



**ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ**



**2°**

**ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ  
ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ  
& ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΤΟΜΟΣ Α'**

**Θ Ε Σ Σ Α Λ Ο Ν Ι Κ Η  
Μ Α Κ Ε Δ Ο Ν Ι Α Π Α Λ Λ Α Σ  
28 - 30, Νοεμβρίου, 2001**

**ΜΕ ΤΗ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ**

**Ο.Α.Σ.Π. - Ι.Τ.Σ.Α.Κ. - Σ.Π.Μ.Ε.**



## Αριθμητική και Πειραματική Διερεύνηση της Σεισμικής Συμπεριφοράς Αρχαίων Μνημείων

### Numerical and Experimental Investigation of the Earthquake Response of Classical Monuments

ΨΥΧΑΡΗΣ Ι.	Πολιτικός Μηχανικός, Επικ. Καθηγητής, Ε.Μ.Π.
ΠΑΠΑΣΤΑΜΑΤΙΟΥ Δ.†	Πολιτικός Μηχανικός, πρ. Αναπλ. Καθηγητής, Ε.Μ.Π.
ΚΑΡΥΔΗΣ Π.	Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Ε.Μ.Π.
ΠΑΠΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ Κ.	Πολιτικός Μηχανικός
ΑΛΕΞΑΝΔΡΗΣ Α.	Πολιτικός Μηχανικός, ΟΤΜ Α.Τ.Ε.
ΜΟΥΖΑΚΗΣ Χ.	Πολιτικός Μηχανικός, Ε.Τ.Ε.Π., Ε.Μ.Π.
ΖΑΜΠΑΣ Κ.	Πολιτικός Μηχανικός
LEMOS J.V.	Πολιτικός Μηχανικός, N.L.C.E., Lisbon, Portugal

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς αρχαίων μνημείων είναι ένα δύσκολο πρόβλημα λόγω της σπονδυλωτής τους κατασκευής, που μπορεί να αντιμετωπιστεί μόνο με αριθμητικές μεθόδους. Η σεισμική απόκριση είναι έντονα μη-γραμμική και παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία ακόμη και σε ασήμαντες αλλαγές των παραμέτρων. Σε αυτή την εργασία γίνεται μία διερεύνηση της συμπεριφοράς τόσο μέσω πειραμάτων όσο και μέσω αριθμητικών αναλύσεων. Η αξιοπιστία των αριθμητικών μεθόδων επαληθεύεται με σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα και γίνεται μία παραμετρική διερεύνηση της επιρροής των χαρακτηριστικών της διέγερσης, της γεωμετρίας της κατασκευής και διαφόρων ατελειών στην πιθανότητα κατάρρευσης.

**ABSTRACT:** The investigation of the dynamic response of classical monuments is a difficult problem, due to their segmental construction by individual stone blocks, which can only be handled through numerical methods. The earthquake response is highly nonlinear and it shows a great sensitivity to even trivial changes of the parameters. In this work, the seismic response is investigated through experimental results and numerical analyses. The efficiency of the numerical methods is verified by comparing the numerical results with the experimental data and a parametric investigation of the effect of the base motion characteristics, the geometry and several imperfections to the possibility of collapse is performed.

#### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς αρχαίων μνημείων είναι ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα, αλλά και πολύ σημαντικό για την αναστήλωση και τη συντήρηση. Προηγούμενες μελέτες δείχνουν ότι αυτές οι κατασκευές είναι γενικώς πολύ ανθεκτικές σε σεισμικές δονήσεις εάν δεν έχουν υποστεί σημαντικές ζημιές, γεγονός που αποδεικνύεται και από το ότι πολλές από αυτές παραμένουν όρθιες για σχεδόν 2500 χρόνια. Η φθορά όμως, που έχουν υποστεί πολλά μνημεία, μειώνει σημαντικά την ευστάθειά τους, με αποτέλεσμα να είναι ορατός ο κίνδυνος κατάρρευσης σε ένα ισχυρό σεισμό.

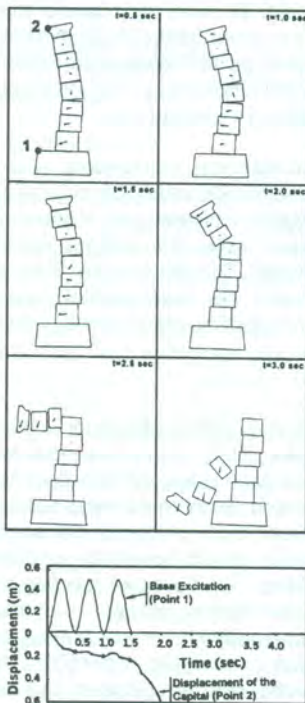
Τα κατακόρυφα φέροντα στοιχεία των κλασικών μνημείων (κίονες, τοίχοι)

αποτελούνται από ανεξάρτητα δομικά υλικά (σπόνδυλοι, λίθοι), που τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο χωρίς συνδετικό κονίαμα. Για το λόγο αυτό, κατά τη διάρκεια ενός σεισμού τα στοιχεία αυτά μπορούν να ολισθήσουν μεταξύ τους και να λικνιστούν, ανεξάρτητα ή σε ομάδες. Η δυναμική απόκριση ενός τέτοιου συστήματος στερεών σωμάτων είναι έντονα μη-γραμμική και πολύπλοκη, επειδή η κατασκευή συνεχώς αλλάζει "μορφή" ταλάντωσης κατά τη διάρκεια της δόνησης, με διαφορετικούς αρμούς να είναι ανοικτοί κάθε στιγμή. Το πλήθος των δυνατών "μορφών" ταλάντωσης αυξάνεται εκθετικά με τον αριθμό των σωμάτων που αποτελούν την κατασκευή. Για το λόγο αυτό, η αναλυτική επίλυση ενός συστήματος πολλών σωμάτων είναι πρακτικά αδύνατη. Ένα παράδειγμα



ταλάντωσης ενός κίονα, που οδηγεί σε κατάρρευση, φαίνεται στο Σχήμα 1, όπου έχει σχεδιαστεί η παραμορφωμένη κατασκευή σε διάφορες χρονικές στιγμές.

