

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ
ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ
ΑΛΜΗΣ
ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟΥ
ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΤΣΑΝΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΚΑΡΑΦΥΛΛΗΣ ΙΑΣΩΝ

ΠΑΡΑΝΥΧΙΑΝΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΜΑΘΙΟΥΔΑΚΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ 2011

Στους γονείς μου και στον αδερφό μου

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Τσάνη που με εμπιστεύτηκε να κάνω τη διπλωματική εργασία μαζί του αλλά και για την βοήθεια που μου προσέφερε. Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω όλους τους βοηθούς του εργαστηρίου που με καθοδήγησαν και μου μετέφεραν την εμπειρία τους και κυρίως το Τσιτσιλώνη Σωτήρη , τη Βροχίδου Αγγελική και το Γρυλλάκη Μανώλη. Τελος θα ήθελα να ευχαριστήσω τα άλλα δύο μέλη της τριμελούς επιτροπής Καραφύλλη Ιάσωνα και Παρανυχιανακη Νικόλαο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	IX
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	II
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	V
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	VI
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	VII
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ	2
1.2 Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	4
2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΗ ΤΗΣ ΑΛΜΗΣ	7
2.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ	7
2.2 ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	16
2.3 ΔΙΑΘΕΣΗ ΤΗΣ ΑΛΜΗΣ	18
3. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	19
3.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ	19
3.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΑΠΟ ΜΟΝΑΔΕΣ ΣΤΟ ΚΟΣΜΟ	22
4. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΡΑΙΩΣΗΣ	29
4.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ	29
4.2 ΒΑΣΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΩΣΤΙΚΩΝ ΦΛΕΒΩΝ	36
5. ΕΜΠΕΙΡΟ ΣΥΣΤΥΜΑ CORMIX (EXPERT SYSTEM)	45
5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ CORMIX	45
5.2 ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ – ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ	46
6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	53
6.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ 1 – ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΕΚΡΟΗ ΜΟΝΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ	53

6.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ 2 – ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΕΚΡΟΗ	60
6.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ 3 – ΜΟΝΑΔΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΛΑΡΝΑΚΑΣ	66
6.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ 4 – ΜΟΝΑΔΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΛΕΜΕΣΟΥ	74
6.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ 5 – ΔΗΜΟΣ ΚΡΑΝΙΔΙΟΥ ΝΟΜΟΥ ΑΡΓΟΛΙΔΑΣ	81
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	88
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	90

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

g'	: Ελαττούμενη επιτάχυνση της βαρύτητας
F_D	: πυκνομετρικός αριθμός Froude
u_0	: ταχύτητα διάθεσης διάθεσης άλμης
D	: διάμετρος του αγωγού διάθεσης
ρ_α	: πυκνότητα της θάλασσας
ρ_0	: πυκνότητα της άλμης
g	: επιτάχυνση της βαρύτητας
$^{\circ}\text{C}$	: κλίμακα βαθμών Κελσίου
ε	: κλίση στρωματοποίησης
$\text{Str\#}$	: παράμετρος στρωματοποίησης
D_p	: διάμετρος του πλουμίου
y	: το βάθος του πλουμίου
ρ_s	: η πυκνότητα του περιβάλλοντος στην επιφάνεια
F_b	: δύναμη λόγω άνωσης
F_w	: το βάρος του όγκου του ρευστού της φλέβας
Δt	: χρονικό διάστημα παροχέτευσης ανωστικής φλέβας
Q_0	: παροχή ανωστικής φλέβας
α_0	: επιφάνεια στομίου εκροής
Re_0	: αριθμός Reynolds
l_Q	: απόσταση από την πηγή ανωστικής φλέβας
M_0	: ορμή
l_M	: κλίμακα μήκους δέσμης ροής - πλουμίου

- Ri_0 : αριθμός Richardson
- S : μέση διάλυση στη διατομή
- b : πλάτος της φλέβας άλμης
- g_0 : ανωστική επιτάχυνση στη θέση διάθεσης της άλμης
- Ha_0 : βάθος νερού θάλασσας στη θέση διάθεσης της άλμης
- H_0 : ύψος του στομίου θέση διάθεσης της άλμης
- x_i : οριζόντια θέση του σημείου πρόσκρουσης στον πυθμένα
- x, z : οριζόντια και κάθετη συντεταγμένη
- x_{max}, z_{max} : οριζόντια και κάθετη θέση του μέγιστου ύψους της φλέβας
- z_{max} : μέγιστο ύψος του επάνω ορίου της φλέβας
- θ_β : γωνία κλίσης πυθμένα
- θ_0 : γωνία κλίσης του στομίου διάθεσης της άλμης

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Αριθμός Manning's n συναρτήσει της τραχύτητας	49
Πίνακας 2. Δεδομένα υποθετικής υποβρύχιας εκροής άλμης	53
Πίνακας 3. Κλίμακες μήκους CORMIX 1 για το πρόβλημα.	55
Πίνακας 4. Δεδομένα επιφανειακής εκροής άλμης	60
Πίνακας 5. Δεδομένα υποβρύχιας εκροής άλμης στη Λάρνακα	66
Πίνακας 6. Κλίμακες μήκους εκροής εργοστασίου αφαλάτωσης στη Λάρνακα	68
Πίνακας 7. Δεδομένα υποβρύχιας εκροής άλμης στη Λεμεσό	74
Πίνακας 8. Κλίμακες μήκους υποβρύχιας εκροής άλμης στη Λεμεσό	76
Πίνακας 9. Δεδομένα υποβρύχιας εκροής άλμης στο Κρανίδι Αργολίδος	81
Πίνακας 10. Κλίμακες μήκους υποβρύχιας εκροής άλμης στο Κρανίδι Αργολίδος	83

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Ζώνες υφαλμύρησης στην Ελλάδα	4
Εικόνα 2. Πολυβάθμια εξάτμιση	8
Εικόνα 3. Πολυβάθμια εκτόνωση	9
Εικόνα 4. Εξάτμιση με επανασυμπύεση ατμών	10
Εικόνα 5. Θερμική συμπίεση ατμών	11
Εικόνα 6. Ηλεκτροδιάλυση	11
Εικόνα 7. Αρχή λειτουργίας όσμωσης	12
Εικόνα 8. Δομή Στοιχείου Μεμβρανών Αντίστροφης Όσμωσης	13
Εικόνα 9. Σχηματική αναπαράσταση της δομής λειτουργίας μονάδος αντίστροφης όσμωσης.	14
Εικόνα 10. Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας συσκευής αντίστροφης όσμωσης	14
Εικόνα 11. Ποσοστά κάθε τεχνολογίας στο κόσμο	16
Εικόνα 12. Διάγραμμα ροής αφαλάτωσης θαλάσσιου νερού Λάρνακας	17
Εικόνα 13. Σωλήνα εκροής	20
Εικόνα 14. Δέσμη ροής εξερχόμενη από υποβρύχια έξοδο	30
Εικόνα 15. Ρυπαντής εξερχόμενος από υποβρύχια έξοδο	31
Εικόνα 16. Κοντινή και ενδιάμεση ζώνης ανάμιξης	32
Εικόνα 17. Μετάβαση από σταθερό σε μη σταθερό κοντινό πεδίο	34
Εικόνα 18. Στρωματοποίηση λίμνης	35
Εικόνα 19. Ανωστική φλέβα αρνητικής και θετικής άνωσης	37
Εικόνα 20. Σχηματική απεικόνιση της πλευρικής όψης της φλέβας της άλμης αρνητικής άνωσης (negatively buoyant jet)	41
Εικόνα 21. Πρώτη καρτέλα cormix – περιγραφή σχεδίου	46
Εικόνα 22. Δεύτερη καρτέλα cormix – γραφικό περιβάλλον CORMIX δεδομένα μολυντή	48
Εικόνα 23. Τρίτη καρτέλα cormix- γραφικό περιβάλλον CORMIX δεδομένα περιβάλλοντος	49
Εικόνα 24. Γραφική αναπαράσταση γωνίας θ και σ cormix	51
Εικόνα 25. Τέταρτη καρτέλα cormix - γραφικό περιβάλλον CORMIX δεδομένα εκροής	51

Εικόνα 26. Δενδρόγραμμα κατηγοριοποίησης της εκροής του προβλήματος- εφαρμογή 1η	55
Εικόνα 27. Διάγραμμα συγκέντρωσης του πλουμίου σε συνάρτηση με την απόσταση από το σημείο εκροής- εφαρμογή 1 ^η	56
Εικόνα 28. Τρισδιάστατη απεικόνιση του πλουμίου για τη περιοχή ενδιαφέροντος	57
Εικόνα 29. Απεικόνιση διαχυτήρα ενός στομίου- εφαρμογή 1 ^η	57
Εικόνα 30. Εφαρμογή 1η με ταχύτητα περιβάλλοντος (ρεύμα) 0,6 m/s	58
Εικόνα 31. Εφαρμογή 1η με διάμετρο του ακροφυσίου από 0,65 m σε 0,35 m.	59
Εικόνα 32. Δενδρόγραμμα κατηγοριοποίησης της εκροής του προβλήματος- εφαρμογή 2 ^η	61
Εικόνα 33. Τρισδιάστατη απεικόνιση του πλουμίου για τη περιοχή ενδιαφέροντος- εφαρμογή 2 ^η	62
Εικόνα 34 : Διάγραμμα συγκέντρωσης του πλουμίου σε συνάρτηση με την απόσταση από το σημείο εκροής. - εφαρμογή 2 ^η	63
Εικόνα 35. Εφαρμογή 2η με ταχύτητα περιβάλλοντος (ρεύμα) 0,7 m/s	64
Εικόνα 36. Εφαρμογή 2η με μικρότερη διάμετρο του ακροφυσίου.	65
Εικόνα 37. Δενδρόγραμμα κατηγοριοποίησης της εκροής του προβλήματος- εφαρμογή 3 ^η	68
Εικόνα 38. Τρισδιάστατη απεικόνιση του πλουμίου για τη περιοχή ενδιαφέροντος- εφαρμογή 3 ^η	69
Εικόνα 39 : Διάγραμμα συγκέντρωσης του πλουμίου σε συνάρτηση με την απόσταση από το σημείο εκροής. - εφαρμογή 3 ^η	70
Εικόνα 40. Απεικόνιση διαχυτήρα ενός στομίου- εφαρμογή 3 ^η	71
Εικόνα 41. Εφαρμογή 3η με το ακροφύσιο 4 m από τον πυθμένα, γωνία θ 45° και διάμετρο ακροφυσίου 0,65 m.	72
Εικόνα 42. εφαρμογή 3η με ταχύτητα περιβάλλοντος σε 0,7 m/s	73
Εικόνα 43. Δενδρόγραμμα κατηγοριοποίησης της εκροής του προβλήματος- εφαρμογή 4η. Η κατηγοριοποίηση είναι NH2.	76
Εικόνα 44. Τρισδιάστατη απεικόνιση του πλουμίου για την περιοχή ενδιαφέροντος- εφαρμογή 4 ^η	77
Εικόνα 45. Εφαρμογή 4η με ακροφύσιο στα 4 m	78
Εικόνα 46 : Διάγραμμα συγκέντρωσης του πλουμίου σε συνάρτηση με την απόσταση από το σημείο εκροής. - εφαρμογή 4 ^η	79

Εικόνα 47. Απεικόνιση διαχυτήρα ενός στομίου- εφαρμογή 4 ^η	79
Εικόνα 48 .: Εφαρμογή 4η με τη διάμετρο του ακροφυσίου από 1 m σε 0,6 m	80
Εικόνα 49 : Δενδρόγραμμα κατηγοριοποίησης της εκροής του προβλήματος- εφαρμογή 5η .Η κατηγοριοποίηση είναι NH5	83
Εικόνα 50. Τρισδιάστατη απεικόνιση του πλουμίου για τη περιοχή ενδιαφέροντος- εφαρμογή 5 ^η	84
Εικόνα 51 : Διάγραμμα συγκέντρωσης του πλουμίου σε συνάρτηση με την απόσταση από το σημείο εκροής. - εφαρμογή 5 ^η	85
Εικόνα 52. Απεικόνιση διαχυτήρα ενός στομίου- εφαρμογή 5 ^η	86
Εικόνα 53. Τρισδιάστατη απεικόνιση του πλουμίου για τη περιοχή ενδιαφέροντος με $\theta=90^\circ$ - εφαρμογή 5η	87
Εικόνα 54. Διάγραμμα συγκέντρωσης του πλουμίου σε συνάρτηση με την απόσταση από το σημείο εκροής με $\theta= 90^\circ$ - εφαρμογή 5 ^η	87

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική ασχολείται με διάφορες επιπτώσεις που έχει η αφαλάτωση στο θαλάσσιο περιβάλλον και κυρίως από την απόρριψη της άλμης. Η εκτίμηση εξάγεται από το έμπειρο σύστημα cormix.

Στο κεφάλαιο 2 περιλαμβάνονται στοιχεία για την ιστορία της αφαλάτωσης και την αφαλάτωση στην Ελλάδα.

Στο κεφάλαιο 3 αναφέρονται περιληπτικά στοιχεία για όλες τις μεθόδους αφαλάτωσης, την παραγωγική διαδικασία μιας μονάδας αφαλάτωσης με έμφαση στην αντίστροφη όσμωση και τεχνικές με τις οποίες μπορεί να διατεθεί η άλμη που παράγεται με κύριο αποδέκτη τη θάλασσα.

Στο κεφάλαιο 4 εξετάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τα εργοστάσια αφαλάτωσης γενικά αλλά και από την απόρριψη της άλμης στη θάλασσα. Επίσης αναφέρονται παραδείγματα από υπάρχουσες μονάδες σε όλο το κόσμο, την τεχνολογία τους με ιστορικά στοιχεία αλλά και πώς η κάθε μία από αυτές διαθέτει τα αλμόλοιπα στη θάλασσα.

Στο κεφάλαιο 5 αναλύονται τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τις βασικές διάλυσης. Γίνεται αναλυτική μαθηματική περιγραφή πώς λειτουργούν οι αγνωστικές φλέβες.

Στο κεφάλαιο 6 δίνονται στοιχεία για το έμπειρο σύστημα cormix που χρησιμοποιείται στη παρούσα διπλωματική για τη διάθεση της άλμης. Γίνεται επίσης αναλυτική περιγραφή όλων των σταδίων λειτουργίας του cormix με τις καρτέλες του.

Στο κεφάλαιο 7 γίνεται η εφαρμογή του προγράμματος με προσπάθεια εκτίμησης των συνεπειών της απόρριψης. Συγκεκριμένα μελετώνται οι περιπτώσεις : α) υποθετικής περίπτωσης μονού υποβρύχιου ακροφυσίου και β) επιφανειακής εκροής. Επίσης μελετώνται οι περιπτώσεις υπάρχουσών ή μελλοντικών μονάδων αφαλάτωσης στη Λάρνακα, στη Λεμεσό και στο Κρανίδι Αργολίδος.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να μελετηθεί η διασπορά της άλμης από μονάδα αφαλάτωσης και να προτείνει διάταξη, γεωμετρία και τοποθέτηση του διαχυτήρα. Η αφαλάτωση είναι μια όλο και περισσότερο εφαρμοζόμενη τεχνολογία που εξελίσσεται συνεχώς και μάλιστα τα τελευταία χρόνια ραγδαία. Θα γίνει μια προσπάθεια να μελετηθούν οι επιπτώσεις που έχει στο περιβάλλον. Αρχικά αναλύονται διεξοδικά η υπάρχουσα κατάσταση παγκοσμίως, οι τεχνολογίες και ποιές μπορεί να είναι οι επιπτώσεις μιας μονάδας στο περιβάλλον. Δίνεται έμφαση στην εκροή άλμης και εξετάζονται τα δεδομένα σε έμπειρο σύστημα cornix για υποβρύχιο μονό διαχυτήρα και μία περίπτωση επιφανειακής εκροής. Γίνεται επίσης εκτίμηση για το πώς μια μονάδα πρέπει να διαθέσει την άλμη της ώστε να έχει τις λιγότερες πιθανές συνέπειες στο περιβάλλον. Δίνονται επίσης στοιχεία για το πώς λειτουργεί μια δέσμη ροής σαν ανωστική φλέβα και οι βασικές αρχές των μοντέλων αραίωσης. Ακόμη γίνεται εκτίμηση της αναγκαιότητας του συστήματος cornix και των τρόπων βελτίωσης του.

1.1. ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

Η αφαλάτωση είναι μια διαδικασία ανάκτησης πόσιμου νερού από θαλασσινό, υφάλμυρο ή χαμηλής ποιότητας νερό, μέσω διεργασιών αφαίρεσης αλάτων από τα αλατούχα ύδατα.

Η διαδικασία αφαλάτωσης μέσω εξάτμισης ήταν γνωστή στην αρχαία Ελλάδα οι ναυτικοί της οποίας χρησιμοποιούσαν στα μεγάλα ταξίδια τους μικρές συσκευές απόσταξης θαλασσινού νερού, ενώ το 350 π.χ. είχε μελετηθεί πειραματικά από τον Αριστοτέλη. Τον 16ο αιώνα οι Ευρωπαίοι Θαλασσοπόροι μεταφέρουν στα πλοία τους, μονάδες αφαλάτωσης οι οποίες επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν μόνο σε περίπτωση ανάγκης.

Το 1850 ο Αμερικανός μηχανικός Norbert Rillieux αναπτύσσει μεθόδους απόσταξης της ζάχαρης που ελαττώνουν τις απαιτήσεις ενέργειας κατά 80%, οι οποίες στα τέλη του 19ου αιώνα αρχίζουν να εφαρμόζονται και στην αφαλάτωση θαλασσινού νερού. Το 1930 ξεκίνησε στη Σοβιετική Ένωση έρευνα για τη ηλιακή απόσταξη με εφαρμογή στην αφαλάτωση. Το 1950 η Αμερικανική κυβέρνηση δημιουργεί ειδική υπηρεσία (OSW-Office of Saline Water) ενώ αρχίζουν οι πρώτες σύγχρονες εφαρμογές θερμικής αφαλάτωσης σε χώρες της Μέσης Ανατολής.

Το 1960 ξεκινούν στο πανεπιστήμιο UCLA της Καλιφόρνια τα πρώτα πειράματα στην Αντίστροφη Όσμωση με την κατασκευή των πρώτων μεμβρανών από τους ερευνητές, Sydney Loeb και Shrinivasa Sourirajan. Το 1964 η Σοβιετική Ένωση δημιουργεί τον πυρηνικό αντιδραστήρα BN-350 όπου το 60% της ενέργειας του χρησιμοποιείται για μονάδα αφαλάτωσης παράγοντας 120.000 m³/μέρα για 30 χρόνια. Αυτή η μονάδα αποτελούσε παγκόσμιο πρότυπο για πολλά χρόνια και είναι η πρώτη μονάδα που δεν χρειαζόταν εξωτερική παροχή ενέργειας. Σήμερα που η πυρηνική ενέργεια μπορεί να θεωρηθεί παρωχημένη, τα συμπεράσματα από αυτή τη μονάδα αφαλάτωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μελλοντικές μονάδες αφαλάτωσης που είναι αυτόνομες ενεργειακά, όπως μονάδες που χρησιμοποιούν ηλιακή ή αιολική ενέργεια. Το 1965 κατασκευάζεται η πρώτη πειραματική μονάδα αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού με την μέθοδο της Αντίστροφης Όσμωσης.

Στα τέλη της δεκαετίας του '70 ο ερευνητής John Cadotte συνεργάτης του America's Midwest Research Institute και της Film Tec Corporation εφευρίσκει μια εξαιρετικά βελτιωμένη μεμβράνη η χρήση της οποίας γενικεύεται τα επόμενα χρόνια. Την

περίοδο 1990-2003 πραγματοποιείται σημαντική τεχνολογική πρόοδος στην αντίστροφη όσμωση με αποτέλεσμα τη βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας, της ποιότητας του νερού και κυρίως τη μείωση του κόστους αφαλάτωσης (κατά 3 φορές).

Το 2006 σε μελέτη που δημοσιεύθηκε στο περιοδικό Science γνωστοποιήθηκε η επιτυχής κατασκευή νανοσωλήνων άνθρακα (carbon-nanotube membrane) που μειώνουν το κόστος παραγωγής κατά 3-4 φορές, λόγω της πολύ χαμηλότερης πίεσης που απαιτείται. Η μέθοδος βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο και σύμφωνα με εκτιμήσεις θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανική κλίμακα τα επόμενα 6 με 8 χρόνια [Wikipedia.org].

1.2 Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Στην Ελλάδα οι πρώτες προσπάθειες στον τομέα της αφαλάτωσης έγιναν στα τέλη της 10ετίας του 60 και αφορούσαν μικρές πειραματικές μονάδες ηλιακής απόσταξης. Τα επόμενα χρόνια δημιουργήθηκαν εγκαταστάσεις ηλιακής απόσταξης για ύδρευση στα νησιά Νίσυρο, Κίμωλο, Κεφαλονιά, Ιθάκη, Πάτμο, Καστελόριζο, Σύμη και Αίγινα αλλά οι περισσότερες εγκαταλείφθηκαν κυρίως λόγω προβλημάτων συντήρησης ή λειτουργίας.

Η πιο αξιόλογη και καινοτόμος εφαρμογή ήταν αυτή της Πάτμου με επιφάνεια εξάτμισης 8,665 m² και μέση παραγωγική ικανότητα 25 m³/ ημέρα. Μετά το 1980 η ανάπτυξη εφαρμογών αφαλάτωσης για παραγωγή νερού ύδρευσης στηρίχθηκε σχεδόν αποκλειστικά στην τεχνολογία αντίστροφης όσμωσης η οποία κατέστη αποδοτικότερη και πλέον συμφέρουσα για τις Ελληνικές συνθήκες. Αξιόλογη πρόοδος όμως σημειώνεται μετά το 1990 λόγω κυρίως της αύξησης των αναγκών ύδρευσης στα άνυδρα νησιά που προκλήθηκε από την αυξημένη τουριστική δραστηριότητα. Το 2008 η συνολική κατανάλωση των νησιών του Αιγαίου ήταν περίπου 166 εκ. m³ ετησίως που καλύπτονταν κατά 82,6% με υπόγεια ύδατα, κατά 4,4% με ταμιευτήρες, κατά 4,1% με αφαλάτωση και κατά 1,4% με μεταφορά νερού από άλλες περιοχές, ενώ το συνολικό ετήσιο έλλειμμα που δεν καλύπτονταν ήταν περίπου 20 εκ. m³.

Σήμερα λειτουργούν στη χώρα μας 50 μονάδες αφαλάτωσης που εξυπηρετούν την ύδρευση δήμων και κοινοτήτων με συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα αφαλάτωσης περίπου 35 χιλιάδες m³/ημέρα, ενώ υπάρχουν και αρκετές εκατοντάδες μικρότερες μονάδες ιδιωτικής χρήσης (ξενοδοχεία, βιομηχανίες, κατοικίες, κ.τ.λ.). Η

συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού υπερβαίνει τα 50 χιλ. m³/ημέρα και υφάλμυρου τα 100 χιλ. m³/ημέρα. Οι σημαντικότερες μονάδες αφαλάτωσης βρίσκονται στη Σύρο, τη Μύκονο και στη Χίο.

Η χώρα μας παρά την αφθονία ανανεώσιμων υδάτινων πόρων (782 m³ πόσιμου νερού ανά κάτοικο ετησίως, έναντι 548 της Γαλλίας, 460 της Γερμανίας, 284 της Ιρλανδίας και 50 της Μάλτας) αντιμετωπίζει σημαντικά προβλήματα λόγω της γεωγραφικής κατανομής του υδατικού δυναμικού (συγκέντρωση στα δυτικά και βόρεια της χώρας), της ανορθολογικής διαχείρισης και των άνυδρων νησιών της.



Εικόνα 1. Ζώνες υφαλμύρωσης στην Ελλάδα [geo.auth.gr]

Η υπερβολική χρήση άριστης ποιότητας πόσιμου νερού προερχόμενου από γεωτρήσεις, για άρδευση αποτελεί κατασπατάληση και υπερεκμετάλλευση πολύτιμων και δύσκολα ανανεώσιμων πόρων. Σύμφωνα με εκτιμήσεις λειτουργούν στη χώρα μας περίπου 300.000 γεωτρήσεις (35-40% των οποίων παράνομες) αριθμός υπερβολικός για τις δυνατότητες των υπεδαφικών υδροφορέων (>31% για το σύνολο της χώρας, +320% στη Θεσσαλία, +260% στην Αττική, +200% στην Πελοπόννησο και τα νησιά του Αιγαίου, +20% στην Κεντρική και +30% στη Δυτική Μακεδονία). Η ανεξέλεγκτη εκμετάλλευση έχει σαν συνέπεια την μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και κυρίως την υφαλμύρωση τεράστιων παραθαλάσσιων εκτάσεων σε επίπεδα επικίνδυνα όχι μόνο για πόση αλλά και για γεωργικές χρήσεις. Εκτιμάται ότι η υφαλμύρωση υπερβαίνει τα 2.000.000 στρέμματα γεωργικής γης με οξυμμένα προβλήματα σε πολλές παράκτιες περιοχές του Αιγαίου.

Εκτός από την υφαλμύρωση σημαντικά προβλήματα ποιότητας του πόσιμου νερού δημιουργεί η ρύπανση των υπόγειων υδάτων με νιτρικά και ο ευτροφισμός

(υπέρμετρη αύξηση υδρόβιων φωτοσυνθετικών οργανισμών) στα επιφανειακά ύδατα.

Με τη συνεχιζόμενη υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδροφορέων, τις αρνητικές επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών (μείωση βροχοπτώσεων, μεγαλύτερη ένταση-μικρότερη διάρκεια, κ.τ.λ.) οι μελλοντικές ανάγκες σε πόσιμο νερό ίσως να είναι πολύ μεγαλύτερες. Το πρόβλημα αναμένεται να οξυνθεί τα επόμενα χρόνια διότι με την υπεράντληση των τελευταίων δεκαετιών η συντήρηση των υδροφορέων σε ανεκτά επίπεδα θα απαιτούσε την παύση λειτουργίας των γεωτρήσεων για 3-5 συνεχόμενα χρόνια κάθε 10ετία, ενώ η αποκατάσταση ήδη υφάλμυρων υδροφορέων πολύ περισσότερα χρόνια (αφού μία ελάχιστη ποσότητα θαλασσινού νερού, της τάξης 1-2% μέσα στο γλυκό νερό, το καθιστά μη πόσιμο).

Σε πρώτη φάση η αφαλάτωση θα έπρεπε να εξετασθεί ως η μόνη βιώσιμη λύση που θα υποκαθιστούσε τη μεταφορά νερού στα άνυδρα νησιά. Το 2008 εκτιμάται ότι μεταφέρθηκαν περίπου 1.600.000 m³ με μέσο κόστος μεταφοράς 8,28 ευρώ το m³. Σε 14 νησιά των Κυκλάδων μεταφέρθηκαν 570.000 m³ και σε 20 των Δωδεκανήσων 1.000.000 m³ με συνολικό κόστος 13 εκ. ευρώ. Το ποσό αυτό επαρκεί για την κατασκευή μικρών μονάδων αφαλάτωσης δυναμικότητας τουλάχιστον 3.000 m³/ημέρα(>1.000.000 m³ ετησίως) με κόστος παραγωγής ανά m³ νερού 2 με 3 φορές χαμηλότερο από το κόστος μεταφοράς. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι μεγαλύτερες ανάγκες παρουσιάζονται κατά τους θερινούς μήνες και ως εκ τούτου απαιτείται μεγαλύτερη ικανότητα αφαλάτωσης (τουλάχιστον 20% σε ετήσια βάση) και εγκαταστάσεις αποθήκευσης (δεξαμενές ή λιμνοδεξαμενές) τα προβλήματα των άνυδρων νησιών μπορούν να επιλυθούν οριστικά χωρίς πρόσθετο κόστος σε μία περίοδο 3-4 ετών.

Λόγω των ειδικών συνθηκών που επικρατούν στα μικρά νησιά και σε πολλούς μικρούς ή απομονωμένους νησιωτικούς οικισμούς (υψηλό κόστος ηλεκτρισμού, έντονη εποχικότητα στην κατανάλωση, έλλειψη υποδομών αποθήκευσης και διανομής), είναι εφικτή η αξιοποίηση του άφθονου αιολικού δυναμικού κυρίως μέσω πλωτών αιολικών μονάδων αφαλάτωσης. Ήδη λειτουργεί με επιτυχία, παρά τα αρχικά προβλήματα που αντιμετώπισε, η πρώτη πλωτή μονάδα αφαλάτωσης στην Ηρακλεία. Η μονάδα αυτή (η Υδριάδα) που θεωρείται πρωτοποριακή σε παγκόσμιο επίπεδο, είναι Ελληνικού σχεδιασμού και κατασκευής. Λόγω των προβλημάτων υφαλμύρησης και κακής ποιότητας νερού που αντιμετωπίζουν οι παράκτιες περιοχές δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες ανάπτυξης της αφαλάτωσης και σε ορισμένες

πόλεις ή οικισμούς που η μεταφορά νερού από την ενδοχώρα είναι ασύμφορη ή δύσκολη λόγω των γεωμορφολογικών συνθηκών της περιοχής.

Οι επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών, η εξάντληση-υποβάθμιση των υπόγειων αποθεμάτων καθώς και οι δημογραφικές και λοιπές αλλαγές (αύξηση πληθυσμού, τουρισμός, κ.τ.λ.) δημιουργούν σοβαρά προβλήματα λειψυδρίας στα νησιά και ορισμένες παράκτιες περιοχές, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες. Η κακή διαχείριση των υδατικών πόρων που θεωρείται από τα σημαντικότερα αίτια της λειψυδρίας, οφείλεται στην υπερεκμετάλλευση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και των επιφανειακών υδάτων, στην έλλειψη σχεδίου διαχείρισης, στις κακές υποδομές (δίκτυα ύδρευσης, δεξαμενές, εξοικονόμηση ή ανακύκλωση νερού), αλλά και στις προσωρινές ή μη αποτελεσματικές προσπάθειες που έγιναν στο παρελθόν. Σε πολλές περιπτώσεις, οι εναλλακτικές λύσεις που εφαρμόστηκαν δεν ήταν αποτελεσματικές ή οικονομικά βιώσιμες και παρά το υψηλό κόστος τους δεν συνέβαλαν στην επίλυση των προβλημάτων (λιμνοδεξαμενές, νέες γεωτρήσεις, έργα εμπλουτισμού υπόγειων υδροφορέων, μεταφορά νερού).

Η οξύτητα των σημερινών προβλημάτων, η έλλειψη εναλλακτικών επιλογών και κυρίως οι προβλεπόμενες αυξημένες ανάγκες για την επόμενη 10ετία, επιβάλλουν την αφαλάτωση σαν την πλέον αξιόπιστη και ενδεδειγμένη λύση τόσο από οικονομική όσο και από περιβαλλοντική άποψη. Ήδη αρκετές χώρες της Μεσογείου και της Μέσης Ανατολής, όπως το Ισραήλ, η Κύπρος, η Μάλτα, η Ισπανία (Κανάρια νησιά, κ.τ.λ.) και οι χώρες του Κόλπου, καλύπτουν μεγάλο ή και το μεγαλύτερο μέρος των αναγκών τους σε νερό με τη χρήση συστημάτων αφαλάτωσης. Σε πρώτη φάση η αφαλάτωση θα έπρεπε να εξετασθεί ως η μόνη βιώσιμη λύση που θα υποκαθιστούσε τη μεταφορά νερού στα άνυδρα νησιά, θα εξασφάλιζε υψηλής ποιότητας πόσιμο νερό και θα μείωνε το κόστος κατά 2-3 φορές (συγκριτικά με τη μεταφορά). Σε δεύτερη φάση θα μπορούσε να επεκταθεί σε παράκτιες περιοχές με σοβαρά προβλήματα υποβάθμισης του υδροφόρου ορίζοντα, για τις οποίες η μεταφορά νερού από την ενδοχώρα είναι ασύμφορη ή δύσκολη. Εκτός από την ριζική επίλυση των προβλημάτων λειψυδρίας, η αξιοποίηση των συγκριτικών πλεονεκτημάτων που διαθέτει η χώρα μας για την ανάπτυξη τεχνολογίας πλωτών μονάδων αφαλάτωσης, θα μπορούσε να συμβάλει στην ουσιαστική ανάπτυξη της χώρας [Δαγκαλίδης, 2009].

2.ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

Οι μέθοδοι αφαλάτωσης που χρησιμοποιούνται σήμερα κατατάσσονται κυρίως σε δύο κατηγορίες: στις μεθόδους εξάτμισης και στις μεθόδους μεμβρανών. Υπάρχουν επίσης άλλες μέθοδοι οι οποίες βρίσκονται ακόμη σε πειραματικό στάδιο ή δεν είναι συμφέρουσες από οικονομική άποψη. Οι μέθοδοι εξάτμισης χρησιμοποιούνται σήμερα μόνο στις πετρελαιοπαραγωγούς χώρες της Μέσης Ανατολής που διαθέτουν άφθονους ενεργειακούς πόρους ενώ στις υπόλοιπες χώρες χρησιμοποιείται κυρίως η μέθοδος της Αντίστροφης Όσμωσης που είναι πιο οικονομική.

2.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

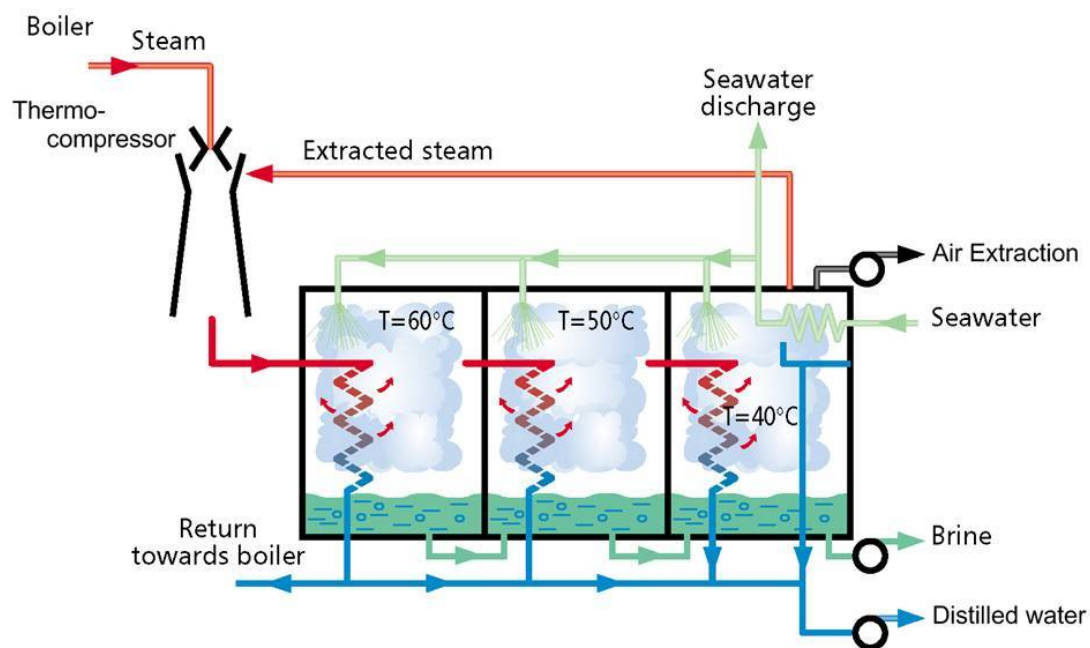
Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την αφαλάτωση είναι οι εξής: μέθοδοι εξάτμισης ή θερμικές: πολυβάθμια εξάτμιση (Multi-Effect Evaporation ή Distillation –ME ή MED), πολυβάθμια εκτόνωση (Multi-Stage Flash Distillation-MSF), εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών (Mechanical Vapor Compression - MVC ή VC), θερμική συμπίεση ατμών (Thermal Vapor Compression–TVC). Μέθοδοι μεμβρανών: αντίστροφη ώσμωση (Reverse Osmosis - RO), ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis – ED), αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis Reversal - EDR). Λοιπές μέθοδοι (σε πειραματικό στάδιο ή οικονομικά ασύμφορες): ιοντοανταλλαγή, πάγωμα, απόσταξη με μεμβράνες, ηλιακή αεριοποίηση, κρυσταλλοποίηση με υδρικό αιθάνιο, νανόφιλτρα (carbon-nanotube membrane).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία των σημαντικότερων μεθόδων με ιδιαίτερη έμφαση όμως στη μέθοδο της Αντίστροφης Όσμωσης η οποία εφαρμόζεται στις περιπτώσεις μας στην Κύπρο και στις υποθετικές εφαρμογές 1, 2.

Μέθοδοι Εξάτμισης ή Θερμικές

Πολυβάθμια εξάτμιση (Multi-Effect Evaporation ή Distillation – ME ή MED)

Τα απλά (αλλά ενεργοβόρα) συστήματα αφαλάτωσης μίας βαθμίδας, αποτελούνται από ένα λέβητα θέρμανσης, αποστακτήρα, συμπυκνωτή ατμών και διαχωριστή που παγιδεύει τις λεπτές σταγόνες της άλμης και τις αποχωρίζει από τον ατμό. Τα συστήματα Πολυβάθμιας εκτόνωσης (Multi-Effect Evaporation ή Distillation – ME ή MED) αποτελούνται από περισσότερες βαθμίδες, δηλαδή πολλά εξατμιστήρια στην σειρά, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη εκμετάλλευση της θερμότητας του όλου συστήματος. Ο ατμός θέρμανσης εισάγεται μόνο στην πρώτη βαθμίδα, όπου θερμαίνει το αλμυρό νερό μέχρι την θερμοκρασία βρασμού (100°C). Οι ατμοί που σχηματίζονται στην πρώτη βαθμίδα χρησιμοποιούνται ως ατμός θέρμανσης στην δεύτερη βαθμίδα, η οποία βρίσκεται σε χαμηλότερη πίεση από την πρώτη ώστε το διάλυμα της άλμης να βράζει σε χαμηλότερη θερμοκρασία κ.ο.κ. [Δαγκαλίδης, 2009].

