

Επίδραση της ακρίβειας των οργάνων μέτρησης στην επιλογή νέων θέσεων για την επέκταση συστήματος ενόργανης παρακολούθησης

Measurement accuracy effect on the selection of new measurement locations for an existing monitoring network

ΑΡΝΑΟΥΤΗ, Σ.Α. Πολιτικός Μηχανικός, Υποψ. Διδάκτορας, Α.Π.Θ.
ΧΑΤΖΗΓΩΓΟΣ, Θ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Α.Π.Θ.
ΤΣΟΤΣΟΣ, Σ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Οι γενικές αρχές της γεωστατιστικής χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του εξεταζόμενου μεγέθους και του σφάλματός του σε σύστημα ενόργανης παρακολούθησης, όταν τα όργανα μέτρησης παρουσιάζουν την ίδια ακρίβεια. Όταν η ακρίβεια των υφιστάμενων οργάνων μέτρησης είναι διαφορετική, η γεωστατιστική χρειάζεται να συνδυαστεί με την τεχνική Monte Carlo. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόζεται σε ένα πραγματικό πρόβλημα κατολίσθησης, την κατολίσθηση Jinnosuke-dani στην Ιαπωνία, όπου παρακολουθούνται οι επιφανειακές μετακινήσεις.

ABSTRACT : Geostatistics general principles are applied to obtain the estimation and the estimation error of the parameter, when the measurements have the same accuracy. When this is not the case, geostatistics is combined with Monte Carlo technique. This methodology is applied in a real landslide problem, the Jinnosuke-dani landslide in Japan, where surface displacement monitoring takes place.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενόργανη παρακολούθηση γεωτεχνικών έργων, κατά το διάστημα κατασκευής και λειτουργίας τους, αποτελεί ενδιαφέρουσα προσέγγιση στη γεωτεχνική μηχανική για την κατανόηση της συμπεριφοράς τους, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια που η ενοργάνωση συνδυάζεται με τη συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας.

Στα γεωτεχνικά έργα, απαντάται συχνά το ίδιο μέγεθος να καταγράφεται με διαφορετική ακρίβεια στις διάφορες θέσεις μέτρησης. Ο κυριότερος λόγος είναι ότι για τη μέτρησή του μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές τεχνικές, π.χ. η επιφανειακή οριζόντια μετακίνηση του εδάφους που μπορεί να μετρηθεί τόσο από τοπογραφικές μεθόδους όσο κι από κλισιόμετρα, οριζόντια επιμηκυνσιόμετρα και μετρητές ρωγμών. Ακόμα και μετρήσεις που πραγματοποιούνται με το ίδιο είδος οργάνου μπορεί να εμφανίζουν διαφορετική ακρίβεια ανάλογα με τη θέση τους.

Παράδειγμα αποτελούν τα κλισιόμετρα που η ακρίβειά τους εξαρτάται, μεταξύ άλλων, κι από την ποιότητα της εγκατάστασης της σωλήνωσης.

Η γεωστατιστική προσφέρει εργαλεία για την εκτίμηση του προς διερεύνηση μεγέθους σε όλο το πεδίο, καθώς και για τον προσδιορισμό του σφάλματος εκτίμησης, όταν τα όργανα μέτρησης παρουσιάζουν το ίδιο σφάλμα. Στην παρούσα εργασία, για να συμπεριληφθεί η περίπτωση οργάνων μέτρησης με διαφορετική ακρίβεια, η μεθοδολογία επεκτείνεται, συνδυάζοντας τη γεωστατιστική με την τεχνική Monte Carlo.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Θεωρητική βάση γεωστατιστικής

Η γεωστατιστική είναι μια στατιστική μέθοδος που αφορά χωρικές μεταβλητές, δηλαδή μεταβλητές που μεταβάλλονται στο πεδίο και παρουσιάζουν συνέχεια στο χώρο.

Χρησιμοποιεί μετρήσεις της χωρικής μεταβλητής σε διάφορα σημεία στο πεδίο για να εκτιμήσει την τιμή της σε ένα άλλο σημείο αμερόληπτα και με ελαχιστοποίηση του σφάλματος. Ένα από τα πλεονεκτήματα της γεωστατιστικής, έναντι άλλων μεθόδων παρεμβολής, είναι ότι πρόκειται για ακριβή μέθοδο παρεμβολής (η εκτίμηση στη θέση των σημείων μετρήσης ταυτίζεται με τη μέτρηση) και ταυτόχρονα παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού του σφάλματος εκτίμησης. Οι θεμελιώδεις αρχές της γεωστατιστικής περιγράφονται στα έργα διαφόρων συγγραφέων (Kitanidis, 1997, Chilès & Delfiner, 1999).

Βασικό εργαλείο της γεωστατιστικής είναι το 'variogram' γ, που περιγράφει τον τρόπο που μεταβάλλονται οι χωρικές μεταβλητές στο πεδίο. Πιο συγκεκριμένα, δείχνει τη διαφορά – υψωμένη στο τετράγωνο - ανάμεσα στις μετρήσεις που απέχουν απόσταση h σε σχέση με την απόσταση αυτή.

Αξίζει στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι στην ελληνική βιβλιογραφία ο όρος variogram εμφανίζεται με διάφορες εκδοχές, μεταξύ των οποίων 'ημιδιασπορά', 'βαριόγραμμα', 'ημιμεταβλητόγραμμα'. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ο όρος 'διασπορόγραμμα', που περιλαμβάνει τόσο την έννοια της διασποράς-variante όσο και του γραφήματος.

