμου.....	σελ.22
2.5 Ρεύματα που προκαλούνται λόγω του ανέμου.....	σελ.24
2.5.1 Μαθηματικά ομοιώματα παράκτιας κυκλοφορίας.....	σελ.26

Κεφάλαιο 3	σελ.28
3.1 Ανάμιξη σε ταμιευτήρες- λίμνες.....	σελ.28
3.2 Η συμπεριφορά των ταμιευτήρων – λιμνών.....	σελ.28
3.3 Βαρότροπες και Βαροκλινείς συνθήκες.....	σελ.31
3.4 Εισροές – εκροές σε ταμιευτήρες.....	σελ.32
3.4.1 Εισροή ρεύματος σε ταμιευτήρα.....	σελ.32
3.4.2 Εκροή από ταμιευτήρα.....	σελ.34
3.4.3 Επιφανειακοί άνεμοι.....	σελ.35
3.4.4 Θερμική ενέργεια δια της επιφάνειας.....	σελ.36
3.5 Κατακόρυφη ανάμιξη στο επιλίμνιο.....	σελ.38
3.5.1 Διεισδυτική μετάθεση.....	σελ.38
3.6 Κατακόρυφη ανάμιξη στο υπολίμνιο.....	σελ.40
3.7 Οριζόντια ανάμιξη σε ταμιευτήρες.....	σελ.41
3.8 Θερμοκρασία.....	σελ.41
Κεφάλαιο 4	σελ.47
4.1 Μοντέλα Προσομοίωσης.....	σελ.47
4.2 Διαδικασία Προσομοίωσης.....	σελ.48
4.2.1 Καθορισμός του προβλήματος και του σκοπού της προσομοίωσης.....	σελ.48
4.2.2 Καθορισμός συστήματος.....	σελ.48
4.2.3 Νοητική σύλληψη και δημιουργία του μοντέλου.....	σελ.48
4.2.4 Συλλογή δεδομένων και επεξεργασία.....	σελ.49
4.2.5 Δημιουργία του κώδικα.....	σελ.49
4.2.6 Επαλήθευση του κώδικα.....	σελ.49
4.2.7 Επιβεβαίωση του μοντέλου.....	σελ.49
4.3 Επιλογή Μοντέλου.....	σελ.50
4.3.1 Παραδοχές για την προσομοίωση της Τεχνητής Λίμνης Καστρακίου.....	σελ.50

Κεφάλαιο 5	σελ.51
5.1 Παρουσίαση του Αριθμητικού Κώδικα MIKE 3 FM (HD).....	σελ.51
5.1.1 Ο Τρισδιάστατος Κώδικας MIKE 3 FM (HD).....	σελ.51
5.2 Η Μαθηματική Διατύπωση των Εξισώσεων.....	σελ.51
5.2.1 Τρισδιάστατες εξισώσεις σε Καρτεσιανές Συντεταγμένες.....	σελ.51
5.2.1.1 Εξισώσεις ρηχού στρώματος (Shallow water equations).....	σελ.51
5.2.1.2 Εξισώσεις μεταφοράς για την αλατότητα και τη θερμοκρασία.....	σελ.54
5.2.1.3 Εξίσωση μεταφοράς ρύπου.....	σελ.56
5.2.1.4 Οι εξισώσεις του μοντέλου σε Καρτεσιανές και Σίγμα συντεταγμένες.....	σελ.56
5.2.2 Η προσομοίωση της τύρβης.....	σελ.59
5.2.2.1 Η έννοια του τυρβώδους ιζώδους.....	σελ.59
5.2.2.2 Προσομοίωση της τύρβης στην οριζόντια διεύθυνση.....	σελ.59
5.2.2.3 Προσομοίωση της τύρβης στην κατακόρυφη διεύθυνση.....	σελ.60
5.3 Η Αριθμητική Επίλυση των Εξισώσεων.....	σελ.63
Κεφάλαιο 6	σελ.65
6.1 Εφαρμογή του Αριθμητικού Μοντέλου στη Μελέτη της Ροής στη Τεχνητή Λίμνη του Φράγματος Καστρακίου και τα συμπεράσματα-αποτελέσματά του.....	σελ.65
6.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικής προσομοίωσης.....	σελ.73
6.3 Τελικά Συμπεράσματα.....	σελ.82
Ευρετήριο.....	σελ.83
Βιβλιογραφία.....	σελ.86

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής του ΤΕΙ ΠΑΤΡΑΣ, υπό την επίβλεψη των καθηγητών Δρ. Διονυσίας-Πηνελόπης Κοντονή και Δρ. Φουρνιώτη Νικόλαου. Εκ προοιμίου θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας σε όλους όσους βοήθησαν και συνέβαλαν στην πραγματοποίησή της.

Καταρχάς, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα την επιβλέπουσα καθηγήτριά μας Δρ. Διονυσία-Πηνελόπη Κοντονή για την ουσιαστική βοήθεια και το ενδιαφέρον της για την πραγματοποίηση της πτυχιακής μας. Η πάντα καλή διάθεσή της και η εμπιστοσύνη την οποία επέδειξε στο πρόσωπό μας αποτέλεσαν ουσιαστικά στοιχεία για την ευχάριστη ολοκλήρωση της πτυχιακής μας εργασίας. Επίσης, ευχαριστίες θα θέλαμε να εκφράσουμε στον επιβλέποντα καθηγητή μας Δρ. Φουρνιώτη Νικόλαο για το φιλικό περιβάλλον που κατάφερε να δημιουργήσει κατά τη συνεργασία μας και την προθυμία του να μας βοηθήσει και να συζητήσει κάθε απορία και προβληματισμό που προέκυπτε κατά τη διάρκεια διεξαγωγής της πτυχιακής μας εργασίας. Επιπλέον, τον ευχαριστούμε ιδιαίτερα για τη γενικότερη παιδεία και την καθοδήγηση που μας προσέφερε κατά τη συνεργασία μας. Τέλος, ας μην ξεχνάμε την στήριξη και την άμεση βοήθεια που μας προσέφεραν οι γονείς μας κατά τη διάρκεια των σπουδών μας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα Πτυχιακή Εργασία μελετάται αριθμητικά η τρισδιάστατη υδροδυναμική κυκλοφορία των υδάτων που προκαλείται από τη δράση του ανέμου στην τεχνητή λίμνη του Καστρακίου. Για τις αριθμητικές προσομοιώσεις εφαρμόζεται ο τρισδιάστατος αριθμητικός κώδικας MIKE 3(FM), του υδραυλικού Ινστιτούτο της Δανίας (Danish Hydraulic Institute (D.H.I.)).

Σκοπό αποτελεί ο υπολογισμός των επιφανειακών ρευμάτων σε διάφορες φάσεις δράσης του ανέμου. Με βάση τις προσομοιώσεις αποδεικνύεται ότι ισχυρά ανεμογενή ρεύματα παρατηρούνται στη μέγιστη στένωση και πλησίον των ακτών. Τα αριθμητικά αυτά αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν στο μέλλον για τη μελέτη προβλημάτων ρύπανσης και ποιότητας των υδάτων στη τεχνητή λίμνη. Επίσης, στην πτυχιακή εργασία χρησιμοποιούνται όλες οι υφιστάμενες βιβλιογραφικές πηγές και μετρήσεις, στις οποίες υπήρξε πρόσβαση είτε μέσω του Διαδικτύου είτε από υλικό που μας παραχωρήθηκε από τους επιβλέποντες.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας είναι η τρισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση της υδροδυναμικής κυκλοφορίας της Τεχνητής Λίμνης Καστρακίου

(Εικόνα 1.). Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον υπολογισμό του πεδίου της υδροδυναμικής κυκλοφορίας της λίμνης που προκαλείται από τη δράση του ανέμου.

Αρχικά, στόχο αποτελεί η συλλογή και επεξεργασία μετρήσεων. Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται αριθμητικές προσομοιώσεις της υδροδυναμικής κυκλοφορίας του ταμιευτήρα του φράγματος Καστρακίου (Εικόνα 2.) και τα αριθμητικά αποτελέσματα συγκρίνονται με τις συνήθεις τιμές ρευμάτων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Τα αριθμητικά αυτά αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν για τη μελέτη προβλημάτων ρύπανσης και ποιότητας υδάτων στη τεχνητή λίμνη. Επιπλέον, γίνονται υδραυλικές και ωκεανογραφικές παρατηρήσεις για τη δομή της ροής και εξάγονται γενικότερα συμπεράσματα για τη κυκλοφορία των υδάτων στη τεχνητή λίμνη του φράγματος και ερμηνεύεται η δομή της ροής, που προκαλείται αποκλειστικά από τη δράση του ανέμου.



Εικόνα 1. Πανοραμική άποψη της Τεχνητής Λίμνης Καστρακίου (<http://www.airphotos.gr/etoloakamanialimnes.htm>)



Εικόνα 2. Φράγμα Καστρακίου (<http://www.airphotos.gr/etoloakamanialimnes.htm>)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Το φράγμα είναι τεχνικό έργο που κατασκευάζεται κάθετα στην κοίτη ενός φυσικού ρεύματος (ποταμού) για την αποκοπή της ροής, με σκοπό την αποθήκευση, παροχέτευση ή ανάσχεση της πλημμυρικής παροχής του ρεύματος.

Τα φράγματα είναι έργα μεγάλης σημασίας και πολύ μεγάλου κόστους. Απαιτούν πολύ χρόνο για να κατασκευαστούν και ιδιαίτερα σοβαρές και πολυδάπανες γεωφυσικές έρευνες πριν τη θεμελίωσή τους, διότι οποιοδήποτε λάθος στην κατασκευή, μπορεί αργότερα να στοιχίσει τόσο το ίδιο το έργο όσο και πολλές ανθρώπινες ζωές. Απαιτούν τη μεταφορά τεράστιων ποσοτήτων από υλικά, συχνά σε σημαντική απόσταση, τη χρησιμοποίηση τεράστιας ποσότητας τσιμέντου (μπετόν αρμέ), τη διάνοιξη πολλών χιλιομέτρων δρόμων στη γύρω περιοχή, την αποψίλωση μιας μεγάλης έκτασης κοντά στο φράγμα, την απασχόληση εκατοντάδων ή (ανάλογα με το μέγεθος του φράγματος) χιλιάδων εργατών, τεχνιτών και μηχανημάτων.

Η κατανομή των βροχοπτώσεων στον ελληνικό χώρο είναι τέτοια, ώστε η υγρή εποχή να συμπίπτει με το χειμώνα, ενώ το καλοκαίρι που καλλιεργούνται τα περισσότερα φυτά, τα ποτάμια μας έχουν ελάχιστο ή καθόλου νερό. Προέκυψε λοιπόν η ανάγκη να αποταμιευτεί νερό από την υγρή και πλούσια περίοδο για την ξηρή και φτωχή σε νερό. Η αποταμίευση αυτή γίνεται μέσω της κατασκευής φραγμάτων. Όμως, ταυτόχρονα με την αποταμίευση νερού, έχουμε τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος (υδροηλεκτρικά φράγματα), εκμεταλλευόμενοι τη μηχανική ενέργεια των υδατοπτώσεων. Σε μια χώρα όπως η δική μας, που παρουσιάζει έλλειμμα ηλεκτρικής ενέργειας, τα υδροηλεκτρικά φράγματα δίνουν σημαντικό ποσοστό της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα φράγματα, λοιπόν, στη χώρα μας εξυπηρετούν κυρίως αρδευτικούς και ηλεκτροπαραγωγικούς σκοπούς.

Η λειτουργικότητα των φραγμάτων είναι πολλαπλή μιας και προσφέρει ανεκτίμητες παροχές στον άνθρωπο. Καταρχάς, ένα βασικό στοιχείο είναι η αποταμίευση νερού, για ύδρευση και άρδευση. Επίσης επιτρέπει την παραγωγή φθηνής ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε να περιορίζεται το πρόβλημα κατανομής ηλεκτρικού ρεύματος. Επιπροσθέτως, η ενέργεια που παράγεται δεν επιφέρει ρύπανση στο περιβάλλον και υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης για ώρες ανάγκης (πράσινη ενέργεια). Τα φράγματα, ακόμα εγγυώνται αποτελεσματική προστασία από τις πλημμύρες. Συμβάλλουν στη διατήρηση καθαρού περιβάλλοντος. Η προσφορά τους στη δημιουργία νέων υγροτόπων ήταν και είναι τεράστια και αποδείχτηκε κερδοφόρα για την ανάπτυξη του οικοτουρισμού και επομένως τη βελτίωση της γενικής οικονομίας της χώρας μας.

Τα φράγματα έχουν να προσφέρουν αναμφίβολα πολλά πλεονεκτήματα ταυτόχρονα με τα μειονεκτήματα. Αυτό που χρειάζεται για να εξασφαλιστεί η ισορροπία, είναι να γίνονται προσεκτικές μελέτες πριν την κατασκευή οποιουδήποτε φράγματος ανάλογα πάντα με τις συνθήκες που επικρατούν σε κάθε περιοχή. Με αυτόν τον τρόπο θα αποφευχθούν κάποια από τα πιθανά προβλήματα, που μπορεί να αποβούν μοιραία

στο μέλλον. Πρέπει να αποκτήσουμε όλοι μας περιβαλλοντική συνείδηση και να ευαισθητοποιηθούμε όσον αφορά το θέμα της κατασκευής φραγμάτων, γιατί η προστασία του περιβάλλοντος είναι υπόθεση όλων μας. Το οικονομικό κέρδος που προκύπτει είναι σημαντικό, αλλά δεν παύουν να υπάρχουν αρνητικές συνέπειες στο περιβάλλον. Οι συνέπειες αυτές είναι η αποψίλωση δασών στη φάση της κατασκευής του φράγματος και η κάλυψη μεγάλων δασικών εκτάσεων που βρίσκονται μέσα στη λεκάνη κατάκλισης από τα νερά του φράγματος. Ολόκληρα χωριά, παλιές εκκλησίες, αρχαιολογικά ευρήματα, αγροί, όλα βυθίζονται μέσα στο νερό και καμιά φορά σε εποχές ξηρασίας, προβάλλουν πάνω από την επιφάνεια του νερού. Οι άνθρωποι είναι υποχρεωμένοι να εγκαταλείψουν τα σπίτια τους και να μετακινηθούν σε νέες θέσεις όπου θα κατασκευαστούν τα νέα χωριά.

Όταν ολοκληρωθεί η κατασκευή του φράγματος, χρειάζεται κάποιος χρόνος μέχρι να γεμίσει ο ταμιευτήρας και να χρησιμοποιηθεί το νερό του. Ο χρόνος που απαιτείται για την πλήρωση της λεκάνης του φράγματος ποικίλλει ανάλογα με τις βροχοπτώσεις, το μέγεθος του φράγματος, το ύψος του. Για όσο χρόνο όμως το ποτάμι αποκόβεται και τροφοδοτεί με τα νερά του το φράγμα, όλοι οι οργανισμοί που ζουν κάτω από αυτό (κατάντη του φράγματος), υποφέρουν από έλλειψη νερού.

Το φράγμα κατακρατεί εκατομμύρια ή δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα νερού. Το νερό αυτό έχει τεράστιο βάρος και ασκεί πολύ μεγάλες πιέσεις στα στρώματα του εδάφους. Ανάλογα με το είδος των πετρωμάτων της περιοχής και με τις ιδιαίτερες τοπικές γεωλογικές συνθήκες, είναι πιθανό να προκληθούν τοπικοί σεισμοί, ορισμένοι από τους οποίους μπορεί να έχουν σημαντικό μέγεθος. Οι οργανισμοί που ζουν στο ποτάμι, στις εκβολές του, στις λίμνες που πιθανόν να σχηματίζει, έχουν προσαρμοστεί στη διακύμανση της παροχής του ποταμού στη διάρκεια του έτους και μπορούν να αντιμετωπίζουν τις εποχικές μεταβολές με επιτυχία. Η κατασκευή ενός μεγάλου φράγματος αλλάζει τις υδρολογικές συνθήκες, μεταβάλλει τη ροή και την παροχή του ποταμού και προκαλεί αξεπέραστα πολλές φορές προβλήματα στους φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς, που εξαρτώνται άμεσα ή έμμεσα από το νερό του ποταμού.

Στη φάση της προμελέτης, οι ειδικοί επιστήμονες (μηχανικοί, γεωλόγοι, γεωφυσικοί) θα αποφασίσουν για την ακριβή θέση του φράγματος, με κριτήριο την καταλληλότητα της θέσης αλλά και την ανταπόκρισή της σε άλλες ανάγκες. Αφού αποφασιστεί η θέση του φράγματος, μέσα πιθανώς από μερικές διαφορετικές προτάσεις, αρχίζουν ειδικές μελέτες και έρευνες του εδάφους και του υπεδάφους της περιοχής (γεωφυσικές έρευνες, γεωτρήσεις, κ.λ.π.), με στόχο να διαγνωστούν πιθανές αδυναμίες, που θα μπορούσαν να δημιουργήσουν αργότερα προβλήματα διαφυγής νερού και καταστροφής του φράγματος.

1.1.1 Επιλογή θέσης, διάταξης και τύπου φράγματος ανάλογα με:

1. Την επιδιωκόμενη χρήση υδάτων
2. Τις τοπογραφικές συνθήκες
3. Τις γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες
4. Τις υδρολογικές και υδραυλικές συνθήκες
5. Συνθήκες ασφάλειας και οικονομίας

6. Περιβαλλοντικές συνθήκες

Ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή επιλέγεται και ο καταλληλότερος τύπος φράγματος. Μερικοί τύποι φραγμάτων είναι οι ακόλουθοι:

1.1.2 Φράγματα από σκυρόδεμα:

1. Φράγματα βαρύτητας

- Απαιτήσεις για ικανή βραχώμαζα-ομογενές πέτρωμα θεμελίωσης
- Ευαισθησία στις καθιζήσεις-διαφορικές καθιζήσεις
- Ευαισθησία στις υποπιέσεις-στην κουρτίνα στεγανοποίησης και στην αποστράγγιση της θεμελίωσης

2. Τοξωτά φράγματα

- Απαιτήσεις για ιδιαίτερα ικανή βραχώμαζα στα αντερίσματα και τη βάση θεμελίωσης. Συμβατότητα στις παραμορφώσεις
- Χαμηλή ευαισθησία στις υποπιέσεις
- Μορφολογικοί περιορισμοί

3. Αντηριδωτά

1.1.3 Χωμάτινα φράγματα:

1. Εύκαμπτα φράγματα

- Βραχώμαζα χαμηλών αντοχών, μαλακοί βράχοι, ετερογένεια, εδάφη
- Ευαισθησία στην υπόγεια διάβρωση από διαφυγές νερού
- Προσεκτική επιλογή θέσης υπερχειλιστή - εκχειλιστή

2. Λιθόρριπτα με χωμάτινες ζώνες

3. Φράγματα πολλαπλών ζωνών με αργιλικό υλικό

Η μελέτη ενός τέτοιου όγκου θα πρέπει να περιλαμβάνει λεπτομερειακή διερεύνηση και αξιολόγηση όλων των παραμέτρων που επιτρέπουν την ασφαλή κατασκευή του και την απουσία αστοχιών κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του . Τα κυριότερα αίτια των αστοχιών που έχουν εντοπισθεί στην κατασκευή και λειτουργία των φραγμάτων είναι:

- Θραύση και ολίσθηση της θεμελίωσης

- Εσωτερικές διαβρώσεις και ανάπτυξη υποπιέσεων στο πέλμα του φράγματος
- Εξασθένηση της θεμελίωσης από διαβροχή και αποσάθρωση
- Μετακινήσεις και ερπυσμοί πάνω σε επιφάνειες ρηγμάτων
- Ολισθήσεις, μετακινήσεις ή παραμορφώσεις στα αντερίσματα
- Διάβρωση-υποσκαφή από πλημμύρες (υπερχείλιση)
- Υπερβολικές παραμορφώσεις στη θεμελίωση
- Υπερβολικές παραμορφώσεις στο φράγμα
- Κακότεχνη κατασκευή
- Ανεπαρκής στατιστική μελέτη
- Σεισμική καταπόνηση

Τα παραπάνω αίτια οφείλονται:

- Είτε σε κενά τεχνικών γνώσεων του γεωλόγου και τεχνικογεωλογικών γνώσεων του μηχανικού
- Είτε σε λαθεμένες ή ατελείς γεωλογικές γνωματεύσεις
- Είτε σε ατελές ή περιορισμένο πρόγραμμα ερευνητικών εργασιών πεδίου, σε ένα πνεύμα κακώς εννοούμενης οικονομίας, αφού έχει αποδειχθεί ότι το κόστος μιας πλήρους γεωλογικής-γεωτεχνικής έρευνας δεν ξεπερνά το 4% της μελέτης κατασκευής του έργου.

Στη μελέτη ενός φράγματος περιλαμβάνεται και η μελέτη του χώρου κατασκευής των συνοδών έργων. Για τα έργα αυτά συντάσσονται είτε ξεχωριστές μελέτες, είτε μελέτες αυτών των έργων που εντάσσονται σε ξεχωριστά τεύχη και αποτελούν επιμέρους τμήματα της κύριας μελέτης.

Στα έργα αυτά εντάσσονται:

- Η σήραγγα εκτροπής (diversion tunnel), εφόσον κριθεί απαραίτητη
- Το κυρίως ανάντη πρόφραγμα (Κ.Α.Π.)
- Ο υπερχειλιστής ή εκχυλιστής (spillway) or (weir)
- Ο αγωγός προσαγωγής (Power tunnel), προκειμένου για ενεργειακά φράγματα
- Η σήραγγα φυγής (tailrace tunnel or channel)
- Ο εκκενωτής πυθμένα (botton outlet)
- Τα έργα ανάσχεσης πλημμύρας (Surge tank)

Τα φράγματα, βέβαια, δεν είναι έργα αθάνατα. Η διάρκεια της ζωής τους μετριέται σε λίγες δεκάδες χρόνια. Κύρια αιτία του “θανάτου” τους είναι η πλήρωσή τους, με φερτά υλικά που μεταφέρει το ποτάμι που εισρέει στον ταμιευτήρα. Όλα τα ποτάμια, ακόμη και τα μικρότερα, μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες χώματος, χαλικιών, βράχων, ιλύος, που σιγά-σιγά τα αποθέτουν στις εκβολές τους ή, στην περίπτωση μας, στον ταμιευτήρα του φράγματος. Με την πάροδο των ετών, τα υλικά αυτά απομειώνουν τη χωρητικότητα του φράγματος σε νερό, μέχρι να το γεμίσουν τελείως (πράγμα σπάνιο) ή μέχρι να είναι τόσο μικρή η ποσότητα του νερού που χωράει το φράγμα, ώστε ουσιαστικά να έχει μεταβληθεί σε μια λίμνη με ασήμαντη χωρητικότητα και επομένως μικρό, ωφέλιμο υδραυλικό φορτίο, λόγω του χαμηλού ύψους του νερού. Οι μελέτες που προηγούνται της κατασκευής ενός φράγματος λαμβάνουν πάντα υπόψη τους το χρόνο ζωής του, ώστε να είναι βέβαιο ότι τα τεράστια χρηματικά ποσά που επενδύονται στην κατασκευή του θα αποσβεστούν από τις υπηρεσίες που θα προσφέρει αυτό στη διάρκεια της ζωής του.

1.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΚΑΣΤΡΑΚΙΟΥ

1.2.1 Γενικότητες

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται ειδικότερα στοιχεία για το Φράγμα Καστρακίου, του οποίου την τεχνητή λίμνη πρόκειται να μελετήσουμε στην συνέχεια ως προς την κυκλοφορία των υδάτων της. Το υδροηλεκτρικό φράγμα Καστρακίου (Εικόνα 3.) κατασκευάστηκε το 1969. Είναι το δεύτερο κατά σειρά φράγμα του ποταμού Αχελώου. Το ύψος της στέψης του φράγματος είναι 95 μέτρα, το μήκος του 530 μέτρα και το πλάτος στη βάση 380 μέτρα. Με την κατασκευή του φράγματος δημιουργήθηκε η τεχνητή λίμνη του Καστρακίου.

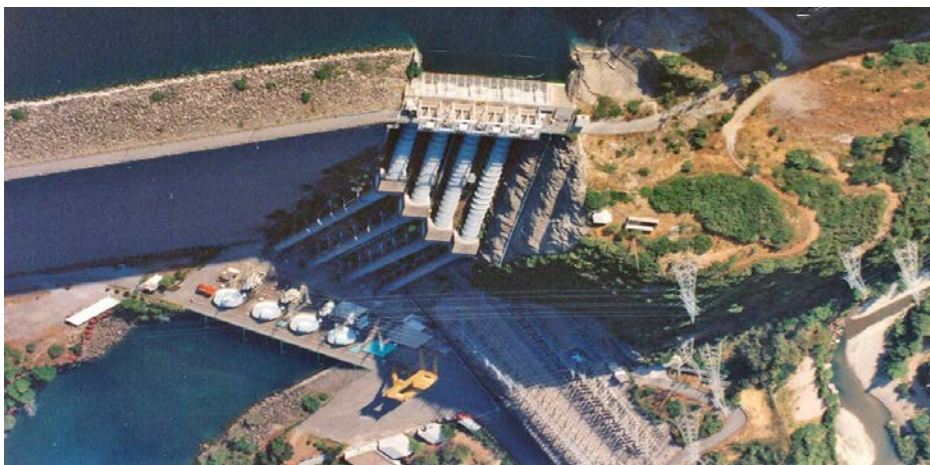


Εικόνα 3. Γενική άποψη του φορέα του φράγματος Καστρακίου (ΔΕΗ, 2010).

Η λίμνη Καστρακίου είναι τεχνητή λίμνη κοντά στα χωριά Καστράκι και Μπαμπαλιό της Αιτωλοκαρνανίας στη Δυτική Στερεά Ελλάδα, πάνω στην κοίτη του ποταμού Αχελώου. Η έκταση της επιφάνειας της λίμνης που έχει δημιουργηθεί είναι 2.800.000 m² και περιέχει περίπου 1.000.000 m³ νερό, ενώ το εμβαδό του ταμιευτήρα είναι 2.420.000 m². Η λίμνη στο Καστράκι δημιουργήθηκε και αυτή από ένα δεύτερο φράγμα στον Αχελώο ποταμό. Εκεί έχει δημιουργηθεί υδροηλεκτρικός σταθμός της ΔΕΗ που εξοικονομεί σημαντική υδροηλεκτρική ενέργεια αποφεύγοντας την ενέργεια από πετρέλαιο και την ρύπανση του περιβάλλοντος. Επιπλέον, ειδικότερα στοιχεία (ΔΕΗ, 2011) είναι η μέγιστη παροχευτικότητα εκχειλιστή (Εικόνα 4. και Εικόνα 5.) η οποία είναι 3700 m³/sec, η μέση ωριαία παροχή ίδιας λεκάνης (Σχήμα 1.), η ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα είναι 53 εκατομμύρια m³ νερό, η εγκατάσταση ισχύς είναι 320 MW (4x80), χρησιμοποιώντας francis type turbines και η ετήσια παραγωγή είναι 598 GWH (Εικόνα 6.).

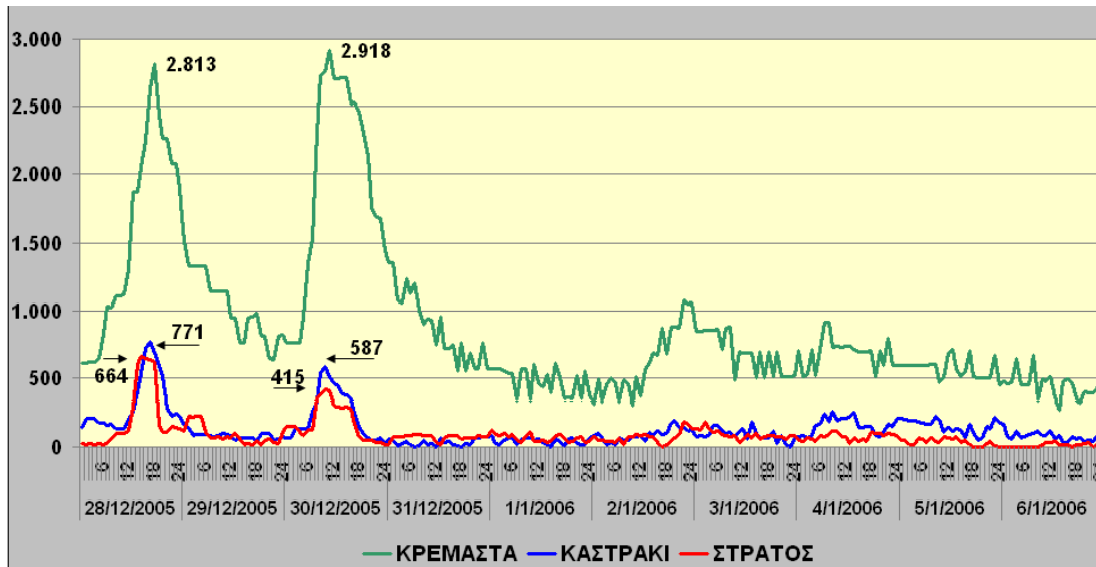


Εικόνα 4. Εκχειλιστής του υδροηλεκτρικού φράγματος Καστρακίου (ΔΕΗ, 2010)

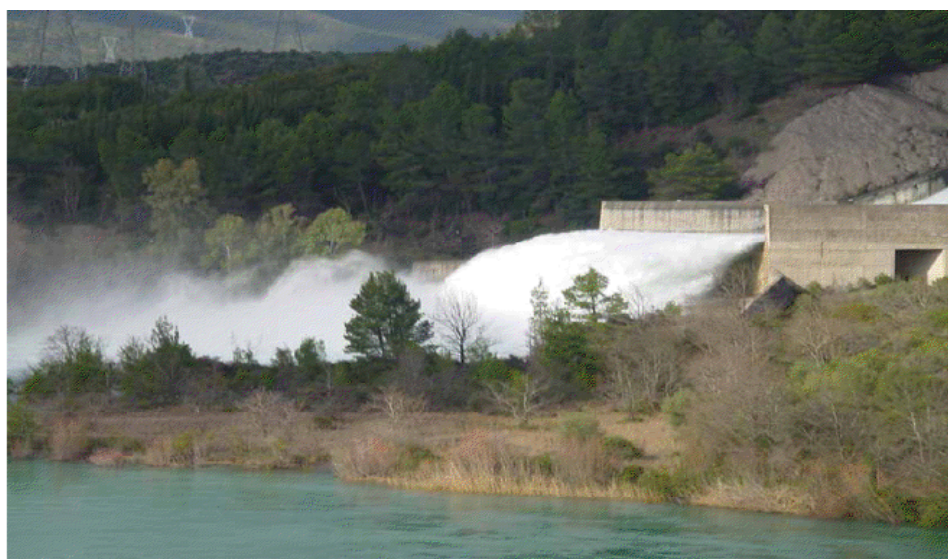


Εικόνα 5 . Γενική άποψη του εκχειλιστή της τεχνητής λίμνης Καστρακίου
(<http://www.airphotos.gr/etoloakarnanialimnes.htm>)

Συγκρότημα Αχελώου



Σχήμα 1. Διάγραμμα μέσης ωριαίας παροχής ίδιας λεκάνης (ΔΕΗ, 2010)



Εικόνα 6. Υπερχειλιστής Καστρακίου σε λειτουργία (ΔΕΗ, 2010)

1.2.2 Στοιχεία για τον ποταμό Αχελώο

Ο Αχελώος είναι ο δεύτερος σε μήκος ποταμός της Ελλάδας. Πηγάζει από την οροσειρά της Πίνδου και συγκεκριμένα από το όρος Λάκμος (Περιστέρι), νότια νοτιοδυτικά του Μετσόβου και μετά από μια διαδρομή 220 χιλιομέτρων εκβάλλει στο Ιόνιο πέλαγος, έχοντας σχηματίσει με τις προσχώσεις του τα νησιά Εχινάδες. Κατά τη

διαδρομή του διέρχεται από τους νομούς Τρικάλων, από τα όρια των νομών Καρδίτσας και Άρτας και στη συνέχεια από τα όρια των νομών Ευρυτανίας και Αιτωλοακαρνανίας. Διαχωρίζει με την πορεία του την Ακαρνανία από την Αιτωλία, διασχίζοντας διαδοχικά τις τεχνητές λίμνες των Κρεμαστών, του Καστρακίου και του Στράτου και αρδεύει την πεδιάδα του Αγρινίου. Στη ροή του προς το Ιόνιο δέχεται τα νερά των παραποτάμων του Αγραφιώτη, Ταυρωπού, Τρικεριώτη και Ινάχου. Σήμερα οι τρεις πρώτοι χύνονται στην τεχνητή λίμνη των Κρεμαστών και ο τέταρτος στην τεχνητή λίμνη του Καστρακίου. Θεωρείται ο πλουσιότερος σε νερά γηγενής ποταμός της Ελλάδας (Εικόνα 7.).