Μία χαρακτηριστική ιδιότητα της συμπεριφοράς είναι η εξαιρετική ευαισθησία της ακόμη και σε ασήμαντες αλλαγές των παραμέτρων. Για παράδειγμα, πειράματα σεισμικής απόκρισης ενός κίονα, που έγιναν στο σεισμικό προσομοιωτήρα του Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π., έδειξαν ότι επανάληψη του ίδιου πειράματος μπορεί να οδηγήσει σε αρκετά διαφορετικά αποτελέσματα, λόγω μη ελεγχόμενων μικροδιαφορών στην αρχική τοποθέτηση του κίονα. Χαρακτηριστικό είναι και το γεγονός ότι ένας κίονας μπορεί να αντρέπεται για μία συγκεκριμένη σεισμική δόνηση και να μην ανατρέπεται για την ίδια δόνηση, μεγεθυνημένη με ένα συντελεστή μεγαλύτερο της μονάδας.



Σχήμα 1. Λικνισμός και κατάρρευση ενός κίονα υπό αρμονική διέγερση.

Figure 1. Vibration and collapse of a column under harmonic excitation.

Η δυναμική συμπεριφορά μιας σπονδυλωτής κατασκευής διέπεται από τους ίδιους βασικούς κανόνες με την απόκριση ενός λικνιζόμενου σώματος. Και σε αυτή την απλούστερη δυνατή περίπτωση, όμως, η απόκριση είναι εξίσου μη γραμμική και ευαίσθητη στις παραμέτρους. Παρά τη φαινομενική του απλότητα, και αυτό το πρόβλημα είναι πολύπλοκο στην ανάλυσή του, και έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές τον τελευταίο αιώνα. Αντίθετα, σχετικά λίγες εργασίες έχουν παρουσιαστεί πάνω στη δυναμική συμπεριφορά πολύπλοκων συστημάτων πολλών στερεών σωμάτων. Ένας αρκετά εμπειριστικώς κατάλογος των εργασιών που έχουν γίνει σε αυτό το θέμα μπορεί να βρεθεί στην εργασία των Papantonopoulos et al (2001).

Ενώ η αναλυτική αντιμετώπιση του προβλήματος είναι πρακτικά ανέφικτη, η εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων φαίνεται πως μπορεί να προσεγγίσει αρκετά ικανοποιητικά το φαινόμενο. Για παράδειγμα, προηγούμενες μελέτες (Papastamatiou and Psycharis, 1993, Psycharis et al, 1993) έδειξαν ότι η μέθοδος των διακριτών στοιχείων (Distinct Element Method), που πρωτοεφαρμόστηκε από τον Cundall (Cundall, 1971), είναι μία αποτελεσματική μέθοδος για τη μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς αρχαίων μνημείων. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία έχουν προκύψει με χρήση των προγραμμάτων UDEC (Itasca, 1993), δύο διαστάσεων, και 3DEC (Itasca, 1994), τριών διαστάσεων.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας που διεξάγεται στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας Ε.Μ.Π. τα τελευταία χρόνια πάνω σε αυτό το θέμα. Στην αρχή παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα της σεισμικής απόκρισης ενός ομοιώματος ενός κίονα του Παρθενώνα, σε κλίμακα 1:3. Στη συνέχεια γίνεται μία σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων του προγράμματος 3DEC με τα πειραματικά δεδομένα, με σκοπό τη διερεύνηση της αξιοπιστίας του αριθμητικού κώδικα. Τέλος, γίνεται μία παραμετρική διερεύνηση της επιρροής διαφόρων παραγόντων στον κίνδυνο κατάρρευσης αρχαίων μνημείων υπό αρμονική και σεισμική διέγερση. Η διερεύνηση αυτή γίνεται με χρήση του προγράμματος UDEC.

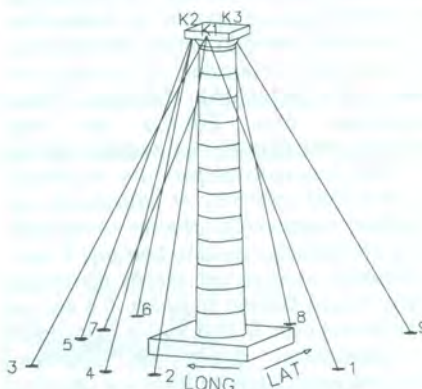
## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΝΟΣ ΚΙΟΝΑ

### 2.1. Πειραματική διάταξη

Τα πειράματα διενεργήθησαν στο σεισμικό προσομοιωτήρα του Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. σε ένα



μοντέλο ενός κίονα του Παρθενώνα σε κλίμακα 1:3 (Σχήμα 2). Το προσομοίωμα είχε κατασκευαστεί από μάρμαρο, αποτελούσαν από 12 ισουψείς σπονδύλους ύψους 0.26 m και ένα κιονόκρανο ύψους 0.22 m και εδραζόταν σε επίσης μαρμάρινη βάση. Η διάμετρος στη βάση ήταν 0.547 m και στην κορυφή 0.40 m και το συνολικό ύψος ήταν 3.34 m.



Σχήμα 2. Φωτογραφία και διάταξη σύνδεσης βελομέτρων του πειραματικού μοντέλου του κίονα.  
Figure 2. Photograph and displacement transducers setup of the multi-block column model.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη διαμόρφωση των αρμών των σπονδύλων. Για να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη επιφάνεια επαφής μεταξύ γειτονικών σπονδύλων, ο κίονας κατασκευάστηκε κατ' αρχήν σε ένα ενιαίο κομμάτι, το οποίο στη συνέχεια χωρίστηκε στους σπονδύλους, ώστε να δημιουργηθούν κατοπτρικές επιφάνειες. Πριν την κοπή των σπονδύλων, δέκα ευθείες γραμμές διαφορετικών χρωμάτων σχεδιάστηκαν περιμετρικά, κατά μήκος του κίονα, ώστε να είναι δυνατή η επανατοποθέτηση των σπονδύλων σύμφωνα με τον αρχικό τους προσανατολισμό. Οι ευθείες αυτές χρησίμευσαν και για τη μέτρηση των παραμενουσών γωνιών στροφής γύρω από τον κατακόρυφο άξονα του κίονα. Επίσης, για την αποφυγή της θραύσης των ακμών κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, δημιουργήθηκε μία εγκοπή στην περίμετρο κάθε σπονδύλου, βάθους 1.0 cm και πάχους 0.5 mm.

