

# Αριθμητική Προσομοίωση του Καθεστώτος των Πίεσεων Πόρων σε Υλικά Κατολίσθησης Χαμηλής Διαπερατότητας με Υποστράγγιση

## Numerical Simulation of the Pore Pressure Regime in Low Permeability Landslide Materials with Underdrainage

ΜΠΑΡΔΑΝΗΣ, Μ. Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π., MSc/DIC, Υποψ. Διδ. Ε.Μ.Π., ΕΔΑΦΟΣ Ε.Π.Ε.  
ΝΤΟΥΝΙΑΣ, Γ. Δρ Πολιτικός Μηχανικός, ΕΔΑΦΟΣ Ε.Π.Ε.  
ΚΑΒΟΥΝΙΔΗΣ, Σ. Δρ Πολιτικός Μηχανικός, ΕΔΑΦΟΣ Ε.Π.Ε.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Υλικά κατολισθήσεων που έχουν μετακινηθεί σημαντικά καλύπτουν ορισμένες φορές παλιές κοίτες ποταμών ή άλλους διαπερατούς σχηματισμούς με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας ιδιαίτερης μορφής της κατανομής της πίεσης πόρων με το βάθος εντός της μάζας τους που οφείλεται στην υποστράγγισή τους από τη θαμμένη διαπερατή στρώση. Πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις για την προσομοίωση του καθεστώτος των πιέσεων πόρων εντός τέτοιων υλικών καταλήγοντας σε οδηγίες για την ορθή κατάσταση του αριθμητικού προσομοιώματος, αλλά και σε απαντήσεις που αφορούν τη διαπερατότητα των απαντώμενων σχηματισμών, την επικοινωνία τους με άλλους σχηματισμούς και τις οριακές συνθήκες του προβλήματος.

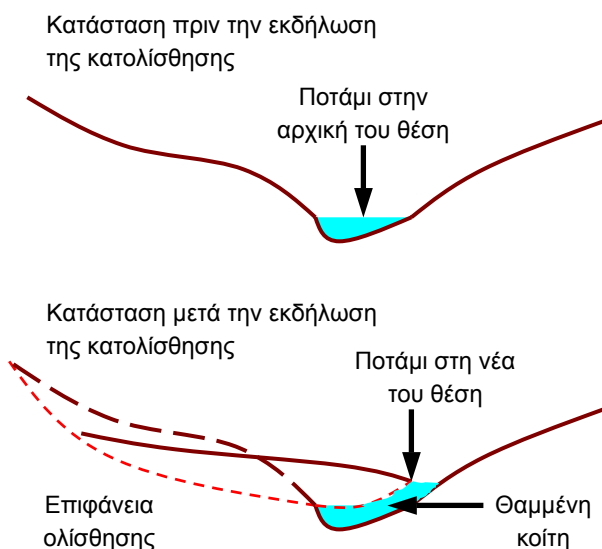
**ABSTRACT :** Landslides sometimes cover permeable materials lying downhill of their original position. As a result the downhill part of the landslide mass is underdrained, i.e. a perched water table is established in the low permeability landslide material. Numerical analyses for the simulation of the pore pressure regime in such cases were performed, leading to guidelines for the correct setup of the numerical model. At the same time answers are given to questions regarding the permeability of the formations involved and their connection to other formations and the boundary conditions of the problem.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παλιοκατολισθήσεις μεγάλου μεγέθους με σημαντικές μετακινήσεις από το χρόνο εκδήλωσής τους μέχρι σήμερα οδηγούν ορισμένες φορές στην κάλυψη διαπερατών σχηματισμών από τα υλικά κατολίσθησης. Αυτοί μπορεί να είναι σχηματισμοί διαπερατών πετρωμάτων ευρισκόμενοι κατάντη των κατολισθήσεων κατά τον χρόνο της εκδήλωσής τους ή συχνότερα κοίτες ποταμών που θάβονται από τα υλικά κατολίσθησης με τον ρου των ποταμών να εκτρέπεται από αυτά. Οι Μπαρδάνης κ.α. (2006), παρουσίασαν παραδείγματα δύο κατολισθήσεων από τον ελλαδικό χώρο, ο πόδας των οποίων έχει καλύψει παλιές κοίτες ποταμών και οι Ντουνιάς & Δέδε (2006) παρουσίασαν μία κατολίσθηση, ο πόδας της οποίας έχει καλύψει διαπερατούς σχηματισμούς. Και στις τρεις ανα-

φερόμενες περιπτώσεις τα υλικά κατολίσθησης στην περιοχή του ποδός υποστραγγίζονται λόγω της παρουσίας του θαμμένου διαπερατού σχηματισμού που βρίσκεται υπό χαμηλότερη πίεση πόρων από την αντιστοιχούσα στην υδροστατική κατανομή της πίεσης πόρων σε εκείνο το βάθος.

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται ο τυπικός μηχανισμός δημιουργίας τέτοιων γεωλογικών διαστρωματώσεων, όπως αφορά σε παλιές κοίτες ποταμών. Σε ένα πρηνές που αστοχεί τα υλικά κατολίσθησης αρχίζουν να καλύπτουν τη διαμορφωμένη κοίτη, εκτρέποντας ταυτόχρονα την κοίτη του ποταμού προς την αντίθετη πλευρά απ' την οποία κινείται η κατολίσθηση με αποτέλεσμα τη δημιουργία νέας κοίτης. Ανάλογα με το πόσο στενή είναι η διαμορφωμένη κοίτη πριν από την εκδήλωση της κατολίσθησης και πόσο ραγδαία η μετακίνηση



Σχήμα 1. Μηχανισμός κάλυψης παλαιών κοιτών από υλικά κατολίσθησης.

Figure 1. Mechanism leading to covering of old river-beds by landslide materials.