(α)



(β)

Εικόνα 7. Γενική άποψη του ποταμού Αχελώου, όπου έχει κατασκευαστεί το ΥΗΕ Καστρακίου, (α) πλησίον του ταμειευτήρα, (β) στη μέγιστη στένωση ποταμού. (www.wikipedia_axelwos.gr)

1.2.3 Στοιχεία για τη βιοποικιλότητα του Φράγματος Καστρακίου

Τα φράγματα είναι έργα μεγάλης σημασίας, διότι συμβάλλουν στην ανάπτυξη της βιοποικιλότητας της περιοχής. Συγκεκριμένα το φράγμα του Καστρακίου, έχει δημιουργήσει μια νέου τύπου αύξηση των φυσικών οικοσυστημάτων (φυλλοβόλα είδη δένδρων όπως βελανιδιές, οξιές, καστανιές) και οργανισμών οι οποίοι σχετίζονται με την παραποτάμια βλάστηση. Επιπλέον, το φράγμα αυτό οδήγησε σε αύξηση των θηλαστικών και των προστατευόμενων ειδών, όπως είναι η βίδρα, που βρίσκουν καταφύγιο στο δάσος γύρω από τη λίμνη. Εντυπωσιακή είναι και η ποικιλότητα στην ορνιθοπανίδα της περιοχής, όπου έχει διαπιστωθεί η παρουσία περισσότερων των 70 ειδών. Όσον αφορά τους ιχθυοπληθυσμούς, οι εμπλουτισμοί που έγιναν με νέα ιχθυοπανίδα, π.χ. στον ταμιευτήρα του Καστρακίου, οδήγησαν σε αύξηση αυτών από πέντε σε δώδεκα και στον πολλαπλασιασμό των ειδών της ιχθυοπανίδας που ξεπερνά κάθε προσδοκία, όπως τα χέλια και τα μύδια. Στην περιοχή του ταμιευτήρα μπορεί να συναντήσει κανείς και πολλά είδη ερπετών όπως είναι η σαΐτα, τρανόσαυρα και η οχιά, ενώ δε λείπουν και τα αμφίβια είδη, όπως είναι ο δεινοπόδαρος. Γενικώς, η έκταση της περιοχής είναι μεγάλη και παρουσιάζει ποικιλία οικοτόπων, όπου μπορούμε να συναντήσουμε ανάλογη ποικιλία χλωρίδας και πανίδας (Εικόνα 8.).



Εικόνα 8. Γενική άποψη της βιοποικιλότητας του Φράγματος Καστρακίου
(<http://www.protothema.gr/environment/article/?aid=82828>)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ

2.1.1 Η Υδροδυναμική μελέτη των υδάτινων σωμάτων

Τα νερά στις φυσικές ή τεχνικές λίμνες και τα ποτάμια, βρίσκονται, συνήθως, σε συνεχή κίνηση. Υπάρχουν πολλοί πρακτικοί λόγοι για τους οποίους γνώση των παραμέτρων και ικανότητα εκτίμησης ή και υπολογισμού της υδροδυναμικής κυκλοφορίας παράκτιων και εσωτερικών υδάτων είναι χρήσιμη στις μέρες μας.

Η μελέτη της κυκλοφορίας των υδάτων, για κάποιο υδάτινο σώμα, μπορεί να πραγματοποιείται είτε με επιτόπου μετρήσεις, ή με τη κατασκευή φυσικών ομοιωμάτων στο εργαστήριο ή τέλος με την ανάπτυξη /εφαρμογή μαθηματικών (αριθμητικών) ομοιωμάτων. Ωστόσο, κάποιες φορές όταν κυρίως οι συνθήκες το επιτρέπουν ή το επιβάλλουν μπορεί να πραγματοποιείται και συνδυασμός των παραπάνω μεθόδων. Στις μέρες μας η ανάπτυξη των σύγχρονων ισχυρών υπολογιστών επέβαλε κυρίως τη χρήση αριθμητικών ομοιωμάτων. Τα μαθηματικά αυτά ομοιώματα μπορούν ικανοποιητικά και με πολύ χαμηλό κόστος να προβλέπουν την υδροδυναμική συμπεριφορά των υδάτινων σωμάτων υπό διάφορες φυσικές φορτίσεις, υπό την προϋπόθεση όμως να έχουν "ρυθμιστεί" προηγουμένως με κατάλληλο τρόπο.

Ιδιαίτερη σημασία, κατά την αριθμητική προσομοίωση, παρουσιάζουν οι υποθέσεις οι οποίες υιοθετούνται για την ανάλυση της ροής, καθώς και η διαμόρφωση του πεδίου επίλυσης. Για την περίπτωση ανάλυσης ροών χρησιμοποιούνται εξισώσεις ορμής και συνέχειας, στις εξισώσεις ορμής υπεισέρχεται και ο όρος (παράμετρος) της δύναμης Coriolis. Τα περισσότερα αριθμητικά μοντέλα θεωρούν υδροστατική την κατανομή της πίεσης κατά την κατακόρυφο, απλοποιώντας την κατακόρυφη εξίσωση της ορμής και εφαρμόζουν διάφορες μεθόδους για την διαχείριση της ελεύθερης επιφάνειας.

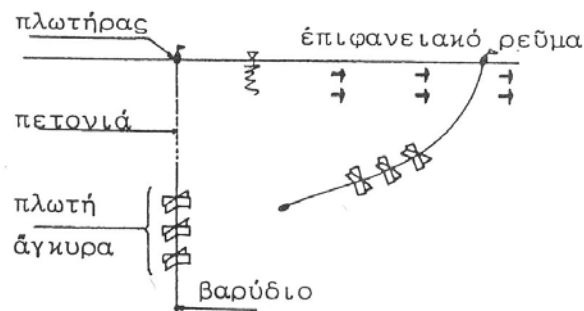
Τα όρια του πεδίου επίλυσεως στο συγκεκριμένο ταμιευτήρα εξομαλύνθηκαν, έτσι ώστε να διαμορφώνεται όσο το δυνατόν ομαλότερη ακτογραμμή και να αποφεύγονται αριθμητικά προβλήματα.

Τα διάφορα αριθμητικά μοντέλα που αναπτύσσονται πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους τις περισσότερες από τις παραπάνω παραμέτρους, με σκοπό την όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση του φυσικού προβλήματος, συνεκτιμώντας ταυτόχρονα και τον απαιτούμενο χρόνο προσομοίωσης. Ωστόσο, κάθε φορά καλό είναι οι αριθμητικές προσομοιώσεις να αλληλοσυμπληρώνονται και με επιτόπου μετρήσεις, που αν και περιγράφουν συνήθως συγκεκριμένες καταστάσεις στον χρόνο δίχως τη δυνατότητα της πρόβλεψης, δεν παύουν να αποτελούν τον καλύτερο έλεγχο για την αξιοπιστία των αριθμητικών προβλέψεων του μαθηματικού ομοιώματος.

2.1.2 Υδροδυναμική μελέτη της παράκτιας κυκλοφορίας

Θα περιγράψουμε το μαθηματικό μοντέλο που μας επιτρέπει τον υπολογισμό των ρευμάτων, γνωρίζοντας την τοπογραφία της παράκτιας περιοχής και τις οριακές συνθήκες. Τα μαθηματικά μοντέλα αποτελούν γενικά ένα εύχρηστο και οικονομικό μέσο περιγραφής και κυρίως προβλέψεως της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ενός αποδέκτη, με την προϋπόθεση όμως να έχουν “ρυθμιστεί” προηγουμένως με κατάλληλο τρόπο. Πράγματι, όπως θα δούμε παρακάτω στη δόμηση του μοντέλου υπεισέρχονται ορισμένες φυσικές σταθερές η τιμή των οποίων εκλέγεται έτσι ώστε τα αποτελέσματα του αριθμητικού υπολογισμού να συμφωνούν με τα αποτελέσματα επί τόπου μετρήσεων βασικών υδροδυναμικών μεγεθών.

Η μέτρηση των ρευμάτων είναι γενικά μια δύσκολη επιχείρηση, προϋποθέτει την ύπαρξη ενός σταθερού σημείου αναφοράς ή ενός σημείου που μετατοπίζεται με γνωστή ταχύτητα. Γενικά είναι δύσκολο να πραγματοποιήσουμε ένα τέτοιο σημείο. Κοντά στη ξηρά βέβαια είναι δυνατόν να σταθεροποιήσουμε ένα πλοiάριο από το οποίο γίνονται οι μετρήσεις με τη βοήθεια αγκυρών ή να κατασκευάσουμε ειδικές εξέδρες εφοδιασμένες με όργανα μετρήσεως. Χωρίς να μπορούμε στις λεπτομέρειες για τη διαδικασία μέτρησης των ρευμάτων αναφέρουμε ότι μια πρώτη εικόνα για την ένταση και διεύθυνση των ρευμάτων είναι δυνατόν να σχηματίσουμε παρακολουθώντας την κίνηση πλωτών αγκυρών. Οι διαδοχικές θέσεις των αγκυρών αυτών σημειώνονται στον χάρτη παρακολουθώντας με ένα πλοiάριο τη θέση των επιφανειακών πλωτήρων (Σχήμα 2.). Όπως φαίνεται στο σχήμα, όταν υπάρχει ένα ισχυρό επιφανειακό ρεύμα η μέθοδος αυτή οδηγεί σε σημαντικά σφάλματα. Τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκαν αυτόματοι ρευματογράφοι που επιτρέπουν την καταγραφή της εντάσεως και της διεύθυνσεως των ρευμάτων σε ένα δεδομένο σημείο (Γκανούλης, 1984).



Σχήμα 2. Πλωτή άγκυρα και συμπεριφορά της όταν αναπτύσσεται ένα ισχυρό επιφανειακό ρεύμα (Γκανούλης, 1984)

2.2 ΑΝΕΜΟΓΕΝΗ ΡΕΥΜΑΤΑ-ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

Η κυκλοφορία των επιφανειακών νερών είναι αποτέλεσμα του παγκόσμιου συστήματος κυκλοφορίας των ανέμων και της ανάπτυξης των ηπείρων και των ωκεανών πάνω στον πλανήτη.

2.2.1 Γένεση ανεμογενών ρευμάτων

Ο Ekman το 1905 δημοσίευσε τα αποτελέσματα της μαθηματικής προσομοίωσης σχετικά με τη δημιουργία των ανεμογενών ρευμάτων. Αφορμή για την έρευνα του υπήρξαν οι παρατηρήσεις του Νορβηγού εξερευνητή Nansen, ο οποίος κατά τη διάρκεια μιας αποστολής στον Αρκτικό Ωκεανό το 1896 παρατήρησε ότι τα παγόβουνα δεν κινούνταν στη διεύθυνση του ανέμου που έπνεε αλλά σε διεύθυνση που σχημάτιζε δεξιόστροφη γωνία 20-40 μοίρες.

Η δημιουργία αυτών των ρευμάτων έχει αποδειχτεί ότι οφείλεται:

- i. Στη διατμητική τάση που εξασκεί ο άνεμος που πνέει πάνω στην επιφάνεια του ταμιευτήρα της λίμνης και έχει ως αποτέλεσμα να συμπαρασύρει τα επιφανειακά νερά προς την ίδια κατεύθυνση. Εμπειρικά, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου W , τόσο ισχυρότερη είναι η εφαπτόμενη δύναμη τ , που ασκείται απ' αυτόν στην επιφάνεια του ταμιευτήρα και τόσο ταχύτερο θα είναι το επιφανειακό ρεύμα:

$$\tau = cW^2 \quad (2.2.1)$$

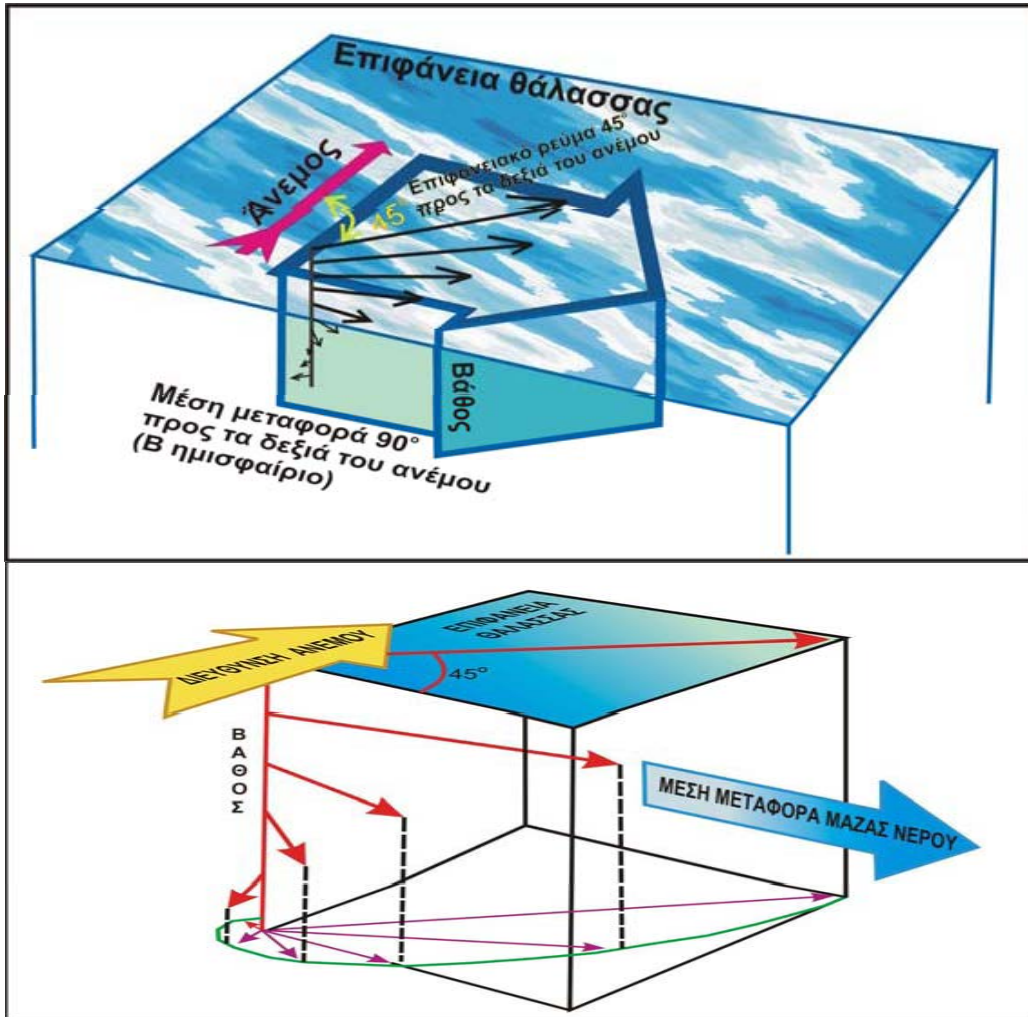
όπου η παράμετρος c εξαρτάται από τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες (Θεοδώρου, 2002). Η ταχύτητα του επιφανειακού ρεύματος είναι ίση περίπου με το 3% της ταχύτητας του ανέμου.

- ii. Στη δύναμη Coriolis που επιδρά κάθετα στη διεύθυνση της κινούμενης μάζας και την εκτρέπει συνεπώς από την πορεία της, προς τα δεξιά στο βόρειο ημισφαίριο και προς τα αριστερά στο νότιο.

2.2.2 Η προσομοίωση του Ekman

Ο Ekman υπέθεσε ότι σταθερός άνεμος πνέει επάνω από ωκεανό άπειρου βάθους, άπειρου πλάτους και σταθερής πυκνότητας. Επίσης, υπέθεσε ότι η επιφάνεια του ωκεανού παραμένει οριζόντια, έτσι ώστε η πίεση σε όλα τα βάθη να είναι σταθερή. Εξετάζοντας την ισορροπία των δυνάμεων –τριβής και Coriolis- στον άπειρο αριθμό στρωμάτων που αποτελούν την υδάτινη στήλη, το ομοίωμα του Ekman έδειξε ότι στο βόρειο (νότιο) ημισφαίριο η δύναμη Coriolis τείνει να εκτρέψει το επιφανειακό νερό δεξιόστροφα (αριστερόστροφα), ενώ η δύναμη του ανέμου προσπαθεί να το επαναφέρει στην ίδια με εκείνον διεύθυνση. Όταν τελικά επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ των δύο αυτών δυνάμεων, η διεύθυνση ροής του επιφανειακού ρεύματος σχηματίζει γωνία 45° δεξιόστροφα (αριστερόστροφα) με τη διεύθυνση με από την οποία πνέει ο άνεμος. Κάτω από την επιφάνεια κάθε στρώμα νερού τίθεται σε κίνηση παρασυρόμενο από το

υπερκείμενο στρώμα. Επίσης λόγω της επίδρασης της Coriolis, κάθε στρώμα τείνει να κινηθεί πιο δεξιά (αριστερά) της διεύθυνσης στην οποία σύρεται από το υπερκείμενο στρώμα. Τέλος, η ταχύτητα του ρεύματος μειώνεται με το βάθος. Συνεπώς, τα διανύσματα του ρεύματος σχηματίζουν σπειροειδές και η προκύπτουσα θεωρητική κατανομή του ρεύματος είναι σήμερα γνωστή ως σπειροειδές του Ekman (Σχήμα 3.).



Σχήμα 3. Απεικόνιση ανάπτυξης της σπείρας σύμφωνα με τον Ekman (http://en.wikipedia.org/wiki/Paul_Ekman)

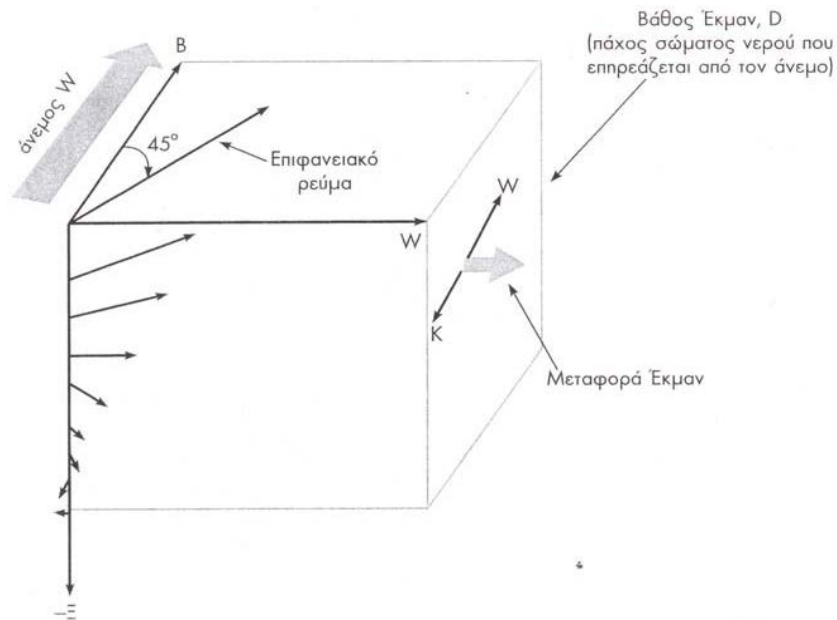
2.2.3 Μεταφορά Ekman

Το σημαντικότερο όμως αποτέλεσμα της μαθηματικής προσομοίωσης του Ekman είναι ότι η μέση κίνηση του στρώματος που επηρεάζει ο άνεμος γίνεται κάθετα ως προς τη διεύθυνση του ανέμου προς τα δεξιά στο βόρειο ημισφαίριο και προς τα αριστερά στο νότιο ημισφαίριο. Το τελευταίο συμπέρασμα γίνεται κατανοητό εαν εξετάσουμε την ισορροπία των δυνάμεων που ασκούνται στο στρώμα επιρροής του ανέμου. Σε κατάσταση ισορροπίας η δύναμη του ανέμου (W) και η Coriolis (K) αντισταθμίζουν η μια την άλλη. Κατά συνέπεια, το μέσο ρεύμα κινείται κάθετα ως προς τη διεύθυνση του ανέμου, δεξιόστροφα στο βόρειο ή αριστερόστροφα στο νότιο ημισφαίριο, αντιστοίχως. Ο συνολικός όγκος νερού ανά δευτερόλεπτο (σε m^3s^{-1}) του στρώματος που επηρεάζει ο άνεμος μεταφέρεται σε διεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση του ανέμου και ονομάζεται μεταφορά του Ekman.

Η κίνηση των επιφανειακών νερών μεταδίδεται και στα βαθύτερα στρώματα λόγω της συνεκτικότητας (ιξώδες) του νερού με την ταχύτητα κίνησης του νερού σε κάθε στρώμα ελαττούμενη με το βάθος. Θεωρείται λοιπόν ότι υπάρχουν επάλληλα στρώματα νερού, τα οποία κινούνται με ταχύτητα ελαττούμενη προς τα κάτω. Αν σε κάθε στρώμα του νερού που κινείται ενεργεί η δύναμη Coriolis, τότε η διεύθυνση κίνησης κάθε στρώματος θα είναι προς τα δεξιά της διεύθυνσης κίνησης του υπερκείμενου στρώματος. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα σπειροειδές που ονομάζεται “Σπειροειδές του Ekman” (Σχήμα 4.). Η κίνηση αυτή μεταδίδεται περίπου μέχρι βάθος 100m και είναι περίπου το 4% της ταχύτητας στην επιφάνεια. Η κατεύθυνση μεταφοράς του συνόλου της μάζας του νερού πάχους 100m (στρώμα Ekman) είναι κάθετη και προς τα δεξιά της διεύθυνσης με την οποία πνέει ο άνεμος. Σύμφωνα με την προσομοίωση Ekman, η επιφανειακή ταχύτητα του ανεμογενούς ρεύματος δίνεται από τη σχέση

$$u = \tau / (A\rho f)^{1/2} \quad (2.2.2)$$

όπου τ είναι η διατμητική τάση του ανέμου στην επιφάνεια του ταμειυτήρα, A ο συντελεστής κατακόρυφης εσωτερικής τριβής, f η παράμετρος Coriolis ($f = 2\Omega \sin\phi$, όπου Ω η γωνιακή ταχύτητα της Γης γύρω από τον άξονά της και ϕ το γεωγραφικό πλάτος) και ρ η πυκνότητα του νερού (Θεοδώρου, 2002).



Σχήμα 4. Προσομοίωση των ανεμογενών ρευμάτων και ανάπτυξη της σπείρας σύμφωνα με τον Ekman (Θεοδώρου, 2002)

2.3 ANEMOI

Οι άνεμοι πάνω από το επιλίμνιο μπορούν να χωριστούν γενικά σε δύο κατηγορίες, τους ισχυρούς και τους ασθενείς ανέμους. Οι πρώτοι προκαλούν γενικότερη κυκλοφορία στον ταμιευτήρα και η ανάμιξη είναι μεγάλης κλίμακας. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η ανάμιξη στο επιλίμνιο λόγω ασθενών μόνο ανέμων. Οι άνεμοι που φυσούν πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια μιας λίμνης, εξασκούν διατμητικές τάσεις στην υδάτινη επιφάνεια και έτσι σχηματίζονται κύματα, τα οποία στη συνέχεια θραύονται και μεταβιβάζουν ενέργεια στο νερό. Η κίνηση των κυμάτων, παράγει τύρβη στις άνω στρώσεις ιδίως μετά τη θραύση των κυμάτων. Η τύρβη καθώς και η μέση κίνηση διάτμησης της άνω στρώσης εξασκούν μεταξύ τους επιδράσεις παράγεται δε παραπέρα τυρβώδης κινητική ενέργεια. Μερικές φορές αυτή η αλληλοεπίδραση παράγει μια δευτερεύουσα κίνηση, καθώς και ένα ρεύμα προς την κατεύθυνση κίνησης του ανέμου. Οι δευτερεύουσες κινήσεις ονομάζονται κυψέλες Langmuir και έχουν ειδικό χαρακτηριστικό σχήμα. Η καθαρή τυρβώδης κινητική ενέργεια που παράγεται στην άνω στρώση μεταβιβάζεται στις κάτω στρώσεις του επιλιμνίου, με τη διαδικασία της τυρβώδους διάχυσης ή με τις μεταθετικές κινήσεις των κυψελών Langmuir. Η ολική εισροή έργου από τον άνεμο δίνεται από τη σχέση,

$$W_{\varepsilon} = \tau_s \cdot \bar{u}_w \quad (2.3.1)$$

όπου $\bar{u}_w = u_*$, δηλαδή ανάλογη της ταχύτητας τριβής ($u_* = \sqrt{\tau_s / \rho_m}$).

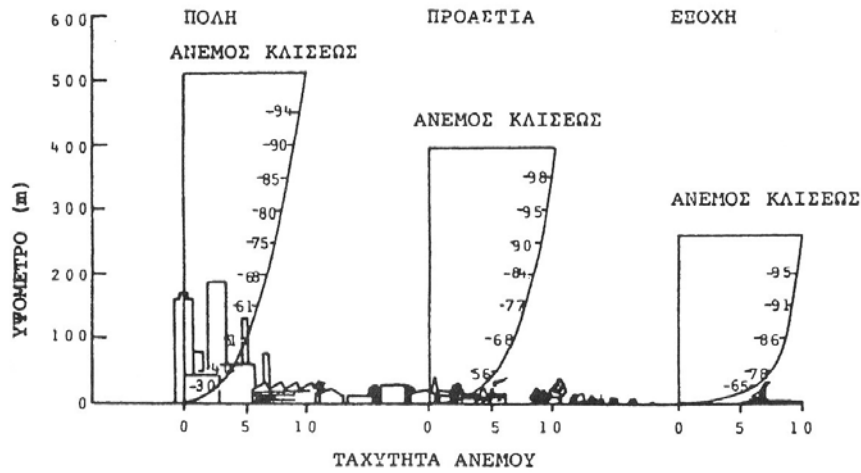
Επειδή οι διατμητικές τάσεις τ_s πλησίον της επιφάνειας είναι τάξης, $\rho_m \cdot u_*^2$, είναι, $W_\varepsilon - u_*^3$. Εκτός της ανάμιξης στην άνω στρώση, ο άνεμος προκαλεί και επιτάχυνση του νερού, έτσι ώστε εγκαθίσταται μια κίνηση του επιλίμιου με τοπικές ταχύτητες $\bar{u}(z)$.

2.4 ΟΡΙΑΚΗ ΣΤΟΙΒΑΔΑ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Το χαμηλότερο τμήμα της ατμόσφαιρας είναι εκείνο που ενδιαφέρει περισσότερο τα προβλήματα ρυπάνσεως, αφού μέσα σε αυτό διαχέονται οι μεγαλύτερες ποσότητες ρυπαντών. Στην κατώτερη οριακή στοιβάδα της ατμόσφαιρας, ας πούμε στα πρώτα 15 μέτρα περίπου, η περιστροφή του ανέμου από τις δυνάμεις Coriolis είναι αμελητέα. Η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου πάνω στη κατακόρυφη διεύθυνση μπορεί να υπολογιστεί με πολύ απλά μοντέλα. Όταν επικρατούν συνθήκες ουδέτερης ισορροπίας, ο λογαριθμικός νόμος της θεωρίας του Prandtl προσεγγίζει ικανοποιητικά αυτή τη κατανομή. Σύμφωνα με το νόμο αυτό έχουμε:

$$\bar{u}_z = \frac{1}{K} \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} \ln \frac{z}{z_o} \quad (2.4.1)$$

όπου \bar{u}_z είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου στο υψόμετρο z , K είναι η σταθερά του von Karman που περιλαμβάνεται από τους μετεωρολόγους ίση με 0,4 και το τ_o η διατμητική τάση του ανέμου. Η πυκνότητα και η διατμητική τάση μεταβάλλονται λίγο στις πρώτες δεκάδες μέτρα της οριακής στοιβάδας. Η τ_o παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 10 dyn/cm² πάνω από το έδαφος και μικρότερες τιμές πάνω από τη λίμνη. Η ποσότητα z_o ονομάζεται “μήκος τραχύτητας” και παίρνει συνήθως τιμές που κυμαίνονται ανάμεσα στο 1/10 και το 1/30 του μεγέθους των στοιχείων της τραχύτητας. Έτσι το z_o κυμαίνεται από 0,1 cm στην περίπτωση κοντής βλάστησης (χόρτα κλπ.) μέχρι 100 cm για δάσος με δέντρα ύψους περίπου 10 m. Το Σχήμα 5. δείχνει με ποιο τρόπο επιδρά η τραχύτητα κοντά σε μια κατοικημένη περιοχή πάνω στη κατανομή του ανέμου.



Σχήμα 5. Επίδραση της τραχύτητας πάνω στη κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου (Γκανούλης, 1984)

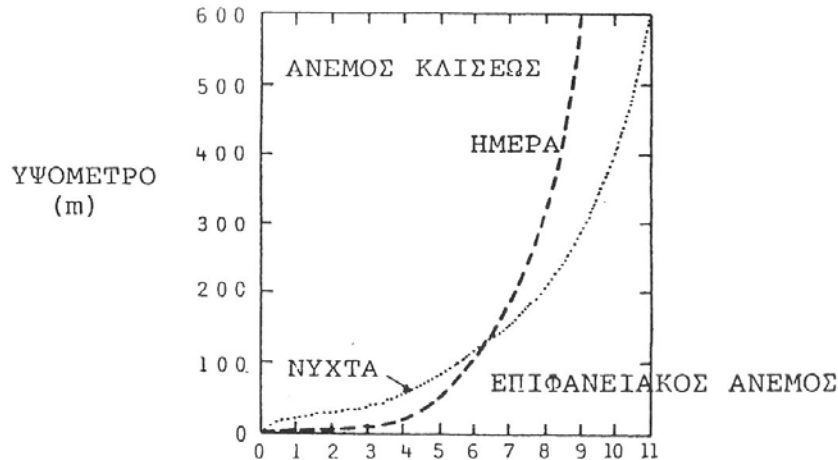
Η τιμή του τ_0 δεν είναι συνήθως γνωστή αλλά υπολογίζεται από επιτόπου παρατηρήσεις. Επίσης το μήκος z_0 μπορεί να υπολογιστεί από πειραματικά δεδομένα, για τα οποία χρειάζονται τουλάχιστον δύο παρατηρήσεις σε διαφορετικά υψόμετρα.

Σύμφωνα με τον λογαριθμικό νόμο ο άνεμος μηδενίζεται στο υψόμετρο $z = z_0$ ή σε απόσταση πάρα πολύ μικρή από την επιφάνεια της γης. Αν όμως το έδαφος καλύπτεται από διάφορα φυτά, είναι δυνατόν ο μηδενισμός αυτός να γίνεται σε μια απόσταση πιο μεγάλη από την επιφάνεια της γης. Ο λογαριθμικός νόμος μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$\bar{u}_z = \frac{1}{K} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \quad (2.4.2)$$

όπου το d είναι της τάξεως μεγέθους του ύψους που έχουν τα φυτά.

