

(Συνοπτική-Ευθεία)

**ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΡΧΑΙΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ
ΤΗΣ ΚΛΑΣΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΛΛΗΝΙΣΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ
ΠΡΟΚΑΤΑΡΤΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ ΜΝΗΜΕΙΩΝ ΤΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΑΚΗΣ**

Γεώργιος Χ. Μάνος, Καθηγητής, Διάταξη Τεχνητών Σεισμών Εργαστηρίου Αντοχής Υλικών
Τμήμα Πολιτικών Μηχ., Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Μίλτων Δημοσθένους, Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Διάταξη Τεχνητών Σεισμών
Εργαστηρίου Αντοχής Υλικών, Τμήμα Πολιτικών Μηχ., Α.Π.Θ., και
Ερευνητής στο Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών
Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ).

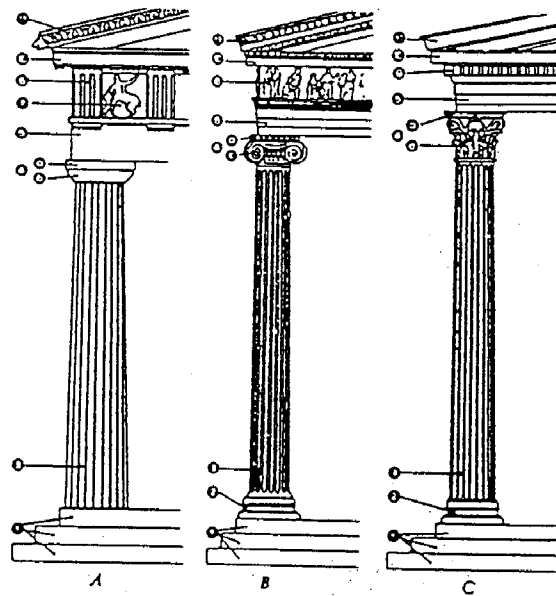
ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας διερευνούνται τα μορφολογικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των κίωνων αρχαίων μνημείων της κλασσικής και ελληνοιστικής περιόδου σε οκτώ αρχαιολογικούς χώρους της Μακεδονίας και Θράκης, τόσο μέσα από βιβλιογραφικές πηγές όσο και από επιτόπου παρατηρήσεις. Η προσπάθεια αυτή επικεντρώνεται σε αρχαία μνημεία που έχουν ως βασικό δομικό σύστημα την κιονοστοιχία. Επιπλέον, παρά τις προφανείς δυσκολίες, γίνεται μια προκαταρτική προσπάθεια συσχέτισης τη υφιστάμενης κατάστασης των υπό εξέταση μνημείων με την ιστορία της σεισμικής δράσης στην κάθε περιοχή. Σύμφωνα με τα στοιχεία που προέκυψαν από αυτήν την εξέταση, επιλέχθηκε ένας αντιπροσωπευτικός μονολιθικός κίονας δωρικού ρυθμού, συνολικού ύψους 1.48m και διάμετρο βάσης 0.26m, ο οποίος κατασκευάστηκε από μάρμαρο. Ο κίονας αυτός μεταφέρθηκε στη Διάταξη Τεχνητών Σεισμών του Α.Π.Θ. όπου μελετήθηκαν εργαστηριακά τα δυναμικά του χαρακτηριστικά σε λικνιστική απόκριση και για συνθήκες ελεύθερης έδρασης. Η μελέτη αυτή αποσκοπούσε στην ανάπτυξη μεθοδολογιών που να μπορούν να προσδιορίσουν τα κυρίαρχα δυναμικά χαρακτηριστικά μονολιθικών κίωνων τόσο σε εργαστηριακές συνθήκες όσο και σε συνθήκες επιτόπου μετρήσεων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα αρχαία μνημεία της κλασσικής και ελληνοιστικής περιόδου έχουν ως βασικό δομικό σύστημα την κιονοστοιχία η οποία μαζί με τους κατακόρυφους τοίχους καλείται να παραλάβει τόσο τα κατακόρυφα όσο και τα σεισμικά φορτία που καταπονούν τέτοιου είδους κατασκευές. Η κιονοστοιχία κατά μήκος του αναπτύγματος της αποτελείται από σειρά κίωνων που συνδέονται στην κεφαλή τους με τα επιστύλια. Εγκάρσια προς το επίπεδο της κιονοστοιχίας, δημιουργείται σύζευξη με τους κατακόρυφους τοίχους που συνήθως βρίσκονται στο εσωτερικό ενός μνημείου αυτής της μορφολογίας. Προφανώς λόγω της κατάρρευσης αυτών των συνδέσεων, η εικόνα μεμονωμένων κίωνων που στέκονται ελεύθερα σε διάφορους αρχαιολογικούς χώρους της ανατολικής Μεσογείου είναι σε όλους μας πολύ οικεία. Οι κίονες διακρίνονται ως προς τη μορφή τους σε μονολιθικούς και σφονδυλωτούς. Οι μονολιθικοί είναι ολόσωμοι και έχουν στην κεφαλή

τους ελεύθερα εδραζόμενο το κιονόκρανο, ενώ ο κορμός των σφονδυλωτών κίωνων αποτελείται από σφονδύλους που εδράζονται ο ένας πάνω στον άλλο, που στην αρχική τους κατάσταση είχαν τέλεια συναρμογή χωρίς τη χρήση οποιουδήποτε συνδετικού υλικού. Οι κίονες αυτοί φέρουν, όπως και οι μονολιθικοί, κιονόκρανο στην κορυφή τους. Μια δεύτερη διάκριση μεταξύ των κίωνων γίνεται αναφορικά με το ρυθμό τους. Έχουμε έτσι τους δωρικούς, ιωνικούς και κορινθιακούς κίονες όπου η κύρια διάκριση τους από αρχιτεκτονική πλευρά εστιάζεται στην συσχ'ετιση των διαφόρων γεωμετρικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών τους με κυρίαρχη διαφοροποίηση μεταξύ των άλλων της μορφής του κιονόκρανου. Από δομοστατικής πλευράς το ενδιαφέρον ως προς τους διάφορους ρυθμούς εστιάζεται στη μορφή (μονολιθικός - σφονδυλωτός) και στο λόγο ύψους προς βάση. Διακρίνουμε έτσι τους ιωνικούς και κορινθιακούς κίονες σε υψίκορμους, με αναλογία ύψους προς βάση περίπου 10/1, σε αντίθεση με τους δωρικούς κίονες που ο λόγος αυτός κυμαίνεται περίπου 5/1 (σχήμα 1). Η βιβλιογραφία είναι πολύ πλούσια σε περιγραφές των ιδιαίτερων γεωμετρικών χαρακτηριστικών των κίωνων για διάφορους περιστύλιους ναούς της κλασσικής περιόδου και πολύ μικρή αναφορά γίνεται εδώ [1, 2, 3].



Σχήμα 1. Οι κλασσικοί ελληνικοί ρυθμοί κίωνων. Α Δωρικός, Β Ιωνικός, Γ Κορινθιακός.

Η εικόνα που παρουσιάζουν πολλά από τα μνημεία αυτά σε διάφορους αρχαιολογικούς χώρους, δηλαδή αυτή κατασκευών που διάφορα στοιχεία τους έχουν υποστεί κατάρρευση, δίδουν το ερέθισμα της σύνδεσης της σημερινής κατάστασής τους με ισχυρή σεισμική δράση του παρελθόντος. Οι συνήθεις εικόνες από την σημερινή κατάσταση μνημείων της εν λόγω μορφολογίας είναι ότι λείπουν οι ξύλινες στέγες, από τις μαρμάρινες οροφές σώζονται μικρά τμήματα ενώ ένα μεγάλο μέρος από τους τοίχους και κυρίως τα άνω τμήματα των κιονοστοιχιών έχουν καταρρεύσει. Αρκετά δε από τα μέρη ενός αρχαίου μνημείου που είναι ακόμα στη θέση τους φέρουν έντονα σημάδια αλλοίωσης της αρχικής τους μορφής λόγω της επίδρασης διαφόρων δράσεων μεταξύ των οποίων υποθέτουμε ότι θα πρέπει να είναι και η σεισμική δράση δεδομένης της σεισμικότητας της

Ανατολικής Μεσογείου. Η σύνθετη συμπεριφορά των αρχαίων Ελληνικών και Ρωμαϊκών μνημείων σε περίπτωση σεισμού καθώς και οι πιθανές βλάβες που μπορεί να προκύψουν είναι ένα πρόβλημα που μέχρι σήμερα δεν έχει εξεταστεί σε μεγάλο βάθος. Κυρίως από εργαστηριακές παρατηρήσεις σε απλά στοιχεία με αντίστοιχες μορφολογίες προκύπτει ότι κάτω από την επίδραση σεισμικών διεγέρσεων, τόσο ο κίονας όσο και η κιονοστοιχία, μπορεί να εμφανίσουν μια ή συνδυασμό από τις πιο κάτω μορφές βλαβών.

