

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ – ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Ενόργανη παρακολούθηση ελεύθερα ιστάμενου πολυσπόνδυλου κίονα στο Ναό του Ολυμπίου Διός στην Αθήνα. Αξιολόγηση των καταγραφών, αριθμητική προσομοίωση, σύγκριση»*

ΕΥΡΥΚΛΕΙΑ ΑΛΕΞΑΝΔΡΑΚΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ

ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ ΓΑΡΙΝΗ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΟΣ

ΑΘΗΝΑ  
ΜΑΪΟΣ 2023

στον Αριστείδη

# Πίνακας περιεχομένων

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

## ABSTRACT

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΚΟΠΟΣ

1. *Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> - Απόκριση αρχαίων κατασκευών σε σεισμικές καταπονήσεις*
  - 1.1. Περιγραφή αρχαίων κατασκευών
  - 1.2. Απόκριση των αρθρωτών κατασκευών σε δυναμικές καταπονήσεις
  - 1.3. Προσομοίωση και ανάλυση
2. *Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> – Ο Ναός Ολυμπίου Διός*
  - 2.1. Περιγραφή βραχώδους υποβάθρου
  - 2.2. Ιστορική ανασκόπηση
  - 2.3. Ο ελεύθερα ιστάμενος κίονας της νοτιοδυτικής γωνίας
3. *Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> – Ενόργανη Παρακολούθηση*
  - 3.1. Γενικά
  - 3.2. Τύποι αισθητήρων
  - 3.3. Καθορισμός ορίων συναγερμού
  - 3.4. Παραδείγματα ενόργανης παρακολούθησης αρχαίων μνημείων
4. *Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> - Μελέτη περίπτωσης*
  - 4.1. Ενοργάνωση του ελεύθερα ιστάμενου κίονα της νοτιοδυτικής γωνίας του Ναού του Ολυμπίου Διός
  - 4.2. Η δοκιμή περιβαλλοντικών δονήσεων (AVT)
  - 4.3. Το αριθμητικό προσομοίωμα
  - 4.4. Βαθμονόμηση του μέτρου ελαστικότητας
  - 4.5. Αριθμητική ανάλυση
5. *Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> – Συμπεράσματα*

## Ευχαριστίες

## Βιβλιογραφία

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η ενόργανη παρακολούθηση αρχαίου κίονα με σκοπό να διερευνηθεί η συμπεριφορά του απέναντι σε δυναμικές καταπονήσεις. Η εργασία ξεκινάει με την περιγραφή των γενικών χαρακτηριστικών των κατασκευών που χαρακτηρίζονται ως αρχαίες και των χαρακτηριστικών της απόκρισής τους σε δυναμικές καταπονήσεις. Γίνεται η περιγραφή του Ναού του Ολυμπίου Διός στην Αθήνα (ιστορικά και γεωμετρικά στοιχεία, περιγραφή βραχώδους υποβάθρου) και παρουσιάζεται λεπτομερώς η κατάσταση διατήρησης του δυτικότερου από τους ιστάμενους κίονες του μνημείου.

Συνεχίζει περιγράφοντας τη σημασία της παρακολούθησης της δομικής κατάστασης (SHM) και των δοκιμών περιβαλλοντικών δονήσεων (AVT) για την αξιολόγηση της ακεραιότητας των ιστορικών κατασκευών και δίνει παραδείγματα εφαρμογών SHM και AVT σε παρόμοιες κατασκευές.

Μελετώνται στη συνέχεια τα αποτελέσματα δοκιμής περιβαλλοντικών δονήσεων (AVT) που καταγράφηκαν από επιταχυνσιογράφους που εγκαταστάθηκαν στον αρχαίο κίονα. Οι καταγραφές των οργάνων χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μέτρου ελαστικότητας του κίονα, ως ένα δείκτη της απομείωσης των μηχανικών χαρακτηριστικών του υλικού, λόγω των του συνόλου βλαβών που παρουσιάζει. Η βαθμονόμηση αυτή διασφαλίζει ότι το μοντέλο αναπαριστά με ακρίβεια τη συμπεριφορά και την απόκριση του κίονα. Το βαθμονομημένο αριθμητικό μοντέλο στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την προσομοίωση και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του κίονα υπό πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις.

Η ανάλυση αυτή αποσκοπεί στην αξιολόγηση της δομικής απόδοσης του κίονα και στην εκτίμηση της τρωτότητάς του σε σεισμικά γεγονότα.

## **ABSTRACT**

In this paper the instrumental monitoring of an ancient column is presented in order to investigate its behaviour against dynamic stresses.

The paper starts with a description of the general characteristics of structures classified as ancient and the characteristics of their response to dynamic stresses. A description of the Temple of Olympian Zeus in Athens is given, as well as the current state of preservation of the westernmost of the still standing columns of the monument.

The paper goes on to describe the importance of structural health monitoring (SHM) and ambient vibration testing (AVT) for assessing the integrity of historic structures and gives examples of applications of SHM and AVT to similar structures.

Ambient vibration test (AVT) results recorded by accelerometers installed on the western column of the monument are then studied. The instrument recordings were used to calibrate the modulus of elasticity of the column as an indicator of the degradation of the mechanical properties of the material due to the damage of the column. The calibrated numerical model is then used to simulate and predict the behaviour of the column under actual seismic excitations. This analysis aims to evaluate the structural performance of the column and assess its vulnerability to seismic events.



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ -ΣΚΟΠΟΣ

Η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών (Structural Health Monitoring ή SHM), έχει στόχο την παροχή αξιόπιστων δεδομένων σχετικά με τη δομική κατάσταση των κατασκευών (ατέλειες, αστοχίες, κλπ), ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί η συνέχεια της χρήσης της κατασκευής και οι πιθανές απαιτούμενες ενισχύσεις. Κατάλληλοι αισθητήρες τοποθετούνται στα κρίσιμα σημεία της κατασκευής (π.χ. περιοχές μέγιστων αναμενόμενων φορτίσεων), παρέχοντας δεδομένα σχετικά με την συμπεριφορά της κατασκευής. Η σύγκριση των δεδομένων αυτών με την θεωρητική συμπεριφορά της κατασκευής, παρέχει την δυνατότητα της "συνεχούς παρακολούθησης" της κατασκευής και της αποκάλυψης οποιασδήποτε δομικής αστοχίας.

Η Ανάλυση Δονήσεων Περιβάλλοντος (Ambient Vibration Analysis), ή αλλιώς Λειτουργική Ιδιομορφική Ανάλυση (Operational Modal Analysis - OMA) χρησιμοποιεί τις καταγραφές των περιβαλλοντικών δονήσεων (AVT=Ambient Vibration Tests), για τον προσδιορισμό των ιδιομορφικών παραμέτρων (ιδιοσυχνότητες, απόσβεση και ιδιομορφές) μιας κατασκευής κατά τη λειτουργία της. Σαν ένταση χρησιμοποιεί τις δυναμικές φορτίσεις που προέρχονται από το περιβάλλον της κατασκευής (άνεμος, δονήσεις από τη δραστηριότητα της πόλης κλπ) οι οποίες καταγράφονται από αισθητήρες εγκατεστημένους στις κατασκευές.

Τα αρχαία μνημεία, ειδικά εκείνα που είναι αρθρωτά δομημένα, χωρίς συνδετικό κονίαμα μεταξύ των λιθοσωμάτων, αποτελούν μια ομάδα κατασκευών που δεν μπορούν να ενταχθούν σε κάποιο κανονισμό, ούτε να σχεδιαστεί η απόκρισή τους σε δυναμικά φαινόμενα όπως συμβαίνει στις σύγχρονες κατασκευές από ωπλισμένο σκυρόδεμα και ως ένα βαθμό στις παραδοσιακές κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία.

Ως εκ τούτου, ένα σημαντικό εργαλείο για την ανάλυση τέτοιων κατασκευών, είναι η παρακολούθηση της κινηματικής τους συμπεριφοράς κατά τη διάρκεια γεγονότων δυναμικής καταπόνησης όπως είναι ο σεισμός. Οι μετρήσεις που λαμβάνονται από τα όργανα που εγκαθίστανται σε επιλεγμένες θέσεις της κατασκευής μπορούν να δώσουν πληροφορίες για τα εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη που αναπτύσσονται στην κατασκευή, μέσω της επιλεγμένης μεθόδου ανάλυσης. Όσο μεγαλύτερο είναι το χρονικό διάστημα των καταγραφών, τόσο πιο αξιόπιστα τα δεδομένα των δράσεων και κατ' επέκταση τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

## *Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>- Απόκριση αρχαίων κατασκευών σε σεισμικές καταπονήσεις*

### *1.1. Περιγραφή αρχαίων κατασκευών*

Οι μνημειακές κατασκευές της κλασσικής, ελληνιστικής και ρωμαϊκής περιόδου χαρακτηρίζονται από την έλλειψη συνδετικού κονιάματος μεταξύ των λιθοσωμάτων. Κατασκευάζονται είτε με την απλή τοποθέτηση λίθων πάνω σε άλλους, είτε με τη χρήση συνδέσμων μεταξύ των λιθοσωμάτων οι οποίοι ήταν :

- οριζόντιοι σιδηροί ή και ορειχάλκινοι σχήματος διπλού Ταυ ή Π και
- κατακόρυφοι συνδέσμοι που ονομάζονται γόμφοι οι οποίοι ήταν (α) ξύλινοι (πόλοι) με ξύλινες διαπλατύνσεις (εμπόλια) στις οποίες προσαρμόζονταν οι πόλοι ή (β) σιδηροί και ενίοτε ορειχάλκινοι

Ειδικότερα, οι κίονες των αρχαίων ναών, στοών και λοιπών αρχαίων κατασκευών, ήταν είτε μονολιθικοί (αποτελούνταν από έναν λαξευμένο λίθο στις διαστάσεις του κίονα) είτε κατασκευάζονταν με την τοποθέτηση χονδρολαξευμένων λίθων πάνω σε άλλους χρησιμοποιώντας κατακόρυφους ξύλινους (πόλοι) ή μεταλλικούς συνδέσμους (γόμφοι) για τη μεταξύ τους σύνδεση. Ακολουθούσε η λάξευση των λίθων, σύμφωνα με τον επιλεγμένο αρχιτεκτονικό ρυθμό, μέχρι να πάρουν τη τελική τους μορφή. Ιδιαίτερη φροντίδα δινόταν στους αρμούς μεταξύ των λίθων (ή σπονδύλων) με στόχο αφενός την τελειοποίηση της εικόνας και αφετέρου την άψογη προσαρμογή των διεπιφανειών καθώς ήταν καθοριστική για την ευστάθειά τους κατά τη διάρκεια σεισμικών γεγονότων.

Κατασκευές δομημένες κατ' αυτόν τον τρόπο διατηρούνται μέχρι σήμερα αποσπασματικά, όμως ο κυριότερος παράγοντας της φθοράς τους δεν είναι τα φυσικά φαινόμενα όπως θα περίμενε κανείς, αλλά ο άνθρωπος. Η εγκατάλειψη, οι επιδρομές λαών και η αποδόμησή τους για την επανάχρηση των υλικών τους, είναι οι κυριότεροι λόγοι για την αποσπασματική διατήρησή τους. Σ' αυτούς προστίθενται οι χημικοί παράγοντες (δράση νερού, ατμοσφαιρικοί μόλυνση κλπ) οι οποίοι βλάπτουν την επιφάνεια του υλικού δόμησης.

Οι μνημειακές κατασκευές βασίζονται για την ευστάθειά τους, στο βάρος τους και στις δυνάμεις τριβής μεταξύ των μελών τους. Φαίνεται πως αυτοί οι μηχανισμοί επαρκούν για την ευστάθειά τους έναντι δυναμικών φαινομένων.

Σπανιότατα υπάρχουν καταγραφές για κατάρρευση τέτοιων κατασκευών από σεισμούς ή άλλα φυσικά φαινόμενα. Αυτό οφείλεται αφενός στο στιβαρό φέροντα οργανισμό των κατασκευών αυτών, και αφετέρου στην τεκτονική ιστορία της περιοχής στην οποία βρίσκεται το μνημείο. Ειδικά για την πόλη των Αθηνών δεν υπάρχουν μέχρι σήμερα πληροφορίες που να οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η πόλη έχει πληγεί σημαντικά από ισχυρούς σεισμούς στη μακρά της ιστορία και οι σεισμικές βλάβες αφορούν κυρίως παλαιές και τρωτές κατασκευές <sup>(7)</sup>. Επιπλέον, δεν υπάρχουν πληροφορίες για απώλειες ζώων ή πρόκληση κοινωνικής κρίσης με εξαίρεση τους δύο σύγχρονους σεισμούς του 1981 στις Αλκυονίδες και του 1999 στην Πάρνηθα, η ένταση των οποίων για διάφορες περιοχές των Αθηνών ήταν πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τα μέχρι τότε γνωστά δεδομένα. Οι

τοποθεσίες κοντά στην Αθήνα που ήταν κατά το παρελθόν σεισμικά ενεργές, παραμένουν και σήμερα ενεργές, καταδεικνύοντας την μακροπρόθεσμη φύση της σεισμικής επικινδυνότητας σε μία περιοχή.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αρχαίας κατασκευής που κατέρρευσε από φυσικό φαινόμενο είναι ο πεσμένος κίονας του Ναού του Ολυπίου Διός ο οποίος έπεσε λόγω μιας δυνατής θύελλας που έπληξε τη Αθήνα το 1852. Οι λόγοι που τον έκαναν ευάλωτο στη θύελλα ερευνώνται ακόμη, με επικρατέστερο το σενάριο της μονόπλευρης αστοχίας της θεμελίωσής του από αίτια που δεν σχετίζονται με τη συγκεκριμένη θύελλα.

Στις επόμενες φωτογραφίες φαίνονται αντιπροσωπευτικά παραδείγματα ενός κλασικού, ενός ελληνιστικού και ενός ρωμαϊκού μνημείου.



**Εικ.1.** Κατασκευή 4ου π.χ. αι. : Ναός Ηφαίστου στην Αρχαία Αθηναϊκή Αγορά



**Εικ. 2.**  
Κατασκευή 1<sup>ου</sup> π.χ. αι.: Ωρολόγιον Ανδρόνικου  
Κυρρήστου στη Ρωμαϊκή Αγορά της Αθήνας



**Εικ. 3.** Κατασκευή 2<sup>ου</sup> μ.χ. αι.: Ναός Ολυπίου Διός στην  
Αθήνα

## *1.2. Απόκριση των αρθρωτών κατασκευών σε δυναμικές καταπονήσεις*

Τα αρχαία μνημεία έχουν φέροντα οργανισμό που δεν μπορεί να προσδιοριστεί πλήρως από κανονισμούς και πρότυπα για τη συμπεριφορά και τη λειτουργία τους όπως συμβαίνει α/ με τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα

β/ με τις κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία όταν αποτελούνται από λιθοσώματα γνωστής συμπεριφοράς και

γ/ με την ξηρή δόμηση και γενικώς βιομηχανοποιημένα υλικά προκαθορισμένων μηχανικών ιδιοτήτων και συμπεριφοράς στην καταπόνηση είτε αυτή είναι στατική είτε είναι δυναμική.

Για το λόγο αυτό, μέχρι σήμερα δεν υπάρχει κανονισμός ή έστω κατευθυντήριες οδηγίες που να ενσωματώνουν τον υπολογισμό και τον έλεγχο τέτοιων κατασκευών.

Οι πολυσπόνδυλοι κίονες που κυρίως καλούνται να φέρουν βαρυτικά φορτία, όταν υφίστανται μικρής έντασης οριζόντια διέγερση όπως περιβαλλοντικές δονήσεις ή μικρής έντασης σεισμικές δονήσεις, τείνουν να συμπεριφερθούν γραμμικά, χωρίς ανασήκωμα των διεπιφανειών τους, με χαρακτηριστικά που θυμίζουν τη συμπεριφορά μονολιθικού κίονα.

<sup>(26)</sup> Ο Κ. Ζάμπας στη μελέτη του (1985) *THE PROBLEM OF THE PARTHENON'S EARTHQUAKE RESISTANCE - TESTING THE EXISTING SITUATION AND THE RESTORATION PROPOSALS IN A STAGE OF PREPARATORY STUDY* θεωρεί ότι αυτή η συμπεριφορά ισχύει για οριζόντια φορτία που δεν υπερβαίνουν το 4% περίπου του συνολικού κατακόρυφου φορτίου.

Κατά τη διάρκεια ενός ισχυρού σεισμού όμως, η απόκριση συνεχώς εναλλάσσεται μεταξύ των διαφόρων μορφών ταλάντωσης. Κάθε μορφή ταλάντωσης διέπεται από διαφορετικές εξισώσεις κίνησης, γεγονός που οδηγεί στη μη-γραμμικότητα της συμπεριφοράς. <sup>(15)</sup>

Έχει παρατηρηθεί επίσης ότι, συχνά, η εκτός επιπέδου επιβαλλόμενη κίνηση μπορεί να προκαλέσει παραμένουσες μετατοπίσεις σε διευθύνσεις διαφορετικές από αυτές της διέγερσης.

### *1.2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόκριση σε σεισμικά γεγονότα*

Η απόκριση των κλασικών μνημείων σε σεισμικές διεγέρσεις (και επομένως και ο κίνδυνος κατάρρευσης) επηρεάζεται από δύο βασικούς παράγοντες: (α) από τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης και (β) από το μέγεθος της κατασκευής. Όσον αφορά την περίοδο της εδαφικής κίνησης, η απόκριση μεγαλώνει σχεδόν εκθετικά όσο μεγαλώνει η περίοδος. Έτσι, ενώ ένα μνημείο μπορεί να έχει μικρή παραμόρφωση σε έναν υψίσυχνο σεισμό, είναι πιθανόν να καταρρεύσει σε έναν μακροπερίοδο σεισμό με μικρότερη μέγιστη επιτάχυνση. Στην πρώτη περίπτωση, η παραμόρφωση οφείλεται κυρίως σε ολισθήσεις των επιμέρους δομικών στοιχείων, ενώ στη δεύτερη επικρατεί ο λικνισμός. Όσον αφορά το μέγεθος της κατασκευής, η απόκριση αλλάζει σημαντικά όταν αλλάζουν οι απόλυτες διαστάσεις, ακόμη και εάν διατηρηθεί η ίδια αναλογία διαστάσεων <sup>(15)</sup> κάτι αναμενόμενο εφόσον η σεισμική δύναμη που αναλαμβάνει μία κατασκευή είναι ευθέως ανάλογη της μάζας της ( $F=m \cdot a$ ). Για

το λόγο αυτό, τα πειράματα που χρησιμοποιούν μοντέλα κατασκευών υπό κλίμακα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη στα αποτελέσματά τους αυτόν τον παράγοντα.

Ο Κ. Παπαντωνόπουλος θίγει το θέμα της κατάστασης διατήρησης του κίονα, καθώς οι απώλειες μάζας ακόμα και όταν πρόκειται για μικρά τμήματα ειδικά σε περιοχές έδρασης επηρεάζουν την ευστάθειά του. Σύμφωνα με τη μελέτη του στο Ναό του Επικούριου Απόλλωνα, η ανάλυση έδειξε ότι ελεύθερα ιστάμενοι κίονες μπορούν να παραλάβουν με ασφάλεια μεγάλες σεισμικές δονήσεις με τα χαρακτηριστικά του σεισμού της Καλαμάτας το 1986 ( την χρονοϊστορία την οποία εφάρμοσε στην ανάλυσή του) εφόσον βρίσκονται σε καλή κατάσταση διατήρησης. Σε κάθε περίπτωση, η ανατροπή ενός κίονα σε δεδομένη σεισμική διέγερση, δεν σημαίνει ότι αυτός θα ανατραπεί υποχρεωτικά και κάτω από μεγεθυμένη διέγερση. <sup>(1)</sup>

Ατέλειες της σημερινής τους κατάστασης με κυριότερη αυτή της έλλειψης έδρασης λόγω απομείωσης της βάσης του κίονα αλλά και των επιφανειών έδρασης των σπονδύλων, μειώνουν δραματικά την ευστάθεια των κατά τα άλλα στιβαρών αυτών κατασκευών. <sup>(1)</sup>

Για το λόγο αυτό, ένα μνημείο που έχει ανταποκριθεί επαρκώς σε ισχυρούς σεισμούς δεν αποκλείεται να καταρρεύσει υπό την επίδραση μικρότερων σεισμών λόγω των ατελειών που έχουν επιφέρει στη δομή του οι απομειώσεις ή αποτμήσεις της μάζας του.

Βέβαια, σημαντικός παράγοντας για την ευστάθεια ενός ελεύθερα ιστάμενου κίονα αποτελεί το έδαφος στο οποίο είναι θεμελιωμένος καθώς και η κατασκευή της θεμελίωσής του. Κατά κανόνα οι αρχαίες κατασκευές είναι θεμελιωμένες στο βραχώδες υπόβαθρο. Αυτό σημαίνει ότι για τη θεμελίωση μιας αρχαίας κατασκευής προηγείτο η εκσκαφή μέχρι το βράχο είτε ολόκληρης της κάτοψης, είτε των περιοχών που καταλάμβαναν τοίχοι , κιονοστοιχίες και άλλα μέρη του φέροντα οργανισμού της. Και επειδή δεν ήταν εύκολη η λάξευση του βράχου, η θεμελίωση ακολουθούσε το ανάγλυφο του βραχώδους υποβάθρου, με αποτέλεσμα κάποια δομικά στοιχεία να έχουν κατασκευή θεμελίωσης ύψους μερικών εκατοστών και κάποια άλλα αρκετών μέτρων. Όπως είναι αναμενόμενο, δομικά στοιχεία με θεμελίωση ύψους αρκετών μέτρων είναι πιο ευάλωτα στη δυναμική καταπόνηση από άλλα που έχουν θεμελιωθεί στο βράχο μέσω ενός θεμελίου μερικών εκατοστών. Το υλικό κατασκευής της θεμελίωσης, επηρεάζει επίσης την αντοχή της.

Κατά τη διάρκεια του λικνισμού, τα σημεία επαφής μεταξύ των σπονδύλων μειώνονται δραματικά με αποτέλεσμα ακόμα και μικρές ατέλειες στη διεπιφάνειά τους να προκαλέσουν κατάρρευση, όπως προέκυψε από την κλιμακωμένη σεισμική διέγερση σε υπό κλίμακα κίονα 5 σπονδύλων που παρουσιάζεται από τους Vasileios A. Drosos · Ioannis Anastasopoulos <sup>(10)</sup>. Στην ίδια πειραματική διέγερση παρατηρείται ότι παρόλο που η εφαρμόστηκε σε μία διεύθυνση, αναπτύχθηκαν μετατοπίσεις σπονδύλων προς όλες τις διευθύνσεις.

Είναι γνωστό ότι, όταν εκδηλώνεται ανατροπή χωρίς ολίσθηση των σπονδύλων, αναπτύσσεται ροπή επαναφοράς  $M$  λόγω του ίδιου βάρους, ή οποία μειώνεται γραμμικά, όσο αυξάνεται η γωνία εκτροπής  $\gamma$ . <sup>(7)</sup>

Σύμφωνα με τον Α. Κουνάδη (2014) οι μονολιθικοί κίονες ανατρέπονται ευκολότερα από τους αντίστοιχης ακαμψίας και γεωμετρίας πολυσπόνδυλους κατά τη διάρκεια ενός

σεισμού. Οι μικρομετατοπίσεις που λαμβάνουν χώρα μεταξύ των σπονδύλων ενός πολυσπόνδylου κίονα, απορροφούν την εδαφική ενέργεια και μειώνουν αισθητά την εδαφική επιτάχυνση στην κορυφή των κίωνων. Η μείωση αυτή μπορεί να μετρηθεί μόνο πειραματικά.<sup>(11)</sup>

#### Επιρροή των επιστυλίων

Οι αναλύσεις που διεξήχθησαν δείχνουν ότι τα συστήματα κινοστοιχίας με ενιαίο επιστύλιο έχουν παρόμοια συμπεριφορά με τους ελεύθερους κίονες κάτω από σεισμικές διεγέρσεις, αλλά απαιτούν υψηλότερες επιταχύνσεις για να ανατραπούν από τους αντίστοιχους ελεύθερους κίονες με τις ίδιες διαστάσεις και αριθμό σπονδύλων<sup>(12)</sup>. Εξετάζοντας τη σταθερότητα των κινοστοιχιών πολλαπλών τυμπάνων με ένα μόνο επιστύλιο, υπό σεισμούς που επιλέχθηκαν από περιοχές όπου βρίσκονται συχνά αυτά τα μνημεία, όπως η περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου, οι προσομοιώσεις αποκαλύπτουν ότι τα αυτά συστήματα έχουν την ικανότητα να αντέχουν σε ισχυρούς σεισμούς χωρίς κατάρρευση. Από την άλλη πλευρά, φαίνεται να είναι πιο ευάλωτα σε σεισμούς με πολύ χαμηλές κυρίαρχες συχνότητες (δηλαδή μεγάλες περιόδους). Το επιστύλιο φαίνεται να είναι το μέρος της κατασκευής με τον μεγαλύτερο κίνδυνο αστοχίας κάτω από αυτά τα φορτία<sup>(12)</sup>

Στη «Μελέτη σεισμικής συμπεριφοράς των στύλων του Ολυμπίου Διός – Εφαρμογή στη διερεύνηση της σεισμικής ιστορίας της Αθήνας»<sup>(6)</sup>, αναφέρεται ότι, η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος των δύο κίωνων με επιστύλιο δεν είναι αρκετά διαφορετική από αυτή των μεμονωμένων κίωνων. Στη συγκεκριμένη μελέτη που έλαβε χώρα στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος που χρηματοδότησε ο ΟΑΣΠ το 2005, χρησιμοποιήθηκαν αρμονικές διεγέρσεις για την ανάλυση της αρχαίας αυτής κατασκευής με τη μέθοδο των διακριτών στοιχείων με τον κώδικα 3DEC της εταιρείας Itasca Consulting Group, Inc. Στόχος της μελέτης ήταν να διερευνηθεί η επιρροή διαφόρων παραμέτρων στην απόκριση των πολυσπόνδylων κίωνων του μνημείου στην περίπτωση που είναι συνδεδεμένοι με επιστύλιο και μη. Παρά τη διαφορετική φύση των αρμονικών από τις σεισμικές διεγέρσεις, η χρήση των αρμονικών διεγέρσεων, βοήθησε στην παραμετροποίηση αυτή περισσότερο από τις σεισμικές.

Οι αναλύσεις, που έλαβαν χώρα σε αυτή τη μελέτη, δείχνουν ότι η διαφορά αυτή δεν είναι τόσο μεγάλη. Αυτό φαίνεται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τη μέθοδο της χρονοϊστορίας αφενός σε ένα μεμονωμένο κίονα του Ναού του Ολυμπίου Διός και αφετέρου σε σύστημα 2 κίωνων συζευγμένων με επιστύλιο. Τα αποτελέσματα για  $T=0.80$  sec,  $v=80$  cm/sec και διάρκεια δόνησης 2 κύκλων, δείχνουν ότι γενικώς η ύπαρξη επιστυλίου οδηγεί σε λίγο μικρότερες μετακινήσεις, χωρίς όμως να αλλάζει ουσιαστικά ο τρόπος ταλάντωσης.

Το γεγονός αυτό πρέπει να αποδοθεί στη μεγάλη αδράνεια των λικνιστικών ταλαντώσεων των κίωνων, οι οποίες δεν φαίνεται να μπορούν να επηρεαστούν σημαντικά από την ύπαρξη του επιστυλίου. Γενικότερα, οι αριθμητικές αναλύσεις επαληθεύονται από πειραματικά δεδομένα, ως προς τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόκριση τόσο των

κιονοστοιχιών με επιστύλια όσο και των ελεύθερα ιστάμενων κίωνων και τα συμπεράσματα συνοψίζονται στα παρακάτω:

A) και τα δύο συστήματα αποκρίνονται καλύτερα σε υψίσυχνες διεγέρσεις, ενώ καταρρέουν νωρίτερα υπό μακροπερίοδες διεγέρσεις <sup>(10),(12)</sup>,

B) οι κιονοστοιχίες με επιστύλια απαιτούν υψηλότερες επιταχύνσεις για να καταρρεύσουν

#### Δράση των γόμφων

Οι κατακόρυφοι σύνδεσμοι μεταξύ διαδοχικών σπονδύλων δεν φαίνεται να επηρεάζουν θετικά την απόκριση πολυσπόνδυλων κίωνων καθώς εμποδίζουν τις μικρομετατοπίσεις οι οποίες απορροφούν ενέργεια και μειώνουν καθύψος την εδαφική κίνηση. <sup>(10)</sup> Βέβαια εξαρτάται από το πόσο στιβαρός είναι ο σύνδεσμος αλλά και από τη θέση του στη διεπιφάνεια μεταξύ σπονδύλων. Ένας κεντρικός πόλος από ξύλο πιθανώς να εξαντλεί νωρίς τη διατμητική του αντοχή και να μην επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη σχετική μετατόπιση. Αντίθετα, δύο στιβαροί σύνδεσμοι από σίδηρο αντιδιαμετρικά διατεταγμένοι πάνω στη διεπιφάνεια δύο διαδοχικών σπονδύλων, έχουν προφανώς μεγαλύτερη διατμητική αντοχή, η οποία αν προστεθεί στις δυνάμεις τριβής μεταξύ των σπονδύλων θα περιορίσει ή και θα μηδενίσει τις σχετικές μετατοπίσεις.

#### Η επιρροή της ενδοσιμότητας της βάσης

Σύμφωνα με τον Housner, ο οποίος διερεύνησε συστηματικά τη δυναμική άκαμπτου σώματος πάνω σε άκαμπτη οριζόντια βάση στην οποία επιβάλλεται οριζόντια μετακίνηση, το εύρος της ταλάντωσης, μειώνεται σημαντικά μετά από κάθε σύγκρουση του σώματος με τη βάση ενώ η συχνότητα της ταλάντωσης παρουσιάζει σημαντική αύξηση που πλησιάζει το άπειρο.

Οι περισσότερες αναλύσεις θεωρούν ότι οι κατασκευές είναι θεμελιωμένες σε άκαμπτη βάση, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη την αλληλεπίδραση εδάφους –κατασκευής, την ιδιότητα δηλαδή της θεμελίωσης να απορροφά μέρος της ενέργειας κατά τη δυναμική φόρτιση και να υφίσταται παραμόρφωση.

Στο «M. Salvati» Εργαστήριο Δοκιμών Υλικών του Πολυτεχνείου του Μπάρι, έλαβαν χώρα πειράματα από τους Dora Fotti και Vitantonio Vacca, <sup>(26)</sup> σε έναν πολυσπόνδυλο κίονα τοποθετημένο πάνω σε σεισμική τράπεζα ενός βαθμού ελευθερίας η οποία υποβάλλεται σε παλμικές και κυκλικές αρμονικές διεγέρσεις. Ο κίονας τοποθετείται μια φορά σε άκαμπτη και μια φορά σε παραμορφώσιμη βάση.

Στόχος των πειραμάτων ήταν:

1. Να μελετηθεί τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά η επίδραση της παραμορφωσιμότητας της βάσης στη συνολική δυναμική του φαινομένου.
2. Να μελετηθεί τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά η επίδραση της παραμορφωσιμότητας του θεμελίου στη σταθερότητα (όπως ορίζεται στους Zhang και Makris <sup>(27)</sup>) του κίονα για παλμικά φορτία.



3. Να διατυπωθούν προτάσεις, συμβατές με τις σημερινές αναστηλωτικές πρακτικές, για λειτουργικές λύσεις που μειώνουν τη σεισμική τρωτότητα τέτοιων κατασκευών και μεγιστοποιούν την ακεραιότητα του αρχαίου υλικό.

Ο πολυσπόνδυλος κίονας που χρησιμοποιήθηκε έχει γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός δωρικού κίονα ως ακολούθως:

- Λόγος συνολικού ύψους προς διάμετρο βάσης ίσο με 6,5
- 6 σπονδύλους ίδιου ύψους συν το επιστύλιο
- Η οριζόντια τομή του σπονδύλου έχει 20 ημικυκλικές αύλακες
- Η μείωση τη διαμέτρου προς τα πάνω ισούται με το λόγο της διαμέτρου της βάσης του επιστυλίου προς τη βάση του κίονα ίσος με 0.9
- Οι σπόνδυλοι τοποθετούνται με απλή επαφή χωρίς να παρεμβάλλεται κανενός είδους εμπόδιο στην σχετική τους μετατόπιση
- Η διάμετρος της βάσης ισούται με 11.5 εκ. Και το συνολικό ύψος του κίονα ισούται με 74.75 εκ.

Ο σχεδιασμός του δείγματος έλαβε υπόψη γεωμετρικές κανονικοποιήσεις και την καθύψος ομοιομορφία για την επιλογή του αριθμού των σπονδύλων, με στόχο να μην επιβάλει πολύπλοκες παραμέτρους στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Ιδιαίτερη φροντίδα δόθηκε στην υλοποίηση των διεπιφανειών μεταξύ γειτονικών σπονδύλων, δεδομένου ότι ατελείς επαφές επηρεάζουν σημαντικά τη δυναμική απόκριση. Οι διεπιφάνειες επεξεργαστήκαν με αρκετή τραχύτητα ώστε να αναπαραχθεί η τυπική τριβή τέτοιων κατασκευών.

Οι πολυσπόνδυλοι κίονες έχουν την τάση να αναπτύσσουν μετατοπίσεις προς όλες τις διευθύνσεις, ακόμα κι αν η επιβαλλόμενη διέγερση έχει μόνο μία διεύθυνση. Ως εκ τούτου, υπάρχουν 2 σημεία μέτρησης της επιτάχυνσης, στην κορυφή του τρίτου και του έκτου σπονδύλου τόσο στη διεύθυνση της διέγερσης όσο και στην εγκάρσια αυτής.

Πραγματοποιήθηκαν παλμικά πειράματα, ακολουθώντας μια σταδιακή αύξηση της συχνότητας και επαναλήφθηκαν με την ίδια διαμόρφωση για να αξιολογηθεί η αξιοπιστία της απόκρισης στην ελάχιστη ή αμελητέα διακύμανση της επιβαλλόμενης διέγερσης.

Πολυκυκλικές αρμονικές αναλύσεις έλαβαν χώρα με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

1)  $f = 1.00 \text{ Hz}$ ,  $a = 10 \text{ mm}$

2)  $f = 1.50 \text{ Hz}$ ,  $a = 15 \text{ mm}$

3)  $f = 1.75 \text{ Hz}$ ,  $a = 15 \text{ mm}$

Όλες επαναλήφθηκαν με τον κίονα σε άκαμπτη και παραμορφώσιμη βάση. Η άκαμπτη βάση υλοποιήθηκε με μία μεταλλική πλάκα πάχους 3mm ενώ η παραμορφώσιμη με ένα στρώμα φελλού μέτριας πυκνότητας, πάχους 1.5cm.

Παρατηρήθηκαν οι παρακάτω μορφές απόκρισης του κίονα:

- Ο κίονας δεν καταρρέει ακόμα και όταν καταγράφονται ανασηκώματα και στροφές (ορατές ή μη) μεταξύ των σπονδύλων.

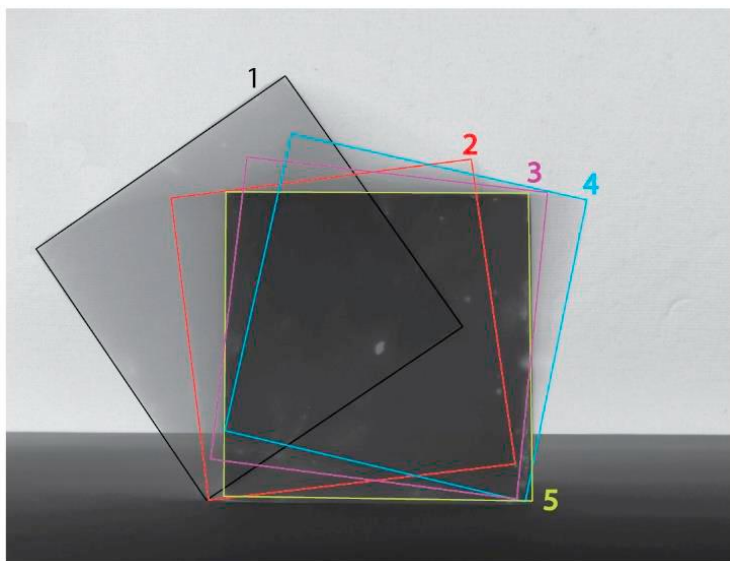


- Ο κίονας καταρρέει μόλις η βάση του λικνιστεί έστω και μία φορά, π.χ όταν συγκρουστεί τουλάχιστον μία φορά με την επιφάνεια έδρασης.
- Ο κίονας καταρρέει ακόμα και χωρίς να λικνιστεί η βάση του, δηλαδή χωρίς να υπάρχει σύγκρουση της βάσης με την επιφάνεια έδρασης.
- Ο κίονας καταρρέει μερικώς
- Σε κανένα από τα πειράματα που έλαβαν χώρα ο κίνας δεν έμεινε άθικτος, ούτε στην περίπτωση της άκαμπτης ούτε της παραμορφώσιμης βάσης, παρατηρήθηκε όμως ότι ο κίονας πάνω σε παραμορφώσιμη βάση παρουσιάζει βελτιωμένη δυναμική συμπεριφορά σε σχέση με αυτόν σε άκαμπτη βάση.