Η γεωστατιστική ανάλυση περιλαμβάνει δυο φάσεις:

α) τη δομική ανάλυση, δηλ. τον προσδιορισμό του διασπορογράμματος που περιγράφει τη μεταβλητότητα της συγκεκριμένης μεταβλητής στο χώρο και

β) τη βέλτιστη γραμμική αμερόληπτη εκτίμηση, όπου με χρήση των κατάλληλων εξισώσεων προκύπτουν οι εκτιμήσεις τις μεταβλητής (kriging).

Στη βιβλιογραφία απαντώνται ποικίλα προσομοιώματα για το διασπορόγραμμα, αλλά στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί κυρίως το δυναμικό προσομοίωμα, το οποίο περιγράφεται από τη σχέση:

$$\gamma(h) = \alpha \cdot h^\beta + n \quad (1)$$

όπου h η απόσταση και α, β, n οι παράμετροι του προσομοιώματος. Η ειδική περίπτωση όπου β=1 αντιστοιχεί στο γραμμικό προσομοίωμα.

Η ανάλυση παρέχει, εκτός από την εκτίμηση της παραμέτρου σε ένα σημείο, και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (mean square error - MSE) της εκτίμησης στο σημείο αυτό. Αν η

διαδικασία επαναληφθεί για κάθε σημείο του πεδίου (σημεία ελέγχου), προκύπτει η εκτίμηση και το σφάλμα σε όλο τον προς διερεύνηση χώρο.

2.2 Προηγούμενες εργασίες σχετικά με όργανα μέτρησης διαφορετικής ακρίβειας

Οι συνήθεις εφαρμογές της γεωστατιστικής αφορούν όργανα με μηδενικό σφάλμα. Όταν τα όργανα παρουσιάζουν κοινό, μη μηδενικό σφάλμα, τότε η διασπορά του σφάλματος υπεισέρχεται στην ανάλυση μέσω της εισαγωγής της παραμέτρου n στο διασπορόγραμμα (με n ίσο με τη διασπορά του σφάλματος). Στην περίπτωση αυτή, η επίλυση ακολουθεί τη μεθοδολογία που περιγράφεται στον Cressie (1988), εξαναγκάζοντας το kriging να λειτουργήσει ως μη-ακριβής μέθοδος παρεμβολής.

Στη διεθνή βιβλιογραφία εντοπίζονται κάποιες προσπάθειες για τον συνυπολογισμό της διαφορετικής ακρίβειας των μετρήσεων, προερχόμενες κυρίως από το χώρο καταγραφής της βροχόπτωσης, όπου χρησιμοποιούνται συνήθως περιορισμένης ακρίβειας αλλά μεγάλου εύρους ραντάρ βροχόπτωσης σε συνδυασμό με τα ακριβέστερα βροχόμετρα. Πρόκειται για τις αναφορές των Krajewski (1987), Todini (2001) και Abbasroug et al (1998). Αν και το πρόβλημα αντιμετωπίζεται θεωρητικά, στην εφαρμογή των προτεινόμενων μεθοδολογιών εμφανίζονται δυσκολίες στους μεν δυο πρώτους λόγω του δυσχερούς, αν όχι αδύνατου, προσδιορισμού των παραμέτρων που απαιτούνται, στον δε Abbasroug επειδή απαιτεί τη θεώρηση σταθερής μέσης τιμής στο πεδίο, κάτι που δεν απαντάται συχνά στις γεωτεχνικές εφαρμογές.

2.3 Επέκταση θεωρίας στην περίπτωση οργάνων μέτρησης διαφορετικής ακρίβειας

Στην παρούσα εργασία, η μεθοδολογία επεκτείνεται, περιλαμβάνοντας όργανα διαφορετικής ακρίβειας, μέσω της εισαγωγής της τεχνικής Monte Carlo.

Ας θεωρηθεί ότι υπάρχουν n διαθέσιμες μετρήσεις της παραμέτρου z στα σημεία s_i του πεδίου, με $i=1,2,\dots,n$ κι ότι η κάθε μία από αυτές παρουσιάζει μέση τιμή $z(s_i)$ και τυπική απόκλιση $\sigma(s_i)$. Δεδομένου ότι η ανάλυση αφορά τυχαία σφάλματα, γίνεται εύλογα η παραδοχή της κανονικής κατανομής των μετρήσεων.

Αρχικά, εκτιμάται η ευαισθησία των παραμέτρων του διασπορογράμματος στα σφάλματα των μετρήσεων, χωρίς την απαίτηση πολλαπλών αναλύσεων, μέσω της τεχνικής Rosenblueth (1975). Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζεται η μέση τιμή κι ο συντελεστής μεταβλητότητας των παραμέτρων του διασπορογράμματος, πραγματοποιώντας $2n+1$ αναλύσεις, σε κάθε μία από τις οποίες μεταβάλλεται η μέση τιμή της i -οστής μέτρησης κατά $\pm\sigma(s_i)$. Εάν ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι περιορισμένος ($CV \ll 1$), τότε το διασπορογράμμα μπορεί να θεωρηθεί σταθερό κι η διαδικασία απλοποιείται σημαντικά, όπως εξηγείται παρακάτω.

Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η τεχνική Monte Carlo, πραγματοποιώντας πολλαπλές γεωστατιστικές αναλύσεις και μεταβάλλοντας σε κάθε μία από αυτές τις τιμές των καταγραφών, σύμφωνα με τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση κάθε σημείου μέτρησης. Τελικά, έπειτα από μεγάλο αριθμό αναλύσεων, προκύπτουν η εκτίμηση και η διασπορά της εκτίμησης, καθώς και το σφάλμα MSE και η διασπορά του, σε κάθε σημείο ελέγχου.

