

3. Περιγραφή του πειράματος.

3.1 Γενικά.

Οι σεισμικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Διευθυντής: Καθηγητής Π. Καρύδης. Υπεύθυνος σεισμικής τράπεζας: Χ. Μουζάκης Πολιτικός Μηχανικός Λέκτορας ΕΜΠ). Στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας είναι εγκατεστημένος ο σεισμικός προσομοιωτήρας 6 βαθμών ελευθερίας, με πλήρη ηλεκτρονικό έλεγχο και σύστημα συλλογής δεδομένων 64 καναλιών. Τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του σεισμικού προσομοιωτήρα δίνονται στην παράγραφο 3.1.

Στόχος των πειραμάτων ήταν η διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς τριών ακριβών αντιγράφων γλυπτών εκτεθειμένων σε πρισματικά βάθρα και ιδιαίτερα ο ρόλος των πείρων, οι οποίοι είχαν τοποθετηθεί τόσο μεταξύ βάσης και βάθρου εκθέματος, όσο και μεταξύ βάθρου και εκθέματος (βλ. εικ. 22). Τα εκθέματα και ο τρόπος στησίματος και στερέωσής τους είναι αντιπροσωπευτικός τριών συνήθων περιπτώσεων:

Η «Πλάκα» είναι ακριβές αντίγραφο μαρμάρινης επιτύμβιας πλάκας ή στήλης με παράσταση οπλιτοδρόμου (περί το 500 πΧ) που εκτίθεται στο Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο. Στηρίζεται σε βάθρο από μάρμαρο Δεματίου (Ιωαννίνων). Είναι μια χαρακτηριστική περίπτωση εκθέματος στο οποίο ένα αντικείμενο με πολύ μικρή τη μια διάσταση της έδρας του (πλάκα) στηρίζεται σε βάθρο, του οποίου επίσης η μια διάστασή του είναι πολύ μικρότερη της άλλης, ούτως ώστε φαινομενικώς να παρουσιάζει κατά την μια διεύθυνση μεγάλη αστάθεια.

Η «Λήκυθος» είναι ακριβές αντίγραφο μαρμάρινης επιτύμβιας ληκύθου με ανάγλυφη παράσταση δεξίωσης (χρονολογείται στον 4^ο αι. π.Χ.), που εκτίθεται στο μουσείο Μπενάκη. Στηρίζεται σε υψίκορμο βάθρο από μάρμαρο Δεματίου. Είναι χαρακτηριστική περίπτωση μιας «τολμηρής» έκθεσης υψίκορμου (ραδινού) εκθέματος σε ραδινή βάση με αποτέλεσμα να προκαλείται αίσθημα μεγάλης αστάθειας προς όλες τις διευθύνσεις.

Η «Κεφαλή» είναι ακριβές αντίγραφο της μαρμάρινης κεφαλής της Υγείας, πιθανώς έργο του Σκόπα (περί το τελευταίο τρίτο του 4^{ου} αι. π.Χ.), που εκτίθεται στο Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο. Πρόκειται για μια τυπική περίπτωση ενός εκθέματος μικρών διαστάσεων και μικρού βάρους, το οποίο στηρίζεται σε μια εξαιρετικά υψίκορμη βάση.

Η έκθεση των γλυπτών γίνεται σε βάθρα χωρίς οποιοδήποτε οριζόντιο στήριγμα σε γειτονικό τοίχο, αφού απαιτείται να είναι περίοπτα. Οι βάσεις είναι υψίκορμες, επειδή το έκθεμα πρέπει να βρίσκεται στο ύψος του θεατή – επισκέπτη. Τέλος η στήριξη του βάθρου στο δάπεδο και του εκθέματος στο βάθρο είναι απλή έδραση, ούτως ώστε να είναι δυνατή η αφαίρεσή τους προκειμένου να γίνει μια μελλοντική επανέκθεσή τους ή να υποστούν εργασίες συντήρησης ή συμπλήρωσης με νέα θραύσματα.



Εικ. 22. Γενική άποψη του σεισμικού προσομοιωτήρα, της βάσης, των βάθρων και των αντιγράφων των 3 μουσειακών αντικειμένων.

Είναι γνωστό ότι τα ελεύθερα εδραζόμενα στερεά σώματα και τα συστήματα από ελεύθερα εδραζόμενα σώματα αποκρίνονται σε σεισμική καταπόνηση είτε με λικνισμό, είτε με ολίσθηση. Το φαινόμενο έχει μελετηθεί αρχικώς από τον G. Housner⁷ και Ιάπωνες ερευνητές στη δεκαετία του 60 και έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών, ανάμεσα στους οποίους είναι και πολλοί Έλληνες, τις δυο τελευταίες δεκαετίες. Συνήθως αφορμή είναι η μελέτη της συμπεριφοράς αρχαίων μνημείων σε σεισμική καταπόνηση⁸. Αναφέρεται ιδίως το ευρωπαϊκό πρόγραμμα “Monuments under seismic action” μεγάλο μέρος του οποίου εκτελέστηκε στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ, με την πειραματική και αριθμητική μελέτη ενός μαρμάρινου ομοιώματος κίονος του Παρθενώνος υπό κλίμακα 1/3⁹.

Στις έρευνες αυτές εξετάζεται κυρίως η συμπεριφορά μονόλιθων και πολύλιθων συστημάτων χωρίς οποιοδήποτε σύνδεσμο μεταξύ τους. Στην περίπτωση του παρόντος προγράμματος εξετάζεται κυρίως ο ρόλος των πείρων στη συμπεριφορά δίλιθων συστημάτων. Οι πείροι εμποδίζουν την εκδήλωση ολισθήσεων και είναι σχεδιασμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να μην εμποδίζουν μεν την εκδήλωση του λικνισμού (για το λόγο αυτό έχουν ελαφρώς κολουροκωνικό σχήμα), αλλά σε οριακή κατάσταση να αποτρέπουν την ανατροπή του συστήματος.

Οι δοκιμές με τη χρήση του σεισμικού προσομοιωτήρα πραγματοποιήθηκαν σε δυο φάσεις. Κατά την πρώτη (Φάση Ι) το δοκίμιο διεγέρθηκε από τριαξονικά πραγματικά επιταχυνσιογραφήματα των σεισμών της Καλαμάτας, της Έδεσσας και του Αργοστολίου. Συνολικά κατά τη φάση αυτή εκτελέστηκαν 15 δοκιμές. Η φάση Ι σταμάτησε μετά την ανατροπή της ληκύθου (χωρίς όμως την καταστροφή της). Στη συνέχεια έγινε ανασχεδιασμός του πείρου μεταξύ της ληκύθου και του βάθρου της και ακολούθησε η δεύτερη φάση (Φάση ΙΙ), κατά την οποία επαναλήφθηκαν ορισμένες από τις σεισμικές διεγέρσεις της φάσης Ι προκειμένου να ελεγχθεί η επαναληψιμότητα των πειραματικών αποτελεσμάτων και έγιναν επιπλέον ισχυρότερες δοκιμές σε σχέση με αυτές της φάσης Ι, έτσι ώστε να ελεγχθούν τα τελικά όρια ευστάθειας των δοκιμών. Συνολικά εκτελέστηκαν 10

⁷ G. Housner, “The behaviour of inverted pendulum structure during earthquakes”, Bulletin of the Seismological Society of America, V.53, February 1963, pp. 403-417

⁸ Βλέπε σχετικά:

C. Zambas, “The Problem of the Parthenon's Earthquake Resistance”, Proceedings of the 2nd International Meeting for the Restoration of the Acropolis Monuments, Athens 12-14 Sept. 1983, Athens 1986, pp. 127-183. και

Κ. Ζάμπας, «Μελέτη Αποκαταστάσεως του Παρθενώνος, τ. 3β», Υπουργείο Πολιτισμού - Επιτροπή Συντηρήσεως Μνημείων Ακροπόλεως, Αθήνα 1994.

⁹ Βλέπε σχετικά:

D. Papastamatiou, I. Psycharis, P. Carydis, C. Papantonopoulos, H. Mouzakis, J.V. Lemos and C. Zambas, “Monuments under seismic action – A numerical and experimental approach”, Report No. NTUA/LEE-97/01, Laboratory for Earthquake Engineering, National Technical University, Athens, Greece (1997),

P. G. Carydis, H. P. Mouzakis, C. Papantonopoulos, D. Papastamatiou, I. N. Psycharis, E. A. Vougioukas, C. Zambas, “Experimental and Numerical Investigations of the Earthquake Response of Classical Monuments”, Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco 1996, Paper No 1388, και

Κ. Παπαντωνόπουλος, «Αρχαία Μνημεία υπό Σεισμική Δράση», Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2000.