Σε όλα τα πειράματα παρατηρήθηκε μια δραστική μείωση της σεισμικής τρωτότητας του κίονα πάνω σε παραμορφώσιμη βάση. Για την πρώτη και δεύτερη από τις παραπάνω αρμονικές διεγέρσεις, ο κίονας πάνω σε άκαμπτη βάση κατέρρευσε εντελώς μετά τους τρεις πρώτους κύκλους, ενώ στην περίπτωση της παραμορφώσιμης βάσης παραμένει σταθερός μετά από 10 κύκλους, με κάποιες παραμένουσες μετατοπίσεις.

### 1.3. Προσομοίωση και ανάλυση

Η δυναμική απόκριση άκαμπτων σωμάτων είναι πολύπλοκη ακόμα και για ένα μοναδικό σώμα. Η πολυπλοκότητα πολλαπλασιάζεται όταν προστεθεί δεύτερο σώμα πάνω στο πρώτο και πολύ περισσότερο για περισσότερα σώματα. Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει την απόκριση ενός άκαμπτου σώματος που αφήνεται να ταλαντωθεί ελεύθερα από μια αρχική επικλινή θέση. Η θέση του σώματος σε διαδοχικές χρονικές στιγμές δείχνει ότι η κίνηση περιλαμβάνει τόσο λικνισμό όσο και μετατοπίσεις.



**Εικ.4.** Η κίνηση άκαμπτου σώματος που αφήνεται να ταλαντωθεί ελεύθερα από μία αρχική επικλινή θέση <sup>(12)</sup>

Η μελέτη αρχαίων πολυσπόνδυλων κίωνων αλλά και κάθε συστήματος με σύνθετη συμπεριφορά, απαιτεί προηγμένες τεχνικές, όπως είναι οι μέθοδοι αριθμητικής προσομοίωσης.

Η μέθοδος διακριτών στοιχείων (DEM: Distinct Elements Method) χρησιμοποιείται συνήθως για την προσομοίωση συστημάτων με πολλαπλά σώματα. Η DEM αντιμετωπίζει κάθε μεμονωμένο σώμα ως διακριτό στοιχείο και μοντελοποιεί τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους με βάση τις δυνάμεις επαφής, την τριβή και άλλες σχετικές παραμέτρους. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την προσομοίωση πολύπλοκων κινήσεων, όπως η ταλάντωση και η μετατόπιση, και παρέχει πληροφορίες για τη συμπεριφορά του συστήματος με την πάροδο του χρόνου.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM: Finite Elements Method) είναι μια άλλη ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική αριθμητικής προσομοίωσης. Η FEM διαιρεί το σύστημα σε πεπερασμένα στοιχεία και επιλύει τη συμπεριφορά κάθε στοιχείου με βάση εξισώσεις που καθορίζουν τη μηχανική τους συμπεριφορά. Χρησιμοποιείται συνήθως για την ανάλυση της δομικής απόκρισης σωμάτων, υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης. Η FEM μπορεί επίσης να εφαρμοστεί για τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς πολυσπόνδυλων στύλων, λαμβάνοντας υπόψη τις αλληλεπιδράσεις και τις παραμορφώσεις μεταξύ των γειτονικών στοιχείων.

Τόσο το DEM όσο και η FEM έχουν τα δικά τους πλεονεκτήματα και περιορισμούς και η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του συστήματος που μελετάται και τους ερευνητικούς στόχους.

Η χρήση μεθόδων αριθμητικής προσομοίωσης, συμπεριλαμβανομένων των DEM και FEM, παρέχει στους ερευνητές ισχυρά εργαλεία για τη μοντελοποίηση και την κατανόηση της πολύπλοκης συμπεριφοράς συστημάτων που περιλαμβάνουν πολλαπλά σώματα, όπως οι αρχαίοι κίονες. Οι μέθοδοι αυτές επιτρέπουν τη διερεύνηση διαφόρων παραγόντων, όπως η δομική σταθερότητα, η δυναμική απόκριση και οι επιδράσεις διαφόρων παραμέτρων, σε ένα περιβάλλον προσομοίωσης, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για την περαιτέρω ανάλυση των κατασκευών.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> – Ο Ναός Ολυμπίου Διός

### 2.1. Περιγραφή βραχώδους υποβάθρου

Η γεωλογική δομή του συστήματος των Αθηναϊκών σχιστολίθων που εμφανίζονται κυρίως στη χαμηλή ζώνη και στη βάση των πρανών του Βράχου της Ακρόπολης, περιλαμβάνει: <sup>(7)</sup>

i) **Ψαμμίτες**, τεφροπράσινους, μεσόκοκκους έως λεπτόκοκκους, μετρίως έως ισχυρώς αποσαθρωμένους και έντονα διερρηγμένους. Εμφανίζονται σε μικρές νησίδες καλυπτόμενοι από μικρού πάχους μανδύα αποσάθρωσης ή από σημαντικού πάχους προσχώσεις.

ii) **Μαργαϊκή φάση**, με ψαμμιτο-μάργες τεφρού-φαιοκίτρινου ή υποπράσινου χρώματος και υποκίτρινους λεπτοπλακώδεις μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, έντονα διερρηγμένους. Εντοπίζεται, κυρίως, στη βόρεια κλιτύ του Βράχου σε εναλλαγή με τους ψαμμίτες.

iii) **Λατυποκροκαλοπαγές**, με αποστρογγυλεμένα ή γωνιώδη τεμάχια, κυρίως ασβεστολίθων, πυριτιολίθων και ψαμμιτών μέσα σε αργιλοψαμμιτική ή ασβεστομαργαϊκή συνδετική μάζα. Δεν παρατηρείται συγκεκριμένη διαβάθμιση ή κανονική διάταξη των λατυπών-κροκαλών. Εμφανίζεται, ως επί το πλείστον, στη νότια και δυτική κλιτύ του Βράχου, όπως επίσης στη νότια και βόρεια του Αρείου Πάγου.

Υπερκείμενα των παραπάνω σχηματισμών απαντώνται σε κανονική επαφή οι γκρι Ανωκρητιδικοί ασβεστόλιθοι, των οποίων το πάχος δεν ξεπερνά τα 40m. Σε γενικές γραμμές είναι άστρωτοι, αλλά κατά θέσεις εμφανίζονται σε παχυπλακώδη στρώση. Οι ασβεστόλιθοι αυτοί φέρουν έντονο δίκτυο διαρρήξεων και διακλάσεων, λόγω εκτεταμένων διαβρωσιγενών-καρστικών φαινομένων. Επίσης, φαινόμενα διαλυτοποίησης του ασβεστολίθου λόγω του νερού της βροχής είχαν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κοιλοτήτων, που εντοπίζονται κυρίως στη βορειοδυτική και τη νότια πλευρά του Βράχου. Να σημειωθεί ότι πολλές από τις ρωγμές και τις κοιλότητες αυτές έχουν πληρωθεί δευτερογενώς με ασβεστομαργαϊκό υλικό λόγω της διάβρωσης.

Στο πλαίσιο της συγχρηματοδοτούμενης Πράξης «Στερέωση και Συντήρηση του Ναού του Ολυμπίου Διός στην Αθήνα» έλαβε χώρα γεωφυσική μελέτη για την αποσαφήνιση του βραχώδους υποβάθρου και της μορφής των θεμελίων του ναού και της πλατείας του ιερού. Οι μέθοδοι διερεύνησης που εφαρμόστηκαν για το σκοπό αυτό ήταν: Σεισμική τομογραφία, Σεισμική διάθλαση, Επιφανειακά κύματα, Γεωραντάρ, Δοκιμή Μηχανικού Παλμού, Δοκιμή Ταχύτητας και Τοπογραφική διόρθωση.

Σύμφωνα με αυτή τη μελέτη<sup>(4)</sup>, το βραχώδες υπόβαθρο στο χώρο του Ολυμπίου είναι ο αθηναϊκός σχιστόλιθος, με τη μορφή χλωριτικού σχιστόλιθου σε εναλλαγή με κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους.

Το ανάγλυφο παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις στο χώρο του ναού, όπου το βάθος αυξάνεται γενικά από τα ανατολικά προς τα δυτικά και νότια, με τις μεγαλύτερες τιμές να παρατηρούνται στη δυτική πλευρά του ναού.

Στην περιοχή του Σηκού παρατηρείται κλιμακωτή μεταβολή του βάθους προς τα δυτικά, ενώ τα βάθη είναι σημαντικά μεγαλύτερα στο εσωτερικό του σε σχέση με τα όριά του. Επίσης, παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση στη διαβάθμιση του βάθους μεταξύ του

βόρειου και νότιου τμήματος του ναού. Το βάθος του βραχώδους υποβάθρου είναι μεγαλύτερο περιμετρικά της κρηπίδας του ναού, εκτός από το ανατολικά τμήμα της πλατείας του ιερού όπου εμφανίζεται επιφανειακά.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της γεωφυσικής μελέτης, η μηχανική συμπεριφορά του βραχώδους υποβάθρου συνοψίζεται στις παρακάτω τιμές (αναφέρονται πρώτες οι τιμές για τη ΝΑ γωνία ακολουθούν αυτές για τη ΝΔ γωνία):

- συμπίεστική ταχύτητα (m/s): 1728 και 1144
- διατμητική ταχύτητα (m/s): 703 και 622
- λόγος Poisson: 0.269
- φαινόμενο βάρος (kN/m<sup>3</sup>): 21.8 και 20.7
- δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (MPa): 2952 και 1931
- θλιπτική αντοχή (MPa): 29.7 και 24.1
- φέρουσα ικανότητα (kPa): 586 και 604
- καθίζηση (mm): 0.40 και 0.48
- στατικό μέτρο ελαστικότητας (MPa): 575 και 372
- συνοχή C (kPa): 293 και 302
- γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi$  (ο): 33 και 35
- κατηγορία εδάφους κατά EAK/EC8: A και B
- η σχιστολιθική βραχομάζα κατατάσσεται κατά RMR στην κατηγορία III, χαρακτηρίζεται ως Μέτρια, με βαθμολογία RMR=59, GSI=56 (εκτιμώμενες τιμές C=200-300 kPa,  $\phi$ =25-35).

Σε ό,τι αφορά τη θεμελίωση των κιόνων, η ίδια μελέτη, με συνδυασμό σεισμικής διερεύνησης (επιφανειακή τομογραφία, διάθλαση) και γεωραντάρ παρείχε αποτελέσματα για το βάθος του βραχώδους υποβάθρου στις θέσεις των θεμελίων:

Οι διαστάσεις θεμελίων είναι της τάξης των 2.80x2.80 m με απόκλιση της τάξης των 0.10 m. Το βάθος των ποδών των θεμελίων κυμαίνεται στη ΝΑ γωνία από 2.4 έως 3.3 m, με σημαντικές διαφοροποιήσεις κατά μήκος της νότιας εξωτερικής κιονοστοιχίας, και μικρότερη διακύμανση στην ενδιάμεση και τη βόρεια κιονοστοιχία. Στη ΝΔ γωνία, το αντίστοιχο βάθος κυμαίνεται από 3.9 έως 4.1 m.

Ο αριθμός και τα ύψη των λίθων της θεμελίωσης μετρήθηκαν έμμεσα από την απόσταση μεταξύ των οριζόντιων αρμών. Το πλήθος των στρώσεων κυμαίνεται από 6 έως 9, στη ΝΑ γωνία και 8 έως 9 στη ΝΔ. Τα ύψη των λίθων στην πλειοψηφία των θεμελίων κυμαίνονται από 0.3 έως 0.6 m.

Η μηχανική ποιότητα των θεμελίων εκτιμήθηκε στις περισσότερες θέσεις ως μέση-υψηλή. Το υλικό των λίθων είναι κυρίως ασβεστόλιθος υψηλής αντοχής, ενώ βρέθηκε και ασβεστόλιθος πολύ υψηλής αντοχής (κρυσταλλικός ή μάρμαρο) καθώς και ασβεστόλιθος χαμηλής αντοχής (λατυποπαγής ή ρηγματωμένος).

Στην περιοχή Σηκού, υπάρχει μια βαθμιαία αύξηση του βάθους του βραχώδους υποβάθρου από ανατολικά προς δυτικά.



**Εικ.5.** Η Θεμελίωση του κίονα της ΝΔ πλευράς του Ναού που κατέρρευσε από τη καταιγίδα του 1852 .  
 Διακρίνονται 7 στρώσεις λίθων κάτω από το στυλοβάτη.  
 Πηγή: Pictorial dictionary of Ancient Athens-John Traulso/New York 1980

## *2.2. Ιστορικά στοιχεία – Περιγραφή του μνημείου*

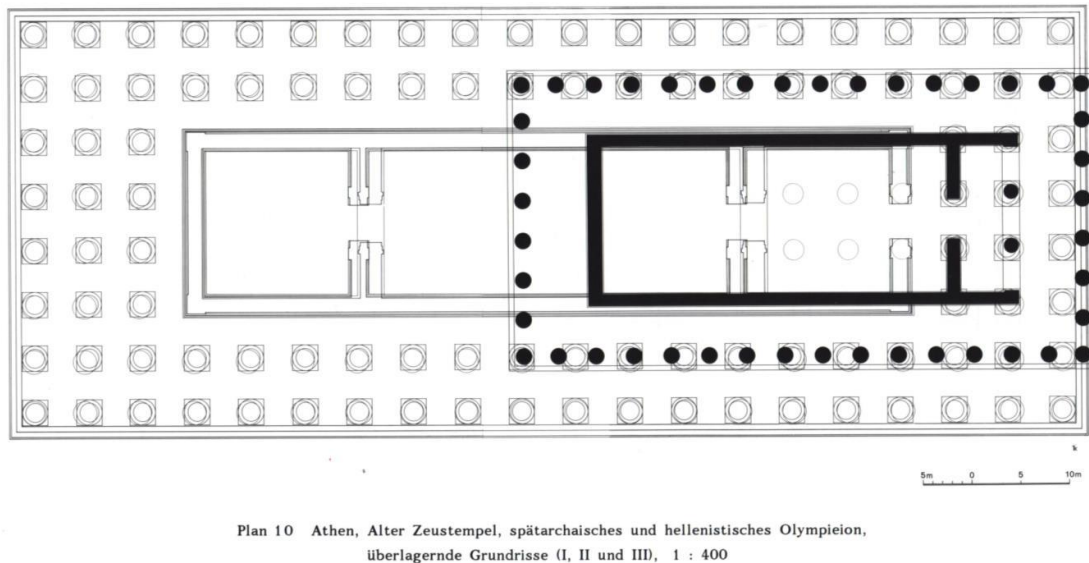
Ο ναός του Ολυμπίου Διός οικοδομήθηκε πάνω σε ένα σχετικά χαμηλό παριλίσιο έξαρμα της γης, ανάμεσα στην Ακρόπολη και τον λόφο του Αρδηττού, στις όχθες του Ιλισού, κοντά στην πηγή της Καλλιρρόης, που ήταν η πλουσιότερη πηγή της Αθήνας. Αντικατέστησε ένα από τα αρχαιότερα ιερά της Αθήνας, το οποίο σύμφωνα με την αττική παράδοση είχε ιδρυθεί από τον γενάρχη των Ελλήνων Δευκαλίωνα. Ο Penrose βρήκε πρώτος ενδείξεις για την ύπαρξη του αρχικού ιερού όταν ανακάλυψε ένα τμήμα θεμελίωσης με κατεύθυνση B-N μέσα στο σηκό του μεταγενέστερου ναού. <sup>(9)</sup> Το νότιο άκρο αυτού του θεμελίου βρίσκεται κάτω από τη θέση ενός κίονα της εσωτερικής νότιας κιονοστοιχίας <sup>(31)</sup>.

Ο ναός άρχισε να χτίζεται από τον τύρρανο Πεισίστρατο, γύρω στο 515 π.Χ. Το δομικό του υλικό ήταν πωρόλιθος, ενώ ο αρχιτεκτονικός ρυθμός του Ναού αυτού ήταν κατά πάσα πιθανότητα δωρικός καθώς το γιγάντιο μέγεθός του ταίριαζε στον αυστηρό δωρικό ρυθμό

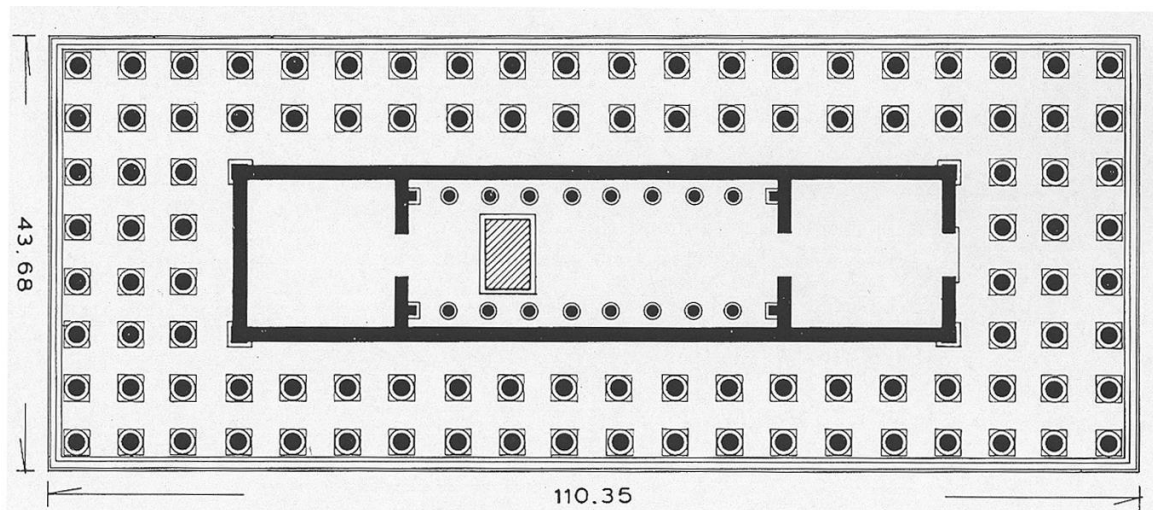


παρά στον ιωνικό όπως άλλοι ναοί της εποχής <sup>(31)</sup>. Σ' αυτό συνηγορεί και ο τρόπος κατασκευής των κιόνων που εδράζονται απ' ευθείας στο στυλοβάτη χωρίς βάσεις (Dinsmoor).

Η ανοικοδόμηση του ναού διακόπηκε με την κατάλυση της τυραννίας, γύρω στο 510 π.Χ. Παρέμεινε έτσι για περίπου 300 χρόνια πριν να επαναληφθούν οι εργασίες για την ανοικοδόμησή του γύρω στο 175 π.Χ. με χορηγία του βασιλιά της Συρίας Αντιόχου Δ' του Επιφανούς. Τότε οικοδομήθηκε ένας μαρμάρινος ναός κορινθιακού ρυθμού στις ίδιες αρχικές διαστάσεις με μικρές διαφοροποιήσεις στα μεταξόνια των κιόνων και στους τοίχους του σηκού. Ο ναός αποπερατώθηκε από το ρωμαίο αυτοκράτορα Αδριανό και εγκαινιάστηκε το 131/132 μ.Χ.



**Εικ.6.** Κάτοψη των διαδοχικών φάσεων του ναού (πηγή: Toelle-Kastenbein 1994) Με έντονο χρώμα φαίνεται ο αρχαίος ναός.



**Εικ.7.** Ο ναός του Ολύμπιου Δία κατά την αποπεράτωσή του από τον αυτοκράτορα Αδριανό. Κάτοψη. [πηγή: Travlos (1980)]

Η ερείπωση του ναού αρχίζει στα μέσα του 5ου αι. μ.Χ. Σήμερα από τους 104 εξωτερικούς κίονες διατηρούνται μόνο 15 ιστάμενοι και ένας πεσμένος ο οποίος κατέρρευσε κατά τη διάρκεια θύελλας τον Οκτώβριο του 1852.

Η πρώτη σωστική επέμβαση στο ναό έγινε το 1835 για να ακολουθήσει το 1892 στερέωση τριών ρηγματωμένων επιστυλίων στη νοτιοανατολική γωνία του ναού σύμφωνα με τη μελέτη του Ernst Ziller.

Ο αδριάνειος ναός, μήκους 110,35μ. και πλάτους 43,68μ. στην ευθυνηρία, ήταν δίπτερος στις μακρές πλευρές (2 x 20 κίονες) και τρίπτερος στις στενές (3x8 κίονες), είχε δηλαδή συνολικά 104 κίονες στην περίσταση.

Η εξωτερική κιονοστοιχία είχε ενιαία θεμελίωση ενώ κάθε κίονας της εσωτερικής κιονοστοιχίας είχε μεμονωμένο στυλοβάτη, από πωρόλιθους. Τα θεμέλια της εξωτερικής κιονοστοιχίας, πλάτους 4,70μ., ήταν δομημένα με επιμελώς συναρμοσμένους ακροπολίτες και ερυθρούς υμήττειους ασβεστόλιθους ενώ το βάθος θεμελίωσης ήταν ανάλογο της γεωμορφολογίας του εδάφους. Έτσι, ενώ στην ανατολική πλευρά απαντά ένας θεμέλιος δόμος, στη βορειοδυτική γωνία έχουν αποκαλυφθεί 5 ανισοϋψείς θεμέλιοι δόμοι, στη δε νοτιοδυτική γωνία έως και δώδεκα θεμέλιοι δόμοι κάτω από την ευθυνηρία, συνολικού βάθους 4,70μ. <sup>(5)</sup>

Η ευθυνηρία και οι βαθμίδες ήταν κατασκευασμένες από πωρόλιθους, συνδεδεμένους με συνδέσμους σχήματος διπλού ταυ, με γόμφους (κατακόρυφοι σιδερένιοι σίνδεσμοι πρισματικής διατομής) και παραγόμφους (σιδερένια ελάσματα, μήκους 0,10 - 0,15μ. τοποθετημένα λοξά, κατά τον αρμό ώσεως του άνω λίθου στον οποίον βρίσκονταν ο γόμφος ώστε να λειτουργεί συγχρόνως ως οριζόντιος και κάθετος σύνδεσμος). Οι γωνίες της ευθυνηρίας δεν έχουν το ίδιο ακριβώς υψόμετρο: ΝΑ γωνία: 79.014, ΝΔ :78.995, ΒΔ: 79.003, ΒΑ:79.033μ. <sup>(5)</sup>

Το μεταξόνιο μεταξύ πλίνθων των κιόνων ήταν κατά μέσο όρο στην πρόσοψη περίπου 5,50μ., στις μακρές πλευρές περίπου 5,25μ. ενώ η αναλογία μεταξονίου προς την κάτω διάμετρο των κιόνων ήταν περίπου 1:2,3.<sup>(17)</sup>

Οι κίονες του μνημείου αποτελούνται από 13 έως 16 σπονδύλους τα ύψη των οποίων κυμαίνονται από 0,5μ έως 1,4 μ. Έχουν 24 ταινίες με ισάριθμες αύλακες λαξευμένες σε ημικυκλική διατομή, διαμέτρου περίπου 0,21μ. στον κατώτερο σπόνδυλο – περίπου 0,18μ. στον κορυφαίο και με κατακόρυφη ταινία πλάτους 0,04μ.

Η διάμετρος των σπονδύλων μετράται στον κατώτερο σπόνδυλο στην τελική επιφάνεια της ταινίας από 1,90μ-1,96μ και στον κορυφαίο από 1,65μ έως 1,70μ.

Τα κιονόκρανα (κορινθιακού ρυθμού) αποτελούνται από δύο λίθους συνολικού ύψους κοντά στα 2,00 μ (με μικρές αποκλίσεις της τάξης λίγων εκατοστών) ενώ οι λίθοι χωριστά έχουν ύψη περίπου 90 εκ ο ανώτερος και 1,10μ ο υποκείμενός του. Το ύψος των κιόνων φτάνει σχεδόν τα 17μ.

Τα επιστύλια του ναού ήταν τρίλιθα, εκτός από τις γωνίες όπου ήταν δίλιθα για πρακτικούς λόγους που είχαν να κάνουν με την κατασκευή της γωνίας. Σήμερα τα επιστύλια διατηρούνται αποσπασματικά και μόνο στη νοτιοανατολική γωνία του ναού, ενώ δεν διατηρείται κανένα τμήμα πάνω από αυτά.

Ο θριγκός πάνω από τα επιστύλια συνεχιζόταν με τη ζωφόρο ύψους 97εκ, η οποία αποτελείτο από τον εξωτερικό λίθο και δύο αντιθήματα πίσω από αυτόν, και το οριζόντιο

γείσο. Η στέγη είχε μαρμάρινα κεραμίδια, ενώ υπάρχει πιθανότητα ο σηκός να ήταν υπαίθριος καθώς ο Βιτρούβιος μιλάει για τη δυνατότητα που είχε να δει τον έναστρο ουρανό από το εσωτερικό του Ναού.

Ο κορινθιακός ρυθμός των κίωνων της περίπτωσης του Ναού του Ολυμπίου Διός δεν συναντάται συχνά στην αρχαία Ελλάδα. Παρόλο που ο συγκεκριμένος ρυθμός χρησιμοποιήθηκε ευρέως σε εσωτερικά τμήματα ναών, στοών, καθώς και σε χορηγικές κατασκευές, δεν χρησιμοποιήθηκε σε εξωτερικές κιονοστοιχίες. Ο δωρικός ρυθμός αντίθετα χρησιμοποιήθηκε ευρέως στην περίπτωση ναών.

Κρίνοντας από τις αναλογίες του ύψους τους σε σχέση με τη διάμετρο της βάσης τους, οι κίονες του Ολυμπίου παραπέμπουν μάλλον σε ιωνικό ρυθμό με κορινθιακό κιονόκρανο, παρά σε κορινθιακό, καθώς ο δεύτερος περιελάμβανε πιο ραδινές αναλογίες.

#### Αναλογία ύψους προς διάμετρο βάσης ναών της αρχαίας Ελλάδας

Ναός του Απόλλωνα στις Βάσσες (δωρικός):  $h/d=6/1.2=5$

Ναός του Ηφαίστου(δωρικός):  $h/d=5,7/0.9=6,3$

Παρθενώνας(δωρικός):  $h/d=10,43/1,92=5,42$

Ολυμπείο (κορινθιακός):  $h/d=16,85/2,30=7,32$  η αναλογία ύψους (μετρούμενο από τον στυλοβάτη) προς διάμετρο βάσης

Στο ύψος των κίωνων συμπεριλαμβάνεται το κιονόκρανο ενώ η διάμετρος της βάσης στους δωρικούς κίονες μετράται στην αύλακα.



### 2.3 Ο ελεύθερα ιστάμενος κίονας της νοτιοδυτικής γωνίας

Είναι ο δυτικότερος από τους 15 ιστάμενους κίονες του Ναού του Ολυμπίου Διός. Είναι γωνιακός κίονας, ανήκει δηλαδή στην εσωτερική από τις δύο κιονοστοιχίες των μακρών πλευρών του μνημείου και συγχρόνως στην εσωτερική από τις τρεις κιονοστοιχίες των στενών πλευρών του. Τρία δίλιθα επιστύλια διασταυρώνονταν στην άνω έδρα του κιονοκράνου του.

Το συνολικό ύψος του φτάνει τα 17 μέτρα μετρούμενο από την άνω έδρα του στυλοβάτη. Αποτελείται συνολικά από είκοσι δόμους λευκού πεντελικού μαρμάρου:

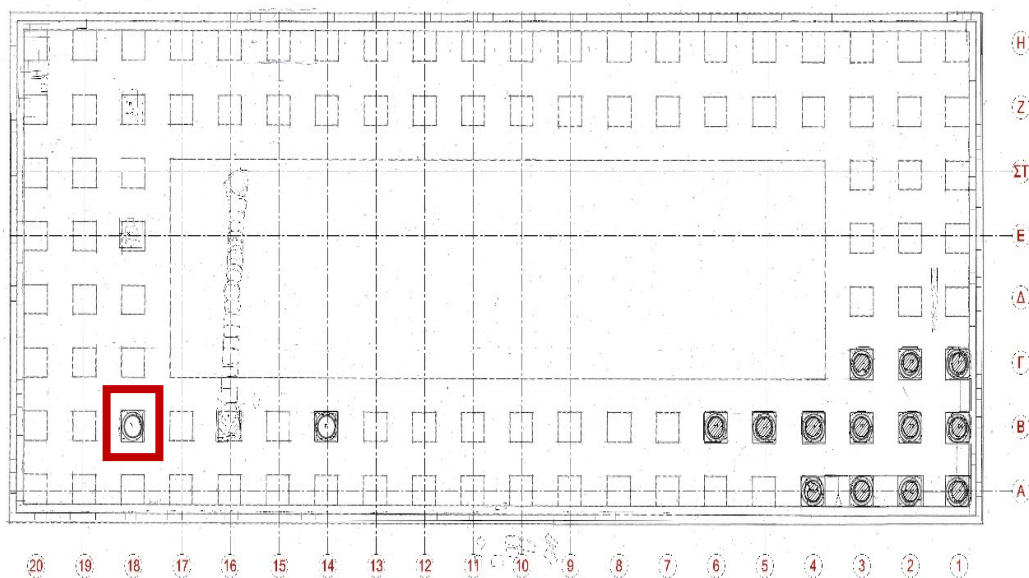
Δύο παράλληλα τοποθετημένες ορθογωνικούς λίθους πλάτους 1,285 και 1,312 αντίστοιχα, μήκους 2,62 και ύψους 0,53 μ που αποτελούν την πλίνθο του κίονα

Επάνω στην πλίνθο εδράζεται κυκλική βάση ύψους 65 εκ. Η διάμετρός της είναι 2,30μ.. Το κυμάτιό της δεν σώζεται ακέραιο σε κανένα σημείο του.

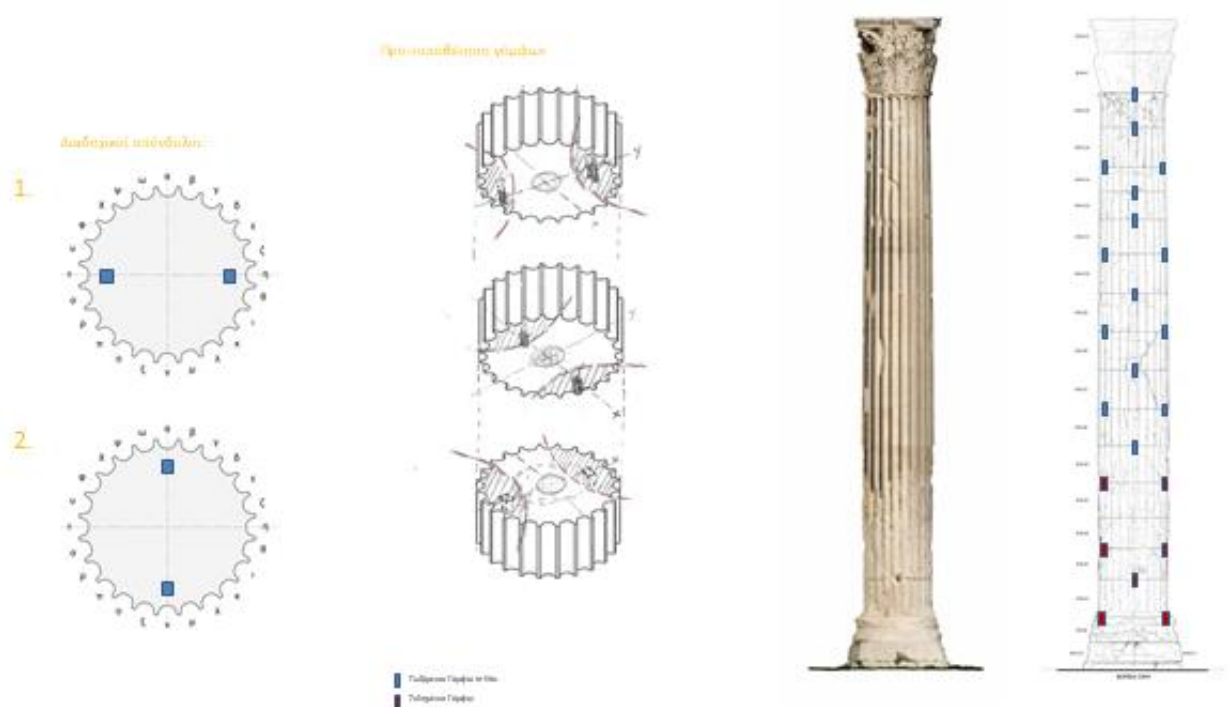
Ο κορμός, καθαρού ύψους 13,76μ. αποτελείται από δεκαπέντε επιμέρους σπονδύλους, το ύψος των οποίων κυμαίνεται από 0,63 έως 1,05 μ. Στον κορμό διακρίνονται 24 ραβδώσεις κορινθιακού ρυθμού, δηλαδή φέρει 24 αύλακες που διαχωρίζονται μεταξύ τους με κατακόρυφες ταινίες.

Τέλος, στη στέψη φέρει κιονόκρανο κορινθιακού ρυθμού, αποτελούμενο από δύο λίθους, συνολικού ύψους 1,93 μ.

Οι σπόνδυλοι που συνθέτουν τον κορμό συνδέονται μεταξύ τους με 2 πρισματικούς μεταλλικούς γόμφους, διατομής 4x4 εκ. τοποθετημένοι σε απόσταση 15-17 εκ. περίπου από την περίμετρο. Η απόσταση αυτή μετράται στο κέντρο της αύλακας. Δεν υπάρχει κεντρικός πόλος, ο οποίος συναντάται κυρίως σε μνημεία κλασικής εποχής. Η διάταξη των γόμφων καθ' ύψος είναι σταυρωτή. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι θέσεις των γόμφων ανά σπόνδυλο.



Εικ.8. Η θέση του κίονα στην κάτοψη του ναού



**Εικ.9.** Η διάταξη των γόμφων στον δυτικότερα ιστάμενο κίονα του Ναού του Ολυμπίου Διός.  
(<sup>3</sup>) Κατά κανόνα είναι σταυρωτά τοποθετημένοι με εξαίρεση εκείνους μεταξύ 11<sup>ου</sup> - 12<sup>ου</sup> και 12<sup>ου</sup>-13<sup>ου</sup> σπονδύλου. Με κόκκινο χρώμα δηλώνονται εκείνοι που αποσπάστηκαν από μολυβδορύχους.

Οι ραβδώσεις των σπονδύλων έχουν διαφορετικό πλάτος και βάθος. Η μεν ταινία έχει σταθερό πλάτος 4 εκ περίπου, η δε αύλακα έχει μειούμενο πλάτος από κάτω προς τα πάνω. Συγκεκριμένα, στους πρώτους σπονδύλους το πλάτος της αύλακας είναι 21 και το βάθος 10 εκ., ενώ στον τελευταίο το πλάτος είναι 17,5 και το βάθος 8,5 εκ. περίπου.



**Εικ.10.** Τυπικό κιονόκρανο του Ναού του Ολυμπίου Διός

Η θεμελίωσή του αποτελείται από τουλάχιστον 7 σειρές λίθων , αν κρίνουμε από τη θεμελίωση του παρακείμενου κίονα στον οποίο έχει γίνει ανασκαφή (εικ. ..) με συνολικό ύψος γύρω στα 4 μέτρα.

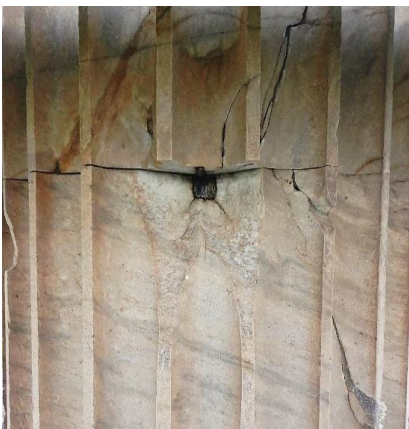
Οι φθορές του κίονα δεν επιτρέπουν την ασφαλή μέτρηση της έντασής του. Διακρίνεται ωστόσο έντονη μείωση, ελάττωση δηλαδή της διαμέτρου των σπονδύλων προς τα πάνω η οποία δεν είναι γραμμική, κάτι που υποδηλώνει την ύπαρξη της έντασης.

Σύμφωνα με τον Penrose, οι κίονες του Ολυμπείου έχουν ένταση και μείωση, η δε ένταση παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή της περίπου στα 3 μέτρα πάνω από τη βάση του κίονα. Η διαφορά της διαμέτρου του ανώτερου σπονδύλου με τον κατώτερο είναι 0,28 μέτρα.<sup>(9)</sup>

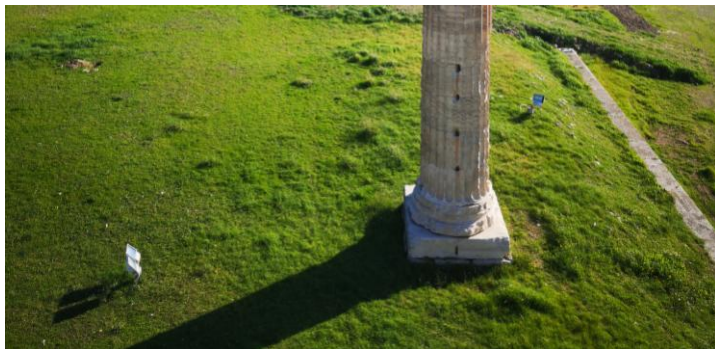
Η παθολογία του εν λόγω κίονα έχει την τυπική εικόνα που παρουσιάζει όλο το μνημείο:

- Απολαξευμένες ταινίες μέχρι τα πέντε περίπου μέτρα του ύψους του για την παραγωγή ασβέστη.
- Απόσπαση των σιδερένιων γόμφων μέχρι το ίδιο περίπου ύψος για την επανάχρησή τους.
- Ρωγμές που οφείλονται στην οξείδωση και ακολούθως διόγκωση των σιδηρών στοιχείων σύνδεσης των λίθων.
- Βλάβες που προκλήθηκαν από «ελαττώματα» του υλικού όπως κομμούς ή φλεβώσεις του μαρμάρου, που επιδεινώθηκαν με την επίδραση του νερού, τις θερμοκρασιακές μεταβολές, και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες.
- Ρηγματώσεις από δυναμικές καταπονήσεις λόγω σεισμών ή συγκρούσεων από την κατάρρευση των ανώτερων μελών του μνημείου.
- Προηγούμενες επεμβάσεις συντήρησης, που ξεπέρασαν τον ωφέλιμο χρόνο ζωής τους και από ένα σημείο και μετά δρουν βλαπτικά, όπως σφραγίσεις που ρηγματώθηκαν και επιτρέπουν στο νερό να εισέλθει χωρίς όμως να στεγνώνει επαρκώς κ.α.