Στην περίπτωση που το διασπορογράμμα θεωρηθεί σταθερό, δηλαδή οι παράμετροι α , β και η είναι αμετάβλητοι, εξαλείφεται, σε κάθε επανάληψη Monte Carlo, η απαίτηση για δομική ανάλυση. Αυτό παρέχει μεγάλο υπολογιστικό όφελος, δεδομένου ότι το πιο χρονοβόρο κομμάτι κάθε επανάληψης είναι ο προσδιορισμός των παραμέτρων του διασπορογράμματος. Επίσης, η σταθερότητα του $\gamma(h)$ συνεπάγεται και σταθερότητα στο MSE, εφόσον το σφάλμα αυτό εξαρτάται αποκλειστικά από τις παραμέτρους του διασπορογράμματος και τη διάταξη της ενοργάνωσης. Άρα, στην περίπτωση του σταθερού $\gamma(h)$, ο υπολογισμός του MSE μπορεί να γίνει μόνο μια φορά και η διασπορά του είναι μηδενική. Συνεπώς, η απλοποιητική παραδοχή της σταθερότητας του διασπορογράμματος προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση στον υπολογιστικό χρόνο κατά την ανάλυση Monte Carlo.

Τελικά, το σφάλμα E στην εκτίμηση της παραμέτρου z στο πεδίο προκύπτει ως άθροισμα των δυο επιμέρους σφαλμάτων, του τετραγωνικού σφάλματος E_s λόγω της στοχαστικής φύσης της παραμέτρου (MSE) και του τετραγωνικού σφάλματος λόγω της ανακρίβειας των μετρήσεων E_{MC} , που δεν είναι άλλο από τη διασπορά που παρουσιάζουν οι εκτιμήσεις της παραμέτρου z στο σύνολο των αναλύσεων Monte Carlo.

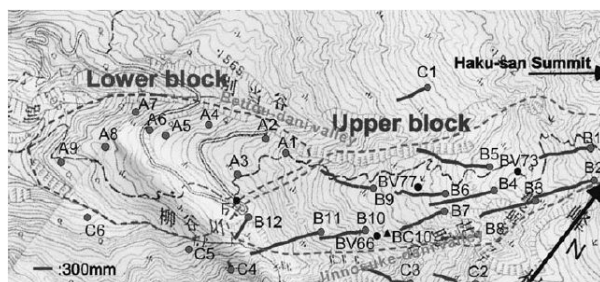
Η βέλτιστη θέση για την τοποθέτηση των νέων οργάνων μέτρησης προκύπτει ως αυτή που περιορίζει στο μέγιστο βαθμό την αβεβαιότητα στο πεδίο, δηλ. που προκαλεί τη μεγαλύτερη μείωση στο συνολικό σφάλμα ΣΕ στο διερευνόμενο πεδίο, το οποίο είναι το άθροισμα των E κάθε σημείου ελέγχου (Rouhani, 1985).

3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας χρησιμοποιήθηκε μια περίπτωση κατολίσθησης δανεισμένη από τη διεθνή βιβλιογραφία, η κατολίσθηση Jinnosuke-dani, που περιγράφεται αναλυτικά στην αναφορά των Wang et al. (2007).

Πρόκειται για μια γιγάντια κατολίσθηση μήκους 2km και πλάτους 0,5km, που βρίσκεται στην ορεινή περιοχή της Haku-san, στην Ιαπωνία. Το φαινόμενο εξελίσσεται εντός του γεωλογικού σχηματισμού Tedorī, ο οποίος αποτελείται από εναλλασσόμενα επίπεδα αργιλικού σχιστόλιθου (shale) και ψαμμίτη. Η κλίση του πρानούς είναι 22° .

Η Jinnosuke-dani κατολίσθηση είναι η πιο ενεργή κατολίσθηση της περιοχής με ρυθμό που αγγίζει τα 10cm/yr. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τον υψηλό κίνδυνο που διατρέχουν 1200 άνθρωποι στα κατάντη φράγματος από πιθανή υπερπήδηση λόγω ξαφνικής αστοχίας του πρानούς, οδήγησε το αρμόδιο Υπουργείο της Ιαπωνίας στην υιοθέτηση ενός 7ετούς προγράμματος εκτεταμένης ενόργανης παρακολούθησης, με σκοπό τον εντοπισμό των παραγόντων που επηρεάζουν την κατολίσθηση και τον επακόλουθο σχεδιασμό των μέτρων υποστήριξής της.



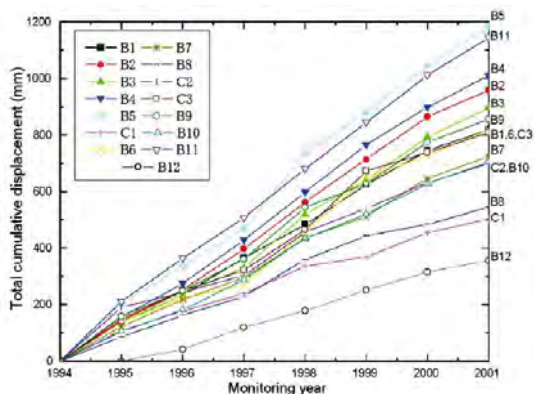
Σχήμα 1: Κάτοψη κατολίσθησης (από Wang et al., 2007)

Figure 1: Landslide plan view (after Wang et al., 2007)

Η ενόργανη παρακολούθηση αποτελείται από:

- καταγραφές επιφανειακών μετακινήσεων με χρήση GPS και ηλεκτρονική μέθοδο μέτρησης αποστάσεων. Πρόκειται για 9 σημεία μετρήσεων A1-A9 στο κάτω τμήμα της κατολίσθησης, 12 σημεία B1-B12 στο άνω τμήμα της και 6 σημεία C1-C6 εκτός της κατολίσθησης. Οι θέσεις των μετρήσεων δίνονται στο Σχήμα 1. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται κι η διεύθυνση των μετακινήσεων.
- κλισιόμετρα για τον προσδιορισμό της ζώνης ολίσθησης,
- 7 κατακόρυφα επιμηκυσιόμετρα,
- πιεζόμετρα, για να εκτιμηθεί η επιρροή της μεταβολής του υδροφόρου ορίζοντα στις μετακινήσεις.

