

# ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

Ιωάννης Α. Δούκας<sup>1</sup>, Δημήτριος Ρωσσικόπουλος<sup>2</sup>

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

<sup>1</sup>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

<sup>2</sup>Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών

## Περίληψη

Οι γεωδαιτικές μέθοδοι προσδιορισμού μετακινήσεων και/ή παραμορφώσεων στηρίζονται: α. Στη δημιουργία και τη μέτρηση σε διάφορες εποχές ενός δικτύου ελέγχου και β. Στην ανάλυση των διαχρονικών μετρήσεων του δικτύου. Η εν λόγω ανάλυση γίνεται: i. Για τον υπολογισμό του σχήματος του παραπάνω δικτύου σε κάθε εποχή μέτρησής του και ii. Για τη σύγκριση των σχημάτων μεταξύ τους στις διαφορετικές αυτές εποχές.

Αναφορικά με τα τεχνικά έργα και τα μνημεία, η περιορισμένη έκταση του αντικειμένου καθώς και η απαραίτητη μεγάλη ακρίβεια στα αποτελέσματα επιβάλλουν συνηθέστερα το συνδυασμό των γεωδαιτικών μεθόδων με άλλες μεθόδους (π.χ. των εκκρεμών, των κλισίμετρων, των μεταβολών μήκους, των καθιζήσεων, δυναμικές μέθοδοι κ.λπ.).

Επειδή το μέγεθος των αναμενόμενων μετακινήσεων μπορεί να κυμαίνεται από μερικά mm μέχρι μερικές δεκάδες cm, ποικίλουν ανάλογα και οι προδιαγραφές ακριβείας για τη μέτρηση των στοιχείων που απαιτούνται για την εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων. Κατά κανόνα όμως σε τέτοιες εργασίες επιδιώκεται η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια (σε μετρήσεις και υπολογισμούς), διότι τα αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή κρίσιμων συμπερασμάτων. Το γεγονός αυτό επιβάλλει τη χρήση οργάνων και μεθόδων υψηλής ακριβείας. Επί πλέον, μπορεί να απαιτείται κατά περίπτωση και βοηθητικός εξοπλισμός που έχει επινοηθεί και κατασκευαστεί με σκοπό τη διευκόλυνση των εργασιών αλλά και την αύξηση της απόδοσης των γεωδαιτικών οργάνων. Η επιδίωξη της μεγαλύτερης δυνατής ακριβείας από την πλευρά του μαθηματικού μοντέλου και η εφαρμογή αυστηρών υπολογιστικών μεθόδων σε παρόμοιες εργασίες είναι αυτονόητα δικαιολογημένα.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι αφενός μεν η αναλυτική παρουσίαση οργάνων και μεθόδων μέτρησης που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους εφαρμογές, αφετέρου δε η αναλυτική παρουσίαση των μεθόδων ανάλυσης που εφαρμόζονται στις μετρήσεις ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την κατάσταση ή τη διαχρονική συμπεριφορά του τεχνικού έργου ή του μνημείου.

*Λέξεις-Κλειδιά: γεωδαιτικά δίκτυα ελέγχου, συνόρθωση παρατηρήσεων, μικρομετακινήσεις, παραμορφώσεις μνημείων, παραμορφώσεις τεχνικών έργων, στατιστικοί έλεγχοι.*

## Abstract

The geodetic methods for the determination of movements and/or deformations are based on: a. The establishment of a control network and its measurement (at various epochs) b. The comparative analysis of the measurements of the network (per epoch and in combinations among epochs). This analysis aims to: i. Calculate the geometric shape of the above network at each epoch measured, and ii. Compare the geometric shapes between these different epochs.

Regarding the structures-technical works (natural and man-made, as well) and monuments, the fact is that the determination of their movements and/or deformations forms a research field of - some-

Ιωάννης Δούκας<sup>1</sup>, Δημήτριος Ρωσσικόπουλος<sup>2</sup>, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,

<sup>1</sup>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, <sup>2</sup>Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Γεωδαιτικοί Έλεγχοι Παραμορφώσεων. Η περίπτωση των μνημείων και των τεχνικών έργων.

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

how - narrow scientific interest. On the other hand, this research field does requires high precision (measurements, results). Consequently, the problem is most usually tackled with a combination of methods. Such a combination normally comprises proper geodetic methods with geotechnical and/or construction ones, respectively. The standards of high accuracy is a fundamental factor since the conclusions going to be derived – as a rule - have an a-priori crucial character. Such high standards mean high-accuracy (even special dedicated-to-case) instruments, similar methods of measurement and of course high-definition mathematical model(s).

The purposes of this paper are: (a). a presentation of – mainly geodetic - instruments and measurement methods used in such applications, (b). a presentation of methods of analysis applied to observations, which lead to firm and secure conclusions concerning the situation or the temporal behaviour of the technical work (or the monument).

*Keywords: geodetic control networks, adjustment of observations, small movements, deformation, monuments, buildings, constructions, statistical tests.*

## 1. Εισαγωγή

Οι μέθοδοι προσδιορισμού μικρομετακινήσεων και ανάλυσης των παραμορφώσεων αναφέρονται κατ' αρχήν στην επιφάνεια του εδάφους και σε θέματα που σχετίζονται με τις παραμορφώσεις στα όρια των τεκτονικών πλακών, καταλαμβάνοντας επάξια μια θέση υπεροχής ανάμεσα στις άλλες προσεγγίσεις στο σημαντικό πρόβλημα της πρόγνωσης των σεισμών (καθώς και σε θέματα που σχετίζονται π.χ. με τις κατολισθήσεις ή τις καθιζήσεις εξαιτίας π.χ. μεταλλευτικών εξορύξεων, ή αντλήσεων πετρελαίου, υπόγειων υδάτων κ.λπ.). Εκτός όμως από τη μελέτη των παραμορφώσεων του στερεού φλοιού της Γης το πρόβλημα αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία και στη μελέτη των παραμορφώσεων μεγάλων τεχνικών έργων όπως είναι τα φράγματα, οι γέφυρες, τα ψηλά κτίρια κ.ά., καθώς σχετίζεται άμεσα με την πιθανή κατάρρευση του έργου και την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής. Ο διαχρονικός έλεγχος των μνημείων είναι επίσης μια ουσιαστική εργασία, χρήσιμη για τις μελέτες συντήρησης και αποκατάστασής τους.

Για τον προσδιορισμό και την ανάλυση της συμπεριφοράς των παραμορφώσεων των κατασκευών (που μπορούν να είναι ανθρώπινες - όπου υπάγονται π.χ. τα τεχνικά έργα και τα μνημεία – ή φυσικές – όπου υπάγονται π.χ. τα πρηνή), υπάρχουν δύο ανεξάρτητες μεταξύ τους διαδικασίες (Δούκας, 1984, Ρωσσικόπουλος, 2012). Η πρώτη διαδικασία έχει να κάνει με τη μέτρηση των μεταβολών που υφίσταται το έργο ή το μνημείο (π.χ. μικρομετακινήσεις, καταναγκασμοί, στροφές κ.λπ.) σε διάφορα επιλεγμένα σημεία της κατασκευής, μέσα από τη λεγόμενη «μετρική αποτύπωση» (π.χ., Δούκας κ.ά., 1990). Η δεύτερη διαδικασία έχει να κάνει με τον υπολογισμό των παραμέτρων παραμόρφωσης στα προαναφερθέντα επιλεγμένα σημεία και σε κάθε σημείο του έργου, εφαρμόζοντας μεθόδους πρόγνωσης, όπως π.χ. αναλυτική παρεμβολή, σημειακή προσαρμογή, πεπερασμένα στοιχεία κ.λπ., στα αποτελέσματα των γεωδαιτικών μετρήσεων (π.χ., Rossikopoulos, 2001, Ρωσσικόπουλος, 2012).

## 2. Οι μέθοδοι και τα όργανα

Αναφορικά με τις παραμορφώσεις και τις μεθόδους, με αντίστοιχα όργανα που υπάγονται σε αυτές (Δούκας, 1988a,b, 1999, 2010a,b, Δούκας κ.ά., 1990, 1992, 1993, Μπαντέλας κ.ά. 1997, Ρωσσικόπουλος, 2012), υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες: Οι γεωτεχνικές και κατασκευαστικές μέθοδοι (που θεωρούνται εδώ ως μια ομάδα λόγω μεγάλης ομοιογένειας και συγγένειας) και οι γεωδαιτικές μέθοδοι προσδιορισμού μετακινήσεων.

Ιωάννης Δούκας<sup>1</sup>, Δημήτριος Ρωσσικόπουλος<sup>2</sup>, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,

<sup>1</sup>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, <sup>2</sup>Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Γεωδαιτικοί Έλεγχοι Παραμορφώσεων. Η περίπτωση των μνημείων και των τεχνικών έργων.

2.1. Οι γεωτεχνικές και κατασκευαστικές μέθοδοι (βλ σχήμα 1 και σχήμα 2).

- Μετρήσεις μεταβολών σχετικών υψόμετρων π.χ. με αλφαδολάστιχα ή παρόμοιες διατάξεις υδροστατικής χωροστάθμησης (water levels, water hose levels).
- Μετρήσεις μεταβολών γραμμικών διαστάσεων π. χ. με μηκυνσιόμετρα (extensometers).
- Μετρήσεις μεταβολών κλίσεων π.χ. με κλισίμετρα (inclinometers, tiltmeters).
- Μετρήσεις μεταβολών στην πίεση/στάθμη των υπόγειων υδάτων π.χ. με ειδικά πιεζόμετρα (piezometers).
- Μετρήσεις μεταβολών στην πίεση εδαφών π.χ. με ειδικές συσκευές (earth pressure cells).
- Μετρήσεις ταλαντώσεων και κραδασμών, αναφορικά με το έδαφος, με επιταχυνσιόμετρα (accelerometers).
- Μετρήσεις μεταβολών κλίμακας παραμορφώσεων (strain) π.χ. με σύρματα Invar, με ειδικούς μετρητές παραμορφώσεων (strainmeters) κ.λπ.
- Μετρήσεις μεταβολών κλίσεων - κατά την κατακόρυφη διεύθυνση - π.χ. με διατάξεις νήματος(ων) της στάθμης (plumb lines). Συνηθέστερα, χρησιμοποιούνται σε υψίκορμες κατασκευές (καμινάδες, πύργοι αεροδρομίων, φράγματα κ.λπ.).
- Μετρήσεις μεταβολών κλίσεων - κατά την οριζόντια διεύθυνση - π.χ. με κλισίμετρα. Συνηθέστερα, χρησιμοποιούνται σε εκτεταμένες οριζόντια κατασκευές όπως είναι π.χ. οι γέφυρες.
- Μετρήσεις ταλαντώσεων και δονήσεων, αναφορικά με κατασκευές, με επιταχυνσιογράφους (accelerometers) και LDV (Laser-Doppler Vibrometers).

