

**ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ: ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΩΝ ΟΜΑΔΩΝ ΣΤΟ
ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ / ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ**

Τίτλος Υποέργου:

«Εργαστηριακή προσομοίωση περιβαλλοντικών ροών μεγάλης κλίμακας υπό την επίδραση δυνάμεων Coriolis – Εφαρμογές στην επίδραση των εκροών των ποταμών Νέστου, Στρυμόνα, Έβρου στις παράκτιες προστατευόμενες περιοχές της Θράκης και Ανατολικής Μακεδονίας.»

ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ ΠΑΚΕΤΟΥ ΕΡΓΑΣΙΩΝ 4
Επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων

- Ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων (δημοσίευση)
- Εμβάθυνση στο φυσικό πρόβλημα και εύρεση πειραματικών – ημιεμπειρικών εξισώσεων (δημοσίευση)

Φορέας υλοποίησης : ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ
Επιστημονικός υπεύθυνος: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΩΤΣΟΒΙΝΟΣ

ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ- ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ - ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ
Α' ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ
ΒΑΣ. ΣΟΦΙΑΣ 12—67100 ΞΑΝΘΗ
ΤΗΛ.: 25410 79604 – 25410 79321 – 25410 79610
E-mail: kotsovin @civil.duth.gr

Ερευνητική ομάδα

Επιστημονικός υπεύθυνος: Καθηγητής Κωτσοβίνος Νικόλαος

Μέλη ΔΕΠ του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης

Σούλης Ιωάννης (Αν. Καθηγητής)
Χρυσάνθου Βλάσιος (Αν. Καθηγητής)
Συλαίος Γεώργιος (Επ. Καθηγητής)
Αγγελίδης Παναγιώτης (Λέκτορας)

Επιστημονικοί συνεργάτες

Χατζηκωνσταντίνου Αναστάσιος (Φυσικός, Υποψήφιος Διδάκτορας)
Κονιδάρης Αριστείδης (Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφιος Διδάκτορας)
Γιοβανούδης Χρήστος (Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφιος Διδάκτορας)
Γεωργουλός Αναστάσιος (Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφιος Διδάκτορας)
Γυρίκης Βασίλειος (Πολιτικός Μηχανικός)

Συνεργαζόμενα μέλη – καθηγητές εφαρμογών στο ΤΕΙ Καβάλας

Αποστολίδου Ελένη
Σαράφης Ηλίας
Παναγιωτίδης Θεολόγης
Κόγια Φωτεινή

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗ: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

ΤΙΤΛΟΣ: «ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ CORIOLIS ΣΤΗΝ ΕΚΡΟΗ
ΥΦΑΛΜΥΡΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΑ ΔΑΡΔΑΝΕΛΙΑ ΣΤΟ ΒΟΡΕΙΟ ΑΙΓΑΙΟ»

ΣΥΓΓΡΑΦΕΙΣ: Γεωργουλός Α., Κονιδάρης Α., Αγγελίδης Π., Κωτσοβίνος Ν.

ΣΥΝΕΔΡΙΟ: 10^ο Πανελλήνιο Συνέδριο της ΕΥΕ, Ξάνθη 2006

2. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗ: ΕΜΒΑΘΥΝΣΗ ΣΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΚΑΙ ΕΥΡΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ – ΗΜΙΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

ΤΙΤΛΟΣ: «SPREADING WIDTH OF A 2D BRINE SEWAGE AFTER
IMPINGING ON A SHALLOW SEA FREE SURFACE»

ΣΥΓΓΡΑΦΕΙΣ: Αγγελίδης Π., Γυρίκης Β., Κονιδάρης Α., Κωτσοβίνος Ν.

ΣΥΝΕΔΡΙΟ: MWWD 2004 – 3rd International Conference on Marine Waste
Water Disposal and Marine Environment, Catania (I) Sept. 27 – Oct 2, 2004

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ CORIOLIS ΣΤΗΝ ΕΚΡΟΗ ΥΦΑΛΜΥΡΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΑ ΔΑΡΔΑΝΕΛΙΑ ΣΤΟ ΒΟΡΕΙΟ ΑΙΓΑΙΟ

Γεωργουλός Α.,

Υπ. Διδάκτορας
Τμ. Πολ. Μηχ. Δ.Π.Θ.
Β.Σοφίας 12, 67100 Ξάνθη
ageorg@civil.duth.gr

Κονιδάρης Α.,

Υπ. Διδάκτορας
Τμ. Πολ. Μηχ. Δ.Π.Θ.
Β.Σοφίας 12, 67100 Ξάνθη
akonida@civil.duth.gr

Αγγελίδης Π.,

Λέκτορας
Τμ. Πολ. Μηχ. Δ.Π.Θ.
Β.Σοφίας 12, 67100 Ξάνθη
pangelid@civil.duth.gr

Κωτσοβίνος Ν.

Καθηγητής
Τμ. Πολ. Μηχ. Δ.Π.Θ.
Β.Σοφίας 12, 67100 Ξάνθη
kotsovin@civil.duth.gr

ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ : Δαρδανέλια, Βόρειο Αιγαίο, πλούμιο, Coriolis

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στις μέρες μας, μια από τις σημαντικότερες πηγές ρύπανσης του Βορείου Αιγαίου είναι η εισροή υδάτων από τα στενά των Δαρδανελίων και κατά επέκταση από τη Μαύρη Θάλασσα. Ο βασικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μακροσκοπική μελέτη του επιφανειακού ανωστικού πλουμίου, που δημιουργείται από την εκροή των υφάλμυρων υδάτων των Δαρδανελίων στο Βόρειο Αιγαίο και κυρίως η επίδραση που έχει η δύναμη Coriolis στην πορεία και εξάπλωση του εν λόγω πλουμίου. Η μελέτη πραγματοποιείται με τη χρήση της μεθόδου της «οπτικοποίησης» της ροής (flow visualization), με τη βοήθεια ενός πειραματικού ομοιώματος του Βορείου Αιγαίου, που έχει κατασκευαστεί σε μια περιστρεφόμενη δεξαμενή. Επίσης τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίνονται με κατάλληλα επεξεργασμένα δορυφορικά δεδομένα, που αφορούν την υπό έρευνα περιοχή. Από τη σύγκριση αυτή προκύπτει σύγκλιση των αποτελεσμάτων και προκύπτουν πολύτιμα ποιοτικά (κυρίως) συμπεράσματα.

EFFECT OF THE CORIOLIS FORCE IN THE DISCHARGE OF BRACKISH WATERS FROM THE DARDANELLES INTO THE NORTH AEGEAN

Georgoulas A.,

Phd Candidate
Civil Eng. Dep.-DUTH
V.Sofias 12, 67100 Xanthi
ageorg@civil.duth.gr

Konidaris A.,

Phd Candidate
Civil Eng. Dep.-DUTH
V.Sofias 12, 67100 Xanthi
akonida@civil.duth.gr

Angelidis P.,

Lecturer
Civil Eng. Dep.-DUTH
V.Sofias 12, 67100 Xanthi
pangelid@civil.duth.gr

Kotsovinos N.

Professor
Civil Eng. Dep.-DUTH
V.Sofias 12, 67100 Xanthi
kotsovin@civil.duth.gr

KEYWORDS: Dardanelles, North Aegean, plume, Coriolis

ABSTRACT

Nowadays, one of the most important sources of pollution for the North Aegean Sea is the water inflow from the Dardanelles straits and by extension from the Black Sea. The main aim of the current work is the macroscopic study of the surface buoyant plume that is formed from the discharge of the brackish waters from the Dardanelles into the North Aegean Sea and mainly the effect that the Coriolis force has in the root and dispersion pattern of the proposed plume. The study is carried out using an experimental model of the North Aegean, which has been constructed in a rotating tank, following the method of Flow Visualization. A comparison is made with properly processed satellite data in order to validate the experimental results. From the comparison of the experimental and satellite data, which have a high degree of convergence, some valuable qualitative results can be withdrawn.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας, μία από τις σημαντικότερες πηγές ρύπανσης του Βορείου Αιγαίου είναι η Μαύρη Θάλασσα, η ποιότητα της οποίας έχει επιβαρυνθεί σε μεγάλο βαθμό τα τελευταία 30 χρόνια [1]. Όπως τονίζουν πολλοί επιστήμονες και ερευνητές, η Μαύρη Θάλασσα χρησιμοποιείται καθημερινά ως τόπος απόρριψης τεραστίων ποσοτήτων βιομηχανικών, γεωργικών, αστικών ακόμη και πυρηνικών αποβλήτων, που παράγονται από τη δραστηριότητα 160 εκατομμυρίων ανθρώπων, που κατοικούν σε 16 χώρες. Η μόλυνση από πετρελαιοειδή εκτιμάται σε περισσότερους από 100.000 τόνους το χρόνο, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι παράνομες απορρίψεις έρματος των δεξαμενόπλοιων, οι οποίες φαίνεται ότι είναι κοινό μυστικό στην περιοχή. Έχει υπολογιστεί, ότι κάθε χρόνο περίπου 136 τόνοι λιπαντικών, ορυκτελαίων, καυσίμων ή χημικών, διασκορπίζονται εξαιτίας ατυχημάτων στη Μαύρη Θάλασσα και από εκεί, μέσω των Δαρδανελίων, εισρέουν στο Βόρειο Αιγαίο [1]. Οι επικίνδυνοι αυτοί ρύποι, που μεταφέρονται τόσο από τη Μαύρη Θάλασσα μέσω του Βοσπόρου και των Δαρδανελίων, αλλά και από τα ποτάμια που εκρέουν στο Αιγαίο απειλούν να διαταράξουν το άλλοτε παρθένο οικοσύστημα του Αρχιπελάγους. Παρά το γεγονός, ότι το Βόρειο Αιγαίο είναι αρκετά βαθύ, φθάνει περίπου τα 1.200 μέτρα, τα νερά του δεν μπορούν σε μεγάλο βαθμό να αναμιχθούν με τα νερά του Νοτίου Αιγαίου εξαιτίας της τοπογραφίας και της μορφολογίας του πυθμένα. Έτσι, η ανταλλαγή νερών μεταξύ Βορείου και Νοτίου Αιγαίου δεν είναι δυνατή για βάθη νερού μεγαλύτερα από 200 μέτρα. Πρέπει επίσης να σημειωθεί, ότι σημαντικό ρόλο στην τροχιά του επιφανειακού πλουμίου διαδραματίζει και το γεγονός, ότι το επιβαρυνόμενο με ρύπους νερό που εκρέει από τα Δαρδανέλια, λόγω επίδρασης της δύναμης Coriolis μετά από κάποιο διάστημα εκτρέπεται προς τα βόρεια και έτσι δημιουργείται επιπλέον συσσώρευση ρύπων στο Βόρειο Αιγαίο. Επομένως, είναι σημαντικό να διερευνηθεί η πορεία και εξάπλωση των υδάτων που εισρέουν στο Αιγαίο καθώς και η μακροπρόθεσμη συσσώρευση των ρύπων που μεταφέρουν.