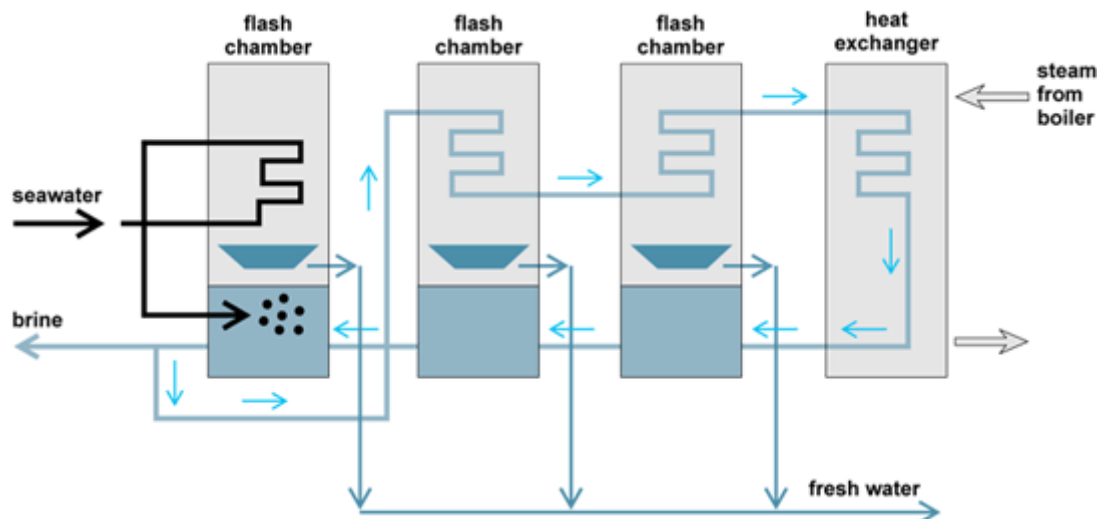


Εικόνα 2. Πολυβάθμια εξάτμιση [SIDEM]

Πολυβάθμια εκτόνωση (Multi-Stage Flash Distillation - MSF)

Στην πολυβάθμια εκτόνωση (MSF), μία ποσότητα θαλασσινού νερού θερμαίνεται υπό μια ορισμένη πίεση, σε θερμοκρασία ελάχιστα χαμηλότερη από αυτή

του σημείου βρασμού του και στην συνέχεια εισάγεται σε ένα θάλαμο ο οποίος βρίσκεται σε χαμηλότερη πίεση από αυτή του διαλύματος, όπου προκαλείται απότομος (εκρηκτικός) βρασμός του διαλύματος. Σε όλη την μάζα του υγρού σχηματίζονται στιγμιαία φυσαλίδες και το νερό εξατμίζεται μέχρι του σημείου όπου επέρχεται ισορροπία του διαλύματος με τους σχηματιζόμενους ατμούς (υπό συγκεκριμένη πίεση). Ο εκρηκτικός αυτός βρασμός με τον σχηματισμό ατμών έχει σαν αποτέλεσμα την ψύξη του διαλύματος. Η ψύξη αυτή είναι σημαντική π.χ. για την εξάτμιση περίπου του 7% μίας ποσότητας θαλασσινού νερού αρχικής θερμοκρασίας 100 °C, η θερμοκρασία του φθάνει μετά την εξάτμιση περίπου τους 60 °C. Για να είναι δυνατή μία νέα εκρηκτική εξάτμιση στην επόμενη βαθμίδα πρέπει η πίεση στο θάλαμο να είναι χαμηλότερη από αυτή που αντιστοιχεί στο σημείο βρασμού του διαλύματος στην προηγούμενη βαθμίδα [Δαγκαλίδης, 2009].

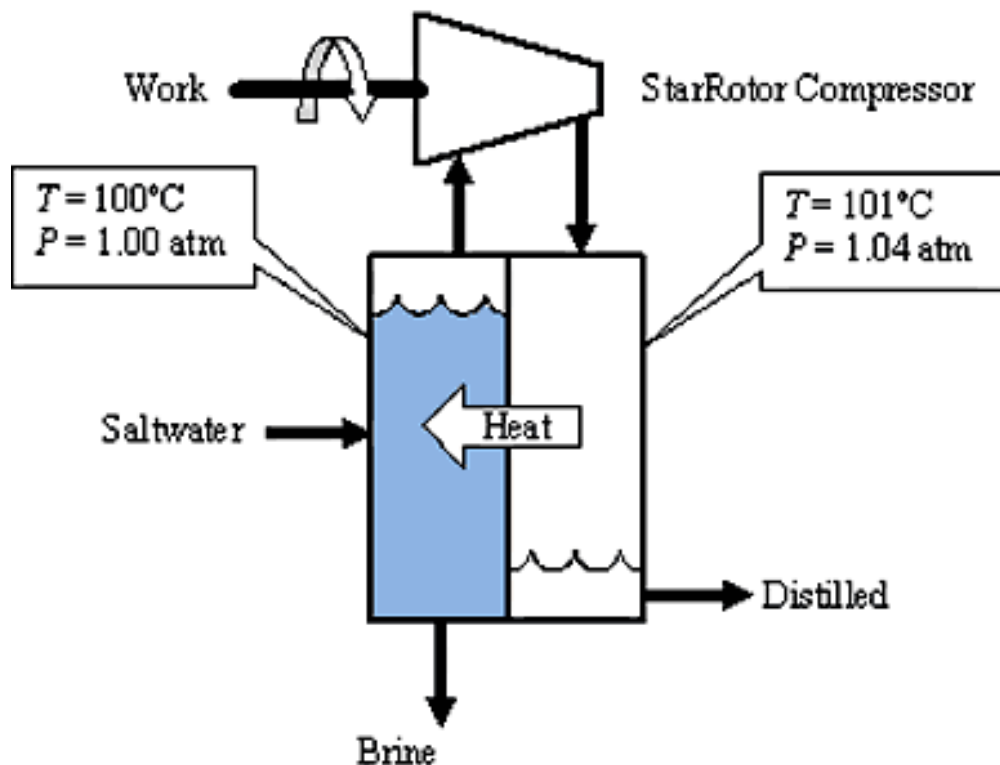


Εικόνα 3. Πολυβάθμια εκτόνωση [Clark et al., 2008]

Εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών (Mechanical Vapor Compression - MVC ή VC)

Είναι μέθοδος εξάτμισης που αξιοποιεί μία ιδιότητα του νερού (ύπαρξη διαφορετικών σημείων βρασμού ανάλογα με την ατμοσφαιρική πίεση). Η διαδικασία περιλαμβάνει τη μηχανική συμπίεση του ατμού και την αξιοποίηση της λανθάνουσας θερμότητας της εξάτμισης μέσω του συμπιεστή-εναλλάκτη θερμότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με την μηχανική συμπίεση των ατμών σε υψηλότερη πίεση, και την αναθέρμανση των ατμών σε κατάλληλη πίεση και θερμοκρασία ώστε η ενέργεια που προστίθεται στο σύστημα να αντισταθμίζει τις απώλειες πίεσης και να κρατά το

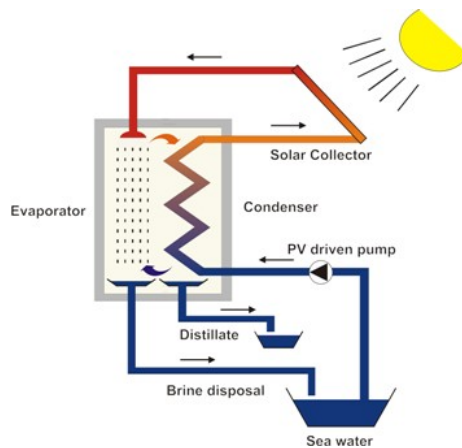
διάλυμα στο σημείο βρασμού. Θερμότητα από εξωτερική πηγή παρέχεται στο σύστημα, μόνο κατά την έναρξη της λειτουργίας της εγκατάστασης και για το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να φτάσει το διάλυμα τροφοδότησης στο σημείο βρασμού. Με τη διακοπή παροχής ενέργειας το σύστημα διατηρείται σε λειτουργία μόνο από την προσφερόμενη ενέργεια του συμπιεστή και από πιθανή συμπλήρωση των απωλειών θερμότητας. Η υπόλοιπη εξωτερική ενέργεια που απαιτείται για την εγκατάσταση είναι αυτή για την κίνηση των αντλιών κυκλοφορίας των διαλυμάτων [Δαγκαλίδης, 2009].



Εικόνα 4. Εξάτμιση με επανασυμπύεση ατμών [atlanticgreenfuels.com]

Θερμική συμπίεση ατμών (Thermal Vapor Compression – TVC)

Είναι παρόμοια μέθοδος με την προηγούμενη με τη διαφορά ότι η συμπίεση του ατμού δεν πραγματοποιείται μηχανικά αλλά θερμικά.



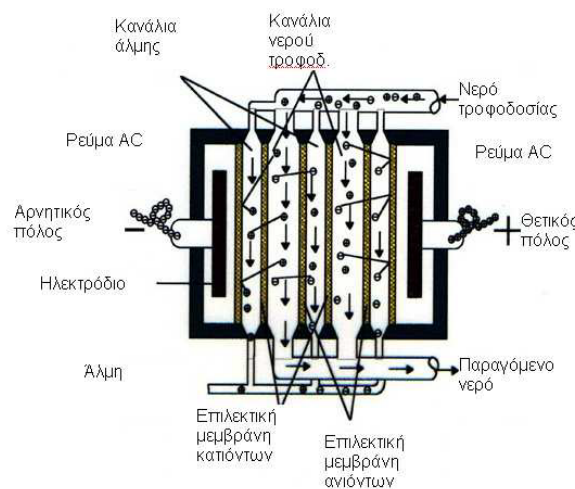
Εικόνα 5. Θερμική συμπίεση ατμών [solar desalination zulenet.com]

Μέθοδοι Μεμβρανών

Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis – ED)

Η ηλεκτροδιάλυση είναι μία ηλεκτροχημική μέθοδος διαχωρισμού στην οποία τα ιόντα μεταφέρονται μέσα από μεμβράνες, από την πλευρά όπου το διάλυμα έχει την μικρότερη συγκέντρωση ιόντων σε αυτή με την μεγαλύτερη συγκέντρωση και με την εφαρμογή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος.

Αντίστροφη Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis Reversal - EDR)



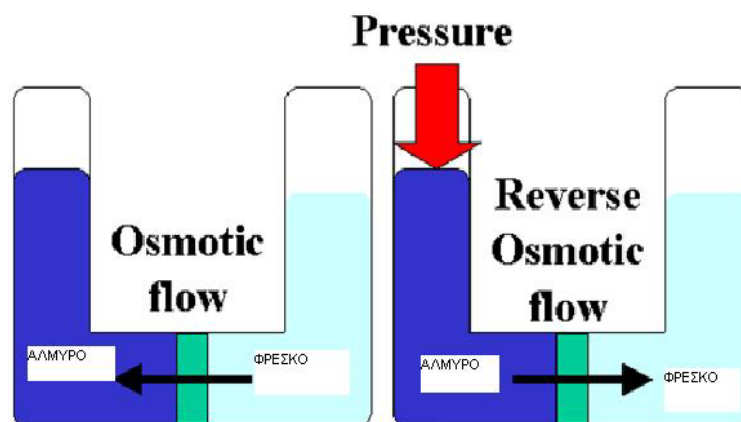
Εικόνα 6. Ηλεκτροδιάλυση [thewatertreatmentplant.com]

Αντίστροφη Όσμωση (Reverse Osmosis - RO)

Αρχή λειτουργίας της Αντίστροφης Όσμωσης

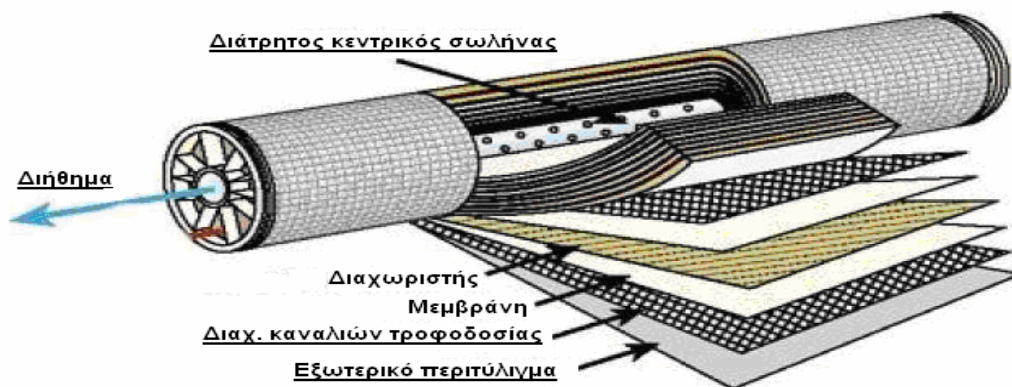
Η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης αποτελεί την πλέον διαδεδομένη, αξιόπιστη και οικονομική τεχνολογία για την παραγωγή υψηλής ποιότητας νερού ύδρευσης. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου στηρίζεται σε αντιστροφή του φυσικού φαινομένου της όσμωσης. Φυσιολογικά, όταν δυο υγρά με διαφορετική πυκνότητα (περιεκτικότητα σε άλατα) έρθουν σε επαφή, τότε το υγρό με την μικρότερη πυκνότητα, μετατοπίζεται προς το υγρό με την υψηλότερη πυκνότητα, μέχρι να υπάρξει ισορροπία (το όλο μείγμα να αποκτήσει την ίδια πυκνότητα). Αυτή η ιδιότητα ονομάζεται διάχυση. Όταν όμως μεταξύ των δυο υγρών παρεμβληθεί μια ημιπερατή μεμβράνη, τότε εμποδίζεται η διέλευση των αλάτων, αλλά όχι και του νερού (διαλύτης) που διέρχεται ελεύθερα στο αλατούχο διάλυμα. Η οσμωτική ροή από το αραιότερο προς το πυκνότερο υγρό συνεχίζεται, μέχρι να επιτευχθεί μια κατάσταση ισορροπίας, η οποία χαρακτηρίζεται από την υψηλότερη στάθμη του αλατούχου διαλύματος (η διαφορά της στάθμης των διαλυμάτων αντιστοιχεί στην οσμωτική πίεση). Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται Όσμωση. Αν όμως ασκηθεί πίεση στο αλατούχο διάλυμα, υψηλότερη της οσμωτικής, τότε η ροή αντιστρέφεται και γίνεται έξοδος καθαρού νερού από το αλατούχο διάλυμα προς το διαλύτη. Αυτό ονομάζεται Αντίστροφη Όσμωση.

Όσμωση και μέθοδος της Αντίστροφης Όσμωσης

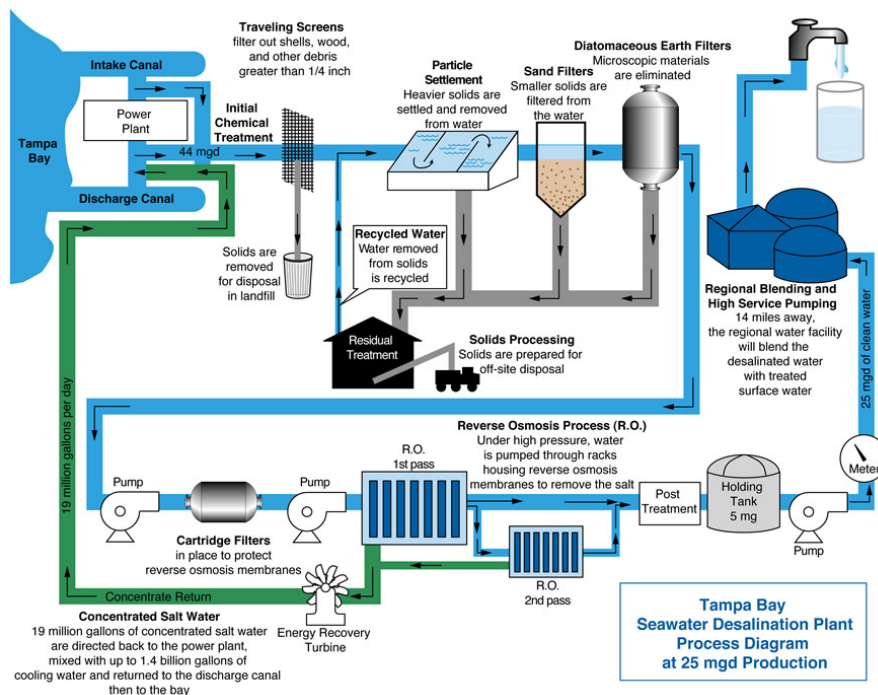


Εικόνα 7. αρχή λειτουργίας όσμωσης
[esru.strath.ac.uk]

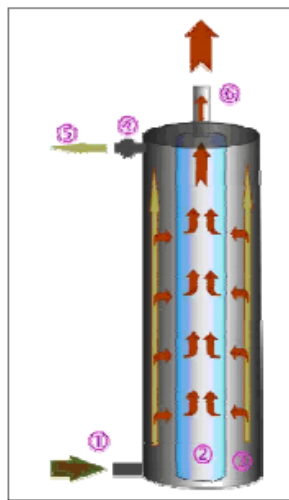
Στις σύγχρονες εφαρμογές αφαλάτωσης η διαδικασία Αντίστροφης Όσμωσης είναι αυτοματοποιημένη με μία αντλία υψηλής πίεσης να διοχετεύει συνεχώς θαλασσινό νερό σε μεμβράνες που βρίσκονται μέσα σε ένα δοχείο υψηλής πίεσης (high pressure vessel). Το διάλυμα τροφοδοσίας (feed water) διαχωρίζεται στο διήθημα (καθαρό νερό) που διέρχεται από τις μεμβράνες (permeate water) και στο απορριπτόμενο διάλυμα υψηλής συγκέντρωσης αλάτων, την άλμη ή αλμόλοιπο (brine). Οι μεμβράνες αποτελούνται από δύο διακεκριμένες στοιβάδες, τον υμένα (skin), που είναι το δραστικό τμήμα της μεμβράνης για τον διαχωρισμό του νερού από τα διαλυμένα ή αιωρούμενα συστατικά και από ένα λεπτό στρώμα πορώδους υλικού το οποίο είναι περατό τόσο από το νερό όσο και από τα υπόλοιπα συστατικά που περιέχονται σε αυτό. Οι μεμβράνες κατασκευάζονται από οργανικές πολυμερείς ενώσεις και είναι τόσο λεπτές και εύθραυστες, ώστε απαιτείται η μορφοποίηση τους (με την βοήθεια διαφόρων στηριγμάτων), σε μονάδες οι οποίες ονομάζονται στοιχεία μεμβρανών (modules) [Δαγκαλίδης, 2009].



Εικόνα 8. Δομή Στοιχείου Μεμβρανών Αντίστροφης Όσμωσης [Δαγκαλίδης, 2009]



Εικόνα 9. Σχηματική αναπαράσταση της δομής λειτουργίας μονάδος αντίστροφης όσμωσης [coal2nuclear.com]



Εικόνα 10. Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας συσκευής αντίστροφης όσμωσης [Μουτάφης, 2008]

Λοιπές μέθοδοι (σε πειραματικό στάδιο ή οικονομικά ασύμφορες)

Ιοντοανταλλαγή

Η μέθοδος εναλλαγής ιόντων χρησιμοποιεί ρητίνες ανιόντων και κατιόντων, οι οποίες προσροφούν τα ιόντα του διαλύματος και τα ανταλλάσσουν με τα κινητά ιόντα που βρίσκονται στο πλέγμα της ρητίνης.

Πάγωμα

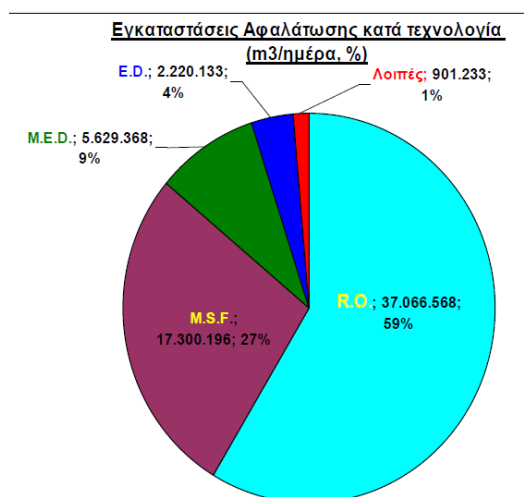
Η αφαλάτωση με ψύξη παρά την απλότητα της δεν είναι ακόμη βιομηχανικά εκμεταλλεύσιμη και η μοναδική μονάδα που λειτούργησε στη Σαουδική Αραβία εγκαταλείφθηκε λόγω ανυπέρβλητων προβλημάτων. Ο πάγος ο οποίος σχηματίζεται κατά την ψύξη του θαλάσσιου νερού αποτελείται από γλυκό νερό ενώ τα άλατα συγκεντρώνονται στην επιφάνεια του πάγου. Η μέθοδος ψύξης απέτυχε κυρίως διότι δεν έγινε δυνατόν να σχηματισθούν μεγάλοι κρύσταλλοι πάγου. Οι λεπτοί κρύσταλλοι συγκρατούσαν στην επιφάνεια τους τα άλατα για την απομάκρυνση των οποίων έπρεπε να χρησιμοποιείται σχεδόν η μισή ποσότητα του νερού. Έτσι η μέθοδος κρίθηκε αντιοικονομική.

Άλλες μέθοδοι: Απόσταξη με μεμβράνες, Ηλιακή αεριοποίηση, Κρυσταλλοποίηση με υδρικό αιθάνιο, Νανόφιλτρα (carbon-nanotube membrane).

Η επιλογή μεθόδου αφαλάτωσης βασίζεται σε συνδυασμό παραγόντων, όπως η ποιότητα του θαλασσινού ή του υφάλμυρου νερού, η απαιτούμενη ποιότητα του παραγόμενου νερού (πόσιμο, αρδευτικό ή βιομηχανικό), το μέγεθος της μονάδας, η διαθεσιμότητα και το κόστος ηλεκτρικής ή θερμικής ενέργειας, τα χαρακτηριστικά του χερσαίου και θαλάσσιου περιβάλλοντα χώρου, οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί, κ.τ.λ.. Με δεδομένους τους παράγοντες αυτούς και το σημερινό τεχνολογικό επίπεδο κάθε μεθόδου, οι σημαντικότερες εφαρμογές σε παγκόσμιο επίπεδο βασίζονται κυρίως στην Αντίστροφη Όσμωση (Reverse Osmosis - RO) και σε μικρότερο βαθμό στην Πολυβάθμια Εκτόνωση (Multi-Stage Flash Distillation - MSF).

Οι λόγοι της επικράτησης της Αντίστροφης Όσμωσης είναι η αξιοπιστία της σε όλο το εύρος μεγεθών (από μερικά λίτρα μέχρι χιλιάδες κυβικά μέτρα την ημέρα), την συμπαγή κατασκευή των μονάδων (πχ. μέσα σε κοντέινερ), την σχετικά μικρή κατασκευαστική περίοδο και κυρίως την μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Έτσι σε μεγάλες μονάδες αντίστροφης όσμωσης με χρήση συστημάτων ανάκτησης ενέργειας (Energy Recovery Devices) επιτυγχάνεται ενεργειακή κατανάλωση περίπου 2,5 kWh/m³ θαλασσινού νερού (4,5-8 χωρίς ERD), έναντι 15 kWh/m³ των μονάδων VC και 20 kWh/m³ περίπου των μονάδων MSF. Επίσης η συνεχής εξέλιξη των μεμβρανών, η βελτίωση της απόδοσης των αντλιών, η χρήση συστημάτων ανάκτησης ενέργειας, η σωστή σχεδίαση των μονάδων και η επίτευξη οικονομικών κλίμακας σε

χαμηλότερα επίπεδα, έχουν μειώσει δραστικά το κόστος του παραγόμενου νερού σε 0,46-1,17 \$/m³ για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού και σε λιγότερο από 0,45 \$/m³ για την αφαλάτωση υφάλμυρου νερού [Δαγκαλίδης, 2009].



Εικόνα 11. Ποσοστά κάθε τεχνολογίας στο κόσμο [Δαγκαλίδης, 2009]

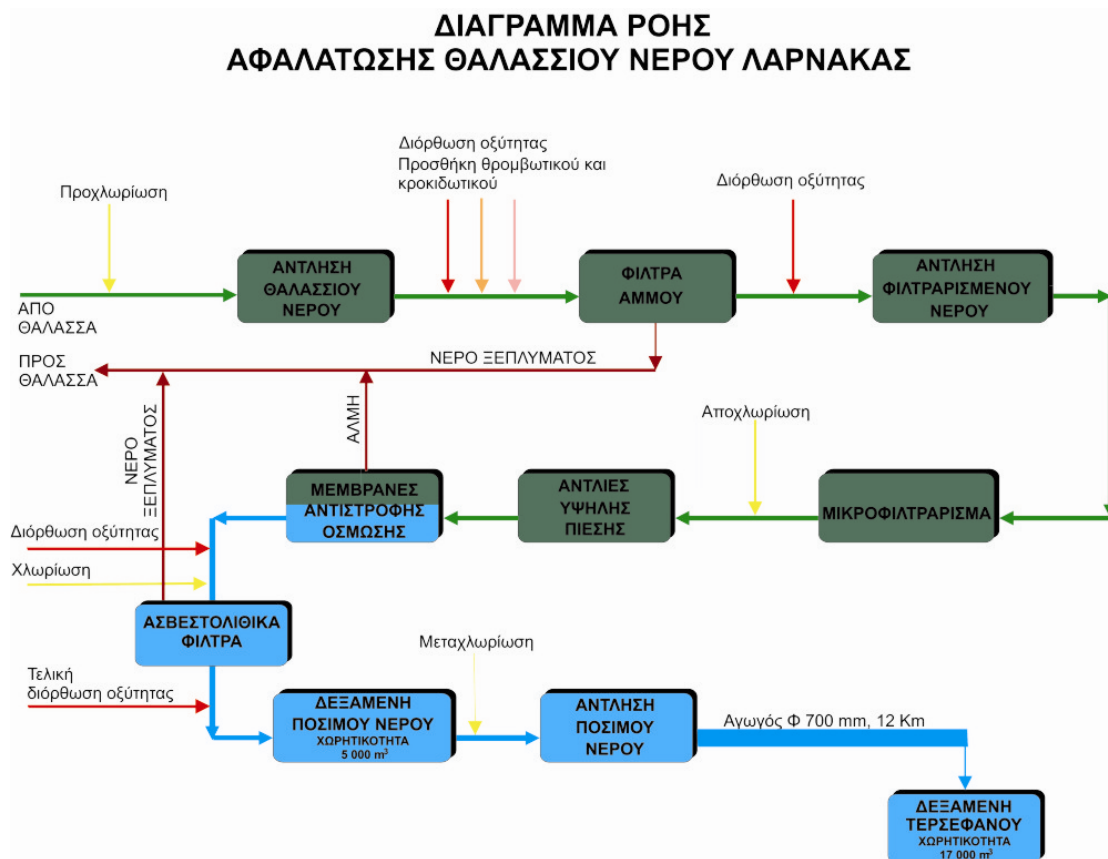
2.2 ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Μια τυπική Μονάδα Αφαλάτωσης περιλαμβάνει:

- Υποθαλάσσιους αγωγούς μεταφοράς θαλάσσιου νερού στη μονάδα και αγωγούς απόρριψης αλμόλοιπου στη θάλασσα.
- Αντλιοστάσιο θαλάσσιου νερού.
- Χερσαίους αγωγούς μεταφοράς νερού και αλμόλοιπου.
- Εργοστάσιο Αφαλάτωσης
- Προεπεξεργασία
- Αντίστροφη Όσμωση
- Τελική επεξεργασία
- Χερσαίους Αγωγούς μεταφοράς πόσιμου νερού σε δεξαμενές ή στους καταναλωτές.

Το νερό αντλείται από απόσταση 300-1000 μέτρων από την ακτή (η απόσταση εξαρτάται από το μέγεθος της μονάδας και τις ιδιαιτερότητες της περιοχής) και μέσω υποθαλάσσιου αγωγού καταλήγει στο αντλιοστάσιο που βρίσκεται στην

παραλία. Στη συνέχεια αφού αφαιρεθούν οι στερεές ουσίες (μέσω πυκνών πλεγμάτων) διοχετεύονται στη μονάδα αφαλάτωσης που βρίσκεται μερικές εκατοντάδες μέτρα από την ακτή. Εκεί πραγματοποιείται η αφαλάτωση που περιλαμβάνει 3 στάδια, την προεπεξεργασία, την αντίστροφη όσμωση και το τελικό στάδιο επεξεργασίας. Στο σχηματικό διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η λειτουργία μίας πλήρους μονάδας Αντίστροφης Όσμωσης.



Εικόνα 12. Διάγραμμα ροής αφαλάτωσης θαλάσσιου νερού Λάρνακας [moa.gov.cy]

- α) Προεπεξεργασία: Αφαιρούνται τα αιωρούμενα σωματίδια και καταστρέφονται οι μικροοργανισμοί ώστε να αποφευχθεί η εναπόθεση τους στις μεμβράνες.
- β) Αντίστροφη Όσμωση: Οι αντλίες υψηλής πίεσης τροφοδοτούν τις μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης με νερό υπό πίεση 65-80 ατμοσφαιρών ώστε να επιτευχθεί η διέλευση του και να απορριφθούν τα άλατα. Η ανάκτηση αφαλατωμένου νερού είναι περίπου 45-50% (1m^3 αφαλατωμένου/ 2m^3 θαλασσινού νερού) και το υπόλοιπο (άλμη) διέρχεται από της αντλίες όπου λόγω της υψηλής πίεσης επιτρέπει την ανάκτηση του 25-30% της αρχικής ενέργειας. Στη συνέχεια μέσω αγωγού απορρίπτεται στη θάλασσα σε σημείο που υπάρχουν ρεύματα ώστε να μην υπάρχει συγκέντρωση αλάτων και ρυπαντών.

γ) Τελική επεξεργασία: Πραγματοποιείται βελτίωση των χαρακτηριστικών του νερού (διόρθωση οξύτητας, αύξηση σκληρότητας) με τη χρήση χημικών (επεξεργασμένου ασβέστη, διοξειδίου του άνθρακα ή θεικού οξέως) σε δεξαμενή και στη συνέχεια αποστέλλεται στο δίκτυο ύδρευσης ή αποθηκεύεται [Δαγκαλίδης, 2009].

2.3 ΔΙΑΘΕΣΗ ΤΗΣ ΑΛΜΗΣ

Γενικοί μέθοδοι διάθεσης της άλμης

Η διάθεση της άλμης από συστήματα αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση πραγματοποιείται στους ακόλουθους αποδέκτες [WHO, 2007]:

Στα επιφανειακά νερά, σε σύστημα αποχέτευσης-βιολογικό καθαρισμό, σε βαθιά πηγάδια-γεωτρήσεις, σε λίμνες εξάτμισης, σε λεκάνες διήθησης, για άρδευση και μέθοδος διάθεσης της άλμης σε παράκτια νερά όπως το θαλάσσιο περιβάλλον. Υπάρχουν επίσης και τρόποι επαναχρησιμοποίησης όπως: η χρήση της σε υγροβιότοπους ή στην ιχθυοκαλλιέργεια.

Η διάθεση της άλμης σε παράκτια νερά είναι ευρέως διαδεδομένη και εφαρμόζεται σε περιπτώσεις εγκαταστάσεων ποικίλης δυναμικότητας που πολλές φορές φτάνει τις χιλιάδες m^3/day . Η διάθεση στη θάλασσα μπορεί να γίνει με μια από τις ακόλουθες δύο μεθόδους:

α) Απευθείας διάθεση με χωριστό υποθαλάσσιο αγωγό διάθεσης (ή σπανιότερα επιφανειακά στην ακτογραμμή)

β) Διάθεση μαζί με την εκροή της μονάδας επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων.

Η ανάμειξη (και αραίωση) της άλμης με επεξεργασμένα νερά από εγκατάσταση επεξεργασίας αστικών λυμάτων και η από κοινού διάθεση τους στα παράκτια νερά αποτελεί μια συνηθισμένη πρακτική. Στην διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες περιπτώσεις, όπως εκείνη στη Φλόριδα των ΗΠΑ, όπου η άλμη διατίθεται στη θάλασσα μαζί με τα λύματα της εγκατάστασης επεξεργασίας των αστικών λυμάτων [Svensson, 2005].

3. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

3.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μονάδων αφαλάτωσης εντοπίζονται σε όλα τα στάδια παραγωγής (τροφοδοσίας, προεπεξεργασίας, αντίστροφης όσμωσης, διάθεσης άλμης, καθαρισμού μεμβρανών). Στο στάδιο της τροφοδοσίας (άντληση θαλασσινού νερού) σημειώνεται θνησιμότητα μικρών οργανισμών, όπως μικρά ψάρια, πλαγκτόν, αυγά ψαριών, αλλά και μεγαλύτερων θαλάσσιων ειδών, λόγω απορρόφησης ή πρόσκρουσης τους στον αγωγό εισροής. Στο στάδιο της προεπεξεργασίας αλλά και της τελικής επεξεργασίας χρησιμοποιούνται διάφορα χημικά (χλώριο, θειικό οξύ, ασβέστιο, διοξείδιο του άνθρακα, κ.τ.λ.) ενώ η όλη διαδικασία απαιτεί σημαντική κατανάλωση ενέργειας (περίπου 3-5 KWh/m³ για θαλασσινό και 0,5-3 KWh/m³ για το υφάλμυρο).

Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι η μέθοδος της Αντίστροφης Όσμωσης είναι η λιγότερο ενεργοβόρος και ρυπαίνουσα από τις λοιπές καθιερωμένες μεθόδους. Το σημαντικότερο πρόβλημα είναι τα απόβλητα άλμης που δημιουργούνται κατά την επεξεργασία του θαλασσινού ή του υφάλμυρου νερού, τα οποία διοχετεύονται χωρίς περαιτέρω επεξεργασία στη θάλασσα. Στις μικρές μονάδες αφαλάτωσης και σε περιοχές με θαλάσσια ρεύματα οι επιπτώσεις δεν είναι σημαντικές αλλά σε μεγαλύτερες μονάδες, που λειτουργούν εδώ και χρόνια σε χώρες της Μέσης Ανατολής, παρατηρήθηκε καταστροφή της θαλάσσιας πανίδας και χλωρίδα σε ακτίνα αρκετών χιλιομέτρων από τις εγκαταστάσεις αφαλάτωσης. Εκτός από την αλατότητα, προβλήματα δημιουργούνται και από την αύξηση της θερμοκρασίας της άλμης κατά περίπου 3 - 4 °C στην αντίστροφη όσμωση (έναντι 10 - 15 °C στις μεθόδους εξάτμισης). Παρατηρούνται επίσης συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων που δεσμεύονται στα ιζήματα και χημική ρύπανση που οφείλεται στα οξέα, τα απολυμαντικά μέσα και στην πλύση των μεμβρανών.

Λόγω των ιδιοτήτων του Ελληνικού νησιωτικού χώρου (υψηλής ποιότητας αλλά οικολογικά ευαίσθητο θαλάσσιο περιβάλλον, περιοχές εξαιρετικού κάλλους, κ.τ.λ.) απαιτείται συστηματική παρακολούθηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της αφαλάτωσης. Η μελέτη των θαλασσιών ρευμάτων και της διασποράς του αλμόλοιπου στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι απαραίτητη για τη σωστή χωροθέτηση των μονάδων και των αγωγών απόρριψης.



Εικόνα 13. Σωλήνας εκροής [Svensson, 2005].

Η τεχνική της αφαλάτωσης θαλασσινού νερού έχει εξελιχθεί σε μια πολύ καλή και αποδοτική λύση για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας ειδικά σε περιοχές όπου το πρόβλημα είναι έντονο (Μέση Ανατολή, νησιά κ.λπ.). Παρόλο όμως τα τεράστια οφέλη για τον άνθρωπο προκαλεί σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα.

Αυτά μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

ηλεκτρική ενέργεια, τροφοδοσία θαλασσινού νερού, επιπτώσεις εξαιτίας της παρουσίας χημικών, προϊόντα διάβρωσης (βαρέα μέταλλα), πρόσθετα κατά της καθίζησης (antiscaling additives), απολυμαντικά πρόσθετα, αλογονούχες οργανικές ενώσεις, αντιαφρώδη πρόσθετα, ουσίες που καταστρέφουν το οξυγόνο (oxygen scavenger), οξέα, θερμότητα, ηχορύπανση, υποβάθμιση χρήσης γης- αισθητική ρύπανση, επίδραση στον υπόγειο υδροφόρο από διαρροές.

Επιπτώσεις από τη διάθεση της άλμης σε παράκτια νερά:

Η παραγόμενη άλμη από τα συστήματα αφαλάτωσης θεωρείται ρυπαντική προς το περιβάλλον για τους εξής λόγους: έχει μεγαλύτερη συγκέντρωση αλάτων από τη θάλασσα, περιέχει χημικές ουσίες από τη προ-επεξεργασία και τη μετά-επεξεργασία του νερού, ενώ συνήθως έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της απόρριψης της άλμης στη θάλασσα σχετίζονται με απώλειες οικοσυστημάτων και θαλάσσιων ειδών. Η διατιθέμενη άλμη είναι πυκνότερη από το θαλασσινό νερό και μετά την ανύψωσή της εξαιτίας της αρχικής ορμής, τείνει στη συνέχεια προς τον πυθμένα, πάνω στον οποίο κινείται.