δοκιμές κατά τη Φάση II. Πριν την έναρξη των σεισμικών δοκιμών έγιναν δοκιμές σταθερής επιτάχυνσης με λογαριθμική σάρωση συχνοτήτων για τον προσδιορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών του δοκιμίου.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, η απόκριση των δοκιμίων προσδιορίστηκε με καταγραφή των οριζοντίων επιταχύνσεων τόσο στα βάθρα όσο και στα εκθέματα. Επίσης κατά τη διάρκεια των δοκιμών της Φάσης I γινόταν καταγραφή των μετακινήσεων με στερεοσκοπική βιντεοσκόπηση και φωτογραμμετρική ανάλυση των εικόνων σύμφωνα με τη μέθοδο που έχει αναπτυχθεί από το εργαστήριο φωτογραμμετρίας του ΕΜΠ (καθηγητής Α. Γεωργόπουλος)¹⁰.

3.2. Τεχνική περιγραφή σεισμικού προσομοιωτήρα και βαθμονόμησή του.

Ο σεισμικός προσομοιωτήρας έξι βαθμών ελευθερίας είναι εγκατεστημένος στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, το οποίο ιδρύθηκε το 1981 για την μελέτη των επιπτώσεων των σεισμών και των δονήσεων στις κατασκευές. Ο σεισμικός προσομοιωτήρας τέθηκε σε λειτουργία και βαθμονομήθηκε στις αρχές του 1986 και έκτοτε βρίσκεται σε πλήρη λειτουργία. Στο Εργαστήριο βρίσκεται επίσης εγκατεστημένος Τοίχος Αντίδρασης για την εκτέλεση στατικών δοκιμών διάτμησης ανακυκλιζόμενης κυρίως μορφής. Από το 1993 το Εργαστήριο αποτελεί μεγάλη εγκατάσταση της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Το 2000 πιστοποιήθηκε για τις παρεχόμενες υπηρεσίες Δυναμικών Σεισμικών Δοκιμών με τη χρήση του σεισμικού προσομοιωτήρα κατά ISO – 9002/1994 από την TUV CERT (TUV Austria Hellas). Κύριες δραστηριότητες του είναι η διδασκαλία μαθημάτων αντισεισμικής μηχανικής, η διεξαγωγή πειραμάτων (δυναμικά, στατικά), η έρευνα και μελέτη κατασκευών με τη χρήση μαθηματικών αναλυτικών προσομοιωμάτων, μετρήσεις δονήσεων στο πεδίο, εγκατάσταση συστημάτων ενόργανης παρακολούθησης κτιρίων / μνημείων, κ.τ.λ. Το Εργαστήριο Αντισεισμικής τεχνολογίας συνεργάζεται με Υπουργεία, Δήμους, τον ΟΑΣΠ, τον ΟΣΚ, τον ΟΣΕ καθώς και με μεγάλες εταιρείες (ABB Hellas, J&P, YTONG, MINERVA) καθώς και εταιρείες του εξωτερικού (ACAI, ABB Sweden, Siemens, ALSTOM Belgium, FIP).

Ο σεισμικός προσομοιωτήρας αποτελείται από μια άκαμπτη πλατφόρμα διαστάσεων 4x4m και βάρους 100 kN. Με τις κατάλληλες αντλίες πίεσης λαδιού, βαλβίδες και αυτοματισμούς έχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης και με υψηλή ακρίβεια ελεγχόμενης ταλάντωσης και στους έξι βαθμούς ελευθερίας. Η ταλάντωση αυτή πραγματοποιείται με τον έλεγχο δύο οριζόντιων υδραυλικών εμβόλων ανά τη διεύθυνση X και Y και τεσσάρων υδραυλικών και ενός πνευματικού εμβόλου κατά τη διεύθυνση Z. Η μέγιστη μεταφορική επιτάχυνση, η οποία μπορεί να αναπτυχθεί στο σεισμικό προσομοιωτήρα είναι 2g κατά τις δύο οριζόντιες διευθύνσεις και 4g κατά την κατακόρυφη. Ταυτοχρόνως υπάρχει ο περιορισμός ότι η κίνηση σε καμία μεταφορική διεύθυνση δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από $\pm 100\text{mm}$ και η ταχύτητα να ξεπερνά τα 1000mm/sec .

¹⁰ A. Georgopoulos, E. Tournas, H. Mouzakis, E. Vougioukas, P. Carydis, "Determination of seismic movements of monuments using stereoscopic video", Optical 3-D Measurement Techniques III (A. Gruen/H. Kahmen, eds), pp. 452-462.

Ο έλεγχος του σεισμικού προσομοιωτήρα γίνεται μέσω αναλογικού συστήματος, το οποίο με τη σειρά του καθοδηγείται από ψηφιακό σύστημα με τη χρήση Η.Υ. Η κίνηση της πλατφόρμας μπορεί να είναι ημιτονικής μορφής, μια τυχαία κίνηση, ένας πραγματικός ή ένας τεχνητός σεισμός. Το σύστημα συλλογής δεδομένων αποτελείται από ειδική μονάδα 64 καναλιών με υψηλή ταχύτητα δειγματοληψίας. Η παραγωγή και επεξεργασία μιας σεισμικής διέγερσης καθώς και η ανάλυση των αποτελεσμάτων γίνεται με ειδικά προγράμματα τα οποία βρίσκονται στη βιβλιοθήκη Η.Υ του Εργαστηρίου.

3.3 Πειραματική Διάταξη

Το δοκίμιο συνίσταται από μία μαρμάρινη πλάκα πάνω στην οποία τοποθετήθηκαν τρία μαρμάρινα βάθρα. Στα βάθρα αυτά στερεώθηκαν τα αντίγραφα - εκθέματα. Μεταξύ μαρμάρινης βάσης και βάθρου κάθε εκθέματος καθώς επίσης και μεταξύ βάθρου και εκθέματος τοποθετήθηκαν πείροι. Η μαρμάρινη πλάκα συγκολλήθηκε σε πλάκα ωπλισμένου σκυροδέματος, η οποία με τη σειρά της παγιώθηκε στον σεισμικό προσομοιωτήρα.

Η γενική πειραματική διάταξη του δοκιμίου φαίνεται στο σχέδιο 1. Πιο συγκεκριμένα η πειραματική διάταξη αποτελείται από τα εξής μέρη (βλ. σχ. 1 έως 10 και εικ. 22 έως 27):

- Βάση διαστάσεων 1.20X1.20 m κατασκευασμένη από ωπλισμένο σκυρόδεμα, επί της οποίας συγκολλήθηκε πλάκα μαρμάρου διαστάσεων 1.20X1.20X0.03 m. Η βάση στερεώθηκε ακλόνητα στη σεισμική τράπεζα με 4 ισχυρούς κοχλίες M30 (βλ. σχέδια 1 και 2 και εικ. 22- 24).
- Τρία μαρμάρινα βάθρα: Το βάθρο της πλάκας με διαστάσεις 0.88X0.25X1.00 m, της ληκύθου με διαστάσεις 0.25X0.25X1.00 m και της κεφαλής της Υγείας με διαστάσεις 0.20X0.20X1.50 m. Στο κάτω τμήμα των βάσεων έχει διαμορφωθεί σκοτία βάθους 1 cm και ύψους 2 cm για αισθητικούς λόγους, άρα η αναλογία ύψους προς πραγματική διάσταση έδρας είναι ακόμη μεγαλύτερη.
- Τα αντίγραφα των εκθεμάτων από τεχνητό λίθο με βάση το λευκό τσιμέντο.



Εικ. 22. Προετοιμασία βάσης και βάθρων.



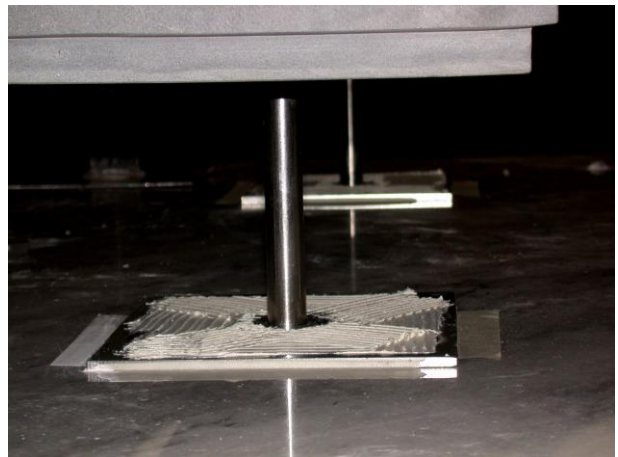
Εικ. 23. Τοποθέτηση βάσης στο σεισμικό προσομοιωτήρα.