της κατολισθαίνουσας μάζας, η αρχική κοίτη μπορεί να καλύπτεται αργά ή να καλύπτεται γρήγορα. Στην πρώτη περίπτωση η θαμμένη κοίτη, η νέα κοίτη και η στρώση που τις ενώνει έχουν πρακτικά ίδιο πάχος και η διαφορά ύψους μεταξύ αρχικής και νέας κοίτης είναι πολύ μικρή. Στη δεύτερη περίπτωση η στρώση που ενώνει παλιά και νέα κοίτη έχει μικρό πάχος και η θαμμένη κοίτη βρίσκεται πολύ χαμηλότερα της σημερινής. Ο προσδιορισμός μεγεθών όπως η υψομετρική διαφορά θαμμένης και νέας κοίτης, το πάχος της στρώσης των υλικών που τις συνδέουν και το πάχος των υλικών της νέας κοίτης αμέσως ανάντη της κατολίσθησης προσφέρουν στοιχεία για το μέγεθος των μετακινήσεων κατά τον χρόνο εκδήλωσης της κατολίσθησης.

Η παρουσία των διαπερατών σχηματισμών κάτω από τα υλικά κατολίσθησης είναι σημαντική, καθώς κατακόρυφα φρέατα που κατασκευάζονται από την επιφάνεια του εδάφους, διαπερνούν τα υλικά κατολίσθησης και φτάνουν μέχρι τις διαπερατές στρώσεις, αποτελούν ελκυστική λύση στράγγισης της κατολίσθησης, εναλλακτική της κατασκευής αποστραγγιστικής σήραγγας. Απαραίτητη προϋπόθεση για τον σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων στράγγισης ωστόσο αποτελεί η καλή γνώση του αρχικού καθεστώτος της πίεσης πόρων στην περιοχή που τα υλικά κατολίσθησης υπέρκεινται των διαπερατών υλικών, αφού αυτό συνιστά τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος. Το καθεστώς αυτό παρουσιάζει

ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε ό,τι αφορά τον εντοπισμό της ύπαρξής του και την τεκμηρίωση της μορφής του (μη γραμμική κατανομή της πίεσης πόρων με το βάθος). Οι Μπαρδάνης κ.α. (2006) παρουσίασαν παραδείγματα τέτοιων κατανομών πίεσης πόρων, καθώς και του τρόπου εντοπισμού τους.

Εκτός όμως από τον εντοπισμό του επικρατούντος καθεστώτος πιέσεων πόρων, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η προσομοίωση της κατάστασης αυτής. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος δεν επιτρέπει τη διαχείρισή του μέσω απλής γραφικής επίλυσης με διαγράμματα ροής ή αναλυτικών λύσεων, απαιτώντας την υιοθέτηση μεθόδων αριθμητικής προσομοίωσης της υπόγειας ροής. Αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της επίδρασης των σχεδιαζόμενων αποστραγγιστικών έργων. Το πρώτο και κύριο βήμα όμως στα πλαίσια τέτοιων αναλύσεων είναι η προσομοίωση του αρχικού καθεστώτος της πίεσης πόρων συναρτήσει των οριακών συνθηκών που εισάγονται στο αριθμητικό προσομοίωμα και των τιμών των παραμέτρων και των καταστατικών προσομοιωμάτων που εισάγονται για τη διαπερατότητα των υλικών που απαντώνται. Η επιλογή του είδους και των τιμών των παραμέτρων πρέπει προφανώς να δικαιολογείται από το γεωλογικό προσομοίωμα, τη φύση των υλικών και τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής.

Στο παρόν άρθρο παρουσιάζεται η γενική γεωμετρική μορφή των παρατηρούμενων κατανομών πίεσης πόρων και διερευνώνται αριθμητικά οι προϋποθέσεις ανάπτυξής τους, μέσω της κατάλληλης επιλογής τιμών συντελεστή διαπερατότητας  $k$ , καταστατικού προσομοιώματος για αυτόν και είδους και τιμών οριακών συνθηκών στο αριθμητικό προσομοίωμα, καταλήγοντας σε οδηγίες, για τη μέθοδο προσομοίωσης και τα μεγέθη που πρέπει να προσδιοριστούν στα πλαίσια της γεωτεχνικής έρευνας σε μία τέτοια κατολίσθηση.

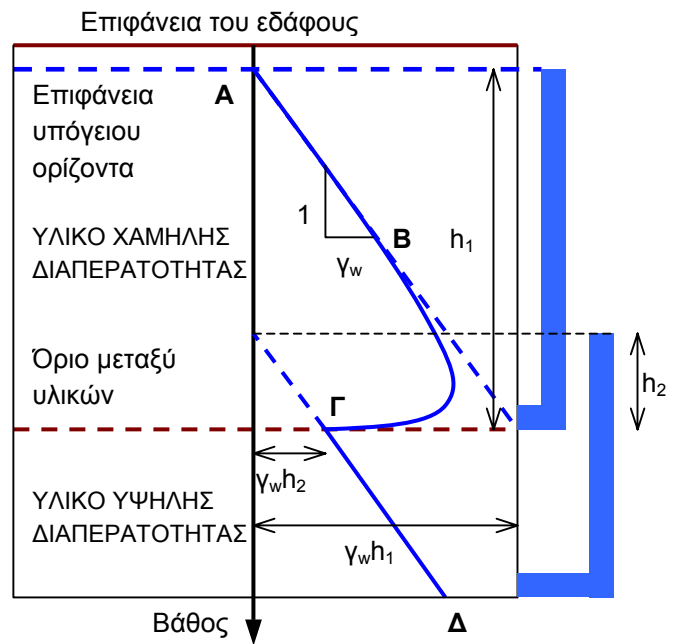
## 2. ΑΠΑΝΤΩΜΕΝΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΠΙΕΣΗΣ ΠΟΡΩΝ

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η γενική μορφή της κατανομής πίεσης πόρων που αναπτύσσεται εντός υλικών κατολίσθησης που υπέρκεινται διαπερατών υλικών υπό χαμηλότερη πίεση σε γεωγραφικές περιοχές με υψηλή βροχόπτωση Αυτή ακολουθεί την υδροστατική κατανομή της πίεσης πόρων μέχρι σημαντικό βάθος, με την πίεση πόρων να μειώνεται στη συνέχεια μέχρι την τιμή της πίε-

