

Γεωδαιτικά Δίκτυα Ελέγχου Βιομηχανικών Παραγώγων.

Εφαρμογή σε Σκάφος του Π-Ν

Α.-Μ. ΑΓΑΤΖΑ-ΜΠΑΛΟΔΗΜΟΥ

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Ο. ΑΡΑΜΠΑΤΖΗ

Επιστημονικός Συνεργάτης Ε.Μ.Π.

Δ.-Δ. ΜΠΑΛΟΔΗΜΟΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. ΣΤΑΘΑΣ

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια διαδικασία ίδρυσης, μέτρησης, υπολογισμού και στατιστικής ανάλυσης γεωδαιτικών δικτύων ελέγχου βιομηχανικών παραγώγων (δικτύων «βιομηχανικής γεωδαισίας»). Δίνεται επιπλέον μια εφαρμογή όσων θεωρητικά αναπτύσσονται. Αντή αφορά στον προσδιορισμό στις τρεις διαστάσεις θέσεων προεπιλεγμένων σημείων πάνω στην άτρακτο σκάφους του Πολεμικού Ναυτικού, σε σχέση με έναν από τους κύριους θεωρητικούς άξονες του σκάφους.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αλματώδης εξέλιξη των γεωδαιτικών οργάνων και μεθοδολογιών των τελευταίων χρόνων έκανε δυνατή την επέκταση των πεδίων εφαρμογών της Γεωδαισίας σε εργασίες με υψηλές απαιτήσεις ακριβείας. Ένα από τα σύγχρονα αυτά πεδία εφαρμογών είναι και αυτό της Βιομηχανικής Γεωδαισίας, βασικό αντικείμενο της οποίας είναι η μέτρηση και ο ακριβής έλεγχος των γεωμετρικών προδιαγραφών (διαστάσεων, συμμετριών κ.λπ.) βιομηχανικών παραγώγων.

Η ανάγκη δημιουργίας αυτού του ιδιαίτερου κλάδου, της Βιομηχανικής Γεωδαισίας, προήλθε από την ανάγκη προσδιορισμού συνόλων σημείων που ανήκουν σε βιομηχανικά παράγωγα, των οπίσιων ο σχεδιασμός γίνεται βάσει μαθηματικών μοντέλων, με μεγάλη προδιαγεγραμμένη και ελέγχιμη ακρίβεια, έτσι ώστε να μπορούν να προσδιοριστούν τυχόν αποκλίσεις στο σχήμα και τις διαστάσεις από τα κατασκευαστικά σχέδια.

Τα στοιχεία που προσδιορίζονται είναι συνήθως οι σχετικές θέσεις προεπιλεγμένων σημείων επάνω στα αντικείμενα ή οι αποστάσεις τους από άξονες ή επίπεδα, που υλοποιούνται ή ορίζονται θεωρητικά επάνω στα ίδια αντικείμενα, σε ένα τοπικό σύστημα αναφοράς.

Οι απαιτούμενοι προσδιορισμοί μπορούν να γίνουν σε μία (υψομετρική), δύο (οριζοντιογραφική) ή και στις τρεις διαστάσεις (στο χώρο), με ακρίβειες που φτάνουν τα λίγα

δέκατα του χιλιοστού, ιδιαίτερα σε εφαρμογές, όπως η ναυπηγική, η αεροναυπηγική, η ρομποτική κ.λ.π.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

x_i, y_i, z_i = ορθογώνιες καρτεσιανές συντεταγμένες του σημείου i

$\delta x_i, \delta y_i, \delta z_i, \delta a_{ij}$ = μεταβολές στις συντεταγμένες και τη γωνία διεύθυνσης

\hat{x} = διάνυσμα των καλύτερων τιμών των συντεταγμένων

σ_o = a priori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους

$\hat{\sigma}_o$ = a posteriori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους

$\sigma_{l_i}^2$ = οι μεταβλητότητες των μετρημένων μεγεθών

$\sigma_{\hat{l}_i}^2$ = οι μεταβλητότητες των καλλίτερων τιμών των μετρημένων μεγεθών

$\sigma_{v_i}^2$ = οι μεταβλητότητες των υπολοίπων v_i

$\hat{\sigma}_{v_i}^2$ = οι a posteriori μεταβλητότητες των υπολοίπων v_i

$|\nabla_{\sigma} l_i|$ = ελάχιστο χονδροειδές σφάλμα που μπορεί να προκαλέσει την απόρριψη μιας παρατήρησης l_i , για ασυσχέτιστες παρατηρήσεις

n = αριθμός παρατηρήσεων σε ένα δίκτυο

m = αριθμός ανεξάρτητων καθοριστικών παραμέτρων

r = n - m = βαθμός ελευθερίας ενός δικτύου

r_i = αριθμός πλεονασμού ή redundancy number (RN) της παρατήρησης l_i

τ = μέτρο εσωτερικής αξιοπιστίας ενός δικτύου ή ελεγχιμότητα (controllability)

γ = μέτρο εξωτερικής αξιοπιστίας ενός δικτύου

Q = πίνακας συντελεστών βάρους

V = πίνακας μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας

2. ΔΙΚΤΥΑ

2.1. Τύρυση - Μετρήσεις

Η βασική μεθοδολογία για τον προσδιορισμό των θέσεων των προεπιλεγμένων σημείων πάνω στα βιομηχανικά παράγωγα είναι η δημιουργία μικροτριγωνομετρικών δικτύων αναφοράς και ελέγχου, η επίλυσή τους με τη μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων και ο στατιστικός τους έλεγχος.

Το **δίκτυο αναφοράς** περιλαμβάνει τα σημεία που ιδρύονται στο γύρω από το αντικείμενο χώρο και από τα οποία γίνονται οι μετρήσεις προς τα σημεία πάνω στο αντικείμενο, που αποτελούν το **δίκτυο ελέγχου**.

Οι ιδιαιτερότητες των δικτύων, που χρησιμοποιούνται στη Βιομηχανική Γεωδαισία, αναφέρονται στα εξής:

- Τα δίκτυα αυτά αναπτύσσονται σε πάρα πολύ περιορισμένο για τα τοπογραφικά δεδομένα χώρο (αποστάσεις μεταξύ των κορυφών από μερικές δεκάδες εκατοστών μέχρι μερικές δεκάδες μέτρων).
- Οι θέσεις των κορυφών των δικτύων αναφοράς τις περισσότερες φορές είναι αρκετά μακριά από το βέλτιστο γεωμετρικά σχήμα, λόγω των δυσκολιών κίνησης και τοποθέτησης των γεωδαιτικών οργάνων μέσα σε εργοστασιακούς χώρους.
- Οι κορυφές των δικτύων αναφοράς χρησιμοποιούνται τόσο ως στάσεις όσο και ως σκοπευόμενα σημεία, ενώ οι κορυφές των δικτύων ελέγχου μόνο ως σκοπευόμενα σημεία.
- Οι κορυφές των δικτύων αναφοράς πρέπει να έχουν ορατότητα προς όσο γίνεται περισσότερες κορυφές των δικτύων ελέγχου, ενώ κάθε κορυφή των δικτύων ελέγχου πρέπει να φαίνεται από τουλάχιστον τρεις κορυφές των δικτύων αναφοράς.
- Για τις μετρήσεις απαιτούνται μέθοδοι και όργανα υψηλής ακρίβειας με δυνατότητα απευθείας μεταφοράς των μετρήσεων σε H/Y.
- Οι ιδιαίτερα αυξημένες απαιτήσεις ακριβείας επιβάλλουν τη χρήση ειδικών συστημάτων τοποθέτησης και κέντρωσης των οργάνων πάνω στις κορυφές των δικτύων αναφοράς. Επίσης, απαιτούνται ειδικοί στόχοι σκοπεύσεων τόσο στις κορυφές των δικτύων αναφοράς όσο και στις κορυφές των δικτύων ελέγχου.
- Σε πολλές περιπτώσεις επιβάλλεται η μη μόνιμη θέση των κορυφών των δικτύων αναφοράς.
- Τα στοιχεία που μετρούνται είναι κυρίως γωνίες (οριζόντιες και κατακόρυφες), χωρίς να αποκλείεται και η μέτρηση μηκών, εφόσον εξασφαλίζεται η αρμονική ακρίβεια μεταξύ γωνιακών και γραμμικών μεγεθών. Στην περίπτωση που μετρούνται μόνο γωνίες, η κλίμακα στα δίκτυα δίνεται με τη χρήση ειδικών βάσεων ίνvar γωνιών μήκους που φέρουν στα άκρα τους ειδικούς στόχους για κοντινές σκοπεύσεις.

- Η ταχύτητα λήψης των απαιτούμενων μετρήσεων στο πεδίο είναι καθοριστική για την επιτυχία της εργασίας, κυρίως σε περιπτώσεις όπου, παράλληλα με τη γεωδαιτική διαδικασία, διεξάγεται και η καθημερινή ρουτίνα παραγωγής.

