

Μελέτη ευστάθειας πρανών και ιεράρχηση των κρίσιμων παραμέτρων μέσω του αλγόριθμου SOM - Kohonen.

Slope stability investigation and critical parameters' rating using SOM algorithm Kohonen.

Μ. ΦΕΡΕΝΤΙΝΟΥ Γεωλόγος, Δρ. ΕΜΠ, Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής & Σ.Τ.Ε
Μ. ΣΑΚΕΛΛΑΡΙΟΥ Αν. Καθηγητής ΕΜΠ, Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής & Σ.Τ.Ε

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην συγκεκριμένη εργασία προτείνεται μια νέα μέθοδος για την ταξινόμηση εδαφικών πρανών κορεσμένων εδαφών, φυσικών ή τεχνητών α) ως προς τον μηχανισμό αστοχίας και β) ως προς το καθεστώς ευστάθειας. Επίσης προτείνεται η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου στο πεδίο των μη κορεσμένων εδαφών για την κατάταξή τους. Τα δεδομένα εισαγωγής για τα κορεσμένα εδάφη είναι οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται σε αναλύσεις ευστάθειας πρανών και για τα μη κορεσμένα εδάφη οι παράμετροι αντοχής. Τα δεδομένα έτυχαν επεξεργασίας με τον αλγόριθμο αυτο-οργάνωσης SOM- Kohonen. Η υλοποίηση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας οδηγεί επίσης στην εξαγωγή νέας γνώσης με τρόπο αντικειμενικό και συστηματικό.

ABSTRACT: In the present paper, a new method is proposed in order to identify natural or man-made saturated soil slopes, according to a) failure mechanism and b) status of stability. Moreover, we propose the application of this methodology in the field of unsaturated soils, in order to classify them. Input data for saturated soils are the parameters involved in slope stability analysis, and for unsaturated soils are strength parameters. Data were elaborated with SOM- Kohonen algorithm. The realization of the current methodology leads also to data mining with a systematic and objective method.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αντικείμενο της εργασίας επικεντρώνεται στην παρουσίαση μιας πρωτότυπης μεθοδολογίας χρησιμοποιώντας την τεχνολογία των τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ΤΝΔ) για την ανάδειξη των σχέσεων συσχέτισης μεταξύ των παραγόντων που ελέγχουν την ευστάθεια φυσικών ή τεχνητών πρανών κορεσμένων εδαφών, και την ταξινόμησή τους ως προς το μηχανισμό αστοχίας και το καθεστώς ευστάθειας. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία εφαρμόστηκε επίσης στο πεδίο της εδαφομηχανικής των μη κορεσμένων εδαφών, η φύση και η μηχανική συμπεριφορά των οποίων συχνά οδηγεί στην πρόκληση αστοχιών, με σκοπό την κατάταξη τους σύμφωνα με την κοκκομετρική τους διαβάθμιση και την διερεύνηση της σχέσης συσχέτισης της τελικής προσαύξησης της φαινόμενης συνοχής C_{max} με παραμέτρους

αντοχής. Η ταξινόμηση του εδάφους είναι απαραίτητη για την ταυτοποίηση του εδάφους η οποία μπορεί να δώσει μία εικόνα για την μηχανική συμπεριφορά του. Με την υλοποίηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας διεξάγεται μια αντικειμενική ιεράρχηση των κρίσιμων παραμέτρων που ελέγχουν το σύστημα πρανές - αστοχία. Η ιεράρχηση προκύπτει ως αποτέλεσμα του συνδυασμού των ΤΝΔ και των μητρώων αλληλεπίδρασης που προτάθηκαν από τον Hudson, (1992). Αναδεικνύονται οι ειδικές γενεσιουργές αιτίες οι οποίες συνδέονται με την αστοχία ενός συγκεκριμένου πρανού και η επιλογή, και ο σχεδιασμός των κατάλληλων μέτρων θεραπείας προκύπτει στα πλαίσια μιας αντικειμενικής και ποσοτικοποιημένης διαδικασίας. Η εφαρμογή της μεθόδου αναμένεται να βοηθήσει στην πρόληψη έναντι κατολισθήσεων και στο στάδιο λήψης απόφασης και σχεδιασμού.

2. ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ΤΝΔ) είναι απλοποιημένες μορφές των βιολογικών νευρωνικών δικτύων καθώς διατηρούν αρκετές από τις λειτουργίες και την οργάνωση η οποία έχει παρατηρηθεί στον ανθρώπινο εγκέφαλο. Όπως και τα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα τα ΤΝΔ μπορούν να εκπαιδευτούν, να αναγνωρίζουν αρχέτυπα, να ταξινομούν δεδομένα, να εκτιμούν προβλέψεις για μελλοντικά γεγονότα και να επιδεικνύουν αφαιρετική ικανότητα.

Πρόκειται για υπολογιστικές μηχανές, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί για να μιμούνται τον τρόπο με τον οποίο ο εγκέφαλος πραγματοποιεί μια συγκεκριμένη λειτουργία. Τα ΤΝΔ αποτελούν συστήματα με ικανότητα μάθησης. Η βασική αρχή της επαγωγικής μάθησης στηρίζεται στο ότι η γνώση ή η μάθηση μιας έννοιας (συνάρτησης) υποστηρίζεται από ένα σύνολο παραδειγμάτων.

Οι μεθοδολογίες επαγωγικής μάθησης που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι: Α) Εκπαίδευση με εποπτεία κατά την οποία το ΤΝΔ προσπαθεί να επιτύχει μέσω μιας συνάρτησης ενεργοποίησης (έννοια) μια σχέση η οποία θα συνδέει τα ζεύγη διανυσμάτων εισόδου – εξόδου (παραδείγματα). Ο πιο διαδεδομένος αλγόριθμος προσέγγισης συνάρτησης είναι ο αλγόριθμος Back-propagation. Β) Εκπαίδευση χωρίς εποπτεία κατά την οποία επιτυγχάνεται μια απεικόνιση ενός πολυδιάστατου χώρου πληροφοριών σε έναν άλλο μικρότερης διάστασης. Το ΤΝΔ τροφοδοτείται μόνο με διανύσματα εισόδου και αυτά ταξινομούνται σε κατηγορίες ανάλογα με τις πιθανές ομοιοτητές.

