

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ
ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΣΤΟΝ
ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΣΤΡΑΤΟΥ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ Η/Υ**



ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΕΣ :

**ΜΑΡΙΑ-ΔΙΟΝΥΣΙΑ ΓΙΑΤΡΑ
ΜΑΡΙΑ ΜΑΡΙΟΛΑ
ΣΠΥΡΙΔΟΥΛΑ-ΣΑΝΤΡΑ ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ**

ΕΙΣΗΓΗΤΕΣ-ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ: Δρ. ΔΙΟΝΥΣΙΑ-ΠΗΝΕΛΟΠΗ Ν. ΚΟΝΤΟΝΗ
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός
Αν. Καθηγήτρια Τ.Ε.Ι.

Δρ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ Θ. ΦΟΥΡΝΙΩΤΗΣ
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός
Επιστημονικός Συνεργάτης Τ.Ε.Ι.

ΠΑΤΡΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2011

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελίδα

<u>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ</u>	4
<u>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</u>	7
<u>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</u>	8
<u>ΣΚΟΠΟΣ</u>	9
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ</u>	10
1.1 ΓΕΝΙΚΑ	10
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	10
1.3 ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ.....	11
1.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ.....	13
1.5 ΟΡΙΣΜΟΙ-ΕΠΕΞΗΓΗΣΕΙΣ.....	14
1.6 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ.....	16
1.6.1 ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	16
1.6.2 ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΑΝΩΤΑΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ.....	19
1.6.3 ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΤΥΠΟ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ.....	23
1.6.4 ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΜΕΓΙΣΤΟ ΥΨΟΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ.....	24
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΣΤΡΑΤΟΥ</u>	27
2.1 ΠΟΤΑΜΟΣ ΑΧΕΛΩΟΣ.....	27
2.2 ΦΡΑΓΜΑ ΣΤΡΑΤΟΥ.....	30
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΓΕΝΙΚΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ</u>	32
3.1 ΑΝΕΜΟΓΕΝΗ ΡΕΥΜΑΤΑ.....	32
3.1.1 ΣΥΖΕΥΞΗ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΑΣ.....	32
3.1.2 ΓΕΝΕΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ.....	33
3.1.3 ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΚΑΙ ΙΣΗΜΕΡΙΝΗ ΑΝΑΔΥΣΗ.....	34
3.2 ΓΕΩΣΤΡΟΦΙΚΑ ΡΕΥΜΑΤΑ.....	35
3.2.1 ΘΕΡΜΟ-ΑΛΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ.....	36
3.2.2 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ.....	36
3.3 ΑΔΡΑΝΕΙΑ ΚΑΙ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΑ ΡΕΥΜΑΤΑ.....	38
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΜΙΞΗ ΣΕ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ</u>	39
4.1 Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ – ΛΙΜΝΩΝ.....	39
4.2 ΕΙΣΡΟΕΣ- ΕΚΡΟΕΣ ΣΕ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ.....	42

4.2.1 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΙ ΑΝΕΜΟΙ.....	42
4.2.2 ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΔΙΑ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	43
4.2.3 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ –ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΟΜΗ.....	44
4.2.4 ΕΙΣΡΟΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ.....	49
4.2.5 ΕΚΡΟΗ ΑΠΟ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ.....	50
4.3 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΑΝΑΜΙΞΗ ΣΤΟ ΕΠΙΛΙΜΝΙΟ.....	51
4.3.1 ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΗ ΜΕΤΑΘΕΣΗ.....	51
4.3.2 ΑΝΕΜΟΙ	54
4.4 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΑΝΑΜΙΞΗ ΣΤΟ ΥΠΟΛΙΜΝΙΟ	54
4.5 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΑΝΑΜΙΞΗ ΣΕ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ.....	55
4.6 ΕΙΣΡΟΕΣ ΣΕ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ.....	55
4.7 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΟΡΙΑΚΗ ΣΤΟΙΒΑΔΑ – ΔΡΑΣΗ ΑΝΕΜΟΥ.....	54
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ</u>	60
5.1 ΓΕΝΙΚΟΤΗΤΕΣ ΠΑΝΩ ΣΤΑ ΡΕΥΜΑΤΑ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΟΥΝΤΑΙ ΠΑΝΩ ΣΤΟΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ.....	60
5.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΟΜΟΙΩΜΑ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ.....	61
5.3 ΡΕΥΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝΤΑΙ ΛΟΓΩ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ – ΑΝΕΜΟΓΕΝΗ ΡΕΥΜΑΤΑ.....	62
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΦΡΑΓΜΑΤΑ, ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ</u>	64
6.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	67
6.2 ΒΑΣΙΚΑ ΟΦΕΛΗ ΑΠΟ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ	66
6.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	69
6.4 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	70
6.5 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΓΗΙΝΟ ΦΛΟΙΟ.....	72
6.6 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΒΙΟΛΟΓΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	73
6.7 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΥΔΡΟΒΙΑ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	73
6.8 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΖΩΗ.....	74
6.9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	75

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ</u>	77
7.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	78
7.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ.....	80
7.3 ΕΞΕΛΙΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	80
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΜΙΚΕ 3 FM (HD)</u>	82
8.1 Ο ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΙΚΕ 3 FM (HD).....	82
8.2 Η ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ.....	82
8.2.1 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΣΕ ΚΑΡΤΕΣΙΑΝΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ.....	82
8.2.1.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΗΧΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	82
8.2.1.2 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ.....	85
8.2.1.3 ΕΞΙΣΩΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΡΥΠΟΥ.....	86
8.2.1.4 ΟΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΚΑΡΤΕΣΙΑΝΕΣ ΚΑΙ ΙΓΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ.....	87
8.2.2 Η ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ.....	89
8.2.2.1 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΙΕΩΔΟΥΣ.....	89
8.2.2.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΣΤΗΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ.....	89
8.2.2.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ.....	90
8.3 Η ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ.....	92
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ</u>	94
9.1 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ.....	94
9.2 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	95
9.3 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΤΟ ΟΠΟΙΟ ΘΑ ΕΠΙΛΥΘΟΥΝ ΟΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΗΣ.....	99
9.4 ΑΠΕΙΚΟΝΗΣΗ ΤΗΣ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΣΤΡΑΤΟΥ.....	100
9.5 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	101
9.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	107
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	108

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Ετήσια παραγόμενη υδροηλεκτρική ενέργεια ΥΗΣ των εξεταζόμενων φραγμάτων (σελ.19)

Σχήμα 2: Χωρητικότητα ταμιευτήρα στην ΑΣΠ (σελ.21)

Σχήμα 3: Τύποι φραγμάτων εξεταζόμενων ταμιευτήρων (σελ.24)

Σχήμα 4: Ταξινόμηση φραγμάτων βάσει του μέγιστου ύψους (σελ.26)

Σχήμα 5: Γράφημα εισροών-εκροών στους ταμιευτήρες του Συγκροτήματος Αχελώου (σελ.29)

Σχήμα 6: Γράφημα παροχών π. Αχελώου στους Ταμιευτήρες Κρεμαστών, Καστρακίου, Στράτου (σελ.30)

Σχήμα 7: Προσομοίωση των ανεμογενών ρευμάτων σύμφωνα με τον Ekman (σελ.34)

Σχήμα 8: Άντληση από μεταφορά Ekman στην περιοχή του ισημερινού (σελ.35)

Σχήμα 9: Η θερμοκρασία επηρεάζει τους υδρόβιους πληθυσμούς (σελ.45)

Σχήμα 10: Θερμική στρωμάτωση βαθιάς λίμνης στη διάρκεια του καλοκαιριού (σελ.46)

Σχήμα 11: Θερμική στρωμάτωση και αναστροφή (σελ.47)

Σχήμα 12: Φάσεις της θερμικής στρωμάτωσης του νερού μιας διμικτικής λίμνης, από αρχές καλοκαιριού μέχρι αρχές φθινοπώρου και οι αναστροφές, φθινοπωρινή και εαρινή (σελ.48)

Σχήμα 13: Η είσοδος δυναμικής ενέργειας με το ρεύμα (σελ.49)

Σχήμα 14: Δομή θερμοκλινούς σε λίμνες (σελ.53)

Σχήμα 15: Περιοχές ανάμιξης (σελ.56)

Σχήμα 16: Επίδραση της ταχύτητας πάνω στην κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου (σελ.58)

Σχήμα 17: Μεταβολή της κατανομής των ταχυτήτων του ανέμου με τις συνθήκες ευστάθειας της ατμόσφαιρας(σελ.59)

Σχήμα 18: Πλωτή άγκυρα και συμπεριφορά της όταν αναπτύσσεται ένα ισχυρό επιφανειακό ρεύμα (σελ.60)

Σχήμα 19: Τρισδιάστατο πεδίο παράκτιας κυκλοφορίας (σελ.62)

Σχήμα 20: Απλό μοντέλο για την μελέτη ρευμάτων στον Β. Ατλαντικό (σελ.62)

Σχήμα 21: Η επίδραση της δύναμης Coriolis (σελ.63)

Σχήμα 22: Η επίδραση της δύναμης Coriolis στο Βόρειο και Νότιο ημισφαίριο (σελ.63)

Σχήμα 23: Α) Συνολική έκταση ταμιευτήρων μεγάλων φραγμάτων (σε χιλιάδες km^2) ανά περιοχή του κόσμου. Β) Μέση έκταση ταμιευτήρων μεγάλων φραγμάτων (σε km^2) ανά περιοχή του κόσμου (σελ.66)

Σχήμα 24: Δομή τρισδιάστατου υπολογιστικού πλέγματος που εφαρμόζεται στον κώδικα (σελ.93)

Σχήμα 25: Αποτύπωση των σημείων της ακτογραμμής του ταμιευτήρα στο πρόγραμμα Autocad (σελ.99)

Σχήμα 26 : Μη-δομημένο υπολογιστικό πλέγμα για την μελέτη ανεμογενούς ροής που προκύπτει από βόρειο άνεμο με ταχύτητα 10 m/s (σελ.100)

Σχήμα 27: Διάγραμμα βαθυμετρίας (σελ.101)

Σχήμα 28: Στιγμιότυπο 1/30 υπό την δράση Βόρειου ανέμου ταχύτητας 10 m/s (σελ.102)

Σχήμα 29: Στιγμιότυπο 3/30 υπό την δράση Βόρειου ανέμου ταχύτητας 10 m/s (σελ.103)

Σχήμα 30: Στιγμιότυπο 15/30 υπό την δράση Βόρειου ανέμου ταχύτητας 10 m/s (σελ.104)

Σχήμα 31: Στιγμιότυπο 30/30 υπό την δράση Βόρειου ανέμου ταχύτητας 10 m/s (σελ.105)

Σχήμα 32: Διάγραμμα ελεύθερης επιφάνειας (σελ.106)

Σχήμα 33: : Διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας (σελ.106)

Σχήμα 34: Διάγραμμα Παροχής σε συνάρτηση με τον Χρόνο (σελ.107)

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 : Κατηγορίες φραγμάτων (σελ.13)

Πίνακας 2: Ετήσια παραγόμενη υδροηλεκτρική ενέργεια ΥΗΣ των εξεταζόμενων φραγμάτων (σελ.18)

Πίνακας 3: Χωρητικότητα ταμιευτήρα στην ΑΣΠ (σελ.20)

Πίνακας 4: Κατηγοριοποίηση χωρητικότητας ταμιευτήρα στην ΑΣΠ (σελ./22)

Πίνακας 5: Ποσοστιαία κατηγοριοποίηση χωρητικότητας ταμιευτήρα στην ΑΣΠ (σελ.23)

Πίνακας 6: Τύποι φραγμάτων εξεταζόμενων ταμιευτήρων (σελ.23)

Πίνακας 7: Ταξινόμηση φραγμάτων βάσει του μέγιστου ύψους (σελ.25)

Πίνακας 8: Ποσοστιαία ταξινόμηση φραγμάτων βάσει του μέγιστου ύψους (σελ.28)

Πίνακας 9: Εμπειρικές σταθερές στο μοντέλο $k - \varepsilon$ (σελ.92)

Πίνακας 10 : Συντεταγμένες σημείων στο Excel (σελ.98)

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Αεροφωτογραφία του ποταμού Αχελώου (σελ.27)

Εικόνα 2: Αεροφωτογραφία του ποταμού Αχελώου (σελ.28)

Εικόνα 3: Αεροφωτογραφία της Τεχνητής Λίμνης του Στράτου (σελ.29)

Εικόνα 4: Αεροφωτογραφία φράγματος Στράτου (σελ.30)

Εικόνα 5: Γεωστροφικά ρεύματα και δυναμική τοπογραφία από τον δορυφόρο Topex Poseidon (σελ.35)

Εικόνα 6: Δυναμική τοπογραφία της επιφάνειας των ωκεανών, όπως προκύπτει από τον δορυφόρο Topex Poseidon (σελ.36)

Εικόνα 7: Δυναμική τοπογραφία στα 500db ως προς τα 800db στο ανατολικό Ιόνιο πέλαγος (σελ.37)

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία εκπονήθηκε στο Τ.Ε.Ι. Πατρών σε συνεργασία με το Εργαστήριο Υδραυλικής Μηχανικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, υπό την επίβλεψη της Δρ. Διονυσίας-Πηνελόπης Κοντονή και του Δρ. Νικόλαου Φουρνιώτη.

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας σε όλους όσους βοήθησαν και συνέβαλαν στην πραγματοποίηση της.

Καταρχάς, ευχαριστούμε την επιβλέπουσα Καθηγήτρια μας Δρ. Κοντονή Διονυσία-Πηνελόπη για την πολύτιμη βοήθεια και το ενδιαφέρον της. Να τονίσουμε ότι σε όλη την διάρκεια των προπτυχιακών μας σπουδών δεν έπαψε να μας συμβουλεύει κατάλληλα για την καλύτερη εξέλιξή μας και την πρόοδο μας.

Θερμά ευχαριστούμε τον επιβλέποντα Καθηγητή μας Δρ. Νικόλαο Φουρνιώτη. Η καλή διάθεση του, το ευχάριστο κλίμα που είχε δημιουργήσει, ο χρόνος που μας αφιέρωσε, οι εύστοχες παρατηρήσεις του και η επιτυχείς συνεργασία μας αποτέλεσαν κύριους παράγοντες για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους γονείς μας για την ενθάρρυνση και την συνεχή υποστήριξη τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη παρούσα πτυχιακή εργασία μελετάται αριθμητικά η τρισδιάστατη ροή που προκαλείται από την δράση του ανέμου στην Τεχνητή Λίμνη του φράγματος Στράτου. Για τις αριθμητικές προσομοιώσεις εφαρμόζεται ο τρισδιάστατος αριθμητικός κώδικας MIKE 3 (FM), του υδραυλικού ινστιτούτου της Δανίας (D.H.I).

Σκοπό αποτελεί ο υπολογισμός των επιφανειακών και υποεπιφανειακών ρευμάτων σε διάφορες φάσεις δράσης του ανέμου. Με βάση τις προσομοιώσεις αποδεικνύεται ότι ισχυρά ρεύματα παρατηρούνται στη μέγιστη στένωση και κοντά στις ακτές του ταμειυτήρα.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν μπορούν να αξιοποιηθούν στο μέλλον για την μελέτη προβλημάτων ρύπανσης και ποιότητας υδάτων στην Τεχνητή Λίμνη.

ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας είναι η τρισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση της υδροδυναμικής κυκλοφορίας της Τεχνητής Λίμνης του Φράγματος Στράτου. Για την βαθύτερη κατανόηση της υδροδυναμικής κυκλοφορίας και κυρίως για την εκτίμηση της επιρροής κάθε φυσικής φόρτισης στην δομή της κυκλοφορίας, εξετάζετε ξεχωριστά κάθε φόρτιση και ερμηνεύονται τα αριθμητικά αποτελέσματα. Εφαρμόζεται βαθμιαίως μεταβαλλόμενο υπολογιστικό πλέγμα που περιλαμβάνει την περιοχή της Τεχνητής Λίμνης και υπολογίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια το πεδίο ροής από τον άνεμο. Τα αριθμητικά αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν για την μελέτη προβλημάτων ρύπανσης και ποιότητας υδάτων στην Τεχνητή Λίμνη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η διαχείριση του νερού, από την αρχαιότητα έως σήμερα, αποτελεί μείζον θέμα για τους μηχανικούς, καθώς πρόκειται αφενός για αγαθό απαραίτητο για την επιβίωση και εξυπηρέτηση του ανθρώπου και αφετέρου τα υδατικά αποθέματα είναι εξαντλήσιμα σε σχέση με τον χώρο και τον χρόνο. Επομένως, η εξασφάλιση επαρκών αποθεμάτων νερού, αποτελεί μέριμνα κάθε σύγχρονου κράτους.

Είναι γνωστό ότι στον ελληνικό χώρο παρουσιάζεται γεωγραφική και χρονική ανισοκατανομή των υδατικών πόρων, με την ύπαρξη των περισσότερων από αυτών στο δυτικό τμήμα της χώρας (Δυτική Στερεά Ελλάδα, Πελοπόννησος και Ήπειρος), ενώ σε άλλες περιοχές υπάρχουν ελάχιστα υδατικά αποθέματα (π.χ. Κυκλάδες και Δωδεκάνησα). Η γεωγραφική ανισοκατανομή οφείλεται σε κλιματολογικούς και γεωγραφικούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα ότι οι περισσότερες και εντονότερες βροχοπτώσεις παρατηρούνται στη Δυτική Ελλάδα. Η χρονική ανισοκατανομή των βροχοπτώσεων, η οποία οφείλεται στο ελληνικό κλίμα, έχει σαν αποτέλεσμα οι περισσότερες βροχές να πέφτουν τους χειμερινούς μήνες και ελάχιστες έως καθόλου τους θερινούς.

Από τα παραπάνω, είναι φανερό ότι είναι απαραίτητη η ύπαρξη έργων ταμίευσης των επιφανειακών υδάτων. Τα σημαντικότερα από τα έργα αυτά είναι τα φράγματα, τα οποία χρησιμεύουν στην αποθήκευση των επιφανειακών υδάτων και κατ' εξέλιξη στη διαχείρισή τους προς όφελος του ανθρώπου.

1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Ο άνθρωπος, από την αρχαιότητα προσπάθησε να δαμάσει το νερό για να εξυπηρετήσει τους σκοπούς και τις ανάγκες του. Αναμφισβήτητα, η υδρολογία αποτελεί ιστορικά μία από τις παλαιότερες εφαρμογές των επιστημών προς όφελος του ανθρώπου. Ήδη, από τη 2^η π.Χ. χιλιετία, τα έργα ύδρευσης γνώρισαν μεγάλη ακμή σε χώρες όπως η Αίγυπτος, η Κίνα, η Μεσοποταμία και η Κρήτη. Ακόμα και εκτροπές ποταμών είναι γνωστές από τους αρχαίους μύθους. Ένα από τα βασικότερα έργα για την εκμετάλλευση του πολύτιμου αυτού αγαθού, είναι τα φράγματα.

Τα φράγματα είναι από τα πρώτα τεχνικά επιτεύγματα του ανθρώπου, αφού οι πρώτες κατασκευές ανάγονται στα προϊστορικά χρόνια. Από τα παλιότερα φράγματα, αναφέρονται εκείνο του ποταμού Ιορδάνη και του Τίγρη. Στα 4.000 π.Χ., κατασκευάστηκε φράγμα στον ποταμό Νείλο της Αιγύπτου, το οποίο διατηρήθηκε περίπου 4.500 χρόνια. Στα νεότερα χρόνια, σπουδαίο θεωρήθηκε το φράγμα Puentes στην Ισπανία, που κατασκευάστηκε το 1753 και καταστράφηκε το 1891.

Στην Ελλάδα, το πρώτο φράγμα κατασκευάστηκε στην αρχαία Αλυζία (μεταξύ 1^{ου} και 5^{ου} π.Χ. αιώνα). Το πρώτο σύγχρονο φράγμα ήταν του Μαραθώνα, το οποίο κατασκευάστηκε από την ΕΥΔΑΠ το 1931. Επίσης, το πρώτο φράγμα που κατασκευάστηκε από τη ΔΕΗ ήταν εκείνο Λούρου, το 1954. Το Υπουργείο Γεωργίας άρχισε να ενδιαφέρεται για την κατασκευή φραγμάτων στη χώρα μας από τα μέσα της δεκαετίας του '60. Ορισμένα φράγματα επίσης κατασκευάστηκαν και από το

ΥΠΕΧΩΔΕ. Στην παρούσα εργασία αναφέρονται 26 μεγάλα φράγματα, των οποίων οι αρμόδιοι φορείς κατασκευής είναι η ΔΕΗ, η ΕΥΔΑΠ, το ΥΠΕΧΩΔΕ και το Υπουργείο Γεωργίας.

Φράγματα της ΔΕΗ: Τα πρώτα φράγματα που κατασκευάστηκαν ήταν του Λούρου το 1954, του Λάδωνα το 1955 και του Ταυρωπού το 1959. Ήταν και τα τρία από σκυρόδεμα, βαρύτητας του Λούρου, τοξωτό του Ταυρωπού και βαρύτητας μετά διακένων στοιχείων του Λάδωνα (αντηριδωτό).

Αν εξαιρέσουμε το φράγμα του Λούρου, όπου συμμετείχε από ελληνικής πλευράς η ΕΤΕΡ. Α.Ε., αυτά τα φράγματα μελετήθηκαν και κατασκευάστηκαν από ξένες εταιρείες. Το 1965 και με αμερικάνικες πιστώσεις, κατασκευάζεται το φράγμα Κρεμαστών στον ποταμό Αχελώο, το πρώτο χωμάτινο και ένα από τα μεγαλύτερα της Ευρώπης. Ακολούθησε το φράγμα Καστρακίου το 1969, το οποίο παρουσίασε σημαντικό ενδιαφέρον, από την άποψη ότι ήταν το πρώτο που κατασκευάστηκε από ελληνικές εταιρείες (Οδών – Οδοστρωμάτων, Δομική, ΕΔΟΚ – ΕΤΕΡ Α.Ε.). Η μελέτη έγινε από αμερικάνικη εταιρεία (Ebasco Services Inc.), με ευρεία όμως συμμετοχή Ελλήνων μηχανικών.

Μετά το φράγμα Καστρακίου, οι Ελληνικές εμπειρίες επικεντρώθηκαν στις μελέτες και κατασκευές χωμάτινων και λιθόρριπτων φραγμάτων. Έτσι, κατασκευάστηκαν τα φράγματα Πολυφύτου το 1974, Πουρναρίου το 1981, Σφηκιάς και Ασωμάτων το 1985, Στράτου το 1988, Πηγών Αώου το 1989. Στα τέλη του 1997 ολοκληρώθηκε η κατασκευή των φραγμάτων Θησαυρού και Πλατανόβρυσης στο Νέστο και του φράγματος της Μεσοχώρας στον Αχελώο.

Τα φράγματα της ΔΕΗ, αν και έχουν υψηλό κόστος κατασκευής, δικαιολογούν την ύπαρξή τους, διότι η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας αποσβένει βαθμιαία αυτό το κόστος, όπως αποδεικνύει η μέχρι τώρα ιστορία των πρώτων φραγμάτων στον ελληνικό χώρο. Επιπλέον, τα φράγματα της ΔΕΗ εξυπηρετούν αρδευτικούς και υδρευτικούς σκοπούς, είναι δηλαδή πολλαπλής σκοπιμότητας.

Από τα φράγματα αυτά, καινοτομία παρουσιάζουν:

- το λιθόρριπτο φράγμα Μεσοχώρας του οποίου το στεγανό στοιχείο αποτελεί ανάντη πλάκα σκυροδέματος, η κατασκευή της οποίας απαιτεί ειδική τεχνική και εξειδικευμένο επιστημονικό και εργοτεχνικό προσωπικό.
- το φράγμα Πλατανόβρυσης από κυλινδρικό σκυρόδεμα με χρήση ιπτάμενης τέφρας στη σύνθεση του σκυροδέματος. Η ιπτάμενη τέφρα προέρχεται από την καύση λιγνίτη στους θερμικούς σταθμούς της Κοζάνης και έχει ως αποτέλεσμα και μείωση του κόστους κατασκευής του έργου.

1.3 ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Η υδρόσφαιρα αποτελείται από το σύνολο των νερών των ωκεανών, θαλασσών, λιμνών, ποταμών, παγετώνων, του εδάφους και της ατμόσφαιρας. Από τη συνολική ποσότητα νερού των $1,4 \times 10^9$ κυβικών μέτρων, το 96,5 % αποτελεί τις θάλασσες και τους ωκεανούς, το 1,8% αποτελεί τους παγετώνες και το υπόλοιπο είναι το ποσοστό το οποίο μπορεί να έχει χρήση για την εξυπηρέτηση των αναγκών του ανθρώπου.

Δραστηριότητες για την εκμετάλλευση των νερών αποτελούν:

- η ηλεκτροπαραγωγή με τις υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις, οι οποίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από το νερό των ποταμών και των θαλασσών,
- οι μεταφορές, οι οποίες χρησιμοποιούν τα νερά των ποταμών, θαλασσών και λιμνών για τη μετακίνηση πλοίων και ξυλείας,
- οι βελτιώσεις της γης, οι οποίες περιλαμβάνουν τις αρδεύσεις, τις αποστραγγίσεις περιοχών και τη μετατροπή σε καλλιεργήσιμη γη των ξηρών περιοχών,
- οι αστικές και βιομηχανικές χρήσεις νερού, οι οποίες περιλαμβάνουν την οικιακή και κοινοτική ύδρευση, βιομηχανική χρήση, επεξεργασία νερού και αποχετεύσεις,
- οι εμπορικές χρήσεις του νερού, οι οποίες περιλαμβάνουν ιχθυοκαλλιέργειες, καλλιέργειες φυκιών, αλιεία ψαριών και αναζήτηση γούνας, παραγωγή αλατιού, επεξεργασία ορυκτών και ψύξη μηχανημάτων.

Η χρησιμοποίηση του νερού από ποταμούς, λίμνες και υπόγεια νερά μπορεί να είναι καταναλωτική, όπως η ύδρευση και η άρδευση, στις οποίες το νερό δεν επιστρέφει στην αρχική του θέση, ή μη καταναλωτική, όπως η υδροηλεκτρική παραγωγή, αλιεία και ναυσιπλοΐα, στις οποίες το νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί περισσότερες από μία φορές.

Συνδυασμός της καταναλωτικής και της απλής χρησιμοποίησης του νερού δεν είναι δυνατόν να γίνεται πάντοτε. Οι καταναλωτικές χρήσεις του νερού είναι μερικές φορές μεγαλύτερες από τις διαθέσιμες ποσότητες νερού, οπότε γίνεται μεταφορά νερού από περιοχές με άφθονες διαθέσιμες ποσότητες νερού σε περιοχές με ανεπαρκείς ποσότητες νερού.

Οι υδραυλικές κατασκευές έχουν σκοπό τον έλεγχο των νερών, έτσι ώστε να προκύψει η βέλτιστη χρησιμοποίησή τους. Με τις υδραυλικές κατασκευές μετατρέπεται η φυσική ροή των νερών του ποταμού σε ρυθμιζόμενη ροή, η οποία προσαρμόζεται σε χρήσεις προσοδοφόρες για την εθνική οικονομία κάθε χώρας, σε συνδυασμό με την προστασία του περιβάλλοντος. Παράλληλα, επιτυγχάνεται η βέλτιστη χρησιμοποίηση του νερού με την αποθήκευσή του σε ταμιευτήρες και με τη ρύθμιση της παροχής του ανάλογα με την ποιότητα η οποία απαιτείται για τη χρησιμοποίησή του.

Οι υδραυλικές κατασκευές, ανάλογα με τη θέση των νερών για τα οποία κατασκευάστηκαν, διακρίνονται σε κατασκευές στους ποταμούς, στις λίμνες και στις ακτές. Ανάλογα με την επίπτωση των κατασκευών στη ροή του ποταμού, οι υδραυλικές κατασκευές διακρίνονται σε έργα ανάσχεσης – εγκιβωτισμού και σε έργα μεταφοράς.

Τα έργα ανάσχεσης περιλαμβάνουν κυρίως τα **φράγματα**, τα οποία δημιουργούν διακοπή της ροής και επομένως τον σχηματισμό ενός ταμιευτήρα ανάντη του φράγματος, με στάθμη νερού υψηλότερη από τη στάθμη νερού κατόντη του φράγματος. Ακόμη, περιλαμβάνουν εκτός από το κύριο φράγμα, βοηθητικά φράγματα ή αναχώματα, τοίχους αντιστήριξης πρηνών και προστασία πρηνών με διάφορα υλικά.

Τα έργα μεταφοράς περιλαμβάνουν διώρυγες μεταφοράς νερού, οχετούς στην επιφάνεια του εδάφους και υπόγειες σήραγγες. Ο σκοπός κατασκευής των έργων αυτών είναι η τροφοδότηση στροβίλων υδροηλεκτρικού σταθμού, αρδεύσεις

καλλιεργήσιμων εκτάσεων, μεταφορά νερού σε άλυδρες περιοχές και προμήθεια νερού για αστική και βιομηχανική χρήση.

1.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Φράγμα είναι τεχνικό έργο που κατασκευάζεται στην κοίτη ενός φυσικού υδατορεύματος για να ανακόψει τη ροή, με σκοπό την αποθήκευση του νερού για μελλοντική χρησιμοποίησή του. Η έκταση γης στην οποία αποθηκεύεται το νερό και βρίσκεται στα ανάντη του φράγματος, ονομάζεται ταμιευτήρας.

Σκοπός της κατασκευής ενός φράγματος μπορεί να είναι:

- Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Η άρδευση καλλιεργούμενων εδαφών
- Η ύδρευση πόλεων, οικισμών ή βιομηχανικών μονάδων
- Η διαμόρφωση πλωτών διωρύγων
- Η ρύθμιση της παροχής φυσικών ρευμάτων (ποταμών)

Τα φράγματα διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με την κατασκευή τους, τη λειτουργία τους και τη σκοπιμότητά τους. Από κατασκευαστική πλευρά κατατάσσονται σύμφωνα με στο παρακάτω Πίνακα 1:



Πίνακας 1:κατηγορίες φραγμάτων

Ανάλογα με τη λειτουργία διακρίνονται σε φράγματα ανύψωσης της στάθμης, φράγματα αποθήκευσης και φράγματα παροχέτευσης. Ανάλογα με το σκοπό για τον οποίο γίνονται, χαρακτηρίζονται ως φράγματα για άρδευση, για ύδρευση, για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κλπ. Στην εργασία έγινε ταξινόμηση των φραγμάτων ανάλογα με το ύψος τους σε μικρά (ύψους < 15 m), σε φράγματα μέσου ύψους (≤ 50 m) και μεγάλα (ύψους > 50 m) φράγματα.

1.5 ΟΡΙΣΜΟΙ - ΕΠΕΞΗΓΗΣΕΙΣ

Στην παρούσα ενότητα ορίζονται και επεξηγούνται οι βασικοί όροι που χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό των ταμιευτήρων.

Τεχνητή λίμνη: Με τον όρο τεχνητή λίμνη αποκαλούμε κάθε λίμνη που σχηματίστηκε με κατασκευή φραγμάτων, συνήθως κάθετα στη ροή ποταμών, αλλά και πολύ μικρότερων υδάτινων ρευμάτων, που προέρχονται από την ίδια λεκάνη απορροής, όπως είναι η Λίμνη του Μαραθώνα. Ο σκοπός της δημιουργίας τέτοιων λιμνών είναι η παραγωγή ενέργειας, η άρδευση και η ύδρευση. Ο τεχνικός όρος που χρησιμοποιείται για την αναφορά στις τεχνητές λίμνες είναι Ταμιευτήρας (αγγλ. reservoir). Στην Ελλάδα υπάρχουν, μέχρι σήμερα, 25 τέτοιες λίμνες με συνολική επιφάνεια 358.235 km².

Λεκάνη απορροής: Η λεκάνη απορροής είναι μία περιοχή της επιφάνειας της γης, η οποία περικλείεται από τον υδροκρίτη, στην οποία συγκεντρώνονται ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα που στη συνέχεια καταλήγουν σε ένα κεντρικό σύστημα. Αυτό το κεντρικό σύστημα μπορεί να είναι ένα ποτάμι που καταλήγει στη θάλασσα, ένας χείμαρρος ή μία λίμνη, σε ένα κλειστό σύστημα, στην οποία συγκεντρώνεται το νερό και εξατμίζεται, ή απορροφάται από το έδαφος. Υδροκρίτης είναι τα όρια μιας λεκάνης απορροής που την χωρίζουν από μια γειτονική λεκάνη απορροής

Ποτάμι: Το όνομα του ποταμού στο οποίο δημιουργείται ο ταμιευτήρας.

Υπηρεσία: Η υπηρεσία η οποία ανέλαβε την κατασκευή του φράγματος.

Έτος κατασκευής: Το έτος ολοκλήρωσης κατασκευής του έργου (φράγματος).

Ταμιευτήρας - Ανώτατη Στάθμη Πλημμύρας (ΑΣΠ):

- ∅ Ανώτατη Στάθμη Πλημμύρας (ΑΣΠ): Η στάθμη που αντιστοιχεί στη μέγιστη αναμενόμενη στάθμη της πλημμύρας μελέτης.
- ∅ Επιφάνεια ΑΣΠ: Η επιφάνεια του ταμιευτήρα που περικλείεται από την ΑΣΠ.
- ∅ Χωρητικότητα ΑΣΠ: Ο όγκος του ταμιευτήρα που αντιστοιχεί στην επιφάνεια της ΑΣΠ.

Ταμιευτήρας - Ανώτατη Στάθμη Λειτουργίας (ΑΣΛ):

- ∅ Ανώτατη Στάθμη Λειτουργίας (ΑΣΛ): Η στάθμη που αντιστοιχεί στην ανώτατη στάθμη του ωφέλιμου όγκου του ταμιευτήρα.
- ∅ Επιφάνεια ΑΣΛ: Η επιφάνεια του ταμιευτήρα που περικλείεται από την ΑΣΛ.
- ∅ Χωρητικότητα ΑΣΛ: Ο όγκος του ταμιευτήρα που αντιστοιχεί στην επιφάνεια της ΑΣΛ.

Φράγμα - Χαρακτηριστικά:

- ∅ Τύπος: Τα φράγματα που κατασκευάζονται για τη δημιουργία ταμιευτήρων διακρίνονται σε φράγματα βαρύτητας από σκυρόδεμα, σε τοξωτά φράγματα και σε χωμάτινα ή λιθόρριπτα φράγματα.

∅ Όγκος (m^3): Ο όγκος των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του φράγματος.

∅ Μέγιστο ύψος (m): Η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του βαθύτερου σημείου της θεμελίωσης και της στέψης του φράγματος.

Φράγμα – Στέψη: Το ανώτερο υψομετρικά τμήμα του αναχώματος.

- ∅ Μήκος (m): Το μήκος της στέψης.
- ∅ Υψόμετρο (m): Το υψόμετρο της στέψης. Κατά κανόνα ταυτίζεται με την ΑΣΠ.
- ∅ Πλάτος (m): Το πλάτος της στέψης.

