



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΡΧΑΙΩΝ
ΝΑΩΝ – Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΝΑΟΥ ΤΟΥ
ΕΠΙΚΟΥΡΙΟΥ ΑΠΟΛΛΩΝΑ**

ΑΡΒΑΝΙΤΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΦΑΚΙΟΛΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ



ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΔΡ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΑΘΡΕΠΤΑΣ

ΠΑΤΡΑ 2012



ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΡΧΑΙΩΝ
ΝΑΩΝ – Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΝΑΟΥ ΤΟΥ
ΕΠΙΚΟΥΡΙΟΥ ΑΠΟΛΛΩΝΑ**

ΑΡΒΑΝΙΤΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΦΑΚΙΟΛΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ



ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΔΡ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΑΘΡΕΠΤΑΣ

ΠΑΤΡΑ 2012

© Βασίλειος Αρβανίτης , Παναγιώτης Φακιολάς , 2012

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Ανωτάτου Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πατρών.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ισχυροί σεισμοί αποτελούν σημαντική απειλή ιστορικών μνημείων, όπως αρχαίων κίωνων, ιδιαίτερα σε σεισμογενείς περιοχές όπως είναι η Ελλάδα, η Ιταλία, η Τουρκία και η Κύπρος. Οι αρχαίες μνημειακές κατασκευές συνήθως αποτελούνται από σπονδύλους, πέτρινους ή μαρμάρινους, που είναι τοποθετημένοι ο ένας πάνω στον άλλο, συνήθως χωρίς κάποιο συνδετικό υλικό. Κάτω από τη δράση μίας ισχυρής σεισμικής διέγερσης του εδάφους θεμελίωσης, οι σπόνδυλοι αποκρίνονται σαν ανεξάρτητα στερεά σώματα, τα οποία μπορούν να ολισθήσουν μεταξύ τους ή να λικνιστούν ανεξάρτητα ή σαν ομάδες σπονδύλων. Η όλη απόκριση του κίονα μπορεί να χαρακτηριστεί έντονα μη γραμμική, αφού παρατηρούνται μεγάλες σχετικές μετακινήσεις και συνεχείς εναλλαγές της γεωμετρίας και των συνοριακών συνθηκών του προβλήματος.

Η κατανόηση της σεισμικής απόκρισης των ιστορικών αυτών μνημείων, μπορεί να βοηθήσει στην προστασία τους από σεισμούς, καθώς και να δώσει χρήσιμες πληροφορίες για παλαιότερους σεισμούς που έπληξαν περιοχές και μνημεία. Επιπλέον, είναι ενδιαφέρον το γεγονός ότι έχουν καταγραφεί περιπτώσεις όπου ισχυροί σεισμοί έπληξαν συγκεκριμένες περιοχές με καταστροφικά αποτελέσματα, χωρίς όμως να προκαλέσουν κατάρρευση ή σημαντικές ζημιές σε παρακείμενους σπονδυλωτούς κίονες. Έτσι είναι επιστημονικά ενδιαφέρον να κατανοηθούν οι μηχανισμοί που επιτρέπουν την ευστάθεια που επιδεικνύουν αυτές οι σημαντικές κατασκευές. Τέτοιοι μηχανισμοί άλλωστε συναντώνται πολύ σπάνια σε σύγχρονες κατασκευές και είναι εξαιρετικά δύσκολο να προσομοιωθούν με αναλυτικές μεθόδους, ιδιαίτερα όταν οι κίονες δεν είναι μονολιθικοί και αποτελούνται από αριθμό σπονδύλων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια αριθμητική μελέτη της σεισμικής απόκρισης των κίωνων της περίπτωσης του κλασικού ναού του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών Φιγάλειας. Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, η αξιοπιστία του οποίου στην εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης πολυσπόνδουλων κίωνων ελέγχθηκε, αρχικά, με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στη συνέχεια, με το λογισμικό διερευνήθηκε η απόκριση τριών, αντιπροσωπευτικών, κίωνων του περιστυλίου του μνημείου, που αποτελούνται από κιονόκρανο και διαφορετικό αριθμό σπονδύλων (πέντε, έξι και επτά), σε τέσσερις καταγραφές σεισμών του ελλαδικού χώρου. Το κυριότερο συμπέρασμα που προέκυψε από τη μελέτη είναι ότι οι κίονες του ναού, εφόσον διατηρούν τους σπονδύλους τους χωρίς επικίνδυνες ρωγμές και με άθικτες εδράσεις, βρίσκονται σε κατακόρυφη στάση και εδράζονται σε δύσκαμπτη βάση, δύνανται να αντιστέκονται σε σημαντικές σεισμικές δράσεις, μεγαλύτερες από τις δράσεις που εκτιμάται ότι εφαρμόζουν σε αυτούς οι συνήθεις σεισμικές δονήσεις της περιοχής. Κατά συνέπεια, μετά την ολοκλήρωση των, εν εξελίξει σήμερα, εργασιών αποκατάστασης του ναού και την εξασφάλιση των προϋποθέσεων ευστάθειας που αναφέρθηκαν προηγουμένως, ο κίνδυνος κατάρρευσης από σεισμικά αίτια που θα απειλεί τους κίονες θα είναι μικρός.

SUMMARY

This paper presents a numerical study, conducted with the aim to investigate the seismic response of the columns in the perimeter of the classical temple of Apollo Epikourios, which is located at Bassai, in the west Peloponnesus. The study was conducted using the FE software Abaqus, which efficiency to predict the seismic response of multi-drum columns was firstly investigated with satisfactory results. Then, with the software was examined the seismic response of three columns of Apollo Epikourios temple, representative of the perimeter colonnade, composed of a capital and seven or six or five drums. The numerical results showed that the temple columns, in vertical position, on rigid base and with intact drums and contacts, have the capacity to withstand significant seismic loads, larger than the loads that are being estimated to be imposed on the columns by the usual earthquakes in the area. Thus, after the restoration of the monument and, consequently, the establishment of the aforementioned stability conditions, the seismic risk for the columns will be minor.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Ο ΣΕΙΣΜΟΣ	
1.1. Εισαγωγή	11
1.2. Τι είναι ο σεισμός	11
1.3. Η δομή του εσωτερικού της Γης	12
1.4. Ο τρόπος και το σημείο δημιουργίας ενός σεισμού	13
1.5. Τα είδη των σεισμών	15
1.6. Τα είδη των σεισμικών κυμάτων	16
1.7. Ο υπολογισμός μεγέθους των σεισμών	17
1.8. Οι σεισμοί στον Ελληνικό χώρο	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Ο ΝΑΟΣ ΤΟΥ ΕΠΙΚΟΥΡΙΟΥ ΑΠΟΛΛΩΝΑ	
2.1. Η δομή των αρχαίων ναών	21
2.2. Η ιστορία του ναού	22
2.3. Περιγραφή του ναού και της κατάστασης διατήρησής του	23
2.4. Οι πρώτες αναστηλώσεις και οι σημερινές προσπάθειες	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΜΕΛΕΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΡΧΑΙΩΝ ΚΙΟΝΩΝ	
3.1. Συνοπτική παρουσίαση της σεισμικής απόκρισης αρχαίων κιόνων..	28
3.2. Περιληπτική επισκόπηση των προγενεστέρων μελετών	29
3.3. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων	30
3.4. Εισαγωγή στο ABAQUS	31
3.5. Πεπερασμένα στοιχεία και άκαμπτα σώματα	32
3.6. Διερεύνηση της αξιοπιστίας του λογισμικού ABAQUS να προβλέπει τη σεισμική απόκριση πολυσπόνδυλων κιόνων	33
3.6.1. Τα πειραματικά δεδομένα	33
3.6.2. Το Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας	33
3.6.3. Η συνοπτική παρουσίαση του προγράμματος	34
3.6.4. Η αριθμητική προσομοίωση των πειραμάτων	36
3.6.5. Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων - αριθμητικών προβλέψεων.	38
3.6.6. Συμπέρασμα	41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Η ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ABAQUS

4.1. Αριθμητική μελέτη της σεισμικής απόκρισης τριών κίονων	42
4.1.1. Τα προσομοιώματα	42
4.1.2. Οι σεισμικές διεγέρσεις	45
4.1.3. Η σεισμική απόκριση του κίονα KN3	46
4.1.4. Η ευστάθεια των κίονων KN3, KB2 και KN5	51
4.1.5. Η επίδραση της απόκλισης από την κατακόρυφο στην ευστάθεια του κίονα KB2	52
4.1.6. Η επίδραση της κρηπίδας στην απόκριση του κίονα KB2	53
4.2. Σχολιασμός των αριθμητικών αποτελεσμάτων	56
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	61
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	62
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	63
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	64

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Ο ΣΕΙΣΜΟΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γη παρουσιάζει συνεχώς μεταβολές στη μορφή και το ανάγλυφο της γι' αυτό και χαρακτηρίζεται "ζωντανός" πλανήτης. Ο σεισμός είναι ένα φυσικό φαινόμενο που αποδεικνύει αυτή ακριβώς τη "δράση" της γης και είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τη ζωή και την ιστορία της. Σε πολλές περιπτώσεις δυστυχώς, η γένεση ενός σεισμού έχει καταστροφικές συνέπειες για τα ανθρώπινα δημιουργήματα και κατ' επέκταση για τον ίδιο τον άνθρωπο. Είναι φανερό ότι με την πάροδο του χρόνου οι πόλεις επεκτείνονται, τα κτίσματα πολλαπλασιάζονται, οπότε αυξάνονται οι πιθανότητες για περισσότερες καταστροφές. Στον εικοστό αιώνα, περισσότεροι από 1.000.000 άνθρωποι σε όλο τον κόσμο έχασαν τη ζωή τους κατά τη διάρκεια σεισμικών δονήσεων, ενώ δισ. δολάρια σε παγκόσμιο επίπεδο δαπανώνται ετησίως για την αντιμετώπιση των αναγκών και την ανασυγκρότηση των σεισμόπληκτων περιοχών.

Η Ελλάδα είναι γνωστό ότι κατέχει την πρώτη θέση από άποψη σεισμικότητας στην Ευρώπη και την έκτη σε παγκόσμιο επίπεδο. Είναι λοιπόν βέβαιο ότι σεισμοί, στη χώρα μας, θα γίνονται διαρκώς. Χρέος της Πολιτείας είναι να μεριμνήσει για την ελαχιστοποίηση των απωλειών σε έμψυχο δυναμικό και υλικοτεχνική υποδομή. Αυτό επιτυγχάνεται αφενός με την ορθή εφαρμογή του ισχύοντος αντισεισμικού κανονισμού στις κατασκευές και αφετέρου με την οργάνωση της κοινωνικής αντισεισμικής άμυνας μέσω της ευρείας ενημέρωσης του πληθυσμού (ψυχολογική και πρακτική προετοιμασία των πολιτών).

Για να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά των κίωνων, των κιονοστοιχιών, των επιστυλίων και γενικά των αρχαίων ναών στους σεισμούς, θα πρέπει πρώτα να κατανοήσουμε τι ακριβώς είναι ο σεισμός σαν φυσικό φαινόμενο, πώς λειτουργεί μηχανικά, και με ποιόν τρόπο έχει επίδραση στη ζωή μας και τις κατασκευές. Για το λόγο αυτό σε αυτό κεφάλαιο γνωρίζουμε τον σεισμό ως φυσικό φαινόμενο, τις ιδιότητές του και όλα όσα γνωρίζουμε μέχρι σήμερα για τους τρόπους δημιουργίας του και τον υπολογισμό του. Επίσης γίνεται αναφορά για το φαινόμενο του σεισμού στον Ελλαδικό χώρο ειδικότερα.

1.2 ΤΙ ΕΙΝΑΙ Ο ΣΕΙΣΜΟΣ

Ο σεισμός είναι ένα φυσικό φαινόμενο, το οποίο προκαλείται από ξαφνική απελευθέρωση μηχανικής ενέργειας από το εσωτερικό της γης προς την επιφάνειά της. Η ενέργεια αυτή έχει τη μορφή αναταράξεων στη στεριά ή τσουνάμι στη θάλασσα, και διαδίδεται μέσω των σεισμικών κυμάτων. Ο σεισμός μπορεί να είναι και αποτέλεσμα ανθρώπινης δραστηριότητας, όπως για

παράδειγμα μιας υπόγειας πυρηνικής δοκιμής. Γενικά, η λέξη "σεισμός" περιγράφει κάθε σεισμικό γεγονός - φυσικό φαινόμενο ή αποτέλεσμα ανθρώπινης δραστηριότητας, που παράγει σεισμικά κύματα τα οποία διαδίδονται στο εσωτερικό της γης.

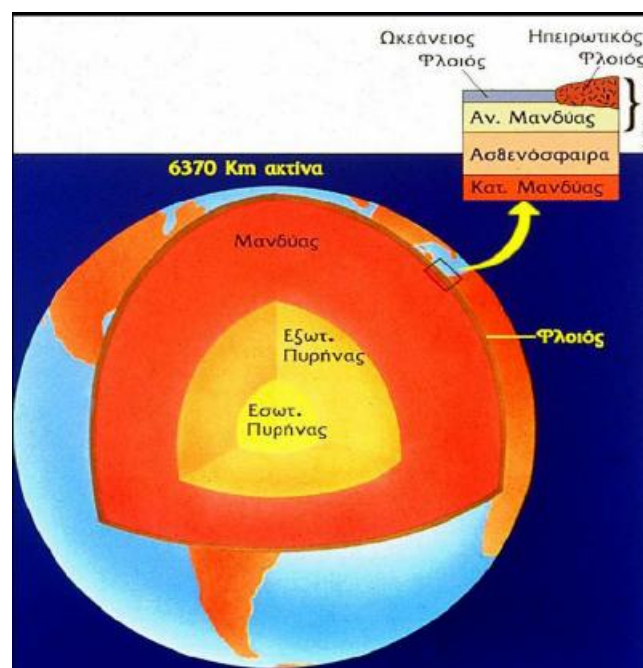
1.3 Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΤΗΣ ΓΗΣ

Η Γη αποτελείται από τρία διαφορετικά στρώματα το φλοιό, το μανδύα και τον πυρήνα, συνολικού πάχους 6.370km περίπου.

Ο φλοιός είναι το στερεό, εξωτερικό περίβλημα της Γης. Υπάρχουν δύο είδη φλοιού, ο ηπειρωτικός και ο ωκεάνιος. Το μέσο πάχος του ηπειρωτικού είναι περίπου 35km, κάτω όμως από τις μεγάλες οροσειρές μπορεί να φτάσει τα 60 - 70km. Το μέσο πάχος του ωκεάνιου είναι 7km.

Ο μανδύας είναι το αμέσως επόμενο στρώμα και φτάνει μέχρι το βάθος των 2.900km. Η επιφάνεια που χωρίζει το φλοιό από το μανδύα, είναι η ασυνέχεια Mohorovicic. Ως λιθόσφαιρα χαρακτηρίζεται ένα δύσκαμπτο στρώμα, μέσου πάχους 80 χιλιομέτρων περίπου, που αποτελείται από το στερεό φλοιό και μέρος του στερεού ανώτερου μανδύα. Το τμήμα του μανδύα που βρίσκεται κάτω από τη λιθόσφαιρα είναι γνωστό ως ασθενόσφαιρα.

Κάτω από το μανδύα υπάρχει ο πυρήνας που φτάνει έως το κέντρο της γης. Ο πυρήνας διακρίνεται σε εξωτερικό (υγρή/ρευστή κατάσταση) και σε εσωτερικό (στερεή κατάσταση).



Εικ. 1. Δομή της Γης.

1.4 Ο ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΙ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΟΣ ΣΕΙΣΜΟΥ

Η λιθόσφαιρα δεν είναι ενιαία αλλά απαρτίζεται από ένα σύνολο μεγάλων και μικρότερων πλακών που ολισθαίνουν πάνω στο υποκείμενο παχύρευστο μανδουακό υλικό (ασθενόσφαιρα) πραγματοποιώντας σχετικές μεταξύ τους κινήσεις. Οι πλάκες αυτές λέγονται λιθοσφαιρικές πλάκες. Τα αίτια κίνησης τους πιθανόν να είναι οι οριζόντιες εφαπτομενικές δυνάμεις που ασκούνται στον πυθμένα τους από τα θερμικά ρεύματα μεταφοράς τα οποία δημιουργούνται στον ασθενοσφαιρικό μανδύα.

Η θεωρία που ερμηνεύει ικανοποιητικά το σύνολο των γεωλογικών και γεωφυσικών παρατηρήσεων, που σχετίζονται με την ενεργό τεκτονική δράση και κατά συνέπεια και με τη σεισμική δράση, είναι αυτή που περιγράφει την κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών.

Οι λιθοσφαιρικές πλάκες αλλού αποκλίνουν, αλλού συγκλίνουν και αλλού η μία κινείται παράλληλα εφαπτομενικά σε σχέση με τη διπλανή της.

Στις περιοχές που αποκλίνουν οι λιθοσφαιρικές πλάκες θερμό ασθενοσφαιρικό υλικό βγαίνει στην επιφάνεια, ψύχεται, στερεοποιείται και έτσι δημιουργείται νέα λιθόσφαιρα κατά μήκος των δύο πλευρών ράχων που χαρακτηρίζονται ως μεσοωκεάνιες ράχες (π.χ. μεσοωκεάνια ράχη Ατλαντικού ωκεανού, απομάκρυνση Νοτιο-Αμερικανικής και Αφρικανικής πλάκας).

Στις περιοχές που ολισθαίνουν οριζόντια η μία πλάκα σε σχέση με την άλλη, η κίνηση γίνεται κατά μήκος των ρηγμάτων μετασχηματισμού.

Στην περίπτωση της σύγκλισης των πλακών η πυκνότερη από τις δύο βυθίζεται κάτω από την άλλη. Όταν η υποβυθιζόμενη λιθόσφαιρα φτάσει σε μεγάλα βάθη λιώνει μέσα στο θερμό μανδουακό υλικό κι έτσι καταστρέφεται λιθοσφαιρικό υλικό. Η δημιουργία νέου λιθοσφαιρικού υλικού στις μεσοωκεάνιες ράχες αντισταθμίζεται λοιπόν με την καταστροφή αντίστοιχης ποσότητας στις περιοχές σύγκλισης πλακών, οπότε η συνολική επιφάνεια της Γης παραμένει "αμετάβλητη".

Αποτέλεσμα της σχετικής κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών είναι η αργή παραμόρφωση των πετρωμάτων στις παρυφές τους. Για το λόγο αυτό, στα πετρώματα που βρίσκονται κοντά στις περιοχές αυτές συσσωρεύονται τεράστια ποσά δυναμικής ενέργειας (ενέργεια ελαστικής παραμόρφωσης πετρωμάτων), και αναπτύσσονται μεγάλες τάσεις που συνεχώς αυξάνουν. Όταν οι τάσεις αυξηθούν τόσο πολύ, ώστε να υπερβούν το όριο αντοχής του λιθοσφαιρικού υλικού στο σημείο αυτό, επέρχεται θραύση. Ταυτόχρονα πραγματοποιείται απότομη σχετική κίνηση των δύο τμημάτων που έχουν προκύψει, κατά μία επιφάνεια, έως ότου ισορροπήσουν σε νέες θέσεις. Η επιφάνεια αυτή είναι το σεισμικό ρήγμα. Τη χρονική αυτή στιγμή γεννιέται ένας σεισμός.

Ο χώρος που πρωτοεκδηλώνεται η διάρρηξη των πετρωμάτων (σεισμογόνος χώρος) μπορεί κατά προσέγγιση να θεωρηθεί ως σημείο και ονομάζεται εστία ή υπόκεντρο του σεισμού. Το ίχνος της κατακόρυφης προβολής της εστίας πάνω

στην επιφάνεια της γης είναι το επίκεντρο, ενώ η απόστασή του από την εστία (βάθος της εστίας) λέγεται εστιακό βάθος.

Οι σεισμοί γεννιούνται μόνο μέσα στη λιθόσφαιρα και κατά κύριο λόγο εντοπίζονται στα όρια των λιθосφαιρικών πλακών.

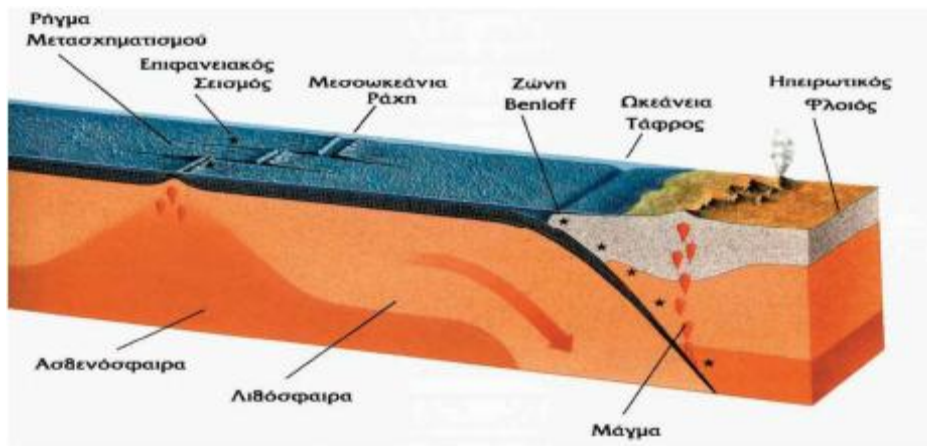
Οι εστίες των σεισμών βρίσκονται είτε κοντά στην επιφάνεια είτε σε βάθος πολλών χιλιομέτρων. Εντοπίζονται έως και στα 720km περίπου, βάθος που μπορεί να φτάσει η καταδυόμενη λιθόσφαιρα διατηρώντας τις ελαστικές της ιδιότητες.

Λόγω των κινήσεων των λιθосφαιρικών πλακών, δημιουργούνται μεσοωκεάνιες ράχες στις περιοχές απόκλισης των πλακών και ζώνες υποβύθισης στις περιοχές σύγκλισης. Στις μεσοωκεάνιες ράχες γεννιούνται μόνο επιφανειακοί σεισμοί, ενώ στις περιοχές σύγκλισης πλακών που υπάρχει καταβύθιση της μίας πλάκας κάτω από την άλλη γεννιούνται και «πλουτώνιοι» σεισμοί.

Οι εστίες των σεισμών στις περιοχές σύγκλισης πλακών συγκεντρώνονται σε μία "σεισμική ζώνη", τη ζώνη Benioff, που τοποθετείται κατά μήκος της πάνω επιφάνειας της καταδυόμενης λιθосφαιρικής πλάκας, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3. Στη ζώνη αυτή παρατηρούνται και τα περισσότερα φαινόμενα παραμόρφωσης και μεταμόρφωσης των πετρωμάτων.



Εικ. 2. Η διεύθυνση κινήσεως των λιθосφαιρικών πλακών.



Εικ. 3. Κινήσεις των λιθосφαιρικών πλακών. Στη περιοχή απόκλισης των πλακών δημιουργείται μεσσοκεάνια ράχη (επιφανειακοί σεισμοί). Στη περιοχή σύγκλισης των πλακών δημιουργείται ωκεάνια τάφρος. Απεικονίζεται και η σεισμική ζώνη Benioff (σεισμοί επιφανειακοί και πλουτώνιοι).

1.5 ΤΑ ΕΙΔΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ

Οι τύποι των φυσικών σεισμών διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο γέννησης τους σε τεκτονικούς, εγκατακρημνισιγενείς και ηφαιστειακούς. Οι σεισμοί στην πλειονότητά τους προέρχονται, όπως ήδη αναφέρθηκε, από καταπόνηση της λιθόσφαιρας και χαρακτηρίζονται ως τεκτονικοί. Το 90% περίπου των επιφανειακών και το σύνολο των πλουτώνιων σεισμών είναι τεκτονικοί, και λόγω της μεγάλης συχνότητάς τους αυτοί ουσιαστικά αποτελούν το μεγαλύτερο σεισμικό κίνδυνο. Οι εγκατακρημνισιγενείς είναι σεισμοί συνήθως μικρού μεγέθους και τοπικού χαρακτήρα. Οφείλονται στην εγκατακρήμνιση οροφών υπογείων κοιλωμάτων (π.χ. σπηλαίων) λόγω διάβρωσης και ορισμένες φορές έχουν παρατηρηθεί σε μετασεισμική ακολουθία ως συνεπακόλουθο άλλου τύπου σεισμών. Αυτοί αποτελούν περίπου το 3% του συνόλου των επιφανειακών σεισμών. Ηφαιστειακοί ονομάζονται οι σεισμοί που είναι αποτέλεσμα αλλαγής της πίεσης στο εσωτερικό της γης, λόγω της εισροής ή εκροής μάγματος, και μπορεί να είναι εξίσου καταστροφικοί προκαλώντας σχισμές στο έδαφος, παραμόρφωση του εδάφους, και ζημιές σε κατασκευές. Είναι επιφανειακοί και είτε προηγούνται είτε συνοδεύουν ηφαιστειακές εκρήξεις, ενώ αποτελούν περίπου το 7% του συνόλου των επιφανειακών σεισμών.

