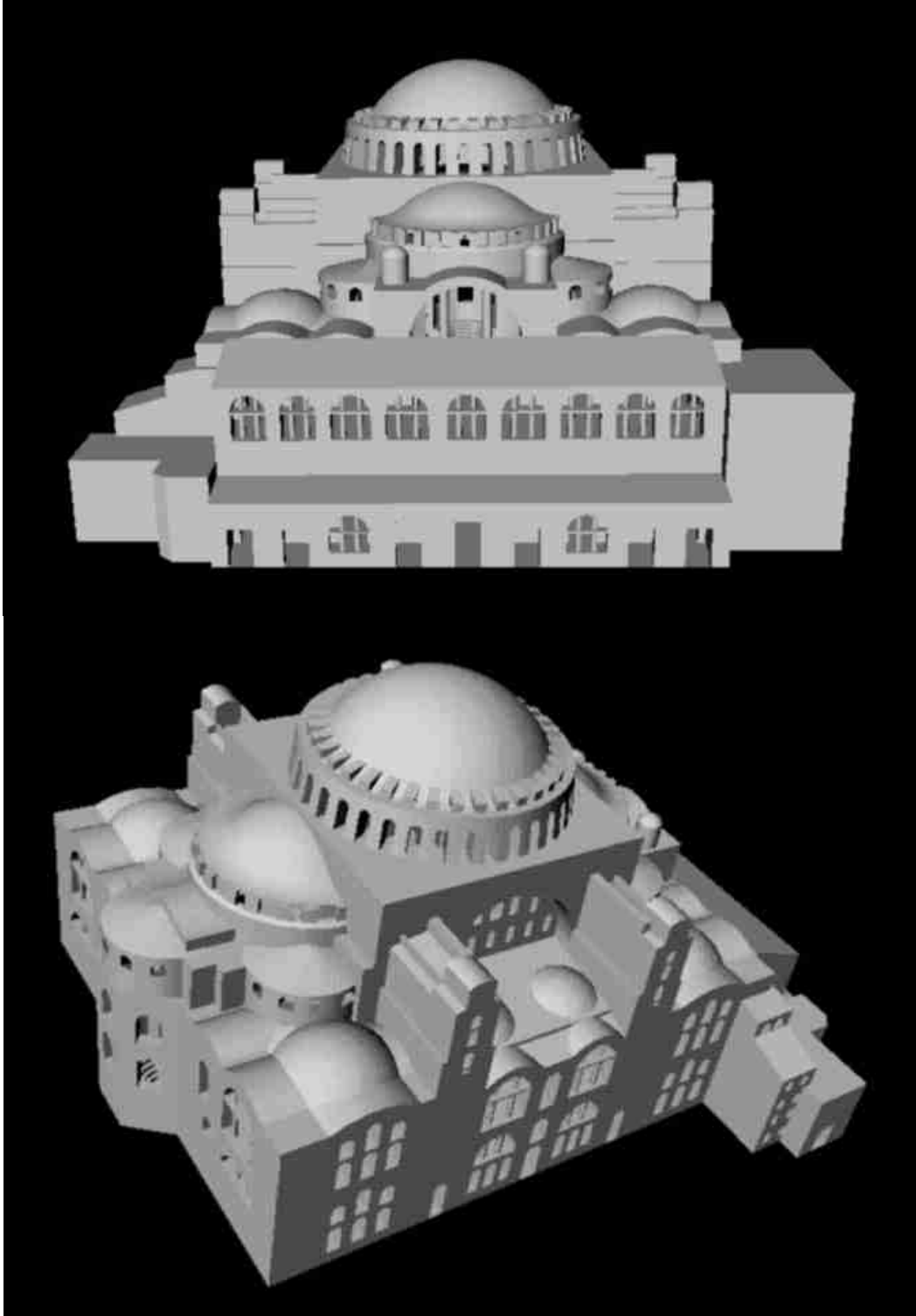


Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πατρών,
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής

Αντισεισμική τεχνολογία στην αρχαία Ελλάδα και το Βυζάντιο



Βασιλειάδης-Τζανετουλάς Σωτήριος,
Εισηγητές: Dr. Ν. Καθρέπτας, κκ. Κ. Χαβέλα
Πάτρα 2010

Πρόλογος

Στην πιο σεισμογενή περιοχή της Ευρώπης, από την εποχή του Μινωικού πολιτισμού μέχρι την πτώση της Κωνσταντινούπολης, κατασκευάστηκαν μεγαλειώδη κτήρια, πολλά από τα οποία άντεξαν τη φθορά του χρόνου και των πολυάριθμων σεισμικών δονήσεων. Νέες μελέτες προσπαθούν να αποκρυπτογραφήσουν τα αντισεισμικά χαρακτηριστικά που κατέστησαν αυτές τις κατασκευές διαχρονικές. Όμως το ερώτημα που γεννάται είναι αν αυτές οι κατασκευές βασίστηκαν στον εμπειρικό σχεδιασμό και την τύχη, ή αν ήταν αποτέλεσμα βαθύτερης γνώσης των Αρχαίων Ελλήνων και Βυζαντινών μηχανικών, χιλιάδες χρόνια πριν από τη δημιουργία της σύγχρονης αντισεισμικής τεχνολογίας.

Περίληψη

Η τελειότητα των αρχαίων ελληνικών και βυζαντινών κατασκευών, οι οποίες αψηφούν τον χρόνο χαρακτηρίζεται από την ικανότητα τους να αντιστέκονται στους πολυάριθμους σεισμούς της ιδιαίτερα σεισμικής περιοχής όπου δομήθηκαν. Πρέπει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με τα σύγχρονα στοιχεία, στην Ελλάδα απελευθερώνεται περίπου η μισή σεισμική ενέργεια της Ευρώπης. Πώς όμως κατόρθωσαν οι Αρχαίοι να προστατεύσουν τα κτίρια τους, τα οποία ήταν κατασκευασμένα από υλικά περιορισμένων μηχανικών προδιαγραφών, από το καταστρεπτικό μένος του Εγκέλαδου; Η αρχαιολογική σκαπάνη και μελέτη έχει αποκαλύψει ότι σε αρκετές αρχαίες κατασκευές ο φέρων οργανισμός είχε ενισχυθεί με δομικά στοιχεία που τις κατέστησαν αντισεισμικές. Συγκεκριμένα, στο Ακρωτήρι της Θήρας πρόσφατες ανασκαφές αποκάλυψαν διώροφα και τριώροφα κτήρια όπου η λιθοδομή είχε ενισχυθεί με ξύλινες κατασκευές πολύπλοκης γεωμετρίας, ενώ στον Παρθενώνα (438 π.χ.) οι μαρμάρινες κολώνες ήταν ενισχυμένες με μεταλλικές δοκούς σχήματος I. Αυτά τα παραδείγματα αντικατοπτρίζουν τη σχεδιαστική αντίληψη και γνώση των αρχαίων, χιλιάδες χρόνια πριν από την ανάπτυξη της σύγχρονης αντισεισμικής τεχνολογίας και την έλευση των σημερινών υλικών υψηλής αντοχής. Η σε βάθος ανάλυση των αρχαίων κατασκευών μπορεί να προσφέρει σχεδιαστικές λύσεις για την κατασκευή των νέων κτηρίων, αλλά και για τη συντήρηση των ιστορικών.

Περιεχόμενα

Αρχαία Ελλάδα:	4
Αρχαία ναυπηγική και οικοδομική:	4
Αρχαίες ξύλινες κατασκευές:	6
Αντισεισμική συμπεριφορά των αρχαίων ναών:	8
Παρθενώνας:	11
Αντισεισμικότητα του ναού:	14
Πειραματική διερεύνηση κίωνων και κιονοστοιχιών αρχαίων ναών:	18
Αντισεισμικός Σχεδιασμός Βυζαντινών κτηρίων:	39
Αγία Σοφία:	41
Αντισεισμικός σχεδιασμός της Αγίας Σοφίας:	43
Δυναμική ανάλυση και σεισμική αντίδραση της Αγίας Σοφίας:	45
Βιβλιογραφία / Αναφορές:	66

Αρχαία Ελλάδα



Ναός του Ποσειδώνα στο Σούνιο

ΑΡΧΑΙΑ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΗ

Τα τεχνολογικά επιτεύγματα στην Αρχαία Ελλάδα είναι αδιαμφισβήτητα. Αρκεί να αναλογιστεί κανείς τον μηχανισμό των Αντικυθήρων. Στον τομέα της ναυπηγικής, οι Αρχαίοι Έλληνες έδιναν ιδιαίτερη σημασία, καθώς μέσω των πλοίων κατόρθωναν να επικοινωνήσουν με τους λαούς της Μεσογείου και της Μαύρης θάλασσας, επεκτείνοντας έτσι τους εμπορικούς και πολιτιστικούς τους δεσμούς. Η σύνδεση της τεχνολογίας της ναυπηγικής και της οικοδομικής είναι καταγεγραμμένη και στα αρχαία κείμενα. Ανατρέχοντας στην Οδύσσεια και στον πολιτισμό των μυθικών Κυκλώπων, οι οποίοι δεν γνώριζαν ναυπηγική, ο Όμηρος σχολιάζει ότι αν οι Κύκλωπες είχαν πλοία, τα σπίτια τους θα ήταν καλοκτισμένα. Αιώνες πριν από τον Τρωικό πόλεμο, τα μινωικά πλοία κυριαρχούσαν στο Αιγαίο καθιστώντας τους Μινωίτες τους κυριότερους θαλασσινούς και εξερευνητές της εποχής τους. Από τις ανασκαφές του Evans στην Κνωσό μέχρι τις πιο πρόσφατες ανασκαφές το 1972 στο Ακρωτήριο της Θήρας, αποκαλύφθηκαν σημαντικά στοιχεία για τα μινωικά και κυκλαδικά πλοία. Οι έρευνες του Evans στην Κνωσό οδήγησαν στην ανακάλυψη λίθων πάνω στους οποίους είχαν χαραχθεί οι φιγούρες πλοίων. Από αυτούς τους λίθους μόνο ελάχιστες πληροφορίες μπόρεσαν να εξαχθούν. Στον αντίποδα, στο Ακρωτήριο της Θήρας, οι ανασκαφές του καθηγητή Μαρινάτου έφεραν στο φως σημαντικά στοιχεία. Ο καλοδιατηρημένος οικισμός του Ακρωτηρίου είχε καλυφθεί από ηφαιστειακή τέφρα, αποτέλεσμα της έκρηξης του ηφαιστείου το 1628 π.χ. (σύμφωνα με

εκτιμήσεις). Το «Δυτικό Σπίτι» του οικισμού περιλαμβάνει μία σειρά πολύχρωμων τοιχογραφιών οι οποίες αναπαριστούν επτά πλοία της περιόδου. Οι περίτεχνες αυτές αναπαραστάσεις οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι Μινωίτες είχαν αναπτύξει σε εξαιρετικό βαθμό τη ναυπηγική τέχνη.



Η ναυπηγική και η οικοδομική μπορούν να χαρακτηριστούν «συγκοινωνούντα δοχεία» όσον αφορά τη μεταφορά τεχνογνωσίας. Ο βασικός λόγος είναι ότι η χρήση του ξύλου ήταν απαραίτητη και στους δύο τομείς. Αν και ο πολιτισμός του Ακρωτηρίου «έσβησε» άδοξα λόγω της έκρηξης του ηφαιστείου, τα καλοδιατηρημένα κτήρια αποκαλύπτουν κάποια από τα μυστικά της κατασκευής τους. Πρόσφατες ανασκαφές οδήγησαν στην ανακάλυψη εξαιρετικά καλοκτισμένων διώροφων και τριώροφων κτηρίων που άντεξαν στην έντονη σεισμική δραστηριότητα της εποχής. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα σπίτια της εποχής ήταν λιθόκτιστα. Οι πέτρες μπορούν να χαρακτηριστούν ως ψαθυρά υλικά, δηλαδή υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται από την περιορισμένη αντοχή τους στην κάμψη και τον εφελκυσμό. Επομένως, η ταυτόχρονη άσκηση δύο ίσων και αντίθετων δυνάμεων σε ένα ψαθυρό υλικό μπορούν να το οδηγήσουν σε θραύση. Για την προστασία της λιθοδομής από τα σεισμικά φαινόμενα χρησιμοποιήθηκαν πολύπλοκες ξύλινες κατασκευές. Σύμφωνα με τους ειδικούς, οι ξύλινες κατασκευές για την αντισεισμική θωράκιση των αρχαίων κτηρίων πηγάζουν από την τεχνογνωσία και τους πειραματισμούς που είχαν υλοποιηθεί στη ναυπηγική. Πραγματοποιώντας ένα χρονικό άλμα περίπου μιας χιλιετίας από τα περίτεχνα μινωικά πλοία, θα διαπιστώσουμε ότι μεταξύ του 650 και του 610 π.χ. ναυπηγείται η τριήρης από τον Κορίνθιο Αμεινοκλή. Οι αθηναϊκές τριήρεις κυριάρχησαν στο Αιγαίο και αποτέλεσαν το σύμβολο της ισχύος της Αρχαίας Αθήνας. Το 480 π.χ. στη ναυμαχία της Σαλαμίνας οι τριήρεις απέδειξαν έμπρακτα την υπεροχή της ελληνικής ναυπηγικής και στρατηγικής, κατατροπώνοντας τον περσικό στόλο. Σύμφωνα με τον Πλούταρχο, οι τριήρεις ήταν σχεδιασμένες για ταχύτητα και ευελιξία. Τα κατασκευαστικά στοιχεία των σκαφών αυτών παρέμειναν διάσπαρτα στον χρόνο μέχρι τις συντονισμένες προσπάθειες ανακατασκευής που οδήγησαν στη ναυπήγηση της σύγχρονης τριήρους «Ολυμπιάς».

Αναφορές για τη σημασία της επιλογής του ξύλου υπάρχουν σε διάφορα αρχαία ελληνικά κείμενα μεταξύ των οποίων του Πλάτωνα, του Αριστοφάνη

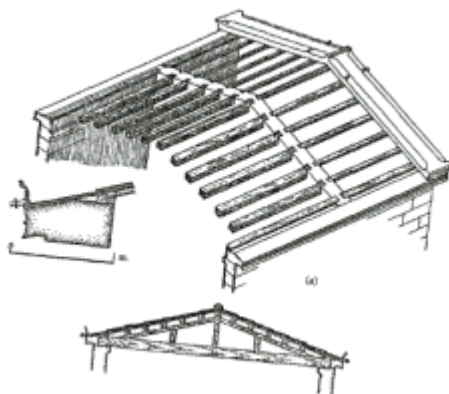
και του Θεοφράστου. Ιδιαίτερα σημαντικές είναι οι πληροφορίες που δίνει ο Θεόφραστος, ο οποίος περιγράφει με ακρίβεια την ξυλεία που χρησιμοποιείτο όχι μόνο στην αρχαία Ελλάδα αλλά και στη Φοινίκη και τη Συρία για την κατασκευή των επιμέρους στοιχείων των πλοίων της εποχής. Περιγράφει παράλληλα την ξυλεία που χρησιμοποιείτο στα σπίτια και στα πλοία, γεγονός που ενισχύει την άποψη ότι η ανάπτυξη της ναυπηγικής συνδέεται άρρηκτα με αυτήν της οικοδομικής.



ΑΡΧΑΙΕΣ ΞΥΛΙΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Το ξύλο είναι ένα από τα αρχαία δομικά υλικά που για αιώνες, σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές, αποτέλεσε το πιο διαδεδομένο υλικό. Η κατεργασία της ξυλείας είναι εύκολη ακόμα και με εργαλεία χεριού και απαραίτητη για την αξιοποίηση της σε μια κατασκευή. Η μικρή πυκνότητα, η αντοχή, η εξαιρετική συμπεριφορά στις σεισμικές δονήσεις και το υψηλό μέτρο ελαστικότητας αποτελούν τα κυριότερα πλεονεκτήματα του ξύλου. Στα μειονεκτήματα του περιλαμβάνονται η ευαισθησία στις συνθήκες του περιβάλλοντος και το γεγονός ότι είναι ιδιαίτερα εύφλεκτο. Τα κείμενα του Θεοφράστου αποδεικνύουν ότι οι Αρχαίοι Έλληνες γνώριζαν τις ιδιότητες και τις διαφορές των διαφόρων ειδών ξύλου. Συγκεκριμένα, ο Θεόφραστος αναφέρει ότι στην κατασκευή μερικών τριηρών είχε χρησιμοποιηθεί ξύλο πεύκου διότι δεν

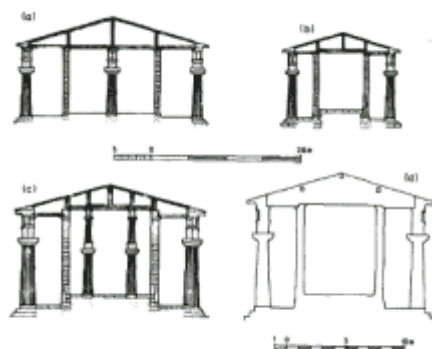
μπορούσαν να βρουν έλατο. Το πεύκο έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από το έλατο, γεγονός που περιορίζει την ταχύτητα του σκάφους. Ο Θεόφραστος γνώριζε ότι στη Συρία και στη Φοινίκη οι τριήρεις ήταν κατασκευασμένες από κέδρο, επειδή το πεύκο ήταν επίσης δυσεύρετο. Η καρίνα των τριηρών κατασκευαζόταν από δρυ ώστε να είναι ανθεκτική καθώς οι τριήρεις σύρονταν συχνά στις ακτές. Παράλληλα συμπληρώνει ότι στα μικρότερα σκάφη χρησιμοποιούσαν οξιά για την καρίνα. Από τα σύγχρονα στοιχεία επιβεβαιώνονται οι καλύτερες μηχανικές ιδιότητες της δρυός και η χαμηλότερη πυκνότητα του ελάτου σε σχέση με το πεύκο. Επίσης, το ναυάγιο της Κυρήνειας στα ανοικτά της ομώνυμης πόλης της κατεχόμενης σήμερα Κύπρου, μαρτυρά ότι τα αρχαία εμπορικά πλοία της εποχής ήταν κατασκευασμένα κυρίως από πεύκο, οξιά και δρυ. Σύμφωνα με τα στοιχεία (μπρούτζινα νομίσματα και ραδιοχρονολόγηση) το εν λόγω ναυάγιο χρονολογείται στο 300 π.χ., δηλαδή την εποχή περίπου του Μεγάλου Αλεξάνδρου, ενώ το φορτίο που μετέφερε αποτελείτο από αμύγδαλα και αμφορείς με κρασί.



Σχέδιο αρχαίας ελληνικής οροφής

Η αχίλλειος πτέρνα των αρχαίων ελληνικών ναών ήταν ίσως οι οροφές. Δεν είναι τυχαίο ότι μόνο μέρη από οροφές έχουν βρεθεί. Πολλές οροφές ήταν κατασκευασμένες από ξύλινο σκελετό και ήταν καλυμμένες από κεραμίδια. Είναι γνωστό ότι τα κεραμίδια άρχισαν να παράγονται μαζικά στην Κόρινθο από τον 7ο π.χ. αιώνα. Οι οροφές στηρίζονταν στους κίονες και συνδέονταν από κίονα σε κίονα με δοκούς. Σύμφωνα με στοιχεία του Πανεπιστημίου Richmond των ΗΠΑ, η μεγαλύτερη δοκός σε αρχαίο ναό στην Ελλάδα ήταν στον Παρθενώνα και είχε μήκος της τάξης των 11 μέτρων. Πρέπει να σημειωθεί ότι στον ναό του Απόλλωνα στην αποικιοκρατούμενη Σικελία υπήρχαν δοκοί με μήκος 18 μέτρων. Προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι στις αποικίες οι μηχανικοί κατόρθωσαν να ξεπεράσουν τις Μητροπόλεις. Ο Trevor Hodge, ο οποίος είχε γράψει βιβλίο με θέμα τις αρχαίες ελληνικές ξύλινες οροφές (πανεπιστημιακές εκδόσεις Cambridge) διατύπωσε την εικασία ότι στις αποικίες τις Σικελίας πρέπει να γνώριζαν τις αρχές του χωροδικτυώματος από το 550 π.χ.! Το συμπέρασμα του αυτό στηρίζεται στη λογική ότι μόνο με χωροδικτυώματα θα μπορούσαν οι αρχαίοι να καλύψουν ανοίγματα 18 μέτρων. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα χωροδικτυώματα χρησιμοποιούνται όχι μόνο στις ξύλινες αλλά και στις μεταλλικές οροφές καθώς είναι ένας

οικονομικός, αποτελεσματικός και αντισεισμικός τρόπος κάλυψης μεγάλων επιφανειών. Για αυτό τον λόγο χωροδικτυώματα μπορεί να αντικρύσει κανείς στις οροφές βιομηχανικών κτηρίων (για παράδειγμα εργοστάσια), σε πισίνες και σε γήπεδα καλαθοσφαίρισης και ποδοσφαίρου. Υπάρχουν όμως και αρκετοί επιστήμονες που διαφωνούν με τις απόψεις του Hodge. Το κυριότερο επιχείρημα είναι ότι η αρχιτεκτονική στη Σικελία ήταν λιγότερο ανεπτυγμένη ενώ είχε τάσεις μίμησης της αρχιτεκτονικής των πόλεων της Αρχαίας Ελλάδας.



Διάταξη των δοκών σε αρχαίους ελληνικούς ναούς

ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΡΧΑΙΩΝ ΝΑΩΝ

Τα τελευταία είκοσι χρόνια, η αντισεισμική συμπεριφορά των αρχαίων κατασκευών έχει προκαλέσει το ενδιαφέρον επιστημόνων στην Ελλάδα και στο εξωτερικό. Διάφορες μελέτες έχουν εκπονηθεί κυρίως για τους κλασικούς αρχαίους μαρμάρινους ναούς της Ελλάδας και της Νότιας Ιταλίας. Οι πειραματικές και θεωρητικές μελέτες που έχουν δημοσιευθεί πρόσφατα αφορούν κυρίως τη συμπεριφορά των κίονων καθώς και των επιστυλίων τους και συμπεραίνουν ότι η δυναμική τους απόκριση διαφέρει σημαντικά από τις σύγχρονες κατασκευές. Πρέπει να σημειωθεί ότι στις αρχαίες κατασκευές, τα διάφορα μαρμάρινα ή πέτρινα μέρη είναι τοποθετημένα προσεκτικά το ένα πάνω στο άλλο δίχως τη χρήση κάποιου συνδετικού υλικού. Κατά την κλασική περίοδο στην Αρχαία Ελλάδα, τα διάφορα κομμάτια του κίονα ήταν συνδεδεμένα μεταξύ τους με ένα σύστημα το οποίο περιελάμβανε ένα μικρό ξύλινο πάσσαλο και δύο υποδοχές. Η διάμετρος των υποδοχών διέφερε σημαντικά από ναό σε ναό ανάλογα με το μέγεθος των επιμέρους κίονων. Αυτό το στοιχείο σκιαγραφεί τον προσεκτικό σχεδιασμό των αρχαίων μηχανικών και αρχιτεκτόνων. Αξίζει να αναφερθεί ότι στον ναό του Ποσειδώνα στο Σούνιο η διάμετρος των υποδοχών ήταν 2,7 ενώ στο Ερεχθείο της Ακρόπολης των Αθηνών 4,7 εκατοστά του μέτρου. Κατά τη διάρκεια μιας

σημαντικής σεισμικής δόνησης, τα επιμέρους στοιχεία του κίονα (σπονδυλοι) δονούνται, αλλά και μετακινούνται το ένα σε σχέση με το άλλο. Οι μετακινήσεις αυτές είναι της τάξης των μερικών χιλιοστών του μέτρου. Σύμφωνα με πρόσφατη μελέτη του Δημήτριου Κωνσταντινίδη και του Νίκου Μακρή, από το Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας στο Berkeley των ΗΠΑ και το Πανεπιστήμιο της Πάτρας, αντίστοιχα, οι μετακινήσεις των επιμέρους σπονδύλων του κίονα είναι ιδιαίτερα σημαντικές όσον αφορά την αντισεισμική του συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα, οι δύο επιστήμονες απέδειξαν ότι η πιο αποτελεσματική συμπεριφορά αυτών των κίωνων οφείλεται στην ελευθερία μετακίνησης στη διεπιφάνεια ανάμεσα στους δύο σπονδύλους σε σχέση με τους μονολιθικούς κίονες ίδιων διαστάσεων. Κατά συνέπεια, οι σπονδυλωτοί κίονες αντέχουν σε σημαντικές σεισμικές δονήσεις χωρίς να καταρρέουν. Επιπλέον, οι ίδιοι επιστήμονες, με την εφαρμογή προσομοιώσεων, συμπέραναν ότι η χρήση του αρχαίου συστήματος του ξύλινου πασσάλου είναι καλύτερη από τη χρήση σύγχρονων μεταλλικών στοιχείων. Ο λόγος είναι ότι τα μεταλλικά μέρη καθιστούν άκαμπτα τα διάφορα μέρη του κίονα με αποτέλεσμα να υπάρχουν επιπτώσεις στην αντισεισμική του συμπεριφορά.

Αξιοσημείωτη είναι και η πειραματική προσέγγιση του Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Οι ερευνητές του Πολυτεχνείου κατασκεύασαν ένα μοντέλο κίονα του Παρθενώνα σε κλίμακα ένα προς τρία. Ο εν λόγω κίονας κατασκευάστηκε από πεντελικό μάρμαρο όπως και οι πραγματικοί κίονες του Παρθενώνα. Υπενθυμίζεται ότι κατά τη διάρκεια ενός σεισμού η συμπεριφορά των κίωνων είναι μη γραμμική και εξαιρετικά πολύπλοκη. Συγκεκριμένα, μικρές μεταβολές στη δόνηση ή στις γεωμετρικές παραμέτρους του κίονα μεταβάλλουν σημαντικά τη συμπεριφορά του συστήματος. Λόγω αυτής της πολυπλοκότητας, η μαθηματική αντιμετώπιση του προβλήματος της ανάλυσης της αντισεισμικής συμπεριφοράς των αρχαίων ναών είναι σχεδόν αδύνατη. Αυτός είναι και ο κυριότερος λόγος για τον οποίο οι επιστήμονες καταφεύγουν σε αριθμητικές προσεγγίσεις και μεθόδους για την απλοποίηση των προβλημάτων και την εξεύρεση λύσεων. Στον αντίποδα, σύμφωνα με τους ερευνητές του ΕΜΠ, η πειραματική προσέγγιση μπορεί να προσφέρει σημαντικές πληροφορίες για την κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός κίονα. Για την προσομοίωση του σεισμού, ο κίονας υπό κλίμακα τοποθετήθηκε πάνω στη δονούμενη τράπεζα του Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Η δονούμενη τράπεζα κινείται με έξι βαθμούς ελευθερίας, ενώ οι επιβαλλόμενες επιταχύνσεις είναι διπλάσιες της επιτάχυνσης της βαρύτητας στην οριζόντια διεύθυνση και τετραπλάσιες στην κατακόρυφη διεύθυνση. Για τη μέτρηση των επιταχύνσεων κατά τη δόνηση, τοποθετήθηκαν 14 αισθητήρες σε διάφορα σημεία του κίονα, ενώ δύο κάμερες κατέγραφαν τη συμπεριφορά του.