Υδροληψία :

∅ Τύπος: Ο τύπος κατασκευής του έργου το οποίο θα μεταφέρει το νερό του ταμιευτήρα στον προορισμό του, π.χ. υδροηλεκτρικό εργοστάσιο.

∅ Υψόμετρο πυθμένα: το υψόμετρο που βρίσκεται το κατώτατο σημείο του έργου της υδροληψίας.

Υπερχειλιστής: Ονομάζεται η υδραυλική κατασκευή μορφή κλειστού ή ανοικτού αγωγού από όπου υπερχειλίζει η πλεονάζουσα ποσότητα νερού που δεν χρησιμοποιείται για τους προδιαγεγραμμένους σκοπούς. Επομένως, ο υπερχειλιστής συνιστά ειδική χρήση ενός εκχειλιστή.

∅ Τύπος: Ο τύπος κατασκευής του έργου το οποίο εξασφαλίζει το φράγμα από ενδεχόμενη υπερχείλισή του σε περίοδο πλημμυρικών παροχών.

∅ Μήκος (m): Το μήκος της στέψης.

∅ Υψόμετρο Στέψης (m): Το υψόμετρο της στέψης.

∅ Ανώτατη Στάθμη (m):

∅ Κατώτατη Στάθμη (m):

∅ Παροχή σχεδιασμού (m^3/sec): Η παροχή που μπορεί να περάσει από τον υπερχειλιστή στην ΑΣΠ.

Εκκενωτής πυθμένα:

∅ Διάθεση: ΝΑΙ = Διατίθεται εκκενωτής στο έργο
ΟΧΙ = Δεν διατίθεται εκκενωτής στο έργο

∅ Τύπος: Ο τύπος κατασκευής του έργου το οποίο αποσκοπεί στην ταπείνωση της στάθμης ή στην πλήρη εκκένωση της υδαταποθήκης.

∅ Θέση: Η περιοχή του φράγματος στην οποία έχει τοποθετηθεί ο εκκενωτής.

∅ Παροχή σχεδιασμού (m^3/sec): Η παροχή η οποία μπορεί να περάσει από τον εκκενωτή.

Ενέργεια – Μονάδες:

∅ Αριθμός: Ο αριθμός των μονάδων παραγωγής ενέργειας

∅ Τύπος: Ο τύπος κατασκευής των μονάδων ενέργειας.

∅ Ονομαστική ισχύς (MW): Η ονομαστική ισχύς που παράγεται από το σύνολο των μονάδων ενέργειας του ΥΗΣ.

Ενέργεια – Ύψος πτώσης:

∅ Μέγιστο: Το μέγιστο ύψος των γραμμικών και τοπικών απωλειών
∅ Ελάχιστο: Το ελάχιστο ύψος των γραμμικών και τοπικών απωλειών

Ετήσια Συνολική Ενέργεια (GWh): Η συνολική ενέργεια που παράγεται ανά έτος στον ΥΗΣ

1.6 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

1.6.1 ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Το έτος 1950 μπορεί να χαρακτηριστεί σαν ορόσημο στην ιστορία του εξηλεκτρισμού στην Ελλάδα. Μέχρι τότε, η παραγωγή και η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας γινόταν από 400 περίπου ηλεκτρικές εκμεταλλεύσεις, οι οποίες εξυπηρετούσαν σχεδόν 800 πόλεις και κωμοπόλεις, λειτουργούσαν ανεξάρτητα η μία από την άλλη και ήταν δημοτικές, κοινοτικές ή ιδιωτικές.

Οι παλαιότεροι θα θυμούνται την Ηλεκτρική Εταιρεία Αθηνών-Πειραιώς (ΗΕΑΠ), τον ΓΛΑΥΚΟ στην Πάτρα ή την ΚΕΤΗΘ στη Θεσσαλονίκη. Αυτές ήταν οι πιο γνωστές. Οι υπόλοιπες, κατά κανόνα, διέθεταν εγκαταστάσεις παραγωγής και διανομής παλιές, φθαρμένες και συνήθως ανεπαρκείς. Σε πολλές περιπτώσεις η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος ήταν μόνο βραδινή και οι βλάβες συχνότατες.

Ένα χαρακτηριστικό της επικρατούσας κατάστασης το 1950 ήταν και η ανισότητα στην κατά κεφαλή κατανάλωση μεταξύ κέντρων και επαρχίας και η ανισότητα στη διαμόρφωση των τιμολογίων του καταναλωτή. Ενώ λοιπόν ο μέσος όρος κατανάλωσης κατά κεφαλή ήταν 71 κιλοβατώρες (kWh), στην περιοχή της πρωτεύουσας η πραγματική κατανάλωση ήταν 312 kWh κατά κεφαλή και μόλις 14 kWh για κάθε κάτοικο της υπαίθρου. Η δε τιμή της κιλοβατώρας κυμαινόταν από 1.147 δρχ. στην Αθήνα και στον Πειραιά.

Είναι ευνόητο ότι με αυτές τις συνθήκες δεν ήταν δυνατό να αναπτυχθεί ηλεκτροκίνητη βιομηχανία εκτός ορίων Αττικής ή αγροτικός εξηλεκτρισμός ή γενικότερα ευρύτερη οικιακή χρήση ηλεκτρικής ενέργειας.

Με την ίδρυση της ΔΕΗ ο εξηλεκτρισμός της χώρας τίθεται σε νέα πλαίσια με στόχο την ενιαία πλέον ρύθμιση του θέματος. Από το 1950 μέχρι σήμερα έχει ηλεκτροδοτηθεί πάνω από το 99,8 % του πληθυσμού της χώρας και η ανά κάτοικο ετήσια κατανάλωση, από 87 kWh το 1952 έφθασε τις 2.956 kWh το 1990.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη ΔΕΗ επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους, όπως:

- με καύση λιγνίτη

- με καύση πετρελαίου
- με κίνηση στροβίλων (τουρμπινών) από υδατοπτώσεις
- με εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες
- με εκμετάλλευση της ηλιακής με τις φωτοβολταϊκές διατάξεις
- η λεγόμενη υδροηλεκτρική ενέργεια

Η παραγωγή της υδροηλεκτρικής ενέργειας, η οποία ας σημειωθεί είναι από τις φιλικότερες προς το περιβάλλον, προϋποθέτει διαρκή και επαρκή ροή νερού για την κίνηση των στροβίλων και μετατροπή της κινητικής σε ηλεκτρική ενέργεια. Επειδή η ροή των ποταμών είναι ακανόνιστη και εξαρτώμενη από τις κλιματικές-υδρολογικές συνθήκες, είναι απαραίτητη η δυνατότητα ρύθμισης της ροής του προς εκμετάλλευση υδατορεύματος. Η καλύτερη λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η κατασκευή τεχνητών ταμιευτήρων με την κατασκευή φραγμάτων σε κατάλληλα σημεία φυσικών κοιλοτήτων μέσα στη διαδρομή του ποταμού. Ακολουθεί η πλήρωση αυτών και η κατασκευή των υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής κατόπιν των φραγμάτων, όπου η ροή είναι φυσική, λόγω της διαφοράς στάθμης και ελεγχόμενη με συστήματα θυροφραγμάτων, υπερχειλιστών, διωρύγων διαφυγής και με άλλα συναφή τεχνικά έργα.

Έτσι η ΔΕΗ, εκμεταλλεζόμενη το έντονο φυσικό ανάγλυφο της χώρας μας, κατασκεύασε αρκετούς τέτοιους ταμιευτήρες, οι οποίοι δεν είναι τίποτε άλλο από τεχνητές λίμνες. Σήμερα, περίπου το ένα τέταρτο της συνολικά εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος στην Ελλάδα, περίπου 3.000 MW, είναι υδροηλεκτρική, προερχόμενη από ένα σύνολο 20 σταθμών. Προγραμματίζεται δε, η κατασκευή επτά ακόμη νέων υδροηλεκτρικών σταθμών, συνολικής ισχύος 446,5 MW.

Οι τεχνητές όμως λίμνες της ΔΕΗ δεν εξυπηρετούν μόνο την παραγωγή ενέργειας. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα υδροηλεκτρικά έργα είναι πολλαπλού σκοπού. Έτσι, ταυτόχρονα με την παραγωγή ενέργειας εξυπηρετείται και η άρδευση, η ύδρευση, η αντιπλημμυρική προστασία, η βιομηχανική ψύξη, οι ποτάμιες μεταφορές, δραστηριότητες αναψυχής κτλ.

Αυτό όμως που μέχρι σήμερα περνούσε σχεδόν απαρατήρητο, είναι η επίδραση που είχε η κατασκευή και η λειτουργία κάθε τέτοιου ταμιευτήρα στην ευρύτερη περιοχή. Και βεβαίως μιλάμε για κάθε είδους επιδράσεις: Στην κοινωνία, στην οικονομία, στον τουρισμό, στην αισθητική του τοπίου, στο μικρόκλιμα, στα φυτά και τα ζώα και γενικά στο περιβάλλον. Μια λίμνη, είτε αυτή είναι φυσική είτε τεχνητή, καταλήγει, στις περισσότερες περιπτώσεις και αν δεν υπάρξει ανθρωπογενής επέμβαση, σε συνώνυμο του υγροβιότοπου. Έτσι, οι τεχνητές λίμνες της ΔΕΗ έχουν εξελιχθεί σε όμορφους υγροβιότοπους, διατηρώντας και αυξάνοντας τη βιοποικιλότητα στην περιοχή επίδρασής τους, δείχνοντας ότι η ανάπτυξη μπορεί να συνυπάρξει με έννοιες όπως ο οικότουρισμός ή η φυσιολατρία και ότι η ορθολογική διαχείριση των φυσικών πόρων μπορεί να οδηγήσει στην αειφορία, με ασφάλεια για το φυσικό περιβάλλον και παράλληλα με την κοινωνική και οικονομική άνθηση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η τεχνητή λίμνη Πλαστήρα, η οποία αποτελεί σημαντικό τουριστικό πόλο έλξης.

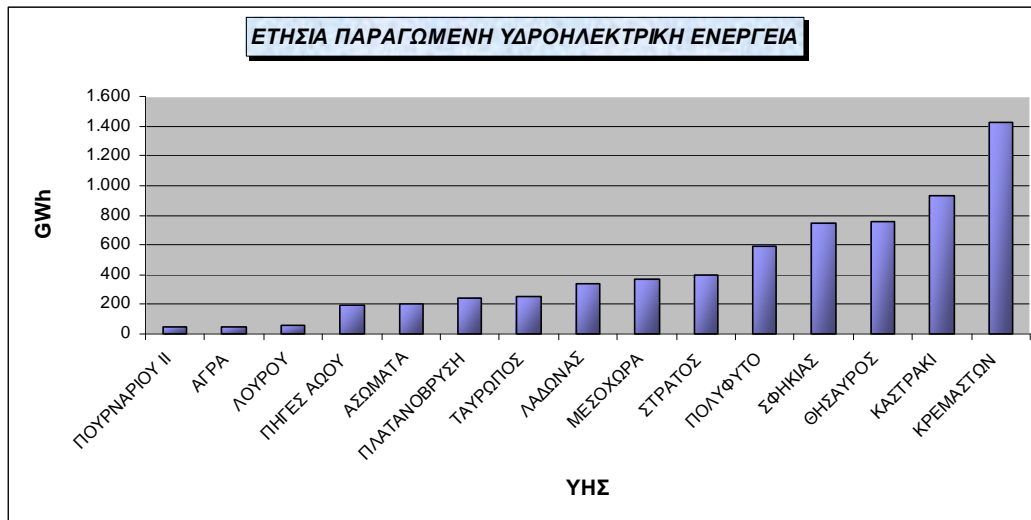
Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η ετήσια παραγόμενη υδροηλεκτρική ενέργεια από τους ΥΗΣ της ΔΕΗ. Σημειώνεται ότι από την ενέργεια του ΥΗΣ Σφηκιάς οι 471 GWh προέρχονται από άντληση και οι 275 GWh χωρίς άντληση. Ομοίως, από την

ενέργεια του ΥΗΣ Θησαυρού οι 315 GWh προέρχονται από άντληση και οι 440 GWh χωρίς άντληση.

ΕΤΗΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΜΕΝΗ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (GWh)	
ΠΟΥΡΝΑΡΙ ΙΙ	45
ΑΓΡΑΣ	50
ΛΟΥΡΟΣ	60
ΠΗΓΕΣ ΑΩΟΥ	198
ΑΣΩΜΑΤΑ	200
ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ	240
ΤΑΥΡΩΠΟΣ	250
ΛΑΔΩΝΑΣ	340
ΜΕΣΟΧΩΡΑ	372
<u>ΣΤΡΑΤΟΣ</u>	<u>400</u>
ΠΟΛΥΦΥΤΟ	589
ΣΦΗΚΙΑ	746
ΘΗΣΑΥΡΟΣ	755
ΚΑΣΤΡΑΚΙ	930
ΚΡΕΜΑΣΤΑ	1.430

Πίνακας 2: Ετήσια παραγόμενη υδροηλεκτρική ενέργεια ΥΗΣ των εξεταζόμενων φραγμάτων(http://itia.ntua.gr/nikos/arc_int/CDfrag/Kefalaia/Teliko2.doc)

Τα αποτελέσματα φαίνονται σχηματικά στο Σχήμα 1 που ακολουθεί:



Σχήμα 1: Ετήσια παραγόμενη υδροηλεκτρική ενέργεια ΥΗΣ των εξεταζόμενων φραγμάτων (http://itia.ntua.gr/nikos/arx_int/CDfrag/Kefalaia/Teliko2.doc)

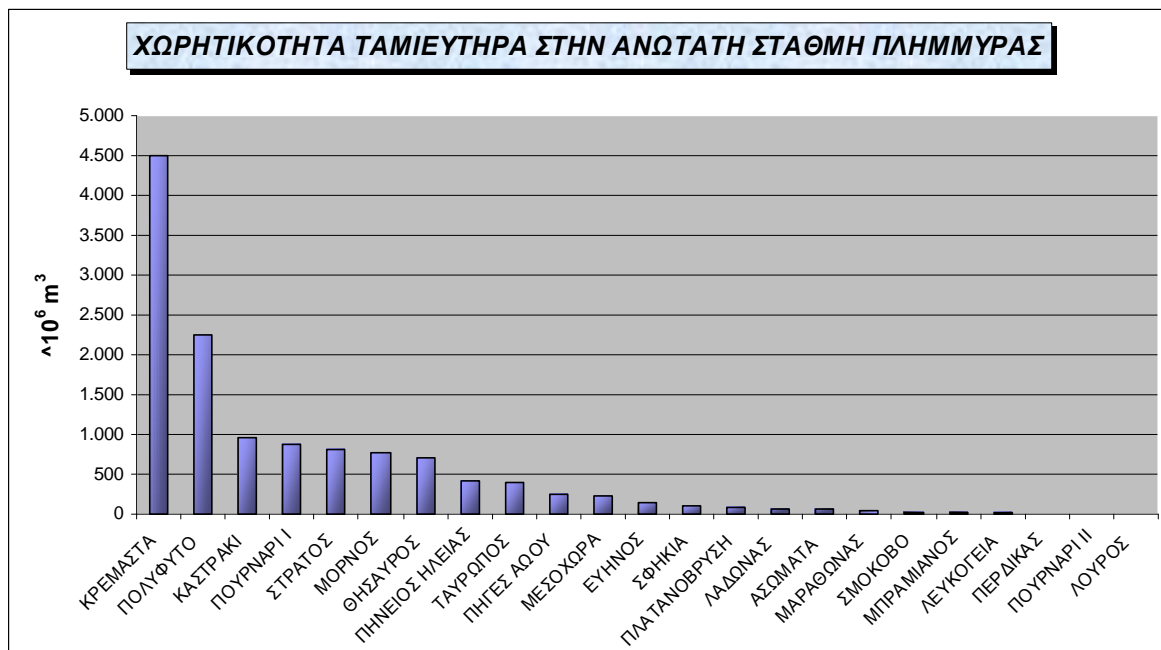
Παρατηρούμε ότι η περισσότερη υδροηλεκτρική ενέργεια παράγεται από τους ΥΗΣ του Πολυφύτου, της Σφηκιάς, του Θησαυρού, του Καστρακίου και των Κρεμαστών. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι βρίσκονται σε εξέλιξη δύο μικρά υδροηλεκτρικά έργα της ΕΥΔΑΠ: του Μαραθώνα, με ισχύ 1.000 KW και ετήσια παραγόμενη ενέργεια 2,1 GWh και του Ευήνου, με ισχύ 560 KW και ετήσια παραγόμενη ενέργεια 0,7 GW

1.6.2 ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΑΝΩΤΑΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ

Σε αυτή την ενότητα ταξινομούνται οι ταμιευτήρες βάσει της χωρητικότητας στην ανώτατη στάθμη πλημμύρας. Από την ταξινόμηση παραλείπονται οι ταμιευτήρες του υγροβιότοπου Άγρα, της λιμνοδεξαμενής Τάκας Αρκαδίας και του φράγματος Φανερωμένης Ηρακλείου.

ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑΣ	ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΑΣΠ ($\cdot 10^6 \text{ m}^3$)
ΚΡΕΜΑΣΤΑ	4.500
ΠΟΛΥΦΥΤΟ	2.244
ΚΑΣΤΡΑΚΙ	950
ΠΟΥΡΝΑΡΙ Ι	865
<u>ΣΤΡΑΤΟΣ</u>	<u>810</u>
ΜΟΡΝΟΣ	763,71
ΘΗΣΑΥΡΟΣ	705
ΠΗΝΕΙΟΣ ΗΛΕΙΑΣ	420
ΤΑΥΡΩΠΟΣ	400
ΠΗΓΕΣ ΑΩΟΥ	260
ΜΕΣΟΧΩΡΑ	228
ΕΥΗΝΟΣ	137,63
ΣΦΗΚΙΑ	103
ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ	93
ΛΑΔΩΝΑΣ	57,60
ΑΣΩΜΑΤΑ	56
ΜΑΡΑΘΩΝΑΣ	40,34
ΣΜΟΚΟΒΟ	20
ΜΠΡΑΜΙΑΝΟΣ	15
ΛΕΥΚΟΓΕΙΑ	11,950
ΠΕΡΔΙΚΑΣ	10
ΠΟΥΡΝΑΡΙ ΙΙ	4,60
ΛΟΥΡΟΣ	1,076

Πίνακας 3: Χωρητικότητα ταμιευτήρα στην ΑΣΠ (http://itia.ntua.gr/nikos/ax_int/CDfrag/Kefalaia/Teliko2.doc)



Σχήμα 2: Χωρητικότητα ταμιευτήρα στην ΑΣΠ (http://itia.ntua.gr/nikos/arx_int/CDfrag/Kefalaia/Teliko2.doc)

Από τον Πίνακα 3 προκύπτει ότι τη μεγαλύτερη χωρητικότητα έχουν οι ταμιευτήρες των φραγμάτων στα Κρεμαστά (4.500.000.000 m³) και στο Πολύφυτο (2.244.000.000 m³). Ακολουθούν οι ταμιευτήρες του Καστρακίου (950.000.000 m³), του Στράτου (810.000.000 m³), του Πουρναρίου Ι (865.000.000 m³), του Μόρνου (763.710.000 m³) και του Θησαυρού (705.000.000 m³). Στον Πίνακα 4, τα παραπάνω αποτελέσματα ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:

- § Ταμιευτήρες με χωρητικότητα μικρότερη από 500*10⁶ m³.
- § Ταμιευτήρες με χωρητικότητα μεγαλύτερη από 500 * 10⁶ m³ και μικρότερη από 1.000*10⁶ m³.
- § Ταμιευτήρες με χωρητικότητα μικρότερη από 1.000*10⁶ m³.

ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑΣ	ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΑΣΠ ($\times 10^6 \text{ m}^3$)		
	<500	500> & <1.000	>1.000
ΣΦΗΚΙΑ	103	-	-
ΠΗΓΕΣ ΑΛΟΥ	260	-	-
<u>ΣΤΡΑΤΟΣ</u>	-	<u>810</u>	-
ΤΑΥΡΩΠΟΣ	400	-	-
ΠΟΥΡΝΑΡΙ Ι	-	865	-
ΠΟΥΡΝΑΡΙ ΙΙ	4,60	-	-
ΚΡΕΜΑΣΤΑ	-	-	4.500
ΚΑΣΤΡΑΚΙ	-	950	-
ΠΟΛΥΦΥΤΟ	-	-	2.244
ΑΣΩΜΑΤΑ	56	-	-
ΜΟΡΝΟΣ	-	763,71	-
ΛΟΥΡΟΣ	1,076	-	-
ΛΑΔΩΝΑΣ	57,6	-	-
ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ	93	-	-
ΘΗΣΑΥΡΟΣ	-	705	-
ΜΕΣΟΧΩΡΑ	228	-	-
ΣΜΟΚΟΒΟ	20	-	-
ΜΑΡΑΘΩΝΑΣ	40,34	-	-
ΕΥΗΝΟΣ	137,63	-	-
ΛΕΥΚΟΓΕΙΑ ΔΡΑΜΑΣ	11,95	-	-
ΠΗΝΕΙΟΣ ΗΛΕΙΑΣ	420	-	-
ΜΠΡΑΜΙΑΝΟΣ ΙΕΡΑΠΕΤΡΑΣ	15	-	-

Πίνακας 4: Κατηγοριοποίηση χωρητικότητας ταμιευτήρα στην ΑΣΠ (http://itia.ntua.gr/nikos/arx_int/CDfrag/Kefalaia/Teliko2.doc)

Στον Πίνακα 5 φαίνεται ο αριθμός των φραγμάτων που αντιστοιχούν σε κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες, καθώς και το ποσοστό σε σχέση με το σύνολο

ανά κατηγορία. Παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των ταμιευτήρων (69,6%) έχει χωρητικότητα στην ΑΣΠ μικρότερη από $500 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

	ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΑΣΠ ($\cdot 10^6 \text{ m}^3$)		
	<500	500> & <1.000	>1.000
ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ	15	5	2
ΠΟΣΟΣΤΟ	68,2%	22,7%	9,1%

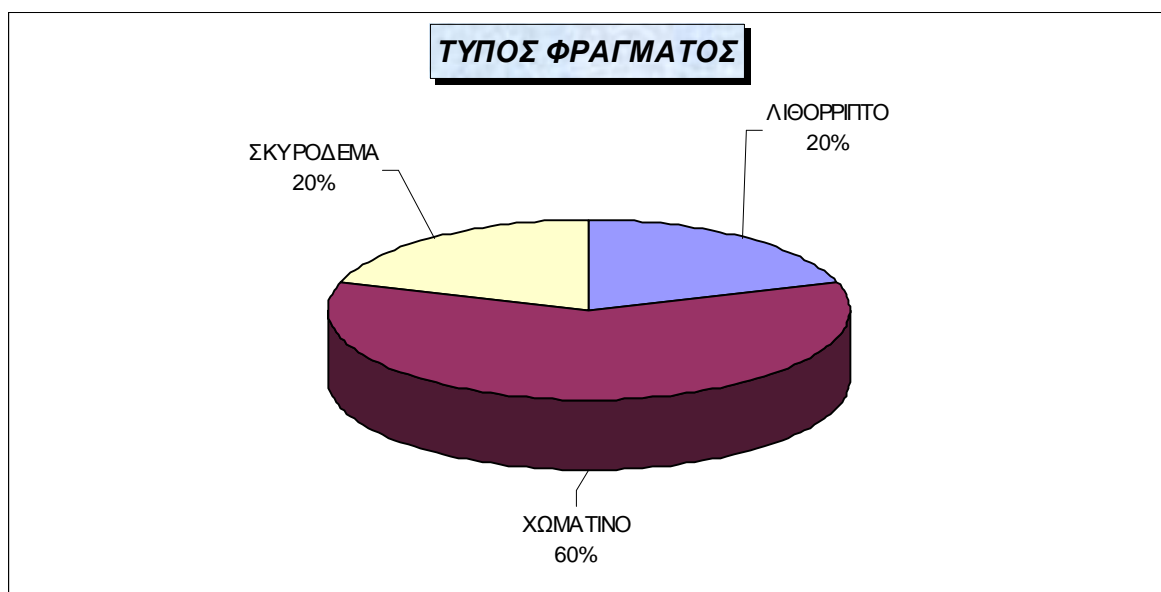
Πίνακας 5: Ποσοστιαία κατηγοριοποίηση χωρητικότητας ταμιευτήρα στην ΑΣΠ (http://itia.ntua.gr/nikos/arx_int/CDfrag/Kefalaia/Teliko2.doc)

1.6.3 ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΤΥΠΟ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Σε αυτή την ενότητα ταξινομούνται οι ταμιευτήρες βάσει της χωρητικότητας στην ανώτατη στάθμη πλημμύρας. Από την ταξινόμηση παραλείπονται οι ταμιευτήρες της Αγίας Βαρβάρας, της Πλατανόβρυσης, του Θησαυρού, του Σμοκόβου, της Φανερωμένης Ηρακλείου και του Μπραμιανού Ιεράπετρας, διότι δεν υπήρχε διαθέσιμο το συγκεκριμένο στοιχείο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 6 και στο Σχήμα 3:

ΤΥΠΟΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ		
ΛΙΘΟΡΡΙΠΤΟ	ΧΩΜΑΤΙΝΟ	ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ
ΣΦΗΚΙΑ	ΠΗΓΕΣ ΑΛΟΥ	ΤΑΥΡΩΠΟΣ
ΠΟΛΥΦΥΤΟ	<u>ΣΤΡΑΤΟΣ</u>	ΛΟΥΡΟΣ
ΜΕΣΟΧΩΡΑ	ΠΟΥΡΝΑΡΙ Ι	ΛΑΔΩΝΑΣ
ΣΜΟΚΟΒΟ	ΜΟΡΝΟΣ	ΜΑΡΑΘΩΝΑΣ
-	ΚΡΕΜΑΣΤΑ	-
-	ΚΑΣΤΡΑΚΙ	-
-	ΑΣΩΜΑΤΑ	-
-	ΑΓΡΑ	-
-	ΕΥΗΝΟΣ	-
-	ΛΕΥΚΟΓΕΙΑ ΔΡΑΜΑΣ	-
-	ΠΕΡΔΙΚΑΣ	-
-	ΠΗΝΕΙΟΣ ΗΛΕΙΑΣ	-

Πίνακας 6: Τύποι φραγμάτων εξεταζόμενων ταμιευτήρων (http://itia.ntua.gr/nikos/arb_int/CDfrag/Kefalaia/Teliko2.doc)



Σχήμα 3: Τύποι φραγμάτων εξεταζόμενων ταμιευτήρων (http://itia.ntua.gr/nikos/arb_int/CDfrag/Kefalaia/Teliko2.doc)

Όπως φαίνεται το μεγαλύτερο ποσοστό φραγμάτων είναι χωμάτινα (63%), εφόσον όπως προειπώθηκε είναι πιο εύκολη και συμφέρουσα η κατασκευή τους.

1.6.4 ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΜΕΓΙΣΤΟ ΥΨΟΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Στην παρούσα ενότητα γίνεται ταξινόμηση των ταμιευτήρων βάσει του μέγιστου ύψους φράγματος. Από την ταξινόμηση λείπουν τα φράγματα Πουρνάρι II, Άγρας και φανερωμένη Ηρακλείου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 7 που ακολουθεί:

ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑΣ	ΜΕΓΙΣΤΟ ΥΨΟΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ	
	>15m & <50m	>50m
ΛΟΥΡΟΥ	18	-
<u>ΣΤΡΑΤΟΣ</u>	<u>26</u>	-
ΠΕΡΔΙΚΑΣ	30	-
ΛΕΥΚΟΓΕΙΑ ΔΡΑΜΑΣ	32	-
ΜΑΡΑΘΩΝΑΣ	47	-
ΑΣΩΜΑΤΑ	-	52
ΠΗΝΕΙΟΣ ΗΛΕΙΑΣ	-	53
ΛΑΔΩΝΑΣ	-	56
ΜΠΡΑΜΙΑΝΟΣ ΙΕΡΑΠΕΤΡΑΣ	-	63
ΠΗΓΕΣ ΑΩΟΥ	-	78
ΣΦΗΚΙΑ	-	82
ΤΑΥΡΩΠΟΣ	-	83
ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ	-	95
ΚΑΣΤΡΑΚΙ	-	96
ΣΜΟΚΟΒΟ	-	104
ΕΥΗΝΟΣ	-	104
ΠΟΥΡΝΑΡΙΟΥ Ι	-	107
ΠΟΛΥΦΥΤΟ	-	112
ΜΟΡΝΟΣ	-	139
ΜΕΣΟΧΩΡΑ	-	150
ΚΡΕΜΑΣΤΩΝ	-	160
ΘΗΣΑΥΡΟΣ	-	172

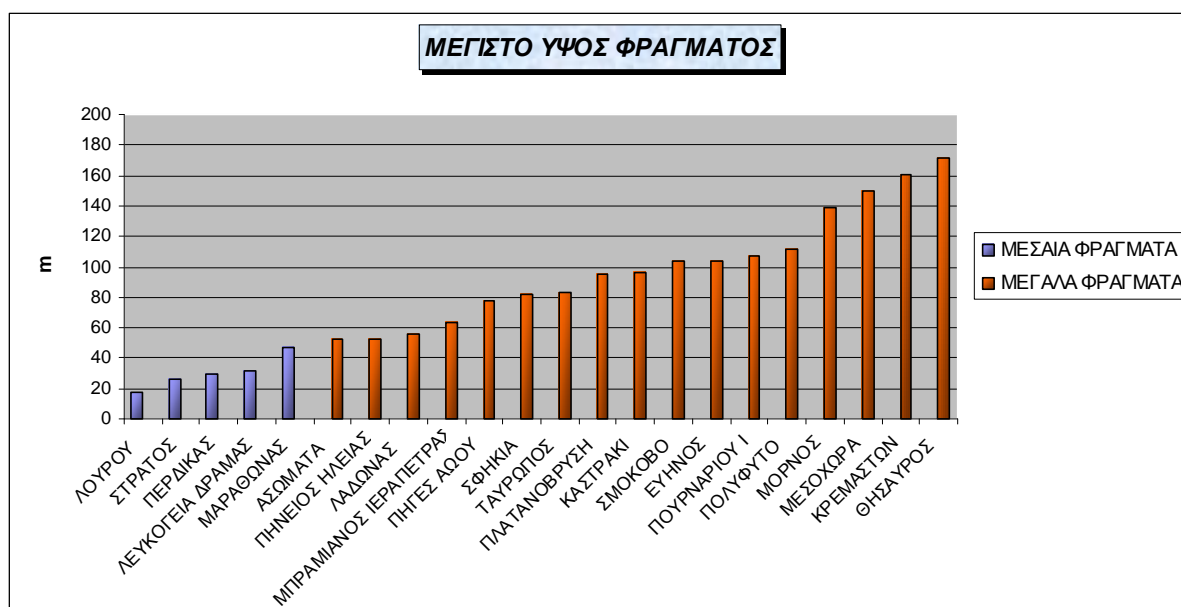
Πίνακας 7: Ταξινόμηση φραγμάτων βάσει του μέγιστου ύψους (http://itia.ntua.gr/nikos/ax_int/CDfrag/Kefalaia/Teliko2.doc)

Η ταξινόμηση αυτή σε ποσοστιαία μορφή φαίνεται στον Πίνακα 8:

	ΜΕΓΙΣΤΟ ΥΨΟΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ (m)		
	<15	15> & <50	>50
ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ	0	5	17
ΠΟΣΟΣΤΟ	0,0%	21,7%	73,9%

Πίνακας 8: Ποσοστιαία ταξινόμηση φραγμάτων βάσει του μέγιστου ύψους (http://itia.ntua.gr/nikos/arx_int/CDfrag/Kefalaia/Teliko2.doc)

Τα παραπάνω παρίστανται και γραφικά στο Σχήμα 4:



Σχήμα 4: Ταξινόμηση φραγμάτων βάσει του μέγιστου ύψους (http://itia.ntua.gr/nikos/arx_int/CDfrag/Kefalaia/Teliko2.doc)

Παρατηρούμε ότι κανένα από τα εξεταζόμενα φράγματα δεν έχει ύψος μικρότερο από 15m, ενώ μόνο πέντε έχουν μέγιστο ύψος ανάμεσα σε 15m και 50m, είναι δηλαδή μεσαία. Όλα τα υπόλοιπα, το 74% περίπου είναι μεγάλα φράγματα (ύψος >50m).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΣΤΡΑΤΟΥ

2.1 Ο ΠΟΤΑΜΟΣ ΑΧΕΛΩΟΣ

Ο Αχελώος ή Ασπροπόταμος (Εικόνες 1, 2) είναι ένα από τα μεγαλύτερα ποτάμια της Ελλάδος. Πηγάζει στην Ήπειρο, στις νότιες πλαγιές του όρους Περιστέρι (νότια της Πίνδου), διασχίζει τον κάμπο του Αγρινίου και διανύοντας μία διαδρομή 200 χλμ. χύνεται εκεί που ο Πατραϊκός κόλπος συναντά το Ιόνιο πέλαγος. Είναι ο δεύτερος σε μήκος ποταμός της Ελλάδας. Η λεκάνη απορροής του καλύπτει έκταση 5.572 km², το ύψος της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης είναι 1.620 mm, ο μέσος ετήσιος όγκος νετού 8.860 x 10⁶ m³, η δε μέση ετήσια απορροή του εκτιμάται σε 7.800 x 10⁶ m³ νερού. Από τα νερά του ποταμού αρδεύονται περί τα 370.000 στρέμματα γεωργικής γης.



Εικόνα 1: Αεροφωτογραφία του ποταμού Αχελώου (<http://www.airphotos.gr/>)

Τροφοδοτείται από τα νερά των ρεμάτων και ποταμών Άσπρος, Λεπενίτσα, Ξεροπλατάνια, Κομναϊτικο, Βακαριώτη, Βασαλάκα, Καπραλία, Νέγκρη, Κούτσορο, Καλή Πηγή, Παφρώνη, Βατακιάδα, Καμπουργιανίτικο, Πλατανιάς, Αγραφιώτη, Μέγδοβα, Λεπιανίτη, Γρανιτσιώτη, Ζαμπατορέματος, Ίναχο, που διαβρώνουν το έδαφος της Ευρυτανίας και μέσω της διώρυγας Διμήκου δέχεται τα πλεονάζοντα νερά των λιμνών Τριχωνίδας και Λυσιμαχίας. Έχει υποστεί ουσιαστικές αλλοιώσεις από την κατασκευή των τεσσάρων Υδροηλεκτρικών φραγμάτων για την παραγωγή ενέργειας (Κρεμαστών με 4.700 x 10⁶ m³, Καστρακίου με 1.000 x 10⁶ m³, Ταυρωπού με 400 x 10⁶ m³ και Στράτου με 150 x 10⁶ m³), αλλά και την άρδευση άλλων περιοχών, όπως αυτά της : Μεσοχώρας με ωφέλιμη χωρητικότητα 228 x 10⁶ m³

νερού, Συκιάς με $502 \times 106 \text{ m}^3$, από το οποίο προβλέπεται να γίνει και η εκτροπή μέσω σήραγγας $600 \times 106 \text{ m}^3$ νερού προς τη Θεσσαλία.