Επίσης οι σεισμοί διακρίνονται και ανάλογα με το εστιακό τους βάθος σε επιφανειακούς ή μικρού βάθους, ενδιάμεσου βάθους και μεγάλου βάθους. Το εστιακό βάθος είναι σημαντικό χαρακτηριστικό ενός σεισμού ως προς τις καταστροφές που αυτός μπορεί να επιφέρει στις ανθρώπινες κατασκευές, γιατί επηρεάζει την εξασθένηση των σεισμικών κυμάτων και τη διασπορά τους. Επιφανειακοί χαρακτηρίζονται οι σεισμοί όταν το εστιακό τους βάθος είναι μικρότερο από 60km και είναι αυτοί που προκαλούν συνήθως τις μεγαλύτερες

καταστροφές, ενδιάμεσου βάθους όταν το εστιακό βάθος κυμαίνεται μεταξύ 60 και 300km, και μεγάλου βάθους όταν το εστιακό βάθος είναι μεγαλύτερο από 300km. Οι ενδιάμεσου και μεγάλου βάθους σεισμοί χαρακτηρίζονται ως «πλουτώνιοι».

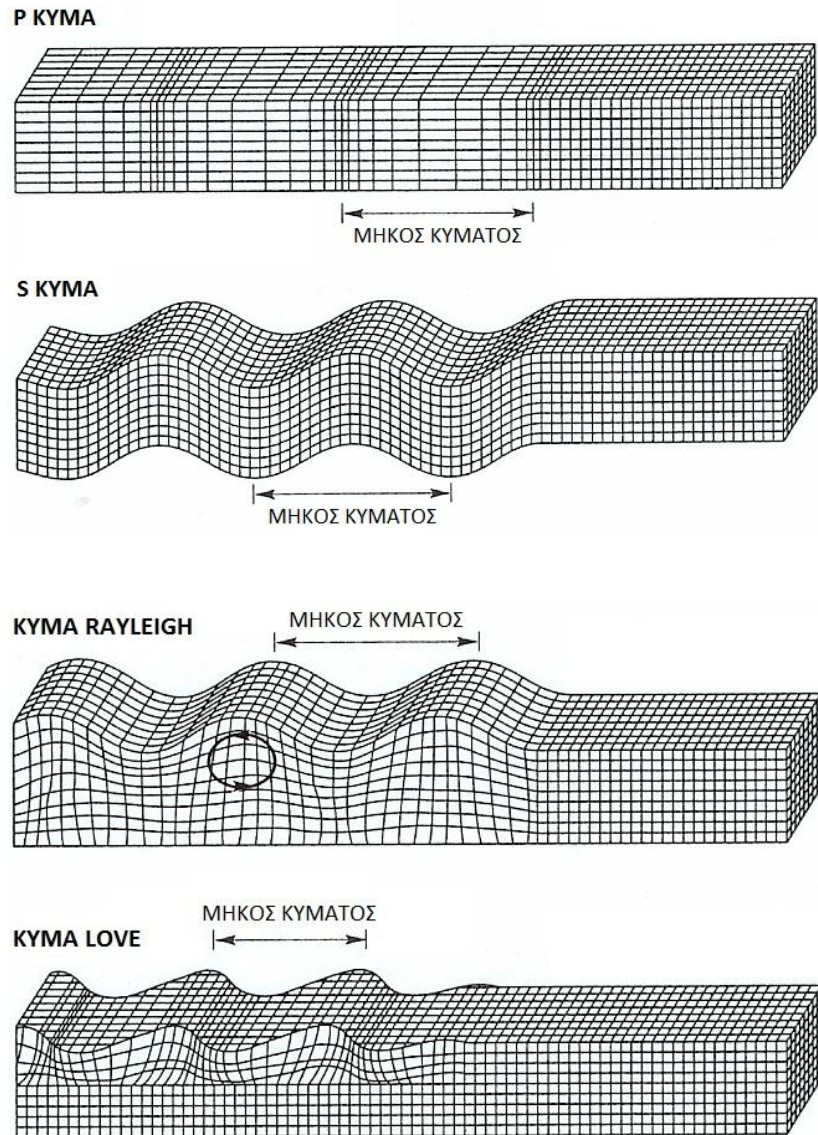
1.6 ΤΑ ΕΙΔΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Η διάρρηξη των πετρωμάτων που σηματοδοτεί τη γένεση ενός σεισμού συνοδεύεται από απότομη έκλυση ενέργειας. Η συσσωρευμένη δυναμική ενέργεια παραμόρφωσης των πετρωμάτων μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια ταλάντωσης των υλικών σημείων της επιφάνειας του ρήγματος. Οι ταλαντώσεις αυτές μεταδίδονται στα γειτονικά τους σημεία κ.λπ.. Στην περίπτωση αυτή επέρχονται μεταβολές τόσο στον όγκο όσο και στο σχήμα των πετρωμάτων και έτσι παράγονται δύο είδη κυμάτων: τα επιμήκη (P - πρωτεύοντα), και τα εγκάρσια (S - δευτερεύοντα) . Τα κύματα αυτά χαρακτηρίζονται ως κύματα χώρου και διαδίδονται προς κάθε κατεύθυνση στο εσωτερικό της Γης, τόσο στα επιφανειακά στρώματα όσο και στον πυρήνα. Τα εγκάρσια κύματα δε διαδίδονται στον εξωτερικό πυρήνα γεγονός που αποτελεί απόδειξη ότι αυτός βρίσκεται σε υγρή κατάσταση (είναι γνωστό ότι δεν είναι δυνατή η διάδοση των S κυμάτων στα ρευστά).

Κατά τη διάδοση των επιμήκων σεισμικών κυμάτων τα υλικά σημεία του μέσου διάδοσης ταλαντώνονται παράλληλα προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, ενώ στην περίπτωση των εγκαρσίων κυμάτων τα υλικά σημεία ταλαντώνονται κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Εξαιτίας της ανομοιογένειας των πετρωμάτων τα κύματα χώρου κατά τη διάδοσή τους δημιουργούν και άλλα κύματα, τα επιφανειακά καθώς και ανακλάσεις και διαθλάσεις των P και S κυμάτων. Τα επιφανειακά κύματα διακρίνονται σε διάφορα είδη όπως τα κύματα Love (L), Rayleigh (R) και Stonley (S). Τα κύματα αυτά κατά τη διάδοσή τους ακολουθούν συγκεκριμένα στρώματα του επιφανειακού τμήματος της Γης, δε διαδίδονται δηλαδή προς όλες τις κατευθύνσεις όπως τα κύματα χώρου.

Η ταχύτητα διάδοσης των επιμήκων κυμάτων είναι μεγαλύτερη από αυτή των εγκαρσίων. Για το λόγο αυτό τα επιμήκη φθάνουν πρώτα σε ένα σημείο της επιφάνειας της γης και όπως είναι αναμενόμενο είναι τα πρώτα κύματα που καταγράφονται από τους σειсмоγράφους. Τα πλάτη των εγκαρσίων είναι μεγαλύτερα από τα πλάτη των άλλων κυμάτων και κατά συνέπεια αυτά είναι τα κύματα που προκαλούν τις μεγαλύτερες βλάβες στις κατασκευές.



Εικ. 4. Μοντέλο διάδοσης των κυμάτων χώρου P και S, και των επιφανειακών κυμάτων R και L.

1.7 Ο ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ

Για να υπάρχει κάποιο μέτρο σύγκρισης των σεισμών δημιουργήθηκε η ανάγκη υπολογισμού μίας ποσότητας που να τους χαρακτηρίζει. Έτσι ορίστηκε το μέγεθος (M) του σεισμού που είναι το μέτρο της ενέργειας που εκλύεται από την εστία κατά τη διάρκεια της σεισμικής δόνησης.

Το μέγεθος προσδιορίζεται με μετρήσεις διαφόρων παραμέτρων των σεισμικών κυμάτων όπως το πλάτος, η περίοδος και η διάρκεια.

Για τον υπολογισμό του μεγέθους των σεισμών επινοήθηκαν διάφορες κλίμακες. Οι πιο γνωστές είναι, η κλίμακα επιφανειακού μεγέθους M_s , χωρικού μεγέθους M_b , μεγέθους διάρκειας M_T , μεγέθους σεισμικής ροπής M_w και η

κλίμακα τοπικού μεγέθους M_L η οποία είναι γνωστή και ως κλίμακα Ρίχτερ (Richter), το όνομά της οποίας δόθηκε από τον επινοητή της Charles Francis Richter το 1935. Στην Ελλάδα, συνήθως, οι αναφορές στο μέγεθος γίνονται σε κλίμακα επιφανειακού μεγέθους M_s .

Οι σεισμοί που προκαλούν βλάβες έχουν τις περισσότερες φορές μέγεθος μεγαλύτερο από 5 βαθμούς της κλίμακας Richter. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι οι επιπτώσεις ενός σεισμού στους ανθρώπους και στις κατασκευές (βλάβες ή μη βλάβες) εξαρτώνται εκτός από το μέγεθος και από άλλους παράγοντες όπως: το βάθος της εστίας, τη θέση του επικέντρου, το είδος της κατασκευής, το έδαφος θεμελίωσης της κατασκευής, τη γειτνίαση με ενεργά ρήγματα κ.λπ..

Το μεγαλύτερο μέγεθος σεισμού που έχει μετρηθεί έως σήμερα σε παγκόσμια κλίμακα είναι 9,5. Για να γίνει κατανοητή η αντιστοιχία των εννοιών μέγεθος - ενέργεια που εκλύεται από ένα σεισμό αρκεί να αναφερθεί ότι για μεγάλους σεισμούς (μέγεθος 8,7 - 8,9) η ενέργεια που εκλύεται είναι περίπου 900 φορές μεγαλύτερη από αυτήν της βόμβας στη Χισοσίμα.

Ο μεγαλύτερος ίσως ελληνικός σεισμός ($M = 8,3$) έπληξε την Κρήτη, έγινε στις 21 Ιουλίου του 365μ.Χ. και προκάλεσε μεγάλες καταστροφές σε περιοχές της Μεσογείου (Κρήτη, Πελοπόννησο, Αίγυπτο, Σικελία, Δαλματικές ακτές).

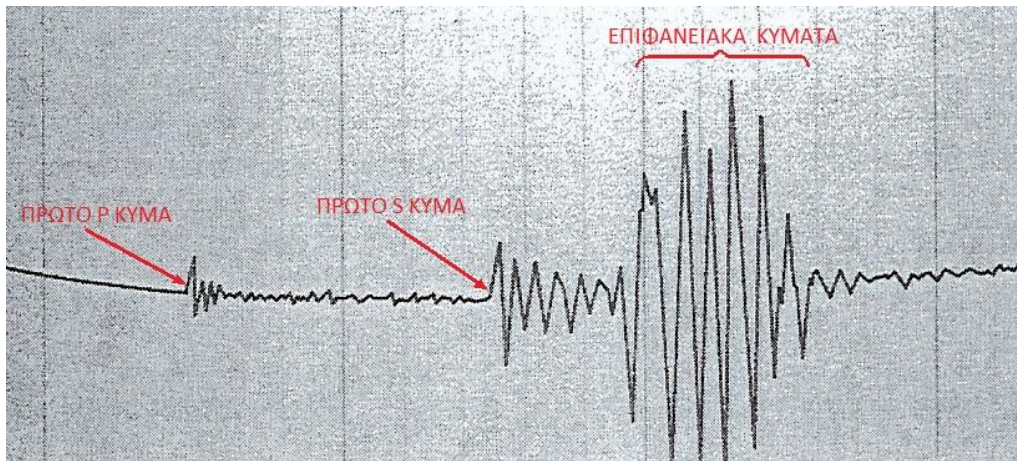
Το συχνότερα παρατηρούμενο μέγιστο μέγεθος σεισμού -ετησίως- στη χώρα μας είναι το 6,3.

Μία άλλη ποσότητα που αποτελεί μέτρο των μακρο-σεισμικών αποτελεσμάτων και πιο συγκεκριμένα μέτρο των βλαβών της σεισμικής δόνησης στους ανθρώπους και στις τεχνικές κατασκευές, είναι η ένταση του σεισμού.

Οι εμπειρικές κλίμακες που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της έντασης είναι: η τροποποιημένη 12βάθμια κλίμακα Mercalli (MM, 1931), η επίσης 12βάθμια MSK (1964) που προτάθηκε από τους Medvedev, Sponheuer, Karnik και η 8βάθμια JMA (Japanese Meteorological Agency) που χρησιμοποιείται από τους Ιάπωνες. Το 1992 το Συμβούλιο της Ευρώπης υιοθέτησε μία νέα κλίμακα που αποτελεί εξέλιξη της MSK και έχει προσαρμοστεί σε ευρωπαϊκά δεδομένα. Η κλίμακα αυτή είναι η EMS (European Macroseismic Scale).

Η ένταση ενός σεισμού είναι διαφορετική από περιοχή σε περιοχή και εξαρτάται κυρίως από την απόσταση της περιοχής αυτής από την εστία του σεισμού και εδαφικούς παράγοντες.

Τα όργανα καταγραφής των σεισμικών δονήσεων είναι τα σειμοσκόπια, οι σειμογράφοι και τα σεισμόμετρα. Ο σειμογράφος χρησιμοποιείται για την μέτρηση και καταγραφή των σεισμικών δονήσεων. Η λειτουργία του βασίζεται στην αρχή της αδράνειας και στο ότι η σεισμική δόνηση μεταβάλλει την δυναμική ενέργεια του μετρητή. Η καταγραμμένη μεταβολή ονομάζεται σειμογράφημα ή σεισμόγραμμα (εικ. 5).



Εικ. 5. Σειсмоγράφημα ή σεισμόγραμμα.

1.8 ΟΙ ΣΕΙΣΜΟΙ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ

Η σεισμικότητα ενός τόπου καθορίζεται από τη συχνότητα εμφάνισης των σεισμών και από τα μεγέθη τους. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία η Ελλάδα, από άποψη σεισμικότητας, κατέχει την πρώτη θέση στη Μεσόγειο και στην Ευρώπη καθώς και την έκτη θέση σε παγκόσμιο επίπεδο, μετά την Ιαπωνία, Vanuatu (Νέες Εβρίδες), Περού, νησιά Σολομώντος και Χιλή.

Έχει ήδη επισημανθεί ότι οι περισσότεροι σεισμοί οφείλονται στις κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών, και κατά συνέπεια οι ζώνες έντονης σεισμικής δράσης ουσιαστικά ταυτίζονται με τις παρυφές των πλακών.

Ο ελληνικός χώρος βρίσκεται στο όριο επαφής και σύγκλισης της Αφρικανικής και της Ευρασιατικής λιθοσφαιρικής πλάκας. Για το λόγο αυτό, η ενεργός τεκτονική στο χώρο αυτό είναι έντονη. Η κατανομή των επικέντρων των επιφανειακών σεισμών (βάθος μικρότερο των 60 χλμ.) οριοθετεί διάφορες σεισμικές ζώνες. Η κυριότερη είναι αυτή που εκτείνεται κατά μήκος της εξωτερικής (κοίλης) πλευράς του ελληνικού τόξου, δηλαδή, ακτές δυτικής Ελλάδας, Ιόνια νησιά, ΝΔ Πελοπόννησος, νότια Κρήτη, Κάρπαθος, Ρόδος. Άλλες σημαντικές ζώνες έχουν διεύθυνση Ανατολή - Δύση, όπως Β. Αιγαίου, Θεσσαλίας - Σποράδων, Πατραϊκού - Κορινθιακού, κλπ.

Μία γεωγραφική κατανομή των επικέντρων των σεισμών στον ελληνικό χώρο οδηγεί στις εξής παρατηρήσεις:

Οι σεισμοί ενδιάμεσου βάθους εκδηλώνονται στην περιοχή του Ν. Αιγαίου. Τα επίκεντρα διατάσσονται σε μία ζώνη παράλληλη με το ελληνικό τόξο, ενώ οι εστίες βρίσκονται πάνω στη ζώνη Benioff η οποία κλίνει με γωνία περίπου 35° από το κυρτό προς το κοίλο μέρος του τόξου, από την Ανάτ. Μεσόγειο προς το Αιγαίο πέλαγος. Τα εστιακά τους βάθη φτάνουν έως τα 160 km περίπου.

Τα επίκεντρα των επιφανειακών σεισμών στον Ελληνικό χώρο και τις γύρω περιοχές, εμφανίζουν σημαντική διασπορά. Παρόλα αυτά όμως, τα περισσότερα διατάσσονται κατά μήκος μίας τοξοειδούς ζώνης στην περιοχή του ελληνικού τόξου (Δ. Αλβανία - νησιά Ιονίου πελάγους - Κρήτη - Κάρπαθος - Ρόδος - Ν.Δ. Τουρκία). Σημαντική σεισμική δραστηριότητα παρατηρείται επίσης και στην περιοχή του Β. Αιγαίου και της Β.Δ. Ανατολίας.



Εικ. 6. Κατανομή των epicέντρων των επιφανειακών σεισμών στον Ελληνικό χώρο. (Parazachos B.C. et al., 1997).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Ο ΝΑΟΣ ΤΟΥ ΕΠΙΚΟΥΡΙΟΥ ΑΠΟΛΛΩΝΑ

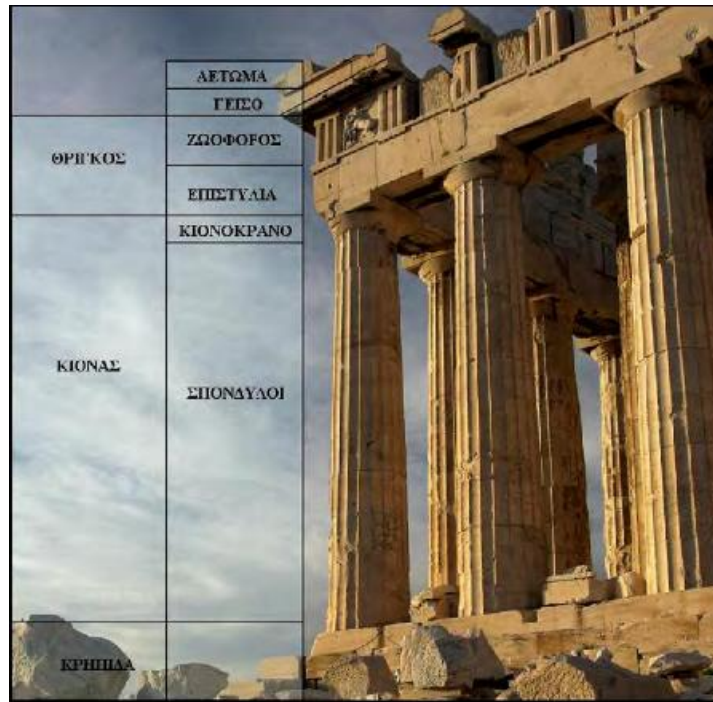
2.1 Η ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΑΡΧΑΙΩΝ ΝΑΩΝ

Οι αρχαίοι ελληνικοί ναοί, που βρίσκονται κυρίως σε σειсмоγενείς 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 (Εικ. 7.). Οι κίονες αποτελούνται από τους σπονδύλους και το κιονόκρανο και η διάμετρος τους μειώνεται προς τα άνω. 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 διπλού ταυ ή Π.

Η ύπαρξη αρχαίων εντορμιών ή 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 ζημιά. Η ύπαρξη συνδέσμων ωστόσο αλλοιώνει σχετικά τον μηχανισμό απόσβεσης της σεισμική ενέργειας σπονδυλωτών κατασκευών που επιτυγχάνεται μέσω της σχετικής ολίσθησης και της κρούσης των λίθων.



Εικ. 7. Βασικά στοιχεία ανωδομής αρχαίου ναού.

2.2 Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΟΥ ΝΑΟΥ

Νοτιοδυτικά της Ανδρίτσαινας, σε ένα επιβλητικό και άγριο ορεινό τοπίο, βρίσκεται ο μεγαλοπρεπής ναός του Επικούριου Απόλλωνα, ένας από τους μεγαλύτερους ναούς της Αρχαιότητας.

Ο ναός βρίσκεται σε απόσταση 14 χλμ. νότια της Ανδρίτσαινας, σε υψόμετρο 1.130 μ., επάνω στο όρος Κωτίλιο. Στην τοποθεσία αυτή, που στην αρχαιότητα ονομαζόταν Βάσσεσ (που σημαίνει μικρά πλατώματα σε βράχους), οι κάτοικοι της γειτονικής Φιγάλειας είχαν ιδρύσει, από τον 7ο αι.π.Χ., ιερό του Απόλλωνος Βασσίτα, τον οποίο και λάτρευαν με την προσωυμία του Επικουρίου- συμπαραστάτη στον πόλεμο ή στην αρρώστια. Το επίθετο Επικούριος δόθηκε την εποχή των πολέμων με τους Σπαρτιάτες γύρω στο 650 π.Χ.

Ο ναός του Απόλλωνος στο ιερό των Βασσών αποτελεί ένα από τα καλύτερα σωζόμενα μνημεία της κλασικής αρχαιότητας. Συγκεκριμένα, είναι ο καλύτερα διατηρημένος ναός μετά το ναό του Ηφαίστου στην Αθήνα. Από όλους τους ναούς της Πελοποννήσου, ύστερα από το ναό της Τεγέας, θα μπορούσε αυτός να πάρει την πρώτη θέση για το κάλλος του μαρμάρου και το αρμονικό σύνολο.

Χτίστηκε το 420-400 π.Χ. στη θέση ενός παλαιότερου, αρχαϊκού ναού. Ο περιηγητής Πausanίας, που επισκέφτηκε και θαύμασε το μνημείο στα μέσα

περίπου του 2ου αι.μ.Χ., αναφέρει ως αρχιτέκτονά του τον Ικτίνο. Η θέση που κατέχει ο ναός στην ιστορία της ελληνικής αρχιτεκτονικής είναι ξεχωριστή, καθώς συνδυάζει με ιδιοφυή τρόπο τα αρχαϊστικά στοιχεία, που υπαγόρευε η τοπική θρησκευτική παράδοση, με τις τολμηρές ανανεωτικές ιδέες του δημιουργού του.

2.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΝΑΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΟΥ

Ο κλασικός ναός του Επικούριου Απόλλωνα στις Βάσσεις Φιγάλειας (Εικ. 8.), σε αντίθεση με τα συνήθη δεδομένα, διατηρεί ένα ιδιαίτερα μεγάλο ποσοστό από το δομικό υλικό του in-situ (κρηπίδα, κίονες και επιστύλια περίστασης), αναστηλωμένο (τοίχοι σηκού και δύο κίονες) και διάσπαρτο στον αρχαιολογικό χώρο (μέλη από τα ανώτερα τμήματα του κτηρίου), γεγονός που τον καθιστά ως ένα από τα πιο καλοδιατηρημένα δείγματα της αρχαίας οικοδομικής.

Εντύπωση προκαλεί, επίσης, ότι οι 35 από τους 38 κίονες του περιστυλίου του παραμένουν ιστάμενοι 25 αιώνες από την ανέγερσή τους, παρά το γεγονός ότι ευρίσκονται σε περιοχή με σημαντική σεισμική δραστηριότητα (δυτική Πελοπόννησο).

Όμως, ο ναός στην υπάρχουσα κατάστασή του παρουσιάζει πολλές και εκτεταμένες βλάβες, οι κυριότερες από τις οποίες είναι: οι ανομοιόμορφες καθιζήσεις της θεμελίωσης, οι πλείστες θραύσεις των λίθων της κρηπίδας, οι σημαντικές αποκλίσεις των κίωνων από την κατακόρυφο και οι έντονες ρηγματώσεις και αποσαθρώσεις των επιστυλίων. Οι βλάβες αυτές εδώ και αρκετές δεκαετίες έχουν προκαλέσει την ανησυχία ότι εγκυμονούν σοβαρούς κινδύνους κατάρρευσης σε περίπτωση μελλοντικού, κοντινού στο μνημείο, ισχυρού σεισμού.