1) Ολίσθηση των σφονδύλων μεταξύ τους ή στη βάση έδρασης τους με αποτέλεσμα τη μετατόπιση από την αρχική τους θέση.

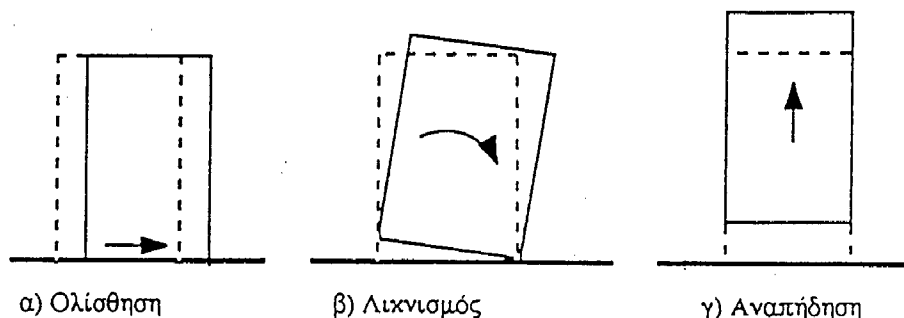
2) Ανατροπή που προκύπτει ως αποτέλεσμα λικνιστικής κίνησης.

3) Πρόκληση βλαβών στη βάση έδρασης ή στη θεμελίωση με αποτέλεσμα την εμφάνιση παραμένουσας κλίσης.

4) Την εμφάνιση ρηγματώσεων ή θραύσεων στο υλικό των κίωνων ως αποτέλεσμα της επενέργειας των σεισμικών δυνάμεων.

5) Σταδιακή κατάρρευση τμημάτων έως την ολική κατάρρευση του αρχαίου μνημείου.

Από αυτές τις μορφές των βλαβών, που συνδέονται με αντίστοιχες μορφές απόκρισης, αν εξαιρέσουμε την περίπτωση εμφάνισης ρηγματώσεων στο σώμα των κίωνων, τότε σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις τα διάφορα δομικά στοιχεία μιας τέτοιας μορφολογίας μπορεί να θεωρηθούν ότι συμπεριφέρονται ως ελεύθερα εδραζόμενα στερεά σώματα. Η παραδοχή αυτή μπορεί να γίνει λόγω των μεγάλων γεωμετρικών μετατοπίσεων στις θέσεις συνδέσεων των διάφορων δομικών στοιχείων συγκριτικά με τις μικρές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο σώμα των διαφόρων τμημάτων. Ειδικότερα, κάτω από σεισμικές διεγέρσεις, ένα ελεύθερα εδραζόμενο στερεό σώμα μπορεί να αναπτύξει στο δισδιάστατο χώρο το φαινόμενο της ολίσθησης, του λικνισμού ή της αναπήδησης ή συνδυασμό όλων αυτών των μορφών απόκρισης.



Σχήμα 2. Μορφές απόκρισης των ελεύθερα εδραζόμενων στερεών σωμάτων σε δυναμικές διεγέρσεις της βάσης τους.

Ο μονολιθικός κίονας, που μπορούμε να πούμε ότι αποτελεί ένα στερεό σώμα ελεύθερα εδραζόμενο στη βάση του με βάση την προηγούμενη θεώρηση, αποτελεί τη βασική μονάδα της κιονοστοιχίας ενός αρχαίου μνημείου αυτής της μορφολογίας (π.χ. περίστυλος ναός). Στερεά σώματα με λόγο ύψους προς βάση σαν αυτό των μονολιθικών

κίωνων, αναπτύσσουν σε περίπτωση σεισμού κυρίως το φαινόμενο του λικνισμού. Για να μπορέσουμε όμως να μελετήσουμε τη σεισμική τους συμπεριφορά θα πρέπει πρώτα να εκτιμήσουμε τα χαρακτηριστικά τους μεγέθη που επηρεάζουν κυρίαρχα αυτή τη συμπεριφορά όπως έχουν μελετηθεί στο παρελθόν από διάφορους ερευνητές. Στα πλαίσια λοιπόν αυτής της εργασίας, καταβάλλεται προσπάθεια προσδιορισμού, μέσω μετρητικών μεθόδων, των δυναμικών χαρακτηριστικών ενός μονολιθικού κίονα σε λικνιστική απόκριση, που έχει επιλεγεί ως αντιπροσωπευτικός τύπος δωρικών κιονοστοιχιών αρχαιολογικών χώρων της Μακεδονίας και Θράκης.

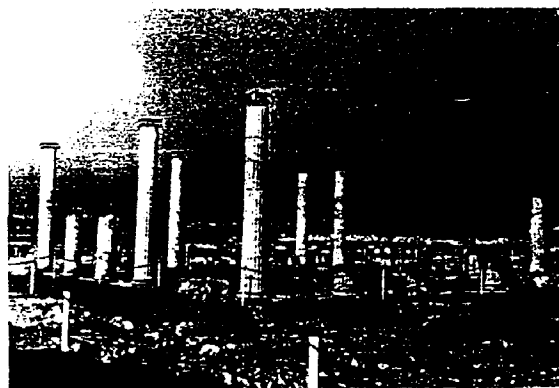
2. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΙΟΝΩΝ ΑΠΟ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ ΤΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΡΑΚΗΣ

Στα πλαίσια της παρούσης ερευνητικής προσπάθειας επιλέχθηκε ένα περιορισμένος (για πρακτικούς λόγους) αριθμός αντιπροσωπευτικών μνημείων της μορφολογίας που ενδιαφέρει, σε συγκεκριμένους αρχαιολογικούς χώρους της Μακεδονίας και Θράκης, που είναι ιδιαίτερης ιστορικής σημασίας και περιλαμβάνουν μνημεία που είτε η σημερινή τους εικόνα είτε η αντίστοιχη αρχαιολογική μελέτη υποδηλώνουν την αρχική τους κατάσταση.

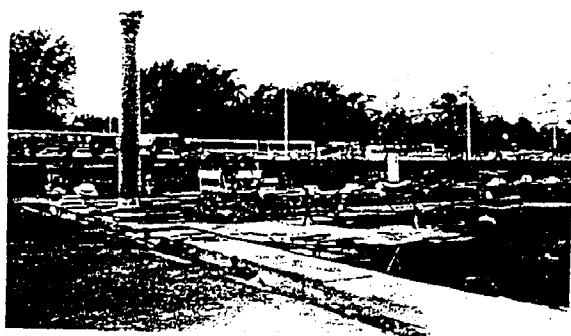
Από το χώρο της Μακεδονίας εξετάστηκαν μνημεία από τους αρχαιολογικούς χώρους της Βεργίνας (Αιγές), του Δίου (φωτ. 1), της Πέλλας (φωτ. 2), της Θεσσαλονίκης (φωτ. 3) και της Αμφίπολης και από το χώρο της Θράκης μνημεία από τους αρχαιολογικούς χώρους των Φιλίππων (φωτ. 4) της Θάσου και της Σαμοθράκης.



Φωτ. 1. Αρχαιολογικός χώρος του Δίου



Φωτ. 2. Αρχαιολογικός χώρος της Πέλλας



Φωτ. 3. Αρχαία αγορά της Θεσσαλονίκης



Φωτ. 4. Αρχαιολογικός χώρος των Φιλίππων

Η διερεύνηση αυτή επικεντρώνεται σε μνημεία από τους πιο πάνω αρχαιολογικούς χώρους που έχουν ως βασικό δομικό σύστημα την κιονοστοιχία. Ως τέτοια μπορούν να θεωρηθούν οι αρχαίοι Περίστυλοι Ναοί, οι Θησαυροί και οι Αίθουσες των Αναθημάτων, οι Στοές, οι Θόλοι και τα Πέρικεντρα Κτίρια, τα Προπύλαια, οι Οικίες και τα Ανάκτορα.