Ο βασικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι, η μακροσκοπική μελέτη του επιφανειακού ανωστικού πλουμίου, που δημιουργείται από την εκροή των υφάλμυρων υδάτων των Δαρδανελίων στο Βόρειο Αιγαίο και κυρίως η επίδραση που έχει η περιστροφή της γης και η δύναμη Coriolis στην πορεία και στην εξάπλωση του εν λόγω πλουμίου, η σύγκριση εργαστηριακών και δορυφορικών εικόνων, όπου απεικονίζεται το συγκεκριμένο φαινόμενο ροής και τέλος η εξαγωγή βασικών και κυρίως ποιοτικών αποτελεσμάτων, που σχετίζονται με την κυκλοφορία των νερών, που εκρέουν από τα Δαρδανέλια στο Βόρειο Αιγαίο καθώς και τη μακροπρόθεσμη συσσώρευση των μεταφερόμενων ρύπων.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται επιγραμματικά μια σειρά προηγούμενων ερευνών, που σχετίζονται με την παρούσα εργασία. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση, που ακολουθεί, εστιάζεται σε εργασίες που περιέχουν πληροφορίες σχετικά με εκροές μεγάλων ποταμών σε θαλάσσιους αποδέκτες και την επίδραση της δύναμης Coriolis στις εκροές αυτές, σε εργασίες που περιλαμβάνουν υδραυλικά δεδομένα της υπό μελέτη περιοχής και τέλος σε εργασίες που καταδεικνύουν το πεδίο εξάπλωσης του εν λόγω πλουμίου μέσω δορυφορικών εικόνων.

Στην εργασία [2] μελετάται η εκροή του ποταμού Niagara στη λίμνη Ontario, με τη χρήση ενός πειραματικού μοντέλου σε περιστρεφόμενο περιβάλλον. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ξεκάθαρα την επίδραση της περιστροφής στην εκροή και βοηθούν στο διαχωρισμό μεταξύ των σχετικών επιδράσεων της άνωσης και της περιστροφής στην εκροή του πλουμίου ενός ποταμού σε έναν υδάτινο αποδέκτη διαφορετικής πυκνότητας και θερμοκρασίας. Η εργασία [3] ασχολείται με την τρισδιάστατη μελέτη των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών του πλουμίου του ποταμού Rhone τόσο με τη χρήση μετρήσεων πεδίου, όσο και με αριθμητική προσομοίωση. Από τα αποτελέσματα είναι εμφανές, ότι το πλούμιο λόγω περιστροφής εκτρέπεται προς τα δεξιά του άξονα εκροής.

Περιστατικά σχηματισμού πλουμίων από εκροές ποταμών καθώς και παράγοντες που ελέγχουν την εξάπλωσή τους στην βόρειο-δυτική Μεσόγειο θάλασσα, αναλύοντας δορυφορικές εικόνες περιέχονται στην εργασία [4]. Δορυφορικές παρατηρήσεις και παρατηρήσεις πεδίου των πλουμίων των ποταμών Santa Clara και Ventura, παρουσιάζονται στην εργασία [5]. Και εδώ επίσης συμπεραίνεται, ότι ανωστικές και περιστροφικές δυνάμεις τείνουν να εκτρέψουν την πορεία των πλουμίων κατά την κατεύθυνση των πόλων. Στην εργασία [6] ένα μοντέλο μη δομημένου κανάβου χρησιμοποιήθηκε για προσομοιώσεις των δυναμικών χαρακτηριστικών πλουμίων ποταμών. Οι προσομοιώσεις καταδεικνύουν τον σημαντικό ρόλο, που διαδραματίζει η δύναμη Coriolis στην πορεία εξάπλωσης των πλουμίων. Η κατά μήκος της ακτής μεταφορά ενός επιφανειακού πλουμίου ποταμού μελετάται στην εργασία [7] χρησιμοποιώντας ένα τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο. Η μελέτη αυτή προβλέπει την εκτροπή της τροχιάς του πλουμίου, που παρατηρήθηκε και σε άλλες εργασίες, καθώς και τη δημιουργία ενός ρεύματος, που αναπτύσσεται κατά μήκος της ακτής.

Η εξάπλωση του πλουμίου, που προκαλείται από την εκροή του ποταμού Ebro (Ισπανία) στα νερά των Βορειοδυτικών ακτών της Μεσογείου, εξετάζεται με χρήση αριθμητικής προσομοίωσης στην εργασία [8].

Παρατηρείται, ότι η πορεία του πλουμίου εκτρέπεται προς τα δεξιά και ακολουθεί την ακτογραμμή δεξιά της εκροής. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στην εργασία [9], όπου μελετάται πειραματικά η επίδραση της περιστροφής της γης στην εξέλιξη των μεγάλης κλίμακας περιβαλλοντικών ροών, όπως οι εκροές ποταμών. Στην εργασία [10] δορυφορικά δεδομένα χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του περιεχόμενου Χλωροφύλλης-Α στη θάλασσα του Βορείου Αιγαίου αποσκοπώντας στην εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με το πεδίο ροής. Σε μια άλλη εργασία [11] του ίδιου ερευνητή μελετούνται οι σχηματισμοί Χλωροφύλλης-Α στη θάλασσα του Βορείου Αιγαίου, με έμφαση στην περιοχή της εκροής από τα στενά των Δαρδανελίων, χρησιμοποιώντας ωκεανο-χρωματικά δορυφορικά δεδομένα. Επίσης σύγκριση γίνεται και με αντίστοιχα δεδομένα μετρήσεων πεδίου.

Ο κύριος στόχος της εργασίας [1] είναι ο προσδιορισμός των επιδράσεων που προκαλούνται στην περιβαλλοντική κατάσταση του Βορείου Αιγαίου, από την εισροή σε αυτό μεγάλων ποσοτήτων υδάτων τόσο από τους ποταμούς, αλλά κυρίως από την εκροή των υδάτων της Μαύρης Θάλασσας μέσω των στενών των Δαρδανελίων. Στην εργασία [12] περιέχονται σημαντικά ωκεανογραφικά δεδομένα και υδρογραφικά χαρακτηριστικά, σχετικά με την ανταλλαγή υδάτινων μαζών μεταξύ του Αιγαίου, των Δαρδανελίων και της Θάλασσας του Μαρμαρά. Επίσης τα εποχιακά χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας υδάτων στη θάλασσα του Βορείου Αιγαίου εξετάζονται στην εργασία [13].

Η ανταλλαγή υδάτων ανάμεσα στη θάλασσα του Μαρμαρά και στη θάλασσα του Αιγαίου πελάγους διαμέσου των στενών των Δαρδανελίων, ερευνάται στην εργασία [14], χρησιμοποιώντας ένα διδιάστατο, μη-υδροστατικό, μη-γραμμικό αριθμητικό μοντέλο. Τέλος, μια υδρογραφική ανασκόπηση σχετικά με δεδομένα θερμοκρασίας και αλατότητας για τα νερά του Βορείου Αιγαίου και της Μαύρης Θάλασσας καθώς και με δεδομένα υδάτινης κυκλοφορίας στο Βόρειο Αιγαίο περιέχεται στην εργασία [15].

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

2.1 Κατασκευή του φυσικού ομοιώματος του Βορείου Αιγαίου σε περιστρεφόμενη δεξαμενή

Στην κατασκευή του φυσικού ομοιώματος, λόγω των πεπερασμένων διαστάσεων της διατιθέμενης περιστρεφόμενης δεξαμενής, εφαρμόστηκε η τεχνική της στρεβλής κλίμακας, η οποία συνήθίζεται σε μοντέλα προσομοίωσης θαλάσσιων περιοχών. Έτσι ως οριζόντια κλίμακα μηκών χρησιμοποιήθηκε η $k_{hor}=10^{-5}$ και ως κατακόρυφη η $k_{ver}=10^{-3}$. Χρησιμοποιώντας διαστατική ανάλυση και ομοιότητα κατά Froude και κατά Rosby προέκυψαν όλες οι απαραίτητες κλίμακες μοντελοποίησης καθώς και τα χαρακτηριστικά μεγέθη της εκροής από τον Ελλήσποντο.

