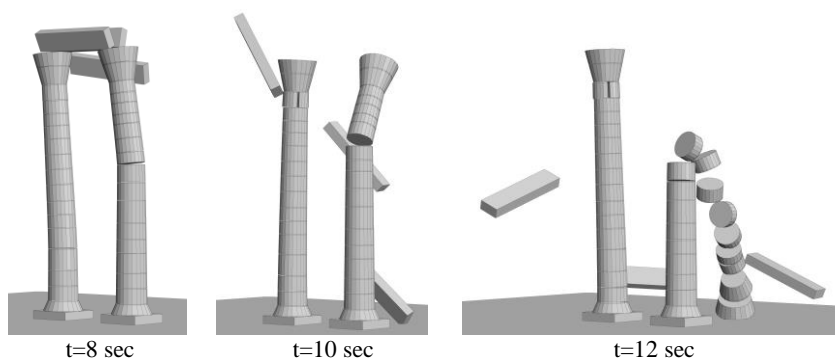




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

# ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΣΤΥΛΩΝ ΤΟΥ ΟΛΥΜΠΙΟΥ ΔΙΟΣ - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΙΣΤΟΡΙΑΣ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ

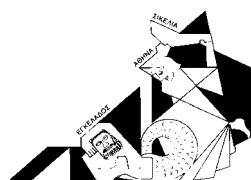
Τελική Εκθεση  
Ερευνητικού Προγράμματος  
του Ο.Α.Σ.Π.



## ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΟΜΑΔΑ

Ι. Ψυχάρης (Επιστημονικός Υπεύθυνος)  
Μ. Κορρές  
Κ. Παπαντωνόπουλος  
Ι. Ταφλαμπάς  
Σ. Σουάνης  
J.V. Lemos

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗ:  
NTUA/LEE-05/01  
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2005



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Αθήνα



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ  
ΣΤΥΛΩΝ ΤΟΥ ΟΛΥΜΠΙΟΥ ΔΙΟΣ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ  
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΙΣΤΟΡΙΑΣ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ**

Τελική Εκθεση  
Ερευνητικού Προγράμματος  
του Ο.Α.Σ.Π.

**ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΟΜΑΔΑ**

Επιστημονικός Υπεύθυνος

Ι. Ψυχάρης, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μέλη

Μ. Κορρές, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. Παπαντωνόπουλος, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Ι. Ταφλαμπάς, Πολιτικός Μηχανικός

Σ. Σουάνης, Πολιτικός Μηχανικός

J.V. Lemos, Ph. D., LNEC, Lisbon, Portugal

ΑΘΗΝΑ  
Φεβρουάριος 2005

*Στον αείμνηστο φίλο και συνεργάτη*

***Δημήτρη Παπασταματίου***

*..... έγινεν συν τοις άλλοις η παρατήρησις ότι η έκσπασις και από της φυσικής των θέσεως αποκίνησις των τυμπάνων αρχαίων στύλων σημαίνει ότι και την Αττικήν, ιδίως δε τας Αθήνας συνετάραξαν κατά την μακράν περίοδον των αιώνων σφοδροί σεισμοί.*

*Η παρατήρησις αύτη είνε ορθοτάτη, θα ηδυνάμεθα δε να εξετάσωμεν ακριβέστερον τας ζημίας άς επήνεγκον οι σεισμοί εις την πόλιν κατά διαφόρους χρόνους, άν η ιστορία διεφύλασεν ημίν πλήρη κτάλογον των γενομένων σεισμών. Αλλά τοιαύται ακριβείς σημειώσεις ελλείπουσι δυστυχώς και μόνον σποραδικάς μανθάνομεν ειδήσεις.*

*Σπυρίδων Λάμπρος  
Περιοδικόν «Εστία»  
10 Μαΐου 1881*





# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b>	v
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	
ΓΕΝΙΚΑ	1.1
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	1.3
ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΡΧΑΙΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ	1.6
ΧΡΟΝΙΚΟ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΒΛΑΒΩΝ ΣΤΑ ΜΝΗΜΕΙΑ ΤΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ	1.7
<b>2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ</b>	
ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΗΣ ΑΝΕΓΕΡΣΗΣ ΤΟΥ ΝΑΟΥ ΤΟΥ ΟΛΥΜΠΙΟΥ ΔΙΑ	2.1
Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ ΝΑΟΥ	2.5
ΕΡΕΙΠΩΣΗ ΤΟΥ ΜΝΗΜΕΙΟΥ ΚΑΙ ΣΩΣΤΙΚΕΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ	2.10
<b>3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ</b>	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3.1
Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	3.2
ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	3.8
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	3.19
<b>4. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΓΙΑ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ</b>	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4.1
ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	4.2
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	4.4

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ .....	4.23
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	4.27
<b>5. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΙΣΤΟΡΙΑΣ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ</b>	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5.1
ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ .....	5.3
ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ .....	5.8
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ .....	5.15
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	5.73
<b>6. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΕ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΥΣ ΣΕΙΣΜΟΥΣ</b>	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6.1
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ .....	6.4
ΚΙΟΝΕΣ 7.5 ΚΑΙ 7.6 .....	6.8
ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΓΩΝΙΑ .....	6.19
ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΓΩΝΙΑ .....	6.35
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	6.49
<b>7. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ</b>	
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ.....	7.1
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΙΣΤΟΡΙΑΣ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ .....	7.2
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΕ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΥΣ ΣΕΙΣΜΟΥΣ .....	7.4
<b>8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς των κατασκευών της κλασικής αρχαιότητας είναι εξαιρετικά ενδιαφέρον θέμα, όχι μόνο γιατί συνδέεται άμεσα με τη συντήρηση και αναστήλωση των αρχαίων μνημείων, αλλά και γιατί οι κατασκευές αυτές είναι γενικώς πολύ ανθεκτικές σε σεισμικές δονήσεις. Η τελευταία παρατήρηση αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον αν αναλογιστεί κανείς τον μη μονολιθικό τρόπο δόμησής τους, που βασίζεται μόνο στις δυνάμεις τριβής, αφού οι λίθοι των τοίχων και οι σπόνδυλοι των κιόνων τοποθετούνται ο ένας πάνω στον άλλο χωρίς συνδετικό υλικό μεταξύ τους. Η καλή αντισεισμική συμπεριφορά αυτών των κατασκευών αποδεικνύεται αναλυτικά, έχει όμως αποδειχθεί και εμπράκτως, από το γεγονός ότι πολλά τμήματα των αρχαίων μνημείων εξακολουθούν να στέκουν όρθια, 2500 χρόνια μετά την κατασκευή τους, σε εξαιρετικά σειсмоγενείς περιοχές όπως η Ελλάδα και η νότιος Ιταλία.

Δυστυχώς, η καλή αντισεισμική συμπεριφορά απομειώνεται με τις βλάβες που έχουν σήμερα τα μνημεία. Η μείωση της ευστάθειας είναι εκθετική προς το βαθμό βλαβών, με αποτέλεσμα, σε ορισμένα μνημεία ή σε τμήματά τους να είναι ορατός ο κίνδυνος κατάρρευσης σε ένα ισχυρό σεισμό.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η σεισμική απόκριση των Στύλων του Ολυμπίου Διός στην Αθήνα. Το κτήριο αυτό, γνωστό και ως Ολυμπιεόν, ήταν ένας από τους μεγαλύτερους ναούς της αρχαίας Ελλάδας. Από σεισμική άποψη, οι τεράστιοι κίονες του ναού αποτελούσαν θετικό στοιχείο για το κτήριο, αφού σε τέτοιου είδους σπονδυλωτές κατασκευές το απόλυτο μέγεθος παίζει σημαντικό ρόλο. Οι σχετικές αναλύσεις αποσκοπούν στη διερεύνηση της επιρροής διαφόρων παραμέτρων στη σεισμική συμπεριφορά του κτηρίου και σε μία πρώτη προσεγγιστική εκτίμηση του μελλοντικού σεισμικού κινδύνου, λαμβάνοντας υπόψη και τις υφιστάμενες βλάβες.

Ένα δεύτερο σκέλος της εργασίας αναφέρεται στη διερεύνηση της σεισμικής ιστορίας της Αθήνας, με βάση τη σημερινή κατάσταση του μνημείου. Για το σκοπό αυτό γίνεται μία «ανάστροφη» ανάλυση: μόνιμες παραμορφώσεις, που εκτιμάται ότι θα προκαλούσαν στην κατασκευή διάφοροι σεισμοί, συγκρίνονται με τις υφιστάμενες. Οπωσδήποτε μία τέτοια προσπάθεια είναι φιλόδοξη, αφού είναι γνωστή η ευαισθησία της δυναμικής συμπεριφοράς λικνιζομένων σωμάτων ακόμη και σε μικρές αλλαγές των παραμέτρων. Εκτός αυτού, για μία εξαιρετικά μεγάλη χρονική περίοδο οι πληροφορίες για την κατάσταση του κτηρίου είναι σχεδόν ανύπαρκτες. Παρ' όλα αυτά, τα πρώτα αποτελέσματα αυτής της προσπάθειας είναι ενθαρρυντικά, αφού φαίνεται ότι, παρά τις παραπάνω δυσκολίες, αρκετά λογικά συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες της ερευνητικής ομάδας προς τον Οργανισμό Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, που χρηματοδότησε το ομώνυμο ερευνητικό πρόγραμμα και έτσι κατέστη δυνατή η πραγματοποίηση αυτής μελέτης.

Η εργασία αφιερώνεται στη μνήμη του καθηγητή Δημήτρη Παπασταματίου, ο οποίος ήταν ένθερμος υποστηρικτής της ιδέας ότι τα αρχαία μνημεία που σώζονται σήμερα αποτελούν *πειράματα σε φυσική κλίμακα*, αφού στη μακροχρόνια ζωή τους έχουν *καταγράψει* όλα τα μεγάλα φυσικά γεγονότα, στα οποία έχουν υποβληθεί. Η αποκωδικοποίηση αυτών των πληροφοριών, εάν μπορούσε να γίνει, θα μας έδινε σημαντικές πληροφορίες για τη σεισμική ιστορία της χώρας μας. Δυστυχώς, η μοίρα δεν του επέτρεψε να συμμετάσχει, ως μέλος της ερευνητικής ομάδας, όπως ήταν αρχικά προγραμματισμένο, στην προσπάθεια πραγματοποίησης αυτού του στόχου που επιχειρείται με την παρούσα εργασία. Ελπίζουμε ότι το τελικό αποτέλεσμα θα τον ικανοποιούσε, αν και είναι βέβαιο ότι ο ίδιος θα είχε να προσφέρει πολλά περισσότερα, ιδιαίτερα στο σεισμολογικό σκέλος της μελέτης, όπου το κενό που άφησε είναι οπωσδήποτε δυσαναπλήρωτο.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2005

Γιάννης Ν. Ψυχάρης

Επιστημονικός Υπεύθυνος

# 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### ΓΕΝΙΚΑ

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 οι κατασκευές αυτές είναι γενικώς πολύ ανθεκτικές σε σεισμικές δονήσεις, εάν δεν έχουν υποστεί σημαντικές ζημιές, γεγονός που αποδεικνύεται και από το γεγονός ότι πολλές από αυτές παραμένουν όρθιες για σχεδόν 2500 χρόνια. Η φθορά, όμως, που έχουν υποστεί πολλά μνημεία, μειώνει την ευστάθειά τους, με αποτέλεσμα να είναι ορατός ο κίνδυνος κάποιας κατάρρευσης σε ένα ισχυρό σεισμό.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η σεισμική απόκριση των Στύλων του Ολυμπίου Διός στην Αθήνα, στα πλαίσια ενός ερευνητικού προγράμματος που χρηματοδοτήθηκε από τον Ο.Α.Σ.Π. Η μελέτη κινήθηκε σε τρεις κατευθύνσεις:

- (α) Στη διερεύνηση της επιρροής διαφόρων παραμέτρων, που σχετίζονται με τη σεισμική δόνηση και με τη γεωμετρία της κατασκευής, στη δυναμική συμπεριφορά.
- (β) Σε μία πρώτη προσπάθεια εξαγωγής συμπερασμάτων για τους σεισμούς που έχουν πλήξει την Αθήνα τα 2000 χρόνια ζωής του μνημείου, με βάση τις μόνιμες παραμορφώσεις που μετρήθηκαν στην κατασκευή.
- (γ) Σε μία πρώτη, προσεγγιστική διερεύνηση του μελλοντικού σεισμικού κινδύνου για την κατασκευή, λαμβάνοντας υπόψη και τις βλάβες που υπάρχουν σήμερα.

Οπωσδήποτε, η εξάντληση όλων των παραπάνω θεμάτων δεν ήταν δυνατή μέσα στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος. Πιστεύουμε, όμως, ότι προέκυψαν αρκετά σημαντικά συμπεράσματα και ότι η εργασία συνεισφέρει στην κατανόηση του δύσκολου προβλήματος της σεισμικής απόκρισης των κατασκευών της κλασικής αρχαιότητας.

Ιδιαίτερα στο (β) θέμα, είναι η πρώτη φορά, απ' ό,τι γνωρίζουμε, που γίνεται μία τέτοια προσπάθεια.

Στο παρόν, πρώτο κεφάλαιο της τελικής έκθεσης, γίνεται αρχικά μία παρουσίαση της διεθνούς βιβλιογραφίας, πάνω σε θέματα που σχετίζονται με τη δυναμική απόκριση σπονδυλωτών κατασκευών, ξεκινώντας από την απλούστερη περίπτωση του λικνιζόμενου στερεού σώματος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της σεισμικής συμπεριφοράς των αρχαίων μνημείων και οι σημαντικότερες παράμετροι που την επηρεάζουν. Τέλος, δίνεται μία ανασκόπηση των ιστορικών καταγραφών που αφορούν στην απόκριση των μνημείων της Αττικής σε παλαιότερους σεισμούς.

Στο δεύτερο κεφάλαιο συνοψίζονται τα της ανέγερσης του ναού του Ολυμπίου Διός και περιγράφονται τα αρχιτεκτονικά και δομικά στοιχεία. Στη συνέχεια περιγράφεται η κατάσταση του μνημείου σε διάφορες στιγμές της ζωής του, σύμφωνα με τις καταγραφές ιστορικών και τις αναπαραστάσεις του κτηρίου.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η μέθοδος ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε, η οποία αποτελεί μία εφαρμογή της μεθόδου των διακριτών στοιχείων. Παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της μεθόδου και αποτελέσματα μιας προηγούμενης ανάλυσης, τα οποία επιβεβαιώνουν την αξιοπιστία της. Στο τέλος του κεφαλαίου δίνονται πληροφορίες σχετικά με τα προσομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις και τις παραδοχές που έγιναν.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στην παραμετρική διερεύνηση της απόκρισης δύο κίωνων του μνημείου, μεμονωμένων ή συζευγμένων με επιστύλιο, σε ημιτονικές εδαφικές διεγέρσεις. Στο τέλος του κεφαλαίου συγκρίνονται τα αποτελέσματα των ημιτονικών διεγέρσεων με αυτά που προκύπτουν για σεισμικές δονήσεις με αντίστοιχα χαρακτηριστικά.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εξετάζεται η σεισμική ιστορία της Αθήνας αναφορικά προς τη σημερινή, διαταραγμένη μορφή του μνημείου. Παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις των σπονδύλων που μετρήθηκαν, δίνονται στοιχεία για τις σεισμικές διεγέρσεις που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση και εξάγονται συμπεράσματα για τους σεισμούς, που είναι πιθανόν να έχουν πλήξει την κατασκευή στα 2000 χρόνια της ζωής της.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μία πρώτη εκτίμηση του κινδύνου κατάρρευσης τμημάτων του μνημείου σε μελλοντικούς σεισμούς. Σε αυτές τις αναλύσεις λαμβάνονται υπόψη προσεγγιστικά και οι βλάβες που υπάρχουν σήμερα στους κίονες.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία.

Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο συγκεντρώνονται οι βιβλιογραφικές αναφορές της μελέτης.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η δυναμική συμπεριφορά αρχαίων, κλασικών μνημείων σε σεισμικές δονήσεις αποτελεί ένα ιδιάζον και πολύ δύσκολο πρόβλημα, που δεν υπάγεται στους κανόνες που διέπουν τη συμπεριφορά των συνήθων κατασκευών. Η ιδιομορφία της σεισμικής απόκρισης πηγάζει από την ιδιαιτερότητα στον τρόπο δόμησης. Έτσι, σε αντίθεση με τις συνήθεις κατασκευές, τα κατακόρυφα φέροντα στοιχεία των κλασικών μνημείων (κίονες, τοίχοι) αποτελούνται από αυτοτελή δομικά στοιχεία (σπόνδυλοι, λιθόπλινθοι), 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. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σε σώμα αποτελούμενο από 11 σπονδύλους, ο αριθμός των δυνατών μορφών ταλάντωσης είναι θεωρητικά ίσος με 88573 [Ζάμπας (1994)]. Για το λόγο αυτό, η αναλυτική επίλυση ενός συστήματος πολλών σωμάτων είναι πρακτικά αδύνατη.

Μία χαρακτηριστική ιδιότητα της συμπεριφοράς είναι η μεγάλη 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. [Μουζακίς et al (2002)], έδειξαν ότι επανάληψη του ίδιου πειράματος μπορεί να οδηγήσει σε αρκετά διαφορετικά αποτελέσματα, λόγω μη ελεγχόμενων μικρών διαφορών στη διέγερση και την αρχική γεωμετρία του κίονα. Χαρακτηριστικό είναι και το γεγονός ότι ένας κίονας μπορεί να ανατρέπεται για μία συγκεκριμένη σεισμική δόνηση και να μην ανατρέπεται για την ίδια δόνηση με μεγαλύτερη ένταση.

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, ο λικνισμός σωμάτων είναι ένα πολύπλοκο στην ανάλυσή του πρόβλημα που έχει απασχολήσει πολλούς



ερευνητές τον τελευταίο αιώνα. Παρ' ότι οι πρώτες προσπάθειες μελέτης αρχίζουν στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα [Perry (1881), Milne (1881)], η πρώτη εμπειριστατωμένη αναλυτική διερεύνηση του φαινομένου παρουσιάζεται μόλις το 1963 [Housner (1963)]. Στα χρόνια που ακολουθούν, αρκετοί ερευνητές ασχολούνται με το πρόβλημα, είτε αναλυτικά [ενδεικτικά αναφέρουμε τις εργασίες των Meek (1975), Yim et al (1980), Ishiyama (1982), Spanos and Koh (1984), Tso and Wong (1989a)] είτε πειραματικά [Priestley et al (1978), Tso and Wong (1989b)]. Επίσης, έρευνα γίνεται σε παραλλαγές των παραμέτρων του προβλήματος, όπως η ελαστική θεμελίωση, η παραμορφώσιμη κατασκευή ή και τα δύο [π.χ. Psycharis and Jennings (1983a) και (1985), Psycharis (1983b) και (1991), Yim and Chopra (1984), Koh et al (1986)].

Σε όλες αυτές τις θεωρητικές και πειραματικές αναλύσεις τονίζεται ο μη γραμμικός χαρακτήρας και η ευαισθησία του φαινομένου. Ένα από τα μεγέθη που επηρεάζουν τη συμπεριφορά είναι και ο συντελεστής αποκατάστασης που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της κρούσης που συμβαίνει μεταξύ σώματος και βάσης κάθε φορά που αλλάζει ο πόλος περιστροφής. Αποδεικνύεται, θεωρητικά και πειραματικά, ότι η επιρροή του συντελεστή αυτού δεν είναι μονότονη [Aslam (1980)]. Ενώ, δηλαδή, στα ελαστικά συστήματα αύξηση του συντελεστή αποκατάστασης σημαίνει και αύξηση της απόσβεσης με αντίστοιχη μείωση της απόκρισης, στην περίπτωση των λικνιζομένων σωμάτων μικρή μεταβολή του συντελεστή αποκατάστασης επηρεάζει σημαντικά την όλη απόκριση κατά τρόπο απρόβλεπτο.

Αντίθετα με τη μελέτη της συμπεριφοράς ενός λικνιζομένου σώματος, σχετικά λίγες εργασίες έχουν παρουσιαστεί πάνω στη δυναμική συμπεριφορά πολύπλοκων συστημάτων πολλών στερεών σωμάτων, συμπεριλαμβανομένων και των κλασικών κινώνων. Ενδεικτικά αναφέρουμε τις εργασίες των Allen et al (1986), Sinopoli (1989a,b,c), Psycharis (1990), Manos & Demosthenous (1992), Winkler et al (1995), Psycharis et al (2000), κ.α. Σε αυτές τις αναλύσεις, έχει ληφθεί υπόψη δισδιάστατη (επίπεδη) απόκριση του συστήματος. Οι ερευνητές που έχουν ασχοληθεί με την τρισδιάστατη ανάλυση τέτοιων συστημάτων είναι πολύ λίγοι [Wolf (1976), Koh et al (1990a&b) και (1991), Papantonopoulos et al (2002), Mouzakis et al (2002), Psycharis et al (2003)].

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι απλοποιητικές παραδοχές, που βασίζονται σε θεώρηση συνεχών συστημάτων με ελατήρια μεταξύ των σωμάτων, είναι ακατάλληλες για την ορθή πρόβλεψη της σεισμικής συμπεριφοράς τέτοιων κατασκευών σε ισχυρές εδαφικές δονήσεις. Σε αυτές τις αναλύσεις, οι τιμές των ιδεατών ελατηρίων υπολογίζονται με βάση την "ιδιοπερίοδο" του συστήματος, που αντιστοιχεί σε μικροδονήσεις, ώστε να επαληθεύονται τα πειραματικά αποτελέσματα [Angoti (1985), Blasi (1989),

Theofanopoulos et al (1989), Hanazoto et al (1989)]. Η προσέγγιση αυτή αποδίδει τη ψευδοελαστικότητα των αρμών και ισχύει μόνο για μικρές παραμορφώσεις. Εάν, όμως, η δόνηση είναι αρκετά ισχυρή, ώστε να αρχίσουν λικνιστικές κινήσεις και ολισθήσεις, η θεώρηση αυτή παύει να ισχύει, αφού σε αυτή την περίπτωση το σύστημα δεν διαθέτει ιδιοπεριόδους με την κλασική έννοια και η περίοδος των ελεύθερων ταλαντώσεων εξαρτάται από το πλάτος της απόκρισης.

Ενώ η αναλυτική αντιμετώπιση του προβλήματος της δυναμικής συμπεριφοράς συστοιχιών σωμάτων είναι πρακτικά ανέφικτη, η εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων φαίνεται πως μπορεί να προσεγγίσει αρκετά ικανοποιητικά το φαινόμενο. Για παράδειγμα, προηγούμενες μελέτες [Psycharis et al (1993), Papantonopoulos et al (2002)] έδειξαν ότι η μέθοδος των διακριτών στοιχείων (Distinct Element Method), που πρωτοεφαρμόστηκε από τον Cundall (1971), είναι αποτελεσματική για τη μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς αρχαίων μνημείων. Μία αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου και της αποδοτικότητάς της δίνεται στο Κεφ. 3.

Σε ό,τι αφορά τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, αυτή παρουσιάζει προβλήματα στην εφαρμογή της για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο λικνισμός και η ολίσθηση σωμάτων διέπονται από διαφορετικούς νόμους απ' ό,τι η ελαστοπλαστική συμπεριφορά συνεχών συστημάτων. Μία σημαντική διαφορά είναι ότι αυτά τα συστήματα δεν διαθέτουν ιδιοπεριόδους με την κλασική έννοια, η δε ακαμψία τους γίνεται αρνητική όταν αρχίσει ο λικνισμός. Η συνήθης τεχνική που χρησιμοποιείται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι η πρόβλεψη κάποιου ειδικού στοιχείου στη διεπιφάνεια [Ulm (1993)]. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το στοιχείο διεπιφάνειας μορφώνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι σε θέση να αντιμετωπίσει 3 είδη κίνησης: παράλληλη και κατακόρυφη σχετική μετακίνηση και στροφή με πόλο περιστροφής το κέντρο του στοιχείου [Tonki (1983)]. Στην περίπτωση της δυναμικής ανάλυσης, απαιτούνται βήμα προς βήμα ολοκληρώσεις στο πεδίο του χρόνου για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων κίνησης [Herrmann (1978)] με σημαντική αύξηση του απαιτούμενου χρόνου υπολογισμού.

Είναι προφανές ότι η ανάλυση της σεισμικής συμπεριφοράς των αρχαίων μνημείων είναι ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα. Από την άλλη μεριά, είναι απαραίτητη για τη λήψη αποφάσεων που αφορούν την αναστήλωση και τη συντήρηση.

## ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΡΧΑΙΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα αρχαία μνημεία και ιδιαίτερα οι κίονες, αποτελούνται από ανεξάρτητους δομικούς λίθους (σπονδύλους στην περίπτωση των κίωνων), οι οποίοι τοποθετούνται ο ένας πάνω στον άλλο χωρίς συνδετικό υλικό (κονίαμα). Θα πρέπει όμως να τονιστεί η καλή προετοιμασία των διεπιφανειών που, στις περισσότερες περιπτώσεις, οδηγούσε σε σχεδόν τέλεια επαφή. Οι ξύλινοι σύνδεσμοι (πόλοι-εμπόλια), που συνήθως τοποθετούνταν κατά την κλασική εποχή μεταξύ των σπονδύλων, αποσκοπούσαν στην ευκολότερη και καλύτερη κέντρωση των σπονδύλων κατά τη στιγμή της τοποθέτησης και δεν χρησίμευαν για τη βελτίωση της αντοχής του κτίσματος. Αργότερα, κατά την ελληνιστική και ρωμαϊκή εποχή χρησιμοποιήθηκαν και μεταλλικοί γόμφοι (διατμητικοί σύνδεσμοι), όπως για παράδειγμα στο Ολυμπείο της Αθήνας που μελετάται σε αυτή την εργασία, οι οποίοι πιθανώς υπηρετούσαν την καλύτερη παραλαβή των σεισμικών φορτίων. Όπως φαίνεται όμως από τις αναλύσεις, η συμμετοχή τους στη σεισμική απόκριση είναι γενικώς μικρή.

Ως σπονδυλωτές κατασκευές, τα αρχαία μνημεία συμπεριφέρονται διαφορετικά από τις συνήθεις κατασκευές σε ένα ισχυρό σεισμό. Τα επιμέρους δομικά στοιχεία μπορούν να λικνίζονται και να ολισθαίνουν μεταξύ τους, ανεξάρτητα ή σε ομάδες. Η συμπεριφορά αυτή οδηγεί σε μία πολύπλοκη και δύσκολη να αναλυθεί, μη-γραμμική και πολύ ευαίσθητη απόκριση. Συνοψίζοντας τα συμπεράσματα προηγούμενων ερευνών πάνω σε αυτό τον τομέα, τόσο θεωρητικών όσο και πειραματικών, μπορούμε να επισημάνουμε τα παρακάτω χαρακτηριστικά της σεισμικής απόκρισης τέτοιων κατασκευών:

1. Κατασκευές τέτοιου τύπου δεν διαθέτουν ιδιομορφές με την κλασική έννοια. Για ελεύθερες ταλαντώσεις, η ιδιοπερίοδος της κίνησης εξαρτάται από το εύρος της ταλάντωσης και μειώνεται με το πλήθος των κύκλων και των κρούσεων που συμβαίνουν μεταξύ των λίθων λόγω του λικνισμού. Κατά τη διάρκεια ενός ισχυρού σεισμού, η απόκριση συνεχώς αλλάζει «μορφή ταλάντωσης». Κάθε μορφή ταλάντωσης διέπεται από διαφορετικές εξισώσεις κίνησης, γεγονός που οδηγεί στη μη-γραμμικότητα της συμπεριφοράς. Ως παράδειγμα της μη-γραμμικότητας αναφέρεται ότι μία κατασκευή μπορεί να ανατρέπεται για μία συγκεκριμένη σεισμική διέγερση και να μην ανατρέπεται για την ίδια διέγερση μεγεθυμένη με ένα συντελεστή μεγαλύτερο της μονάδας.

2. Η απόκριση είναι πολύ ευαίσθητη, ακόμη και σε μικρές αλλαγές των παραμέτρων που αφορούν τη γεωμετρική διαμόρφωση της κατασκευής και τα χαρακτηριστικά της διέγερσης. Η ευαισθησία της απόκρισης έχει επαληθευτεί πειραματικά, αφού επανάλυση

του ίδιου πειράματος έδωσε αρκετά διαφορετικά αποτελέσματα σε ορισμένες περιπτώσεις. Στις αναλυτικές επιλύσεις, η ευαισθησία της συμπεριφοράς είναι επίσης εμφανής, αφού ασημαντες αλλαγές των παραμέτρων μπορεί να προκαλέσουν ουσιώδεις αλλαγές στην απόκριση. Ένα άλλο αποτέλεσμα της ευαισθησίας είναι η σημαντική εκτός επιπέδου κίνηση που συνήθως συμβαίνει για καθαρά επίπεδη διέγερση. Σε ορισμένα πειράματα, η κίνηση αυτή είχε παρόμοιο μέγεθος με την παραμόρφωση στο επίπεδο της διέγερσης.

3. Η απόκριση των κλασικών μνημείων σε σεισμικές διεγέρσεις (και επομένως και ο κίνδυνος κατάρρευσης) επηρεάζεται από δύο βασικούς παράγοντες: (α) τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης και (β) το μέγεθος της κατασκευής. Όσον αφορά την περίοδο της εδαφικής κίνησης, η απόκριση μεγαλώνει σχεδόν εκθετικά όσο η περίοδος μεγαλώνει. Έτσι, ενώ ένα μνημείο μπορεί να έχει πολύ μικρή παραμόρφωση σε έναν υψίσυχο σεισμό, είναι δυνατόν να καταρρεύσει σε ένα πολύ μακροπερίοδο σεισμό με την ίδια μέγιστη επιτάχυνση. Στην πρώτη περίπτωση η παραμόρφωση οφείλεται κυρίως σε ολισθήσεις των επιμέρους δομικών στοιχείων, ενώ στη δεύτερη επικρατεί ο λικνισμός. Όσον αφορά το μέγεθος της κατασκευής, η απόκριση αλλάζει σημαντικά όταν αλλάζουν οι απόλυτες διαστάσεις, ακόμη και εάν διατηρηθεί η ίδια αναλογία διαστάσεων. Γενικώς, κατασκευές μεγάλου μεγέθους είναι πολύ πιο ευσταθείς από αντίστοιχες μικρού μεγέθους.

4. Γενικώς, τα κλασικά μνημεία παρουσιάζουν μία αξιοσημείωτη ευστάθεια σε σεισμικά φορτία, παρά τη σπονδυλωτή δομή τους. Η ευστάθειά τους όμως μειώνεται σημαντικά όταν υπάρχουν βλάβες στην κατασκευή, όπως αποτμήσεις τμημάτων σπονδύλων, κλίσεις κιόνων από την κατακόρυφο, μετατοπίσεις σπονδύλων κλπ. Τέτοιες βλάβες είναι συνήθεις σε αρχαία μνημεία και μπορεί να εγκυμονούν σοβαρούς κινδύνους σε περίπτωση κάποιου ισχυρού μελλοντικού σεισμού. Γι' αυτό και το γεγονός ότι ένα μνημείο έχει επιβιώσει για τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα δεν αποτελεί εγγύηση ότι δεν θα κινδυνεύσει και σε μία μελλοντική, ισχυρή σεισμική δόνηση.

## **ΧΡΟΝΙΚΟ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΒΛΑΒΩΝ ΣΤΑ ΜΝΗΜΕΙΑ ΤΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μια προσπάθεια εντοπισμού των σεισμών που έπληξαν την Αττική, από τον 2<sup>ο</sup> αιώνα μ.Χ., χρονολογία αποπεράτωσης του ναού του Ολυμπίου Διός, μέχρι και σήμερα. Παράλληλα σημειώνονται οι βλάβες που προκλήθηκαν από τους σεισμούς αυτούς στα μνημεία της Αττικής<sup>1</sup>.

### **12<sup>ος</sup> αιώνας**

---

<sup>1</sup> Κύριες πηγές της έρευνας αυτής είναι οι Ambraseys (1996), Παπαζάχος (1989), Παπαντωνόπουλος (2000) και Σπυρόπουλος (1997).

Πριν τον 13<sup>ο</sup> αιώνα πρέπει να συνέβη στην Αθήνα ένας πολύ ισχυρός σεισμός. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από τη σημαντική μετατόπιση που παρατηρείται στο Ν τοίχο και τους κίονες του Παρθενώνα, η οποία προκλήθηκε από αυτό το σεισμό, ενώ παλαιότερα απεδίδετο, λανθασμένα, στην έκρηξη του 1687 [Korres (1996)]. Κρίνοντας από το μέγεθος των βλαβών που προκάλεσε στον Παρθενώνα, ο σεισμός πρέπει να ήταν ο πλέον καταστροφικός που έπληξε την πόλη από τον 5<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. Το επίκεντρό του πρέπει να ήταν στη Δ Αττική ή τον Κορινθιακό κόλπο.

### **1705, 3 Σεπτεμβρίου**

Ο σεισμός αυτός είναι ο πρώτος στα νεώτερα χρόνια για τον οποίο, αν και υπάρχει σαφής φιλολογική μαρτυρία, δεν είναι ακριβώς γνωστή η χρονολογία γένεσής του<sup>2</sup>. Σύμφωνα με ενθύμηση από το χρονικό της μονής Αγ. Αναργύρων [Λάμπρος (1881)]:

*«Τω έτει τούτω μέγας σεισμός εγένετο και άπαντες οι οίκοι εσεισθησαν και η εκκλησία του αγίου Διονυσίου εις δύο εσχίσθη και ο του αρχιερέως οίκος κλόνω μέγα και λίθω εκ του Βράχου προσβληθείς, το ανώγειον εκρημνίσθη. Τούτο δε εγένετο το εσπέρας του αγίου Χαρίτωνος πολλοί τε οίκοι της του Σωτήρος Νικοδήμου μονής κατεκριμνήσθησαν και η βασιλική εκκλησία ερράγη».*

Η εκκλησία του Διονυσίου του Αεροπαγίτου, καθώς και ο οίκος του μητροπολίτη βρίσκονταν στις βόρειες παρυφές του Αρείου Πάγου, απ' όπου και κατέπεσε ο βράχος. Εξ άλλου, η μονή Νικοδήμου είναι η ομώνυμη σήμερα Ρώσικη εκκλησία. Τέλος, η θέση της βασιλικής εκκλησίας δεν είναι απολύτως γνωστή, εικάζεται ότι βρισκόταν στον κήπο των Ιλισσίδων Μουσών, κοντά στο Στάδιο.

### **1785, 13 Ιουνίου**

Το επίκεντρο του σεισμού τοποθετείται στην περιοχή του Ωρωπού, σε απόσταση 35 χλμ. από την Αθήνα. Αν και αναφέρονται ζημιές στο κάστρο της Χαλκίδας, δεν υπάρχουν ενδείξεις για βλάβες στην Αθήνα.

---

<sup>2</sup> Κατά τον Σπ. Λάμπρο ο σεισμός έγινε μεταξύ 1687 και 1751, ο Β. Παπαζάχος τον προσδιορίζει στις 16 Σεπτεμβρίου 1694, ενώ ο Ν. Ambraseys στις 3 Σεπτεμβρίου 1705, τοποθετώντας μάλιστα το επίκεντρό του, μεταξύ Ωρωπού και Πλαταιών, σε απόσταση 30 χλμ. από την Αθήνα. Με βάση τουρκικά αρχειακά έγγραφα, ο σεισμός αυτός είναι βέβαιον ότι συνέβη το 1705 [Ambraseys and Finkel (1992)].

**1805, 16-17 Σεπτεμβρίου (Νοεμβρίου)**

Ο σεισμός αυτός, μεγέθους πιθανώς  $M=6.0$ , προκάλεσε την πτώση μαρμάρων από το δυτικό αέτωμα του Παρθενώνα, σύμφωνα με αναφορά του άγγλου αρχιτέκτονα Dodwell (1819)<sup>3</sup>.

**1837, 18 Μαρτίου**

Η δόνηση, μεγέθους  $M=6.2$ , προερχόταν από εστία στο νότιο Σαρωνικό ( $37.4^{\circ}\text{N}$ ,  $23.6^{\circ}\text{E}$ ), κοντά στην Ύδρα (ένταση VII). Τα σπίτια στην Ύδρα, τον Πόρο και στην απέναντι ακτή της Ερμιόνης έπαθαν βαριές ζημιές, χωρίς όμως να σημειωθούν καταρρεύσεις. Στην οθωνική Αθήνα<sup>4</sup>, ο σεισμός έγινε έντονα αισθητός ως κυματοειδής δόνηση και προκάλεσε μεγάλο πανικό. Υπάρχει η μαρτυρία ότι «από τα αετώματα του τετρακίονιου στην αγορά έπεσαν μεγάλα μαρμάρινα κομμάτια προς τα δυτικά». Το εν λόγω τετρακίONIO είναι το Πρόπυλον<sup>5</sup> της Αρχηγέτιδος Αθηνάς (Παζαρόπορτα), στη δυτική πλευρά της ρωμαϊκής αγοράς. Η σύγκριση δύο εικόνων του μνημείου, της παράστασης των Stuart-Revetts το 1753 (Εικ. 1.1) και της απεικόνισης του Du Moncel περί το 1842 (Εικ. 1.2), δίνει μια ιδέα για τις ζημιές που προκάλεσε ο σεισμός στο αέτωμα. Τα καταρριφθέντα τμήματα του θριγκού, καθώς και το κορυφαίο γείσο του αετώματος, επανατοποθετήθηκαν την περίοδο 1915-1917 με μέριμνα του Α. Ορλάνδου [Μαλλούχου-Tufano (1998)].

**1853, 18 Αυγούστου**

Η δόνηση, μεγέθους  $M=6.0-6.8$ , είχε επίκεντρο στην περιοχή της Θήβας (ένταση X), όπου και προκάλεσε μεγάλες καταστροφές. Στην Αθήνα, ο σεισμός έγινε έντονα αισθητός, χωρίς όμως να αναφέρονται σημαντικές ζημιές.

---

<sup>3</sup> Είναι αξιοσημείωτο ότι, λίγα χρόνια προηγουμένως (1801-1803), είχε αποτειχιστεί ο γλυπτός διάκοσμος του Παρθενώνα από τον λόρδο Έλγιν. Είναι πολύ γνωστές οι μεγάλες δομικές βλάβες που προκλήθηκαν, την εποχή εκείνη, στον Παρθενώνα και το Ερέχθειο, από την αποτείχιση των γλυπτών, ή άλλων χαρακτηριστικών αρχιτεκτονικών μελών. Είναι, λοιπόν, πιθανό η πτώση των μαρμάρων να οφείλεται και στην επιχείρηση προσπορισμού του γλυπτού διακόσμου, η οποία και διατάραξε την ισορροπία των μαρμάρων.

<sup>4</sup> Η Αθήνα είχε ανακηρυχθεί πρωτεύουσα του νεοσύστατου ελληνικού κράτους μόλις προ τετραετίας.

<sup>5</sup> Το Πρόπυλον, δωρικού ρυθμού, έχει πλάτος 11.0 m και απαρτίζεται από 4 κίονες με κάτω διάμετρο 1.42 m και ύψος 7.87 m. Για να διευκολύνεται η εμπορική κίνηση, το κεντρικό άνοιγμα (2.50 m) είναι ευρύτερο των πλευρικών (1.42 m). Όπως αναφέρεται και στην επιγραφή του επιστυλίου, το πρόπυλο ιδρύθηκε από τους Αθηναίους χάρις στις επιχορηγήσεις του Ιούλιου Καίσαρα και του Αυγούστου. Το μνημείο κατασκευάστηκε περί το 10 π.Χ. και το δομικό του υλικό είναι το πεντελικό μάρμαρο. Το πρόπυλο, γνωστό και ως *Πύλη της Αγοράς* ή *Παζαρόπορτα* ήταν επί τουρκοκρατίας το κομβικό σημείο της κοινωνικής ζωής της πόλης.



**Εικ. 1.1.** Το Πρόπυλον της Αρχηγέτιδος Αθηνάς (Παζαρόπορτα) στη δυτική πλευρά της ρωμαϊκής αγοράς. Σχέδιο των Stuart και Revett, 1753.



**Εικ. 1.2.** Η Παζαρόπορτα, το 1843. Σχέδιο Du Moncel.

**1874, 17 Ιανουαρίου**

Πρόκειται, μάλλον, για ένα μικρό τοπικό σεισμό που προκάλεσε την κατάρρευση ετοιμόρροπου τμήματος των τειχών της Ακρόπολης, που είχε κατασκευαστεί από τον Οδ. Ανδρούτσο.

**1889, 22 Ιανουαρίου**

Ο σεισμός προκάλεσε τη διάνοιξη κατακορύφων αρμών στον τρούλο και τα τείχη της μονής Δαφνίου.

**1894, 20 Απριλίου**

Πρόκειται για τον προσεισμό, μεγέθους  $M=6.4-6.7$ , από την περιοχή του Μαρτίνου, που προηγήθηκε του μεγάλου σεισμού που ακολούθησε 7 ημέρες αργότερα. Αναφέρεται η πτώση ενός μαρμάρου από την Πύλη του Αδριανού, καθώς και η πτώση ενός κιονοκράνου στην αρχαία αγορά.

**1894, 27 Απριλίου**

Ο μεγάλος αυτός σεισμός, με επίκεντρο τον Αγ. Κωνσταντίνο Λοκρίδος<sup>6</sup>, μεγέθους  $M=7.0$ , προκάλεσε την πτώση αρκετών μαρμάρων από τον θριγκό της δυτικής πρόστασης του Παρθενώνα. Έπεσαν 35 περίπου θραύσματα από τα επιστύλια της πρόστασης του οπισθονάου, καθώς και τεμάχια μήκους μέχρι 1.0 m από τον 5<sup>ο</sup> σπόνδυλο του 4<sup>ου</sup> (από Δ.) κίονα της βόρειας κιονοστοιχίας [Μαλλούχου-Tufano (1998)]. Η πτώση των θραυσμάτων αποδίδεται στην επισφαλή ισορροπία που είχε προκαλέσει η πυρκαγιά των αρχαίων χρόνων. Κατά τα άλλα, δεν παρατηρήθηκαν μόνιμες παραμορφώσεις στο κτήριο από τον σεισμό αυτό [Κορρές & Μπούρας (1983), Ζάμπας (1994)].

---

<sup>6</sup> Είναι χαρακτηριστικό ότι από την ίδια περίπου περιοχή της Αταλάντης προερχόταν και η σεισμική ακολουθία του 427-426 π.Χ., που είναι η πρώτη, γνωστή από φιλολογικές πηγές, εστία σεισμών που έπληξε την Αττική. Στους σεισμούς αυτούς είχε κατ' αρχάς αποδοθεί η μετακίνηση της βορειοανατολικής γωνίας του Παρθενώνα κατά 2.5 cm προς Β [Κορρές (1983)]. Η επέμβαση όμως στο τμήμα αυτό του μνημείου επέτρεψε νεώτερες παρατηρήσεις, οι οποίες οδήγησαν το μελετητή σε αναθεώρηση την αρχικής του άποψης και την τοποθέτηση του σεισμικού συμβάντος στα προχριστιανικά χρόνια, χωρίς συγκεκριμένη χρονική αναφορά. [Κορρές (1996)]. Τη βεβαιότητά του, ότι ο σεισμός του 426 π.Χ. είναι αδύνατο να προκάλεσε μια τόσο εκτεταμένη βλάβη στον μόλις ανεγερθέντα Παρθενώνα, εκφράζει και ο N. Ambraseys, ο οποίος μάλιστα υπολογίζει ότι η σεισμική επιτάχυνση, που αναπτύχθηκε στην Αθήνα, δεν πρέπει να ήταν μεγαλύτερη από 3%-4% g [Ambraseys (1996)].



**1914, 17 Οκτωβρίου**

Ο σεισμός, μεγέθους  $M=6.0$ , με επίκεντρο την περιοχή της Θήβας, προκάλεσε μικρές βλάβες στο λεκανοπέδιο της Αθήνας.

**1928, 22 Απριλίου**

Ο σεισμός, μεγέθους  $M=6.3$ , με επίκεντρο την περιοχή της Κορίνθου, κατέστρεψε τη νέα πόλη της Κορίνθου. Στην Αθήνα και τον Πειραιά αναφέρονται μικρές ζημιές.

**1930, 17 Απριλίου**

Ο σεισμός, μεγέθους  $M=6.0$ , είχε επίκεντρο την περιοχή του Σοφικού κοντά στην Κόρινθο. Δεν αναφέρονται σοβαρές ζημιές στην Αθήνα. Ας σημειωθεί ότι την εποχή εκείνη (1921-1939) έχουν αναληφθεί από τον Ν. Μπαλάνο μεγάλης κλίμακας αναστηλώσεις στον βράχο της Ακρόπολης.

**1938, 20 Ιουλίου**

Ο σεισμός, μεγέθους  $M=6.0$ , με επίκεντρο τον Ωρωπό, έγινε έντονα αισθητός στην Αθήνα, χωρίς όμως να προκαλέσει βλάβες.

**1981, 24 Φεβρουαρίου**

Πρόκειται για τη γνωστή σεισμική ακολουθία του κόλπου των Αλκυονίδων, της οποίας ο κύριος σεισμός, μεγέθους  $M=6.7$ , ακολουθήθηκε λίγες ώρες αργότερα από μετασεισμό, μεγέθους  $M=6.4$ . Αναφέρεται ο θάνατος 20 ατόμων, ο τραυματισμός 500, ενώ παράλληλα προκλήθηκαν σοβαρότατες βλάβες στην Κορινθία, Βοιωτία, Φωκίδα και στο νομό Αττικής.

Αντίθετα με τους σεισμούς του 1894, ο σεισμός των Αλκυονίδων το 1981 προκάλεσε γενικές παραμορφώσεις στον Παρθενώνα<sup>7</sup> από τους κατώτερους σπονδύλους των κιόνων μέχρι τον θριγκό [Κορρές & Μπούρας (1983), Ζάμπας (1994)]. Από μετρήσεις του Μ. Κορρέ στην ΒΑ γωνία, αμέσως μετά τον κύριο σεισμό, είναι γνωστό ότι οι διανοίξεις αρμών που προκλήθηκαν δεν διευρύνθηκαν από τον μετασεισμό που ακολούθησε. Οι σημαντικότερες βλάβες, που παρατηρήθηκαν στον Παρθενώνα από τον κύριο σεισμό, είναι περιληπτικά οι ακόλουθες:

- Καταπονήθηκαν ιδιαίτερα οι 4 γωνίες της περίστασης. Στο Β και Ν τμήμα του θριγκού παρατηρήθηκε άνοιγμα των αρμών στην κατεύθυνση Α-Δ κοντά στις γωνίες. Στη ΒΑ γωνία ο αρμός άνοιξε κατά 3 cm. περίπου, ενώ στη ΒΔ και ΝΔ γωνία το άνοιγμα των

---

<sup>7</sup> Για τις βλάβες του Παρθενώνα από τον σεισμό του 1981, οι σχετικές πληροφορίες αντλήθηκαν από τις μελέτες των Κορρέ & Μπούρα (1983) και Ζάμπας (1994).

αρμών δεν υπερέβη το 1 cm. Ο ΒΔ κίονας εμφάνισε στροφή, ο πρώτος σπόνδυλος του ΝΔ κίονα μετατοπίστηκε προς ΒΑ, ενώ ο πρώτος σπόνδυλος των δύο γειτονικών του κίωνων της δυτικής πλευράς εμφάνισε μετακίνηση προς Α (παρόμοιες, αλλά μικρότερες μετατοπίσεις σημειώθηκαν επίσης σε πλείστους κίονες των Προπυλαίων και του Ερεχθείου).

- Οι δύο γωνιακοί κίονες της ανατολικής πλευράς της περίπτωσης μετακινήθηκαν και εστράφησαν. Ενδείξεις της μετακίνησης/στροφής παρατηρήθηκαν στην έδραση των κίωνων (ίχνη της παλαιάς έδρασης, θραύσεις ακμών ραβδώσεων κτλ.). Ο ΒΑ κίονας εμφάνισε τάση ανατροπής, με μετατόπιση και στροφή σε κατακόρυφο επίπεδο. Στον κατώτατο σπόνδυλο του κίονα αυτού αποχωρίστηκε ένα τμήμα, λόγω συγκέντρωσης τάσεων στην ακραία περιοχή της επιφάνειας έδρασης του σπονδύλου. Επίσης, στον λίθο του στυλοβάτη της ΒΑ γωνίας διαπιστώθηκαν νέα ρήγματα, ενώ διανοίχτηκε και ο αρμός του επιστυλίου πάνω από τον ΝΑ κίονα. Στο ΝΑ κίονα παρατηρήθηκε στροφή των 2 πρώτων σπονδύλων. Ακόμη διαπιστώθηκε θραύση του 6<sup>ου</sup> επιστυλίου της ανατολικής πλευράς.
- Στη δυτική πλευρά διανοίχτηκαν οι αρμοί του επιστυλίου και του διαζώματος, ενώ όλη η δυτική κιονοστοιχία λικνίστηκε. Ο λικνισμός συμπαρέσυρε τις δοκούς του δυτικού πτερού που ολίσθησαν επί των θράνων της δυτικής πρόστασης. Οι ολισθήσεις αυτές δεν υπερέβησαν τα 4 cm, ενώ παράλληλα δεν παρατηρήθηκαν μόνιμες παραμορφώσεις στον Οπισθόναο.
- Διαπιστώθηκαν μετακινήσεις στον θριγκό πάνω από τον 16<sup>ο</sup> κίονα της Β και Ν πλευράς. Παρατηρήθηκε επίσης, κοντά στη ΒΔ γωνία, θραύση ορειχάλκινου συνδέσμου, που είχε τοποθετηθεί κατά τις αναστηλώσεις Μπαλάνου και συνέδεε τα αντιθήματα της ζωφόρου.

Στο Ολυμπείο αναφέρεται, κατά μαρτυρία του Μ. Κορρέ, θραύση στο άνω μέρος του κιονοκράνου του ΝΑ κίονα, στο τμήμα που επιέζετο από το υποχωρόν μέρος του προ πολλού θραυσμένου 1<sup>ου</sup> επιστυλίου της νότιας πλευράς.

Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζουν οι εκτεταμένες βλάβες που υπέστη ένα από τα αξιολογότερα οχυρωματικά έργα της αρχαιότητας, που βρίσκεται πολύ κοντά στο επίκεντρο του σεισμού των Αλκυονιδών, το φρούριο στα ΑιγόσθENA<sup>8</sup>. Παρατηρήθηκαν τα εξής: απόκλιση από την κατακόρυφο τμημάτων του τείχους και των πύργων, διανοίξεις των αρμών ώσεως μέχρι και 15 cm, αποκολλήσεις των παρειών του τείχους από τον πυρήνα, ανατροπή λιθοπλίνθων των υψηλότερων στρώσεων, τόσο στο τείχος όσο και

<sup>8</sup> [Παχύγιαννη (1991)]. Το σχετικό κεφάλαιο περί Αιγόσθενων βασίζεται στις εκθέσεις αυτοψίας του μηχανικού Αι. Βαζιργιαντζίκη και της εφόρου της Γ' Εφορείας Αρχαιοτήτων Θ. Καράγιωργα.

στους πύργους, κατάρρευση τμήματος του τείχους σε μήκος 12-13 m κτλ. Σοβαρότατες ζημιές έπαθαν οι δύο γωνιακοί πύργοι: Ο νότιος πύργος Α, που είναι και ο επιβλητικότερος των τειχών, απώλεσε τις ανώτατες 5-6 στρώσεις από κάθε πλευρά, των οποίων οι λίθοι, λόγω ειδικών οικοδομικών συνθηκών, κατέπεσαν επί το πλείστον στο εσωτερικό του πύργου, ενώ ο βόρειος τοίχος εμφάνισε κυρτωτική παραμόρφωση προς τα έξω, συνδυαζόμενη, ως συνήθως, με διανοίξεις αρμών από τη στάθμη του ανωφλίου και άνω. Ο βόρειος πύργος D απώλεσε 15 στρώσεις του ανατολικού του τοίχου (οι λίθοι αναγνωρίζονται ακόμη και σήμερα στην παρακείμενη ρεματιά), ενώ παράλληλα παρουσίασε γενική χαλάρωση της δομής του με διανοίξεις αρμών που υπερβαίνουν τα 15-20 cm. Είναι επίσης χαρακτηριστικό ότι αρκετές ζημιές παρατηρήθηκαν μετά τον μετασεισμό της 4ης Μαρτίου 1981, μεγέθους  $M=6.3$ , σε τμήματα της οχύρωσης που είχαν ήδη σοβαρά διαταραχθεί από τον κύριο σεισμό.

### **1999, 7 Σεπτεμβρίου**

Στις 14:57 της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1999 σημειώθηκε ισχυρός σεισμός, μεγέθους  $M=5.9$ , 18 χλμ. βορειοδυτικά του κέντρου της Αθήνας. Από τις διαθέσιμες καταγραφές των επιταχυνσιογράφων, που βρίσκονταν σε απόσταση 9-14 χλμ. από το επίκεντρο του σεισμού, προκύπτει ότι οι μέγιστες οριζόντιες εδαφικές επιταχύνσεις κυμάνθηκαν μεταξύ 0.07 g και 0.50 g, ενώ η δεσπόζουσα περίοδος της δόνησης κυμάνθηκε μεταξύ 0.15 sec και 0.30 sec.

Στη Φυλή (Χασιά), η οποία ανήκει στην πλειόσειστη περιοχή, όπου η ένταση του σεισμού προσδιορίστηκε σε IX, παρατηρήθηκαν σοβαρές βλάβες στο περιώνυμο αρχαίο φρούριο, αλλά και στο νεκροταφείο της πόλης (ανατροπές επιτάφιων σταυρών και διάρρηξη επιτύμβιων πλακών). Στο βράχο της Ακρόπολης, και συγκεκριμένα στον Παρθενώνα, παρατηρήθηκαν διανοίξεις αρμών και εγκάρσιες μετακινήσεις επιστυλίων της τάξης των 2-3 mm, περισσότερο στη ΒΔ γωνία και λιγότερο στις λοιπές γωνίες του κτηρίου, εκ των οποίων, όμως, οι δύο ανατολικές ήσαν προσφάτως αποκατεστημένες με χρήση νέων ενισχύσεων και συνδέσεων. Στα Προπύλαια παρατηρήθηκαν θραύσεις ακμών λόγω συγκέντρωσης τάσεων και μικρομετακινήσεις σπονδύλων. Τέλος, στο Ερέχθειο δεν σημειώθηκαν βλάβες. Συμπερασματικά, οι βλάβες αυτές, συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες του προηγούμενου σεισμού των Αλκυονίδων (1981), είναι κατά πολύ υποδεέστερες.

Ειδικότερα για το Ολυμπίο, δεν αναφέρθηκαν βλάβες που να προκλήθηκαν από αυτό το σεισμό.

# 2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΝΑΟΥ

## ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΗΣ ΑΝΕΓΕΡΣΗΣ ΤΟΥ ΝΑΟΥ ΤΟΥ ΟΛΥΜΠΙΟΥ ΔΙΑ

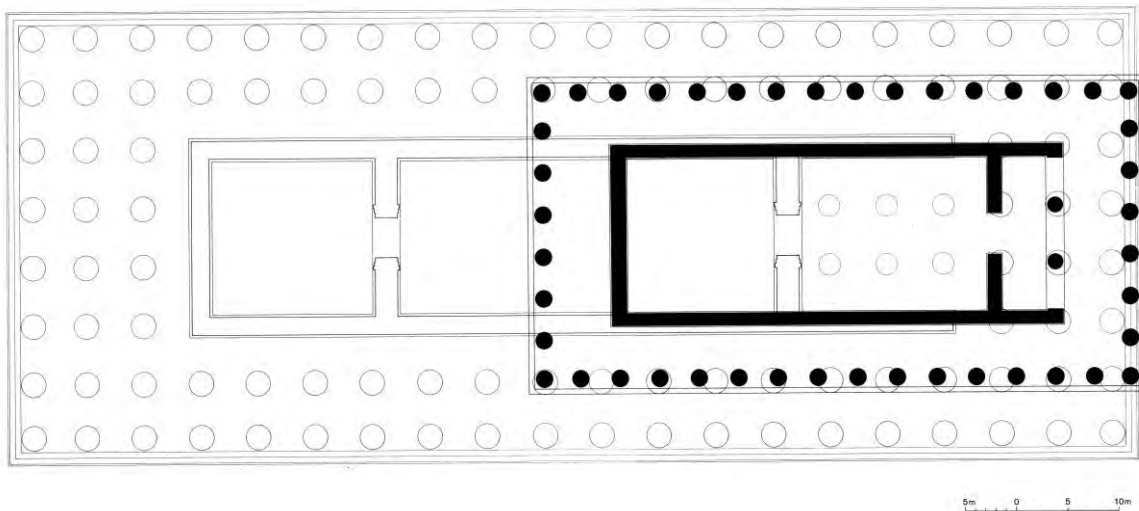
Ο μαρμάρινος ναός του Ολύμπιου Δία στην Αθήνα (Ολυμπιείον) είναι ένας από τους μεγαλύτερους ναούς της αρχαίας Ελλάδας. Δεκαπέντε μόλις χρόνια μετά τα εγκαίνια, που οργάνωσε ο αυτοκράτορας Αδριανός στο τέλος του καλοκαιριού του 131 μ.Χ., τον επισκέπτεται ο Πausanίας και αντικρίζει το αξιοθέατο χρυσελεφάντινο άγαλμα του θεού. Πρόκειται για την τελευταία, και πιο ευτυχισμένη, περίοδο της ανοικοδόμησης του τεράστιου αυτού ναού, που ανταγωνίζεται τα αντίστοιχα παραδείγματα της Ιωνίας: το Ηραίο της Σάμου, το Αρτεμίσιο της Εφέσου και το ναό του Διδυμαίου Απόλλωνα κοντά στη Μίλητο. Πράγματι, αν και ο ναός του Ολύμπιου Δία αποπερατώθηκε τα χρόνια του Αδριανού, η ιστορία της ίδρυσης του φθάνει μέχρι τον 6<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. Χαρακτηριστική είναι άλλωστε η δήλωση του Φιλόστρατου (Σοφιστ. Ι 25, 6): *«Το δε Αθήνησιν Ολύμπιον δι' ἐξήκοντα και πεντακοσίων ετών αποτελεσθέν καθιερώσας ο αυτοκράτωρ, ως χρόνου μέγα αγώνισμα»*.

Η τοποθεσία ανέγερσης του ναού συνδέεται με τη λατρεία του Δία, από τον καιρό ακόμη του κατακλυσμού και τον μυθικό Δευκαλίωνα. Το σχετικά χαμηλό παραίλισιο έξαρμα της γης κοντά στην πηγή της Καλλιρρόης, που ήταν η πλουσιότερη πηγή της Αθήνας, είχε χρησιμεύσει στα προϊστορικά χρόνια ως πυρήνας συνοικισμού. Στη μακρά ιστορία του τεμένους μπορούν να διακριθούν τρεις κύριες φάσεις του ναού:

**ΦΑΣΗ Ι:** Ένας πανάρχαιος ναός του Δία, που ήταν από τους επιβλητικότερους ναούς της πόλης, στα ύστερα γεωμετρικά και πρώτα αρχαϊκά χρόνια. Σύμφωνα με όλες τις ενδείξεις [Toelle–Kastenbein (1994)], ο ναός εκείνος, διαστάσεων 60.50m × 30.00 m, μετρούσε 8 δωρικούς κίονες ύψους 7.50 m στην πρόσοψη και 16 στις μακρές πλευρές. Η κρηπίδα και οι κίονες ήταν κατασκευασμένοι από ασβεστόλιθο, ενώ ο θριγκός και οι

οροφές ήταν ξύλινες. Ο ναός αυτός φαίνεται ότι καταστράφηκε από πυρκαϊά, που προκλήθηκε από πτώση κεραυνού.

**ΦΑΣΗ II:** Ο γιγάντιος δωρικός ναός των Πεισιστρατιδών (Εικ. 2.1), του οποίου ουσιαστικά διάδοχος είναι ο σωζόμενος ναός. Η κατασκευή του ναού άρχισε περί το 529 π.Χ. και διήρκεσε περίπου μία εικοσαετία. Διακόπηκε με την κατάλυση της τυραννίας περί το 510 π.Χ. και τη μεταβολή του αθηναϊκού πολιτεύματος<sup>1</sup>. Αρχιτέκτονες ήταν οι Αντιστάτης, Κάλαιοσχος, Αντιμαχίδης και Πωρίνος (Βιτρ. VII προοίμ. 15).



**Εικ. 2.1.** Ο ναός των Πεισιστρατιδών σε σχέση με τον πανάρχαιο ναό του Δία. Κάτοψη. [Toelle–Kastenbein (1994)].

Οι εργασίες που έγιναν σε αυτό το χρονικό διάστημα περιελάμβαναν τα εξής [Κορρές (1999)]:

- Καθαίρεση του προγενέστερου ναού.
- Εκσκαφή 10000 m<sup>3</sup> εδάφους και λάξευση 2000 m<sup>2</sup> βράχου για την έδραση των θεμελίων.
- Κατασκευή θεμελίων συνολικού όγκου 5000 m<sup>3</sup> με λίθους, που ο καθένας ζύγιζε ένα τόννο κατά μέσο όρο.
- Κατασκευή ευθυνηρίας και κρηπίδας με τρεις βαθμίδες, γενικών διαστάσεων 43.50 m × 110.20 m περίπου και συνολικού όγκου 2000 m<sup>3</sup> περίπου. Η κατασκευή

<sup>1</sup> Είναι χαρακτηριστικό ότι ο Αριστοτέλης θεωρεί τη κατασκευή του ως παράδειγμα επαχθούς έργου, παραβάλλοντάς την μάλιστα με τις πυραμίδες της Αιγύπτου: «παράδειγμα δε τούτου αι τε πυραμίδες αι περί Αίγυπτον και τα αναθήματα των Κυπελιδών και του Ολυπίου η οικοδόμησις υπό των Πεισιστρατιδών, και των περί Σάμον έργων τα Πολυκράτεια».

ήταν υψηλής ακριβείας με λίθους, το βάρος των οποίων κυμαινόταν από ένα έως έντεκα τόννους.

- Δόμηση πολλών κίωνων με διάμετρο βάσης 2.47 m.

Το δομικό του υλικό ήταν πωρόλιθος, ο ονομαζόμενος και *ακτίτης λίθος*, γιατί προερχόταν από τα λατομεία της πειραϊκής ακτής, που βρίσκονταν σε απόσταση 12 χλμ. από τον τόπο ανέγερσης του ναού [Κορρές (1993)]. Η διακοπή της ανέγερσης του ναού συνέβη όταν οι κίονες της περίπτωσης είχαν ήδη συμπληρωθεί κατά τα δύο τρίτα, φτάνοντας σε ύψος οκτώ μέτρων περίπου.

Η οικοδομική πολιτική της νεοσύστατης δημοκρατίας συνδύασε τη διακοπή της κατασκευής του Ολυμπίου με την έναρξη ενός άλλου μεγαλεπίβολου έργου: την κατασκευή ενός μεγάλου πώρινου ναού της Αθηνάς Παρθένου στην Ακρόπολη, στη θέση του σημερινού Παρθενώνα, σε αντικατάσταση του αντίστοιχου αρχαϊκού πώρινου περίπτερου. Οι κίονες αυτού του Παρθενώνα, ολιγότεροι αλλά όχι μικρότεροι εκείνων του Ολυμπίου, ήταν εύλογο να παραχθούν στα πειραϊκά λατομεία από όγκους, που αρχικά προορίζονταν για το Ολυμπείο. Με αυτόν τον τρόπο, αφ' ενός θα γινόταν εκμετάλλευση της έως τότε παραγωγής λίθων και αφ' ετέρου οι εργαζόμενοι στο παυθέν έργο δεν θα έμεναν άνεργοι. Η μεταφορά όμως των σπονδύλων και των επιστυλίων, βάρους 15 τόννων, από τον Πειραιά στην Ακρόπολη παρουσίασε σημαντικά προβλήματα. Ο κλεισθένης Παρθενώνας έμεινε και αυτός ημιτελής και το μόνο που θυμίζει σήμερα την προετοιμασία της κατασκευής του είναι το γιγάντιο συμπαγές βάθρο του κάτω από τον περίκλειο Παρθενώνα.

Τριάντα χρόνια μετά τη διακοπή του έργου (479 π.Χ.), αρκετοί σπόνδυλοι, αφού τεμαχίστηκαν, χρησιμοποιήθηκαν στην ανέγερση του ανατολικού βραχίονα του θεμιστόκλειου τείχους<sup>2</sup>. Το γεγονός ότι αφαιρέθηκαν μόνο σπόνδυλοι και όχι λίθοι της κρηπίδας καθιστά πιθανόν ότι υπήρχε ακόμη η πρόθεση μελλοντικής συνέχισης του έργου επάνω στην ίδια κρηπίδα, αλλά με μαρμάρινους κίονες. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η προτίμηση για μαρμάρινους κίονες είχε ήδη εφαρμοστεί προ μιας δεκαετίας στον Παρθενώνα, με συνέπεια τη ματαίωση του μεγάλου πώρινου ναού χάριν του πρώτου μαρμάρινου διαδόχου του. Το ημιτελές έργο παρέμεινε στις παρυφές της πόλης για περισσότερο από 300 χρόνια, ως ένα επιβλητικό ερείπιο της τυραννίας: «*Ολύμπιον ημιτελές μεν κατάπληξιν δ' έχον την της οικοδομίας υπογραφήν, γενόμενον δ' αν βέλτιστον είπερ συνετελέσθη*» (Ηρακλείδης κριτικός, “Περί των εν τη Ελλάδι πόλεων”).

---

<sup>2</sup> Ορισμένοι από τους τεμαχισμένους αυτούς σπονδύλους βρίσκονται ακόμα και σήμερα στη βόρεια πλευρά του περιβόλου.

**ΦΑΣΗ III:** Ο ελληνιστικός μαρμάρινος ναός, κορινθιακού ρυθμού, που, κατά τις φιλολογικές πηγές, άρχισε να κτίζεται επί των Πεισιστράτιων θεμελίων το 174 π.Χ. από τον ηγεμόνα της Συρίας Αντίοχο τον Επιφανή, ο οποίος βασίλευε στη Συρία από το 176 έως το 165 π.Χ. Είναι γνωστό [Τραυλός (1993)] ότι κατά τον 2<sup>ο</sup> π.Χ. αιώνα παρατηρείται μεγάλη άνθηση στην πόλη της Αθήνας με την ανέγερση μεγάλων μνημείων<sup>3</sup>, που οφείλεται κυρίως στη γενναιοδωρία των ισχυρών βασιλέων της Περγάμου και της Συρίας.

Ο μαρμάρινος ναός κατέλαβε ακριβώς την κρηπίδα του προκατόχου του, μετά από απλή αντικατάσταση των ορατών λίθων της δεύτερης βαθμίδας και του στυλοβάτη με αντίστοιχους μαρμάρινους. Οι πώροι λίθοι που αντικαταστάθηκαν, καθώς και πολλοί πώρινοι σπόνδυλοι που είχαν απομείνει, χρησιμοποιήθηκαν στα μεμονωμένα θεμέλια της εσώτερης περίπτωσης. Η συνύπαρξη της πρώτης πώρινης βαθμίδας της αρχικής κρηπίδας με τις υπερκείμενες νέες μαρμάρινες δεν αποτελεί εξαιρετική ανωμαλία και συναντάται και σε άλλες περιπτώσεις, όπως στον αρχικό μαρμάρينو Παρθενώνα και στο μαρμάρينو ναό του Ηφαίστου, όπου η πρώτη βαθμίδα δεν είναι μαρμάρινη.

Για πρώτη φορά στην ιστορία της αρχαίας αρχιτεκτονικής χρησιμοποιήθηκαν κορινθιακού ρυθμού κιονόκρανα στην περίπτωση ενός μεγάλου ναού. Μέχρι τότε, κορινθιακά κιονόκρανα εφαρμόζονταν κυρίως στους εσωτερικούς χώρους, π.χ. στο ναό του Επικούριου Απόλλωνα στις Βάσσεις, στο ναό της Αθηνάς στην Τεγέα, στο θόλο της Επιδαύρου κ.τ.λ.

Όπως αναφέρθηκε, η έναρξη της οικοδομίας του μαρμάρινου Ολυμπίου αποδίδεται στον Αντίοχο τον Επιφανή. Ωστόσο, πρόσφατη συστηματική μελέτη και κατάταξη των λίθων του κτηρίου με βάση ασφαλή τεχνολογικά κριτήρια [Κορρές (1999)] απεκάλυψε την ύπαρξη μιας πολύ παλαιότερης, άγνωστης και ίσως αμάρτυρης φάσης του μαρμάρινου ναού. Οι περισσότεροι από τους διατηρημένους είκοσι λίθους των τοίχων παρουσιάζουν τα ίδια οικοδομικά γνωρίσματα, που διαφέρουν ριζικά από την οικοδομική πρακτική της εποχής του Αντίοχου και είναι ίδια με εκείνα των λίθων του Παρθενώνα και των άλλων αθηναϊκών έργων της κλασικής εποχής: εντορμίες συνδέσμων μορφής διπλού ταυ όπως στο Ερέχθειο, αναθυρώσεις και οπές ανύψωσης με καρκίνο όπως στον Παρθενώνα, κατεργασία εδρών όπως στα Προπύλαια κλπ. Η όψη αυτών των λίθων παρουσιάζει πινάκωση (περιμετρικές βαθμιδωτές ταινίες) περισσότερο εξελιγμένη εκείνης των λίθων των Προπυλαίων και μάλλον παρόμοια με εκείνη των λίθων του μνημείου του Λυσικράτους. Με βάση αυτά τα γνωρίσματα, η κατασκευή του σηκού του Ολυμπίου μπορεί να χρονολογηθεί στην κλασική εποχή με κατώτερο δυνατό όριο τους χρόνους του

---

<sup>3</sup> Την εποχή αυτή ιδρύονται στην Αθήνα η στοά του Ευμένους του Β' (197-159 π.Χ.) στη νότια πλευρά της Ακρόπολης, η στοά του Απάλου του Β' (159-138 π.Χ.) στην αγορά κ.τ.λ.