Γι αυτό το 2001 ξεκίνησε το από καιρό προγραμματιζόμενο έργο αποκατάστασης του μνημείου, με κύριους στόχους την άρση των γεωμετρικών μεταβολών του φέροντος οργανισμού του, την ενίσχυση των μηχανισμών άμυνάς του έναντι των φυσικών φαινομένων και τη συντήρηση του δομικού υλικού του.

Το έργο, το οποίο εκτελείται υπό την εποπτεία της Επιτροπής Συντήρησης ναού Επικούριου Απόλλωνα (Ε.Σ.Ν.Ε.Α.), είναι επικεντρωμένο, κατ' αρχήν, στο βόρειο τμήμα του περιστυλίου και οι βασικές εργασίες που περιλαμβάνει είναι: α) καταβίβαση των επιστυλίων, απομάκρυνση των κίωνων, ολόσωμων, και αποσυναρμολόγηση της κρηπίδας, β) στερέωση της θεμελίωσης, γ) δομική αποκατάσταση, συντήρηση και ανάταξη των λίθων της κρηπίδας, με ταυτόχρονο εφοδιασμό τους με νέα συνδετήρια στοιχεία από τιτάνιο δ) επαναφορά των κίωνων, ολόσωμων, στο μνημείο, σε κατακόρυφη στάση και ε)

δομική αποκατάσταση, συντήρηση, ανατοποθέτηση και εκ νέου σύνδεση των επιστυλίων. Μέχρι σήμερα έχει σχεδόν ολοκληρωθεί η αποκατάσταση της βόρειας όψης του μνημείου, ενώ υλοποιείται η αποκατάσταση των βορειότερων τμημάτων των μακρών πλευρών του.



Εικ. 8. Ο ναός του Επικούριου Απόλλωνα από ΒΔ, πριν από την έναρξη των εργασιών αποκατάστασής του.

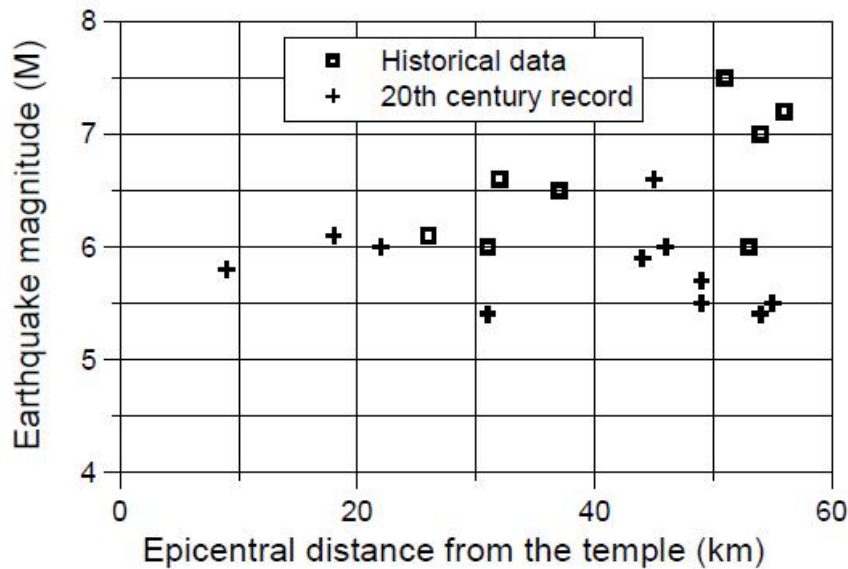
Ο ναός του Επικούριου Απόλλωνα είναι περίπτερος, διαμορφωμένος σε πρόναο, σηκό, άδυτο και οπισθόναο· έχει κατασκευαστεί, κυρίως, από τον τοπικό λευκό- λευκότεφρο πλακώδη ασβεστόλιθο. Το κτήριο είναι προσανατολισμένο από βορρά προς νότο, ενώ οι διαστάσεις του στη στάθμη της θεμελίωσης είναι 16,14 x 39,84 [m]. Το περιστύλιο του μνημείου συνθέτουν 38 δωρικοί κίονες (6 x 15), ύψους 5.97 m, οι οποίοι διαθέτουν εξωτερική διάμετρο 1.12 m στην κάτω έδρα τους και 0.92 m στην άνω έδρα του τελευταίου σπονδύλου τους, εκτός των κίωνων της βόρειας πλευράς που είναι κατασκευασμένοι παχύτεροι με αντίστοιχες διαμέτρους 1.16 m και 0.95 m. Σε αντίθεση με τη συνήθη αρχαία πρακτική (προφανώς για λόγους οικονομίας υλικού) οι κίονες αποτελούνται από κιονόκρανο και μεταβλητό πλήθος ανισοϋψών σπονδύλων. Συγκεκριμένα, από τους 37 ιστάμενους σήμερα κίονες του μνημείου, 4 κίονες διαθέτουν 5 σπόνδυλους, 12 κίονες 6 σπόνδυλους, 14 κίονες 7 σπόνδυλους, 5 κίονες 8 σπόνδυλους, 1 κίονας 9 σπόνδυλους και 1 κίονας 10 σπόνδυλους. Το σύστημα έδρασης του ναού συνίσταται στη θεμελίωση μόνο των φερόντων στοιχείων (κίωνων και τοίχων) και τη μεταφορά των φορτίων της ανωδομής μέσω ενός μεταβλητού ύψους θεμελίου στο βράχο. Το ύψος του θεμελίου από λίγα εκατοστά στη βόρεια και ανατολική πλευρά, λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του (≈ 2.5 m) στη νοτιοδυτική γωνία του κτηρίου, μια και η φυσική κλίση του βραχώδους υπόβαθρου είναι από ΒΑ προς ΝΔ.

Η ζωφόρος του ναού είναι ένα πραγματικό αριστούργημα αποτελούμενη από εικοσιτρείς μαρμάρινες πλάκες, από τις οποίες οι έντεκα δυτικά παρίσταναν

«Κενταυρομαχία» (Λάπηθες - Κένταυροι) και οι έντεκα ανατολικά «Αμαζονομαχία» (Αθηναίοι - Αμαζόνες). Η κεντρική στο βάθος παρίστανε τον Απόλλωνα που με τη συνδρομή της Αρτέμιδος, έκανε να επέλθει η δικαιοσύνη, που διαταράχτηκε από τους αίτιους των φοβερών μαχών (Κενταύρους - Αμαζόνες). Πρόκειται για πραγματικό αριστούργημα που η ζωντάνια και η έκφραση των μορφών, καθώς και η συνταιριασμένη πλοκή των σκηνών, το κατατάσσουν στους καλύτερους γλυπτικούς διακόσμους της αρχαιότητας. Δυστυχώς τα μοναδικά αυτά γλυπτά της ζωφόρου του Επικούριου Απόλλωνα, κατά τη διάρκεια της Τουρκοκρατίας έγιναν αντιληπτά από Ευρωπαίους αρχαιοκάπηλους και εκλάπησαν. Σήμερα το μεγαλύτερο μέρος τους κοσμεί τις προθήκες του Βρετανικού μουσείου, αλλά και του μουσείου του Λούβρου και του Μονάχου. Μέσα στο ναό υπήρχε και μεγάλο (3,66 m) χάλκινο άγαλμα του Απόλλωνα το οποίο κατά τις μαρτυρίες του Πausανία, όταν ιδρύθηκε η Μεγάλη Πόλις μεταφέρθηκε και τοποθετήθηκε εκεί, μπροστά από το τέμενος του Λυκαίου Διός.

Ο ναός σώζεται σήμερα, ως ανοικτό ερείπιο, σε μορφή που έλαβε ύστερα από, εν πολλοίς, άγνωστες οικοδομικές περιπέτειες και την ευρεία αναστηλωτική προσπάθεια των αρχών του 20ου αιώνα, κατά την οποία αναστηλώθηκαν σχεδόν στο σύνολό τους οι τοίχοι του σηκού και οι δύο νότιοι κίονες της δυτικής πλευράς -σήμερα μόνος κατακείμενος κίονας από το περιστύλιο είναι ο νοτιοανατολικός. Στην υπάρχουσα κατάστασή του το μνημείο παρουσιάζει πολλές και εκτεταμένες γεωμετρικές παραμορφώσεις: έντονες διαφορικές καθιζήσεις, αποκλίσεις κίωνων από την κατακόρυφο, μετατοπίσεις και στροφές σπονδύλων, μετακινήσεις επιστυλίων κ.α., ενώ μεγάλα είναι και τα προβλήματα με το υλικό του, αφού τα περισσότερα αρχιτεκτονικά μέλη είναι κατακερματισμένα και αποσαθρωμένα. Οι βλάβες αυτές αποτελούν συνέπεια πολλών παραγόντων που συνέδρασαν στη μακρόχρονη ιστορία του ναού, οι πιο καθοριστικοί από τους οποίους θεωρούνται η αστοχία της θεμελίωσης και οι διάφορες ανθρώπινες επεμβάσεις που, με στόχο τον προσπορισμό των μετάλλων των συνδέσεων, προκάλεσαν τη κατεδάφιση των τοίχων και τις πλείστες απολαξεύσεις μελών. Συγκεκριμένα, για τις παραμορφώσεις των κίωνων της περίπτωσης, οι αποκλίσεις από την κατακόρυφο και οι απώλειες της πλήρους έδρασης τους οφείλονται κυρίως στις καθιζήσεις της θεμελίωσης και στις συνακόλουθες θραύσεις των λίθων της κρηπίδας, ενώ οι μετακινήσεις των σπονδύλων τους προκλήθηκαν από τους σεισμούς που διέγειραν το μνημείο στην μακράιωνη ιστορία του. Προκύπτει, δηλαδή, από τη μελέτη της ιστορίας του ναού και της κατάστασης διατήρησής του ότι η σημαντική σεισμική δραστηριότητα της περιοχής (Σχ. 1.) δεν ευθύνεται για κάποια εκτεταμένη κατάρρευση στο κτήριο, ούτε για τις πιο σημαντικές γεωμετρικές παραμορφώσεις του. Έκδηλα, λοιπόν, εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο ναός έχει επιδείξει, ακόμη και στην ερειπιώδη κατάσταση που έχει περιέλθει τους τελευταίους αιώνες, εξαιρετική αντισεισμική συμπεριφορά. Παρά ταύτα, οι

κίνδυνοι που απειλούν το μνημείο στη περίπτωση δημιουργίας ισχυρού σεισμού σε κοντινή περιοχή, είναι προφανείς και απορρέουν από την ετοιμορροπία των επιστυλίων, την επισφαλή ισορροπία των κίωνων, τις δυνητικές αστοχίες υλικού λόγω υπέρβασης των αντοχών του, συνέπεια των μειωμένων επιφανειών έδρασης κ.α.



Σχ. 1. Συσχέτιση επικεντρικής απόστασης και μεγέθους των κοντινών στο ναό σεισμών, γνωστών από ιστορικές πηγές και ενόργανες καταγραφές (στοιχεία από Parazachos et. al., 2000).

2.4 ΟΙ ΠΡΩΤΕΣ ΑΝΑΣΤΗΛΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΟΙ ΣΗΜΕΡΙΝΕΣ ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΕΣ

Η πρώτη προσπάθεια αναστήλωσης του ναού πραγματοποιήθηκε το 1902 υπό τον Π. Καββαδία και κράτησε έξι χρόνια. Το 1965 ο ναός παθαίνει μεγάλες ζημιές από τον καταστρεπτικό σεισμό που έπληξε την περιοχή. Τον ίδιο χρόνο γίνονται οι πρώτες σωστικές παρεμβάσεις ενώ τον επόμενο ένας κεραυνός δημιουργεί νέα προβλήματα στο μνημείο, το οποίο πλέον κινδυνεύει άμεσα αφού έχουν πάρει κλίση οι κίονες και ολόκληρο το κτίριο έχει παραμορφωθεί.

Το 1970 δημιουργείται η Επιτροπή Συντήρησης του Ναού Επικούρειου Απόλλωνος (ΕΣΝΕΑ). Κατά τη δεκαετία 1985-1995 η Επιτροπή προχώρησε σε τέσσερα βασικά μέτρα προστασίας του ναού. Δημιούργησε ένα προστατευτικό στέγαστρο πάνω από το ναό, έλαβε αντισεισμικά μέτρα, απομάκρυνε τα όμβρια ύδατα και έλαβε μέτρα προστασίας από τους κεραυνούς.

Τον Ιούνιο του 1997 το Κεντρικό Αρχαιολογικό Συμβούλιο μετά από μια μαραθώνια συζήτηση αποφάσισε να προχωρήσει σε ουσιαστικά έργα στερέωσης και αποκατάστασης του ναού. Συγκεκριμένα αποφάσισε ότι το μνημείο για να σωθεί πρέπει να διαλυθεί, να υπάρξει καταβίβαση των επιστυλίων και μεταφορά των κίωνων προκειμένου να ενισχυθεί η θεμελίωση, και να συντηρηθούν τα 2.000 αρχιτεκτονικά μέλη, που θα κατέβουν.

Μετά παρέλευση τριών ετών αδράνειας - παρά το γεγονός ότι ο ναός κινδύνευε πλέον με κατάρρευση - το Κεντρικό Αρχαιολογικό Συμβούλιο συνεδρίασε ξανά το Σεπτέμβριο του 2000 παρουσία της ΕΣΝΕΑ. Στη συνεδρίαση υπήρξαν διαφωνίες και διατυπώθηκαν διαμετρικά αντίθετες απόψεις περί του τρόπου στερέωσης και αποκατάστασης του ναού. Τελικά αποφασίστηκε κατά πλειοψηφία να εγκριθεί “κατ αρχήν” η μελέτη για επέμβαση στο βόρειο πτερό του ναού, με την “πilotική” μετακίνηση της βορειοδυτικής γωνιάς του, δηλαδή των τεσσάρων επιστυλίων και των τριών κίωνων του και τη διάλυση της κρηπίδας όπου εδράζονται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΕΛΕΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΡΧΑΙΩΝ ΚΙΟΝΩΝ

3.1 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΑΡΧΑΙΩΝ ΚΙΟΝΩΝ

Οι κίονες των μνημειακών κτηρίων των κλασικών χρόνων, όπως είναι γνωστό, είναι κατασκευές που αποτελούνται από αρκετά ανεξάρτητα, ισχυρά, σχεδόν απαραμόρφωτα, λίθινα στοιχεία (τους σπονδύλους), κατάλληλα λαξευμένα και συναρμολογημένα χωρίς την παρεμβολή συνδετικού κονιάματος, ώστε στις περισσότερες περιπτώσεις να έχει επιτευχθεί σχεδόν τέλεια συναρμογή. Σε αντίθεση με το δομικό τους σύστημα που είναι απλό, το φαινόμενο της σεισμικής απόκρισής τους είναι εξαιρετικά πολύπλοκο και έντονα μη γραμμικό. Συγκεκριμένα, οι κίονες αποκρίνονται στις ισχυρές σεισμικές διεγέρσεις παρουσιάζοντας αλληπάλληλες σχετικές περιστροφές και ολισθήσεις ή λικνισμό (ανεξάρτητα ή σε ομάδες) των σπονδύλων τους. Έτσι, καταναλώνονται μεγάλα ποσά από την εισαγόμενη ενέργεια, λόγω της υπερνίκησης των δεσμών της τριβής και των κρούσεων. Μετά το τέλος της σεισμικής δόνησης, εφόσον δεν έχουν ξεπεραστεί τα όρια που υπαγορεύονται από τις αρχές της ευσταθούς ισορροπίας (ώστε να έχει εκδηλωθεί μερική ή ολική κατάρρευση), οι σπόνδυλοι επανέρχονται στην κατάσταση ηρεμίας μέσω ελεύθερης ταλάντωσης με απόσβεση.

Ο μηχανισμός απόκρισης που μόλις περιγράφηκε, ο οποίος κάνει τους κίονες ιδιαίτερα ανθεκτικούς έναντι κατάρρευσης (και όχι φυσικά έναντι βλαβών, γεωμετρικών παραμορφώσεων δηλαδή) ακόμα και σε ιδιαίτερα ισχυρούς σεισμούς, είναι εξαιρετικά δύσκολο να περιγραφεί αναλυτικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένας πολυσπόνδυλος κίονας όσο διαρκεί η σεισμική διέγερσή του αλλάζει διαρκώς «μορφή» ταλάντωσης, με διαφορετικό πλήθος ανοικτών αρμών κάθε στιγμή. Ο αριθμός των δυνατών «μορφών» ταλάντωσης είναι ιδιαίτερα μεγάλος, εκθετικά αυξανόμενος με την αύξηση του πλήθους των σπονδύλων, έτσι για τα συνήθη πλήθη σπονδύλων των κλασικών κίωνων η αναλυτική επίλυση του συστήματος είναι πρακτικά αδύνατη. Γι αυτό το λόγο, τα τελευταία χρόνια οι επιστήμονες έχουν εστιάσει σε πειραματικές και αριθμητικές διερευνήσεις για την πληρέστερη και σε βάθος κατανόηση του φαινομένου της απόκρισης των πολυσπόνδυλων κίωνων. Τα συμπεράσματα στα οποία συγκλίνουν οι έρευνες αυτές συνοψίζονται ακολούθως.

Η πιθανότητα ένας κίονας να ανατραπεί από μία σεισμική διέγερση αυξάνει με την αύξηση της έντασης της διέγερσης, με την αύξηση της λυγηρότητας του κίονα και με τη μείωση του μεγέθους του (για τις ίδιες αναλογίες διαστάσεών του). Το περιεχόμενο των συχνοτήτων της σεισμικής διέγερσης είναι ο κατ'

εξοχήν καθοριστικός παράγοντας για την απόκριση και, κατ' επέκταση, την ευστάθεια ενός πολυσπόνδυλου κίονα. Συγκεκριμένα, υψίσυχνες σεισμικές διεγέρσεις οδηγούν στην εκδήλωση μετακινήσεων, σχετικά μικρών, στο ανώτερο τμήμα του κίονα και αδυνατούν να τον οδηγήσουν σε ανατροπή και για ιδιαίτερα υψηλές τιμές επιταχύνσεων. Αντίθετα, μακροπερίοδοι σεισμοί ενεργοποιούν σχεδόν όλους τους αρμούς του κίονα με σημαντικές στροφές περί τον κατακόρυφο άξονα, και φαίνεται ότι μπορούν να τον ανατρέψουν και για μέτριες τιμές επιταχύνσεων. Το φαινόμενο της σεισμικής απόκρισης των πολυσπόνδυλων κίωνων είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο ακόμα και σε πολύ μικρές μεταβολές των παραμέτρων του συστήματος ή της διέγερσης· οι αλλαγές αυτές μάλιστα, εάν εφαρμοστούν την κατάλληλη στιγμή, μπορούν να επιφέρουν δραστικές αλλαγές στην απόκριση. Η παραμορφωμένη κατάσταση ενός μεμονωμένου κίονα μετά από σεισμό δεν αποτελεί ένδειξη του μεγέθους των μετακινήσεων που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της δόνησης. Έχει παρατηρηθεί σε δοκίμια κίωνων ότι ενώ παρουσιάζουν σημαντικό λικνισμό και στροφές γύρω από τον κατακόρυφο άξονά τους κατά τη διάρκεια πειραματικών σεισμικών διεγέρσεων, στο τέλος επανέρχονται σχεδόν στην αρχική τους θέση με πολύ μικρές παραμένουσες μετατοπίσεις.

Εν κατακλείδι, διαπιστώνεται ότι όλοι οι μελετητές του φαινομένου της σεισμικής απόκρισης των πολυσπόνδυλων κίωνων ομογνωμούν περί της μεγάλης έναντι κατάρρευσης σεισμικής αντοχής τους, κάτι που αποδεικνύεται άμεσα και από το μεγάλο πλήθος ιστάμενων αρχαίων κίωνων. Η μεγάλη αντισεισμική αντοχή των κίωνων, όμως, ισχύει υπό προϋποθέσεις· όταν δηλαδή οι κίονες βρίσκονται σε καλή κατάσταση (με σπονδύλους χωρίς επικίνδυνες ρωγμές και με άθικτες εδράσεις), σε κατακόρυφη στάση, και εδράζονται σε δύσκαμπτη βάση. Όσο η κατάσταση ενός κίονα αποκλίνει από αυτές, τόσο αυξάνει η πιθανότητα να καταρρεύσει ο κίονας από σεισμικό συμβάν.

3.2 ΠΕΡΙΛΗΠΤΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΓΕΝΕΣΤΕΡΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ

Στις τελευταίες δεκαετίες που η μελέτη του ναού του Επικούριου Απόλλωνα έχει προχωρήσει σε βάθος, αρκετές είναι οι αριθμητικές μελέτες που εκπονήθηκαν με θέμα την εξέταση της ευστάθειας των κίωνων της περιστασής του. Σε όλες τις μελέτες αυτές χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό της μεθόδου των διακριτών στοιχείων UDEC και το φαινόμενο προσεγγίστηκε σε δύο διαστάσεις. Αν και η δισδιάστατη ανάλυση, όπως είναι φυσικό, δεν περιλαμβάνει όλες τις παραμέτρους της απόκρισης των πολυσπόνδυλων κίωνων, τα αποτελέσματα τέτοιων μελετών είναι πολύ χρήσιμα για την εξαγωγή ποιοτικών, συγκριτικών, συμπερασμάτων για την επιρροή διαφόρων παραμέτρων στον σεισμικό κίνδυνο κατάρρευσης των κίωνων του ναού.

Στην πρώτη σχετική μελέτη που εκπονήθηκε (Παπασταματίου κ.α., 1990) προσδιορίστηκε με όρους δυναμικής θεώρησης η μείωση της ευστάθειας του τυπικού κίονα του ναού με την αύξηση της αρχικής απόκλισης. Συγκεκριμένα, με παραμετρική μεγέθυνση της μέγιστης επιτάχυνσης του εδάφους για τον σεισμό της Καλαμάτας του 1986 προέκυψε μείωση του κατωφλίου ανατροπής κατά 15% και 30% για αρχικές κλίσεις μιας και δύο μοιρών αντίστοιχα. Στη μελέτη αυτή επίσης διαπιστώθηκε ότι μείωση της βάσης του κίονα κατά 10%, 25% και 50% μειώνει τη μέγιστη επιτάχυνση ανατροπής κατά 15%, 33% και 66% αντίστοιχα. Το 2000 δημοσιεύτηκε μία εκτεταμένη εργασία (Psycharis et al.), κατά την οποία με τη χρήση του προγράμματος διακριτών στοιχείων έγινε εκτίμηση της τρωτότητας του τυπικού κίονα του ναού σε αρμονική διέγερση, λαμβάνοντας υπόψη αρχική κλίση 2.5ο και 6.0ο, και απώλεια έδρασης 17% και 28%. Στην ίδια εργασία έγιναν αναλύσεις και για δύο κίονες που συνδέονται με επιστύλιο, στις οποίες φάνηκε ότι η σύζευξη των δύο κίωνων δεν αλλάζει σημαντικά τον κίνδυνο κατάρρευσης, παρότι αλλάζει η κινηματική του συστήματος. Με τη χρήση του λογισμικού UDEC έχει εκτιμηθεί και η τρωτότητα των κίωνων σε σχέση με το διαφορετικό πλήθος των σπονδύλων (Παπαντωνόπουλος, 2000). Συγκεκριμένα, για τρεις κίονες με 5, 7 και 10 σπονδύλους, με χρήση του επιταχυνσιογραφήματος του σεισμού της Καλαμάτας, διαπιστώθηκε ότι το πλήθος των σπονδύλων δεν επηρεάζει κατά συστηματικό τρόπο την απόκριση του κίονα, αν και από τα αποτελέσματα διαφάνηκε κάποια τάση βελτίωσης της ευστάθειας με αύξηση του αριθμού των σπονδύλων.

3.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος (δηλαδή μέθοδος υπολογισμού με χρήση H/Y) για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων.

Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Όμως, υπήρχε η ανάγκη να λυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα και γι' αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι.

Μία τέτοια μέθοδος είναι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Αυτό όμως το μειονέκτημα ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου ήταν τόσο μεγάλη, που ακόμα και

σήμερα χρησιμοποιείται στην έρευνα και στην βιομηχανία για τον υπολογισμό και τη μελέτη διάφορων κατασκευών.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία εξέλιξη των μητρώϊκών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων και έγινε από διάφορους σπουδαίους επιστήμονες όπως ο Ιωάννης Αργύρης, ο Clough, ο Ritz και άλλοι.

