Προσομοίωση Αδρανειακών Ροών και Ροών σε Ρωγματωμένους Υδροφορείς

Κ. Μουτσόπουλος[1], Ι. Μελαδιώτης[2]

1. Εργαστήριο Οικολογικής Μηχανικής και Τεχνολογίας, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, kmoutso@env.duth.gr
2. Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, imeladio@civil.auth.gr

Περίληψη

Οι συμβατικές μαθηματικές προσεγγίσεις της υπόγειας υδραυλικής, οι οποίες στηρίζονται στις υποθέσεις της ισχύος του νόμου του Darcy και της υπόθεσης του ισοδύναμου συνεχούς μέσου, δεν είναι κατάλληλες για την προσομοίωση ενός μεγάλου αριθμού προβλημάτων με πρακτική σημασία. Στην παρούσα εργασία περιγράφονται κατάλληλες προσεγγίσεις για περιπτώσεις στις οποίες δεν ισχύουν οι παραπάνω υποθέσεις.

Simulation of Inertial Flows and Flows in Fractured Aquifers

K. Moutsopoulos[1], I. Meladiotis[2]

1. Laboratory of Ecological Engineering and Technology, Department of Environmental Engineering, Democritus University of Thrace, Xanthi, kmoutso@env.duth.gr
2. Laboratory of Engineering Geology, Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, imeladio@civil.auth.gr

Abstract

The conventional mathematical description of groundwater flow, based on the Darcy equation and the equivalent continuum approach, although it is a very convenient and effective tool in its range of validity, it is not adequate to describe several problems of practical importance. Simulation approaches for inertial flows and flows in fractured media are discussed.

1. Εισαγωγή

Η σημασία του υπόγειου υδατικού δυναμικού για την βιώσιμη ανάπτυξη, είναι προφανής αφού καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του εκμεταλλεύσιμου όγκου νερού. Απαραίτητο εργαλείο για την βέλτιστη διαχείριση, είναι η σωστή προσομοίωση , η οποία επιτρέπει την αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων αξιοποίησης αυτών των πόρων. Για λόγους ευκολίας, γίνεται συχνά η παραδοχή ότι η κίνηση του νερού στο υπέδαφος μπορεί να περιγραφεί με γραμμικές μαθηματικές λύσεις (νόμος του Darcy, εξίσωση της θερμότητας η οποία προκύπτει από συνδυασμό του παραπάνω νόμου με την εξίσωση της συνέχειας).

Οι λόγοι για τις παραπάνω επιλογές, είναι εν μέρει ιστορικοί αλλά και πρακτικοί. Στους ιστορικούς λόγους, μπορούμε να αναφέρουμε μεταξύ των άλλων τη χρήση ηλεκτρικών ομοιωμάτων, βασισμένα στην αναλογία ανάμεσα στον νόμο του Darcy και στη μαθηματική περιγραφή της μεταφοράς του ηλεκτρισμού, η σημασία της οποίας είχε δοθεί στην έρευνα των λεπτόκοκκων χαλαρών σχηματισμών, η ύπαρξη μεθόδων για την επίλυση των εξισώσεων της διάχυσης οι οποίες είχαν άμεση εφαρμογή σε προβλήματα υπόγεια υδραυλικής. Οι πρακτικοί λόγοι αφορούν στην ευκολία επίλυσης την εξισώσεων αυτών και στην δυνατότητα του γρήγορου προσδιορισμού των παραμέτρων οι οποίοι υπεισέρχονται στις εξισώσεις αυτές (π.χ. με την βοήθεια δοκιμαστικών αντλήσεων).

Με βάση την προσέγγιση της κίνησης του νερού η οποία περιγράφτηκε, έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες εξεζητημένα μαθηματικά εργαλεία για την εκτίμηση της αβεβαιότητας η οποία εμπεριέχεται σε κάθε περιγραφή των γεωλογικών σχηματισμών, αλλά και την βελτιστοποίηση της χρήσης του υπόγειου νερού. Για τον σκοπό αυτό, οι προσεγγίσεις οι οποίες περιγράφτηκαν παραπάνω, έχουν συνδυασθεί με μεθόδους της θεωρίας των πιθανοτήτων, της ασαφούς λογικής αλλά και της επιχειρησιακής έρευνας.