Λυκούργου (μία μικρή ανασκαφή μέσα από τη ΝΑ γωνία δεν εντόπισε όστρακα παλαιότερα του 2<sup>ου</sup> π.Χ. αιώνα). Ο Αντίοχος, επομένως, είναι μόνον ο συνεχιστής της κατασκευής του μαρμάρινου ναού και όχι εκείνος που την άρχισε. Ακολούθως, ο αρχιτέκτονας του Αντιόχου Cossutius δεν είναι ο σχεδιαστής του μαρμάρινου ναού, αλλά απλώς ο υπεύθυνος για την εφαρμογή προϋπάρχοντος σχεδίου. Το συμπέρασμα αυτό εναρμονίζεται με τη διατύπωση που χρησιμοποιεί ο Βιτρούβιος αναφερόμενος στο ρόλο του Cossutius (VII, προοίμ. 17) και ειδικότερα με τη διευκρινιστική παρατήρηση περί μη ύπαρξης σχετικού συγγράμματος του ρωμαίου αρχιτέκτονα.

Ο ναός, αφού στήθηκαν οι περισσότεροι κίονες με τα επιστύλια τους και αποπερατώθηκε ο σηκός<sup>4</sup>, παρέμεινε για δεύτερη φορά ημιτελής, λόγω του πρόωρου θανάτου του Αντιόχου (175-164 π.Χ.)<sup>5</sup>. Τρεις σχεδόν αιώνες αργότερα, ο αυτοκράτορας Αδριανός κατά την πρώτη επίσκεψή του στην Αθήνα (124 μ.Χ.) ανέλαβε το έργο της αποπεράτωσης του γιγάντιου έργου<sup>6</sup> (Εικ. 2.2 και 2.3). Την περίοδο αυτή κατασκευάστηκε και ο ευρύχωρος περίβολος του ναού, διαστάσεων 205.80 m × 128.70 m, ο οποίος οριοθετείται από αναλημματικό τοίχο, ενισχυμένο με χτιστές αντηρίδες ανά 5.30 m. Αθηναίοι τίμησαν τον αυτοκράτορα για τις ευεργεσίες του στην πόλη με την ανέγερση του τόξου, γνωστού ως «πύλη του Αδριανού», που υψώνεται κοντά στη βορειοδυτική γωνία του περιβόλου.

## Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ ΝΑΟΥ

Η κάτοψη του Ολυμπίειου αντιστοιχεί σε δίπτερο ναό με 2×20 κίονες στις μακρές πλευρές και σε τρίπτερο με 3×8 κίονες στις στενές πλευρές, ήτοι συνολικά  $2 \times (2 \times 20 + 3 \times 4) = 104$  κίονες στην περίσταση. Το ύψος των κιόνων φθάνει τα 16.89 m, η διάμετρος της κάτω βάσης δεν υπερβαίνει τα 1.92 m (1.94 m για τους γωνιακούς κίονες). Οι διαστάσεις αυτές τους κατατάσσουν μεταξύ των μεγαλύτερων που απαντώνται σε κλασικούς ναούς (Εικ. 2.4). Ο λόγος ύψους προς διάμετρο είναι 8.81. Πρόκειται για την υψηλότερη τιμή αναλογιών σωζομένου κίονα στην Ελλάδα. Ωστόσο, για κορινθιακό κίονα η τιμή αυτή είναι μάλλον χαμηλή (λίγο αργότερα το ύψος τέτοιων κιόνων φθάνει ή και υπερβαίνει τις 10 διαμέτρους).

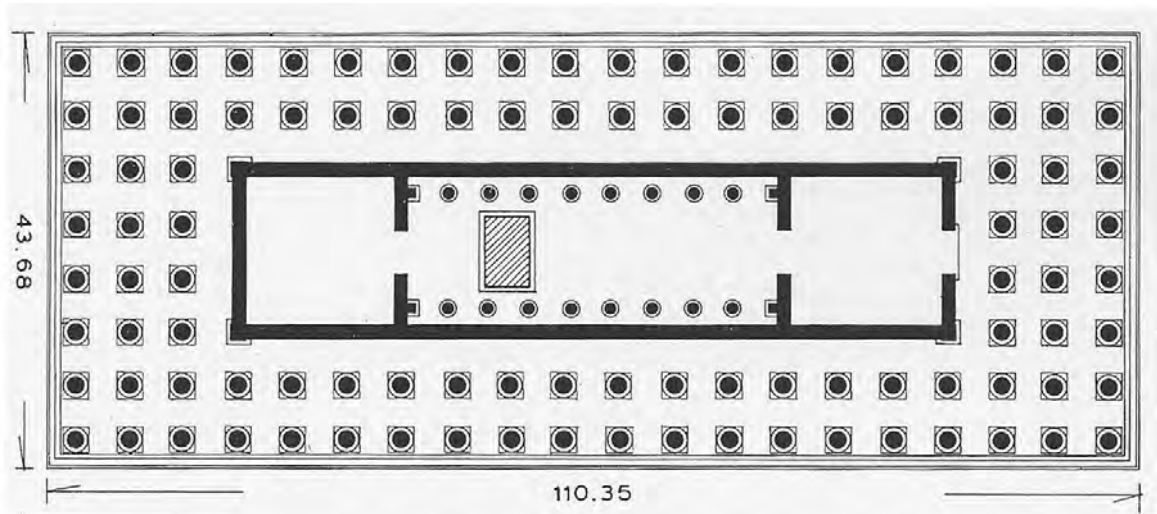
---

<sup>4</sup> Οι μονολιθικοί εσωτερικοί κίονες, που απέσπασε ο Σύλλας το 86 π.Χ. για την επισκευή του κατεστραμμένου από πυρκαϊά ναού του Καπιτωλίου Διός στη Ρώμη, ανήκουν σε αυτή τη περίοδο ανέγερσης του ναού (Πλιν. Φυσ. Ιστ. 36, 45).

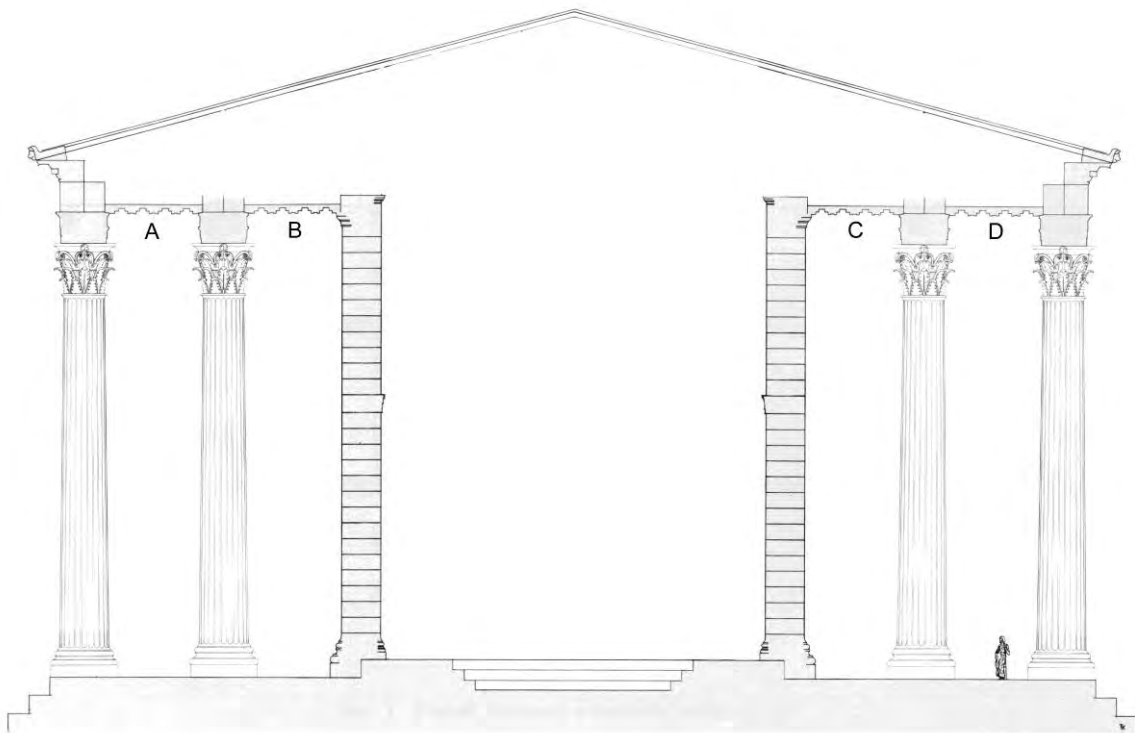
<sup>5</sup> Ο ρωμαίος Βιτρούβιος, στο γνωστό περί αρχιτεκτονικής σύγγραμμά του, αναφέρεται στον ημιτελή ναό του Αντιόχου, τον οποίο θεωρεί ως παράδειγμα οκτάστυλου δίπτερου ναού με ύπαιθρο σηκό [Παπαχατζής (1983)].

<sup>6</sup> Είχε μεσολαβήσει κάποια προσπάθεια συνέχισης του έργου στα χρόνια του Αυγούστου (Σουετώνιος).

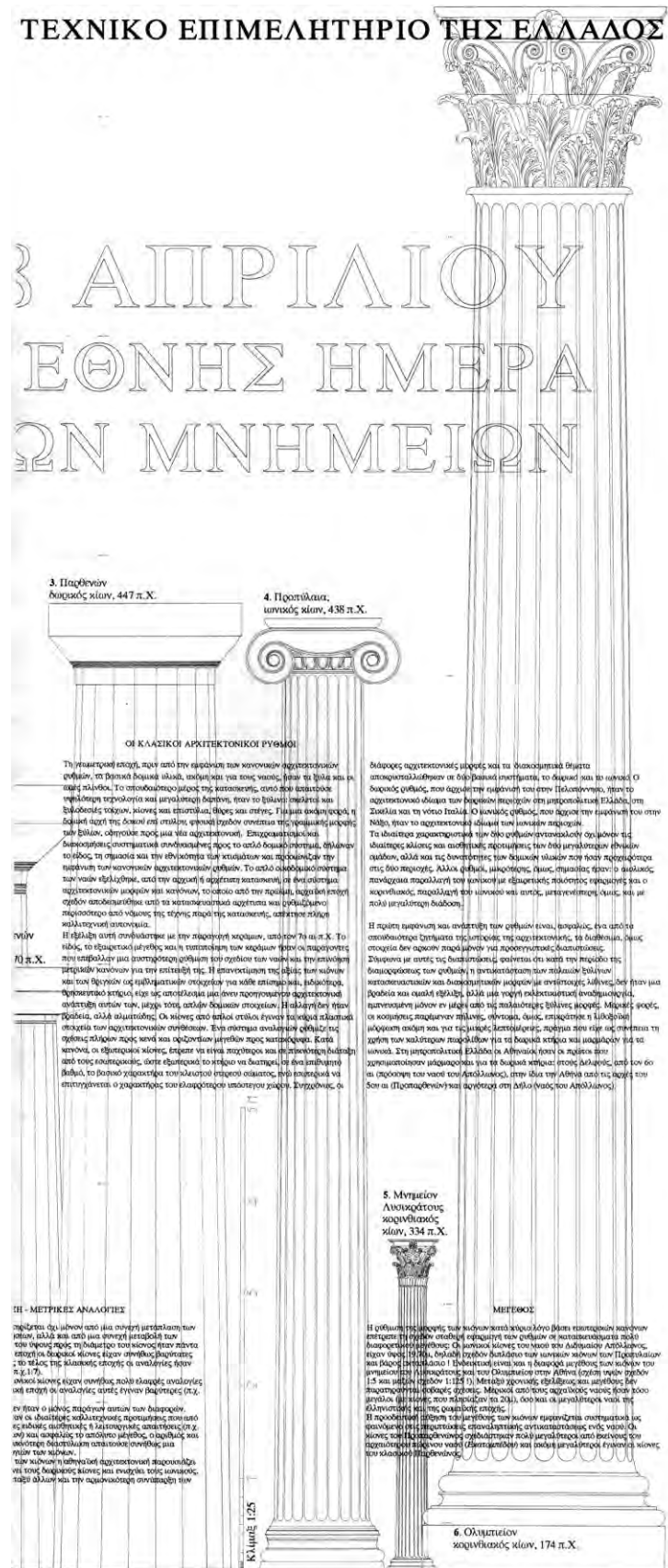




**Εικ. 2.2.** Ο ναός του Ολύμπιου Δία κατά την αποπεράτωσή του από τον αυτοκράτορα Αδριανό. Κάτοψη. [Travlos (1980)].



**Εικ. 2.3.** Ο ναός του Ολύμπιου Δία. Εγκάρσια τομή [τροποποιημένο σχέδιο Toelle-Kastenbein (1994)]. Στις περιοχές B και C οι οροφές δεν τοποθετήθηκαν ποτέ.



**Εικ. 2.4.** Σύγκριση του μεγέθους του κίονα του Ολυμπιείου (δεξιάς κίονας) με άλλους κίονες κλασικών ναών (από αφίσα Συνεδρίου ΤΕΕ, σχέδιο Μ. Κορρέ).

Η ποσότητα μαρμάρου που χρησιμοποιήθηκε ήταν τόσο μεγάλη, ώστε φαίνεται πως εξαντλήθηκε το μάρμαρο από την κεντρική περιοχή του Πεντελικού. Υπολογίζεται ότι μόνο για τους κίονες του ναού χρησιμοποιήθηκαν 15500 τόννοι μαρμάρου, ποσότητα τετραπλάσια από αυτήν που χρειάστηκε για να κατασκευαστούν οι κίονες του Παρθενώνα [Gruben (1986)].

Μελέτη του διάσπαρτου και του κατά χώραν υλικού από τον Μ. Κορρέ επέτρεψε την ανακάλυψη και τη συστηματική κατάταξη πλείστων λεπτομερειών της κατασκευής και τη γραφική αποκατάσταση των χαμένων μερών του κτηρίου. Τα κυριότερα αποτελέσματα αυτής της μελέτης είναι:

- Η πρώτη βαθμίδα της κρηπίδας, έξοχο δείγμα της τελειότητας του αρχαιότερου ναού, είχε ύψος περίπου 0.63 m, πλάτος, χωρίς το άπεργον, περίπου 0.60 m και περιείχε 216 εξωτερικούς λίθους με περίτεχνα άπεργα, όχι μόνο στο μέτωπο, αλλά και στην άνω επιφάνεια. Η δεύτερη βαθμίδα, η οποία ήταν μαρμαρίνη και ελαφρώς υψηλότερη, περιείχε 220 λίθους.
- Ο στυλοβάτης της ανατολικής και της δυτικής πλευράς ήταν μαρμαρίνος σε όλο το πλάτος του. Ο στυλοβάτης των μακρών πλευρών ήταν κατά τα μετακίονια πλήρως μαρμαρίνος, ενώ το υπό τους κίονες μή ορατό μέρος του ήταν πώρινο. Μαζί με τους τέσσερις γωνιακούς, περιείχε 168 λίθους ολικού βάρους χιλίων και πλέον τόννων.
- Οι πλίνθοι των κιόνων, πλην των γωνιαίων, ήταν δίλιθες, ενώ εκείνες των γωνιαίων ήταν σύμφυτες με τις επ' αυτών βάσεις (λίθοι βάρους 16 τόννων).
- Τα κιονόκρανα αποτελούνται από δύο επάλληλους, κατάλληλα προσαρμοσμένους λίθους.
- Οι τοίχοι είχαν πάχος περίπου 1.7 m και πλην τοιχοβάτου και ορθοστατών περιείχαν 23 στρώσεις ύψους περίπου 0.61 m, εκ των οποίων η κατώτερη και ανώτερη αποτελούνταν από διάτονους λίθους, οι δε λοιπές από ημιδιάτονους και δρομικούς. Τα μέτωπα των λίθων, πλην των ακραίων, είχαν μήκος περίπου 1.15 m. Μαζί με τα επίτοιχα επιστύλια, οι τοίχοι περιείχαν σχεδόν 8500 λίθους συνολικού βάρους 18000 τόννων.
- Τη στήριξη των οροφών υπηρετούσαν 188 δοκοί συνολικού βάρους 1280 τόννων, οι οποίες γεφύρωναν την απόσταση των θριγκών επάνω από τις κιονοστοιχίες και τους τοίχους. Στις γωνίες του εξωτερικού και του εσωτερικού πτερού, οκτώ ειδικές ισχυρές δοκοί-προεκτάσεις της ανώτερης ζώνης του θριγκού επέτρεπαν την έδραση των ακραίων δοκών εκάστου πτερού. Οι δοκοί έφεραν 712 φατνωματικές

πλάκες ολικού βάρους 1350 τόννων, οι οποίες περιείχαν 1424 φατνώματα. Μαζί με τις μεταδόκιες πλάκες, οι οροφές αριθμούσαν 1442 λίθους συνολικού βάρους 3000 τόννων.

- Ο εξωτερικός θριγκός περιείχε ζωφόρο ύψους 0.97 m, λίθοι της οποίας σώζονται, αλλά δυστυχώς με κατεστραμμένη την εξωτερική επιφάνεια.
- Η ύπαρξη “οδόντων” επάνω από τη ζωφόρο, των οποίων δυστυχώς δεν βρέθηκαν ακόμη κατάλοιπα, αποδεικνύεται από υπολογισμούς βασισμένους στα μέτρα των γείσων και των περιμετρικών στοιχείων της κεράμωσης.
- Σε κάθε μεταξόνιο αντιστοιχούσαν πέντε λίθοι του οριζόντιου γείσου (264 λίθοι ολικού βάρους 720 τόννων) και οκτώ διαστήματα της κεράμωσης.
- Η μαρμάρινη κεράμωση περιείχε 152 περιμετρικούς λίθους σίμης, ολικού βάρους 400 τόννων, 11396 στρωτήρες πλάτους 0.68 m και μήκους 0.67 m, 11470 κοινούς καλυπτήρες και 154 κορυφαίους καλυπτήρες.

Ο ναός, ακολουθώντας τις αντιλήψεις των ελληνιστικών χρόνων, παρουσιάζει έναν αυστηρό γεωμετρικό κάναβο, επί του οποίου εντάσσονται όλα τα αρχιτεκτονικά του στοιχεία [Κορρές (1999)]:

- Τα μεταξόνια στις όψεις είναι  $L=5.50$  m και στις μακρές πλευρές  $L=5.53$  m.
- Τα αντίστοιχα πλάτη των επιστυλίων είναι 1.83 m και 1.84 m, δηλαδή  $2/6 L$ .
- Τα πλάτη των δοκών είναι  $B=0.917$  m, δηλαδή  $1/6 L$ .
- Τα διαστήματα των φατνών είναι 1.83 m στις όψεις και 1.84 m στις μακρές πλευρές, δηλαδή  $2/6 L$ .
- Τα μήκη λιθοπλίνθων είναι 1.14 m στις όψεις και 1.19 m στις μακρές πλευρές, δηλαδή  $5/4 B$  ( $B$ =πλάτος δοκού).
- Το μέτρο της κεράμωσης είναι 0.68 m στις όψεις και 0.67 m στις μακρές πλευρές, δηλαδή  $1/8 L$ .

Το γενικό μετρικό σύστημα του ναού, θεωρώντας ως εμβάτη (= κοινός διαιρέτης των μεγάλων μέτρων)  $E=0.23$  m = 12.5 δάκτυλοι, συνοψίζεται ως εξής:

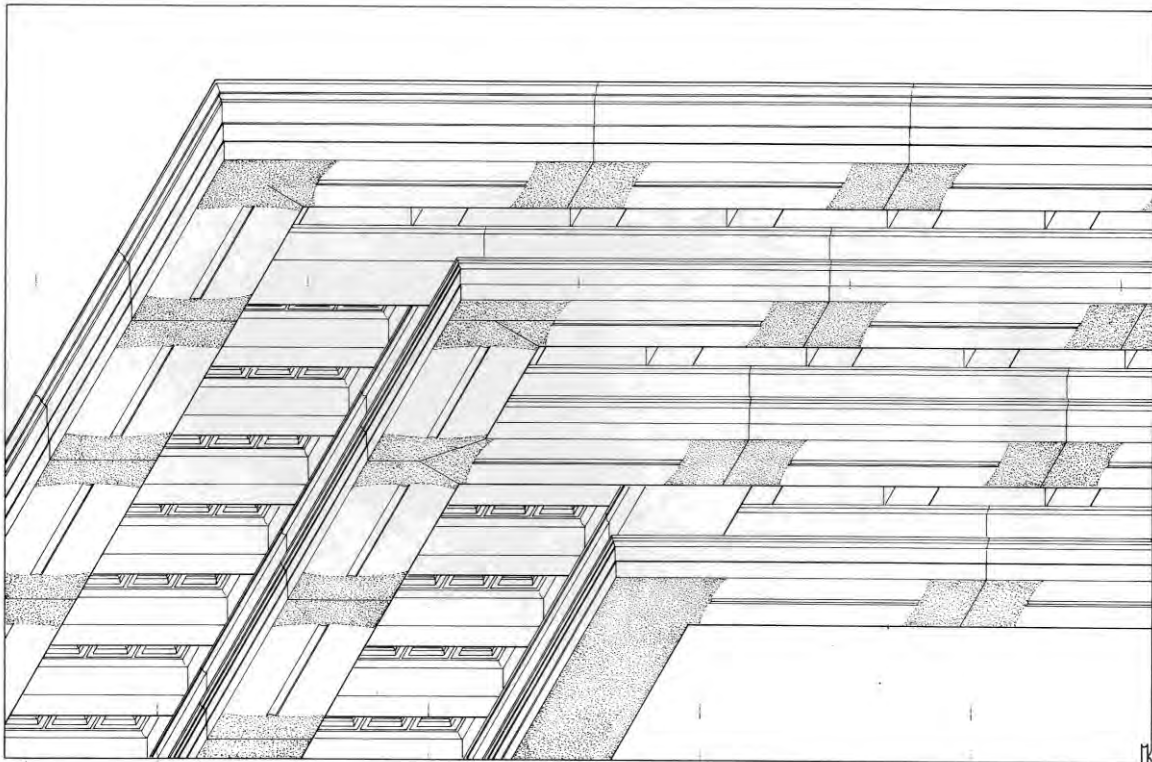
- Μεταξόνιο  $L = 24E$
- Θεμελιώδες μέτρο (πλάτος) επιστυλίου =  $8E$
- Θεμελιώδες μέτρο φατνωματικών οροφών =  $4E$  (πλάτος δοκού  $4E$ , άξονες φατνωμάτων ανά  $4E$ )

- Θεμελιώδες μέτρο σηκού = 5Ε
- Θεμελιώδες μέτρο στέγης = 3Ε.

Αρχιτεκτονικά σχέδια του Μ. Κορρέ, που δείχνουν τη διαμόρφωση διαφόρων στοιχείων του ναού, παρουσιάζονται στις Εικ. 2.5, 2.6 και 2.7.

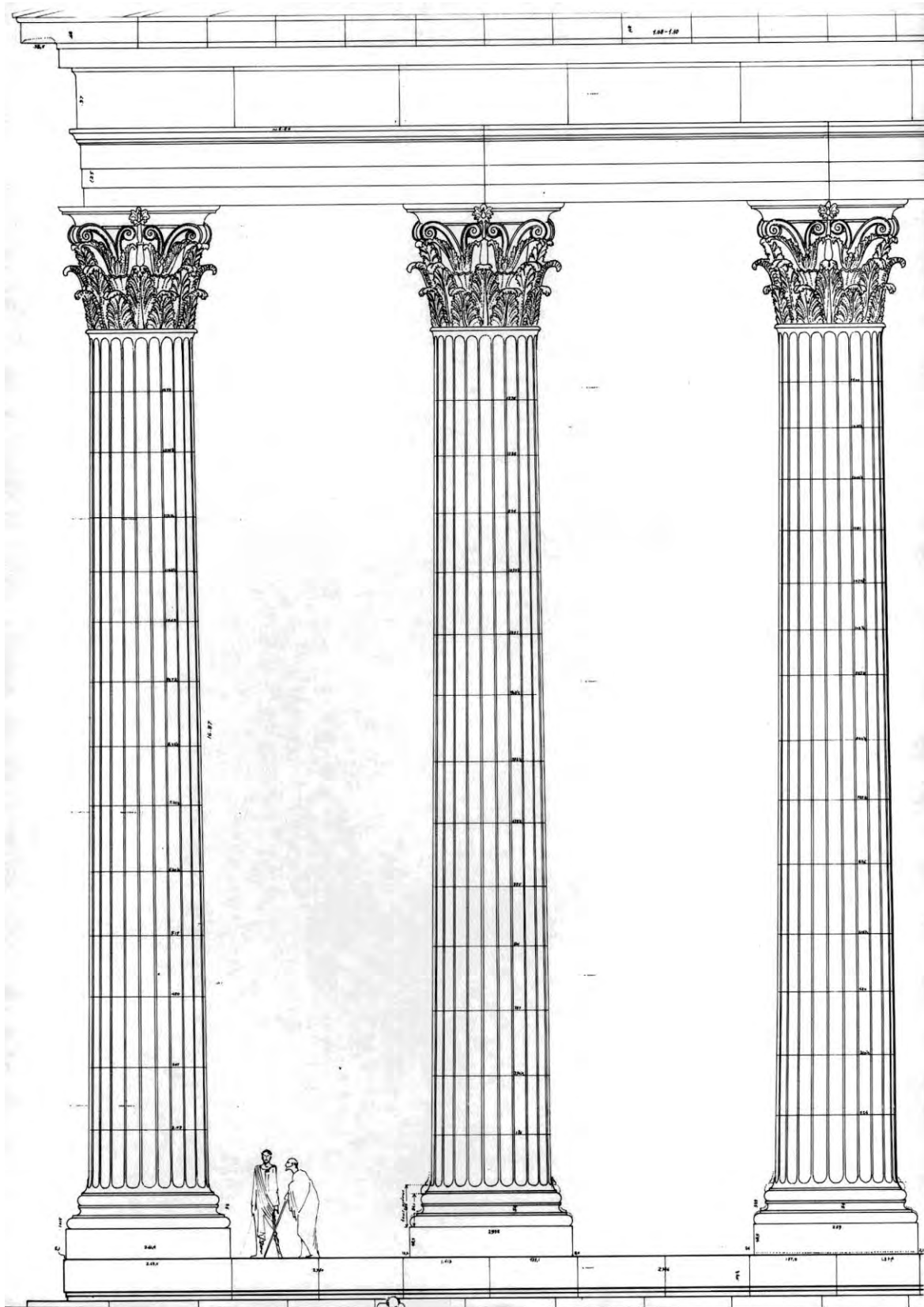
## ΕΡΕΙΠΩΣΗ ΤΟΥ ΜΝΗΜΕΙΟΥ ΚΑΙ ΣΩΣΤΙΚΕΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ

Αν στους αρχαίους χρόνους ο Πausanίας είναι ο τελευταίος που επισκέπτεται και σχολιάζει το ναό του Ολυμπίου Διός (146 μ.Χ.), στους νεώτερους χρόνους η πρώτη αναφορά στο μνημείο γίνεται από έναν άλλο “επίδοξο” Πausανία, τον Κυριακό Pizzicollì από την Αγκώνα, τον επονομαζόμενο Αγκωνίτη. Ο Κυριακός επισκέπτεται τη φραγκοκρατούμενη Αθήνα το 1436 και αναγνωρίζει τα ερείπια του Ολυμπίου ως ανάκτορο του Αδριανού<sup>7</sup> [Gregoroni (1889)]. Σε 13 αιώνες, η καταστροφή που υπέστη ο περίλαμπρος ναός είναι συντριπτική:

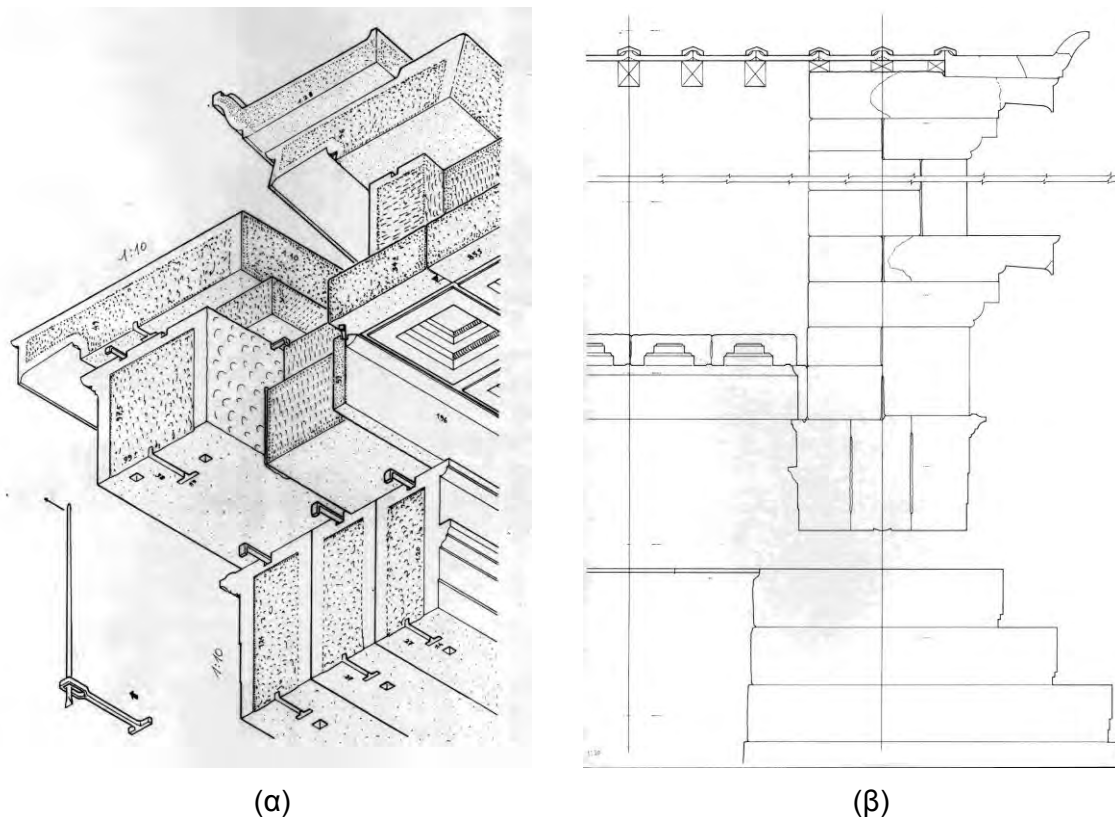


**Εικ. 2.5.** Αξονομετρική άνοψη της οροφής (Μ. Κορρές).

<sup>7</sup> Ο πρώτος που αναγνώρισε το γνωστό, από τις αναφορές του Βιτρούβιου και του Πausανία, ναό του Ολυμπίου Διός ήταν, το 1675, ο J. Transfeldt.



Εικ. 2.6. Αναπαράσταση τμήματος της πρόσοψης του ναού (Μ. Κορρές).



**Εικ. 2.7.** Λεπτομέρειες: (α) τοποθέτησης επιστυλίων και (β) διαμόρφωσης οροφής (Μ. Κορρές).

- Από το αρχικό “δάσος” των 104 κίωνων της περίπτωσης, οι απομένοντες ιστάμενοι κίονες του μεγάλου αυτού ναού, είναι μόλις 21. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για την ίδρυση των κίωνων χρησιμοποιήθηκαν 15.500 τόνοι μαρμάρου.
- Η ανωδομή του ναού (οροφές, ζωφόρος, κεράμωση) απουσιάζει, πλην ορισμένων επιστυλίων. Πρόκειται για μια τεράστια ποσότητα μαρμάρου. Πράγματι, όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα, σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες [Κορρές (1999)] μόνο για τη στήριξη των οροφών είχαν χρησιμοποιηθεί 188 δοκοί βάρους 1.280 t, οι οποίες έφεραν 712 φατνωματικές πλάκες βάρους 1.350 t. Εξ άλλου η κεράμωση αριθμούσε συνολικά (στρωτήρες και καλυπτήρες) περί τους 23.000 λίθους.
- Ο σηκός έχει επίσης διαλυθεί. Πρόκειται για την αποσυναρμολόγηση τοίχων πάχους 1.70 m οι οποίοι περιείχαν σχεδόν 8.500 λίθους, ολικού βάρους 18.000 t.

Με ποιόν τρόπο εξαφανίστηκαν δεκάδες χιλιάδες τόνοι μαρμάρου σε 1300 χρόνια είναι εν πολλοίς άγνωστο. Είναι όμως γνωστό ότι, κάτι περισσότερο από ένα αιώνα μετά την επίσκεψη του Πausανία, η απειλή των ληστρικών επιδρομών Γότθων και Ερούλων,

αναγκάζει τον αυτοκράτορα Βαλεριανό (253-260 μ.Χ.) να επισκευάσει τα τείχη της πόλης. Στο βαλεριάνιο τείχος ενσωματώνεται τμήμα της νοτιοδυτικής γωνίας του περιβόλου του Ολυμπίου. Παρ' όλα αυτά, οι Έρουλοι καταλαμβάνουν και πυρπολούν την πόλη, προκαλώντας τρομακτικές καταστροφές. Αν και η κατοχή της πόλης από τους επιδρομείς δεν διήρκεσε επί μακρόν, οι ζημιές από τις πυρπολήσεις των δημόσιων οικοδομημάτων ήταν τεράστιες [Τραυλός (1993)]. Προφανώς ο ναός του Ολυμπίου Διός, ευρισκόμενος μάλιστα στα όρια του υστερορωμαϊκού τείχους, θα είχε γνωρίσει τις πρώτες λεηλασίες. Ο χώρος φαίνεται ότι μεταβάλλεται σε ένα τεράστιο ερειπιώνα, που αποτελεί ανεξάντλητη πηγή τροφοδοσίας της ασβεστοκάμινου, αλλά και προσπορισμού οικοδομικού υλικού (Εικ. 2.8).

Αν επί της εποχής του Κυριακού του Αγκωνίτου τον 15ον αιώνα, λίγα μόλις χρόνια πριν την κατάληψη της πόλης από τους Τούρκους, διεσώζοντο 21 κίονες, επί τουρκοκρατίας και ως το τέλος του 18ου αιώνα ο αριθμός τους είχε μειωθεί σε 17. Πράγματι, το 1753, οι αρχιτέκτονες Stuart και Revett σχεδιάζουν 17 κίονες: τους 13 κίονες της νοτιοανατολικής γωνίας, 3 κίονες της εσωτερικής σειράς του νότιου πετρού, και ένα μεμονωμένο κίονα της δυτικής πλευράς (Εικ. 2.9). Ο κίονας αυτός<sup>8</sup> (Εικ. 2.10) ανατινάχτηκε το 1759 από τον βοεβόδα της Αθήνας Γ. Τζισδαράκη<sup>9</sup>. Χρειάστηκαν 4 εκρήξεις για να ανατραπεί και οι σπόνδυλοί του χρησίμευσαν τελικά ως πρώτη ύλη της ασβεστοκάμινου που προμήθευε με ασβέστη το Κουρσουνού τζαμί στην πλατεία Μοναστηρακίου<sup>10</sup> [Bracken (1983)] .

Η τελευταία καταστροφή στο μνημείο συνέβη σχετικά πρόσφατα, τον Οκτώβριο του 1852. Τότε μια τρομερή φθινοπωρινή ανεμοθύελλα σάρωσε την Αθήνα, προξενώντας σημαντικές καταστροφές στην πόλη, καθώς και στις παράλιες περιοχές της Αττικής. Η θύελλα αυτή ανέτρεψε τον μεσαίο από τους τρεις κίονες της νότιας πλευράς (Εικ. 2.11). Ο κίονας κείται ακόμη και σήμερα στη θέση της πτώσης του, με την χαρακτηριστική (υπό τύπον ντόμινο) διάταξη των σπονδύλων του (Εικ. 2.12). Μετά το τελευταίο αυτό συμβάν, απομένουν ιστάμενοι μέχρι σήμερα στο μνημείο 15 από τους 104 αρχικά ιδρυμένους κίονες.

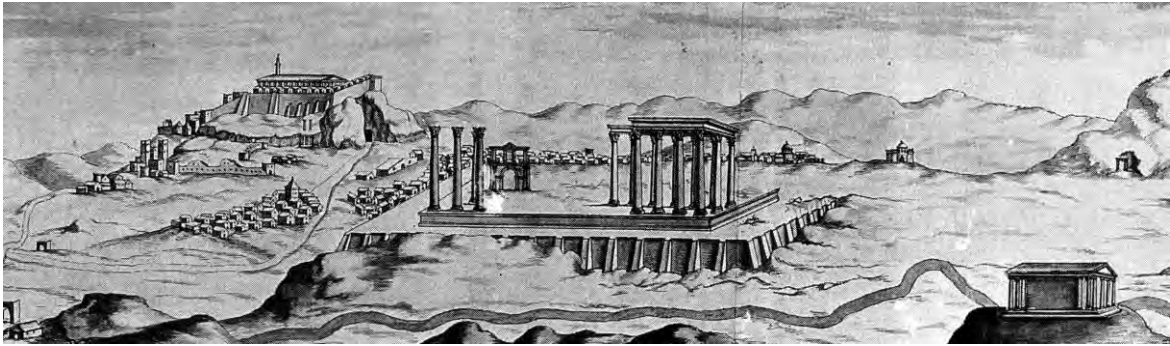
---

<sup>8</sup> Απεικονίζεται και σε ένα σχέδιο του M. le Roy, το 1755 (Εικ. 2.10).

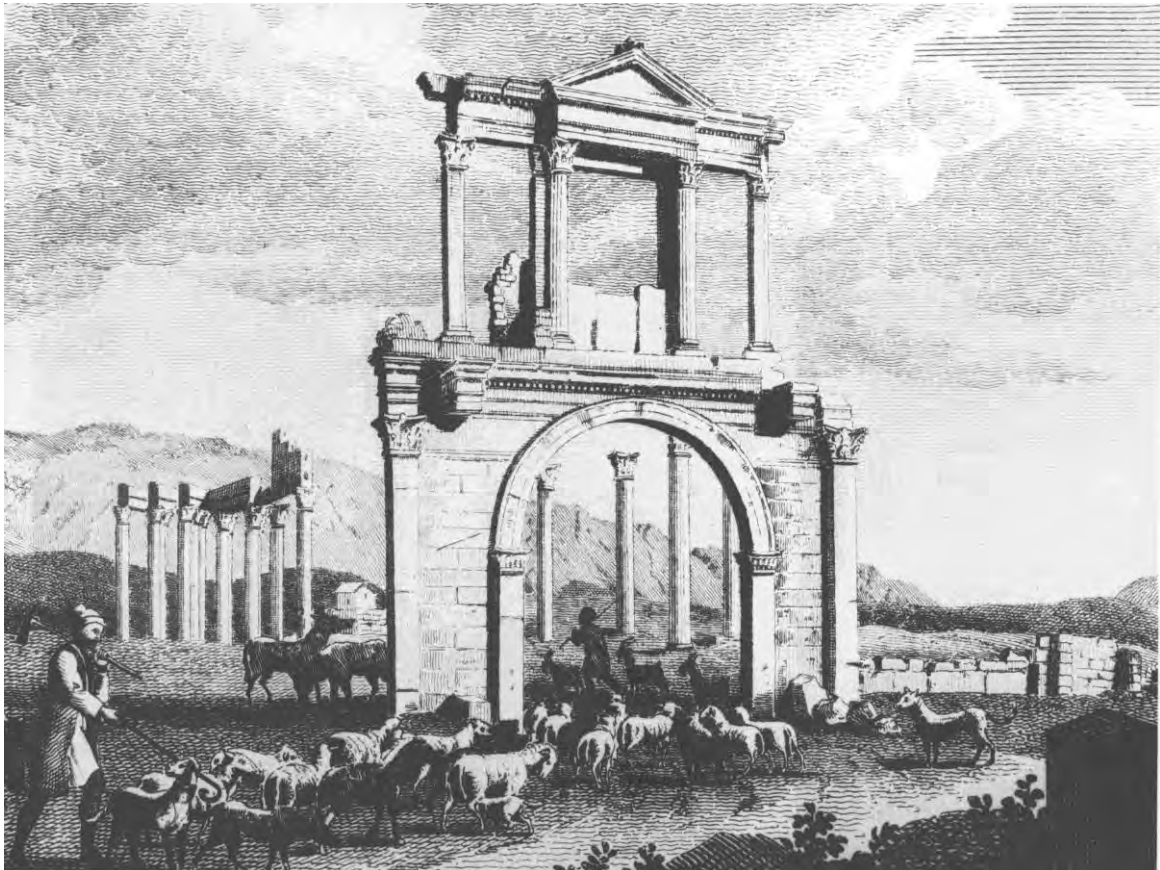
<sup>9</sup> Οι Αθηναίοι κατήγγειλαν την πράξη του στο σουλτάνο, ο οποίος του αφαίρεσε το αξίωμα και τον εξεδίωξε από την πόλη [Μπίρης (1966)].

<sup>10</sup> Πολυάριθμα θραύσματα του μνημείου, που βρίσκονται ακόμη και πάνω στην Ακρόπολη, προέρχονται από τη διάλυση των κτισμάτων της τουρκικής περιόδου.

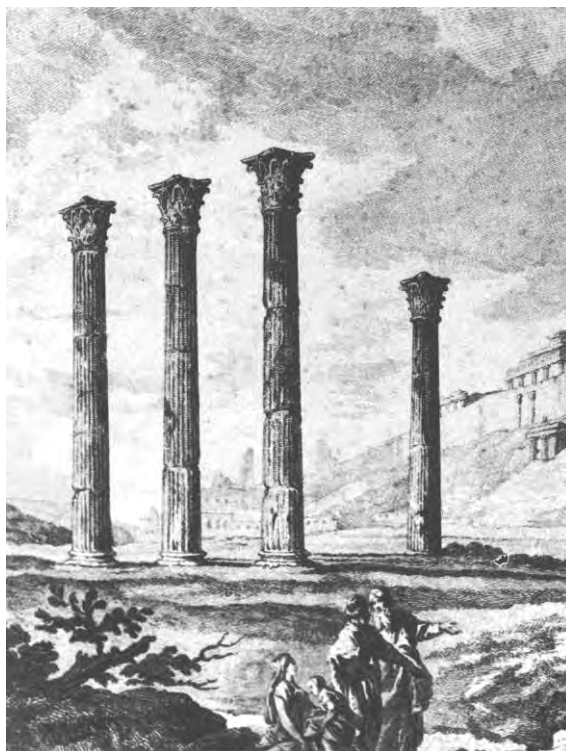




*Εικ. 2.8. Ο ναός του Ολύμπιου Δία και η Ακρόπολη. Σχέδιο αγνώστου προ του 1687.*



*Εικ. 2.9. Η Πύλη του Αδριανού και ο ναός του Ολύμπιου Δία. Σχέδιο των Stuart και Revett, 1753.*



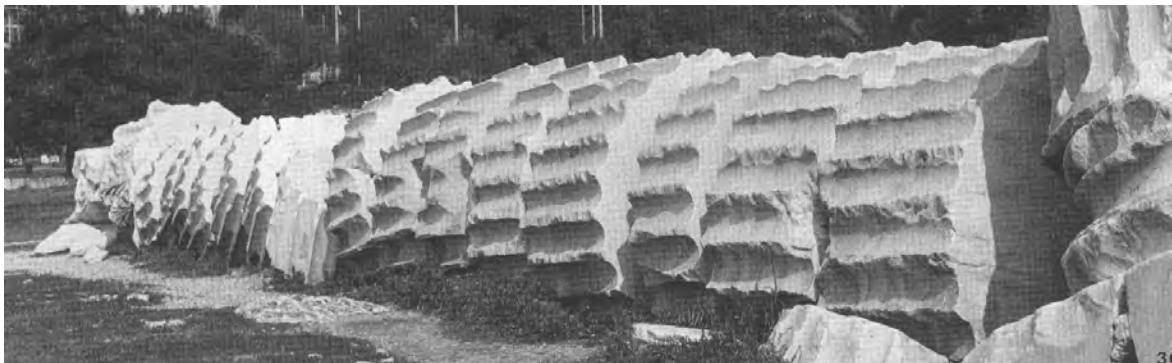
**Εικ. 2.10.** Οι δυτικότερα ιστάμενοι κίονες του νοτίου πτερού και ο μεμονωμένος κίονας της δυτικής πλευράς. (Σχέδιο του M. le Roy, 1755). Ο τελευταίος δεξιά ανατινάχθηκε το 1759, ο μεσαίος από τους εναπομείναντες έπεσε το 1852.

Είναι αξιοσημείωτο ότι από την ίδια ανεμοθύελλα καταρρίφθηκαν οι 3 αναστηλωμένοι ημικίονες και τα επιστύλια του δυτικού τοίχου του Ερεχθείου. Μαζί με τους κίονες έπεσαν και τα αρχιτεκτονικά μέλη των ενδιάμεσων τοιχοδομών. Η κατάσταση των ανατραπέντων κίωνων του Ερεχθείου περιγράφεται λεπτομερώς από τον Thomas Wyse [Patton (1927)]: «Μπορεί να δει κανείς δύο από τους κορμούς (των κίωνων) στη θέση που έπεσαν σε σχετικά καλή κατάσταση. Τα 2/3 κάθε κορμού σώζονται μαζί με τμήματα των συνημμένων τοίχων. Ο τρίτος βρίσκεται λίγο μακρύτερα. Τα κιονόκρανα διαμελίσθηκαν και διασκορπίστηκαν σε κάθε διεύθυνση».

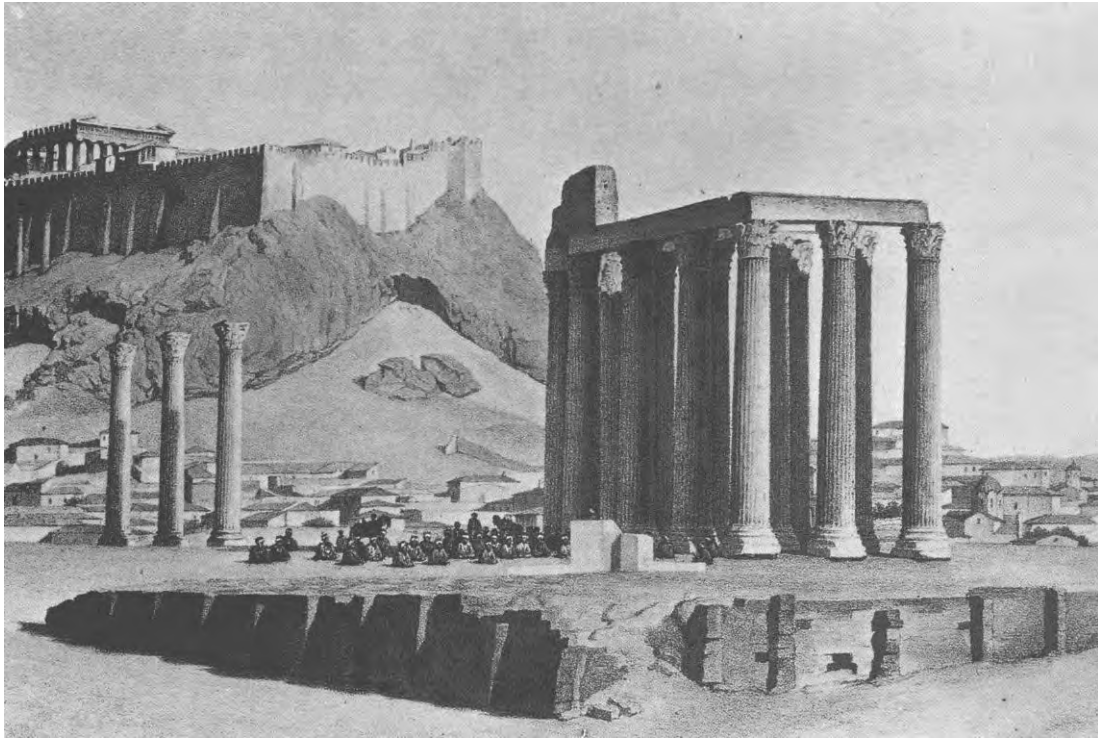
Είναι σκόπιμο να αναφερθούμε και σε μια κατασκευή που συχνά εμφανίζεται στις απεικονίσεις του μνημείου (Εικ. 2.9 και 2.13). Πρόκειται για ένα κελί, που είχε κατασκευαστεί από «στυλίτες» μοναχούς πάνω στο επιστύλιο που συνδέει τους δυτικότερους κίονες της νοτιοανατολικής γωνίας. Το κτίσμα αυτό, του οποίου το ύψος ποικίλλει από 2 ως 4 ορόφους ανάλογα με τη χρονολογία και την ακρίβεια των διαφόρων απεικονίσεων, κατεδαφίστηκε το 1886, μετά από ζωή 7 – 8 αιώνων. Η αναπαράσταση του κτίσματος δίνεται στην Εικ. 2.14 [Bouras (1996)].



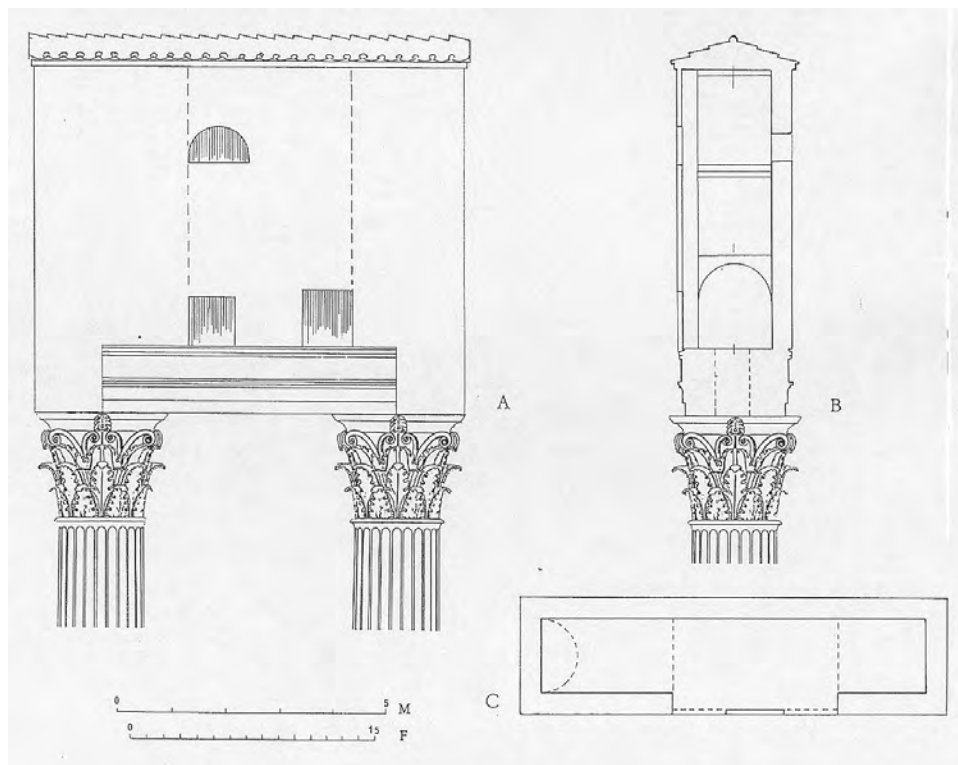
**Εικ. 2.11.** Ολυμπιείον. Το θεμέλιο του κατακείμενου κίονα. [Toelle–Kastenbein (1994)].



**Εικ. 2.12.** Ολυμπιείον. Ο κατακείμενος κίονας. [Toelle–Kastenbein (1994)].



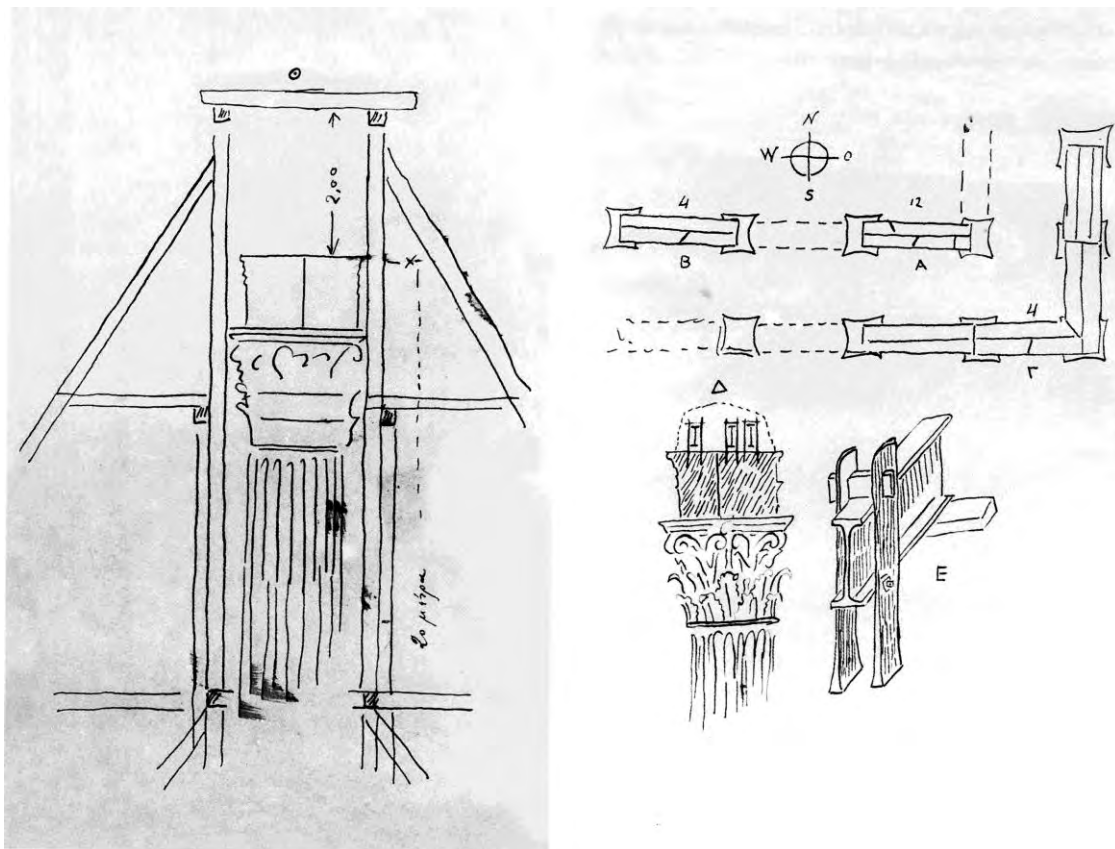
**Εικ. 2.13.** Ολυμπιείον. Σχέδιο Dupre 1819.



**Εικ. 2.14.** Αναπαράσταση του κτίσματος του «στυλίτη» μοναχού [Bouras (1996)].



**Εικ. 2.15.** Επισκευή κίονα του Ολυμπείου το 1835. Φωτογραφία του 1986 [Μαλλούχου-Tufano (1998)].



**Εικ. 2.16.** Σχέδιο του E. Ziller για τη στερέωση των επιστυλίων του Ολυμπείου το 1892. [Μαλλούχου-Tufano (1998)].

Η πρώτη σωστική επέμβαση<sup>11</sup> στο ναό γίνεται το 1835 από τη νεοσύστατη εφορεία αρχαιοτήτων, λίγα μόλις χρόνια μετά την ίδρυση του νεοελληνικού κράτους. Συμπληρώνεται με μάρμαρο ο πρώτος σπόνδυλος του βορειοδυτικότερου από τους ιστάμενους κίονες (Εικ. 2.15). Η επόμενη επέμβαση πραγματοποιείται το 1892 και αφορά τη στερέωση τριών επιστυλίων της νοτιοανατολικής γωνίας, σύμφωνα με πρόταση του W. Doerpfeld<sup>12</sup>. Τα επιστύλια αναρτώνται από σιδηροδοκούς διατομής διπλού T, μήκους 5.30 m, οι οποίες τοποθετούνται επ' αυτών και επικαλύπτονται με λιθοδομή και τσιμεντοκονίαμα, σύμφωνα με μελέτη του E. Ziller (Εικ. 2.16). Το 1902, και από το 1907 ως το 1909, συμπληρώνεται με πωρόλιθο (πειραϊκό ακτίτη) και πεντελικό μάρμαρο η κρηπίδα και ο στυλοβάτης της νοτιοανατολικής γωνίας. Στερεώνονται επίσης τα θεμέλια ορισμένων κίωνων.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η αντιγνωμία του F.C.Penrose<sup>13</sup> και του W. Doerpfeld το 1886 για την αναγκαιότητα στερέωσης των δύο εναπομεινάντων κίωνων της νοτιοδυτικής γωνίας. Ο Penrose, ο οποίος είχε ανασκάψει τμήμα των θεμελίων του ναού και ως εκ τούτου είχε ιδία αντίληψη της κατάστασής τους, θεωρούσε ότι η βασική αιτία της κατάρριψης από την ανεμοθύελλα του μεσαίου κίονα της εν λόγω γωνίας ήταν η αστοχία του θεμελίου της. Έτσι πρότεινε την αφανή, κάτω από την υφιστάμενη επιφάνεια του εδάφους, ενίσχυση των θεμελίων των δύο άλλων κίωνων με έκχυση σκυροδέματος.

---

<sup>11</sup> Οι σωστικές επεμβάσεις περιγράφονται από τη [Μαλλούχου-Tufano (1998)].

<sup>12</sup> Ο W. Doerpfeld (1853-1940) διετέλεσε διευθυντής του DAI (Γερμανικού Αρχαιολογικού Ινστιτούτου) από το 1887 ως το 1912 και συνεργάστηκε στενά με την Αρχαιολογική Εταιρεία.

<sup>13</sup> Ο F.C.Penrose (1817-1903) διετέλεσε διευθυντής της Βρετανικής Αρχαιολογικής Σχολής από το 1886 ως το 1887. Ο Penrose, κατά την παραμονή του στην Αθήνα από το 1846 ως το 1847, είχε αποτυπώσει με αξεπέραστη ακρίβεια τον Παρθενώνα και άλλα αθηναϊκά μνημεία, μεταξύ των οποίων και το Ολυμπίειον. Τα αποτελέσματα των ερευνών αυτών δημοσιεύτηκαν στο κλασικό πλέον σύγγραμμά του για την αθηναϊκή αρχιτεκτονική.



# 3

## ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αναλύσεις της παρούσας εργασίας βασίζονται σε αριθμητικές επιλύσεις προσομοιωμάτων των διαφόρων τμημάτων της κατασκευής με τη μέθοδο των διακριτών στοιχείων. Κάθε κατασκευή που εξετάζεται αποτελείται από ανεξάρτητα στερεά σώματα, που προσομοιάζουν τους σπονδύλους των κίωνων και τις δοκούς των επιστυλίων. Σε κάθε μοντέλο υπολογισμού χρησιμοποιείται η ακριβής γεωμετρία των κίωνων και των επιστυλίων (κατά το δυνατόν). Όλες οι επιλύσεις γίνονται με τον κώδικα 3DEC της εταιρείας Itasca Consulting Group, Inc., ο οποίος μπορεί να υπολογίσει τη δυναμική απόκριση τέτοιων κατασκευών στο χώρο και το χρόνο.

Παρακάτω γίνεται κατ' αρχήν μία παρουσίαση της μεθόδου των διακριτών στοιχείων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αποτελέσματα από μία προηγούμενη έρευνα που είχε διεξαχθεί στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας Ε.Μ.Π., στην οποία είχε γίνει σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αριθμητικών αναλύσεων με το 3DEC. Η σύγκριση αφορούσε τη σεισμική απόκριση ενός μοντέλου ενός κίονα του Παρθενώνα σε κλίμακα 1:3 υπό διάφορες σεισμικές διεγέρσεις. Από τη σύγκριση αυτή επιβεβαιώθηκαν οι μεγάλες δυνατότητες της μεθόδου των διακριτών στοιχείων και η αξιοπιστία του κώδικα 3DEC. Επίσης, προέκυψαν οι τιμές των παραμέτρων στις διεπιφάνειες, που θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε μαρμάρινους κίονες, οι οποίες εφαρμόστηκαν και στην παρούσα εργασία.

Στο τελευταίο τμήμα του κεφαλαίου δίνονται όλες οι λεπτομέρειες προσομοίωσης της κατασκευής, οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν και ο τρόπος αρίθμησης των κίωνων του ναού.



## Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

### Βασικές αρχές

Η Μέθοδος των Διακριτών Στοιχείων (Distinct Element Method) παρουσιάστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1970 από τον P. Cundall (1971) με σκοπό τη ρεαλιστική αντιμετώπιση της συμπεριφοράς βραχιδών σχηματισμών, οι οποίοι, σύμφωνα με τη μέθοδο, θεωρούνται ως ένα σύνολο διακεκριμένων (discrete) στερεών σωμάτων. Οι επιφάνειες διαχωρισμού των σωμάτων θεωρούνται διεπιφάνειες και έτσι το πρόβλημα της ασυνέχειας αντιμετωπίζεται ως οριακή συνθήκη. Οι δυνάμεις επαφής και οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται στις διεπιφάνειες, όταν το σύστημα βρίσκεται υπό φόρτιση, υπολογίζονται μέσω μιας σειράς υπολογισμών, οι οποίοι εξετάζουν την κίνηση κάθε επί μέρους σώματος. Η μέθοδος εξετάζει τις μετακινήσεις και τις δυνάμεις που αναπτύσσονται σε κάθε σώμα χωριστά και εντοπίζει αυτόματα τις επαφές μεταξύ των σωμάτων, ώστε τα μεγέθη αυτά να είναι συμβατά. Με τον τρόπο αυτό δεν υπάρχει περιορισμός στη μεταφορική κίνηση και τη στροφή κάθε σώματος και η ανάλυση μπορεί να εφαρμοστεί ανεξαρτήτως του μεγέθους των μετακινήσεων.

Η μέθοδος των διακριτών στοιχείων που παρουσιάστηκε το 1971 αφορούσε επίπεδα προβλήματα στερεών σωμάτων. Το 1980, με την εμφάνιση του προγράμματος UDEC [Itasca (1993)], αντιμετωπίστηκε και το θέμα της παραμορφωσιμότητας των σωμάτων. Από το 1983, ξεκίνησε η εργασία επέκτασης της μεθόδου στον τρισδιάστατο χώρο, η οποία ευοδώθηκε το 1988 με την αποπεράτωση της 1ης έκδοσης του προγράμματος 3DEC. Έκτοτε, και τα δύο προγράμματα έχουν γνωρίσει αρκετές εκδόσεις.

Η μέθοδος κατατάσσεται στις τεχνικές προσομοίωσης του μη συνεχούς μέσου και ως εκ τούτου ανήκει στην ευρύτερη οικογένεια των μεθόδων του διακεκριμένου στοιχείου (Discrete Element Methods). Ως μη συνεχές νοείται ένα σώμα, το οποίο διακόπτεται από ασυνέχειες και περιβάλλεται από ελεύθερες επιφάνειες. Κατά τον ορισμό του P. Cundall (1979), μια τεχνική προσομοίωσης ανήκει στην κατηγορία του διακεκριμένου στοιχείου, μόνο όταν διαθέτει τα εξής δύο χαρακτηριστικά γνωρίσματα:

1. Επιτρέπει πεπερασμένες μετακινήσεις και στροφές, ακόμη και πλήρη αποχωρισμό των επί μέρους σωμάτων.
2. Αναγνωρίζει αυτόματα, κατά τη διάρκεια του υπολογισμού, νέες επαφές των σωμάτων.

Χωρίς το πρώτο χαρακτηριστικό, η μέθοδος δεν μπορεί να αναπαραστήσει τον μηχανισμό συμπεριφοράς του ασυνεχούς μέσου. Χωρίς το δεύτερο, περιορίζεται το πεδίο

εφαρμογής της σε συστήματα λίγων σωμάτων, των οποίων η αλληλεπίδραση είναι γνωστή εκ των προτέρων.

Ο όρος “μέθοδος των διακριτών στοιχείων” εισήχθηκε από τους Cundall και Strack (1979) για να χαρακτηρίσει την ιδιαίτερη εκείνη υποκατηγορία της μεθόδου των διακεκριμένων στοιχείων, που έχει τις εξής δύο ιδιότητες:

1. Αντιμετωπίζει παραμορφώσιμες επαφές.
2. Χρησιμοποιεί την αναλυτική (explicit) τεχνική για την εν χρόνω επίλυση των πρωταρχικών εξισώσεων κίνησης. Η λέξη “πρωταρχική” αντιδιαστέλλει την εν λόγω μέθοδο από τις τεχνικές που βασίζονται στις μετασχηματισμένες ιδιομορφικές εξισώσεις.

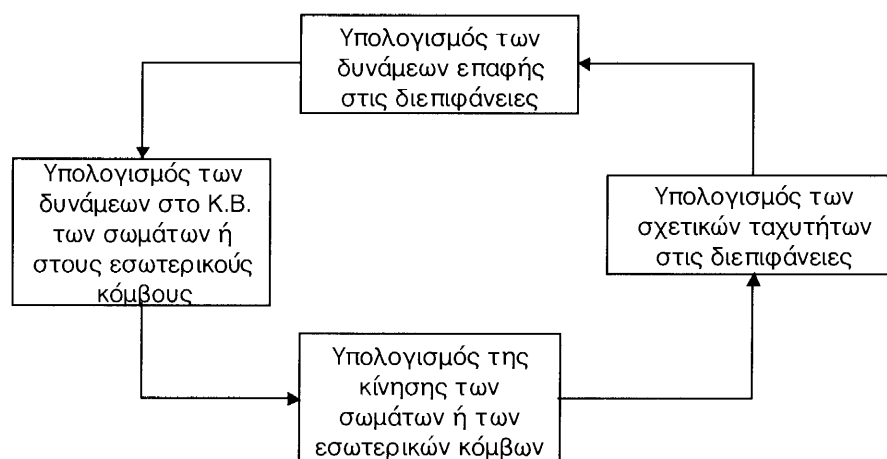
Η αναλυτική (explicit) τεχνική της βήμα-βήμα ολοκλήρωσης που εφαρμόζεται από τη μέθοδο των διακριτών στοιχείων παρουσιάζει πλεονεκτήματα, ιδιαίτερα για εξαιρετικά μη-γραμμικά προβλήματα, αφού οι καταστατικές σχέσεις εφαρμόζονται με ένα πολύ άμεσο τρόπο. Αντίθετα, οι έμμεσες (implicit) μητρωικές μέθοδοι είναι υποχρεωμένες να αντιμετωπίζουν το πρόβλημα σε κάθε βήμα ως ένα σύνολο γραμμικών εξισώσεων, οι οποίες επιλύονται συνολικά για όλη την κατασκευή. Αυτή η ανάγκη θεώρησης γραμμικής συμπεριφοράς σε κάθε βήμα οδηγεί σε μία “θολή” απεικόνιση του πραγματικού φαινομένου και δίνει περισσότερη έμφαση σε αριθμητικά θέματα απ’ ό,τι στα φυσικά, αφού σε κάθε βήμα απαιτούνται πολλές επαναλήψεις, σε κάθε μία από τις οποίες γίνεται πλήρης επίλυση ενός ισοδύναμου γραμμικού προβλήματος. Αντίθετα, οι αναλυτικές (explicit) μέθοδοι υπολογισμού επιλύουν ανεξάρτητα για κάθε τμήμα ή στοιχείο της κατασκευής και έτσι η εφαρμογή ακόμη και των πλέον πολύπλοκων σχέσεων τάσεων-παραμορφώσεων γίνεται με μία απλή ανάγνωση μιας καμπύλης.

Στη μέθοδο των διακριτών στοιχείων, τα επιμέρους σώματα μπορούν να είναι στερεά ή παραμορφώσιμα. Στερεά θεωρούνται τα σώματα που δεν μεταβάλλουν τη μορφή τους με την επιβολή των φορτίων. Η θεώρηση αυτή εφαρμόζεται στις περιπτώσεις που η συμπεριφορά του συστήματος καθορίζεται κατά κύριο λόγο από τις ασυνέχειες, και ως εκ τούτου η ελαστικότητα των σωμάτων μπορεί, χωρίς μεγάλο λάθος, να αγνοηθεί. Οι παραπάνω προϋποθέσεις ικανοποιούνται σε συστήματα που βρίσκονται υπό καθεστώς χαμηλών τάσεων, ή όταν οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών χαρακτηρίζονται από υψηλές αντοχές και χαμηλή παραμορφωσιμότητα. Θα μπορούσαμε, με άλλα λόγια, να ισχυριστούμε ότι, στα συστήματα στερεών σωμάτων η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων σε κάποια επαφή παραμένει ασύζευκτη προς την αντίστοιχη σχέση μιας άλλης επαφής του ίδιου σώματος. Σε αρκετές όμως περιπτώσεις η ελαστικότητα των σωμάτων δεν μπορεί να αγνοηθεί. Στην περίπτωση των παραμορφωσίμων σωμάτων, γίνεται

εσωτερικός διαχωρισμός κάθε σώματος σε ένα δίκτυο τριγωνικών στοιχείων πεπερασμένων διαφορών, το πλήθος των οποίων καθορίζει και την πολυπλοκότητα της παραμόρφωσης του σώματος. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται απαραμόρφωτα σώματα για την προσομοίωση των σπονδύλων των κίωνων και των δοκών των επιστυλίων.

Η μέθοδος των διακριτών στοιχείων χρησιμοποιεί, ακόμη και για τη λύση οιονεί στατικών προβλημάτων, ένα δυναμικό αλγόριθμο. Οι υπολογισμοί εναλλάσσονται μεταξύ της εφαρμογής των νόμων που διέπουν τις σχέσεις δύναμης - μετακίνησης στις επαφές και της εφαρμογής του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα, που διέπει την κίνηση κάθε μεμονωμένου σώματος. Σε κάθε επαφή έχει προκαθοριστεί η σχέση δύναμης – μετακίνησης, η οποία μπορεί να είναι γραμμική (π.χ. ατένεια ελατηρίου) ή κάποια μη-γραμμική συνάρτηση. Η σχέση αυτή χρησιμοποιείται για να βρεθούν οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στις διεπιφάνειες από τις γνωστές (ή προκαθορισμένες) μετακινήσεις. Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα χρησιμοποιείται στη συνέχεια για να υπολογιστεί η κίνηση των σωμάτων, που οφείλεται στις γνωστές (ή προκαθορισμένες) δυνάμεις που ενεργούν σε αυτά. Στα παραμορφώσιμα σώματα, η κίνηση υπολογίζεται για όλους τους εσωτερικούς κόμβους κάθε σώματος.