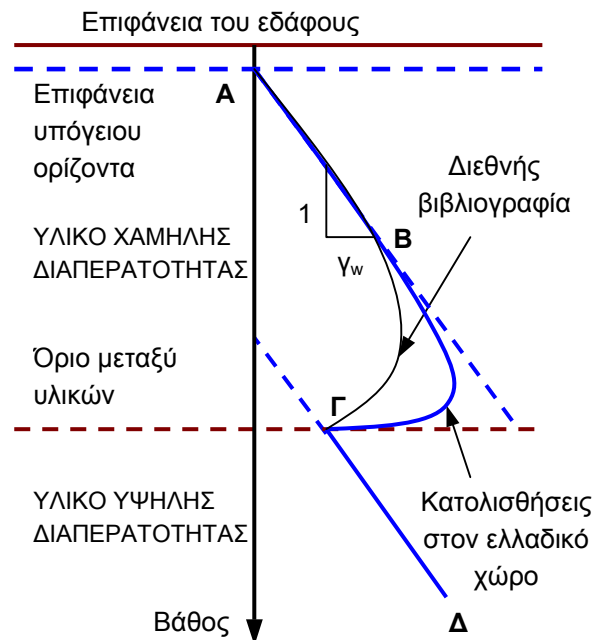
σης στην οποία υπακούει η υποκείμενη θαμμένη στρώση στο όριο ακριβώς μεταξύ των δύο στρώσεων. Η ανώτερη στρώση υλικού χαμηλότερης διαπερατότητας βρίσκεται υπό πίεση ίση με  $\gamma_w h_1$ , που αντιστοιχεί στο ύψος  $h_1$  από τη διεπιφάνεια υλικών κατολίσθησης-θαμμένης διαπερατής στρώσης, και η κατώτερη στρώση υλικού υψηλότερης διαπερατότητας βρίσκεται υπό πίεση ίση με  $\gamma_w h_2$ , όπου  $h_2$  το υδραυλικό ύψος από τη διεπιφάνεια υλικών κατολίσθησης-θαμμένης διαπερατής στρώσης που καθορίζει την πίεση εντός αυτής.

Παρόμοιες κατανομές πιέσεων πόρων εντός φυσικών υλικών χαμηλής διαπερατότητας αναφέρονται στη βιβλιογραφία από τους Kenward & Reader (1975), Vaughan & Wallbancke (1975) και Vaughan (1994), οι οποίοι επισημαίνουν ότι για την επίτευξή τους, βασική προϋπόθεση αποτελεί η μείωση του συντελεστή διαπερατότητας με το βάθος ως αποτέλεσμα της αύξησης της ενεργού τάσης και της συνεπακόλουθης μείωσης του λόγου κενών. Η σχετική επιρροή έχει διερευνηθεί από τους Bromhead & Vaughan (1980), Vaughan (1983) και Vaughan (1989) για διάφορες μάλιστα κατανομές του συντελεστή διαπερατότητας με την κατακόρυφη τάση και τον λόγο κενών.

Αντίθετα ωστόσο από την μορφή της κατανομής της πίεσης πόρων στα αναφερόμενα στη βιβλιογραφία παραδείγματα, όπου η μείωση της πίεσης πόρων εντός των υλικών χαμηλότερης διαπερατότητας αρχίζει από μέσο βάθος (σε σχέση με το βάθος της διαπερατής στρώσης), στα παραδείγματα από τον ελλαδικό χώρο (Μπαρδάνης κ.α., 2006) η μείωση της πίεσης πόρων αρχίζει από σημαντικά μεγαλύτερο βάθος. Το βάθος αυτό μάλιστα είναι τόσο, που η περιοχή μείωσης της πίεσης πόρων, από την αντιστοιχούσα υδροστατική στην χαμηλότερη πίεση της υποκείμενης στρώσης, περιορίζεται πρακτικά στα τελευταία 2-3 m πάνω από τη διεπιφάνεια υλικών κατολίσθησης-θαμμένης κοίτης (Σχ. 3). Στη ζώνη αυτή λοιπόν ο συντελεστής διαπερατότητας μειώνεται πολύ περισσότερο από την αντιστοιχούσα στο βάθος αυτό μεταβολή της κατακόρυφης τάσης. Η εξήγηση βρίσκεται στο ότι στο βάθος αυτό εντοπίζεται η επιφάνεια ολίσθησης, όπου η διάτμηση έχει προκαλέσει επιλεκτικό προσανατολισμό των αργιλικών πλακιδίων στην οριζόντια διεύθυνση με αποτέλεσμα η συνιστώσα του συντελεστή διαπερατότητας στην κατακόρυφη διεύθυνση να είναι πολύ μικρότερη της αντιστοιχούσας στο επίπεδο τάσεων τιμής του. Η πιθανόν αμετάβλητη τιμή του συντελεστή διαπερατότητας στην οριζόντια διεύθυνση δεν



Σχήμα 2. Κατανομή πίεσης πόρων με το βάθος σε υλικά χαμηλής διαπερατότητας με υποστράγγιση που υπέρκεινται πιο διαπερατής στρώσης υπό χαμηλότερη πίεση.  
Figure 2. Pore pressure distribution with depth in low permeability soil with underdrainage overlying higher permeability layer under lower pressure.



Σχήμα 3. Σύγκριση κατανομών πίεσης πόρων σε υλικά με υποστράγγιση από παραδείγματα της διεθνούς βιβλιογραφίας και κατολισθήσεις στον ελλαδικό χώρο.  
Figure 3. Comparison between pore pressure distributions in soils with underdrainage from the literature and landslides in Greece.

επηρεάζει, αφού για την ανάπτυξη των παρατηρηθεισών κατανομών πίεσης πόρων έχει σημασία η κατακόρυφη συνιστώσα του μεγέθους αυτού. Η επιφάνεια ολίσθησης λοιπόν λειτουργεί σαν ένα είδος αδιαπέρατης «μεμβράνης» που δυσχεραίνει ακόμα περισσότερο τη φυσική στράγγιση των υλικών κατολίσθησης προς τη θαμμένη διαπερατή στρώση, από όσο την προκαλεί ούτως ή άλλως η μείωση του συντελεστή διαπερατότητας με την αύξηση της τάσης με το βάθος.