Η χρήση των θεωρητικών αυτών προσεγγίσεων και εργαλείων, αποτελούν εξαιρετική βοήθεια στα πλαίσια της ισχύος τους. Η αλόγιστη χρήση τους όμως μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα, σε λάθος πολιτικές διαχείρισης των υδατικών πόρων αλλά και σε όχι βέλτιστες κατευθύνσεις όσο αφορά τις ερευνητικές ατραπούς. Κατά συνέπεια, θα πρέπει να υπάρχουν κριτήρια για τον εντοπισμό των περιπτώσεων στις οποίες οι παραπάνω συμβατικές προσεγγίσεις δεν ισχύουν και να είναι διαθέσιμο το θεωρητικό υπόβαθρο για την περιγραφή των διεργασιών στις περιπτώσεις αυτές. Με τα ζητήματα αυτά, ασχολείται η παρούσα εργασία. Από γεωλογική άποψη, αποκλίσεις από την κλασσική προσέγγιση εμφανίζονται κυρίως σε ρωγματωμένους υδροφορείς αλλά και σε χονδρόκοκκους χαλαρούς σχηματισμούς. Όσον αφορά το μαθηματικό φορμαλισμό, διακρίνονται αποκλίσεις οι οποίες οφείλονται στη μη ισχύ της προσέγγισης του ισοδύναμου συνεχούς, στη μη ύπαρξη υδραυλικής ισορροπίας στο εσωτερικό ενός στοιχειώδους όγκου, ή στην μη ύπαρξη έρπουσας ροής στην κλίμακα των πόρων.

2. Προσέγγιση του ισοδύναμου συνεχούς μέσου

2.1. Μη ισχύς της υπόθεσης υδραυλικής ισορροπίας: τα μοντέλα πολλαπλής μεταφορικότητας και πολλαπλού πορώδους

Βασική αρχή για την ισχύ των συμβατικών εξισώσεων οι οποίες αναφέρθηκαν στην εισαγωγή, είναι ότι μία μοναδική τιμή για κάθε Α.Σ.Ο. είναι αρκετή για να περιγράψει την συμπεριφορά ενός υδροφόρου σχηματισμού. Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η γεωμετρία των πόρων δεν είναι ομοιόμορφη, είναι δυνατόν να προκύψουν αποκλίσεις από την κατάσταση υδραυλικής ισορροπίας.

Κριτήρια για την κατηγοριοποίηση των διακένων σε περισσότερες κατηγορίες, είναι διαφορές στο εύρος τους ή ο διαφορετικός προσανατολισμός στον χώρο (Moutsopoulos et al., 2001). Τέτοιες ομάδες μπορεί να αντιστοιχούν στο πρωτογενές πορώδες και σε μία ή περισσότερες ομάδες ρωγμών. Για την περίπτωση της ισχύος του ισοδύναμου συνεχούς μέσου, εκφράζονται οι ιδιότητες σε κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες με μία κατάλληλη διαδικασία ομογενοποίησης. Προκύπτει έτσι ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με όρους οι οποίοι περιγράφουν την ανταλλαγή της ποσότητας νερού. Η προσέγγιση της διπλής μεταφορικότητας, αντιστοιχεί στην περίπτωση ενός συστήματος το οποίο αποτελείται από ένα πυκνό δίκτυο ρωγμών και απο πρωτογενές πορώδες. Εάν επιπλέον η ροή είναι οριζόντια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω μαθηματική περιγραφή:

$$S_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} - T_1 \left(\frac{\partial^2 h_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h_1}{\partial y^2} \right) = \kappa \left(h_1 - h_2 \right) \tag{2.1a}$$

$$S_2 \frac{\partial h_2}{\partial t} - T_2 \left(\frac{\partial^2 h_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h_2}{\partial y^2} \right) = \kappa \left(h_1 - h_2 \right) \tag{2.1b}$$

Στις σχέσεις αυτές ο δείκτης 1 αντιστοιχεί στις ρωγμές και ο δείκτης 2 στο πρωτογενές πορώδες. h_i, T_i, S_i είναι το πιεζομετρικό φορτίο, η μεταφορικότητα και η αποθηκευτικότητα του μέσου i αντίστοιχα ($i=1,2$), ενώ η παράμετρος κ συμβολίζει τον συντελεστή ανταλλαγής.