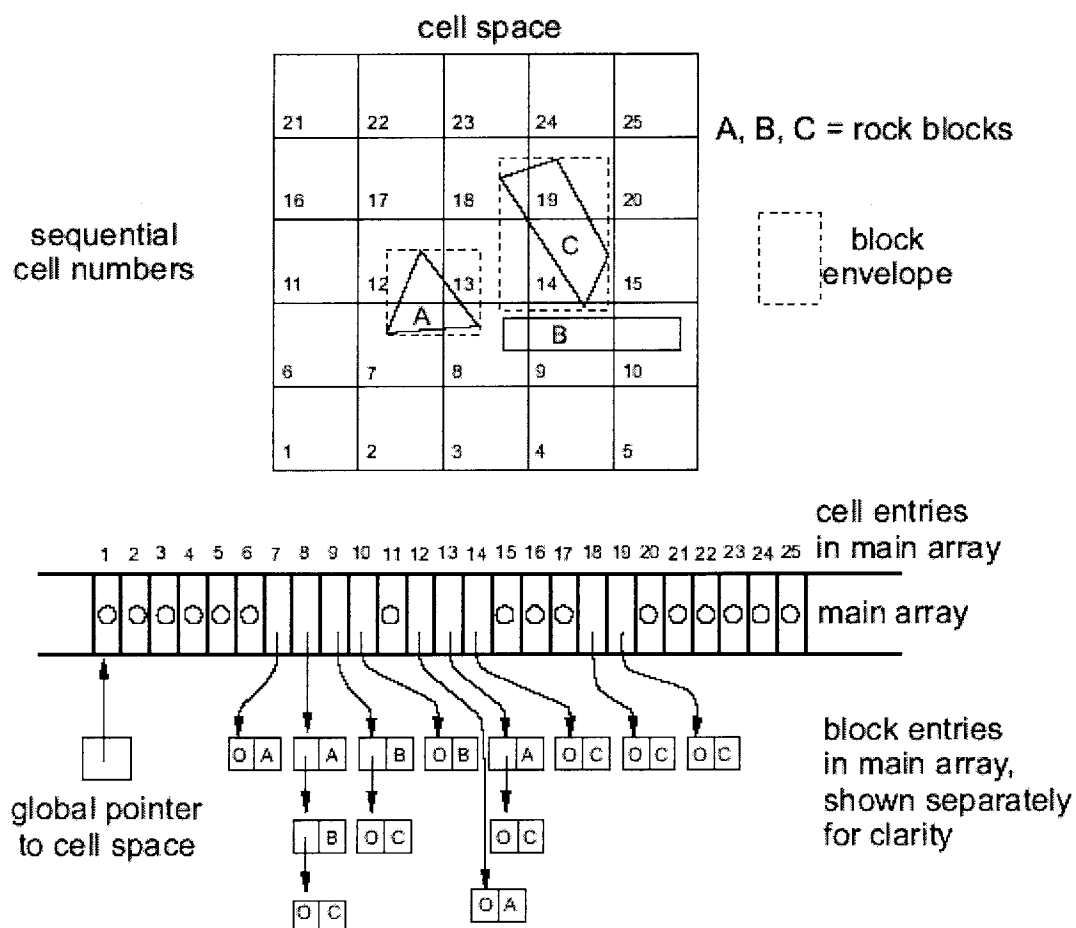
Σχηματικά, ο κύκλος υπολογισμού της μεθόδου φαίνεται στο Σχ. 3.1. Σε κάθε βήμα, η ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης δίνει τις νέες θέσεις των σωμάτων, από τις οποίες υπολογίζονται οι μετακινήσεις στις διεπιφάνειες. Με εφαρμογή των καταστατικών νόμων που συνδέουν τις δυνάμεις με τις μετακινήσεις σε κάθε διεπιφάνεια υπολογίζονται οι νέες δυνάμεις επαφής μεταξύ των σωμάτων, οι οποίες εφαρμόζονται στα σώματα στον επόμενο κύκλο επίλυσης για τον υπολογισμό της νέας θέσης τους.



**Σχ. 3.1.** Κύκλος υπολογισμού της μεθόδου των διακριτών στοιχείων [Itasca (1998)].

**Προσδιορισμός επαφών**

Ένα από τα βασικά αντικείμενα της επίλυσης είναι ο προσδιορισμός των επαφών μεταξύ των στοιχείων. Για το σκοπό αυτό προσδιορίζονται κατ' αρχήν τα *γειτονικά* στοιχεία κάθε σώματος, τα οποία θεωρούνται υποψήφια για να έλθουν σε επαφή μαζί του. Αυτό επιτυγχάνεται με μία διαδικασία κατάταξης όλων των στοιχείων σε *κελιά* (cells). Κατ' αρχήν, ο χώρος που καταλαμβάνει η κατασκευή χωρίζεται σε ορθογώνια παραλληλεπίπεδα (κελιά) και κάθε σώμα αντιστοιχίζεται με το κελί ή τα κελιά που καταλαμβάνει ο "περιβάλλον χώρος" του. Ο περιβάλλον χώρος ορίζεται ως το μικρότερο ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, με πλευρές παράλληλες στους άξονες αναφοράς, που περιέχει ολόκληρο το σώμα. Έτσι, για κάθε κελί υπάρχει ένας κατάλογος όλων των σωμάτων που καταλαμβάνουν κάποιο τμήμα του. Όλα τα σώματα, των οποίων ο περιβάλλον χώρος αντιστοιχίζεται σε κοινά κελιά με τον περιβάλλοντα χώρο κάποιου συγκεκριμένου σώματος, αναγνωρίζονται ως γειτονικά αυτού του σώματος. Η διαδικασία φαίνεται ενδεικτικά στο Σχ. 3.2 για ένα επίπεδο πρόβλημα.



**Σχ. 3.2.** Παράδειγμα διαμερισμού δισδιάστατου χώρου σε κελιά και αντιστοίχιση κελιών-σωμάτων [Itasca (1998)].

Ο καθορισμός των επαφών μεταξύ γειτονικών σωμάτων επιτυγχάνεται με έλεγχο όλων των δυνατών περιπτώσεων. Στον τρισδιάστατο χώρο, μία κορυφή ενός σώματος Α μπορεί να βρίσκεται σε επαφή με μία κορυφή ή με μία ακμή ή με μία έδρα ενός γειτονικού σώματος Β. Εάν το σώμα Α έχει  $v_A$  κορυφές (vertices),  $e_A$  ακμές (edges) και  $f_A$  έδρες (faces) και το σώμα Β έχει  $v_B$  κορυφές,  $e_B$  ακμές και  $f_B$  έδρες, το πλήθος των δυνατών συνδυασμών που θα πρέπει να ελεγχθούν είναι:

$$n = (v_A + e_A + f_A) \cdot (v_B + e_B + f_B)$$

Για παράδειγμα, δύο κύβοι μπορούν να έλθουν σε επαφή με 676 τρόπους. Στην πράξη, ο αριθμός των ελέγχων μειώνεται, γιατί κάποιοι τύποι επαφών αντιμετωπίζονται ως οριακές καταστάσεις άλλων τύπων. Έτσι, εξετάζονται μόνο επαφές τύπου *κορυφή-με-πλευρά* και *ακμή-με-ακμή* και οι υπόλοιποι τύποι ανάγονται σε αυτούς ως εξής:

- Επαφή τύπου *κορυφή-με-κορυφή* προκύπτει όταν τρεις ή περισσότερες επαφές τύπου *κορυφή-με-έδρα* συνυπάρχουν στην ίδια θέση.
- Επαφή τύπου *κορυφή-με-ακμή* προκύπτει όταν δύο επαφές τύπου *κορυφή-με-έδρα* συνυπάρχουν.
- Επαφή τύπου *ακμή-με-έδρα* προκύπτει όταν δύο επαφές τύπου *ακμή-με-ακμή* υπάρχουν μεταξύ δύο σωμάτων.
- Επαφή τύπου *έδρα-με-έδρα* προκύπτει όταν υπάρχουν τρεις ή περισσότερες επαφές τύπου *ακμή-με-ακμή* ή τύπου *κορυφή-με-έδρα*.

Με αυτό τον τρόπο, το πλήθος των δυνατών συνδυασμών περιορίζεται σε:

$$n = v_A \cdot f_B + v_B \cdot f_A + e_A \cdot f_B + e_B \cdot f_A$$

Στην περίπτωση των δύο κύβων, οι συνδυασμοί που προκύπτουν είναι 240. Στο 3DEC χρησιμοποιείται και το τέχνασμα του κοινού επιπέδου (common plane) για τον ευκολότερο προσδιορισμό των επαφών.

### Υπολογισμός δυνάμεων στις επαφές

Στις επιφάνειες επαφής μεταξύ των σωμάτων, η συμπεριφορά καθορίζεται από τις ελαστικές σταθερές  $K_n$  (ατένεια στη διεύθυνση που είναι κάθετη στη διεπιφάνεια) και  $K_s$  (ατένεια στην εφαπτομενική διεύθυνση). Οι σταθερές αυτές καθορίζουν τη συμπεριφορά στην ελαστική περιοχή. Για μετακινήσεις μεγαλύτερες από κάποιο όριο, όμως, μπορεί να προκληθεί αστοχία λόγω εφελκυσμού ή ολίσθησης. Στην περίπτωση αστοχίας, ο προσδιορισμός των δυνάμεων που αναπτύσσονται στις επαφές γίνεται με το γενικευμένο νόμο της τριβής κατά Coulomb. Ο νόμος εφαρμόζεται με παρόμοιο τρόπο τόσο για τις

επαφές μεταξύ στερεών σωμάτων όσο και για τις επαφές μεταξύ παραμορφώσιμων σωμάτων. Στους υπολογισμούς λαμβάνονται υπόψη η αστοχία σε διάτμηση, η αστοχία σε εφελκυσμό καθώς και η διασταλτικότητα (dilatation) της διεπιφάνειας, δηλαδή η απομάκρυνση που συμβαίνει όταν δύο ανώμαλες επιφάνειες ολισθαίνουν η μία ως προς την άλλη.

Για τον υπολογισμό των δυνάμεων αλληλεπίδρασης μεταξύ επαπτομένων σωμάτων, η επιφάνεια επαφής διακριτοποιείται σε τριγωνικές υπο-επιφάνειες (sub-contacts). Οι δυνάμεις υπολογίζονται για κάθε υπο-επιφάνεια.

Στην ελαστική περιοχή, η μεταβολή των δυνάμεων  $\Delta F$  που συμβαίνει σε κάθε βήμα υπολογίζεται από την αντίστοιχη μεταβολή της μετακίνησης  $\Delta U$  στην αντίστοιχη διεύθυνση. Στην κάθετη στην επιφάνεια διεύθυνση,  $n$ , εφαρμόζεται η σχέση (θλιπτικές δυνάμεις θεωρούνται θετικές):

$$\Delta F_n = -K_n \cdot \Delta U_n \cdot A_c$$

όπου  $A_c$  είναι το εμβαδόν της υπο-επιφάνειας. Στην εφαπτομενική στην επιφάνεια διεύθυνση,  $s$ , εφαρμόζεται η σχέση:

$$\Delta F_s = -K_s \cdot \Delta U_s \cdot A_c$$

Σε έναν κόμβο, στον οποίο δεν έχει συμβεί προηγούμενα ολίσθηση ή αποκόλληση, η μέγιστη ορθή εφελκυστική δύναμη που μπορεί να αναπτυχθεί είναι:

$$T_{max} = -T \cdot A_c$$

όπου  $T$  είναι η εφελκυστική αντοχή. Αντίστοιχα, σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb, η μέγιστη διατμητική δύναμη είναι:

$$F_{s,max} = c \cdot A_c + F_n \cdot \tan \varphi$$

όπου  $c$  είναι η συνοχή και  $\varphi$  η γωνία τριβής στη διεπιφάνεια.

Εάν σε κάποια υπο-επιφάνεια διαπιστωθεί αρχή αστοχίας σε εφελκυσμό ή διάτμηση, η εφελκυστική αντοχή και η συνοχή μηδενίζονται, δηλαδή:

$$T_{max} = 0$$

$$F_{s,max} = F_n \cdot \tan \varphi$$

Η διασταλτικότητα της διεπιφάνειας λαμβάνει χώραν μόνο εάν υπάρχει ολίσθηση και μετρίεται με την απομάκρυνση των δύο επιφανειών, που υπολογίζεται από τη διατμητική μετακίνηση  $\Delta U_s$  από τη σχέση:

$$\Delta U_n(\text{dil}) = \Delta U_s \cdot \tan \psi$$

όπου  $\psi$  είναι η γωνία διασταλτικότητας. Στη συνέχεια, διορθώνεται η ορθή δύναμη στην υπο-επιφάνεια, ώστε να ληφθεί υπόψη η επιρροή της διασταλτικότητας:

$$F_n' = F_n + K_n \cdot \Delta U_n(\text{dil}) \cdot A_c$$

Σε ολισθαίνουσες επιφάνειες, η γωνία διασταλτικότητας μειώνεται όσο η τριβή πλησιάζει την οριακή της κατάσταση. Στο 3DEC, αυτό λαμβάνεται υπόψη με τον ορισμό μιας οριακής διατμητικής μετακίνησης  $U_s$ . Όταν η διατμητική μετακίνηση ξεπερνάει αυτή την τιμή, η γωνία διασταλτικότητας  $\psi$  τίθεται ίση με 0.

### ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η ικανότητα της μεθόδου των διακριτών στοιχείων, και συγκεκριμένα του προγράμματος 3DEC, να προβλέπουν με ικανοποιητική ακρίβεια τη σεισμική συμπεριφορά κίωνων της κλασικής αρχαιότητας, έχει επαληθευτεί με σύγκριση των αποτελεσμάτων με πειραματικά δεδομένα [Papantonopoulos et al (2002)]. Τα πειραματικά δεδομένα περιγράφονται στην εργασία των Mouzakis et al (2002) και αφορούν στη σεισμική απόκριση ενός προσομοιώματος ενός στύλου του Παρθενώνα, σε κλίμακα 1:3, στο σεισμικό προσομοιωτήρα του Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας Ε.Μ.Π. Το μοντέλο ήταν κατασκευασμένο από πεντελικό μάρμαρο (ίδιο υλικό με αυτό των κίωνων του Παρθενώνα), είχε ύψος 3.35 m και αποτελείτο από 12 σπονδύλους, σταθερού ύψους, και κιονόκρανο.

Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν διαβαθμισμένοι σεισμοί του ελληνικού χώρου και συγκεκριμένα: η καταγραφή στο Αργοστόλι του σεισμού της Κεφαλονιάς, 1983, ο σεισμός της Καλαμάτας, 1986 και ο σεισμός της Γρίβας, 1990, όπως καταγράφηκε στη Έδεσσα. Οι δύο τελευταίοι σεισμοί χρησιμοποιούνται και στην παρούσα εργασία και περισσότερα στοιχεία δίνονται στο Κεφ. 5.

Οι αριθμητικές αναλύσεις έγιναν με το 3DEC για κατασκευή ίδια με το μοντέλο των πειραμάτων (εκτός από κάποιες μικρές διαφορές, όπως π.χ. ότι η διατομή των σπονδύλων αντί για κυκλική ήταν πολυγωνική με 10 κορυφές). Οι σεισμικές διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ίδιες με αυτές των πειραμάτων.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων αφορούσε τη χρονοϊστορία της μετακίνησης του κιονοκράνου. Οι τιμές των παραμέτρων για τις επαφές ( $K_n$  και  $K_s$ ) διαφοροποιούνταν κάπως μεταξύ των πειραμάτων, με σκοπό την καλύτερη σύγκλιση των αποτελεσμάτων. Έτσι, οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:  $K_n = 1.0$  ή  $2.0 \times 10^9$  Pa/m,  $K_s = 1.0$  ή  $2.0 \times 10^9$  Pa/m,  $\phi = 35^\circ$  ή  $37^\circ$  και  $c=0$ . Στις περισσότερες περιπτώσεις, χρησιμοποιήθηκε μηδενική απόσβεση, επειδή έτσι προέκυπταν τα καλύτερα αποτελέσματα, τουλάχιστον στο χρονικό

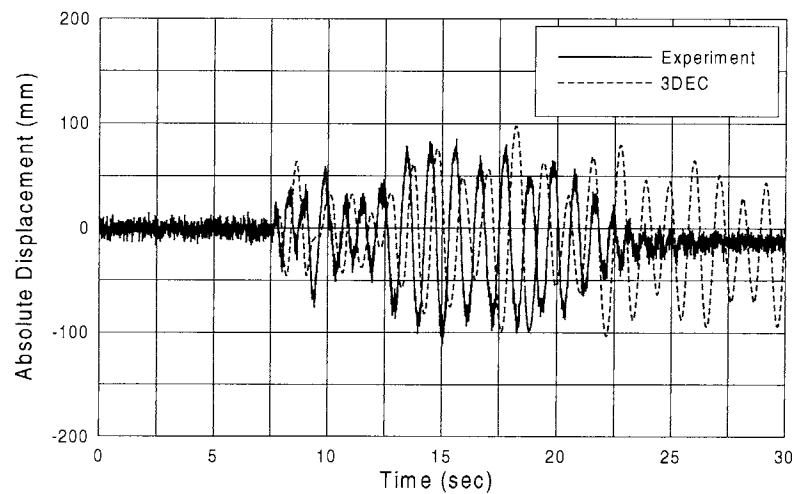
διάστημα που διαρκούσε η ισχυρή σεισμική δόνηση. Άλλες τιμές απόσβεσης χρησιμοποιήθηκαν σε ορισμένες μόνο περιπτώσεις για λόγους σύγκρισης. Παρακάτω γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων αυτής της μελέτης.

### **Σεισμός Καλαμάτας**

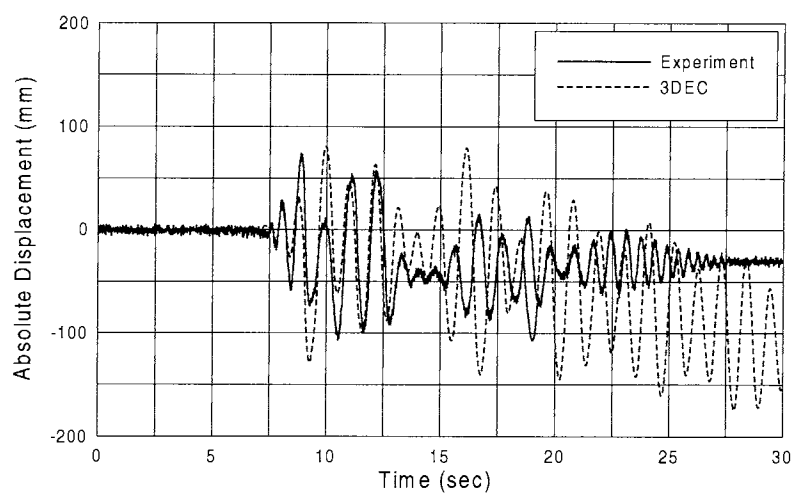
Τα αποτελέσματα της σύγκρισης για το σεισμό της Καλαμάτας δίνονται στα Σχ. 3.3 έως 3.5. Σε όλες τις αναλύσεις αυτής της περίπτωσης, οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τις επαφές ήταν:  $K_n=1.0 \times 10^9$  Pa/m,  $K_s=1.0 \times 10^9$  Pa/m,  $\varphi=37^\circ$ . Στο Σχ. 3.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των μετακινήσεων του κιονοκράνου στις δύο οριζόντιες και στην κατακόρυφη διεύθυνση. Γι' αυτά τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκε μηδενική απόσβεση. Είναι προφανές από αυτά τα διαγράμματα ότι η σύγκλιση των αποτελεσμάτων για μηδενική απόσβεση είναι ικανοποιητική, τόσο όσον αφορά το εύρος ταλάντωσης, όσο και όσον αφορά το φασματικό περιεχόμενο της απόκρισης. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι, λόγω της ευαισθησίας της συμπεριφοράς, για την οποία έγινε λόγος στο Κεφ. 1, δεν θα περίμενε κανείς πλήρη ταύτιση των πειραματικών με τα αναλυτικά αποτελέσματα. Η ευαισθησία αυτή επαληθεύτηκε και κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, αφού σε ορισμένες περιπτώσεις επανάληψη του ίδιου πειράματος έδωσε διαφορετικά αποτελέσματα [Mouzakis et al (2002)]. Η σύγκλιση, επομένως, που επετεύχθη στο Σχ. 3.3 θεωρείται ικανοποιητική.

Εάν στην επίλυση ληφθεί υπόψη και απόσβεση (Σχ. 3.4 και 3.5), η απόκριση αλλάζει σημαντικά. Στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχ. 3.4 χρησιμοποιήθηκε πολύ μικρή απόσβεση  $\alpha=0.5\%$ , ενώ σε αυτά του Σχ. 3.5 η απόσβεση ήταν  $\alpha=1.0\%$ . Η απόσβεση βελτιώνει τα αποτελέσματα προς το τέλος του σεισμού, όταν ο κίονας εκτελεί πρακτικά ελεύθερες ταλαντώσεις με μικρό πλάτος ταλάντωσης, αλλά μειώνει ανεπιθύμητα την απόκριση κατά τη διάρκεια της ισχυρής εδαφικής δόνησης. Φαίνεται, επομένως, ότι θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές τιμές απόσβεσης σε διάφορες χρονικές στιγμές: στη διάρκεια της ισχυρής δόνησης, είναι καλύτερο να χρησιμοποιείται μηδενική απόσβεση ενώ προς το τέλος του σεισμού απόσβεση της τάξης του 1% έως 5%, για να ληφθεί υπόψη η απώλεια ενέργειας που συμβαίνει κατά το λικνισμό λόγω της κρούσης των σπονδύλων. Επειδή όμως στην πράξη η αλλαγή της απόσβεσης κατά τη διάρκεια της απόκρισης δεν είναι εύκολη (αλλά όχι αδύνατη), προτείνεται η χρήση μηδενικής απόσβεσης, αφού, πρακτικά, το τμήμα της απόκρισης που μας ενδιαφέρει είναι αυτό που αντιστοιχεί στην ισχυρή δόνηση. Γι' αυτό το λόγο, στις υπόλοιπες σεισμικές διεγέρσεις χρησιμοποιήθηκε μόνο μηδενική απόσβεση.

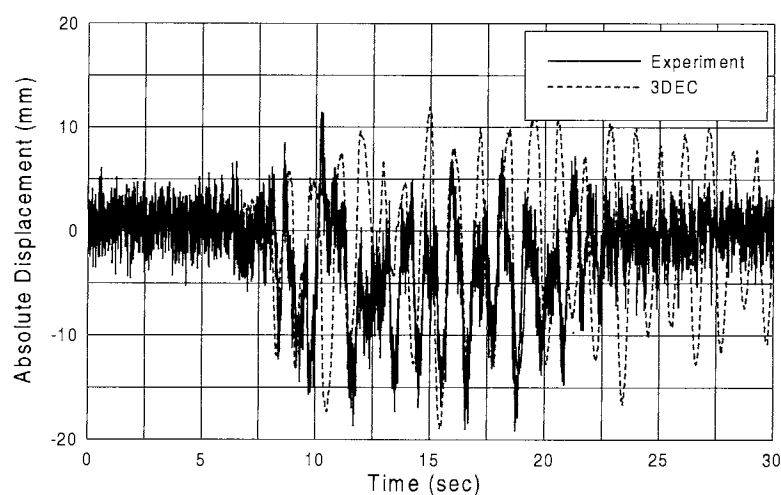




(α)

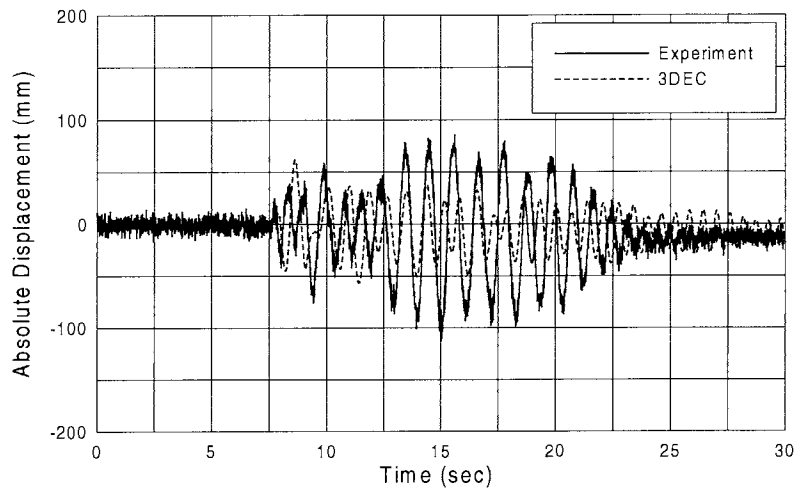


(β)

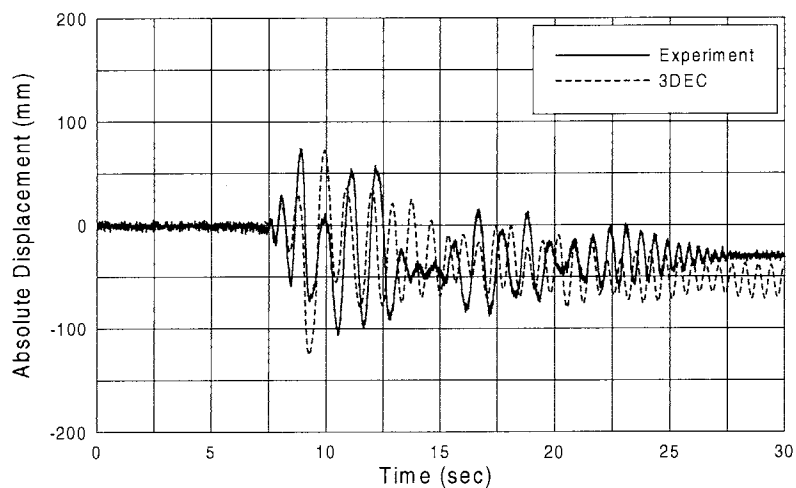


(γ)

**Σχ. 3.3.** Σύγκριση αποτελεσμάτων 3DEC με πειραματικά δεδομένα για το σεισμό της Καλαμάτας και μηδενική απόσβεση: (α) διαμήκης διεύθυνση, (β) εγκάρσια διεύθυνση, (γ) κατακόρυφη διεύθυνση [Papantonopoulos et al (2002)].

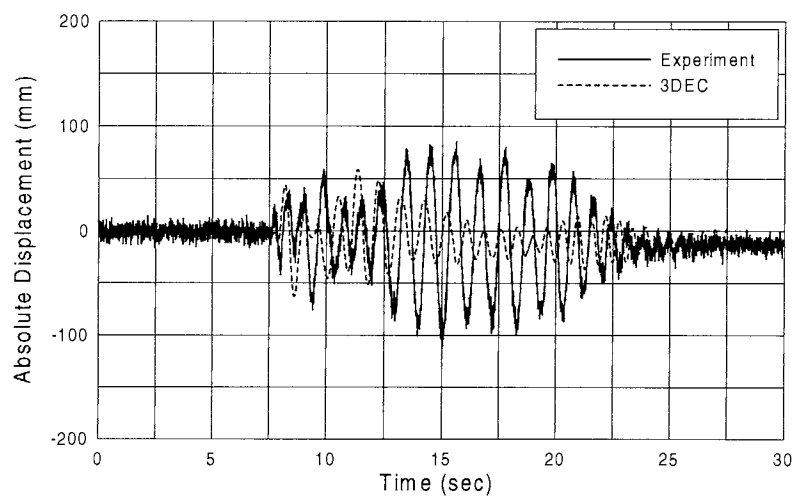


(α)

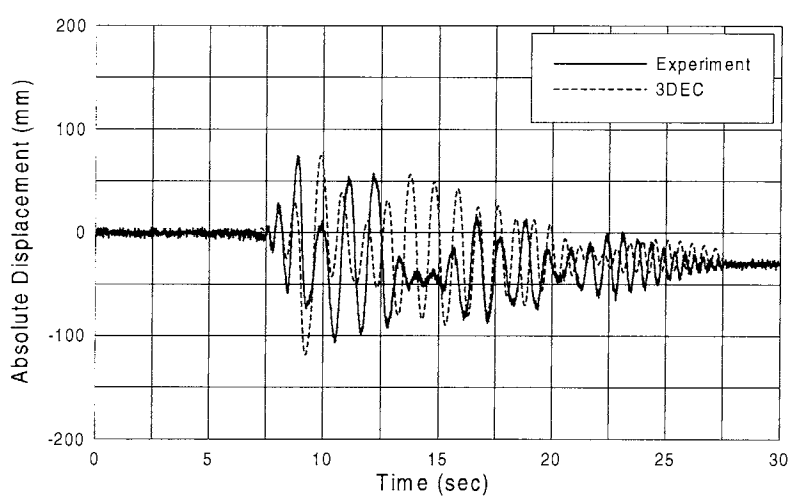


(β)

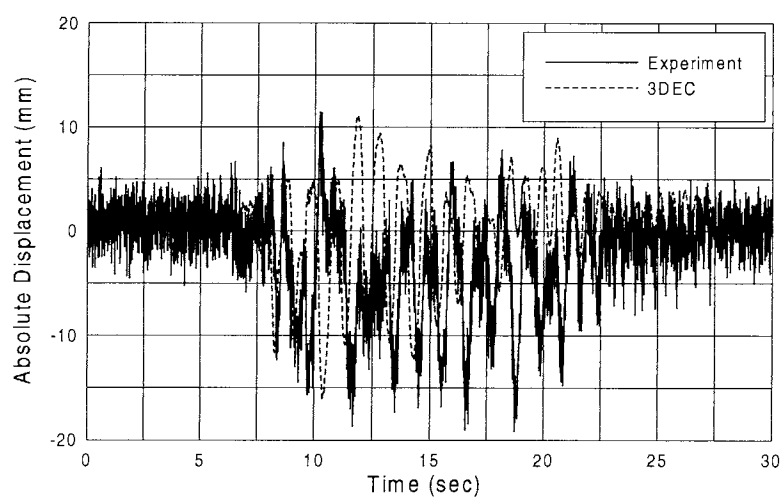
**Σχ. 3.4.** Σύγκριση αποτελεσμάτων 3DEC με πειραματικά δεδομένα για το σεισμό της Καλαμάτας και απόσβεση  $d=0.5\%$ : (α) διαμήκης διεύθυνση, (β) εγκάρσια διεύθυνση [Papantonopoulos et al (2002)].



(α)



(β)



(γ)

**Σχ. 3.5.** Σύγκριση αποτελεσμάτων 3DEC με πειραματικά δεδομένα για το σεισμό της Καλαμάτας και απόσβεση  $d=1.0\%$ : (α) διαμήκης διεύθυνση, (β) εγκάρσια διεύθυνση, (γ) κατακόρυφη διεύθυνση [Papantonopoulos et al (2002)].

### Σεισμός Έδεσσας

Τα αποτελέσματα γι' αυτό το σεισμό παρουσιάζονται στα Σχ. 3.6 και 3.7, όπου φαίνεται η μετακίνηση δύο σημείων του κionoκράνου στις δύο οριζόντιες και στην κατακόρυφη διεύθυνση. Τα δύο σημεία K2 και K3, στα οποία αναφέρονται τα σχήματα, βρίσκονταν στο μέσον δύο καθέτων μεταξύ τους πλευρών του κionoκράνου. Σε αυτή την περίπτωση, οι τιμές των παραμέτρων στις επαφές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:  $K_n=2.0 \times 10^9$  Pa/m,  $K_s=2.0 \times 10^9$  Pa/m,  $\varphi=35^\circ$ , ενώ η απόσβεση ήταν μηδενική.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων είναι γενικώς ικανοποιητική, τόσο όσον αφορά το εύρος ταλάντωσης, όσο και όσον αφορά τις μόνιμες μετατοπίσεις μετά το σεισμό. Για το σημείο K3 (Σχ. 3.6), αξίζει να σημειωθεί ότι η μέγιστη τιμή της μετακίνησης σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα ήταν 148.8 mm, ενώ το 3DEC έδωσε μετακίνηση 133.9 mm. Επίσης η συμφωνία στις μόνιμες ολισθήσεις είναι πολύ καλή και στις δύο διευθύνσεις.

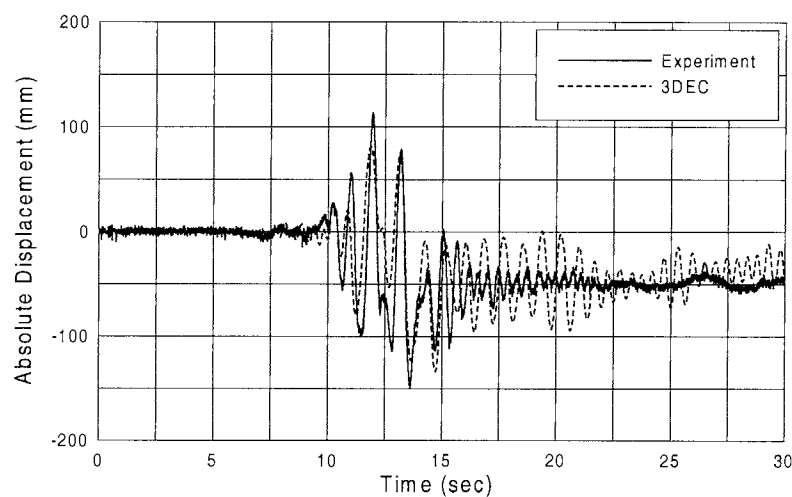
Για το σημείο K2 (Σχ. 3.7), η αριθμητική ανάλυση υποεκτιμά τη μέγιστη μετακίνηση (πείραμα: 172.6 mm, 3DEC: 109.7 mm) ενώ αντίθετα υπερεκτιμά τις ολισθήσεις κατά 30-40 mm. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι το πείραμα αυτό επανελήφθη και δεύτερη φορά και σε αυτή την περίπτωση η μέγιστη μετακίνηση ήταν της τάξης των 150 mm, τιμή που έχει μικρότερη διαφορά από την πρόβλεψη της αριθμητικής επίλυσης.

Στην κατακόρυφη διεύθυνση, η συμφωνία πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων είναι αρκετά καλή και για τα δύο σημεία, λαμβάνοντας υπόψη και το ότι η απόκριση είναι πολύ υψίσυχνη και μικρού πλάτους (μικρότερου από 30 mm).

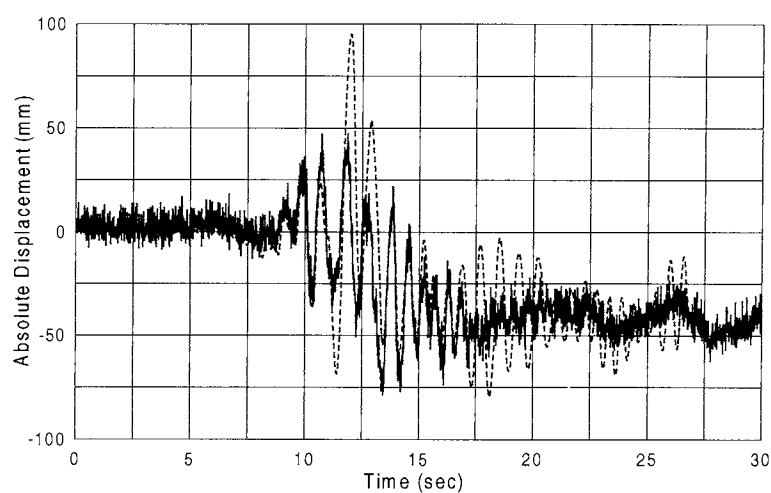
### Σεισμός Αργοστολίου

Τα αποτελέσματα για αυτή τη σεισμική διέγερση παρουσιάζονται στα Σχ. 3.8 και 3.9, όπου δίνεται η σχετική μετακίνηση του σημείου K3 στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις. Σε αυτή την περίπτωση, οι τιμές των παραμέτρων στις επαφές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:  $K_n=2.0 \times 10^9$  Pa/m,  $K_s=1.0 \times 10^9$  Pa/m,  $\varphi=35^\circ$ , ενώ η απόσβεση ήταν και πάλι μηδενική.

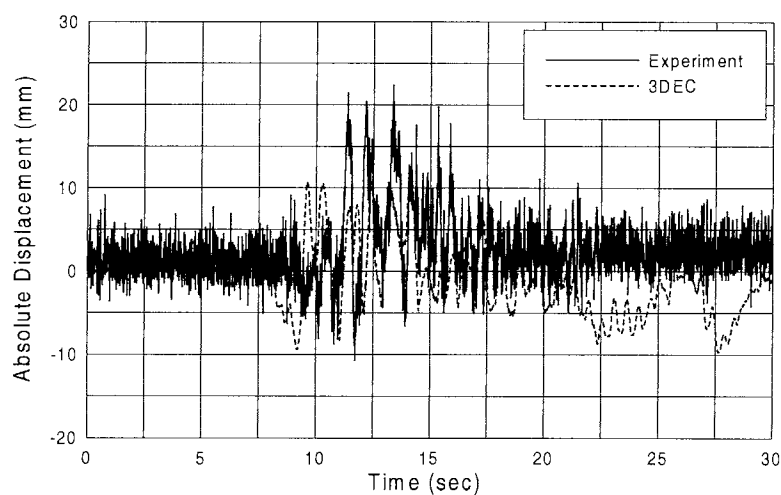
Αυτό το πείραμα επαναλήφθηκε δύο φορές (EQ14 και EQ15) με σκοπό να ελεγχθεί η επαναληψιμότητα. Η αριθμητική ανάλυση επίσης έγινε δύο φορές χρησιμοποιώντας ως διέγερση την καταγραφή της κίνησης της σεισμικής τράπεζας που αντιστοιχούσε σε κάθε πείραμα. Οι δύο αυτές καταγραφές είχαν μικρές διαφορές μεταξύ τους, που έφθαναν το 2% στην τιμή της μέγιστης ταχύτητας. Στα Σχ. 3.8 και 3.9 δίνονται ξεχωριστά διαγράμματα για τα πειράματα EQ14 και EQ15, τα οποία δείχνουν ικανοποιητική συμφωνία αποτελεσμάτων και στις δύο διευθύνσεις.



(α)

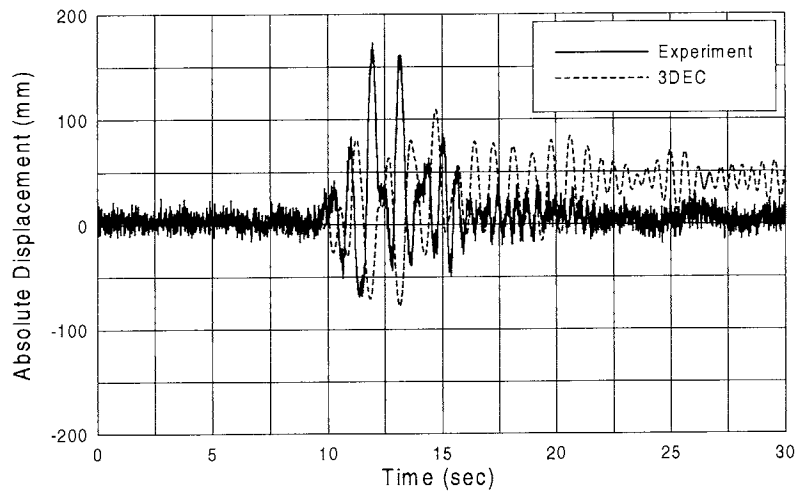


(β)

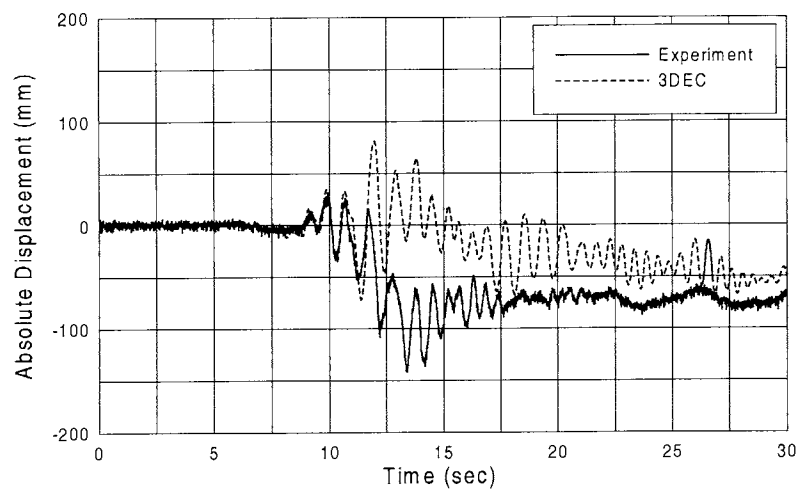


(γ)

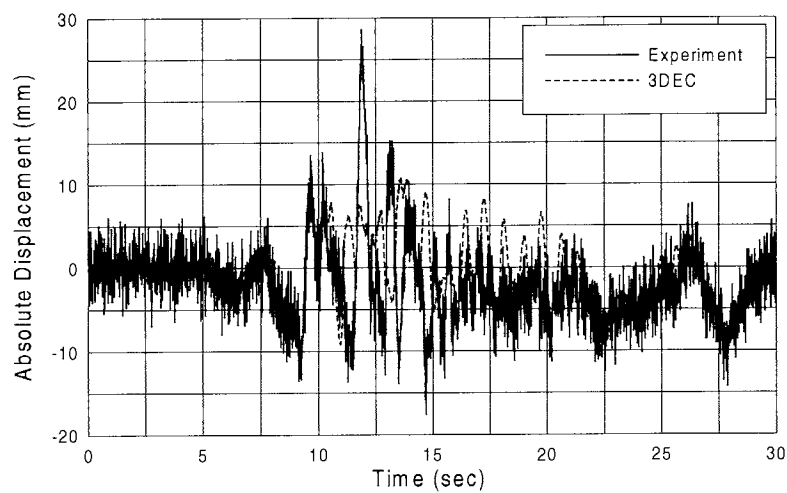
**Σχ. 3.6.** Μετακίνηση του σημείου K3 του κιονοκράνου για τη σεισμική δόνηση της Έδεσσας: (α) διαμήκης διεύθυνση, (β) εγκάρσια διεύθυνση, (γ) κατακόρυφη διεύθυνση [Papantonopoulos et al (2002)].



(α)



(β)



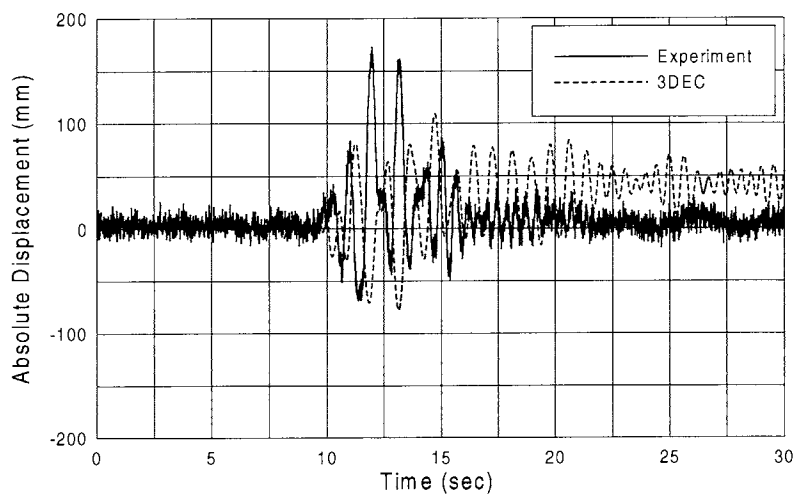
(γ)

**Σχ. 3.7.** Μετακίνηση του σημείου K2 του κιονοκράνου για τη σεισμική δόνηση της Έδεσσας: (α) διαμήκης διεύθυνση, (β) εγκάρσια διεύθυνση, (γ) κατακόρυφη διεύθυνση [Papantonopoulos et al (2002)].

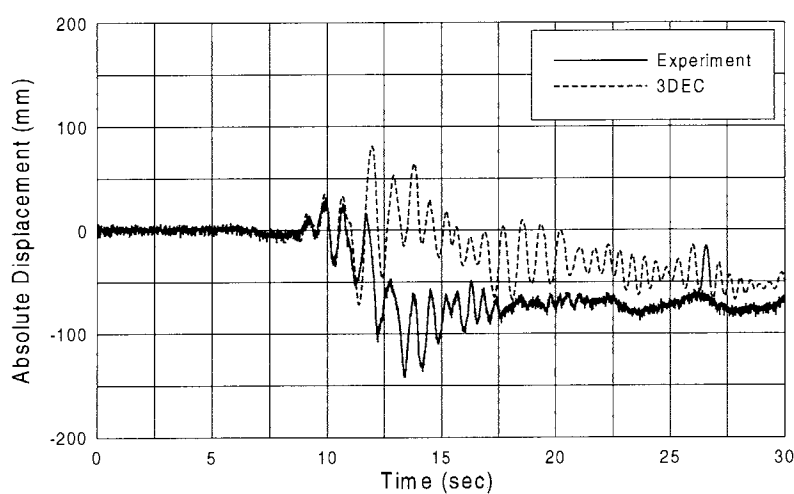
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στα πειράματα, εκτός από τη μικρή διαφορά στη διέγερση, υπήρχε και διαφορά στην αρχική γεωμετρία των κίωνων, σφού ήταν αδύνατη η ακριβής επανατοποθέτηση των σπονδύλων στην ίδια θέση. Στις αριθμητικές αναλύσεις, η άγνωστη αυτή διαφορά στη γεωμετρία δεν μπορούσε να ληφθεί υπόψη και η μόνη διαφορά μεταξύ των EQ14 και EQ15 ήταν η μικρή διαφοροποίηση της διέγερσης.

Η ευαισθησία της απόκρισης, ακόμη και στις μικρές διαφορές της διέγερσης που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι εμφανής τόσο στα πειραματικά, όσο και στα αριθμητικά αποτελέσματα. Η διαφορά μεταξύ των δύο πανομοιότυπων πειραμάτων είναι περισσότερο έντονη στις μόνιμες μετατοπίσεις που προκαλούνται από τις ολισθήσεις των σπονδύλων. Έτσι, στη διαμήκη διεύθυνση (Σχ. 3.8) στο πείραμα EQ15 συνέβη μία μόνιμη μετατόπιση στο κιονόκρανο, της τάξης των 50 mm, ενώ στο EQ14 η αντίστοιχη ολίσθηση ήταν μικρότερη από 10 mm. Η μορφή όμως της χρονοϊστορίας της απόκρισης ήταν παρόμοια και στα δύο πειράματα. Στις αριθμητικές αναλύσεις, η παραμένουσα μετακίνηση ήταν παρόμοια για τα δύο πειράματα: 15 mm για το EQ14 και 12 mm για το EQ15, αλλά προς την άλλη κατεύθυνση.

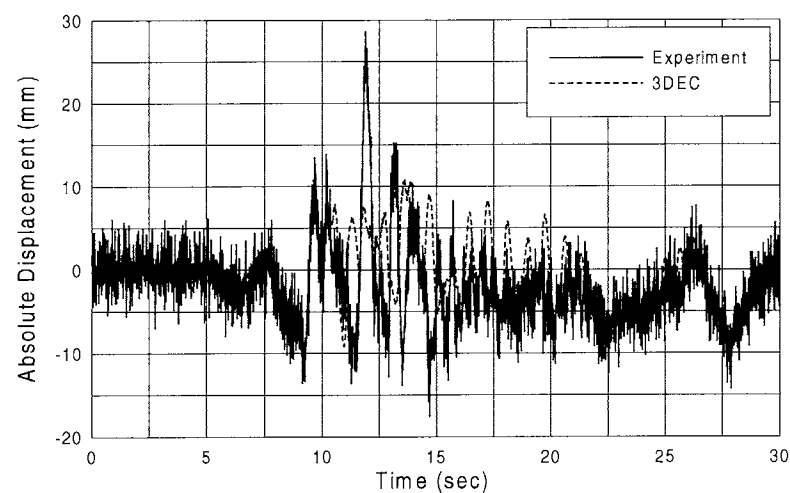
Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι η συμφωνία των αποτελεσμάτων μεταξύ των πειραμάτων και των αναλύσεων με το 3DEC ήταν πολύ ικανοποιητική, αφού η αριθμητική ανάλυση μπόρεσε να προβλέψει με αρκετή ακρίβεια όλα τα βασικά χαρακτηριστικά της απόκρισης (πλάτος ταλάντωσης, περίοδος κίνησης, μόνιμες ολισθήσεις κ.λ.π.). Η σύγκριση των αποτελεσμάτων πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την ευαισθησία του φαινομένου και το γεγονός ότι ίδια αποτελέσματα δεν προέκυψαν ούτε κατά την επανάληψη του ίδιου πειράματος. Από την άλλη μεριά, η ευαισθησία αυτή, που είναι εμφανής ακόμη και για μικρές αλλαγές των παραμέτρων, μας αναγκάζει να αντιμετωπίζουμε τα αποτελέσματα αναλύσεων της σεισμικής συμπεριφοράς μνημείων, όπως αυτά που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια αυτής της εργασίας, με κάποια επιφύλλαξη.



(α)



(β)



(γ)

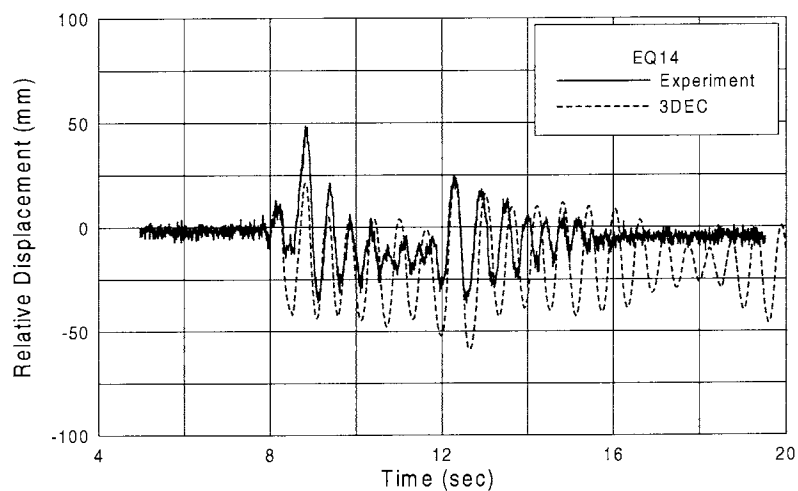
**Σχ. 3.7.** Μετακίνηση του σημείου K2 του κionoκράνου για τη σεισμική δόνηση της Έδεσσας: (α) διαμήκης διεύθυνση, (β) εγκάρσια διεύθυνση, (γ) κατακόρυφη διεύθυνση [Papantonopoulos et al (2002)].



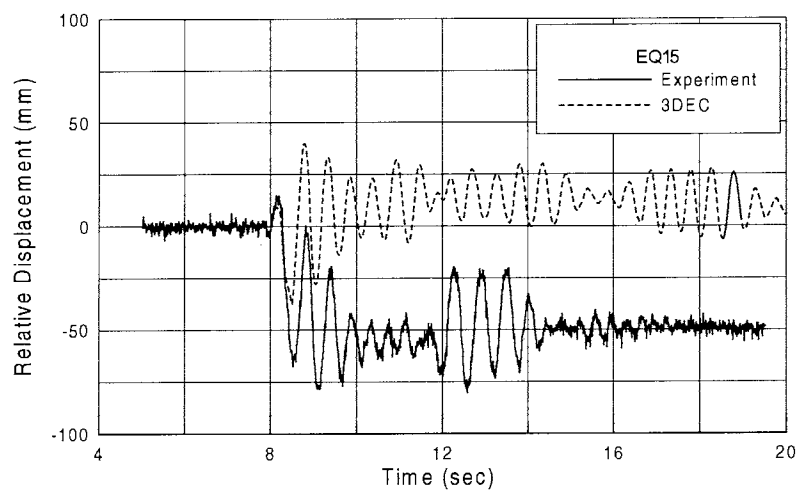
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στα πειράματα, εκτός από τη μικρή διαφορά στη διέγερση, υπήρχε και διαφορά στην αρχική γεωμετρία των κiónων, σφού ήταν αδύνατη η ακριβής επανατοποθέτηση των σπονδύλων στην ίδια θέση. Στις αριθμητικές αναλύσεις, η άγνωστη αυτή διαφορά στη γεωμετρία δεν μπορούσε να ληφθεί υπόψη και η μόνη διαφορά μεταξύ των EQ14 και EQ15 ήταν η μικρή διαφοροποίηση της διέγερσης.

Η ευαισθησία της απόκρισης, ακόμη και στις μικρές διαφορές της διέγερσης που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι εμφανής τόσο στα πειραματικά, όσο και στα αριθμητικά αποτελέσματα. Η διαφορά μεταξύ των δύο πανομοιότυπων πειραμάτων είναι περισσότερο έντονη στις μόνιμες μετατοπίσεις που προκαλούνται από τις ολισθήσεις των σπονδύλων. Έτσι, στη διαμήκη διεύθυνση (Σχ. 3.8) στο πείραμα EQ15 συνέβη μία μόνιμη μετατόπιση στο κιονόκρανο, της τάξης των 50 mm, ενώ στο EQ14 η αντίστοιχη ολίσθηση ήταν μικρότερη από 10 mm. Η μορφή όμως της χρονοϊστορίας της απόκρισης ήταν παρόμοια και στα δύο πειράματα. Στις αριθμητικές αναλύσεις, η παραμένουσα μετακίνηση ήταν παρόμοια για τα δύο πειράματα: 15 mm για το EQ14 και 12 mm για το EQ15, αλλά προς την άλλη κατεύθυνση.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι η συμφωνία των αποτελεσμάτων μεταξύ των πειραμάτων και των αναλύσεων με το 3DEC ήταν πολύ ικανοποιητική, αφού η αριθμητική ανάλυση μπόρεσε να προβλέψει με αρκετή ακρίβεια όλα τα βασικά χαρακτηριστικά της απόκρισης (πλάτος ταλάντωσης, περίοδος κίνησης, μόνιμες ολισθήσεις κ.λ.π.). Η σύγκριση των αποτελεσμάτων πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την ευαισθησία του φαινομένου και το γεγονός ότι ίδια αποτελέσματα δεν προέκυψαν ούτε κατά την επανάληψη του ίδιου πειράματος. Από την άλλη μεριά, η ευαισθησία αυτή, που είναι εμφανής ακόμη και για μικρές αλλαγές των παραμέτρων, μας αναγκάζει να αντιμετωπίζουμε τα αποτελέσματα αναλύσεων της σεισμικής συμπεριφοράς μνημείων, όπως αυτά που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια αυτής της εργασίας, με κάποια επιφύλλαξη.

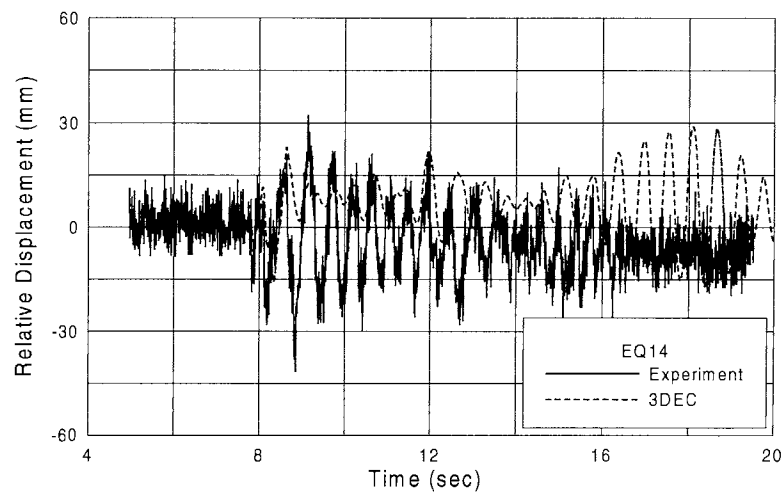


(α)

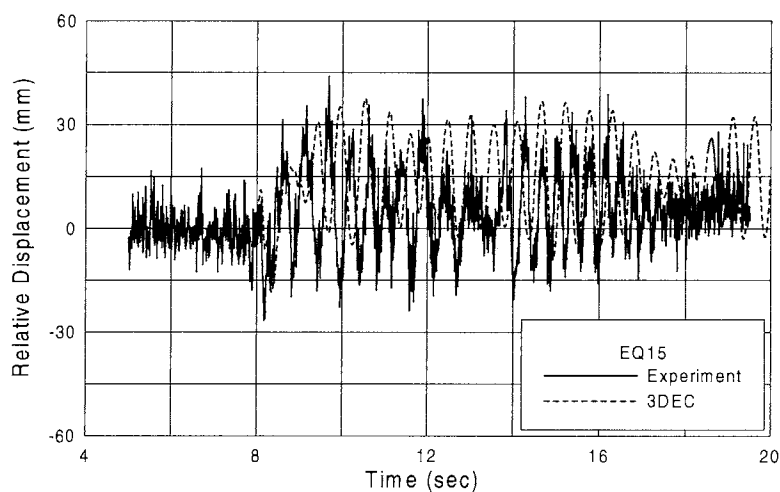


(β)

**Σχ. 3.8.** Διαμήκης μετακίνηση του κionoκράνου για τη σεισμική δόνηση του Αργοστολίου [Papantonopoulos et al (2002)].



(α)



(β)

**Σχ. 3.9.** Εγκάρσια μετακίνηση του κιονοκράνου για τη σεισμική δόνηση του Αργοστολίου [Papantonopoulos et al (2002)].

## ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Στην παρούσα μελέτη, κάθε κίονας της κατασκευής αντιστοιχίζεται σε ένα διπλό αριθμό, ανάλογα με τη θέση στην οποία βρίσκεται (σύμβαση Μ. Κορρέ). Ο πρώτος αριθμός αντιστοιχεί στη σειρά, στην οποία ανήκει ο κίονας, και ο δεύτερος στη στήλη. Οι σειρές αντιστοιχούν στη διεύθυνση Α-Δ και αριθμούνται από βορρά προς νότο. Οι στήλες αντιστοιχούν στη διεύθυνση Β-Ν και αριθμούνται από ανατολή προς δύση. Στο Σχ. 3.10 δίνεται η αρίθμηση των σειρών και των στηλών σύμφωνα με αυτή τη σύμβαση.

Όλες οι αναλύσεις που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια αφορούν τη σεισμική συμπεριφορά των κίωνων της ΝΑ γωνίας του ναού. Οι κίονες αυτοί αποτελούν σχεδόν το σύνολο των σωζόμενων σήμερα κίωνων, με εξαίρεση τους δύο μεμονωμένους κίονες της ΝΔ πλευράς. Όλοι οι σωζόμενοι κίονες φαίνονται με γραμμοσκίαση στο Σχ. 3.10, όπου, επίσης με γραμμοσκίαση, δείχνονται και τα σωζόμενα επιστύλια, έστω και εάν αυτά δεν είναι πλήρη (λείπουν δοκοί). Στο Σχ. 3.11 φαίνεται η κάτοψη της ΝΑ γωνίας με την ακριβή γεωμετρία των επιστυλίων, όπως σώζονται.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 3.10, οι σωζόμενοι κίονες της ΝΑ γωνίας μπορούν να χωριστούν σε τρεις ομάδες:

1. Τους δύο κίονες 7.5 και 7.6, συνδεδεμένους με επιστύλιο.
2. Την εξωτερική γωνία, η οποία αποτελείται από τους κίονες 6.1, 7.1, 8.1, 8.2, 8.3 και 8.4, που επίσης είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με επιστύλια.
3. Την εσωτερική γωνία, η οποία αποτελείται από τους κίονες 6.2, 7.2, 6.3, 7.3 και 7.4, που είναι συνδεδεμένοι με επιστύλια σχηματίζοντας ένα διπλό Γ.

Στα προσομοιώματα της ανάλυσης εφαρμόστηκε, κατά το δυνατόν, η πραγματική γεωμετρία της κατασκευής (αριθμός σπονδύλων, θέσεις αρμών). Όπου δεν είχαμε ακριβείς πληροφορίες, η γεωμετρία δόθηκε προσεγγιστικά με βάση τη φωτογράφιση του μνημείου. Επίσης, στους κίονες που παρουσιάζουν μεγάλες αποτμήσεις τμημάτων σε ορισμένους σπονδύλους, αυτές ελήφθησαν υπόψη, χωρίς όμως μεγάλη ακρίβεια.

Οι γενικές διαστάσεις του τυπικού κίονα, που ελήφθησαν υπόψη στα προσομοιώματα της μελέτης, δίνονται στο Σχ. 3.12. Η διάμετρος του κατώτερου σπονδύλου, που προσομοιάζει τη βάση του κίονα, κυμαίνεται από 2.51 m έως 1.92 m, ενώ η διάμετρος των σπονδύλων του κυρίως κίονα κυμαίνεται από 1.92 m στη βάση έως 1.57 m στην κορυφή. Το κιονόκρανο έχει διάμετρο 1.57 m στη βάση του και 2.51 m στην κορυφή του και αποτελείται από δύο τμήματα. Επίσης, στη βάση του κίονα θεωρήθηκε μία ορθογωνική πλάκα ύψους 0.52 m. Το συνολικό ύψος του κίονα είναι 16.81 m.

Ας σημειωθεί ότι ο αριθμός των σπονδύλων δεν είναι σταθερός σε όλους τους κίονες. Οι σπόνδυλοι που φαίνονται στο Σχ. 3.12 αντιστοιχούν στον κίονα 7.6. Τα επιστύλια αποτελούνται από δύο ή τρεις δοκούς. Στις περιπτώσεις που λείπει κάποια δοκός από κάποιο επιστύλιο (Σχ. 3.11), η αντίστοιχη δοκός αφαιρέθηκε και από το αριθμητικό μοντέλο.

Στα αριθμητικά προσομοιώματα του 3DEC, οι σπόνδυλοι προσομοιάστηκαν με πολυέδρα 22 πλευρών, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.13. Η επιλογή των 22 πλευρών έγινε επειδή οι κίονες του μνημείου φέρουν 22 ραβδώσεις. Όλοι οι σπόνδυλοι και οι δοκοί των επιστυλίων θεωρήθηκαν απαραμόρφωτα σώματα. Η πυκνότητα του μαρμάρου ελήφθη ίση με  $2700 \text{ kg/m}^3$ .

Οι ελαστικές σταθερές που ελήφθησαν υπόψη στους αρμούς είναι:  $K_n=5.0 \times 10^9 \text{ Pa/m}$ ,  $K_s=1.0 \times 10^9 \text{ Pa/m}$ , ενώ δεν ελήφθη υπόψη καθόλου εφελκυστική αντοχή. Η γωνία τριβής ελήφθη ίση με  $\varphi=36.87^\circ$  που αντιστοιχεί σε συντελεστή τριβής  $\tan\varphi=0.75$ . Επίσης, θεωρήθηκε ότι η συνοχή έχει μηδενική τιμή.

Στα μοντέλα υπολογισμού ελήφθησαν υπόψη και οι μεταλλικοί σύνδεσμοι που υπάρχουν μεταξύ των σπονδύλων των κιόνων. Αντίθετα αμελήθηκαν οι σύνδεσμοι που αρχικά υπήρχαν μεταξύ των δοκών των επιστυλίων (Σχ. 3.11), επειδή, στις περισσότερες περιπτώσεις, οι σύνδεσμοι αυτοί έχουν αφαιρεθεί.

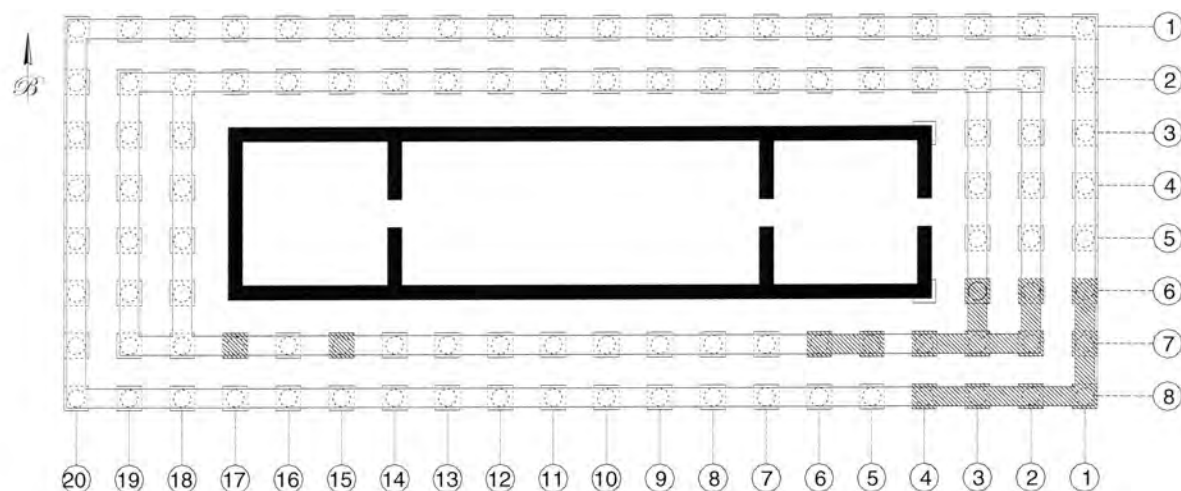
Οι σύνδεσμοι μεταξύ των σπονδύλων έχουν τετραγωνική διατομή εμβαδού  $9\text{-}14 \text{ cm}^2$  και μήκος  $12\text{-}14 \text{ cm}$ . Οι υποδοχές των συνδέσμων στους σπονδύλους (εμπόλια) είναι μεγαλύτερης διατομής (περίπου  $6 \times 6 \text{ cm}^2$ ) και γι' αυτό το κενό επληρούτο κατά την κατασκευή με μολύβι. Σε κάθε αρμό υπάρχουν δύο σύνδεσμοι διατεταγμένοι τυχαία στις διευθύνσεις B-N ή A-Δ. Οι σύνδεσμοι είναι κατασκευασμένοι από καθαρό σίδηρο.

Για να ληφθούν υπόψη οι μεταλλικοί σύνδεσμοι στα μοντέλα υπολογισμού, θεωρήθηκαν δύο μη-γραμμικά διατμητικά ελατήρια σε κάθε αρμό με τις παρακάτω ιδιότητες:

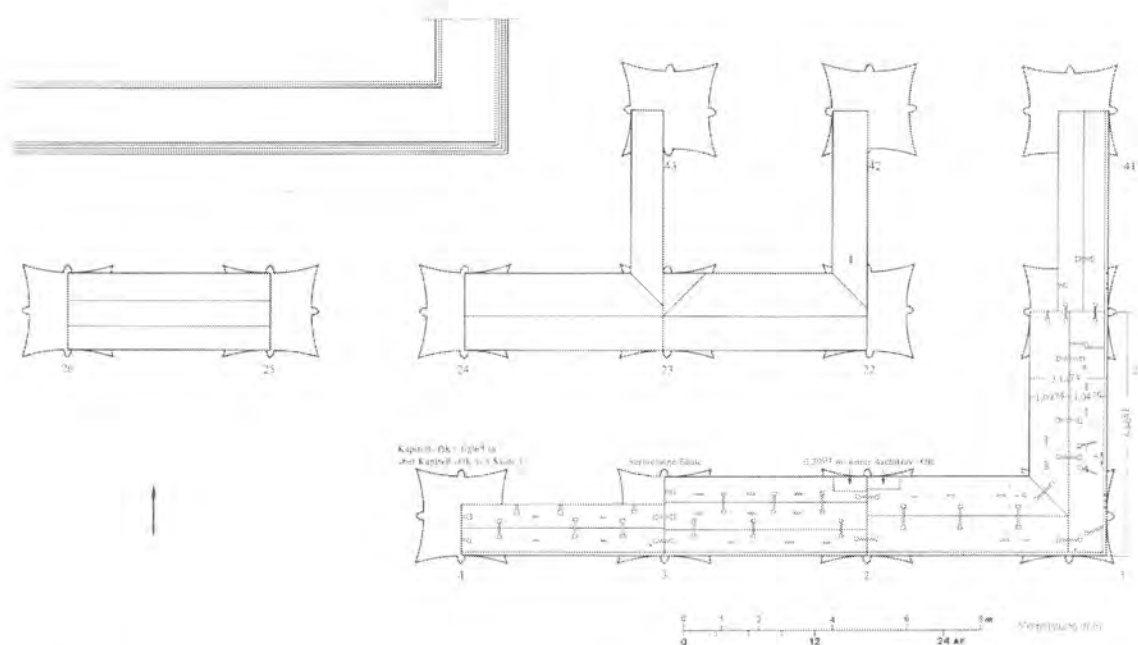
- Ενεργό μήκος προς κάθε πλευρά του αρμού:  $6 \text{ cm}$ .
- Αξονική ατένεια  $\approx 0$
- Διατμητική ατένεια:  $K_s = G \cdot A/L$

Για το σίδηρο θεωρούμε  $E=200 \times 10^6 \text{ KN/m}^2$ ,  $\nu=0.3 \Rightarrow G=77 \times 10^6 \text{ KN/m}^2$

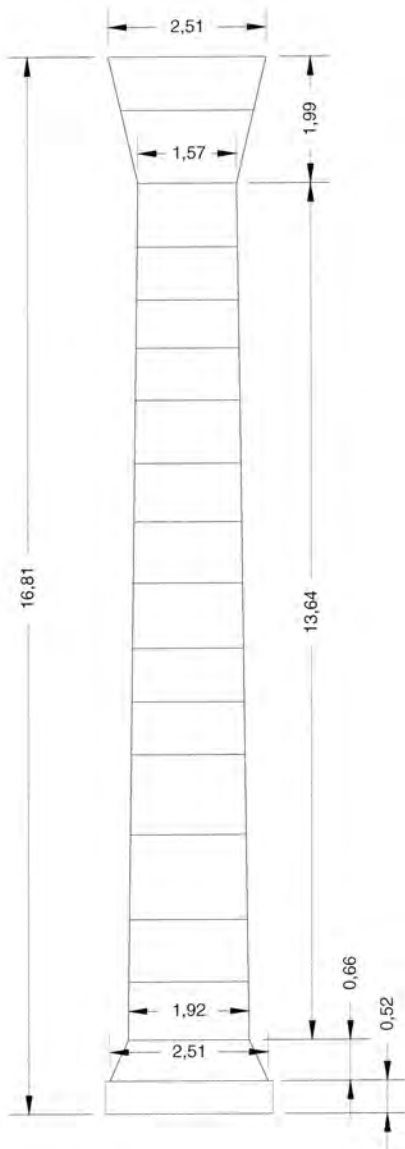
Για  $A=9 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ,  $L=0.12 \text{ m}$  προκύπτει:  $K_s = 580000 \text{ KN/m} = 5.8 \times 10^8 \text{ N/m}$



**Σχ. 3.10.** Αρίθμηση κίωνων. Με γραμμοσκίαση συμβολίζονται οι κίονες και τα επιστύλια που σώζονται σήμερα.



**Σχ. 3.11.** Κάτοψη των σωζομένων σήμερα επιστυλίων της ΝΑ γωνίας [Toelle-Kastenbein (1994)].



**Σχ. 3.12.** Διαστάσεις τυπικού κίονα που εφαρμόστηκαν στα προσομοιώματα υπολογισμών.



**Σχ. 3.13.** Μορφή σπονδύλου που εφαρμόστηκε στα προσομοιώματα υπολογισμών.

- Διατμητική αντοχή:  $T_{ult} = \tau_{ult} \cdot A$

$$\text{Θεωρούμε } \tau_{ult} = 240 \text{ KN/m}^2, A = 9 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \Rightarrow T_{ult} \approx 220 \text{ KN} = 2.2 \times 10^5 \text{ N.}$$

Γενικώς η απόσβεση ετέθη ίση με μηδέν. Για τις επιλύσεις όμως που παρουσιάζονται στο Κεφ.5, όπου μας ενδιέφεραν οι μόνιμες παραμορφώσεις των κίωνων μετά από κάθε σεισμική δόνηση, θεωρούσαμε αρχικά μηδενική απόσβεση, αλλά αρκετά μετά την ισχυρή σεισμική δόνηση αυξάναμε την απόσβεση για να περιορίσουμε τις ελεύθερες ταλαντώσεις και να έχουμε ταχύτερη σύγκλιση στην τελική παραμορφωμένη κατάσταση.