2.2. Συνορθώσεις - Βελτιστοποίησης

Στις περιπτώσεις αυτές ενδείκνυται τα δίκτυα να συνορθώνονται **ενιαία** (σημεία ελέγχου με σημεία αναφοράς) με τη μέθοδο μεταβολής των συντεταγμένων και τις ελάχιστες εξωτερικές δεσμεύσεις.

Έτσι, στα δίκτυα οριζοντίου ελέγχου, εφόσον έχουν μετρηθεί οριζόντιες γωνίες ή ανεξάρτητες διευθύνσεις και αποστάσεις, θεωρούνται τρεις δεσμεύσεις, μια σταθερή κορυφή ($\delta_x = 0$, $\delta_y = 0$) και μια σταθερή γωνία διεύθυνσης ($\delta_{az} = 0$). Αποφεύγεται η σταθεροποίηση μίας από τις δύο συνιστώσες της δεύτερης κορυφής, διότι τότε θα πρέπει να εξετάζεται ο προσανατολισμός της διεύθυνσης, προκειμένου να επιλεγεί η κατάλληλη για απαλοιφή συνιστώσα.

Στα τριδιάστατα δίκτυα, όπου μετρούνται οριζόντιες γωνίες ή ανεξάρτητες διευθύνσεις, κεκλιμένα μήκη, κατακόρυφες γωνίες και πιθανά υψημετρικές διαφορές (με γεωμετρική χωροστάθμηση), θεωρούνται τέσσερις δεσμεύσεις ($\delta_x = 0$, $\delta_y = 0$, $\delta_z = 0$, $\delta_{az} = 0$).

Στις παραπάνω περιπτώσεις, εφόσον δεν έχουν μετρηθεί μήκη, θεωρείται ένα μήκος ως σταθερό.

Επισημαίνεται πως στις περιπτώσεις μετρήσεων ανεξάρτητων διευθύνσεων, οι άγνωστοι προσανατολισμού, που είναι όσοι και οι στάσεις των γωνιομετρήσεων, είναι δυνατόν να απαλείφονται [1], [14].

Θεωρείται σκόπιμο, πριν από την εκτέλεση των μετρήσεων, να γίνεται μια μελέτη βελτιστοποίησης, προκειμένου να επιλεγεί ο κατάλληλος συνδυασμός μετρήσεων και ακριβειών που εξασφαλίζει την απαιτούμενη ακρίβεια και αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Στα δίκτυα της Βιομηχανικής Γεωδαισίας η διαδικασία της βελτιστοποίησης σπάνια αφορά στη γεωμετρική θέση των κορυφών τους, μια και στην πλειονότητα των περιπτώσεων οι θέσεις είναι σχεδόν προκαθορισμένες από τις (κτιριακές) εγκαταστάσεις, μέσα στις οποίες ιδρύονται τα δίκτυα αυτά.

2.3. Ακρίβεια

Επιλέγοντας αρχικά τα σημεία ελέγχου και αναφοράς, προγραμματίζονται οι μετρήσεις και επιλέγονται τα όργανα με βάση τις αβεβαιότητές τους και την επιδιωκόμενη ακρίβεια. Με τον αρχικό αυτό προγραμματισμό, υπολογίζεται ο a priori πίνακας μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας των καλύτερων τιμών των συντεταγμένων, που αποτελεί το βασικό εργαλείο για τον υπολογισμό των τυπικών σφαλμάτων οποιουδήποτε μεγέθους συνδέεται με αυτές.

Στις περιπτώσεις που σκοπό έχουν τον εντοπισμό πιθανών αποχώρων του σχήματος του αντικειμένου που ελέγχεται από την ιδανική του κατάσταση, ενδιαφέρουν οι **αβεβαιότητες των σχετικών θέσεων** των σημείων ελέγχου που φυσικά βρίσκονται επάνω στο αντικείμενο. Τέτοια μεγέθη μπορεί να είναι τα τυπικά σφάλματα διαφορών συντεταγμένων, αποστάσεων, γωνιών αλλά και οι μεγάλοι ημιάξονες των ελλειψεων ή ελλειψοειδών σφάλματος που δίνουν το μέγιστο σφάλμα στη σχετική θέση δύο σημείων.

Έτσι, υπολογίζονται τα τυπικά σφάλματα που ενδιαφέρουν και εξετάζεται αν οι ελάχιστες αποδεκτές παραμορφώσεις (σύμφωνα με τις προδιαγραφές) βρίσκονται μέσα στα διαστήματα εμπιστοσύνης 99%. Αν όχι, προστίθενται μετρήσεις ή επιλέγονται οργανα που δίνουν καλύτερες ακρίβειες στις μετρήσεις, μέχρις ότου επιτευχθεί ο ιδανικός συνδυασμός [2].

2.4. Αξιοπιστία

Η απαιτούμενη ακρίβεια μπορεί να εξασφαλιστεί και χωρίς αξιοπιστία. Η έννοια της **αξιοπιστίας** συνδέεται με τη δυνατότητα να εντοπίζονται μετά τη συνόρθωση κατά το δυνατόν μικρότερα χονδροειδή σφάλματα καθώς και η επίδρασή τους στα τελικά αποτελέσματα της συνόρθωσης. Αν π.χ. ένα σημείο προσδιορίζεται με τις ελάχιστες αναγκαίες μετρήσεις και υπάρχει ένα χονδροειδές ή και συστηματικό σφάλμα σε μία από αυτές, αν οι μετρήσεις έχουν μικρά τυπικά σφάλματα, θα προκύψει η θέση του σημείου με μεγάλη ακρίβεια, αλλά θα είναι λανθασμένη, χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου.

Σύμφωνα με τη μέθοδο ελέγχου των παρατηρήσεων του Baarda [5], [6], [8], είναι δυνατόν, πριν γίνουν οι παρατηρήσεις, να υπολογιστούν τα ελάχιστα χονδροειδή σφάλματα που μπορούν να προκαλέσουν απόρριψη των παρατηρήσεων και τα οποία φυσικά όσο μικρότερα είναι, τόσο πιο ευαίσθητο είναι το δίκτυο σε ελέγχους. Τα σφάλματα αυτά, σύμφωνα με τον Baarda, εκφράζουν την **εσωτερική αξιοπιστία** του δικτύου που μπορεί να θεωρηθεί ως **ελεγξιμότητα (controllability)**.

Το ελάχιστο χονδροειδές σφάλμα, που μπορεί να προκαλέσει την απόρριψη μίας παρατηρήσης I_i , για ασυσχέτιστες παρατηρήσεις, δίνεται από τη σχέση:

$$|\nabla_o I_i| = \delta_o \sigma_{l_i} \sqrt{\frac{I}{r_i}} \quad (2.1)$$

$$\text{όπου: } r_i = \frac{\sigma_{v_i}^2}{\sigma_{l_i}^2} = 1 - \frac{\sigma_{\hat{l}_i}^2}{\sigma_{l_i}^2} \quad (2.2)$$

$$\sigma_{\hat{l}_i}^2 = \text{τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα } V_l = \sigma_o P^{-1}$$

$\sigma_{\hat{l}_i}^2$ = τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα

$$V_{\hat{l}} = \sigma_o^2 Q_{\hat{l}} = \sigma_o^2 A (A' P A)^{-1} A' \quad (2.3)$$

$\sigma_{v_i}^2$ = τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα

$$V_v = \sigma_o^2 Q_v = V_l - V_{\hat{l}} \quad (2.4)$$

$$\text{που σημαίνει ότι } \sigma_{v_i}^2 = \sigma_{l_i}^2 - \sigma_{\hat{l}_i}^2 \quad (2.5)$$

Η παράμετρος δ_o είναι καθαρός αριθμός, που εξαρτάται από τις πιθανότητες α και β , που έχουν επιλεγεί για τα λάθη τύπου **I** (απόρριψη σωστής μέτρησης) και **II** (αποδοχής λανθασμένης μέτρησης) στους a posteriori στατιστικούς ελέγχους και δίνει την εκκεντρότητα της εναλλακτικής υπόθεσης.

Η παράμετρος r_i , για την οποία ισχύει: $0 \leq r_i \leq 1$, ονομάζεται **Αριθμός Πλεονασμού ή Redundancy Number (RN)** και εξαρτάται από τη γεωμετρία του δικτύου και από τον αριθμό των παρατηρήσεων που επιτρέπουν τον έλεγχο των I_i . Η παράμετρος αυτή δείχνει το πόσο βελτιώνεται η ακρίβεια του μεγέθους από τη συνόρθωση.

Αναφέρεται πως $\Sigma r_i = r = n - m$ (βαθμός ελευθερίας), οπότε μπορεί να υπολογιστεί η μέση τιμή $\bar{r} = \frac{r}{n}$. Έτσι, ο αριθμός r_i , που αντιστοιχεί στη μέτρηση I_i , δίνει τη συνεισφορά της συγκεκριμένης παρατηρησης στο βαθμό ελευθερίας του δικτύου.

