

Η παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα, κατά τις εργασίες αποκατάστασης

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΠΑΝΤΑΖΗΣ

Δρ. Αγρονόμος & Τοπογράφος Μηχ. ΕΜΠ
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ
e-mail: gpanta@central.ntua.gr

ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ ΛΑΜΠΡΟΥ

Δρ. Αγρονόμος & Τοπογράφος Μηχ. ΕΜΠ
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ
e-mail: litsal@central.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται, η μεθοδολογία και η μορφή των αποτελεσμάτων ως διαγράμματα και πίνακες της συστηματικής παρακολούθησης της κινηματικής συμπεριφοράς του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα, κατά τη διάρκεια των εργασιών αποκατάστασης (2016 - 2017), οι οποίες πραγματοποιήθηκαν από ερευνητική ομάδα του ΕΜΠ, σε χρονικό διάστημα λιγότερο του ενός έτους.

Για τις ανάγκες της παρακολούθησης (monitoring) εγκαταστάθηκε ένα τριδιάστατο γεωδαιτικό δίκτυο, του οποίου οι κορυφές σημάνθηκαν με ειδικό τρόπο.

Η παρακολούθηση υλοποιήθηκε με δυο διαδικασίες, με τη χρήση κατάλληλου ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού που παρέχει αβεβαιότητα $\pm 1''$ στη μέτρηση των διευθύνσεων και $\pm 1\text{mm}$ στη μέτρηση του μήκους.

Στην πρώτη διαδικασία (στατική) το δίκτυο μετράται σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, επιλύεται ως τριδιάστατο και γίνεται έλεγχος απόλυτης και σχετικής μετακίνησης των κορυφών του.

Η αβεβαιότητα προσδιορισμού (1σ) των συντεταγμένων x , y κυμαίνεται από $\pm 0.1\text{mm} - \pm 0.3\text{mm}$ και H από $\pm 0.1\text{mm} - \pm 0.2\text{mm}$. Αυτό σημαίνει ότι το δίκτυο μπορεί να ανιχνεύσει μετακινήσεις της τάξης του 1mm για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Με ειδική μεθοδολογία προσδιορίζεται το ύψος οργάνου του γεωδαιτικού σταθμού, όταν αυτός τοποθετείται στις κορυφές του δικτύου με αβεβαιότητα $\pm 0.3\text{mm}$.

Στη δεύτερη διαδικασία (δυναμική), πραγματοποιείται συνεχής μέτρηση -παρακολούθηση συγκεκριμένων σημείων του δικτύου. Ο γεωδαιτικός σταθμός τοποθετείται μόνιμα σε μια κορυφή του τριδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου και επικοινωνεί ενσύρματα με φορητό υπολογιστή που βρίσκεται τοποθετημένος δίπλα του.

Με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού επιτυγχάνεται, η οργάνωση του σεναρίου παρακολούθησης, η καταγραφή των μετρήσεων που πραγματοποιούνται προς τα επιλεγμένα σημεία, ο έλεγχος των μετρήσεων και η διαχείριση των αποτελεσμάτων.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της μεταβολής της θέσης των σημείων ελέγχου πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο, είτε με τη μορφή πινάκων, είτε με τη μορφή διαγραμμάτων ώστε να είναι δυνατή η άμεση λήψη αποφάσεων για την αποφυγή αστοχίας του μνημείου.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ιεροσόλυμα, Πανάγιος Τάφος, Ιερό Κουβούκλιο, Γεωδαιτικός σταθμός Υψηλής Ακρίβειας, monitoring, απόλυτη μετακίνηση, σχετική μετακίνηση, αβεβαιότητα.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρουσία του ανθρώπου στη γη διαχρονικά συνδέεται με την κατασκευή τεχνικών έργων που είναι απαραίτητα για την επιβίωσή του αλλά και την ανάπτυξη των δραστηριοτήτων του.