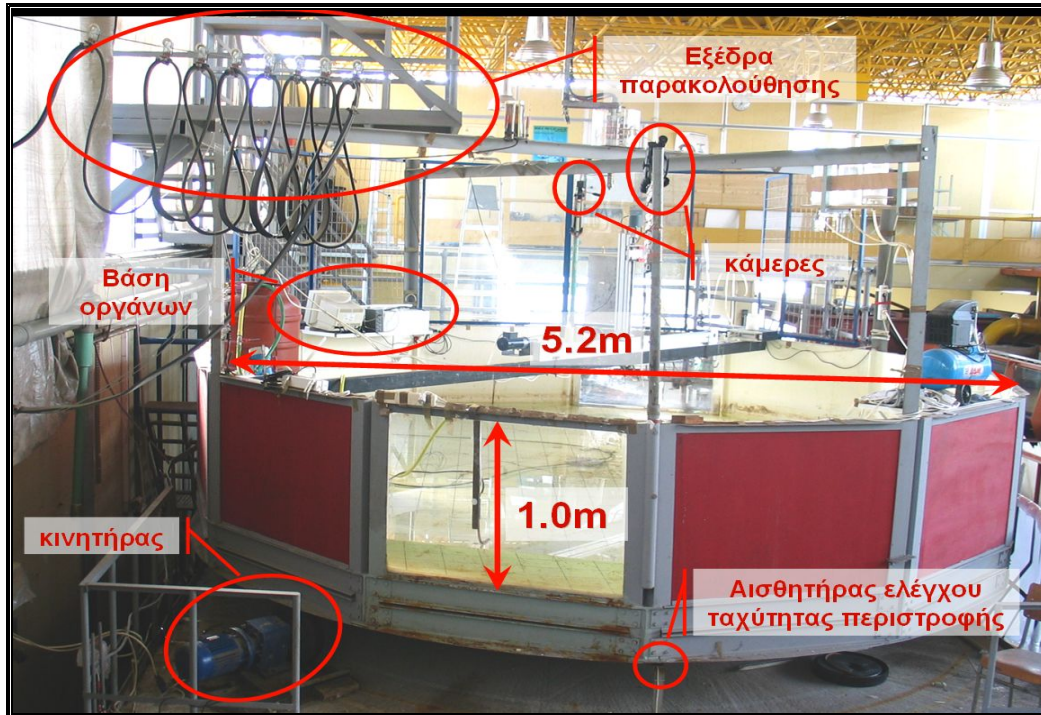
Για τη βυθομετρία του ομοιώματος του Βορείου Αιγαίου, που κατασκευάστηκε για το σκοπό της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκε ναυτικός χάρτης του Β. Αιγαίου της Υδρογραφικής Υπηρεσίας του Πολεμικού Ναυτικού, ο οποίος εκτός από τη λεπτομερή ακτογραμμή, περιλαμβάνει τις ισοβαθείς, καθώς και τα ακριβή βάθη σε διάφορα διάσπαρτα σημεία στο χάρτη. Για την υλοποίηση των ισοβαθών χρησιμοποιήθηκαν ως οδηγοί φύλλα από κόντρα-πλακέ θαλάσσης. Σύμφωνα με το χάρτη, οι ισοβαθείς σχεδιάστηκαν με μαρκαδόρο πάνω στο κόντρα-πλακέ και στη συνέχεια κόπηκαν με σέγα. Η στήριξη των ισοβαθών έγινε με τη χρήση ξύλινων ορθοστατών, κομμένων στο σωστό ύψος και κολλημένων με το κόντρα-πλακέ και τον πυθμένα της δεξαμενής με σιλικόνη και πολυουρεθάνη. Για τα διάσπαρτα σημεία για τα οποία αναφερόταν στο χάρτη το συγκεκριμένο βάθος κόπηκαν αντίστοιχοι ξύλινοι ορθοστάτες και τοποθετήθηκαν στη δεξαμενή στο αντίστοιχο ύψος. Παράλληλα με την τοποθέτηση των ισοβαθών, γίνονταν η πλήρωση των νεκρών όγκων, με τη χρήση κυρίως τούβλων και ελαφρομπετόν καθώς και με άλλα αδρανή. Η τελική επιφάνεια του ομοιώματος διαμορφώθηκε με έτοιμο σοβά και επικαλύφθηκε με ένα υπόστρωμα μονωτικού υλικού (aquadur) και στη συνέχεια με στεγανωτικό πολυουρεθανικής βάσης (Hyperdesmo-2K-W). Στο τέλος σχεδιάστηκαν με ανεξίτηλο μαρκαδόρο οι διάφορες ισοβαθείς, γεμίζοντας με νερό τη δεξαμενή σε αντίστοιχα βάθη.

2.2 Περιγραφή πειραματικής διάταξης και διαδικασίας μετρήσεων

Η περιστρεφόμενη δεξαμενή, που διατίθεται στο Α' Εργαστήριο Υδραυλικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης και όπου κατασκευάστηκε το ομοίωμα του Β. Αιγαίου, έχει διάμετρο 5.2m. Πρόκειται για μεταλλική κατασκευή, που στηρίζεται σε έναν κεντρικό άξονα, ο οποίος εδράζεται σε βάση κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα. Στο Σχήμα 1 φαίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά της εν λόγω δεξαμενής.

Γενικά, η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων αποτελείται από την περιστρεφόμενη δεξαμενή μέσα στην οποία κατασκευάστηκε το ομοίωμα του Βορείου Αιγαίου, από τις κάμερες

βιντεοσκόπησης και καταγραφής των πειραμάτων, τους προβολείς φωτισμού, τη διάταξη εκροής γλυκού νερού (Δαρδανέλια), το βαρέλι αποθήκευσης γλυκού νερού, τη διάταξη χρωματισμού γλυκού νερού, ένα αλατόμετρο-αγωγιμόμετρο για την μέτρηση της αλατότητας του αλμυρού νερού του ομοιώματος (Βόρειο Αιγαίο), τα τηλεχειριστήρια ελέγχου όλων των συσκευών της πειραματικής διάταξης και τέλος τη διάταξη ετοιμασίας αλμυρού νερού συγκεκριμένης αλατότητας για πλήρωση της δεξαμενής πριν τη διεξαγωγή κάθε πειράματος.



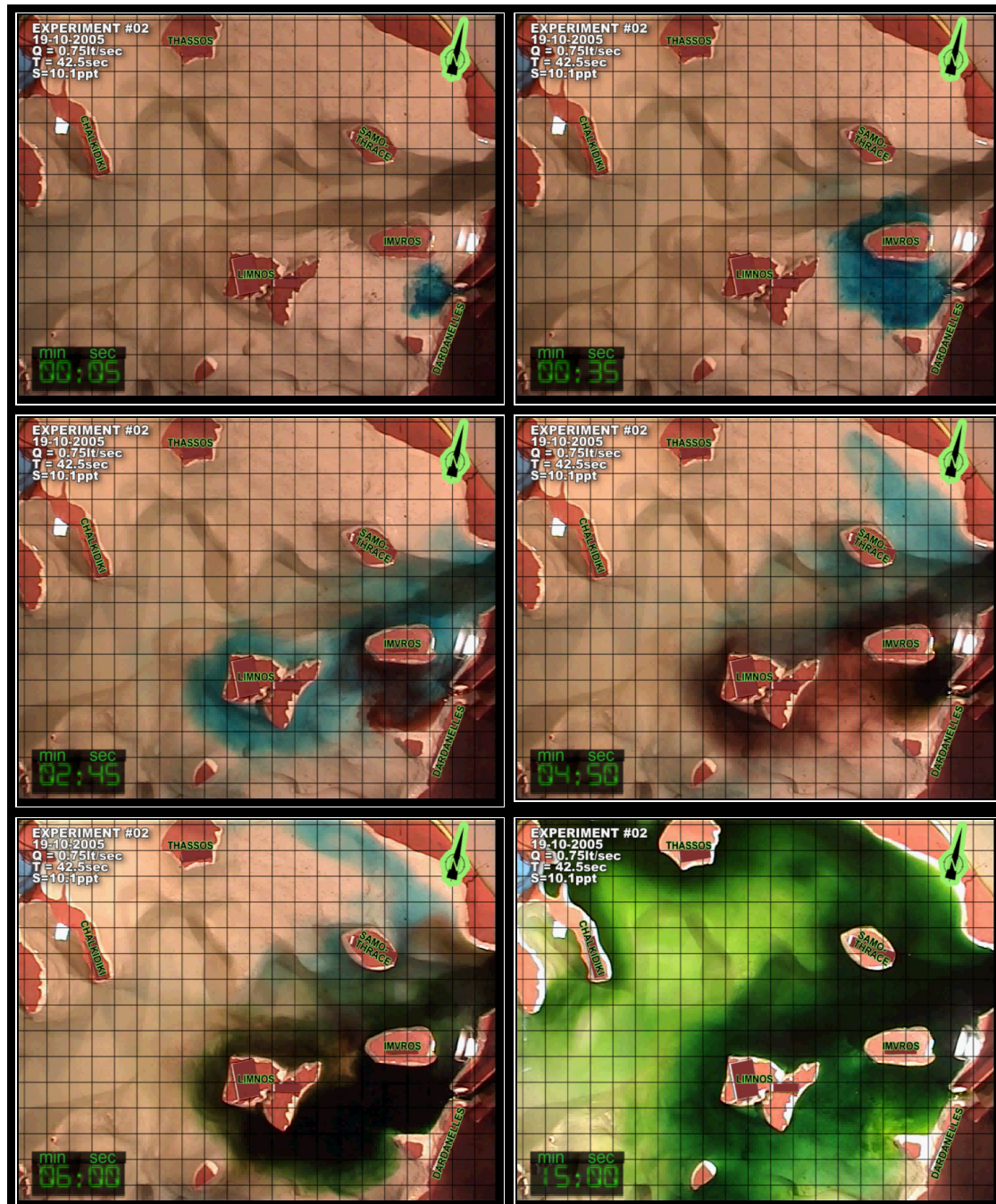
Σχήμα 1. Βασικά χαρακτηριστικά της περιστρεφόμενης δεξαμενής

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί, ότι για την εκροή από τα στενά των Δαρδανελίων χρησιμοποιήθηκε γλυκό νερό, έτσι ώστε η διαφορά αλατότητας με το αλμυρό νερό της περιστρεφόμενης δεξαμενής (μοντέλο) να είναι της ίδιας τάξης με αυτή μεταξύ Δαρδανελίων και Βορείου Αιγαίου (πρότυπο). Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της οπτικοποίησης της ροής (flow visualization) και για τον σκοπό αυτό το γλυκό νερό της εκροής από τα Δαρδανέλια χρωματίζονταν χρησιμοποιώντας τη διάταξη χρωματισμού, που αναφέρθηκε παραπάνω. Συνολικά διεξήχθησαν επτά πειράματα από τα οποία το ένα πραγματοποιήθηκε χωρίς να τεθεί η δεξαμενή σε περιστροφή, έτσι ώστε να διαπιστωθεί η διαφοροποίηση της τροχιάς και της εξάπλωσης του υπό μελέτη πλουμίου χωρίς την επίδραση της δύναμης Coriolis. Μετά το τέλος κάθε πειράματος ακολουθούσε απεγκατάσταση των καμερών και επεξεργασία των βίντεο σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, έτσι ώστε να είναι πιο εύκολη η μελέτη των πειραματικών εικόνων και η σύγκρισή τους με τις κατάλληλα επεξεργασμένες δορυφορικές εικόνες.