Η διάθεση της άλμης στα παράκτια νερά μπορεί να επιφέρει περιβαλλοντικές επιπτώσεις στους θαλάσσιους οργανισμούς (θαλάσσια χλωρίδα και πανίδα). Αυτές μπορεί να οφείλονται στα υψηλά επίπεδα συγκεντρώσεων αλάτων (υψηλές συγκεντρώσεις και διακυμάνσεις αλατότητας) της άλμης, καθώς και στα χημικά

συστατικά, που ενδεχομένως περιέχονται στην άλμη από την προεπεξεργασία του θαλασσινού νερού και την πλύση των μεμβρανών [Μπάτσος, 2011].

Επιπτώσεις εξαιτίας της αυξημένης αλατότητας

Το φυσικό εύρος διακύμανσης της αλατότητας του θαλασσινού νερού είναι συνήθως της τάξης του $\pm 10\%$ της μέσης ετήσιας τιμής. Εντός αυτών των ορίων υπάρχει ανοχή των θαλάσσιων οργανισμών σε αυξημένες τιμές [WHO, 2007]. Ο Jenkins αναφέρει την τιμή των 40 ppt ως μέγιστο ανεκτό όριο αλατότητας σε παράκτια νερά όπου η αλατότητα είναι της τάξης των 35 ppt. Σε συνθήκες υψηλής αλατότητας, επικρατούν οι οργανισμοί με ανοχή στις αυξημένες τιμές αλατότητας και οι λιγότερο ανθεκτικοί οργανισμοί μεταναστεύουν ή πεθαίνουν [Jenkins, 2006].

Διεθνείς Εξελίξεις

Τις τελευταίες δεκαετίες η παγκόσμια δυναμικότητα αφαλάτωσης παρουσιάζει σημαντική ανάπτυξη (8% μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης την περίοδο 1980-2009) που οφείλεται κυρίως στην ωρίμανση των τεχνολογιών αντίστροφης όσμωσης και στην αύξηση των αναγκών σε πόσιμο νερό. Η εγκατεστημένη δυναμικότητα υπολογίζεται σήμερα σε 59,9 εκ. m^3 /ημέρα, ενώ άλλα 9,1 εκ. m^3 /ημέρα βρίσκονται σε φάση κατασκευής [Δαγκαλίδης, 2009]. Οι εγκαταστάσεις αφαλάτωσης που βρίσκονται σήμερα σε λειτουργία παγκοσμίως, υπερβαίνουν τις 14.000 (ενώ στο τέλος του 2008 ήταν 13.869 σύμφωνα με την IDA). Περισσότερο από το μισό της παγκόσμιας δυναμικότητας είναι εγκατεστημένο στις άνυδρες χώρες της Μέσης Ανατολής και της Βόρειας Αφρικής οι οποίες καλύπτουν το σύνολο ή σημαντικότατο τμήμα των αναγκών τους κυρίως με θερμική αφαλάτωση. Άλλες χώρες με σημαντικό δυναμικό όπως οι ΗΠΑ, η Ισπανία, η Κίνα, η Ιαπωνία η Αυστραλία, το Ισραήλ και η Κύπρος χρησιμοποιούν κυρίως μεθόδους μεμβρανών. Είναι αξιοσημείωτο ότι οι 10 πρώτες χώρες ελέγχουν το 87,5% της παγκόσμιας δυναμικότητας. Οι προοπτικές του κλάδου αφαλάτωσης είναι ιδιαίτερα θετικές για τα επόμενα χρόνια. Σύμφωνα με τις προβλέψεις της Global Water Intelligence η παγκόσμια δυναμικότητα αφαλάτωσης αναμένεται να υπερδιπλασιαστεί μέχρι το 2016 (από 52 εκ. m^3 /ημέρα το 2008 σε 107 εκ. m^3 /ημέρα το 2016) [globalwaterintel.com].

3.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΑΠΟ ΜΟΝΑΔΕΣ ΣΤΟ ΚΟΣΜΟ

Μονάδα αφαλάτωσης στο Perth, Αυστραλία

Είναι μια μονάδα δυναμικότητας $140.000 \text{ m}^3/\text{day}$ και καλύπτει το 17% των αναγκών της περιοχής καθώς παράγει κατά μέσο όρο πάνω από 130.000 m^3 πόσιμου νερού τη μέρα.

Η εκροή της άλμης ($2,31 \text{ m}^3/\text{s}$) σε αυτήν την μονάδα γίνεται από έναν αγωγό διαμέτρου 1.2 m, μήκους 160 m και 40 θυρίδες διάχυσης τοποθετημένες ανά 5 m και με ονομαστική διάμετρο 0.22 m. Το σημείο της εκροής βρίσκεται 470m από την ακτή σε βάθος 10 m. Η εκροή από τους διαχυτήρες γίνεται υπό γωνία 60 μοιρών ως προς την οριζόντια. Ο σχεδιασμός αυτός έγινε με την προσδοκία ότι η φλέβα θα έφτανε σε ύψος 8.5 m πριν αρχίσει να κατεβαίνει εξαιτίας της αυξημένης του πυκνότητας. Σχεδιάστηκε για να γίνει ρεύμα πυκνότητας στο τέλος της ζώνης μίξης.

Η άδεια λειτουργίας της μονάδας απαιτεί συγκεκριμένα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου στην περιοχή για να μπορεί να λειτουργεί. Επιπλέον μια ελάχιστη διάλυση της άλμης 45 φορές στο τέλος της ζώνης μίξης (end of nearfield mixing region), ορισμένη 50 m από τους διαχυτήρες. Το πρώτο χρόνο λειτουργίας έγινε καταγραφή με κάμερα και αισθητήρες για να σιγουρευτούν ότι προέβλεψαν σωστά και ότι η πανίδα και χλωρίδα της περιοχής προστατεύονται [Μπάτσος, 2011].

Μονάδα αφαλάτωσης στην Πάφο, Κύπρος

Η δυναμικότητα της συγκεκριμένης μονάδας αντίστροφης όσμωσης σε αρχικό στάδιο είναι της τάξεως των $10.000 \text{ m}^3/\text{d}$ ενώ προβλέπεται η αναβάθμισή της ώστε να η παροχή πόσιμου νερού να ανέρχεται $35.000 \text{ m}^3/\text{d}$. Η χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας αφαλάτωσης συνεπάγεται την παροχή ($700 \text{ m}^3/\text{h}$ βάσει του αρχικού σχεδιασμού και $2,500 \text{ m}^3/\text{h}$ βάσει της προβλεπόμενης επέκτασης) πυκνού σε άλατα διαλύματος (άλμη). Η αλατότητα της άλμης είναι κατά 70% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του αντλούμενου θαλασσινού νερού. Οι παραγόμενες ποσότητες άλμης αμέσως μετά την διέλευση τους από το σύστημα ανάκτησης ενέργειας προωθούνται μέσω υπόγειου αγωγού (μήκους περίπου 300 m) ο οποίος ακολουθεί παράλληλη διαδρομή με την ακτή. Στην συνέχεια η ροή της άλμης εκρέει μέσω υποθαλάσσιου αγωγού 800 m απο την ακτή.

Η επιλογή του μήκους των 800 m υπαγορεύτηκε από την ανάγκη ώστε η απόληξη του αγωγού να βρίσκεται σε απόσταση από την ακτή μεγαλύτερη των 700m

καθώς στην ενδιάμεση περιοχή ενδημούν λιβάδια Ποσειδωνίας τα οποία δεν πρέπει να επηρεαστούν από την απορριπτόμενη άλμη. Ο αγωγός έχει διάμετρο 750mm, θα κατασκευαστεί από υαλόνημα (fiberglass) και για λόγους ασφάλειας και προστασίας του περιβάλλοντος θα περιβάλλεται από εξωτερικό σωλήνα, όπως ακριβώς συμβαίνει για τον αγωγό άντλησης.

Οι προδιαγραφές που τέθηκαν από τον Τομέα Θαλάσσιου Περιβάλλοντος του Τμήματος Αλιείας και Θαλάσσιων Ερευνών (βάθος στο σημείο απόληξης αγωγού απόρριψης τουλάχιστον 5 μέτρα και 3 μέτρα τουλάχιστον από την επιφάνεια της θάλασσας) επέβαλαν την εγκατάσταση του αγωγού απόρριψης με τέτοιο τρόπο ώστε η απόληξη αυτού να αιωρείται σε ύψος περίπου 4 μέτρων από τον πυθμένα (στο σημείο εγκατάστασης το βάθος της θάλασσας είναι περίπου 7.25 μέτρα). Η απόληξη του αγωγού δεν φέρει κάποια ειδική διαμόρφωση (π.χ. διαχύτη πολλαπλών απολήξεων) [Μπάτσος, 2011].

Μονάδα αφαλάτωσης στην Λάρνακα, Κύπρος

Η Μονάδα Αφαλάτωσης Λάρνακας λειτούργησε τον Ιούνιο 2001 και είχε δυναμικότητα 52.000 m³/d. Η μονάδα επεκτάθηκε κατά 10.000 m³/ημέρα και από τον Ιανουάριο 2009 η δυναμικότητα της έφτασε στις 62.000 m³/ημέρα. Η Μονάδα Αφαλάτωσης Λάρνακας μαζί με τη Μονάδα Αφαλάτωσης της Δεκέλειας καλύπτουν σε μεγάλο βαθμό τις ανάγκες των Επαρχιών Λευκωσίας, Λάρνακας και Αμμοχώστου. Η μονάδα έχει αγωγό απόρριψης 1500 m μακριά από την ακτή και εκρέει σε βάθος 18m με παροχή 0,740 m³/s.

Μονάδα αφαλάτωσης στην Λεμεσό, Κύπρος

Τον Δεκέμβριο του 2008 ολοκληρώθηκε η κατασκευή της Κινητής Μονάδας Αφαλάτωσης Μονής η οποία παράγει 20.000 m³/ημέρα. Η Μονάδα αυτή θα εξυπηρετεί τις ανάγκες της Λεμεσού μέχρι το τέλος του 2011. Επίσης, τον Ιανουάριο 2009 ξεκίνησε τη λειτουργία της η Κινητή Μονάδα Επεξεργασίας νερού του Υδροφορέα του ποταμού Γαρύλλη δυναμικότητας 10.000 m³/ημέρα για τις υδρευτικές ανάγκες της Λεμεσού. Για την κάλυψη των αναγκών της Επαρχίας Λεμεσού για τα επόμενα είκοσι χρόνια αποφασίστηκε η κατασκευή μόνιμης Μονάδας στην περιοχή Ακρωτηρίου-Επισκοπής δυναμικότητας 40.000 m³/ημέρα με δυνατότητα επέκτασης στα 60.000 m³/ημέρα. Η Μονάδα είναι υπό κατασκευή και αναμένεται να λειτουργήσει πριν το Καλοκαίρι του 2012. Η μονάδα θα έχει αγωγό

απόρριψης 1.500 m μακριά από την ακτή και εκρέει σε βάθος 15m με παροχή 0,463 m³/s.

Μονάδα αφαλάτωσης Scattergood στην Καλιφόρνια

Πρόκειται για μια μονάδα αφαλάτωσης στην Καλιφόρνια του Λος Άντζελες με δυναμικότητα 220.000 m³/day [Jenkins and Wasyl, 2005]. Η μονάδα αυτή είναι συνδεδεμένη με το προϋπάρχον σύστημα κυκλοφορίας κρύου νερού από τον παρακείμενο σταθμό παραγωγής ενέργειας. Το αλμόλοιπο εδώ, δηλαδή το νερό με την αυξημένη περιεκτικότητα σε αλάτι που μένει από την διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης, αφού αναμειχθεί με κρύο νερό μεταφέρεται για απόρριψη στη θάλασσα μέσω ενός ή περισσοτέρων από τους υπάρχοντες αγωγούς. Οι αγωγοί αυτοί είναι:

1. Ένας αγωγός με διάμετρο 5.25m θερμικής απόρριψης που εξυπηρετεί τον σταθμό παραγωγής με σημείο εκροής τοποθετημένο 360m από την ακτή
2. Ένας αγωγός με διάμετρο 3.6m που χρησιμοποιείται σε έκτακτες συνθήκες τοποθετημένος 1.615m από την ακτή
3. Ένας αγωγός με διάμετρο 3.6m βαθιάς εκροής τοποθετημένος 8.262m από την ακτή

Μετά από μελέτη που πραγματοποιήθηκε εκτιμήθηκε η διάλυση και η διασπορά του αλμόλοιπου για κάθε μια από τις τρεις εναλλακτικές επιλογές εκροής. Τα σενάρια που μελετήθηκαν έλαβαν υπόψη τις συνθήκες που επικρατούν στον ωκεανό και είχαν εύρος τιμών για το παραγόμενο νερό μεταξύ 52.800 και 220.000 m³/day. Αυτό έγινε για να εκτιμηθεί η ικανότητα παροχής κάθε επιλογής εκροής.

Οι υδροδυναμικές μελέτες καθώς και τα στοιχεία που υπάρχουν για την περιοχή εδώ και 20 χρόνια έδωσαν μερικά πολύ χρήσιμα συμπεράσματα:

- Όταν η παραγωγή καθαρού νερού είναι περιορισμένη μεταξύ 52.800 μέχρι 110.000 m³/day τότε ο αγωγός που είναι τοποθετημένος 360m από την ακτή προσφέρει επαρκή διάλυση του αλμόλοιπου κάτω από όλες τις συνθήκες.
- Όταν η παραγωγή καθαρού νερού αυξάνεται σε 220.000 m³/day τότε το αλμόλοιπο που εκρέει παραμένει κάτω από τα θαλάσσια βιολογικά όρια κατά 82% των περιπτώσεων. Το υπόλοιπο 18% όταν η αλατότητα του πυθμένα υπερβαίνει την

ανοχή των βιολογικών ορίων μια μεγάλη περιοχή φυσικού περιβάλλοντος υπεραλατώνεται.

- Εκροή αλμόλοιπου από τον δεύτερο αγωγό που βρίσκεται 1615m από την ακτή υπερβαίνει τα όρια στο 98% των περιπτώσεων αν η παραγωγή νερού είναι της τάξεως των 52.800 m³/day. Αν η ποσότητα του παραγόμενου νερού αυξηθεί στα 220.000 m³/day τότε τα όρια υπερβαίνονται στο 100% των περιπτώσεων. Η εκροή από αυτόν τον αγωγό δεν είναι μια εφικτή λύση εκτός εάν το αλμόλοιπο αναμιγνύεται επιπλέον με θαλασσινό νερό πριν την εκροή. Η αναλογία θαλασσινού νερού που απαιτείται για εξάλειψη της υπεραλατότητας είναι 3.25 προς 1.
- Εκροή αλμόλοιπου από τον τρίτο βαθύ αγωγό που βρίσκεται 8262m από την ακτή δεν προκαλεί προβλήματα υπεραλατότητας. Η εκροή από αυτόν τον αγωγό προσφέρει το μικρότερο ρίσκο όσον αφορά τις επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον ενώ επιτρέπει την μέγιστη παραγωγή νερού από την μονάδα [Μπάτσος, 2011].

Μονάδες αφαλάτωσης στα Κανάρια νησιά, Ισπανία [Sadhvani, 2005]

Bocabarranco (SWRO)

Η μονάδα αυτή βρίσκεται στα νοτιοδυτικά του νησιού στα Κανάρια, στην παραλία Bocabarranco στο Galdar. Έχει δυναμικότητα παραγωγής 7.000 m³/day, ποσοστό ανάκτησης 45%, και τα συνολικά αιωρούμενα στερεά στην εκροή (TDS) είναι 400 ppm και το νερό που παράγει χρησιμοποιείται για οικιακή κατανάλωση. Η μονάδα αυτή είναι μέρος μιας ενιαίας εγκατάστασης αφαλάτωσης σε μια έκταση 10.000 m² και χρησιμοποιεί τις ίδιες υποδομές. Υπάρχει ακόμα μια μονάδα αντίστροφης όσμωσης στο συγκρότημα που παράγει νερό για γεωργική χρήση, και μια μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων πολύ κοντά. Το αλμόλοιπο διοχετεύεται μέσω δύο αγωγών στην αιγιαλίτιδα ζώνη, ο πρώτος είναι διπλός για την εκροή αλμόλοιπου από τη μονάδα πόσιμου νερού με διάμετρο 300mm και ο δεύτερος 400mm για τη γεωργική χρήση. Και οι δυο αγωγοί εκρέουν κοντά στην παραλία. Η λύση που για όλες τις εκροές ακόμα και αυτές από την επεξεργασία υγρών αποβλήτων ήταν εκροή μέσω μεγάλου αγωγού στη θάλασσα. Η συχνότητα καθαρισμού του φίλτρου της άμμου στο στάδιο προεπεξεργασίας είναι περίπου μια φορά την εβδομάδα και τα υπολείμματα εκρέουν και αυτά στον αγωγό της άλμης. Το ίδιο συμβαίνει και με τις μεμβράνες που καθαρίζονται 3-4 φορές το χρόνο [Μπάτσος, 2011].

Arucas (SWRO)

Αυτή η μονάδα βρίσκεται στα νότια του νησιού, σε μια περιοχή που ονομάζεται Punta de Camello, σε υψόμετρο 33.27m πάνω από τη θάλασσα. Έχει δυναμικότητα 5.000 m³/day, ποσοστό ανάκτησης 45%, συνολικά αιωρούμενα στερεά στην εκροή 400 ppm και το νερό που παράγει χρησιμοποιείται για γεωργική χρήση. Η μονάδα είναι κοντά σε μια άλλη με παρόμοιο σχεδιασμό, με διαφορετική όμως χρήση. Η άλμη συναντά τον ήδη προϋπάρχον από το 1994 αγωγό με διάμετρο 400 mm και εκρέουν κατευθείαν στην ακτογραμμή. Υπάρχει ένας κατάλογος με ενδημικά θαλάσσια είδη, κόκκινα φύκια (*Rissoella Verruculosa*), υπήρχαν σε εκείνο το μέρος και τώρα είναι κατεστραμμένα από προηγούμενες επιπτώσεις [Μπάτσος, 2011].

Roque prieto (SWRO)

Και αυτή η μονάδα βρίσκεται νοτιοδυτικά του νησιού στην περιοχή Roque prieto, Guía, όχι μακριά από το Bocabarranco. Έχει δυναμικότητα 5.000 m³/day ανάκτηση 45%, TDS 400ppm, και παράγει πόσιμο νερό. Η μονάδα είναι παρακείμενη σε μια μονάδα εξάτμισης με 1.500 m³/day παραγόμενο νερό. Το νερό τροφοδοσίας λαμβάνεται μέσω φρεάτων (beach wells) και η εκροή γίνεται μαζί και των δυο μονάδων κατευθείαν στην ακτή [Μπάτσος, 2011].

Aldea

Βρίσκεται δυτικά του νησιού La Aldea, στο San Nicolas de Tolentino, σε μια έκταση 5500 m². Και εδώ υπάρχει κοντά μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Η βασική χρήση του νερού που παράγεται είναι γεωργική. Η μονάδα έχει δυναμικότητα 10.000 m³/day, με ανάκτηση 45%. Είχε όμως αρχικά σχεδιαστεί για παραγωγή 5.000 m³/day και για TDS λιγότερο από 400 mg/l. Η άλμη εδώ αναμειγνύεται με την εκροή της μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και εκρέουν με αγωγό διαμέτρου 500mm μέσα στη θάλασσα [Μπάτσος, 2011].

Maspalomas II

Βρίσκεται νότια του νησιού αριστερά από το Barranco del Toro, μετά την εκροή του στην παραλία Playa del Toro. Τροφοδοτείται με 42.000 m³/day θαλάσσιο νερό και παράγει 25.000 m³/day πόσιμο νερό. Έχει TDS 90.000 mg/l επειδή χρησιμοποιείται και δεύτερο στάδιο με πίεση 90 bar αυξάνοντας την ανάκτηση στο 60%. Η εκροή γίνεται με αγωγούς στη θάλασσα και η διάλυση από τα 75 psu στα 38

psu επιτυγχάνεται 20m από το σημείο εκροής. Παρόλα αυτά η χλωρίδα και η πανίδα της περιοχής επηρεάστηκαν αρκετά [Μπάτσος, 2011].

Μονάδα αφαλάτωσης στο Al-Jubail (MSF) [Al-Mutaz, 2006]

Η μονάδα αφαλάτωσης του Al- Jubail βρίσκεται στον αραβικό κόλπο. Τα χαρακτηριστικά του αγωγού εκροής είναι: μήκος 2km, διάμετρος 0.9m, βάθος σημείου εκροής 4m με κατακόρυφη εκροή. Η μέση πυκνότητα της θάλασσας στην περιοχή είναι $1.027,5 \text{ kg/m}^3$ ενώ η πυκνότητα του αλμόλοιπου είναι $1.046,5 \text{ kg/m}^3$. Η δυνατότητα παραγωγής νερού της μονάδας είναι $1.115.400 \text{ m}^3/\text{day}$ και η εκροή του αλμόλοιπου είναι $1.632.400 \text{ m}^3/\text{day}$ ή $16.25 \text{ m}^3/\text{s}$. Η μέση θερμοκρασία της θάλασσας στην περιοχή είναι 32°C ενώ του αλμόλοιπου είναι 38°C . Στη θάλασσα υπάρχει 46.000 ppm (TDS) ενώ στην άλμη υπάρχει περιεκτικότητα 67.000 ppm . Όλες οι παραπάνω παράμετροι χρησιμοποιήθηκαν στο CORMIX από τους μηχανικούς, για να εκτιμηθούν τα προφίλ της συγκέντρωσης και της θερμοκρασίας για την εκροή του αλμόλοιπου. Στο σημείο εκροής έχει μέγιστη θερμοκρασία η οποία μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε μέχρι να φτάσει στα επίπεδα θερμοκρασίας της θάλασσας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η πτώση της θερμοκρασίας είναι πολύ έντονη στην αρχή μέχρι το πλούμιο να ακουμπήσει τον πυθμένα σε απόσταση 2.77m από το σημείο εκροής. Μέσα στην απόσταση αυτή το πλούμιο έχει αναμειχθεί σημαντικά και η διάλυση στον άξονα του είναι 30 φορές μεγαλύτερη από το σημείο εκροής. Καθώς το πλούμιο ταξιδεύει πιο μακριά η θερμοκρασία του πέφτει σταδιακά και φτάνει σχεδόν στα επίπεδα της θάλασσας σε απόσταση 101.41m από το σημείο εκροής. Από αυτά τα αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι η εκροή του θερμού αλμόλοιπου από την μονάδα αφαλάτωσης του Al- Jubail δεν έχει δραστηκές επιδράσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον του Αραβικού κόλπου [Μπάτσος, 2011].

4. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΡΑΙΩΣΗΣ

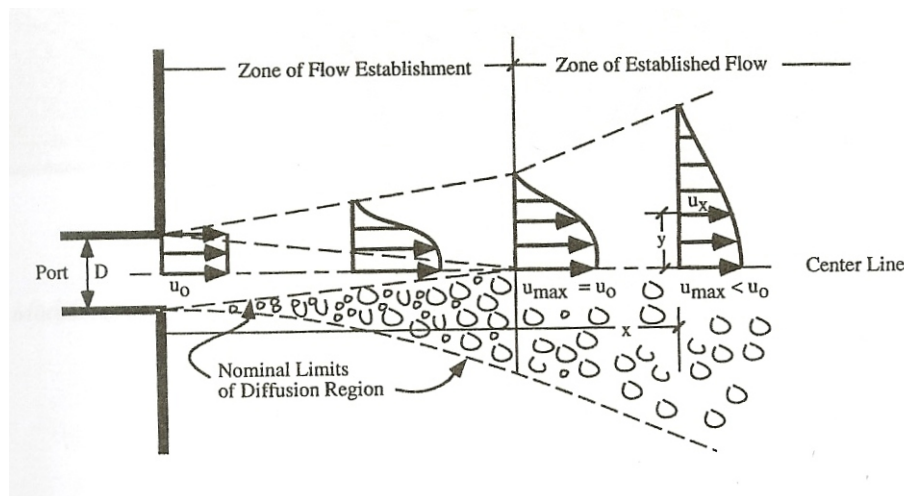
4.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

ΦΥΣΙΚΗ ΠΛΟΥΜΙΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΕΣΜΗΣ ΡΟΗΣ

Η διάλυση επιτυγχάνεται μέσω του μηχανισμού ενσωμάτωσης υλικών από το περιβάλλον στο πλούμιο. Αυτό μπορεί να περιγραφεί ως η διαδικασία με την οποία το υγρό ρέει στο εσωτερικό του πλουμίου μέσω της εξωτερικής επιφάνειας.

ΑΠΛΗ ΔΕΣΜΗ ΕΚΡΟΗΣ ΜΟΝΟΥ ΒΥΘΙΣΜΕΝΟΥ ΔΙΑΧΥΤΗΡΑ

Στην Εικόνα 14 φαίνεται μία δέσμη εξερχόμενη από μονό διαχυτήρα ο οποίος είναι βυθισμένος σε στάσιμα ύδατα μεγαλύτερης πυκνότητας. Η δέσμη ροής (jet) έχει υψηλή ταχύτητα ροής, η κινητική ενέργεια της οποίας θα χάνεται σταδιακά λόγω επαφής με το γύρω υγρό. Λόγω της απώλειας αυτής, προκαλείται η επιθυμητή διάλυση [Albertson et al., 1950]. Η διάχυση ξεκινάει αμέσως μετά την έξοδο όπου η εκροή υπόκειται σε επιτάχυνση λόγω άνωσης. Η δέσμη αρχίζει να ανυψώνεται στην επιφάνεια εξαιτίας της μικρότερης πυκνότητάς του. Η σχετική κίνηση μεταξύ της εκροής και του στάσιμου νερού αναπτύσσει μία αστάθεια στην περίμετρο του ρεύματος, δημιουργώντας δίνες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μία διαδικασία πλευρικής μίξης που εξελίσσεται εσωτερικά και εξωτερικά καθώς απομακρύνεται από την έξοδο. Το σημείο στο οποίο η περιοχή ανάμιξης διαπερνά τον άξονα της δέσμης σηματοδοτεί την αρχική ζώνης εγκαθίδρυσης της ροής. Η ταχύτητα σταδιακά μειώνεται όσο ανέρχεται εκτός από την αρχική περιοχή όπου υπάρχει μία επιτάχυνση λόγω του g_0 . Έτσι, η δέσμη ροής θα αυξηθεί όσο αυξάνει και η απόσταση. Η ζώνη αυτή είναι περίπου 6 φορές τη διάμετρο της εξόδου σε μήκος όταν είναι κυκλική και 5 φορές σε πλάτος τη διάμετρο της εξόδου όταν είναι ορθογώνια [Albertson et al., 1950].

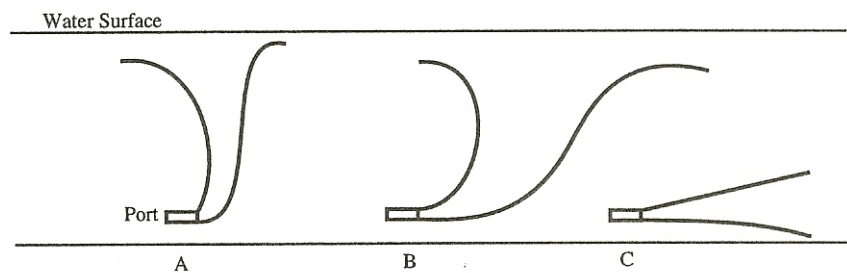


Εικόνα 14. Δέσμη ροής εξερχόμενη από υποβρύχια έξοδο [Albertson, 1994]

Η αρχική ζώνη της ροής τελειώνει μόλις το κεντρικό κομμάτι της δέσμης έχει γίνει τυρβώδες. Η μετάβαση από τη ζώνη αυτή είναι δύσκολο να προσδιοριστεί. Το τέλος της αρχικής ζώνης ροής συνοδεύεται από μία σχεδόν μηδενική τιμή ταχύτητας κατά μήκος του κεντρικού άξονα, κάτι που θεωρητικά είναι αδύνατο.

ΠΛΟΥΜΙΑ ΚΑΙ ΔΕΣΜΕΣ ΡΟΗΣ

Μία δέσμη ροής είναι αυτή που παρουσιάζει ροή λόγω ορμής αλλά όχι ροή λόγω άνωσης. Μία δέσμη ροής υπό άνωση παρουσιάζει τόσο ορμή όσο και άνωση. Ένα πλούμιο παρουσιάζει ροή μόνο λόγω άνωσης. Ροές με θετική άνωση ορίζονται αυτές όπου η δύναμη της άνωσης ασκείται αντίθετα από τη δύναμη της βαρύτητας. Ροές με αρνητική άνωση ορίζονται αυτές όπου η δύναμη της άνωσης έχει ίδια φορά με τη δύναμη της βαρύτητας [Tsanis and Valeo, 1994].



Εικόνα 15. Ρυπαντής εξερχόμενος από υποβρύχια έξοδο: Α) Πλούμιο Β) Δέσμη ροής υπό άνωση Γ) Δέσμη ροής [Tsanis and Valeo, 1994]

Μία πολύ σημαντική παράμετρος στα μοντέλα αραίωσης είναι ο αριθμός Froude FD . Ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις βαρύτητας και υπολογίζεται από τον τύπο

$$F_D = u_0 / (g'_0 \cdot D)^{1/2}$$

Όπου u_0 είναι η ταχύτητα εκροής από την έξοδο, D η διάμετρος της εξόδου, g'_0 η ελαττούμενη επιτάχυνση της βαρύτητας που ισούται με $g(\rho_\alpha - \rho_0)/\rho_\alpha$ όπου ρ_0 είναι η πυκνότητα των λυμάτων, ρ_α η πυκνότητα περιβάλλοντος και g η επιτάχυνση της βαρύτητας [Tsanis and Valeo, 1994].

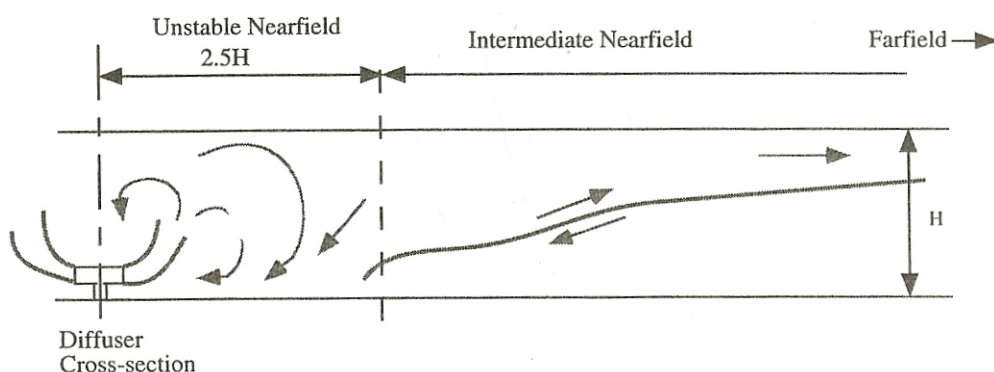
ΕΓΓΥΣ ΖΩΝΗ

Το εγγύς πεδίο ή αρχική ζώνη ανάμιξης περιλαμβάνει τη ζώνη εγκατάστασης της ροής και την εγκατεστημένη ζώνη της ροής. Όλη η αρχική ανάμιξη που οφείλεται στη διάχυση της κινητικής ενέργειας λαμβάνει χώρα στη ζώνη αυτή. Τα αρχικά χαρακτηριστικά της ορμής, της άνωσης και της γεωμετρίας της εκροής επηρεάζουν την πορεία της δέσμης ροής και την ανάμιξη. Περιλαμβάνει οποιαδήποτε αλληλεπίδραση επιφανειακή ή με το κατώτερο στρώμα. Στην περιοχή αυτή, ο σχεδιασμός της εκροής μπορεί να επηρεάσει τα αρχικά χαρακτηριστικά ανάμιξης μέσω της κατάλληλης επιλογής των μεταβλητών σχεδιασμού [Tsanis and Valeo, 1994].

ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΖΩΝΗ

Ορισμένα μοντέλα ροής παρουσιάζουν μία ενδιάμεση ζώνη μεταξύ του κοντινού και του απομακρυσμένου πεδίου. Στην εικόνα 16 φαίνεται ένας διαχυτήρας

σε στάσιμα νερά. Στην ασταθή εγγύς ζώνη δημιουργείται πλήρης κατακόρυφη ανάμιξη. Η περιοχή αυτή σηματοδοτείται από ισορροπία για την κάθετη ροή του ρεύματος με την οριζόντια κίνηση που τείνει να το εξαπλώσει. Ακριβώς κάτω από την επιφάνεια γίνεται η στρωματοποίηση. Το επιφανειακό στρώμα κινείται κατάντη λόγω ορμής και εξαπλώνεται εγκάρσια. Η δέσμη ροής κυριαρχείται από οριζόντιες κινήσεις [Akar and Jirca, 1991].



Εικόνα 16. Κοντινή και ενδιάμεση ζώνης ανάμιξης [Akar and Jirca, 1991]

ΜΑΚΡΙΝΗ ΖΩΝΗ

Όσο η δέσμη ροής ταξιδεύει μακριά από την πηγή, τα χαρακτηριστικά αυτής γίνονται όλο και λιγότερο σημαντικά. Το πεδίο αυτό χαρακτηρίζεται από διάχυση και οριζόντια μεταφορά. Οι συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον έχουν το πρώτο λόγο στην πορεία και την αραίωση της δέσμης. Οι ιδιότητες της ροής και της διάλυσης επηρεάζονται πλέον μόνο από περιβαλλοντικούς παράγοντες [Ng, 1990].

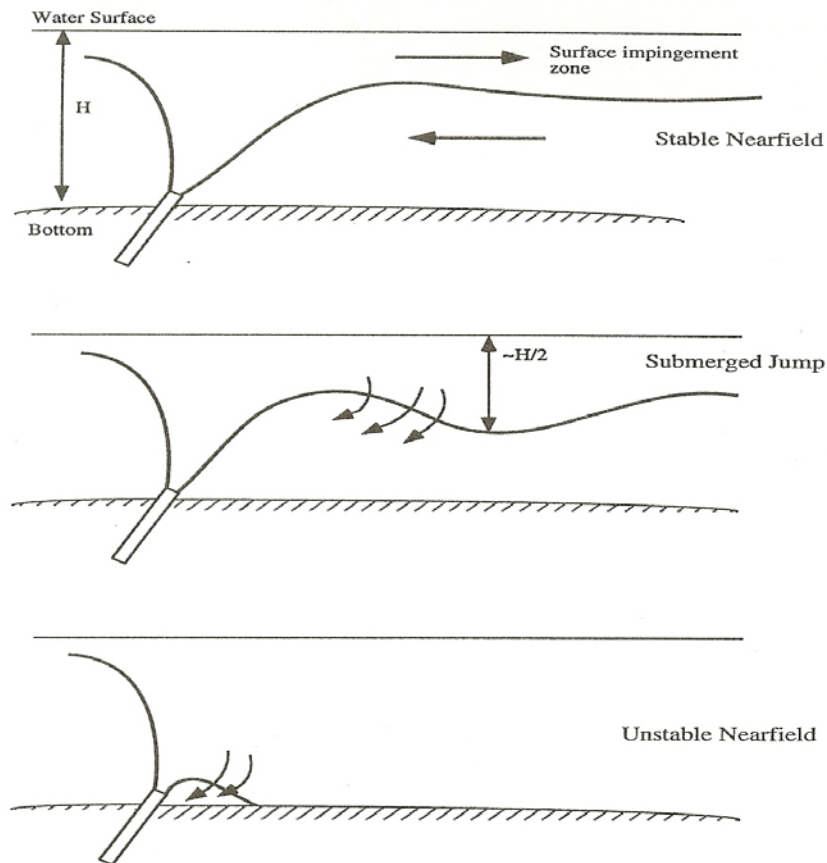
ΒΑΘΟΣ

Πλούμια τα οποία ανυψώνονται λόγω άνωσης προς την επιφάνεια σταθερές στήλες ακολουθούμενα από πλευρική εξάπλωση συναντώνται συνήθως σε βαθιά νερά με δέσμες ροής μικρού αριθμού Froude. Γλυκό νερό περιβάλλοντος συνεχώς ενσωματώνεται στη δέσμη ροής. Το πάχος του στρώματος εξάπλωσης που επιτυγχάνεται στην επιφάνεια είναι ανάλογο με το βάθος [Koh and Brooks, 1975]. Για ένα καθαρό πλούμιο το στρώμα εξάπλωσης ισοδυναμεί με το 15% του βάθους ενώ για μία δέσμη ροής ισοδυναμεί με το 15-20% του βάθους [Ng, 1990]. Σε περίπτωση που το βάθος της περιοχής είναι μικρό και ο αριθμός Froude μεγάλος, τότε

η ροή ενδέχεται να γίνει ασταθής. Όταν η δέσμη προσκρούει στην ελεύθερη επιφάνεια σχηματίζεται ένα λεπτό στρώμα το οποίο ακολουθεί μία οριζόντια εξάπλωση και έπειτα ένα αδύναμο υδραυλικό άλμα (απότομη πτώση κινητικής ενέργειας). Όσο αυξάνει ο αριθμός Froude, τόσο αυξάνει και το στρώμα, γεγονός που οδηγεί σε αστάθεια. Η αστάθεια συμβαίνει όταν το υδραυλικό άλμα φτάσει το ήμισυ του βάθους [Jirca and Harleman, 1973]. Αν ο αριθμός Froude είναι πολύ μεγάλος το πάχος του άλματος μπορεί να γίνει ίσο με το συνολικό βάθος και το πλούμιο να επανεισάγει ρυπασμένο νερό. Σε αυτή την περίπτωση η κοντινή ζώνη είναι πλήρως αναμειγμένη κάθετα (Εικόνα 17).