Τέτοια έργα είναι φράγματα, γέφυρες ή γεφύρια, μεγάλοι αυτοκινητόδρομοι, σήραγγες, ψηλά κτήρια, ιστορικά κτήρια, προκατασκευές, στάδια, θέατρα, κ.α

Πολλές επιστήμες ασχολούνται με τη μελέτη και τη λειτουργία αυτών των κατασκευών. Μια από αυτές είναι η Γεωδαισία. Συμβάλλει από τη δική της σκοπιά, με την καταγραφή -

τεκμηρίωση του μεγέθους και του σχήματος αυτών των κατασκευών αλλά και με την παρακολούθηση της μεταβολής της θέσης τους και της μορφής τους στο πέρασμα του χρόνου. Έτσι έχει δημιουργηθεί ένας ιδιαίτερος κλάδος της γεωδαισίας που ασχολείται με την ανάπτυξη κατάλληλων μεθοδολογιών για την παρακολούθηση της σταθερότητας ή της κινηματικής συμπεριφοράς τέτοιων κατασκευών. Η παρακολούθηση εκτελείται τόσο κατά τη διάρκεια των εργασιών κατασκευής όσο και μετά το τέλος τους. Ο κλάδος αυτός είναι διεθνώς γνωστός με τον όρο "monitoring" κατά την ελληνική ορολογία "*παρακολούθηση παραμορφώσεων (deformation) ή μετακινήσεων (displacements)*".

Στο πλαίσιο των ελέγχων και της διαχρονικής παρακολούθησης της συμπεριφοράς των κατασκευών, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων που σχετίζονται με τη μεταβολή της θέσης ενός σημείου και την αξιολόγησή της. Οι μέθοδοι αυτές αξιοποιούν στο έπακρο τα σύγχρονα συστήματα μέτρησης και στηρίζονται στην εγκατάσταση και την επιτυχή λειτουργία ενός γεωδαιτικού δικτύου, παρακολούθησης μετακινήσεων (μιας, δύο ή τριών διαστάσεων).

Η εγκατάσταση ενός γεωδαιτικού δικτύου σήμερα συνήθως προκύπτει από τη συνεργασία του Τοπογράφου Μηχανικού με επιστήμονες άλλων ειδικοτήτων (διεπιστημονική ομάδα). Και αυτό γιατί οι γνώσεις των άλλων επιστημόνων (γεωλόγων, γεωτεχνικών, αρχαιολόγων, χημικών, κ.α) είναι αυτή που θα καθοδηγήσει την επιλογή των βέλτιστων θέσεων εγκατάστασης των κορυφών του γεωδαιτικού δικτύου.

Αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα των ολοκληρωμένων συστημάτων μέτρησης, σήμερα είναι δυνατή η συνεχής παρακολούθηση σημείων που είναι εγκατεστημένα σε κρίσιμα σημεία μιας κατασκευής, η καταγραφή, μετάδοση και αξιολόγηση των μεταβολών που παρατηρούνται.

2. ΤΟ 3D ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΣΤΟ ΙΕΡΟ ΚΟΥΒΟΥΚΛΙΟ

Η εγκατάσταση του τριδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου πραγματοποιήθηκε τον Ιούλιο του 2016. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από 17 σημεία από τα οποία:

- a. **3 σημεία** τοποθετήθηκαν μόνιμα στον 1^ο όροφο της Ροτόντας (Γαλαρία Λατίνων), ώστε να έχουν ορατότητα τουλάχιστον ανά δύο σε όλα τα σημεία του Ιερού Κουβουκλίου. Αυτά τα σημεία υλοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας ειδικές μεταλλικές βάσεις (εικόνα 1) και μόνιμα τρικόχλια (εικόνα 2) με σκοπό να ελαχιστοποιηθούν – εξαιρεθούν τα σφάλματα κέντρωσης και οριζοντίωσης.