Αποτελέσματα, αξιολογήσεις και συγκρίσεις από τις παραπάνω μετρήσεις δίνονται στην αναφορά του Wang et al., 2007. Για τις ανάγκες τις παρούσας εργασίας, η οποία εστιάζει στις επιφανειακές μετακινήσεις του πρηνούς, χρειάζεται να αναφερθεί ότι το πρηνές χωρίζεται σε δυο τμήματα, το άνω και το κάτω (βλ. Σχήμα 1). Πράγματι, το άνω τμήμα κινείται έντονα με ταχύτητα 130mm/yr – σχεδόν σταθερή εντός της 7ετίας, ενώ το κάτω τμήμα παραμένει σχετικά σταθερό με ρυθμούς 3-15mm/yr. Οι μετρήσεις δίνονται στο Σχήμα 2. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο διαχωρισμός αυτός βασίζεται αποκλειστικά στις καταγραφές του πεδίου, δεδομένου ότι το όριο ανάμεσα στα δυο τμήματα δεν είναι ορατό από την επιτόπια έρευνα.



Σχήμα 2: Χρονική εξέλιξη των επιφανειακών μετακινήσεων (από Wang et al., 2007)
Figure 2: Time series of surface displacement (after Wang et al., 2007)

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Η εφαρμογή που ακολουθεί αφορά μόνο το άνω τμήμα της κατολίσθησης Jinnosuke. Η ανάλυση δεν εφαρμόζεται και στα δυο

τμήματα, διότι ο μηχανισμός της κατολίσθησης είναι διαφορετικός κι άρα απαιτείται διαφορετική δομική ανάλυση κι επίλυση σε κάθε τμήμα ξεχωριστά.

Στις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις των σημείων B1~B12, που αφορούν την καταγραφή των μετακινήσεων στο άνω τμήμα που διερευνάται. Στο ίδιο τμήμα υπήρχαν διαθέσιμες και μετρήσεις κλισιομέτρων, οι οποίες όμως δεν ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθούν, γιατί αφορούν διαφορετικά χρονικά διαστήματα.

Οι αναλύσεις που περιγράφονται πραγματοποιήθηκαν με το πρόγραμμα KRIG_ARN που λειτουργεί σε περιβάλλον MATLAB και αναπτύχθηκε από την πρώτη συγγραφέα στο πλαίσιο της διδακτορικής της διατριβής.

4.1 Δομική ανάλυση

Ο προσδιορισμός του διασπορογράμματος, δηλαδή η επιλογή προσομοιώματος και η εκτίμηση των παραμέτρων του, στις συνήθεις εφαρμογές, προκύπτει άμεσα από τις μετρήσεις στο πεδίο. Ωστόσο, στην προκειμένη περίπτωση, και στις γεωτεχνικές εφαρμογές γενικότερα, το πλήθος των διαθέσιμων μετρήσεων είναι περιορισμένο, γεγονός που μειώνει την αξιοπιστία του $\gamma(h)$.

Έτσι, η επιλογή προσομοιώματος του γ δε βασίζεται αποκλειστικά στις μετρήσεις, αλλά και στην κρίση του μελετητή. Ως υποψήφια προσομοιώματα επιλέγονται το δυναμικό και το γραμμικό, ως μη στάσιμα. Όσο αφορά τις παραμέτρους των προσομοιωμάτων, αυτές προκύπτουν από τη μέθοδο περιορισμένης μέγιστης πιθανοφάνειας (RML-restricted maximum likelihood) (Pardo-Igúzquiza, 1998a και 1998β).

Στη συνέχεια, για την τελική επιλογή του προσομοιώματος, διενεργούνται διαγνωστικοί έλεγχοι (Kitanidis, 1991 & Kitanidis & Vomvoris, 1983). Στην προκειμένη περίπτωση, το γραμμικό προσομοίωμα δεν καλύπτει τις απαιτήσεις των διαγνωστικών ελέγχων κι άρα, στη συνέχεια της εργασίας, η ανάλυση αφορά αποκλειστικά το δυναμικό.

Στο σημείο αυτό αξίζει να τονιστεί ότι δε διερευνήθηκαν περιπτώσεις τάσεων μεταβολής (universal kriging) ή ανισοτροπίας, διότι τα πιο εξεζητημένα αυτά προσομοιώματα απαιτούν τον προσδιορισμό μεγαλύτερου αριθμού παραμέτρων, πράγμα αδύνατο με το ήδη περιορισμένο πλήθος μετρήσεων που είναι διαθέσιμο.

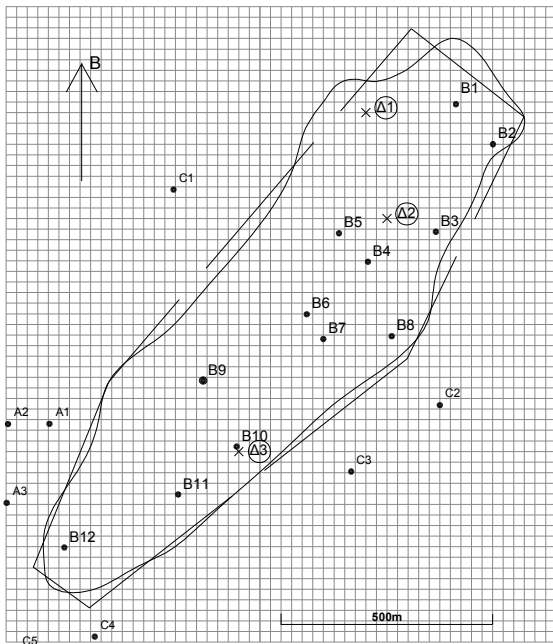
Πιο συγκεκριμένα, για τις μετρήσεις των μετακινήσεων στην κατολίσθηση Jinnosuke, η μέθοδος RML (με θεώρηση $n=0$) έδωσε τις τιμές που φαίνονται στον πίνακα 1:

