

Υπολογιστική Διερεύνηση Ροϊκού Πεδίου Βιολογικών Υγρών σε Κλινικά Σημαντικές Συνθήκες με Απλεγματικές Μεθόδους

Ε. Δ. Σκούρας,^{1,2} Χ. Α. Παρασκευά,³ Μ. Σ. Βαλαβανίδης,⁴
Α. Ν. Καλαράκης,² Ι. Καλογήρου,² και Κ. Μαυρίδης²

¹ Ίδρυμα Τεχνολογίας & Έρευνας (ΙΤΕ)/Ινστιτούτο Επιστημών Χημικής Μηχανικής (ΙΕΧΜΗ),
Σταδίου, Πλατάνι, 26504 Πάτρα, Ελλάδα

² ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας/Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε., Μ. Αλεξάνδρου 1, 26334 Πάτρα, Ελλάδα

³ Πανεπιστήμιο Πατρών/Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Καραθεοδωρή 1, 26504 Πάτρα, Ελλάδα

⁴ ΤΕΙ Αθήνας/Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε., Αγ. Σπυρίδωνος, 12243 Αθήνα, Ελλάδα

Περίληψη

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD) αποτελεί ένα από τα πλέον ενδιαφέροντα και σύγχρονα επιστημονικά αντικείμενα στη μοντελοποίηση και προσομοίωση της ροής βιολογικών υγρών (αίματος ή ούρων) σε αγγεία και αρτηρίες και την εκτίμηση των ρευστοδυναμικών παραμέτρων αυτής. Δημοσιευμένες μελέτες σε πειραματικά μοντέλα και υπολογιστικές τεχνικές σε ομοιώματα αρτηριών και πραγματικές, στενωμένες αρτηρίες καταδεικνύουν ότι οι φυσικοχημικές ιδιότητες που διέπουν την τοπική μεταφορά μάζας και την ανάπτυξη διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια συνάφειας βιολογικού υγρού (αίματος ή ούρων) και τοιχώματος αγγείου αποτελούν σημαντικές αιμοδυναμικές παραμέτρους που επηρεάζουν τόσο την παθογένεση όσο και την εξέλιξη της αθηρωμάτωσης/στένωσης. Επίσης τονίζουν ότι οι τοπικές αιμοδυναμικές παράμετροι, που είναι ειδικές για κάθε ασθενή, θα πρέπει να χαρακτηρίζονται με ακρίβεια, ιδιαίτερα πριν από τη λήψη της ιατρικής απόφασης για θεραπευτική παρέμβαση. Προς αυτήν την κατεύθυνση είναι προφανές ότι η εφαρμογή της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής θα πρέπει να υλοποιηθεί σε δεδομένα του ίδιου του ασθενούς και πιο συγκεκριμένα πάνω σε πραγματικές αγγειακές δομές και αθηρώματα. Το παρόν έργο έχει εστιάσει στην εφαρμογή των CFD αλγορίθμων σε στενωμένες νεφρικές αρτηρίες και στενωμένες ουρήθρες.

Για δεκαετίες, οι μέθοδοι των Πεπερασμένων Διαφορών, των Πεπερασμένων Όγκων και των Πεπερασμένων Στοιχείων έχουν επικρατήσει ως τα αριθμητικά σχήματα τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στην επίλυση πλήθους προβλημάτων, τα οποία καλύπτουν ευρεία περιοχή επιστημονικών και τεχνολογικών εφαρμογών. Μια συνήθης δυσκολία των μεθόδων αυτών προέρχεται από το χρόνο και την προσπάθεια που απαιτούνται για την διακριτοποίηση και αρίθμηση των στοιχείων του υπολογιστικού χώρου, δηλαδή αυτού που ονομάζουμε δημιουργία πλέγματος. Στο στάδιο αυτό δαπανάται συνήθως η περισσότερη προσπάθεια, ιδιαίτερος όταν πρόκειται για προβλήματα τριών διαστάσεων (3D) με υψηλές βαθμώσεις των συναρτήσεων πεδίου. Επιπλέον, αυτές οι παραδοσιακές μέθοδοι είναι συχνά πολύ αργές στη σύγκλισή τους, απαιτώντας την επίλυση χιλιάδων εξισώσεων προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια.

Τα τελευταία έτη μια καινοτόμος ομάδα τεχνικών, καλούμενες «Απλεγματικές» μέθοδοι (Meshless methods), έχει ταχύτατα αναπτυχθεί και έχει έλξει την προσοχή της επιστημονικής κοινότητας. Στη μέθοδο αυτή, σε καμία φάση της διαδικασίας επιλύσεως του αντίστοιχου προβλήματος, δεν απαιτείται πολυγωνοποίηση είτε του υπολογιστικού χωρίου είτε της επιφάνειάς του. Οι μέθοδοι αυτές είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να χειρίζονται προβλήματα με μεγάλη παραμόρφωση, κινούμενα όρια και πολύπλοκη γεωμετρία. Σήμερα υπάρχουν διάφορων τύπων απλεγματικές μέθοδοι, όπου κάθε μία εξ αυτών παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Για τον λόγο αυτό το διεθνές ερευνητικό ενδιαφέρον εστιάζεται και στη βελτίωση των μεθόδων αυτών.

Στην παρούσα εργασία, η απλεγματική μέθοδος της *τοπικής ταύτισης* χρησιμοποιείται για την αριθμητική επίλυση των τρισδιάστατων εξισώσεων παροδικής, ασυμπίεστης, και στρωτής ροής αιμοδυναμικού ρευστού σε στενωμένες αρτηρίες. Οι ισχύουσες εξισώσεις, εκφράζοντας τη διατήρηση της μάζας και της ορμής, γραμμένες στη μορφή ταχύτητας-στροβιλότητας. Οι συνιστώσες της ταχύτητας προσδιορίζονται επιλύοντας ελλειπτικές εξισώσεις τύπου Poisson, ενώ η μέθοδος *διόρθωσης της ταχύτητας* εφαρμόζεται στις εξισώσεις ισοζυγίου ορμής ώστε να εξασφαλίζεται η συνέχεια της μάζας. Για τους υπολογισμούς με μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων, όπου απαιτείται, έχει χρησιμοποιηθεί το λογισμικό ANSYS CFX.

Το φυσικό πρόβλημα μοντελοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη σημαντικές αιμοδυναμικές παραμέτρους σχετικά με τη τοπική μεταφορά μάζας και την ανάπτυξη διατμητικών τάσεων στην επαφή βιολογικού υγρού και τοιχώματος αγγείου, οι οποίες αναλύθηκαν τόσο με απλεγματικές όσο και με τυπικές CFD μεθόδους FEM. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων ανέδειξε την ακρίβεια χρήσης αυτών των ταχύτερων - σε σχέση με τις συμβατικές- καινοτόμων υπολογιστικών μεθόδων, όπως και την αποτελεσματικότερη χρήση τους για την υπολογιστική διερεύνηση σε εύρος συνθηκών που σχετίζονται τόσο με την παθογένεση όσο και την εξέλιξη της αθηρωμάτωσης/στένωσης.

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) - Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: ΑΡΧΙΜΗΔΗΣ ΙΙΙ Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.

Θεματικές Ενότητες:

1. Φαινόμενα Μεταφοράς
2. Βιοχημική Μηχανική - Βιοτεχνολογία