

Υδρολογική προσομοίωση της ροής σε υδροφορείς υψηλής αβεβαιότητας

Ευάγγελος Ρόζος

Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Έτος δημοσίευσης: 2010

Περίληψη

Τα σύγχρονα υπολογιστικά συστήματα έχουν δώσει τη δυνατότητα να προσομοιωθούν οι φυσικές διεργασίες με μοντέλα φυσικής βάσης που έχουν ικανοποιητική ταχύτητα αλλά και εύχρηστο γραφικό περιβάλλον εργασίας. Στην περίπτωση των υπόγειων υδροφορέων τα μοντέλα αυτά επιλύουν τη διαφορική εξίσωση ροής με κάποια αριθμητική μέθοδο που απαιτεί λεπτομερή διακριτοποίηση του πεδίου ροής. Παρόλα αυτά, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες τα μοντέλα λεπτομερούς διακριτοποίησης δεν αποτελούν την πιο ενδεδειγμένη επιλογή. Παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων είναι τα ακόλουθα:

- Αν η γεωμετρία του υδροφορέα δεν είναι γνωστή τότε η χρήση ενός μοντέλου που βασίζεται στην επίλυση διαφορικών εξισώσεων δεν είναι εφικτή εφόσον δεν είναι γνωστό το πεδίο ορισμού της άγνωστης συνάρτησης (υδραυλικό φορτίο).
- Αν δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις στάθμης τότε δεν μπορεί να ελεγχθεί η αξιοπιστία της προσομοιωμένης διακύμανσης της στάθμης του υδροφορέα και ως εκ τούτου αυτή στερείται χρησιμότητας (άρα καταναλώνεται άσκοπα υπολογιστικός χρόνος για τον υπολογισμό της).
- Αν ο υδροφορέας αποτελείται από δύο διακριτά αλλά αλληλεπιδρώντα πορώδη μέσα, με το πρωτογενές πορώδες να έχει πολύπλοκη και άγνωστη γεωμετρία, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο εννοιολογικές προσεγγίσεις για τη μοντελοποίηση του. Σε αυτές τις προσεγγίσεις η διακριτοποίηση με υψηλή πυκνότητα δεν επιφέρει αύξηση ακρίβειας.
- Αν η ροή στον υδροφορέα γίνεται κυρίως διαμέσου ασυνεχειών (π.χ. καρστικοί υδροφορείς) τότε οι συνθήκες ροής, που εναλλάσσονται μεταξύ ροής με ελεύθερη επιφάνεια και υπό πίεση, δεν μπορούν να περιγραφούν από την εξίσωση Darcy. Μια μικτή εξίσωση κατάλληλη να περιγράψει και τις δύο φάσεις ροής καθώς και τη μετάβαση από τη μια στην άλλη, θα μπορούσε να αποδειχθεί πλεονεκτική σε αυτές τις περιπτώσεις.

Οι υδροφορείς που παρουσιάζουν τουλάχιστον ένα από τα προηγούμενα χαρακτηριστικά ονομάζονται στην παρούσα διατριβή υδροφορείς υψηλής αβεβαιότητας. Στόχος της διατριβής είναι η ανάδειξη εξειδικευμένων μεθόδων και η κατασκευή συναφών μοντέλων για τη μελέτη αυτών των υδροφορέων.