### 3. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ

Για την αριθμητική διερεύνηση του προβλήματος πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις υπόγειας ροής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων όπως αυτή ενσωματώνεται στον κώδικα SLIDE, της Rocscience Ltd. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η γεωμετρία του θεωρητικού παραδείγματος για το οποίο καταστρώθηκε το προσομοίωμα. Αποτελείται από 415 τετραπλευρικά, οκτακομβικά πεπερασμένα στοιχεία. Τα διατιθέμενα από τον κώδικα πεπερασμένα στοιχεία διαθέτουν βαθμούς ελευθερίας ως προς την πίεση πόρων και την ταχύτητα ροής και δυνατότητα εισαγωγής αρνητικών τιμών της πίεσης και συνεκτίμηση της επιρροής τους στην υπόγεια ροή μέσω της μείωσης που προκαλούν στον συντελεστή διαπερατότητας. Οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος ήταν 1252. Προς απλοποίηση των συμπερασμάτων των θεωρητικών αναλύσεων, αυτές επιλέχθηκε να γίνουν σε ένα θεωρητικό παράδειγμα κατολίσθησης που έχει καλύψει την παλιά κοίτη ενός ποταμού. Καταστρώθηκε λοιπόν το προσομοίωμα (Σχ. 4) μίας κατολίσθησης μήκους 120 m, μέγιστου βάθους 17 m, βάθους πάνω από τη θαμμένη κοίτη 15-17 m, με πάχος θαμμένης στρώσης 5 m και υψομετρική διαφορά σημερινής κοίτης από τη διεπιφάνεια υλικών κατολίσθησης-θαμμένης κοίτης 5 m. Τα υλικά κατολίσθησης οριοθετούνται από το σχήμα ΒΓΔΕΖΗ, η στρώση των διαπερατών υλικών από το σχήμα ΔΕΖΘΙΚΛ, και κάτω από αυτά εισήχθη ενδιάμεση στρώση μέχρι τη γραμμή ΜΝΞΟ, κάτω από την οποία εισήχθη το βραχώδες υπόβαθρο.

### 4. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ

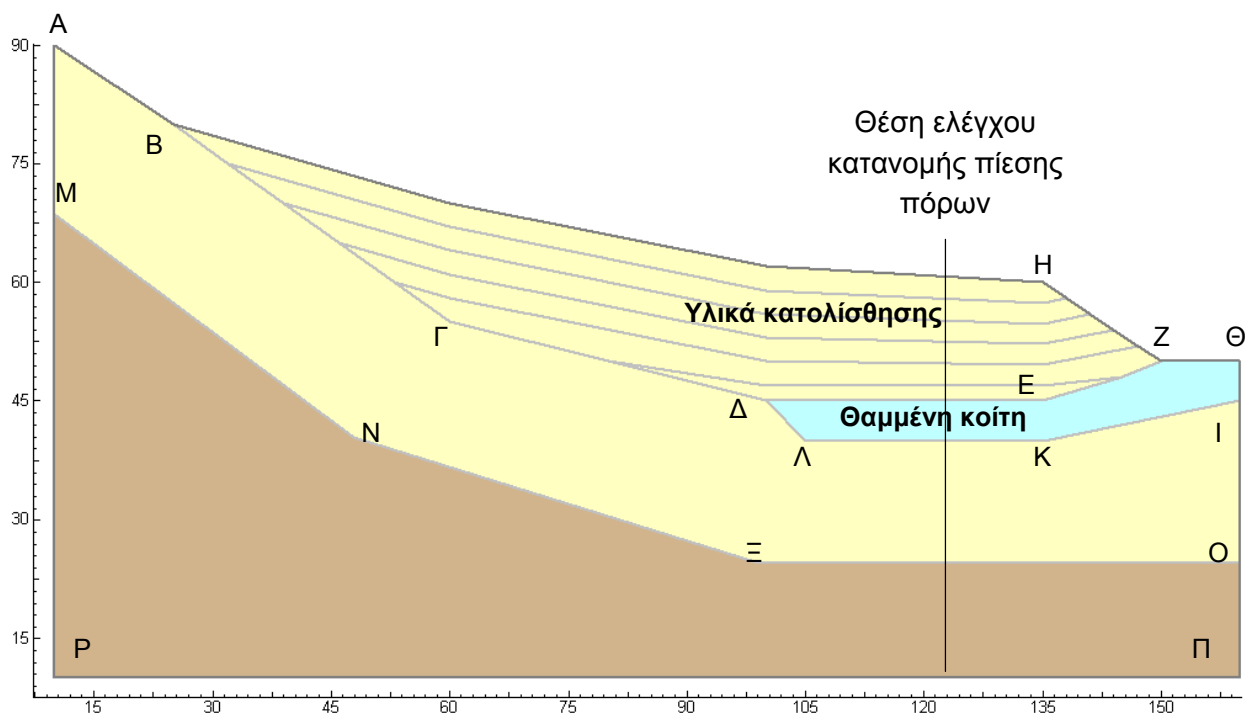
Η πρώτη ομάδα αριθμητικών αναλύσεων αφορούσε στη διερεύνηση του προβλήματος ως προς τον συντελεστή διαπερατότητας των υλικών κατολίσθησης. Ο πρώτος από αυτούς

τους ελέγχους έγινε αναζητώντας μοναδική τιμή του συντελεστή διαπερατότητας με την οποία θα μπορούσε να προβλεφθεί η θεωρητική κατανομή της πίεσης πόρων με το βάθος που απεικονίζεται στο Σχήμα 5 (υπόθεση ομοιογενούς ισοτροπικού συντελεστή διαπερατότητας). Δοκιμάστηκαν 5 διαφορετικές τιμές του συντελεστή διαπερατότητας ( $10^{-8}$ ,  $10^{-9}$ ,  $10^{-10}$ ,  $10^{-11}$  και  $10^{-12}$  m/s με τιμή για τη θαμμένη κοίτη  $10^{-4}$  m/s). Όπως προκύπτει από τις προβλεφθείσες κατανομές της πίεσης πόρων στη θέση ελέγχου (Σχ. 5), καμία δεν μπόρεσε να προβλέψει, όχι μόνο τη θεωρητική κατανομή, αλλά ούτε καν μία κατανομή πίεσης πόρων που να αντιστοιχεί σε υποστράγγιση.