Σύμφωνα και πάλι με τον Baarda, ως **εξωτερική αξιοπιστία (ευαισθησία, sensibility)** θεωρείται η επίδραση των χονδροειδών σφαλμάτων των παρατηρήσεων που δεν προκαλούν απόρριψη τους, στις καλύτερες τιμές \hat{x} των παραμέτρων ή σε συναρτήσεις τους $f(\hat{x})$. Έτσι, αν με $\nabla f(\hat{x})$ συμβολίστει η επίδραση του χονδροειδούς σφάλματος $|\nabla_o I_i|$ στη συνάρτηση $f(\hat{x})$, αποδεικνύεται πως:

$$|\nabla f(\hat{x})| \leq \delta_o \frac{\sigma_{\hat{l}_i}}{\sigma_{v_i}} \sigma_{f(\hat{x})} = \delta_o \sigma_{f(\hat{x})} \sqrt{\frac{1}{r_i} - 1} \quad (2.6)$$

Συνηθίζεται [3], [6] να θεωρείται ως **μέτρο εσωτερικής αξιοπιστίας** το μέγεθος:

$$\tau = \sqrt{\frac{1}{r_i}} = \frac{\sigma_{l_i}}{\sigma_{v_i}} \quad (2.7)$$

και ως **μέτρο εξωτερικής αξιοπιστίας** το μέγεθος:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{r_i} - 1} = \frac{\sigma_{\hat{l}_i}}{\sigma_{v_i}} \quad (2.8)$$

$$\text{για τα οποία ισχύει: } \tau^2 - \gamma^2 = 1 \quad (2.9)$$

Είναι προφανές ότι τόσο η εσωτερική όσο και η εξωτερική αξιοπιστία μεγαλώνουν, όσο μεγαλώνουν οι αριθμοί πλεονασμού r_i . Έτσι, εκείνο που πρέπει να επιδιώκεται κατά το σχεδιασμό των δικτύων είναι η μεγιστοποίηση των r_i . Θεωρούνται πολύ ικανοποιητικές οι τιμές $0.4 \leq r_i \leq [15]$. Αντίθετα, θεωρείται επικίνδυνο να επιδιώκεται μεγιστοποίηση του \bar{r} , μια και αυτό μπορεί να επιτευχθεί, εφόσον ο βαθμός ελευθερίας είναι μεγάλος, ενώ ενδεχομένως να υπάρχουν παρατηρήσεις που δεν ελέγχονται.

2.5. Στατιστικοί Έλεγχοι

2.5.1. Έλεγχοι των παρατηρήσεων

Μετά τις μετρήσεις και τη συνόρθωση, γίνεται ο ολικός έλεγχος της αρχικής υπόθεσης, προκειμένου να ελεγχθεί το στατιστικό και συναρτησιακό μοντέλο. Ελέγχεται ο λόγος

$$\frac{\sigma_o^2}{\sigma_s^2} \text{ με κατανομή Fischer } F(r, \infty, \alpha) \text{ ή } \chi^2(r, \alpha) \text{ και για επίπεδο σημαντικότητας } \alpha = 5\%.$$

δο σημαντικότητας $\alpha = 5\%$. Εκτός από τον ολικό έλεγχο, ελέγχεται και κάθε μία παρατήρηση για χονδροειδή σφάλματα.

Ελέγχονται τα στατιστικά μεγέθη $|W_i| = \left| \frac{v_i}{\sigma_{v_i}} \right|$ με κανονική κατανομή ή με F κατανομή για επίπεδο σημαντικότητας συνήθως $\alpha_0 = 0.1\%$ ($P = 1 - \alpha_0 = 99.9\%$) για κλασικά δίκτυα, ενώ για δίκτυα της Βιομηχανικής Γεωδαισίας μπορεί να θεωρηθεί και $\alpha_0 = 5\%$. Οπότε το $|W_i|$ συγκρίνεται με $z_{\frac{1-\alpha_0}{2}}$ ή $\sqrt{F_{1,\infty,1-\alpha_0}}$.

Οι έλεγχοι αυτοί είναι αντίστοιχοι με εκείνους που ανέπτυξε ο Baarda, μόνο που δεν επιλέγεται το επίπεδο σημαντικότητας α του ολικού ελέγχου με βάση το βαθμό ελευθερίας, διότι σε αυτές τις περιπτώσεις, ο μεγάλος βαθμός ελευθερίας θα οδηγούσε σε πολύ μεγάλο επίπεδο σημαντικότητας, με συνέπεια αυξημένο κίνδυνο για λάθος τύπου I (απόρριψη ορθής αρχικής υπόθεσης H_0) [15].

Τα παραπάνω γίνονται, αν είναι γνωστό το a priori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους σ_o , που σημαίνει γνωστές αβεβαιότητες των μετρήσεων, πράγμα που συνήθως συμβαίνει στις ανισοβαρείς παρατηρήσεις.

Αν, όμως, οι παρατηρήσεις είναι ισοβαρείς και δεν είναι γνωστά τα τυπικά τους σφάλματα ή τα βάρη έχουν προκύψει από κάποια σχέση μεταξύ των σφαλμάτων και δεν είναι γνωστό το a priori τυπικό σφάλμα της μοναδισίας μέτρησης, τότε δεν γίνεται ολικός έλεγχος, ενώ οι παρατηρήσεις ελέγχονται με τα αντίστοιχα στατιστικά μεγέθη που έχουν προκύψει από το a posteriori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους $\hat{\sigma}_o$ που εκτιμάται από τη συνόρθωση.

Έτσι, ελέγχονται τα στατιστικά μεγέθη $\hat{w}_i = \left| \frac{v_i}{\hat{\sigma}_{v_i}} \right|$, βάσει της **ταυ** κατανομής [13], όπου:

$$\hat{\sigma}_{v_i}^2 = \text{τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα} \\ \hat{V}_v = \hat{\sigma}_v^2 Q_v$$

Συνήθως, αντί της **ταυ** κατανομής, χρησιμοποιείται η **Student** με βαθμό ελευθερίας $r - 1$, [7], όπου αντί του στατιστικού μεγέθους \hat{w}_i , χρησιμοποιείται το:

$$\hat{w}'_i = \hat{w}_i \frac{\sqrt{r-1}}{\sqrt{r-\hat{w}_i^2}} \quad (3.1)$$

Το μέγεθος \hat{w}'_i συγκρίνεται με $t_{r-1, 1-\alpha_0/2}$, συνήθως για $\alpha_0 = 0.1\%$ για κλασικά δίκτυα.

2.5.2. Έλεγχος των παραμορφώσεων

Για τον έλεγχο των πιθανών παραμορφώσεων, ελέγχεται ο λόγος της διαφοράς από το πρότυπο τον προς έλεγχο μεγέθους προς το τυπικό του σφάλμα, βάσει της κανονικής κατανομής ή της κατανομής Student, ανάλογα με το αν χρησιμοποιείται το a priori ή το a posteriori τυπικό σφάλμα σ_o . Συνήθως επιλέγεται $\alpha = 5\%$.

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

3.1. Εισαγωγή

Ένα δίκτυο ελέγχου όμοιων απαιτήσεων με αυτές, που προδιαγράφηκαν στα προηγούμενα, ιδρύθηκε από το Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας (Ε.Γ.Γ.) του Τμήματος Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών (Τ.Α.Τ.Μ.) του Ε.Μ.Π. στο Ναύσταθμο Σαλαμίνας (Ν/Σ), στο χώρο ενός από τα υπόστεγα όπου συντηρούνται και επισκευάζονται υποβρύχια (ΥΒ) του Πολεμικού Ναυτικού (Π-Ν).

Ο σκοπός ίδρυσης του δίκτυου αυτού ήταν:

- Να προσδιορίσει τη θέση 96 «απρόσιτων» σημείων («σημείων ελέγχου»), που βρίσκονται στο πρόσθιο μέρος του σώματος ενός από τα ΥΒ του Π-Ν, σε σχέση με έναν από τους βασικούς θεωρητικούς άξονες του σκάφους (στα επόμενα θα αναφέρεται ως ΒΑΑ / Βασικός Άξονας Αναφοράς), με ακρίβεια καλύτερη από ± 2 mm, ταυτόχρονα με τον προσδιορισμό του άξονα αυτού [9], [11].
- Να αποτελέσει την υποδομή στο συγκεκριμένο υπόστεγο για γεωδαιτικές εργασίες ακριβείας σε σκάφη του Π-Ν (προσδιορισμό σημείων και αξόνων επ' αυτών με μεγάλη ακρίβεια, ευθυγραμμίσεις, παραλληλισμοί κ.λπ.).