Στη μελέτη του αντικειμένου της διατριβής αναπτύχθηκαν καινοτόμες τεχνικές οι οποίες εφαρμόστηκαν σε ένα συνθετικό υδροφορέα και σε έξι πραγματικούς υδροφορείς (Αλυρός Αγίου Νικολάου, Πηγές Λιλαίας άνω ρου Βοιωτικού Κηφισού, Βοιωτικός Κηφισός, Δυτική Θεσσαλία και πηγές Bregava σε Βοσνία Ερζεγοβίνη). Οι ιδιότητες του συνθετικού υδροφορέα παρήχθησαν από ένα δισδιάστατο στοχαστικό μοντέλο το οποίο παρήγαγε πεδίο αγωγιμοτήτων με ρεαλιστική στατιστική δομή (ετερογενής υδροφορέας με ομοιογενείς γειτονίες/περιοχές). Οι πραγματικοί υδροφορείς είναι αντιπροσωπευτικοί, από άποψη διαθέσιμης πληροφορίας, των περιπτώσεων ικανοποιητικής επάρκειας, μερικής επάρκειας και ανεπάρκειας δεδομένων. Από άποψη υδρογεωλογίας οι υδροφορείς αυτοί είναι καρστικοί (εκτός από τη Δυτική Θεσσαλία που είναι κοκκώδης) και το δίκτυο των ασυνεχειών έχει άγνωστη γεωμετρία και ανάπτυξη. Για να εξαχθούν συμπεράσματα, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων μοντελοποίησης με κλασικές και εναλλακτικές μεθόδους διακριτοποίησης. Στις εναλλακτικές μεθόδους η διακριτοποίηση έγινε, ανάλογα με τη διαθέσιμη πληροφορία, με μονοκυτταρικό, ολιγοκυτταρικό και πολυκυτταρικό κάρναβο.

Οι πρωτότυπες συμβολές αυτής της διατριβής είναι οι ακόλουθες:

- Μοντέλο ευέλικτης διακριτοποίησης. Αναπτύχθηκε μοντέλο του οποίου ο κάρναβος διακριτοποίησης μπορεί να είναι από μονοκυτταρικός μέχρι λεπτομερή πολυκυτταρικός με ακανόνιστη γεωμετρία κυττάρων.
- Υδραυλικό ανάλογο. Η υλοποίηση που επιλέχθηκε για το μοντέλο βασίστηκε στη σύλληψη ενός υδραυλικού αναλόγου. Σύμφωνα με αυτήν, η ροή σε έναν υδροφορέα αναπαρίσταται από τη ροή σε ένα δίκτυο δεξαμενών και αγωγών. Οι δεξαμενές προσομοιώνουν τις διεργασίες που σχετίζονται με την αποθήκευση νερού και οι αγωγοί προσομοιώνουν τις διεργασίες που σχετίζονται με την κίνηση του νερού. Η διακύμανση της στάθμης των δεξαμενών αντιστοιχεί στη διακύμανση της στάθμης του υδροφορέα στα αντίστοιχα κύτταρα της διακριτοποίησης.
- Μελέτη σφάλματος πολυκυτταρικών μοντέλων. Τα πολυκυτταρικά μοντέλα έχουν χρησιμοποιηθεί (άμεσα ή έμμεσα) εκτεταμένα σε περιβαλλοντικές και υδρολογικές εφαρμογές στις οποίες επικρατούν μόνιμες συνθήκες ροής (π.χ. δίκτυα ροής για τον υπολογισμό των διαφυγών κάτω από φράγματα). Στην παρούσα διατριβή ερευνήθηκε το σφάλμα των πολυκυτταρικών μοντέλων όταν οι συνθήκες ροής είναι μη μόνιμες. Η έρευνα βασίζεται σε θεωρητική και σε αριθμητική ανάλυση του σφάλματος χρησιμοποιώντας για σύγκριση μοντέλα πεπερασμένων διαφορών.
- Μικτή εξίσωση ροής. Επινοήθηκε μικτή εξίσωση που είναι εφαρμόσιμη και στα δύο είδη ροής εντός ενός καρστικού αγωγού, δηλαδή με ελεύθερη επιφάνεια και υπό πίεση. Η ιδέα προέρχεται από την υδραυλική συμπεριφορά των σήραγγων που παροχετεύουν νερό από ταμειυτήρα (π.χ. εκκενωτής πυθμένα). Όταν η στάθμη στον ταμειυτήρα είναι πάνω από την οροφή της σήραγγας στο σημείο υδροληψίας τότε αυτή λειτουργεί ως αγωγός υπό πίεση. Όταν η στάθμη πέσει κάτω από την οροφή της σήραγγας τότε αυτή μεταβαίνει σε συνθήκες ροής με ελεύθερη επιφάνεια. Οι δύο αυτές συνθήκες ροής αντιστοιχούν στις συνθήκες στον υδροφορέα κατά την υγρή και ξηρή περίοδο του υδρολογικού έτους, η δε σήραγγα αντιστοιχεί στους καρστικούς αγωγούς.