Μεταξύ αφ ενός του βάθρου και της βάσης και αφ' ετέρου του εκθέματος και του βάθρου έχουν τοποθετηθεί πείροι από ανοξείδωτο χάλυβα με το σύστημα που εφαρμόζόταν στα αρχαία χρόνια στους πόλους και τα εμπόλια: Μια μεταλλική θήκη – κυλινδρικός σωλήνας - είναι στερεωμένη σε εγκοπή του κάθε αντικειμένου, ούτως ώστε κατά την τοποθέτηση οι πείροι, που έχουν ελαφρώς κολουροκωνικό σχήμα, να εισχωρούν στις θήκες (βλ. φωτ. 24- 26). Στη λήκυθο και την κεφαλή της Υγείας υπάρχουν από ένας πείρος (βάση - βάθρο και βάθρο - έκθεμα) και στην πλάκα από δυο ζεύγη. Τα χαρακτηριστικά των πείρων φαίνονται στο σχέδιο 9.

Στις κάτω έδρες των βάθρων έχουν συγκολληθεί ελάσματα διαστάσεων 170X170X5 mm, από οπές των οποίων διέρχονται οι πείροι (βλ. εικ. 24). Τα ελάσματα αποσκοπούν να αποσοβήσουν ενδεχόμενη απόσχιση της βάσης του μαρμάρου από συγκέντρωση τάσεων στην άντυγα. Η προσθήκη των ελασμάτων αυξάνει ακόμη περισσότερο την αναλογία του ύψους προς τη διάσταση της έδρας, με αποτέλεσμα το σύστημα των απλώς εδραζομένων σωμάτων να είναι ακόμα ραδινότερο. Στο σχέδιο 8 δίνονται τα στοιχεία των ιδεατών πρισμάτων που αντιστοιχούν στα τρία δοκίμια, από τα οποία προκύπτουν τα γεωμετρικά δεδομένα για τον υπολογισμό της συμπεριφοράς τους.



Εικ. 24. Η βάση με τους πείρους των βάθρων.



Εικ. 25. Τοποθέτηση βάθρου επί προτοποθετημένου πείρου «εν αναμονή».



Εικ. 26. Άποψη των πείρων των δοκιμίων.



Εικ. 27. Διάτρηση έδρα ληκύθου για τοποθέτηση πείρου.

3.4 Πειραματικές διεγέρσεις

Κατά τη Φάση Ι και Φάση ΙΙ πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σταθερής επιτάχυνσης λογαριθμικής σάρωσης συχνοτήτων και σεισμικές δοκιμές με τη χρήση πραγματικών και τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων.

3.4.1 Ημιτονική διέγερση σταθερής επιτάχυνσης

Για τον υπολογισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών του, κάθε δοκίμιο διεγέρθηκε από μια χρονοϊστορία ημιτονικής μορφής σταθερής επιτάχυνσης 0.05g με λογαριθμική σάρωση συχνοτήτων από 1-16Hz. Η ταχύτητα σάρωσης ήταν μία οκτάβα το λεπτό. Κατά τις δοκιμές αυτές καταγράφονταν οι επιταχύνσεις στη μαρμάρινη βάση, στα βάθρα και στα αρχαιολογικά εκθέματα. Οι δοκιμές διενεργήθηκαν κατά τις διευθύνσεις X, Y και Z ξεχωριστά.

3.4.2 Σεισμικές διεγέρσεις

Το δοκίμιο υποβλήθηκε σε τριαξονικές διεγέρσεις με χρονοϊστορίες επιταχύνσεων στους τρεις μεταφορικούς άξονες X, Y και Z. Η επιτάχυνση κάθε σεισμικής διέγερσης κατά τις διευθύνσεις X, Y και Z αυξανόταν κλιμακωτά ως ποσοστό των επιλεγμένων σεισμών.

Στην Φάση Ι, οι χρονοϊστορίες αποτελούσαν τις συνιστώσες των ακόλουθων πραγματικών σεισμών που έχουν καταγραφεί στον Ελλαδικό χώρο:

- Σεισμός Καλαμάτας (13/9/1986, M=6.2) με μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση 0.27g, δεσπόζουσα περίοδο 0.35 sec και διάρκεια ισχυρής δόνησης περί τα 6 sec. Το επιταχυνσιογράφημα καταγράφηκε σε σκληρό έδαφος σε απόσταση 9km από το επίκεντρο.
- Μετασεισμός (24/3/1983, M=5.5) του κυρίου σεισμού της Κεφαλονιάς (17/01/1983, M=7.0). Τα επιταχυνσιογραφήματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές καταγράφηκαν στο Αργοστόλι (θα αναφέρεται ως σεισμός Αργοστολίου) σε απόσταση 10.0km από το επίκεντρο. Τα επιταχυνσιογραφήματα καταγράφηκαν σε βράχο, έχουν μικρή διάρκεια, ενώ η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση είναι 0.31 g.
- Σεισμός του Γρίβα (21/12/1990, M=5.9). Τα επιταχυνσιογραφήματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές καταγράφηκαν στην Έδεσσα (θα αναφέρεται ως σεισμός Έδεσσας) σε απόσταση περίπου 31.0km από το επίκεντρο. Τα επιταχυνσιογραφήματα καταγράφηκαν σε μαλακό έδαφος, η κίνηση έχει περίπου ημιτονοειδή μορφή, με περίοδο 0.60 sec και μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση 0.10g.
- Στη Φάση ΙΙ το δοκίμιο διεγέρθηκε από τους προαναφερόμενους σεισμούς καθώς επίσης και με τα ακόλουθα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα:
- Τεχνητός σεισμός, ο οποίος προσομοιάζει τον κύριο σεισμό της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999 που έπληξε την περιοχή των Αθηνών (7/9/1999, M= 5.9) με μέγιστη επιτάχυνση 0.67 g, και
- Τεχνητός σεισμός μεγάλης διάρκειας, με μεγάλες ιδιοπεριόδους και με μεγάλη κορυφαία επιτάχυνση 0.45g, το φάσμα του οποίου περιβάλλει το Φάσμα EC8 για εδαφική επιτάχυνση 0.35g.

Κατά τις δοκιμές επιλέχθηκαν οι πιο πάνω σεισμοί γιατί αποτελούν αντιπροσωπευτικούς σεισμούς του Ελλαδικού χώρου και γιατί ο καθένας από αυτούς παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά (διάρκεια, δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο, μέγιστη επιτάχυνση).

Στους Πίνακες 1 και 2 παρουσιάζονται οι σεισμικές διεγέρσεις που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε δοκίμιο στη Φάση Ι και στη Φάση ΙΙ αντίστοιχα συμπεριλαμβανομένων και των διεγέρσεων λογαριθμικής σάρωσης. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των επιταχύνσεων των τριών συνιστωσών των επιλεγμένων σεισμών. Στα Σχήματα 1 - 5 φαίνονται οι συνιστώσες κάθε σεισμού καθώς επίσης και τα φάσματα επιταχύνσεων τους. Όλα τα φάσματα υπολογίστηκαν για 1/18 της οκτάβας και ποσοστό απόσβεσης 5%.

Πίνακας 1. Περιγραφή και κωδικοποίηση δοκιμών Φάσης Ι.

