



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ
ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

"Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ"

ΒΕΝΕΤΗΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΤΖΑΜΠΙΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ,
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧ/ΤΩΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2016

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής ήταν ο προσδιορισμός της μεταβολής της αντίστασης λείας, επίπεδης, ορθογωνικής πλάκας αλουμινίου που προκαλείται από βαφές πλοίων όπως και από τεχνητή τραχύτητα. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με τεχνητή τραχύτητα περιελάμβαναν γυαλόχαρτα καθώς και τεχνητούς μικροοργανισμούς μόλυνσης. Το σύνολο των μετρήσεων αφορούσε αριθμούς Reynolds από 4.0×10^5 έως 4.5×10^6 .

Αρχικώς, δημιουργήθηκε πειραματική διάταξη για τη στήριξη της ορθογωνικής πλάκας στο φορείο της δεξαμενής και την ενίσχυση της ακαμψίας της. Για λόγους ευθυγράμμισης τοποθετήθηκαν σύρματα στην πλώρη, στο μέσο και στην πρύμνη της πλάκας προκαλώντας σημαντική αύξηση της αντίστασης. Για τον υπολογισμό και αφαίρεση της συγκεκριμένης συνιστώσας της ολικής αντίστασης δημιουργήθηκε εκ νέου διάταξη στήριξης ενός σύρματος με τη μορφή υδροτομής. Το βρεχόμενο μήκος σύρματος και η γωνία στήριξης αυτού στο νερό ήταν ίδια με την πλάκα. Στη συνέχεια, η μετρούμενη αντίσταση του σύρματος αφαιρέθηκε από την ολική αντίσταση της πλάκας

Οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν κοντά στον κρίσιμο αριθμό Reynolds για επίπεδη ορθογωνική πλάκα. Για να εξασφαλιστεί τυρβώδης ροή σε όλο το μήκος της πλάκας έγινε πειραματική διερεύνηση για την επιλογή κατάλληλου διεγέρτη τύρβης. Ως διεγέρτες χρησιμοποιήθηκαν σύρματα διαμέτρου 0.8, 0.9, 1.0, 1.128 και 1.3 mm κολλημένα στο 5% του ολικού μήκους της πλάκας από το άκρο πρόσπτωσης.

Αφού επιλέχθηκε ο κατάλληλος διεγέρτης τύρβης πραγματοποιήθηκαν δοκιμές αντίστασης της πλάκας για διάφορες βαφές. Συγκεκριμένα, δοκιμάστηκαν τρεις βαφές πολουρεθάνης, δύο βαφές σιλικόνης και μία ακρυλική βαφή. Δύο εκ

των βαφών πολυουρεθάνης και η μία βαφή σιλικόνης ήταν βαφές antifouling υπό ερευνητικό στάδιο. Το σύνολο το βαφών προέρχεται από την διδακτορική διατριβή της Ε. Κιοσίδου.

Στο επόμενο στάδιο πειραμάτων αυξήθηκε η τραχύτητα της πλάκας με χρήση γυαλόχαρτου σε όλη την βρεχόμενη επιφάνειά της, με στόχο το προσδιορισμό του ισοδύναμου ύψους τραχύτητας. Για τις ανάγκες των συγκεκριμένων πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν γυαλόχαρτα κοκκομετρίας grit-40 και grit-80. Επίσης, έγινε διερεύνηση για το κατά πόσον η θέση της τραχύτητας επηρεάζει την αύξηση της αντίστασης και για το λόγο αυτό τα πειράματα επαναλήφθηκαν για κάλυψη της πλάκας μέχρι το 5% του μήκους της από το άκρο πρόσπτωσης.

Ύστερα, δημιουργήθηκε τεχνητό πλακίδιο fouling από πραγματικούς οργανισμούς που αναπτύχθηκαν στα νερά της Ελευσίνας μέσα σε χρονικό διάστημα ενός έτους. Για τη κατασκευή του πλακιδίου οι γεωμετρίες σαρώθηκαν με 3D Scanner για να ψηφιοποιηθούν. Στη συνέχεια, με χρήση του προγράμματος Rhinoceros και βάση φωτογραφιών ρεαλιστικού fouling δημιουργήθηκε το πλακίδιο. Ωστόσο, τα συγκεκριμένα πειράματα αφορούν τη συνέχιση της παρούσας διπλωματικής και θα μελετηθούν ενδελεχώς στο μέλλον.

Ταυτόχρονα με τα πειράματα, υπολογισμοί αντίστασης για την λεία επίπεδη ορθογωνική πλάκα έγιναν με αριθμητικές μεθόδους χρησιμοποιώντας το κώδικα CFD του καθηγητή Γ. Τζαμπίρα. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Γεώργιο Τζαμπίρα που με την επιστημονική του καθοδήγηση, ιδέες και συμβουλές βοήθησε στο να πραγματοποιηθεί η παρούσα διπλωματική εργασία.

Οπωσδήποτε οφείλω να ευχαριστήσω την Υ.Δ Ευαγγελία Κιοσίδου με την οποία συνεργάστηκα για τη διεξαγωγή των πειραμάτων και την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Κρίσιμη ήταν η συμβολή του Δημήτρη Λιαροκάπη τόσο στο πειραματικό μέρος όσο και στη συγγραφή. Τον ευχαριστώ για το χρόνο και την όρεξή που διέθεσε.

Ευχαριστώ επίσης το Γιάννη Τραχανά αφενός γιατί χωρίς τη συνέργεια του τα πειράματα θα είχαν σημαντικές καθυστερήσεις και αφετέρου λόγω της ενεργητικότητας με την οποία τροφοδοτούσε όλους εμάς τους υπολοίπους.

Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω το Γιώργο Μυλωνά για την καταπληκτική δουλειά και τεχνικές λύσεις που προσέφερε κάθε φορά που τον χρειαζόμασταν, δηλαδή καθημερινά.

Δε ξεχνώ να ευχαριστήσω το Φώτη Κασάπη ο οποίος βοήθησε στην πραγματοποίηση των πειραμάτων αντικαθιστώντας τους Δημήτρη και Γιάννη.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να αναφέρω ότι πέραν της ατομικής συνεισφοράς του καθενός, όλοι μαζί δημιούργησαν ένα πολύ ευχάριστο, φιλικό και θερμό κλίμα από την αρχή μέχρι το τέλος προσφέροντάς μου μοναδικές αναμνήσεις στην τελευταία δοκιμασία πριν την απόκτηση του πτυχίου από τη σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών.

Περιεχόμενα

Περίληψη	iii
Ευχαριστίες	v
Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 1: Θεωρητικό μέρος.....	2
1.1 Fouling	2
1.1.1 Ρύπανση γάστρας (Fouling)	2
1.1.2 Συστήματα βαφής Antifouling	5
1.2 Διεγέρτες τύρβης.....	6
1.3 Οριακό στρώμα	11
1.3.1 Γενικά	11
1.3.2 Εσωτερική, εξωτερική περιοχή τυρβώδους οριακού στρώματος.....	13
1.3.3 Τραχύτητα σε επίπεδη πλάκα	15
1.3.4 Προσδιορισμός συνάρτησης τραχύτητας (Roughness Function).....	17
1.3.5 Πρόβλεψη της μεταβολής της αντίστασης τριβής σε πλοίο από μετρήσεις σε επίπεδη πλάκα.....	19
1.3.6 Πρόβλεψη ολικής αντίστασης κατά ITTC-78	20
1.4 Βαθμονόμηση και Συναρτήσεις μεταφοράς.....	21
Κεφάλαιο 2: Πειραματικός εξοπλισμός κα διατάξεις.....	23
2.1 Πειραματική Δεξαμενή	23
2.2 Χαρακτηριστικά ορθογωνικής πλάκας	25
2.3 Πειραματική διάταξη ορθογωνικής επίπεδης πλάκας.....	25
2.4 Πειραματική διαδικασία και καταγραφή μετρήσεων.....	28
2.5 Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση αντίστασης σύρματος	30
2.6 Συλλογή και καταγραφή μετρήσεων.....	31
Κεφάλαιο 3: Πειράματα.....	32
3.1 Πειράματα για τη μέτρηση της αντίστασης σύρματος.....	32
3.2 Πειράματα σε επίπεδη ορθογωνική πλάκα	33
3.2.1 Πειράματα διεγερτών τύρβης	34
3.2.2 Πειράματα ορθογωνικής επίπεδης πλάκας με βαφές	37
3.2.3 Πειράματα επίπεδης ορθογωνικής πλάκας με γυαλόχαρτο.....	40
3.2.4 Πειράματα προσδιορισμού του κύματος που δημιουργεί η πλάκα	43
3.2.5 Πειράματα μέτρησης της πρόσθετης αντίστασης λόγω fouling.....	44

Κεφάλαιο 4: Ανάλυση και σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	47
4.1 Αποτελέσματα αντίστασης σύρματος.....	47
4.2 Αποτελέσματα λείας ορθογωνικής πλάκας και διεγερτών τύρβης.....	49
4.3 Αποτελέσματα πειραμάτων πλάκας με βαφές.....	53
4.4 Αποτελέσματα πλάκας με γυαλόχαρτα.....	58
4.5 Αποτελέσματα κυματομορφών.....	61
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και προτάσεις διερεύνησης.....	65
5.1 Συμπεράσματα.....	65
5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	67
Αναφορές.....	69

Εισαγωγή

Η ρύπανση της βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας των πλοίων επιδρά αρνητικά στην ολική αντίστασή τους και κατά συνέπεια στην κατανάλωση καυσίμου. Η οικονομικότερη εκμετάλλευση των πλοίων από τις πλοιοκτήτριες εταιρείες δημιουργεί την ανάγκη διερεύνησης, τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά, των επιπτώσεων του fouling ώστε να είναι δυνατή η λήψη μέτρων που να βελτιστοποιούν την ενεργειακή απόδοσή τους.

Στα πλαίσια επίτευξης αυτού του στόχου, οι εταιρείες χρωμάτων έχουν αναπτύξει συστήματα βαφών που σκοπό έχουν να καθυστερήσουν την ανάπτυξη μικροοργανισμών. Πέραν αυτού όμως, οι συγκεκριμένες εταιρείες έχουν αναπτύξει βαφές που υπόσχονται μειωμένη αντίσταση τριβής.

Για την εργαστηριακή μέτρηση της διαφοράς της αντίστασης λόγω βαφών, ρύπανσης και τραχύτητας συνήθως χρησιμοποιείται η διάταξη της ορθογωνικής πλάκας. Η συγκεκριμένη διάταξη έχει απασχολήσει κατά καιρούς τους ερευνητές. Η ΙΤΤC στη μεθοδολογία που προτείνει για τον υπολογισμό της ολικής αντίστασης πλοίου από πειράματα σε μοντέλο, χρησιμοποιεί τη διδιάστατη ορθογωνική πλάκα για τον υπολογισμό της συνιστώσας της αντίστασης τριβής. Σύγχρονες έρευνες που έχουν γίνει για το προσδιορισμό της πρόσθετης αντίστασης που προκαλείται από την ανάπτυξη μικροοργανισμών (fouling) (Schultz και Swain, 2000), καθώς και συστημάτων βαφών (Schultz, 2004) χρησιμοποιούν και αυτές ορθογωνικές πλάκες.

Κεφάλαιο 1: Θεωρητικό μέρος

1.1 Fouling

1.1.1 Ρύπανση γάστρας (Fouling)

*Η θεωρία που ακολουθεί, όπως και η θεωρία της επόμενης παραγράφου βασίζεται στη διδακτορική εργασία του Maxim Candries "*Drag, boundary-layer and roughness characteristics of marine surfaces coated with antifoulings*", Δεκέμβριος 2001.

Ρύπανση (fouling) γάστρας ονομάζεται η ανεπιθύμητη ανάπτυξη οργανισμών σε τεχνητές κατασκευές βυθισμένες σε θαλασσινό νερό, εκ των οποίων η πιο ορατή μορφή είναι το macro-fouling (πεταλίδες, φύκια). Ο έλεγχος του fouling είναι απαραίτητος προκειμένου να αποφευχθεί αύξηση της αντίστασης και κατά συνέπεια, αυξημένες απαιτήσεις ισχύος και κατανάλωσης καυσίμου για τη διατήρηση της ίδιας υπηρεσιακής ταχύτητας. Το fouling μπορεί επίσης να επιταχύνει τη διάβρωση και να μειώσει την αποτελεσματικότητα της έλικας. Για τα συμβατικά πλοία, το 50-80% της αντίστασης είναι αντίσταση τριβής μεταξύ του ύδατος και της βρεχόμενης επιφάνειας του πλοίου. Η λεία, βρεγμένη επιφάνεια που έχει ένα νεότευκτο πλοίο έχει τραχύτητα περίπου 80-130 μm. Ωστόσο, η τραχύτητα της επιφάνειας η οποία έχει ρυπανθεί με φύκια για παράδειγμα, μπορεί εύκολα να υπερβαίνει τα 1000 μm, αυξάνοντας υπερβολικά την αντίσταση εν μέρει λόγω της μεταβολής του πεδίου πιέσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος της γάστρας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η αύξηση μπορεί να φτάσει το 300% για την αντίσταση μιας έντονα ρυπασμένης (heavy-fouled) πλάκας σε σύγκριση με μια λεία. Οι Schultz και Swain (1998, 1999, 2000) πραγματοποίησαν πειράματα σε σήραγγα νερού με LDV (Laser Doppler Velocimetry) σε επίπεδες πλάκες και παρατήρησαν αύξηση μέχρι και 187% στην αντίσταση τριβής όταν στην πλάκα είχε αναπτυχθεί microfouling/slime.

Το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ πραγματοποίησε δοκιμές ισχύος ύστερα από υποβρύχιο καθαρισμό φρεγάτας. Μια σημαντική αλλαγή στην κατανάλωση ενέργειας μετρήθηκε μετά την αφαίρεση του 22-μηνών στρώματος slime, που κυμαίνεται από 8-18% και η μέγιστη ταχύτητα του πλοίου αυξήθηκε κατά 1 κόμβο περίπου (Bohlander, 1991).

Η ανάπτυξη του fouling πραγματοποιείται σε τέσσερα στάδια. Η ρύπανση ξεκινά από τη στιγμή που το πλοίο είναι βυθισμένο στο θαλασσίνο νερό. Στη γάστρα του πλοίου συσσωρεύεται διαλυμένη οργανική ύλη και μόρια όπως πολυσακχαρίτες και πρωτεΐνες. Αυτή η διαδικασία θεωρείται το πρώτο στάδιο του fouling. Ξεκινά μέσα σε δευτερόλεπτα, σταθεροποιείται μέσα σε λίγες ώρες και δημιουργεί το πρώτο στρώμα που θα δεχτεί αργότερα τα επόμενα στάδια ρύπανσης. Η γένεση της ρύπανσης σχεδόν πάντα συμβαίνει όταν το πλοίο είναι σε κατάσταση ηρεμίας, συνηθέστερα στο λιμάνι. Τα λιμάνια διαφέρουν σημαντικά στην τάση τους να προκαλέσουν ρύπανση και το πρόβλημα της ρύπανσης είναι εντονότερο στα τροπικά νερά. Η φύση της ρύπανσης εξαρτάται από το είδος των ζώων και φυτών που υπάρχουν στο νερό, την αλατότητα, τη θερμοκρασία του νερού, το βαθμό του φωτισμού της επιφάνειας του κύτους, την εποχή που ο ελλιμενισμός λαμβάνει χώρα και το χρόνο που δαπανάται στο λιμάνι.

Όταν διαμορφωθεί ένα πρώτο φιλμ fouling, τότε βακτήρια και μονοκύτταροι οργανισμοί, όπως φύκια, ανιχνεύουν την επιφάνεια και εγκαθίστανται σε αυτή, σχηματίζοντας ένα μικροβιακό φιλμ. Αυτό το δεύτερο στάδιο της απόθεσης οργανισμών, περιλαμβάνει την έκκριση των βλεννογόνων πολυσακχαριτών και γενικά διευκολύνει τη δημιουργία μακρο-ρύπανσης (macro-fouling). Η γλίτσα που δημιουργείται έχει ήδη ένα σημαντικό αντίκτυπο στις επιδόσεις του πλοίου.

Η παρουσία κολλωδών εκκρίσεων και η τραχύτητα των ακανόνιστων μικροβιακών αποικιών επιτρέπει την εγκατάσταση περισσότερων σωματιδίων και οργανισμών. Αυτά είναι πιθανό να περιλαμβάνουν σπόρια φυκιών, θαλάσσιους μύκητες και πρωτόζωα. Η μετάβαση από μια μικροβιακή μεμβράνη σε μια πιο σύνθετη που περιλαμβάνει συνήθως πολυκύτταρους πρωτογενείς παραγωγούς, φυτοφάγα ζώα και τους αποικοδομητές θεωρείται ως το τρίτο στάδιο της ρύπανσης.

Το τελικό στάδιο περιλαμβάνει την εγκατάσταση και την ανάπτυξη ρυπογόνων φυκιών και ζώων. Πράσινα φύκια μπορούν να μεγαλώσουν μέχρι 150 χιλιοστά σε μια ζώνη πλάτους λίγων μέτρων στην ίσαλο γραμμή. Αναπτύσσονται γρήγορα και η προσπάθεια για τρίψιμο μπορεί να προκαλέσει μια ακόμη πιο ισχυρή ανάπτυξη μέσα σε λίγες εβδομάδες. Η ρύπανση από ζώα μπορεί να αποτελείται από πεταλίδες, μύδια, πολύζωα, και σκουλήκια. Όπως αναφέρθηκε, η ανάπτυξή τους μειώνει την απόδοση του πλοίου δραστικά και πρέπει οπωσδήποτε να αποφεύγεται. Μερικά παραδείγματα ρύπανσης φαίνονται στις ακόλουθες εικόνες.



Εικόνα 1: Οι εικόνες αυτές προέρχονται από το αρχείο της Ε. Κιοσίδου και απεικονίζουν χαρακτηριστικούς οργανισμούς fouling που αναπτύχθηκαν στην περιοχή της Ελευσίνας

1.1.2 Συστήματα βαφής Antifouling

Η οικονομική εκμετάλλευση των πλοίων περιλαμβάνει πολλές παραμέτρους. Μία εξ αυτών, με ιδιαίτερη σημαντική επίδραση στα έξοδα συντήρησης και λειτουργίας ενός πλοίου είναι η επιλογή κατάλληλου συστήματος βαφής που θα προστατέψει τη μεταλλική κατασκευή από διάβρωση αλλά και το fouling. Το fouling αυξάνει την αντίσταση τριβής η οποία αποτελεί το 80-90% της συνολικής αντίστασης σε αργόπλοια πλοία. Άμεση συνέπεια της αύξησης της αντίστασης είναι η αυξημένη κατανάλωση καυσίμου και οι αυξημένες εκπομπές αερίων ρύπων.

Παλαιότερα, για να διατηρηθεί η γάστρα του πλοίου σε ικανοποιητική κατάσταση, έπρεπε τα πλοία να δεξαμενίζονται κάθε έξι μήνες. Σήμερα, χάρις στις εξελίξεις στην βιομηχανία χρωμάτων, τα πλοία παραμένουν για μεγαλύτερα διαστήματα στο νερό, ως και πέντε χρόνια, διατηρώντας ικανοποιητικές επιδόσεις (Candries, 2001).

Ο ευρέως διαδεδομένος τύπος antifouling, μέχρι και το 2003, ήταν τα χρώματα Self-Polishing Co-polymers (SPC) τα οποία περιέχουν βιοκτόνο με βάση τον κασσίτερο, Tri-Butyl Tin (TBT). Όταν η συγκεκριμένη βαφή είναι βυθισμένη στο νερό λαμβάνει χώρα χημική αντίδραση που απελευθερώνει το TBT με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός υδατοδιαλυτού προϊόντος το οποίο 'ξεπλένεται' από την επιφάνεια με αργό αλλά σταθερό ρυθμό. Η διάρκεια ζωής αυτού του συστήματος βαφής εξαρτάται από το πάχος της επίστρωσης. Επίσης, ύστερα από 25 χρόνια εμπειρίας, οι εταιρείες χρωμάτων ήταν σε θέση να επιτύχουν την επιθυμητή ταχύτητα αντίδρασης καθώς και να ικανοποιούν τις ιδιαίτερες απαιτήσεις κάθε τύπου πλοίου.

Η τοξίνη που χρησιμοποιείται σε αυτά τα χρώματα διαλύεται στο νερό σκοτώνοντας τους μικρο-οργανισμούς που προσκολλούνται στη γάστρα. Όμως το TBT διαλυόμενο στο νερό απειλεί και άλλους οργανισμούς σε παράκτιες περιοχές

(μύδια κλπ.). Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προέκυψαν από τη χρήση αυτής της ουσίας οδήγησαν το Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO) στην απαγόρευσή της (2003), αναγκάζοντας περίπου το 75% του παγκοσμίου στόλου σε αναζήτηση νέου συστήματος βαφής (Anderson, 2000)

Τα δύο συστήματα που ήρθαν να αντικαταστήσουν το TBT-SPC με ικανοποιητικά αποτελέσματα είναι τα Tin-Free SPC και τα Foul Release συστήματα. Τα πρώτα λειτουργούν όπως και ο προκάτοχός τους με τη διαφορά ότι αντί για κασσίτερο χρησιμοποιούν βιοκτόνο με βάση το χαλκό. Τα Foul-Release συστήματα είναι μη τοξικά και αποτελούνται από ελαστομερείς σιλικόνες (silicone elastomers) με μικρή ενέργεια επιφανείας που εμποδίζει τους μικρο-οργανισμούς να προσκολληθούν στο μεταλλικό περίβλημα. Οποιοσδήποτε οργανισμός προσκολλάται, συνήθως όταν το πλοίο είναι ακίνητο εντός λιμανιού, καθαρίζεται με τη βοήθεια των υδροδυναμικών διατμητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται όταν το πλοίο κινείται με ικανοποιητική ταχύτητα. Πέραν της συνεισφοράς τους στην αντιμετώπιση του fouling, τα συστήματα αυτά έχουν παρατηρηθεί να μειώνουν την ολική αντίσταση και ως αποτέλεσμα να αυξάνουν τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα ή να μειώνουν την κατανάλωση, αν η ταχύτητα θεωρηθεί σταθερή.

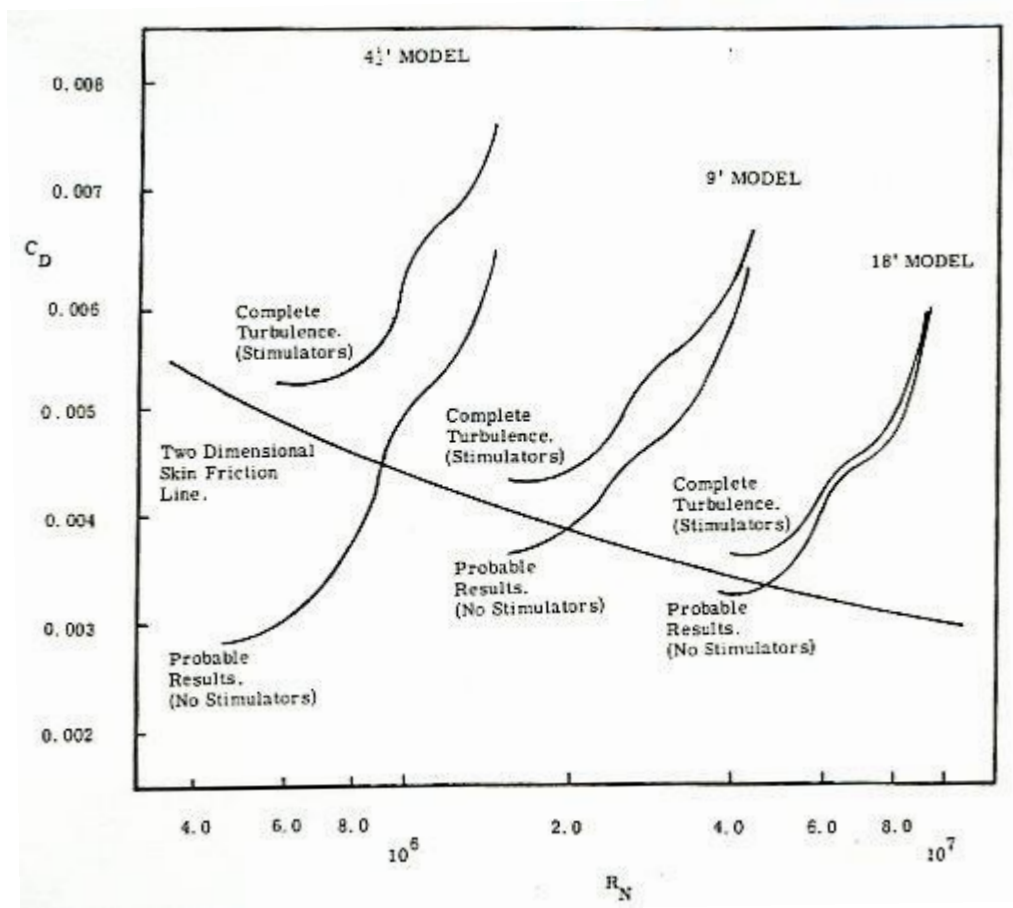
Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξετάστηκε η επίδραση στην αντίσταση μιας σειράς νέων, υπό μελέτη antifouling συστημάτων βαφής.