Η ανακάλυψη γνώσης σε βάσεις δεδομένων (Fayyad et al, 1996), αναφέρεται στη βιβλιογραφία και ως εξόρυξη δεδομένων (data mining), είναι ένα σχετικά νέο πεδίο έρευνας το οποίο αφορά στην ανακάλυψη νέων προτύπων ή δομών σε μεγάλες βάσεις δεδομένων. Πρόκειται για την ερμηνεία ενός συστήματος μέσω κωδικοποιημένων εγγραφών σε μια βάση δεδομένων. Ο αλγόριθμος αυτο-οργάνωσης απεικόνισης SOM εκτός από εργαλείο στατιστικής ανάλυσης, είναι κυρίως ένα ΤΝΔ μη επιβλεπόμενης μάθησης το οποίο συνδυάζει μεθόδους ποσοτικοποίησης διανύσματος και μεθόδους προβολής διανύσματος (Kohonen T., 1995). Το SOM Toolbox, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα είναι

ένα εργαλείο που αποτελείται από μία βιβλιοθήκη λειτουργιών οι οποίες ενσωματώνονται στο υπολογιστικό περιβάλλον Matlab. Τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου εργαλείου είναι η δυνατότητα δυναμικής απεικόνισης, το γραφικό περιβάλλον διεπαφής με τον χρήστη, η ενσωμάτωση υπολογισμών μητρώων, καθώς και η υψηλού επιπέδου γλώσσα προγραμματισμού που παρέχει. Το βασικό του πλεονέκτημα έναντι των κλασικών αλγόριθμων προβολής που δανείζονται οι μέθοδοι στατιστικής ανάλυσης είναι ότι προσφέρει τη δυνατότητα απεικόνισης των συστοιχιών δεδομένων, δηλαδή την τάση των δεδομένων για δημιουργία συγκεντρώσεων, γύρω από τα διανύσματα βέλτιστης προσαρμογής και προβάει n - διαστάσεων δεδομένα σε δύο διαστάσεις, με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρούνται οι μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ των πεδίων της βάσης (Iivarinen J. et al., 1994). Η κύρια εφαρμογή της μεθόδου αφορά σε δεδομένα των οποίων η διάσταση, η πολυπλοκότητα και ο όγκος είναι απαγορευτικά μεγάλος για την εξαγωγή συμπερασμάτων με την ανθρώπινη και μόνο παρατήρηση.

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ SOM

3.1 Προεπεξεργασία των δεδομένων

Πρόκειται για ένα σύνθετο στάδιο, και αποτελεί ίσως το πιο ουσιαστικό στάδιο της ανάλυσης. Η διαδικασία εστιάζεται :

- 1) Στην επιλογή των παραμέτρων και των ομάδων δεδομένων τα οποία θα τροφοδοτήσουν την κατασκευή του μοντέλου.
- 2) Στο φιλτράρισμα των δεδομένων από εσφαλμένες και μη ενδιαφέρουσες τιμές.
- 3) Στη μετατροπή των δεδομένων σε μορφή τέτοια, την οποία το μοντέλο θα χρησιμοποιήσει κατά τον βέλτιστο δυνατό τρόπο.
- 4) Στην επιλογή της αρχιτεκτονικής του ΤΝΔ.
- 5) Στην κανονικοποίηση των τιμών με σκοπό την δημιουργία ενιαίας κλίμακας για την αποφυγή προβλημάτων κυριαρχίας μιας παραμέτρου έναντι της άλλης.

Το εύρος των τιμών των μεταβλητών μετά την εφαρμογή μιας μεθόδου κανονικοποίησης, συστέλλεται. Η όλη διαδικασία οδηγεί συχνά στο να μην λαμβάνονται υπ' όψιν κατά την εκπαίδευση οι ακραίες τιμές. Αυτό αποτελεί μια δυσάρεστη παρενέργεια του αλγόριθμου, και μπορεί να αποβεί εις βάρος της ανάλυσης αν οι ακραίες τιμές έχουν ενδιαφέρον.

Στα δεδομένα εφαρμόστηκε κανονικοποίηση τύπου, "histC", οι τιμές κανονικοποιούνται στο διάστημα [0,1] και "var" όπου οι τιμές κανονικοποιούνται στο διάστημα [-1,1]. Η επιλογή προέκυψε μετά από δοκιμές (Φερεντίνου 2004) όπου διαπιστώθηκε ότι οι συγκεκριμένες μέθοδοι κανονικοποίησης αποδίδουν μικρή τιμή του τοπογραφικού σφάλματος (t_e) και του σφάλματος ποσοτικοποίησης (q_e) μετά την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων. Τα μεγέθη (t_e, q_e) αποτελούν το μέτρο έκφρασης του βαθμού σύγκλισης του νευρωνικού δικτύου.

3.2 Εκκίνηση και εκπαίδευση

Ο αλγόριθμος εκπαίδευσης ο οποίος χρησιμοποιήθηκε είναι ο αλγόριθμος δέσμης (batch training). Έγινε τυχαία εκκίνηση των βαρών των διανυσμάτων εισόδου. Η εκπαίδευση πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις: αρχική αδρομερής (robust) εκπαίδευση με μεγάλη αρχική ακτίνα γειννίασης, και δεύτερη λεπτομερής, συντονισμός (fine-tuning) με μικρότερη ακτίνα γειννιάς και μικρότερο βαθμό εκπαίδευσης. Η συνάρτηση γειννίασης η οποία χρησιμοποιήθηκε είναι η Gauss.