2.3 Πειραματικά Αποτελέσματα

Στο Σχήμα 2 περιέχονται ενδεικτικά ορισμένα στιγμιότυπα (frames) από τα επεξεργασμένα βίντεο του δεύτερου από τα πειράματα, που διεξήχθησαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Στο πάνω αριστερά τμήμα του κάθε στιγμιότυπου αναγράφονται τα στοιχεία του αντίστοιχου πειράματος. Πρώτα αναγράφεται ο αύξων αριθμός του κάθε πειράματος, ακολουθεί η ημερομηνία διεξαγωγής και τέλος αναγράφονται οι τιμές της παροχής εκροής από τα Δαρδανέλια στο Βόρειο Αιγαίο Q , της περιόδου περιστροφής της δεξαμενής T καθώς και η τιμή της αλατότητας S του αλμυρού νερού, που περιείχε η περιστρεφόμενη δεξαμενή. Στο κάτω αριστερά τμήμα φαίνεται ο χρόνος που έχει περάσει από την στιγμή που αρχίζει η εκροή γλυκού νερού στο Βόρειο Αιγαίο. Ο κάναβος που υπάρχει σε κάθε στιγμιότυπο, αντιστοιχεί σε 10x10km πραγματική απόσταση και έχει τοποθετηθεί, έτσι ώστε να μπορεί να υπάρχει μια εκτίμηση της εξάπλωσης του επιφανειακού ανωστικού πλουμίου, που δημιουργείται κατά την εκροή των υδάτων των Δαρδανελίων στο Βόρειο Αιγαίο. Στο πάνω δεξιά τμήμα του κάθε εικόνας καταδεικνύεται η θέση του βορά. Τέλος αναγράφονται τα ονόματα των νησιών, της Χαλκιδικής και των Δαρδανελίων.

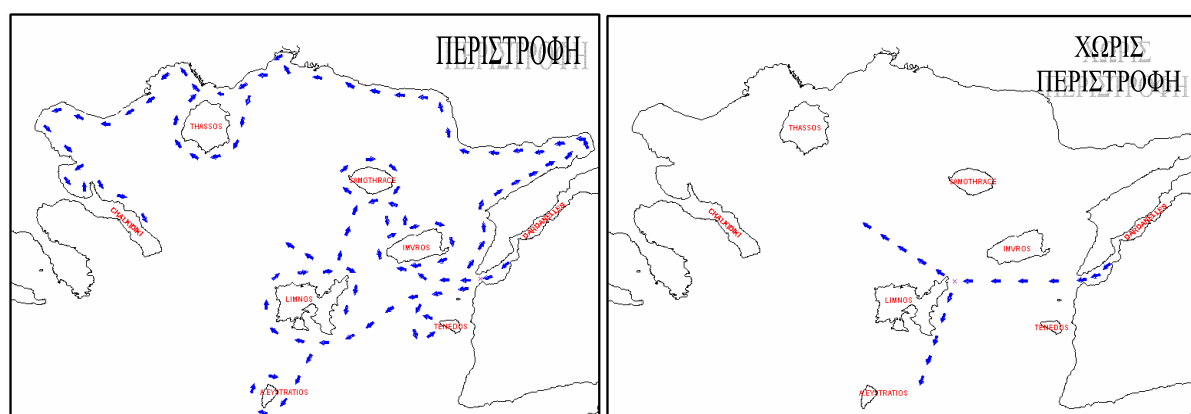
Η μελέτη και σύγκριση των βίντεο των πειραμάτων, τα οποία διεξήχθησαν σε περιστρεφόμενο περιβάλλον, οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι η περιστροφή δημιουργεί γενικά κυκλικές και αντικυκλικές κινήσεις κατά την πορεία και εξάπλωση του γλυκού, χρωματισμένου νερού των Δαρδανελίων, μέσα στον αλμυρό υδάτινο αποδέκτη της περιστρεφόμενης δεξαμενής (Βόρειο Αιγαίο). Η μορφή αυτή της ροής του χρωματισμένου νερού εμφανίζεται σχεδόν η ίδια σε όλα τα πειράματα που διεξήχθησαν σε περιστρεφόμενο περιβάλλον, με μικρές έως ασημαντες διαφορές στις χρονικές στιγμές έναρξης καθώς και στις χρονικές διάρκειες των επιμέρους φαινόμενων ροής που παρατηρήθηκαν.



Σχήμα 2. Ενδεικτικά στιγμιότυπα δεύτερου πειράματος

Αμέσως μετά την έναρξη της διάθεσης της επιφανειακής εκροής από τα στενά των Δαρδανελίων και για λίγο χρονικό διάστημα η ροή κατευθύνεται ευθύγραμμα σχηματίζοντας μια περίπου κυκλική κηλίδα, η οποία αυξάνεται βαθμιαία. Μετά από λίγο, η ροή εκτρέπεται προς τα δεξιά (βόρεια) και η κυκλική κηλίδα μετασχηματίζεται σε μια περίπου ελλειπτική κηλίδα με τον μεγάλο της άξονα σχεδόν κάθετο στην διεύθυνση

της εκροής. Κατόπιν ένα τμήμα της εκτρεπόμενης προς τα βόρεια ροής κατευθύνεται προς τα νότια παράλια της Ίμβρου, όπου διασπάται σε δύο τμήματα. Το ένα τμήμα εξαπλώνεται αντικυκλωνικά γύρω από τα παράλια της Ίμβρου ενώ το άλλο τμήμα κατευθύνεται βόρειο-ανατολικά της Ίμβρου (μεταξύ Ίμβρου και ηπειρωτικής ακτής) και εξαπλώνεται σε μια ζώνη κατά μήκος της ακτογραμμής, που βρίσκεται στα δεξιά (βόρεια) του σημείου της εκροής. Παράλληλα, στο ίδιο χρονικό διάστημα δημιουργείται και ένας μικρός κυκλώνας νότια της εκροής στην περιοχή δυτικά της Τενέδου. Αξίζει επίσης να σημειωθεί, ότι δημιουργείται ακόμη ένας μικρός κυκλώνας στην περιοχή μεταξύ Ίμβρου και Σαμοθράκης. Κατόπιν, για ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα δημιουργείται ένα νέο τμήμα ροής, το οποίο κατευθύνεται προς τα νότια παράλια της Λήμνου και στη συνέχεια εξαπλώνεται αντικυκλωνικά γύρω από αυτήν. Στο τέλος του χρονικού αυτού διαστήματος ένα κομμάτι του τμήματος της ροής, που εξαπλώνεται κυκλωνικά γύρω από τη Λήμνο, κατευθύνεται ανατολικά του Αγ. Ευστράτιου και εξαπλώνεται αντικυκλωνικά γύρω από τα παράλιά του. Περίπου την ίδια χρονική στιγμή δημιουργούνται δύο νέα τμήματα ροής. Το ένα αρχίζει να εξαπλώνεται αντικυκλωνικά γύρω από τη Σαμοθράκη και το άλλο κατευθύνεται βορειοδυτικά μέχρι να φτάσει στις νότιες ακτές της Θάσου. Κατά την υπόλοιπη διάρκεια των πειραμάτων, η κυκλοφορία των υδάτων που προέρχονται από τα στενά των Δαρδανελίων μέσα στην περιοχή του Βορείου Αιγαίου ακολουθεί τη μορφή που μόλις περιγράφηκε. Τέλος, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στο τέλος του κάθε πειράματος το χρωματισμένο γλυκό νερό (νερό Δαρδανελίων) γενικά περιορίζεται στην περιοχή του Βορείου Αιγαίου και ειδικότερα βόρεια του άξονα Σκύρου-Λέσβου με σχεδόν καθόλου χρώμα να ανιχνεύεται νότια του εν λόγω άξονα. Συνοψίζοντας, από ότι παρατηρήθηκε στα πειράματα το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του νερού που εισέρχεται στο Βόρειο Αιγαίο από τα στενά των Δαρδανελίων συγκεντρώνεται στην περιοχή της εκροής, στις περιοχές γύρω από την Ίμβρο, τη Λήμνο και τη Σαμοθράκη καθώς και κατά μήκος της ακτογραμμής που βρίσκεται στα δεξιά (βόρεια) της εκροής σε μια ζώνη που εκτείνεται μέχρι και τη Χαλκιδική (Σχήμα 3α).