1.2 Διεγέρτες τύρβης

*Η θεωρία που ακολουθεί βασίζεται σε δημοσίευση των Joubert και Matheson "*Wind Tunnel of Two Lucy Asthon Reflex Geosims*", (1970).

Κατά την εκτέλεση πειραμάτων σε μοντέλα υπό κλίμακα, προκύπτουν σημαντικά προβλήματα λόγω της ύπαρξης στρωτής ροής σε μεγάλο μήκος του

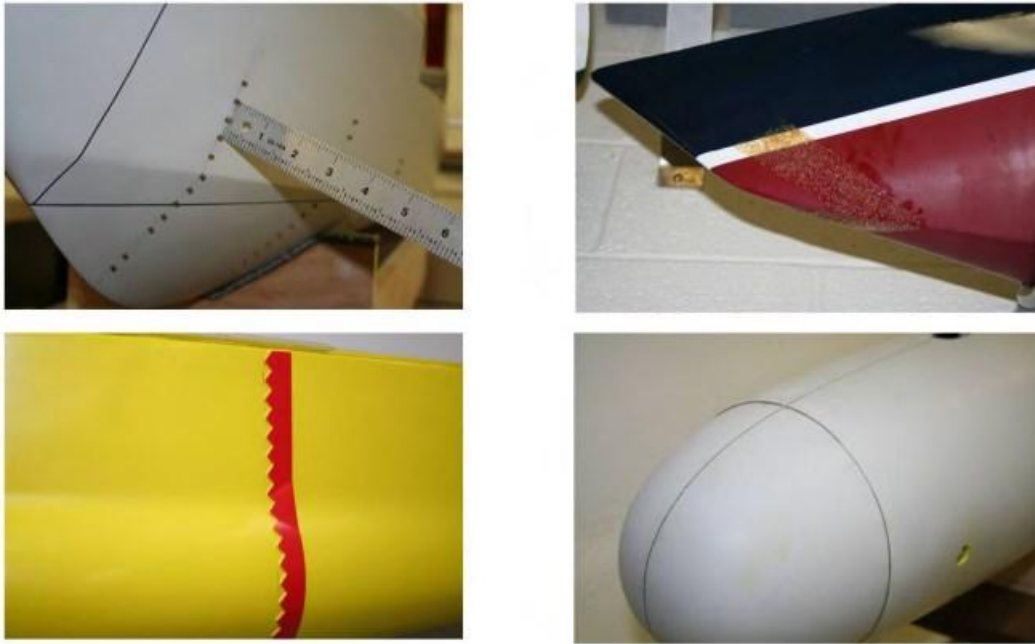
μοντέλου. Τα αποτελέσματα αυτού του προβλήματος είναι πιο έντονα σε κοντά μοντέλα όπου ο αριθμός Reynolds είναι σχετικά μικρός σε σχέση με μοντέλα μεγαλύτερου μήκους. Αυτό επαληθεύεται και από το διάγραμμα 1 όπου για το μακρύ μοντέλο, με μήκος 18', οι καμπύλες για τους αδιάστατους συντελεστές αντίστασης με χρήση και χωρίς χρήση διεγέρτη σχεδόν ταυτίζονται σε αντίθεση με το κοντό μοντέλο μήκους $4\frac{1}{2}'$ όπου οι διαφορές είναι εμφανείς..



Διάγραμμα 1: Σύγκριση δοκιμών για διάφορα μεγέθη μοντέλου με και χωρίς διεγέρτη (Joubert και Matheson, 1970)

Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος κρίνεται απαραίτητη καθώς η βασική θεωρία, σύμφωνα με την οποία προκύπτουν αποτελέσματα στο πλοίο από μοντέλα, προϋποθέτει παρόμοιες ροές σε πλοίο και μοντέλο.

Συνήθης πρακτική για να ξεπεραστεί το πρόβλημα ανάπτυξης στρωτής ροής σε μεγάλο μήκος του μοντέλου είναι η χρήση διεγερτών τύρβης. Οι διεγέρτες τύρβης μετατρέπουν τη ροή από στρωτή σε τυρβώδη. Εκτός αυτού όμως, έχουν και άλλα πλεονεκτήματα όπως το ότι σταθεροποιούν τη μεταβατική διαδικασία στο οριακό στρώμα και ως εκ τούτου και τις μετρήσεις αντίστασης.



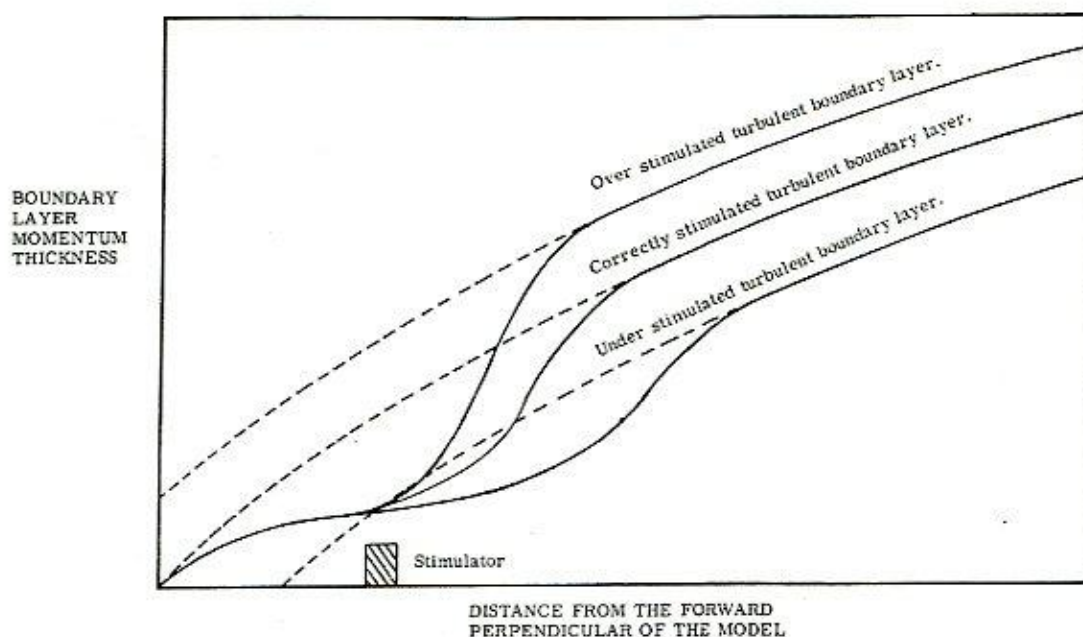
Εικόνα 2: Παραδείγματα διεγερτών τύρβης. Καρφιά, κόκκοι άμμου, hama stripes, σύρματα (Murphy, 2010)

Από τους διάφορους τύπους διεγερτών τύρβης που έχουν χρησιμοποιηθεί σε πειρατικές δοκιμές δύο γνωρίζουν ευρεία αποδοχή, τα σύρματα και τα καρφιά. Ακόμα και για αυτά όμως υπάρχουν δυσκολίες και μειονεκτήματα. Οι Klebanoff και Diehl (1951) κατέληξαν ότι τα σύρματα δεν είναι απολύτως κατάλληλα καθώς εισάγουν παραμορφώσεις στο οριακό στρώμα οι οποίες παραμένουν σε μεγάλες αποστάσεις από το σύρμα. Όσο για τα καρφιά, υπάρχουν διαφωνίες σχετικά με το κατάλληλο μέγεθος και την ισαπόστασή τους (Hughes και Allan, 1951). Στη βιβλιογραφία αναφέρονται ακόμα δύο τύποι διεγερτών τύρβης, τα γυαλόχαρτα (ή

κόκκοι σκόνης) και οι ταινίες hama (Murphy, 2010). Στην εικόνα 2 παρουσιάζονται οι τύποι διεγερτών που αναφέρονται στο κείμενο.

Για να επιτευχθεί ίδιο καθεστώς ροής στο μοντέλο όπως και στο πλοίο, είναι απαραίτητο το ενεργό σημείο του τυρβώδους οριακού στρώματος να βρίσκεται στην ίδια σχετική θέση και συγκεκριμένα στο σημείο πρόσπτωσης. Το σημείο αυτό καλείται σημείο εικονικής προέλευσης (virtual origin).

Αν το virtual origin προκύπτει μπροστά ή πίσω από το σημείο πρόσπτωσης της ροής στο μοντέλο, τότε το οριακό στρώμα είναι «υπέρ» ή «υπό» διεγερμένο αντίστοιχα (σχήμα) και θα προκύψει ανάλογα μεγαλύτερη ή μικρότερη αντίσταση για το μοντέλο από αυτή που χρειάζεται για τη σύγκριση με το κανονικό πλοίο.



Διάγραμμα 2: Τυρβώδες οριακό στρώμα που δείχνει την περίπτωση υπό και υπέρ διεγερμένης ροής (Joubert και Matheson, 1970)

Για να διαπιστωθεί η ύπαρξη πλήρως τυρβώδους οριακού στρώματος σε μοντέλα πλοίου οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται ποικίλουν. Συνήθεις τεχνικές είναι η οπτική παρακολούθηση, hotfilm και η σύγκριση αποτελεσμάτων αντίστασης. Η

γενική ιδέα πίσω από την τελευταία μέθοδο είναι ότι ο πιο κατάλληλος διεγέρτης τύρβης είναι αυτός που δίδει τη μέγιστη αντίσταση σε χαμηλές ταχύτητες και τη χαμηλότερη αντίσταση σε υψηλές.

Κατά την επιλογή διεγέρτη τύρβης υπάρχουν δύο συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται. Πρώτον, οι γεωμετρικές τους ιδιότητες πρέπει να επιλέγονται με τρόπο τέτοιο ώστε να επιτυγχάνεται σταθερή τυρβώδης ροή. Στην περίπτωση των συρμάτων, όπου η ροή μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμη με ροή γύρω από κύλινδρο απείρου μήκους, το παραπάνω κριτήριο οδηγεί σε ένα κατώτερο όριο αριθμού Reynolds όπου η ροή είναι στρωτή. Δεύτερον, το ύψος πρέπει να μην είναι ψηλότερο από το πάχος του οριακού στρώματος στο σημείο που τοποθετείται ο διεγέρτης. Αν παραβιαστεί αυτό ο κανόνας τότε η παρασιτική αντίσταση, δηλαδή η πρόσθετη αντίσταση λόγω της ύπαρξης του διεγέρτη, αυξάνεται με αποτέλεσμα την υπερεκτίμηση της δύναμης αντίστασης. Ο συνδυασμός αυτών των δύο συνθηκών οδηγεί σε πλήθος γεωμετρικών τιμών που μπορούν να επιλεγούν σε ένα εύρος ταχυτήτων δοκιμών.

Στις περισσότερες περιπτώσεις το virtual origin δε θα συμπέσει με το σημείο πρόσπτωσης για όλες τις ταχύτητες δοκιμών. Για να διατηρηθεί το εν λόγω σημείο σε μια συγκεκριμένη θέση, για παράδειγμα το σημείο πρόσπτωσης, είναι απαραίτητο να μεταβάλλεται συνεχώς η θέση του διεγέρτη ανάλογα με την ταχύτητα. Αυτό όμως προσθέτει δυσκολίες κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Γενικά, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για τον υπολογισμό του virtual origin οι οποίες βασίζονται σε παραμέτρους του πάχους οριακού στρώματος. Ωστόσο, οι μέθοδοι αυτοί δεν οδηγούν πάντε σε σωστά αποτελέσματα.

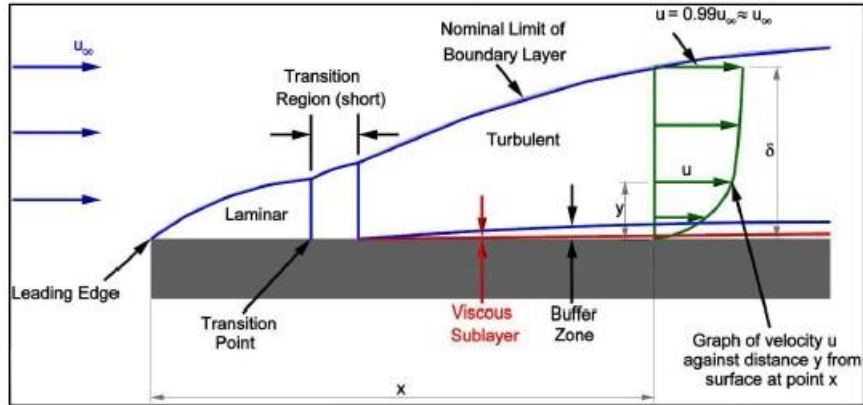
Τέλος, δεν υπάρχει συγκεκριμένη μεθοδολογία που να καθορίζει το είδος του διεγέρτη καθώς και τη θέση που αυτός πρέπει να τοποθετηθεί. Μέχρι στιγμής, είναι διαθέσιμες περιορισμένες οδηγίες, εμπειρικής φύσεως, που απαντάνε στο ερώτημα. Ο τύπος και η θέση του διεγέρτη μεταβάλλονται σύμφωνα με το εξεταζόμενο μοντέλο και είναι στην ελευθερία του ερευνητή η επιλογή του κατάλληλου διεγέρτη μέσω μιας διαδικασίας δοκιμών (Murphy, 2010)

1.3 Οριακό στρώμα

1.3.1 Γενικά

Η θεωρία του οριακού στρώματος αναπτύχθηκε από τον L. Prandtl 1904 (Schlichting, 1979). Σύμφωνα με την εν λόγω θεωρία, όταν ένα ρευστό διέρχεται από την επιφάνεια ενός σώματος, τότε υπάρχει μια λεπτή περιοχή πολύ κοντά στο σώμα όπου η ταχύτητα του ρευστού μεταβάλλεται από μηδέν στην επιφάνεια του σώματος (συνθήκη μη ολίσθησης), στη μέγιστη ταχύτητα του ρευστού, ταχύτητα ελεύθερης ροής. Η περιοχή αυτή ονομάζεται οριακό στρώμα και η συμπεριφορά του ρευστού είναι αποτέλεσμα της συνεκτικότητας (Schultz, Swain, 2000).

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το προφίλ ταχυτήτων και το πάχος οριακού στρώματος σε διάφορες θέσεις μια πλάκας άνωθεν της οποίας διέρχεται ρευστό. Στο μπροστινό μέρος της πλάκας η κατανομή της ταχύτητας είναι ομοιόμορφη. Επίσης, όπως φαίνεται από το σχήμα, το πάχος του οριακού στρώματος δ , αυξάνεται προς την κατεύθυνση της ροής καθώς όλο και μεγαλύτερες ποσότητες ρευστού επηρεάζονται από την ύπαρξη της πλάκας. Το πάχος του οριακού στρώματος, σε κανονικά πλοία, στην περιοχή της πρύμνης, ξεπερνάει το μέτρο.



Σχήμα 1: Ανάπτυξη οριακού στρώματος πάνω από επίπεδη πλάκα (Cortona, 2013)

Εντός του οριακού στρώματος, λόγω της μεταβολής της συνιστώσας της ταχύτητας που είναι εφαπτομενική στην επιφάνεια του σώματος, αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις αντίστασης. Οι τάσεις αυτές είναι πολύ μικρές στην περιοχή εκτός του οριακού στρώματος και μπορούν να αμεληθούν. Ο διαχωρισμός της ροής σε δύο περιοχές, που προκύπτει λόγω της προηγούμενης παρατήρησης, απλοποιεί αισθητά τη μαθηματική θεωρία του φαινομένου. Στην πραγματικότητα, η θεωρητική μελέτη τέτοιων ροών έγινε δυνατή ύστερα από αυτή την παρατήρηση του Prandtl.

Η ροή άνωθεν επιφανείας παραμένει στρωτή για μια περιορισμένη απόσταση. Στη συνέχεια, δημιουργούνται αστάθειες και η ροή εξελίσσεται σε τυρβώδη. Χαρακτηριστικό μέγεθος με το οποίο συνδέεται η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη είναι ο αριθμός Reynolds.

$$Re_x = \frac{U_e x}{\nu} \quad (1)$$

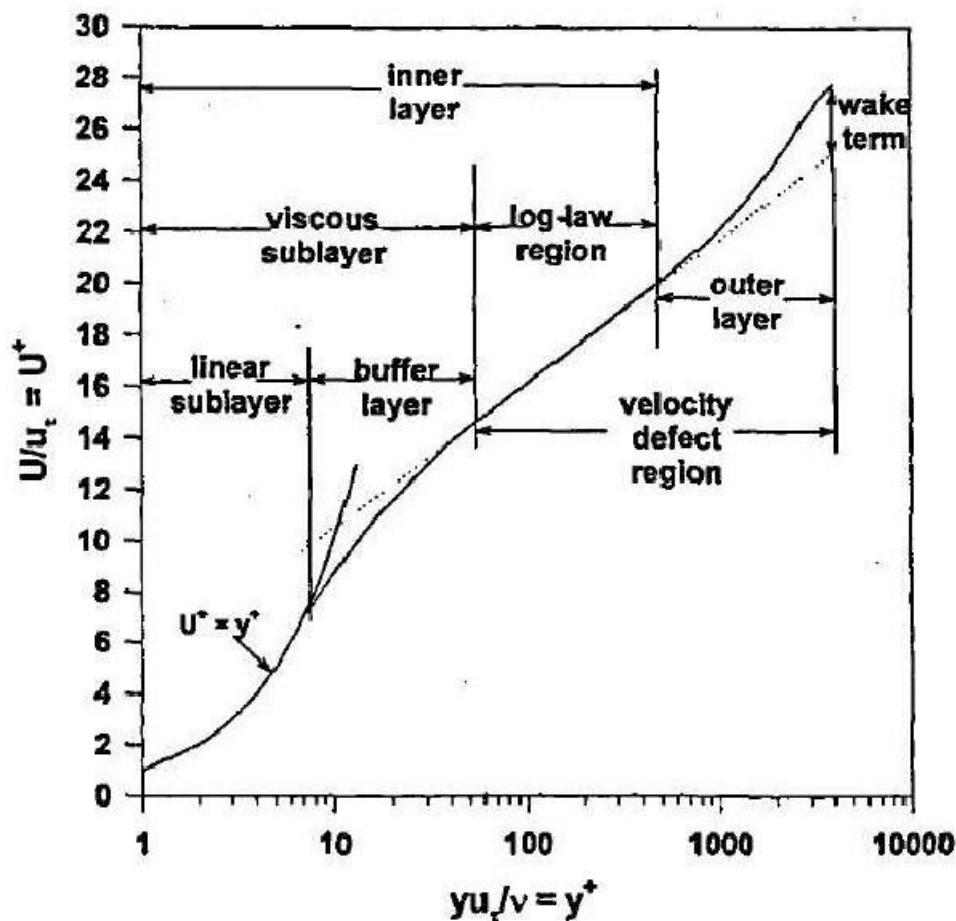
Όπου U_e είναι η ταχύτητα της ελεύθερης ροής, x η οριζόντια απόσταση από την αρχή της επιφάνειας και ν το κινηματικό ιξώδες του ρευστού.

Η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή συμβαίνει σε αριθμούς Reynolds από 5×10^5 έως 5×10^6 σε μια λεία πλάκα. Στο πλοίο, από τα πρώτα κιάλας μέτρα η ροή μετατρέπεται σε τυρβώδη. Επομένως, για να επιτευχθεί ομοιότητα της ροής μεταξύ

πλοίου και μοντέλου απαιτείται η διέγερση τύρβης. Η χρήση διεγερτών τύρβης στα μοντέλα έχει αυτό το σκοπό και θα αναπτυχθεί σε επόμενη παράγραφο.

1.3.2 Εσωτερική, εξωτερική περιοχή τυρβώδους οριακού στρώματος

Η μέση ροή σε ένα τυρβώδες οριακό στρώμα θεωρείται ότι αποτελείται από δύο στρώματα, το εσωτερικό και το εξωτερικό, το καθένα χαρακτηριζόμενο από ένα δικό του νόμο. Το εσωτερικό στρώμα εμπεριέχει το συνεκτικό υπόστρωμα, μέρος του οποίου είναι το στρωτό οριακό υπόστρωμα, και την περιοχή του λογαριθμικού νόμου και καταλαμβάνει περί το 20% του τυρβώδους οριακού στρώματος. Παρόλο που η εσωτερική περιοχή είναι σχετικά λεπτή, σε αυτή λαμβάνει χώρα το 70% της μεταβολής της ταχύτητας. (Schultz και Swain 2000). Στο διάγραμμα 3 παρουσιάζονται αναλυτικά οι επιμέρους περιοχές του οριακού στρώματος.



Διάγραμμα 3: Επιμέρους περιοχές εντός του οριακού στρώματος (Schultz και Swain, 2000)

Στο εσωτερικό, η μέση ταχύτητα U σε μια συγκεκριμένη απόσταση από τον τοίχο y , εξαρτάται από την ταχύτητα τριβής U_τ , το κινηματικό ιξώδες ν και το ύψος τραχύτητας k το οποία λαμβάνεται ίσο με το ισοδύναμο ύψος τραχύτητας άμμου k_s . Το k_s είναι το ύψος ομοιόμορφα, πυκνά κατανεμημένων κόκκων άμμου που δίνουν την ίδια roughness function με αυτή που μελετάται υπό συνθήκες πλήρως τραχιάς επιφάνειας (fully rough regime) (Schlichting, 1979). Η συναρτησιακή αυτή εξάρτηση ονομάζεται ‘νόμος τοίχου’ (law of the wall) και διατυπώθηκε από τους Schaubauer και Tchen (1961).

$$\frac{U}{U_\tau} = f \left[\frac{yU_\tau}{\nu}, \frac{kU_\tau}{\nu} \right] \Rightarrow U^+ = f[y^+, k^+] \quad (2)$$

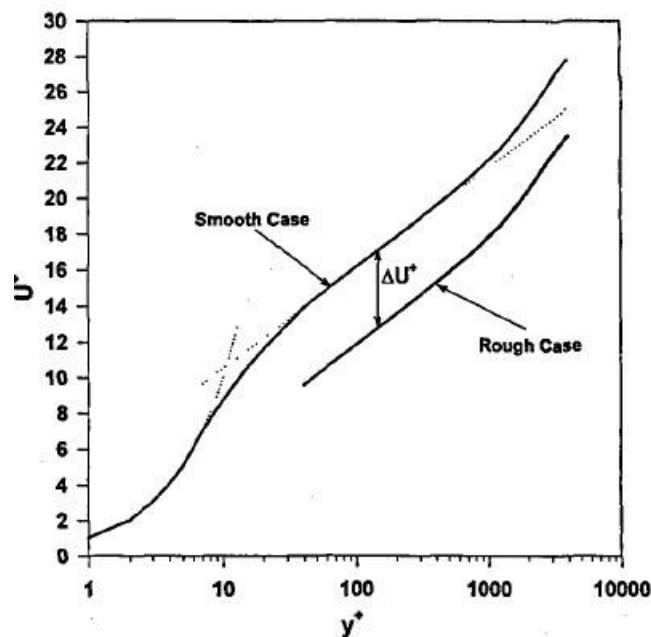
Για το εξωτερικό στρώμα, ο von Karman (1930) έδειξε ότι η διαφορά μεταξύ της ταχύτητας στο εξωτερικό άκρο του οριακού στρώματος U_e και της τοπικής μέσης ταχύτητας U , σε απόσταση y από τον τοίχο, καθορίζεται από το πάχος του οριακού στρώματος δ και το U_τ . Αυτή η συναρτησιακή εξάρτηση καλείται ‘velocity-defect law’ και δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{U_e - U}{U_\tau} = g \left[\frac{y}{\delta} \right] \Rightarrow U_e^+ - U^+ = g \left[\frac{y}{\delta} \right] \quad (3)$$

Εάν συνδυαστούν τα προφίλ ταχυτήτων που προκύπτουν από τους δυο παραπάνω νόμους (2), (3) προκύπτει ένα λογαριθμικό προφίλ ταχύτητας στην περιοχή επικάλυψής τους ($\delta \gg y \gg \nu/U_\tau$). Αυτός είναι ο ‘λογαριθμικός νόμος’ (log-law) και προτάθηκε από τον Millikan (1938) για λείους τείχους. Για ροές πάνω από λείους ή τραχείς τείχους ο παραπάνω νόμος εκφράζεται ως εξής:

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B - \Delta U^+(k^+) \quad (4)$$

Στην παραπάνω σχέση $\kappa=0.41$ είναι η σταθερά von Karman, το B για λείο τοίχο είναι ίσο με 5.0 και ΔU^+ είναι η συνάρτηση τραχύτητας (roughness function, για λεία επιφάνεια ίση με μηδέν). Η φυσική σημασία της roughness function είναι ότι αποτυπώνει τη μείωση που προκαλείται στο προφίλ της ταχύτητας στην περιοχή ισχύος του λογαριθμικού νόμου η οποία συνδέεται με επιπλέον απώλειες ορμής και αυξημένη αντίσταση τριβής. Στο διάγραμμα 4 παρουσιάζεται το προφίλ της ταχύτητας στην περίπτωση λείας και τραχιάς επιφάνειας. Η απόσταση των δύο καμπυλών, στην περιοχή ισχύος του λογαριθμικού νόμου, είναι ίση με ΔU^+ .