Το θεωρητικό υπόβαθρο της εξισώσης (2.1) αναπτύσσεται μεταξύ άλλων από τους Aifantis (1977) και Moutsopoulos et al., (2001). Η εξίσωση (2.1) είχε χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για να περιγράψει τα δεδομένα από μία δοκιμαστική άντληση σταθερής παροχής στη Μαυροπηγή Κοζάνης (Μελαδιώτης και Μουτσόπουλος, 2003). Στην εργασία αυτή, η οποία απ' ότι γνωρίζουμε είναι η μοναδική περίπτωση εφαρμογής του μοντέλου αυτού στην Ελλάδα, δίνονται ενδεικτικές τιμές για τους συντελεστές της εξίσωσης διπλής μεταφορικότητας, αλλά και οδηγίες για την χρήση τη μη συμβατικής αυτής μεθοδολογίας από γεωλογικά και τεκτονικά δεδομένα του μελετούμενου γεωλογικού σχηματισμού.

Ένα από τα πλεονεκτήματα του μαθηματικού αυτού μοντέλου, είναι η ευελιξία του. Μπορεί εύκολα να γενικευτεί ώστε να περιγράφει οποιοδήποτε αριθμό από ισοδύναμα συνεχή μέσα, προσέγγιση η οποία είναι απαραίτητη για την περιγραφή συστημάτων με πολλές οικογένειες ρωγμών (μοντέλο πολλαπλής μεταφορικότητας). Αν θεωρήσουμε την γενικευμένη περίπτωση ενός μη ισότροπου μέσου, η μαθηματική έκφραση της κίνησης του νερού, είναι η παρακάτω:

$$S_i \frac{\partial h_i}{\partial t} - \nabla' \cdot \left(T_i \cdot \nabla' h_i \right) = \sum_{j=1,n}^{j \neq i} \kappa_{i,j} \left(h_j - h_i \right) \quad i = 1, \ldots, n \tag{2.2}$$

όπου ο δείκτης i μας δείχνει την «ταυτότητα» του «ισοδύναμου συνεχούς μέσου», h_i, T_i, S_i είναι το πιεζομετρικό φορτίο, η μεταφορικότητα και η αποθηκευτικότητα του μέσου i αντίστοιχα. Ο συντελεστής $\kappa_{i,j}$ είναι ένα μέτρο για την ανταλλαγή ρευστού ανάμεσα στα μέσα i και j ενώ το σύμβολο ∇' αντιστοχεί στον τελεστή Nabla σε δύο διαστάσεις.

Αντίθετα η εξίσωση (2.1), μπορεί και να απλοποιηθεί παραλείποντας ορισμένους όρους:

Στην πράξη επειδή η διαπερατότητα (και η μεταφορικότητα) των ρωγμών είναι πολύ μεγαλύτερη από την διαπερατότητα του πρωτογενούς πορώδους, η εξίσωση (2.1) μπορεί να γραφεί και ως εξής (Bibby, 1981, Onder, 1998):

$$S_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} - T_1 \left(\frac{\partial^2 h_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h_1}{\partial y^2} \right) = \kappa \left(h_1 - h_2 \right) \tag{2.3a}$$

$$S_2 \frac{\partial h_2}{\partial t} = \kappa \left(h_1 - h_2 \right) \tag{2.3b}$$

Στην περίπτωση αυτή, αναφερόμαστε στο μοντέλο διπλού πορώδους επειδή ενώ εμφανίζεται μόνο μία μεταφορικότητα, το μαθηματικό ομοίωμα αφορά δύο ισοδύναμα συνεχή μέσα. Η απλοποιημένη αυτή παραδοχή, παρουσιάζει πλεονεκτήματα όσο αφορά τις μεθόδους μαθηματικής επίλυσης.

