

# ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΕΡΟΥ ΚΟΥΒΟΥΚΛΙΟΥ ΤΟΥ ΠΑΝΑΓΙΟΥ ΤΑΦΟΥ ΣΤΑ ΙΕΡΟΣΟΛΥΜΑ

Δημήτριος Ζάχος<sup>1</sup>, Γεώργιος Πανταζής<sup>1</sup>, Αντωνία Μοροπούλου<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
<sup>2</sup>Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
email: [jimizachos@gmail.com](mailto:jimizachos@gmail.com)

## Περίληψη

Η συντήρηση και επισκευή μιας κατασκευής ή ενός μνημείου, επιβάλλει τη συνεχή παρακολούθηση της στατικής του επάρκειας. Οι γεωδαιτικές μέθοδοι, αξιοποιώντας τη σύγχρονη τεχνολογία στη συλλογή δεδομένων και στην επεξεργασία τους, συμβάλλουν καθοριστικά, στη γρήγορη και άμεση διαπίστωση οποιασδήποτε μεταβολής στη κινηματική συμπεριφορά και οδηγούν με ασφάλεια στην αντιμετώπισή της.

Στην παρούσα εργασία αξιοποιούνται τα δεδομένα συνεχούς παρακολούθησης ενός 3D γεωδαιτικού δικτύου που εγκαταστάθηκε στο Ιερό Κουβούκλιο του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα, κατά τις εργασίες αποκατάστασης του μνημείου από τη διεπιστημονική ομάδα του ΕΜΠ (2016-2017).

Το δίκτυο αυτό εγκαταστάθηκε με σκοπό τη μελέτη της κινηματικής συμπεριφοράς του Ιερού κουβουκλίου διαχρονικά σε όλη τη διάρκεια των εργασιών αποκατάστασης. Αυτό υλοποιήθηκε με την εγκατάσταση ενός μόνιμου γεωδαιτικού συστήματος συνεχούς παρακολούθησης (monitoring). Συγκεκριμένα, με τη χρήση ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού, την ενσύρματη επικοινωνία του με φορητό υπολογιστή και την αξιοποίηση κατάλληλου λογισμικού επετεύχθη, η οργάνωση του σεναρίου παρακολούθησης, η καταγραφή των μετρήσεων, η αποστολή τους σε εξουσιοδοτημένο Η/Υ στο ΕΜΠ καθώς και ο έλεγχος των μετρήσεων και η διαχείριση των αποτελεσμάτων. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της μεταβολής θέσης των σημείων ελέγχου με τη μορφή πινάκων ή διαγραμμάτων σε πραγματικό χρόνο, παρείχε τη δυνατότητα άμεσης λήψης αποφάσεων για την αποφυγή αστοχίας του μνημείου.

Στην εργασία αυτή γίνεται εκτενής ανάλυση και ταξινόμηση των δεδομένων παρακολούθησης. Συγκεκριμένα, διαθέτοντας για κάθε κορυφή του 3D δικτύου διαγράμματα (charts) μεταβολής θέσης και διαγράμματα διασποράς (scatter plot) συναρτήσει του χρόνου, γίνεται ταξινόμηση τόσο ως προς το εύρος τιμών των μεταβολών όσο και ως προς το συνολικό μέγεθός τους διαχρονικά, κι αυτό διότι το γεγονός ότι μια κορυφή εμφανίζει το μέγιστο εύρος μεταβολών δεν συνεπάγεται και μέγιστες συνολικά μεταβολές διαχρονικά.

Με αυτή την ανάλυση δεδομένων, διαπιστώνεται η επιτυχία ενός τέτοιου συστήματος monitoring να αποδώσει την κινηματική συμπεριφορά του μνημείου, ανάλογα με το χρονικό βήμα παρακολούθησης που θα επιλεγεί, αλλά και η ικανότητα του δικτύου να ανιχνεύει μετακινήσεις της τάξης του 1mm για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. 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.

*Λέξεις – κλειδιά: monitoring, Ιερό Κουβούκλιο, Ιερουσαλήμ, μετακινήσεις, ταξινόμηση*

Δημήτριος Ζάχος, Γεώργιος Πανταζής, Αντωνία Μοροπούλου  
Ανάλυση δεδομένων συνεχούς παρακολούθησης του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα  
Τμητικός – συλλεκτικός Τόμος στη μνήμη Ευαγγελίας Λάμπρου

# **Analysis of successive monitoring data of the Holy Aedicule of Holy Tomb in Jerusalem**

## **Abstract**

The maintenance and repair of a construction or a monument requires successive monitoring of its static competence. The geodetic methods, utilizing state-of-the-art technology for data collection and processing, contribute decisively to the fast and immediate detection of any change in the kinematic behavior, leading safely to the best solution.

In this paper, data of successive monitoring, of a 3D geodetic network that was established in the Holy Aedicule inside the Holy Tomb of Jerusalem, during restoration works carried out by the interdisciplinary team of NTUA (2016-2017), are utilized.

This network was established for the study of the kinematic behavior of the Holy Aedicule over time. This was accomplished with the installation of a permanent geodetic successive monitoring system. Specifically, with the use of a total station, its wired connection with a portable PC and the use of special software, the organization of the monitoring scenario, the data recording and sending to an authorized PC back to NTUA, as well as the measurements' control and results' management, were achieved. The presentation of the position's change results provided the ability for immediate decision making in order to avoid any monument's failure.

In this paper extensive analysis and classification of the monitoring data are studied. Having charts of position's change and scatter plots over time for every control point of the 3D network, classification regarding the range of values, but also the overall magnitude of these changes over time, is carried out, due to the fact that if one point shows the maximum range does not mean that it will also show the total maximum changes.

