

ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΑ ΠΑΛΛΟΜΕΝΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΩΣ ΒΙΟΜΙΜΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗ ΠΡΩΣΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΣΕ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ

Ε.Σ. Φίλιππας, Υπ. Διδάκτορας, evfilip@central.ntua.gr
Κ.Α. Μπελιμπασάκης, Καθηγητής, kbel@fluid.mech.ntua.gr
Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

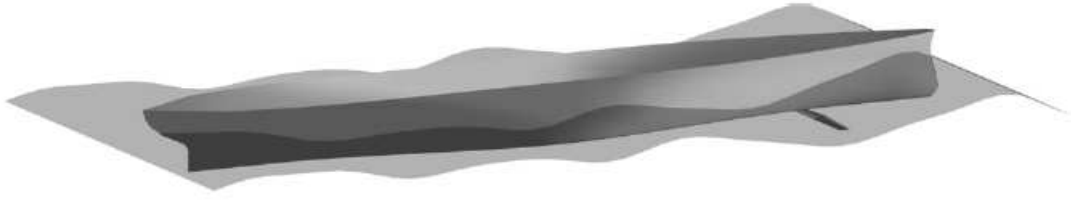
ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Βιομιμητικά συστήματα τύπου παλλόμενων πτερυγίων τοποθετημένα στη γάστρα του πλοίου εξετάζονται ως μη μόνιμοι προωστήρες, για τη υποβοήθηση της πρόωσης του πλοίου σε κυματισμούς. Η κύρια διάταξη αποτελείται από οριζόντιο πτερύγιο που κινείται με τη σταθερή πρόσω ταχύτητα του πλοίου και παράλληλα εκτελεί κατακόρυφη ταλαντωτική κίνηση, λόγω της κατακόρυφης ταλάντωσης και του προνευτασμού του πλοίου σε κυματισμούς, ενώ η ίδια περιστροφική ταλάντωση του πτερυγίου γύρω από τον άξονά του ελέγχεται ενεργητικά. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένα υπολογιστικό υδροδυναμικό μοντέλο για τη προσομοίωση του ανωτέρω συστήματος, με τις επιδράσεις της ελεύθερης επιφάνειας σε ήρεμο νερό, καθώς και σε περιοδικούς προσπίπτοντες κυματισμούς. Για την αποδοτική υλοποίηση της αριθμητικής μεθοδολογίας αναπτύσσεται υπολογιστικός κώδικας, αξιοποιώντας τεχνολογίες παράλληλου προγραμματισμού σε κάρτα γραφικών (General-Purpose Computing on Graphics Processing Units - GPGPU), χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού CUDA C/C++. Παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα σχετικά με τον συντελεστή ώσης και λεπτομερή χαρακτηριστικά του πεδίου ροής, από όπου διαφαίνεται ότι μπορεί να επιτευχθεί σημαντική απόδοση. Η παρούσα μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό και τον έλεγχο βιομιμητικών συστημάτων για την εκμετάλλευση της ενέργειας των κυματισμών με σκοπό την υποβοήθηση της πρόωσης πλοίων, με ταυτόχρονη βελτίωση της δυναμικής τους ευστάθειας.

Λέξεις Κλειδιά: παλλόμενα πτερύγια, υποβοήθηση πρόωσης πλοίου σε κυματισμούς, μέθοδος συνοριακών στοιχείων, παράλληλος προγραμματισμός, GPU

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η στροφή σε φιλικότερες προς το περιβάλλον μεταφορές, έχει αναγνωριστεί ως ένας πολύ σημαντικός παράγοντας σχετικά με την εξοικονόμηση ενέργειας και την κλιματική αλλαγή. Αναλογιζόμενοι τη σημαντική συμβολή των εμπορικών πλοίων στην παγκόσμια ρύπανση, βλ. π.χ. Colvile et al (2001), Flannery (2005), η βελτιστοποίηση της προωστήριας απόδοσης των πλοίων σε ρεαλιστικές συνθήκες πλεύσης είναι κρίσιμης σημασίας. Από την άλλη πλευρά, η εξέλιξη των θαλάσσιων οργανισμών έχει καταδείξει ότι τα ταλαντούμενα πτερύγια μπορεί να λειτουργήσουν αποδοτικά ως βιομιμητικό σύστημα πρόωσης. Επιπρόσθετα, η πειραματική και θεωρητική έρευνα, σχετικά με τα συγκεκριμένα συστήματα, έχει δείξει ότι, κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες, αποδίδουν σημαντικά επίπεδα ώσης και μεγάλο βαθμό απόδοσης, βλ. π.χ., Triantafyllou et al (2004), Taylor et al (2010).



Σχήμα 1. Γάστρα πλοίου με παλλόμενο πτερύγιο κάτω από την τρόπιδα, σε πρωραίο σταθμό.

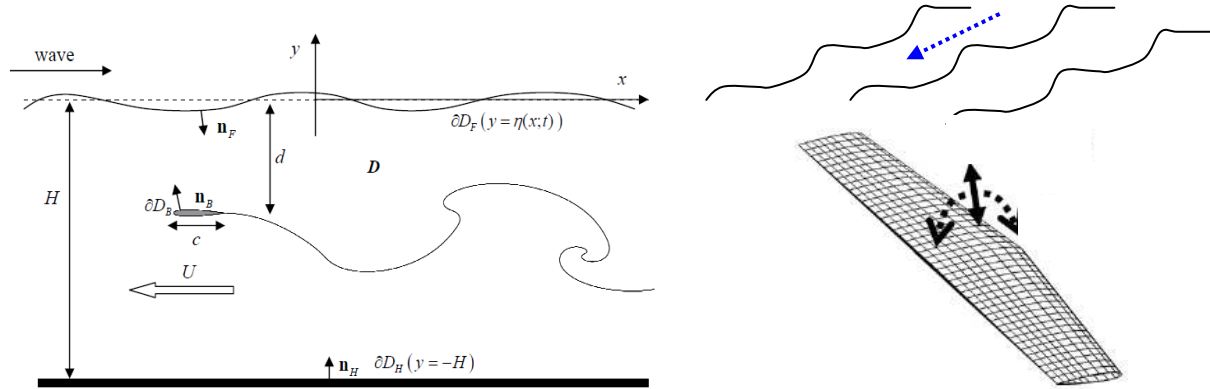
Σε πραγματικές συνθήκες πλεύσης το πλοίο υποβάλλεται σε ταλαντωτικές κινήσεις λόγω των κυματισμών και οι κατακόρυφες κινήσεις του θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την ίδια κατακόρυφη κίνηση του πτερυγίου-προωστήρα, η οποία είναι και η περισσότερο ενεργοβόρα, χωρίς κόστος, ενώ η περιστροφική κίνηση του πτερυγίου μπορεί να ελεγχθεί κατάλληλα. Οι αρχικές προσπάθειες σε αυτή την κατεύθυνση επικεντρώθηκαν σε παθητικά συστήματα πτερυγίων κάτω από τη γάστρα του πλοίου, για την μετατροπή μέρους της ενέργειας των κινήσεων του πλοίου σε πρόωση, με ταυτόχρονη μείωση των αποκρίσεων. Εκτενής επισκόπηση στα βιομημητικά συστήματα πρόωσης υπάρχει στην εργασία Rozhdestvensky & Ryzhov (2003). Αποτελέσματα μοντελοποίησης ταλαντούμενων υδροτομών κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια και σε κυματισμούς παρουσιάζονται σε διάφορες εργασίες, όπως Zhu et al (2006), De Silva & Yamaguchi (2012) και Xu et al (2017). Στην τελευταία παρουσιάστηκαν αποτελέσματα για υδροτομές σε κυματισμούς Stokes πέμπτης τάξης. Εργαζόμενοι στην παραπάνω κατεύθυνση, οι Belibassakis & Politis (2013) προχώρησαν στην μελέτη της σύζευξης του ταλαντωτικού προωστήρα με τις εξισώσεις της δυναμικής του πλοίου, με παράλληλη χρήση ενεργητικού συστήματος ρύθμισης της περιστροφικής κίνησης του πτερυγίου, η οποία βασίζεται στη κατακορυση ταχύτητα του πλοίου (βλ. επίσης Politis & Politis 2014).