α)

β)

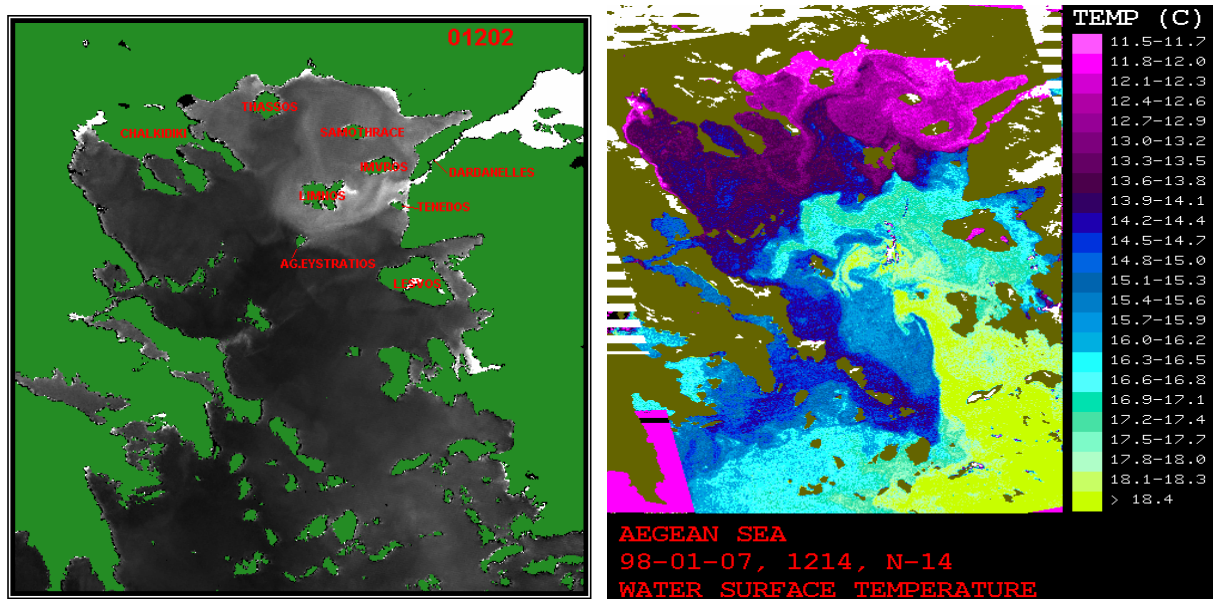
Σχήμα 3. Κυκλοφορία υδάτων εκροής Δαρδανελίων στο Βόρειο Αιγαίο: α) με περιστροφή της δεξαμενής, β) χωρίς περιστροφή της δεξαμενής

Όσον αφορά το πείραμα που πραγματοποιήθηκε χωρίς περιστροφή, η εξάπλωση του υπό μελέτη πλουμίου με απουσία της δύναμης Coriolis είναι τελείως διαφορετική από αυτήν που περιγράφηκε προηγουμένως. Στο συγκεκριμένο πείραμα, αμέσως μετά την έναρξη της διάθεσης της επιφανειακής εκροής από τα στενά των Δαρδανελίων η ροή κατευθύνεται ευθύγραμμα σχηματίζοντας μια περίπου κυκλική κηλίδα η οποία αυξάνεται συνεχώς. Μετά από μικρό χρονικό διάστημα η κηλίδα συναντά το ανατολικό άκρο της Ίμβρου και ένα μικρό τμήμα της αλλάζει πορεία και κατευθύνεται βόρεια μεταξύ της Ίμβρου και της ηπειρωτικής ακτής. Η αρχική κηλίδα συνεχίζει να αυξάνεται χωρίς εκτροπή μέχρι τη χρονική στιγμή που συναντά τα ανατολικά παράλια της Λήμνου. Στο σημείο αυτό η κηλίδα διασπάται σε δύο καινούρια τμήματα, το ένα κατευθυνόμενο βόρειο-δυτικά και το άλλο κατευθυνόμενο νότιο-δυτικά. Και τα δύο αυτά νέα τμήματα ροής δημιουργούν δύο νέες σχεδόν κυκλικές κηλίδες, οι οποίες αναπτύσσονται με τον ίδιο τρόπο, όπως η αρχική, αλλά σε διευθύνσεις που σχηματίζουν μεταξύ τους μια αμβλεία γωνία (Σχήμα 3β). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι, στην περίπτωση απουσίας της δύναμης Coriolis, το γλυκό νερό που εκρέει από τα στενά των Δαρδανελίων, εξαπλώνεται με την πάροδο του χρόνου σχεδόν σε ολόκληρο το Αιγαίο χωρίς να περιορίζεται βόρεια του άξονα Σκύρου-Λέσβου, όπως στα προηγούμενα πειράματα. Επίσης παρατηρείται, ότι στο συγκεκριμένο πείραμα για τον συνολικό χρόνο προσομοίωσης δεν διακρίνονται περιοχές υψηλής συγκέντρωσης χρώματος, όπως στα προηγούμενα πειράματα, αλλά αντίθετα υπάρχει μια ομοιόμορφη κατανομή συγκέντρωσης χρώματος στο τέλος του πειράματος. Στα Σχήματα 3α και 3β δίνεται σχηματικά η κυκλοφορία των υδάτων που εκρέουν στο Βόρειο Αιγαίο από τα στενά των Δαρδανελίων, όπως παρατηρήθηκε στα πειράματα με περιστροφή και χωρίς περιστροφή αντίστοιχα.

2.4 Δορυφορικά Δεδομένα

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, προκειμένου να επαληθευτούν τα πειραματικά αποτελέσματα πραγματοποιήθηκε σύγκριση των εργαστηριακών εικόνων με αντίστοιχες δορυφορικές εικόνες, που καταδεικνύουν την πορεία και εξάπλωση του επιφανειακού ανωστικού πλουμίου, που σχηματίζεται από την εκροή των υφάλμυρων υδάτων των Δαρδανελίων στο Βόρειο Αιγαίο. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δυο είδη ειδικά επεξεργασμένων δορυφορικών εικόνων της υπό μελέτη περιοχής. Στο πρώτο είδος δορυφορικών εικόνων η εξάπλωση του υπό μελέτη πλουμίου καταδεικνύεται χρησιμοποιώντας την Χλωροφύλλη-Α σαν ανιχνευτική ουσία (SeaWifs Chlorophyll Maps). Οι χάρτες αυτοί της Χλωροφύλλης-Α προκύπτουν από επεξεργασία δορυφορικών δεδομένων SeaWifs (επίπεδο 1) χρησιμοποιώντας το πακέτο λογισμικού SEADAS. Στο δεύτερο είδος δορυφορικών εικόνων μπορεί να παρατηρηθεί η εξάπλωση του υπό μελέτη πλουμίου στη θαλάσσια περιοχή του Βορείου Αιγαίου καταδεικνύοντας την επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας (sea surface temperature images).

Συγκρίνοντας τις δορυφορικές εικόνες (Σχήματα 4α και 4β) με τις εργαστηριακές εικόνες συμπεραίνεται, ότι η μορφή της εξάπλωσης του υπό μελέτη πλουμίου συγκλίνει πάρα πολύ με τη μορφή που παρατηρήθηκε στα πειράματα. Πιο συγκεκριμένα, τα βασικά τμήματα ροής και τα πεδία εξάπλωσής τους που περιγράφονται στα πειράματα της παρούσας εργασίας ανιχνεύονται επίσης και στις δορυφορικές εικόνες. Έτσι και εδώ, το υπό μελέτη πλούμιο φαίνεται να εξαπλώνεται σε μια ζώνη κατά μήκος της ηπειρωτικής ακτογραμμής βόρεια της εκροής η οποία εκτείνεται μέχρι και της ακτές της Χαλκιδικής. Παρόμοια πεδία εξάπλωσης με τα πειράματα ανιχνεύονται επίσης και γύρω από την Ίμβρο, τη Λήμνο, τη Σαμοθράκη, τον Άγιο Ευστράτιο, την Τένεδο και τη Θάσο. Αξίζει να σημειωθεί, ότι περίπου οι ίδιες περιοχές υψηλής και χαμηλής συγκέντρωσης, που παρατηρήθηκαν στα πειράματα, ανιχνεύονται και στις δορυφορικές εικόνες. Για παράδειγμα, η περιοχή χαμηλής συγκέντρωσης μεταξύ Χαλκιδικής, Λήμνου και Θάσου είναι εμφανής σχεδόν σε όλες τις δορυφορικές εικόνες. Τέλος, όπως και στα πειράματα έτσι και εδώ, σχεδόν μηδενικές συγκεντρώσεις υδάτων, που προέρχονται από τα στενά των Δαρδανελίων, ανιχνεύονται νότια του άξονα Σκύρου-Λέσβου.



α)

β)

Σχήμα 4. Δορυφορικές εικόνες: α) Χάρτης χλωροφύλλης β) Εικόνα επιφανειακής θαλάσσιας θερμοκρασίας

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα έρευνα καταδεικνύεται πειραματικά, ότι η επίδραση της περιστροφής της γης (δύναμη Coriolis) διαφοροποιεί τελείως τις ροές μεγάλης κλίμακας, όπως είναι το υπό μελέτη επιφανειακό πλούμιο υφάλμυρων υδάτων της Μαύρης θάλασσας που εκρέει στο Βόρειο Αιγαίο μέσω των Δαρδανελίων. Η εξάπλωση του πλουμίου αυτού υπό την επίδραση της δύναμης Coriolis διαχωρίζεται σε δύο κύρια ρεύματα. Το ένα ρεύμα εξαπλώνεται βόρεια σε μια ζώνη κατά μήκος της ακτής μεταφέροντας κάποιο κλάσμα της εκροής, ενώ το υπόλοιπο νερό από την εκροή ανακυκλοφορεί μέσα σε μια συνεχώς αυξανόμενη “τοπική κηλίδα” στην περιοχή