Διάγραμμα 4: Μετατόπιση στο προφίλ του λογαριθμικού νόμου λόγω τραχύτητας (Schultz και Swain, 2000)

1.3.3 Τραχύτητα σε επίπεδη πλάκα

Η παρουσία τραχύτητας σε επιφάνεια επηρεάζει το οριακό στρώμα αυξάνοντας τις διαταραχές και ανακατεύοντας το ρευστό. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αύξηση της τύρβης και των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται. Οι

περισσότερες μορφές τραχύτητας είναι τύπου k , δηλαδή η μεταβολή στην αντίσταση τριβής αποδίδεται στο ύψος τραχύτητας k .

Σύμφωνα με τα παραπάνω διακρίνονται τρεις καταστάσεις τραχύτητας. Αυτές είναι η υδραυλικά λεία, η ενδιάμεση και η πλήρως τραχιά. Σημαντική παράμετρος για την κατάταξη μιας επιφάνειας σε κατηγορία είναι ο αριθμός τραχύτητας Reynolds που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$k^+ = \frac{kU_\tau}{\nu} \quad (5)$$

Στην περίπτωση της υδραυλικά λείας επιφάνειας ($k^+ < 5$) όλα τα χαρακτηριστικά της τραχύτητας είναι αρκετά μικρά και βρίσκονται εντός του στρωτού οριακού στρώματος. Η συμπεριφορά μιας τέτοιας επιφάνειας δε διαφέρει από τη συμπεριφορά απόλυτα λείας επιφάνειας και οι διατμητικές τάσεις επηρεάζονται σχεδόν αποκλειστικά από τη συνεκτικότητα του ρευστού.

Στην ενδιάμεση κατάσταση ($5 < k^+ < 70$) παρατηρείται αύξηση της αντίστασης τριβής. Η διατμητική τάση κοντά στον τοίχο καθορίζεται από τη συνεκτικότητα αλλά και από τη τύρβη.

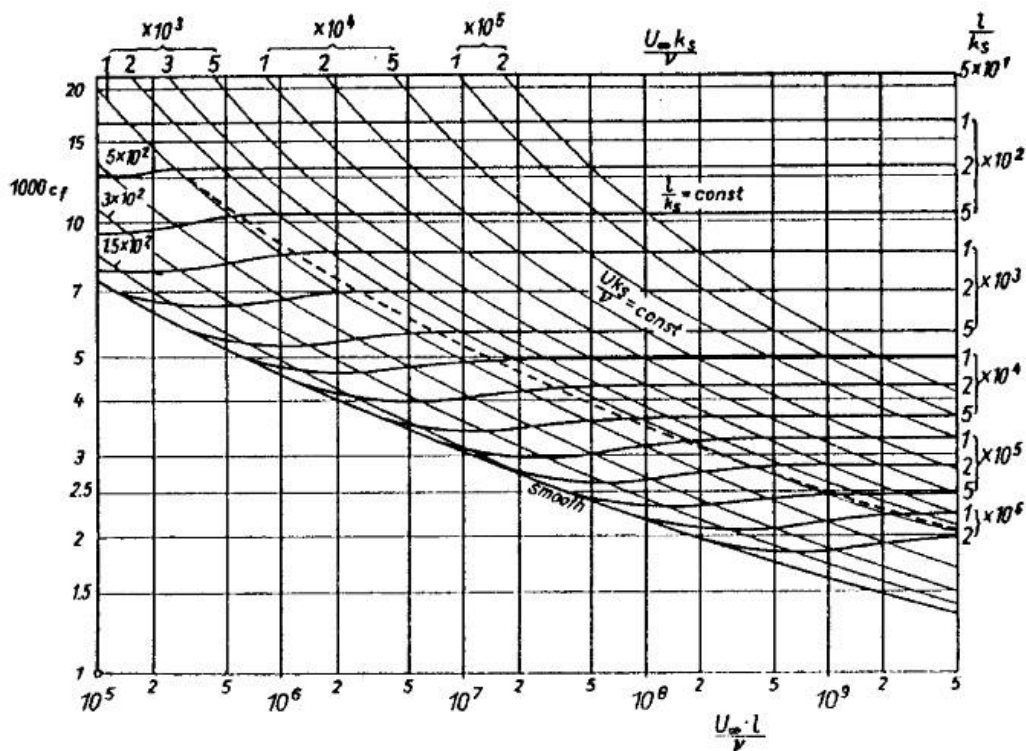
Τέλος, στην πλήρως τραχιά επιφάνεια ($k^+ > 70$) το στρωτό οριακό υπόστρωμα καταστρέφεται και η διατμητική τάση στον τοίχο καθορίζεται από την τύρβη.

Σε θαλάσσιες εφαρμογές συναντάται η ενδιάμεση κατάσταση καθώς η υδραυλικά λεία επιφάνεια είναι δύσκολο να επιτευχθεί, ενώ η πλήρως τραχιές επιφάνειες συνεπάγονται αυξημένες απαιτήσεις ισχύος και εκπομπές ρύπων.

Στις περισσότερες εφαρμογές η επιφάνεια της πλάκας δεν μπορεί να θεωρηθεί λεία. Οι Prandtl και Schlichting μετέφεραν τις μετρήσεις του Nikuradse για τραχείς σωλήνες στην περίπτωση της τραχιάς πλάκας χρησιμοποιώντας την λογαριθμική

κατανομή της ταχύτητας (Τσαγγάρης, 2005). Τα αποτελέσματα για τον ολικό συντελεστή τραχύτητας (c_f) παρουσιάζονται στο επόμενο διάγραμμα ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds με παράμετρο τη σχετική τραχύτητα l/k_s , όπου l το μήκος της πλάκας. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι ο ολικός συντελεστής τριβής είναι ανεξάρτητος του αριθμού Reynolds στην πλήρως τραχιά περιοχή και προσεγγίζεται από την ακόλουθη σχέση.

$$c_f = \left(1.89 + 1.62 \log \frac{l}{k_s} \right)^{-2.5} \quad (6)$$



Διάγραμμα 5: Συντελεστής ολικής αντίστασης για τραχιά επίπεδη πλάκα (Schlichting, 1979)

1.3.4 Προσδιορισμός συνάρτησης τραχύτητας (Roughness Function)

Μια συνεχής προσπάθεια των μηχανικών είναι να συσχετίσουν τις μετρήσεις τραχύτητας μιας τυχαία τραχιάς επιφάνειας με τη συνάρτηση τραχύτητας αυτής, της οποίας η φυσική σημασία περιγράφεται στην παράγραφο 1.3.2. Οι Colerbrook και White (1937) κατέληξαν στην ακόλουθη σχέση.

$$\Delta U^+ = A \log[1 + k^+] \quad (9)$$

Οι Townsin και Dey (1990) αφού έδειξαν ότι για ανώμαλη τραχύτητα, όπως ισχύει στην περίπτωση φρεσκοβαμμένων πλοίων, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και το προφίλ της επιφάνειας, κατέληξαν σε μια σχέση παρόμοια με του Colerbrook.

$$\Delta U^+ = A \log \left[1 + 0.18 \frac{hU_\tau}{\nu} \right] \quad (10)$$

Ο Granville (1987) κατέληξε σε μια έμμεση μέθοδο για τον υπολογισμό της roughness function για επίπεδες πλάκες η οποία στηρίζεται στη γνώση δύο απλών μεγεθών, της αντίστασης ρυμούλκησης (D) και της ταχύτητας ρυμούλκησης (V). Γνωρίζοντας τις δύο αυτές πειραματικές τιμές υπολογίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις, μέσω επαναληπτικής διαδικασίας, η τιμή της roughness function ως συνάρτηση του αριθμού τραχύτητας Reynolds (k^+).

$$k^+ = \left(\frac{k}{L} \right) \left(\frac{Re_L C_f}{2} \right) \left(\sqrt{\frac{2}{C_f}} \right)_R \left[1 - \frac{1}{\kappa} \left(\sqrt{\frac{C_f}{2}} \right)_R + \frac{1}{\kappa} \left(\frac{3}{2\kappa} - \Delta U^{+'} \right) \left(\frac{C_f}{2} \right)_R \right] \quad (11)$$

$$\Delta U^+ = \left(\sqrt{\frac{2}{C_f}} \right)_R - \left(\sqrt{\frac{2}{C_f}} \right)_S - 19.7 \left[\left(\sqrt{\frac{C_f}{2}} \right)_R - \left(\sqrt{\frac{C_f}{2}} \right)_S \right] - \frac{1}{\kappa} \Delta U^{+'} \left(\sqrt{\frac{C_f}{2}} \right)_R \quad (12)$$

Στις παραπάνω σχέσεις k είναι το ύψος τραχύτητας, L το μήκος της πλάκας, Re_L είναι ο αριθμός Reynolds βασισμένος στο μήκος της πλάκας, C_f είναι ο ολικός συντελεστής τριβής, κ η σταθερά Von Karman και $\Delta U^{+'}$ είναι η παράγωγος της roughness function ως προς το φυσικό λογάριθμο του k^+ . Τα R και S υποδηλώνουν τραχιά και λεία κατάσταση αντίστοιχα. Η επαναληπτική διαδικασία αρχίζει θεωρώντας $\Delta U^{+'}=0$.

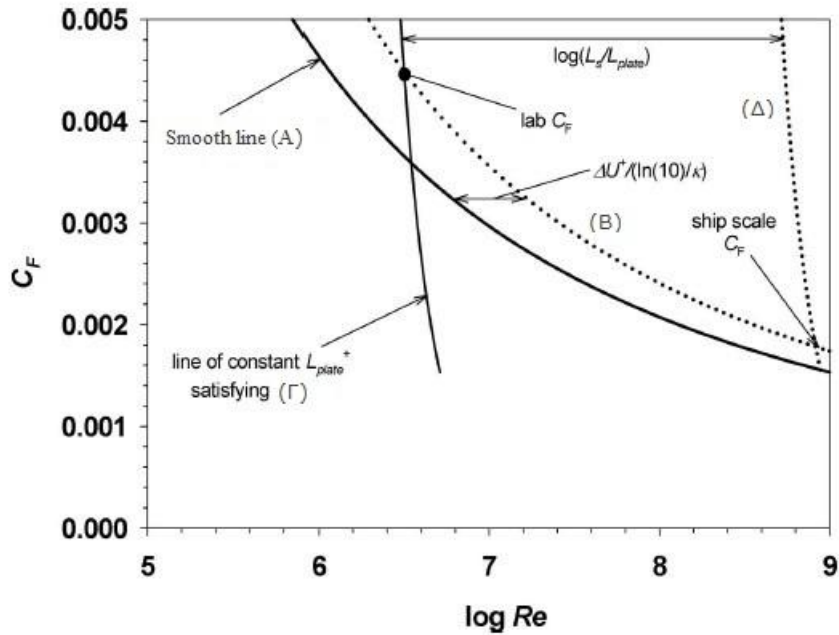
1.3.5 Πρόβλεψη της μεταβολής της αντίστασης τριβής σε πλοίο από μετρήσεις σε επίπεδη πλάκα

Ο Granville (1958) ανέπτυξε μια διαδικασία με την οποία οι μετρούμενες μεταβολές λόγω τραχύτητας στην αντίσταση τριβής επίπεδης πλάκας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της αντίστοιχης μεταβολής σε πλοίο με τα ίδια χαρακτηριστικά επιφανείας.

Η διαδικασία που ανέπτυξε ο Granville συνοψίζεται στα ακόλουθα βήματα. Αρχικά, γίνεται γραφική παράσταση του C_f ως συνάρτηση του $\log(Re)$ για τη λεία πλάκα (A) και για την τραχιά πλάκα (δεν φαίνεται στο σχήμα). Στη συνέχεια χαράσσεται μία καμπύλη παράλληλη στην καμπύλη της λείας πλάκας σε απόσταση $\Delta U^+ \kappa / \ln(10)$ προς τα δεξιά (B). Μια τρίτη καμπύλη (Γ) χαράσσεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση όπου $L_{PLATE}^+ = L_{PLATE} U_T V^{-1}$.

$$Re = \frac{L_{PLATE}^+}{\sqrt{\frac{C_f}{2}} \left(1 - \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{C_f}{2}} \right)} \quad (13)$$

Τέλος, η καμπύλη σταθερού L_{PLATE}^+ μετατοπίζεται παράλληλα προς υψηλότερους αριθμούς Reynolds απόσταση ίση με $\log(L_s/L_{PLATE})$ (Δ). Το σημείο τομής της καμπύλης (Γ) με την (B) (που πρέπει να είναι και σημείο της καμπύλης της τραχιάς πλάκας) ορίζει το C_f της πλάκας, ενώ το σημείο τομής της (Δ) με τη (B) ορίζει το C_{fs} του πλοίου. Η μεταβολή του ολικού συντελεστή αντίστασης τριβής πλοίου (ΔC_f) ορίζεται ως η διαφορά του συντελεστή τριβής της λείας περίπτωσης στον ίδιο αριθμό Reynolds από αυτόν που υπολογίστηκε με την παραπάνω διαδικασία (C_{fs}).



Διάγραμμα 6: Γραφική απεικόνιση του νόμου ομοιότητας του Granville (Schultz, 2007)

1.3.6 Πρόβλεψη ολικής αντίστασης κατά ITTC-78

Σύμφωνα με την ITTC ο πειραματικός υπολογισμός της ολική αντίστασης πλοίου από πειράματα ρυμούλκησης που πραγματοποιούνται σε μοντέλα υπό κλίμακα σε δεξαμενή βασίζεται στην ακόλουθη σχέση.

$$C_{TS} = (1 + k)C_{FS} + C_R + \Delta C_F + C_{AAS} + C_A \quad (14)$$

Στην παραπάνω σχέση k είναι συντελεστής μορφής που υπολογίζεται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, C_{FS} είναι ο συντελεστής τριβής που δίνεται από τη σχέση $C_{FS} = 0,075(\log_{10} Re - 2)^{-2}$, C_R είναι ο συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης, ΔC_F είναι η πρόσθετη αντίσταση λόγω τραχύτητας, C_{AAS} είναι ο συντελεστής αντίστασης αέρα και C_A είναι ένας διορθωτικός συντελεστής. Για περισσότερες πληροφορίες ο αναγνώστης παραπέμπεται στη δεύτερη αναθεώρηση της ITTC-78 του 2011.

Η μεταβολή της αντίστασης τριβής (ΔC_F) λόγω της ύπαρξης τραχύτητας δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta C_F = 0.044 \left[\left(\frac{k_s}{L_{WL}} \right)^{1/3} - 10Re^{-1/3} \right] + 0.000125 \quad (15)$$

Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιεί τη μέση τραχύτητα της γάστρας (k_s) (συνήθης τιμή του k_s στο συγκεκριμένο τύπο είναι τα 150 μ m) χωρίς να λαμβάνει υπόψη την ύπαρξη του fouling και σύμφωνα με τις υποδείξεις της ITTC (2011a) δεν μπορεί να έχει οικουμενική εφαρμογή. Για το λόγο αυτό παροτρύνει τους ερευνητές για τη δημιουργία νέας συνάρτησης υπολογισμού του ΔC_F βασισμένης σε πειραματικά δεδομένα.

1.4 Βαθμονόμηση και Συναρτήσεις μεταφοράς

Κατά τη διάρκεια του πειραμάτων υπάρχουν μετρητικά συστήματα για όλα τα μεγέθη που μας αφορούν (αντίσταση στη συγκεκριμένη περίπτωση). Τα περισσότερα όργανα που χρησιμοποιούνται στη δεξαμενή μετράνε τάση (Volts) η οποία στη συνέχεια ανάγεται στις φυσικές μονάδες μέτρησης των μετρούμενων μεγεθών (kr, cm, g, deg) μέσω των συναρτήσεων μεταφοράς.

Η συνάρτηση μεταφοράς για κάθε όργανο προκύπτει με τη διαδικασία βαθμονόμησης και προηγείται του πειράματος. Τα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιούνται στα πειράματα έχουν γραμμική απόκριση στην περιοχή λειτουργίας τους. Για το λόγο αυτό, οι συναρτήσεις μεταφοράς τους είναι γραμμικές, δηλαδή της μορφής:

$$y = ax + b \quad (7)$$

Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης προσδιορίζονται τα a , b . Αυτό επιτυγχάνεται επιβάλλοντας γνωστές τιμές στα όργανα (μεταβλητές y) και καταγράφοντας τα αποτελέσματα σε Volts (μεταβλητές x). Από τα γνωστά ζεύγη

τιμών (x,y) προσδιορίζεται η ευθεία που περνάει όσο το δυνατόν πιο κοντά από όλα τα σημεία με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων.

Επειδή η τιμή του b μπορεί να αλλάξει από μέτρηση σε μέτρηση κατά τη διάρκεια της κύριας πειραματικής διαδικασίας, πριν από κάθε δοκιμή, λαμβάνεται μηδενική μέτρηση x_0 για κάθε μετρούμενο μέγεθος. Κατά το τρέξιμο μετράται η τιμή x_1 , οπότε το ζητούμενο φυσικό μέγεθος προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$y = y - y_0 = (ax_1 + b) - (ax_0 + b) = a(x_1 - x_0) \quad (8)$$

Η βαθμονόμηση των οργάνων, δηλαδή η εξαγωγή της συνάρτησης μεταφοράς για κάθε μετρητική διάταξη, πρέπει να γίνεται κάθε φορά πριν τη διεξαγωγή μετρήσεων για να ληφθούν υπόψη διαταραχές που επηρεάζουν το σύστημα και μπορούν να μεταβάλλουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Τέτοιες διαταραχές μπορεί να είναι η συχνότητα και η τάση του δικτύου τροφοδοσίας ρεύματος, η διαφοροποίηση της θερμοκρασίας, της υγρασίας κλπ.

Κεφάλαιο 2: Πειραματικός εξοπλισμός και διατάξεις

2.1 Πειραματική Δεξαμενή

Τα πειράματα που παρουσιάζονται στην διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκαν στην Πειραματική Δεξαμενή της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, στο εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής.

Η εν λόγω δεξαμενή έχει μήκος 100m, πλάτος 4.6m και το βάθος του νερού την περίοδο των πειραμάτων ήταν 2.90m. Είναι εξοπλισμένη με φορείο δοκιμών, σύστημα παραγωγής κυματισμών καθώς και σύστημα απόσβεσης κυματισμών. Στη μια πλευρά της δεξαμενής υπάρχουν ειδικά παράθυρα ύψους 1m που εκτείνονται σε μήκος 18m.

Στη μια άκρη της δεξαμενής υπάρχει το σύστημα παραγωγής κυματισμών το οποίο αποτελείται από πτερύγιο ανοξείδωτου χάλυβα (πλάτους 4.6mm και ύψους 2m) εδρασμένο σε βάθρο χάλυβα ύψους 1.30m από τον πυθμένα της δεξαμενής. Το πτερύγιο κινείται μέσω υδραυλικού συστήματος ισχύος 15kW. Το νερό από την πίσω πλευρά του πτερυγίου αντλείται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας.

Στο άλλο άκρο της δεξαμενής έχει κατασκευαστεί ειδική ημπερατή ακτή συνολικού μήκους 11.1m για την απόσβεση των προσπιπτόντων κυματισμών. Η συγκεκριμένη κατασκευή πετυχαίνει συντελεστή απόσβεσης 95%. Πέραν της ειδικά διαμορφωμένης ακτής, χρησιμοποιούνται και δύο σειρές φελλών απόσβεσης κατά μήκος των πλευρών της δεξαμενής που βοηθούν στην ταχύτερη απόσβεση της ενέργειας των διαταραχών. Επιπλέον, για την απόσβεση υψηλών κυματισμών που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων από το πρότυπο, στο πίσω μέρος του φορείου βρίσκεται ειδικός μηχανισμός βίαιης απόσβεσης υψηλών κυματισμών

(σιδερώστρα). Η σιδερώστρα τοποθετείται εφαπτομενικά της επιφάνειας του νερού κατά την επιστροφή του φορείου στη θέση εκκίνησης.

Το φορείο έχει βάρος 5.5 tons και κινείται πάνω σε σιδηροτροχιές κατά μήκος της δεξαμενής με μέγιστη ταχύτητα 5.5m/s ή 10.5 knots. Οδηγείται από ειδικό χειριστήριο και διαθέτει γέφυρα προσδέσεως των προτύπων καθώς και γέφυρα παρακολούθησης των πειραμάτων. Πάνω στο φορείο τοποθετείται όλος ο αναγκαίος εξοπλισμός για τη διεξαγωγή των διαφόρων πειραμάτων (όργανα μέτρησης, φίλτρα, μετατροπείς A/D, ψηφιακές κάρτες, υπολογιστές). Η ταχύτητα του φορείου μετριέται με ειδικό τροχό με φωτοηλεκτρικό σύστημα και με ακρίβεια 0.1mm/s. Για τη κίνηση του φορείου σε χαμηλές ταχύτητες (μέχρι 0.5m/s) χρησιμοποιείται ηλεκτροκινητήρας συνεχούς ρεύματος που τροφοδοτείται με ανορθωμένη τάση από το δίκτυο. Για μεγαλύτερες ταχύτητες, υπάρχουν τέσσερις κινητήρες συνεχούς ρεύματος που τροφοδοτούνται από σύστημα 51kW μέσω εναέριων ροηφόρων αγωγών.

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων το πρότυπο μοντέλο, ή η πλάκα στην περίπτωση της παρούσας διπλωματικής, συνδέονται με το φορείο μέσω του δυναμομέτρου. Η απαραίτητη ώση που απαιτείται για την κίνηση των σωμάτων στο νερό μεταβιβάζεται μέσω του δυναμομέτρου από το φορείο στα σώματα. Η πρόσδεσή τους γίνεται με τρόπο τέτοιο ώστε σε κατάσταση ηρεμίας τα σώματα να πλέουν ισοβύθιστα στο κατάλληλο βύθισμα. Για να επιτευχθεί αυτό τοποθετούνται ειδικά βάρη σε κατάλληλες θέσεις.

Τα μετρητικά συστήματα επί του φορείου είναι πλήρως αυτοματοποιημένα με χρήση Η/Υ, ο οποίος κάνει στη συνέχεια και την ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων. Η πειραματική δεξαμενή διαθέτει όλα τα όργανα που απαιτούνται για τη μέτρηση των μεγεθών που μας ενδιαφέρουν (δυνάμεις, ροπές, κινήσεις, ταχύτητες ρευστού, πιέσεις ρευστού).