Όπως φαίνεται στο Σχ. 1, το πτερύγιο εκτελεί συνδυασμένη μεταφορική και περιστροφική ταλάντωση, ενώ το πλοίο κινείται με σταθερή πρόσω ταχύτητα σε κυματισμούς. Εξετάζεται τόσο η περίπτωση απλών όσο και σύνθετων κυματισμών, οι οποίοι περιγράφονται από κατευθυντικό φάσμα. Στην τελευταία περίπτωση η κατακόρυφη κίνηση του πτερυγίου επάγεται από την τυχαία κίνηση του πλοίου λόγω των κυματισμών, και πιο συγκεκριμένα από την κατακόρυφη ταλάντωση (heave) και την προνευτασμό (pitch) του πλοίου, στο σταθμό όπου το πτερύγιο είναι τοποθετημένο. Η περιστροφική κίνηση του πτερυγίου ελέγχεται με βάση τη χρονική ιστορία της κατακόρυφης του ταλάντωσης (η οποία είναι εύκολο να μετρηθεί) και παρέχεται με πολύ χαμηλό κόστος από εξωτερικό μηχανισμό. Τα αριθμητικά αποτελέσματα κατέδειξαν ότι σημαντικά επίπεδα ώσης και βελτίωση της ευστάθειας του πλοίου μπορούν να επιτευχθούν σε ρεαλιστικές καταστάσεις θάλασσας, με χρήση κατάλληλου κανόνα ελέγχου. Λεπτομερέστερη διερεύνηση των επιδράσεων της ελεύθερης επιφάνειας και των κυματισμών παρουσιάζεται στην εργασία Filippas & Belibassakis (2014) και η επέκτασή της σε πολυχρωματικούς κυματισμούς παρουσιάζεται από τους Belibassakis & Filippas (2015).

Η παρούσα εργασία εστιάζει στη λεπτομερή διερεύνηση των επιδράσεων ελεύθερης επιφάνειας και τρισδιάστατων περιοδικών κυματισμών υπό γωνία πρόσπτωσης, καθώς και στις επιδράσεις του λόγου επιμήκους και του σχήματος των πτερυγίων στη λειτουργία του συστήματος. Επεκτείνεται η μέθοδος που παρουσιάστηκε από τους Filippas & Belibassakis (2014) στις τρεις διαστάσεις. Για την αποδοτική υλοποίηση της αριθμητικής μεθοδολογίας αναπτύσσεται υπολογιστικός κώδικας, αξιοποιώντας τεχνολογίες παράλληλου προγραμματισμού σε κάρτα γραφικών (General-Purpose Computing on Graphics Processing Units - GPGPU), χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού CUDA C/C++. Η μέθοδος εφαρμόζεται στην υδροδυναμική ανάλυση τρισδιάστατων πτερυγίων που εκτελούν μη μόνιμη κίνηση κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας, σε ήρεμο νερό και σε προσπίπτοντες αρμονικούς κυματισμούς που διαδίδονται υπό γωνία ως προς την διεύθυνση κίνησης του πλοίου, και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με πειράματικές μετρήσεις και άλλες μεθόδους. Καταδεικνύεται ότι οι επιδράσεις της ελεύθερης επιφάνειας και των κυματισμών, καθώς και τα τρισδιάστατα φαινόμενα είναι σημαντικά σε αρκετές καταστάσεις λειτουργίας, και ότι ικανοποιητικά επίπεδα ώσης μπορούν να επιτευχθούν ακόμα και όταν το πτερύγιο-προωστήρας επιχειρεί σε πλευρικούς κυματισμούς.

2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Αμελώντας σε πρώτη προσέγγιση την επίδραση της γάστρας του πλοίου στη ροή γύρω από το πτερύγιο, η μελετώμενη διάταξη εικονίζεται στο Σχ. 2. Το πρόβλημα εξετάζεται στο πεδίο του χρόνου και το ταλαντούμενο πτερύγιο αναπαρίσταται από κινούμενο σύνορο $\partial D_B(t)$ ως προς το ακίνητο σύστημα αναφοράς. Στις περιπτώσεις όπου το πλάτος των θαλάσσιων κυματισμών θεωρείται μικρό σε σύγκριση με το μήκος κύματος επιτρέπεται ως πρώτη προσέγγιση η γραμμικοποίηση των συνθηκών ελεύθερης επιφάνειας στη μέση στάθμη ανύψωσής της (η οποία εικονίζεται στο Σχ. 2 με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 2. Ταλαντούμενη πτέρυγα σε λειτουργία προωστήρα σε πεδίο κυματισμών.

Το συνολικό δυναμικό $\Phi_T(\mathbf{x};t)$ αποτελείται από το γνωστό κυματικό δυναμικό $\Phi_I(\mathbf{x};t)$ και το πεδίο διαταραχής $\Phi(\mathbf{x};t)$ που ικανοποιεί την εξίσωση Laplace σε κάθε χρονικό βήμα, τη συνθήκη μη εισχώρησης στο σώμα

$$\frac{\partial \Phi_B(\mathbf{x};t)}{\partial n_B} = b, \quad b = -\frac{\partial \Phi_I(\mathbf{x};t)}{\partial n_B} + \mathbf{V}_B \cdot \mathbf{n}_B, \quad \mathbf{x} \in \partial D_B, \quad (1)$$

και την αντίστοιχη ομογενή συνθήκη στον πυθμένα. Στην παραπάνω σχέση \mathbf{n} είναι το μοναδιαίο κάθετο (στο σύνορο) διάνυσμα με διεύθυνση προς το εσωτερικό του χωρίου $D \subseteq \mathbb{R}^3$ και $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, x_3\}$. Επιπρόσθετα, θεωρούνται οι συνθήκες ελεύθερης επιφάνειας (δυναμική και κινηματική), οι οποίες στη περίπτωση του γραμμικοποιημένου προβλήματος ικανοποιούνται στη μέση στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας.