κατάντη της εκροής δημιουργώντας κατά την εξάπλωσή του νέα τμήματα ροής τα οποία αναπτύσσονται αντικυκλωνικά γύρω από τα νησιά του Βορείου Αιγαίου. Χαρακτηριστική επίσης είναι και η παρουσία κάποιων κυκλωνικών κινήσεων μικρότερου μεγέθους από ότι οι αντικυκλώνες γύρω από τα νησιά. Όσον αφορά την συγκέντρωση και συσσώρευση των υδάτων, που εκρέουν από τα στενά των Δαρδανελίων στη θαλάσσια περιοχή του Αιγαίου, είναι εμφανές ότι αυτά συσσωρεύονται κυρίως στην περιοχή του Βορείου Αιγαίου, με υψηλές τιμές συγκεντρώσεων να ανιχνεύονται στις περιοχές γύρω από την Ίμβρο, τη Λήμνο, τη Σαμοθράκη, τον Άγιο Ευστράτιο, τη Θάσο καθώς και σε μια ζώνη που εκτείνεται κατά μήκος της ηπειρωτικής ακτογραμμής, ξεκινώντας από την έξοδο των Δαρδανελίων στο Αιγαίο και καταλήγοντας στις δυτικές ακτές της Χαλκιδικής. Τα πειραματικά ποιοτικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με αντίστοιχα αποτελέσματα, που προέρχονται από την επεξεργασία δορυφορικών εικόνων άλλων ερευνητών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υποστηρίχθηκε από το ερευνητικό πρόγραμμα ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ (ΕΠΕΑΕΚ-ΥΠΕΠΘ). Η χρηματοδότηση έγινε κατά 75% από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο και κατά 25% από εθνικούς πόρους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Χατζηκωνσταντίνου Α., Αγγελίδης Π., Κωτσοβίνος Ν.Ε., (2005) "Επιδράσεις στην περιβαλλοντική κατάσταση του βορείου Αιγαίου λόγω εισροής υδάτων από ποταμούς και από τα στενά των Δαρδανελίων", Πρακτικά σε CD-ROM του 5ου Διεθνούς Συνεδρίου για την **Τεχνολογία Περιβάλλοντος με Θέμα «Περιβάλλον και Ανάπτυξη»**, HELECO 2005, Αθήνα, 2005.
2. Atkinson J., Guoqing Lin and Mannesha Joshi (1994) "Physical model of Niagara river discharge", **Great Lakes Res.**, Vol. 20 (3), pp. 583-589.
3. Durand N., Sandrine Arnoux-Chiarassa, Sylvain Quillon, Vincent Rey and Philippe Fraunie (1994) "**Three-dimensional plume of the Rhone river**", P.A. Davies, Oxford Univ. Press, pp. 341-353.
4. Arnau Pedro, Camino Liqueste and Miquel Canals (2004) "River mouth plume events and their dispersal in the northwestern Mediterranean sea", **Oceanography**, Vol. 17 (3).
5. Warrick J., Leal A. K. Mertes, Libe Washburn and David A. Siegel (2004) "Dispersal forcing of Southern California river plumes, based on field and remote sensing observations", **Geo-Mar Lett.**, Vol. 24, pp. 46-52.
6. Cheng T. Ralph and Vincenzo Casulli (2003) "Modeling a three-dimensional river plume over continental shelf using a 3D unstructured grid model", Proc. 8th International Conference of **Estuarine and Coastal Modeling**, pp. 1027-1043.
7. Dereck A. Fong and W. Rockwell Geyer (2002) "The alongshore transport of freshwater in a surface-trapped river plume", American Meteorological Society, **Journal of Physical Oceanography**, Vol. 32 (3), pp. 957-972.
8. Mestres M., Joan Pau Sierra, Agustin Sanchez-Arcilla, Julio Gonzalez Del Rio, Thomas Wolf, Andres Rodriguez and Sylvain Quillon (2003) "Modeling of the Ebro river plume. Validation with field observations", **SCI. MAR.**, Vol. 67 (4), pp. 379-391.
9. Γρηγοριάδου Β., Κονιδάρης Α., Αγγελίδης Π., Κωτσοβίνος Ν. (2005) "Ρύπανση παράκτιων ζωνών από εκτροπές εκροών ποταμών υπό την επίδραση της δύναμης Coriolis", Πρακτικά σε CD-ROM του 5ου Διεθνούς Συνεδρίου για την **Τεχνολογία Περιβάλλοντος με Θέμα «Περιβάλλον και Ανάπτυξη»**, HELECO 2005, Αθήνα, 2005.
10. Jonsson L. (2001), "**Seawifs Chl-A data in the north Aegean sea and discharge properties from the Dardanelles strait**", Dep. of Water Resources Engineering, Univ. of Lund P.O. Box 118, S-221 00 Lund, Sweden.
11. Jonsson L., (2001) "**Some quality and hydrodynamic features of the north Aegean sea derived from SEAWIFS ocean color data**", Dep. of Water Resources Engineering, Univ. of Lund P.O. Box 118, S-221 00 Lund, Sweden.
12. Unluata U., T. Orguz, M.A. Latif and E. Ozsoy (1990) "On the physical oceanography of the Turkish straits", **The Physical Oceanography of Sea Straits**, pp.25-60.
13. Kourafalou V.H. and K. Barbopoulos (2003) "High resolution simulations on the north Aegean sea seasonal circulation", **Annales Geophysicae**, Vol. 21, pp. 251-265.
14. Stashchuk N., and Kolumban Hutter (2001) "Modeling of water exchange through the strait of the Dardanelles", **Continental Shelf Research**, Vol. 21, pp. 1364-1382.
15. Zodiadis G., Alexandri S., Parlakis P., Jonsson L., Kallos G., Demetropoulos A., Georgiou G., Theodorou A. and Balopoulos E. (1996) "Tentative study of flow patterns in the north Aegean sea using NOAA-AVHRR images and 2D model simulation", **Ann. Geophysicae**, Vol. 14, pp. 1221-1231.

Spreading Width of a 2D Brine Sewage after Impinging on a Shallow Sea Free Surface

Angelidis P. B.⁽¹⁾, Gyrikis V., Konidakis A., Kotsovinos N. E.⁽²⁾

Summary

We consider the problem of the disposal vertically upwards of heavy brine sewage from a two-dimensional diffuser in a relatively shallow, homogeneous, motionless, lighter ambient sea. The disposal of brine (which is heavier than the sea water) produces a negative buoyant jet (two dimensional fountain), which if the sea is deep enough penetrates up to a maximum vertical penetration H_{max} . If the depth of the sea is less than H_{max} , then the brine fountain impinges on the free surface and spreads laterally. In this paper we use laboratory experiments and dimensional considerations to investigate the spreading behaviour (width) of the vertical fountain after its impingement upon the free surface of an initially homogeneous and quiescent ambient. The lateral distance to which the fountain fluid spreads along the surface before falling back into the ambient (due to negative buoyancy) was found to be a function of the initial source Froude number, the slot width of the diffuser and the depth at which the fluid was injected. The experimental results have been used to derive an equation relating the width at the free surface with the initial parameters of the flow.

Keywords :

Two-dimensional diffuser, negatively buoyant jet, fountain

Introduction

The development of seawater desalination plants for urban supply and agricultural use has increased considerably in recent years as a means for relieving the shortage of water resources. A by-product of these plants is the water that is rejected after the desalination process, and it has to be disposed off with a salt content which can be double that of sea water in its natural state, and thus with a density which is much higher. The rejected high salinity water is called brine water. The brine water has to be disposed off in such a way that its potential negative impact on marine communities is reduced to a minimum. One question (which outside of the

¹ (Lecturer) (Democritus University of Thrace, School of Engineering)-(Vas. Sofias 12, 67100)-(Xanthi, Greece)-(tel.:+3025410 79610, fax.:+3025410 79604)-(e-mail: info@civil.duth.gr and web: www.duth.gr)-(pangelid@civil.duth.gr)

² (Professor) Democritus University of Thrace, School of Engineering)-(Vas. Sofias 12, 67100)-(Xanthi, Greece)-(tel.:+3025410 79601, fax.:+3025410 79604)-(e-mail: info@civil.duth.gr and web: www.duth.gr)-(kotsovin@civil.duth.gr)

objectives of this paper) involves determining the degree of tolerance of the marine organisms to the increase in salinity associated with dumping the brine water back into the sea. A second question concerns studying the way that this rejected heavier brine water behaves, because it operates in a completely different way from the conventional wastewater diffusers flowing out from treatment plants, which has a positive buoyancy. The main characteristic that distinguishes the rejected brine water from normal seawater is its higher density (from 1.04 to 1.06 gr/cm³), which leads to a negative buoyancy flux.

The two-dimensional flow, which is created when a dense jet is injected from a (two-dimensional) diffuser vertically upward into a lighter (assumed homogeneous in this paper) ambient is usually called two-dimensional (2D) fountain. Given enough depth, and due to the initial upward momentum, the fountain brine fluid moves vertically upwards, its momentum continuously diminishes due to the action of the negative buoyancy flux, and stops when the vertical momentum becomes equal to zero. Therefore, given enough depth, the 2D fountain penetrates to a maximum distance from the source (which depends on the initial momentum and the negative buoyancy flux). The entrained water into the fountain is a mixture of ambient sea water and of the descending brine fountain water. Subsequently, the diluted brine water fountain falls back (because it is heavier than the ambient sea water) around the diffuser. In view of this, the diluted brine water tends to settle on the seabed, forming a stratified layer, which forms a bottom gravity current due to its difference in density from the sea water. The gravity current increases in size, while at the same time gradually is diluted. Various environmental studies indicate that it is not necessary for the bottom sea plants to be completely covered by a layer of water with a very high salinity level (brine water) for them to suffer from negative impact. All that is required is for there to be a high salinity level on the seabed itself for harmful effects to be observed.

Therefore it seems reasonable to explore alternative ways of disposing of the rejected water to increase the extension of the near field initial dispersion and at the same time increasing the dilution. With these objectives in mind, the study focused on a disposal of the brine water where the initial momentum is high enough to impinge on the free sea surface, see Figure 1.