Οι κορυφές του δικτύου ελέγχου έπρεπε να υλοποιηθούν με τρόπο, ώστε:

- Να υπάρχουν οι μέγιστες δυνατές ορατότητες από τις κορυφές του δικτύου ελέγχου προς τα 96 προς προσδιορισμό σημεία, με δεδομένες τις δυσκολίες που προκαλούν τα ικριώματα που περιβάλλουν το σκάφος (ελάχιστη απαίτηση: κάθε ένα από τα 96 σημεία να φαίνεται από 3 τουλάχιστον κορυφές του δικτύου ελέγχου). Επίσης, να εξασφαλίζονται οι μέγιστες δυνατές ορατότητες προς 2 σημεία πάνω στο κατάστρωμα του YB (σημεία του κατακορύφου επιπέδου που περιέχει ο BAA) [9].
- Να εξασφαλίζονται σταθερότητα και ακρίβεια κέντρωσης των γεωδαιτικών οργάνων, ώστε να μπορούν να επιτευχθούν υψηλές ακρίβειες.
- Να εξασφαλίζονται τη σταθερή γεωμετρία του δικτύου, χωρίς να είναι μόνιμα εγκαταστημένες στο υπόστεγο, ώστε να μην ενοχλούν ή να κινδυνεύουν να καταστραφούν από άλλες εργασίες.
- Να είναι εύκολες πιθανές μικρές τροποποιήσεις - επεκτάσεις του δικτύου, ανάλογα με το μέγεθος, τη μορφή και τη θέση του εκάστοτε σκάφους που θα ανελκυσθεί για έλεγχο ή/και επισκευές στο συγκεκριμένο υπόστεγο.

Έτσι, έπρεπε να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν από το Ε.Γ.Γ. ειδικές βάσεις στήριξης και κέντρωσης των γεωδαιτικών οργάνων, που με απλούς τρόπους θα στηρίζονται στα υποστυλώματα του υπόστεγου, χωρίς καμιά μη αντιστρεπτή επέμβαση σε αυτά. Για τυχόν κορυφές του δικτύου που δεν θα ήταν τοποθετημένες στα υποστυλώματα, έπρεπε να κατασκευαστούν ειδικά μπουλόνια κέντρωσης, που θα ήταν τοποθετημένα μόνιμα στο δάπεδο του υπόστεγου.

Με δεδομένη τη μορφή του υπόστεγου και τις δυνατές θέσεις, στις οποίες μπορούσαν να τοποθετηθούν οι ειδικά σχεδιασμένες βάσεις, που θα υλοποιούσαν τις κορυφές του δικτύου ελέγχου, επελέγησαν τέτοιες θέσεις, ώστε να εξασφαλίζονται αμοιβαίες ορατότητες και τις μέγιστες δυνατές ορατότητες προς το σκάφος.

Συνολικά επιλέχθηκαν να τοποθετηθούν 6 στάσεις στον πρώτο όροφο του υπόστεγου (3 αριστερά και 3 δεξιά), 2 στο δεύτερο όροφο (1 αριστερά και 1 δεξιά), 2 στον τρίτο όροφο (1 αριστερά και 1 δεξιά) και 1 στο δάπεδο στην είσοδο του υπόστεγου. Στις στάσεις αυτές, για τον έλεγχο κάθε σκάφους, κάθε φορά θα προστίθενται 2 στάσεις πάνω στο κατάστρωμα του σκάφους (που είναι τα υλοποιημένα σημεία του BAA) και, ανάλογα με τις εργασίες που θα πρέπει κάθε φορά να γίνουν, 4 στάσεις στις εξόδους τεσσάρων από τους τορπιλοσωλήνες του YB. Οι 17 κορυφές του δικτύου ελέγχου, που επελέγησαν στην περίπτωση του συγκεκριμένου YB, φαίνονται στο σχήμα 1. Το δίκτυο ελέγχου και τα 96 προς προσδιορισμό σημεία φαίνονται σε οριζόντιογραφία στο σχήμα 2.

Για να επιτευχθεί η προδιαγεγραμμένη ακρίβεια (καλύτερη των ± 2 mm) στον προσδιορισμό των καρτεσιανών συντεταγμένων των κορυφών του δικτύου, έγινε **βελτιστοποίηση** (μέσω των προγραμμάτων OPT2D και OPT3D, [4]), από όπου προέκυψαν ο αριθμός των παρατηρήσεων (αριθμός διευθύνσεων, κατακορύφων γωνιών και πλευρών που έπρεπε να μετρηθούν) και οι ακρίβειες των γεωδαιτικών οργάνων που θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν για τις μετρήσεις (γωνιομετρικά όργανα απόδοσης 0.1 mgon και όργανα μέτρησης μηκών ακρίβειας ± 3 mm για μήκη μικρότερα των 100 m).

3.2. Κατασκευές

Από το Ε.Γ.Γ. σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν **ειδικές μεταλλικές βάσεις κέντρωσης των γεωδαιτικών οργάνων**, οι οποίες πακτώθηκαν στα υποστυλώματα του υποστέγου. Σε αυτές υπάρχει σύστημα εξαναγκασμένης κέντρωσης του οργάνου, με αποτέλεσμα αυτό να τοποθετείται στην ίδια ακριβώς θέση κάθε φορά. Οι βάσεις αυτές στηρίζονται σε ράβδους μήκους 35 cm με μια ελαφριά κλίση ως προς την κάθετο στο υποστύλωμα, και αυτό για να είναι καλύτερες οι ορατότητες του παρατηρητή. Υπάρχει, επίσης, βραχίονας αντιστρήιξης των βάσεων για την αποφυγή ταλαντώσεων ή και παραμορφώσεων, δεδομένου ότι τα όργανα, που τοποθετήθηκαν επάνω τους, ζυγίζουν περίπου 10 Kgr (σχήμα 3).

Στις επιλεγμένες θέσεις των υποστυλώματων του υποστέγου συγκολλήθηκαν μόνιμα ελάσματα, στα οποία οι βάσεις αυτές βιδώνουν σταθερά κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των γεωδαιτικών μετρήσεων και αφαιρούνται μετά τη λήξη τους.

Οι βάσεις, που τοποθετήθηκαν στις εξόδους των τεσσάρων τορπιλοσωλήνων, κατασκευάστηκαν με τις ίδιες αρχές, μόνο που πακτώθηκαν επάνω στο σώμα του YB.

Επειδή οι πλευρές του υλοποιημένου δικτύου ήταν πολύ μικρές, οι κοινοί στόχοι γωνιομετρήσεων δημιουργούσαν μεγάλες αβεβαιότητες στις σκοπεύσεις. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν **ορειχάλκινοι στόχοι κωνικής μορφής** ύψους 3 cm, οι οποίοι μπορούν να τοποθετηθούν στις βάσεις και υλοποιούν τα σημεία σκόπευσης με πολύ μεγάλη ακρίβεια (σχήμα 4).

3.3. Μετρήσεις

Τα όργανα, που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις, ήταν:

- Ηλεκτρονικό θεοδόλοιχο Leica T1610 με ελάχιστη ανάγνωση γωνιών $1^{\circ c}$ και ακρίβειες γωνιών $\pm 5^{\circ c}$ (κατά DIN 18723) [12].
- Επιβατικό όργανο E.D.M. Leica DIOR 3002S, με ακρίβεια στη μέτρηση του μήκους ± 3 mm ± 3 ppm. Το όργανο αυτό έχει τη δυνατότητα μέτρησης του μήκους τόσο πάνω σε ειδικό στόχο (κατάφωτο) (εμβέλεια έως 8 km) όσο και σε οποιαδήποτε επιφάνεια χωρίς τη χρήση καταφώτου (μέχρι τα 200 περίπου μέτρα), όπου θα πρέπει να

- προσδιορίζεται η πιθανή σταθερά της τυχαίας επιφάνειας πρόσπτωσης [12].
- Γεωδαιτικός Σταθμός (Total Station) Leica TC1600 με ελάχιστη ανάγνωση γωνιών 1° και ακρίβειες γωνιών $\pm 5^{\circ}$ (κατά DIN 18723) και με ακρίβεια μηκών $\pm 3\text{mm}$ $\pm 3\text{ppm}$ [12].
 - Στόχοι στους οποίους ήταν προσαρμοσμένο ειδικό πρίσμα (κατάφωτο) για την ηλεκτρομαγνητική μέτρηση των μηκών.
 - Ειδικά κατασκευασμένοι γωνιομετρικοί στόχοι.
 - Μεταλλική μετροταινία διπρημένη ανά 0.5 mm.
 - Χωροβάτης Wild NA2 και τα απαραίτητα παρελκόμενα, για την υψομετρική σύνδεση με γεωμετρική χωροστάθμηση των κορυφών του δικτύου ελέγχου στους τρεις ορόφους του υποστέγου [12].

Πριν από τις μετρήσεις, όλα τα όργανα ελέγθηκαν για την ακρίβεια των μετρούμενων μεγεθών και για τη σωστή λειτουργία τους, σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές ISO / DIN 12857-2 και 12857-3 [10], στους ειδικά διαμορφωμένους εργαστηριακούς χώρους του Τ.Α.Τ.Μ.

