

Βελτιστοποίηση συστήματος ενόργανης παρακολούθησης: εφαρμογή στο σταθμό 'Αγία Παρασκευή' της γραμμής 3 του ΜΕΤΡΟ ΑΘΗΝΑΣ

Optimum design of an existing monitoring network: an application to 'Agia Paraskevi' station of Line 3 of ATHENS METRO

ΑΡΝΑΟΥΤΗ, Σ.Α. Πολιτικός Μηχανικός, MSc, Υποψ. Διδάκτορας, Α.Π.Θ.
ΧΑΤΖΗΓΩΓΟΣ, Θ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Α.Π.Θ.
ΜΗΛΙΩΤΗΣ, Ι. Γεωλόγος, ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ
ΜΑΥΡΟΜΜΑΤΗ, Χ. Πολιτικός Μηχανικός, MSc., ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ
ΜΠΟΥΣΟΥΛΑΣ, Ν. Πολιτικός Μηχανικός, MSc., ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ
ΤΣΟΤΣΟΣ, ΣΤ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Η γεωστατιστική παρέχει τα κατάλληλα εργαλεία για την ανάδειξη των βέλτιστων θέσεων για την ταυτόχρονη προσθήκη ή αφαίρεση ενός ή περισσότερων οργάνων μέτρησης σε υπάρχον σύστημα ενόργανης παρακολούθησης. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε ένα πραγματικό πρόβλημα βαθιάς εκσκαφής, την εκσκαφή του σταθμού "Αγία Παρασκευή" του ΜΕΤΡΟ της ΑΘΗΝΑΣ, όπου οι αναπτυσσόμενες επιφανειακές καθιζήσεις καταγράφονται από ένα πυκνό δίκτυο χωροστάθμησης.

ABSTRACT : Geostatistics provides the tools to detect the optimum locations for the simultaneous addition or abstraction of one or more measurement devices at an existing monitoring network. The methodology is applied in a real deep excavation problem, the excavation of the "Agia Paraskevi" station of ATHENS METRO, where the surface settlements are recorded by a dense leveling monitoring network.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, όλο και πιο συχνά, η κατασκευή γεωτεχνικών έργων συνοδεύεται από συστηματική ενόργανη παρακολούθηση, καθώς αυτή βελτιώθηκε και διευκολύνθηκε από τη ραγδαία πολύπλευρη τεχνολογική εξέλιξη.

Σε πολλές περιπτώσεις ενοργάνωσης, προκύπτει η ανάγκη πύκνωσης ή αραιώσης του αρχικού δικτύου παρακολούθησης. Συνήθως, η εργασία αυτή επαφίεται στην κρίση και την εμπειρία των υπευθύνων ή ακολουθεί υπάρχουσες γενικές, σχετικές κανονιστικές διατάξεις. Όμως, θα μπορούσε να ακολουθεί μια περισσότερο ορθολογική υπολογιστική διαδικασία βασισμένη στις αρχές της γεωστατιστικής. Πράγματι, μέσω της γεωστατιστικής ανάλυσης, θα μπορούσε να εκτιμηθεί η αβεβαιότητα του εξεταζόμενου μεγέθους και να προταθεί η προσθήκη σημείων μέτρησης στις θέσεις που προκαλούν τη μέγιστη βελτίωση της ακρίβειας σε όλο το

διερευνούμενο πεδίο. Τα αντίστροφα ισχύουν για την περίπτωση ανάγκης αφαίρεσης σημείων μέτρησης.

Στην παρούσα εργασία, η γεωστατιστική ανάλυση εφαρμόζεται στο σταθμό 'Αγία Παρασκευή' για τον εντοπισμό των σημείων μέτρησης που θα μπορούσαν να αφαιρεθούν, χωρίς σημαντική αύξηση της αβεβαιότητας στο πεδίο. Τα κριτήρια προσδιορισμού των προς αφαίρεση σημείων μέτρησης τροποποιούνται, για να δώσουν ιδιαίτερη βαρύτητα σε περιοχές που παρουσιάζουν υψηλές καταγραφές ή/και μεγάλο ρυθμό ανάπτυξης.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Θεωρητική βάση γεωστατιστικής

Οι βασικές αρχές της γεωστατιστικής μπορούν να αναζητηθούν σε ποικίλα βιβλία, μεταξύ των οποίων αυτά των Kitanidis (1997) και Chilès & Delfiner (1999). Μια σύνοψη δίνεται και στο

άρθρο Αρναούτη (2010) που παρουσιάζεται στο ίδιο συνέδριο.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, αξίζει να αναφερθεί ότι η γεωστατιστική ανάλυση υπολογίζει, μεταξύ άλλων, το σφάλμα εκτίμησης MSE (mean square error) σε κάθε σημείο ελέγχου, που αποτελεί μέτρο της αβεβαιότητας της εκτίμησης στο συγκεκριμένο σημείο.