Οι γεωτεχνικές/κατασκευαστικές μέθοδοι μετρήσεων παραμορφώσεων, έχουν να κάνουν όπως είναι φανερό με άμεσες μετρήσεις.



Σχήμα 1. Αντιπροσωπευτικά όργανα που χρησιμοποιούνται στις γεωτεχνικές και κατασκευαστικές μεθόδους I: (α). Εξελιγμένο αλφαδολάστιχο (β). Μηκυνσιόμετρο (γ). Κλισίμετρο σε συνεργασία

Ιωάννης Δούκας<sup>1</sup>, Δημήτριος Ρωσσικόπουλος<sup>2</sup>, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,

<sup>1</sup>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, <sup>2</sup>Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Γεωδαιτικοί Έλεγχοι Παραμορφώσεων. Η περίπτωση των μνημείων και των τεχνικών έργων.

με H/Y (δ). Είδη πιεζομέτρων (ε). Strainmeters (στ). Earth pressure cells.



Σχήμα 2. Αντιπροσωπευτικά όργανα που χρησιμοποιούνται στις γεωτεχνικές και κατασκευαστικές μεθόδους II: (α). Ψηφιακό κλισίμετρο (β). Επιταχυνσιόμετρο τριών αξόνων (γ). Vibrometer (δ). Strainmeter (ε). Vibrometer με ψηφιακό αλφάδι (στ). Laser scanner και Laser Vibrometer.

## 2.2. Οι Γεωδαιτικές μέθοδοι (βλ. σχήμα 3)

Αυτές διακρίνονται σε δύο υποκατηγορίες:

**Έμμεσες γεωδαιτικές:** Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στα λεγόμενα κλασσικά γεωδαιτικά δίκτυα ελέγχου: μιας διάστασης (υψομετρικά), δύο διαστάσεων (οριζόντια) και τριών διαστάσεων (μικτά, υψομετρικά + οριζόντια). Επίσης, τα δίκτυα μπορεί να είναι φωτογραμμετρικά (επίγεια ή εναέρια), δορυφορικά (GPS/GNSS) ή οποιοσδήποτε συνδυασμός αυτών (ανάλογα με το είδος, τη θέση και φυσικά το μέγεθος-έκταση της υπό μελέτη κατασκευής).

**Άμεσες γεωδαιτικές:** Αυτές έχουν τα χαρακτηριστικά των γεωτεχνικών/κατασκευαστικών μεθόδων και χωρίζονται στις εξής υποκατηγορίες :

- Μετρήσεις μεταβολών σχετικών υψόμετρων π.χ. με ακριβείς υψομετρικές μεθόδους.
- Μετρήσεις μεταβολών μηκών π.χ. με EDM (ηλεκτρομαγνητικά όργανα μέτρησης αποστάσεων), μεταλλικές μετροταινίες, σύρματα Invar.
- Μετρήσεις μεταβολών κλίσεων π.χ. με θεοδόλιχους ακριβείας 1" ή με οπτικούς κατακορυφωτές.

Οι γεωτεχνικές και κατασκευαστικές μέθοδοι (και οι άμεσες γεωδαιτικές) μετράνε σχετικές παρά απόλυτες μετακινήσεις, παρόλο που – εύλογα - οι απόλυτες μετακινήσεις είναι και οι χρησιμότερες. Για το λόγο αυτό, οι γεωδαιτικές και ειδικότερα οι έμμεσες γεωδαιτικές μέθοδοι θεωρούνται κορυφαία επιλογή αφού, παρέχουν τη δυνατότητα προσδιορισμού των - επιθυμητών

Ιωάννης Δούκας<sup>1</sup>, Δημήτριος Ρωσσικόπουλος<sup>2</sup>, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,

<sup>1</sup>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, <sup>2</sup>Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Γεωδαιτικοί Έλεγχοι Παραμορφώσεων. Η περίπτωση των μνημείων και των τεχνικών έργων.

για την παραπέρα ανάλυση παραμορφώσεων - απόλυτων μετατοπίσεων, σε σχέση με την γύρω περιοχή που θεωρείται σταθερή.



Σχήμα 3. Σύγχρονα αντιπροσωπευτικά γεωδαιτικά όργανα που χρησιμοποιούνται στις γεωδαιτικές μεθόδους: (α). Γεωδαιτικός σταθμός χωρίς απαίτηση πρίσματος (β). Ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός (γ), (δ), και (ε). Διάφοροι τύποι Laser scanner (στ). Επίγεια φωτογραμμετρική κάμερα.

Οι έμμεσες γεωδαιτικές μέθοδοι προσδιορισμού μετακινήσεων στηρίζονται στη δημιουργία ενός γεωδαιτικού δικτύου ελέγχου (control network) και στην ανάλυση των παρατηρήσεων (GPS, γωνιών, διευθύνσεων, αποστάσεων, υψομετρικών διαφορών κ.λπ.) για τον υπολογισμό του (γεωμετρικού) σχήματος του παραπάνω δικτύου για κάποιες εποχές και τη σύγκριση των σχημάτων μεταξύ τους στις διαφορετικές αυτές εποχές. Αναφορικά με τα εμπλεκόμενα γεωδαιτικά όργανα, αυτά μπορούν να καταταχθούν ως εξής:

#### **Α. Όργανα/συστήματα μέτρησης γωνιών, αποστάσεων και υψομετρικών διαφορών:**

*Για γωνίες:* Θεοδόλχοι (μηχανικοί ή συνηθέστερα σήμερα ηλεκτρονικομηχανικοί).

*Για αποστάσεις:* EDMΙ που χρησιμοποιούν υπέρυθη ακτινοβολία ή ακτινοβολία Laser (μονοχρωματική, πολυχρωματική). Στην κατηγορία υψίστης ακριβείας συναντώνται τα συμβολόμετρα Laser.

*Για υψομετρικές διαφορές:* Χωροβάτες (μηχανικοί ή συνηθέστερα σήμερα ηλεκτρονικομηχανικοί), στις δε κατηγορίες υψηλής ακριβείας συναντώνται και οι χωροβάτες με χρήση Laser, σε συνδυασμό με ειδικές σταδίες ραβδωτού κώδικα (barcode).

*Γεωδαιτικά όργανα πολλαπλών χρήσεων:* Εδώ συναντώνται οι γεωδαιτικοί σταθμοί (total stations) που συνδυάζουν μέτρηση γωνιών και EDMΙ. Τα τελευταία χρόνια υπάρχουν και οι αυτόματοι σταθμοί (ρομποτικοί-αυτοκινούμενοι, βασισμένοι σε ηλεκτρονικούς σερβομηχανισμούς), με τη δυνατότητα να δέχονται οδηγίες για τη διαδικασία μετρήσεων από συνδεδεμένο Η/Υ που

Ιωάννης Δούκας<sup>1</sup>, Δημήτριος Ρωσσικόπουλος<sup>2</sup>, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,

<sup>1</sup>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, <sup>2</sup>Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Γεωδαιτικοί Έλεγχοι Παραμορφώσεων. Η περίπτωση των μνημείων και των τεχνικών έργων.

"τρέχει" κατάλληλο λογισμικό και/ή να τους "διδάσκεται" μια σειρά κινήσεων-μετρήσεων, επαναλαμβανόμενη, χωρίς τη συνδρομή παρατηρητή. Επί πλέον, στην κατηγορία αυτή εντάσσονται τα καλούμενα "έξυπνα" ή "ρομποτικά" συστήματα, στα οποία συνδυάζονται και διάφοροι αισθητήρες (όπως π.χ. CCD κάμερα – Charge-Coupled Device) για τον αυτόματο εντοπισμό στόχων (Automatic Target Recognition – ATR). Τέτοια συστήματα είναι ικανά να εκτελούν μετρήσεις, να εντοπίζουν ταλαντώσεις, να παρακολουθούν (μέσω ATR) στόχο που κινείται, να υπολογίζουν (σε πραγματικό χρόνο), να δίδουν τα αποτελέσματα, να τροποποιούν μόνα τους το αρχικά δοσμένο "σενάριο" μετρήσεων.

## **B. Όργανα/συστήματα προσδιορισμού σημείων στο χώρο.**

*Βασίζόμενα στη μέθοδο της 3D-εμπροσθοτομίας:* Με τη μέθοδο αυτή, ελάχιστη απαίτηση είναι να χρησιμοποιηθούν δύο ηλεκτρονικομηχανικοί θεοδολίχοι (είτε αυτοκινούμενοι είτε όχι), οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με H/Y. Τα δύο όργανα τοποθετούνται σε ειδικούς τρίποδες και για να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες (x, y, z) ενός σημείου στο χώρο, σκοπεύεται αυτό ταυτοχρόνως από τους δύο θεοδολίχους και μετρούνται αντίστοιχα οι δύο κατακόρυφες και οι δύο οριζόντιες γωνίες προς αυτό. Για τη μέτρηση μιας επιφάνειας (π.χ. πρόσοψη μνημείου) δύο θεοδολίχοι είναι αρκετοί. Για τη μέτρηση-αποτύπωση ακριβείας ενός στερεού (π.χ. ενός κτιρίου, μιας γέφυρας) απαιτείται η δημιουργία τριγωνομετρικού δικτύου ακριβείας και η χρήση πολλών γωνιομετρήσεων από περισσότερους των δύο θεοδολίχους. Σήμερα ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να φτάσει και τους οκτώ (8) συνεργαζόμενους θεοδολίχους.