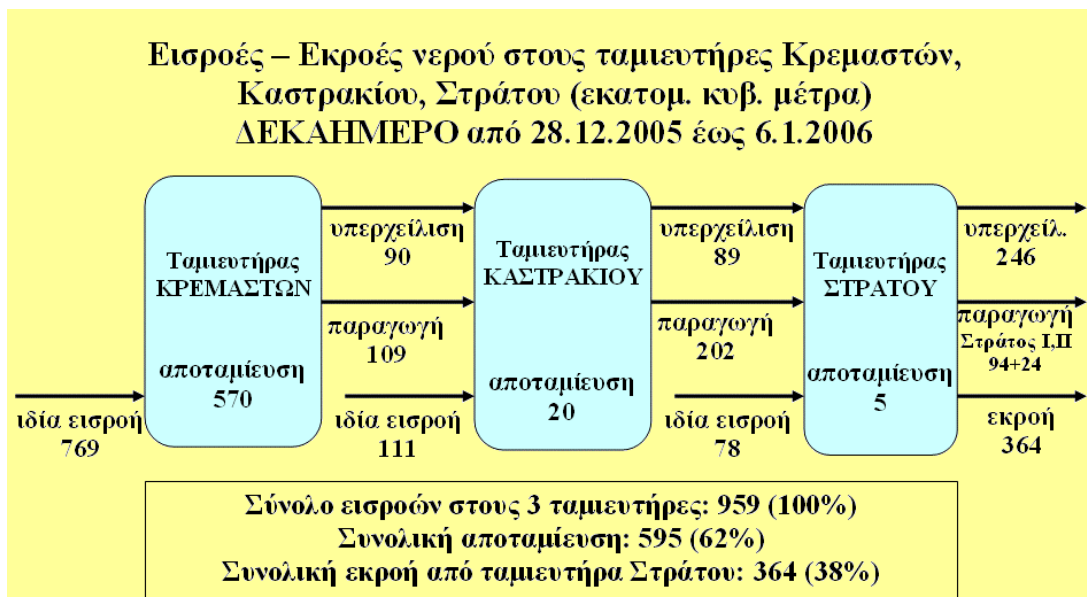


Εικόνα 2: Αεροφωτογραφία του ποταμού Αχελώου (<http://www.airphotos.gr/>)

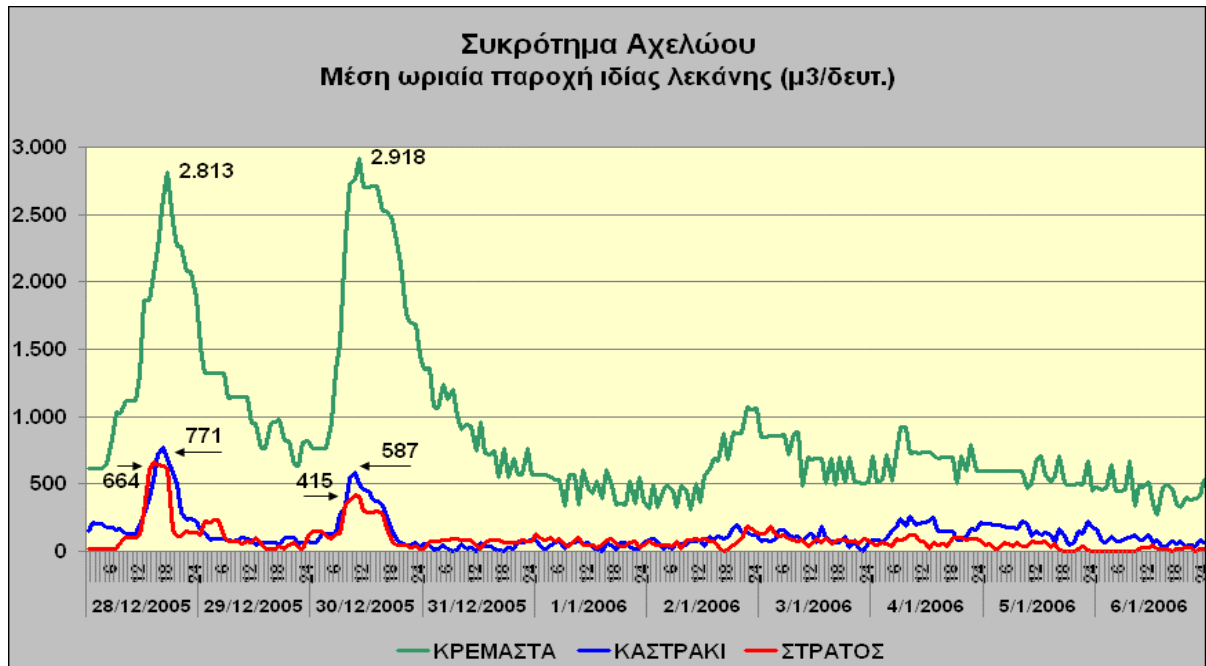
Για τους αρχαίους Έλληνες ο Αχελώος ήταν ο πατέρας όλων των ρεόντων υδάτων. Ο ποταμός - θεός προκαλούσε δέος στους προγόνους μας, χαρίζοντας άφθονο νερό και επεκτείνοντας συνεχώς το επιβλητικό του δέλτα. Στην αρχαιότητα λατρευόταν ως θεός, ιδιαίτερα από του Αιτωλούς και τους Ακαρνάνες που κατοικούσαν στην Παραχελωίτιδα γη. Στην αρχαία Ακαρνανία γίνονταν αγώνες προς τιμήν του ενώ οι παλιότερες σωζόμενες παραστάσεις του θεού Αχελώου φθάνουν μέχρι και τον 6^ο αι. π.Χ.. Με την μορφή ανθρωπόμορφου ταύρου παρίσταναν την ορμητικότητά του και με τη μορφή δράκου τον ελικοειδή ρου των νερών του. Κατά τη μυθολογία ο Αχελώος θεωρούνταν ο σπουδαιότερος ποτάμιος θεός, γιος του Ωκεανού και της Τηθύος, πατέρας των Νυμφών και των Σειρηνών, γεννήτορας όλων των ρεόντων υδάτων και των πηγών. Στην ομηρική Ιλιάδα, ανώτερος σε δύναμη του θεϊκού Αχελώου θεωρούνταν μόνον ο Δίας. Πολύ γνωστό στην αρχαία μυθολογία και τέχνη είναι το θέμα της αναμέτρησης του ποτάμιου θεού Αχελώου με τον ημίθεο Ηρακλή για χάρη της Δηϊάνειρας, κόρης του βασιλιά της Ακαρνανίας Οινέα. Υπάρχουν αρκετές εκδοχές για την προέλευση της ονομασίας του Αχελώου. Η επικρατέστερη θεωρία παραπέμπει στη σανσκριτική ρίζα «αχ» που σημαίνει νερό και το συγκριτικό επίθετο «λώων» (μεγαλύτερος) . Στους μεσαιωνικούς χρόνους ο ποταμός πήρε το όνομα Ασπροπόταμος ή Άσπρος λόγω της αφρισμένης εικόνας του ποταμού κατά τους ανοιξιάτικους μήνες, όταν λιώνουν τα χιόνια ή του λευκού χρώματος των χαλικιών στις όχθες του και της άσπρης λάσπης που κατεβάζει το ρεύμα του.



Εικόνα 3: Αεροφωτογραφία της Τεχνητής Λίμνης του Στράτου (<http://www.airphotos.gr/>)



Σχήμα 5: Γράφημα εισροών-εκροών στους ταμιευτήρες του Συγκροτήματος Αχελώου (Δ.Ε.Η., 2011)



Σχήμα 6: Γράφημα παροχών π. Αχελώου στους Ταμιευτήρες Κρεμαστών, Καστρακίου, Στράτου (Δ.Ε.Η., 2011)

2.2 ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΤΟΥ ΣΤΡΑΤΟΥ

Το υδροηλεκτρικό φράγμα Στράτου βρίσκεται στον νομό Αιτωλοακαρνανίας, επί του ποταμού Αχελώου. Βρίσκεται βόρεια του Αγρινίου και δυτικά του χωριού Στράτος, από όπου πήρε και το όνομά του.



Εικόνα 4: Αεροφωτογραφία φράγματος Στράτου, όπου διακρίνεται το συγκρότημα του υπερχειλιστή (<http://www.airphotos.gr/>)

Κατασκευάστηκε το 1989 και δημιούργησε την τεχνητή λίμνη Στράτου, την τρίτη κατά σειρά τεχνητή λίμνη του Αχελώου, μετά τις λίμνες Καστρακίου και Κρεμαστών. Το υδροηλεκτρικό εργοστάσιο διαθέτει τέσσερις μονάδες ηλεκτρικής παραγωγής, συνολικής ισχύος 150 MW και μαζί με τα υπόλοιπα φράγματα συμμετέχει με ποσοστό 10% στην ετήσια παραγωγή ρεύματος της χώρας. Ωστόσο, σύμφωνα με τη WWF η ίδια η ΔΕΗ προβλέπει μείωση κατά 274 GWh της συνολικής παραγόμενης ενέργειας στο σύστημα Αχελώου, λόγω μειωμένων παροχών στα φράγματα Στράτου, Κρεμαστών και Καστρακίου. Από τεχνικής άποψης ανήκει στα χωμάτινα λιθόρριπτα φράγματα και κατασκευάστηκε εξολοκλήρου από ελληνικές εταιρίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΓΕΝΙΚΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Η συμβολή των θαλάσσιων οικοσυστημάτων και γενικότερα του θαλάσσιου περιβάλλοντος, στην εξέλιξη, εξάπλωση, ανάπτυξη αλλά και στο 'εύζειν' της ανθρωπότητας υπήρξε σημαντική και πολλές φορές καθοριστική. Η λειτουργία αυτών των οικοσυστημάτων, από το πιο απλό, όπως π.χ. μια λίμνη ή ένα ποτάμι, μέχρι τους ωκεανούς, είναι τόσο πολύπλοκη αλλά βασίζεται σε κάποια γενικά χαρακτηριστικά και αιτίες που ποικίλουν, ανάλογα με το οικοσύστημα, μόνο στην κλίμακα. Το θαλασσινό νερό βρίσκεται σε συνεχή οριζόντια και κατακόρυφη κίνηση. Η κίνηση αυτή μπορεί να είναι συνεχής, ασυνεχής, περιοδική, απεριοδική και έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγάλης ή μικρής κλίμακας θαλάσσιων ρευμάτων.

Τα θαλάσσια ρεύματα διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με το αίτιο που είναι υπεύθυνο για το σχηματισμό τους. Οι κατηγορίες των θαλάσσιων ρευμάτων είναι:

- i. Τα ανεμογενή ρεύματα από τον άνεμο.
- ii. Τα ρεύματα πυκνότητας που προκαλούνται από τις διαφορές πυκνότητας στο θαλασσινό νερό.
- iii. Τα παλιρροιακά ρεύματα που προκαλούνται από την έλξη, κυρίως του ήλιου και της Σελήνης και δευτερευόντως από τα άλλα ουράνια σώματα.
- iv. Τα κυματογενή ρεύματα που προκαλούνται από τα κύματα.

Τα ρεύματα που παρατηρούνται στα μεγάλα υδάτινα σώματα είναι αποτέλεσμα της συνισταμένης κίνησης του θαλασσινού νερού που προκύπτει από την επίδραση σ' αυτό του συνόλου των προαναφερθέντων αιτίων.

Θεωρείται ότι στα σώματα αυτά διαμορφώνονται δύο στρώματα: το επιφανειακό στρώμα και το βαθύ στρώμα. Τα κύρια ρεύματα που παρατηρούνται στο επιφανειακό στρώμα εξαρτώνται επί το πλείστον από τον άνεμο, ενώ στο βαθύ στρώμα εξαρτώνται από τις διαφορές πυκνότητας στο χώρο, οι οποίες εξαρτώνται με τη σειρά τους από τη θερμοκρασία και την αλατότητα και επομένως η κυκλοφορία αυτή ονομάζεται "θερμο-αλατική κυκλοφορία".

3.1 ΑΝΕΜΟΓΕΝΗ ΡΕΥΜΑΤΑ

3.1.1 ΣΥΖΕΥΞΗ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΑΣ

Όταν πνέει άνεμος στην επιφάνεια της θάλασσας, μεταφέρεται ενέργεια από τον άνεμο στα επιφανειακά θαλάσσια στρώματα. Μέρος της ενέργειας αυτής καταναλώνεται στη δημιουργία επιφανειακών κυμάτων βαρύτητας και ένα άλλο μέρος της ενέργειας προκαλεί τα ρεύματα. Οι διεργασίες μέσω των οποίων γίνεται η κατανομή της ενέργειας στα κύματα και στα ρεύματα είναι πολύπλοκες. Ωστόσο, είναι εμπειρικά γνωστό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου W , τόσο ισχυρότερη θα είναι η εφαιπτομενική δύναμη t , που ασκείται απ' αυτόν στην επιφάνεια της θάλασσας και τόσο ταχύτερο θα είναι το επιφανειακό ρεύμα:

$$t = c \cdot W^2 \quad (3.1)$$

όπου η παράμετρος c εξαρτάται από τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες και η τιμή της είναι τόσο μεγαλύτερη όσο ισχυρότερες είναι οι τοπικές αναταρακτικές κινήσεις. Επίσης, έχει διαπιστωθεί ότι η ταχύτητα του επιφανειακού ρεύματος είναι περίπου ίση με το 3% της ταχύτητας του ανέμου. Η επίδραση του ανέμου στην

επιφάνεια της θάλασσας μεταδίδεται μέσα στην υδάτινη στήλη λόγω εσωτερικής τριβής. Στο θαλάσσιο περιβάλλον, η εσωτερική τριβή δεν οφείλεται σε μοριακές αλλά σε στροβιλοειδής διεργασίες, δηλαδή σε ανταλλαγές διάφορου μεγέθους όγκων νερού. Όμως, το βάθος μέχρι το οποίο λαμβάνει χώρα η στροβιλοειδής ανάμειξη, και κατά συνέπεια το μέγεθος της στροβιλοειδούς εσωτερικής τριβής, εξαρτάται από το βαθμό στρωμάτωσης της υδάτινης στήλης.

Το γεγονός ότι η μεταφορά της ενέργειας από τον άνεμο στην υδάτινη στήλη γίνεται με στροβιλοειδής και όχι με μοριακές διεργασίες έχει μεγάλη σημασία για τα ανεμογενή ρεύματα. Για παράδειγμα, η επίδραση ανέμου ταχύτητας 10 ms^{-1} θα έφτανε με μοριακές διεργασίες το πολύ δύο μέτρα βάθος, ακόμη και αν ο άνεμος έπνεε σταθερά για δύο ημέρες. Η περιγραφή των ανεμογενών και όχι μόνο αυτών ρευμάτων θα ήταν απλούστερη, εάν η γη δεν κινούνταν. Όμως, η γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της.

Τα ανεμογενή ρεύματα προκαλούνται όταν άνεμος και θάλασσα βρίσκονται σε κατάσταση ισορροπίας. Διότι, όταν πνέει άνεμος επάνω από μια θαλάσσια επιφάνεια, το επιφανειακό ρεύμα αρχικά κινείται με επιτάχυνση, μέχρι να αποκτήσει τη μέγιστη ταχύτητα που αντιστοιχεί στον άνεμο. Όταν αυτό επιτευχθεί η επιτάχυνση παύει και η δυνάμεις που ασκούνται βρίσκονται σε ισορροπία.

3.1.2 ΓΕΝΕΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ

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 Νάνσεν, ο οποίος κατά την διάρκεια μια αποστολής στον Αρκτικό Ωκεανό το 1896 παρατήρησε ότι τα παγόβουνα δεν κινούνταν στην διεύθυνση του ανέμου που έπνεε αλλά σε διεύθυνση που σχημάτιζε δεξιόστροφη γωνία $20-40^\circ$.

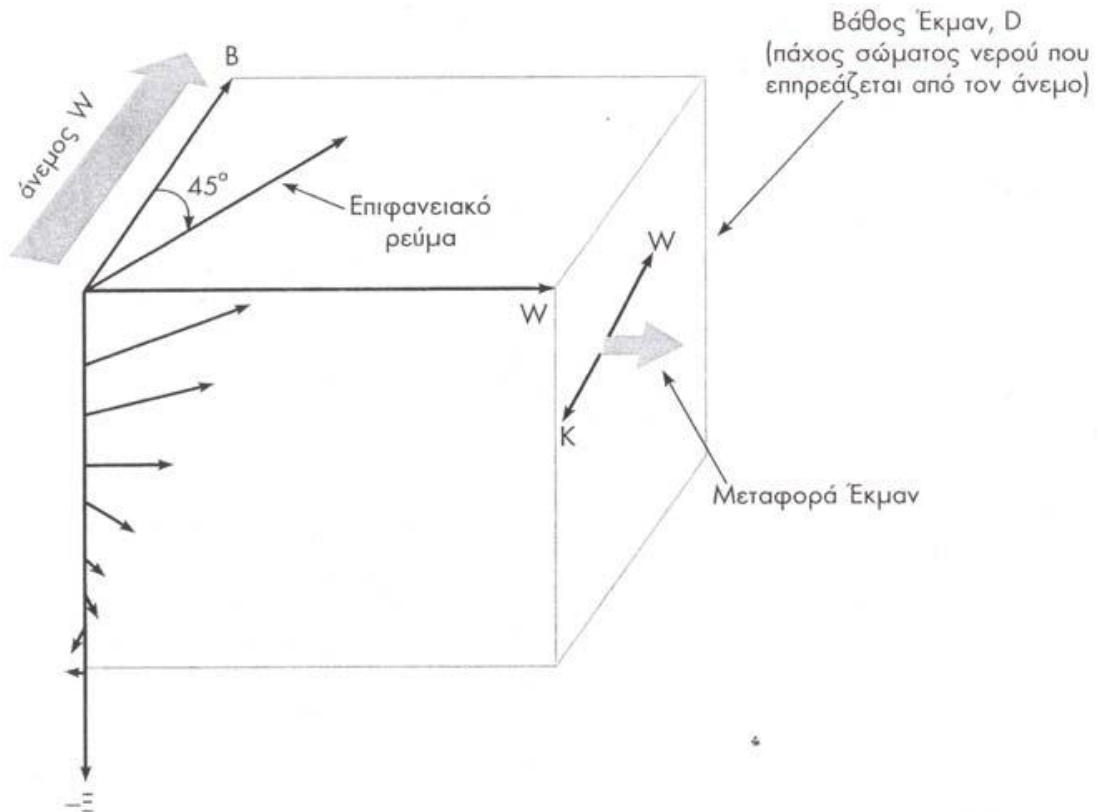
Η προσομοίωση του Ekman

Ο Ekman υπέθεσε ότι σταθερός άνεμος πνέει πάνω 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 τη υδάτινη στήλη, το ομοίωμα του Ekman έδειξε ότι στο βόρειο (νότιο) ημισφαίριο η Coriolis δύναμη τείνει να εκτρέψει το επιφανειακό νερό δεξιόστροφα (αριστερόστροφα), ενώ η δύναμη του ανέμου προσπαθεί να το επαναφέρει στη ίδια με εκείνον διεύθυνση. Όταν τελικά επιτευχθεί η ισορροπία μεταξύ των δύο αυτών δυνάμεων, η διεύθυνση ροής του επιφανειακού ρεύματος σχηματίζει γωνία 45° δεξιόστροφα (αριστερόστροφα) με τη διεύθυνση από την οποία πνέει ο άνεμος. Κάτω από την επιφάνεια στρώμα νερού τίθεται σε κίνηση παρασυρόμενο από το υπερκείμενο στρώμα. Επίσης, λόγω της επίδρασης από την δύναμη Coriolis, κάθε στρώμα τείνει να κινηθεί πιο δεξιά (αριστερά), της διεύθυνσης στην οποία σύρεται από το υπερκείμενο στρώμα. Τέλος η ταχύτητα του ρεύματος είναι σήμερα γνωστή ως σπειροειδές του Ekman Σχήμα 7.

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 την διεύθυνση του ανέμου προς τα δεξιά στο βόρειο ημισφαίριο και προς τα αριστερά στο νότιο ημισφαίριο. Το τελευταίο συμπέρασμα γίνεται κατανοητό

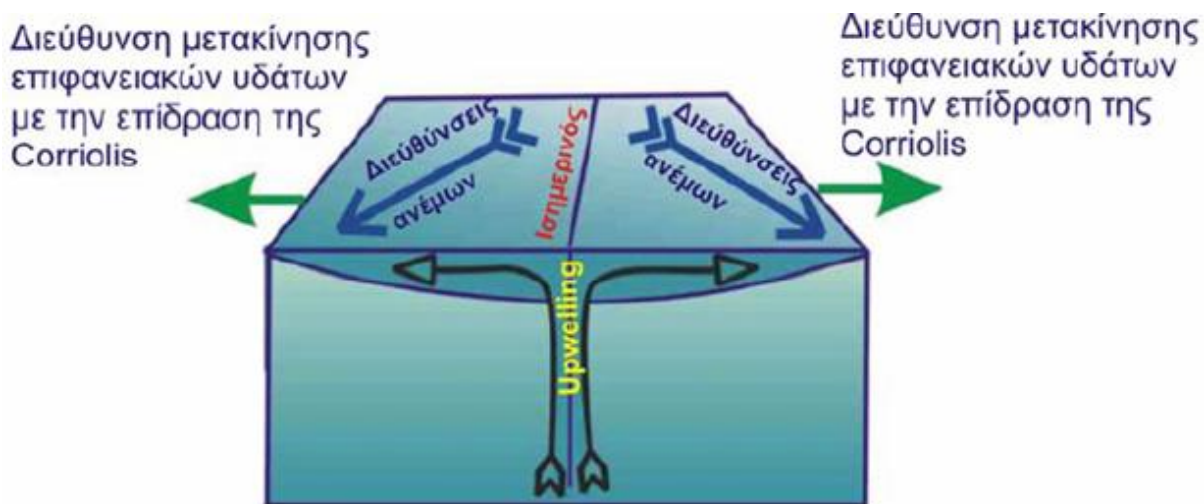
εάν εξετάσουμε την ισορροπία των δυνάμεων που ασκούνται στο στρώμα επιρροής του ανέμου. Σε κατάσταση ισορροπίας του ανέμου (W) και η Coriolis (C) αντισταθμίζουν η μία την άλλη. Κατά συνέπεια, το μέσο ρεύμα κινείται κάθετα ως προς την διεύθυνση του ανέμου, δεξιόστροφα στο βόρειο ή αριστερόστροφα στο νότιο ημισφαίριο αντιστοίχως. Ο συνολικός όγκος νερού ανά δευτερόλεπτο (m^3s^{-1}) του στρώματος που επηρεάζει ο άνεμος μεταφέρεται σε διεύθυνση κάθετη προς την διεύθυνση του ανέμου και ονομάζεται μεταφορά Ekman.



Σχήμα 7: Προσομοίωση των ανεμογενών ρευμάτων σύμφωνα με τον Ekman (Θεοδώρου, 2000)

3.1.3 ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΚΑΙ ΙΣΗΜΕΡΙΝΗ ΑΝΑΔΥΣΗ

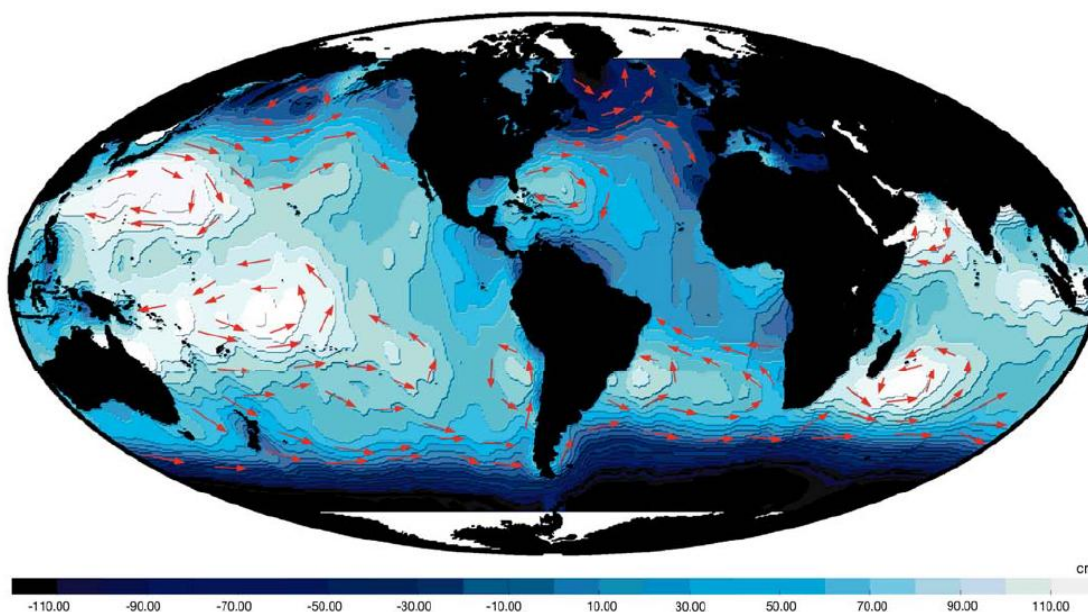
Η μεταφορά του Ekman προκαλεί συχνά την ανάδυση των παράκτιων νερών. Στο βόρειο ημισφαίριο εάν η ακτή βρίσκεται στα αριστερά της διεύθυνσης από την οποία πνέει ο άνεμος, προκαλείται μεταφορά προς την ανοικτή θάλασσα επιφανειακού νερού και αντικατάσταση του τελευταίου με ανάδυση στην επιφάνεια ψυχρότερου νερού, προερχόμενου από βαθύτερα στρώματα. Το χρώμα του νερού που αναβλύζει είναι πράσινο, γιατί είναι πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά και επομένως συντηρεί μεγαλύτερους φυτοπλαγκτονικούς πληθυσμούς. Αν, αντιθέτως η ακτή βρίσκεται στα δεξιά της διεύθυνσης από την οποία πνέει ο άνεμος, τότε προκαλείται μεταφορά νερού προς την ακτή και βύθισή του εκεί. Ανάδυση παρατηρείται και στον ισημερινό όπου η ανατολική συνιστώσα των Αληγών προκαλεί μεταφορά νερών προς βορά στο νότιο ημισφαίριο και προς νότο στο νότιο ημισφαίριο. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο Σχήμα 8.



Σχήμα 8: Άντληση από μεταφορά Ekman στην περιοχή του ισημερινού

3.2 ΓΕΩΣΤΡΟΦΙΚΑ ΡΕΥΜΑΤΑ

Τα γεωστροφικά ρεύματα είναι ρεύματα που αναπτύσσονται από οριζόντιες διαφορές πίεσης με ταυτόχρονη επίδραση της δύναμης Coriolis (Εικόνα 5). Ο άνεμος, η μεταφορά Ekman, η εξάτμιση και άλλοι παράγοντες προξενούν αποκλίσεις στην πραγματική στάθμη της θάλασσας από την στάθμη ισορροπίας που είναι η επιφάνεια του γεωειδούς. Πρέπει να σημειωθεί ότι για διδακτικούς λόγους η στάθμη της ισορροπίας θα θεωρηθεί σαν επίπεδη επιφάνεια.



Εικόνα 5: Γεωστροφικά ρεύματα και δυναμική τοπογραφία από τον δορυφόρο Topex Poseidon

Στην πράξη δεν υπάρχει επίπεδο με την γεωμετρική έννοια, γιατί οι διαστάσεις των λεκανών είναι τέτοιες που η καμπυλότητα της γης αλλά και η πραγματική επιφάνεια του γεωειδούς είναι σημαντικές. Στον παρατηρητή όμως που εξετάζει τις οριζόντιες διαφορές πίεσης η επιφάνεια του γεωειδούς 'φαίνεται' σαν επίπεδο. Αντί

λοιπόν να μιλάμε για οριζόντια επίπεδα πιο σωστό είναι να αναφερόμαστε σε γεωδυναμικές επιφάνειες. Μια γεωδυναμική επιφάνεια είναι μια επιφάνεια πάνω στην οποία η ύλη δεν παρουσιάζει διαφορά δυναμικής ενέργειας.

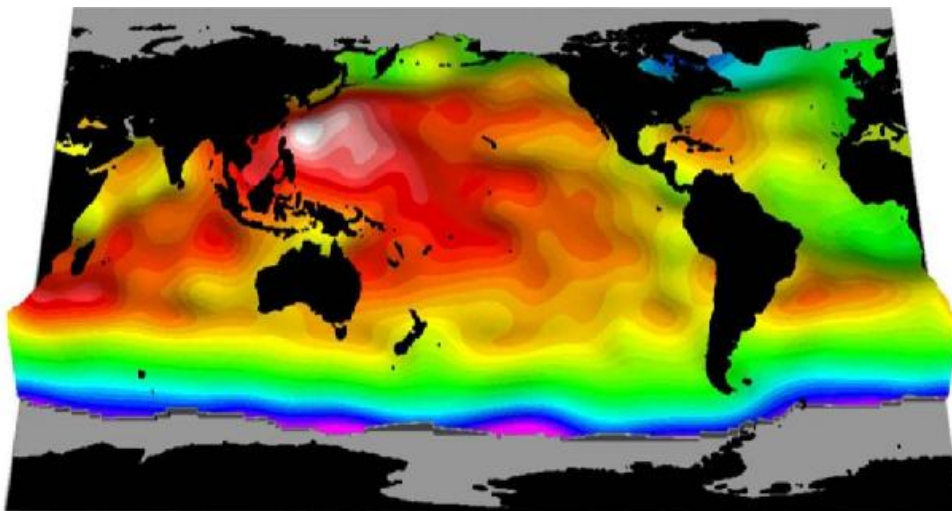
3.2.1 ΘΕΡΜΟ-ΑΛΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ

Η θερμο-αλατική κυκλοφορία στους ωκεανούς είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης διακυμάνσεων της πυκνότητας στο θαλάσσιο χώρο. Η ύπαρξη διαφορών στις πυκνότητες στην υδάτινη στήλη οδηγεί τις μάζες του θαλασσινού νερού να βυθίζονται ή να αναδύονται μέχρι να βρεθούν σε ισορροπία με τις περιβάλλουσες θαλάσσιες μάζες, καθώς επίσης και να κινούνται οριζόντια στο χώρο ισορροπίας τους ανάλογα με την επικρατούσα πιεσοβαθμίδα.

Η Coriolis εκτροπή νερών προκαλεί τη συσσώρευση επιφανειακών νερών και συνεπώς τη δημιουργία κλίσης εγκάρσια προς τη διεύθυνση του ρεύματος. Η κλίση της θαλάσσιας επιφάνειας ισοδυναμεί με δύναμη της οριζόντιας βαθμίδας πίεσης. Η ροή που προκύπτει από την εξισορρόπηση της δύναμης της οριζόντιας βαθμίδας πίεσης και της Coriolis επίδρασης ονομάζεται γεωστροφικό ρεύμα και ρέει σε διεύθυνση κάθετη προς την κλίση της ισοβαρικής επιφάνειας. Η φορά της ροής είναι τέτοια, ώστε, στο βόρειο (νότιο) ημισφαίριο, δεξιά (αριστερά) της ροής, να βρίσκονται οι υψηλές πιέσεις. Γεωστροφικά ρεύματα δημιουργούνται εκτός από την ανεμογενή συσσώρευση νερών σε μια παράκτια περιοχή (βαροτροπικές συνθήκες) και από εγκάρσιες μεταβολές της πυκνότητας προερχόμενες από θερμοαλατικές μεταβολές (βαροκλινείς συνθήκες) είτε, τέλος, από συνδυασμό των παραπάνω.

3.2.2 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ

Ας υποθέσουμε ότι σταθερός άνεμος πνέει για αρκετό χρονικό διάστημα επάνω από μια θαλάσσια επιφάνεια, έτσι ώστε στο εσωτερικό της τελευταίας να επικρατήσει γεωστροφική ισορροπία.

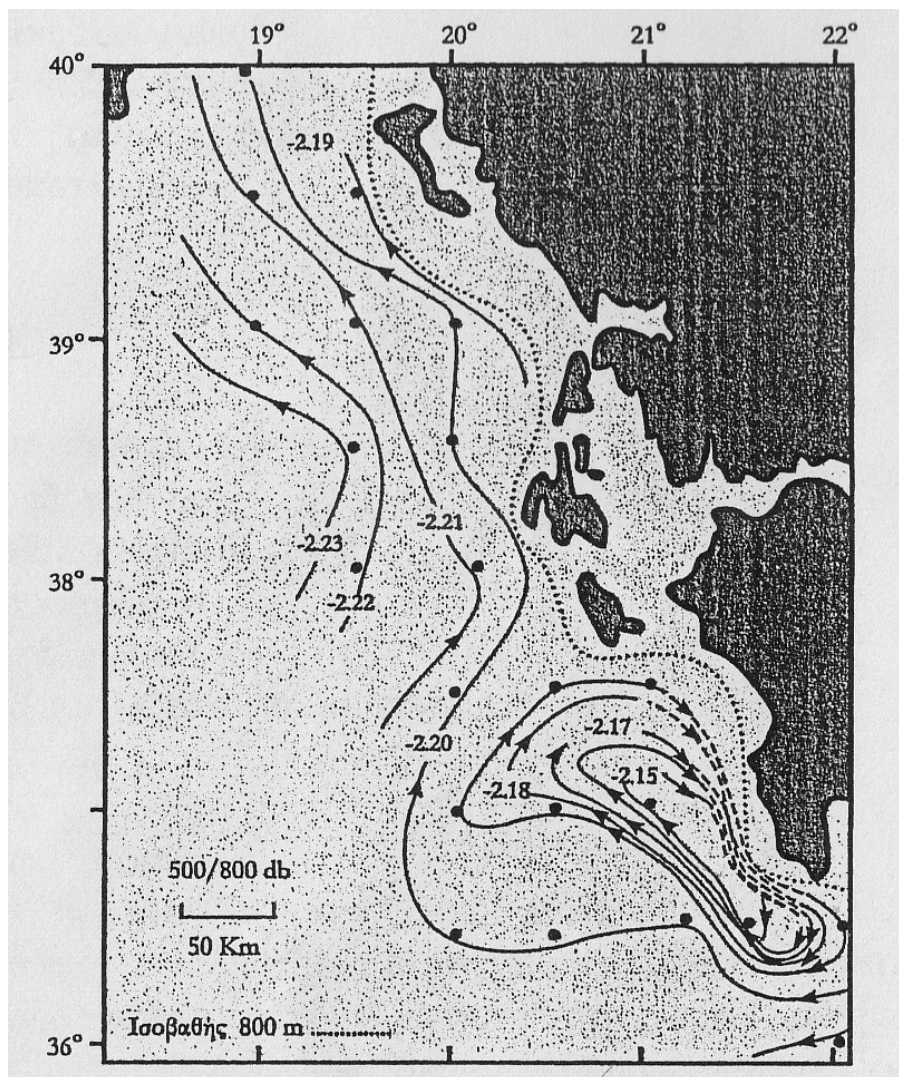


Εικόνα 6: Δυναμική τοπογραφία της επιφάνειας των ωκεανών, όπως προκύπτει από τον δορυφόρο Topex Poseidon

Εάν, στη συνέχεια, η ταχύτητα του ανέμου αυξηθεί και σταθεροποιηθεί σε κάποια νέα τιμή, η προστιθέμενη ενέργεια θα προκαλέσει αύξηση της ταχύτητας του ρεύματος και κατά συνέπεια αύξηση της κλίσης των ισοβαρικών και ισόπυκνων

επιφανειών. Οι τελευταίες θα γίνουν περισσότερο απότομες – δηλαδή θα αποκλίνουν ακόμη πιο πολύ από την οριζόντια θέση της ελάχιστης ενέργειας. Συνεπώς, θα αυξηθεί τόσο η δυναμική όσο και η κινητική ενέργεια του θαλάσσιου μέσου. Λόγω της σχέσης μεταξύ της κλίσης μιας ισοβαρικής επιφάνειας και της δυναμικής της ενέργειας, οι αποκλίσεις των ισοβαρικών επιφανειών από την οριζόντια διεύθυνση αναφέρονται ως δυναμικά ύψη και μετρώνται σε μονάδες δυναμικής ενέργειας και όχι γεωμετρικής απόστασης (δυναμικά μέτρα)

Οι διακυμάνσεις του δυναμικού ύψους σε μια ισοβαρική επιφάνεια, σχετικά με κάποια πίεση στην οποία υποθέτουμε ότι η αντίστοιχη ισοβαρική επιφάνεια είναι οριζόντια, αναφέρονται ως δυναμική τοπογραφία (Εικόνα 7). Μπορούμε να υπολογίσουμε τη δυναμική τοπογραφία μιας οποιασδήποτε ισοβαρικής επιφάνειας σχετικά με οποιαδήποτε άλλη.