2.2 Προηγούμενες εργασίες σχετικά με τη βελτιστοποίηση συστημάτων ενόργανης παρακολούθησης

Οι πρώτες αναφορές σχετίζονται με την τοποθέτηση ενός οργάνου μέτρησης σε υφιστάμενο δίκτυο (Matalas, 1968), όπου η επιλεγόμενη θέση ταυτίζεται με το σημείο του πεδίου που παρουσιάζει το μέγιστο σφάλμα εκτίμησης MSE. Για τους Bras & Rodríguez-Iturbe (1976), η βέλτιστη θέση συμπίπτει με το σημείο που προκαλεί τη μεγαλύτερη μείωση στη συνάρτηση κόστους CF, η οποία εξαρτάται τόσο από το σφάλμα MSE όσο και από το κόστος αγοράς κι εγκατάστασης των νέων οργάνων μέτρησης. Το 1985, ο Rouhani παρουσιάζει έναν αλγόριθμο για τον προσδιορισμό της μείωσης στο πεδίο του MSE που επιφέρει η τοποθέτηση ενός οργάνου σε μια συγκεκριμένη θέση. Η βέλτιστη θέση είναι αυτή που προκαλεί τη μεγαλύτερη μείωση του σφάλματος αθροιστικά σε όλο το πεδίο κι όχι σημειακά.

Ολοκληρώνοντας, χρειάζεται να τονιστεί ότι όλες οι προαναφερόμενες μέθοδοι απαιτούν μια θεώρηση για τη μορφή του διασπορογράμματος. Αυτή μπορεί να προκύψει είτε από προηγούμενη εμπειρία του μελετητή σε παρόμοιες εφαρμογές είτε, συχνότερα, από μετρήσεις που υπάρχουν ήδη στο πεδίο. Για το λόγο αυτό, οι περισσότερες αναφορές σχετίζονται με την προσθήκη οργάνων σε υφιστάμενο δίκτυο κι όχι με το σχεδιασμό του συστήματος από την αρχή, πάντα με την υπόθεση ότι οι νέες μετρήσεις δε θα μεταβάλλουν το διασπορόγραμμα. Επίσης, σε περιπτώσεις όπου η παράμετρος που μετράται μεταβάλλεται στο χρόνο, η γεωστατιστική μπορεί να προσφέρει απαντήσεις για τη βελτιστοποίηση του δικτύου μόνο με την υπόθεση ότι το διασπορόγραμμα παρουσιάζει σταθερή μορφή με το πέρασμα του χρόνου. Ειδάλλως, η επίλυση θα αφορά την παρούσα κατανομή του εξεταζόμενου μεγέθους κι όχι τη μελλοντική.

2.3 Συναρτήσεις κόστους

Όπως προαναφέρθηκε, οι περισσότερες αναφορές συνδέουν την επιλογή νέων θέσεων ενόργανωσης με την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους ή αντικειμενικής συνάρτησης CF, βασικό συστατικό της οποίας είναι το σφάλμα εκτίμησης MSE που προέρχεται από τη γεωστατιστική ανάλυση.

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιούνται τέσσερις διαφορετικές συναρτήσεις κόστους. Στην πρώτη (Rouhani, 1985), απόλυτο κριτήριο για την επιλογή θέσης είναι η αβεβαιότητα στην εκτίμηση σε όλο το πεδίο:

$$CF_1 = \sum_{i=1}^m (MSE)_i \quad (1)$$

όπου $(MSE)_i$ το σφάλμα εκτίμησης του i -οστού σημείου ελέγχου και m το πλήθος τους στο πεδίο.

Στα γεωτεχνικά έργα, συχνά, το ενδιαφέρον δε διαχέεται εξίσου σε όλο το πεδίο, αλλά εστιάζεται σε περιοχές όπου τα μετρούμενα μεγέθη παρουσιάζουν μεγάλες καταγραφές ή ιδιαίτερα υψηλό ρυθμό ανάπτυξης. Για να συμπεριληφθούν και αυτές οι παράμετροι, οι συναρτήσεις κόστους τροποποιήθηκαν ως εξής:

$$CF_2 = \sum_{i=1}^m (MSE)_i \cdot E_i \quad (2)$$

$$CF_3 = \sum_{i=1}^m (MSE)_i \cdot R_i \quad (3)$$

$$CF_4 = \sum_{i=1}^m (MSE)_i \cdot E_i \cdot R_i \quad (4)$$

όπου E_i και R_i η τιμή του εξεταζόμενου μεγέθους και ο ρυθμός ανάπτυξής του στο σημείο ελέγχου i αντίστοιχα.

Επομένως, η CF_2 δίνει έμφαση στις περιοχές με υψηλές καταγραφές, η CF_3 στις περιοχές όπου οι τιμές αυξάνονται με γρήγορο ρυθμό, ενώ η CF_4 παρέχει περισσότερη βαρύτητα στις περιοχές που εμφανίζουν και τα δύο χαρακτηριστικά.

Γίνεται φανερό ότι οι τιμές των E_i & R_i αφορούν τη χρονική στιγμή που εξετάζεται και άρα ο προσδιορισμός των βέλτιστων θέσεων που βασίζονται σε αυτές εμπεριέχει κάποιον 'χρονικό περιορισμό', δηλ. οι θέσεις

εξακολουθούν να φέρουν τον τίτλο 'βέλτιστες' για όσο χρονικό διάστημα η κατανομή στο πεδίο των E_i & R_i παραμένει αμετάβλητη.

2.4 Προσδιορισμός θέσεων για τη βέλτιστη διάταξη του δικτύου εντοπισμού

Έχοντας επιλέξει το είδος της συνάρτησης κόστους και με δεδομένο τον αριθμό N των σημείων μέτρησης που θα προστεθούν στο υφιστάμενο δίκτυο, οι N βέλτιστες θέσεις επιλέγονται έτσι ώστε να εξασφαλίζουν τη μεγαλύτερη μείωση στη συνάρτηση κόστους. Δεδομένου ότι οι τιμές των E_i & R_i δε μεταβάλλονται με την προσθήκη των νέων σημείων, αρκεί, για τον προσδιορισμό της βέλτιστης θέσης, να εκτιμηθεί η επίδραση της διάταξης του συστήματος εντοπισμού στο σφάλμα MSE.