Περαιτέρω, στην περίπτωση ροής γύρω από ανωστικά σώματα το πρόβλημα συνοδεύεται από τις συνθήκες των ακολουθούντων φύλλων στροβιλότητας των πτερυγίων (κινηματική και δυναμική) που εξασφαλίζουν ότι η πίεση και η κάθετη ταχύτητα είναι συνεχείς διαμέσου αυτών. Επιπρόσθετα, η ικανοποίηση συνθήκης τύπου Kutta είναι απαραίτητη, προκειμένου να ορισθεί η κυκλοφορία γύρω από το πτερύγιο σε κάθε χρονική στιγμή. Στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται μη γραμμική συνθήκη Kutta τύπου πίεσης, η οποία εξασφαλίζει σε κάθε χρονικό βήμα μηδενική διαφορά πίεσης στο χείλος εκφυγής. Περισσότερες λεπτομέρειες για τη συνθήκη Kutta και το μοντέλο ομμόρου των πτερυγίων στις δύο διαστάσεις υπάρχουν στην εργασία Filippas & Belibassakis (2014), και η επέκταση στο μη γραμμικό πρόβλημα στις τρεις διαστάσεις και σε μη γραμμικούς κυματισμούς ανώτερης τάξης παρουσιάζεται λεπτομερώς στην εργασία Φίλιππας (2018, διδακτορική εργασία υπό εκπόνηση). Στην περίπτωση κυματισμών μικρού πλάτους, ο υπό γωνία διαδιδόμενος αρμονικός κυματισμός, όσον αφορά την ανύψωση και το δυναμικό, είναι ως ακολούθως

$$\eta(\mathbf{x}_F; t) = \eta_0 \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}_F - \omega_1 t), \quad \text{και} \quad \Phi_I(\mathbf{x}_F; t) = \frac{g\eta_0}{\omega_1} \frac{\cosh(k(x_3 + H))}{\cosh(kH)} \sin(k\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}_F - \omega_1 t), \quad (2)$$

όπου η_0 είναι το πλάτος του κυματισμού, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, $\omega_l^2 = kg \tanh(kH)$ είναι η απόλυτη συχνότητα, ενώ η συχνότητα συνάντησης είναι $\omega_0 = \omega_l + kU \cos \beta$, όπου k ο κυματαριθμός, β η γωνία πρόσπτωσης των κυματισμών, $\mathbf{k} = (k \cos \beta, k \sin \beta)$ ο διανυσματικός κυματαριθμός και $\mathbf{x}_F = (x_1, x_2)$. Οι ανωτέρω αναπαραστάσεις τροποποιούνται κατάλληλα για πολυχρωματικά-πολυκατευθυντικά συστήματα κυματισμών και για μη γραμμικά κύματα.

Εφαρμόζοντας στο πρόβλημά μας το θεώρημα αναπαράστασης του δυναμικού οδηγούμαστε ένα σύστημα δύο συνοριακών ολοκληρωτικών εξισώσεων, μία για το άγνωστο δυναμικό στο σώμα Φ_B και μία για το δυναμικό στην ελεύθερη επιφάνεια Φ_F . Χρησιμοποιείται η συνάρτηση Green που αποτελείται από τη θεμελιώδη λύση της εξίσωσης Laplace που αντιστοιχεί σε πηγή Rankine και μία κατοπτρική ως προς το σύνορο του οριζώντιου πυθμένα. Με το τρόπο αυτό η συνοριακή συνθήκη πυθμένα ικανοποιείται αυτόματα. Το θεώρημα αναπαράστασης συμπεριλαμβάνει τη συνεισφορά του ομόρρου ∂D_w και κατ'αυτόν τον τρόπο εισάγονται φαινόμενα μνήμης στο μοντέλο. Επιπρόσθετα φαινόμενα μνήμης εμφανίζονται λόγω της περίθλασης και της ακτινοβολίας κυματικών διαταραχών από την ταλαντούμενη υδροτομή. Τέλος, η συνεισφορά το προσπίπτοντος κυματικού πεδίου συμπεριλαμβάνεται στο ολοκλήρωμα στο κινούμενο-ταλαντούμενο σώμα, με χρήση της συνοριακής συνθήκης στερεού συνόρου τύπου Neumann, εξίσωση (1).

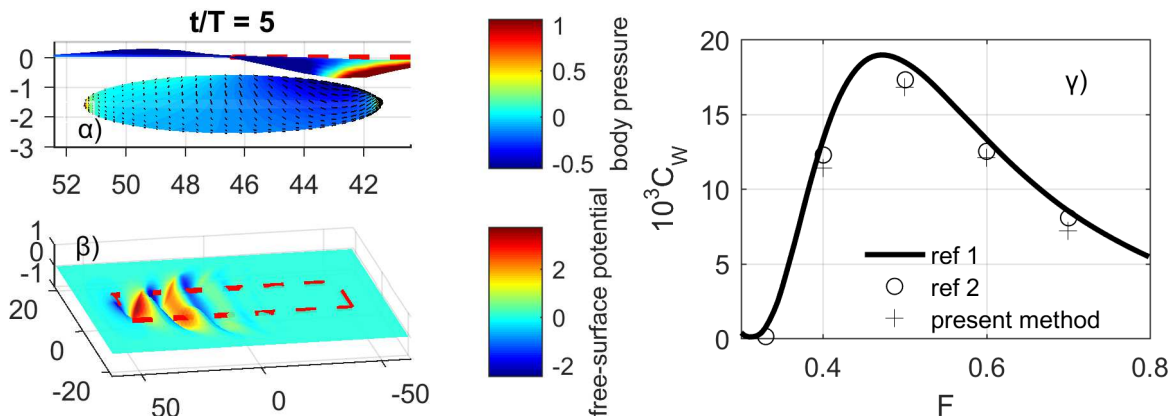
Η διακριτοποίηση βασίζεται σε χαμηλοτάξια μέθοδο συνοριακών στοιχείων, και οδηγεί στην κατασκευή του διακριτού τελεστή Dirichlet-to-Neumann (DtN), που υλοποιείται κάθε χρονική στιγμή στα πλαίσια των προσεγγίσεων που περιγράφονται στη συνέχεια: α) Το σύνορο του σώματος προσεγγίζεται από μία συλλογή N_B διγραμμικών συνοριακών στοιχείων, ενώ η ελεύθερη επιφάνεια, η λωρίδα Kutta (Politis, 2011) και ο ομόρρους του πτερυγίου προσεγγίζονται από N_F , N_K και $N_w(t)$ στοιχεία, αντιστοίχως, εξασφαλίζοντας συνέχεια γεωμετρίας. β) Το δυναμικό και η κάθετη παράγωγος, το άλμα του δυναμικού στον ομόρρο, καθώς και η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, σε κάθε χρονικό βήμα, προσεγγίζονται από κατά τμήματα σταθερές κατανομές. γ) Εφαρμόζεται ένα σχήμα ταξίθεσίας (collocation scheme) με σημεία ελέγχου τα κεντροειδή των συνοριακών στοιχείων.