Για την καταγραφή της συμπεριφοράς του κίονα χρησιμοποιήθηκαν τόσο επιταχυνσιογράφοι όσο και βελομέτρα.

Επιταχυνσιογράφοι τοποθετήθηκαν σε όλο το ύψος του μοντέλου, ένας σε κάθε σπόνδυλο και δύο στο κιονόκρανο. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι οι καταγραφές των επιταχυνσιογράφων δεν είναι άμεσα χρησιμοποιήσιμες επειδή περιέχουν ένα ποσοστό της επιτάχυνσης της βαρύτητας που θα πρέπει να αφαιρεθεί. Το ποσοστό αυτό της βαρύτητας προέρχεται από τη στροφή των σπονδύλων, γύρω από οριζόντιο άξονα, κατά τη διάρκεια του λικνισμού. Για να αφαιρεθεί αυτό το ποσοστό από τις καταγραφές πρέπει να είναι γνωστή η γωνία στροφής κάθε σπονδύλου, κάθε χρονική στιγμή. Αυτό θα απαιτούσε την πλήρη καταγραφή της κίνησης όλων σπονδύλων, που δεν έγινε στα συγκεκριμένα πειράματα. Για το λόγο αυτό, οι καταγραφές των επιταχυνσιογράφων χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή ποιοτικών και όχι ποσοτικών συμπερασμάτων.

Τα βελομέτρα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ειδικού τύπου, με πολύ μικρή ακαμψία, για να μην επηρεάζουν την απόκριση του κίονα. Χρησιμοποιήθηκαν εννέα όργανα, που



ήταν στερεωμένα στη σεισμική τράπεζα και συνδέονταν σε ομάδες των τριών με τις τρεις πλευρές του κιονόκρανου μέσω λεπτών συρμάτων (Σχήμα 2). Η διάταξη της σύνδεσης επελέγη με κατάλληλο τρόπο, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός της μετακίνησης του κιονόκρανου από τις καταγραφές των οργάνων.

Ως διέγερση βάσης χρησιμοποιήθηκαν τρεις σεισμικές δονήσεις με αρκετά διαφορετικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν: ο σεισμός της Καλαμάτας της 13-9-1986 ( $M_s=6.2$ ), όπως καταγράφηκε στο κτίριο της Νομαρχίας, ο σεισμός της Γρίβας της 21-12-1990 ( $M_s=5.9$ ), όπως καταγράφηκε στην Έδεσσα, και ένας μετασεισμός του σεισμού της Κεφαλονιάς της 17-1-1983, που καταγράφηκε στο Αργοστόλι στις 24-3-1983 ( $M_s=5.5$ ). Η καταγραφή της Καλαμάτας παρουσιάζει μέγιστη επιτάχυνση 0.27 g και διάρκεια ισχυρής δόνησης 6 sec, της Έδεσσας περιέχει μία σχεδόν ημιτονικής μορφής ισχυρή δόνηση περιόδου 0.6 sec με μέγιστη επιτάχυνση 0.10 g, ενώ η καταγραφή του Αργοστολίου δείχνει μία υψίσυχη κίνηση, διάρκειας περίπου 2 sec και μέγιστης επιτάχυνσης 0.31 g. Οι καταγραφές αυτές πολλαπλασιάστηκαν με κατάλληλους συντελεστές, έτσι ώστε οι δονήσεις να είναι αρκετά ισχυρές για να προκαλέσουν σημαντικές μετακινήσεις και λικνισμό στους σπονδύλους, χωρίς όμως κίνδυνο κατάρρευσης.

## 2.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Ενδεικτικά διαγράμματα των αποτελεσμάτων φαίνονται στα Σχήματα 3, 4 και 5 για τις τρεις σεισμικές δονήσεις.

Ένα σημαντικό συμπέρασμα που προέκυψε από τα πειράματα είναι ότι η τελική μόνιμη παραμόρφωση του κίονα δεν αποτελεί ένδειξη του μεγέθους των μετακινήσεων που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της δόνησης. Έτσι, υπήρξαν περιπτώσεις που ο κίονας παρουσίασε σημαντικό λικνισμό και στροφές γύρω από κατακόρυφο άξονα κατά τη διάρκεια του σεισμού, αλλά στο τέλος του πειράματος είχε επανέλθει σχεδόν στην αρχική του θέση, με πολύ μικρές μόνιμες ματατοπίσεις. Επομένως, είναι λάθος να προσπαθήσει κάποιος να βγάλει συμπεράσματα για το εάν

ένα μνημείο κινδύνευσε ή όχι κατά τη διάρκεια ενός σεισμού μόνο από παρατηρήσεις των παραμενουσών παραμορφώσεων.

Ένα άλλο συμπέρασμα ήταν ότι για καθαρά επίπεδη διέγερση, η κίνηση του κίονα δεν περιοριζόταν στο επίπεδο της δόνησης, αλλά προέκυψαν και σημαντικές μετακινήσεις εκτός επιπέδου. Σε πολλές περιπτώσεις, οι μεγαλύτερες μόνιμες παραμορφώσεις συνέβησαν σε διεύθυνση διαφορετική από αυτή της διέγερσης. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στη μικρή επιφάνεια επαφής κατά τη διάρκεια του λικνισμού, λόγω της κυκλικής διατομής των σπονδύλων, η οποία επιτρέπει την έναρξη της εκτός επιπέδου κίνησης, ακόμη και για πολύ μικρές αδρανειακές δυνάμεις σε αυτή τη διεύθυνση, που προκαλούνται από τις αναπόφευκτες ατέλειες.