Οι Lin & Rouhani (2001), στηριζόμενοι στη θεωρία ότι το διασπορόγραμμα δε θα μεταβληθεί σημαντικά με την προσθήκη των N σημείων μέτρησης, παρέχουν εξισώσεις για τη μεταβολή του σφάλματος $\Delta(MSE)$ στη θέση i λόγω της τοποθέτησης των νέων σημείων μέτρησης σε συγκεκριμένο συνδυασμό θέσεων κι άρα μπορεί να υπολογιστεί η μεταβολή της συνάρτησης κόστους $\Delta(CF)$ σε κάθε σημείο ελέγχου i . Αθροίζοντας τις $\Delta(CF)$ για όλα τα σημεία ελέγχου στο πεδίο, προκύπτει η συνολική μεταβολή της CF στο πεδίο λόγω του συγκεκριμένου συνδυασμού. Αν η διαδικασία επαναληφθεί για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς, προκύπτει ο βέλτιστος, ως αυτός που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μείωση στην CF .

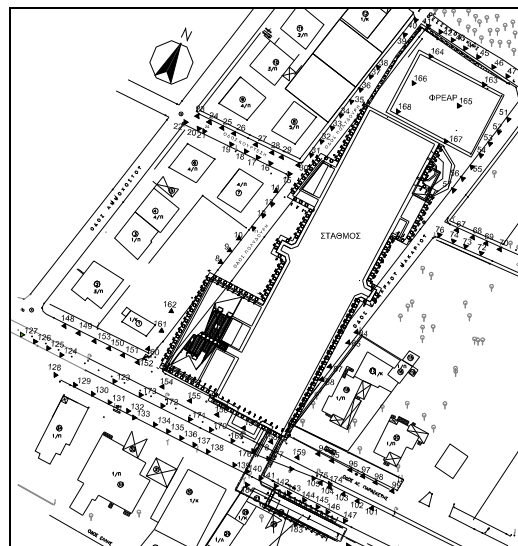
Εάν οι υποψήφιες θέσεις είναι πολλές ή αν ο αριθμός των πρόσθετων σημείων είναι μεγάλος, τότε η εκτίμηση της $\Delta(CF)$ για κάθε υποψήφιο συνδυασμό απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Για το λόγο αυτό, υιοθετείται κατάλληλος αλγόριθμος (Pardolguizquia, 1998), ώστε να προκύψει ο βέλτιστος συνδυασμός, δηλαδή αυτός που ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση κόστους.

Αντίστοιχη είναι κι η διαδικασία όταν πρόκειται για τον περιορισμό του δικτύου εντοπισμού, με τη διαφορά ότι πλέον αναζητείται ο συνδυασμός που προκαλεί τη μικρότερη αύξηση στη συνάρτηση κόστους.

3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η μεθοδολογία εφαρμόστηκε στην εκσκαφή του σταθμού 'Αγία Παρασκευή' της γραμμής 3 του ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ.

Πρόκειται για μια βαθιά εκσκαφή με διαστάσεις 26x110m περίπου και βάθους 24m εντός Τεταρτογενών αποθέσεων που συνίστανται σε αργίλους, αμμώδεις αργίλους και αμμώδεις αργίλους με χάλικες. Η κάτοψη του σταθμού δίνεται στο Σχήμα 1, όπου διακρίνονται, μεταξύ άλλων, η υπόγεια σήραγγα πρόσβασης και η είσοδος των επιβατών στη νότια πλευρά του σταθμού, τα κτίρια περιμετρικά του έργου και το ήδη κατασκευασμένο φρέαρ εξαερισμού στη βόρεια πλευρά του σταθμού. Το συγκεκριμένο έργο παρουσιάζει την ιδιαιτερότητα ότι μέρος της εκσκαφής πραγματοποιείται καθώς ο συρμός του μετρό βρίσκεται σε λειτουργία. Για το λόγο αυτό, υιοθετήθηκε μια πιο πυκνή διάταξη ενόργανης παρακολούθησης, που περιλαμβάνει πλήθος αυτοματοποιημένων και μη οργάνων μέτρησης (π.χ. πιεζόμετρα, κλισιόμετρα, μικρόμετρα, επιμηκυνσιόμετρα, αισθητήρες παραμορφώσεων τροχιών, διατομές Bassett) και τοπογραφικές μεθόδους (χωροστάθμηση, σύστημα Georobot, σύστημα γεωδαιτικού σταθμού). Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη χωροστάθμηση του έργου, η οποία περιλαμβάνει την καταγραφή, σχεδόν σε καθημερινή βάση, των κατακόρυφων μετακινήσεων σε 135 σημεία (ακίδες) περιμετρικά του σταθμού. Η θέση των ακίδων κι η αρίθμησή τους φαίνεται στο Σχήμα 1.