4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ.

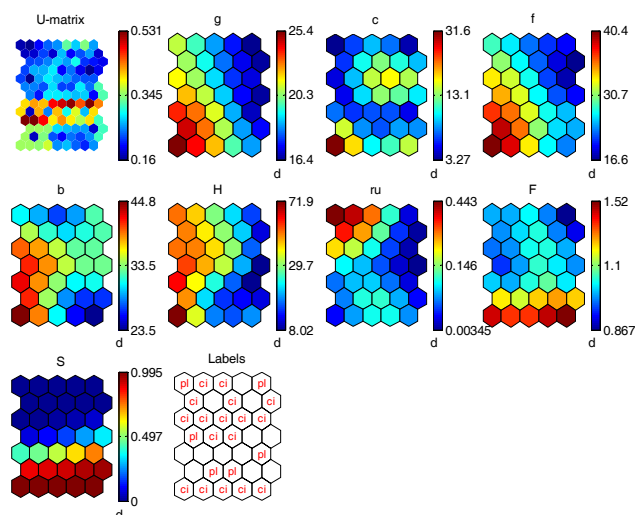
4.1 Ταξινόμηση ως προς το μηχανισμό αστοχίας και το καθεστώς ευστάθειας.

Τα αριθμητικά δεδομένα τα οποία έχουν επεξεργαστεί, μετά από κατάλληλη μορφοποίηση εισήχθησαν με τη μορφή μητρώου στο πρόγραμμα SOM (Φερεντίνου, 2004). Το πρόβλημα της ευστάθειας των πρानών, για το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων, έχει ήδη αντιμετωπιστεί ως πρόβλημα προσέγγισης εξίσωσης (Sakellariou et al, 2005, Φερεντίνου, 2004, Sakellariou et al, 1997), με τον αλγόριθμο Back-propagation.

Στόχος της επεξεργασίας της ίδιας ομάδας δεδομένων με τον αλγόριθμο αυτο-οργάνωσης SOM έναν κατ'εξοχήν αλγόριθμο ταξινόμησης, είναι ο εντοπισμός συστοιχιών διανυσμάτων, (περιπτώσεων πρानών) οι οποίες συνδέονται με διαφορετικούς μηχανισμούς αστοχίας, και διαφορετικό καθεστώς ευστάθειας. Επίσης, η συσχέτιση των παραμέτρων, έτσι ώστε μετά από επεξεργασία των απεικονίσεων που δημιουργούνται από την υλοποίηση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας να προκύψει νέα γνώση ως προς την ιεράρχηση των

παραμέτρων που ελέγχουν την ευστάθεια ενός πρανούς, είτε εκφράζεται ποσοτικά ως συντελεστής ασφαλείας F , είτε εκφράζεται ημιποσοτικά ως καθεστώς ευστάθειας. Η πληροφορία που αφορά στην ευστάθεια κωδικοποιήθηκε κατάλληλα έτσι ώστε το ποσοστό ευστάθειας S παίρνει στην τιμή 1 (st), όταν το πρανός έχει παραμείνει σταθερό, διαφορετικά τείνει στην τιμή 0 ως ασταθές (un). Εισάγεται επίσης η πληροφορία του είδους του μηχανισμού αστοχίας, όπου (ci): circular, (pl): plane. Οι παράμετροι οι οποίες εξετάστηκαν είναι: το ειδικό βάρος (γ), η συνοχή (c), η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ), η γωνία κλίσης του πρανούς (β), το ύψος του πρανούς (H), ο συντελεστής πίεσης του νερού των πόρων (r_u), ο συντελεστής ασφαλείας (F), το καθεστώς ευστάθειας (S).

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης των ΤΝΔ μέσω των εποπτικών απεικονίσεων που παρέχει ο αλγόριθμος SOM. Στο "Σχήμα 1" που ακολουθεί πραγματοποιείται μια πολλαπλή απεικόνιση η οποία αποτελείται από 10 επιμέρους χάρτες. Ο πρώτος ξεκινώντας από άνω αριστερά είναι ο χάρτης αυτο-οργάνωσης με την μορφή μητρώου αποστάσεων ο οποίος οπτικοποιεί το συνολικό αποτέλεσμα της εκπαίδευσης.



Σχήμα 1. Απεικόνιση μητρώου αποστάσεων, ταξινόμηση ως προς το μηχανισμό αστοχίας. Figure 1. Clustering visualization, according to failure mechanism.

Από αυτόν εξάγεται η πληροφορία της γενικής δομής των δεδομένων και της αναγνώρισης των συστοιχιών. Ο τελευταίος χάρτης (Labels), απεικονίζει εποπτικά την δομή του χάρτη αποστάσεων. Η πολλαπλή αυτή απεικόνιση ολοκληρώνεται με το σύνολο

των 8 χαρτών οι οποίοι απεικονίζουν τα συστατικά επίπεδα. Κάθε συστατικό επίπεδο αντιστοιχεί σε μία μεταβλητή. Στο χάρτη αποστάσεων, υψηλές τιμές (θερμά χρώματα) δηλώνουν όρια συστοιχιών ενώ ομοιογενείς περιοχές χαμηλών τιμών (ψυχρά χρώματα) χαρακτηρίζουν τις ίδιες τις συστοιχίες.