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΒΙΝΤΕΟ
1	Λογαριθμική Σάρωση Συχνοτήτων 1-16Hz στη διεύθυνση Y	FQY-a01	
2	Λογαριθμική Σάρωση Συχνοτήτων 1-16Hz στη διεύθυνση X	FQX-a02	
3	Λογαριθμική Σάρωση Συχνοτήτων 1-16Hz στη διεύθυνση Z*	FQZ-a03	
4	Σεισμός Καλαμάτας XYZ σε ποσοστό 30%	KA3030-a04	
5	Σεισμός Αργοστολίου XY σε ποσοστό 30%	AR2030-a05	S3
6	Σεισμός Έδεσσας XY σε ποσοστό 100%	ED2100-a06	
7	Σεισμός Έδεσσας XYZ σε ποσοστό 100%	ED3100-a07	
8	Σεισμός Αργοστολίου XYZ σε ποσοστό 30%	AR3030-a08	
9	Σεισμός Καλαμάτας XY σε ποσοστό 30%	KA2030-a09	
10	Σεισμός Καλαμάτας XY σε ποσοστό 50%	KA2050-a10	S4
11	Σεισμός Καλαμάτας XYZ σε ποσοστό 50%	KA3050-a11	
12	Σεισμός Καλαμάτας XYZ σε ποσοστό 50%	KA3050-a12	S6
13	Σεισμός Έδεσσας XYZ σε ποσοστό 140%	ED3140-a13	
14	Σεισμός Αργοστολίου XYZ σε ποσοστό 50%	AR3050-a14	
15	Σεισμός Αργοστολίου XYZ σε ποσοστό 100%	AR3100-a15	S7
16	Σεισμός Καλαμάτας XYZ σε ποσοστό 70%	KA3070-a16	
17	Σεισμός Καλαμάτας XYZ σε ποσοστό 100%	KA3100-a17	S9
18	Σεισμός Καλαμάτας XYZ σε ποσοστό 110%	KA3110-a18	S10

* Δεν υπήρχε αισθητήρας στη διεύθυνση Z

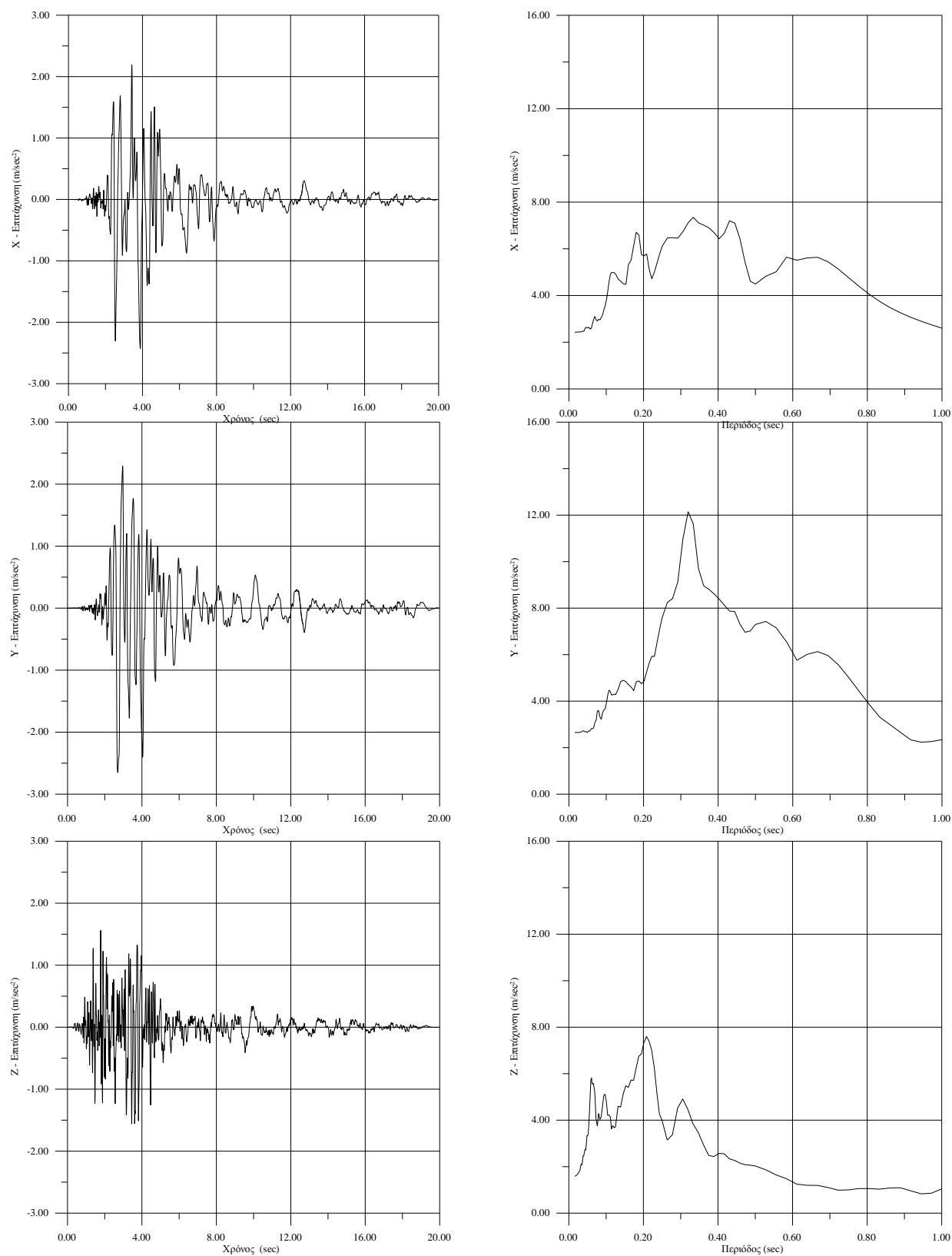
Πίνακας 2. Περιγραφή και κωδικοποίηση δοκιμών Φάσης II.

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΚΩΔΙΚΟΣ
1	Λογαριθμική Σάρωση Συχνοτήτων 1-16Hz στη διεύθυνση X	FQX-b01
2	Λογαριθμική Σάρωση Συχνοτήτων 1-16Hz στη διεύθυνση Y	FQY-b02
3	Λογαριθμική Σάρωση Συχνοτήτων 1-16Hz στη διεύθυνση Z*	FQZ-b03
4	Σεισμός Έδεσσας XYZ σε ποσοστό 100%	ED3100-b04
5	Σεισμός Καλαμάτας XYZ σε ποσοστό 50%	KA3050-b05
6	Σεισμός Αργοστολίου XYZ σε ποσοστό 100%	AR3100-b06
7	Σεισμός Καλαμάτας XYZ σε ποσοστό 70%	ED3100-b07
8	Σεισμός Καλαμάτας XYZ σε ποσοστό 100%	KA3100-b08
9	Σεισμός Καλαμάτας XYZ σε ποσοστό 110%	KA3110-b09
10	Σεισμός Αθηνών XYZ σε ποσοστό 50%	AT3050-b10
11	Σεισμός Αθηνών XYZ σε ποσοστό 100%	AT3100-b11
12	Τεχνητός Σεισμός XYZ σε ποσοστό 50%	AE3050-b12
13	Τεχνητός Σεισμός XYZ σε ποσοστό 100%	AE3100-b100