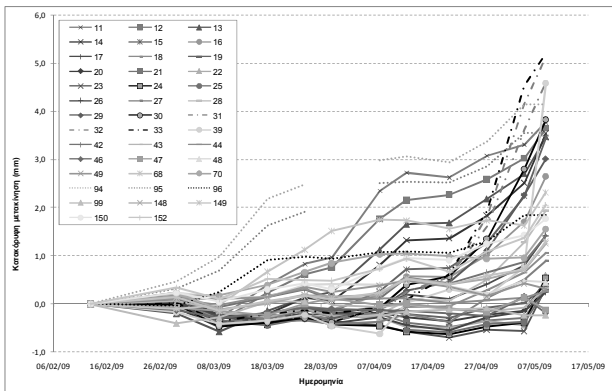
Σχήμα 1: Κάτοψη σταθμού
Figure 1: Station plan view

Η εργασία αναφέρεται στις κατακόρυφες μετακινήσεις που αναπτύχθηκαν κατά το χρονικό διάστημα από 13/02/09 έως τις 09/05/09, δηλ. από την έναρξη εκσκαφής του πρίσματος που δημιουργήθηκε γύρω από την

σε λειτουργία σήραγγα ΜΕΤΡΟ έως την ολοκλήρωση των εκσκαφών και της σκυροδέτησης του πυθμένα του σταθμού. Το εν λόγω πρίσμα παρουσιάζεται στη Φωτογραφία 1. Η εφαρμογή που ακολουθεί δε λαμβάνει υπόψη τις 59 ακίδες που βρίσκονται στο νότιο τμήμα του σταθμού, διότι θεωρείται ότι οι μετρήσεις τους επηρεάζονται από την εκσκαφή της σήραγγας πρόσβασης της νότιας εισόδου. Άλλωστε υπάρχει πληθώρα ακίδων - 76 στο σύνολο - στο υπόλοιπο τμήμα του έργου. Στις 09/05/09 καταγράφηκαν οι κατακόρυφες μετακινήσεις σε 42 σημεία. Στο Σχήμα 2 δίνονται οι μετακινήσεις αυτές (οι θετικές τιμές αφορούν καθιζήσεις) εντός του προαναφερόμενου χρονικού διαστήματος.



Φωτογραφία 1: Άποψη πρίσματος
 Photograph 1: Prism view



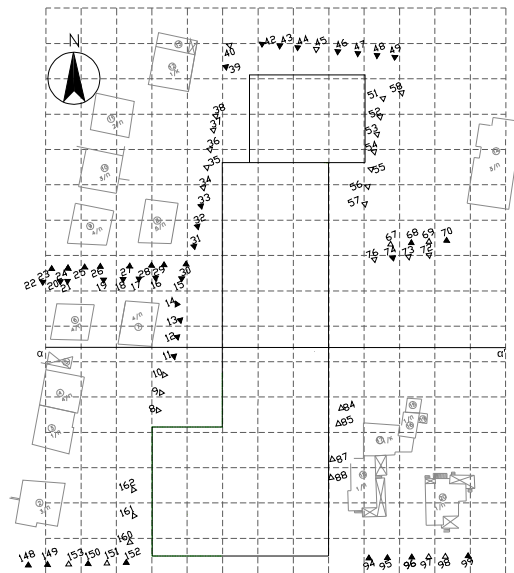
Σχήμα 2: Χρονική εξέλιξη καθιζήσεων
 Figure 2: Time series of settlement

Αξίζει να αναφερθεί ότι το κάθε στάδιο εκσκαφής, μετά τις 13/02/09, ξεκινάει από το νότιο άκρο και ολοκληρώνεται στο βόρειο άκρο του σταθμού. Για το λόγο αυτό, οι καθιζήσεις αναπτύσσονται νωρίτερα στις ακίδες στο νότιο τμήμα του έργου, όπως οι 94, 95, 96, ενώ εμφανίζονται σχεδόν ταυτόχρονα με την ολοκλήρωση των εκσκαφών στις ακίδες που

βρίσκονται στο βόρειο τμήμα του έργου, όπως οι 31, 32, 33. Επίσης, μεγαλύτερες καθιζήσεις, όπως ήταν αναμενόμενο, καταγράφονται στις ακίδες που βρίσκονται σε μικρή απόσταση από το σταθμό (π.χ. στην 30) σε σχέση με τις πιο μακρινές (π.χ. 24).

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείται η κάτοψη του σχήματος 3, όπου παρουσιάζονται τόσο ο κάρναβος που χρησιμοποιείται (σημεία ελέγχου), όσο και η θέση των ασυνεχειών, που επιλέχθηκαν έτσι ώστε να συμπίπτουν με το περίγραμμα του σταθμού και του φρέατος. Ως ασυνέχειες στην ανάλυση ορίζονται οι ευθείες που, αν τέμνουν την ευθεία που ενώνει ένα σημείο μέτρησης με ένα σημείο ελέγχου, τότε δεν επιτρέπουν τη συμμετοχή της μέτρησης του πρώτου στην εκτίμηση των καθιζήσεων του δεύτερου. Στο ίδιο σχήμα δίνονται κι οι 76 ακίδες που συμμετέχουν στην ανάλυση. Με διαγραμμισμένο τρίγωνο διακρίνονται οι ακίδες στις οποίες είναι διαθέσιμες μετρήσεις στην ημερομηνία που διερευνάται (09/05). Επίσης, διακρίνεται το ευθύγραμμο τμήμα α-α', που συμμετέχει στο δεύτερο μέρος της ανάλυσης.