Η δονούμενη τράπεζα μπορεί να προγραμματιστεί κατάλληλα για την αναπαραγωγή διαφόρων σεισμικών δονήσεων που έλαβαν χώρα στο παρελθόν. Στη συγκεκριμένη μελέτη, οι επιστήμονες του ΕΜΠ προσομοίωσαν μεταξύ άλλων τον σεισμό της Κεφαλληνίας (17 Ιανουαρίου 1983), της Καλαμάτας (13 Σεπτεμβρίου 1986) και της Έδεσσας (21 Δεκεμβρίου του

1990). Οι σεισμοί αυτοί, αν και διαφορετικοί, είχαν ως κοινά σημεία το μικρό εστιακό τους βάθος καθώς και τις σημαντικές καταστροφές που προκάλεσαν. Το συμπέρασμα της μελέτης είναι ότι ο κίονας έχει τη δυνατότητα να αντέξει σημαντικές παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια των δονήσεων. Αναγνωρίστηκε επίσης ότι δεν είναι δυνατή η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για τη συμπεριφορά των κίωνων από μοντέλα υπό κλίμακα. Παράλληλα επιβεβαιώθηκε η εξάρτηση των αποτελεσμάτων από μικρές ατέλειες του μοντέλου καθώς και η μη επαναληψιμότητα των πειραμάτων.

Η αντισεισμική συμπεριφορά του Πρόναου του Παρθενώνα μελετήθηκε με τη χρήση υπολογιστικών μοντέλων από ερευνητές του ΕΜΠ και του Εθνικού Εργαστηρίου Μηχανικής στη Λισαβόνα της Πορτογαλίας. Η εν λόγω μελέτη επικεντρώθηκε κυρίως στην εύρεση βέλτιστης λύσης για τη μερική ανασύλωση του Πρόναου ο οποίος είχε καταρρεύσει μετά τη μεγάλη δόνηση του 1867. Η έρευνα αυτή επιβεβαιώνει από τη σκοπιά της προσομοίωσης τη μη γραμμικότητα της συμπεριφοράς των αρχαίων κίωνων κατά τη διάρκεια ενός σεισμού και επισημαίνει τις δυσκολίες για την ακριβή αντιμετώπιση του προβλήματος. Ένα από τα σημαντικά συμπεράσματα της συγκεκριμένης ανάλυσης είναι ότι τα αρχαία μνημεία ήταν κατάλληλα κατασκευασμένα για τους συνήθεις σεισμούς. Παράλληλα όμως επισημαίνεται ότι στη σημερινή τους μορφή είναι πιο ευαίσθητα λόγω των ζημιών που έχουν υποστεί με την πάροδο των αιώνων. Πιο συγκεκριμένα, οι συνήθεις φθορές όπως η αποκόλληση κομματιών των κίωνων, η μετακίνηση τμημάτων του ναού και η καθίζηση των θεμελίων αποτελούν συνήθεις παράγοντες που επηρεάζουν καταλυτικά την αντισεισμική συμπεριφορά των αρχαίων μνημείων. Η αποκατάσταση αυτών των ζημιών στο μέτρο του δυνατού είναι απαραίτητη ώστε να διατηρηθούν τα αρχαία μνημεία σε καλή κατάσταση για τις επόμενες γενιές.

ΠΑΡΘΕΝΩΝΑΣ



Ο Παρθενώνας αποτελεί το λαμπρότερο μνημείο της Αθηναϊκής πολιτείας και τον κολοφώνα του δωρικού ρυθμού. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 448/7 π.χ. και τα εγκαίνια έγιναν το 438 π.χ. στα Μεγάλα Παναθήναια, ενώ ο γλυπτός διάκοσμος περατώθηκε το 433/2 π.χ. Σύμφωνα με τις πηγές, οι αρχιτέκτονες που εργάστηκαν ήταν ο Ικτίνος, ο Καλλικράτης και πιθανόν ο Φειδίας, που είχε και την ευθύνη του γλυπτού διακόσμου. Είναι ένας από τους λίγους ολομάρμαρους ελληνικούς ναούς και ο μόνος δωρικός με ανάγλυφες όλες του τις μετόπες. Πολλά τμήματα του γλυπτού διακόσμου, του επιστυλίου και των φατνωμάτων της οροφής έφεραν γραπτό διάκοσμο με κόκκινο, μπλε και χρυσό χρώμα. Χρησιμοποιήθηκε πεντελικό μάρμαρο, εκτός από το στυλοβάτη που κατασκευάστηκε από ασβεστόλιθο.

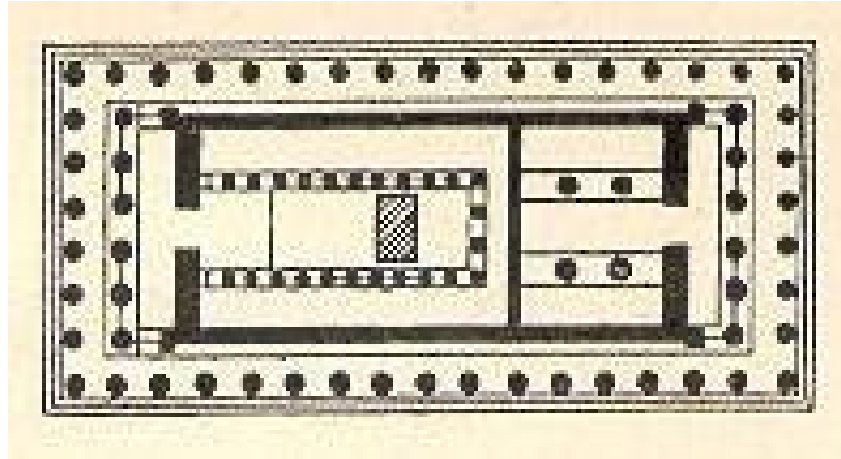
Το πτερό είχε 8 κίονες κατά πλάτος και 17 κατά μήκος. Η τοποθέτηση των κίωνων είναι ασυνήθιστα πυκνή με αναλογία διαμέτρου κίονα και μετακιονίου διαστήματος 1:2,25 (πρβ. την αναλογία 1: 2,32 στο ναό του Δία στην Ολυμπία και 1:2,65 στο ναό της Αφαίας στην Αίγινα). Στις στενές πλευρές υπήρχε και δεύτερη σειρά 6 κίωνων που δημιουργούσε την ψευδαίσθηση δίπτερου ναού. Μια άλλη ιδιομορφία ήταν η ύπαρξη ζωφόρου που περιέτρεχε το σηκό σε όλο του το μήκος και αποτελεί ίσως την πιο φανερή από τις ιωνικές επιδράσεις. Οι μετόπες της ανατολικής πλευράς απεικονίζουν τη Γιγαντομαχία. Στην δυτική παριστάνεται Αμαζονομαχία, στη νότια Κενταυρομαχία και στη βόρεια σκηνές από τον Τρωικό πόλεμο. Η ζωφόρος απεικονίζει την πομπή των Παναθηναίων, την πιο μεγάλη θρησκευτική γιορτή των αρχαίων Αθηνών, και

περιλαμβάνει μορφές θεών, ζώων και περίπου 360 μορφές ανθρώπων. Τα δύο αετώματα του ναού απεικονίζουν σκηνές από την μυθολογία: πάνω από την κύρια είσοδο του ναού, στα ανατολικά, την γέννηση της Αθηνάς και στην δυτική πλευρά την διαμάχη Αθηνάς και Ποσειδώνα για την κατοχή της αττικής γης. Αν και ο ναός αυτός διέφερε από άλλους δωρικούς ναούς όσον αφορά στην έκταση της διακόσμησης του, παρόλα αυτά η διακόσμηση αυτή δεν επηρέαζε την ενότητα του συνόλου, έτσι ώστε να δημιουργείται μια ισορροπημένη, ιδανική αρχιτεκτονική μορφή.

Στο εσωτερικό υπήρχε δίτονη (διώροφη) δωρική κιονοστοιχία σχήματος «Π», που δημιουργούσε ένα υπερώο, από το οποίο οι επισκέπτες μπορούσαν να θαυμάσουν από διάφορα σημεία το χρυσελεφάντινο άγαλμα της Αθηνάς. Στον οπισθόδομο φυλασσόταν ο θησαυρός, δηλαδή τα πολύτιμα αφιερώματα της Αθηνάς. Η οροφή του στηριζόταν σε τέσσερις ιωνικούς κίονες. Η στέγη ολόκληρου του ναού, μαζί με τους στρωτήρες, τους καλυπτήρες και τα ακροκέραμα, ήταν μαρμάρινη, αλλά στηριζόταν σε μεγάλες ξύλινες δοκούς.

Ο Παρθενώνας παρουσιάζει τέλεια αρμονικές αναλογίες μέχρι την παραμικρή του λεπτομέρεια· μολονότι ο ναός αυτός ήταν μεγαλύτερος από τους άλλους δωρικούς ναούς της εποχής του (με 8x17 κίονες, αντί για 6x13 που συνηθίζονταν τον 5ο αι. π.χ.), οι αναλογίες του ήταν τόσο αρμονικές, ώστε να του προσδίδουν εκπληκτική ομοιογένεια μορφής, μνημειώδη μεγαλοπρέπεια και πρωτοφανή χάρη σε σύγκριση με τους πιο βαρείς δωρικούς προκατόχους του.

Στη φήμη του ναού συντέιναν και οι ασύλληπτες εκλεπτύνσεις, οι αδιόρατες αποκλίσεις από την κατακόρυφο και την οριζόντια κατεύθυνση και οι αρμονικές αναλογίες. Ο στυλοβάτης παρουσίαζε ελαφρά τυμπανοειδή καμπύλωση, οι ραδινοί κίονες απέκλιναν από την κατακόρυφο προς το κέντρο του ναού και η συνολική σχεδίαση ήταν πυραμιδοειδής. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχανόταν μία κίνηση προς τα μέσα και προς τα πάνω που μετέτρεπε τον Παρθενώνα σε ένα παλλόμενο οργανικό σύνολο. Η ένταση των κίωνων (ένα ανεπαίσθητο «φούσκωμα» στο μεσαίο τμήμα τους) απέδιδε οπτικά το γεγονός ότι οι κίονες σήκωναν μεγάλο βάρος. Οι αναρίθμητες αυτές λεπτότητες σχεδιάστηκαν με μεγαλοφυή τρόπο και εκτελέστηκαν με απαράμιλλη μαθηματική ακρίβεια.



Στην κατασκευή του συναντάμε πολλά στοιχεία τελειότητας, που φανερώνουν ότι οι δύο αρχιτέκτονες -και ειδικά ο Ικτίνος- κατείχαν πολύ ειδικές γνώσεις, σίγουρο πάντως είναι ότι οι ναοί που κατασκεύασαν είναι φτιαγμένοι σαν μια μικροκοσμική εικόνα του τέλειου σύμπαντος

σε κάθε μέρος του ναού επικρατούσε ένα σύστημα αναλογίας σύμφωνα με τον κανόνα του Πολυγνώτου και όλες οι διαστάσεις είχαν μια δεδομένη σχέση με τη διάμετρο του κίονα. Κάθε κίονας είχε ελάχιστα μεγαλύτερη διάμετρο από τη βάση μέχρι τη μέση, λέπταινε προς την κορυφή και έκλινε προς το κέντρο της κιονοστοιχίας στην οποία ανήκε. Έτσι οι κίονες του Παρθενώνα δεν είναι κάθετοι, αλλά αν προεκταθούν νοητά προς τα επάνω, συναντιούνται στα 1852 μέτρα, σχηματίζοντας μια νοητή πυραμίδα, η κορυφή της οποίας βρίσκεται ακριβώς πάνω από το σημείο που ήταν τοποθετημένο το κεφάλι του αγάλματος της Αθηνάς. Κατά περίεργο επίσης τρόπο, ο όγκος της πυραμίδας αυτής είναι ο μισός της μεγάλης πυραμίδας της Αιγύπτου

στο σχέδιο του Παρθενώνα δεν υπάρχει καμία ευθεία γραμμή. Παντού συναντάμε απαλές καμπύλες. Επίσης στην πρόσθια (μπροστινή) όψη ισχύει: πλάτος = φ χ ύψος (όπου φ είναι ο αριθμός της χρυσής τομής), ενώ στις αναλογίες του ναού συναντάμε και τη σχέση $a/2a+1$. Το οπτικό αποτέλεσμα είναι εκτός από αρμονικό πολλές φορές και απροσδόκητο, μιας και ο Παρθενώνας καταφέρνει να δείχνει εντυπωσιακά μεγαλύτερος από το πραγματικό του μέγεθος, χωρίς όμως να βαραίνει το χώρο.

Αξιοσημείωτο είναι ότι υπάρχουν πλήθος ενδείξεων μη συμπαγούς θεμελίωσης του ναού σε βάθος 11 μέτρων με σημαντικό ίσως υπόγειο τμήμα ή και θάλαμο.

Επίσης, ο Παρθενώνας είναι χτισμένος με έναν ιδιαίτερο, αντισεισμικό τρόπο, με τα τμήματά του να είναι ενωμένα με λιωμένο μολύβι στις κατάλληλες διαμορφωμένες ενώσεις των μαρμάρων του.

Όσον αφορά την τοποθεσία που είναι χτισμένος ο ναός σε σχέση με κάποια άλλα κτίσματα της αρχαίας Αθήνας, το κέντρο του Παρθενώνα (η τομή των διαγωνίων του) απέχει εξίσου από το κέντρο του Ηφαιστείου, από το κέντρο του βήματος των ρητόρων της Πνύκας, από το κέντρο της βάσεως του μνημείου του Φιλοπάππου και από το κέντρο του σηκού του Ναού του Ολυμπίου Διός. Όλα τα παραπάνω με μέγιστη προσέγγιση.

Επίσης, δεν μπορούμε να παραβλέψουμε ότι η κατασκευή αλλά και η θέση που είναι χτισμένος ο Παρθενώνας φανερώνουν μια ιδιαίτερη γεωδαιτική

αρμονία (γεωδαιτική είναι η σχέση των μέτρων του ναού με τα μέτρα της γης).

Όσον αφορά τη γεωδαιτική κατασκευή του ναού, η διάσταση του κοντού στυλοβάτη του Παρθενώνα είναι ίση με ένα δευτερόλεπτο (1'') ενός τόξου γεωγραφικού πλάτους της Γης. Αυτό δηλώνει ότι τα μέτρα του Παρθενώνα δεν είναι τυχαία, αλλά οι κατασκευαστές του γνώριζαν τις διαστάσεις τη Γης και φυσικά το σφαιρικό της σχήμα

Αντισεισμικότητα του ναού

Επί αιώνες ο Παρθενώνας αντιστέκεται στα ρίχτερ που κλονίζουν την Ελλάδα. Οι κίονές του αντέχουν στις δονήσεις. Και τροφοδοτούν με δεκάδες ερωτήματα τη διεθνή επιστημονική κοινότητα η οποία αναζητά το μυστικό της κατασκευής και της αντισεισμικής συμπεριφοράς του.

Μεγάλες ζημιές, σύμφωνα με τον κ. Κορρέ, υπέστη ο Παρθενώνας στο σεισμό των 6,7 ρίχτερ του Φεβρουαρίου του 1981 που είχε ως επίκεντρο τα νησιά Αλκυονίδες του Κορινθιακού Κόλπου. «Μετά το σεισμό εκείνο, οι παραμορφώσεις στο άνω μέρος του ναού ήταν τεράστιες. Κίονες μικρομετακινήθηκαν, δοκοί μετακινήθηκαν μέχρι και 4 εκατοστά, έσπασαν σπόνδυλοι. Αντίθετα οι ζημιές που προκάλεσε ο σεισμός της Πάρνηθας το 1999 δεν ήταν σοβαρές γιατί εκείνη τη χρονιά είχαν προχωρήσει τα έργα αναστήλωσης του Παρθενώνα, ειδικά σε ευαίσθητα σημεία του ναού που κινδύνευαν.

Οι αρχαίες κατασκευές αποδείχτηκε ότι έχουν μεγάλη σεισμική αντοχή. Οι αρχαίοι Έλληνες δεν είχαν αντισεισμικούς κανονισμούς. Ήξεραν όμως τις μηχανικές ιδιότητες, την αντοχή των υλικών που χρησιμοποιούσαν. Τα δομικά στοιχεία του ναού έχουν τέλειες εδράσεις μεταξύ τους, δεν είχαν κονιάματα. Η δομή των μνημείων βασίζεται στην τέλεια επαφή των αρμών.

Ο Παρθενώνας σε ένα μικρό σεισμό δεν κινείται καθόλου, σε σχέση με τα σημερινά κτίρια που κουνιούνται ακόμα και με 3 ή 4 ρίχτερ.

Η ουσιώδης διαφορά από τις συνήθεις οικοδομές με φέροντα οργανισμό από σκελετό και πλαίσιο μπετόν αρμέ ή σιδηρών στοιχείων είναι ότι τα τελευταία παραμορφώνονται την ώρα του σεισμού κατά ελαστικό τρόπο. Στήλες και δοκοί κάμπτονται και ταλαντώνονται, όπως τα δέντρα. Ενώ, στην περίπτωση των λίθινων κίωνων και επιστηλίων, όπως στον Παρθενώνα, οι επιμέρους λίθοι πρακτικώς δεν παραμορφώνονται, απλώς μετακινούνται, ολισθαίνουν. Εάν η επιτάχυνση είναι μεγαλύτερη, ανασηκώνονται στη μία ή την άλλη πλευρά τους και όσο περισσότερο διαρκεί η εδαφική κίνηση τόσο περισσότερο και αυτά “λικνίζονται”, με μικρές αναπηδήσεις πότε στη μία άκρη και πότε στην άλλη. Τούτο έχει ως αποτέλεσμα να θραύονται κομματάκια κατά μήκος των ακμών, εκεί όπου άλλα εδράζονται σε εκείνα.

Αποτέλεσμα της έρευνας για τη σεισμική συμπεριφορά των κίωνων σε αρχαίους ναούς, που διενήργησαν οι επιστήμονες του Αριστοτέλειου Πανεπιστήμιου Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ), οι οποίοι εφάρμοσαν για πρώτη φορά στη χώρα και τη μέθοδο του μικρού θορύβου.

Όλα έγιναν κατά τη διάρκεια ενός ερευνητικού προγράμματος που πραγματοποιήθηκε από τον Σεπτέμβριο του 2005 έως και τον Δεκέμβριο του 2007.

Επιστημονικός υπεύθυνος της όλης προσπάθειας ήταν ο καθηγητής του Εργαστηρίου Εδαφομηχανικής, Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής και Θεμελιώσεων του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του ΑΠΘ, Κυριαζής Πιπιλάκης.

Τότε δημιουργήθηκε μία ηλεκτρονική βάση δεδομένων με κατηγοριοποίηση των εδαφικών, των γεωμετρικών και των μηχανικών χαρακτηριστικών εννέα Ελληνικών ναών της κλασσικής αρχαιότητας.

Με σύγχρονα λογισμικά εργαλεία ηλεκτρονικού υπολογιστή δημιουργήθηκαν και μελετήθηκαν διάφορες προσομοιώσεις των κίονων και των συστημάτων πόλων-εμπολίων της Ελληνιστικής Στοάς της Ακρόπολης Λίνδου. Οι κίονες και οι πόλοι υποβλήθηκαν σε μία σειρά από σεισμικές διεγέρσεις .

Από τα αποτελέσματα της έρευνας αναδείχθηκαν ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά του τρόπου ταλάντωσης των κίονων για διαφορετικά συστήματα πόλων-εμπολίων (αποτελούμενα από ξύλο ή τιτάνιο.).

Με αυτό τον τρόπο εκτιμήθηκε η θετική – αρνητική συνεισφορά του καθενός συστήματος στην σεισμική απόκριση του κίονα.

Τα αποτελέσματα κατέδειξαν – πλην κάποιων εξαιρέσεων- την πολύ καλή συμπεριφορά των δομικών συστημάτων των κίονων, καθώς αυτοί παρουσίασαν εξαιρετική ευστάθεια ακόμη και για πολύ μεγάλες τιμές της εδαφικής επιτάχυνσης.

«Πρόκειται μία οικονομική και εύκολα εφαρμόσιμη μέθοδος, που εφαρμόζεται για την εκτίμηση των δυναμικών χαρακτηριστικών απόκρισης τους. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως στη γεωτεχνική σεισμική μηχανική και κατά τη διάρκεια των τελευταίων χρόνων επεκτάθηκε η εφαρμογή αυτής και στις αναδομές. Η μεθοδολογία ως καινοτόμα χρήζει περαιτέρω έρευνας.

Τα πρώτα αποτελέσματα όμως, είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά για την εύρεση του «εν δυνάμει» τρόπου απόκρισης των κίονων και συνεπώς της μεθοδολογίας προσέγγισης των αναστηλωτικών επεμβάσεων», ανακοίνωσαν οι επιστήμονες.

Χαρακτηριστικό είναι ότι οι αρχαίοι κίονες ήταν στατικά συστήματα μεταφοράς των φορτίων αποτελούμενα από ένα ή περισσότερα τεμάχια λίθων (σφόνδυλοι), τα οποία εδράζονταν εν επαφή χωρίς να χρησιμοποιείται κάποιο συνδετικό υλικό.

Οι σφόνδυλοι συνδέονταν μεταξύ τους μέσω των κατάλληλων στοιχείων σύνδεσης που ονομάζεται σύστημα πόλου-εμπολίου. Το σύστημα αυτό

χρησιμοποιούνταν στην αρχαιότητα για την επίτευξη τέλειας έδρασης μίας μεταξύ των επιφανειών των σφονδύλων.

Άλλωστε, είναι γνωστή η εμμονή των αρχαίων Ελλήνων για την εξάλειψη των αρμών της ασυνέχειας.

«Η σημασία του συγκεκριμένου συστήματος στη σεισμική μηχανική είναι, εξαιρετική, αφού αποτελεί ένα παράγοντα «έξυπνης» απόσβεσης της σεισμικής ενέργειας μέσω της παραμόρφωσής του κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης των κίωνων.

Η επιλογή του κατάλληλου υλικού και διατομής του πύλου αποτελεί καίριο ζήτημα κατά τις σύγχρονες αναστηλωτικές επεμβάσεις. Οι κίονες ως στατικά συστήματα που υποβάλλονται σε δυναμικές διεγέρσεις φαίνεται ότι παρουσιάζουν «χαοτικό» τρόπο συμπεριφοράς και αποτελούν αντικείμενο επιστημονικής έρευνας των τελευταίων δεκαπέντε ετών», εξήγησαν οι επιστήμονες.

Χαρακτήρισαν, μάλιστα, «καίριας σημασίας» την της σεισμικής συμπεριφοράς αυτών των συστημάτων σε ότι αφορά στη βάθος γνώση του τρόπου απόσβεσης της σεισμικής ενέργειας, την αποτίμηση της τρωτότητας τους και του βαθμού ασφάλειας των αναστηλωτικών επεμβάσεων.

Στην επιστημονική ομάδα που πραγματοποίησε την έρευνα συμμετείχαν τα εργαστήρια Εδαφομηχανικής- Γεωτεχνικής- Σεισμικής Μηχανικής και Αντοχής Υλικών του Α.Π.Θ., ο Τομέας Αρχαιολογίας του τμήματος Ιστορίας και Αρχαιολογίας του ίδιου πανεπιστημίου, καθώς και η Επιτροπή Στερεώσεως – Αναστυλώσεως των Μνημείων της Ακρόπολης Λίνδου.

Οι κυριότεροι σεισμοί της Αθήνας από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα:

- * -427 π.χ.: Ισχυρός σεισμός έγινε αισθητός σε Αθήνα, Εύβοια, Βοιωτία και μερικώς στον Ορχομενό. Κατά τις αναφορές του Θουκυδίδη, η πιθανή εστία ήταν η Αταλάντη.
- * -426 π.χ.: Το καλοκαίρι του έτους αυτού, από ισχυρό σεισμό στην ευρεία περιοχή της Αταλάντης, μετατοπίστηκε η βορειοανατολική γωνία του Παρθενώνα.
- * -3-9-1705: Σεισμική δόνηση από την περιοχή ανάμεσα στον Ωρωπό και στις Πλαταιές.
 - * -13-6-1785: Σεισμική δόνηση με επίκεντρο τον Ωρωπό, 35 χιλιόμετρα βόρεια της Αθήνας.
 - * -17-9-1805 ή 17-11-1805: Σεισμική δόνηση έγινε αισθητή τις νυχτερινές ώρες στην Αθήνα.
 - * -8-8-1853: Στην Αθήνα έγινε αισθητός σεισμός, πιθανόν 6 Ρίχτερ.
 - * -17-1-1874: Το πρωί έγινε σεισμική δόνηση που πιθανόν είχε

επίκεντρο την Αθήνα.

* -24-2-1981: Σεισμική δόνηση 6,8 Ρίχτερ με επίκεντρο τις Αλκυονίδες.

* -7-9-1999: Ισχυρή σεισμική δόνηση 5,9 Ρίχτερ με επίκεντρο την Πάρνηθα.