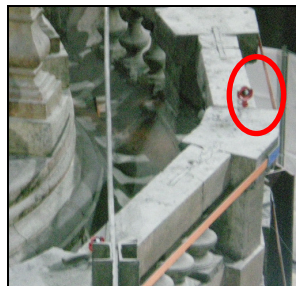


Εικόνα 1: Ειδική μεταλλική βάση



Εικόνα 2: Τρικόχλιο μόνιμα τοποθετημένο πάνω στη μεταλλική βάση

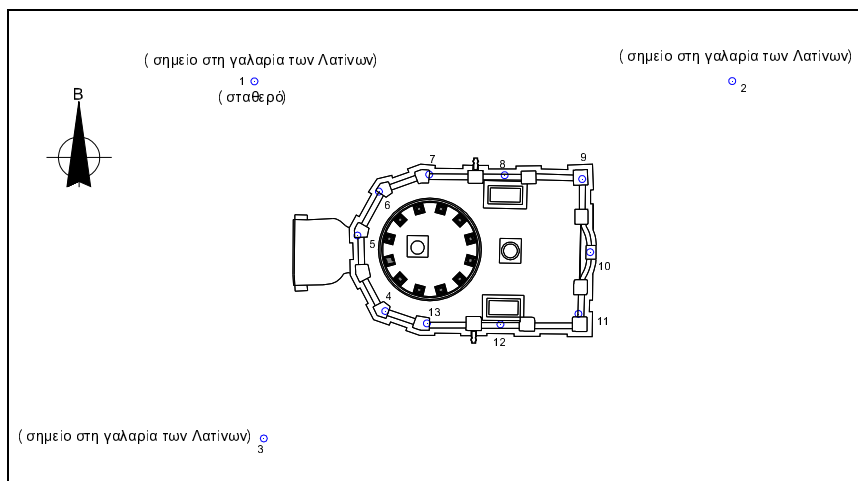
- b. **10 σημεία** τοποθετήθηκαν μόνιμα στην οροφή του Ιερού Κουβουκλίου, σε υψόμετρο περίπου 761.00m, χρησιμοποιώντας υψηλής ακρίβειας mini ανακλαστήρες (εικόνα 3).



Εικόνα 3: Σημεία στην οροφή του Ιερού Κουβουκλίου

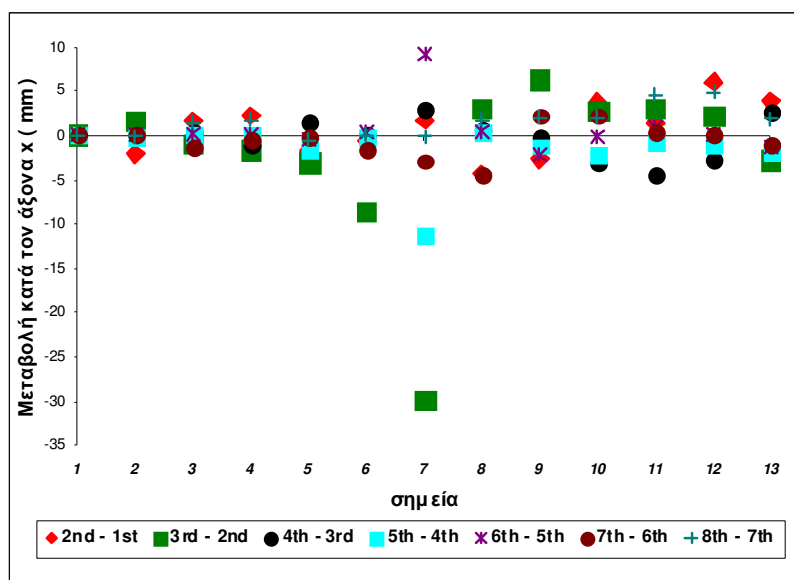
Τα 13 αυτά σημεία αποτελούν το τριδιάστατο δίκτυο παρακολούθησης μετακινήσεων, που χρησιμοποιήθηκε για την παρακολούθηση των μετακινήσεων - παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια των εργασιών αποκατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου αλλά και για την πραγματοποίηση όλων των γεωδαιτικών μετρήσεων ακριβείας σε κοινό σύστημα αναφοράς (σχήμα 1).

ε. Άλλα 4 σημεία τοποθετήθηκαν στην ανατολική όψη του Ιερού Κουβουκλίου με σκοπό τη συνεχή παρακολούθηση των μεταβολών τους κατά τη διάρκεια ανάταξης των πεσσών.