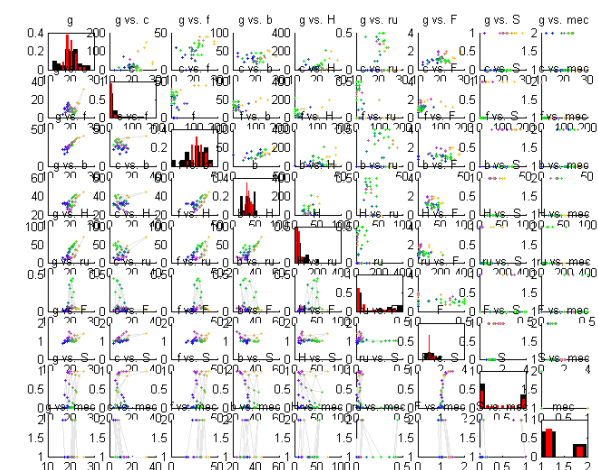
Η τεχνική αυτή αποδίδει με παρόμοια χρώματα παρόμοιες μονάδες χάρτη και λαμβάνει υπ' όψιν της τις διαφορές των χρωμάτων, έτσι ώστε να αντικατοπτρίζει στο διανυσματικό χώρο εκπαίδευσης τις αποστάσεις από το διανυσματικό χώρο των αρχικών πρωτογενών δεδομένων όσο πιο πιστά γίνεται. Ο κώδικας χρωμάτων χρησιμοποιείται για διασύνδεση διαφορετικών απεικονίσεων στην ίδια βάση δεδομένων.

Το κάθε συστατικό επίπεδο απεικονίζει γενικότερα την διασπορά των τιμών της συγκεκριμένης μεταβλητής μετά την εκπαίδευση. Συνοδεύεται από μία ράβδο ίδιου μήκους για όλα τα συστατικά επίπεδα, η οποία δείχνει την διακύμανση των τιμών των μεταβλητών μετά την εκπαίδευση. Θερμά χρώματα υποδηλώνουν υψηλές τιμές τις παραμέτρου ενώ ψυχρά χρώματα υποδηλώνουν χαμηλές τιμές της παραμέτρου. Το εύρος των τιμών δεν ταυτίζεται με το εύρος τιμών των διανυσμάτων εισόδου αλλά όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι πιο περιορισμένο και ακολουθεί την ίδια διάταξη και δομή. Επίσης, οι τιμές αυτές έχουν υποστεί από – κανονικοποίηση, και συμβολίζεται με το μικρό γράμμα "d" κάτω από κάθε ράβδο.

Από την εποπτική παρατήρηση της πολλαπλής απεικόνισης προκύπτουν τα εξής: Στο συγκεκριμένο χάρτη είναι εμφανής η παρουσία δύο συστοιχιών. Σε κάθε συστοιχία συμμετέχουν διανύσματα που σχετίζονται τόσο με επίπεδης μορφής ολίσθηση όσο και διανύσματα που σχετίζονται με κυκλικής μορφής αστοχία. Η διάκριση μεταξύ των δύο ως προς τον μηχανισμό αστοχίας δεν γίνεται άμεσα αντιληπτή καθώς και στις δύο συμμετέχουν τόσο διανύσματα για τα οποία υποθέτουμε αστοχία κυκλικής μορφής όσο και διανύσματα για τα οποία υποθέτουμε αστοχία επίπεδης μορφής. Οι παράμετροι οι οποίες φαίνεται ότι διαφοροποιούν τις δύο συστοιχίες, και ουσιαστικά τις χαρακτηρίζουν, είναι το καθεστώς ευστάθειας (S) και ο συντελεστής ασφαλείας (F). Οι υπόλοιπες παράμετροι δεν χαρακτηρίζουν κάποια συστοιχία. Μια άλλη παρατήρηση είναι ότι ο συντελεστής πίεσης νερού των πόρων (r_u) συσχετίζεται με το καθεστώς ευστάθειας, (S) (παίρνει τιμές

μικρότερες του 0.15 για τα πρηνή τα οποία παρέμειναν σταθερά).

Τα μητρώα διασποράς - ιστογράμματα είναι ίσως τα διαγράμματα που παρέχουν την περισσότερη πληροφορία και είναι απλά διαγράμματα διασποράς και ιστογράμματα για το σύνολο των μεταβλητών. Απεικονίζουν αποτελεσματικά τα ζεύγη των μεταβλητών με σκοπό την ανάδειξη σχέσεων μεταξύ τους ανά δύο. Συνεπώς ένα μητρώο διασποράς επεκτείνει αυτήν την ιδέα σε πολλαπλά ζεύγη μεταβλητών. Για το σύνολο δεδομένων που μελετάται, δημιουργήθηκε ένα μητρώο διασποράς 9 x 9, Σχήμα 2. Το είδος του μηχανισμού αστοχίας έχει ενσωματωθεί ως ένατη μεταβλητή (mec). Οι μεταβλητές τοποθετούνται στην κύρια διαγώνιο από το στοιχείο (1,1) του μητρώου προς το (9,9) με σειρά (γ,c,φ,β,H,r_u,F,S,mec). Με κόκκινο χρώμα αναπαριστώνται οι τιμές μετά την εκπαίδευση, και με μαύρο οι τιμές των πρωτότυπων διανυσμάτων δεδομένων πριν την εκπαίδευση. Στο άνω τρίγωνο παρουσιάζονται διαγράμματα διασποράς με τα αρχικά δεδομένα πριν την εκπαίδευση και στο κάτω τρίγωνο παρουσιάζονται τα διαγράμματα διασποράς με τα διανύσματα μετά το πέρας της εκπαίδευσης. Η κωδικοποίηση των χρωμάτων των αρχικών και των διανυσμάτων που προέκυψαν μετά την εκπαίδευση, ακολουθεί την κωδικοποίηση που φαίνεται στον χάρτη αποστάσεων "Σχήμα 1". Από το διάγραμμα του "Σχήματος 2" προκύπτει επίσης ότι για το σύνολο δεδομένων που μελετάται υπάρχει ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ:



Σχήμα 2. Διάγραμμα διασποράς 9 X 9.
Figure1. Scatter diagram 9 X 9.