Στη διάρκεια της ημέρας με αρκετή ηλιοφάνεια δημιουργείται τυρβώδεις θερμική ανάμιξη της ατμόσφαιρας με συνέπεια η κατανομή του ανέμου να είναι “πλατύτερη” από ότι τη νύχτα, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.



Σχήμα 6. Μεταβολή της κατανομής των ταχυτήτων του ανέμου με τις συνθήκες ευστάθειας της ατμόσφαιρας (Γκανούλης, 1984)

Κατά συνέπεια η πρακτική χρήσιμου λογαριθμικού νόμου είναι πολύ περιορισμένη. Συνήθως χρησιμοποιείται μια εμπειρική κατανομή που έχει τη μορφή:

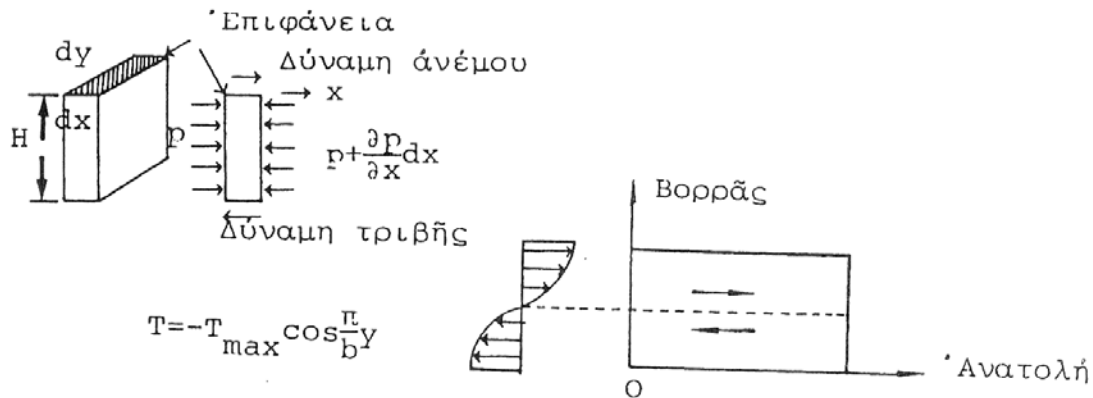
$$\frac{\overline{u_z}}{\overline{u_0}} = \left(\frac{z}{z_0} \right)^n \quad (2.4.3)$$

όπου το n μεταβάλλεται από 0,12-0,50 ανάλογα με τις συνθήκες ατμοσφαιρικής ευστάθειας. Όσο μεγαλύτερη είναι η ευστάθεια τόσο μεγαλύτερο είναι και το n . Η κατανομή των ταχυτήτων σε τυρβώδη ροή πάνω από επίπεδη πλάκα αντιστοιχεί σε τιμή του εκθέτη ίση με $1/7$ ή $n=0,14$. Η τιμή αυτή αποδεικνύεται ότι είναι μια καλή προσέγγιση για αδιαβατική ατμόσφαιρα πάνω από λεία επιφάνεια.

2.5 ΡΕΥΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝΤΑΙ ΛΟΓΩ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

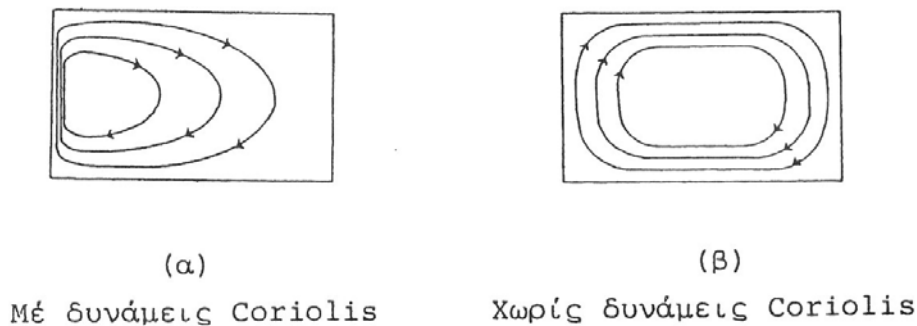
Όταν η βασική αιτία που δημιουργεί τα ρεύματα είναι ο άνεμος υπάρχουν ειδικές λύσεις των εξισώσεων που περιγράψαμε παραπάνω για ορισμένες απλές περιπτώσεις. Οι κυριότερες υποθέσεις που γίνονται συνήθως είναι ότι η ελεύθερη επιφάνεια είναι οριζόντια, ότι ο πυθμένας είναι επίπεδος, ενώ παραλείπεται η επίδραση των μη γραμμικών όρων που περιγράφουν τις επιταχύνσεις. Σαν παράδειγμα ειδικής λύσεως αναφέραμε τη λύση του Ekman.

Θεωρητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η ερμηνεία των μεγάλων ρευμάτων, με βάση απλά θεωρητικά μοντέλα.



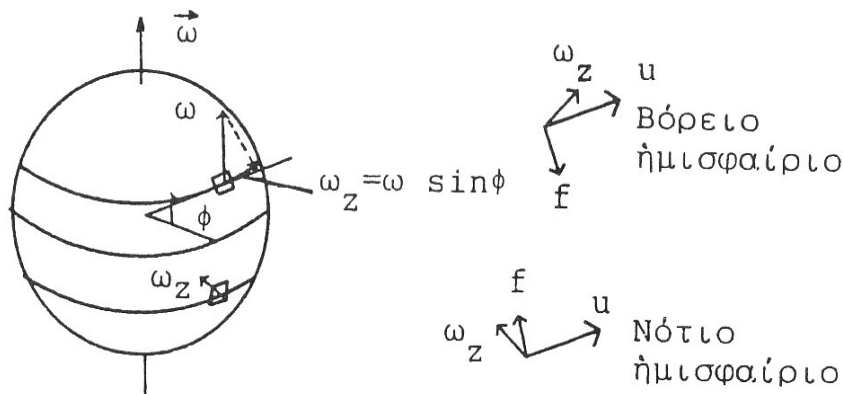
Σχήμα 7. Απλό μοντέλο για τη μελέτη ρευμάτων (Γκανούλης, 1984)

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα 7 η κίνηση θεωρείται ότι αναπτύσσεται σε μια ορθογώνια δεξαμενή και ότι η ροή γίνεται στην επιφάνεια με ομοιόμορφη κατανομή ταχυτήτων κατά το βάθος. Ο άξονας των x διευθύνεται προς την ανατολή ενώ ο άξονας των y προς τον Βορρά. Στην επιφάνεια της λίμνης αναπτύσσονται οι διαμηθικές τάσεις λόγω ανέμων που έχουν διεύθυνση παράλληλη προς τον ισημερινό και ημιτονοειδή κατανομή. Το αποτέλεσμα του υπολογισμού φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 8 με τη μορφή γραμμών ροής



Σχήμα 8. Γραμμές ροής ρευμάτων (Γκανούλης, 1984)

όπου παρατηρούμε ότι η επίδραση των δυνάμεων Coriolis είναι σημαντική. Η επίδραση αυτή είναι διαφορετική στο Βόρειο και Νότιο ημισφαίριο όπως φαίνεται στο σχήμα 9.



Σχήμα 9. Επίδραση των δυνάμεων Coriolis (Γκανούλης, 1984)

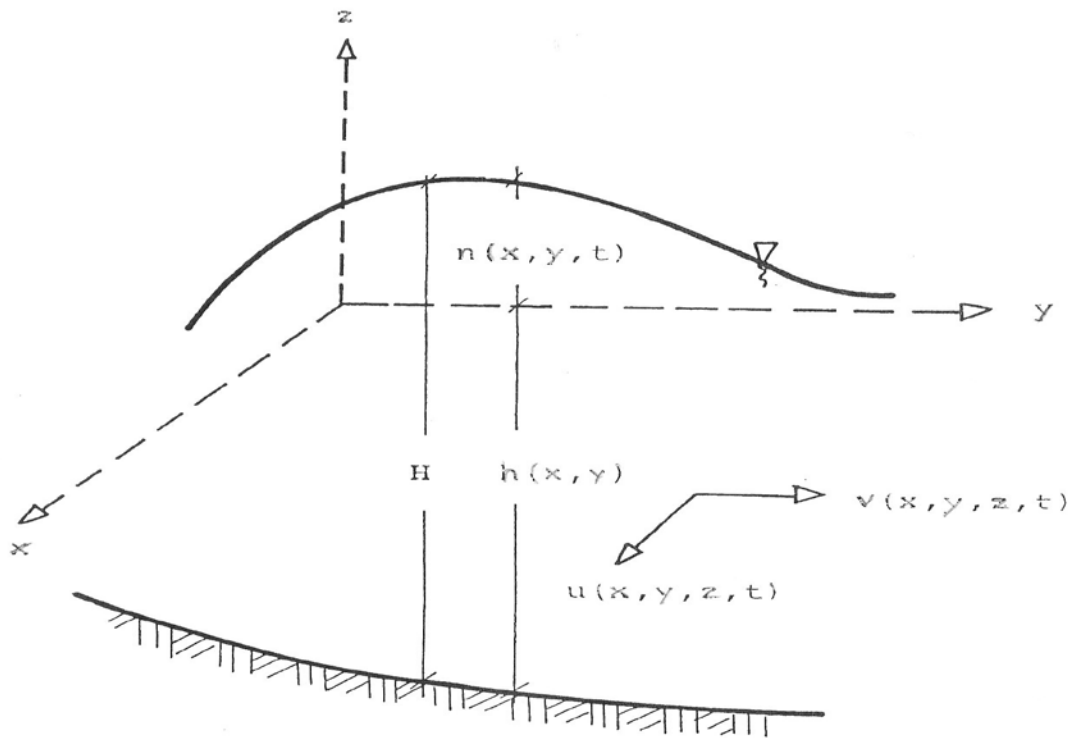
Πράγματι αν ένα ρευστό κινείται στο βόρειο ημισφαίριο με ταχύτητα u προς την ανατολή, η δύναμη Coriolis ανά μονάδα μάζας που έχει μέγεθος $2\omega_z u = 2\omega(\sin \varphi)u$ διευθύνεται προς τον ισημερινό. Το ίδιο συμβαίνει και για το νότιο ημισφαίριο.

Βέβαια τα παραπάνω έχουν ενδιαφέρον κυρίως από ποιοτική άποψη για την ερμηνεία ορισμένων αποτελεσμάτων κυκλοφορίας ρευμάτων σε παράκτιες περιοχές. Στην περίπτωση της υδροδυναμικής μελέτης μιας συγκεκριμένης περιοχής, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιήσουμε το γενικό μαθηματικό μοντέλο για το οποίο μπορούμε να βρούμε αριθμητικές λύσεις στον υπολογιστή.

2.5.1 Μαθηματικά ομοιώματα παράκτιας κυκλοφορίας

Η παράκτια περιοχή στην οποία περιγράφεται η κίνηση των ρευμάτων ορίζεται από το πυθμένα και την ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Η ροή που αναπτύσσεται είναι συνήθως μη μόνιμη και τυρβώδης με αμελητέες τις κατακόρυφες συνιστώσες της ταχύτητας. Γνωρίζοντας την τοπογραφία του πυθμένα και ορίζοντας το οριζόντιο επίπεδο αναφοράς $O.xy$ στη θέση $h(x,y)$, όπως φαίνεται στο σχήμα 10 για την περίπτωση της παράκτιας κυκλοφορίας σε τρισδιάστατο χώρο σαν άγνωστα μεγέθη εμφανίζονται οι οριζόντιες συνιστώσες της ταχύτητας:

$u=u(x, y, z, t)$ $v=v(x, y, z, t)$ και η υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας $\eta=\eta(x, y, z, t)$.



Σχήμα 10. Τρισδιάστατο πεδίο παράκτιας κυκλοφορίας (Γκανούλης, 1984)

Τα μεγέθη αυτά υπακούουν στις εξισώσεις διατηρήσεως των ποσοτήτων κινήσεως, οι οποίες περικλείουν τους όρους των δυνάμεων Coriolis. Στο δεύτερο μέλος των εξισώσεων αυτών, εκτός από τις πιέσεις εμφανίζονται οι τάσεις λόγω του ιξώδους και λόγω τυρβώδους ροής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 ΑΝΑΜΙΞΗ ΣΕ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ- ΛΙΜΝΕΣ

Οι ταμιευτήρες είναι τεχνητές λίμνες, οι οποίες συνήθως κατασκευάζονται για αποθήκευση νερού, για έλεγχο των πλημμυρών ή για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πολλές φορές χρησιμοποιούνται επίσης για έλεγχο θερμοκρασίας, της αλατότητας, ή άλλων παραμέτρων ποιότητας του νερού. Έτσι, πολλές φορές τοποθετούνται στους ταμιευτήρες στόμια εξόδου του νερού σε διάφορα βάθη ώστε να λαμβάνεται θερμόμετρο νερό από περιοχές πλησίον της επιφάνειας (π.χ. για άρδευση) ή ψυχρότερο νερό από το πυθμένα, π.χ. για εκτροφή ιχθύων. Στις περιπτώσεις αυτές βέβαια πρέπει να γίνεται έλεγχος ποιότητας και των υδάτινων μαζών που παραμένουν μέσα στο ταμιευτήρα.

Μια ενδιαφέρουσα παράμετρος της ποιότητας του νερού, είναι ο μέσος χρόνος παραμονής του μέσα στο ταμιευτήρα, που μπορεί να θεωρηθεί ως ηλικία του όγκου του ταμιευτήρα προς τη μέση παροχή εισόδου του νερού. Σε μεγάλες λίμνες ο χρόνος αυτός μπορεί να είναι της τάξης πολλών ετών, ενώ σε μικρές δεξαμενές μπορεί να είναι της τάξης λίγων ημερών. Αν ο χρόνος παραμονής του νερού είναι μικρός τότε η ποιότητα του νερού στον ταμιευτήρα θα εξαρτάται κυρίως από τη ποιότητα του εισρέοντος νερού. Αν όμως ο χρόνος παραμονής είναι σημαντικός, τότε η ποιότητα νερού επηρεάζεται σοβαρά από άλλες εισροές, όπως π.χ. δια μέσου του πυθμένα ή της επιφάνειας, ή και από βιολογική δράση.

Μια άλλη σημαντική παράμετρος σχετίζεται με το κλίμα της περιοχής. Ταμιευτήρες σε ψυχρά κλίματα παρουσιάζουν συνήθως έναν ετήσιο κύκλο στρωματοποίησης. Κατά τη διάρκεια του θέρους η θερμή επιφανειακή στρώση (επιλίμνιο) επιπλέει επάνω από το ψυχρότερο κύριο σώμα του νερού (υπολίμνιο), τη φάση δε αυτή διαδέχεται η ψύχρανση της επιφάνειας το φθινόπωρο. Σημασία έχει επίσης η δράση των τοπικών ανέμων ανάλογα με την έντασή τους.

3.2 Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ – ΛΙΜΝΩΝ

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των λιμνών είναι μετεωρολογικοί, καθώς και οι διάφορες εισροές – εκροές νερού.

Από άποψη θερμοκρασιών, σε πολλούς ταμιευτήρες παρουσιάζεται γενικά ένας ετήσιος κύκλος. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα το νερό πλησίον της επιφάνειας ψύχεται συνεχώς, γίνεται βαρύτερο και κάποτε βυθίζεται. Η ανάμιξη που ακολουθεί επανυξάνεται λόγω της ταυτόχρονης δράσης των ανέμων, και έτσι ουσιαστικά το νερό γίνεται ομογενές από άποψη πυκνοτήτων. Κατά τη διάρκεια της άνοιξης και στις αρχές του θέρους λαμβάνει χώρα εισροή νερού μέσα στον ταμιευτήρα, το οποίο λόγω των διαφόρων προσμίξεων (κυρίως αλάτι από την καλοκαιρινή εξάτμιση) είναι σχετικά βαρύτερο και κατευθύνεται προς τον πυθμένα, διαλυόμενο συνεχώς στην προς τα κατάντη πορεία του. Το θέρος και μέρος του φθινοπώρου η ηλιακή θερμότητα δημιουργεί στρωματοποίηση πυκνοτήτων, και το χειμώνα ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

Η δράση των ανέμων και των διαφόρων εισροών είναι απορυθμιστικοί παράγοντες της ευστάθειας των διαφόρων στρώσεων (που δημιουργούνται λόγω μεταβολών πυκνότητας), έτσι δε γίνεται σημαντική κατακόρυφη ανάμιξη. Η ηλιακή θερμότητα δημιουργεί τη στρωματοποίηση της πυκνότητας, ενώ ο άνεμος αναμιγνύει

συνήθως σημαντικά την άνω στρώση, δηλαδή το επιλίμνιο. Κάτω από το επιλίμνιο υπάρχει μια σημαντική μεταβολή θερμοκρασιών, που χωρίζει τα βαθύτερα νερά από την επιφανειακή στρώση. Η στρώση αυτής της μεταβολής λέγεται θερμοκλινές. Τα βαθιά νερά προστατεύονται από τον άνεμο μέσω του σταθερού θερμοκλινές και σχηματίζουν το λεγόμενο υπολίμνιο. Γενικά, οι λίμνες και οι ταμιευτήρες παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές στη συμπεριφορά τους από περιοχή σε περιοχή και από εποχή σε εποχή.

Στις λίμνες και στους ταμιευτήρες εμφανίζονται συνήθως σημαντικές διαφορές θερμοκρασιών καθ' ύψος, με ψυχρότερες μάζες πλησίον του πυθμένα και θερμότερες πλησίον της ελεύθερης επιφάνειας. Οι (νοητές) γραμμές ίσων θερμοκρασιών (ισοθερμοκρασιακές γραμμές) είναι συνήθως οριζόντιες, αν και πολλές φορές λαμβάνουν χώρα περιοδικές ταλαντώσεις αυτών (seiches), όπως π.χ. σε περιόδους ισχυρών ανέμων ή μεταβολών ατμοσφαιρικής πίεσης ή και εισροών νερού, οπότε και οι γραμμές ίσων πυκνοτήτων ταλαντεύονται επίσης σημαντικά γύρω από ένα μέσο επίπεδο.

Ως εισαγωγή στη μελέτη των κινήσεων που προκαλούν ανάμιξη και διάλυση, θα εξεταστεί η δομή των ταλαντώσεων που οφείλονται σε εξωτερικές διαταραχές. Η πυκνότητα του νερού, p_s , μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη.

$$p_s = p_m + p_e(z) + p''(x, z, t) \quad (3.2.1)$$

όπου p_m είναι η (σταθερή) πυκνότητα του νερού που αντιστοιχεί στη μέση θερμοκρασία, $p_e(z)$ είναι η διαφορά πυκνότητας (ως προς τη p_m) που προστίθεται π.χ. όταν μεταβληθεί η θερμοκρασία ως προς τη μέση και δεν υπάρχει κίνηση (οπότε γενικά, η δομή πυκνοτήτων είναι οριζόντια), ενώ $p''(x, y, t)$ είναι η διαφορά πυκνοτήτων που προστίθεται όταν υπάρχουν κινήσεις. Για σταθερή πυκνότητα είναι $p_s = p_m$. Η αρχή των συντεταγμένων (x, y) βρίσκεται στον πυθμένα της λίμνης, z είναι η κατακόρυφη και θετική προς τα άνω και t είναι ο χρόνος. Ένα μέτρο της συνεχούς κλίσης πυκνότητας δίνεται από τη γνωστή παράμετρο,

$$\varepsilon' = -(1/p_m) \cdot (dp_e/dz), \quad \text{ή} \quad -(1/p_m) \cdot (dp_s/dz) \quad (3.2.2)$$

$$\text{αφού} \quad dp_e/dz = dp_s/dz \quad \text{και} \quad dp_m/dz = 0$$

Σε ένα ομογενές υγρό είναι $\varepsilon' = 0$, ενώ χωρίς τη συνεκτικότητα κάθε κίνηση μέσα σε αυτό είναι αστρόβιλη, η δε βαρύτητα ασκεί απλώς μια υδροστατική πίεση. Πράγματι:

α) σε κινήσεις ομογενούς υγρού, που δεν προκαλούν επιφανειακά κύματα, το μόνο αποτέλεσμα των καθολικών δυνάμεων βαρύτητας είναι η δημιουργία υδροστατικής πίεσης ίσης με $p_m \cdot g \cdot (H - z)$, όπου H το συνολικό βάθος του ταμιευτήρα. Έτσι, αν είναι ρ η πίεση που δημιουργείται λόγω των κινήσεων, η οποία οφείλεται σε όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν την κίνηση αυτή (δυνάμεις αδράνειας, βαρύτητας,

συνεκτικότητας), τότε είναι δυνατόν η ανάλυση (εξίσωση κίνησης) να γίνεται με τη διαφορά (υδροδυναμική πίεση),

$$p = p - p_m \cdot g \cdot (H - z) \quad (3.2.3)$$

δηλαδή να μην λαμβάνεται υπόψη η δύναμη της βαρύτητας (κλειστά συστήματα, αβαρή ρευστά στοιχεία). Η απλοποίηση όμως αυτή μπορεί να γίνει δεκτή μόνο εφόσον η κίνηση λαμβάνει χώρα μέσα στην υγρή μάζα του ταμιευτήρα, κι όχι στην ελεύθερη επιφάνεια αυτού, τούτο δε οφείλεται στο ότι στην ελεύθερη επιφάνεια οι πιέσεις πρέπει να είναι ίσες προς την ατμοσφαιρική πίεση (οριακή συνθήκη).

β) Η επιρροή της ελεύθερης επιφάνειας σε ομογενή αποδέκτη μπορεί να ληφθεί υπόψη στην ανάλυση αν εξεταστεί η ισορροπία των πιέσεων η οποία πρέπει να υπάρχει στην ελεύθερη επιφάνεια. Αν μια μάζα από το ρευστό κινηθεί με οριζόντια ταχύτητα V , προσκρούσει στο στερεό όριο του ταμιευτήρα και κατόπιν ακινητοποιηθεί, τότε η πίεση ανακοπής που αναπτύσσεται εκεί (Bernoulli) είναι

$$\Delta_p = (1/2) \cdot p_m \cdot V^2 \quad (3.2.4)$$

Αυτή η αύξηση της πίεσης πρέπει να εξισορροπηθεί από την τοπική ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, δηλαδή από αύξηση της υδροστατικής πίεσης. Η μέγιστη όμως δυνατή αύξηση της υδροστατικής πίεσης είναι της τάξης του $p_m \cdot g \cdot H$. Η τετραγωνική ρίζα του λόγου $p_m \cdot V^2 / p_m \cdot g \cdot H$, είναι ο γνωστός αριθμός Froude των ομογενών υγρών,

$$F = V / \sqrt{g \cdot H} \quad (3.2.5)$$

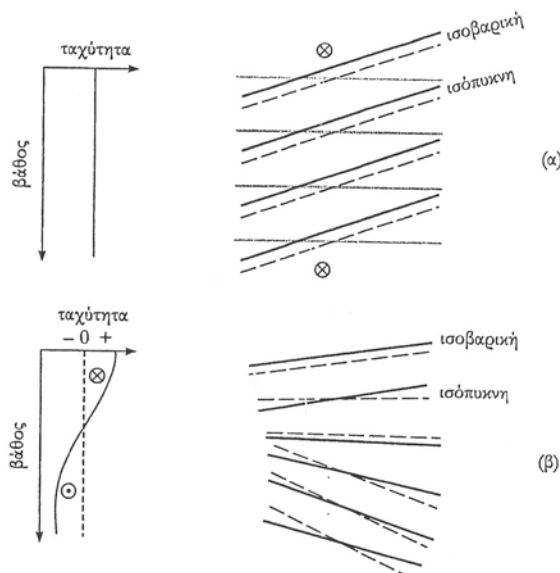
που είναι ακριβώς ένα μέτρο της επιρροής της ελεύθερης επιφάνειας. Αν ο F είναι σημαντικός, τότε οι ανυψώσεις στην ελεύθερη επιφάνεια θα είναι σημαντικές σε σχέση με το βάθος, γενικά δε επιφανειακές ανυψώσεις σημαίνουν δημιουργία επιφανειακών κυμάτων. Είναι γνωστό, από τους αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια, ότι τα επιφανειακά κύματα μεγάλου μήκους κινούνται με ταχύτητα $C_w = \sqrt{g \cdot H}$. Έτσι ο αριθμός Froude είναι, $F = V / C_w$. Αν η μάζα του ρευστού κινηθεί με ταχύτητα μικρότερη της C_w ($F < 1$), τότε στην ελεύθερη επιφάνεια δημιουργείται κυματισμός με ύψος πίεσης που είναι μικρότερο του $p_m \cdot g \cdot H$ και έτσι, η ελεύθερη επιφάνεια δεν διαταράσσεται σημαντικά και παραμένει περίπου ακίνητη και οριζόντια. Αν όμως είναι $F > 1$, τότε το δημιουργούμενο επιφανειακό κύμα είναι ισχυρό, παρατηρούνται δε σημαντικές επιφανειακές μετατοπίσεις.

3.3 ΒΑΡΟΤΡΟΠΕΣ ΚΑΙ ΒΑΡΟΚΛΙΝΕΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Οι ισοβαρικές επιφάνειες, δηλαδή οι επιφάνειες ίσης πίεσης, είναι παράλληλες όχι μόνο με την επιφάνεια της λίμνης αλλά επίσης και με τις επιφάνειες σταθερής πυκνότητας ή ισόπυκνες επιφάνειες. Οι συνθήκες αυτές χαρακτηρίζονται ως βαροτροπικές. Στις βαροτροπικές συνθήκες η μεταβολή της πίεσης σε μια οριζόντια επιφάνεια καθορίζεται μόνο από τη κλίση της επιφάνειας της λίμνης, συνεπώς οι ισοβαρικές επιφάνειες είναι παράλληλες με την επιφάνεια της λίμνης (Σχήμα 11. (α)). Όταν υπάρχουν εγκάρσιες μεταβολές της πυκνότητας, οι ισοβαρικές επιφάνειες δεν είναι παράλληλες με την επιφάνεια της λίμνης. Στην περίπτωση αυτή, οι ισοβαρικές επιφάνειες τέμνουν τις ισόπυκνες, γιατί οι πρώτες κλίνουν σε αντίθετη κατεύθυνση με τις δεύτερες και οι συνθήκες αυτές χαρακτηρίζονται ως βαροκλιτικές (σχήμα 11. (β)).

Βαρότροπες συνθήκες χαρακτηρίζουν το καλά αναμειγμένο επιφανειακό στρώμα της λίμνης, καθώς και την υδάτινη στήλη κάτω από το μόνιμο θερμοκλινές, όπου πυκνότητα και πίεση εξαρτώνται κυρίως από το βάθος, και επομένως ισόπυκνες και ισοβαρικές επιφάνειες είναι παράλληλες. Οι συνθήκες είναι έντονα βαροκλιτικές στη περιοχή του μόνιμου θερμοκλινούς, ιδιαίτερα σε περιοχές ισχυρών επιφανειακών ρευμάτων.

Όταν οι συνθήκες είναι βαροκλιτικές, οι ισόπυκνες επιφάνειες έχουν κλίσεις εκατονταπλάσιες των κλίσεων των ισοβαρικών και αυτές είναι μετρήσιμες. Συνεπώς, στην πράξη το ρεύμα υπολογίζεται από την κατανομή της πυκνότητας με το βάθος, δηλαδή από τη κλίση των ισόπυκνων επιφανειών. Ο υπολογισμός της πυκνότητας είναι σχετικά εύκολος, γιατί η πυκνότητα εξαρτάται από τη θερμοκρασία, δηλαδή παράμετρος εύκολα και με ακρίβεια μετρούμενη.



Σχήμα 11. Σχέση μεταξύ ισοβαρικών και ισόπυκνων επιφανειών σε (α) βαρότροπες και (β) βαροκλιτικές συνθήκες (Θεοδώρου, 2002)

3.4 ΕΙΣΡΟΕΣ – ΕΚΡΟΕΣ ΣΕ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ

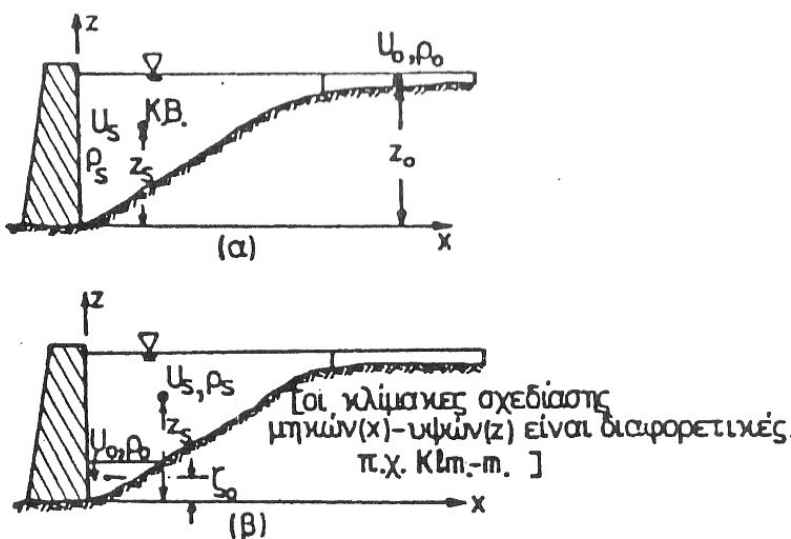
Στη παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν διάφορες εξωτερικές πηγές ενέργειας ως προς τους ταμιευτήρες και τις λίμνες, που μπορούν να τους επηρεάσουν είτε με διέλευση μέσω της ελεύθερης επιφάνειας είτε με εισρέοντα ρεύματα, ή ακόμα και με εκρέουσες παροχές.

3.4.1 Εισροή ρεύματος σε ταμιευτήρα

Όταν ένα ρεύμα νερού (ποταμός) εισέρχεται μέσα σε έναν ταμιευτήρα, συνήθως είναι ψυχρότερο από το νερό του ταμιευτήρα, διότι τι τελευταίο έχει θερμανθεί από τον ήλιο, ή μεταφέρει αιωρούμενα φερτά υλικά και έτσι έχει γενικά μεγαλύτερη πυκνότητα. Κατά αυτό τον τρόπο εκτός της εισόδου νέας μάζας στον ταμιευτήρα, το ρεύμα εισάγει κινητική και δυναμική ενέργεια. Η κινητική ενέργεια ανά μονάδα όγκου (παροχή ενέργειας) του ρεύματος, που περνά από κάθε διατομή (ταχύτητα μεταβολής ενέργειας, δηλαδή ισχύς) είναι

$$Q_E = \int_{E_\pi} (1/2) \cdot \rho_0 \cdot \bar{u}^3 \cdot dE_\pi = \int_{E_\pi} (1/2) \cdot \rho_0 \cdot \bar{u}^2 \cdot dQ \quad (3.4.1)$$

όπου E_π είναι η εγκάρσια διατομή του ρεύματος (σε κάποια ανάντη απόσταση, ώστε να μην επηρεάζεται από τον ταμιευτήρα), ρ_0 είναι η πυκνότητα του νερού στο ρεύμα, \bar{u} είναι η τοπική ταχύτητα αυτού και $dQ = \bar{u} \cdot dE_\pi$ στοιχειώδης παροχή όγκου.