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται τα παραπάνω είδη ρωγμών.



**Εικ. 11.** Ήραυση και αποκόλληση τμήματος του σπονδύλου λόγω της οξείδωσης του γόμφου



**Εικ.12.** Απολαξεύσεις των ταινιών και απόσπαση των μεταλλικών γόμφων μέχρι κάποιο ύψος



**Εικ.13.** Ατέλειες του υλικού που εξελίχθηκαν σε ρωγμές

Η παθολογία που παρουσιάζει σήμερα ο κίονας είναι το αθροιστικό αποτέλεσμα πολλών παραγόντων όπως

α/οι συγκρούσεις που έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης των παρακείμενων ή ανώτερων δομικών στοιχείων,

β/ η απουσία των σιδηρών γόμφων από τη στιγμή που απολαξεύτηκαν και μετά

γ/ το γεγονός ότι από μία χρονική στιγμή και μετά μετατράπηκε σε πολυσπόνδυλο πρόβολο ο οποίος συμπεριφέρεται διαφορετικά από ένα σύστημα κίωνων με επιστύλια και την υπόλοιπη ανωδομή του μνημείου (σύστημα φαντωματικών δοκών και πλακών, ζωφόρος, γείσο, σίμη, στέγη)

δ/ η γήρανση του υλικού

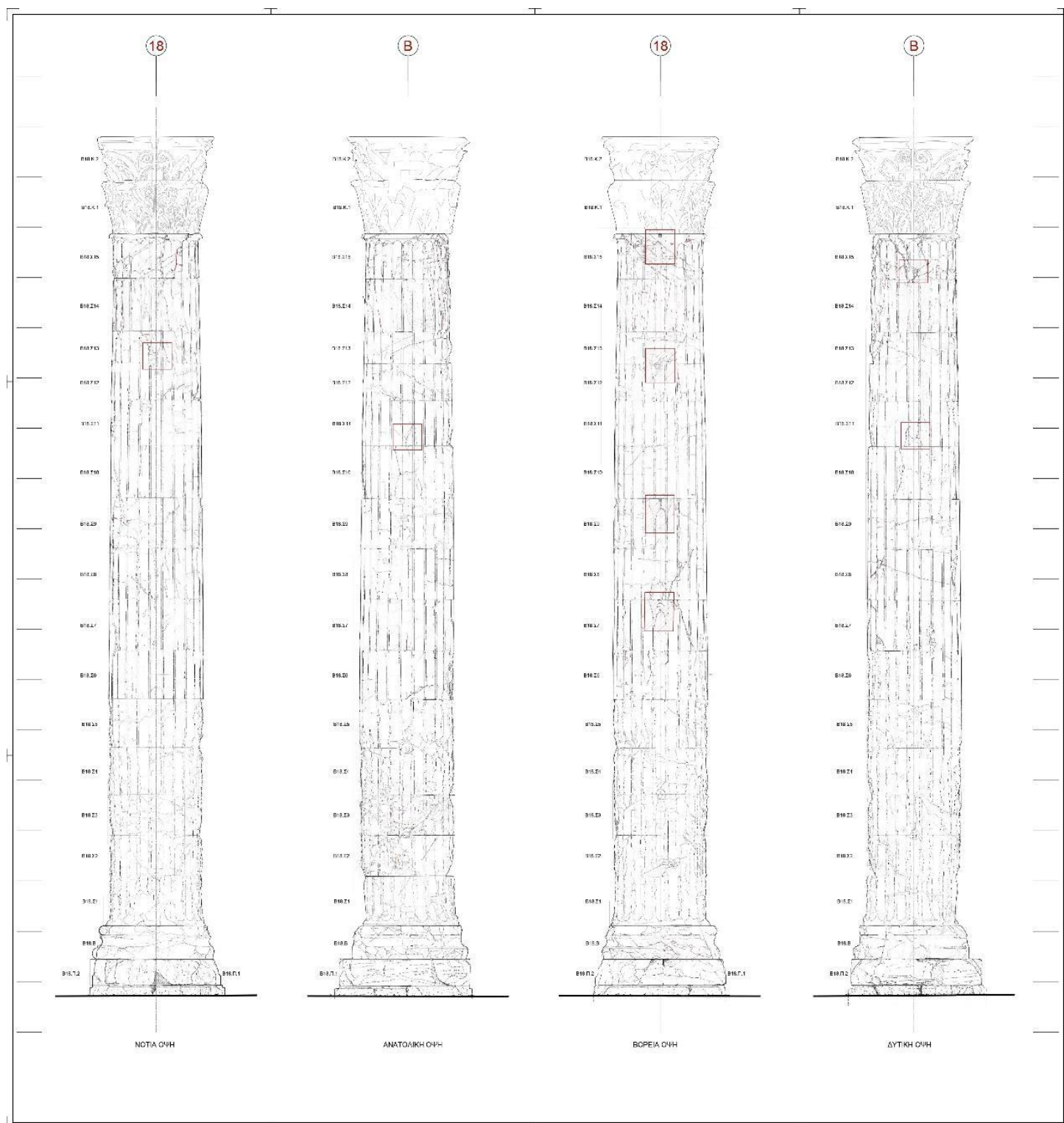
ε/ η επιρροή της κάθε βλάβης από τη στιγμή που δημιουργείται

Σ' αυτή την εικόνα της παθολογίας βέβαια πρέπει να ληφθεί υπόψη, και η παθολογία που πιθανώς αναπτύχθηκε πριν καταρρεύσει η υπόλοιπη ανωδομή του μνημείου.

Η έντονη ρηγμάτωση που παρατηρείται στο κιονόκρανο και στους ανώτερους σπονδύλους του κίονα είναι χαρακτηριστική των κίωνων που δεν περιορίζονται κινηματικά από την ύπαρξη επιστυλίων, καθώς τα επιστύλια επιβάλλουν περιορισμό στο λικνισμό των ανώτερων λίθων και για το λόγο αυτό στα συστήματα κίωνων που συνδέονται με επιστύλια παρατηρούνται παραμένουσες στροφές και μετατοπίσεις αλλά όχι έντονες και διαμπερείς ρηγματώσεις. Αντίθετα, στους ελεύθερα ιστάμενους κίονες, λόγω της ελεύθερης κίνησης των ανώτερων τμημάτων, οι παραμένουσες σχετικές στροφές μεταξύ των σπονδύλων δεν είναι τόσο έντονες, όμως λόγω και της μειωμένης μάζας στους ανώτερους σπονδύλους, ο λικνισμός είναι έντονος, οι συγκρούσεις είναι επαναλαμβανόμενες με αποτέλεσμα την εικόνα της έντονης διαμπερούς ρηγμάτωσης και της γενικότερης αποδιοργάνωσης των λίθων.

Ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή της παθολογίας του κίονα ανά μέλος του.





**Εικ. 14.** Όψεις του δυτικού κίονα. Σημειώνονται οι θέσεις εκδήλωσης σημαντικής παθολογίας γύρω από γόμφους. (πηγή: Αρχιτεκτονική Μελέτη του Κίονα B18-Βιργινία Σιδεράκη- Αρχιτέκτων Μηχανικός MSc)

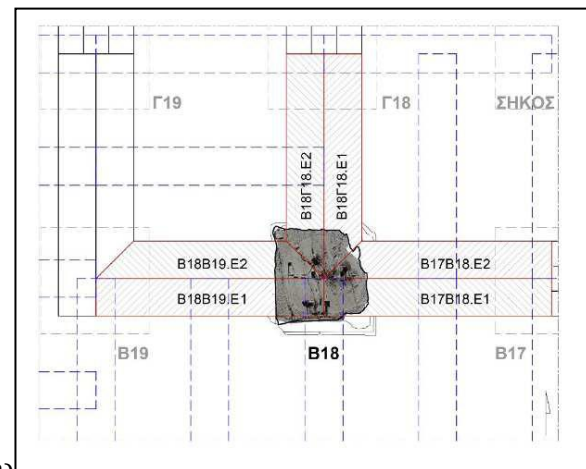
## Κιονόκρανο



(1)



(2)



κατώτερος λίθος κιονοκράνου (1) ΝΑ όψη, (2) ΒΔ όψη



(1)



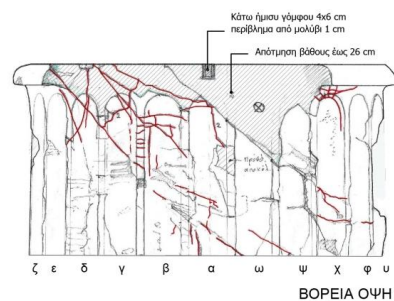
(2)

(1)άνω έδρα του ανώτερου λίθου κιονοκράνου (2) νότια όψη ανώτερου λίθου κιονοκράνου

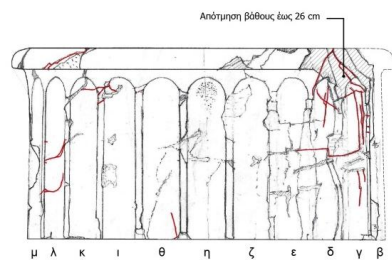
Πολλές ρωγμές και αποτμήσεις μαρμάρου και γλυπτού διάκοσμου. Η άνω έδρα του ανώτερου λίθου φέρει ίχνη (εντορμίες, μοχλοβόθρια) από τη σύνδεση με τα υπερκείμενα επιστύλια. Από τα ίχνη συμπεραίνουμε ότι στον κίονα συναντούνταν 3 επιστύλια, ένα στη διεύθυνση βορρά –νότου και δύο στη διεύθυνση ανατολής δύσης.



## 15ος σπόνδυλος



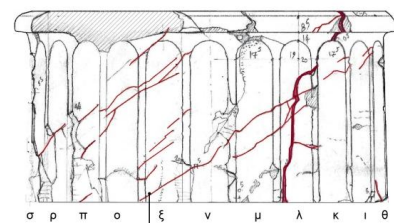
ΒΟΡΕΙΑ ΟΨΗ



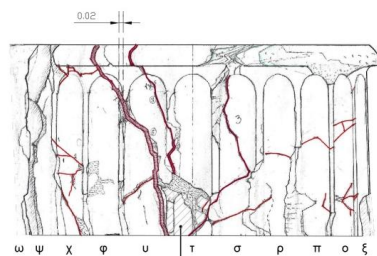
ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΟΨΗ



Βόρεια όψη



ΝΟΤΙΑ ΟΨΗ



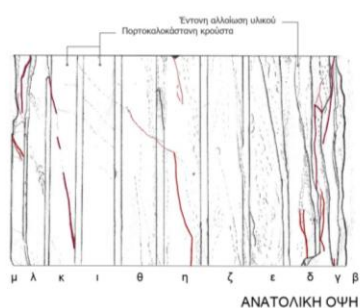
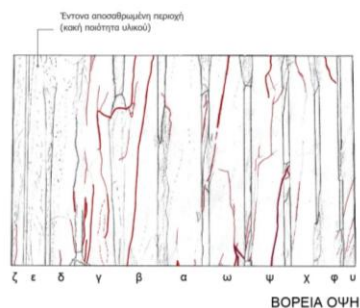
ΔΥΤΙΚΗ ΟΨΗ



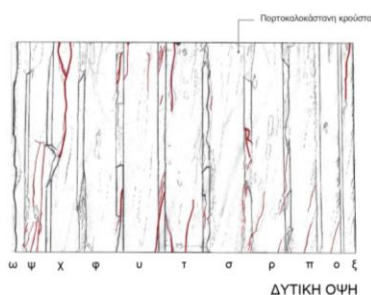
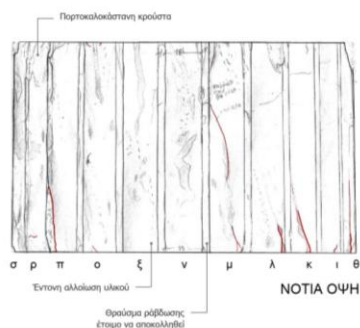
Δυτική όψη

Παρατηρούνται δύο μεγάλες ρηγματώσεις, τμήματα του ίδιου ρήγματος που πιθανώς χωρίζει το σπόνδυλο σε δύο μέρη. Παρατηρούνται επίσης πολλές μικρές ρωγμές διαφόρων διευθύνσεων οι οποίες μάλλον αποτελούν την εξέλιξη των ελαττωμάτων του υλικού. Η εικόνα αυτή οφείλεται κυρίως σε δυναμικές φορτίσεις που δέχτηκε ο συγκεκριμένος λίθος οι οποίες μπορεί να προέρχονται από σεισμό, άλλες δυναμικές καταπονήσεις ή από συγκρούσεις επιστυλίων και άλλων λίθων της ανωδομής τη στιγμή της κατάρρευσής τους.

## 14ος σπόνδυλος



Βόρεια όψη

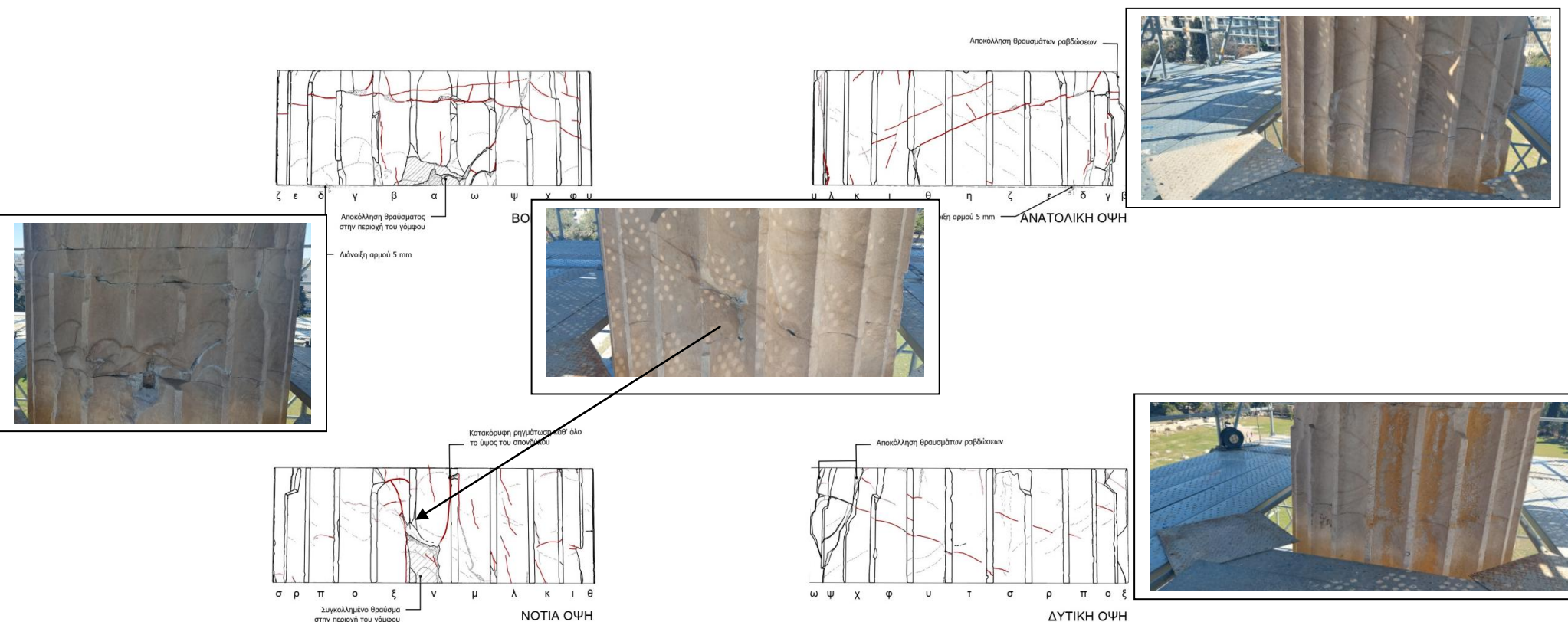


Ανατολική όψη

Ο σπόνδυλος εκδηλώνει κατακόρυφες ρωγμές οι οποίες παραπέμπουν σε καταπόνηση παράλληλη με τη στρωματογραφία του υλικού. Η καταπόνηση μπορεί να είναι δυναμική, κατά τη διάρκεια σεισμών, ή να οφείλεται στη φθορά του ίδιου του υλικού καθώς είναι εκτεθειμένο επί σειρά αιώνων σε μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας, ή από την οξείδωση των κατακόρυφων σιδηρών συνδέσμων. Στη βόρεια όψη οι ρωγμές αυτές είναι περισσότερες, κάτι που δικαιολογείται από τον προσανατολισμό, διότι οι γενικά οι βόρειες όψεις είναι πιο ευάλωτες λόγω της μικρότερης έκθεσης στον ήλιο και συνακόλουθα της μεγαλύτερης συγκράτησης υγρασίας. Στην ανατολική όψη, ο σιδηρός γόμφος έχει προκαλέσει ρωγμή που αναπτύσσεται από τη βάση του σπονδύλου προς τα πάνω και τείνει να αποτινάξει σφηνόσχημο τμήμα.

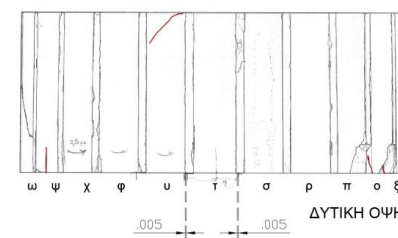
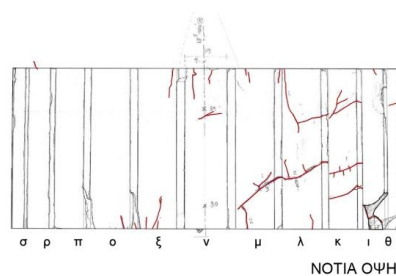
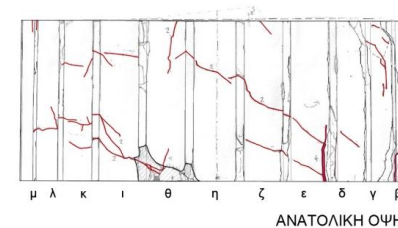
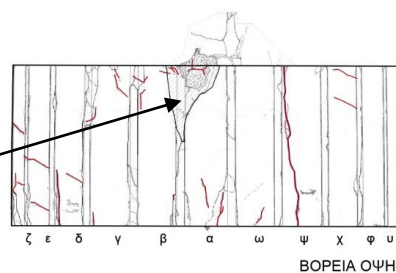
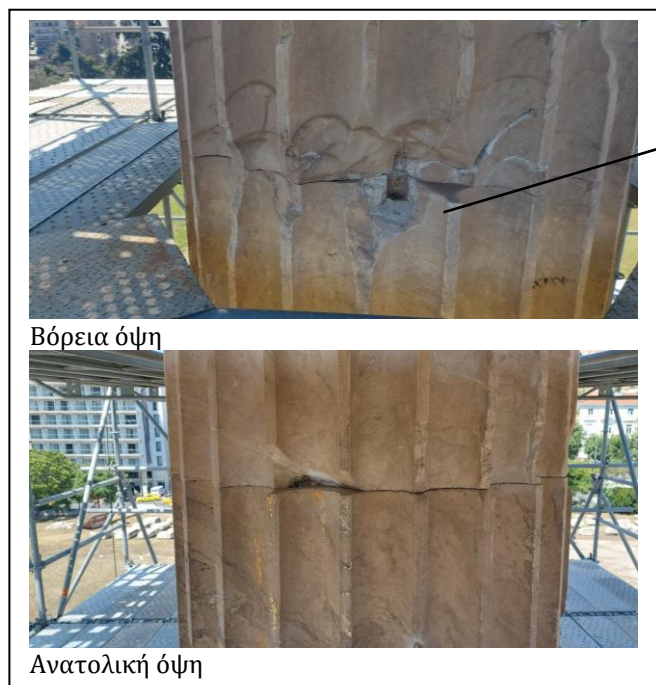


### 13ος σπόνδυλος



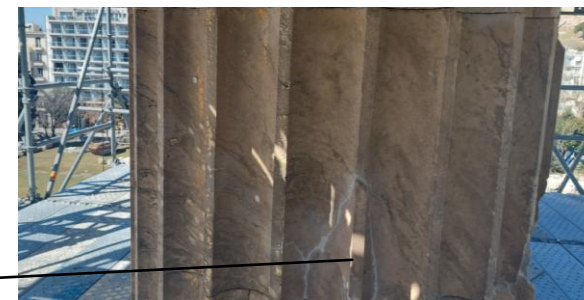
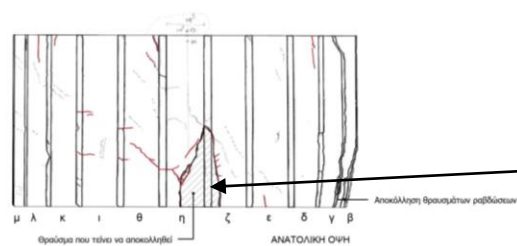
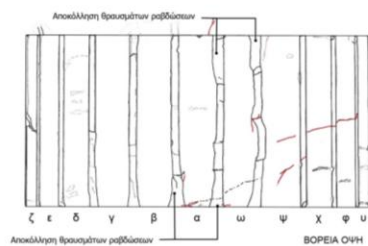
Εκδηλώνεται μία ομάδα ρωγμών στη βάση της βόρειας όψης του σπονδύλου προερχόμενη από την οξείδωση του μεταλλικού γόμφου. Παρόμοια εικόνα παρατηρείται και στη νότια όψη όπου βρίσκεται ο δεύτερος γόμφος της σύνδεσης των Σ12 και Σ13. Παρατηρείται επίσης σχεδόν οριζόντια ρωγμή η οποία προέρχεται από ατέλειες του υλικού (ενδιάμεση επιφάνεια κάθετη στη διαστρωμάτωση του πετρώματος), και η οποία επιδεινώθηκε πιθανώς από δυναμικά φορτία μάλλον τη στιγμή της σύγκρουσης με τμήματα της ανωδομής που κατέρρευσαν. Η ρωγμή συνεχίζεται προς την ανατολική όψη με μικρότερο εύρος ακολουθώντας πάντα φυσική ατέλεια του μαρμάρου. Στο πέρας της εκδηλώνεται απόσπαση τμήματος της ταινίας η οποία ήταν προφανώς ευάλωτη στη θέση αυτή λόγω της συγκεκριμένης ατέλειας στη διαστρωμάτωση του υλικού. Παρατηρείται γενικά φτωχή ποιότητα μαρμάρου με πολλές ατέλειες όπως προσμίξεις άλλων στοιχείων παράλληλα με τη διαστρωμάτωση του πετρώματος, διακλάσεις κλπ.

## 12<sup>ος</sup> σπόνδυλος

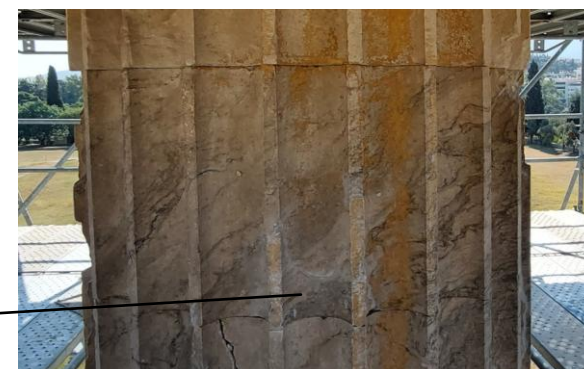
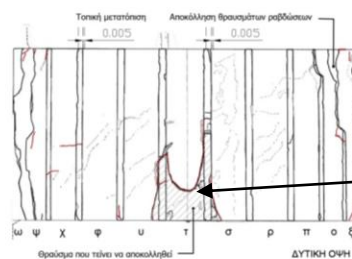
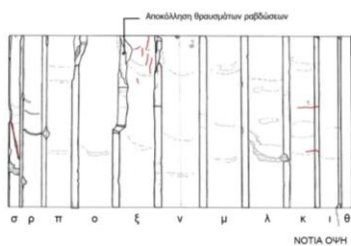


Ο σπόνδυλος φέρει γόμφους στην Βόρεια και Νότια πλευρά του, τόσο στην έδρα του, όσο και στην στέψη του. Είναι η μόνη περίπτωση που οι γόμφοι δεν είναι σταυρωτά διατεταγμένοι. Το κυριότερο πρόβλημα του σπονδύλου είναι η αποτίναξη του μαρμάρου στη βόρεια όψη στην περιοχή του οξειδωμένου γόμφου. Στην ανατολική όψη παρατηρείται αρχαία σφήνωση μέσα σε μολύβι η οποία έχει αποτινάξει το μάρμαρο.

## 11<sup>ος</sup> σπόνδυλος



Ανατολική όψη



Δυτική όψη

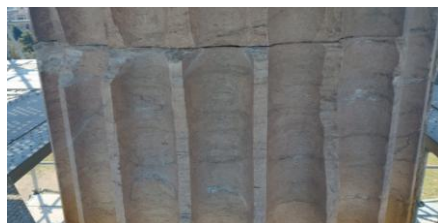
Στη βάση της δυτικής όψης, στην περιοχή του γόμφου παρατηρείται ρηγματώση που τείνει να αποτινάξει το μάρμαρο, λόγω της οξείδωσης του σιδήρου.

Ρωγμές στη βάση της ανατολικής όψης στην αύλακα του γόμφου και τη διπλανή της τείνουν να αποκόψουν σφήνα από το μάρμαρο.

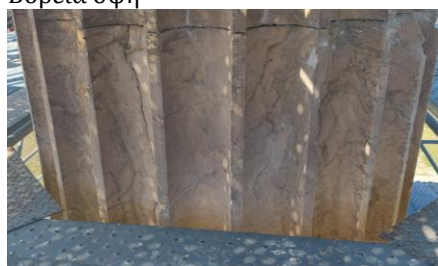
Προφανώς οφείλονται στην οξείδωση του γόμφου.

Πολλές φλεβώσεις στο υλικό, και σπασμένες ακμές ταινιών κυρίως στη βόρεια όψη.

## 10<sup>ος</sup> σπόνδυλος



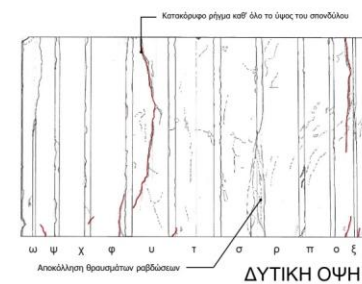
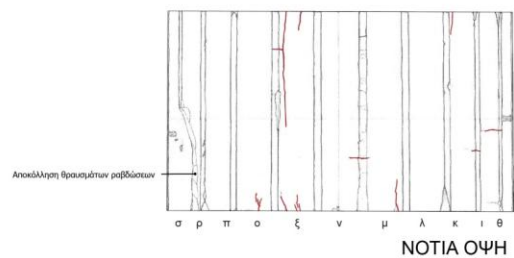
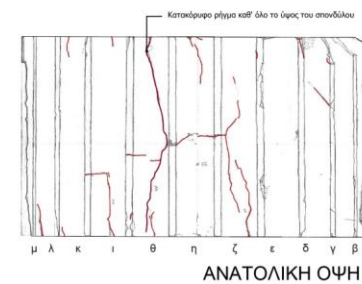
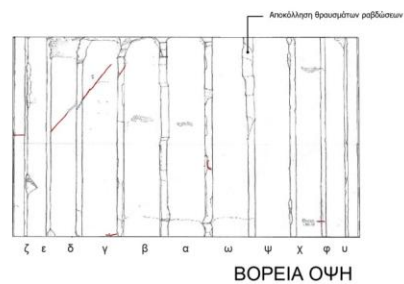
Βόρεια όψη



Ανατολική όψη



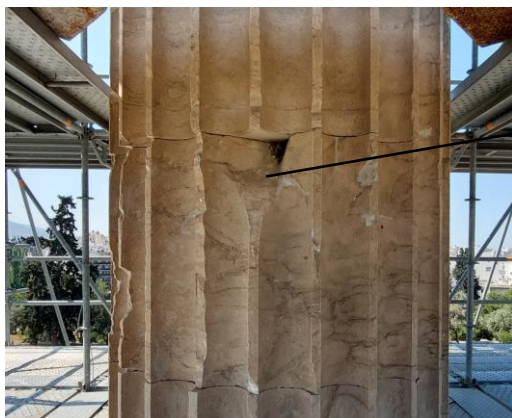
Δυτική όψη



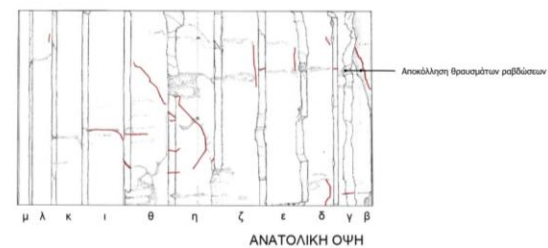
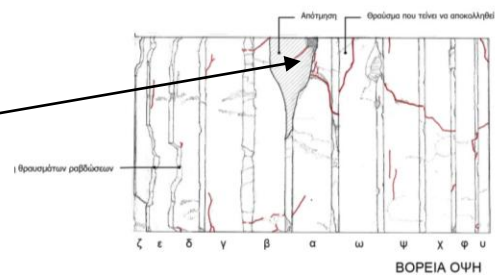
Στη δυτική όψη, παρατηρείται σχεδόν κατακόρυφο ρήγμα στη διπλανή από την αύλακα του γόμφου. Παρόμοιο ρήγμα μικρότερου εύρους παρατηρείται και στην ανατολική όψη. Και τα δύο ρήγματα κλείνουν προς τα κάτω πριν φτάσουν στη βάση του σπονδύλου. Πιθανώς να πρόκειται για διαμπερές ρήγμα.



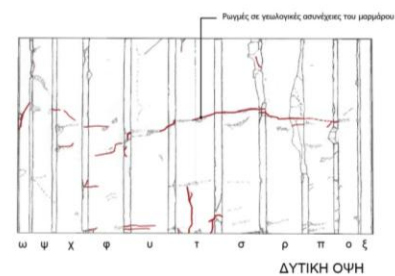
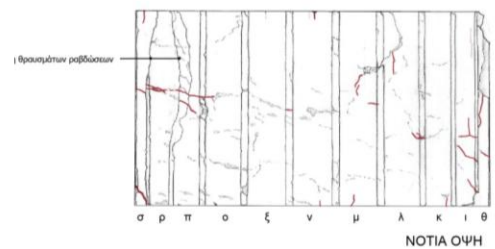
## 9ος σπόνδυλος



Βόρεια όψη

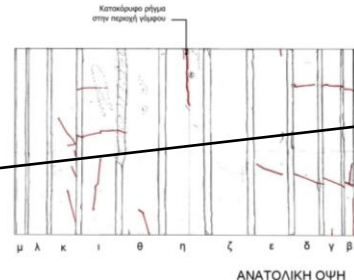
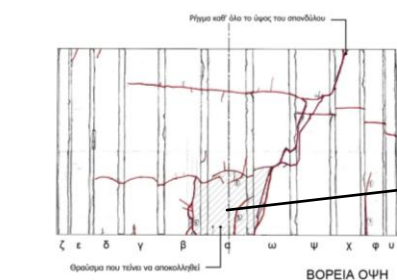


Ανατολική όψη

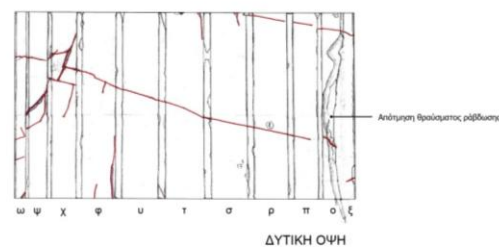
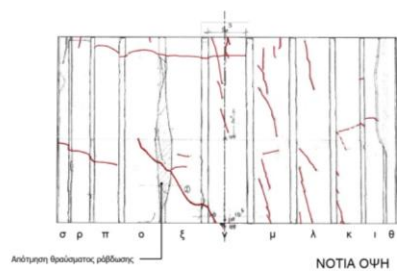


Στο άνω τμήμα της βόρειας όψης ο οξειδωμένος γόμφος έχει αποτινάξει το γειτονικό μάρμαρο. Η ανατολική όψη είναι ταλαιπωρημένη σε αντίθεση με τη συνολική εικόνα του κίονα όπου η ανατολική όψη γενικά διατηρείται καλύτερα, διότι λόγω προσανατολισμού δεν παραμένει υγρασία, ούτε επιβαρύνεται από ψύχος και ψυχρούς ανέμους. Αυτό το γεγονός οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι ρωγμές και οι σπασμένες ταινίες αυτής της όψης οφείλονται μάλλον σε συγκρούσεις κατά την κατάρρευση των ανώτερων μελών του μνημείου.

## 8ος σπόνδυλος



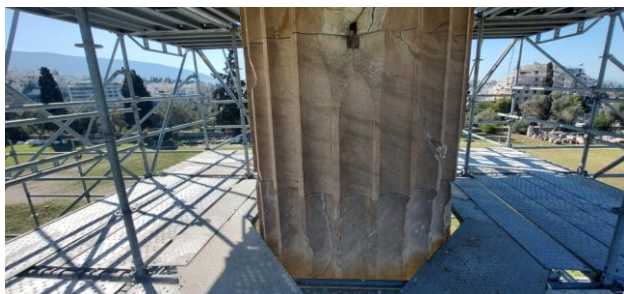
Βόρεια όψη



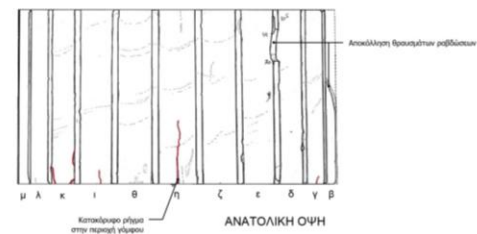
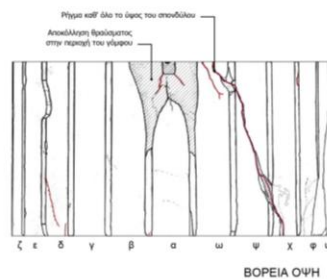
Ανατολική όψη

Οι ταινίες του είναι σε καλή κατάσταση διότι στο ύψος αυτό δεν έχουν γίνει απολαξεύσεις μαρμάρου για την παρασκευή ασβέστη. Ατέλειες του μαρμάρου έχουν δημιουργήσει σύμπλεγματα ρωγμών στη βόρεια και νότια όψη. Η έλλειψη του μαρμάρου στη βάση της βόρειας όψης οφείλεται στην οξείδωση του γόμφου που συνδέει τον 7ο και 8 σπόνδυλο. Μεγάλη λοξή ρωγμή που ξεκινάει από τη θέση του γόμφου στη βάση της βόρειας όψης αναπτύσσεται προς τα δυτικά και καταλήγει στην άνω έδρα του σπονδύλου. Στο άνω τμήμα της ανατολικής όψης, κατακόρυφη ρωγμή στη θέση του γόμφου υποδηλώνει οξείδωση του σιδήρου.

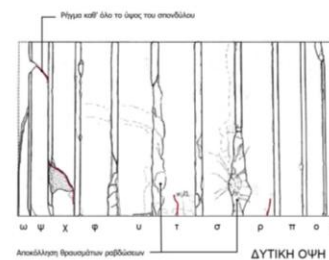
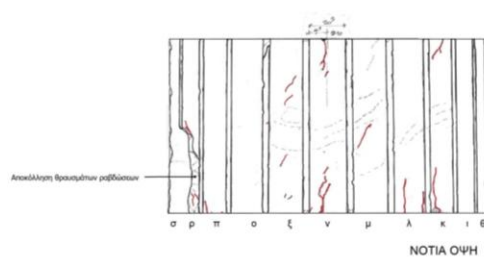
## 7ος σπόνδυλος



Βόρεια όψη

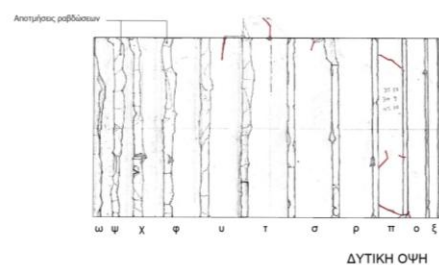
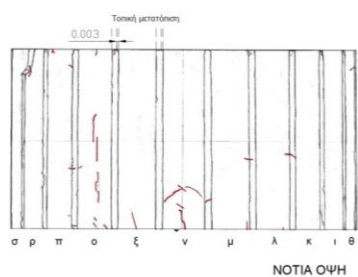
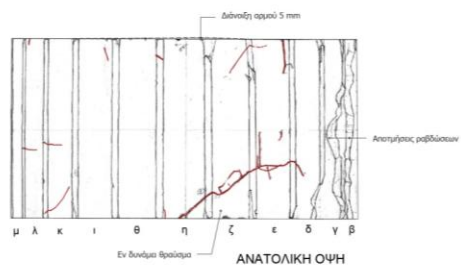
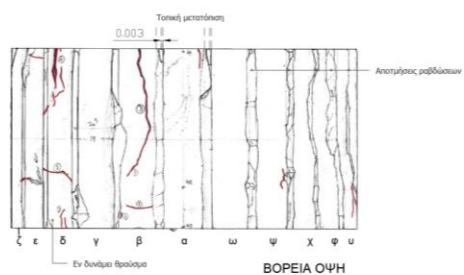


Βορειοδυτική όψη



Λοξή ρωγμή ξεκινάει από την άνω έδρα της βόρειας όψης, αναπτύσσεται προς τα δυτικά καταλήγει στη βάση του σπονδύλου.  
Ο γόμφος μεταξύ 7ου και 8ου σπονδύλου

## 6ος σπόνδυλος



Βόρεια όψη



Δυτική όψη

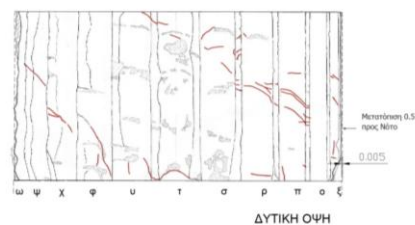
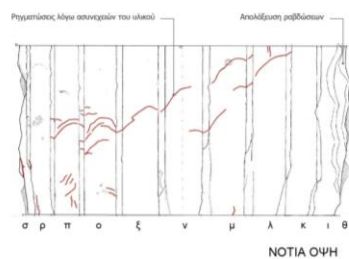
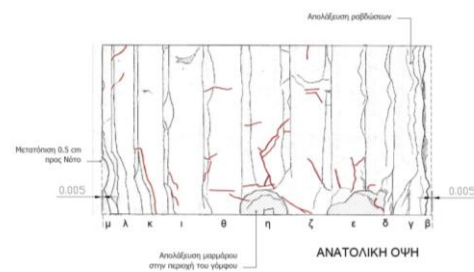
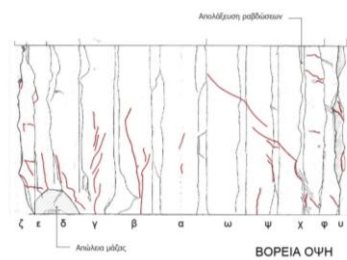


Νότια όψη

Απολαξευμένες ταινίες στην ανατολική, δυτική και βόρεια όψη του σπονδύλου. Παρατηρείται ρήγμα που ξεκινάει από τη βάση του σπονδύλου στην ανατολική όψη και εξελίσσεται λοξά προς τα πάνω.