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτούνται τα εξής στάδια:

1) Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα CAD και δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο.

2) Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται. Παραδείγματος χάριν, αν επιλεγεί να λυθεί το μοντέλο σε στατική καταπόνηση θα πρέπει να δοθούν τα δεδομένα για τις δυνάμεις και τις στηρίξεις. Αυτή η διαδικασία γίνεται με προγράμματα που αποκαλούνται pre processor.

3) Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα λέγονται solver και χρησιμοποιούν για τις επιλύσεις αριθμητικές μεθόδους.

4) Αφού τελειώσει και η επίλυση με τα αποτελέσματα, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα που αποκαλείται post processor για να μπορέσει ο μελετητής να τα δει.

3.4 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ABAQUS

Το ABAQUS είναι μια ακολουθία από ισχυρά προγράμματα προσομοίωσης εφαρμοσμένης μηχανικής, βασισμένα στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία μπορεί να λύσει τα προβλήματα που κυμαίνονται από τις σχετικά απλές γραμμικές αναλύσεις, ως τις πιο απαιτητικές μη γραμμικές προσομοιώσεις. Το ABAQUS περιέχει μια εκτενή βιβλιοθήκη στοιχείων, τα οποία μπορούν να διαμορφώσουν ουσιαστικά οποιαδήποτε γεωμετρία. Έχει έναν εξίσου εκτενή κατάλογο πρότυπων υλικών, τα οποία μπορούν να προσομοιώσουν τη συμπεριφορά των περισσότερων χαρακτηριστικών υλικών εφαρμοσμένης μηχανικής συμπεριλαμβανομένων των μετάλλων, ελαστικών, πολυμερών, σύνθετων υλικών, οπλισμένου σκυροδέματος, συνθλίψιμους και ελαστικούς αφρούς και γεωτεχνικών υλικών όπως το έδαφος και ο βράχος. Σχεδιασμένο ως εργαλείο προσομοίωσης γενικής χρήσης, το ABAQUS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μελετήσει προβλήματα πέρα από τα δομικά

προβλήματα (τάσης/μετατόπισης). Μπορεί να προσομοιώσει προβλήματα σε πολλές διαφορετικές περιοχές όπως : η μεταφορά θερμότητας, η διάχυση μάζας, η θερμική διαχείριση των ηλεκτρικών των ηλεκτρικών τμημάτων (ζεύγη θερμο-ηλεκτρικών αναλύσεων), η ακουστική, η εδαφομηχανική (ζεύγη αναλύσεων ρευστού-πίεσης πόρων) και η πιεζοηλεκτρική ανάλυση.

Το ABAQUS είναι απλό στη χρήση και προσφέρει στο χρήστη ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων. Ακόμη και οι πιο περίπλοκες αναλύσεις μπορούν να μοντελοποιηθούν εύκολα. Παραδείγματος χάριν, τα προβλήματα με πολλαπλά συστατικά διαμορφώνονται συνδέοντας τη γεωμετρία κάθε συστατικού με τα κατάλληλα πρότυπα υλικά. Στις περισσότερες προσομοιώσεις, συμπεριλαμβανομένων και των μη γραμμικών, ο χρήστης οφείλει μόνο να δώσει τα κατασκευαστικά δεδομένα, όπως τη γεωμετρία της κατασκευής, της συμπεριφοράς των υλικών της, των συνοριακών συνθηκών της και των φορτίων που εφαρμόζονται σε αυτήν. Σε μία μη γραμμική ανάλυση το ABAQUS επιλέγει αυτόματα τις κατάλληλες αυξήσεις φορτίων και τις ανοχές σύγκλισης, ενώ όχι μόνο επιλέγει τις τιμές για αυτές τις παραμέτρους, αλλά επίσης τις ρυθμίζει συνεχώς κατά τη διάρκεια της ανάλυσης για να εξασφαλίσει ότι θα λαμβάνεται μια ακριβής λύση αποτελεσματικά. Έτσι ο χρήστης χρειάζεται σπάνια να καθορίζει τις παραμέτρους για τον έλεγχο της αριθμητικής λύσης του προβλήματος.

3.5 ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΑΚΑΜΠΤΑ ΣΩΜΑΤΑ

Πεπερασμένα στοιχεία και άκαμπτα σώματα αποτελούν τα θεμελιώδη συστατικά ενός μοντέλου του ABAQUS. Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι παραμορφώσιμα, ενώ τα άκαμπτα σώματα μετακινούνται στο χώρο χωρίς να αλλάζει το σχήμα τους. Ακόμα κι αν οι χρήστες των προγραμμάτων ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων έχουν μια γνώση των πεπερασμένων στοιχείων, η γενική αρχή των άκαμπτων σωμάτων μέσα σε ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων πιθανόν να είναι κάτι καινούριο.

Για υπολογιστική αποδοτικότητα το ABAQUS έχει μια γενική άκαμπτη ικανότητα σωμάτων. Οποιοδήποτε σώμα ή μέρος ενός σώματος μπορεί να οριστεί ως ένα άκαμπτο σώμα. Οι περισσότεροι τύποι στοιχείων μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε έναν ορισμό άκαμπτων σωμάτων. Το πλεονέκτημα των άκαμπτων σωμάτων πέρα από τα παραμορφώσιμα σώματα είναι ότι η κίνηση ενός άκαμπτου σώματος περιγράφεται πλήρως από λιγότερους από έξι βαθμούς ελευθερίας σε έναν κόμβο αναφοράς. Αντίθετα, τα παραμορφώσιμα στοιχεία έχουν πολλούς βαθμούς ελευθερίας και απαιτούν ακριβείς υπολογισμούς στοιχείων για να προσδιορίσουν τις παραμορφώσεις. Όταν τέτοιες παραμορφώσεις είναι αμελητέες ή δεν ενδιαφέρουν, η μοντελοποίηση ενός συστατικού ως άκαμπτο σώμα παράγει σημαντικό υπολογιστικό κέρδος, χωρίς να επηρεάζονται τα γενικά αποτελέσματα.

3.6 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ABAQUS ΝΑ ΠΡΟΒΛΕΠΕΙ ΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΠΟΛΥΣΠΟΝΔΥΛΩΝ ΚΙΟΝΩΝ

3.6.1 Τα πειραματικά δεδομένα

Η αξιοπιστία του λογισμικού ABAQUS που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για την εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης των κίωνων του ναού του Επικούριου Απόλλωνα ελέγχθηκε, αρχικά, μέσω της σύγκρισης καταγεγραμμένων σε δύο πειράματα, σεισμικών αποκρίσεων ενός πολυσπόνδουλου μαρμάρινου κίονα με τα αποτελέσματα που έδωσε η προσομοίωση των πειραμάτων. Ο έλεγχος της αξιοπιστίας του λογισμικού βασίστηκε σε παρόμοια εργασία που έγινε με το πρόγραμμα διακριτών στοιχείων 3DEC (Parantonopoulos et al., 2002). Τα πειράματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι μέρος ενός εκτενούς πειραματικού προγράμματος που έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π., με στόχο τη διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς ενός ομοιώματος κίονα του πρόναου του Παρθενώνα, σε κλίμακα 1/3. Ακολουθεί συνοπτική παρουσίαση του προγράμματος, λεπτομερής περιγραφή του οποίου ευρίσκεται στο (Mouzakis et al., 2002).

3.6.2 Το Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας

Το Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου ιδρύθηκε το 1981, για τη μελέτη των επιπτώσεων των σεισμών και των δονήσεων στις κατασκευές. Ασχολείται με τη σεισμική συμπεριφορά των κατασκευών, τη πειραματική και αναλυτική μελέτη δομικών συστημάτων, σύγχρονων κατασκευών, ιστορικών κτιρίων και αρχαίων μνημείων, με επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών, με σύγχρονες μεθόδους αντισεισμικού σχεδιασμού, μετρήσεις δονήσεων στο πεδίο, κ.α. ενώ συνεισφέρει και στην αντιμετώπιση των καταστροφικών συνεπειών των σεισμών μέσω της εκπαιδευτικής και ερευνητικής διαδικασίας. Στο εργαστήριο βρίσκεται εγκατεστημένος και σεισμικός προσομοιωτήρας έξι βαθμών ελευθερίας, που μάλιστα τότε θεωρήθηκε και μοναδικός στον κόσμο λόγω των δυνατοτήτων του, ο οποίος εκτός των άλλων διαθέτει πλήρη εξοπλισμό για την πραγματοποίηση δυναμικών μετρήσεων και στο πεδίο. Τέθηκε σε λειτουργία και βαθμονομήθηκε στις αρχές του 1986 και έκτοτε λειτουργεί αδιάλειπτως.

Ο σεισμικός προσομοιωτήρας του εργαστηρίου αποτελείται από μια άκαμπτη πλατφόρμα επιφάνειας $4 \times 4 \text{ m}^2$ 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 (6 DOF). Η ταλάντωση αυτή πραγματοποιείται με τον έλεγχο δύο οριζόντιων υδραυλικών εμβόλων κατά τη διεύθυνση x, δύο οριζόντιων υδραυλικών εμβόλων κατά τη διεύθυνση y και τεσσάρων υδραυλικών και ενός πνευματικού εμβόλου κατά την κατακόρυφη διεύθυνση z.

Ο έλεγχος τού σεισμικού προσομοιωτήρα γίνεται μέσω αναλογικού συστήματος, το οποίο με τη σειρά του καθοδηγείται από ψηφιακό σύστημα με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η κίνηση τής επιφάνειας δοκιμών τού σεισμικού προσομοιωτήρα μπορεί να είναι μια ημιτονική διέγερση, μια τυχαία κίνηση ή και ένας σεισμός, όπως αυτός έχει καταγραφεί στη φύση, αλλά και ένας τεχνητός σεισμός με επιθυμητά χαρακτηριστικά.

Η παραγωγή και επεξεργασία τής σεισμικής διέγερσης καθώς και η ανάλυση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων γίνονται μέσω ειδικών προγραμμάτων επεξεργασίας σημάτων, που υπάρχουν στη βιβλιοθήκη τού ηλεκτρονικού υπολογιστή τού Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας. Στην ίδια βιβλιοθήκη διατίθεται πληθώρα καταγραφών φυσικών σεισμών, που έχουν καταγραφεί μέχρι σήμερα ανά τη Γη (www.lee.civil.ntua.gr).



Εικ. 9.α, 9.β. Διατάξεις κιονοστοιχιών στο σεισμικό προσομοιωτήρα.

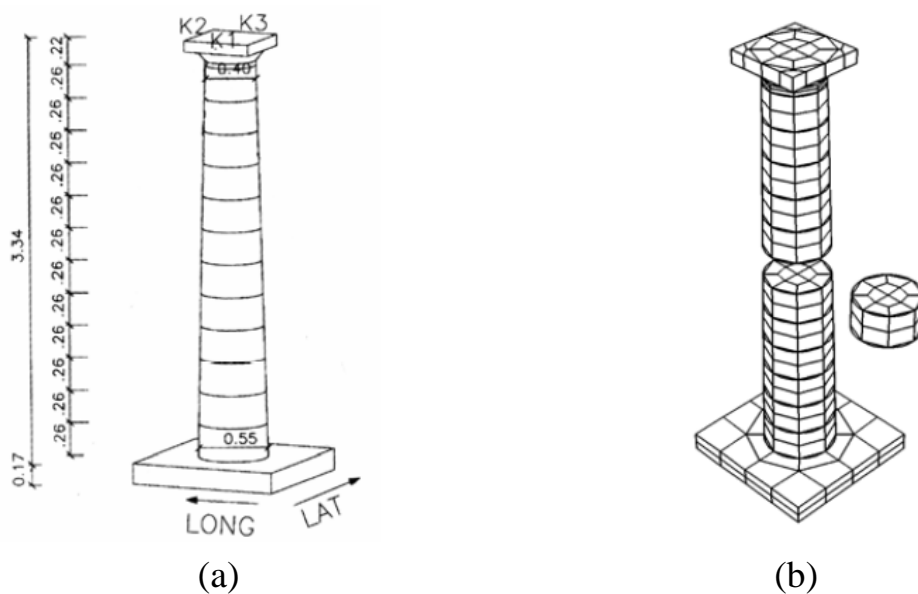
3.6.3 Η συνοπτική παρουσίαση του προγράμματος

Ο κίονας-δοκίμιο ήταν κατασκευασμένος από πεντελικό μάρμαρο, αράβδωτος, με μείωση, αλλά χωρίς ένταση. Αποτελούνταν από 12 ισοϋψείς σπονδύλους ύψους 0.26 m και ένα κιονόκρανο ύψους 0.22 m (Σχ. 2α.). Είχε κάτω διάμετρο 0.56 m και εδραζόταν σε μαρμάρινη βάση η οποία ήταν πακτωμένη στη σεισμική τράπεζα του εργαστηρίου του Ε.Μ.Π. Συνολικά, στα πλαίσια του προγράμματος διενεργήθηκαν 19 πειράματα, στα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως διεγέρσεις της βάσης καταγραφές τριών σεισμικών συμβάντων του ελλαδικού χώρου με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Οι σεισμικές καταγραφές που είχαν επιλεγεί είναι: α) Η καταγραφή του Αργοστολίου, που προκλήθηκε από σεισμό

στις 24/3/1983, μεγέθους $M=5.5$, με επίκεντρο σε απόσταση 10 km από την πόλη. β) Η καταγραφή του σεισμού της Καλαμάτας, που συνέβη στις 13/9/86, μεγέθους $M=6.0$, που είχε επίκεντρο 12 km βόρεια της πόλης. γ) Η καταγραφή του σεισμού της Έδεσσας, με μέγεθος $M = 5.9$, που συνέβη στις 21/12/90 με επίκεντρο που προσδιορίστηκε σε απόσταση 31 km ΒΑ της πόλης.

Οι σεισμικές καταγραφές εισάγονταν πολλαπλασιασμένες με κατάλληλους συντελεστές, έτσι ώστε οι δονήσεις να προκαλούν μετακινήσεις και λικνισμό στους σπονδύλους του δοκιμίου, χωρίς να επιφέρουν κατάρρευσή του. Για την καταγραφή της απόκρισης του κίονα είχαν χρησιμοποιηθεί επιταχυνσιογράφοι και βελόμετρα, τα τελευταία με τέτοια διάταξη ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός της μετακίνησης του κιονόκρανου από τις καταγραφές των οργάνων.

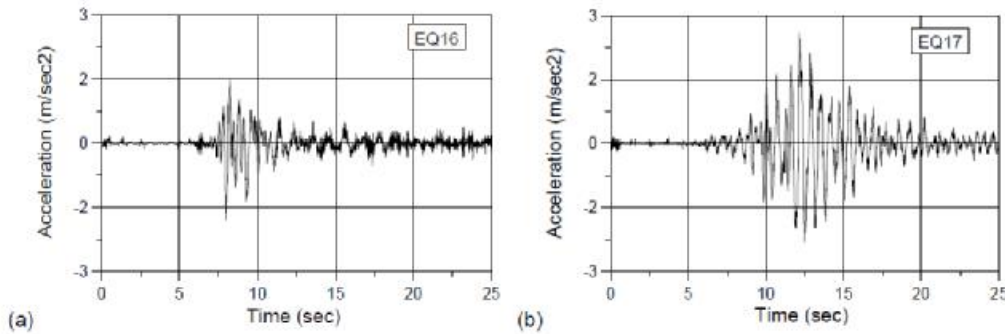
Όπως προαναφέρθηκε από το σύνολο των πειραμάτων του ερευνητικού προγράμματος του Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. επιλέχθηκαν δύο, στα οποία είχαν χρησιμοποιηθεί οι σεισμικές καταγραφές της Καλαμάτας και της Έδεσσας, για να συγκριθούν τα αποτελέσματά τους για τις μετατοπίσεις του κιονόκρανου με τα αντίστοιχα που έδωσαν οι αριθμητικές προσομοιώσεις τους. Τα δεδομένα των διεγέρσεων της σεισμικής τράπεζας των πειραμάτων αυτών παρατίθενται στον Πίνακα 1., ενώ οι επιταχύνσεις της σεισμικής τράπεζας, κατά τη διαμήκη διεύθυνση, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.



Σχ. 2. (α) Ο κίονας-δοκίμιο σε σκαρίφημα (Μουζακίς et al., 2002), και (β) το αριθμητικό προσωμοίωμά του.

Πείραμα	Καταγραφή σεισμού	Πολστικός Συντελεστής	Μέγιστες επιταχύνσεις (g)		
			Διαμήκης	Εγκάρσια	Κατακόρ.
EQ16	Καλαμάτας	0.5	0.18	0.12	0.10
EQ17	Έδεσσας	2.0	0.26	0.15	0.09

Πίν. 1. Τα βασικά δεδομένα των διεγέρσεων της σεισμική τράπεζας των δύο πειραμάτων, αποτελέσματα των οποίων συγκρίθηκαν με αντίστοιχα αριθμητικά.



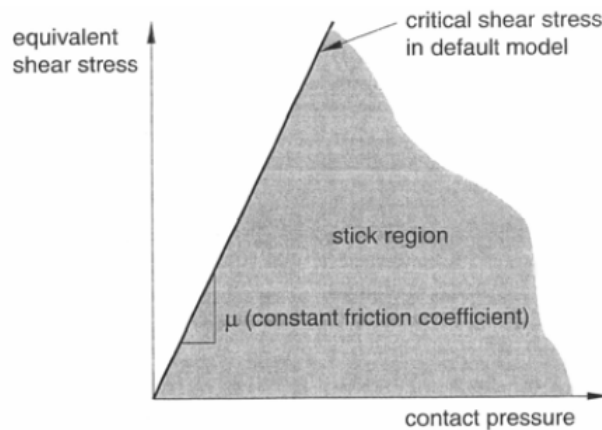
Σχ. 3. Οι επιταχύνσεις της σεισμικής τράπεζας κατά τη διαμήκη διεύθυνση, στα πειράματα (a)EQ16 και (b) EQ17.

3.6.4 Η αριθμητική προσομοίωση των πειραμάτων

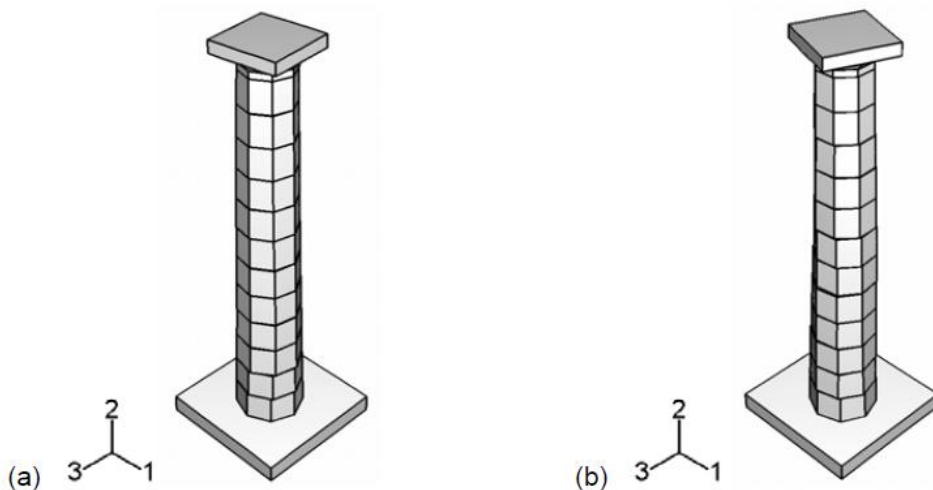
Για την αριθμητική προσομοίωση των δύο πειραμάτων σεισμικής φόρτισης του κίονα-δοκιμίου, με τη χρήση του υποπρογράμματος ABAQUS/Explicit, μορφώθηκε τρισδιάστατο προσομοίωμα με βάση τις διαστάσεις του δοκιμίου, στο οποίο κάθε σπόνδυλος αποτελεί ξεχωριστό μέλος/«εξάρτημα» της κατασκευής/μοντέλου. Η διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία των σπονδύλων έγινε με τη χρήση τρισδιάστατων εξαεδρικών στοιχείων (8 κόμβων), με συνέπεια μικρή διαφοροποίηση της γεωμετρίας του προσομοιώματος από αυτή του δοκιμίου, αφού οι πλευρικές έδρες του είναι πολυγωνικές και όχι κυλινδρικές (Σχ. 2b.).

Η προσομοίωση της συμπεριφοράς των επιφανειών επαφής των σπονδύλων έγινε με τη χρήση κατάλληλου μοντέλου αλληλεπίδρασης επιφανειών, το οποίο εισάγει παράλληλα στον αρμό την τριβή, με τη χρήση συντελεστή τριβής (Σχ. 4.), ο οποίος ορίστηκε 0.7 (από την φυσική ιδιότητα του μαρμάρου), και την απόσβεση με συντελεστή απόσβεσης που μετά από προκαταρκτική διερεύνηση επιλέχθηκε 0.01. Το μοντέλο αυτό επιτρέπει τη μεταβίβαση κάθετα στη διεπιφάνεια οποιασδήποτε πίεσης μεταξύ των επιφανειών, όταν αυτές είναι σε επαφή και το μηδενισμό των πιέσεων, όταν οι επιφάνειες διαχωρίζονται. Για να αποφευχθούν ακόμη και πολύ μικρές ελαστικές παραμορφώσεις των σπονδύλων εισήχθη στο πρόγραμμα ως μέτρο ελαστικότητας του υλικού του προσομοιώματος δεκαπλάσια τιμή του πραγματικού μέτρου ελαστικότητας του μαρμάρου. Οι δυναμικές φορτίσεις του προσομοιώματος με τις σεισμικές

διεγέρσεις των πειραμάτων υλοποιήθηκαν αριθμητικά ως επιβαλλόμενες μετατοπίσεις της βάσης του κίονα με την εισαγωγή της χρονοϊστορίας των μετατοπίσεων της σεισμικής τράπεζας του εκάστοτε πειράματος. Αναφέρεται, επίσης, ότι η μόρφωση του προσομοιώματος του κίονα έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε η 1 διεύθυνσή του ταυτίστηκε με τη διαμήκη (longitudinal) διεύθυνση του δοκιμίου των πειραμάτων (δηλαδή την οριζόντια διεύθυνση με τη μεγαλύτερη επιτάχυνση), η 2 διεύθυνση με την κατακόρυφη (vertical) και η 3 με την δεύτερη οριζόντια (lateral). Οι παραμορφωμένες στάσεις του προσομοιώματος του κίονα-δοκιμίου που έδωσαν οι αριθμητικές προσομοιώσεις των δύο πειραμάτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.



Σχ. 4. Περιοχές ολίσθησης διεπιφανειών, σύμφωνα με το μοντέλο τριβής που χρησιμοποιήθηκε.



Σχ. 5. Οι παραμορφωμένες στάσεις του αριθμητικού προσομοιώματος του κίονα, οι οποίες προέκυψαν από την προσομοίωση των πειραμάτων (a) EQ16 και (b) EQ17.

3.6.5 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων - αριθμητικών προβλέψεων

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των αριθμητικών προβλέψεων της σεισμική απόκρισης του κίονα/δοκιμίου συγκρίθηκαν οι χρονοϊστορίες των μετακινήσεων που έδωσαν οι αριθμητικές προσομοιώσεις των πειραμάτων για δύο χαρακτηριστικά σημεία του κιονόκρανου του δοκιμίου με τις καταγραφείσες στα πειράματα μετακινήσεις αυτών των σημείων. Οι θέσεις των σημείων αυτών, με ονομασία K2 και K3, είναι στα μέσα γειτονικών πλευρών του άβακα και φαίνονται στο Σχήμα 2a.