Σχήμα 3: Κάρναβος ανάλυσης
 Figure 3: Analysis grid

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

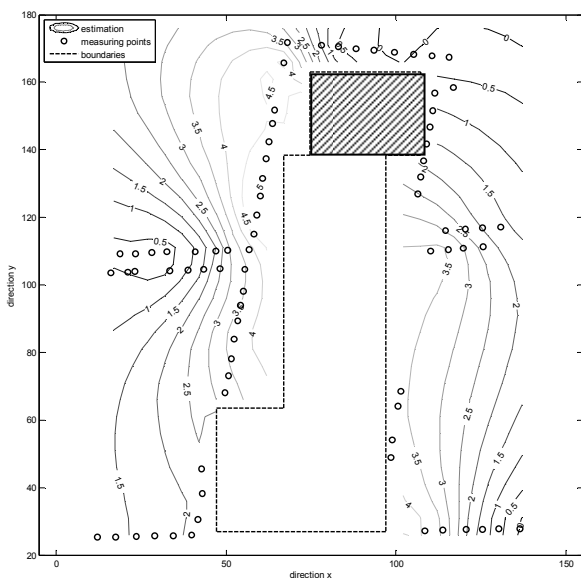
Στη συγκεκριμένη εφαρμογή υιοθετήθηκε το γραμμικό προσομοίωμα και περιγράφεται από τη σχέση:

$$\gamma = 0,05 \cdot h \quad (1)$$

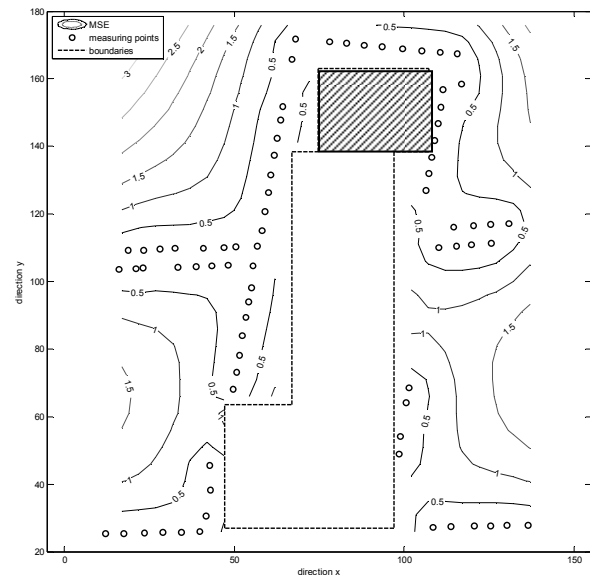
όπου h η απόσταση. Το επιλεγόμενο διασπορόγραμμα ικανοποιεί τους διαγνωστικούς ελέγχους (Kitanidis, 1997).

4.2 Βέλτιστη γραμμική αμερόληπτη εκτίμηση (Σύνηθες kriging)

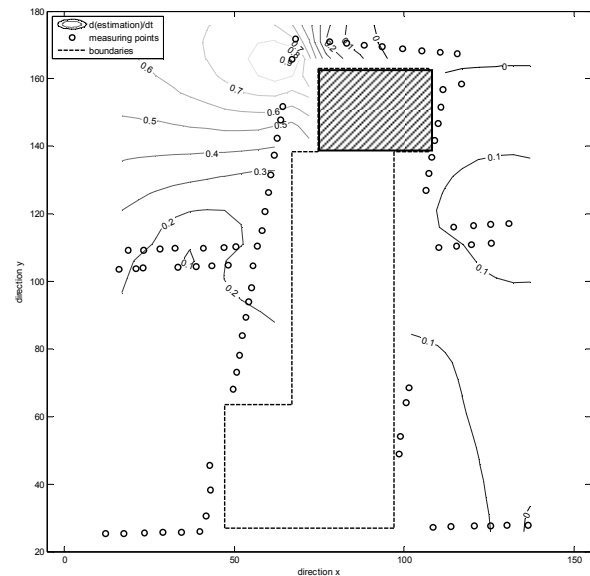
Αρχικά, πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση για την εκτίμηση των καθιζήσεων και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) της εκτίμησης αυτής για τις 09/05. Τα αποτελέσματα δίνονται στα Σχήματα 4 και 5 αντίστοιχα. Επίσης, οι καθιζήσεις στο πεδίο εκτιμήθηκαν και στις 05/05, για να προκύψουν οι ισούψεις του ρυθμού ανάπτυξης καθιζήσεων στο πεδίο στο διάστημα 05/05-09/05 (Σχήμα 6), που είναι και ο ρυθμός ανάπτυξης που θα χρησιμοποιηθεί στις CF_3 & CF_4 .



Σχήμα 4: Εκτίμηση καθιζήσεων (09/05)
Figure 4: Settlement estimation (09/05)



Σχήμα 5: Σφάλμα MSE (09/05)
Figure 5: Error MSE (09/05)



Σχήμα 6: Εκτίμηση ρυθμού καθιζήσεων (05/05-09/05)
Figure 6: Settlement rate (05/05-09/05)

Από το Σχήμα 6 γίνεται φανερός ο έντονος ρυθμός ανάπτυξης των καθιζήσεων στο βόρειο-δυτικό άκρο του έργου (0,9mm/d), ο οποίος οφείλεται στην εκσκαφή μεγάλου βάθους, η οποία πραγματοποιήθηκε τις συγκεκριμένες μέρες στο αντίστοιχο τμήμα του σταθμού.