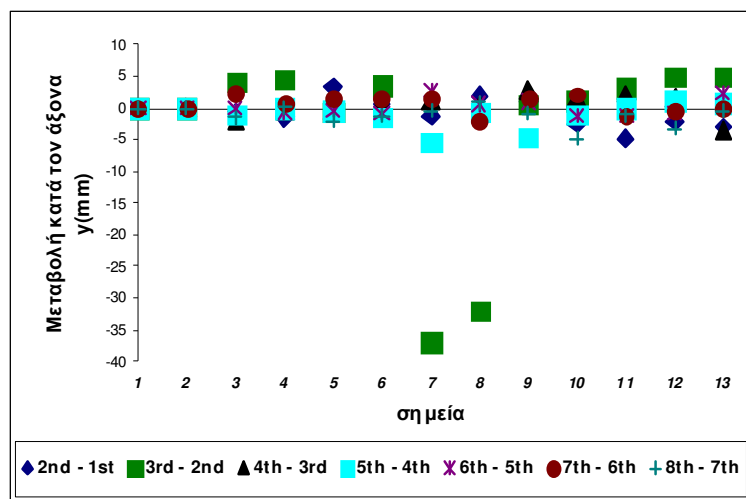


Σχήμα 1. Η μορφή του τριδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου

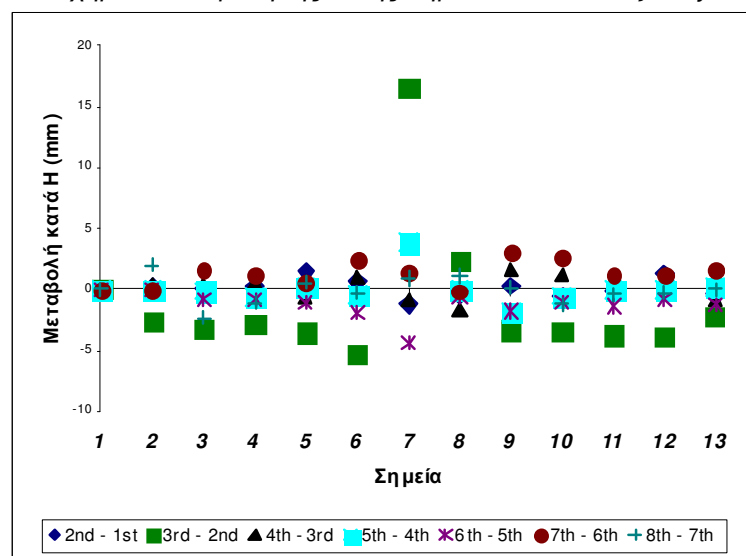
Το 3D γεωδαιτικό δίκτυο μετρήθηκε σε 8 διαφορετικές χρονικές στιγμές (φάσεις) στο χρονικό διάστημα 15 Ιουλίου 2016 – 11 Ιανουαρίου 2017, χρησιμοποιώντας τον γεωδαιτικό σταθμό υψηλής ακρίβειας Trimble S9 (μετρήθηκαν οριζόντιες γωνίες, κατακόρυφες γωνίες και μήκη). Οι συν/νες των σημείων προσδιορίστηκαν με αβεβαιότητα καλύτερη από $\pm 1\text{mm}$ για επίπεδο εμπιστοσύνης 99%.



Σχήμα 2 Μεταβολή της θέσης σημείων κατά τον άξονα x



Σχήμα 3 Μεταβολή της θέσης σημείων κατά τον άξονα y



Σχήμα 4 Υψομετρική μεταβολή της θέσης σημείων

Από τα σχήματα 2, 3 και 4 παρατηρούμε ότι:

- Οι μεταβολές κατά τον άξονα x κυμαίνονται κυρίως από -10mm έως 10mm
- Οι μεταβολές κατά τον άξονα y κυμαίνονται κυρίως από -6mm έως 6mm
- Οι κατακόρυφες μεταβολές κυμαίνονται κυρίως από -6mm έως 5mm

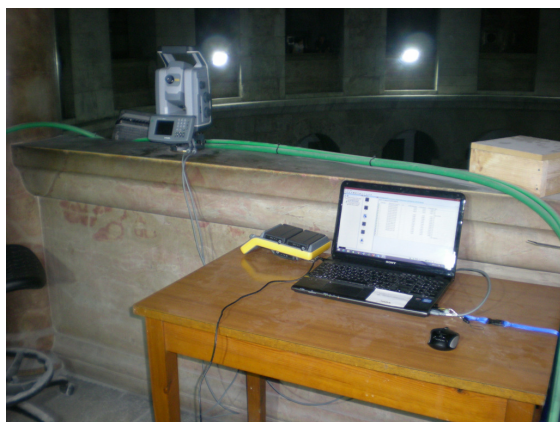
3. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΟΝΙΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ

Για τις ανάγκες της μόνιμης παρακολούθησης της κινηματικής συμπεριφοράς του Ιερού Κουβουκλίου, εγκαταστάθηκε ένα μόνιμο γεωδαιτικό σύστημα παρακολούθησης (monitoring).

