



**ΕΘΝΙΚΟ
ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α.Π. :
Αθήνα,

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

Προς τα Μέλη ΔΕΠ της
Σχολής Μηχ/γων
Μηχ/κών

ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του Υ.Δ. κ. **ΑΝΔΡΟΝΙΚΟΥ Θεόλογου**, Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού, την οποία εκπόνησε στον Τομέα Ρευστών. Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί την Τρίτη 15 Φεβρουαρίου 2022 ώρα 12.00 το μεσημέρι διαδικτυακά. Ο ελληνικός τίτλος της Διδακτορικής Διατριβής είναι ο εξής:

«Αλληλεπίδραση αιωρούμενου ελικοπτέρου με το έδαφος και με εμπόδια:

Υπολογιστική Διερεύνηση»

Και ο Αγγλικός ως εξής

«Hovering helicopter interaction with the ground and bluff bodies: A CFD based investigation »

Ο Κοσμητόρας της Σχολής



- Για οδηγίες για την πρόσβαση σας διαδικτυακά απευθυνθείτε στον Επιβλέποντα του Υ.Δ. Αναπλ.Καθ. Β. Ριζιώτη (vasilis@fluid.mech.ntua.gr)

Διδακτορική Διατριβή

**Τίτλος: Αλληλεπίδραση αιωρούμενου ελικοπτέρου με το έδαφος και με εμπόδια.
Υπολογιστική διερεύνηση.**

Θεολόγος Ανδρόνικος, Υποψήφιος Διδάκτορας

Επιβλέπων, Βασίλης Ριζιώτης

Περίληψη

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή μελετάται η αλληλεπίδραση ενός αιωρούμενου ελικοπτέρου με το έδαφος και με εμπόδια. Η περιορισμένη βιβλιογραφία επί του φαινομένου τόσο σε υπολογιστικό όσο και σε πειραματικό πλαίσιο αποτέλεσε το κίνητρο της εργασίας. Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση των επιπτώσεων αυτής της αλληλεπίδρασης στην πτήση αιώρησης του ελικοπτέρου καθώς και η ανάλυση και κατηγοριοποίηση των φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα.

Όταν ένα ελικόπτερο προσγειώνεται ή απογειώνεται ο ομόρρους του αλληλεπιδρά με το έδαφος και με παρακείμενα εμπόδια. Η παραπάνω κατάσταση οδηγεί σε μεταβολές των φορτίων και της απόδοσης του ελικοπτέρου, οι οποίες αποτελούν συνάρτηση του λόγου ύψους αιώρησης-διαμέτρου του κύριου δρομέα. Με αυτό τον τρόπο το πεδίο ροής διαφοροποιείται ουσιαστικά συγκριτικά με το αντίστοιχο της πτήσης αιώρησης μακριά από στερεά σύνορα.

Η πτήση αιώρησης ελικοπτέρου μακριά από το έδαφος χαρακτηρίζεται από τη δημιουργία μιας ροής δέσμης που εκπέμπεται από τον κύριο δρομέα, με τον ταυτόχρονο σχηματισμό ενός δακτυλίου στροβιλότητας. Προϊόντος του χρόνου, ο δακτύλιος αυτός απομακρύνεται με σταθερή ταχύτητα. Αντίθετα, όταν ένα ελικόπτερο αιωρείται κοντά στο έδαφος ή σε εμπόδια, παρατηρείται η δημιουργία οριακών στρωμάτων πάνω στις στερεές επιφάνειες, τα οποία αλληλεπιδρούν με τον δακτύλιο στροβιλότητας. Η αλληλεπίδραση των παραπάνω στρωμάτων διάτμησης οδηγεί στην δημιουργία ισχυρών δομών στροβιλότητας, διαμορφώνοντας με αυτό τον τρόπο ένα σύνθετο πεδίο ροής που επηρεάζει την φόρτιση του ελικοπτέρου.

Η ανάλυση της αλληλεπίδρασης περιλαμβάνει πειραματικά αποτελέσματα και υπολογιστικές προσομοιώσεις για ένα μοντέλο ελικοπτέρου υπό κλίμακα. Οι διαστάσεις του ελικοπτέρου και των εμποδίων έχουν υποστεί ανάλογη μείωση ούτως ώστε να προσομοιάζουν την αλληλεπίδραση ελικοπτέρου με κτήριο. Η επιλογή των παραμέτρων λειτουργίας του υπό κλίμακα μοντέλου πραγματοποιήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε η ταχύτητα ακροπερυγίου του κύριου δρομέα να διατηρηθεί σταθερή. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρία διαφορετικά πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα (Πολυτεχνείο του Μιλάνο, Πανεπιστήμιο της Γλασκόβης, ONERA) για σχετικά χαμηλούς αριθμούς Re (μικρότερους από 300000). Οι πειραματικές μετρήσεις αφορούν παρόμοιες διατάξεις με διαφορετικές παραμέτρους ωστόσο. Με αυτό τον τρόπο και αδιαστατοποιώντας τα αποτελέσματα, τα συμπεράσματα που εξάγονται μπορούν κατηγοριοποιηθούν βάσει των φυσικών φαινομένων και όχι ανάλογα με την εκάστοτε πειραματική διάταξη.