- Με θεοδολίχους χωρίς σερβοκίνηση: Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να αποτελείται από δύο (2) ως οκτώ (8) θεοδολίχους, με ειδικό λογισμικό και, για τη διευκόλυνση σκόπευσης, ένας από τους θεοδολίχους μπορεί να εξοπλιστεί με πρόσθετη συσκευή εκπομπής Laser, η ακτίνα της οποίας (με ίχνος κουκίδας) βοηθά στον προσδιορισμό και σκόπευση στόχων από τους υπόλοιπους θεοδολίχους. Η ακρίβεια μέτρησης γωνιών σε τέτοια συστήματα ποικίλει από  $\pm 0.005\text{gon}$  ως  $\pm 0.00015\text{gon}$ , η δε μέση ταχύτητα μέτρησης υπό κανονικές συνθήκες είναι της τάξης των πενήντα (50) σημείων την ώρα.

- Με θεοδολίχους σερβοκίνησης (αυτοκινούμενους) εξοπλισμένους με CCD (Charge-Coupled Device) κάμερα: Είναι συνδυασμοί θεοδολίχων (2 ως 8 όργανα), συνοδευόμενα από ένα τουλάχιστον H/Y. Συνηθέστερα υπάρχει ένας βασικός H/Y (με το λογισμικό υπολογισμών και ανάλυσης καθώς και τα αρχεία μετρήσεων) και ένας τουλάχιστον βοηθητικός H/Y – σε δίκτυο με το βασικό H/Y - για τον έλεγχο των «σεναρίων» μέτρησης των θεοδολίχων που συνδέονται μαζί του. Η ακρίβεια γωνιομετρήσεων είναι της τάξης των  $\pm 0.00010\text{gon}$  ÷  $\pm 0.00015\text{gon}$ . Στους θεοδολίχους μπορεί να χρησιμοποιηθεί μοντέλο εξοπλισμένο με συσκευή εκπομπής Laser για την καλύτερη στόχευση και/ή μοντέλο εφοδιασμένο με CCD κάμερα για την (με χρήση τεχνητής νοημοσύνης) αυτόματη αναγνώριση των στόχων. Γενικότερα, με τη μέθοδο της 3D-εμπροσθοτομίας, είτε οι θεοδολίχοι είναι αυτοκινούμενοι είτε όχι, η τελική επιτυγχανόμενη ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων (x, y, z) είναι της τάξης των  $\pm 0.05\text{mm}$  ÷  $\pm 0.1\text{mm}$ .

*Βασίζόμενα στη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων:* Με τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ένας θεοδολίχος υψηλής ακριβείας, συνδυαζόμενος με ένα EDMΙ επίσης υψηλής ακριβείας. Οι συντεταγμένες των υπό έλεγχο σημείων είναι πολικές (και όχι ορθογώνιες), προκύπτουν δε από μετρήσεις γωνιών και μηκών. Ως "στόχοι" επί των σημείων που ενδιαφέρουν χρησιμοποιούνται ειδικά ανακλαστικά σώματα (ανακλαστήρες ή ταινίες). Σε εξέλιξη της μεθόδου αυτής, γίνεται χρήση ηλεκτρονικού σερβοθεοδολίχου ή τέλος γεωδαιτικού σταθμού υψηλής ακριβείας (που μπορεί να είναι συμβατικός ή με σερβοκίνηση). Σήμερα ο κανόνας είναι η χρήση ηλεκτρονικών θεοδολίχων, σε σύνδεση με φορητό H/Y (όπου ενυπάρχει το κατάλληλο λογισμικό). Αναφορικά με τα EDMΙ, σήμερα είναι δυνατή και η χρήση ειδικών τέτοιων οργάνων μέτρησης αποστάσεων χωρίς την απαίτηση χρήσης ανακλαστήρων (γεγονός

Ιωάννης Δούκας<sup>1</sup>, Δημήτριος Ρωσσικόπουλος<sup>2</sup>, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,

<sup>1</sup>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, <sup>2</sup>Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Γεωδαιτικοί Έλεγχοι Παραμορφώσεων. Η περίπτωση των μνημείων και των τεχνικών έργων.

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012



που επιτρέπει την απρόσκοπτη μέτρηση και σε σημεία που βρίσκονται σε απρόσιτες επιφάνειες). Γενικότερα, με τη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων, είτε οι θεοδόλχοι είναι αυτοκινούμενοι είτε όχι, οι γωνίες μπορούν να μετρηθούν με θεωρητική ακρίβεια  $\pm 0.15 \text{gon} \div \pm 0.5 \text{gon}$ , τα μήκη με θεωρητική ακρίβεια  $[(\pm 1.0 \text{mm} \div \pm 3.0 \text{mm}) \div (\pm 1.0 \text{ppm} \div \pm 3.0 \text{ppm})]$ . Η τελική ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων (x, y, z), για αποστάσεις μεταξύ οργάνου-στόχου  $100 \text{m} \div 1000 \text{m}$ , μπορεί να φτάσει στο  $\pm 1.0 \text{mm} \div \pm 1.5 \text{mm}$ . Γενικά, συγκρίνοντας τα συστήματα που χρησιμοποιούν τη μέθοδο 3D-εμπροσθοτομίας με τα συστήματα που χρησιμοποιούν τη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων, σε πολλές περιπτώσεις δρουν συμπληρωματικά μεταξύ τους.

*Όργανα (συστήματα) Φωτογραμμετρίας-Κλασσικά:* Η Φωτογραμμετρία με απλά λόγια είναι η αποτύπωση με τη χρήση φωτογραφιών (που λαμβάνονται από αέρος ή επί του εδάφους). Ουσιαστικά μετρώνται αντικείμενα τριών διαστάσεων μέσα από τη σύγκριση δύο ή περισσότερων δισδιάστατων εικόνων, οι οποίες ελήφθησαν από διαφορετικές θέσεις. Κοινά σημεία που προσδιορίζονται επάνω στις εικόνες επιτρέπουν τον προσδιορισμό της γραμμής σκόπευσης (από κάθε σημείο προς τη θέση κάθε κάμερας). Οπότε, γνωρίζοντας τη θέση κάθε κάμερας, με τριγωνισμούς (και τη χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων) υπολογίζονται οι θέσεις των σημείων.

*Σύγχρονα όργανα (συστήματα) Φωτογραμμετρίας, τεχνολογίας Βιντεομετρίας – Βιντεογραμμετρίας:* Πρόκειται για μια τεχνολογία μέτρησης με την οποία προσδιορίζονται οι συντεταγμένες (x, y, z) σημείων ενός αντικειμένου με τη χρήση εικόνων βίντεο που λαμβάνονται από διαφορετικές κάμερες (και γωνίες, αντίστοιχα). Έτσι, "ψηφιοποιούνται" ταχύτατα τα αποτυπώσιμα στερεά αντικείμενα (ή παρακολουθούνται σε πραγματικό χρόνο ως προς τις παραμορφώσεις τους). Κατά κανόνα χρησιμοποιούνται ειδικές CCD βιντεοκάμερες. Η ακρίβεια προσδιορισμού σημείου μπορεί να φτάσει το  $\pm 0.1 \text{mm}$ , με βασικό μειονέκτημα της μεθόδου τη μικρή σε διαστάσεις λαμβανόμενη εικόνα και φυσικά το υψηλό κόστος.

*Σύγχρονα όργανα (συστήματα) Φωτογραμμετρίας, τεχνολογίας Laser:*

- Ο ανιχνευτής Laser (Laser tracker): Πρόκειται για σύστημα που αποκλειστικά χρησιμοποιείται στη βιομηχανία οπότε, απλά αναφέρεται εδώ και δεν περιγράφεται.
- Ο σαρωτής Laser (Laser scanner, γνωστό και ως: LIDAR-Light Detection And Ranging): Η αρχή λειτουργίας μοιάζει πολύ με εκείνη του γεωδαιτικού σταθμού, ανάλογα δε με το μοντέλο και κατασκευαστή ένας σαρωτής Laser μπορεί να λειτουργεί με ρυθμό συλλογής που πλέον πολύ άνετα ξεπερνά τις 100,000 συντεταγμένες (x, y, z)/sec. Με το συγκεκριμένο όργανο, σαρώνεται με την ακτίνα Laser το υπόψη αντικείμενο, το δε διαχεόμενο φως ανιχνεύεται από το όργανο. Οι ψηφιακές εικόνες που προκύπτουν αποθηκεύονται αυτόματα σε έναν Η/Υ και με το κατάλληλο λογισμικό προκύπτουν 3D συντεταγμένες (συνεπαγωγικά, 3D εικόνες και σχέδια με ακρίβεια της τάξης των  $\pm 5 \text{mm}$ ) του στερεού που αποτυπώνεται.

### 3. Προβλήματα και επιλογές στην ανάλυση των παρατηρήσεων

Το πρόβλημα της μελέτης των παραμορφώσεων (κυρίως των μνημείων και των τεχνικών έργων) τίθεται με δύο διαφορετικές μορφές:

- ως εκτίμηση των αποκλίσεων της επιφάνειας του αντικειμένου που μετριέται από μια ιδανική επιφάνεια που περιγράφεται με μαθηματικές σχέσεις, και
- ως έλεγχος μικρομετακινήσεων από τη σύγκριση διαχρονικών μετρήσεων ορισμένων σημείων πάνω στο αντικείμενο.

Στην πρώτη περίπτωση έχουμε μετρήσεις μιας εποχής και η ανάλυσή τους γίνεται με έναν από τους παρακάτω τρόπους (Ρωσσικόπουλος, 2012):

Ιωάννης Δούκας<sup>1</sup>, Δημήτριος Ρωσσικόπουλος<sup>2</sup>, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,

<sup>1</sup>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, <sup>2</sup>Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Γεωδαιτικοί Έλεγχοι Παραμορφώσεων. Η περίπτωση των μνημείων και των τεχνικών έργων.