4.3 Περιορισμός δικτύου ενόργανης παρακολούθησης

Ήδη, από το σύνηθες kriging, έχουν προκύψει οι τιμές E_i , MSE_i και R_i (Σχήματα 4, 5 και 6)

που απαιτούνται για τον υπολογισμό των συναρτήσεων κόστους CF_0 , για την υφιστάμενη διάταξη.

Για τον προσδιορισμό των σημείων μέτρησης που μπορούν να απορριφθούν από τα 76 διαθέσιμα, εφαρμόζονται οι σχέσεις του Rouhani (2001) για την εκτίμηση της μεταβολής του MSE σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται στην αναφορά του Pardo-Igúzquiza (1998).

Στην παρούσα εργασία περιλαμβάνονται δυο αναλύσεις. Στην πρώτη, προσδιορίζονται τα σημεία μέτρησης που είναι βέλτιστο να απορριφθούν από το υπάρχον δίκτυο ενοργάνωσης, όταν επιλέγεται αυτό να περιοριστεί κατά 1, 2 ή 3 σημεία. Η ανάλυση αφορά κάθε μία από τις τέσσερις συναρτήσεις κόστους που περιγράφονται στις σχέσεις (1)~(4). Στη δεύτερη ανάλυση, παρουσιάζεται η εκτίμηση των μετακινήσεων κατά μήκος της γραμμής α-α' (βλ. Σχήμα 3) στις 09/05, στηριζόμενη, όχι στα 76 σημεία μέτρησης, αλλά σε αυτά που απομένουν μετά τη βέλτιστη απομάκρυνση του 20% αυτών ($N=1\sim 15$). Το δεύτερο αυτό τμήμα αφορά μόνο τη συνάρτηση κόστους CF_1 .

4.4 Αποτελέσματα πρώτης ανάλυσης

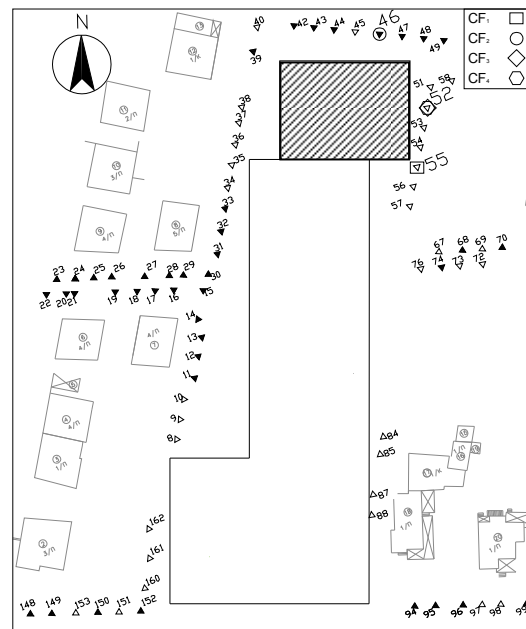
Για τις τέσσερις συναρτήσεις κόστους, η βέλτιστη διάταξη δικτύου περιλαμβάνει την απόρριψη των σημείων μέτρησης που δίνονται στον Πίνακα 2. Τα ίδια αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 7,8,9 που ακολουθούν για τις περιπτώσεις $N=1,2,3$ αντίστοιχα.

Πίνακας 2. Απορριπτόμενες θέσεις
Table 2. Rejected locations

	N=1	N=2	N=3
CF_1	55	17,20	17,20,29
CF_2	46	29,98	20,29,46
CF_3	52	17,98	10,17,98
CF_4	52	98,153	17,98,153

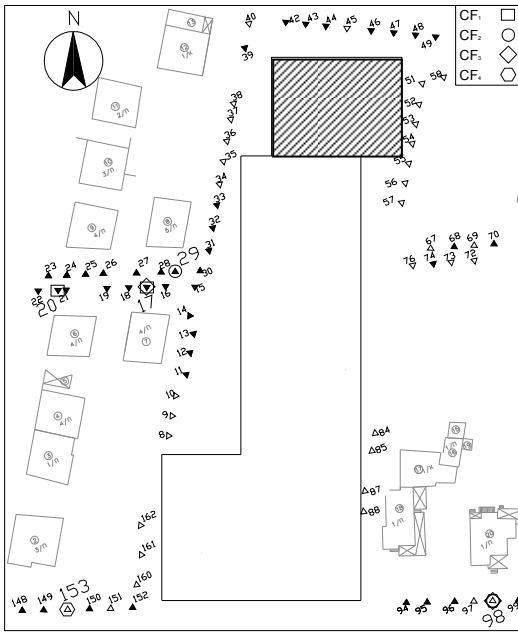
Όσο αφορά την περίπτωση $N=1$, όταν μόνο η ακρίβεια στο πεδίο λαμβάνεται υπόψη (CF_1), τότε επιλέγεται να απορριφθεί το σημείο 55, το οποίο περιβάλλεται από αρκετό αριθμό σημείων μέτρησης. Επομένως, η απομάκρυνσή του επηρεάζει ελάχιστα τα επίπεδα σφάλματος στην περιοχή, εφόσον αυτά διατηρούνται σε μηδενικά επίπεδα από την παρουσία των γειτονικών σημείων μέτρησης. Αν ενδιαφέρον παρουσιάζουν