Τα στοιχεία που μετρήθηκαν είναι ανεξάρτητες διευθύνσεις, κατακόρυφες γωνίες και κεκλιμένα μήκη μεταξύ των κορυφών.

Οι γωνιομετρήσεις έγιναν με τη μέθοδο των πλήρων περιστροφών σε δύο πλήρεις περιόδους. Σε κάθε σκόπευση, όπου αυτό ήταν δυνατό, γινόταν και μέτρηση του κεκλιμένου μήκους. Επιπλέον μετρήθηκαν τα μήκη μεταξύ των κορυφών 101, 102 και 103 και 108, 109 και 110 με τη μεταλλική μετροταινία, σε μετάβαση και επιστροφή (μήκη της τάξης των 8 και 16 m). Στην περίπτωση αυτή, οι κορυφές είχαν επισημανθεί με ειδικά κατασκευασμένους μικρούς κώνους τοποθετημένους σε τρικόχλια, ώστε να εξασφαλίζεται η κατακορυφότητα του άξονά τους.

3.4. Επιλύσεις - Συνορθώσεις

Η απαίτηση από το χρήστη ήταν ο προσδιορισμός των θέσεων των σημείων σε δύο διαστάσεις, όμως για καθαρά ερευνητικούς λόγους έγιναν δύο προσδιορισμοί, στις 2 (x, y) και τις 3 (x, y, z) διαστάσεις.

Ορίστηκε ως σύστημα αναφοράς ένα αυθαίρετο καρτεσιανό σύστημα, με σταθερή την κορυφή 116 του δικτύου ελέγχου (σχ. 1) και σταθερή διεύθυνση την πλευρά 116 - 115 του δικτύου. Θεωρήθηκαν:

$$x_{116} = 100.000 \text{ m}, y_{116} = 100.000 \text{ m}, z_{116} = 16.766 \text{ m}$$

$$a_{116-115} = 100^{\circ}.$$

Οι κορυφές 116 και 115 ήταν τα 2 υλοποιημένα στο κατάστρωμα του YB σημεία του κατακορύφου επιπέδου που περιέχει τον BAA [9], [11]. Το υψόμετρο της 116 δόθηκε με βάση τη γεωμετρική χωροστάθμηση που έγινε γύρω από το YB.

Στο επιλεγμένο αυθαίρετο καρτεσιανό σύστημα αναφοράς υπολογίστηκαν, με βάση τις συντεταγμένες των 116 και 115, οι προσωρινές συντεταγμένες (x, y, z) των κορυφών του ενιαίου δικτύου.

Προσδιορίστηκαν:

- Σε ενιαία επίλυση οι ορθογώνιες συντεταγμένες (x, y, z) των 17 κορυφών του δικτύου ελέγχου και των 96 σημείων του YB. Το διδιάστατο γεωδαιτικό δίκτυο των 113 κορυφών επιλύθηκε με τις ελάχιστες εξωτερικές δεσμεύσεις, με τη χρήση του προγράμματος ADJ3D [4]. Το πρόγραμμα αυτό δίνει ως τελικά αποτελέσματα:

- Το a posteriori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους $\hat{\sigma}_o$.
- Τις τελικές συντεταγμένες \hat{x} των κορυφών του δικτύου.
- Τον τελικό πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των $V_{\hat{x}}$ κορυφών του δικτύου.
- Στατιστικό έλεγχο των παρατηρήσεων για επίπεδο σημαντικότητας 5%.
- Τον αριθμό πλεονασμού κάθε παρατήρησης και το μέσο αριθμό πλεονασμού του δικτύου.

- Σε ενιαία επίλυση οι ορθογώνιες συντεταγμένες (x, y) των 17 κορυφών του δικτύου ελέγχου και των 96 σημείων του YB, σε αυθαίρετο καρτεσιανό σύστημα αναφοράς. Το διδιάστατο γεωδαιτικό δίκτυο των 113 κορυφών επιλύθηκε με τις ελάχιστες εξωτερικές δεσμεύσεις, με τη χρήση του προγράμματος ADJ2D [4]. Το πρόγραμμα αυτό δίνει ως τελικά αποτελέσματα:

- Το a posteriori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους $\hat{\sigma}_o$.
- Τις τελικές συντεταγμένες \hat{x} των κορυφών του δικτύου.
- Τον τελικό πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας $V_{\hat{x}}$ των κορυφών του δικτύου.
- Στατιστικό έλεγχο των παρατηρήσεων για επίπεδο σημαντικότητας 5%.
- Τις απόλυτες ελλείψεις σφάλματος των κορυφών του δικτύου.
- Τις σχετικές ελλείψεις σφάλματος μεταξύ των κορυφών που έχουν επιλεγεί.
- Τον αριθμό πλεονασμού κάθε παρατήρησης και το μέσο αριθμό πλεονασμού του δικτύου.

- Από τις τελικές συντεταγμένες (x, y), που προέκυψαν από την επίλυση του διδιάστατου δικτύου, υπολογίστηκαν στο ορίζοντιο επίπεδο για τα 96 σημεία ελέγχου του YB:

- Οι αποστάσεις A από το κατακόρυφο επίπεδο που περιέχει τον BAA, οι οποίες, από τον ορισμό του συστήματος αναφοράς, αντιστοιχούν στις τεταγμένες για των σημείων (σχ. 2).
- Οι αποστάσεις C πάνω στον BAA (πλευρά 116 - 115 του δικτύου ελέγχου) από τον άξονα Y που διέρχεται από την κορυφή 116 (σχ. 2).

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα τελικά αποτελέσματα συνοψίζονται στα παρακάτω:

- Οι αρχικές επιλογές των βαρών (προεκτιμήσεις των ακριβειών των μετρημένων μεγεθών) ήταν επιτυχείς.

Προέκυψαν οι τιμές:

$$\text{- για το 3D δίκτυο: } \frac{\hat{\sigma}_o^2}{\sigma_o^2} = \pm 1.11$$

$$\text{- για το 2D δίκτυο: } \frac{\hat{\sigma}_o^2}{\sigma_o^2} = \pm 0.98$$

- Ο έλεγχος για χονδροειδή σφάλματα ήταν επιτυχής.
- Ο μέσος αριθμός πλεονασμού που υπολογίστηκε ήταν για μεν την περίπτωση του 3D δίκτυου 0.6, για δε την περίπτωση του ενιαίου 2D δίκτυου 0.7, ενώ οι δυσμενέστεροι αριθμοί πλεονασμού ήταν της τάξης του 0.4 σε 4 παρατηρήσεις από το σύνολο των 504. Τόσο οι μέσοι αριθμοί πλεονασμού όσο και οι αριθμοί πλεονασμού των παρατηρήσεων και στα 2 δίκτυα που επιλύθηκαν κρίνονται ικανοποιητικοί.
- Οι τελικές ακρίβειες που επετεύχθησαν ήταν:
στις συντεταγμένες του 3D δίκτυου: $\pm 1.0 \div \pm 1.3$ mm
στις συντεταγμένες του 2D δίκτυου: $\pm 0.8 \div \pm 1.1$ mm
στον προσδιορισμό των αποστάσεων A και C:
 $\pm 1.2 \div \pm 1.8$ mm.

Οι ακρίβειες αυτές πληρούν την προδιαγεγραμμένη απαίτηση των ± 2 mm.

Όπως απέδειξαν τα τελικά αποτελέσματα, η γεωδαιτική διαδικασία που ακολουθήθηκε (σχεδιασμός δικτύου, διαδικασία παρατηρήσεων και υπολογισμών) υπήρξε επιτυχής. Οι ειδικές κατασκευές (στόχοι και βάσεις κέντρωσης των οργάνων), που σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν από το Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας του Τ.Α.Τ.Μ.-Ε.Μ.Π., λειτούργησαν και απέδωσαν τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Η διαδικασία, που περιγράφεται στην εφαρμογή αυτή, έχει ήδη εφαρμοστεί και σε δεύτερο YB του Π-Ν με τα ίδιας τάξης ακρίβειας αποτελέσματα, αλλά σε πολύ πιο σύντομο χρονικό διάστημα. Η πρώτη εφαρμογή της απαίτησε 2 μήνες προετοιμασία στο χώρο των μετρήσεων και στο γραφείο, 5 ημέρες για την εκτέλεση των μετρήσεων και 10 ημέρες για την επεξεργασία των μετρήσεων και την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων, ενώ η δεύτερη εφαρμογή απαίτησε 15 ημέρες, 3 ημέρες και 1 εβδομάδα αντίστοιχα.