Πίνακας 1. Τιμές παραμέτρων γ
Table 1. Variogram parameters

Παράμετροι	Τιμές
α	122,4318
β	1,1348

4.2 Βέλτιστη γραμμική αμερόληπτη εκτίμηση

Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείται η κάτοψη του σχήματος 3, όπου φαίνονται οι θέσεις των 12 σημείων μέτρησης που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση (B1~B12), οι θέσεις των τριών υποψήφιων νέων σημείων ($\Delta 1 \sim \Delta 3$), οι θέσεις των ασυνεχειών, που επιλέχθηκαν έτσι ώστε να περιγράφουν το ίχνος της κατολίσθησης στο άνω τμήμα της και ο χρησιμοποιούμενος κάρναβος για τα σημεία ελέγχου.



Σχήμα 3: Κάτοψη κατολίσθησης για την ανάλυση

Figure 3: Landslide plan view used for analysis

Πραγματοποιούνται συνολικά 9 αναλύσεις (Πίνακας 2) σύμφωνα με τις εξισώσεις του συνήθους kriging (ordinary kriging). Οι πρώτες τρεις αναλύσεις αφορούν το υπάρχον σύστημα ενόργανης παρακολούθησης των 12 σημείων μέτρησης. Η ανάλυση 1 θεωρεί ότι τα όργανα

μέτρησης δεν παρουσιάζουν σφάλματα, ενώ οι άλλες δύο θεωρούν ότι οι μετρήσεις παρουσιάζουν σφάλμα με τυπική απόκλιση $\pm 10\text{mm}$, που θεωρείται από τους συγγραφείς ότι περιγράφει την ακρίβεια καταγραφών GPS θεωρώντας τεχνική RTK (real time kinematic). Η διαφορά στις αναλύσεις 2 και 3 έγκειται στο ότι η 2 επιλύεται αποκλειστικά με την προσέγγιση της μη ακριβούς παρεμβολής (NEI), ενώ τα αποτελέσματα της 3 αφορούν το συνδυασμό γεωστατιστικής και τεχνικής Monte Carlo (MC), σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε. Οι υπόλοιπες έξι αναλύσεις αφορούν την εκτίμηση της μεταβολής του συνολικού σφάλματος ΣΕ στο πεδίο (άθροισμα των σφαλμάτων E κάθε σημείου ελέγχου) λόγω προσθήκης ενός νέου σημείου μέτρησης στο υφιστάμενο δίκτυο ενοργάνωσης. Οι θέσεις των πρόσθετων σημείων (βλ. Σχήμα 3) επιλέχθηκαν έτσι ώστε το $\Delta 1$ να βρίσκεται μακριά από τα υφιστάμενα σημεία μέτρησης, το $\Delta 2$ ανάμεσα σε σημεία μέτρησης και το $\Delta 3$ πολύ κοντά σε σημείο μέτρησης. Για κάθε ένα από τα πρόσθετα σημεία, πραγματοποιούνται δυο αναλύσεις στην πρώτη θεωρείται ότι το πρόσθετο όργανο μέτρησης είναι κλισιόμετρο με τυπική απόκλιση $\sigma = \pm 1,13\text{mm}$, ενώ στη δεύτερη ότι το πρόσθετο όργανο είναι ένα ακόμα σημείο μέτρησης GPS με $\sigma = \pm 10\text{mm}$.

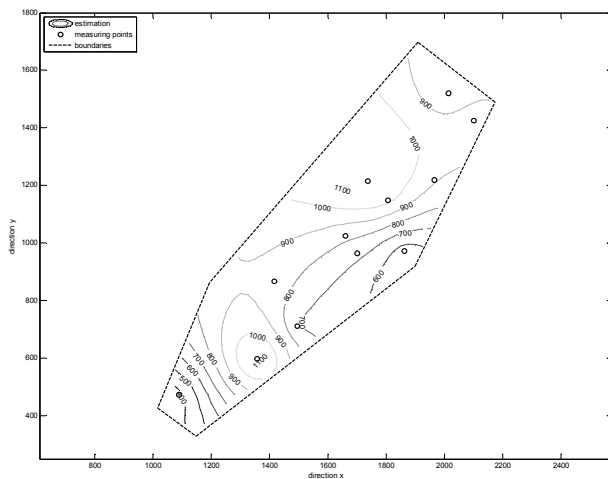
Πίνακας 2. Θεωρήσεις αναλύσεων
Table 2. Analyses assumptions

Ανάλυση	Πρόσθετο σημείο μέτρησης	Ακρίβεια μετρήσεων B1~B12	Ακρίβεια πρόσθετου σημείου
1	-	0	-
2 (NEI)	-	$\pm 10\text{mm}$	-
3 (MC)	-	$\pm 10\text{mm}$	-
4	$\Delta 1$	$\pm 10\text{mm}$	$\pm 1,13\text{mm}$
5	$\Delta 1$	$\pm 10\text{mm}$	$\pm 10\text{mm}$
6	$\Delta 2$	$\pm 10\text{mm}$	$\pm 1,13\text{mm}$
7	$\Delta 2$	$\pm 10\text{mm}$	$\pm 10\text{mm}$
8	$\Delta 3$	$\pm 10\text{mm}$	$\pm 1,13\text{mm}$
9	$\Delta 3$	$\pm 10\text{mm}$	$\pm 10\text{mm}$