Πειραματική διερεύνηση κίωνων και κιονοστοιχιών αρχαίων ναών

Η σεισμική απόκριση μεμονωμένων στερεών σωμάτων, τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο χωρίς συνδετικό κονίαμα, αποτελεί ένα πολύπλοκο μη-γραμμικό φαινόμενο, που δεν ακολουθεί τους απλούς κανόνες κλίμακας. Παρόλο που ως τώρα έχουν παρουσιαστεί στην επιστημονική κοινότητα σημαντικές εργασίες για την αριθμητική προσέγγιση του λικνισμού στερεών σωμάτων, πολύ λίγα πειράματα έχουν πραγματοποιηθεί, τα περισσότερα μάλιστα σε μικρή κλίμακα. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η πειραματική διερεύνηση μεμονωμένων κίωνων και κιονοστοιχιών αρχαίων ναών, που προσομοιώνουν τμήματα του Πρόναου του Παρθενώνα σε κλίμακα 1:3. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 5 σειρές πειραμάτων. Η πρώτη σειρά ήταν απλοί κίονες χωρίς επιστύλια. Στη συνέχεια εξετάστηκαν δύο διατάξεις κιονοστοιχιών: μια στην οποία οι κίονες βρίσκονται εν σειρά και μια στην οποία βρίσκονται σε γωνία 90 μοιρών. Στις κιονοστοιχίες οι κίονες συνδέονται με επιστύλια. Τέλος τοποθετήθηκαν μεταλλικοί σύνδεσμοι στα επιστύλια, παρόμοιας γεωμετρίας (διπλού ταυ) με αυτούς που χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες αναστηλώσεις στον Παρθενώνα.

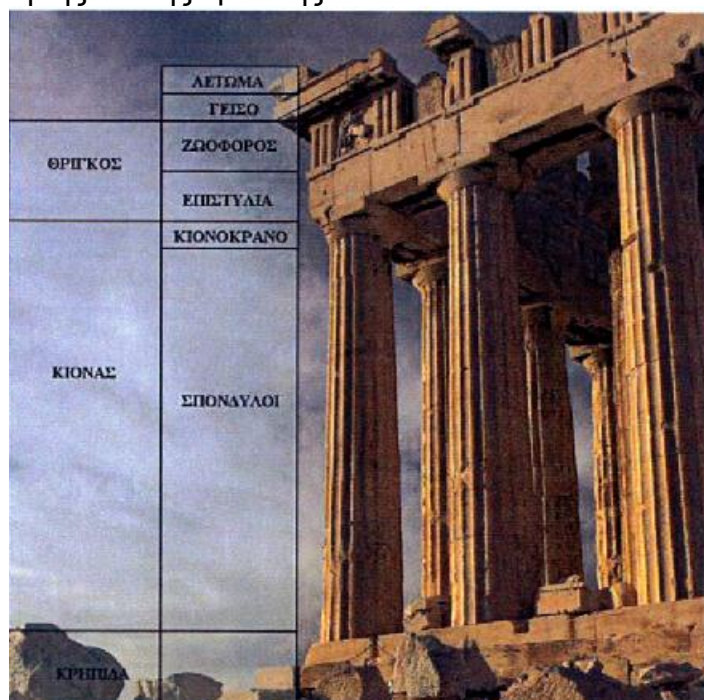
Εισαγωγή

Οι αρχαίοι ελληνικοί ναοί, που βρίσκονται κυρίως σε σεισμογενείς περιοχές, είναι πολυσπόνδυλες κατασκευές. Η σεισμική συμπεριφορά αυτών των κατασκευών διαφέρει σημαντικά από αυτήν των σύγχρονων. Κατά τη διάρκεια ενός σεισμού οι λίθοι μπορεί να ολισθήσουν μεταξύ τους ή/και να λικνιστούν, ανεξάρτητα ή σε ομάδες, δημιουργώντας ένα ιδιαίτερο σύστημα απορρόφησης ενέργειας.

Τα βασικά στοιχεία της ανωδομής ενός ναού αποτελούν η κρηπίδα, οι κίονες και ο θριγκός. Οι κίονες αποτελούνται από τους σπονδύλους και το κιονόκρανο και η διάμετρος τους μειώνεται προς τα ανω. Ο θριγκός αποτελείται από δύο μέρη, το επιστύλιο και την ζωοφόρο. Το επιστύλιο είναι ένα παραλληλόγραμμο κομμάτι μαρμάρου και ανάλογα με την διαθεσιμότητα υλικού στην περιοχή την περίοδο της κατασκευής του ναού, μπορεί να αποτελείται από ένα έως και τρία κομμάτια, τα οποία συνδέονταν με συνδέσμους σχήματος ταυ ή Π.

Η ύπαρξη αρχαίων εντορμιών από προηγούμενες επεμβάσεις/αποκαταστάσεις επιτρέπει τη χρήση σύγχρονων συνδέσμων από τιτάνιο στις αναστηλώσεις. Οι σύνδεσμοι εξασφαλίζονται στις εντορμίες με τη χρήση τσιμεντοκονίας. Το βασικότερο κριτήριο σχεδιασμού είναι η προστασία των μαρμάρινων λίθων. Συνεπώς οι σύνδεσμοι σχεδιάζονται έτσι ώστε να ταιριάζουν με τις διαστάσεις των υπαρχουσών εντορμιών, καθώς επίσης και να απορροφούν σε περίπτωση σεισμικής διέγερσης την ενέργεια και να

αστοχούν πριν υποστεί το μάρμαρο οποιαδήποτε ζημία. Η ύπαρξη συνδέσμων ωστόσο αλλοιώνει σχετικά τον μηχανισμό απόσβεσης της σεισμικής ενέργειας σπονδυλωτών κατασκευών που επιτυγχάνεται μέσω της σχετικής ολίσθησης και της κρούσης των λίθων.



Σχήμα 1: Βασικά στοιχεία της ανοδομής ενός αρχαίου ναού

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η πειραματική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος PROHITEC (Earthquake Protection of Historical Buildings by Reversible Mixed Technologies) στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου σε:

1. μεμονωμένους πολυσπόνδουλους κίονες. Η εξέταση των μεμονωμένων κίωνων

Κρίθηκε απαραίτητη, καθώς σε έναν σημαντικό αριθμό αρχαίων ναών, εξαιτίας των καταπονήσεων που έχουν υποστεί κατά το πέρασμα του χρόνου (βανδαλισμούς, σεισμούς, κατάρρευση οροφής κ.α.), έχει απομείνει μόνο ένας μεμονωμένος πολυσπόνδυλος κίονας. Επίσης η κατανόηση των μεμονωμένων κίωνων βοηθάει στη πληρέστερη κατανόηση των κιονοστοιχιών.

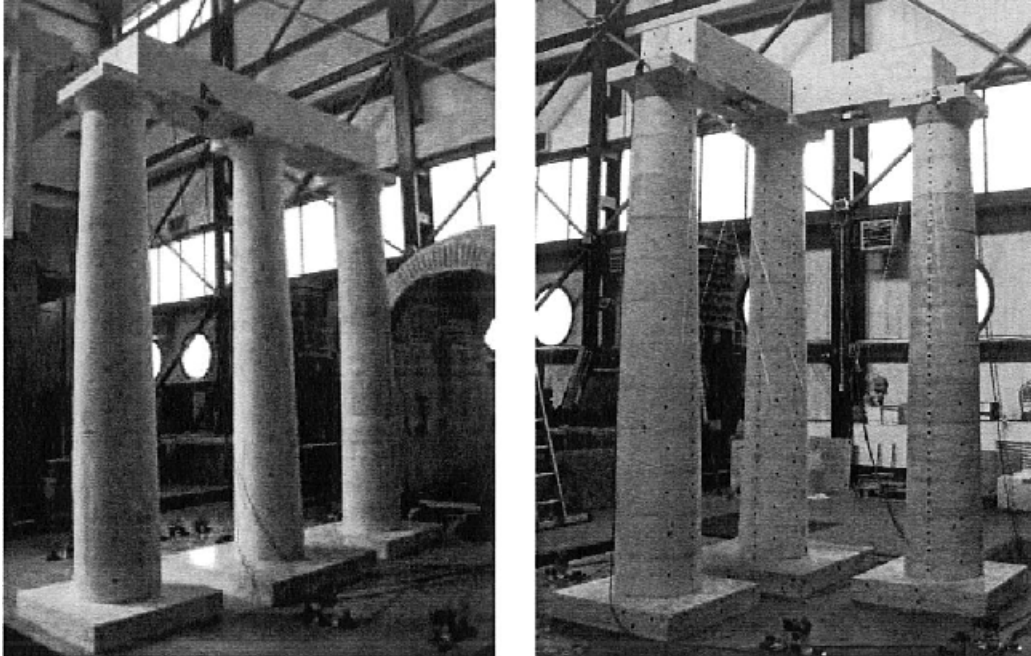
2. κιονοστοιχίες με επιστύλια, που αποτελούν χαρακτηριστικά τμήματα ενός ναού, όπως είναι η διάταξη των κίωνων εν σειρά και σε γωνία 90 μοιρών. Οι κιονοστοιχίες εξετάστηκαν με και χωρίς συνδέσμους επιστύλιων σχήματος διπλού ταυ.



Σχήμα 2: Μεμονωμένοι κίονες στο σεισμικό προσομοιωτή



Σχήμα 3: Χαρακτηριστικά παραδείγματα αρχαίων ναών, στους οποίους έχουν απομείνει μεμονωμένοι κίονες. Από αριστερά προς τα δεξιά διακρίνονται οι ναοί στην Νεμέα, στην Κόρινθο και στους Δελφούς.



Σχήμα 2: Οι δύο διατάξεις κιονοστοιχιών που εξετάστηκαν πειραματικά: μία στην οποία οι κίονες βρίσκονται εν σειρά και μια στην οποία βρίσκονται σε γωνία 90 μοιρών.

Πειραματικά Δοκίμια

Τα δοκίμια των πειραμάτων κατασκευάστηκαν βάση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και των υλικών του Πρόναου του Παρθενώνα. Ο Πρόναος υπέστη επιζήμιες επεμβάσεις όταν ο ναός χρησιμοποιήθηκε σαν χριστιανική εκκλησία, ενώ καταστράφηκε ολοσχερώς στον βομβαρδισμό του 1687. Βάση της μελέτης του Μ. Κορρέ το 1995 ξεκίνησε η αποκατάσταση του τμήματος αυτού του ναού. Έχει ολοκληρωθεί η πλήρης ανασύλωση τριών κίωνων και η μερική των υπόλοιπων τριών (ΥΣΜΑ, 2007).

Για την πειραματική διερεύνηση κατασκευάστηκαν τρεις κίονες, επτά επιστύλια και δώδεκα σύνδεσμοι επιστυλίων. Εξαιτίας των περιορισμών της σεισμικής τράπεζας (συνολική διάσταση και βάρος που μπορεί να φέρει) οι διαστάσεις των δοκιμίων είναι σε κλίμακα 1 προς 3 του πρωτότυπου. Τα αναλυτικά χαρακτηριστικά των μεμονωμένων τμημάτων είναι τα εξής:

1. Κίονες: Κάθε κίονα αποτελείται από μία βάση, δώδεκα σπονδύλους και ένα κιονόκρανο. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι κίονες ήταν παρόμοιοι αλλά όχι πανομοιότυποι. Η πρώτη βασική διαφορά αφορά το υλικό που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε κίονα. Το κιονόκρανο και η βάση του κίονα Κ1 είναι από μάρμαρο Πεντελικού, ενώ του κίονα Κ3 από μάρμαρο Καβάλας. Σημειώνεται ότι ο Παρθενώνας είναι κατασκευασμένος από μάρμαρο Πεντελικού. Η δεύτερη διαφορά είναι ότι ο κίονας Κ1 έχει ένταση, δηλαδή ελαφρά καμπύλωση περίπου στα 2/5 του ύψους, η οποία δεν ξεπερνά τη διάμετρο της βάσης του.

2. Επιστύλια: Για κάθε διάταξη (κίονες εν σειρά και κίονες σε γωνία) οι διαστάσεις των δοκών των επιστυλίων είναι διαφορετικές. Συνεπώς κατασκευάστηκαν επτά δοκοί ύψους 0,35μ, οι διαστάσεις των οποίων διακρίνονται στο σχήμα 7.

3 Σύνδεσμοι επιστυλίων: Βάση των εντορμιών που υπάρχουν στα επιστύλια του Παρθενώνα κατασκευάστηκαν δύο τύποι συνδέσμων (τύπος Β και τύπος C). Οι δύο τύποι συνδέσμων είναι ίδιου σχήματος διπλού ταυ. Διαφοροποιούνται μόνο στο μήκος (οι διαμήκεις σύνδεσμοι τύπου C έχουν μεγαλύτερο μήκος). Οι σύνδεσμοι είναι μεταλλικοί και σταθεροποιούνται στις εντορμίες με τη χρήση φύλλων μολυβιού.

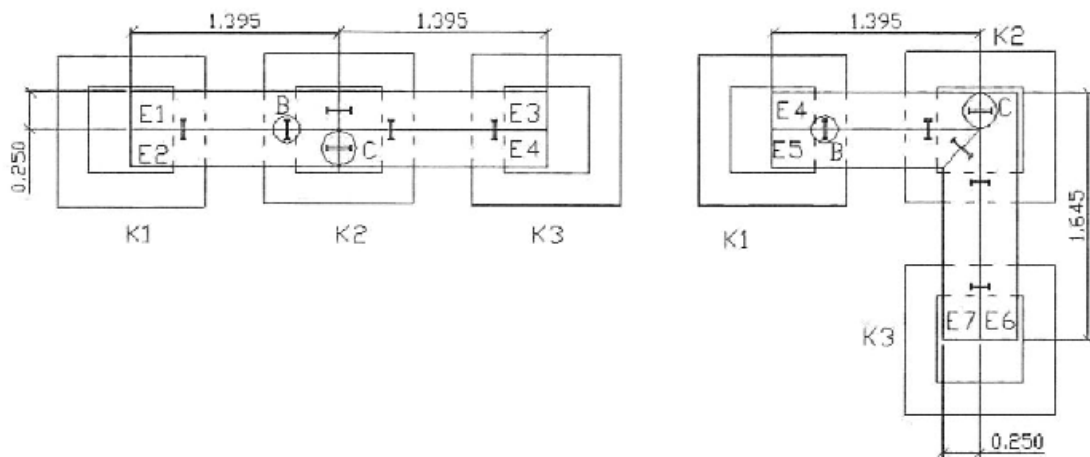
Ο πρωτότυπος ναός έχει πολλές αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες, οι οποίες για λόγους απλούστευσης της κατασκευής των δοκιμίων αγνοηθήκαν. Οι κυριότερες αποκλίσεις μεταξύ δοκιμίων και πρωτότυπου είναι οι παρακάτω:

A. Οι αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες των επιστυλίων και οι ραβδώσεις των κίωνων αγνοήθηκαν

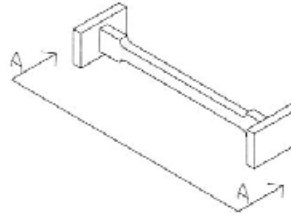
B. Όλοι οι σπόνδυλοι έχουν το ίδιο ύψος. Οι αρχαίοι κίονες είχαν συνήθως σπονδύλους με διαφορετικό μεταξύ τους ύψος, ανάλογα με τα κομμάτια μαρμάρου που ήταν διαθέσιμα. Το πλήθος όμως των σπονδύλων στο πρωτότυπο και τα δοκίμια είναι ίδιο.

Γ. Στον Πρόναο ο αριθμός των δοκών των επιστυλίων που συνδέουν δύο κίονες είναι τρεις. Στα δοκίμια, χωρίς να μειώνεται η επιφάνεια σύνδεσης, χρησιμοποιήθηκαν δύο δοκοί σε κάθε επιστύλιο.

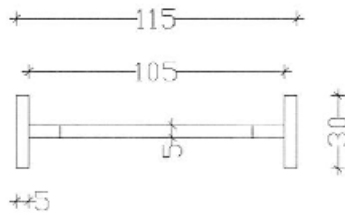
Δ. Το υλικό των συνδέσμων των επιστυλίων που χρησιμοποιείται στην πράξη είναι τιτάνιο. Καθώς όμως στην πειραματική διερεύνηση δεν αντιμετωπίζονται προβλήματα διάβρωσης κ.α. οι σύνδεσμοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν χαλύβδινοι. Επίσης στις αναστηλώσεις το υλικό σταθεροποίησης των συνδέσμων στις εντορμίες είναιτσιμεντοκονία. Εξαιτίας της κλίμακας (1 προς 3), το μέγεθος των κόκκων θα έπρεπε να είναι υπερβολικά μικρό. Για το λόγο αυτό τοποθετήθηκαν φύλλα μολυβιού.



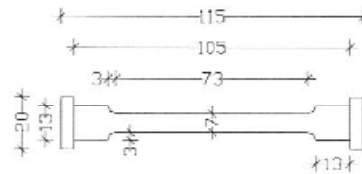
Σχήμα 7: Διατάξεις και θέσεις μεταλλικών συνδέσμων σχήματος διπλού ταυ. Οι διαμήκεις σύνδεσμοι (σύνδεσμοι C) έχουν μεγαλύτερο μήκος από τους εγκάρσιους συνδέσμους B.



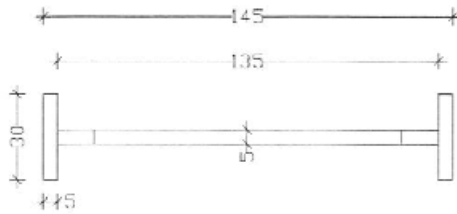
Σύνδεσμος τύπου Β
Κάτοψη



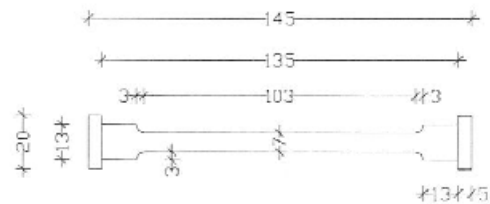
Όψη Α-Α



Σύνδεσμος τύπου C
Κάτοψη



Όψη Α-Α



Σχήμα 8: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των συνδέσμων τύπου Β και C.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο σεισμικό προσομοιωτή του Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Ο σεισμικός προσομοιωτής αποτελείται από μία άκαμπτη πλατφόρμα επιφανείας 4.0μ x 4.0μ. Με τις κατάλληλες αντλίες πίεσης λαδού, βαλβίδες και αυτοματισμούς έχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης και με υψηλή ακρίβεια ελεγχόμενης ταλάντωσης και στους έξι βαθμούς ελευθερίας (6 DOF). Για τη σεισμική τράπεζα υπήρχαν οι ακόλουθοι περιορισμοί: Το βάρος των δοκιμών δεν επιτρέπεται να ξεπερνά τα 100 κΝ, η μέγιστη μετατόπιση που μπορεί να επιτευχθεί είναι +/- 0.10 μ σε κάθε διεύθυνση, ενώ οι μέγιστες επιταχύνσεις είναι 2.0g στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις και 4.0g στην κατακόρυφη διεύθυνση.

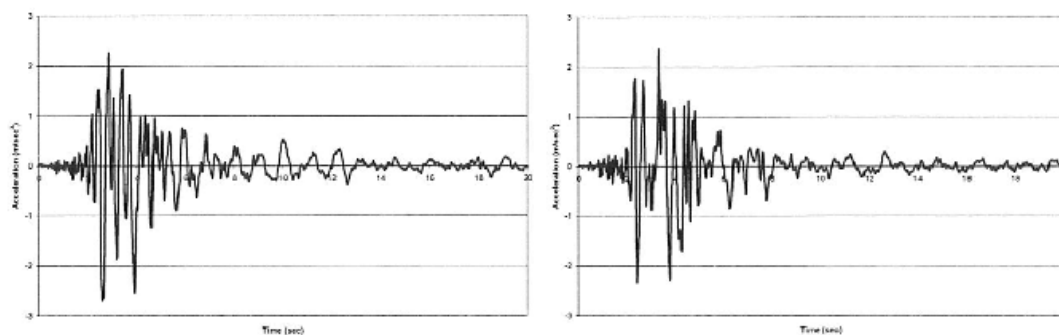
ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ

Για τα πειράματα επιλέχθηκαν δύο σεισμικές διεγέρσεις, που έχουν συμβεί στον ελλαδικό χώρο και έχουν διαφορετικά μεταξύ τους χαρακτηριστικά. Οι διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι καταγραφές από:

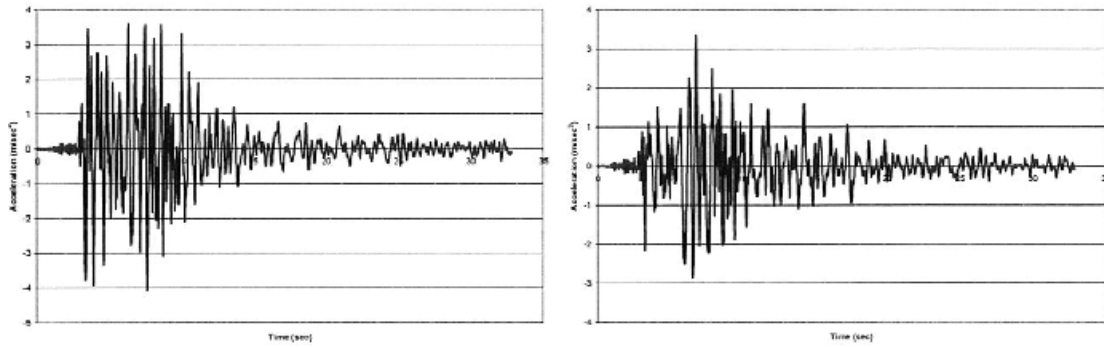
1. το σεισμό της Καλαμάτας (13 Σεπτεμβρίου 1986). Ο σεισμός ήταν μεγέθους $M=6.2$ και η καταγραφή έγινε στο κτίριο της Νομαρχίας, σε απόσταση 9 km από το επίκεντρο και σε σκληρές εδαφικές συνθήκες. Η καταγραφή έχει διάρκεια ισχυρής σεισμικής δόνησης (6.0 sec) και μέγιστη επιτάχυνση 0.27g
2. το σεισμό της Λευκάδας (14 Αυγούστου 2003). Ο σεισμός ήταν μεγέθους $M=6.4$ και οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις που καταγράφηκαν είναι 0.42g και 0.34g κατά τις δυο οριζόντιες συνιστώσες.

Στα σχήματα 9 και 10 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες επιταχύνσεων στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις των δύο καταγράφων που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα.

Η ένταση των καταγραφών απομειώθηκε κατάλληλα ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή διέγερση του δοκιμίου, αποφεύγοντας όμως τον κίνδυνο κατάρρευσης του, που θα προκαλούσε ζημιές στη σεισμική τράπεζα. Ο κατάλληλος συντελεστής κλίμακας της επιτάχυνσης που χρησιμοποιήθηκε, είχε καθοριστεί από προκαταρκτική ανάλυση που έγινε με την χρήση του προγράμματος διακριτών στοιχείων 3DEC και του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Η μέγιστη επιτάχυνση βάσης που εφαρμόστηκε σε κάθε πείραμα παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 9: Σεισμός Καλαμάτας – Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης των οριζοντίων καταγραφών.



Σχήμα 10: Σεισμός Λευκάδας – Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης των οριζοντίων καταγραφών.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Στον πίνακα 1 δίνονται οι σειρές πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας. Αρχικά εξετάστηκαν οι μεμονωμένοι πολυσπόνδυλοι κίονες και στις δύο σεισμικές διεγέρσεις της Καλαμάτας και της Λευκάδας (Πείραμα 1 και Πείραμα 2). Και στα δύο πειράματα η ένταση των σεισμών είχε απομειωθεί στο 40%. Εν συνεχεία εξετάστηκαν οι κίονες, τοποθετημένοι σε σειρά με επιστύλια. Στο πρώτο πείραμα αυτής της διάταξης (Πείραμα 3), αρχικά η κιονοστοιχία εξετάστηκε στο 40% της έντασης του σεισμού της Καλαμάτας. Καθώς δεν παρατηρήθηκαν μεγάλες μετατοπίσεις αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί δεύτερη φάση πειράματος χωρίς να τοποθετηθούν οι σπόνδυλοι στις αρχικές τους θέσεις για σεισμική διέγερση με το 50% του σεισμού της Καλαμάτας. Στο δεύτερο πείραμα των κίωνων σε σειρά (Πείραμα 4) εφαρμόστηκε το 40% του σεισμού της Λευκάδας. Τα πειράματα 6, 7 και 8 αφορούν τους κίονες σε γωνία με επιστύλια. Και στα τρία πειράματα εφαρμόστηκε η σεισμική διέγερση της Καλαμάτας. Στο πείραμα 6 η ένταση του σεισμού απομειώθηκε στο 50%, ενώ στο πείραμα 7 και 8 στο 40%. Στο πείραμα 8, με σκοπό να εξεταστεί η ασυμμετρία των επιστυλίων, έγινε αλλαγή των αξόνων της σεισμικής διέγερσης (βλέπε Πίνακα 1). Στα πειράματα 9 και 10 εξετάστηκαν οι δυο κιονοστοιχίες με τους κίονες σε γωνία 90 μοιρών και κίονες σε σειρά, με συνδέσμους στα επιστύλια. Και στα δύο πειράματα χρησιμοποιήθηκε ο σεισμός της Καλαμάτας.