Η μη γραμμική συνθήκη Kutta τύπου πίεσης μπορεί να γραφτεί σε διακριτοποιημένη μορφή όπως περιγράφεται αναλυτικά στην εργασία Filippas & Belibassakis (2014). Χρησιμοποιώντας το κατάλληλο τμήμα του τελεστή DtN, στη διακριτοποιημένη μορφή των εξισώσεων ελεύθερης επιφάνειας καθώς και τη διακριτή μορφή της συνθήκης Kutta, καταλήγουμε σε σύστημα συνήθων διαφορικών εξισώσεων που περιγράφει τη δυναμική του συστήματος της μορφής: $d\mathbf{U}/dt = \mathbf{f}(\mathbf{U})$, όπου $\mathbf{U} = [\Phi_F, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\mu}_K]^T$, και $\boldsymbol{\eta} = \{\eta_j\}$ είναι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στα σημεία ελέγχου, και με έντονη γραμματοσειρά συμβολίζονται τα διανύσματα που περιέχουν τα άγνωστα διακριτοποιημένα βαθμωτά πεδία. Η λεπτομερής διατύπωση της συνάρτησης \mathbf{f} στις δύο διαστάσεις υπάρχει στην εργασία Filippas & Belibassakis (2014) ενώ η επέκταση στις τρεις διαστάσεις, λαμβάνοντας υπόψη και τις μη γραμμικότητες, υπάρχει στην εργασία Φίλιππας (2018, διδακτορική εργασία υπό εκπόνηση). Το ανωτέρω σύστημα ολοκληρώνεται αριθμητικά προκειμένου να προβλεφτεί η χρονική εξέλιξη των δυναμικών μεταβλητών $\Phi_F, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\mu}_K$, με βάση τις γνωστές τιμές τους σε προηγούμενους χρόνους, και τη γνωστή ιστορία της έντασης διπόλων στον ομόρρο $\boldsymbol{\mu}_w$, και των δεδομένων πάνω στην επιφάνεια του σώματος $\mathbf{b} = -\partial\Phi_l / \partial n + \mathbf{V}_B \cdot \mathbf{n}_B$. Συγκεκριμένα, ξεκινώντας από δεδομένη αρχική κατάσταση, εφαρμόζεται η αριθμητική μέθοδος χρονικής ολοκλήρωσης για την απόκτηση της λύσης σε κάθε χρονική στιγμή. Μετά από σύγκριση διάφορων μεθόδων διαπιστώσαμε ότι το υψηλοτάξιο σχήμα Adams-Bashford-Moulton predictor-corrector παρέχει τον απαιτούμενο συνδυασμό ακρίβειας, ευστάθειας και απόδοσης. Για την αριθμητική απορρόφηση των κυματικών διαταραχών που φτάνουν στα άκρα του χωρίου, με ελάχιστη ανάκλαση, χρησιμοποιείται μοντέλο απορρόφησης τύπου Perfectly Matched Layer (PML). Αφού ολοκληρωθεί η επίλυση σε κάθε χρονικό βήμα, η πίεση υπολογίζεται με χρήση του θεωρήματος Bernoulli. Τέλος, οι δυνάμεις και οι ροπές υπολογίζονται με απευθείας ολοκλήρωση της πίεσης στο σύνορο του σώματος.

3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Παρουσιάζονται στην συνέχεια αποτελέσματα για μη ανωστικά σώματα (παράγραφοι 3.1 και 3.2) και ταλαντούμενα πτερύγια σε άπειρο ρευστό (παράγραφος 3.3), κάτω από την αρχικά αδιατάραχτη ελεύθερη επιφάνεια (παράγραφος 3.4) και σε κυματισμούς (παράγραφος 3.5). Η μελέτη των χαρακτηριστικών της μεθόδου και η επικύρωσή της στις δύο διαστάσεις έχει γίνει στην εργασία Filippas & Belibassakis (2014). Αναλυτικά η αριθμητική μελέτη, η επικύρωση της γραμμικοποιημένης και της μη γραμμικής εκδοχής της παρούσας μεθόδου, καθώς και πιο ενδελεχής υδροδυναμική μελέτη και παρουσίαση πρακτικών εφαρμογών, παρέχονται στην εργασία Φίλιππας (2018, διδακτορική εργασία υπό εκπόνηση).

3.1 Το πρόβλημα της αντίστασης κυματισμού βυθισμένου, μη ανωστικού σώματος



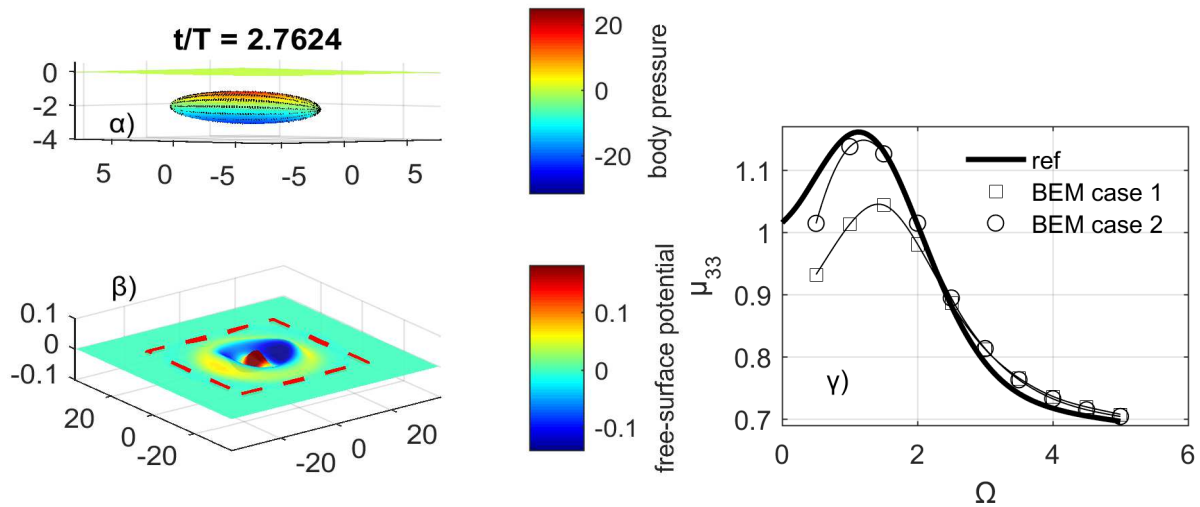
Σχήμα 3. Μελέτη της αντίστασης κυματισμού επιμήκους σφαιροειδούς: α) Πιέσεις και ταχύτητες στο σώμα, και δυναμικό και ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας. β) Συνολικό πεδίο στην ελεύθερη επιφάνεια. γ) Συντελεστής αντίστασης κυματισμού και συγκρίσεις με στοιχεία από τη βιβλιογραφία.

Στο Σχ.3 παρουσιάζονται αποτελέσματα για το πρόβλημα αντίστασης κυματισμού ενός επιμήκους σφαιροειδούς (prolate spheroid) με λόγο αξόνων 5:1:1, σε σταθερή πρόσω κίνηση σε βαθύ νερό που αντιστοιχεί σε αριθμό Froude $F = U / \sqrt{gL}$ στο διάστημα $[0.4, 0.7]$, όπου L είναι το μήκος του σώματος και U η ταχύτητα. Το σώμα βρίσκεται κάτω από την αρχικά αδιατάραχτη ελεύθερη επιφάνεια με τον διαμήκη άξονά του σε βύθιση $d = 0.16L$. Παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο της προσομοίωσης για $F = 0.5$ (Σχήματα 3αβ) καθώς και αποτελέσματα για το συντελεστή αντίστασης κυματισμού $C_w = R_w / 0.5\rho U^2 S_w$ (Σχήμα 3γ). Παρατηρούμε ότι επιτυγχάνεται ικανοποιητική συμφωνία με άλλες μεθόδους (βλ. π.χ. Belibassakis et al 2013, Σχ.11).