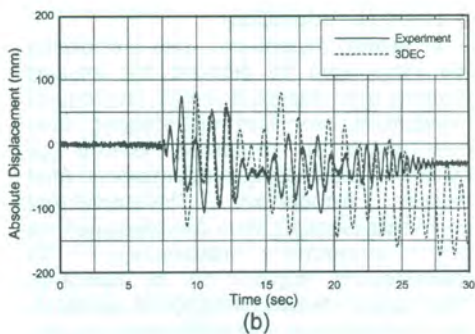
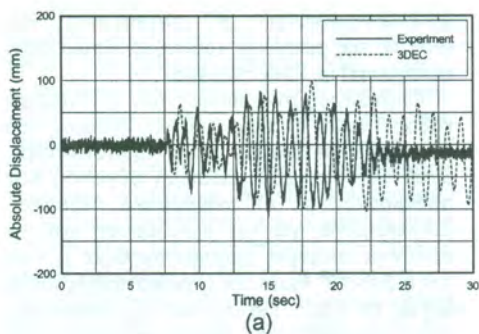
## 2.3. Επαναληψιμότητα των πειραμάτων

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η δυναμική συμπεριφορά είναι πολύ ευαίσθητη ακόμη και σε ασήμαντες αλλαγές των χαρακτηριστικών του συστήματος ή της διέγερσης. Για το λόγο αυτό, επανάληψη του ίδιου πειράματος έδινε διαφορετικά αποτελέσματα, αφού δεν ήταν δυνατόν να επιτευχθούν ακριβώς οι ίδιες αρχικές συνθήκες. Από μετρήσεις που έγιναν, διαπιστώθηκε ότι ακόμη και η κίνηση της σεισμικής τράπεζας μπορούσε να είναι έως 4% διαφορετική για επανάληψη του ίδιου πειράματος.

Η επαναληψιμότητα των πειραμάτων ελέγχθηκε σε αρκετές περιπτώσεις. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 5 για το σεισμό του Αργοστολίου. Οι διαφορές που παρατηρήθηκαν μπορούν να καταταγούν σε τρεις κατηγορίες:

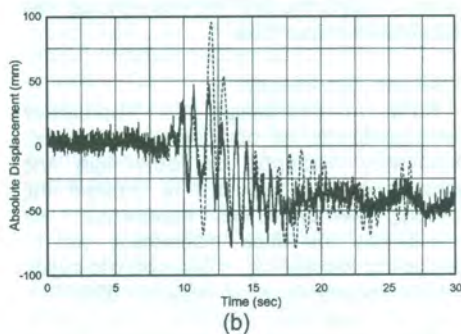
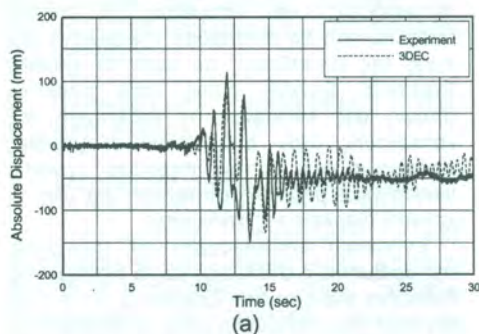
### A. Ολίσθηση

Σε μερικές περιπτώσεις, η γενική μορφή της απόκρισης του κίονα ήταν ίδια, αλλά σε ένα από τα ίδια πειράματα συνέβαινε μία σημαντική ολίσθηση. Μία τέτοια περίπτωση είναι αυτή του Σχήματος 5, όπου στο πείραμα EQ15 συνέβη μία ολίσθηση της τάξης των 50 mm, η οποία δεν συνέβη στο EQ14. Εκτός από αυτή την ολίσθηση, η μορφή της απόκρισης ήταν αρκετά παρόμοια στα δύο πειράματα.



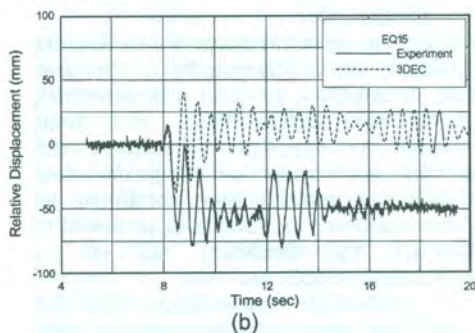
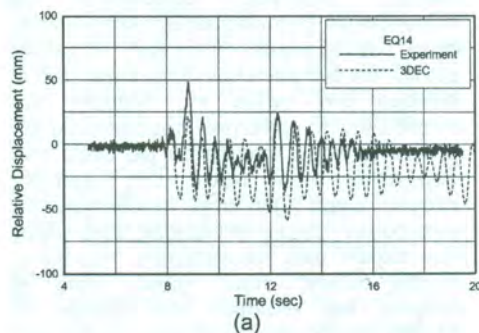
Σχήμα 3. Μετακίνηση του κιονόκranου για το σεισμό της Καλαμάτας: (α) διαμήκης διεύθυνση, (β) εγκάρσια διεύθυνση.

Figure 3. Displacement of the capital for the Kalamata record: (a) longitudinal direction; (b) transverse direction.



Σχήμα 4. Μετακίνηση του κιονόκranου για το σεισμό της Έδεσσας: (α) διαμήκης διεύθυνση, (β) εγκάρσια διεύθυνση.

Figure 4. Displacement of the capital for the Edessa record: (a) longitudinal direction; (b) transverse direction.



Σχήμα 5. Διαμήκης μετακίνηση του κιονόκranου για το σεισμό του Αργοστολίου. Το πείραμα επανηλήφθη δύο φορές: (α) πείραμα EQ14, (β) πείραμα EQ15.

Figure 5. Longitudinal displacement of the capital for the Argostoli record. The same experiment was repeated twice: (a) experiment EQ14; (b) experiment EQ15.