α) Της γωνίας εσωτερικής τριβής (φ) και του ειδικού βάρους (γ) –στοιχείο (3,1), (1,3), β) Της

γωνίας κλίσης του πρανούς (β) και του ειδικού βάρους (γ) –στοιχείο (4,1), (1,4). γ) Της γωνίας κλίσης του πρανούς (β) και της γωνίας εσωτερικής τριβής (ϕ) –στοιχείο (4,3), (3,4), δ) Του ύψους του πρανούς (H) και του ειδικού βάρους (γ) –στοιχείο (5,1), ϵ) Του ύψους του πρανούς (H) και της γωνίας εσωτερικής τριβής (ϕ) –στοιχείο (5,3). ζ) Του ύψους του πρανούς (H) και της γωνίας κλίσης του πρανούς (β) –στοιχείο (5,4), η) Του καθεστώτος ευστάθειας (S) και της πίεσης του νερού των πόρων (ru) –στοιχείο (8,6), θ) Του καθεστώτος ευστάθειας (S) και του συντελεστή ασφαλείας (F)– (8,7).

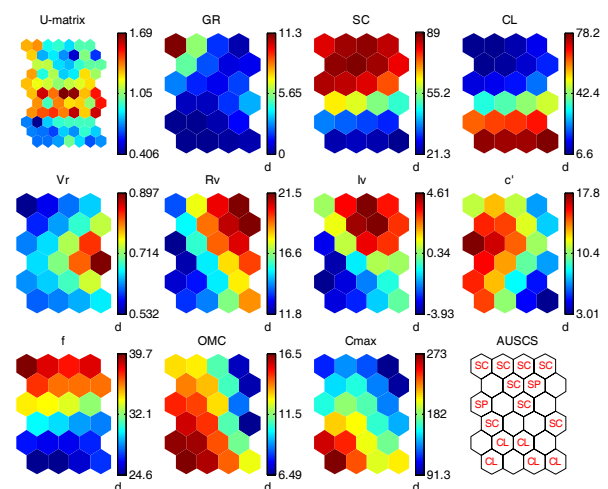
4.2 Ταξινόμηση ως προς την κατάταξη μη κορεσμένων εδαφών.

Τα μη κορεσμένα εδάφη ή μερικώς κορεσμένα εδάφη, διαφοροποιούνται από τα κορεσμένα ως προς την εμφάνιση ζώνης αναρρόφησης πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Λόγω αυτής της ζώνης διαμορφώνονται αρνητικές πιέσεις στο νερό των πόρων του εδάφους και αναπτύσσεται επιπρόσθετη φαινόμενη συνοχή που συντελεί στην αύξηση της διατμητικής αντοχής. Τα μη κορεσμένα εδάφη απαντούν ως υλικά στη φύση τα οποία αναπτύσσονται σε ξηρά περιβάλλοντα.

Η πειραματική έρευνα σε μη κορεσμένα εδάφη για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής, απαιτεί χρόνο, και παρουσιάζει αντικειμενικές δυσκολίες. Οι Lee et al, 2003, βασισμένοι σε δημοσιευμένα πειραματικά δεδομένα και δεδομένα εργαστηριακών δοκιμών τις οποίες εκτέλεσαν σε δείγματα αποσαθρωμένου γρανίτη τα οποία έχουν συλλεχθεί από διάφορες περιοχές στην Κορέα, πρότειναν έναν εμπειρικό τύπο για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής συναρτήσει των παραμέτρων συνοχής (c') και της γωνίας εσωτερικής τριβής (ϕ') για κορεσμένα εδάφη και της τελικής προσαύξεσης της φαινόμενης συνοχής C_{max} . Διατύπωσαν μια μη γραμμική εξίσωση υπερβολής η οποία περιγράφει τη σχέση της διατμητικής αντοχής με την αναρρόφηση.

Οι ίδιοι συγγραφείς ανέπτυξαν αρχικά μία μέθοδο όπου η C_{max} υπολογίζεται μέσω ΤΝΔ επιβλεπόμενης μάθησης υλοποιώντας τον αλγόριθμο Back – Propagation, και στη συνέχεια υπολόγισαν τη συσχέτιση της C_{max} με τις παραμέτρους: κλάσμα άμμου (SC), κλάσμα αργίλου (CL), λόγο κενών (V_r), βέλτιστη περιεχόμενη υγρασία (OMC), συνοχή (c') και γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ'). Στην πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας διερευνήθηκε η

ευαισθησία του αλγόριθμου SOM στα δεδομένα των μη κορεσμένων εδαφών, η εσωτερική τους δομή, η συσχέτιση των παραμέτρων. Επίσης, ένα από τα ζητούμενα ήταν η σύγκριση των αποτελεσμάτων της υλοποίησης του αλγόριθμου μη επιβλεπόμενης μάθησης SOM με αυτά που προέκυψαν από την υλοποίηση του αλγόριθμου επιβλεπόμενης μάθησης από τους προηγούμενους συγγραφείς. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στην επόμενη απεικόνιση. Το νευρωνικό δίκτυο ταξινόμησε επιτυχώς τα εδάφη ανάλογα με την κοκκομετρική τους διαβάθμιση. Είναι εμφανής η παρουσία δύο συστοιχιών: α) επικρατεί το κλάσμα της άμμου (SC), β) επικρατεί το κλάσμα της αργίλου (CL).



Σχήμα 3. Απεικόνιση μητρώου αποστάσεων, ταξινόμηση ως προς την κοκκομετρία.

Figure 3. Clustering visualization classification according to soil characterisation.

Οι παράμετροι οι οποίες φαίνεται ότι διαφοροποιούν τις δύο συστοιχίες και ουσιαστικά τις χαρακτηρίζουν είναι τα συστατικά επίπεδα που προβάλλουν την συμμετοχή του κλάσματος της αργίλου και της άμμου, καθώς και η παράμετρος OMC, η οποία, αφορά στη μέγιστη περιεχόμενη υγρασία, και η γωνία εσωτερικής τριβής. Ως προς την επαλήθευση της μεθοδολογίας και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων, οι συσχετίσεις που προκύπτουν για τις επιμέρους μεταβλητές βρίσκονται σε συμφωνία με αυτές που υπολογίστηκαν από την υλοποίηση των ΤΝΔ επιβλεπόμενης μάθησης. Συγκεκριμένα, η C_{max} είναι υψηλότερη όταν το κλάσμα της άμμου είναι χαμηλό και το κλάσμα της αργίλου είναι υψηλό. Ομοίως οι τιμές της C_{max} είναι υψηλές όταν ο λόγος κενών και η γωνία εσωτερικής τριβής είναι χαμηλή.

5. ΙΕΡΑΡΧΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Ο Hudson (1992) εισήγαγε μια μέθοδο αναλυτικής προσέγγισης προβλημάτων βραχομηχανικής ή εδαφομηχανικής, το μητρώο αλληλεπίδρασης. Η θεώρηση αυτή αποτελεί πρωτότυπη ιδέα του Hudson η οποία έχει πολλές προεκτάσεις και εφαρμογές καθώς προσφέρεται για την χρήση σύγχρονων μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης (έμπειρα συστήματα, νευρωνικά δίκτυα κ.ά.). Προτείνεται μια μεθοδολογία η οποία χρησιμοποιεί ως δεδομένα εισαγωγής τα διαγράμματα διασποράς που προκύπτουν από την εφαρμογή του αλγόριθμου SOM “Σχήμα 1”, στη συνέχεια κωδικοποιούνται κατάλληλα και μεταπίπτουν σε μητρώα αλληλεπίδρασης.

Πρόκειται για ένα εποπτικό τρόπο παρουσίασης της ιεράρχησης των παραμέτρων σε ένα σύστημα δυναμικό, πολυ-παραμετρικό όπως το σύστημα πρανές-κατολίσθηση. Στα μητρώα αλληλεπίδρασης τα διαγώνια στοιχεία αποτελούν τις κύριες παραμέτρους οι οποίες παρουσιάζουν ασθενή εξάρτηση από τις υπόλοιπες, ενώ τα εκτός διαγωνίου στοιχεία αντιπροσωπεύουν τις παραμέτρους με ισχυρή αλληλεπίδραση. Με την μέθοδο γίνεται κατάλληλη κωδικοποίηση του μητρώου έτσι ώστε να προσδιοριστεί το πόσο σημαντική για το σύστημα είναι κάθε παράμετρος. Το μέτρο της σημασίας μιας παραμέτρου για το σύστημα προσδιορίζεται από δύο χαρακτηριστικά μεγέθη, την ένταση αλληλεπίδρασης και την κυριαρχία. Η προβολή αυτών των χαρακτηριστικών απεικονίζεται σε ένα διάγραμμα αιτίου (cause C) – αποτελέσματος (effect E). Η παράμετρος με την υψηλότερη τιμή δίνεται από τη σχέση

$$\frac{C + E}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

και είναι αυτή με την υψηλότερη ένταση αλληλεπίδρασης, ενώ αυτή με την μεγαλύτερη τιμή

$$\frac{C - E}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

είναι η πιο κυρίαρχη. Βασικά χαρακτηριστικά των μητρώων είναι η συμμετρία, καθώς και οι διαστάσεις τους. Η συμμετρία ή μη του μητρώου είναι σημαντική καθώς αντανακλά την κατάσταση του συστήματος. Τα περισσότερα συστήματα βραχομηχανικής και εδαφομηχανικής είναι μη συμμετρικά. Οι παράμετροι προβάλλονται ως ένα νέφος σημείων στο διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος.

Προκειμένου να αναδειχθούν δυαδικοί μηχανισμοί διασύνδεσης παραμέτρων στα προβλήματα της ευστάθειας των πρανών στα πλαίσια της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα διαγράμματα διασποράς και κωδικοποιήθηκαν κατάλληλα έτσι ώστε να προσδιοριστεί η ένταση αλληλεπίδρασης και η κυριαρχία των παραμέτρων στο σύστημα.

Εφαρμόστηκε η μέθοδος κωδικοποίησης της δυαδικής προσέγγισης, κατά την οποία ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης χαρακτηρίζεται ως ανοικτός αν υπάρχει συσχέτιση και κλειστός όταν δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων. Τα στοιχεία εκτός διαγωνίου κωδικοποιούνται με την τιμή 1 όταν ο μηχανισμός είναι ανοικτός διαφορετικά κωδικοποιούνται με την τιμή 0.

Η κωδικοποίηση δυαδικής προσέγγισης εφαρμόστηκε στο μητρώο του “Σχήματος 2” και στα στοιχεία εκτός διαγωνίου, τα οποία έχουν ισχυρή θετική διακύμανση δόθηκε σε αυτά η τιμή 1, ενώ στα υπόλοιπα δόθηκε η τιμή 0. Συνεπώς, πρόκειται για ένα σύστημα όχι, ιδιαίτερα αλληλεπιδραστικό αφού τα 61 από τα 72 στοιχεία εκτός διαγωνίου έχουν κλειστό μηχανισμό. Στον “Πίνακα 1”, παρουσιάζεται το μητρώο αλληλεπίδρασης όπως κωδικοποιήθηκε με τη μέθοδο δυαδικής προσέγγισης. Στην στήλη Σ_j δίνεται το άθροισμα για κάθε γραμμή και αποτελεί την τιμή αιτίου C, ενώ στη γραμμή Σ_i δίνεται το άθροισμα για κάθε μία από τις στήλες και αποτελεί την τιμή αποτελέσματος E. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται οι συντεταγμένες (Cause-Effect C,E) για κάθε παράμετρο “Πίνακας 2”. Τα αθροίσματα των παραμέτρων προβάλλονται ως ζεύγη σημείων στο διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος “Σχήμα 4”.

Πίνακας 1. Μητρώο αλληλεπίδρασης
Table 1. Interaction matrix.