Για τη σύγκλιση της μεθόδου χρησιμοποιούνται δύο σύνολα παραμέτρων, το πρώτο στοχεύει στον υπολογισμό των κατανεμημένων μεγεθών και το δεύτερο στο υπολογισμό της αντίστασης κυματισμού. Το στιγμιότυπο είναι μετά από 5 περιόδους, που αντιστοιχούν στο παραγόμενο κύμα. Το χρονικό βήμα είναι στο 1% (4% στη δεύτερη περίπτωση) της περιόδου, στο σώμα και στην ελεύθερη επιφάνεια έχουμε 640 και 8100 (1472 στη δεύτερη περίπτωση) συνοριακά στοιχεία, αντιστοίχως. Για τον ακριβή υπολογισμό των πεδίων κοντά στους πόλους χρησιμοποιούνται υπολογισμοί διπλής ακρίβειας, αφήνοντας την υλοποίηση κώδικα μικτής ακρίβειας για το συγκεκριμένο πρόβλημα ως πρόταση για μελλοντική εργασία. Για το λόγο αυτό η υλοποίηση του αλγορίθμου στη συγκεκριμένη GPU η οποία χρησιμοποιήθηκε, η οποία είναι σχεδιασμένη για τη διαχείριση γραφικών και όχι για υπολογισμούς, η αναλογία υπολογιστικών μονάδων απλής προς διπλής ακρίβειας είναι 1:32, χαρακτηρίζεται από υψηλή πολυπλοκότητα χώρου (space complexity) και απαιτήθηκαν περίπου 3.2GB (αλλά μόνο 1.5GB στη δεύτερη περίπτωση) από τη VRAM, και σχετικά υψηλή πολυπλοκότητα χρόνου (time complexity) αφού ο χρόνος εκτέλεσης έφτασε τα 1174 δευτερόλεπτα (αλλά μόνο 31 δευτερόλεπτα στη δεύτερη περίπτωση). Σημειώνουμε ότι η απόδοση του GPU κώδικα είναι ουσιαστικά καλύτερη από αυτή που θα είχε αντίστοιχος σειριακός ή/και παράλληλος CPU

κώδικας BEM (ή κώδικας CFD), χρησιμοποιώντας πόρους αντίστοιχου κόστους με αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία.

3.2 Το πρόβλημα ακτινοβολίας βυθισμένου ταλαντούμενου, μη ανωστικού σώματος

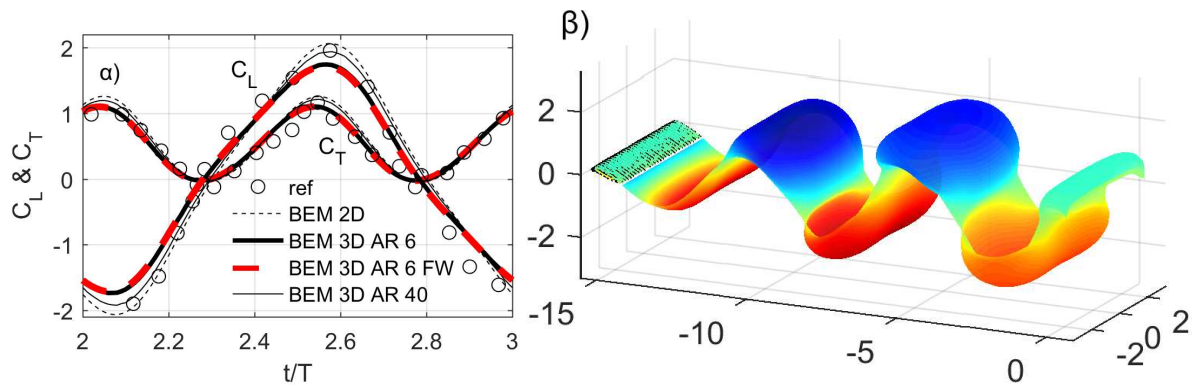


Σχήμα 4. Μελέτη προβλήματος ακτινοβολίας επιμήκους σφαιροειδούς: α) Πιέσεις και ταχύτητες στο σώμα, και δυναμικό και ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας. β) Συνολικό πεδίο στην ελεύθερη επιφάνεια. γ) Συγκρίσεις της παρούσας μεθόδου με στοιχεία από τη βιβλιογραφία όπου στην περίπτωση 1 έχουμε $N_F = 5400$ και στην περίπτωση 2 $N_F = 10000$.

Στο Σχ.4 παρουσιάζονται αποτελέσματα για το πρόβλημα ακτινοβολίας επιμήκους σφαιροειδούς με λόγο αξόνων 6:1:1 σε εξαναγκασμένη κατακόρυφη ταλάντωση (heaving) που αντιστοιχεί αδιάστατη συχνότητα $\Omega = \omega^2 a / g$ στο διάστημα $[0.5, 5]$, κάτω από την αρχικά αδιατάραχτη ελεύθερη επιφάνεια με τον διαμήκη άξονά του σε μέση βύθιση $d = 2b$, όπου a είναι ο μεγάλος και b ο μικρός ημιάξονας, αντίστοιχα, και ω η κυκλική συχνότητα. Στο Σχ. 4α,β παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο της προσομοίωσης για $\Omega = 2.5$, και στο Σχ.4γ αποτελέσματα για τον συντελεστή πρόσθετης μάζας μ_{33} , σε σύγκριση με αντίστοιχα των Chatzigeorgiou & Miloh (2015). Ειδικότερα, στο Σχ. 4α παρουσιάζεται το πεδίο δυναμικού στην ελεύθερη επιφάνεια και το πεδίο πιέσεων στο σώμα, μαζί με το πεδίο ταχυτήτων. Στο Σχ. 4β παρουσιάζεται η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, ενώ με διακεκομμένη γραμμή εικονίζεται το όριο του στρώματος απορρόφησης. Κατα τη προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου το σώμα ξεκινάει ομαλά από την ηρεμία επιταχυνόμενο μέχρι την ημιτονική μόνιμη κατάσταση. Το στιγμιότυπο είναι μετά από περίπου 3 περιόδους, το χρονικό βήμα είναι στο 1% της περιόδου, και στο σώμα και στην ελεύθερη επιφάνεια έχουμε 1350 και 10000 συνοριακά στοιχεία αντιστοίχως. Στην περίπτωση αυτή έγιναν υπολογισμοί με μικτή ακρίβεια, απαιτήθηκαν περίπου 4.8GB από τη VRAM και ο χρόνος εκτέλεσης ήταν περίπου 322 δευτερόλεπτα.

3.3 Ταλαντούμενο πτερύγιο σε άπειρο ρευστό

Στην περίπτωση που ο βιομημητικός προωστήρας απέχει αρκετά από τα άλλα σύνορα (π.χ. βρίσκεται σε μεγάλη βύθιση και σε απόσταση από το πλοίο) η ροή προσεγγίζεται θεωρώντας το πρόβλημα σε μη φραγμένο χωρίο. Θεωρούμε στο Σχ.5 ταλαντούμενο πτερύγιο ορθογωνικής μορφής με υδροτομές NACA0012 και λόγους επιμήκους $AR = 6$ και $AR = 40$, σε αριθμό Strouhal $St = \omega h_0 / \pi U = 0.3$, όπου ω η συχνότητα ταλαντωτικών κινήσεων και U η πρόσω ταχύτητα. Τα πλάτη της μεταφορικής και περιστροφικής ταλάντωσης είναι $h_0 = 0.75c$ και $\theta_0 = 23.3^\circ$, αντίστοιχως, και η διαφορά φάσης των κινήσεων $\psi = 90^\circ$. Η περιστροφική κίνηση γίνεται γύρω από άξονα σε απόσταση $x_R = 0.33c$ από την ακμή πρόσπτωσης. Η υλική παραμόρφωση του ομόρρου των πτερυγίων υπολογίζεται δυναμικά με τεχνικές Free Wake Analysis; βλ. Politis (2011,2016). Στο Σχ.5α παρουσιάζεται η χρονική ιστορία των συντελεστών άνωσης $C_L = F_3 / 0.5\rho U^2 A$ και ώσης, αντίστοιχα, $C_L = -F_1 / 0.5\rho U^2 A$ (όπου A είναι η



Σχήμα 5. Βιομημητικός προωστήρας σε μή φραγμένο χωρίο. α) Χρονική ιστορία δυνάμεων, σύγκριση με πειραματικά δεδομένα και με αποτελέσματα που βασίζονται σε χρήση μοντέλου προδιαγεγραμμένου ομόρρου. β) Δυναμικό και ταχύτητες στο σώμα και άλμα δυναμικού (μη γραμμικό μοντέλο ομόρρου).