## 5ος σπόνδυλος



Ανατολική όψη



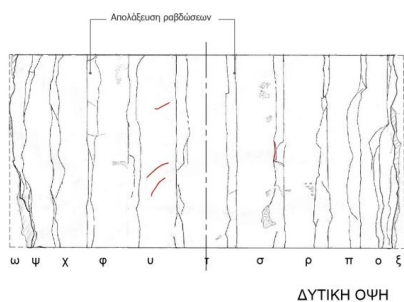
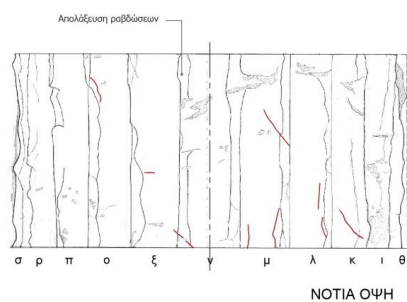
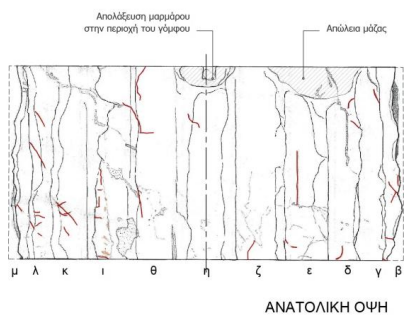
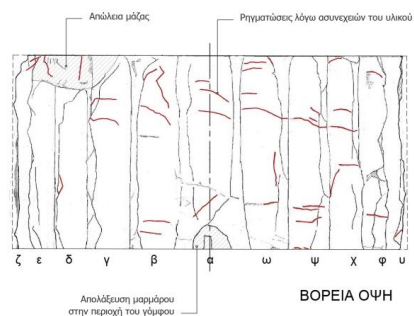
Δυτική όψη



Βόρεια όψη

Απολαξεύσεις ταινιών σε όλες τις όψεις πλην της νότιας. Απολάξευση μαρμάρου στην περιοχή του γόμφου στο κάτω τμήμα της ανατολικής όψης.

## 4ος σπόνδυλος



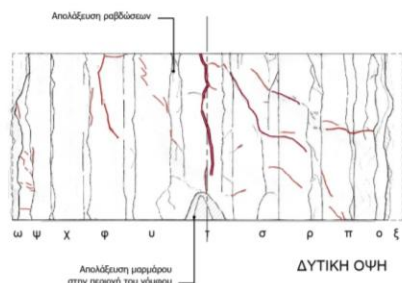
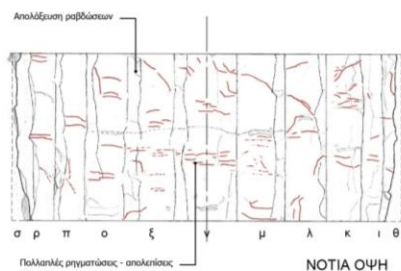
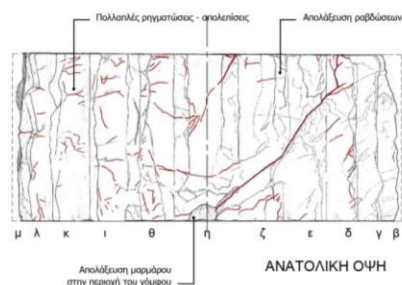
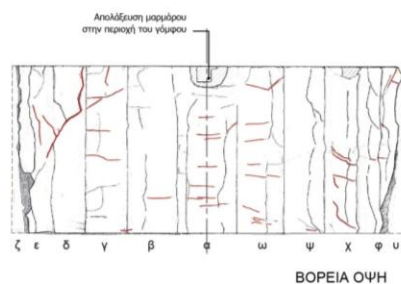
Νότια όψη



Βόρεια όψη

Οριζόντια ρωγμή στη βόρεια όψη, εξέλιξη ατελειών του μαρμάρου. Απολαξεύσεις των ταινιών σε όλες τις όψεις του. Απολάξευση μαρμάρου στην περιοχή του γόμφου στο άνω τμήμα της ανατολικής όψης. Παρόμοια εικόνα στο κάτω τμήμα της βόρειας όψης.

### 3ος σπόνδυλος



Ανατολική όψη



Νότια όψη

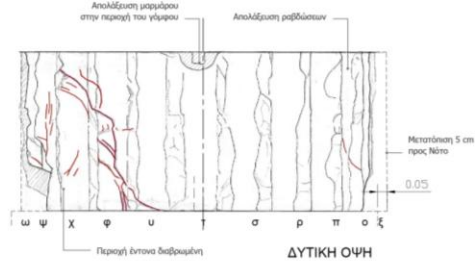
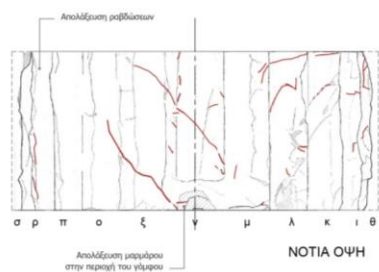
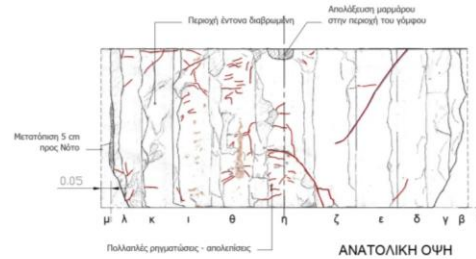
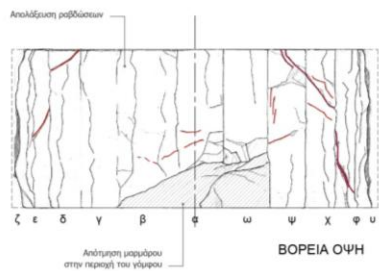
Απολάξευση του μαρμάρου στην κάτω έδρα της ανατολικής όψης, στην περιοχή του γόμφου και λοξό ρήγμα που ξεκινά από τη θέση του γόμφου και αναπτύσσεται λοξά προς τα πάνω.

Στη βόρεια όψη στην περιοχή της άνω έδρας του σπονδύλου παρατηρείται επίσης απολάξευση του μαρμάρου για την απόσπαση του σιδήρου.

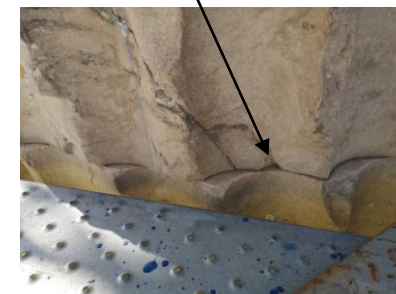
Κατεστραμμένες ραβδώσεις σε όλες τις όψεις έργο ανθρώπινου παράγοντα για την παραγωγή ασβέστη. Τυπική εικόνα όλων των κιόνων του μνημείου μέχρι τα 5 περίπου μέτρα του ύψους τους.



## 2<sup>ος</sup> σπόνδυλος

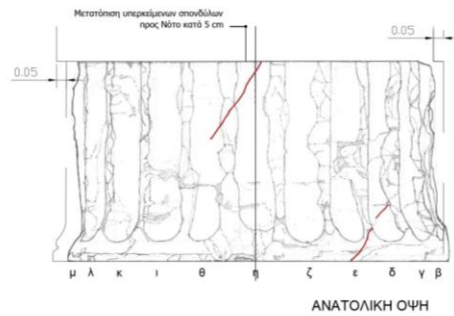
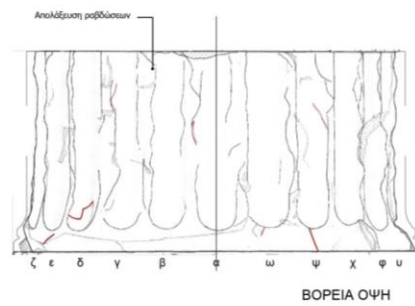


Ανατολική όψη

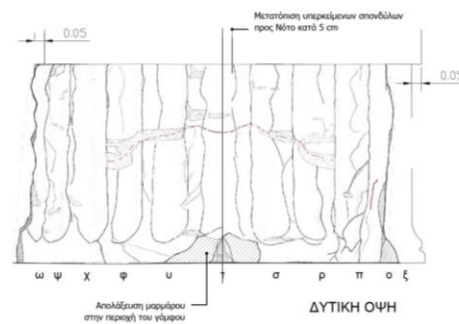
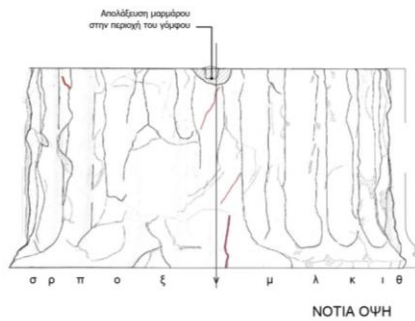


Στον σπόνδυλο αυτό παρατηρείται η μοναδική παραμένουσα στροφή του κίονα. Ο σπόνδυλος έχει στραφεί σε σχέση με τον κατώτερο Σ1 ενώ συγχρόνως έχει μετατοπιστεί προς νότο κατά 5 περίπου εκατοστά. Ο κίονας έχει στραφεί ολόκληρος από τον 2<sup>ο</sup> σπόνδυλο και πάνω σε σχέση με τον 1<sup>ο</sup> σπόνδυλο. Λοξό ρήγμα παρατηρείται στο βορειοανατολικό τμήμα του σπονδύλου. Απώλεια μαρμάρου στην περιοχή του γόμφου, προφανώς από ανθρώπινο παράγοντα.

## 1ος σπόνδυλος

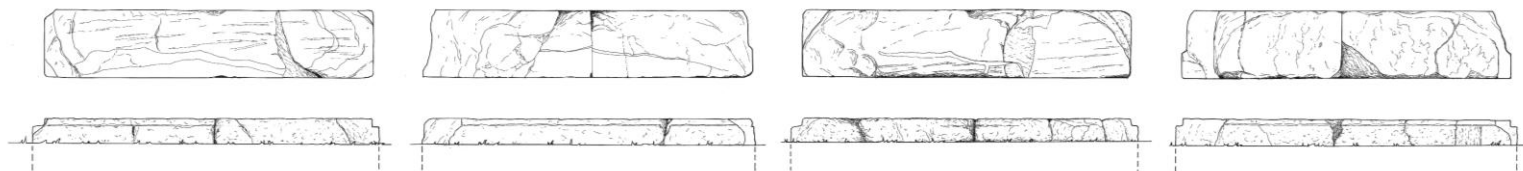


Ανατολική όψη



Απολαξευμένες ταινίες για χρήση του μαρμάρου στην παραγωγή ασβέστη. Απολάξευση μαρμάρου στην περιοχή του γόμφου για την απόσπαση του μετάλλου.

## Βάση και πλίνθοι



Ανατολική όψη



Δυτική όψη



Νότια όψη

Στη νοτιοδυτική και τη βορειοανατολική γωνία της πλίνθου έχουν αποκοπεί τμήματα λίθου για την απόσπαση των μεταλλικών συνδέσμων. Απολαξεύσεις μαρμάρου παρατηρούνται τόσο στην κυκλική βάση όσο και στις 2 λίθους της πλίνθου για τον ίδιο λόγο. Ρήγματα στη βόρεια και ανατολική όψη της πλίνθου τείνουν να αποκόψουν ότι έχει μείνει από τη γωνία του λίθου. Η εικόνα αυτή παραπέμπει σε πιθανή βύθιση του θεμελίου στην περιοχή αυτή. Πρέπει να συνεκτιμηθεί με τα αποτελέσματα άλλων διαγνωστικών μεθόδων όπως γεωφυσικές μέθοδοι ή ενόργανη παρακολούθηση, ή ανασκαφική διερεύνηση.

## *Κεφάλαιο 3ο – Ενόργανη Παρακολούθηση*

### *3.1. Γενικά*

Η ενόργανη παρακολούθηση βρίσκει εφαρμογή στην τεκμηρίωση της συμπεριφοράς των κατασκευών κάθε τύπου και εποχής. Τα τελευταία χρόνια έχει διευρυνθεί το πεδίο των εφαρμογών της πέρα από τις κατασκευές του πολιτικού μηχανικού. Ακολουθούν κάποιες από τις εφαρμογές της:

- A. Για την παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς της κατασκευής μετά από σεισμικά γεγονότα
- B. Για τον καθορισμό της κατάστασης των υλικών και στοιχείων που αποτελούν την κατασκευή, τόσο για το καθένα ξεχωριστά αλλά και ως στοιχεία ενός αναπόσπαστου συνόλου.
- Γ. Για τη σύγκριση της πραγματικής συμπεριφοράς μιας κατασκευής σε σχέση με τις τιμές που ελήφθησαν κατά τον σχεδιασμό της.
- Δ. Για την εξασφάλιση της απαιτούμενης συμπεριφοράς του έργου μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής.
- Ε. Για την παρακολούθηση των επισκευαστικών επεμβάσεων μιας κατασκευής, όπως κάθε είδους επισκευαστικά επιθέματα, οπλισμένα επιχρίσματα, μανδύες ωπλισμένου σκυροδέματος.
- ΣΤ. Για την παρακολούθηση θερμοκρασιακών μεταβολών, ή μεταβολών υγρασίας.
- Ζ. Για ακριβείς μετρήσεις βάρους σε περιοχές που το απαιτεί η ασφάλεια.

Τα κύρια βήματα για την εγκατάσταση ενός συστήματος ενόργανης παρακολούθησης είναι τα παρακάτω<sup>(22)</sup>:

- Επιλογή των κατάλληλων θέσεων για εγκατάσταση αισθητήρα: Αυτό επιτυγχάνεται μέσω λεπτομερούς προσομοίωσης της αναμενόμενης δομικής συμπεριφοράς, προκειμένου να εντοπιστούν τυχόν κρίσιμες περιοχές (π.χ. περιοχές συγκέντρωσης τάσεων ή περιοχές μέγιστης παραμόρφωσης). Επιπλέον, πρέπει να επιλεγεί ο κατάλληλος τύπος αισθητήρων, ανάλογα με το είδος της μέτρησης που θα πραγματοποιηθεί, την απαιτούμενη ακρίβεια και το περιβάλλον λειτουργίας.
- Συλλογή δομικών δεδομένων: Αυτή συνήθως λαμβάνει χώρα τόσο υπό κανονική λειτουργία όσο και υπό συνθήκες μέγιστης φόρτισης, λαμβάνοντας υπόψη τον μέγιστο δυνατό αριθμό μετρήσεων. Απαιτείται ακριβής γνώση των συνθηκών φόρτισης, ώστε οι συγκρίσεις έναντι τυπικής συμπεριφοράς να είναι αξιόπιστες.
- Σύγκριση ανακτημένων μετρήσεων έναντι τυπικής συμπεριφοράς. Αυτή είναι η τελευταία και πιο δύσκολη φάση, η οποία περιλαμβάνει την αξιολόγηση όλων των δεδομένων που συλλέγονται, προκειμένου να εκτιμηθεί η ύπαρξη ή μη δομικής αστοχίας και να την προσδιοριστεί, κατά το δυνατόν, το είδος, η θέση και το μέγεθός της.

Τα παραπάνω περιγράφουν μια βέλτιστη αλληλουχία βημάτων. Στην πράξη, δεν υπάρχει πάντα η λεπτομερής προσομοίωση του φορέα η οποία θα μπορούσε να υποδείξει τις αναμενόμενες θέσεις μέγιστων τάσεων ή εντάσεων. Ειδικά σε μνημειακές κατασκευές, οι θέσεις αυτές είναι δύσκολο να προσδιοριστούν διότι η ανάλυση της κατασκευής δεν δίνει πάντα με ακρίβεια τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη καθώς τις περισσότερες φορές



στην προσομοίωση του φορέα δεν λαμβάνονται υπόψη όλες οι φθορές του μνημείου κάποιες από τις οποίες θα μπορούσαν να τροποποιήσουν τη συμπεριφορά του κατά τη διάρκεια σεισμικών γεγονότων.

Μία διαδικασία που χρησιμοποιείται ευρέως τα τελευταία χρόνια είναι αυτή της άντλησης των δυναμικών χαρακτηριστικών μιας κατασκευής μέσω της Ανάλυσης Δονήσεων Περιβάλλοντος (Ambient Vibration Analysis), ή αλλιώς Λειτουργική Ιδιομορφική Ανάλυση (Operational Modal Analysis - OMA). Δίνει στο μελετητή την αμεσότητα και την ευχέρεια να εκτελεστεί οποιαδήποτε στιγμή, χωρίς την ανάγκη εφαρμογής τεχνητής εδαφικής διέγερσης στο δόμημα. Στόχος της είναι η εξαγωγή των δυναμικών χαρακτηριστικών της κατασκευής κάτω από συνθήκες λειτουργίας της. Ο προσδιορισμός των ιδιοπεριόδων της κατασκευής από δοκιμές δονήσεων περιβάλλοντος είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη και μη καταστροφική τεχνική για τον χαρακτηρισμό της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών. Η προσέγγιση αυτή περιλαμβάνει τη μέτρηση των περιβαλλοντικών δονήσεων μιας κατασκευής με τη χρήση αισθητήρων, όπως επιταχυνσιόμετρα, και στη συνέχεια την ανάλυση του συχνοτικού περιεχομένου αυτών των δονήσεων για τον προσδιορισμό των ιδιοσυχνοτήτων ή ιδιοπεριόδων της κατασκευής. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά και την λειτουργία της κατασκευής με μη καταστροφικό τρόπο. Μπορεί επίσης να βοηθήσει στον εντοπισμό πιθανών προβλημάτων ή δομικών αδυναμιών που ενδεχομένως πρέπει να αντιμετωπιστούν. Επιπλέον, οι δοκιμές δονήσεων περιβάλλοντος μπορούν να εκτελεστούν σε μια ποικιλία δομών, συμπεριλαμβανομένων κτιρίων, γεφυρών, πύργων και άλλων τύπων υποδομών.

Στην πράξη, οι δοκιμές δονήσεων περιβάλλοντος χρησιμοποιούνται συχνά για την αξιολόγηση της κατάστασης υφιστάμενων κατασκευών, την εκτίμηση της επίδρασης περιβαλλοντικών παραγόντων όπως ο άνεμος και οι σεισμοί στη δομή ή για την επαλήθευση της ακρίβειας των αναλυτικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό και την ανάλυση. Συνολικά, ο προσδιορισμός ιδιοπεριόδων από δοκιμές δονήσεων περιβάλλοντος είναι μια χρήσιμη και ισχυρή τεχνική για την αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών και γίνεται όλο και πιο δημοφιλής στις δοκιμές και την ανάλυση κατασκευών.

### **3.2. Τύποι αισθητήρων**

Η επιλογή κατάλληλων αισθητήρων (δηλαδή τα όργανα ή οι διατάξεις που μετρούν το επιλεγμένο κάθε φορά μέγεθος), και των θέσεων εγκατάστασής τους προκύπτει, όπως ήδη αναφέρθηκε, μετά από τη μελέτη της αναμενόμενης συμπεριφοράς της κατασκευής και του εντοπισμού των «ευαίσθητων περιοχών» αυτής (π.χ. περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, σημεία μέγιστης παραμόρφωσης κλπ). Ο τύπος των αισθητήρων που θα χρησιμοποιηθούν, επιλέγεται ανάλογα με το είδος των μετρούμενων μεγεθών, την απαιτούμενη ακρίβεια και το περιβάλλον λειτουργίας.

Οι αισθητήρες ποικίλουν και μπορεί να είναι από απλές διατάξεις με βαθμονομημένες λάμες που μετρούν απόσταση μεταξύ δύο σταθερών σημείων, μέχρι σύγχρονοι αισθητήρες που προσαρμόζονται σε καλώδια οπτικών ινών.

Οι δύο πιο κοινοί τύποι αισθητήρων είναι οι ηλεκτρονικοί και οι οπτικοί. Ένας ηλεκτρονικός αισθητήρας μεταβιβάζει ηλεκτρικά σήματα σε όρους ηλεκτρικού φορτίου ή μεταβολής τάσης. Ο οπτικός αισθητήρας μεταβιβάζει σήματα φωτός.

Ο αισθητήρας αποτελείται από δύο τμήματα. Το κομμάτι του αισθητήρα, που μετατρέπει το μακροσκοπικό μέγεθος (όπως φως, δύναμη, πίεση, θερμοκρασία κ.λ.π.) σε ηλεκτρικά μετρήσιμο σήμα ονομάζεται Μετατροπέας (Transducer), ενώ το ηλεκτρονικό κομμάτι που μετατρέπει το σήμα του μετατροπέα σε κάποιο τυποποιημένης μορφής ονομάζεται Κύκλωμα Οδήγησης (Driving Circuit). Το σύνολο του μετατροπέα και του κυκλώματος οδήγησης ονομάζεται Αισθητήρας. Η ποιότητα και η κατασκευή του μετατροπέα καθορίζει τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα.

Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά κάποιοι τύποι αισθητήρων

- Αισθητήρες παλλόμενης χορδής (vibrating wire displacement transducers)

Περιγράφονται οι αρχές λειτουργίας της σειράς 4400 της εταιρείας Geokon.

Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες είναι σχεδιασμένοι για τη μέτρηση μετατοπίσεων μεταξύ κόμβων και ρωγμών σε σκυρόδεμα, πέτρες, έδαφος και δομικά μέλη. Ο αισθητήρας αποτελείται από ένα παλλόμενο σύρμα σε σειρά με ελατήριο τάσης. Οι μετατοπίσεις καθορίζονται από το τέντωμα του ελατηρίου τάσης, το οποίο παράγει μια ανάλογη αύξηση της τάσης του σύρματος.

Το σύρμα και το ελατήριο συνδέονται με μία ράβδο που ολισθαίνει ελεύθερα και προεξέχει ενός προστατευτικού σωλήνα μέσα στον οποίο μπορεί να ολισθαίνει ελεύθερα. Ένας σφραγιστικός δακτύλιος αποτρέπει την είσοδο του νερού.

Το σήμα συχνότητας μεταδίδεται μέσω του καλωδίου στη θέση ανάγνωσης, και στη συνέχεια ρυθμίζεται και εμφανίζεται σε φορητές συσκευές ενδείξεις ή καταγραφείς δεδομένων (dataloggers).

- Αισθητήρες οπτικών ινών:

Η τεχνολογία της ενόργανης παρακολούθησης με οπτικές ίνες βρίσκει σήμερα εφαρμογή στην παρακολούθηση δομικών στοιχείων των κατασκευών αλλά και στο πεδίο των επισκευών όπως είναι η παρακολούθηση μανδυνών από ωπλισμένο σκυρόδεμα και επισκευαστικών επιθεμάτων (βλ. ανθρακοϋφάσματα). Επίσης στην παρακολούθηση των της απόδοσης των θερμομονώσεων, της μεταβολής της υγρασίας, των θερμοκρασιακών μεταβολών κλπ. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται και στην παρακολούθηση της κατάστασης διατήρησης αγωγών δικτύων (νερού, πετρελαίου ή φυσικού αερίου).

Οι αισθητήρες οπτικής ίνας λειτουργούν με την αυξομείωση μίας ή περισσότερων ιδιοτήτων του φωτός (ένταση, φάση, συχνότητα, πόλωση) που διαδίδεται μέσα στην ίνα.

Εγκαθίστανται σε καλώδια οπτικών ινών που καταλήγουν σε μία ειδική συσκευή αποκωδικοποίησης του οπτικού σήματος. Η συσκευή αυτή στη διεθνή ορολογία ονομάζεται interrogator, όρος που πλέον έχει καθιερωθεί και στην Ελληνική γλώσσα.

Βασικό χαρακτηριστικό της διάταξης είναι η μεγάλη αντοχή της οπτικής ίνας σε μηχανικές καταπονήσεις, καθώς και ότι είναι αδρανής σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία και στο νερό.

Αισθητήρες οπτικών ινών είναι οι αισθητήρες τύπου Bragg Grating, οι οποίοι παίρνουν την ονομασία τους από την συνθήκη του Bragg. Η συνθήκη Bragg συνδέει τις απειροελάχιστες

μεταβολές του μήκους του αισθητήρα με την μεταβολή του ανακλώμενου φάσματος, ως εξής <sup>(22)</sup>:

$$\Delta\lambda = K_e \varepsilon_z + KT\Delta T$$

όπου:  $\Delta\lambda$  είναι η μεταβολή του μήκους κύματος του σήματος

$\varepsilon_z$  είναι η παραμόρφωση του αισθητήρα.

Η τιμή της σταθεράς  $K_e$  δηλώνει τη σχέση μετατροπής παραμόρφωσης - μήκους κύματος του αισθητήρα, ενώ η τιμή της  $KT$ , δηλώνει τη σχέση θερμοκρασίας-μήκους κύματος.

Ενσωματώνονται ως τμήμα μήκους μικρότερο του 1cm μονότροπης οπτικής ίνας, το οποίο πρώτα πρέπει να έχει υποστεί ειδική κατεργασία. Ο εν λόγω αισθητήρας έχει την ιδιότητα σε εισερχόμενη ακτινοβολία ευρέως φάσματος (1530-1570nm) να λειτουργεί σαν οπτικό φίλτρο που αντανakλά μια ελάχιστη ποσότητα του ευρυζωνικού σήματος, επιτρέποντας παράλληλα στο υπόλοιπο φως να συνεχίσει την πορεία του μέσα στην ίνα. Αυτή η τροποποιημένη περιοχή είναι ευαίσθητη στις τάσεις εφελκυσμού και συμπίεσης και στις μεταβολές θερμοκρασίας. Συνεπώς, μεταβάλλεται το ανακλώμενο μήκος κύματος το οποίο στη συνέχεια καταγράφεται από τον ειδικό εξοπλισμό (interrogator) που παρακολουθεί σε τακτά διαστήματα χρόνου τις μεταβολές. Τοποθετούνται εύκολα και με ασφάλεια σε δυσπρόσιτα και ευαίσθητα μέρη και μετρούν πολλές διαφορετικές παραμέτρους όπως η παραμόρφωση, την πίεση, την τάση, κλίση, επιτάχυνση. <sup>(22)</sup>

Οι αισθητήρες τύπου Bragg μπορούν να μετρήσουν την παραμόρφωση με μεγάλη ακρίβεια, ενώ η ευκολία στην τοποθέτηση οδήγησε τους επιστήμονες να χρησιμοποιήσουν τους συγκεκριμένους αισθητήρες σε ένα μεγάλο πεδίο εφαρμογών καθώς με έξυπνες μετατροπές μπορεί κανείς εύκολα να μετρήσει την πίεση, την τάση, κλίση, μετακίνηση ακόμα και επιτάχυνση. <sup>(22)</sup>

### 3.3. Καθορισμός ορίων συναγερμού

Η μελέτη της κατασκευής θα καθορίσει τα αριθμητικά όρια των τάσεων ή παραμορφώσεων ή του κάθε άλλου μετρούμενου μεγέθους, πάνω από τα οποία θα πρέπει να υπάρχει επαγρύπνηση σε ότι αφορά τη λειτουργία της κατασκευής.

Για τη βαθμονόμηση του εύρους των ασφαλών τιμών των μεγεθών, πραγματοποιείται μια αρχική μέτρηση, αμέσως μετά την τοποθέτηση των αισθητήρων, η οποία συγκρίνεται με τα αντίστοιχα εντατικά μεγέθη που έχουν προκύψει από τη σχεδίαση και τον υπολογισμό της κατασκευής. Αν δεν υπάρχει ανάλυση της κατασκευής, η αρχική μέτρηση αποτελεί την τιμή αναφοράς με την οποία συγκρίνονται οι τιμές των επόμενων μετρήσεων προκειμένου να αποφασίζεται εάν απαιτείται περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων για την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς τη δοκιμή ακεραιότητα της κατασκευής. Συχνά, είναι σημαντικό, οι μετρήσεις να γίνονται κάτω από παρόμοιες συνθήκες υγρασίας ή θερμοκρασίας καθώς πολλές κατασκευές μεταβάλλουν τη συμπεριφορά τους με την αυξομείωση των φορτίων που προέρχονται π.χ. από θερμοκρασιακές μεταβολές. Για το λόγο αυτό οι μετρήσεις καλό είναι να γίνονται τις ίδιες ώρες της ημέρας ώστε κατά τη σύγκριση των μετρούμενων μεγεθών να μην υπεισέρχονται διορθωτικοί συντελεστές που αφορούν τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

### 3.4. Παραδείγματα ενόργανης παρακολούθησης αρχαίων μνημείων

#### Ωρολόγιο Ανδρόνικου Κυρρήστου στη Ρωμαϊκή Αγορά

Το Ωρολόγιο Ανδρόνικου Κυρρήστου, κατασκευασμένο τον 1<sup>ο</sup> π.χ. αιώνα εξολοκλήρου από πεντελικό μάρμαρο, είναι ένα οκταγωνικό οικοδόμημα πλευράς περίπου 3,25m και ύψος περί τα 12 μ. Στις τρεις από τις οκτώ πλευρές του προσαρτώνται 2 πρόπυλα και ένα κυλινδρικό πρόσκτισμα το οποίο συνδέεται με τη μεταφορά νερού μέσα στο κτίσμα προκειμένου να λειτουργήσει το υδραυλικό ρολόι που βρισκόταν στο εσωτερικό του. Η περιμετρική του τοιχοποιία αποτελείται από λαξευμένα λιθοσώματα τα οποία δεν έχουν ενιαίο ύψος. Από πάνω προς τα κάτω, διακρίνεται η άνω ζώνη του της κατασκευής η οποία περιλαμβάνει τη στέγη, και τη ζωφόρο πάνω στην οποία είναι λαξευμένες ανάγλυφες παραστάσεις των ανέμων, στη συνέχεια μετά από μια στρώση λίθων μικρού ύψους αναπτύσσεται η επόμενη ζώνη που φτάνει μέχρι το στέγαση των δύο προπύλων στην οποία είναι χαραγμένες ακτίνες που εξυπηρετούσαν τη χρήση του πύργου ως ηλιακό ρολόι, ακολουθεί η κατώτερη ζώνη της τοιχοποιίας και τέλος η τρίβαθμη κρηπίδα, πάνω στην οποία εδράζεται όλο το οικοδόμημα.

Το εγκατεστημένο σύστημα καταγραφής στο Ωρολόγιο του Ανδρόνικου Κυρρήστου περιλαμβάνει οκτώ (8) αισθητήρες τύπου παλλόμενης χορδής (vibrating wire) και μία κεντρική τοπική μονάδα διαμόρφωσης και καταγραφής σήματος. Οι προαναφερθείσες καταγραφές αφορούν στη μέτρηση της δύναμης τανύσεως (προέντασης) του περιμετρικού περιδετήρα, και των παραμορφώσεων συγκεκριμένων δομικών μελών του μνημείου. Συγκεκριμένα, της στροφής σε δύο άξονες μίας θραυσμένης μαρμάρινης λιθόπλακας στην οροφή του μνημείου και στη μεταβολή του εύρους ρωγμής ενός λιθοσώματος από την περιμετρική τοιχοποιία και μιας λιθόπλακας οροφής.

Αναλυτικότερα το σύστημα αποτελείται από <sup>(24)</sup>:

- (i) Δύο (2) κλισιόμετρα τύπου παλλόμενης χορδής (vibrating wire tiltmeter model type 6350) στην εσωτερική πλευρά μιας εκ των κεκλιμένων λιθοπλακών οροφής.
- (ii) Ένα (1) ρωγμόμετρο τύπου παλλόμενης χορδής (vibrating wire crackmeter model type 4420) στην εσωτερική πλευρά μιας εκ των κεκλιμένων λιθοπλακών οροφής.
- (iii) Ένα (1) ρωγμόμετρο τύπου παλλόμενης χορδής (vibrating wire crackmeter model type 4420) στην εσωτερική πλευρά ενός λιθοτεμαχίου της περιμετρικής τοιχοποιίας του μνημείου.
- (iv) Τέσσερα (4) μηκυνσιόμετρα τύπου παλλόμενης χορδής (vibrating wire strandmeters model type 4410) στον περιμετρικό περιδετήρα (ανοξείδωτο συρματόσχοινο) στην εξωτερική περίμετρο στη στάθμη κάτω από τις λιθοπλίνθους της οροφής.
- (v) Μία (1) μονάδα διαμόρφωσης, μέτρησης και καταγραφής σημάτων ενσύρματων αισθητηρίων τύπου παλλόμενης χορδής (16-Channel Datalogger (VW), model type 8002-16, LC-2 Series) στην ενδιάμεση εσωτερική περιμετρική προεξοχή.
- (vi) Εικοσιτέσσερα (24) μικρά μεταλλικά πλακίδια (πούλιες) περί τα υπέρθυρα της Βορειοανατολικής και Βορειοδυτικής πλευράς.<sup>(24)</sup>



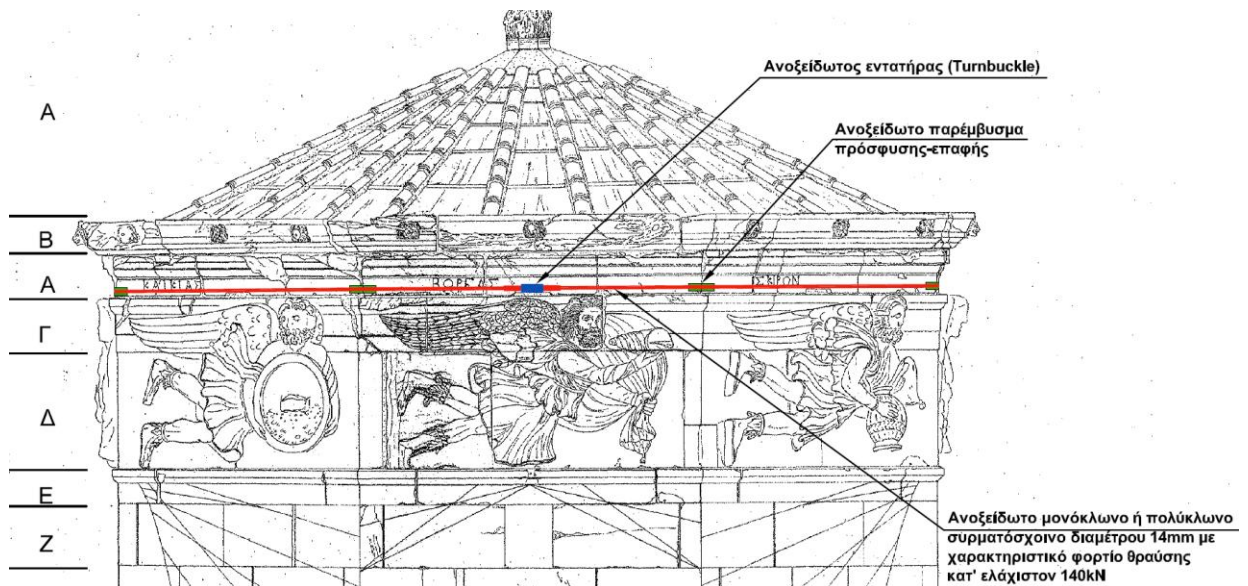
Οι καταγραφές αποθηκεύονται προσωρινά τοπικά στην κεντρική μονάδα (datalogger) και στη συνέχεια συλλέγονται προκειμένου να επεξεργαστούν και να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω.