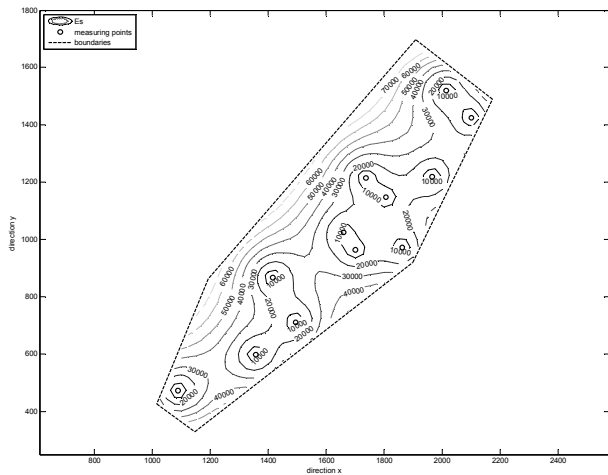
Η επιλογή του $\sigma = \pm 1,13\text{mm}$ στην περίπτωση του κλισιομέτρου βασίστηκε στην αναφορά του Mikkelsen (2003), σύμφωνα με την οποία μια μέση τυπική απόκλιση σημειακής μέτρησης στη διεύθυνση A ενός κλισιομέτρου είναι $\pm 0,08\text{mm}$. Θεωρώντας κλισιόμετρο μήκους 100m, δηλ. 200 μετρήσεων ανά 0,5m, το συνολικό σφάλμα που συγκεντρώνεται στην επιφάνεια είναι $0,08 \cdot \sqrt{2} \cdot 100 = 1,13\text{mm}$.

4.3 Αποτελέσματα

Στα Σχήματα 4 και 5 δίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης 1 σχετικά με τις εκτιμήσεις των μετακινήσεων και το σφάλμα εκτίμησης αντίστοιχα, θεωρώντας μηδενικό σφάλμα στις μετρήσεις ($n=0$). Στο Σχήμα 5 φαίνεται το μηδενικό σφάλμα κοντά στα σημεία μέτρησης και η αύξησή του όσο η απόσταση από τις μετρήσεις αυξάνεται. Επίσης, παρατηρείται συγκέντρωση του σφάλματος στη ΒΔ πλευρά του διερευνόμενου πεδίου, λόγω της απουσίας μετρήσεων στην περιοχή.



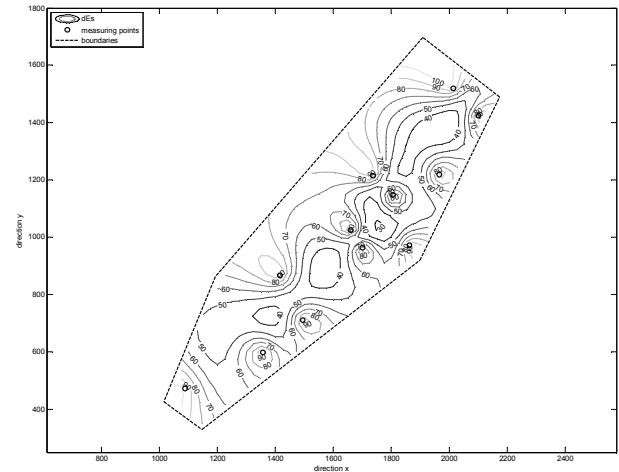
Σχήμα 4: Εκτίμηση μετακινήσεων – Ανάλυση 1
Figure 4: Displacement estimation – Analysis 1



Σχήμα 5: Σφάλμα E_S – Ανάλυση 1
Figure 5: Error E_S - Analysis 1

Στην ανάλυση 2 ($n=100\text{mm}^2$), παρατηρείται ότι η εκτίμηση επηρεάζεται ελάχιστα από την εισαγωγή του n στο διασποροδιάγραμμα. Πράγματι, η μετακίνηση μεταβάλλεται μόνο κατά $0,03\text{mm}$ κατά μέσο όρο στο πεδίο. Η

αύξηση της τυπικής απόκλισης της μετακίνησης κυμαίνεται από $5-10,5\text{mm}$, με μέσο όρο στο πεδίο 8mm . Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6, η αύξηση είναι πιο έντονη στα σημεία μέτρησης (αύξηση ακριβώς κατά 10mm) και μεταβάλλεται εντός του πεδίου. Οι χαμηλότερες τιμές απαντώνται στα σημεία ελέγχου που περιβάλλονται από αρκετά σημεία μέτρησης.



Σχήμα 6: Μεταβολή E_S - Αναλύσεις 1&2
Figure 6: E_S change - Analyses 1&2

Στην ανάλυση 3, θεωρείται ότι το διασπορογράμμα έχει μηδενικό n κι η εισαγωγή του σφάλματος λόγω ανακρίβειας των μετρήσεων προέρχεται από τη διασπορά που θα παρατηρηθεί στην εκτίμηση των μετακινήσεων στις αναλύσεις Monte Carlo. Αρχικά, εκτιμήθηκε η μεταβλητότητα των παραμέτρων του διασπορογράμματος. Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 3. Οι πολύ μικροί συντελεστές μεταβλητότητας επιτρέπουν τη θεώρηση σταθερού διασπορογράμματος στις αναλύσεις Monte Carlo που θα ακολουθήσουν.