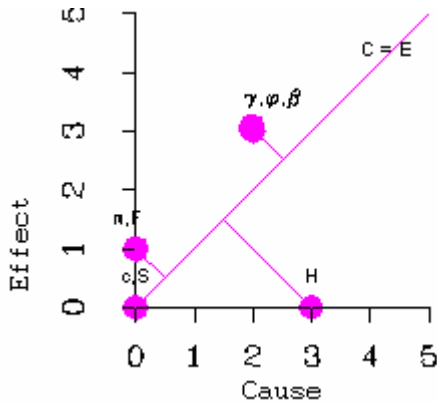
										Σ_j
	γ	0	1	1	0	0	0	0	0	2
	0	ϵ	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	ϕ	1	0	0	0	0	0	2
	1	0	1	β	0	0	0	0	0	2
	1	0	1	1	H	0	0	0	0	3
	0	0	0	0	0	ru	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	F	0	0	0
	0	0	0	0	0	1	1	S	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	mec	0
Σ_i	3	0	3	3	0	1	1	0	0	Μέσος (1.37, 1.37)

Οι θέσεις των σημείων δείχνουν την ένταση αλληλεπίδρασης και την κυριαρχία των

παραμέτρων. Οι πιο αλληλεπιδραστικές παράμετροι προβάλλονται κατά μήκος της ευθείας C=E. Η πλέον κυρίαρχη παράμετρος είναι το ύψος H. Οι παράμετροι οι οποίες έχουν την μεγαλύτερη ένταση αλληλεπίδρασης με το σύστημα είναι το ειδικό βάρος (γ), η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) και η γωνία κλίσης του πρανού (β).

Πίνακας 2. Συντ. αίτιου -αποτελέσματος
Table 2. Cause effect coordinates.

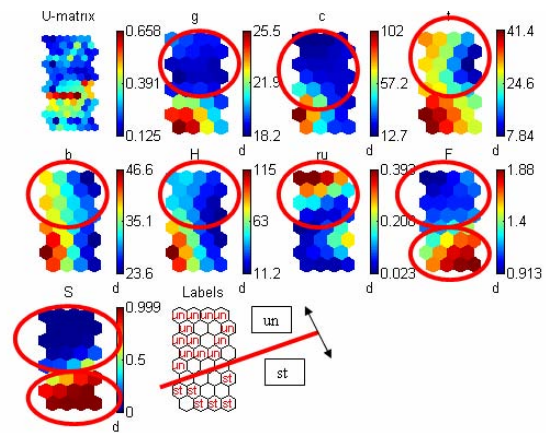
παράμετροι	C	E	C+E	C-E
γ	2	3	5	-1
c	0	0	0	0
ϕ	2	3	5	-1
β	2	3	5	-1
H	3	0	3	3
r_u	0	1	1	-1
F	0	1	1	-1
S	0	0	0	0
mec	0	0	0	0



Σχήμα 4. Διάγραμμα αίτιου – αποτελέσματος γενική περίπτωση.
Figure 4. Cause effect plot, general case.

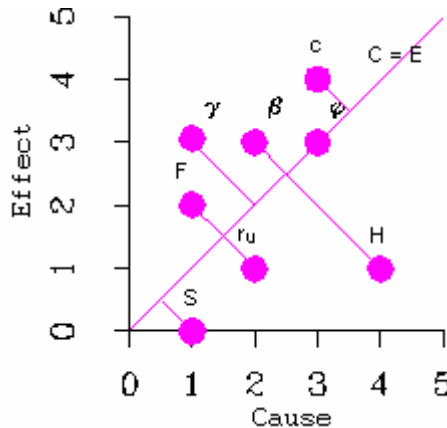
Για τη διερεύνηση της επιρροής των παραμέτρων για κάθε μηχανισμό αστοχίας, δημιουργήθηκαν δύο ΤΝΔ μη επιβλεπόμενης μάθησης για να κατηγοριοποιήσουν τα δεδομένα ως προς το καθεστώς ευστάθειας. Στην συνέχεια έγινε κατάλληλη κωδικοποίηση των μητρώων διασποράς έτσι ώστε να προκύψουν τα αντίστοιχα μητρώα αλληλεπίδρασης και τα διαγράμματα αίτιου – αποτελέσματος για κάθε μηχανισμό. Στην αστοχία κυκλικής μορφής προέκυψε η πολλαπλή απεικόνιση σύμφωνα με την οποία αναγνωρίζονται δύο συστοιχίες, το ΤΝΔ διαχώρισε επιτυχώς τα σταθερά από τα πρανή που αστόχησαν “Σχήμα 5”. Η συστοιχία των πρανών τα οποία έχουν αστοχήσει χαρακτηρίζεται από τιμές $\gamma < 21 \text{ kN/m}^3$, $c < 34 \text{ kPa}$, $H < 37 \text{ m}$ (r_u) > 0.2 , $F < 1.4$. Η συστοιχία των πρανών που παρέμειναν

σταθερά χαρακτηρίζεται από $\gamma > 21 \text{ kN/m}^3$, $c > 34 \text{ kPa}$, $H > 37 \text{ m}$, $r_u < 0.2$ και $F > 1.4$.



Σχήμα 5. Απεικόνιση μητρώου αποστάσεων, κυκλικής μορφής αστοχία.
Figure 5. Clustering visualization circular failure.

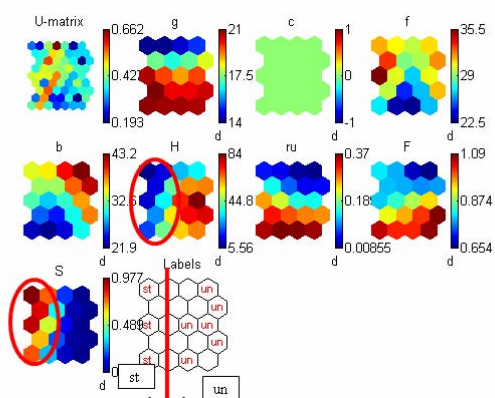
Πιθανά στο αρχικό σύνολο συμπεριλαμβάνονται και βραχύωδη πρανή πληροφορία η οποία δεν υπήρχε στα πρωτογενή δεδομένα. Υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των γ - c, β - H καθώς και F -S. Σύμφωνα με το “Σχήμα 6”, η πιο κυρίαρχη παράμετρος είναι το ύψος (H). Επίσης οι παράμετροι οι οποίες έχουν την μεγαλύτερη ένταση αλληλεπίδρασης με το σύστημα είναι, η συνοχή c και η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ).



