



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80 Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου • ΤΗΛ.: 7721099, FAX: 7721057

Αρ.Πρωτ.: 3240

Αθήνα, 23-5-2013

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

**ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ**

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του **Ευάγγελου Μακρή** Διπλωματούχου Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών & Φυσικών Επιστημών Ε.Μ.Π., που θα πραγματοποιηθεί την Δευτέρα 3 Ιουνίου 2013, ώρα 11:00 π.μ, στην Αίθουσα Διαλέξεων του κτιρίου Εργαστηρίων Αεροδυναμικής-Ναυπηγικής-Υδροδυναμικών Μηχανών στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Το Θέμα της Διδακτορικής Διατριβής είναι:

**«Αριθμητική προσομοίωση πρόσκρουσης –εναπόθεσης μικρο-νάνο σωματιδίων σε εσωτερικές ροές αερολύματος πολύπλοκης γεωμετρίας»**

Επισυνάπτεται περίληψη της παραπάνω Διδακτορικής Διατριβής

Ο εκτελών χρέη Κοσμήτορα

Δ. Ε. Παπαντώνης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### Τομέας Ρευστών

ΥΠΟΨΗΦΙΟΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΑΣ

Μακρής Ευάγγελος

ΘΕΜΑ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Αριθμητική Προσομοίωση πρόσκρουσης - εναπόθεσης μικρό- νάνο - σωματιδίων σε εσωτερικές ροές αερολύματος πολύπλοκης γεωμετρίας.

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η παρούσα διατριβή μελετά τη μεταφορά και εναπόθεση σωματιδίων σε ροές αερολύματος στο εσωτερικό πολύπλοκων γεωμετριών. Για να προσεγγιστεί αριθμητικά το φυσικό πρόβλημα της μεταφοράς και εναπόθεσης σωματιδίων σε ροές αερολύματος πολύπλοκης γεωμετρίας, πρέπει κανείς να αντιμετωπίσει την πρόκληση της δημιουργίας ενός υπολογιστικού χωρίου σύνθετης γεωμετρίας και υψηλής ποιότητας. Επιπλέον, η μεταφορά και εναπόθεση σωματιδίων πρέπει να αναπαρασταθεί με έναν φυσικά έγκυρο τρόπο με τη χρήση μερικών διαφορικών εξισώσεων.

Στην παρούσα διατριβή προτείνεται μια νέα μέθοδος για την παραγωγή ενός υψηλής ποιότητας δομημένου πλέγματος, το οποίο αναπαράγει με πιστότητα την γεωμετρία των ανθρώπινων οργάνων, ξεκινώντας από δεδομένα ιατρικά απεικόνισης. Επιπλέον, διερευνώνται οι μηχανισμοί που διέπουν τις αλληλεπιδράσεις σωματιδίων - ρευστών χρησιμοποιώντας τεχνικές της μηχανικής των ρευστών και εισάγεται μια περαιτέρω βελτίωση σε ένα ήδη υπάρχον μοντέλο μεταφοράς και εναπόθεσης σωματιδίων.

Όσον αφορά την δημιουργία υπολογιστικών χωρίων εντός πολύπλοκων γεωμετρικών, ένας σημαντικός αριθμός παλαιότερων μελετών χρησιμοποίησαν πραγματικές γεωμετρίες για την προσομοίωση ροών μέσω της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD). Αυτές οι μελέτες μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το είδος του χρησιμοποιούμενου υπολογιστικού πλέγματος και τη γεωμετρική πιστότητα μεταξύ του πλέγματος και της φυσικής γεωμετρίας. Η πλειοψηφία αυτών των μελετών ξεκινώντας από δεδομένα ιατρικής απεικόνισης παράγουν ένα μη δομημένο υπολογιστικό πλέγμα που συμμορφώνεται με τη γεωμετρία του ανθρώπινου οργάνου. Ωστόσο, μια σειρά από μελέτες, συμπεριλαμβανομένης της παρούσας διατριβής, έχουν δείξει ότι τα μη δομημένα πλέγματα παρέχουν λιγότερο ακριβείς λύσεις από ό, τι τα δομημένα.