A/A	Διάταξη κίονων	Σεισμός	Σχήμα διάταξης και αξόνων σεισμού
1	Κίονες στη σειρά χωρίς επιστύλια	Καλαμάτα (40%)	
2	Κίονες στη σειρά χωρίς επιστύλια	Λευκάδα (40%)	
3	Κίονες στη σειρά με επιστύλια	Καλαμάτα (40%) και χωρίς αναδιάταξη Καλαμάτα (50%)	
4	Κίονες στη σειρά με επιστύλια	Λευκάδα (40%)	
5	Κίονες σε γωνία με επιστύλια	Καλαμάτα (50%)	
6	Κίονες σε γωνία με επιστύλια	Καλαμάτα (40%)	
7	Κίονες σε γωνία με επιστύλια	Καλαμάτα (40%) αλλαγή αξόνων σεισμικής διέγερσης	
8	Κίονες σε γωνία με επιστύλια και συνδέσμους	Καλαμάτα (40%)	
9	Κίονες στη σειρά με επιστύλια και συνδέσμους	Καλαμάτα (40%) και χωρίς αναδιάταξη Καλαμάτα (50%)	

Πίνακας 1: Σειρά πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν

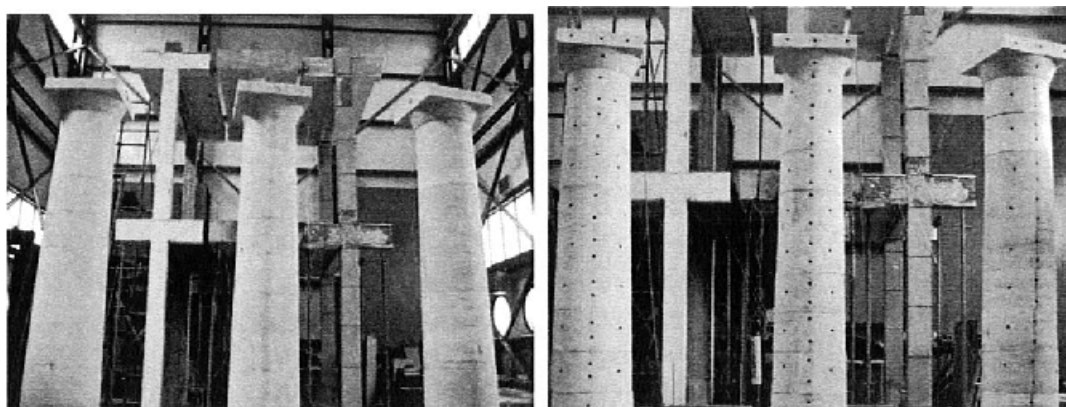
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο σχήμα 11 παρουσιάζονται οι κίνες μετά το τέλος των δύο πρώτων πειραμάτων των μεμονωμένων κίωνων για τις σεισμικές διεγέρσεις της Καλαμάτας και της Λευκάδας (Πείραμα 1 και Πείραμα 2 του Πίνακα 1 αντίστοιχα). Και οι δύο σεισμικές διεγέρσεις είχαν από μειωθεί σο 40%.

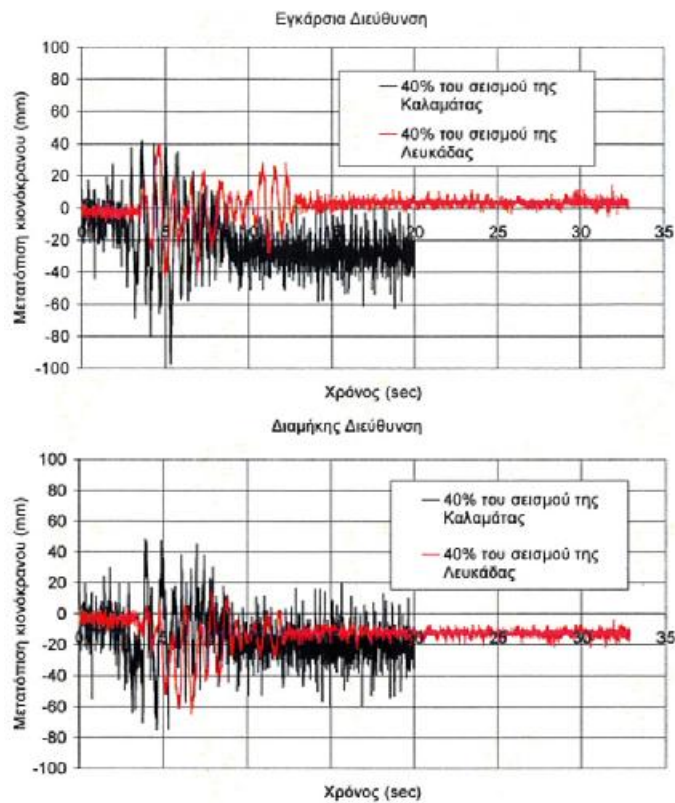
Ο πρώτος κίονας (Κ1) παρουσιάζει και στα δύο πειράματα μια σαφή μονολιθική συμπεριφορά. Καθώς όμως ο σεισμός τα Λευκάδας έχει ένα μεγάλο κομμάτι έντονης διέγερσης (10sec) στον κίονα αρχίζουν από το 10-12 δευτερόλεπτο του σεισμού να παρατηρείται λικνισμός των πρώτων έξι σπονδύλων. Τελικά όμως μετά το πέρας του πειράματος σημαντική μετατόπιση υπάρχει μόνο στην διεπιφάνεια του 4^{ου} και 5^{ου} σπονδύλου.

Στο σχήμα 12 δίνεται η χρονοϊστορία των μετατοπίσεων του κιονόκρανου του κίονα 2 στην εγκάρσια και στην διαμήκη διεύθυνση και στα πειράματα. Ο κίονας είχε παρόμοια συμπεριφορά και στα δύο πειράματα, με λίγο πιο μεγάλες παραμορφώσεις (κατά την διάρκεια του σεισμού, αλλά κυρίως μόνιμη μετατόπιση) στην εγκάρσια διεύθυνση του σεισμού.

Ο κίονας Κ3 έχει τις μεγαλύτερες μετατοπίσεις (στοιχείο που παρατηρήθηκε και στο πρώτο πείραμα), αλλά είχε παρόμοιο σχήμα και κατεύθυνση μετατοπίσεων με τον κίονα Κ2. Ο κίονας Κ1, που έχει ένταση, διαφοροποιήθηκε σημαντικά σε σχέση με τους άλλους δύο κίονες (βλέπε Σχήμα 11).



Σχήμα 11: Φωτογραφία μετά τα πειράματα 1 και 2 (από αριστερά προς τα δεξιά).

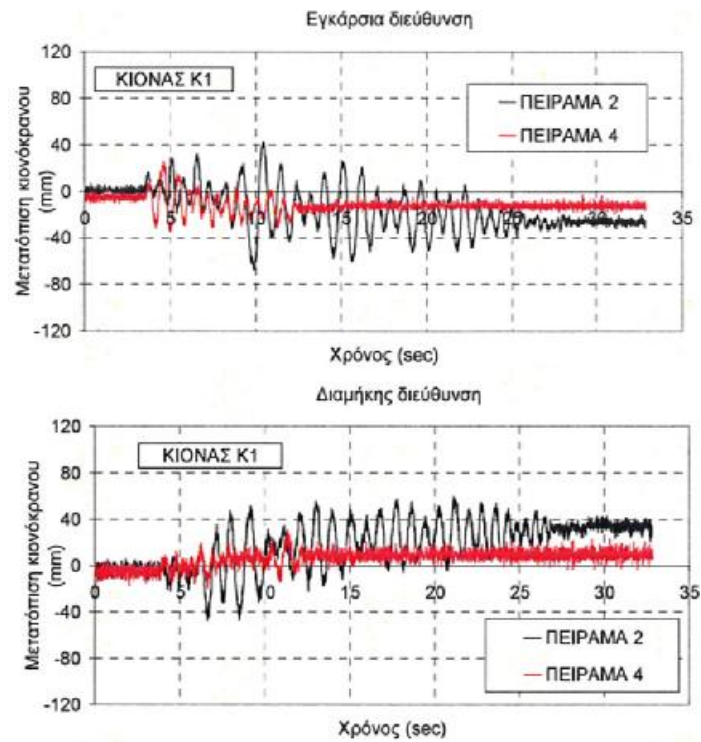


Σχήμα 12: Χρονοϊστορία μετατοπίσεων του κιονόκranου του κίονα 2 για την εγκάρσια και την διαμήκη διεύθυνση στα πειράματα 1 και 2. Και οι δύο σεισμικές διεγέρσεις (Καλαμάτας και Λευκάδας) είχαν απομειωθεί στο 40%

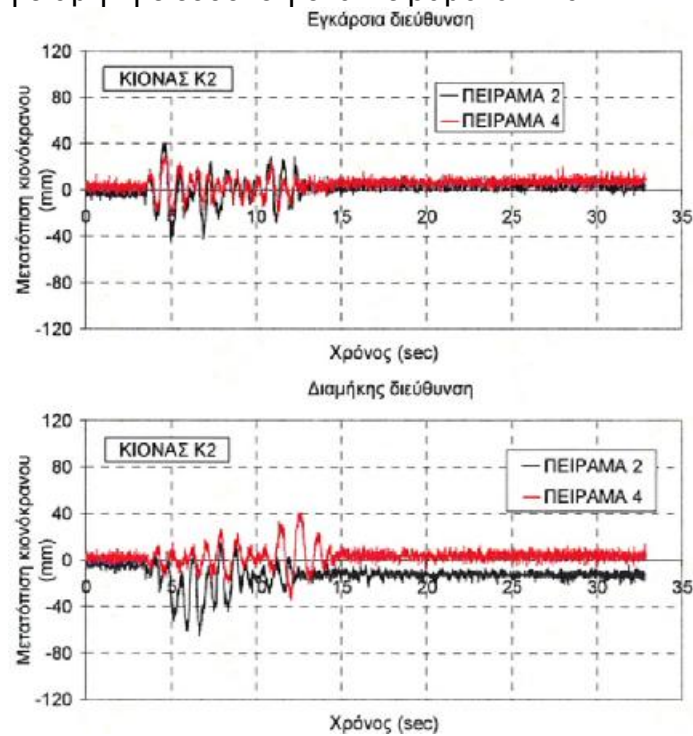
Στα σχήματα 14, 15 και 16 συγκρίνονται οι χρονοϊστορίες των κιονόκranων των κίωνων K1, K2 και K3 για τα πειράματα 2 και 4. Και στα δύο πειράματα εφαρμόστηκε το 40% του σεισμού της Λευκάδας. Στο πείραμα 2 οι κίονες είναι μεμονωμένοι, ενώ στο πείραμα 4 είναι εν σειρά και συνδέονται με επιστύλια. Τα επιστύλια αλλάζουν ριζικά την δυναμική συμπεριφορά των κίωνων. Και οι τρεις κίονες λειτουργούν κυρίως μονοιθικά, ενώ έχουν μικρότερες μεταξύ τους διαφορές στις μετατοπίσεις. Το σύστημα της κιονοστοιχίας εν σειρά είναι σαφώς καλύτερο από αυτό των μεμονωμένων κίωνων, καθώς οι μετατοπίσεις (μέγιστες και μόνιμες) μειώθηκαν στο 50% κατά μέσο όρο. Η επιρροή των επιστυλίων στις μετατοπίσεις κατά τη διάρκεια του σεισμού είναι εμφανής και στους τρεις κίονες και είναι περίπου ίδια, ανεξάρτητα της θέσεως του κίονα στην κιονοστοιχία (άκρη ή μέσον). Στις μόνιμες μετατοπίσεις όμως παρατηρήθηκε μια πολύ μικρή μείωση (10%) στον μεσαίο κίονα της κιονοστοιχίας K2, σε σχέση με αυτή των δύο ακραίων κίωνων K1 και K3 (40%)

Η διαφορά όμως της επιρροής των επιστυλίων στην συμπεριφορά των κίωνων ανάλογα με τη θέση τους στην κιονοστοιχία είναι εντονότερη στους κίονες σε γωνία 90 μοιρών. Στο σχήμα 17 δίνονται οι χρονοϊστορίες των μετατοπίσεων του κίονα 2 (μεσαίος κίονας) στην εγκάρσια και στη διαμήκη διεύθυνση στα πειράματα του μονού κίονα, των κίωνων σε σειρά με επιστύλια και των κίωνων σε γωνία 90 μοιρών για τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας

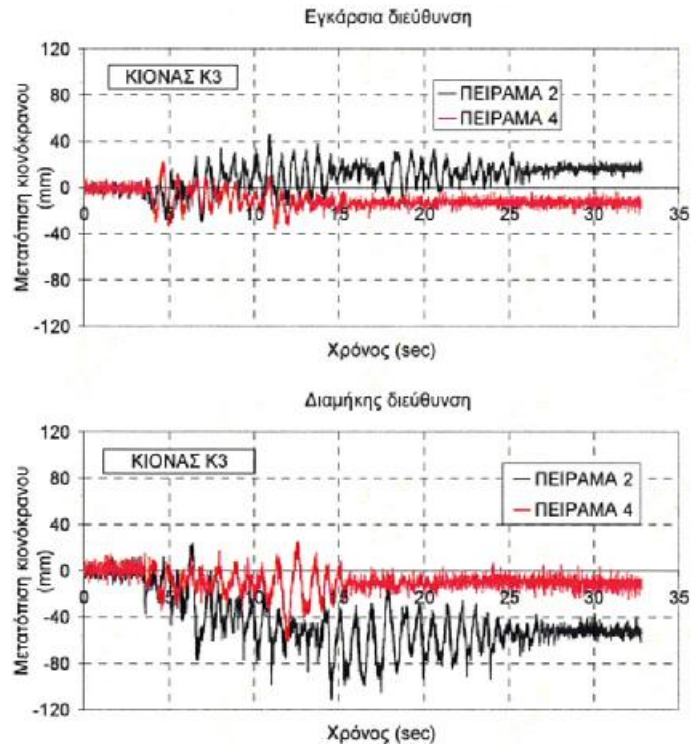
απομειωμένου στο 40%. Παρατηρείται ότι η διάταξη των κίωνων σε σειρά με επιστύλια δίνει τις μικρότερες μετατοπίσεις, ενώ στα άλλα δυο πειράματα οι μέγιστες και παραμένουσες μετατοπίσεις διαφέρουν πολύ λίγο μεταξύ τους.



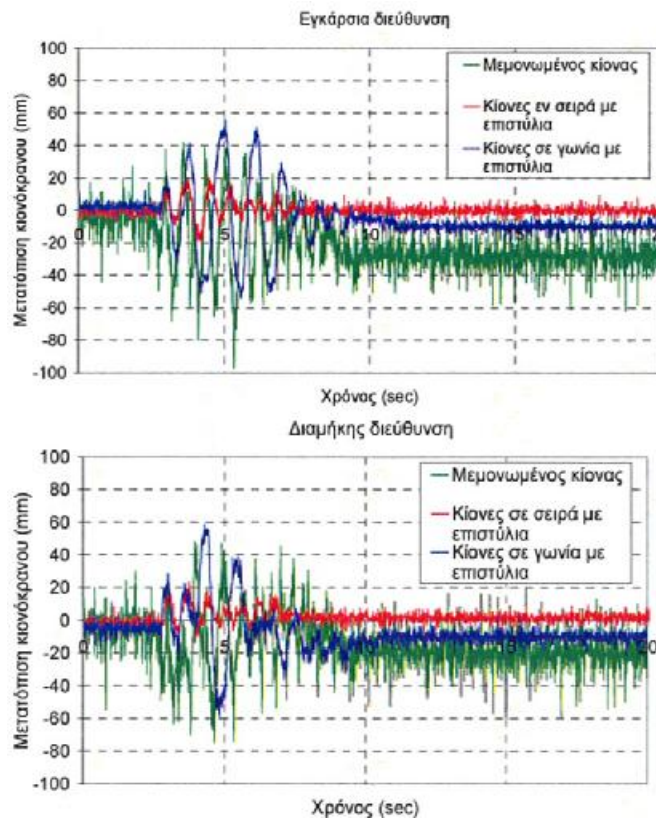
Σχήμα 14: Χρονοϊστορία μετατοπίσεων του κιονόκρανου του κίονα 1 στην εγκάρσια και τη διαμήκη διεύθυνση στα πειράματα 2 και 4.



Σχήμα 15: Χρονοϊστορία μετατοπίσεων του κιονόκρανου του κίονα 2 στην εγκάρσια και τη διαμήκη διεύθυνση στα πειράματα 2 και 4.

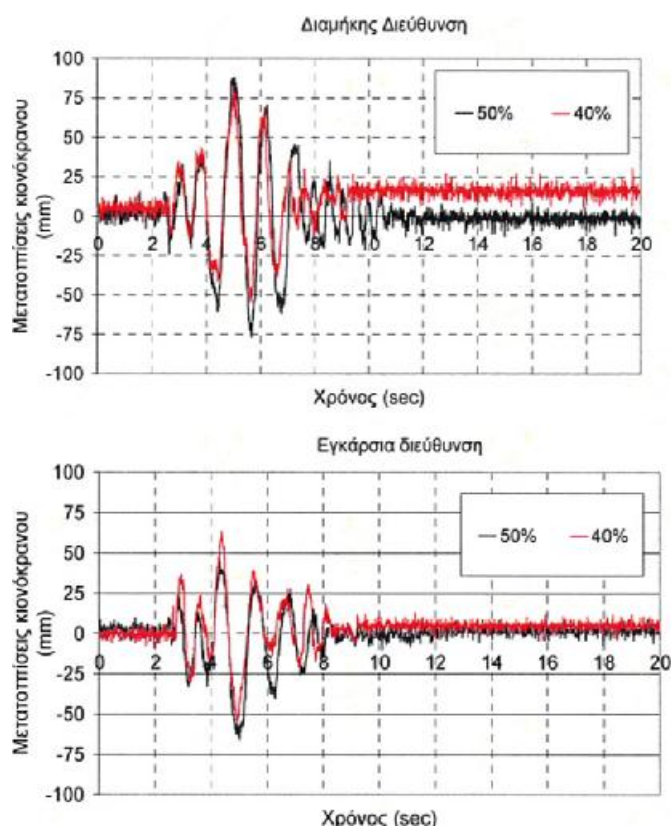


Σχήμα 16: Χρονοϊστορία μετατοπίσεων του κιονόκranου του κίονα 3 στην εγκάρσια και τη διαμήκη διεύθυνση στα πειράματα 2 και 4.



Σχήμα 17: Χρονοϊστορία μετατοπίσεων του κιονόκranου του κίονα 2 στην εγκάρσια και τη διαμήκη διεύθυνση στα πειράματα 1,3 και 6. Το επιταχυνσιογράφημα της Καλαμάτας έχει απομειωθεί 40% και στα τρία πειράματα.

Στο σχήμα 18 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της μετατόπισης του κιονόκranου του κίονα 1 στην εγκάρσια και στη διαμήκη διεύθυνση στα πειράματα των κίονων σε γωνία 90 μοιρών για τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας απομειωμένου στο 40% και στο 50% αντίστοιχα (Πειράματα 5 και 6). Παρότι σε ορισμένες περιπτώσεις τα πειράματα δεν είναι επαναλήψιμα, όπως παρατηρήθηκε στην περίπτωση του μεμονωμένου κίονα σε παλαιότερα πειράματα [Μουζάκης et al, 2002]. Στο σχήμα 18 διαπιστώνεται μία ομοιότητα στη μορφή της ταλάντωσης του κίονα και στα δύο πειράματα. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η συμπεριφορά μίας κιονοστοιχίας ακόμα και με ασύνδετα επιστύλια δεν φαίνεται να χαρακτηρίζεται από την έντονα μη-γραμμική συμπεριφορά των μεμονωμένων πολυσπόνδυλων κίονων. Πρέπει όμως να σημειωθεί, παρατηρώντας τη χρονοϊστορία στην διαμήκη διεύθυνση, ότι επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα από τα παλαιότερα πειράματα [Μουζάκης et al, 2002], ότι αύξηση του μεγέθους του σεισμού δεν οδηγεί απαραίτητα και σε αύξηση των μετατοπίσεων.

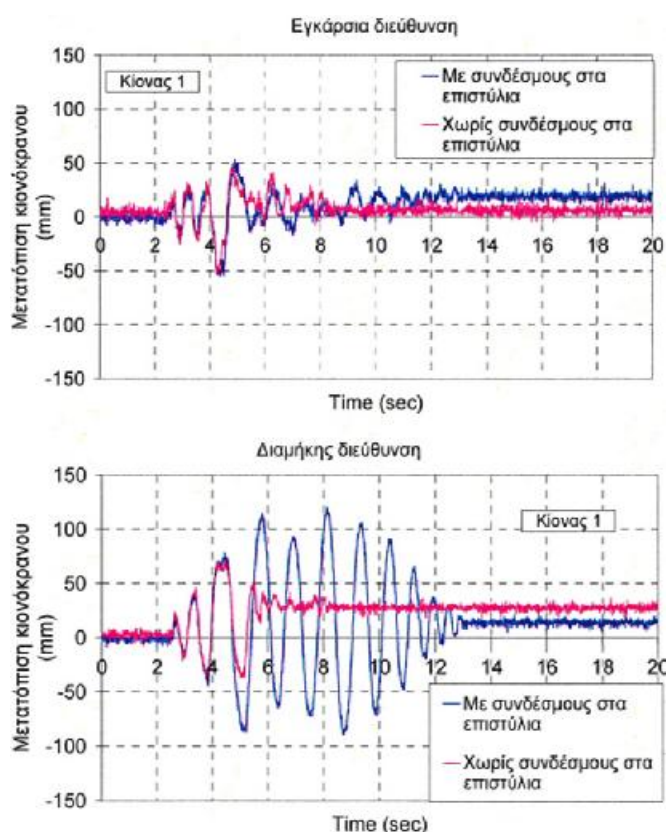


Σχήμα 18: Χρονοϊστορία μετατοπίσεων του κιονόκranου του κίονα 1 στην εγκάρσια και τη διαμήκη διεύθυνση στα πειράματα 5 και 6. Το επιταχυνσιογράφημα της Καλαμάτας έχει απομειωθεί στο 40% και 50% αντίστοιχα.

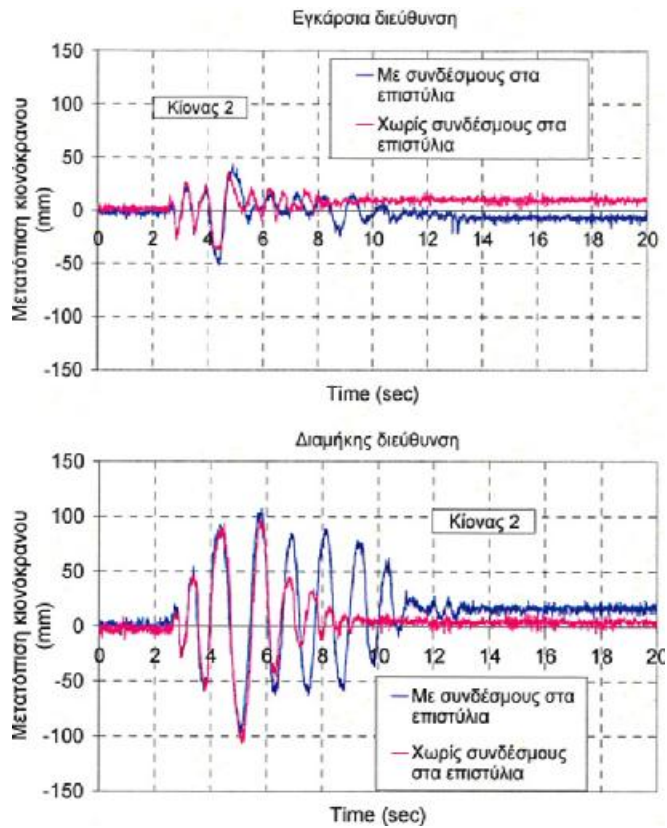
Στα σχήματα 19, 20 και 21 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των μετατοπίσεων των κιονόκranων και των τριών κίονων στην εγκάρσια και τη

διαμήκη διεύθυνση στα πειράματα των κίονων σε γωνία 90 μοιρών με και χωρίς μεταλλικούς συνδέσμους στα επιστύλια αντίστοιχα. Το επιταχυνσιογράφημα της Καλαμάτας έχει απομειωθεί στο 40% και στα δύο πειράματα. Η επιρροή των συνδέσμων στους κίονες κατά τη διάρκεια του σεισμού μπορεί να «χωριστεί» σε δύο ζώνες. Τα πρώτα 6 δευτερόλεπτα, στα οποία η διέγερση είναι ακόμα πολύ μικρή, δεν παρατηρείται καμία διαφορά. Καθώς όμως η ένταση του σεισμού αυξάνεται η ύπαρξη των συνδέσμων αυξάνει τις μετατοπίσεις των κίονων. Οι σύνδεσμοι, μη επιτρέποντας καμία μετατόπιση μεταξύ των επιστυλίων, αυξάνουν την φόρτιση που ασκείται στους κίονες σημαντικά.

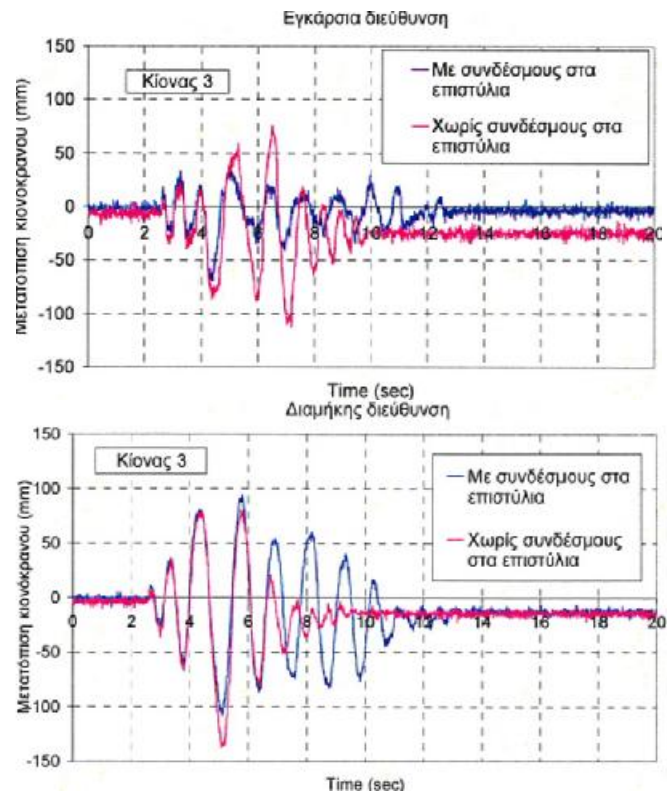
Στο σχήμα 22 δίνεται η εικόνα των επιστυλίων στο τέλος και των δύο πειραμάτων. Στην περίπτωση, όπου δεν υπήρχαν οι σύνδεσμοι ο κίνδυνος κατάρρευσης του ενός κίονα ήταν εμφανής. Επίσης κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, στα οποία τα επιστύλια δεν είχαν συνδέσμους, οι κρούσεις μεταξύ του ήταν σημαντικές προκαλώντας θραύση του μαρμάρου σε αρκετά σημεία (βλέπε Σχήμα 23). Η σύνδεση όμως των επιστυλίων με διπλά ταυ μείωσε δραστικά τις μετακινήσεις και τις κρούσεις μεταξύ των επιστυλίων. Συνεπώς η χρήση του στις αναστηλώσεις πρέπει να γίνεται με προσοχή και ύστερα από μελέτη.