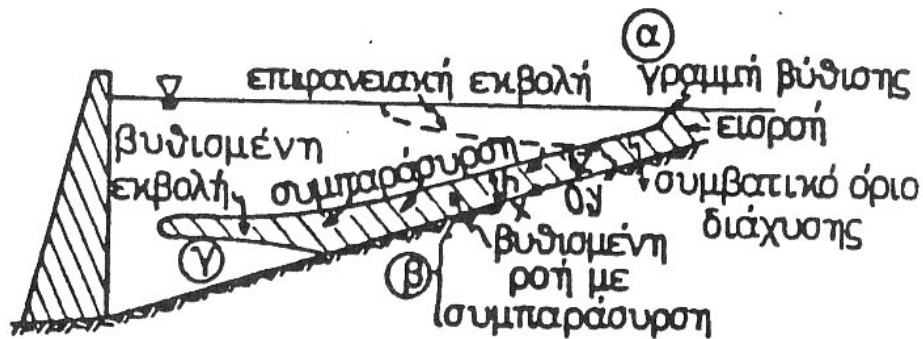
Σχήμα 12. Δομή της ροής του ταμιευτήρα (Ι. Δημητρίου)

Η είσοδος δυναμικής ενέργειας με το ρεύμα παρουσιάζεται, σε απλοποιημένη εικόνα στο σχήμα 12, όπου ο ποταμός υποτίθεται ότι έχει αρκετό μήκος, ώστε να περιέχει π.χ. όγκο νερού ίσο με μιας ημέρας εισροή στον ταμιευτήρα. Έστω επίσης ότι το νερό του ταμιευτήρα έχει σταθερή πυκνότητα p_s ($= p_m < p_0$). Η ενέργεια, που οφείλεται στις διαφορές πυκνότητας, η οποία απελευθερώνεται ώστε να διατεθεί για την ανάμιξη, μπορεί να εκτιμηθεί με υπολογισμό της μείωσης της μέσης δυναμικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της ροής του ποταμού στον πυθμένα. Στη ροή αυτή θεωρείται ότι δεν γίνεται ανάμιξη, αλλά απλή αντικατάσταση των υδάτινων μαζών του ταμιευτήρα, π.χ. μέσω υπερχειλιστή.

Ένας ποταμός που εισέρχεται σε ένα ταμιευτήρα έχει συνήθως διαφορετική πυκνότητα (λόγω διαλυμένων ουσιών ή αιωρούμενων υλικών), ή θερμοκρασία (και επομένως πάλι διαφορετική πυκνότητα) νερού από το επιφανειακό νερό του ταμιευτήρα. Έτσι κατά την είσοδό του, ο ποταμός ωθεί το ακίνητο νερό του ταμιευτήρα προς τα εμπρός, μέχρις ότου οι δυνάμεις άνωσης που οφείλονται στις διαφορές πυκνότητας αποκτήσουν τέτοιο μέγεθος ώστε να διακοπεί η κίνηση.

Αν το νερό που εισρέει είναι ελαφρύτερο από το νερό του ταμιευτήρα, τότε η ροή θα πραγματοποιηθεί στην επιφάνεια του τελευταίου (επιφανειακή φλέβα ή εκβολή). Αν, αντίθετα, το νερό του ποταμού είναι βαρύτερο ή ψυχρότερο (και επομένως βαρύτερο), τότε τούτο θα βυθιστεί και η ροή θα λάβει χώρα σε σημαντικό μέρος της, κατά μήκος του πυθμένα (βυθισμένη εκβολή ή ρεύμα πυκνότητας ή βαρύτητας ή υπορροή).

Για την τελευταία περίπτωση στο σχήμα 13 παρουσιάζονται, σχηματικά, οι τρεις επιμέρους περιοχές ανάμιξης. Στην πρώτη περιοχή, (α), ο ποταμός προχωρεί μέχρι τη θέση που ονομάζεται γραμμή βύθισης και κατόπιν βυθίζεται.



Σχήμα 13. Περιοχές ανάμιξης (Ι. Δημητρίου)

Η ανάμιξη σχετίζεται με τη θέση αυτής της γραμμής βύθισης. Στη δεύτερη περιοχή, (β), η τραχύτητα του πυθμένα οδηγεί (υπό κατάλληλες συνθήκες) και πάλι σε ανάμιξη που πραγματοποιείται με συμπάραιση, και γίνεται κατά μήκος της διεπιφάνειας επαφής του νερού του ταμιευτήρα και του νερού της εισροής. Η τρίτη περιοχή, (γ), σχηματίζεται όταν η πυκνότητα του εισρέοντος νερού εξισώνεται με την πυκνότητα του νερού του ταμιευτήρα, οπότε η εισροή εγκαταλείπει τον πυθμένα και κινείται οριζόντια (βυθισμένη εκβολή).

3.4.2 Εκροή από ταμιευτήρα

Ένα χαρακτηριστικό στο οποίο διαφέρουν οι ταμιευτήρες από τις λίμνες είναι ότι δια μέσου των ταμιευτήρων γίνεται συνήθως ροή μεγάλης κλίμακας και έτσι ο χρόνος παραμονής του νερού σε αυτούς είναι σχετικά μικρός, συνήθως μικρότερος του ενός ή των δύο ετών.

Είναι γνωστό ότι, αν στο πυθμένα μιας δεξαμενής ανοιχθεί μια μικρή και το ρευστό αρχίζει να εκρέει, τότε η μέση ταχύτητα εκροής είναι, $V_{\mu} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$, όπου H το στιγμιαίο βάθος (τύπος Torricelli). Η ταχύτητα αυτή προκύπτει από τη μονοδιάστατη εξίσωση ενέργειας και προϋποθέτει ότι η δυναμική ενέργεια μετατρέπεται πλήρως σε κινητική ενέργεια του ρευστού στη θέση της οπής (μη μόνιμη ροή από μικρή οπή δεξαμενής).

Η γενική αυτή εικόνα μπορεί να εφαρμοστεί κατ' αναλογία και σε έναν ευσταθώς στρωματοποιημένο ταμιευτήρα. Είναι δυνατόν να υποτεθεί ότι η κατακόρυφη καθοδική ταχύτητα της ελεύθερης επιφάνειας, w , είναι σταθερή σε κάθε οριζόντια επιφάνεια καθώς το νερό εξέρχεται από την οπή. Με τέτοια συνθήκη η πυκνότητα p_s του ταμιευτήρα είναι συνάρτηση όχι μόνο του z , αλλά και του χρόνου t . Από τη βασική σχέση

$$p_s = p_m + p_e \quad (3.4.2)$$

είναι, $\partial p_s / \partial z = \partial p_e / \partial z$

ενώ η διαφορική εξίσωση συνέχειας δίνει,

$$Dp_s / Dt = 0 = \partial p_s / \partial t + w \cdot (\partial p_s / \partial z) \quad \text{ή} \quad (\partial p_s / \partial t) = -w \cdot (\partial p_e / \partial z) \quad (3.4.3)$$

Αν είναι H το στιγμιαίο βάθος νερού στη δεξαμενή (από την οπή) με εμβαδόν ελεύθερης επιφάνειας $E_{\pi z}$ και z ένα τυχόν ύψος νερού με οριζόντια επιφάνεια $E_{\pi}(z)$ κατέρχεται κατά dz , είναι δε $p_e \cdot E_{\pi z} \cdot dH = p_s \cdot E_{\pi}(z) \cdot dz$, όπου p_e η πυκνότητα του νερού στην επιφάνεια. Η δυναμική ενέργεια του νερού στον ταμιευτήρα ως σύνολο είναι

$$P = \int_U g \cdot p_s \cdot z \cdot dU = \int_0^H g \cdot z \cdot E_{\pi}(z) \cdot p_s(z, t) \cdot dz \quad (3.4.4)$$

όπου U ο όγκος του νερού και $dU = E_{\pi}(z) \cdot dz$

3.4.3 Επιφανειακοί άνεμοι

Ο άνεμος εξασκεί διατμητικές δυνάμεις στην ελεύθερη επιφάνεια μιας λίμνης και τείνει να σύρει μια επιφανειακή στρώση αυτής (επιφανειακό ρεύμα). Η διατμητική τάση εξαρτάται από την ισχύ ανέμου, την ευστάθεια της στρώσης του αέρα που βρίσκεται σε επαφή με την υδάτινη επιφάνεια, τις γρήγορες μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου, το βαθμό ανάπτυξης επιφανειακών κυματισμών (επιφανειακή ταχύτητα) και την απόσβεση της ενέργειας αυτών στις ακτές της λίμνης. Η εφαπτομενική διατμητική τάση που είναι αποτέλεσμα της διάχυσης ποσότητας κίνησης εγκάρσια προς την ελεύθερη επιφάνεια του νερού γράφεται συνήθως με τη μορφή

$$\tau_s = C_D \cdot p_a \cdot V^2 \quad (3.4.5)$$

όπου C_D είναι αδιάστατος συντελεστής αντίστασης (διάτμησης) που περιέχει τις επιρροές από όλους τους παράγοντες, p_a είναι η πυκνότητα του αέρα και V η ταχύτητα του ανέμου σε κάποιο σταθερό ύψος άνω της ελεύθερης επιφάνειας, συνήθως στα 10m ($p_a = \rho_a / g$).

Η τιμή του συντελεστή C_D έχει μετρηθεί για διάφορες ατμοσφαιρικές συνθήκες και διάφορες περιπτώσεις λιμνών. Έτσι, π.χ. βρέθηκε ότι στην τιμή του C_D δεν παίζει ρόλο το μέγεθος της λίμνης, μικρές δε λίμνες έχουν το ίδιο C_D όπως και ο ωκεανός. Τυπικές τιμές του C_D είναι $C_D = 10^{-3}$ για ανέμους ταχύτητας ως και 5 m/sec, ενώ για μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας και μέχρι 15 m/sec το C_D αυξάνει γραμμικά. Για λίμνες βάθους μικρότερου των 2,5m η τιμή του C_D παραμένει σταθερή, $C_D = 10^{-3}$. Σημαντικός επίσης παράγοντας είναι η ευστάθεια της στρώσης του αέρα που βρίσκεται σε επαφή με την υδάτινη επιφάνεια. Θερμοί άνεμοι πάνω από ψυχρή μάζα νερού είναι ευσταθείς και δίνουν μικρότερο C_D από τις προηγούμενες τιμές ως και 40%, ενώ για ασταθείς ροές του αέρα το C_D μπορεί να αυξηθεί ως και 40%. Για πρακτικούς υπολογισμούς είναι δυνατόν να λαμβάνεται ως μέση τιμή, $C_D = 1,3 \cdot 10^{-3}$. Ο άνεμος κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια προκαλεί κίνηση του νερού με επιφανειακή ταχύτητα, έστω, \bar{u}_w . Έτσι, σε συνδυασμό με τις (προηγούμενες) διατμητικές τάσεις, η κίνηση του ανέμου παράγει έργο (ανά μονάδα χρόνου)

$$W_\varepsilon = \tau_s \cdot \bar{u}_w \quad (3.4.6)$$

που αποτελεί εισροή δια της ελεύθερης επιφάνειας.

Η ταχύτητα \bar{u}_w δεν έχει μετρηθεί πειραματικά, θα πρέπει όμως να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ταχύτητα τριβής,

$$\overline{u_w} - u_* = \sqrt{\tau_s / \rho_m} \quad (3.4.7)$$

Σε βαθείς αποδέκτες το επιφανειακό ρεύμα αντισταθμίζεται από αντίθετη ροή σε χαμηλότερα επίπεδα, σε αβαθείς όμως αποδέκτες παρεμβαίνει και η τριβή του πυθμένα, τ_b . Ο ισχυρός άνεμος προκαλεί κατά την έννοια της κίνησης του (x) τοπική κλίση στην υγρή επιφάνεια, το μέγεθος της οποίας είναι

$$dz/dx = (\tau_s + \tau_b) / \rho_m \cdot g \cdot H \quad (3.4.8)$$

όπου H το τοπικό βάθος του ταμιευτήρα. Η κλίση αυτή είναι μια απλή ερμηνεία της γέννησης των επιφανειακών κυμάτων λόγω ανέμου.

3.4.4 Θερμική ενέργεια δια της επιφάνειας

Από και προς (εκροή ή απώλεια – εισροή ή αύξηση) τον ταμιευτήρα μεταφέρεται δια της ελεύθερης επιφάνειας αυτού θερμότητα, δηλαδή ενέργεια, κατά τρεις τρόπους : με αγωγή σε σχέση με τον εν επαφή αέρα, με εξάτμιση, καθώς και με ακτινοβολία. Στα παρακάτω η εκροή θεωρείται θετική και η εισροή αρνητική.

α) Η θερμική μεταφορά (ενέργεια ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας) που οφείλεται στην αγωγή θερμότητας από ή προς τον εν επαφή αέρα, μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση,

$$H_s = C_s \cdot p_a \cdot C_{pa} \cdot V \cdot (\theta_0 - \theta) \quad (3.4.9)$$

όπου C_s αδιάστατος συντελεστής που εξαρτάται από τους ίδιους παράγοντες ως και ο συντελεστής αντίστασης τριβών ανέμου, C_{pa} ειδική θερμότητα του αέρα, θ_0 η θερμοκρασία του νερού στην επιφάνεια, θ η θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 10 m, V η ταχύτητα του ανέμου και p_a η πυκνότητα του αέρα.

β) Η θερμική εκροή που οφείλεται σε εξάτμιση (ενέργεια ανά μονάδα χρόνου – επιφάνειας) είναι,

$$H_L = C_L \cdot p_a \cdot L_w \cdot V \cdot (Y_0 - Y) \quad (3.4.10)$$

όπου C_L αδιάστατος συντελεστής ανάλογος με τον C_s , L_w η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, Y_0 η ειδική συγκέντρωση υγρασίας κορεσμού στη θερμοκρασία θ_0 και Y (< Y_0) η ειδική συγκέντρωση υγρασίας σε ύψος 10m (τα Y_0 , Y είναι αδιάστατα). Μέση τιμή για τα C_s, C_L , στα πρακτικά προβλήματα είναι, $C_s = C_L = 1,45 \cdot 10^{-3}$. Κατά την εξάτμιση το νερό του ταμιευτήρα ψύχεται.

γ) Ως προς την ακτινοβολία (ενέργεια ανά μονάδα χρόνου – επιφάνειας):

γ.1) Από τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας (εισρέουσα ακτινοβολία μακρών κυμάτων) αυτή δίνεται από τη σχέση,

$$H_1 = -5,18 \cdot 10^{-13} \cdot (1 + 0,17 \cdot C_N^2) \cdot (273 + \theta)^6 \quad (3.4.11)$$

όπου C_N το ποσοστό του υπεράνω ατμοσφαιρικού χώρου που είναι καλυμμένο με νέφη (για ανέφελο ουρανό $C_N=0$ και για πλήρως νεφελώδη ουρανό $C_N=1$)

γ.2) Η επανερχόμενη προς την ατμόσφαιρα ακτινοβολία από την επιφάνεια του νερού (εκροή) δίνεται από τη σχέση,

$$H_2 = 5,23 \cdot 10^{-8} \cdot (273 + \theta_0)^4 \quad (3.4.12)$$

γ.3) Η απ'ευθείας ηλιακή ακτινοβολία (βραχέων κυμάτων) H_{sw} , που προσπίπτει στην επιφάνεια της λίμνης ($H_{sw} < 0$, εισροή), μπορεί να εκτιμηθεί είτε από την έξω της ατμόσφαιρας ακτινοβολία και τις επικρατούσες εκεί συνθήκες, είτε να μετρηθεί η παροχή της απ'ευθείας με ειδικές συσκευές, τα ραδιόμετρα. Η απ'ευθείας ακτινοβολία διεισδύει σε σημαντικό βάθος μέσα στον ταμιευτήρα, ενώ οι προηγούμενες μεταφορές θερμότητας, H_s , H_i απορροφώνται από το πλησίον της επιφάνειας υδάτινο στρώμα (βάθους έως 1m). Αν είναι H_z η ηλιακή ακτινοβολία που παραμένει σε ύψος z μέσα στο νερό (διανομή ακτινοβολίας) και η είναι ο συντελεστής απόσβεσης, τότε είναι,

$$H_z / H_{sw} = e^{-\eta \cdot (H-z)} \quad (3.4.13)$$

όπου ο η εξαρτάται από τη βιολογική ανάπτυξη στο νερό της λίμνης, με τιμές που μεταβάλλονται από $0,2 \text{ m}^{-1}$ για διαυγείς λίμνες, ως $4,0 \text{ m}^{-1}$ για θολές – ευτροφισμένες λίμνες. Ο προσδιορισμός της ακριβούς τιμής του η δεν είναι τόσο απαραίτητος για την ανάμιξη σε λίμνες, διότι η ανάδευση που γίνεται από τους ανέμους επιφέρει συνήθως και ανάμιξη της ηλιακής θερμότητας σε βάθος μεγαλύτερο από το βάθος διείσδυσης. Βέβαια, όταν η λίμνη θερμαίνεται, η ακριβής τιμή του η παίζει σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια των ανώτερων στρώσεων και έτσι αυτή επηρεάζει έμμεσα το βάθος της θερμοκλίνης.

Το αλγεβρικό άθροισμα όλων των προηγούμενων μεταφορών θερμότητας δίνει την καθαρή εισροή ή εκροή θερμότητας δια μέσου της ελεύθερης επιφάνειας, είναι δε δυνατόν να υπολογιστεί η μεταβολή της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, π.χ. τις ώρες της ημέρας.

3.5 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΑΝΑΜΙΞΗ ΣΤΟ ΕΠΙΛΙΜΝΙΟ

Οι περισσότεροι από τους ταμιευτήρες έχουν μια περίοδο στρωματοποίησης, είναι δε πολύ συνηθισμένο φαινόμενο το νερό μιας λίμνης να είναι στρωματοποιημένο θερμοκρασιακά για το μεγαλύτερο μέρος του έτους. Με τέτοιες συνθήκες οι μέσες ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες είναι οριζόντιες και η δομή τους διαταράσσεται μόνο από επιφανειακούς ανέμους και εισροές ρευμάτων. Οι διαταραχές αυτές προκαλούν εσωτερικές ταλαντώσεις οι οποίες για ασθενείς ανέμους δεν προκαλούν ανάμιξη, είναι δε δυνατόν να ληφθούν χρονικά μέσες τιμές θερμοκρασιών οι οποίες να αντιστοιχούν σε ευσταθή κατακόρυφη δομή των θερμοκρασιών, ανεξάρτητα από ταλαντώσεις. Με τέτοιες συνθήκες η ανάμιξη περιορίζεται σε επιφανειακή μεταφορά λόγω κατακόρυφων διεισδυτικών κινήσεων στο επιλίμνιο. Σε ορισμένες άλλες περιπτώσεις πάλι, οι ασθενείς άνεμοι προκαλούν ανάμιξη λόγω ανάδευσης της επιλίμνιας στρώσης από το σχηματισμό κυμάτων. Εξάλλου ισχυροί άνεμοι αυξάνουν σημαντικά την ανάμιξη σε όλο τον ταμιευτήρα. Η αυξημένη επιφανειακή διατμητική τάση κινητοποιεί το επιλίμνιο και σχηματίζει στρώσεις διάτμησης στη θερμοκλίνη, που καταλήγουν σε παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Έτσι, οι ισχυροί άνεμοι οδηγούν σε σοβαρή ανάμιξη στο επιλίμνιο και τα προκαλούμενα εσωτερικά κύματα εντείνουν την κατακόρυφη ανάμιξη στο υπολίμνιο.

3.5.1 Διεισδυτική μετάθεση

Ένας ταμιευτήρας προστατευμένος από επιφανειακούς ανέμους χαρακτηρίζεται συνήθως από μια σταθερή θερμοκρασιακή δομή. Η λίμνη έχει ένα ευσταθώς στρωματοποιημένο υπολίμνιο, μια απότομη θερμοκλίνη και ένα επιλίμνιο το οποίο υφίσταται εικοσιτετράωρες διακυμάνσεις θερμοκρασίας λόγω της ημερήσιας θέρμανσης και της νυκτερινής ψύξης. Το βάθος διείσδυσης της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από τη διαύγεια του νερού, αλλά αν δεν υπάρχει άνεμος, τότε η θερμοκρασία ανέρχεται και παρουσιάζεται στρωματοποίηση στις επιφανειακές στρώσεις κατά τη διάρκεια της ηλιακής ακτινοβολίας. Με την έλευση της νύκτας αρχίζουν να κυριαρχούν οι θερμικές απώλειες λόγω ακτινοβολίας στη θερμική ανταλλαγή που γίνεται στην επιφάνεια, έτσι δε η επιφανειακή στρώση ψύχεται, δηλαδή γίνεται βαρύτερη και ως συνέπεια κάθε κατακόρυφη ελεύθερη μεταθετική κίνηση που δημιουργείται συμβάλλει στην ανάμιξη στο επιλίμνιο. Πολλές φορές αυτές οι κατακόρυφες μεταθετικές κινήσεις φθάνουν μέχρι και τη θερμοκλίνη όπου αρχίζουν να τη "διαβρώνουν", δηλαδή να μεταβάλλουν, τη σταθερή δομή της.

Για τη μελέτη της ανάμιξης εξετάζονται δύο περιπτώσεις:

α) έστω ότι αρχικά η λίμνη, λαμβανόμενη ως σύνολο, έχει σταθερή πυκνότητα ρ_s (ανεξάρτητη του z), έστω δε ότι η επιφάνεια αυτής ψύχεται (θερμική απώλεια) με ταχύτητα H (σε μονάδες ισχύος ανά m^2). Έτσι σχηματίζεται μια λεπτή ψυχρή επιφανειακή στρώση, η οποία στη συνέχεια γίνεται ασταθής (από άποψη άνωσης) και κατέρχεται διεισδύουσα στο σώμα της λίμνης, ενώ η πυκνότητα της λίμνης μεταβάλλεται συνολικά, δηλαδή με τον ίδιο ρυθμό σε κάθε σημείο της. Η καθοδική διαδικασία του επιφανειακού νερού ονομάζεται διεισδυτική μετάθεση. Η επιφανειακή πτώση της θερμοκρασίας που είναι συνέπεια της ψύξης, αυτορυθμίζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε τα δημιουργούμενα καθοδικά ρεύματα να είναι σε θέση να μεταφέρουν το ψύχος με την

ταχύτητα H από την επιφάνεια στα βαθύτερα νερά. Συνήθως αυτή η διαφορά θερμοκρασίας είναι μικρότερη των $0,2$ °C.

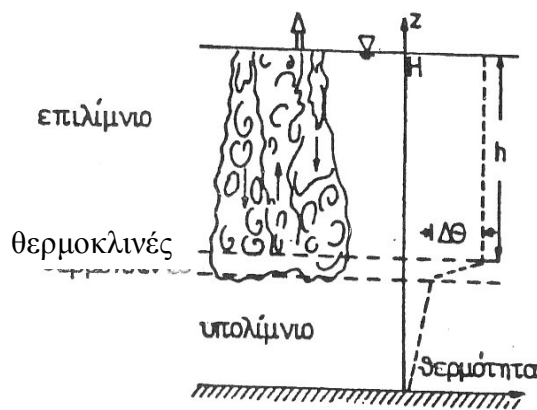
Ο ημερήσιος κύκλος σε ένα ταμιευτήρα μπορεί να θεωρείται συμβατικά ως μια μηχανή θερμότητας, θα ήταν δυνατό να οριστεί ως “ωφέλιμο έργο”, ή “ωφέλιμο αποτέλεσμα” η μεταφορά οξυγόνου ή άλλων στοιχείων (τα οποία αλλιώς θα παρέμεναν ανεκμετάλλευτα στις άνω στρώσεις) σε μεγαλύτερα βάθη, όπου τα χρειάζονται οι υδρόβιοι οργανισμοί. Ο ήλιος εισάγει θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ ο νυκτερινός ουρανός χρησιμοποιείται ως δεξαμενή ψύξης. Το περίεργο είναι ότι οι μηχανικές δράσεις παράγονται κυρίως στη διάρκεια της ψύξης παρά τη φάση της θέρμανσης. Σε μεγάλο βαθμό, το ωφέλιμο έργο δεν εξάγεται προς κατανάλωση εκτός της μηχανής, αλλά καταναλίσκεται εσωτερικά.

Η διαδικασία μετατροπής (θερμική διαστολή ή συστολή, ακολουθούμενη από μηχανική αποδιοργάνωση της ασταθούς από άποψη βαρύτητας δομής) είναι εξωτερική και όχι πολύ αποτελεσματική.

Η ταχύτητα της καθόδου, την οποία συνεπάγεται μια τέτοια διαδικασία ψύξης, μπορεί να υπολογιστεί κατ' εκτίμηση με χρησιμοποίηση μιας πολύ απλής εικόνας. Αν θεωρηθεί μια μικρή ποσότητα ψυχρού επιφανειακού νερού που κατέρχεται υπό την επιρροή της βαρύτητας, τότε, με αγνόηση της συνεκτικότητας και της διάχυσης, η κλίμακα της καθοδικής ταχύτητας \bar{w}_f σε βάθος h , είναι της τάξης του

$$(g \cdot h)^{1/2} = \{(\Delta_p / p_s) \cdot g \cdot h\}^{1/2} \quad \text{ή} \quad \bar{w}_f = (\Delta_p / p_s) \cdot g \cdot h \quad (3.5.1)$$

β) Στη μέχρι τώρα ανάλυση οι υπολογισμοί αναφέρονταν σε σταθερή αρχική πυκνότητα νερού στον ταμιευτήρα, p_s . Ανάλογη ανάλυση μπορεί να εφαρμοστεί σε μια πιο ρεαλιστική περίπτωση αντιμετώπισης μιας λίμνης, με υπολίμνιο, απότομη θερμοκλίνη με αρχική διαφορά θερμοκρασίας $\Delta\theta$, και αρχικά καλά αναμιγμένο επιλίμνιο $p_s = p_m$ βάθους h (Σχήμα 14.). Όταν αρχίσει η ψύξη, αρχίζει και η καθοδική ροή μέσα στο επιλίμνιο, ροή που έχει τυρβώδη χαρακτηριστικά (ελεύθερη μεταθετική ροή).



Σχήμα 14. Κατακόρυφη δομή του θερμοκλινούς σε λίμνες και ταμιευτήρες (Ι. Δημητρίου)

Το εμπρόσθιο μέτωπο της διεισδύουσας ροής μπορεί να οριστεί συμβατικά ως το εμπρόσθιο μέρος πλήθους απλών θερμικών φλεβών (plumes) οι οποίες γεννώνται στην επιφάνεια. Μόλις οι απλές φλέβες φθάσουν στη θερμοκλίνη συναντούν αντίσταση λόγω της εκεί ευσταθούς στρωματοποίησης. Κάθε παραπέρα κάθοδος μπορεί να γίνει μόνον αν υπάρχει ανάμιξη με συμπαράσυρση, δηλαδή με είσοδο ψυχρότερου νερού στις κατερχόμενες μάζες του επιλίμνιου, πράγμα που, με μια απλοποιημένη προσεγγιστική εικόνα, είναι ισοδύναμο με ανύψωση του συμπαρασυρόμενου ρευστού κατά απόσταση $h/2$. Αν η συμπαράσυρση γίνεται με ταχύτητα (είσοδου) dh/dt , τότε η ταχύτητα του απαιτούμενου έργου ανά μονάδα επιφάνειας, είναι:

$$(\text{βάρους συμπαρασυρόμενου ρευστού}) * (\text{διαδρομή}) * (dh/dt) = (-a \cdot g \cdot \Delta\theta \cdot \rho_m) \cdot (h/2) \cdot (dh/dt)$$

σε μονάδες ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας. Έτσι, είναι δυνατόν πλέον να χρησιμοποιηθεί ένα μέρος της τυρβώδους κινητικής ενέργειας για να αυξήσει το βάθος της στρώσης του επιλίμνιου. Αν η θερμοκλίνη φθάσει μέχρι τον πυθμένα, τότε η ενέργεια θα αποσβεσθεί (εσωτερικά) πλήρως. Η ποσότητα dh/dt παριστά επίσης την ταχύτητα καθόδου του κάτω άκρου του επιλίμνιου h .

3.6 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΑΝΑΜΙΞΗ ΣΤΟ ΥΠΟΛΙΜΝΙΟ

Σε πολλές περιπτώσεις λιμνών και το υπολίμνιο έχει επίσης μια, έστω ασθενή, κλίση πυκνοτήτων, έτσι δε θα πρέπει να αναμένεται ότι κι εκεί θα υπάρχει μια ελαφριά ανάμιξη, αν και αυτή είναι πολύ μικρή, ίσως και μοριακής κλίμακας.

Από τις διάφορες μελέτες στο υπολίμνιο προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

α) Ο συντελεστής κατακόρυφης διάχυσης μεταβάλλεται μεταξύ μοριακών τιμών ως και 10^{-4} m/sec.

β) Η κατακόρυφη διάχυση θερμότητας και άλλων δεικτών είναι περίπου η ίδια.

γ) Η κατακόρυφη διάχυση είναι ισχυρότερη όταν υπάρχουν άνεμοι και εισροές ρευμάτων ή εκροές.

δ) Ο συντελεστής διάχυσης είναι συνάρτηση του N .

$$E_z = a \cdot (N^{-2})^\eta$$

όπου $0,2 < \eta < 2,0$ και a συντελεστής αναλογίας.

Αν θεωρηθεί ότι σε έναν ταμιευτήρα δρα επιφανειακά ο άνεμος, τότε το συνολικό έργο εισροής αυτού είναι, $W_\varepsilon \cdot E_{\pi\varepsilon}$, όπου $W_\varepsilon = \tau_s \cdot \bar{u}_w$ και $E_{\pi\varepsilon}$ η άνω επιφάνεια του νερού

στον ταμιευτήρα. Αν επίσης υπάρχει εισροή που απελευθερώνει δυναμική ενέργεια $p = p_i - p_f$, ή και εκροή που μεταβάλλει τη δυναμική ενέργεια, με ταχύτητα dp/dt , στον ταμιευτήρα (όγκου U), τότε μπορεί να αποδειχθεί με τη θεωρία της τυρβώδους ροής, ότι είναι $n=1$ και

$$E_z = \left(\frac{W_\varepsilon \cdot E_{\pi\varepsilon} + dp_{o\lambda} / dt}{U} \right) \cdot N^{-2} \quad (3.6.1)$$

όπου $p_{o\lambda}$ το άθροισμα των δυναμικών ενεργειών εισροών-εκροών. Ο συντελεστής αναλογίας αυτής της σχέσης, που είναι καθαρός αριθμός, πρέπει να βρεθεί πειραματικά.

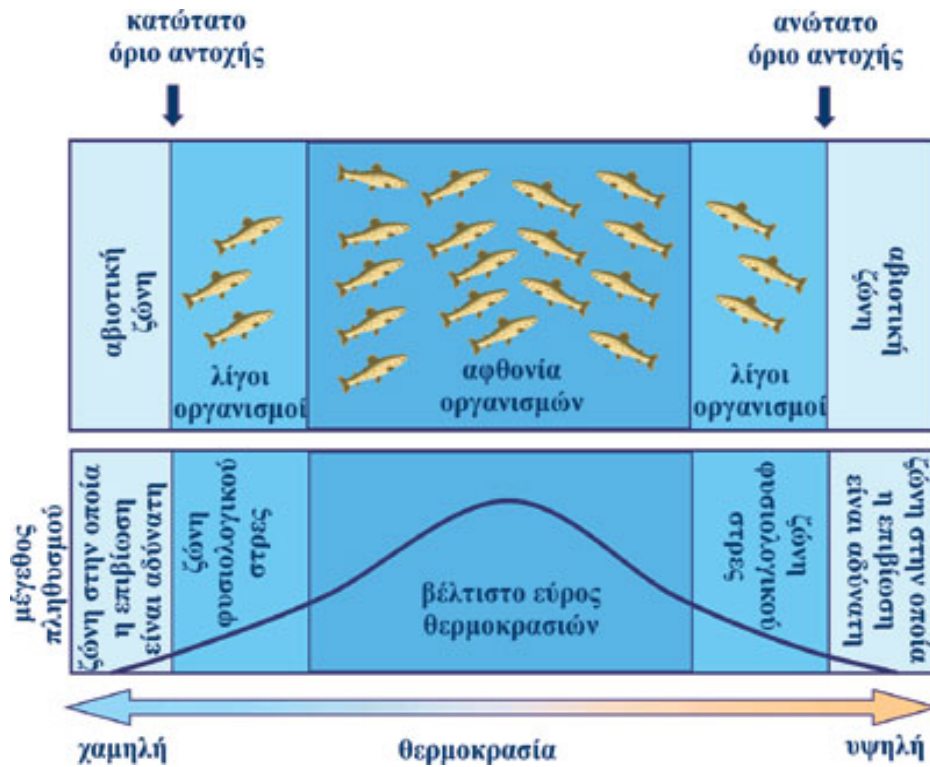
3.7 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΑΝΑΜΙΞΗ ΣΕ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ

Κάθε ταμιευτήρας έχει στη μέση περίπου της δομής του τη θερμοκλίνη. Υπεράνω αυτής, στο επιλίμνιο το οποίο είναι καλώς αναμιγμένη στρώση, δρουν οι τάσεις λόγω ανέμου και δημιουργούνται οριζόντιες κινήσεις. Κάτω από τη θερμοκλίνη λαμβάνει συνήθως χώρα ροή ρευμάτων πυκνότητας μεγάλης οριζόντιας έκτασης. Για τις διαδικασίες οριζόντιας ανάμιξης τόσο στο επιλίμνιο όσο και στο υπολίμνιο δεν υπάρχει ουσιαστικά γενικευμένη μελέτη των φαινομένων, παρά μόνο μεμονωμένες μετρήσεις.