Για την επιβεβαίωση των πειραματικών μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν υπολογιστικές προσομοιώσεις με εργαλεία μεσαίας και μεγάλης υπολογιστικής πιστότητας. Προκαταρκτικές προσομοιώσεις πιστοποίησαν την καλή λειτουργία των εργαλείων και ταυτόχρονα ανέδειξαν τους περιορισμούς της κάθε μεθοδολογίας. Το πρώτο εργαλείο, ένας ασυμπίεστος μη συνεκτικός κώδικας συνοριακών στοιχείων και στοιχείων στροβιλότητας GenUVP, επιτρέπει την προσομοίωση μεγάλου αριθμού περιπτώσεων προλέγοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα. Σε αυτή την

κατεύθυνση, αναδείχθηκαν οι περιορισμοί των μη συνεκτικών μεθόδων αφού εγγενώς αδυνατούν να προλέξουν την δημιουργία οριακών στρωμάτων.

Για να ξεπεραστεί η παραπάνω αδυναμία, χρησιμοποιήθηκε επιλεκτικά μία υβριδική μέθοδος υψηλής ακρίβειας. Η μέθοδος αυτή συνδυάζει μέσω μίας επαναληπτικής διαδικασίας την Eulerian διατύπωση των εξισώσεων της μηχανικής των ρευστών με την Lagrangian εκδοχή. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η ικανοποίηση όλων των οριακών συνθηκών του πεδίου, και εισάγεται στις προσομοιώσεις η συνεκτικότητα του εδάφους και των εμποδίων. Τα αποτελέσματα που παρήχθησαν συγκρίνονται πολύ καλά με τις πειραματικές μετρήσεις.

Καταλήγοντας, κάνοντας χρήση τόσο πειραματικών δεδομένων από ανεξάρτητα πειράματα, όσο και υπολογιστικών αποτελεσμάτων διαφόρων μεθόδων, εξάγονται συμπεράσματα για το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης ελικοπτέρου με το έδαφος και με εμπόδια.

PhD Thesis

Title: Hovering helicopter interaction with the ground and bluff bodies: A CFD based investigation

PhD candidate: Theologos Andronikos

Supervisor: Vasilis Riziotis

Abstract

The interactional phenomena occurring when a helicopter hovers in proximity to the ground and to bluff bodies are addressed in this thesis. The work is motivated by the limited bibliography on this topic. Several surveys have been conducted both experimental and computational, however a systematic work that categorizes and classifies the interaction between the rotor and the ground/bluff bodies is missing. The present work takes into consideration several experimental campaigns, analyzes the results and then by using tools of different fidelity reproduces measured conditions. Through this process solid conclusions are extracted, substantiated both by experimental and computational evidence.

When a helicopter takes off or lands, its wake interferes with the ground and obstacles. This interaction, depending on the height-to-rotor diameter ratio, causes the altering of the rotor loading and performance as compared to the unconstrained case and gives rise to the development of a complex outwash flow in the surroundings of the helicopter. When a helicopter hovers outside the ground effect, the jet flow of the main rotor and the strong tip vortices of the wake travel without constrain below the rotor. As the rotor approaches the ground or an obstacle the jet flow and the vortices interact with the surrounding environment. This leads to the development of boundary layers on the surfaces of solid boundaries which eventually change the flow field. In these cases different shear layers interact with each other causing the formation of strong vortex structures that remain close to the helicopter.

The above phenomena are investigated by three different experimental campaigns conducted by Politecnico di Milano, the University of Glasgow, and ONERA. The test rigs resemble to each other but differ in certain parameters (rotor and obstacle dimensions, rotational speed, etc.). The helicopters that are used, are Mach scaled models leading to relatively low tip Re numbers (below 300000).

To complete the classification of the interactional phenomena, measurements are compared against numerical predictions. Two different tools have been used. The first is a medium fidelity potential solver in which solid boundaries are treated as inviscid surfaces and the wake is modeled by free vortex particles. The velocity field is obtained by solving with a particles mesh technique two Poisson equations. This solver is used for simulating the majority of the cases because of its computational efficiency. Comparison between the predictions of the potential solver against the experiments revealed the limitations of the solver due to its inherent inviscid character. However, these limitations confirmed the first conclusion from the experimental data, which dictates that viscous effects are dominating the flow, especially when the rotor is in close proximity to the ground and the obstacle.

In the direction of overcoming the above limitations and further elaborating the analysis of the interactional phenomena, a high fidelity hybrid solver is exploited. The hybrid solver couples a Lagrangian flow solver that covers the entire flow field with overlaid Eulerian solutions

defined on confined regions around the contained solid boundaries. In this manner all boundary conditions are met (both on the solid and the far field boundaries). Simulations of the hybrid solver are performed in selective cases (those that the potential solver could not reproduce) as the computational cost of the model is significantly higher than that of the potential solver. Comparison of the hybrid model predictions to the experimental data, confirmed the original hypothesis and helped to dive into deeper analysis of the physical mechanisms that dominate the flow around a hovering helicopter in proximity to solid boundaries.