# 4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΓΙΑ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1, η δυναμική απόκριση σπονδυλωτών κατασκευών, όπως τα κλασικά μνημεία, είναι εξαιρετικά ευαίσθητη, ακόμη και σε ασήμαντες αλλαγές των παραμέτρων. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι, ένας κίονας μπορεί να ανατρέπεται για μία συγκεκριμένη σεισμική δόνηση και να μην ανατρέπεται για την ίδια δόνηση μεγεθυμένη με ένα συντελεστή μεγαλύτερο της μονάδας. Μεταξύ των παραμέτρων με έντονη και καθοριστική επίδραση στη συμπεριφορά είναι η ένταση και η περίοδος της εδαφικής δόνησης καθώς και η λυγηρότητα και το μέγεθος της κατασκευής. Μικρότερης σημασίας, αλλά όχι αμελητέας, είναι η διάρκεια της ισχυρής δόνησης και η ακριβής γεωμετρία της κατασκευής (αριθμός σπονδύλων).

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η επιρροή αυτών των παραμέτρων στη δυναμική συμπεριφορά των στύλων του Ολυμπίου Διός και συγκεκριμένα των κίωνων 7.5 και 7.6. (Σχ. 3.10). Όσον αφορά τη διέγερση, για να μπορέσουν να εξαχθούν σαφή συμπεράσματα σχετικά με την επιρροή των χαρακτηριστικών της, προτιμήθηκαν αρμονικές συναρτήσεις αντί πραγματικών καταγραφών σεισμών. Με τον τρόπο αυτό ήταν δυνατή η μελέτη της επιρροής κάθε μιας παραμέτρου με σαφή τρόπο, που δεν θα ήταν εφικτή στην περίπτωση σεισμικών δονήσεων, οι οποίες δεν έχουν ούτε συγκεκριμένη περίοδο ούτε επακριβώς καθορισμένη διάρκεια ισχυρής δόνησης.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μία σεισμική κίνηση δεν μπορεί να αντικατασταθεί από μία αρμονική συνάρτηση. Θα πρέπει όμως να αναφερθεί ότι τα τελευταία χρόνια έχει γίνει προσπάθεια να προσομοιαστούν οι εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου με αναλυτικές συναρτήσεις, οι οποίες φαίνεται ότι μπορούν να αποδώσουν αρκετά ικανοποιητικά τα κινηματικά χαρακτηριστικά της δόνησης [Makris and Chang (2000), Mavroeidis and



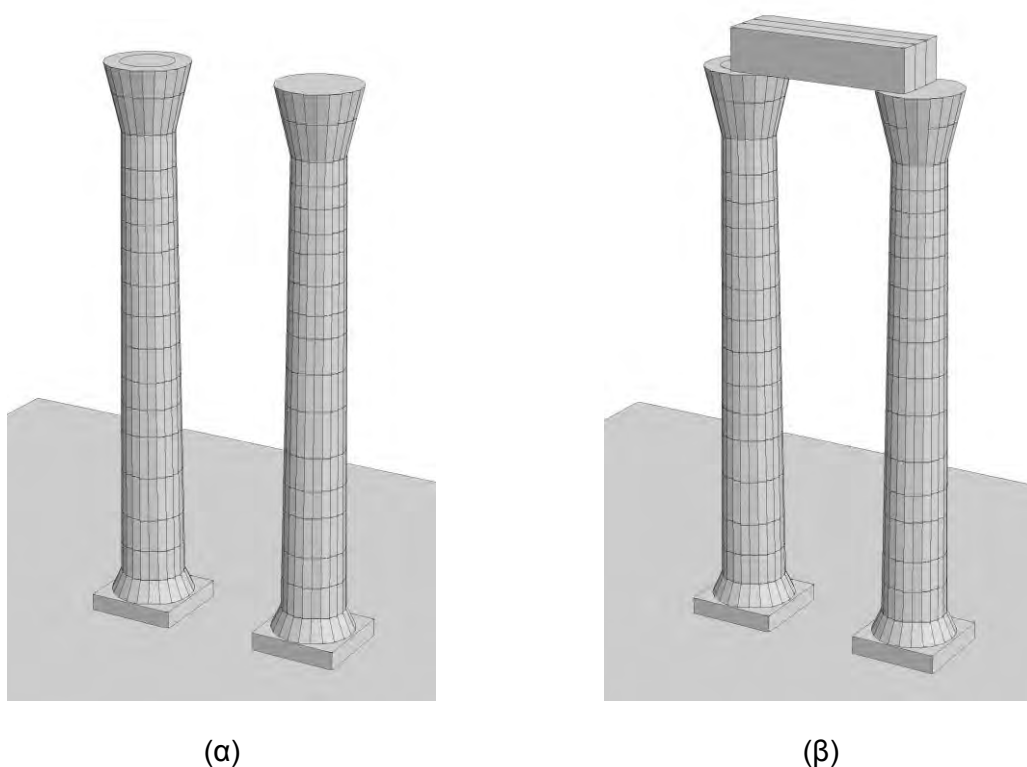
Parageorgiou (2003)]. Σε αυτές τις περιπτώσεις, βέβαια, χρησιμοποιούνται περισσότερο σύνθετες συναρτήσεις από απλά ημίτονα ή συνημίτονα. Στην περίπτωση των λικνιζομένων σωμάτων, και κατ' επέκταση και στα αρχαία μνημεία, η περίοδος της απόκρισης για ισχυρές εδαφικές δονήσεις είναι αρκετά μεγάλη, γι' αυτό κυρίαρχο λόγο στην απόκριση παίζει η δεσπόμενη περίοδος και μικρότερο τα ακριβή χαρακτηριστικά της δόνησης. Για το λόγο αυτό, πιστεύουμε ότι, παρά την ευαισθησία της δυναμικής απόκρισης, η διερεύνηση της συμπεριφοράς του μνημείου σε ημιτονικές διεγέρσεις μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες και για τη σεισμική απόκριση. Είναι ενδιαφέρον να αναφερθεί, ότι προηγούμενες αναλύσεις [Psycharis et al (2000)], στις οποίες έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ ημιτονικών διεγέρσεων και σεισμικών δονήσεων με την ίδια δεσπόμενη περίοδο, έδειξαν μία ομοιότητα, τουλάχιστον όσον αφορά τον κίνδυνο κατάρρευσης. Μία σύγκριση των αποτελεσμάτων για ημιτονικές και σεισμικές διεγέρσεις για την περίπτωση των κιόνων του Ολυμπίου γίνεται στο τέλος του παρόντος κεφαλαίου.

Επειδή η διερεύνηση αφορά το συγκεκριμένο μνημείο (Ολυμπίο), το μέγεθος και η λυγηρότητα των κιόνων είναι δεδομένα. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αυτές οι δύο παράμετροι παίζουν σημαντικό ρόλο στην απόκριση της κατασκευής. Τα συμπεράσματα, επομένως, της παρούσας έρευνας δεν ισχύουν ως έχουν και για άλλα μνημεία. Κάθε μνημείο αποτελεί μία ξεχωριστή περίπτωση με τις δικές του ιδιαιτερότητες. Όμως, η ποιοτική, και όχι η ποσοτική, ανάγνωση των αποτελεσμάτων μπορεί να οδηγήσει σε συμπεράσματα που έχουν γενική εφαρμογή.

## ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Τα προσομοιώματα υπολογισμού, που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις, βασίστηκαν στην ακριβή γεωμετρία των δύο κιόνων 7.5 και 7.6 της νότιας εσωτερικής σειράς και του επιστυλίου τους, που σώζονται σήμερα στην αρχική τους κατάσταση (Σχ. 5.1). Οι σπόνδυλοι των κιόνων προσομοιάστηκαν με ισοδύναμα πολύεδρα 22 πλευρών. Μεταξύ των σπονδύλων ελήφθησαν υπόψη οι μεταλλικοί σύνδεσμοι με ισοδύναμα μη-γραμμικά διατμητικά ελατήρια, όπως περιγράφεται στο Κεφ. 3. Το επιστύλιο προσομοιάστηκε με τρεις δοκούς χωρίς συνδέσμους μεταξύ τους.

Αναλύσεις έγιναν τόσο για τους δύο κίονες μεμονωμένα, όσο και για την περίπτωση που οι κίονες συνδέονται με επιστύλιο (Σχ. 4.1). Έτσι μπορέσαμε να διερευνήσουμε τόσο την επιρροή του αριθμού των σπονδύλων (ο κίονας 7.5 έχει 15 σπονδύλους ενώ ο 7.6 έχει 14 σπονδύλους), όσο και την επιρροή του επιστυλίου στη δυναμική συμπεριφορά.



**Σχ. 4.1.** Προσομοιώματα της ανάλυσης: (α) μεμονωμένοι κίονες 7.6 (αριστερά) και 7.5 (δεξιά) και (β) συζευγμένοι κίονες με επιστύλιο.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι πρόβλημα της επιρροής του επιστυλίου είναι ένα σύνθετο ερώτημα που τίθεται στη διάρκεια μιας αναστήλωσης, εάν δηλαδή η επανατοποθέτηση ενός επιστυλίου, που έχει καταρρεύσει, στην αρχική του θέση θα έχει ευνοϊκή ή δυσμενή επιρροή στη σεισμική συμπεριφορά. Προηγούμενες αναλύσεις για το ναό του Επικούριου Απόλλωνα στις Βάσσεις [Ψυχάρης κ.α. (1996), Psycharis et al (2000)] έδειξαν ότι δεν υπάρχει μονοσήμαντη απάντηση σε αυτό το ερώτημα και ο κίνδυνος κατάρρευσης εξαρτάται από τη διέγερση. Μία διερεύνηση αυτού του θέματος γίνεται και στην παρούσα εργασία για τους κίονες του Ολυμπείου.

Η επίδραση κάθε παραμέτρου μελετάται με την επιρροή της στη μέγιστη μετακίνηση που συμβαίνει στο άνω τμήμα του κionoκράνου (κορυφή του κίονα). Παρ' ότι η μετακίνηση αυτή από μόνη της δεν είναι αντιπροσωπευτική της όλης συμπεριφοράς του κίονα, αφού είναι δυνατόν να συμβούν σημαντικές αλληλοαναιρούμενες μεταξύ τους ολισθήσεις και στροφές στους ενδιάμεσους σπονδύλους, οι οποίες δεν θα απεικονίζονται πλήρως στην τιμή της μετακίνησης της κορυφής, χρησιμοποιείται εδώ επειδή δίνει την καλύτερη δυνατή εικόνα της συμπεριφοράς, που θα μπορούσαμε να έχουμε από ένα μόνο μέγεθος.

Οι παράμετροι που διερευνώνται είναι:

- ❑ Η επιρροή της περιόδου της ημιτονικής διέγερσης.
- ❑ Η επιρροή της έντασης της διέγερσης, η οποία μετράται με τη μέγιστη τιμή της εδαφικής ταχύτητας.
- ❑ Η επιρροή της διάρκειας της διέγερσης, η οποία μετράται με το πλήθος των ημιτονικών παλμών που περιέχονται στην εδαφική κίνηση.
- ❑ Η επιρροή της εσωτερικής γεωμετρίας και του αριθμού των σπονδύλων των κίωνων. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο ένας κίονας έχει 14 σπονδύλους και ο άλλος 15, οι εξωτερικές τους όμως διαστάσεις είναι ίδιες.
- ❑ Η επιρροή της σύζευξης των δύο κίωνων με επιστύλιο, σε σύγκριση με την απόκριση των μεμονωμένων κίωνων.

Όσον αφορά την εδαφική κίνηση, επιλύσεις έγιναν για τις παρακάτω περιπτώσεις:

- ❑ Για περιόδους διέγερσης που κυμαίνονταν από 0.10 sec έως 0.80 sec, με βήμα 0.10 sec.
- ❑ Για μέγιστες τιμές ταχύτητας 40, 60 και 80 cm/sec.
- ❑ Για διάρκεια διέγερσης 1, 2, 3 και 5 κύκλων.

Σε όλες τις περιπτώσεις η σεισμική δόνηση ενεργεί μόνο σε μία οριζόντια διεύθυνση (στη διαμήκη διεύθυνση στην περίπτωση των συζευγμένων κίωνων). Οι επιλύσεις όμως έγιναν στο χώρο.

## ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στους πίνακες 4.1, 4.2 και 4.3 δίνονται οι μέγιστες μετακινήσεις της κορυφής κάθε κίονα για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα γίνεται παρακάτω μία αναλυτική παρουσίαση της επιρροής κάθε παραμέτρου.

Δεν θεωρήθηκε απαραίτητο να δοθούν διαγράμματα με χρονοϊστορίες της απόκρισης για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Δίνονται όμως ενδεικτικά διαγράμματα στα σχήματα 4.2 και 4.3. Στο Σχ. 4.2 δίνονται οι χρονοϊστορίες της απόκρισης για διέγερση με περίοδο 0.80 sec, μέγιστη ταχύτητα 80 cm/sec και διάρκεια 2 κύκλων και γίνεται σύγκριση της μετακίνησης της κορυφής για τους μεμονωμένους και τους συζευγμένους κίονες. Στο Σχ. 4.3 φαίνεται η επιρροή της διάρκειας της σεισμικής κίνησης. Συγκεκριμένα γίνεται σύγκριση της απόκρισης του κίονα 7.6 για διάρκεια διέγερσης 2 κύκλων και 5 κύκλων. Παρά τη μεγάλη διαφορά των δύο διαγραμμάτων, η μέγιστη τιμή της μετακίνησης δεν

αλλάζει σημαντικά. Στο κάτω διάγραμμα των σχημάτων 4.2 και 4.3 δίνονται οι χρονοϊστορίες της εδαφικής διέγερσης, στην ίδια κλίμακα χρόνου, για σύγκριση.

Πίνακας 4.1

**Μέγιστη μετακίνηση (m) κορυφής (κιονόκρानο)  
μεμονωμένου κίονα 7.6 (14 σπονδύλων)**

Ταχύτητα διέγερσης	Διάρκεια διέγερσης	Περίοδος διέγερσης, T (sec)							
		0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
<b>v=40 (cm/sec)</b>	1 κύκλος	0.016	0.032	0.075	0.104	0.140	0.180	0.225	0.257
	2 κύκλοι	0.018	0.042	0.096	0.128	0.174	0.180	0.225	0.257
	3 κύκλοι	0.018	0.046	0.128	0.132	0.171	0.180	0.225	0.257
	5 κύκλοι	0.028	0.051	0.125	0.132	0.171	0.311	0.399	0.257
<b>v=60 (cm/sec)</b>	1 κύκλος	0.039	0.034	0.073	0.138	0.193	0.245	0.311	0.358
	2 κύκλοι	0.041	0.063	0.112	0.178	0.229	0.319	0.418	0.359
	3 κύκλοι	0.034	0.156	0.155	0.255	0.228	0.313	0.416	0.359
	5 κύκλοι	0.044	0.112	0.155	0.257	0.228	0.417	0.552	0.359
<b>v=80 (cm/sec)</b>	1 κύκλος	0.077	0.056	0.053	0.131	0.219	0.292	0.377	0.455
	2 κύκλοι	0.062	0.057	0.103	0.200	0.309	0.337	0.581	0.667
	3 κύκλοι	0.066	0.058	0.152	0.329	0.428	0.338	0.576	0.646
	5 κύκλοι	0.061	0.133	0.194	0.310	0.429	0.338	0.576	0.740

Πίνακας 4.2

**Μέγιστη μετακίνηση (m) κορυφής (κιονόκρानο)  
μεμονωμένου κίονα 7.5 (15 σπονδύλων)**

Ταχύτητα διέγερσης	Διάρκεια διέγερσης	Περίοδος διέγερσης, T (sec)							
		0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
<b>v=40 (cm/sec)</b>	1 κύκλος	0.018	0.022	0.079	0.096	0.133	0.177	0.218	0.256
	2 κύκλοι	0.017	0.031	0.084	0.108	0.143	0.176	0.218	0.256
	3 κύκλοι	0.017	0.041	0.083	0.102	0.145	0.176	0.218	0.256
	5 κύκλοι	0.017	0.045	0.083	0.102	0.145	0.262	0.384	0.256
<b>v=60 (cm/sec)</b>	1 κύκλος	0.031	0.038	0.068	0.139	0.173	0.231	0.286	0.359
	2 κύκλοι	0.029	0.039	0.089	0.149	0.222	0.292	0.387	0.417
	3 κύκλοι	0.029	0.045	0.123	0.217	0.221	0.292	0.384	0.415
	5 κύκλοι	0.029	0.093	0.125	0.214	0.221	0.292	0.384	0.415
<b>v=80 (cm/sec)</b>	1 κύκλος	0.062	0.066	0.063	0.124	0.217	0.267	0.342	0.437
	2 κύκλοι	0.048	0.064	0.117	0.182	0.232	0.339	0.463	0.669
	3 κύκλοι	0.073	0.064	0.119	0.250	0.424	0.343	0.456	0.660
	5 κύκλοι	0.106	0.080	0.157	0.250	0.405	0.336	0.456	0.660

Πίνακας 4.3

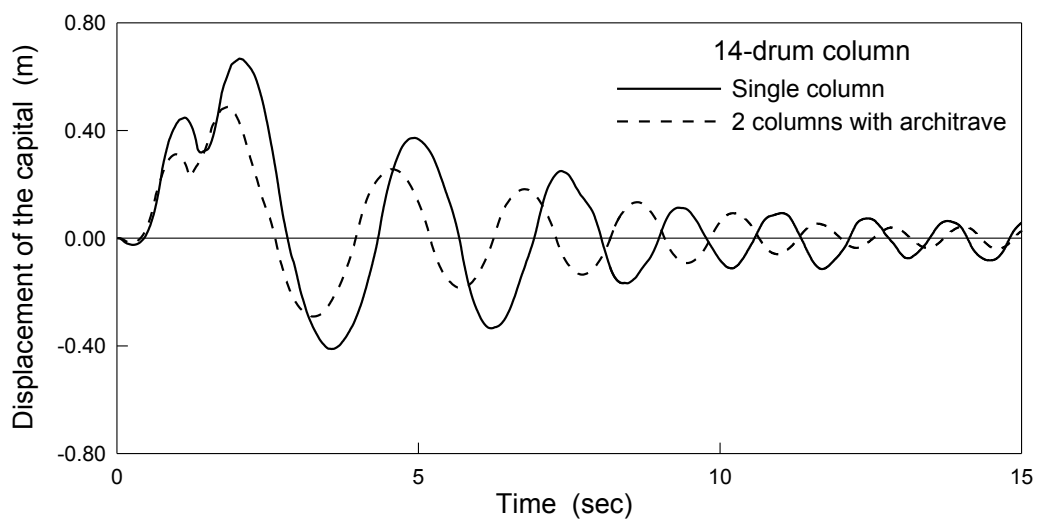
**Μέγιστη μετακίνηση (m) κορυφής (κιονόκρανο)  
κίωνων 7.6 και 7.5 συνδεδεμένων με επιστύλιο**

**(Διέγερση διάρκειας 2 κύκλων)**

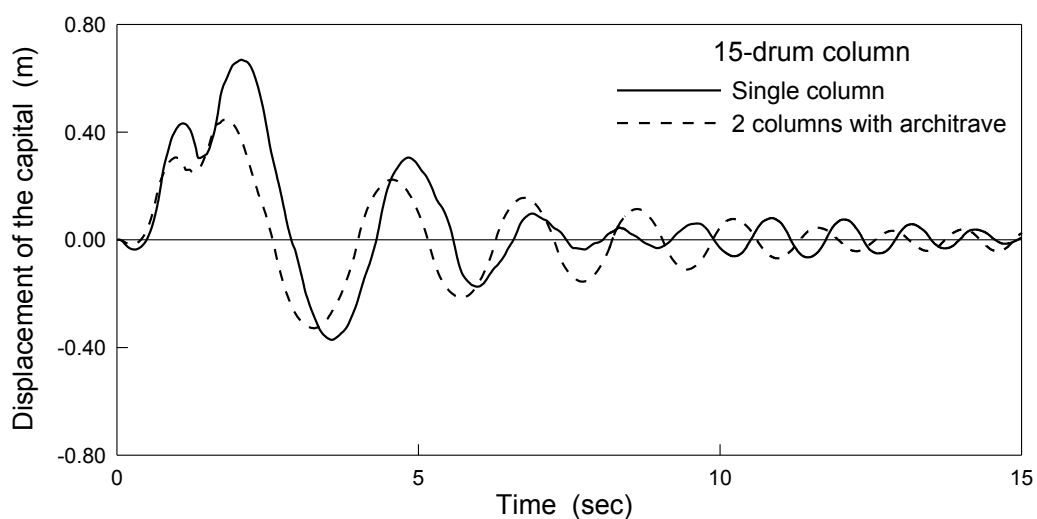
Ταχύτητα διέγερσης	Κίονας	Περίοδος διέγερσης, T (sec)							
		0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
<b>v=40</b> <b>(cm/sec)</b>	7.6 (14 σπον.)	0.014	0.037	0.074	0.123	0.128	0.139	0.180	0.220
	7.5 (15 σπον.)	0.009	0.027	0.053	0.097	0.121	0.141	0.181	0.219
<b>v=60</b> <b>(cm/sec)</b>	7.6 (14 σπον.)	0.014	0.040	0.056	0.118	0.164	0.286	0.244	0.280
	7.5 (15 σπον.)	0.018	0.046	0.057	0.099	0.159	0.242	0.229	0.276
<b>v=80</b> <b>(cm/sec)</b>	7.6 (14 σπον.)	0.022	0.047	0.093	0.130	0.203	0.255	0.386	0.386
	7.5 (15 σπον.)	0.022	0.031	0.080	0.127	0.171	0.255	0.385	0.385

Ενδεικτικές εικόνες του τρόπου απόκρισης των κίωνων σε διάφορες χρονικές στιγμές δίνονται στο Σχ. 4.4, τόσο για τους μεμονωμένους, όσο και για τους συζευγμένους κίονες. Σύγκριση των αντίστοιχων εικόνων των δύο περιπτώσεων δείχνει ότι, παρά την εμφανή διαφορά στο μέγεθος των μετακινήσεων και των στροφών σε ορισμένες θέσεις, η ομοιότητα του τρόπου απόκρισης είναι εντυπωσιακή. Η συμπεριφορά αυτή εναρμονίζεται με το συμπέρασμα προηγούμενων αναλύσεων, ότι δηλαδή, η ακριβής γεωμετρία της κατασκευής δεν επηρεάζει τόσο πολύ τη δυναμική συμπεριφορά και επομένως ακόμη και η απλοποιημένη περίπτωση ενός μεμονωμένου κίονα μπορεί να δώσει αρκετές πληροφορίες για τον τρόπο απόκρισης. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι, για μεγάλες μετακινήσεις κοντά στην κατάρρευση, ακόμη και μικρές διαφοροποιήσεις στη γεωμετρία μπορεί να είναι κρίσιμες για την ευστάθεια της κατασκευής.

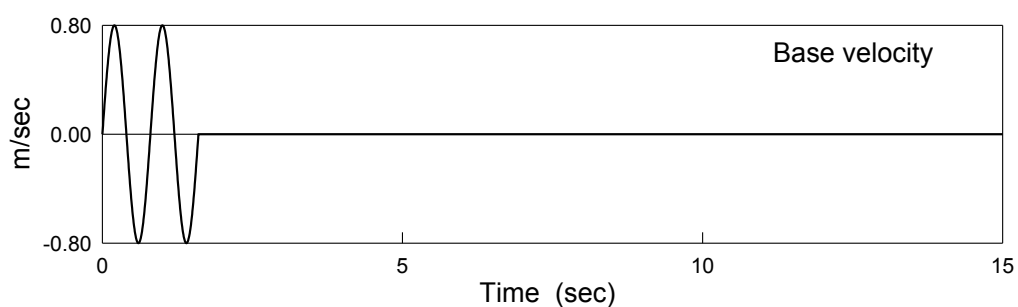
Συγκεντρωτικά διαγράμματα των αποτελεσμάτων δίνονται στα σχήματα 4.5 έως 4.11. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα σχετικά με την επιρροή κάθε παραμέτρου.



(α)

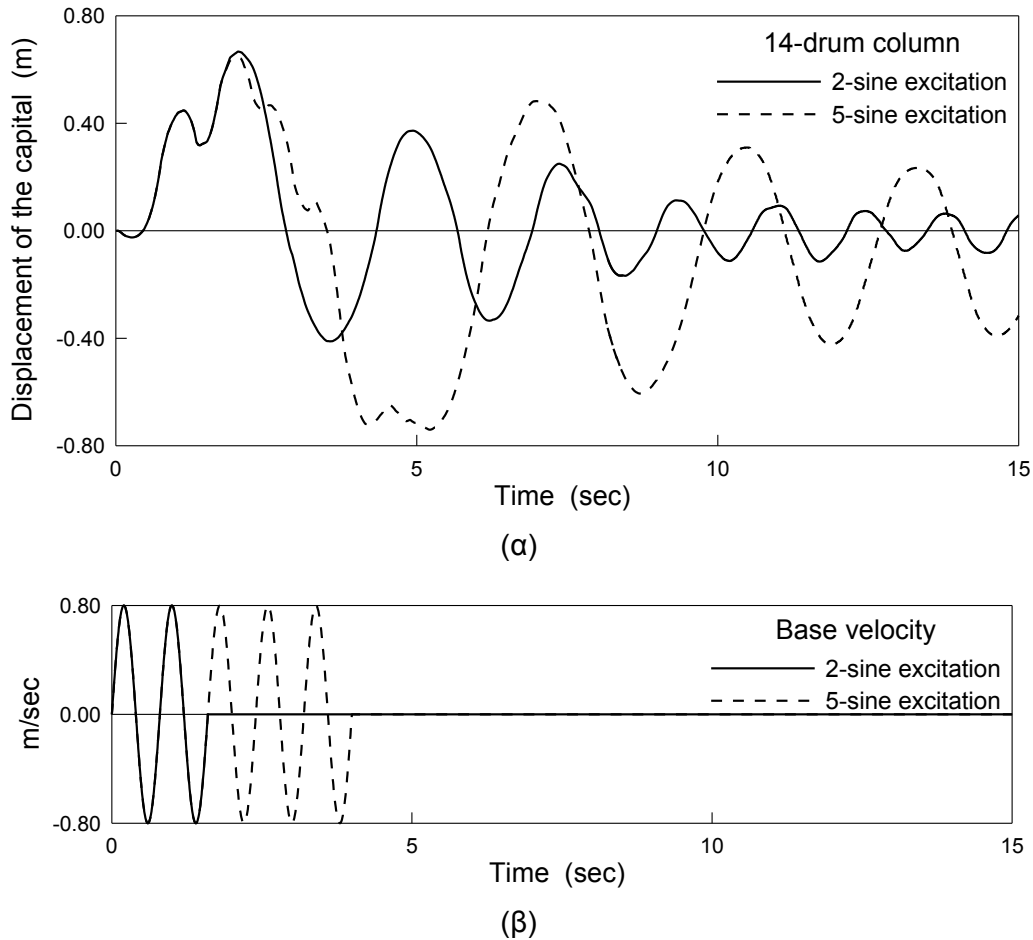


(β)



(γ)

**Σχ. 4.2.** Χρονοϊστορίες της μετακίνησης της κορυφής για ημιτονική διέγερση με περίοδο  $T=0.80$  sec, μέγιστη ταχύτητα  $v=80$  cm/sec και διάρκεια 2 κύκλων: (α) για τον κίονα των 14 σπονδύλων και (β) για τον κίονα των 15 σπονδύλων. Συνεχείς καμπύλες: μεμονωμένοι κίονες, διακεκομμένες καμπύλες: συζευγμένοι κίονες με επιστύλιο.

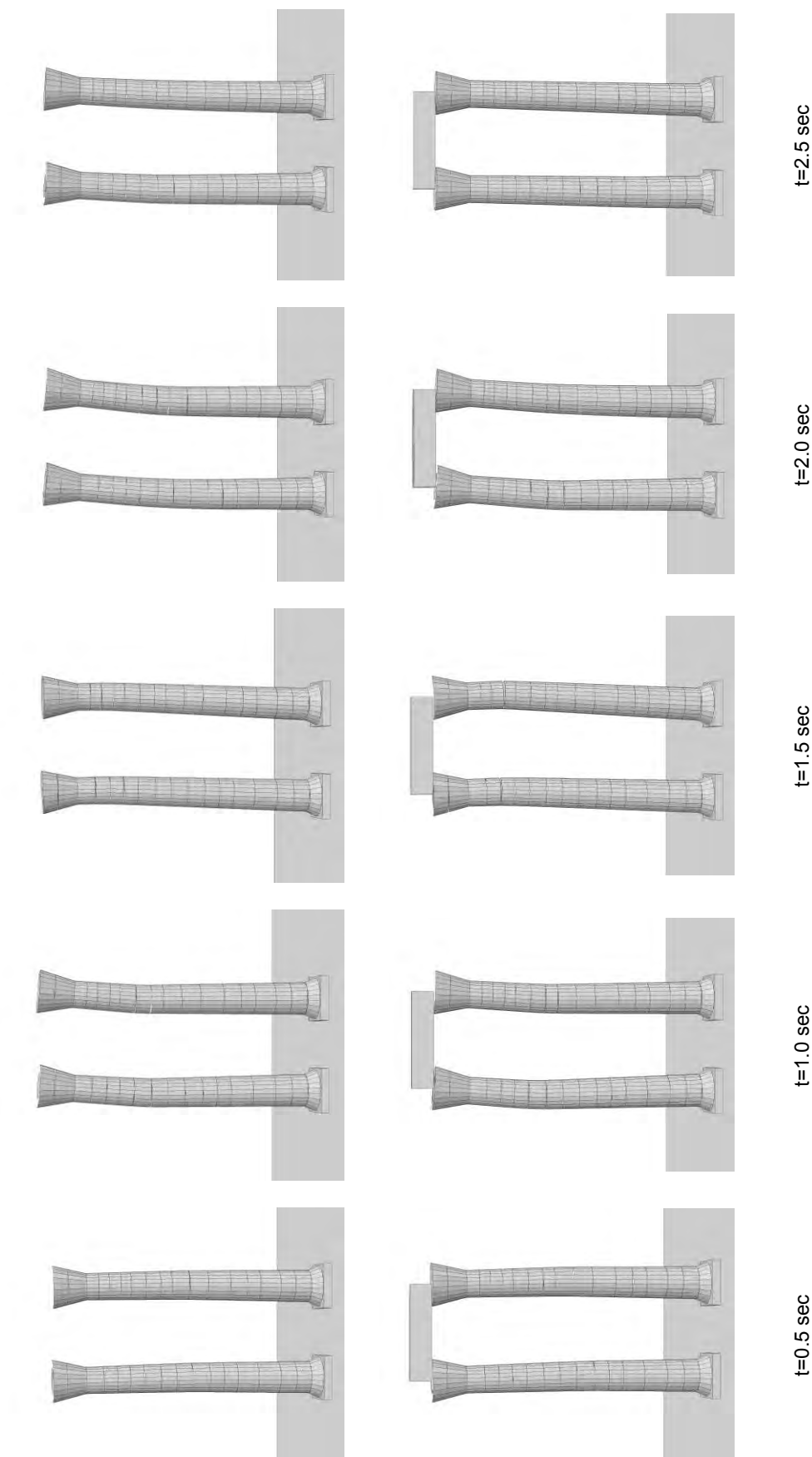


**Σχ. 4.3.** Χρονοϊστορίες της μετακίνησης της κορυφής του κίονα των 14 σπονδύλων για ημιτονική διέγερση με περίοδο  $T=0.80$  sec, μέγιστη ταχύτητα  $v=80$  cm/sec και διάρκεια 2 και 5 κύκλων.

#### Επιρροή της έντασης και της περιόδου της διέγερσης

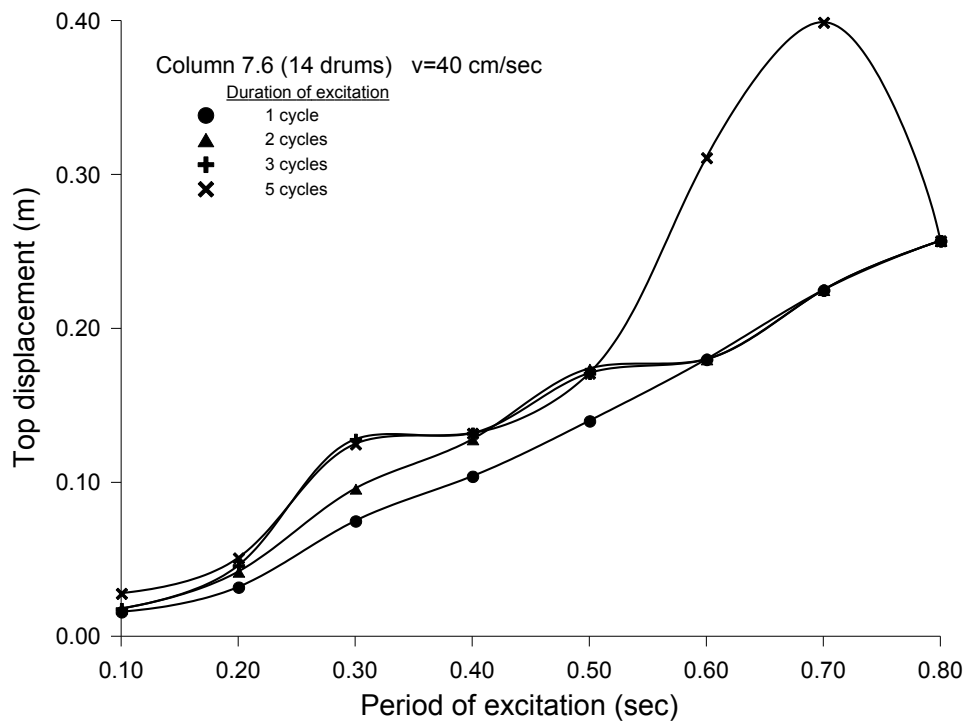
Στα σχήματα 4.5, 4.6 και 4.7 δίνονται τα διαγράμματα που δείχνουν πώς μεταβάλλεται η μετατόπιση της κορυφής των μεμονωμένων κίωνων με την περίοδο της διέγερσης, για μέγιστη εδαφική ταχύτητα  $v=40$ , 60 και 80 cm/sec αντίστοιχα. Σε κάθε διάγραμμα δίνονται οι καμπύλες για τις διαφορετικές περιπτώσεις της διάρκειας διέγερσης που εξετάστηκαν.

Όπως ήταν αναμενόμενο, η επιρροή της περιόδου της εδαφικής κίνησης είναι ιδιαίτερως σημαντική και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μετακίνηση μεγαλώνει σχεδόν γραμμικά με την περίοδο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η γραμμική αυτή σχέση προκύπτει για διεγέρσεις με ίδια εδαφική ταχύτητα. Εάν, αντί για την ίδια ταχύτητα, είχε επιλεγεί ίδια επιτάχυνση στις εδαφικές κινήσεις, η μετακίνηση της κορυφής των κίωνων θα μεγάλωνε σχεδόν εκθετικά με την περίοδο της διέγερσης.

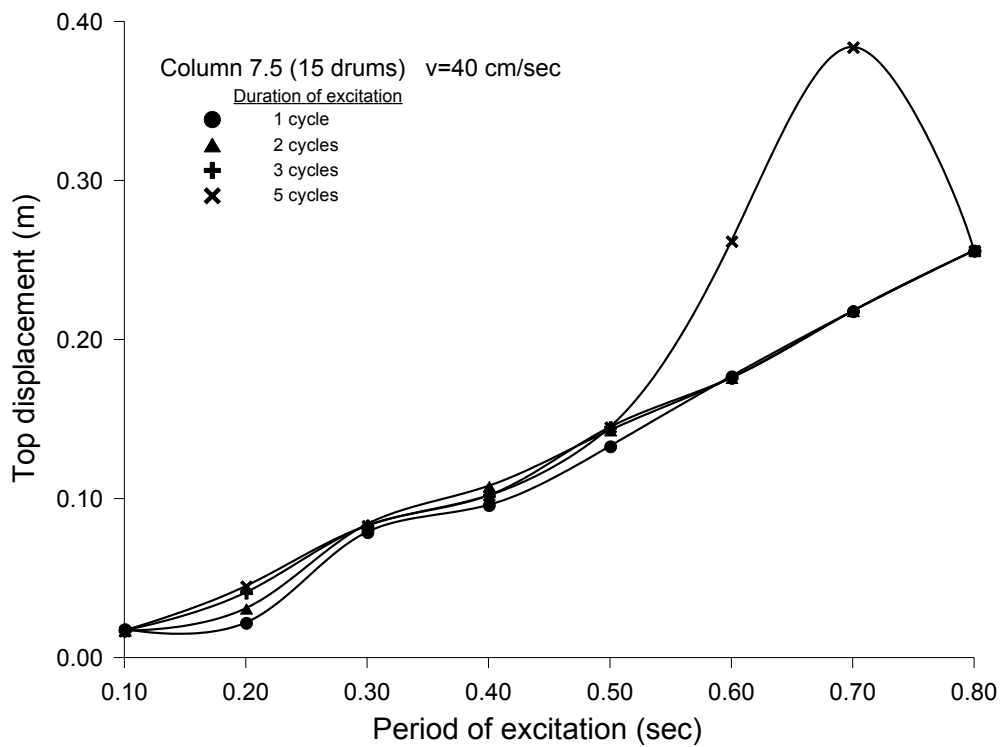


**Σχ. 4.4.** Απόκριση των μεμονωμένων κίονων και των συζευγμένων κίονων με το επιστύλιο σε ημιονική διέγερση βάσης περιόδου  $T=0.80$  sec, εύρους ταχύτητας  $v=100$  cm/sec και διάρκειας δύο κύκλων.



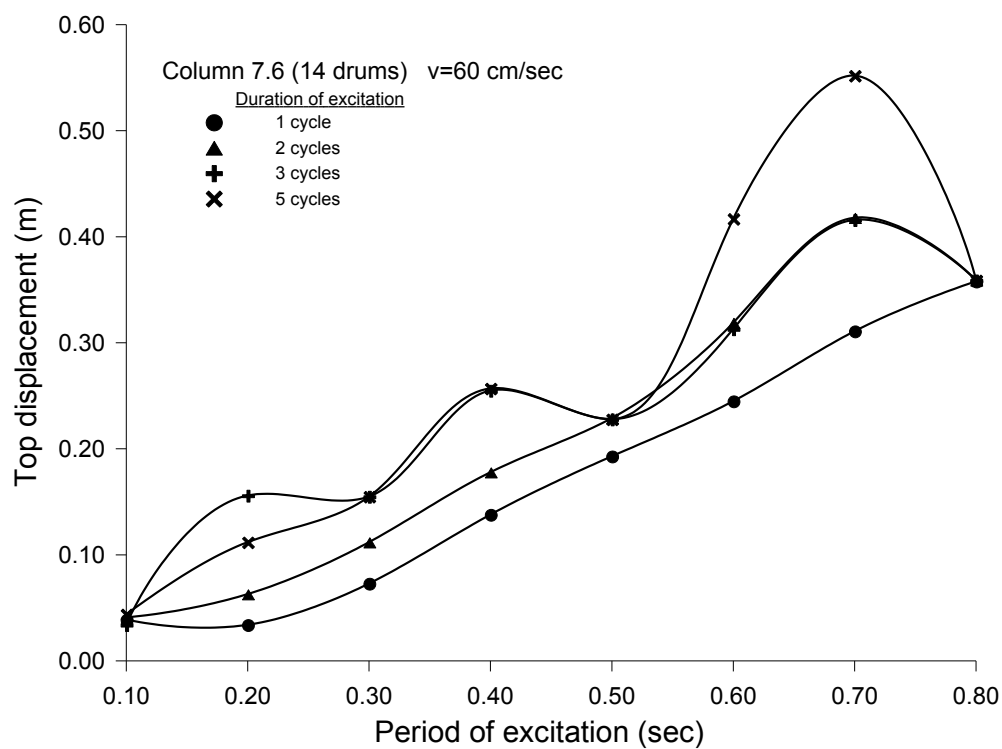


(α)

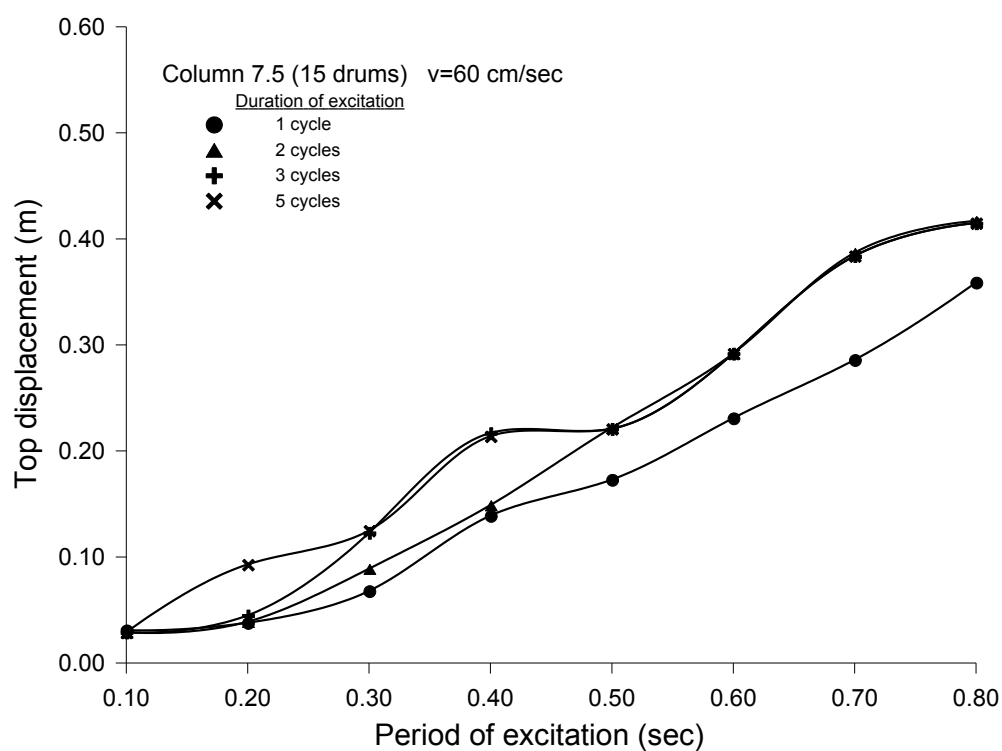


(β)

**Σχ. 4.5.** Μεταβολή της μέγιστης μετακίνησης της κορυφής του μεμονωμένου κίονα με την περίοδο της εδαφικής κίνησης για ταχύτητα διέγερσης  $v=40$  cm/sec.

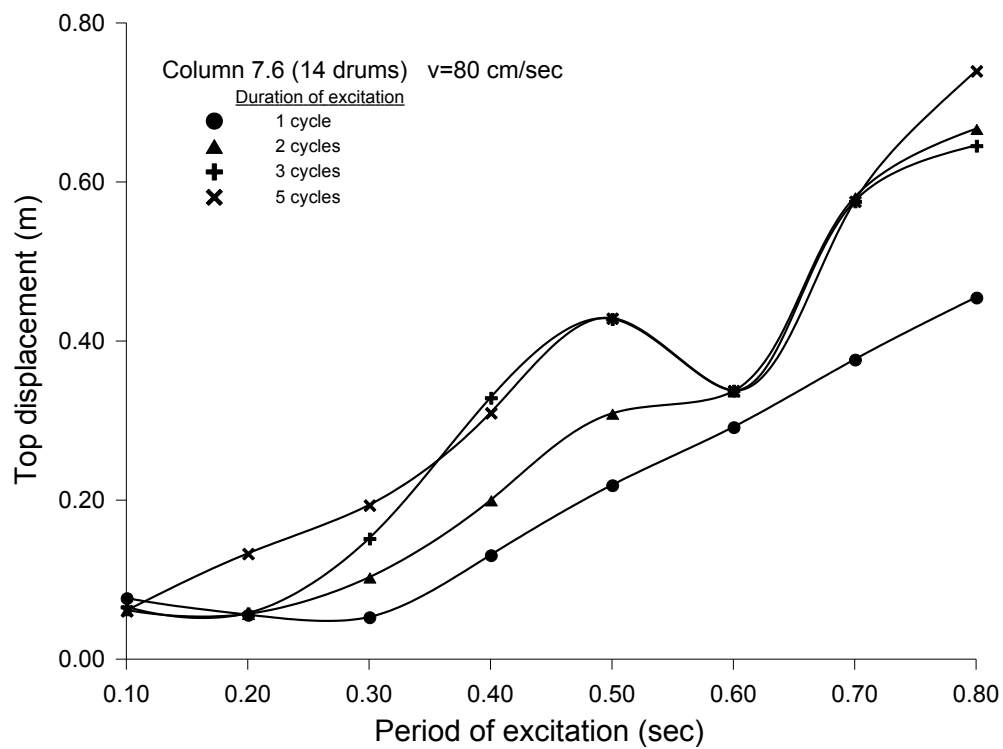


(α)

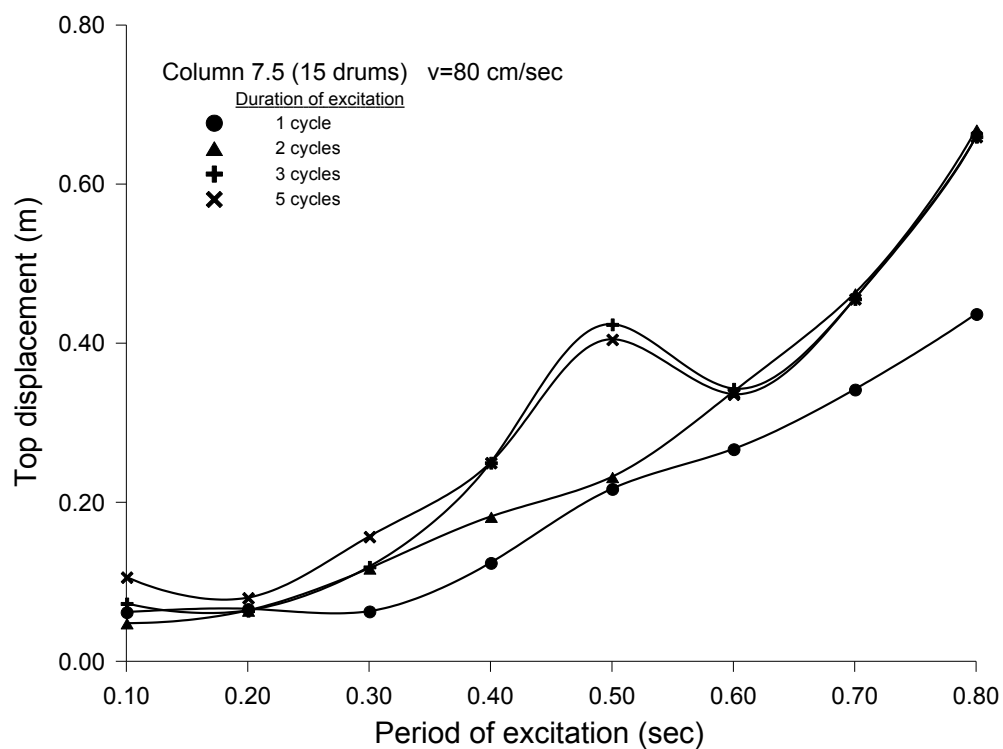


(β)

**Σχ. 4.6.** Μεταβολή της μέγιστης μετακίνησης της κορυφής του μεμονωμένου κίονα με την περίοδο της εδαφικής κίνησης για ταχύτητα διέγερσης  $v=60$  cm/sec.



(α)



(β)

**Σχ. 4.7.** Μεταβολή της μέγιστης μετακίνησης της κορυφής του μεμονωμένου κίονα με την περίοδο της εδαφικής κίνησης για ταχύτητα διέγερσης  $v=80$  cm/sec.

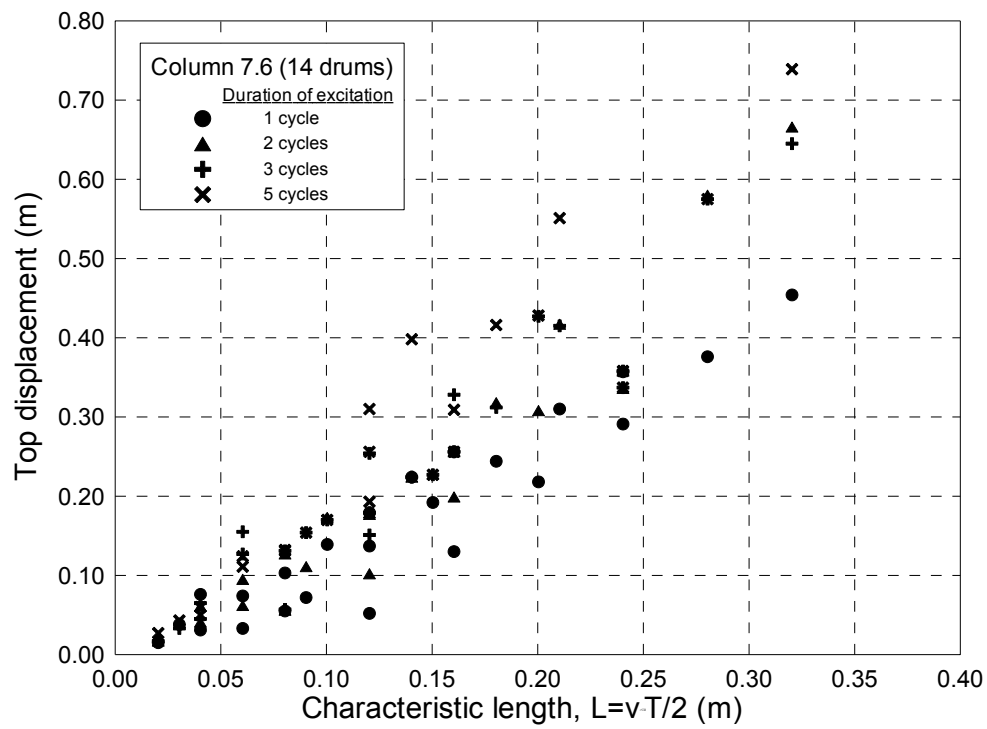
Από προηγούμενες αναλύσεις της σεισμικής απόκρισης κλασικών μνημείων έχει φανερό ότι τα αποτελέσματα παρουσιάζουν καλύτερη σύγκλιση όταν ταξινομούνται με βάση την εδαφική ταχύτητα αντί για την εδαφική επιτάχυνση. Γι' αυτό και στα επόμενα κεφάλαια, όπου εξετάζεται η απόκριση του Ολυμπίειου σε σεισμικές διεγέρσεις, η κανονικοποίηση των διεγέρσεων γίνεται με βάση τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα.

Πρόσφατα, οι Makris and Black (2004a) και (2004b) έδειξαν ότι το χαρακτηριστικό μήκος  $L_p = v_p \cdot T_p$  μπορεί να αποδώσει ποσοτικά τα χαρακτηριστικά της εδαφικής δόνησης. Σε αυτή τη σχέση,  $v_p$  και  $T_p$  είναι αντίστοιχα η μέγιστη τιμή της ταχύτητας και η διάρκεια (1/2 της περιόδου) του δεσπόζοντος παλμού. Κρίθηκε σκόπιμο να ελεγχθεί κατά πόσον το μέγεθος αυτό, που λαμβάνει υπόψη του ταυτόχρονα την ένταση και την περίοδο της εδαφικής διέγερσης, είναι αντιπροσωπευτικό της συμπεριφοράς και οδηγεί σε συγκέντρωση των αποτελεσμάτων. Στην περίπτωση μας, το χαρακτηριστικό μήκος προκύπτει από τη σχέση  $L = v \cdot T/2$  και οι τιμές του δίνονται στον Πίνακα 4.4. Στον ίδιο πίνακα δίνονται και οι αντίστοιχες τιμές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης  $a = (2\pi/T) \cdot v$ , η οποία συνήθως χρησιμοποιείται ως ένδειξη του πόσο ισχυρή είναι η κίνηση του εδάφους. Στο Σχ. 4.8 έχουν σχεδιαστεί τα αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, σε ένα κοινό διάγραμμα για κάθε κίονα, στο οποίο η μέγιστη μετακίνηση της κορυφής σχετίζεται με το χαρακτηριστικό μήκος  $L$ . Όπως προκύπτει από αυτό το σχήμα, υπάρχει μία αρκετά καλή συγκέντρωση των αποτελεσμάτων, που δείχνει μία σαφή, σχεδόν γραμμική, εξάρτηση της μέγιστης μετακίνησης από το μήκος  $L$ , ακόμη και για διεγέρσεις με σημαντικά διαφορετική διάρκεια. Για σύγκριση, αντίστοιχα διαγράμματα δίνονται στα σχήματα 4.9 και 4.10 για την εδαφική ταχύτητα και την εδαφική επιτάχυνση αντίστοιχα. Είναι προφανές ότι η διασπορά των αποτελεσμάτων είναι πολύ μεγαλύτερη σε αυτές τις περιπτώσεις, αφού υπάρχει μεγάλη διακύμανση των τιμών της μετακίνησης κορυφής για την ίδια τιμή της εδαφικής ταχύτητας ή της εδαφικής επιτάχυνσης.

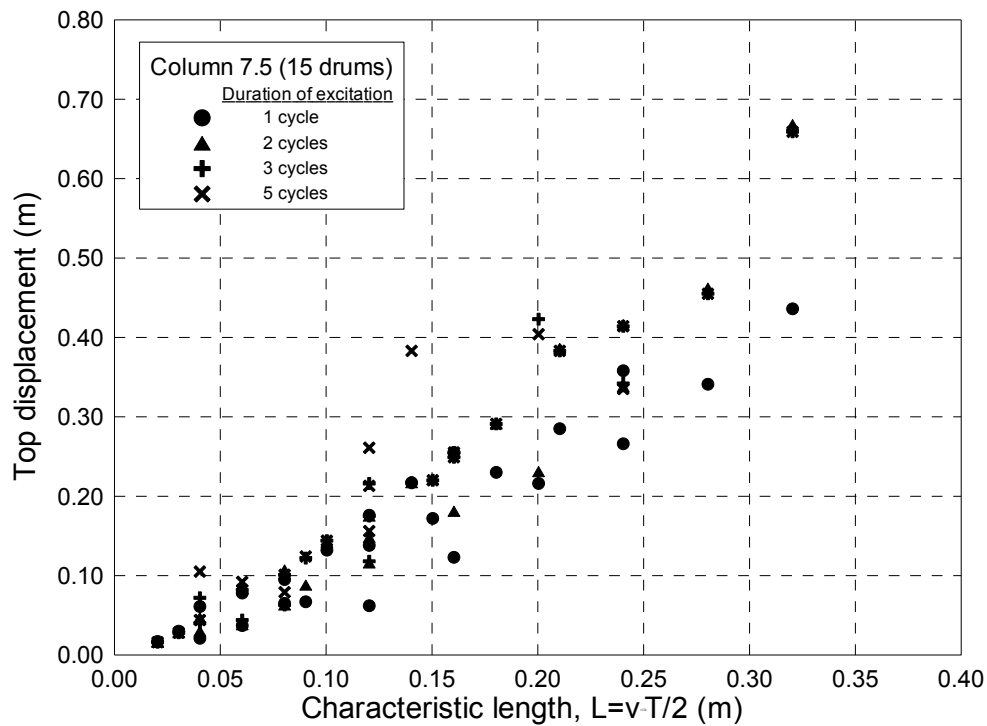
Πίνακας 4.4

**Χαρακτηριστικό μήκος,  $L = v \cdot T/2$  και επιτάχυνση,  $a$  των εδαφικών κινήσεων που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις**

Ταχύτητα διέγερσης	Χαρ.μήκος ή εδ.επιτάχ.	Περίοδος διέγερσης, $T$ (sec)							
		0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
<b><math>v=40</math> (cm/sec)</b>	$L$ (m)	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16
	$a$ (m/sec <sup>2</sup> )	25.13	12.57	8.38	6.28	5.03	4.19	3.59	3.14
<b><math>v=60</math> (cm/sec)</b>	$L$ (m)	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15	0.18	0.21	0.24
	$a$ (m/sec <sup>2</sup> )	37.70	18.85	12.57	9.42	7.54	6.28	5.39	4.71
<b><math>v=80</math> (cm/sec)</b>	$L$ (m)	0.04	0.08	0.12	0.16	0.20	0.24	0.28	0.32
	$a$ (m/sec <sup>2</sup> )	50.27	25.13	16.76	12.57	10.05	8.38	7.18	6.28

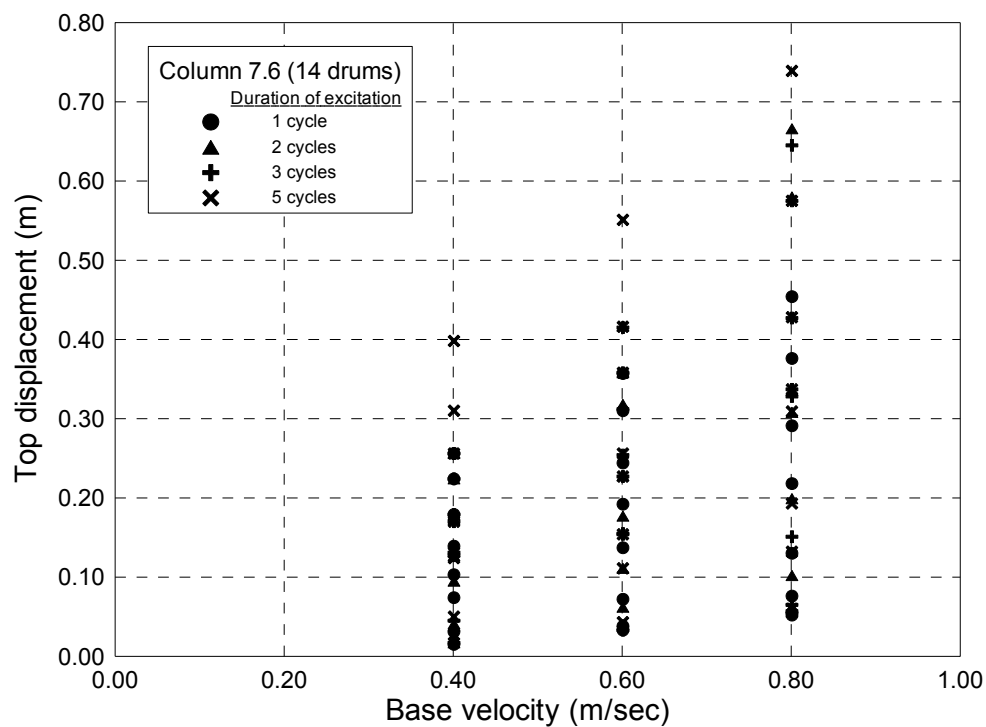


(α)

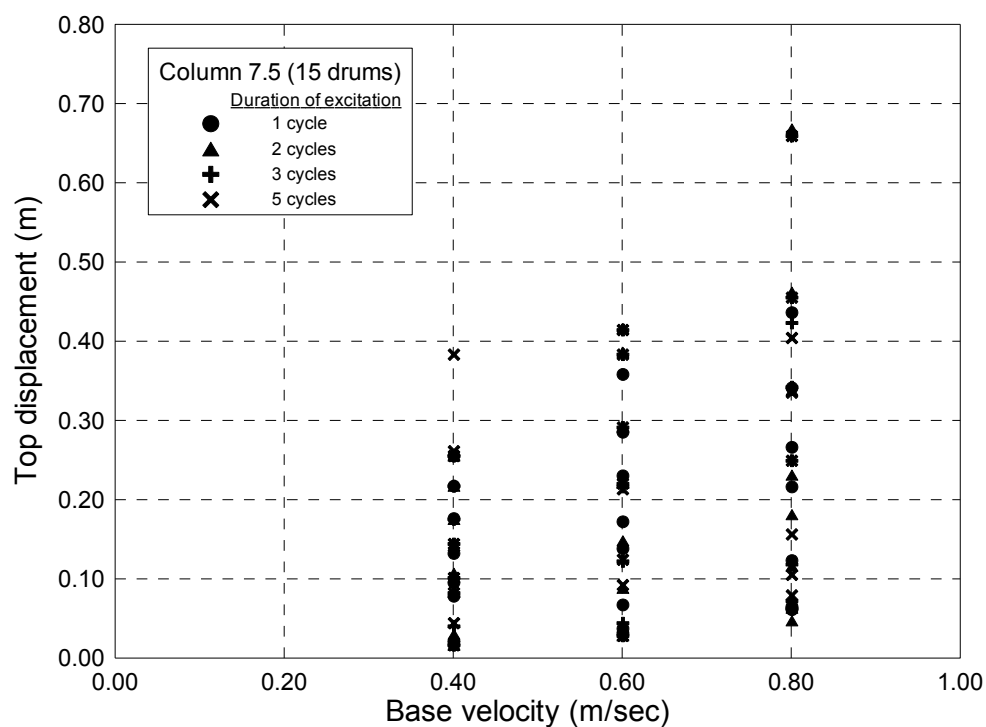


(β)

**Σχ. 4.8.** Μεταβολή της μέγιστης μετακίνησης της κορυφής του μεμονωμένου κίονα με το χαρακτηριστικό μήκος της εδαφικής κίνησης,  $L=v-T/2$ .

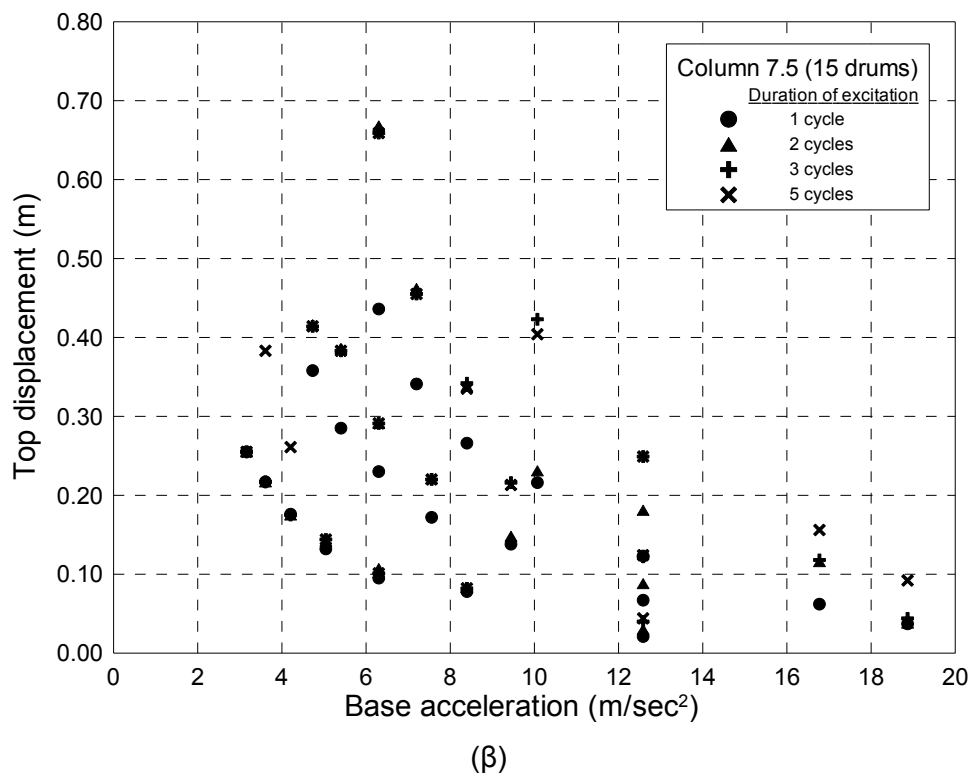
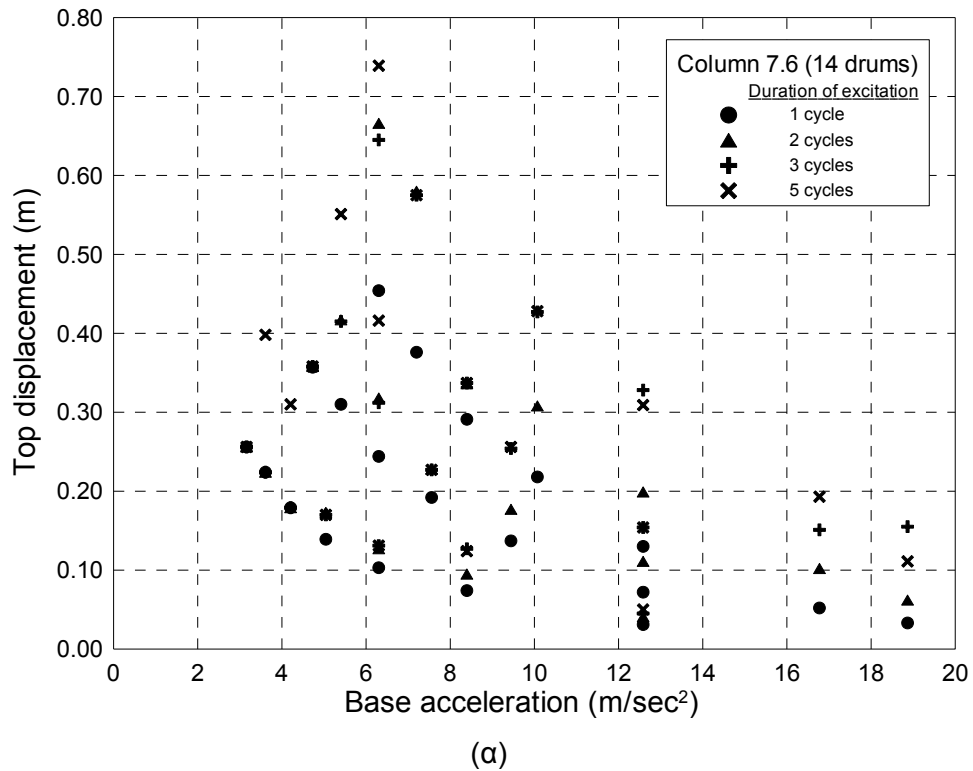


(α)



(β)

**Σχ. 4.9.** Μεταβολή της μέγιστης μετακίνησης της κορυφής του μεμονωμένου κίονα με τη μέγιστη ταχύτητα της εδαφικής κίνησης.



**Σχ. 4.10.** Μεταβολή της μέγιστης μετακίνησης της κορυφής του μεμονωμένου κίονα με τη μέγιστη επιτάχυνση της εδαφικής κίνησης.

### **Επιρροή της διάρκειας της διέγερσης**

Στα σχήματα 4.5, 4.6 και 4.7 δίνονται οι καμπύλες μεταβολής της μετακίνησης κορυφής με την περίοδο της διέγερσης για τις διαφορετικές περιπτώσεις της διάρκειας που εξετάστηκαν. Η διάρκεια της διέγερσης μετράται με το πλήθος των ημιτονικών κύκλων της εδαφικής κίνησης. Είναι εμφανές από αυτά τα διαγράμματα ότι η επιρροή της διάρκειας μεγαλώνει όσο μεγαλώνει η ένταση της διέγερσης. Έτσι, για ταχύτητα εδαφικής κίνησης 40 cm/sec (Σχ. 4.5), η διάρκεια της δόνησης του εδάφους παίζει ασήμαντο ρόλο στη μετακίνηση της κορυφής, εκτός από την περίπτωση των 5 κύκλων και  $T=0.60\div 0.70$  sec. Για ισχυρότερες όμως εδαφικές κινήσεις (Σχ. 4.6 και 4.7), η μετακίνηση της κορυφής γενικώς αυξάνει με το πλήθος των κύκλων της εδαφικής κίνησης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, για 5 κύκλους διέγερσης προκύπτει απόκριση περίπου διπλάσια από αυτή για 1 κύκλο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, όπως προκύπτει από τα διαγράμματα των σχημάτων 4.6 και 4.7, στις περισσότερες περιπτώσεις η απόκριση των κiónων που αντιστοιχεί σε 5 κύκλους διέγερσης είναι περίπου ίση με αυτή που αντιστοιχεί σε 3 κύκλους. Αυτό σημαίνει ότι, μετά από ένα σημείο, η διάρκεια της δόνησης παύει να παίζει σημαντικό ρόλο.

### **Επιρροή της ακριβούς γεωμετρίας των κiónων**

Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι δύο κiónες που εξετάζονται εδώ έχουν τις ίδιες εξωτερικές διαστάσεις, αλλά δεν είναι ίδιοι. Έτσι, ο δυτικός κiónας 7.6 αποτελείται από 14 σπονδύλους, ενώ ο ανατολικός κiónας 7.5 από 15 σπονδύλους. Επίσης, το ύψος των σπονδύλων δεν είναι τυποποιημένο, αλλά διαφέρει σημαντικά από θέση σε θέση, ακόμη και στον ίδιο κiónα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, κατά την ανοικοδόμηση του ναού, το ύψος του κάθε σπονδύλου καθοριζόταν από τις διαστάσεις των τμημάτων του μαρμάρου που ήταν διαθέσιμα εκείνη τη στιγμή.