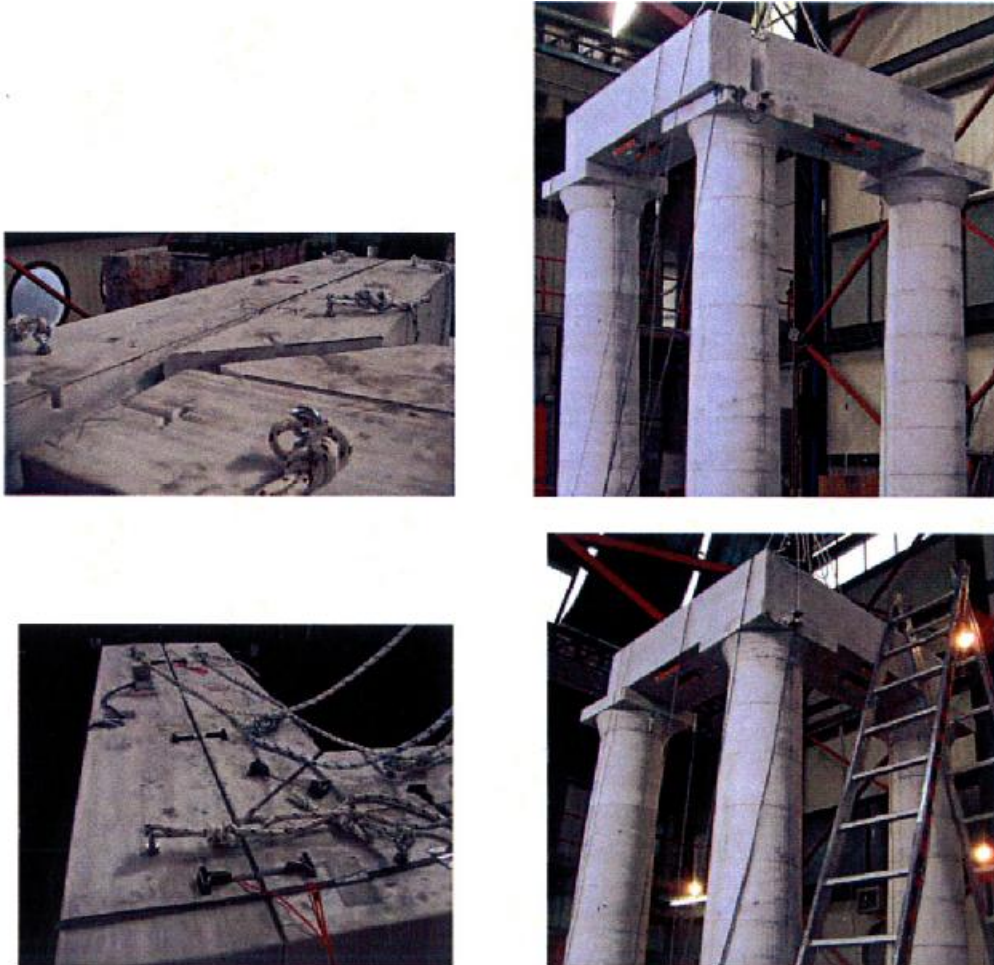
Σχήμα 19: Χρονοϊστορία μετατοπίσεων του κιονόκρανου του κίονα K1 στην εγκάρσια και τη διαμήκη διεύθυνση στα πειράματα των κίονων σε γωνία 90 μοιρών με και χωρίς μεταλλικούς συνδέσμους στα επιστύλια αντίστοιχα (πειράματα 7 και 8). Το επιταχυνσιογράφημα της Καλαμάτας έχει απομειωθεί 40% και στα δύο πειράματα.



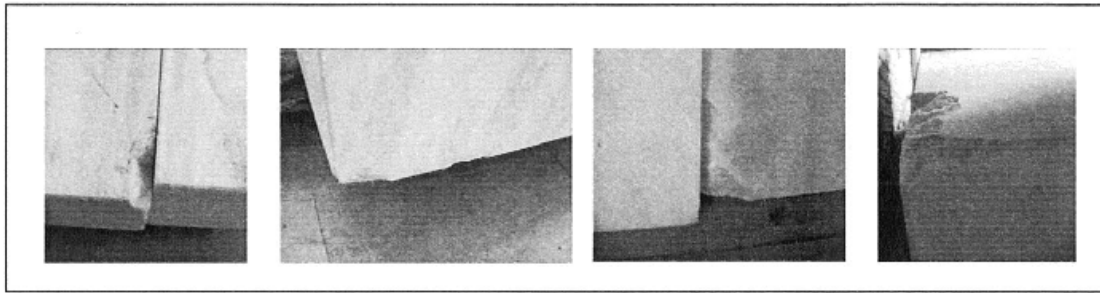
Σχήμα 20: Χρονοϊστορία μετατοπίσεων του κιονόκρανου του κίονα Κ2 στην εγκάρσια και τη διαμήκη διεύθυνση στα πειράματα των κίονων σε γωνία 90 μοιρών με και χωρίς μεταλλικούς συνδέσμους στα επιστύλια αντίστοιχα (πειράματα 7 και 8). Το επιταχυνσιογράφημα της Καλαμάτας έχει απομειωθεί 40% και στα δύο πειράματα.



Σχήμα 21: Χρονοϊστορία μετατοπίσεων του κιονόκranου του κίονα K3 στην εγκάρσια και τη διαμήκη διεύθυνση στα πειράματα των κίωνων σε γωνία 90 μοιρών με και χωρίς μεταλλικούς συνδέσμους στα επιστύλια αντίστοιχα (πειράματα 7 και 8). Το επιταχυνσιογράφημα της Καλαμάτας έχει απομειωθεί 40% και στα δύο πειράματα.



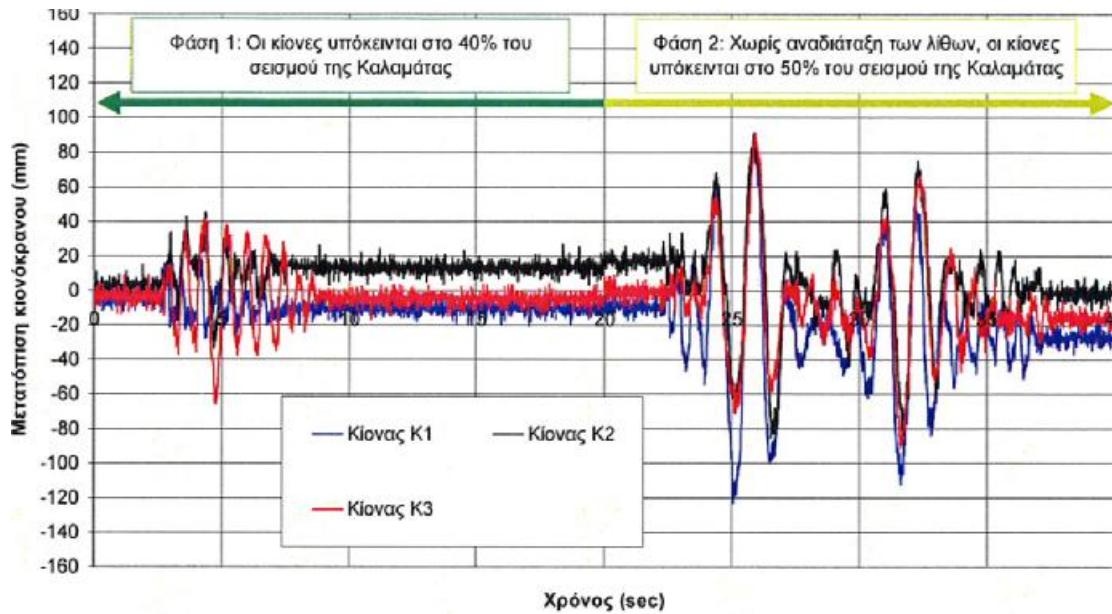
Σχήμα 22: Εικόνα των επιστυλίων στο τέλος και των πειραμάτων των κίωνων σε γωνία. Χωρίς μεταλλικούς συνδέσμους (άνω σειρά) και με συνδέσμους (κάτω σειρά). Παρατηρείται ότι οι σύνδεσμοι μείωσαν δραστικά τις ολισθήσεις των επιστυλίων.



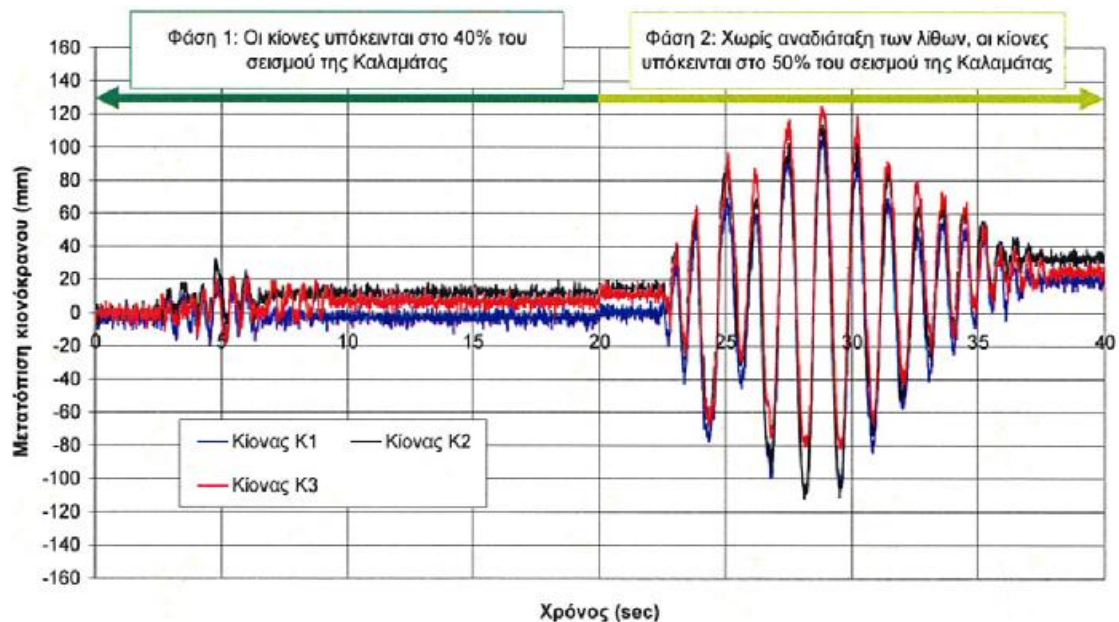
Σχήμα 23: Σε όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε κιονοστοιχίες με επιστύλια που δεν ήταν συνδεδεμένα μεταξύ τους, παρατηρήθηκαν σημαντικές συγκρούσεις μεταξύ των λίθων. Στο πέρας των πειραμάτων οι θραύσεις των επιστυλίων ήταν εμφανής.

Στο σχήμα 24 δίνεται η χρονοϊστορία των μετατοπίσεων των κιονόκρανων και των τριών κίωνων στο Πείραμα 9. Το πείραμα 9, στο οποίο εξετάστηκε η κιονοστοιχία εν σειρά με επιστύλια με μεταλλικούς συνδέσμους, πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις. Στην 1^η φάση το επιταχυνσιογράφημα της Καλαμάτας έχει απομειωθεί στο 40%. Στην συνέχεια, χωρίς να γίνει αναδιάταξη των λίθων (διατηρώντας δηλαδή τις πολύ μικρές μόνιμες μετατοπίσεις των σπονδύλων από την 1^η φάση του πειράματος) πραγματοποιήθηκε η 2^η φάση, όπου η κιονοστοιχία υπόκειται στο 50% του σεισμού της Καλαμάτας. Παρατηρείται ότι οι μετατοπίσεις και στους τρεις κίονες διπλασιάζονται σχεδόν στην δεύτερη φάση συγκριτικά με την πρώτη. Από προηγούμενα πειράματα (σύγκριση πειραμάτων 5 και 6) έχει διαπιστωθεί ότι η αύξηση της έντασης της σεισμικής διέγερσης της Καλαμάτας από 40% σε 50% οδηγεί από μηδενική έως και 5% αύξηση των μετατοπίσεων των κιονόκρανων. Συνεπώς η μεγάλη διαφορά των μετατοπίσεων από την μια φάση του πειράματος στην άλλη οφείλεται κυρίως στα μικρές σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ των σπονδύλων (περίπου 5-10mm, που προκλήθηκαν στην 1^η φάση) με τις οποίες ξεκινάει η 2^η φάση του πειράματος. Ακόμα και οι μικρές αυτές «αρχικές» μετατοπίσεις, είναι ικανές να προκαλέσουν μεγαλύτερες ολισθήσεις και λικνισμό κατά τη διάρκεια μιας επόμενης σεισμικής διέγερσης. Η διαπίστωση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στη μελέτη ενός αρχαίου ναού ή τμημάτων του είναι αρκετά σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη η υφιστάμενη κατάσταση των κίωνων με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

Εγκάρσια διεύθυνση της σεισμικής διέγερσης



Διαμήκης διεύθυνσης της σεισμικής διέγερσης



Σχήμα 24: Χρονοϊστορία μετατοπίσεων των κιονόκρανων και των τριών κίωνων στην εγκάρσια και τη διαμήκη διεύθυνση στις δύο φάσεις του πειράματος 9. Το επιταχυνσιογράφημα της Καλαμάτας έχει απομειωθεί στο 40% στην 1^η φάση του πειράματος. Στην συνέχεια, χωρίς να γίνει αναδιάταξη των λίθων (διατηρώντας δηλαδή τις πολύ μικρές μόνιμες μετατοπίσεις των σπονδύλων από την 1^η φάση του πειράματος) πραγματοποιήθηκε η 2^η φάση, όπου η κιονοστοιχία υπόκειται στο 50% του σεισμού της Καλαμάτας.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα των πειραμάτων συνοψίζονται ως ακολούθως:

Στα πειράματα με τους ανεξάρτητους κίονες διαπιστώθηκε διαφοροποίηση στην δυναμική συμπεριφορά του κίονα K1, που είχε ένταση, σε σχέση με τους άλλους δύο κίονες.

Οι κιονοστοιχίες είναι πιο σταθερές από τους ανεξάρτητους κίονες.

Η συμπεριφορά μιας κιονοστοιχίας ακόμα και με ασύνδετα επιστύλια δεν χαρακτηρίζεται από την έντονα μη-γραμμική συμπεριφορά των μεμονωμένων πολυσπόνδουλων κίωνων. Πρέπει όμως να σημειωθεί, ότι επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα από τα παλαιότερα πειράματα [Μουζάκης et al, 2002], ότι αύξηση του μεγέθους του σεισμού δεν οδηγεί απαραίτητα και σε αύξηση των μετατοπίσεων.

Το πιο «ευάλωτο» τμήμα ενός ναού διαπιστώνεται ότι είναι οι γωνίες του. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων τόσο οι κίονες όσο και τα επιστύλια είχαν μεγαλύτερες μετατοπίσεις τόσο οι κίονες όσο και τα επιστύλια είχαν μεγαλύτερες μετατοπίσεις στην κιονοστοιχία σε γωνία 90 μοιρών. Συγκεκριμένα, όταν δεν υπάρχουν μεταλλικοί σύνδεσμοι η κατάρρευση του εξωτερικού επιστυλίου είναι πολύ πιθανή.

Πιθανές υφιστάμενες μετατοπίσεις σπονδύλων, ακόμα και μικρές, είναι δυνατόν να επηρεάσουν σημαντικά την δυναμική συμπεριφορά. Σε δύο πειράματα (τα πειράματα 3 και 9). Παρατηρήθηκε ότι έχοντας πολύ μικρές σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ των σπονδύλων ο λικνισμός των λίθων σχεδόν διπλασιάζεται. Είναι λοιπόν απαραίτητο σε μια μελέτη να λαμβάνεται υπόψη η υπάρχουσα κατάσταση ενός ναού.

Η επιρροή των συνδέσμων είναι διαφορετική στα διάφορα τμήματα μιας κιονοστοιχίας. Οι μετατοπίσεις των κίωνων κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης και οι μόνιμες ολισθήσεις μεταξύ των σπονδύλων μετά το πέρας του σεισμού αυξάνονται. Οι μετατοπίσεις όμως των δοκών των επιστυλίων μειώνονται δραστικά, μειώνοντας τον κίνδυνο κατάρρευσης των επιστυλίων και τις κρούσεις μεταξύ τους που προκαλούν ζημιές.

ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΒΥΖΑΝΤΙΝΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ

Η Αγία Σοφία και άλλες βυζαντινές κατασκευές παραμένουν όρθιες στο πέρασμα περίπου 1500 χρόνων σε μια από τις πιο σεισμικά δραστήριες περιοχές του κόσμου. Είναι χαρακτηριστικό ότι στην περιοχή αρκετές μεταγενέστερες κατασκευές, μικρότερου μεγέθους, σχεδιασμένες από εκπαιδευμένους μηχανικούς με υλικά ανώτερων μηχανικών ιδιοτήτων, κατέρρευσαν, σε αντίθεση με πλήθος βυζαντινών κατασκευών που αψηφούν τον χρόνο και τις σεισμικές δονήσεις. Ακόμα και με τους σημερινούς κανόνες, τα οικοδομικά υλικά και την υπολογιστική δύναμη, ο αντισεισμικός σχεδιασμός ενός τόσο μεγάλου και πολύπλοκου κτίσματος όπως η Αγία Σοφία στην εν λόγω περιοχή δεν θα ήταν εύκολος.

Αν και οι σημερινοί αντισεισμικοί και οικοδομικοί κανονισμοί δεν αντικατοπτρίζουν τη σχεδιαστική και κατασκευαστική μεθοδολογία του ιστορικού κτίσματος, υπάρχουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά στη φιλοσοφία της κατασκευής.

Διάσπαρτα στα αιώνια δάση του Αγίου Όρους μπορεί να συναντήσει κανείς τα πρότυπα της βυζαντινής αντισεισμικής κατασκευής. Οι Ιερές μονές είναι μεγάλες σε μέγεθος σύνθετες κατασκευές δομημένες από τοιχοποιία ενισχυμένη από ξύλινα στοιχεία. Όπως και στις αρχαίες μινωικές κατασκευές, οι ξύλινες ενισχύσεις αυξάνουν την αντοχή της τοιχοποιίας σε φορτία εφελκυσμού και κάμψης. Τα παράθυρα είναι συνήθως τοξωτά ενώ υπάρχουν και καμάρες.

Τα βυζαντινά κτήρια και κυρίως η Αγία Σοφία έχουν προκαλέσει το ενδιαφέρον των επιστημόνων του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Princeton των ΗΠΑ. Από το 1995 έχουν επισκεφθεί διάφορες ομάδες την Κωνσταντινούπολη για να μελετήσουν και να καταγράψουν διάφορα στοιχεία για τις βυζαντινές εκκλησίες και τα τείχη που περιβάλλουν σημεία της πόλης. Η έρευνα αυτή έχει και ως στόχο την καταγραφή των ζημιών που έχουν υποστεί αυτά τα κτίσματα καθώς και την πραγματοποίηση μελετών για τη μερική αποκατάστασή τους.



Λεπτομέρεια από βυζαντινό μοναστήρι όπου διακρίνεται ο ιδιαίτερος τρόπος τοποθέτησης των τούβλων.

Αγία Σοφία

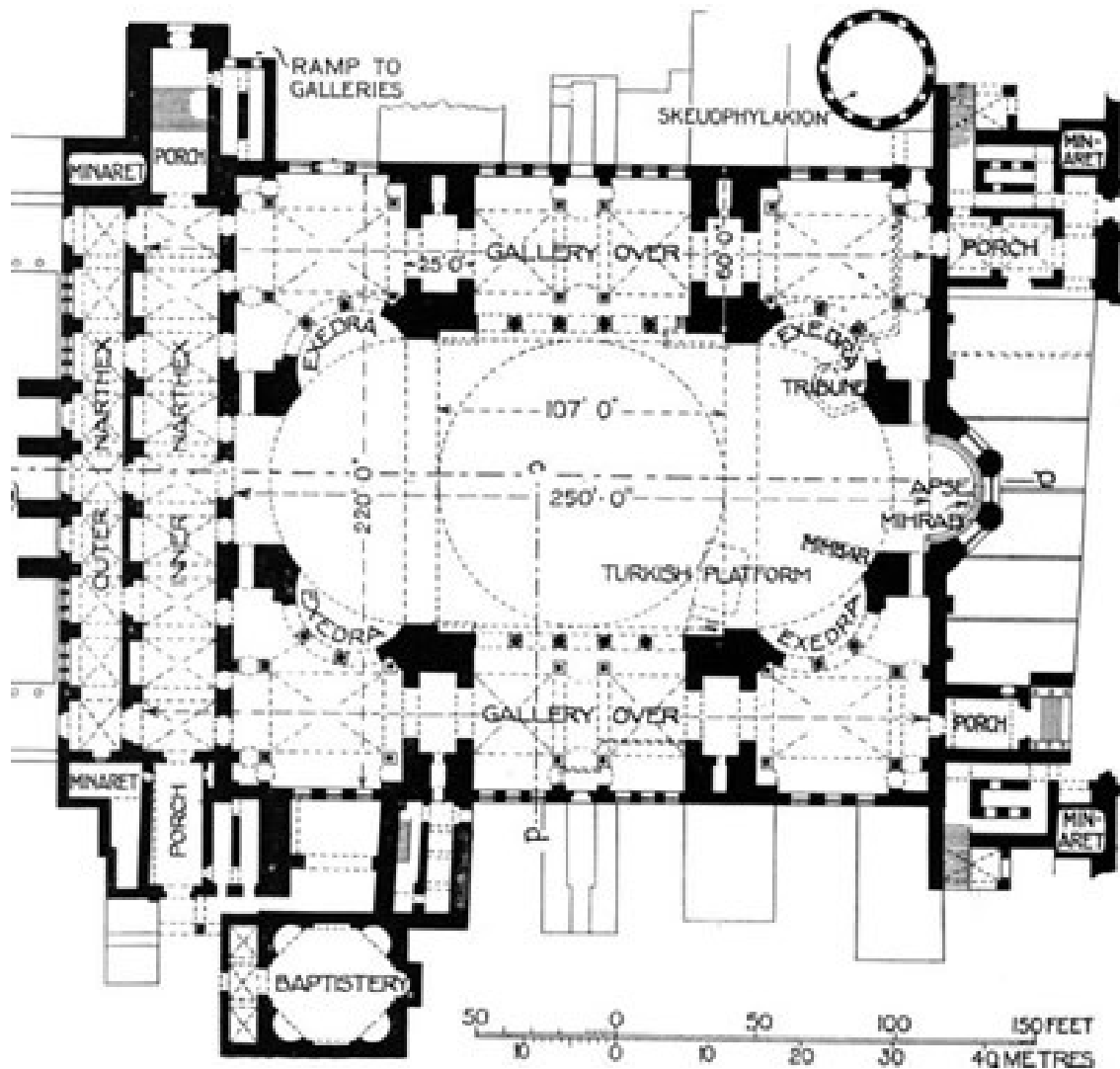


Ο ναός της ΑΣ είναι κάτι μοναδικό. Αποτελεί το πρώτο τετράγωνο κτίριο που σκεπάστηκε με ένα τόσο μεγάλο τρούλου. Ενώ σε σειρά μεγέθους ναού είναι το τρίτο μεγαλύτερο στον κόσμο μετά από το Άγ. Πέτρο στη Ρώμη ο οποίος χτίστηκε 1000 χρόνια μετά και η κατασκευή του διήρκησε 120 χρόνια (πολύ μεγαλύτερος όμως σε μέγεθος), και τον Άγ. Παύλο του Λονδίνου που χτίστηκε 200 χρόνια μετά τον Άγ. Πέτρο και χρειάστηκε 34 χρόνια για να τελειώσει, αρκετά περισσότερα από τα 6 περίπου χρόνια που χρειάστηκαν για την ΑΣ.

Η ιστορία της Αγίας Σοφίας αρχίζει μαζί σχεδόν με αυτή της Κωνσταντινούπολης και του Βυζαντίου. Το 325 ο Μ. Κων/νος χτίζει την πρώτη «Μεγάλη Εκκλησία», στο ίδιο μέρος, πολύ μικρότερη όμως. Το 381 όταν αυτοκράτορας ήταν ο Μ. Θεοδόσιος γίνεται η 2^η Οικουμενική Σύνοδος η οποία επικυρώνει τις αποφάσεις της 1^{ης} και συμπληρώνει το Σύμβολο της Πίστεως, καταλύοντας οριστικά την αίρεση του αρειανισμού.

Τότε όμως ξεσηκώνονται οπαδοί του Αρείου καταστρέφοντας εκτός των άλλων και την εκκλησία αυτή. Επιδιορθώνεται και λειτουργεί αμέσως μετά. Καταστρέφεται για 2^η φορά στις 20 Ιουνίου του 404 επί Αρκαδίου, από οπαδούς του Αγ. Ιωάννου του Χρυσοστόμου που διαμαρτύρονταν για την εξορία του ιερού πατρός. Επισκευάζεται και ξαναλειτουργεί από τις 10

Οκτωβρίου του 415. Καταστρέφεται για 3^η και τελευταία φορά το 532 κατά τη στάση του Νίκα στον Ιππόδρομο. Την ίδια χρονιά ο Ιουστινιανός ο Α΄ αρχίζει την ανέγερση της Αγίας Σοφίας.



Κάτοψη ναού

Ο ναός είναι ρυθμού τριτόκλιτης βασιλικής μετά του τρούλου. Τα σχέδια και η αρχιτεκτονική επιμέλεια του ναού ανατέθηκαν στον μαθηματικό Ανθέμιο από τις Τράλλεις (σημερινό Αιδήνιο) και στον Ισίδωρο από την Μίλητο, 2 από τους καλλίτερους αρχιτέκτονες της εποχής, οι οποίοι κατάφεραν –γιατί περί κατορθώματος πρόκειται- να σχεδιάσουν την Αγία Σοφία σε 4 μήνες. Τα νούμερα και μόνο όμως της Αγίας Σοφίας είναι ενδεικτικά του μοναδικού της

κατασκευής. Διαστάσεις ναού: Νάρθηκας 60μ μήκος - 5,75μ πλάτος Κυρίως ναός 78,16μ - μήκος 71,82μ πλάτος Ύψος μέχρι κορυφή τρούλου 55,60μ δηλ. όσο περίπου μία πολυκατοικία 17 ορόφων ($4+3*17=55$) Σήμα κατατεθέν της Αγίας Σοφίας αποτελεί ο τρούλος της. Διαστάσεις τρούλου: Διάμετρος 33μ - Ύψος από τη βάση του 13,80μ όσο δηλ. μία τριώροφη με τετραώροφη πολυκατοικία. Εκείνο όμως που προσδίδει λάμψη στον τρούλο είναι τα 42 παράθυρα που βρίσκονται στο κατώτερο μέρος του σε σύνολο 180 που έχει όλος ο ναός. Για την κατασκευή της Αγίας Σοφίας χρειάστηκαν 5χρόνια, 10μήνες και 4ημ., σαφώς λιγότερα, όπως είδαμε, απ' ότι στον Αγ. Πέτρο και τον Αγ. Παύλο.