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

1. *Διαχωρισμένη αντιμετώπιση:*
  - α. Συνόρθωση των παρατηρήσεων
  - β. Προσαρμογή της ιδανικής επιφάνειας στις συντεταγμένες που προέκυψαν από τη συνόρθωση (για σχετικές εργασίες βλ. Βλάχος κι ά., 1981, Fotiou et al., 1991).
2. *Ενιαία αντιμετώπιση:* Η ιδανική επιφάνεια περιγράφεται με εξισώσεις - δεσμεύσεις στη συνόρθωση των παρατηρήσεων

Στη δεύτερη περίπτωση έχουμε τις μετρήσεις πολλών εποχών των στοιχείων ενός δικτύου, και οι μικρομετακινήσεις προκύπτουν από τις συγκρίσεις των διαχρονικών μορφών του. Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται διαχωρίζονται ανάλογα με τα όργανα και τις τεχνικές μέτρησης, και ανάλογα με τον τρόπο ανάλυσης (συνόρθωσης) των μετρήσεων (όπως π.χ., διαχωρισμένη συνόρθωση ανά εποχή, ταυτόχρονη συνόρθωση κ.λπ.).

Τα δίκτυα μελέτης των διαχρονικών μεταβολών ενός μνημείου ή ενός τεχνικού έργου αποτελούνται από δύο τμήματα: από ένα *μεταβλητό* και ένα *αμετάβλητο* τμήμα. Ως μεταβλητό ορίζουμε εκείνο το τμήμα του δικτύου που σχηματίζουν τα κινητά σημεία, τα σημεία δηλαδή που βρίσκονται πάνω στο έργο ή στο μνημείο που παραμορφώνεται. Τα σημεία αυτά καλούνται *σημεία έλεγχου*. Ως αμετάβλητο ορίζουμε το τμήμα του δικτύου που σχηματίζουν τα ακίνητα σημεία, τα σημεία δηλαδή που βρίσκονται έξω από την περιοχή που παραμορφώνεται, στην περιοχή γύρω από το μνημείο ή το έργο. Τα σημεία αυτά καλούνται *σημεία αναφοράς*.

Οι μετακινήσεις των σημείων έλεγχου υπολογίζονται σε σχέση με τα σημεία αναφοράς, που βρίσκονται έξω από την περιοχή που παραμορφώνεται. Επομένως, οι μετακινήσεις των σημείων έλεγχου μπορούν να χαρακτηριστούν ως απόλυτες επειδή προσδιορίζονται μονοσήμαντα ως προς τα σημεία αναφοράς, ανεξάρτητα από τον ορισμό του συστήματος αναφοράς των συντεταγμένων.

Η διαχρονική μεταβολή του δικτύου μπορεί να αντιμετωπιστεί από δύο σκοπιές:

- τη *στατική*, όπου συγκρίνονται διαφορετικές μορφές του δικτύου σε διαφορετικές εποχές, δηλαδή γίνεται η συνόρθωση του δικτύου κατά εποχή και στη συνέχεια συγκρίνονται τα αποτελέσματα για τον εντοπισμό και την εκτίμηση των μετακινήσεων, και
- τη *δυναμική*, όπου μελετάται αυτή καθαυτή η μεταβολή του δικτύου, συνορθώνοντας τις παρατηρήσεις όλων των εποχών ταυτόχρονα.

Η συνόρθωση των παρατηρήσεων κάθε εποχής χωριστά, η στατική δηλαδή αντιμετώπιση, είναι αποδεκτή μόνο όταν όλα τα σημεία του δικτύου θεωρούνται κινητά, γιατί διαφορετικά το γεγονός ότι αγνοείται η διαχρονική σύμπτωση των συντεταγμένων των ακίνητων σημείων οδηγεί σε μη βέλτιστα (μικρότερης ακριβείας) αποτελέσματα.

Παρ' όλα αυτά, η μέθοδος των ξεχωριστών συνορθώσεων χρησιμοποιείται στην πράξη είτε για λόγους αδυναμίας εφαρμογής της ταυτόχρονης συνόρθωσης, (πρόκειται για μέθοδο που απαιτεί τη λύση ενός μεγαλύτερου συστήματος κανονικών εξισώσεων), είτε ως ένα πρώτο διαγνωστικό βήμα για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του δικτύου σε κάθε εποχή χωριστά, καθώς και για τον έλεγχο της διαχρονικής σταθερότητας των ακίνητων σημείων.

### 3.1 Εκτίμηση των αποκλίσεων της επιφάνειας του αντικειμένου που μετρείται από μια ιδεατή μαθηματική επιφάνεια

Ο έλεγχος συνίσταται στη μελέτη του πραγματικού σχήματος και του μεγέθους ενός τμήματος του τεχνικού έργου ή του μνημείου, έναντι ενός ιδεατού σχήματος και μεγέθους (του σχήματος και του μεγέθους του πρότυπου σχεδίου), που περιγράφεται με γνωστές μαθηματικές σχέσεις, π.χ. κατακόρυφοι τοίχοι, οριζόντια δάπεδα, κεκλιμένες επίπεδες στέγες, ημισφαιρικοί θόλοι εκκλησιών, δεξαμενές σχήματος κυλίνδρου κ.λπ. Με τη βοήθεια τεχνικών της τοπογραφίας ή της φωτογραμμετρίας περιορισμένου πεδίου, προσδιορίζονται οι συντεταγμένες ενός μεγάλου

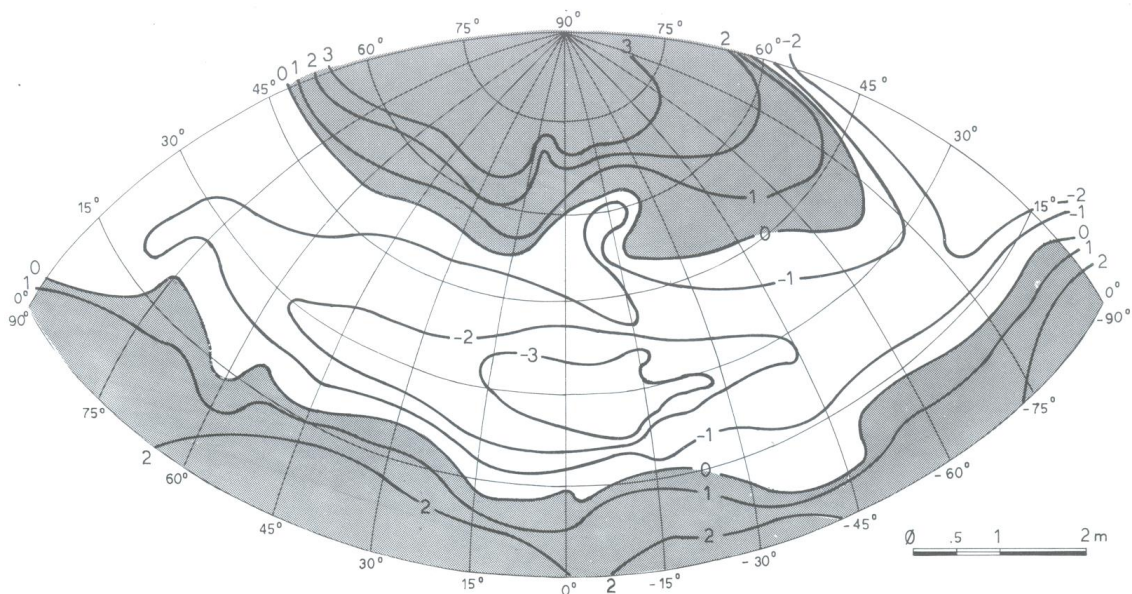
Ιωάννης Δούκας<sup>1</sup>, Δημήτριος Ρωσσικόπουλος<sup>2</sup>, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,

<sup>1</sup>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, <sup>2</sup>Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Γεωδαιτικοί Έλεγχοι Παραμορφώσεων. Η περίπτωση των μνημείων και των τεχνικών έργων.



αριθμού σημείων στην πραγματική επιφάνεια του έργου ή του μνημείου. Αυτές οι συντεταγμένες, περιγράφουν μια επιφάνεια στο χώρο η οποία προσεγγίζει την ιδεατή επιφάνεια. Μια κατάλληλη μέθοδος για τη σύγκριση μιας σχεδιασμένης επιφάνειας και του κατασκευασμένου αντίστοιχού της, είναι η εφαρμογή μιας τεχνικής βέλτιστης προσαρμογής, με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η ιδεατή επιφάνεια προσαρμόζεται στα σημεία του δικτύου, των οποίων οι συντεταγμένες έχουν ήδη υπολογισθεί. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι νέες, διορθωμένες συντεταγμένες που ικανοποιούν πλήρως την ιδεατή επιφάνεια, καθώς επίσης και οι σχετικές “αποχές” τους. Αυτές οι αποχές οφείλονται στα σφάλματα των μετρήσεων ή/και στις πιθανές παραμορφώσεις της επιφάνειας. Στις εφαρμογές αυτές το ενδιαφέρον συγκεντρώνεται κυρίως στην αποτύπωση και ανάλυση καμπύλων επιφανειών, π.χ. θόλων (Σχ. 4), που με ιδιαίτερη συχνότητα εμφανίζονται στα βυζαντινά μνημεία.



Σχήμα 4. Η Αγία Σοφία Θεσσαλονίκης. Κάθετες αποκλίσεις της Πλατυτέρας από τη βέλτιστη σφαίρα αναφοράς (Βλάχος κ.ά. 1981).

Η γενική έκφραση μιας επιφάνειας δίνεται από τον τύπο:

$$f(\mathbf{r}_i, \mathbf{a}) = 0 \quad (1)$$

όπου  $\mathbf{r}_i$  είναι το διάνυσμα των συντεταγμένων ενός σημείου  $P_i$  πάνω στην επιφάνεια αυτή και  $\mathbf{a}$  είναι το διάνυσμα μιας ομάδας αγνώστων παραμέτρων που την περιγράφουν.