Μετά από τα αποτελέσματα των αναλύσεων με ομοιογενή συντελεστή διαπερατότητας εκτελέστηκαν αναλύσεις με ανομοιογενή συντελεστή διαπερατότητας. Λόγω της έλλειψης καταστατικού νόμου για ανομοιογενή με το βάθος συντελεστή διαπερατότητας, η ανομοιογένεια εισήχθη μέσω ξεχωριστών στρώσεων, παράλληλων με την επιφάνεια του εδάφους (ιδέ επιμέρους στρώσεις των υλικών κατολίσθησης στο Σχ. 4). Η παραλληλία αυτή σταματά στον πόδα της κατολίσθησης αφού θεωρείται ορθότερη η θεώρηση ενός γεωλογικού προσομοιώματος, τέτοιου που ο πόδας να αποτελεί προϊόν της διαβρωτικής δράσης του ποταμού, οπότε οι τιμές του συντελεστή διαπερατότητας αντιστοιχούν στο επίπεδο τάσεων προ της διάβρωσης αυτής. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται οι κατανομές του συντελεστή διαπερατότητας που δοκιμάστηκαν (εισήχθησαν στο αριθμητικό προσομοίωμα με βαθμιδωτή αντί για μαθηματικά συνεχή κατανομή). Οι χρησιμοποιηθείσες κατανομές του συντελεστή διαπερατότητας με το βάθος αντιστοιχούν σε γραμμική συσχέτιση του λογαρίθμου του συντελεστή διαπερατότητας με την κατακόρυφη τάση (και άρα με το βάθος). Η γενική μορφή μιας τέτοιας συσχέτισης έχει τη μορφή της Εξίσωσης 1.

$$k = a \times \log \sigma_v \quad (1)$$

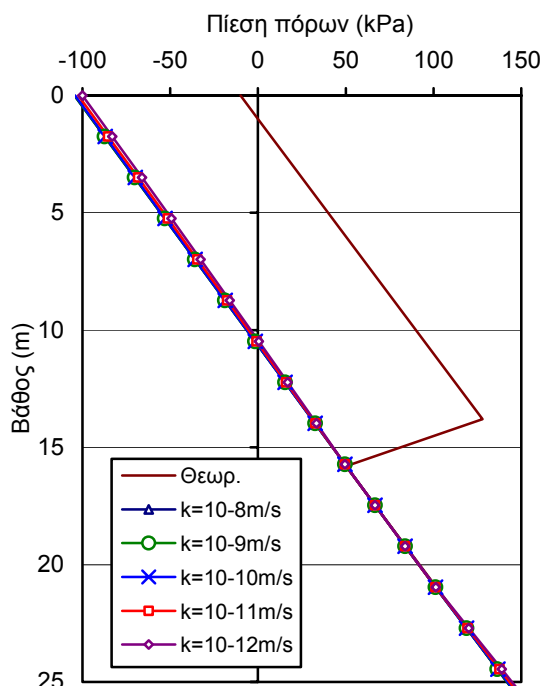
όπου  $a$  ο συντελεστής αναλογίας μεταξύ του συντελεστή διαπερατότητας και του λογαρίθμου της κατακόρυφης ενεργού τάσης. Για όλες τις κατανομές υποτέθηκε ο ίδιος συντελεστής διαπερατότητας που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος των υλικών κατολίσθησης ( $10^{-8}$  m/s) και μεταβλήθηκε ο ρυθμός μείωσης του με το βάθος (ο συντελεστής  $a$ ). Δοκιμάστηκαν 5 διαφορετικές τιμές του  $a$ :  $\alpha$ ) -0.050,  $\beta$ ) -0.075,  $\gamma$ ) -0.100,  $\delta$ ) -0.125 και  $\epsilon$ ) -0.150 ανά μέτρο βάθους (Σχ. 6). Προφανώς κατά την επίλυση



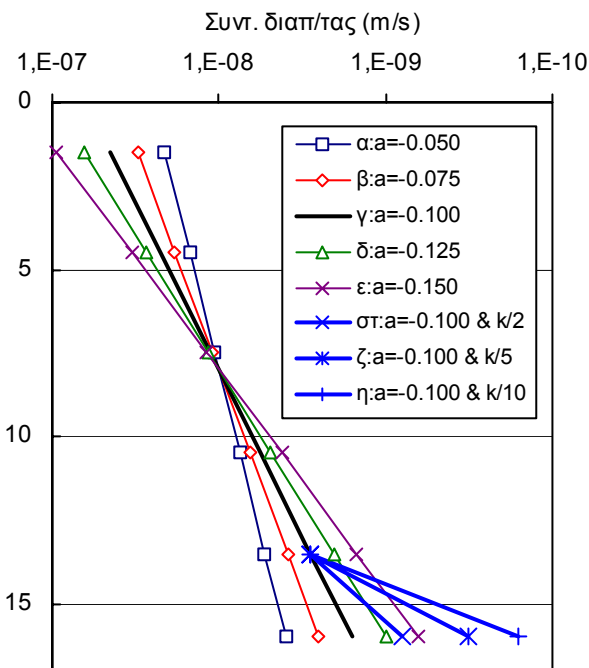
Σχήμα 4. Γεωμετρία του θεωρητικού παραδείγματος κατολίσθησης που υπέρκειται θαμμένης διαπερατής στρώσης για το οποίο καταστρώθηκε αριθμητικό προσομοίωμα.  
 Figure 4. Geometry of the theoretical example of a landslide overlying a buried permeable layer for which the numerical model was set up.

ενός πραγματικού προβλήματος ο ρυθμός αυτός δεν αποτελεί αντικείμενο διερεύνησης, αλλά δεδομένο από τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής έρευνας (αποτελέσματα επιτόπου δοκιμών διαπερατότητας). Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται οι κατανομές της πίεσης για τις κατανομές του συντελεστή διαπερατότητας που δοκιμάστηκαν. Όπως προκύπτει από τις προβλεφθείσες κατανομές της πίεσης πόρων στη θέση ελέγχου, καμμία δεν μπόρεσε να προβλέψει, όχι μόνο τη θεωρητική κατανομή, αλλά ούτε καν μία κατανομή πίεσης πόρων που να αντιστοιχεί σε υποστράγγιση. Η ανομοιογένεια λοιπόν του συντελεστή διαπερατότητας των υλικών κατολίσθησης δεν επαρκεί για την ανάπτυξη επικρεμάμενου υπόγειου ορίζοντα.