## B. Ελεύθερες ταλαντώσεις

Σε μερικές περιπτώσεις, ενώ η απόκριση του κίονα κατά τη διάρκεια της ισχυρής δόνησης ήταν παρόμοια μεταξύ ταυτόσημων πειραμάτων, στο τέλος της δόνησης, όταν στην ουσία η κατασκευή εκκινεί με ελεύθερες ταλαντώσεις, η συμπεριφορά ήταν τελείως διαφορετική. Παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές τόσο στο εύρος όσο και στη συχνότητα ταλάντωσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, σε ορισμένες περιπτώσεις, ο κίονας συνέχιζε να κινείται με σημαντικό λικνισμό μετά το τέλος της ισχυρής δόνησης. Αυτό πιθανόν να οφείλεται σε ασήμαντες αλλαγές που συνέβησαν στις επιφάνειες επαφής μεταξύ των σπονδύλων, οι οποίες όμως ήταν ικανές να προκαλέσουν αρκετά διαφορετική συμπεριφορά σε λικνισμό, λόγω της μεγάλης ευαισθησίας που αναφέρθηκε παραπάνω.

## Γ. Μέγιστη μετακίνηση

Κατά την επανάληψη των πειραμάτων παρατηρήθηκαν, σε ορισμένες περιπτώσεις, σημαντικές διαφορές και στην τιμή της μέγιστης μετακίνησης κατά τη διάρκεια της ισχυρής δόνησης. Για παράδειγμα, σε επανάληψη του ίδιου πειράματος για το σεισμό της Καλαμάτας, η διαφορά στο εύρος της μετακίνησης ήταν της τάξης του 60%.

Πρέπει να σημειωθεί ότι μερικές φορές παρατηρήθηκαν και οι τρεις παραπάνω μορφές μη-επαναληψιμότητας, μαζί.

## 3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΜΕ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Για όλα τα πειράματα έγιναν και αριθμητικές αναλύσεις για να διαπιστωθεί η αξιοπιστία τους. Οι αναλύσεις έγιναν σε τρεις διαστάσεις με το πρόγραμμα 3DEC, που όπως αναφέρθηκε παραπάνω βασίζεται στη μέθοδο των διακριτών στοιχείων. Στον κώδικα του προγράμματος χρειάστηκε να γίνουν ορισμένες τροποποιήσεις με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσής του για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

Το αριθμητικό προσομοίωμα ήταν ένα ακριβές αντίγραφο του πειραματικού, με μόνη διαφορά ότι αντί της κυκλικής διατομής των σπονδύλων χρησιμοποιήθηκε η αντίστοιχη πολυγωνική με 10 κορυφές. Για να είναι πιο ακριβής η σύγκριση των αποτελεσμάτων, ως διεγέρσεις στις αριθμητικές αναλύσεις

χρησιμοποιήθηκαν οι συνιστώσες της κίνησης της σεισμικής τράπεζας, όπως είχαν καταγραφεί σε κάθε πείραμα.

Οι ιδιότητες στις επαφές των σπονδύλων καθορίστηκαν από τις φυσικές ιδιότητες του μαρμάρου με μικρές μόνο τροποποιήσεις, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη σύγκλιση των αριθμητικών με τα πειραματικά δεδομένα. Συγκεκριμένα, για την κατακόρυφη και την οριζόντια ακαμψία χρησιμοποιήθηκε η τιμή  $1.0$  ή  $2.0 \times 10^9$  Pa/m και η γωνία τριβής ετέθη ίση με  $35^\circ$  ή  $37^\circ$ . Για την τιμή της απόσβεσης που έπρεπε να χρησιμοποιηθεί έγινε διερεύνηση, η οποία έδειξε ότι κατά τη διάρκεια της ισχυρής δόνησης η απόσβεση μπορεί να θεθεί ίση με μηδέν. Η παραδοχή αυτή παύει να είναι καλή προς το τέλος της δόνησης, επειδή οδηγεί σε μεγάλες μετακινήσεις, και επομένως, η σωστή αντιμετώπιση θα απαιτούσε την αλλαγή της τιμής της απόσβεσης σε αυτό το χρονικό διάστημα. Επειδή, όμως, από πρακτική άποψη μας ενδιαφέρει η ταλάντωση της κατασκευής όταν συμβαίνουν οι μεγάλες παραμορφώσεις, στην παρούσα εργασία υιοθετήθηκε μηδενική απόσβεση για όλη τη χρονική διάρκεια της απόκρισης.

Ενδεικτικά αποτελέσματα της σύγκρισης της αριθμητικής ανάλυσης με τα πειραματικά δεδομένα φαίνεται στα Σχήματα 3, 4 και 5. Η ακρίβεια που επιτεύχθηκε κατά τη διάρκεια της ισχυρής δόνησης είναι πολύ ικανοποιητική, εάν λάβει κανείς υπόψη του τη μεγάλη ευαισθησία του φαινομένου, που οδηγεί στη μη επαναληψιμότητα των πειραμάτων, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Μία απόλυτη ταύτιση, επομένως, αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων είναι αδύνατη, αφού αναπόφευκτα υπάρχουν διαφορές μεταξύ των δύο μοντέλων. Έτσι, εκτός από τη διαφορά στο σχήμα της διατομής των σπονδύλων, το αριθμητικό προσομοίωμα δεν μπορεί να λάβει υπόψη του μία σειρά από παράγοντες, όπως ατέλειες στις επιφάνειες επαφής, μικρά λάθη στην τοποθέτηση των σπονδύλων, μικρές αποτιμήσεις κατά μήκος των ακμών από προηγούμενα πειράματα, είσοδο σκόνης στους αρμούς κατά τη διάρκεια του λικνισμού κλπ. Παρότι σε συνήθη προβλήματα η επιρροή αυτών των παραμέτρων είναι γενικώς μικρή, στην περίπτωση που συμβαίνει λικνισμός μπορεί να είναι σημαντική.