Οι συντεταγμένες  $\mathbf{r}_i$  του σημείου  $P_i$  πάνω στην ιδεατή επιφάνεια της προηγούμενης σχέσης αναφέρονται στο σύστημα αναφοράς που ορίζεται με αρχή το κέντρο της επιφάνειας και άξονες των οποίων ο προσανατολισμός ορίζεται από τον προσανατολισμό της άγνωστης επιφάνειας. Αν

$$\mathbf{r}^{(T)} = [x \ y \ z]^T \text{ και } \mathbf{r}^{(A)} = [u \ v \ w]^T \quad (2)$$

είναι οι συντεταγμένες ενός σημείου στα δύο αυτά συστήματα (το “τοπικό” σύστημα επεξεργασίας των συντεταγμένων που ορίζουν συνήθως τα όργανα μέτρησης και το σύστημα “του αντικειμένου” που αναφέρονται οι εξισώσεις της ιδεατής επιφάνειας), τότε αυτές συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση:

Ιωάννης Δούκας<sup>1</sup>, Δημήτριος Ρωσσικόπουλος<sup>2</sup>, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,  
<sup>1</sup>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, <sup>2</sup>Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.  
 Γεωδαιτικοί Έλεγχοι Παραμορφώσεων. Η περίπτωση των μνημείων και των τεχνικών έργων.

Πίνακας 1. Η πιστή και η εξομαλυντική προσαρμογή της επιφάνειας σε δεδομένα.

Απλή προσαρμογή	$\mathbf{e}^T \mathbf{e} = \min .$	$\hat{\mathbf{y}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{w}$	$\hat{\sigma}^2 = \frac{\hat{\mathbf{e}}^T \hat{\mathbf{e}}}{n - m}$
Προσαρμογή και συνόρθωση	$\mathbf{v}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{v} = \min .$	$\mathbf{e} = \mathbf{B} \mathbf{v}, \quad \mathbf{M} = \mathbf{B} \mathbf{Q} \mathbf{B}^T$ $\hat{\mathbf{y}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{w}$	$\hat{\sigma}^2 = \frac{\hat{\mathbf{e}}^T \mathbf{M}^{-1} \hat{\mathbf{e}}}{n - m}$

$$\mathbf{r}^{(T)} = \mathbf{R}_1(\omega)\mathbf{R}_2(\varphi)\mathbf{R}_3(\kappa) \mathbf{r}^{(A)} + \Delta\mathbf{r} = \mathbf{R} \mathbf{r}^{(A)} + \Delta\mathbf{r} \quad (3)$$

$$\text{ή } \mathbf{r}^{(A)} = \mathbf{R}^T (\mathbf{r}^{(T)} - \mathbf{r}_o^{(T)}) \quad (4)$$

όπου  $\mathbf{R} = \mathbf{R}_1(\omega)\mathbf{R}_2(\varphi)\mathbf{R}_3(\kappa)$  ο πίνακας στροφής γύρω από τους τρεις άξονες,  $\Delta\mathbf{r}$  οι μεταθέσεις κατά τους τρεις άξονες και  $\mathbf{r}_o$  οι συντεταγμένες  $(x_o, y_o, z_o)$  στο τοπικό σύστημα της αρχής του συστήματος του αντικειμένου. Η επεξεργασία των παρατηρήσεων σε τέτοιου είδους εφαρμογές γίνεται σε ένα τρισδιάστατο σύστημα αναφοράς που είναι συνήθως αυθαίρετο, αλλά λόγω της κλίμακας της αποτύπωσης ένας από τους άξονες ταυτίζεται με την τοπική κατακόρυφο που υλοποιείται από τις διευθύνσεις των αξόνων των οργάνων μέτρησης. Αν θεωρήσουμε τα δύο συστήματα παράλληλα, η βάση π.χ. ενός θόλου είναι οριζόντια, τότε η σχέση (4) γίνεται:

$$\mathbf{r}^{(A)} = \mathbf{r}^{(T)} - \mathbf{r}_o^{(T)} \quad (5)$$

Μετά την επιλογή της αναλυτικής μορφής της επιφάνειας αναφοράς το επόμενο βήμα είναι η προσαρμογή της επιφάνειας αυτής στις “μετρήσεις”. Μετρήσεις θεωρούνται οι συντεταγμένες ενός αριθμού σημείων, που προέκυψαν από την επίλυση τρισδιάστατου συνήθως δικτύου, καταναμημένων όσο το δυνατόν καλύτερα και πυκνότερα πάνω στην επιφάνεια. Ως κριτήριο βέλτιστης προσαρμογής μπορεί να επιλεγεί η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των κάθετων αποστάσεων των σημείων από την επιφάνεια αναφοράς. Αυτό σημαίνει:

$$f(\mathbf{r}_i, \mathbf{a}) = f_i(\mathbf{r}_i, \mathbf{a}^o) + \left. \frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{a}} \right|_o (\mathbf{a} - \mathbf{a}^o) = 0 \quad (6)$$

Για τα  $n$  σημεία το σύστημα γράφεται:

$$\mathbf{w} = \mathbf{H} \mathbf{y} + \mathbf{e} \quad (7)$$

όπου  $\mathbf{y} = \mathbf{a} - \mathbf{a}^o$ ,  $\mathbf{e}$  είναι το διάνυσμα των αποκλίσεων από την επιφάνεια.

Σε μια άλλη αντιμετώπιση, κατά την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των αποκλίσεων λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση των σφαλμάτων των συντεταγμένων, όπως περιγράφεται η συμπεριφορά τους από τον πίνακα (συμ)μεταβλητοτήτων τους. Το σύστημα των μικτών εξισώσεων προκύπτει από τη γραμμικοποίηση της σχέσης (1):

$$f(\mathbf{r}_i^b, \mathbf{a}^o) + \left. \frac{\partial f}{\partial \mathbf{a}} \right|_{o,b} (\mathbf{a} - \mathbf{a}^o) + \left. \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}_i} \right|_{o,b} (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_i^b) = 0 \quad (8)$$

$$\text{ή } w_i + \left. \frac{\partial f}{\partial \mathbf{a}} \right|_o \mathbf{y} - \left. \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}_i} \right|_o \mathbf{v}_i = 0 \quad (9)$$

και τελικά για όλα τα σημεία γράφεται:

$$\mathbf{w} + \mathbf{H} \mathbf{y} - \mathbf{B} \mathbf{v} = \mathbf{0} . \quad (10)$$

Ιωάννης Δούκας<sup>1</sup>, Δημήτριος Ρωσσικόπουλος<sup>2</sup>, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,

<sup>1</sup>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, <sup>2</sup>Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Γεωδαιτικοί Έλεγχοι Παραμορφώσεων. Η περίπτωση των μνημείων και των τεχνικών έργων.

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

Υπολογίζονται έτσι οι αποχές της μετρημένης επιφάνειας από την αντίστοιχη ιδεατή καθώς και οι μεταβλητότητες και συμμεταβλητότητές τους. Στην περίπτωση μιας παραμορφωμένης επιφάνειας, μετά την εφαρμογή των σχετικών ελέγχων, το μέγεθος και ο τρόπος της παραμόρφωσης μπορεί να αξιολογηθεί χρησιμοποιώντας εργαλεία από τη θεωρία της ελαστικότητας.

Η βέλτιστη προσαρμογή που περιγράφηκε παραπάνω γίνεται μετά από τη συνόρθωση του τρισδιάστατου συνήθως δικτύου της τοπογραφίας ή και της φωτογραμμετρίας σ' ένα επόμενο βήμα υπολογισμών. Μπορεί όμως να γίνει και ταυτόχρονα κατά τη συνόρθωση του μικρού δικτύου, εισάγοντας τις εξισώσεις που περιγράφουν τα ιδεατά σχήματα ως ουσιαστικές δεσμεύσεις.

Συνήθως, ως δεσμεύσεις εισάγονται οι γεωμετρικές συνθήκες που ικανοποιούν κάποια σημεία πάνω στο προς έλεγχο τεχνικό έργο (ή μνημείο), με σκοπό είτε τη συμπλήρωση και ενίσχυση του μαθηματικού μοντέλου της συνόρθωσης των παρατηρήσεων, είτε τον έλεγχο των αποκλίσεων δομικών στοιχείων από μαθηματικές επιφάνειες. Παράδειγμα συνθηκών για τη συμπλήρωση και ενίσχυση του μαθηματικού μοντέλου είναι: ο προσανατολισμός των φωτογραφιών στην περίπτωση της φωτογραμμετρίας, ο προσανατολισμός των θεοδολίων στο δίκτυο αναφοράς στην περίπτωση των τοπογραφικών εφαρμογών περιορισμένου πεδίου, κυρίως όταν χρειάζεται να ορισθεί το μέγεθος του δικτύου ή να αποφευχθούν σκοπεύσεις μεταξύ των θεοδολίων. Στην περίπτωση αυτή, συνθήκες όπως συνεπιπεδότητα, ευθυγραμμία στο χώρο ή στο επίπεδο, παραλληλία μεταξύ δύο ή περισσότερων ευθειών, καθετότητα κ.λπ., εισάγονται στο πρόβλημα της συνόρθωσης ως δεσμεύσεις μεταξύ των συντεταγμένων των κορυφών του δικτύου:

$$\begin{aligned} \mathbf{b} &= \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{v}, \quad \mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} = \min \\ \mathbf{H} \mathbf{x} &= \mathbf{z} \end{aligned} \quad (11)$$

Αντίστοιχα, στην περίπτωση του ελέγχου των αποκλίσεων δομικών στοιχείων από μαθηματικές επιφάνειες, μια τέτοια αντιμετώπιση είναι πιο πολύπλοκη καθώς απαιτεί και τον προσδιορισμό της πιο σύνθετης επιφάνειας, όπου οι δεσμεύσεις που προκύπτουν από τη γραμμικοποίηση σχέσεων της μορφής της σχέσης (1) εισάγουν νέες άγνωστες παραμέτρους, οδηγώντας σ' ένα συνθετότερο πρόβλημα συνόρθωσης. Στη σχετική βιβλιογραφία ακολουθείται ως απλούστερη η διαχωρισμένη αντιμετώπιση, δηλαδή η προσαρμογή των συντεταγμένων στις μαθηματικές επιφάνειες η οποία περιγράφηκε παραπάνω.