Για τις περιπτώσεις στις οποίες οι ταχύτητες σε ορισμένες ομάδες είναι μεγάλες ώστε να μην μπορεί να περιγραφεί η υδραυλική συμπεριφορά του αντίστοιχου ισοδύναμου συνεχούς από το νόμο του Darcy, μπορούν να προστεθούν ορισμένοι μη γραμμικοί όροι (βλέπε π.χ. Zissis and Terzidis, 1991).

Οδηγίες για την θεωρητική εκτίμηση των παραμέτρων, δίνονται μεταξύ άλλων από τους Onder (1998) και Moutsopoulos et al. (2001).

Ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα είναι ότι, σε πολλές περιπτώσεις τα αποτελέσματα του μοντέλου διπλής μεταφορικότητας μπορούν να αναχθούν σε αυτά της συμβατικής προσέγγισης, εάν ο χρόνος που λαμβάνει χώρα το φαινόμενο είναι μεγάλος και οι τιμές του συντελεστή ανταλλαγής σημαντικές (Moutsopoulos et al., 2001).

2.2. Αδρανειακές ροές σε πορώδη μέσα

Ο νόμος του Darcy, έχει αποδειχτεί ότι ισχύει μόνο για την περίπτωση έρπουσας ροής. Για την περίπτωση ισχύος της προσέγγισης του ισοδύναμου συνεχούς μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο ο νόμος του Forchheimer αλλά και ο νόμος του Izbash.

Ο νόμος του Forchheimer, γράφεται για την περίπτωση μονοδιάστατης ροής:

$$-\frac{\partial h}{\partial x} = aq + bq|q| \qquad (2.4)$$

Ο πρώτος όρος της δεξιάς πλευράς της παραπάνω εξίσωσης, αντιστοιχεί στις δυνάμεις ιξώδους, ενώ ο δεύτερος στις δυνάμεις αδρανείας. Η μεταβλητή h συμβολίζει το πιεζομετρικό φορτίο, η μεταβλητή q συμβολίζει την ταχύτητα, ενώ οι a και b είναι κατάλληλοι συντελεστές.

Αντίστοιχα, για την περίπτωση μονοδιάστατης ροής με την πρόσθετη προϋπόθεση ότι αυτή λαμβάνει χώρα κατά την θετική φορά του άξονα των x, ο νόμος του Izbash γράφεται:

$$-\frac{\partial h}{\partial x} = \lambda q^{m} \qquad (2.5)$$

όσον αφορά την εξίσωση Izbash, είναι προφανές ότι για την περίπτωση της έρπουσας ροής πρέπει να τεθούν $m = 1$ και $\lambda = a$, ενώ για την περίπτωση πλήρως τυρβώδους ροής $m \to 2$ και $\lambda \to b$.

Η επίλυση της εξίσωσης (2.5), προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα για την περίπτωση κατά την οποία οι συντελεστές m και λ μπορούν να θεωρηθούν σταθεροί (Sen, 1989, Wen *et al.,* 2006), υπόθεση η οποία δεν είναι αυτονόητη για την περίπτωση μη μόνιμης ροής και πρέπει να ελεγχθεί η ισχύς της. Όπως αποδείχτηκε από τους Moutsopoulos and Tsihrintzis (2005), η εξίσωση Forchheimer είναι πιο κατάλληλη για την ποιοτική και ποσοτική περιγραφή έντονα μεταβαλλόμενων πεδίων ροής, ενώ πλεονεκτήματα είναι επίσης ότι το φυσικό της υπόβαθρο έχει διερευνηθεί (Panfilov et al., 2003), αλλά και το ότι υπάρχει μεγάλος αριθμός εξισώσεων για την εκτίμηση των φαινομενολογικών χαρακτηριστικών (Sidiropoulou et al., 2007).