κυρίως οι περιοχές με μεγάλες καταγραφές (CF_2), η θέση 55 δεν αποτελεί λύση, δεδομένου ότι οι αναπτυσσόμενες καθιζήσεις στη θέση αυτή είναι σημαντικές. Στο Σχήμα 4 φαίνεται ότι οι καθιζήσεις είναι ιδιαίτερα περιορισμένες στη B-BA πλευρά του φρέατος. Πράγματι, η μέτρηση που αφαιρείται βρίσκεται στην περιοχή αυτή (σημείο μέτρησης 46), εφόσον συνδυάζει μικρές καταγραφόμενες καθιζήσεις με περιορισμένη αύξηση της αβεβαιότητας στο πεδίο. Τέλος, όταν ο ρυθμός ανάπτυξης των καθιζήσεων συμπεριλαμβάνεται στη συνάρτηση κόστους (CF_3 & CF_4), η βέλτιστη θέση προς αφαίρεση είναι η 52, που βρίσκεται σε περιοχή σχεδόν μηδενικού ρυθμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.

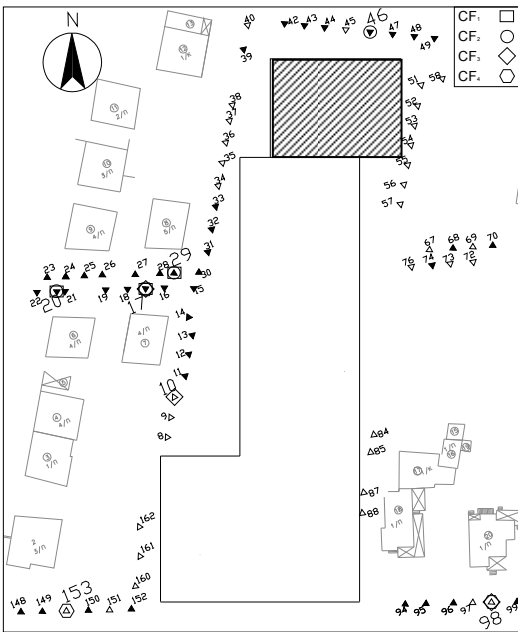


Σχήμα 7: Επίλυση για $N=1$
Figure 7: Solution for $N=1$

Παρόμοιες διατυπώσεις ισχύουν κι όταν αφαιρούνται περισσότερα σημεία μέτρησης. Για την περίπτωση όπου $N=2$ και CF_1 , απορρίπτονται τα σημεία 17 & 20, που βρίσκονται σε περιοχή με πολύ πυκνή διάταξη μετρήσεων. Στις υπόλοιπες συναρτήσεις κόστους, όμως, προτείνονται περισσότερο θέσεις, όπως οι 98 & 153, που εμφανίζουν μικρές καθιζήσεις, μηδανινό ρυθμό ανάπτυξης κι επηρεάζουν λιγότερα σημεία ελέγχου.



Σχήμα 8: Επίλυση για N=2
Figure 8: Solution for N=2



Σχήμα 9: Επίλυση για N=3
Figure 9: Solution for N=3

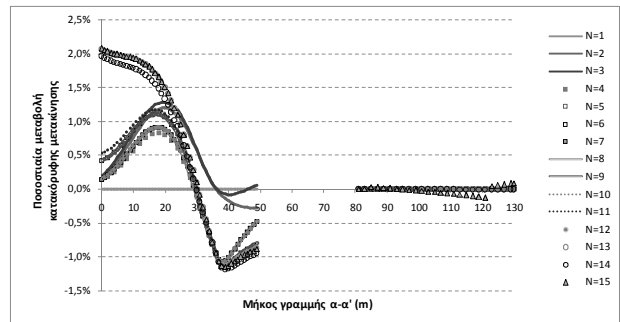
4.5 Αποτελέσματα δεύτερης ανάλυσης

Στον Πίνακα 3 που ακολουθεί δίνονται τα προς απόρριψη σημεία μέτρησης για N=1~15 και CF₁.

Πίνακας 3. Απορριπτόμενες θέσεις
Table 3. Rejected locations

N	Σημεία μέτρησης
1	55
2	17,20
3	17,20,29
4	12,14,17,20
5	12,14,17,20,29
6	12,14,17,20,29,31
7	12,14,17,20,29,55,87
8	12,14,17,20,29,53,55,87
9	12,14,17,20,29,31,53,55,87
10	12,14,17,20,29,31,33,53,55,87
11	12,14,17,20,29,31,33,37,53,55,87
12	12,14,17,20,24,29,31,33,37,53,55,87
13	12,14,17,20,24,29,31,33,37,43,53,55,87
14	10,12,14,17,20,24,29,31,33,37,43,53,55,87
15	12,14,17,20,24,29,31,33,35,37,43,48,53,55,87

Η αφαίρεση των συγκεκριμένων σημείων από το σύστημα ενόργανης παρακολούθησης προκαλεί αύξηση στην αβεβαιότητα στο πεδίο και μεταβάλλει τις εκτιμώμενες καθιζήσεις. Για να προκύψει μια ένδειξη της μεταβολής των εκτιμήσεων σε σχέση με τα αφαιρούμενα σημεία μέτρησης, παρατίθεται το ακόλουθο διάγραμμα, όπου δίνεται η ποσοστιαία μεταβολή των εκτιμώμενων μετακινήσεων για N=1~15 σε σχέση με την αρχική κατάσταση κατά μήκος της γραμμής α-α' στις 09/05.