With this data analysis, the success of such a monitoring system to describe the kinematic behavior of the monument, depending on the defined time interval, but also its ability to detect displacements of the order of 1mm for 95% confidence level, is verified. The role of the marking and implementation of such networks is important, utilizing special permanent installation technique for the geodetic instruments, that minimize or remove centering and levelling errors.

*Key words: monitoring, Holy Aedicule, Jerusalem, displacements, classification*

## 1. Εισαγωγή

Κάθε κατασκευή δοκιμάζεται συνεχώς στις προκλήσεις του περιβάλλοντος της. Σημαντικότεροι φυσικοί παράγοντες που οδηγούν σε πιθανές αλλαγές μιας κατασκευής δομικά ή/και σε δομικές αστοχίες, είναι η οποιαδήποτε μεταβολή ή αστοχία του εδαφικού επιφανειακού υλικού, όπως η καθίζηση του εδάφους, τα φυσικά φαινόμενα, όπως η μετακίνηση του στερεού φλοιού της γης ή οι διαχρονικά δυσμενείς καιρικές συνθήκες στον περιβάλλοντα χώρο (μικροκλίμα) καθώς και η επίδραση των υπόγειων υδάτων. Προβλήματα λειτουργικότητας και στατικής επάρκειας ωστόσο δημιουργούνται και απο την ανθρώπινη δραστηριότητα. Ελλιπής σχεδιασμός, λανθασμένη επιλογή και χρήση υλικών, μη τήρηση των προδιαγραφών κατασκευής και των κανονισμών λειτουργίας, υπερμεγέθης δυναμικές φορτίσεις που οδηγούν την κατασκευή στα μέγιστα όρια αντοχής της, ανεπαρκής προστασία, συντήρηση και ενίσχυση, οδηγούν σε ακαταλληλότητα της κατασκευής ή ακόμα και στην αφαίρεση ανθρώπινων ζώων.

Είναι προφανές ότι για την εξασφάλιση της βιωσιμότητας και της ασφάλειας των κατασκευών είναι απαραίτητη η παρακολούθησή τους (monitoring). Πρόκειται για μια κρίσιμη και συνεχή διαδικασία μελέτης, ανίχνευσης και ανάλυσης των πιθανών μετακινήσεων και αλλαγών θέσης, σχήματος και μορφής των τεχνικών κατασκευών συναρτήσει του χρόνου, για την οποία συνδυάζονται τα αντικείμενα γεωδαισίας, φωτογραμμετρίας, στατικής, ανάλυσης υλικών και στατιστικής ανάλυσης με τα προηγμένα ηλεκτρονικά συστήματα, που επιτρέπουν τη διαχρονική παρακολούθηση, την αξιόπιστη παραγωγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και την έγκαιρη επέμβαση όταν απαιτείται.

Μια τέτοια διαδικασία παρακολούθησης, τόσο *περιοδικής (periodic)* όσο και *συνεχούς (successive)*, εφαρμόστηκε και στις εργασίες αποκατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου, εντός του Ναού της Αναστάσεως στα Ιεροσόλυμα, το διάστημα 2016-2017, που ανέλαβε και ολοκλήρωσε επιτυχώς η διεπιστημονική ομάδα του ΕΜΠ, με πρωτοβουλία του Πατριάρχη Ιεροσολύμων Θεόφιλου ΙΙΙ. Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα διαγνωστικής έρευνας και στρατηγικού σχεδιασμού υλικών και επεμβάσεων συντήρησης και αποκατάστασης (Moropoulou et al. 2019). Στα επόμενα αναλύεται εκτενώς η συνεχής παρακολούθηση του μνημείου απο τη γεωδαιτική σκοπιά, τόσο ως προς τη μεθοδολογία και τον εξοπλισμό, όσο και ως προς τη καταγραφή, ανάλυση και ταξινόμηση των δεδομένων παρακολούθησης.

## 2. Περιοδική παρακολούθηση

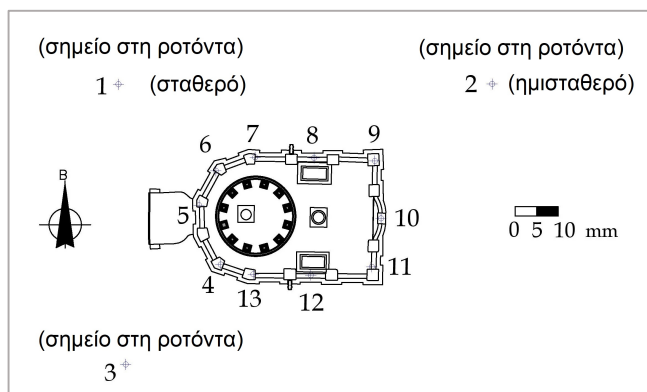
Στα πλαίσια του σχεδίου αποκατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου, ιδρύθηκε στο χώρο περιμετρικά του μνημείου τριδιάστατο γεωδαιτικό δίκτυο ελέγχου μετακινήσεων, αποτελώντας το δίκτυο αναφοράς όλων των γεωδαιτικών μετρήσεων ακριβείας, όπως ήταν η γεωμετρική τεκμηρίωση του μνημείου πριν τις εργασίες, αλλά και ο στατικός έλεγχος και η παρακολούθησή του πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας των εργασιών. Το δίκτυο αποτελείται απο 13 κορυφές (σχήμα 1) σε αυθαίρετο τοπικό σύστημα αναφοράς. Συγκεκριμένα, 3 μόνιμα σημεία ελέγχου ιδρύθηκαν στον 1<sup>ο</sup> όροφο της ροτόντας, με θέση τέτοια ώστε να έχουν καλή ορατότητα μεταξύ τους και να είναι ορατά απο αυτά όλα τα σημεία του Κουβουκλίου τουλάχιστον ανα δύο. Καταλυτικής σημασίας ήταν η υλοποίηση των σημείων αυτών με ειδικές μεταλλικές κατασκευές (εικόνα 1α) και μόνιμα τρικόχλια (εικόνα 1β) με σκοπό την ελαχιστοποίηση – εξάλειψη