Συνοπτικά, τονίζονται τα εξής:

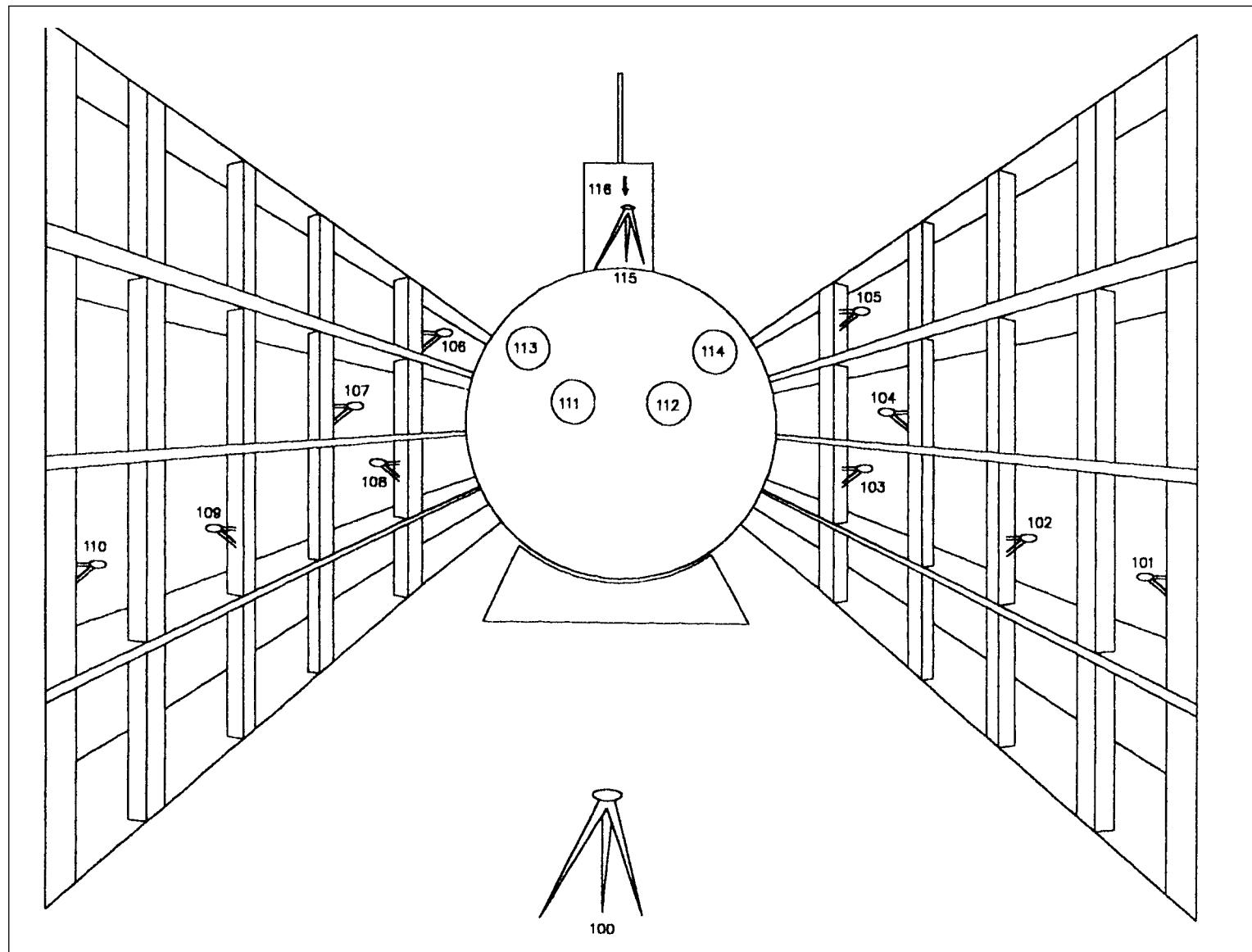
- Κάθε μία περίπτωση ελέγχου βιομηχανικού παραγώγου με γεωδαιτική διαδικασία πρέπει να θεωρείται ξεχωριστή και να αντιμετωπίζεται ως τέτοια.

- Πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των οργάνων και κυρίως των παρελκομένων, και στη σχολαστική εκτέλεση των μετρήσεων, ώστε να εξασφαλίζονται οι υψηλές απαιτήσεις ακριβείας. Απαραίτητα, τα όργανα που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να βαθμονομούνται (διακριβώνονται) πριν και μετά την εκτέλεση των μετρήσεων.
- Στην επίλυση των δικτύων περιορισμένου πεδίου (αποστάσεις μεταξύ κορυφών από μερικές δεκάδες εκατοστά μέχρι μερικές δεκάδες μέτρα) υψηλών προδιαγραφών ακριβείας με τη μέθοδο μεταβολής των συντεταγμένων της M.E.T., ο προσδιορισμός των προσωρινών συντεταγμένων των κορυφών είναι κρίσιμος.
- Πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων, ώστε πιθανοί θόρυβοι να μην λαμβάνονται ως παραμορφώσεις (έλεγχος χονδροειδών σφαλμάτων - υπολογισμός του αριθμού πλεονασμού κάθε παρατήρησης).

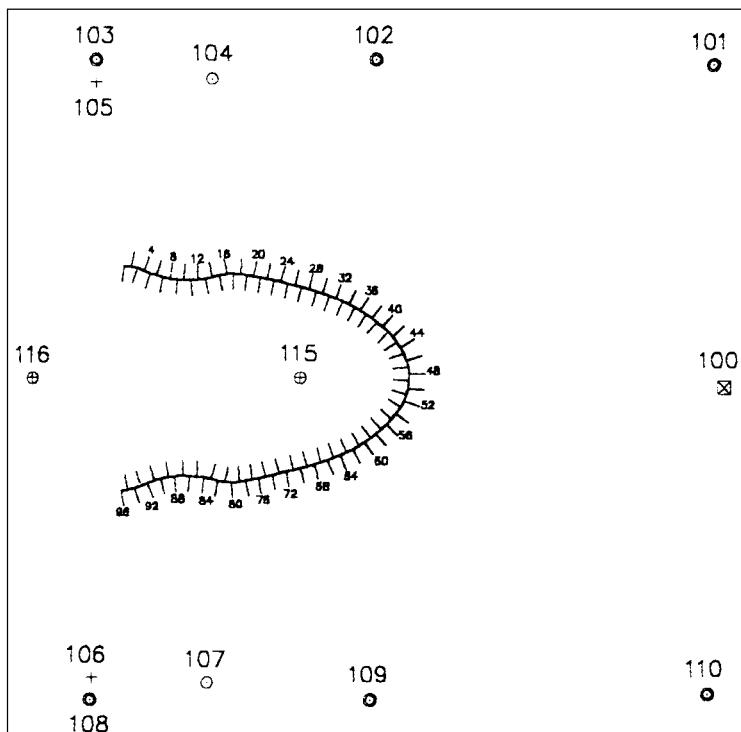
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν:

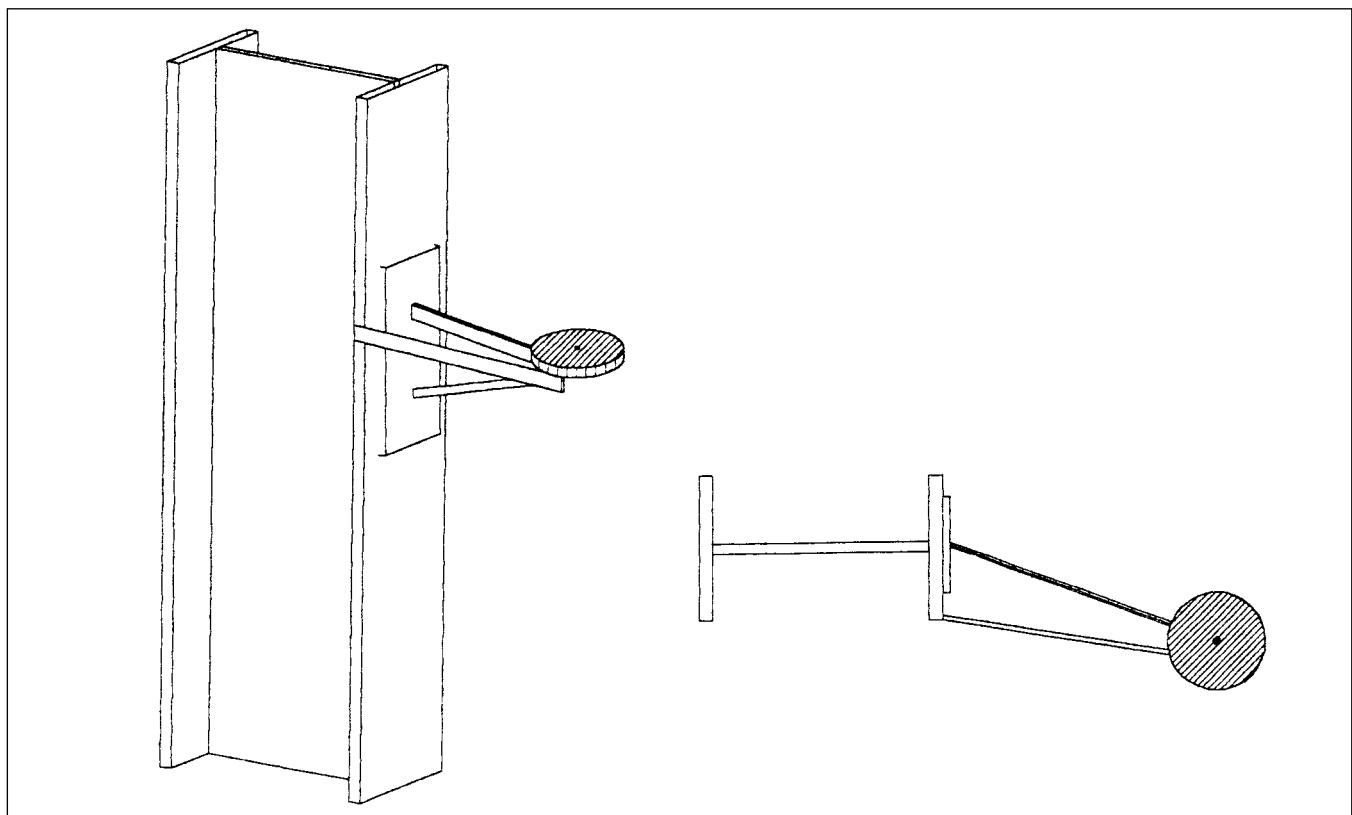
- a) Το προσωπικό του N/S και ιδιαίτερα το προσωπικό του προγράμματος NEPTUNE για τη συνεργασία.
- b) Τον κ. Α. Σιούλη, A.T.M., υποψήφιο διδάκτορα Ε.Μ.Π., για την επιμέλεια των σχημάτων.