Εικόνα 7: Δυναμική τοπογραφία στα 500db ως προς τα 800db στο ανατολικό Ιόνιο πέλαγος (Θεοδώρου, 2000)

Το γεωστοφικό ρεύμα ρέει σε διεύθυνση κάθετη προς την κλίση της ισοβαρικής επιφάνειας και επομένως ρέει κατά μήκος και παράλληλα με τις καμπύλες δυναμικού ύψους. Η φορά της ροής είναι τέτοια, ώστε στο βόρειο ημισφαίριο, δεξιά της ροής, να βρίσκονται οι υψηλές πιέσεις, δηλαδή η ισοβαρική επιφάνεια κλίνει προς τα επάνω και στα δεξιά της ροής. Όσο μεγαλύτερη ταχύτητα έχει το γεωστροφικό ρεύμα, τόσο

πιο απότομη θα είναι η κλίση της ισοβαρικής επιφάνειας και συνεπώς τόσο πιο πυκνά διατεταγμένες θα είναι οι καμπύλες δυναμικού ύψους.

3.3 ΑΔΡΑΝΕΙΑ ΚΑΙ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΑ ΡΕΥΜΑΤΑ

Η δύναμη Coriolis και η φυγόκεντρος δεν είναι πραγματικές δυνάμεις, αλλά οφείλονται στη περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονα της. «Η Coriolis δύναμη» φαίνεται – σε παρατήρηση που περιστρέφεται μαζί με τη Γή – να εκτρέπει ένα κινούμενο ρευστό προς τα δεξιά (Βόρειο ημισφαίριο). Παρομοίως, η «φυγόκεντρος δύναμη» είναι φανταστική. Όταν, για παράδειγμα, βρισκόμαστε σε όχημα, που ακολουθεί καμπυλόγραμμη πορεία, καμιά δύναμη δεν μας ωθεί προς τα έξω. Απλώς, το σώμα μας αντιδρά αδρανειακά. Η υποθετική αυτή δύναμη, που φαίνεται να εκτρέπει ένα κινούμενο σώμα, το οποίο στην πραγματικότητα προσπαθεί να διατηρήσει την κινητική του κατάσταση, ονομάζεται αδρανειακή δύναμη. Τα ρεύματα που δημιουργούνται στον ταμιευτήρα που υπό την επίδραση αδρανειακών δυνάμεων διαγράφουν χαρακτηριστικές ελικοειδής τροχιές ονομάζονται αδρανειακά ρεύματα. Ουσιαστικά, όμως, όλα τα ρεύματα περιέχουν αδρανειακές συνιστώσες σε ποικίλλοντα βαθμό. Τόσο η αδρανειακή όσο και η Coriolis επίδραση επηρεάζουν και οι δύο τις κινήσεις των ρευστών. Για λόγους ευκολίας αναφερόμαστε, συνήθως, απλώς στην επίδραση Coriolis, αλλά πρέπει να γίνει κατανοητό ότι και οι δύο επιδράσεις είναι κατά κανόνα παρούσες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΜΙΞΗ ΣΕ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ

Οι ταμιευτήρες είναι τεχνητές λίμνες, οι οποίες συνήθως κατασκευάζονται για αποθήκευση νερού, για έλεγχο των πλημμύρων ή για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πολλές φορές χρησιμοποιούνται επίσης για έλεγχο θερμοκρασίας, της αλατότητας, η άλλων παραμέτρων ποιότητας του νερού. Έτσι, πολλές φορές τοποθετούνται στους ταμιευτήρες στόμια εξόδου του νερού σε διάφορα βάθη ώστε να λαμβάνεται θερμότερο νερό από περιοχές πλησίον της επιφάνειας (π.χ. για άρδευση) ή ψυχρότερο νερό από τον πυθμένα (π.χ. για εκτροφή ιχθύων). Στις περιπτώσεις αυτές βέβαια πρέπει να γίνεται έλεγχος ποιότητας και των υδάτινων μαζών που παραμένουν μέσα στο ταμιευτήρα (Δημητρίου, 1992).

Μια ενδιαφέρουσα παράμετρος της ποιότητας του νερού, είναι ο μέσος χρόνος παραμονής του μέσα στον ταμιευτήρα, που μπορεί να θεωρηθεί ως πηλίκο 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 την ποιότητα του εισρέοντος νερού. Αν όμως ο χρόνος παραμονής είναι σημαντικός, τότε η ποιότητα του νερού επηρεάζεται σοβαρά από άλλες εισροές, ως π.χ. διαμέσου 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 και με την ένταση τους.

4.1 Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ-ΛΙΜΝΩΝ

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των λιμνών είναι μετεωρολογικοί, καθώς και οι διαφορές 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 επαυξάνεται 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 απόρρυθμιστικοί 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 θερμοκλινής ή θερμοκλινη. Τα βαθειά νερά προστατεύονται από τον άνεμο μέσω της σταθερής θερμοκλινής και σχηματίζουν το λεγόμενο υπολίμνιο. Γενικά, οι λίμνες και οι ταμιευτήρες παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές στην 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 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 εδώ – κατ' αρχάς – η δομή των ταλαντώσεων που οφείλονται σε εξωτερικές διαταραχές. Η πυκνότητα του νερού, ρ_s , μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη,

$$r_s = r_m + r_e(z) + r''(x, z, t) \quad (4.1)$$

όπου ρ_m είναι η (σταθερή) πυκνότητα του νερού που αντιστοιχεί στη μέση θερμοκρασία, είναι η διαφορά πυκνότητας (ως προς τη ρ_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 $\rho''(x, z, t)$ είναι η διαφορά πυκνοτήτων (πέραν της μιας ή των δυο άλλων) που προστίθεται όταν υπάρχουν κινήσεις. Η ρ_m συνδυάζεται με τη ρ_e ή τη ρ_s και τις δυο μαζί, ενώ για σταθερή πυκνότητα $\rho_s = \rho_m$. 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:

$$e' = -(1/r_m) \cdot (dr_e/dz) \quad (4.2)$$

ή

$$e' = -(1/r_m) \cdot (dr_s/dz) \quad (4.3)$$

Αφού $(dr_e/dz) = (dr_s/dz)$ και $(dr_m/dz) = 0$

Σε ένα ομογενές υγρό είναι $e' = 0$, ενώ χωρίς τη συνεκτικότητα κάθε κίνηση μέσα σ' 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:

$$r_m \cdot g \cdot (H - z) \quad (4.4)$$

όπου, H το συνολικό βάθος του ταμιευτήρα.

Έτσι, αν η είναι p 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)

$$P = p - r_m \cdot g \cdot (H - z) \quad (4.5)$$

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 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 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:

$$\Delta r = (1/2) \cdot r_m \cdot V^2 - r_m \cdot V^2 \quad (4.6)$$

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 $r_m \cdot g \cdot H$. Η τετραγωνική ρίζα του λόγου $r_m \cdot V^2 / r_m \cdot g \cdot H$, είναι ο γνωστός αριθμός Froude των ομογενών υγρών,

$$F = V / \sqrt{g \cdot H} \quad (4.7)$$

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:

$$c_w = \sqrt{g \cdot H} \quad (4.8)$$

Έτσι ο αριθμός Froude είναι:

$$F = V / c_w \quad (4.9)$$

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 $r_m \cdot g \cdot H$ 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 (παρόλο βέβαια που η όλη προηγούμενη ανάλυση είναι μάλλον πρωτογενής – για λόγους απλότητας).

4.2 ΕΙΣΡΟΕΣ- ΕΚΡΟΕΣ ΣΕ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ

Στο παρόν κεφάλαιο 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.

4.2.1 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΙ ΑΝΕΜΟΙ

Ο άνεμος εξασκεί συρτικές (διατμητικές) δυνάμεις στην ελεύθερη επιφάνεια μιας λίμνης και τείνει να σύρει μια επιφανειακή στρώση αυτής (επιφανειακό ρεύμα). Η διατμητική τάση εξαρτάται από τν 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,

$$t_s = C_D \cdot r_a \cdot V^2 \quad (4.10)$$

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

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 5m/sec, ενώ για μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας και μέχρι 15m/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 αέρα το C_D μπορεί να αυξηθεί ως και 40%. Για πρακτικούς υπολογισμούς είναι δυνατόν να λαμβάνεται ως μέση τιμή, $C_D = 1,3 \times 10^{-3}$. Ο άνεμος κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια προκαλεί κίνηση του νερού σε επιφανειακή ταχύτητα, έστω, $\overline{u_w}$. Έτσι, σε συνδυασμό με τις (προηγούμενες) διατμητικές τάσεις, η κίνηση του ανέμου παράγει έργο (ανά μονάδα χρόνου),

$$W_e = t_s \cdot \overline{u_w} \quad W_e = t_s \cdot \overline{u_w} \quad (4.11)$$

που αποτελεί εισροή δια της ελεύθερης επιφάνειας.

Η ταχύτητα $\overline{u_w}$ δεν έχει μετρηθεί πειραματικά, θα πρέπει όμως να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ταχύτητα τριβής:

$$\overline{u_w} \approx u_* = \sqrt{t_s / r_m} \quad (4.12)$$

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

$$dz/dx = (t_s + t_b) / r_m \cdot g \cdot H \quad (4.13)$$

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

4.2.2 ΑΝΤΑΛΑΓΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

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 το εν επαφή αέρα, μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$H_s = C_s \cdot r_a \cdot c_{pa} \cdot V \cdot (q_0 - q) \quad (4.14)$$

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 10m, V η ταχύτητα του ανέμου και ρ_a η πυκνότητα του αέρα.

β) **Η θερμική εκροή** που οφείλεται σε εξάτμιση (ενέργεια ανά μονάδα χρόνου-επιφάνειας) είναι:

$$H_L = C_L \cdot r_a \cdot L_w \cdot V \cdot (Y_0 - Y) \quad (4.15)$$

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, $C_s = C_L = 1,45 \times 10^{-3}$. 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:

$$H_1 = -5,18 \cdot 10^{-13} \cdot (1 + 0,17 \cdot C_N^2) \cdot (273 + q)^6 \quad (4.16)$$

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:

$$H_2 = 5,23 \cdot 10^{-8} \cdot (273 + q_0)^4 \quad (4.17)$$

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 = 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:

$$H_z / H_{sw} = e^{-h \cdot (H-z)} \quad (4.18)$$

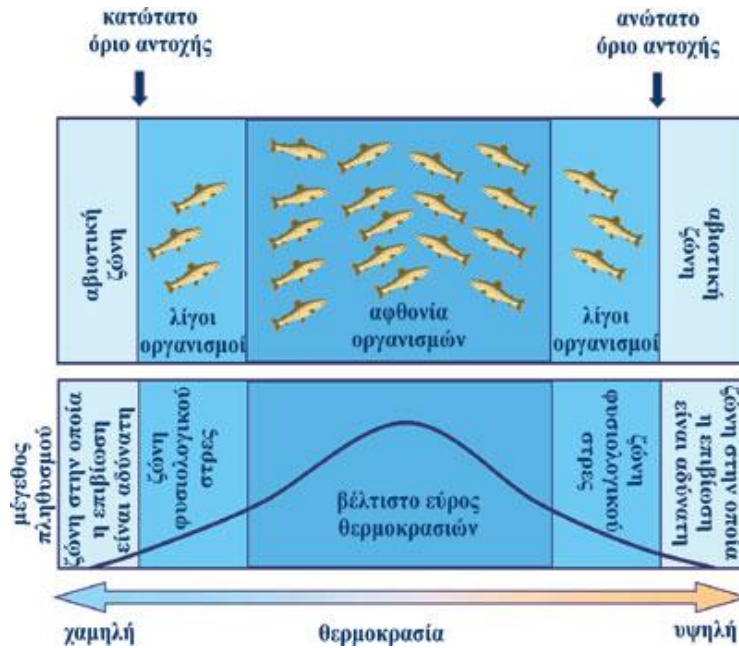
όπου ο h (διαστάσεις $[L]^{-1}$) εξαρτάται από τη βιολογική ανάπτυξη στο νερό της λίμνης, με τιμές που μεταβάλλονται από $0,2 m^{-1}$ για θολές – ευτροφισμένες λίμνες.

Ο προσδιορισμός της ακριβούς τιμής του h δεν είναι τόσο απαραίτητος για την ανάμιξη στις 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 h παίζει σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια των ανώτερων στρώσεων και έτσι αυτή επηρεάζει έμμεσα το βάθος της θερμοκλινης.

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

4.2.3 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ – ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΟΜΗ

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 (Σχήμα 9).



Σχήμα 9: Η θερμοκρασία επηρεάζει τους υδρόβιους πληθυσμούς.

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.

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.

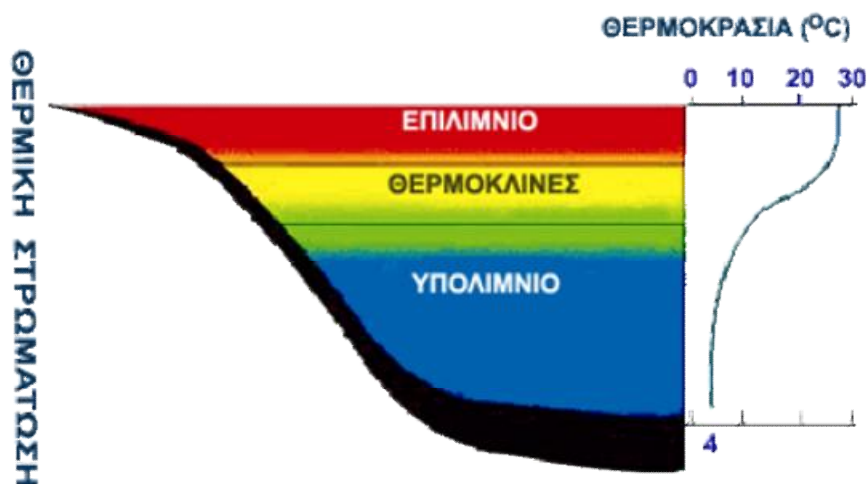
Ανάλογα με τη γεωγραφική τους θέση, τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής και το βάθος τους **οι λίμνες διακρίνονται σε:**

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) – Σχήμα 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.



Σχήμα 10: Θερμική στρωμάτωση βαθιάς λίμνης στη διάρκεια του καλοκαιριού

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.

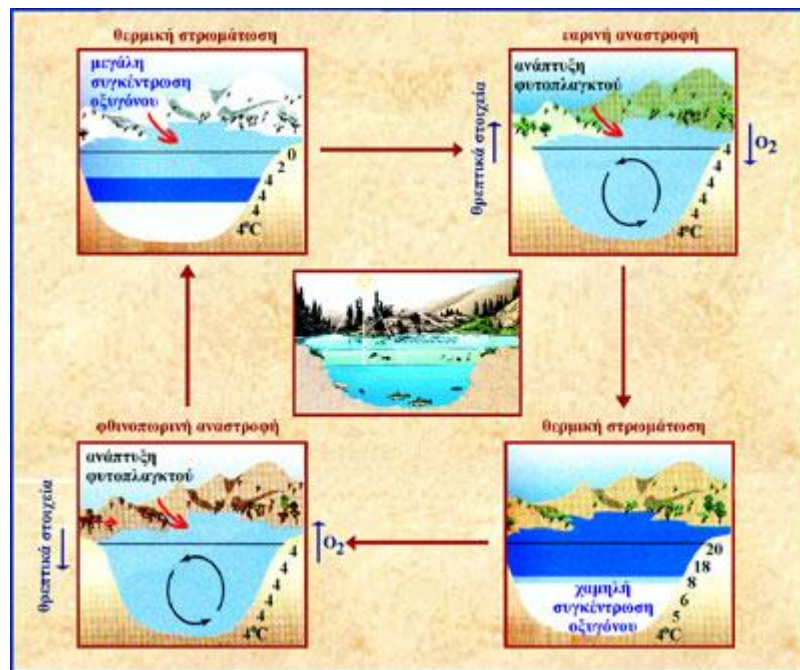
Στην ανώτερη περιοχή του υπολίμνιου, εκεί όπου διαχωρίζεται το επιλίμνιο από το υπολίμνιο και μέσα σε μια υδάτινη περιοχή ελάττωσης της θερμοκρασίας με το βάθος (**μεταλίμνιο**), υπάρχει ένα στρώμα έντονης ασυνέχειας, το **θερμοκλινές**. Πρόκειται για το λεπτό στρώμα νερού που χαρακτηρίζεται από σημαντική 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:

$$\theta'' = d^2 \theta / dz^2 = 0 \quad (4.19)$$

όπου θ = θερμοκρασία και z = βάθος

Η αλλαγή της πυκνότητας του νερού στο μεταλίμνιο 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 (Σχήμα 11).



Σχήμα 11: Θερμική στρωμάτωση και αναστροφή

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 νυκτερινής 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 (Σχήμα 12)



Σχήμα 12: Φάσεις της θερμικής στρωμάτωσης του νερού μιας διμικτικής λίμνης, από αρχές καλοκαιριού μέχρι αρχές φθινοπώρου και οι αναστροφές, φθινοπωρινή και εαρινή.

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 υπολίμνιου - πιθανότατα λόγω του μικρού βάθους - μπορεί να χαρακτηριστεί ως πολυμικτική.)

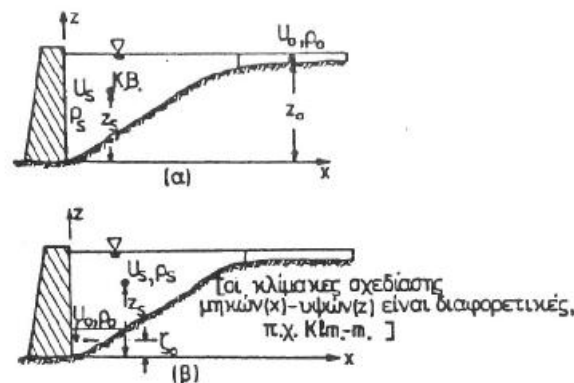
3) αν κατά τη διάρκεια του κύκλου της ετήσιας ανάμιξης, η λίμνη αναμιγνύεται από την επιφάνεια ως τον πυθμένα, η λίμνη ονομάζεται **ολομικτική**, ενώ όταν είναι τόσο βαθιά ώστε δεν υπάρχει αρκετή ενέργεια για να διαταραχθεί η στρωμάτωση και να επέλθει πλήρης ανάμιξη, η λίμνη ονομάζεται **μερομικτική**. (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**.

4.2.4 ΕΙΣΡΟΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ

Όταν ένα ρεύμα νερού (ποταμός) εισέρχεται μέσα σε έναν ταμιευτήρα, συνήθως είναι ψυχρότερο από το νερό του ταμιευτήρα, διότι το τελευταίο έχει θερμανθεί από τον ήλιο, ή μεταφέρει αιωρούμενα φερτά υλικά και έτσι έχει γενικά μεγαλύτερη πυκνότητα. Κατ' 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:

$$Q_E = \int (1/2) \cdot r_0 \cdot \bar{u}^3 \cdot dE_p = \int (1/2) \cdot r_0 \cdot \bar{u}^2 \cdot dQ \quad (4.20)$$

όπου E_p 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}_0 είναι η τοπική ταχύτητα αυτού και $dQ = \bar{u} \cdot dE_p$ στοιχειώδης παροχή όγκου.



Σχήμα 13: Η είσοδος δυναμικής ενέργειας με το ρεύμα (Δημητρίου, 1992)

Η είσοδος δυναμικής ενέργειας με το ρεύμα παρουσιάζεται, σε απλοποιημένη εικόνα, το σχήμα 13, 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 ρ_s ($=\rho_m < \rho_0$). 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 δε γίνεται ανάμιξη, αλλά απλή αντικατάσταση των υδάτινων μαζών του ταμιευτήρα, π.χ. μέσω υπερχειλιστή.

4.2.5 ΕΚΡΟΗ ΑΠΟ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ

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 από την Υδραυλική ότι, αν στον πυθμένα μιας δεξαμενής ανοιχθεί μια μικρή οπή και το ρευστό αρχίζει να εκρέει, τότε η μέση ταχύτητα εκροής είναι:

$$V_m = \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (4.21)$$

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 υποθεθεί 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 ρ_s του ταμιευτήρα είναι συνάρτηση όχι μόνο του z , αλλά και του χρόνου t .

Από τη βασική σχέση $\rho_s = \rho_m + \rho_e$ είναι:

$$Jr_s / Jz = Jr_e / Jz \quad (4.22)$$

ενώ η διαφορική εξίσωση συνέχειας δίνει:

$$Dr_s / Dt = 0 = Jr_s / Jt + w \cdot (Jr_s / Jz) \quad (4.23)$$

ή

$$(Jr_s / Jt) = -w \cdot (Jr_s / Jz) \quad (4.24)$$

Αν είναι H το στιγμιαίο βάθος νερού στη δεξαμενή (από την οπή) με εμβαδόν ελεύθερης επιφάνειας E_{pe} και z ένα τυχόν ύψος νερού με οριζόντια επιφάνεια $E_{\pi}(z)$ κατέρχεται κατά d_z , είναι δε

$$r_e \cdot E_{pe} \cdot dH = r_s \cdot E_{\pi}(z) \cdot dz \quad (4.25)$$

όπου ρ_e η πυκνότητα του νερού στον ταμιευτήρα ως σύνολο είναι:

$$P = \int_U g \cdot r_s \cdot z \cdot dU = \int_0^H g \cdot z \cdot E_p(z) \cdot r_s(z, t) \cdot dz \quad (4.26)$$

όπου U ο όγκος του νερού και

$$dU = E_p(z) \cdot dz \quad (4.27).$$

4.3 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, ανεξάρτητη 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.

4.3.1 ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΗ ΜΕΤΑΘΕΣΗ

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 $d\rho_s/dt$ είναι ανεξάρτητη του z). 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 (βαθμοί κελσίου).

Έτσι ο ημερήσιος κύκλος σε ένα ταμιευτήρα μπορεί να θεωρείται συμβατικά ως μια μηχανή θερμότητας. Θα ήταν δυνατόν να οριστεί ως "ωφέλιμο έργο", ή "ωφέλιμο αποτέλεσμα" η μεταφορά οξυγόνου ή άλλων στοιχείων ή άλλων στοιχείων (τα οποία αλλιώς θα παραμένουν 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 περιεργό είναι οι μηχανές δράσεις παράγονται κυρίως στη διάρκεια της ψύξης παρά στη 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 την μηχανική αποδιοργάνωση της ασταθούς - από άποψη βαρύτητας - δομής) είναι εξωτερική και όχι πολύ αποτελεσματική.

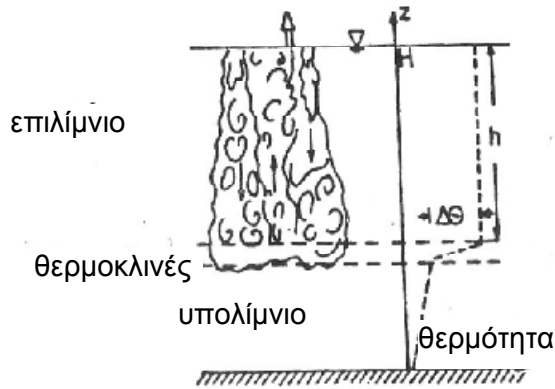
Η ταχύτητα της καθόδου, την οποία συνεπάγεται μια τέτοια διαδικασία ψύξης, μπορεί να υπολογιστεί κατ' εκτίμηση με χρησιμοποίηση μιας πολύ απλής εικόνας. Αν θεωρηθεί μια μικρή ποσότητα ψυχρού επιφανειακού νερού που κατέρχεται υπό την επιρροή της βαρύτητας, τότε, με αγνόηση της συνεκτικότητας και της διάχυσης,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

$$(g \cdot h)^{\frac{1}{2}} = \left\{ \left(\frac{\Delta r}{r_s} \right) \cdot g \cdot h \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.28)$$

ή

$$\overline{w_f}^2 \approx \left(\frac{\Delta r}{r_s} \right) \cdot g \cdot h \quad (4.29).$$

β) στη μέχρι τώρα ανάλυση οι υπολογισμοί αναφέρονται σε σταθερή αρχική πυκνότητα νερού στον ταμιευτήρα, ρ_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 ($\rho_s = \rho_m$) βάθους h , Σχήμα 14.



Σχήμα 14: Δομή θερμοκλινούς σε λίμνες (Δημητρίου, 1992)

Όταν αρχίσει η ψύξη, αρχίζει και η καθοδική ροή μέσα στο επιλίμνιο, ροή που έχει τυρβώδη χαρακτηριστικά (ελεύθερη μεταθετική ροή).

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 θερμοκλινή συναντούν αντίσταση λόγω της εκεί ευσταθούς στρωματοποίησης. Κάθε παραπέρα κάθοδος μπορεί να γίνει μόνον αν υπάρχει ανάμιξη με συμπαρασύρση, 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 $h/2$ (Σχήμα 14). αν η συμπαρασύρση γίνεται με ταχύτητα (είσοδου) dh/dt , τότε η ταχύτητα του απαιτούμενου έργου ανά μονάδα επιφάνειας, είναι:

$$\begin{aligned}
 & (\text{βάρους συμπαρασυρόμενου ρευστού}) \cdot (\text{διαδρομή}) \cdot (dh/dt) = \\
 & = (-a^* \cdot g \cdot \Delta q \cdot r_m) \cdot (h/2) \cdot (dh/dt) \quad (4.30)
 \end{aligned}$$

σε μονάδες ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας. Έτσι, είναι δυνατόν πλέον να χρησιμοποιηθεί ένα μέρος της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (που βρίσκεται στις μεταθετικές κινήσεις) για να αυξήσει το βάθος της στρώσης του επιλίμνιου. Εν η θερμοκλινή φθάσει μέχρι τον πυθμένα, τότε η ενέργεια θα αποσβέσει (εσωτερικά) πλήρως. Η ποσότητα dh/dt παριστά επίσης τη ταχύτητα καθόδου του κάτω άκρου του επιλίμνιου h .

4.3.2 ANEMOI

Οι άνεμοι πάνω από το επιλίμνιο μπορούν να χωριστούν γενικά σε δυο κατηγορίες, α) τους ισχυρούς και β) τους ασθενείς ανέμους. Οι πρώτοι προκαλούν γενικότερη κυκλοφορία στον ταμιευτήρα και η ανάμιξη είναι μεγαλύτερης κλίμακας. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η ανάμιξη στο επιλίμνιο λόγω ασθενών 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 καθώς και η μέση κίνηση διάτμησης της άνω στρώσης –

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 επιλίμνιου, με τη διαδικασία της τυρβώδους διάχυσης ή με τις μεταθετικές κινήσεις των κυψελών Langmuir.

Η ολική εισροή έργου από τον άνεμο δίνεται από την ήδη αναφερθείσα σχέση:

$$W_e = t_s \cdot \overline{u_w} \quad (4.31)$$

όπου $\overline{u_w} \propto u_*$, δηλαδή ανάλογη της ταχύτητας τριβής ($u_* = \sqrt{t_s / r_m}$)

Επειδή οι διατμητικές τάσεις t_s πλησίον της επιφανείας είναι της τάξης, $r_m \cdot u_*^2$, είναι, $W_e \propto u_*^3$. Εκτός της ανάμιξης στην άνω στρώση, ο άνεμος προκαλεί και επιτάχυνση του νερού, έτσι ώστε εγκαθίσταται μια κίνηση του επιλίμνιου με τοπικές ταχύτητες $\overline{u}(z)$.

4.4 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 διάφορες μελέτες στο υπολίμνιο προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

(α) Ο συντελεστής κατακόρυφης διάχυσης μεταβάλλεται μεταξύ μοριακών τιμών και τιμών ως και $10^{-4} \text{ m}^2 / \text{sec}$.

(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:

$$E_z = a \cdot (N^{-2})^n \quad (4.32)$$

Όπου $0,2 < n < 0,2$ και a ο συντελεστής αναλογίας. Αν θεωρηθεί ότι σε έναν ταμιευτήρα δρα ο άνεμος, τότε το συνολικό έργο εισροής αυτού είναι, $W_e = E_{\pi\epsilon}$, όπου $W_e = t_s \cdot \overline{u_w}$ και $E_{\pi\epsilon}$ 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

$$E_z \sim \left(\frac{W_e \cdot \bar{E}_{pe} + dP_{ol} / dt}{U} \right) \cdot N^{-2} \quad (4.33)$$

όπου P_{ol} το άθροισμα των δυναμικών ενεργειών εισροών-εκροών. Ο συντελεστής αναλογίας αυτής της σχέσης, που είναι καθαρός αριθμός, πρέπει να βρεθεί πειραματικά.

4.5 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΑΝΑΜΙΞΗ ΣΕ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ

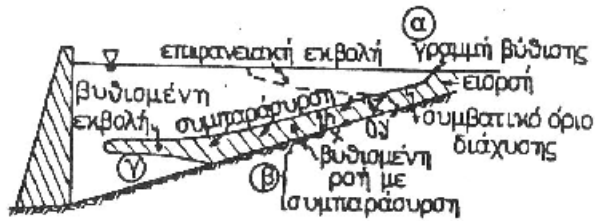
Όπως παρουσιάστηκε στα προηγούμενα, γενικά κάθε ταμιευτήρας υπάρχει στη μέση περίπτωση της δομής του τη θερμοκλίνη. Υπεράνω αυτής, στο επιλίμνιο- το όποιο είναι καλώς αναμιγμένη στρώση, δρουν οι τάσεις λόγω ανέμου και δημιουργούνται οριζόντιες κινήσεις. Κάτω από τη θερμοκλίνη λαμβάνει συνήθως χώρα ροή 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.

4.6 ΕΙΣΡΟΕΣ ΣΕ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ

Ένας ποταμός που εισέρχεται σε ένα ταμιευτήρα έχει συνήθως διαφορετική πυκνότητα (λόγω διαλυμένων ουσιών ή αιωρούμενων υλικών), η θερμοκρασία (και επομένως πάλι διαφορετική πυκνότητα) νερού από το επιφανειακό νερό του ταμιευτήρα. Έτσι κατά την είσοδο 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 ελαφρότερο 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, η ρεύμα πυκνότητας ή βαρύτητας, ή υποροή).

Για την τελευταία περίπτωση Σχήμα 15 παρουσιάζονται, σχηματικά, οι τρεις επιμέρους περιοχές ανάμιξης. Στην πρώτη περιοχή, (α), ο ποταμός προχωρεί μέχρι τη θέση που ονομάζεται γραμμή βύθισης και κατόπιν βυθίζεται. 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 συμπάρασυρση, 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 του ταμιευτήρα, οπότε η εισροή εγκαταλείπει τον πυθμένα και κινείται οριζόντια (βυθισμένη εκβολή). Παρεμφερείς περιοχές μπορούν να εμφανιστούν και στην περίπτωση της επιφανειακής ροής (επιφανειακή εκβολή), αν και – αναλόγως των συνθηκών – η μία ή και περισσότερες περιοχές μπορεί να μην είναι τόσο διακεκριμένες. Παρακάτω θα γίνει αναφορά στα κυριότερα στοιχεία της εκβολής βαρύτερου υγρού και στην ανάμιξη του με το νερό του ταμιευτήρα.



Σχήμα 15: Περιοχές ανάμιξης (Δημητρίου, 1992)

Έστω ότι ο ταμιευτήρας περιέχει νερό σταθερής πυκνότητας, $\rho_s (= \rho_m)$, έστω δε επίσης ότι η πυκνότητα του εισρέοντος νερού είναι $\rho_o (> \rho_m)$. Πράγματι αυτών υποτίθεται ότι η εισροή είναι μόνιμη και ότι πραγματοποιείται κατά μήκος πυθμένα ταμιευτήρα σταθερής κλίσης, επίσης δε ότι η ροή γίνεται ως σε δισδιάστατο αγωγό μέσα στον ταμιευτήρα, και ότι είναι επίσης ταχύτητας V_m και μέσης πυκνότητας ρ σε κάθε εγκάρσια βυθισμένη διατομή εμβαδού E_π (τα μεγέθη V_m , ρ είναι μέσα χρονικά και χωρικά).

Λόγω της συμπαράσυρσης, δηλαδή της ανάμιξης με το περιβάλλον νερό, η παροχή όγκου Q σε κάθε τοπική διατομή E_π αυξάνεται, δηλαδή μεταβάλλεται κατά x , είναι δε δυνατόν να υποτεθεί ότι η αύξηση αυτή είναι ανάλογη της μέσης ταχύτητας σε κάθε θέση, V_m , με έναν συντελεστή αναλογίας (καθαρό αριθμό) a , ο οποίος καλείται συντελεστής συμπαράσυρσης. Έτσι η ολοκληρωτική εξίσωση συνέχειας (παροχή όγκου) του μίγματος, που προκύπτει από ολοκλήρωση της αντίστοιχης διαφορικής, είναι:

$$dQ/dx = d(V_m \cdot E_p)/dx = a \cdot V_m \cdot B \quad (4.34)$$

όπου B είναι το τοπικό πλάτος της ροής, $Q = V_m \cdot E_p$ η τοπική παροχή όγκου,

και $a \cdot V_m$ η ταχύτητα συμπαράσυρσης (εισόδου).