Η δύναμη της αδράνειας είναι η αποσταθεροποιητική δύναμη ενώ η δύναμη της άνωσης είναι η σταθεροποιητική. Έτσι, η αστάθεια ξεκινάει όταν η αδράνεια υπερβαίνει τη δύναμη της άνωσης [Jirca and Harleman, 1979].

Αν η εκροή του διαχυτήρα είναι κοντά σε λίμνη ή στο βυθό, η δέσμη ροής μπορεί να προσκολληθεί στον πυθμένα γεγονός γνωστό σαν προσκόλληση Coanda. Η εγγύτητα του βυθού (ύψος της εξόδου) και το βάθος του νερού έχουν σημασία στα μοντέλα ροής της κοντινής ζώνης για οριζόντιες δέσμες που εξέρχονται από κυλινδρικούς σωλήνες. Η προσκόλληση Coanda έχει καθοριστική σημασία στα αρχικά στάδια δημιουργίας ενός πλουμίου [Tsanis and Valeo, 1994].

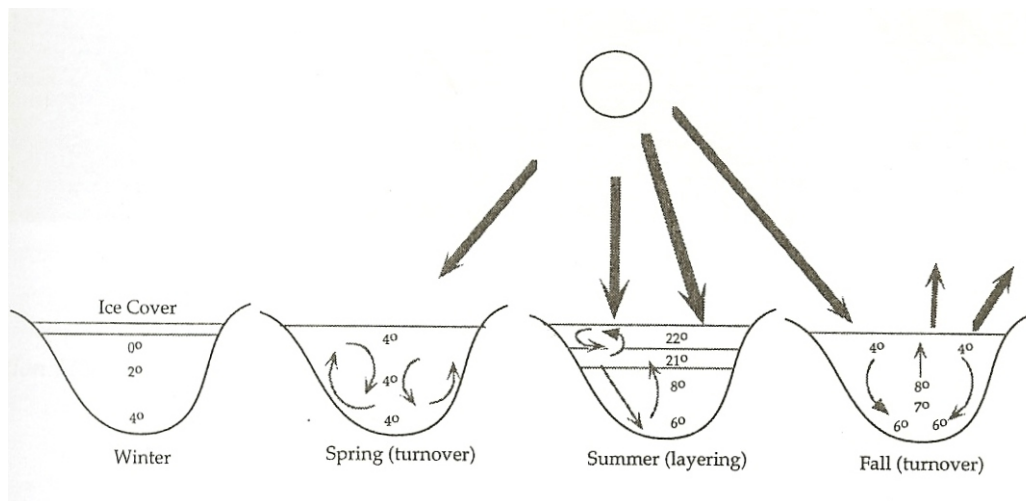


Εικόνα 17. Μετάβαση από σταθερό σε μη σταθερό κοντινό πεδίο [Hamdy, 1981]

ΣΤΡΩΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ

Διαφοροποιήσεις στην πυκνότητα σε σχέση με το βάθος του αποδέκτη ενδέχεται να συμβούν σε διάφορες εποχές. Η στρωματοποίηση που δημιουργείται μπορεί να οδηγήσει σε ποικίλες αραιώσεις κατά τη διάρκεια ενός έτους. Για παράδειγμα, η θέρμανση της επιφάνειας του νερού την άνοιξη προκαλεί αλλαγές σε σχέση με την κατάσταση που επικρατούσε το χειμώνα καθώς το θερμότερο νερό ανυψώνεται. Περαιτέρω θέρμανση κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού προκαλεί τη δημιουργία ενός ακόμα στρώματος, φαινόμενο που παύει το φθινόπωρο λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Το νερό παγώνει, γίνεται πυκνότερο και βυθίζεται. Η μέγιστη πυκνότητα του γλυκού νερού συναντάται στους 4ο C, οπότε ένα στρώμα πάγου στην επιφάνεια δημιουργεί ήπια στρωματοποίηση [Botts and Krushelnicki, 1987].

Μία δέσμη υπό άνωση, που εκρέει σε μία στρωματοποιημένη μάζα νερού, εισάγει υγρό μεγαλύτερης πυκνότητας. Το πλούμιο ανυψώνεται έως ότου να έρθει σε ισορροπία με την πυκνότητα του περιβάλλοντος της περιοχής. Στο σημείο αυτό παγιδεύεται σε ένα τελικό ύψος και η εξάπλωση πλέον από κάθετη γίνεται οριζόντια.



Εικόνα 18. Στρωματοποίηση λίμνης [Hamdy, 1981]

ΡΕΥΜΑΤΑ

Τα ρεύματα αυξάνουν την αραίωση τόσο στο κοντινό όσο και στο μακρινό πεδίο. Όταν ένα ρεύμα διεισδύει σε ένα πλούμιο θα οδηγήσει στην εισαγωγή φρέσκου νερού μέσα σε αυτό. Αυτή η διαδικασία οφείλεται στη διάχυση της κινητικής ενέργειας. Ένα ρεύμα αποτελεί χρονική μεταβλητή και προβλέψεις γι αυτό μπορούν να γίνουν μόνο γενικά. Ένα μοντέλο σε σταθερές συνθήκες μπορεί να συμπεριλάβει το μέγεθος και την κατεύθυνση ενός μόνο ρεύματος. Για ορισμένες περιπτώσεις ο περιορισμός αυτός δεν αποτελεί πρόβλημα. Οι περισσότερες περιπτώσεις μελετώνται για το χειρότερο σενάριο και συνήθως υποτίθενται στάσιμες συνθήκες. Ωστόσο αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υποεκτίμηση της κατάστασης όσον αφορά την αραίωση, και αντιοικονομικό σχεδιασμό. Επειδή η κατεύθυνση του ρεύματος αλλάζει μέσα σε ένα εικοσιτετράωρο, οι ζώνες ανάμιξης και στις δύο πλευρές του διαχυτήρα πρέπει να περιγραφούν [Baumgartner et al., 1993].

4.2 ΒΑΣΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΩΣΤΙΚΩΝ ΦΛΕΒΩΝ

Παρακάτω συνοψίζονται μερικά βασικά στοιχεία της μηχανικής ανωστικών φλεβών [Fisher, Kosh, Imberger and Brooks, 1979]. Η απλή φλέβα στην εκροή της χαρακτηρίζεται από ορμή (ποσότητα κίνησης) και μηδενική διαφορά πυκνότητας, ενώ το πλούμιο στην εκροή του δεν έχει ορμή ή ταχύτητα αλλά χαρακτηρίζεται από διαφορά πυκνότητας η οποία προκαλεί την ροή. Η διαφορά πυκνότητας προκαλεί άνωση, οπότε μια φλέβα η οποία εκτός από αδρανειακές δυνάμεις στην εκροή της έχει και διαφορά πυκνότητας από το ρευστό του αποδέκτη ονομάζεται ανωστική φλέβα (buoyant jet). Μια ανωστική φλέβα μπορεί να είναι φλέβα θετικής ή αρνητικής άνωσης. Θεωρούμε ότι μια ανωστική φλέβα πυκνότητας ρ παροχετεύεται με ρυθμό Q σε αποδέκτη πυκνότητας ρ_a σε χρονικό διάστημα Δt . Ο όγκος δέχεται την δύναμη της αδράνειας (που αρχικά έχει την κατεύθυνση της αρχικής ταχύτητας), το βάρος F_w του όγκου του ρευστού της φλέβας και τη δύναμη F_b λόγω άνωσης. Η συνισταμένη F του βάρους και της άνωσης έχει μέτρο (θετική φορά προς τα πάνω):

$$F = F_b - F_w = \rho_a gV - \rho gV = gV(\rho_a - \rho) = g(\rho_a - \rho)Q\Delta t$$

Η δύναμη F ονομάζεται συνολική ανωστική δύναμη.

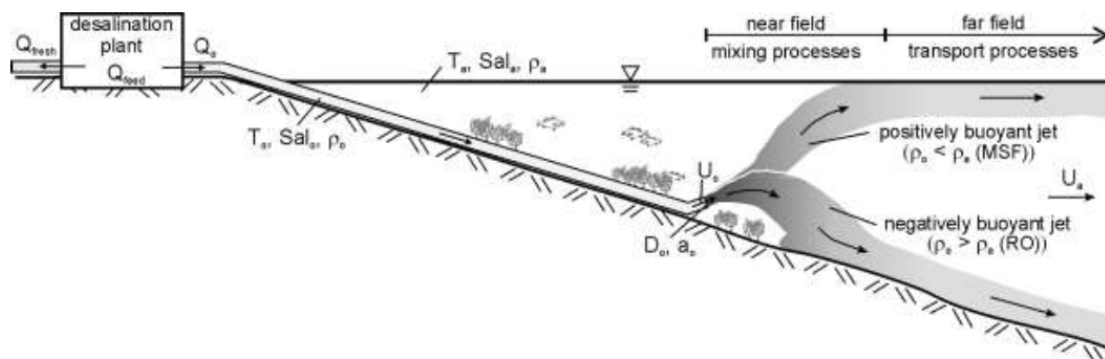
Άρα αν

α) $\rho_a > \rho$ είναι $F_b > F_w$ δηλαδή η F έχει φορά προς τα πάνω.

β) $\rho_a < \rho$ είναι $F_b < F_w$ δηλαδή η F έχει φορά προς τα κάτω.

Συνεπώς μια φλέβα είναι:

- Θετικής άνωσης όταν η συνιστώσα της συνολικής ανωστικής δύναμης έχει φορά προς τα πάνω.
- Αρνητικής άνωσης όταν η συνιστώσα της συνολικής ανωστικής δύναμης έχει φορά προς τα κάτω.



Εικόνα 19. Ανωστική φλέβα αρνητικής και θετικής άνωσης [Svensson, 2005]

Αρχικά η ροή οφείλεται στην ποσότητα κίνησης του ρευστού που εκρέει και η επίδραση της ανωστικής δύναμης είναι αμελητέα. Βαθμιαία αρχίζει η επίδραση της ανωστικής δύναμης και μετά από αρκετή απόσταση όλες οι ανωστικές φλέβες συμπεριφέρονται ως πλούμια, δηλαδή κυριαρχούν σ' αυτές οι ανωστικές δυνάμεις.

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή μιας φλέβας είναι:

I. Οι παράμετροι της φλέβας, όπως η αρχική ταχύτητα εκροής από το στόμιο παροχέτευσης και η αρχική διαφορά πυκνότητας. Η πρώτη δημιουργεί την αρχική ποσότητα κίνησης, ενώ η διαφορά πυκνότητας δημιουργεί την αρχική ανωστική δύναμη.

II. Οι παράμετροι του περιβάλλοντος ρευστού (του αποδέκτη), όπως η ύπαρξη κίνησης ή όχι, η στρωμάτωση ως προς την πυκνότητα και το επίπεδο τύρβης του αποδέκτη.

III. Οι γεωμετρικές παράμετροι, όπως το σχήμα του στομίου παροχέτευσης, η γωνία ως προς το οριζόντιο επίπεδο με την οποία παροχετεύεται η φλέβα και η γειτνίαση με άλλες φλέβες ή στερεά όρια. Έτσι οι φλέβες διακρίνονται σε κυκλικές όταν η παροχέτευση γίνεται από κυκλική οπή και σε δισδιάστατες όταν η παροχέτευση γίνεται από σχισμή πολύ μικρού πλάτους σε σχέση με το μήκος της. Η γωνία παροχέτευσης καθορίζει σε σημαντικό βαθμό αν ο άξονας της φλέβας θα είναι κεκλιμένος ή όχι. Η ροή των φλεβών και των πλουμίων (ή γενικά των ανωστικών φλεβών) μπορεί να είναι στρωτή ή τυρβώδης ανάλογα με τον αριθμό Reynolds στην εκροή, ο οποίος για κυκλικό στόμιο παροχέτευσης ορίζεται ως εξής:

$$Re_0 = U_0 D / \nu$$

όπου U_0 είναι η ταχύτητα εξόδου από το στόμιο διαμέτρου, D και ν είναι η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού της φλέβας. Μεγάλοι αριθμοί Reynolds έχουν ως αποτέλεσμα το σχηματισμό τυρβωδών φλεβών.

Έχει βρεθεί ότι για $Re_0 > 2000$ η ροή της φλέβας είναι συνήθως τυρβώδης [Fisher, Kosh, Imberger and Brooks, 1979].

Στην εκροή μιας φλέβας τα κυριότερα μεγέθη είναι:

Παροχή:

$$Q_0 = U_0 a_0$$

Ροή ειδικής ποσότητας κίνησης:

$$M_0 = U_0 Q_0$$

Όπου U_0 είναι η ταχύτητα εξόδου από το στόμιο εμβαδού a_0 ,

$g'_0 = g(\rho_a - \rho)/\rho_a$ η ελαττούμενη επιτάχυνση της βαρύτητας, ρ_a η πυκνότητα του αποδέκτη και ρ η πυκνότητα της φλέβας.

Ροή ειδικής άνωσης:

$$B_0 = g'_0 Q_0$$

Η εκροή του αλμόλοιπου στον αποδέκτη (θάλασσα) παράγει έντονη ροή εξαιτίας της ασυνέχειας των ταχυτήτων μολυντή-αποδέκτη προκαλώντας τυρβώδη μίξη. Η ασυνέχεια των ταχυτήτων προκύπτει από την αρχική ειδική ποσότητα κίνησης, από την ροή ειδικής άνωσης ή από συνδυασμό αυτών των δύο. Η συμπαράσυρση υγρού του αποδέκτη αραιώνει τον μολυντή (αλμόλοιπο) με αποτέλεσμα να μειώνονται οι διαφορές στη συγκέντρωση ή στις ιδιότητες του ρευστού (πυκνότητα, αλατότητα, θερμοκρασία (για MSF)) ανάμεσα σε μολυντή και αποδέκτη. Η ροή ειδικής ποσότητας κίνησης και η συγκέντρωση της άλμης διασκορπίζονται μέσα στον υδάτινο αποδέκτη (θάλασσα). Αυτή η μίξη αναφέρεται ως μίξη υποβρύχιας ανωστικής φλέβας. Οι συνθήκες του περιβάλλοντος παίζουν και αυτές κάποιο ρόλο στη διαδικασία της μίξης στο κοντινό πεδίο (near-field). Τα ρεύματα που υπάρχουν στον αποδέκτη εκτρέπουν την τροχιά της φλέβας προς την κατεύθυνση των ρευμάτων προκαλώντας υψηλότερη διάλυση. Η στρωματοποίηση της πυκνότητας έχει αρνητική επίπτωση καθώς εμποδίζει την κάθετη επιτάχυνση με αποτέλεσμα να παγιδεύεται το πλούμιο σε ένα τελικό επίπεδο. Ανάλογα με τα δυναμικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ροής, η διαδικασία αλληλεπίδρασης ορίων εμφανίζεται σε κάθετα όρια περιβάλλοντος όπως η επιφάνεια του νερού, ο πυθμένας της θάλασσας ή εσωτερικά όρια (pycnoclines). Η αλληλεπίδραση των ορίων καθορίζει την μετάβαση από το κοντινό (εγγύς πεδίο) στο μακρινό πεδίο.

Για να καθοριστεί τη συμπεριφορά του πλουμίου και τον επηρεασμό βασικών υδροδυναμικών μηχανισμών (cross-flow, διαστρωμάτωση) στη μίξη της άλμης που εκρέει, χρησιμοποιούνται κατάλληλα μεγέθη (κλίμακες μήκους) διαστατικής

ανάλυσης βασισμένα στα μεγέθη της ροής Q_0 , M_0 , J_0 [Nash, 1995], [Jirka et al., 2007]. Ένα σημαντικό εργαλείο στην ανάλυση των ανωστικών φλεβών αποτελεί η διαστατική ανάλυση (dimensional analysis) μέσω της οποίας συνάγεται η μορφή της εξίσωσης που διέπει ένα φαινόμενο προϋποθέτοντας μόνο τη γνώση των σχετικών μεταβλητών που υπεισέρχονται στο φαινόμενο και των διαστάσεων τους. Χρησιμοποιώντας διαστατική ανάλυση για μια κυκλική ανωστική φλέβα, δεδομένου ότι κάθε παράμετρος της ροής εξαρτάται από τα Q_0 , M_0 , B_0 και την απόσταση από την πηγή για κεκλιμένο άξονα προκύπτουν οι εξής χαρακτηριστικές κλίμακες μήκους:

$$l_Q = Q_0 / M_0^{1/2} \text{ και } l_M = M_0^{3/4} / B_0^{1/2}$$

Η φυσική ερμηνεία των οποίων είναι :

- i. Σε απόσταση από την πηγή ίση με l_Q , η παροχή από τη συμπαράσυρση περιβάλλοντος ρευστού είναι περίπου ίση με την αρχική παροχή Q_0 . Σε αποστάσεις πολύ μεγαλύτερες της l_Q ($z / l_Q \gg 1$) η παροχή από τη συμπαράσυρση είναι πολύ μεγαλύτερη από την αρχική παροχή η οποία μπορεί να αμεληθεί, ενώ σε αποστάσεις $z / l_Q \ll 1$ δηλαδή πολύ κοντά στην πηγή η αρχική παροχή και η γεωμετρία του στομίου εκροής παίζουν σημαντικό ρόλο.
- ii. Σε απόσταση από την πηγή ίση με l_M η ποσότητα κίνησης που δημιουργείται από την άνωση είναι περίπου ίση με την αρχική ποσότητα κίνησης M_0 . Σε αποστάσεις πολύ μεγαλύτερες της l_M ($z / l_M \gg 1$) η ποσότητα κίνησης που δημιουργείται από την άνωση είναι πολύ μεγαλύτερη από την αρχική ποσότητα κίνησης, η οποία μπορεί να αμεληθεί, ενώ σε αποστάσεις $z / l_M \ll 1$ η αρχική ποσότητα κίνησης είναι ιδιαίτερα σημαντική. Βέβαια στην περίπτωση των φλεβών αρνητικής άνωσης, η αρχική ποσότητα κίνησης είναι σημαντική σε όλη την τροχιά πριν την αντιστροφή φοράς της ροής, αφού η κατακόρυφη συνιστώσα της αντιτίθεται στην άνωση.

Σε μια ανωστική φλέβα διακρίνονται οι εξής περιοχές:

- Περιοχή $z / l_M \ll 1$ όπου η ανωστική φλέβα συμπεριφέρεται ως απλή φλέβα (jet regime)
- Ενδιάμεση ή μεταβατική περιοχή η οποία απέχει απόσταση από την πηγή της τάξης κλίμακας l_M (buoyant jet ή forced plume)
- Περιοχή $z / l_M \gg 1$ όπου η ανωστική φλέβα συμπεριφέρεται ως πλούμιο (plume regime). Στην περίπτωση των φλεβών αρνητικής άνωσης η συμπεριφορά πλουμίου επιτυγχάνεται συνήθως μετά την αντιστροφή της ροής.

Η αναλογία l_Q / l_M ονομάζεται αριθμός Richardson και εκφράζει το λόγο των αδρανειακών δυνάμεων προς τις ανωστικές δυνάμεις. Για μια κυκλική φλέβα ο αρχικός αριθμός Richardson Ri_0 ορίζεται ως εξής:

$$Ri_0 = l_Q / l_M = Q_0 B_0^{1/2} / M_0^{5/4}$$

Για κυκλική φλέβα συνδέεται με τον αριθμό Richardson ως εξής:

$$Ri_0 = \frac{(\frac{\pi}{4})^{\frac{1}{4}}}{F_0}$$

Τέλος, μια σημαντική παράμετρος στις ανωστικές φλέβες είναι η διάλυση. Η μέση διάλυση στη διατομή S ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού όγκου (παροχής) της φλέβας στην εκάστοτε θέση προς τον αρχικό όγκο (παροχή):

$$S = Q / Q_0$$

Η διάλυση σε μια θέση της φλέβας με πυκνότητα ρ ή με φαινόμενη επιτάχυνση της βαρύτητας g' μπορεί να οριστεί ως [Roberts et al., 1997].

$$S = g'_0 / g' = (\rho_a - \rho_0) / (\rho_a - \rho)$$

Όπου ρ_a η πυκνότητα της εκροής στην έξοδο, ρ_0 η πυκνότητα του αποδέκτη.

Η ισοδύναμη συναρτήσσει της συγκέντρωσης ως:

$$S = (c_a - c_0) / (c - c_0)$$

Όπου c_0 είναι η συγκέντρωση του αποδέκτη, c η συγκέντρωση της φλέβας στη θέση όπου υπολογίζεται η διάλυση και c_a η αρχική συγκέντρωση της εκροής.

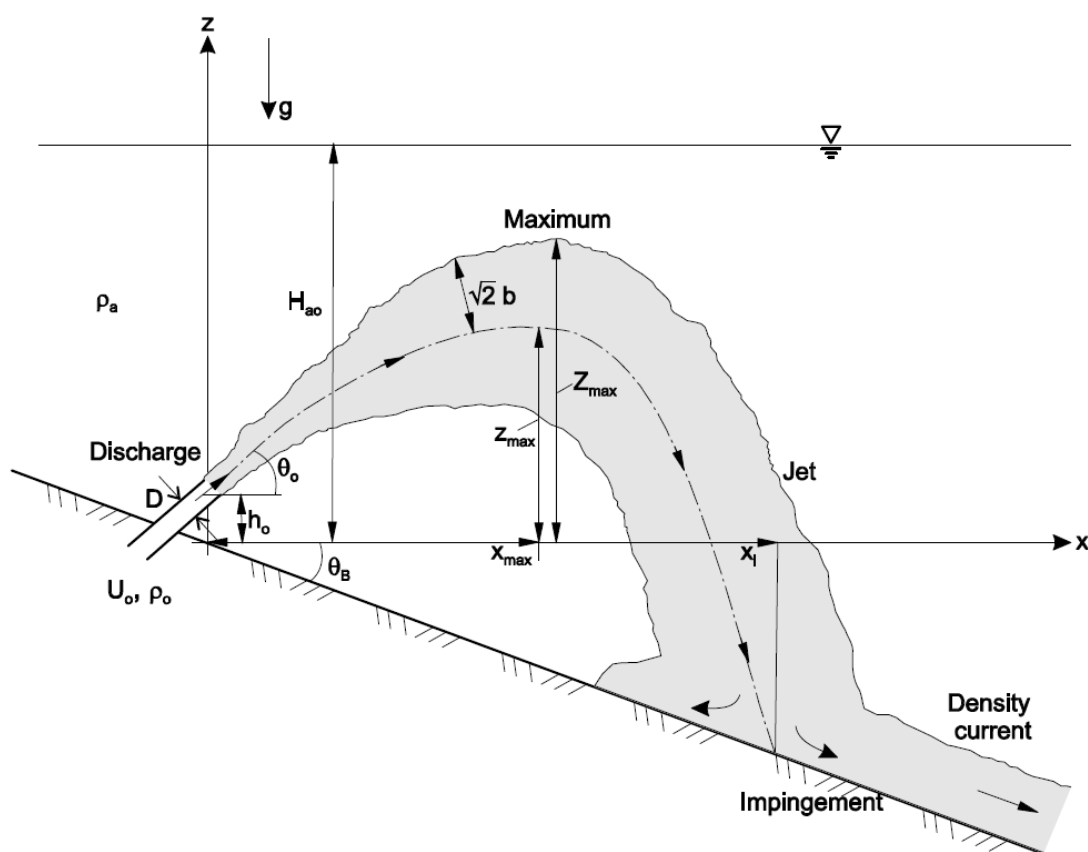
Συχνά υπολογίζεται η ελάχιστη διάλυση, δηλαδή η διάλυση στον άξονα της φλέβας:

$$S = g'_0 / g' = (c_a - c_0) / (c - c_0)$$

Όπου ο δείκτης c δηλώνει μεγέθη στη θέση του άξονα της φλέβας (centerline).

Η διασπορά των φλεβών εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του σχεδιασμού του διαχυτήρα καθώς και συνθήκες που επικρατούν στο θαλάσσιο περιβάλλον της εκροής τους. Εξαιτίας του διαφορετικού επηρεασμού της φυσικής διαδικασίας, η μίξη και η διασπορά των φλεβών κατηγοριοποιούνται σε μίξη κοντινού πεδίου (near-field mixing) και μίξη μακρινού πεδίου (far-field mixing). Η μίξη κοντινού πεδίου επιτυγχάνεται από την ορμή της ροής από την ταχύτητα της εκροής και πρόσθετα από δυνάμεις που δέχονται εξαιτίας των ρευμάτων που επικρατούν στον αποδέκτη-θάλασσα. Η μίξη στο μακρινό πεδίο και η αραίωση βασίζονται απλά στις φυσικές διαδικασίες των ανέμων και των κυμάτων.

Αντίθετα με τις φλέβες θετικής άνωσης που κινούνται προς την επιφάνεια της θάλασσας, οι φλέβες αρνητικής άνωσης βυθίζονται προς τον πυθμένα της θάλασσας. Και τα δυο είδη έχουν παρόμοια διαδικασία μίξης στο κοντινό πεδίο καθώς επηρεάζονται περισσότερο από την ορμή της ροής. Όμως στο μακρινό πεδίο οι φλέβες θετικής άνωσης έχουν καλύτερη και γρηγορότερη διαδικασία μίξης από τις φλέβες αρνητικής άνωσης καθώς πηγαίνουν στην επιφάνεια της θάλασσας όπου εξαιτίας των ανέμων και των κυμάτων δημιουργείται τυρβώδη μίξη. Στο μακρινό πεδίο οι φλέβες αρνητικής άνωσης βρίσκονται στον πυθμένα της θάλασσας όπου η μίξη επηρεάζεται μόνο από τις ταχύτητες πυθμένα, από βαρομετρικές ροές και από την τυρβώδη μίξη κάτω από την επιφάνεια που είναι λιγότερο ισχυρή από την διαδικασία κοντά στην επιφάνεια. Για αυτό το λόγο είναι πολύ σημαντικός ο σχεδιασμός διαχυτήρα της εκροής για την καλύτερη δυνατή αραίωση στο κοντινό πεδίο.



Εικόνα 20. Σχηματική απεικόνιση της πλευρικής όψης της φλέβας της άλμης αρνητικής άνωσης (negatively buoyant jet) [Bleninger and Jirca, 2010]

Οι μεταβλητές που φαίνονται στο σχήμα είναι οι ακόλουθες:

b	: πλάτος της φλέβας άλμης
D	: διάμετρος του αγωγού διάθεσης
F_D	: πυκνομετρικός αριθμός Froude
G	: επιτάχυνση της βαρύτητας
g_o	: ανωστική επιτάχυνση στη θέση διάθεσης της άλμης
H_{a0}	: βάθος νερού θάλασσας στη θέση διάθεσης της άλμης
H_0	: ύψος του στομίου θέση διάθεσης της άλμης
U_0	: ταχύτητα διάθεσης άλμης
x_i	: οριζόντια θέση του σημείου πρόσκρουσης στον πυθμένα
x, z	: οριζόντια και κάθετη συντεταγμένη
x_{max}, z_{max}	: οριζόντια και κάθετη θέση του μέγιστου ύψους της φλέβας
z_{max}	: μέγιστο ύψος του επάνω ορίου της φλέβας
θ_β	: γωνία κλίσης πυθμένα
θ_0	: γωνία κλίσης του στομίου διάθεσης της άλμης
ρ_α	: πυκνότητα της θάλασσας
ρ_0	: πυκνότητα της άλμης

Η θάλασσα που είναι ο αποδέκτης της φλέβας της άλμης θεωρείται ότι έχει ενιαία πυκνότητα ίση με ρ_α . Όπως φαίνεται στην Εικόνα 20 η φλέβα της άλμης έχει ταχύτητα διάθεσης U_0 και πυκνότητα $\rho_0 > \rho_\alpha$. Για τον υπολογισμό της τιμής της παροχής της φλέβας της άλμης (volume flux) (Q_0), της ορμής της (momentum flux) (M_0) και της ανωστικής ροής (buoyancy flux) (J_0) χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες εξισώσεις [Jirka, Bleninger, 2008] :

$$Q_0 = U_0 a_0$$

$$M_0 = U_0 Q_0$$

$$J_0 = g'_0 Q_0$$

$$g'_0 = g(\rho_\alpha - \rho_0)/\rho_\alpha$$

Τα γεωμετρικά και τα δυναμικά χαρακτηριστικά της τυρβώδους φλέβας άλμης προσδιορίζονται από τις κλίμακες μήκους L_Q και L_M [Bleninger and Jirka, 2010].

$$l_Q = Q_0 / M_0^{1/2} \text{ και } l_M = M_0^{3/4} / B_0^{1/2}$$

Ο αδιάστατος πυκνομετρικός αριθμός Froude υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση [Jirka and Bleninger ,2008].

$$F_D = u_0 / (g'_0 \cdot D)^{1/2}$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει

$$Ri_0 = l_Q / l_M = Q_0 B_0^{1/2} / M_0^{5/4}$$

5. ΕΜΠΕΙΡΟ ΣΥΣΤΗΜΑ CORMIX (EXPERT SYSTEM)

5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ CORMIX

Υπάρχει μία σειρά προγραμμάτων που αφορούν με τη μοντελοποίηση εκροής ρυπασμένων υδάτων σε μία μεγαλύτερη υδάτινη μάζα. Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται το λογισμικό πακέτο CORMIX. Το πρόγραμμα αυτό δημιουργήθηκε από το πανεπιστήμιο του Cornell εκ μέρους του Αμερικανικού Οργανισμού Προστασίας του Περιβάλλοντος [epa.gov].

Το CORMIX είναι ένα σύστημα ποιοτικής μοντελοποίησης υδάτινων αποδεκτών και βοήθειας λήψης αποφάσεων σχεδιασμένων για την εκτίμηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου των ζωνών ανάμιξης που δημιουργούνται από λύματα συγκεκριμένων πηγών. Το σύστημα εμβαθύνει στο ρόλο των οριακών αλληλεπιδράσεων για να προβλέψει τη γεωμετρία του πλουμίου και τη διάλυση σε σχέση με τις ζώνες ανάμειξης. Αποτελείται από τρία υποσυστήματα: CORMIX1, CORMIX2 και CORMIX3.

Το CORMIX1 ασχολείται με υποβρύχιες εκροές μονής εξόδου με θετική, αρνητική και ουδέτερη άνωση μέσα σε υδάτινο περιβάλλον (βαθιά ή ρηχά νερά, στάσιμα ή ρέοντα, ομοιόμορφο ή στρωματοποιημένο περιβάλλον) όπως ποτάμια, λίμνες, δεξαμενές, εκβολές ποταμών ή παράκτιες περιοχές. Υποθέτει σταθερές συνθήκες ροής τόσο για την εκροή όσο και για το περιβάλλον. Μπορεί να προβλέψει την τροχιά και το σχήμα του πλουμίου, τη συγκέντρωση ρυπαντών και την αραίωση τόσο για το κοντινό όσο και για το μακρινό πεδίο.

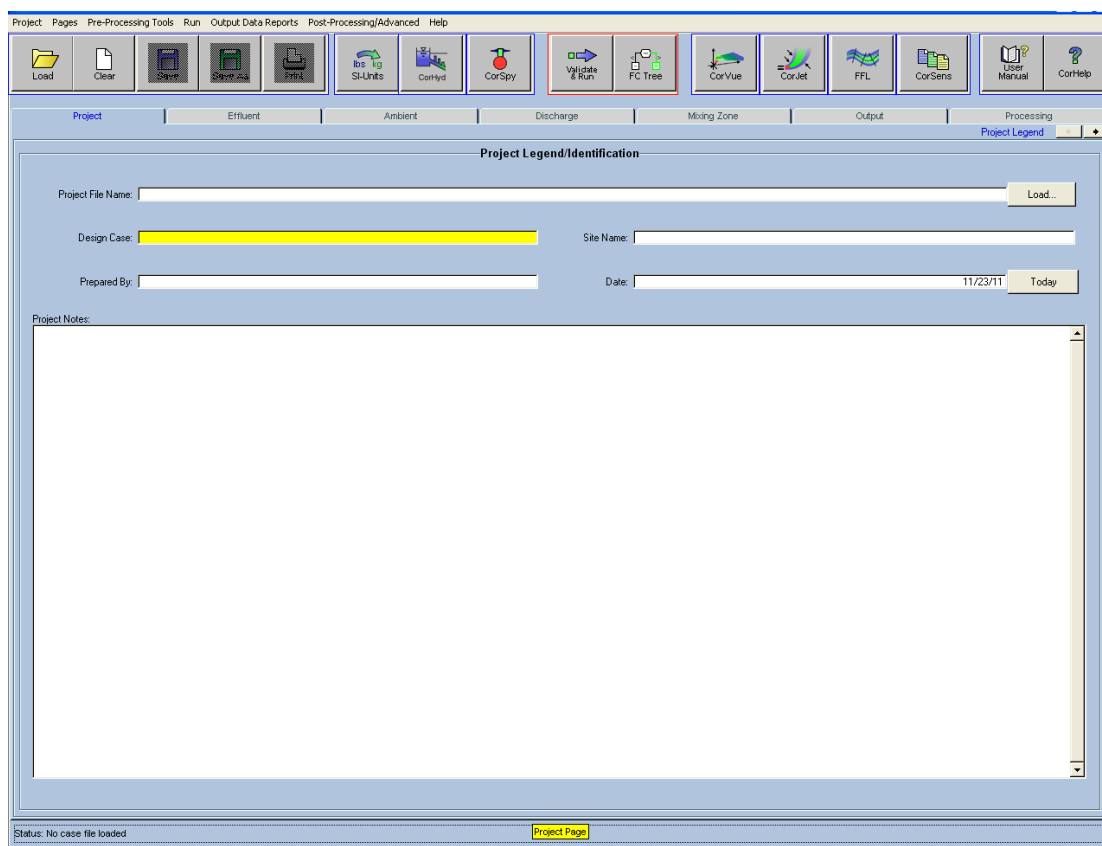
Το υποσύστημα CORMIX2 χρησιμοποιείται για προβλέψεις εκροής από υποβρύχιους διαχυτήρες πολλαπλών εξόδων για συμβατικό ή τοξικό ρυπαντή. Λόγω της δυνατότητάς τους να παρέχουν σε μεγάλο βαθμό αρχική ανάμιξη έχει αυξηθεί η χρήση τους για το σχεδιασμό απορρίψεων. Ποικίλουν από διαχυτήρες αποβλήτων για την εκροή επεξεργασμένων υδάτων βιολογικών καθαρισμών, θερμικούς διαχυτήρες για νερό ψύξης που χρησιμοποιείται σε εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μέχρι διαχυτήρες για βιομηχανικά απόβλητα και απορρίψεις άλμης από εργοστάσια αφαλάτωσης. Μπορεί να προβλέψει ιδιαίτερα περίπλοκες περιπτώσεις εκροής που περιλαμβάνουν βαθύ ή ρηχό θαλάσσιο περιβάλλον, στρωματοποιημένο ή ομοιόμορφο και οριακές αλληλεπιδράσεις.

Το υποσύστημα CORMIX3 αναλύει επιφανειακές απορρίψεις που προκύπτουν όταν υγρά απόβλητα εισέρχονται σε μία υδάτινη μάζα μέσω ενός καναλιού, αγωγού ή αγωγού που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια. Σε αντίθεση με το CORMIX1 και CORMIX2 περιορίζεται σε απορροές με θετική ή ουδέτερη άνωση. Όπως όλα τα μοντέλα, έτσι και το CORMIX έχει ορισμένους περιορισμούς. Μια μικρή αλλαγή σε μία μεταβλητή εισόδου μπορεί να επιδράσει στην αναγνώριση διαφορετικού είδους ροής με εντελώς διαφορετικές προβλέψεις που οδηγούν σε διαφορετικούς ρυθμούς ανάμειξης δημιουργώντας πιθανές ασυνέχειες στα αποτελέσματα πρόβλεψης.

Το μοντέλο δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις με υψηλή ανομοιομορφία και ραγδαίες δυναμικές μεταβολές περιβάλλοντος

5.2 ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ - ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ

Παρακάτω θα γίνει μια περιγραφή της διαδικασίας που θα ακολουθηθεί μέσω του CORMIX. Η επόμενη εικόνα δείχνει το γραφικό περιβάλλον που χρησιμοποιεί το λογισμικό CORMIX.