Η εφαρμογή του μοντέλου στους καρστικούς υδροφορείς Λιλαίας και Bregava με τη χρήση της μικτής εξίσωσης ροής πέτυχε μια σημαντική βελτίωση της μοντελοποίησης όσον αφορά στην προσομοιωμένη στάθμη. Παρόλα αυτά, και σύμφωνα με τα συμπεράσματα της εφαρμογής στον υδροφορέα των πηγών Αλμυρού Αγίου Νικολάου, όταν δεν υπάρχουν μετρήσεις στάθμης ή όταν η διακύμανση της στάθμης δεν είναι το ζητούμενο από την προσομοίωση τότε η γραμμική εξίσωση Darcy πλεονεκτεί τόσο από άποψη αξιοπιστίας (λιγότερες παραδοχές) όσο και από λειτουργική άποψη (ταχύτερη επίλυση).

Από τις εφαρμογές στον υδροφορέα της Δυτικής Θεσσαλίας αναδείχθηκαν τα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα των πολυκυτταρικών μοντέλων σε σχέση με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, η οποία ήταν η μέθοδος αναφοράς για τις συγκρίσεις. Το βασικό πλεονέκτημα των πολυκυτταρικών μοντέλων είναι η ικανοποιητική ακρίβεια ακόμα και με μικρό πλήθος κυττάρων διακριτοποίησης το οποίο συνεπάγεται μεγάλη ταχύτητα υπολογισμού. Τα μειονεκτήματα των πολυκυτταρικών μοντέλων είναι η προαπαιτήση υδραυλικής πληροφορίας (ισοδυναμικές γραμμές) για τη χάραξη των κυττάρων, το γεγονός ότι δεν περιγράφονται με ακρίβεια η χωρική κατανομή των ιδιοτήτων του υδροφορέα και το ότι δεν μπορεί να εκτιμηθεί a priori το σφάλμα της προσομοίωσης.

Σημαντικό στοιχείο του μοντέλου που αναπτύχθηκε είναι η δυνατότητα σύνδεσης και παράλληλης (αμφίδρομης) λειτουργίας του με άλλα μοντέλα που προσομοιώνουν άλλες συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου (π.χ. επιφανειακά νερά, ανθρώπινες παρεμβάσεις). Από το σύνολο των εφαρμογών προέκυψε ότι η ολιστική προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών με εννοιολογικά αλληλεπιδρώντα μοντέλα είναι πιο κατάλληλη για την κατάρτιση του υδατικού ισοζυγίου μιας υδρολογικής οντότητας (π.χ. υδρολογικής λεκάνης) σε σχέση με μια σειριακή εφαρμογή μοντέλων φυσικής βάσης. Αυτό συμβαίνει γιατί στη δεύτερη περίπτωση οι είσοδοι των μοντέλων που εξαρτώνται δυναμικά από την αλληλεπίδραση μεταξύ των υδρολογικών υποσυστημάτων προσεγγίζονται με παραδοχές. Αντιθέτως στην περίπτωση της ολιστικής προσέγγισης οι δυναμικές είσοδοι προσομοιώνονται στα πλαίσια της παράλληλης εφαρμογής των μοντέλων.

Στις εφαρμογές των μηχανικών υπάρχει πάντα αβεβαιότητα που οφείλεται στην ελλιπή γνώση των πραγματικών συνθηκών και ιδιοτήτων της φύσης. Σε μη μόνιμες συνθήκες ροής τα πολυκυτταρικά μοντέλα εισάγουν σφάλμα μικρότερο της αβεβαιότητας αυτής και επομένως είναι επιλέξιμα για εφαρμογή παίρνοντας υπόψη και τα πλεονεκτήματα τους όπως αυξημένη ταχύτητα επίλυσης και απλότητα στην σύλληψη και εφαρμογή.