Στο σεισμό της Καλαμάτας (Σχήμα 3), η σύγκριση είναι ικανοποιητική, τόσο στο εύρος



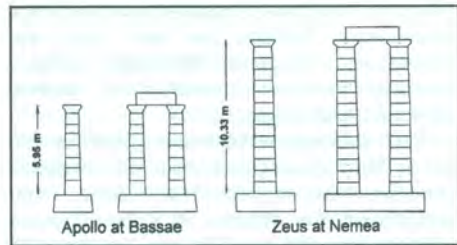
της ταλάντωσης όσο και στη συχνότητα κίνησης, εκτός από το τέλος της κίνησης, όπου η αριθμητική ανάλυση δίνει μεγάλες μετακινήσεις λόγω της μηδενικής απόσβεσης. Πολύ καλή είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων και για το σεισμό της Έδεσσας (Σχήμα 4), όπου η αριθμητική ανάλυση πρόβλεψε αρκετά ικανοποιητικά ακόμη και την ολίσθηση που συμβαίνει στους σπονδύλους. Στην περίπτωση του σεισμού του Αργοστολίου (Σχήμα 5) τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης δείχνουν επίσης καλή σύγκλιση με τα πειράματα, τόσο στη μορφή όσο και στο φασματικό περιεχόμενο της απόκρισης. Φυσικά, δεν μπόρεσαν να προβλέψουν την ολίσθηση που παρατηρήθηκε στο πείραμα EQ15, που πρέπει να οφείλεται σε κάποια μικρή αλλαγή που συνέβη στις αρχικές συνθήκες του δοκιμίου, αφού δεν εμφανίζεται στο παρόμοιο πείραμα EQ14.

#### 4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

##### 4.1. Μοντέλα και μέθοδος υπολογισμού

Η παραμετρική διερεύνηση που παρουσιάζεται εδώ αφορά στην επιρροή διαφόρων παραμέτρων στον κίνδυνο κατάρρευσης. Η ανάλυση έγινε για προσομοιώματα κίονων του ναού του Επικούριου Απόλλωνα στις Βάσσεις και του ναού του Δία στη Νεμέα. Οι κίονες των δύο αυτών ναών παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους, τόσο στο απόλυτο μέγεθος όσο και στη λυγρότητα (ο λόγος ύψους προς βάση είναι 5.36 στο ναό του Επικούριου Απόλλωνα και 6.79 στο ναό του Δία), όπως φαίνεται στο Σχήμα 6. Εκτός από τους μεμονωμένους κίονες, αναλύσεις έγιναν και για δύο κίονες που συνδέονται με επιστύλιο. Η παραμετρική διερεύνηση έγινε για αρμονική διέγερση, αλλά τα αποτελέσματα συγκρίνονται και με αυτά που προκύπτουν για σεισμικές διεγέρσεις.

Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα UDEC και η ανάλυση έγινε σε δύο διαστάσεις. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάλυση σε δύο διαστάσεις δεν μπορεί να συμπεριλάβει όλες τις παραμέτρους της απόκρισης, όπως τη στροφή γύρω από κατακόρυφο άξονα, που προέρχεται από τον ταυτόχρονο λίκνισμό και στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις, με αποτέλεσμα να οδηγεί σε μη-συντηρητικά αποτελέσματα, προβλέποντας



Σχήμα 6. Περιπτώσεις κίονων που αναλύθηκαν.

Figure 6. Systems considered in the analysis.

μεγαλύτερη ευστάθεια από μία αντίστοιχη ανάλυση σε τρεις διαστάσεις. Από την άλλη μεριά, η δισδιάστατη ανάλυση οδηγεί ευκολότερα σε ποιοτικά συμπεράσματα, επειδή ακριβώς περιορίζει την κίνηση σε ένα επίπεδο. Για το λόγο αυτό, σε αυτή την εργασία επιλέγη η δισδιάστατη ανάλυση, αφού σκοπός ήταν η εξαγωγή συγκριτικών συμπερασμάτων για την επιρροή διαφόρων παραμέτρων στον κίνδυνο κατάρρευσης και όχι η ποσοτική εκτίμηση αυτού του κινδύνου.

Στην παραμετρική διερεύνηση, εκτός από την επιρροή της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών της διέγερσης, μελετήθηκε επίσης και η επιρροή διαφόρων ατελειών, όπως αποτομήσεις σπονδύλων και αρχική κλίση του κίονα, η παρουσία των οποίων αυξάνει δραστικά τον κίνδυνο κατάρρευσης.

##### 4.2. Αρμονική διέγερση

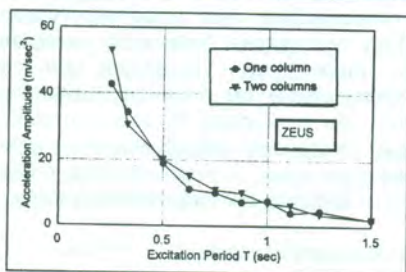
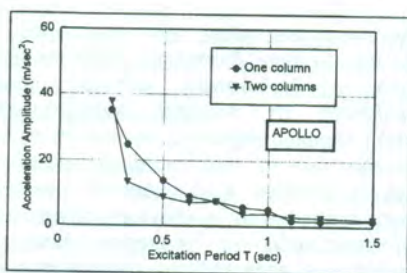
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δίνονται υπό μορφήν διαγραμμάτων που συσχετίζουν το ελάχιστο εύρος της εδαφικής επιτάχυνσης, που απαιτείται για την κατάρρευση της κατασκευής με διάφορες παραμέτρους. Σημειώνεται όμως ότι, λόγω της μη γραμμικής συμπεριφοράς, είναι δυνατόν να μη συμβαίνει κατάρρευση για διέγερση μεγαλύτερου εύρους.

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η μεγάλη επιρροή της περιόδου της διέγερσης στην πιθανότητα αστοχίας. Είναι προφανές ότι, τόσο ο μεμονωμένος κίονας όσο και η συστοιχία των δύο κίονων καταρρέουν για πολύ μικρότερη εδαφική επιτάχυνση όταν η περίοδος της εδαφικής κίνησης μεγαλώνει. Η περίοδος της διέγερσης επηρεάζει και τον τρόπο ταλάντωσης αυτών των κατασκευών. Έτσι παρατηρήθηκε ότι για υψίσυχνη



διέγερση, συνέβαινε σημαντική ολίσθηση των σπονδύλων, ιδιαίτερα στο άνω τμήμα της κατασκευής. Αντίθετα, εδαφικές κινήσεις μεγάλης περιόδου προκαλούσαν κυρίως λικνισμό στους κίονες.

Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε ότι, για τις δεσπόζουσες περιόδους των συνήθων σεισμών, οι κίονες των ναών που εξετάστηκαν δεν φαίνεται να κινδυνεύουν με κατάρρευση. Για παράδειγμα, για περίοδο 0.25 sec, ο κίονας του ναού του Απόλλωνα δεν ανατρέπεται ούτε για επιτάχυνση 3.0 g. Η τιμή όμως αυτή μειώνεται εκθετικά με την αύξηση της περιόδου.



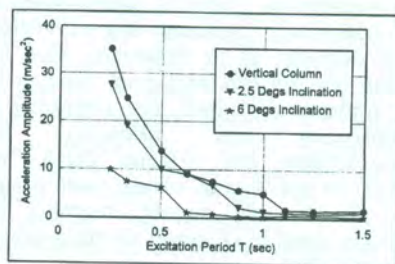
Σχήμα 7. Επιρροή της περιόδου της διέγερσης στην εδαφική επιτάχυνση που απαιτείται για κατάρρευση.

Figure 7. Dependence of the ground acceleration, required for collapse, on the period of the excitation.

Ένα άλλο ενδιαφέρον συμπέρασμα είναι ότι η σύζευξη των δύο κίονων με ένα επιστύλιο δεν φαίνεται να αλλάζει σημαντικά τον κίνδυνο κατάρρευσης, παρότι αλλάζει η κινηματική του συστήματος. Σε άλλες περιπτώσεις η σύζευξη είναι ευνοϊκή και σε άλλες δυσμενής.

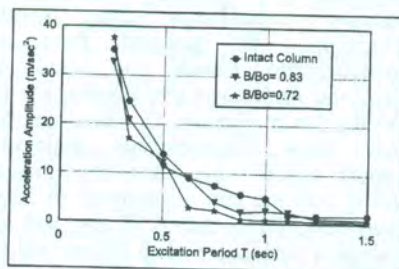
Η επιρροή δύο συνήθων τύπων ατελειών φαίνεται στα Σχήματα 8 και 9 για τον κίονα του ναού του Απόλλωνα. Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται η επιρροή της αρχικής κλίσης,

ατέλεια που απαντάται σε πολλούς κίονες του ναού του Απόλλωνα. Εξετάζονται περιπτώσεις που η αρχική κλίση είναι 2.5° και 6.0° και είναι προφανές ότι η ευστάθεια μειώνεται σημαντικά όσο η κλίση μεγαλώνει. Στην περίπτωση του ναού του Επικούριου Απόλλωνα, αυτό σημαίνει ότι κίνδυνος αστοχίας υφίσταται πλέον και για τοπικούς, υψίσχυντους σεισμούς.



Σχήμα 8. Επιρροή της αρχικής κλίσης στην επιτάχυνση που απαιτείται για κατάρρευση.

Figure 8. Dependence of the acceleration, required for collapse, on the initial inclination.



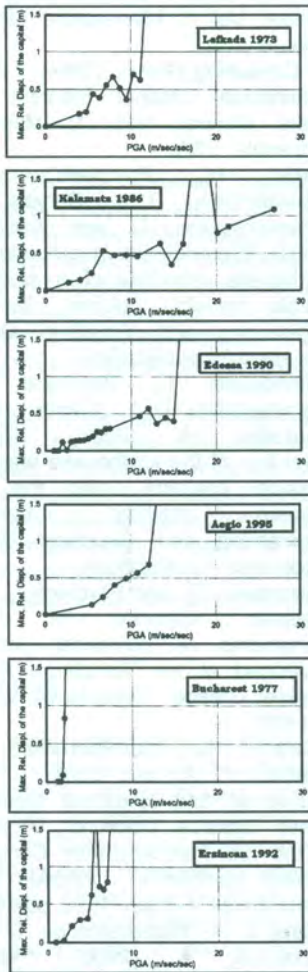
Σχήμα 9. Επιρροή της μείωσης της βάσης στην επιτάχυνση που απαιτείται για κατάρρευση.

Figure 9. Dependence of the acceleration, required for collapse, on the base reduction.

Στο Σχήμα 9 φαίνεται η επιρροή της μείωσης της επιφάνειας έδρασης στην ευστάθεια του κίονα. Η μείωση αυτή απαντάται σε πολλούς αρχαίους ναούς και οφείλεται κυρίως σε απότμηση τμήματος της βάσης από κατοίκους της περιοχής, σε μία προσπάθεια ανατροπής του κίονα.



Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η επιρροή ζημιών και ατελειών στην πιθανότητα κατάρρευσης είναι αθροιστική. Επομένως, ενώ τα αρχαία μνημεία είναι πολύ ανθεκτικά σε σεισμούς, όταν δεν παρουσιάζουν φθορές, στη σημερινή τους μορφή, με τις πολλές ζημιές που έχουν υποστεί, είναι πολύ πιο ευάλωτα και πολλές φορές απαιτούν επεμβάσεις για την αύξηση της ευστάθειάς τους.

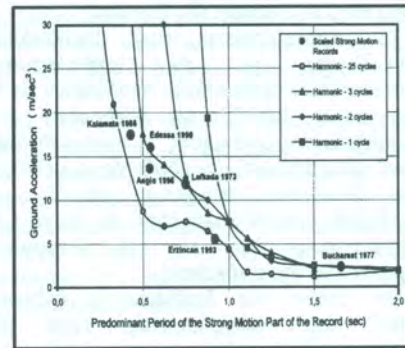


Σχήμα 10. Μέγιστη μετακίνηση της κορυφής του κίονα ανάλογα με το εύρος της σεισμικής επιτάχυνσης.  
Figure 10. Maximum top displacement versus the seismic excitation amplitude.

#### 4.3. Σεισμική απόκριση

Η σεισμική απόκριση και ο έλεγχος ανατροπής υπολογίστηκαν για διάφορους σεισμούς με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Διαγράμματα των αποτελεσμάτων δίνονται στο Σχήμα 10.