Παρά τη διαφορετική επιμέρους γεωμετρία των δύο κiónων, η απόκρισή τους δεν φαίνεται να διαφοροποιείται σημαντικά, όπως προκύπτει από τα σχήματα 4.5, 4.6 και 4.7. Υπάρχουν βέβαια διαφορές στην τιμή της μέγιστης μετακίνησης, αλλά οι διαφορές αυτές δεν θεωρούνται σημαντικές, δεδομένης της ευαισθησίας του φαινομένου και της μεγάλης διακύμανσης που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από τη σύγκριση των χρονοϊστοριών που δίνονται στα σχήματα 4.2 (α) και (β), αλλά και από τον τρόπο ταλάντωσης των κiónων που φαίνεται στην πάνω σειρά του Σχ. 4.3.

Το συμπέρασμα αυτό διερευνήθηκε περισσότερο, επειδή έχει μεγάλη πρακτική σημασία, αφού σημαίνει ότι σε μία μελέτη ενός κλασικού ναού θα μπορούσε να μην



εφαρμοστεί η ακριβής γεωμετρία κάθε κίονα, για λόγους απλοποίησης του προσομοιώματος. Έτσι π.χ. θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένας τυποποιημένος κίονας σε όλες τις θέσεις και τα αποτελέσματα να είναι αρκετά αξιόπιστα. Για την περαιτέρω διερεύνηση έγιναν αναλύσεις και σε τρεις άλλες περιπτώσεις κίωνων. Ο ένας κίονας είχε 15 σπονδύλους με την ακριβή γεωμετρία του κίονα 7.16 (Σχ. 3.10), ο οποίος κατέρρευσε στην ανεμοθύελλα του 1852 και βρίσκεται στο έδαφος. Οι άλλοι δύο κίονες ήταν θεωρητικοί, ο ένας με 15 ισοϋψείς σπονδύλους και ο άλλος με 16 ισοϋψείς σπονδύλους. Οι κίονες υποβλήθηκαν σε ημιτονικές εδαφικές κινήσεις με μέγιστη επιτάχυνση 0.20 g, 0.50 g και 0.75 g και διαφορετικές περιόδους. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 4.5 και σε μορφή διαγραμμάτων στο σχήμα 4.11.

Πίνακας 4.5

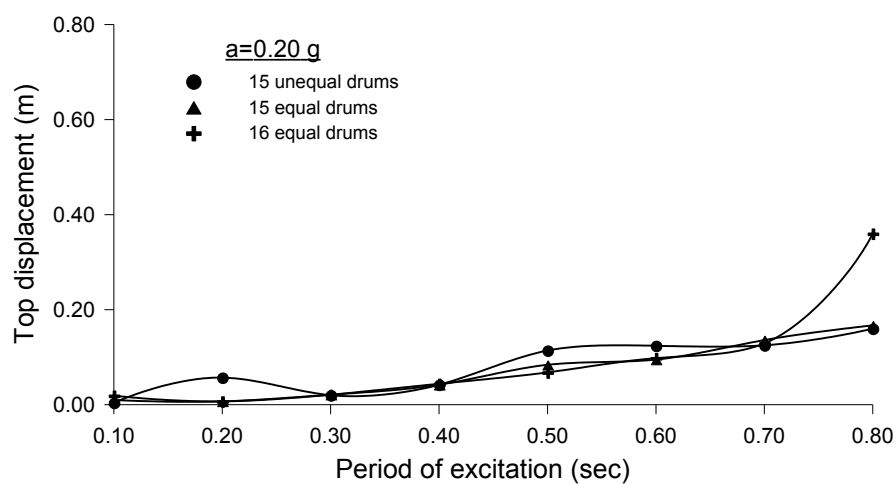
**Μέγιστη μετακίνηση (m) κορυφής (κινονόκρानο) κίονα 7.16 (με 15 ανισοϋψείς σπονδύλους) και κίωνων με 15 και 16 ισοϋψείς σπονδύλους**

Επιτ/νση διέγερσης	Πλήθος & είδος σπονδύλ.	Περίοδος διέγερσης, T (sec)							
		0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
<b>a=0.20g</b>	15 άνισοι	0.004	0.057	0.020	0.042	0.114	0.124	0.125	0.160
	15 ίσοι	0.010	0.007	0.021	0.042	0.084	0.095	0.136	0.167
	16 ίσοι	0.019	0.007	0.021	0.044	0.068	0.098	0.129	0.360
<b>a=0.50g</b>	15 άνισοι	0.010	0.023	0.165	0.542	1.055	0.362	0.957	×
	15 ίσοι	0.005	0.172	0.396	0.311	0.737	0.718	1.374	0.772
	16 ίσοι	0.062	0.087	0.274	0.682	0.863	0.663	0.888	×
<b>a=0.75g</b>	15 άνισοι	0.123	0.240	0.174	0.554	1.083	×	×	×
	15 ίσοι	0.014	0.479	0.255	1.160	1.600	1.128	×	×
	16 ίσοι	0.065	0.328	0.607	0.191	0.322	×	0.839	×

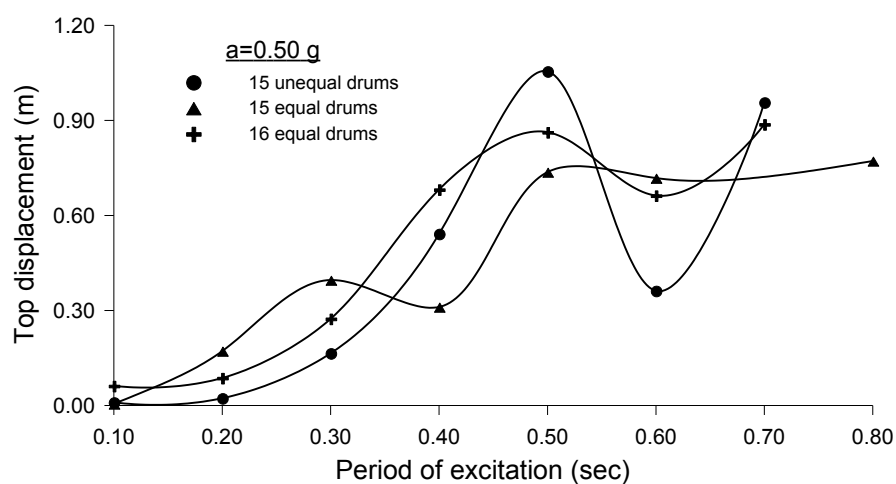
× = κατάρρευση

Είναι εμφανές από αυτά τα διαγράμματα ότι οι διαφορές που προκύπτουν από την αλλαγή της γεωμετρίας των κίωνων είναι μεγαλύτερες για τις περισσότερο ισχυρές δονήσεις. Δεν υπάρχει όμως μία σαφής τάση συμπεριφοράς και οι διακυμάνσεις, παρ' ότι είναι αρκετά μεγάλες σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορούμε να πούμε ότι βρίσκονται μέσα στο εύρος των αβεβαιοτήτων και της παρατηρούμενης μεγάλης διακύμανσης των αποτελεσμάτων ακόμη και για την ίδια γεωμετρία.

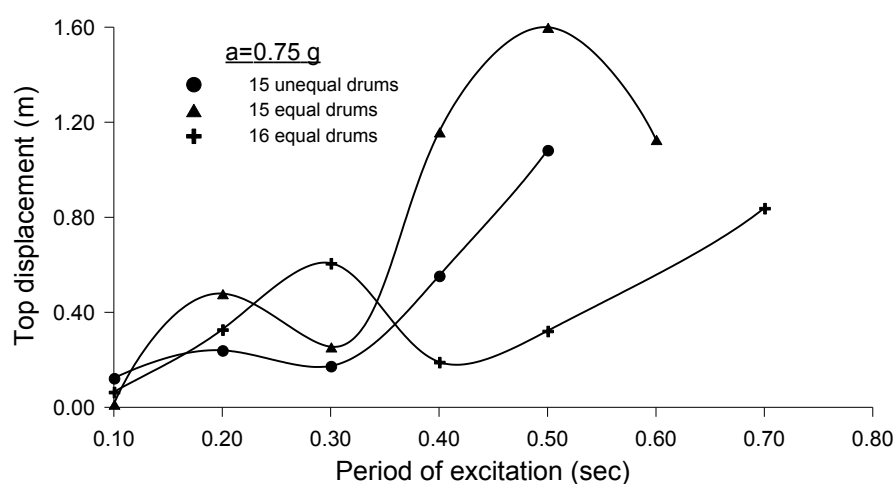
Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόμοιο συμπέρασμα είχε εξαχθεί και στην εργασία των Psycharis et al (2000), όπου είχε μελετηθεί η κατάρρευση κλασικών κίωνων. Είχε προταθεί σε αυτή την εργασία ότι θα μπορούσε, σε πρώτη προσέγγιση, να χρησιμοποιηθεί ακόμη και ο ισοδύναμος μονολιθικός κίονας (ένα ενιαίο σώμα χωρίς



(α)



(β)



(γ)

**Σχ. 4.11.** Σύγκριση της μέγιστης μετακίνησης της κορυφής τριών κιόνων με 15 ανισοϋψείς, 15 ισοϋψείς και 16 ισοϋψείς σπονδύλους αντίστοιχα.

οριζόντιους αρμούς), για την εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου. Η χρήση του ισοδύναμου μονολιθικού κίονα παρέχει μεγάλη υπολογιστική ευκολία, αφού η δυναμική του απόκριση μπορεί να βρεθεί πολύ πιο εύκολα, με εφαρμογή κλειστού τύπου λύσεων των διαφορικών εξισώσεων κίνησης.

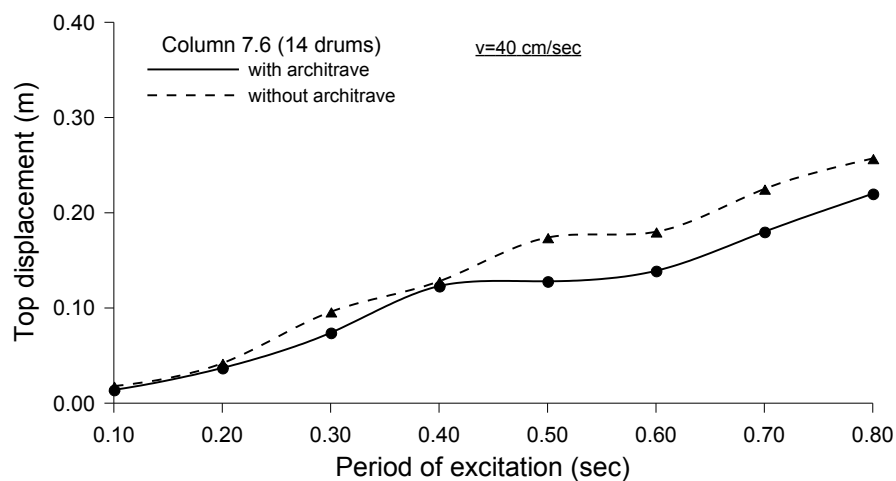
### **Επιρροή της ύπαρξης επιστυλίου**

Είναι προφανές ότι η ύπαρξη του επιστυλίου επηρεάζει τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, αφού αναγκάζει τους κίονες να κινηθούν με περίπου την ίδια μετακίνηση κορυφής. Από αυτή την άποψη, το επιστύλιο προσφέρει “δυσκαμψία” στην κατασκευή. Από την άλλη μεριά, όμως, η μάζα του επιστυλίου αυξάνει το αδρανειακό φορτίο. Δεν είναι επομένως σαφές, εάν η ύπαρξη του επιστυλίου βελτιώνει ή χειροτερεύει την απόκριση των κίωνων.

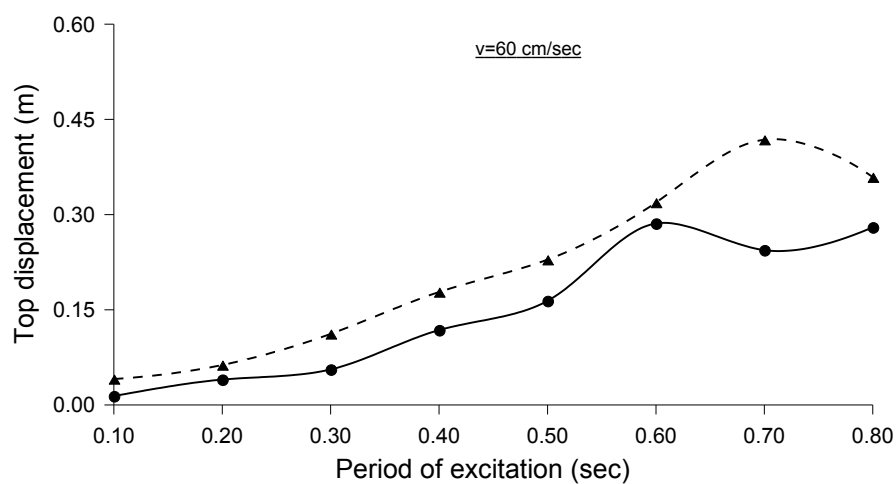
Θα περίμενε κανείς ότι η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος των δύο κίωνων με επιστύλιο είναι αρκετά διαφορετική από αυτή των μεμονωμένων κίωνων. Οι αναλύσεις, όμως, δείχνουν ότι η διαφορά αυτή δεν είναι τόσο μεγάλη. Αυτό φαίνεται στο Σχ. 4.2, όπου έχει σχεδιαστεί η χρονοϊστορία της απόκρισης για τον μεμονωμένο κίονα 7.6 και το σύστημα των συζευγμένων κίωνων για  $T=0.80$  sec,  $v=80$  cm/sec και διάρκεια δόνησης 2 κύκλων. Το γεγονός αυτό πρέπει να αποδοθεί στη μεγάλη αδράνεια των λικνιστικών ταλαντώσεων των κίωνων, οι οποίες δεν φαίνεται να μπορούν να επηρεαστούν σημαντικά από την ύπαρξη του επιστυλίου.

Στα Σχ. 4.12 και 4.13 γίνεται η σύγκριση της μέγιστης μετακίνησης της κορυφής των κίωνων 7.6 και 7.5, αντίστοιχα, για απόκριση χωρίς επιστύλιο και με επιστύλιο και για διάφορες περιπτώσεις δόνησης. Είναι προφανές ότι η ύπαρξη του επιστυλίου μειώνει τη μετακίνηση, αλλά όχι σημαντικά. Θα μπορούσαμε επομένως να πούμε, ότι, τουλάχιστον για την περίπτωση του Ολυμπίου, η ύπαρξη του επιστυλίου φαίνεται, εκ πρώτης όψεως, να είναι ευνοϊκή.

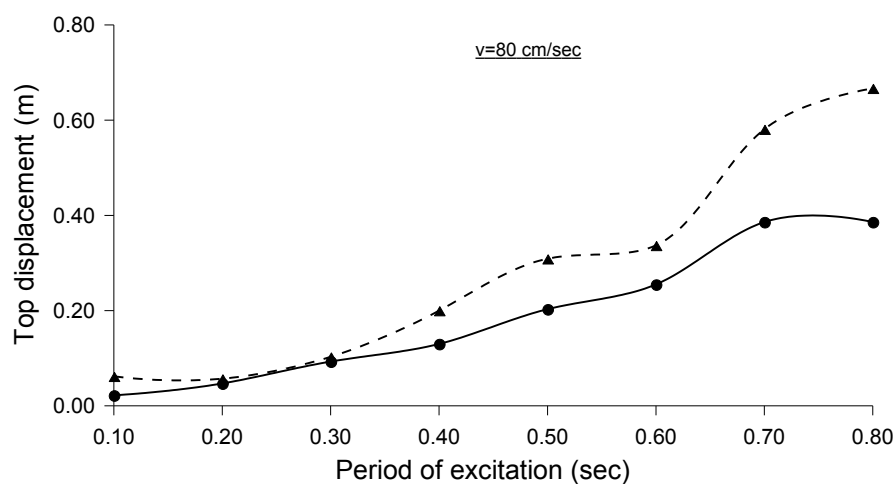
Θα πρέπει να τονιστεί ότι το συμπέρασμα αυτό δεν ισχύει για εδαφικές κινήσεις που φθάνουν την κατασκευή κοντά στην κατάρρευση, επειδή σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί η ύπαρξη του επιστυλίου να έχει δυσμενές αποτέλεσμα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το επιστύλιο είναι συνήθως το πρώτο στοιχείο της κατασκευής που καταρρέει. Μία τέτοια περίπτωση φαίνεται στο Σχ. 5.16 του επόμενου κεφαλαίου. Η πτώση του επιστυλίου μπορεί να έχει δραματικές συνέπειες για το κτήριο, γιατί μπορεί πέφτοντας να κτυπήσει γειτονικούς κίονες και να προκαλέσει και τη δική τους κατάρρευση, η οποία υπό κανονικές συνθήκες πιθανόν να μη συνέβαινε.



(α)

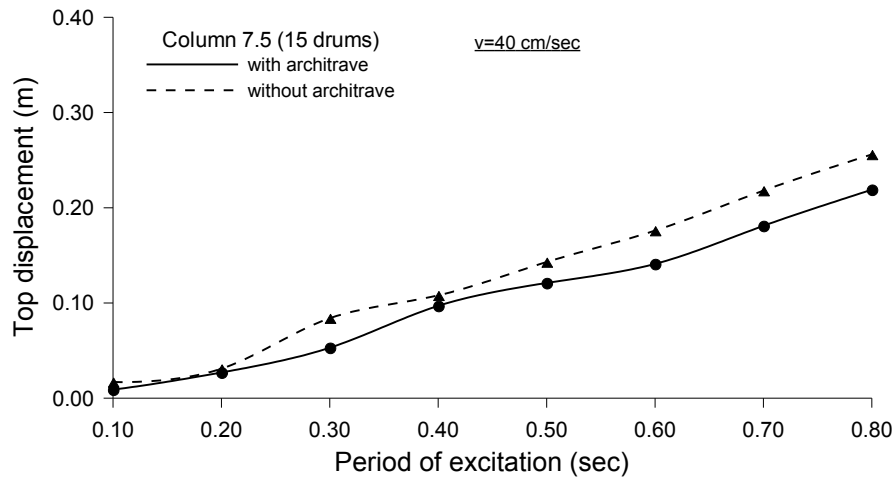


(β)

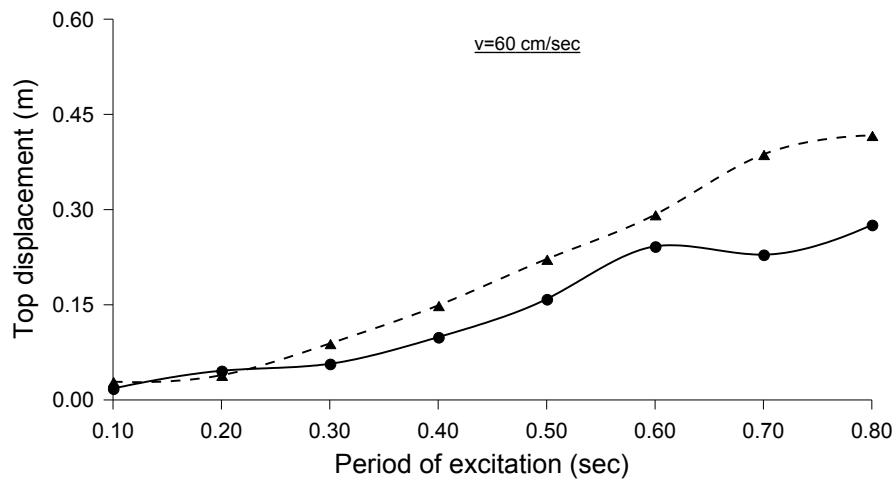


(γ)

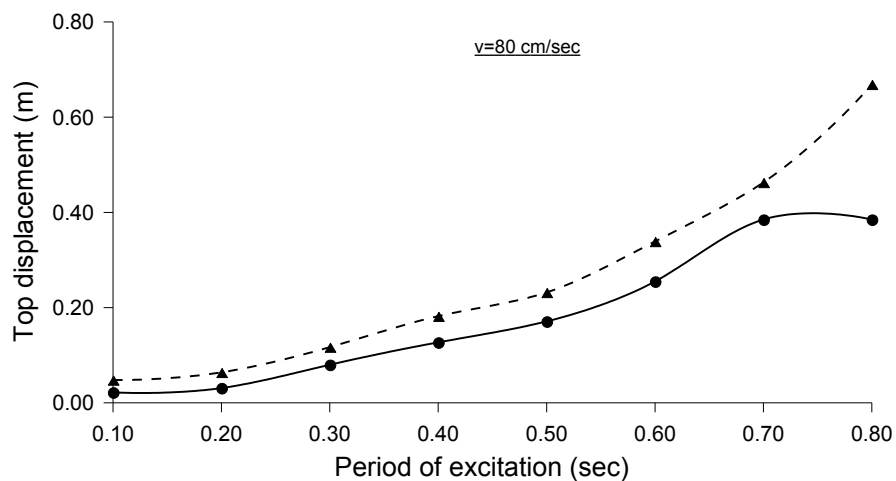
**Σχ. 4.12.** Σύγκριση της μέγιστης μετακίνησης της κορυφής του κίονα 7.6 για απόκριση σε σύστημα δύο κίόνων με επιστύλιο (συνεχής γραμμή) και μεμονωμένα (διακεκομένη γραμμή) για σεισμική διέγερση 2 κύκλων.



(α)



(β)



(γ)

**Σχ. 4.13.** Σύγκριση της μέγιστης μετακίνησης της κορυφής του κίονα 7.5 για απόκριση σε σύστημα δύο κίονων με επιστύλιο (συνεχής γραμμή) και μεμονωμένα (διακεκομένη γραμμή) για σεισμική διέγερση 2 κύκλων.

## ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ

Στο επόμενο κεφάλαιο 5, γίνεται ανάλυση του συστήματος των δύο κiónων 7.5 και 7.6 συζευγμένων με επιστύλιο για σεισμικές διεγέρσεις. Τα χαρακτηριστικά των σεισμών που χρησιμοποιούνται δίνονται στον πίνακα 5.2 αυτού του κεφαλαίου. Οι σεισμικές διεγέρσεις εφαρμόζονται διαβαθμισμένες έτσι ώστε η μέγιστη εδαφική ταχύτητα να ισούται με 40, 60, 80 και 100 cm/sec. Είναι δυνατή, επομένως η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν για τις σεισμικές διεγέρσεις με αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση που αναπτύχθηκε παραπάνω για τις αρμονικές διεγέρσεις με την ίδια εδαφική ταχύτητα. Θα πρέπει, όμως, να σημειωθεί ότι υπήρχαν οι εξής διαφορές μεταξύ των αναλύσεων:

1. Οι επιλύσεις για τις σεισμικές διεγέρσεις έγιναν για ταυτόχρονη σεισμική δόνηση στη διαμήκη και την εγκάρσια διεύθυνση της κατασκευής. Αντίθετα, οι επιλύσεις για τις αρμονικές διεγέρσεις έγιναν για εδαφική κίνηση μόνο στη διαμήκη διεύθυνση.
2. Στις επιλύσεις για τις σεισμικές διεγέρσεις ελήφθη υπόψη και μία διαμπερής ρωγμή, που υπάρχει στον τελευταίο σπόνδυλο (κάτω από το επιστύλιο) του δυτικού κίονα 7.6. Η ρωγμή αυτή πιθανόν να επηρέασε τα αποτελέσματα για τον συγκεκριμένο κίονα.

Στον πίνακα 4.6 δίνονται οι μέγιστες τιμές της μετακίνησης στην κορυφή του δυτικού κίονα 7.6 και του ανατολικού κίονα 7.5 που προέκυψαν από τις αναλύσεις για τις σεισμικές διεγέρσεις. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τις αρμονικές διεγέρσεις με διάρκεια 2 κύκλων δίνονται στον πίνακα 4.3. Στις σεισμικές διεγέρσεις του πίνακα 4.6 δεν συμπεριλαμβάνεται ο σεισμός Erzincan, παρ' ότι διερευνάται στο Κεφ. 5, επειδή έχει δεσπόζουσα περίοδο περίπου 2.00 sec και επομένως δεν μπορεί να γίνει σύγκριση με τα αποτελέσματα των αρμονικών διεγέρσεων, για τις οποίες η μέγιστη περίοδος που εξετάστηκε ήταν 0.80 sec.

**Πίνακας 4.6**

**Μέγιστη μετακίνηση (m) κορυφής (κιονόκρανο) κiónων 7.6 και 7.5  
(συζευγμένων με επιστύλιο), για σεισμικές διεγέρσεις**

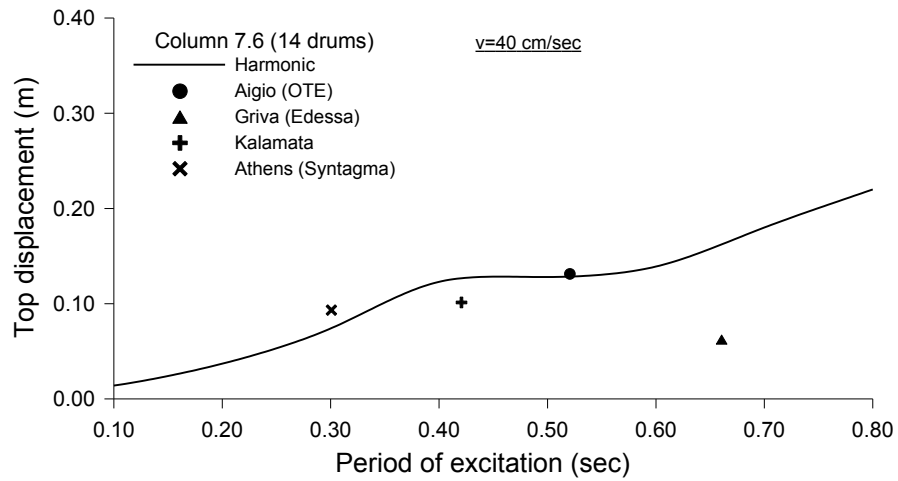
max εδαφ. Ταχύτητα PGV (cm/sec)	Σεισμική διέγερση							
	Αίγιο (ΟΤΕ)		Γρίβα (Εδεσσα)		Καλαμάτα (Νομαρχία)		Αθήνα (Σύνταγμα)	
	κ. 7.6	κ. 7.5	κ. 7.6	κ. 7.5	κ. 7.6	κ. 7.5	κ. 7.6	κ. 7.5
40	0.132	0.132	0.063	0.063	0.102	0.113	0.094	0.098
60	0.147	0.159	0.147	0.131	0.216	0.199	0.111	0.106
80	0.149	0.165	0.222	0.204	0.147	0.146	0.151	0.156

Για να καταστεί δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων πρέπει να γίνει και αντιστοίχιση των περιόδων μεταξύ των δύο τύπων διεγέρσεων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η τιμή της δεσπόζουσας περιόδου των σεισμών. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι υπολογισμού της δεσπόζουσας περιόδου [για λεπτομέρειες αυτών των μεθόδων βλ. Psycharis et al (2002)], οι οποίες όμως οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα.

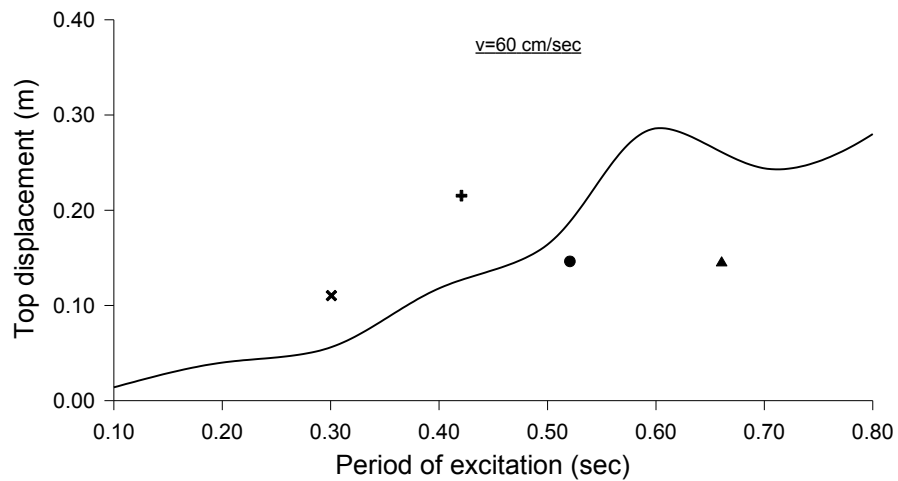
Στον πίνακα 5.2 δίνονται οι τιμές της δεσπόζουσας περιόδου κάθε σεισμού με βάση τη μέγιστη τιμή του φάσματος ταχυτήτων. Στην παρούσα ανάλυση, η τιμή της δεσπόζουσας περιόδου υπολογίστηκε από συνδυασμό των τιμών που αντιστοιχούν στη μέγιστη τιμή στο φάσμα επιταχύνσεων και κάποια τοπική έξαρση στο φάσμα ταχυτήτων στην αντίστοιχη περιοχή περιόδων. Χρησιμοποιήθηκαν τα φάσματα που αντιστοιχούν στη συνιστώσα που εφαρμόστηκε στη διαμήκη διεύθυνση της κατασκευής (σχήματα 5.6 έως 5.10, αριστερή στήλη) και προέκυψαν οι παρακάτω τιμές:

Αίγιο:	$T_p = 0.52 \text{ sec}$
Γρίβα:	$T_p = 0.66 \text{ sec}$
Καλαμάτα:	$T_p = 0.42 \text{ sec}$
Αθήνα:	$T_p = 0.30 \text{ sec.}$

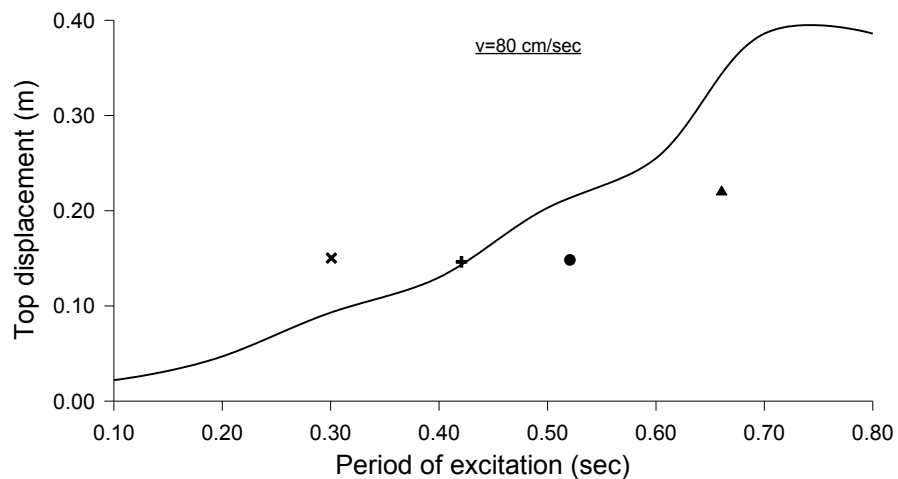
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχ. 4.14 και 4.15. Σε αυτά τα σχήματα, με συνεχή γραμμή έχουν σχεδιαστεί οι καμπύλες που αντιστοιχούν στην απόκριση του κίονα για τις αρμονικές διεγέρσεις (επανάληψη των αντίστοιχων καμπυλών των Σχ. 4.12 και 4.13) και με μεμονωμένα σημεία δείχνονται τα αποτελέσματα για τις σεισμικές διεγέρσεις, ανάλογα με τη δεσπόζουσα περίοδο κάθε σεισμού. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων είναι ικανοποιητική, ιδιαίτερα για εδαφική ταχύτητα 40 cm/sec. Εξαίρεση αποτελεί ο σεισμός της Γρίβας, ο οποίος, παραδόξως, δίνει αρκετά μικρότερες μετακινήσεις από τις αντίστοιχες αρμονικές διεγέρσεις, παρά το γεγονός ότι η συγκεκριμένη καταγραφή περιέχει μία εμφανή, σχεδόν ημιτονική δόνηση [Σχ. 5.7.(α)]. Γενικώς, πάντως, επαληθεύεται αυτό που αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, ότι δηλαδή, για τη δυναμική απόκριση κλασικών κίωνων και συστημάτων κίωνων, ακόμη και οι απλές ημιτονικές διεγέρσεις μπορούν, σε ικανοποιητικό βαθμό, να δώσουν σημαντικά συμπεράσματα, τα οποία να ισχύουν και για σεισμικές δονήσεις.



(α)



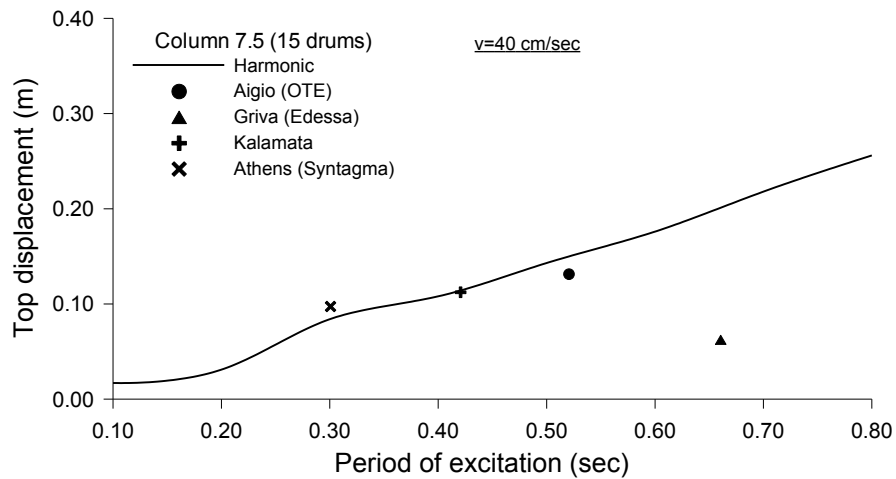
(β)



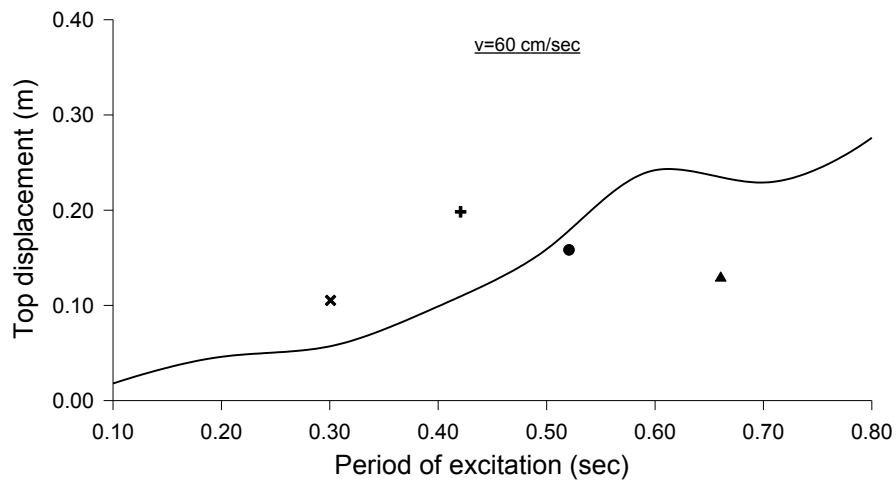
(γ)

**Σχ. 4.14.** Σύγκριση της μέγιστης μετακίνησης της κορυφής του κίονα 7.6 για αρμονική διέγερση διάρκειας 2 κύκλων (συνεχής γραμμή) και σεισμικές διεγέρσεις με την ίδια εδαφική ταχύτητα.

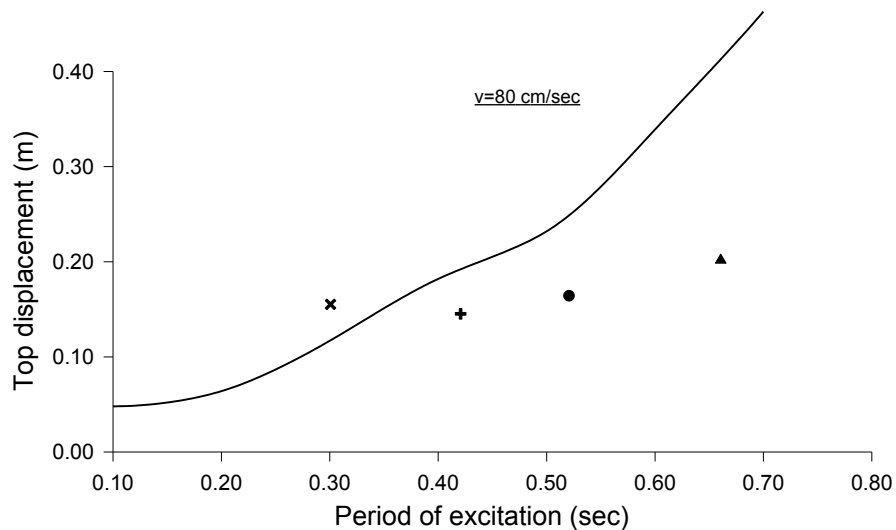




(α)



(β)



(γ)

**Σχ. 4.15.** Σύγκριση της μέγιστης μετακίνησης της κορυφής του κίονα 7.5 για αρμονική διέγερση διάρκειας 2 κύκλων (συνεχής γραμμή) και σεισμικές διεγέρσεις με την ίδια εδαφική ταχύτητα.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία διερεύνηση της επιρροής διαφόρων παραμέτρων στην απόκριση των κίωνων του Ολυμπιείου, για αρμονική διέγερση της βάσης. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν αφορούν τόσο τα χαρακτηριστικά της διέγερσης (περίοδος, πλάτος ταλάντωσης, διάρκεια δόνησης) όσο και τη γεωμετρία των κίωνων (διαφορά στο πλήθος σπονδύλων και σύζευξη των κίωνων με επιστύλιο). Η επιρροή αυτών των παραμέτρων μελετήθηκε με βάση τη μέγιστη μετακίνηση της κορυφής του κιονοκράνου, η οποία δίνει την καλύτερη δυνατή γενική εικόνα της ταλάντωσης κατά τη διάρκεια της δόνησης, χωρίς όμως να μπορεί να απεικονίσει πλήρως όλες τις λεπτομέρειες της κίνησης, όπως ολισθήσεις και στροφές σπονδύλων.

Τα συμπεράσματα μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

1. Επαληθεύτηκε για άλλη μία φορά η σημαντική επιρροή της περιόδου της εδαφικής δόνησης στο πλάτος απόκρισης. Για ίδια εδαφική ταχύτητα, η μετακίνηση της κορυφής των κίωνων μεγαλώνει σχεδόν γραμμικά με την περίοδο της δόνησης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το χαρακτηριστικό μήκος,  $L=v \cdot T/2$ , φαίνεται να είναι το κρίσιμο μέγεθος που επηρεάζει σχεδόν γραμμικά την απόκριση, ανεξάρτητα από τη συγκεκριμένη τιμή του πλάτους της εδαφικής ταχύτητας,  $v$ , και της περιόδου της διέγερσης,  $T$ .
2. Η διάρκεια της εδαφικής κίνησης αρχίζει να γίνεται σημαντική μόνο για ισχυρές δονήσεις, με ταχύτητα μεγαλύτερη από 60 cm/sec. Επομένως, για τους συνήθεις σεισμούς, η διάρκεια της ισχυρής δόνησης δεν φαίνεται να παίζει ουσιαστικό ρόλο.
3. Η ακριβής γεωμετρία των κίωνων επηρεάζει την απόκριση, ιδιαίτερα για ισχυρές εδαφικές δονήσεις. Η επιρροή όμως αυτή βρίσκεται μέσα στο εύρος των αβεβαιοτήτων των αποτελεσμάτων, δεδομένης και της ευαισθησίας του φαινομένου. Υπό αυτό το πνεύμα, μπορούμε να πούμε ότι η ακριβής γεωμετρία δεν φαίνεται να είναι τόσο σημαντική.
4. Η προσθήκη επιστυλίου, που ενώνει τους δύο κίονες, γενικώς οδηγεί σε λίγο μικρότερες μετακινήσεις, χωρίς όμως να αλλάζει ουσιαστικά ο τρόπος ταλάντωσης. Για τους κίονες του Ολυμπιείου, επομένως, τα επιστύλια φαίνεται να είναι ευνοϊκά όσον αφορά τη σεισμική συμπεριφορά. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι σε περίπτωση που καταρρεύσουν (τα επιστύλια είναι συνήθως τα πρώτα στοιχεία που καταρρέουν) μπορεί να κτυπήσουν τους παρακείμενους κίονες με επιβλαβείς συνέπειες.

5. Παρ' ότι οι σεισμικές δονήσεις δεν μπορούν να προσομοιωθούν πολύ ικανοποιητικά με τις απλές αρμονικές (ημιτονικές) συναρτήσεις που εξετάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο, τα αποτελέσματα δεν είναι τόσο διαφορετικά, τουλάχιστον όσον αφορά στη μέγιστη μετακίνηση, εάν η εδαφική ταχύτητα και η δεσπόζουσα περίοδος είναι ίσες στους δύο τύπους διεγέρσεων. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί η αβεβαιότητα στον υπολογισμό της δεσπόζουσας περιόδου, αφού δεν υπάρχει κοινώς αποδεκτή μέθοδος υπολογισμού και οι διαφοροποιήσεις που προκύπτουν από την εφαρμογή διαφόρων μεθόδων συχνά είναι μεγάλες.

# 5 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΙΣΤΟΡΙΑΣ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα αρχαία μνημεία, τα οποία σώζονται σήμερα, έχουν κατασκευαστεί πριν από 2000 έως 2500 χρόνια. Είναι βέβαιο ότι στη μακρόχρονη ζωή τους, σε μία σεισμογενή χώρα όπως η Ελλάδα, έχουν υποβληθεί σε πολλές ισχυρές σεισμικές δονήσεις. Δεδομένης της σπονδυλωτής κατασκευής τους, κάθε ισχυρός σεισμός προκαλεί λικνισμό και ολισθήσεις στα μέλη της κατασκευής, που οδηγούν σε μόνιμες παραμορφώσεις, το μέγεθος των οποίων εξαρτάται από την ένταση και τα χαρακτηριστικά του σεισμού. Μπορούμε να πούμε, επομένως, ότι κάθε ισχυρός σεισμός έχει αφήσει τα αποτυπώματά του πάνω στην κατασκευή. Εάν μπορούσαμε να αποκρυπτογραφήσουμε αυτά τα αποτυπώματα, θα συγκεντρώναμε σημαντικές πληροφορίες για τη σεισμικότητα της περιοχής κάθε μνημείου, από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα. Με άλλα λόγια, τα αρχαία μνημεία αποτελούν ένα “πείραμα” σε φυσική κλίμακα, που διαρκεί περισσότερο από 2000 χρόνια, για το οποίο όμως εμείς γνωρίζουμε μόνο το τελικό αποτέλεσμα των σεισμικών διεγέρσεων, στις οποίες έχει υποβληθεί.

Η αποκρυπτογράφηση όλων των χαρακτηριστικών των σεισμικών δονήσεων, στις οποίες έχει υποβληθεί ένα μνημείο, με βάση την κατάσταση στην οποία βρίσκεται σήμερα, είναι ένα εξαιρετικά δύσκολο πρόβλημα. Αυτό οφείλεται στους παρακάτω λόγους:

- i. Στο γεγονός ότι έχουμε σημαντική άγνοια για την κατάσταση που βρισκόταν το μνημείο κάθε χρονική περίοδο, τόσο όσον αφορά το βαθμό ερείπωσής του, όσο και όσον αφορά τις ζημιές στα φέροντα στοιχεία του.
- ii. Το παραπάνω γεγονός, σε συνδυασμό με τη μη-γραμμικότητα και την ευαισθησία της απόκρισης, η οποία όπως αναφέρθηκε στο Κεφ. 1 προκαλεί σημαντικές διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά, ακόμη και για μικρές αλλαγές της διέγερσης ή των χαρακτηριστικών του συστήματος, καθιστά πρακτικά αδύνατο τον ακριβή

προσδιορισμό των σεισμικών δονήσεων με βάση τις μόνιμες παραμορφώσεις που έχουν προκληθεί σε ένα μνημείο.

- iii. Επιπρόσθετα των παραπάνω, η διαδοχική υποβολή ενός μνημείου σε πολλές σεισμικές διεγέρσεις οδηγεί σε παραμόρφωση, η οποία είναι διαφορετική από την αθροιστική παραμόρφωση των επιμέρους αποκρίσεων που θα συνέβαιναν σε αδιατάρακτη κατασκευή. Παρ' ότι, γενικώς, η υποβολή της κατασκευής σε συνεχόμενες διεγέρσεις αυξάνει τις μόνιμες μετακινήσεις, οι αναλύσεις δείχνουν ότι υπάρχουν και περιπτώσεις που η διπλή εφαρμογή της ίδιας σεισμικής διέγερσης οδηγεί σε μείωση της τελικής παραμόρφωσης, σε σύγκριση με την παραμόρφωση για μία μόνο διέγερση.

Είναι προφανές, επομένως, ότι ακριβή συμπεράσματα για τους σεισμούς που έχουν πλήξει την περιοχή ενός μνημείου, δεν μπορούν να εξαχθούν. Τα αποτελέσματα όμως δείχνουν ότι, παρ' όλες τις ασάφειες που περιγράφησαν παραπάνω, κάποιες εύλογες υποθέσεις μπορούν να προκύψουν. Για παράδειγμα, μπορεί να αποκλεισθεί ότι έχει γίνει σεισμός σε μία περιοχή, ο οποίος θα προκαλούσε κατάρρευση ή υπερβολικές ζημιές σε ένα μνημείο, οι οποίες όμως δεν υφίστανται. Ή αντίθετα, εάν ένα μνημείο παρουσιάζει σημαντικές βλάβες, είναι δυνατόν να προκύψουν συμπεράσματα για την ελάχιστη ένταση των σεισμών που απαιτούνται για να προκληθούν αυτές οι βλάβες.

Σε αυτό το πνεύμα έγινε στα πλαίσια του παρόντος προγράμματος μία διερεύνηση της σεισμικής ιστορίας της Αθήνας, με βάση την παραμορφωμένη κατάσταση, στην οποία βρίσκεται σήμερα το Ολυμπίεο. Για λόγους περιορισμού του όγκου των δεδομένων, ώστε να καταστεί δυνατή η εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων, οι αναλύσεις περιορίστηκαν μόνο στο σύστημα των δύο κίωνων με επιστύλιο της εσωτερικής νότιας κιονοστοιχίας, κοντά στη ΝΑ γωνία (κίονες 7.5 και 7.6, Σχ. 3.10). Επίσης, η σύγκριση των αποτελεσμάτων με την υφιστάμενη κατάσταση έγινε μόνο για τον δυτικό κίονα 7.6. Η θέση των κίωνων και η σημερινή τους κατάσταση φαίνονται στη φωτογραφία του Σχ. 5.1.

Η επιλογή των συγκεκριμένων κίωνων έγινε για τους παρακάτω λόγους:

- Επειδή είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με επιστύλιο και είναι πιο αντιπροσωπευτικοί της συμπεριφοράς του μνημείου απ' ό,τι ένας μεμονωμένος κίονας. Επίσης, οι κίονες αυτοί βρίσκονται στη σημερινή τους κατάσταση (ασύνδετοι με την υπόλοιπη κατασκευή) για πολλά χρόνια.
- Επειδή έχουν περισσότερο σαφή συμπεριφορά με λιγότερες αβεβαιότητες απ' ό,τι οι παρακείμενες συστοιχίες κίωνων σε σχηματισμό γωνίας και επομένως τα αποτελέσματα είναι περισσότερο αξιόπιστα.

Παρά τις αβεβαιότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω, τα αποτελέσματα είναι αρκετά ενθαρρυντικά. Έτσι, για ισχυρούς κοντινούς σεισμούς, σαν αυτούς που θα πρέπει να έχουν πλήξει την Αθήνα αρκετές φορές, η παραμορφωμένη διάταξη των σπονδύλων που προέκυψε από τις αναλύσεις πλησιάζει σε ικανοποιητικό βαθμό την πραγματική κατάσταση. Αντίθετα, σεισμικές διεγέρσεις αρκετά μεγάλης περιόδου, που θα μπορούσαν να οφείλονται σε ισχυρούς μακρινούς σεισμούς, αν έχουν συμβεί θα πρέπει να ήταν μικρής ισχύος, αφού σε αντίθετη περίπτωση θα δημιουργούσαν μεγάλες παραμορφώσεις, ασύμβατες με τη σημερινή κατάσταση του μνημείου.

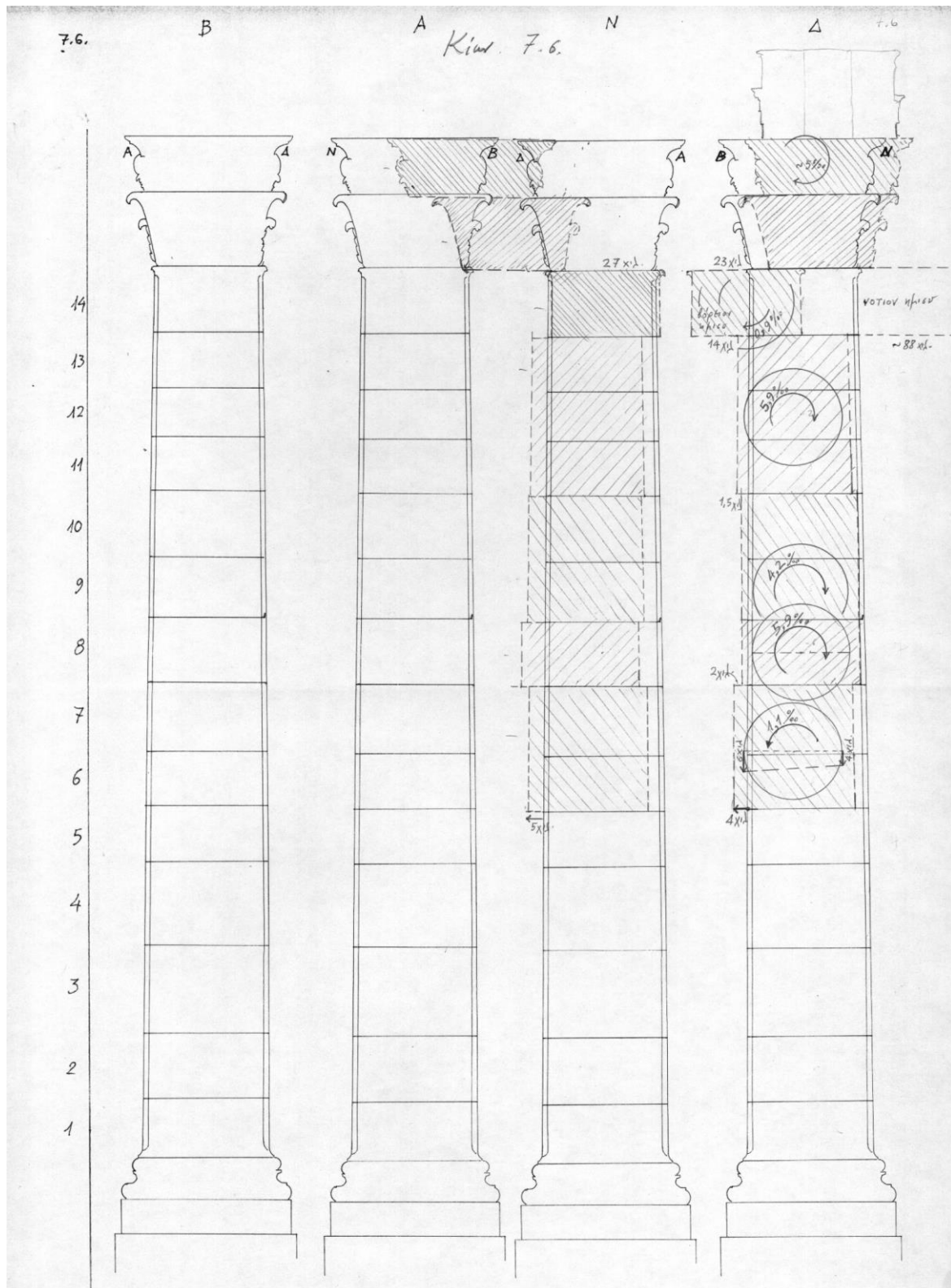


**Σχ. 5.1.** Βορειοανατολική άποψη των δύο κίωνων με το επιστύλιο της ΝΑ γωνίας (δύο αριστεροί κίονες) που ελήφθησαν υπόψη στις αναλύσεις [Toelle–Kastenbein (1994)].

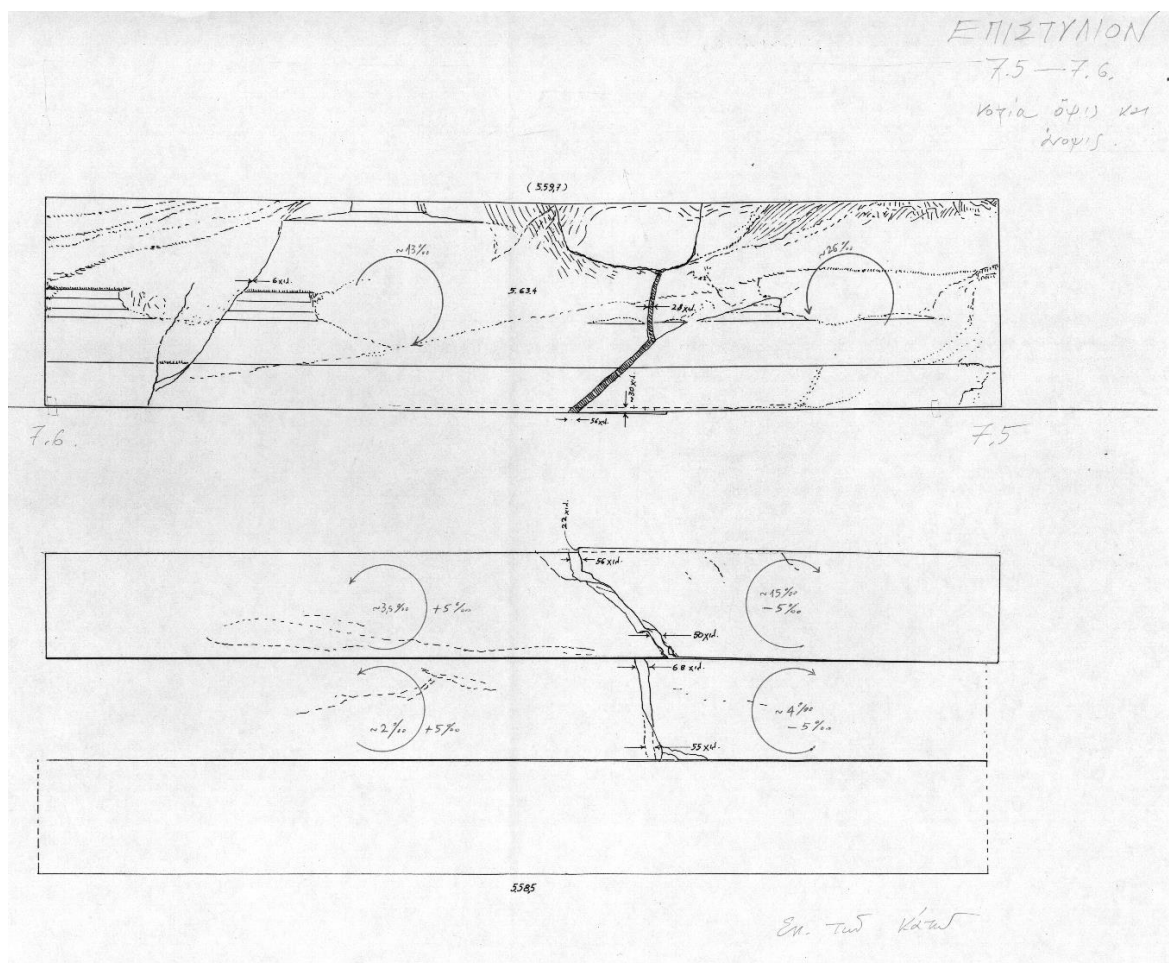
## ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Για τους σκοπούς της παραπάνω διερεύνησης έγινε λεπτομερής αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης των κίωνων 7.5 και 7.6 καθώς και του επιστυλίου. Έμφαση δόθηκε στις σχετικές ολισθήσεις των σπονδύλων των κίωνων. Οι μετακινήσεις που μετρήθηκαν δίνονται στα σχήματα 5.2 και 5.3 και στον πίνακα 5.1.

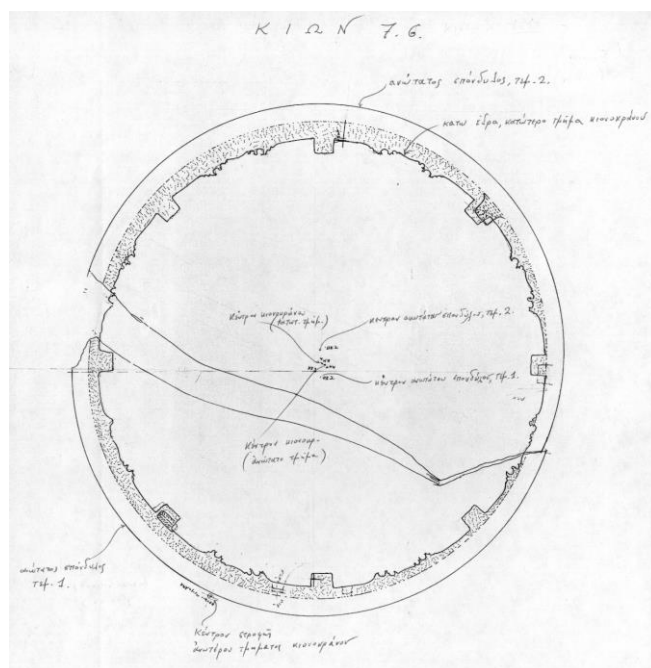
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο σπόνδυλος 14 του δυτικού κίονα 7.6 (τελευταίος σπόνδυλος πριν το κιονόκρανο) παρουσιάζει σχεδόν μία κατακόρυφη διαμπερή ρωγμή με κλίση  $30^\circ$  περίπου ως προς τον άξονα Α-Δ και σημαντικές σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των δύο τμημάτων του σπονδύλου (Σχ. 5.4). Γι' αυτό και στο προσομοίωμα των αναλύσεων η ρωγμή αυτή ελήφθη υπόψη.



Σχ. 5.2. Μόνιμες μετακινήσεις των σπονδύλων του κίονα 7.6, σχεδιασμένες εν εξάρσει (αποτύπωση από Μ. Κορρέ).



Σχ. 5.3. Νότια όψη και άνοψη (εκ των κάτω) του επιστυλίου (αποτύπωση από Μ. Κορρέ).



Σχ. 5.4. Θέση ρωγμής και μετακινήσεις του ρηγματωμένου σπονδύλου 14 του κίονα 7.6 (αποτύπωση από Μ. Κορρέ).



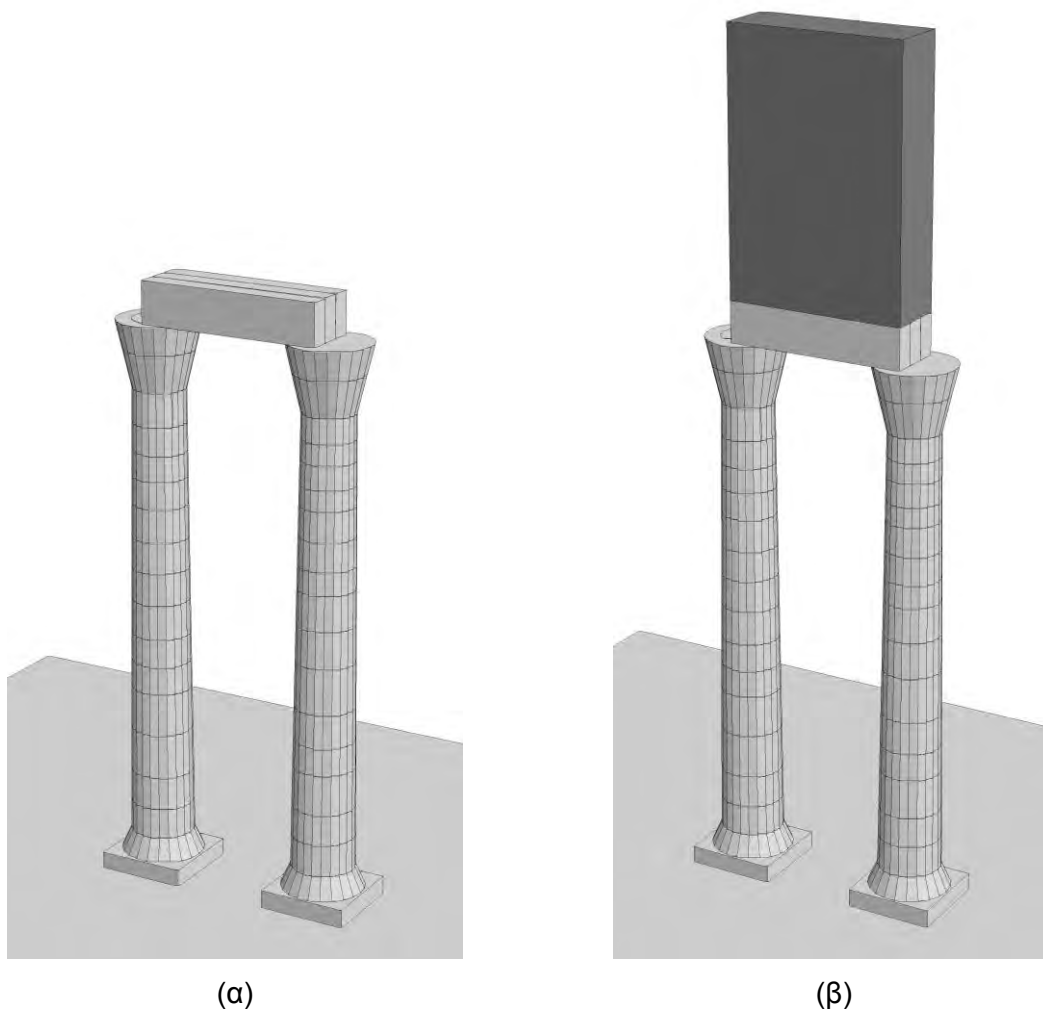
**Πίνακας 5.1**  
**Μετατοπίσεις σπονδύλων κίονα 7.6 ως προς τη βάση (mm)**

Σπόνδυλος	Νότια όψη (διαμήκης διεύθυνση)	Δυτική όψη (εγκάρσια διεύθυνση)
Κιονόκρανο (άνω τμ.)	-40.0	+8.0
Κιονόκρανο (κάτω τμ.)	-27.0	+5.0
14 (βόρειο τμήμα)	+1.5	-18.0
14 (νότιο τμήμα)	+1.5	+88.0
13	-5.5	-3.5
12	-5.5	-3.5
11	-5.5	-3.5
10	-5.5	-2.0
9	-5.5	-2.0
8	-7.0	-2.0
7	-5.0	-4.0
6	-5.0	-4.0
1 έως 5	≈ 0.0	≈ 0.0

Αντίθετα, η ρωγμή του επιστυλίου, που φαίνεται στο Σχ. 5.3 δεν ελήφθη υπόψη, επειδή τα δύο τμήματα των δοκών του επιστυλίου δεν φαίνεται να είναι αποκολλημένα μεταξύ τους. Σε αντίθετη περίπτωση το επιστύλιο δεν θα μπορούσε να σταθεί στη θέση του.

Οι μετακινήσεις που δίνονται στο Σχ. 5.2 και τον Πίνακα 5.1 είναι σχετικές ως προς τη βάση. Τυχόν μετακινήσεις ολόκληρων των κiónων δεν είναι δυνατόν να μετρηθούν, αφού δεν είναι γνωστή η αρχική θέση τους σε απόλυτες συντεταγμένες. Οι μετακινήσεις αυτές, εάν έχουν συμβεί, θα πρέπει να είναι πολύ μικρές, αλλιώς θα οδηγούσαν σε μεταβολή της απόστασης μεταξύ των κiónων, η οποία όμως δεν φαίνεται να υπάρχει. Επίσης, αν είχαν συμβεί τέτοιες μετακινήσεις, πιθανότατα θα είχαν παρατηρηθεί ίχνη τους στο στυλοβάτη (παρόμοια ίχνη έχουν παρατηρηθεί στο ναό του Επικούριου Απόλλωνα στις Βάσες).

Το προσομοίωμα υπολογισμού βασίστηκε στην ακριβή γεωμετρία των δύο κiónων και του επιστυλίου (Σχ. 5.5). Οι σπόνδυλοι των κiónων προσομοιάστηκαν με ισοδύναμα πολυέδρα 22 πλευρών. Το επιστύλιο αποτελείται από τρεις δοκούς. Μεταξύ των σπονδύλων ελήφθησαν υπόψη οι μεταλλικοί σύνδεσμοι με ισοδύναμα αξονικά στοιχεία, όπως περιγράφεται στο Κεφ. 3. Σύνδεσμοι θεωρήθηκαν και μεταξύ των δοκών του επιστυλίου (με ίδιες ιδιότητες) που υπήρχαν στην άνω παρειά των δοκών, παρ' ότι σήμερα δεν υπάρχουν, επειδή έχουν αφαιρεθεί προ αρκετών (άγνωστον πόσων) ετών.



**Σχ. 5.5.** Το προσομοίωμα των δύο κίονων με επιστύλιο που ελήφθη υπόψη στις αναλύσεις: (α) χωρίς κτίσμα, (β) με κτίσμα.

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφ. 2, για πολλά έτη στην κορυφή του επιστυλίου των συγκεκριμένων κίονων υπήρχε και ένα 4-όροφο κτίσμα (Σχ. 2.9, 2.13 και 2.14). Το βάρος αυτού του κτίσματος θα πρέπει να επηρέασε τη σεισμική συμπεριφορά των κίονων, γι' αυτό αναλύσεις έγιναν τόσο για την περίπτωση χωρίς κτίσμα όσο και για την περίπτωση με κτίσμα. Στο προσομοίωμα υπολογισμού, το κτίσμα ελήφθη υπόψη με ένα πρόσθετο στερεό σώμα στην κορυφή του επιστυλίου [Σχ. 5.5.(β)], διαστάσεων  $L=5.50$  m,  $B=1.83$  m (ίσων με τις διαστάσεις του επιστυλίου) και  $H=8.00$  m με μέσο ειδικό βάρος  $\gamma=12.00$  KN/m<sup>3</sup>. Το συνολικό βάρος του κτίσματος προκύπτει περίπου 1000 KN, τιμή που είναι συμβατή με τις διαστάσεις της κατασκευής που δίνονται στην εργασία του Μπούρα (Bouras, 1996). Ο συντελεστής τριβής μεταξύ αυτού του σώματος και του επιστυλίου θεωρήθηκε πολύ μεγάλος (γωνία τριβής  $87^\circ$  που αντιστοιχεί σε συντελεστή τριβής 20) ώστε να μη συμβαίνει ολίσθηση κατά τη διάρκεια του σεισμού.

## ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ

Όπως είναι γνωστό από παλαιότερες αναλύσεις της δυναμικής συμπεριφοράς λικνιζομένων σωμάτων, αλλά και όπως έγινε φανερό από τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των κίωνων του Ολυμπίου σε ημιτονικές διεγέρσεις, η απόκριση σπονδυλωτών κατασκευών επηρεάζεται σημαντικά όχι μόνο από την ένταση αλλά και από τη δεσπόζουσα περίοδο της εδαφικής κίνησης. Για να μπορέσουμε, επομένως, να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα για τη σεισμική ιστορία της Αθήνας, μελετήσαμε τη συμπεριφορά του προσομοιώματος των δύο κίωνων σε πέντε σεισμικές διεγέρσεις με αρκετά διαφορετικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν οι καταγραφές των παρακάτω σεισμών:

- (1) Του σεισμού του Αιγίου (1995). Ο σεισμός ήταν μεγέθους  $M=6.2$ , και η καταγραφή έγινε σε απόσταση 18 km από το επίκεντρο, στο κτίριο ΟΤΕ, που ήταν θεμελιωμένο σε σχετικά μαλακό έδαφος. Στην καταγραφή δεσπόζει ένας ισχυρός παλμός περιόδου 0.5 sec με μέγιστη επιτάχυνση 0.50 g περίπου.
- (2) Του σεισμού της Γρίβας (1990), όπως καταγράφηκε στην Έδεσσα. Ο σεισμός ήταν μεγέθους  $M=5.9$ . Η καταγραφή της Έδεσσας έγινε σε απόσταση 31 km από το επίκεντρο, σε μαλακό έδαφος. Η επιρροή του εδάφους είναι εμφανής στο επιταχυνσιογράφημα, το οποίο παρουσιάζει μεγάλη διάρκεια ισχυρής δόνησης, περίπου 6.0 sec, η οποία χαρακτηρίζεται από παλμούς περιόδων  $0.5 \div 0.7$  sec μικρής σχετικά επιτάχυνσης, της τάξης του 0.10 g.
- (3) Του σεισμού της Καλαμάτας (1986). Ο σεισμός ήταν μεγέθους  $M=6.2$  και η καταγραφή έγινε στο κτίριο της Νομαρχίας, σε απόσταση 9 km από το επίκεντρο και σε σκληρές εδαφικές συνθήκες. Η καταγραφή έχει διάρκεια ισχυρής σεισμικής δόνησης περίπου 6.0 sec και μέγιστη επιτάχυνση 0.27 g. Η δόνηση παρουσιάζει πλούσιο φασματικό περιεχόμενο στο εύρος περιόδων από 0.3 έως 0.7 sec περίπου και μπορεί να χαρακτηριστεί ως τυπική καταγραφή κοντινού πεδίου.
- (4) Του σεισμού του Erzincan, Τουρκία (1992). Ο ισχυρός αυτός σεισμός, μεγέθους  $M=6.9$ , προήλθε από τη διάρρηξη ενός οριζόντιου ρήγματος και η καταγραφή έγινε κοντά στο ρήγμα. Το επιταχυνσιογράφημα έχει μέγιστη επιτάχυνση περίπου 0.50 g και παρουσιάζει μία μεγάλη δεσπόζουσα περίοδο, περίπου ίση με 2.00 sec, η οποία προκαλεί μεγάλες ζημιές στους σπονδυλωτούς κίονες των αρχαίων μνημείων. Μία τέτοια μακροπερίοδος διέγερση δεν φαίνεται πιθανόν να έχει συμβεί στην Αθήνα, αλλά εξετάζεται στην παρούσα ανάλυση για λόγους πληρότητας.