Αν θεωρηθεί ως δέκτης το νερό του ποταμού, τότε η συγκέντρωση μάζας αυτού σε κάθε διατομή είναι:

$$r \cdot (r - r_s)/(r_o - r_s) = r_o \cdot \Delta r / \Delta r_o \quad (4.35)$$

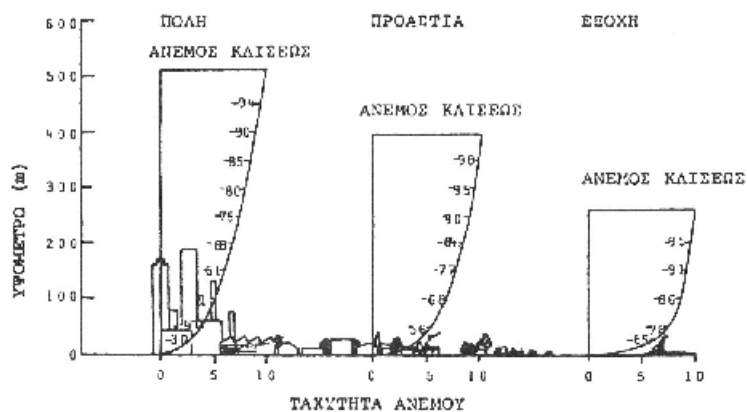
όπου $\Delta r_o = \rho_o - \rho_s$ και $\Delta r = \rho - \rho_s$.

4.7 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΟΡΙΑΚΗ ΣΤΟΙΒΑΔΑ – ΔΡΑΣΗ ΑΝΕΜΟΥ

Το χαμηλότερο τμήμα της ατμόσφαιρας είναι εκείνο που ενδιαφέρει περισσότερο τα προβλήματα ρυπάνσεως, αφού μέσα σ' αυτό διαχέονται οι μεγαλύτερες ποσότητες ρυπαντών. Στη κατώτερη οριακή στοιβάδα της ατμόσφαιρας, ως 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 Pmandt1 προσεγγίζει ικανοποιητικά αυτή την κατανομή. Συμφώνα με το νόμο αυτό έχουμε:

$$\overline{u_z} = \frac{1}{K} \sqrt{\frac{t_o}{r}} \ln \frac{z}{z_o} \quad (4.36)$$

όπου $\overline{u_z}$ είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου στο υψόμετρο z , K είναι η σταθερά του von Karman περιλαμβάνεται από τους μετεωρολόγους ίση με 0,4 και t_o η διαμηθική τάση του ανέμου. Η πυκνότητα και η διαμηθική τάση μεταβάλλονται λίγο στις πρώτες δεκάδες μέτρα της οριακής στοιβάδας. Η t_o παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 10 dyn/cm² πάνω από την θάλασσα. 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 βλαστήσεως (χόρτα κλπ.) μέχρι 100 cm για δάσος με δέντρα ύψους περίπου 10 m. Το Σχήμα 16 δείχνει με ποιο τρόπο επιδρά η τραχύτητα κοντά σε μια κατοικημένη περιοχή πάνω στην κατανομή του ανέμου. Η τιμή του t_o δεν είναι συνήθως γνωστή αλλά υπολογίζεται από τις επιτόπιες παρατηρήσεις. Επίσης το μήκος z_o μπορεί να υπολογιστεί από πειραματικά δεδομένα, για τα οποία χρειάζονται τουλάχιστον δυο παρατηρήσεις σε διαφορετικά υψόμετρα.



Σχήμα 16: Επίδραση της τραχύτητας πάνω στην κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου (Γκανούλης, 1984)

Συμφώνα με τον αλγοριθμικό νόμο ο άνεμος μηδενίζεται στο υψόμετρο $z = z_o$ η 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 κατά συνέπεια να γενικευθεί και να πάρει την μορφή:

$$\overline{u_z} = \frac{1}{K} \sqrt{\frac{t_o}{r}} \ln \left(\frac{z-d}{z_o} \right) \quad (4.37)$$

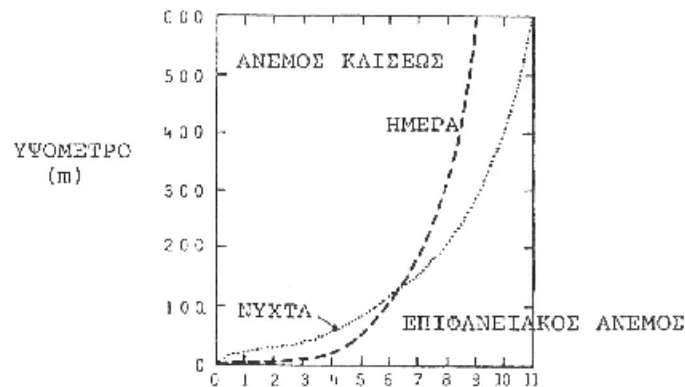
όπου το d είναι της τάξεως μεγέθους του ύψους που έχουν τα φυτά.

Όπως είπαμε και προηγουμένως ο λογαριθμικός νόμος ισχύει για μια αδιαβατική ατμόσφαιρα, όπως συμβαίνει στα κατωτέρα 900m κατά την διάρκεια της νύκτας. Στη διάρκεια όμως της ημέρας με αρκετή ηλιοφάνεια δημιουργείται τυρβώδης

θερμική ανάμιξη της ατμόσφαιρας με συνέπεια η κατανομή του ανέμου να είναι "πλατύτερη" απ' ό τι την νύκτα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 17. Κατά συνέπεια η πρακτική χρήση του λογαριθμικού νόμου είναι πολύ περιορισμένη. Συνήθως χρησιμοποιείται μια εμπειρική κατανομή που έχει την μορφή:

$$\frac{\overline{u_z}}{u_o} = \left(\frac{z}{z_o} \right)^n \quad (4.38)$$

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.



Σχήμα 17: Μεταβολή της κατανομής των ταχυτήτων του ανέμου με τις συνθήκες ευστάθειας της ατμόσφαιρας (Γκανούλης, 1984)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

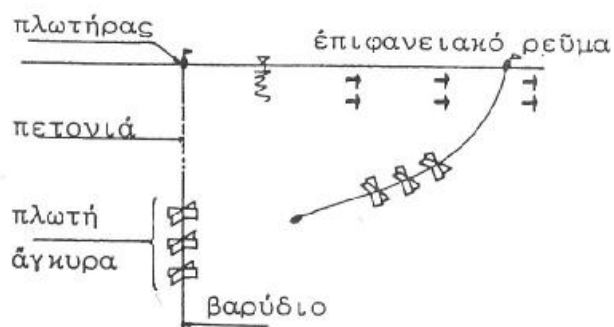
5.1 ΓΕΝΙΚΟΤΗΤΕΣ ΠΑΝΩ ΣΤΑ ΡΕΥΜΑΤΑ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ ΣΤΟΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ

Βασικός παράγοντας της μεταφοράς των ρυπών και γενικότερα της δομής τα ροής στον ταμιευτήρα είναι τα ρεύματα. Ονομάζουμε έτσι την κίνηση των ρευστών σωματιδίων του νερού που προέρχεται από τις διάφορες αιτίες εσωτερικές και εξωτερικές.

Εσωτερικές αιτίες είναι οι ανομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας, της αλατότητας και της πυκνότητας που δημιουργούν αστάθεια με συνέπεια να εμφανίζεται κυκλοφορία της μάζας. Η κυκλοφορία αυτή μπορεί να είναι οριζόντια ή κατακόρυφη και σαν χαρακτηριστικά παραδείγματα μπορούμε να αναφέρουμε τα ρεύματα πυκνότητας.

Οι κυριότερες εξωτερικές αιτίες που δημιουργούν ρεύματα είναι οι άνεμοι και οι παλίρροιες. Οι δυο αυτοί παράγοντες μπορούν να συνυπάρχουν, ορισμένες όμως περιπτώσεις η μία αιτία είναι πολύ πιο καθοριστική από την άλλη.

Παρακάτω θα περιγράψουμε το μαθηματικό μοντέλο που μας επιτρέπει το υπολογισμό των ρευμάτων που δημιουργούνται στον ταμιευτήρα, 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`` προηγούμενος με κατάλληλο τρόπο.



Σχήμα 18: Πλωτή ἀγκυρα και συμπεριφορά της όταν αναπτύσσεται ένα ισχυρό επιφανειακό ρεύμα (Γκανούλης, 1984)

Πράγματι, όπως θα δούμε παρακάτω στην 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 γνώστη ταχύτητα. Στον ταμιευτήρα σταθεροποιούμε ένα πλοίο από το οποίο γίνονται οι μετρήσεις με την βοήθεια τεσσάρων αγκυρών ή να κατασκευάσουμε ειδικές εξέδρες εφοδιασμένες με όργανα μετρήσεως. Χωρίς να μπούμε σε λεπτομέρειες για την μετρολογία των ρευμάτων

αναφέρουμε ότι μια πρώτη εικόνα για την ένταση και διεύθυνση των ρευμάτων είναι δυνατόν να σχηματίσουμε παρακολουθώντας την κίνηση πλατών αγκυρών. Οι διαδοχικές θέσεις των αγκυρών αυτών σημειώνονται στον χάρτη παρακολουθώντας μ' ένα πλοίο την θέση των επιφανειακών πλωτήρων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 18 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 σ' ένα δεδομένο σημείο. Θα κλείσουμε αυτήν τη παράγραφο, αναφέροντας ακόμα μια Τρίτη κατηγορία ρευμάτων που έχουν μικρότερη σημασία σε ότι αφορά την μεταφορά μάζας και που οφείλονται στους κυματισμούς. Τέτοια ρεύματα παρατηρούνται κυρίως σε παράκτιες ρηχές περιοχές.

5.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΟΜΟΙΩΜΑ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

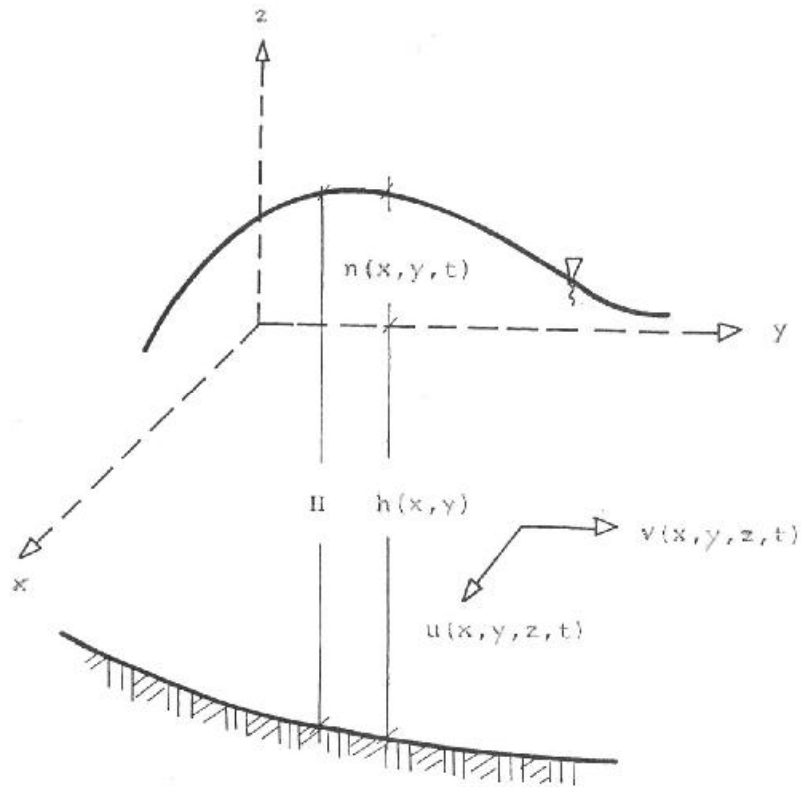
Η παράκτια περιοχή στην οποία περιγράφεται η κίνηση των ρευμάτων ορίζεται από τον πυθμένα και την ελεύθερη επιφάνεια του νερού του ταμειυτήρα. Η ροή αναπτύσσεται είναι συνήθως μη μόνιμη και τυρβώδης με αμελητέες τις κατακόρυφες συνιστώσες της ταχύτητας. Γνωρίζοντας την τοπογραφία του πυθμένα και ορίζοντας το οριζόντιο επίπεδο αναφοράς $0.xy$ στη θέση $h(x,y)$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 19 για τη περίπτωση της παράκτιας κυκλοφορίας σε τρισδιάστατο χώρο σαν άγνωστα μεγέθη εμφανίζονται οι οριζόντιες συνιστώσες της ταχύτητας:

$$u = u(x, y, t)$$

$$v = v(x, y, t)$$

η υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας

$$n = n(x, y, z, t)$$

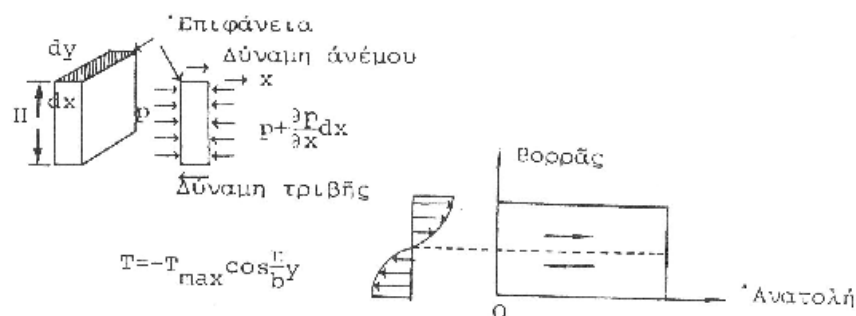


Σχήμα 19: Τρισδιάστατο πεδίο παράκτιας κυκλοφορίας (Γκανούλης, 1984)

5.3 ΡΕΥΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝΤΑΙ ΛΟΓΩ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ – ΑΝΕΜΟΓΕΝΗ ΡΕΥΜΑΤΑ

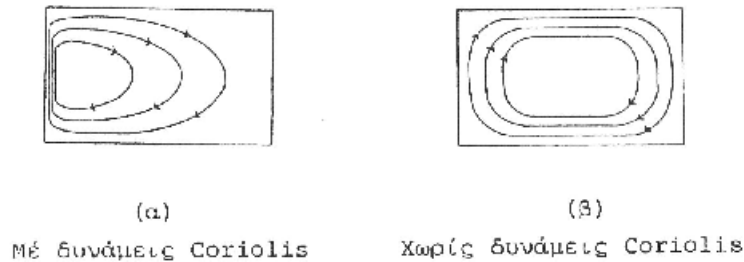
Όταν η βασική αιτία που δημιουργεί τα θαλάσσια ρεύματα είναι ο άνεμος υπάρχουν ειδικές λύσεις των εξισώσεων για ορισμένες απλές περιπτώσεις. Οι κυριότερες υποθέσεις που γίνονται συνήθως είναι ότι η ελεύθερη επιφάνεια είναι οριζόντια, ότι ο πυθμένας είναι επίπεδος, ενώ παραλείπεται η επίδραση των γραμμικών όρων που περιγράφουν τις επιταχύνσεις.

Θεωρητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η ερμηνεία των μεγάλων ωκεάνιων ρευμάτων όπως το Gulf Stream στο βόρειο Ατλαντικό, με βάση απλά θεωρητικά μοντέλα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 20 η κίνηση θεωρείται ότι αναπτύσσεται σε μια ορθογώνια δεξαμενή και ότι η ροή γίνεται στην επιφάνεια με ομοιόμορφη κατανομή ταχυτήτων κατά βάθος.



Σχήμα 20: Απλό μοντέλο για την μελέτη ρευμάτων στον Β. Ατλαντικό (Γκανούλης, 1984)

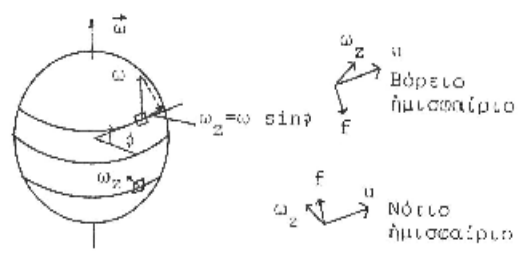
Ο άξονάς των x διευθύνσεων προς την Ανατολή ενώ ο άξονας των y προς τον Βορρά. Στην επιφάνεια του ωκεανού αναπτύσσονται οι διατμητικές τάσεις λόγω ανέμων που έχουν διεύθυνση παράλληλα προς τον ισημερινό και ημιτονοειδή κατανομή. Το αποτέλεσμα του υπολογισμού φαίνεται στο Σχήμα 21 με την μορφή γραμμών ροής, όπου παρατηρούμε ότι η επίδραση των δυνάμεων Coriolis είναι σημαντική.



Σχήμα 21: Η επίδραση της δύναμης Coriolis (Γκανούλης, 1984)

Η επίδραση αυτή είναι διαφορετική στο Βόρειο και Νότιο ημισφαίριο όπως φαίνεται στο Σχήμα 22. Πράγματι αν ένα ρευστό σωματίδιο κινείται στο βόρειο ημισφαίριο με ταχύτητα u προς την ανατολή, η δύναμη Coriolis ανά μονάδα μάζας που έχει μέγεθος διευθύνεται προς τον ισημερινό. Το ίδιο συμβαίνει και για το νότιο ημισφαίριο.

Βέβαια τα παραπάνω έχουν ενδιαφέρον κυρίως από την 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. Οι αριθμητικοί αλγόριθμοι βασίζονται συνήθως στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών ή των πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 22: Η επίδραση της δύναμης Coriolis στο Βόρειο και Νότιο ημισφαίριο (Γκανούλης, 1984)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΦΡΑΓΜΑΤΑ, ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

Η κατασκευή και λειτουργία των μεγάλων φραγμάτων επιδρά, θετικά ή αρνητικά, στα φυσικά οικοσυστήματα και τη βιοποικιλότητα. Οι εν λόγω επιδράσεις αποτελούν και τη βασικότερη "ένσταση" των πολέμιων των μεγάλων φραγμάτων, θέμα που έχει τροφοδοτήσει τα τελευταία χρόνια αρκετές συζητήσεις για την ωφελιμότητα ή όχι των έργων αυτών ή το συνολικό τους σχεδιασμό, ενώ αποτελούν αιτία για την πραγματοποίηση σημαντικών επενδύσεων με στόχο τη μείωση των αρνητικών επιδράσεων. Όμως, παρά τη λήψη μέτρων, τις βελτιώσεις στον προγραμματισμό, το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία και τη διαχείριση φραγμάτων, σήμερα παραμένει μια ευρέως διαδεδομένη οικολογική ανησυχία ότι τα μεγάλα φράγματα οδηγούν σε σημαντικές αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών των φυσικών οικοσυστημάτων. Η οικολογική αυτή ανησυχία διερευνάται στο παρόν άρθρο με την ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, των οικοσυστημικών λειτουργιών και της διεθνούς εμπειρίας στο σχεδιασμό, κατασκευή και ορθολογική διαχείριση των φραγμάτων.

Ο ρόλος των φραγμάτων είναι η αναρύθμιση της ροής των ποταμών και η χρησιμοποίηση των πολύτιμων υδάτινων πόρων κατά τρόπο οικονομικά αποδοτικότερο και περισσότερο ωφέλιμο. Η κατασκευή τους ξεκίνησε πριν από πολλούς αιώνες πριν ακόμα δημιουργηθούν ερωτήματα κι ανησυχίες για τις περιβαλλοντικές μεταβολές που προκαλούν και τις αντιρρήσεις για τη ωφελμιστική σκοπιμότητά τους. Τα πρώτα φράγματα που κατασκευάστηκαν αποσκοπούσαν κυρίως στην παροχή αντιπλημμυρικής προστασίας και την αποθήκευση νερού για αρδευτικούς και υδρευτικούς σκοπούς, ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, για ιχθυοκαλλιέργειες, για τουρισμό και αναψυχή. Σήμερα, τα φράγματα έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις άλλες κατασκευές πολιτικού μηχανικού, έχουν πολύ μεγαλύτερο μέγεθος σε σχέση με το παρελθόν, αξιοποιούν τις γνώσεις της υδρολογίας και της υδρομηχανικής και το μέγεθος των επιπτώσεων άμεσων ή έμμεσων, οικονομικών ή μη οικονομικών έχει αυξηθεί.

Το παλαιότερο φράγμα που αναφέρεται στην Ιστορία (4η χιλιετία π.Χ.) βρισκόταν στη Γιάβα της σημερινής Ιορδανίας και χρησίμευε για τη συλλογή πόσιμου νερού. Ένα άλλο φράγμα που κατασκευάστηκε την περίοδο 2600-2500 π.Χ., επίσης για τη συλλογή πόσιμου νερού, είναι το Sadd-el-Kafara στο Wadi Garawi της Αιγύπτου. Το γεώφραγμα στον ποταμό Ορόντες της σημερινής Συρίας κατασκευάστηκε περί το 1300 π.Χ. και χρησίμευε για συλλογή νερού προς άρδευση και πόση, και είναι ακόμα διατηρημένο, γιατί αξιοποιήθηκε και συντηρήθηκε από μεταγενέστερους λαούς. Στα νεότερα χρόνια, σπουδαίο θεωρήθηκε το φράγμα Puentes στην Ισπανία, το οποίο κατασκευάστηκε το έτος 1753 και καταστράφηκε το 1891.

Στον ελληνικό χώρο, τα γνωστότερα φράγματα είναι αυτά που σχετίζονται:

(α) Με υδροηλεκτρική χρήση, όπως του Λούρου (1954), του Λάδωνα (1955), του Ταυρωπού (1959), των Κρεμαστών (1965), του Καστρακίου (1969), του Πολυφύτου (1974), του Πουρναρίου (1981), της Σφηκιάς και των Ασωμάτων (1985), του Στράτου (1988) κ.ά..

(β) Με υδρευτική χρήση, όπως του Μαραθώνα που ξεκίνησε το έτος 1926 και ολοκληρώθηκε το 1931, του Μόρνου που ολοκληρώθηκε το έτος 1979 κ.ά..

(γ) Με αρδευτική χρήση, όπως της Λευκόγειας Δράμας (1972), της Απολακκιάς Ρόδου (1978), του Λειβαδιού Αστυπάλαιας (1978), της Φανερωμένης και της Πλακιώτισσας στην περιοχή Μεσαράς Ηρακλείου (1980), του Δοξά στην περιοχή του Φενεού Κορινθίας (1982), της Φωλιάς Καβάλας (1983), του Κατάφυτου Δράμας (1984) κ.ά..

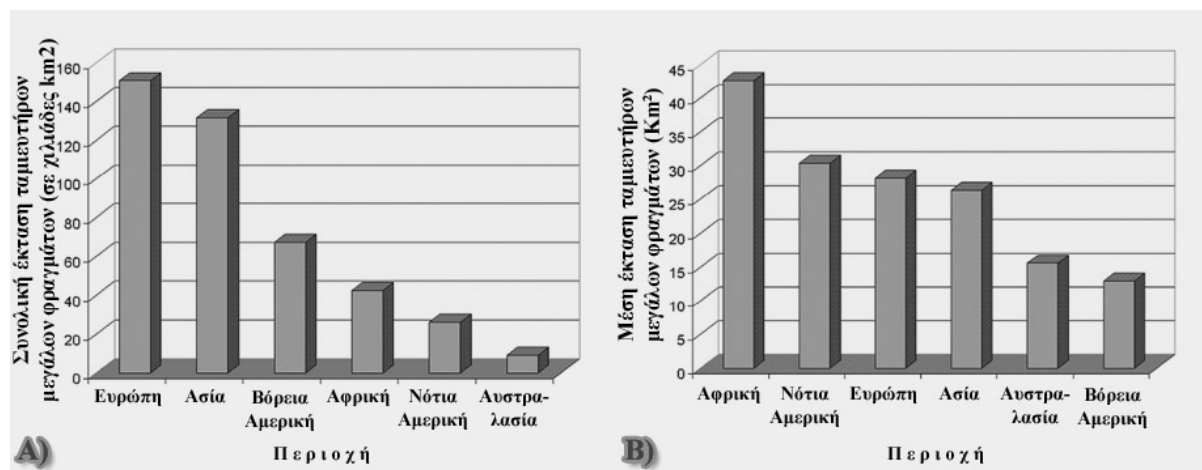
Στη σύγχρονη εποχή η πλειονότητα των φραγμάτων χρησιμοποιείται για πολλαπλούς σκοπούς. Συγκεκριμένα παγκοσμίως τα φράγματα χρησιμοποιούνται για αρδευτικούς σκοπούς (37%), για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (16%), για παροχή πόσιμου νερού (12%), για αντιπλημμυρικό έλεγχο (6%), για σκοπούς αναψυχής (3%) και για λοιπούς σκοπούς (4%) {14}. Τα οφέλη από τη λειτουργία αυτών των φραγμάτων υπήρξαν πολλαπλά, όμως έχουν σε πολλές περιπτώσεις σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Γενικότερα, η αξιοποίηση των υδάτινων πόρων με τη χρήση φραγμάτων έχει δημιουργήσει πολλές συγκρούσεις και γίνεται όλο και περισσότερο σαφές ότι οι περιβαλλοντικές και κοινωνικές διαστάσεις του θέματος πρέπει να τύχουν ουσιαστικότερης διερεύνησης και κοινωνικής διαβούλευσης.

Μέχρι τη δεκαετία του '50 κατασκευάζονταν περίπου 700 μεγάλα φράγματα κάθε 10-ετία σε όλον τον κόσμο. Τα επόμενα χρόνια ο αριθμός αυτός αυξήθηκε κατακόρυφα, ενώ άρχισαν να εμφανίζονται οι πρώτες αντιδράσεις για τα πραγματικά οφέλη που προκύπτουν από τη λειτουργία τους, καθώς και απόψεις ότι προκαλούνται στο περιβάλλον καταστροφές και μακροχρόνιες αρνητικές επιδράσεις που υπερβαίνουν τα άμεσα οικονομικά οφέλη. Έτσι, αναδείχθηκε η ανάγκη για καλύτερο σχεδιασμό των φραγμάτων και για λήψη των κατάλληλων μέτρων, ώστε να μειωθούν στο ελάχιστο οι περιβαλλοντικές ή όποιες άλλες επιπτώσεις και απώλειες. Σε πολλές περιπτώσεις άλλαξε τελείως ο σχεδιασμός των φραγμάτων, με απώτερο στόχο τη βιώσιμη διαχείριση του ύδατος στην οποία θα λαμβάνονταν μέριμνα για την οικονομική, κοινωνική και πολιτιστική ανάπτυξη, καθώς και για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Βέβαια, δεν μπορεί να παραβλεφθεί το γεγονός ότι μετά τη δεκαετία του '60 στις αναπτυσσόμενες χώρες η ευαισθησία για περιβαλλοντικά ζητήματα αυξήθηκε σημαντικά, κυρίως λόγω της πληθυσμιακής διόγκωσης, της ανεξέλεγκτης ρύπανσης του εδάφους, του αέρα και των υδάτινων πόρων, της αύξησης των βιομηχανικών και οικιακών αποβλήτων, καθώς επίσης και των προκαλούμενων μεταβολών στα οικοσυστήματα και στην βιοποικιλότητά τους. Η αύξηση πληθυσμού, η χρήση των τεχνολογικών επιτευγμάτων, η διόγκωση των οικονομικών δραστηριοτήτων, οι αστικές επεκτάσεις, η ανάπτυξη στο οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο, τα φράγματα, οι ταμιευτήρες νερού και άλλες υποδομές είχαν σημαντικές επιπτώσεις στη φυσική ισορροπία και οι περιβαλλοντικές μεταβολές έλαβαν ανησυχητικές διαστάσεις, ενώ το «περιβάλλον» ως θέμα έγινε ιδιαίτερα δημοφιλές. Τα παραπάνω είχαν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση αντιθέσεων, μεταξύ των αρμόδιων για το σχεδιασμό (planners) και των μηχανικών από τη μια πλευρά, και των διάφορων κοινωνικών, περιβαλλοντικών κι επιστημονικών ομάδων από την άλλη, που εναντιώνονται στην υλοποίηση και λειτουργία μεγάλων υποδομών (φράγματα, ταμιευτήρες, έργα εκτροπής ποταμών, κλπ) με βασικό επιχείρημα την προστασία του περιβάλλοντος και τη διαφύλαξη της βιοποικιλότητας,

Σήμερα, θεωρείται γενικότερα αποδεκτό ότι οι πολιτιστικές, κοινωνικές, ανθρωπιστικές και περιβαλλοντικές αξίες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον προγραμματισμό, σχεδιασμό και κατασκευή των μεγάλων έργων και η αξιολόγησή τους θα πρέπει να επεκτείνεται πέραν του συνυπολογισμού των παραδοσιακών οικονομικών αξιών. Πλέον, η διαχείριση του ύδατος προσανατολίζεται κατά ένα μεγάλο μέρος στην διαφύλαξη κι εξοικονόμηση των υδατικών πόρων, την επαναχρησιμοποίησή τους όταν είναι εφικτό, και την πρόληψη και μείωση της ρύπανσής τους.

Αν και το μέγεθος φραγμάτων και ταμιευτήρων είναι ιδιαίτερα μεταβλητό, είναι δυνατό να εξεταστεί το ευρύ πεδίο των επιδράσεων. Στο Σχήμα 23(A) παρουσιάζει τη συνολική επιφάνεια των ταμιευτήρων μεγάλων φραγμάτων, ενώ στο Σχήμα 23(B) παρουσιάζει τη μέση επιφάνεια των ταμιευτήρων μεγάλων φραγμάτων ανά ήπειρο. Τα σχήματα αυτά δείχνουν τις μεγάλες συνολικές επιφάνειες που καταλαμβάνουν οι ταμιευτήρες των φραγμάτων, αλλά και τη μεγάλη απόκλιση μεταξύ των επιφανειών από την άποψη του μέσου μεγέθους των ταμιευτήρων. Συνυπολογίζοντας τις διαφορές στο μέγεθος των εκτάσεων που καταλαμβάνουν οι ταμιευτήρες ανά ήπειρο και τη συνεχή αύξηση της ζήτησης για νερό, εκτιμούμε ότι τα μεγάλα φράγματα θα συνεχίσουν να κατασκευάζονται, αφού συμβάλλουν στην οικονομική ανάπτυξη του σύγχρονου κόσμου.



Σχήμα 23: Α) Συνολική έκταση ταμιευτήρων μεγάλων φραγμάτων (σε χιλιάδες km²) ανά περιοχή του κόσμου. Β) Μέση έκταση ταμιευτήρων μεγάλων φραγμάτων (σε km²) ανά περιοχή του κόσμου.

Η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελώντας μια μορφή «καθαρής» ενέργειας μπορεί να υποκαταστήσει την καύση πετρελαίου ή λιθάνθρακα μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Βέβαια, ο συνυπολογισμός της περιβαλλοντικής διάστασης και του περιβαλλοντικού κόστους στο σχεδιασμό τέτοιων έργων, η αξιολόγηση των οικολογικών μεταβολών και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων θεωρούνται πλέον δεδομένα.

Το «φυσικό περιβάλλον» εντός της λεκάνης απορροής κάθε ποταμού έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και κάθε παρέμβαση επί αυτού απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Εντός της λεκάνης υπάρχουν φυσικά οικοσυστήματα που περιλαμβάνουν όχι μόνο τους υδρόβιους βιότοπους που συνδέονται άμεσα με το νερό του ποταμού, αλλά με όλα τα στοιχεία της ποτάμιας λεκάνης απορροής. Τα οικοσυστήματα αυτά περιλαμβάνουν: το κεφαλόβρυσσο (τις πηγές) του νερού και τη χωροταξική τοπιογραφία της λεκάνης απορροής, το φυσικό κανάλι από τις πηγές του νερού έως

τη θάλασσα, τις παρόχθιες περιοχές, το σχετιζόμενο υπόγειο νερό στο κανάλι και τις όχθες του ποταμού και τις κοίτες πλημμυρών, τους υγρότοπους, την εκβολή του ποταμού και το πλησίον στις όχθες περιβάλλον που εξαρτάται από τις εισροές γλυκού νερού. Τα οικοσυστήματα αυτά εκτελούν λειτουργίες, όπως: ο έλεγχος πλημμυρών και η προστασία από καταιγίδες, η παραγωγή προϊόντων όπως η άγρια πανίδα, τα αλιεύματα και οι δασικοί πόροι, ενώ παράλληλα έχουν σημαντική αισθητική και πολιτιστική αξία.

Η συνολική αξία των αγαθών και των υπηρεσιών του οικοσυστήματος υπολογίζεται σε 50 τρισεκατομμύρια € ετησίως, εκ των οποίων περίπου 12,5 τρις € αφορούν άμεσα τα οικοσυστήματα γλυκού νερού. Με δεδομένο την ύπαρξη και αναγνώριση των αξιών αυτών του οικοσυστήματος, η ανάπτυξη λεκανών απορροής ποταμών πρέπει να καθορίσει πόσο νερό απαιτείται για τη συντήρηση των οικοσυστημάτων, για να παρέχει τα περιβαλλοντικά αγαθά και τις ενδολεκάνιες υπηρεσίες και πόση ποσότητα νερού πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να υποστηρίξει τη γεωργία, τη βιομηχανία και τις αστικές δραστηριότητες της λεκάνης απορροής.

Η υπάρχουσα σήμερα γνώση, δείχνει ότι οι επιδράσεις των φραγμάτων στα οικοσυστήματα είναι βαθύτατα εδραιωμένες, σύνθετες, ποικίλες, αλληλοεξαρτώμενες και σε πολλές περιπτώσεις αρνητικές. Στο βόρειο ημισφαίριο 77% των μεγαλύτερων ποταμών επηρεάζονται από τα φράγματα και σε πολλούς ποταμούς οι περιορισμοί στη ροή τους αρχίζουν από την περιοχή των πηγών τους.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις κάθε φράγματος είναι «μοναδικές» και εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως η δομή του φράγματος και η λειτουργία του, η τοπική υδρολογία, οι ποτάμιες διαδικασίες, ο όγκος των φερτών υλών, οι γεωμορφολογικοί περιορισμοί, το κλίμα και οι βασικές ιδιότητες του τοπικού βιόκοσμου. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των φραγμάτων μπορούν να ταξινομηθούν σε μακροπρόθεσμες και βραχυπρόθεσμες, επιπτώσεις που βρίσκονται στην εγγύς ή την ευρύτερη περιοχή τους. Είναι προφανές, ότι η επιδίωξη του σχεδιασμού είναι η ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων και η μεγιστοποίηση των ωφελειών.

6.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Τα φράγματα είναι κατασκευές σχεδιασμένες με σκοπό την αποθήκευση και την εκτροπή του νερού, την αλλαγή της φυσικής διανομής και το συγχρονισμό των ποτάμιων ροών προκειμένου να ικανοποιηθούν οι ανθρώπινες ανάγκες. Υπό αυτήν τη μορφή, αλλάζουν συγχρόνως τις θεμελιώδεις διαδικασίες για τα φυσικά οικοσυστήματα, αφού λειτουργούν ως «εμπόδια» στις διαμήκεις ανταλλαγές νερού στους ποταμούς. Με την αλλαγή του τρόπου της κατάντη ροής (δηλ. ένταση, συγχρονισμός και συχνότητα), αλλάζουν το υδατικό ίζημα και τα θρεπτικά καθεστώτα, μεταβάλλουν τη θερμοκρασία του ύδατος και τη χημεία του. Οι ταμειυτήρες πλημμυρίζουν τα χερσαία οικοσυστήματα, καταστρέφοντας φυτά και αναγκάζουν μετακίνηση των ζώων. Δεδομένου ότι πολλά είδη προτιμούν τα κατώτατα σημεία κοιλάδων, η συσσώρευση νερού σε μεγάλη κλίμακα μπορεί να επηρεάσει μοναδικούς βιότοπους άγριας φύσης και να εξαφανίσει ολόκληρους πληθυσμούς απειλούμενων υπό εξαφάνιση ειδών.