Δημήτριος Ζάχος, Γεώργιος Πανταζής, Αντωνία Μοροπούλου

Ανάλυση δεδομένων συνεχούς παρακολούθησης του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα

Τμητικός – συλλεκτικός Τόμος στη μνήμη Ευαγγελίας Λάμπρου

των σφαλμάτων κέντρωσης και οριζοντίωσης. Τα υπόλοιπα 10 σημεία ελέγχου τοποθετήθηκαν μόνιμα στην επίστεψη του Ιερού Κουβουκλίου, χρησιμοποιώντας υψηλής ακρίβειας mini ανακλαστήρες (Λάμπρου, Πανταζής 2017)



Σχήμα 1. Η γεωμετρία του τριδιάστατου δικτύου ελέγχου



Εικόνα 1α. Ειδική μεταλλική βάση



Εικόνα 1β. Τρικόχλιο μόνιμα τοποθετημένο πάνω στη μεταλλική βάση

Η περιοδική παρακολούθηση του μνημείου αφορά στη μέτρηση του δικτύου σε μεμονωμένα χρονικά διαστήματα. Το δίκτυο μετρήθηκε σε 8 διαφορετικές χρονικές στιγμές, από τον Ιούλιο του 2016 έως τον Ιανουάριο του 2017, χρησιμοποιώντας τον ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό S9 της Trimble, με ακρίβεια μέτρησης διευθύνσεων 1'' και μηκών  $\pm 1\text{mm} \pm 2\text{ppm}$ , ενώ πραγματοποιήθηκε και μια 9<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως αναφορά για μελλοντική παρακολούθηση. Για κάθε φάση μέτρησης ελέγχθηκαν στατιστικά τα αποτελέσματα, έγινε η συνόρθωση με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, τόσο με τις εξωτερικές (*fixed parameters*) όσο και με τις εσωτερικές δεσμεύσεις (*inner constraints – free net*) (Ζάχος 2018), και ελέγχθηκε το δίκτυο για την ύπαρξη απόλυτων και σχετικών μετακινήσεων για όλες τις φάσεις. Ο έλεγχος έγινε για ενιαία τριδιάστατη επίλυση στο χώρο αλλά και για οριζοντιογραφική και υψομετρική επίλυση χωριστά.

Για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, η ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων είναι της τάξης του  $\pm 1\text{mm}$  για επίλυση με εξωτερικές και  $\pm 0.5\text{mm}$  για επίλυση με εσωτερικές δεσμεύσεις αντίστοιχα. Επιπλέον, η εφαρμογή ειδικής μεθοδολογίας προσδιορισμού του ύψους οργάνου και του ύψους στόχου, χρησιμοποιώντας ψηφιακό χωροβάτη και σταδία, με ακρίβεια  $\pm 0.5\text{mm}$ , συνέβαλε στην τελική αξιοπιστία του δικτύου (Pantazis, Lambrou 2017). Αποδεικνύεται έτσι η επιτυχία ενός τέτοιου δικτύου να ανιχνεύει κρίσιμες μετακινήσεις με αβεβαιότητα καλύτερη από  $\pm 1\text{mm}$ , για εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια.

Δημήτριος Ζάχος, Γεώργιος Πανταζής, Αντωνία Μοροπούλου

Ανάλυση δεδομένων συνεχούς παρακολούθησης του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα

Τμητικός – συλλεκτικός Τόμος στη μνήμη Ευαγγελίας Λάμπρου

### 3. Συνεχής παρακολούθηση

#### 3.1 Εγκατάσταση και Λειτουργία Μόνιμου Συστήματος Παρακολούθησης Μετακινήσεων

Για τον πληρέστερο έλεγχο της στατικής ακεραιότητας του Ιερού Κουβουκλίου, απαραίτητη ήταν η διαχρονική παρακολούθηση του τριδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου ελέγχου τόσο κατά τη διάρκεια όσο και μετά την ολοκλήρωση των εργασιών αποκατάστασης. Για τις ανάγκες της *συνεχούς παρακολούθησης*, εγκαταστάθηκε στο χώρο του μνημείου ένα μόνιμο γεωδαιτικό σύστημα παρακολούθησης μετακινήσεων (deformation monitoring). Το σύστημα υλοποιήθηκε με τη χρήση του TS Trimble S9, ο οποίος τοποθετήθηκε μόνιμα στην κορυφή 2 του δικτύου, αφού από τη θέση αυτή είναι ορατό σχεδόν το σύνολο των σημείων που έχουν τοποθετηθεί στην οροφή του Ιερού Κουβουκλίου. Ο γεωδαιτικός σταθμός επικοινωνούσε ενσύρματα με ένα φορητό υπολογιστή που βρισκόταν μόνιμα τοποθετημένος δίπλα του (εικόνα 2), στον οποίο ήταν εγκατεστημένο το λογισμικό Trimble 4D Control. Πρόκειται για ένα αξιόπιστο εργαλείο που προσφέρει τη βέλτιστη διαχείριση σε εργασίες ακριβείας, ανιχνεύοντας ταχύτατα τις κρίσιμες μετακινήσεις στο πεδίο, σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 2. Το σύστημα συνεχούς παρακολούθησης σε λειτουργία