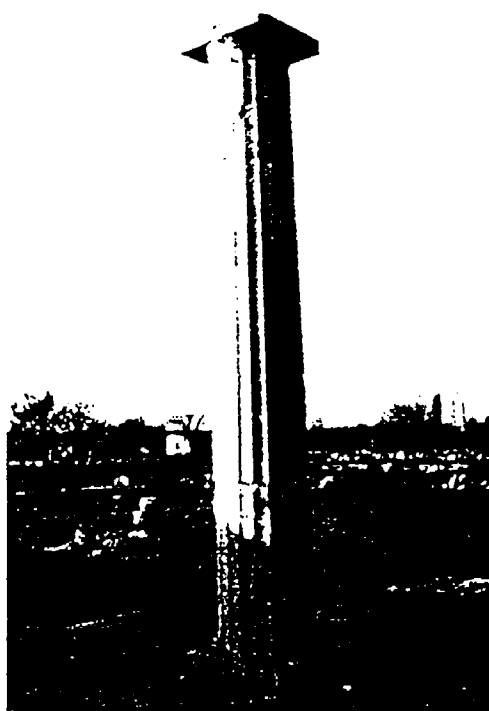
Από επιτόπου παρατηρήσεις καθώς και μέσα από την εξετασθείσα βιβλιογραφία [1,2,3], έχει προκύψει ότι στους πιο πάνω αρχαιολογικούς χώρους υπάρχουν και οι τρεις βασικοί ρυθμοί των αρχαίων κίωνων, ο δωρικός, ο ιωνικός και ο κορινθιακός. Οι κίονες αυτοί ήταν ή εξακολουθούν να είναι μέχρι σήμερα τόσο σε μονολιθική όσο και σφονδυλωτή μορφή.

Δωρικοί κίονες: Έχουν επισημανθεί δωρικοί κίονες στο Ανάκτορο της *Βεργίνας*, στην Οικία της Αρπαγής της Ελένης (φωτ. 5) και στην Αγορά της *Πέλλας*, στην Παλαιόστρα και στο Ξυστό δρόμο του Γυμνασίου της *Αμφίπολης* και σε αρκετά μνημεία του Ιερού της *Σαμοθράκης*, ανάμεσα στα οποία το Ιερό των Καβείρων όπου πέντε από αυτούς τους κίονες είναι αναστηλωμένοι. Επίσης αναφέρεται ως Δωρικός ναός και σε αναπαράσταση φαίνεται με δύο δωρικούς κίονες στην πρόσοψη, ο ναός της Δήμητρας στο Δίον.

Ιωνικοί κίονες: Ιωνικοί κίονες έχουν επισημανθεί στον ναό της Ισιδας στο αρχαίο Δίον, στην οικία του Διονύσου στην *Πέλλα*, στα Προπύλαια του Ιερού της *Σαμοθράκης* καθώς και σε άλλα κτίρια των πιο πάνω αρχαιολογικών χώρων.

Κορινθιακοί κίονες: Οι κίονες αυτοί έχουν επισημανθεί κυρίως στην Αρχαία Αγορά της *Θεσσαλονίκης* και σε διάφορα μνημεία του αρχαιολογικού χώρου των *Φιλίππων*.

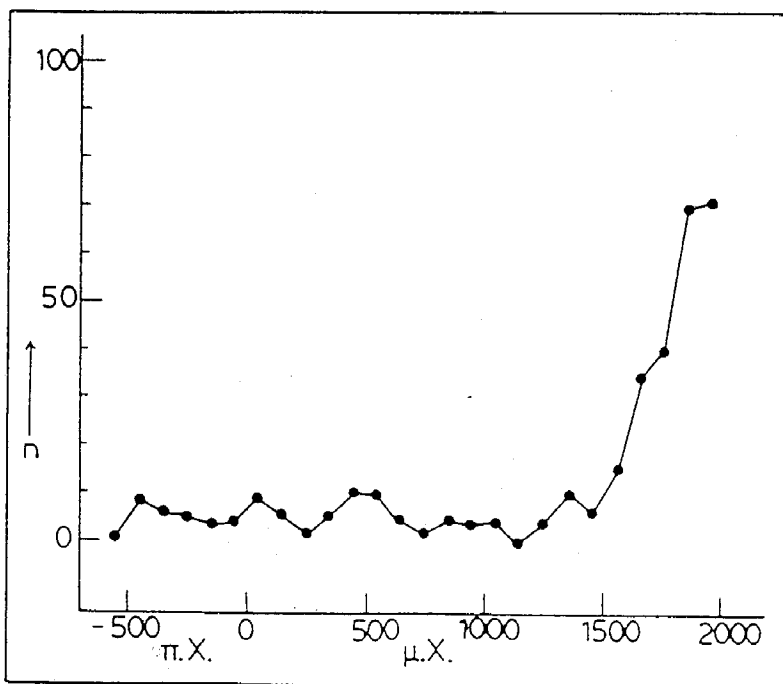
Μέσα από τη βιβλιογραφία που εξετάστηκε δεν ήταν δυνατός ο σαφής προσδιορισμός των διαστάσεων των κίωνων στα μνημεία των ως άνω αρχαιολογικών χώρων, με εξαίρεση τους κίονες της Αρχαίας Αγοράς της Θεσσαλονίκης. Ωστόσο, από επιτόπου παρατηρήσεις και σχετικές μετρήσεις διαπιστώθηκε ότι το ύψος των κίωνων της εξετασθείσας περιοχής, κυμαίνεται από 3.0 έως 5.0m ενώ η διάμετρος της βάσης τους είναι ανάλογη του ύψους όπως καθορίζεται από τον ρυθμό του κίονα, με βάση γεωμετρικές σχέσεις και κανόνες του αντίστοιχου ρυθμού.



Φωτ. 5. Δωρικός κίονας στην Οικία της Αρπαγής της Ελένης στην Πέλλα.

3. Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΡΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΑΚΗΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ ΤΩΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΤΟΥΣ ΧΩΡΩΝ.

Η γνώση μας για τους ισχυρούς σεισμούς του παρελθόντος στον ευρύτερο ελληνικό χώρο είναι σχετικά πλούσια συγκρινόμενη με άλλες περιοχές της υδρογείου, π.χ. Η.Π.Α., γεγονός που οφείλεται στην πλούσια ιστορία και τον πολιτισμό που αναπτύχθηκε στο συγκεκριμένο χώρο τα τελευταία 4000 χρόνια. Σημαντικές έρευνες μελέτης των ιστορικών σεισμών του ευρύτερου ελληνικού χώρου με αναφορές στις συνέπειες αυτών των σεισμών στο δομημένο περιβάλλον της κάθε εποχής αποτελούν την κύρια πηγή πληροφόρησης αναφορικά με τις συνέπειες των σεισμών σε αρχαία μνημεία, όπως αυτά που εξετάζονται στα πλαίσια αυτής της έρευνας. Οι πληροφορίες που περιλαμβάνονται στον κατάλογο των ιστορικών σεισμών που συντάχθηκε από τους Παπαζάχο και Παπαζάχου [4] αποτέλεσε την πολύτιμη κύρια πηγή σχετικά με τη σεισμική δράση στην περιοχή που εξετάζουμε (Μακεδονία - Θράκη) στα πλαίσια της παρούσας εξέτασης. Παρόλα αυτά, η γνώση της ισχυρής σεισμικής δράσης μέσω της ιστορικής σεισμικότητας πρέπει να θεωρηθεί χρήσιμη ως ορισμένο βαθμό και να αναγνωρισθεί ότι πιθανόν να εμπεριέχει ελλειπή στοιχεία. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3, όπου για τα τελευταία 2500 χρόνια εμφανίζεται υπερπολλαπλάσια σεισμική δράση για τα τελευταία 300 χρόνια, γεγονός που δεν δικαιολογείται από καμιά επιστημονική τεκμηρίωση σεισμοτεκτονικής έξαρσης αλλά θα πρέπει να αποδοθεί στην ύπαρξη και τήρηση καλύτερων ιστορικών και επιστημονικών στοιχείων.



Σχήμα 3. Χρονική μεταβολή του αριθμού n των γνωστών σεισμών ανά αιώνα στον ελληνικό χώρο [4]

Επιπρόσθετα, η έλλειψη σαφούς γνώσης όλων των βασικών παραμέτρων της σεισμικής δράσης μέσω της μελέτης της ιστορικής σεισμικότητας γίνεται εμφανέστερη όταν για τη σε βάθος μελέτη της συμπεριφοράς δομικών συστημάτων είναι απαραίτητη η γνώση στοιχείων, όχι μόνον για την ένταση και την επικεντρική περιοχή, αλλά και γνώση των δυναμικών χαρακτηριστικών της εδαφικής κίνησης και των μεγεθών αντιστοίχων παραμέτρων (επιτάχυνση, ταχύτητα, μετατόπιση). Μόνον έτσι μπορεί να ερμηνευτεί με ικανοποιητικό βαθμό προσέγγισης η εικόνα συγκεκριμένων βλαβών, όπως αυτές ενδιαφέρουν στην παρούσα εργασία.