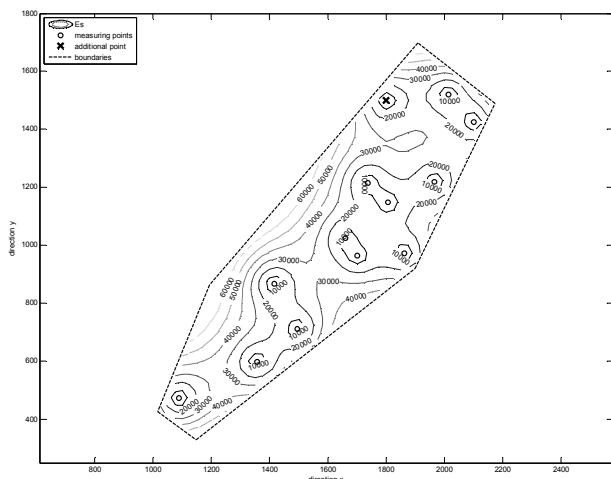
Πίνακας 3. Συντελεστές μεταβλητότητας
Table 3. Coefficients of variation

Παράμετροι	Σ.Μ.
α	0,025
β	0,002

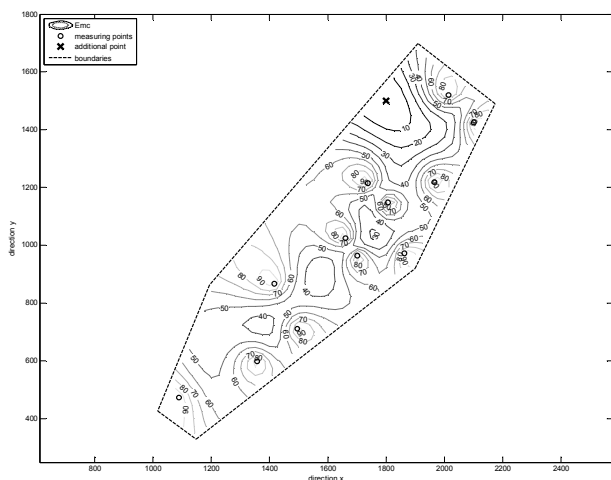
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν έπειτα από 10.000 αναλύσεις Monte Carlo ταυτίζονται σημαντικά με αυτά της ανάλυσης 2. Πιο συγκεκριμένα, η εκτίμηση των μετακινήσεων διαφέρει κατά $0,05\text{mm}$ μέσο όρο στο πεδίο σε σχέση με της ανάλυσης 2. Αντίστοιχες μικρές

τιμές παρατηρούνται και στις διαφορές μεταξύ των σφαλμάτων των δυο αναλύσεων.

Στις υπόλοιπες αναλύσεις, θεωρήθηκε ως τιμή μέτρησης του πρόσθετου σημείου, αυτή που προέκυψε από την ανάλυση 1. Στα Σχήματα 7 & 8 δίνονται το τετραγωνικό σφάλμα εκτίμησης E_S και το τετραγωνικό σφάλμα λόγω ανακρίβειας μετρήσεων E_{MC} για την ανάλυση 4 αντίστοιχα. Είναι φανερή η μείωση του E_S στη γειτονιά του $\Delta 1$, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται, έστω και λίγο, το σφάλμα E_{MC} .



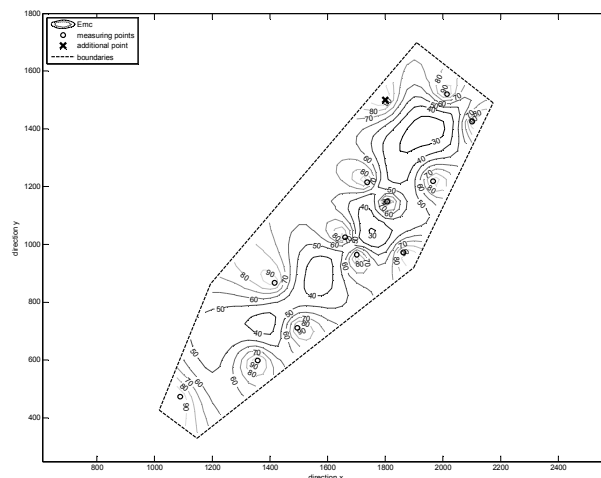
Σχήμα 7: Σφάλμα E_S – Ανάλυση 4
Figure 7: Error E_S – Analysis 4



Σχήμα 8: Σφάλμα E_{MC} – Ανάλυση 4
Figure 8: Error E_{MC} – Analysis 4

Στην ανάλυση 5, το E_S παραμένει σταθερό, μιας και τόσο το διασπορόγραμμα όσο και τα διαθέσιμα σημεία μέτρησης είναι σταθερά. Δίνεται μόνο το σφάλμα E_{MC} (Σχήμα 9), όπου φαίνεται η μικρή βελτίωση του σφάλματος E_{MC} στην περιοχή του $\Delta 1$. Η μέγιστη μεταβολή

τυπικής απόκλισης των μετακινήσεων λόγω ανακρίβειας μετρήσεων στην ανάλυση 4 είναι 2,8mm, ενώ στην ανάλυση 5 είναι σαφώς μικρότερη ($\Delta\sigma_{max}=1,4mm$).