### 3.2 Σύγκριση των διαχρονικών μορφών ενός γεωδαιτικού δικτύου

Όταν η συνόρθωση των παρατηρήσεων ενός δικτύου μελέτης μικρομετακινήσεων, γίνεται χωριστά για κάθε εποχή, τότε, οι διαφορές των συντεταγμένων πιθανώς να οφείλονται (Ρωσσικόπουλος, 1988, 2003, 2012):

- στη διαχρονική μεταβολή της μορφής του δικτύου εξαιτίας της παραμόρφωσης του αντικειμένου που μετρείται,
- στα τυχαία σφάλματα των παρατηρήσεων, και
- στους ορισμούς του συστήματος αναφοράς στις χωριστές συνορθώσεις των εποχών.

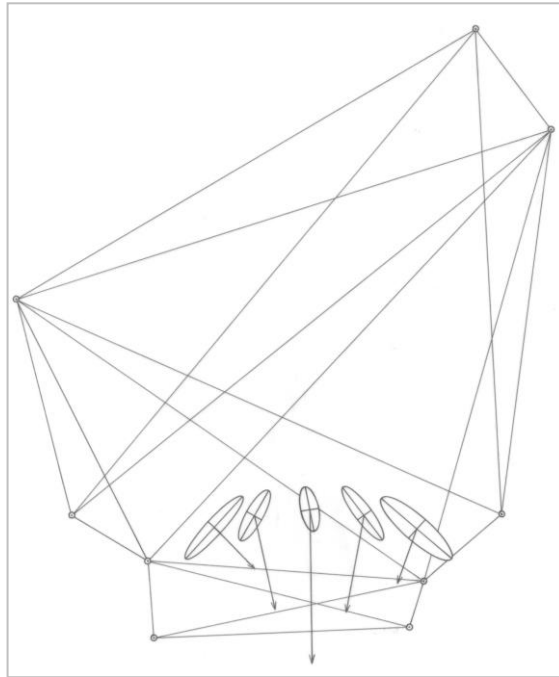
Η μεταβολή στον ορισμό του συστήματος αναφοράς της μιας εποχής, μεταβάλλει τις εκτιμήσεις των μετακινήσεων σε σύγκριση με τις άλλες εποχές. Επομένως, πριν από τη σύγκριση των διαχρονικών μορφών του δικτύου, για να υπολογισθούν οι εκτιμήσεις των μετακινήσεων, θα πρέπει να απομακρυνθεί από τις διαφορές το μέρος εκείνο, που οφείλεται στους ορισμούς των συστημάτων αναφοράς στις χωριστές συνορθώσεις. Αντιμετωπίζεται δηλαδή ένα πρόβλημα σύνδεσης των διαφορετικών μορφών του δικτύου.

Στην περίπτωση που όλα τα σημεία του δικτύου θεωρούνται κινητά, το πρόβλημα της σύνδεσης

Ιωάννης Δούκας<sup>1</sup>, Δημήτριος Ρωσσικόπουλος<sup>2</sup>, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,

<sup>1</sup>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, <sup>2</sup>Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Γεωδαιτικοί Έλεγχοι Παραμορφώσεων. Η περίπτωση των μνημείων και των τεχνικών έργων.



δύο διαχρονικών του μορφών αντιμετωπίζεται μετασχηματίζοντας τις συντεταγμένες των κοινών

Σχήμα 5. Δίκτυο ελέγχου μικρομετακινήσεων φράγματος. Στα σημεία ελέγχου (επί του φράγματος) έχουν σχεδιασθεί οι ελλείψεις εμπιστοσύνης για πιθανότητα 95% και οι μετακινήσεις που προέκυψαν από την ταυτόχρονη συνόρθωση των παρατηρήσεων 9 εποχών. Επειδή οι μετακινήσεις (σχεδιασμένες ως διανύσματα) δεν περιέχονται μέσα στις ελλείψεις, συμπεραίνεται ότι αυτές οφείλονται σε πραγματικές παραμορφώσεις του φράγματος (Ρωσσικόπουλος, 2003).

σημείων (δηλ. των σημείων που υπάρχουν σ' όλες τις εποχές) της μιας εποχής, ώστε να προσαρμοσθούν με βέλτιστο τρόπο στις συντεταγμένες της άλλης εποχής, αλλάζοντας το σύστημα αναφοράς κατά θέση και προσανατολισμό ή κατά θέση, προσανατολισμό και κλίμακα (αν δεν έχουν γίνει μετρήσεις αποστάσεων). Στην περίπτωση αυτή, οι μορφές του δικτύου στις διάφορες εποχές μπορούν να θεωρηθούν ότι είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους αν: (α). στις χωριστές συνορθώσεις χρησιμοποιηθούν οι ίδιες προσεγγιστικές συντεταγμένες για τα σημεία και επιπλέον, (β). το πρόβλημα του ορισμού του συστήματος αναφοράς αντιμετωπισθεί εισάγοντας (μερικές) εσωτερικές δεσμεύσεις, για την ομάδα όμως των σημείων εκείνων που εμφανίζονται σ' όλες τις εποχές.

Το πρόβλημα της σύνδεσης των μορφών του δικτύου στις διάφορες εποχές διαφέρει στην περίπτωση των δικτύων που αποτελούνται από ένα μεταβλητό και ένα αμετάβλητο τμήμα, όπως είναι τα δίκτυα μελέτης μετακινήσεων των μνημείων και των τεχνικών έργων. Όταν ορισμένα σημεία του δικτύου θεωρηθούν ότι είναι ακίνητα, τότε η σύνδεση των διαχρονικών μορφών του δικτύου προκύπτει από την υπόθεση της διαχρονικής σύμπτωσης των σημείων αναφοράς και δεν επιτρέπεται καμία από τις διαχρονικές μορφές του δικτύου να δεχτεί παράλληλες μεταθέσεις, στροφές ή αλλαγές κλίμακας ανεξάρτητες από τις άλλες. Αν οι χωριστές συνορθώσεις δύο εποχών αποτελούν τις τελικές συνορθώσεις, η μοναδική αντιμετώπιση του προβλήματος της σύνδεσης (προκειμένου να μη χαθεί η πληροφορία που προέρχεται από τη διαχρονική σύμπτωση των σημείων αναφοράς), είναι μία "επόμενη" συνόρθωση του αμετάβλητου τμήματος του δικτύου μόνο. Στην περίπτωση αυτή, οι συντεταγμένες των σημείων που προέκυψαν από τις χωριστές συνορθώσεις αποτελούν τις παρατηρήσεις που συνοδεύονται από τους "κατ' εκτίμηση" πίνακες

Ιωάννης Δούκας<sup>1</sup>, Δημήτριος Ρωσσικόπουλος<sup>2</sup>, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,

<sup>1</sup>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, <sup>2</sup>Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Γεωδαιτικοί Έλεγχοι Παραμορφώσεων. Η περίπτωση των μνημείων και των τεχνικών έργων.

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

συμμεταβλητοτήτων. Άγνωστες παράμετροι στη συνόρθωση αυτή είναι οι παράλληλες μεταθέσεις, οι στροφές ή και οι κλίμακες της κάθε μορφής του αμετάβλητου τμήματος, σε σχέση με τη μορφή μιας εποχής αναφοράς. Στη συνέχεια, διορθώνονται και μετασχηματίζονται οι συντεταγμένες των σημείων έλεγχου ώστε να προκύψουν οι μετακινήσεις και γίνονται οι σχετικοί στατιστικοί έλεγχοι. Η σύγκριση των εποχών ανά δύο μεταξύ τους και η εφαρμογή μεθόδων παρεμβολής και πρόγνωσης, όπως είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, η αναλυτική παρεμβολή ή η σημειακή προσαρμογή απαρτίζουν τα αναμφισβήτητα δημοφιλέστερα «εργαλεία» ανάλυσης παραμορφώσεων στη γεωδαιτική βιβλιογραφία.

Οι μετακινήσεις θεωρούνται εξαρτημένες μεταξύ τους στο χώρο και όλοι υπολογισμοί γίνονται σύμφωνα με τα παρακάτω βήματα (Rossikopoulos, 2001):

α. Συνόρθωση των παρατηρήσεων της κάθε εποχής:  $\mathbf{b} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{v}$ ,  $\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} = \min$

Γίνονται οι χωριστές συνορθώσεις ανά εποχή, αξιολογούνται στατιστικά τα αποτελέσματα και τελικά προκύπτουν οι συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου για κάθε εποχή και ο πίνακας συμμεταβλητοτήτων τους.

β. Βέλτιστη προσαρμογή των συντεταγμένων μεταξύ των εποχών.

Απαλείφονται οι διαφορές των συντεταγμένων που οφείλονται στον διαφορετικό ορισμό του συστήματος αναφοράς των παραπάνω χωριστών ανά εποχή συνορθώσεων των παρατηρήσεων.