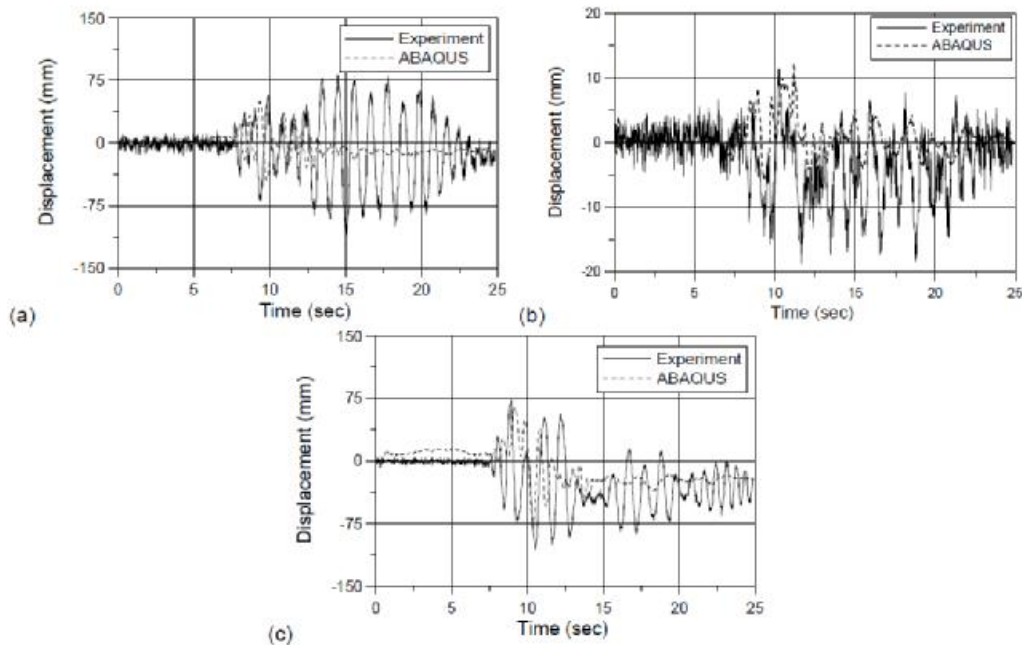
Στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των απόλυτων μετατοπίσεων του σημείου K2 του κιονόκρανου σε τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων, για το πείραμα EQ16. Παρατηρείται ότι στη διαμήκη διεύθυνση η αριθμητική επίλυση δίνει αποτελέσματα παραπλήσια με αυτά του πειράματος μέχρι το πέρας της ισχυρής δόνησης. Στη συνέχεια η ταλάντωση του σημείου του κιονόκρανου που δίνει το πρόγραμμα αποσβένεται σε αντίθεση με του πειράματος που ενισχύεται. Έτσι, το πρόγραμμα υποεκτιμά τη μέγιστη μετατόπιση (EQ16: 112.5 mm, ABAQUS: 50.2 mm) και δεν προβλέπει τη χρονική στιγμή που αυτή εκδηλώνεται. Στην κατακόρυφη διεύθυνση η σύγκριση της μετατόπισης του σημείου που έδωσε το πρόγραμμα και της καταγραφείσας στο πείραμα είναι ικανοποιητική. Το περιεχόμενο των συχνοτήτων των ταλαντώσεων είναι παραπλήσιο, οι χρονικές στιγμές που εκδηλώνονται οι μέγιστες μετατοπίσεις είναι κοντινές, και παρόλο που το εύρος της ταλάντωσης που προβλέπεται αριθμητικά είναι υποεκτιμημένο, οι τιμές των μέγιστων μετατοπίσεων δεν είναι ιδιαίτερα μακρινές (EQ16: 19.1 mm, ABAQUS: 12.3 mm). Στην εγκάρσια διεύθυνση η συμφωνία αριθμητικής επίλυσης και πειράματος είναι πολύ ικανοποιητική. Το λογισμικό προέβλεψε τη μορφή της ταλάντωσης (μέχρι το πέρας της ισχυρής δόνησης)· οι τιμές των μέγιστων μετατοπίσεων είναι κοντινές (EQ16: 106.5 mm, ABAQUS: 74.7 mm), και οι χρονικές στιγμές που έλαβαν χώρα είναι σχεδόν ταυτόσημες. Ακόμη, η μικρή παραμένουσα μετατόπιση που έδωσε το πείραμα (≈ 30 mm) προβλέφτηκε αριθμητικά, ελαφρώς υποεκτιμημένη (≈ 20 mm).

Στα Σχήματα 8 και 9 συγκρίνονται οι απόλυτες μετατοπίσεις των σημείων K2 και K3 του κιονόκρανου, αντίστοιχα, για το πείραμα EQ17.

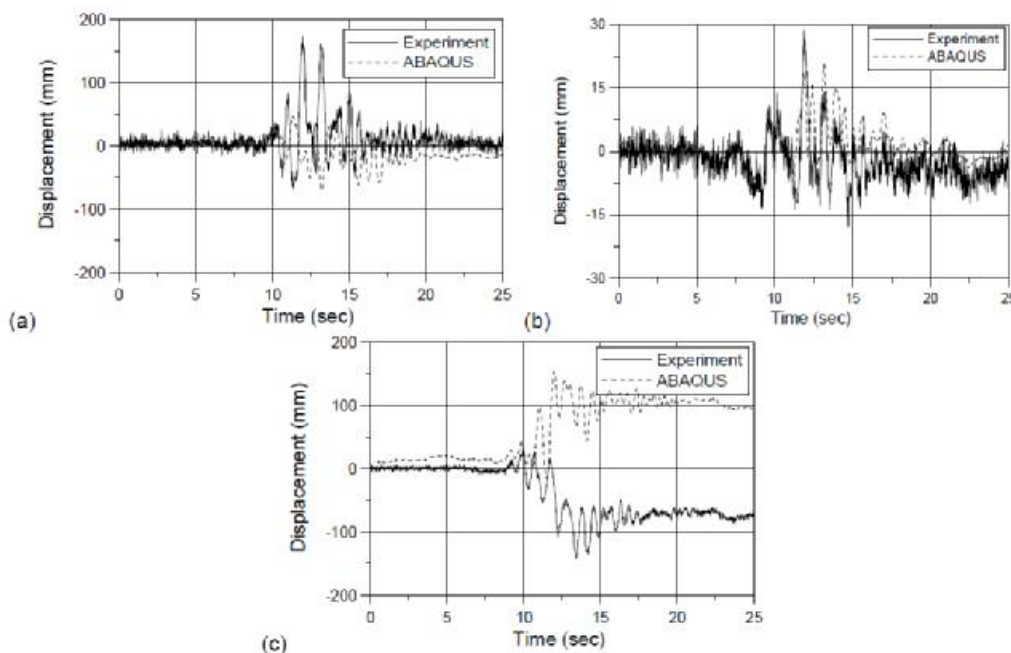
Για το σημείο K2, στη διαμήκη διεύθυνση, οι μορφές ταλάντωσής του που το πείραμα και το πρόγραμμα έδωσαν είναι παρόμοιες, χωρίς όμως το πρόγραμμα να προβλέπει σωστά ούτε τη φορά ούτε την τιμή της μέγιστης μετατόπισης (EQ17: 172.6 mm, ABAQUS: 70.4 mm).

Στην κατακόρυφη διεύθυνση τα αριθμητικά αποτελέσματα είναι κοντινά στα πειραματικά, έχουν σχεδόν πανομοιότητες μορφές ταλάντωσης, και παραπλήσιες μέγιστες μετατοπίσεις (EQ17: 28.6 mm, ABAQUS: 20.6 mm) και

χρονικές στιγμές που συνέβησαν. Στην εγκάρσια διεύθυνση, αν και το περιεχόμενο των συχνοτήτων των ταλαντώσεων του σημείου είναι παραπλήσιο, η αριθμητική επίλυση δίνει ολίσθηση κιονόκρανου αντίθετη από αυτήν που έδωσε το πείραμα. Πάντως, οι ολισθήσεις εκδηλώνονται σχεδόν την ίδια χρονική στιγμή και έχουν παρόμοιο μέγεθος (EQ17: ≈ 75 mm, ABAQUS: ≈ 100 mm). κατά συνέπεια οι μέγιστες μετατοπίσεις έλαβαν χώρα σε κοντινές χρονικές στιγμές και οι απόλυτες τιμές τους είναι παραπλήσιες (EQ17: 141.9 mm, ABAQUS: 153.5 mm).



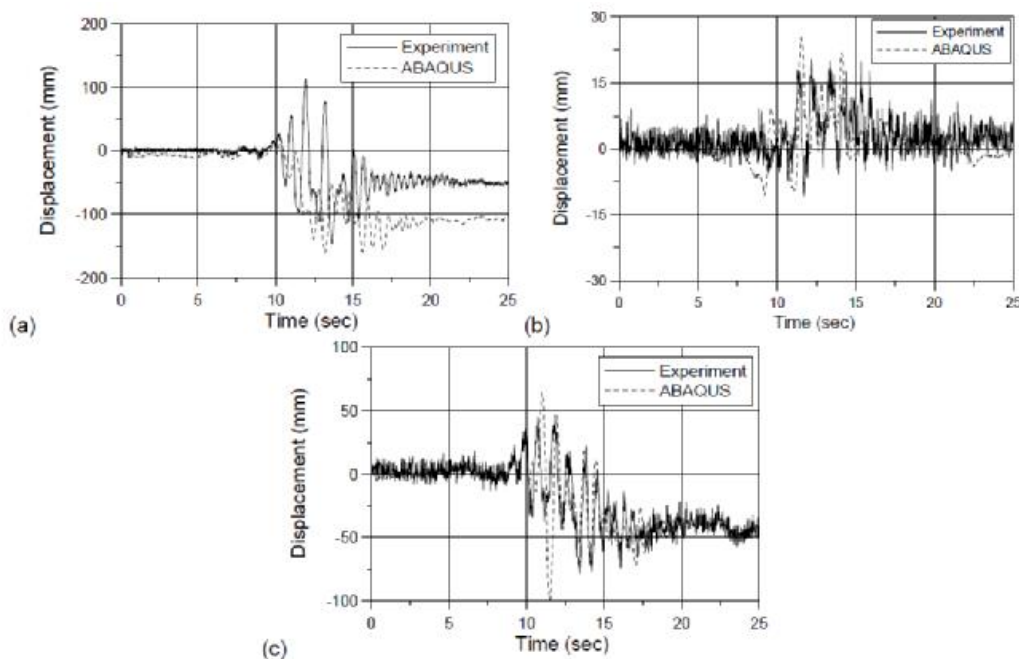
Σχ. 6. Μετακίνηση του σημείου K2 του κιονόκρανου για το πείραμα EQ16: (a) διαμήκης διεύθυνση, (b) κατακόρυφη διεύθυνση και (c) εγκάρσια διεύθυνση.



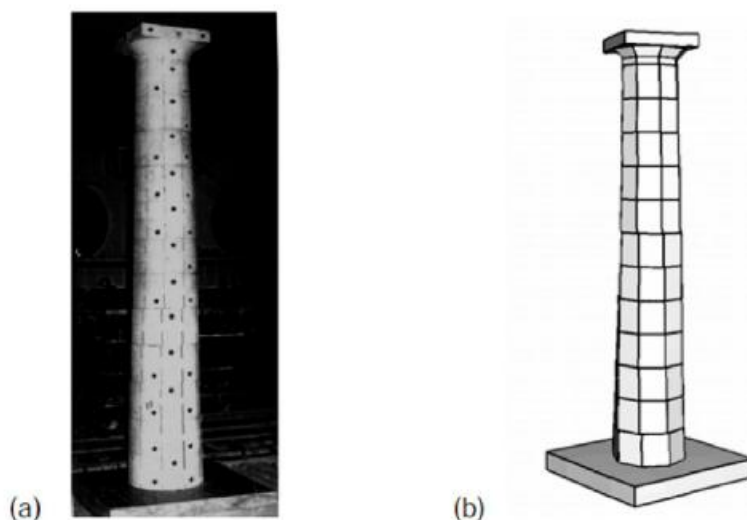
Σχ. 7. Μετακίνηση του σημείου K2 του κιονόκρανου για το πείραμα EQ17: (a) διαμήκης διεύθυνση, (b) κατακόρυφη διεύθυνση και (c) εγκάρσια διεύθυνση.

Για το σημείο K3 η αριθμητική προσομοίωση του πειράματος έδωσε τα πιο επιτυχημένα αποτελέσματα, αφού οι μετατοπίσεις του σημείου που προέβλεψε είναι εξαιρετικά κοντά στις καταγραφείσες και στις τρεις διευθύνσεις (Σχ. 8.). Συγκεκριμένα, στη διαμήκη διεύθυνση η αριθμητική επίλυση έδωσε μορφή ταλάντωσης του σημείου παρόμοια με αυτή του πειράματος και μέγιστη μετατόπιση με πολύ κοντινή τιμή (EQ17: 148.8 mm, ABAQUS: 161.4 mm) και σχεδόν ταυτόχρονη με την πειραματική. Στην κατακόρυφη διεύθυνση το περιεχόμενο των συχνοτήτων των ταλαντώσεων είναι παραπλήσιο, οι μέγιστες μετατοπίσεις είναι κοντινές (EQ17: 22.4 mm, ABAQUS: 25.2 mm) και οι χρονικές στιγμές που οι τελευταίες εκδηλώθηκαν είναι σχεδόν όμοιες. Στην εγκάρσια διεύθυνση το πρόγραμμα επιτυγχάνει να προσδιορίσει τη μορφή της ταλάντωσης του σημείου, την τιμή της μέγιστης μετατόπισης (αν και ελαφρώς υπερτιμημένη: EQ17: 78.5 mm, ABAQUS: 99.7 mm) και τη παραμένουσα μετατόπιση του σημείου, μεγέθους περίπου 40 mm.

Τέλος, αναφέρεται ότι και οι παραμένουσες μετακινήσεις των σπονδύλων που έδωσε η αριθμητική προσομοίωση του πειράματος (Σχ. 9.) είναι ποιοτικά συμβατές με αυτές που περιγράφουν οι ερευνητές που πραγματοποίησαν την πειραματική διερεύνηση, οι οποίοι αναφέρουν ότι σχεδόν σε όλους τους αρμούς παρατηρήθηκαν παραμένουσες ολισθήσεις και σημαντικότερες στροφές περί τον κατακόρυφο άξονα (Mouzakis et al., 2002).



Σχ. 8. Μετακίνηση του σημείου K3 του κιονόκρανου για το πείραμα EQ17: (a) διαμήκης διεύθυνση, (b) κατακόρυφη διεύθυνση και (c) εγκάρσια διεύθυνση.



Σχ. 9. (a) Μετακινήσεις σπονδύλων του δοκιμίου του κίονα μετά από πειράματα στη σεισμική τράπεζα (Παπαντωνόπουλος, 2005) και (b) η παραμορφωμένη στάση του αριθμητικού μοντέλου του κίονα, η οποία προέκυψε από την προσομοίωση του πειράματος EQ17.

3.6.6 Συμπέρασμα

Από τις συγκρίσεις αριθμητικών προβλέψεων-πειραματικών αποτελεσμάτων για τη σεισμική απόκριση του ομοιώματος του κίονα του Παρθενώνα, προκύπτει ότι το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε αναπαρήγαγε τα βασικά χαρακτηριστικά του φαινομένου της λικνιστικής απόκρισης των πολυσπόνδυλων κίωνων (περιεχόμενο συχνοτήτων της ταλάντωσης, μέγιστη μετατόπιση, ολίσθηση), μέσω επιλύσεων στις οποίες δεν είχαν μεταβληθεί, ουσιαστικά, οι βασικές παράμετροι του προβλήματος. Εάν μαζί με αυτό ληφθούν υπόψη και οι δυσκολίες που επιφέρει η γνωστή ευαισθησία του φαινομένου της απόκρισης πολύλιθων σωμάτων στην ασφαλή αναλυτική ή αριθμητική εκτίμησή του, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το λογισμικό προέβλεψε ικανοποιητικά τη σεισμική απόκριση του κίονα-δοκιμίου και άρα δύναται να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης κατασκευών ιδίου ή παρόμοιου χαρακτήρα, όπως είναι οι αρχαίοι κίονες ή γενικότερα αρχαίες κατασκευές από λαξευτούς λίθους εν ξηρώ συναρμολογημένους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Η ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ABAQUS

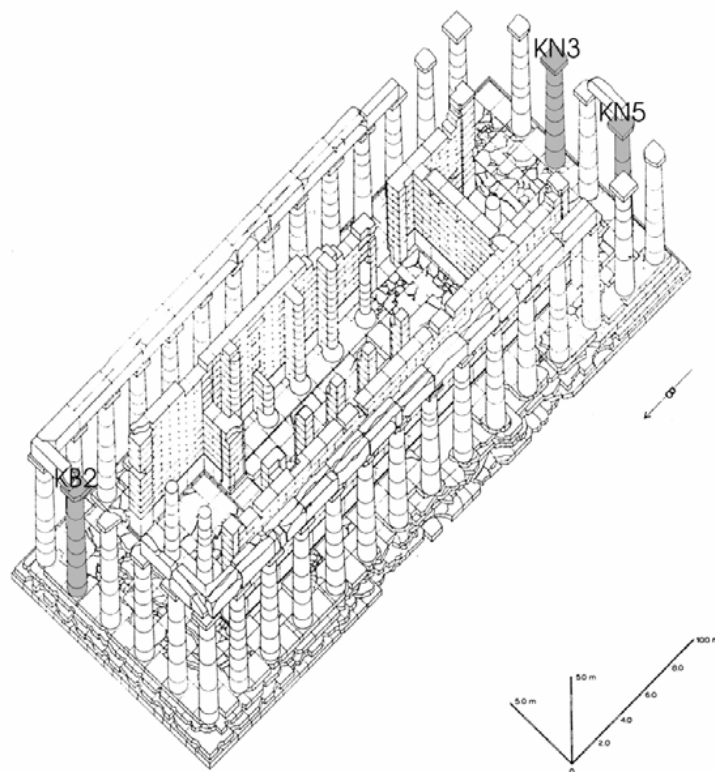
4.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΡΙΩΝ ΚΙΟΝΩΝ

4.1.1 Τα προσομοιώματα

Οι τρεις κίονες του ναού των οποίων διερευνήθηκε η σεισμική συμπεριφορά είναι: ο τρίτος από ανατολικά κίονας του νότιου πτερού (κίονας KN3), ο οποίος απαρτίζεται από κιονόκρανο και επτά σπόνδλους, ο δεύτερος από ανατολικά του βόρειου πτερού (κίονας KB2), ο οποίος έχει κιονόκρανο και έξι σπόνδλους και ο πέμπτος από ανατολικά του νότιου πτερού (κίονας KN5), που αποτελείται από κιονόκρανο και πέντε σπόνδλους. Οι θέσεις των κίωνων στο μνημείο και οι εξωτερικές διαστάσεις των μελών τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 και στο Σχήμα 10. Οι αριθμητικές αναλύσεις περιλαμβάνουν εξέταση της σεισμικής απόκρισης του κίονα KN3, εκτίμηση του σεισμικού ορίου ανατροπής των κίωνων KN3, KB2 και KN5, εκτίμηση της επιρροής της απόκλισης από την κατακόρυφο στην ευστάθεια του κίονα KB2 και διερεύνηση της επίδρασης της κρηπίδας στη σεισμική απόκριση του κίονα KB2. Οι εν λόγω κίονες επιλέχθηκαν ως αντιπροσωπευτικοί του περιστυλίου, διότι με τον ίδιο με αυτούς αριθμό σπονδύλων (5, 6 ή 7) αποτελούνται άλλοι 27 κίονες μόλις 7 από τους 37 σήμερα ιστάμενους απαρτίζονται από διαφορετικό αριθμό σπονδύλων και γιατί οι δύο από αυτούς (κίονες KN3 και KN5) διαθέτουν τις τυπικές διαστάσεις των κίωνων της περίπτωσης, ενώ ο τρίτος (κίονας KB2) ανήκει στην ξεχωριστή κατηγορία των παχύτερων κίωνων του βόρειου πτερού.

Σπόνδ	Κίονας KN3			Κίονας KB2			Κίονας KN5		
	Διάμετρος (m)		Ύψος	Διάμετρος (m)		Ύψος	Διάμετρος (m)		Ύψος
	Κάτω	Άνω		Κάτω	Άνω	Κάτω	Άνω		
1 ^{ος}	1.12	1.09	0.97	1.16	1.14	0.46	1.12	1.06	1.63
2 ^{ος}	1.09	1.06	0.81	1.14	1.09	1.31	1.06	1.03	0.94
3 ^{ος}	1.06	1.03	0.82	1.09	1.06	0.73	1.03	1.00	0.72
4 ^{ος}	1.03	1.00	0.70	1.06	1.03	0.80	1.00	0.97	0.92
5 ^{ος}	1.00	0.98	0.69	1.03	0.98	1.23	0.97	0.92	1.24
6 ^{ος}	0.98	0.95	0.68	0.98	0.95	0.90	-	-	-
7 ^{ος}	0.95	0.92	0.78	-	-	-	-	-	-
Κιονόκρ.	0.92	-	0.52	0.95	-	0.54	0.92	-	0.52
Άβακας	1.19 x 1.19 x 0.20			1.25 x 1.25 x 0.21			1.19 x 1.19 x 0.20		

Πίν. 2. Οι διαστάσεις των κίωνων που διερευνήθηκε η σεισμική συμπεριφορά.

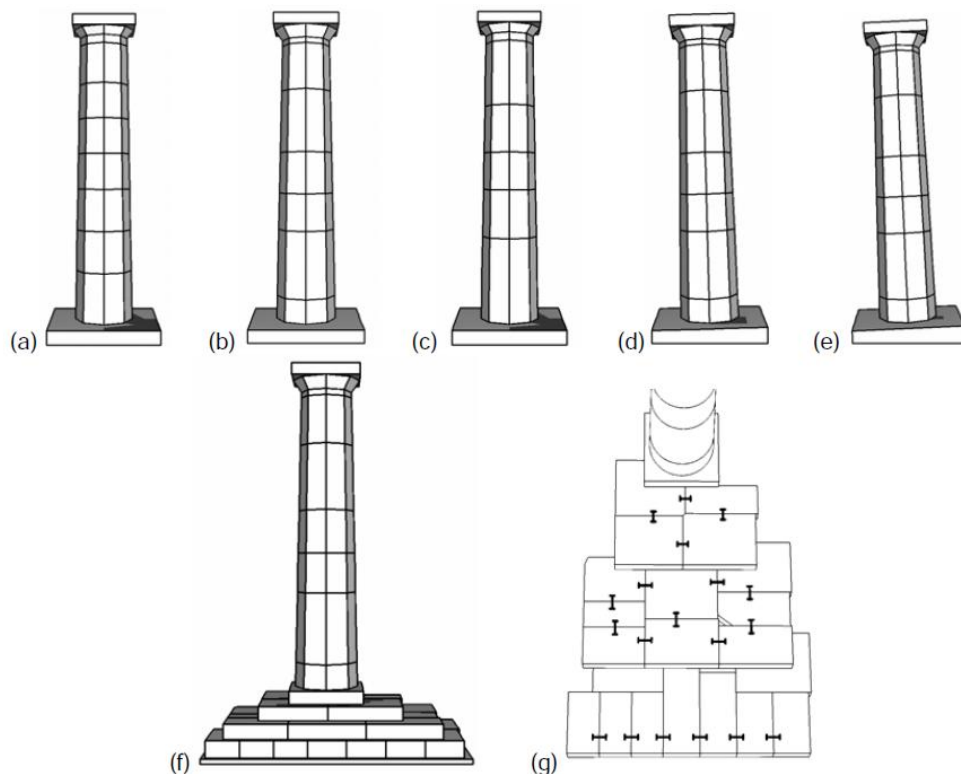


Σχ. 10. Προοπτικό σχέδιο του ναού του Επικούριου Απόλλωνα πριν από την έναρξη των εργασιών αποκατάστασης του (Σβολόπουλος, 1995), στο οποίο σημαίνονται με γκρι χρώμα οι τρεις κίονες των οποίων διερευνήθηκε αριθμητικά η σεισμική απόκριση.

Για τις αριθμητικές διερευνήσεις της παρούσας μελέτης μορφώθηκαν συνολικά έξι τρισδιάστατα προσομοιώματα (Σχ. 11.). Τα τρία από αυτά αντιστοιχούν στους κίονες KN3, KB2 και KN5, ελεύθερα ιστάμενους επί ορθογώνιας παραλληλόγραμμης βάσης. Δύο προσομοιώνουν τον κίονα KB2 να εδράζεται επί βάσης κατάλληλου σχήματος (τραπεζιόσχημης τομής) και διαστάσεων ώστε να αποκλίνει από την κατακόρυφο κατά γωνίες 1.5 και 2.5 μοιρών. Το έκτο προσομοίωμα περιλαμβάνει τον κίονα KB2, τους λίθους των τριών βαθμίδων της κρηπίδας και της ευθυντηρίας που μεταβιβάζουν το βάρος του κίονα στη θεμελίωση και ορθογώνια παραλληλόγραμμη βάση. Το έκτο προσομοίωμα εμπεριέχει, επίσης, στοιχεία που προσομοιώνουν τους μεταλλικούς συνδέσμους των υποκείμενων του κίονα λίθων.