Οι αναλύσεις αυτές επεβεβαίωσαν τα συμπεράσματα της παραμετρικής διερεύνησης και έδειξαν την επιρροή της περιόδου της διέγερσης στον κίνδυνο κατάρρευσης. Έτσι, για το σεισμό του Βουκουρεστίου, ο κίονας του ναού του Απόλλωνα αστοχεί για εδαφική επιτάχυνση μόλις 0.23 g, ενώ για το σεισμό του Erzsoban για επιτάχυνση μικρότερη από 0.60 g. Και οι δύο αυτές σεισμικές δονήσεις περιέχουν παλμούς μεγάλης περιόδου. Για τους υπόλοιπους σεισμούς που εξετάστηκαν, απαιτήθηκε σημαντικά μεγαλύτερο εύρος εδαφικής επιτάχυνσης για την κατάρρευση (μεγαλύτερο από 1.2 g).



Σχήμα 11. Σύγκριση των αποτελεσμάτων για σεισμική και αρμονική διέγερση.  
Figure 11. Comparison of results for earthquake and harmonic excitation.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τις σεισμικές διεγέρσεις εξετάστηκαν και σε σύγκριση με τα αντίστοιχα για αρμονική διέγερση. Η σύγκριση αυτή δίνεται στο Σχήμα 11, όπου η απαιτούμενη εδαφική επιτάχυνση για την ανατροπή του κίονα έχει σχεδιαστεί ως προς τη δεσπόζουσα περίοδο κάθε σεισμικής κίνησης, ενώ στο ίδιο σχήμα φαίνονται και οι καμπύλες για ημιτονική διέγερση διάρκειας 1, 2, 3 και 25 κύκλων. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως οι σεισμικές διεγέρσεις ακολουθούν αρκετά καλά την καμπύλη που αντιστοιχεί σε αρμονική



εδαφική επιτάχυνση, διάρκειας τουλάχιστον τριών κύκλων.

##### 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πειραματικών και αριθμητικών αναλύσεων της δυναμικής συμπεριφοράς κίονων κλασικών μνημείων.

Τα πειράματα έγιναν σε ένα μαρμάρινο προσομοίωμα, σε κλίμακα 1:3, ενός κίονα του Παρθενώνα και έδειξαν την ευαισθησία της απόκρισης ακόμη και σε ασήμαντες αλλαγές των παραμέτρων. Για το λόγο αυτό, επανάληψη του ίδιου πειράματος οδηγούσε σε διαφορετικά αποτελέσματα. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι καθαρά επίπεδες διεγέρσεις προκαλούσαν σημαντικές παραμορφώσεις και στην εκτός επιπέδου διεύθυνση. Μία άλλη παρατήρηση των πειραμάτων ήταν ότι οι παραμένουσες παραμορφώσεις στο τέλος της διέγερσης ήταν συνήθως μικρές και δεν ήταν ενδεικτικές της σημαντικής λικνιστικής ταλάντωσης του κίονα κατά τη διάρκεια της δόνησης.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα τρισδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων με το πρόγραμμα 3DEC. Με δεδομένη την ευαισθησία της απόκρισης, η σύγκριση ήταν πολύ ικανοποιητική και έδειξε ότι η μέθοδος των διακριτών στοιχείων μπορεί να προβλέψει αρκετά καλά τόσο το εύρος των μετακινήσεων όσο και το φασματικό περιεχόμενο της απόκρισης.

Με χρήση της διδιάστατης έκδοσης UDEC του προγράμματος, έγινε μία παραμετρική διερεύνηση του εύρους της εδαφικής επιτάχυνσης που απαιτείται για να προκληθεί κατάρρευση. Εξετάστηκε η επιρροή της περιόδου μιας ημιτονικής διέγερσης καθώς και αρχικών ατελειών και συγκεκριμένα αρχικής κλίσης και μειωμένης βάσης έδρασης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η πιθανότητα αστοχίας αυξάνεται σημαντικά για διεγέρσεις μεγάλης περιόδου και για κίονες με αρχικές ζημιές. Για σεισμικές διεγέρσεις, προκύπτουν ανάλογα συμπεράσματα, τα οποία είναι συγκρίσιμα με τα αντίστοιχα για αρμονική δόνηση διάρκειας τουλάχιστον τριών κύκλων.

##### 6. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία έχει γίνει στα πλαίσια του προγράμματος 61/0578 (ΠΕΝΕΔ) της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας και

του προγράμματος EV5V CT93 0300 (πρόγραμμα Environment) της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

##### 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Cundall, P. A. (1971), "Computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems", Proc. symp. int. soc. rock mech., Vol. 1, paper No. II-8, Nancy, France.
- Itasca Consulting Group, (1993), "UDEC, Universal Distinct Element Code", Users Manual, Vol. 1, Minneapolis, Minnesota, USA.
- Itasca Consulting Group, (1994), "3DEC: 3-Dimensional Distinct Element Code", Users Manual, Vol. 1, Minneapolis, Minnesota, USA.
- Mouzakis, H., Psycharis, I. N., Papastamatiou, D. Y., Carydis, P. G., Papantonopoulos, C. and Zambas, C. (2001), "Experimental investigation of the earthquake response of a model of a marble classical column", Earthquake Engineering and Structural Dynamics (accepted for publication).
- Papantonopoulos, C., Psycharis, I. N., Papastamatiou, D. Y., Lemos, J. V. and Mouzakis, H. (2001), "Numerical prediction of the earthquake response of classical columns using the distinct element method", Earthquake Engineering and Structural Dynamics (accepted for publication).
- Papastamatiou, D. and Psycharis, I. (1993), "Seismic response of classical monuments. A numerical perspective developed at the Temple of Apollo in Bassae, Greece", Terra Nova, Vol. 5, pp 591-601.
- Psycharis, I. N., Papastamatiou, D. Y., Cundall, P. A. and Lorig, L. (1993), "Numerical and Analytical Modeling of Greek Classical Columns", Proceedings of the 3rd Pan American Congress of Applied Mechanics - PACAM III, Sao Paulo, Brasil, 4-8 Jan. 1993, pp 487-490.
- Psycharis, I. N., Papastamatiou, D. Y. and Alexandris, A. (2000), "Parametric Investigation of the Stability of Classical Columns under Harmonic and Earthquake Excitations", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 29, pp 1093-1109.