3.8 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Η θερμοκρασία είναι καθοριστικός παράγοντας στη λειτουργία του οικοσυστήματος της λίμνης επειδή επηρεάζει τη διαλυτότητα του οξυγόνου και άλλων συστατικών, το μεταβολισμό των υδρόβιων οργανισμών αλλά και τη διαδικασία διάσπασης των οργανικών ουσιών που υπάρχουν. Οι τιμές των βέλτιστων θερμοκρασιών για τους υδρόβιους φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς ποικίλουν (Εικόνα 9.)

Οι υδρόβιοι πληθυσμοί μπορούν να διακριθούν γενικά σε θερμοανθεκτικούς με αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και σε ψυχροανθεκτικούς με αντοχή στις χαμηλές θερμοκρασίες. Όσον αφορά το εύρος των θερμοκρασιών μέσα στο οποίο είναι δυνατή η επιβίωση των υδρόβιων πληθυσμών, οι διάφοροι οργανισμοί μπορούν να διακριθούν σε ευρύθερμους, με ανθεκτικότητα σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και σε στενόθερμους, με ανθεκτικότητα σε μικρές μόνο μεταβολές της θερμοκρασίας. Όσο η θερμοκρασία του νερού πλησιάζει τη βέλτιστη τιμή για κάποιους υδρόβιους οργανισμούς, τόσο οι οργανισμοί αυτοί γίνονται περισσότερο δραστήριοι, καταναλώνουν περισσότερη τροφή και χρησιμοποιούν περισσότερο οξυγόνο.



Εικόνα 9. Η θερμοκρασία επηρεάζει τους υδρόβιους πληθυσμούς (www.wikipedia.gr)

Συνεπώς, η θερμοκρασία του νερού όχι μόνο διαμορφώνει τη σύνθεση των βιοκοινοτήτων, αλλά επιδρά και στη συμπεριφορά τους και στο μέγεθος κατ' επέκταση των πληθυσμών τους.

Ανάλογα με τη γεωγραφική τους θέση, τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής και το βάθος τους οι λίμνες διακρίνονται σε:

Τροπικές: θερμοκρασία των επιφανειακών νερών μεγαλύτερη από 4 °C

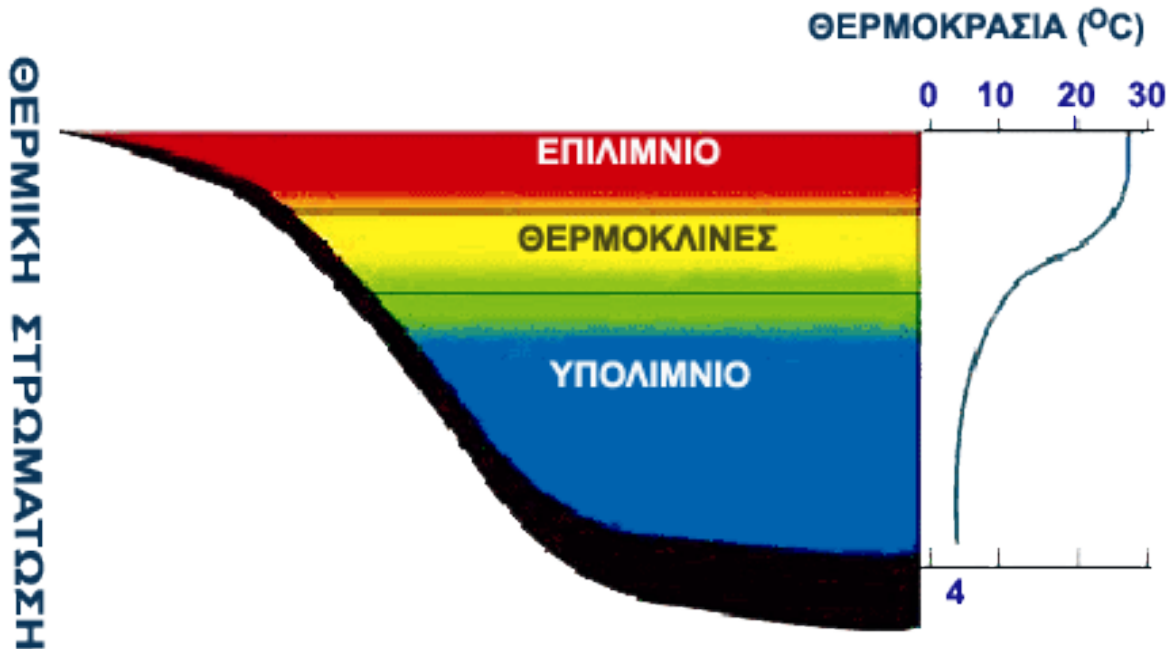
Εύκρατες: θερμοκρασία των επιφανειακών νερών και κάτω από 4 °C

Πολικές: θερμοκρασία των επιφανειακών νερών μικρότερη από 4 °C όλη τη διάρκεια του έτους (στον πυθμένα όμως η θερμοκρασία σταθεροποιείται στους 4 °C)

Στα εύκρατα γεωγραφικά πλάτη και σε βαθιές λίμνες, καθώς ο ήλιος θερμαίνει τη λίμνη, δημιουργεί ένα θερμό και λιγότερο πυκνό επιφανειακό στρώμα με σχετικά ομοιόμορφη θερμοκρασία και δική του κυκλοφορία, το επιλίμνιο. Πρόκειται για το επιφανειακό νερό (και αυτό που βρίσκεται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια) που δέχεται άμεσα τις επιδράσεις από τις μεταβολές της θερμοκρασίας του αέρα (εποχιακές διακυμάνσεις της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας) και τον άνεμο και περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου. Το νερό στο επιλίμνιο είναι συνήθως θερμότερο από αυτό των υποκείμενων στρωμάτων. Κατά τη χειμερινή ωστόσο περίοδο και όταν η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας πλησιάζει το μηδέν, το επιλίμνιο μπορεί να είναι

ψυχρότερο από τα υποκείμενα στρώματα, των οποίων η θερμοκρασία παραμένει σταθερή (4 °C) (Εικόνα 10.).

Το επιλίμνιο βρίσκεται πάνω σε ένα πυκνότερο, ψυχρότερο και "αδιατάραχτο" στρώμα, το υπολίμνιο. Πρόκειται για το κατώτερο, βαρύτερο και ψυχρότερο στο μεγαλύτερο διάστημα του έτους στρώμα της λίμνης που χαρακτηρίζεται συνήθως από χαμηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου. Λόγω ανώμαλης διαστολής και μεγάλης θερμοχωρητικότητας του νερού, κατά τους ψυχρούς μήνες του έτους (θερμοκρασία ατμόσφαιρας κοντά ή υπό του μηδενός), η θερμοκρασία στο υπολίμνιο παραμένει σταθερή (4 °C) και υψηλότερη από αυτή του επιλίμνιου.



Εικόνα 10. Θερμική στρωμάτωση βαθιάς λίμνης στη διάρκεια του καλοκαιριού (www.wikipedia.gr)

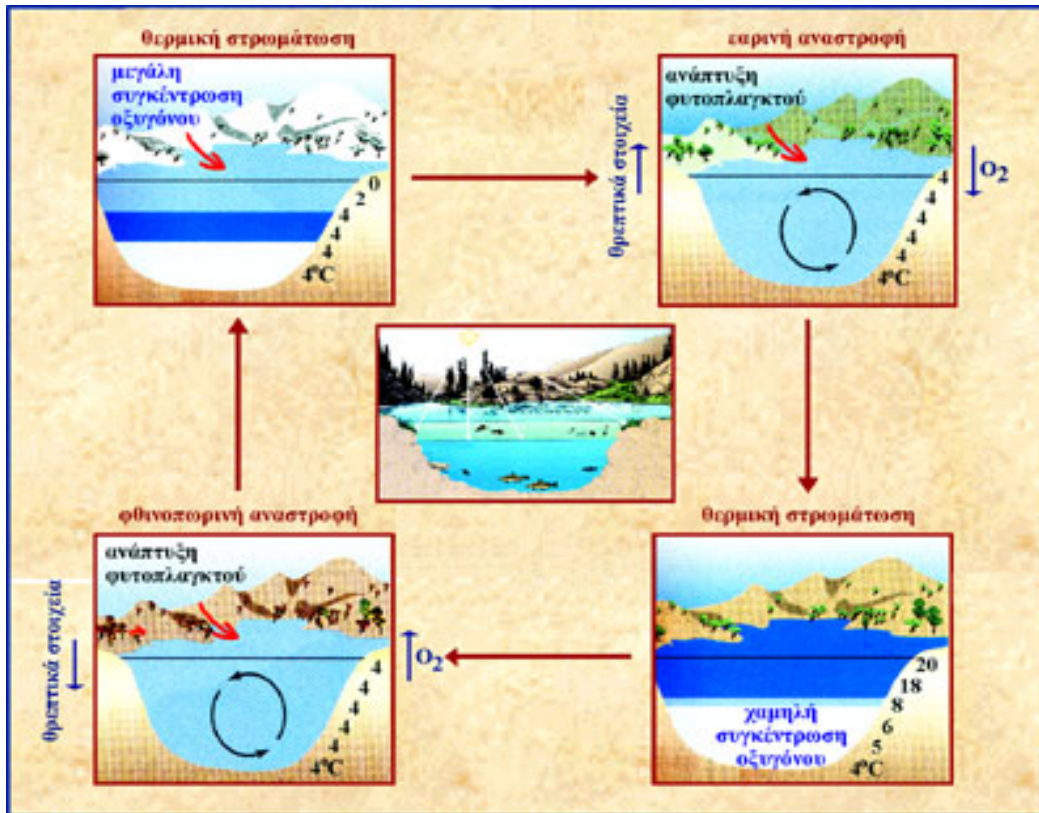
Στην ανώτερη περιοχή του υπολίμνιου, εκεί όπου διαχωρίζεται το επιλίμνιο από το υπολίμνιο και μέσα σε μια υδάτινη περιοχή ελάττωσης της θερμοκρασίας με το βάθος (μεταλίμνιο), υπάρχει ένα στρώμα έντονης ασυνέχειας, το θερμοκλινές. Πρόκειται για το λεπτό στρώμα νερού που χαρακτηρίζεται από σημαντική ελάττωση της θερμοκρασίας όσο αυξάνεται το βάθος. Αν και ο όρος θερμοκλινές συχνά χρησιμοποιείται ως συνώνυμο του μεταλιμνίου, στην πραγματικότητα αντιστοιχεί στην επιφάνεια με το μεγαλύτερο ρυθμό μείωσης της θερμοκρασίας σε σχέση με το βάθος. Συνεπώς το θερμοκλινές είναι το σημείο της μεγαλύτερης μείωσης της θερμοκρασίας μέσα στο μεταλίμνιο και εκφράζεται μαθηματικά με τον παρακάτω τύπο:

$$\theta'' = d^2 \theta / d^2 z = 0 \quad (3.8.1)$$

όπου θ = θερμοκρασία και z = βάθος

Η αλλαγή της πυκνότητας του νερού στο μεταλλίμιο λειτουργεί σαν ένας φυσικός φραγμός που εμποδίζει την ανάμιξη του νερού των ανώτερων και των βαθύτερων στρωμάτων για αρκετούς μήνες κι εμποδίζει τη μεταφορά του διαλυμένου οξυγόνου και των θρεπτικών συστατικών από το επιλίμνιο στο υπολίμνιο.

Κατά τη διάρκεια του χειμώνα η θερμική στρωμάτωση δεν είναι έντονη, γιατί η ελάττωση της θερμοκρασίας στο επιλίμνιο επηρεάζει ελάχιστα το υπολίμνιο και γενικά θεωρείται ότι η θερμοκρασία παραμένει σχεδόν σταθερή (Εικόνα 11.).



Εικόνα 11. Θερμική στρωμάτωση και αναστροφή (www.wikipedia.gr)

Το καλοκαίρι όμως τα νερά θερμαίνονται και σαν ελαφρύτερα παραμένουν στην επιφάνεια, οπότε δεν γίνεται ανάμιξη των επιφανειακών με τα βαθύτερα στρώματα, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται σαφώς το φαινόμενο της θερμικής στρωμάτωσης.

Το φθινόπωρο, λόγω της μειωμένης ηλιακής ακτινοβολίας και της αυξημένης νυχτερινής απώλειας θερμότητας, η θερμοκρασία του επιλίμνιου ελαττώνεται πλησιάζοντας τη θερμοκρασία του υπολίμνιου οπότε είναι δυνατή η πλήρης ανάμιξη των νερών της λίμνης με τη βοήθεια του ανέμου. Συμβαίνει δηλαδή η φθινοπωρινή αναστροφή.

Την άνοιξη, εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας, τα παγωμένα επιφανειακά νερά θερμαίνονται και εξισώνονται θερμοκρασιακά με τα νερά του υπολίμνιου, οπότε είναι πάλι δυνατή η ανάμιξη των νερών. Συμβαίνει, δηλαδή, η εαρινή αναστροφή.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στα υδάτινα οικοσυστήματα ένα μεγάλο μέρος της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε θερμότητα αυξάνοντας τη θερμοκρασία του νερού. Ωστόσο συνεισφορά θερμότητας στο νερό, σε μικρότερα όμως

μεγέθη, μπορεί να γίνει και από τον αέρα, το ίζημα και τις γειτονικές χερσαίες εκτάσεις. Το βάθος μέχρι το οποίο γίνεται η ανάμιξη του νερού εξαρτάται εν μέρει από την έκθεση της λίμνης στον άνεμο (πιο συγκεκριμένα από την απόσταση από την οποία φυσάει ο άνεμος στη λίμνη χωρίς σημαντική αλλαγή στη διεύθυνσή του), αλλά κυρίως από το μέγεθος της λίμνης.

Η ανάμιξη των νερών έχει σαν συνέπεια την κυκλοφορία των θρεπτικών στοιχείων που υπάρχουν στον πυθμένα της λίμνης (άλατα φωσφόρου, αζώτου και οργανικές ενώσεις) σε όλη τη μάζα του νερού, ενισχύοντας έτσι τον ευτροφισμό της λίμνης, αλλάζοντας το χρώμα της και επηρεάζοντας την οξυγόνωση των νερών του πυθμένα.

Επειδή όλες οι λίμνες αναμειγνύονται ως ένα βαθμό, ένα χρήσιμο εργαλείο για την κατάταξη ή κατηγοριοποίησή τους βασίζεται στο πόσο πλήρης είναι η ανάμιξη των νερών σε κατακόρυφο άξονα κατά τη διάρκεια των χαμηλότερων θερμοκρασιών και της μεγαλύτερης θολερότητας. Έτσι:

1) οι λίμνες που παγώνουν κατά τη διάρκεια του χειμώνα ονομάζονται διμικτικές, αφού αναμειγνύονται πλήρως δυο φορές το χρόνο - το φθινόπωρο πριν παγώσει η επιφάνεια και την άνοιξη αφού λιώσουν οι πάγοι. Οι περισσότερες εύκρατες λίμνες είναι διμικτικές (Εικόνα 12.)



Εικόνα 12. Φάσεις της θερμικής στρωμάτωσης του νερού μιας διμικτικής λίμνης, από αρχές καλοκαιριού μέχρι αρχές φθινοπώρου και οι αναστροφές, φθινοπωρινή και εαρινή. (www.wikipedia.gr)

2) οι λίμνες που ποτέ δεν καλύπτονται πλήρως από πάγο και κατά τη διάρκεια του χειμώνα και της άνοιξης αναμειγνύονται συνεχώς από τον αέρα, ονομάζονται μονομικτικές.

3) εάν η λίμνη είναι ρηχή και εκτεθειμένη σε ανέμους, η θερμική στρωμάτωση μπορεί να διαρκεί μία ή δυο εβδομάδες, στη συνέχεια να αναμειγνύεται πλήρως εξαιτίας καταιγίδων και το φαινόμενο αυτό να επαναλαμβάνεται τακτικά. Αυτός ο τύπος των λιμνών είναι

μάλλον κοινός και ονομάζονται πολυμικτικές. Η λίμνη της Καστοριάς, λόγω της παρουσίας απότομων διαβαθμίσεων στη στήλη του νερού, χωρίς όμως το σχηματισμό καθορισμένου υπολίμιου-πιθανότατα λόγω του μικρού βάθους-μπορεί να χαρακτηριστεί ως πολυμικτική.

4) αν κατά τη διάρκεια του κύκλου της ετήσιας ανάμιξης, η λίμνη αναμιγνύεται από την επιφάνεια ως τον πυθμένα, η λίμνη ονομάζεται ολομικτική, ενώ όταν είναι τόσο βαθιά ώστε δεν υπάρχει αρκετή ενέργεια για να διαταραχθεί η στρωμάτωση και να επέλθει πλήρης ανάμιξη, η λίμνη ονομάζεται μερομικτική. (Μερικές από τις βαθύτερες λίμνες είναι μερομικτικές, όπως η Τανγκανίκα στην Αφρική με μόνιμο θερμοκλινές στα 400 περίπου μέτρα). Οι λίμνες με μόνιμη κάλυψη πάγου στις πολικές περιοχές ονομάζονται αμικτικές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Η ορθολογική διαχείριση των περιβαλλοντικών συστημάτων απαιτεί πρόβλεψη πιθανών μελλοντικών προβληματικών καταστάσεων, πράγμα που είναι δύσκολο, αν όχι αδύνατο. Οι πολύπλοκες επιδράσεις μεταξύ φυσικοχημικών και βιολογικών παραμέτρων προσδίδουν στην πρόγνωση μεγάλο βαθμό δυσκολίας. Γι' αυτούς λοιπόν του λόγους δημιουργήθηκαν μοντέλα που βοηθούν στην πρόβλεψη μελλοντικών φαινομένων. Οι συνήθεις τύποι μοντέλων προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται στην ωκεανογραφία είναι:

-Αναλυτικά μοντέλα: Προσομοιώνουν κυρίως στη μία διάσταση χρησιμοποιώντας ορισμένες εξισώσεις με απλές λύσεις.

-Φυσικά μοντέλα: Έχουν υψηλό κόστος κατασκευής γιατί κατασκευάζονται στο εργαστήριο αλλά μερικές φορές τα αποτελέσματά τους είναι πολύ καλά. Το μειονέκτημά τους είναι ότι δημιουργούνται σε κλίμακα μικρότερη της φυσικής, με ότι αυτό συνεπάγεται.

-Αριθμητικά μοντέλα: Το σύστημα περιγράφεται με πιο πολύπλοκες εξισώσεις οι οποίες όμως δεν έχουν απλές λύσεις. Ένας κίνδυνος που εμπεριέχεται στη χρήση αριθμητικών μοντέλων είναι η εισαγωγή ψευδών λύσεων.

-Στοχαστικά μοντέλα: Στα μοντέλα αυτά περιλαμβάνονται όσα χρησιμοποιούν στατιστικές μεθόδους επεξεργασίας των αποτελεσμάτων τους.

Στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιείται αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης. Πρόκειται για μοντέλο στο οποίο ένα φαινόμενο μπορεί να περιγραφεί με εξισώσεις των οποίων όμως οι λύσεις δεν είναι απλές. Για την επίλυση των εξισώσεων εφαρμόζονται αριθμητικές προσεγγίσεις με τη μέθοδο α) των πεπερασμένων διαφορών και β) των πεπερασμένων στοιχείων (Ζαχαρίας, 2002).

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών απαιτεί την κατασκευή σταθερού και συνήθως ορθογώνιου κανάβου που πρέπει να καλύπτει όλο το πεδίο ροής. (C. S. Yu et al, 1989, G. Quiros et al, 1992, S. Cais et al, 2001, A.J. Elliott et al, 2003, G. Lacroix et al, 2004, K. Edelvang et al, 2005, D.A. Brooks, 2005, B. Zanuttigh, 2006). Οι υπό μελέτη εξισώσεις υπολογίζονται στις κορυφές του κανάβου και αφού πρώτα γίνει μετατροπή των διαφορικών εξισώσεων σε μερικές παραγώγους, οι οποίες περιγράφουν τη ροή σε αλγεβρικές σχέσεις πεπερασμένων διαφορών. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων όπως και η προηγούμενη μέθοδος ανήκει στην κατηγορία των λεγόμενων μεθόδων πεδίου. Απαιτεί τη δημιουργία κανάβου, όχι υποχρεωτικά ορθογώνιου, ώστε να γίνει ο διαχωρισμός του υπολογιστικού πεδίου σε ένα σύνολο διακεκριμένων υποχώρων, τα πεπερασμένα στοιχεία (R.D. Pingree et al, 1979, W.G. Gray, 1989, O. Filippova et al, 1998).

Σύμφωνα με τον Oren (1984) η αριθμητική προσομοίωση είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που αφορά τη δημιουργία μοντέλων φυσικών συστημάτων, που προσομοιώνονται στον υπολογιστή. Αριθμητικό μοντέλο ή ομοίωμα είναι η ανάπτυξη εξισώσεων και περιορισμών, καθώς και ο υπολογιστικός κώδικας που δίνει τις αριθμητικές λύσεις τους.

Τα αριθμητικά μοντέλα

α) δίνουν τη δυνατότητα πολλαπλών πειραματισμών μεταβάλλοντας τα δεδομένα εισαγωγής και παρατηρώντας πως συμπεριφέρεται το σύστημα κάτω από διαφορετικές συνθήκες,

β) έχουν τη δυνατότητα να προσομοιώνουν σε σχετικά μικρό χρόνο (π.χ. μερικές δεκάδες ώρες) τα φαινόμενα που θα εξελίσσονταν σε πολύ μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες και

γ) το φυσικό σύστημα δεν επηρεάζεται από τις διάφορες δοκιμές

4.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Για τη δημιουργία ενός αριθμητικού μοντέλου θα πρέπει να μελετηθούν τα εξής στάδια (Ζαχαρίας, 1993).

4.2.1 Καθορισμός του προβλήματος και του σκοπού της προσομοίωσης

Η δημιουργία ενός μοντέλου εξαρτάται από την περιοχή μελέτης και τις ιδιαιτερότητες αυτής (Morse, 1977). Ο κύριος σκοπός των προσομοιώσεων είναι η κατανόηση και η πρόβλεψη των χωρικών και χρονικών αλλαγών που υφίσταται το φυσικό σύστημα. Για να επιτευχθεί αυτό είναι απαραίτητη η καλή γνώση της φύσης και των χαρακτηριστικών του συστήματος.

4.2.2 Καθορισμός συστήματος

Η δημιουργία ενός μοντέλου καθιστά αναγκαίο τον καθορισμό των οριακών συνθηκών του συστήματος. Πρέπει αρχικά, να οριστούν οι γεωγραφικοί περιορισμοί του συστήματος. Αυτό απαιτεί την κατανόηση της δυναμικής του συστήματος. Κάθε σημείο της μορφολογίας της περιοχής μπορεί να επηρεάζει ένα σχετικά μεγάλο φάσμα παραμέτρων όπως τα ρεύματα και τον άνεμο.

4.2.3 Νοητική σύλληψη και δημιουργία του μοντέλου

Κατά τη δημιουργία ενός μοντέλου πρέπει να ληφθούν υπόψη κυρίως οι παράμετροι που είναι σημαντικές για την περιγραφή του φυσικού συστήματος (Nioul, 1975). Για παράδειγμα, η προσομοίωση της παράκτιας κυκλοφορίας προϋποθέτει τη γνώση των γενεσιουργών αιτιών (επίδραση του ανέμου στην επιφάνεια, βαρότροπη κυκλοφορία κ.α.). Οι παράμετροι περιγραφής του συστήματος που συμπεριλαμβάνονται σε αυτό εξαρτώνται από το βαθμό σημαντικότητάς τους και από την κρίση του ερευνητή (Shannon, 1975). Η προσέγγιση στην πραγματικότητα επιτυγχάνεται με μοντέλο βασισμένο μόνο σε ακριβή δεδομένα και προσεκτικές παραδοχές (Naylor & Finger, 1967).

4.2.4 Συλλογή δεδομένων και επεξεργασία

Είναι σημαντική η απόκτηση επαρκών και αξιόπιστων στοιχείων για την περιγραφή του φυσικού συστήματος. Τα δεδομένα αυτά πρέπει να καλύπτουν ένα σχετικά μακρύ χρονικό διάστημα ώστε να περιγράφουν όλες τις φυσικές διεργασίες που πιθανόν να συμβαίνουν στο σύστημα καθώς επίσης θα χρησιμοποιηθούν στη φάση επιβεβαίωσης του μοντέλου.

4.2.5 Δημιουργία του κώδικα

Όταν το φυσικό σύστημα περιγράφεται με εξισώσεις οι οποίες συμπληρώνονται από κατάλληλες οριακές συνθήκες, τότε γράφεται ο κώδικας του μοντέλου που θα προσομοιώσει το φυσικό σύστημα. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα υπολογιστικό πρόγραμμα στο οποίο ενσωματώνονται όλες οι παραπάνω παράμετροι. Ο κώδικας αυτός είναι το εργαλείο της πρόγνωσης.

4.2.6 Επαλήθευση του κώδικα

Με την πολυπλοκότητα του κώδικα των αριθμητικών μοντέλων είναι πολύ δύσκολο να δημιουργηθεί ένα μοντέλο χωρίς να αποφευχθούν λάθη. Συνεπώς, είναι αναγκαία η επαλήθευση του κώδικα. Η συνήθης διαδικασία είναι η προσομοίωση ενός συγκεκριμένου και απλού φυσικού συστήματος στο οποίο γνωρίζουμε ήδη τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

4.2.7 Επιβεβαίωση του μοντέλου

Η επιβεβαίωση ενός μοντέλου είναι προβληματική, γιατί εμπεριέχει πρακτικές, θεωρητικές, στατιστικές και φιλοσοφικές δυσκολίες (Naylor, 1966). Το πρόβλημα οφείλεται στο ότι όλα τα μοντέλα εμπεριέχουν απλοποιήσεις και παραδοχές που δε συμβαίνουν στο φυσικό σύστημα. Γενικά, όλα τα μοντέλα προσεγγίζουν σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό τη φύση (Shannon, 1975), επομένως, δεν είναι εφικτή η καθιέρωση μιας συγκεκριμένης διαδικασίας επιβεβαίωσής τους. Ένα μοντέλο επιβεβαιώνεται όταν αποδεχτεί ότι περιγράφει με ακρίβεια τη συμπεριφορά του φυσικού συστήματος. Αν αυτό δε συμβαίνει, τότε απαιτείται τροποποίηση του κώδικα και της φιλοσοφίας του μοντέλου ώστε αυτά να προσεγγίζουν τα πραγματικά δεδομένα της περιοχής εφαρμογής.

4.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η προσομοίωση της κυκλοφορίας του ταμιευτήρα του φράγματος Καστρακίου.

Η επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος απαιτεί τη χρήση ενός μοντέλου που να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις:

1. Να διαθέτει ομοίωμα κυκλοφορίας.
2. Να είναι υδροδυναμικό.
3. Να είναι τρισδιάστατο.
4. Να έχει τη δυνατότητα εφαρμογής σε παράκτια ζώνη.

Στη συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε και χρησιμοποιήθηκε το αριθμητικό μοντέλο τρισδιάστατης μελέτης της κυκλοφορίας των υδάτων MIKE3 και συγκεκριμένα, για την προσομοίωση της κυκλοφορίας των υδάτων, εφαρμόστηκε το MIKE3 (FM) του Υδραυλικού Ινστιτούτου DHI (Danish Hydraulic Institute).

Το υδροδυναμικό μοντέλο του MIKE3 είναι ένα γενικό σύστημα μοντελοποίησης, το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της ροής και της μεταβολής του ύψους νερού σε κόλπους, παράκτιες περιοχές και περιοχές ποτάμιων εκβολών.

4.3.1 Παραδοχές για την προσομοίωση της Τεχνητής Λίμνης Καστρακίου

Για τη διεξαγωγή της μελέτης σε ότι αφορά το ταμιευτήρα του φράγματος θα λάβουμε υπόψη μας κάποιες παραδοχές.

A) Θα θεωρήσουμε ότι η λίμνη του φράγματος είναι καλώς αναμεμιγμένη (άρα αναφερόμαστε σε χειμερινή-βαρότροπη κυκλοφορία), εννοώντας ότι η λίμνη διατηρεί την ίδια θερμοκρασία σε όλο το εύρος της. Επιπλέον, κατά τη κυκλοφορία των υδάτων θεωρούμε ότι η πυκνότητα του νερού είναι σταθερή, ρ =σταθερή, κατά το βάθος.

B) Επίσης, μια δεύτερη παραδοχή που υφίσταται αναγκαίο να λάβουμε υπόψη μας είναι ότι δεν χρησιμοποιήσαμε το πραγματικό βάθος λίμνης, αλλά με τον όγκο και το εμβαδόν του ταμιευτήρα υπολογίσαμε ένα μέσο σταθερό βάθος, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στην αριθμητική μελέτη. Το βάθος υπολογίζεται μέσω της έκφρασης

$$H = \frac{V}{A}, \text{ όπου } V = \text{όγκος ταμιευτήρα και } A = \text{εμβαδό επιφάνειας.}$$

Γ) Επιπλέον, μια τρίτη παραδοχή είναι ότι θεωρούμε σταθερό άνεμο και ως προς τη διεύθυνση και ως προς το μέτρο. Στη διεύθυνση που φυσάει ο άνεμος δημιουργείται στη λίμνη αύξηση του πιεζομετρικού φορτίου και επομένως ανάπτυξη βαθμίδας πίεσης. Έτσι, έχουμε υδροδυναμική κυκλοφορία των υδάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΚΩΔΙΚΑ MIKE 3 FM (HD)

5.1.1 Ο ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ MIKE 3 FM (HD)

Ο κώδικας MIKE 3 Flexible Mesh (Hydrodynamic Module) βασίζεται στη χρησιμοποίηση ενός ευπροσάρμοστου (flexible), μη δομημένου υπολογιστικού πλέγματος στην οριζόντια διεύθυνση και καρτεσιανού στην κατακόρυφη, με σκοπό την ακριβέστερη αριθμητική προσομοίωση ροών με γεωμετρίες ωκεανογραφικής κλίμακας, σε παράκτια περιβάλλοντα ή δέλτα ποταμών.

Ο κώδικας αναπτύχθηκε για την προσομοίωση τρισδιάστατων ροών με ελεύθερη επιφάνεια και βρίσκει, μέχρι σήμερα, εφαρμογή στην μελέτη της υδροδυναμικής κυκλοφορίας λιμνών, ποταμών, κόλπων και ταμειυτήρων, επιτρέποντας την προσομοίωση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς τους λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη την επιρροή εξωτερικών δράσεων-δυνάμεων, καθώς και την κατακόρυφη στρωματοποίηση.

Στο παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνουμε για λόγους πληρότητας μόνον, τις γενικές μορφές των εξισώσεων πάνω στις οποίες βασίζεται ο κώδικας. Το υλικό αυτό, μαζί με περισσότερες λεπτομέρειες, υπάρχει στα εγχειρίδια του κώδικα MIKE 3 FM (DHI, 2007).