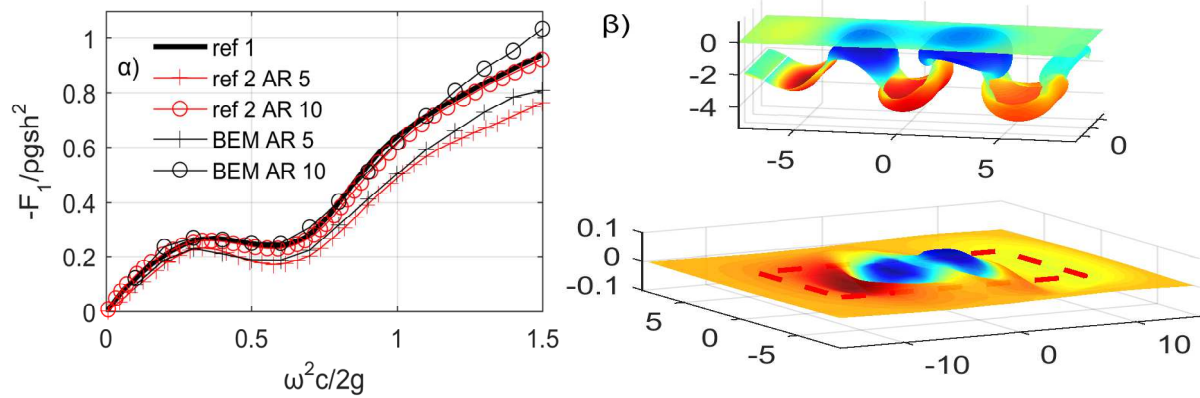
επιφάνεια του πτερυγίου), κατά τη διάρκεια μιας περιόδου, και τα αποτελέσματα συγκρίνονται καλά με τις πειραματικές μετρήσεις και βρίσκονται σε συμφωνία με αντίστοιχα διδιάστατα αποτελέσματα (Filippas & Belibassakis 2014, Σχ.17), καθώς αυξάνεται ο λόγος επιμήκους του πτερυγίου. Στο Σχ. 5β απεικονίζεται το πεδίο δυναμικού και ταχυτήτων στο σώμα, καθώς και οι εντάσεις διπόλων στην επιφάνεια του μη γραμμικού ομόρρου. Η προσομοίωση είναι στο πεδίο του χρόνου και το σώμα ξεκινάει ομαλά από την ηρεμία επιταχυνόμενο μέχρι την ημιτονική μόνιμη κατάσταση. Τα στιγμιότυπα είναι μετά από περίπου 3 περιόδους, το χρονικό βήμα είναι στο 1% της περιόδου. Στη συνέχεια τα στοιχεία αφορούν την περίπτωση με $AR = 6$. Στο σώμα έχουμε 1860 συνοριακά στοιχεία. Στην περίπτωση αυτή έγιναν υπολογισμοί με μικτή ακρίβεια, απαιτήθηκαν περίπου 1.3GB από τη VRAM και ο χρόνος εκτέλεσης ήταν περίπου 21 δευτερόλεπτα στην περίπτωση του παγωμένου ομόρρου και 88 δευτερόλεπτα στην περίπτωση του ελεύθερου ομόρρου. Για το συγκεκριμένο αριθμό Strouhal τα αποτελέσματα που λαμβάνονται με το μη γραμμικό ομόρρου παρουσιάζουν μικρές διαφορές με αντίστοιχα με χρήση μοντέλου προδιαγεγραμμένου ομόρρου το οποίο βασίζεται στη τροχιά της ακμής εκφυγής και επιταχύνει σημαντικά τους υπολογισμούς.

3.4 Επιδράσεις ελεύθερης επιφάνειας

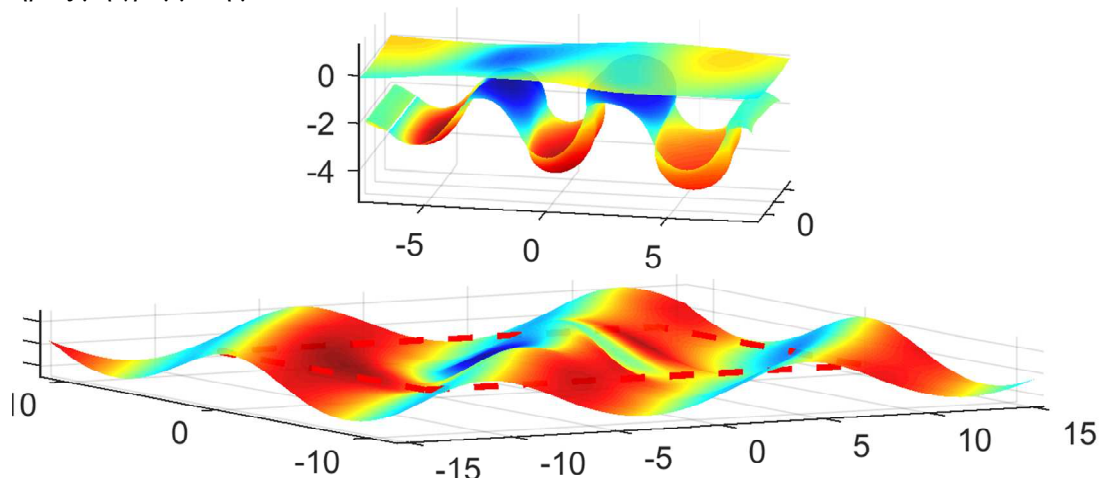
Στο Σχ.6 παρουσιάζονται αποτελέσματα για το ταλαντούμενο πτερύγιο κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια, σε ήρεμο νερό. Για την επικύρωση της μεθοδολογίας χρησιμοποιούμε δύο περιπτώσεις κτακόρυφα ταλαντούμενου ορθογωνικού πτερύγιου με υδροτομές NACA0012 και NACA0005, με χορδή c , λόγους επιμήκους $AR = 5$ και $AR = 10$, σε αριθμό Froude $F = U / \sqrt{gc} = 0.18$. Το πτερύγιο βρίσκεται σε μέση βύθιση $d = 0.5c$ και τα πλάτη ταλάντωσης είναι $h_0 = 0.1c$ και $h_0 = 0.025c$. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με προβλέψεις γραμμικοποιημένης θεωρίας (ref 1) και 3D BEM (ref 2) που υπάρχουν στην εργασία Zhu et al (2006), παρουσιάζοντας ικανοποιητική συμφωνία. Επιπλέον στο Σχ. 6β, για $F = 0.9$ και $d = 0.5c$, απεικονίζεται το πεδίο δυναμικού στο σώμα και στην ελεύθερη επιφάνεια καθώς και η εξέλιξη του φύλου στροβιλότητας και του άλματος του δυναμικού (ένταση διπόλων) στον ομόρρου όπως υπολογίστηκαν από την πλήρως μη γραμμική εκδοχή της μεθόδου (Filippas, 2018, διδακτορική εργασία υπό εκπόνηση). Τα στιγμιότυπα είναι μετά από περίπου 3 περιόδους, το χρονικό βήμα είναι στο 0.5% της περιόδου. Στο σώμα και στην ελεύθερη επιφάνεια έχουμε 1860 και 2170 συνοριακά στοιχεία. Στην περίπτωση αυτή έγιναν υπολογισμοί με μικτή ακρίβεια, απαιτήθηκαν περίπου 1.4GB από τη VRAM και ο χρόνος εκτέλεσης ήταν περίπου 270 δευτερόλεπτα στην περίπτωση του προδιαγεγραμμένου ομόρρου των πτερυγίων και 847 δευτερόλεπτα στην περίπτωση του μη γραμμικού ομόρρου.