Σχήμα 6. Διάγραμμα αίτιου – αποτελέσματος, κυκλικής μορφής αστοχία.
Figure 6. Cause effect plot, circular failure.

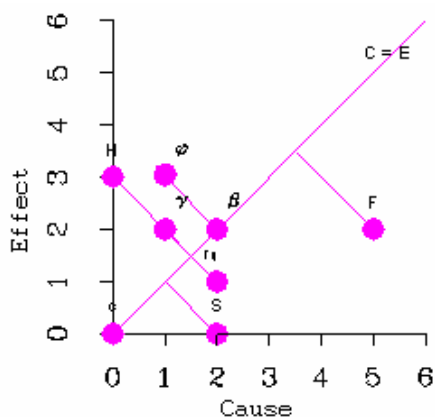
Η επεξεργασία των δεδομένων πρανών για τα οποία έγινε υπόθεση αστοχίας έναντι επίπεδης μορφής οδήγησε στην πολλαπλή απεικόνιση “Σχήμα 7” όπου, επιτυχώς διαχωρίστηκαν τα σταθερά από τα πρανή που αστόχησαν. Η συστοιχία των πρανών που παρέμειναν σταθερά χαρακτηρίζεται από ύψη

μικρότερα των 30m. Υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ (H) και (S).



Σχήμα 7. Πολλαπλή απεικόνιση μητρώου αποστάσεων, περίπτωση επίπεδης ολίσθησης. Figure 7. Clustering visualization plane failure.

Σύμφωνα με το διάγραμμα αιτίου αποτελέσματος η πλέον κυρίαρχη παράμετρος είναι ο συντελεστής ασφαλείας F , ενώ το ύψος H είναι το λιγότερο κυρίαρχο. Μεγαλύτερη ένταση αλληλεπίδρασης με το σύστημα έχουν ο συντελεστής ασφαλείας (F), η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) και η γωνία κλίσης του πρανού (β). Η λιγότερο αλληλεπιδραστική είναι η συνοχή (τιμές $C+E = 0$).



Σχήμα 8. Διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος, επίπεδη ολίσθηση. Figure 8. Cause effect plot, plane failure.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αναπτύχθηκαν ΤΝΔ τα οποία κατηγοριοποιούν ως προς το μηχανισμό αστοχίας, ως προς το καθεστώς ευστάθειας και ως προς την κατάταξη των εδαφών. Ιεραρχήθηκε η κυριαρχία και η ένταση αλληλεπίδρασης των παραμέτρων που ελέγχουν το σύστημα πρανές - κατολίσθηση με τρόπο αντικειμενικό

και ποσοτικοποιημένο. Τα αποτελέσματα της υλοποίησης της προτεινόμενης μεθοδολογίας προέκυψαν από την συνδυασμένη εφαρμογή του αλγόριθμου SOM και των μητρώων αλληλεπίδρασης. Οι χάρτες αυτοοργάνωσης αναδεικνύουν δομές δεδομένων από ένα σύνολο δεδομένων και σχέσεις συσχέτισης μεταβλητών μέσα από αποδοτικές απεικονίσεις. Εκτιμάται, ότι οι μέθοδοι υπολογιστικής νοημοσύνης αποτελούν εργαλεία χρήσιμα τα οποία δίνουν ρεαλιστικά αποτελέσματα και συμπληρώνουν τις αναλυτικές μεθόδους στην επίλυση προβλημάτων γεωτεχνικής μηχανικής.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Fayyad, U.M., Piatetsky – Shapiro, G., & Smyth.P. (1996) “From data mining to knowledge discovery: An overview” In Knowledge Discovery and Data Mining, pp 1-34. AAAI Press / MIT Press, Menlo Park.

Hudson J.A., (1992), “Rock Engineering systems: Theory and Practice”, Horwood

Iivarinen J., Kohonen T., Kangas J., & Kaski S. (1994) “Visualizing the clusters on the self – organizing map”. In C. Carlson, T. Jarvi, T. Reponen, editors, Proc. of the Conf. on AI Research in Finland, Nr 12 in the Pub. of the Finish A.I. Society, 122-126 Helsinki.

Kohonen, T., (1995a), “Self-Organizing Map”, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin, 113.

Lee S.J., S.R. Lee, Kim Y.S., (2003) “An approach to estimate unsaturated shear strength using artificial neural network and hyperbolic formulation”. Computers & Geotechnics 30, 489-503.

Math Works, Inc Matlab, (1999).

Sakellariou M.G., Ferentinou M., (2005) "A study of slope stability prediction using neural networks", Geotechnical & Geological Engineering, Vol. 24, Nr 3, pp: 419 – 445, Kluwer.

Σακελλαρίου Μ., Ηλίας Π. ,(1997): "Διερεύνηση Δυνατότητας Εφαρμογής Νευρωνικών Δικτύων στην Εκτίμηση Ευστάθειας Πρανών" 3ο Παν. Συν. Γεωτεχνικής Μηχ., Πάτρα, Τόμος 2ος σελ. 269-276.

Φερεντίνου, Μ. (2004). “Εκτίμηση του κινδύνου των κατολισθήσεων με Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα σε Περιβάλλον Γ.Π.Σ.”, Διδ. Διατ. ΕΜΠ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα υποστηρίχθηκε από το πρόγραμμα ΕΠΕΑΕΚ II - ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ, το οποίο συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (75%) και από Εθνικούς Πόρους (25%).