5.2 Η ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

Ο κώδικας βασίζεται στην αριθμητική επίλυση των τρισδιάστατων εξισώσεων RANS, και στις υποθέσεις Boussinesq και υδροστατικής κατανομής της πίεσης. Το μοντέλο αποτελείται από τις εξισώσεις της συνέχειας, ορμής, θερμοκρασίας, αλατότητας και πυκνότητας, ενώ για το “κλείσιμο” της τύρβης χρησιμοποιούνται κάποια από τα γνωστά μοντέλα. Για το τρισδιάστατο μοντέλο η διαχείριση της ελεύθερης επιφάνειας πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τον σ -μετασχηματισμό (σ -coordinate transformation approach). Ο κώδικας MIKE 3 Flow Model FM, έχει αναπτυχθεί από την “DHI-Water & Environment” (DHI, 2007). Για λόγους οικονομίας παρουσιάζονται μόνον οι υδροδυναμικές εξισώσεις, τα μοντέλα “κλεισίματος” της τύρβης και στοιχεία της αριθμητικής μεθόδου που είναι διαθέσιμα. Ειδικότερες λεπτομέρειες μπορούν να αναζητηθούν στο εγχειρίδιο επιστημονικής τεκμηρίωσης του κώδικα (Scientific Documentation, DHI 2007).

5.2.1 Τρισδιάστατες εξισώσεις σε Καρτεσιανές Συντεταγμένες

5.2.1.1 Εξισώσεις ρηχού στρώματος (Shallow water equations)

Το αριθμητικό μοντέλο βασίζεται στην επίλυση των τρισδιάστατων εξισώσεων Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) που έχουν προέλθει από την διαδικασία εφαρμογής του μέσου όρου στις εξισώσεις Navier-Stokes (N-S), για ασυμπίεστο ρευστό, περιγράφοντας πλέον τις μέσες τιμές των ποσοτήτων που μας ενδιαφέρουν. Οι τρισδιάστατες εξισώσεις έχουν απλοποιηθεί με βάση την προσέγγιση Boussinesq

(Boussinesq Approximation), θεωρώντας υδροστατική κατανομή της πίεσης στην κατακόρυφη διεύθυνση-z και απλοποιώντας την εξίσωση της ορμής. Επιπλέον, για την προσομοίωση των τάσεων Reynolds, που προέρχονται από την διαδικασία εφαρμογής του μέσου όρου στις εξισώσεις N-S, εφαρμόζεται η υπόθεση του Boussinesq (Boussinesq Assumption) σύμφωνα με την οποία ο υπολογισμός των τυρβωδών τάσεων βασίζεται στον υπολογισμό ενός όρου, του τυρβώδους ιξώδους.

Η εξίσωση συνέχειας γράφεται ως εξής:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (5.2.1)$$

και οι εξισώσεις ορμής διαμορφώνονται στην x και y , αντίστοιχα, διεύθυνση ως εξής:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_\alpha}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \\ + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \end{aligned} \quad (5.2.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_\alpha}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \\ + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \end{aligned} \quad (5.2.3)$$

όπου t είναι ο χρόνος, x , y και z είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες, η είναι η άνοδος της επιφάνειας του ύδατος (surface elevation) από την αδιατάρακτη επιφάνεια, d είναι το βάθος της στάθμης της αδιατάρακτης επιφάνειας του ύδατος (still water depth), $h = \eta + d$ είναι το συνολικό βάθος του ύδατος (total water depth), u , v και w είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας στην κατεύθυνση x , y και z αντίστοιχα, $f = 2\Omega \sin \phi$ είναι η παράμετρος Coriolis (Ω είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής και ϕ το γεωγραφικό πλάτος). Επίσης, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, ρ είναι η πυκνότητα του νερού, S_{xx} , S_{xy} , και S_{yy} είναι οι συνιστώσες των τάσεων ακτινοβολίας (radiation stress tensor), v_t είναι το κατακόρυφο τυρβώδες ιξώδες, p_α είναι η ατμοσφαιρική πίεση, ρ_0 είναι η πυκνότητα αναφοράς. S είναι το μέγεθος της εκροής λόγω σημειακών πηγών και (u_s, v_s) είναι η ταχύτητα με την οποία το νερό του υδάτινου σώματος που εξετάζουμε εκρέει στο περιβάλλον νερό. Οι

όροι της οριζόντιας τάσης (horizontal stress terms) περιγράφονται χρησιμοποιώντας μια σχέση βαθμίδας-τάσεως, η οποία απλοποιείται στις παρακάτω εκφράσεις:

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (5.2.4)$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (5.2.5)$$

όπου A είναι το οριζόντιο τυρβώδες ιξώδες.

Η συνοριακή συνθήκη επιφάνειας και πυθμένα για τις u , v και w είναι

Για $z = \eta$:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 v_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad (5.2.6)$$

Για $z = -d$:

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 v_t} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (5.2.7)$$

όπου (τ_{sx}, τ_{sy}) και (τ_{bx}, τ_{by}) είναι οι x και y συνιστώσες της τάσης του ανέμου στην επιφάνεια και τον πυθμένα.

Το συνολικό βάθος του νερού, h , μπορεί να ληφθεί από την κινηματική συνοριακή συνθήκη στην επιφάνεια, αφού το πεδίο της ταχύτητας είναι γνωστό από τις εξισώσεις της ορμής και της συνέχειας. Παρ' όλα αυτά, λαμβάνουμε μια περισσότερο αξιόπιστη και ισχυρή εξίσωση από την κατακόρυφη ολοκλήρωση της εξίσωσης τοπικής συνέχειας:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h \bar{v}}{\partial y} = hS + P - E \quad (5.2.8)$$

όπου \bar{P} και \bar{E} είναι τα επίπεδα (οι τιμές) της κατακρήμνισης και της εξάτμισης αντίστοιχα και \bar{u} και \bar{v} είναι οι μέσες κατά το βάθος ταχύτητες (depth averaged velocities):

$$h \bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz, \quad h \bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad (5.2.9)$$

Οι εξισώσεις (5.2.2), (5.2.3) μαζί με την ολοκληρωμένη εξίσωση της συνέχειας (5.2.8) είναι δυνατόν να αποτελέσουν τη βάση για την ανάλυση (με αριθμητικές μεθόδους) της παράκτιας υδροδυναμικής κυκλοφορίας.

Το ρευστό που μελετάμε θεωρείται ότι είναι ασυμπίεστο. Η πυκνότητα ρ δεν εξαρτάται από την πίεση, αλλά μόνο από τη θερμοκρασία, T και την αλατότητα, s μέσω της καταστατικής εξίσωσης:

$$\rho = \rho(T, s) \quad (5.2.10)$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι η γενική έκφραση της πυκνότητας σε συνάρτηση με την θερμοκρασία, T , και την αλατότητα s , που δίνεται με λεπτομέρεια με βάση την καταστατική εξίσωση της UNESCO (UNESCO, 1981).

5.2.1.2 Εξισώσεις μεταφοράς για την αλατότητα και τη θερμοκρασία

Οι εκφράσεις της θερμοκρασίας, T και της αλατότητας, s ακολουθούν τις γενικές εξισώσεις μεταφοράς και διάχυσης:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + H + T_s S \quad (5.2.11)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + s_s S \quad (5.2.12)$$

όπου D_v είναι ο συντελεστής της κατακόρυφης τυρβώδους διάχυσης (eddy diffusion coefficient), \bar{H} είναι ένας όρος πηγής λόγω της ανταλλαγής θερμότητας με την ατμόσφαιρα, T_s και s_s είναι η θερμοκρασία και η αλατότητα της πηγής, αντίστοιχα, και F είναι οι οριζόντιοι όροι διάχυσης, που ορίζονται ως εξής:

$$(F_T, F_s) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s) \quad (5.2.13)$$

όπου D_h είναι ο συντελεστής οριζόντιας διάχυσης. Οι συντελεστές διάχυσης μπορούν να συσχετιστούν με τα τυρβώδη ιξώδη:

$$D_h = \frac{A}{\sigma_T} \text{ και } D_v = \frac{v_t}{\sigma_T} \quad (5.2.14)$$

όπου σ_T είναι ο αριθμός Prandtl. Σε πολλές εφαρμογές μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας σταθερός αριθμός Prandtl (πχ. Rodi, 1984).

Οι συνοριακές συνθήκες στην επιφάνεια και στον πυθμένα για τη θερμοκρασία
Για $z = \eta$:

$$D_h \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q_n}{\rho_0 c_p} + T_p P - T_e E \quad (5.2.15)$$

Για $z = -d$:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (5.2.16)$$

όπου Q_n είναι η καθαρή επιφανειακή ροή θερμότητας και $c_p = 4217 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ \text{K})$ είναι η ειδική θερμότητα του νερού.

Οι συνοριακές συνθήκες αλατότητας στην επιφάνεια και τον πυθμένα είναι

Για $z = \eta$:

$$\frac{\partial s}{\partial z} = 0 \quad (5.2.17)$$

Για $z = -d$:

$$\frac{\partial s}{\partial z} = 0 \quad (5.2.18)$$

Όταν η ανταλλαγή θερμότητας από την ατμόσφαιρα συμπεριλαμβάνεται, η εξάτμιση ορίζεται ως εξής:

$$\bar{E} = \left(\frac{q_v}{\rho_0 l_v}, 0 \right) \text{ για } (q_v > 0, q_v \leq 0) \quad (5.2.19)$$

όπου q_v είναι η λανθάνουσα ροή της θερμότητας και $l_v = 2.5 \cdot 10^6$ είναι η λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης του νερού.

5.2.1.3 Εξίσωση μεταφοράς ρύπου

Η εξίσωση διατήρησης για την ποσότητα του ρύπου δίνεται από την παρακάτω έκφραση:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = F_C + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) - k_p C + C_s S \quad (5.2.20)$$

όπου C είναι η συγκέντρωση της ποσότητας του ρύπου, k_p είναι ο γραμμικός ρυθμός της αποδόμησής της, C_s είναι η συγκέντρωση της ποσότητας του ρύπου στην πηγή και D_v είναι ο συντελεστής της κατακόρυφης διάχυσης. F_C είναι ο όρος της οριζόντιας διάχυσης που προσδιορίζεται ως εξής:

$$F_C = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] C \quad (5.2.21)$$

όπου D_h είναι ο συντελεστής οριζόντιας διάχυσης.

5.2.1.4. Οι εξισώσεις του μοντέλου σε Καρτεσιανές και Σίγμα συντεταγμένες

Οι παραπάνω εξισώσεις μετασχηματίζονται με τη βοήθεια ενός κατακόρυφου σ-μετασχηματισμού ως εξής:

$$\sigma = \frac{z - z_b}{h}, \quad x' = x, \quad y' = y \quad (5.2.22)$$

όπου το σ λαμβάνει τιμές μεταξύ του μηδενός (στον πυθμένα) και της μονάδας (στην ελεύθερη επιφάνεια). Ο μετασχηματισμός των συντεταγμένων υποδηλώνει σχέσεις όπως:

$$\frac{\partial}{\partial z} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \quad (5.2.23)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right) = \left(\frac{\partial}{\partial x'} - \frac{1}{h} \left(-\frac{\partial d}{\partial x} + \sigma \frac{\partial h}{\partial x} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma}, \frac{\partial}{\partial y'} - \frac{1}{h} \left(-\frac{\partial d}{\partial y} + \sigma \frac{\partial h}{\partial y} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma} \right) \quad (5.2.24)$$

Σε αυτό το νέο σύστημα συντεταγμένων οι εξισώσεις που διέπουν το μοντέλο δίνονται ως:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x'} + \frac{\partial hv}{\partial y'} + \frac{\partial \omega h}{\partial \sigma} = hS \quad (5.2.25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x'} + \frac{\partial huv}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega u}{\partial \sigma} &= fvh - gh \frac{\partial \eta}{\partial x'} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_\alpha}{\partial x'} - \frac{hg}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial p}{\partial x} dz - \\ - \frac{1}{\rho_o} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + hF_u + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_v}{h} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + hu_s S \end{aligned} \quad (5.2.26)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x'} + \frac{\partial hv^2}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega v}{\partial \sigma} &= -fuh - gh \frac{\partial \eta}{\partial y'} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_\alpha}{\partial y'} - \frac{hg}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial p}{\partial y} dz - \\ \frac{1}{\rho_o} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + hF_v + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_v}{h} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + hv_s S \end{aligned} \quad (5.2.27)$$

$$\frac{\partial hT}{\partial t} + \frac{\partial huT}{\partial x'} + \frac{\partial hvT}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega T}{\partial \sigma} = hF_T + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{D_v}{h} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) + hH + hT_s S \quad (5.2.28)$$

$$\frac{\partial hs}{\partial t} + \frac{\partial hus}{\partial x'} + \frac{\partial hvs}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega s}{\partial \sigma} = hF_s + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{D_v}{h} \frac{\partial s}{\partial \sigma} \right) + hS_s S \quad (5.2.29)$$

$$\frac{\partial hk}{\partial t} + \frac{\partial huk}{\partial x'} + \frac{\partial hvk}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega k}{\partial \sigma} = hF_k + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial \sigma} \right) + h(P + B - \varepsilon) \quad (5.2.30)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial hu\varepsilon}{\partial x'} + \frac{\partial hv\varepsilon}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega\varepsilon}{\partial \sigma} &= hF_\varepsilon + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \right) + \\ + h \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon} P + c_{3\varepsilon} B - c_{2\varepsilon} \varepsilon) \end{aligned} \quad (5.2.31)$$

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial huC}{\partial x'} + \frac{\partial hvC}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega C}{\partial \sigma} = hF_C + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{D_v}{h} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) -$$

$$-hk_p C + hC_s \quad (5.2.32)$$

Η τροποποιημένη κατακόρυφη ταχύτητα ορίζεται ως:

$$\omega = \frac{1}{h} \left[w + u \frac{\partial d}{\partial x'} + v \frac{\partial d}{\partial y'} - \sigma \left(\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x'} + v \frac{\partial h}{\partial y'} \right) \right] \quad (5.2.33)$$

Η τροποποιημένη κατακόρυφη ταχύτητα είναι η ταχύτητα κατά μήκος ενός επιπέδου σταθερού σ . Οι όροι οριζόντιας διάχυσης ορίζονται ως εξής:

$$hF_u \approx \frac{\partial}{\partial x} \left(2hA \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hA \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (5.2.34)$$

$$hF_v \approx \frac{\partial}{\partial x} \left(hA \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2hA \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (5.2.35)$$

$$h(F_T, F_s, F_k, F_\varepsilon, F_c) \approx \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(hD_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s, k, \varepsilon, C) \quad (5.2.36)$$

Η συνοριακή συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια και στον πυθμένα δίνονται ως ακολούθως:

Για $\sigma = 1$:

$$\omega = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = \frac{h}{\rho_0 v_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad (5.2.37)$$

Για $\sigma = 0$:

$$\omega = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = \frac{h}{\rho_0 v_t} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (5.2.38)$$

Η εξίσωση για τον προσδιορισμό του βάθους του ύδατος δεν μεταβάλλεται από το μετασχηματισμό συντεταγμένων. Είναι, λοιπόν, ταυτόσημη με την εξίσωση (5.2.8).

5.2.2 Η προσομοίωση της τύρβης

5.2.2.1 Η έννοια του τυρβώδους ιξώδους

Επανερχόμενοι στις εξισώσεις RANS, για περιστρεφόμενο σύστημα και υπό το πρίσμα του σ-μετασχηματισμού (εξ. 5.2.25 και 5.2.26, 5.2.27), υπενθυμίζουμε ότι το κύριο πρόβλημα προσομοίωσης ροών κατά την ανάλυση ενός σημείου (one point modelling) αποτελούν οι τάσεις Reynolds. Το παλαιότερο μοντέλο προσομοίωσης των τάσεων αυτών, εξακολουθεί και σήμερα να αποτελεί τον συνηθέστερο πρακτικό τρόπο αρχικής αντιμετώπισης του προβλήματος της τύρβης. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στην υπόθεση ότι κατ' αναλογία προς τις διατμητικές τάσεις λόγω ιξώδους στην στρωτή ροή, οι τυρβώδεις τάσεις (τάσεις Reynolds) είναι ανάλογες των βαθμίδων της μέσης ταχύτητας. Η ιδέα (υπόθεση) αυτή αποδίδεται στον Boussinesq (Boussinesq assumption, π.χ. Rodi, 1980) και μαθηματικά εκφράζεται ως:

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (5.2.39)$$

όπου ν_t είναι το τυρβώδες κινηματικό ιξώδες το οποίο, σε αντίθεση με το ν , δεν αποτελεί μια ιδιότητα του ρευστού αλλά εξαρτάται από την κατάσταση της τύρβης, δηλαδή το ν_t μπορεί να διαφέρει σημαντικά από σημείου εις σημείο του ροϊκού πεδίου και από ροϊκό πεδίο σε ροϊκό πεδίο. Με k συμβολίζεται η τυρβώδης κινητική ενέργεια ανά μονάδα μάζας. Η εξ. (5.2.39), λόγω της συμπεριφοράς του ν_t , δεν αποτελεί αυτή καθ' αυτή μια καταστατική σχέση για το πρόβλημα “κλεισίματος” της τύρβης αλλά παρέχει το πλαίσιο προς αυτή την κατεύθυνση. Το πρόβλημα τώρα εστιάζεται στον καθορισμό της κατανομής του ν_t .

5.2.2.2 Προσομοίωση της τύρβης στην οριζόντια διεύθυνση

Στην οριζόντια διεύθυνση χρησιμοποιούνται, συνήθως, λιγότερο εξελιγμένα μοντέλα τύρβης Έτσι, αρκετές είναι οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν μοντέλα μηδενικής εξίσωσης θεωρώντας μια σταθερή τιμή του τυρβώδους ιξώδους για την οριζόντια διεύθυνση που συνήθως έχει προσδιοριστεί από κάποιου είδους διαδικασία προσαρμογής, είτε κατευθείαν από πειράματα εξαπλώσεως χρωστικών ιχνηθετών, από διαθέσιμες εμπειρικές πληροφορίες ή από διαδικασία διαδοχικών δοκιμών, ώστε να υπάρξει συμφωνία μεταξύ υπολογισμών και μετρήσεων. Εναλλακτικά, ο Smagorinsky (1963) πρότεινε να εκφράσει τις υποπλεγματικές τάσεις (sub-grid scale stresses) μέσω ενός οιονεί (ενεργού) ιξώδους που σχετίζεται με χαρακτηριστική κλίμακα μηκών. Το τυρβώδες ιξώδες κλίμακας υπο-πλέγματος δίνεται από τη σχέση:

$$A_h = C_s^2 l^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (5.2.40)$$

όπου C_s είναι μια σταθερά, το l είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος και ο τανυστής του ρυθμού παραμόρφωσης δίνεται από τη σχέση:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = 1, 2) \quad (5.2.41)$$

Η παραπάνω έκφραση (5.2.40) μπορεί να γραφεί σε καρτεσιανή μορφή, εμπειρεύοντας τις διαστάσεις του υπολογιστικού πλέγματος στην οριζόντια διεύθυνση, x , y , και για εφαρμογή στις εξισώσεις RANS, ως εξής:

$$A_h = C_s \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 0.5 \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.2.42)$$

Η εμπειρική σταθερά Smagorinsky, C_s , θα πρέπει να επιλέγεται στο διάστημα από 0,25 έως 1,0 (DHI, 2007). Το μοντέλο Smagorinsky συνδέει άμεσα την κατανομή του τυρβώδους ιξώδους με την κλίμακα του πλέγματος Δx , Δy στην οριζόντια διεύθυνση. Ουσιαστικά το μοντέλο παραμετροποιεί την μικρής κλίμακα διαδικασία διάχυσης που δεν μπορεί να επιλυθεί από το αδρό πλέγμα, που εφαρμόζεται στα βαθύτερα, ενώ για την περίπτωση λεπτού πλέγματος, που συνήθως διαμορφώνεται στα ρηχά, υπολογίζεται σημαντικά μικρότερη τιμή A_h , αφού πλέον η διαδικασία της διάχυσης μπορεί να επιλυθεί.

Το μοντέλο μιας εξίσωσης Smagorinsky λαμβάνει ιδιαίτερη αξία στην περίπτωση που χρησιμοποιείται οριζόντιο διαβαθμισμένο πλέγμα. Όπως φαίνεται από την εξ. (5.2.42) η οριζόντια κατανομή του τυρβώδους ιξώδους υπολογίζεται σε όρους τοπικής οριζόντιας διάτμησης (local horizontal shear) και μεγέθους πλέγματος (grid size). Στις περιοχές, λοιπόν, λεπτού πλέγματος οι όροι οριζόντιας διάτμησης είναι σημαντικοί σε σχέση με τους όρους διαστάσεων του πλέγματος. Αντίθετα, στα βαθύτερα όπου συνήθως χρησιμοποιείται αδρότερο υπολογιστικό πλέγμα οι όροι διάτμησης παραμένουν μικροί με αποτέλεσμα οι τιμές που υπολογίζονται για το τυρβώδες ιξώδες να διατηρούνται σε λογικά επίπεδα και να μην λαμβάνουν πολύ μεγάλες τιμές που μπορούν να οδηγήσουν σε μη φυσικά αποτελέσματα κατά την αριθμητική προσομοίωση (Hall and Davies, 2005).

5.2.2.3 Προσομοίωση της τύρβης στην κατακόρυφη διεύθυνση

Στην κατακόρυφη διεύθυνση για την προσομοίωση της τύρβης επιλέγεται το μοντέλο δύο εξισώσεων k - ε που, όπως και το μοντέλο Smagorinsky, χρησιμοποιεί και αυτό την ιδέα του τυρβώδους ιξώδους. Ωστόσο, στο μοντέλο αυτό το ιξώδες εξάγεται από τις τυρβώδεις παραμέτρους k και ε , με χρήση της σχέσεως $\nu_t = C_\mu k^2 / \varepsilon$, όπου k είναι η

τυρβώδης κινητική ενέργεια ανά μονάδα μάζας (ΤΚΕ), ε είναι η ανάλωση της ΤΚΕ και C_μ είναι μια εμπειρική σταθερά (π.χ. Rodi, 1984).

Η τυρβώδης κινητική ενέργεια, k , και η ανάλωσή της ε , λαμβάνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις μεταφοράς:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial uk}{\partial x} + \frac{\partial vk}{\partial y} + \frac{\partial wk}{\partial z} = F_k + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P + B - \varepsilon \quad (5.2.43)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial v\varepsilon}{\partial y} + \frac{\partial w\varepsilon}{\partial z} = F_\varepsilon + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon} P + c_{3\varepsilon} B - c_{2\varepsilon} \varepsilon) \quad (5.2.44)$$

όπου οι όροι P και B δίνονται ως εξής:

$$P = \frac{\tau_{xz}}{\rho_0} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\tau_{yz}}{\rho_0} \frac{\partial v}{\partial z} \approx v_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (5.2.45)$$

$$B = - \frac{v_t}{\sigma_t} N^2 \quad (5.2.46)$$

με τη συχνότητα Brunt – Väisälä, N , να ορίζεται ως εξής:

$$N^2 = - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (5.2.47)$$

όπου σ_t είναι ο τυρβώδης αριθμός Prandtl και σ_k , σ_ε , $c_{1\varepsilon}$, $c_{2\varepsilon}$ και $c_{3\varepsilon}$ είναι εμπειρικές σταθερές. Με F εκφράζονται οι όροι οριζόντιας διάχυσης, που προσδιορίζονται ως εξής:

$$(F_k, F_\varepsilon) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (k, \varepsilon) \quad (5.2.48)$$

Οι συντελεστές οριζόντιας διάχυσης δίνονται ως εξής:

$$D_h = A/\sigma_k \text{ και } D_h = A/\sigma_\varepsilon, \text{ αντίστοιχα.}$$

Αρκετοί καλά μετρημένοι εμπειρικοί συντελεστές εισάγονται στο μοντέλο k - ε . Οι εμπειρικές σταθερές δίδονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.1 Εμπειρικές σταθερές στο μοντέλο $k - \varepsilon$ (από Rodi, 1984).

C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_{3\varepsilon}$	σ_t	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.92	0	0.9	1.0	1.3

Στην επιφάνεια οι συνοριακές συνθήκες για την τυρβώδη κινητική ενέργεια και το ποσοστό ανάλωσής της (dissipation) εξαρτώνται από τη διάτμηση του ανέμου, U_{∞} .

Για $z = \eta$:

$$k = \frac{1}{\sqrt{C_\mu}} U_{\infty}^2 \quad (5.2.49)$$

$$\varepsilon = \frac{U_{\infty}^3}{\kappa \Delta z_b} \quad \text{για } U_{\infty} > 0$$

$$\frac{\partial k}{\partial z} = 0 \quad \varepsilon = \frac{(k \sqrt{C_\mu})^{3/2}}{\alpha \kappa h} \quad \text{για } U_{\infty} = 0 \quad (5.2.50)$$

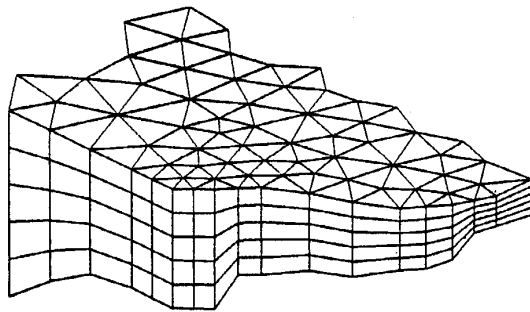
όπου $\kappa = 0.4$ είναι η σταθερά του von Karman, $\alpha = 0.07$, που είναι και εμπειρική σταθερά και Δz_s είναι η απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια. Στον πυθμένα οι συνοριακές συνθήκες έχουν ως εξής:

$$\text{Για } z = -d: \quad k = \frac{1}{\sqrt{C_\mu}} U_b^2 \quad \text{και} \quad \varepsilon = \frac{U_{\infty}^3}{\kappa \Delta z_b} \quad (5.2.51)$$

όπου Δz_b είναι η απόσταση από τον πυθμένα.

5.3 Η ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

Η διακριτοποίηση των τρισδιάστατων εξισώσεων εκτελείται χρησιμοποιώντας την μέθοδο των πεπερασμένων όγκων βασισμένη στο κέντρο του υπολογιστικού κελιού. Η χωρική διακριτοποίηση πραγματοποιείται στο οριζόντιο επίπεδο xy , χρησιμοποιώντας μη-δομημένο υπολογιστικό πλέγμα (unstructured mesh) και στο κατακόρυφο z δομημένο. Το μη-δομημένο πλέγμα αποτελείται, συνήθως, από τριγωνικά ή τετράπλευρα στοιχεία-κελιά, ενώ το δομημένο από ορθογωνικά. Έτσι, στο τρισδιάστατο μοντέλο οι υπολογιστικοί όγκοι, στα κέντρα των οποίων υπολογίζονται οι μεταβλητές, λαμβάνουν σχήμα πρίσματος ή ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου, αντίστοιχα, με βάση το οριζόντιο μη-δομημένο πλέγμα που έχει χρησιμοποιηθεί. Στο σχήμα 15. δίδεται μια γενική άποψη της διαμόρφωσης του τρισδιάστατου υπολογιστικού πλέγματος που χρησιμοποιείται από τον κώδικα.



Σχήμα 15. Δομή τρισδιάστατου υπολογιστικού πλέγματος που εφαρμόζεται στον κώδικα (DHI, 2007).

Στο τρισδιάστατο υπολογιστικό πλέγμα το οποίο δημιουργείται το βάθος του νερού καθορίζεται στο κέντρο των κελιών του οριζόντιου πλέγματος. Η τετμημένη της οριζόντιας ταχύτητας στο κέντρο των τρισδιάστατων κελιών, ενώ η κατακόρυφη ταχύτητα στις οριζόντιες όψεις (faces) των στοιχείων-κελιών.

Η ολοκληρωτική μορφή του συστήματος των τρισδιάστατων εξισώσεων ροής, σε καρτεσιανές συντεταγμένες, μπορεί να γραφεί στην παρακάτω μορφή:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}(\mathbf{U}) = \mathbf{S}(\mathbf{U}) \quad (5.2.52)$$

όπου \mathbf{U} το διάνυσμα των διατηρητικών μεταβλητών, $\mathbf{F} = \mathbf{F}^I - \mathbf{F}^V$ η συνάρτηση του διανύσματος της ροής (flux vector function) και \mathbf{S} είναι το διάνυσμα των όρων πηγής.

Ολοκληρώνοντας την εξ. (5.2.1) επί του i όγκου ελέγχου και χρησιμοποιώντας το θεώρημα Gauss έχουμε:

$$\int_{A_i} \frac{\partial U}{\partial t} d\Omega - \int_{A_i} S(U) d\Omega = - \int_{\Gamma_i} (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n}) ds \quad (5.2.53)$$

όπου A_i η επιφάνεια (area) του υπολογιστικού κελιού, Ω η μεταβλητή ολοκλήρωσης καθορισμένη στην επιφάνεια A_i , Γ_i η περίμετρος του υπολογιστικού κελιού, ds η μεταβλητή ολοκλήρωσης κατά μήκος της περιμέτρου του και n το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια του υπολογιστικού κελιού, με διεύθυνση προς τα έξω.

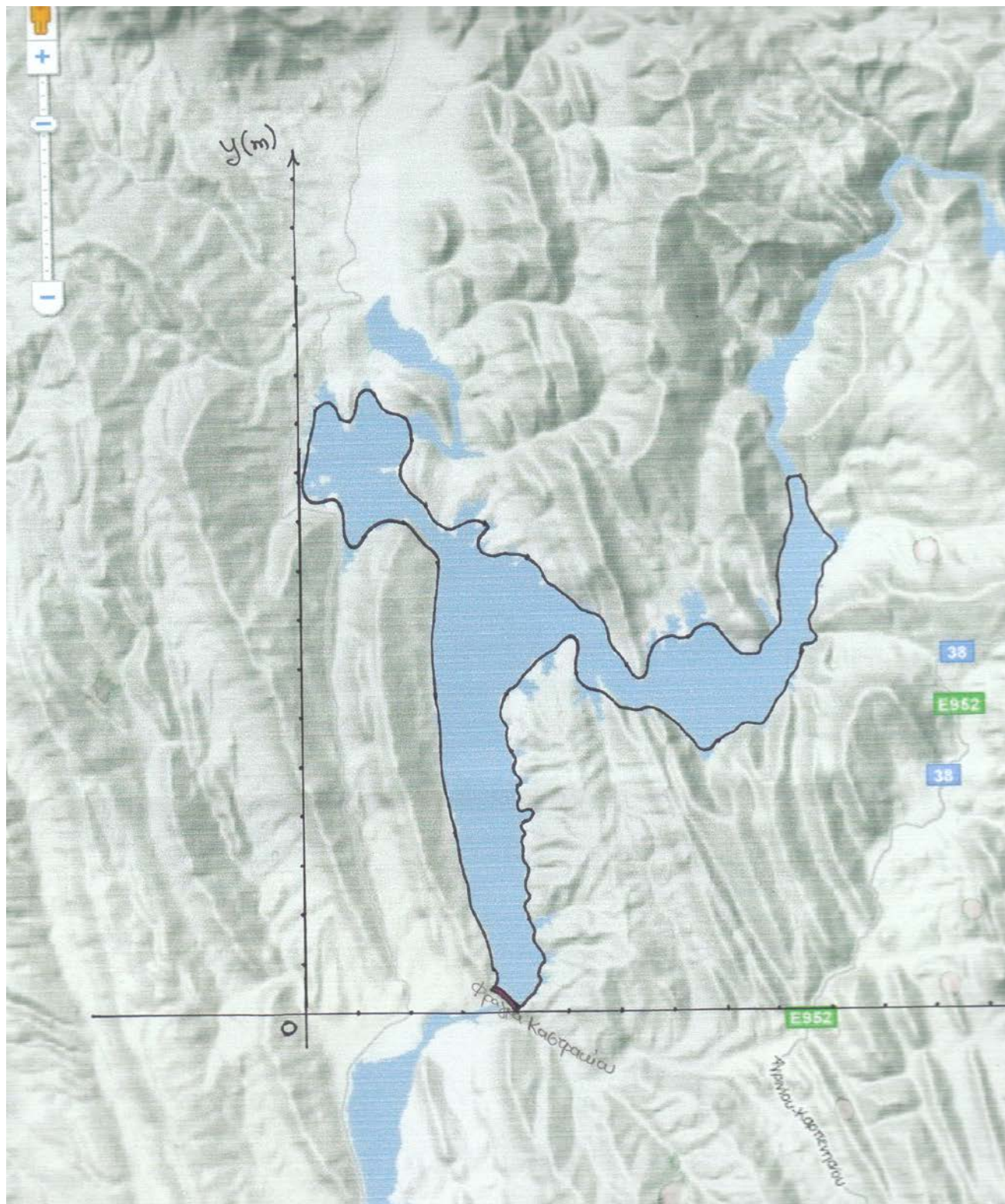
Οι οριζόντιες μεταγωγές ροής (horizontal convective fluxes) υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τον προσεγγιστικό λύτη Riemann, ο οποίος προτάθηκε από τον Roe (1981), ενώ σχήμα πρώτης τάξης χρησιμοποιείται για την χωρική διακριτοποίηση.