2.2 Χαρακτηριστικά ορθογωνικής πλάκας

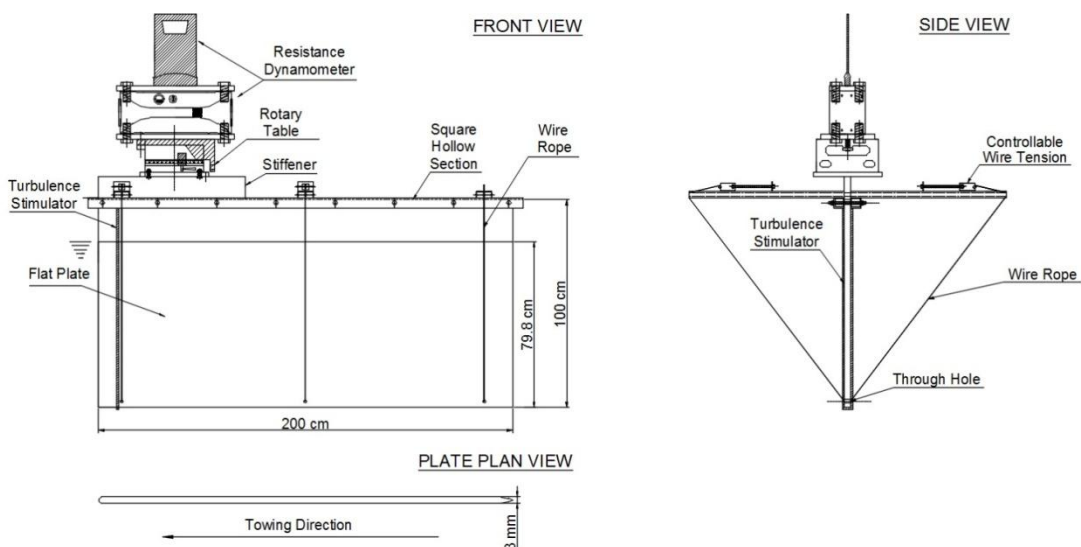
Η πλάκα που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ήταν χορηγία της ΕΛ.Β.ΑΛ (Ελληνική Βιομηχανία Αλουμινίου). Πρόκειται για ορθογωνική πλάκα αλουμινίου με διαστάσεις 2m επί 1m και το πάχος της ήταν 3mm. Το πάχος επιλέχθηκε όσο το δυνατόν μικρότερο για να συμβαδίζει με τη θεωρητική διδιάστατη πλάκα (πλάκα με μηδενικό πάχος) και να περιορισθεί στο ελάχιστο η επίδραση μορφής. Το χείλος πρόσπτωσης και το χείλος εκφυγής μορφοποιήθηκαν με λογική υδροτομής NACA (πομπέ και γωνιακή διαμόρφωση αντίστοιχα) για να προκαλούν τη μικρότερη διαταραχή στη ροή και για την αποφυγή αποκόλλησης στο άκρο εκφυγής.

2.3 Πειραματική διάταξη ορθογωνικής επίπεδης πλάκας

Λόγω του μειωμένου πάχους της πλάκας ήταν απαραίτητη η σωστή στήριξή της για να αντιμετωπιστεί η μειωμένη ακαμψία της. Η συγκεκριμένη διαδικασία αποδείχτηκε αρκετά δύσκολη και μεσολάβησαν διάφοροι τρόποι στήριξης καθώς και αστοχίες μέχρι να βρεθεί ο καταλληλότερος τρόπος.

Η πλάκα στηρίχθηκε κατά μήκος της άνω οριζόντιας ακμής της με δύο αλουμινένιους κοιλοδοκούς. Στο μπροστινό τμήμα αυτής τοποθετήθηκε ο διαιρέτης, μέσω του οποίου η πλάκα συνδέεται στο δυναμόμετρο και από κει στο φορείο. Η έντονη παρουσία δυνάμεων, άρα και ροπών, στο μπροστινό τμήμα της πλάκας αιτιολογούν την απόφαση ο διαιρέτης να τοποθετηθεί σε αυτή τη θέση ώστε η διάταξη της πλάκας να έχει αυξημένη ευστάθεια πορείας. Ο διαιρέτης είναι πολύ σημαντικό μέρος της όλης διάταξης καθώς επιτρέπει την περιστροφή της πλάκας, με βήμα 0.04 της μοίρας, και την ευθυγράμμισή της με τη ροή.

Αρχικά, έγιναν πειραματικές δοκιμές χωρίς επιπλέον ενίσχυση της πλάκας που οδήγησαν σε στρόφη της πλάκας μέσα στο νερό σε ταχύτητα 2.75m/sec και καταστροφή του δυναμομέτρου. Ύστερα από αυτό, παρουσιάστηκε η ανάγκη για αύξηση της στιβαρότητας της διάταξης, καλύτερη ευθυγράμμιση και επιπεδότητα της πλάκας. Για να εξαλειφθούν κοιλότητες της πλάκας, που προέκυψαν από τον τρόπο παραγωγής της καθώς και για να επιτευχθεί η ευθυγράμμιση, χρησιμοποιήθηκαν σύρματα στο μπροστινό, στο μεσαίο και στο πίσω μέρος της. Επίσης, λόγω του μειωμένου πάχους της, τα σύρματα συμβάλλουν στην αύξηση της στιβαρότητας και την αποφυγή της κάμψης κατά τις πειραματικές δοκιμές από τις υδροδυναμικές δυνάμεις που αναπτύσσονται και λόγω των παραμενουσών κοιλοτήτων. Αναλυτικότερα, τα σύρματα διαμέτρου 0.8mm στηρίζονται στη μία πλευρά, στο πάνω μέρος των κοιλοδοκών μέσω εγκαρσίων στηριγμάτων και στη συνέχεια διαπερνούν την πλάκα σε απόσταση 3cm από την κάτω οριζόντια ακμή και προσδένονται στα στηρίγματα στην άλλη μεριά. Η διάταξη παρουσιάζεται στο σχήμα 2.



Σχήμα 2: Σκαρίφημα πειραματικής διάταξης πλάκας (Ε. Κιοσίδου)

Η μετάφραση των αγγλικών όρων που εμφανίζονται στο σχήμα 2 παρουσιάζεται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1: Μετάφραση όρων σχήματος 2

Controllable Wire Tension	Εντατήρας σύρματος ευθυγράμμισης
Flat Plate	Λεία Πλάκα
Resistance Dynamometer	Δυναμόμετρο αντίστασης
Rotary Table	Διαιρέτης
Square Hollow Section	Κοιλοδοκός ορθογωνικής διατομής
Stiffener	Ενισχυτικό
Through Hole	Οπή για την διέλευση του σύρματος
Turbulence Stimulator	Διεγέρτης τύρβης
Wire Rope	Σύρμα ευθυγράμμισης

Για την επίτευξη ισοβύθιστης κατάστασης χρησιμοποιήθηκαν βάρη που τοποθετήθηκαν σε ξύλινο πρόβολο επί των κοιλοδοκών πύραθεν του διαιρέτη. Το συνολικό βάρος που χρησιμοποιήθηκε ήταν 21kg. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών παρατηρήθηκε έμπρομη διαγωγή 7mm. Το βύθισμα πλήρης ήταν 79.8mm ενώ στην πρύμνη ήταν 79.1mm. Τα ίδια πειράματα έγιναν και για μέσα βυθίσματα 42.65cm και 69.65cm και ο λόγος θα γίνει κατανοητός στην ανάλυση αποτελεσμάτων.

Η πλάκα ευθυγραμμίστηκε με τη ροή μέσω του διαιρέτη. Η διαδικασία ευθυγράμμισης περιλαμβάνει τρεξίματα στα οποία αρχικά είναι λυμένος ο διαιρέτης και στη συνέχεια, αφού σταθεροποιηθεί η πλάκα, κλειδώνεται και μετρίεται η αντίσταση ρυμούλκησης. Θεωρήθηκε ότι έχει επιτευχθεί η βέλτιστη ευθυγράμμιση όταν η αντίσταση ρυμούλκησης έλαβε την ελάχιστη τιμή.

Για την ευθυγράμμιση της ακμής πρόσπτωσης καθώς και της ακμής διαφυγής χρησιμοποιήθηκε νήμα στάθμης και συσκευή ακτίνας laser. Τα σύρματα στήριξης τεντώθηκαν ανάλογα με τις απαιτήσεις ευθυγράμμισης.

Έχοντας επιτύχει την ευθυγράμμιση της πλάκας ήταν απαραίτητη η εξασφάλιση της ίδιας θέσης για όλα τα πειράματα. Για το λόγο αυτό, η θέση του δυναμομέτρου, η ένταση των συρμάτων και η γωνία του διαιρέτη δε μεταβλήθηκαν καθ' όλη της διάρκειας των πειραμάτων και η εισαγωγή/εξαγωγή της πλάκας γινόταν με χρήση τεσσάρων κοχλιών που ενώνουν το δυναμόμετρο με το διαιρέτη. Οι αποκλίσεις που μπορούν να δημιουργηθούν από τους κοχλίες ήταν αμελητέες και δεν επηρέασαν την απαίτηση για όμοιες συνθήκες πειραματικών δοκιμών.

Οι αρχικές μετρήσεις, χωρίς την παρουσία διεγέρτη τύρβης, έδωσαν αποτελέσματα αντίστασης αρκετά μικρότερα των αναμενόμενων με έντονη την εμφάνιση μεταβατικής περιοχής. Για να επιτευχθεί καθεστώς τυρβώδους ροής σε όλο το μήκος της πλάκας χρησιμοποιήθηκε διεγέρτης τύρβης που τοποθετήθηκε στο 5% του μήκους (10cm από το χείλος πρόσπτωσης). Ο διεγέρτης ήταν χάλκινο σύρμα διαμέτρου 1mm. Η εκλογή διαμέτρου σύρματος έγινε σύμφωνα με τις οδηγίες προγράμματος σε H/Y που διαθέτει η δεξαμενή. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα λαμβάνει ως δεδομένα τη θερμοκρασία του νερού και την πυκνότητα και δίνει τη διάμετρο του σύρματος που πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε συγκριμένες περιοχές ταχύτητας ρυμούλκησης.

2.4 Πειραματική διαδικασία και καταγραφή μετρήσεων

Αφού ολοκληρωθεί η προετοιμασία της πλάκας, η πλάκα εισέρχεται στο νερό. Η καταγραφή της δύναμης αντίστασης έγινε με εργαστηριακό δυναμόμετρο τύπου R35 με εύρος λειτουργίας τα $\pm 200\text{N}$. Η μετρούμενη τάση από το δυναμόμετρο καταλήγει μέσω φίλτρου και κάρτας A/D 12bit σε πρόγραμμα καταγραφής στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Για ταχύτητες από 0.25-2.00m/sec η καταγραφή γινόταν στα $\pm 2.5\text{Volt}$ (διακριτική ικανότητα 0.001V). Σε μεγαλύτερες ταχύτητες όπου η δύναμη αντίστασης υπερέβαινε τα 2.5V η καταγραφή γινόταν στα $\pm 5.0\text{Volt}$

(διακριτική ικανότητα 0.002Volt). Ακολουθεί η συνάρτηση μεταφοράς για το δυναμόμετρο που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και προέκυψε από βαθμονόμηση του οργάνου.

$$y = 2.0757x - 0.2211 \quad (9)$$

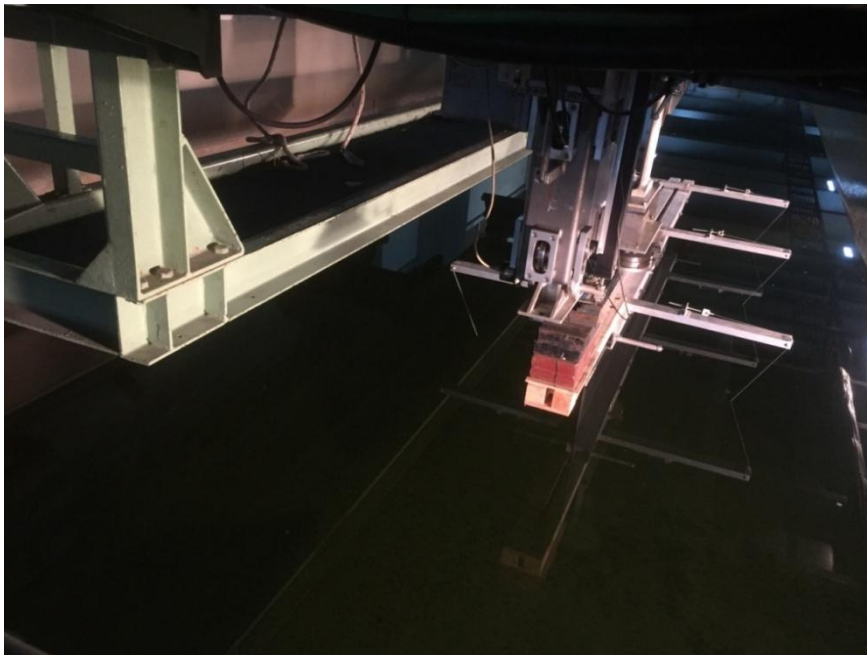
Ο χρόνος καταγραφής προκύπτει από το μήκος της δεξαμενής και ως εκ τούτο στις μικρές ταχύτητες (0.25-2.00m/sec) ήταν 20sec ενώ στις μεγάλες (2.25-2.50m/sec) ήταν 15sec. Η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν 100Hz και η δύναμη αντίστασης προκύπτει ως ο μέσος όρος ολόκληρης της καταγραφής. Η ταχύτητα προκύπτει ως μέσος όρος των δύο τελευταίων δευτερολέπτων. Στο τέλος των πειραμάτων γινόταν επαναληπτική μέτρηση σε δύο τυχαίες ταχύτητες που είχαν δοκιμαστεί για να επαληθευτεί η διατήρηση των σταθερών συνθηκών διεξαγωγής των πειραμάτων και η ορθότητα των αποτελεσμάτων. Πέραν της ταχύτητας και της αντίστασης ρυμούλκησης καταγράφεται και η θερμοκρασία του νερού.

Η διαδικασία που μόλις περιγράφηκε ακολουθείται σε όλα τα πειράματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ακολουθούν φωτογραφίες της πλάκας από την προετοιμασία καθώς και κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών.



Εικόνα 3: Η ορθογωνική πλάκα που χρησιμοποιήθηκε. Διακρίνονται τα βασικά μέρη της διάταξης



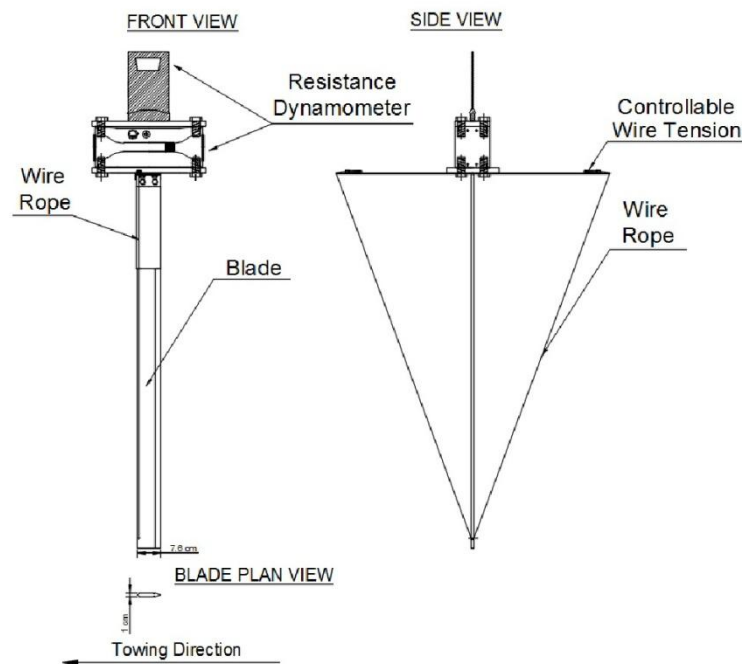
Εικόνα 4: Η ορθογωνική πλάκα εντός της δεξαμενής. Στο μπροστινό μέρος διακρίνονται τα βάρη που χρησιμοποιήθηκαν για τη ρύθμιση της διαγωγιμότητας

2.5 Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση αντίστασης σύρματος

Για τη στήριξη του σύρματος κατασκευάστηκε ειδικό στήριγμα με τις γεωμετρικές λεπτομέρειες που παρουσιάζονται στα σχέδια που ακολουθούν. Το στήριγμα αποτελείται από ένα κατακόρυφο μέλος (blade) με διαμόρφωση στα άκρο

πρόσπτωσης και εκφυγής που ακολουθεί τη νοοτροπία NACA (πομπέ και γωνιακή διαμόρφωση αντίστοιχα). Στο άνω μέρος αυτού βρίσκεται εγκάρσιο στήριγμα στο οποίο προσδένεται το σύρμα διαμέτρου 0.8mm και αφού διαπεράσει τη λεπίδα στο κάτω μέρος προσδένεται στην άλλη μεριά του στηρίγματος. Τέλος, στην κορυφή υπάρχει ορθογωνική πλάκα μέσω της οποίας η διάταξη συνδέεται με το δυναμόμετρο με χρήση τεσσάρων κοχλιών.

Βασικές προϋποθέσεις στη στήριξη του σύρματος ήταν το βρεχόμενο μήκος του καθώς και η γωνία που σχηματίζει με το στήριγμα να είναι ίσες με τις αντίστοιχες που ισχύουν στην ορθογωνική πλάκα. Αυτός ο περιορισμός λήφθηκε υπόψη κατά την κατασκευή της διάταξης.



Σχήμα 3: Σκαρίφημα του στηρίγματος για το σύρμα (Ε. Κιοσίδου)

2.6 Συλλογή και καταγραφή μετρήσεων

Η συλλογή και καταγραφή των μετρήσεων γίνεται με τον ίδιο τρόπο που περιγράφεται για την περίπτωση της επίπεδης ορθογωνικής πλάκας. Ο αναγνώστης παραπέμπεται στην αντίστοιχη παράγραφο για περισσότερες λεπτομέρειες.

Κεφάλαιο 3: Πειράματα

3.1 Πειράματα για τη μέτρηση της αντίστασης σύρματος

3.1.1 Γενικά

Τα σύρματα που χρησιμοποιήθηκαν για τη στήριξη και ευθυγράμμιση της πλάκας συμβάλλουν σημαντικά στην αύξηση της αντίστασης. Κατά την κίνηση του σύρματος μέσα στο νερό λαμβάνουν χώρα φαινόμενα των οποίων η υδροδυναμική συμπεριφορά δεν είναι εύκολο να μελετηθεί. Το φαινόμενο VIV (Vortex Induced Velocity) δεν αναλύθηκε στο θεωρητικό μέρος καθώς ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Η μέτρηση της αντίστασης του σύρματος γίνεται ούτως ώστε να αφαιρεθεί αυτό το κομμάτι αντίστασης από τα πειράματα της πλάκας και να λάβουμε την καθαρή αντίσταση ορθογωνικής πλάκας, χωρίς την επίδραση των συρμάτων.

3.1.2 Πειραματική διαδικασία

Για τη μέτρηση της αντίστασης του σύρματος ήταν απαραίτητο να είναι γνωστή η αντίσταση του στηρίγματος που κατασκευάστηκε. Για το λόγο αυτό χρειάστηκε να γίνουν δύο σειρές μετρήσεων.

Η πρώτη σειρά μετρήσεων αφορούσε τη μέτρηση της αντίστασης του στηρίγματος χωρίς την παρουσία του σύρματος. Το στήριγμα προσδέθηκε στο δυναμόμετρο και έγινε καταγραφή της δύναμης αντίστασης για ταχύτητες από 0.25m/sec μέχρι 2.5m/sec με βήμα 0.25m/sec.

Η δεύτερη σειρά μετρήσεων περιελάμβανε μετρήσεις αντίστασης με στήριγμα και σύρμα. Για το ίδιο εύρος ταχυτήτων και με το ίδιο βήμα υπολογίστηκε η αντίσταση ενός σύρματος μαζί με το στήριγμα. Η καθαρή αντίσταση ενός σύρματος προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$R_{\Sigma YPM.} = R_{\Sigma THP.+ \Sigma YPM.} - R_{\Sigma THP.} \quad (10)$$

3.2 Πειράματα σε επίπεδη ορθογωνική πλάκα

Γενικά

Η περίπτωση της ορθογωνικής πλάκας έχει απασχολήσει κατά καιρούς τους ερευνητές στο χώρο της ρευστομηχανικής. Χρησιμοποιείται κατά την αναγωγή αποτελεσμάτων αντίστασης από μοντέλα σε κανονικά πλοία.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής έγιναν πέντε σειρές πειραμάτων με χρήση ορθογωνικής επίπεδης πλάκας. Αρχικά, στόχος ήταν ο υπολογισμός της αντίστασης λείας ορθογωνικής πλάκας σε ήρεμο νερό και ο υπολογισμός του συντελεστή αντίστασης τριβής (C_F). Η τιμή της αντίστασης ρυμούλκησης λείας πλάκας είναι απαραίτητη για να μπορεί να γίνει σύγκριση με τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τις επόμενες σειρές πειραμάτων και στα οποία η τραχύτητα της πλάκας μεταβάλλεται με διάφορους τρόπους (βαφές, γυαλόχαρτα, fouling).

Στη συνέχεια, η ίδια πλάκα βάφτηκε με έξι διαφορετικά συστήματα βαφών, τέσσερις βαφές anti-fouling και δύο συστήματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων αντίστασης που προέκυπταν από κάθε βαφή. Η ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη λεία πλάκα ακολουθήθηκε για κάθε ένα σύστημα βαφής. Τα χρώματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι υπό μελέτη συστήματα που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής της Ε. Κιοσίδου.

Η τρίτη σειρά πειραμάτων επί της επίπεδης ορθογωνικής πλάκας περιελάμβανε τη δοκιμή συρμάτων διαφορετικής διαμέτρου σε απόσταση 10cm από το άκρο πρόσπτωσης. Τα συγκεκριμένα σύρματα χρησιμοποιούνται ως διεγέρτες τύρβης και σκοπός ήταν ο προσδιορισμός του καταλληλότερου σύρματος για την

επίτευξη πλήρως τυρβώδους ροής στην πλάκα χωρίς την προσθήκη επιπλέον αντίστασης λόγω του σύρματος.

Τα επόμενα πειράματα επί της ορθογωνικής πλάκας περιελάμβαναν την κάλυψη της πλάκας με γυαλόχαρτο και τη μέτρηση της αντίστασης. Σκοπός αυτών των πειραμάτων ήταν να υπολογιστεί κατά πόσο επηρεάζει την αντίσταση η μεταβολή της τραχύτητας της βρεχόμενης επιφάνειας και ο προσδιορισμός του ισοδύναμου ύψους κόκκου άμμου (k_s).

Στα τελευταία πειράματα τα οποία δεν περιλαμβάνονται στην παρούσα διπλωματική, μέρος της πλάκας καλύφθηκε με οργανισμούς fouling οι οποίοι δημιουργήθηκαν με βάση υπάρχοντες φυσικούς οργανισμού που αναπτύσσονται στην περιοχή της Ελευσίνας.

Ο τρόπος με τον οποίο στηρίχθηκε και επιτεύχθηκε η επαρκής ακαμψία της πλάκας περιελάμβανε τη χρήση τριών συρμάτων κατά το διάμηκες. Τα εν λόγω σύρματα επηρεάζουν σημαντικά τις μετρήσεις αντίστασης, για αυτό το λόγο δημιουργήθηκε ειδική διάταξη και πραγματοποιήθηκαν πειράματα για τη μέτρηση της αντίστασής τους.

3.2.1 Πειράματα διεγερτών τύρβης

Γενικά

Για να δημιουργηθεί όμοιο καθεστώς ροής μεταξύ μοντέλου και πλοίου απαιτείται να διεγείρουμε τύρβη σε μικρότερο αριθμό Reynolds. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση διεγερτών τύρβης που όχι μόνο μετατρέπουν τη ροή σε τυρβώδη στο σημείο που θέλουμε αλλά και τη σταθεροποιούν.

Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και στο θεωρητικό μέρος, υπάρχουν διαφόρων ειδών διεγέρτες τύρβης και εναπόκειται στην εμπειρία του ερευνητή η σωστή επιλογή

του τύπου, του μεγέθους και της θέσης που θα τοποθετηθούν ώστε η χρήση τους να έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Η πειραματική διάταξη της επίπεδης ορθογωνικής πλάκας επιτρέπει, λόγω της εκτενούς βιβλιογραφίας που υπάρχει σχετικά με την αντίστασή της, να ελεγχτεί κατά πόσον ο εκάστοτε διεγέρτης έχει τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Σκοπός αυτών των πειραμάτων είναι η διόρθωση του τρόπου επιλογής διαμέτρου σύρματος, που βασίζεται σε λογισμικό πρόγραμμα, για την εκτέλεση πειραμάτων αντίστασης σε μοντέλα πλοίων που πραγματοποιεί το εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής.