Ο ναός καταλαμβάνει έκταση περίπου 8 στρέμματα, όσο περίπου ένα γήπεδο ποδοσφαίρου, ενώ τα ψηφιδωτά γύρω στα 16 στρέμματα καλύπτοντας κάθε καμπύλη, όλη τη στέγη και μέρος των περιμετρικών τοίχων του ναού. (να σημειωθεί ότι ήταν ολόχρυσα). Κόστος κατασκευής 3,6 εκατ. χρυσές λίρες, δηλαδή περίπου 4,4 εκατ. € - και να ληφθεί υπόψη τα χαμηλά ημερομίσθια της εποχής, δεν υπήρχε ασφάλιση των εργαζομένων, και πολλά από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δώρα διαφόρων ηγεμόνων. Συνολικά εργάστηκαν 10000 άνθρωποι 100 μάστορες που ο καθένας είχε 100 εργάτες.

Δυστυχώς όμως, 20 χρόνια μετά, στις 7 Μαΐου του 558, ο τρούλος πέφτει, κατά μία ιστορική πηγή από ισχυρό σεισμό, σύμφωνα όμως με μία παράδοση, όταν ο Ιουστινιανός έβγαζε τις σκαλωσιές του τρούλου τα δοκάρια έπεφταν με δύναμη στο πάτωμα προκαλώντας ισχυρές δονήσεις. Έτσι λοιπόν, όταν τον επισκεύασαν γέμισαν, σύμφωνα με την παράδοση πάντα, τον ναό μέχρι τα πρώτα κατηχούμενα, περίπου σε ύψος 10-15μ., οπότε όταν έπεφταν τα δοκάρια στο νερό δεν δονούσαν την κατασκευή. Τα 2^α εγκαίνια της ΑΣ εορτάζονται και αυτά πανηγυρικός στις 24 Δεκεμβρίου του 563. Ο τρούλος ξαναπέφτει για 2^η φορά, το 989, επισκευάζεται από τον Βασίλειο Βουλγαροκτόνο το 995.

Αντισεισμική τεχνολογία της Αγίας Σοφίας

Έρευνα που υλοποιήθηκε με ελληνική συμμετοχή αποκάλυψε ότι τούβλα δώδεκα φορές πιο ελαφρά από τα συνηθισμένα και ειδικά κονιάματα είναι τα δύο μυστικά που προσέφεραν αντισεισμική προστασία στην κορυφαία δημιουργία της βυζαντινής αρχιτεκτονικής, και της επιτρέπουν να αντέχει σεισμό τουλάχιστον 7 ρίχτερ.

«Καταφέραμε μέσα από τα υλικά να διαβάσουμε τα μυστικά των βυζαντινών μαστόρων», λέει η καθηγήτρια του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου Αντωνία Μοροπούλου, η οποία παρουσίασε τα αποτελέσματα μακρόχρονης έρευνας που πραγματοποιήθηκε από τα πανεπιστήμια του Πρίνστον των ΗΠΑ, του Μπογάζιτζι της Τουρκίας και από το ΕΜΠ στην έκδοση που υπογράφει υπό

τον τίτλο «Η ελληνική συμβολή στη συντήρηση της Αγίας Σοφίας», την οποία εξέδωσε το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος.

Πρώτες ύλες από τη Ρόδο και ειδική τεχνική από την Ανατολή συνδυάστηκαν για να δημιουργηθούν οι οπτόπλινθοι στον σημερινό, δεύτερο, τρούλο της Αγίας Σοφίας, καθώς ο πρώτος κατέρρευσε από σεισμό. Για να αποδειχθεί ο θρύλος που ήθελε τα τούβλα του τρούλου να κατασκευάζονται με ειδική παραγγελία, οι ερευνητές συνέκριναν τα δομικά υλικά της Αγίας Σοφίας με σύγχρονα κτίσματα από την Πόλη και τη Ρόδο. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως κατά 95% οι πρώτες ύλες προέρχονται από τη Ρόδο, είναι εμπλουτισμένες σε άργιλο και μπορούν να δώσουν οπτόπλινθους συμπαγείς και με υψηλή αντοχή. Όσο για την τεχνική όπτησης (ψησίματος των τούβλων) έχει τις ρίζες της στην Ανατολή όπου η συγκεκριμένη τεχνογνωσία ήταν ιδιαίτερα αναπτυγμένη. Τα τούβλα λοιπόν που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κατά πολύ ελαφρύτερα και πιο πορώδη από εκείνα που ήταν σε χρήση εκείνη την εποχή σε άλλες κατασκευές. Ο τούρκος καθηγητής μάλιστα θεωρεί ότι είχαν ψηθεί σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω από τους 750 βαθμούς Κελσίου) ώστε να επιτευχθεί η σωστή αντίδραση μεταξύ των υλικών.

Δεύτερο αντισεισμικό μυστικό της Αγίας Σοφίας ήταν τα κονιάματα από ημι-αποκρυσταλλοποιημένο υλικό που έχει την ιδιότητα να απορροφά την ενέργεια του σεισμού, εξηγεί η κ. Μοροπούλου. Τα κονιάματα αυτά μάλιστα, αφού αναλύθηκαν, ξαναγεννήθηκαν βελτιωμένα στα εργαστήρια. Το αποτέλεσμα ήταν να αντιδράσουν πολύ ικανοποιητικά στον σεισμό του 1999 (είχαν τοποθετηθεί στο μνημείο λίγους μόλις μήνες προ του μεγάλου σεισμού στην Τουρκία) ενώ εκτιμάται πως η σύνθεση και η ιδιοσυστασία του υλικού μπορούσε να αντέξει 7 ρίχτερ. Η σχέση μάλιστα κονιάματος και τούβλου συνετέλεσε στην επιπλέον ενίσχυσή του. Γιατί οι κτίστες, προκειμένου να δουλέψουν γρηγορότερα, έβαζαν μεγαλύτερη ποσότητα κονιάματος στους αρμούς ανάμεσα στα τούβλα. «Το αποτέλεσμα είναι να συμπεριφέρονται οι αρμοί σαν ενισχυμένο τσιμέντο», όπως λέει ο κ. Τσακμάν.

Πριν από την Αγία Σοφία οι αρχιτέκτονες έχτιζαν απλώς πολύ ισχυρά κτίρια προκειμένου να επιζήσουν από τους σεισμούς. Ο καθηγητής Αχμέτ Τσακμάν διατυπώνει την τολμηρή ιδέα ότι μπορεί ο Ανθέμιος να είχε κατασκευάσει μια μηχανή προσομοίωσης σεισμών, με αποτέλεσμα να αντιληφθεί ότι οι πιέσεις σε ένα δυναμικό σύστημα είναι ανάλογες με τη μάζα. Άρα το σχέδιό τους να χρησιμοποιήσουν ελαφρύτερα τούβλα και εύκαμπτο κονίαμα αντί για πέτρα ήταν απολύτως λογικό.

Υπήρξαν όμως και αρχιτεκτονικές πρωτοτυπίες οι οποίες συνέβαλαν στην αντισεισμικότητα του κτηρίου. Σήμερα η Αγία Σοφία έχει καταλήξει ένα συνονθύλευμα από τρούλους, αντερείσματα, μιναρέδες και τείχους αντιστήριξης, που έχουν προστεθεί σε διάφορες εποχές εν ονόματι της θρησκείας ή για λόγους αποκατάστασης. Και παρ' ότι όλα τα οικοδομήματα με τρούλους που χτίζονταν την εποχή εκείνη ήταν κατασκευές με θόλους επάνω σε κυλίνδρους, αντιθέτως η Αγία Σοφία είναι χτισμένη επάνω σε ένα στέμμα από ασίδες. Οι ασίδες αυτές υποστηρίζονταν από τεράστια αντερείσματα τα οποία λάμβαναν την τάση των ασίδων να “ανοίξουν” και είναι κρυμμένες ώστε να μην χαλάνε το οπτικό αποτέλεσμα.

Οι περισσότεροι μελετητές συμφωνούν ότι οι βυζαντινοί αρχιτέκτονες πρέπει να επικεντρώθηκαν με πολύ μεγάλη προσοχή στα απλά γεωμετρικά μεγέθη και στο κλασικό πρότυπο του υπάρχοντος Πανθέου στη Ρώμη, για το οποίο ο Ρόμπερτ Μαρκ είχε κάνει ένα μοντέλο στον υπολογιστή, προτού ασχοληθεί με την Αγία Σοφία. Ως εκείνη τη στιγμή λοιπόν οι περισσότεροι ερευνητές πίστευαν ότι τα 40 παράθυρα στην Αγία Σοφία είχαν τοποθετηθεί μόνο για την οπτική εικόνα. Η δική του έρευνα όμως έδειξε ότι προστέθηκαν εκεί για λόγους στατικούς. Γιατί έτσι αποφεύγονται οι ρωγμές. Κατά τον Μαρκ, ο Ανθέμιος και ο Ισίδωρος γνώριζαν ότι η περιοχή γύρω από τον τρούλο ούτως ή άλλως θα «ήθελε», θα είχε την τάση, να ρηγματωθεί κατά μήκος του άξονα των παραθύρων. Γι' αυτό και χρησιμοποίησαν τα παράθυρα ως τεχνητές ρωγμές.

Δυναμική ανάλυση και σεισμική αντίδραση της Αγίας Σοφίας

Εισαγωγή

Η Αγία Σοφία περιλαμβάνει 4 μεγάλα τούβλινα τόξα τα οποία στηρίζονται σε πέτρινες κολώνες οι οποίες παραλαμβάνουν το βάρος του κεντρικού θόλου διαμέτρου 31 μέτρων καθώς και 2 ημιθόλων. Ιδιοτιμικές (Eigenvalue) αναλύσεις χρησιμοποιώντας μοντέλα περατών στοιχείων για την κύρια κατασκευαστική υποστήριξη του θόλου μας δίνουν προσεγγιστικά διαγράμματα για το σχήμα και τη συχνότητα της κατασκευής. Τα στοιχεία των υλικών για το μοντέλο είναι καθορισμένα για να ταιριάζουν στις μετρήσεις των περιβάλλοντων δονήσεων. Οι μετατοπίσεις που πραγματοποιήθηκαν από ένα πρόσφατο σεισμό έντασης 4.8 βαθμών εξετάζονται. Αναλύσεις συχνότητας και χρόνου χρησιμοποιούνται για να αναγνωριστούν σχήματα και συχνότητες. Η ανάλυση διακριτών χρονικών περιόδων της καταγραφείσας κίνησης δείχνει μια ανεπαίσθητη διαφορά της συχνότητας με την αυξανόμενη ένταση. Η απεικόνιση των μετρηθείσων αντιδράσεων του ιδιοτιμικού μοντέλου ανταποκρίνεται στις αντιδράσεις του κτηρίου.

Ιδιοτιμικό μοντέλο

Δημιουργήθηκε ένα γραμμικό ελαστικό μοντέλο περατών στοιχείων για ιδιοτιμική ανάλυση της κύριας υποστηρικτικής κατασκευής του θόλου, το οποίο ονομάστηκε dyn26a και οι φυσικές συχνότητες του αντιστοιχούν στις παρατηρούμενες τιμές τις οποίες βλέπουμε στον Πίνακα 1 και οι οποίες μετρήθηκαν από τις περιβάλλουσες δονήσεις που πάρθηκαν από το ίδιο το κτήριο [1].

Πίνακας 1. Περιβάλλον καθορισμός (i)

Mode	Παρατηρούμενο	Πρωτεύων FE ⁽ⁱⁱ⁾ model	Τελικό FE ⁽ⁱⁱ⁾ model	Κύρια μετατόπιση
1	1.84	1.97	1.78	A.- Δ.
2	2.09	2.08	2.16	B.- N.
3	2.41	2.37	2.43	Torsional rotation

- (i) Όλες οι συχνότητες είναι σε Hz
- (ii) Πρωτεύων = dyn26a, Τελικό = whole4

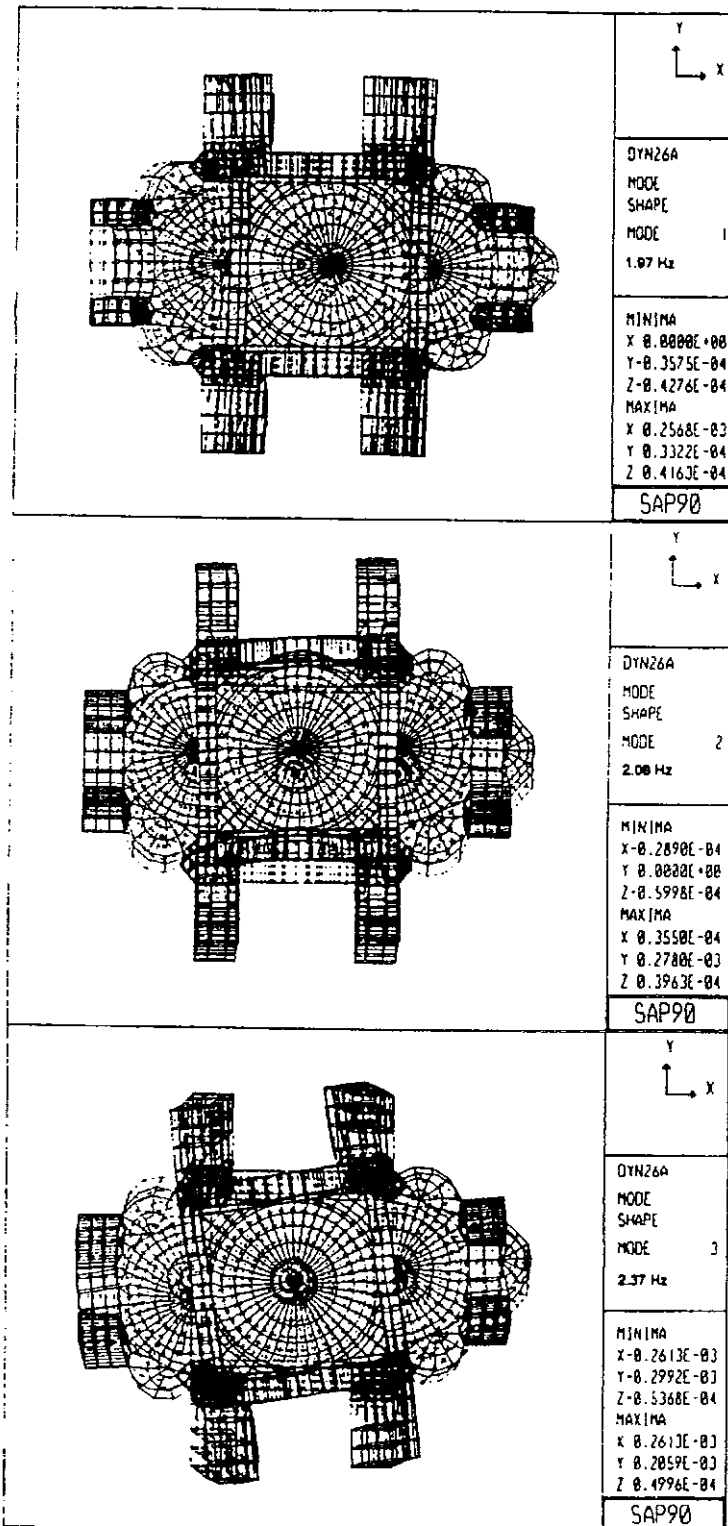
Το πρωτεύων μοντέλο περατών στοιχείων είναι μία πιο σύνθετη εκδοχή του αρχικού μοντέλου το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την στατική ανάλυση [2]. Τα τυμπανοειδή τείχη και κολόνες, οι ανατολικοί αψιδωτοί ημιθόλοι, σκάλες και εξέδρες έχουν προστεθεί. Οι κύριες εξέδρες και το κάτω μέρος των αντιστηριγμάτων είναι από πέτρα και το υπόλοιπο κύριο κτήριο από τούβλο. Πειραματιζόμενοι με το μέτρο ελαστικότητας των δύο στοιχείων, λήφθηκαν συχνότητες που ταίριαζαν με τις περιβάλλουσες μετρήσεις. Οι συχνότητες για το μοντέλο περατών στοιχείων της κύριας δομής που παρατέθηκαν στον Πίνακα 1 πάρθηκαν χρησιμοποιώντας τα μέτρα ελαστικότητας που δίνονται στο Πίνακα 2. Η ίδια πυκνότητα, ρ , χρησιμοποιήθηκαν σε όλες τις περιοχές, εκτός από μία μείωση 25% στα τεταρτοθόλια.

Πίνακας 2. Μέτρο Ελαστικότητας⁽ⁱ⁾ για το Πρωτεύων μοντέλο

Περιοχή	Μέτρο ελαστικότητας E
Πέτρινη τοιχοποιία	10.0
Τούβλινη τοιχοποιία	5.0
Επιβάρυνση	2.5
Περιοχές έντασης	1.0

- (i) Το μέτρο ελαστικότητας είναι σε 10^9 Pa

Τα πρώτα 3 σχήματα για το πρωτεύων μοντέλο παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. Οι μορφές αυτές αντιστοιχούν στην οριζόντια μετακίνηση (1 και 2) και στην συστροφή (3) ολόκληρου του πρωτεύοντος κτηριακού συστήματος.



Σχήμα 1. Φυσικές συχνότητες και μορφές του κύριο κτηριακού μοντέλου.

Κτηριακές επισκευές και συντήρηση Ιστορικών Κτηρίων

Παρόλο που οι ανωτέρω συχνότητες συμφωνούν με αυτές των περιβάλλουσων μετρήσεων, τα μέτρα ελαστικότητας αναγκαία για να ληφθούν είναι υπερβολικά μεγαλύτερα από αυτά τα οποία πάρθηκαν στην στατική ανάλυση [2]. Μπορεί οι κατασκευές που περιβάλλουν το κυρίως κτήριο, τα τείχη, πατώματα, ταβάνια, νάρθηκες και αντερείσματα, που προστέθηκαν πολύ αργότερα, να επηρέασαν τις συχνότητες που μετρήθηκαν στη περιβάλλουσα δονητική μελέτη. Για να ερευνηθεί αυτή η θεωρία, τα επιπλέον κτήρια προστέθηκαν στο πρωτεύων μοντέλο. Το εναλλακτικό αυτό μοντέλο, που ονομάστηκε whole4, είναι εμφανώς σφιχτότερο στα επίπεδα 2 και 3, έχοντας ως αποτέλεσμα συχνότητες που είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από αυτές που πάρθηκαν από το μοντέλο του πρωτεύοντος κτηρίου. Οι συχνότητες για το μοντέλο του τελικού κτηρίου που δίνονται στον Πίνακα 1 είναι βασισμένες στο ίδιο μέτρο ελαστικότητας και πυκνότητα του πρωτεύοντος μοντέλου με την εξαίρεση ότι δεν υπήρξε ελάφρυνση στις επιβαρυσμένες και εντεταμένες περιοχές.

Η ανωτέρω παρατηρήσεις συνοψίζουν τα χαρακτηριστικά της δυναμικής απόκρισης της καθόλου η περιβάλλουσας δόνησης. Η υπόλοιπη έρευνα επικεντρώνεται στα χαρακτηριστικά της επιβαλλόμενης δόνησης. Για να καταλάβουμε τα αποτελέσματα της συστημικής αναγνώρισης, κύρια χαρακτηριστικά του κτηριακού συστήματος, υλικών και μετρημένες χρονικές ιστορίες θα εξεταστούν πρώτα.

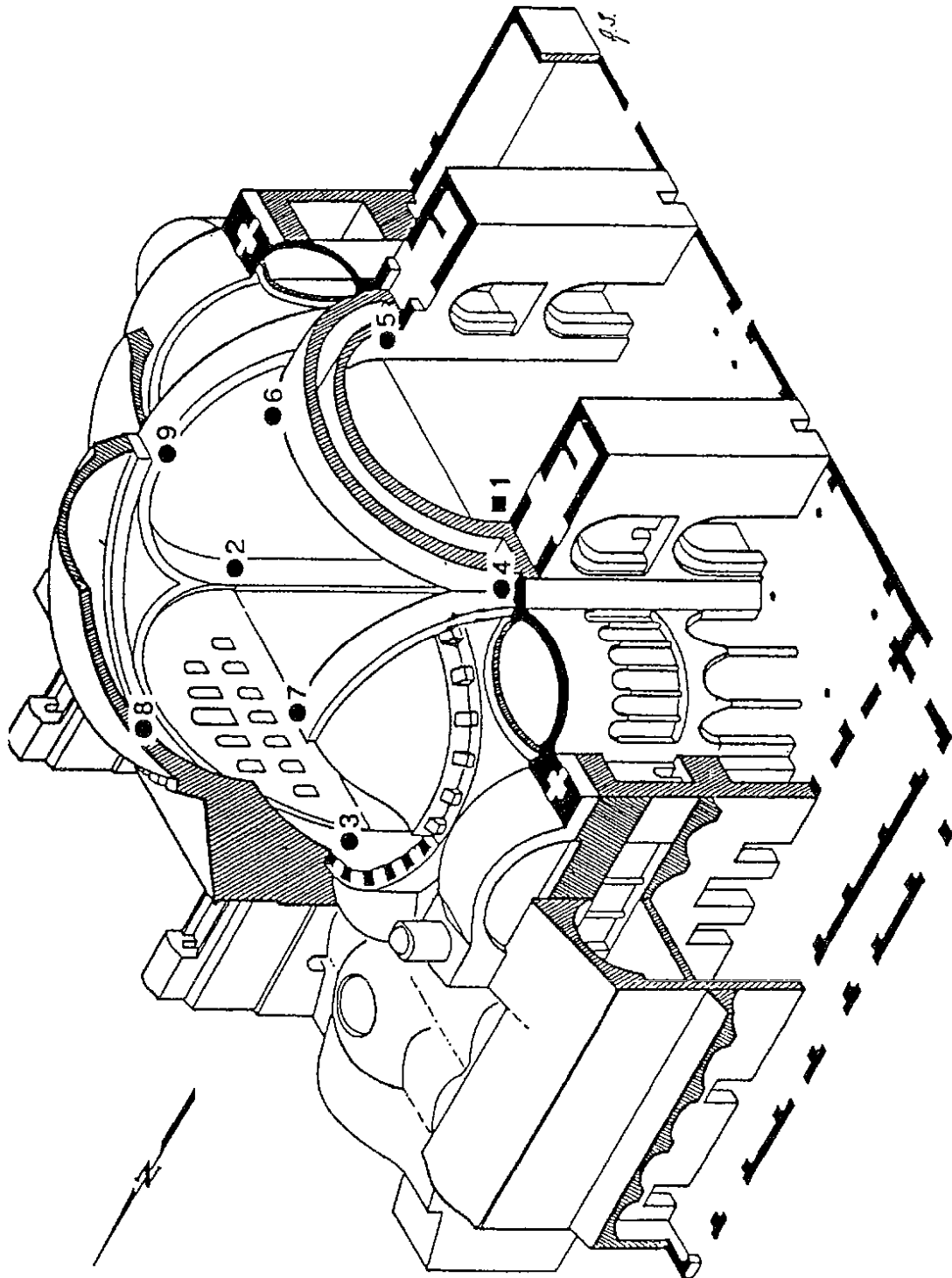
Η υποστηρικτική δομή του κύριου θόλου και η σειρά των οργάνων

Η κύρια δομή που υποστηρίζει τον μεγάλο θόλο της Αγίας Σοφίας και ο προσανατολισμός της απεικονίζονται στο Σχήμα 2. Ο βοράς (N) εφάπτεται με τον θετικό άξονα y του πλάνου. Ο διαμήκης άξονας του συγκροτήματος είναι ο άξονας ανατολής-δύσης (E-W) η ο άξονας x του πλάνου. Ο κύριος θόλος έχει σφαιρικό σχήμα το οποίο κάθεται σε μία τετράγωνη βάση. Βασικά στοιχεία περιλαμβάνουν τα 4 αντιστηρίγματα τα οποία υποστηρίζουν τις γωνίες της βάσης του θόλου και τις 4 κύριες αψίδες που ξεκινάνε από αυτά και στηρίζουν τις αιχμές της βάσης του θόλου.

Οι δύο αψίδες στην Βορινή και Νότια πλευρά ενισχύονται από επιπλέον αψίδες με γεμίσματα μεταξύ των πρωτευόντων και δευτερευόντων αψίδων. Οι βόρειες και νότιες αψίδες έχουν περίπου τις ίδιες διαστάσεις και είναι συμμετρικά τοποθετημένες. Ένα δεύτερο σύστημα από κολόνες προσφέρουν αντίσταση στις πλευρικές κινήσεις των κύριων αντιστηριγμάτων στον ανατολικό-δυτικό άξονα. Η ανατολική και δυτική αψίδα καλύπτουν μία ανοικτή περιοχή με αντιστηρίγματα αποβάθρες να δίνουν πλευρική υποστήριξη στα βασικά αντερείσματα του άξονα βορρά-νότου. Οι αψίδες ανατολής και δύσης δεν είναι συμμετρικές σε διαστάσεις και είναι ελαφρώς ασύμμετρες σε τοποθέτηση. Αυτή η ασυμμετρία οφείλεται σε ανακατασκευή και μεγέθυνση της δυτικής αψίδας μετά από μερική κατάρρευση [3].

Η διάταξη των οργάνων[4] έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να συλλάβουμε τη κίνηση των κυριότερων στοιχείων που σχηματίζουν την υποστηρικτική δομή του κύριου θόλου κατά τη διάρκεια των σεισμών. Το Σχήμα 2 μας δείχνει τη τοποθεσία των εννέα επιταχυνσιογράφων που είναι σχετικοί με το πρωτεύων σύστημα στοιχείων.

Η κίνηση του εδάφους στη βάση των κυρίως αντρεϊσμάτων μετριέται με το όργανο 1 που απεικονίζεται με ένα τετράγωνο στο Σχήμα 2. Οι περιοχές αντίδρασης 2 έως 9 απεικονίζονται με κύκλους στο Σχήμα 2. Η κίνηση στην κορυφή των βασικών αντρεϊσμάτων μετριέται από την διάταξη 2-5 και αυτή στην κορυφή των ασίδων από τη διάταξη 6-9.