Μια καινοτομία της διατριβής είναι η εισαγωγή μιας νέας μεθόδου που συνδυάζει την παραγωγή δομημένου πλέγματος με απόλυτη πιστότητα στην συγκεκριμένη γεωμετρία του ασθενούς. Ξεκινώντας από δεδομένα που λαμβάνονται από μια ιατρική εξέταση απεικόνισης, γίνεται η ανακατασκευή της γεωμετρίας του ανθρώπινου οργάνου καταλήγοντας σε μια τριγωνοποιημένη επιφάνεια (αναπαράσταση επιφάνειας τύπου STL). Από αυτή την επιφανειακή τριγωνοποίηση δημιουργείται ένα υψηλής ποιότητας δομημένο πλέγμα που συμπίπτει απόλυτα με την αρχική γεωμετρία. Για την αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου εκτελέστηκαν μία σειρά από συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών τύπων πλέγματος (μη δομημένα και υβριδικά πλέγματα). Οι συγκρίσεις επιβεβαίωσαν την υπεροχή του δομημένου πλέγματος σε πολλά επίπεδα.

Όσον αφορά την πρόκληση της μοντελοποίησης της μεταφοράς και εναπόθεσης σωματιδίων, πρέπει να σημειωθεί ότι η μοντελοποίηση της μεταφοράς και εναπόθεσης σωματιδίων τείνει να είναι ζήτημα αναγκαιότητας, ειδικά σε περιπτώσεις όπου η άμεση πειραματική μελέτη περιορίζεται σε προσδιορισμό της συνολικής εναπόθεσης και σε περιπτώσεις όπου οι πειραματικές μελέτες είτε απαγορεύονται λόγω ηθικών λόγων ή είναι αδύνατες λόγω των εξαιρετικά πολύπλοκων πεδίων ροής.

Σε αυτή τη διατριβή ένα μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και δυναμικής σωματιδίων που προτάθηκε παλαιότερα αναπτύχθηκε περαιτέρω, προκειμένου να προσομοιώσει χρονικά μεταβαλλόμενες ροές σωματιδίων. Στο προτεινόμενο διφασικό (υγρό-σωματίδια) μοντέλο ο χειρισμός της εξίσωσης που διέπει τη μεταφορά των σωματιδίων (PTE) γίνεται με βάση μια πλήρως Eulerian προσέγγιση που βασίζεται σε τεχνικές υπολογιστικής ρευστομηχανικής, τόσο για τον αέρα όσο και για την φάση των σωματιδίων. Η επικύρωση του νεοεισαγόμενου όρου της χρονικής μεταβολής επιτυγχάνεται μέσω συγκρίσεων με ένα πρόβλημα που έχει αναλυτική λύση, ενώ η ενσωμάτωση της αδράνειας των σωματιδίων στην εξίσωση μεταφοράς (PTE) γίνεται σύμφωνα με το προηγούμενος αναπτυχθέν και επικυρωθέν μοντέλο. Συνολικά, τα πλεονεκτήματα της θεώρησης Euler, σε συνδυασμό με τον νέο εισαγόμενο όρο της χρονικής μεταβολής δίνουν ένα ισχυρό υπολογιστικό μοντέλο που μπορεί να παρέχει πληροφορία για τη μεταφορά και εναπόθεση των σωματιδίων υπό ασταθείς ροές και μπορεί να συμβάλει στην ερμηνεία της συμπεριφοράς των σωματιδίων κάτω από εξαιρετικά ασταθείς ροές στο αναπνευστικό σύστημα.

Οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί σε αυτή τη διατριβή έχουν εφαρμοστεί στη μελέτη τριών περιπτώσεων. Στην εκτίμηση της ροής εντός ανευρύσματος κοιλιακής αορτής, στη μελέτη μιας διακλάδωσης της κοιλιακής αορτής και στην αξιολόγηση της μεταφοράς και εναπόθεσης σωματιδίων υπό πεδίο ροής υψίσυχνου ταλαντευτικού αερισμού και κανονικής αναπνοής. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις παραπάνω μελέτες δείχνουν ότι με την προτεινόμενη μεθοδολογία μπορούν να ληφθούν ακριβείς προβλέψεις της μεταφοράς και εναπόθεσης αδρανών σωματιδίων αερολυμάτων σε μη μόνιμες ροές εντός πολύπλοκων γεωμετριών.

Εν κατακλείδι, η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι ένα σημαντικό βήμα προς την κατεύθυνση μοντελοποίησης εξατομικευμένων περιπτώσεων ασθενών με χρήση της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και δυναμικής σωματιδίων (CFPD).

Τμήματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής παρουσιάστηκαν στις κάτωθι δημοσιεύσεις σε περιοδικά με κριτές και σε διεθνή συνέδρια.

**Διεθνή συνέδρια με κριτές:**

1. Makris E., Gkanis V., Housiadas C. “A methodology to use the flow field from Ansys CFX® software in an in-house sectional aerosol dynamics code. Proceedings of the European Aerosol Conference, Karlsruhe, Germany, 2009.
2. Makris E., Tsangaris S., Housiadas C. “A Methodology to Generate a Patient Specific High Quality Structured Computational Domain from Medical Imaging Data. Proceedings of SIMBIO 2011, Simulation and Modeling of Biological Flows conference, Brussels, Belgium, 2011.
3. Makris E., Neofytou P., Tsangaris S., Housiadas C. “A Semi-Automated Patient Specific CFD Analysis Framework for Cardiovascular System Simulations” Proceedings of the 10th International Workshop on Biomedical Engineering, Kos island, Greece, 2011.
4. Pilou M., Antonopoulos V., Makris E., Neofytou P., Tsangaris S., Housiadas C. “Computational Study of Particle Deposition in a Physiologically Realistic Bifurcation” Proceedings of NanoImpactNet – QNano conference, Dublin, Ireland, 2012.
5. Makris E. A patient-specific structured grid generation method, quality assessment and comparisons. Proceedings of CREST Workshop Recent Developments of Mesh Generation and Biofluids, Tokyo, Japan, 2012.
6. Pilou M, Makris E, Neofytou P, Tsangaris S, Housiadas C, “Computational study of aerosol flow in a physiologically realistic bifurcation under the influence of an external magnetic field. Proceedings of the European Aerosol Conference, Granada, Spain, 2012.
7. Makris E, Pilou M, Neofytou P, Tsangaris S, Housiadas C, “Particle deposition under transient high frequency ventilation air flow in a physiologically realistic bifurcation” Proceedings of the European Aerosol Conference, Granada, Spain, 2012.

**Διεθνή περιοδικά με κριτές:**

1. Makris E., Gkanis V., Tsangaris S., Housiadas C. A methodology to generate structured computational grids from DICOM data: Application to a patient specific Abdominal Aortic aneurysm (AAA) model. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 15(2):173-183, 2012.

2. Makris E., Gkanis V., Tsangaris S., Housiadas C. A novel method for the generation of multi-block computational structured grids from medical imaging of arterial bifurcations. *Medical Engineering and Physics*, 34(8):1157–1166, 2012.

3. Makris E., Pilou M., Neofytou P., Tsangaris S. and Housiadas C. A Semi-Automated Patient Specific Computational Fluid and Particle Dynamics Analysis Framework for Biofluid Simulations. *Pliroforiki*, 23 July :36 – 42, 2012.

4. Pilou M., Antonopoulos V., Makris E., Neofytou P., Tsangaris S., Housiadas C. A Fully Eulerian Approach to Particle Inertial Deposition in a Physiologically Realistic Bifurcation. *Applied Mathematical Modelling*, 37(8):5591–5605, 2013

5. Makris E., Pilou M., Neofytou P., Tsangaris S., Housiadas C. Particle Transport and Deposition under High Frequency Oscillatory Ventilation and Normal Breathing. (Under review)

.