**Εικ. 15.** Το Ωρολόγιον του Ανδρόνικου Κυρρήστου στη Ρωμαϊκή Αγορά της Αθήνας



**Εικ.16.** Κάτοψη της μαρμάρινης στέγης του Ωρολογίου Κυρρήστου. πηγή: (25)



**Εικ.17.** Η θέση του περιμετρικού περιδετήρα πηγή: (20)





**Εικ.18.** Άνοψη της στέγης του μνημείου με τις θέσεις των ρωγμομέτρων και κλισιομέτρων



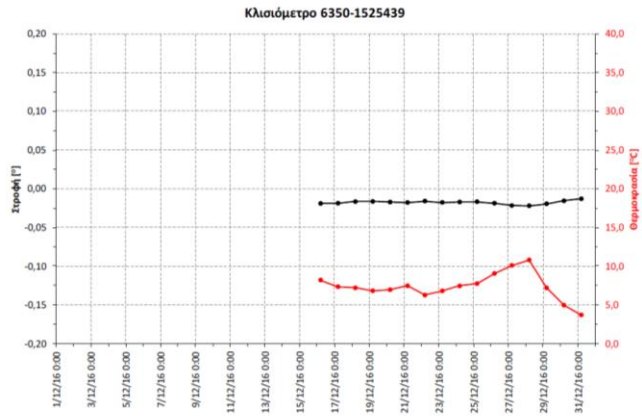
**Εικ.19.** Ρωγμόμετρο τύπου παλλόμενης χορδής (crackmeter 4420-1532066) εγκατεστημένο κάθετα στη ρωγμή της εσωτερικής πλευράς μίας εκ των μαρμάρινων λιθοπλίνθων της οροφής



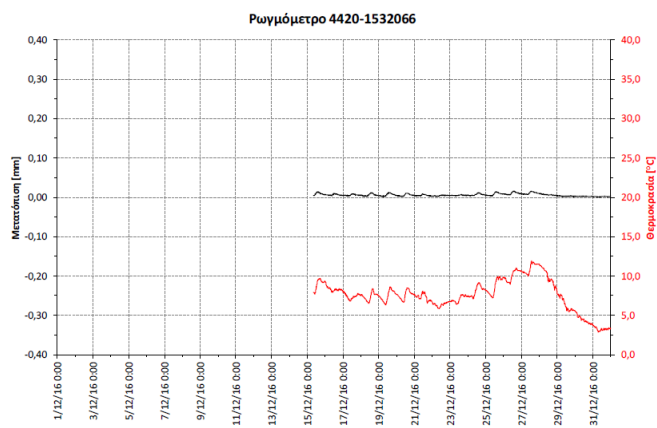
**Εικ.20.** Μηνυνσιόμετρο τύπου παλλόμενης χορδής εγκατεστημένο στον περιμετρικό περιδετήρα



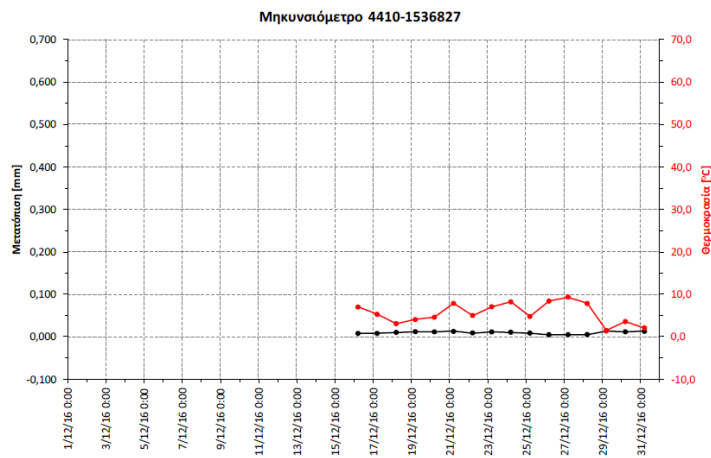
**Εικ.21.** Προσαρμογή του περιδετήρα στις γωνίες



Γράφημα 2. Τιμές κλισιόμετρου 6350-1525439 κεκλιμένης λιθόπλακας οροφής Νο.12 ανά 24hr.



Γράφημα 5. Τιμές ρωγμομέτρου 4420-15312066 κεκλιμένης λιθόπλακας οροφής Νο.18 ανά 15min.



Γράφημα 10. Τιμές μηκυνσιόμετρου 4410-1536827 βόρειας πλευράς ανά 24hr.

**Εικ.22.** Ενδεικτικές καταγραφές των αισθητήρων ανά 24h (πηγή:

Πλευρά	Μήκος [mm]	Σημείο	$\Delta x$ [mm]	$\Delta y$ [mm]
(ΑΒ)	86,40	Γ	0,41	0,14
(ΒΓ)	117,20			
(ΑΓ)	107,45			
(ΔΕ)	115,95	Ζ	-0,08	0,11
(ΕΖ)	121,20			
(ΔΖ)	132,85			
(ΗΘ)	116,70	Ι	-0,22	0,28
(ΘΙ)	106,30			
(ΗΙ)	115,45			
(ΚΛ)	70,00	Μ	-0,09	0,02
(ΛΜ)	87,45			
(ΚΜ)	116,85			
(ΝΞ)	84,80	Ο	-0,25	0,17
(ΞΟ)	81,40			
(ΝΟ)	90,20			
(ΠΡ)	129,70	Σ	0,03	0,04
(ΡΣ)	113,80			
(ΠΣ)	120,65			
(ΤΥ)	94,55	Φ	0,07	0,02
(ΥΦ)	124,65			
(ΤΦ)	129,10			
(ΧΨ)	73,65	Ω	0,02	-0,02
(ΨΩ)	68,90			
(ΧΩ)	73,00			

**Εικ.23.** Μετρήσεις των βαθμονομημένων πλακιδίων για τη μέτρηση εύρους ρωγμών. Στο αριστερό μέρος του πίνακα δίνονται τα οι μετρήσεις των πλευρών και στο δεξί μέρος οι μετατοπίσεις των σημείων ως προς την αρχική μέτρηση.

### Το περιμετρικό Τείχος της Ακρόπολης<sup>(23)</sup>

Το περιμετρικό τείχος της Ακρόπολης δεν αποτελεί ενιαία κατασκευαστική φάση αλλά έχει κατασκευαστεί, συμπληρωθεί και τροποποιηθεί σε διάφορες ιστορικές περιόδους από τη μυκηναϊκή, κλασική έως και την Οθωμανική περίοδο. Στην διάρκεια του χρόνου έχει υποστεί πολλές φθορές οφειλόμενες κυρίως σε δράση του φυσικού περιβάλλοντος καθώς και σε ανθρώπινες παρεμβάσεις<sup>(23)</sup> Οι πολυάριθμοι σεισμοί, οι πόλεμοι, οι μεταβολές στη χρήση και τη γεωμετρία του, αλλά και η γήρανση των υλικών και της δομής του, έχουν οδηγήσει σε ρηγματώσεις και άλλες φθορές που για ευνόητους λόγους είναι απαραίτητο να παρακολουθούνται και να καταγράφεται η εξέλιξή τους.

Από την ιστοσελίδα της ΥΣΜΑ πληροφορούμαστε ότι το 2004-2005 εγκαταστάθηκαν μηχανικά ακρυλικά ρωγμόμετρα για την παρακολούθηση των ρηγμάτων της νοτιοανατολικής γωνίας του Τείχους. Οι ενδείξεις τους είναι σημειακές αλλά χρήσιμες, καθώς με αξιοπιστία συλλέγονται πληροφορίες για το αν και κατά πόσο οι ρηγματώσεις είναι «ενεργές». Οι ενδείξεις μικρομετακινήσεων στη βάση του τείχους έως σήμερα δεν ξεπερνούν τα ~2,3 δέκατα του χιλιοστού και βρίσκονται στα όρια του σφάλματος της μέτρησης.

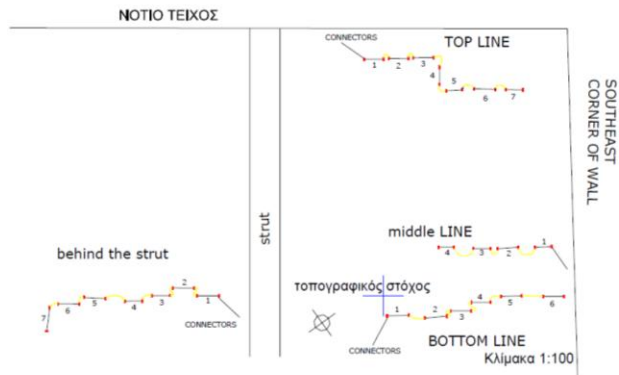
Στα τέλη του 2005 τοποθετήθηκε υπογείως αδιάσταλτο σύρμα INVAR, για έλεγχο των μικρομετακινήσεων του νοτίου τείχους. Ως σημείο αναφοράς των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το ακλόνητο θεμέλιο του Παρθενώνα. Έγινε υπόγεια σύνδεση λίθου της 6ης εκ των άνω στρώσης του θεμελίου του Παρθενώνα με λίθο της ανώτερης αρχαίας στρώσης του νότιου τείχους. Το σύρμα INVAR εγκαταστάθηκε μέσα σε σωλήνα και είναι επισκέψιμο σε τρεις θέσεις από κατακόρυφα φρεάτια. Η στήριξη του στον Παρθενώνα

είναι σταθερή, ενώ στο νότιο τείχος τανύζεται από αντίβαρο επί τροχαλίων. Τυχόν μετακίνηση του τείχους θα εμφανίσει αλλαγή της σχετικής απόστασης στο σύστημα καταγραφής.

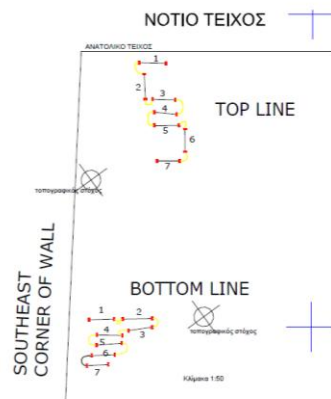
Στο πλαίσιο της ενόργανης παρακολούθησης του Τείχους, τοποθετήθηκαν πιλοτικά αισθητήρες οπτικών ινών τύπου bragg gratings, για τη μέτρηση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων λόγω μηχανικών ή θερμικών αιτιών, σε χαρακτηριστικές περιοχές του τείχους. Οι αισθητήρες αναπτύχθηκαν κυρίως στη ΝΑ γωνία του καθώς και σε περιοχή του βορείου τείχους περί την επίχωση του Αρρηφορίου, όπου το τείχος παρουσιάζει έντονες παραμορφώσεις. Οι καταγραφές έως το 2009 αφορούσαν σε θερμοκρασιακές μεταβολές. Το 2015 τοποθετήθηκαν τέσσερις οπτικές ίνες, δύο εσωτερικά και δύο εξωτερικά, στο θεμέλιο του δυτικού τοίχου της πινακοθήκης των Προπυλαίων.

Σύμφωνα με τους Αστροειδίδη και Εγγλέζο <sup>(23)</sup>, υλοποιήθηκε από την Υπηρεσία Συντήρησης Μνημείου Ακροπόλεως του Υπουργείου Πολιτισμού (ΥΣΜΑ/ΥΠ.ΠΟ) ένα πιλοτικό σύστημα ενόργανης παρακολούθησής της Νοτιοανατολικής περιοχής του Τείχους. Το σύστημα περιλαμβάνει αισθητήρες παραμόρφωσης οπτικών ινών τύπου bragg gratings, οι οποίοι τοποθετήθηκαν σε καθορισμένες θέσεις. Οι θέσεις έχουν επιλεγεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση της διάδοσης των υπαρχουσών ρωγμών. Οι αισθητήρες οπτικών ινών είναι ενσωματωμένοι σε ειδικές ράβδους μήκους περίπου ενός μέτρου.

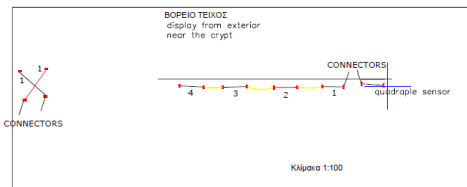
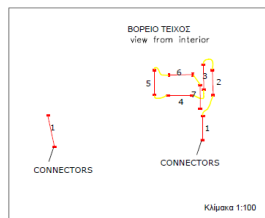
Μετά από τη σχετική έρευνα για τις γεωμετρικές συνθήκες, τις ρωγμές που εκδηλώνονται και τις εντατικές καταστάσεις που φορτίζουν το τείχος, εγκαταστάθηκαν οι αισθητήρες όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες:



Τοποθέτηση αισθητήρων smart rod στην Νότια πλευρά του Τείχους. Έγινε τοπογραφική αποτύπωση υψηλής ακρίβειας των θέσεων εφαρμογής.



Τοποθέτηση αισθητήρων smart rod στην Ανατολική πλευρά του Τείχους. Έγινε τοπογραφική αποτύπωση υψηλής ακρίβειας των θέσεων εφαρμογής.



**Σχήμα 4.** Τοποθέτηση αισθητήρων smart rod. Στη Βόρεια πλευρά του Τείχους. Στο κάτω μέρος του Τείχους παρουσιάζεται η τοποθέτηση των αισθητήρων στο ελεύθερο άκρο του Τείχους και σε χιαστί διατάξη δυο ανεξάρτητα smartrods στην άνω αριστερή γωνία του υπερθυρού της Κρύπτης του Βόρειου Τείχους. Έγινε τοπογραφική αποτύπωση υψηλής ακρίβειας των θέσεων εφαρμογής.

**Εικ.24.** Τοποθέτηση αισθητήρων παραμόρφωσης οπτικών ινών τύπου bragg gratings στο νότιο, ανατολικό και βόρειο τμήμα των τειχών της Ακρόπολης (πηγή: (23))



## Οι 2 Χορηγικοί κίονες στη νότια Κλιτύ της Ακρόπολης<sup>(7)</sup>

Οι δύο χορηγικοί κίονες βρίσκονται στη νότια κλιτύ του Βράχου της Ακρόπολης σε δυσπρόσιτο σημείο, πάνω από το μνημείο του Θρασύλλου.

Ο ανατολικός, στηρίζεται σε εξάβαθμη κρηπίδα και διαθέτει κυματιοφόρο βάση με δυο σπείρες, έξι σπονδύλους και τριγωνικό κιονόκρανο κορινθιακού ρυθμού. Από τις έξι βαθμίδες της κρηπίδας, μόνο οι ανώτερες τρεις είναι εξ' ολοκλήρου κτισμένες με λιθοπλίνθους. Για τις υπόλοιπες τρεις, ο βράχος είναι διαμορφωμένος βαθμιδωτά προς βορρά. Στη νότια πλευρά της κρηπίδας του κίονα Α διακρίνονται σκαλισμένα στην πέτρα πέντε ακόμα επίπεδα. Τα δύο πρώτα είναι τα πιο καλά διατηρημένα. Το τρίτο είναι σημαντικά αλλοιωμένο λόγω της διάβρωσης του βράχου. Τα δύο τελευταία που φτάνουν μέχρι το όριο της κατατομής είναι εντελώς ανεξάρτητα από τον κίονα και αποτελούνται από σαφώς διακριτά τεμάχια.

Ο δυτικός κίονας στηρίζεται σε κρηπίδα πέντε βαθμίδων και διαθέτει βάση με μια σπείρα, πέντε σπονδύλους, κιονόκρανο και επί αυτού ένα επίθημα. Ο βράχος στη βόρεια πλευρά της κρηπίδας δεν έχει διαβαθμίσεις, αλλά είναι σχεδόν κατακόρυφα κομμένος σε όλο το ύψος της βάσης του κίονα. Από τις πέντε βαθμίδες η κατώτερη εμφανίζεται μόνο με τη νότια πλευρά της για να εξομαλύνει την κλίση του βράχου. Εν συνεχεία και σε αντίθεση με την περίπτωση του ανατολικού κίονα, δε διακρίνονται άλλα επίπεδα στο βράχο ο οποίος συνεχίζει απότομος μέχρι τις δύο βαθμίδες που συνορεύουν με την κατατομή (Amandry, 1997). Στο δυτικό κίονα δεν διακρίνεται καμιά επιγραφή στη βάση του.



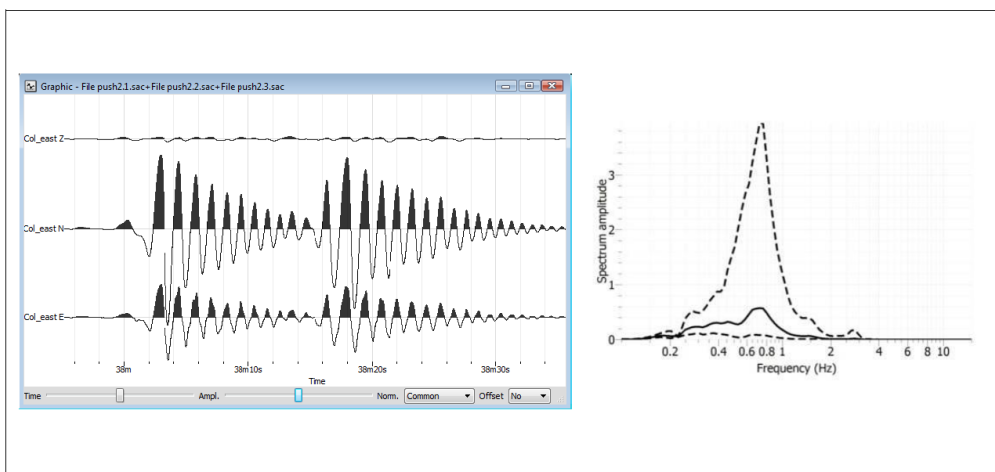
**Εικ.25.** Οι δύο χορηγικοί κίονες πάνω από το μνημείο του Θρασύλλου.  
(από το προσωπικό αρχείο του Κ. Μπολλέτη)

Κατά το διάστημα 13/04/2011 έως 10/05/2011 εγκαταστάθηκαν εννέα σειсмоγράφοι στην περιοχή των χορηγικών κίωνων από το Εργαστήριο Σεισμολογίας του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος του Πανεπιστημίου Αθηνών. Η αναφορά των Β. Κουσκουνά και Ι. Κασσάρα αναφέρει ότι οι αισθητήρες ήταν όργανα υψηλής ευκρίνειας που εγκαταστάθηκαν με στόχο τη συνεχή καταγραφή φυσικού θορύβου στις επιλεγμένες θέσεις καθόλη τη διάρκεια του 24ώρου ώστε να περιλαμβάνονται και πιθανοί εξωγενείς παράγοντες θορύβου για να διερευνηθεί η πιθανή επιρροή τους στους κίονες. Ασκήθηκαν επίσης τεχνητές διεγέρσεις στους κίονες σε διάφορες διευθύνσεις. Εκτιμήθηκαν έτσι, η ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης και άλλες παράμετροι όπως ο συντελεστής απόσβεσης της ιδιοαιώρησης και οι κύριες διευθύνσεις ταλάντωσης.



**Εικ.26.** Θέσεις των 8 από τους 9 αισθητήρων στην περιοχή των χορηγικών κίωνων της Νότιας Κλιτύος. Ο 9<sup>ος</sup> τοποθετήθηκε πιο μακριά πάνω στο σχιστολιθικό βράχο.

Οι σειсмоγράφοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ψηφιακοί, τριών καναλιών με δυναμικό εύρος 24bits τύπου REFTEK. Τα σεισμόμετρα ήταν τριών συνιστωσών, τύπου Lennartz-3D, ιδιοσυχνότητας 1Hz και Guralp CMG-40T ιδιοπεριόδου ενός (1) sec. Για την ανάλυση των καταγραφών χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό GEOPSY το οποίο αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Προγράμματος SESAME (Site EffectS assessment using AMbient Excitations). Ο αλγόριθμος ήταν μία εφαρμογή JAVA.



**Εικ.27.** Παράδειγμα κυματομορφής (αριστερά και μέσου φάσματος πλάτους (δεξιά) ελεύθερης ταλάντωσης με απόσβεση του ανατολικού κίονα στη δ/νση βορρά- νότου που υπολογίστηκε μέσω του αλγόριθμου GEOPSY.

Οι Αμβράζης και Ψυχάρης<sup>(30)</sup> αξιοποίησαν τις καταγραφές των σειсмоγράφων για να βαθμονομήσουν ένα αριθμητικό προσομοίωμα των δύο κίωνων. Το μοντέλο αυτό στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για την αριθμητική ανάλυση των κίωνων του Θρασυλλίου που έγινε με τον κώδικα 3DEC της ITASCAinc που βασίζεται στη μέθοδο των διακριτών στοιχείων ακολουθώντας τη μοριακή δυναμική (MolecularDynamics) μέθοδο.

Η βαθμονόμηση του μοντέλου αφορούσε στην επιλογή των κατάλληλων δυσκαμψιών των αρμών μεταξύ των σπονδύλων των κίωνων καθώς και της δυσκαμψίας του αρμού μεταξύ κίωνων και βραχώδους υποβάθρου. Οι κατάλληλες τιμές επιλέχθηκαν με αντιστοίχιση των φυσικών περιόδων των στηλών που μετρήθηκαν επί τόπου από την περιβαλλοντική και εξαναγκασμένη δόνηση χαμηλού πλάτους που περιγράφηκε παραπάνω. Ο αριθμητικός υπολογισμός των φυσικών περιόδων βασίστηκε στην ελεύθερη ταλάντωση των κίωνων με αίτιο έναν ημιτονοειδή παλμό μικρής περιόδου και μικρού πλάτους. Οι φυσικές περίοδοι καθορίστηκαν από τις κορυφές του φάσματος Fourier της απόκρισης του κιονοκράνου στις δύο κύριες οριζόντιες διευθύνσεις. Οι αναλύσεις έγιναν για διάφορες διευθύνσεις της δόνησης.

Εξετάστηκαν διάφορα σενάρια για την επιλογή των κατάλληλων τιμών δυσκαμψίας μέχρι που η ιδιομορφική ανάλυση έδωσε τιμές ιδιοπεριόδου κοντά στις μετρηθείσες με την περιβαλλοντική και εξαναγκασμένη δόνηση.

## *Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> - Μελέτη περίπτωσης*

### *4.1 Ενοργάνωση του ελεύθερα ιστάμενου κίονα της νοτιοδυτικής γωνίας του Ναού του Ολυμπίου Διός*

Τοποθετήθηκαν 5 (πέντε) επιταχυνσιογράφοι σε τέσσερα(4) μέλη του κίονα : στην κυκλική βάση, στον έκτο σπόνδυλο, στον δέκατο τρίτο σπόνδυλο και στο κιονόκρανο. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν με προσανατολισμό ΝΔ-ΒΑ. Ο προσανατολισμός έλαβε υπόψη την παθολογία που παρατηρείται στη ΒΑ γωνία της πλίνθου και οι αισθητήρες προσανατολίστηκαν έτσι ώστε τα αποτελέσματα να αξιοποιηθούν άμεσα. Πιο συγκεκριμένα τοποθετήθηκαν:

α/ ένας επιταχυνσιογράφος στη νότια πλευρά της κυκλικής βάσης





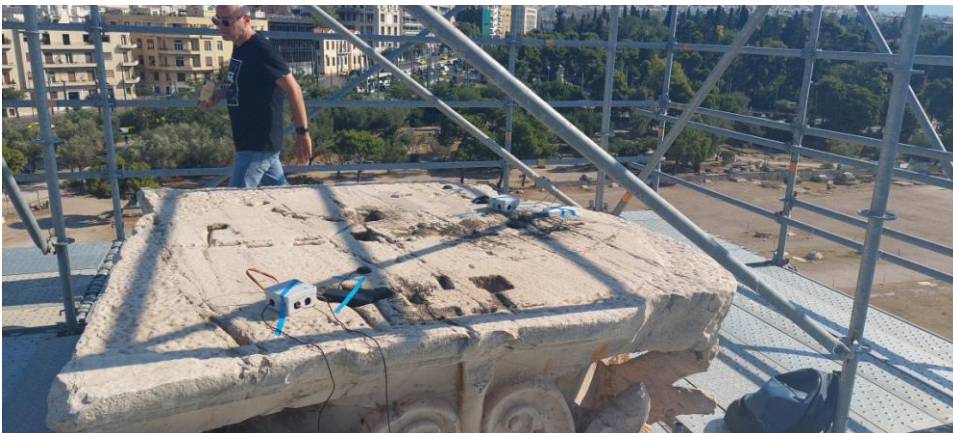
β/ ένας επιταχυνσιογράφος στη νότια πλευρά του έκτου σπονδύλου



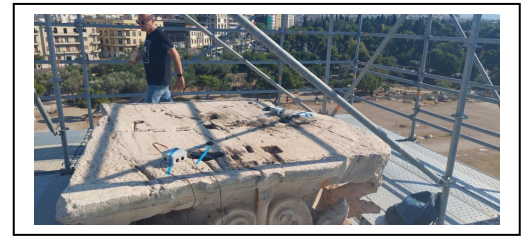
γ/ ένας επιταχυνσιογράφος στην άνω έδρα του 12<sup>ου</sup> σπονδύλου, στη θέση κατακόρυφου συνδέσμου (γόμφου) στη βόρεια πλευρά μεταξύ 12<sup>ου</sup> και 13<sup>ου</sup> σπονδύλου. Σήμερα ο γόμφος δεν υπάρχει, προφανώς μετά την οξείδωση και διόκωσή του η οποία προκάλεσε διάρρηξη και αποκοπή σημαντικού τμήματος από τη μάζα των δύο διαδοχικών σπονδύλων.



δ/ δύο επιταχυνσιογράφοι στην άνω έδρα του κionoκράνου στην νοτιοδυτική και βορειοανατολική περιοχή αντίστοιχα





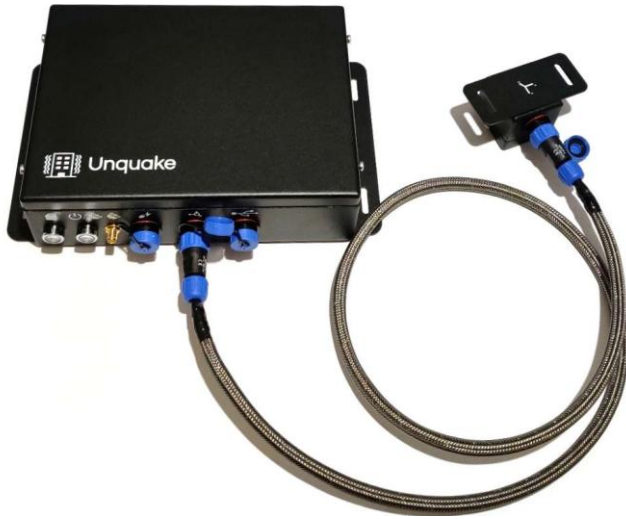


**Εικ.28.** Θέσεις επιταχυνσιογράφων

Οι επιταχυνσιογράφοι που εγκαταστάθηκαν στον κίονα, είναι MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) δηλαδή Μικροηλεκτρομηχανικά Συστήματα. Πρόκειται για μια τεχνολογία που συνδυάζει ηλεκτρικά και μηχανικά στοιχεία σε μικροσκοπική κλίμακα. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες είναι ψηφιακοί, χαμηλού θορύβου και ολίσθησης από την

Analog Devices. Τα ψηφιακά επιταχυνσιόμετρα MEMS χαμηλής ολίσθησης της Analog Devices χρησιμοποιούν έναν αισθητήρα μικρο-ηλεκτρομηχανικού συστήματος (MEMS) που μπορεί να μετρήσει την επιτάχυνση σε τρεις διαστάσεις (x, y και z) με πολύ υψηλή ακρίβεια. Αυτά τα επιταχυνσιόμετρα έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν ακριβή και αξιόπιστα δεδομένα ακόμη και σε σκληρά περιβάλλοντα και υπό ακραίες συνθήκες, όπως υψηλές κρούσεις και δονήσεις.

Τους συγκεκριμένους αισθητήρες τοποθέτησε στις παραπάνω θέσεις η Εταιρεία UNQUAKE.

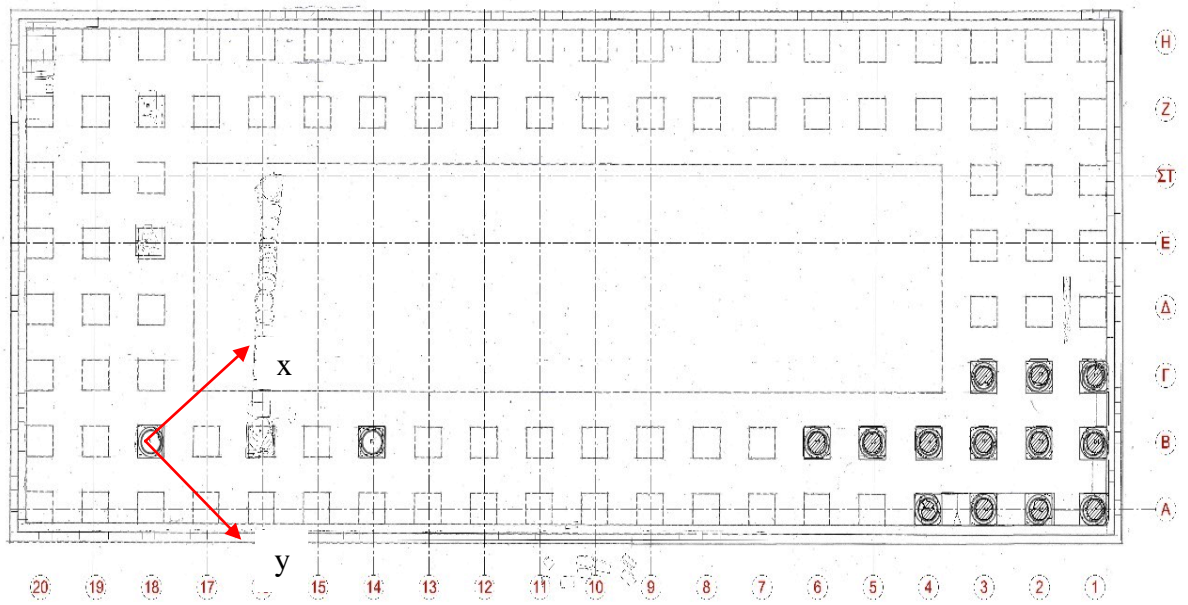


**Εικ.29.** Οι αισθητήρες τύπου MEMS της Analog Devices που τοποθετήθηκαν στον κίονα του Ναού του Ολυμπίου Διός

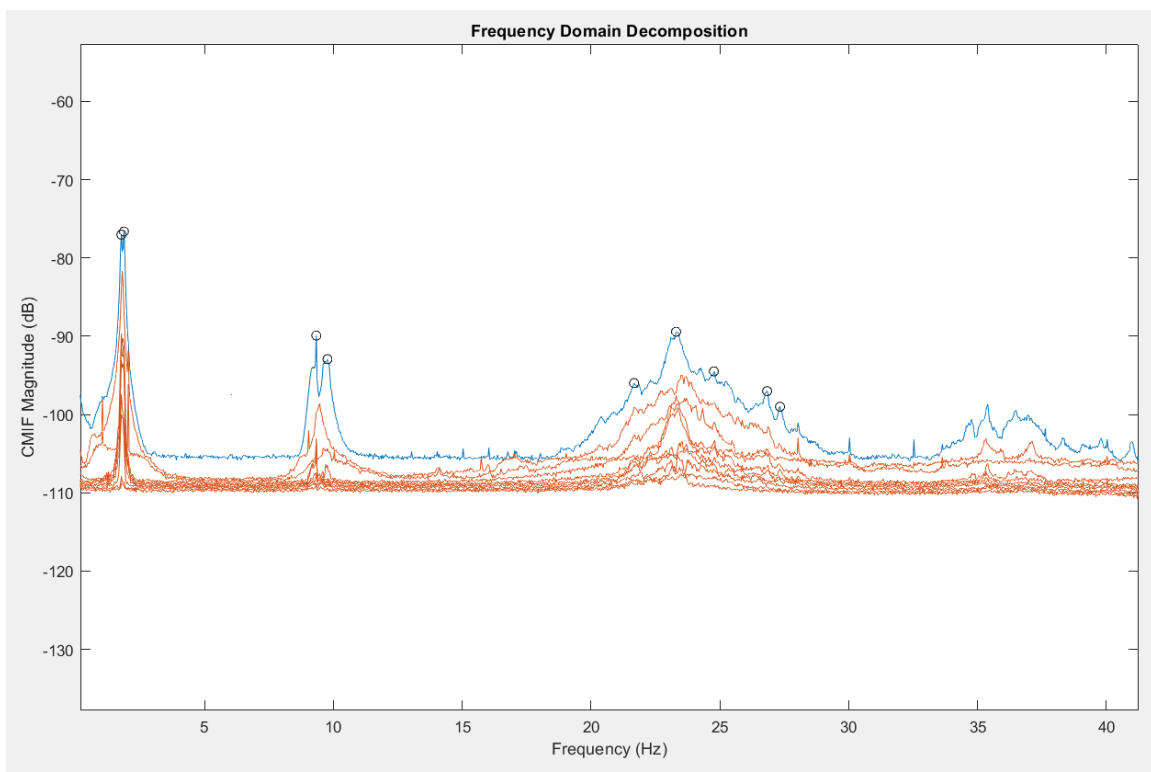
#### *4.2 Η δοκιμή περιβαλλοντικών δονήσεων (AVT)*

Οι πολυσπόνδυλοι κίονες δεν διαθέτουν φυσικές περιόδους στην περίπτωση που το τίναγμα είναι αρκετά δυνατό ώστε να προκαλέσει λίκνισμα ή ολίσθηση. Για χαμηλό πλάτος δονήσεων όμως συμπεριφέρονται σαν συστήματα πολλαπλών βαθμών ελευθερίας, συνεχή και έχουν φυσικές ιδιομορφές.<sup>(30)</sup>

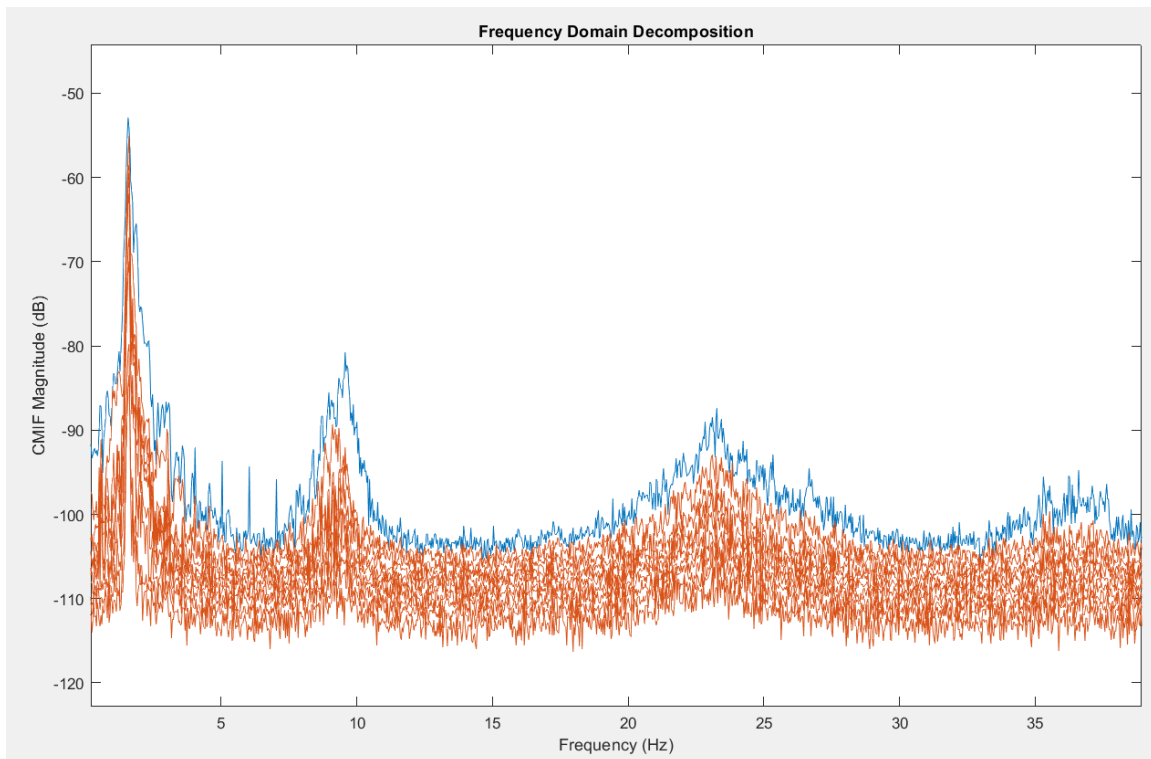
Ο αριθμητικός υπολογισμός των φυσικών περιόδων βασίστηκε στην ελεύθερη ταλάντωση των κίωνων με αίτιο τις περιβαλλοντικές δονήσεις. Οι φυσικές περίοδοι καθορίστηκαν από τις κορυφές του φάσματος Fourier της απόκρισης του κionoκράνου στις δύο κύριες οριζόντιες διευθύνσεις Εικ. 30, 31



Εικ. 30. Οι δύο διευθύνσεις της δόνησης



**Εικ.31.** Φάσμα Fourier της περιβαλλοντικής (ambient) διέγερσης



**Εικ.32.** Φάσμα Fourier της εξαναγκασμένης διέγερσης

Διεύθυνση κίνησης	Συχνότητα (sec <sup>-1</sup> )			
	Μεταφορικές (f1, f2)	Καμπτικές (f3, f4)	Στροφική (f5)	2 <sup>ες</sup> καμπτικές (f6, f7)
Διεύθυνση x	1,77	9,33	23,3	26,83
Διεύθυνση y	1,87	9,77		27,33

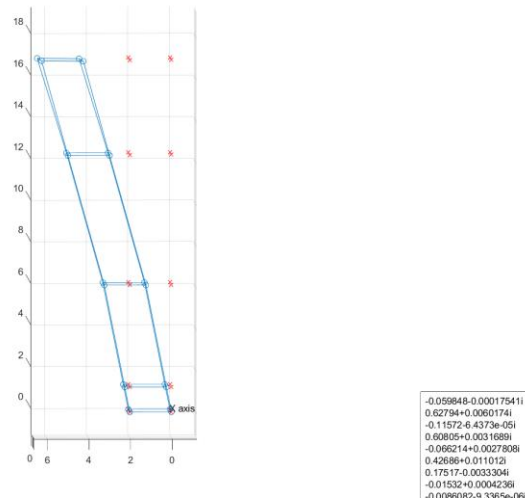
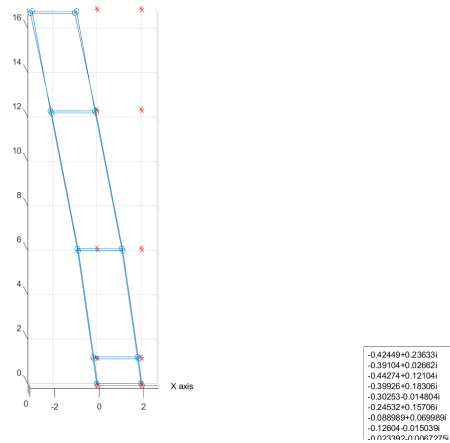
Διεύθυνση κίνησης	Περίοδος (sec)			
	Μεταφορικές (T <sub>1</sub> , T <sub>2</sub> )	Καμπτικές (T <sub>3</sub> , T <sub>4</sub> )	Στροφική (T <sub>5</sub> )	2 <sup>ες</sup> καμπτικές (T <sub>6</sub> , T <sub>7</sub> )
Διεύθυνση x	0,56	0,11	0,04	0,03
Διεύθυνση y	0,53	0,10		0,04

**Εικ. 33.** Οι συχνότητες και οι περίοδοι που μετρήθηκαν με AVT -Ambient Vibration Testing

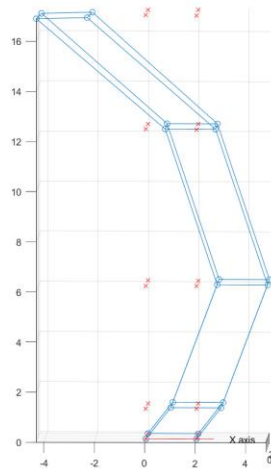
Οι περίοδοι T1 και T2 είναι οι δεσπόζουσες περίοδοι της δόνησης στις δύο επιλεγμένες διευθύνσεις που φαίνονται στην εικόνα 33. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μια μικρή διαφορά μεταξύ των ιδιοσυχνοτήτων όσο και των ιδιοπεριόδων. Θεωρητικά θα περίμενε κανείς την ταύτιση των δύο τιμών διότι ο κίονας είναι συμμετρικός και η θεμελίωσή του εδράζεται κατά πάσα πιθανότητα σε επίπεδη επιφάνεια. Βέβαια αν συνδυαστεί η παθολογία του κίονα και κυρίως της πλίνθου που είναι το κατώτερο στοιχείο της ανωδομής του, με τις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων, δημιουργείται την υπόνοια ότι ίσως υπάρχει κάποιο πρόβλημα

BA γωνία της θεμελίωσης το οποίο δικαιολογεί τις διαφορετικές τιμές των ιδιοσυχνοτήτων.