Η αναγνώριση και ταξινόμηση των περιβαλλοντικών μεταβολών που προσδοκούνται μετά την υλοποίηση ενός φράγματος έχουν μεγάλη σημασία για το

σωστό σχεδιασμό του. Θα επιχειρηθεί στη συνέχεια μια συνοπτική ταξινόμηση των εν λόγω περιβαλλοντικών μεταβολών:

(α) Η λειτουργία των φραγμάτων μεταβάλλει τη δίαιτα του ποταμού κατάντη με εκτεταμένα αποτελέσματα στην τοπική υδρολογία και στα κατάντη ρέοντα ύδατα, καθώς και τη μεταφορά των φερτών υλών. Η μεταβολή αυτή μπορεί να προκαλέσει διαβρώσεις στο έδαφος και να μεταβάλλει το οικοσύστημα που προϋπήρχε στην περιοχή. Η τεχνητή φραγή των ποταμών αυξάνει το χρόνο παραμονής και τη θερμοκρασία του νερού, μειώνει τη θολερότητα, τροποποιεί τη θερμική στρωματοποίηση και επομένως ενισχύει συνήθως την σε φυσική θέση πρωταρχική παραγωγή, η οποία έχει επιπτώσεις στον άνθρακα και τη θρεπτική ισορροπία. Η μεταφορά του ιζήματος μέσω της λεκάνης απορροής και κατά μήκος του ποταμίου συστήματος είναι συνεχής. Πχ στην Καλιφόρνια, η κατασκευή του φράγματος Trinity το 1960 μείωσε τη διετή ροή από 450 m³/sec σε 9 m³/sec με αποτέλεσμα η καταπάτηση της βλάστησης και η απόθεση του ιζήματος να έχουν στενέψει το ποτάμιο κανάλι σε 20%–60% του πρότερου της κατασκευής του φράγματος πλάτους του.

(β) Η δημιουργία του ταμιευτήρα μπορεί να καλύψει αρχαιολογικούς χώρους και χώρους ιστορικής μνήμης, ενώ μπορεί να καλυφθούν χώροι με τοπογραφική, γεωλογική και αισθητική αξία.

(γ) Η συγκράτηση του υδάτινου όγκου εντός του ταμιευτήρα και οι μεταβολές στη ροή του ποταμού που φράσσεται και της ποσότητας των φερτών υλών εμποδίζουν την αναπαραγωγή των ψαριών και επηρεάζουν αρνητικά την πανίδα της κατάντη περιοχής.

(δ) Η θερμοκρασία του νερού, η περιεκτικότητα σε αλάτι και οξυγόνο μπορεί να μεταβληθεί συνεπεία του σχηματισμού του ταμιευτήρα, κάτι που μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στην πανίδα της περιοχής.

(ε) Δημιουργούνται εμπόδια στη διέλευση των ζώων, ενώ προβλήματα προκαλούνται στην «προς τα πάνω» κίνηση των ποτάμιων ψαριών κατά την περίοδο της ωτοκίας τους, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση του πληθυσμού των ποτάμιων ψαριών. Ακόμη τα ψάρια μπορούν να βλαφθούν περνώντας διαμέσου των υδροφρακτών, των στροβίλων και των αντλιών των μεγάλων φραγμάτων.

Η αποξήρανση των βάλτων και άλλων συσσωρεύσεων ύδατος και οι εργασίες εκσκαφής προκαλούν αλλαγές στις δομές της κοίτης ρευμάτων και έχουν αρνητικές επιπτώσεις στα ζώα που ζουν εκεί.

(στ) Η εκφόρτιση τοξικών ουσιών (φυτοφάρμακα, τοξικά μέταλλα κλπ) στο ποτάμιο οικοσύστημα και η συμπύκνωσή τους στην τροφική αλυσίδα μπορεί να έχει άμεσες επιπτώσεις σε ευαίσθητα ζώα και ακόμη όλοι οι οργανισμοί που διαβιούν στο οικοσύστημα μπορεί να απειβιώσουν όταν το υδατορεύμα καταστεί ανίκανο να αυτοανακάμψει από τη ρύπανση.

(ζ) Το υδατικό καθεστώς της περιοχής του φράγματος μπορεί να αλλάξει ως αποτέλεσμα της καταστροφής της φύσης, απροσδόκητες πλημμύρες μπορούν να εμφανιστούν και συνεπώς η βλάστηση και οι φυσικές δομές στις όχθες των ποταμών μπορούν να υποστούν καταστροφές. Η αύξηση στη εξάτμιση του νερού μπορεί να αναμένεται ως αποτέλεσμα της αύξησης της επιφάνειας ύδατος της περιοχής.

Μικροκλιματικές αλλαγές μπορεί να παρατηρηθούν συσχετιζόμενες με τις αλλαγές στο ποσοστό της υγρασίας αέρα, της θερμοκρασίας αέρα των μετακινήσεων αέρα στη μεγάλη κλίμακα και τις αλλαγές στην τοπογραφία περιοχών που προκαλείται από τη λιμνάζουσα (στάσιμη), μεγάλης κλίμακας μάζας του νερού.

(η) Τα φράγματα σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να προκαλέσουν αυξήσεις στις ασθένειες που οφείλονται στην ύπαρξη στάσιμων νερών, όπως τύφος, τυφοειδής πυρετός, ελονοσία και χολέρα.

6.2 ΒΑΣΙΚΑ ΟΦΕΛΗ ΑΠΟ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Η συμβολή των φραγμάτων στην εθνική οικονομία είναι μεγάλη και ποικίλη. Εξυπηρετούν την άρδευση, εξασφαλίζουν πόσιμο νερό, βοηθούν στον έλεγχο των πλημμυρών, εξασφαλίζουν παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δημιουργούν εστίες αλιείας, βοηθούν τον τουρισμό. Ένα νέο περιβάλλον δημιουργείται από τη λειτουργία του φράγματος, αφού συμβάλλει στην έλευση και την ανάπτυξη μιας άλλης πανίδας στην περιοχή. Τα φράγματα συμβάλλουν όχι μόνο στην οικονομική, αλλά και στην περιφερειακή ανάπτυξη, αφού σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες, τα φράγματα έχουν παίξει σημαντικό ρόλο για την ανάπτυξη των υπανάπτυκτων περιοχών.

Επιχειρείται στη συνέχεια μια συνοπτική ταξινόμηση των ωφελειών που προσδοκούνται και προκαλούνται στις περιφέρειες από την κατασκευή των φραγμάτων:

(α) Έλεγχος των πλημμυρών, μείωση ή εξάλειψη των καταστροφών που προκαλούν.

(β) Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και μείωση της εξάρτησης κάθε περιοχής από την ενέργεια που παράγεται από ρυπογόνες διαδικασίες (πετρέλαιο, λιθάνθρακας, κ.λπ.).

(γ) Πιθανά οφέλη που μπορούν να επέλθουν στην περίπτωση που ο ταμιευτήρας ευνοεί τη δημιουργία «υδάτινων οδών».

(δ) Ύδρευση οικισμών και βελτίωση της δημόσιας υγείας λόγω της χρήσης ελεγχόμενου πόσιμου νερού.

(ε) Αύξηση του παραγόμενου γεωργικού προϊόντος λόγω της δυνατότητας άρδευσης γεωργικών εκτάσεων και αύξηση της παραγωγικότητας του αγροτικού τομέα.

(στ) Αύξηση του εισοδήματος που προέρχεται από τις ιχθυοκαλλιέργειες που μπορούν να αναπτυχθούν εντός του ταμιευτήρα του φράγματος.

(ζ) Βελτίωση της τουριστικής ελκυστικότητας των περιοχών πέριξ του φράγματος και του ταμιευτήρα του και αύξηση του τουριστικού εισοδήματος.

6.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Η κύρια υδραυλική επίδραση από την κατασκευή και λειτουργία των φραγμάτων είναι η εκφόρτιση της λεκάνης συλλογής νερού σε μια στάσιμη δεξαμενή (ταμιευτήρα) αντί στη κοίτη ποταμού ή χειμάρρου. Επομένως, μια τέτοια αλλαγή θα αρχίσει κατάντη ενός ρεύματος όπου η κατάντη περιοχή ξεραίνεται μερικώς ή ολικώς και ο ταμιευτήρας αρχίζει να συσσωρεύει νερό. Κατά τη διάρκεια αυτού του προσωρινού ή περιοδικά επαναλαμβανόμενου χρονικού διαστήματος αναπλήρωσης νερού, η υδρολογική ισορροπία της περιοχής μπορεί να καταρρεύσει, να παρατηρηθούν εξαφάνιση ειδών και απότομες δομικές αλλαγές στο υδατικά εξαρτώμενο οικοσύστημα. Η αποσύνθεση της νεκρής χλωρίδας και πανίδας στο νεοερχόμενο σώμα ύδατος επιταχύνεται. Έτσι, οι ανάντη ροές του νερού ρυπαίνονται, χωρίς οξυγόνο στα βαθύτερα μέρη του υδατικού όγκου που βρίσκονται υπό σκοτάδι για μεγάλο χρονικό διάστημα και μυρίζουν συνήθως σαπίλα λόγω της πλούσιας διάθεσης υδρογόνου. Μετά από αυτή τη διαδικασία το ποτάμιο ρεύμα διαμορφώνει ένα νέο και υγιές οικοσύστημα, όμως αυτή η νέα υδατική ισορροπία στο χερσαίο οικοσύστημα και στο θαλάσσιο περιβάλλον στις εκβολές όπου συναντά το ρεύμα τη θάλασσα, δεν έχει την πιθανότητα να αποκτήσει την προηγούμενη οικολογική κατάστασή του.

Το φράγμα του Assuan (ή *Saad el Aali* στα Αραβικά) στην Αίγυπτο, είναι ένα καλό παράδειγμα για αυτήν την περίπτωση. Το εν λόγω φράγμα ύψους 111 m, με μήκος κορωνίδας 3830 m, με όγκο 44.300.000 m³, με ταμιευτήρα σχεδιασμένο να έχει ένα ανώτατο ύψος νερού 183 m από την επιφάνεια της θάλασσας, με συνολική χωρητικότητα ταμιευτήρα 1,6 x 10¹⁰ m³, με συνολικό μήκος 500 Km και ένα μέσο πλάτος 12 Km ³¹¹³είναι λιθόρριπο (*rock-fill*) κατά μήκος του ποταμού Νείλου, ολοκληρώθηκε το 1970, με κόστος ένα δισεκατομμύριο δολάρια και αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα προγράμματα εφαρμοσμένης μηχανικής που εκτελέστηκε μέχρι σήμερα, με μέγεθος 16-17 φορές αυτού της μεγάλης πυραμίδας του Φαραώ στη *Giza*. Το φράγμα αυτό έχει αλλάξει τα χαρακτηριστικά υδατικής τροφοδοσίας της ανατολικής Μεσογείου και το οικοσύστημα του ποταμού Νείλου.

Οι βασικότερες αλλαγές που έχουν επέλθει στο προαναφερθέν φράγμα και μπορούν να επέλθουν στο υδραυλικό σύστημα κάθε άλλου φράγματος με παρόμοια χαρακτηριστικά αναφέρονται στη συνέχεια:

(α) Η ταχύτητα ροής του ποταμού γίνεται στατική στη κατάντη περιοχή, δεδομένου ότι η στάθμη του νερού στη κοίτη του ποταμού δεν αλλάζει σημαντικά. Επομένως, τα χαρακτηριστικά ενεργειακής ροής τροποποιούν το οικοσύστημα διαβίωσης.

(β) Μπορεί να εμφανιστούν θετικές παραλλαγές ως αποτέλεσμα της αυξανόμενης διαρροής στα υπόγεια νερά (έχει υπολογιστεί ότι θα είναι δυνατό να παρέχεται νερό για την έρημο Nubian από τον ποταμό, για οικιακούς και γεωργικούς σκοπούς, με τη βοήθεια του νερού που διαρρέει από τη λίμνη Nasser που είναι πέρα από τον ποταμό Νείλο).

(γ) Καθώς ο ταμιευτήρας αποθήκευσης νερού λειτουργεί όπως μια μεγάλη λεκάνη απορροής αποκατάστασης, η θολερότητα στις ρέοντες κατάντη ποσότητες νερού μειώνεται και η διάβρωση γύρω από τη λίμνη ελαττώνεται αργά.

(δ) Μπορούν να παρατηρηθούν αυξήσεις στις απώλειες εξάτμισης λόγω της διεύρυνσης της επιφάνειας ύδατος.

Οι διαφορές στο θερμοκρασιακό καθεστώς του υδάτινου περιβάλλοντος μπορούν να ταξινομηθούν σε: (α) θερμικές μεταβολές που μπορούν να έχουν ως αποτέλεσμα τους εποχιακούς θερμικούς στρωματικούς σχηματισμούς κατά βάθος του νερού στα φράγματα και (β) μεταβολές που συμβαίνουν στη θερμοκρασία του νερού μέσα στον ταμιευτήρα, συνδέονται με το βάθος του νερού που είναι σε θέση να διαρρεύσει από τους κατάντη υδατοφράκτες του φράγματος και την ανταλλαγή του νερού με σταθερή θερμοκρασία. Στην περίπτωση που το βάθος των υδατοφρακτών είναι κάτω από τη θερμοκλίνη του ταμιευτήρα ο ποταμός θα συμπεριφερθεί όπως ένας ποταμός ψυχρού κλίματος, από χημική και βιολογική άποψη συνθηκών, δεδομένου ότι το νερό θα είναι πάντα κρύο ακόμη και το καλοκαίρι. Αντίθετα, θα συμπεριφερθεί όπως ένας ποταμός θερμού κλίματος, εάν το ρέον νερό είναι σε θερμοκρασίες του νερού επιφάνειας. Αποτελέσματα παρόμοια με αυτά μπορούν να συνεχίσουν να υφίστανται κατάντη για χιλιόμετρα κατά μήκος του ποταμού.

Σοβαρές αλλαγές εμφανίζονται στα χημικά χαρακτηριστικά του ποτάμιου νερού, παρόμοιες με τις θερμοκρασιακές μεταβολές. Εξαρτώμενο από το βάθος των ταμιευτήρων, το νερό που εμφανίζει έλλειψη οξυγόνου και περιλαμβάνει ακόμη και θειούχο υδρογόνο μπορεί να υφίσταται στα βαθύτερα μέρη του ποταμού. Όταν το νερό ρέει κατάντη, μπορούν να εμφανιστούν στη κατάντη περιοχή πολύ σημαντικές ζωτικής σημασίας αλλαγές σχετιζόμενες με το βάθος των υδατοφρακτών των φραγμάτων. Τα προϊόντα αποσύνθεσης των οργανικών ουσιών, που συσσωρεύονται στα βαθύτερα μέρη του ποταμού όπου το οξυγόνο είναι σε περιορισμένες ποσότητες, μπορούν να ανέλθουν μέχρι την επιφάνεια συνοδευόμενα από απότομες απελευθερώσεις αερίων. Αυτό οδηγεί σε μια απότομη προσθήκη διαφορετικών χημικών θρεπτικών ουσιών στο βιοσύστημα και επιπροσθέτως σε μια συχνά, κυμαινόμενη ποιότητα νερού. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι το άζωτο στον αέρα διαλύεται σε ακραία επίπεδα κορεσμού στην κατάντη περιοχή του νερού που πέφτει από τους υδατοφράκτες. Με αυτόν τον τρόπο, το νερό που είναι κορεσμένο περίπου 150% στο άζωτο, μπορεί να είναι μοιραίο για τα ποτάμια ψάρια.

6.4 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Οι ταμιευτήρες νερού επιφέρουν φυσικές, χημικές και βιολογικές αλλαγές στο αποθηκευμένο νερό και στα υποκείμενα εδάφη και πετρώματα, τα οποία επηρεάζουν την ποιότητα νερού. Η χημική σύσταση του νερού μέσα σε ένα ταμιευτήρα μπορεί να είναι σημαντικά διαφορετική από αυτήν των εισρεόμενων ποσοτήτων νερού. Το μέγεθος του ταμιευτήρα, η θέση του στο ποτάμιο σύστημα, η γεωγραφική θέση του όσον αφορά το υψόμετρο και το γεωγραφικό πλάτος και μήκος του, ο χρόνος διατήρησης αποθήκευσης του νερού και η υδατική πηγή(ες), επηρεάζουν τον τρόπο που η κράτηση αποθήκευσης τροποποιεί την ποιότητα του νερού.

Σημαντικές βιολογικά-οδηγούμενες αλλαγές εμφανίζονται μέσα στους θερμικά στρωματοποιημένους ταμιευτήρες νερού. Στο επιφανειακό στρώμα, το φυτοπλαγκτόν (*phytoplankton*) πολλαπλασιάζεται συχνά και απελευθερώνει οξυγόνο, διατηρώντας με αυτόν τον τρόπο τις συγκεντρώσεις σε κοντινά επίπεδα κορεσμού για τη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους. Αντίθετα, η έλλειψη μίξης φυτοπλαγκτόν και ηλιακής ακτινοβολίας για εν θερμώ σύνθεση με συνένωση με το οξυγόνο που χρησιμοποιείται

στην αποσύνθεση της υποβρύχιας βιομάζας, μπορούν να οδηγήσουν σε συνθήκες μη οξυγόνωσης ιστών, στο κατώτατο υδατικό στρώμα.

Οι θρεπτικές ουσίες (δηλαδή ο φώσφορος και το άζωτο), απελευθερώνονται βιολογικά και εκπλύνονται από την πλημμυρισμένη βλάστηση και το έδαφος. Αν και η απαίτηση οξυγόνου και τα θρεπτικά επίπεδα μειώνονται γενικά με το πέρασμα του χρόνου, καθώς η οργανική ουσία μειώνεται, μερικοί ταμιευτήρες απαιτούν μια περίοδο περισσότερων από 20 έτη για να αναπτύξουν σταθερά σε ποιότητα υδατικά καθεστώτα. Κυριότεροι αποδέκτες της ρύπανσης με νιτρικά είναι συνήθως τα αγροτικής χρήσης εδάφη και οι υδατικοί πόροι που επηρεάζονται από αυτά (επιφανειακοί και υπόγειοι). Το φαινόμενο της ρύπανσης των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων συνδέεται άμεσα με την υποβάθμιση του εδάφους, αφού τα υλικά της διάβρωσης που συσσωρεύονται σε αυτά μπορούν να υποβαθμίσουν την ποιότητά τους και κατά ακολουθία να υποβαθμίσουν τη ποιότητα των νερών των ταμιευτήρων των φραγμάτων, που λειτουργούν ως αποδέκτες νιτρικών και διαφόρων άλλων ρυπογόνων ουσιών.

Μετά από την ωρίμανση, οι ταμιευτήρες, όπως οι φυσικές λίμνες, μπορούν να ενεργήσουν ως θρεπτικοί αποδέκτες (οχετοί), ιδιαίτερα για τις θρεπτικές ουσίες που συνδέονται με τα ιζήματα. Ο ευτροφισμός των ταμιευτήρων μπορεί να εμφανιστεί συνεπεία των μεγάλων εισροών της οργανικής φόρτισης ή/και των θρεπτικών ουσιών. Σε πολλές περιπτώσεις αυτές οι εισροές είναι μια συνέπεια των ανθρωπογενών επιρροών στην ποτάμια λεκάνη απορροής (π.χ. χρήση λιπασμάτων, υγρών αποβλήτων κ.λπ.), παρά μια άμεση συνέπεια της παρουσίας των ταμιευτήρων. Ένα τέτοιο διεθνές παράδειγμα, είναι ο ευτροφισμός στο ιδιαίτερα ελεγχόμενο υδατικό σύστημα του ποταμού Waikato στη Νέα Ζηλανδία, που ενισχύθηκε από τις εκφορτίσεις υγρών αποβλήτων και όμβριων υδάτων. Οι θρεπτικοί παλμοί (των εκφορτίσεων), από κοινού με τις συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, μπορούν να οδηγήσουν εντός του νερού, σε ανθίσεις των γαλαζοπράσινων αλγών (*blue-green algae*). που (εκτός από το να είναι αισθητικά δυσάρεστα)

μπορούν να προκαλέσουν τη μείωση κι εξάντληση του οξυγόνου και τις αυξανόμενες συγκεντρώσεις του σιδήρου και του μαγγανίου στο κατώτατο υδατικό στρώμα (πέριξ του πυθμένα), καθώς και αυξημένο pH και οξυγόνο στα ανώτερα υδατικά στρώματα των στρωματοποιημένων ταμιευτήρων.

Ειδικότερα, όσο αφορά τα νιτρικά, σύμφωνα με τους Φιλίντα κ.ά. υπάρχουν δύο κύριες ανησυχίες (προβλήματα) που προκύπτουν από την παρουσία νιτρικών αλάτων στο νερό, οι εξής:

(α) Τα υψηλά επίπεδα νιτρικών αλάτων στους ποταμούς και τις λίμνες μπορούν να αυξήσουν την ανάπτυξη φυκών-αλγών, υποβαθμίζοντας το υδροχαρές βιότοπο των ψαριών και των λοιπών υδρόβιων οργανισμών, καθώς και της άγριας πανίδας. Το άζωτο και ο φώσφορος εμφανίζονται ως οι πρωταρχικοί και κύριοι ρυπαντές σε πολλά υδατικά οικοσυστήματα στις ευρωπαϊκές λεκάνες απορροής, δεδομένου ότι προάγουν την παραγωγή των κυανόφυκων (*blue algae*) και κατά συνέπεια, δημιουργούν προβλήματα στις λίμνες και στα φράγματα, στα μικρόφυτα (*macrophytes*) και τα δινομαστιγοφόρα (*dinoflagellates*), κι επίσης υποβαθμίζουν το περιβάλλον και παρεμποδίζουν τον τουρισμό ή τις υδατοκαλλιέργειες στις παράκτιες περιοχές κ.λπ.. Κάτω από τέτοιες συνθήκες, η αποδοτικότητα των επενδύσεων σ' ότι αφορά την λήψη αποτρεπτικών μέτρων επί των πιέσεων σε βάρος της γεωργίας και

των συναφών πρακτικών, ή επί των δημοτικών και βιομηχανικών λυμάτων, θα πρέπει να αξιολογηθούν και να συγκριθούν.

(β) Τα υψηλά επίπεδα νιτρικών αλάτων στο πόσιμο νερό μπορούν να έχουν δυσμενή αποτελέσματα στην ανθρώπινη υγεία.

Η ρύπανση με υδράργυρο και άλλα βαρέα μέταλλα αποτελεί σημαντικό πρόβλημα των ταμιευτήρων σε μερικές χώρες. Ο υδράργυρος είναι φυσικά παρών σε αβλαβή ανόργανη μορφή σε πολλά είδη εδαφών. Εντούτοις, τα βακτηρίδια, διασπούν, αποσυνθέτουν ουσίες κάτω από ένα νέο ταμιευτήρα, μετασχηματίζουν αυτόν τον ανόργανο υδράργυρο σε μεθυλικό υδράργυρο (*methylmercury*), μια τοξίνη του κεντρικού νευρικού συστήματος. Το πλαγκτόν και άλλα έμβια όντα που βρίσκονται στο κατώτατο σημείο της υδρόβιας τροφικής αλυσίδας απορροφούν *methylmercury*. Καθώς ο *methylmercury* περνά επάνω στην τροφική αλυσίδα αυξάνεται όλο και περισσότερο η συγκέντρωσή του στους οργανισμούς των ζώων που τρώνε το μολυσμένο θήραμα. Μέσω αυτής της διαδικασίας της βιοσυσσώρευσης, τα επίπεδα *methylmercury* στους ιστούς των μεγάλων βρώσιμων ψαριών ή των πουλιών (που διαβιούν στον ταμιευτήρα του φράγματος) και βρίσκονται στην κορυφή της τροφικής-αλυσίδας μπορούν να είναι αρκετές φορές υψηλότερα, απ' ό,τι στους μικρούς οργανισμούς στο κατώτατο σημείο της αλυσίδας. Ο βαθμός στον οποίο η πανίδα έχει καταστεί τοξική με υδράργυρο έχει αποδειχθεί ότι είναι μεταβλητός. Σε άλλους ταμιευτήρες καμία επιπτώση δεν αναφέρεται. Οι αλλαγές ποιότητας νερού λόγω του ταμιευτήρα αντανακλώνται σε όλη την κατάντη κοίτη του ποτάμιου ρεύματος, έχοντας επιπτώσεις στην αρχική παραγωγικότητα και την ασπώνδυλη πανίδα που παρέχει τη βάση για το σύνολο των τροφικών αλυσίδων.

6.5 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΓΗΙΝΟ ΦΛΟΙΟ

Υπάρχει πιθανότητα να μεταβληθεί το μικροκλίμα της περιοχής του φράγματος, λόγω της δημιουργίας του ταμιευτήρα και των προκαλούμενων μεταβολών στην υγρασία και τη θερμοκρασία. Η δημιουργία στάσιμου υδάτινου όγκου μπορεί να επηρεάσει την κίνηση του αέρα κάτι που εξαρτάται από τη μορφολογία του εδάφους της περιοχής.

Οι επιπτώσεις στο γήινο φλοιό δεν μπορούν να χαρακτηρισθούν ως σημαντικές ή ανησυχητικές. Από πολλούς υποστηρίζεται ότι οι ταμιευτήρες μπορούν να προκαλέσουν σεισμούς μικρής κλίμακας, λόγω της ισοστατικής πίεσης που παράγεται με την συσσώρευση νερού, ή να αυξήσουν τη σεισμική δραστηριότητα της περιοχής, εν τούτοις η μεταβολή αυτή δεν έχει τεκμηριωθεί επαρκώς επιστημονικά. Παραταύτα, η πρώτη περίπτωση σεισμικής δραστηριότητας σχετιζόμενη με φράγμα και με την αποθήκευση νερού στον ταμιευτήρα του χρονολογείται από τη δεκαετία του '30 και αφορούσε το φράγμα Boulder (ΗΠΑ), ο ταμιευτήρας του οποίου πληρώθηκε το 1935.

6.6 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΒΙΟΛΟΓΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Η έρευνα όλο και περισσότερο προτείνει ότι το επίπεδο εσωτερικής ρύθμισης της λειτουργίας στα αγροοικοσυστήματα εξαρτάται κατά ένα μεγάλο μέρος από το επίπεδο της παρούσας φυτικής και ζωικής βιοποικιλότητας. Στα αγροοικοσυστήματα, η βιοποικιλότητα εκτελεί μια ποικιλία οικολογικών υπηρεσιών πέρα από την παραγωγή των τροφίμων, συμπεριλαμβανομένης της ανακύκλωσης των θρεπτικών ουσιών, της ρύθμισης του μικροκλίματος και των τοπικών υδρολογικών διαδικασιών, της καταστολής των ανεπιθύμητων οργανισμών και της αποτοξίνωσης των επιβλαβών χημικών ουσιών.

Η βιοποικιλότητα (βιολογική ζωή) του ποταμού αλλάζει γρήγορα στον ταμιευτήρα και στην κατάντη περιοχή, που συνήθως αποτελείται από αγροοικοσυστήματα. Τα μέρη του βιοοικοσυστήματος που επηρεάζονται άμεσα από το φράγμα είναι τα βρεχόμενα μέρη στην ακτή. Κατά τη διάρκεια των εργασιών πλήρωσης του φράγματος, ενώ τα εδάφη παραμένουν κάτω από το νερό, το χερσαίο μέρος της περιοχής μειώνεται. Εντούτοις, τα όρια νερού-εδάφους επεκτείνονται και οι περιοχές με καλλιέργειες, με ζώα ή οικισμούς αλλάζουν. Δασικές και γεωργικές περιοχές μπορούν να βρεθούν κάτω από το νερό. Δεδομένου ότι η στάθμη ύδατος διαφοροποιείται περιοδικά, μερικά είδη αρχίζουν να ζουν κάτω από το νερό κατά διαστήματα, στη ζώνη παλίρροιας. Αυτή η περιοχή μπορεί να αλλάξει σε ελώδη γη ή γη καλαμιώνων εξαρτώμενη από τη δομή του εδάφους. Οι θρεπτικές ουσίες, (φώσφορος, άζωτο κ.λπ.) απελευθερώνονται βιολογικά και διηθούνται από την πλημμυρισμένη βλάστηση και το έδαφος στον υπόγειο υδατικό ορίζοντα και αρκετές φορές επηρεάζουν και τους επιφανειακούς υδατικούς πόρους.

Αν και η απαίτηση οξυγόνου και τα θρεπτικά επίπεδα μειώνονται γενικά με την παρέλευση του χρόνου, καθώς η οργανική ουσία μειώνεται, μερικοί ταμιευτήρες απαιτούν μια περίοδο περισσότερων από 20 έτη για να αναπτύξουν σταθερά σε ποιότητα υδατικά καθεστώτα. Οι σχέσεις νερού-εδάφους-θρεπτικών, που ρυθμίζονται μετά από τις πλημμύρες στην κατάντη περιοχή του φράγματος, αλλάζουν σε μια μακριά χρονική περίοδο. Επιπλέον, επιτακτικές αλλαγές εμφανίζονται στη χλωρίδα, την πανίδα και τις γεωργικές παραδόσεις των ανθρώπων στην περιοχή, επίδραση που μπορεί να επεκταθεί για χιλιόμετρα.

6.7 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΥΔΡΟΒΙΑ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Στην αρχή, οι αποσυνθέτοντες οργανισμοί προκαλούν μια αύξηση στις θρεπτικές ουσίες στο νερό σε μια μικρή χρονική περίοδο. Επομένως, η τιμή του BOD (βιολογικά απαιτούμενο οξυγόνο) του νερού αυξάνεται. Μια αναερόβια αποσύνθεση εκτελείται με τη βοήθεια των στάσιμων υδατικών στρωμάτων κατά μήκος του βάθους του ταμιευτήρα, γεγονός που οδηγεί σε μια σκουρόχρωμη λίμνη που μυρίζει άσχημα. Κατόπιν, παρατηρείται μια τεράστια αύξηση στα φυτοπλαγκτόν (*phytoplanktons*) που τροφοδοτούνται από την αυξανόμενη ποσότητα των θρεπτικών ουσιών.

Εκτός από τα φυτά που καλύπτουν την επιφάνεια του νερού ως μεγάλα πρασινόμαυρα σώματα, μακροχλωρίδα (*macroflora*) μεγαλώνει στην επιφάνεια του νερού. Αυτά τα γεγονότα μπορούν να είναι επιβλαβή και για την έμβια ζωή της λίμνης (ταμιευτήρα), και επίσης για τους ανθρώπους που αλιεύουν, που κάνουν ένα ταξίδι

αναψυχής με βάρκα στη λίμνη και ακόμη και για τους υδροφράκτες των φραγμάτων και τις φτερωτές των αντλιών. Μερικές φορές, η μακροχλωρίδα (*macroflora*) δημιούργησε δράσεις ως μια πηγή φορέας λοιμογόνων ασθενειών. Ξέχωρα, αυτή η αύξηση στον πληθυσμό των φυτών του νερού προκαλεί περισσότερες απώλειες εξάτμισης από ότι κανονικά συμβαίνει από την εξατμισοδιαπνοή.

Το φράγμα είναι ένα πραγματικό εμπόδιο για τα έμβια όντα που κολυμπούν από το ένα άκρο του ποταμού στο άλλο. Η ύπαρξη του φράγματος σημαίνει το θάνατο για τα είδη ψαριών που διαβιούν σε ορισμένες περιόδους της ζωής τους στις πηγές ή στο νερό πλημμυρών και άλλες περιόδους στο δέλτα του ποταμού όπου αυτός ενώνεται με τη θάλασσα. Είναι γνωστό ότι μερικά είδη θαλάσσιων ψαριών έρχονται στο γλυκό νερό και κολυμπούν ανοδικά μέχρι την πηγή προκειμένου να

γεννήσουν τα αυγά τους. Αργότερα, επιστρέφουν στη θάλασσα με τα νεογέννητα νεαρά ψάρια. Ένα φράγμα που θα κατασκευαστεί σε αυτόν τον υδάτινο δρόμο θα διακόψει τον κύκλο ζωής αυτών των πλασμάτων και θα προκαλέσει μαζικούς θανάτους. Έχει προβλεφθεί ότι παρακαμπτήριες ροές νερού (υδάτινοι οδοί) πρέπει να σχεδιάζονται για αυτόν το λόγο.

6.8 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΖΩΗ

Παρά το γεγονός ότι τα φράγματα συμβάλλουν σημαντικά στην εθνική και τοπική ανάπτυξη, δεν είναι εύκολα αποδεκτά για τους ανθρώπους των οποίων οι γεωργικές εκτάσεις, τα σπίτια και το περιβάλλον που ζουν βυθίζονται κάτω από το νερό. Παραδείγματος χάριν, όταν δημιουργήθηκε η λίμνη Volta στην Γκάνα το 1969, αν και εξασφαλίστηκε μια πολύ καλύτερη περιοχή εγκατάστασης των 80.000 κατοίκων της περιοχής σε άλλη γεωγραφική θέση, οι κάτοικοι αρνήθηκαν να εγκαταλείψουν την ευρύτερη περιοχή και κατασκεύασαν τα σπίτια τους σε εκτός σχεδίου περιοχές στις ακτές της νεοσύστατης λίμνης. Μια τέτοια ανεπιτυχής εμπειρία που η αιτία της είναι η κοινωνική-ψυχολογία, μπορεί να αποβεί πολύ επικίνδυνη για τα βιοσυστήματα της περιοχής και για τον ίδιο τον ταμιευτήρα (λίμνη Volta).

Άλλο ένα σημαντικό παράδειγμα των κοινωνικών επιδράσεων των μεγάλων φραγμάτων, αφορά το φράγμα του *Aswan* (*Aswan High Dam*). Η δημιουργία του ταμιευτήρα του φράγματος, τώρα γνωστού ως λίμνη *Nasser* απαίτησε την μετεγκατάσταση περίπου 100000 αιγύπτιων αγροτών, σουδανέζων και νουβίων, οι οποίοι έχασαν την πατρική γη τους και διασκορπίστηκαν στα λιγότερο εύφορα εδάφη στην άνω Αίγυπτο και το ανατολικό Σουδάν. Πέραν της κοινωνικής διάστασης του εν λόγω προβλήματος, η δημιουργία του φράγματος προκάλεσε σημαντική απώλεια για τους ιστορικούς και τους αρχαιολόγους παγκοσμίως, δεδομένου ότι ο πολιτισμός των Νουβίων (*Nubian civilization*) είναι ένας από τους παλαιότερους και μέγιστους πολιτισμούς στην Αφρική. Η πλήρωση του ταμιευτήρα *Nasser*, δημιούργησε την τρίτη σε μέγεθος παγκοσμίως τεχνητή λίμνη, αλλά τα μεγάλα μνημεία των Νουβίων και οι ιστορικές περιοχές τους πνίγηκαν στο νερό και χάθηκαν για πάντα, παρά τις φιλόδοξες προσπάθειες διάσωσης από οργανώσεις όπως η UNESCO.