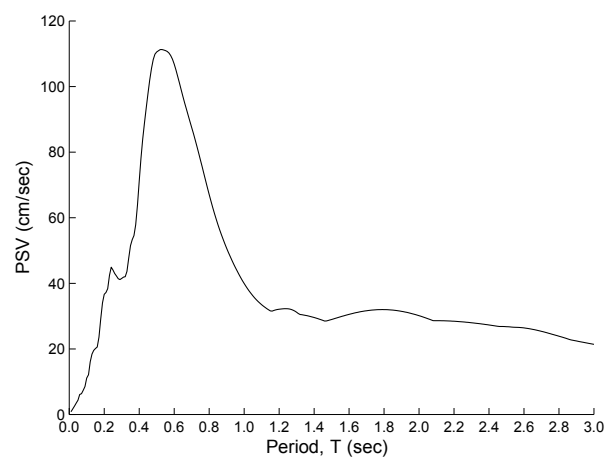
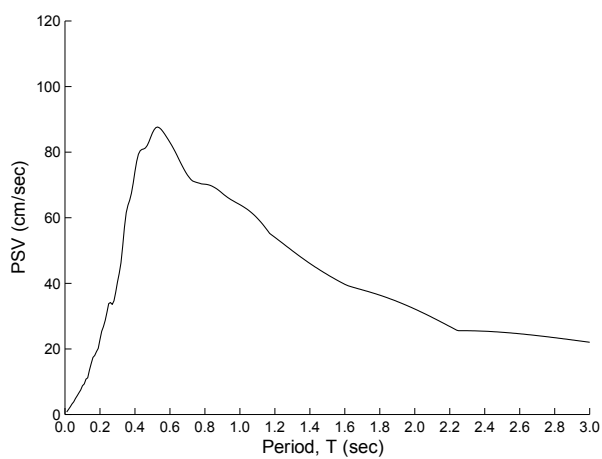
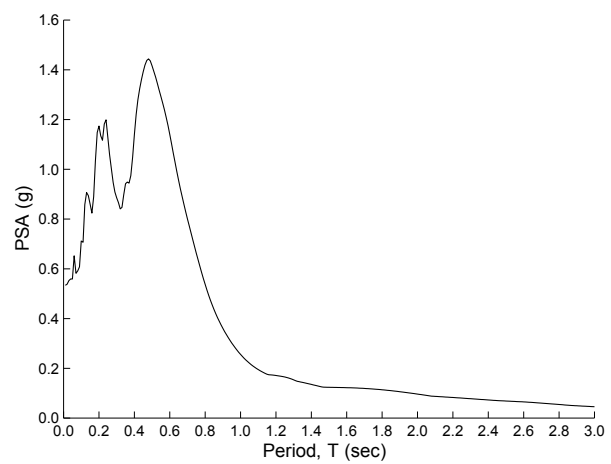
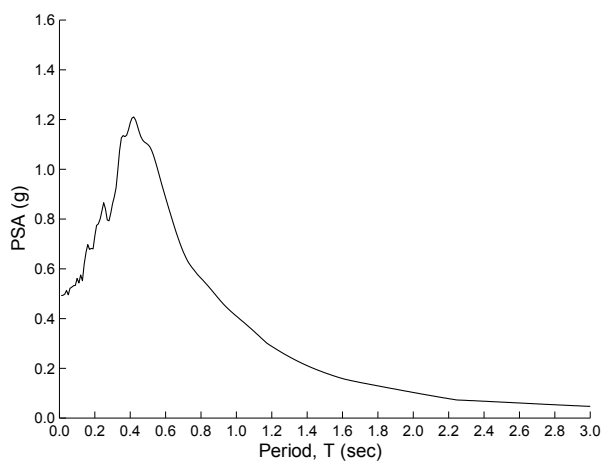
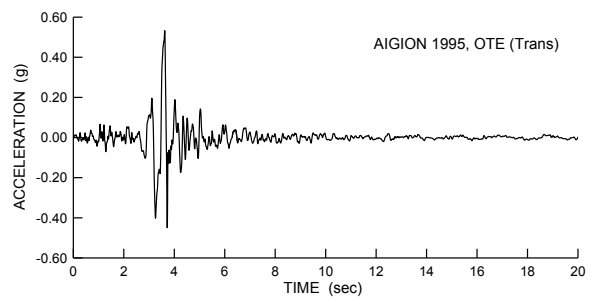
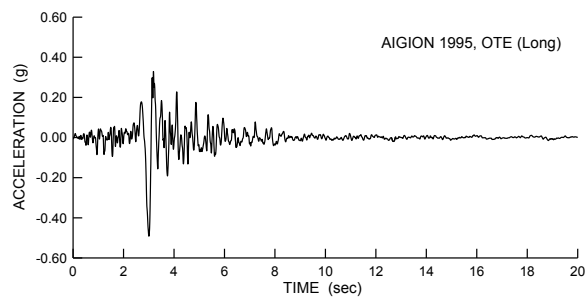
(5) Του σεισμού της Αθήνας (1999), μεγέθους  $M=5.9$ . Χρησιμοποιήθηκε η καταγραφή σε βάθος 7.00 m, στο σταθμό του ΜΕΤΡΟ στο Σύνταγμα, που βρίσκεται σε απόσταση 22 km από το επίκεντρο και λιγότερο από 1.00 km από το Ολυμπείο. Το πέτρωμα στην περιοχή είναι αθηναϊκός σχιστόλιθος. Πρόκειται για μία υψίσυχη δόνηση κατά τη διάρκεια της ισχυρής κίνησης, που ακολουθείται από μία δόνηση μικρότερης επιτάχυνσης αλλά μεγαλύτερης περιόδου, με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται υψηλές τιμές στο φάσμα ταχυτήτων σε όλο το εύρος από 0.20 έως 0.90 sec περίπου.

Τα χαρακτηριστικά των παραπάνω σεισμικών διεγέρσεων δίνονται στον Πίνακα 5.2, ενώ οι χρονοϊστορίες των δύο οριζόντιων καταγραφών κάθε σεισμού και τα αντίστοιχα φάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων δίνονται στα σχήματα 5.6 έως 5.10. Η δεσπόζουσα περίοδος  $T_p$ , που δίνεται στον πίνακα 5.2, είναι αυτή που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του φάσματος ταχυτήτων, γι' αυτό είναι διαφορετική από αυτή που χρησιμοποιήθηκε στο Κεφ. 4.

Για τις δυναμικές αναλύσεις έγινε κανονικοποίηση των σεισμικών διεγέρσεων. Η κανονικοποίηση έγινε με βάση τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV) που αντιστοιχεί σε κάθε καταγραφή. Η επιλογή της εδαφικής ταχύτητας ως κρίσιμου παραμέτρου για την κανονικοποίηση έγινε επειδή προηγούμενες αναλύσεις έχουν αποδείξει ότι η απόκριση των αρχαίων μνημείων μπορεί να ταξινομηθεί καλύτερα με βάση την εδαφική ταχύτητα της διέγερσης απ' ό,τι με βάση την εδαφική επιτάχυνση. Οι δυναμικές αναλύσεις έγιναν για ταυτόχρονη εφαρμογή και των δύο οριζόντιων συνιστωσών κάθε σεισμού, κανονικοποιημένων όμως στην ίδια μέγιστη εδαφική ταχύτητα.

**Πίνακας 5.2**  
**Χαρακτηριστικά σεισμικών διεγέρσεων**

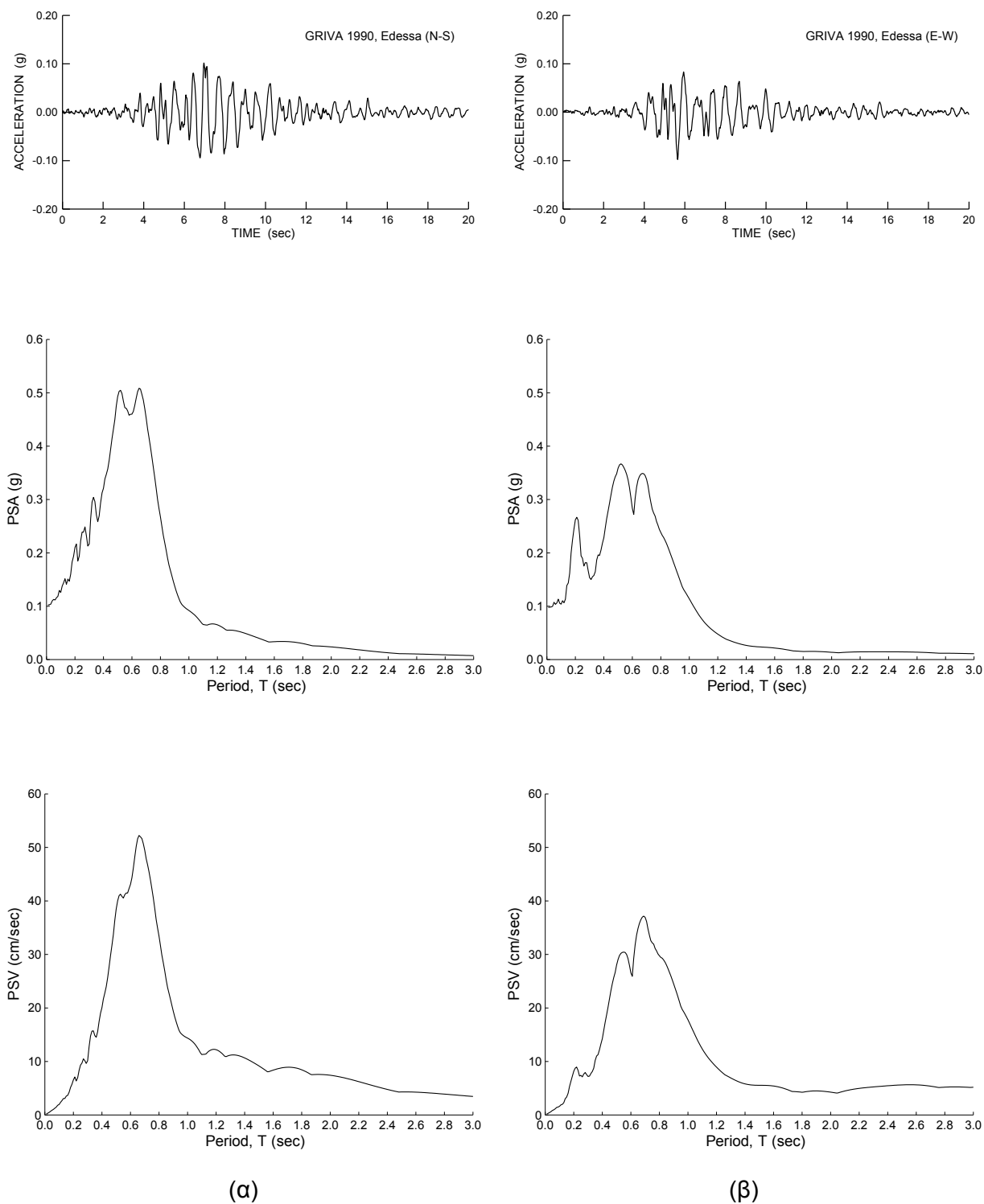
Σεισμός	Ημερ/νία	M	Long			Trans		
			PGA (g)	PGV (cm/sec)	$T_p$ (sec)	PGA (g)	PGV (cm/sec)	$T_p$ (sec)
Αίγιο (ΟΤΕ)	15-06-95	6.2	0.49	44.0	0.52	0.53	46.3	0.52
Γρίβα (Έδεσσα)	21-12-90	5.9	0.10	10.9	0.66	0.10	9.6	0.69
Καλαμάτα (Νομαρχία)	13-09-86	6.2	0.24	32.0	0.66	0.27	23.5	0.66
Erzincan (Τουρκία)	13-03-92	6.9	0.51	83.9	2.12	0.50	64.3	2.04
Αθήνα (Σύνταγμα)	07-09-99	5.9	0.15	12.6	0.52	0.23	13.5	0.20



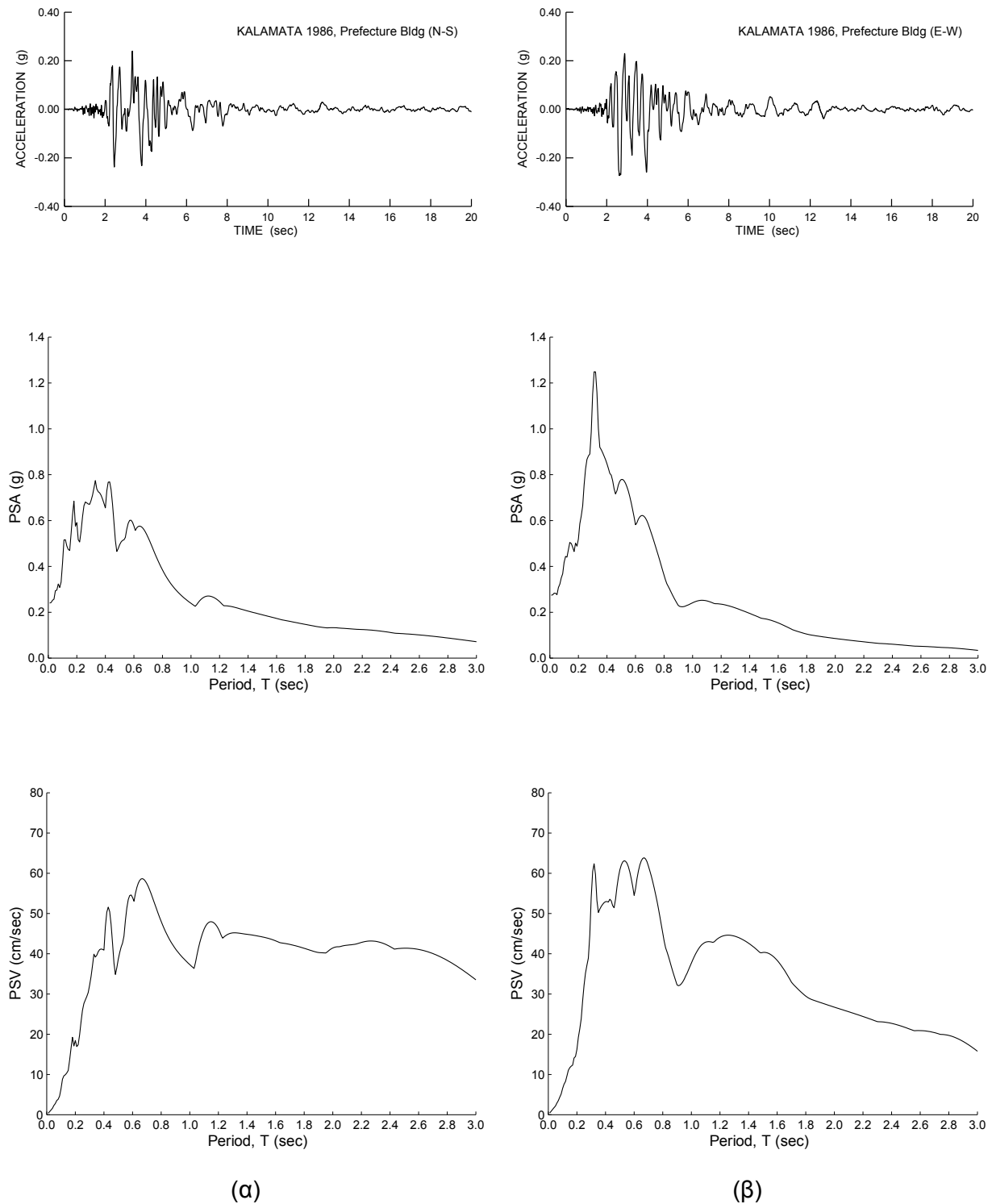
(α)

(β)

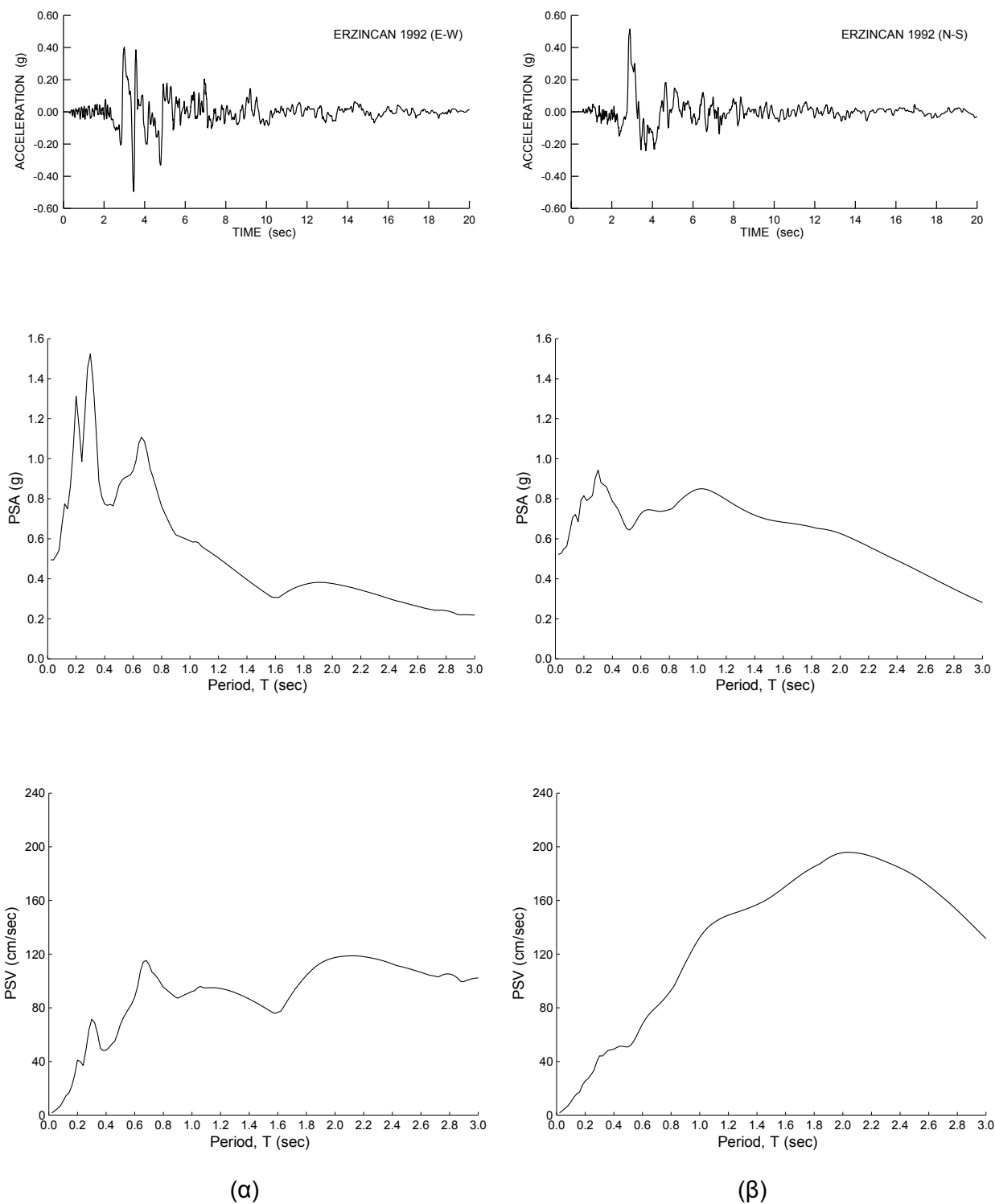
**Σχ. 5.6.** Χρονοϊστορίες εδαφικής επιτάχυνσης και ψευδοφάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων των δύο οριζόντιων διευθύνσεων του σεισμού του Αιγίου, 1995.



**Σχ. 5.7.** Χρονοϊστορίες εδαφικής επιτάχυνσης και ψευδοφάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων των δύο οριζόντιων διευθύνσεων της εγγραφής στην Έδεσσα του σεισμού της Γρίβας, 1990.

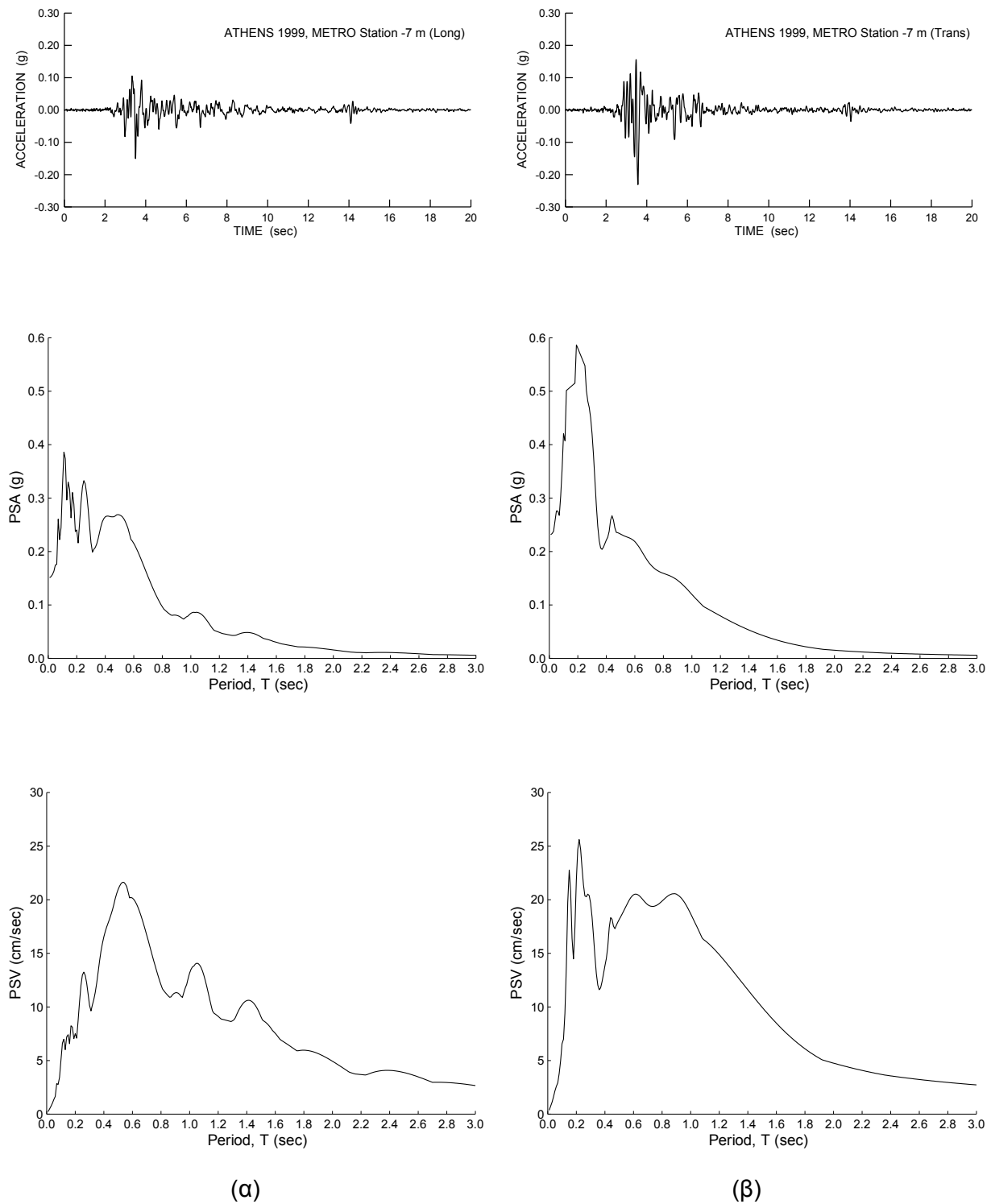


**Σχ. 5.8.** Χρονοϊστορίες εδαφικής επιτάχυνσης και ψευδοφάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων των δύο οριζόντιων διευθύνσεων της εγγραφής στο κτίριο της Νομαρχίας του σεισμού της Καλαμάτας, 1986.



**Σχ. 5.9.** Χρονοϊστορίες εδαφικής επιτάχυνσης και ψευδοφάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων των δύο οριζόντιων διευθύνσεων του σεισμού του Erzincan, 1992.





**Σχ. 5.10.** Χρονοϊστορίες εδαφικής επιτάχυνσης και ψευδοφάσματα επιταχύνσεων και ταχυτήτων των δύο οριζόντιων διευθύνσεων στο Σύνταγμα (σταθμός ΜΕΤΡΟ, -7.00 m) του σεισμού της Αθήνας, 1999.

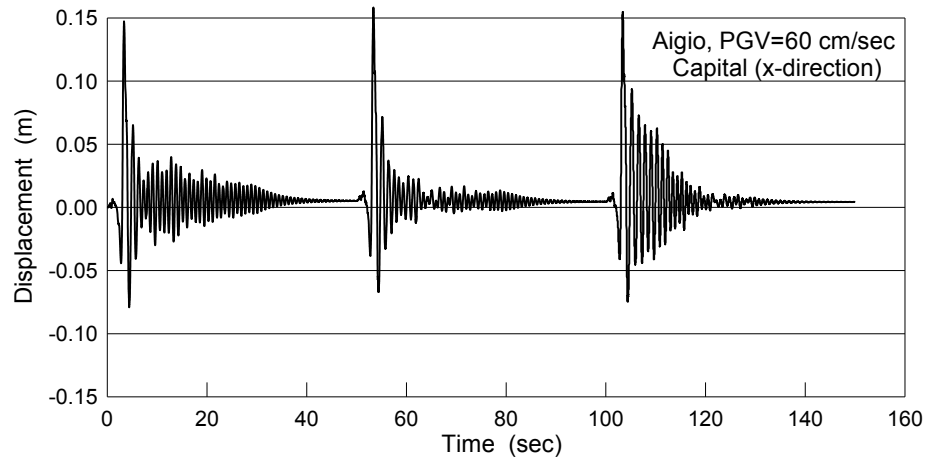
## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Η ανάλυση που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο αφορά στη σύγκριση των μόνιμων παραμορφώσεων, που προκαλούνται από τους σεισμούς που αναφέρθηκαν παραπάνω, κανονικοποιημένους σε διάφορα επίπεδα της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας, PGV, με τις πραγματικές παραμορφώσεις που μετρήθηκαν στο μνημείο. Με τη σύγκριση αυτή αποσκοπούμε στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τους σεισμούς που πλήξει την Αθήνα στη διάρκεια ζωής του μνημείου. Σε κάθε επίλυση εφαρμόζαμε ως διέγερση στη βάση των προσομοιωμάτων του Σχ. 5.5 τις δύο οριζόντιες συνιστώσες του σεισμού, κανονικοποιημένες στην επιθυμητή στάθμη της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας PGV (ίδιες και στις δύο διευθύνσεις). Προέκυπταν έτσι οι χρονοϊστορίες των μετακινήσεων όλων των σπονδύλων των κιόνων και των κιονοκράνων στη διαμήκη και την εγκάρσια διεύθυνση, από τις οποίες υπολογίζαμε τις μόνιμες παραμορφώσεις, που παρέμεναν μετά το τέλος της σεισμικής διέγερσης.

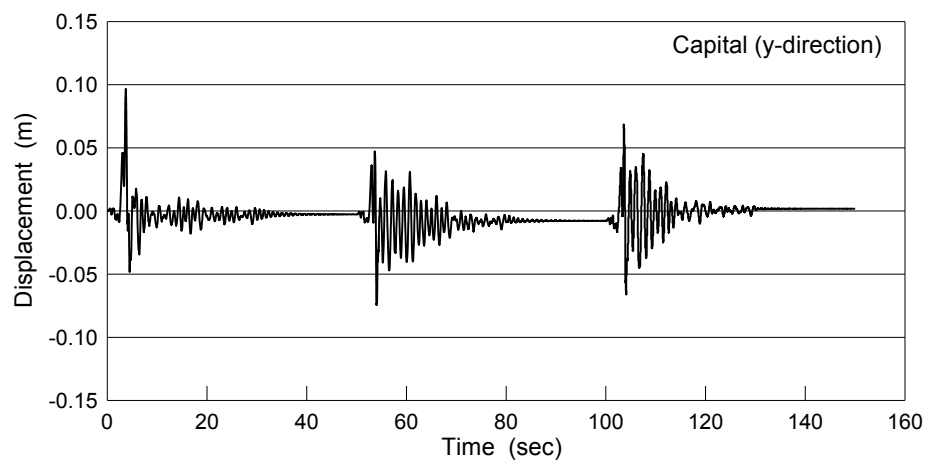
Για να ληφθεί υπόψη η συσώρευση των παραμορφώσεων, που συμβαίνει όταν το μνημείο υποβάλλεται σε πολλούς διαδοχικούς σεισμούς, έγιναν αναλύσεις με μία, δύο και τρεις ίδιες σεισμικές δονήσεις στη σειρά. Μεταξύ των διαδοχικών σεισμικών διεγέρσεων παρεμβalόταν αρκετός χρόνος, ώστε το σύστημα να βρίσκεται πρακτικά σε ηρεμία όταν πλήττεται από τον επόμενο σεισμό.

Ενδεικτικά διαγράμματα των αποτελεσμάτων για την ακολουθία των τριών σεισμικών διεγέρσεων δίνονται στα σχήματα 5.11 έως 5.14, για το άνω τμήμα του κιονόκρανου (διαγράμματα (α) και (β) για τη διαμήκη και την εγκάρσια διεύθυνση αντίστοιχα) και το ΝΔ τέμαχος του σπασμένου σπονδύλου 14 (διάγραμμα (γ), εγκάρσια διεύθυνση) του δυτικού κίονα 7.6.

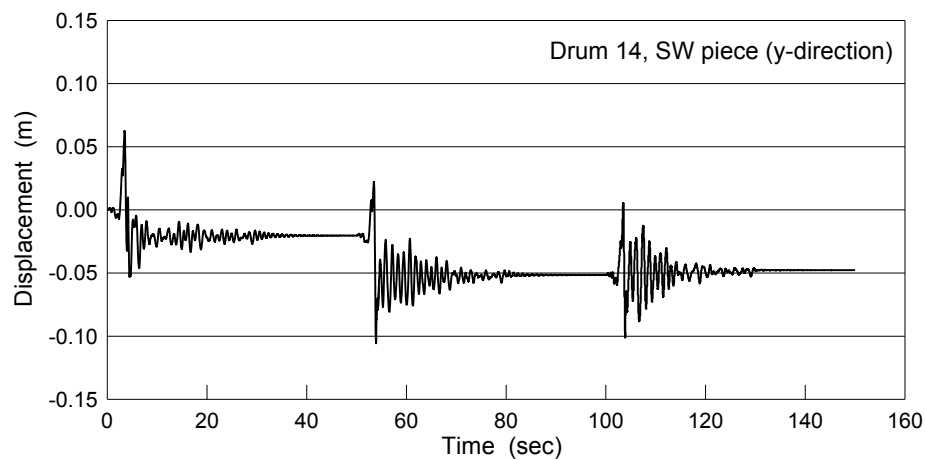
Γενικώς, η υποβολή της κατασκευής σε συνεχόμενες σεισμικές καταπονήσεις οδηγούσε σε συσσωρευτική αύξηση των παραμορφώσεων. Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι υπήρχαν και αρκετές περιπτώσεις, στις οποίες η επανάληψη του ίδιου σεισμικού κραδασμού δεν δημιουργούσε σημαντικές πρόσθετες μόνιμες μετακινήσεις [π.χ. Σχ. 5.11.(α), 5.12.(α)] ή αναιρούσε, σε ένα βαθμό, τις παραμορφώσεις του προηγούμενου σεισμού [π.χ. Σχ. 5.11.(β)]. Μία χαρακτηριστική περίπτωση τέτοιου μη συστηματικού τρόπου συμπεριφοράς παρουσιάζεται στο Σχ. 5.11.(β), όπου ο δεύτερος σεισμός αυξάνει τις μετατοπίσεις του κιονοκράνου που έχει προκαλέσει ο πρώτος, ο τρίτος όμως σεισμός αναιρεί όλη τη μετατόπιση των προηγούμενων και προκαλεί μετατόπιση του κιονοκράνου προς την αντίθετη κατεύθυνση.



(α)

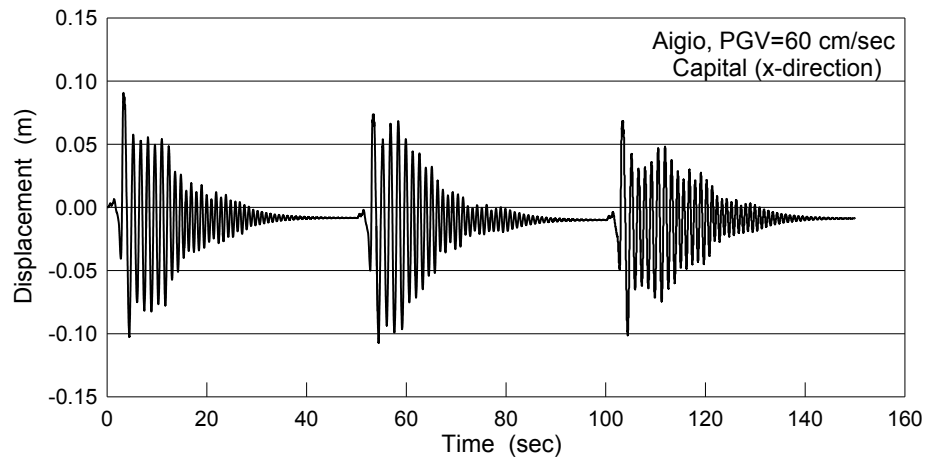


(β)

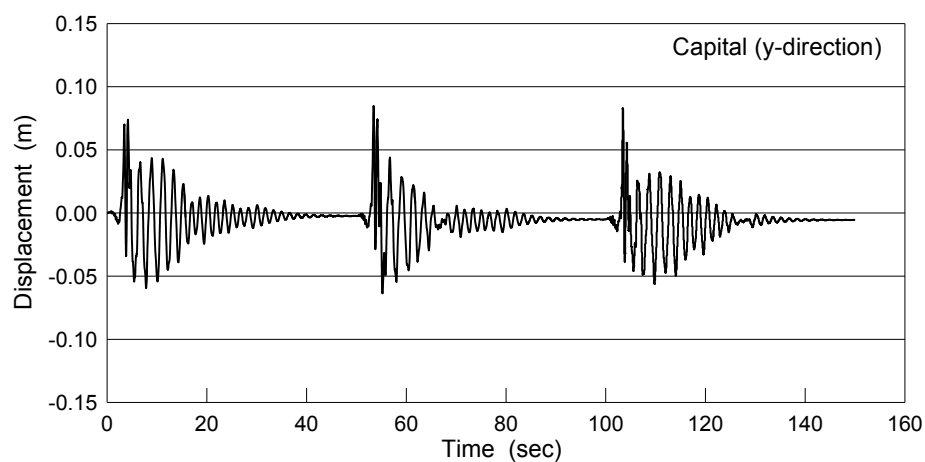


(γ)

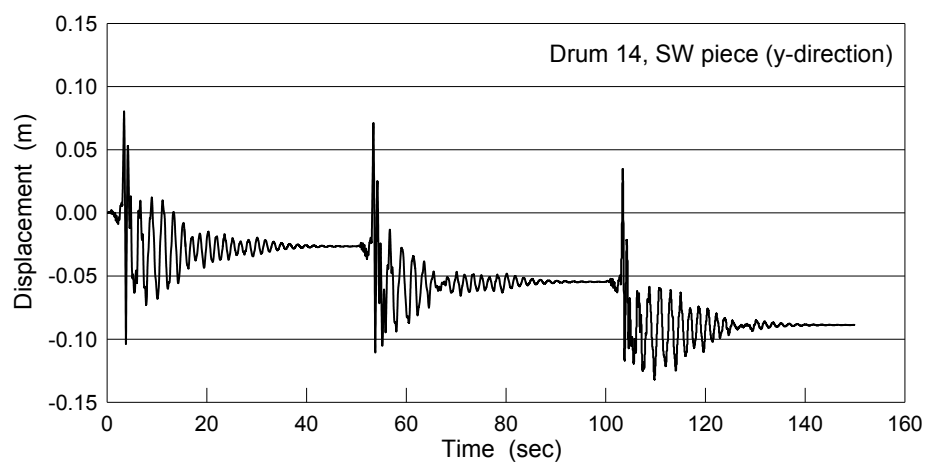
**Σχ. 5.11.** Χρονοϊστορίες της μετακίνησης: (α) του άνω τμήματος του κιονοκράνου στη διαμήκη διεύθυνση, (β) του άνω τμήματος του κιονοκράνου στην εγκάρσια διεύθυνση και (γ) του ΝΔ τμήματος του σπασμένου σπονδύλου 14 στην εγκάρσια διεύθυνση για ακολουθία 3 σεισμών τύπου Αιγίου με PGV=60 cm/sec (δυτικός κίονας 7.6, χωρίς κτίσμα επί του επιστυλίου).



(α)

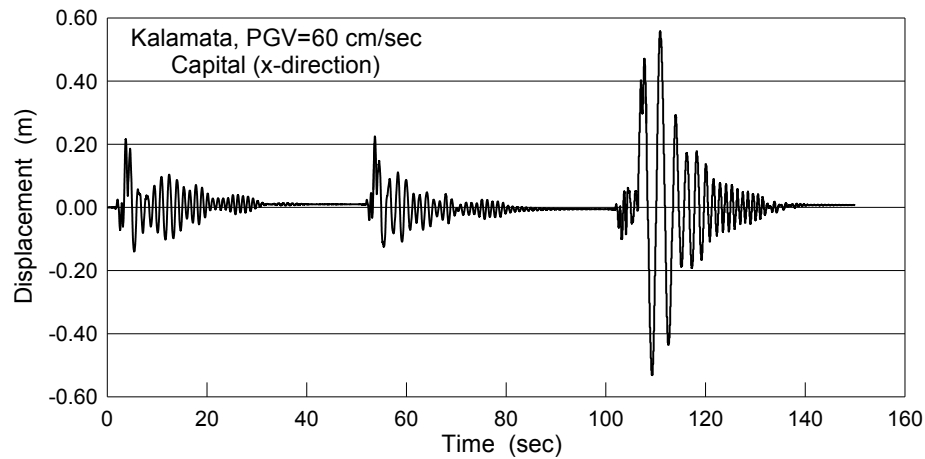


(β)

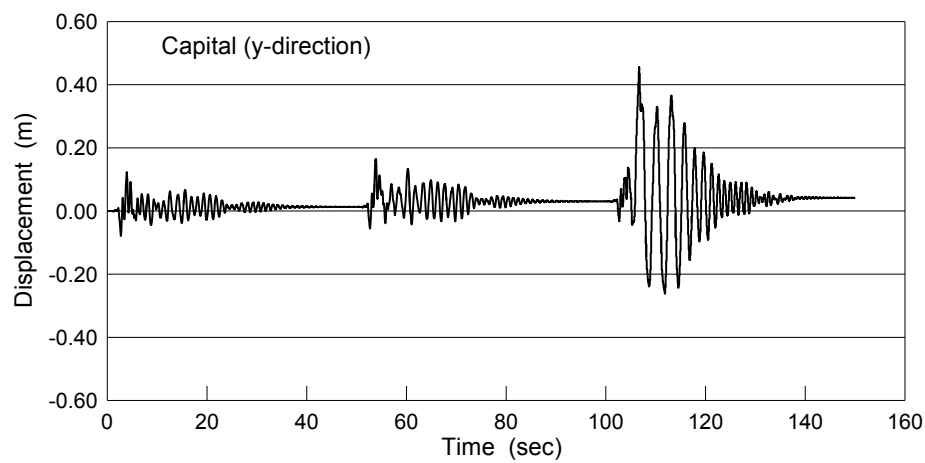


(γ)

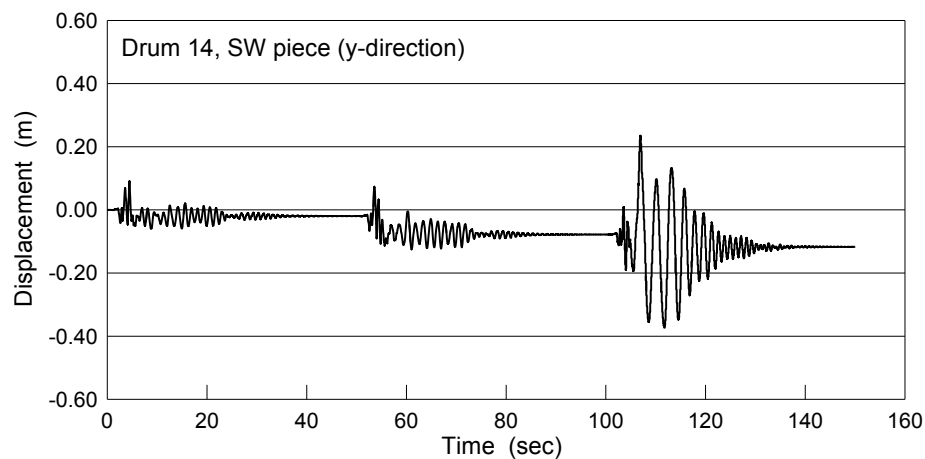
**Σχ. 5.12.** Χρονοϊστορίες της μετακίνησης: (α) του άνω τμήματος του κιονοκράνου στη διαμήκη διεύθυνση, (β) του άνω τμήματος του κιονοκράνου στην εγκάρσια διεύθυνση και (γ) του ΝΔ τμήματος του σπασμένου σπονδύλου 14 στην εγκάρσια διεύθυνση για ακολουθία 3 σεισμών τύπου Αιγίου με PGV=60 cm/sec (δυτικός κίονας 7.6, με κτίσμα επί του επιστυλίου).



(α)

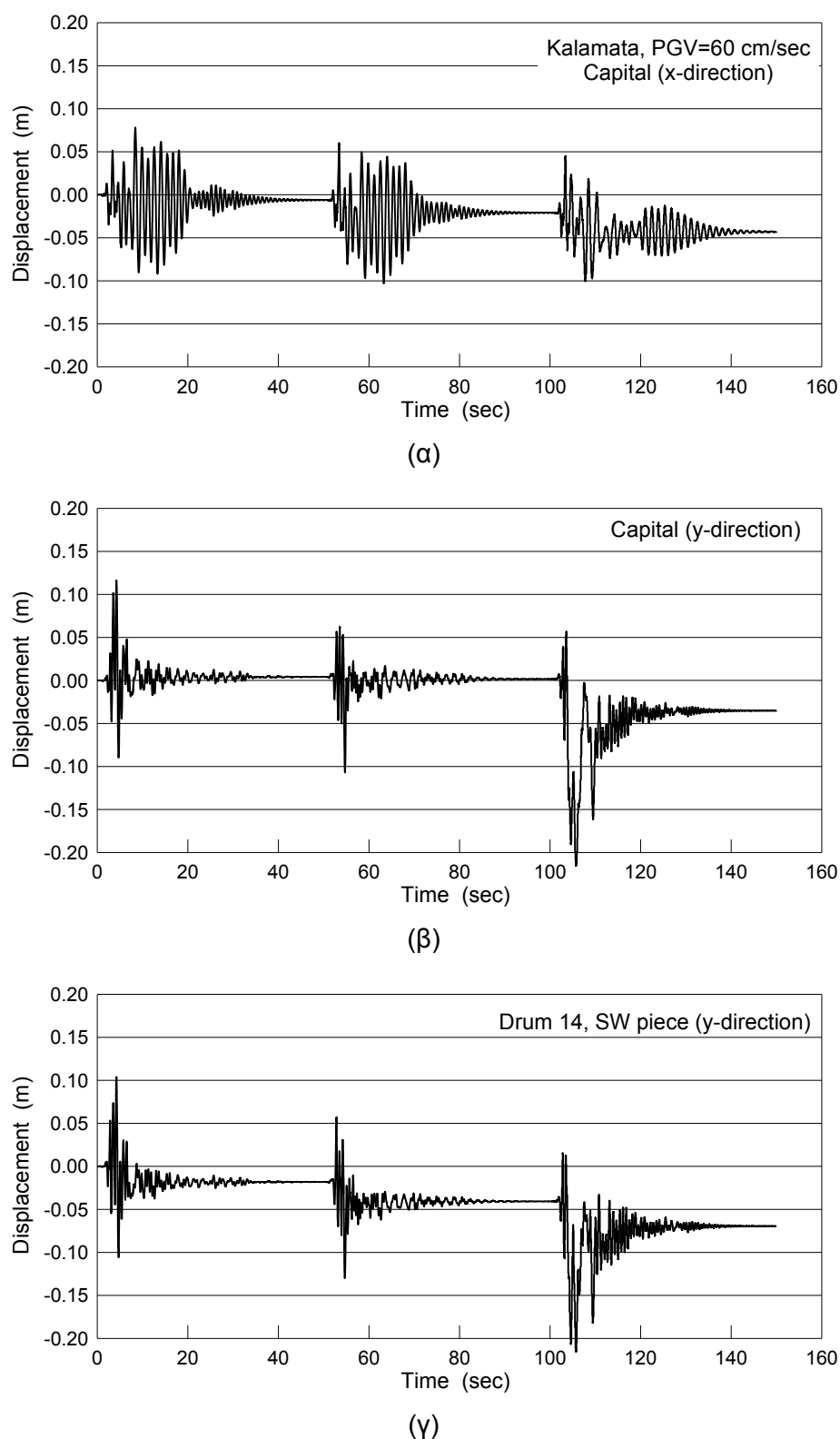


(β)

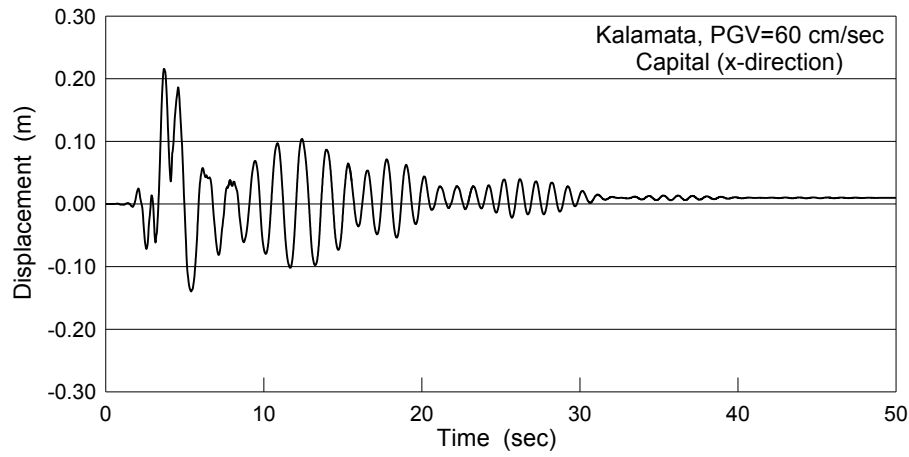


(γ)

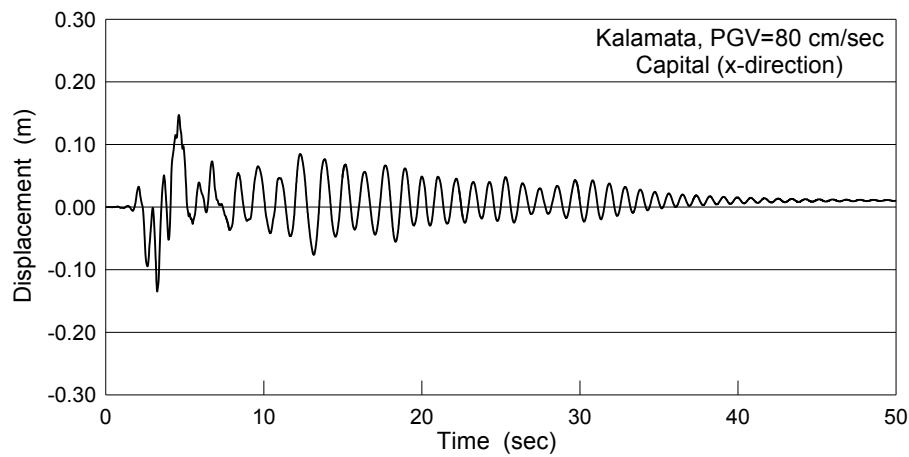
**Σχ. 5.13.** Χρονοϊστορίες της μετακίνησης: (α) του άνω τμήματος του κιονοκράνου στη διαμήκη διεύθυνση, (β) του άνω τμήματος του κιονοκράνου στην εγκάρσια διεύθυνση και (γ) του ΝΔ τμήματος του σπασμένου σπονδύλου 14 στην εγκάρσια διεύθυνση για ακολουθία 3 σεισμών τύπου Καλαμάτας με  $PGV=60$  cm/sec (δυτικός κίονας 7.6, χωρίς κτίσμα επί του επιστυλίου).



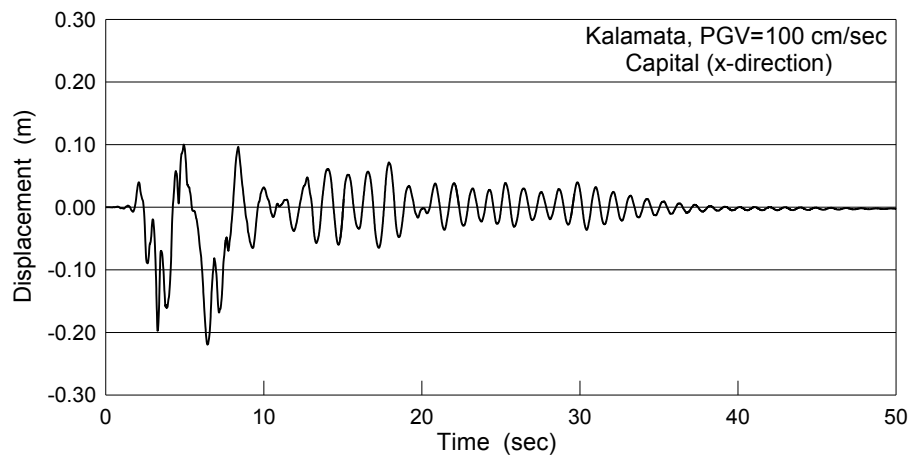
**Σχ. 5.14.** Χρονοϊστορίες της μετακίνησης: (α) του άνω τμήματος του κιονοκράνου στη διαμήκη διεύθυνση, (β) του άνω τμήματος του κιονοκράνου στην εγκάρσια διεύθυνση και (γ) του ΝΔ τμήματος του σπασμένου σπονδύλου 14 στην εγκάρσια διεύθυνση για ακολουθία 3 σεισμών τύπου Καλαμάτας με  $PGV=60$  cm/sec (δυτικός κίονας 7.6, με κτίσμα επί του επιστυλίου).



(α)



(β)



(γ)

**Σχ. 5.15.** Χρονοϊστορίες της μετακίνησης του άνω τμήματος του κιονοκράνου στη διαμήκη διεύθυνση για σεισμό τύπου Καλαμάτας με: (α) PGV=60 cm/sec, (β) PGV=80 cm/sec και (γ) PGV=100 cm/sec (δυτικός κίονας 7.6, χωρίς κτίσμα επί του επιστυλίου).

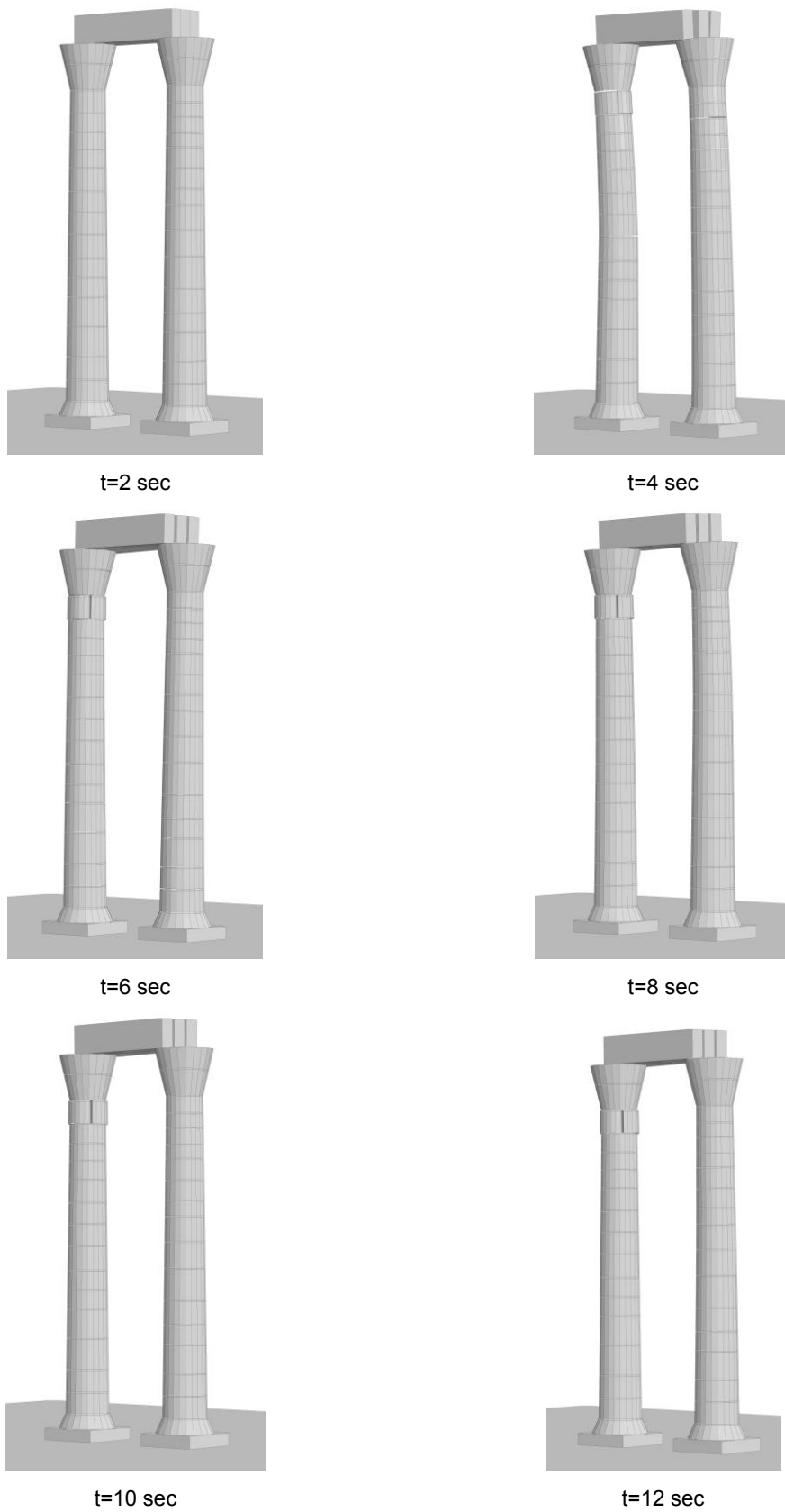
Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η συμπεριφορά του σπασμένου σπονδύλου 14. Γενικώς, τα δύο τμήματα έχουν την τάση να απομακρύνονται μεταξύ τους μετά από κάθε σεισμική καταπόνηση, υπάρχουν όμως και περιπτώσεις που η συμπεριφορά αυτή δεν ακολουθείται. Για παράδειγμα, στο σεισμό του Αιγίου το ΝΔ τμήμα παρουσιάζει μία σημαντική μόνιμη μετατόπιση στην εγκάρσια διεύθυνση [Σχ. 5.11.(γ)], η οποία σχεδόν τριπλασιάζεται μετά τη δεύτερη επανάληψη του σεισμικού κραδασμού, ενώ παραμένει πρακτικά αμετάβλητη (στην πραγματικότητα παρουσιάζει μικρή μείωση) μετά την τρίτη επανάληψη του σεισμού.

Η επιρροή του κτίσματος επί του επιστυλίου δεν είναι μονοσήμαντη. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το βάρος του κτίσματος είχε ευνοϊκή επίδραση και μείωνε τις τελικές παραμορφώσεις, όπως φαίνεται από τη σύγκριση των σχημάτων 5.13 και 5.14 για το σεισμό της Καλαμάτας (επισημαίνεται η διαφορά στην κλίμακα των μετατοπίσεων μεταξύ των δύο σχημάτων). Υπήρχαν όμως και περιπτώσεις που η ύπαρξη του κτίσματος οδηγούσε σε μεγαλύτερες μόνιμες μετατοπίσεις, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του σεισμού του Αιγίου [σύγκριση σχημάτων 5.11.(α)&(γ) με σχήματα 5.12.(α)&(γ) αντίστοιχα].

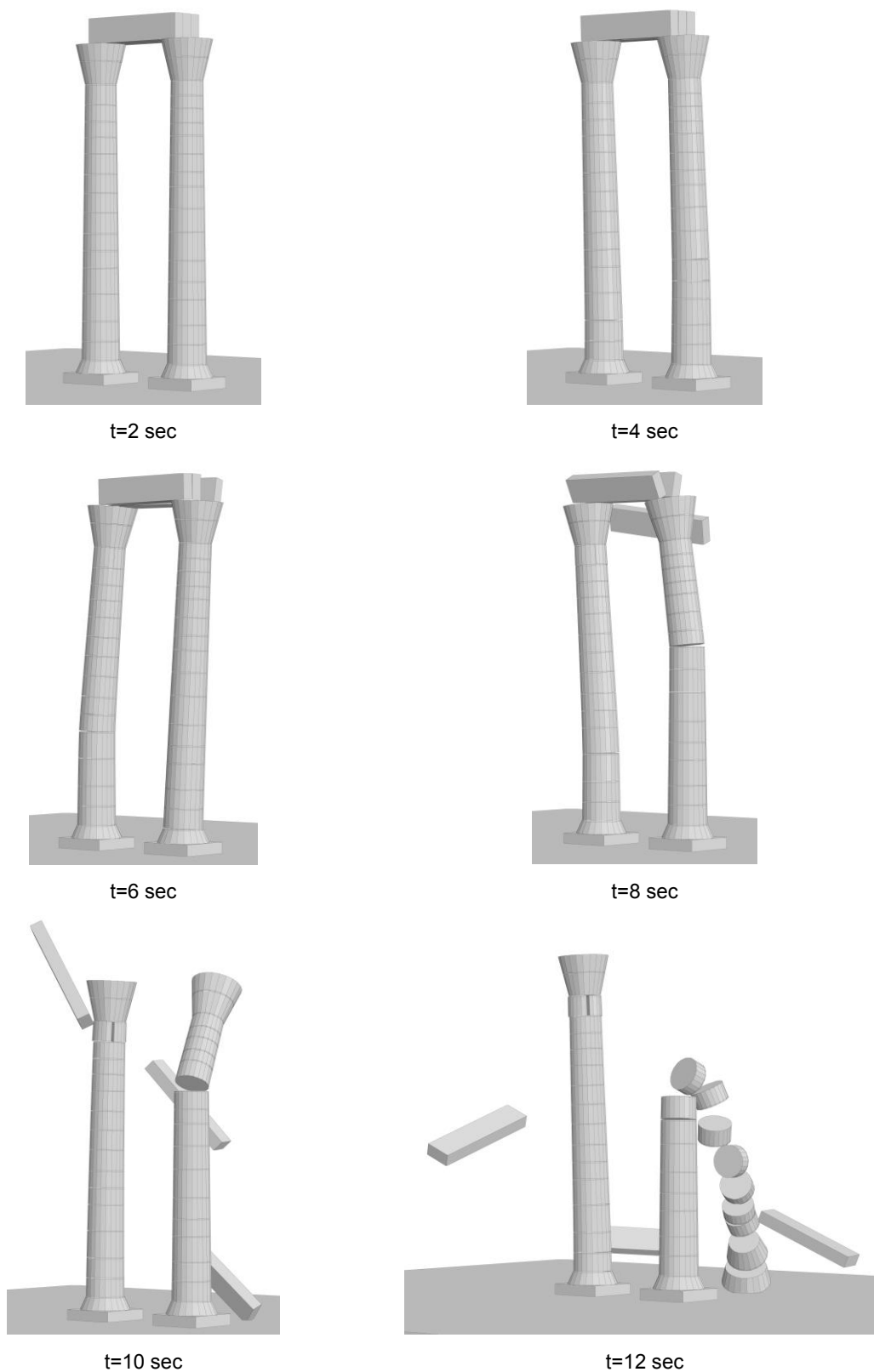
Λόγω της μη γραμμικής συμπεριφοράς, αύξηση της έντασης της σεισμικής δόνησης δεν προκαλεί πάντοτε και αύξηση της απόκρισης και των προκαλούμενων μόνιμων μετατοπίσεων. Αυτό φαίνεται στο Σχ. 5.15, όπου παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της απόκρισης του κιονοκράνου του κίονα 7.6, στη διαμήκη διεύθυνση, για το σεισμό της Καλαμάτας με  $PGV=60, 80$  και  $100 \text{ cm/sec}$ . Σε αυτή την περίπτωση, η μέγιστη μετακίνηση κατά τη διάρκεια του σεισμού είναι μεγαλύτερη για  $PGV=60 \text{ cm/sec}$  απ' ό,τι για  $PGV=80 \text{ cm/sec}$ , ενώ η μικρότερη μόνιμη μετατόπιση συμβαίνει για  $PGV=100 \text{ cm/sec}$ .

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, ακόμη και για αρκετά ισχυρές σεισμικές δονήσεις, ο λικνισμός (rocking) των σπονδύλων των κίωνων είναι αρκετά μικρός και επομένως οι μόνιμες μετατοπίσεις οφείλονται κυρίως σε ολισθήσεις. Αυτό φαίνεται στο Σχ. 5.16, όπου παρουσιάζεται η ταλάντωση της κατασκευής για το σεισμό της Καλαμάτας με μέγιστη εδαφική ταχύτητα  $PGV=100 \text{ cm/sec}$ . Δεδομένου ότι η εδαφική ταχύτητα του σεισμού ήταν  $32 \text{ cm/sec}$  στη μία κατεύθυνση και  $23 \text{ cm/sec}$  στην άλλη (Πίνακας 5.2), η σεισμική αυτή δόνηση αντιστοιχεί σε κραδασμό μεγαλύτερο κατά 3 έως 4 φορές από αυτόν που συνέβη στην Καλαμάτα το 1986. Στο Σχ. 5.16 φαίνεται ότι συμβαίνει κάποιος λικνισμός για  $t=4 \text{ sec}$  (όταν συμβαίνει και η ισχυρή σεισμική δόνηση, βλ. Σχ. 5.8), ο οποίος όμως δεν είναι όσο μεγάλος θα ανέμενε κανείς για ένα τόσο ισχυρό σεισμό. Το γεγονός ότι ο λικνισμός είναι μικρός οφείλεται στη γνωστή αντίστροφη σχέση μεταξύ λικνιστικών ταλαντώσεων και μεγέθους της κατασκευής. Το συγκεκριμένο μνημείο είναι ένα από τα μεγαλύτερα της αρχαιότητας και έτσι οι λικνιστικές ταλαντώσεις είναι αρκετά μικρές.





**Σχ. 5.16.** Ταλαντώσεις των δύο κιόνων με επιστύλιο στο σεισμό της Καλαμάτας με μέγιστη εδαφική ταχύτητα  $PGV=100$  cm/sec.



**Σχ. 5.17.** Ταλαντώσεις και κατάρρευση των δύο κιόνων με επιστύλιο στο σεισμό του *Erzincan* με μέγιστη εδαφική ταχύτητα  $PGV=40$  cm/sec.

Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόμοιας έντασης λικνισμός αναμένεται και για την αρκετά μικρότερη σεισμική δόνηση με  $PGV=60$  cm/sec, η οποία προκαλεί ίδιας τάξεως ταλαντώσεις στους κίονες (Σχ. 5.15).

Παρ' ότι οι λικνιστικές ταλαντώσεις δεν είναι έντονες, σε πολλές περιπτώσεις η κατασκευή βρίσκεται στα όρια κατάρρευσης, αφού μικρές διαταραχές στην απόκριση, π.χ. λόγω αλλαγής παραμέτρων, μπορούν εύκολα να προκαλέσουν αστοχία. Τέτοιες περιπτώσεις «πρόκλησης» κατάρρευσης από κάποια διαταραχή παρατηρήθηκαν όταν πέφτουν οι δοκοί του επιστυλίου. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο Σχ. 5.17 για το σεισμό του Erzincan με  $PGV=40$  cm/sec, όπου η διαταραχή που προκαλεί η πτώση του επιστυλίου οδηγεί τελικά και στην κατάρρευση του ανατολικού κίονα 7.5.

Οι μόνιμες παραμορφώσεις, που προκαλούνται στους σπονδύλους και το κιονόκρανο του δυτικού κίονα 7.6 για τους σεισμούς που εξετάσαμε και για διάφορα επίπεδα  $PGV$ , δίνονται στα σχήματα 5.18 έως 5.53. Σε κάθε διάγραμμα δίνεται η τελική παραμορφωμένη νότια και δυτική όψη του κίονα. Στα ίδια σχήματα δίνονται και οι πραγματικές παραμορφώσεις που μετρήθηκαν στο μνημείο, για σύγκριση. Οι μετατοπίσεις των σπονδύλων παρουσιάζονται *σχετικά ως προς τη βάση*, δηλαδή δεν παρουσιάζεται η συνολική μετατόπιση του κίονα, επειδή και η αντίστοιχη μετατόπιση που αφορά την υφιστάμενη κατάσταση δεν είναι γνωστή. Για το θέμα αυτό, όμως, γίνεται ιδιαίτερη αναφορά παρακάτω.

Σε κάθε σεισμό, κατ' αρχήν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για μία μεμονωμένη σεισμική δόνηση με  $PGV=40, 60, 80$  και  $100$  cm/sec και για κατασκευή χωρίς κτίσμα στο επιστύλιο. Στη συνέχεια εξετάζεται η απόκριση σε πολλαπλές σεισμικές δονήσεις και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για ένα μόνο σεισμό και για ακολουθία τριών σεισμικών κραδασμών (για  $PGV=40$  και  $60$  cm/sec). Τέλος, εξετάζεται η επιρροή της ύπαρξης του κτίσματος επί του επιστυλίου και δίνονται οι μετατοπίσεις που προκύπτουν για κάθε σεισμό (με  $PGV=60$  cm/sec), τόσο μεμονωμένα όσο και σε ακολουθία τριών σεισμικών κραδασμών.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η παραμορφωμένη εικόνα του κίονα που προκύπτει από τις αναλύσεις ταιριάζει αρκετά με αυτή που μετρήθηκε, με διαφοροποιήσεις βέβαια για κάθε σεισμική δόνηση και κάθε ένταση. Η σημαντικότερη ίσως διαφορά, μεταξύ των αποτελεσμάτων και της πραγματικής κατάστασης, αφορά τη μετακίνηση των δύο τμημάτων του κιονοκράνου που εμφανίζεται στη νότια όψη, η οποία σε πολλές περιπτώσεις προκύπτει μικρότερη από τη μετρηθείσα. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι η μετατόπιση αυτή είναι πολύ πιθανόν να οφείλεται σε μη σεισμικούς παράγοντες και να

συνέβη κατά την κατάρρευση του γειτονικού κίονα 7.7, ο οποίος συνδεόταν με επιστύλιο με τον κίονα 7.6.