Όλα τα προσομοιώματα μορφώθηκαν με βάση τις εξωτερικές διαστάσεις των αρχιτεκτονικών μελών του μνημείου, με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε λίθος να αποτελεί αυτόνομο στοιχείο του μοντέλου. Σε κάθε περίπτωση τα αρχιτεκτονικά μέλη προσομοιώθηκαν στις θέσεις και στην κατάσταση που εκτιμάται ότι είχαν στην αρχική μορφή του ναού δηλαδή σε πλήρη μεταξύ τους επαφή, χωρίς σχετικές μετακινήσεις και χωρίς ασυνέχειες ή ανομοιομορφες απομειώσεις υλικού. Η διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία των μελών έγινε με τη χρήση τρισδιάστατων εξαεδρικών (8 κόμβων) και πενταεδρικών (6

κόμβων) στοιχείων. Έτσι οι πλευρικές έδρες των προσομοιωμάτων των κίωνων διαμορφώθηκαν πολυγωνικές (αντί κυλινδρικές, με ραβδώσεις).



Σχ. 11. Τα αριθμητικά προσομοιώματα: (a) κίονας KN3, (b) κίονας KB2, (c) κίονας KN5, (d), (e) κίονας KB2 αποκλίνων από την κατακόρυφο κατά 1.5ο και 2.5ο, αντίστοιχα, (f) κίονας KB2 και οι υποκείμενοι λίθοι της κρηπίδας και της ευθυντηρίας, και (g) σκαρίφημα όπου παρουσιάζονται οι θέσεις των στοιχείων που συνδέουν τους υποκείμενους λίθους του κίονα KB2.

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ως αντιπροσωπευτικά των συνδέσμων των λίθων αντιστοιχούν σε ελατήρια συνδεδεμένα σε δύο σημεία των γειτονικών συνδεδόμενων λίθων, τα οποία παρουσιάζουν αξονική και διατμητική αντίσταση. Για τα ελατήρια ορίστηκε ελαστική συμπεριφορά με τη χρήση μέτρου δυσκαμψίας 50x106 N/m και 25x106 N/m στη διαμήκη και την εγκάρσια διεύθυνσή τους, αντίστοιχα (οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν για να αντιστοιχούν, κατά προσέγγιση, στη δυσκαμψία των νέων συνδέσμων από τιτάνιο που τοποθετούνται στους λίθους στα πλαίσια του έργου αποκατάστασης του ναού, Papadopoulos, 2007). Οι θέσεις των συνδετήριων στοιχείων στο προσομοίωμα αντιστοιχούν στις θέσεις των συνδέσμων στο μνημείο (Σχ. 11g.).

Το υλικό των λίθινων στοιχείων των προσομοιωμάτων θεωρήθηκε ελαστικό, συνεχές και ισότροπο. Για την αποφυγή ακόμη και πολύ μικρών ελαστικών παραμορφώσεων εισήχθη ως μέτρο ελαστικότητας του υλικού των προσομοιωμάτων δεκαπλάσια τιμή του μέτρου ελαστικότητας του

ασβεστόλιθου. Η προσομοίωση της συμπεριφοράς των επιφανειών επαφής των λίθων έγινε με τη χρήση του μοντέλου αλληλεπίδρασης επιφανειών που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις του ομοιώματος του κίονα του Παρθενώνα. Έτσι, παράλληλα στον αρμό εισήχθη η τριβή με τη χρήση συντελεστή τριβής 0.75 -τιμή που έχει προσδιοριστεί για το υλικό δομής του ναού σε σχετική εργαστηριακή μελέτη (Παπαντωνόπουλος, 1995)- και η απόσβεση με συντελεστή απόσβεσης 0.01, ενώ κάθετα στη διεπιφάνεια ήταν δυνατή η μετάβαση οποιασδήποτε πίεσης μεταξύ των επιφανειών, όταν αυτές ήταν σε επαφή και ο μηδενισμός των πιέσεων, όταν οι επιφάνειες διαχωρίζονταν.

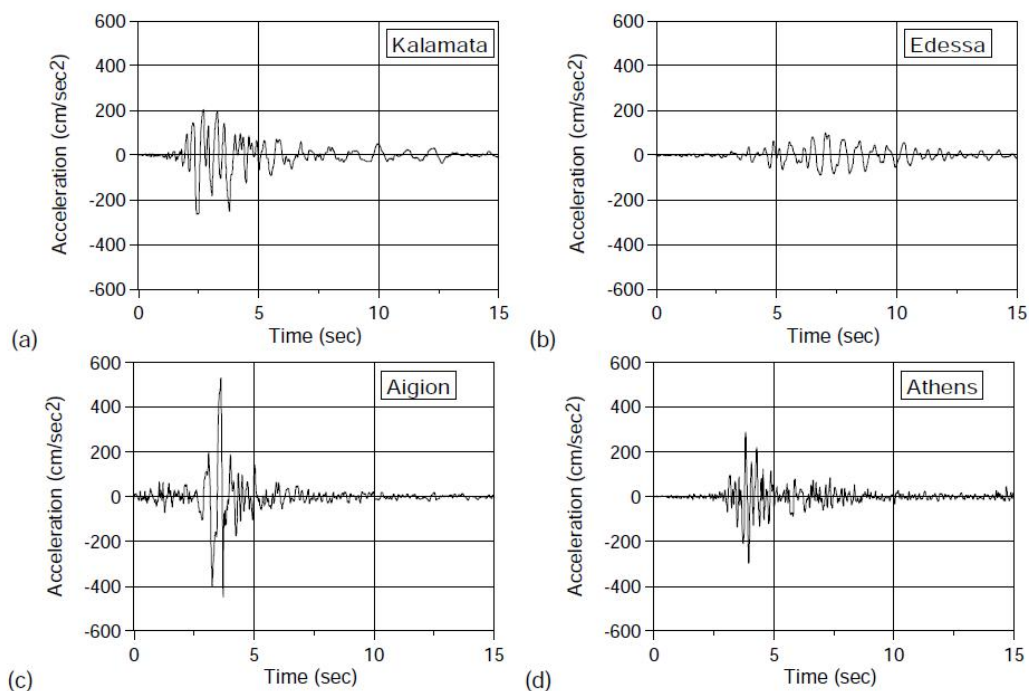
Τα προσομοιώματα φορτίστηκαν από τα ίδια βάρη τους και από δυναμικές φορτίσεις, οι οποίες εφαρμόζονταν ως επιβαλλόμενες μετατοπίσεις στις βάσεις των προσομοιωμάτων. Για τις δυναμικές φορτίσεις χρησιμοποιήθηκαν οι χρονοϊστορίες των μετατοπίσεων τεσσάρων καταγραφών σεισμικών συμβάντων του ελλαδικού χώρου, κλιμακούμενες με κατάλληλους πολλαπλασιαστικούς συντελεστές. Οι καταγραφές περιγράφονται ακολούθως.

4.1.2 Οι σεισμικές διεγέρσεις

Οι σεισμικές καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν, πολλαπλασιασμένες με διάφορους συντελεστές, ως διεγέρσεις των βάσεων των προσομοιωμάτων των κίωνων είναι οι παρακάτω:

α) Η καταγραφή του σεισμού που συνέβη στην Καλαμάτα στις 13/9/86, μεγέθους $M=6.0$, με επίκεντρο 12 km βόρεια της πόλης. Η καταγραφή αυτή έχει μέγιστη επιτάχυνση 0.27g, δεσπόζουσα περίοδο κραδασμού περίπου 0.35 sec και διάρκεια ισχυρής δόνησης 4 sec. β) Η καταγραφή του σεισμού της Έδεσσας, με μέγεθος $M = 5.9$, που συνέβη στις 21/12/90 με επίκεντρο που προσδιορίστηκε σε απόσταση 31 km βορειοανατολικά της πόλης. Λόγω της μεγάλης απόστασης του επιταχυνσιογράφου από το επίκεντρο του σεισμού η καταγραφή αυτή έχει χαμηλές επιταχύνσεις (η μέγιστη οριζόντια μόλις ξεπέρασε τη 0.10g), σε αντίθεση με τις ιδιοπεριόδους των οριζόντιων συνιστωσών, οι οποίες επηρεαζόμενες από τους μαλακούς σχηματισμούς του υπεδάφους είναι αρκετά υψηλές ($T= 0.50 - 0.70$ sec). Παρά τις χαμηλές επιταχύνσεις η διάρκεια της ισχυρής δόνησης προσεγγίζει τα 6.0 sec. γ) Η καταγραφή του Αιγίου, που προκλήθηκε από σεισμό στις 15/6/1995, μεγέθους $M=6.4$, με επίκεντρο σε απόσταση 18 km βορειοδυτικά της πόλης. Το κύριο χαρακτηριστικό της δόνησης αυτής είναι η ύπαρξη παλμού μεγάλης επιτάχυνσης (μέγιστες τιμές οριζόντιων συνιστωσών 0.54g και 0.50g) και μακράς περιόδου (περίπου 0.5 έως 0.6 sec). Η καταγραφή δίνει διάρκεια ισχυρής δόνησης 6 sec. δ) Η καταγραφή του σεισμού της Αθήνας που συνέβη

στις 7/9/99, μεγέθους $M=5.9$, η οποία πραγματοποιήθηκε στο κτίριο του Κ.Ε.Δ.Ε., Πειραιώς 166. Η εν λόγω καταγραφή, η οποία ελήφθη σε απόσταση 11 km από το επίκεντρο του σεισμού, παρουσιάζει μέγιστη επιτάχυνση 0.30g, περίοδο κραδασμού περίπου 0.20 sec και διάρκεια ισχυρής δόνησης 5.5 sec. Η επιλογή των συγκεκριμένων καταγραφών έγινε, διότι θεωρούνται αντιπροσωπευτικές των σεισμικών κινήσεων του ελλαδικού χώρου, ενώ κινούνται και σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Οι διαμήκεις συνιστώσες των επιταχύνσεων των τεσσάρων καταγραφών παρουσιάζονται στο Σχήμα 12. Οι μέγιστες τιμές των επιταχύνσεων, των ταχυτήτων και των μετατοπίσεων, και στις τρεις διευθύνσεις, των σεισμικών καταγραφών παρατίθενται στον Πίνακα 3.



Σχ. 12. Οι διαμήκεις συνιστώσες των επιταχύνσεων των σεισμικών καταγραφών: (α) της Καλαμάτας (1986), (β) της Έδεσσας (1990), (γ) του Αγίου (1995) και (δ) της Αθήνας (1999) που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές διερευνήσεις.

Σεισμική καταγραφή	Μέγιστη επιτάχυνση (g)			Μέγιστη ταχύτητα (cm/sec)			Μέγιστη μετατόπιση (cm)		
	Διαμ.	Κατακ.	Εγκ.	Διαμ.	Κατακ.	Εγκ.	Διαμ.	Κατακ.	Εγκ.
Καλαμάτας	0.27	0.19	0.23	24.0	8.1	30.9	5.6	1.4	7.1
Έδεσσας	0.10	0.04	0.10	10.9	3.0	8.4	1.1	0.3	0.9
Αιγίου	0.54	0.20	0.50	48.1	14.5	43.4	6.1	2.6	6.7
Αθήνας	0.30	0.16	0.26	14.7	7.0	16.1	2.1	1.8	1.9

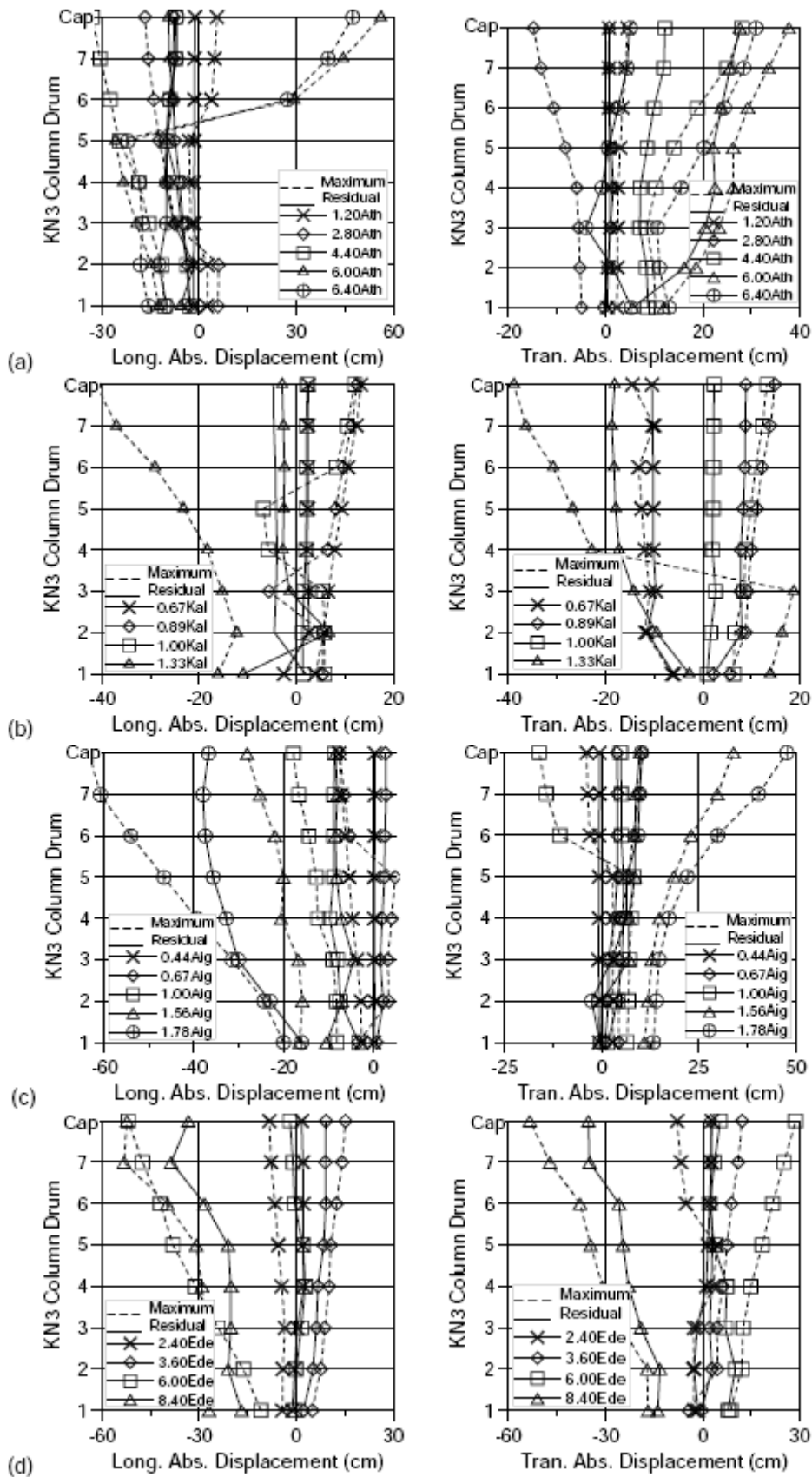
Πίν. 3. Οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις, ταχύτητες και μετατοπίσεις των σεισμικών καταγραφών.

4.1.3 Η σεισμική απόκριση του κίονα KN3

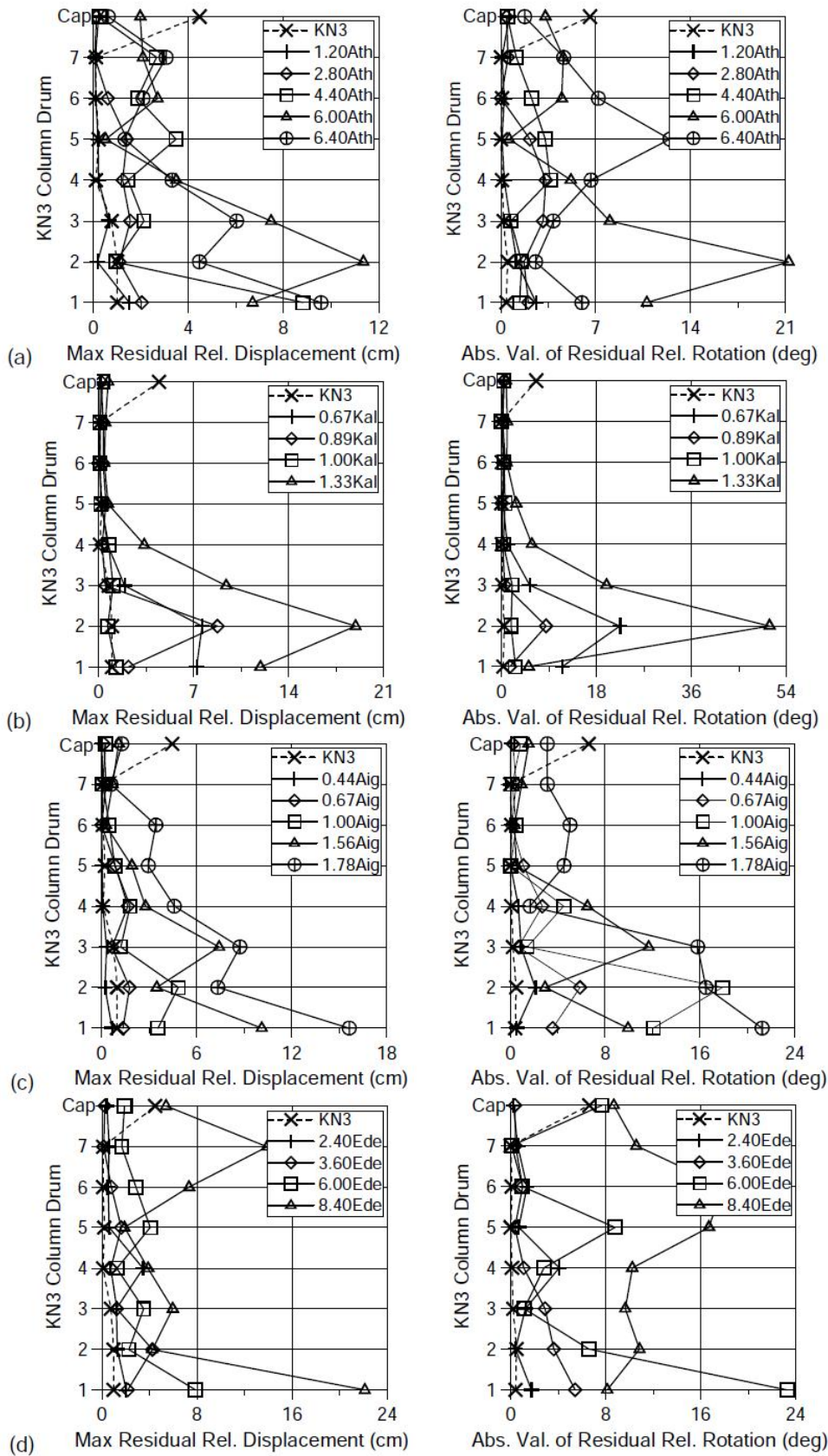
Για τη μελέτη της σεισμικής απόκρισης ενός μεμονωμένου κίονα, σε κατακόρυφη στάση, της περίπτωσης του ναού του Επικούριου Απόλλωνα επιλέχθηκε ο τρίτος από ανατολικά κίονας του νότιου περού (κίονας KN3), διότι διαθέτει διαστάσεις και αριθμό σπονδύλων όπως η πλειονότητα των κίωνων του περιστυλίου. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές αριθμητικές επιλύσεις με τη χρήση των τεσσάρων σεισμικών καταγραφών που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, οι οποίες εισάγονταν στο προσομοίωμα του κίονα ως διέγερση της βάσης του, πολλαπλασιασμένες με κατάλληλο συντελεστή, αυξανόμενο σταδιακά σε κάθε επίλυση μέχρι την επίτευξη της ανατροπής του προσομοιώματος.

Συνολικά είκοσι πέντε αριθμητικές επιλύσεις διενεργήθηκαν, σε κάθε μία από τις οποίες οι μετακινήσεις κάθε λίθινου μέλους του κίονα καταγραφόταν. Από τις επιλύσεις προέκυψε ότι για την ανατροπή του προσομοιώματος του κίονα χρειάστηκαν διεγέρσεις μεγέθους 6.8 φορές τη σεισμική καταγραφή της Αθήνας, 1.56 φορές την καταγραφή του σεισμού της Καλαμάτας, 2 φορές την καταγραφή του σεισμού του Αιγίου και 9.60 φορές τη σεισμική καταγραφή της Έδεσσας. Τα αποτελέσματα αυτά δίνουν κάτω όρια για τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, ταχύτητα και μετατόπιση του σεισμικού συμβάντος που ανατρέπει τον κίονα 0.42g, 48.1 cm/sec² και 10.6 cm, αντίστοιχα.

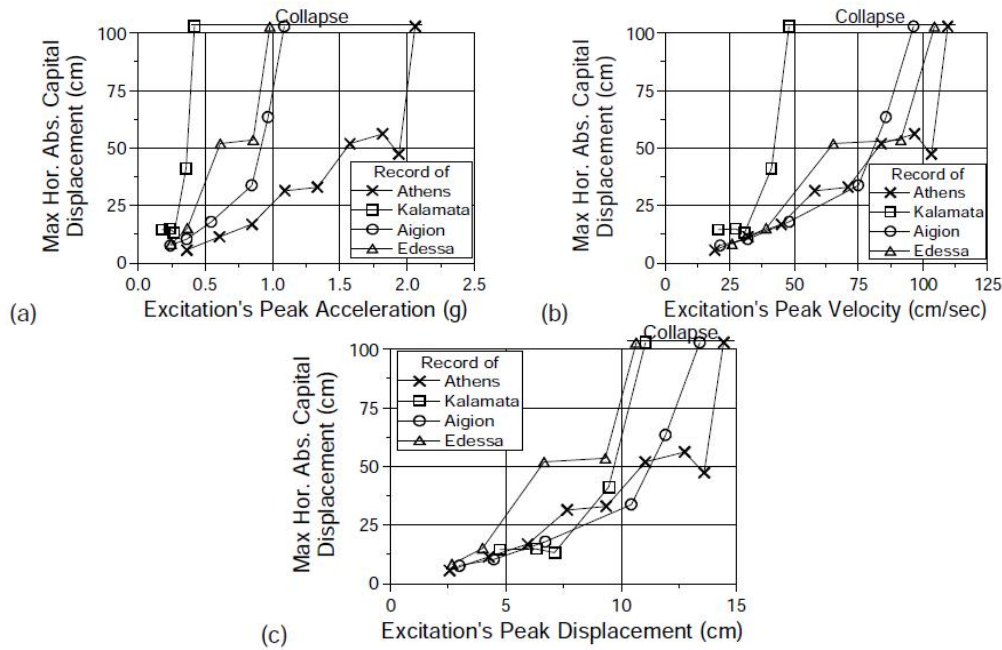
Τα κυριότερα αποτελέσματα των αριθμητικών επιλύσεων, σχετικά με τις μετακινήσεις των σπονδύλων και του κιονόκρανου του προσομοιώματος του κίονα, παρουσιάζονται στα Σχήματα 13 και 14. Σε όλες τις περιπτώσεις οι μετακινήσεις αφορούν στα κέντρα βάρη των μελών του κίονα. Σημειώνεται ότι στο Σχήμα 14 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των παραμενουσών σχετικών μετατοπίσεων όπως προέκυψαν από το διανυσματικό άθροισμα των σχετικών τιμών στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις, ενώ οι παραμένουσες σχετικές στροφές παρουσιάζονται κατ' απόλυτη τιμή. Στα διαγράμματα του Σχήματος 14 εμπεριέχονται και οι γεωμετρικές παραμορφώσεις του κίονα KN3, όπως έχουν αποτυπωθεί στο μνημείο, για να συγκριθούν με τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα. Στο Σχήμα 15 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των οριζόντιων μετατοπίσεων του κιονόκρανου σε συνάρτηση με τις μέγιστες τιμές των επιταχύνσεων, των ταχυτήτων και των μετατοπίσεων των διεγέρσεων που τις προκάλεσαν, ανεξαρτήτως διεύθυνσης. Επίσης, παρουσιάζονται και τα όρια των μέγιστων τιμών των παραμέτρων των διεγέρσεων που προκάλεσαν κατάρρευση του προσομοιώματος του κίονα.