3.5 Βιομημητικός προωστήρας σε κυματισμούς

Τέλος, εξετάζουμε τον προηγούμενο βιομημητικό προωστήρα σε περιοδικούς προσπίπτοντες κυματισμούς με πλάτος $\eta_0 = 0.2c$, γωνία πρόσπτωσης $\beta = 45^\circ$ και συχνότητα επιλεγμένη έτσι ώστε η συνιστώσα του κύματος στη διεύθυνση κίνησης του πτερυγίου να έχει συχνότητα συνάντησης ίδια



Σχήμα 6. Βιομημητικός προωστήρας κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια. α) Μέση τιμή του συντελεστή ώσης συναρτήσει της αδιάστατης συχνότητας. β) Δυναμικό και ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας με τη πλήρως μη γραμμική μέθοδο.



Σχήμα 7. Βιομημητικός προωστήρας σε πλάγιους κυματισμούς.

με τη συχνότητα του πτερυγίου. Στο Σχ.7 εικονίζεται το συνολικό πεδίο δυναμικού στο σώμα και στην ελεύθερη επιφάνεια, καθώς και η εξέλιξη του φύλλου στροβιλότητας και του άλματος του δυναμικού (ένταση διπόλων) στον ομόρρο, όπως υπολογίστηκαν για κυματισμούς Stokes 5^{ης} τάξης. Στο σώμα και στην ελεύθερη επιφάνεια έχουμε 1860 και 2976 συνοριακά στοιχεία. Στην περίπτωση αυτή έγιναν υπολογισμοί με μικτή ακρίβεια, απαιτήθηκαν περίπου 1.5GB από τη VRAM και ο χρόνος εκτέλεσης ήταν περίπου 350 δευτερόλεπτα στην περίπτωση του προδιαγεγραμμένου ομόρρου των πτερυγίων και 981 δευτερόλεπτα στην περίπτωση του μη γραμμικού ομόρρου.

4. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ GPGPU ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΚΩΔΙΚΑ

Για την αποδοτική υλοποίηση της αριθμητικής μεθοδολογίας αναπτύσσεται υπολογιστικός κώδικας, αξιοποιώντας τεχνολογίες παράλληλου προγραμματισμού σε κάρτα γραφικών (General-Purpose Computing on Graphics Processing Units - GPGPU), χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού CUDA C/C++. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η κάρτα γραφικών GTX1080 της Nvidia, με 2560 πυρήνες απλής ακρίβειας και 8GB διαθέσιμη VRAM και η έκδοση 8 της CUDA. Στη συνέχεια παραθέτουμε συνοπτικά βασικές παρατηρήσεις πάνω στην υλοποίηση του παράλληλου GPU-κώδικα:

1) Η παρούσα αριθμητική μεθοδολογία μπορεί να χαρακτηριστεί κυρίως ως compute-intensive, λόγω των απαιτητικών υπολογισμών ιδιόμορφων ολοκληρωμάτων, που χρειάζονται για το υπολογισμό των πινάκων των συντελεστών επιρροής. Στην περίπτωση αυτή σημαντική είναι η χρήση, όπου είναι δυνατό, υπολογισμών μικτής ακρίβειας (mixed precision arithmetics), βλ., π.χ., Trompoukis (2012). Σημειώνουμε ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση η υλοποίηση και ο έλεγχος της ακρίβειας γίνεται με τη χρήση Templates.

2) Σημαντικός είναι ο σωστός σχεδιασμός του υπολογιστικού πλέγματος (GPU grid), ιδιαίτερα για τις data-intensive αλλά και για τις compute-intensive διεργασίες, ως προς την απόδοση, αλλά και γενικά, για την παραγωγή κομμού, εύκολα κατανοητού και επεκτάσιμου κώδικα. Αυτός περιλαμβάνει την επιλογή της διάστασης του πλέγματος και των blocks (1D, 2D ή και 3D στις σύγχρονες κάρτες γραφικών), καθώς και η επιλογή του αριθμού των thread ανά block. Επίσης σημαντική είναι η επιλογή των παραπάνω σε συνδυασμό με τον αριθμό καταχωρητών (registers) που χρησιμοποιούν οι GPU-kernels ώστε να μεγιστοποιηθεί η επιτευχθείσα occupancy κατά την εκτέλεσή τους. Σχετικά με την συγκεκριμένη εφαρμογή αναφέρουμε ότι χρησιμοποιούνται pointers σε functions και ένα 3D grid για να επιτευχθεί ο ταυτόχρονος υπολογισμός των συντελεστών επαγωγής από πηγές και δίπολα. Εναλλακτικές επιλογές θα μπορούσαν να είναι η χρήση διαφορετικών streams ή recursive kernels δύο επιπέδων βάθους (στις μοντέρνες GPU).

3) Για τη σωστή άθροιση και αποθήκευση δεδομένων που υπολογίζονται παράλληλα χρησιμοποιούνται atomic operations που υπάρχουν διαθέσιμες στις τελευταίες εκδόσεις της CUDA και για υπολογισμούς διπλής ακρίβειας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα στη παρούσα εργασία είναι ο υπολογισμός του δεξιού μέλους του διακριτού DtN και ο πολλαπλασιασμός του με το αντίστοιχο διάνυσμα εντάσεων ιδιομορφιών, και ο υπολογισμός ταχυτήτων στον ελεύθερο ομόρρου.

4) Όταν υπάρχει έντονη επικοινωνία της GPU με τη CPU σημαντική είναι η τεχνική που θα επιλεγεί για την αποθήκευση και τη μεταφορά δεδομένων. Στη συγκεκριμένη υλοποίηση ελάχιστα δεδομένα μεταφέρονται από τη RAM στη VRAM και αντίστροφα, γιατί ουσιαστικά το backend κομμάτι του κώδικα εκτελείται στη GPU ενώ μόνο pre- και post-processing μέρος γίνεται στη CPU. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε την κλασική τεχνική δέσμευσης μνήμης (cudaMalloc) και αντιγραφής μνήμης (cudaMemcpy) από και προς τη VRAM. Στις περιπτώσεις συχνότερης επικοινωνίας ή συνεργασίας πολλών καρτών γραφικών σε σύστημα με κοινή μνήμη (shared memory system), ενδείκνυται να εξεταστεί η εφαρμογή zero-copy τεχνικών και η χρήση της, φιλικής προς τη χρήση, προσέγγισης που αξιοποιεί τη unified memory (στις μοντέρνες κάρτες γραφικών), αντιστοίχως.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε μία τρισδιάστατη, μη μόνιμη μέθοδος συνοριακών στοιχείων, και η εφαρμογή της στην υδροδυναμική ανάλυση ταλαντούμενων πτερυγίων τα οποία λειτουργούν ως βιομημητικοί προωστήρες, σε ήρεμο νερό και υπό την παρουσία κυματισμών υπό γενική κατεύθυνση διάδοσης. Η μέθοδος μοντελοποιεί την ακριβή γεωμετρία των πτερυγίων και λαμβάνει πλήρως υπόψη τα τρισδιάστατα φαινόμενα λόγω πεπερασμένου ανοίγματος αυτών. Για την αποδοτική υλοποίηση της αριθμητικής μεθοδολογίας αναπτύσσεται και βελτιστοποιείται υπολογιστικός κώδικας, αξιοποιώντας τεχνολογίες παράλληλου προγραμματισμού σε κάρτα γραφικών (General-Purpose Computing on Graphics Processing Units - GPGPU), χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού CUDA C/C++. Παρουσιάστηκαν αποτελέσματα σε διάφορες περιπτώσεις και συγκρίσεις με δεδομένα από τη βιβλιογραφία, από όπου προκύπτει ότι η παρούσα μέθοδος χαρακτηρίζεται από ικανοποιητική σχέση ακρίβειας και υπολογιστικού κόστους. Επιπλέον, καταδείχθηκε ότι οι επιδράσεις της ελεύθερης επιφάνειας, των κυματισμών, καθώς και των τρισδιάστατων φαινομένων που σχετίζονται με τη γεωμετρία του πτερυγίου, είναι σημαντικές για μεγάλο εύρος των παραμέτρων λειτουργίας του συστήματος.