Όταν ορισμένα σημεία του δικτύου θεωρηθούν ότι είναι ακίνητα, τότε η σύνδεση των διαχρονικών μορφών του δικτύου προκύπτει από την υπόθεση της διαχρονικής σύμπτωσης των σημείων αναφοράς. Έστω ότι από τις χωριστές συνορθώσεις των δύο μορφών ενός δικτύου προέκυψαν οι συντεταγμένες και ο πίνακας συμμεταβλητοτήτων τους για την εποχή  $t_\alpha$ , καθώς και οι συντεταγμένες και ο πίνακας συμμεταβλητοτήτων τους για την εποχή  $t_\beta$

$$\mathbf{x}_\alpha = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_\alpha \\ \ddot{\mathbf{x}}_\alpha \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q}_\alpha^{(\alpha)} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{Q}}_\alpha & \tilde{\mathbf{Q}}_\alpha \\ \tilde{\mathbf{Q}}_\alpha^T & \ddot{\mathbf{Q}}_\alpha \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}_\beta = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_\beta \\ \ddot{\mathbf{x}}_\beta \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q}_\beta^{(\beta)} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{Q}}_\beta & \tilde{\mathbf{Q}}_\beta \\ \tilde{\mathbf{Q}}_\beta^T & \ddot{\mathbf{Q}}_\beta \end{bmatrix} \quad (12)$$

αντιστοίχως, όπου  $\dot{\mathbf{x}}$  το διάνυσμα των συντεταγμένων των σταθερών σημείων (σημείων αναφοράς) και  $\ddot{\mathbf{x}}$  το διάνυσμα των συντεταγμένων των κινητών σημείων (σημείων ελέγχου). Στην περίπτωση αυτή, η σύνδεση των δύο διαχρονικών μορφών του δικτύου γίνεται σύμφωνα με τον παρακάτω διαχωρισμένο αλγόριθμο συνόρθωσης (Ρωσσικόπουλος, 2003, 2012):

α. Συνόρθωση με το μοντέλο του μετασχηματισμού ομοιότητας (ή άκαμπτου) των **κοινών σημείων αναφοράς** και εκτίμηση των παραμέτρων μετασχηματισμού.

Γίνεται δηλαδή μετασχηματισμός και συνόρθωση των κοινών σημείων αναφοράς έτσι ώστε οι συντεταγμένες της  $t_\beta$  εποχής των σημείων αυτών να γίνουν ίδιες με αυτές της  $t_\alpha$  εποχής. Οι συντεταγμένες των δύο εποχών ενός σημείου  $i$  συνδέονται με τη σχέση:

$$\dot{\mathbf{x}}_i^{(\alpha)} - \dot{\mathbf{v}}_i^{(\alpha)} = \lambda \mathbf{R}(\dot{\mathbf{x}}_i^{(\beta)} - \dot{\mathbf{v}}_i^{(\alpha)}) + \Delta \mathbf{x} \quad (13)$$

β. Διόρθωση των συντεταγμένων των **μη κοινών σημείων αναφοράς** των δύο εποχών (διόρθωση της εποχής  $t_\alpha$ , διόρθωση και μετασχηματισμός της εποχής  $t_\beta$ ).

Τα μη κοινά σημεία αναφοράς συμμετέχουν στη συνόρθωση με τις σχέσεις:

$$\dot{\mathbf{x}}_i = \dot{\mathbf{x}}_i^{(\alpha)} - \dot{\mathbf{v}}_i^{(\alpha)} \quad \text{μη κοινά σημεία αναφοράς της εποχής } t_\alpha \quad (14)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_i = \lambda \mathbf{R}(\dot{\mathbf{x}}_i^{(\beta)} - \dot{\mathbf{v}}_i^{(\beta)}) + \Delta \mathbf{x} \quad \text{μη κοινά σημεία αναφοράς της εποχής } t_\beta \quad (15)$$

γ. Διόρθωση των συντεταγμένων των **σημείων ελέγχου** της εποχής  $t_\alpha$ , διόρθωση και μετασχηματισμός των σημείων ελέγχου της εποχής  $t_\beta$ .

Τα μη κοινά σημεία ελέγχου συμμετέχουν στη συνόρθωση με τις σχέσεις:

Ιωάννης Δούκας<sup>1</sup>, Δημήτριος Ρωσσικόπουλος<sup>2</sup>, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,

<sup>1</sup>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, <sup>2</sup>Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Γεωδαιτικοί Έλεγχοι Παραμορφώσεων. Η περίπτωση των μνημείων και των τεχνικών έργων.

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

$$\ddot{\mathbf{x}}_i = \ddot{\mathbf{x}}_i^{(\alpha)} - \ddot{\mathbf{v}}_i^{(\alpha)} \quad \text{μη κοινά σημεία ελέγχου της εποχής } t_\alpha \quad (16)$$

$$\ddot{\mathbf{x}}_i = \lambda \mathbf{R}(\ddot{\mathbf{x}}_i^{(\beta)} - \ddot{\mathbf{v}}_i^{(\beta)}) + \Delta \mathbf{x} \quad \text{μη κοινά σημεία ελέγχου της εποχής } t_\beta \quad (17)$$

δ. Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και εκτίμηση των μετακινήσεων.

Οι σημαντικότεροι στατιστικοί έλεγχοι που πρέπει να γίνουν για την αξιολόγηση των παραπάνω αποτελεσμάτων, είναι οι εξής:

- Έλεγχος σταθερότητας των σημείων αναφοράς (ολικός ή κατά σημείο)
- Έλεγχος μετακίνησης των σημείων ελέγχου.
- Αξιολόγηση της αξιοπιστίας των παραπάνω ελέγχων σε σχέση με την αξιοπιστία των δύο διαχρονικών δικτύων που συγκρίνονται.

Στη δυναμική αντιμετώπιση των διαχρονικών δικτύων μελετάται αυτή καθαυτή η παραμόρφωση του δικτύου, συνορθώνοντας τις παρατηρήσεις όλων των εποχών ταυτόχρονα (Ρωσσικόπουλος, 1988, 2012). Στην περίπτωση των δικτύων παρακολούθησης των παραμορφώσεων μεγάλων τεχνικών έργων, η σύνδεση γίνεται με αυστηρά καθορισμένο τρόπο μέσα από το μοντέλο συνόρθωσης. Τα δίκτυα αυτά αποτελούνται από:

- παρατηρήσεις που έγιναν σε διαφορετικές εποχές
- σημεία που αλλάζουν θέση από εποχή σε εποχή και
- σημεία που μένουν "αμετακίνητα" για όλες τις εποχές.

Το σύστημα των εξισώσεων παρατηρήσεων για τις παρατηρήσεις που έγιναν στις  $m$  εποχές γράφεται:

$$\mathbf{b} = \dot{\mathbf{A}} \dot{\mathbf{x}} + \ddot{\mathbf{A}} \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{D} \mathbf{y} + \mathbf{v} \quad (18)$$

όπου  $\dot{\mathbf{x}}$  είναι το διάνυσμα των διορθώσεων των προσεγγιστικών συντεταγμένων των σημείων αναφοράς  $\ddot{\mathbf{x}}$  είναι το διάνυσμα των διορθώσεων των προσεγγιστικών συντεταγμένων των ελεγχόμενων σημείων  $\mathbf{y}$  το διάνυσμα των αδιάφορων παραμέτρων και  $\mathbf{v}$  το διάνυσμα των σφαλμάτων των παρατηρήσεων. Αναλυτικότερα η σχέση (16) γράφεται:

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_1 &= \dot{\mathbf{A}}_1 \dot{\mathbf{x}} + \ddot{\mathbf{A}}_1 \ddot{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{D}_1 \mathbf{y}_1 + \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{b}_2 &= \dot{\mathbf{A}}_2 \dot{\mathbf{x}} + \ddot{\mathbf{A}}_2 \ddot{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{D}_2 \mathbf{y}_2 + \mathbf{v}_2 \\ &\vdots \\ \mathbf{b}_m &= \dot{\mathbf{A}}_m \dot{\mathbf{x}} + \ddot{\mathbf{A}}_m \ddot{\mathbf{x}}_m + \mathbf{D}_m \mathbf{y}_m + \mathbf{v}_m \end{aligned} \quad (19)$$

όπου ο δείκτης ( $a$ ) αναφέρεται στην  $t_a$  εποχή. Το κριτήριο των ελαχίστων τετραγώνων, αν πάρουμε υπόψη ότι οι παρατηρήσεις κατά εποχή είναι ανεξάρτητες, γράφεται αναλυτικά:

$$\sum_{\alpha=1}^m \mathbf{v}_\alpha^T \mathbf{P}_\alpha \mathbf{v}_\alpha = \min . \quad (20)$$

όπου  $\mathbf{P}_\alpha = \mathbf{Q}_\alpha^{-1}$  είναι ο πίνακας βάρους των παρατηρήσεων της  $t_\alpha$  εποχής.

Πριν από την ανάλυση των παρατηρήσεων για τον εντοπισμό των μικρομετακινήσεων  $\square$  θα πρέπει αυτές να ελεγχθούν αν περιέχουν χονδροειδή ή συστηματικά σφάλματα εκτός από τις διαφορές που οφείλονται στις μικρομετακινήσεις. Για το λόγο αυτό, συνορθώνονται οι παρατηρήσεις για κάθε εποχή χωριστά με ελάχιστες δεσμεύσεις και γίνονται οι παρακάτω έλεγχοι:

- Έλεγχος για την ύπαρξη και τον εντοπισμό πιθανών χονδροειδών σφαλμάτων (εφαρμόζεται η σάρωση δεδομένων – data snooping – για απορριπτέες παρατηρήσεις).
- Έλεγχος του στοχαστικού μοντέλου (έλεγχος ομοιογένειας των μεταβλητοτήτων αναφοράς)

Ιωάννης Δούκας<sup>1</sup>, Δημήτριος Ρωσσικόπουλος<sup>2</sup>, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,

<sup>1</sup>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, <sup>2</sup>Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Γεωδαιτικοί Έλεγχοι Παραμορφώσεων. Η περίπτωση των μνημείων και των τεχνικών έργων.

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012



- Αξιολόγηση της εσωτερικής και εξωτερικής αξιοπιστίας του δικτύου.

Είναι αυτονόητο ότι ο σχεδιασμός ενός δικτύου μελέτης παραμορφώσεων πρέπει να γίνεται με αυστηρά κριτήρια αξιοπιστίας και ελαχιστοποιώντας το μέγεθος των οριακών συστηματικών ή χονδροειδών σφαλμάτων (που ενδεχομένως δεν ανιχνεύονται) στις παρατηρήσεις.