Παρά τις ενγενείς λοιπόν δυσκολίες που προκύπτουν από την ελλιπή πληροφόρηση ως προς την σεισμική κίνηση, καθώς και πλήρη βιβλιογραφική ανφορά για τη μορφή της απόκρισης και των βλαβών των κατασκευών που ενδιαφέρουν, η εικόνα της σημερινής κατάστασης των μνημειακών κατασκευών τους, που περιλαμβάνουν το στοιχείο της κιονοστοιχίας, θα μπορούσε να συσχετιστεί με αντίστοιχες εικόνες κατάρρευσης ομοιωμάτων κίωνων σε εργαστηριακές δοκιμές υπό τεχνητές σεισμικές διεγέρσεις [5]. Υπό αυτές τις προϋποθέσεις, τέτοιας μορφής εικόνες που παρουσιάζουν αυτού του είδους οι μνημειακές κατασκευές σήμερα μπορούν να θεωρηθούν ενδεικτικές του πιθανού συσχετισμού της σημερινής εικόνας των εν λόγω μνημείων με τη σεισμική δράση.

Με βάση τη βιβλιογραφική έρευνα που έγινε στα πλαίσια αυτής της εργασίας, προκύπτει χρονική συσχέτιση για τα οικιστικά συγκροτήματα που συνδέονται με τους αρχαιολογικούς χώρους του Δίου, της Πέλλας, της Θεσσαλονίκης και των Φιλιππων με καταστροφές από συγκεκριμένη σεισμική δράση [3, 4]. Έτσι με βάση το λογικό συσχετισμό που αναπτύχθηκε προηγουμένως θα μπορούσε να συνδεθεί η σημερινή εικόνα των συγκεκριμένων μνημειακών κατασκευών στους εν λόγω αρχαιολογικούς χώρους που περιλαμβάνουν το στοιχείο της κιονοστοιχίας με τη σεισμική δραστηριότητα. Ο χρονικός αυτός συσχετισμός δεν έγινε δυνατό να τεκμηριωθεί στον ίδιο βαθμό για τα οικιστικά συγκροτήματα που συνδέονται με τους αρχαιολογικούς χώρους της Βεργίνας, της Αμφίπολης, της Θάσου και της Σαμοθράκης.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΕΝΟΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΥ ΚΙΟΝΑ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΑΚΗΣ.

4.1. Μόρφωση και κατασκευή του μονολιθικού κίονα

Για την μόρφωση του μονολιθικού κίονα έχουν ληφθεί υπόψη τα παρακάτω κριτήρια:

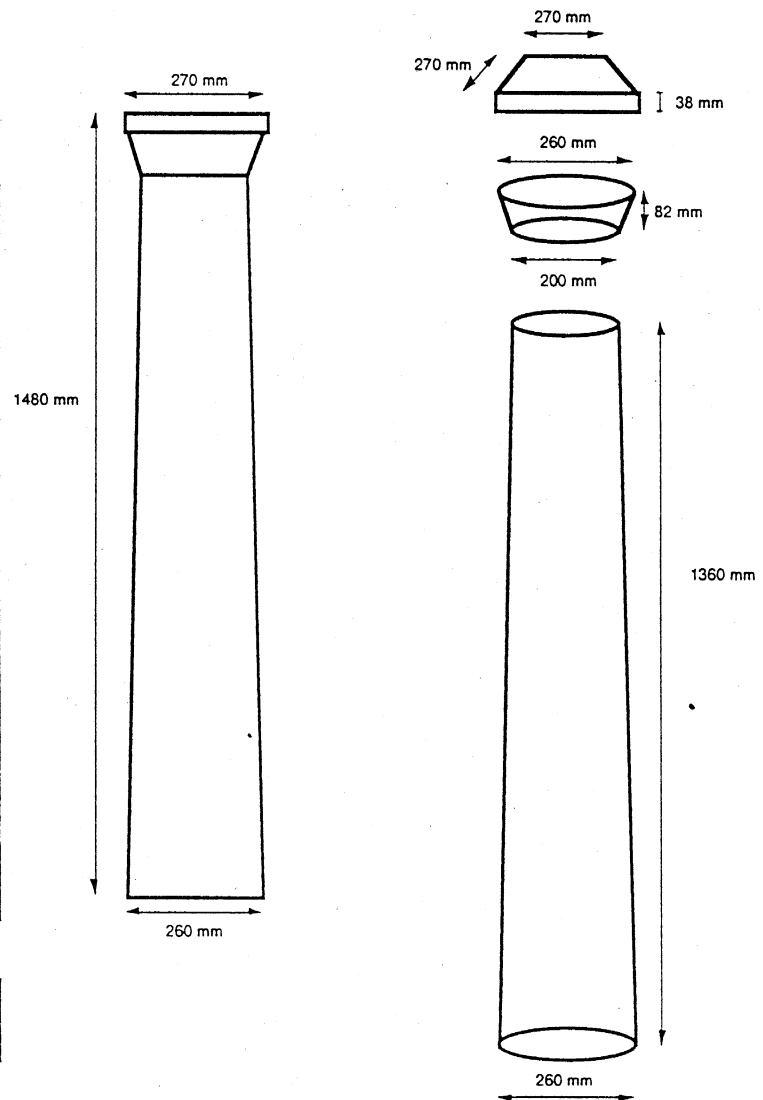
1ον) Το ομοίωμα αυτό του μονολιθικού κίονα θα πρέπει να είναι, όσον αφορά το ρυθμό και τις γεωμετρικές του διαστάσεις, ένας κίονας αντιπροσωπευτικός για την περιοχή Μακεδονίας και Θράκης.

2ον) Λήφθηκαν υπόψη οι γεωμετρικές διαστάσεις της Διάταξης Τεχνητών Σεισμών του Α.Π.Θ. σε συνδιασμό με μελλοντική επέκταση των ερευνητικών δραστηριοτήτων της Διάταξης σε πιο πολύπλοκες μορφές τμημάτων αυτού του είδους των κατασκευών πέρα από το μεμονωμένο μονολιθικό κίονα.

Με βάση λοιπόν τα πιο πάνω κριτήρια και από τα αποτελέσματα της έρευνας που έγινε σε αρχαιολογικούς χώρους της περιοχής, αποφασίστηκε ο κίονας αυτός να είναι δωρικού ρυθμού. Οι γεωμετρικές διαστάσεις του φυσικού ομοιώματος φαίνονται στο σχήμα 4. Επιπλέον θα πρέπει να αναφερθεί ότι, ενώ στους πρωτότυπους κίονες το κιονόκρανο είναι ελεύθερα εδραζόμενο στον κορμό του κίονα, στο φυσικό αυτό ομοίωμα αποφασίστηκε το κιονόκρανο να είναι μονολιθικά συνδεδεμένο με τον κορμό του κίονα. Η κατασκευή του μορφώματος έγινε στο εξειδικευμένο εργαστήριο μαρμάρινων κατασκευών Φυλακτός, στη Θεσσαλονίκη και αμέσως μετά την κατασκευή του μεταφέρθηκε στη Διάταξη Τεχνητών Σεισμών του Α.Π.Θ. (φωτο. 6).



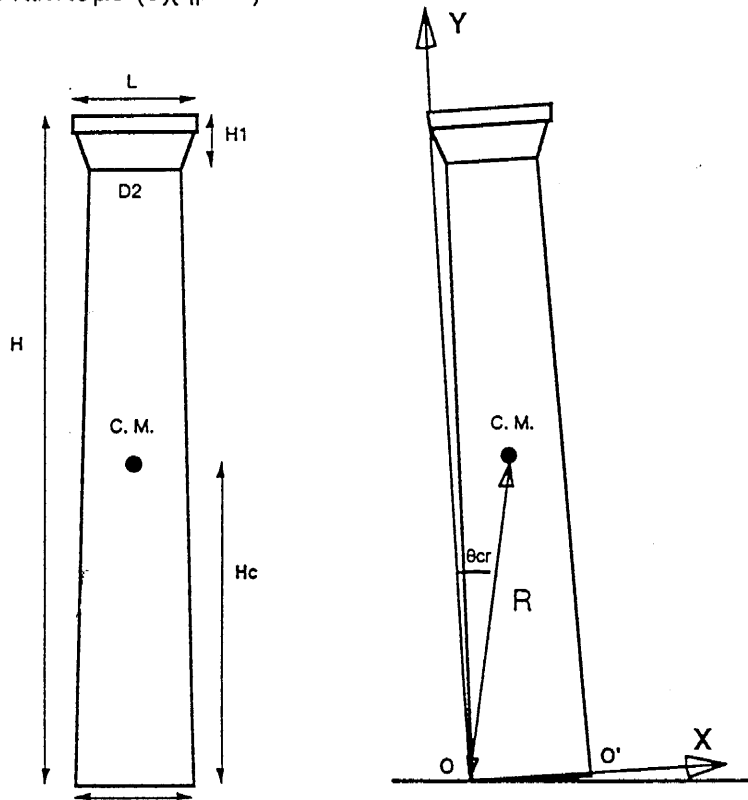
Φωτ. 6. Μαρμάρινος κίονας



Σχήμα 4. Γεωμετρικές διαστάσεις του κίονα

4.2. Βασικές αρχές της λικνιστικής συμπεριφοράς μονολιθικών σωμάτων.