Σχήμα 2: Η υποστηρικτική δομή του κυρίου θόλου και η σειρά των οργάνων που καταγράφουν τις δυνατές κινήσεις.

Ιδιότητες τοιχοποιίας που επηρεάζουν την δυναμική απόκριση

Οι τοιχοποιίες της Αγίας Σοφίας, που είναι είτε από τούβλο είτε από πέτρα και κονίαμα, παίζουν σημαντικό ρόλο στο να καθορίζουν την απόσβεση και το πόσο σφιχτά είναι τα βασικά δομικά στοιχεία. Αυτό το κεφάλαιο καταδεικνύει σημαντικές διαστάσεις της τοιχοποιίας τις οποίες πρέπει να λάβουμε υπόψη όποτε καθορίζουμε ιδιότητες του συστήματος και αναλυτικά μοντέλα χρησιμοποιώντας παρατηρούμενες αντιδράσεις.

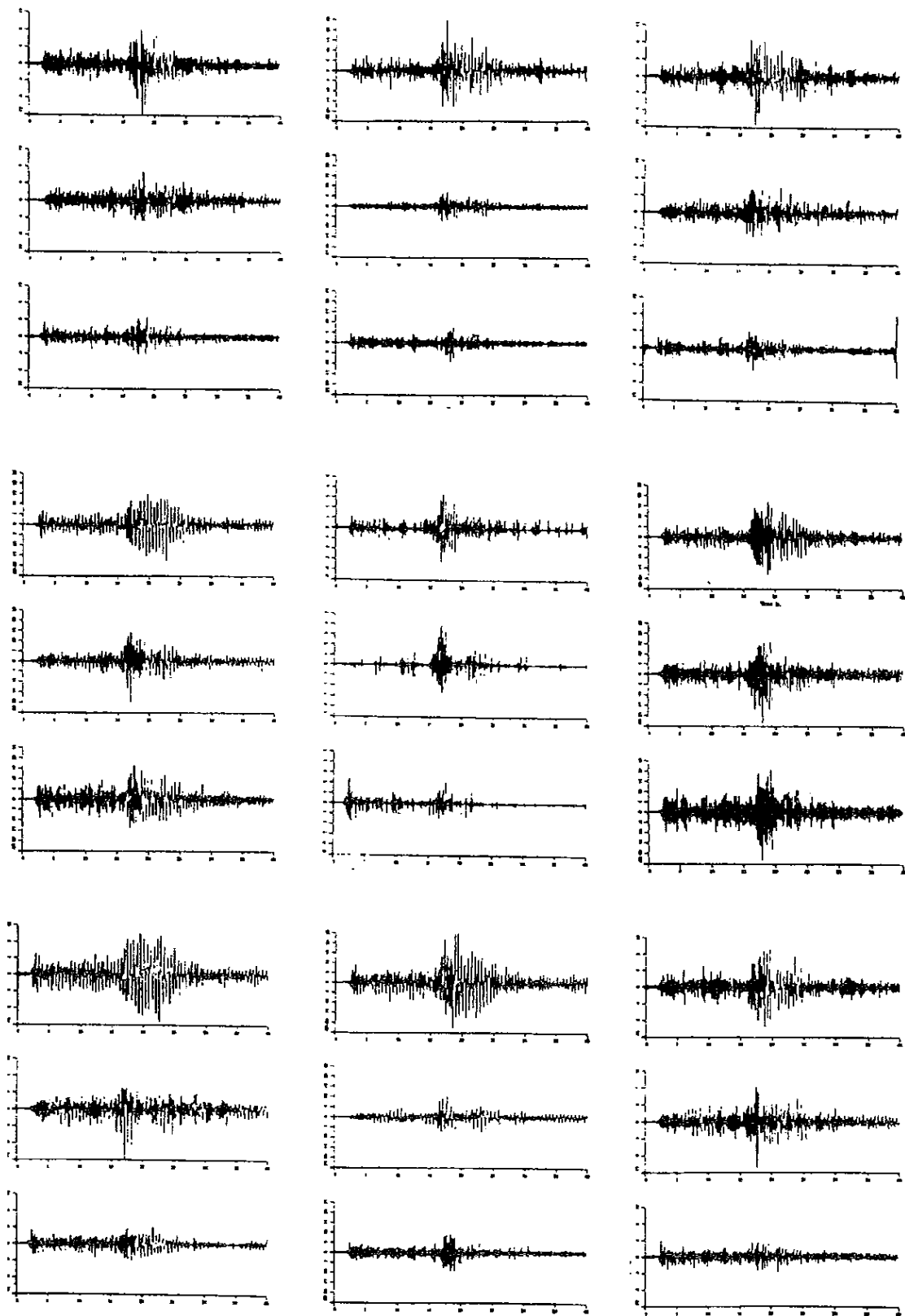
Τα κύρια αντερείσματα είναι κατασκευασμένα από πέτρινη τοιχοποιία. Το πάχος του κονιάματος είναι περίπου ίσο με αυτό των τούβλων (~ 50mm)[5]. Τα μήκη των τούβλων στις κύριες αψίδες ξεπερνούν τα 6m. Προκαταρκτική ανάλυση [6] δειγμάτων από την εκκλησία δείχνουν ότι το κονίαμα είναι ηφαιστειακής προέλευσης, όχι καθαρός ασβέστης, και περιέχει θραύσματα τούβλου στη σύνθεση του, καθώς επίσης και αλουμίνιο, ασβέστιο και άνθρακα. Τα θραύσματα λειτουργούν ως ενεργοποιητής ενώ τα υπόλοιπα υλικά παραθέτουν σε συγκολλητική ουσία.

Στην ουσία, το ηφαιστειακό κονίαμα που χρησιμοποιείται στην τούβλινη τοιχοποιία μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα τσιμέντο με στρεπτική αντοχή που ξεπερνά τα $3.5(10^6)$ Pa. Σύμφωνα με αυτή τη λογική η παρουσία των τούβλων παίρνει ένα διαφορετικό νόημα από το σύνηθες που είναι να είναι ένα βασικό υλικό για την παραλαβή φορτίων. Τα τούβλα της Αγίας Σοφίας μπορούν να θεωρηθούν ότι προσδίδουν δυσκαμψία αντί για αντοχή στο σύνολο. Το σύνολο είναι επίσης ελαφρύτερο από το σύγχρονο τσιμέντο αφού δεν χρησιμοποιείται η πυκνότερη πέτρα σαν συστατικό.

Μετρήσεις κινήσεων

Και οι 9 επιταχυνσιογράφοι ενεργοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια ενός σεισμού μεγέθους 4.8 στις 22 Μαρτίου του 1992. Το επίκεντρο ήταν στο Karacabey 120km νότια της Αγίας Σοφίας. Στο Σχήμα 3 βλέπουμε ότι ο σεισμός προκάλεσε οριζόντιες (N-S (y), E-W (x)) και κάθετες (z) μετακινήσεις στις αντίστοιχες χρονικές περιόδους και στις εννέα τοποθεσίες. Οι τρεις συνιστώσες για κάθε περιοχή αντίδρασης παρουσιάζονται σε διάταξη που αντιστοιχεί σε κάθε τοποθεσία κατ' αντιστοιχία (Σχήμα 2). Οι καταγραφές στο κέντρο του πλάνου αντιστοιχούν με την μετακίνηση της βάσης στη τοποθεσία 1, η οποία είναι κάτω από την τοποθεσία 2 στο πλάνο. Η έκταση που καθορίζεται από τις συντεταγμένες είναι η ίδια για όλες τις τοποθεσίες στο ίδιο υψόμετρο.

Σε κάθε περίπτωση οι καταγραφές δείχνουν ότι έχουμε μία μη στατική διαδικασία η οποία διενεργείται με τρεις στατικές χρονικές περιόδους. Η πρώτη περίοδος είναι από το 2^ο μέχρι το 12^ο δευτερόλεπτο και αντιστοιχεί στην ενέργεια συμπιεστικών κυμάτων, η δεύτερη από το 15^ο μέχρι το 25^ο δευτερόλεπτο και αντιστοιχεί στην άφιξη των διατμητικών κυμάτων, ενώ η Τρίτη περίοδος είναι από το 30^ο μέχρι το 40^ο δευτερόλεπτο και αντιστοιχεί στην περίοδο εξασθένησης της ενέργειας της κίνησης της βάσης. Η εντονότερη κίνηση παρατηρήθηκε κατά τη δεύτερη περίοδο.



Σχήμα 3: Καταγεγραμμένες επιταχύνσεις για τον σεισμό της 22ας Μαρτίου, 1992 με επίκεντρο το Karacabey.

Η κίνηση κατά τον άξονα βορρά-νότου υπερισχύει κατά όλα τα διαστήματα. Η ανατολικό-δυτική είναι σημαντική μόνο κατά το 2^ο διάστημα, ενώ η κάθετη μέτρια κατά τα 2 πρώτα διαστήματα αλλά αμελητέα στο 3^ο. Η κίνηση αντίδρασης είναι εμφανέστερη στο οριζόντιο επίπεδο (N-S και E-W) με εξαίρεση τις κορυφές της ανατολικής και δυτικής αψίδας όπου η κάθετη κίνηση είναι σημαντική. Σε γενικές γραμμές η κίνηση στον άξονα βορρά-νότου υπερισχύει στο οριζόντιο επίπεδο. Αυτό είναι ιδιαίτερος εμφανές στις κορυφές της βόρειας και νότιας αψίδας όπου η βόρεια-νότια κίνηση αντιστοιχεί στην εκτός-πλάνου-κίνηση των αψίδων. Η μέγιστη επιτάχυνση είναι περίπου 25 cm/s² και συμβαίνει εκεί μεταξύ του 16^{ου} και 20^{ου} δευτερολέπτου. Σημαντικές κινήσεις αντίδρασης στον ανατολικό-δυτικό άξονα συμβαίνουν στις κορυφές όλων των αντερείσμάτων και στις κορυφές της ανατολικής και δυτικής αψίδας. Σημαντική κάθετη κίνηση αντίδρασης έχουμε μόνο στις κορυφές της ανατολικής και δυτικής αψίδας.

Είναι εμφανές ότι οι μεγαλύτερες επιταχύνσεις συμβαίνουν στα ψηλότερα υψόμετρα. Η κίνηση σε σημεία στο ίδιο υψόμετρο δείχνουν παρόμοιες εντάσεις με την εξαίρεση ότι μεγαλύτερη ένταση (σύμφωνα με τις μετρήσεις των κινήσεων) φαίνεται στην βόρεια-νότια κίνηση στις τοποθεσίες 4 και 6. Η μέγιστη μετακίνηση στο σημείο 4 εκτιμάτε στα 0.071cm η οποία είναι διπλάσια από τη μετακίνηση στα σημεία 2,3 και 5. Παρομοίως, η μέγιστη μετακίνηση στο σημείο 6 εκτιμάτε στα 0.13cm η οποία είναι διπλάσια από αυτήν του σημείου 8. Αυτή η συμπεριφορά συνδέεται πιθανότατα με τα θεμέλια του νοτιοδυτικού κυρίως αντερείσματος.

System Identification

Ανάλυση φάσματος

Μη κανονικοποιημένες μονομερής power spectral density (PSD) εκτιμήσεις έχουν υπολογιστεί για κάθε οριζόντια καταγραφή κίνηση χρησιμοποιώντας πρότυπα προγράμματα [7] για ανάλυση τύπου Fast Fourier Transformation (FFT). Το φασματικό παράθυρο Tukey-Hanning [7] έχει χρησιμοποιηθεί για να πάρουμε ομαλές απεικονίσεις που δείχνουν τις κυρίαρχες συχνότητες. Το Σχήμα 4 δείχνει τα φάσματα που πήραμε για τρία επίπεδα της κύριας κατασκευής φερόμενοι στην κάθε καταγραφή σαν την πραγματοποίηση μίας και μόνο μη στατικής διαδικασίας. Η είσοδος της ενέργειας φαίνεται να είναι συγκεντρωμένη στην βόρεια-νότια κίνηση κοντά σε μια συχνότητα περίπου ίση με 2.4Hz. Μη αμελητέα ενέργεια παρατηρείτε επίσης στην ανατολικό-δυτική κίνηση έχοντας συχνότητα που κορυφώνεται μεταξύ των 2.7 και 4.2 Hz. Η ενέργεια αντίδρασης είναι συγκεντρωμένη στον άξονα βορρά-νότου με κινήσεις που έχουν συχνότητα περίπου στα 1.8, 2.4 και 3.3Hz, με τη σημείωση ότι η ενέργεια αντίδρασης που αντιστοιχεί στα 3.3Hz εξασθενεί στο επίπεδο των κορυφών των αψίδων.

Όπως περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι χρονικές ιστορίες δείχνουν ότι η όλη καταγραφή είναι πιο αληθοφανώς απεικονισμένη από τρεις μικρότερες σχεδόν στατικές διαδικασίες οι οποίες έχουν διαφορετικό επίπεδο εντάσεως. Η κάθε μία από τις περιόδους έχει οριστεί με διάρκεια 10.24 δευτερολέπτων για να πάρουμε τα καλύτερα αποτελέσματα στην εκτίμηση PSD. Η δύναμη του φάσματος για τις ξεχωριστές περιόδους μας δείχνει ότι η δύναμη της δεύτερης περιόδου υπερσχύει των άλλων δυο. Το Σχήμα 5 μας δείχνει τα φάσματα της δεύτερης περιόδου. Το διάστημα συχνοτήτων μεταξύ 1.6 και 2.8 Hz έχει απομονωθεί, διότι σε αυτό το διάστημα μέσα περιμένουμε τα 3 πρώτα επίπεδα να κινηθούν βασισμένοι στις μετρήσεις της περιβάλλουσας δόνησης. Οι τάσεις που παρατηρήθηκαν για τα φάσματα που πήραμε χρησιμοποιώντας όλες τις καταγραφές φαίνεται να είναι ελεγχόμενες από το φάσμα της μεσαίας χρονικής διάρκειας.

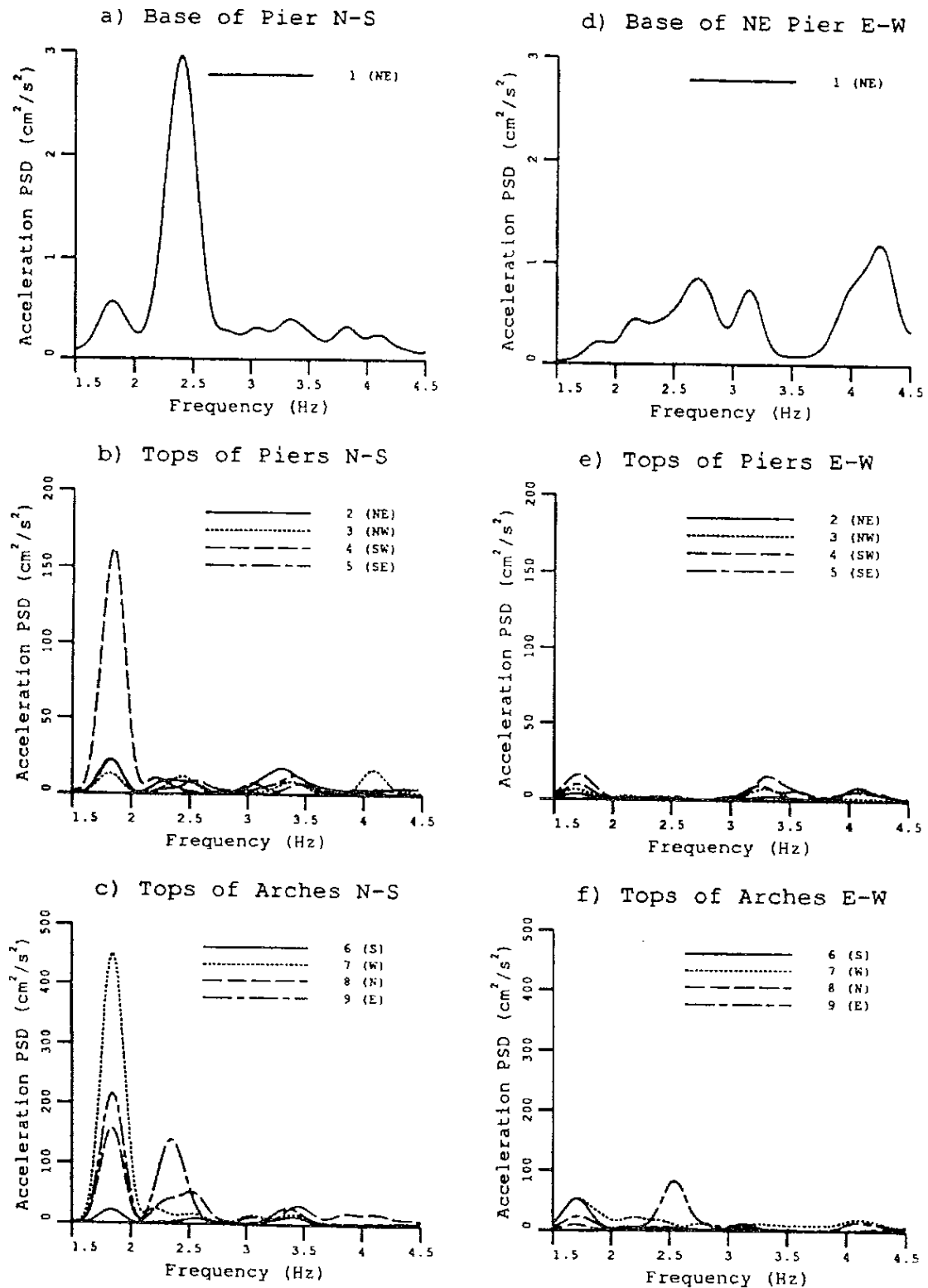
Το σύστημα αναγνώρισης έχει αποκτηθεί μέσω εκτιμήσεων της μετακίνησης ή της συχνότητας που της ενέργειας της αντίδρασης. Το σύστημα συχνοτήτων και αποσβέσεως ορίζεται μετρικά και από άποψη αντικειμένων σε όλη τη κατασκευή από σύνθετες αξίες που εξαρτώνται από συχνότητες και την σχέση εισροής-εκροής η οποία εκφράζεται από την λειτουργία της μεταβίβασης. Μία απλή αλγεβρική σχέση υπάρχει μεταξύ αυτής της λειτουργίας και του μέτρου δύναμης του φάσματος της ποσότητας εισροών εκροών για ένα γραμμικό σύστημα το οποίο περνάει μία στατική κίνηση [8]. Τα Σχήματα 6 και 7 δείχνουν τις πειραματικές μεταβιβαστικές ενέργειες, H_{yy} και H_{xx} , τα οποία πήραμε χρησιμοποιώντας αυτή την σχέση. Το H_{yy} αναπαριστά την μεταβιβαστική λειτουργία για την Y (N-S) αντιδραστική κίνηση η οποία προκαλείται από εισαγωγή Y (N-S) κίνησης στη βάση, και το H_{xx} , την X (E-W) αντίδραση που προκαλείται από X (E-W) εισαγωγή. Χρησιμοποιώντας τη δεύτερη διάρκεια, οι παρατηρούμενες συχνότητες που παίρνουμε δίνονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Σεισμική βαθμονόμηση (i)

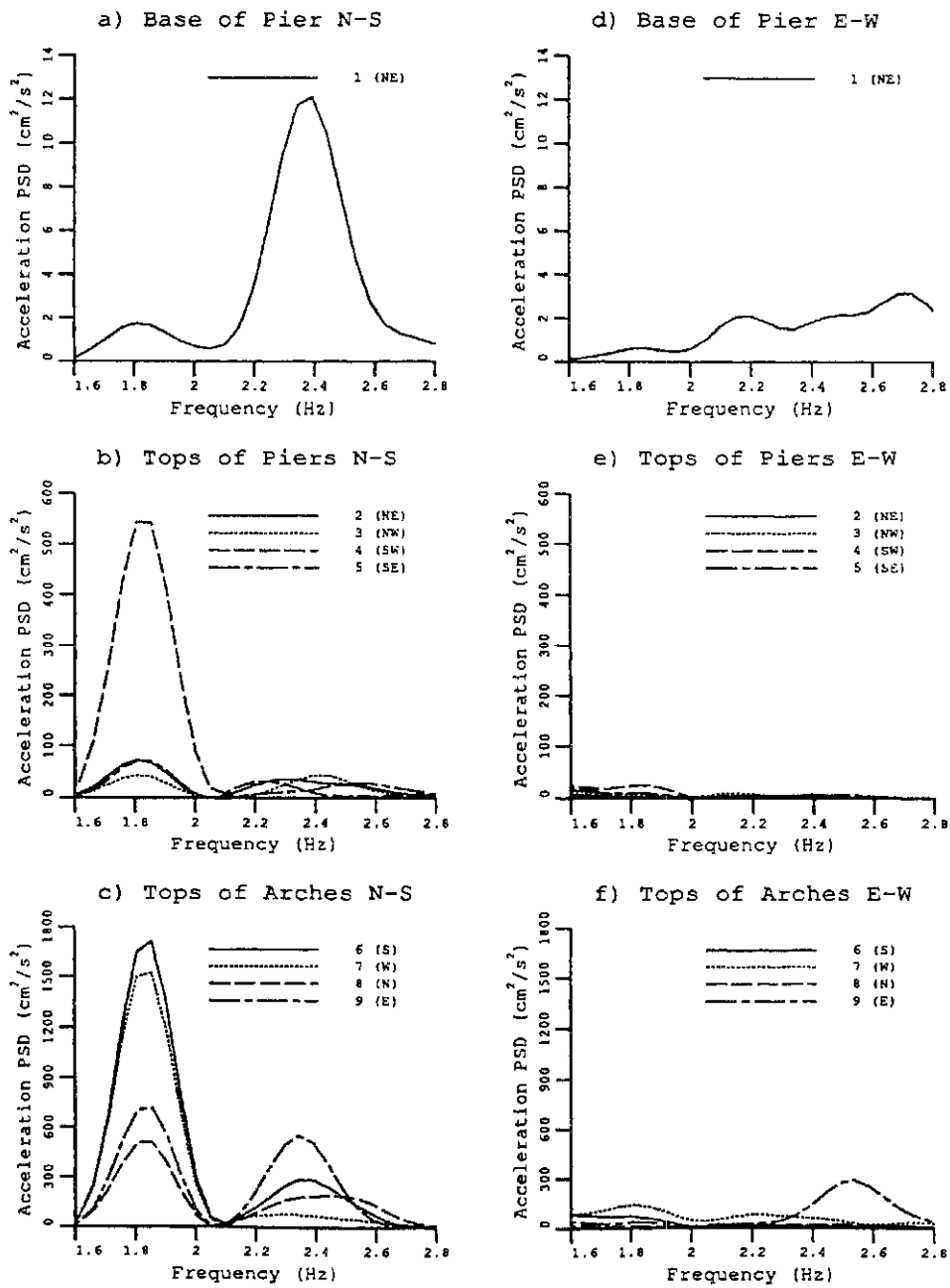
Επίπεδο	Παρατηρούμενη	Προσομοιωμένη (ii)	Υπερισχύουσα κίνηση
1	1.53	1.74	E-W (άξονας X)
2	1.85	1.88	N-S (άξονας Y)
3	2.15	2.10	Διαμητική (άξονας Z)

- (i) Όλες οι συχνότητες είναι σε Hz
- (ii) Προσομοίωση χρησιμοποιώντας το μοντέλο περατών στοιχείων Hsdyntc4

Το σύστημα ανταποκρίνεται κυρίως στα 1.85 Hz στο 2^ο χρονικό διάστημα. Αυτό αναπαριστά μία μείωση 10% στη συχνότητα του επιπέδου 2 σε σχέση με την συχνότητα της περιβάλλουσας δόνησης που είναι στα 2.09 Hz. Σύμφωνα με την πρώτη χρονική διάρκεια η υπερισχύουσα συχνότητα είναι τα 2.0 Hz, που αντιστοιχεί σε μια μείωση 5%. Αυτή η μείωση της συχνότητας μαζί με την αύξηση της επιβαλλόμενης δόνησης είναι συνεπής με την συμπεριφορά της μη-γραμμικής ή φθαρμένης κατασκευής. Η φθορά εδώ είναι απίθανη λόγω του ότι η μέγιστη επιτάχυνση στη βάση είναι μικρότερη από το 1% της βαρύτητας. Άμα ένα τέτοιας μικρής έντασης γεγονός μπορέσει να προκαλέσει ζημιά, σημαντική συγκέντρωση θα είχε συμβεί στην μεγάλη ιστορία του κτηρίου και θα ήταν εμφανής. Η μη γραμμικότητα η οποία συνδέεται με μερικά από τα στοιχεία των υλικών της τοιχοποιίας τα οποία περιγράφηκαν νωρίτερα είναι πραγματικά εκπληκτική σε τέτοια χαμηλά επίπεδα.



Σχήμα 4: Φάσματα δυνάμεως της επιτάχυνσης χρησιμοποιώντας όλες τις καταγραφές.