Με το λογισμικό αυτό επιτυγχάνεται:

- i. Η επικοινωνία του H/Y με το γεωδαιτικό σταθμό
- ii. Ο ορισμός και 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 έγκαιρη λήψη αποφάσεων

Ο φορητός υπολογιστής ήταν συνδεδεμένος ενσύρματα ή ασύρματα με το διαδίκτυο, χρησιμοποιώντας το δίκτυο Internet που είχε εγκατασταθεί στο χώρο των εργασιών ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά των δεδομένων αλλά και ο χειρισμός και ο έλεγχος του προγράμματος παρακολούθησης από οποιοδήποτε άλλο H/Y 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 εξουσιοδοτημένος 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.

Τα αποτελέσματα (συν/νες) μεταφέρονταν με τη μορφή διαγραμμάτων μέσω διαδικτύου στο ΕΜΠ στην Αθήνα. 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 (Πανταζής, Λάμπρου 2017). Σκοπός αυτής της συνδεσμολογίας ήταν η παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς του Ιερού Κουβουκλίου, κατά τη διάρκεια των εργασιών αποκατάστασης οι οποίες εκτελέστηκαν κυρίως βραδινές ώρες και η ενημέρωση των εκτελούντων τις εργασίες για οποιαδήποτε αστοχία. Το σύστημα τέθηκε σε λειτουργία τον Αύγουστο του 2016, πραγματοποιώντας μια εικονική και μια πραγματική σειρά παρατηρήσεων.

Η εικονική παρακολούθηση πραγματοποιήθηκε όταν στο Ιερό Κουβούκλιο δεν πραγματοποιούνταν εργασίες και απέβλεπε στη σύνδεση των συστημάτων, στην οργάνωση των παρατηρήσεων και στην επικοινωνία του συστήματος με τον εξωτερικό χώρο. Διήρκεσε περίπου 4 ώρες και ολοκληρώθηκε επιτυχώς. Στις 31 Αυγούστου 2016 πραγματοποιήθηκε και μια πραγματική σειρά μετρήσεων κατά το χρονικό διάστημα από περίπου στις 8μ.μ. έως τις 6π.μ., όταν στο Ιερό Κουβούκλιο εξελίσσονταν εργασίες αποκατάστασης. Οργανώθηκαν μετρήσεις στους 10 ανακλαστήρες στην επίστεψη του μνημείου, σε I και II θέση τηλεσκοπίου, με χρονικό βήμα επανάληψης 10min, στο διάστημα 7π.μ. έως 7μ.μ. καθημερινά (Πανταζής, Λάμπρου 2017). Φυσικά υπήρχε η δυνατότητα αλλαγής του χρονικού βήματος των μετρήσεων, ανάλογα με τις απαιτήσεις.

### 3.2 Ανάλυση Δεδομένων Παρακολούθησης

Το σύστημα λειτουργούσε από τον Αύγουστο του 2016 έως τον Μάρτιο του 2017. Τα δεδομένα του συστήματος παρακολούθησης που κρίθηκε απαραίτητο να ταξινομηθούν και να αξιολογηθούν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας αφορούν στο χρονικό διάστημα 1/1/2017 έως 7/3/2017 (λήξη μετρήσεων), και η λήψη τους έγινε μέσω του λογισμικού Trimble 4D control. Το λογισμικό αυτό παρέχει την δυνατότητα αυτόματης αποθήκευσης τόσο των πρωτογενών δεδομένων (raw readings) όσο και δεδομένων μέσω των τιμών για σετ παρατηρήσεων (summarized data sets) ωριαία, ημερήσια, εβδομαδιαία κλπ. ανάλογα με τις απαιτήσεις και το ορισμένο χρονικό βήμα μέτρησης.

Ο λόγος που επιλέχθηκε μια τέτοια ταξινόμηση είναι το γεγονός ότι σε όλη τη διάρκεια του έργου, ο όγκος των μετρήσεων ήταν τέτοιου μεγέθους που πέρα από τις μέσες ημερήσιες τιμές μεταβολής θέσης και τις κρίσιμες μετακινήσεις των κορυφών του δικτύου, δεν επέτρεπε την περαιτέρω χρονική ανάλυση των μεταβολών, της τάσης τους και της κινητικότητας των κορυφών.

Τα δεδομένα που ταξινομούνται είναι διαγράμματα μεταβολής θέσης. Συγκεκριμένα, για κάθε αισθητήρα (sensor/reflector) που είναι τοποθετημένος σε κάθε κορυφή του δικτύου,

Δημήτριος Ζάχος, Γεώργιος Πανταζής, Αντωνία Μοροπούλου

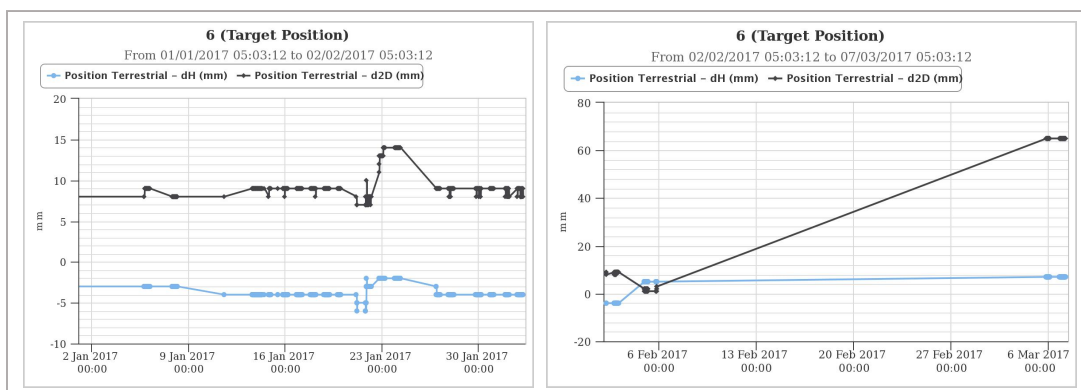
Ανάλυση δεδομένων συνεχούς παρακολούθησης του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα

Τμητικός – συλλεκτικός Τόμος στη μνήμη Ευαγγελίας Λάμπρου

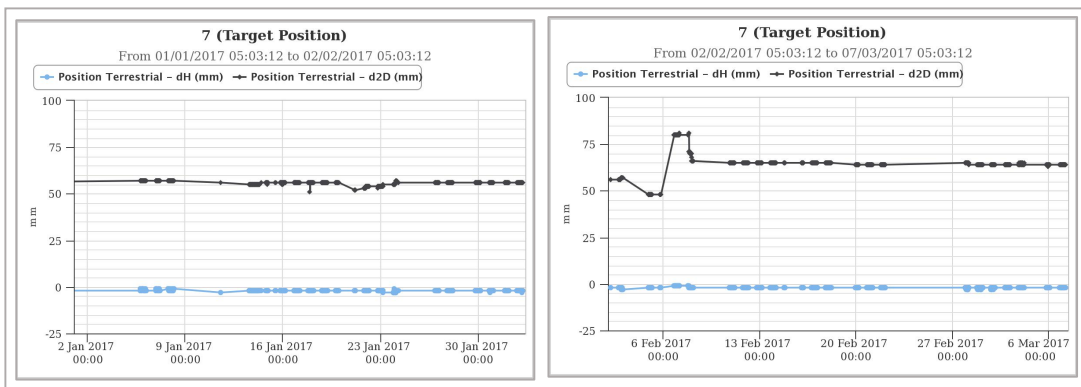
εκτός της σταθερής (κορυφή 1) και ημισταθερής (κορυφή 2), λήφθηκαν δύο είδη διαγραμμάτων :

- Διαγράμματα (charts) μεταβολής θέσης οριζοντιογραφικά (d2D) και υψομετρικά (dH) συναρτήσει του χρόνου και
- Διαγράμματα διασποράς (scatter plot) μεταβολής θέσης κατά το επίπεδο (N, E) και κατά το επίπεδο (H, Tangential)

Όπως αναφέρθηκε, το χρονικό βήμα των μετρήσεων ορίστηκε στα 10min. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα λεπτομερούς επίβλεψης των αποτελεσμάτων και ορισμού της χρονικής περιόδου εμφάνισης στα τελικά διαγράμματα. Ανάλογα λοιπόν με τον ρυθμό μεταβολής και το μέγεθος των οριζοντιογραφικών και υψομετρικών μεταβολών, επιλέχθηκε και ο τρόπος εμφάνισής τους σε διαγράμματα διμήνου, μηνιαία, εβδομαδιαία, ημερήσια, ωριαία κ.α. (Ζάχος 2018). Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής θέσης των κορυφών 6 και 7, για τις περιόδους 1/1/17-2/2/17 (1<sup>ο</sup> μηνιαίο) και 2/2/17-7/3/17 (2<sup>ο</sup> μηνιαίο).



Σχήμα 2. Διαγράμματα μεταβολής θέσης οριζοντιογραφικά (d2D) και υψομετρικά (dH) για την κορυφή 6, για τον 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> μήνα



Σχήμα 3. Διαγράμματα μεταβολής θέσης οριζοντιογραφικά (d2D) και υψομετρικά (dH) για την κορυφή 7, για τον 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> μήνα

Παρατηρώντας τα διαγράμματα, η κορυφή 6 παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον κι αυτό διότι εμφανίζει το μέγιστο εύρος τιμών σε ότι αφορά τις οριζοντιογραφικές μεταβολές θέσεις, απ' όλες τις υπόλοιπες κορυφές. Συγκεκριμένα το εύρος αυτό κυμαίνεται από μια ελάχιστη τιμή 1mm (4-5/2/17) έως τη μέγιστη τιμή των 65mm (5/3/17), με μια μέση τιμή

Δημήτριος Ζάχος, Γεώργιος Πανταζής, Αντωνία Μοροπούλου

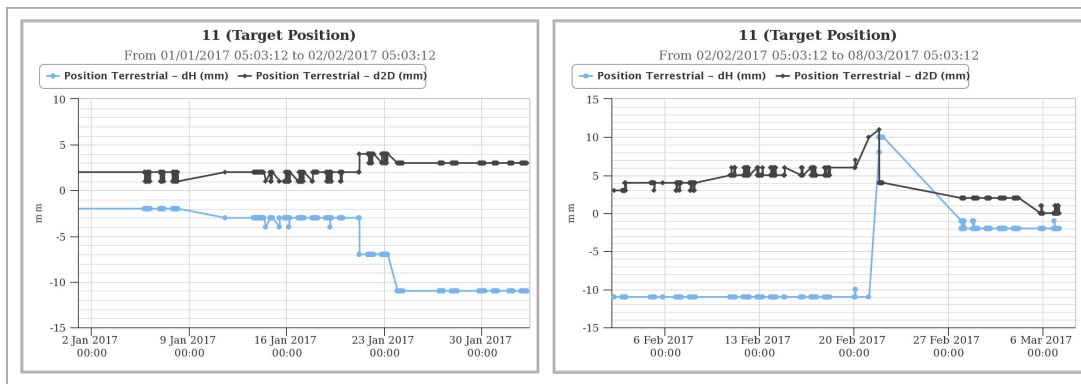
Ανάλυση δεδομένων συνεχούς παρακολούθησης του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα

Τμητικός – συλλεκτικός Τόμος στη μνήμη Ευαγγελίας Λάμπρου



9mm στο χρονικό διάστημα 1/1/17-3/2/17. Επιπλέον, σημειώνεται μια μέγιστη υψομετρική μεταβολή της τάξης των 7mm μεταξύ 5-7/3/17.