3. Περίπτωση μη ισχύος της προσέγγισης του ισοδύναμου συνεχούς μέσου: Διακριτή προσομοίωση της ροής σε ρωγμές

3.1. Πεδίο ισχύος της διακριτής προσομοίωσης της ροής σε ρωγμές

Για να είναι δυνατόν ένα πορώδες μέσο να προσομοιωθεί με την προσέγγιση του ισοδύναμου συνεχούς, θα πρέπει το μέγεθος του Α.Σ.Ο. που το χαρακτηρίζει να είναι πολλές τάξεις μεγέθους μικρότερο από τις χαρακτηριστικές διαστάσεις της περιοχής στο οποίο λαμβάνει χώρα η ροή. Ενώ όταν ένας ρωγματωμένος υδροφορέας περιλαμβάνει ένα πυκνό δίκτυο ρωγμών η παραπάνω παραδοχή ισχύει, όταν η ροή λαμβάνει χώρα σε περιορισμένο αριθμό από ρωγμές, η κάθε ασυνέχεια θα πρέπει να προσομοιωθεί ως ένας ξεχωριστός αγωγός. Χαρακτηριστικές εφαρμογές αναφέρονται σε προβλήματα αποθήκευσης ραδιενεργών αποβλήτων (Fillion and Noyer, 1996), σε προβλήματα ύδρευσης αλλά και αξιοποίησης γεωθερμικών πεδίων (Kohl et al., 1997). Όσο αφορά την διαχείριση των υδατικών πόρων στον ελλαδικό χώρο, χαρακτηριστικές εφαρμογές αναφέρονται στην ύδρευση της πόλης των Χανίων όπως και στην ευρύτερη βιομηχανική ζώνη του Ηρακλείου Κρήτης (Ζαχαριάδη κ.α., 2006).

3.2. Μέθοδοι προσομοίωσης

Από τεχνική άποψη, λόγω της τυχαίας θέσης των ρωγμών στον χώρο και της πολύπλοκης γεωμετρίας η οποία προκύπτει, είναι αναγκαία η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Ένα από τα αξιόπιστα προγράμματα για την επίλυση αυτής της κατηγορίας προβλημάτων, είναι το ROCKFLOW (Kohlmeier et al., 2007). Η αξιοπιστία του για την επίλυση της ροής μέσα σε ρωγμές έχει διαπιστωθεί στο διεθνές τεστ HYDROCOIN 2.

Όσο αφορά τις εξισώσεις οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της υδραυλικής συμπεριφοράς των ρωγμών, είναι οι ίδιες με αυτές οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τα πορώδη μέσα: δηλαδή οι προαναφερθέντες νόμοι των Darcy, Forchheimer, Izbash, (βλέπε Zimmerman and Bodvarsson, 1996, Skjetne et al., 1999, Wen et al., 2006).

Επισημαίνεται ότι για την σωστή δόμηση των αριθμητικών ομοιωμάτων, η συνεργασία των επιστημόνων οι οποίοι ασχολούνται με την προσομοίωση της κίνησης του νερού στο υπέδαφος, με τους αντίστοιχους ειδικούς των επιστημονικών περιοχών της υδρογεωλογίας και της τεκτονικής για τον προσδιορισμό της θέσης των ρωγμών στον χώρο και για την εκτίμηση των υδραυλικών χαρακτηριστικών των ρωγμών αυτών, είναι αναγκαία.

3.3. Μέθοδοι εντοπισμού υπεδαφικών υδροφόρων ρηγμάτων η μεγάλου μήκους ρωγμών

Στους βραχώδεις σχηματισμούς, τα υπεδαφικά ρήγματα και οι μεγάλου μήκους ρωγμές που υδροφορούν και των οποίων τα ίχνη δεν εμφανίζονται στην επιφάνεια του εδάφους, είναι δυνατόν να εντοπιστούν με την εφαρμογή δύο διαδοχικών γεωφυσικών μεθόδων επιφάνειας δηλαδή εκείνης της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου VLF (Παπαζάχου, 1986) και της μεθόδου της επαγόμενης πόλωσης.

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος VLF (Very Low Frequency) επιτρέπει τον εντοπισμό και τον προσδιορισμό της γεωμετρίας του υπεδαφικού ρήγματος ως αγώγιμης ζώνης η οποία αναπτύσσεται μέσα σε ένα μη αγώγιμο βραχώδες μέσο και η οποία είναι δυνατόν να πληρούται από αγώγιμο αργιλικό υλικό ή να διαρρέεται από νερό.