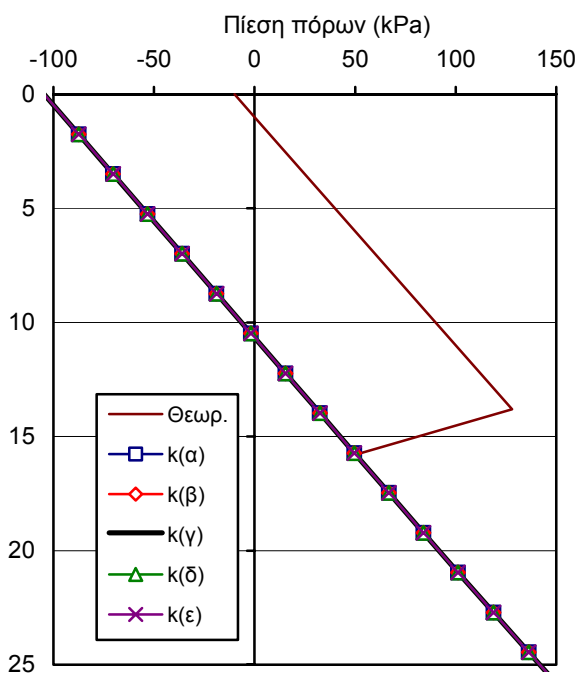
Στην τελευταία ομάδα αναλύσεων εισήχθη ο μικρότερος συντελεστής διαπερατότητας στη ζώνη της επιφάνειας ολίσθησης αμέσως πάνω από την διεπιφάνεια υλικών κατολίσθησης-θαμμένης διαπερατής στρώσης που αντιστοιχεί στον επιλεκτικό προσανατολισμό των αργιλικών πλακιδίων λόγω διάτμησης. Η κατανομή του συντελεστή διαπερατότητας με το βάθος εντός των υλικών κατολίσθησης ήταν η κατανομή  $\gamma$  του Σχήματος 6 (στην οποία ο ρυθμός μείωσης του συντελεστή διαπερατότητας με το βάθος αντιστοιχεί σε πραγματικά δεδομένα για



Σχήμα 5. Θεωρητική κατανομή της πίεσης πόρων με το βάθος συγκρινόμενη με τις προβλεφθείσες με τη ΜΠΣ για ισοτροπικό και ομοιογενή συντελεστή διαπερατότητας.  
 Figure 5. Theoretical distribution of pore pressure with depth compared to predicted by FEM analyses with isotropic, homogeneous with depth coefficient of permeability.



Σχήμα 6. Δοκιμασθείσες κατανομές του συντελεστή διαπερατότητας με το βάθος εντός των υλικών κατολίσθησης.  
Figure 6. Tested distributions of coefficient of permeability with depth for the landslide material.



Σχήμα 7. Θεωρητική κατανομή της πίεσης πόρων με το βάθος συγκρινόμενη με τις προβλεφθείσες με τη ΜΠΣ για συντελεστή διαπερατότητας μειούμενο με το βάθος.  
Figure 7. Theoretical distribution of pore pressure with depth compared to predicted by FEM analyses with coefficient of permeability decreasing with depth.

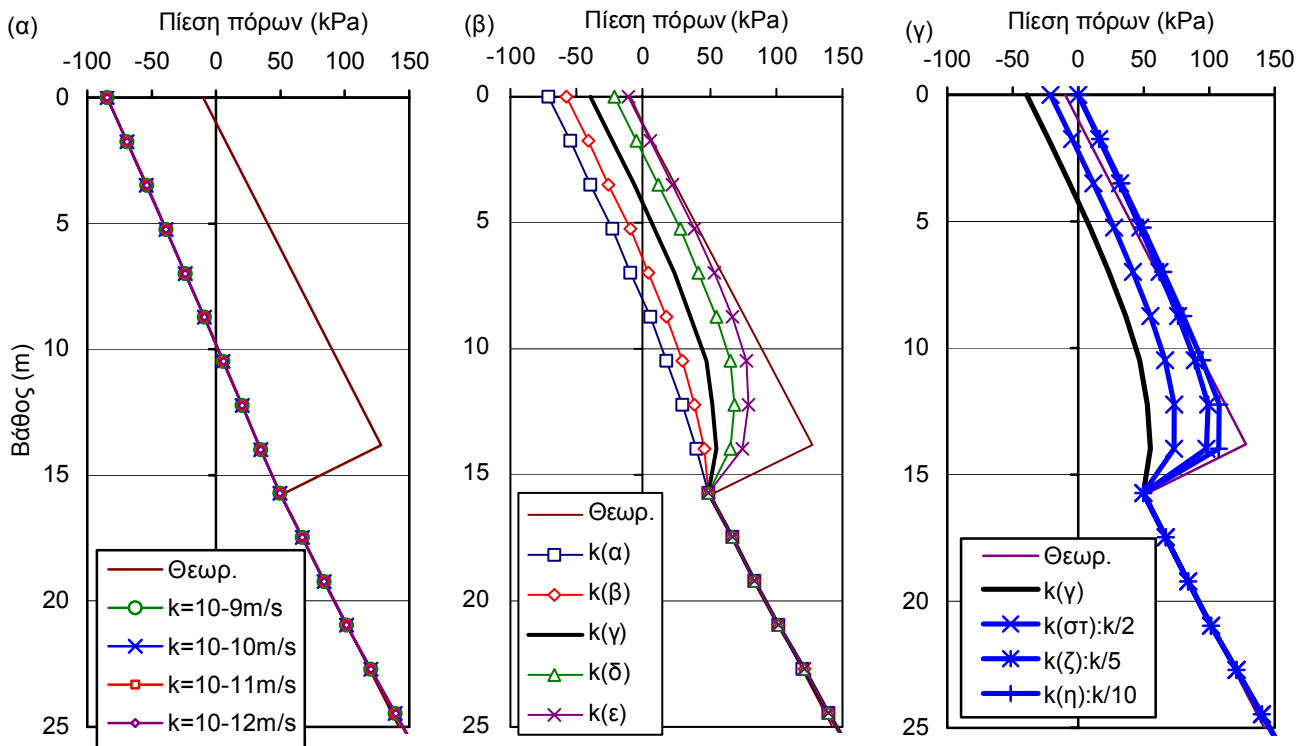
υλικά κατολίσθησης σε ιλυολιθικό φλύσχη, Μπαρδάνης κ.α., 2006). Ο συντελεστής διαπερατότητας στην οριζόντια διεύθυνση υποτέθηκε ο ίδιος όπως και στην προηγούμενη ομάδα αναλύσεων, ενώ ο συντελεστής διαπερατότητας στην κατακόρυφη διεύθυνση υποτέθηκε 2 (στ), 5 (ζ) και 10 (η) φορές μικρότερος. Και πάλι όχι μόνο δεν προβλέφθηκε η θεωρητική κατανομή, αλλά ούτε καν μία κατανομή πίεσης πόρων που να αντιστοιχεί σε υποστράγγιση.