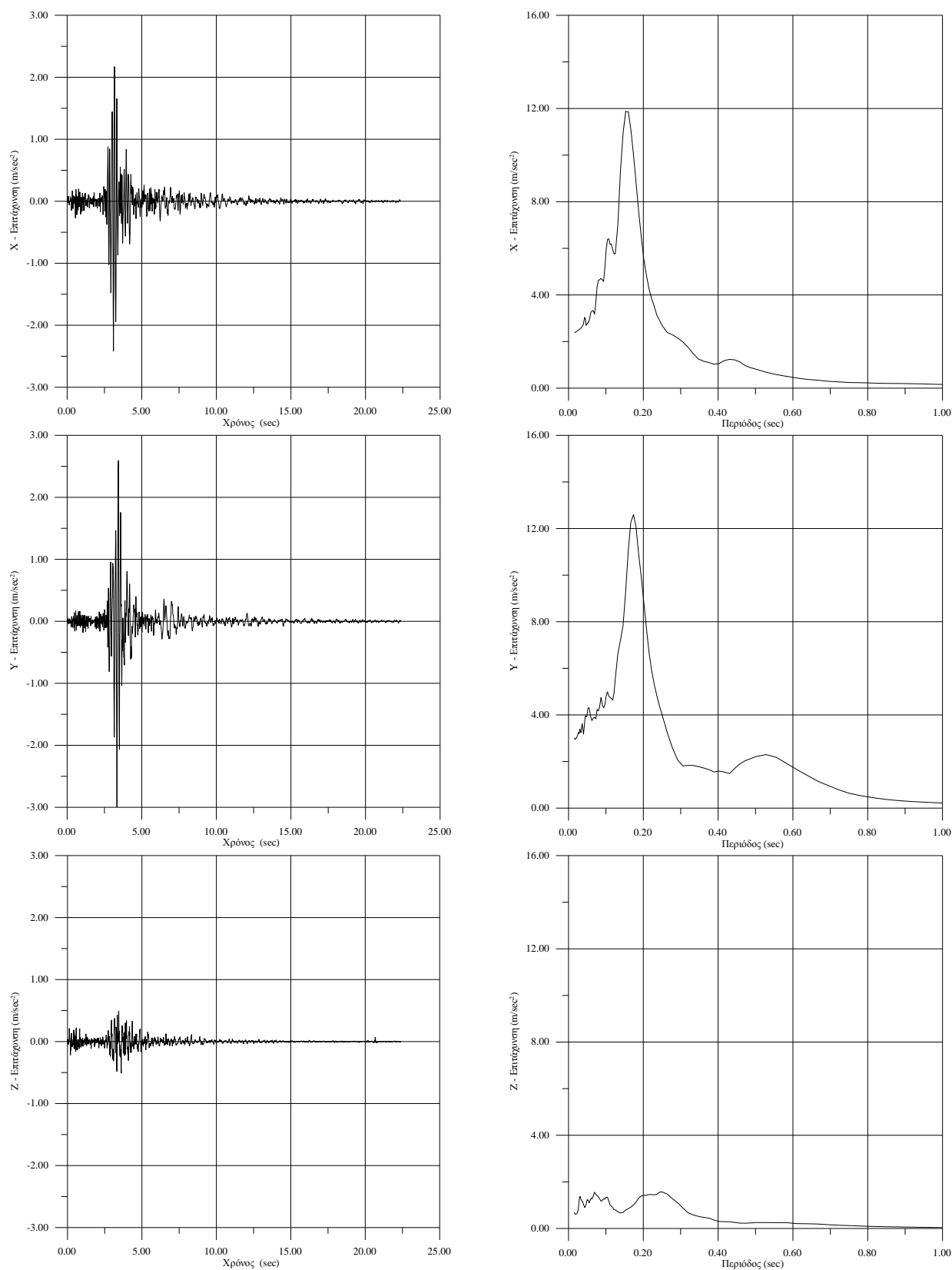
* Δεν υπήρχε αισθητήρας στη διεύθυνση Z

Πίνακας 3. Μέγιστες απόλυτες τιμές επιταχύνσεων συνιστωσών σεισμών (ποσοστό 100%)

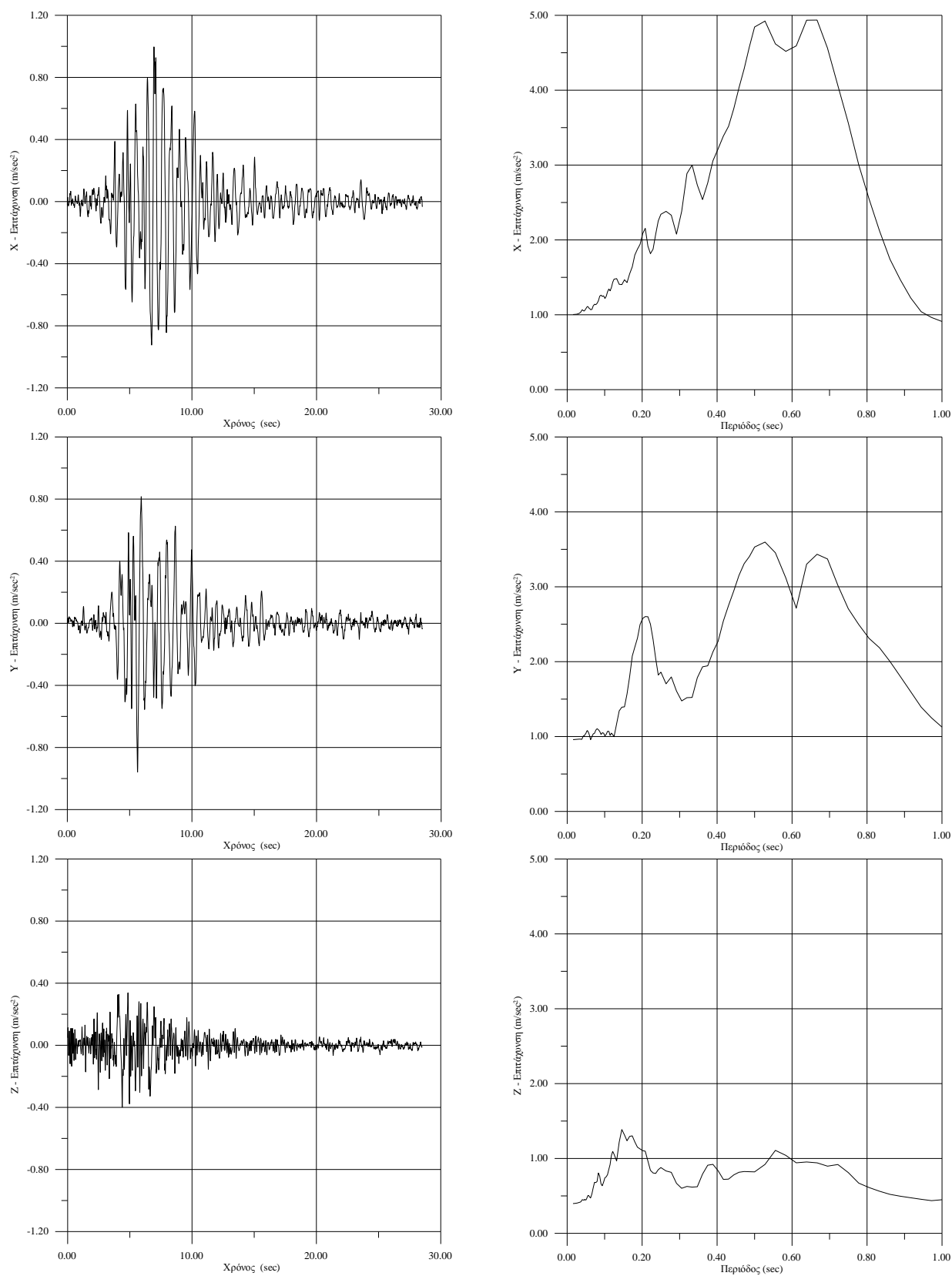
Διεύθυνση	Συνιστώσες επιταχυνσιογραφημάτων (m/sec ²)				
	Σεισμός Καλαμάτας	Σεισμός Αργοστολίου	Σεισμός Έδεσσας	Τεχνητός Σεισμός Αθηνών	Τεχνητός Σεισμός (EC 8)
X	2.432	2.419	0.997	5.286	4.449
Y	2.651	2.995	0.958	6.662	4.449
Z	1.561	0.510	0.399	5.240	2.256



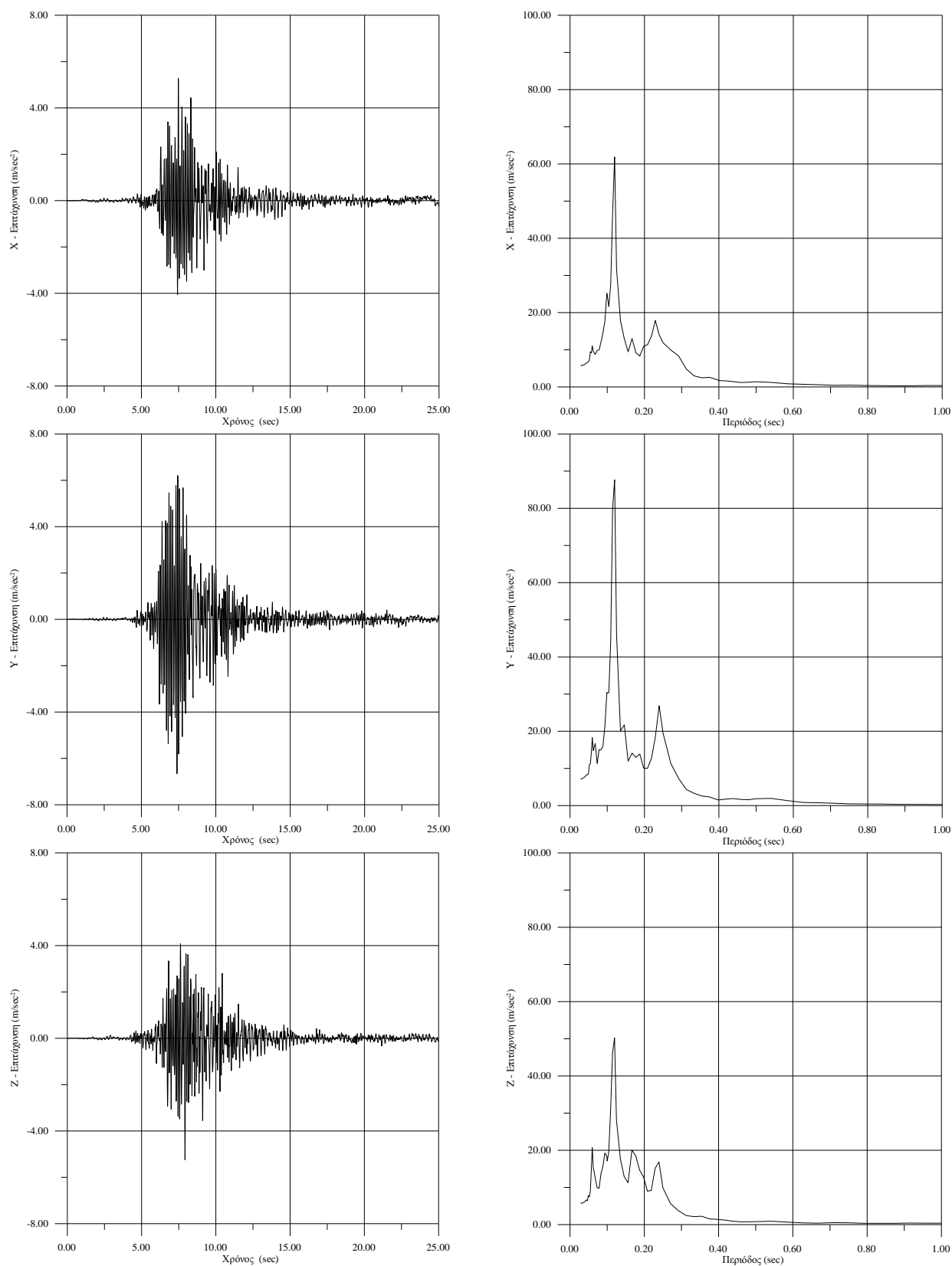
Σχήμα 1. Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων σεισμού Καλαμάτας και Φάσματα Απόκρισης.