Η δυναμική συμπεριφορά συμπαγών σωμάτων ελεύθερα εδραζόμενων στη βάση τους και με αναλογία ύψους προς βάση όπως αυτή του υπό εξέταση μονολιθικού κίονα, κυριαρχείται από λικνισμό (σχήμα 5).



Σχήμα 5. Λικνιστική απόκριση του μονολιθικού κίονα.

Οι εξισώσεις της λικνιστικής κίνησης των στερεών σωμάτων σε δυναμικές διεγέρσεις της βάσης τους είναι [6]:

$$I_0 \ddot{\theta} + M R \ddot{U} \cos(\theta_{cr} - \theta) + M g \left(1 + \frac{\ddot{V}}{g}\right) R \sin(\theta_{cr} - \theta) = 0 \quad \theta > 0 \quad (1)$$

$$I_0 \ddot{\theta} + M R \ddot{U} \cos(\theta_{cr} + \theta) - M g \left(1 + \frac{\ddot{V}}{g}\right) R \sin(\theta_{cr} + \theta) = 0 \quad \theta < 0 \quad (2)$$

όπου

I_0 , η πολική ροπή αδράνειας του σώματος ως προς το πόλο περιστροφής

M , η μάζα του στερεού σώματος

R , η απόσταση του κέντρου μάζας από τον πόλο περιστροφής

θ , η γωνία λικνισμού (ή περιστροφής του σώματος γύρω από το πόλο περιστροφής)

θ_{cr} , η κρίσιμη γωνία λικνισμού του σώματος πέραν της οποίας επέρχεται ανατροπή σε ελεύθερες λικνιστικές ταλαντώσεις

g , η επιτάχυνση της βαρύτητας

\ddot{U} , η οριζόντια επιτάχυνση της διέγερσης της βάσης και

\ddot{V} , η κατακόρυφη επιτάχυνση της διέγερσης της βάσης

Στη διεθνή βιβλιογραφία ορίζεται ως φυσική λικνιστική συχνότητα του στερεού σώματος η ποσότητα [7]:

$$P = \sqrt{\frac{M g R}{I_0}} \quad (3)$$

Αν τις εξισώσεις 1 και 2 τις πολλαπλασιάσουμε με τον όρο (g/I_0) τότε αυτές λαμβάνουν την πιο κάτω μορφή:

$$g \ddot{\theta} + P^2 \ddot{U} \cos(\theta_{cr} - \theta) + g P^2 \left(1 + \frac{\ddot{V}}{g}\right) \sin(\theta_{cr} - \theta) = 0 \quad \theta > 0 \quad (4)$$

$$g \ddot{\theta} + P^2 \ddot{U} \cos(\theta_{cr} + \theta) - g P^2 \left(1 + \frac{\ddot{V}}{g}\right) \sin(\theta_{cr} + \theta) = 0 \quad \theta < 0 \quad (5)$$

Από τις πιο πάνω εξισώσεις παρατηρούμε ότι, εκτός από το αίτιο της διέγερσης, τα χαρακτηριστικά μεγέθη του στερεού σώματος που επηρεάζουν τη λικνιστική του συμπεριφορά είναι η κρίσιμη γωνία λικνισμού (θ_{cr}) και η φυσική λικνιστική του συχνότητα (P). Επιπλέον, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι στη φάση εναλλαγής του πόλου περιστροφής του στερεού σώματος επισυμβαίνει κρούση του λικνιζόμενου στερεού με τη βάση έδρασης του που συνεπάγεται απώλεια κινητικής ενέργειας με αποτέλεσμα τη μείωση της γωνιακής του ταχύτητας. Ο λόγος της γωνιακής του ταχύτητας αμέσως μετά την κρούση με αυτή που έχει πριν από την κρούση, καλείται συντελεστής αποκατάστασης (coeff. of restitution).

$$e = \frac{\dot{\theta}'}{\dot{\theta}} \quad (6)$$

όπου $\dot{\theta}'$: γωνιακή ταχύτητα μετά την κρούση

$\dot{\theta}$: γωνιακή ταχύτητα πριν από την κρούση

$e < 1$: συντελεστής αποκατάστασης (coefficient of restitution).

Οι Kimura και Iida [8], και αργότερα ο Housner [9], διατύπωσαν την πιο κάτω σχέση (εξ. 7) για την εκτίμηση του συντελεστή αποκατάστασης, με βάση το θεώρημα διατήρησης της ορμής και με την παραδοχή ότι το στερεό σώμα και η βάση έδρασης του αποτελούν ενιαίο σύστημα.

$$e = 1 - \frac{m R^2}{I_0} (1 - \cos 2\theta_{cr}) \quad (7)$$

Στη διεθνή βιβλιογραφία [5, 10, 11, 12], γίνεται αρκετή κριτική στην πιο πάνω σχέση υπολογισμού του συντελεστή αποκατάστασης (e) δεδομένου ότι σ' αυτή δεν συνεκτιμάται καθόλου το είδος του υλικού τόσο του στερεού σώματος όσο και της βάσης έδρασης. Για το λόγο αυτό, η πιο πάνω σχέση όταν υιοθετείται θα πρέπει να γίνεται με αρκετές

επιφυλάξεις δεδομένου ότι, όπως έχει προκύψει από προηγούμενες έρευνες, η λικνιστική απόκριση παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία ακόμα και σε πολύ μικρές μεταβολές του συντελεστή αποκατάστασης (e).

4.2.1. Εφαρμογή των βασικών αρχών της λικνιστικής συμπεριφοράς στο φυσικό ομοίωμα που εξετάζεται.

Σύμφωνα λοιπόν με την πιο πάνω αναφορά και τη γεωμετρία του μονολιθικού κίονα, τα χαρακτηριστικά του μεγέθη που σχετίζονται με τη λικνιστική του συμπεριφορά είναι:

$$M = 169 \text{ kg}$$

$$R = 713 \text{ mm}$$

$$\Theta_{cr} = 10.51 \text{ deg}$$

$$P = 3.153 \text{ Hz}$$

$$e = 0.952 \text{ (με βάση τον τύπο των Kimura και Iida ή Housner).}$$

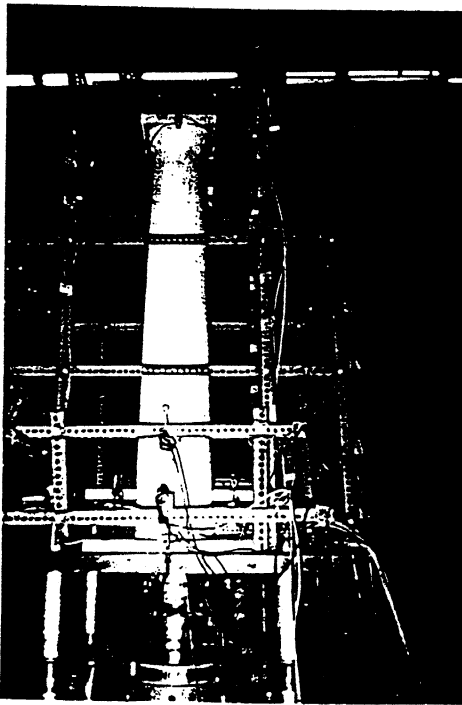
Όπως προκύπτει από τη διεθνή βιβλιογραφία, για την επίλυση του προβλήματος της λικνιστικής συμπεριφοράς των στερεών σωμάτων, οι τιμές της φυσικής λικνιστικής συχνότητας (P) και του συντελεστή αποκατάστασης (e) λαμβάνονται είτε από τις εξισώσεις 3 και 7 αντίστοιχα, είτε με βάση τα αποτελέσματα από εργαστηριακές δοκιμές [5,10,11,12]. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται στη συνέχεια τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης που έγινε για την εκτίμηση των πιο πάνω παραμέτρων (P και e) του εν λόγω φυσικού ομοιώματος και προτείνεται μια νέα μέθοδος η οποία μπορεί να τύχει εφαρμογής σε πραγματικές κατασκευές.

4.3. Ενοργάνωση του πειράματος και πειραματική ακολουθία.