Πειραματική διάταξη, προετοιμασία

Η πειραματική διάταξη που πραγματοποιείται είναι η ίδια με τα αυτή που χρησιμοποιήθηκε και στα προηγούμενα πειράματα. Πριν από την πειραματική δοκιμή τοποθετείται σύρμα διαφορετικής διαμέτρου σε απόσταση 10cm από το άκρο πρόσπτωσης. Η τοποθέτηση του σύρματος γίνεται με χρήση υγρής κόλλας.

Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν πέντε (5) χάλκινα σύρματα περιέλιξης με διαμέτρους 0.8mm, 0.9mm, 1.0mm, 1.128mm και 1.3mm.

Το βύθισμα της πλάκας παρέμεινε αμετάβλητο (79.8-fore, 79.1-aft). Έγιναν δοκιμές σε δέκα (10) ταχύτητες από 0.25-2.50m/sec.

Το συγκεκριμένο πείραμα πραγματοποιήθηκε για το διεγέρτη διαμέτρου 1.128mm και σε μειωμένο μέσο βύθισμα 69.65cm (70.0-fore, 69.3-aft). Σκοπός του συγκεκριμένου πειράματος ήταν ο προσδιορισμός της συνιστώσας της ολικής αντίστασης που οφείλεται στον κυματισμό με τη θεώρηση ότι η αντίσταση μορφής είναι αμελητέα και η αντίσταση κυματισμού σταθερή στις δύο περιπτώσεις. Αναλυτικότερα, άμα από την ολική αντίσταση της πλάκας με μέσο βύθισμα 79.45cm

(R_{T80}) αφαιρεθεί η ολική αντίστασης της πλάκας με μέσο βύθισμα 69.65cm (R_{T70}) τότε το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι ίσο με την αντίσταση τριβής ισοβύθιστης πλάκας με βύθισμα 9.8cm. Αδιαστατοποιώντας για την καινούργια επιφάνεια A λαμβάνεται ο αδιάστατος συντελεστής αντίστασης τριβής.

$$R_{T80} = R_{F80} + R_W, R_{T70} = R_{F70} + R_W$$

$$R_{T80} - R_{T70} = R_{F80} - R_{F70} = R_{F10} \quad (11)$$

$$\frac{R_{F10}}{0.5\rho AV^2} = C_F$$



Εικόνα 5: Χάλκινο σύρμα διαμέτρου 1.0mm ως διεγέρτης τύρβης σε απόσταση 10cm από το άκρο πρόσπτωσης

3.2.2 Πειράματα ορθογωνικής επίπεδης πλάκας με βαφές

Γενικά

Τα συστήματα βαφής χρησιμοποιούνται για να προστατεύσουν και να θωρακίσουν τις κατασκευές, μία εξ αυτών είναι και τα πλοία, από τις περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες βρίσκονται. Ακραίες θερμοκρασίες, διαβρωτικό περιβάλλον, ανάπτυξη μικρο/μακρο-οργανισμών (fouling) κλπ. Με αυτό τον τρόπο περιορίζονται τα έξοδα συντήρησης.

Ιδιαίτερα στην ναυπηγική όμως, οι βαφές μπορούν να συνεισφέρουν θετικά στη μείωση της αντίστασης τριβής είτε περιορίζοντας τη ρύπανση, είτε δημιουργώντας μια επιφάνεια με καλύτερη υδροδυναμική συμπεριφορά.

Στα πειράματα που έγιναν και αφορούσαν τις βαφές, γίνεται προσπάθεια να διαπιστωθεί κατά πόσον αυτά μπορούν να μειώσουν τη συνολική αντίσταση και ποια είναι η σχετική διαφορά μεταξύ τους στο συγκεκριμένο μέγεθος. Οι βαφές που χρησιμοποιήθηκαν έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον ως προς τις ιδιότητές τους για προστασία κατά του fouling αλλά στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής δεν θα εξεταστεί αυτή τους η συμπεριφορά.

Πειραματική προετοιμασία

Για το συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη της ορθογωνικής επίπεδης πλάκας.

Η βαφή της πλάκας με την εκάστοτε βαφή έγινε με ψεκασμό χρησιμοποιώντας πιστόλι ψεκασμού με ακροφύσιο 2.2mm. Προσαρτημένο στο πιστόλι ήταν το δοχείο με τη βαφή αραιωμένη με διαλύτη νίτρου σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Το πιστόλι ήταν συνδεδεμένο με δοχείο αέρα υπό υψηλή πίεση (8 bar). Πριν την βαφή της πλάκας προηγείτο κάλυψη όλων των παρελκομένων (σύρματα, στηρίγματα, διαιρέτης κλπ).

Οι βαφές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν στην πλειοψηφία τους βαφές δύο συστατικών (εκτός από τις βαφές σιλικόνης που ήταν τριών συστατικών) και η ανάμειξη των συστατικών έγινε σύμφωνα με τις αναλογίες που ορίζει ο κατασκευαστής. Χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονική ζυγαριά με ακρίβεια γραμμαρίου.

Συνολικά δοκιμάστηκαν τρεις βαφές πολυουρεθάνης, δύο που βρίσκονται υπό ερευνητικό στάδιο και μία εμπορική που χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά. Επίσης δοκιμάστηκε μία ακρυλική βαφή περασμένης γενιάς και δύο βαφές σιλικόνης, μία πειραματική και μία ως αναφορά.

Η βαφές πολυουρεθάνης βάφτηκαν η μία πάνω στην άλλη χωρίς να μεσολαβεί καθαρισμός της πλάκας. Δε χρησιμοποιήθηκε αστάρι (primer) και για το λόγο χρειάστηκαν δύο περάσματα από την πρώτη βαφή που χρησιμοποιήθηκε (PU-F0032). Όλες οι υπόλοιπες είχαν ικανοποιητικό αποτέλεσμα με ένα πέραςμα.

Η ακρυλική βαφή τοποθετήθηκε πάνω από τις βαφές πολυουρεθάνης. Αφού ολοκληρώθηκαν τα πειράματα και με την ακρυλική βαφή η πλάκα καθαρίστηκε και απομακρύνθηκαν τα στρώματα βαφής χρησιμοποιώντας διαλύτη νίτρου.

Στη συνέχεια ακολούθησε η βαφή με την πρώτη βαφή σιλικόνης. Για τις συγκεκριμένες βαφές προηγήθηκε ένα πρώτο πέραςμα με αστάρι καθώς η συνάφεια της βαφής σιλικόνης με την αλουμινένια πλάκα δεν ήταν επαρκής. Για μια ακόμη φορά η δεύτερη βαφή περάστηκε πάνω από την προηγούμενη χωρίς να προηγηθεί καθαρισμός της πλάκας.

Τέλος, αναφέρεται ότι κατά τη διάρκεια αυτών των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ως διεγέρτης τύρβης χάλκινο σύρμα διαμέτρου 1.0mm σε απόσταση 10cm από το άκρο πρόσπτωσης. Το μέσο βύθισμα της πλάκας παρέμεινε σταθερό και ίσο με 79.45cm (79.8cm-fore, 79.1cm-aft) σε όλες τις δοκιμές.



Εικόνα 6: Ανάμειξη συστατικών βαφής σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή



Εικόνα 7: Ντυμένη πλάκα πριν το βάψιμο. Κάτω δεξιά διακρίνεται το δοχείο αέρα που χρησιμοποιείται για το ψεκασμό της βαφής



Εικόνα 8: Ψεκασμός της βαφής με χρήση πιστολιού

Πειραματική διαδικασία

Η πειραματική διαδικασία περιελάμβανε τη μέτρηση της ολικής αντίστασης σε ταχύτητες από 0.25m/sec μέχρι 2.50m/sec. Δεν ήταν δυνατό να γίνουν δοκιμές σε μεγαλύτερες ταχύτητες λόγω των έντονων πλάγιων δυνάμεων που δημιουργούνταν προκαλώντας στροφή στην πλάκα με πιθανές καταστρεπτικές επιπτώσεις.

Μετά την ολοκλήρωση της βαφής, αφού η βαφή είχε στεγνώσει και πριν γίνουν οι πειραματικές δοκιμές, πραγματοποιήθηκε για κάθε βαφή τραχυμέτρηση και παχυμέτρηση.

3.2.3 Πειράματα επίπεδης ορθογωνικής πλάκας με γυαλόχαρτο

Γενικά

Η τραχύτητα επηρεάζει την αντίσταση τριβής κάθε σώματος που κινείται μέσα σε ένα ρευστό. Επίσης, τα σύγχρονα υπολογιστικά πακέτα υδροδυναμικής (CFD) μπορούν να συμπεριλάβουν στους υπολογισμούς μια ομοιόμορφη τραχύτητα. Επομένως, κάθε επιφάνειας τυχαίας τραχύτητας είναι πολύ χρήσιμο να αντιστοιχηθεί

σε μια ισοδύναμη επιφάνεια ομοιόμορφης τραχύτητας ούτως ώστε να μπορεί να μοντελοποιηθεί σε ένα κώδικα CFD.

Σκοπός της παρακάτω πειραματικής διαδικασίας είναι ο προσδιορισμός του ύψους τραχύτητας (k_s) για τα γυαλόχαρτα που χρησιμοποιήθηκαν. Όπως είναι γνωστό και από το θεωρητικό μέρος (Schlichting, 1979) σε πλήρως τραχιές επιφάνειες ο συντελεστής αντίστασης τριβής είναι ανεξάρτητος του αριθμού Reynolds και εξαρτάται μόνο από τη σχετική τραχύτητα (L/k_s).

Στη συνέχεια, γίνεται προσπάθεια ώστε να ελεγχτεί το κατά πόσο τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τα γυαλόχαρτα που χρησιμοποιήθηκαν μπορούν να μοντελοποιήσουν το ρεαλιστικό fouling που χρησιμοποιήθηκε.

Πειραματική προετοιμασία

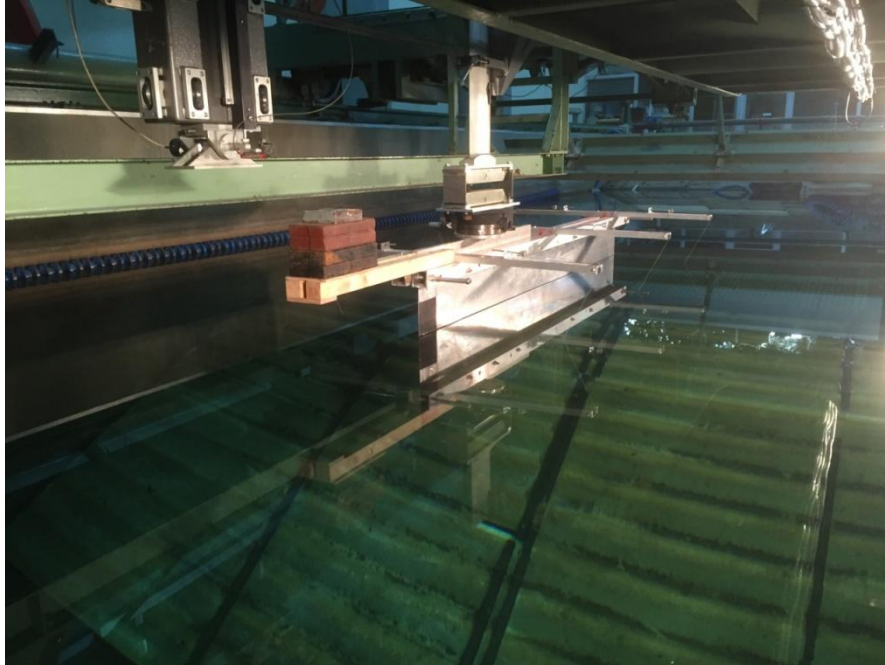
Για τη διεξαγωγή αυτών των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο γυαλόχαρτα της 3M κοκκομετρίας grit-40 και grit-80 (40 και 80 κόκκοι άμμου ανά τετραγωνικό εκατοστό αντίστοιχα).

Για κάθε ένα γυαλόχαρτο δοκιμάστηκαν δύο περιπτώσεις καλυπτικότητας. Η πρώτη αφορούσε την κάλυψη της πλάκας από το χείλος πρόσπτωσης μέχρι 10cm προς τα πίσω. Σκοπός είναι να φανεί το κατά πόσο επηρεάζει την αντίσταση ρυμούλκησης η ύπαρξη τραχύτητας στην πλώρη. Εκτός αυτού όμως, παρατηρείται το κατά πόσο μπορεί ένα κομμάτι γυαλόχαρτου με τη συγκεκριμένη έκταση και θέση να λειτουργήσει ως διεγέρτης τύρβης.

Στη δεύτερη περίπτωση ολόκληρη η πλάκα καλύφθηκε με γυαλόχαρτο. Για την κόλληση του γυαλόχαρτου επί της πλάκας χρησιμοποιήθηκε υγρή βενζινόκολλα. Για την αφαίρεση της βενζινόκολλας μετά το πέρας του πειραμάτων και την απομάκρυνση των γυαλόχαρτων χρησιμοποιήθηκε διαλύτης νίτρου.

Οι μετρήσεις αντίστασης έγιναν στο εύρος ταχυτήτων 0.25-2.50m/sec και σε μέσο βύθισμα 79.45cm.

Στα συγκεκριμένα πειράματα δε χρησιμοποιήθηκε διεγέρτης τύρβης.



Εικόνα 9: Πειραματική δοκιμή με γυαλόχαρτο grit-40 στην περιοχή της πλώρης



Εικόνα 10: Ολόκληρη η πλάκα καλυμμένη με γυαλόχαρτο grit-80

3.2.4 Πειράματα προσδιορισμού του κύματος που δημιουργεί η πλάκα

Γενικά

Μέρος των δοκιμών που γίνονται σε ένα μοντέλο πλοίου είναι ο προσδιορισμός του συστήματος κυματισμών που δημιουργεί (wave cuts). Μέσω των συγκεκριμένων μετρήσεων μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την αντίσταση κυματισμού για το μοντέλο καθώς η αντίσταση κυματισμού είναι ανάλογη του τετραγώνου του ύψους κύματος (Πολίτης, 2011).

Ωστόσο, η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την πρόσδεση της επίπεδης πλάκας στο φορείο καθώς και για την επαρκή στήριξή της δεν επιτρέπει τη διεξαγωγή τέτοιων μετρήσεων. Συγκεκριμένα τα σύρματα που της προσδίδουν επαρκή δυσκαμψία αλλοιώνουν το σύστημα κυματισμού της πλάκας. Για το λόγο αυτό προσδιορίστηκε πειραματικά η κυματομορφή που δημιουργείται πάνω της καθώς κινείται μέσα στο νερό. Σκοπός της συγκεκριμένης μέτρησης είναι η περαιτέρω σύγκριση του αποτελέσματος με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από ανάλυση CFD.

Πειραματική διαδικασία

Για την αποτύπωση του κυματισμού δημιουργήθηκε πλέγμα (grid) μέσω του σχεδιαστικού προγράμματος AutoCAD. Το συγκεκριμένο πλέγμα είχε ισαπόσταση γραμμών σε οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση ίση με 2mm. Το πλέγμα που δημιουργήθηκε τυπώθηκε σε plotter και στη συνέχεια κολλήθηκε στην πλάκα. Το μηδέν κατά το κατακόρυφο βρισκόταν στο ύψος της ισάλου ενώ η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του πλέγματος καθ' ύψος ήταν τα 5cm και -5cm.

Η μορφή των κυματισμών εξήχθη για τις ταχύτητες 0.5, 1.00, 1.50, 2.00 και 2.50m/sec. Συγκεκριμένα, σε κάθε ταχύτητα έγινε λήψη φωτογραφιών και video ανά 10cm με φωτογραφική μηχανή και υποβρύχια κάμερα αντίστοιχα. Από τις εικόνες

που προέκυψαν ήταν δυνατός ο προσδιορισμός σημείων της κυματομορφής ανά 10cm. Τα εν λόγω σημεία χρησιμοποιήθηκαν για να χαραχτεί η καμπύλη του κύματος στην εκάστοτε ταχύτητα.

3.2.5 Πειράματα μέτρησης της πρόσθετης αντίστασης λόγω fouling

Γενικά

Τα καύσιμα είναι το σημαντικότερο έξοδο στη λειτουργία των πλοίων και για το λόγο αυτό η προσοχή των ερευνητών είναι στραμμένη στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για την κίνησή τους. Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την αντίσταση του πλοίου, και κατ' επέκταση την κατανάλωση καυσίμου είναι η ανάπτυξη μικρο-οργανισμών στο περίβλημα αυτού που αυξάνουν την τραχύτητά του.

Στόχος των συγκεκριμένων πειραμάτων ήταν ο προσδιορισμός της αύξησης της αντίστασης στο πλοίο, μέσω της μεθόδου του Granville που παρουσιάζεται στο θεωρητικό μέρος, δηλαδή με προεκβολή των αποτελεσμάτων που προκύπτουν στην πλάκα όταν είναι καλυμμένη με fouling.

Λίγα λόγια για τους μικρο-οργανισμούς που χρησιμοποιήθηκαν

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένα, για τη δημιουργία του τεχνητού fouling χρησιμοποιήθηκαν πραγματικοί μικρο-οργανισμοί. Στα πλαίσια του διδακτορικού της Ε. Κιοσίδου μελετήθηκε η ανάπτυξη θαλάσσιας ρύπανσης στα νερά της Ελευσίνας πάνω σε βαφές antifouling. Για το σκοπό αυτό τοποθετήθηκαν βαμμένα πλακίδια (10cm x 10cm) στη θάλασσα της Ελευσίνας στα οποία αναπτύχθηκαν οι οργανισμοί που χρησιμοποιήθηκαν. Το μέγεθος των οργανισμών καθώς και η πυκνότητα αυτών προσομοιάζει τη χειρίστη περίπτωση (μετά από διάστημα 12 μηνών) όπου οι οργανισμοί έχουν αναπτυχθεί αρκετά και υπάρχει υψηλή καλυπτικότητα.

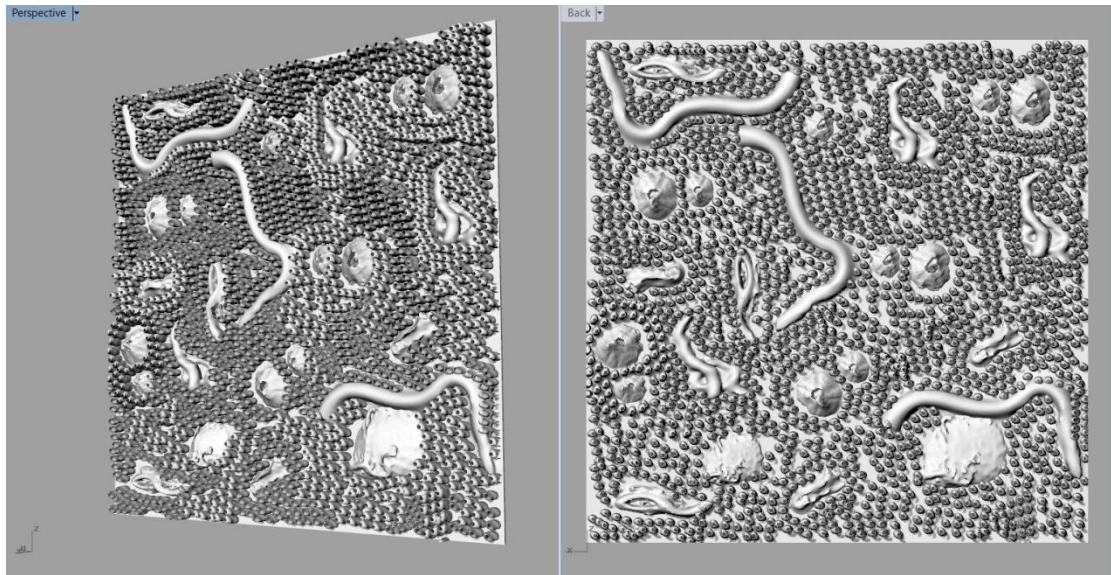
Πειραματική διαδικασία

Πρώτο βήμα για την πραγματοποίηση των εν λόγω πειραμάτων ήταν η δημιουργία του τεχνητού fouling. Για το λόγο αυτό έγινε επιλογή αντιπροσωπευτικών οργανισμών που συνέθεσαν ένα ορθογωνικό τεχνητό πλακίδιο fouling και παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 11: Οργανισμοί που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του τεχνητού fouling. (1) αχιβάδα, (2),(3),(5) δακτυλιοσκώληκες, (4) serpulid, (6) βάλανος.

Για τη δημιουργία του πλακιδίου οι οργανισμοί σκαναρίστηκαν σε 3D-Scanner και ψηφιοποιήθηκε η γεωμετρία τους σε αρχείο τύπου .stl. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε η γεωμετρία του πλακιδίου με χρήση του σχεδιαστικού πακέτου *Rhinoceros 5*. Τα συγκεκριμένα πλακίδια δημιουργήθηκαν με χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή στον οποίο τροφοδοτείται απευθείας η γεωμετρία που σχεδιάστηκε στο *Rhinoceros 5* σε μορφή .stl.



Εικόνα 12: Δημιουργία τεχνητού πλακιδίου στο *Rhinoceros 5*

Στη συνέχεια, τα πλακίδια κολλήθηκαν με χρήση βενζινόκολλας στο πίσω μέρος της πλάκας δημιουργώντας μια ομοιόμορφη, πλήρη κατανομή με καλυπτικότητες 5,10 και 20% επί της ολικής επιφάνειας της πλάκας.

Οι δοκιμές αντίστασης πραγματοποιήθηκαν σε μέσο βύθισμα 79.45cm και για ταχύτητες από 0.25m/sec έως 2.50m/sec. Πριν τη έναρξη των πειραμάτων για την εκάστοτε καλυπτικότητα γινόταν μέτρηση της θερμοκρασίας του νερού της δεξαμενής.

Κεφάλαιο 4: Ανάλυση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

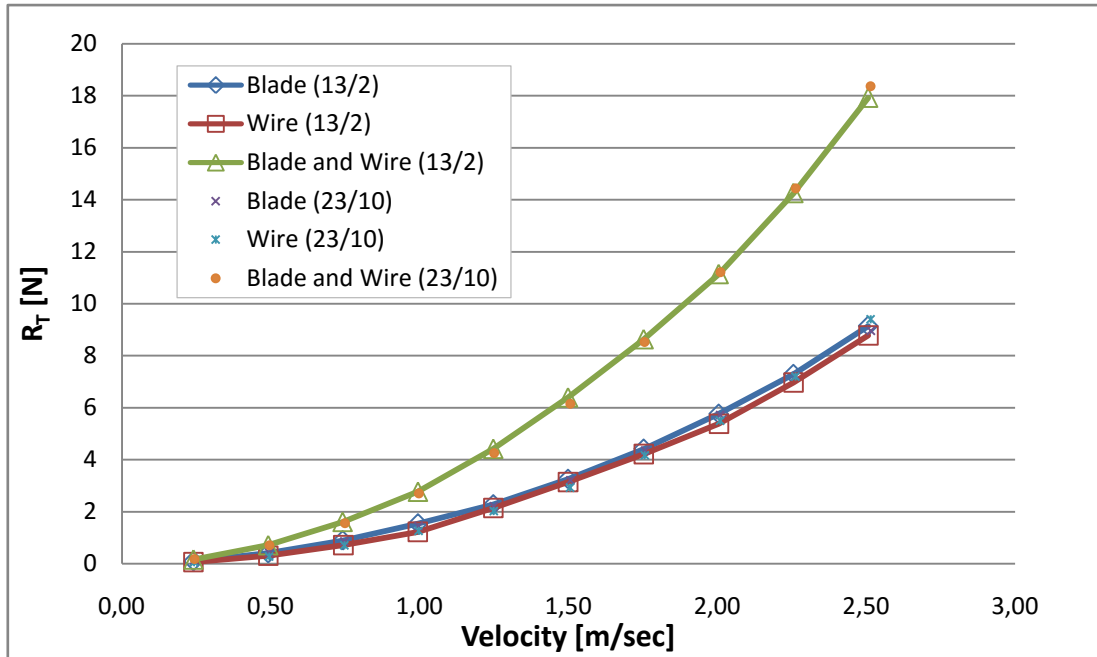
4.1 Αποτελέσματα αντίστασης σύρματος

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων αντίστασης που σα σκοπό έχουν τον προσδιορισμό της δύναμης αντίστασης του σύρματος. Το πειράματα αυτά πραγματοποιήθηκαν σε δύο διαφορετικές ημερομηνίες, με διαφορετικές θερμοκρασίες νερού (21.5°C -23/10 και 13.2°C -13/2), ώστε να ληφθεί υπόψη οποιαδήποτε μεταβολή στην αντίσταση λόγω της θερμοκρασίας. Σύμφωνα με το διάγραμμα, τα αποτελέσματα παρουσιάζουν πολύ μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας. Οι διαφορές παρουσιάζονται σε λεπτομέρεια στο διάγραμμα 7 και στον πίνακα 2.