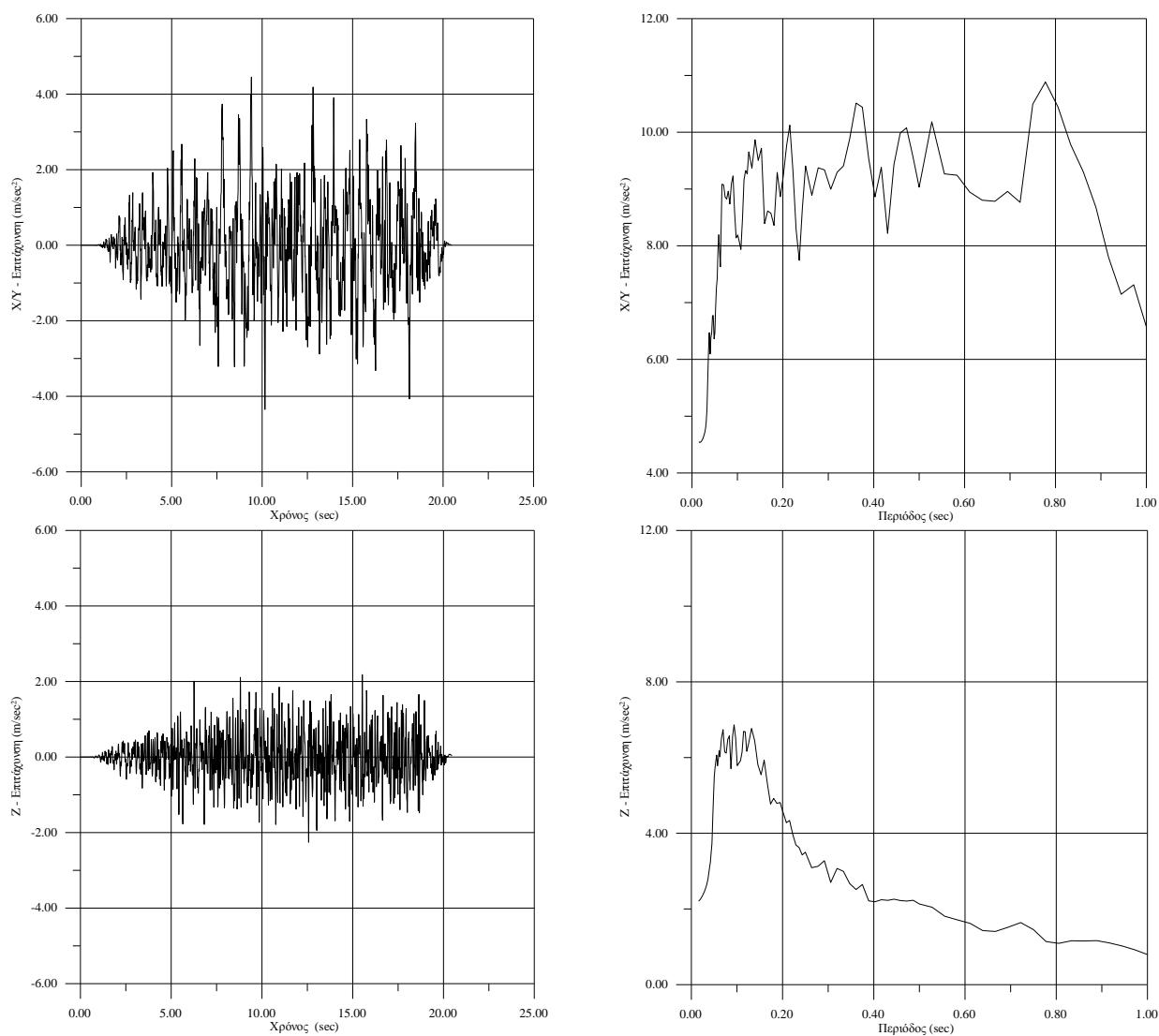
Σχήμα 2. Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων σεισμού Αργοστολίου και Φάσματα Απόκρισης.



Σχήμα 3. Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων σεισμού Έδεσσας και Φάσματα Απόκρισης.



Σχήμα 4. Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων τεχνητού σεισμού Αθηνών και Φάσματα Απόκρισης.



Σχήμα 5. Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων τεχνητού σεισμού EC8 και Φάσματα Απόκρισης.

3.5 Μετρητική Διάταξη

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών καταγράφονταν στο δοκίμιο οι επιταχύνσεις του σεισμικού προσομοιωτήρα καθώς επίσης και οι αναπτυσσόμενες επιταχύνσεις στη μαρμάρινη βάση, στα βάθρα και στα αρχαιολογικά εκθέματα. Στα σχέδια 4, 5 και 7 παρουσιάζονται οι θέσεις μέτρησης των επιταχύνσεων. Η πειραματική διάταξη ήταν ίδια και στις δύο φάσεις δοκιμών.

Τα επιταχυνσιόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις δοκιμές ήταν της εταιρείας ENDEVCO/USA και της εταιρείας KYOWA/JAPAN. Η βαθμονόμηση των επιταχυνσιομέτρων τόσο της σεισμικής τράπεζας όσο των επιταχυνσιομέτρων πάνω στα δοκίμια έγιναν με τον βαθμονομητή επιταχυνσιομέτρων ENDEVCO 28959 DV αλλά και τη μέθοδο της στατικής βαθμονόμησης.

Στον Πίνακα 4 φαίνεται η κωδικογράφηση των επιταχυνσιομέτρων και στην εικ. 28 οι θέσεις των οργάνων επί των δοκιμών.

Κατά τη διάρκεια των ισχυρών δοκιμών της Φάσης Ι γινόταν καταγραφή των μετακινήσεων με στερεοσκοπική βιντεοσκόπηση (βλ. εικ. 29, 30). Από τα αρχεία των βιντεοσκοπήσεων διασώθηκαν αυτά που αντιστοιχούν στις δοκιμές του πίνακα 1(S3 έως S10). Τα σημεία στα οποία γινόταν η καταγραφή φαίνονται στο σχέδιο 10.