Το σύστημα υλοποιήθηκε με τη χρήση του ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού Trimble S9, ο οποίος τοποθετείται μόνιμα στην κορυφή 2 του τριδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου, αφού από τη θέση αυτή είναι ορατό σχεδόν το σύνολο των σημείων που έχουν τοποθετηθεί στην οροφή του Ιερού Κουβουκλίου. Ο γεωδαιτικός σταθμός επικοινωνεί ενσύρματα με έναν φορητό υπολογιστή που βρίσκεται μόνιμα τοποθετημένος δίπλα του (εικόνα 3), όπου είναι εγκατεστημένο το λογισμικό Trimble 4D Control. Με το λογισμικό αυτό επιτυγχάνεται:

- i. Η επικοινωνία του Η/Υ με το γεωδαιτικό σταθμό
- ii. Η οργάνωση του σεναρίου παρακολούθησης
- iii. Η καταγραφή των μετρήσεων που πραγματοποιεί ο γεωδαιτικός σταθμός προς τα επιλεγμένα σημεία

- iv. Ο έλεγχος των μετρήσεων και η διαχείριση των δεδομένων
- v. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της μεταβολής της θέσης των σημείων ελέγχου, σε πραγματικό χρόνο, είτε με τη μορφή πινάκων, είτε με τη μορφή διαγραμμάτων.
- vi. Η λήψη αποφάσεων



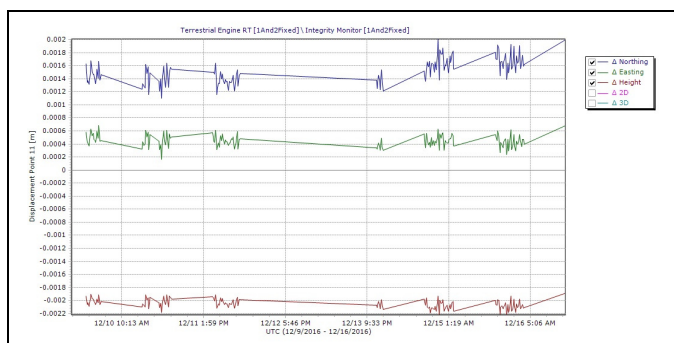
Εικόνα 3: το σύστημα παρακολούθησης σε λειτουργία

Ο φορητός υπολογιστής είναι συνδεδεμένος ενσύρματα ή ασύρματα με το διαδίκτυο, χρησιμοποιώντας το δίκτυο Internet που εγκαταστάθηκε στο χώρο των εργασιών. Έτσι είναι δυνατή η μεταφορά των δεδομένων αλλά και ο χειρισμός και ο έλεγχος του προγράμματος παρακολούθησης από οποιοδήποτε άλλο υπολογιστή εντός ή εκτός του ναού της Αναστάσεως. Αυτό σχεδιάστηκε να γίνεται:

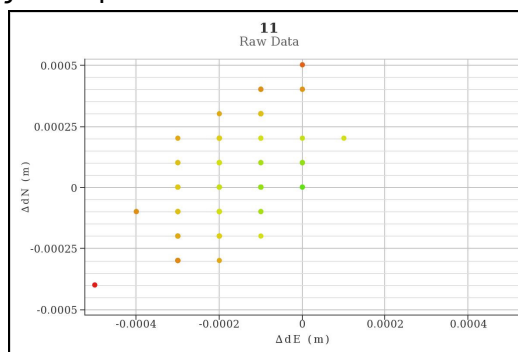
- είτε με τη χρήση του λογισμικού Team viewer με τη βοήθεια του οποίου οποιοσδήποτε απομακρυσμένος χρήστης, μπορεί να βλέπει και να αξιολογεί τα αποτελέσματα από το χώρο του γραφείου του
- είτε χρησιμοποιώντας το λογισμικό Trimble 4D Control, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα μέσω της εφαρμογής web transfer στον απομακρυσμένο χρήστη, μέσω διαδικτύου και αφού επιτευχθούν οι αντίστοιχες διαδικτυακές συνδεσμολογίες, να επικοινωνεί με τη βάση καταγραφής των μετρήσεων και να αξιολογεί τα αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο.

Σκοπός αυτής της συνδεσμολογίας είναι να παρακολουθείται η κινηματική συμπεριφορά του Ιερού Κουβουκλίου, κατά τη διάρκεια των εργασιών αποκατάστασης οι οποίες εκτελέστηκαν κυρίως βραδινές ώρες και να ενημερώνονται οι εκτελούντες τις εργασίες για οποιαδήποτε αστοχία. Τα αποτελέσματα (συν/νες) μεταφέρονται με τη μορφή διαγραμμάτων (σχήματα 5, 6) μέσω διαδικτύου στο ΕΜΠ στην Αθήνα.

Το σύστημα λειτούργησε τον Αύγουστο του 2016 έως το Μάρτιο του 2017.