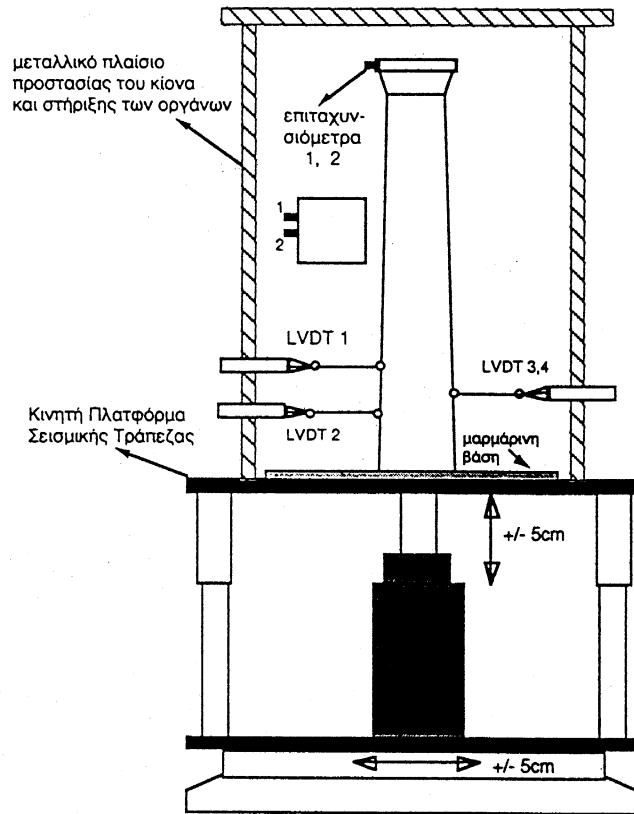
Αρχικά τοποθετήθηκε στην κινητή πλατφόρμα (σεισμική τράπεζα) της Διάταξης Τεχνητών Σεισμών του Α.Π.Θ. μια μαρμάρινη πλάκα η οποία συνδέθηκε ακλόνητα με αυτή και αποτελούσε τη βάση έδρασης του μαρμάρινου κίονα. Ακολούθως τοποθετήθηκε κεντρικά σ' αυτήν ο μαρμάρινος κίονας και ένα μεταλλικό πλαίσιο το οποίο αποσκοπούσε αφενός στην προστασία του κίονα σε περίπτωση ανατροπής του και αφετέρου στην προσαρμογή των ηλεκτρονικών οργάνων μέτρησης της απόκρισης του. Τοποθετήθηκαν τέσσερα μηκυνσιόμετρα (LVDT) κοντά στη βάση του κίονα και δύο επιταχυνσιόμετρα στην κορυφή του (φωτ. 7 και σχήμα 6). Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων, τα ηλεκτρικά σήματα από αυτά τα όργανα καταγράφονταν σε Η/Υ με βήμα δειγματοληψίας $dt=0.002\text{sec}$. Ταυτόχρονα, οι μετρήσεις της απόκρισης μέσω δύο οργάνων καταγράφονταν σε αναλυτή πραγματικού χρόνου (real time analyser).

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγιναν συνολικά έξι πειράματα ελεύθερων λικνιστικών ταλαντώσεων. Στα πειράματα αυτά δίνονταν μια αρχική γωνία λικνισμού του κίονα και στη συνέχεια το φυσικό αυτό ομοίωμα αφήνονταν να λικνιστεί ελεύθερα

αναπτύσσοντας κατ' αυτό τον τρόπο ελεύθερη λικνιστική απόκριση ή όπως συνήθως αναφέρεται "ελεύθερη λικνιστική ταλάντωση". Το πρώτο πείραμα έγινε για μικρή σχετικά αρχική γωνία λικνισμού ώστε να ελεγχθεί η καλή λειτουργία του συστήματος ενοργάνωσης. Ακολούθως, σε κάθε πείραμα αυξάνονταν προοδευτικά η αρχική γωνία λικνισμού ώστε να ληφθούν μετρήσεις από μια σειρά πειραμάτων με διαφορετικές αρχικές γωνίες λικνισμού καλύπτοντας έτσι ένα ευρύ φάσμα.



Φωτ. 7. Ο μαρμάρινος κίονας στη Διάταξη Τεχνητών Σεισμών



Σχήμα 6. Ενοργάνωση του μαρμάρινου κίονα

4.3. Εκτίμηση του συντελεστή αποκατάστασης (e) και της φυσικής λικνιστικής συχνότητας (P) του κίονα από την επεξεργασία των καταγραφών των μηκυνσιομέτρων (LVDT).

Για την εκτίμηση του συντελεστή αποκατάστασης (e) του κίονα, μέσα από την επεξεργασία των καταγραφών των μηκυνσιομέτρων, ακολουθήθηκε η κατωτέρω διαδικασία:

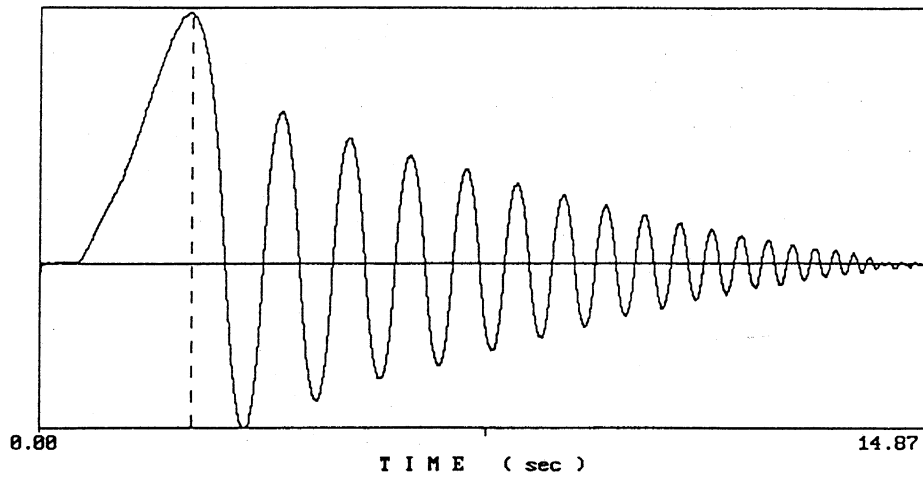
Αρχικά γίνονταν επεξεργασία των δύο καταγραφών από τα μηκυνσιόμετρα LVDT1 και LVDT2 που ήταν τοποθετημένα στην ίδια πλευρά του κίονα και σε διαφορετικό ύψος κοντά στη βάση του. Από την επεξεργασία αυτή υπολογίζονται οι γωνίες λικνισμού που ανέπτυξε ο κίονας (σχήμα 7). Στη συνέχεια γίνονταν απομάκρυνση του πρώτου κύκλου λικνισμού ώστε να αποκλισθεί πιθανή επιρροή του αιτίου που επέβαλε την αρχική γωνία λικνισμού. Στη συνέχεια εκτελέστηκαν μια σειρά από αναλυτικών επιλύσεων του ίδιου προβλήματος με δεδομένα την αρχική γωνία λικνισμού θ_0 και της τιμής της κρίσιμης

γωνίας λικνισμού (θ_{cr}) και της τιμής της φυσικής λικνιστικής συχνότητας (P) που υπολογίστηκαν προηγουμένως. Σε κάθε επίλυση γίνονταν μια σχετικά μικρή μεταβολή στη τιμή του συντελεστή αποκατάστασης (e) ώστε στο τέλος της παραμετρικής αυτής εξέτασης να προκύψει η καλύτερη σύγκλιση στο πεδίο του χρόνου μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων από τις αναλυτικές επιλύσεις και με κριτήριο τον αριθμό των κύκλων λικνισμού και τη μέγιστη γωνία λικνισμού σε κάθε κύκλο (σχήμα 8) και συνεπώς να προκύψει με τον τρόπο αυτό η εκτίμηση της τιμής του συντελεστή αποκατάστασης (e). Αν από τις πιο πάνω επιλύσεις δεν προέκυπτε ικανοποιητική σύγκλιση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων στο πεδίο του χρόνου (παρά τη σύγκλιση στις μέγιστες τιμές της απόκρισης), τότε με σταθερά τη τιμή του συντελεστή αποκατάστασης που προσδιορίστηκε στο προηγούμενο στάδιο, επαναλαμβάνονταν και πάλι η σειρά των αναλυτικών επιλύσεων μεταβάλλοντας αυτή τη φορά τις τιμές της φυσικής λικνιστικής συχνότητας (σχήμα 9). Στον πίνακα 1 δίνονται τα αποτελέσματα από την πειραματική ακολουθία των έξι πειραμάτων ελεύθερων λικνιστικών ταλαντώσεων.