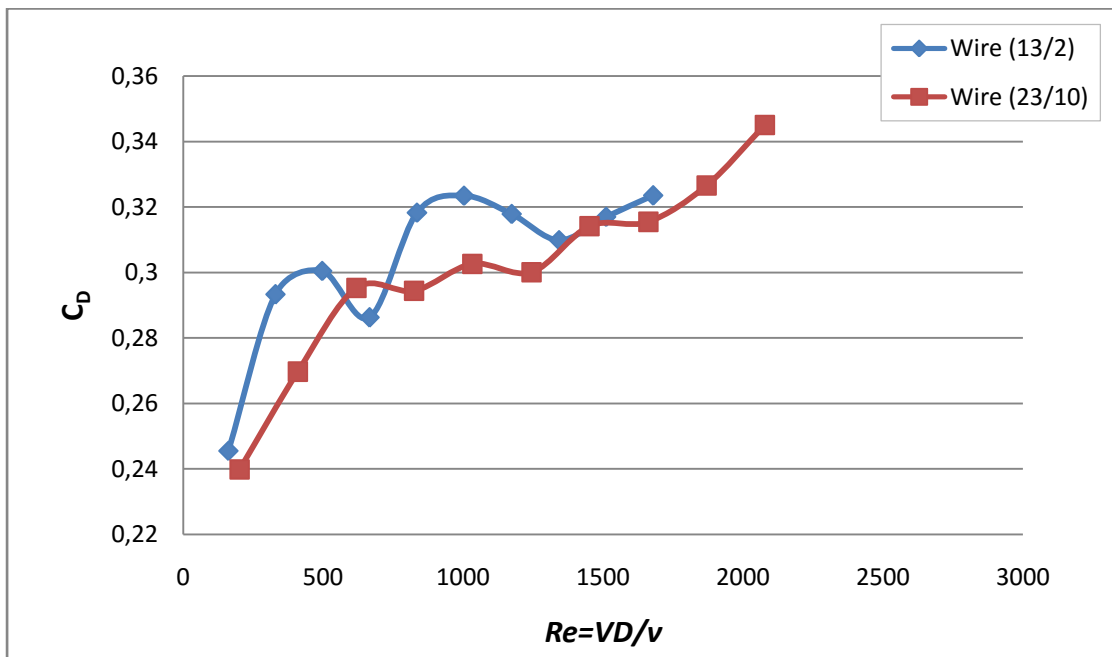
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον προκύπτει από το γεγονός ότι η αντίσταση του σύρματος διαμέτρου 0.8mm και συνολικού βρεχόμενου μήκους 172cm είναι συγκρίσιμη με την αντίσταση του στηρίγματος.

Η πρόσθετη αντίσταση που δημιουργούν τα τρία σύρματα στην διάταξη της ορθογωνικής πλάκας είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η διόρθωση της τιμής της ολικής αντίστασης με τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου πειράματος για να μπορέσει να υπολογιστεί η συνιστώσα της αντίστασης που οφείλεται αποκλειστικά στην πλάκα.

Στο Διάγραμμα 8 παρουσιάζεται ο αδιάστατος συντελεστής αντίστασης του σύρματος. Η ελαφρώς αυξανόμενη τιμή του συντελεστή οφείλεται σε διαταραχές που προκύπτουν στον ομόρρου του σύρματος καθώς και στη στένωση του ομόρρου καθώς το σημείο αποκόλλησης κινείται προς τα μπρος (Steven, 2016)



Διάγραμμα 7: Διάγραμμα αντίστασης-ταχύτητας για (α) το στήριγμα τύπου NACA, (β) το σύρμα και (γ) στήριγμα και σύρμα μαζί για δύο διαφορετικές ημερομηνίες διεξαγωγής του πειράματος



Διάγραμμα 8: Διάγραμμα αδιάστατου συντελεστή συναρτήσει του αριθμού Reynolds βασισμένου στη διάμετρο σύρματος

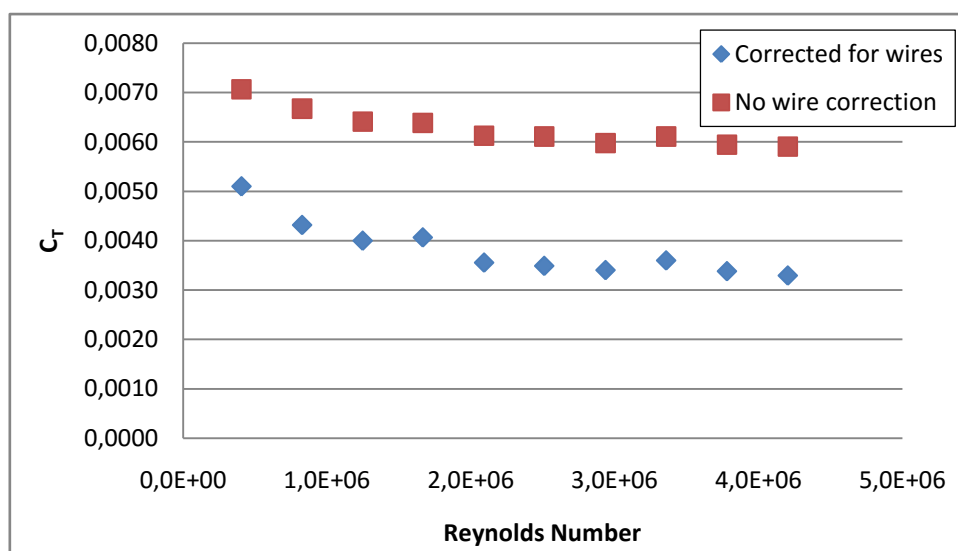
Πίνακας 2: Πίνακες με τη δύναμη αντίστασης για το ένα και τα τρία σύρματα

Wires (13/2/2016)			Wires (23/10/2015)		
Speed	R_T	Three wires resistance	Speed	R_T	Three wires resistance
[m/sec]	[N]	[N]	[m/sec]	[N]	[N]
0.240	0.061	0.176	0.243	0.061	0.176
0.492	0.305	0.880	0.495	0.285	0.821
0.744	0.713	2.053	0.747	0.713	2.053
0.994	1.222	3.519	0.997	1.262	3.636
1.247	2.138	6.158	1.249	2.036	5.864
1.498	3.136	9.031	1.505	2.932	8.445
1.752	4.215	12.139	1.756	4.174	12.022
2.005	5.376	15.482	2.010	5.498	15.834
2.256	6.964	20.056	2.262	7.208	20.760
2.507	8.776	25.276	2.515	9.408	27.094

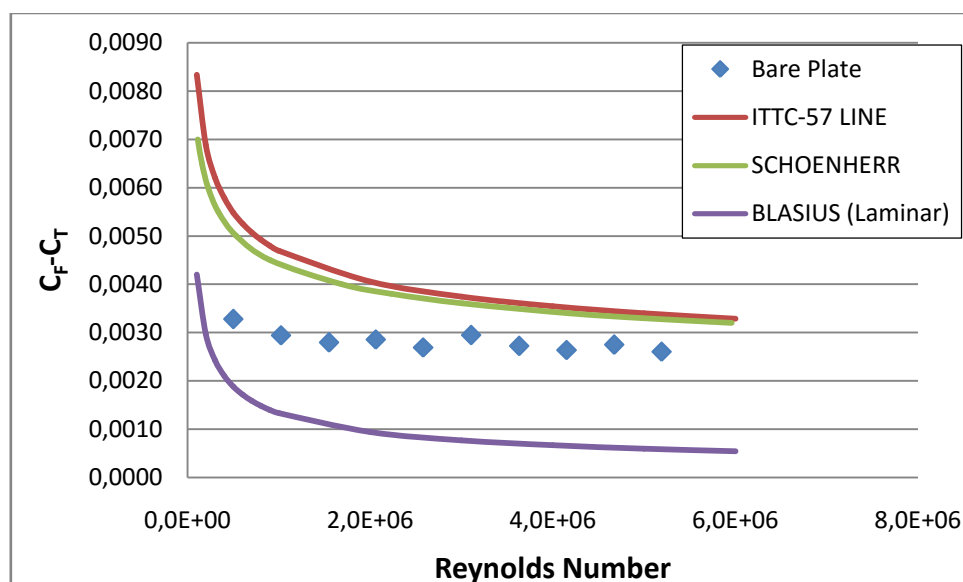
4.2 Αποτελέσματα λείας ορθογωνικής πλάκας και διεγερτών τύρβης

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι απαραίτητο να γίνει διόρθωση των αποτελεσμάτων ώστε να αφαιρεθεί η συνιστώσα της αντίστασης που οφείλεται στα σύρματα που χρησιμοποιούνται για να εξασφαλίσουν την επιπεδότητα και την ευθυγράμμιση της πλάκας. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα από το Διάγραμμα 9.

Στο Διάγραμμα 10 παρουσιάζεται ο ολικός αδιάστατος συντελεστής αντίστασης (συμπεριλαμβανομένης της υπόλοιπης αντίστασης) για την επίπεδη ορθογωνική πλάκα. Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζονται καμπύλες του αδιάστατου συντελεστή αντίστασης τριβής για τη στρωτή (Blasius) και την τυρβώδη (Schoenherr, ITTC) περίπτωση ροής. Από το συγκεκριμένο διάγραμμα προκύπτει ότι δεν έχει αναπτυχθεί επαρκής τύρβη στη ροή γύρω από τη πλάκα αλλά υπάρχει μια εκτενής περιοχή που η ροή παραμένει στρωτή.



Διάγραμμα 9: Ολικός συντελεστή αντίστασης πριν και μετά τη διόρθωση για τα σύρματα

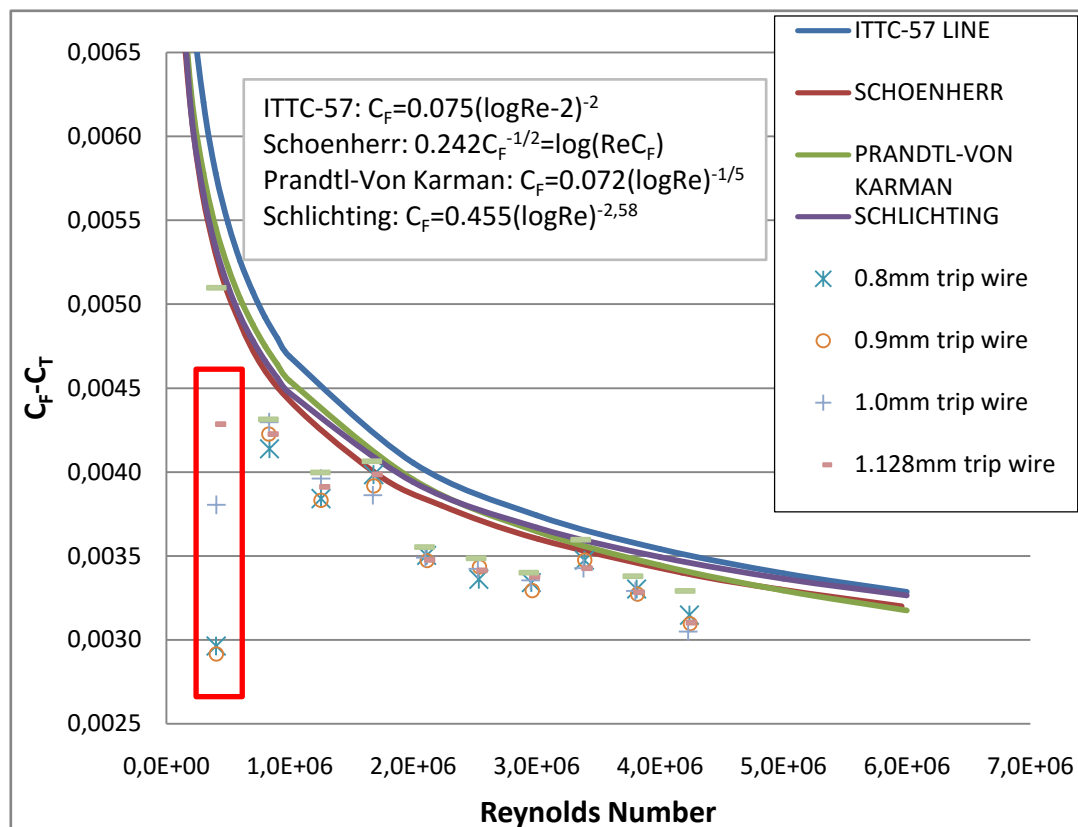


Διάγραμμα 10: Αδιάστατος συντελεστής ολικής αντίστασης συναρτήσει Reynolds για τη λεία πλάκα. Επιπλέον παριστάνονται καμπύλες C_F κατά Schoenherr, ITTC και Blasius.

Η χρήση διεγέρτη τύρβης καθιστά τη ροή τυρβώδη (Joubert και Matheson, 1970) και θα αυξήσει την τιμή της αντίστασης δίνοντας τιμές πιο κοντά στις τιμές της βιβλιογραφίας. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων για τους διάφορους διεγέρτες τύρβης παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 11. Όπως είναι φανερό από το κόκκινο πλαίσιο στο διάγραμμα, όλοι οι διεγέρτες εκτός του σύρματος διαμέτρου 1.3mm αδυνατούν να διεγείρουν επαρκώς τη ροή για χαμηλούς αριθμούς Reynolds

(ταχύτητα 0.25m/sec). Σε μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds οι τιμές του C_T είναι παραπλήσιες.

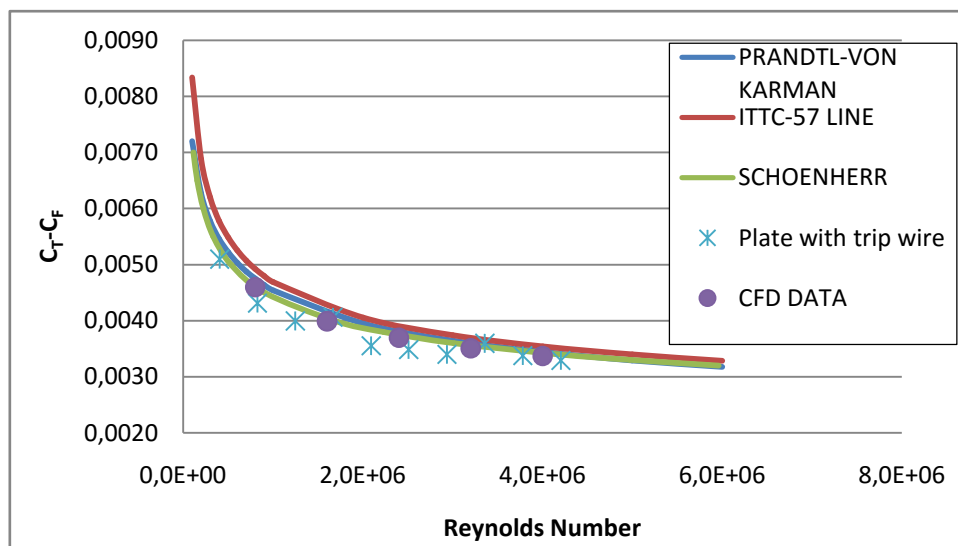
Οι μετρήσεις ακολουθούν τη λογαριθμική μορφή όπως αναμένεται από τις καμπύλες που έχουν αντληθεί από τη βιβλιογραφία. Τυχόν σφάλματα στη μορφή πιθανώς να εισάγονται από τη διόρθωση που έγινε για την πρόσθετη αντίσταση συρμάτων.



Διάγραμμα 11: Διάγραμμα C_f συναρτήσει του Re για τα πειράματα με τους διεγέρτες τύρβης.

Ταυτόχρονα με τα πειράματα, έγινε προσομοίωση των πειραμάτων με κώδικα CFD του καθηγητή Γ. Τζαμπίρα. Στο Διάγραμμα 12 παρουσιάζονται οι αδιάστατοι συντελεστές αντίστασης τριβής που προέκυψαν από των κώδικα σε σύγκριση με τη βιβλιογραφία και τα πειραματικά αποτελέσματα για τον ολικό συντελεστή αντίστασης με διεγέρτη 1.3mm.

Στον Πίνακα 2 βρίσκονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των CFD. Σύμφωνα με τα συγκεκριμένα αποτελέσματα, η συνιστώσα του ολικού συντελεστή αντίστασης που οφείλεται στην υπόλοιπη αντίσταση (αντίσταση κυματισμού και αντίσταση μορφής) κυμαίνεται από 4.4-5.9%. Έχοντας αυτό ως δεδομένο θα μπορούσε να εξαχθεί η συνιστώσα της υπόλοιπης αντίστασης από τα πειραματικά δεδομένα.



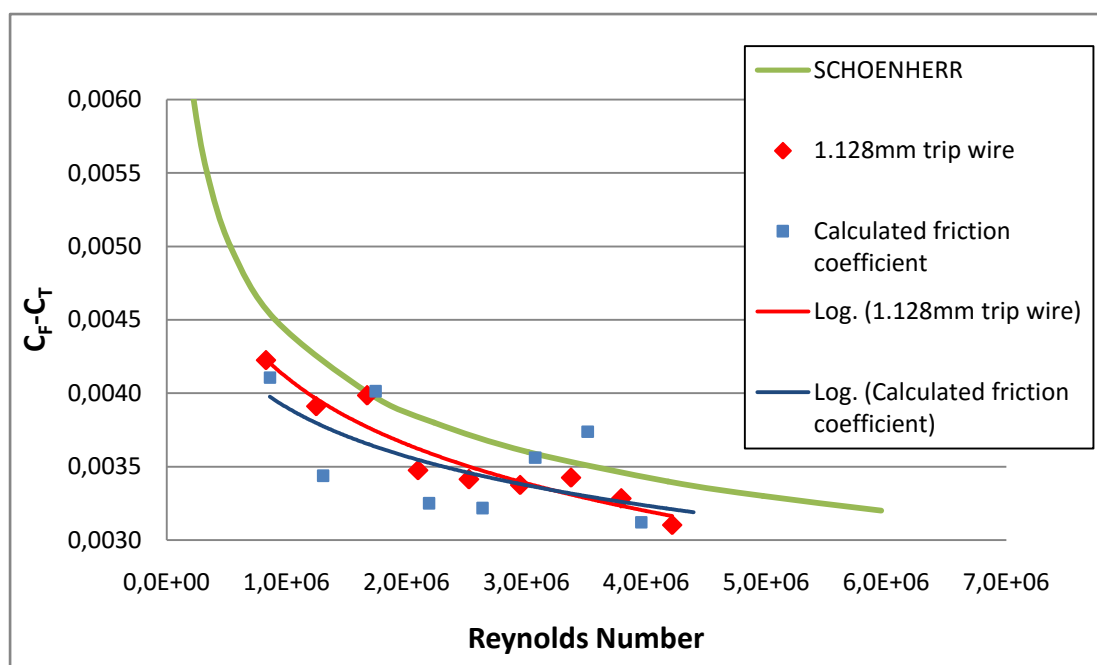
Διάγραμμα 12: Fitting δεδομένων για το διεγέρτη διαμέτρου 1mm σε συνάρτηση της μορφής της ITTC

Πίνακας 3: Αποτελέσματα CFD για λεία ορθογωνική πλάκα

CFD DATA						
Speed	Reynolds Number	CFD- C_T	CFD- C_F	CFD- C_p	% C_p	A
[m/sec]						[m ²]
0.5	8.0E+05	0.004809	0.0046	0.0002115	0.044	3.217
1	1.6E+06	0.004208	0.0040	0.0002165	0.051	3.216
1.5	2.4E+06	0.003909	0.0037	0.0002147	0.055	3.216
2	3.2E+06	0.003717	0.0035	0.0002108	0.057	3.216
2.5	4.0E+06	0.003581	0.0034	0.0002106	0.059	3.215

Στο Διάγραμμα 13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τα πειράματα σε μειωμένο βύθισμα αφού έχει γίνει η αφαίρεση των ολικών αντιστάσεων όπως αναφέρεται στην πειραματική διαδικασία. Εν ολίγοις, τα μπλε σημεία έχουν προκύψει διαιρώντας για την επιφάνεια που προκύπτει για θεωρητικό βύθισμα 9.8cm. Τα

συγκεκριμένα αποτελέσματα έχουν μεγάλη διασπορά και το fitting που γίνεται με λογαριθμική καμπύλη είναι υπό αμφισβήτηση. Από τη διαφορά της κόκκινης καμπύλης από την μπλε προκύπτει η συνιστώσα της αντίστασης κυματισμού. Ωστόσο, παρατηρείται ότι η C_w συνεχώς μειώνεται με την αύξηση του Re γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με την πραγματικότητα. Για το λόγο αυτό, τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου πειράματος δεν έχουν την απαιτούμενη ακρίβεια και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξαχθούν συμπεράσματα για τον υπολογισμό της συνιστώσας της ολικής αντίστασης που οφείλεται στον κυματισμό.



Διάγραμμα 13: Διάγραμμα υπολογισμού αδιάστατου συντελεστή τριβής

4.3 Αποτελέσματα πειραμάτων πλάκας με βαφές

Τα αποτελέσματα παχυμέτρησης του Πίνακα 3 αφορούν το πρόσθετο πάχος που προκύπτει ανά μεριά στην πλάκα λόγω της επίστρωσης της βαφής. Όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα, η πλάκα βάφτηκε αρχικά με την F0032-PU, χωρίς τη χρήση Tie Coat και πάνω σε αυτή ακολούθησαν η F0027-PU, η F0042-PU και η FXS2-Acrylic χωρίς να προηγηθεί καθαρισμός της. Ύστερα, ακολούθησε καθαρισμός, επίστρωση Tie Coat και βαφή με τη F0033-Silicone και τέλος με την FXS1-Silicone.

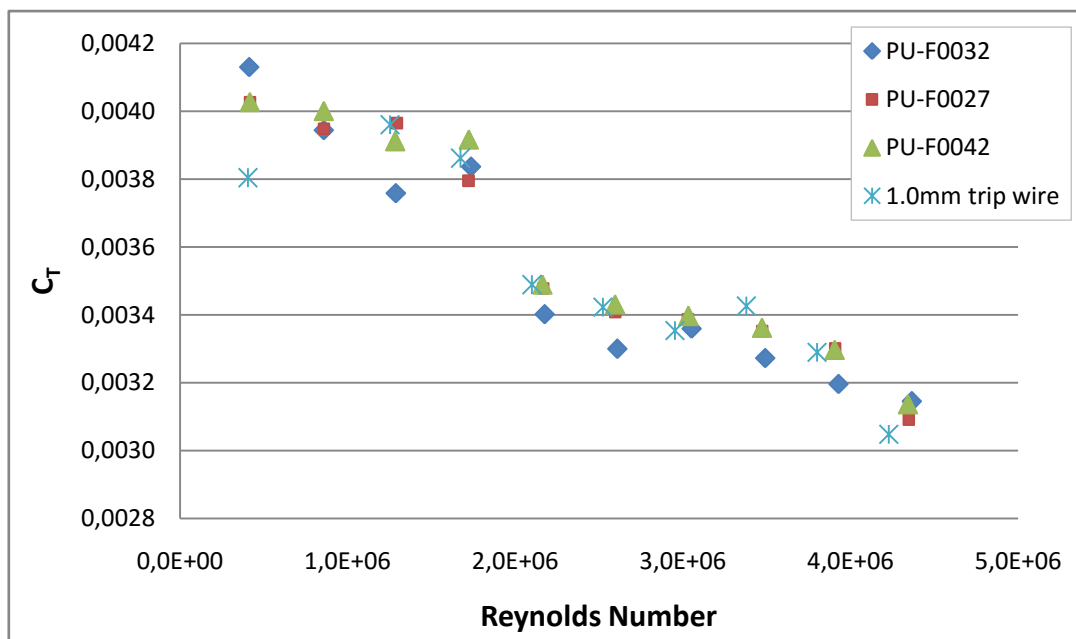
Από τον Πίνακα 3 είναι φανερή η αύξηση του πάχους καθώς η μία βαφή τοποθετείται πάνω στην προηγούμενη.