Πίνακας 5.3

**Μόνιμες μετατοπίσεις (σχετικές ως προς τη βάση) κιονοκράνου και  
ΝΔ τμήματος σπονδύλου 14 του κίονα 7.6 (mm)**

PGV (cm/s)	Σει- σμικ. ακο- λουθ.	Θέση	Σεισμική διέγερση									
			Αίγιο, 1995 (ΟΤΕ)		Γρίβα, 1990 (Έδεσσα)		Καλαμάτα, 1986 (Νομαρχία)		Erzincan, 1992		Αθήνα, 1999 (Σύνταγμα)	
			Νότια όψη (διαμ. διεύθ.)	Δυτ. Όψη (εγκ. διεύθ.)	Νότια όψη (διαμ. διεύθ.)	Δυτ. Όψη (εγκ. διεύθ.)	Νότια όψη (διαμ. διεύθ.)	Δυτ. Όψη (εγκ. διεύθ.)	Νότια όψη (διαμ. διεύθ.)	Δυτ. Όψη (εγκ. διεύθ.)	Νότια όψη (διαμ. διεύθ.)	Δυτ. Όψη (εγκ. διεύθ.)
Χωρίς κτίσμα επί του επιστυλίου												
40	1 σεισ.	Κιονόκρανο (άνω τμ.)	1.3	1.7	0.9	0.9	-5.2	-2.5	ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ		-1.4	-1.9
		Κιονόκρανο (κάτω τμ.)	1.2	1.6	0.8	0.8	-4.8	-3.0			-1.3	-1.7
		ΝΔ τμ.σπ.14	1.0	9.5	0.7	10.7	-4.1	9.1			-1.1	2.9
	2 σεισ.	Κιονόκρανο (άνω τμ.)	2.8	5.0	-5.4	-0.8	-0.6	-1.8			1.4	-0.9
		Κιονόκρανο (κάτω τμ.)	2.4	4.7	-4.7	-0.7	-0.6	-2.3			1.3	-0.9
		ΝΔ τμ.σπ.14	1.8	16.1	-3.6	20.4	-0.5	29.7			1.3	7.3
	3 σεισ.	Κιονόκρανο (άνω τμ.)	-1.8	5.9	3.5	-1.8	-1.0	0.1			4.3	-1.5
		Κιονόκρανο (κάτω τμ.)	-1.8	5.6	3.2	-1.7	-1.1	-0.6			4.0	-1.5
		ΝΔ τμ.σπ.14	-1.7	23.3	2.9	28.2	-0.2	46.9			3.7	8.8
60	1 σεισ.	Κιονόκρανο (άνω τμ.)	4.1	3.6	-0.3	-3.4	10.4	-11.3	-15.9	-6.0	-10.4	-0.3
		Κιονόκρανο (κάτω τμ.)	3.8	3.6	0.6	-6.1	8.5	-11.0	-14.8	-5.6	-9.6	1.2
		ΝΔ τμ.σπ.14	3.0	21.2	6.7	74.0	7.0	21.6	-13.4	3.5	-8.4	13.8
	2 σεισ.	Κιονόκρανο (άνω τμ.)	2.2	9.0	-8.7	-11.9	-4.7	-27.1	ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ		-3.0	-13.0
		Κιονόκρανο (κάτω τμ.)	2.5	7.7	-6.6	-14.6	-6.6	-24.5			-2.5	-8.9
		ΝΔ τμ.σπ.14	2.1	52.9	3.3	106.7	2.0	81.3			-0.4	33.6
	3 σεισ.	Κιονόκρανο (άνω τμ.)	1.3	-0.4	-33.6	5.5	8.5	-37.7			-6.1	-15.5
		Κιονόκρανο (κάτω τμ.)	1.0	-0.7	-24.8	-1.1	4.9	-43.0			-5.3	-9.8
		ΝΔ τμ.σπ.14	0.2	49.1	-4.5	139.7	23.2	121.2			-0.6	62.3
80	1 σεισ.	Κιονόκρανο (άνω τμ.)	9.7	5.9	-29.1	1.4	10.3	-10.7	1.2	-1.1	-7.8	-1.1
		Κιονόκρανο (κάτω τμ.)	9.1	5.3	-25.4	-2.4	5.9	-10.9	1.5	-0.3	-7.2	2.2
		ΝΔ τμ.σπ.14	7.7	19.8	-19.2	30.7	3.7	71.6	2.0	15.1	-4.2	30.3
100	1 σεισ.	Κιονόκρανο (άνω τμ.)	11.7	2.1	-22.8	7.3	-5.3	-6.9	ΚΑΤΑΡ- ΡΕΥΣΗ		-10.2	6.5
		Κιονόκρανο (κάτω τμ.)	11.6	1.3	-19.2	9.0	-8.3	-17.8			-9.0	9.3
		ΝΔ τμ.σπ.14	11.7	13.8	-7.0	103.1	-2.3	65.4			-6.7	40.9

PGV (cm/s)	Σει- σμικ. ακο- λουθ.	Θέση	Σεισμική διέγερση									
			Αίγιο, 1995 (ΟΤΕ)		Γρίβα, 1990 (Έδεσσα)		Καλαμάτα, 1986 (Νομαρχία)		Erzincan, 1992		Αθήνα, 1999 (Σύνταγμα)	
			Νότια όψη (διαμ. διεύθ.)	Δυτ. Όψη (εγκ. διεύθ.)	Νότια όψη (διαμ. διεύθ.)	Δυτ. Όψη (εγκ. διεύθ.)	Νότια όψη (διαμ. διεύθ.)	Δυτ. Όψη (εγκ. διεύθ.)	Νότια όψη (διαμ. διεύθ.)	Δυτ. Όψη (εγκ. διεύθ.)	Νότια όψη (διαμ. διεύθ.)	Δυτ. Όψη (εγκ. διεύθ.)
Με κτίσμα επί του επιστυλίου												
60	1 σεισ.	Κιονόκρανο (άνω τμ.)	-9.2	3.2	-9.8	-3.0	-6.1	-3.2	-21.3	5.0	-10.4	-2.7
		Κιονόκρανο (κάτω τμ.)	-8.9	3.3	-9.1	-3.0	-5.6	-3.2	-20.6	5.2	-9.9	-1.9
		ΝΔ τμ.σπ.14	-8.0	27.3	-7.9	30.3	-4.7	19.1	-19.7	11.3	-9.3	31.2
	2 σεισ.	Κιονόκρανο (άνω τμ.)	-11.7	6.5	-38.5	-9.9	-20.4	0.6	-25.7	1.6	-11.3	-3.3
		Κιονόκρανο (κάτω τμ.)	-11.1	6.8	-35.8	-9.7	-18.6	-0.5	-24.7	1.2	-10.8	-2.1
		ΝΔ τμ.σπ.14	-8.7	56.0	-30.2	61.7	-15.3	43.0	-23.4	17.8	-9.4	47.8
	3 σεισ.	Κιονόκρανο (άνω τμ.)	-11.3	7.9	ΚΑΤΑΡ- ΡΕΥΣΗ		-42.2	38.3	-33.0	5.1	-14.7	-7.0
		Κιονόκρανο (κάτω τμ.)	-10.7	8.0			-40.4	33.8	-31.6	4.5	-14.1	-5.3
		ΝΔ τμ.σπ.14	-6.0	91.1			-35.7	72.6	-29.9	31.9	-11.2	65.2

Πίνακας 5.4

**Μετρηθείσες μετατοπίσεις (σχετικές ως προς τη βάση)  
κιονοκράνου και ΝΔ τμήματος σπονδύλου 14 του κίονα 7.6 (mm)**

Θέση	Νότια όψη (διαμήκης διεύθ.)	Δυτική όψη (εγκάρσια διεύθ.)
Άνω τμήμα κιον/νου	-40.0	8.0
Κάτω τμήμα κιον/νου	-27.0	5.0
ΝΔ τμήμα σπονδ. 14	1.5	88.0

Ενδεικτικά αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 5.3, όπου φαίνονται οι παραμένουσες μετατοπίσεις των δύο τμημάτων του κιονοκράνου και του ΝΔ τμήματος του σπασμένου σπονδύλου 14, που προέκυψαν από τις αναλύσεις στις διάφορες περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Επισημαίνεται, πάντως, ότι η μετατόπιση του κιονοκράνου δεν δίνει πλήρη εικόνα της παραμόρφωσης του κίονα, γι' αυτό κανείς θα πρέπει να εξετάζει τη συνολική παραμόρφωση, όπως αυτή δίνεται στα σχήματα 5.18 έως 5.53. Για σύγκριση, στον Πίνακα 5.4 δίνονται οι πραγματικές μετατοπίσεις που μετρήθηκαν στα δύο τμήματα του κιονοκράνου και στον σπόνδυλο 14.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη σύγκριση των παραμορφώσεων του κίονα, όπως αυτές δίνονται στα Σχ. 5.18 έως 5.53, χωριστά για κάθε σεισμική διέγερση.

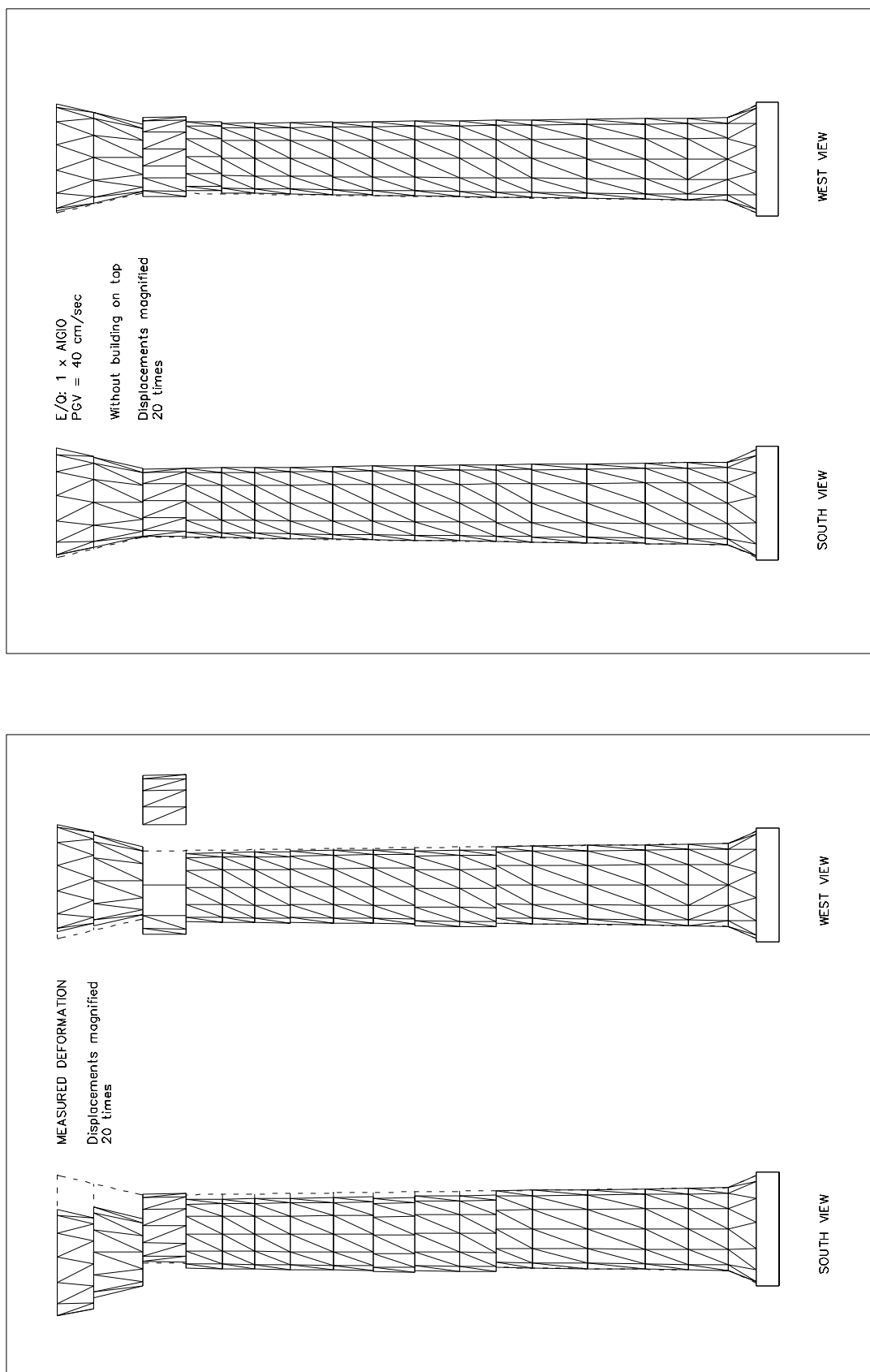
### **Σεισμός Αιγίου, 1995**

Ο σεισμός του Αιγίου (1995) χαρακτηρίζεται από έναν σχεδόν ημιτονικό παλμό περιόδου 0.50 sec και μέγιστης επιτάχυνσης 0.50 g περίπου (Σχ. 5.6). Πρόκειται για έναν ισχυρό σεισμό μικρής όμως διάρκειας, που θα μπορούσε να πλήξει και την περιοχή της Αθήνας.

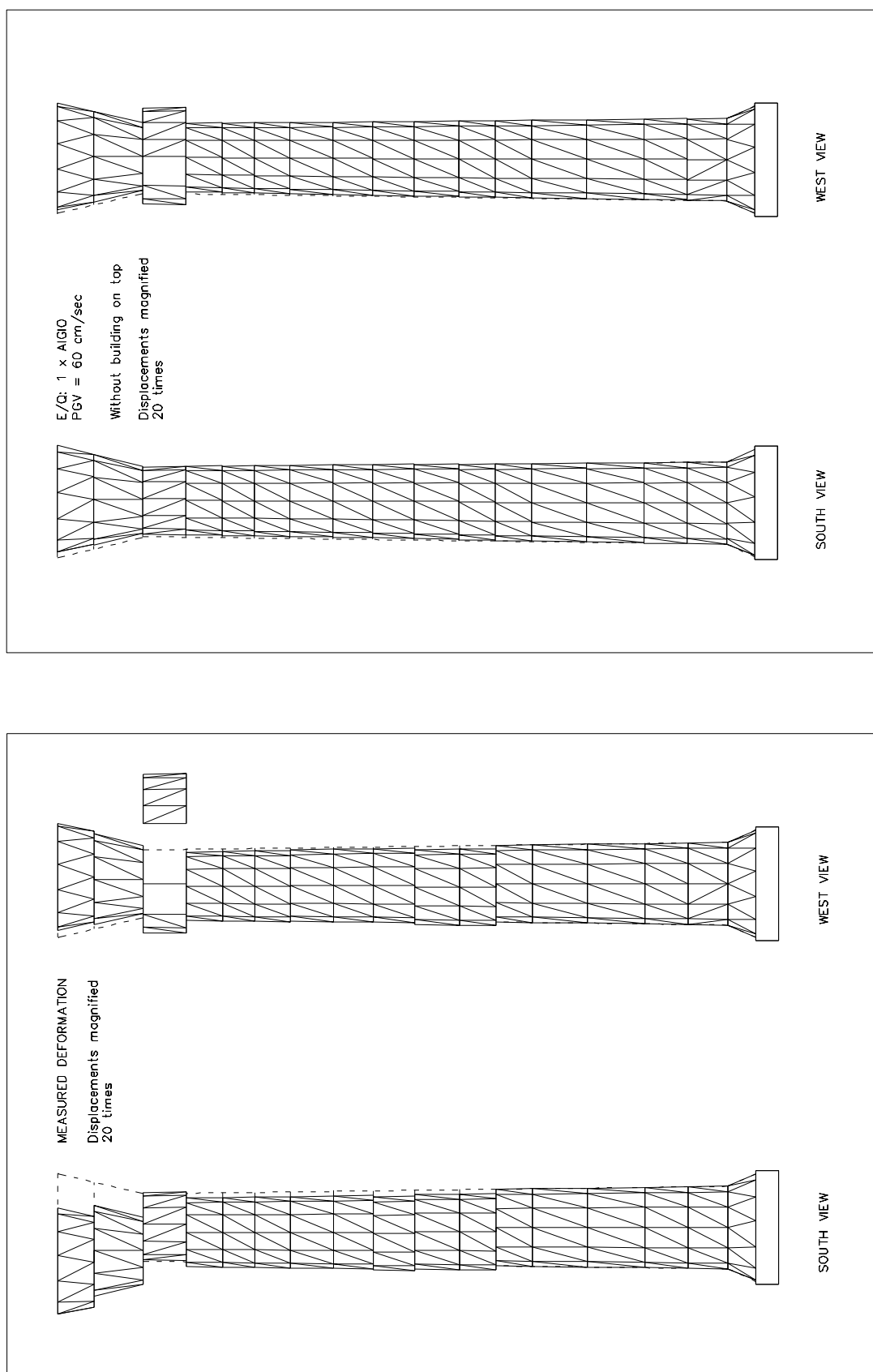
Όπως φαίνεται από το Σχ. 5.18, ο σεισμός του Αιγίου με  $PGV=40$  cm/sec οδηγεί σε μορφή παραμόρφωσης συμβατή με την πραγματική κατάσταση, αλλά με αρκετά μικρότερες τιμές από αυτές που μετρήθηκαν. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, η τιμή  $PGV=40$  cm/sec αντιστοιχεί σε λίγο μικρότερο σεισμό από αυτόν που καταγράφηκε στο Αίγιο το 1995, όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 5.2 ( $\max PGV=46.30$  cm/sec).

Εάν αυξηθεί η ένταση του σεισμού, έτσι ώστε  $PGV=60$  cm/sec (Σχ. 5.19), αυξάνουν αρκετά τόσο οι μετακινήσεις των δύο τμημάτων του σπασμένου σπονδύλου 14, όσο και οι μετακινήσεις των σπονδύλων του ανώτερου τμήματος του κίονα, οι οποίες πλησιάζουν περισσότερο στην πραγματική κατάσταση. Ένας τέτοιος σεισμός αντιστοιχεί περίπου σε 1.5 φορές το σεισμό του 1995. Περαιτέρω αύξηση της έντασης του σεισμού προκαλεί μικρή περαιτέρω αύξηση των μετακινήσεων, όπως προκύπτει από τα σχήματα 5.20 και 5.21, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για  $PGV=80$  cm/sec (περίπου 2 φορές ο σεισμός του 1995) και  $PGV=100$  cm/sec (περίπου 2.5 φορές ο σεισμός του 1995). Θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι μετατοπίσεις του κίονα είναι συμβατές με τις πραγματικές ακόμη και για τέτοιες μεγάλες τιμές εδαφικής ταχύτητας, οι οποίες αντιστοιχούν σε εξαιρετικά ισχυρούς σεισμούς, οι οποίοι εάν συνέβαιναν σήμερα στην Αθήνα θα προκαλούσαν σημαντικές βλάβες και στις σύγχρονες κατασκευές.

Η υποβολή του μνημείου σε περισσότερες της μιας σεισμικές διεγέρσεις τύπου Αιγίου, αυξάνει αρκετά τις μετακινήσεις, ιδιαίτερα στα δύο τμήματα του σπασμένου σπονδύλου 14, όπως φαίνεται στα Σχ. 5.22 και 5.23, όπου παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα για ένα μόνο σεισμό και μία ακολουθία 3 ίδιων σεισμών με  $PGV=40$  και 60 cm/sec, αντίστοιχα. Με εξαίρεση τη μεγάλη μετρηθείσα μετακίνηση των δύο τμημάτων του κιονοκράνου στη νότια όψη, η οποία δεν προκύπτει από τις αριθμητικές αναλύσεις (η οποία, όμως, όπως αναφέρθηκε παραπάνω μπορεί να προκλήθηκε κατά την κατάρρευση του κίονα 7.7), η παραμορφωμένη κατάσταση του κίονα, όπως παρουσιάζεται σήμερα, θα μπορούσε να έχει προκληθεί από μία τέτοια ακολουθία σεισμικών διεγέρσεων.

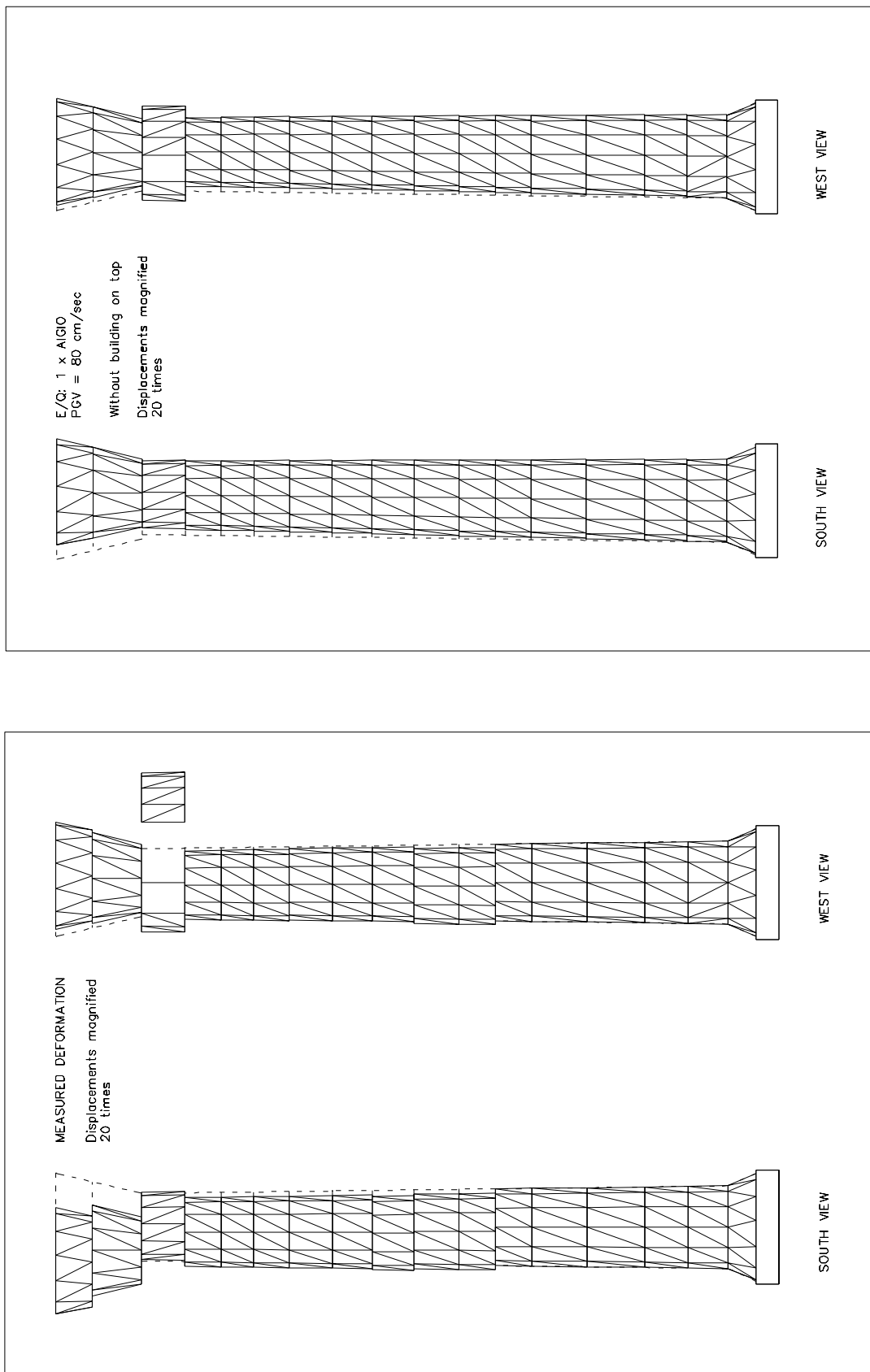


**Σχ. 5.18.** Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός του Αγίου με  $PGV=40 \text{ cm/sec}$ .

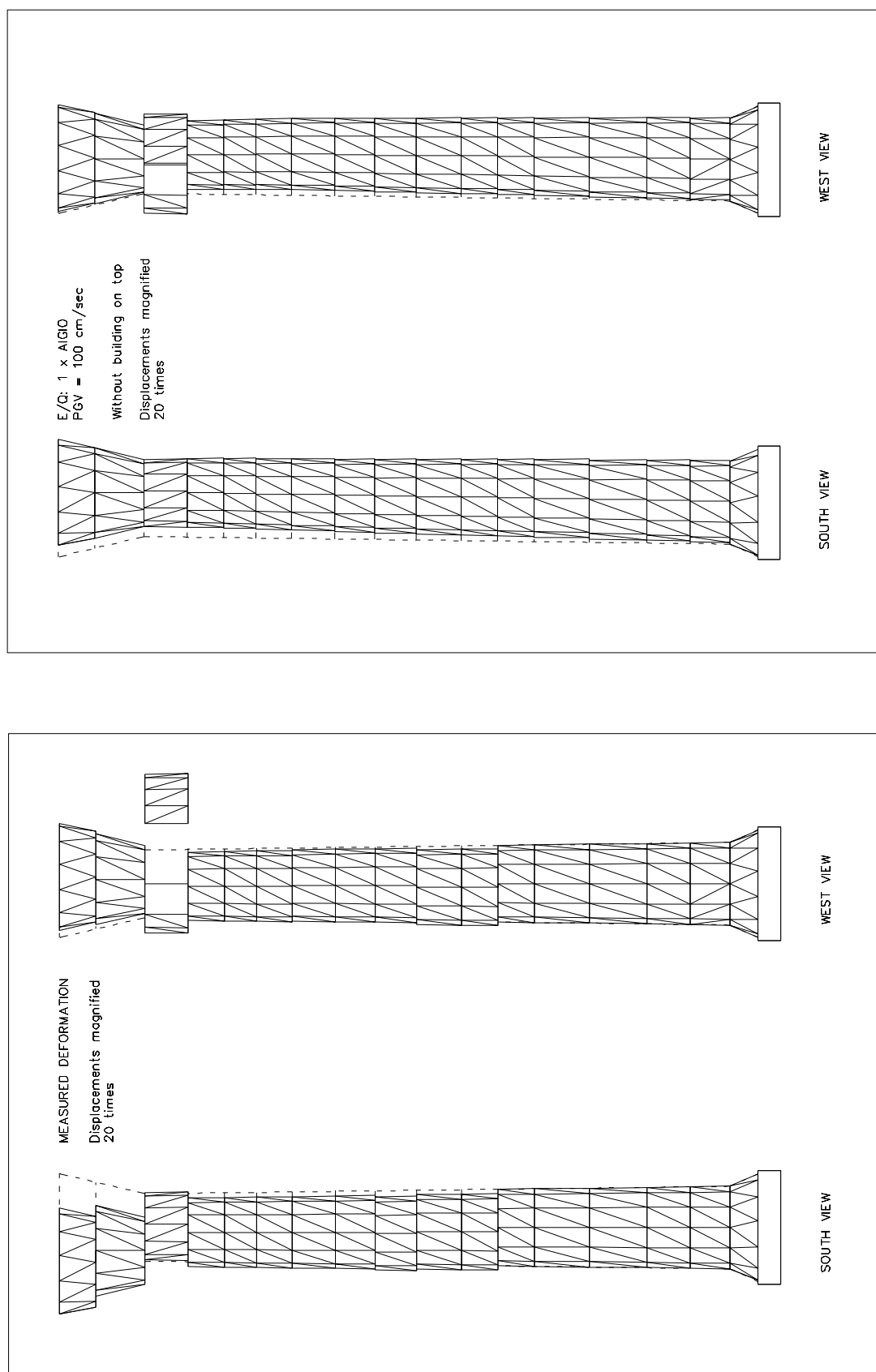


**Σχ. 5.19.** Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός του Αιγίου με  $PGV=60 \text{ cm/sec}$ .

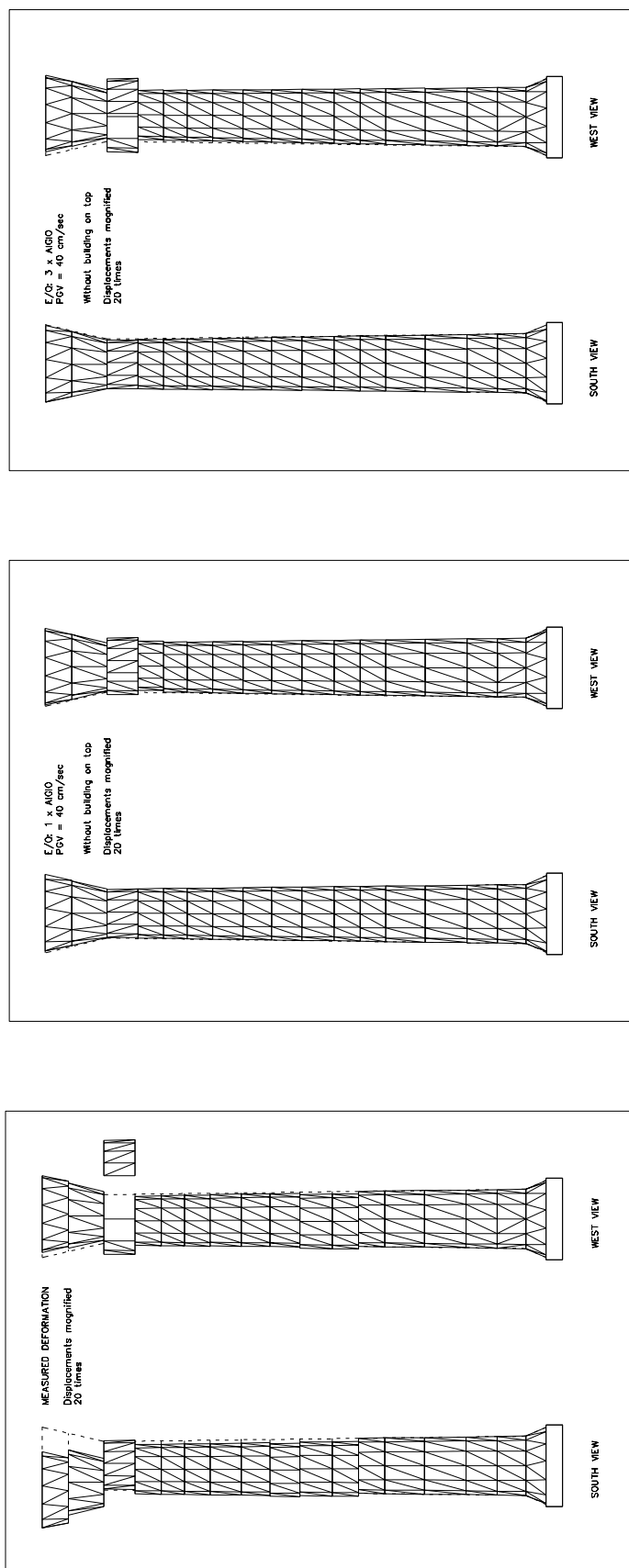




**Σχ. 5.20.** Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός του Αγίου με  $PGV=80 \text{ cm/sec}$ .



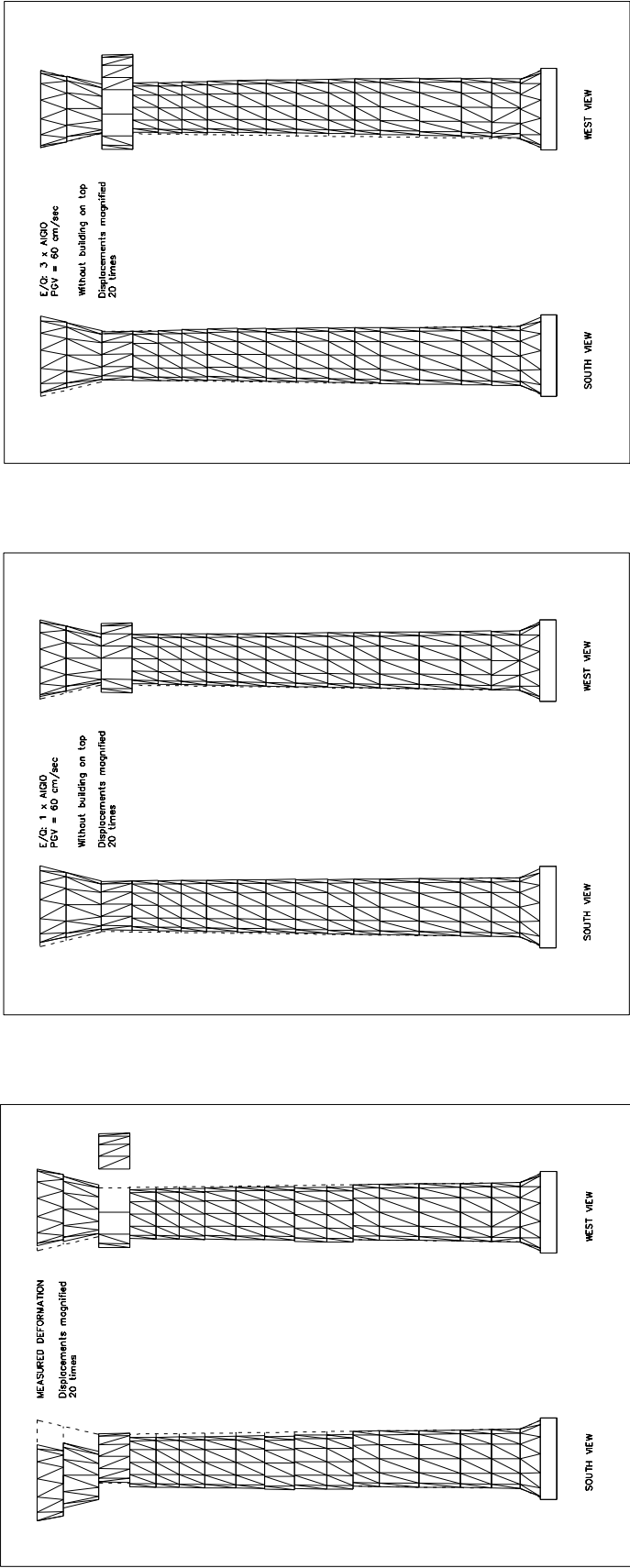
**Σχ. 5.21.** Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός του Αγίου με  $PGV=100 \text{ cm/sec}$ .



(α)

(β)

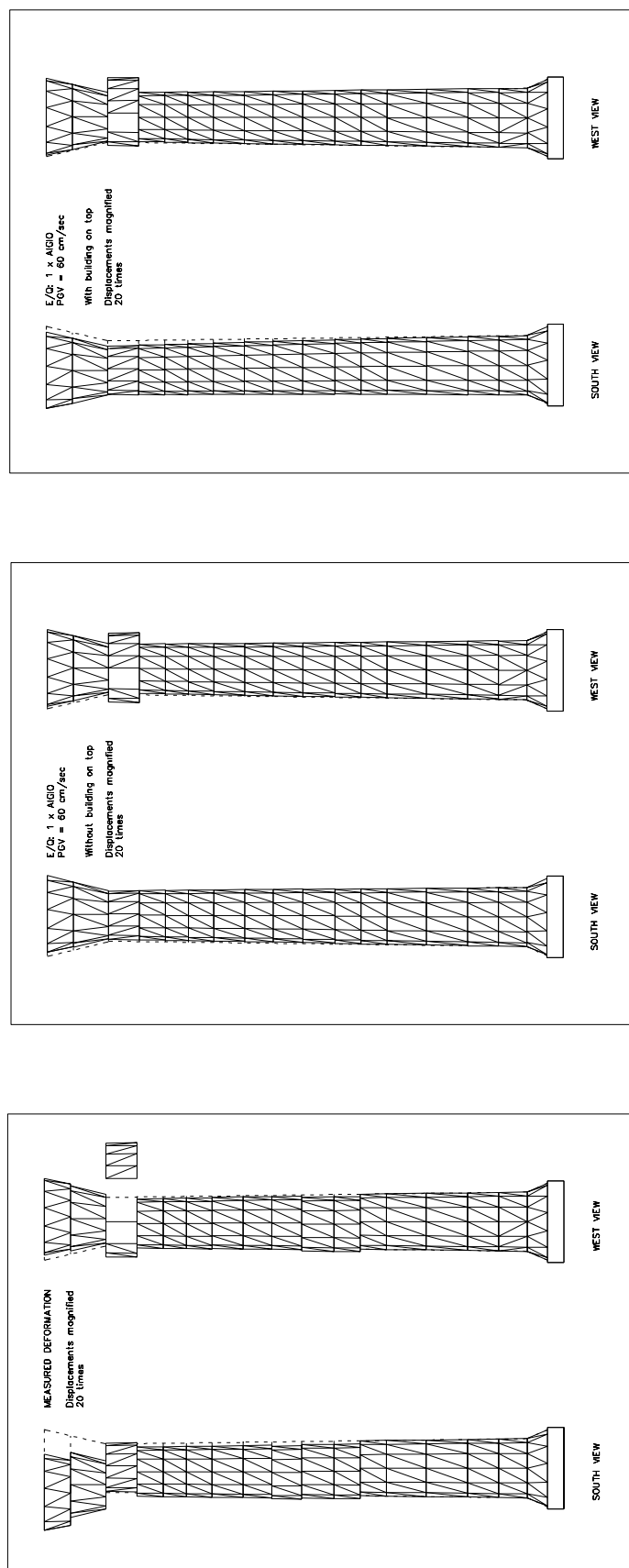
**Σχ. 5.22.** Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός του Αιγίου με  $PGV=40 \text{ cm/sec}$  (α) για ένα μόνο σεισμό και (β) για ακολουθία 3 διαδοχικών σεισμικών διεγέρσεων.



(α)

(β)

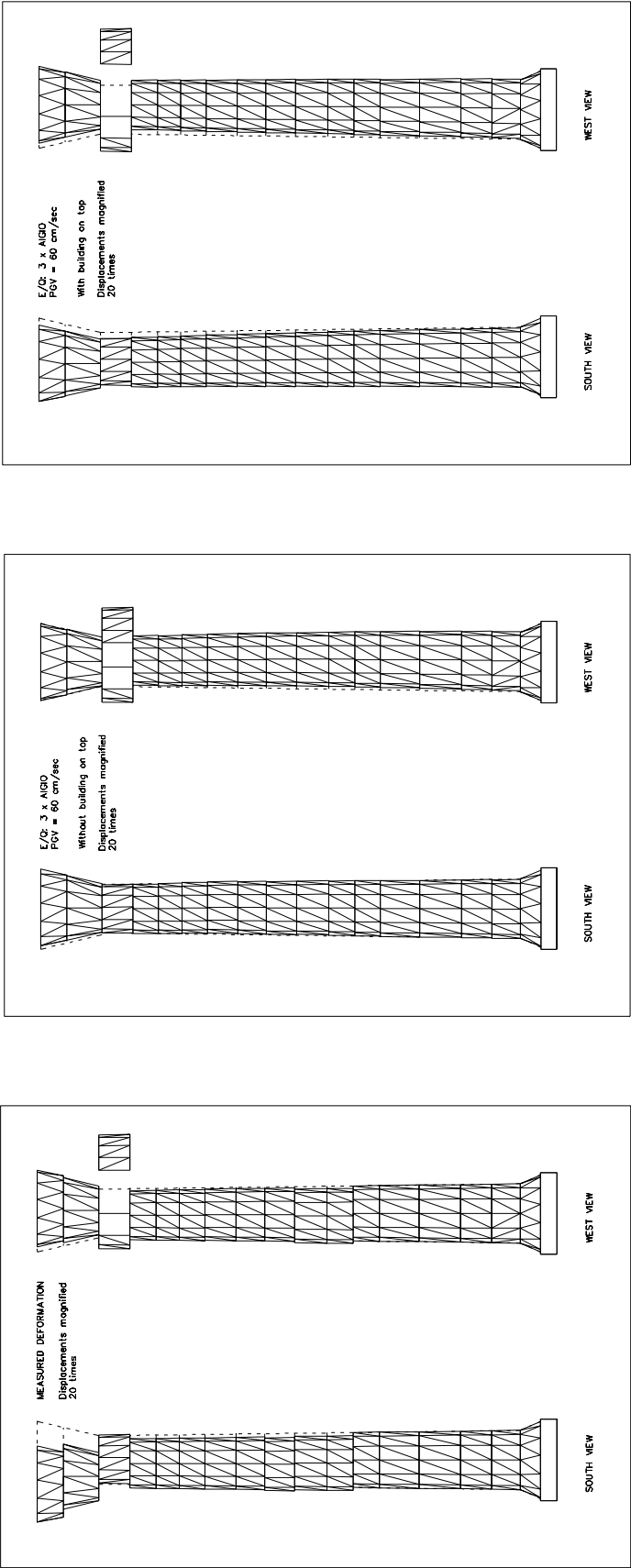
Σχ. 5.23. Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός του Αιγίου με  $PGV=60 \text{ cm/sec}$  (α) για ένα μόνο σεισμό και (β) για ακολουθία 3 διαδοχικών σεισμικών διεγέρσεων.



(α)

(β)

**Σχ. 5.24.** Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός του Αγίου με  $PGV=60 \text{ cm/sec}$  για ένα μόνο σεισμό (α) χωρίς κτίσμα και (β) με κτίσμα.



(α)

(β)

Σχ. 5.25. Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός του Αιγίου με  $PGV=60 \text{ cm/sec}$  σε ακολουθία 3 σεισμικών διεγέρσεων (α) χωρίς κτίσμα και (β) με κτίσμα.

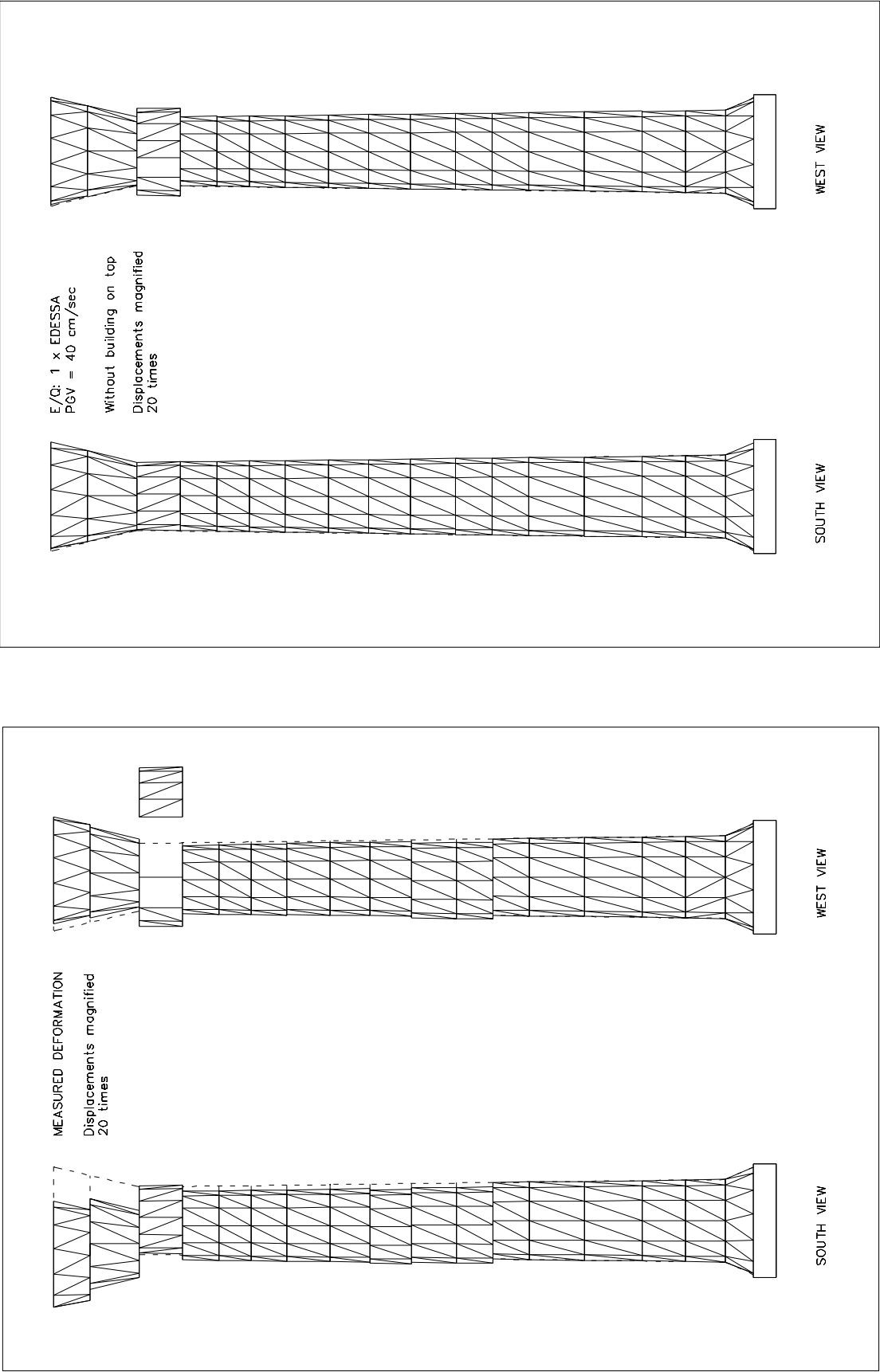
Η ύπαρξη του κτίσματος επί του επιστυλίου αυξάνει λίγο τις μετατοπίσεις των σπονδύλων για τη συγκεκριμένη σεισμική δόνηση με  $PGV=60$  cm/sec. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχ. 5.24 και 5.25 για έναν και τρεις σεισμούς, απ' όπου φαίνεται πως ακόμη και με την παρουσία του κτίσματος οι προβλεπόμενες παραμορφώσεις είναι συμβατές με τις πραγματικές.

Προκύπτει από τα παραπάνω ότι η υφιστάμενη παραμόρφωση στο μνημείο θα μπορούσε να έχει προκληθεί από μία ακολουθία 3-4 σεισμικών δονήσεων τύπου Αιγίου με μέγιστη εδαφική ταχύτητα περίπου 60 cm/sec, δηλαδή 1.50 φορές ισχυρότερων από το σεισμό που έπληξε το Αίγιο το 1995. Το ίδιο αποτέλεσμα θα μπορούσε να έχει προκληθεί και από ένα μεμονωμένο σεισμικό γεγονός, αρκετά όμως ισχυρότερο, με εδαφική ταχύτητα της τάξης των 80 cm/sec (2.00 φορές ισχυρότερο από το σεισμό του Αιγίου). Αντίθετα, μικρότεροι σεισμοί με  $PGV<40$  cm/sec προκαλούν μικρές μόνιμες μετατοπίσεις σπονδύλων και απαιτείται επανάληψη αρκετών τέτοιων σεισμών για να προκληθεί η υφιστάμενη κατάσταση.

#### **Σεισμός Γρίβας (καταγραφή Έδεσσας), 1990**

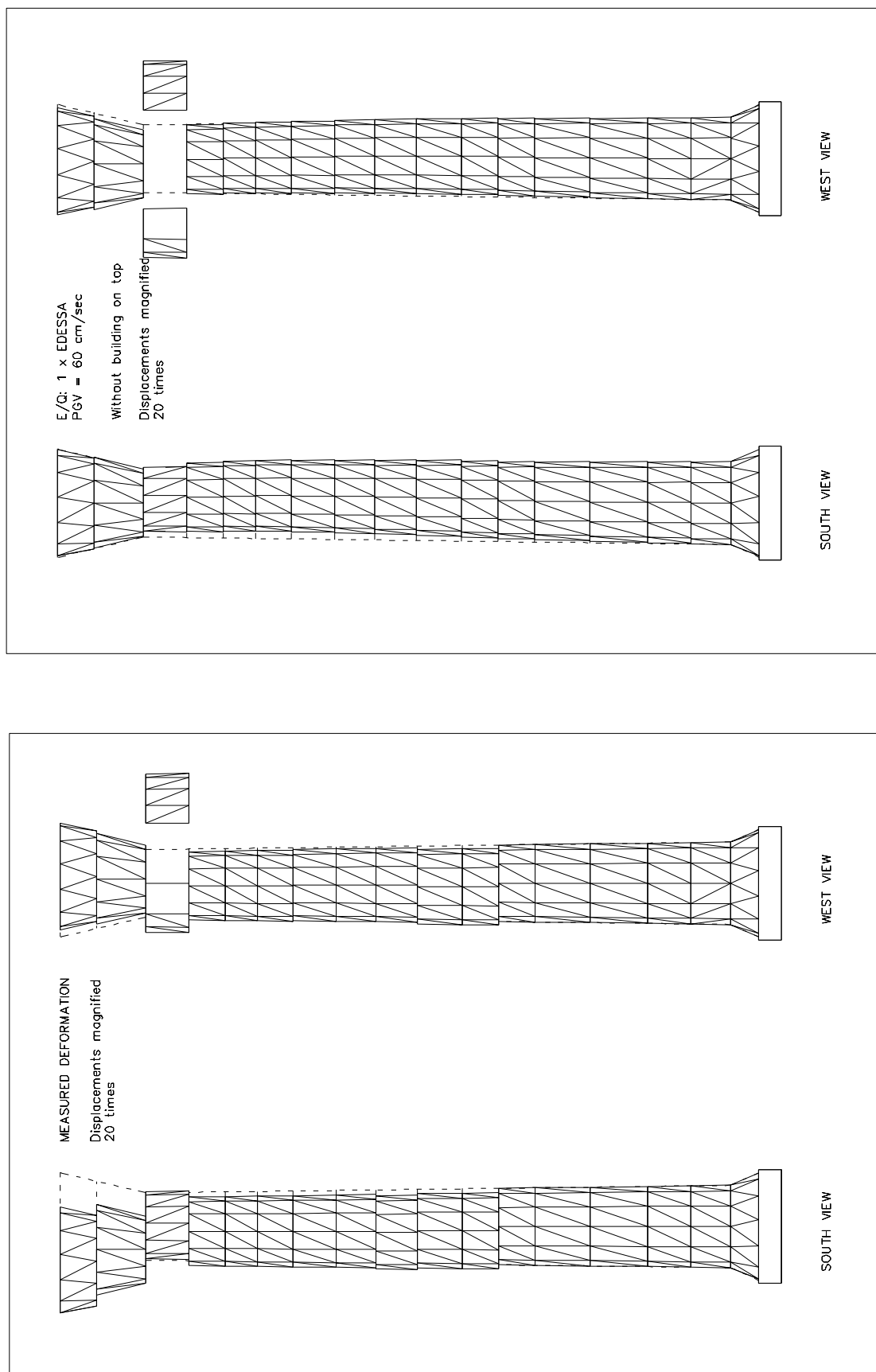
Η καταγραφή του σεισμού της Γρίβας (1990), που έγινε στην Έδεσσα, χαρακτηρίζεται από μία ακολουθία πολλών ημιτονικών παλμών περιόδου 0.65 sec περίπου (Σχ. 5.7). Η καταγραφή είναι αρκετά ασθενής ( $PGA=0.10$  g,  $PGV=10$  cm/sec, περίπου), εάν όμως μεγεθυνθεί κατά 4 φορές, έτσι ώστε  $PGV=40$  cm/sec, θα μπορούσε να αντιστοιχιστεί με το σεισμό του Αιγίου, αλλά με πολλούς ημιτονικούς παλμούς και μεγάλη διάρκεια. Η σύγκριση επομένως των αποτελεσμάτων μεταξύ του σεισμού του Αιγίου και του σεισμού της Γρίβας (Έδεσσα) οδηγεί σε συμπεράσματα σχετικά με την επιρροή της διάρκειας της ισχυρής σεισμικής δόνησης στην απόκριση του μνημείου.

Ο σεισμός της Γρίβας για  $PGV=40$  cm/sec (Σχ. 5.26) οδηγεί σε μικρές μόνιμες παραμορφώσεις που είναι ανάλογες με αυτές που προκαλεί ο σεισμός του Αιγίου για την ίδια τιμή  $PGV$  (Σχ. 5.18), αλλά αρκετά μικρότερες από τις μετρηθείσες στον κίονα. Η αύξηση της εδαφικής ταχύτητας του κραδασμού σε  $PGV=60$  cm/sec (Σχ. 5.27) αυξάνει σημαντικά τις μετατοπίσεις, όχι μόνο του κιονοκράνου και των δύο τμημάτων του σπονδύλου 14, αλλά και των υπολοίπων σπονδύλων σε όλο το ύψος του κίονα. Η μορφή και το μέγεθος της παραμόρφωσης είναι τώρα αρκετά κοντά στην υφιστάμενη κατάσταση. Σε σύγκριση με το σεισμό του Αιγίου με την ίδια εδαφική ταχύτητα (Σχ. 5.19), οι μόνιμες μετακινήσεις είναι αρκετά μεγαλύτερες, γεγονός που θα πρέπει να αποδοθεί αφ' ενός στη μεγαλύτερη διάρκεια και τις πολλές επαναλήψεις της ισχυρής σεισμικής δόνησης και αφ' ετέρου στη λίγο μεγαλύτερη περίοδο του σεισμού (0.65 sec έναντι 0.50 sec στο σεισμό του Αιγίου).

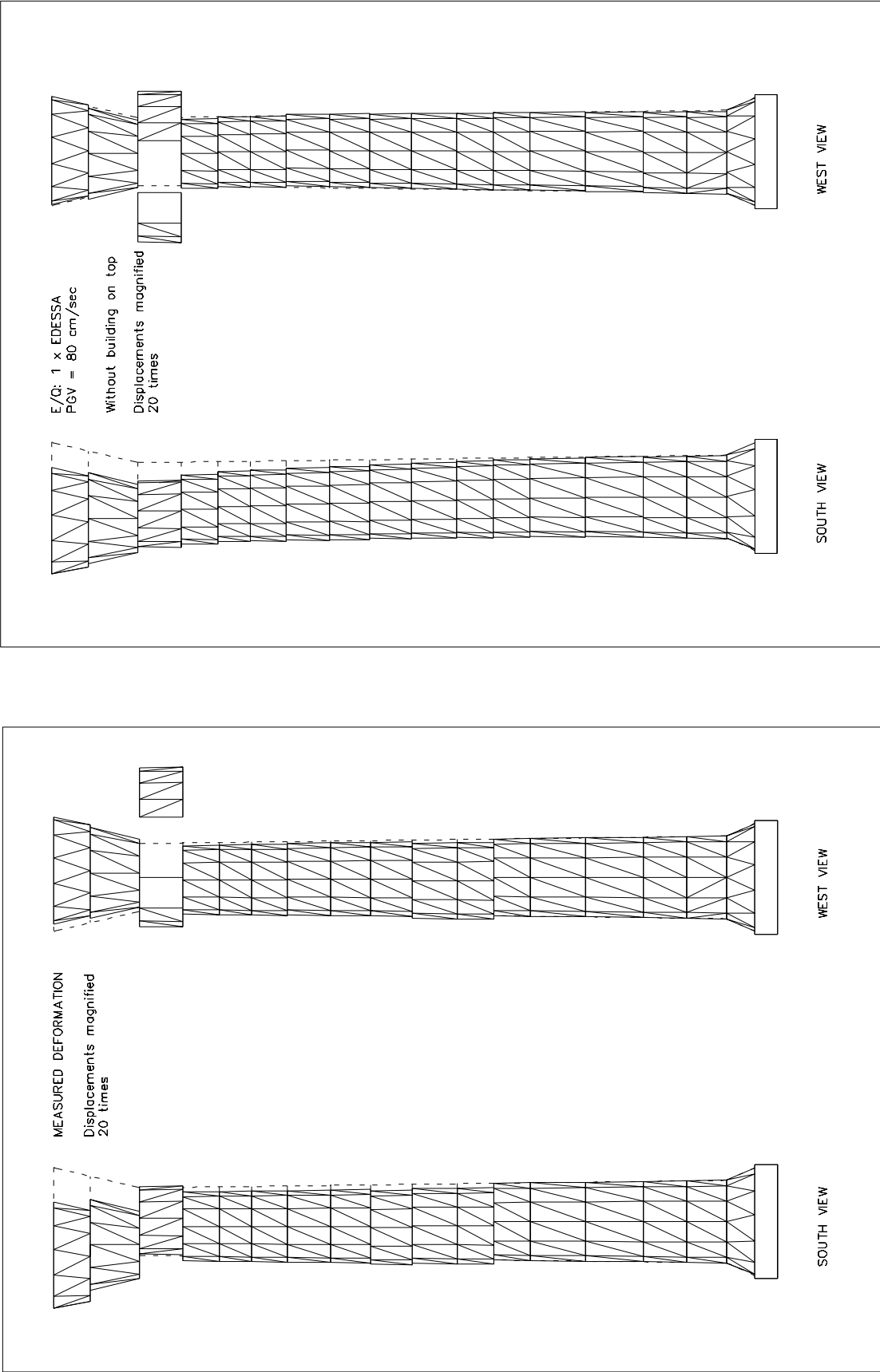


Σχ. 5.26. Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Γρίβας (Εδεσσα) με PGV=40 cm/sec.

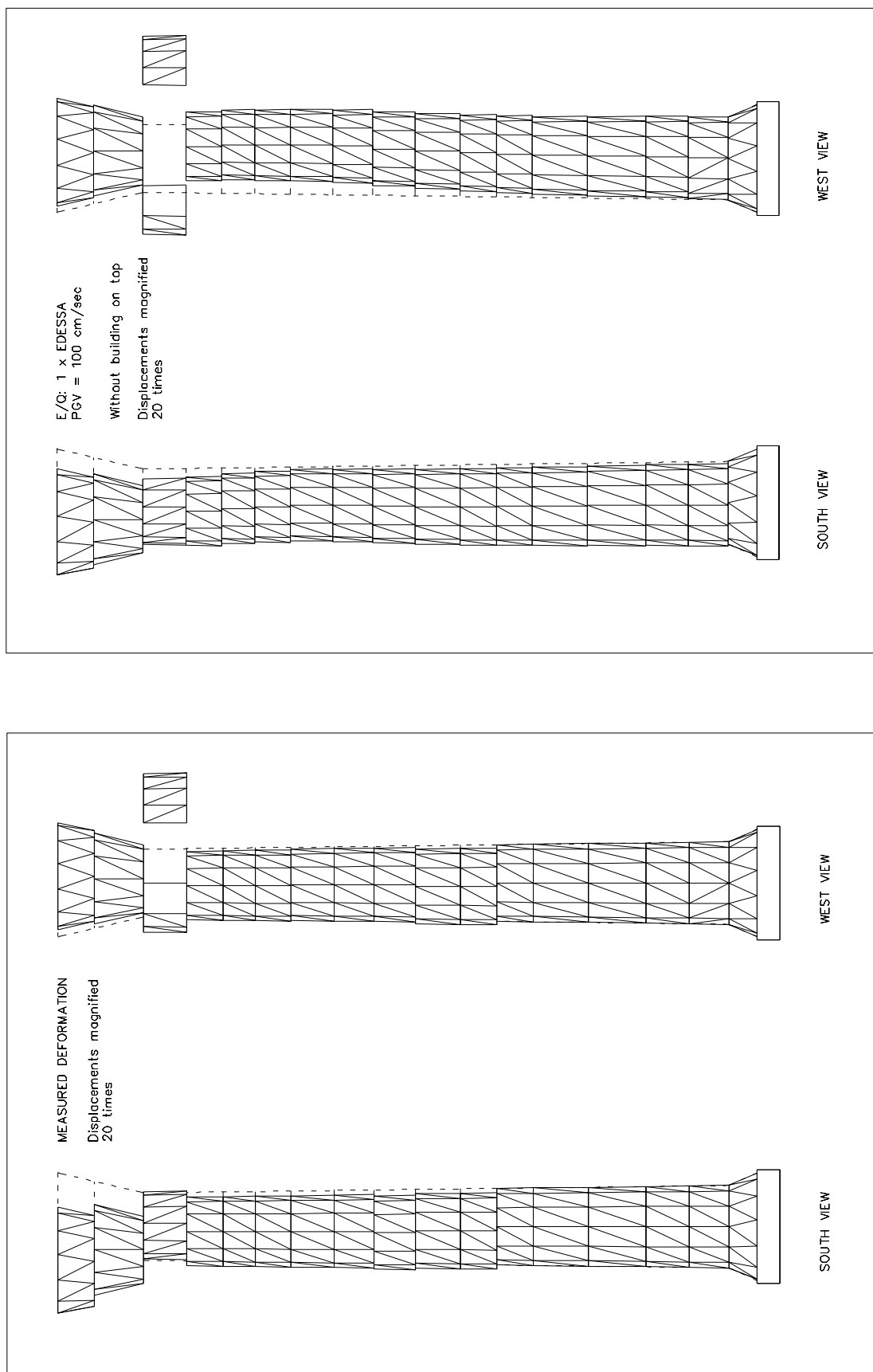




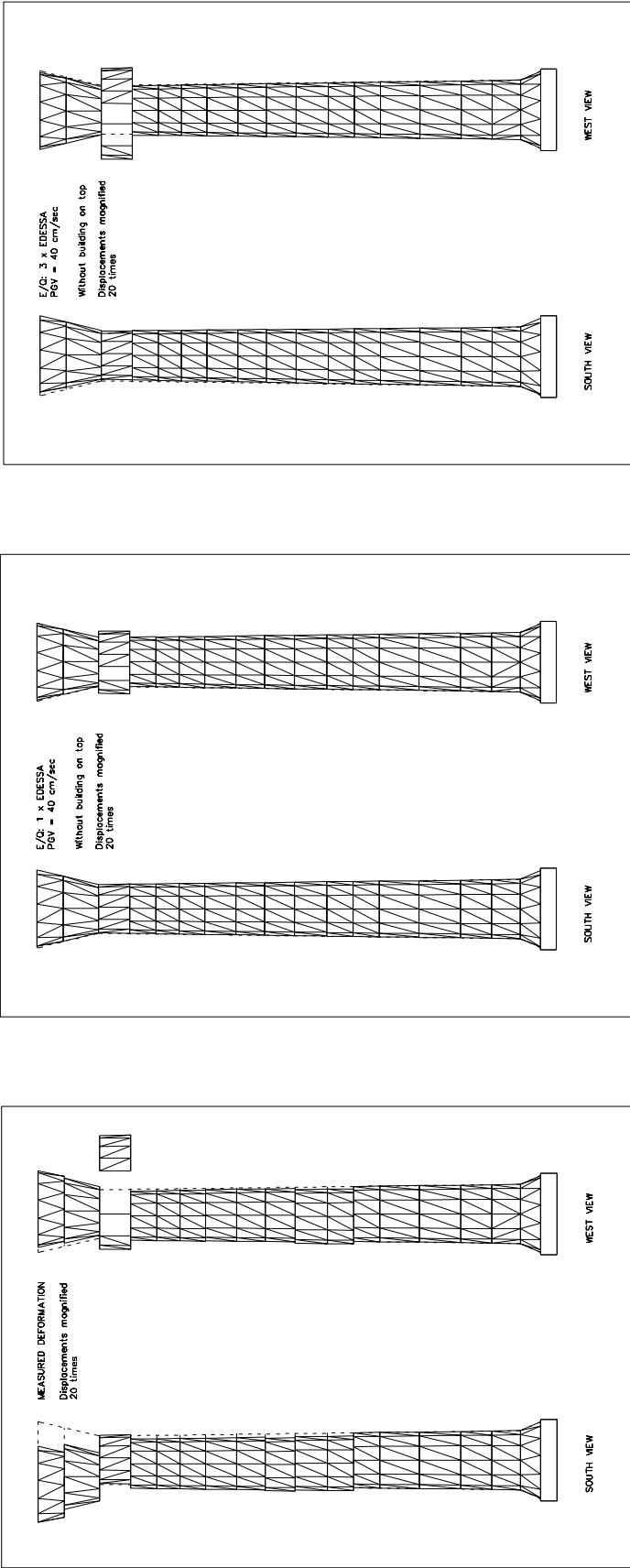
**Σχ. 5.27.** Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Γρίβας (Εδεσσα) με  $PGV=60 \text{ cm/sec}$ .



Σχ. 5.28. Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Γρίβας (Εδεσσα) με PGV=80 cm/sec.



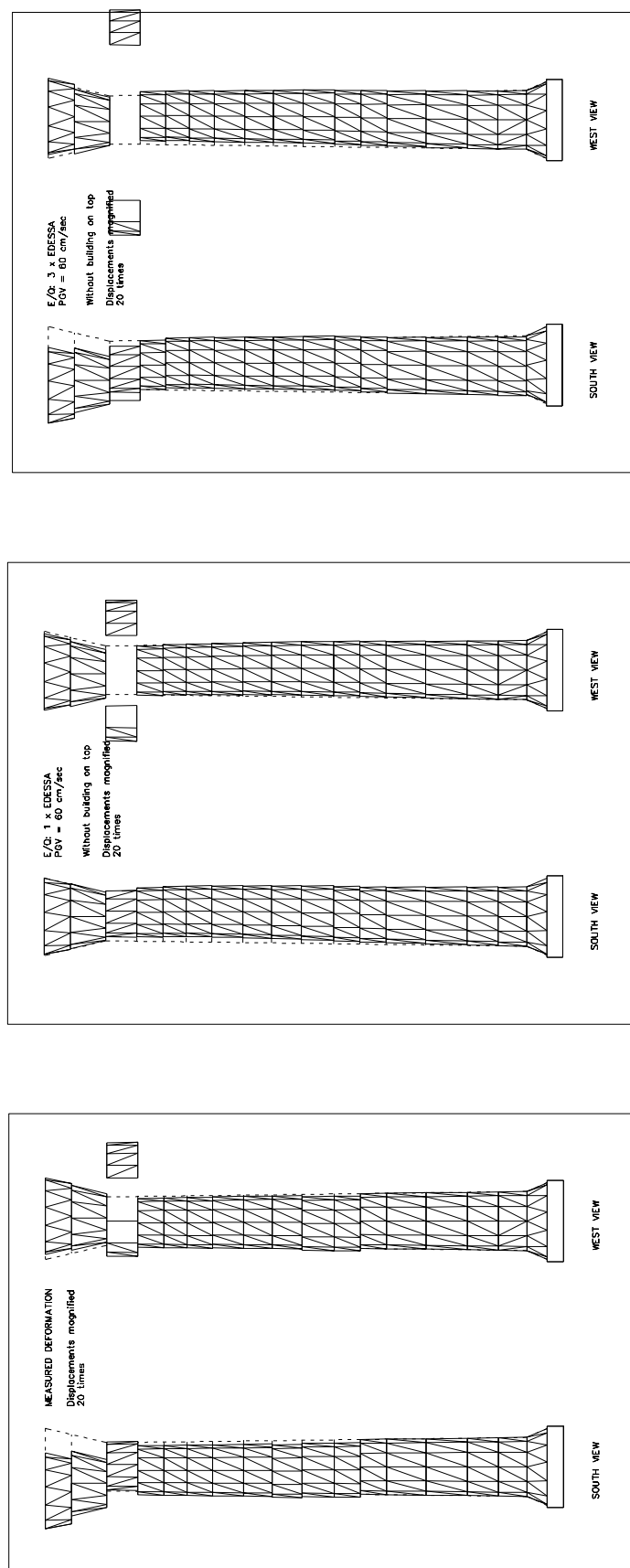
**Σχ. 5.29.** Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Γρίβας (Εδεσσα) με  $PGV=100$ .



(α)

(β)

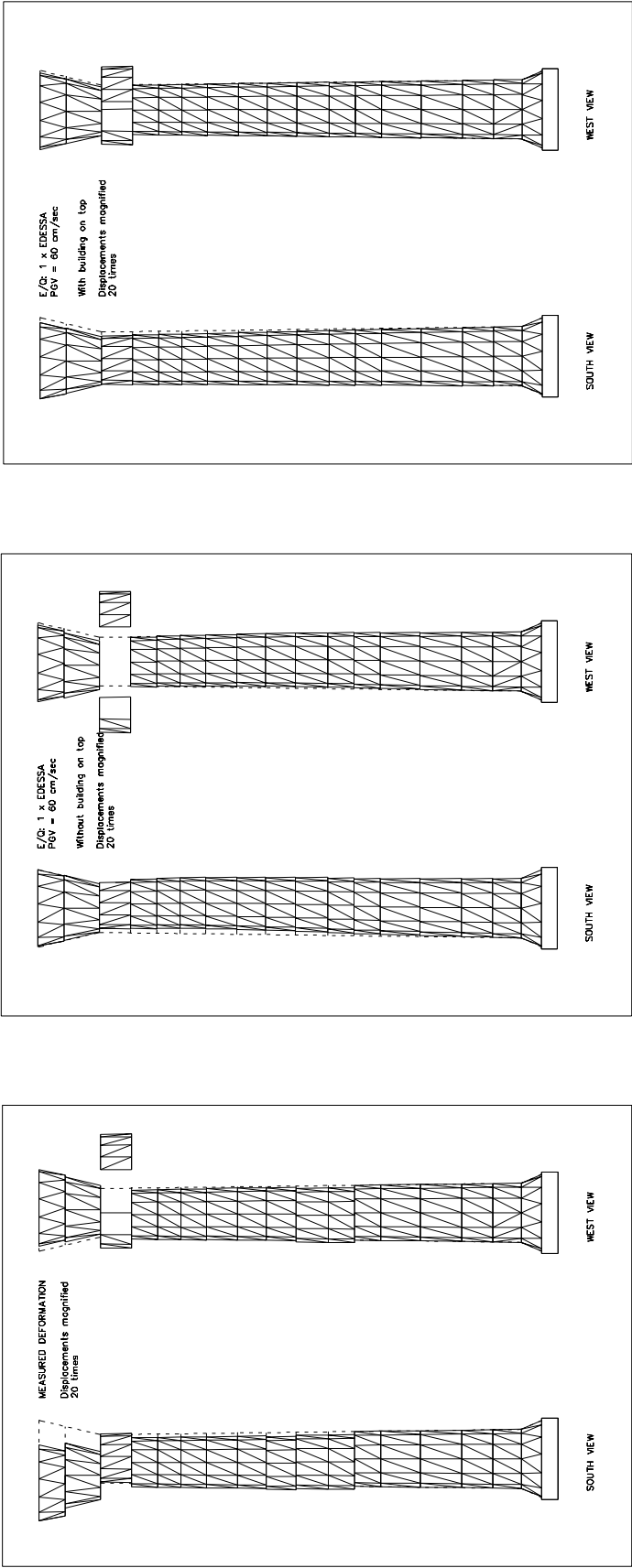
Σχ. 5.30. Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Γρίβας (Εδέσσα) με  $PGV=40\text{ cm/sec}$  (α) για ένα μόνο σεισμό και (β) για ακολουθία 3 διαδοχικών σεισμικών διεγέρσεων.



(α)

(β)

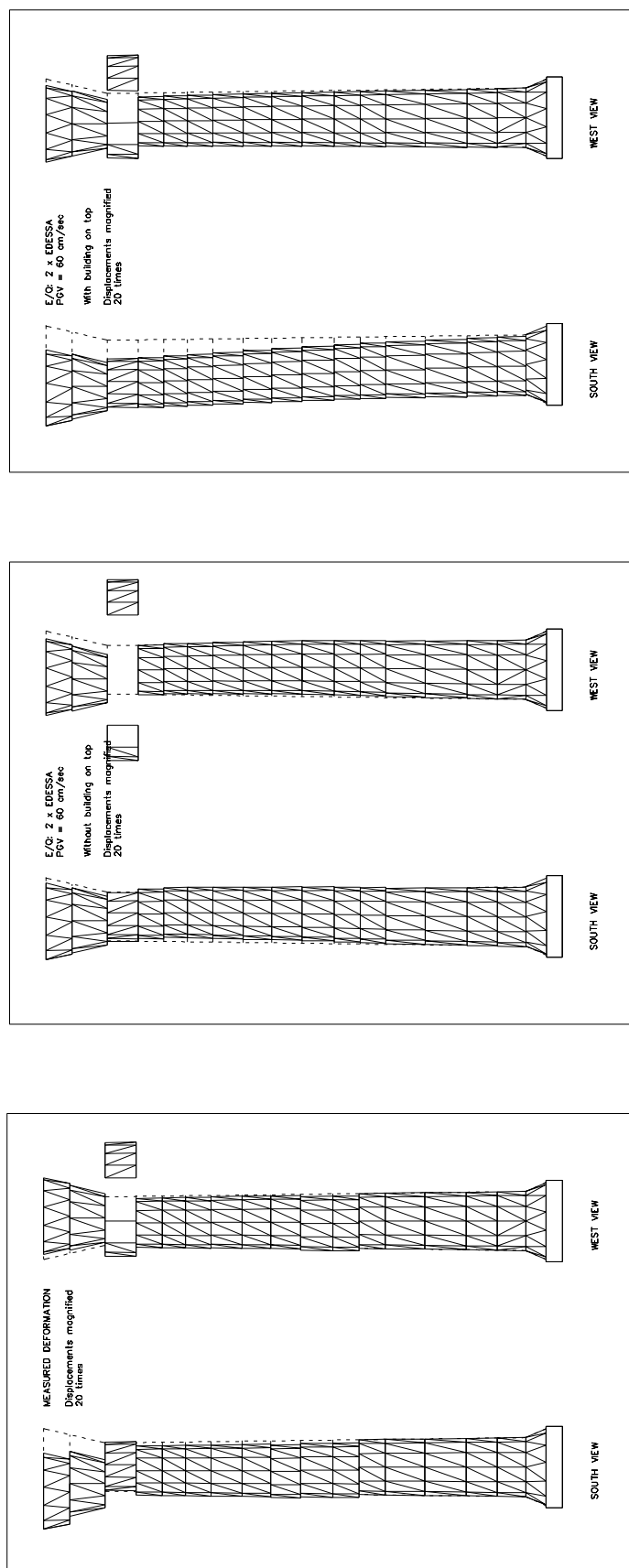
**Σχ. 5.31.** Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Γρίβας (Εδεσσα) με  $PGV=60 \text{ cm/sec}$  (α) για ένα μόνο σεισμό και (β) για ακολουθία 3 διαδοχικών σεισμικών διεγέρσεων.



(α)

(β)

Σχ. 5.32. Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Γρίβας (Εδεσσα) με PGV=60 cm/sec για ένα μόνο σεισμό (α) χωρίς κτίσμα και (β) με κτίσμα.



(α)

(β)

**Σχ. 5.33.** Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Γρίβας (Εδεσσα) με  $PGV=60 \text{ cm/sec}$  σε ακολουθία 2 σεισμικών διεγέρσεων (α) χωρίς κτίσμα και (β) με κτίσμα (για 3 σεισμικές διεγέρσεις, η κατασκευή με κτίσμα καταρρέει).