Σχήμα 5: Χρονοσειρά μεταβολής θέσης στις 3 διαστάσεις



Σχήμα 6: Χρονοσειρά μεταβολής κατά x, y

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την εργασία αυτή επιχειρείται μια σύντομη παρουσίαση τις εγκατάστασης και λειτουργίας ενός ολοκληρωμένου γεωδαιτικού συστήματος παρακολούθησης της κινηματικής συμπεριφοράς του Ιερού Κουβουκλίου στο ναό της Αναστάσεως στα Ιεροσόλυμα, κατά τη διάρκεια των εργασιών αναστήλωσης. Διαπιστώθηκε ότι ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να αποδώσει την κινηματική συμπεριφορά του έργου, ανάλογα με το χρονικό βήμα παρακολούθησης που θα επιλεγεί. Σημαντικός είναι ο ρόλος της σήμανσης και εγκατάστασης τέτοιων δικτύων, με χρήση εξαναγκασμένης μόνιμης τοποθέτησης των οργάνων, που εξασφαλίζει σταθερότητα και μηδενίζει το σφάλμα κέντρωσης.

Με τις παραπάνω προδιαγραφές εγκατάστασης του δικτύου και τη χρήση κατάλληλου γεωδαιτικού εξοπλισμού, είναι εφικτή η επίτευξη ακρίβειας μερικών δεκάτων του mm σε τέτοια δίκτυα. Έτσι η ευαισθησία ενός τέτοιου δικτύου μπορεί να φθάσει την τάξη του 1mm για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, γεγονός που εγγυάται την ασφάλεια του μνημείου και των εργαζομένων κατά τη διάρκεια του έργου της αποκατάστασης.

Προβλήματα επικοινωνίας του συστήματος στο χώρο του Ιερού Κουβουκλίου με το κέντρο ελέγχου στην Αθήνα, που οφείλονταν στη λειτουργία του διαδικτύου, αντιμετωπίστηκαν με την επί τόπου επέμβαση και την ενδυνάμωση των διαδικτυακών υπηρεσιών.

4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Moropoulou, A., Korres, E., Georgopoulos, A., Spyrakos, C., (2015). Integrated Diagnostic Research Project and Strategic Planning for Materials, Interventions, Conservation and Rehabilitation of the Holy Edicule of the Holy Sepulchre in the Holy Church of the Resurrection in Jerusalem. Interim report (unpublished).

Moropoulou, A., (2017). Presentation upon completion of the Holy Aedicule Rehapilation

Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ. (1990). Παρακολούθηση παραμορφώσεων των φερόντων στοιχείων του σταδίου Ειρήνης και Φιλίας. Ίδρυση δικτύου κατακορύφου ελέγχου στην ευρύτερη περιοχή του σταδίου, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ. Διπλωματική εργασία.

Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ. (2008). Παρακολούθηση παραμορφώσεων φραγμάτων με γεωδαιτικές μεθόδους. Παρουσίαση στο "1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων με Διεθνή συμμετοχή", Λάρισα. Πρακτικά συνεδρίου σε ηλεκτρονική μορφή.

Lambrou E., Nikolitsas K., Pantazis G. (2011). Special marking of 3d networks' points for the monitoring of modern constructions ". Δημοσίευση στο περιοδικό Journal of Civil engineering and Architecture (ISSN 1934-7359), Volume 5, Number 7, Serial No 44, pp 643-649. Παρουσίαση και στο "13th FIG Symposium on Deformation measurements and Analysis – Measuring the changes - 4th IAG symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering", Λισσαβόνα, Πορτογαλία. Πρακτικά συνεδρίου σε ηλεκτρονική μορφή

Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ. (2011) "Geodetic monitoring of bridge oscillations". Παρουσίαση στο International conference "Innovations on Bridges and Soil-Bridge Interaction", Αθήνα, Οκτώβριος 2011. Πρακτικά συνεδρίου, Εκδόσεις Ιδρύματος Ευγενίδου, σελ. 455 – 462.

Pantazis G., Constantinidis C., Stavrou G. (2016). "Evaluation of the sensitivity of 3D monitoring networks by applying both different measurement methods and adjustments." Παρουσίαση στο " 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)", Βιέννη , Αυστρία, Μάρτιος 2016. πρακτικά συνεδρίου

Pantazis G., Lambrou E. (2016) "Enhancement of 3D monitoring networks' sensitivity by low cost innovative implementation." Παρουσίαση στο " 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)", Βιέννη , Αυστρία, Μάρτιος 2016. πρακτικά συνεδρίου.
Δημοσίευση στο ηλεκτρονικό περιοδικό mycoordinates. Volume XIII, Issue 1, January 2017