Η μέθοδος της επαγόμενης πόλωσης που ακολουθεί, επιτρέπει τον ακριβή διαχωρισμό των δύο προαναφερόμενων περιπτώσεων με βάση την τιμή της "φορτιστικότητας". Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της παρουσίας νερού μέσα σε ένα ρήγμα, οι τιμές της "φορτιστικότητας" είναι μηδενικές, ενώ στην περίπτωση που τα ρήγματα είναι πληρωμένα με αργιλικό υλικό, οι τιμές της "φορτιστικότητας" είναι αντίθετα υψηλές.

3.4. Μέθοδοι υπολογισμού φαινομενολογικών παραμέτρων και κριτήρια επιλογής εξισώσεων για την περίπτωση διακριτής προσομοίωσης των ρωγμών

Όσο αφορά την κατάλληλη μαθηματική περιγραφή της κίνησης του νερού σε ρωγμές, υπάρχουν αξιόλογα συμπεράσματα κυρίως όσον αφορά την περίπτωση της έρπουσας ροής, περίπτωση κατά την οποία χρησιμοποιείται ο "κλασικός" κυβικός νόμος, (Zimmerman and Bodvarsson, 1996), αλλά και της πλήρως αναπτυγμένης τυρβώδους ροής (Louis, 1967, Kohl et al., 1997).

Ένα κρίσιμο σημείο, είναι η περιγραφή της ενδιάμεσης συμπεριφοράς ανάμεσα στις δύο παραπάνω περιπτώσεις, τόσο όσον αφορά την κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων οι οποίες υπεισέρχονται στις εξισώσεις Forchheimer και Izbash, αλλά και κριτηρίων για τον προσδιορισμό των περιπτώσεων στις οποίες λαμβάνει χώρα έρπουσα ή πλήρως τυρβώδης ροή. Στο πλαίσιο αυτό, εντάσσεται ο χαρακτηρισμός της υδραυλικής συμπεριφοράς και η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου προσομοίωσης για μη μόνιμες συνθήκες όπως επεσήμαναν οι Kohl et al., (1997), ένα πρόβλημα το οποίο έχει εξεταστεί πρόσφατα από τους Moutsopoulos and Tsihrintzis (2005) για την περίπτωση εξιδανικευμένων συνθηκών.

Όσον αφορά την εφαρμογή στην πράξη, σημαντικός είναι ο προσδιορισμός όχι μόνο της θέσης των ρωγμών η οποία αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αλλά και του εύρους των διακένων και της τραχύτητας τους, ώστε να μπορέσουν να εφαρμοστούν στην πράξη οι θεωρητικές σχέσεις οι οποίες αναφέρονται στην βιβλιογραφία.

4. Συμπεράσματα

Οι μέθοδοι προσομοίωσης των υπόγειων υδατικών πόρων, οι στρατηγικές διαχείρισης τους και οι ερευνητικοί άξονες, δεν πρέπει να βασίζονται μονόπλευρα στις προσεγγίσεις της συμβατικής υπόγειας υδραυλικής. Στην παρούσα δημοσίευση, παρουσιάζονται οι κύριες περιπτώσεις για τις οποίες δεν ισχύουν οι προαναφερθείσες προσεγγίσεις όπως και τα πλέον εύχρηστα μαθηματικά ομοιώματα για την περιγραφή των φαινομένων. Η παρούσα ανάλυση, διευκρινίζει πολλά θέματα σχετικά με την προσομοίωση των υπόγειων ροών τα οποία δεν είχαν αναλυθεί στην ελληνόγλωσση βιβλιογραφία και ως εκ τούτου θα συνεισφέρει στην επίλυση προβλημάτων μεγάλης πρακτικής σημασίας, αλλά και στην ερευνητική προσπάθεια την σχετιζόμενη με θέματα μη συμβατικής υδραυλικής.