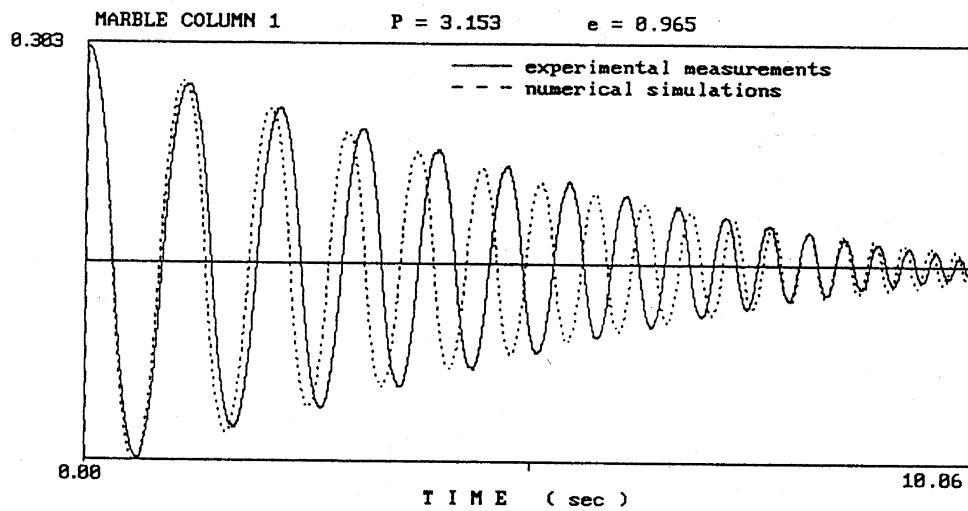
Πίνακας 1. Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων του συντελεστή αποκατάστασης και της φυσικής λικνιστικής συχνότητας από την επεξεργασία των καταγραφών των μηκυνσιομέτρων.

ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΓΩΝΙΑ ΛΙΚΝΙΣΜΟΥ θ_0 (θ_0/θ_{cr})	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ e	ΦΥΣΙΚΗ ΛΙΚΝΙΣΤΙΚΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ P (Hz)
1	0.117	0.964	3.0
2	0.153	0.960	3.0
3	0.166	0.963	3.0
4	0.212	0.962	3.0
5	0.303	0.965	3.0
6	0.305	0.974	3.0
Μέσος όρος	όρος	0.9647	3.0

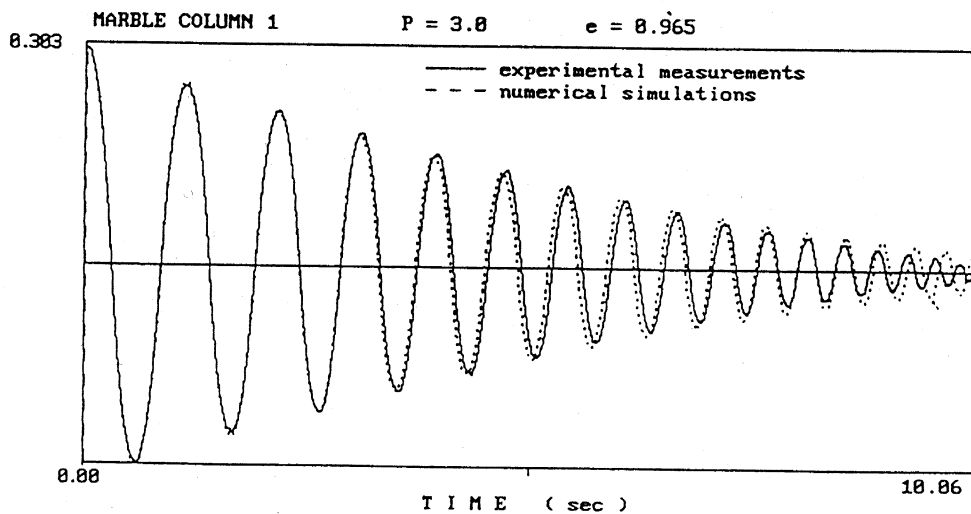
Από τις αναλυτικές εκφράσεις που υπολογίζουν τις τιμές της φυσικής λικνιστικής συχνότητας και του συντελεστή αποκατάστασης (εξ. 3 και εξ.7), έχουν προκύψει για τον μονολιθικό κίονα που εξετάζουμε οι τιμές $P=3.153\text{Hz}$ και $e=0.952$ ενώ οι αντίστοιχες τιμές που βρέθηκαν με βάση τα πειραματικά στοιχεία είναι $P=3.0\text{Hz}$ και $e=0.9647$. Παρατηρούμε λοιπόν ότι υπάρχει απόκλιση μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών τιμών της φυσικής λικνιστικής συχνότητας περίπου 5.0% ενώ για το συντελεστή αποκατάστασης αντίστοιχα 1.0%. Ωστόσο θα πρέπει να επισημανθεί ότι, τόσο με βάση τα αποτελέσματα από την παρούσα έρευνα όσο και τη διεθνή βιβλιογραφία [5, 6, 7, 10, 11], η λικνιστική απόκριση των στερεών σωμάτων επηρεάζεται καθοριστικά ακόμα και από μικρές μεταβολές του συντελεστή αποκατάστασης γι' αυτό και δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην ακριβή προσέγγιση αυτού του συντελεστή.



Σχήμα 7. Γωνίες λικνισμού του μαρμάρινου κίονα καθ' όλη τη χρονική διάρκεια του πειράματος



Σχήμα 8. Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων της ελεύθερης λικνιστικής ταλάντωσης του κίονα ($P=3.153\text{Hz}$, $e=0.965$)

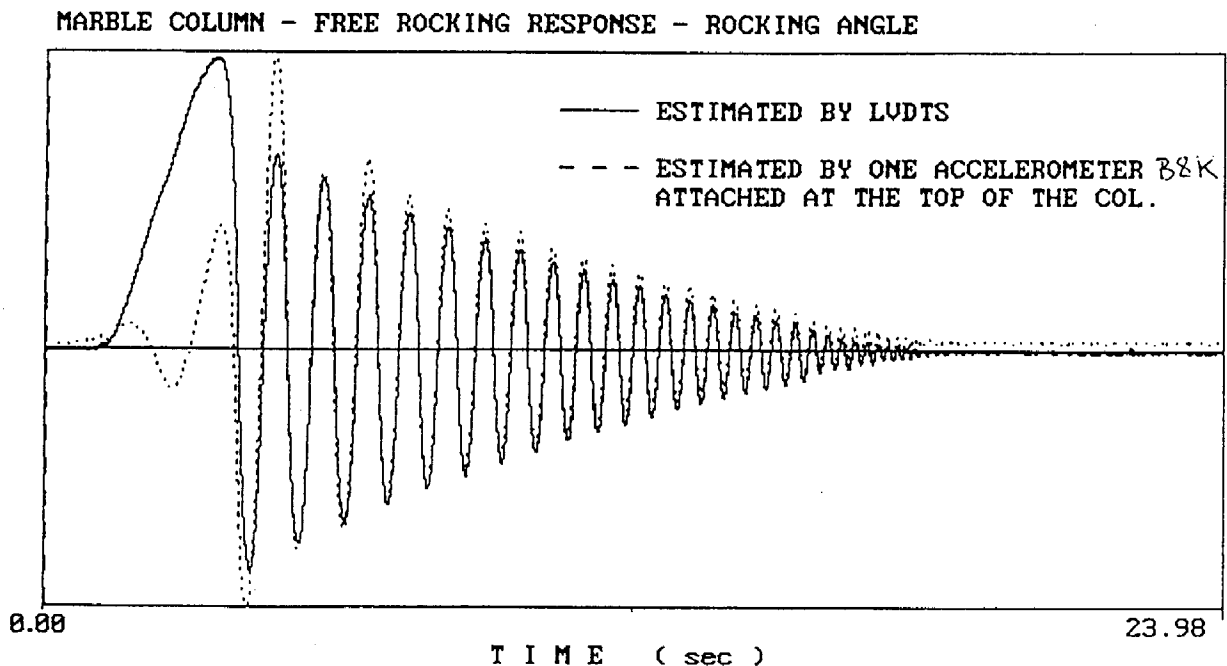


Σχήμα 9. Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων της ελεύθερης λικνιστικής ταλάντωσης του κίονα ($P=3.0\text{Hz}$, $e=0.965$)

4.4. Εκτίμηση του συντελεστή αποκατάστασης (e) και της φυσικής λικνιστικής συχνότητας (P) του κίονα από την επεξεργασία των καταγραφών των επιταχυνσιομέτρων.