Η κορυφή 7 αντίστοιχα, είναι αυτή που εμφανίζει τις μέγιστες συνολικά οριζοντιογραφικές μεταβολές θέσης συναρτήσει του χρόνου, οι οποίες κυμαίνονται κατά μέσο όρο στα 60mm, με ελάχιστη τιμή τα 48mm (5/2/17) και μέγιστη τα 81mm (7/2/17). Εδώ σημειώνεται ακόμα το δεύτερο κατά σειρά μέγιστο εύρος τιμών των οριζοντιογραφικών μεταβολών, μετά την κορυφή 6. Συνδυαστικά με τα αποτελέσματα του ελέγχου μετακινήσεων κατά την περιοδική παρακολούθηση, για την κορυφή 7 προσδιορίζονται τα μεγαλύτερα κατά μέσο όρο διανύσματα μεταβολής.



Σχήμα 4. Διαγράμματα μεταβολής θέσης οριζοντιογραφικά (d2D) και υψομετρικά (dH) για την κορυφή 11, για τον 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> μήνα

Αναλύοντας τα διαγράμματα υψομετρικά, η κορυφή 11 παρουσιάζει το μεγαλύτερο εύρος αλλά και τις μέγιστες διαχρονικά κατά μέγεθος υψομετρικές μεταβολές, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ -11mm (23/1/17 - 21/2/17) και 10mm (21-22/2/17), όπως φαίνεται και στο σχετικό σχήμα 4.

### 3.3 Ταξινόμηση Δεδομένων Παρακολούθησης

Για τα διαθέσιμα δεδομένα έγιναν δύο είδη ταξινόμησης :

- ως προς το εύρος τιμών των μεταβολών οριζοντιογραφικά (range d2D) και υψομετρικά (range dH)
- ως προς το συνολικό μέγεθος των μεταβολών διαχρονικά, τόσο οριζοντιογραφικά (max d2D) όσο και υψομετρικά (max dH)

Κι αυτό επειδή το γεγονός ότι μια κορυφή μπορεί να εμφανίζει το μέγιστο εύρος μεταβολών δεν σημαίνει ότι εμφανίζει και τις μέγιστες συνολικά κατά μέγεθος μεταβολές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η κορυφή 6, η οποία ναι μεν παρουσιάζει μέγιστο εύρος οριζοντιογραφικών μεταβολών, αλλά διαχρονικά οι μέγιστες συνολικά μεταβολές εμφανίζονται στη κορυφή 7.

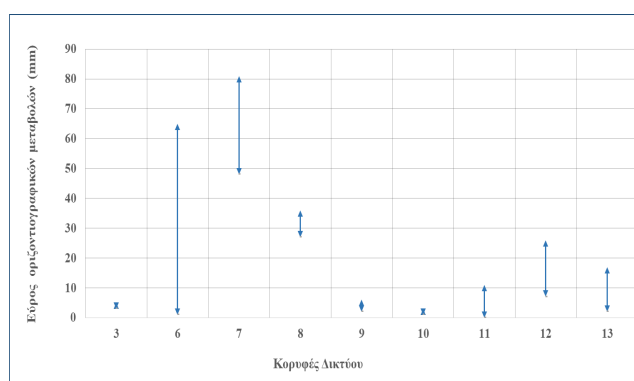


Πίνακας 1. Ταξινόμηση κορυφών ως προς το εύρος τιμών των μεταβολών θέσης (αύξουσα σειρά)

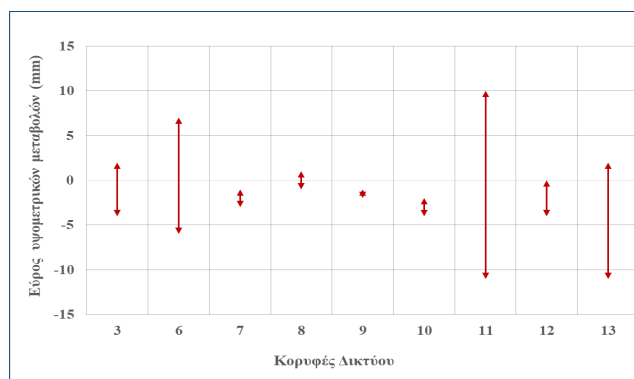
Οριζοντιογραφικά (d2D)		Υψομετρικά (dH)		Οριζοντιογραφικά (d2D)		Υψομετρικά (dH) – κατα μέτρο	
10	1.0 – 3.0 mm	9	-2.0 – -1.0 mm	10	2.0 mm	8	1.0 mm
3	3.0 – 5.0 mm	7	-3.0 – -1.0 mm	9	4.0 mm	9	1.5 mm
9	2.0 – 6.0 mm	8	-1.0 – 1.0 mm	3	4.0 mm	12	1.5 mm
8	27.0 – 36.0 mm	10	-4.0 – -2.0 mm	11	5.5 mm	3	2.0 mm
11	0.0 – 11.0 mm	12	-4.0 – 0.0 mm	6	33.0 mm	7	2.5 mm
13	2.0 – 17.0 mm	3	-4.0 – 2.0 mm	13	9.5 mm	13	3.0 mm
12	7.0 – 26.0 mm	6	-6.0 – 7.0 mm	12	16.5 mm	10	3.2 mm
7	48.0 – 81.0 mm	13	-11.0 – 2.0 mm	8	31.5 mm	6	4.0 mm
<b>6</b>	<b>1.0 – 65.0 mm</b>	<b>11</b>	<b>-11.0 – 10.0 mm</b>	<b>7</b>	<b>62.0 mm</b>	<b>11</b>	<b>7.3 mm</b>