Σχήμα 9: Σφάλμα E_{MC} – Ανάλυση 5
Figure 9: Error E_{MC} – Analysis 5

Παρόμοιες εικόνες παρουσιάζουν και τα σφάλματα στις επόμενες αναλύσεις. Συγκεντρωτικά, ο περιορισμός του τετραγωνικού σφάλματος αθροιστικά στο πεδίο για κάθε ανάλυση δίνεται στον πίνακα 4, ως ποσοστό του αντίστοιχου σφάλματος που προέκυψε στην ανάλυση 3. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η επιλογή της θέσης του νέου σημείου είναι καθοριστική για τη βελτίωση της ακρίβειας εκτίμησης στο πεδίο. Πράγματι, η θέση $\Delta 1$ – μακριά από τις υπάρχουσες μετρήσεις – βελτιώνει ως και 11% την ακρίβεια των εκτιμήσεων. Αν, όμως, επιλεγεί μια θέση στη γειτονιά των μετρήσεων, η βελτίωση είναι περιορισμένη. Σχετικά με την ακρίβεια της μέτρησης, σαφώς η επιλογή του κλισιομέτρου έναντι ενός ακόμα σημείου GPS, περιορίζει το σφάλμα E_{MC} σε μεγαλύτερο βαθμό. Η επίδραση, μάλιστα, της ακρίβειας του οργάνου φαίνεται να εντείνεται όσο απομακρύνεται το όργανο από τις υπόλοιπες μετρήσεις. Ωστόσο, η συμβολή της ακριβέστερης καταγραφής στη συνολική βελτίωση του σφάλματος είναι μηδαμινή, μιας και υπερκαλύπτεται από την αβεβαιότητα της στοχαστικής ανάλυσης (για αυτό οι τιμές της στήλης $\Sigma(E_S)$ ταυτίζονται με αυτές της στήλης ΣE στον Πίνακα 4).

Πίνακας 4. Βελτίωση ακρίβειας (%)
Table 4. Accuracy increase (%)

Ανάλυση	$\Sigma(E_s)$	$\Sigma(E_{MC})$	ΣE
4	10,89	9,19	10,89
5	10,89	3,41	10,89
6	2,38	3,69	2,38
7	2,38	0,30	2,38
8	0,35	3,27	0,35
9	0,35	0,92	0,35

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάστηκε η επέκταση της κλασικής μεθοδολογίας της γεωστατιστικής σχετικά με την εκτίμηση των μετακινήσεων και του σφάλματος της εκτίμησης, στην περίπτωση που το σύστημα ενόργανης παρακολούθησης αποτελείται από όργανα διαφορετικής ακρίβειας. Ο προσδιορισμός του συνολικού σφάλματος του πεδίου επιτρέπει την εκλογή καταλληλότερης θέσης για την τοποθέτηση νέου σημείου μέτρησης. Πράγματι, αν η διαδικασία που πραγματοποιήθηκε για τα τρία σημεία Δ1~Δ3 επαναληφθεί για όλες τις υποψήφιες θέσεις, η θέση με το μικρότερο συνολικό σφάλμα στο πεδίο είναι η βέλτιστη.

Στην προκειμένη εφαρμογή, τα αποτελέσματα έδειξαν πως καθοριστικός παράγοντας για τη βελτίωση της ακρίβειας στο πεδίο είναι η επιλογή της θέσης του οργάνου μέτρησης κι όχι η ακρίβειά του. Πράγματι, η αβεβαιότητα της στοχαστικής φύσης της παραμέτρου υπερτερεί σημαντικά έναντι της αβεβαιότητας που πηγάζει από τα σφάλματα μέτρησης. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι είναι προτιμότερο, σε παρόμοιες εφαρμογές, το κόστος ενόργανης παρακολούθησης να διαχέεται για την αύξηση του αριθμού των μετρήσεων παρά για την αγορά ακριβέστερων οργάνων.

6. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η πρώτη συγγραφέας επιθυμεί να ευχαριστήσει το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ) για την οικονομική υποστήριξη που παρέχει στη διδακτορική της έρευνα.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abbaspour, K.C. et al (1998), "An alternative to cokriging for situations with small sample sizes", *Mathematical Geology*, Vol. 30, No. 8, pp. 259-274.

Chilés, J.P. and Delfiner, P. (1999), "Geostatistics: modeling spatial uncertainty", John Wiley & Sons, Inc., N.Y., U.S.A., p. 695.

Cressie, N. (1988), "Spatial prediction and ordinary kriging", *Mathematical Geology*, Vol. 20, No. 4, pp. 405-421.

Kitanidis, P.K. and Vomvoris, E.G. (1983), "A geostatistical approach to the inverse problem in groundwater modeling (steady state) and one-dimensional simulations", *Water Resources Research*, Vol. 19, No. 3, pp. 677-690.

Kitanidis, P.K. (1991), "Orthonormal residuals in geostatistics: model criticism and parameter estimation", *Mathematical Geology*, Vol. 23, No. 5, pp. 741-758.

Kitanidis, P.K. (1997), "Introduction to Geostatistics: Applications to Hydrogeology", Cambridge University Press, Cambridge, U.K., p. 247.

Krajewski, W.F. (1987), "Cokriging radar-rainfall and rain gage data", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92, D8, 9571-9580.

Mikkelsen, P.E. (2003), "Advances in inclinometer data analysis", *Symposium on Field Measurements in Geomechanics, FMGM2003*, Oslo, Norway.

Pardo-Igúzquiza, E. (1998α), "Maximum likelihood estimation of spatial covariance parameters", *Mathematical Geology*, Vol. 30, No. 1, pp. 95-108.

Pardo-Igúzquiza, E. (1998β), "MLREML4: a program for the inference of the power variogram model by maximum likelihood and restricted maximum likelihood", *Computers and Geosciences*, Vol. 24, No. 6, pp. 537-543.

Rosenbluth, E. (1975), "Point estimates for probability moments", *Proceedings of National Academy of Science, USA*, Vol. 72, No. 10, pp. 3812-3814.

Rouhani, Sh. (1985), "Variance reduction analysis", *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 6, pp. 837-846.

Todini, E. (2001), "A Bayesian technique for conditioning radar precipitation estimates to rain-gauge measurements", *Hydrology and Earth System Science*, Vol. 5, No. 2, pp. 187-199.

Wang, F., Okuno, T. and Matsumoto, T. (2007), "Deformation characteristics and influential factors for the giant Jinnosuke-dani landslide in the Haku-san Mountain area, Japan", Vol. 4, pp. 19-31.