## 5. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Βασικό συμπέρασμα των προηγούμενων αναλύσεων είναι ότι μόνη της η κατάλληλη τιμή του συντελεστή διαπερατότητας ή η μείωσή του με το βάθος δεν επαρκούν για την πρόβλεψη κατανομής πίεσης πόρων με υποστράγγιση. Η επόμενη ομάδα αναλύσεων αφορούσε στη διερεύνηση του προβλήματος ως προς τις οριακές συνθήκες του αριθμητικού προσομοιώματος και συγκεκριμένα την κατείσδυση από την επιφάνεια του εδάφους. Αν αναζητηθούν εμπειρικές συσχετίσεις για αυτό το μέγεθος (ενδεικτικά: Ξανθόπουλος, 1990), προκύπτει ότι εξαρτάται από την κλίση της επιφάνειας του εδάφους, το υψόμετρο, το είδος του εδάφους στην επιφάνεια, το βαθμό κορεσμού του κοντά στην επιφάνεια, τη φυτοκάλυψη και το είδος της βλάστησης. Η προσπάθεια να υπολογιστεί λοιπόν η τιμή του μεγέθους αυτού κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους σε ένα πραγματικό πρόβλημα οδηγεί σε τιμές του και κατανομές του κατά μήκος της εξεταζόμενης διατομής που ξεφεύγουν από τις συνήθεις δυνατότητες υπολογισμού (και ακόμα περισσότερο από τα δεδομένα που είναι συνήθως διαθέσιμα ακόμα και σε μία αρκετά εκτεταμένη γεωτεχνική έρευνα υποβοηθούμενη από υδρολογικά δεδομένα). Αντ' αυτού θεωρήθηκε ότι εφαρμόζεται ενιαία τιμή της κατείσδυσης σε ένα τμήμα μόνο του μήκους της διατομής και δοκιμάστηκαν διάφορες τιμές για το τμήμα αυτό του μήκους της διατομής και την ίδια την τιμή της κατείσδυσης. Η διαδικασία αυτή προτείνεται άλλωστε και ως μέθοδος, αντί για την προσπάθεια υπολογισμού της κατείσδυσης και της κατανομής της επί της επιφάνειας του εδάφους.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 8. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 8α, η εισαγωγή κατείσδυσης από την επιφάνεια δεν παίζει κανένα ρόλο όταν τα υλικά κατολίσθησης θεωρούνται ομοιογενή ως προς τον συντελεστή διαπερατότητάς τους.





Σχήμα 8. Θεωρητική κατανομή της πίεσης πόρων με το βάθος συγκρινόμενη με τις προβλεφθείσες με τη ΜΠΣ για εισαγωγή κατείδυσης από την επιφάνεια και: α) ομοιογενή συντελεστή διαπερατότητας, β) συντελεστή διαπερατότητας μειούμενο με το βάθος, και γ) συντελεστή διαπερατότητας μειούμενο με το βάθος με περαιτέρω μείωσή του στη ζώνη της επιφάνειας ολίσθησης (κατανομές του συντελεστή διαπερατότητας με το βάθος από το Σχ. 6).

Figure 8. Theoretical distribution of pore pressure with depth compared to predicted by FEM analyses after introduction of infiltration from the ground surface with: α) homogeneous with depth coefficient of permeability, β) coefficient of permeability decreasing with depth, and γ) coefficient of permeability decreasing with depth with further decrease at the zone of the sliding surface (distributions of coefficient of permeability with depth as shown in Fig. 6).

Αντίθετα, όπως φαίνεται από το Σχήμα 8β, όταν θεωρούνται ανομοιογενή, με τον συντελεστή διαπερατότητας να μειώνεται με το βάθος, όσο πιο μεγάλη η μείωση του συντελεστή διαπερατότητας με το βάθος, τόσο καλύτερα προσομοιώνουν την παρουσία επικρεμάμενου υπόγειου οριζοντα εντός των υλικών κατολίσθησης. Για την τιμή του ρυθμού μείωσης με το βάθος που αντιστοιχεί στα πραγματικά δεδομένα, όσο αυξάνεται ο συντελεστής ανισοτροπίας της ζώνης που αντιστοιχεί στην επιφάνεια ολίσθησης, δηλαδή όσο μειώνεται η κατακόρυφη συνιστώσα του  $k$  ως προς την οριζόντια στην στρώση αυτή, τόσο καλύτερα προσομοιώνεται η παρουσία επικρεμάμενου υπόγειου οριζοντα εντός των υλικών κατολίσθησης (Σχ. 8γ). Τέλος, ελέγχοντας την τιμή της κατείδυσης με μεγαλύτερη ακρίβεια, προσομοιώνεται τελικά η μορφή της κατανομής της πίεσης πόρων (Σχ. 9).

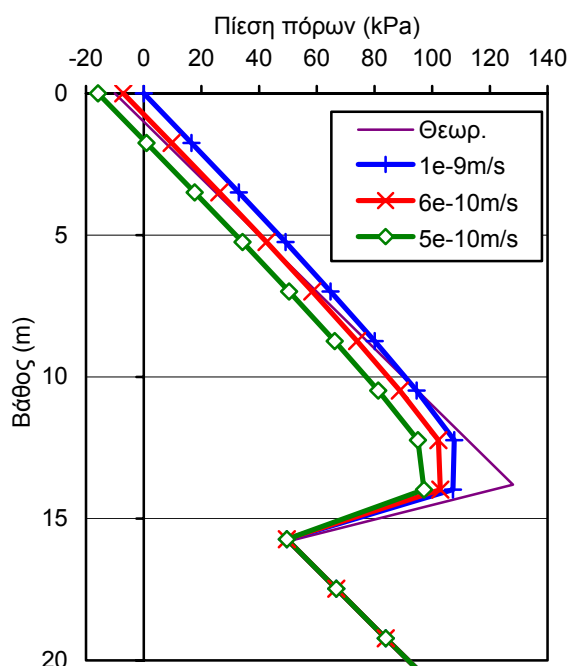
## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για να προβλεφθεί το καθεστώς των πιέσεων πόρων που παρατηρείται στα κατάντη τμήματα κατολισθήσεων που υπέρκεινται διαπερατών σχηματισμών, πρέπει:

α. Να εισαχθεί μείωση του συντελεστή διαπερατότητας των υλικών κατολίσθησης με το βάθος.