Πίνακας 2. Ταξινόμηση κορυφών ως προς το συνολικό μέγεθος των μεταβολών θέσης διαχρονικά (αύξουσα σειρά)

Ως προς το εύρος τιμών, σε ότι αφορά τις οριζοντιογραφικές μεταβολές, το μέγιστο εμφανίζεται στη κορυφή 6, οι μεταβολές της οποίας κυμαίνονται από 1mm (4-5/2/17) έως 65mm (5/3/17). Το αντίστοιχο μέγιστο εύρος υψομετρικών μεταβολών σημειώνεται στη κορυφή 11, οι μεταβολές της οποίας κυμαίνονται από -11mm (23/1-21/2/17) έως 10mm (21-22/2/17).



Σχήμα 5. Εύρος τιμών οριζοντιογραφικής μεταβολής θέσης κορυφών δικτύου



Σχήμα 6. Εύρος τιμών υψομετρικής μεταβολής θέσης κορυφών δικτύου

Ως προς το συνολικό μέγεθος των μεταβολών διαχρονικά στην περίοδο 1/1/17 έως 7/3/17, η κορυφή 7 παρουσιάζει τις μέγιστες οριζοντιογραφικές μεταβολές θέσης, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 48mm (5/2/17) και 81mm (7/2/17), με μια μέση τιμή στα 62mm. Οι αντίστοιχες μέγιστες υψομετρικές διαφορές εμφανίζονται και πάλι στη κορυφή 11 και κυμαίνονται από -11mm (23/1-21/2/17) έως 10mm (21-22/2/17), με μια μέση κατά μέτρο τιμή 7.3mm.

Μια από τις πιο βασικές αιτίες εκδήλωσης αυτών των σημαντικών σε μέγεθος μεταβολών ήταν οι εργασίες που διεξάγονταν στο χώρο του μνημείου παράλληλα με την παρακολούθησή του. Ειδικότερα, η κορυφή 7 βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του Κουβουκλίου, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται άμεσα από τις εργασίες ανάταξης των πεσσών στη βόρεια όψη του μνημείου. Επιπλέον, οι εργασίες απομάκρυνσης και επανατοποθέτησης των ορθομαρμαρώσεων, αφού είχε αποκατασταθεί η εσωτερική τοιχοποιία του μνημείου, συνεισέφεραν με τη σειρά τους στα τελικά αποτελέσματα.

#### **4. Συμπεράσματα**

Για την ολοκληρωμένη παρακολούθηση και μελέτη της στατικής επάρκειας του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου Ιεροσολύμων, εφαρμόστηκε ένα πλάνο τόσο περιοδικής όσο και συνεχούς παρακολούθησης. Αρχικά, με την εγκατάσταση και μέτρηση ενός τριδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου ελέγχου σε μεμονωμένες χρονικές στιγμές, αποδεικνύεται η ικανότητα ενός τέτοιου δικτύου να ανιχνεύει και να προσδιορίζει κρίσιμες μετακινήσεις στο χώρο, και μάλιστα με αβεβαιότητα καλύτερη από  $\pm 0.5\text{mm}$  για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Ωστόσο, η συνεχής παρακολούθηση είναι αυτή που δίνει συνολικά την κινηματική συμπεριφορά του μνημείου διαχρονικά. Τα κύρια πλεονεκτήματα της εγκατάστασης και χρήσης ενός τέτοιου μόνιμου συστήματος συνεχούς παρακολούθησης μετακινήσεων είναι η παραγωγή πληροφορίας σχετικά με τις μεταβολές θέσης των κορυφών του δικτύου σε πραγματικό χρόνο, η δυνατότητα ειδοποίησης του χρήστη άμεσα όταν οι μεταβολές υπερβαίνουν το ορισμένο αποδεκτό όριο, καθώς και η εξ' αποστάσεως χρήση του συστήματος, οργάνωση του πλάνου μετρήσεων και λήψη αποφάσεων. Μέσα από την ανάλυση και ταξινόμηση των δεδομένων συνεχούς παρακολούθησης, διαπιστώνεται ότι παρόλο που εμφανίζονται σημαντικές μετακινήσεις κορυφών, όπως οριζοντιογραφικά για την κορυφή 7 και υψομετρικά για την κορυφή 11, αυτές οφείλονται στις παράλληλες εργασίες αποκατάστασης του μνημείου. Επομένως, αφού οι μετακινήσεις αυτές είναι στιγμιαίες δεν αποτελούν κίνδυνο για την στατική λειτουργία του Κουβουκλίου. Στην ακρίβεια του συστήματος, συνέβαλαν η εξαναγκασμένη μόνιμη τοποθέτηση των κορυφών τοποθέτησης του οργάνου, που εξαλείφει τα σφάλματα κέντρωσης και οριζοντίωσης καθώς και ειδική μέθοδος ακριβείας μέτρησης του ύψους οργάνου. Τελικώς, διαπιστώνεται η αξιοπιστία ενός τέτοιου συστήματος monitoring να αποδίδει επιτυχώς την κινηματική συμπεριφορά της εκάστοτε κατασκευής συμβάλλοντας στην βιώσιμη προστασία της αλλά και να διασφαλίζει την στατική της ακεραιότητα διαχρονικά, με τη χρήση των διαθέσιμων τεχνολογιών.