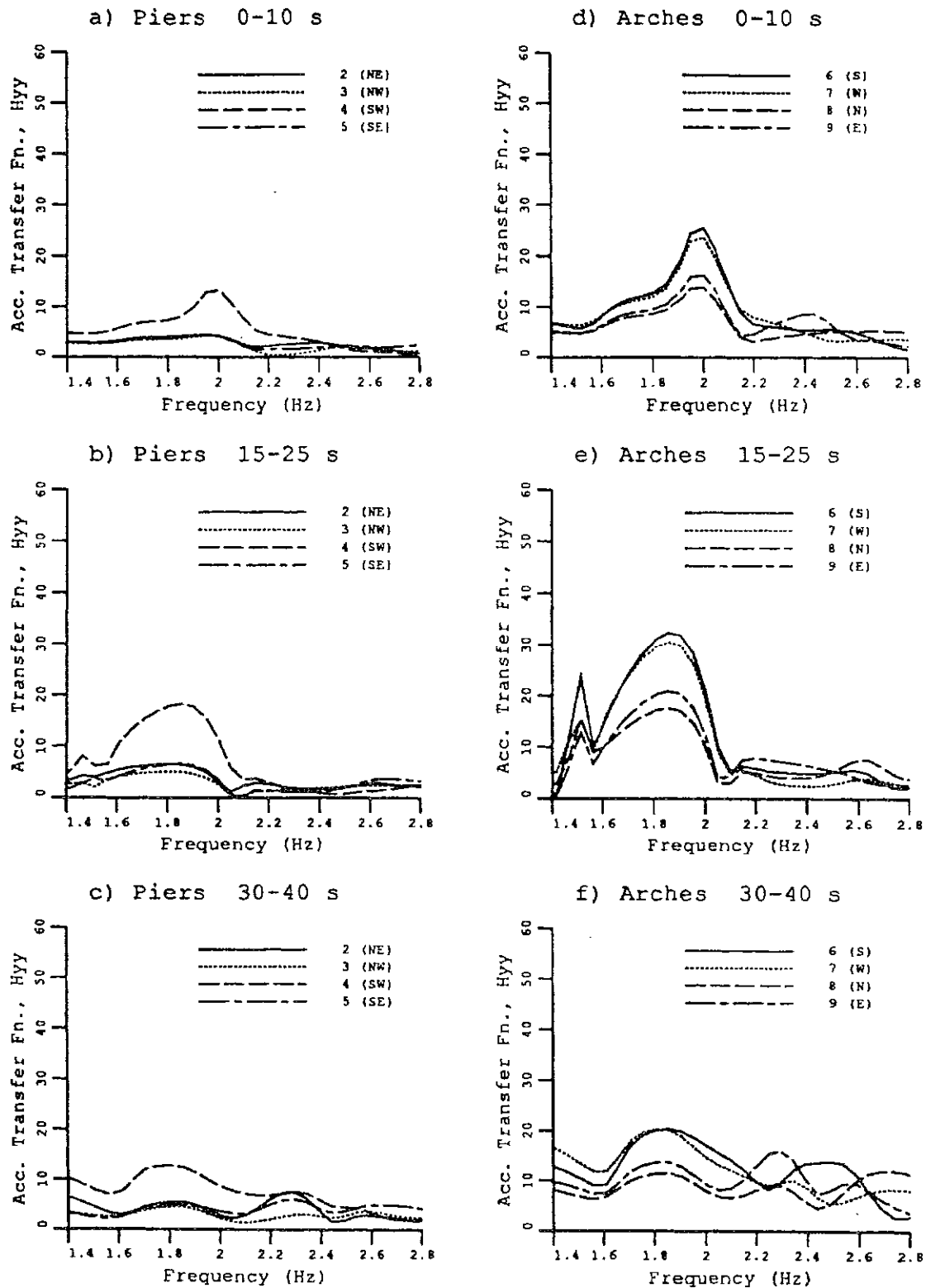
Σχήμα 5: Φάσματα δυνάμεως της επιτάχυνσης χρησιμοποιώντας τη δεύτερη χρονική διάρκεια.

Οι μεταφορικές διαδικασίες μας δείχνουν μία τάση του νότιο-δυτικού κυρίως αντερείσματος και της νότιας και δυτικής βασικής αφίδας που στηρίζονται σε αυτό να ανταποκρίνεται σε μεγαλύτερα εύρη δόνησεως από τα άλλα αντερείσματα και αφίδες στη κίνηση επιπέδου 2. Η συμπεριφορά στο επίπεδο 3 η οποία περιλαμβάνει περιστροφή είναι κάπως διαφορετική. Τα στοιχεία του επιπέδου αυτού είναι κάπως πιο αδύναμα σε σχέση με την αντίδραση του επιπέδου 2. Δευτερεύουσες κορυφώσεις εμφανίζονται στο εύρος από 2.2 μέχρι 2.6 Hz το οποίο είναι συνεπές με την περιβάλλουσα δόνηση των 2.4 Hz. Δεν έχουμε πολλές ενδείξεις για τα επίπεδα που επιτυγχάνονται στις κορυφές στις κορυφές των βασικών αντερείσμάτων με εξαίρεση το τρίτο διάστημα που βλέπουμε μία μικρή κορύφωση στα 2.3Hz. Στις κορυφές των αντερείσμάτων, η ανατολική αφίδα φαίνεται να ανταποκρίνεται περισσότερο στην κίνηση επιπέδου 2 στις συχνότητες μεταξύ 2.2 και 2.4Hz.

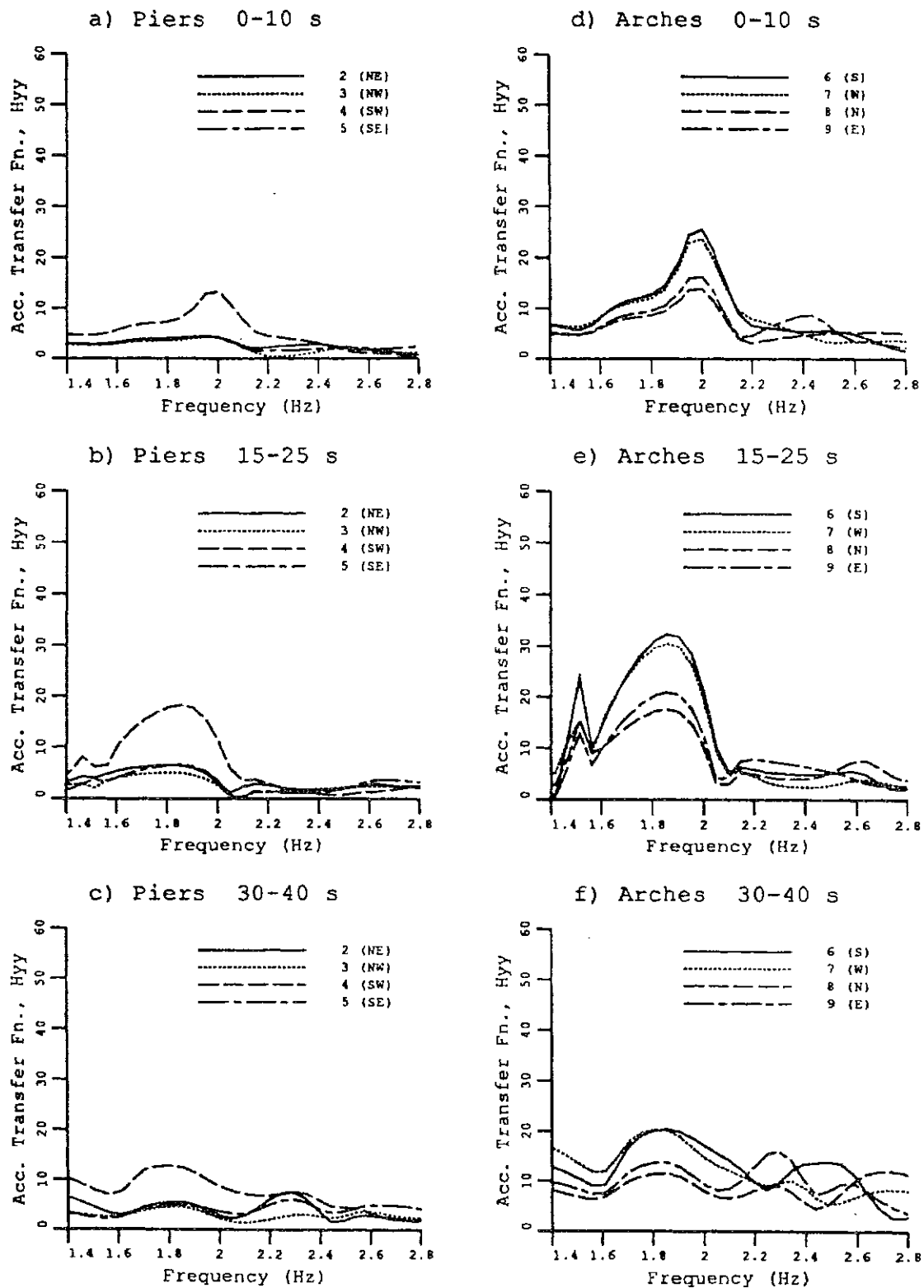
Απεικονιζόμενη κίνηση

Για να μπορέσουμε να εξετάσουμε τα σχήματα που ανταποκρίνονται στις μετρήσεις των επιπέδων, η σχετική κίνηση των τοποθεσιών σε διαφορετικά υψόμετρα εξετάστηκε εμφανισιακά με την βοήθεια την απεικόνισης. Οι κινήσεις πρώτα φιλτραρίστηκαν για να απομονωθεί η αναμενόμενη συχνότητα για το επίπεδο που μας ενδιέφερε. Ένα πρόγραμμα γραφικών το οποίο ονομάστηκε Animhs δημιουργήθηκε για να επιτευχθεί η απεικόνιση, ενώ το φιλτράρισμα έγινε χρησιμοποιώντας κανονικές τεχνικές ανάλυσης δεδομένων [9]. Το πρόγραμμα γραφικών μας δείχνει τον θόλο σαν ένα κύκλο ο οποίος εδράζεται σε ένα τετράγωνο το οποίο με τη σειρά του οριοθετείται από τους άξονες των αφίδων. Οι πραγματικές κινήσεις οι οποίες φιλτραρίστηκαν από τα αρχικά χρονικά διαστήματα κοντά στην επιλεγμένη συχνότητα έχουν σχεδιαστεί σε ομοιόμορφα χρονικά διαστήματα. Η παραμόρφωση του τετραγώνου και του κύκλου παρεισάγονται σε διγραμμική μορφή.

Οι αφιλτράριστες και φιλτραρισμένες παραμορφώσεις από την κορυφή του βόρειο-ανατολικού κυρίως αντερείσματος απεικονίζονται στο Σχήμα 8. Το Σχήμα 9 δείχνει εικόνες της απεικονισμένης αντίδρασης η οποία συνδυάζει ταυτόχρονες φιλτραρισμένες παραμορφώσεις στις κορυφές των τεσσάρων κυρίως αντερείσμάτων και αφίδων. Ο σταυρός (στόχος) ορίζει την σχετική μετακίνηση ή στροφή της βάσης του θόλου δείχνοντας την αρχική και την αλλαγμένη θέση. Τα σχήματα των επιπέδων παρατηρήθηκαν σε πραγματικό χρόνο και βρέθηκαν να είναι πιο πολύπλοκα από τα μοντέλα περατών στοιχείων. Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 9, η αντίδραση του επιπέδου 2 περιέχει ένα μικρό ανατολικό-δυτικό στοιχείο το οποίο έχει ως αποτέλεσμα μια ελλειπτική τροχία από το κέντρο μάζας, και το επίπεδο 3 δεν είναι καθαρή περιστροφή. Στο απεικονιζόμενο επίπεδο 3, η ανατολική και δυτική αφίδα κινούνται σε σχεδόν διατμητικού τύπου κίνηση στον άξονα βορρά-νότου.



Σχήμα 6: Αντιδραστικές ενέργειες μετακίνησης για τον άξονα βορρά-νότου για τις δυνάμεις στην βάση βορρά-νότου.

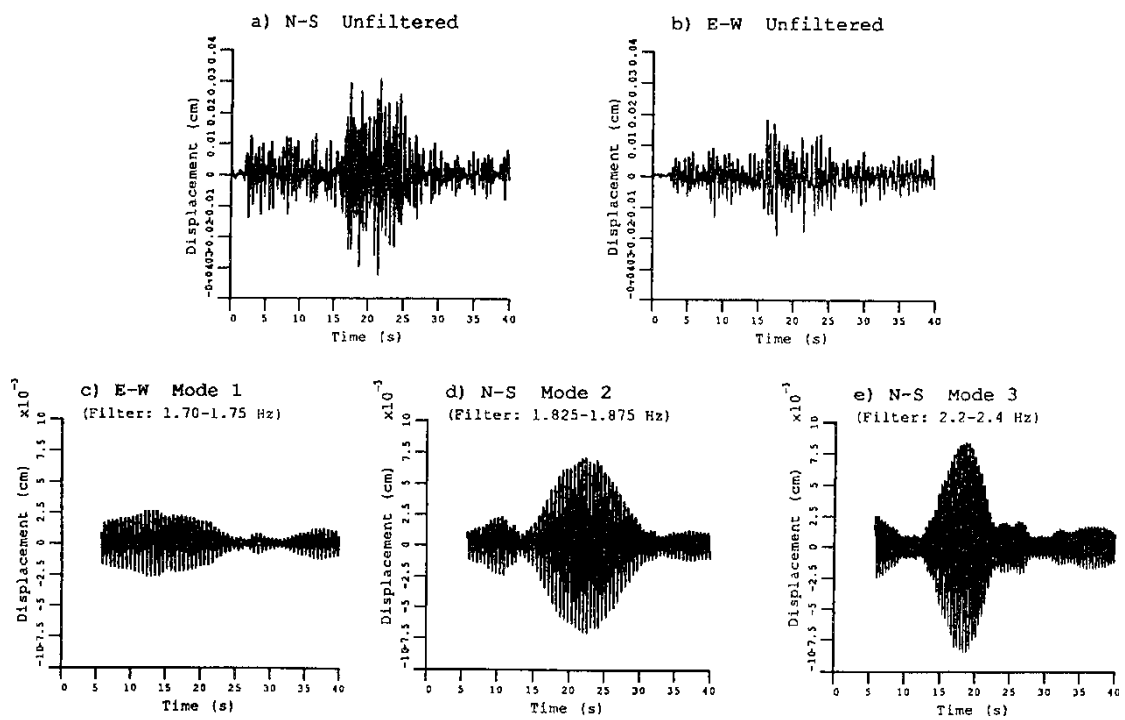


Σχήμα 7: Αντιδραστικές ενέργειες μετακίνησης για τον άξονα ανατολής-δύσης για τις δυνάμεις στην βάση ανατολής-δύσης.

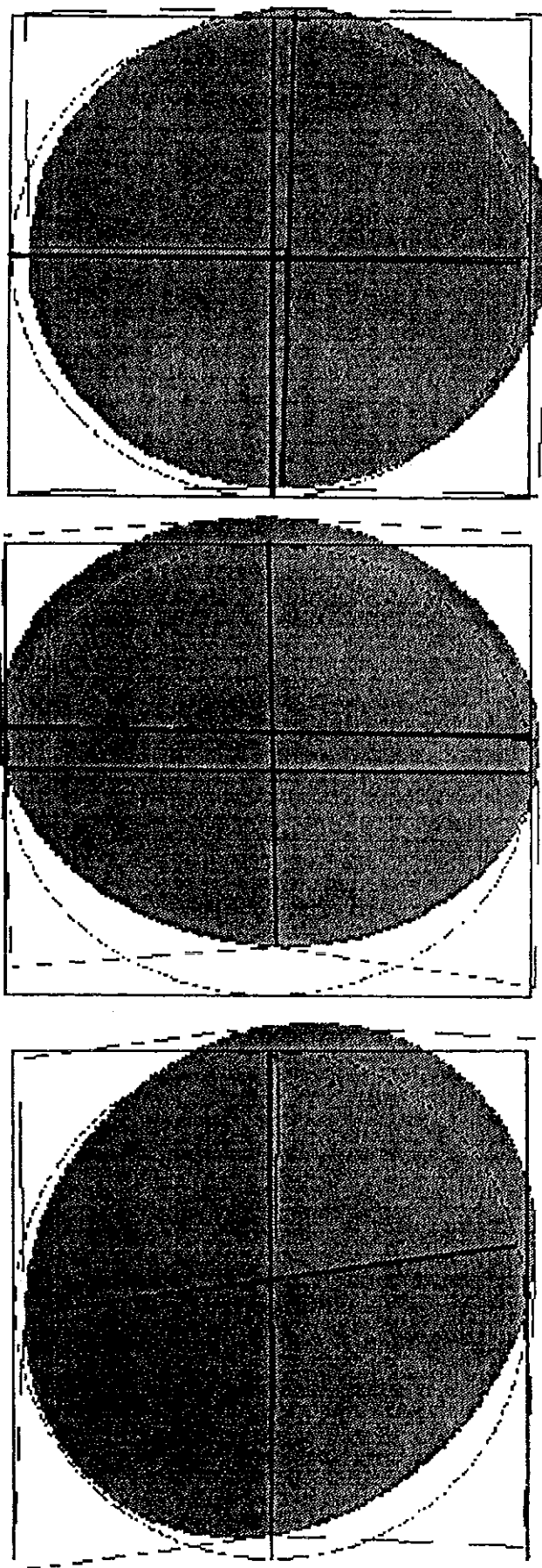
Προσομοίωση

Μία προσπάθεια για να αντιστοιχίσουμε την καταγεγραμμένη αντίδραση χρησιμοποιώντας ένα γραμμικό μοντέλο περατών στοιχείων έγινε για να εξετάσουμε την αξιοπιστία του σε κατάσταση επιβαλλόμενης δόνησης. Το μοντέλο το οποίο ονομάστηκε Hsdyntc4 κατασκευάστηκε, το μοντέλο είναι παρόμοιο με το αρχικό, dyn26a, αλλά έχει μεγαλύτερη ακρίβεια στην περιοχή των ασίδων. Οι ελαστικές ιδιότητες έχουν ρυθμιστεί για να ταιριάζουν με τη παρατηρούμενη αλλαγή στην συχνότητα κατά το 2^ο διάστημα της κίνησης αντίδρασης του σεισμού. Το μέτρο ελαστικότητας και η πυκνότητα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το μοντέλο είναι τα ίδια με αυτά του μοντέλου dyn26a (βλ. Πίνακα2), με την εξαίρεση ότι οι τιμές E σε περιοχές άλλες από αυτές της πέτρινης τοιχοποιίας και των περιοχών έντασης μειώθηκαν κατά 20% στα 4.0×10^9 Pa. Επίσης, καμία διαφοροποίηση δεν έγινε για επιβαρυσμένες περιοχές. Οι συχνότητες που πάρθηκαν με την ιδιοτιμική ανάλυση του μοντέλου Hsdyntc4 δίνονται στον Πίνακα 3.

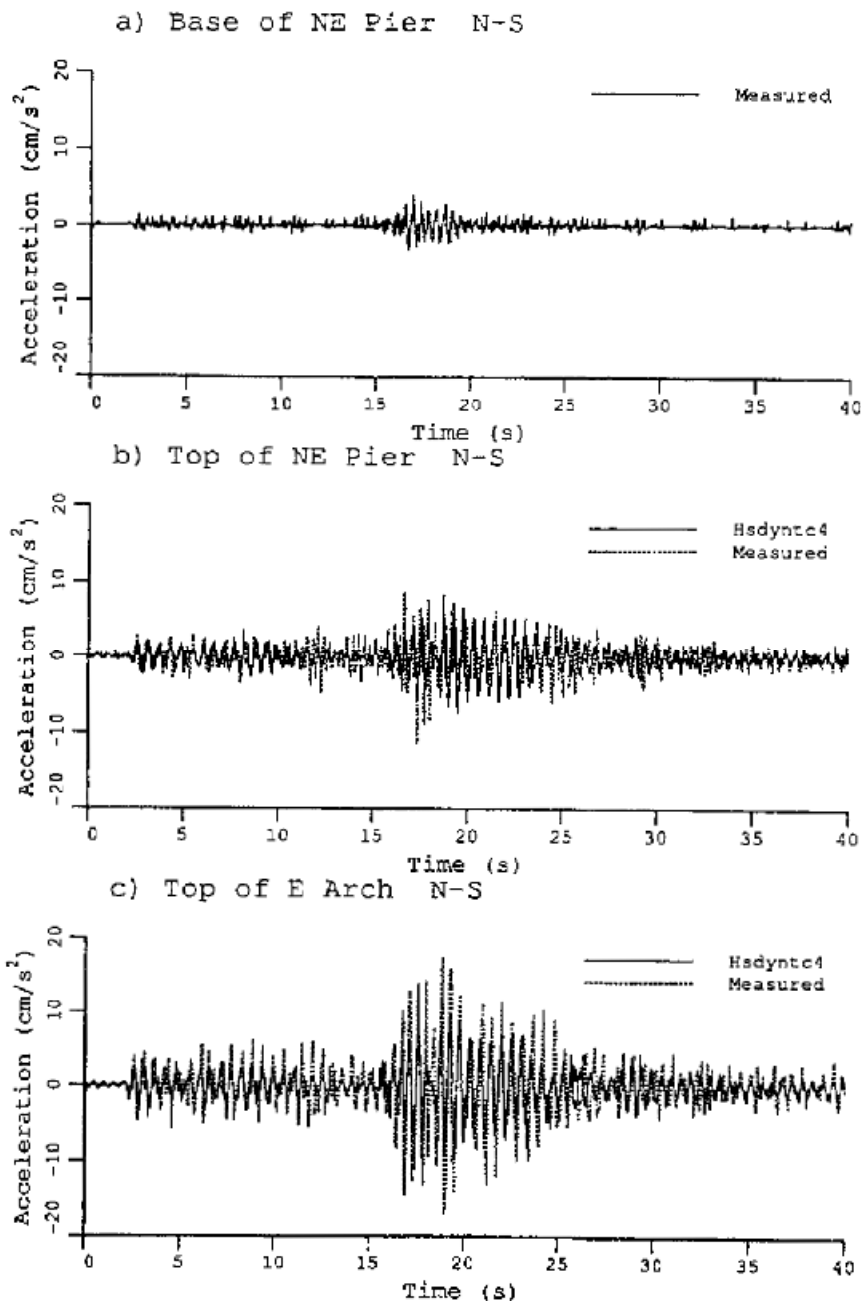
Η προσομοιωμένη αντίδραση του μοντέλου στον σεισμό υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την μέθοδο υπέρ-επιβολής επιπέδων με την τροφοδότηση επιταχύνσεων σε όλα τα σημεία της βάσης του μοντέλου ίδιες με αυτές που μετρήθηκαν στη βάση του βορειοανατολικού κυρίως αντερείσματος. Το Σχήμα 10 μας δείχνει τις μετρημένες και προσομοιωμένες επιταχύνσεις στον άξονα βορρά-νότου για όλες τις χρονικές περιόδους στις κορυφές του βορειοδυτικού αντερείσματος και της ανατολικής ασίδας τα οποία υποδεικνύουν ένα συνεχές ρου φορτίου προς το έδαφος. Δέκα επίπεδα υπέρ-επιβλήθηκαν υποθέτοντας εξασθένηση 2% σε κάθε επίπεδο. Στις κορυφές των αντερεισμάτων, οι αντιδράσεις συμφωνούν μεταξύ τους, αλλά είναι αισθητά μεγαλύτερες από αυτές που είχαν υπολογιστεί.



Σχήμα 8: Φιλτραρισμένες και μη χρονικές διάρκειες για την κορυφή της βορειοδυτικής αψίδας.



Σχήμα 9: Απεικόνιση σχημάτων επιπέδων της κύριας δομής.



Σχήμα 10: Προσομοιωμένη αντίδραση σε σεισμό χρησιμοποιώντας το πρωτεύων μοντέλο.

Συμπέρασμα

Το δυναμικό μοντέλο της Αγίας Σοφίας δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας καθορισμένες αναλύσεις περατών στοιχείων και εικονικές παρουσιάσεις μετρημένων κινήσεων αντίδρασης σε σεισμό, Χρησιμοποιώντας δεδομένα από πρόσφατο μικρού επιπέδου σεισμό, οι κυρίαρχες συχνότητες που αναγνωρίστηκαν σε μία μελέτη περιβάλλουσας δόνησης επιβεβαιώθηκαν. Οι παρατηρούμενες συχνότητες υποδεικνύουν μία μη γραμμική συμπεριφορά για την φέρουσα τοιχοποιία ακόμα και σε πολύ μικρά επίπεδα αντίδρασης. Τα γραμμικά μοντέλα περατών στοιχείων της πέτρινης τοιχοποιίας της υποστηρικτικής κατασκευής του θόλου συμφωνούν με τις μετρημένες αντιδράσεις, ενώ τα μοντέλα της τούβλινης τοιχοποιίας προβλέπουν μικρότερες αντιδράσεις από αυτές. Το μοντέλο δυναμικής αντίδρασης μας δίνει ένα σημαντικό εργαλείο για να παρατηρούμε την σεισμική αντοχή της Αγίας Σοφίας. Όσο καταγράφονται μεγαλύτεροι σεισμοί και παρατηρούνται ορατές ζημιές, θα καταστεί περισσότερο αναγκαίο να συμπεριλάβουμε μη γραμμικές ενέργειες που σχετίζονται με την κατασκευή της τοιχοποιίας τέτοιων μοντέλων.

Βιβλιογραφία/ αναφορές

Dynamic analysis and earthquake response of Hagia Sophia

Istanbul Ayasofya Muezesi Yapısal Sisteminin ve Deprem Güvenliğinin Sağlanmasına Yönelik Tedbirlerin Tespiti

Hagia Sophia: Static Analysis of a Finite Element Model

Structural Analysis of Hagia Sophia: A Historical Perspective

Instrumentation of Hagia Sophia and the Analysis of the Response of the Structure to an Earthquake of 4.8 Magnitude

Hagia Sophia: Architecture, Structure and Liturgy of Justinian's Great Church

Preliminary Analysis of the Masonry of the Hagia Sophia Basilica

Users Manual: FORTRAN subroutines for statistical analysis

Introduction to Random Vibrations and Spectral Analysis

Dimitrios Konstantinidis, Nicos Makris: SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF MULTIDRUM CLASSICAL COLUMNS, Proceedings of MeMat2005, June 1-3, 2005, Baton Rouge, Louisiana, USA

H. P. Mouzakis et al.: EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EARTHQUAKE RESPONSE OF A MODEL OF A MARBLE CLASSICAL COLUMN, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31, 1681-1698, 2002.

I. N. Psycharis et al.: NUMERICAL STUDY OF THE SEISMIC BEHAVIOUR OF A PART OF THE PARTHENON PRONAOS, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 32, 2063-2084, 2003.

C. Papantonopoulos et al.: NUMERICAL PREDICTION OF THE EARTHQUAKE RESPONSE OF CLASSICAL COLUMNS USING THE DISTINCT ELEMENT METHOD, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31, 1699-1717, 2002.

J. S. Morrison et al.: THE ATHENIAN TRIREME, Cambridge University Press.

Χρήστος Δ. Λάζος: ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΤΗΝ ΑΡΧΑΙΑ ΕΛΛΑΔΑ, Αίολος.

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Ι. ΧΡΟΝΑΙΟΣ, Β. Eng. Τεχνολογία Υλικών και Φυσική, Β. Eng. Πολιτικός Μηχανικός, Μ. Sc. Θεωρητική Χημεία, Περιοδικό Το Περισκόπιο της Επιστήμης, τεύχος 303, σσ. 47-55

Apologitis.com/gr/ancient/byz_arxitektoniki.htm

<http://www.tanea.gr/default.asp?pid=2&artid=4567391&ct=4>