Η εκτίμηση των παραμέτρων αυτών μέσα από την κατάλληλη επεξεργασία των καταγραφών των επιταχυνσιομέτρων έχει ιδιαίτερη σημασία δεδομένου ότι, όχι μόνο για τα αρχαία μνημεία της κλασσικής και ελληνιστικής περιόδου [13, 14], αλλά και για άλλου είδους κατασκευές, η ενοργάνωση τους στην πράξη και η παρακολούθηση της σεισμικής τους συμπεριφοράς σε πραγματικές συνθήκες γίνεται συνήθως με τέτοιου είδους όργανα.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε εδώ συνίσταται κυρίως στην κατάλληλη επεξεργασία των καταγραφών της απόκρισης των επιταχύνσεων στην κορυφή του κίονα, μέσα από σχετικές αριθμητικές ολοκληρώσεις, ώστε να προκύπτει τελικά το ιστορικό των γωνιών λικνισμού του μονολιθικού κίονα. Αφού επιτευχθεί αυτό το στάδιο τότε για την εύρεση του συντελεστή αποκατάστασης και της φυσικής λικνιστικής συχνότητας ακολουθούμε την ίδια διαδικασία που αναπτύξαμε προηγουμένως. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, η μεθοδολογία αυτή που αναπτύχθηκε εδώ βαθμονομήθηκε με βάση τα αποτελέσματα από τις καταγραφές των μηκυνσιομέτρων. Λόγω όμως του περιορισμένου χώρου δεν είναι δυνατή η πλήρης παρουσίαση αυτής της μεθοδολογίας. Ωστόσο, στο σχήμα 10 παραθέτουμε τα αποτελέσματα από ένα πείραμα όπου έγινε σύγκριση των γωνιών λικνισμού όπως αυτές προέκυψαν από την επεξεργασία των καταγραφών 2 μηκυνσιομέτρων και ενός επιταχυνσιομέτρου.



Σχήμα 10. Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων των γωνιών λικνισμού σε ελεύθερη λικνιστική ταλάντωση του κίονα όπως πρέκυψαν από την επεξεργασία των καταγραφών της απόκρισης του κίονα από δύο μηκυνσιομέτρα και ένα επιταχυνσιόμετρο

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1. Με βάση τη βιβλιογραφική έρευνα που έγινε στους αρχαιολογικούς χώρους της Μακεδονίας και της Θράκης (Βεργίνα, Δίον, Πέλλα, Θεσσαλονίκη, Αμφίπολη, Φιλίπποι, Θάσος και Σαμοθράκη), προκύπτει χρονική συσχέτιση για τα οικιστικά συγκροτήματα των αρχαιολογικών χώρων του Δίου, της Πέλλας, της Θεσσαλονίκης και των Φιλίππων με καταστροφές από συγκεκριμένες σεισμικές δράσεις. Ο χρονικός αυτός συσχετισμός δεν ήταν δυνατός για τους αρχαιολογικούς χώρους της Βεργίνας, της Αμφίπολης, της Θάσου και της Σαμοθράκης. Ωστόσο η εικόνα που παρουσιάζουν σήμερα μπορεί να συσχετιστεί με ανάλογες εικόνες καταρρεύσεων από σεισμική δράση σε μνημεία με βασικό γνώρισμα την κιονοστοιχία.

5.2. Από την εξέταση που έγινε σε μνημεία των ως άνω αρχαιολογικών χώρων, που έχουν βασικό γνώρισμα την κιονοστοιχία, διαπιστώθηκε η ύπαρξη και των τριών ρυθμών αρχαίων κίωνων, δηλ. του δωρικού, του ιωνικού και του κορινθιακού.

5.3. Οι μεμονωμένοι μονολιθικοί κίονες, που αποτελούν τη βασική μονάδα των κιονοστοιχιών, κάτω από την επίδραση σεισμικών διεγέρσεων αναπτύσσουν κυρίως λικνιστική απόκριση, ανάλογη με αυτή των ελεύθερα εδραζομένων στερεών σωμάτων. Τα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη ενός ελεύθερα εδραζόμενου στερεού σώματος, και κατ' αναλογία ενός μονολιθικού κίονα, που επηρεάζουν σημαντικά την λικνιστική του απόκριση είναι ο συντελεστής αποκατάστασης (e), η φυσική λικνιστική του συχνότητα (P) και η κρίσιμη γωνία λικνισμού (θ_{cr}).

5.4. Τέλος, μέσα από την πειραματική μελέτη ενός φυσικού ομοιώματος δωρικού κίονα, αντιπροσωπευτικού, ως προς τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά, για την περιοχή Μακεδονίας και Θράκης, έγινε δυνατή η ανάπτυξη μεθόδων, τόσο για εργαστηριακή εφαρμογή όσο και για επι τόπου μετρήσεις, για την εκτίμηση του συντελεστή αποκατάστασης και της φυσικής λικνιστικής συχνότητας του μονολιθικού κίονα. Η ανάπτυξη αυτών των μεθόδων βασίζεται στην κατάλληλη επεξεργασία των καταγραφών μηκυσιομέτρων και επιταχυνσιομέτρων που παρακολουθούν την απόκριση του κίονα σε ελεύθερες λικνιστικές ταλαντώσεις. Η ανάπτυξη και βαθμονόμηση αυτών των μεθόδων ολοκληρώθηκε μέσα από την επεξεργασία των καταγραφών της απόκρισης του κίονα σε έξι πειράματα ελεύθερης λικνιστικής ταλάντωσης που έγιναν στη Διάταξη Τεχνητών Σεισμών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί τμήμα ερευνητικής προσπάθειας που έγινε στη Διάταξη Τεχνητών Σεισμών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ. η οποία χρηματοδοτήθηκε από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Πρόληψης και Πρόγνωσης Σεισμών (Ε.Κ.Π.Π.Σ.). Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τόσο το Ε.Κ.Π.Π.Σ. όσο και το τεχνικό προσωπικό του Εργαστηρίου Αντοχής των Υλικών του Α.Π.Θ. για τη συμβολή τους στην επιτυχή ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Μαθήματα Ιστορίας της Αρχιτεκτονικής, Πρώτος Τόμος, Δεύτερη Έκδοση, Χαράλαμπος Μπούρας, Ε.Μ.Π., Αθήνα 1980.
- 2) Αρχιτεκτονική της Απώτερης και Κλασσικής Αρχαιότητας, Μέρος Α, Αργύρη Πετρονώπη, Εκδόσεις Γαρταγάνη, Θεσσαλονίκη, 1991.
- 3) Μακεδονία, Εκδοτική Αθηνών, Αθήνα 1993.
- 4) Οι σεισμοί της Ελλάδος, Β. κ. Κ. Παπαζάχου, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 1989.
- 5) Πειραματική και Αριθμητική Μελέτη της Δυναμικής Συμπεριφοράς Συμπαγών ή Σφονδυλωτών Σωμάτων, Μ. Δημοσθένους, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ., 1994.
- 6) Rocking response of rigid blocks to earthquake, Yim C., Chopra A.K., Penzien J., Report No UCB/EERC-80/02, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, Jan. 1980.
- 7) Rocking of rigid blocks due to harmonic shaking, Spanos P. D. and Koh A. S., J. of Eng. Mechanics, ASCE, 110(11), pp. 1627-1642.
- 8) On rocking of rectangular columns, Kimura H. and Iida K., Journal of the Seismological society of Japan, Vol. 6, No. 3, March 1934, pp. 125-149.
- 9) The behavior of Inverted pendulum structures during earthquake, Housner G. W., Bulletin of the seismological Society of America, Vol. 53, No. 2, Feb. 1963, pp. 403-417.
- 10) Rocking and overturning response of rigid bodies to earthquake motions, Aslam, M. Godden W. G., Scalise D.T., Report to LBL-7539, Lawrence Berkeley laboratory, University of California, Berkeley, November 1978.
- 11) Seismic response of structures free to rock on their foundations, M.J.N. Priestley, R.J. Evison, A.J. Carr, Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 11, No 3, Sept. 1978.
- 12) Steady state rocking response of rigid blocks. Part 2 - Experiment, Wong C. M. and Tso W. K., Earthq. Engin. and Struc. Dynamics, Vol. 18, pp. 107-120
- 13) Δομικά προβλήματα αποκατάστασης του Παρθενώνα, Κ. Ζάμπας, τόμος 2α, σελ 153-180, Επιτροπή Συντηρήσεως Μνημείων Ακροπόλεως, Αθήνα 1989.
- 14) Η εν ξηρώ δόμησης. Συμβολή στον αντισεισμικό έλεγχο των αρχαίων μνημείων, Κ. Παπαντωνόπουλος, Πρακτικά 1ου Ελληνικού συνεδρίου Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, 2ος τόμος, σελ. 171-180, Αθήνα, Μάιος 1992.