Previous investigators, e.g. Goldman and Jaluria [1], Campbell and Turner [2], Baines et al [3], Zhang and Baddour [4] and Huai and Yang [5] studied the problem of a jet of heavy fluid issuing vertically upward (2D fountain) into homogeneous, effectively infinitely deep, lighter ambient fluid.

However, to the best of our knowledge, no studies have been cited which examine what happens when the ambient fluid is not deep enough and the fountain impinges the free surface. No studies have been cited to examine how far a 2D fountain would spread if the fountain fluid impinged on the free surface before reaching its maximum vertical penetration level (geometry and flow configuration of Figure 1). The basic objective of this paper is to study the lateral width of the free surface spreading of the brine water due to free surface impingement.

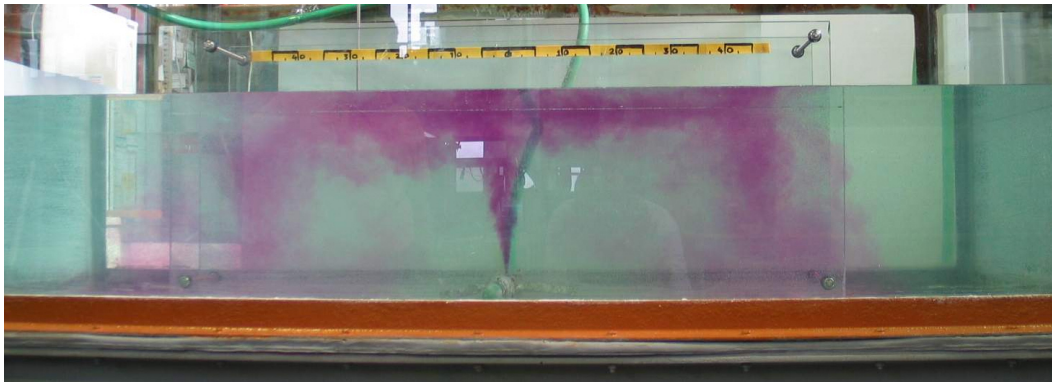


Figure 1. Photo of the 2D fountain impinging upon the free watersurface of the initially homogeneous and quiescent ambient experimental tank. For clarity, the fountain fluid was dyed red. We observe the jet up flow, the surface spreading, the spreading width, and the down flow (as two plane negative plumes, dyed red) to the left and to the right of the heavier diluted fountain fluid.

1. Experimental Setup – Experimental Results

The experiments were carried out in a 690 mm deep glass tank, with length 1945 mm and width 1140 mm, filled with tap water. The water depth varied from 25 to 40 cm. The diffuser was constructed from stainless steel pipe of internal diameter 2.54 cm and of length 20 cm, installed at the center of the tank and at a vertical distance of 6 cm from the bottom of the tank. The diffuser had 20 ports of diameter 1.5 mm. In order to achieve two dimensionality, two glass walls of length 120 cm and height 52.7 cm were used. The glasses were installed perpendicular to the diffuser, and vertical at a between distance of 20 cm. The diffuser was fed with salt water from a constant pressure tank. The round negative buoyant jets from the ports were issued directed vertically upwards and merged at a distance about 1 cm from the diffuser, forming a two dimensional negative buoyant jet (i.e. a 2D fountain), which impinges on the free surface.

A substantial number of experiments were performed (26 experiments), where we vary the initial volume flux of salt water Q_0 out of the diffuser, the depth of the water in the tank, and the initial density of salt water. The main emphasis of these experiments is to determine the lateral width of the impinging fountain at the free surface. The experiments were recorded continuously using a color video camera, and the video recordings were used later on to calculate the total width $R_{0\lambda}$ of the fountain spreading at the free surface. Table 1 contains all the initial parameters of the various experimental runs and the experimental results of the total lateral length of the impinging fountain fluid at the free surface. The symbols in this table are presented subsequently:

H_e : water height above the diffuser, (cm)

Q_0 : salt water volume flux, (lt/h)

u_0 : initial velocity at the diffuser ports, (cm/sec)

ρ_0 : density of the salt water at the exit from diffuser, (gr/cm³)

ρ_a : density of the ambient water, (gr/cm³)

Fro: Froude number defined according of the paper of Zhang and Baddour [4] =
$$\frac{u_o}{\sqrt{\frac{\rho_o - \rho_a}{\rho_o} g b_o}}$$

$R_{o\lambda}$: total lateral width of the fountain water spreading at the free surface, (cm)

b_o : half of the diffuser slot width, (cm)

EXPERIMENTAL PARAMETERS AND EXPERIMENTAL RESULTS (LATERAL WIDTH)									
No	H_e	Q_0	u_0	ρ_0	ρ_a	Fro	$R_{o\lambda}$	$H_e + (R_{o\lambda}/2)$	b_o
-	cm	l/h	cm/s	g/cm ³	g/cm ³	-	cm		cm
1	19	96,9	76,2	1,021	1,000	175,87	30,0	34,00	0,0093
2	19	116,0	91,2	1,021	1,000	210,51	32,5	35,25	0,0093
3	19	135,1	106,2	1,021	1,000	245,15	42,5	40,25	0,0093
4	19	144,7	113,7	1,021	1,000	262,47	57,5	47,75	0,0093
5	19	154,2	121,2	1,021	1,000	279,79	63,0	50,50	0,0093
6	19	163,7	128,7	1,0195	1,000	308,10	85,0	61,50	0,0093
7	24	120,8	94,9	1,021	1,000	219,17	27,5	37,75	0,0093
8	24	144,7	113,7	1,021	1,000	262,47	35,0	41,50	0,0093
9	24	168,5	132,5	1,021	1,000	305,77	57,5	52,75	0,0093
10	24	192,4	151,2	1,021	1,000	349,08	68,5	58,25	0,0093
11	24	201,9	158,7	1,021	1,000	366,40	80,5	64,25	0,0093
12	24	211,5	166,2	1,021	1,000	383,72	80,0	64,00	0,0093
13	29	120,8	94,9	1,021	1,000	219,17	25,0	41,50	0,0093
14	29	135,1	106,2	1,021	1,000	245,15	32,0	45,00	0,0093
15	29	154,2	121,2	1,021	1,000	279,79	45,0	51,50	0,0093
16	29	173,3	136,2	1,021	1,000	314,44	60,0	59,00	0,0093
17	29	192,4	151,2	1,021	1,000	349,08	68,0	63,00	0,0093
18	29	211,5	166,2	1,0195	1,000	397,91	85,0	71,50	0,0093
19	29	230,6	181,2	1,0195	1,000	433,84	90,0	74,00	0,0093
20	34	154,2	121,2	1,021	1,000	279,79	25,0	46,50	0,0093
21	34	173,3	136,2	1,021	1,000	314,44	52,5	60,25	0,0093
22	34	192,4	151,2	1,021	1,000	349,08	55,0	61,50	0,0093
23	34	201,9	158,7	1,021	1,000	366,40	65,0	66,50	0,0093
24	34	211,5	166,2	1,0195	1,000	397,91	70,0	69,00	0,0093
25	34	221,0	173,7	1,0195	1,000	415,87	75,0	71,50	0,0093
26	34	230,6	181,2	1,0195	1,000	433,84	77,5	72,75	0,0093

Table 1. Experimental parameters and experimental results (lateral width)

2. Analyses of the Experimental Results

As we discussed before, in the case of a jet issuing vertically upwards into fluid (with sufficient depth) with density lighter than the jet density, the fluid of the jet cannot penetrate in a vertical direction beyond a certain ceiling level. The flow pattern is characterized by the conical jet up flow and by the surrounding down flow region. For a homogeneous ambient fluid the down flow region extends downwards to the diffuser. Near the ceiling level, (i.e. the highest level reached by the fluid of the jet) the diluted jet fluid leaves the up flow region to enter into the down flow region.

Zhang and Baddour [4] conducted an experimental study on a plane negatively buoyant jet in a homogeneous ambient. They injected a heavy salt solution upward into a tank of fresh water and measured the ceiling height Z_m of the jet. Using dimensional arguments they related the ceiling height Z_m to the volume, momentum, and buoyancy fluxes at the jet source, and derived for large initial Froude number the simplified equation:

$$Z_m = C_m \cdot b_o \cdot \text{Fro}^{4/3} \quad (1)$$

where

C_m = the proportionality constant, evaluated from experimental data

b_o = half of the diffuser slot width

Fro = Froude number, defined according to the paper of Zhang and Baddour [4] =

$$\frac{u_o}{\sqrt{\frac{\rho_o - \rho_a}{\rho_o} g b_o}} \quad (2)$$

The proportionality constant C_m evaluated from their experimental data is approximately equal to 2 for large initial Froude number and they found

$$\frac{Z_m}{b_o} = 2.0 \text{Fro}^{4/3} \quad (\text{for large initial Froude number}) \quad (3)$$

For the case that we study in this paper, i.e. the case where the negative jet impinges on the free surface, we argue that theoretically calculated ceiling height Z_m is related to the depth of the fluid above the diffuser H_ε ($H_\varepsilon < Z_m$) and one half of the total width of the lateral surface spreading $R_{o\lambda}/2$. We argue therefore that the dimensionless width $R_{o\lambda}$ of surface spreading, defined as

$$\frac{[H_\varepsilon + (R_{o\lambda}/2)]}{b_o} \quad (4)$$

depends on the initial Froude number, and on the dimensionless water depth H_ε/b_o .

We plot subsequently in Figure 2 the dimensionless (according to equation 4) experimental results (given in Table 1) as a function of the initial Froude number to the 4/3 power, i.e. $\text{Fro}^{3/4}$.

In Figure 2 we plot all the experimental results, for all values of the dimensionless depth H_ε/b_0 .