Η παρούσα μέθοδος μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό, τη διαχείριση και τον έλεγχο τέτοιων βιομημητικών συστημάτων για την υποβοήθηση της πρόωσης πλοίων σε κυματισμούς. Μελλοντικές επεκτάσεις συμπεριλαμβάνουν την συστηματική μελέτη και βελτιστοποίηση της γεωμετρίας και της κινηματικής ταλαντούμενων πτερυγίων, καθώς και σύνθετων διατάξεων αποτελούμενων από πολλά πτερύγια. Επιπρόσθετα, ιδιαίτερα ενδιαφέροντα είναι η διερεύνηση της λειτουργίας του συστήματος σε τρισδιάστατους κυματισμούς, που αντιστοιχούν σε ρεαλιστικές καταστάσεις θάλασσας, καθώς και η σύζευξη του συστήματος με τη δυναμική του πλοίου και η αλληλεπίδραση του με τη γάστρα και άλλα παρελκόμενα. Άλλη μια σημαντική κατεύθυνση είναι η μελέτη των επιδράσεων ελαστικότητας των πτερυγίων στην συμπεριφορά του συστήματος (βλ. Priouvolos et al 2018), καθώς και η διερεύνηση μη-γραμμικών φαινομένων και ασταθειών από την αλληλεπίδραση της ελεύθερης επιφάνειας με τον ομόρρου των πτερυγίων σε καταστάσεις λειτουργίας

σε μικρή βύθιση. Για τα ανωτέρω κρίσιμη θεωρείται η επέκταση του υπολογιστικού κώδικα, με συνδυασμό γλώσσας CUDA C/C++ και πρωτοκόλλου Message Passing Interface (MPI), ώστε να μπορεί να κλιμακώνει σε συστήματα κατανομημένης μνήμης που αποτελούνται από συστοιχίες καρτών γραφικών (GPU clusters).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε το Κοινοφελές Ίδρυμα Αλέξανδρος Σ. Ωνάσης για την υποστήριξη με υποτροφία του πρώτου συγγραφέα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Belibassakis, K.A., Filippas, E.S. (2015) Ship propulsion in waves by actively controlled flapping foils, *Applied Ocean Research* 52: 1-11.
- Belibassakis, K.A., Gerostathis, Th.P., Kostas, K.V., Politis, C.G., Kaklis, P.D., Ginnis, A.I., Feuer, C. (2013) A BEM-isogeometric method for the ship wave-resistance problem, *Ocean Engin.* 60: 53-67.
- Belibassakis, K.A., Politis, G.K. (2013) Hydrodynamic performance of flapping wings for augmenting ship propulsion in waves, *Ocean Engineering* 72: 227-240.
- Chatjigeorgiou, I.K., Miloh, T. (2015) Radiation and oblique diffraction by submerged prolate spheroids in water of finite depth, *J. Ocean Eng. Mar. Energy* 1: 3-18.
- Colville, R.N., Hutchinson, E.J., Mindell, J.S., Warren, R.F. (2001) The transport sector as a source of air pollution, *Atmospheric Environment* 35(9): 1537-1565.
- De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H. (2012) Numerical study on active wave devouring propulsion, *Journal of Marine Science and Technology* 17(3): 261-275.
- Filippas, E.S., Belibassakis, K.A. (2014) Hydrodynamic analysis of flapping-foil thrusters operating beneath the free surface and in waves, *Engineering Analysis with Boundary Elements* 41: 47-59.
- Flannery, T. (2005) *The weather makers*, Penguin.
- Politis, G.K. (2011) Application of a BEM time stepping algorithm in understanding complex unsteady propulsion hydrodynamic phenomena, *Ocean Engineering* 38: 699-711.
- Politis, G., Politis, K. (2014) Biomimetic propulsion under random heaving conditions using active pitch control, *Journal of Fluids & Structures* 47: 139-149.
- Politis, G. (2016) Unsteady wake rollup modeling using a mollifier based filtering technique, *Dev Appl Ocean Eng* 5, doi: 10.14355.
- Priovolos, A.K., Filippas E.S., Belibassakis K.A. (2018) A vortex-based method for improved flexible flapping-foil thruster performance, *Engineering Analysis with Boundary Elements* 95: 69-84.
- Rozhdestvensky K.V., Ryzhov V.A. (2003) Aero-hydrodynamics of flapping wing propulsors, *Progress in Aerospace Sciences* 39: 585-633.
- Taylor, G.K., Triantafyllou, M.S., Tropea, C. (2010) *Animal Locomotion*, Springer Verlag.
- Triantafyllou, M.S., Techet, A.H., Hover, F.S. (2004) Review of experimental work in biomimetic foils, *IEEE J. Oceanic Eng.* 29: 585-594.
- Trompoukis, X.S. (2012) Solving aerodynamic-aeroelastic problems on Graphics Processing Units, PhD thesis, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, Greece.
- Xu, G.D., Duan, W.Y., Zhou, B.Z. (2017) Propulsion of an active flapping foil in heading waves of deep water, *Engineering Analysis with Boundary Elements* 84: 63-76.
- Zhu, Q., Liu, Y., Yue, D.K.P. (2006) Dynamics of a three-dimensional oscillating foil near the free-surface, *AIAA Journal* 44(12): 2997-3009.

ABSTRACT

Flapping wings located beneath or to the side of the hull of the ship are investigated as unsteady thrusters, augmenting ship propulsion in waves. The main arrangement consists of horizontal wing(s) in vertical oscillatory motion, induced by ship heave and pitch motions in waves, while rotation about the wing pivot axis is actively controlled. For the detailed investigation of the free-surface effects, a three-dimensional boundary element method (BEM) is developed for the hydrodynamic analysis of the flapping foil operating as an unsteady thruster. For the efficient implementation of the numerical algorithm a computational code is developed, exploiting parallel programming techniques and general-purpose programming on graphics processing units (GPGPU), by using the CUDA C/C++ application programming interface (API). Numerical calculations are presented over a range of motion parameters and compared against other methods and experimental data. Our analysis indicates that significant efficiency is achieved and the free-surface effects cannot be neglected. The present work can be exploited for the design and optimum control of such systems extracting energy from sea waves for augmenting marine propulsion in rough seas, with simultaneous reduction of ship responses offering also dynamic stabilisation.