Πίνακας 4. Θέσεις και κωδικοποίηση επιταχυνσιομέτρων

ΟΡΓΑΝΟ	ΘΕΣΗ	ΚΩΔΙΚΟΣ
A1Y	Κεφαλή Υγείας. Βάθρο άνω.	HYbY
A1X	Κεφαλή Υγείας. Βάθρο άνω.	HYbX
A2Y	Λήκυθος. Βάθρο άνω.	LlbY
A2X	Λήκυθος. Βάθρο άνω.	LlbX
A3Y	Αναθηματική πλάκα. Βάθρο άνω.	PLbY
A3X	Αναθηματική πλάκα. Βάθρο άνω.	PLbX
A4Y	Λήκυθος. Σε ύψος 1.06 m από την έδρα.	LloY
A4X	Λήκυθος. Σε ύψος 1.06 m από την έδρα.	LloX
A5Y	Αναθηματική πλάκα. Άνω.	PLoY
A5X	Αναθηματική πλάκα. Άνω.	PLoX

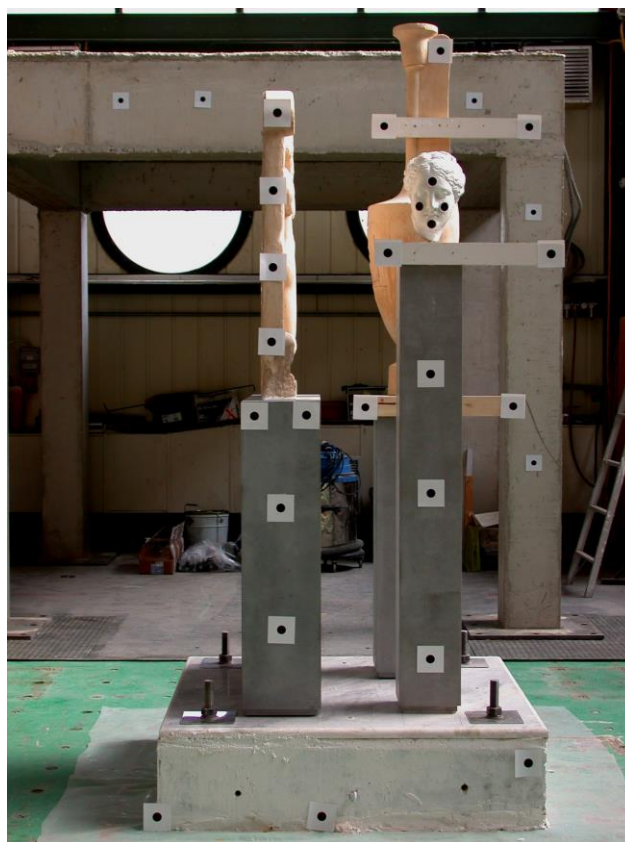
Παράλληλα με την στερεοσκοπική βιντεοσκόπηση έγινα και συνήθη βίντεο και ψηφιακή φωτογράφιση των δυο φάσεων. Τα σχετικά CD δίνονται στο Παράρτημα 2.



Εικ. 28. Μετρητική διάταξη. Θέσεις επιταχυνσιόμετρων.



Εικ. 29. Γενική άποψη της πειραματικής διάταξης. Στο βάθος φαίνεται το σύστημα της στεροσκοπικής βιντεοσκόπησης.



Εικ. 30. Γενική άποψη της πειραματικής διάταξης με τα σημεία – στόχους για την καταγραφή των μετακινήσεων.

4. Αποτελέσματα δοκιμών.

Στο Παράρτημα 3 παρουσιάζονται όλες οι καταγραφές των σημάτων όπως αυτά αναλύθηκαν στα διάφορα σημεία μέτρησης για όλες τις δοκιμές για το εξεταζόμενο δοκίμιο στη Φάση I και II αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα σε κάθε παράρτημα παρουσιάζονται οι ακόλουθες χρονοϊστορίες:

1. Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων σεισμικού προσομοιωτήρα κατά τις διευθύνσεις X, Y και Z.
2. Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων κατά τις διευθύνσεις X και Y στα διάφορα σημεία μέτρησης.
3. Χρονοϊστορίες μετακινήσεων κατά τις διευθύνσεις X και Y στα διάφορα σημεία μέτρησης

Στις ακόλουθες παραγράφους παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα προέκυψαν από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα δίνονται οι μέγιστες αναπτυσσόμενες επιταχύνσεις, μετακινήσεις και στροφές και υπολογίζονται οι συντελεστές μεγέθυνσης, γίνεται σύγκριση μεταξύ των αποκρίσεων του δοκιμίου στις δυο φάσεις προκειμένου να ελεγχθεί η επαναληψιμότητα των δοκιμών, συγκρίνονται οι αποκρίσεις για τις διάφορες διεγέρσεις και εξετάζονται οι τροχιές των σημείων -στόχων των αντικειμένων του δοκιμίου.

4.1. Συντελεστές μεγέθυνσης

Ήδη από τις πρώτες δοκιμές με τις ημιτονικές διεγέρσεις σταθερής επιτάχυνσης παρατηρείται σημαντική μεγέθυνση της επιτάχυνσης μεταξύ σεισμικού προσομοιωτήρα και αντικειμένων (βλ. παράρτημα 3, καταγραφές δοκιμών 1 και 2).

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται οι μέγιστες απόλυτες τιμές των επιταχύνσεων στις διάφορες θέσεις μέτρησης, οι οποίες καταγράφηκαν κατά τις δοκιμές λογαριθμικής σάρωσης 1 και 2 και τις ισχυρές δοκιμές 7, 15 και 17 της Φάσης I, ενώ στον Πίνακα 6 δίνονται οι αντίστοιχες τιμές για τις δοκιμές 1, 2, 4, 6, 8 και 11 της Φάσης II (πριν την έναρξη της Δοκιμής 13 αφαιρέθηκαν τα επιταχυνσιόμετρα από τις μαρμάρινες βάσεις και τα εκθέματα προκειμένου να μην καταστραφούν). Στους Πίνακες 7 έως 10 δίνονται οι συντελεστές μεγέθυνσης μεταξύ σεισμικού προσομοιωτήρα – μαρμάρινης βάσης καθώς επίσης και οι συντελεστές μεγέθυνσης μεταξύ μαρμάρινης βάσης – εκθέματος. Οι συντελεστές μεγέθυνσης παρουσιάζονται για τις ισχυρές δοκιμές της Φάσης I (Δοκιμή 7, 15 και 17) και Φάσης II (Δοκιμές 4, 6 και 8) καθώς επίσης και για τις δοκιμές λογαριθμικής σάρωσης συχνοτήτων. Οι συντελεστές μεγέθυνσης επιτάχυνσης σεισμικού προσομοιωτήρα – μαρμάρινης βάσης προκύπτουν ως ο λόγος της επιτάχυνσης στη μαρμάρινη βάση προς την επιτάχυνση στο σεισμικό προσομοιωτήρα, ενώ οι συντελεστές μεγέθυνσης μαρμάρινης βάσης – εκθέματος προκύπτουν ως ο λόγος των επιταχύνσεων στη βάση και στο έκθεμα.

Η γενική διαπίστωση από τους πίνακες 5-10 είναι ότι παρουσιάζεται σημαντική μεγέθυνση της επιτάχυνσης για όλες τις δοκιμές. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση της πλάκας (σημείο μέτρησης 5Y) στην οποία καταγράφεται μέγιστη επιτάχυνση 14,2 και 15,9 m/sec² στις φάσεις I και II αντιστοίχως για την ημιτονική διέγερση με επιτάχυνση 0,5 m/sec², δηλαδή 28 και 32 φορές μεγαλύτερες αντιστοίχως.

Μικρότερη, αλλά πολύ σημαντική ενίσχυση παρατηρείται επίσης και για τα άλλα αντικείμενα – εκθέματα και βάθρα- για τις ημιτονικές και τις σεισμικές διεγέρσεις.

Πίνακας 5. Φάση Ι: Απόλυτες μέγιστες τιμές επιταχύνσεων κατά τις Δοκιμές 1, 2, 7, 15 και 17.

Σημείο Μέτρησης	Δοκιμή 1 Λογαριθμική Σάρωση κατά Υ	Δοκιμή 2 Λογαριθμική Σάρωση κατά Χ	Δοκιμή 7 (Σεισμός Έδεσσας)	Δοκιμή 15 (Σεισμός Αργοστολίου)	Δοκιμή 17 (Σεισμός Καλαμάτας)
A1X (m/sec ²)	3.051	2.949	2.688	2.153	7.259
A1Y (m/sec ²)	3.952	2.121	1.667	3.040	6.121
A2X (m/sec ²)	4.142	4.057	3.722	5.895	6.671
A2Y (m/sec ²)	4.626	4.522	3.787	6.161	8.172
A3X (m/sec ²)	-	1.126	1.171	2.737	2.946
A3Y (m/sec ²)	3.698	1.565	3.841	5.31	-
A4X (m/sec ²)	5.641	5.728	4.988	6.202	-
A4Y (m/sec ²)	5.334	5.442	5.050	6.802	-
A5X (m/sec ²)	14.169	1.722	6.636	12.896	12.436
A5Y (m/sec ²)	-	0.163	6.770	11.875	15.534
Χ-Επιτάχυνση Σεισμ. Πρ. (m/sec ²)	-	0.762	1.116	2.587	2.590
Υ-Επιτάχυνση Σεισμ. Πρ. (m/sec ²)	0.738	-	0.961	3.027	3.044
Ζ-Επιτάχυνση Σεισμ. Πρ. (m/sec ²)	-	-	0.457	0.603	1.643

Πίνακας 6. Φάση ΙΙ: Απόλυτες μέγιστες τιμές επιταχύνσεων κατά τις Δοκιμές 1,2,4,6,8 και 11.