β. Η μείωση αυτή δεν επαρκεί μόνη της για την πρόβλεψη της έντονης μείωσης της πίεσης πόρων που παρατηρείται κοντά στη διεπιφάνεια υλικών κατολίσθησης-διαπερατής στρώσης και πρέπει να εισαχθεί ακόμα πιο ραγδαία μείωση του συντελεστή διαπερατότητας εκεί. Αυτή δε συνιστά απλώς αριθμητική απαίτηση, αλλά επιβάλλεται φυσικά λόγω της παρουσίας της επιφάνειας ολίσθησης σε εκείνη τη θέση.

γ. Επειδή πρόκειται για υλικά κατολίσθησης, συχνά τалаιπωρημένα, κατακερματισμένα, εξαλλοιωμένα και τεκτονισμένα ως αποτέλεσμα



Σχήμα 9. Επιρροή της τιμής της κατείδυσης (κατανομή  $\gamma$  και λόγος ανισοτροπίας 10).  
Figure 9. Influence of infiltration value (distribution  $\gamma$  and anisotropy ratio 10).

προηγούμενων της εκδήλωσης της κατολίσθησης διεργασιών αλλά και αυτής καθεαυτής της μετακίνησής τους λόγω της κατολίσθησης, η εισαγωγή ανισοτροπίας στο συντελεστή διαπερατότητας δεν δικαιολογείται φυσικά, όπως π.χ. σε φυσικές ιζηματογενείς αργίλους. Εξαιρεση αποτελεί η στρώση που προσομοιώνει τη χαμηλότερης διαπερατότητας στρώση των υλικών κατολίσθησης αμέσως πάνω από τη διεπιφάνεια υλικών κατολίσθησης-διαπερατών σχηματισμών, λόγω του προσανατολισμού των πλακιδίων της αργίλου εκεί εξαιτίας της διάτμησης κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης. Και πάλι ωστόσο ο τεκμηριωμένος προσδιορισμός του συντελεστή ανισοτροπίας αποτελεί ιδιαίτερα δύσκολο επίτευγμα. Η αποφυγή εισαγωγής ανισοτροπίας για όλη την υπόλοιπη μάζα των υλικών κατολίσθησης είναι επιβεβλημένη, αφού, αν και δεν προκαλεί διαφορές κατά το στάδιο της βαθμονόμησης ως προς τις αρχικές συνθήκες, οδηγεί σε προβλέψεις σε βάρος της ασφάλειας κατά τις αναλύσεις με μέτρα βαθείας στράγγισης που χρησιμοποιούν τις θαμμένες διαπερατές στρώσεις.

δ) Εκτός από τη μείωση του συντελεστή διαπερατότητας, απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη των παρατηρηθεισών κατανομών πίεσης πόρων είναι και η εισαγωγή κατείδυσης από την επιφάνεια. Ο προσδιορισμός της έκτα-

σης στην οποία εφαρμόζεται ως οριακή συνθήκη στα πλαίσια αριθμητικών αναλύσεων και το μέγεθός της αποτελούν περισσότερο αποτέλεσμα αντίστροφης ανάλυσης (κατ' αντιστοιχία με άλλα μεγέθη, όπως η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής στις αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας) παρά μαθηματικού υπολογισμού από υπάρχουσες συσχετίσεις.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bromhead, E.N., Vaughan, P.R. (1980) "Solutions for seepage in soils with an effective stress dependent permeability", Proc. Conf. Num. Methods for Non-linear Problems, Vol 1, pp. 567-578.
- Kennard, M.F., Reader, R.A. (1975) "Cow Green dam and reservoir", Proc. Instn Civ. Engrs, Part 1, 58, May, pp. 147-175.
- Μπαρδάνης, Μ., Ντουνιάς, Γ., Καβουνίδης, Σ. (2006), «Παραδείγματα υλικών κατολίσθησης χαμηλής διαπερατότητας με υποστράγγιση από τον ελλαδικό χώρο», 5<sup>ο</sup> Παν. Συν. Γεωτ. & Γεωπ/κής Μηχανικής, Ξάνθη, 31 Μαΐου-2 Ιουνίου 2006.
- Ντουνιάς, Γ. και Δέδε, Β. (2006). «Σταθεροποίηση με στραγγιστικές σήραγγες της κατολίσθησης '93 του ταμιευτήρα Ευήνου», 5<sup>ο</sup> Παν. Συν. Γεωτ. & Γεωπ/κής Μηχανικής, Ξάνθη, 31 Μαΐου-2 Ιουνίου 2006.
- Ξανθόπουλος, Θ. Σ. (1990). «Εισαγωγή στην τεχνική υδρολογία», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- Vaughan, P.R. (1989) "Non-linearity in seepage problems—theory and field observations", De Mello Volume, Sao Paulo, Edgar Blucher, pp. 501-516.
- Vaughan, P.R. (1994) "Assumption, prediction and reality in geotechnical engineering", Geotechnique, Vol 44, No 4, pp. 573-608.
- Vaughan, P.R., Kennard, R.M., Greenwood, D.A. (1983) "Squeeze grouting of a stiff fissured clay after a tunnel collapse", Proc. 5<sup>th</sup> Eur. Conf. Soil Mech., Helsinki, Finland, Vol 1, pp. 171-176.
- Vaughan, P.R., Wallbancke, H.J. (1975) "The stability of cut and fill slopes in boulder clay", Proc. Symp. Engng Behaviour of Glacial Materials, Birmingham, Midland Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 209-219.