Όσον αφορά τη χρονική ολοκλήρωση, ο τρισδιάστατος κώδικας ως προς τον χρόνο είναι semi-implicit, χρησιμοποιώντας μια διαδικασία κατά την οποία οι οριζόντιοι όροι διαχειρίζονται explicitly (ρητά) ενώ οι κατακόρυφοι implicitly (άρρητα). Ειδικότερα, η χρονική ολοκλήρωση των εξισώσεων του ρηχού στρώματος, καθώς και των εξισώσεων μεταγωγής-διάχυσης, εκτελείται χρησιμοποιώντας είτε σχήματα χαμηλής τάξης (low order method) είτε ανωτέρας (higher order method). Στην περίπτωση που επιλέγεται μέθοδος χαμηλής τάξης οι οριζόντιοι όροι διαχειρίζονται εφαρμόζοντας ρητό σχήμα Euler πρώτης τάξης (first order explicit Euler method), ενώ οι κατακόρυφοι όροι άρρητο σχήμα δευτέρας τάξης εφαρμόζοντας τον τραπεζοειδή κανόνα (second order implicit trapezoidal rule). Στην επιλογή μεθόδου ανωτέρας τάξης οι οριζόντιοι όροι ολοκληρώνονται εφαρμόζοντας μέθοδο δευτέρας τάξης Runge Kutta (second order Runge Kutta method), ενώ οι κατακόρυφοι χρησιμοποιώντας σχήμα δευτέρας τάξης (second order implicit trapezoidal rule).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΗΤΗ ΛΙΜΝΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΑΣΤΡΑΚΙΟΥ ΚΑΙ ΤΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ.

Σε αυτό το κεφάλαιο αναφερόμαστε στη διαδικασία την οποία ακολουθήσαμε για την εύρεση του μέσου βάθους H , ώστε να γίνει η εφαρμογή του αριθμητικού μοντέλου και να έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα και συμπεράσματα. Αρχικά, χρησιμοποιήσαμε τον γεωφυσικό χάρτη στον οποίο απεικονίζεται ο ταμιευτήρας του φράγματος Καστρακίου (με κλίμακα τέτοια ώστε 1cm στο χάρτη αντιστοιχεί στη πραγματικότητα σε 869,57m) και για τις ανάγκες της αριθμητικής προσομοίωσης εξομαλύνθηκαν τα όρια του ταμιευτήρα, έτσι ώστε να διαμορφώνεται όσο το δυνατόν ομαλότερη ακτογραμμή και να αποφεύγονται αριθμητικά προβλήματα. Στη συνέχεια, ελήφθησαν 170 σημεία σε συγκεκριμένη απόσταση (3 mm) μεταξύ τους επάνω στο χάρτη και μετά από μέτρηση των σημείων κατά x και y βρήκαμε τις συντεταγμένες τους. Τις συντεταγμένες αυτές μετατρέψαμε σε m, και με τη βοήθεια του προγράμματος excell φτιάξαμε το διάγραμμα της ακτογραμμής του ταμιευτήρα του φράγματος (Σχήμα 17.). Τέλος, με τις συντεταγμένες x και y , χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα autocad 2011 (Σχήμα 18.) υπολογίσαμε το εμβαδόν του ταμιευτήρα του Καστρακίου $A=2.120.000 m^2$, το οποίο έχει μια μικρή απόκλιση από το πραγματικό ($A=2.420.000 m^2$) λόγω της εξομάλυνσης των ορίων. Από πληροφορίες που αντλήσαμε από τη ΔΕΗ βρήκαμε τον όγκο του ταμιευτήρα του φράγματος $V=53.000.000 m^3$. Έτσι, από τον τύπο $H=V/A$ υπολογίσαμε το μέσο βάθος, $H=22$ m. Στη συνέχεια, μέσω του τρισδιάστατου αριθμητικού κώδικα MIKE 3 (FM) έγιναν οι κατάλληλοι υπολογισμοί των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών της ροής. Στο σχήμα 16 που ακολουθεί φαίνεται ο χάρτης που χρησιμοποιήθηκε για την ψηφιοποίηση της ακτογραμμής που χρησιμοποιήθηκε από τον κώδικα MIKE 3 (FM) HD.



Σχήμα 16. Χάρτης: Απεικόνιση του ταμιευτήρα υδροηλεκτρικού φράγματος Καστρακίου ([google earth](#))

x (cm)	y(cm)	x(m)	y(m)
3,5	0,5	3043,495	434,785
3,6	0,8	3130,452	695,656
3,55	1,1	3086,974	956,527
3,5	1,4	3043,495	1217,398
3,4	1,7	2956,538	1478,269
3,25	2	2826,103	1739,14
3,15	2,3	2739,146	2000,011
3,1	2,55	2695,667	2217,404
3	2,85	2608,71	2478,275
2,95	3,15	2565,232	2739,146
2,95	3,45	2565,232	3000,017
2,9	3,8	2521,753	3304,366
2,8	4,1	2434,796	3565,237
2,75	4,4	2391,318	3826,108
2,7	4,7	2347,839	4086,979
2,65	4,95	2304,361	4304,372
2,6	5,3	2260,882	4608,721
2,6	5,6	2260,882	4869,592
2,6	5,95	2260,882	5173,942
2,6	6,25	2260,882	5434,813
2,55	6,55	2217,404	5695,684
2,5	6,85	2173,925	5956,555
2,5	7,15	2173,925	6217,426
2,5	7,5	2173,925	6521,775
2,5	7,8	2173,925	6782,646
2,55	8,1	2217,404	7043,517
2,55	8,45	2217,404	7347,867
2,6	8,7	2260,882	7565,259
2,6	9,05	2260,882	7869,609
2,6	9,35	2260,882	8130,48
2,4	9,55	2086,968	8304,394
2,2	9,75	1913,054	8478,308
2	10	1739,14	8695,7

Πίνακας: Συντεταγμένων x,y του ταμιευτήρα του φράγματος

x(cm)	y(cm)	x(m)	y(m)
1,7	10,05	1478,269	8739,179
1,4	9,9	1217,398	8608,743
1,2	9,7	1043,484	8434,829
1	9,5	869,57	8260,915
0,85	9,7	739,1345	8434,829
0,85	10,05	739,1345	8739,179
0,8	10,35	695,656	9000,05
0,5	10,45	434,785	9087,007
0,2	10,45	173,914	9087,007
0,1	10,75	86,957	9347,878
0,1	11	86,957	9565,27
0,15	11,3	130,4355	9826,141
0,2	11,6	173,914	10087,01
0,25	11,9	217,3925	10347,88
0,3	12,2	260,871	10608,75
0,55	12,45	478,2635	10826,15
0,75	12,3	652,1775	10695,71
0,9	12,05	782,613	10478,32
1,1	12,3	956,527	10695,71
1,2	12,6	1043,484	10956,58
1,45	12,6	1260,877	10956,58
1,6	12,35	1391,312	10739,19
1,8	12,2	1565,226	10608,75
2,1	12,05	1826,097	10478,32
2,15	11,75	1869,576	10217,45
2,1	11,45	1826,097	9956,577
1,95	11,2	1695,662	9739,184
2	10,9	1739,14	9478,313
2,1	10,6	1826,097	9217,442
2,3	10,4	2000,011	9043,528
2,5	10,1	2173,925	8782,657
2,7	9,9	2347,839	8608,743
3	9,9	2608,71	8608,743
3,25	10	2826,103	8695,7
3,55	9,9	3086,974	8608,743
3,4	9,6	2956,538	8347,872

Πίνακας: Συντεταγμένων x,y του ταμιευτήρα του φράγματος

x(cm)	y(cm)	x(m)	y(m)
3,5	9,3	3043,495	8087,001
3,8	9,3	3304,366	8087,001
4,1	9,3	3565,237	8087,001
4,4	9,15	3826,108	7956,566
4,6	8,9	4000,022	7739,173
4,8	8,65	4173,936	7521,781
5,05	8,5	4391,329	7391,345
5,25	8,2	4565,243	7130,474
5,5	8,1	4782,635	7043,517
5,75	7,9	5000,028	6869,603
5,85	7,6	5086,985	6608,732
6	7,3	5217,42	6347,861
6,2	7,05	5391,334	6130,469
6,35	6,8	5521,77	5913,076
6,55	6,9	5695,684	6000,033
6,6	7,2	5739,162	6260,904
6,8	7,55	5913,076	6565,254
7,05	7,6	6130,469	6608,732
7,35	7,6	6391,34	6608,732
7,6	7,85	6608,732	6826,125
7,9	7,8	6869,603	6782,646
8,1	7,55	7043,517	6565,254
8,3	7,3	7217,431	6347,861
8,6	7,25	7478,302	6304,383
8,85	7,5	7695,695	6521,775
9,05	7,7	7869,609	6695,689
9,15	8	7956,566	6956,56
9,1	8,3	7913,087	7217,431
9,1	8,6	7913,087	7478,302
9,1	9	7913,087	7826,13
9,15	9,3	7956,566	8087,001

Πίνακας: Συντεταγμένων x,y του ταμιευτήρα του φράγματος

x(cm)	y(cm)	x(m)	y(m)
9,2	9,6	8000,044	8347,872
9,35	9,95	8130,48	8652,222
9,4	10,25	8173,958	8913,093
9,35	10,55	8130,48	9173,964
9,4	10,85	8173,958	9434,835
9,6	10,75	8347,872	9347,878
9,7	10,4	8434,829	9043,528
9,8	10,1	8521,786	8782,657
9,9	9,85	8608,743	8565,265
10,1	9,6	8782,657	8347,872
10,15	9,3	8826,136	8087,001
9,95	9,1	8652,222	7913,087
9,9	8,75	8608,743	7608,738
9,8	8,45	8521,786	7347,867
9,8	8,15	8521,786	7086,996
9,7	7,85	8434,829	6826,125
9,8	7,6	8521,786	6608,732
9,55	7,4	8304,394	6434,818
9,5	7,1	8260,915	6173,947
9,35	6,8	8130,48	5913,076
9,2	6,55	8000,044	5695,684
9,05	6,3	7869,609	5478,291
8,9	6	7739,173	5217,42
8,65	5,8	7521,781	5043,506
8,35	5,8	7260,91	5043,506
8,05	5,6	7000,039	4869,592
7,85	5,45	6826,125	4739,157
7,55	5,3	6565,254	4608,721
7,35	5,6	6391,34	4869,592
7,15	5,8	6217,426	5043,506
6,95	6	6043,512	5217,42
6,7	6,2	5826,119	5391,334
6,4	6,15	5565,248	5347,856
6,1	6,2	5304,377	5391,334
5,9	6,4	5130,463	5565,248
5,6	6,55	4869,592	5695,684
5,3	6,7	4608,721	5826,119
5,2	7	4521,764	6086,99

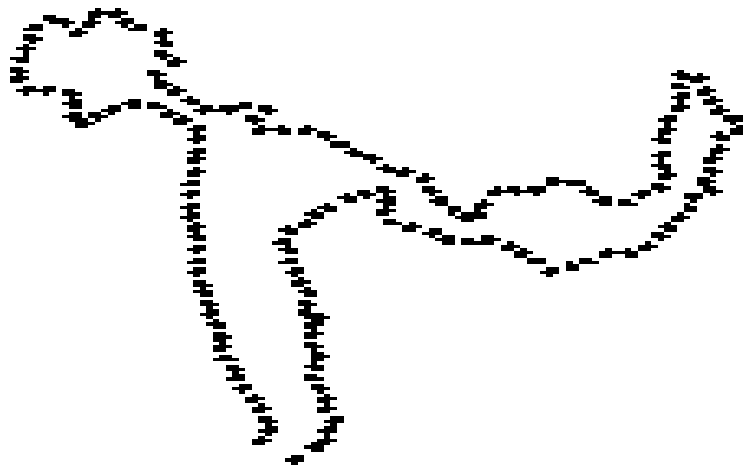
Πίνακας: Συντεταγμένων x,y του ταμιευτήρα του φράγματος

x(cm)	y(cm)	x(m)	y(m)
5,25	7,3	4565,243	6347,861
5,2	7,6	4521,764	6608,732
4,95	7,5	4304,372	6521,775
4,7	7,35	4086,979	6391,34
4,45	7,1	3869,587	6173,947
4,25	6,9	3695,673	6000,033
4,1	6,65	3565,237	5782,641
3,9	6,45	3391,323	5608,727
3,8	6,15	3304,366	5347,856
3,9	5,9	3391,323	5130,463
3,9	5,6	3391,323	4869,592
4	5,3	3478,28	4608,721
4,05	5	3521,759	4347,85
4,15	4,7	3608,716	4086,979
4,1	4,4	3565,237	3826,108
4,1	4,1	3565,237	3565,237
4,3	4	3739,151	3478,28
4,2	3,8	3652,194	3304,366
4,2	3,5	3652,194	3043,495
4,2	3,2	3652,194	2782,624
4,3	2,9	3739,151	2521,753
4,25	2,6	3695,673	2260,882
4,2	2,3	3652,194	2000,011
4,3	2	3739,151	1739,14
4,4	1,7	3826,108	1478,269
4,4	1,4	3826,108	1217,398
4,55	1,1	3956,544	956,527
4,45	0,8	3869,587	695,656
4,4	0,5	3826,108	434,785
4,25	0,3	3695,673	260,871
4	0	3478,28	0

Πίνακας: Συντεταγμένων x,y του ταμιευτήρα του φράγματος

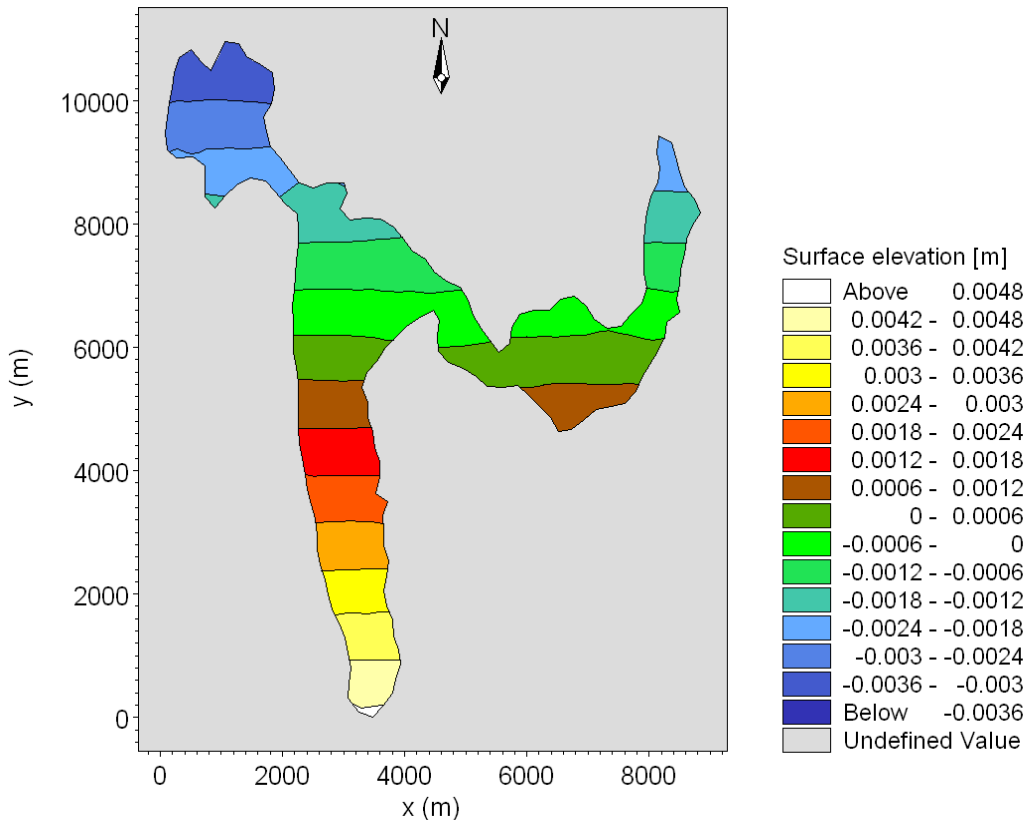


Σχήμα 17. Γραφική παράσταση του ταμιευτήρα του φράγματος μέσω Excel με τη χρήση των συντεταγμένων x,y.



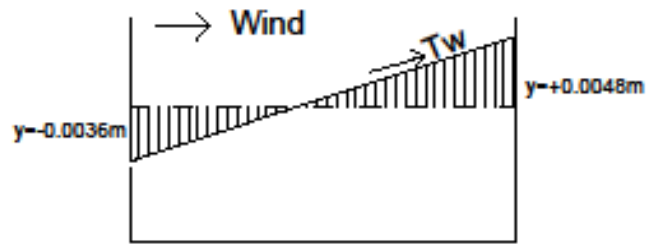
Σχήμα 18. Γραφική παράσταση του ταμιευτήρα του φράγματος μέσω Autocad με τη χρήση των συντεταγμένων x,y για την εύρεση του εμβαδού.

6.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ



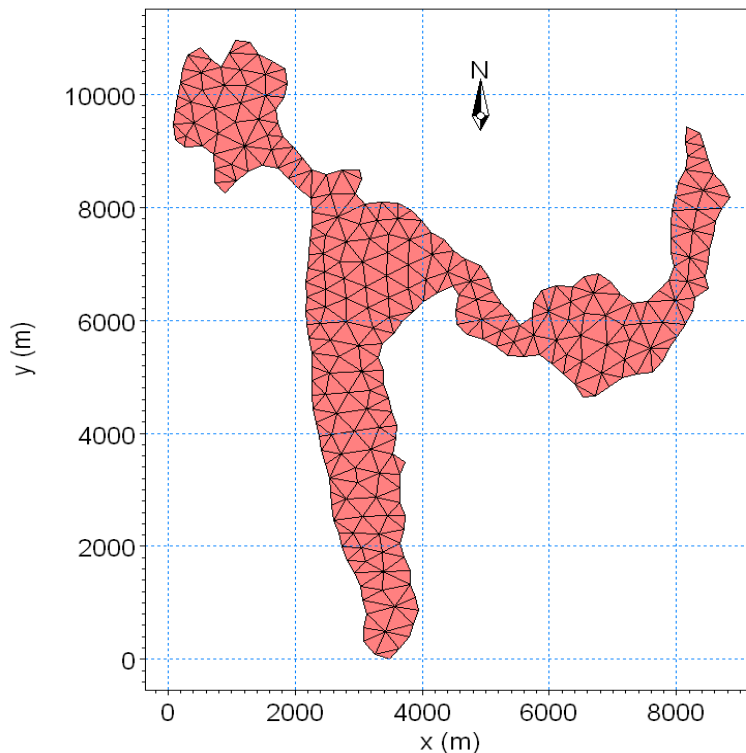
Σχήμα 19. Διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας κατά τη δράση Βόρειου ισχυρού ανέμου ταχύτητας 10 m/s.

Κατά τη διεύθυνση δράσης του ανέμου η ελεύθερη επιφάνεια αποκτά θετική κλίση αυξάνοντας τη στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα όπως φαίνεται στο σχήμα 19. Ιδιαίτερα, στη θέση όπου βρίσκεται το σώμα του φράγματος παρατηρείται η μέγιστη αύξηση της ελεύθερης επιφάνειας που φτάνει τα 0,0048 m. Το φαινόμενο αυτό είναι χαρακτηριστικό της ανεμογενούς ροής και ονομάζεται στη διεθνή βιβλιογραφία <<wind-setup>>. Η μεταβολή στην ελεύθερη επιφάνεια είναι γραμμική ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζει η αρνητική τιμή (-0,0036 m) που λαμβάνει το βάθος ροής στο βόρειο τμήμα του ταμιευτήρα όπου έχουμε την έναρξη δράσης του ανέμου.



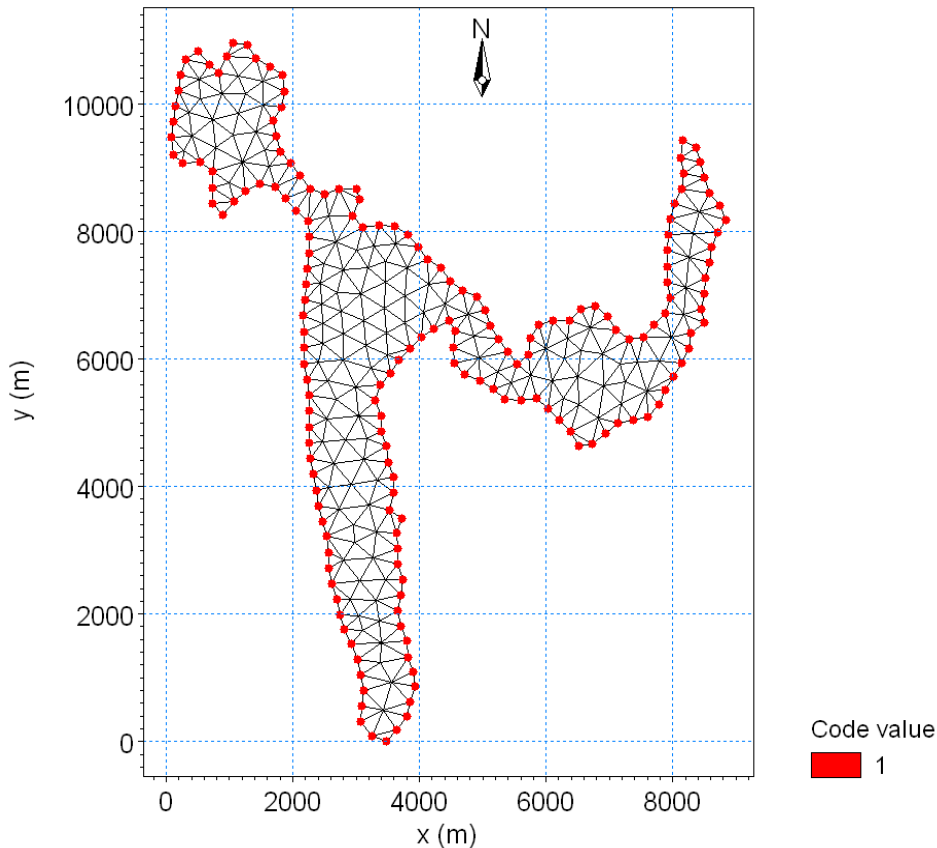
Σχήμα 20. Κατά το βάθος τομή σε απλοποιημένο μονοδιάστατο μοντέλο ανεμογενούς ροής σε λίμνη. Με T_w συμβολίζεται η διατμητική τάση που ασκεί ο άνεμος στην ελεύθερη επιφάνεια.

Στο σχήμα 20 δίδεται σχηματικά ένα απλοποιημένο μοντέλο δράσης του ανέμου σε κλειστή λίμνη. Χαρακτηριστική είναι η αύξηση (κλίση) της ελεύθερης επιφάνειας, κατά τη διεύθυνση δράσης του ανέμου. Οι τιμές της ελεύθερης επιφάνειας $+y=0,0048\text{ m}$ και $-y=0,0036\text{ m}$ είναι εκείνες που λαμβάνονται από την αριθμητική προσομοίωση για σταθερό άνεμο ταχύτητας 10 m/s .



Σχήμα 21. Απεικόνιση σταθερής βαθυμετρίας του υπολογιστικού πλέγματος του ταμιευτήρα.

Στο παραπάνω σχήμα 21 απεικονίζεται το μέσο βάθος του ταμιευτήρα που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της αριθμητικής προσομοίωσης. Το οποίο θεωρήσαμε σταθερό σε όλο το εύρος του ταμιευτήρα του φράγματος, $H=22m$. Αυτό είχε ως σκοπό την αποφυγή αριθμητικών προβλημάτων κατά την διαδικασία της προσομοίωσης καθώς και την απλοποίηση των αριθμητικών προσομοιώσεων.



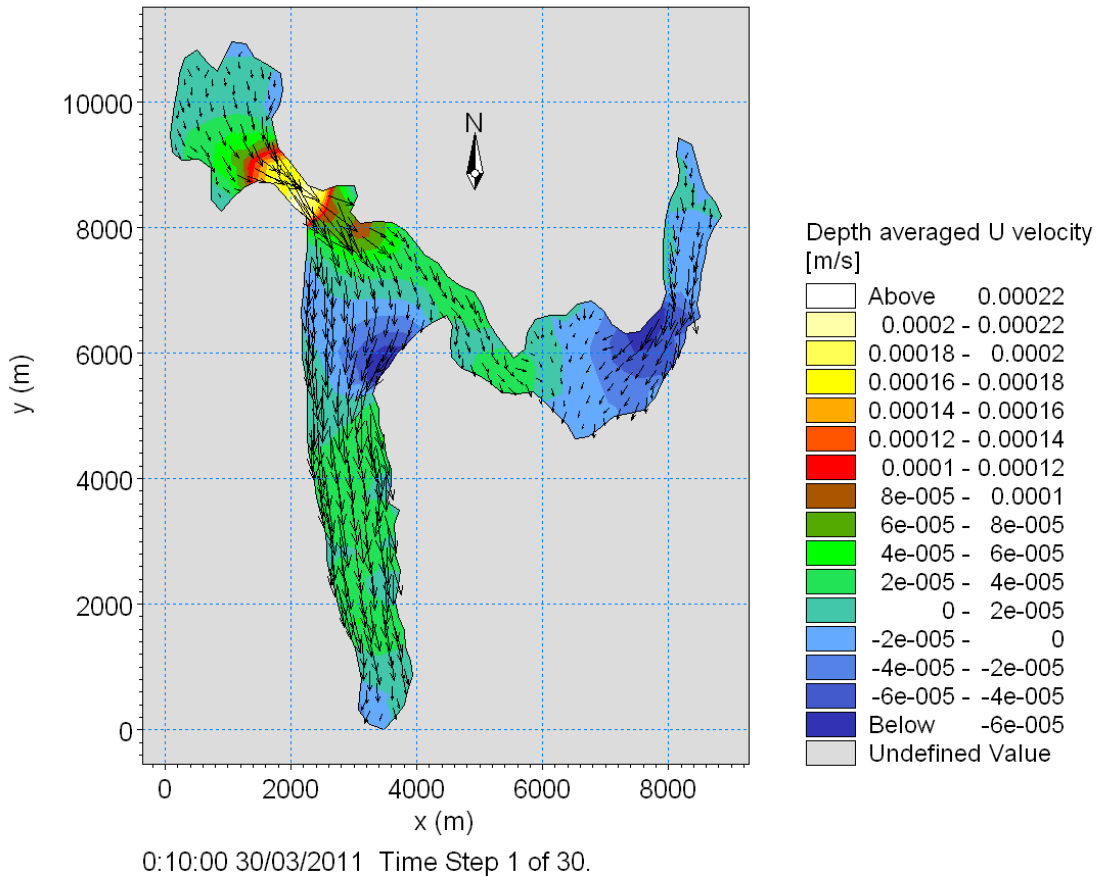
Σχήμα 22. Διαμόρφωση του υπολογιστικού πεδίου στο οποίο έχουν επιλυθεί οι εξισώσεις ροής.

Στο σχήμα 22 δίδεται η κάτοψη της λίμνης όπου φαίνεται το υπολογιστικό πλέγμα διαμορφώθηκε με τριγωνικά στοιχεία – κελιά με διαστάσεις τέτοιες ώστε το εμβαδόν του κάθε υπολογιστικού κελιού να είναι $A=95.000 \text{ m}^2$, που αντιστοιχεί σε μέσο μήκος πλευράς ισόπλευρου τριγώνου 435 m.

$$A = \frac{1}{2}(\Delta x) \cdot (\Delta x)$$

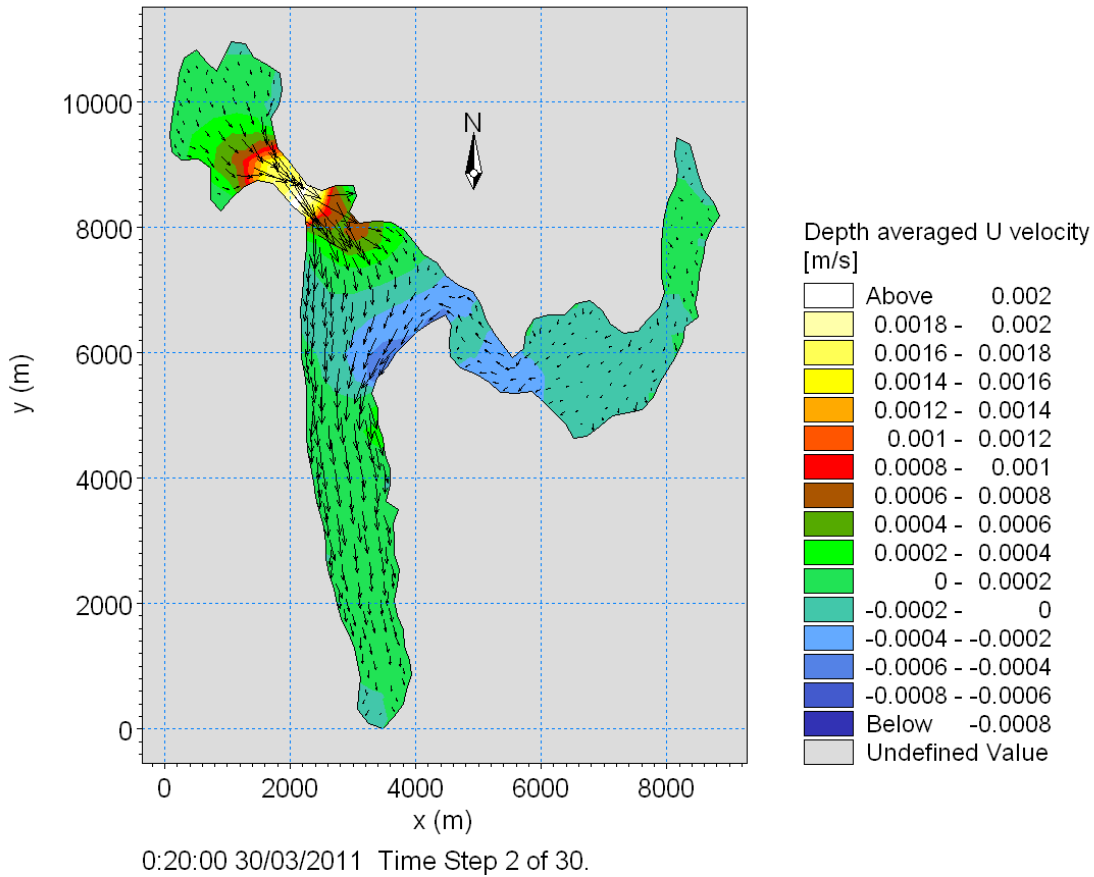
$$\Delta x^2 = 2A \Rightarrow (\Delta x) = \sqrt{2A} \Rightarrow (\Delta x) = \sqrt{2 \cdot 95.000} = \sqrt{190.000} \Rightarrow (\Delta x) \cong 435m$$

Ο αριθμός των υπολογιστικών κελιών είναι $N=404$. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις έγιναν για πραγματικό χρόνο δράσης του ανέμου ίσο με 5 h (ώρες) που αντιστοιχεί σε υπολογιστικό χρόνο 30 min.