Σημείο Μέτρησης	Δοκιμή 1 Λογαριθμική Σάρωση κατά Χ	Δοκιμή 2 Λογαριθμική Σάρωση κατά Υ	Δοκιμή 4 Σεισμός Έδεσσας	Δοκιμή 6 (Σεισμός Αργοστολίου)	Δοκιμή 8 (Σεισμός Καλαμάτας)	Δοκιμή 11 (Τεχνητός σεισμός Αθηνών)
A1X (m/sec ²)	3.046	2.562	3.988	3.862	5.857	5.229
A1Y (m/sec ²)	2.025	3.436	3.281	5.170	5.273	5.224
A2X (m/sec ²)	4.008	3.727	2.776	4.694	6.995	7.142
A2Y (m/sec ²)	5.181	6.085	5.680	4.945	8.010	9.550
A3X (m/sec ²)	0.891	1.517	0.971	2.266	2.717	7.946
A3Y (m/sec ²)	0.979	2.981	3.066	4.934	6.082	-
A4X (m/sec ²)	-	12.213	9.668	6.566	8.977	-
A4Y (m/sec ²)	10.928	5.903	8.132	5.783	14.381	-
A5X (m/sec ²)	0.632	0.186	5.734	7.004	12.439	-
A5Y (m/sec ²)	0.445	15.945	14.872	11.350	17.148	-
Χ-Επιτάχυνση Σεισμ.Πρ. (m/sec ²)	0.675	-	1.088	2.511	2.591	5.841
Υ-Επιτάχυνση Σεισμ. Πρ. (m/sec ²)	-	0.724	1.016	2.849	2.956	7.086
Ζ-Επιτάχυνση Σεισμ.Πρ. (m/sec ²)	-	-	0.416	0.675	1.655	5.596

Πίνακας 7. Φάση Ι: Συντελεστές Μεγέθυνσης – Σεισμικός Προσομοιωτήρας - Βάθρα

Σημείο Μέτρησης	Διεύθυνση	Βάθρο	Δοκιμή 1	Δοκιμή 2	Δοκιμή 7	Δοκιμή 15	Δοκιμή 17
Σ. Πρ./Α1	X	«Κεφαλής»	-	3.870	2.409	0.832	2.802
	Y		5.355	-	1.734	1.004	2.011
Σ. Πρ./Α2	X	«Ληκύθου»	-	5.324	3.335	2.279	2.576
	Y		6.268	-	3.941	2.035	2.685
Σ. Πρ./Α3	X	«Πλάκας»	-	1.478	1.049	1.057	1.137
	Y		5.011	-	3.997	1.754	-

Πίνακας 8. Φάση Ι: Συντελεστές Μεγέθυνσης – Βάθρα - Εκθέματα

Σημείο Μέτρησης	Διεύθυνση	Έκθεμα	Δοκιμή 1	Δοκιμή 2	Δοκιμή 7	Δοκιμή 15	Δοκιμή 17
Α4/Α2	X	«Λήκυθος»	1.362	1.412	1.340	1.052	-
	Y		1.153	1.203	1.334	1.104	-
Α5/Α3	X	«Πλάκα»	3.830	1.529	5.667	4.710	4.221
	Y		-	0.104	1.763	2.236	-

Πίνακας 9. Φάση ΙΙ: Συντελεστές Μεγέθυνσης – Σεισμικός Προσομοιωτήρας - Βάθρα

Σημείο Μέτρησης	Διεύθυνση	Βάθρο	Δοκιμή 1	Δοκιμή 2	Δοκιμή 4	Δοκιμή 6	Δοκιμή 8
Σ. Πρ./Α1	X	«Κεφαλής»	4.513	-	3.665	1.538	2.261
	Y		-	4.746	3.229	1.815	1.784
Σ. Πρ./Α2	X	«Ληκύθου»	5.938	-	2.551	1.869	2.700
	Y		-	8.405	5.590	1.736	2.710
Σ. Πρ./Α3	X	«Πλάκας»	1.320	-	0.892	0.902	1.049
	Y		-	4.117	3.018	1.732	2.058

Πίνακας 10. Φάση ΙΙ: Συντελεστές Μεγέθυνσης – Βάθρα - Εκθέματα

Σημείο Μέτρησης	Διεύθυνση	Έκθεμα	Δοκιμή 1	Δοκιμή 2	Δοκιμή 4	Δοκιμή 6	Δοκιμή 8
Α4/Α2	X	«Λήκυθος»	-	3.277	3.483	1.400	1.283
	Y		2.109	6.970	1.432	1.169	1.795
Α5/Α3	X	«Πλάκα»	0.709	0.122	5.905	3.091	4.578
	Y		0.455	5.349	4.851	2.300	2.819

Από τους Πίνακες 5-10 διαπιστώνουμε ότι ο συντελεστής μεγέθυνσης επιτάχυνσης για το σεισμό του Αργοστολίου (Δοκιμή 15 Φάσης Ι και Δοκιμή 6 Φάσης ΙΙ), τόσο μεταξύ σεισμικού προσομοιωτήρα - βάθρου όσο και μεταξύ βάθρου- εκθέματος ήταν μικρότερος συγκρινόμενος με τους αντίστοιχους συντελεστές για το σεισμό της Έδεσσας και της Καλαμάτας. Η μεγαλύτερη ενίσχυση βάθρου-εκθέματος παρατηρήθηκε στην «πλάκα» κατά τη διεύθυνση Χ στο σεισμό της Έδεσσας τόσο κατά τη Φάση Ι όσο και κατά τη Φάση ΙΙ, ενώ η μεγαλύτερη ενίσχυση σεισμικού προσομοιωτήρα – βάθρου παρατηρήθηκε στο βάθρο της «ληκύθου» κατά τη διεύθυνση Υ και στις δύο φάσεις δοκιμών.

Στα σχήματα 6 έως 9 δίνονται οι καταγραφές των επιταχύνσεων για όλα τα αντικείμενα για 4 από τις δοκιμές στην διεύθυνση Υ. Τα γραφήματα έχουν σχεδιαστεί με κοινές κλίμακες χρόνου και επιτάχυνσης, έτσι ώστε να φαίνεται η σημαντική μεγέθυνση της επιτάχυνσης στα εκθέματα. Στο σχ. 9 φαίνονται οι καταγραφές

της δοκιμής 16 της φάσης I, κατά την οποία κατέρρευσε η λήκυθος και καθώς χτύπησε στο βάθρο της επιτύμβιας πλάκας επηρέασε τις καταγραφές και σε αυτή.

Στις εικόνες 31-34 φαίνονται στιγμιότυπα από τις δοκιμές των φάσεων I και II.

Στα σχήματα 10 έως 32 δίνονται τα διαγράμματα της συνάρτησης μεταφοράς για τις δοκιμές λογαριθμικής σάρωσης συχνοτήτων για τις δυο φάσεις των δοκιμών. Η συνάρτηση ορίζεται αφ' ενός μεν μεταξύ σεισμικού προσομοιωτήρα και βάθρων, αφ' ετέρου δε μεταξύ βάθρων και εκθεμάτων. Από τα διαγράμματα αυτά προκύπτει επίσης η σημαντική ενίσχυση της διέγερσης για ορισμένες συχνότητες.

Μολονότι η θεωρία της λικνιστικής απόκρισης των ελευθέρως ισταμένων σωμάτων υποθέτει ο λικνισμός αρχίζει μόλις η εδαφική επιτάχυνση ως ποσοστό του g ξεπεράσει το λόγο του πλάτους προς το ύψος του σώματος, στην περίπτωση των αντικειμένων του πειράματος παρατηρούμε ότι εκδηλώνεται λικνισμός για πολύ χαμηλότερη τιμή της επιτάχυνσης (σύγκρινε επιτάχυνση $0.05g$ με συντελεστές α του σχήματος 9). Η σημαντική ενίσχυση για ορισμένη συχνότητα της διέγερσης επιβεβαιώνει ότι τα ελευθέρως ιστάμενα αντικείμενα διαθέτουν μια ιδιοσυχνότητα, η οποία δεν οφείλεται στην ελαστικότητα του συστήματος, αλλά στις μικρές ανωμαλίες των επαφών στις έδρες (βάθρο – βάση και αντικείμενο – βάθρο).

Η ιδιοσυχνότητα για κάθε σύστημα βάθρο – αντικείμενο καθορίζει τόσο την έναρξη του λικνισμού του, όσο και την περαιτέρω απόκριση του συστήματος.