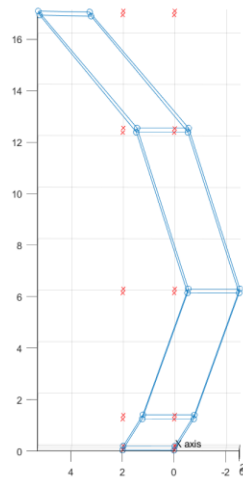
Στις επόμενες εικόνες φαίνονται οι 9 πρώτες ιδιομορφές που προέκυψαν από τις μετρήσεις.



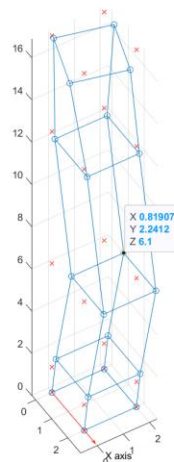




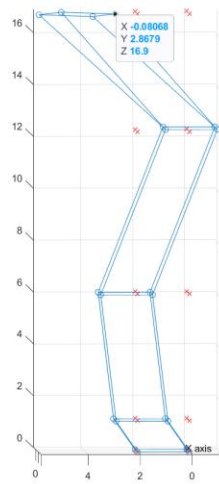
-0.59549+0.0054696i  
 -0.13692-0.022521i  
 -0.61413+0.0031087i  
 -0.20668+0.017905i  
 0.10855-0.0094939i  
 0.01712+0.0082607i  
 0.077968-0.037831i  
 0.40095-0.046517i  
 0.15829+0.015027i



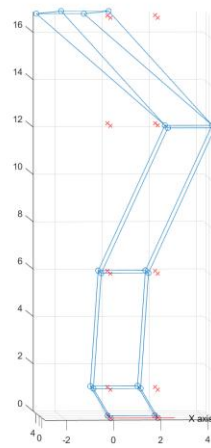
-0.0072032-0.048787i  
 0.47121+0.41062i  
 -0.071756-0.070621i  
 0.45658+0.3981i  
 0.0090041+0.013757i  
 -0.076526-0.08015i  
 -0.35995-0.24893i  
 0.026793+0.0034167i  
 0.02957+0.029306i



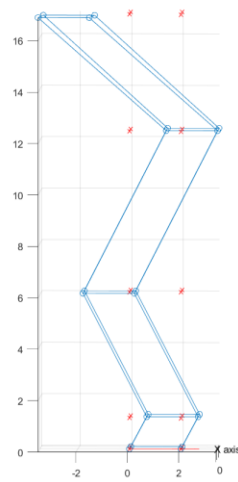
0.092068-0.0037121i  
 -0.090673+0.26298i  
 0.018251+0.56042i  
 -0.0023727-0.47825i  
 0.047371-0.50992i  
 -0.013305+0.010993i  
 0.034457+0.0019031i  
 0.11701+0.28287i  
 0.0346017+0.0684758i



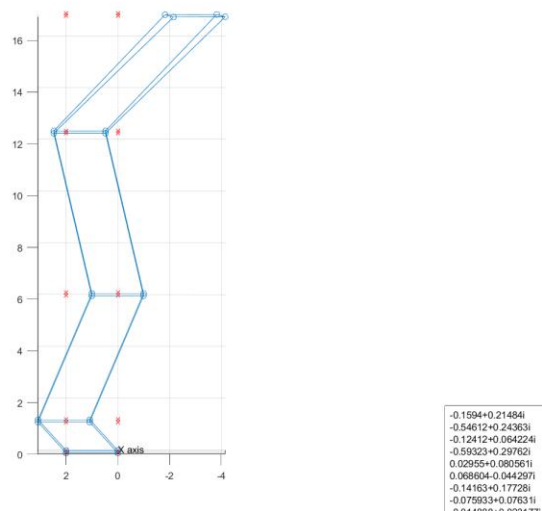
-0.080335+0.12743i  
0.4097-0.22753i  
-0.29724+0.19583i  
0.54683-0.29295i  
0.2553-0.062772i  
-0.16739+0.088654i  
0.20781-0.22865i  
-0.1101+0.10469i  
-0.042125+0.013252i



-0.24647-0.035827i  
0.50427-0.020927i  
-0.41517+0.026509i  
0.52743+0.0071417i  
0.32908+0.062271i  
-0.28698-0.086258i  
0.070964-0.051236i  
-0.052429+0.067462i  
-0.096457+0.025135i



-0.47641-0.19084i  
-0.37225-0.058849i  
-0.49742-0.064594i  
-0.36246-0.078725i  
0.20122+0.068381i  
0.11482+0.042913i  
-0.13172+0.075664i  
-0.25448+0.12117i  
0.001303+0.060721i



### 4.3 Το αριθμητικό προσομοίωμα

Η αριθμητική ανάλυση του δυτικότερα ιστάμενου κίονα στο ναό του Ολυμπίου Διός έγινε με το πρόγραμμα Abacus που βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Πρόκειται για ένα λογισμικό που δίνει τη δυνατότητα αριθμητικής προσομοίωσης πολλών συστημάτων, από απλές γραμμικές μέχρι πολύπλοκες δυναμικές ανελαστικές αναλύσεις. Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα διακριτοποίησης μονοδιάστατων, διδιάστατων και τρισδιάστατων φορέων καθώς και πολλών υλικών όπως χάλυβα, σκυρόδεμα, σύνθετα υλικά, ελαστομερή κλπ. Το συγκεκριμένο αριθμητικό προσομοίωμα αναλύθηκε στο Abacus-explicit, το οποίο χρησιμοποιείται για την επίλυση δυναμικών φορτίσεων, παροδικών δυναμικών φαινομένων και έντονα μη γραμμικών προβλημάτων, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την επίλυση στατικών συστημάτων. Στο Abacus-explicit η ανάλυση γίνεται με τη δυναμική μέθοδο ρητής ολοκλήρωσης δηλαδή, η κινηματική κατάσταση στο τέλος ενός επαυξητικού βήματος υπολογίζεται αναλυτικά από την κινηματική κατάσταση (μετατοπίσεις, ταχύτητες και επιταχύνσεις) της αρχής του. Για την ανάλυση δεν απαιτείται η κατασκευή του μητρώου δυσκαμψίας του συστήματος.

Το προσομοίωμα μορφώθηκε στο πλαίσιο της μελέτης του Πολιτικού Μηχανικού Χ. Παπαδόπουλου<sup>(2)</sup> που εκπονήθηκε για τις ανάγκες του έργου «Στερέωση και Συντήρηση του Ναού του Ολυμπίου Διός στην Αθήνα».

Το υλικό του κίονα θεωρείται ισότροπο - γραμμικώς ελαστικό, με πυκνότητα ίση με 2700 kgf/m<sup>3</sup>, μέτρο ελαστικότητας ίσο με 50 GPa και λόγο του Poisson ίσο με 0.25.

Κάθε σπόνδυλος προσομοιώθηκε ως παραμορφώσιμο σώμα, κάνοντας χρήση χωρικών τρισδιάστατων στοιχείων συνεχούς μέσου. Χρησιμοποιήθηκαν οκταεδρικά και εξαεδρικά ορθογωνικά στοιχεία 8 κόμβων (C3D8R). Έτσι οι πλευρικές έδρες των σπονδύλων διαμορφώθηκαν ιδεατώς ως πολυγωνικές (αντί κυλινδρικές, με ραβδώσεις). Η διακριτοποιημένη (πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων) γεωμετρία του προσομοιώματος απεικονίζεται στην Εικ. 34.

Οι διεπιφάνειες μεταξύ των σπονδύλων προσομοιώθηκαν με καταστατικό δεσμό τριβής-επαφής (friction + unilateral hard contact). Όμως, όπως ήδη αναφέρθηκε, η παρουσία ζεύγους αντιδιαμετρικών κατακόρυφων ισχυρών γόμφων, εναλλάξ τοποθετημένων από

σπόνδυλο σε σπόνδυλο, παρεμποδίζει την οριζόντια ολισθητική μετακίνηση, αλλά και την οριζόντια ολισθητική στροφή, ενώ πιθανώς περιορίζει και την λικνιστική κίνηση μεταξύ των σπονδύλων. Αυτό βέβαια ισχύει από την βάση του 6ου σπονδύλου και άνω, δεδομένου ότι στους κατώτερους σπόνδυλους και βάσεις οι γόμφοι έχουν αφαιρεθεί τους μολυβδορύχους.

Επισημαίνεται ότι η εικόνα παθολογίας του κίονα, όπου η μοναδική αξιόλογη μετακίνηση-στροφή καταγράφεται στον δεύτερο κατώτερο σπόνδυλο Σ2 (από τον οποίο έχουν αφαιρεθεί οι γόμφοι), συνάδει με την παραπάνω εκτίμηση. Όλοι οι υπερκείμενοι σπόνδυλοι ακολούθησαν (κυρίως ως ενιαίο σώμα) την ολισθητική ή/και λικνιστική κίνηση του Σ2 -σε ισχυρή παρελθούσα σεισμική διέγερση-. Η παρουσία των γόμφων από τον 6ο σπόνδυλο και άνω, περιορίζει τους βαθμούς ελευθερίας των σπονδύλων σε ολίσθηση και ίσως σε λικνισμό. Ως εκ τούτου οι όποιες πιθανές μετακινήσεις-στροφές του κίονα θα πρέπει να αναμένονται κυρίως στους χαμηλούς (μη-γομφωμένους σήμερα) σπονδύλους. Για να διερευνηθεί η επιρροή των γόμφων στην σεισμική ευστάθεια του κίονα, εξετάστηκαν 2 υπολογιστικές συνθήκες για τον δεσμό τριβής μεταξύ των σπονδύλων:

(i) Συνθήκη συμβατικής τριβής μεταξύ όλων των σπονδύλων

Η τιμή του συντελεστή στατικής τριβής, για όλες τις διεπιφάνειες, θεωρήθηκε ίση με 0,60, ενώ ο συντελεστής τριβής ολίσθησης λογίζεται ίσος με τον συντελεστή στατικής τριβής. Για τον δεσμό τριβής-επαφής θεωρήθηκε επίσης ένα στοιχειώδες ποσοστό απόσβεσης ίσο με 0,01.

(ii) Συνθήκη λίαν υψηλής τριβής (rough friction), από την βάση του 6ου σπονδύλου και άνω. Υπό την συνθήκη αυτή, οι σπόνδυλοι (από τον 6ο και άνω) δε δύνανται υπολογιστικώς να ολισθήσουν (η ολισθητική κίνηση δεσμεύεται). Αντίθετα, η λικνιστική κίνηση (unilateral hard contact) παραμένει ελεύθερη, παρότι όπως ήδη επισημάνθηκε, ακόμα και αυτή, περιορίζεται από την παρουσία των γόμφων. Η τιμή του συντελεστή στατικής τριβής για τους χαμηλούς σπονδύλους (άνευ γομφώσεων) λαμβάνεται κατά την συμβατική συνθήκη (0,60).

Το αριθμητικό προσομοίωμα είναι ακριβής αναπαράσταση του κίονα βασισμένη στην αποτύπωση που έλαβε χώρα στο πλαίσιο του συγχρηματοδοτούμενου έργου «Στερέωση και Συντήρηση του ναού του Ολυμπίου Διός στην Αθήνα» που υλοποιείται από την Εφορεία Αρχαιοτήτων πόλης Αθηνών. Δεν έχουν εισαχθεί φθορές διότι

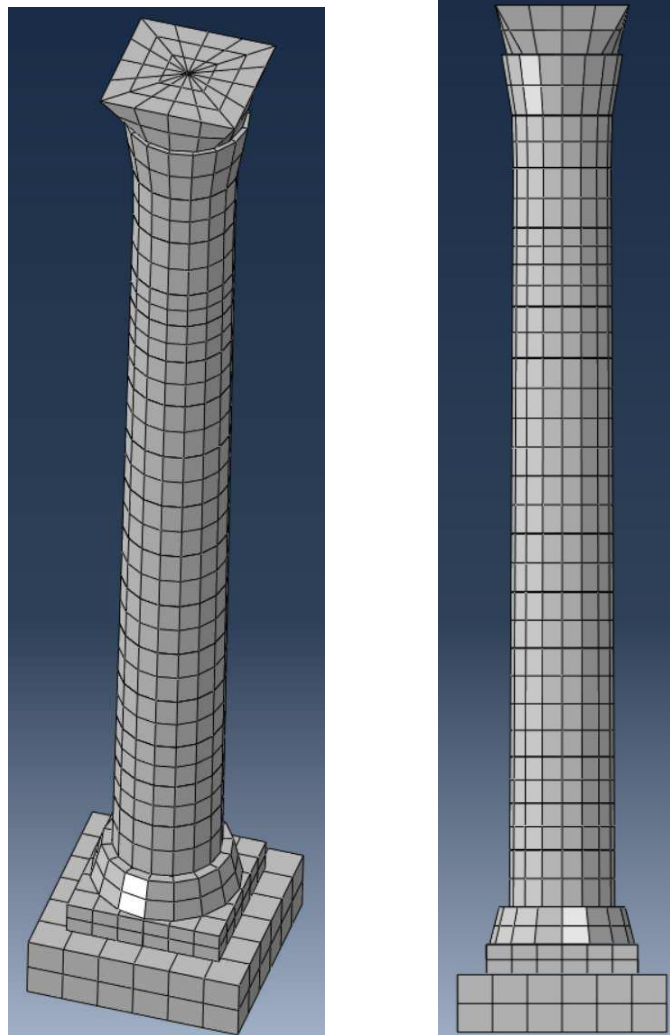
α/ δεν μπορεί να αποδοθεί με ακρίβεια το μέγεθος των ρωγμών παρά μόνο στο ορατό κομμάτι τους. Ως εκ τούτου δεν υπάρχει η πληροφορία για τη συνέχεια των ρωγμών μέσα στο σώμα των σπονδύλων, δηλαδή τη διεύθυνση και το εύρος τους.

β/ ο χρόνος δημιουργίας των βλαβών είναι άγνωστος και δεν μπορούμε να γνωρίζουμε αν και σε ποιο βαθμό κάποια βλάβη έχει επηρεάσει την υφιστάμενη κατάσταση του κίονα.

γ/ στο πλαίσιο του έργου πρόκειται να αποκατασταθούν οι ασυνέχειες και οι ελλείψεις μάζας που παρουσιάζει ο κίονας, άρα η επιλογή να μην εισαχθεί στο προσομοίωμα η παθολογία έχει στόχο να προσομοιάσει τη λειτουργία του αποκατεστημένου κίονα.

Για τις ανάγκες της ιδιομορφικής ανάλυσης που έλαβε χώρα προκειμένου να επιλεγούν οι κατάλληλες ιδιοπερίοδοι που πλησιάζουν εκείνες που μετρήθηκαν από τη δοκιμή περιβαλλοντικών δονήσεων, απαλείφθηκαν οι βαθμοί ελευθερίας των αρμών μεταξύ των σπονδύλων μέσω κινηματικών δεσμεύσεων. Έτσι ο κίονας λειτούργησε ελαστικά κατά την

ιδιομορφική ανάλυση. Η παραδοχή αυτή είναι ρεαλιστική διότι, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι πολυσπόνδυλοι κίονες, όταν υφίστανται μικρής έντασης οριζόντια διέγερση όπως περιβαλλοντικές δονήσεις ή μικρής έντασης σεισμικές δονήσεις, τείνουν να συμπεριφερθούν γραμμικά, χωρίς ανασήκωμα των διεπιφανειών τους, με χαρακτηριστικά που θυμίζουν τη συμπεριφορά μονολιθικού κίονα.



**Εικ.34.** Το αριθμητικό προσομοίωμα



## Η απόσβεση του αριθμητικού προσομοιώματος

Τα αριθμητικά προσομοιώματα δονούμενων κατασκευών λαμβάνουν υπόψη τρεις πηγές διασποράς της ενέργειας: μέσα από μη γραμμικές αδρανειακές δυνάμεις, ακτινοβολία ενέργειας, και απόσβεση της κατασκευής.<sup>(34)</sup> Στις περισσότερες εφαρμογές, η διασπορά της ενέργειας είναι επιθυμητή διότι μειώνει τα επίπεδα απόκρισης. Η ακριβής περιγραφή ενός μοντέλου είναι σημαντική, διότι η υπόθεση για μεγάλη διασπορά ενέργειας μπορεί να είναι μη συντηρητική. Η γνώση για την ποσότητα της ενέργειας που διαχέεται προέρχεται κυρίως από πειραματικά δεδομένα απόκρισης κατασκευών και υλικών τους με τη χρήση χρονοϊστορίας και δοκιμών πεδίου. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων μπορεί να είναι πολύ ακριβή και να μετατρέπονται άμεσα σε μοντέλα μη γραμμικών αδρανειακών δυνάμεων όπως ελαστοπλαστική υστερητική συμπεριφορά. Αντίθετα, τα αποτελέσματα από την τεκμηρίωση των κατασκευών είναι λιγότερο ακριβή διότι μπορεί να είναι παρούσες και οι τρεις πηγές της ενεργειακής διασποράς και είναι δύσκολο να διαχωριστούν τα χαρακτηριστικά καθεμιάς από αυτές.<sup>(34)</sup> Οι δοκιμές με δονήσεις πεδίου όσο και οι μελέτες που τεκμηριώνουν συστήματα με τη μέθοδο της καταγραφής περιβαλλοντικών δονήσεων εκτελούνται συνήθως σε μικρά πλάτη και ως εκ τούτου, οι τιμές της απόσβεσης που ορίζονται θα πρέπει να περιλαμβάνουν μόνο την επίδραση από την ακτινοβολία ενέργειας και την απόσβεση της κατασκευής. Αυτά τα δεδομένα είναι χρήσιμα για τη βαθμονόμηση αριθμητικών μοντέλων σε περιοχή μικρού πλάτους, αλλά και πάλι δεν προκύπτει γενικός κανόνας για τις σχετικές ποσότητες αυτών των δύο μηχανισμών διασποράς ενέργειας. Δεδομένης της φύσης των περιβαλλοντικών δονήσεων, μια λογική διαδικασία για να βαθμονομηθεί η διασπορά της ενέργειας σε ένα αριθμητικό μοντέλο, θα ήταν να συμπεριλάβει κανείς κατάλληλους μηχανισμούς διασποράς της ενέργειας όπως μέσω της ενδοσιμότητας της θεμελίωσης ή των μεταθετών ορίων και στη συνέχεια να προσδώσει αρκετή απόσβεση στην κατασκευή έως ότου πλησιάσουν τα δεδομένα από τις καταγραφές των περιβαλλοντικών δονήσεων.

Γενικά, οι λόγοι απόσβεσης που προσδιορίζονται από μικρές κινήσεις των κατασκευών δεν είναι αντιπροσωπευτικοί και δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται απευθείας για την ανάλυση της απόκρισης σε σεισμούς που προκαλούν μεγάλες κινήσεις στην κατασκευή, πολύ περισσότερο όταν αυτές προκαλούν διαρροή των δομικών στοιχείων.<sup>(35)</sup> Οι λόγοι απόσβεσης που προκύπτουν από μεγάλες δονήσεις κατασκευών, περιλαμβάνουν και άλλους παράγοντες διάχυσης της ενέργειας εκτός της απόσβεσης όπως η διαρροή των μελών τους. Στην ιδανική περίπτωση, η χρήσιμη απόσβεση για τη δυναμική ανάλυση κατασκευών θα μπορούσε να προκύψει από τη μόνιμη καταγραφή των επιταχύνσεών τους. Χρήσιμα θα ήταν δεδομένα που προκύπτουν από την καταγραφή πολλών συστημάτων όμοιων με το μελετούμενο, ως μια βάση για την εκτίμηση της απόσβεσης. Ένα μητρώο απόσβεσης δεν μπορεί να διαμορφωθεί από τις ιδιότητες απόσβεσης των μελών που αποτελούν την κατασκευή όπως γίνεται με το μητρώο δυσκαμψίας, διότι οι ιδιότητες απόσβεσης των επιμέρους υλικών δεν είναι επαρκώς καθορισμένες όπως είναι το μέτρο ελαστικότητας που υπεισέρχεται στον προσδιορισμό του μητρώου δυσκαμψίας.

Σήμερα υπάρχουν προτεινόμενες τιμές απόσβεσης για διαφορετικά επίπεδα κίνησης κατασκευών όπως είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα, η μεταλλική κατασκευή, η άοπλη και οπλισμένη τοιχοποιία και άλλες κατασκευές με γνωστή συμπεριφορά.

Στην περίπτωση αρχαίου κίονα η τιμή απόσβεσης πρέπει να αποτυπώνει με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά διάχυσης ενέργειας. Εάν υπερεκτιμηθεί ή υποεκτιμηθεί, μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένες ιδιοσυχνότητες, σχήματα ιδιομορφών και δυναμικές αποκρίσεις. Εκτιμάται συνήθως μέσω πειραματικών μετρήσεων, εμπειρικών τύπων ή μηχανικής κρίσης.

Στην παρούσα εργασία επιχλέχθηκε να μην εισαχθεί τιμή απόσβεσης στο αριθμητικό προσομοίωμα κατά την ιδιομορφική ανάλυση, καθώς δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν κανονιστικές τιμές. Άλλωστε στο συγκεκριμένο σύστημα δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη στην ανάλυση πέρα από τις πρώτες μεταφορικές ιδιομορφές, άρα η υιοθέτηση μιας απόσβεσης τύπου Rayleigh damping δεν θα ήταν χρήσιμη διότι εδώ η δυναμική συμπεριφορά καθορίζεται κυρίως από τη φυσική συχνότητα που σχετίζεται με την εν λόγω ιδιομορφή, η οποία αντιπροσωπεύει τον θεμελιώδη τρόπο ταλάντωσης με την υψηλότερη φυσική συχνότητα. Δεδομένου ότι η συμπεριφορά του συστήματος επηρεάζεται κυρίως από αυτόν τον τρόπο, οι πρόσθετες επιδράσεις απόσβεσης μπορούν να αποτυπωθούν επαρκώς με τη χρήση των κατάλληλων ιδιοτήτων υλικών και τεχνικών μοντελοποίησης.

#### 4.4 Βαθμονόμηση του μέτρου ελαστικότητας

Η βαθμονόμηση έγινε μέσω ιδιομορφικής ανάλυσης στο πρόγραμμα Abacus χρησιμοποιώντας το μοντέλο που περιγράφηκε παραπάνω.

Αποδόθηκαν διάφορες τιμές του μέτρου ελαστικότητας στο υλικό του κίονα και μέσω ιδιομορφικής ανάλυσης προέκυψαν οι αντίστοιχες τιμές ιδιοσυχνοτήτων και ιδιοπεριόδων. Έγιναν διάφορα σενάρια για το μέτρο ελαστικότητας  $E$  : αποδόθηκε ενιαίο  $E$  στον κίονα αλλά και επιμέρους τιμές σε ομάδες σπονδύλων ανάλογα με τη φθορά που παρουσιάζουν. Διαπιστώθηκε ότι η ιδιομορφική ανάλυση έχει ίδια αποτελέσματα αν αποδοθεί ενιαίο  $E$  ίσο με το μέσο όρο των επιμέρους τιμών του  $E$ . Στις εικ.... Φαίνονται τα σενάρια και οι τιμές  $f$  και  $T$  που προέκυψαν.

Στις εικόνες 35, 36 φαίνεται η διασπορά των τιμών της ιδιοσυχνότητας και της ιδιοπεριόδου του κίονα μετά από συνολικά 28 δοκιμές τιμών του μέτρου Ελαστικότητας.

Από τις δοκιμές προκύπτει το συμπέρασμα ότι ένα εύρος τιμών του μέτρου ελαστικότητας μεταξύ 18GPa και 21 GPa δίνει τιμές για την ιδιοσυχνότητα και την ιδιοπερίοδο του κίονα κοντά στις τιμές που προέκυψαν από τη δοκιμή περιβαλλοντικών δονήσεων. Για την περεταίρω ανάλυση επιλέγουμε την τιμή που βρίσκεται πιο κατά στην τιμή της πρώτης μεταφορικής συνιστώσας της ιδιοσυχνότητας (ή ιδιοπεριόδου). Άρα για την περαιτέρω ανάλυση θα χρησιμοποιηθεί η τιμή  $E=18$  Gpa.

Στοιχείο κίονα	ΟΜΑΔΕΣ	ΣΕΝΑΡΙΟ 1					ΣΕΝΑΡΙΟ 2					ΣΕΝΑΡΙΟ3				
		E (GPa)	f1 (sec <sup>-1</sup> )	f2 (sec <sup>-1</sup> )	T1 (sec)	T2 (sec)	E (GPa)	f1 (sec <sup>-1</sup> )	f2 (sec <sup>-1</sup> )	T1 (sec)	T2 (sec)	E (GPa)	f1 (sec <sup>-1</sup> )	f2 (sec <sup>-1</sup> )	T1 (sec)	T2 (sec)
K1	marble0_60	10,00	1,82	1,82	0,55	0,55	10,00	1,56	1,56	0,64	0,64	25,00	1,78	1,78	0,56	0,56
K2																
Σ15	marble0_20	8,00					6,00					8,00				
Σ14																
Σ13																
Σ12																
Σ11	marble0_45	25,00					10,00					20,00				
Σ10																
Σ9																
Σ8																
Σ7																
Σ6																
Σ5																
Σ4																
Σ3	marble0_35	17,00					15,00					17,50				
Σ2																
Σ1																
B																
Π																
<b>M.O.</b>		<b>15,00</b>					<b>10,25</b>					<b>17,63</b>				

Σενάρια απόδοσης μέτρου ελαστικότητας σε ομάδες σπονδύλων ανάλογα με το βαθμό βλάβης.

Στοιχείο κίονα	ΟΜΑΔΕΣ	ΣΕΝΑΡΙΟ 4					ΣΕΝΑΡΙΟ 5					ΣΕΝΑΡΙΟ 6				
		E (GPA)	f1 (sec <sup>-1</sup> )	f2 (sec <sup>-1</sup> )	T1 (sec)	T2 (sec)	E (GPA)	f1 (sec <sup>-1</sup> )	f2 (sec <sup>-1</sup> )	T1 (sec)	T2 (sec)	E (GPA)	f1 (sec <sup>-1</sup> )	f2 (sec <sup>-1</sup> )	T1 (sec)	T2 (sec)
K1	marble0_60															
K2		20,00	1,82	1,82	0,55	0,55	11,00	1,51	1,51	0,66	0,66	14,00	1,64	1,64	0,61	0,61
Σ15	marble0_20															
Σ14																
Σ13																
Σ12		11,00					11,00					14,00				
Σ11	marble0_45															
Σ10																
Σ9																
Σ8																
Σ7																
Σ6																
Σ5																
Σ4		20,00					11,00					14,00				
Σ3	marble0_35															
Σ2																
Σ1																
B																
Π		11,00					11,00					14,00				
<b>M.O.</b>		<b>15,50</b>					<b>11,00</b>					<b>14,00</b>				

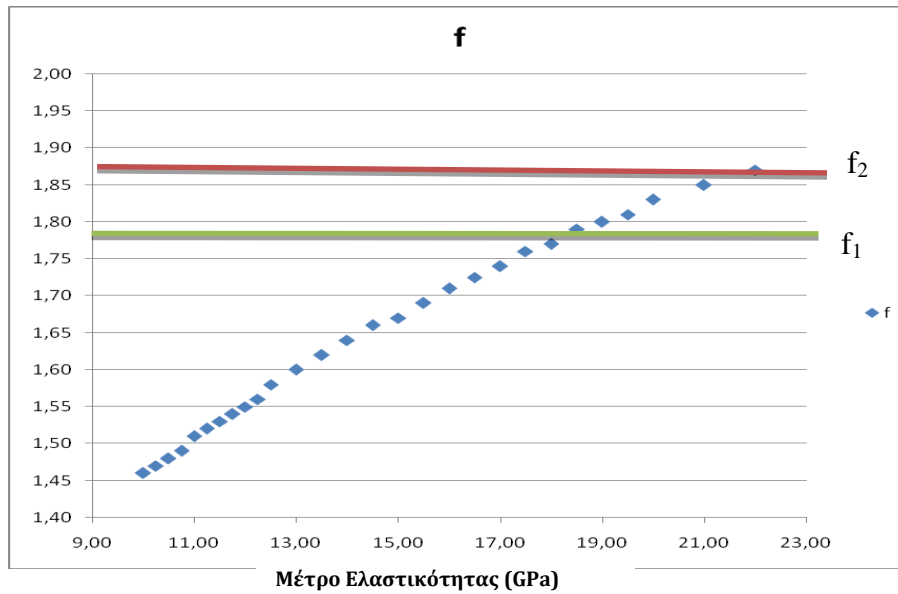
Σενάρια απόδοσης μέτρου ελαστικότητας σε ομάδες σπονδύλων ανάλογα με το βαθμό βλάβης

Στοιχείο κίονα	ΟΜΑΔΕΣ	ΣΕΝΑΡΙΟ7					ΣΕΝΑΡΙΟ8					ΣΕΝΑΡΙΟ9				
		E (GPA)	f1 (sec <sup>-1</sup> )	f2 (sec <sup>-1</sup> )	T1 (sec)	T2 (sec)	E (GPA)	f1 (sec <sup>-1</sup> )	f2 (sec <sup>-1</sup> )	T1 (sec)	T2 (sec)	E (GPA)	f1 (sec <sup>-1</sup> )	f2 (sec <sup>-1</sup> )	T1 (sec)	T2 (sec)
K1	marble0_60	19,00	1,80	1,80	0,56	0,56	18,00	1,77	1,77	0,56	0,56	18,50	1,79	1,79	0,56	0,56
K2																
Σ15	marble0_20	19,00					18,00					18,50				
Σ14																
Σ13																
Σ12																
Σ11	marble0_45	19,00					18,00					18,50				
Σ10																
Σ9																
Σ8																
Σ7																
Σ6																
Σ5																
Σ4																
Σ3	marble0_35	19,00					18,00					18,50				
Σ2																
Σ1																
B																
Π																
<b>M.O.</b>		<b>19,00</b>					<b>18,00</b>					<b>18,50</b>				

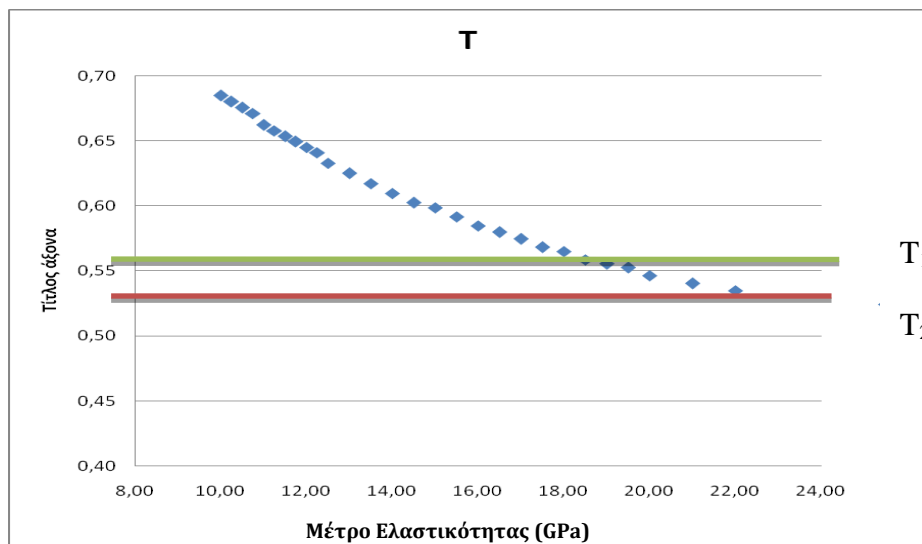
Σενάρια απόδοσης μέτρου ελαστικότητας σε ομάδες σπονδύλων ανάλογα με το βαθμό βλάβης



## Βαθμονόμηση μέτρου ελαστικότητας βάσει δοκιμής περιβαλλοντικών δονήσεων



**Εικ.35.** Η διασπορά των συχνοτήτων που υπολογίστηκαν με βάση τα μέτρα ελαστικότητας που αποδόθηκαν στον κίονα.  $f_1$  και  $f_2$  είναι οι φυσικές συχνότητες που μετρήθηκαν επί τόπου από τις περιβαλλοντικές ταλαντώσεις



**Εικ.36.** Η διασπορά της περιόδου  $T$  που υπολογίστηκε με βάση τα μέτρα ελαστικότητας που αποδόθηκαν στον κίονα.  $T_1$  και  $T_2$  είναι οι φυσικές περίοδοι που μετρήθηκαν επί τόπου από τις περιβαλλοντικές ταλαντώσεις

E	f	T
10,00	1,46	0,68
10,25	1,47	0,68
10,5	1,48	0,68
10,75	1,49	0,67
11,00	1,51	0,66
11,25	1,52	0,66
11,50	1,53	0,65
11,75	1,54	0,65
12,00	1,55	0,65
12,25	1,56	0,64
12,50	1,58	0,63
13,00	1,6	0,63
13,50	1,62	0,62
14,00	1,64	0,61
14,50	1,66	0,60
15,00	1,67	0,60
15,50	1,69	0,59
16,00	1,71	0,58
16,50	1,725	0,58
17,00	1,74	0,57
17,50	1,76	0,57
18,00	1,77	0,56
18,50	1,79	0,56
19,00	1,8	0,56
19,50	1,81	0,55
20,00	1,83	0,55
21,00	1,85	0,54
22,00	1,87	0,53

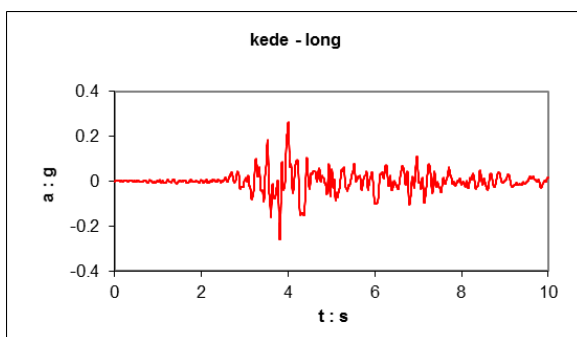
**Εικ.37.** Πίνακας τιμών ιδιοσυχνοτήτων & ιδιοπεριόδων που προέκυψαν από ιδιομορφική ανάλυση στο πρόγραμμα Abacus μέσα από διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας

#### 4.5 Αριθμητική ανάλυση

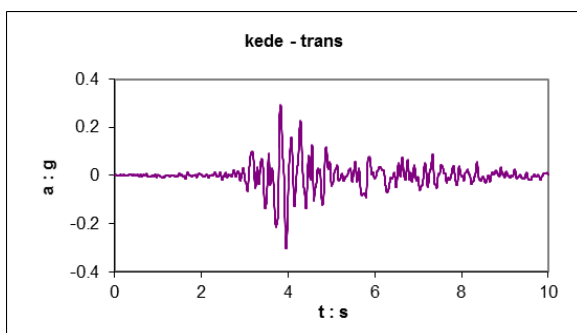
Για την αριθμητική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο που περιγράφηκε στην παρ. 4.3. Οι βαθμοί ελευθερίας μεταξύ των σωμάτων που αποτελούν τον σπόνδυλο είχαν δεσμευτεί για τις ανάγκες της ιδιομορφικής ανάλυσης. Τώρα απελευθερώθηκαν ώστε ο κάθε σπόνδυλος να μπορεί να κινείται ελεύθερα με μοναδικό περιορισμό την τριβή. Ο συντελεστής τριβής ελήφθη ίσος με 0.7.