Εικόνα 21. Πρώτη καρτέλα cormix – περιγραφή σχεδίου

Τα δεδομένα εισόδου είναι χωρισμένα σε έξι τοπικά παράθυρα (κατηγορίες):

Περιγραφή σχεδίου- μελέτης (project)

Ιδιότητες μολυντή (effluent)

Συνθήκες περιβάλλοντος (ambient)

Γεωμετρία εκροής

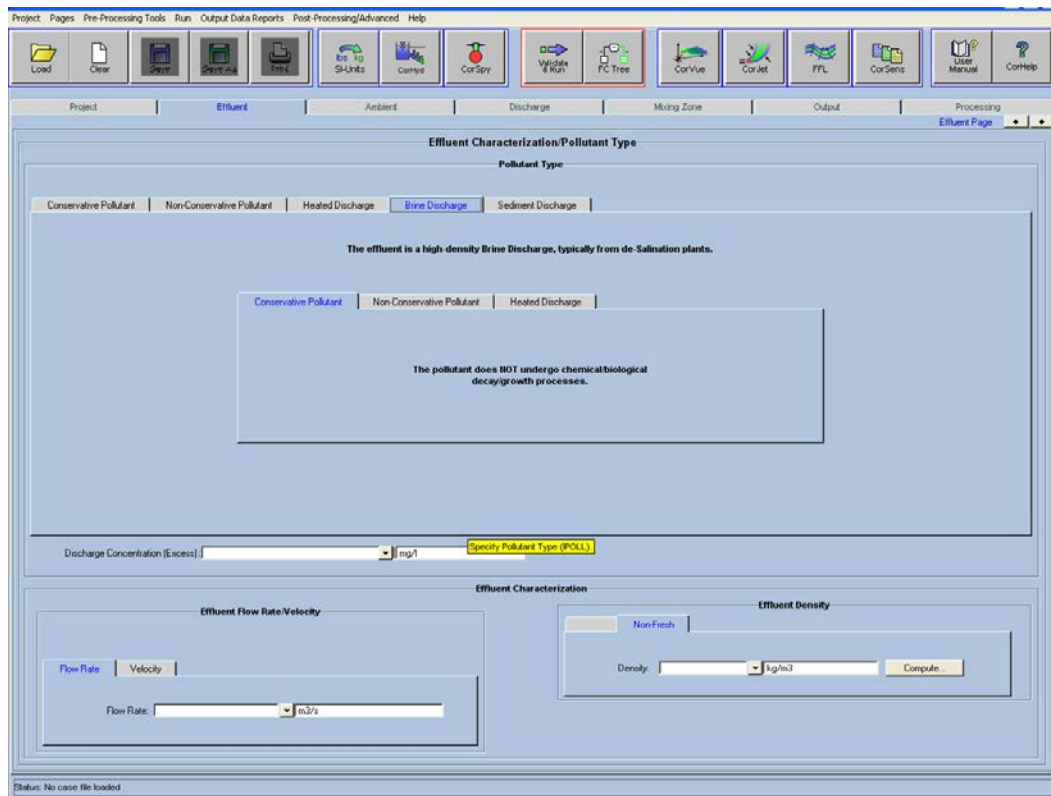
Προσδιορισμός περιοχής μίξης (mixing zone)

Έλεγχος δεδομένων εξόδου (output)

Το παράθυρο processing χρησιμεύει για την εκτέλεση του προγράμματος και δεν απαιτεί δεδομένα εισόδου.

Δεδομένα project: Είναι το πρώτο παράθυρο που απαιτεί δεδομένα και περιέχει βασικές πληροφορίες αναγκαίες για το χειρισμό και την αποθήκευση αρχείων και περιγραφή προσομοιώσεων για μετέπειτα χρήση. Το πρώτο που πρέπει να γίνει είναι η αποθήκευση (save) για τη δημιουργία ενός νέου αρχείου δεδομένων μελέτης. Αυτά που ζητούνται να συμπληρωθούν είναι το όνομα του αρχείου (project file name), όνομα περιοχής (site name), υπόθεση σχεδιασμού (design case) καθώς επίσης μπορεί να συμπληρωθεί και το όνομα του χρήστη (prepared by).

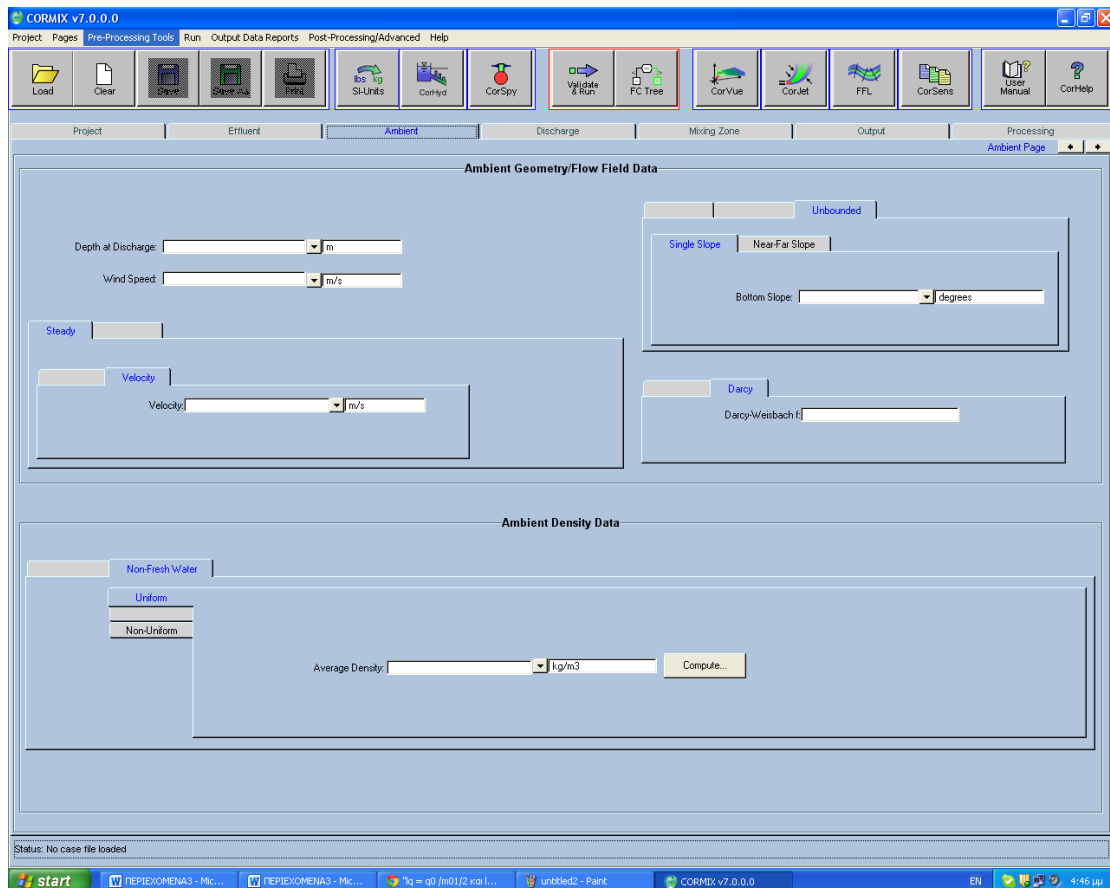
Δεδομένα Ιδιότητες εκροής-λυμάτων: Ένα τέτοιο παράθυρο δεδομένων ενεργό φαίνεται στην Εικόνα 22. Πρέπει καταρχάς να επιλεγθεί ο τύπος μολυντή που υφίσταται. Conservative pollutant (συντηρητικός), non-conservative pollutant (αναπτυσσόμενος), heated discharge (εκροή θερμού υγρού), brine discharge (άλμη). Αυτός ο τύπος εκροής (brine) είναι αποτέλεσμα από τη διαδικασία της αφαλάτωσης. Στο CORMIX η άλμη τείνει να έχει πάντα πυκνότητα μεγαλύτερη από το περιβάλλον όπου εκρέει (οι φλέβες της άλμης είναι φλέβες αρνητικής άνωσης). Εφόσον επιλέγεται η εκροή άλμης ο χρήστης μπορεί να εισάγει τη συγκέντρωση της άλμης η οποία μπορεί να είναι conservative, non conservative, heated όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως .



Εικόνα 22. Γραφικό περιβάλλον CORMIX δεδομένα μολυντή

Δεδομένα συνθήκες περιβάλλοντος: Ένα ενεργό παράθυρο δεδομένων περιβάλλοντος φαίνεται στην Εικόνα 23. Οι συνθήκες περιβάλλοντος καθορίζονται από τη γεωμετρία και τις υδρολογικές συνθήκες στην γειτονία της εκροής. Εξαιτίας της σημαντικής επίπτωσης που έχει στη διαδικασία της μίξης η αλληλεπίδραση με τα όρια, οι απαιτήσεις δεδομένων περιβάλλοντος για ανάλυση σε πλευρικά περιορισμένο περιβάλλον ή όχι παρουσιάζονται παρακάτω. Οι αναλύσεις του CORMIX, όπως και όλες οι εκτιμήσεις στην περιοχή μίξης, πραγματοποιούνται συνήθως με την υπόθεση σταθερών συνθηκών περιβάλλοντος. Παρόλο που το πραγματικό υγρό περιβάλλον δεν είναι ποτέ σταθερό, αυτή η υπόθεση είναι αρκετή όταν η διαδικασία της μίξης είναι αρκετά γρήγορη σχετικά με τις κλίμακες μήκους των υδρογραφικών παραλλαγών. Σε μη σταθερές παλιρροιακές συνθήκες η υπόθεση αυτή δεν είναι χρήσιμη και μπορεί να σημειωθούν σημαντικές συγκεντρώσεις. Το CORMIX εκτιμά αυτήν την κατάσταση και υπολογίζει κάποιες επιδράσεις στην συμπεριφορά του πλουμίου.

Το γραφικό περιβάλλον για αυτό το παράθυρο δεδομένων φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 23. Γραφικό περιβάλλον CORMIX δεδομένα περιβάλλοντος

Τραχύτητα: Ένα άλλο στοιχείο που πρέπει να δοθεί σαν δεδομένο είναι είτε ο αριθμός Manning's n είτε ο συντελεστής Darcy- Weisbach f που μπορεί να καθοριστούν ανάλογα με την τραχύτητα του καναλιού. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται το n για διαφορετικές τραχύτητες.

Τύπος καναλιού	Manning's n
Φυσικό κανάλι επίπεδο, χωρίς βλάστηση	0.020
Φυσικό κανάλι με κάποιες πέτρες και βλάστηση	0.025
Καθαρό ευθύγραμμο φυσικό ποτάμι	0.025 – 0.030
Ελικοειδές κανάλι με στέρνες και ύφαλους	0.033 – 0.040
Ελικοειδές κανάλι με πυκνή βλάστηση	0.050 – 0.150
Καθαρό ευθύγραμμο αλουβιακό κανάλι	$0.031d^{1/6}$ $d = 75\%$ της εναπόθεσης ιζήματος σε πόδια(feet)

Πίνακας 2. Αριθμός Manning's n συναρτήσει της τραχύτητας [Μπάτσος, 2011]

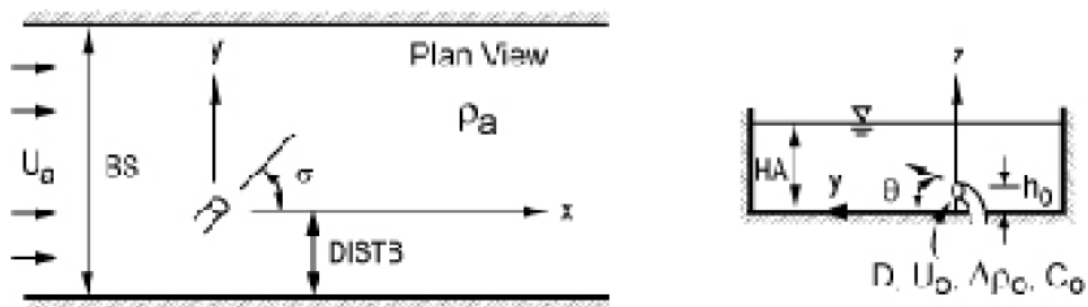
Πυκνότητα: Οι πληροφορίες για την διανομή της πυκνότητας στον αποδέκτη είναι ένα πολύ σημαντικό στοιχείο για τη σωστή πρόβλεψη της συμπεριφοράς της

φλέβας. Το CORMIX εξετάζει πρώτα αν το περιβάλλον υγρό είναι υφάλμυρο ή αλμυρό. Αν είναι υφάλμυρο και η θερμοκρασία του είναι πάνω από 40C, το σύστημα δίνει τη δυνατότητα να εισαχθεί η θερμοκρασία περιβάλλοντος και υπολογίζει την πυκνότητα. Αυτός είναι και ο τρόπος που προτείνεται για να υπολογιστεί την πυκνότητα υφάλμυρου νερού, παρόλο που η θερμοκρασία δεν χρειάζεται για την ανάλυση των συνθηκών μίξης. Τυπικές τιμές αλατότητας για ανοιχτή θάλασσα είναι 33-35 ppt. Ο χρήστης καθορίζει τότε η πυκνότητα είναι ομοιόμορφη ή όχι. Πρακτικά μεταβολές της πυκνότητας μικρότερες από 0.1 kg/m³ και θερμοκρασίας λιγότερο από 10C μπορούν να αμεληθούν. Για ομοιόμορφες συνθήκες καθορίζονται η μέση πυκνότητα και μέση θερμοκρασία.

Ταχύτητα ανέμου: αφού καθοριστεί η ταχύτητα ανέμου σχεδιασμού, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η ταχύτητα ανέμου δεν παίζει ρόλο στη μίξη της κοντινής περιοχής και μπορεί μόνο να επηρεάσει την συμπεριφορά του πλουμίου στην μακρινή περιοχή (και ιδιαίτερα για θερμές φλέβες).

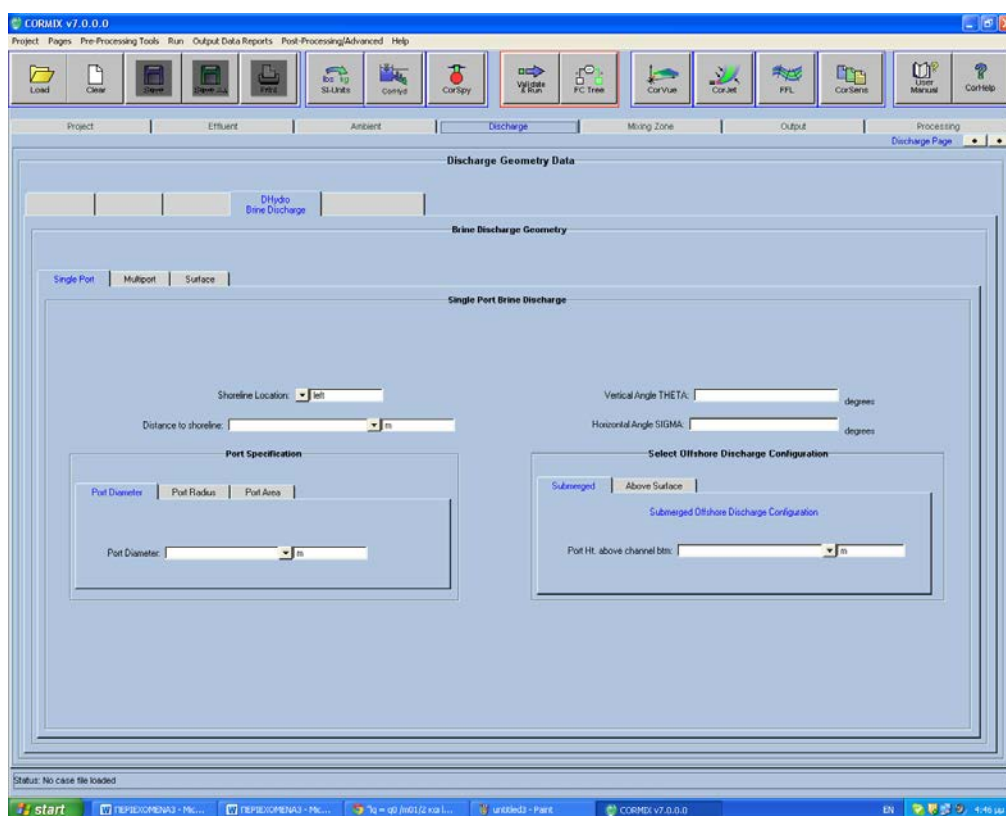
Δεδομένα γεωμετρίας εκροής: Υπάρχουν τρεις διαφορετικές επιλογές, εκροή από βυθισμένο στόμιο (CORMIX 1), από βυθισμένο διαχυτήρα πολλών στομιών (CORMIX 2) και επιφανειακή εκροή (CORMIX 3). Για να μπορέσει το CORMIX 1 να προσανατολίσει την φλέβα χρειάζεται να προσδιοριστούν κάποια στοιχεία:

- I. Τοποθεσία της πλησιέστερης ακτής (δεξιά ή αριστερά) όπως τη βλέπει κάποιος παρατηρητής που κοιτάζει κατά τη φορά της εκροής.
- II. Απόσταση από την πλησιέστερη ακτή (DISTB).
- III. Διάμετρος στομίου εκροής
- IV. Για βυθισμένες εκροές, ύψος από το κέντρο του στομίου μέχρι τον πυθμένα (H₀).
- V. Γωνία θ που σχηματίζεται στο κατακόρυφο επίπεδο από τον άξονα του στομίου με την οριζόντιο (THETA).
- VI. Γωνία σ που σχηματίζεται στο οριζόντιο επίπεδο από τον άξονα της φλέβας δεξιόστροφα ως τον άξονα χ (SIGMA).



Εικόνα 24. Γραφική αναπαράσταση γωνίας θ και σ cormix (cormix manual)

Το γραφικό περιβάλλον για αυτό το παράθυρο δεδομένων φαίνεται στην Εικόνα 25.



Εικόνα 25. Γραφικό περιβάλλον CORMIX δεδομένα εκροής

6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ CORMIX

6.1 Εφαρμογή 1η: Υποθετική υποβρύχια εκροή άλμης

Μία εγκατάσταση αφαλάτωσης εκρέει άλμη κοντά σε ακτή με συγκέντρωση 100% πάνω από την συγκέντρωση περιβάλλοντος, με παροχή $1\text{m}^3/\text{s}$. Η πυκνότητα της εκροής είναι $1052.9\text{kg}/\text{m}^3$. Το περιβάλλον όπου γίνεται η εκροή έχει βάθος στο σημείο της εκροής 26.204m και κλίση πυθμένα 3° . Η ταχύτητα του ρεύματος παράλληλο στην ακτή είναι $0.2\text{m}/\text{s}$ και η πυκνότητα της θάλασσας είναι $1023.98\text{kg}/\text{m}^3$. Η εκροή γίνεται από ένα ακροφύσιο σε απόσταση 500m από την ακτή. Το ακροφύσιο βρίσκεται σε κάθετη γωνία 45° και οριζόντια γωνία 90° . Η διάμετρος του ακροφυσίου είναι 0.65m και εκρέει σε απόσταση 1m από το πυθμένα. Η νομοθεσία ορίζει διάλυση 10% της αρχικής συγκέντρωσης σε απόσταση 300m από το σημείο της εκροής. Ο συντελεστής τραχύτητας Darcy – Weisbach είναι 0,025 και ταχύτητα ανέμου $2\text{m}/\text{s}$.

Τα δεδομένα της άσκησης συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3. Δεδομένα υποθετικής υποβρύχιας εκροής άλμης

Παράμετρος	Επεξήγηση	Αρχική Τιμή
Q	Παροχή	$1\text{m}^3/\text{s}$
ρ_o	Πυκνότητα εκροής	$1052.9\text{kg}/\text{m}^3$
ρ_a	Πυκνότητα περιβάλλοντος	$1023.98\text{kg}/\text{m}^3$
D_0	Διάμετρος ακροφυσίου	0.65m
SLOPE	Κλίση Πυθμένα	3°
U_A	Ταχύτητα περιβάλλοντος	$0.2\text{m}/\text{s}$
DISTB	Απόσταση από ακτή	500m
THETA	Κάθετη γωνία εκροής	45
SIGMA	Οριζόντια γωνία εκροής	90
CSTD	Συγκέντρωση νομοθεσίας	10%
RMZ	Ζώνη ανάμιξης	300m
UW	Ταχύτητα ανέμου	$2\text{m}/\text{s}$
F	Συντελεστής Darcy Weisbach	0.025

Στη συνέχεια εισάγονται τα δεδομένα για το περιβάλλον όπου γίνεται η εκροή. Συγκεκριμένα εισάγονται το βάθος της όπου γίνεται η απορροή (26,204 m), την ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή (2 m/s), την κλίση του πυθμένα (3%), την ταχύτητα των ρευμάτων στη θαλάσσια περιοχή που εξετάζεται τα οποία επηρεάζουν τη διασπορά της άλμης (0,2m/s). Το CORMIX δεν είναι δυναμικό μοντέλο και μπορούμε να εισάγουμε μόνο σταθερή ταχύτητα του ανέμου και των ρευμάτων στη περιοχή. Ύστερα εισάγεται την μέση πυκνότητα της θαλάσσιας περιοχής υπό μελέτη 1023.98 kg/m^3 και τον συντελεστή Darcy-Weisbach 0,025.

Στη συνέχεια εισάγονται τα δεδομένα για την εκροή. Επιλέγεται το CORMIX 1 για μονό υποβρύχιο ακροφύσιο. Στην περίπτωση αυτή βρίσκεται 500 μέτρα μακριά από την ακτή σηματοδύοντας κάθετα σε αυτή. Εισάγεται λοιπόν γωνία $\theta=45^\circ$ και γωνία $\sigma=90^\circ$. Η γωνία θ είναι που σηματοδύει το ακροφύσιο ως προς τον άξονα των z και η γωνία σ ως προς τον άξονα των x. Ο άξονας των x είναι παράλληλος στην ακτογραμμή. Εισάγουμε διάμετρο του αγωγού 0,65m και απόσταση του κέντρου του αγωγού από τον πυθμένα 1 m.

Προκειμένου να διαπιστωθεί αν η εγκατάσταση ξεπερνάει τα όρια της νομοθεσίας εισάγονται τα δεδομένα της ζώνης ανάμειξης. Συγκεκριμένα πρέπει να επιτυγχάνεται διάλυση 10 % στα 300 μέτρα από την απόρριψη. Η περιοχή ενδιαφέροντος είναι 1000 m.

Τα εξαγόμενα αρχεία από το cormix είναι: prediction file, session report, flow class description, design recommendations και processing record. Ύστερα ελέγχουμε και τρέχουμε το μοντέλο από το validate and run. Η κατηγοριοποίηση της ροής από το FC tree του CORMIX είναι η κατηγορία NH1.

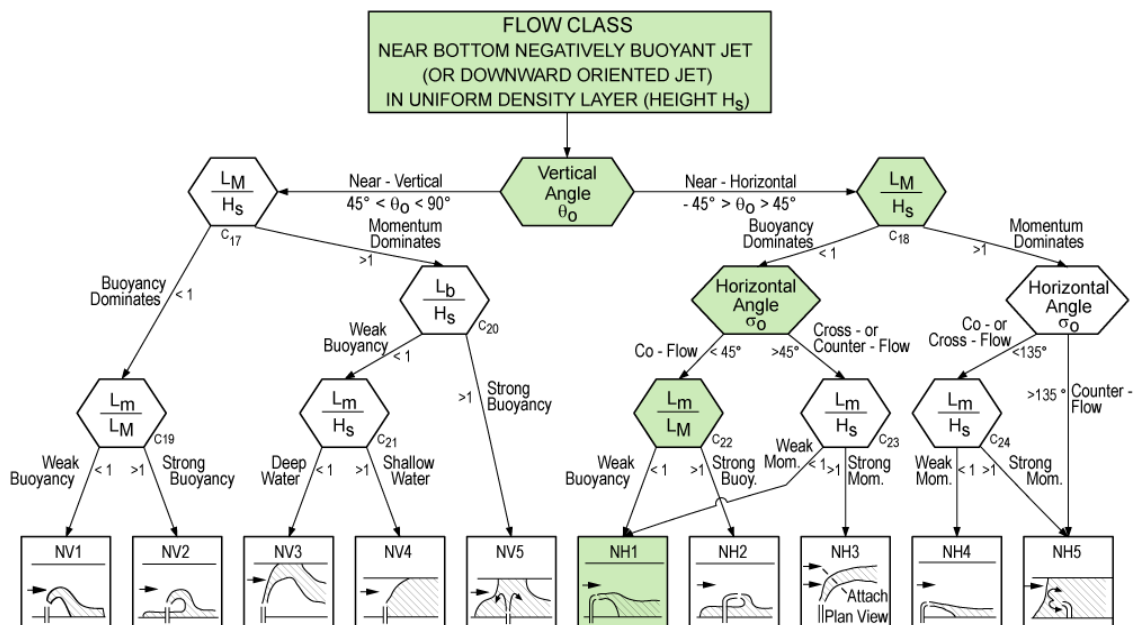
Η κατηγοριοποίηση NH1 είναι για φλέβες αρνητικής άνωσης που εκρέουν οριζόντια ή σχεδόν οριζόντια. Η ταχύτητα του περιβάλλοντος επιδράει σχετικά ισχυρά. Η φλέβα μπορεί να ανυψωθεί ή να υπάρχει ακόμα και θετική άνωση εάν ο διαχυτήρας εκρέει προς τα κάτω και η δέσμη ροής έρθει σε επαφή με στρωματοποίηση στο πυθμένα. Στη δέσμη ροής μετά το μέγιστο ύψος θα κυριαρχήσει η αρνητική άνωση και θα συμπεριφερθεί σαν πλούμιο.

Η επαφή του πλουμίου με την ακτή δεν εμφανίζεται (δεν συναντά εμπόδια σε αυτή τη προσομοίωση). Το πρόβλημα όπως ορίστηκε είναι ένα πρόβλημα εκροής άλμης με ένα στόμιο υπόγειας εκροής (CORMIX 1). Οι κλίμακες μήκους όπως αυτές υπολογίστηκαν από το CORMIX παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4 : Κλίμακες μήκους CORMIX 1 για το πρόβλημα.

Κλίμακα μήκους	(m)
L_Q	1.15
L_m	4.34
L_b	34.62
L_M	1.54
L_m'	99999
L_b'	99999

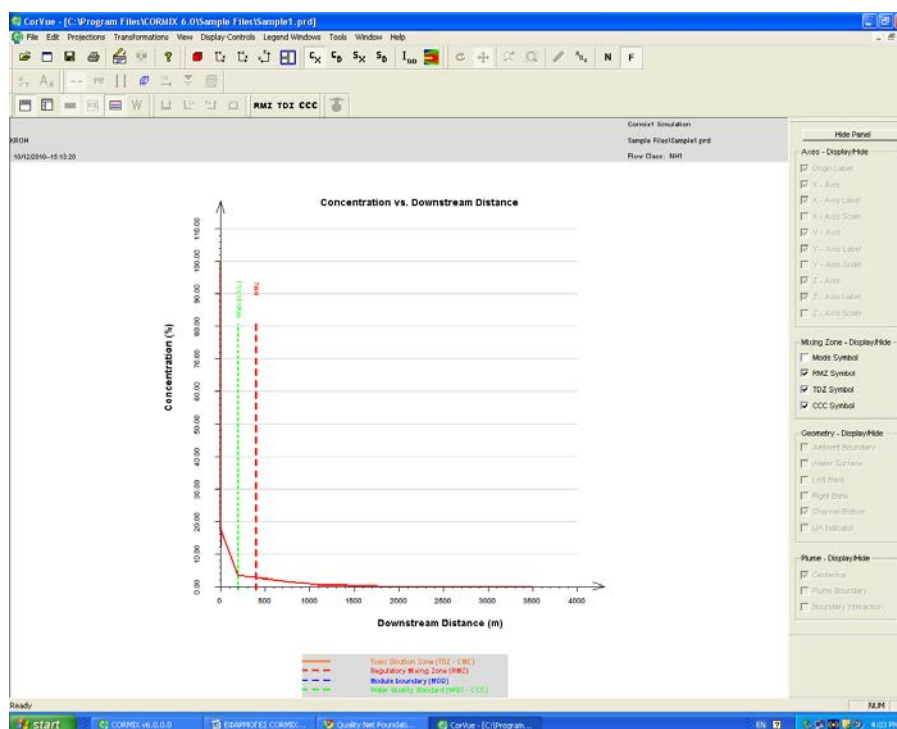
Η κατηγοριοποίηση της εκροής έγινε όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω δενδρόγραμμα:



Εικόνα 26. Δενδρόγραμμα κατηγοριοποίησης της εκροής του προβλήματος.

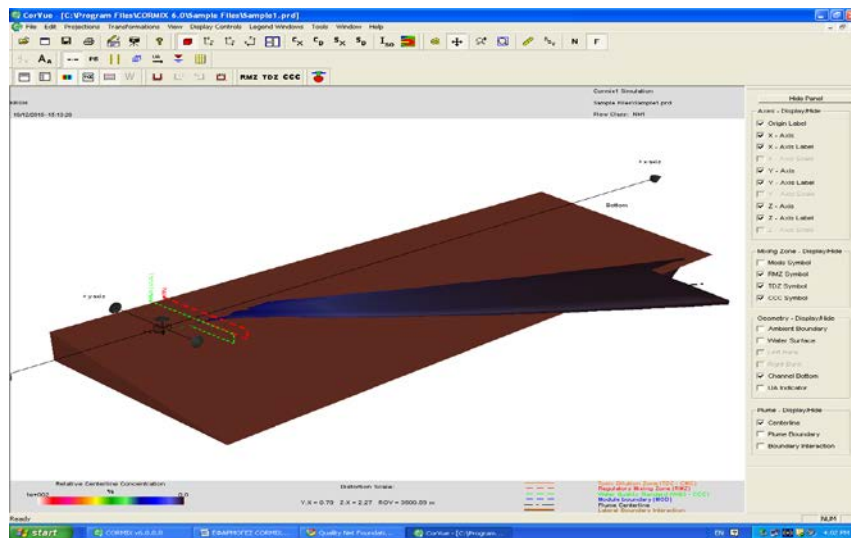
Στη ζώνη κανονικής ανάμιξης (RMZ) η κατάσταση του πλουμίου όπως αυτή έχει οριστεί έχει συγκέντρωση ρυπαντή $c=2.19\%$ και λόγο διάλυσης $=45,7$. Στο σημείο του πλουμίου με συντεταγμένες $x = 300m$, $y = -186.07m$, $z = -38.65m$ (συντεταγμένες γραμμής μέσης της ροής), το μέγεθος του πλουμίου είναι 19.96 (μισό πλάτος) και 1.33 πάχος. Αθροιστικός χρόνος ταξιδιού $< 4.42sec$. Στο σημείο αυτό το πλούμιο δεν έχει έρθει σε επαφή με καμία όχθη. Επιπλέον η ποιότητα νερού συνάδει με τα κριτήρια που εισήχθησαν εντός της κανονικής ζώνης ανάμιξης. Ποιο

συγκεκριμένα, η ποιότητα του περιβάλλοντος νερού επιτεύχθηκε στο σημείο $x=144\text{m}$, $y=-29.66\text{m}$, $z=-30.54\text{m}$. Στο σημείο αυτό ο λόγος διάλυσης είναι 10, η συγκέντρωση είναι 10% ενώ το πλούμιο έχει διαστάσεις μισό πλάτος = 30.54m και πάχος = 0.92m.

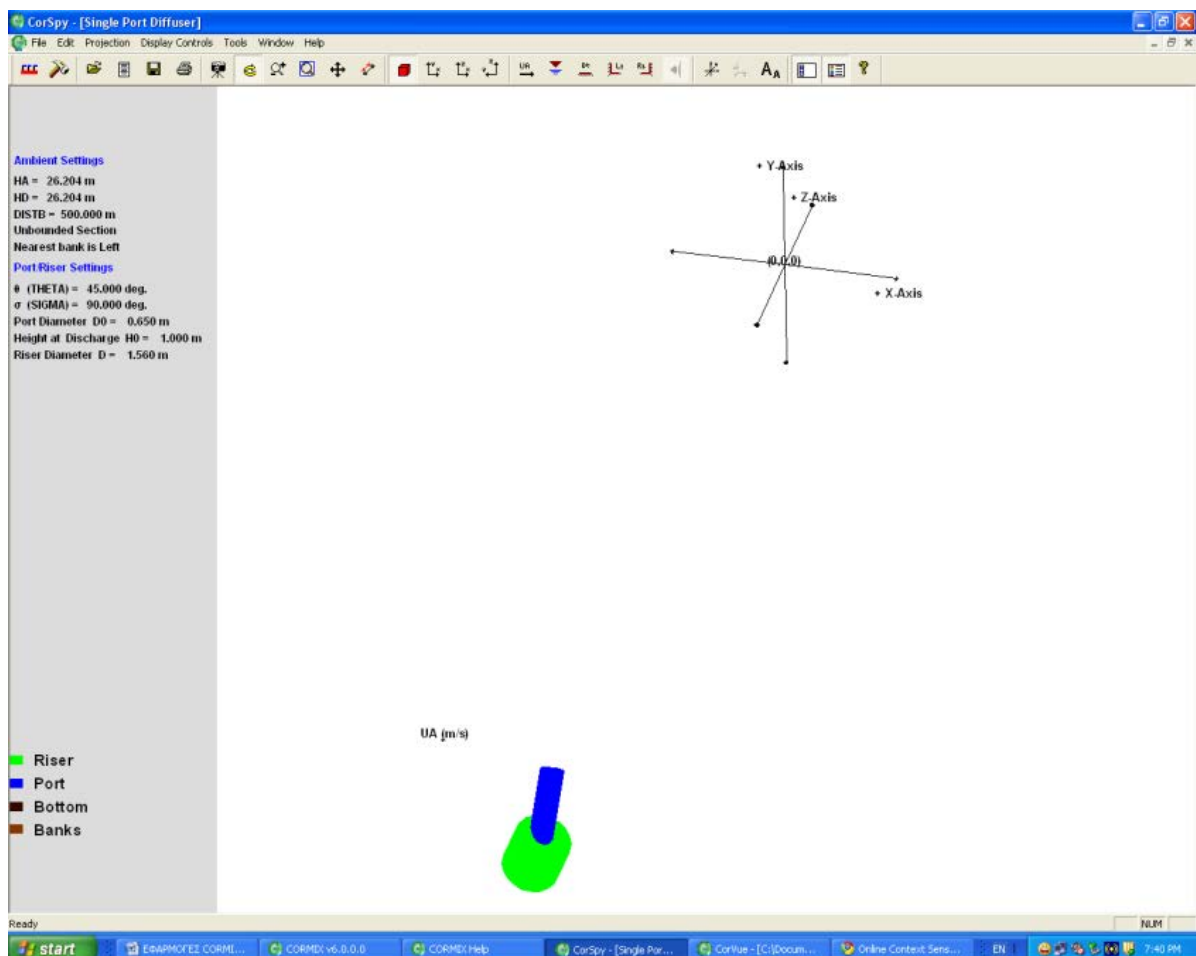


Εικόνα 27. Διάγραμμα συγκέντρωσης του πλουμίου σε συνάρτηση με την απόσταση από το σημείο εκροής

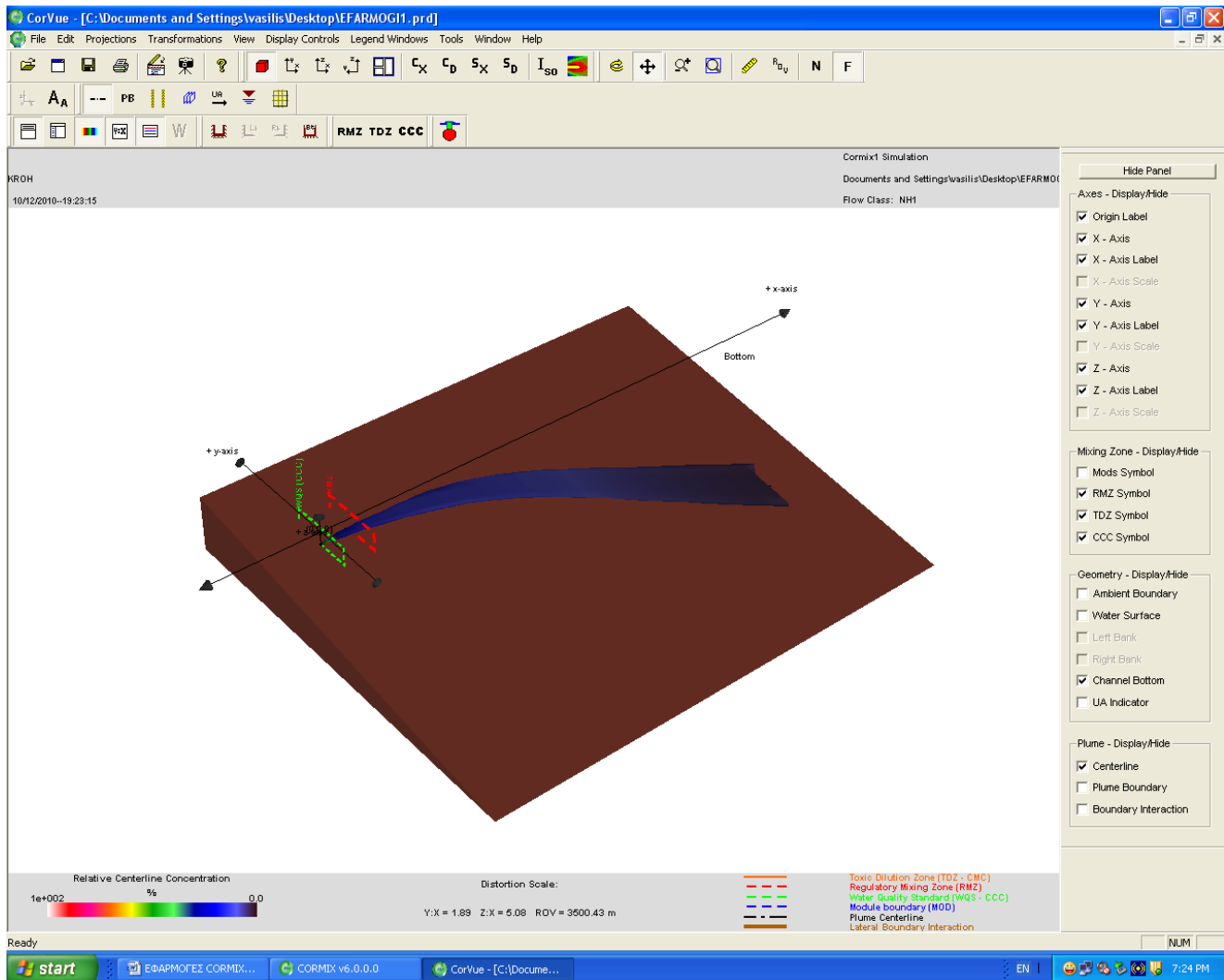
CorVue



Εικόνα 28. Τρισδιάστατη απεικόνιση του πλουμίου για τη περιοχή ενδιαφέροντος.