The best fit line is given by the equation

$$\frac{[H_\varepsilon + (R_{o\lambda}/2)]}{b_0} = 1.97 \text{Fro}^{4/3} + 1700 \quad (5)$$

We observe that to the first approximation the normalized width of surface spreading varies as

$$\frac{[H_\varepsilon + (R_{o\lambda}/2)]}{b_0} \sim 1.97 \text{Fro}^{4/3} \quad (6)$$

i.e. the normalized width varies in a similar manner with equation 3, which gives the maximum penetration height, and the experimental coefficient is almost the same.

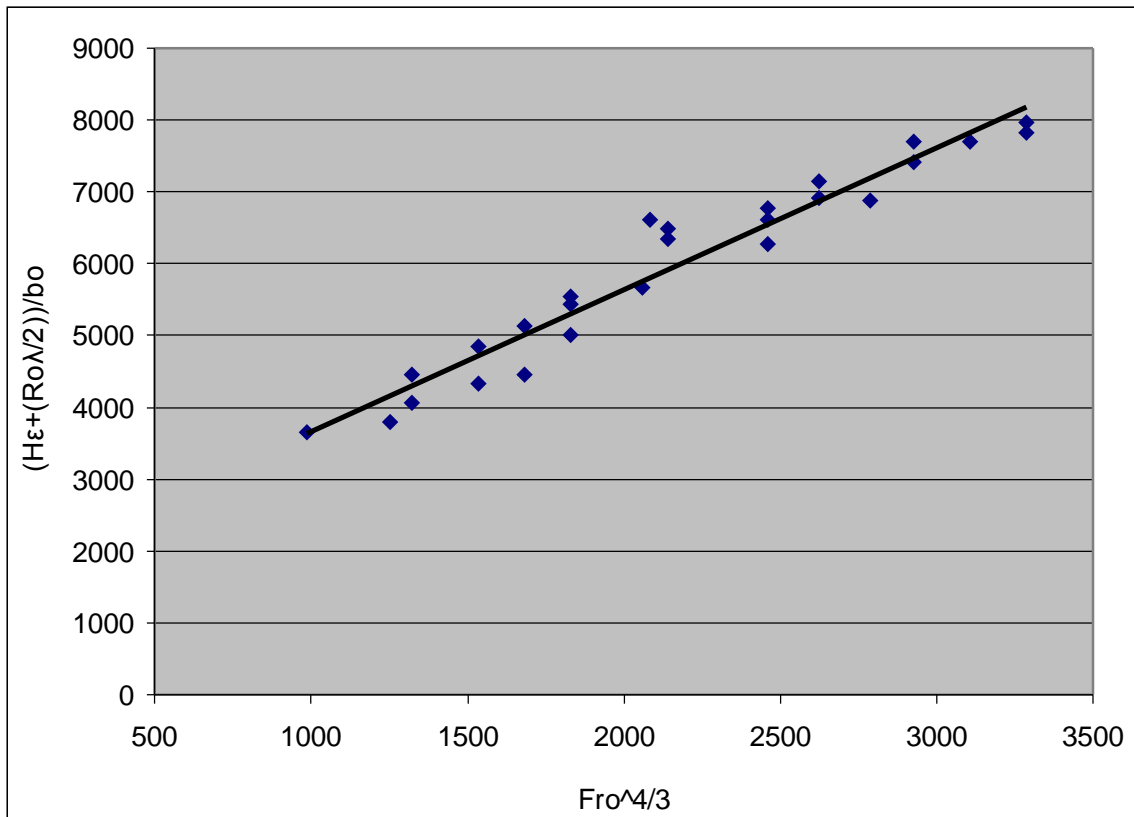


Figure 2. Normalized lateral surface width $R_{o\lambda}$ of the impinging fountain as a function of the four water heights above the diffuser ($H = 19, 24, 29$, and 34 cm). The solid line is the line of best fit to the data.

Finally, we made an attempt to correlate the normalized surface width $R_{o\lambda}$ with the normalized water depth H_ε/b_0 and with the initial Froude number Fro , see Figure 3. We plot in Figure 3 the dimensionless (according to equation 4) experimental results (given in Table 1) as a function of the dimensionless parameter $(H_\varepsilon/b_0)^{0.45} Fro^{0.6}$. The best fit line is given by the equation

$$\frac{[H_\varepsilon + (R_{o\lambda}/2)]}{b_0} = 5.46 \left(\frac{H_\varepsilon}{b_0} \right)^{0.45} Fro^{0.6} \quad (5)$$

The above analysis is valid for large initial Froude numbers i.e. for $Fro > 100$.

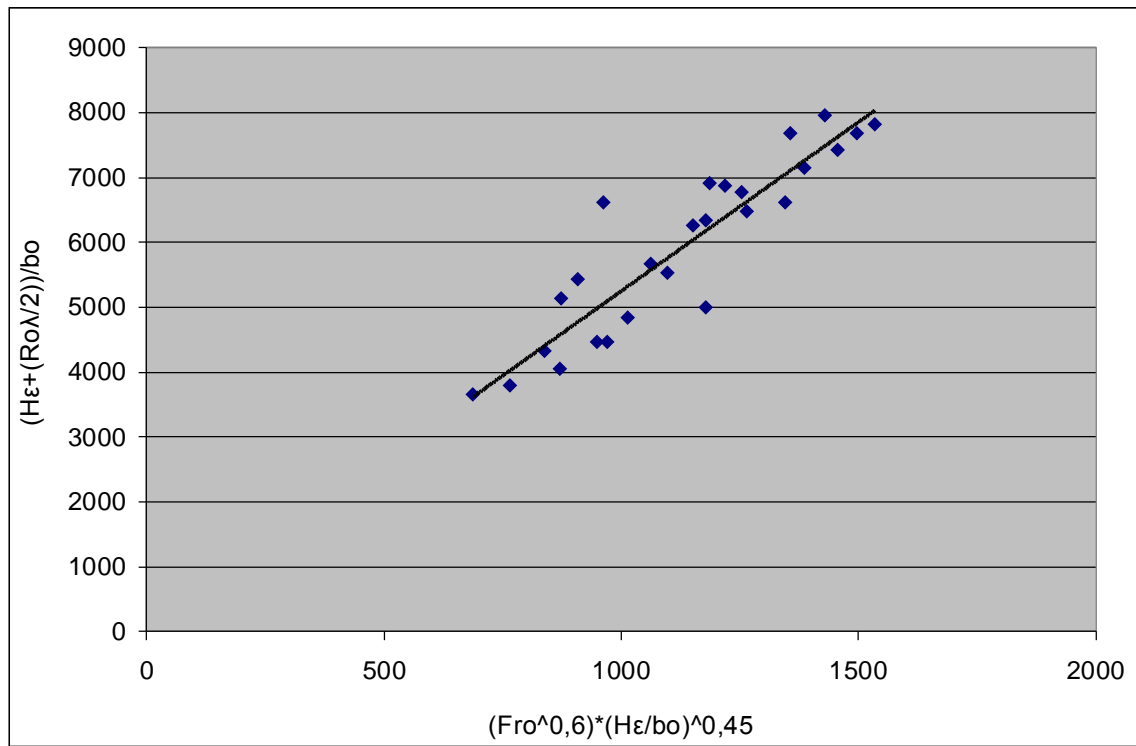


Figure 3. Normalized lateral surface width $R_{o\lambda}$ of the impinging fountain as a function of $(H_\varepsilon/b_0)^{0.45} Fro^{0.6}$ for the four water heights above the diffuser ($H = 19, 24, 29$, and 34 cm). The solid line is the line of best fit to the data .

It is recognized that more experimental and analytical work is needed to improve the functional dependence of the normalized width $Ro\lambda$ from the initial fountain parameters. In addition, the time dependence of such experiments should be studied to understand the recirculation dynamics between the axial jet flow and the down flow at the edges of the surface spreading.

Conclusions

The properties of negatively buoyant jets impinging on the free water surface in a quiescent and homogeneous ambient have been investigated using laboratory experiments. The experimental results show that the impingement results in the generation of a two-dimensional surface lateral spreading at the site of the impact and the generation of two laterals plume like flows due to the negative buoyancy of the surface spreading fountain fluid. In other words, as the fountain impinges on the free surface, it spreads out laterally before sinking downward as two curtains, i.e. as two plane plumes to the left and to the right of the 2D fountain.

In this paper we studied the spreading width of the fountain fluid as it impinged on the free surface. For large initial Froude numbers, it was found that spreading width to be a function of the source Froude number, the slot width of the diffuser and the distance from the fountain source to the impinged free surface.

To the best of our knowledge, experimental results for this problem are not available, and therefore this paper may be useful for the design of the disposal of industrial discharge such as brine, which is released into the ocean through multiport diffusers.

Acknowledgements

The writers would like to thank the technical staff of the Laboratory of Hydraulics of Democritus University of Thrace, and especially the technicians P. Stefanidis, K. Gianakoulas, N. Koussis, and D. Kefalopoulos, who assisted in data collection.

<p style="text-align: center;">D.U.TH. Democritus University of Thrace School of Engineering , Department of Civil Engineering, Vas. Sofias 12, 67100 Xanthi – Greece, www.duth.gr.</p>

References

- [1] Goldman,D. - Jaluria,Y.: “Effect of opposing buoyancy on the flow in free and wall jets”, J. Fluid Mech., vol.166, pp.41-56, (1986).
- [2] Campbell,I.H. - Turner,J.S.: “Fountains in magma chambers”, J.Petrology, vol.30, No.4, pp. 885-923, (1989).
- [3] Baines,W.D. - Turner,J.S. - Campbell,I.H.: “Turbulent fountains in an open chamber”, J.Fluid Mech.,vol.212, pp.557-592, (1990).
- [4] Zhang,H. - Baddour,R.E.: “Maximum vertical penetration of plane turbulent negatively buoyant jets”, J. Engineering Mechanics, vol.123, No.10, pp.973-977, (1997).
- [5] Huai,W. - Li,W. - Yang,Z.: “Numerical prediction on characteristics for vertical plane negatively buoyant jets”, 29th IAHR Congress, Beijing China, September 17-21, (2001).