Στον Πίνακα 3 εμπεριέχονται επίσης οι μέσες τιμές για την τραχύτητα (Ra: απόσταση κορυφών από επίπεδο αναφοράς) κάθε βαφής. Τη μέγιστη τραχύτητα παρουσιάζει η ακρυλική βαφή. Η τελική επιφάνεια των βαφών πολυουρεθάνης παρουσιάζουν διαφορές μεταξύ τους ως προς την τραχύτητα ενώ οι σιλικόνες έχουν παραπλήσιες τιμές. Η τελική τραχύτητα της επιφάνειας εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη διαδικασία βαφής (μάστορα) καθώς και από την αραίωση της βαφής

Πίνακας 4: Αποτελέσματα τραχυμετρήσεων και παχυμετρήσεων για τις βαφές και την πλάκα αλουμινίου

Βαφή	Παχυμέτρηση [μm]	Τραχυμέτρηση Ra [μm]
F0033-Silicone	59.9	1.87
FXS1-Silicone	92.16	1.55
F0042-PU	146.8	1.37
F0027-PU	107.41	0.95
F0032-PU	54.36	2.14
FXS2-Acrylic	195.38	2.15
Aluminium Plate	-	0.38-0.45

Από το Διάγραμμα 14 και από τον Πίνακα 4, αγνοώντας τις ταχύτητες των 0.25 και 0.50m/sec καθώς σε αυτές δεν έχει αναπτυχθεί επαρκής τύρβη, παρατηρείται ότι οι βαφές πολυουρεθάνης παρουσιάζουν μειωμένη αντίσταση σε σχέση με την άβαφη πλάκα. Ωστόσο, η τιμή της αντίστασης αυξάνεται ακολουθώντας την αύξηση πάχους της πλάκας που προκύπτει από τη διαδοχική βαφή αυτής με τις διάφορες βαφές. Σύμφωνα με τα δεδομένα, η μείωση του ολικού συντελεστή αντίστασης μπορεί να φτάσει το 5.1% στην ταχύτητα των 0.75m/sec.



Διάγραμμα 14: Αδιάστατος συντελεστής ολικής αντίστασης συναρτήσει του αριθμού Reynolds για τις βαφές πολυουρεθάνης σε σχέση με τη γυμνή πλάκα με διεγέρτη διαμέτρου 1mm

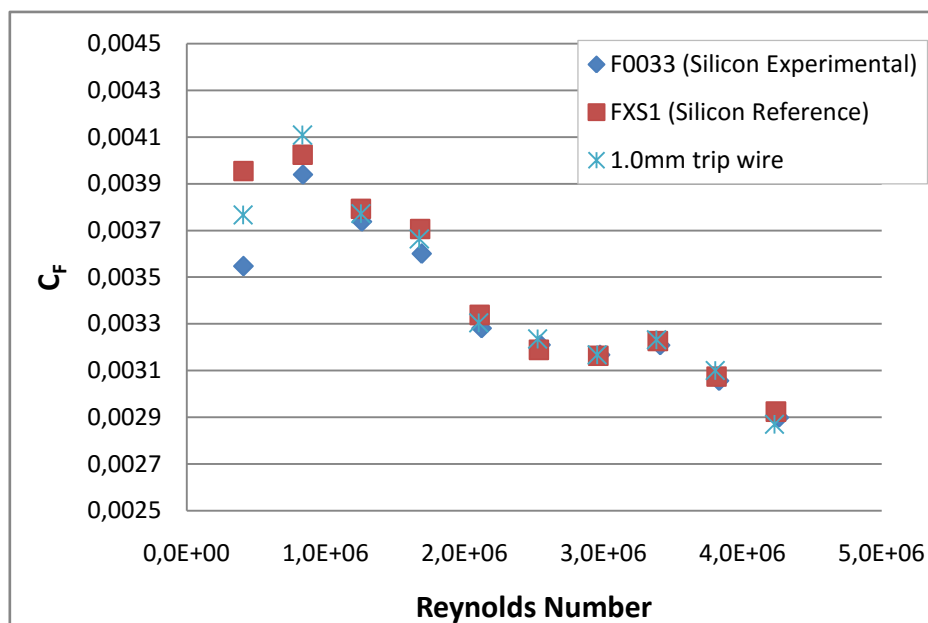
Πίνακας 5: Ποσοστιαία διαφορά το ολικού συντελεστή αντίστασης για την άβαφη πλάκα και για τις βαφές πολυουρεθάνης

% Διαφορές βαφών PU σε σχέση με άβαφη πλάκα			
Speed [m/sec]	F0032	F0027	F0042
0.25	8.57%	5.87%	5.87%
0.50	-8.21%	-8.10%	-6.88%
0.75	-5.10%	0.11%	-1.22%
1.00	-0.65%	-1.73%	1.43%
1.25	-2.51%	-0.31%	0.01%
1.50	-3.59%	-0.42%	0.25%
1.75	0.16%	1.00%	1.27%
2.00	-4.47%	-2.14%	-1.86%
2.25	-2.85%	0.38%	0.23%
2.50	3.17%	1.40%	2.90%

% Διαφορές βαφών Silicone σε σχέση με άβαφη πλάκα		
Speed [m/sec]	F0033	FXS1
0.25	-5.85%	4.98%
0.50	-4.13%	-2.06%
0.75	-0.91%	0.54%
1.00	-1.75%	1.15%
1.25	-0.71%	1.03%
1.50	-0.80%	-1.44%
1.75	-0.01%	-0.12%
2.00	-0.74%	-0.19%
2.25	-1.45%	-0.84%
2.50	1.02%	1.89%

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 5, οι βαφές σιλικόνης φαίνεται να παρουσιάζουν και αυτές χαμηλότερες τιμές αντίστασης σε σχέση με την άβαφη πλάκα. Η μέγιστη μείωση του ολικού συντελεστή αντίστασης είναι 4.13% για την ταχύτητα των 0.50m/sec στην πειραματική βαφή. Παρόλα αυτά, οι μειώσεις που

παρατηρούνται είναι μικρότερες σε σχέση με τις βαφές πολυουρεθάνης. Όπως και στην περίπτωση των βαφών PU εξαιρείται της αξιολόγησης η χαμηλή ταχύτητα των 0.25m/sec καθώς η ροή γύρω από την πλάκα είναι στρωτή σε μεγάλη έκταση.

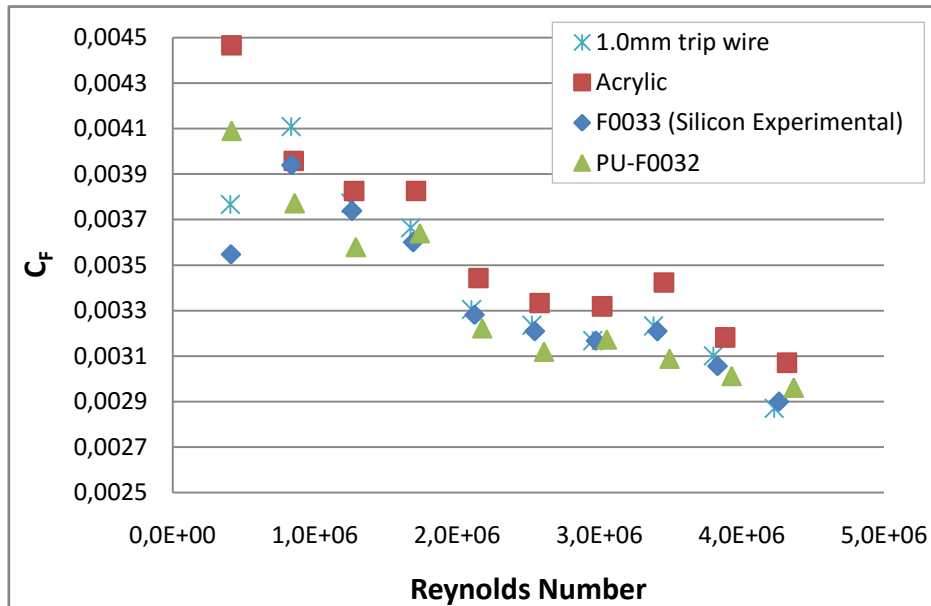


Διάγραμμα 15: Αδιάστατος συντελεστής αντίστασης τριβής συναρτήσει του αριθμού Reynolds για τις βαφές σιλικόνης σε σχέση με τη γυμνή πλάκα με διεγέρτη διαμέτρου 1mm

Στο Διάγραμμα 16 γίνεται προσπάθεια σύγκρισης των διαφορετικών τύπων βαφής (ακρυλική, σιλικόνη, πολυουρεθάνη) χωρίς να γίνεται διάκριση για τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε μίας. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε μία αντιπροσωπευτική βαφή από κάθε επιμέρους κατηγορία. Άμεσα προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ακρυλική βαφή εμφανίζει τη μεγαλύτερη αντίσταση, αρκετά μεγαλύτερη και από την άβαφη πλάκα. Ωστόσο, η αυξημένη αντίσταση της συγκεκριμένης βαφής οφείλεται εν μέρει και στο αυξημένο πάχος της πλάκας καθώς σύμφωνα με τον Πίνακα 3 το πάχος της (αρχικό 3mm) αυξάνεται κατά 13%.

Με τη βοήθεια του Πίνακα 6 προκύπτει ακόμα το συμπέρασμα ότι την ελάχιστη τιμή του ολικού συντελεστή αντίστασης την παρουσιάζει η βαφή πολυουρεθάνης. Η πειραματική αυτή παρατήρηση έρχεται να καταρρίψει τις προβλέψεις ότι η βαφή σιλικόνης θα είχε τη μικρότερη τιμή αντίστασης λόγω της

ιδιαίτερα γλιστερής της υφής. Επιπλέον, οι δύο βαφές έχουν παραπλήσια πρόσθετα πάχη και παραπλήσιες τραχύτητες, οπότε η διαφορά στην αντίσταση μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά στον τύπο της βαφής και όχι σε παράγοντες που επηρεάζονται από τον τρόπο βαφής και τον αριθμό στρώσεων βαφής.



Διάγραμμα 16: Αδιάστατου συντελεστή αντίστασης τριβής συναρτήσει του αριθμού Reynolds για βαφές από διαφορετικές κατηγορίες

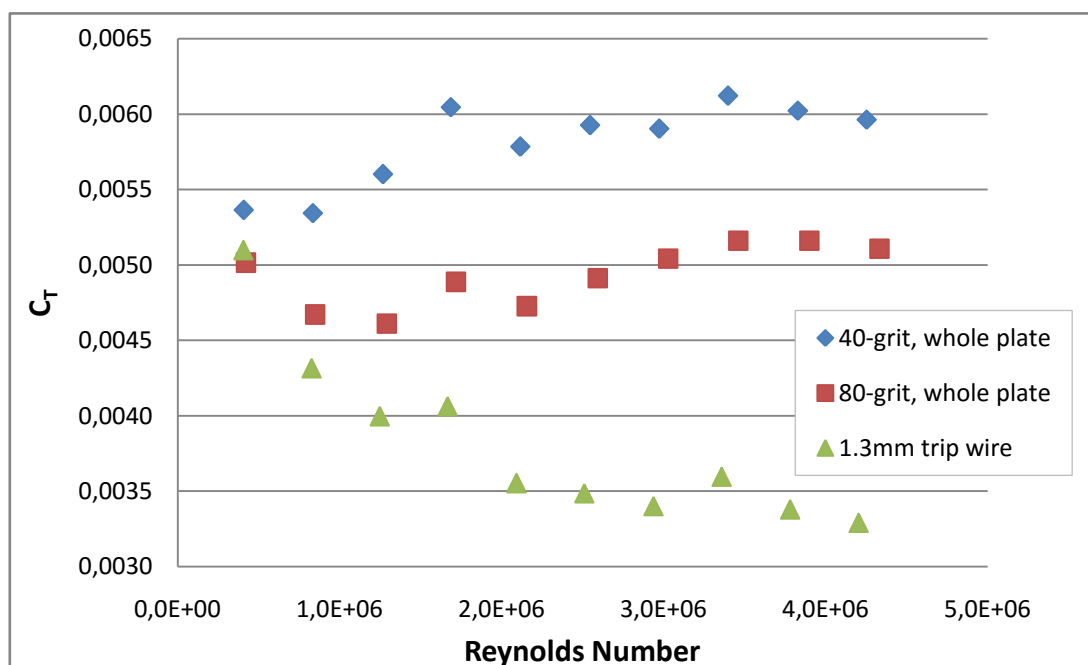
Πίνακας 6: Ποσοστιαία διαφορά το ολικού συντελεστή αντίστασης για την άβαφη πλάκα για τους διάφορους τύπους βαφών

% Διαφορές βαφών σε σχέση με άβαφη πλάκα			
Speed [m/sec]	F0032 PU	F0033 Silicone	Acrylic
0.25	8.57%	-5.85%	18.55%
0.50	-8.21%	-4.13%	-3.67%
0.75	-5.10%	-0.91%	1.42%
1.00	-0.65%	-1.75%	4.41%
1.25	-2.51%	-0.71%	4.19%
1.50	-3.59%	-0.80%	3.03%
1.75	0.16%	-0.01%	4.77%
2.00	-4.47%	-0.74%	5.89%
2.25	-2.85%	-1.45%	2.62%
2.50	3.17%	1.02%	7.00%

4.4 Αποτελέσματα πλάκας με γυαλόχαρτα

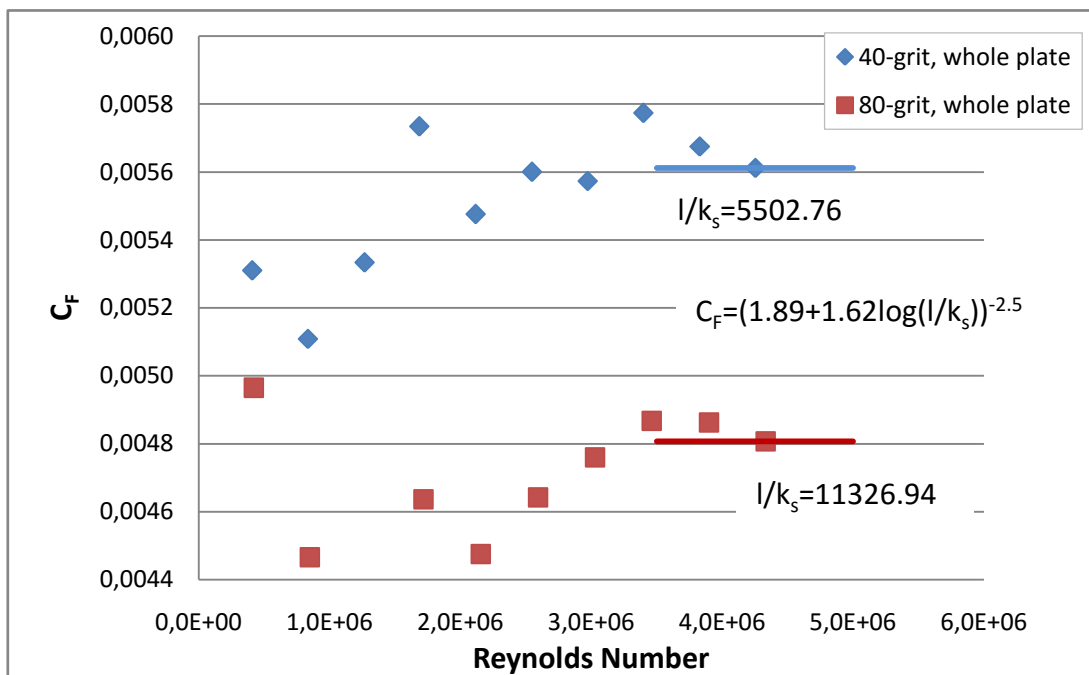
Σύμφωνα με το Διάγραμμα 17 αλλά και όπως είναι αναμενόμενο από τη θεωρία (Schlichting, 1979), η παρουσία γυαλόχαρτου σε ολόκληρη την έκταση της πλάκας, πέραν από την αύξηση του ολικού συντελεστή αντίστασης προκαλεί και αλλαγή στη μορφή της καμπύλης. Συγκεκριμένα, πηγαίνοντας δεξιά στο διάγραμμα, ο ολικός συντελεστής αντίστασης, που μπορεί να θεωρηθεί ότι προσεγγίζει ικανοποιητικά το συντελεστή τριβής λόγω της μειωμένης υπόλοιπης αντίστασης της πλάκας, καθίσταται ανεξάρτητος του αριθμού Reynolds και εξαρτάται μόνο από την τραχύτητα. Αυτό οφείλεται στη ροή γύρω από την πλάκα η οποία βρίσκεται σε fully rough regime. Εκτενέστερη αναφορά στο θέμα γίνεται στο θεωρητικό μέρος.

Η αύξηση του ολικού συντελεστή αντίστασης σε σχέση με τη λεία πλάκα φτάνει μέχρι 81% στην περίπτωση του χοντρού γυαλόχαρτου (grit-40) και 55% για το πιο λεπτό (grit-80) στην ταχύτητα των 2.50m/sec.



Διάγραμμα 17: Αδιάστατος συντελεστή αντίστασης τριβής για λεία πλάκα και πλάκα με γυαλόχαρτα

Αφαιρώντας από τον ολικό συντελεστή αντίστασης τη συνιστώσα της υπόλοιπης αντίστασης, η οποία είναι γνωστή από τα αποτελέσματα των CFD, ξαναγίνεται το προηγούμενο διάγραμμα με κατακόρυφο άξονα την τιμή του C_F (Διάγραμμα 18). Σύμφωνα με τη σχέση που αναγράφεται στο συγκεκριμένο διάγραμμα (Schlichting, 1979) υπολογίζεται το ισοδύναμο ύψος τραχύτητας. Οι υπολογισμοί παρουσιάζονται στον Πίνακα 7 και η τιμή των k_s που προκύπτει για τα δύο γυαλόχαρτα προσεγγίζει με ικανοποιητική ακρίβεια τις θεωρητικές τιμές.



Διάγραμμα 18: Υπολογισμός της τιμής του l/k_s

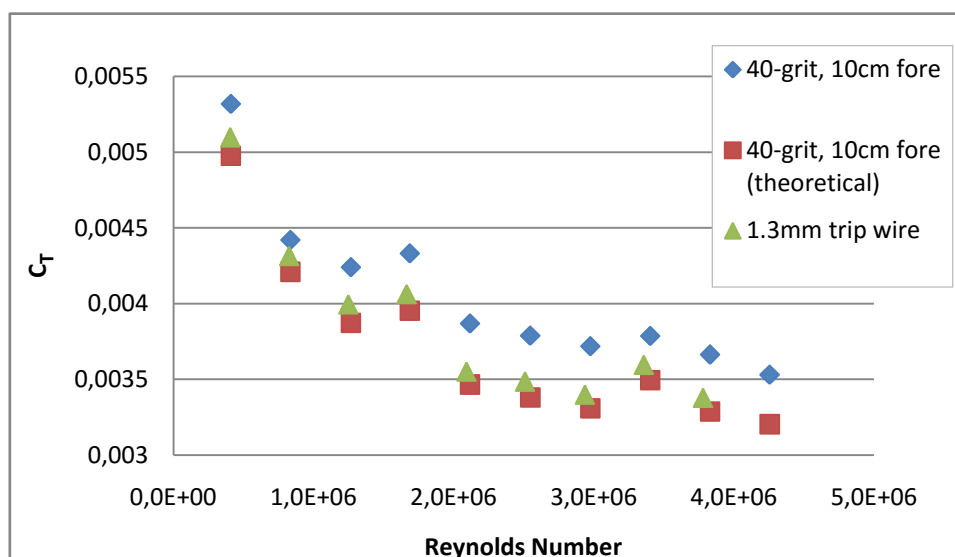
Πίνακας 7: Υπολογισμός ισοδύναμου ύψους τραχύτητας k_s

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ k_s ΓΥΑΛΟΧΑΡΤΩΝ				
	l	l/k_s	k_s	Theor. k_s
	[m]		[μm]	[μm]
grit-40	2.00	5502.76	363.454	428
grit-80		11326.94	176.5702	192

Η επίδραση του γυαλόχαρτου στον ολικό συντελεστή αντίστασης δεν είναι ανεξάρτητη από τη θέση στην οποία βρίσκεται το γυαλόχαρτο. Αυτό φαίνεται

ξεκάθαρα στα διαγράμματα 19 και 20. Στα συγκεκριμένα διαγράμματα, οι θεωρητικές καμπύλες έχουν προκύψει προσθέτοντας στη λεία πλάκα το ποσοστό της πρόσθετης αντίστασης λόγω του γυαλόχαρτου με την υπόθεση ότι η πρόσθετη αντίσταση κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια της πλάκας. Αυτό γίνεται κατανοητό από την ακόλουθη σχέση στην οποία R υποδηλώνει δύναμη αντίστασης και A επιφάνεια. Επίσης, τα S , $BARE$, $FORE$ δηλώνουν γυαλόχαρτο, λεία και μπροστινό τμήμα αντίστοιχα.

$$R_{TH} = R_{BARE} + \frac{R_S - R_{BARE}}{A} A_{FORE} \quad (12)$$

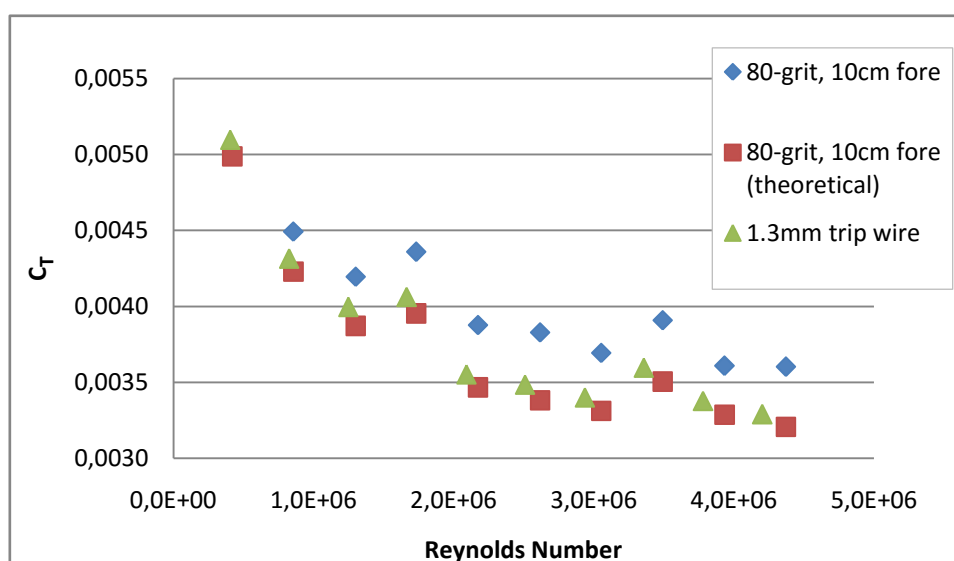


Διάγραμμα 19: Αδιάστατος συντελεστής αντίστασης τριβής για το γυαλόχαρτο grit-40 στην πλώρη και ο αντίστοιχος αν θεωρηθεί ότι η πρόσθετη αντίσταση λόγω γυαλόχαρτου είναι ανεξάρτητη της θέσης

Όπως είναι αναμενόμενο λόγω της αυξημένης πίεσης που επικρατεί στο προωαίο τμήμα, η διαταραχή της λειότητας της πλάκας στην πλώρη με χρήση γυαλόχαρτου προκαλεί εντονότερη αύξηση της αντίστασης απ' ό,τι σε άλλες θέσεις. Δηλαδή, η περιοχή της πλώρης επηρεάζει περισσότερο την ολική αντίσταση.

Στα ίδια διαγράμματα έχει συμπεριληφθεί και ο ολικός συντελεστής τραχύτητας για λεία πλάκα με διεγέρτη διαμέτρου 1.3mm. Συγκρίνοντας τα

αποτελέσματα μεταξύ τους, προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα συγκεκριμένα γυαλόχαρτα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε διεγέρτες τύρβης. Η χρήση ομοιόμορφης τραχύτητας αντί σύρματος για τη διέγερση τύρβης πλεονεκτεί ως προς τη μη εισαγωγή αναταραχών και παρασιτικών φαινομένων στο οριακό στρώμα, στο πίσω μέρος του σύρματος τα οποία διατηρούνται για μεγάλη απόσταση μετά από αυτό (Klebanoff και Diehl, 1951).