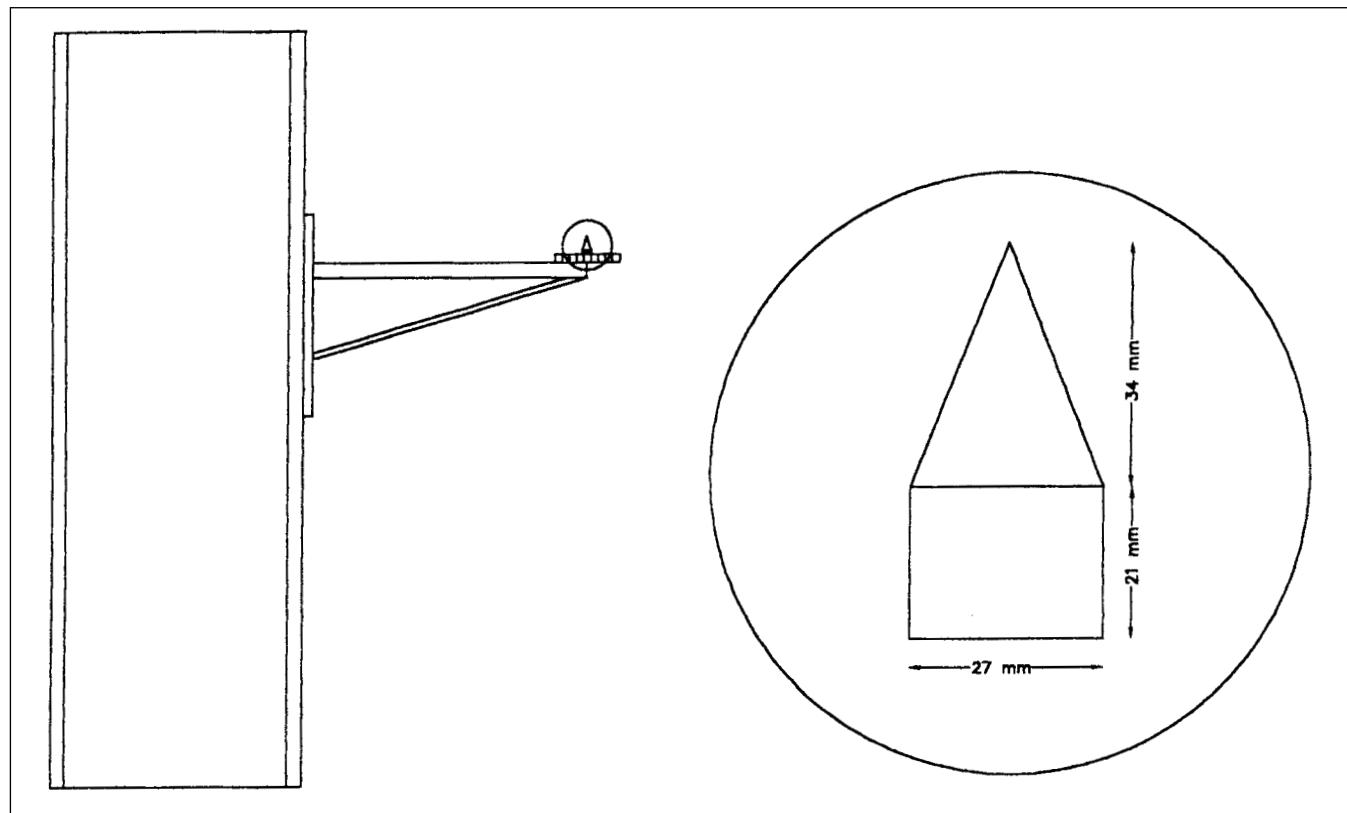
Σχήμα 1: Οι 17 κορυφές των δικτύων αναφοράς.
Figure 1: The 17 reference points of the network.



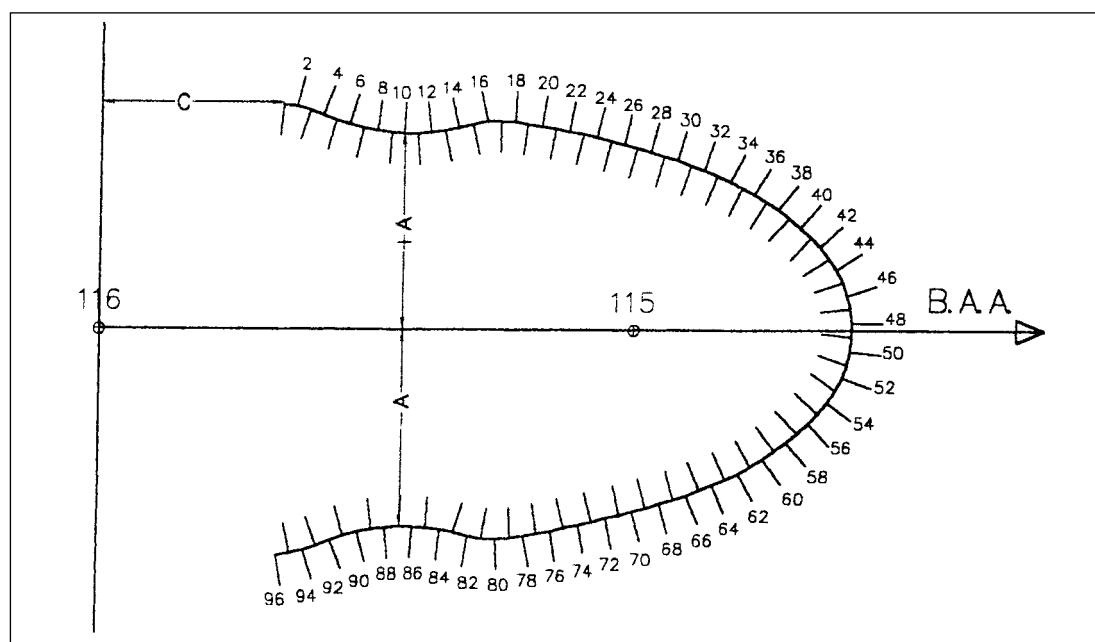
Σχήμα 2: Οι 13 κορυφές αναφοράς από τις οποίες προσδιορίστηκαν οι θέσεις των 96 σημείων ελέγχου.
Figure 2: The 13 reference points from where the positions of the 96 control points were determined.



Σχήμα 3: Ειδικές βάσεις στήριξης και κέντρωσης γεωδαιτικών οργάνων.
Figure 3: Special construction for the centering of geodetic instruments.



Σχήμα 4: Ειδικά κατασκευασμένοι ορειχάλκινοι στόχοι κωνικής μορφής.
Figure 4: Special constructed targets for angle measurements.