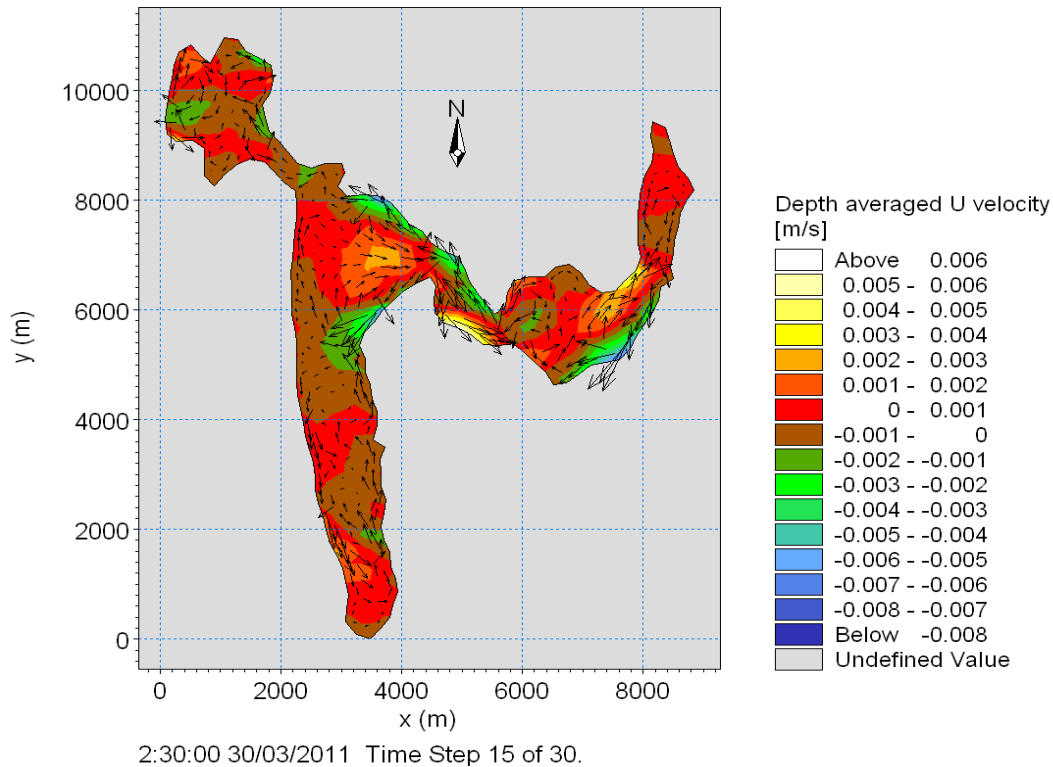
Σχήμα 23. Στιγμιότυπο όπου στο οποίο απεικονίζεται το πεδίο ρευμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια του ταμιευτήρα, για τα πρώτα 10 min από την έναρξη δράσης του ανέμου.

Στο στιγμιότυπο του σχήματος 23 διακρίνεται το πεδίο των επιφανειακών ρευμάτων 10 min μετά την έναρξη δράσης του ανέμου. Στην ελεύθερη επιφάνεια δεν έχει προλάβει να διαμορφωθεί το πεδίο ροής που αντιστοιχεί στη μόνιμη ροή οπότε η δράση του ανέμου σαρώνει την ελεύθερη επιφάνεια με αποτέλεσμα τα ρεύματα να ακολουθούν τη διεύθυνση δράσης του ανέμου. Στη μικρότερη διατομή του ταμιευτήρα που παρατηρείται στη θέση $(x, y) = (2000, 8500)$ λαμβάνουμε τη μεγαλύτερη ταχύτητα, όπως αναμένεται και για την περίπτωση ανοικτού αγωγού στη θέση της μέγιστης στένωσης.



Σχήμα 24. Στιγμιότυπο όπου φαίνεται το πεδίο ρευμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια του ταμιευτήρα για τα πρώτα 20 min από την έναρξη δράσης του ανέμου.

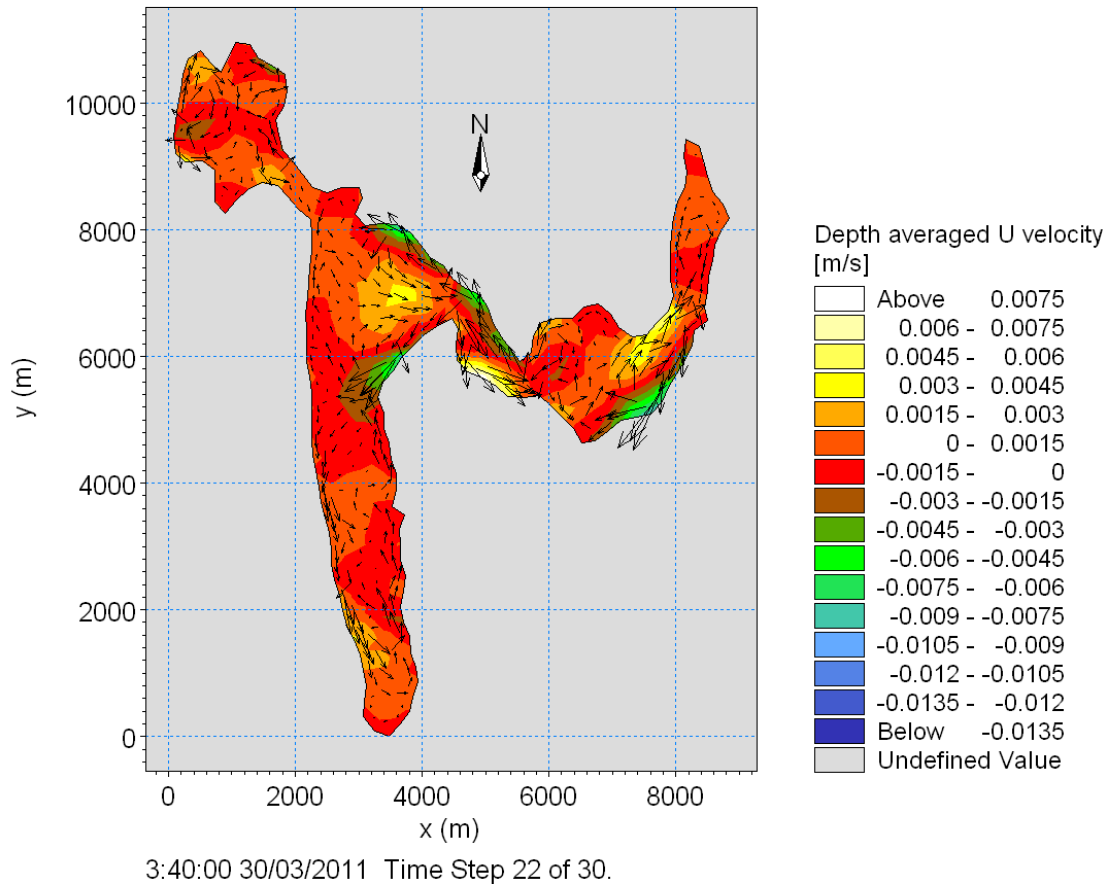
Στο στιγμιότυπο του σχήματος 24 διακρίνεται το πεδίο των επιφανειακών ρευμάτων 20 min μετά την έναρξη δράσης του ανέμου. Ο άνεμος σαρώνει την ελεύθερη επιφάνεια διαμορφώνοντας πεδίο ροής που ακολουθεί την διεύθυνση δράσης του ανέμου. Το ανατολικό στενό τμήμα <<δουλεύει>> (συμπεριφέρεται) ως φυσικός (ανοικτός) αγωγός με στένωση. Άρα, έχει μεγαλύτερη ταχύτητα όπως αναμένεται.



Σχήμα 25. Στιγμιότυπο στο οποίο διακρίνεται το πεδίο των επιφανειακών ρευμάτων 2:30 h(ώρες) μετά την έναρξη δράσης του ανέμου.

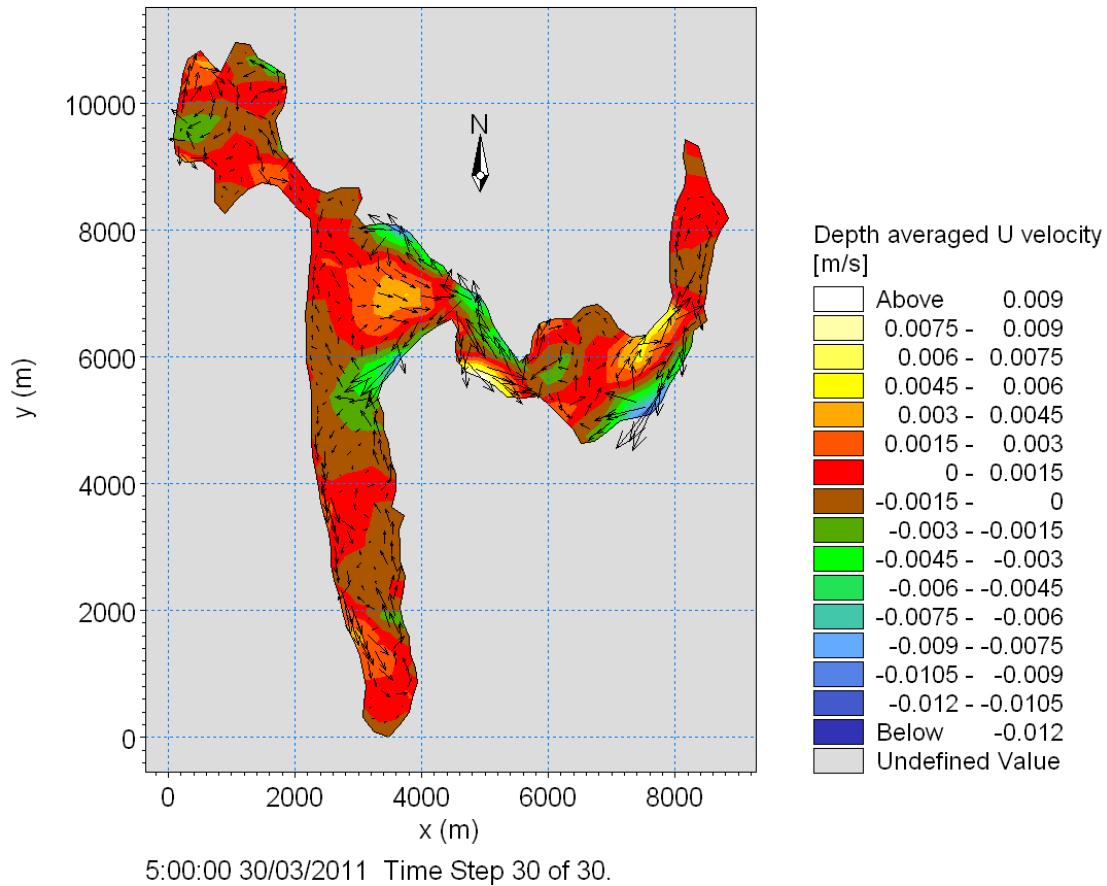
Το πεδίο ροής στο σχήμα 25 αναπαριστάται με την ταχύτητα των ρευμάτων που λαμβάνει θετικές και αρνητικές τιμές. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η δομή της κυκλοφορίας των υδάτων που φαίνεται, ότι στις ανατολικές ακτές του ταμειυτήρα η διεύθυνση των ρευμάτων είναι κατά τη φορά δράσης του ανέμου μέχρι τη θέση του φράγματος όπου η ροή αναστρέφεται ακολουθώντας αντίθετη πορεία και εξαναγκάζοντας τα ύδατα να ακολουθούν περιστροφική (αριστερόστροφη) κίνηση. Η παρατήρηση αυτή είναι σημαντική, γιατί στην περίπτωση που ένας ρύπος εγχυθεί σε κάποια θέση των ανατολικών ακτών αυτός θα κινηθεί από το πεδίο ροής προς τα βόρεια του ταμειυτήρα, προκαλώντας εκεί και μόνο πιθανή ρύπανση.

Στις θέσεις μέγιστης στένωσης ενώ με βάση την αρχή της συνέχειας αναμένεται αύξηση της ταχύτητας αυτό δεν παρατηρείται και στις δύο θέσεις στενώσεως. Αλλά μόνο στην δυτική πλευρά του ταμειυτήρα και αυτό οφείλεται στην κυκλοφορία της ροής και όχι στη παρουσία της στένωσης.



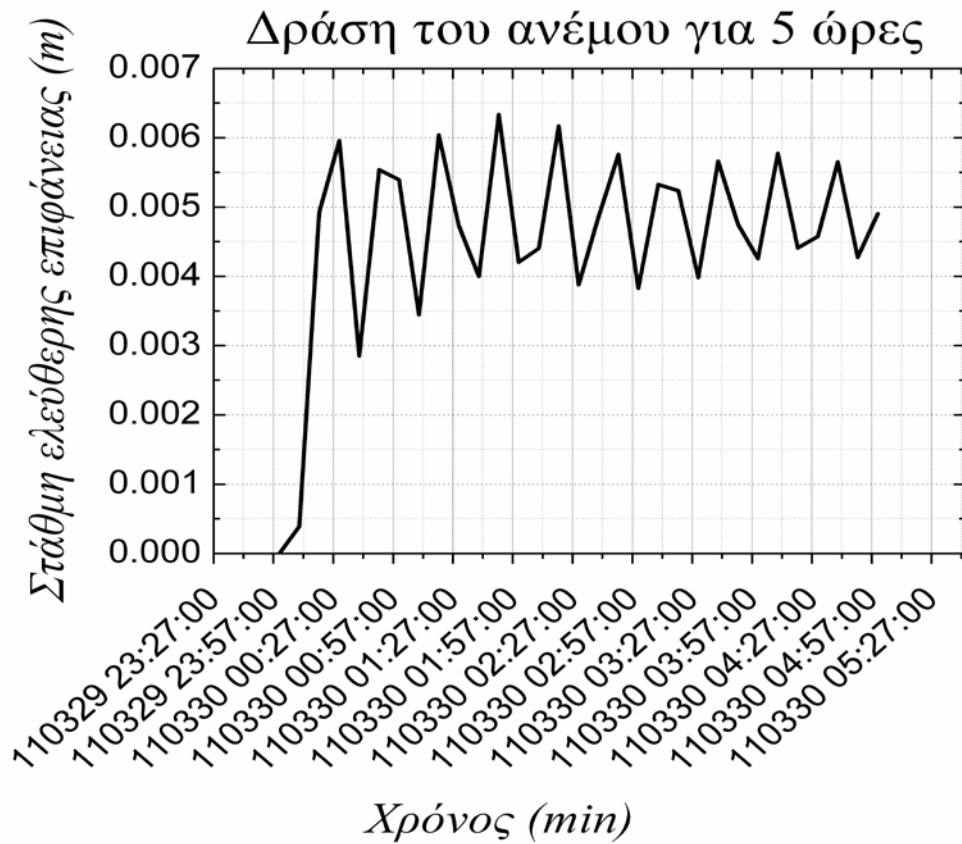
Σχήμα 26. Στιγμιότυπο όπου φαίνεται το πεδίο ρευμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια του ταμιευτήρα 3:40 h (ώρες) μετά την έναρξη δράσης του ανέμου.

Το πεδίο ροής στο σχήμα 26 αναπαριστάται με την ταχύτητα των ρευμάτων που λαμβάνει θετικές και κατά το πλείστον αρνητικές τιμές. Σε αυτό το στιγμιότυπο παρατηρείται ότι στις ανατολικές ακτές του ταμιευτήρα η διεύθυνση των ρευμάτων είναι κατά τη φορά δράσης του ανέμου μέχρι τη θέση του φράγματος όπου η ροή αναστρέφεται ακολουθώντας αντίθετη πορεία και εξαναγκάζοντας τα ύδατα να ακολουθούν περιστροφική (αριστερόστροφη) κίνηση.



Σχήμα 27. Τελικό στιγμιότυπο κατά το οποίο διακρίνεται το πεδίο των επιφανειακών ρευμάτων 5 h(ώρες) μετά την έναρξη δράσης του ανέμου.

Σε αυτό το στιγμιότυπο (Σχήμα 27.) παρατηρείται ότι, με βάση τις αριθμητικές προσομοιώσεις τα ύδατα ακολουθούν τη φορά του ανέμου στην ανατολική πλευρά του ταμιευτήρα, στη συνέχεια καθώς τα ύδατα φτάνουν στο φράγμα ακολουθούν περιστροφική κίνηση. Επιπλέον, μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι τα ρεύματα λόγω κλίσης της ελεύθερης επιφάνειας πάλι και στην περίπτωση αυτή οι μέγιστες ταχύτητες παρατηρούνται στις στενώσεις του ταμιευτήρα. Αυτό οφείλεται στην απλή φυσική γεωμετρία του ταμιευτήρα που ακολουθεί τη φιλοσοφία της ροής σε στένωση.



Σχήμα 28. Μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας κατά τη δράση του ανέμου.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας, ακριβώς ανάντη του σώματος του φράγματος, που προκαλείται από τη δράση του ανέμου (Σχήμα 28.). Η ελεύθερη επιφάνεια ταλαντώνεται με μικρή διακύμανση λαμβάνοντας τιμές με εύρος περίπου 0,003 m. Αν και η τιμή αυτή είναι αρκετά μικρή μπορεί βαθμιαία να προκαλέσει φθορά στα ανάντη τμήματα του έργου.

6.3 Τελικά Συμπεράσματα

1. Υπολογίστηκε το τρισδιάστατο πεδίο επιφανειακών και υποεπιφανειακών ρευμάτων που προκαλούνται από τη δράση του ανέμου στον ταμιευτήρα του φράγματος Καστρακίου.
2. Εκτιμήθηκαν οι θέσεις όπου εμφανίζονται τα ισχυρότερα ανεμογενή ρεύματα με ταχύτητες (0.0048, 0.0090, 0.0075), με αποτέλεσμα οι θέσεις αυτές να μπορούν να προταθούν στο μέλλον ως πιθανά σημεία απόρριψης σημειακών πηγών ρύπανσης, όπως είναι οι αγωγοί διάθεσης λυμάτων (αστικών ή βιομηχανικών) από την εγγύς περιοχή.
3. Παρατηρείται μονιμότητα στη δομή των ρευμάτων που ακολουθούν τη διεύθυνση του ανέμου στις ανατολικές ακτές του ταμιευτήρα και αντίθετη φορά στις δυτικές.
4. Μελετήθηκε η μέγιστη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού στον ταμιευτήρα και συγκεκριμένα ανάντη του σώματος του φράγματος, όπου λαμβάνει μέγιστη τιμή 0,006 m. Η τιμή αυτή είναι καθοριστική για την περεταίρω μελέτη της αντοχής των υλικών που τοποθετούνται στην ανάντη παρειά του φράγματος λόγω της μεταβολής της στάθμης ανάντη της παρειάς του φράγματος.
5. Το πεδίο των ρευμάτων που υπολογίστηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δεδομένο εισόδου σε κώδικες προσομοίωσης της μεταφοράς του ιζήματος στον πυθμένα του ταμιευτήρα με αποτέλεσμα να μπορεί να εκτιμηθεί ο ωφέλιμος χρόνος ζωής του φράγματος.
6. Αποκτήθηκε γενικότερη εμπειρία στην εφαρμογή τρισδιάστατων αριθμητικών κωδίκων για την προσομοίωση της ροής υπό φυσικές φορτίσεις όπως είναι ο άνεμος και η θερμική στρωμάτωση. Αν και στη παρούσα εργασία θεωρήθηκε ρ =σταθερό καθ' ύψος της υδάτινης στήλης.
7. Αποκτήθηκε εμπειρία στη χρήση σχεδιαστικού λογισμικού autocad μέσω της αξιοποίησής του για τον υπολογισμό του εμβαδού της επιφάνειας των υδάτων του ταμιευτήρα.

Ευρετήριο

Εικόνες

- Εικόνα 1.** Πανοραμική άποψη του φράγματος Καστρακίου.....σελ.6
- Εικόνα 2.** Φράγμα Καστρακίου.....σελ.6
- Εικόνα 3.** Γενική άποψη του φορέα του φράγματος Καστρακίου.....σελ.11
- Εικόνα 4.** Εκχειλιστής του υδροηλεκτρικού φράγματος Καστρακίουσελ.12
- Εικόνα 5.** Γενική άποψη του εκχειλιστή της τεχνητής λίμνης Καστρακίου.....σελ.12
- Εικόνα 6.** Υπερχειλιστής Καστρακίου σε λειτουργίασελ.13
- Εικόνα 7.** Γενική άποψη του ποταμού Αχελώου, όπου έχει κατασκευαστεί το ΥΗΕ Καστρακίου, (α) πλησίον του ταμιευτήρα, (β) στη μέγιστη στένωση ποταμού.....σελ.14
- Εικόνα 8.** Γενική άποψη της βιοποικιλότητας του Φράγματος Καστρακίου.....σελ.15
- Εικόνα 9.** Η θερμοκρασία επηρεάζει τους υδρόβιους πληθυσμούς.....σελ.42
- Εικόνα 10.** Θερμική στρωμάτωση βαθιάς λίμνης στη διάρκεια του καλοκαιριούσελ.43
- Εικόνα 11.** Θερμική στρωμάτωση και αναστροφή.....σελ.44
- Εικόνα 12.** Φάσεις της θερμικής στρωμάτωσης του νερού μιας διμικτικής λίμνης, από αρχές καλοκαιριού μέχρι αρχές φθινοπώρου και οι αναστροφές, φθινοπωρινή και εαρινή.....σελ.45

Σχήματα

- Σχήμα 1.** Διάγραμμα μέσης ωριαίας παροχής ίδιας λεκάνηςσελ.13
- Σχήμα 2.** Πλωτή άγκυρα και συμπεριφορά της όταν αναπτύσσεται ένα ισχυρό επιφανειακό ρεύμα.....σελ.17
- Σχήμα 3.** Απεικόνιση ανάπτυξης της σπείρας σύμφωνα με τον Ekman.....σελ.19

Σχήμα 4. Προσομοίωση των ανεμογενών ρευμάτων σύμφωνα με τον Ekman	σελ.21
Σχήμα 5. Επίδραση της ταχύτητας πάνω στη κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου	σελ.23
Σχήμα 6. Μεταβολή της κατανομής των ταχυτήτων του ανέμου με τις συνθήκες ευστάθειας της ατμόσφαιρας	σελ.24
Σχήμα 7. Απλό μοντέλο για τη μελέτη ρευμάτων	σελ.25
Σχήμα 8. Γραμμές ροής ρευμάτων	σελ.25
Σχήμα 9. Επίδραση των δυνάμεων Coriolis	σελ.26
Σχήμα 10. Τρισδιάστατο πεδίο παράκτιας κυκλοφορίας.....	σελ.27
Σχήμα 11. Σχέση μεταξύ ισοβαρικών και ισόπυκνων επιφανειών σε (α) βαροτροπικές και (β) βαροκλιτικές συνθήκες.....	σελ.31
Σχήμα 12. Δομή της ροής του ταμιευτήρα.....	σελ.32
Σχήμα 13. Περιοχές ανάμιξης	σελ.33
Σχήμα 14. Κατακόρυφη δομή του θερμοκλινούς σε λίμνες και ταμιευτήρες.....	σελ.39
Σχήμα 15. Δομή τρισδιάστατου υπολογιστικού πλέγματος που εφαρμόζεται στον κώδικα.....	σελ.63
Σχήμα 16. Χάρτης: Απεικόνιση του ταμιευτήρα υδροηλεκτρικού φράγματος Καστρακίου	σελ.66
Σχήμα 17. Γραφική παράσταση του ταμιευτήρα του φράγματος μέσω Excell με τη χρήση των συντεταγμένων x,y.....	σελ.72
Σχήμα 18. Γραφική παράσταση του ταμιευτήρα του φράγματος μέσω Autocad με τη χρήση των συντεταγμένων x,y για την εύρεση του εμβαδού.....	σελ.72
Σχήμα 19. Διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας κατά τη δράση Βόρειου ισχυρού ανέμου ταχύτητας 10 m/s.....	σελ.73
Σχήμα 20. Κατά το βάθος τομή σε απλοποιημένο μονοδιάστατο μοντέλο ανεμογενούς ροής σε λίμνη. Με T_w συμβολίζεται η διατμητική τάση που ασκεί ο άνεμος στην ελεύθερη επιφάνεια.....	σελ.74
Σχήμα 21. Απεικόνιση σταθερής βαθυμετρίας του υπολογιστικού πλέγματος του ταμιευτήρα.....	σελ.74

Σχήμα 22. Διαμόρφωση του υπολογιστικού πεδίου στο οποίο έχουν επιλυθεί οι εξισώσεις ροής.....σελ.75

Σχήμα 23. Στιγμιότυπο όπου στο οποίο απεικονίζεται το πεδίο ρευμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια του ταμιευτήρα, για τα πρώτα 10 min από την έναρξη δράσης του ανέμου.....σελ.76

Σχήμα 24. Στιγμιότυπο όπου φαίνεται το πεδίο ρευμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια του ταμιευτήρα για τα πρώτα 20 min από την έναρξη δράσης του ανέμου.....σελ.77

Σχήμα 25. Στιγμιότυπο στο οποίο διακρίνεται το πεδίο των επιφανειακών ρευμάτων 2:30 h(ώρες) μετά την έναρξη δράσης του ανέμου.....σελ.78

Σχήμα 26. Στιγμιότυπο όπου φαίνεται το πεδίο ρευμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια του ταμιευτήρα 3:40 h (ώρες) μετά την έναρξη δράσης του ανέμου.....σελ.79

Σχήμα 27. Τελικό στιγμιότυπο κατά το οποίο διακρίνεται το πεδίο των επιφανειακών ρευμάτων 5 h(ώρες) μετά την έναρξη δράσης του ανέμου.....σελ.80

Σχήμα 28. Μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας κατά τη δράση του ανέμου.....σελ.81

Πίνακες

Πίνακας 5.1 Εμπειρικές σταθερές στο μοντέλο $k - \epsilon$ (από Rodi, 1984).....σελ.62

Πίνακας: Συντεταγμένων x,y του ταμιευτήρα του φράγματος.....σελ.67-71

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία

[1] Δ.-Π. Ν. Κοντονή, Υπολογισμός Κατασκευών με Η/Υ, Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής, Τ.Ε.Ι. Πάτρας, Πάτρα, 1995/1999.

[2] Δ.-Π. Ν. Κοντονή, Επιστημονικά-Εκπαιδευτικά Προγράμματα Η/Υ ειδικότητας Πολιτικού Μηχανικού, Πάτρα, 1985-2011.

[3] Δ.-Π. Ν. Κοντονή, Πολιτικός Μηχανικός & Η/Υ, Εισαγωγή στους Η/Υ, Εισαγωγή στο Διαδίκτυο (Internet) και στις υπηρεσίες του (Διδακτικές Σημειώσεις), Ασκήσεις Προγραμματισμού Η/Υ I & II (Φύλλα Έργου), Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής, Τ.Ε.Ι. Πάτρας, Πάτρα, 1998-2011.

[4] Γιάννη Α., 2003, Αριθμητική προσομοίωση της επίδρασης της απορροής του ποταμού Αχελώου, στην παράκτια κυκλοφορία και τη διάχυση των νιτρικών και φωσφορικών αλάτων στον Πατραϊκό κόλπο. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.

[5] Δρακόπουλος Π., Λασκαράτος Α., 1993. Ημιημερήσια βαροκλιτικά φαινόμενα, εκδόσεις Αρμός.

[6] Θεοδώρου. Ι. Α., 2000. Γενική Ωκεανογραφία, Μακεδονικές Εκδόσεις.

[7] Θεοδώρου. Ι. Α., 2002. Μηχανική των ωκεανών, Μακεδονικές Εκδόσεις.

[8] Λασκαράτος Α., Παπαγεωργάκη Γ., 1984. Μελέτη των επιφανειακών θερμοκρασιών θάλασσας (SST).

[9] Ζαχαρίας Ι., 2002. Σημειώσεις Επιχειρησιακής Ωκεανογραφίας, εκδόσεις Σταμούλη

[10] Δημητρίου Ι. Περιβαλλοντική Υδραυλική, εκδόσεις Ίων.

[11] Τσόγκας Ε. Χρήστος, Τσόγκα Ελισάβετ Χ., 2009. Υδροδυναμικά Έργα Φράγματα, εκδόσεις Ίων.

[12] Ιακώβου Γ. Γκανούλη, 1984. Υδραυλική Περιβάλλοντος, Θεσσαλονίκη, εκδόσεις Συμμετρία.

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

[1] Artina S., Bolognesi A., Liserra T., Maglionico M., 2006. Simulation of a storm sewer network in industrial area: Comparison between models calibrated through experimental data. *Environmental Modelling & Software*, 22, Issue 8, p.p. 1221-1228.

[2] Shankar J. N., Cheong F. H., Sankaranarayanan S. 1997. Multilevel finite-difference model for three-dimensional hydrodynamic circulation. *Ocean Engng*, 24, No 9, p.p.785-816.

[3] Tucker S. C., Steby A. J., 1995. Daytime Mechanical Water Circulation Channel Catfish Ponds. *Aquacultural Engineering*, 14, p.p. 15-27.

[4] Berthot A., Pattiaratchi C., 2005. Field measurements of the three-dimensional current structure in the vicinity of a headland-associated linear sandbank. *Continental Shelf Research*

[5] <http://www.mikebydhi.com/Products/CoastAndSea/MIKE3/Hydrodynamics.aspx>

[6] <http://el.wikipedia.org/wiki/Φράγμα>

[7] <http://www.cityofagrinio.gr/city/dams>

[8] <http://www.airphotos.gr/etoloakarnanialimnes.htm>

[9] <http://www.numm.ac.be/coherens.html>

[10] http://www.gfdl.dov/~rwh/HIM/him_c.html

[11] http://www.mpimet.mpg.de/working_groups/wg2/HOPE.html

[12] <http://www.knmi.nl/~jwdv/WAQUA/General.html>

[13] http://itia.ntua.gr/nikos/avx_int/CDfrag/reservoirs/Kastraki_main.htm

- [14] <http://gym-dafnis.ach.sch.gr/fragmata.htm>
- [15] <http://egpaid.blogspot.com/2009/01/blog-post-6013.html>
- [16] http://el.wikipedia.org/wiki/Υδροηλεκτρικό_φράγμα_Καστρακίου
- [17] <http://cool.pblogs.gr/tags/fragmata-gr.html>
- [18] <http://wikimapia.org/el/Υδροηλεκτρικός-Σταθμός-Φράγματος-Καστρακίου-320-MW>
- [19] <http://www.hellenica.de/ΥdroilektrikoFragmaΚαστρακίου.html>
- [20] http://e-topo.web.auth.gr/TOMEIS_INDE/Fotiadis/FRAGMATA/index.html
- [21] <http://myagrinio.blogspot.com/2010/04/blog-post-09.html>
- [22] www.greecephotos.gr/.../displayimage.php
- [23] <http://www.epoxi.gr/photo12.htm>
- [24] <http://www.soc.soton.ac.uk/JRD/OCCAM>
- [25] www.hellenica.de/.../LimniKastrakiou.html
- [26] www.dei.gr/Documents/imeranerou.pdf
- [27] www.googleearth.com
- [28] www.wikipedia_axelwos.gr
- [29] <http://www.protothema.gr/environment/article/?aid=82828>