#### **6. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η μελέτη και το έργο της αποκατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου κατέστησαν δυνατά και εκτελέστηκαν υπό την αιγίδα του Μακαριότατου Πατριάρχη Ιεροσολύμων Θεόφιλου Γ'.

Η κοινή συμφωνία των χριστιανικών κοινοτήτων του Status Quo παρείχε το θεσμικό πλαίσιο για την εκτέλεση του έργου.

Ο Σεβασμιότατος Κουστωδός των Αγίων Τόπων, Αρχιεπίσκοπος Pierbattista Pizzaballa (μέχρι τον Μάιο του 2016 – και τώρα Αποστολικός Διοικητής του Λατινικού Πατριαρχείου Ιεροσολύμων), Πάτερ Francesco Patton (από τον Ιούνιο του 2016) και ο Μακαριότατος Αρμένιος Πατριάρχης Ιεροσολύμων, Nourhan Manougian, εξουσιοδότησαν τον Μακαριότατο Πατριάρχη Ιεροσολύμων Θεόφιλο Γ' και το ΕΜΠ να πραγματοποιήσουν αυτή την έρευνα και το έργο.

Χορηγίες από όλο τον κόσμο εξασφάλισαν τη χρηματοδότηση του έργου. Αξίζει να αναφερθεί η Ιωάννα-Μαρία Ertegun ως Μεγάλος ευεργέτης και ο Jack Shear ευεργέτης μέσω του WMF, η Aegean Airlines ως κύριος χορηγός των μεταφορών του προσωπικού κ.ά.

Ευχαριστίες αποδίδονται στην διεπιστημονική ομάδα του ΕΜΠ για την προστασία των μνημείων, καθηγητές Εμ. Κορρέ, Α. Γεωργόπουλο, Α. Μοροπούλου, Κ. Σπυράκο, Χ. Μουζάκη και ειδικότερα στην Α. Μοροπούλου, ως Επικεφαλής και Επιστημονικά Υπεύθυνη, του έργου αποκατάστασης.

### Βιβλιογραφία

Δούκας Ι. Δ., Ρωσσικόπουλος Δ., *Κριτήρια Αξιολογίας Στατιστικών Ελέγχων*, παρουσίαση στο 3<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, 2010, Λάρνακα

Ζάχος Δ., *Σύγκριση μεθόδων ελαχίστων δεσμεύσεων συνόρθωσης τριδιάστατου δικτύου ελέγχου μετακινήσεων. Ανάλυση δεδομένων συνεχούς παρακολούθησης. Εφαρμογή στο δίκτυο του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου*, διπλωματική εργασία, Οκτώβριος 2018, Αθήνα

Πανταζής Γ., Λάμπρου Ε., *Η παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα, κατά τις εργασίες αποκατάστασης*, παρουσίαση στο 5<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, 2017, Αθήνα

Lambrou E, Nikolitsas K, Pantazis G., *Special marking of 3d networks' points for the monitoring of modern constructions*, J of Civil engineering and Architecture, 5/7: 643-649, 2011.

Moropoulou A., Karoglou M., Agapakis I., Mouzakis C., Asimakopoulos S., Pantazis G., Lambrou E., *Holy Selphuchre Monitoring System*, παρουσίαση στο «1<sup>st</sup> International Conference on Transdisciplinary Multispectral Modeling and Cooperation for the Preservation of Cultural Heritage (TMM\_CH)», Οκτώβριος 2018, Αθήνα. Πρακτικά Συνεδρίου

Moropoulou A., Georgopoulos A., Lambrou E., Pantazis G., Soile S., Tapeinaki S., Tsilimantou E., Lampropoulos K., *Multispectral monitoring of the successive phases of the Holy Aedicule rehabilitation*, παρουσίαση στο 4<sup>th</sup> Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Μάιος 2019, Αθήνα

Moropoulou A., Karoglou M., Agapakis I., Mouzakis C., Asimakopoulos S., Pantazis G., Lambrou E., *Structural health monitoring of the Holy Aedicule in Jerusalem*, Structural Control and Health Monitoring, Volume 26, Issue 9, August 2019

Trimble Inc., *Trimble 4D Control Web User Manual*, Version 4.6

Δημήτριος Ζάχος, Γεώργιος Πανταζής, Αντωνία Μοροπούλου

Ανάλυση δεδομένων συνεχούς παρακολούθησης του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα

Τμητικός – συλλεκτικός Τόμος στη μνήμη Ευαγγελίας Λάμπρου

---

Pantazis G., Lambrou E., *Enhancement of 3D monitoring networks' sensitivity by low cost innovative implementation*, παρουσίαση στο 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)", Vienna, Austria, March 2016. Published in magazine mycoordinates, Volume XIII, Issue 1, January 2017

Zachos D., Pantazis G., Lambrou E., *The significance of 3D network adjustment by using different least squares methods for the constructions' monitoring. Application on the monitoring network of the Holy Aedicule in Jerusalem*, παρουσίαση στο 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Μάιος 2019, Αθήνα