Το τελικό στάδιο των υπολογισμών αποτελεί η ανάλυση των παραμορφώσεων με μεθόδους παρεμβολής και πρόγνωσης, όπως είναι τα πεπερασμένα στοιχεία, η αναλυτική παρεμβολή και η σημειακή προσαρμογή. Οι διορθωμένες μεταβολές των συντεταγμένων (δηλ. οι μετακινήσεις) θεωρούνται τιμές αγνώστων συναρτήσεων της θέσης των κορυφών του δικτύου, που μπορούν να προσεγγισθούν όμως από συναρτήσεις γνωστής γραμμικής μορφής του τύπου  $\mathbf{u}_i = \mathbf{\Phi}(\mathbf{r}_i) \mathbf{a}$ , όπου  $\mathbf{u}_i$  είναι το διάνυσμα των «μετακινήσεων» του σημείου  $P_i$ ,  $\mathbf{a}$  οι άγνωστες παράμετροι και  $\mathbf{\Phi}(\mathbf{r}_i)$  ο γνωστός πίνακας των συντελεστών των αγνώστων, (τα στοιχεία του οποίου είναι οι τιμές γνωστών συναρτήσεων της θέσης του  $P_i$ ). Η χρήση των παραπάνω αναλυτικών συναρτήσεων για την περιγραφή των μετακινήσεων επιτρέπει το συνδυασμό των γεωδαιτικών παρατηρήσεων με τα αποτελέσματα των γεωτεχνικών/κατασκευαστικών μεθόδων, οπότε και επιτυγχάνεται έτσι η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια αλλά και ο υψηλότερος βαθμός αξιοπιστίας των τελικών αποτελεσμάτων.

#### 4. Επίλογος

Τα γεωδαιτικά δίκτυα μεγάλης ακριβείας έχουν γίνει απαραίτητα στη μελέτη των παραμορφώσεων του στερεού φλοιού της Γης και έχουν λάβει κυρίαρχη και ακλόνητη θέση ανάμεσα στις άλλες προσεγγίσεις που αφορούν στο σημαντικό πρόβλημα της πρόγνωσης των σεισμών. Εκτός όμως από τη μελέτη των παραμορφώσεων του στερεού φλοιού της Γης εξαιτίας της σεισμικής δραστηριότητας, τα γεωδαιτικά δίκτυα μεγάλης ακριβείας αποκτούν ιδιαίτερη σημασία στη μελέτη της μετακίνησης του εδάφους εξαιτίας κατολισθήσεων ή καθιζήσεων καθώς επίσης και στη μελέτη των παραμορφώσεων μνημείων και μεγάλων τεχνικών έργων όπως είναι τα φράγματα, οι γέφυρες, τα ψηλά κτίρια κ.ά.

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκαν βασικά όργανα και μέθοδοι μέτρησης που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση των τεχνικών έργων και των μνημείων, καθώς και οι μέθοδοι ανάλυσης που εφαρμόζονται στις μετρήσεις ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την κατάσταση ή τη διαχρονική συμπεριφορά του τεχνικού έργου ή του μνημείου. Δεδομένου ότι οι αναμενόμενες μικρομετακινήσεις έχουν κατά κανόνα πολύ μικρές τιμές, η επιδίωξη της μεγαλύτερης δυνατής ακριβείας από την πλευρά του μαθηματικού μοντέλου σε παρόμοιες εφαρμογές είναι αυτονόητα, και δικαιολογημένη αλλά και επιβεβλημένη.

#### Αναφορές

Βλάχος Δ., Δερμάνης Α. και Λιβιεράτος Ε., "Αποκλίσεις Θόλων Μνημείων από Ιδανικές Μαθηματικές Επιφάνειες", Γεωδαιτικά Τετράδια, 2, 2, σελ. 131-148, 1981, Θεσσαλονίκη.

Δερμάνης Α. και Φωτίου Α., "Μέθοδοι και Εφαρμογές Συνόρθωσης Παρατηρήσεων", 1992, Εκδόσεις Ζήτη.

Δερμάνης Α., "Συνορθώσεις Παρατηρήσεων και Θεωρία Εκτίμησης", 1987, Εκδόσεις Ζήτη.

Δούκας Ι.Δ., "Η Εφαρμογή της Στατιστικής στα Οριζόντια Τριγωνομετρικά Δίκτυα", Δελτίο Νο 127 Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού, σελ. 21-57, 1984.

Δούκας Ι.Δ., "Η Γεωδαιτική Προσέγγιση στο Πρόβλημα των Παραμορφώσεων", Έκδοση Εργαστηρίου Γεωδαισίας Νο 12, σελ. 1-28, 1988a, Θεσσαλονίκη.

Ιωάννης Δούκας<sup>1</sup>, Δημήτριος Ρωσσικόπουλος<sup>2</sup>, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,

<sup>1</sup>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, <sup>2</sup>Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Γεωδαιτικοί Έλεγχοι Παραμορφώσεων. Η περίπτωση των μνημείων και των τεχνικών έργων.

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

Δούκας Ι.Δ., "Ένα Μαθηματικό Μοντέλο για τη Μελέτη και Ανάλυση των Παραμορφώσεων σε Τεχνικά Έργα με Βάση Οριζόντια Δίκτυα Ελέγχου", Δελτίο Κ.Ε.Δ.Ε. Υπουργείου Δημοσίων Έργων, Τεύχη 1-2, σελ. 53-61, 1988b.

Δούκας Ι.Δ., "Συστήματα Εντοπισμού Σημείων στο Χώρο και Εφαρμογές τους", Ημερίδα: Το Εργαστήριο Γεωδαισίας Α.Π.Θ. – Ερευνητικές δραστηριότητες και παροχή εξειδικευμένων υπηρεσιών, σελ. 1-24, 15 Δεκεμβρίου 1999, Θεσσαλονίκη.

Δούκας Ι.Δ., "Η Γεωδαισία (Όργανα και Μέθοδοι) και η Μετρολογία Τριών Διαστάσεων", 3ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, 5 & 6 Φεβρουαρίου 2010a, Λάρνακα, Κύπρος.

Δούκας Ι.Δ., "Μετρήσεις Υψηλής Ακριβείας - Περί Μετρολογίας (Ορολογία, Εξελίξεις) - Διακρίβωση Γεωδαιτικών Οργάνων - Γεωδαιτική Μετρολογία (Όργανα, Μέθοδοι, Εφαρμογές)", Διδακτικό βοήθημα, Μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών του Τμήματος Αγρονόμων-Τοπογράφων Μηχανικών ΑΠΘ (Κατεύθυνση: Τοπογραφικές Εφαρμογές, Μάθημα: Μετρήσεις Υψηλής Ακριβείας), σελ. 1-91, 2010b, Θεσσαλονίκη.

Δούκας Ι.Δ., Μπαντέλας Α.Γ., και Σαββαΐδης Π., "Εμπειρίες από την Παρακολούθηση Καθιζήσεων Οικοδομικού Έργου", 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής, σελ. 333-340, 21-23 Οκτωβρίου 1992, Θεσσαλονίκη.

Δούκας Ι.Δ., Μπαντέλας Α.Γ., Σαββαΐδης Π., και Υφαντής Ι., "Τεχνική Γεωδαισία: Πεδία Εφαρμογών και Προοπτικές", Συνέδριο Ο Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός προς το 2000. Εξέλιξη - Προοπτικές – Δυνατότητες, σελ. 247-260, 6-7-8 Δεκεμβρίου 1990, Θεσσαλονίκη.

Δούκας Ι.Δ., Μπαντέλας Α.Γ., Σαββαΐδης Π., και Υφαντής Ι., "Τεχνική Γεωδαισία: Η Αναγκαιότητα των Μετρήσεων Ακριβείας σε Φυσικές και Τεχνητές Κατασκευές", Τιμητικός τόμος του καθηγητή της Πολυτεχνικής Σχολής Γ. Νιτσιώτα, Επιστημονική Επετηρίδα Πολυτεχνικής Σχολής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τ. ΙΓ', τ. Α', σελ. 353-386, 1993, Θεσσαλονίκη.

Μπαντέλας Α.Γ., Σαββαΐδης Π., Υφαντής Ι. και Δούκας Ι.Δ., "Τεχνική Γεωδαισία: Σύγχρονα Μετρητικά Συστήματα και Πεδία Εφαρμογών", Τιμητικός τόμος του καθηγητή της Πολυτεχνικής Σχολής Λ. Μαυρίδη: Η Γη και το Σύμπαν, σελ. 493-503, 1997.

Ρωσσικόπουλος Δ., "Ένας Διαχωρισμένος Αλγόριθμος για τη Συνόρθωση των Δικτύων Παρακολούθησης Μεγάλων Τεχνικών Έργων", Ερατοσθένης, 21, σελ. 89-112, 1988, Θεσσαλονίκη.

Ρωσσικόπουλος Δ., "Σύγκριση των Διαχρονικών Μορφών Δικτύου Παρακολούθησης Παραμορφώσεων Μνημείων και Τεχνικών Έργων", Στο: Α. Δερμάνης (Επ. Έκδ.): Από τα Άστρα στη Γη και τον Πολιτισμό. Τιμητικός τόμος αφιέρωμα στη μνήμη του καθηγητή Αλέξανδρου Τσιούμη. σελ. 7-14, 2003, Εκδόσεις Ζήτη. Θεσσαλονίκη,

Ρωσσικόπουλος Δ., *Τεκτονική Γεωδαισία. Μετρώντας τις Παραμορφώσεις της Γης και των Τεχνικών Έργων*, Εκδόσεις Ζήτη (υπό έκδοση, 2012).

Fotiou A., Livieratos E., Lombardini G. and Paraschakis I., "Dome Representation Using Photogrammetrically Derived Data and Best Fitting Techniques", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, No. 46, pp. 231-246, 1991.

Rossikopoulos D., "Modelling Alternatives in Deformation Measurements", First International Symposium on Robust Statistics and Fuzzy Techniques in Geodesy and GIS. Ed.: A. Carosio and H. Kutterer. 2001, ETH Zurich.

Ιωάννης Δούκας<sup>1</sup>, Δημήτριος Ρωσσικόπουλος<sup>2</sup>, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,

<sup>1</sup>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, <sup>2</sup>Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Γεωδαιτικοί Έλεγχοι Παραμορφώσεων. Η περίπτωση των μνημείων και των τεχνικών έργων.

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας  
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου  
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012