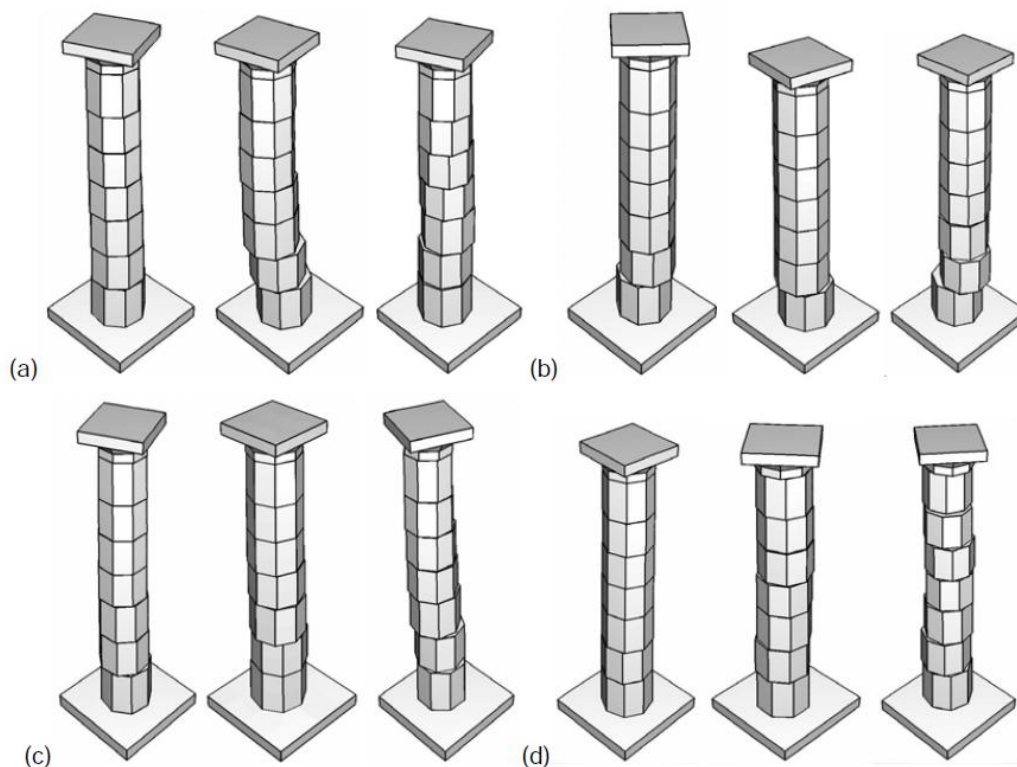
Σχ. 13. Μέγιστες και παραμένουσες απόλυτες μετατοπίσεις των σπονδύλων και του κιονόκρανου του προσομοιώματος του κίονα KN3, όπως προέκυψαν από τη διερεύνηση της απόκρισής του στη σεισμική καταγραφή (a) της Αθήνας, (b) της Καλαμάτας, (c), του Αιγίου, και (d) της Εδέσσας.



Σχ. 14. Παραμένουσες σχετικές μετατοπίσεις και στροφές των σπονδύλων και του κιονόκρανου του προσομοιώματος του κίονα KN3, όπως προέκυψαν από τη διερεύνηση της απόκρισής του στη σεισμική καταγραφή (a) της Αθήνας, (b) της Καλαμάτας, (c), του Αιγίου, και (d) της Έδεσσας.



Σχ. 15. Μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις του κινούκρανου του προσομοιώματος του κίονα KN3 σε συνάρτηση με τις μέγιστες τιμές (a) των επιταχύνσεων, (b) των ταχυτήτων και (c) των μετατοπίσεων των κλιμακούμενων σεισμικών διεγέρσεων.



Σχ. 16. Οι παραμορφωμένες στάσεις του προσομοιώματος του κίονα KN3, όπως όπως προέκυψαν από τη διέγερσή του με τη σεισμική καταγραφή: (a) της Αθήνας, πολλαπλασιασμένη με 3.60, 5.20 και 6.40, (b) της Καλαμάτας, πολ/σμένη με 0.67, 0.89 και 1.33, (c) του Αιγίου, πολ/σμένη με 1.00, 1.56 και 1.78, και (d) της Έδεσσας, πολ/σμένη με 3.60, 6.00 και 8.40.

4.1.4 Η ευστάθεια των κίωνων KN3, KB2 και KN5

Για να διαπιστωθεί εάν επηρεάζεται η ευστάθεια των κίωνων της περίπτωσης του ναού του Επικούριου Απόλλωνα από το γεγονός ότι πολλοί κίονες διαθέτουν διαφορετικό αριθμό σπονδύλων, πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές αριθμητικές επιλύσεις με τα προσομοιώματα των κίωνων KN3, KB2 και KN5 (οι οποίοι διαθέτουν 7, 6 και 5 σπόνδυλους, αντίστοιχα) να διεγείρονται από τις σεισμικές καταγραφές της Καλαμάτας της Έδεσσας του Αιγίου και της Αθήνας, διαρκώς κλιμακούμενες μέχρι την επίτευξη της ανατροπής των προσομοιωμάτων.

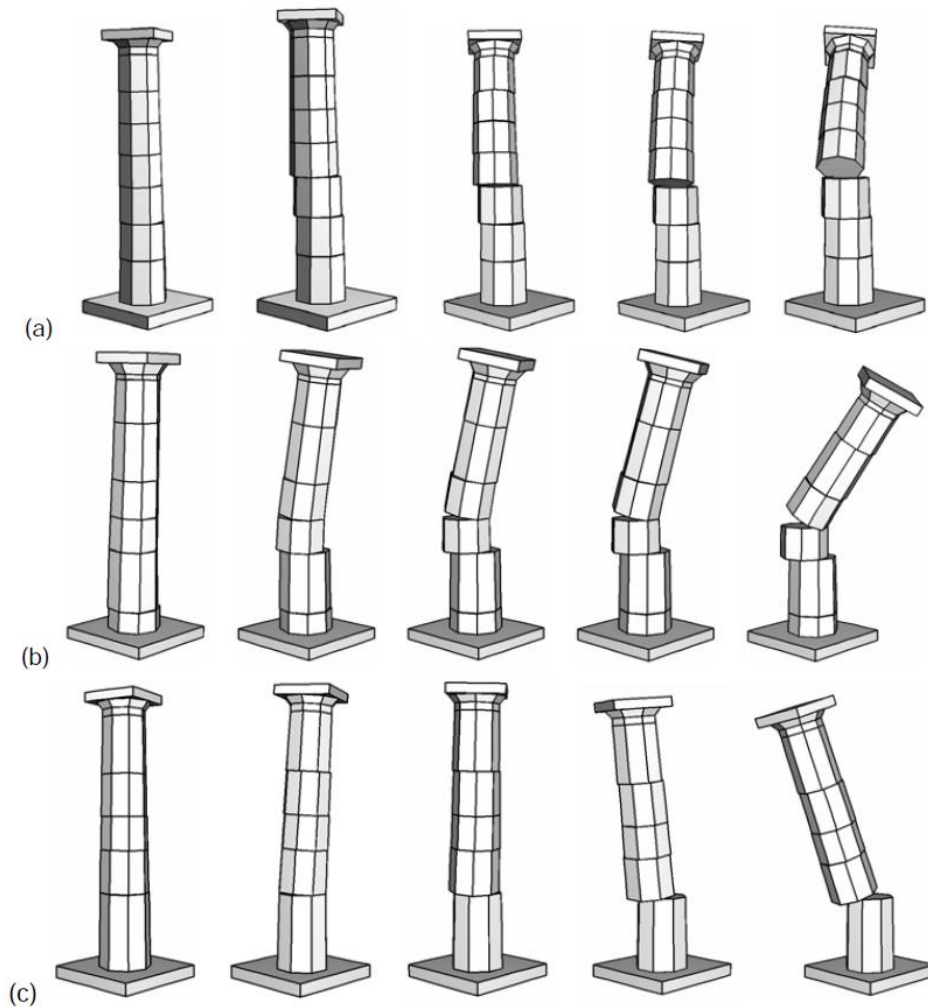
Τα αποτελέσματα για τα κατώτατα όρια των μέγιστων τιμών των επιταχύνσεων, των ταχυτήτων και των μετατοπίσεων των τεσσάρων σεισμικών καταγραφών, κατάλληλα κλιμακούμενων, που ανατρέπουν τους κίονες, παρατίθενται στον Πίνακα 3. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των μέγιστων επιταχύνσεων, ταχυτήτων και μετατοπίσεων των διεγέρσεων που ανέτρεψαν τα προσομοιώματα των τριών κίωνων του ναού.

Κίονας	Σεισμική καταγραφή	Scaling factor	PGA (g)	PGV (cm/sec)	PGD (cm)	Αποτέλεσμα: κατάρρευση κιονόκ. και
KN	Αθήνας	6.80	2.06	109.5	14.4	4 από 7 σπ.
	Καλαμάτας	1.56	0.42	48.1	11.1	6 από 7 σπ.
	Αιγίου	2.00	1.09	96.2	13.4	4 από 7 σπ.
	Έδεσσας	9.60	0.98	104.3	10.6	3 από 7 σπ.
KB	Αθήνας	6.80	2.06	109.5	14.4	3 από 6 σπ.
	Καλαμάτας	1.33	0.36	41.2	9.5	5 από 6 σπ.
	Αιγίου	2.67	1.45	128.3	17.9	2 από 6 σπ.
KN	Έδεσσας	10.80	1.10	117.3	12.0	1 από 6 σπ.
	Αθήνας	6.40	1.94	103.1	13.6	3 από 5 σπ.
	Καλαμάτας	2.00	0.54	61.8	14.2	4 από 5 σπ.
	Αιγίου	2.44	1.33	117.6	16.4	2 από 5 σπ.
	Έδεσσας	9.60	0.98	104.3	10.6	3 από 5 σπ.

Πίν. 3. Οι μέγιστες τιμές επιταχύνσεων, ταχυτήτων και μετατοπίσεων των σεισμικών διεγέρσεων που ανέτρεψαν τα προσομοιώματα των τριών κίωνων.

Κίονας	Κρίσιμης διέγερσης βάσης κίονα, μέγιστη					
	επιτάχυνση (g)		ταχύτητα (cm/sec)		μετατόπιση (cm)	
	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
KN3	1.14	0.68	89.5	28.2	12.4	1.83
KB2	1.24	0.71	99.1	39.3	13.4	3.59
KN5	1.20	0.59	96.7	24.2	13.7	2.37
Όλοι	1.19	0.60	95.1	28.6	13.2	2.51

Πίν. 4. Στατιστικά στοιχεία που αφορούν στη σεισμική διέγερση που δύναται να επιφέρει κατάρρευση στους τρεις κίονες του ναού.

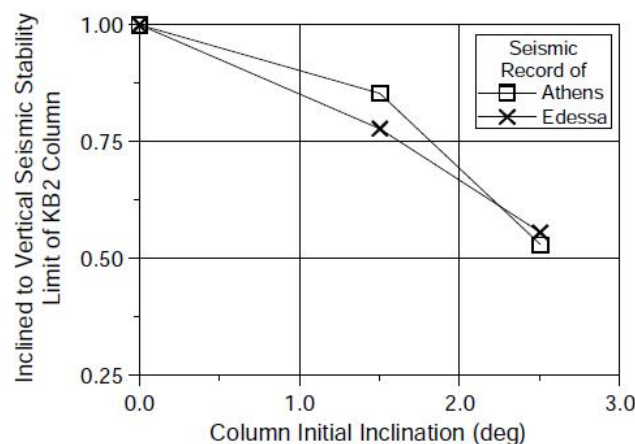


Σχ. 17. Στιγμιότυπα από την κατάρρευση: (a) του προσομοιώματος του κίονα KN3, διεγερμένου από τη καταγραφή του σεισμού του Αιγίου, πολλαπλασιασμένη με 2.00, (b) του προσομοιώματος του κίονα KB2, διεγερμένου από τη σεισμική καταγραφή της Αθήνας, πολ/σμένη με 6.80 και (c) του προσομοιώματος του κίονα KN5, διεγερμένου από το σεισμό της Καλαμάτας πολ/σμένο με 2.00.

4.1.5 Η επίδραση της απόκλισης από την κατακόρυφο στην ευστάθεια του κίονα KB2

Για να εκτιμηθεί η επίρεια της απόκλισης από την κατακόρυφο στην ευστάθεια των κίωνων του ναού του Επικούριου Απόλλωνα πραγματοποιήθηκε παραμετρική αριθμητική μελέτη της ευστάθειας του κίονα KB2 για αρχικές γωνίες απόκλισης 1.50 και 2.50 και για διεγέρσεις βάσης τις σεισμικές καταγραφές της Έδεσσας και της Αθήνας, των οποίων η ένταση κλιμακωνόταν σταδιακά έως την επίτευξη της ανατροπής του κίονα. Λόγω της γεωμετρικής ασυμμετρίας του προσομοιώματος του κεκλιμένου κίονα όλες οι αριθμητικές επιλύσεις έλαβαν χώρα για τη δυσμενέστερη φορά του σεισμικού συμβάντος,

δηλαδή οι διεγέρσεις εφαρμόστηκαν έτσι ώστε η διεύθυνσή τους με τη μέγιστη επιτάχυνση να ταυτίζεται με τη διεύθυνση κατά την οποία ο κίονας έκλινε. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το προσομοίωμα του κίονα που παρουσίαζε 1.5ο αρχική απόκλιση από την κατακόρυφο ανατράπηκε όταν διεγέρθηκε με 5.80 φορές την καταγραφή του σεισμού της Αθήνας και με 8.40 φορές τη σεισμική καταγραφή της Έδεσσας, ενώ το προσομοίωμα με απόκλιση 2.5ο κατάρρευσε όταν φορτίστηκε δυναμικά με την καταγραφή της Αθήνας πολλαπλασιασμένη με 3.60 και της Έδεσσας πολλαπλασιασμένη με 6.00 (πίν. 3.7). Τα στοιχεία αυτά ισοδυναμούν με υποβίβαση της αντισεισμικής ικανότητας του κίονα, σε σχέση με αυτή που επέδειξε κατακόρυφα ιστάμενος και διεγειρόμενος από τις καταγραφές των σεισμών της Αθήνας και της Έδεσσας, αντίστοιχα, κατά 15% και 22%, όταν αποκλίνει 1.5ο και κατά 47% και 44%, όταν έχει απόκλιση 2.5ο. Η επιρροή της απόκλισης στην ευστάθεια του κίονα παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 18., που ακολουθεί.



Σχ. 18. Η επιρροή της απόκλισης από την κατακόρυφο στην ευστάθεια του κίονα KB2.

4.1.6. Η επίδραση της κρηπίδας στην απόκριση του κίονα KB2

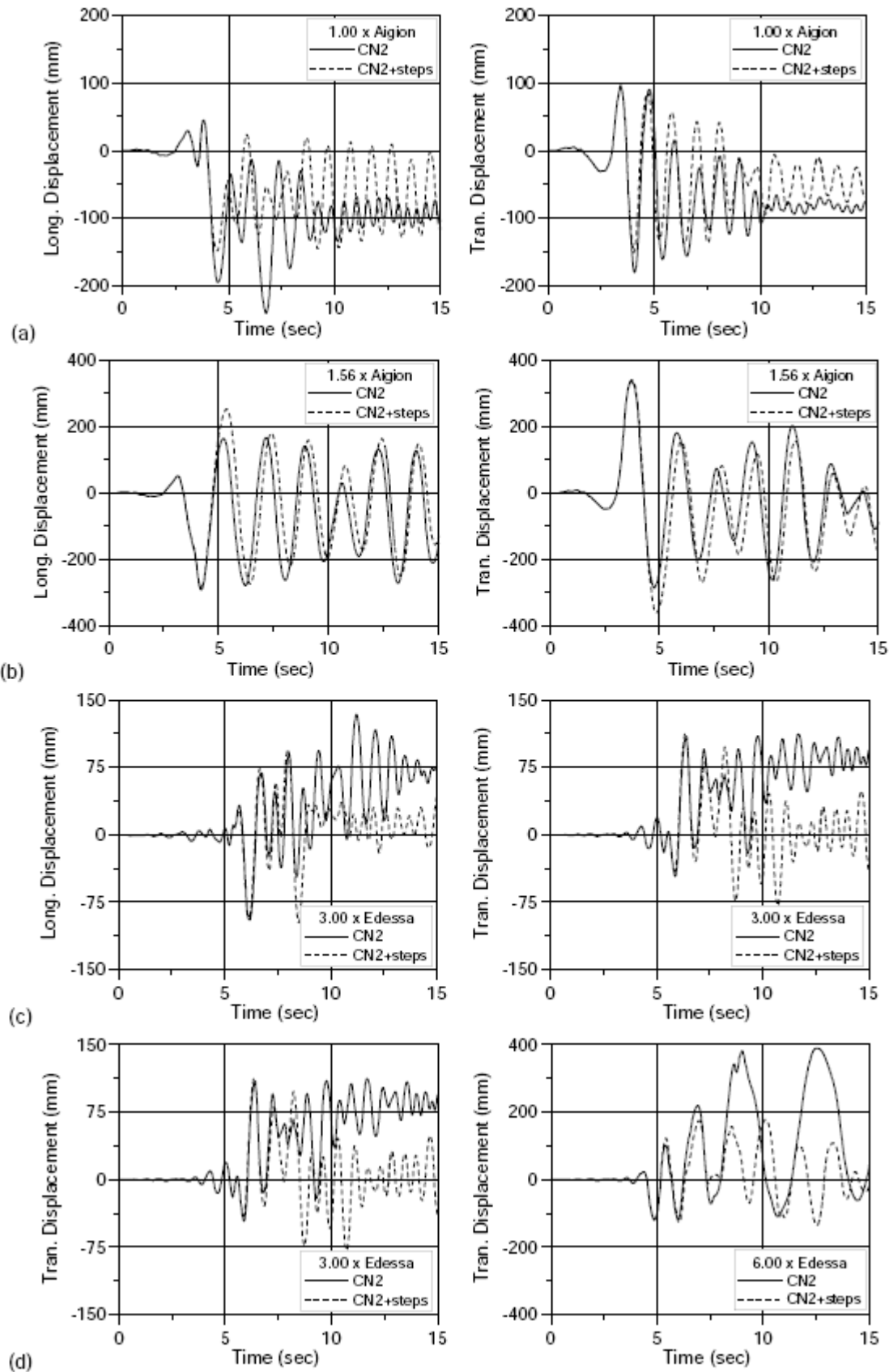
Όλες οι προηγούμενες διερευνήσεις αφορούν στην απόκριση κίωνων που διεγείρεται σεισμικά ο λίθος επί του οποίου εδράζονται. Όμως, οι κίονες της περίπτωσης του ναού του Επικούριου Απόλλωνα εδράζονται επί των τριών αναβαθμών της κρηπίδας και ανισοϋπούς θεμελίωσης, η οποία στην ανατολική πλευρά και στο μεγαλύτερο μέρος της βόρειας και της νότιας πλευράς του μνημείου αποτελείται από μια στρώση λίθων, την ευθυντηρία. Για την εξέταση της επίδρασης της ύπαρξης υποκείμενων στρώσεων λίθων στη σεισμική απόκριση των κίωνων του ναού πραγματοποιήθηκε μικρή διερεύνηση κατά την οποία το προσομοίωμα που περιλαμβάνει τον κίονα KB2, τους υποκείμενους αυτού λίθους της κρηπίδας και της ευθυντηρίας, συνδετήρια στοιχεία των

λίθων, και ορθογώνια παραλληλόγραμμη βάση, καθώς και το προσομοίωμα του κίονα KB2 εδραζόμενου απ' ευθείας σε βάση, φορτίστηκαν δυναμικά με τη σεισμική καταγραφή του Αιγίου πολλαπλασιασμένη με τους συντελεστές 1.00 και 1.56, και της Έδεσσας, πολλαπλασιασμένη με 3.00 και 6.00. Όλες οι επιλύσεις με το πρώτο προσομοίωμα πραγματοποιήθηκαν με τη διεύθυνση της διέγερσης με τη μέγιστη επιτάχυνση να συμπίπτει με το διαμήκη άξονα της κρηπίδας.

Στον Πίνακα 5 παρατίθενται οι μέγιστες τιμές των εφελκυστικών και διατμητικών δράσεων που παρουσιάστηκαν στα συνδετήρια στοιχεία των υποκείμενων λίθων του κίονα, ανά στρώση, ανεξάρτητα αν οι τιμές εμφανίστηκαν στο ίδιο ή σε άλλο στοιχείο. Στο Σχήμα 19 παρατίθενται συγκρίσεις των χρονοϊστοριών των απόλυτων μετατοπίσεων του κιονόκρανου, στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις, που έδωσαν οι επιλύσεις με τα δύο προσομοιώματα (στην κατακόρυφη διεύθυνση τα αποτελέσματα ήταν πολύ κοντινά, σχεδόν ταυτόσημα). Οι μετατοπίσεις αφορούν στο κέντρο της άνω έδρας του άβακα.

Θέση συνδέσμου	Δράση σε συνδετήριο στοιχείο (σε kN) από προσομοίωση που χρησιμοποιήθηκε							
	η σεισμική καταγραφή του Αιγίου, πολλαπλασιασμένη με				η σεισμική καταγραφή της Έδεσσας, πολλαπλασιασμένη με			
	1.00		1.56		3.00		6.00	
	Εφελκυστ.	Διατμητ.	Εφελκυστ.	Διατμητ.	Εφελκυστ.	Διατμητ.	Εφελκυστ.	Διατμητ.
Ευθυντηρία	0.50	0.59	1.95	2.90	0.44	0.63	1.26	0.91
1 ^{ος} αναβαθ.	3.01	1.04	2.86	2.32	2.50	0.72	4.17	1.49
2 ^{ος} αναβαθ.	3.15	0.96	3.54	2.48	2.93	0.89	6.44	2.79

Πίν. 5. Μέγιστες δράσεις στα συνδετήρια στοιχεία των υποκείμενων λίθων του κίονα KB2.



Σχ. 19. Σύγκριση των απολύτων μετατοπίσεων του κινούκρανου που προέκυψαν από φόρτιση των δύο προσομοιωμάτων του κίονα KB2 (απομονωμένου, και με του υποκείμενους του λίθους) με τη σεισμική καταγραφή: (α), (β) του Αιγίου πολλαπλασιασμένη με 1.00 και 1.56, και (c), (d) της Έδεσσας πολλαπλασιασμένη με 3.00 και 6.00.

Από την παραβολή των αποτελεσμάτων για τις μετακινήσεις του κιονόκρανου των δύο προσομοιωμάτων του κίονα KB2 προκύπτουν οι παρατηρήσεις που ακολουθούν: Οι πρώτες «δίδυμες» προσομοιώσεις, στις οποίες χρησιμοποιήθηκε η καταγραφή του σεισμού του Αιγίου (Σχ. 19a.), έδωσαν διαφορετικές αποκρίσεις κυρίως στη διαμήκη διεύθυνση, όπου η μέγιστη μετατόπιση και η παραμένουσα ολίσθηση που εκδηλώθηκαν στο προσομοίωμα του απομονωμένου κίονα είναι διπλάσιες των αντίστοιχων τιμών που καταγράφηκαν στο προσομοίωμα με την κρηπίδα. Στην εγκάρσια διεύθυνση υπάρχουν παρόμοιες διαφοροποιήσεις, αλλά αρκετά μικρότερου, σχεδόν ασήμαντου, εύρους. Στο δεύτερο ζεύγος αριθμητικών επιλύσεων με τη σεισμική καταγραφή του Αιγίου, όπου το δυναμικό φορτίο ήταν μεγαλύτερο, ο κίονας παρουσίασε παρεμφερείς, σχεδόν όμοιες, αποκρίσεις σε όλες τις διευθύνσεις (Σχ. 19b.). Αντίθετα στις αριθμητικές επιλύσεις που χρησιμοποιήθηκε η μακροπερίοδη σεισμική καταγραφή της Έδεσσας προέκυψε διαφοροποίηση στην απόκριση του κίονα και για τα δύο επίπεδα δυναμικής φόρτισης που ελέγχθηκαν. Πιο συγκεκριμένα για τη διέγερση με τη μικρότερη ένταση καταγράφηκαν σημαντικές παραμένουσες μετατοπίσεις ($\approx 75 - 80$ mm) και στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις στον απομονωμένο κίονα, οι οποίες δεν εμφανίστηκαν στο άλλο μοντέλο (Σχ. 19c.). Στο τελευταίο ζεύγος προσομοιώσεων το λογισμικό προέβλεψε μόνο για το προσομοίωμα του κίονα χωρίς τους υποκείμενους λίθους σημαντική λικνιστική μετακίνηση και μεγάλη παραμένουσα μετατόπιση (≈ 150 mm) και στις δύο διευθύνσεις (Σχ. 19d.).