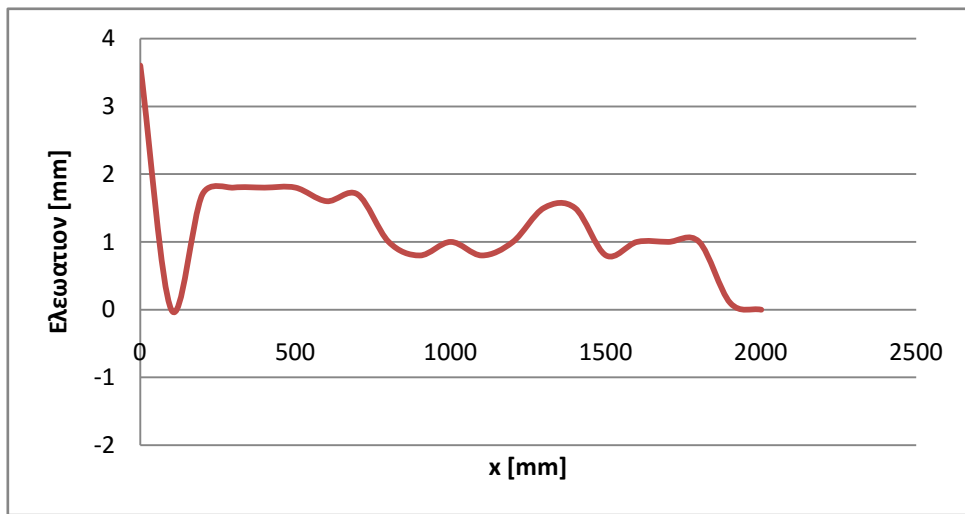


Διάγραμμα 20: Αδιάστατος συντελεστής αντίστασης τριβής για το γυαλόχαρτο grit-80 στην πλώρη και ο αντίστοιχος αν θεωρηθεί ότι η πρόσθετη αντίσταση λόγω γυαλόχαρτου είναι ανεξάρτητη της θέσης

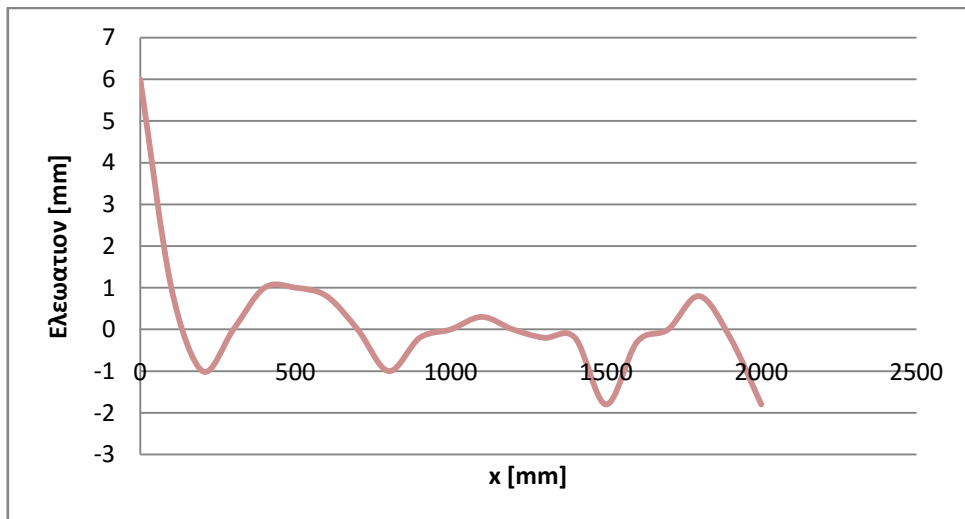
4.5 Αποτελέσματα κυματομορφών

Η επιλογή του ελάχιστου δυνατού πάχους της πλάκας που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων έγινε με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της υπόλοιπης αντίστασης (αντίστασης μορφής και κυματισμού). Ωστόσο, η παρουσία κυματισμού είναι αναπόφευκτη λόγω της παρουσίας ελεύθερης επιφάνειας που διαπερνάται από την πλάκα. Τα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζουν το προφίλ του κύματος που δημιουργήθηκε για τις ταχύτητες των 0.50, 1.00, 1.50, 2.00 και 2.50m/sec. Είναι εμφανές ότι στην πλώρη της πλάκας δημιουργείτε μια έντονη ανύψωση της στάθμης του νερού. Στις μικρές ταχύτητες (0.50 και 1.00 m/sec)

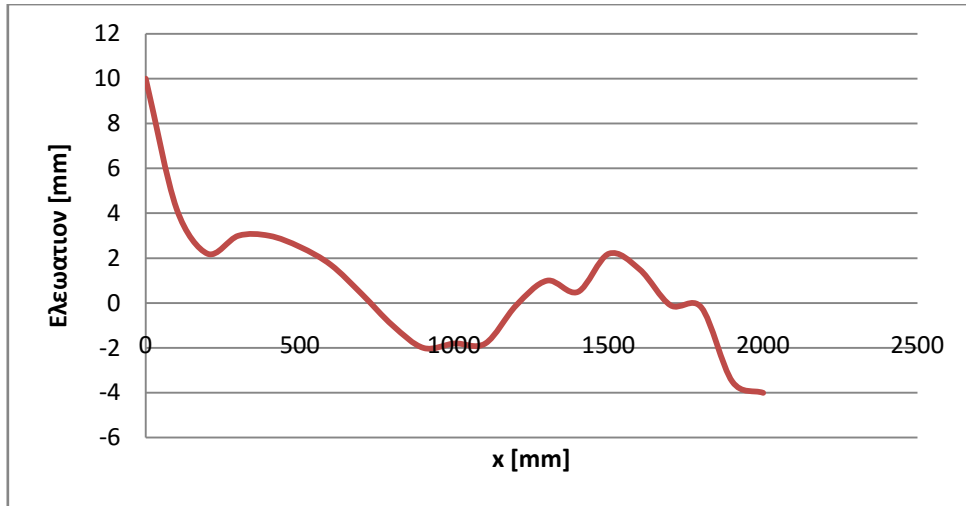
παρατηρείται η δημιουργία τριών μικρότερων κορυφών κατά την κίνηση στο πίσω μέρος της πλάκας. Στις τρεις μεγαλύτερες ταχύτητες οι ενδιάμεσες κορυφές μειώνονται σε δύο στην ταχύτητα 1.50m/sec και σε ακόμη μεγαλύτερες ταχύτητες εξαφανίζονται πλήρως. Καθώς η ταχύτητα της πλάκας (λεπτόγραμμα και επίμηκες σώμα) μεταβάλλεται σε βαθύ νερό, το μήκος κύματος αλλάζει ανάλογα του τετραγώνου της ταχύτητας (Πολίτης, 2005).



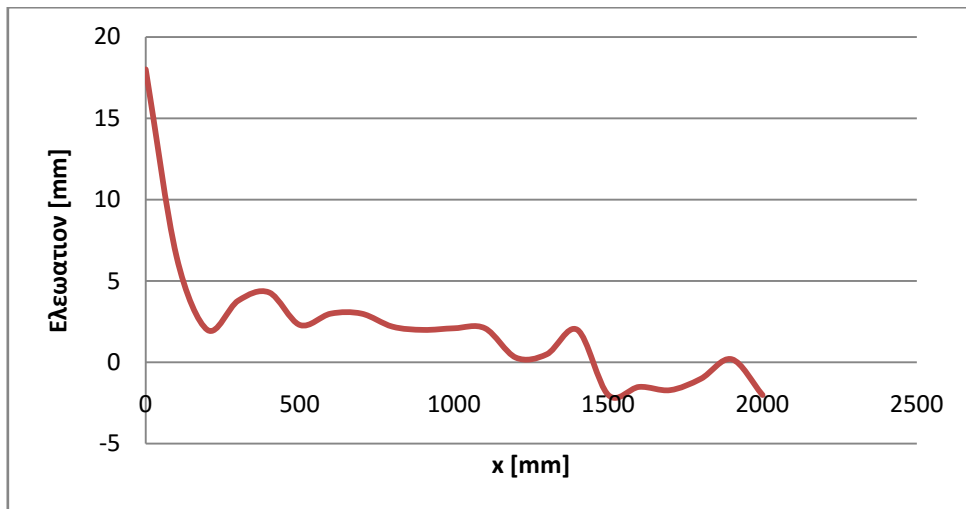
Διάγραμμα 21: Μορφή κυματισμού στην ίσαλο για ταχύτητα 0.50m/sec



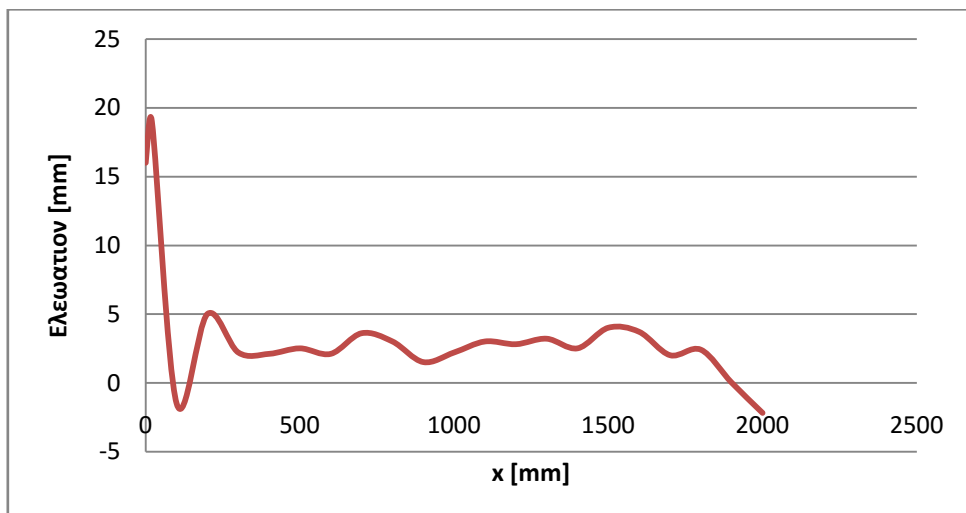
Διάγραμμα 22: Μορφή κυματισμού στην ίσαλο για ταχύτητα 1.00m/sec



Διάγραμμα 23: Μορφή κυματισμού στην ίσαλο για ταχύτητα 1.50m/sec

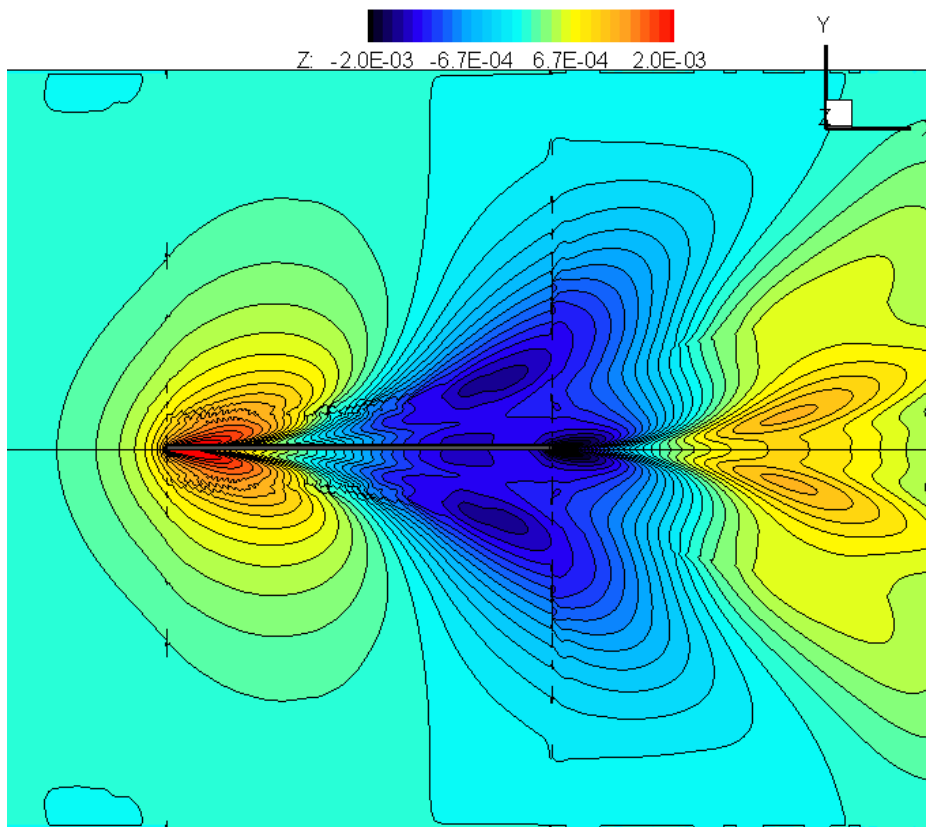


Διάγραμμα 24: Μορφή κυματισμού στην ίσαλο για ταχύτητα 2.00m/sec



Διάγραμμα 25: Μορφή κυματισμού στην ίσαλο για ταχύτητα 2.50m/sec

Τέλος, στο τελευταίο σχήμα το οποίο προέρχεται από τα πειράματα με κώδικα CFD και που σκοπό έχουν να παραλληλιστούν με τα πειράματα που έγιναν στην πειραματική δεξαμενή, παρουσιάζεται το σύστημα κυματισμών που δημιουργείται γύρω από την πλάκα για $Re=4 \times 10^6$ και $F_N=0.56$ (ταχύτητα 2.48m/sec). Στην πλώρη δημιουργείται μια έντονη κορυφή η οποία ακολουθείται από κοιλάδα που ολοκληρώνεται με το πέρας της πλάκας. Σε απόσταση περίπου ένα μέτρο από την πρύμνη εμφανίζεται η δεύτερη κορυφή του εγκάρσιου κύματος. Το μήκος κύματος έτσι όπως προκύπτει από τα CFD είναι περίπου 3m.



Διάγραμμα 26: Wave contour από CFD για $Re=4 \times 10^6$

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και προτάσεις διερεύνησης

5.1 Συμπεράσματα

Αρχικός σκοπός των πειραμάτων που παρουσιάστηκαν στην παρούσα διπλωματική αναφορά ήταν η μέτρηση μικρών μεταβολών στην αντίσταση τριβής που οφείλονται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της βρεχόμενης επιφάνειας και προκύπτουν από τα συστήματα βαφών που χρησιμοποιούνται .

Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε η πειραματική διάταξη της επίπεδης ορθογωνικής πλάκας. Η απαίτηση για προσέγγιση της τιμής της αντίστασης τριβής οδήγησε στην επιλογή πλάκας πολύ μικρού πάχους ώστε να περιοριστεί η υπόλοιπη αντίσταση. Ωστόσο, όπως φάνηκε και από τα τελευταία πειράματα, δημιουργείται σύστημα κυματισμών και το οποίο όμως δεν ξεπερνά το 6% του ολικού συντελεστή αντίστασης.

Η ανάγκη πρόσθετης στήριξης της πλάκας με τα σύρματα δημιούργησε μια επιπλέον συνιστώσα αντίστασης λόγω των συρμάτων, για τον υπολογισμό της οποίας χρειάστηκε να δημιουργηθεί μια νέα διάταξη. Η αντίσταση του σύρματος που κινείται με το διαμήκη άξονα κάθετα στη ροή προέκυψε να είναι αρκετά μεγάλη και συγκρίσιμη με την αντίσταση μίας κακής σε ποιότητα κατασκευής υδροτομής.

Τα πειράματα για τον έλεγχο της αντίστασης πραγματοποιήθηκαν κοντά στην κρίσιμη περιοχή του αριθμού Reynolds για ορθογωνική πλάκα, οπότε ήταν απαραίτητο να γίνει διερεύνηση για την επιλογή του βέλτιστου διεγέρτη τύρβης που θα καθιστούσε τη ροή στην πλάκα τυρβώδη για όλες τις ταχύτητες δοκιμών. Χρησιμοποιήθηκαν χάλκινα σύρματα διαμέτρου 0.8, 0.9, 1.0, 1.13 και 1.3mm, σε απόσταση 10cm από το άκρο πρόσπτωσης και διαπιστώθηκε ότι το σύρμα διαμέτρου

1.3mm είχε τα επιθυμητά αποτελέσματα με τα σύρματα μικρότερης διαμέτρου να αδυνατούν να διεγείρουν τύρβη στην ταχύτητα των 0.25m/sec.

Στη συνέχεια, ακολούθησαν οι δοκιμές των βαφών που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος. Έγινε έλεγχος σε τρεις βαφές πολυουρεθάνης, δύο σιλικόνης και σε μία ακρυλική. Το αποτέλεσμα αυτών των πειραμάτων έδειξε ότι οι βαφές πολυουρεθάνης εμφανίζουν τη μικρότερη αντίσταση, έως και 4.47% μικρότερο συντελεστή ολικής αντίστασης από την άβαφη, λεία κατάσταση. Οι βαφές σιλικόνης έρχονται δεύτερες και τέλος, με τα χειρότερα αποτελέσματα αντίστασης, η ακρυλική βαφή. Στα συγκεκριμένα πειράματα δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στη διαχείριση των αποτελεσμάτων καθώς τα διαφορετικά πάχη πλάκας που προέκυπταν από την βαφή των βαφών επηρέαζαν τα αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό, τα τελικά αποτελέσματα αφορούν βαφές με παρόμοιο πάχος βαφής. Επίσης, προέκυψε το συμπέρασμα, που επιβεβαιώνεται και από τη βιβλιογραφία, ότι σε Smooth Regime η τραχύτητα δεν επηρεάζει την αντίσταση και οι μικρές μεταβολές της αντίστασης προέρχονται από άλλα χαρακτηριστικά της επιφάνειας.

Τα πειράματα με τα γυαλόχαρτα σε ολόκληρη την πλάκα σκοπό είχαν να προσδιοριστεί το ισοδύναμο ύψος τραχύτητας. Όπως φάνηκε, μπορεί κανείς με τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, να προσδιορίσει πειραματικά το συγκεκριμένο μέγεθος καθώς οι πειραματικοί υπολογισμοί έπεσαν πολύ κοντά στους θεωρητικούς. Αυτό το συμπέρασμα είναι πολύ χρήσιμο καθώς σκοπός είναι να αντιστοιχηθούν τυχαίες τραχύτητες σε ομοιόμορφες κατανομές τραχυτήτων που είναι διαχειρίσιμες από κώδικες CFD.

Τα γυαλόχαρτα στο πρωραίο τμήμα έδειξαν ότι η τραχύτητας της πλήρης επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση. Από αυτά τα πειράματα προκύπτει επίσης το

συμπέρασμα ότι η συγκεκριμένη χρήση γυαλόχαρτου μπορεί να είναι ικανοποιητική και ως διεγέρτης τύρβης ύστερα από κατάλληλη διερεύνηση.

Δυστυχώς, λόγω ιδιαίτερων τεχνικών δυσκολιών στην εκτύπωση των πλακιδίων fouling δεν ήταν δυνατή η διεξαγωγή των συγκεκριμένων πειραμάτων. Σκοπός αυτών, ήταν να προσδιοριστεί ο ισοδύναμο ύψος τραχύτητα k_S με την ίδια μεθοδολογία που έγινε και στα γυαλόχαρτα.

Τέλος, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον κώδικα CFD που έτρεξε ο επιβλέπων καθηγητής Γ. Τζαμπίρας βρίσκονται σε συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα και ποσοτικοποιούν την επίδραση της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυματισμού και μορφής, κάτι το οποίο δεν μπόρεσε να γίνει πειραματικά με το να γίνουν τα πειράματα σε μικρότερο βύθισμα.

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Κλείνοντας αυτή την αναφορά προκύπτει ότι η τραχύτητα δεν είναι ένα μέγεθος το οποίο από μόνο του μπορεί να ποσοτικοποιήσει διαφορές στην αντίσταση επιφανειών που βρίσκονται εντός του Smooth Regime. Για το λόγο αυτό προτείνεται ο υπολογισμός, τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά (θεωρητικό μέρος), της συνάρτησης τραχύτητας των επιφανειών ώστε να μπορούν να προκύψουν συμπεράσματα που αποκωδικοποιούν την αρχή λειτουργίας των βαφών σχετικά με τη μείωση της αντίστασης. Επιπλέον, τα συγκεκριμένα πειράματα πρέπει να γίνουν και σε υψηλότερους αριθμούς Reynolds ώστε να προσεγγιστεί ικανοποιητικά η επίδραση των βαφών σε διαστάσεις πλοίου.

Τα πειράματα με τεχνητό fouling πέραν των δοκιμών στην πρύμνη της πλάκας καλό θα ήταν να δοκιμαστούν για διάφορες κατανομές, σύμφωνα με το πρότυπο της ASTM, σε όλη την έκτασή της.

Επιπλέον, η μέτρηση της αντίστασης μοντέλων πλοίων καλυμμένα με fouling σε ήρεμο νερό καθώς και σε κυματισμούς είναι δουλειά με μεγάλο ενδιαφέρον τόσο από ερευνητική σκοπιά όσο και από τη σκοπιά των πλοιοκτητών. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στις θέσεις, πυκνότητες και κατανομές της μόλυνσης. Τέλος, θέμα μελλοντικής έρευνας θα μπορούσε να είναι η διερεύνηση της λειτουργίας της έλικας όταν σε αυτή έχουν αναπτυχθεί μικρο αλλά και μακρο-οργανισμοί.

Αναφορές

Anderson, C. (2000). *Antifoulings: Regulatory and Technological Update*. Newcastle.

Beale, S. (2016, March 28). *Crossflow*. Ανάκτηση 3 28, 2016, από Thermopedia: <http://www.thermopedia.com/content/674/>

Bohlander, G. (1991). Biofilm effect on drag: Measurements on ships. *The Institute of Marine Engineers Third International Conference*, (σσ. 135-138). London.

Candries, M. (2001). *Drag boundary-layer and roughness characteristics of marine surfaces coated with antifoulings*. Newcastle.

Colerbrook, C., & C.M., W. (1937). Experiments with fluid friction in roughened pipes. *Proceedings of the Royal Society of London* , 367-381.

Granville, P. S. (1958). The Frictional Resistance and Turbulent Boundary Layer of Rough Surfaces. *JOURNAL OF SHIP RESEARCH* , 52-74.

Granville, P. S. (1987). Three Indirect Methods for the Drag Characterization of Arbitrarily Rough Surfaces on Flat Plates. *JOURNAL OF SHIP RESEARCH* , 70-77.

Hughes, G., & Allan, J. (1951). Turbulence stimulation on ship models. *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers* , 281-314.

Joubert, P. N. (1970). Wind Tunnel Tests of Two Lucy Ashton Reflex Geosims. *JOURNAL OF SHIP RESEARCH* , 241-276.

Klebanoff, P., & Diehl, Z. (1951). *Some Features of Artificially Thickened Fully Developed Turbulent Boundary Layers with Zero Pressure Gradient*. Washington Bureau of Standards: NACA Report 1110.

Murphy, J. (2010). *A Novel Approach to Turbulence Stimulation for Ship-Model Testing*. Annapolis.

Schlichting, H. (1979). *Boundary-layer Theory*. McGraw-Hill.

Schultz, M. (2007). Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering. *Biofouling* , 331-341.

Schultz, M. (2004). Frictional Resistance of Antifouling Coating Systems. *Journal of Fluids Engineering* , 1039-1047.

Schultz, M. P., & Swain, G. W. (2000). The influence of Biofilms on Skin Friction Drag. *Biofouling* , 129-139.

Schultz, M., & Swain, G. (1999). The effect of biofilms on turbulent boundary layers. *Journal of Fluids Engineering Transactions of the ASME* , 44-51.

Schultz, M., & Swain, G. (1998). The effects of biofilms on turbulent boundary layer structure. *Proceedings of the International Symposium on Seawater Drag Reduction* , 175-181.

Townsin, R., & Dey, S. (1990). The correlation of roughness drag with surface characteristics. *Marine Roughness and Drag Workshop* , Paper 8.

Πολίτης, Γ. (2011 Revised). *Σημειώσεις μαθήματος "Αντίστασης και Πρόωσης Πλοίου"*. Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ.

Τσαγγάρης, Σ. (2005). *Μηχανική των Ρευστών*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμεών.