



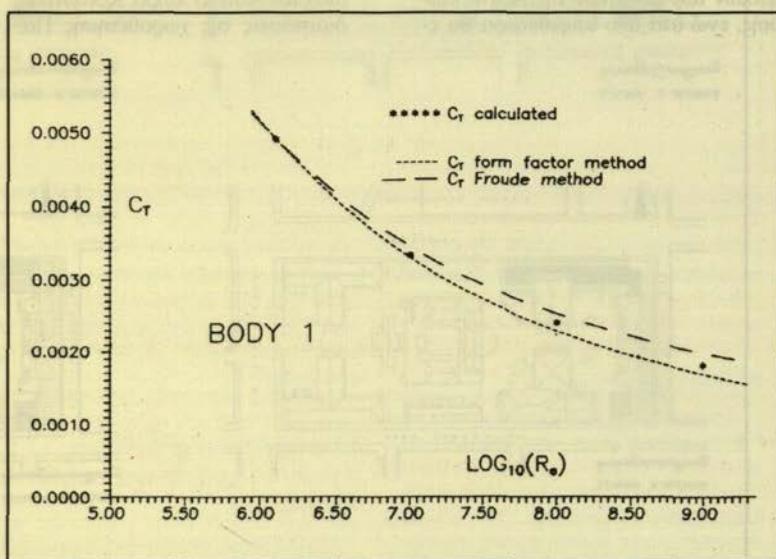
Υπολογιστική Υδροδυναμική

Εφαρμογές σε προβλήματα πρόωσης-προοπτικές

του Γ.Δ. Τζαμπίρα

Κατά την τελευταία δεκαετία, έχει αυξηθεί διεθνώς το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη υπολογιστικών μεθόδων που αφορούν την πρόγνωση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς των πλοίων, με βασικό στόχο την ακριβέστερη εκτίμηση της εγκατεστημένης ισχύος που απαιτείται για να κινούνται σε προδιαγεγραμμένες ταχύτητες. Όπως είναι προφανές, το πρόβλημα αυτό συνδέεται άμεσα τόσο με την οικονομική λειτουργία ενός πλοίου όσο και με τις σημερινές απαιτήσεις για εξοικονόμηση ενέργειας.

Η αναγκαιότητα για τον, κατά το δυνατό, ακριβέστερο υπολογισμό των χαρακτηριστικών της υδροδυναμικής αντίστασης και πρόωσης των πλοίων, προέκυψε από την αδυναμία των παραδοσιακών εμπειρικών μεθόδων να προβλέψουν με ακρίβεια αυτά τα χαρακτηριστικά στη φυσική κλίμακα (full scale), χρησιμοποιώντας αποτελέσματα πειραμάτων που γίνονται σε κλίμακα προτύπου (model scale). Είναι γνωστό π.χ. ότι η μέθοδος Froude που εφαρμόζεται για την εκτίμηση της αντίστασης σε κλίμακα πραγματικού πλοίου οδηγεί πολλές φορές σε σημαντική υπερεκτίμηση της απαιτούμενης ισχύος πρόωσης, ενώ η μέθοδος των συντελεστών μορφής (form factor) σε, σχεδόν, συστηματική υποεκτίμησή της.



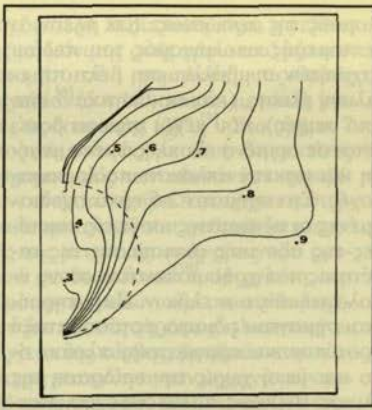
Σχήμα 1: Σύγκριση υπολογιστικών και εμπειρικών μεθόδων για αξονοσυμμετρικό σώμα.

Η αβεβαιότητα των σχετικών εκτιμήσεων στις περιπτώσεις των μεγάλων πλοίων μπορεί να είναι της τάξεως του 20%, με άμεσες επιπτώσεις στο κόστος εγκατάστασης των μηχανών και της λειτουργίας τους.

Από την άλλη πλευρά η αριθμητική πρόγνωση του πεδίου ροής γύρω από ένα πλοίο που κινείται με σταθερή ταχύτητα αποτελεί ένα από τα πολυπλοκότερα προβλήματα της υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Η δημιουργία κυματισμών, η μη μόνιμη τοπικά δράση της

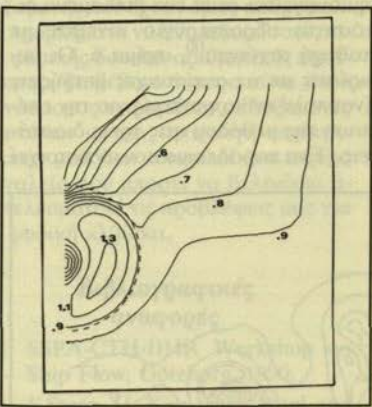
έλικας και οι υψηλοί αριθμοί Reynolds της φυσικής κλίμακας που χαρακτηρίζονται από πλήρως τυρβώδη ροή, συνιστούν τους σημαντικότερους παράγοντες δυσκολιών που πρέπει να αντιμετωπίσει μια αριθμητική μέθοδος. Παρ' όλο που τα φαινόμενα αυτά διέπονται από τις γνωστές εξισώσεις Navier-Stokes, που δεχόμαστε ότι περιγράφουν τη δυναμική των ρευστών, είναι αδύνατο ακόμη και με τους υπάρχοντες υπερυπολογιστές να επιτευχθεί πλήρης αριθμητική τους επίλυση.

Ο Γ. Δ. Τζαμπίρας είναι Αναπλ. Καθ. του Τμ. Ναυπηγών Μηχ/γων Μηχανικών ΕΜΠ.



Σχήμα 2: Ισοϋψείς της ταχύτητας χωρίς τη λειτουργία της έλικας (πρότυπο).

Σε αντίθεση όμως με τη δυσκολία της αντιμετώπισης του πραγματικού προβλήματος, εκτεταμένες αριθμητικές εφαρμογές και συγκρίσεις των αποτελεσμάτων με αντίστοιχα πειράματα δεδομένα έχουν δείξει ότι ορισμένα απλοποιημένα θεωρητικά μοντέλα μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις των πρακτικών εφαρμογών. Δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η εφαρμογή των μοντέλων τύρβης^[1], που εισάγονται για να περιγράψουν τη μέση κατάσταση της ροής υιοθετώντας απλοποιήσεις σχετικά με τη συμπεριφορά του ρευστού στις μικρές κλίμακες, καθώς και η προσομοίωση της δράσης της έλικας με απλά μοντέλα δίσκου ορμής^[2]. Ενώ και στις δύο περιπτώσεις το πρότυπο είναι σημαντικά απλοποιημένο σε σχέση με το φυσικό φαινόμενο, τα αποτελέσματα των υπολογισμών εί-

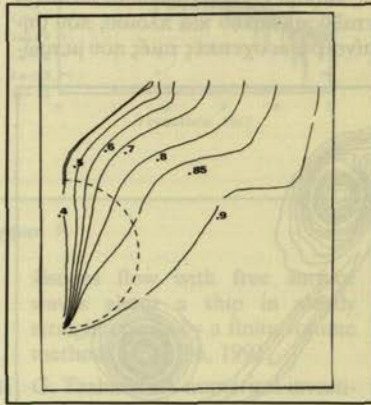


Σχήμα 4: Ισοϋψείς της ταχύτητας με λειτουργία της έλικας (πρότυπο).

να πολύ ενθαρρυντικά ιδίως όταν μας ενδιαφέρουν ορισμένα γενικά υδροδυναμικά χαρακτηριστικά που έχουν άμεση σχέση με τη διαδικασία επιλογής

της έλικας και της προωστήτριας εγκατάστασης.

Η σημερινή εξέλιξη δείχνει ότι αρκετές ερευνητικές ομάδες έχουν ξεπεράσει τα πρώτα στάδια των δυσκολιών που αφορούν στον υπολογισμό του τυρβώδους πεδίου ροής γύρω από γάστρες πλοίων όταν αγνοηθεί (σε πρώτη προσέγγιση) ο σχηματισμός των κυματισμών που προκαλεί.^[1] Οι ερευνητικές προσπάθειες στρέφονται πλέον στην αριθμητική επίλυση του προβλήματος της ελεύθερης επιφάνειας (κυματισμών) σε συνδυασμό με την ύπαρξη της τυρβώδους ροής γύρω από ένα επιπλέον σώμα. Δεν είναι του παρόντος να αναλύσουμε τις μαθηματικές δυσκολίες της αντιμετώπισης αυτών

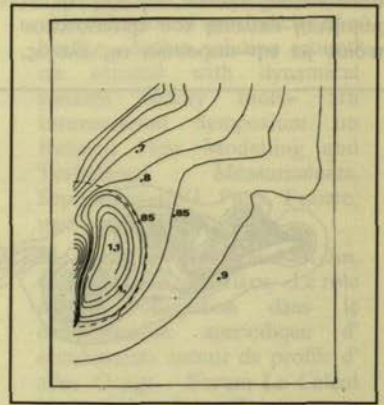


Σχήμα 3: Ισοϋψείς της ταχύτητας χωρίς τη λειτουργία της έλικας (πλοίο).

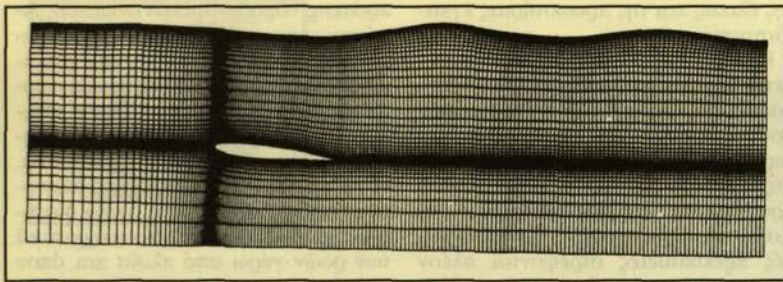
των προβλημάτων, αλλά πρέπει να σημειωθεί ότι η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς είναι σημαντικά πολλαπλάσια σε σχέση με όλες τις περιπτώσεις που έχουν μελετηθεί μέχρι σήμερα. Παρόλα αυτά έχουν ήδη δοθεί ορισμένες αριθμητικές λύσεις^[3] με πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα σχετικά με τη μορφή των δημιουργούμενων κυματισμών σε κλίμακα προτύπου. Οι λύσεις αυτές δεν είναι ακόμα ακριβείς (κυρίως λόγω των αραιών αριθμητικών πλεγμάτων που επιτρέπουν οι δυνατότητες των υπολογιστών), αλλά παρέχουν πολύ σημαντικές πληροφορίες που αφορούν τις διαδικασίες σύγκλισης των αλγορίθμων. Δεν είναι τυχαίο ότι πολλοί αισιόδοξοι ερευνητές εκφράζουν την άποψη ότι η πειραματική δεξιαμενή θα αντικατασταθεί από την «αριθμητική» (numerical towing tank).

Στο τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων του Ε.Μ.Π. έχει αρχίσει από το 1980 ένα ερευνητικό πρόγραμμα που έχει σκοπό την ανάπτυξη αριθμητικών μοντέλων και κωδίκων Η/Υ για την επίλυση προβλημάτων αντίστασης και

πρόωσης υδροδυναμικών σωμάτων. Από την εφαρμογή των μεθόδων που αναπτύχθηκαν, προέκυψαν πολύ χρήσιμα συμπεράσματα κυρίως σε ό,τι αφορά τη συμπεριφορά τους στους υψηλούς αριθμούς Reynolds που χαρακτηρίζουν τις ροές στη φυσική κλίμακα. Η μελέτη π.χ. ροών γύρω από αξονοσυμμετρικά σώματα, στα οποία διατηρούνται πολλά από τα χαρακτηριστικά των ροών γύρω από πλοία και όπου επί πλέον μπορούμε να επιτύχουμε ακριβείς αριθμητικές λύσεις με μικρό υπολογιστικό κόστος, έδειξε κατ' αρχήν ότι οι μέθοδοι προεκβολής Froude ή συντελεστών μορφής αποτυγχάνουν στις περισσότερες περιπτώσεις να δώσουν ικανοποιητικές προβλέψεις^[4]. Στο σχήμα 1 φαίνονται οι συγκρίσεις μεταξύ των υπολογισμών και των δύο εμπειρικών μεθόδων για ένα αξονοσυμμετρικό σώμα με λόγο διαμέτρου-μήκους 1:6, υπό τη μορφή του αδιάστατου συντελεστή ολικής αντίστασης C_T . Αν θεωρήσουμε ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα στο χαμηλό αριθμό Reynolds 10^6 συνιστούν ένα «πείραμα», τότε χρησιμοποιώντας τις υποθέσεις των δύο μεθόδων προεκβολής μπορούμε να σχεδιάσουμε τις δύο διακεκομμένες καμπύλες του σχήματος (Froude, form factor) σε όλη την περιοχή των αριθμών Reynolds που μας ενδιαφέρουν. Είναι εύκολο να παρατηρήσουμε ότι τα αποτελέσματα των υπολογισμών, που αντιστοιχούν στην «πραγματική» κατάσταση, σε αριθμούς Re^{10^7} , 10^8 και 10^9 , βρίσκονται μεταξύ των δύο παραπάνω καμπυλών και οι σχετικές διαφορές μεγαλώνουν με την αύξηση της κλίμακας. Από ανάλογα αριθμητικά πειράματα σε μεγάλα tankers^[5], στα οποία η αντίσταση κυματισμού είναι δευτερεύουσας σημασίας, προέκυψαν



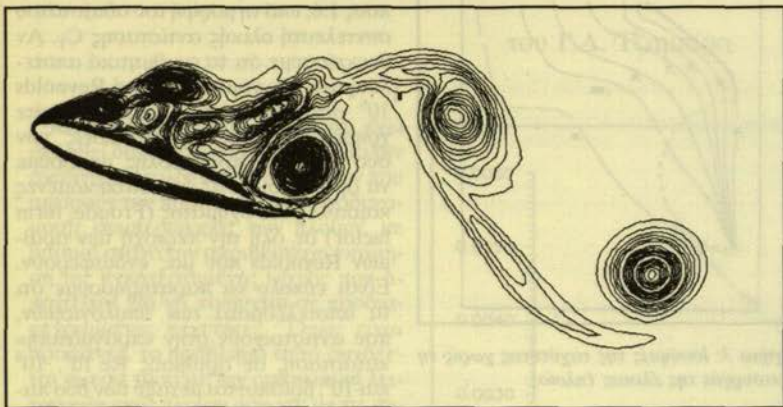
Σχήμα 5: Ισοϋψείς της ταχύτητας με λειτουργία της έλικας (πλοίο).



Σχήμα 6: Σχηματισμός κυμάτων πάνω από υδροπτερόγιο.

παρόμοια αποτελέσματα. Οι διαφορές μεταξύ των αριθμητικών υπολογισμών και των εμπειρικών εκτιμήσεων βρέθηκε ότι μπορεί να είναι της τάξεως του 20%, που είναι σημαντικό σφάλμα αν λάβουμε υπόψη μας ότι οι ισχείς προώσεως σε τέτοια πλοία κυμαίνου-

προέκυψαν επίσης πολύ ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Σαν παράδειγμα αναφέρουμε ότι το ποσοστό αύξησης της αντίστασης λόγω της δράσης της έλικας παραμένει αξιοσημείωτα σταθερό μεταξύ προτύπου και πλοίου, που σημαίνει ότι οι σχετικές τιμές που μετρώ-

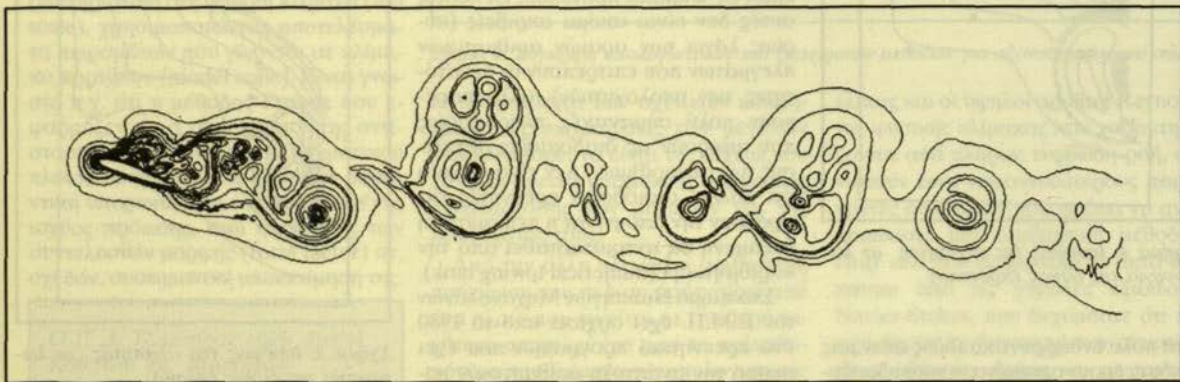


Σχήμα 7: Στιγμαίος σχηματισμός στροβίλων σε αεροτομή.

νται γύρω στις 50.000 PS.

Από την προσομοίωση του προβλήματος της αυτοπρόωσης στους παραπάνω τύπους πλοίων, δηλαδή την αριθμητική επίλυση του τριδιάστατου πεδίου με την παρουσία της έλικας,

νται σε μια δεξαμενή προτύπων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τους υπολογισμούς στη φυσική κλίμακα. Αντίστοιχα αποτελέσματα διαπιστώθηκαν και για άλλα χαρακτηριστικά μεγέθη που υπεισέρχονται στους υπολο-



Σχήμα 8: Ρυθμός μετατροπής κινητικής ενέργειας σε θερμότητα.

γισμούς της προώσεως. Επί πλέον, ο λεπτομερής υπολογισμός του πεδίου ταχυτήτων συμβάλλει στη βέλτιστη επιλογή έλικας, (είτε αριθμητικά^[6] είτε από σειρές), που μέχρι σήμερα βασίζεται σε ορισμένα ολοκληρωμένα μεγέθη και αρκετά απλουστευτικές παραδοχές. Στα σχήματα 2-5 είναι σχεδιασμένες οι αδιάστατες ισοϋψείς καμπύλες της αξονικής συνιστώσας της ταχύτητας που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς των ελίκων. Παρατηρούνται σημαντικές διαφορές τόσο μεταξύ προτύπου και πραγματικού πλοίου, όσο και με ή χωρίς την επίδραση της έλικας. Βεβαίως, πρέπει να έχουμε κατά νου ότι η αριθμητική λύση είναι μία απλούστευση του αντίστοιχου πολύπλοκου φυσικού φαινομένου. Γι' αυτό το λόγο, η αξιοπιστία των μεθόδων που χρησιμοποιούμε έχει προηγουμένως ελεγχθεί συγκρίνοντας υπολογιστικά και πειραματικά αποτελέσματα, που είναι εφικτά μόνο σε κλίμακες προτύπων. Το πρόβλημα, τέλος, της ελεύθερης επιφάνειας αντιμετωπίζεται με συνδυασμό πειραματικών μετρήσεων των κυματισμών και εφαρμογή υπολογιστικών μεθόδων^[7].

Παράλληλα με τη μελέτη των προβλημάτων που ενδιαφέρουν άμεσα πρακτικές εφαρμογές, αναπτύσσονται στο Τμήμα Ναυπηγών και ερευνητικές δραστηριότητες που αναφέρονται είτε στη βελτίωση των ήδη υπάρχουσών αριθμητικών μεθόδων, είτε στη διερεύνηση βασικών ρευστομηχανικών προβλημάτων. Στην πρώτη περίπτωση αναφέρεται ως παράδειγμα η αριθμητική προσομοίωση του κυματισμού που δημιουργείται όταν ένα βυθισμένο διδιάστατο υδροπτερόγιο κινείται με σταθερή ταχύτητα^[8], σχήμα 6. Οι συγκρίσεις με τις αντίστοιχες μετρήσεις είναι πολύ ενθαρρυντικές για την επέκταση της μεθόδου στις τρεις διαστάσεις. Ένα παράδειγμα που αντιστοιχεί

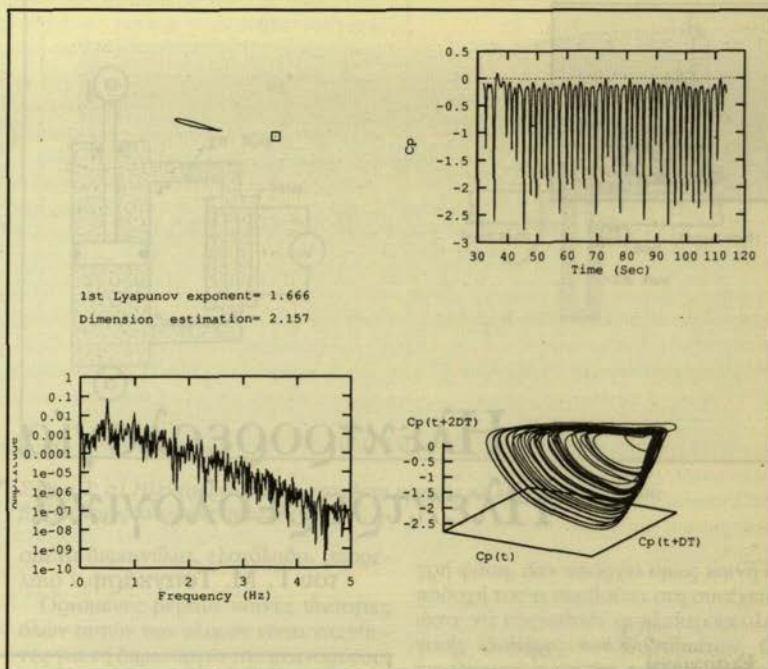
στη δεύτερη περίπτωση είναι η μελέτη της μη μόνιμης ροής γύρω από μία αεροτομή σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds (5×10^3) και σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης (20°)^[9]. Στο σχήμα 7 μπορούμε να δούμε τους στιγμιαίους σχηματισμούς των οδοντών στροβίλων, ενώ στο σχήμα 8 φαίνεται η στιγμιαία κατανομή του ρυθμού μετατροπής της κινητικής ενέργειας του ρευστού σε θερμότητα^[10]. Η μελέτη παρόμοιων μεγεθών, άμεσα συνδεδεμένων με ποσότητες όπως η κινητική ενέργεια της τύρβης, βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών μετάβασης της ροής από στρωτή σε τυρβώδη, και πιθανόν σε καλύτερη μοντελοποίηση ροών υψηλών αριθμών Reynolds. Για τη μελέτη της κατανομής των μηχανισμών ασταθείας σε τέτοιου είδους ροές, αλλά και της εξέλιξής τους με την αλλαγή του αριθμού Reynolds, γίνεται εκτεταμένη εφαρμογή μεθόδων της θεωρίας δυναμικών συστημάτων^[11] που είναι χρήσιμες για την ανάλυση των μηχανισμών που παράγουν χάος, σχήμα 9. Τέτοιου τύπου μελέτες έχουν τεράστιες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, γι' αυτό μεγάλο μέρος των υπολογισμών έχουν γίνει σε υπερυπολογιστές τύπου CRAY^[12].

Με τη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών, διαφαίνεται ότι μέσα στην επόμενη πενταετία θα είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε αν οι υπολογιστικές μέθοδοι μπορούν πράγματι να υποκαταστήσουν τα πειράματα σε θέματα πρόωσης συμβατικών πλοίων.

Σ' αυτή την περίπτωση θα δικαιωθούν οι θιασώτες της «αριθμητικής» δεξαμενής που έχουν όμως ακόμη πολλά προβλήματα να αντιμετωπίσουν, τόσο φυσικής όσο και αριθμητικής προέλευσης. Το βέβαιο σήμερα είναι ότι ο συνδυασμός πειραμάτων σε δεξαμενές προτύπων με την εφαρμογή υπολογιστικών μεθόδων αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο που μπορεί να βελτιώσει αποτελεσματικά τις προβλέψεις μας για τη φυσική κλίμακα.

Βιβλιογραφικές αναφορές

[1] SSPA-CTH-IIHR Workshop on Ship Flow, Göteborg, 1990.
 [2] F.Stern, H. Kim, V.C. Patel and H.C.Chen «A viscous flow approach to the computation of propeller-hull interaction», JSR, 32, 1988.
 [3] H., Miyata, M. Zhu and O. Watanabe «Numerical study on



Σχήμα 9.

viscous flow with free surface waves about a ship in steady straight course by a finite volume method», JSR, 36, 1992.

[4] G. Tzabiras «A numerical investigation of the Reynolds scale effect on the resistance of bodies of revolution», Ship Tech. Research, 39, 1992.
 [5] G. Tzabiras «Resistance and self-propulsion numerical experiments on two tankers at model and full scale» Ship Tech. Research, 40, 1993.
 [6] G. Politis and K. Belibasakis «Application of panel methods in linearized lifting surface propeller performance problem», 5th IMAEM Congress, 1990.
 [7] G. Tzabiras, T. Loukakis, D. Garofallidis «On the numerical solution of the total ship resistance problem under a predetermined free surface», 19th ONR Symp., Ann Arbor, 1990.
 [8] G. Tzabiras, Y. Ventikos «Calculation of the wave pattern generated by a 2D Hydrofoil. A Navier - Stokes approach» 1st Int. Conf. on Math. and Num. Aspects of Wave Propagation Phenomena, Strasbourg, France, 1991.

[9] Y. Ventikos, G. Tzabiras, M. Braza, «On the calculation of the intrinsic unsteadiness past an aerofoil», Third National Conference on Mechanics E.E. Th. E. M. (HSTAM, IUTAM member), 1991, Athens, Greece.
 [10] Y. Ventikos, G. Tzabiras, M. Braza, «The effect of viscous dissipation on the organized structures in the wake past an aerofoil in transition to turbulence», 9th Int. Symp. on Turbulent Shear Flows, August, 1993, Kyoto, Japan to appear.
 [11] Y. Ventikos, G. Tzabiras, M. Braza, «Identification of aperiodicity of a Navier - Stokes solution around on aerofoil with dynamical systems theory tools» 5th International Symposium on Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements, September 1993, Paris, France, υπό δημοσίευση.
 [12] M. Braza, G. Desregaud G. Jin, G. Tzabiras, Y. Ventikos, «Le role de la dissipation dans le comportement aperiodique d'écoulements autour de profils d'aile» Congr. - Forum Le Calcul Numerique Intensif pour la Science, Palaiseau, France, June 1993, υπό δημοσίευση.