Επί πλέον, πρέπει να αναφερθούν αλλαγές στη μορφή οικονομικής ανάπτυξης και στα συστήματα παραγωγής που αρχίζουν πριν από την κατασκευή του φράγματος συμπεριλαμβανομένης της απαλλοτρίωσης της γης, της απασχόλησης εργαζομένων στην κατασκευή και τις μεταφορές. Εργαζόμενοι από την περιοχή

κατασκευής του φράγματος συμμετέχουν στην κατασκευή αν και τις περισσότερες φορές οι τεχνικοί και οι εμπειρογνώμονες προέρχονται από άλλα μέρη. Η αύξηση της απασχόλησης στην περιοχή και η οικονομική ανάπτυξη δημιουργεί δευτερογενώς νέα απασχόληση και αυξάνει τις ανάγκες για κατοικίες, εγκαταστάσεις, νέα έργα. Σε πολλές περιπτώσεις, η μεταβολή στην ανάπτυξη της περιοχής είναι σημαντική, ώστε το φράγμα να καθίσταται ένα είδος «συμβόλου» για την περιοχή. Η κοινωνική ζωή γίνεται ενεργή, το εμπόριο παρουσιάζει αύξηση και οι πολιτιστικές δραστηριότητες άνοδο. Επί πλέον, τα φράγματα βελτιώνουν τη ζωή και το επίπεδο αγροτικής παραγωγής στις κατάντη περιοχές λόγω της μείωσης του κινδύνου για πλημμύρες.

6.9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, οι περιβαλλοντικές μεταβολές που προέρχονται από τα φράγματα είναι ποικίλες, και με διαφορετική σημασία ή σπουδαιότητα. Υπάρχει μεγάλη δυσκολία στον καθορισμό και υπολογισμό εκ των προτέρων, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των επιδράσεων στις οικοσυστημικές λειτουργίες, από την κατασκευή των φραγμάτων και ιδιαίτερη δυσκολία στο να καθοριστεί ποιες μεταβολές είναι θετικές και ποιες αρνητικές. Επίσης, υπάρχει δυσκολία στην ποσοτικοποίηση των μεταβολών και την έκφρασή τους σε χρηματικούς ή οικονομικούς όρους, ώστε να καταστούν συγκρίσιμες μεταξύ τους και η τελική επιλογή για την κατασκευή και τα χαρακτηριστικά του φράγματος να πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο μιας ανάλυσης κόστους - οφέλους.

Οι μεταβολές αυτές εξαρτώνται από το είδος, το μέγεθος, τη θέση του φράγματος και του ταμιευτήρα του, τη βιοποικιλότητα και ευαισθησία του οικοσυστήματος ανάντη και κατάντη του φράγματος, ενώ η εκτίμησή τους θα πρέπει να γίνεται χωριστά για κάθε φράγμα και ταμιευτήρα. Από την άλλη πλευρά είναι λάθος να θεωρούνται εξ αρχής οι επιπτώσεις των φραγμάτων αρνητικές στο σύνολό τους. Για τον ορθολογικό σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός τέτοιου έργου έχει σημασία η επιστημονική κατάρτιση και η γνώση του μελετητή κι αξιολογητή, αλλά και η σχέση του με το έργο, η σχετική κρατική και διεθνής εμπειρία και η διεπιστημονικότητα στην προσέγγιση των θετικών και αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, καθώς και των εφικτών λύσεων, με στόχο την ορθότερη περιβαλλοντική και αιεφορική διαχείριση των σχετιζόμενων υδατικών πόρων.

Μέχρι σήμερα δεν υπάρχει κάποια κανονιστική ή τυποποιημένη προσέγγιση για να διευθυνσιοδοτηθούν οι επιδράσεις του οικοσυστήματος προς συγκεκριμένες κατευθύνσεις και θα πρέπει να εξεταστούν σε κάθε περίπτωση χωριστά. Επιπλέον, η αποδοχή των αλλαγών οικοσυστήματος θα ποικίλει με τη φύση των ανθρωπινων κοινωνιών, των πολιτισμών, και των προσδοκιών.

Οι αποφάσεις για σχεδιασμό και κατασκευή των μεγάλων φραγμάτων πρέπει να λαμβάνονται ύστερα από συνεκτίμηση, σύγκριση και αξιολόγηση σε βάθος των δυσμενών επιπτώσεων και των ωφελειών. Ο σχεδιασμός και το μέγεθος του φράγματος πρέπει να εξασφαλίζουν τις ελάχιστες αρνητικές επιπτώσεις και τις μέγιστες θετικές. Οι μεταβολές στο οικοσύστημα, θετικές ή αρνητικές, αποτελούν πλέον βασικό παράγοντα καθορισμού των χαρακτηριστικών κάθε φράγματος και της απόφασης για την κατασκευή του ή όχι. Αυτό όμως δεν μπορεί να αποτελέσει το «άλλοθι» για πολλούς που μεγεθύνουν και υπερτονίζουν τη σημασία κάποιων περιβαλλοντικών επιπτώσεων και υποβαθμίζουν την οικονομική σημασία καθώς και

τη συμβολή αυτών των έργων στην ανάπτυξη ελλειμματικών σε υδατικούς πόρους περιοχών. Η μελέτη των φραγμάτων, των σχετιζόμενων οικοσυστημικών διεργασιών που επηρεάζουν και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (θετικών και αρνητικών), απαιτεί διεπιστημονικές προσεγγίσεις και συνεργασίες, ρεαλιστική και όχι μωπτική θεώρηση κάποιων θεμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: 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 υδροδυναμική, 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 (προβλήματα στην αναπαράσταση της τύρβης, επίδραση της κλίμακας της στη ροή κτλ.).
- **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, κυρίως λόγω κακής ή ελλιπούς ρύθμισής τους.
- **Στοχαστικά μοντέλα:** Στα μοντέλα αυτά περιλαμβάνονται όσα χρησιμοποιούν στατιστικές μεθόδους επεξεργασίας των αποτελεσμάτων τους.

Στη συγκεκριμένη εργασία 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 (I. Ζαχαρίας, 2002). Ο κώδικας που εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων.

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 (real time) και γ) το φυσικό σύστημα δεν επηρεάζεται από τις διάφορες δοκιμές.

7.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

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

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.

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 κύματα, την παλίρροια, τα ρεύματα, τον άνεμο κλπ.

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 (παλίρροια, επίδραση του ανέμου στην επιφάνεια, οριζόντιες και κατακόρυφες διαφορές πυκνότητας 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) 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 περιγράψουν όλες τις φυσικές διεργασίες που πιθανόν να συμβαίνουν στο σύστημα καθώς επίσης θα χρησιμοποιηθούν στη φάση επιβεβαίωσης του μοντέλου.

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. Ο προγραμματισμός του κώδικα γίνεται με τη βοήθεια της FORTRAN, της PASCAL, της C++.

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.

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.

8) Σχεδιασμός δοκιμών

Πολυάριθμες δοκιμές μπορούν να απαιτηθούν σε ένα αριθμητικό μοντέλο προκειμένου να αποκτηθεί πληροφόρηση σχετικά με μελλοντικές χωρο-χρονικές μεταβολές του φυσικού συστήματος.

Οι προσομοιώσεις είναι ο λιγότερο δαπανηρός τρόπος για την απόκτηση πληροφόρησης σχετικά με προβλέψεις μελλοντικών καταστάσεων, προϋποθέτουν όμως αποφάσεις τακτικής. Οι τελευταίες αφορούν τις συνθήκες έναρξης, των αριθμό των κομβικών σημείων, το χρονικό βήμα και τον υπολογιστικό χρόνο της προσομοίωσης. Από την προσομοίωση θα προκύψουν πολλά αρχεία που θα επεξεργαστούν στατιστικά για να οδηγήσουν σε γενικά συμπεράσματα.

9) Αποτελέσματα και ερμηνεία

Στο τελευταίο στάδιο αναλύονται και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση. Η ερμηνεία προϋποθέτει μετατροπή κλίμακας από εκείνη του υπολογιστή στη φυσική κλίμακα. Για τον σκοπό αυτό θα πρέπει να

λαμβάνονται υπόψη οι υποθέσεις, οι περιορισμοί και οι παραδοχές που έγιναν στα προηγούμενα στάδια, κατά την ακριβώς αντίθετη διαδικασία.

Αν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης χρησιμοποιηθούν για την πρόγνωση μελλοντικών καταστάσεων, τότε απαιτείται η χρήση της στατιστικής. Αν όμως τα αποτελέσματα χρησιμοποιηθούν για την επιβεβαίωση κάποιων υποθέσεων, οι στατιστικές δοκιμές δε χρειάζονται.

7.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

Η υδροδυναμική κυκλοφορία στις παράκτιες περιοχές οφείλεται, όπως έχει αναφερθεί, σε διάφορα γενεσιουργά αίτια μεταξύ των οποίων τα κυριότερα είναι η παλίρροια, ο άνεμος και οι διαφορές πυκνότητας του θαλασσινού νερού. Συνήθως ο διαχωρισμός των μαθηματικών ομοιωμάτων γίνεται με βάση το γενεσιουργό αίτιο κίνησης. Ωστόσο, η διάκριση αυτή έχει περισσότερο μαθηματική σκοπιμότητα και λιγότερο φυσική σημασία, δεδομένου ότι τα αίτια μπορούν να συνυπάρχουν στο τελικό αποτέλεσμα με διαφορετικές αναλογίες.

Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στα γενικά χαρακτηριστικά και τις απλοποιημένες παραδοχές ενός γενικευμένου μαθηματικού ομοιώματος, το οποίο δημιουργήθηκε από τον καθηγητή Χ. Κουτίτα, χαρακτηριστικό για τον ελληνικό χώρο, κυρίως κατά την δεκαετία του 1980.

7.3 ΕΞΕΛΙΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Όπως αναφέρθηκε και πιο πριν, η λειτουργία ενός φυσικού συστήματος βασίζεται σε πολύπλοκες φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες. Για την ερμηνεία και την κατανόηση αυτών των φαινομένων αναπτύχθηκαν διάφοροι μαθηματικοί αλγόριθμοι. Τις τελευταίες δεκαετίες τα μοντέλα προσομοίωσης ερμηνεύουν, επαληθεύουν και κάνουν πρόγνωση για διάφορα φυσικά φαινόμενα όπως την υδροδυναμική κυκλοφορία των υδάτινων συστημάτων, τη διάχυση ρύπων και τη ρύπανση αυτών (S. Artina et al, 2006), τη μεταβολή της αλατότητας, της πυκνότητας, την επίδραση του ανέμου και της παλίρροιας. Εκτός από την μελέτη της υδροδυναμική κυκλοφορία των συστημάτων, υπάρχουν μοντέλα για την πρόγνωση του καιρού, για τη μελέτη της βιομάζας στις παράκτιες περιοχές καθώς και την παρακολούθηση του φυτοπλαγκτόν στην ανοιχτή θάλασσα (G.S. Tucker, et al, 1993, K. Edelvang, 2005) αλλά και για τη μελέτη διαφόρων οργανισμών όπως του *orhothrix fragillis* (A. Lefebvre et al, 2002).

Όπως είναι λογικό, τα μοντέλα προσομοίωσης, για να φτάσουν στη σημερινή τους μορφή, ξεκίνησαν να δημιουργούνται από απλούς αλγορίθμους, αρχικά στη μια διάσταση. Έτσι στα πρώτα μοντέλα οι προσομοιώσεις γίνονταν στη μια διάσταση, συνήθως στη διάσταση x (S. Cai et al, 2001) διότι η επίλυση των αλγορίθμων είναι διαδικασία σαφώς πιο εύκολη. Στις προσομοιώσεις στη μια διάσταση οι απλουστεύσεις και οι παραδοχές είναι αρκετές και κατά συνέπεια το αποτέλεσμα που προκύπτει τελικά απέχει αρκετά από την πραγματικότητα. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν δισδιάστατα μοντέλα τα οποία προσομοιώνουν καλύτερα τη λειτουργία του υπό μελέτη φαινομένου. Ειδικότερα, τα δισδιάστατα υδροδυναμικά

μοντέλα προσομοίωσης ακολουθούν τα ίδια βήματα μέχρι το τελικό στάδιο προσομοίωσης λαμβάνοντας τις ίδιες παραδοχές (R.D. Pingree et al, 1979, A. Baptista et al, 1989, C.S. Yu et al, 1989, N. Praagman et al, 1989, I.S. Robinson, 1980, G. Quiros et al, 1992). Πολλά υδροδυναμικά αριθμητικά πρότυπα που αναπτύσσονται τα πρόσφατα έτη, είναι βασισμένα στη θεωρία του δισδιάστατου ρηχού ύδατος που υποθέτει την ομοιογένεια του ύδατος στην κατεύθυνση βάθους και την υδροδυναμική διανομή της πίεσης ύδατος. Η θεωρία προέρχεται από το γεγονός ότι η οριζόντια συνισταμένη της τρέχουσας ταχύτητας υπερισχύει. Αλλά, η κάθετη συνιστώσα είναι επίσης σημαντική επειδή η κάθετη κυκλοφορία έχει μια σημαντική επίδραση στα φαινόμενα μεταφορών όπως αλατότητα, θερμοκρασία, μολυσματικός παράγοντας, κ.λπ. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να λάβει κανείς υπόψη το κάθετο τμήμα ταχύτητας στην ανάλυση της τρέχουσας ροής. Έτσι, δημιουργήθηκαν τα τριών διαστάσεων μοντέλα προσομοίωσης τα οποία είναι και τα πληρέστερα αλλά και τα πιο δύσκολα στην επίλυσή τους (M. Kawahara et al, 1983, N.J Shankar et al, 1996, Grundlehner, 1997, G. Lacroix et al, 2004, Q. Mao et al, 2004, Brethot et al, 2005, Brooks, 2005, S. Artina et al, 2006).

Όπως έχει αναφερθεί υπάρχουν τέσσερα είδη μοντέλων προσομοίωσης όπως τα στοχαστικά (Brethot et al, 2005), αλλά τα περισσότερα υδροδυναμικά μοντέλα ανήκουν στην κατηγορία των αριθμητικών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΚΩΔΙΚΑ MIKE 3 FM (HD)

8.1 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 γεωμετρικές 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 ταμιευτήρων, 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).

8.2 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).

8.2.1 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΣΕ ΚΑΡΤΕΣΙΑΝΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ

8.2.1.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΗΧΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

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:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (8.1)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fu - g \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{r_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{r_0} \int_z^h \frac{\partial r}{\partial x} dz - \frac{1}{r_0 h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \\ + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \end{aligned} \quad (8.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -fv - g \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{1}{r_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{r_0} \int_z^h \frac{\partial r}{\partial y} dz - \frac{1}{r_0 h} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \\ + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \end{aligned} \quad (8.3)$$

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, $f = 2\Omega \sin f$ είναι η παράμετρος Coriolis (Ω είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής και f 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_a 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:

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (8.4)$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (8.5)$$

όπου A είναι το οριζόντιο τυρβώδες ιξώδες.

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

Για $z = \eta$:

$$u \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} - w = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{r_0 v_t} (t_{sx}, t_{sy}) \quad (8.6)$$

Για $z = -d$:

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{r_0 v_t} (t_{bx}, t_{by}) \quad (8.7)$$

όπου (t_{sx}, t_{sy}) και (t_{bx}, t_{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:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h \bar{v}}{\partial y} = hS + P - E \quad (8.8)$$

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):

$$h \bar{u} = \int_{-d}^h u dz, \quad h \bar{v} = \int_{-d}^h v dz \quad (8.9)$$

Οι εξισώσεις (8.2), (8.3) μαζί με την ολοκληρωμένη εξίσωση της συνέχειας (8.8) είναι δυνατόν να αποτελέσουν τη βάση για την ανάλυση (με αριθμητικές μεθόδους) της παράκτιας υδροδυναμικής κυκλοφορίας.

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

$$r = r(T, s) \quad (8.10)$$

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).

8.2.1.2 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

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

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + H + T_s S \quad (8.11)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + s_s S \quad (8.12)$$

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:

$$(F_T, F_s) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s) \quad (8.13)$$

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

$$D_h = \frac{A}{s_T} \text{ και } D_v = \frac{v_t}{s_T} \quad (8.14)$$

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 $z = \eta$:

$$D_h \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q_n}{r_0 c_p} + T_p P - T_e E \quad (8.15)$$

Για $z = -d$:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (8.16)$$

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 $z = \eta$:

$$\frac{\partial s}{\partial z} = 0 \quad (8.17)$$

Για $z = -d$:

$$\frac{\partial s}{\partial z} = 0 \quad (8.18)$$

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

$$\bar{E} = \left(\frac{q_v}{r_0 l_v}, 0 \right) \text{ για } (q_v > 0, q_v \leq 0) \quad (8.19)$$

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.

8.2.1.3 ΕΞΙΣΩΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΡΥΠΟΥ

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = F_C + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) - k_p C + C_s S \quad (8.20)$$

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:

$$F_c = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] C \quad (8.21)$$

όπου D_h είναι ο συντελεστής οριζόντιας διάχυσης.

8.2.1.4 ΟΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΚΑΡΤΕΣΙΑΝΕΣ ΚΑΙ ΣΙΓΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ

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

$$\sigma = \frac{z - z_b}{h}, \quad x' = x, \quad y' = y \quad (8.22)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial z} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \quad (8.23)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right) = \left(\frac{\partial}{\partial x'} - \frac{1}{h} \left(-\frac{\partial d}{\partial x} + s \frac{\partial h}{\partial x} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma}, \frac{\partial}{\partial y'} - \frac{1}{h} \left(-\frac{\partial d}{\partial y} + s \frac{\partial h}{\partial y} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma} \right) \quad (8.24)$$

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

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x'} + \frac{\partial hv}{\partial y'} + \frac{\partial wh}{\partial \sigma} = hS \quad (8.25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x'} + \frac{\partial hvu}{\partial y'} + \frac{\partial hwu}{\partial \sigma} &= fvh - gh \frac{\partial h}{\partial x'} - \frac{h}{r_0} \frac{\partial p_a}{\partial x'} - \frac{hg}{r_0} \int_z^h \frac{\partial p}{\partial x} dz - \\ &- \frac{1}{r_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + hF_u + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_v}{h} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + hu_s S \end{aligned} \quad (8.26)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x'} + \frac{\partial hv^2}{\partial y'} + \frac{\partial hwn}{\partial \sigma} = -fuh - gh \frac{\partial h}{\partial y'} - \frac{h}{r_0} \frac{\partial p_a}{\partial y'} - \frac{hg}{r_0} \int_z^h \frac{\partial p}{\partial y} dz -$$

$$\frac{1}{r_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + hF_v + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_v}{h} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + hv_s S \quad (8.27)$$

$$\frac{\partial hT}{\partial t} + \frac{\partial huT}{\partial x'} + \frac{\partial hvT}{\partial y'} + \frac{\partial hwT}{\partial s} = hF_T + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{D_v}{h} \frac{\partial T}{\partial s} \right) + hH + hT_s S \quad (8.28)$$

$$\frac{\partial hs}{\partial t} + \frac{\partial hus}{\partial x'} + \frac{\partial hvs}{\partial y'} + \frac{\partial hws}{\partial s} = hF_s + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{D_v}{h} \frac{\partial s}{\partial s} \right) + h s_s S \quad (8.29)$$

$$\frac{\partial hk}{\partial t} + \frac{\partial huk}{\partial x'} + \frac{\partial hvk}{\partial y'} + \frac{\partial hwk}{\partial s} = hF_k + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{v_t}{s_k} \frac{\partial k}{\partial s} \right) + h(P + B - \varepsilon) \quad (8.30)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial he}{\partial t} + \frac{\partial hue}{\partial x'} + \frac{\partial hve}{\partial y'} + \frac{\partial hwe}{\partial s} &= hF_e + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{v_t}{s_e} \frac{\partial e}{\partial s} \right) + \\ &+ h \frac{e}{k} (c_{1e} P + c_{3e} B - c_{2e} \varepsilon) \end{aligned} \quad (8.31)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial huC}{\partial x'} + \frac{\partial hvC}{\partial y'} + \frac{\partial hWC}{\partial s} &= hF_c + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{D_v}{h} \frac{\partial C}{\partial s} \right) - \\ &- hk_p C + hC_s \end{aligned} \quad (8.32)$$

Η τροποποιημένη κατακόρυφη ταχύτητα ορίζεται ως:

$$\omega = \frac{1}{h} \left[w + u \frac{\partial d}{\partial x'} + v \frac{\partial d}{\partial y'} - s \left(\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x'} + v \frac{\partial h}{\partial y'} \right) \right] \quad (8.33)$$

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

$$hF_u \approx \frac{\partial}{\partial x} \left(2hA \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hA \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (8.34)$$

$$hF_v \approx \frac{\partial}{\partial x} \left(hA \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2hA \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (8.35)$$

$$h(F_T, F_s, F_k, F_e, F_c) \approx \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(hD_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s, k, \varepsilon, C) \quad (8.36)$$

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

Για $\sigma = 1$:

$$\omega=0, \left(\frac{\partial u}{\partial s}, \frac{\partial v}{\partial s} \right) = \frac{h}{r_0 v_t} (t_{sx}, t_{sy}) \quad (8.37)$$

Για $\sigma = 0$:

$$\omega=0, \left(\frac{\partial u}{\partial s}, \frac{\partial v}{\partial s} \right) = \frac{h}{r_0 v_t} (t_{bx}, t_{by}) \quad (8.38)$$

Η εξίσωση για τον προσδιορισμό του βάθους του ύδατος δεν μεταβάλλεται από το μετασχηματισμό συντεταγμένων. Είναι, λοιπόν, ταυτόσημη με την εξίσωση (8.8).

8.2.2 Η ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ

8.2.2.1 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΙΞΩΔΟΥΣ

Επανερχόμενοι στις εξισώσεις RANS, για περιστρεφόμενο σύστημα και υπό το πρίσμα του σ-μετασχηματισμού (εξ. 25 και 26, 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:

$$- \overline{r u_i u_j} = r n_i \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} r k d_{ij} \quad (8.39)$$

όπου v_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 v_t μπορεί να διαφέρει σημαντικά από σημείο εις σημείο του ροϊκού πεδίου και από ροϊκό πεδίο σε ροϊκό πεδίο. Με k συμβολίζεται η τυρβώδης κινητική ενέργεια ανά μονάδα μάζας. Η εξ. (39), λόγω της συμπεριφοράς του v_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 v_t .

8.2.2.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΣΤΗΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ

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:

$$A_h = C_s^2 l^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (8.40)$$

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

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = 1, 2) \quad (8.41)$$

Η παραπάνω έκφραση (40) μπορεί να γραφεί σε καρτεσιανή μορφή, εμπεριέχοντας τις διαστάσεις του υπολογιστικού πλέγματος στην οριζόντια διεύθυνση, x , y , και για εφαρμογή στις εξισώσεις RANS, ως εξής:

$$A_h = C_s \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 0.5 \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8.42)$$

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. (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).

8.2.2.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ

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 $n_t = C_m k^2 / \varepsilon$ όπου k είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια ανά μονάδα μάζας (ΤΚΕ), ε είναι η ανάλωση της ΤΚΕ και C_m είναι μια εμπειρική σταθερά (π.χ. Rodi, 1984).

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

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial uk}{\partial x} + \frac{\partial vk}{\partial y} + \frac{\partial wk}{\partial z} = F_k + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_t}{s_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P + B - e \quad (8.43)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial ue}{\partial x} + \frac{\partial ve}{\partial y} + \frac{\partial we}{\partial z} = F_e + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_t}{s_e} \frac{\partial e}{\partial z} \right) + \frac{e}{k} (c_{1e} P + c_{3e} B - c_{2e} e) \quad (8.44)$$

όπου οι όροι P και B δίνονται ως εξής:

$$P = \frac{t_{xz}}{r_0} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{t_{yz}}{r_0} \frac{\partial v}{\partial z} \approx v_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (8.45)$$

$$B = -\frac{v_t}{s_t} N^2 \quad (8.46)$$

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

$$N^2 = -\frac{g}{r_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (8.47)$$

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

$$(F_k, F_e) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (k, e) \quad (8.48)$$

Οι συντελεστές οριζόντιας διάχυσης δίνονται ως εξής:

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

Αρκετοί καλά μετρημένοι εμπειρικοί συντελεστές εισάγονται στο μοντέλο k - ε . Οι εμπειρικές σταθερές δίδονται στον παρακάτω πίνακα 9.

C_m	C_{1e}	C_{2e}	C_{3e}	σ_t	σ_k	σ_e
0.09	1.44	1.92	0	0.9	1.0	1.3

Πίνακας 9: Εμπειρικές σταθερές στο μοντέλο $k - \varepsilon$ (από Rodi, 1984).

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

Για $z = \eta$:

$$K = \frac{1}{\sqrt{c_m}} U_{ts}^2 \quad (8.49)$$

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

$$\frac{\partial k}{\partial z} = 0 \quad \varepsilon = \frac{(k\sqrt{c_m})^{3/2}}{akh} \quad \text{για } U_{ts} = 0 \quad (8.50)$$

όπου $k = 0.4$ 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:

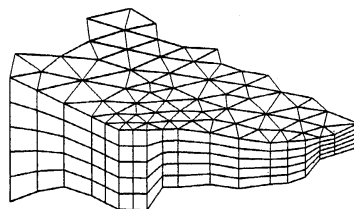
Για $z = -d$:

$$k = \frac{1}{\sqrt{c_m}} U_{tb}^2 \quad \text{και} \quad \varepsilon = \frac{U_{ts}^3}{k\Delta z_b} \quad (8.51)$$

όπου Δz_b είναι η απόσταση από τον πυθμένα.

8.3 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 24 δίδεται μια γενική άποψη της διαμόρφωσης του τρισδιάστατου υπολογιστικού πλέγματος που χρησιμοποιείται από τον κώδικα.



Σχήμα 24: 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:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}(\mathbf{U}) = \mathbf{S}(\mathbf{U}) \quad (8.52)$$

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. (1) επί του i όγκου ελέγχου και χρησιμοποιώντας το θεώρημα Gauss έχουμε:

$$\int_{A_i} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} d\Omega - \int_{A_i} \mathbf{S}(\mathbf{U}) d\Omega = - \int_{\Gamma_i} (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n}) ds \quad (8.53)$$

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 \mathbf{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 9: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

9.1 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Στην επίλυση του προβλήματος θεωρήσαμε τις παρακάτω παραδοχές:

1. Εξετάζουμε την Λίμνη την περίοδο του χειμώνα που είναι καλώς αναμεμιγμένη, δηλαδή η κυκλοφορία είναι Βαρότροπη και η πυκνότητα του νερού παραμένει σταθερή.

2. Έχουμε μέσο σταθερό βάθος λίμνης 13.09 m, που το υπολογίσαμε βάση του τύπου:

$$H=V/A$$

όπου, H: μέσο βάθος ροής

V: όγκος υδάτων

A: εμβαδόν επιφάνειας

3. Θεωρούμε ότι δρα Βόρειος άνεμος, με σταθερή ταχύτητα 10 m/s σε όλη την διάρκεια της προσομοίωσης.

9.2 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

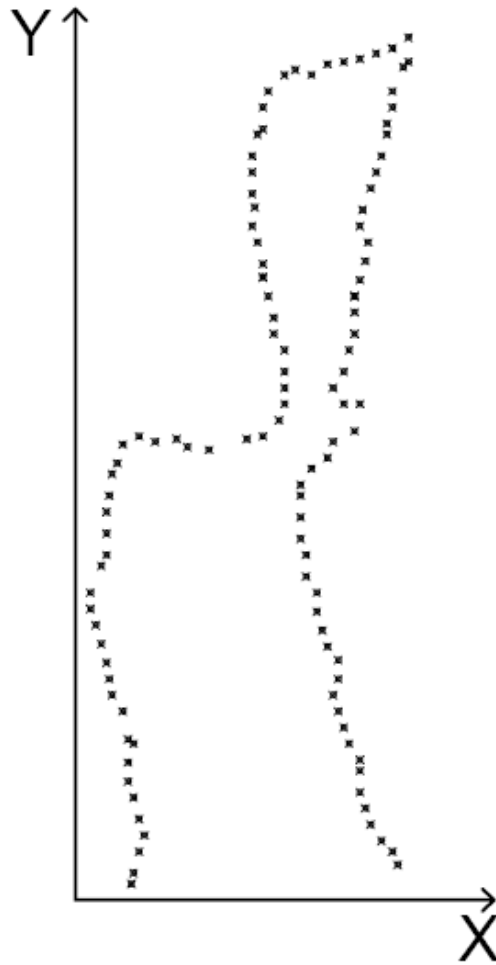
Αρχικά από το Google earth εκτυπώσαμε την κάτοψη του ταμιευτήρα του υδροηλεκτρικού φράγματος Στράτου (Εικόνα που δίδετε στο Παράρτημα) σε κλίμακα που 1 cm στο χάρτη αντιστοιχεί στην πραγματικότητα σε 416,67 m. Μετρήσαμε σημεία πάνω στην ακτογραμμή σε απόσταση ανά 0.30 cm (που αντιστοιχεί 125 m πραγματικής απόστασης) και χρησιμοποιήσαμε το Excel για να μετατρέψουμε τις συντεταγμένες των σημείων από την κλίμακα του σχεδίου στην πραγματικότητα, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 10:

X(cm)	Y(cm)	X'(m)	Y'(m)
1,10	0,00	458,33	0,00
0,90	0,20	375,00	83,33
1,00	0,60	416,67	250,00
1,10	0,90	458,33	375,00
1,00	1,20	416,67	500,00
0,90	1,60	375,00	666,67
0,80	1,90	333,33	791,67
0,80	2,25	333,33	937,50
0,90	2,60	375,00	1083,33
0,80	2,80	333,33	1166,67
0,70	3,20	291,67	1333,33
0,50	3,50	208,33	1458,33
0,45	3,80	187,50	1583,33
0,40	4,10	166,67	1708,33
0,30	4,45	125,00	1854,17
0,20	4,80	83,33	2000,00
0,10	5,10	41,67	2125,00
0,10	5,40	41,67	2250,00
0,30	5,90	125,00	2458,33
0,40	6,10	166,67	2541,67
0,40	6,50	166,67	2708,33
0,40	6,90	166,67	2875,00
0,45	7,20	187,50	3000,00
0,50	7,60	208,33	3166,67
0,60	7,80	250,00	3250,00
0,70	8,15	291,67	3395,83
1,00	8,30	416,67	3458,33
1,30	8,20	541,67	3416,67
1,70	8,25	708,33	3437,50
1,90	8,10	791,67	3375,00
2,30	8,05	958,33	3354,17
2,60	8,20	1083,33	3416,67
3,00	8,25	1250,00	3437,50
3,30	8,30	1375,00	3458,33
3,60	8,60	1500,00	3583,33
3,70	8,90	1541,67	3708,33
3,70	9,20	1541,67	3833,33
3,70	9,50	1541,67	3958,33

X(cm)	Y(cm)	X'(m)	Y'(m)
3,70	9,90	1541,67	4125,00
3,50	10,20	1458,33	4250,00
3,50	10,50	1458,33	4375,00
3,40	10,90	1416,67	4541,67
3,30	11,25	1375,00	4687,50
3,30	11,50	1375,00	4791,67
3,20	11,90	1333,33	4958,33
3,10	12,20	1291,67	5083,33
3,15	12,55	1312,50	5229,17
3,10	12,80	1291,67	5333,33
3,10	13,20	1291,67	5500,00
3,10	13,50	1291,67	5625,00
3,20	13,90	1333,33	5791,67
3,30	14,00	1375,00	5833,33
3,30	14,40	1375,00	6000,00
3,40	14,70	1416,67	6125,00
3,70	15,00	1541,67	6250,00
3,90	15,10	1625,00	6291,67
4,20	15,10	1750,00	6291,67
4,50	15,20	1875,00	6333,33
4,80	15,25	2000,00	6354,17
5,10	15,30	2125,00	6375,00
5,40	15,40	2250,00	6416,67
5,70	15,50	2375,00	6458,33
6,00	15,70	2500,00	6541,67
6,00	15,25	2500,00	6354,17
5,90	15,15	2458,33	6312,50
5,70	14,70	2375,00	6125,00
5,70	14,40	2375,00	6000,00
5,60	14,10	2333,33	5875,00
5,60	13,90	2333,33	5791,67
5,50	13,50	2291,67	5625,00
5,40	13,20	2250,00	5500,00
5,30	12,90	2208,33	5375,00
5,15	12,50	2145,83	5208,33
5,10	12,20	2125,00	5083,33
5,25	11,90	2187,50	4958,33
5,20	11,55	2166,67	4812,50
5,10	11,20	2125,00	4666,67
5,00	10,90	2083,33	4541,67
5,00	10,60	2083,33	4416,67
5,00	10,20	2083,33	4250,00
4,90	9,90	2041,67	4125,00
4,80	9,50	2000,00	3958,33
4,60	9,20	1916,67	3833,33
4,80	8,90	2000,00	3708,33
5,10	8,90	2125,00	3708,33
5,30	8,60	2208,33	3583,33
5,00	8,40	2083,33	3500,00

X(cm)	Y(cm)	X'(m)	Y'(m)
4,60	8,20	1916,67	3416,67
4,50	7,90	1875,00	3291,67
4,20	7,70	1750,00	3208,33
4,00	7,40	1666,67	3083,33
4,00	7,20	1666,67	3000,00
4,00	6,80	1666,67	2833,33
4,00	6,40	1666,67	2666,67
4,10	6,10	1708,33	2541,67
4,10	5,70	1708,33	2375,00
4,30	5,40	1791,67	2250,00
4,30	5,05	1791,67	2104,17
4,40	4,70	1833,33	1958,33
4,50	4,40	1875,00	1833,33
4,70	4,15	1958,33	1729,17
4,70	3,80	1958,33	1583,33
4,60	3,50	1916,67	1458,33
4,70	3,20	1958,33	1333,33
4,80	2,90	2000,00	1208,33
4,90	2,60	2041,67	1083,33
5,10	2,30	2125,00	958,33
5,10	2,10	2125,00	875,00
5,10	1,70	2125,00	708,33
5,20	1,40	2166,67	583,33
5,30	1,10	2208,33	458,33
5,50	0,80	2291,67	333,33
5,70	0,60	2375,00	250,00
5,80	0,35	2416,67	145,83

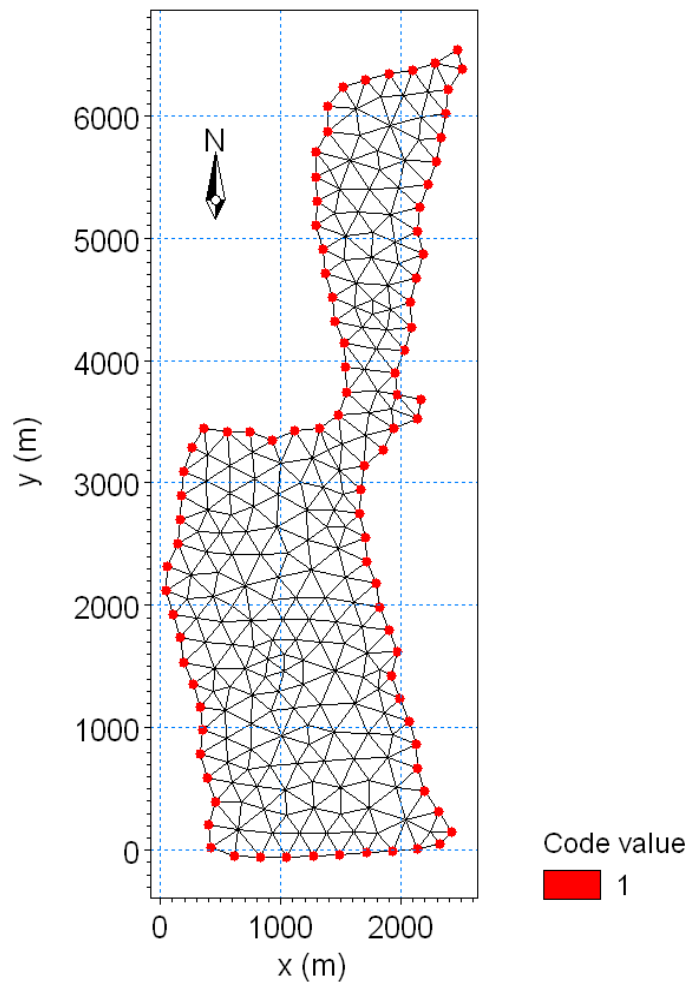
Πίνακας 10 : Συντεταγμένες σημείων που ελήφθησαν από το Google Earth



Σχήμα 25: Αποτύπωση των σημείων της ακτογραμμής του ταμιευτήρα στο πρόγραμμα Autocad

Με βάση τα σημεία αυτά αποτυπώσαμε την ακτογραμμή του ταμιευτήρα στο πρόγραμμα Autocad (Σχήμα 25) και μέσω αυτού υπολογίστηκε το εμβαδόν της επιφάνειας του ταμιευτήρα. Γνωρίζοντας τον όγκο του ταμιευτήρα από την ΔΕΗ και έχοντας τον εμβαδόν της επιφάνειας υπολογίσαμε το μέσο βάθος ροής. Με βάση αυτά τα στοιχεία και του προγράμματος MIKE 3 FM (HD) προέκυψαν τα παρακάτω:

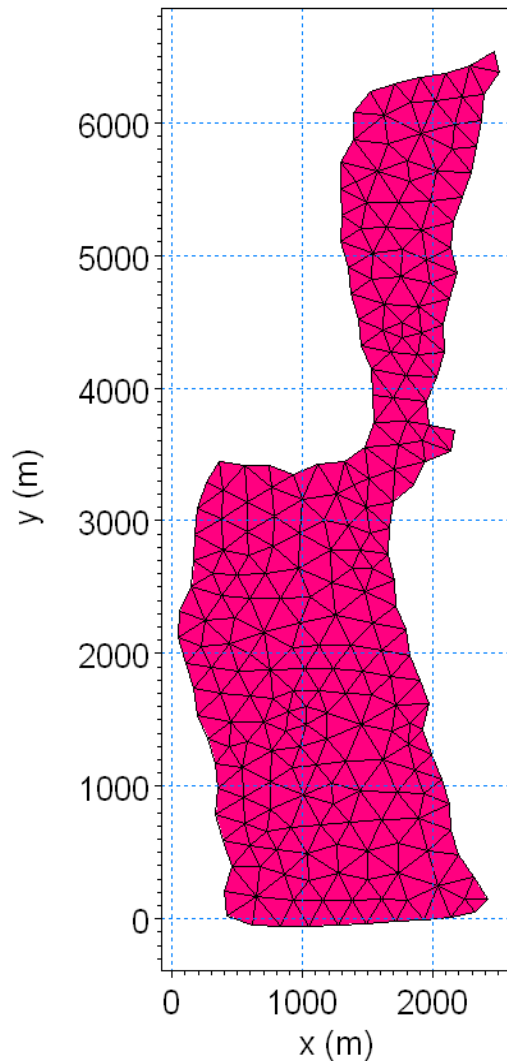
9.3 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΤΟ ΟΠΟΙΟ ΘΑ ΕΠΙΛΥΘΟΥΝ ΟΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΗΣ



Σχήμα 26 : Μη-δομημένο υπολογιστικό πλέγμα για την μελέτη ανεμογενούς ροής που προκύπτει από βόρειο άνεμο με ταχύτητα 10 m/s.

Το υπολογιστικό πλέγμα διαμορφώθηκε με τριγωνικά στοιχεία-κελιά με διαστάσεις τέτοιες ώστε το εμβαδόν του υπολογιστικού κελιού να είναι $A = 30\,000\text{ m}^2$ που αντιστοιχεί σε μέσο μήκος πλευράς ισόπλευρου τριγώνου (υπολογιστικού κελιού) $\Delta x = 245\text{ m}$. Ο αριθμός των υπολογιστικών κελιών είναι $N = 403$. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις έγιναν για πραγματικό χρόνο δράσης του ανέμου ίσο με 5 ώρες (real time) που αντιστοιχεί σε υπολογιστικό χρόνο 30min (computational time).

9.4 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΣΤΡΑΤΟΥ

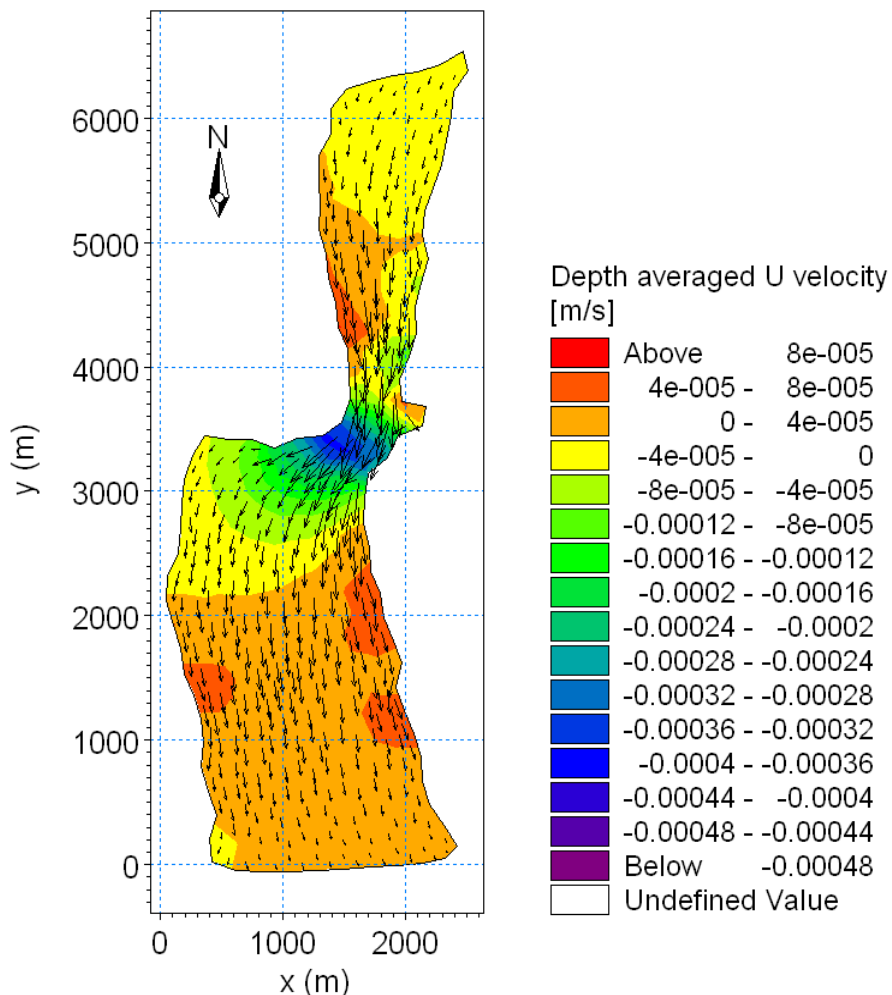


Σχήμα 27: Διάγραμμα βαθυμετρίας

Παρατηρούμε ότι όπως έχει διαμορφωθεί η βαθυμετρία δεν παρουσιάζει χρωματικές διακυμάνσεις, αλλά χαρακτηρίζεται από ένα χρώμα σε όλο της το ανάπτυγμα. Τούτο οφείλεται στο γεγονός ότι εφαρμόστηκε ομοιόμορφο βάθος ροής σε όλο τον ταμιευτήρα με σκοπό να απλοποιηθεί η επίλυση. Συγκεκριμένα, επιλέγει ως μέσο βάθος ροής αυτό που προκύπτει από το λόγο V/A . Όπου V ο όγκος υδάτων (ΔΕΗ, 2011) του ταμιευτήρα και A το εμβαδόν της επιφάνειάς του.

9.5 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο Σχήμα 27 δίδεται ένα στιγμιότυπο που αντιστοιχεί στο πρώτο χρονοβήμα (1/30) όπου φαίνεται το πεδίο ρευμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια του ταμειυτήρα 10 min μετά την έναρξη δράσης του ανέμου.

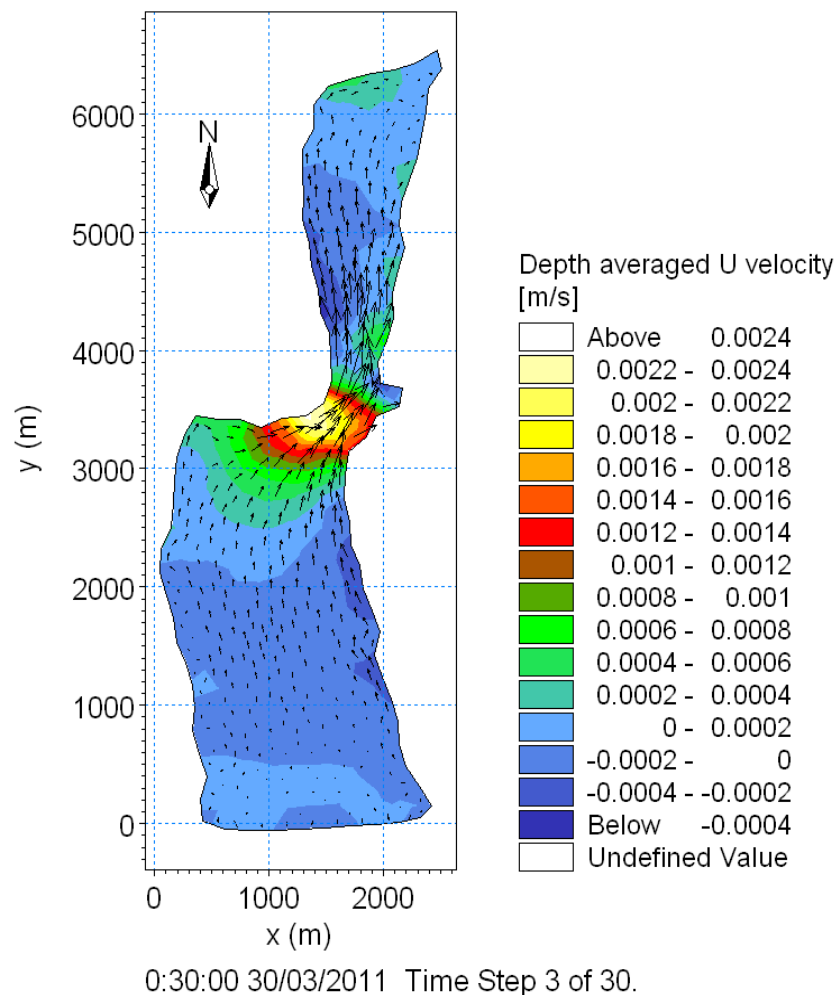


0:10:00 30/03/2011 Time Step 1 of 30.

Σχήμα 28: Στιγμιότυπο 1/30 υπό την δράση Βόρειου ανέμου ταχύτητας 10 m/s

Ο άνεμος σαρώνει την ελεύθερη επιφάνεια διαμορφώνοντας πεδίο ροής που ακολουθεί την διεύθυνση δράσης του ανέμου. Και στη στένωση λαμβάνουμε την μεγαλύτερη ταχύτητα όπως αναμένεται για την περίπτωση ανοικτού αγωγού. Συγκεκριμένα, τα ανεμογενή ρεύματα λαμβάνουν τιμές από 0 έως 8e-005 m/s.

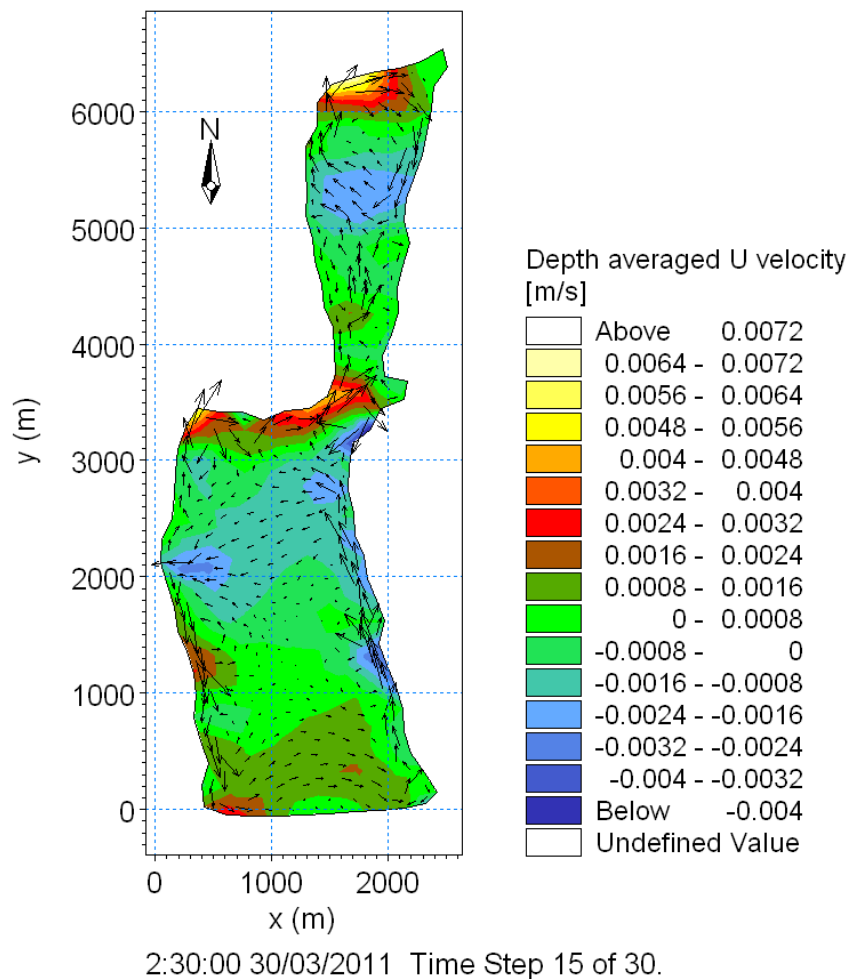
Στο Σχήμα 28 δίδεται ένα στιγμιότυπο που αντιστοιχεί στο τρίτο χρονο-βήμα (3/30) όπου φαίνεται το πεδίο ρευμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια του ταμιευτήρα 30 min μετά την έναρξη δράσης του ανέμου.



Σχήμα 29: Στιγμιότυπο 3/30 υπό την δράση Βόρειου ανέμου ταχύτητας 10 m/s

Παρατηρείται αναστροφή των ρευμάτων λόγω κλίσης της ελεύθερης επιφάνειας. Σε όλη την επιφάνεια του ταμιευτήρα έχουμε αύξηση της ταχύτητας, και στην περίπτωση αυτή οι μέγιστες ταχύτητες παρουσιάζονται στην στένωση. Αυτό οφείλεται στην απλή φυσική γεωμετρία του ταμιευτήρα που ακολουθεί τη φιλοσοφία της ροής σε στένωση.

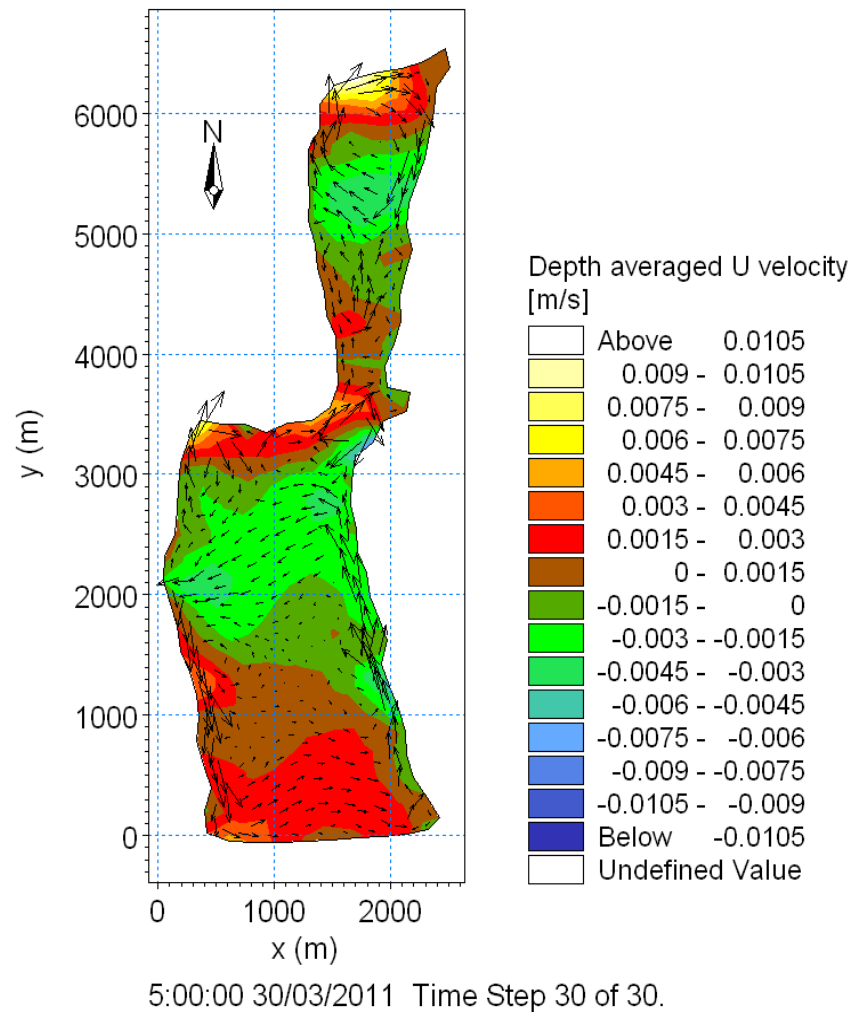
Στο Σχήμα 29 δίδεται ένα στιγμιότυπο που αντιστοιχεί στο δεκατοπέμπτο χρονο-βήμα (15/30) όπου φαίνεται το πεδίο ρευμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια του ταμιευτήρα 2,5 h μετά την έναρξη δράσης του ανέμου.



Σχήμα 30: Στιγμιότυπο 15/30 υπό την δράση Βόρειου ανέμου ταχύτητας 10 m/s

Στο στιγμιότυπο αυτό απεικονίζονται τα ρεύματα 2,5 ώρες από την έναρξη του ανέμου όπου έχει αναπτυχθεί πλήρως η ανεμογενής κυκλοφορία. Το πεδίο ροής στο σχήμα αναπαρίσταται 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 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. Η παρατήρηση αυτή είναι σημαντική γιατί στην περίπτωση που ένας ρύπος εγχυθεί σε κάποια θέση των ανατολικών ακτών αυτός θα κινηθεί απ' το πεδίο ροής προς τα βόρεια του ταμιευτήρα. Συνεπώς, παρατηρείται μονιμότητα στη δομή των ρευμάτων που ακολουθούν τη διεύθυνση του ανέμου στις ανατολικές ακτές του ταμιευτήρα και αντίθετα στις δυτικές.

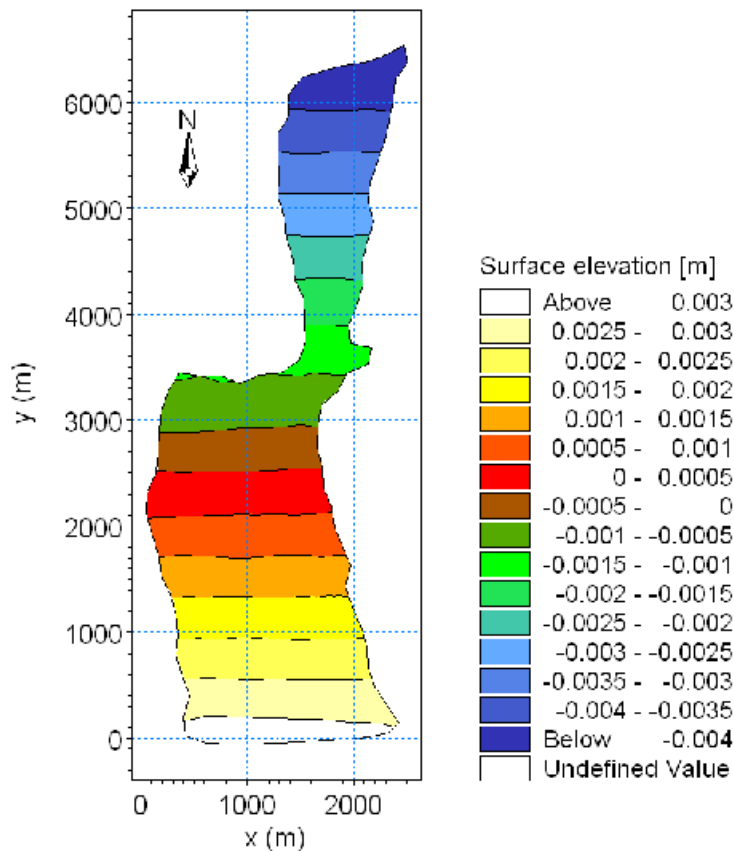
Στο Σχήμα 30 δίδεται ένα στιγμιότυπο που αντιστοιχεί στο τελευταίο χρονοβήμα (30/30) όπου φαίνεται το πεδίο ρευμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια του ταμιευτήρα 5 h μετά την έναρξη δράσης του ανέμου.



Σχήμα 31: Στιγμιότυπο 30/30 υπό την δράση Βόρειου ανέμου ταχύτητας 10 m/s

Τα ρεύματα στο στιγμιότυπο αυτό ακολουθούν την ίδια πορεία όπως και στο προηγούμενο. Διαφορά υπάρχει στη ταχύτητα που έχει μειωθεί σε μέτρο ενώ έχει αυξηθεί η περιοχή που αναπτύσσονται μέγιστες ταχύτητες.

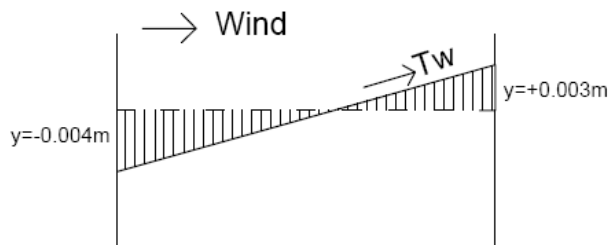
Στο Σχήμα 31 δίδεται η διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας κατά τη δράση Βόρειου ισχυρού ανέμου ταχύτητας 10m/sec



5:00:00 30/03/2011 Time Step 30 of 30.

Σχήμα 32: Διάγραμμα ελεύθερης επιφάνειας

Κατά την διεύθυνση δράσης του ανέμου η ελεύθερη επιφάνεια αποκτά θετική κλίση αυξάνοντας τη στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα. Ιδιαίτερα, στη θέση που βρίσκεται το σώμα του φράγματος παρατηρείται η μέγιστη αύξηση της ελεύθερης επιφάνειας που φτάνει τα 0,003m.

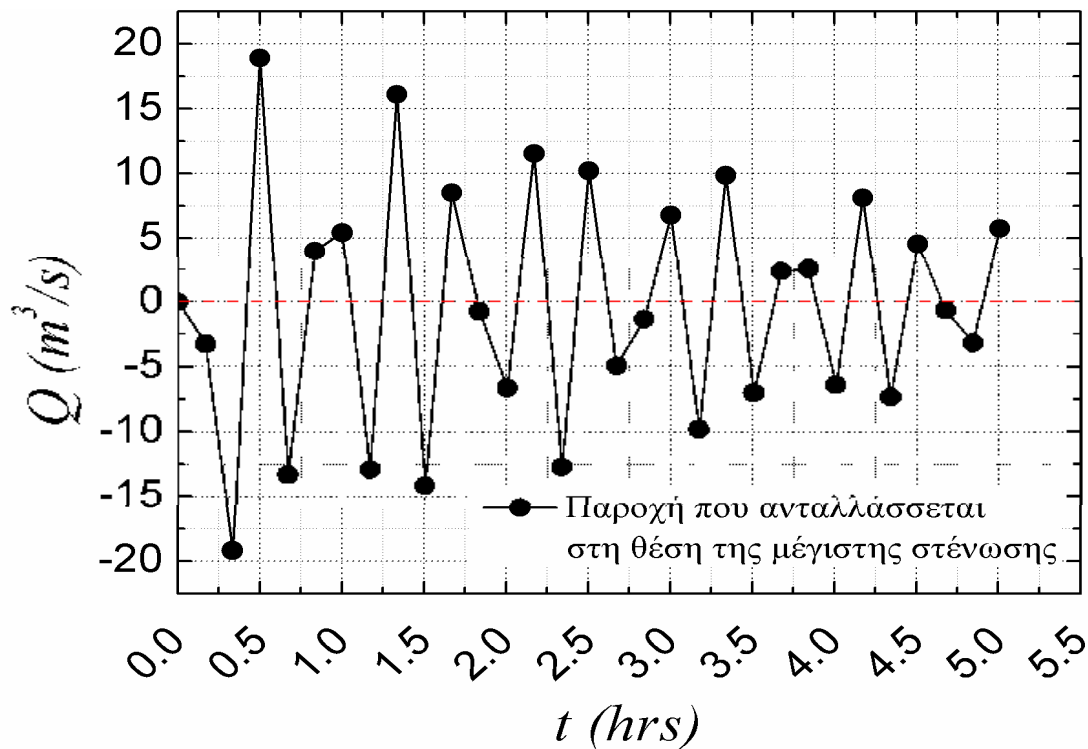


Σχήμα 32: Διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας

Το φαινόμενο αυτό είναι χαρακτηριστικό της ανεμογενούς ροής και ονομάζεται στη διεθνή βιβλιογραφία wind-setup (Σχήμα 32). Η μεταβολή στην ελεύθερη επιφάνεια είναι γραμμική ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζει η αρνητική τιμή (-0.004m) που λαμβάνει

το βάθος ροής στο βόρειο τμήμα του ταμιευτήρα όπου έχουμε την έναρξη δράσης του ανέμου.

Στο Σχήμα 33 δίδεται η παροχή που ανταλλάσσεται στη θέση της μέγιστης στένωσης



Σχήμα 34: Διάγραμμα Παροχής σε συνάρτηση με τον Χρόνο

Το διάγραμμα της παροχής που ανταλλάσσεται στη θέση όπου παρουσιάζεται η μέγιστη στένωση στον ταμιευτήρα της τεχνητής λίμνης Στράτου. Παρατηρούμε ότι καθώς περνάει η ώρα όπου δρα ο άνεμος, συνολικής διάρκειας 5 ωρών, το εύρος της παροχής μειώνεται και τείνει στην τιμή μηδέν. Η μηδενική στάθμη της παροχής (μηδενική ανταλλαγή) δίδεται στο σχήμα ως μια συνεχής κόκκινη γραμμή. Το αποτέλεσμα αυτό είναι απολύτως λογικό με την αναμενόμενη συμπεριφορά της παροχής υπό πραγματικές συνθήκες, καθότι στις λίμνες αναμένεται μηδενική παροχή σε κάθε διατομή σε μόνιμη κατάσταση της ροής. Η αρχική μη μηδενική συμπεριφορά (μέγιστο εύρος +20 έως -20 m³/s) εξηγείται από το γεγονός της μετάβασης από την ηρεμία σε μια μόνιμη κατάσταση της υδροδυναμικής κυκλοφορίας υπό τη σταθερή δράση του ανέμου. Αυτή η μετάβαση της ροής ερμηνεύεται ως transition time λόγω της δράσης του ανέμου.

9.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Υπολογίστηκε το τρισδιάστατο πεδίο επιφανειακών και υποεπιφανειακών ρευμάτων που προκαλούνται από την δράση του ανέμου στον ταμιευτήρα του φράγματος Στράτου.
2. Εκτιμήθηκαν οι θέσεις όπου εμφανίζονται τα ισχυρότερα ανεμογενή ρεύματα με ταχύτητες 0.009-0.0105 m/s, 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. Μελετήθηκε η μέγιστη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού στον ταμιευτήρα και συγκεκριμένα ανάντη του σώματος του φράγματος, όπου λαμβάνει μέγιστη τιμή $H=0.003\text{m}$. Η τιμή αυτή είναι καθοριστική για την περαιτέρω μελέτη της αντοχής των υλικών που μπορεί να φθαρούν λόγω της μεταβολής της στάθμης ανάντη της παρειάς του φράγματος.
4. 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.
5. Αποκτήθηκε γενικότερη εμπειρία στην εφαρμογή τρισδιάστατων αριθμητικών κωδικών για την προσομοίωση της ροής υπό φυσικές φορτίσεις, όπως είναι ο άνεμος και η θερμική στρωμάτωση (αν και στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε ρ=σταθερό καθ' ύψος της υδάτινης στήλης).
6. Αποκτήθηκε εμπειρία σε χρήση σχεδιαστικού λογισμικού μέσω της αξιοποίησης του για τον υπολογισμό του εμβαδού της επιφάνειας των υδάτων του ταμιευτήρα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

1. Δ.-Π. Ν. Κοντονή, 1995-1999. “Υπολογισμός Κατασκευών με Η/Υ”, Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής, Τ.Ε.Ι. Πάτρας, Πάτρα.
2. Δ.-Π. Ν. Κοντονή, 1985-2011. Επιστημονικά- Εκπαιδευτικά Προγράμματα Η/Υ ειδικότητας Πολιτικού Μηχανικού, Πάτρα.
3. Δ.-Π. Ν. Κοντονή, 1998-2011. “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.
4. Γκανούλη, Ι.Γ., 1984. “Υδραυλική Περιβάλλοντος”, Θεσσαλονίκη, σ.σ. 73-79 και 157-175.
5. Δημητρίου, Ι., 1992. “Περιβαλλοντική Υδραυλική”, σ.σ. 185-219.
6. Δρακόπουλος Π., Λασκαράτος Α., 1993. Ημήμερη βροκλινικά φαινόμενα στον Πατραϊκό και Κορινθιακό κόλπο. Πρακτικά 4^{ου} Πανελληνίου Συμποσίου Ωκεανογραφίας και Αλιείας, σελ. 164-167.
7. Θεωδόρου, Α.Ι., 2000, “Ωκεανογραφία, εισαγωγή στο θαλάσσιο περιβάλλον”, Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, σ.σ. 251-262.
8. Θεωδώρα. Ι. Α., 2002. Μηχανική των ωκεανών.
9. Τσόγκα, Ε.Χ., Τσόγκας, Χ.Ε., 2009, “Υδροδυναμικά Έργα Φράγματα”, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα.
10. Φουρνιώτης, Ν.Θ., 2009. “Τρισδιάστατη Αριθμητική Προσομοίωση της Υδροδυναμικής Κυκλοφορίας του Πατραϊκού Κόλπου, με Έμφαση στον Υπολογισμό Ρευμάτων στην Παράκτια Ζώνη του Λιμένα Πατρών”, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, σ.σ. 1-323.
11. Χορς, Γ.Μ., 1999. “Υδροδυναμική Κόλπων και Ταμειυτήρων”, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Ξενόγλωσση

1. Baines, D.W. and Knapp, D.J., 1965. “Wind Driven Water Currents”, Journal of the Hydraulic Division ASCE, pp. 205-221.
2. Bye, J.A.T., 1965. “Wind-Driven Circulation in Unstratified Lakes”, Limnology and Oceanography, pp. 451-458
3. DHI Software, 2007. “MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM Hydrodynamic and Transport Module”, Scientific Documentation.
4. DHI Software, 2007. MIKE 3 FLOW MODEL FM 2007, “Hydrodynamic Module-User Guide”.
5. Fourniotis, N.Th, Dimas, A.A. and Demetracopoulos, A.C., 2006. “Spatial development of turbulent open channel flow over bottom with multiple dunes”, Proc. Intl. Conf. River Flow 2006, Lisbon, Portugal, September 2006.
6. Ligget, J.A. and Hadjithodorou, C., 1969. “Circulation in Shallow Homogeneous Lakes”, Journal of the Hydraulic Division ASCE, HY2: pp. 609-620.
7. Nezu, I. and Nakagawa, H., 1993. “Turbulence in Open-Channel Flows”, IAHR Monograph, A.A. Balkema, Rotterdam.

8. Nezu I. and Rodi W. (1985), "Experimental study on secondary currents in open channel flow", Proc. of 21st IAHR Congress, Melbourne, vol. 2: 115-119.
9. Rameshwaran P., Naden P.S. (2004), "Three-dimensional modelling of free surface variation in a meandering channel", Journal of Hydraulic Research, vol. 42(6), p.p. 603-615.
10. Tsuruya, H., Nakano, S., Kato, H., 1985. "Experimental study of wind driven current in wind-wave tank – effect of return flow on wind driven flow", The Ocean Surface, pp. 425-430.

Διαδίκτυο

1. <http://nemertes.lis.upatras.gr/dspace/bitstream/123456789/547/1/%CE%91%CF%81%CE%B9%CE%B8%CE%BC%CE%B7%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE%20%CF%80%CF%81%CE%BF%CF%83%CE%BF%CE%BC%CE%BF%CE%AF%CF%89%CF%83%CE%B7%20%CF%84%CE%B7%CF%82%20%CE%BA%CF%85%CE%BA%CE%BB%CE%BF%CF%86%CE%BF%CF%81%CE%AF%CE%B1%CF%82%20%CF%84%CF%89%CE%BD%20%CF%85%CE%B4%CE%AC%CF%84%CF%89%CE%BD%20%CF%83%CF%84%CE%BF%CE%BD%20%CE%A0%CE%B1%CF%84%CF%81%CE%B1%CF%8A%CE%BA%CF%8C%20%CE%BA%CF%8C%CE%BB%CF%80%CE%BF.pdf>
2. itia.ntua.gr/nikos/arx_int/CDfrag/Kefalaia/Teliko2.doc
3. <http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teelar/EKDILWSEIS/damConference/eisigisis/2.5.pdf>
4. http://www.aixmes.com/index.php?option=com_content&task=view&id=1011&Itemid=55
5. <http://sfrang.com/historia/selida626.htm>
6. <http://www.eemf.gr/>
7. <http://www.citypress.gr/index.html?action=article&article=36436>
8. <http://www.dei.gr/Documents/imeranerou.pdf>
9. <http://www.hellenica.de/Griechenland/Geo/GR/YdroilektrikoFragmaStratou.html>
10. <http://www.mikebydhi.com/Products/CoastAndSea/MIKE3/Hydrodynamics.aspx>