4.2 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Από την αριθμητική εξέταση της σεισμικής απόκρισης του κίονα KN3 του ναού του Επικούριου Απόλλωνα προέκυψε ότι ο κίονας, στην κατάσταση που ελέγχθηκε (ελεύθερα και κατακόρυφα ιστάμενος, με άθικτες εδράσεις σπονδύλων και επί άκαμπτης βάσης), διαθέτει ιδιαίτερα μεγάλη, έναντι ανατροπής, σεισμική αντοχή. Συγκεκριμένα, προέκυψαν κάτω όρια για τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, ταχύτητα και μετατόπιση του σεισμικού συμβάντος που ανατρέπει τον κίονα να είναι $0.42g$, 48.1 cm/sec² και 10.6 cm, αντίστοιχα. Από τη διερεύνηση διαφάνηκε, επίσης, ότι η απόκριση του κίονα συσχετίζεται πολύ καλά με τη μέγιστη τιμή της μετατόπισης της διέγερσής του και ότι το εύρος διακύμανσης της μετατόπισης που απαιτείται για να ανατραπεί ο κίονας είναι αρκετά μικρό (Σχ. 15c.). Αρκετά καλά με τη σεισμική απόκριση και το όριο ανατροπής του κίονα συσχετίζεται και η μέγιστη ταχύτητα της διέγερσης (Σχ. 15b.). Αν μάλιστα, εξαιρεθούν τα αποτελέσματα που έδωσε η χρήση της σεισμικής καταγραφής της Καλαμάτας, η οποία παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή μέγιστης εδαφικής μετατόπισης από όλες τις καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν, τότε η συσχέτιση γίνεται μεγαλύτερη. Αντίθετα, η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης της διέγερσης δεν αποτέλεσε παράγοντα που επηρέασε

συστηματικά την απόκριση του προσομοιώματος (Σχ. 15a).· αν και, εφόσον αγνοηθούν ξανά τα σχετικά με την καταγραφή του σεισμού της Καλαμάτας αποτελέσματα, παρατηρείται μία φθίνουσα τάση της μέγιστης επιτάχυνσης της διέγερσης που ανατρέπει τον κίονα όσο αυξάνει η δεσπόζουσα περίοδος της διέγερσης. Οι ίδιες εκτιμήσεις για τις παραμέτρους της διέγερσης του επηρεάζουν την ευστάθεια προέκυψαν και από τις διερευνήσεις για τους δύο άλλους κίονες του ναού (Πίν. 3.).

Αναφορικά με τις γεωμετρικές παραμορφώσεις του προσομοιώματος του κίονα KN3, ως αποτέλεσμα των σεισμικών διεγέρσεων του, διαπιστώθηκε ότι οι μέγιστες μετατοπίσεις των σπονδύλων και του κιονόκρανου που αναπτύσσονταν κατά τη διάρκεια των δονήσεων είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες παραμένουσες· οι διαφορές αυτές, μάλιστα, αυξάνουν όσο μεγαλώνει το μέγεθος της δόνησης (Σχ. 13.). Η εκτίμηση αυτή έρχεται σε συμφωνία με συμπέρασμα σχετικής πειραματικής διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε σε ομοίωμα κίονα του πρόναου του Παρθενώνα (Mouzakis et al., 2002). Επίσης, τα μεγέθη των σχετικών παραμενουσών μετατοπίσεων και στροφών των μελών του κίονα μειώνονται όσο υψηλότερη είναι η θέση τους, σχεδόν στο σύνολο των περιπτώσεων που εξετάστηκαν, με ελάχιστες εξαιρέσεις που αφορούν σε προσομοιώσεις που χρησιμοποιήθηκε η μακροπερίοδη καταγραφή της Έδεσσας (Σχ. 13. και 16.). Τα αποτελέσματα αυτά συνάδουν με τις αποτυπωμένες παραμορφώσεις του κίονα στο μνημείο. Επιπλέον, οι μορφές των τεθλασμένων γραμμών που περιγράφουν τις παραμορφώσεις του προσομοιώματος του κίονα, αλλά και η οπτική παρατήρηση των στιγμιότυπων που παρουσιάζουν την απόκρισή του, συντείνουν στο συμπέρασμα ότι το είδος της κίνησης που επικρατεί στην απόκριση του κίονα στις ισχυρές σεισμικές διεγέρσεις είναι λικνισμός κατά ομάδες σπονδύλων, με αποτέλεσμα οι παραμένουσες γεωμετρικές παραμορφώσεις να οφείλονται κυρίως σε επίπεδες ή χωρικές περιστροφικές μετακινήσεις. Αυτή η λικνιστική διαδικασία, μάλιστα, ήταν που οδήγησε σε κατάρρευση τα προσομοιώματα και των τριών κίωνων σε όλες τις περιπτώσεις (Σχ. 17.). Παρόμοια ευρήματα προέκυψαν και από αριθμητική διερεύνηση της σεισμικής διερεύνησης κίωνων του πρόναου Παρθενώνα (Psycharis et al., 2003).

Από τον αριθμητικό έλεγχο της ευστάθειας των τριών κίωνων του ναού (KN3, KB2 και KN5) διαφάνηκε πως το γεγονός ότι διαθέτουν διαφορετικό αριθμό σπονδύλων (7, 6 και 5, αντίστοιχα) δεν επηρεάζει με συστηματικό τρόπο το όριο ανατροπής τους (Πίν. 3.). Άλλωστε, και από επισκόπηση των στιγμιότυπων απόκρισης των προσομοιωμάτων των κίωνων (Σχ. 17.) δεν διαπιστώνεται ουσιαστική ποιοτική διαφοροποίηση στον τρόπο που αποκρίθηκαν στις σεισμικές διεγέρσεις. Αντίθετα, η ανάλυση έδωσε παρόμοια αποτελέσματα για τα όρια ευστάθειας και των τριών κίωνων, κάτι που επιτρέπει

την ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων για την εξαγωγή συνολικής ποσοτικής εκτίμησης για την αντισεισμική ικανότητα που διαθέτει σχεδόν το σύνολο των κίωνων του περιστυλίου (διότι, όπως προαναφέρθηκε, όμοιο αριθμό σπόνδυλων με ένα από τους τρεις κίονες διαθέτουν οι 30 από τους 37, σήμερα ιστάμενους, κίονες του μνημείου) πάντα υπό τις προϋποθέσεις ότι είναι κατακόρυφοι, με άθικτες εδράσεις και τους σπονδύλους τους και τη βάση τους σε καλή κατάσταση. Έτσι, προκύπτει ότι η μια σεισμική διέγερση για να ανατρέψει τους κίονες της περίπτωσης του ναού πρέπει να παρουσιάζει, τουλάχιστον, μέγιστη εδαφική ταχύτητα 95.1 cm/sec (± 28.6 cm/sec) ή μέγιστη εδαφική μετατόπιση 13.2 cm (± 2.51 cm) (Πίν. 4.). Για να διατυπωθεί εκτίμηση για το τι επίδραση μπορούν να επιφέρουν στις σύγχρονες κατασκευές σεισμικά επίπεδα παρόμοια με αυτά που προέκυψαν ότι ανατρέπουν τους κίονες του ναού, αναφέρεται ότι σύμφωνα με σχετική μελέτη για τον ελλαδικό χώρο (Koliopoulos et al., 1998), σεισμικά συμβάντα με μέγιστη εδαφική ταχύτητα μεγαλύτερη από 75 cm/sec προκαλούν βλάβες IX της κλίμακας Modified Mercalli.

Αναφέρεται, επίσης, ότι ο Κ. Παπαντωνόπουλος (1995) χρησιμοποιώντας αναλυτικό κριτήριο ανατροπής στέρεου σώματος που διεγείρεται από σεισμικές διεγέρσεις, κριτήριο που χρησιμοποιεί ως παραμέτρους την εδαφική ταχύτητα και τη μετατόπιση (Ishiyama et al., 1982), κατέληξε ότι μονόλιθος κίονας που διαθέτει διαστάσεις όμοιες με τις τυπικές των κίωνων της περίπτωσης του μνημείου ανατρέπεται για κατώτατα όρια μέγιστης εδαφικής ταχύτητας 63.0 cm/sec και μέγιστης εδαφικής μετατόπισης 20.0 cm. Το ότι είναι συγκρίσιμα αυτά τα μεγέθη (πολύ περισσότερο βέβαια για την κρίσιμη μέγιστη εδαφική ταχύτητα) με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από την παρούσα αριθμητική εργασία, αποτελεί ένδειξη για το ότι είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για μία πρώτη προσεγγιστική εκτίμηση του ορίου ανατροπής ενός πολυσπόνδυλου κίονα η σχετικά απλή αναλυτική επίλυση του ισοδύναμου προς αυτόν μονόλιθου. Εκτίμηση που έχει εξαχθεί και από προγενέστερη αριθμητική εργασία (Psycharis et al., 2000). Από τα προηγούμενα προκύπτει η παρατήρηση ότι οι κίονες του μνημείου θα διέθεταν μεγάλη αντοχή έναντι ανατροπής στις σεισμικές δράσεις εάν ήταν μονοσπόνδυλοι. Η παρατήρηση αυτή ενισχύεται και από το γεγονός ότι επτά κίονες του αρχαϊκού ναού του Απόλλωνα της Κορίνθου, που είναι μονοσπόνδυλοι και με κοντινές διαστάσεις και λυγηρότητα μ' αυτές των κίωνων του ναού του Επικούριου Απόλλωνα, παραμένουν ιστάμενοι μέχρι σήμερα παρά το ότι ευρίσκονται σε περιοχή με ιδιαίτερα βεβαρημένο σεισμικό παρελθόν.

Η διερεύνηση της επιρροής της απόκλισης από την κατακόρυφο στην ευστάθεια του κίονα KB2 κατέδειξε σημαντική υποβίβαση της αντισεισμικής ικανότητας του προσομοιώματος του κεκλιμένου κίονα (Σχήμα 18.), συνηγορώντας και αυτή στο ότι οι κλίσεις των κίωνων στην υπάρχουσα κατάσταση του μνημείου είναι σημαντικά επιβαρυντικές στην ευστάθειά τους. Ενδεικτικό είναι ότι για τη

μεγαλύτερη τιμή απόκλισης που ελέγχθηκε στην παρούσα εργασία, 2.5 μοίρες, η οποία είναι μάλιστα μικρότερη (κοντινή πάντως) από τη μέγιστη καταγεγραμμένη στο περιστύλιο του ναού, η μείωση στην ευστάθεια του προσομοιώματος του κίονα προσέγγισε το 50%. Διαφάνηκε, επίσης, από τα αριθμητικά αποτελέσματα (κυρίως στις επιλύσεις με τη σεισμική καταγραφή της Αθήνας) ότι όσο μεγαλώνει η απόκλιση από την κατακόρυφο του κίονα τόσο αυξάνεται ο ρυθμός με τον οποίο μειώνεται η αντισεισμική ικανότητά του.

Η τελευταία διερεύνηση, που έλαβε χώρα στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, είναι σχετική με το πόσο μεταβάλλεται η σεισμική απόκριση του κίονα KB2 από την ύπαρξη μεταξύ αυτού και του σεισμικά διεγερόμενου υπόβαθρου τεσσάρων στρώσεων λίθων, όπως συμβαίνει στο μνημείο, σε σχέση με την απόκριση που θα είχε ο κίονας αν εδραζόταν απ' ευθείας στη διεγερόμενη βάση. Με αυτό το σκοπό τα δύο προσομοιώματα του κίονα φορτίστηκαν με τη σεισμική καταγραφή του Αιγίου, πολλαπλασιασμένη με 1.00 και 1.56 και της Έδεσσας με 3.00 και 6.00. Σημειώνεται ότι αυτά τα επίπεδα δυναμικών φορτίσεων αντιστοιχούν στο 37% και 58% του ορίου ανατροπής που προέκυψε από τη διερεύνηση της ευστάθειας του προσομοιώματος του απομονωμένου κίονα με τη χρήση της σεισμικής καταγραφής του Αιγίου, και στο 28% και 56% με την καταγραφή της Έδεσσας. Αν και η διερεύνηση αυτή είναι σχετικά περιορισμένη, τα αποτελέσματά της υποδεικνύουν ότι η ύπαρξη των στρώσεων των λίθων κάτω από τον κίονα τείνει να περιορίσει το εύρος λικνιστού του και να μειώσει τις παραμένουσες ολισθήσεις του (το πρώτο διαπιστώθηκε μόνο στις αναλύσεις που χρησιμοποιήθηκε η σεισμική καταγραφή της Έδεσσας). Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στην επιπρόσθετη κατανάλωση της εισαγομένης ενέργειας που λαμβάνει χώρα στις διεπιφάνειες των υποκείμενων λίθων του κίονα, λόγω των συγκρούσεων και των ολισθήσεων των λίθων (παρατήρηση που επιβεβαιώνεται από τις εντάσεις που εμφανίστηκαν στα συνδετήρια στοιχεία τους, Πίν. 5.). Άρα, έμμεσα, μπορεί να εξαχθεί η εκτίμηση ότι το προσομοίωμα του κίονα που περιλαμβάνει και τους λίθους της κρηπίδας και της ευθυντηρίας (το οποίο είναι το πιο αντιπροσωπευτικό της κατάστασης του κίονα στο μνημείο) διαθέτει παρόμοιο, ή μεγαλύτερο, όριο σεισμικής κατάρρευσης με το όριο του απλού προσομοιώματος του κίονα.

Η τελευταία εκτίμηση επιτρέπει να χρησιμοποιηθούν τα στοιχεία, που προέκυψαν από τις προηγούμενες αριθμητικές διερευνήσεις για να γίνει αποτίμηση του σεισμικού κινδύνου κατάρρευσης των κίωνων της περίπτωσης του ναού στην κατάσταση που θα περιέλθουν μετά το πέρας των εργασιών αποκατάστασης του μνημείου, υπό την προϋπόθεση ότι, για λόγους απλοποίησης του προβλήματος, η επιρροή της αποκαταστημένης θεμελίωσης στην απόκριση της ανωδομής του ναού θα θεωρηθεί αμελητέα και η επίδραση της σύζευξης των κίωνων με τα επιστύλια όχι επιβαρυντική στην ευστάθειά τους. Η αξιοπιστία της πρώτης θεώρησης προκύπτει όχι μόνο από τα μέτρα που

λαμβάνονται για την ενίσχυση της θεμελίωσης του ναού (Papadopoulos, 2008), αλλά και από το γεγονός ότι το αποδιοργανωμένο από αιώνες, ανομοιόμορφου ύψους, δυτικό θεμέλιο δε συνέβαλλε ώστε κάποιος σεισμός της περιοχής να προκαλέσει εκτεταμένη κατάρρευση στο μνημείο. Σε ότι αφορά τη δεύτερη θεώρηση υπάρχουν προγενέστερες αριθμητικές μελέτες (Psycharis et al., 2000), (Ψυχάρης κ.α., 2005) που έχουν καταδείξει ότι η σύζευξη κίωνων με επιστύλιο δεν μεταβάλλει ουσιαστικά την ευστάθειά τους. Έτσι, με τη χρήση εμπειρικών σχέσεων απόσβεσης της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας και μετατόπισης επιφανειακών σεισμών που έχουν διατυπωθεί για τον ελλαδικό χώρο (Scarlatoudis et al., 2003), για πιθανότητα κατάρρευσης 50%, και για παραμέτρους κρίσιμης διέγερσης $PGV=95.1$ cm/sec ή $PGD=13.2$ cm (Πίν. 4.) εξάγεται ότι οι κίονες του ναού θα καταρρεύσουν εάν λάβει χώρα επιφανειακός σεισμός με επίκεντρο σε απόσταση από το μνημείο 5 km και με μέγεθος πολύ μεγαλύτερο από $M=7.0$. Από τα γνωστά στοιχεία για τη σεισμικότητα της περιοχής του ναού (Σχ. 1.) διαπιστώνεται ότι σεισμικά συμβάντα τόσο μεγάλης έντασης δεν έχουν καταγραφεί σε μικρές επικεντρικές από το ναό αποστάσεις· αντίθετα, οι γνωστοί κοντινοί σεισμοί κυμαίνονται σε επίπεδα αρκετά χαμηλότερα ($M\approx 6.0$).

Κατά συνέπεια, μπορεί να διατυπωθεί ότι μετά την ολοκλήρωση των εργασιών αποκατάστασης του μνημείου και την επαναδημιουργία των προϋποθέσεων για την ιδιαίτερα μεγάλη ευστάθεια των κίωνων (με την ενίσχυση της θεμελίωσης, την αποκατάσταση της ακεραιότητας και της σύνδεσης των λίθων της κρηπίδας και την επαναφορά των κίωνων στην κατακόρυφη στάση) ο κίνδυνος να ανατραπούν κίονες από σεισμικό συμβάν θα είναι ιδιαίτερα περιορισμένος. Η αξιοπιστία αυτού του συμπεράσματος υποστηρίζεται, φυσικά, και από το γεγονός ότι σχεδόν το σύνολο του περιστύλιου του ναού παραμένει ιστάμενο είκοσι πέντε αιώνες από τότε που κατασκευάστηκε.



Εικ. 10. Το περιστύλιο του ναού του Επικούριου Απόλλωνα, σχεδόν στο σύνολό του, παραμένει ιστάμενο είκοσιπέντε αιώνες από την κατασκευή του.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρά την ευαισθησία του φαινομένου της σεισμικής απόκρισης των πολυσπόνδυλων κίωνων και τις αναγκαίες, λόγω της πολυπλοκότητας του θέματος, προσεγγιστικές και απλουστευτικές παραδοχές που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια των αριθμητικών επιλύσεων της παρούσας εργασίας για την προσομοίωση των κίωνων του ναού του Επικούριου Απόλλωνα, διαφάνηκε από τα αποτελέσματα ότι το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε δύναται να προβλέψει με αξιοπιστία τη δυναμική συμπεριφορά των κίωνων του μνημείου. Αυτό υποστηρίζεται όχι μόνο από το ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν συμφωνούν με αντίστοιχα στοιχεία από προγενέστερες σχετικές πειραματικές και αριθμητικές εργασίες, αλλά και από το ότι δεν έρχονται σε αντίθεση με την κατάσταση στην οποία διατηρούνται οι κίονες του ναού. Με βάση το συμπέρασμα αυτό μπορούν να διατυπωθούν οι παρακάτω εκτιμήσεις, οι οποίες προέκυψαν από τα αποτελέσματα των αριθμητικών διερευνήσεων, σχετικές με τη σεισμική απόκριση των κίωνων του περιστυλίου του ναού των Βασσών.

Οι κίονες της περίπτωσης του ναού, εφόσον διατηρούν τους σπονδύλους τους χωρίς επικίνδυνες ρωγμές και με άθικτες εδράσεις, βρίσκονται σε κατακόρυφη στάση και εδράζονται σε δύσκαμπτη βάση, δύνανται να αντιστέκονται σε σημαντικές σεισμικές δράσεις, μεγαλύτερες από τις δράσεις που εφαρμόζουν σε αυτούς οι συνήθεις σεισμικές δονήσεις της περιοχής. Κατά συνέπεια, μετά την ολοκλήρωση των εργασιών αποκατάστασης του μνημείου και την εξασφάλιση των προϋποθέσεων ευστάθειας που αναφέρθηκαν προηγουμένως, ο κίνδυνος κατάρρευσης από σεισμικά αίτια που θα απειλεί τους κίονες θα είναι μικρός.

Ο διαφορετικός αριθμός των σπονδύλων, που διαθέτουν οι κίονες του ναού, δεν επιφέρει ουσιαστική διαφοροποίηση στην αντισεισμική ικανότητά τους. Οι αποκλίσεις από την κατακόρυφο που παρουσιάζουν οι κίονες στην υπάρχουσα κατάσταση του μνημείου επιδρούν επιβαρυντικά στη σεισμική αντοχή τους. Η μείωση στο όριο ανατροπής των κίωνων προσεγγίζει στις περιπτώσεις με τις μεγαλύτερες τιμές αποκλίσεων, περίπου, το 50% του ορίου που θα διέθεταν ιστάμενοι κατακόρυφα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Καθοριστικός παράγων για την επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσης πτυχιακής εργασίας, υπήρξε η βοήθεια και καθοδήγηση του επιβλέποντος Δρ. καθηγητή κ. Νικολάου Καθρέπτα, τον οποίον και ευχαριστούμε θερμά.

Επίσης ευχαριστούμε πολύ τον αγαπητό φίλο κ. Δημήτριο Γιαννούλη Υπσγό της Πολεμικής Αεροπορίας, για τις πολύτιμες συμβουλές του στον τρόπο κατάρτισης της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστούμε τα μέγιστα τους γονείς μας, που μας έδειξαν τον δρόμο και μας στήριξαν να φθάσουμε ως εδώ.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

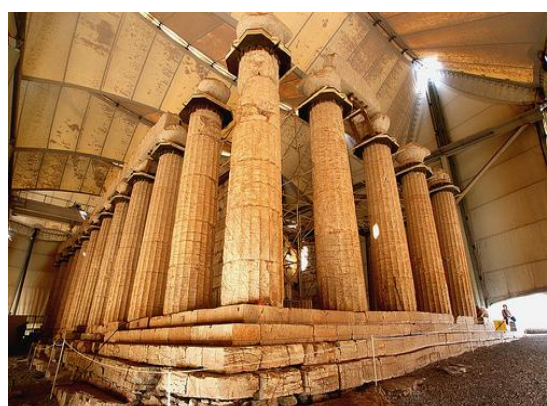
- 1) Μ.-Ε. Δασίου, Χ. Μουζάκης, Ι. Ψυχάρης, Κ. Παπαντωνόπουλος, Ι. Βάγιας, «Πειραματική διερεύνηση κιόνων και κιονοστοιχιών αρχαίων ναών», 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας 5–7 Νοεμβρίου 2008.
- 2) Κωνσταντίνος Παπαδόπουλος, Ελισάβετ Βιντζιλάου, «Η Σεισμική Απόκριση των Κιόνων της Περίστασης του Ναού του Επικούριου Απόλλωνα», 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας 5–7 Νοεμβρίου 2008.
- 3) Λοΐζος Παπαλοΐζου, Παναγιώτης Πολυκάρπου, Πέτρος Κωμοδρόμος, «Σεισμική απόκριση αρχαίων κιόνων και κιονοστοιχιών», 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας 5–7 Νοεμβρίου 2008.
- 4) Μ.-Ε. Δασίου, Ι. Ψυχάρης, Ι. Βάγιας, «Ανάλυση σεισμικής συμπεριφοράς κιόνων και κιονοστοιχιών αρχαίων ναών», 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας 5–7 Νοεμβρίου 2008).
- 5) Ν. Αργυρίου, Κ. Πιτιλάκης, Α. Σέξτος, «Αριθμητική μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς σφονδυλωτών κατασκευών».ΥΠ.ΠΟ.Ερευνητικό Πρόγραμμα «ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ ΙΙ» 2002.
- 6) Γ. Ν. Ψυχάρης, «Σεισμική συμπεριφορά αρχαίων μνημείων και ιστορικών κατασκευών», Αθήνα 2009.
- 7) Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.), «Σεισμός- η γνώση είναι προστασία».

Διαδικτυακοί Σύνδεσμοι:

1. «Εισαγωγή στη χρήση του ABAQUS», <http://www.scribd.com/doc/38430579/abaqus>.
2. Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας Ε.Μ.Π., Αθήνα. <http://lee.civil.ntua.gr/istoria.html>
3. Σελίδες Ιστορίας και Επιστήμης, «Ο ναός του Επικούριου Απόλλωνα στις Βάσσειες», http://history-pages.blogspot.gr/2012/05/blog-post_08.html

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ο ΝΑΟΣ ΤΟΥ ΕΠΙΚΟΥΡΙΟΥ ΑΠΟΛΛΩΝΑ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΕΙΚΟΝΕΣ



ΣΥΝΕΧΕΙΑ ...



Εικόνες 1-8. Ο Ναός όπως διασώζεται σήμερα, ύστερα από τις εργασίες αποκατάστασης και συντήρησής του.



Εικόνα 9. Το στέγαστρο, που προστατεύει το ευαίσθητο οικοδομικό υλικό από τις ακραίες καιρικές συνθήκες της περιοχής, το αντισεισμικό ικρίωμα και οι άλλες εγκαταστάσεις είναι προσωρινά, για όσο διάστημα απαιτήσουν οι σωστικές εργασίες.