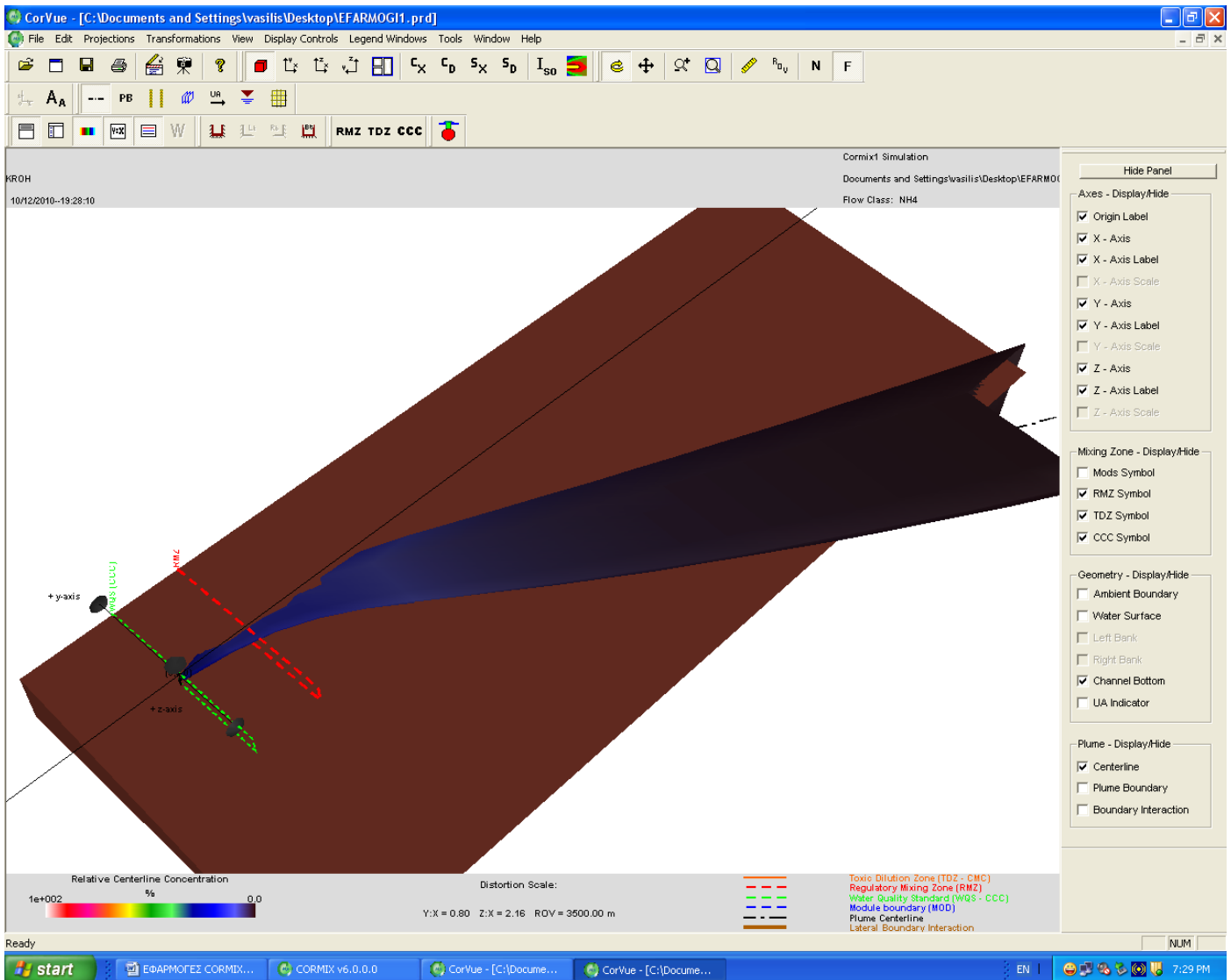


Εικόνα 29. Απεικόνιση διαχυτήρα ενός στομίου.



Εικόνα 30. Εφαρμογή 1^η με ταχύτητα περιβάλλοντος (ρεύμα) 0,6 m/s

Εδώ μεταβάλλεται μόνο η ταχύτητα των ρευμάτων και παρατηρείται ότι το δυνατότερο ρεύμα συμπαρασέρνει τη δέσμη ροής λίγο περισσότερο από πριν. Συγκεκριμένα η ταχύτητα περιβάλλοντος (ρεύμα) είναι 0,6 m/s.



Εικόνα 31. Εφαρμογή 1^η με διάμετρο του ακροφυσίου από 0,65 m σε 0,35 m.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση μεταβάλλεται η διάμετρος του ακροφυσίου από 0,65 m σε 0,35 m. Τα κριτήρια για την ποιότητα της εκροής εκληρόνονται ποιο γρήγορα, στα πρώτα μέτρα της εκροής. Αυτό συμβαίνει επειδή αυξάνεται η ταχύτητα εκροής και η τυρβώδης διάχυση στα πρώτα μέτρα .

6.2 Εφαρμογή 2^η: Υποθετική επιφανειακή εκροή άλμης

Η εκροή μίας εγκατάστασης αφαλάτωσης, επιστρέφει στη θάλασσα από την οποία προήλθε με 70% μεγαλύτερη αλατότητα. Η παροχή της εκροής είναι $25.33\text{m}^3/\text{s}$. Η πυκνότητα της εκροής είναι $1052.9\text{kg}/\text{m}^3$. Το περιβάλλον που γίνεται η διάθεση έχει 3.5m βάθος στο σημείο της εκροής και η κλίση του πυθμένα είναι 3° . Η ταχύτητα παράλληλα στην ακτή είναι $0.1\text{m}/\text{s}$. Η πυκνότητα του περιβάλλοντος που γίνεται η διάθεση είναι $1023.98\text{kg}/\text{m}^3$. Η εκροή είναι επιφανειακή (surface flush discharge), και πραγματοποιείται μέσω ανοικτού καναλιού που σχηματίζει οριζόντια γωνία SIGMA 90° με την ακτή. Τα χαρακτηριστικά του ανοικτού αγωγού είναι 8m πλάτος και 1.5m βάθος. Η νομοθεσία ορίζει επιπλέον αλατότητα μέχρι 10% σε απόσταση 500m από το σημείο της εκροής. Ο συντελεστής τραχύτητας Darcy – Weisbach είναι ίσος με 0,025 και η ταχύτητα ανέμου $0.1\text{m}/\text{s}$.

Τα δεδομένα της άσκησης συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

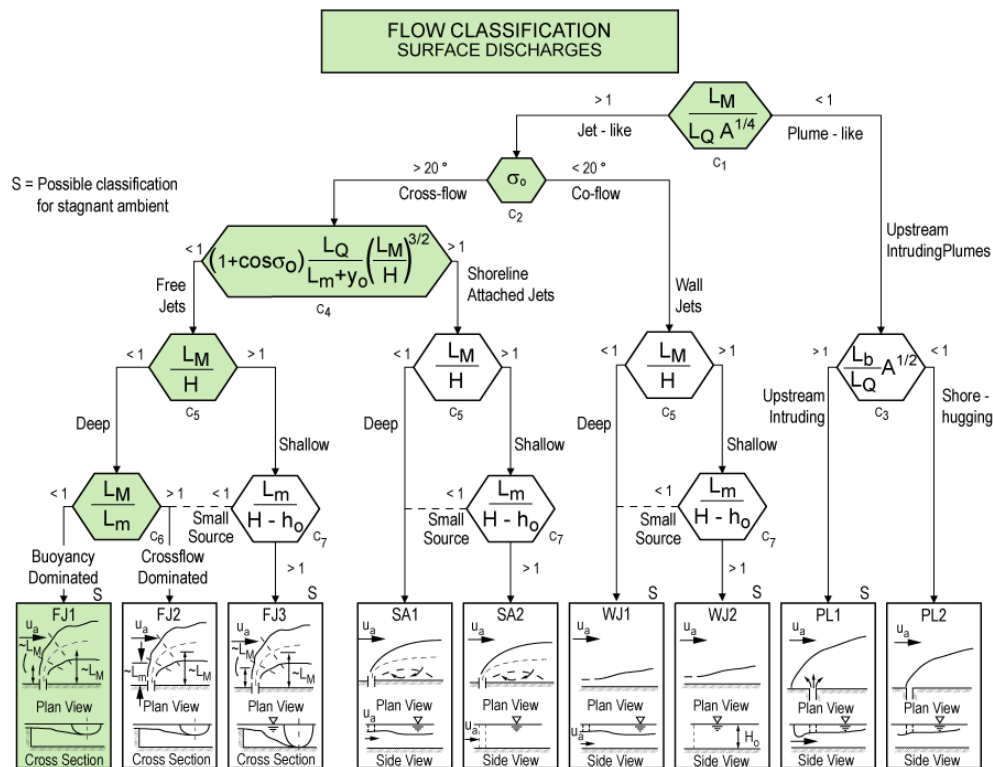
Πίνακας 5. Δεδομένα υποθετικής επιφανειακής εκροής άλμης

Παράμετρος	Επεξήγηση	Αρχική Τιμή
Q	Παροχή	$25.33\text{m}^3/\text{s}$
ρ_o	Πυκνότητα εκροής	$1052.9\text{kg}/\text{m}^3$
ρ_a	Πυκνότητα περιβάλλοντος	$1023.98\text{kg}/\text{m}^3$
SLOPE	Κλίση Πυθμένα	3°
U_A	Ταχύτητα περιβάλλοντος	$0.1\text{m}/\text{s}$
B_0	Πλάτος καναλιού	8m
H_0	Βάθος καναλιού	1.5m
SIGMA	Οριζόντια γωνία εκροής	90
CSTD	Συγκέντρωση νομοθεσίας	10%
RMZ	Ζώνη ανάμιξης	500m
UW	Ταχύτητα ανέμου	$0.1\text{m}/\text{s}$
F	Συντελεστής Darcy Weisbach	0.025

Η περίπτωση είναι ένα πρόβλημα εκροής άλμης από επιφανειακό ανοικτό αγωγό (CORMIX 3). Η πρώτη προσομοίωση στη οποία χρησιμοποιήθηκαν τα παραπάνω δεδομένα, παρουσιάζεται γραφικά.

Αποτελέσματα προσομοίωσης:

Η εκροή κατατάσσεται στην κατηγορία FJ1 των επιφανειακών απορροών.

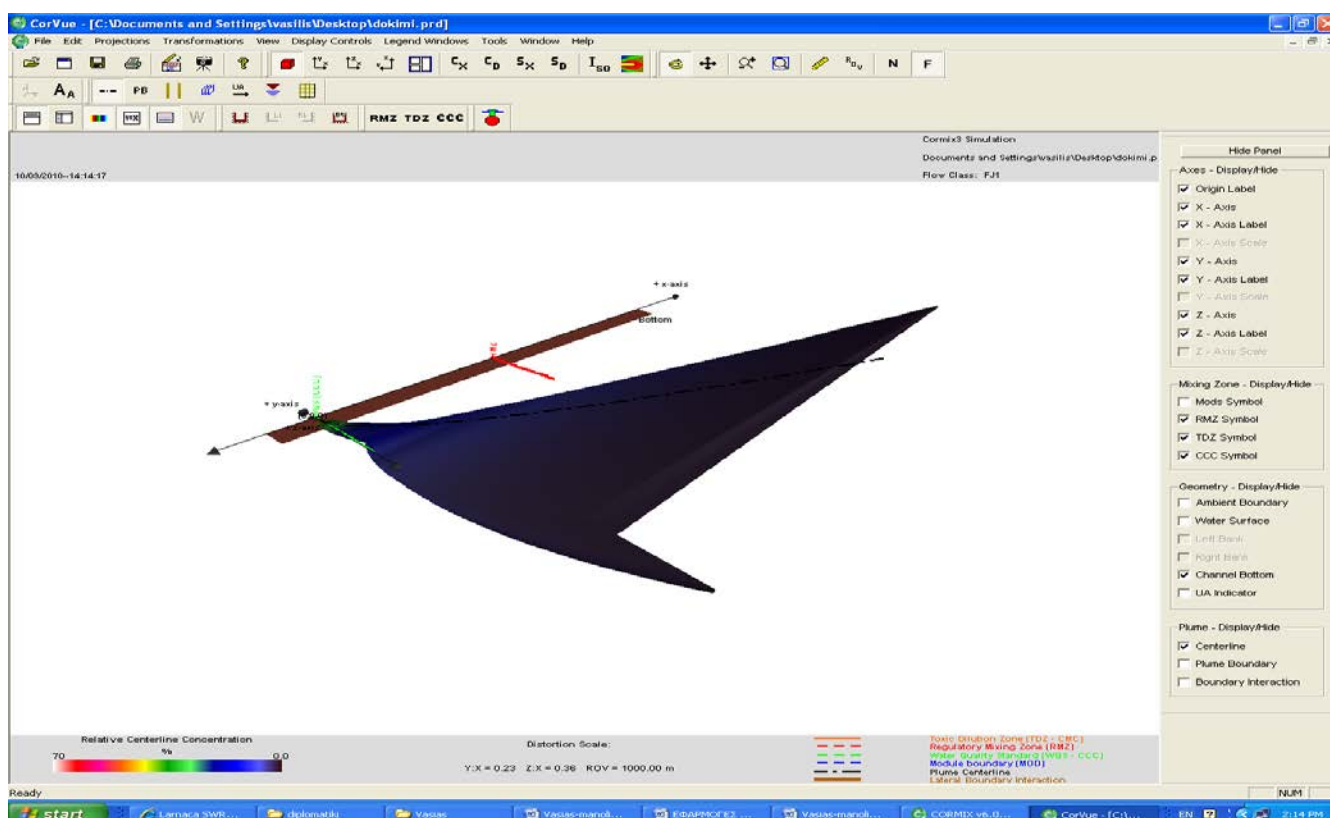


Εικόνα 32. Δενδρόγραμμα κατηγοριοποίησης της εκροής του προβλήματος-εφαρμογή 2^η

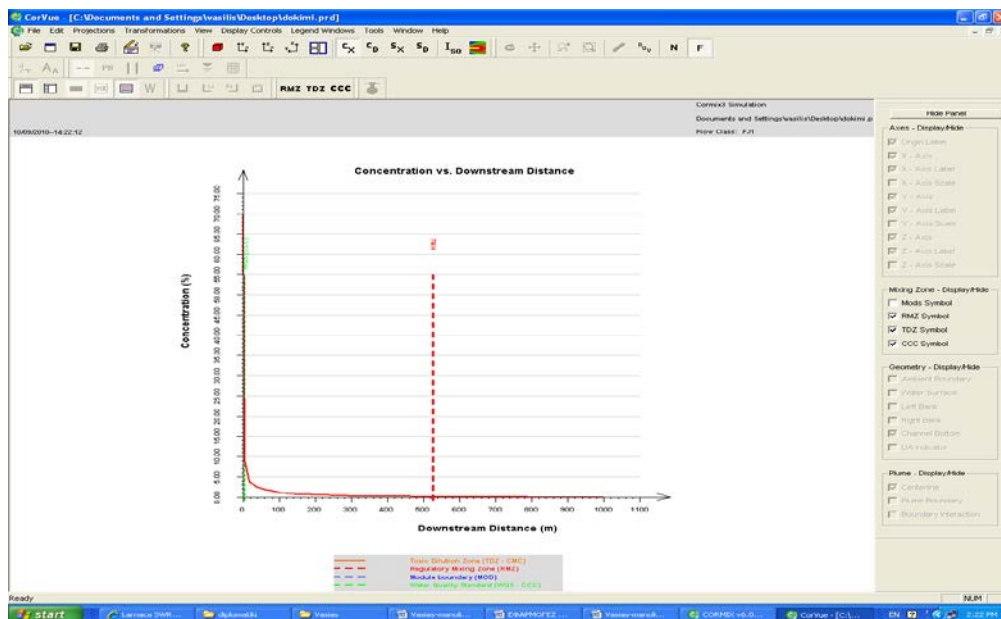
Κατηγοριοποίηση FJ1 : Η πυκνότητα της εκροής είναι μεγαλύτερη από του περιβάλλοντος στο επίπεδο της εκροής. Αρχικά παρατηρείται επαρκής διασπορά στο οριζόντιο και στο κάθετο άξονα. Έτσι η εκροή έχει αρνητική άνωση και θα τείνει να βυθίζεται. Το πλούμιο έρχεται σε πλήρη κατακόρυφη μίξη στην περιοχή κοντά στην εκροή, αλλά επαναστρωματοποιείται κατάντη, με αποτέλεσμα να μη βρίσκεται σε πλήρη μίξη σε μακρινή από την εκροή περιοχή. Το πλούμιο δεν συναντά εμπόδια σε αυτή τη προσομοίωση ούτε συναντά την ακτή.

Ζώνη κανονικής ανάμιξης (RMZ): Η κατάσταση του πλουμίου στη ζώνη κανονικής ανάμιξης όπως αυτή έχει οριστεί έχει συγκέντρωση ρυπαντή $c = 0,26\%$ και λόγος διάλυσης = 268.3. Στο σημείο του πλουμίου με συντεταγμένες $x = 500\text{m}$, $y = -2236.6\text{m}$, $z = -117.2\text{m}$ (συντεταγμένες γραμμής μέσης της ροής), το μέγεθος του πλουμίου είναι 325.4m (μισό πλάτος) και 2.58m πάχος. Στο σημείο αυτό το πλούμιο δεν έχει έρθει σε επαφή με καμία όχθη. Η ποιότητα νερού εντός της ζώνης κανονικής ανάμιξης έχει ικανοποιηθεί. Συγκεκριμένα, η ποιότητα του περιβάλλοντος νερού επιτεύχθηκε στο σημείο $x=5.14\text{m}$, $y=-156.06\text{m}$, $z=-8,18\text{m}$. Στο σημείο αυτό ο λόγος διάλυσης είναι 7, η συγκέντρωση είναι 10% ενώ το πλούμιο έχει διαστάσεις μισό πλάτος = 7.78m και πάχος = 2.58m.

CorVue

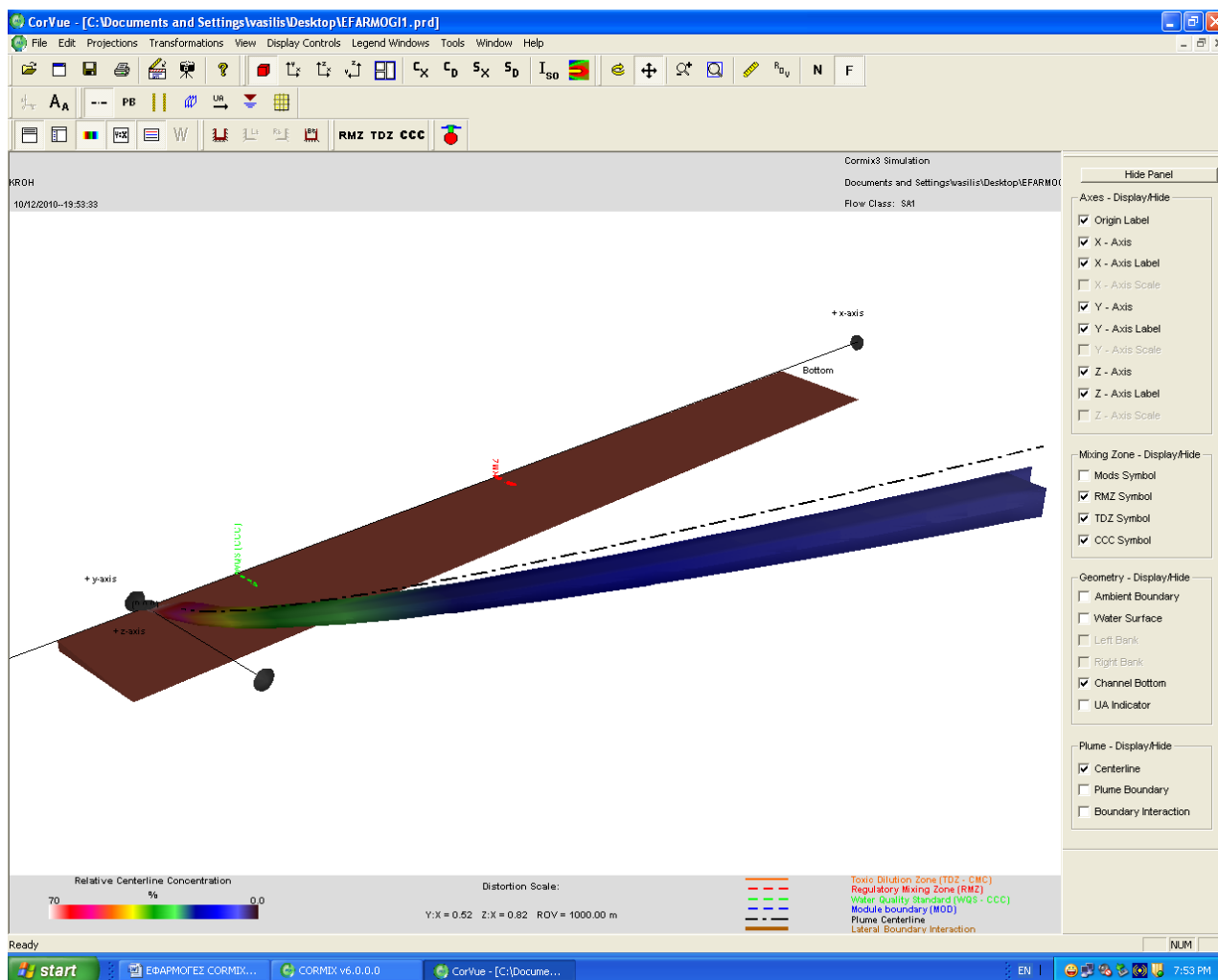


Εικόνα 33. Τρισδιάστατη απεικόνιση του πλουμίου για τη περιοχή ενδιαφέροντος-εφαρμογή 2^η



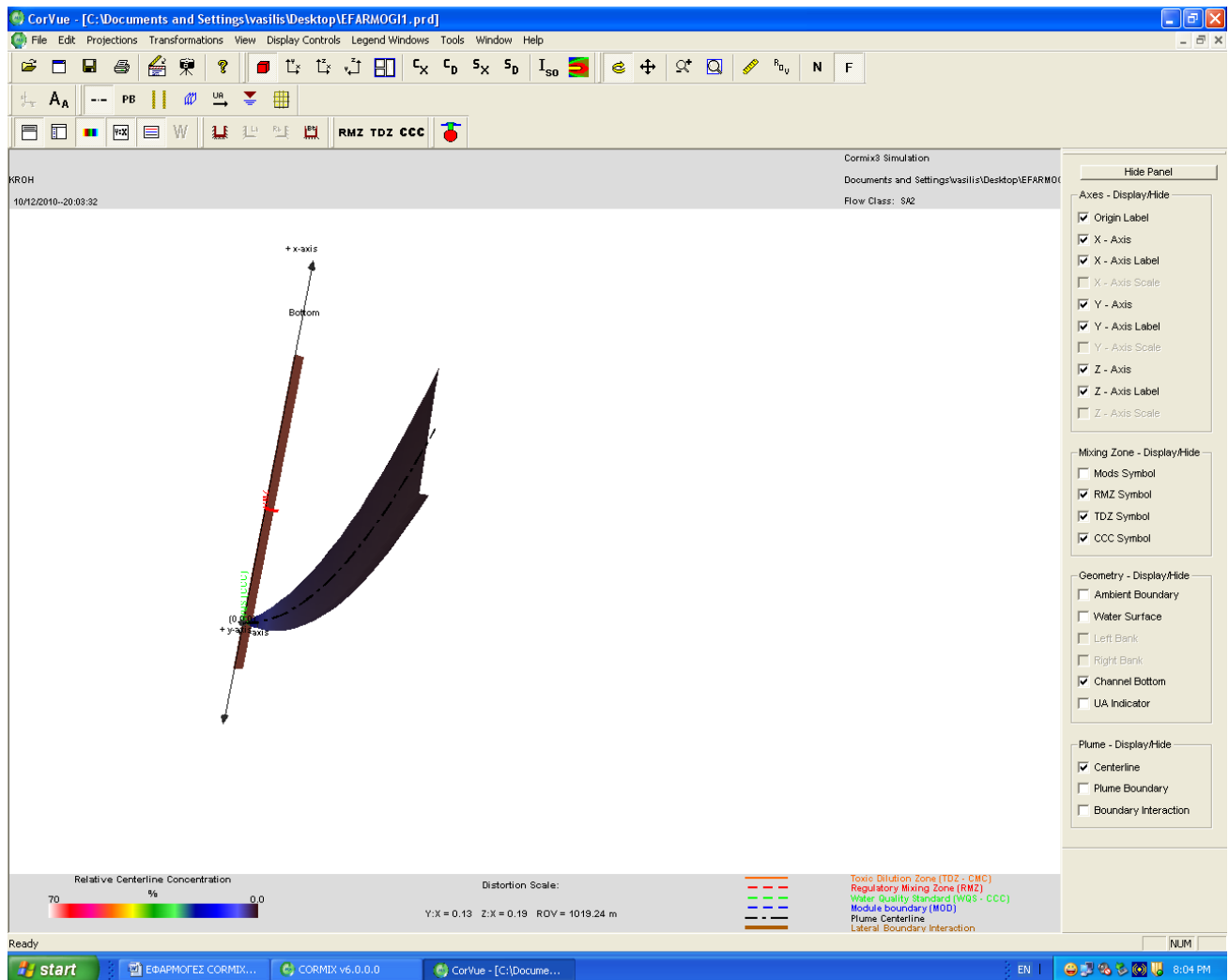
Εικόνα 34. Διάγραμμα συγκέντρωσης του πλουμίου σε συνάρτηση με την απόσταση από το σημείο εκροής.

Προτάσεις- Συμπεράσματα: Παρατηρείται ότι υπάρχει μία ασυνήθιστα μεγάλη ταχύτητα και όγκο εκροής, ο οποίος μας εγγυάται μια πολύ γρήγορη ανάμιξη και επιτυγχάνονται τα κριτήρια απόρριψης ήδη από τα πρώτα μέτρα. Αυτή η διάταξη προτείνεται προκειμένου να επιτευχθεί μεγάλη ταχύτητα εκροής στη μονάδα αφαλάτωσης.



Εικόνα 35. Εφαρμογή 2^η με ταχύτητα περιβάλλοντος (ρεύμα) 0,7 m/s

Αν αλλάξει η ταχύτητα περιβάλλοντος από 0,1 m/s σε 0,7 m/s τότε παρατηρείται ότι αργεί να επιτευχθεί η επιθυμητή συγκέντρωση. Αυτό γίνεται διότι αργεί η ροή να λειτουργήσει ως πλούμιο και να διαλυθεί γρηγορότερα. Το ρεύμα συμπαρασέρνει τη ροή περισσότερο.



Εικόνα 36. Εφαρμογή 2^η με μικρότερη διάμετρο του ακροφυσίου.

Αν μειωθούν οι διαστάσεις του αγωγού παρατηρείται ότι το πλούμιο απομακρύνεται περισσότερο από την ακτή αλλά έχει παρόμοια διάχυση. Αυτό γίνεται διότι δημιουργείται μεγαλύτερη ταχύτητα εξόδου του πλουμίου από το κανάλι απόρριψης.

6.3 Εφαρμογή 3^η: Εκροή από εργοστάσιο αφαλάτωσης στη Λάρνακα

Υποβρύχια εκροή άλμης από εργοστάσιο αφαλάτωσης

Η εγκατάσταση αφαλάτωσης στη Λάρνακα έχει τα εξής χαρακτηριστικά. Συγκέντρωση σε περίσσεια 97 % από την συγκέντρωση της θάλασσας που γίνεται η απορροή. Συγκεκριμένα γίνεται απορροή με συγκέντρωση 72.000 mg/L – 82.000 mg/L και ο αποδέκτης έχει συγκέντρωση 38.000 mg/L – 40.000 mg/L όμοια με την μελλοντική εγκατάσταση αφαλάτωσης στη Λεμεσό. Παίρνεται μέση τιμή 77.000 mg/L συγκέντρωση απορροής και 39.000 mg/L συγκέντρωση αποδέκτη. Άρα περίσσεια 97%. Η παροχή από το ακροφύσιο είναι 0,740 m³/s και η πυκνότητα της απορροής είναι 1052,9 kg/m³. Με αυτά τα στοιχεία μπορούμε να συμπληρωθούν τις 2 πρώτες καρτέλες του CORMIX.

Πίνακας 6. Δεδομένα υποβρύχιας εκροής άλμης στη Λάρνακα

Παράμετρος	Επεξήγηση	Αρχική Τιμή
Q	Παροχή	0,740m³/s (64000 m³/day)
ρ_ο	Πυκνότητα εκροής	1052.9 kg/m³
ρ_α	Πυκνότητα περιβάλλοντος	1023.98kg/m³
D₀	Διάμετρος ακροφυσίου	1 m
SLOPE	Κλίση Πυθμένα	1,2°
U_A	Ταχύτητα περιβάλλοντος	0.2m/s
DISTB	Απόσταση από ακτή	1500 m
THETA	Κάθετη γωνία εκροής	0
SIGMA	Οριζόντια γωνία εκροής	0
CSTD	Συγκέντρωση νομοθεσίας	10%
RMZ	Ζώνη ανάμιξης	300m
UW	Ταχύτητα ανέμου	0,2m/s
F	Συντελεστής Darcy Weisbach	0.025

Στη συνέχεια εισάγονται τα δεδομένα για το περιβάλλον όπου γίνεται η εκροή. Συγκεκριμένα εισάγεται το βάθος της όπου γίνεται η εκροή (18m), την ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή (0,2 m/s), την κλίση του πυθμένα (1,2 %), την ταχύτητα των ρευμάτων στη θαλάσσια περιοχή που εξετάζεται τα οποία επηρεάζουν τη διασπορά της άλμης (0,25m/s). Το CORMIX δεν είναι δυναμικό μοντέλο και μπορεί να εισαχθεί μόνο σταθερή ταχύτητα του ανέμου και των ρευμάτων στη περιοχή. Ύστερα εισάγεται την μέση πυκνότητα της θαλάσσιας περιοχής υπό μελέτη 1023.9 kg/m^3 και τον συντελεστή Darcy-Weisbach 0,025.

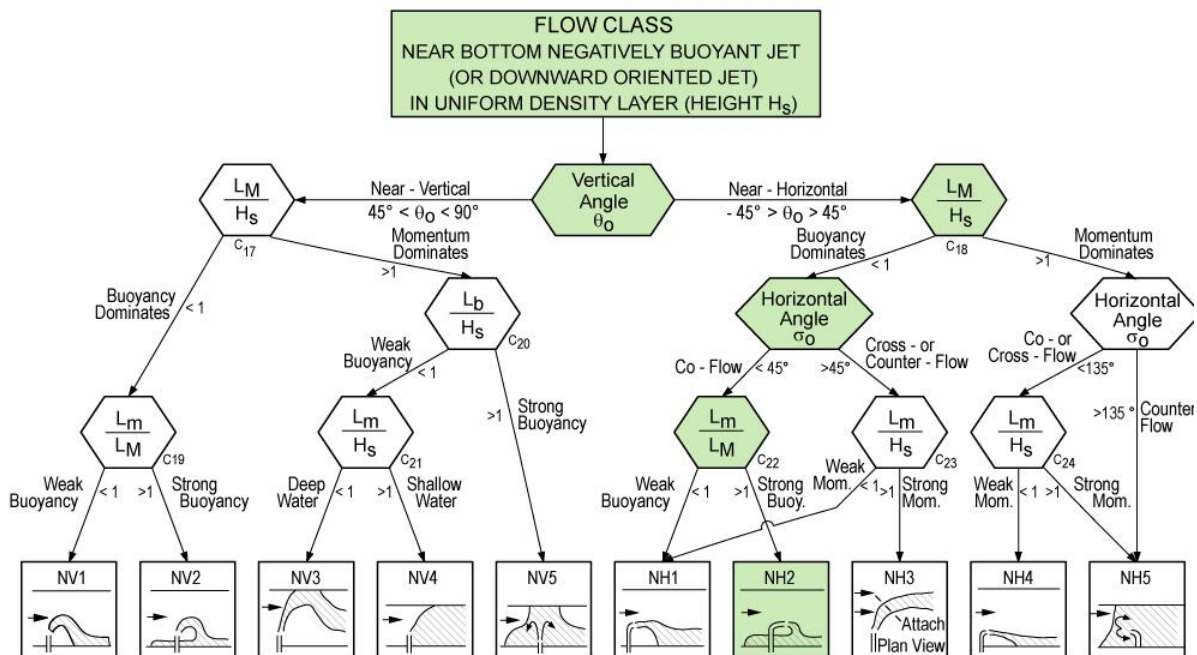
Στη συνέχεια εισάγονται τα δεδομένα για την εκροή. Επιλέγεται το CORMIX 1 για μονό υποβρύχιο ακροφύσιο. Στην περίπτωση μας βρίσκεται 1500m από την ακτή σηματοδύνοντας αριστερά. Εισάγεται λοιπόν γωνία θ και γωνία σ 0° και 0° αντίστοιχα. Η γωνία θ είναι που σηματοδύει το ακροφύσιο ως προς τον άξονα των z και η γωνία σ ως προς τον άξονα των x . Ο άξονας των x είναι παράλληλος στην ακτογραμμή. Εισάγεται διάμετρος του αγωγού 1 m και απόσταση του κέντρου του αγωγού από τον πυθμένα 1 m.

Προκειμένου να διαπιστωθεί αν η εγκατάσταση ξεπερνάει τα όρια της νομοθεσίας εισάγονται τα δεδομένα της ζώνης ανάμειξης. Συγκεκριμένα πρέπει να επιτυγχάνεται διάλυση 10 % στα 300 μέτρα από την απόρριψη. Η περιοχή ενδιαφέροντος είναι 1000 m.

Τα εξαγόμενα αρχεία από το cormix είναι: prediction file, session report, flow class description, design recommendations και processing record. Ύστερα ελέγχεται και τρέχεται το μοντέλο από το validate and run. Η κατηγοριοποίηση της ροής από το FC tree του CORMIX είναι η κατηγορία NH2.

Πίνακας 7. Κλίμακες μήκους εκροής εργοστασίου αφαλάτωσης στη Λάρνακα

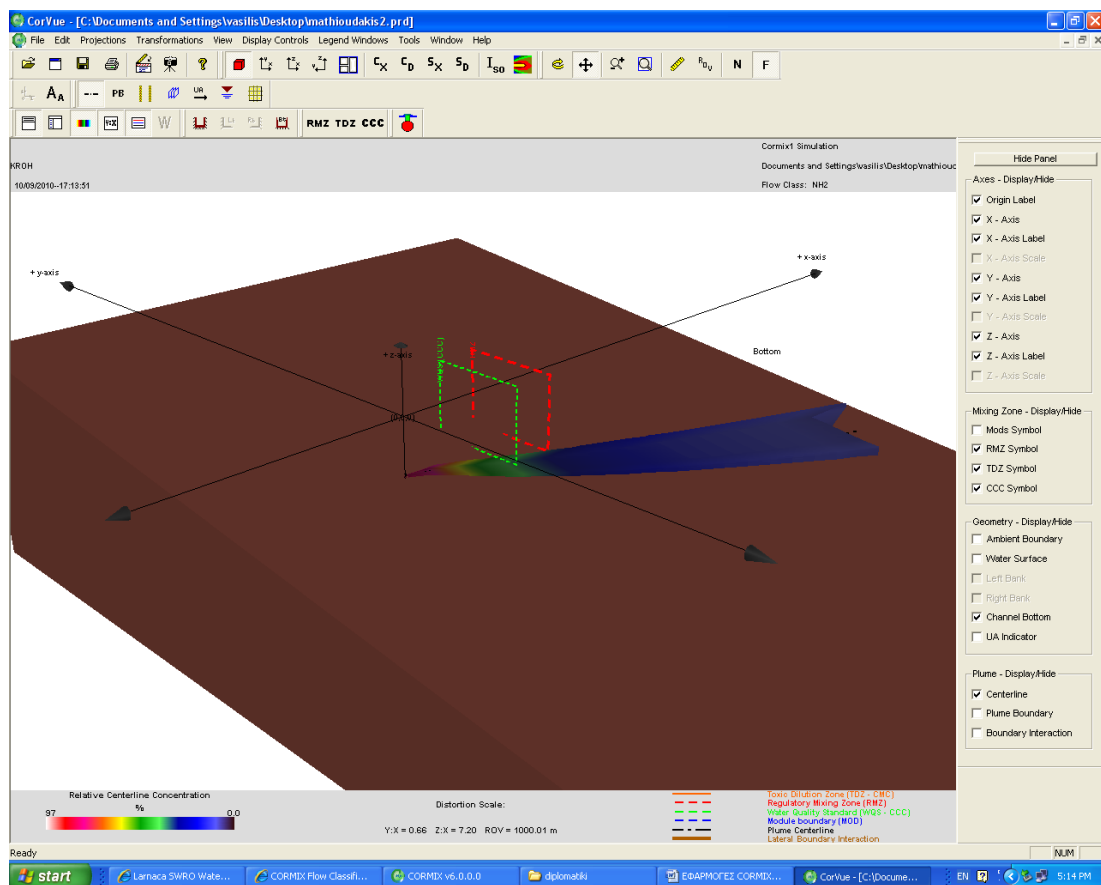
$L_Q = 0.89 \text{ m}$
$L_m = 3.34 \text{ m}$
$L_b = 13.12 \text{ m}$
$L_M = 1.69 \text{ m}$
$L_m' = 99999 \text{ m}$
$L_b' = 99999 \text{ m}$



Εικόνα 37. Δενδρόγραμμα κατηγοριοποίησης της εκροής του προβλήματος-εφαρμογή 3^η Η κατηγοριοποίηση είναι NH2

Η κατηγοριοποίηση NH2 είναι για φλέβες αρνητικής άνωσης που εκρέουν οριζόντια ή σχεδόν οριζόντια. Η ταχύτητα του περιβάλλοντος επιδράει πολύ λίγο. Η φλέβα μπορεί να ανυψωθεί ή να υπάρχει ακόμα και θετική άνωση εάν ο διαχυτήρας εκρέει προς τα κάτω και η δέσμη ροής έρθει σε επαφή με στρωματοποίησης στο πυθμένα. Στη δέσμη ροής μετά το μέγιστο ύψος θα κυριαρχήσει η αρνητική άνωση και θα συμπεριφερθεί σαν πλούμιο.

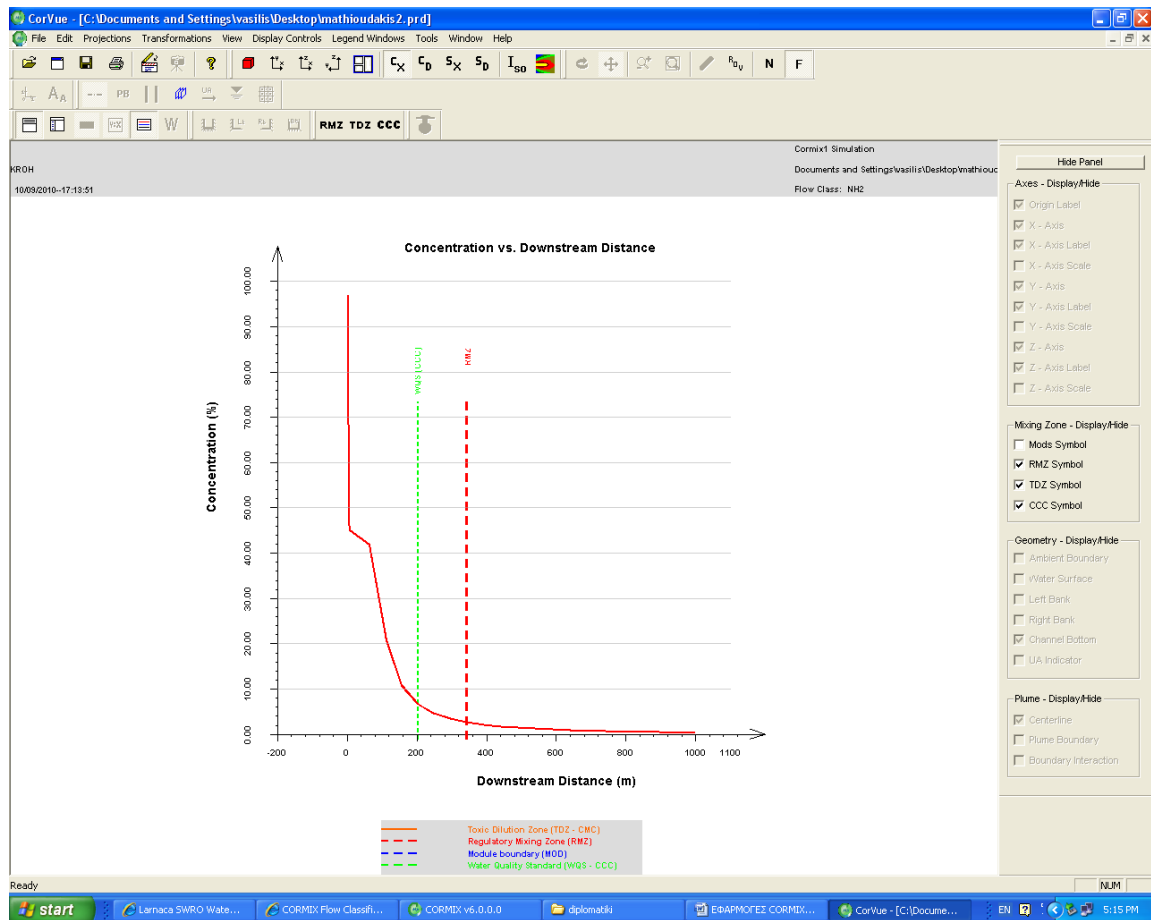
CoRVue



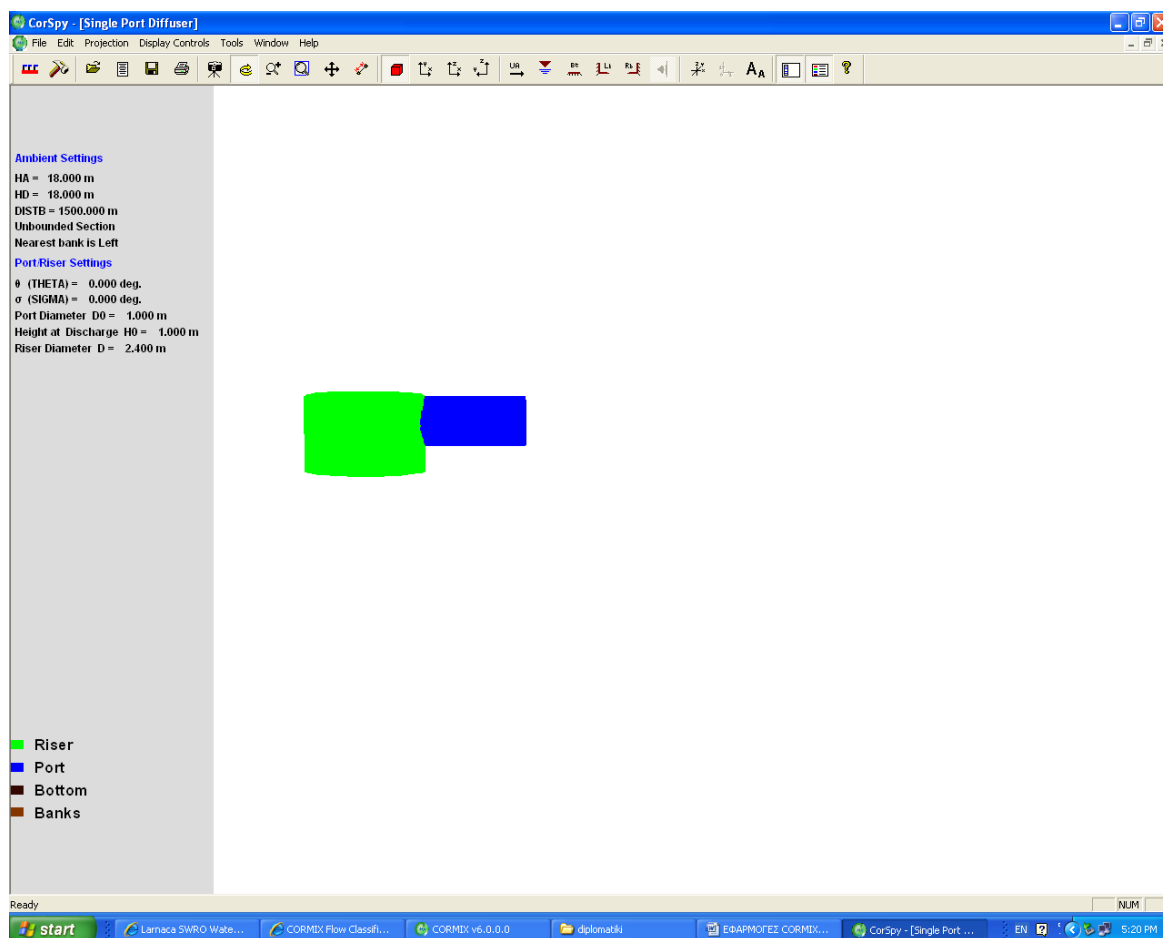
Εικόνα 38. τρισδιάστατη απεικόνιση του πλούμιου για τη περιοχή ενδιαφέροντος-εφαρμογή 3^η

Η περίσσεια άλμης στη περιοχή RMZ είναι 3.42% και ο λόγος διάλυσης 38.3. Θέση πλούμιου : $x = 300$ m, $y = -211.57$ m, $z = -20.54$ m. Οι διαστάσεις του πλούμιου είναι μισό πλάτος 22.75 m και πάχος 0.53 m. Το πλούμιο μέχρι αυτό το σημείο δεν έχει έρθει σε επαφή με την ακτή ή όχθη και ο εκτιμώμενος χρόνος για να φτάσει εκεί είναι $< 16,3897$ sec. Η ποιότητα του νερού επιτεύχθηκε στο σημείο $x = 164.77$ m, $y = -98.53$ m, $z = -19.18$ m. Δηλαδή σε αυτό το σημείο η συγκέντρωση (περίσσεια) ήταν 10 % και οι διαστάσεις του πλούμιου είναι μισό πλάτος 30.13 m και πάχος 0.44 m. Στο συγκεκριμένο γράφημα φαίνεται ότι η επιθυμητή συγκέντρωση επιτυγχάνεται στα 200 μέτρα περίπου από το σημείο της εκροής.

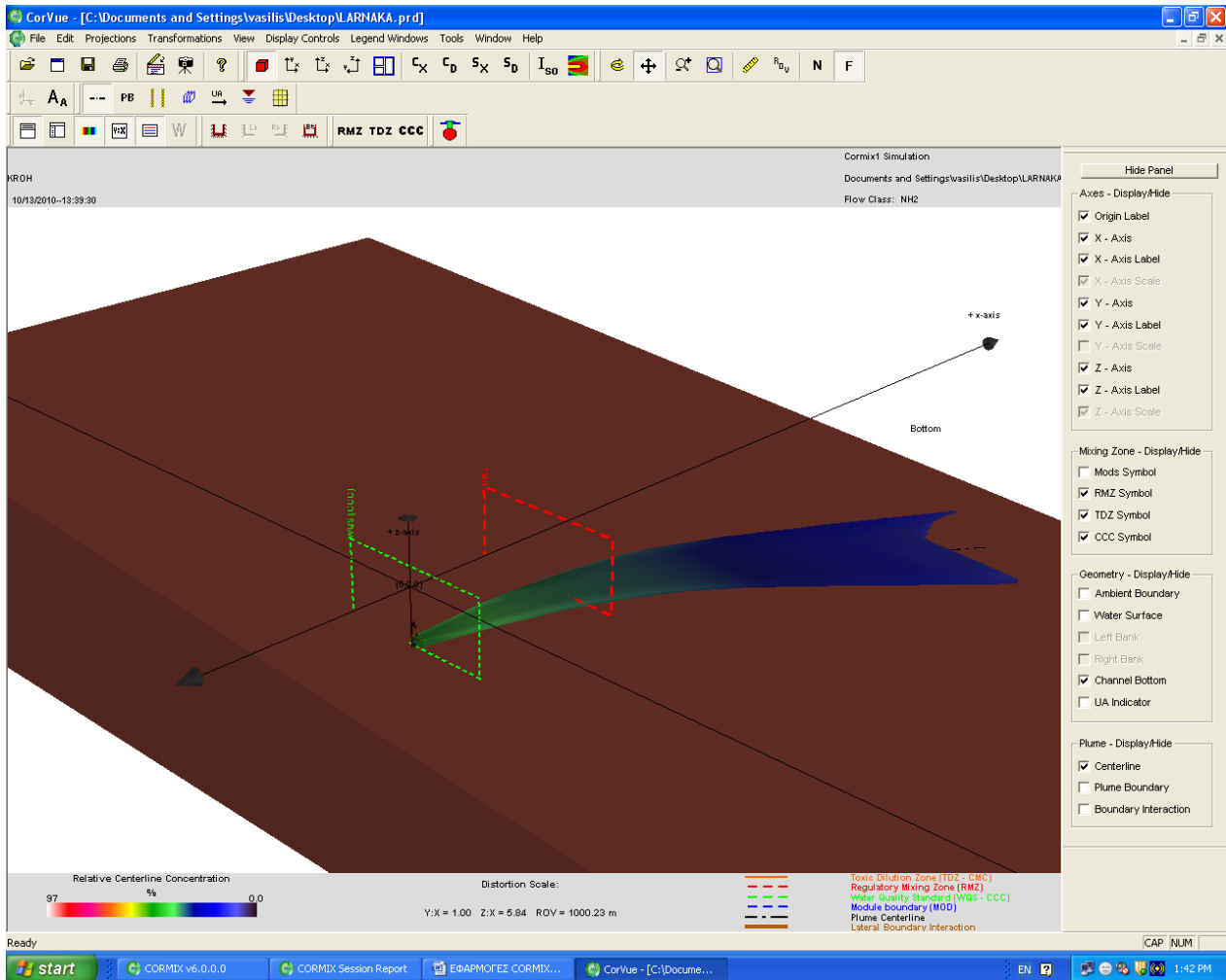
CorSpy



Εικόνα 39. Διάγραμμα συγκέντρωσης του πλουμίου σε συνάρτηση με την απόσταση από το σημείο εκροής. - εφαρμογή 3^η

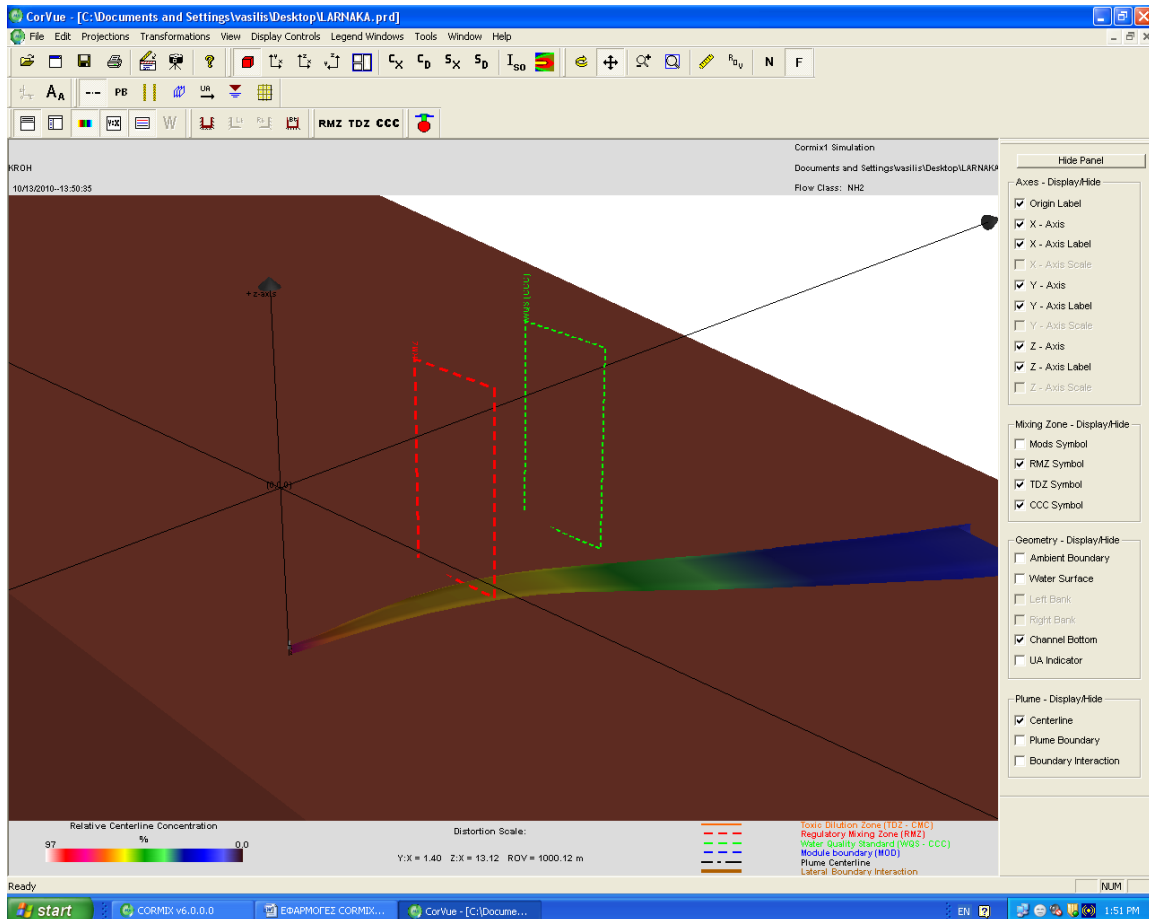


Εικόνα 40. Απεικόνιση διαχυτήρα ενός στομίου- εφαρμογή 3^η



Εικόνα 41. Εφαρμογή 3^η με το ακροφύσιο 4 m από τον πυθμένα, ορίσαμε γωνία θ 45° και διάμετρο ακροφυσίου 0,65 m.

Οι προϋποθέσεις της νομοθεσίας επετεύχθησαν στα πρώτα μέτρα και συγκεκριμένα στα 23.08 m όταν υψώθηκε το ακροφύσιο 4 m από τον πυθμένα, ορίστηκε γωνία θ 45° και διάμετρο ακροφυσίου 0,65 m. Αυτή η διάταξη συνίσταται για μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο απο τη μονάδα.



Εικόνα 42. Εφαρμογή 3^η με ταχύτητα περιβάλλοντος σε 0,7 m/s

Αν αλλάξει μόνο η ταχύτητα περιβάλλοντος τότε η μονάδα δεν συμβαδίζει με τα όρια της νομοθεσίας. Συγκεκριμένα αν η ταχύτητα περιβάλλοντος ανέλθει σε 0,7 m/s τότε επιθυμητή συγκέντρωση 10% επιτυγχάνεται στα 482.4 m σε απόλυτη απόσταση μακριά από την εκροή.

6.4 Εφαρμογή 4η: Εκροή από μελλοντικό εργοστάσιο αφαλάτωσης στη Λεμεσό

Υποβρύχια εκροή άλμης από εργοστάσιο αφαλάτωσης

Η εγκατάσταση αφαλάτωσης στη Λεμεσό που πρόκειται να λειτουργήσει το 2012 έχει τα εξής χαρακτηριστικά. Συγκέντρωση σε περίσσεια 97% από την συγκέντρωση της θάλασσας που γίνεται η απορροή. Συγκεκριμένα υπάρχει εκροή με συγκέντρωση 72000 mg/L – 82000 mg/L και ο αποδέκτης έχει συγκέντρωση 38.000 mg/L – 40.000 mg/L. Παίρνεται μέση τιμή 77.000 mg/L συγκέντρωση εκροής και 39.000 mg/L συγκέντρωση αποδέκτη. Άρα περίσσεια 97%. Η παροχή από το διαχυτήρα είναι 0,463 m³/s και η πυκνότητα της απορροής είναι 1052,9 kg/m³. Με αυτά τα στοιχεία μπορούμε να συμπληρωθούν οι 2 πρώτες καρτέλες του CORMIX.

Πίνακας 8. Δεδομένα υποβρύχιας εκροής άλμης στη Λεμεσό

Παράμετρος	Επεξήγηση	Αρχική Τιμή
Q	Παροχή	0,463m³/s m³/day) (64000
ρ_ο	Πυκνότητα εκροής	1052.9 kg/m³
ρ_α	Πυκνότητα περιβάλλοντος	1023.98kg/m³
D₀	Διάμετρος ακροφυσίου	1 m
SLOPE	Κλίση Πυθμένα	1°
U_A	Ταχύτητα περιβάλλοντος	0.25m/s
DISTB	Απόσταση από ακτή	1500 m
THETA	Κάθετη γωνία εκροής	0
SIGMA	Οριζόντια γωνία εκροής	0
CSTD	Συγκέντρωση νομοθεσίας	10%
RMZ	Ζώνη ανάμιξης	300m
UW	Ταχύτητα ανέμου	0,2 m/s
F	Συντελεστής Weisbach	Darcy 0.025

Στη συνέχεια εισάγονται τα δεδομένα για το περιβάλλον όπου γίνεται η εκροή. Συγκεκριμένα το βάθος της όπου γίνεται η απορροή (15 m), την ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή (0,2 m/s), την κλίση του πυθμένα (1 %), την ταχύτητα των ρευμάτων στη θαλάσσια περιοχή που εξετάζεται τα οποία επηρεάζουν τη διασπορά της άλμης. Το CORMIX δεν είναι δυναμικό μοντέλο και μπορούν να εισαχθούν μόνο σταθερή ταχύτητα του ανέμου και των ρευμάτων στη περιοχή. Ύστερα εισάγεται η μέση πυκνότητα της θαλάσσιας περιοχής υπο μελέτη 1023.9 kg/m^3 και ο συντελεστής Darcy-Weisbach 0,025.

Στη συνέχεια εισάγονται τα δεδομένα για την εκροή. Επιλέγεται το CORMIX 1 για μονό υποβρύχιο ακροφύσιο. Στην περίπτωση μας βρίσκεται 1500 μέτρα από την ακτή σηματοδύοντας αριστερά. Εισάγονται λοιπόν γωνία θ και γωνία σ 0° και 0° αντίστοιχα. Η γωνία θ είναι που σηματοδύει το ακροφύσιο ως προς τον άξονα των z και η γωνία σ ως προς τον άξονα των x . Ο άξονας των x είναι παράλληλος στην ακτογραμμή. Εισάγονται διάμετρο του αγωγού 1 m και απόσταση του κέντρου του αγωγού από τον πυθμένα 2 m.

Προκειμένου να διαπιστωθεί αν η εγκατάσταση ξεπερνάει τα όρια της νομοθεσίας εισάγονται τα δεδομένα της ζώνης ανάμειξης. Συγκεκριμένα πρέπει να επιτυγχάνεται διάλυση 10 % στα 300 μέτρα από την απόρριψη. Η περιοχή ενδιαφέροντος είναι 1000 m.

Τα εξαγόμενα αρχεία από το cormix είναι: prediction file, session report, flow class description, design recommendations και processing record. Ύστερα ελέγχεται και τρέχεται το μοντέλο από το validate and run. Η κατηγοριοποίηση της ροής από το FC tree του CORMIX είναι η κατηγορία NH2 όπως στη Λάρνακα. Η κατηγοριοποίηση της ροής μας από το FC tree του CORMIX είναι η παρακάτω.

$$L_Q = 0.89 \text{ m}$$

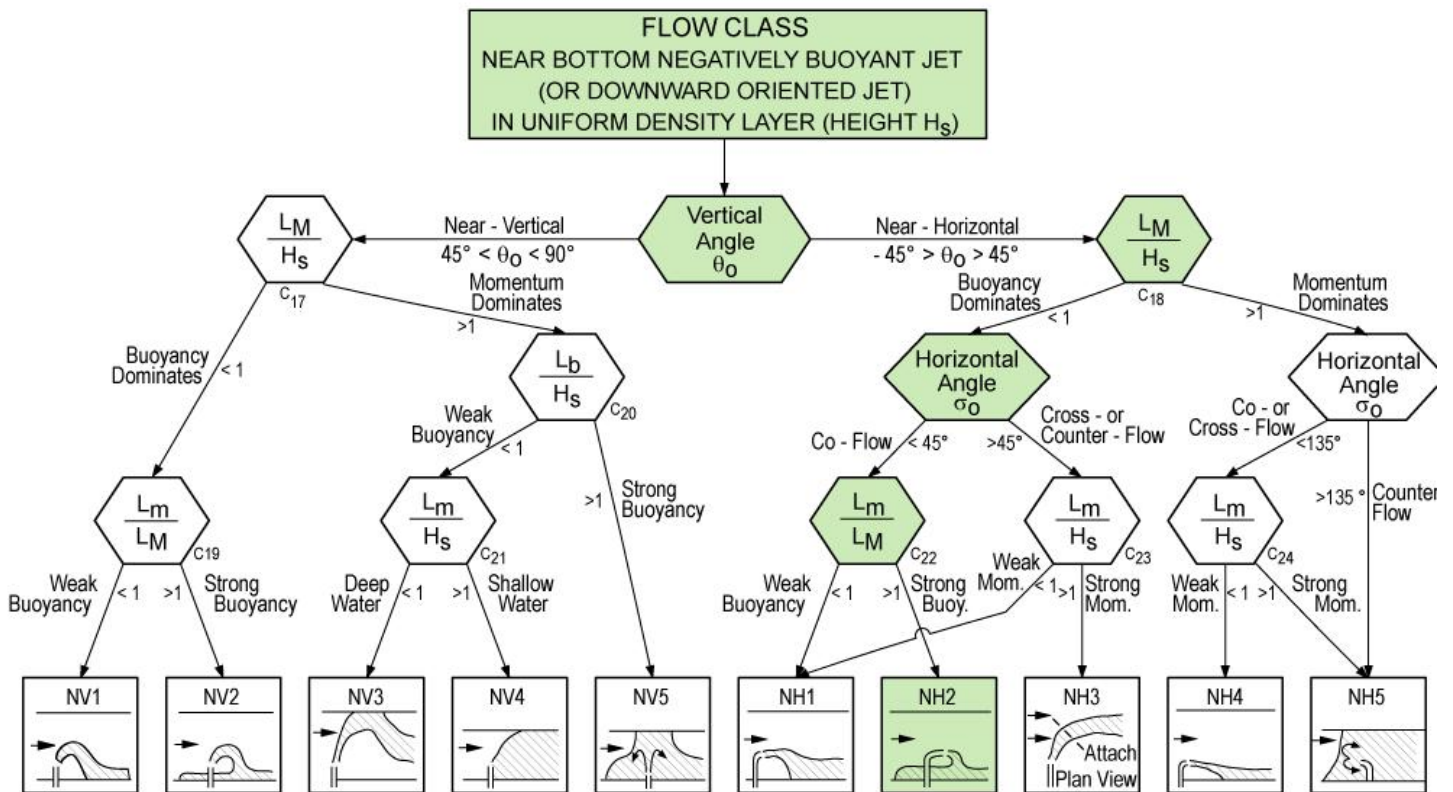
$$L_m = 2.09 \text{ m}$$

$$L_b = 8.23 \text{ m}$$

$$L_M = 1.05 \text{ m}$$

$$L_m' = 99999 \text{ m}$$

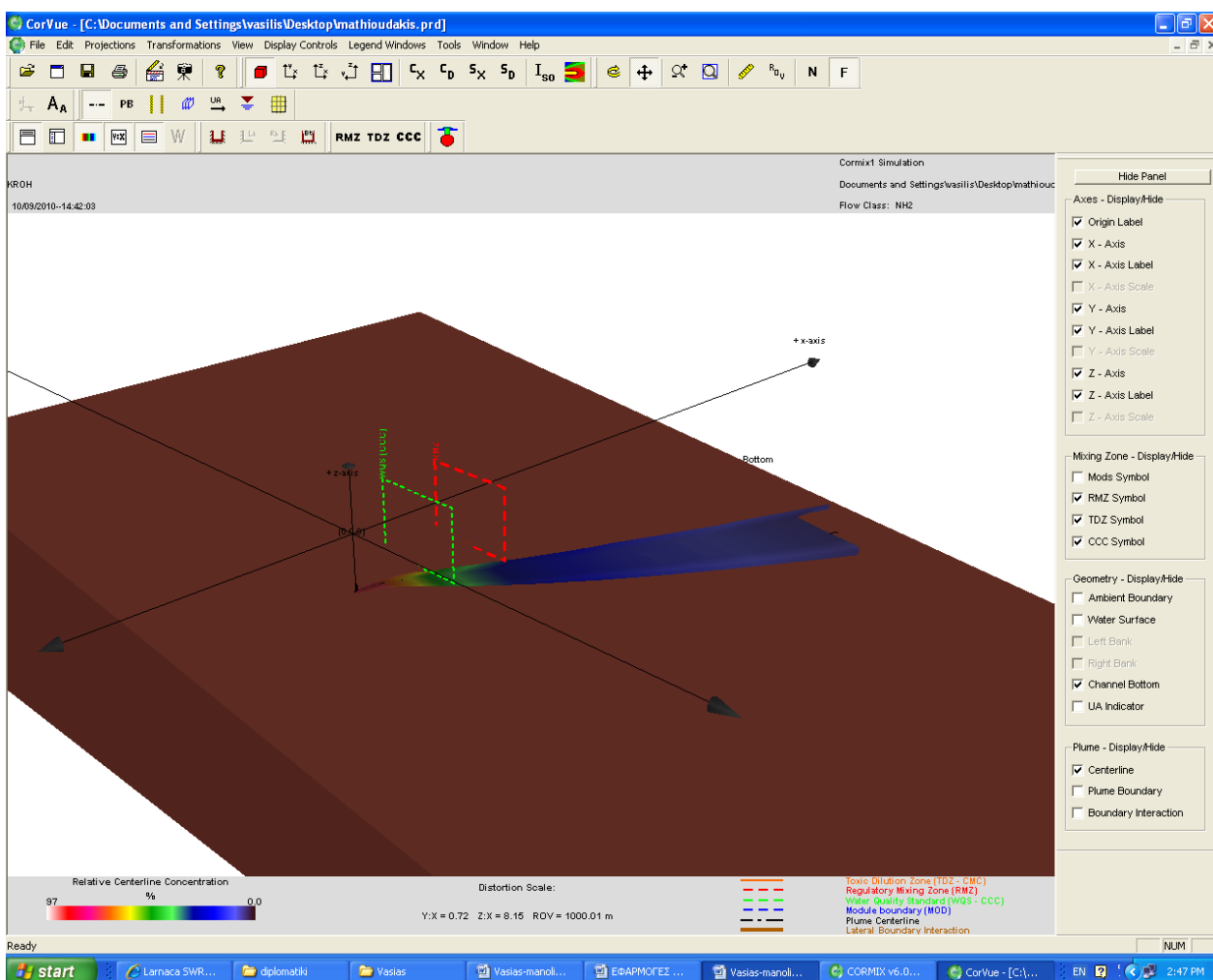
$$L_b' = 99999 \text{ m}$$



Εικόνα 43. Δενδρόγραμμα κατηγοριοποίησης της εκροής του προβλήματος-εφαρμογή 4^η. Η κατηγοριοποίηση είναι NH2.

Η κατηγοριοποίηση NH₂ είναι για φλέβες αρνητικής άνωσης που εκρέουν οριζόντια ή σχεδόν οριζόντια. Η ταχύτητα του περιβάλλοντος επιδράει πολύ λίγο. Η φλέβα μπορεί να ανυψωθεί ή να υπάρχει ακόμα και θετική άνωση εάν ο διαχυτήρας εκρέει προς τα κάτω και η δέσμη ροής έρθει σε επαφή με στρωματοποίηση στο πυθμένα. Στη δέσμη ροής μετά το μέγιστο ύψος θα κυριαρχήσει η αρνητική άνωση και θα συμπεριφερθεί σαν πλούμιο.

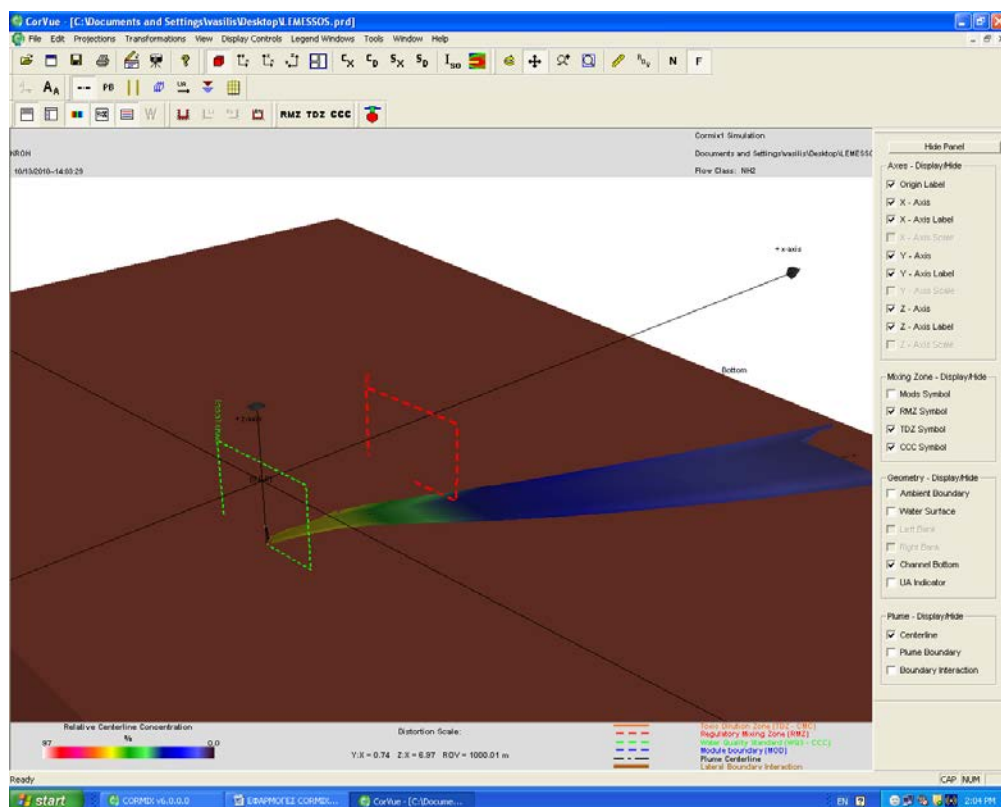
CoRVue



Εικόνα 44. Τρισδιάστατη απεικόνιση του πλουμίου για τη περιοχή ενδιαφέροντος-εφαρμογή 4^η

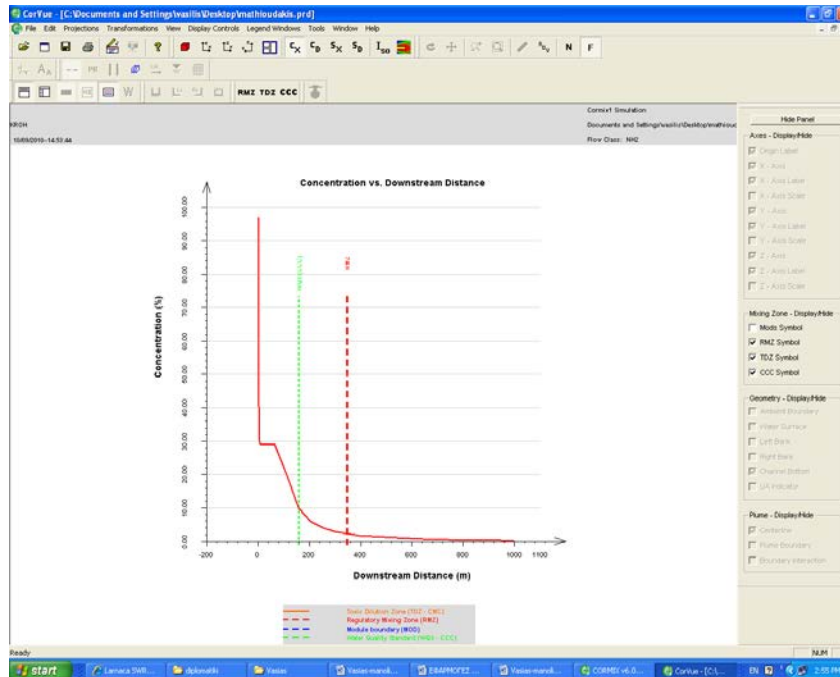
Εδώ παρατηρείται ότι η περίσσεια συγκέντρωση 10% που ζητάει η νομοθεσία στα 300 m έχει καλυφθεί ήδη πριν τα 200 m. Η περίσσεια άλμης στη περιοχή RMZ είναι 2,9 % και ο λόγος διάλυσης 33.2. Θέση πλούμιου : $x = 300$ m, $y = -188.05$ m, $z = -16.88$ m. Οι διαστάσεις του πλούμιου είναι μισό πλάτος 37.58 m και πάχος 0.56 m. Το πλούμιο μέχρι αυτό το σημείο δεν έχει έρθει σε επαφή με την ακτή ή όχθη και ο εκτιμώμενος χρόνος για να φτάσει εκεί είναι < 18.4050 sec. Η ποιότητα του νερού επιτεύχθηκε στο σημείο $x = 159.15$, $y = -77.42$ m, $z = -15.77$ m. Δηλαδή σε αυτό το σημείο είχαμε η συγκέντρωση (περίσσεια) ήταν 10 % και οι διαστάσεις του πλούμιου είναι μισό πλάτος 21,42 m και πάχος 0.35 m.

CoRVue



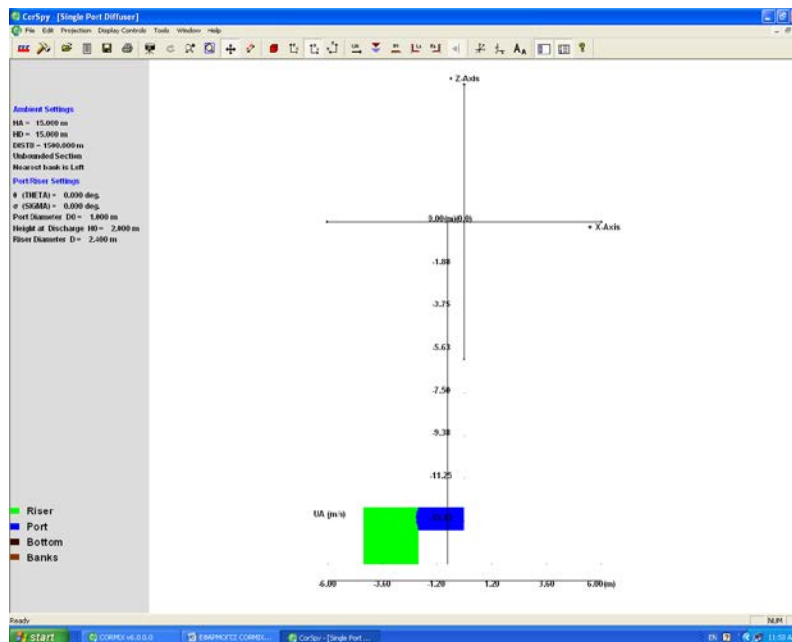
Εικόνα 45. Εφαρμογή 4^η με ακροφύσιο στα 4 m

Αν υψωθεί το ακροφύσιο στα 4 m δηλαδή 2 m περισσότερο επιτυγχάνεται η συγκέντρωση της νομοθεσίας στα πρώτα 2 μέτρα από την εκροή.

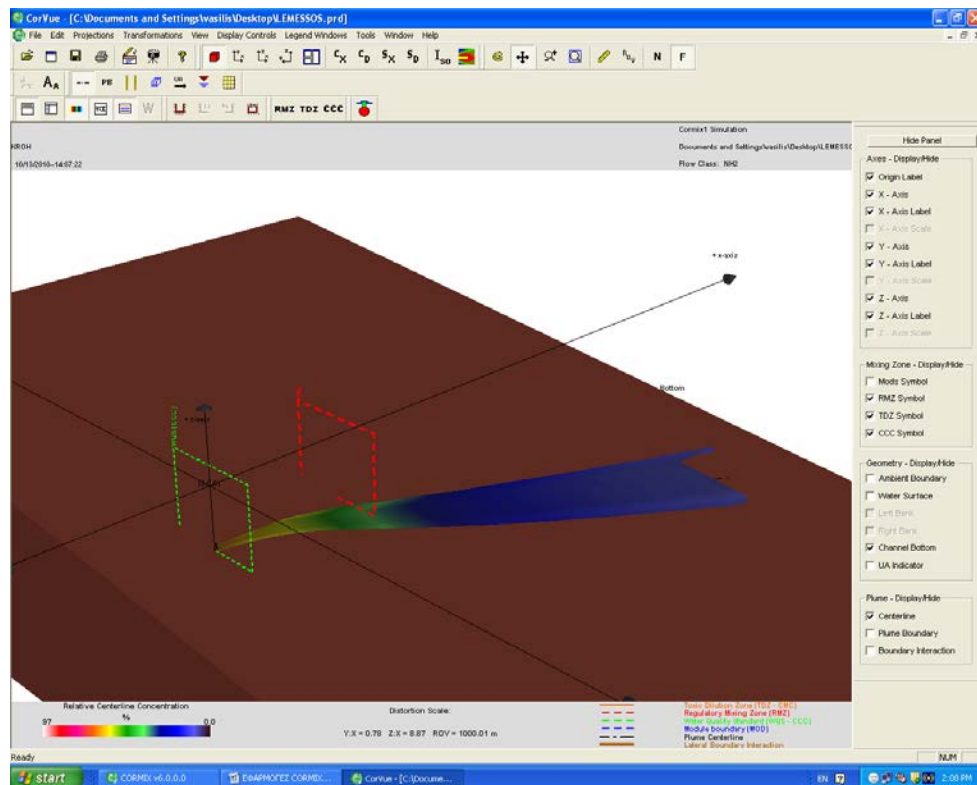


Εικόνα 46. Διάγραμμα συγκέντρωσης του πλουμίου σε συνάρτηση με την απόσταση από το σημείο εκροής. - εφαρμογή 4^η

CorSpy



Εικόνα 47. Απεικόνιση διαχυτήρα ενός στομίου- εφαρμογή 4^η



Εικόνα 48. Εφαρμογή 4^η με τη διάμετρο του ακροφυσίου από 1 m σε 0,6 m

Αν μεταβληθεί η διάμετρος του ακροφυσίου από 1 m σε 0,6 m λαμβάνεται επίσης μεγαλύτερη ταχύτητα εξόδου, με την οποία επιτυγχάνονται τα όρια της νομοθεσίας στα πρώτα 3,5 m.

Προτάσεις σχεδιασμού: Ένα μικρότερο ακροφύσιο θα δημιουργούσε μεγαλύτερη ταχύτητα απορροής και αυτό θα μας έδινε στο εγγύς πεδίο καλύτερη μίξη. Επίσης αν το ακροφύσιο είναι κάθετο στην ακτή βοηθάει στην μίξη για εκροές με αρνητική άνωση.

6.5 Εφαρμογή 5^η: Εκροή από μελλοντικό εργοστάσιο αφαλάτωσης στο Κρανίδι Αργολίδος.

Υποβρύχια εκροή άλμης από εργοστάσιο αφαλάτωσης

Η εγκατάσταση αφαλάτωσης που μελετάται στο Κρανίδι παράγει 12.270 m³/day πόσιμο νερό. Η συνολική ποσότητα άλμης που παράγεται είναι 23300 m³/day. Το συνολικό μήκος του αγωγού απόρριψης είναι 417 μέτρα αλλά τα 277 από αυτά είναι χερσαία και τα 140 μακριά από την ακτογραμμή. Η συγκέντρωση στην εκροή είναι σε περίσσεια 100%. Η παροχή είναι 0,27 m³/sec.

Πίνακας 10. Δεδομένα υποβρύχιας εκροής άλμης στο Κρανίδι Αργολίδος

Παράμετρος	Επεξήγηση	Αρχική Τιμή
Q	Παροχή	0,27m ³ /s (23300 m ³ /day)
ρ _ο	Πυκνότητα εκροής	1058 kg/m ³
ρ _α	Πυκνότητα περιβάλλοντος	1029kg/m ³
D ₀	Διάμετρος ακροφυσίου	0,6 m
SLOPE	Κλίση Πυθμένα	12,8°
U _A	Ταχύτητα περιβάλλοντος	0,1m/s
DISTB	Απόσταση από ακτή	140 m
THETA	Κάθετη γωνία εκροής	45
SIGMA	Οριζόντια γωνία εκροής	90
CSTD	Συγκέντρωση νομοθεσίας	10%
RMZ	Ζώνη ανάμιξης	300m
UW	Ταχύτητα ανέμου	3 m/s
F	Συντελεστής Darcy Weisbach	0.02

Εισάγονται στο cormix τα δεδομένα για το περιβάλλον όπου γίνεται η εκροή. Συγκεκριμένα το βάθος της όπου γίνεται η απορροή (30 μέτρα) την ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή (3 m/s) την κλίση του πυθμένα ($12,8^\circ$), την ταχύτητα των ρευμάτων στη θαλάσσια περιοχή υπο μελέτη τα οποία επηρεάζουν τη διασπορά της άλμης. Το CORMIX δεν είναι δυναμικό μοντέλο και μπορούν να εισαχθούν μόνο σταθερή ταχύτητα του ανέμου και των ρευμάτων στη περιοχή. Ύστερα εισάγεται η μέση πυκνότητα της θαλάσσιας περιοχής υπο μελέτη 1029kg/m^3 και τον συντελεστή Darcy-Weisbach 0,02.

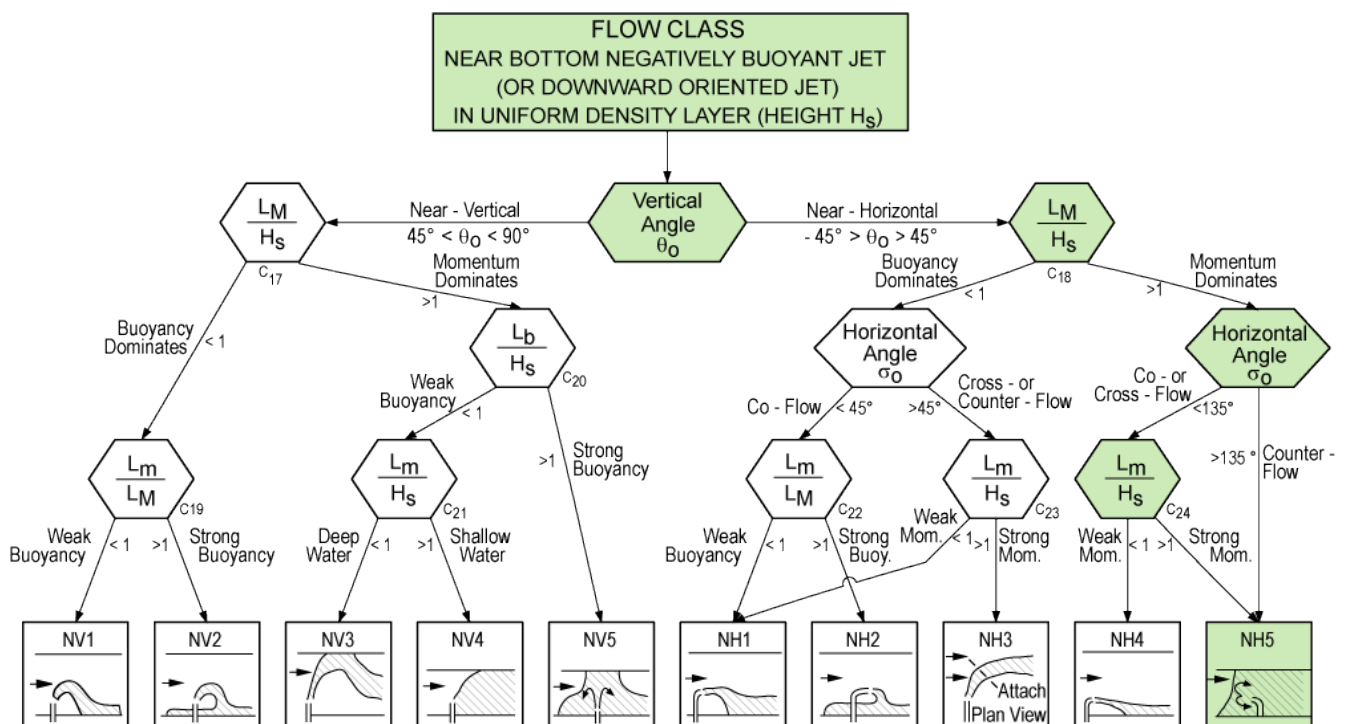
Στη συνέχεια εισάγονται τα δεδομένα για την εκροή. Επιλέγεται το CORMIX 1 για μονό υποβρύχιο ακροφύσιο. Στην περίπτωση μας βρίσκεται 140 μέτρα κάθετα από την ακτή. Εισάγονται λοιπόν γωνία θ και γωνία σ 45° και 90° αντίστοιχα. Η γωνία θ είναι που σημαδεύει το ακροφύσιο ως προς τον άξονα των z και η γωνία σ ως προς τον άξονα των x . Ο άξονας των x είναι παράλληλος στην ακτογραμμή. Εισάγεται διάμετρος του αγωγού 0,6 m και απόσταση του κέντρου του αγωγού από τον πυθμένα 3m.

Προκειμένου να διαπιστωθεί αν η εγκατάσταση ξεπερνάει τα όρια της νομοθεσίας εισάγονται τα δεδομένα της ζώνης ανάμειξης. Συγκεκριμένα πρέπει να επιτυγχάνεται διάλυση 10 % στα 300 μέτρα από την απόρριψη. Η περιοχή ενδιαφέροντος είναι 3500 m.

Τα εξαγόμενα αρχεία από το cormix είναι: prediction file, session report, flow class description, design recommendations και processing record. Ύστερα ελέγχεται και τρέχεται το μοντέλο από το validate and run. Η κατηγοριοποίηση της ροής από το FC tree του CORMIX είναι η κατηγορία NH5.

Πίνακας 11. Κλίμακες μήκους υποβρύχιας εκροής άλμης στο Κρανίδι Αργολίδος

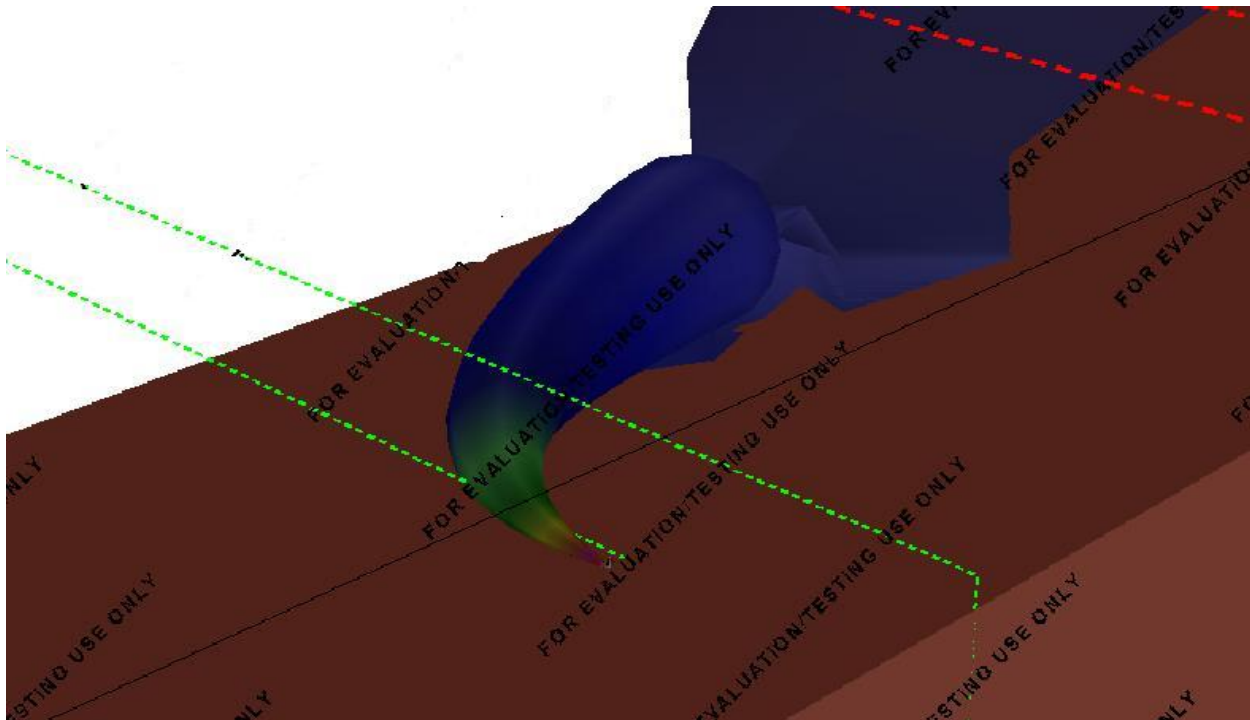
$L_Q = 0.5317 \text{ m}$
$L_m = 54,61 \text{ m}$
$L_b = 802,54 \text{ m}$
$L_M = 14,25 \text{ m}$
$L_m' = 99999 \text{ m}$
$L_b' = 99999 \text{ m}$



Εικόνα 49. Δενδρόγραμμα κατηγοριοποίησης της εκροής του προβλήματος-εφαρμογή 5^η. Η κατηγοριοποίηση είναι NH5.

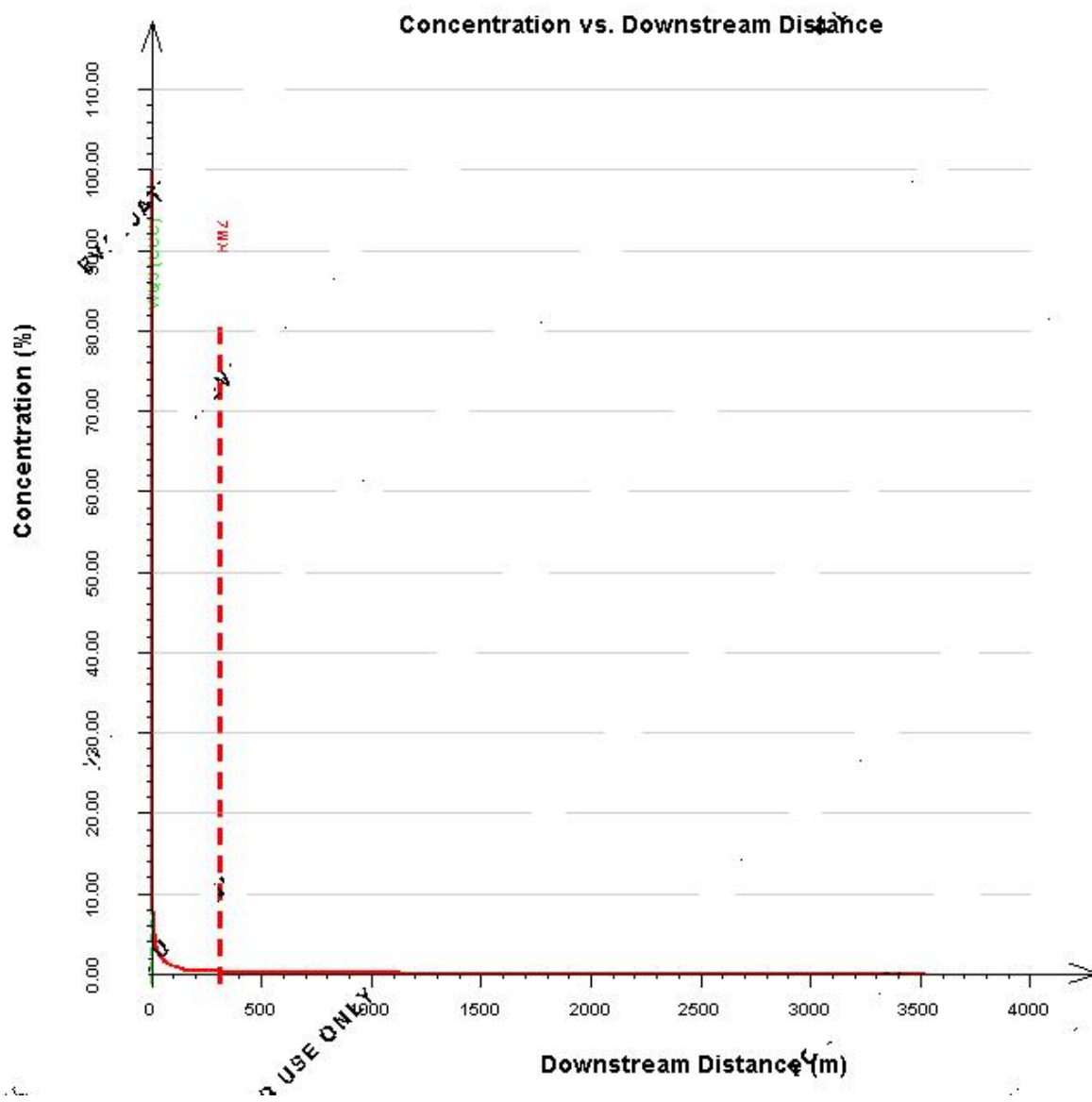
Η κατηγοριοποίηση είναι NH5, δηλαδή ροή με αρνητική άνωση κοντά στο πυθμένα με ενιαίο στρώμα πυκνότητας. Εκρέει οριζόντια ή σχεδόν οριζόντια από τον διαχυτήρα. Η δέσμη ροής είναι αντίθετη στα θαλάσσια ρεύματα τα οποία την κυριεύουν.

CorVue



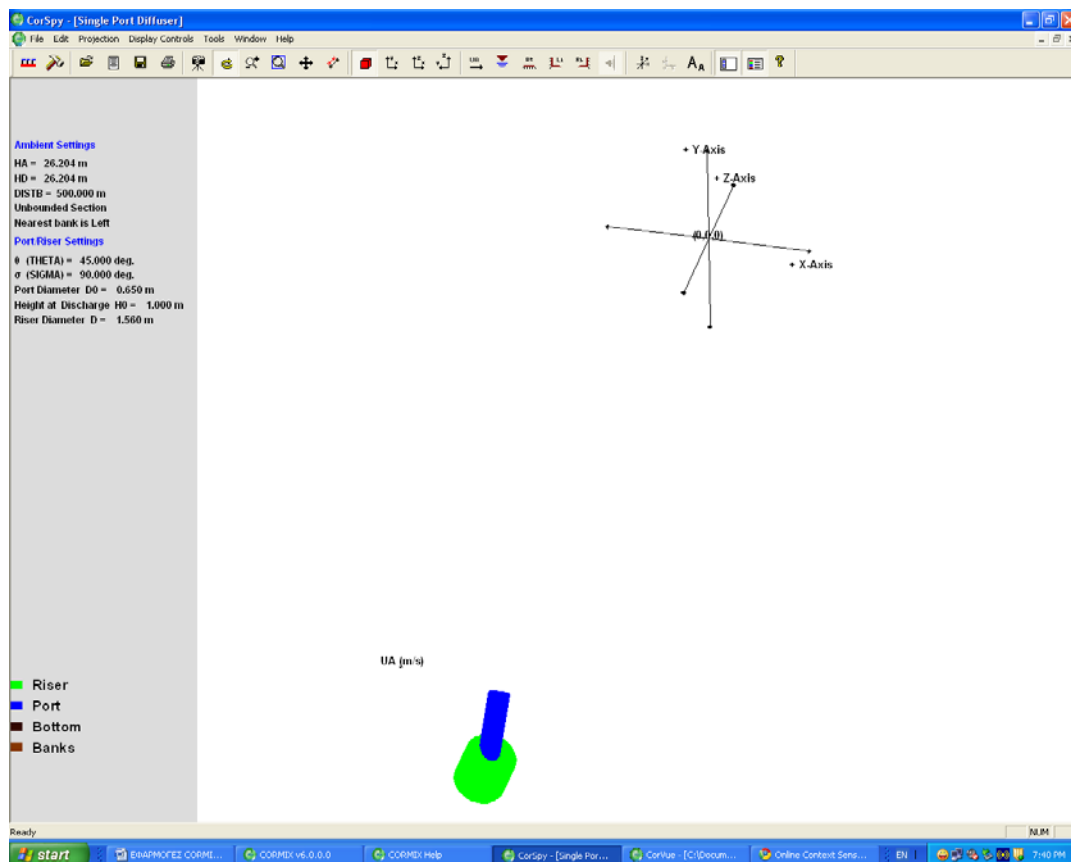
Εικόνα 50. Τρισδιάστατη απεικόνιση του πλούμιου για τη περιοχή ενδιαφέροντος-εφαρμογή 5^η

Η περίσσεια άλμης στη περιοχή RMZ είναι 0.44 % και ο λόγος διάλυσης 222,3, θέση πλούμιου : $x = 300 \text{ m}$, $y = -251.21 \text{ m}$, $z = -88.88 \text{ m}$. Οι διαστάσεις του πλούμιου είναι μισό πλάτος 53.06 m και πάχος 29.73m. Το πλούμιο σε αυτό το σημείο έχει έρθει σε επαφή με την ακτή ή όχθη και ο εκτιμώμενος χρόνος για να φτάσει εκεί είναι $< 2402 \text{ sec}$. Η ποιότητα του νερού επιτεύχθηκε στο σημείο $x = 3,5 \text{ m}$, $y = 40,76 \text{ m}$, $z = -31,81 \text{ m}$. Δηλαδή σε αυτό το σημείο η συγκέντρωση (περίσσεια) ήταν 10 % και οι διαστάσεις του πλούμιου είναι μισό πλάτος 5,08 m και πάχος 5.44 m. Στο παραπάνω γράφημα φαίνεται ότι η επιθυμητή συγκέντρωση επιτυγχάνεται στα αρχικά μέτρα από το σημείο της εκροής.

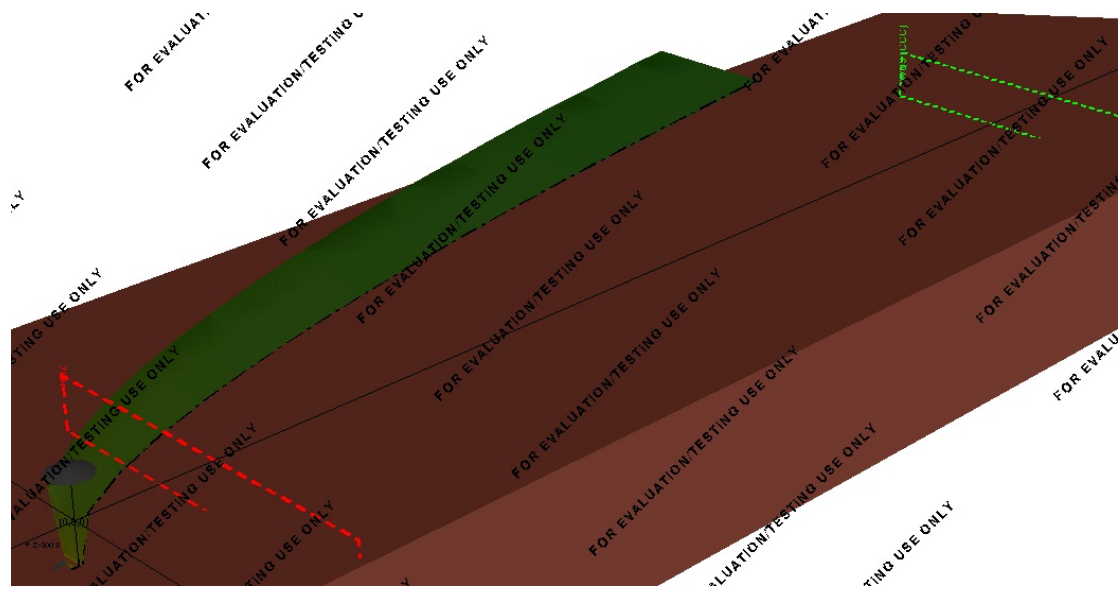


Εικόνα 51. Διάγραμμα συγκέντρωσης του πλουμίου σε συνάρτηση με την απόσταση από το σημείο εκροής. - εφαρμογή 5^η

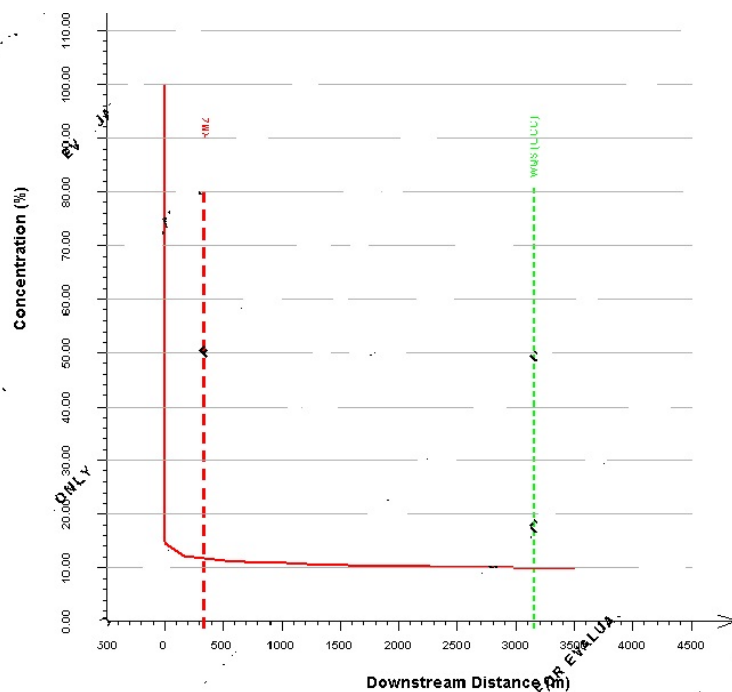
CorSpy



Εικόνα 52. Απεικόνιση διαχυτήρα ενός στομίου- εφαρμογή 5^η



Εικόνα 53. Τρισδιάστατη απεικόνιση του πλουμίου για τη περιοχή ενδιαφέροντος με $\theta=90^\circ$ - εφαρμογή 5^η



Εικόνα 54. Διάγραμμα συγκέντρωσης του πλουμίου σε συνάρτηση με την απόσταση από το σημείο εκροής με $\theta= 90^\circ$ - εφαρμογή 5^η

Εάν μεταβληθεί η κάθετη γωνία θ σε 90° τότε παρατηρούμε ότι η διάλυση της άλμης είναι πολύ αργή και συγκεκριμένα στα 3060 m από την εκροή. Αυτό γίνεται επειδή η δέσμη ροής δεν απομακρύνει τη φλέβα μακριά από την ακτή αλλά την εκτοξεύει προς την επιφάνεια της θάλασσας, με κίνδυνο να παρασύρει το πλούμιο στην ακτή.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η αφαλάτωση είναι μια πολύ σημαντική λύση που πρέπει να μελετηθεί άμεσα ειδικά για τα μικρά άνυδρα νησιά του Ελλαδικού χώρου. Τα νησιά αυτά έχουν κόστος μεταφοράς για υδροφόρα πλοία 10-11 € ενώ μια μονάδα αφαλάτωσης κόστους 300.000 € παράγει 500 m³/ημέρα με κόστος 2 €. Αν συνδυαστεί με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας το κόστος πέφτει ακόμα περισσότερο και η μονάδα είναι αυτόνομη. Οι μονάδες αφαλάτωσης γενικά μέχρι και σήμερα χρησιμοποιούνται ως έσχατη λύση. Το μεγάλο μειονέκτημα μετά από το περιβαλλοντικό κόστος είναι η ενέργεια που χρειάζονται – περίπου 2,3 kW ανά m³. Οι μονάδες έχουν όμως έχουν αρκετά περιβαλλοντικά προβλήματα να επιλύσουν και κυρίως αυτό της διάθεσης της άλμης. Μια ολοκληρωμένη μελέτη μπορεί να μηδενίσει τις επιπτώσεις της άλμης στην θάλασσα, λαμβάνοντας υπόψη και τη διεθνή εμπειρία. Τα κύρια συμπεράσματα είναι ότι :

A) Πρέπει οπωσδήποτε και πέρα από τις θεωρητικές προβλέψεις οι μονάδες να κάνουν συνεχείς και συστηματικούς ελέγχους της αλατότητας στο σημείο εκροής και πέρα από αυτό.

B) Οι υποβρύχιοι διαχυτήρες είναι προτιμότεροι από τις επιφανειακές απορροές διότι έτσι δεν υπάρχει άλμη σε επιφανειακά νερά που ζουν πιο ευαίσθητοι οργανισμοί και γίνονται οι περισσότερες ανθρώπινες δραστηριότητες, ενώ δεν υπάρχει κίνδυνος το πλούμιο να προσκολληθεί στην ακτή.

Γ) Ο υποβρύχιος διαχυτήρας πρέπει να είναι όσο πιο μακριά από την ακτή ώστε να έχει μικρότερο αντίκτυπο στις ανθρώπινες δραστηριότητες και μια πιθανή αστοχία να συμβεί μακριά από την ακτή.

Δ) Ο διαχυτήρας πρέπει να στοχεύει κάθετα στην ακτή ($\sigma = 90^\circ$) και με κάθετη γωνία θ από 30° έως 60°. Αυτό ωθεί τη δέσμη ροής μακριά από την ακτή και μειώνει το μήκος-κόστος του αγωγού. Παράλληλα αποφεύγεται ο κίνδυνος το πλούμιο να γυρίσει προς την ακτή και να υπάρχουν προβλήματα διάβρωσης κλπ. Ο διαχυτήρας δεν πρέπει να στοχεύει στη επιφάνεια ή προς την ακτή. Τέτοιες δομές δε συνίσταται.

Ε) Οι μονάδες θα πρέπει να κτίζονται σε περιοχές μη κατοικημένες, περιοχές που δεν έχουν χρήση ψυχαγωγίας (θαλάσσιο μπάνιο, ψάρεμα κλπ.). Επίσης θα ήταν σκόπιμο

οι μονάδες να βρίσκονται κοντά σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας, έτσι ώστε να αποφεύγεται το οικονομικό αλλά και το περιβαλλοντικό κόστος από την μεταφορά της ενέργειάς.

ΣΤ) Οι μονάδες πρέπει να έχουν εύκολη πρόσβαση στα αντλιοστάσια ύδρευσης της περιοχής

Ι) Όσο μεγαλύτερη παραγωγικότητα έχει η μονάδα τόσο πιο μακριά από την ακτή πρέπει να εκρέει αλμόλοιπα, σε μεγαλύτερο βάθος και μακριά από κατοικημένη περιοχή.

ΙΑ) Το cormix δεν είναι δυναμικό μοντέλο και δεν επιτρέπει τη πρόβλεψη από δυναμική αλλαγή ταχύτητας ανέμου, θαλάσσιου ρεύματος, αλατότητας, παροχής κλπ. Αυτό συνεπάγεται μια όχι τόσο ακριβή αποτίμηση των συνεπειών. Το cormix πρέπει να εξελιχθεί σε δυναμικό μοντέλο που να εξάγει ασφαλέστερα συμπεράσματα.

ΙΒ) Τα συμπεράσματα από το μοντέλο είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μικρότερου μήκους αγωγός για εκροή αλμόλοιπου αλλά αυτό δε συνίσταται επειδή πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η έλλειψη στην ακρίβεια του cormix που δε μπορεί να διαχειριστεί όλα τα δεδομένα περιβάλλοντος και αυτά που διαχειρίζεται δεν είναι δυναμικά αλλά σε σταθερές τιμές. Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και μια μελλοντική επέκταση της μονάδας που θα αύξανε την εκροή, πιθανώς και την αλατότητα της.

ΙΓ) Μια μικρή αλλαγή σε μία μεταβλητή εισόδου μπορεί να επιδράσει στην αναγνώριση διαφορετικού είδους ροής με εντελώς διαφορετικές προβλέψεις που οδηγούν σε διαφορετικούς ρυθμούς ανάμειξης δημιουργώντας πιθανές ασυνέχειες στα αποτελέσματα πρόβλεψης.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Δαγκαλίδης Α., 2009. Κλαδική μελέτη 12: αφαλάτωση νερού. Μονάδα οικονομικής ανάλυσης και αγορών, Τράπεζα Πειραιώς.
2. Μουτάφης Π., 2008. Κάλυψη ζήτησης ενέργειας και νερού με αιολική ενέργεια και αφαλάτωση στη νήσο Σίκινο. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο.
3. Μπάτσος Δ., 2011. Μαθηματική προσομοίωση διάθεσης άλμης σε παράκτιες περιοχές με το μοντέλο CORMIX. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο.
4. Akar P. J. and Jirca G. H., 1991. CORMIX2: An Expert System for Hydrodynamic Mixing Zone Analysis of Conventional and Toxic Multiport Diffuser Dischargers, EPA/600/3-91/073, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia.
5. Al-Mutaz I. S., Al-Mojjly A., Abashar M. E., 2006. Thermal and brine Dispersion from coastal MSF desalination plants. 4th International conference on marine wastewater discharges and coastal environment (MWWP) Antalya Turkey.
6. Albertson M. L., Dai Y. B., Jensen R. A. and Rouse H., 1950. Diffusion of Submerged Jets, Trans. ASCE. Vol. 115, pp. 639-697.
7. Baumgartner D. J., Frick W. E. and Roberts P. J. W., 1993. Dilution Models for Effluent Discharges (Second Edition), EPA/600-R-93/139, U.S. Environmental Protection Agency, ERL-Narragansett, Newport, Oregon.
8. Bleninger T. and Jirka G.H., 2010. Environmental planning, prediction and management of brine discharges from desalination plants.
9. Botts, L. and Krushelnicki, 1987. The Great Lakes: An Environmental Atlas and Resource Book, EPA-905/9-87-002, U.S. Environmental Protection Agency, Chicago, Illinois.
10. Fisher H. B., Kosh E. J., Imberger R.C.Y., Brooks N.H. 1979. Mixing in inland and coastal waters.

11. Hamdy Y., 1981. Dispersion of Effluent Plumes from Diffusers on Near-Shore Regions of the Great Lakes, Vol. 1. Initial Mixing Processes, Ontario Ministry of the Environment, Toronto, Ont., 47pp.
12. Jenkins SA., 2006. Brine concentration and dilution, "Developing a Tool to Guide State and Local desalination planning:A Comprehensive Economic and Environmental Framework to fully Acces the Benefits and Costs of Desalination,California.
13. Jenkins SA., Wasyl D.J., 2005. Oceanographic considerations for desalination plants in southern California coastal waters.
14. Jirca G. H. and Harleman D. R. F., 1973. The Mechanics of Submerged Multiport Diffusers for Buoyant Discharges in Shallow Water, Technical Report No 169, R. M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
15. Jirca, G. H. and Harleman, D. R. F., 1979. Stability and Mixing of a Vertical Plane Buoyant Jet in Confined Depth, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 94, part 2, pp. 275-304
16. Jirka G. H., Doneker R. L., Nash J. D., 2007. CORMIX User Manual: a Hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters. MixZon Inc.
17. Jirka H., Bleninger T., 2008. Modelling and environmentally sound management of brine discharges from desalination plants. Desalination 221 pp. 585-597.
18. Kim D.G., 2000. Modeling Mixing of Thermal Effluent from Multiport Diffuser, Dept. of Civil Engineering, Seoul, Korea.
19. Koh R. C. and Brooks N. H., 1975. Fluid Mechanics of Waste Water Disposal in the Ocean, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 7, pp. 187-211.
20. Nash J. D., 1995. Buoyant discharges into reversing ambient current.
21. Ng K. Y., 1990. Thermal Plumes from Staged Multiport Diffusers in a Uniform Quiescent Environment, W.M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, California.
22. Roberts P. J. W., Ferrier A., Daviero G., 1997. Mixing in the inclined dense jets J. Hydraulic Engineering 123 pp. 693-699.

23. Svensson M., 2005. Desalination and the Environment: Options and considerations for brine disposal in inland and coastal locations.
24. Tsanis I. K. and Valeo, 1994. C. Environmental Hydraulics Vol I, Mixing Zone Models for Submerged Discharges, Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston
25. WHO, 2007. Desalination for safe water supply. Guidance for health and environmental aspects applicable to desalination, Public health and environment, World Health Organization, Genova 2007.

Internet sites

26. Epa.gov
27. Wikipedia.org
28. Coal2nuclear.com
29. Enru.strath.ac.uk
30. Geo.auth.gr
31. Moa.gov.cy
32. Sidem.com
33. Atlanticgreenfuels.com
34. Zule.net
35. Thewaterreatmentplant.com