Το μέτρο ελαστικότητας όλου του κίονα ελήφθη ίσο με 18 GPa σύμφωνα με τη βαθμονόμηση που έγινε κατά την ιδιομορφική ανάλυση.

Στο προσομοίωμα εφαρμόστηκαν οι δύο οριζόντιες συνιστώσες του σεισμού της Πάρνηθας 1999, M5.9 που καταγράφηκαν στο σταθμό ΚΕΔΕ.



Δ/νση X: ΚΕΔΕ-  
long με κορυφαία  
επιτάχυνση PGA =  
0.26 g



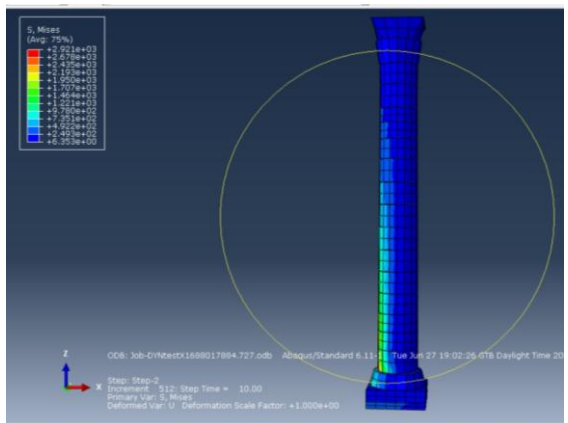
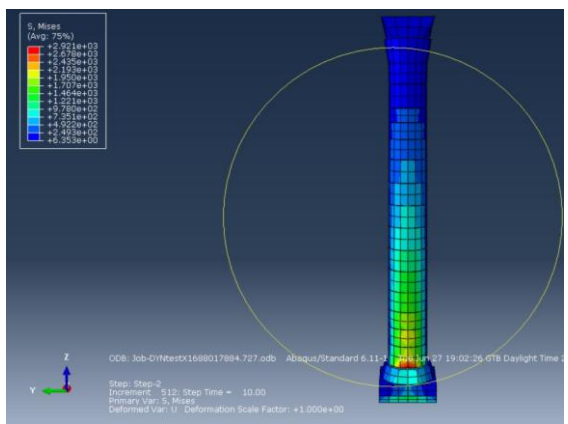
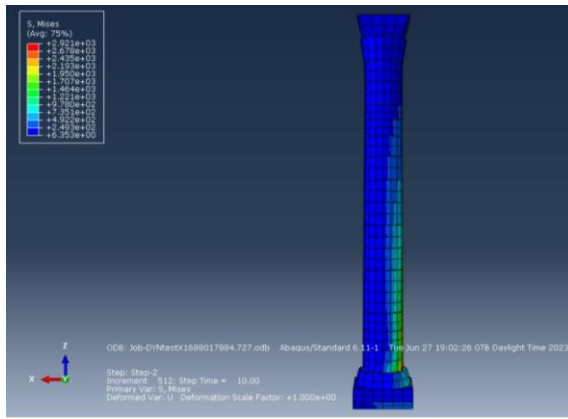
Δ/νση Y: ΚΕΔΕ-  
trans με κορυφαία  
επιτάχυνση PGA =  
0.30 g

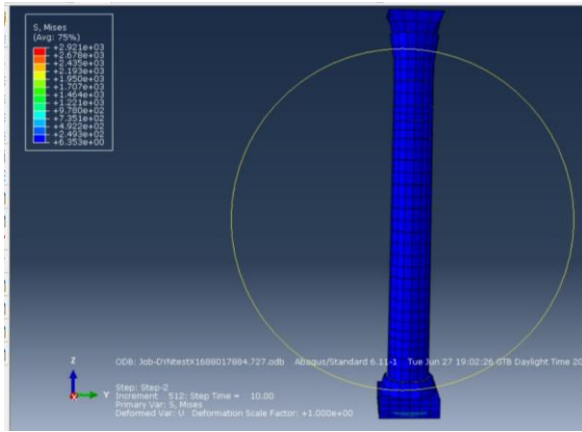
Για τις ανάγκες της ανάλυσης, εφαρμόστηκε αρχικά μόνο η ΚΕΔΕ -long στη δ/νση X και ελήφθησαν οι μετακινήσεις και επιταχύνσεις σε τέσσερα σημεία καθ' ύψος του κίονα στα ύψη 1,13m 7,15m 13,5m 16,87m μετρούμενα από τη βάση της πλίνθου. Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν και οι δύο οριζόντιες συνιστώσες του σεισμού και ελήφθησαν τα αντίστοιχα μεγέθη.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν και οι δύο οριζόντιες συνιστώσες του σεισμού και ελήφθησαν τα αντίστοιχα μεγέθη.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης για κάθε διέγερση. Τα μέγιστα μεγέθη των μετακινήσεων και των επιταχύνσεων αναφέρονται σε απόλυτες τιμές.

## Σεισμός στη διεύθυνση X

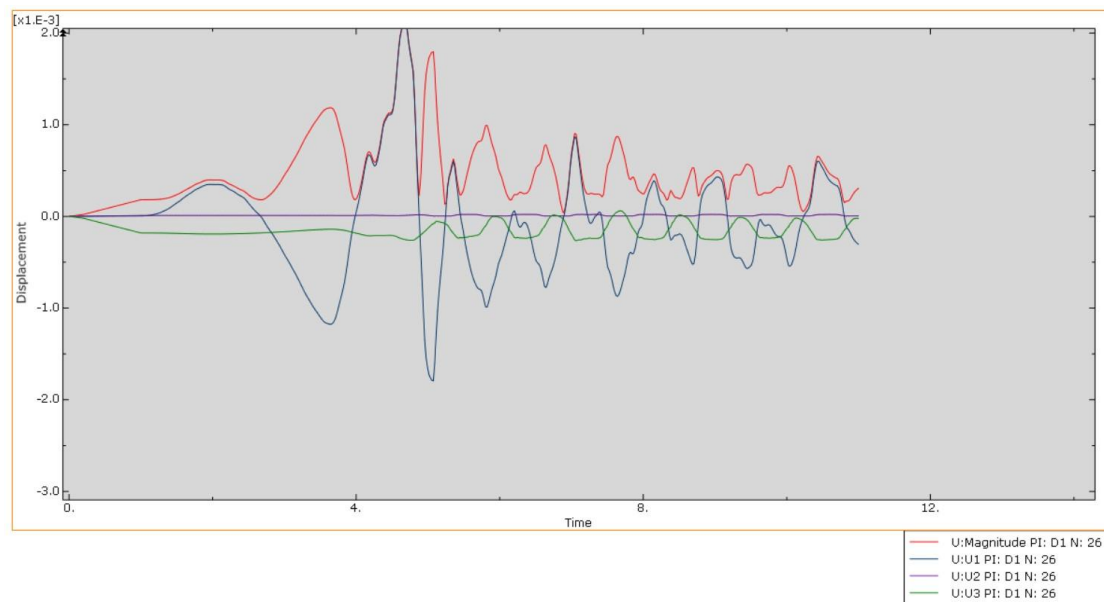




Χρωματική διαβάθμιση των αναπτυσσόμενων τάσεων στις 4 όψεις του κίονα στα 10 sec της διέγερσης

Ακολουθούν οι χρονοϊστορίες μετακινήσεων και επιταχύνσεων σε σχέση με το χρόνο σε τέσσερις θέσεις καθύψους του κίονα: στον 1<sup>ο</sup>, στον 7<sup>ο</sup>, στον 14<sup>ο</sup> σπόνδυλο και στη στέψη του κιονοκράνου.

#### Χρονοϊστορίες μετατοπίσεων



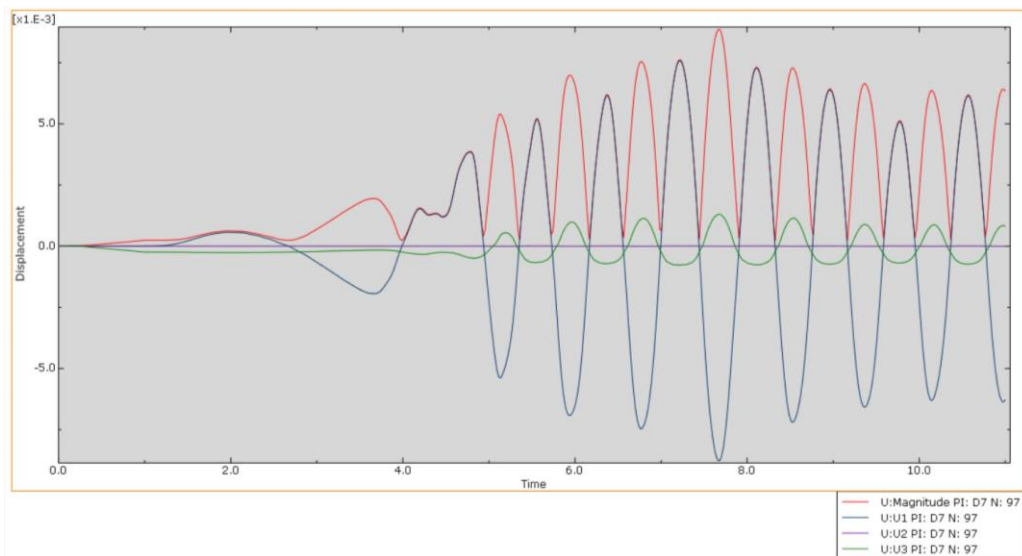
Χρονοϊστορία μετατοπίσεων στη βάση του 1<sup>ου</sup> σπονδύλου

Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά X παρατηρείται στα 4,675sec και είναι ίση με 0,00219 m

Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά Y παρατηρείται στα 7,124 sec και είναι ίση με  $2.18 \cdot 10^{-5}$  m

Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά Z παρατηρείται στα 7,064 sec και είναι ίση με 0,00027m



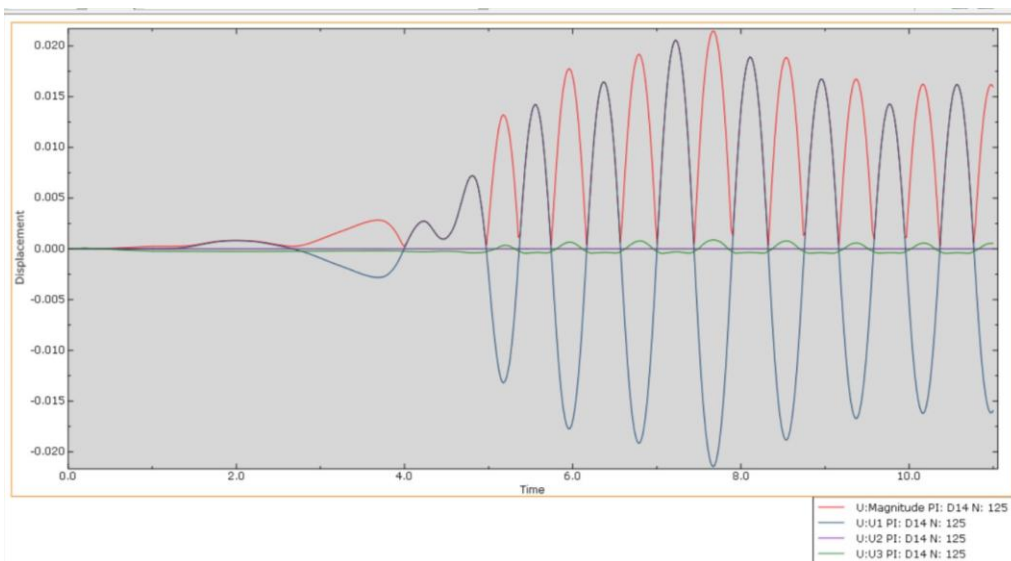


Χρονοϊστορία μετατοπίσεων στον 7<sup>ο</sup> σπόνδυλο

Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά X παρατηρείται στα 7,665sec και είναι ίση με 0,00877 m

Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά Y παρατηρείται στα 7,204 sec και είναι ίση με  $7,52 \cdot 10^{-6}$  m

Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά Z παρατηρείται στα 7,685 sec και είναι ίση με 0,001305m

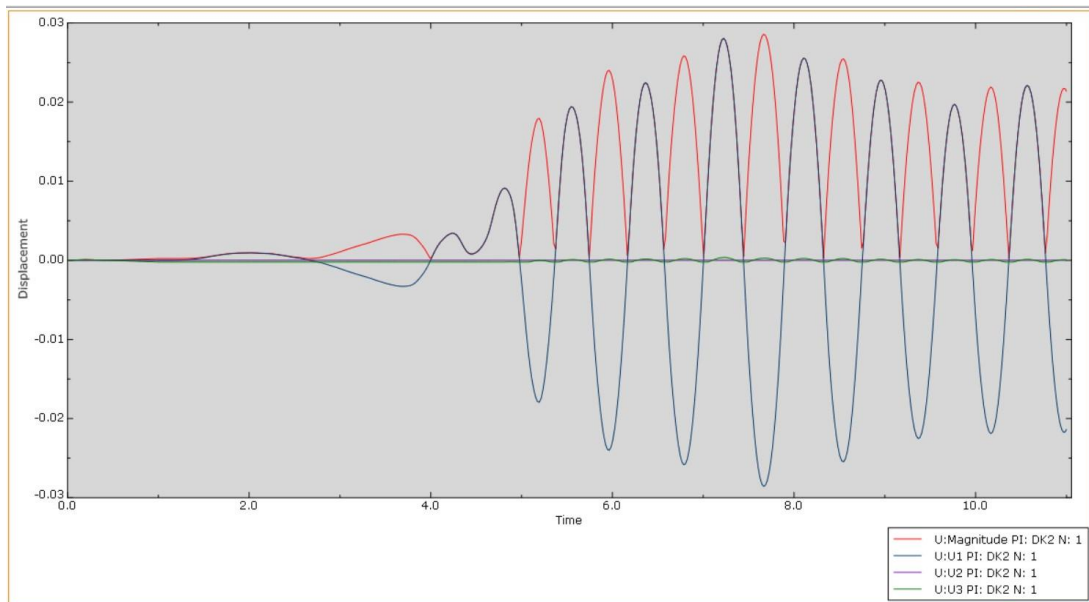


Χρονοϊστορία μετατοπίσεων στον 14<sup>ο</sup> σπόνδυλο

Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά X παρατηρείται στα 7,665 sec και είναι ίση με 0,02147 m

Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά Y παρατηρείται στα 5,470 sec και είναι ίση με  $1,93 \cdot 10^{-6}$  m

Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά Z παρατηρείται στα 7,665 sec και είναι ίση με 0,000878m



Χρονοϊστορία μετατοπίσεων στην κορυφή του κίονα

Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά X παρατηρείται στα 7,665 sec και είναι ίση με 0,02857m

Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά Y παρατηρείται στα 11 sec και είναι ίση με  $8,6 \cdot 10^{-11}$  m

Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά Z παρατηρείται στα 7,244 sec και είναι ίση με 0,000359m

Η κατανομή των μέγιστων μετατοπίσεων με το χρόνο έχει ως εξής:

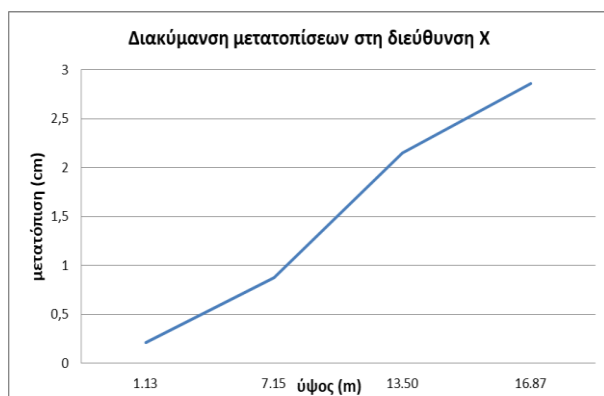
ΥΨΟΣ (m)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ X (cm)	ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (sec)
1.13	0,2104	4,675
7.15	0,8774	7,665
13.50	2,1466	7,665
16.87	2,857	7,665

ΥΨΟΣ (m)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Y (cm)	ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (sec)
1.13	0,00218	7,124
7.15	0,00075	7,204
13.50	0,00019	5,47
16.87	0,00019	11

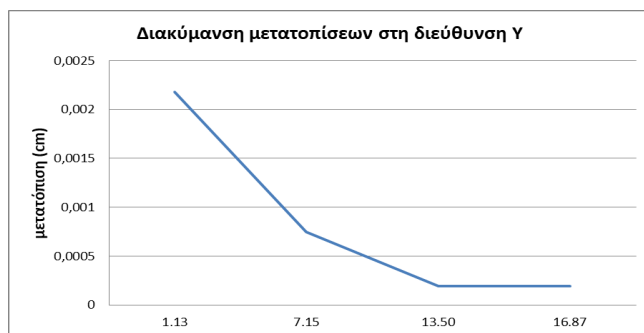
ΥΨΟΣ (m)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Z (cm)	ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (sec)
1.13	0,0027	7,064
7.15	0,13	7,685
13.50	0,0878	7,665
16.87	0,0359	7,244

Η κατανομή των μετατοπίσεων με το ύψος έχει ως εξής:

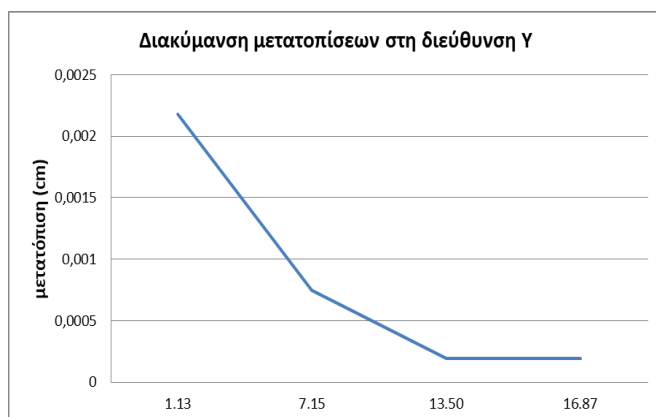
Ύψος (m)	Μετατόπιση X (cm)
1.13	0,2104
7.15	0,8774
13.50	2,1466
16.87	2,857



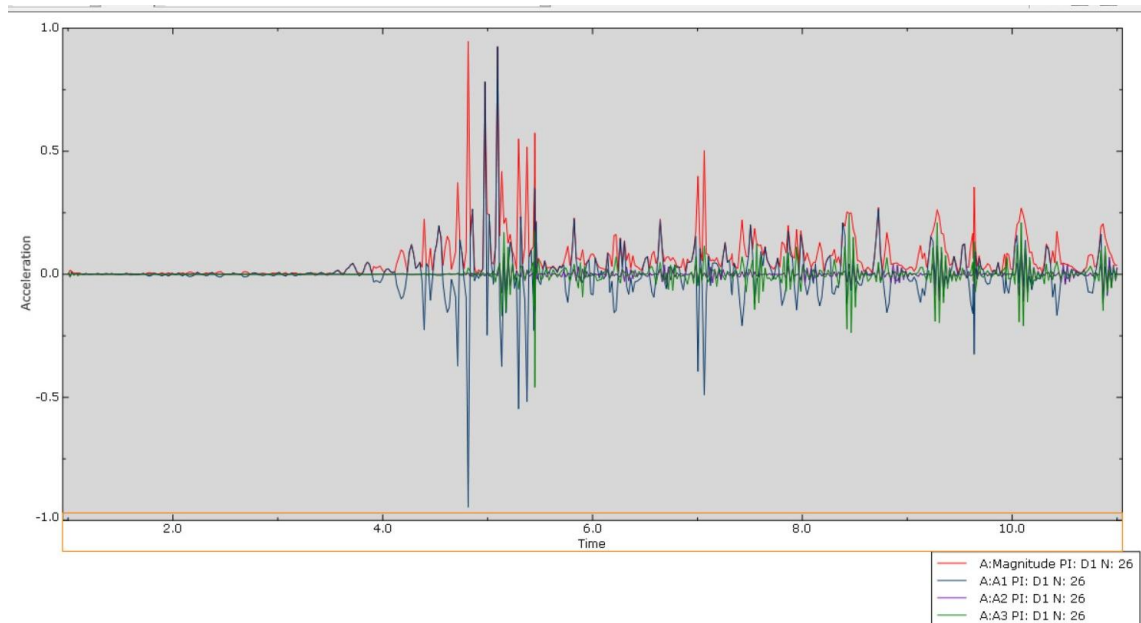
Ύψος (m)	Μετατόπιση Υ (cm)
1.13	0,00218
7.15	0,00075
13.50	0,00019
16.87	0,00019



Ύψος (m)	Μετατόπιση Ζ (cm)
1.13	0,0027
7.15	0,13
13.50	0,0878
16.87	0,0359



### Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων

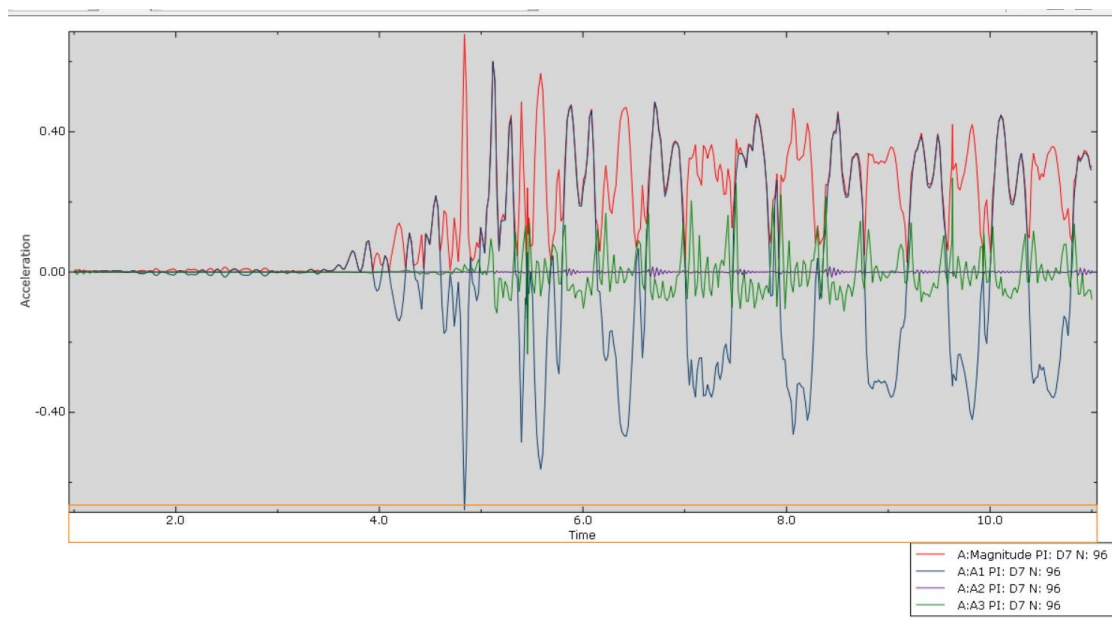


#### Χρονοϊστορία επιταχύνσεων στη βάση του 1<sup>ου</sup> σπονδύλου

Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση X παρατηρείται στα 4,815 sec και είναι ίση με 0,946m/sec<sup>2</sup>

Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση Y παρατηρείται στα 10sec και είναι ίση με 0,109 m/sec<sup>2</sup>

Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση Z παρατηρείται στα 5,45 sec και είναι ίση με 0,459 m/sec<sup>2</sup>



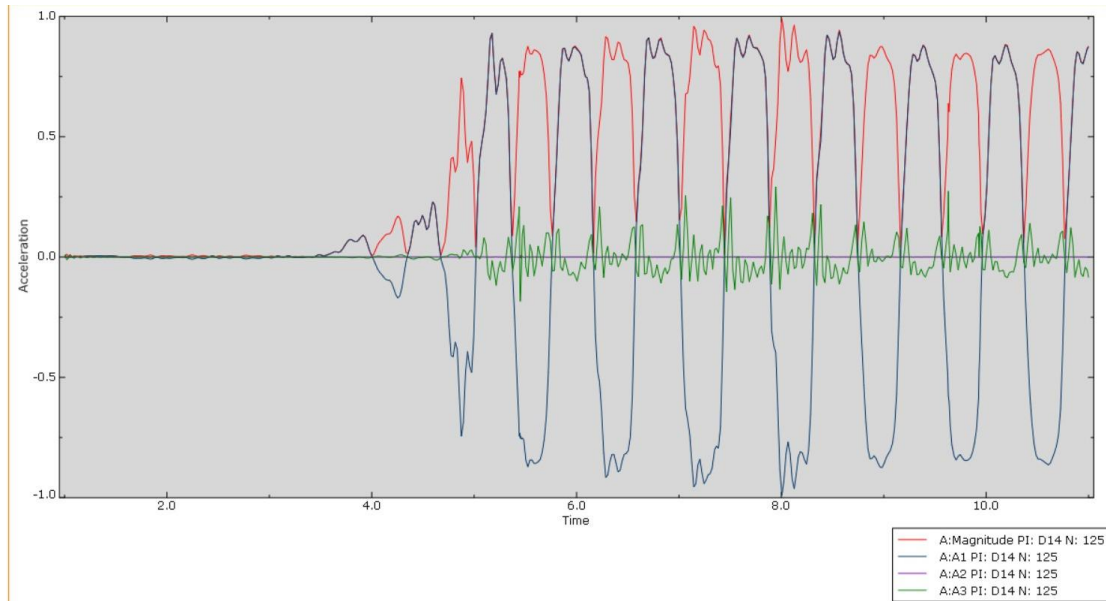
#### Χρονοϊστορία επιταχύνσεων στον 7<sup>ο</sup> σπόνδυλο



Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση X παρατηρείται στα 4,835 sec και είναι ίση με  $0,678\text{m/sec}^2$

Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση Y παρατηρείται στα 5,45 sec και είναι ίση με  $0,0159\text{m/sec}^2$

Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση Z παρατηρείται στα 9,63 sec και είναι ίση με  $0,268\text{m/sec}^2$

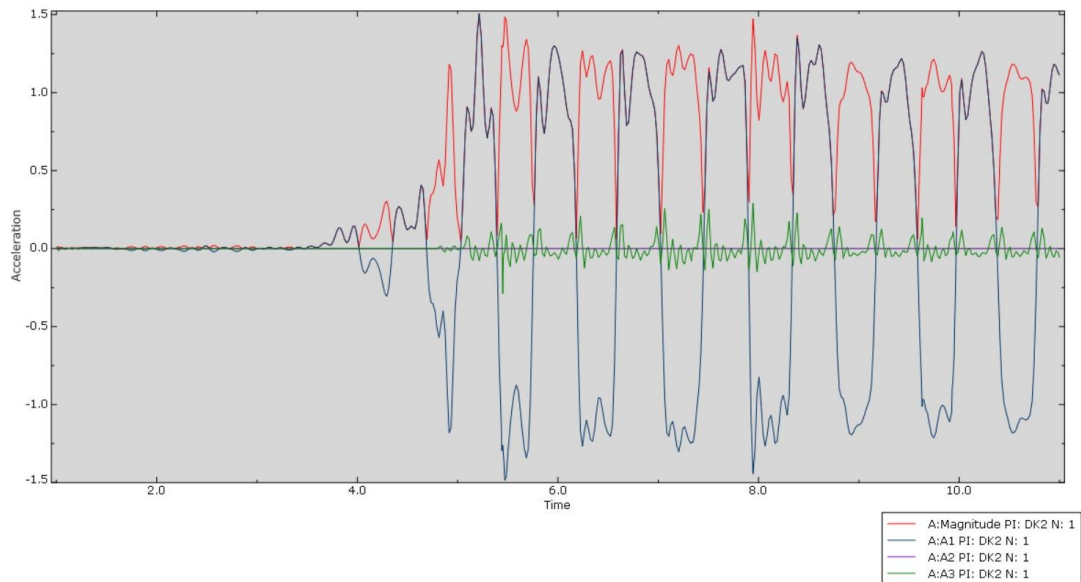


Χρονοϊστορία επιταχύνσεων στον 14° σπόνδυλο

Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση X παρατηρείται στα 8 sec και είναι ίση με  $0,99\text{m/sec}^2$

Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση Y παρατηρείται στα 5,45sec και είναι ίση με  $0,0071\text{m/sec}^2$

Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση Z παρατηρείται στα 7,94 sec και είναι ίση με  $0,292\text{m/sec}^2$



Χρονοϊστορία επιταχύνσεων στην κορυφή του κίονα

Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση X παρατηρείται στα 5,215 sec και είναι ίση με  $1,51 \text{ m/sec}^2$

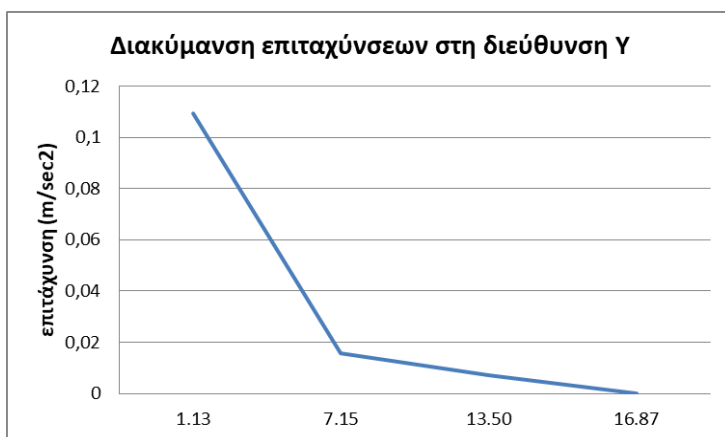
Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση Y παρατηρείται στα 5,45 sec και είναι ίση με  $7,1 \cdot 10^{-8} \text{ m/sec}^2$

Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση Z παρατηρείται στα 7,94 sec και είναι ίση με  $0,29 \text{ m/sec}^2$

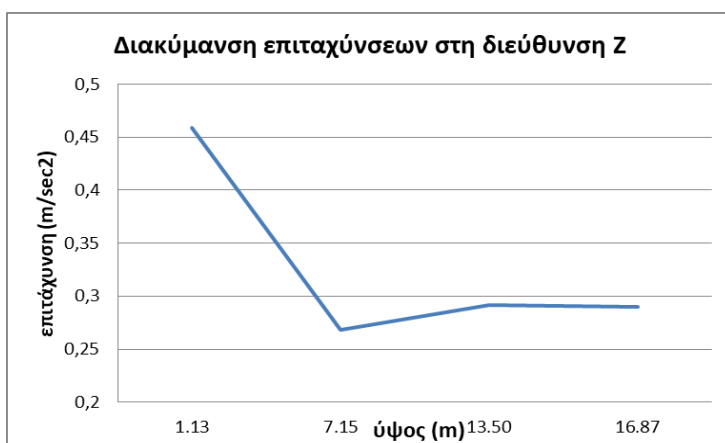
Η κατανομή των επιταχύνσεων με το ύψος έχει ως εξής:



Ύψος (m)	Επιτάχυνση X (m/sec²)
1.13	0,9457
7.15	0,6781
13.50	0,9903
16.87	1,5064

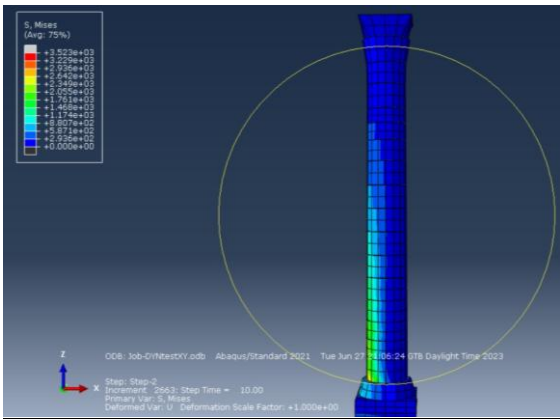
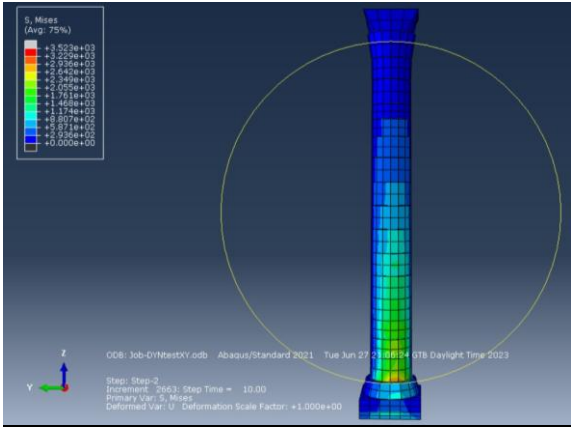
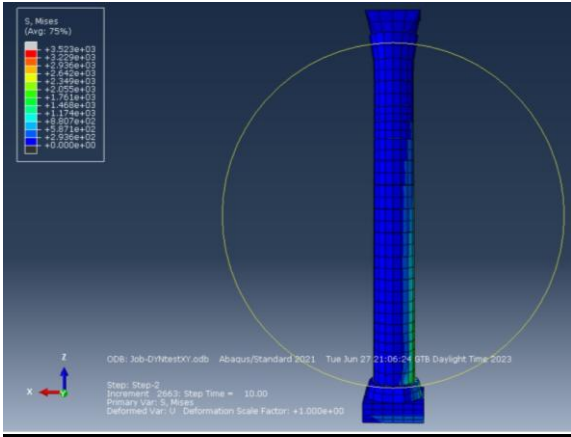


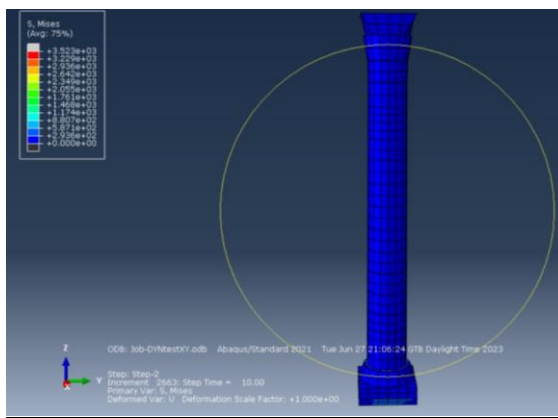
Υψος (m)	Επιτάχυνση Y (m/sec²)
1.13	0,1092
7.15	0,0159
13.50	0,0072
16.87	0



Υψος (m)	Επιτάχυνση Z (m/sec²)
1.13	0,459
7.15	0,268
13.50	0,292
16.87	0,29

**Σεισμός στη διεύθυνση XY**

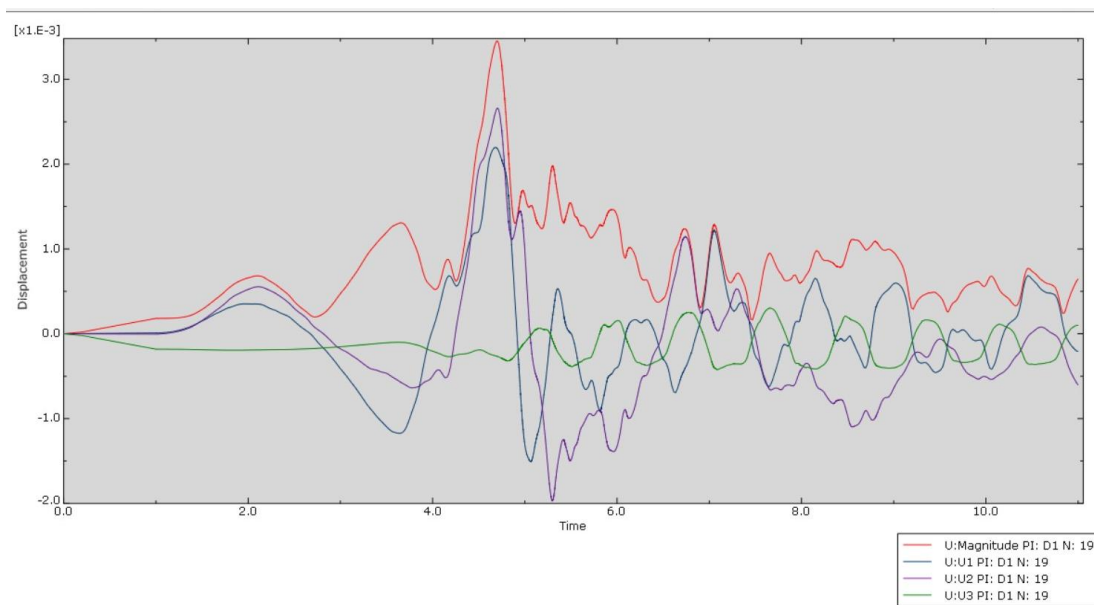




Χρωματική διαβάθμιση των αναπτυσσόμενων τάσεων στις 4 όψεις του κίονα στα 10 sec

Ακολουθούν οι χρονοϊστορίες μετακινήσεων και επιταχύνσεων σε τέσσερις θέσεις καθύψος του κίονα: στον 1<sup>ο</sup>, στον 7<sup>ο</sup>, στον 14<sup>ο</sup> σπόνδυλο και στη στέψη του κίονοκράνου.