Σχήμα 10: Ποσοστιαία μεταβολή καθιζήσεων
Figure 10: Percentage of settlement change

Παρατηρείται ότι η αφαίρεση έως και 15 σημείων μέτρησης από το δίκτυο παρακολούθησης δεν προκαλεί σημαντικές μεταβολές στις εκτιμώμενες καθιζήσεις. Πράγματι, η μέγιστη μεταβολή δεν ξεπερνάει το 2% και εμφανίζεται αφότου έχουν αφαιρεθεί περισσότερα από 10 σημεία. Το αριστερό τμήμα της ευθείας παρουσιάζει πιο έντονες μεταβολές γιατί αφορά την περιοχή που απορρίπτονται τα περισσότερα σημεία, ενώ ο δεξιός κλάδος παραμένει σχετικά

ανεπηρέαστος, διότι λίγα σημεία επιλέγονται προς αφαίρεση από την περιοχή αυτή.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μεθοδολογία – στηριζόμενη στις αρχές της γεωστατιστικής – για την εκτίμηση της βέλτιστης θέσης προσθήκης ή αφαίρεσης σημείων μέτρησης σε υφιστάμενο δίκτυο ενόργανης παρακολούθησης. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόστηκε για τον περιορισμό ενός πραγματικού δικτύου ενοργάνωσης, δεδομένου του μεγάλου πλήθους των διαθέσιμων μετρήσεων. Η επιλογή των αφαιρούμενων θέσεων βασίστηκε - μέσω της συνάρτησης κόστους – τόσο στην ανάγκη περιορισμού της αβεβαιότητας στο πεδίο όσο και στην μεγαλύτερη απαίτηση για πληροφoρία στις περιοχές με μεγάλες καταγραφές ή/και με υψηλό ρυθμό ανάπτυξης. Από τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εφαρμογής προκύπτει ότι η συνάρτηση κόστους που θα υιοθετηθεί επηρεάζει ουσιαστικά τα σημεία μέτρησης που προτείνονται να αφαιρεθούν.

Η μεθοδολογία επαναλήφθηκε για να προσδιοριστεί ο βέλτιστος συνδυασμός 1~15 σημείων μέτρησης προς απόρριψη από το δίκτυο παρακολούθησης, λαμβάνοντας υπόψη μόνο το σφάλμα εκτίμησης. Παρόλο τον υψηλό αριθμό απορριπτόμενων σημείων, οι εκτιμήσεις των καθιζήσεων κατά μήκος μιας τυχαίας ευθείας στο πεδίο επηρεάζονται ελάχιστα, επιτρέποντας την αφαίρεσή τους. Η προσέγγιση αυτή οδηγεί στον επανασχεδιασμό του αρχικού δικτύου ενοργάνωσης, περιορίζοντας σημαντικά το μετέπειτα κόστος και χρόνο της ενόργανης παρακολούθησης, αποδεχόμενοι βέβαια τη συνεπακόλουθη αύξηση στο σφάλμα πεδίου.

Καταληκτικά, η γεωστατιστική ανάλυση προσφέρει ένα χρήσιμο εργαλείο για τον ορθολογικό σχεδιασμό δικτύων ενόργανης παρακολούθησης, προτείνοντας τις βέλτιστες θέσεις ανάλογα με τα κριτήρια που τίθενται και παρέχοντας στο Μηχανικό χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τη μεταβολή της ακρίβειας που θα επέλθει στο πεδίο.

6. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

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

Οι συγγραφείς της εργασίας αυτής θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τη Διοίκηση της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ για τη δυνατότητα δημοσίευσης της εργασίας.

Επισημαίνεται ότι τα επιχειρήματα και τα συμπεράσματα που περιέχονται στην παρούσα εργασία αποτελούν προσωπικές απόψεις των συγγραφέων και δεν απηχούν αναγκαστικά την επίσημη άποψη της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αρναούτη, Σ.Α., Χατζηγώγος, Θ. και Τσότσος, Σ. (2010), “Επίδραση της ακρίβειας των οργάνων μέτρησης στην επιλογή νέων θέσεων για την επέκταση υφιστάμενου συστήματος ενόργανης παρακολούθησης”, 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Βόλος.
- Bras, R.L. and Rodríguez-Iturbe, I. (1976), “Network design for the estimation of areal mean of rainfall events”, *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 6, pp. 1185-1195.
- Chilés, J.P. and Delfiner, P. (1999), “Geostatistics: modeling spatial uncertainty”, John Wiley & Sons, Inc., N.Y., U.S.A., p. 695.
- Kitanidis, P.K. (1997), “Introduction to Geostatistics: Applications to Hydrogeology”, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., p. 247.
- Lin, Y.P. and Rouhani, Sh. (2001), “Multiple-point variance analysis for optimal adjustment of a monitoring network”, *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 69, pp. 239-266.
- Matalas, N.C. (1968), “Optimum gaging station location”, *Proceedings at IBM Scientific Computing Symposium, Water and Air Resources Management*, IBM, White Plains, N.Y.
- Pardo-Igúzquiza, E. (1998), “Optimal selection of number and location of rainfall gauges for areal rainfall estimation using geostatistics and simulated annealing”, *Journal of Hydrology*, Vol. 210, pp. 206-220.
- Rouhani, Sh. (1985), “Variance reduction analysis”, *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 6, pp. 837-846.