Σχήμα 5: Αποστάσεις των σημείων ελέγχου από τον B.R.A.
Figure 5: Distances of the control points from the B.R.A.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αγατζά-Μπαλοδήμου Α.-Μ.: «Θεωρία Σφαλμάτων και Μ.Ε.Τ.», Διδακτικές Σημειώσεις Τ.Α.Τ.Μ.-Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1989.
2. Αγατζά-Μπαλοδήμου Α.-Μ.: «Ειδικά Θέματα Θεωρία Σφαλμάτων και Μ.Ε.Τ.», Διδακτικές Σημειώσεις Τ.Α.Τ.Μ.-Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1996.
3. Αγατζά-Μπαλοδήμου Α.-Μ.: «Θεωρία Σφαλμάτων και Συνορθώσεις II», Διδακτικές Σημειώσεις Τ.Α.Τ.Μ.-Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1999.
4. Αγατζά-Μπαλοδήμου Α.-Μ.: «Προγράμματα H/Y σε QB 45», 1996.
5. Baarda W.W.: «A testing procedure for use in Geodetic Networks», **New Series, vol. 2, No 5**, Delft University of Technology, 1968.
6. Cross P.A.: «Advanced Least Squares applied to Position-Fixing», Polytechnic of East London, Working Paper No 6, 1990.
7. Forstner W.: «The Reliability of Block Triangulation», Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1985.
8. Kavouras M.: «On the detection and the determination of reliability in Geodetic Networks», University of New Brunswick, Technical Report No 87, 1982.
9. Μπαλοδήμος Δ.-Δ., Αγατζά-Μπαλοδήμου Α.-Μ., Σταθάς Δ., Δογγούρης Σ., Λάμπρου Ε.: "Προσδιορισμός και υλοποίηση με γεωδαιτική μεθοδολογία του βασικού άξονα αναφοράς σε υποβρύχιο", **Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση TEE, Σειρά I, τόμ. 19**, τεύχ. 3, σελ. 103-111.
10. Μπαλοδήμος Δ.-Δ., Σταθάς Δ.: «Γεωδαιτικά όργανα και μέθοδοι μέτρησης γωνιών και μηκών», Διδακτικές Σημειώσεις Τ.Α.Τ.Μ.-Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1993.
11. Πολεμικό Ναυτικό: «Οδηγίες - Προδιαγραφές».
12. Prospectus Γεωδαιτικών Οργάνων.
13. Pope A.: «The statistics of Residuals and the detection of Outliers», N.O.A.A., Rockville, 1976.
14. Rainsford H.F.: «Survey Adjustments and Least Squares Method», Constable Company Ltd., London, 1968.
15. Strang Van Hees G.L.: «Testing of Geodetic Networks», Delft University of Technology, Radio Positining on Sea.

Α.-Μ. Αγατζά-Μπαλοδήμου,

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π., Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Τομέας Τοπογραφίας, Εργαστήριο Ανώτερης και Δορυφορικής Γεωδαισίας, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου.

Δ.-Δ. Μπαλοδήμος,

Καθηγήτρις Ε.Μ.Π., Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Τομέας Τοπογραφίας, Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου.

Ο. Αραμπατζή,

Επιστημονικός συνεργάτης Ε.Μ.Π., Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Τομέας Τοπογραφίας, Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου.

Δ. Σταθάς,

Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π., Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Τομέας Τοπογραφίας, Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου.

Extended summary

Geodetic Control Networks for Industrial Products. Application on a Submarine

A.-M. AGATZA-BALODIMOU

Professor N.T.U.A.

O. ARABATZI

Scientific Collaborator N.T.U.A.

D.-D. BALODIMOS

Professor N.T.U.A.

D. STATHAS

Assistant Professor N.T.U.A.

Abstract

The present paper deals with the procedure followed in order to detect discrepancies in the geometry of industrial products from their specified shape. As an application, the procedure followed in order to determine the position of 96 points established on the body of a submarine relative to one of its main theoretical axes is presented.

1. INTRODUCTION

The rapid development of geodetic instrumentation and techniques during the last decade has allowed for the application of geodetic methods for monitoring several industrial products. Thus, the special branch of Industrial Geodesy has been developed, dealing with the detection of discrepancies in the geometry of industrial products from their specified shape or their deformations occurring with time, by precise and reliable geodetic measurements.

2. THEORETICAL PROCEDURE

In order to determine the relative positions of points or their distances from predefined axes or planes there is a need for establishing, measuring and adjustment of horizontal, vertical or 3D geodetic control networks, consisting of reference points established in the area immediately around the object and control points on the object.

As the area around the object is usually limited, the geometry of these networks is far from optimal, while the distances between points are very short. Thus, in order to achieve the desired accuracy, which is of the order of a few millimeters, high precision instrumentation should be used and provision should be made for the appropriate centering devices and targets.

The elements measured are usually directions or angles (horizontal and vertical), and distances, provided that their

accuracy is compatible with that of angles. In vertical and 3D networks height differences may also be measured by geometric leveling. In the case of only angular measurements the scale of the networks is provided by special invar rods equipped with targets at both ends for short range observations.

It is recommended to include both reference and control points in a simultaneous least square adjustment by the method of Variation of Coordinates with the minimum set of constraints, while an optimization of the network should be attempted before the measurements.

In the case of networks created for the detection of discrepancies from the specified geometry of the object, the optimization deals with the uncertainties in the relative positions of control points or of their distances from predefined axes or planes as compared with the anticipated discrepancies. In the process of optimization, provision should also be made for maximum controllability and sensitivity, which is achieved by maximizing the redundancy numbers of the observations.

Measurements and adjustment should be followed by the appropriate statistical tests for gross and systematic errors, while the computed discrepancies should be tested against their standard errors in order to test their significance.

3. APPLICATION

The presented application deals with the procedure followed in order to determine the position of the 96 hydrophones of a submarine relative to one of its main theoretical axes, the so called «Basic Reference Axis - BRA» with an accuracy better than ± 2 mm.

The submarine was positioned in a hangar which did not allow for a large variety of choices concerning the reference points of the network.

Finally, 17 reference points were selected (fig. 1) after an optimization. Fourteen of the reference points were established on the metal pillars of the hangar, distributed in 3 levels and materialized by special constructions (fig. 3). The last 3 of the reference points were materialized by tripods, 2 of which were also points on the line which is the intersection of the vertical plane containing the BRA with the deck of the ship.

The total network consisted of 113 points (17 reference and 96 control points) (fig. 2). Each of the 96 control point could be observed from at least three reference points.

Measurements of horizontal and vertical angles and of slope distances were carried out using electronic digital instrumentation. All instruments were checked and adjusted before and after the measurements, according to ISO / DIN 12857-2 and 12857-3.

4. RESULTS

Two least square adjustments by the method of Variation of Coordinates with the minimum set of constraints were carried out, one for the 2D and one for the 3D network.

The final results are:

⇒ The initial weights were successfully selected:

$$\begin{cases} 3D \text{ network: } \frac{\hat{\sigma}_o^2}{\sigma_o^2} = 1.11 \\ 2D \text{ network: } \frac{\hat{\sigma}_o^2}{\sigma_o^2} = 0.98 \end{cases}$$

- ⇒ The statistical tests for gross errors were successful.
- ⇒ The calculated mean redundancy numbers were 0.6 for the 3D and 0.7 for the 2D network, which are considered as satisfactory.
- ⇒ The final achieved accuracies were:
 - * $\pm 1.0 \div \pm 1.3$ mm, for the coordinates of the 3D network.
 - * $\pm 0.8 \div \pm 1.1$ mm, for the coordinates of the 2D network.
 - * $\pm 1.2 \div \pm 1.8$ mm, for the determination of the distances A and C (fig. 2).

These results fulfill the desired accuracy of ± 2.0 mm.

As the final results show, the geodetic procedure which was followed (optimization of the network, measurements and adjustment) was successful.

Finally, it should be pointed out that:

- A geodetic control network for a special industrial product should be considered as unique.
- The instrumentation used should fulfil the appropriate standards of accuracy; before and after the measurements, all instruments should be properly calibrated.
- The accuracy of the provisional coordinates is critical in the case of short range geodetic networks.
- Special care should be taken in the statistical testing of observations and results, to avoid the confusion of discrepancies with noise.

A.-M. Agatza-Balodimou,

Professor N.T.U.A., Department of Rural and Surveying Engineering, Section of Topography, Laboratory of Higher and Satellite Geodesy, 9, Iroon Polytechniou str., 157 80, N.T.U.A. Campus, Zografos, Athens.

D.-D. Balodimos,

Professor N.T.U.A., Department of Rural and Surveying Engineering, Section of Topography, Laboratory of General Geodesy, 9, Iroon Polytechniou str., 157 80, N.T.U.A. Campus, Zografos, Athens.

O. Arabatzi,

Scientific collaborator N.T.U.A., Department of Rural and Surveying Engineering, Section of Topography, Laboratory of General Geodesy, 9, Iroon Polytechniou str., 157 80, N.T.U.A. Campus, Zografos, Athens.

D. Stathas,

Assistant professor N.T.U.A., Department of Rural and Surveying Engineering, Section of Topography, Laboratory of General Geodesy, 9, Iroon Polytechniou str., 157 80, N.T.U.A. Campus, Zografos, Athens.