#### Χρονοϊστορίες μετατοπίσεων



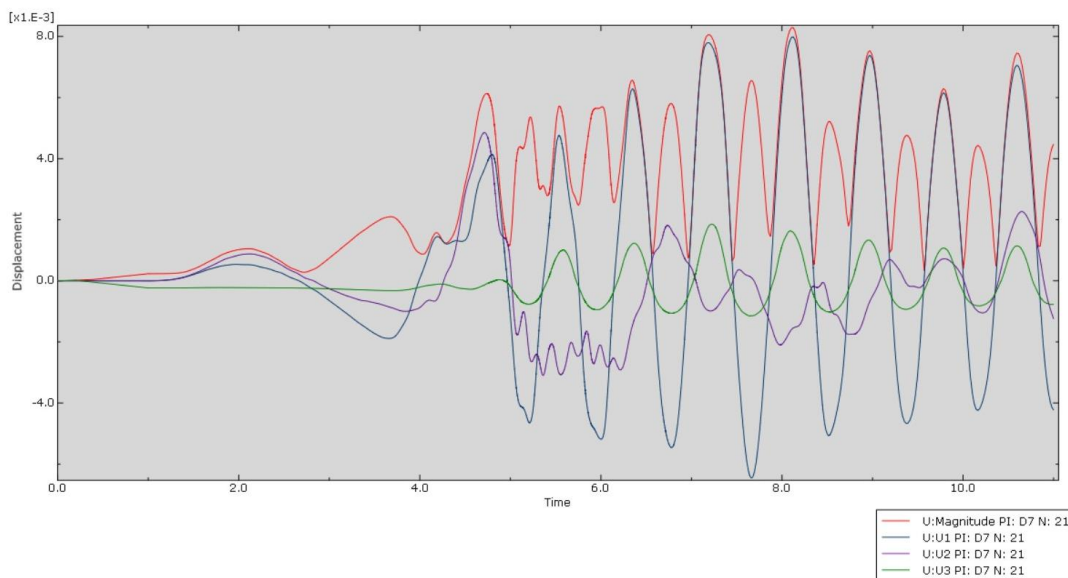
Χρονοϊστορία μετατοπίσεων στη βάση του 1<sup>ου</sup> σπονδύλου

Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά X παρατηρείται στα 4,69sec και είναι ίση με 0,002197 m

Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά Y παρατηρείται στα 4,70sec και είναι ίση με 0,002661 m

Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά Z παρατηρείται στα 7,66sec και είναι ίση με 0,000303m



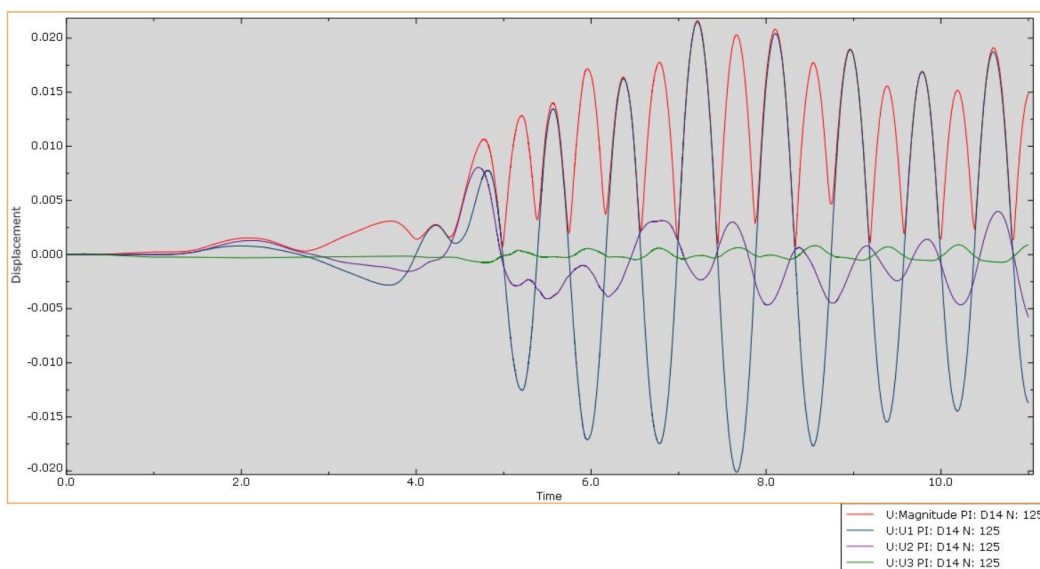


#### Χρονοϊστορία μετατοπίσεων στον 7<sup>ο</sup> σπόνδυλο

Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά X παρατηρείται στα 8,12sec και είναι ίση με 0,007989 m

Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά Y παρατηρείται στα 4,72sec και είναι ίση με 0,004855 m

Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά Z παρατηρείται στα 7,22sec και είναι ίση με 0,001857m

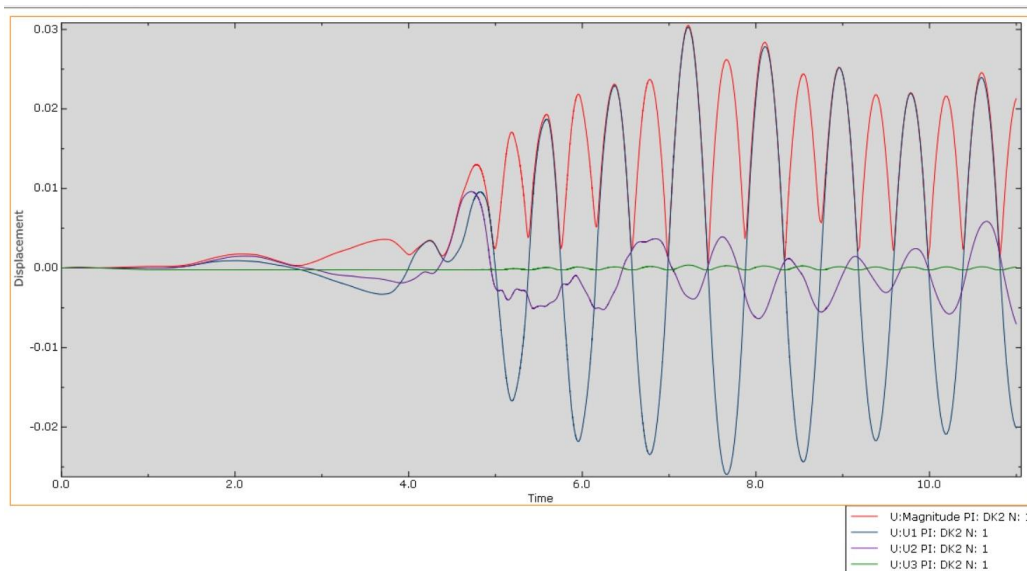


#### Χρονοϊστορία μετατοπίσεων στον 14<sup>ο</sup> σπόνδυλο

Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά X παρατηρείται στα 7,22sec και είναι ίση με 0,0215 m

Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά Y παρατηρείται στα 4,70sec και είναι ίση με 0,0080 m

Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά Z παρατηρείται στα 11sec και είναι ίση με 0,00091m



Χρονοϊστορία μετατοπίσεων στην κορυφή του κίονα

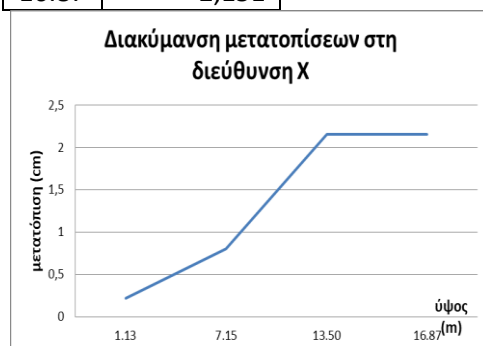
Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά X παρατηρείται στα 7,22sec και είναι ίση με 0,0215 m

Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά Y παρατηρείται στα 4,71sec και είναι ίση με 0,0080 m

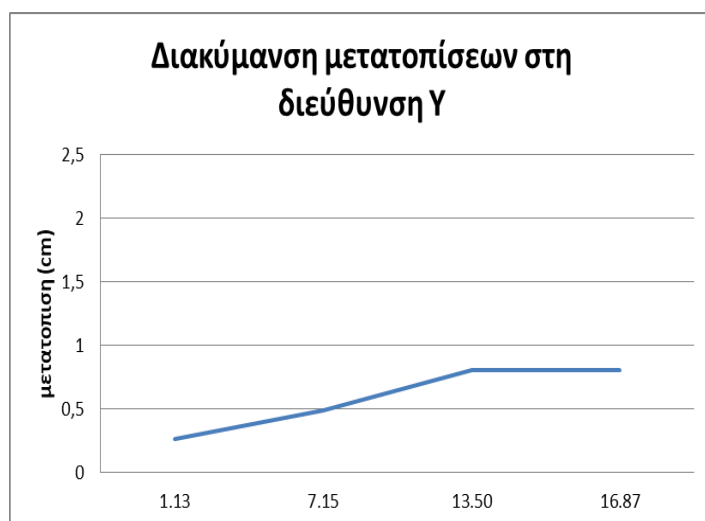
Η μεγαλύτερη τιμή της μετακίνησης κατά Z παρατηρείται στα 11sec και είναι ίση με 0,00091m

Συγκεντρωτικά, η κατανομή των μετατοπίσεων με το ύψος έχει ως εξής:

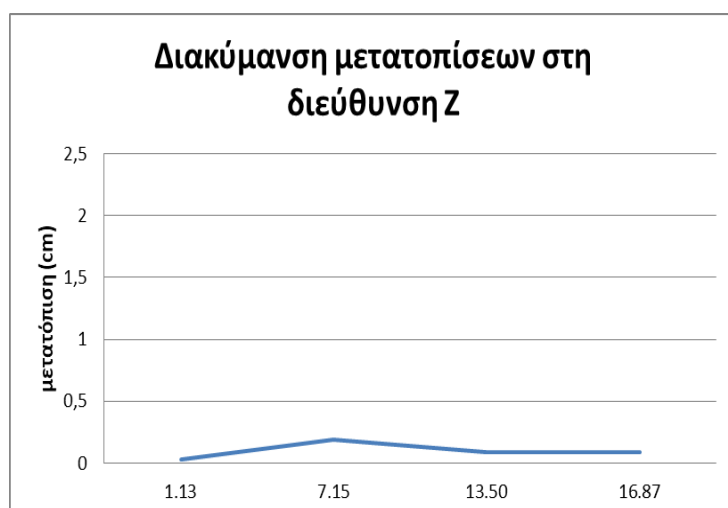
Ύψος (m)	Μετατόπιση X (cm)
1.13	0,2197
7.15	0,7989
13.50	2,151
16.87	2,151



Ύψος (m)	Μετατόπιση Υ (cm)
1.13	0,2661
7.15	0,4855
13.50	0,8062
16.87	0,8062



Ύψος (m)	Μετατόπιση Ζ (cm)
1.13	0,0303
7.15	0,1857
13.50	0,091
16.87	0,091



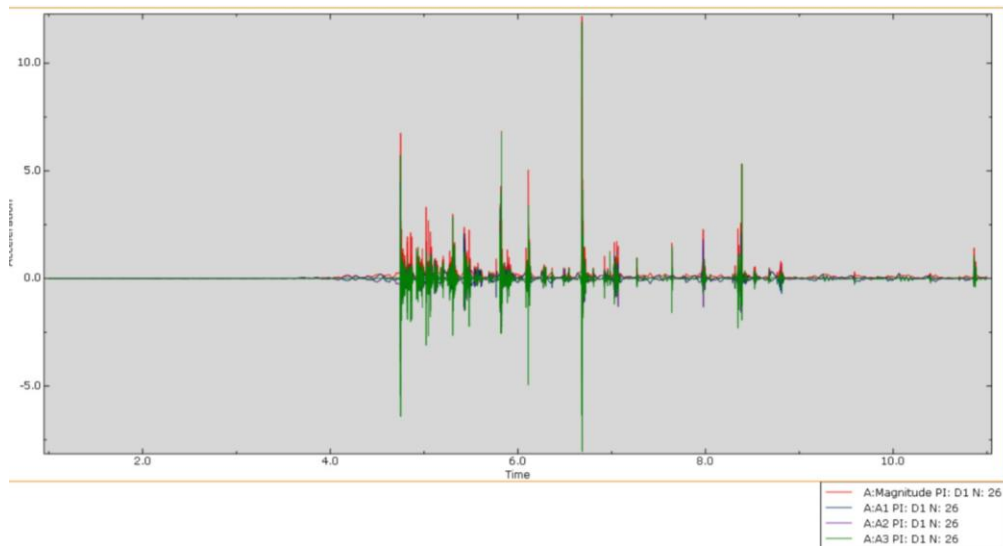
Η κατανομή των μέγιστων μετατοπίσεων με το χρόνο έχει ως εξής:

ΥΨΟΣ (m)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ X (cm)	ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (sec)
1.13	0,2104	4,69
7.15	0,8774	8,12
13.50	2,1466	7,22
16.87	2,857	7,22

ΥΨΟΣ (m)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Y (cm)	ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (sec)
1.13	0,00218	4,7
7.15	0,00075	4,72
13.50	0,00019	4,7
16.87	0,00019	4,71

ΥΨΟΣ (m)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣ ΗΣ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Z (cm)	ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣ ΗΣ (sec)
1.13	0,0027	7,66
7.15	0,13	7,22
13.50	0,0878	11
16.87	0,0359	11

### Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων

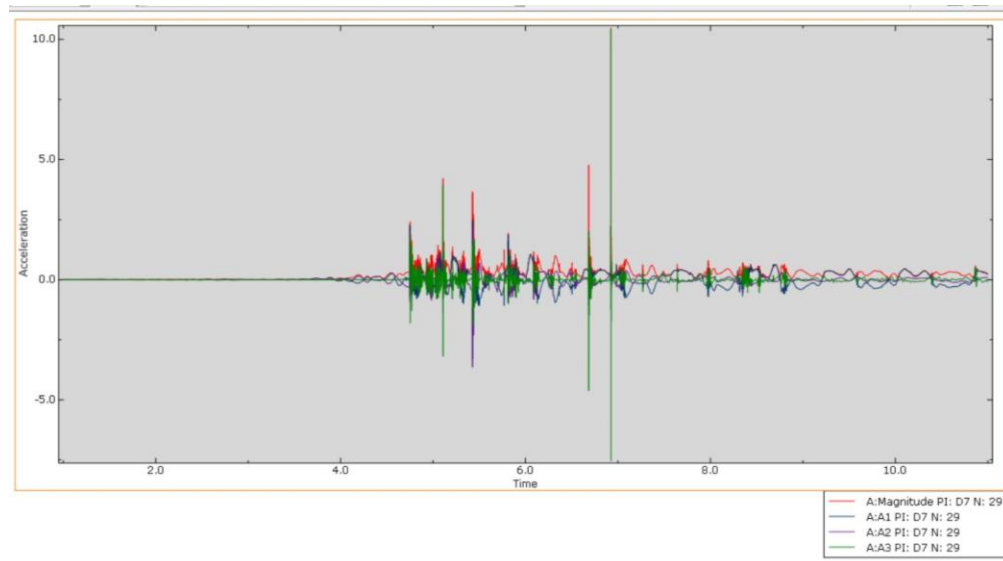


#### Χρονοιστορία επιταχύνσεων στον 1<sup>ο</sup> σπόνδυλο

Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση X παρατηρείται στα 4,75 sec και είναι ίση με  $4,466\text{m/sec}^2$

Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση Y παρατηρείται στα 6,68 sec και είναι ίση με  $4,75\text{m/sec}^2$

Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση Z παρατηρείται στα 6,68 sec και είναι ίση με  $11,90\text{m/sec}^2$



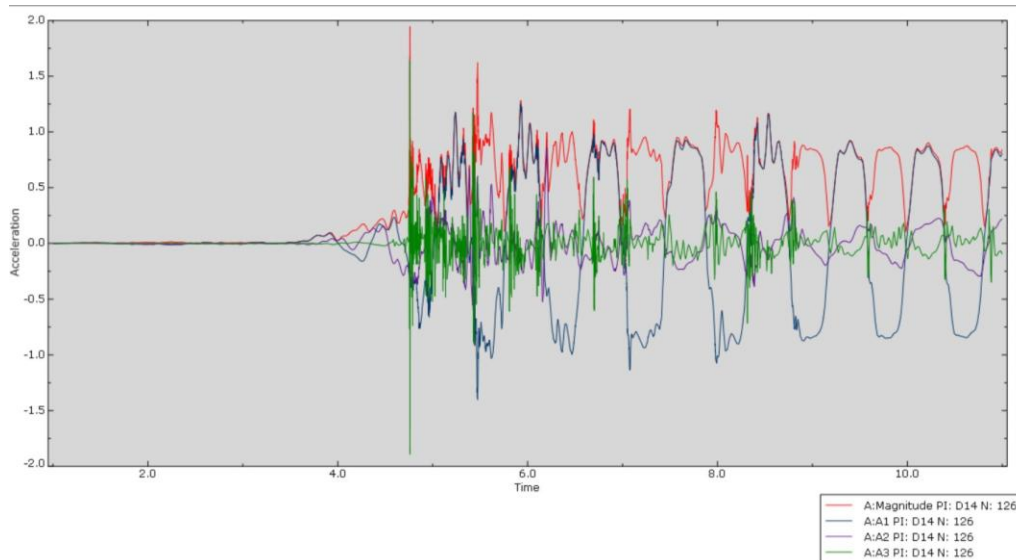
#### Χρονοιστορία επιταχύνσεων στον 7<sup>ο</sup> σπόνδυλο

Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση X παρατηρείται στα 5,42sec και είναι ίση με  $3,32\text{m/sec}^2$

Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση Y παρατηρείται στα 5,42sec και είναι ίση με  $3,64\text{m/sec}^2$

Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση Z παρατηρείται στα 6,92 sec και είναι ίση με  $10,43\text{m/sec}^2$



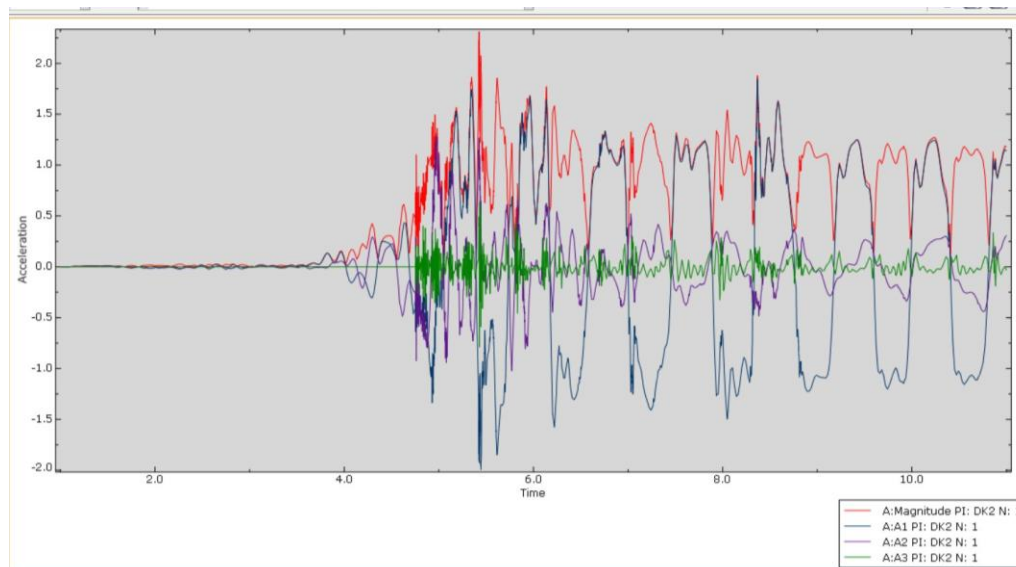


#### Χρονοϊστορία επιταχύνσεων στον 14<sup>ο</sup> σπόνδυλο

Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση X παρατηρείται στα 5,47 sec και είναι ίση με  $1,40\text{m/sec}^2$

Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση Y παρατηρείται στα 6,20 sec και είναι ίση με  $0,86\text{m/sec}^2$

Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση Z παρατηρείται στα 4,76 sec και είναι ίση με  $1,89\text{m/sec}^2$



#### Χρονοϊστορία επιταχύνσεων στην κορυφή του κίονα

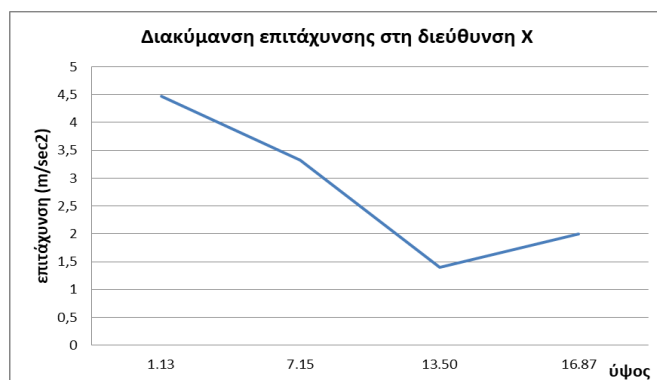
Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση X παρατηρείται στα 5,44 sec και είναι ίση με  $1,99\text{m/sec}^2$

Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση Y παρατηρείται στα 4,97sec και είναι ίση με  $1,28\text{m/sec}^2$

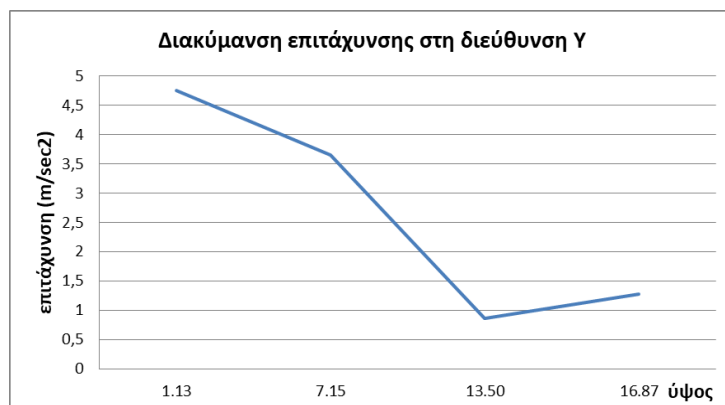
Η μεγαλύτερη τιμή της επιτάχυνσης στη διεύθυνση Z παρατηρείται στα 5,429 sec και είναι ίση με  $0,788\text{m/sec}^2$

Συγκεντρωτικά η κατανομή των επιταχύνσεων με το ύψος έχει ως εξής:

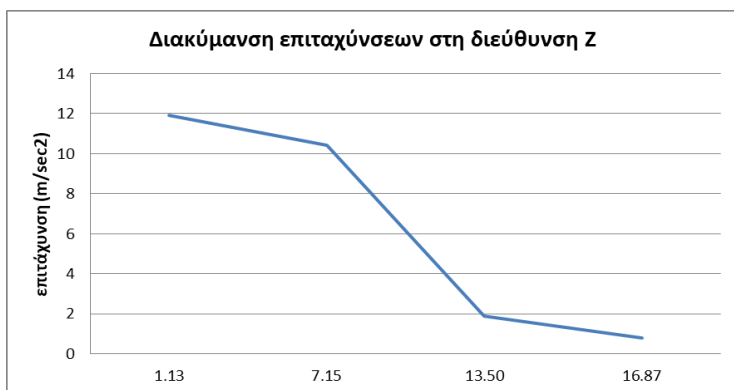
υψος (m)	επιτάχυνση (m/sec <sup>2</sup> )
1.13	4,4663
7.15	3,3248
13.50	1,4037
16.87	1,9953



υψος (m)	επιτάχυνση (m/sec <sup>2</sup> )
1.13	4,7494
7.15	3,6441
13.50	0,8594
16.87	1,2805



υψος (m)	επιτάχυνση (m/sec <sup>2</sup> )
1.13	11,9
7.15	10,43
13.50	1,89
16.87	0,788



Στην παρούσα εργασία τοποθετήθηκαν επιταχυνσιογράφοι στον δυτικότερο από τους ιστάμενους κίονες του Ναού του Ολυμπίου Διός στην Αθήνα, με σκοπό να καταγραφεί η συμπεριφορά του σε συνθήκες λειτουργίας και στη συνέχεια να βαθμονομηθεί το αριθμητικό προσομοίωμα του κίονα με κριτήριο την τιμή του μέτρου ελαστικότητάς του ως ένας δείκτης για τη συνολική εικόνα των φθορών και ατελειών που παρουσιάζει.

Από την ιδιομορφική ανάλυση που έγινε στο πρόγραμμα Abacus explicit, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας που προέκυψε είναι 18 Gpa, τιμή πολύ μικρότερη από αυτή του υλικού κατασκευής του, που δίνει ωστόσο μια εικόνα (σε γενικές έστω γραμμές) της κατάστασης διατήρησής του.

Από την ανάλυση που έγινε στη συνέχεια, με βάση το βαθμονομημένο προσομοίωμα, έγινε δυνατή η παρατήρηση της συμπεριφοράς του σε συνθήκες πραγματικού σεισμού. Τα συμπεράσματα από αυτή την ανάλυση συνοψίζονται παρακάτω.

- Η απόκριση του κίονα αποδείχτηκε επαρκής κάτι που επιβεβαιώνει τη θεωρία ότι κατασκευές σαν αυτή είναι ανθεκτικές σε διεγέρσεις που δεν έχουν μεγάλη περίοδο.
- Οι μετακινήσεις που καταγράφονται στον κίονα κατά κανόνα αυξάνονται με το ύψος, εκτός από τις μετακινήσεις που προκύπτουν στη διεύθυνση Υ όταν εφαρμόζεται μόνο η long συνιστώσα του σεισμού.
- Η χρονική κατανομή των επιταχύνσεων έχει ως εξής:  
Στην περίπτωση που εφαρμόστηκε μόνο η διαμήκης συνιστώσα του σεισμού οι μέγιστες τιμές εμφανίστηκαν λίγο μετά τα 7 δευτερόλεπτα.  
Στην περίπτωση που εφαρμόστηκε ο σεισμός και στις δύο διευθύνσεις είχαμε τις μέγιστες τιμές ως εξής:  
Μετά 7,22 sec οι μέγιστες μετατοπίσεις στη δ/νση X  
Στα 4,7 sec οι μέγιστες μετατοπίσεις στη δ/νση Υ  
Μετά 7,22 sec οι μέγιστες μετατοπίσεις στη δ/νση Z  
Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι σ'αυτή τη διέγερση ο κίονας συμπεριφέρεται γενικά δύσκαμπτα.
- Οι επιταχύνσεις που καταγράφονται στο κίονα μειώνονται με το ύψος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μικρομετατοπίσεις που λαμβάνουν χώρα μεταξύ των σπονδύλων ενός πολυσπόνδου κίονα, απορροφούν την εδαφική ενέργεια και μειώνουν την εδαφική επιτάχυνση στην κορυφή των κίωνων.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας οφείλω θερμές ευχαριστίες

στην επιβλέπουσα της διπλωματικής κα Ευαγγελία Γαρίνη για τη συνεργασία της και την άμεση ανταπόκριση όσες φορές ζήτησα τη βοήθειά της

στον κ. Χρήστο Παπαδόπουλο για την αμέριστη βοήθειά του πάνω στο λογισμικό και το αριθμητικό προσομοίωμα

στον κ. Σταύρο Χατζηελευθερίου για την παραχώρηση των επιταχυνσιογράφων και τη συνεχή υποστήριξη.

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. **Papantonopoulos C.L.**  
Committee for the preservation of the Temple of Apollo Epikourios 30  
«*The Earthquake Resistance of Ancient Columns: A Numerical Perspective Developed at the Classical Temple of Apollo Epikourios.*»
2. **Παπαδόπουλος Χρίστος, - Πολιτικός Μηχανικός-Δομοστατικός MSc**  
«Εκπόνηση μελέτης σεισμικής απόκρισης με πρόταση επεμβάσεων δομητικής αποκατάστασης του κίονα B18 και των επιστυλίων A1A2E1 και A1A2E2 του Ναού του Ολυμπίου Διός στον αρχαιολογικό χώρο του Ολυμπίου αρμοδιότητας Εφορείας Αρχαιοτήτων πόλης Αθηνών»,  
Στο πλαίσιο της συγχρηματοδοτούμενης πράξης: «Στερέωση και Συντήρηση του Ναού του Ολυμπίου Διός στην Αθήνα», Δεκέμβριος 2021
3. **Σιδεράκη Βιργινία, Αρχιτέκτων Μηχανικός MSc:**  
«Αρχιτεκτονική Τεκμηρίωση του κίονα B18 στο πλαίσιο του Έργου «Στερέωση και Συντήρηση του Ναού του Ολυμπίου Διός στην Αθήνα»  
Στο πλαίσιο της συγχρηματοδοτούμενης πράξης: «Στερέωση και Συντήρηση του Ναού του Ολυμπίου Διός στην Αθήνα», Αθήνα 2021
4. **Πολυμενάκος Λάζαρος , 2019**  
«Γεωτεχνική μελέτη για την αποσαφήνιση του υποβάθρου του Ναού του Ολυμπίου Διός»  
στο πλαίσιο της συγχρηματοδοτούμενης πράξης: «Στερέωση και Συντήρηση του Ναού του Ολυμπίου Διός στην Αθήνα»
5. **Εφορεία Αρχαιοτήτων Αθηνών (Ν. Σακκά, Δ. Κουκουλάς, Ε. Καρακικέ, Β. Μανουσιάδου, Ε. Αλεξανδράκη), 2017**  
«Μελέτη Στερέωσης του Ναού του Ολυμπίου Διός στην Αθήνα»
6. **Ψυχάρης Ι. (επιστημονικός υπεύθυνος), Κορρές Μ., Παπαντωνόπουλος Κ., Ταφλαμπάς Ι, Σουάνης Σ., Lemos J.V. , 2005**  
«Μελέτη σεισμικής συμπεριφοράς των στύλων του Ολυμπίου Διός – Εφαρμογή στη διερεύνηση της σεισμικής ιστορίας της Αθήνας»  
Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας ΕΜΠ
7. **Κ. Ζάμπας, Ν. Αμβράζης, Κ. Μπολέτης, Ι. Ζάμπα**  
«Οι δύο χορηγικοί κίονες της νότιας κλιτύς της Ακρόπολης ως μάρτυρες της σεισμικής ιστορίας του κέντρου των Αθηνών»  
Μελέτη χρηματοδοτούμενη από το κοινωφελές Ίδρυμα Ιωάννη Σ. Λάτση στο πλαίσιο του προγράμματος «Μελέτες 2011»  
Αθήνα, 2011
8. **Stuart. J & Revett, N. [1787],**  
“*The Antiquities of Athens*”
9. **Penrose, F. C. (1851),**  
“*An Investigation of the Principles of Athenian Architecture*” chapter XII  
London 1888
10. **Vasileios A. Drosos · Ioannis Anastasopoulos (2014)**  
«*Experimental investigation of the seismic response of classical temple columns*»
11. **Anthony N. Kounadis 2014**  
«*On the rocking complex response of ancient multispandyle columns: a genius and challenging structural system requiring reliable solution*»
12. **Loizos Papaloizou, Ernestos Sarri, Panayotis Polykarpou, Petros Komodromos 2020**  
«*Earthquake vulnerability of ancient multi-drum columns with a single epistyle*»
13. **Sarhosis, V orcid.org/0000-0002-8604-8659, Baraldi, D, Lemos, JV et al. (1 more author)(2019)**



- Dynamic behaviour of ancient freestanding multi-drum and monolithic columns subjected to horizontal and vertical excitations.*
- 14. Ιωάννης Ψυχάρης καθηγητής ΕΜΠ (Επιστημονικός υπεύθυνος)-2019**  
*«Μελέτη σεισμικής απόκρισης των εννέα νοτιοανατολικών κιόνων του Ναού του Ολυμπίου Διός στην Αθήνα»- Ερευνητικό πρόγραμμα στο πλαίσιο της συγχρηματοδοτούμενης πράξης: «Στερέωση και Συντήρηση του Ναού του Ολυμπίου Διός στην Αθήνα»*
  - 15. Ioannis N. Psycharis, Michalis Fragiadakis and Ioannis Stefanou**  
*Seismic reliability assessment of classical columns subjected to near-fault ground motions*
  - 16. Ιωάννης Τραυλός**  
*«Pictorial Dictionary of ancient Athens»*  
 Εκδόσεις Hacker art Books, London 1980
  - 17. Μανόλης Κορρές**  
*«Ολυμπείον»*  
 Περιοδικό ΑΝΘΕΜΙΟΝ τεύχος 5<sup>ο</sup> , 1999
  - 18. Papers of American School of Classical Studies at Athens,**  
 VOLUME I- 1882-1883
  - 19. Wycherley, R. E.**  
*“The Olympieion at Athens”, CRBS 5, 1963.*
  - 20. Παπαδόπουλος Χρίστος- Πολιτικός Μηχανικός-Δομοστατικός MSc**  
*“Στατική μελέτη του Ωρολογίου του Ανδρονίκου Κυρρήστου” στο πλαίσιο της Συγχρηματοδοτούμενης Παράξης «Συντήρηση και Ανάδειξη του Ωρολογίου Ανδρονίκου Κυρρήστου», Μάιος 2015*
  - 21. Ευάγγελος Αστρεινίδης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, PhD Imperial College**  
*«Ενόργανη παρακολούθηση Δομικών κατασκευών με χρήση αισθητήρων οπτικών ινών»*
  - 22. George J. Tsamasphyros, Elias A. Koulalis, George N. Kanderakis, Nikos K. Furnarakis, Vangelis Z. Astreinidis - National Technical University of Athens,**  
 Department of Engineering Science, Section of Mechanics, Athens, Greece  
*«Structural Health Monitoring of a Steel Railway Bridge using Optical Fibre, Bragg Grating Sensors and Numerical Simulation».*
  - 23. Ευάγγελος Αστρεινίδης, Δημήτριος Εγγλέζος**  
 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας  
 5–7 Νοεμβρίου, 2008  
*«Ενόργανη Παρακολούθηση Παραμορφώσεων του Τείχους της Ακρόπολης με Αισθητήρες Οπτικών Ινών – Σύγκριση Μετρήσεων και Αναλυτικών Προβλέψεων»*  
**Ιωάννης-Ορέστης Γεωργόπουλος Δρ Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.,**  
**Κωνσταντίνος Παπανικολόπουλος Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, ΜΔΕ-**  
 Δεκέμβριος 2015  
*«Τεχνική έκθεση εγκατάστασης συστήματος ενόργανης παρακολούθησης του Μνημείου του Ωρολογίου του Ανδρονίκου Κυρρήστου» στο πλαίσιο του έργου «Συντήρηση και ανάδειξη του Ωρολογίου Ανδρονίκου Κυρρήστου, στον αρχαιολογικό χώρο της Ρωμαϊκής Αγοράς Αθηνών»*  
 Δεκέμβριος 2015
  - 24. Μαγδαληνή-Στυλιανή Τρύφωνα- Διπλωματική Εργασία,**  
*«Γεωμετρική Τεκμηρίωση Ωρολογίου Ανδρονίκου Κυρρήστου»*  
 ΕΜΠ-Σχολή Αρχονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών- Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας  
 Αθήνα 2015
  - 25. DORA Foti & VITANTONIO Vacca**

- Department of Civil Engineering Sciences and Architecture, Polytechnic University of Bari, Italy  
*“Experimental investigation of the seismic response of a multi – drum column”*
- 26. Nicos Makris, Member, ASCE, and Jian Zhang**  
*«ROCKING RESPONSE OF ANCHORED BLOCKS UNDER PULSE-TYPE MOTIONS»*
- 27. Amirhosein Shabani, Mohyeddin Feyzabadi, Mahdi Kioumars**  
*Department of Civil Engineering and Energy Technology, Oslo Metropolitan University, Oslo 0166, Norway*  
*«Model updating of a masonry tower based on operational modal analysis: The role of soil-structure interaction»*
- 28. Ilaria Capanna, Riccardo Cirella, Angelo Aloiso, Rocco Alaggio, Franco Di Fabio and Massimo Frangiacomo (2021)-Civil and Environmental Engineering Department, University of L’Aquila**  
*“Operational Modal Analysis, Model Update and Fragility Curves Estimation, through Truncated Incremental Dynamic Analysis, of a Masonry Belfry”*
- 29. Standoli, G., et al.**  
*"Model Updating of Historical Belfries Based on OMA Identification Techniques."*  
*International Journal of Architectural Heritage (2020): 1-25.*
- 30. Nicholas Ambraseys · Ioannis N. Psycharis**  
*Assessment of the long-term seismicity of Athens from two classical columns*  
*Bull Earthquake Eng (2012) 10:1635–1666*
- 31. R. E. Wycherley**  
*The Olympieion at Athens*
- 32. Komodromos P., Papaloizou L., Polycarpou P.**  
*“Simulation of the response of ancient columns under harmonic and earthquake excitations”*  
*Engineering Structures, 2154-2164. 2008*
- 33. Housner G.W (1963)**  
*‘The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes’.*  
*Bulletin of seismological Society of America, 403-417.*
- 34. John F. Hall (Department of Civil Engineering, Caltech, Pasadena CA)**  
*“Problems encountered from the use (or misuse) of Rayleigh damping”*  
*Dam Safety Technology Development Program*  
*U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Technical Service Center, Denver, Colorado, December 2007*
- 35. Anil K. Chopra**  
*“Δυναμική των κατασκευών – Θεωρία και εφαρμογές στη σεισμική μηχανική”*  
*Τρίτη έκδοση*  
*Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας - 2010*