Βιβλιογραφία

1. Aifantis, E. C., 1977. *Introducing a multi-porous medium*. Developments in Mechanics, 8:209-211.
2. Bibby R., 1981. *Mass transport of solutes in dual porosity media*. Water Resour. Res. 30:2913-2925.
3. Fillion, E. and M.-L. Noyer, 1996. *Flow modelling in a dual porosity domain with automatic mesh generation and parameter calibration: application to the Aespoe site*. Journal of Hydrology 180:1-19.
4. Kohl, T., Evans, K.F., Hopkirk, R.J., Jung and R., Rybach, L., 1997. *Observation and simulation of non-Darcian flow transients in fractured rock.* Water Resources Research, 33(3):407-418.
5. Kohlmeier M., Massman, J., Wulkau M, und Ziefle G., 2007. *Rockflow 5, User's Manual –keyword description*, Institut fuer Stroemungsmechanik, Leibnitz Universitaet Hannover.
6. Louis, C., 1967. *Strömungsvorgänge in klüftigen Medien und ihre Wirkung auf die Standsicherheit von Bauwerken und Böschungen im Fels*. Ph.D. Thesis. Inst, für Bodenmechanik und Felsmechanik, Univ. Karlsruhe, Karlsruhe, Germany.
7. Μελαδιώτης Ι. και Μουτσόπουλος Κ.Ν., 2002. Υδρογεωλογικές συνθήκες και *υδραυλική συμπεριφορά του ρωγματωμένου κροκαλοπαγή υδροφορέα Μαυροπηγής Κοζάνης.* Μεταλλειολογικά και Μεταλλοτεχνικά Χρονικά, 12:27-38.
8. Moutsopoulos, K. N., Konstantinidis A.A., Meladiotis, I.D., Tzimopoulos C. D. and Aifantis, E.C., 2001. *Hydraulic behavior and contaminant Transport in multiple porosity media.* Transport in Porous Media, 42:265-292.

9. Moutsopoulos, K.N., and Tsihrintzis, V.A., 2005. *Approximate analytical solutions of the Forchheimer equation*. Journal of Hydrology, 309: (1-4): 93-103.
10. Onder, H., 1998. *One-dimensional transient flow in a finite fractured aquifer system*. Hydrological Sciences, 43:243-265.
11. Panfilov, M., Oltean, C., Panfilova, I., and Bues M., 2003. *Singular nature of nonlinear macroscale effects in high-rate flow through porous media.* C R Acad. Sci. Paris Ser Mecanique, 331:41-48.
12. Παπαζάχου, Β. 1986. *Εισαγωγή στην Εφηρμοσμένη Γεωφυσική*. Θεσσαλονίκη, Εκδ. Παπαγεωργίου, σελ. 322.
13. Sen, Z., 1989. *Non linear flow toward wells.* J. Hydr. Engn., 115(2):192-209.
14. Sidiropoulou, M. G., Moutsopoulos K.N. and Tsihrintzis V.A., 2007. *Determination of Forchheimer equation coefficients a and b*. Hydrological Processes. 21(4):534-554.
15. Skjetne, E., Hansen, A. and Gudmundsson, H. J.S., 1999. *High velocity flow in a rough fracture.* J. of Fluid Mechanics, 385:1-20.
16. Wen, Z., Huang, G. and Zhan, H., 2006. *Non-Darcian flow in a single confined vertical fracture toward a well*. Journal of Hydrology, 330(3-4):698-708.
17. Ζαχαριάδη, Χ.Ι., Παπαδοπούλου, Μ.Π. και Καρατζάς Γ. Π. 2006. *Μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρινσης σε καρστικοποιημένη παράκτια περιοχή*. 10ο Πανελλήνιο συνέδριο της Ε.Υ.Ε., Ξάνθη, 1003-1010.
18. Zimmerman, R.W. and Bodvarsson, G.S., 1996. *Hydraulic conductivity of rock fractures.* Transport in Porous Media, 23(1):1-30.
19. Zissis, T., and Terzidis, G. 1991 *Unsteady non-darcy flow in fractured aquifers.* Proceedings of the European Conference Advances in Water Technology Athens, Greece, pp. 185-194.