Αντίθετα, περαιτέρω αύξηση της εδαφικής ταχύτητας σε  $PGV=80$  cm/sec (Σχ. 5.28) οδηγεί σε εξαιρετικά μεγάλες παραμορφώσεις του ανώτερου τμήματος του κίονα, στη διαμήκη διεύθυνση, οι οποίες δεν είναι συμβατές με τις μετατοπίσεις που μετρήθηκαν. Παρόμοιο συμπέρασμα εξάγεται και για ακόμη ισχυρότερη δόνηση με  $PGV=100$  cm/sec, για την οποία οι προκαλούμενες μετατοπίσεις είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις πραγματικές, τόσο στη διαμήκη όσο και στην εγκάρσια διεύθυνση. Θεωρείται, επομένως, μάλλον απίθανο τέτοιοι ισχυροί σεισμοί να έχει πλήξει την Αθήνα.

Η επανάληψη 3 φορές της σεισμικής δόνησης με  $PGV=40$  cm/sec (Σχ. 5.30) αυξάνει τις μόνιμες μετατοπίσεις σε σύγκριση με το μεμονωμένο σεισμό, ιδιαίτερα σε ό,τι αφορά τα δύο τμήματα του σπασμένου σπονδύλου 14, οι οποίες είναι πλέον παραπλήσιες με τις υφιστάμενες. Παρόμοιο συμπέρασμα εξάγεται και για ακολουθία 3 σεισμικών δονήσεων με  $PGV=60$  cm/sec, η οποία οδηγεί επίσης σε παραμόρφωση του κίονα κοντά στην υφιστάμενη κατάσταση, εκτός από τη μεγάλη μετατόπιση των δύο τμημάτων του σπονδύλου 14 (Σχ. 5.31). Είναι αξιοσημείωτο ότι σε αυτή την περίπτωση ακόμη και οι μετατοπίσεις των δύο τμημάτων του κιονοκράνου είναι πολύ παρόμοιες με τις πραγματικές. Έτσι, η σημερινή κατάσταση θα μπορούσε να είναι το αποτέλεσμα μιας ακολουθίας σεισμών τύπου Έδεσσας με εδαφική ταχύτητα  $PGV=40$  έως  $60$  cm/sec.

Η ύπαρξη του κτίσματος επί του επιστυλίου μειώνει τις μετατοπίσεις για το μεμονωμένο σεισμό με  $PGV=60$  cm/sec (Σχ. 5.32), ιδιαίτερα σε ό,τι αφορά την ολίσθηση των δύο τμημάτων του σπονδύλου 14, αλλά η παραμορφωμένη κατάσταση εξακολουθεί να είναι συμβατή με την πραγματική. Αντίθετα, στην περίπτωση της ακολουθίας των 3 σεισμικών δονήσεων, η κατασκευή με κτίσμα καταρρέει. Στο Σχ. 5.33, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για ακολουθία 2 σεισμών, που δείχνουν σημαντικές παραμορφώσεις στη διαμήκη διεύθυνση, μη συμβατές με τη σημερινή κατάσταση του κίονα.

Συμπερασματικά, φαίνεται ότι σεισμικές δονήσεις της μορφής της καταγραφής της Έδεσσας (αρκετοί ημιτονικοί παλμοί περιόδου περίπου  $0.60$  sec) είναι πιθανόν να έχουν πλήξει την Αθήνα, αφού οδηγούν σε παραμόρφωση του κίονα 7.6 πολύ παρόμοια με αυτήν που μετρήθηκε. Για ένα μεμονωμένο σεισμό, η μέγιστη εδαφική ταχύτητα θα μπορούσε να είναι ακόμη και  $60$  cm/sec. Αντίθετα, για επανάληψη σεισμικών δονήσεων, η ένταση της δόνησης θα πρέπει να ήταν μικρότερη, ιδιαίτερα εάν υπήρχε το κτίσμα επί της κατασκευής. Ισχυρότεροι σεισμοί τέτοιου τύπου, με ταχύτητα της τάξης των  $80$  έως  $100$  cm/sec, δεν φαίνεται πιθανόν να έχουν συμβεί, αφού οδηγούν σε παραμορφώσεις που δεν είναι συμβατές με την πραγματική κατάσταση.



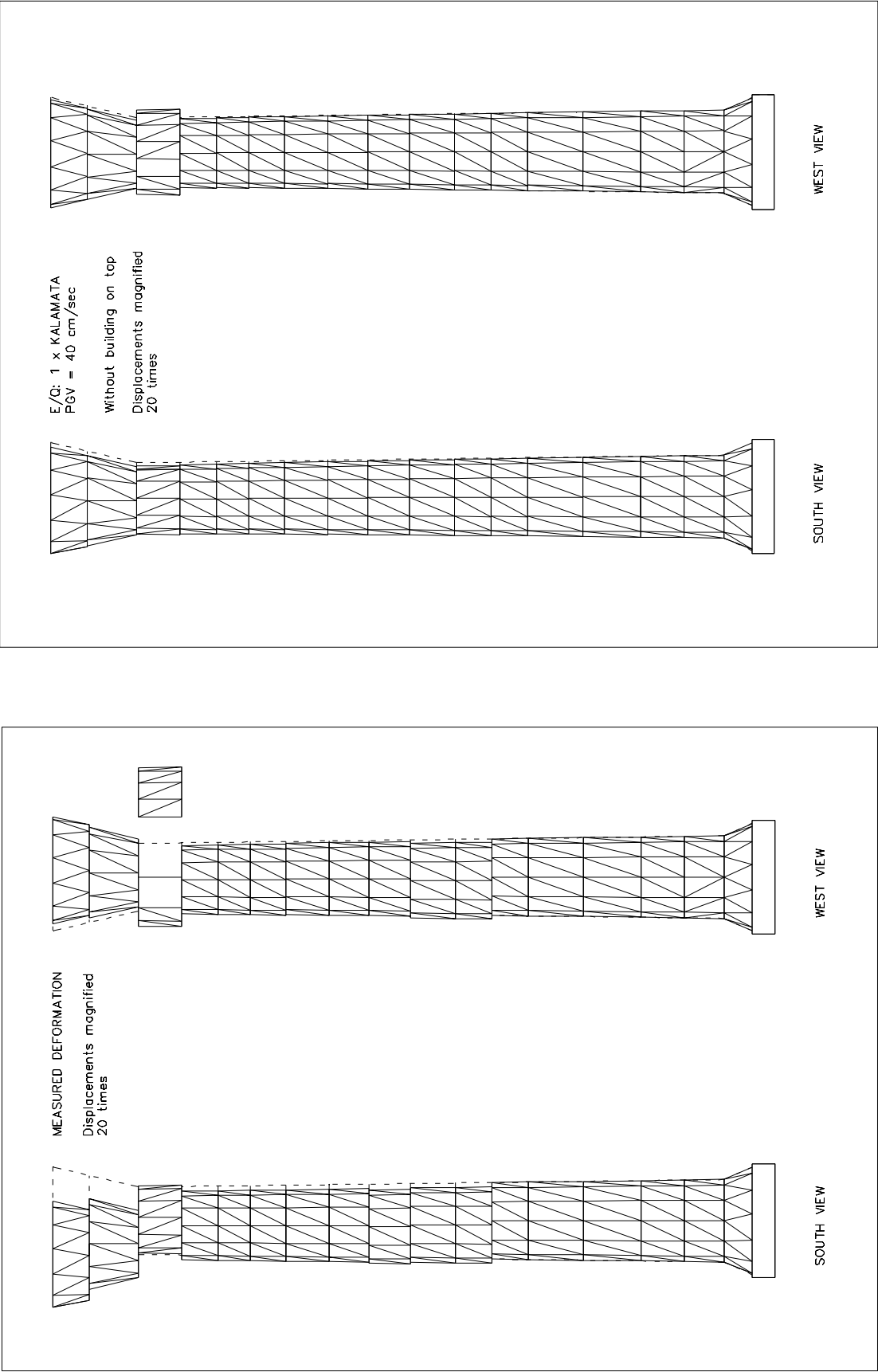
**Σεισμός Καλαμάτας, 1986**

Ο σεισμός της Καλαμάτας (1986) είναι ένας τυπικός σεισμός κοντινού πεδίου με πλούσιο φασματικό περιεχόμενο (Σχ. 5.8). Τέτοιου τύπου σεισμοί εκτιμάται ότι μπορούν να συμβούν στην περιοχή της Αθήνας. Ο σεισμός είχε μέγιστη εδαφική ταχύτητα 32 cm/sec στη διεύθυνση B-N και 23 cm/sec στη διεύθυνση A-Δ.

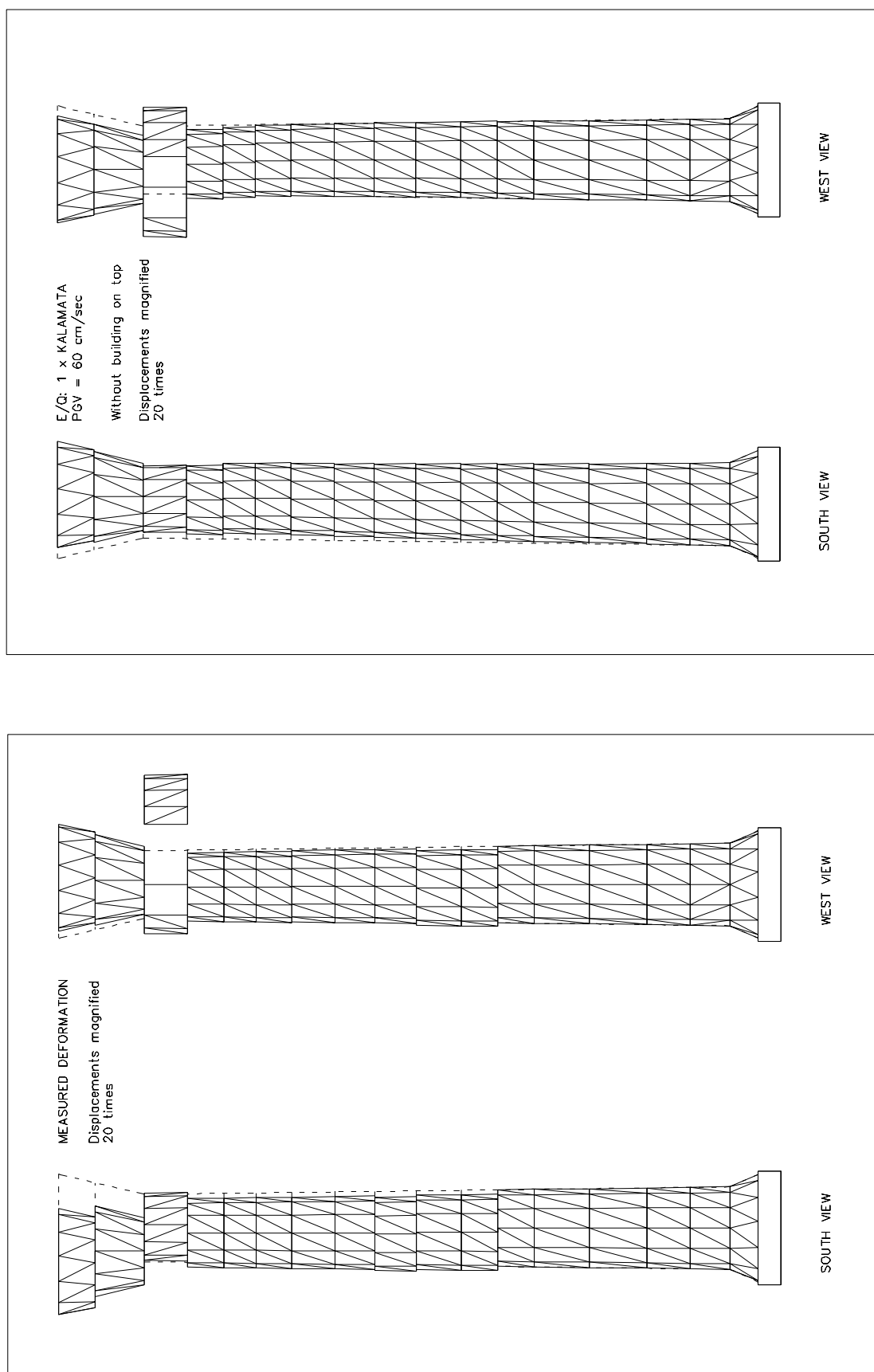
Στο Σχ. 5.34 δίνονται οι παραμορφώσεις του κίονα 7.6 για μέγιστη εδαφική ταχύτητα  $PGV=40$  cm/sec, που αντιστοιχεί σε μεγέθυνση του σεισμού κατά 1.5 φορά περίπου. Η παραμόρφωση του κίονα είναι συμβατή με τις μετατοπίσεις που μετρήθηκαν στο μνημείο, αλλά οι τιμές των μετακινήσεων είναι μικρότερες. Τα αποτελέσματα πλησιάζουν περισσότερο την πραγματική κατάσταση εάν η εδαφική ταχύτητα μεγεθυνθεί στην τιμή  $PGV=60$  cm/sec (Σχ. 5.35), δηλαδή περίπου 2 φορές ισχυρότερη δόνηση απ' ό,τι ο σεισμός του 1986.

Περαιτέρω αύξηση της έντασης της δόνησης σε  $PGV=80$  cm/sec (Σχ. 5.36) δεν οδηγεί σε σημαντικά μεγαλύτερες παραμορφώσεις, εκτός από τις αρκετά μεγάλες μετατοπίσεις των δύο τμημάτων του σπασμένου σπονδύλου 14. Η συμπεριφορά αυτή, ότι δηλαδή οι μόνιμες μετακινήσεις των σπονδύλων για  $PGV=80$  cm/sec είναι παρόμοιες με αυτές για  $PGV=60$  cm/sec, οφείλεται στη μη γραμμικότητα του φαινομένου και μπορεί να ανατραπεί με μικρή αλλαγή των παραμέτρων. Για το λόγο αυτό, θεωρούμε ότι το όριο της εδαφικής ταχύτητας για τη δημιουργία των υφιστάμενων παραμορφώσεων του κίονα από ένα μεμονωμένο σεισμό τύπου Καλαμάτας είναι περίπου 60 cm/sec, χωρίς όμως να αποκλείεται ότι οι μετακινήσεις αυτές μπορεί να προκλήθηκαν από ένα αρκετά ισχυρότερο σεισμό. Σημειώνεται ότι εάν αυξηθεί ακόμη περισσότερο η εδαφική ταχύτητα και φθάσει την τιμή  $PGV=100$  cm/sec προκύπτει μία σημαντική μετατόπιση των ανώτερων σπονδύλων στην εγκάρσια διεύθυνση, που δεν είναι συμβατή με την υφιστάμενη κατάσταση (Σχ. 5.37).

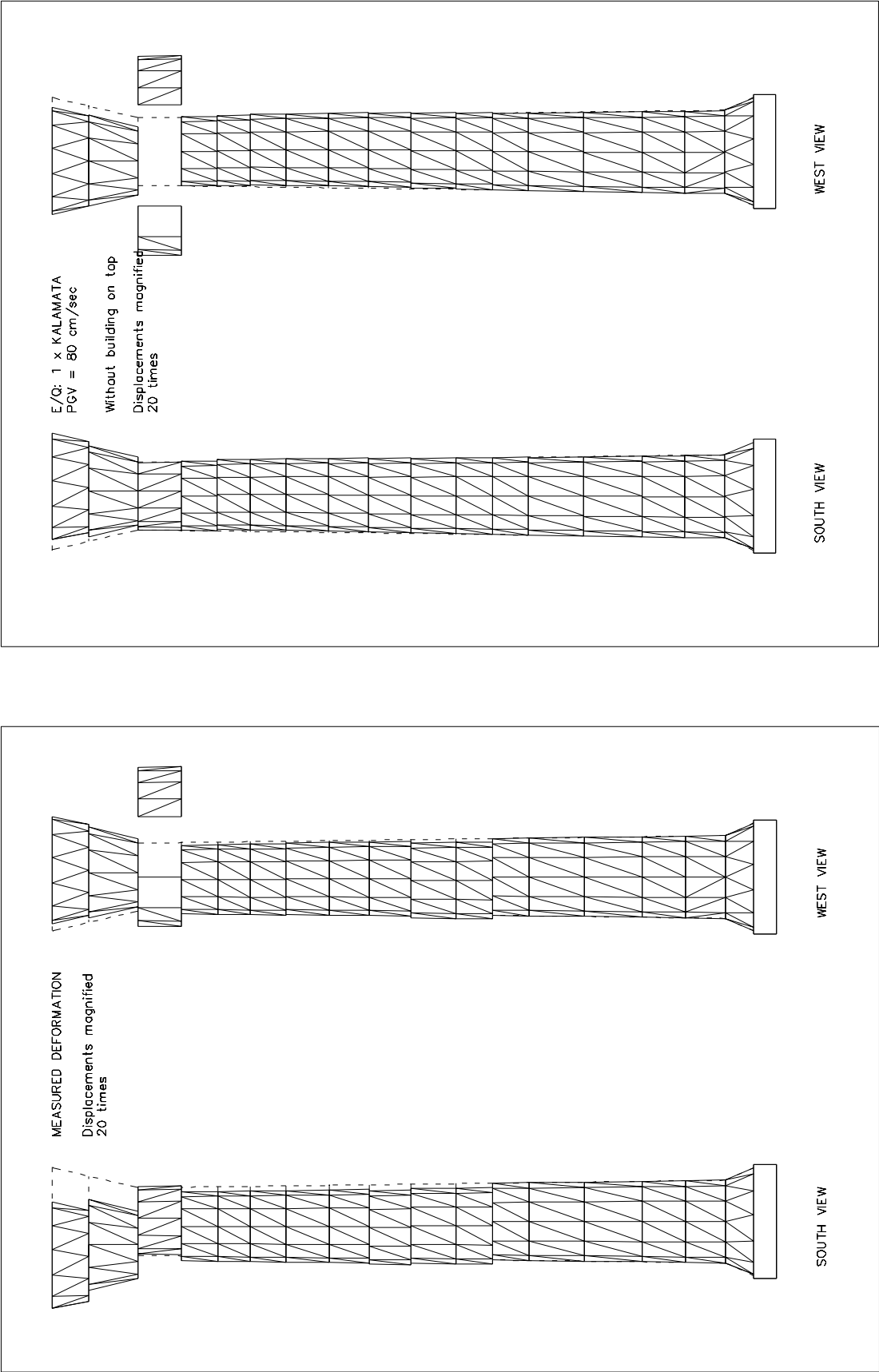
Η καταπόνηση της κατασκευής με μία ακολουθία 3 σεισμικών δονήσεων με  $PGV=40$  cm/sec (Σχ. 5.38) οδηγεί σε αύξηση των μετακινήσεων των δύο τμημάτων του σπασμένου σπονδύλου και η τελική παραμορφωμένη εικόνα του κίονα είναι αρκετά κοντά στην πραγματική. Αντίθετα, επανάληψη 3 φορές του σεισμού με  $PGV=60$  cm/sec (Σχ. 5.39) οδηγεί σε σημαντικές μετατοπίσεις του κιονόκρανου στην εγκάρσια διεύθυνση και των δύο τμημάτων του σπονδύλου 14, αρκετά μεγαλύτερες από τις μετακινήσεις που εμφανίζονται σήμερα στην κατασκευή. Επίσης, η μορφή παραμόρφωσης του ανώτερου μισού τμήματος του κίονα στην εγκάρσια διεύθυνση δεν συμβαδίζει με την πραγματική κατάσταση.



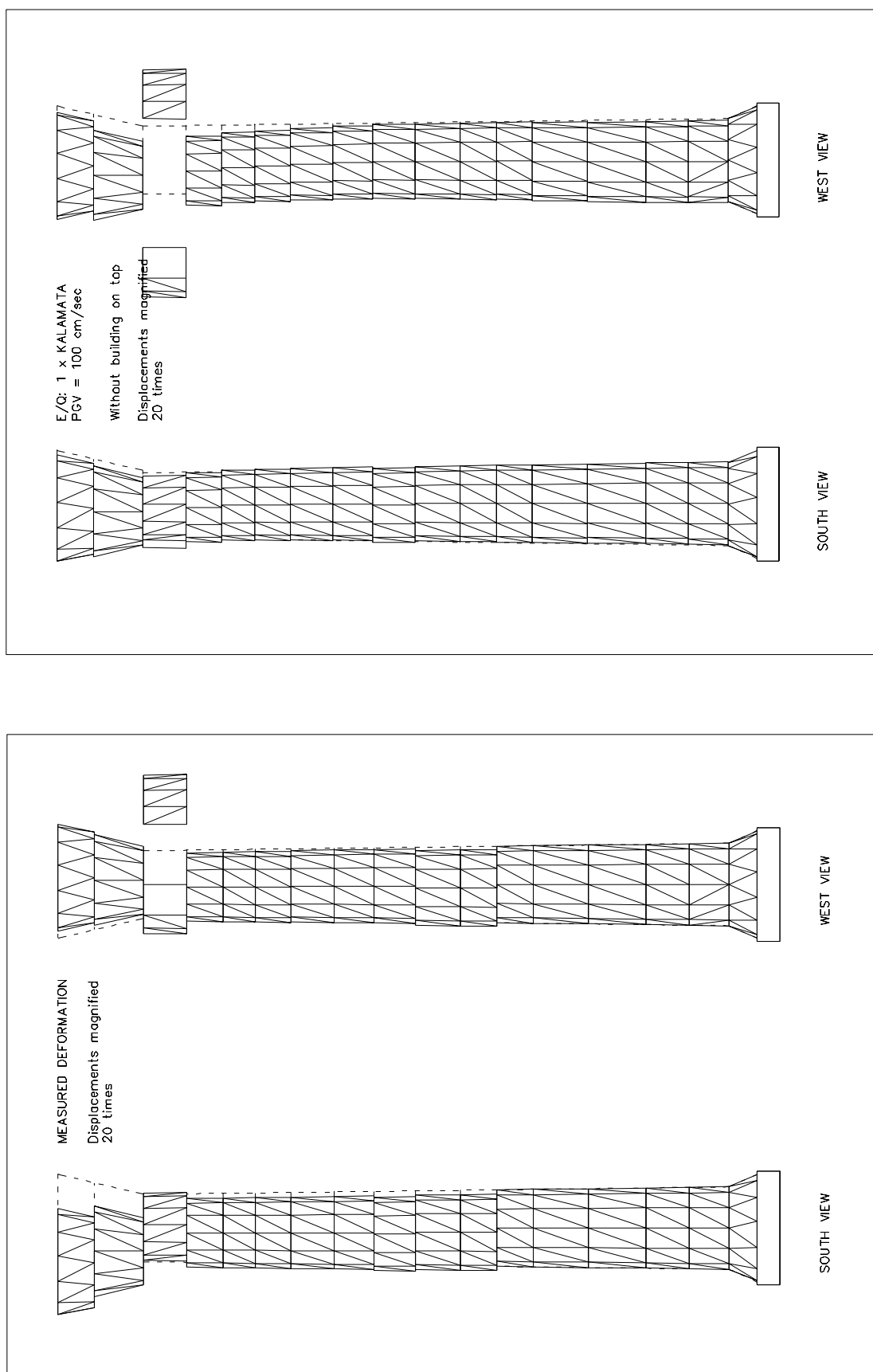
**Σχ. 5.34.** Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Καλαμάτας (Νομαρχία) με  $PGV=40 \text{ cm/sec}$ .



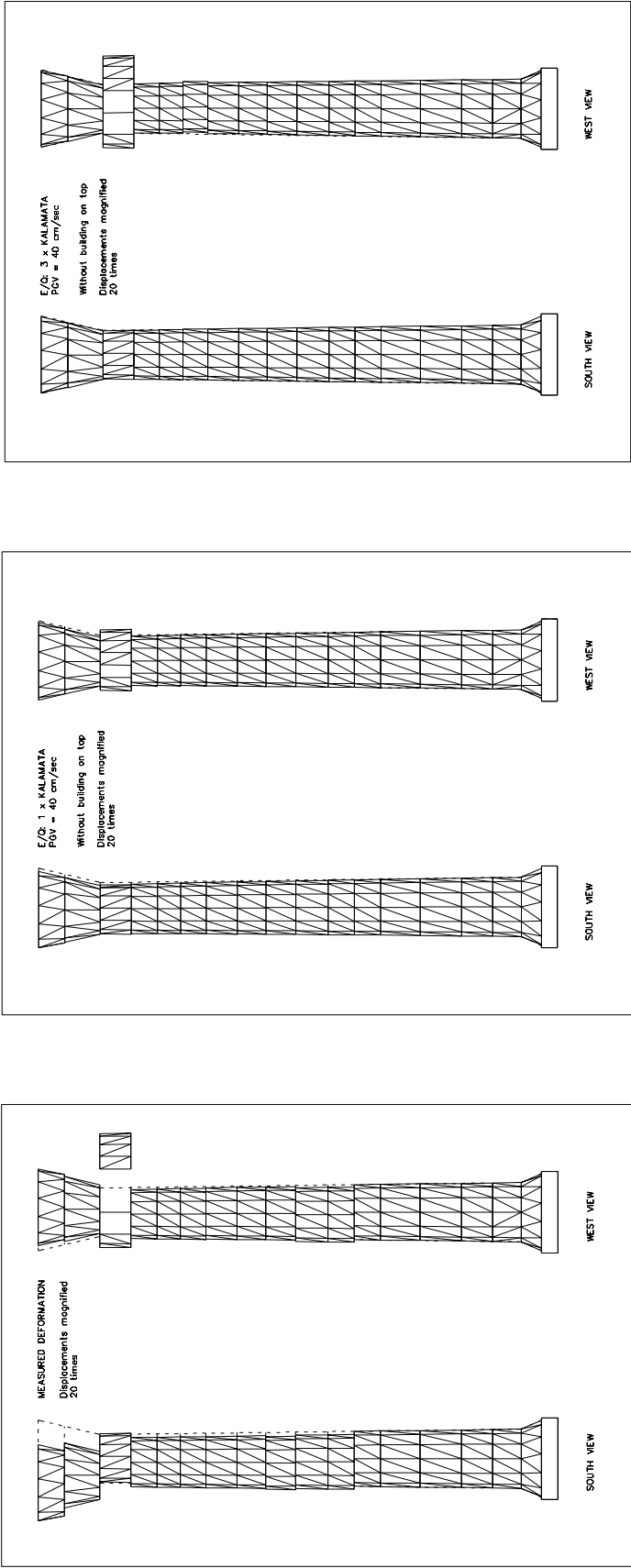
**Σχ. 5.35.** Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Καλαμάτας (Νομαρχία) με PGV=60 cm/sec.



Σχ. 5.36. Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Καλαμάτας (Νομαρχία) με PGV=80 cm/sec.



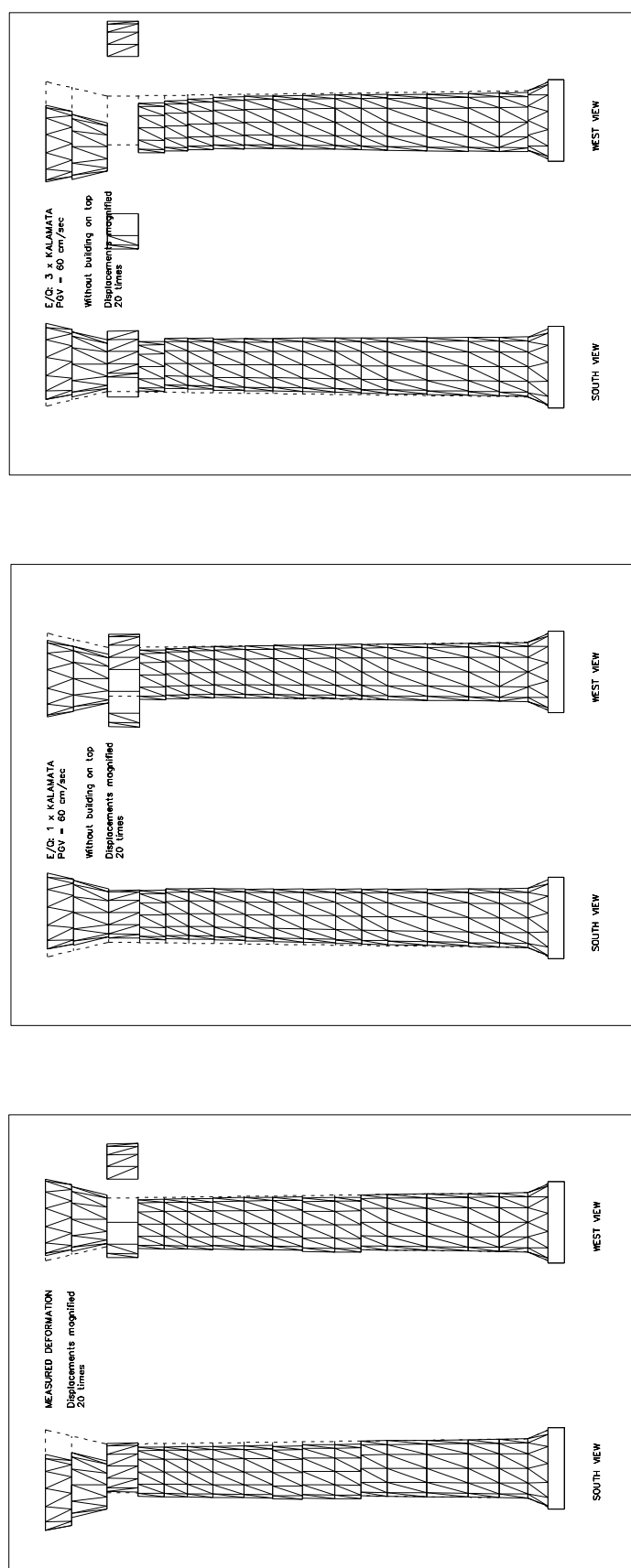
**Σχ. 5.37.** Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Καλαμάτας (Νομαρχία) με  $PGV=100\text{ cm/sec}$ .



(α)

(β)

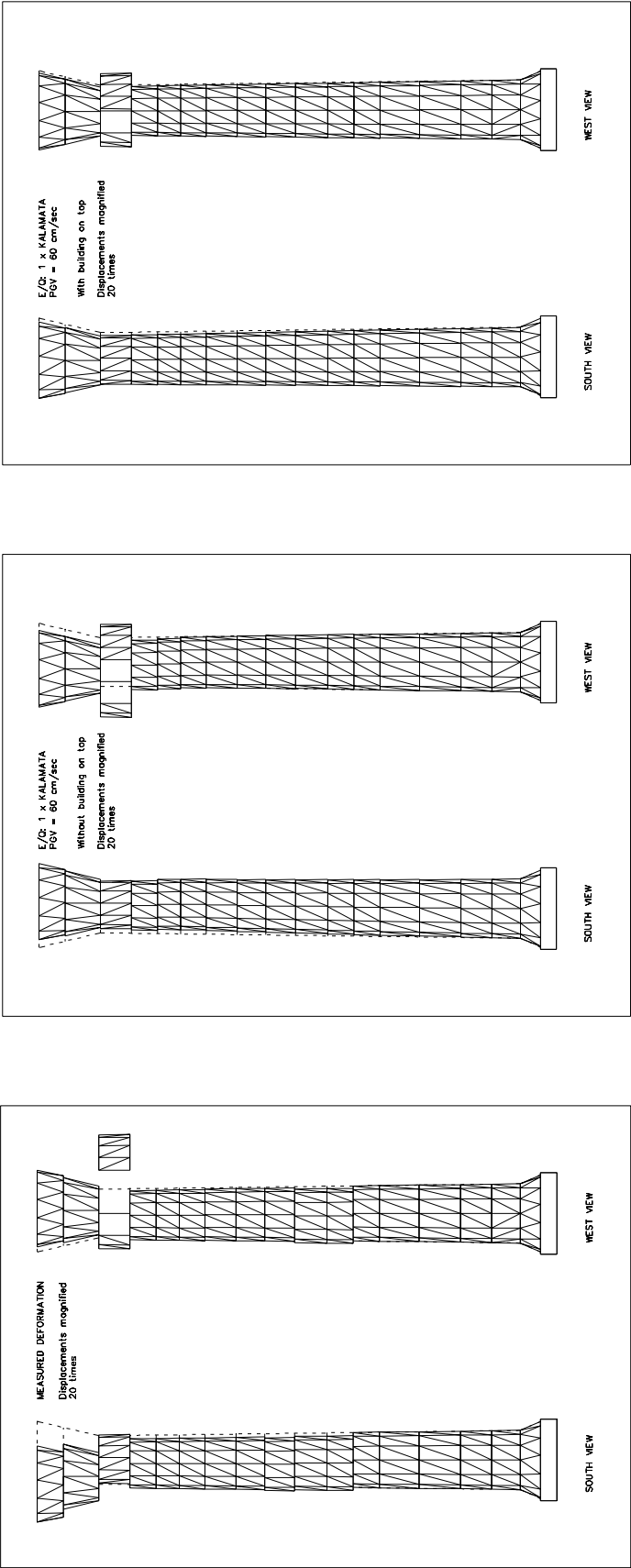
Σχ. 5.38. Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Καλαμάτας (Νομαρχία) με  $PGV=40\text{ cm/sec}$  (α) για ένα μόνο σεισμό και (β) για ακολουθία 3 διαδοχικών σεισμικών διεγέρσεων.



(α)

(β)

**Σχ. 5.39.** Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Καλαμάτας (Νομαρχία) με  $PGV=60 \text{ cm/sec}$  (α) για ένα μόνο σεισμό και (β) για ακολουθία 3 διαδοχικών σεισμικών διεγέρσεων.

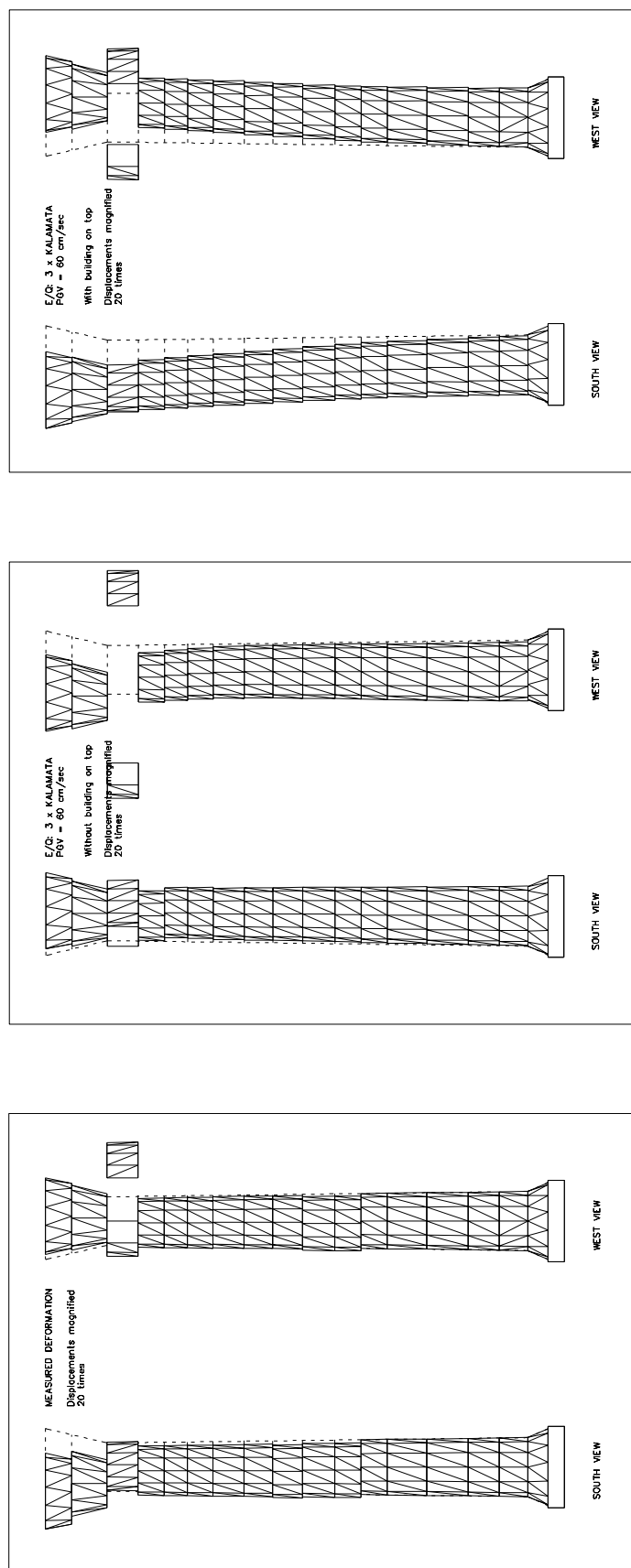


(α)

(β)

Σχ. 5.40. Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Καλαμάτας (Νομαρχία) με PGV=60 cm/sec για ένα μόνο σεισμό (α) χωρίς κτίσμα και (β) με κτίσμα.





(α)

(β)

**Σχ. 5.41.** Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Καλαμάτας (Νομαρχία) με  $PGV=60 \text{ cm/sec}$  σε ακολουθία 3 σεισμικών διεγέρσεων (α) χωρίς κτίσμα και (β) με κτίσμα.

Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και εάν ληφθεί υπόψη η επιρροή του κτίσματος επί του επιστυλίου. Στο Σχ. 5.40 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για ένα μόνο σεισμό με  $PGV=60$  cm/sec, όπου φαίνεται ότι το κτίσμα μειώνει τις μόνιμες μετατοπίσεις των σπονδύλων, αλλά η τελική περαμόρφωση του κίονα εξακολουθεί να είναι αρκετά παρόμοια με την υφιστάμενη. Αντίθετα, στην περίπτωση της ακολουθίας των 3 σεισμικών διεγέρσεων με  $PGV=60$  cm/sec (Σχ. 5.41) η ύπαρξη του κτίσματος οδηγεί σε αύξηση των μετατοπίσεων των σπονδύλων, οι οποίες τώρα είναι πολύ μεγαλύτερες από τις πραγματικές.

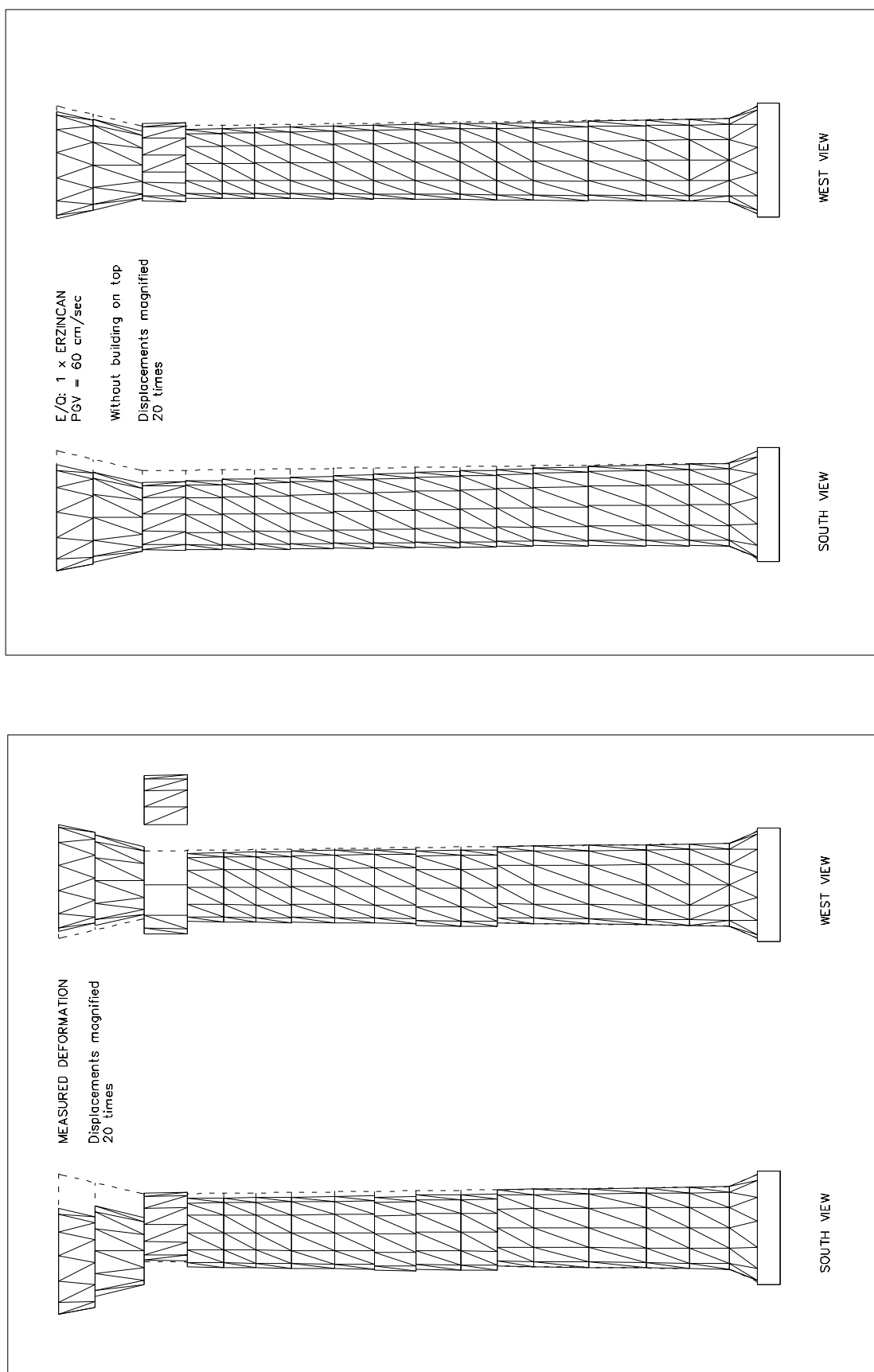
Συμπερασματικά, κρίνοντας από τη μόνιμη παραμόρφωση του κίονα φαίνεται πως σεισμοί τύπου Καλαμάτας είναι πιθανόν να έχουν συμβεί στην Αθήνα με μέγιστη εδαφική ταχύτητα  $PGV \approx 60$  cm/sec, για ένα μόνο σεισμικό γεγονός, και  $PGV \approx 40$  cm/sec για ακολουθία 3-4 τέτοιου τύπου σεισμών.

### **Σεισμός Erzincan, 1992**

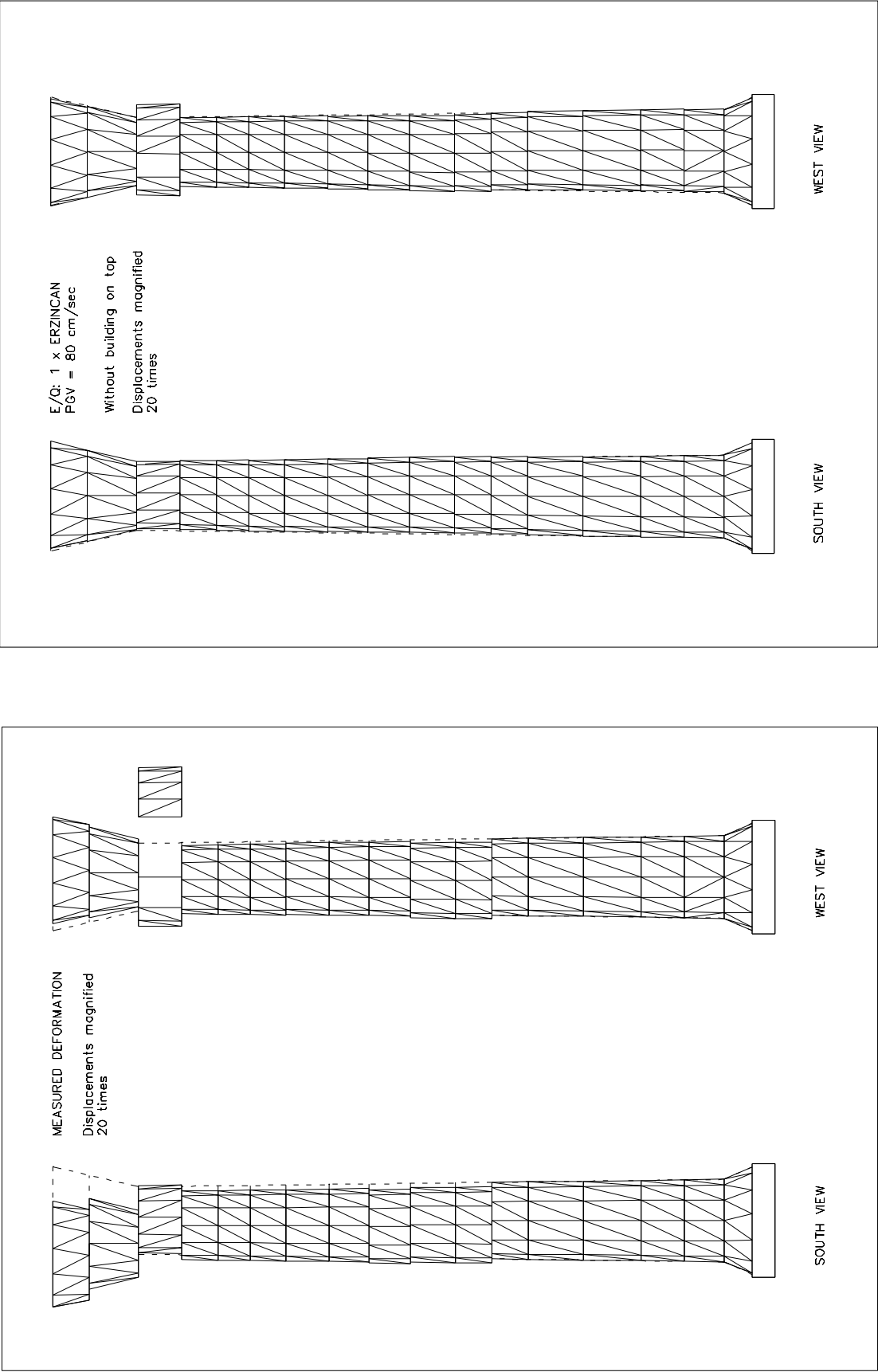
Ο σεισμός του Erzincan (1992) χαρακτηρίζεται από έναν ισχυρό παλμό περιόδου 2.00 sec και μέγιστης επιτάχυνσης 0.50 g περίπου (Σχ. 5.9). Πρόκειται για μία πολύ ισχυρή δόνηση, η οποία λόγω της μεγάλης περιόδου και της μεγάλης εδαφικής ταχύτητας (84 cm/sec στη διεύθυνση Α-Δ και 64 cm/sec στη διεύθυνση Β-Ν) προκαλεί σημαντικές ζημιές στους κίονες του Ολυμπίου.

Πράγματι, το σύστημα των δύο κίωνων με το επιστύλιο καταρρέει όταν υποβληθεί σε αυτή τη σεισμική δόνηση με  $PGV=40$  cm/sec (βλ. Σχ. 5.17), δηλαδή περίπου το  $\frac{1}{2}$  της πραγματικής καταγραφής. Η κατασκευή παραμένει ευσταθής για  $PGV=60$  cm/sec και  $PGV=80$  cm/sec (Σχ. 5.42 και 5.43 αντίστοιχα) και καταρρέει και πάλι για  $PGV=100$  cm/sec.

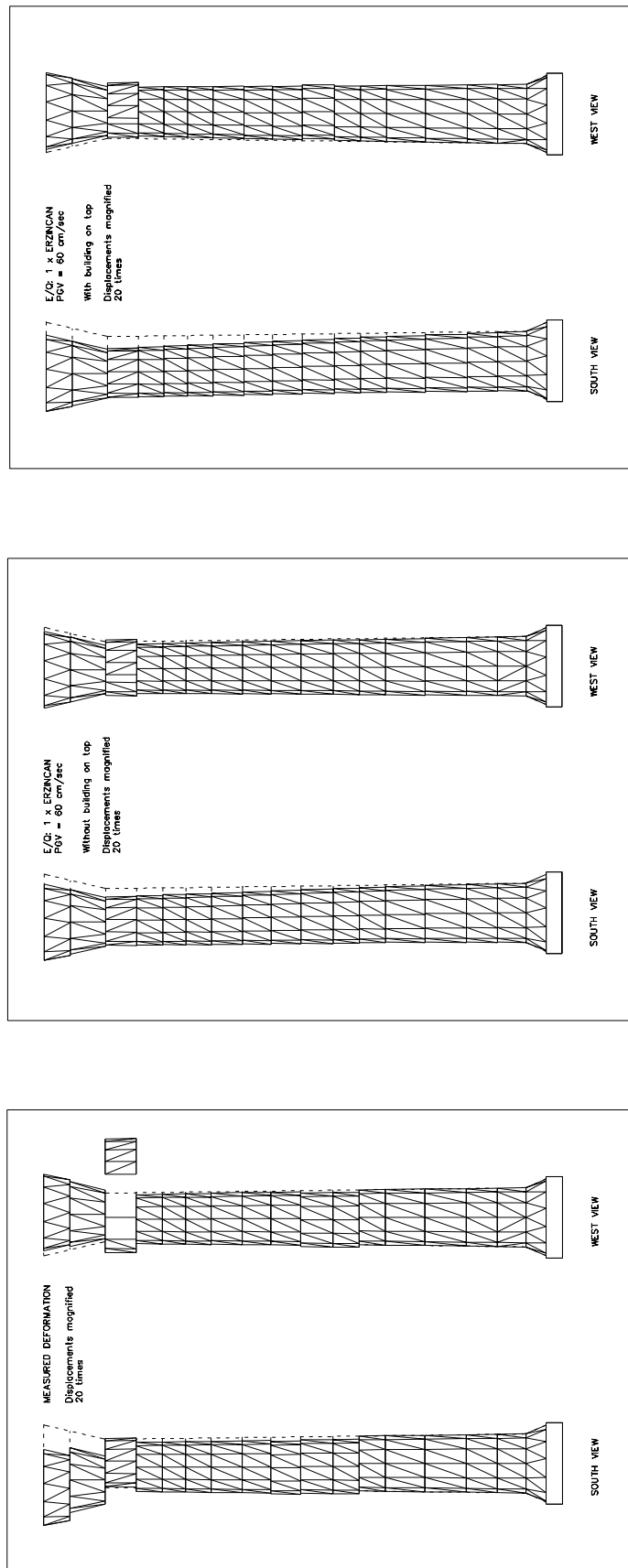
Όπως φαίνεται στα Σχ. 5.42 και 5.43, οι μόνιμες μετατοπίσεις των σπονδύλων, στις περιπτώσεις που το σύστημα δεν καταρρέει, δεν είναι μεγάλες αλλά παρόμοιες με τις υφιστάμενες. Θα πρέπει να τονιστεί, όμως, ότι οι μετατοπίσεις που δείχνονται στα σχήματα 5.42 και 5.43 είναι σχετικές ως προς τη βάση. Στην πραγματικότητα, ο σεισμός προκαλεί και μία σημαντική μετακίνηση ολόκληρων των κίωνων (απόλυτη μετατόπιση), της τάξης των 5 έως 7 cm, η οποία, εάν είχε συμβεί, θα ήταν αναγνωρίσιμη, τόσο από τη σημερινή μετατοπισμένη θέση των κίωνων, όσο και από τα ίχνη της ολίσθησης, που λογικά θα είχαν προκληθεί στο στυλοβάτη. Το γεγονός αυτό, που αναπτύσσεται διεξοδικά παρακάτω, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τόσο μακροπερίοδοι σεισμοί δεν φαίνεται πιθανόν να έχουν συμβεί στην Αθήνα.



**Σχ. 5.42.** Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός του Erzincan με  $PGV=60 \text{ cm/sec}$ .



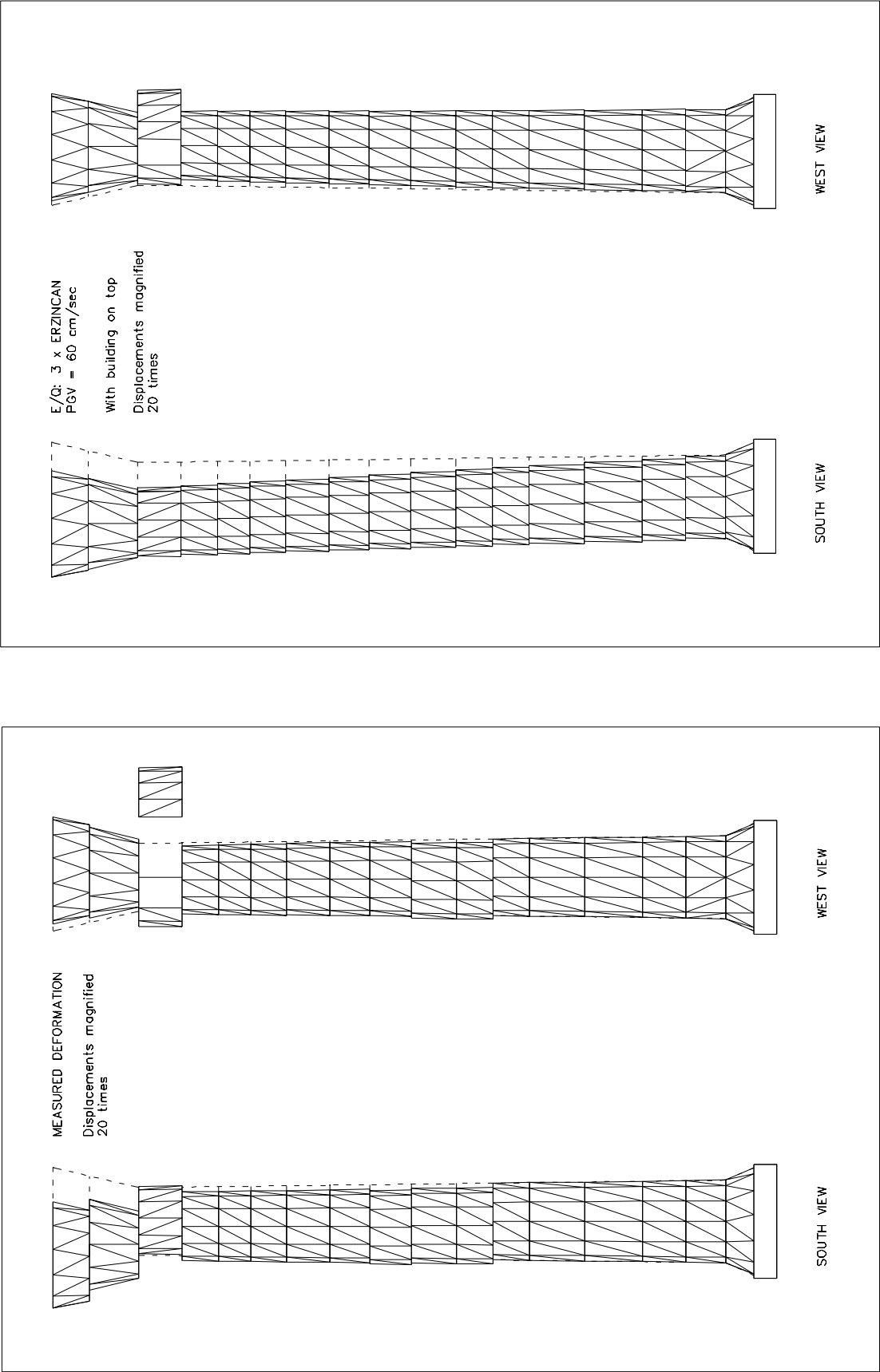
Σχ. 5.43. Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός του Erzincan με PGV=80 cm/sec.



(α)

(β)

**Σχ. 5.44.** Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός του Erzincan με  $PGV=60 \text{ cm/sec}$  για ένα μόνο σεισμό (α) χωρίς κτίσμα και (β) με κτίσμα.



Σχ. 5.45. Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός του Erzincan με PGV=60 cm/sec σε ακολουθία 3 σεισμικών διεγέρσεων με κτίσμα (χωρίς κτίσμα η κατασκευή καταρρέει).

Η επανάληψη του σεισμικού κραδασμού με  $PGV=60$  cm/sec μία ακόμη φορά οδηγεί σε κατάρρευση της κατασκευής, γι' αυτό δεν παρουσιάζονται διαγράμματα για ακολουθία σεισμικών διεγέρσεων.

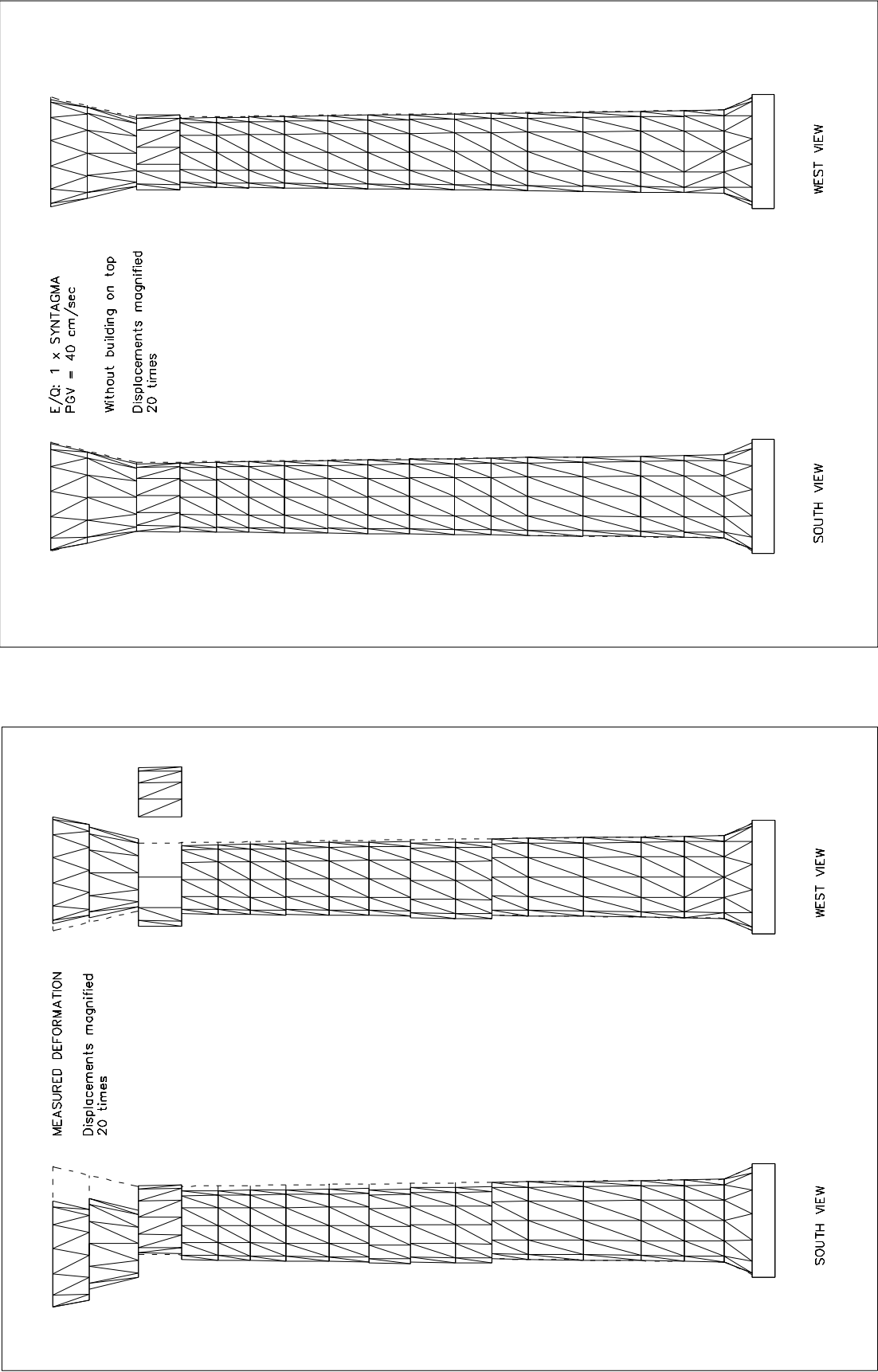
Η ύπαρξη του κτίσματος επί του επιστυλίου οδηγεί σε αύξηση των μετατοπίσεων των σπονδύλων για το μεμονωμένο σεισμό με  $PGV=60$  cm/sec (Σχ. 5.44), οι οποίες τώρα προκύπτουν αρκετά μεγαλύτερες από τις πραγματικές στη διαμήκη διεύθυνση. Φαίνεται, όμως, ότι το κτίσμα έχει ευνοϊκή επίδραση στην ευστάθεια της κατασκευής, η οποία τώρα δεν καταρρέει για ακολουθία 3 σεισμών με  $PGV=60$  cm/sec (Σχ. 5.45). Οι μετακινήσεις όμως που προκύπτουν είναι πολύ μεγάλες και μη συμβατές με την πραγματική κατάσταση.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι δεν φαίνεται πιθανόν να έχουν συμβεί στην Αθήνα μακροπερίοδοι σεισμού τύπου Erzincan.

#### **Σεισμός Αθήνας (Σύνταγμα), 1999**

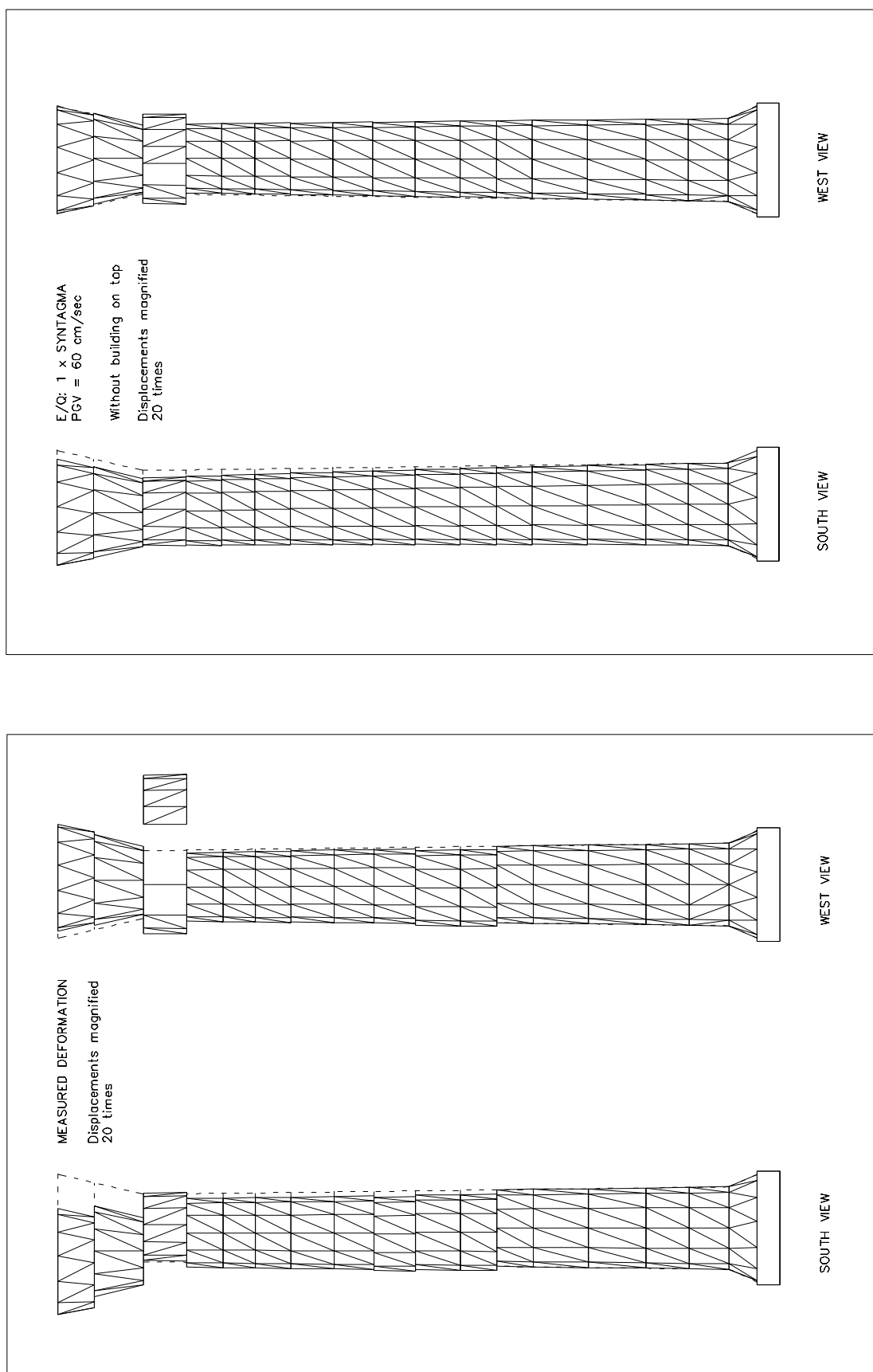
Ο σεισμός που έγινε στην Αθήνα το 1999 δεν προκάλεσε εμφανείς ζημιές στο μνημείο. Η πλησιέστερη καταγραφή του σεισμού ήταν αυτή στο σταθμό του ΜΕΤΡΟ στο Σύνταγμα, η οποία είναι πλούσια σε φασματικό περιεχόμενο αλλά αντιστοιχεί σε μία μέτρια εδαφική δόνηση, με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση  $0.23$  g και μέγιστη εδαφική ταχύτητα  $13$  cm/sec. Σκοπός της παρούσας ανάλυσης είναι να διερευνηθούν οι ζημιές που θα προκαλούσε στο μνημείο μία αρκετά πιο ισχυρή δόνηση τέτοιας μορφής.

Στο Σχ. 5.46 παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις των σπονδύλων για  $PGV=40$  cm/sec, δηλαδή 3 φορές μεγαλύτερο σεισμό από την καταγραφή του 1999. Η μορφή της παραμόρφωσης και οι σχετικά μικρές τιμές μετατοπίσεων είναι παρόμοιες με αυτές που προέκυψαν για τους αντίστοιχους κοντινούς σεισμούς που εξετάστηκαν παραπάνω (Αίγιο, Καλαμάτα). Οι μετατοπίσεις μεγαλώνουν αρκετά όταν η εδαφική ταχύτητα αυξηθεί σε  $PGV=60$  cm/sec (Σχ. 5.47) και πλησιάζουν τις τιμές της πραγματικής παραμόρφωσης. Περαιτέρω αύξηση της εδαφικής ταχύτητας σε  $PGV=80$  cm/sec (που αντιστοιχεί σε 6 φορές την καταγραφή του 1999), ακόμη και σε  $PGV=100$  cm/sec, δεν προκαλεί αντίστοιχη αύξηση των μετακινήσεων (Σχ. 5.47 και 5.48 αντίστοιχα), οι οποίες εξακολουθούν να είναι συμβατές με τη μετρηθείσα παραμόρφωση. Θεωρητικά, επομένως, τέτοιοι εξαιρετικά ισχυροί σεισμοί δεν μπορούν να αποκλειστούν, κρίνοντας από τη σημερινή παραμορφωμένη κατάσταση του κίονα.

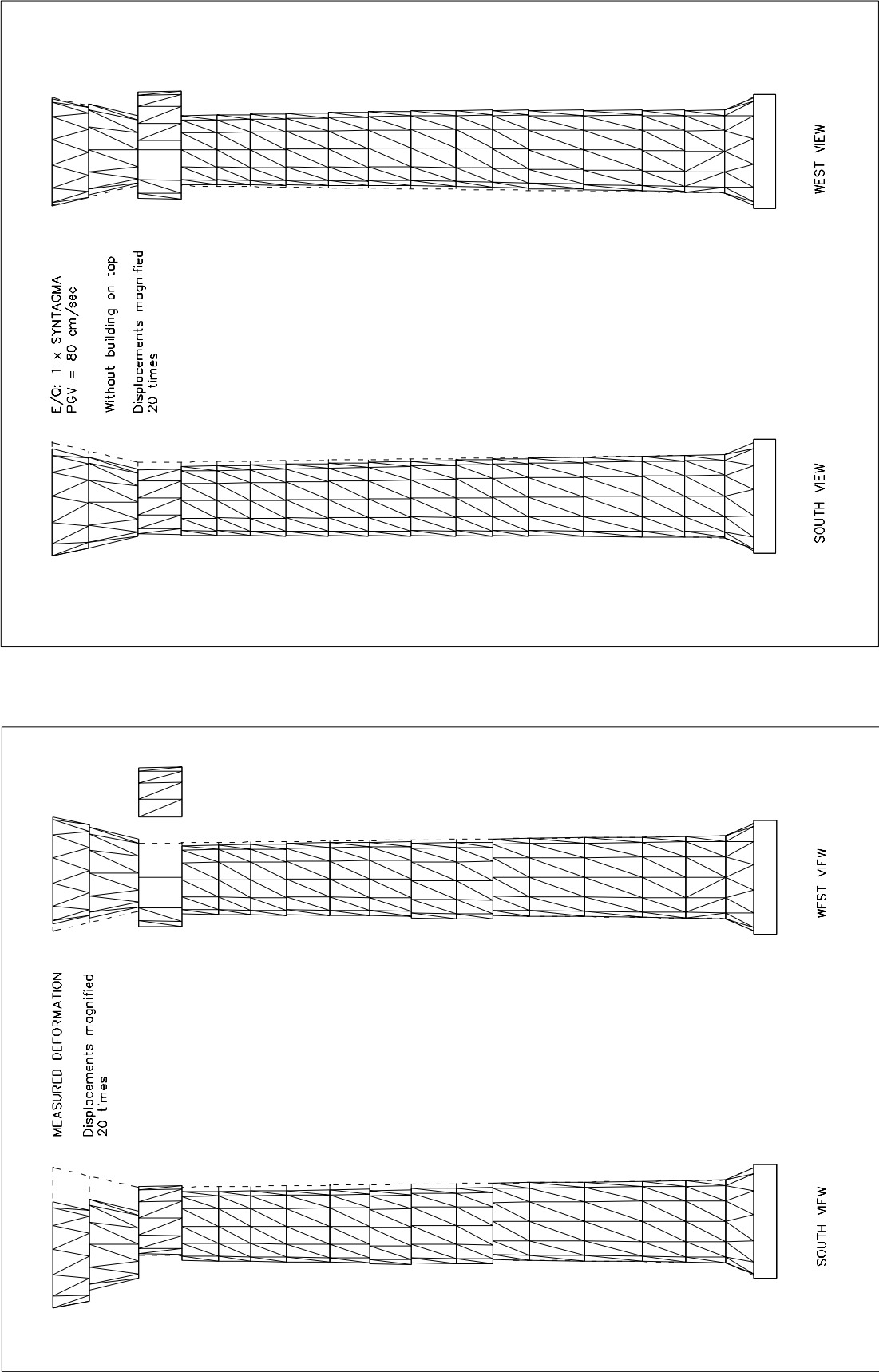


Σχ. 5.46. Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Αθήνας (Σύνταγμα) με PGV=40 cm/sec.

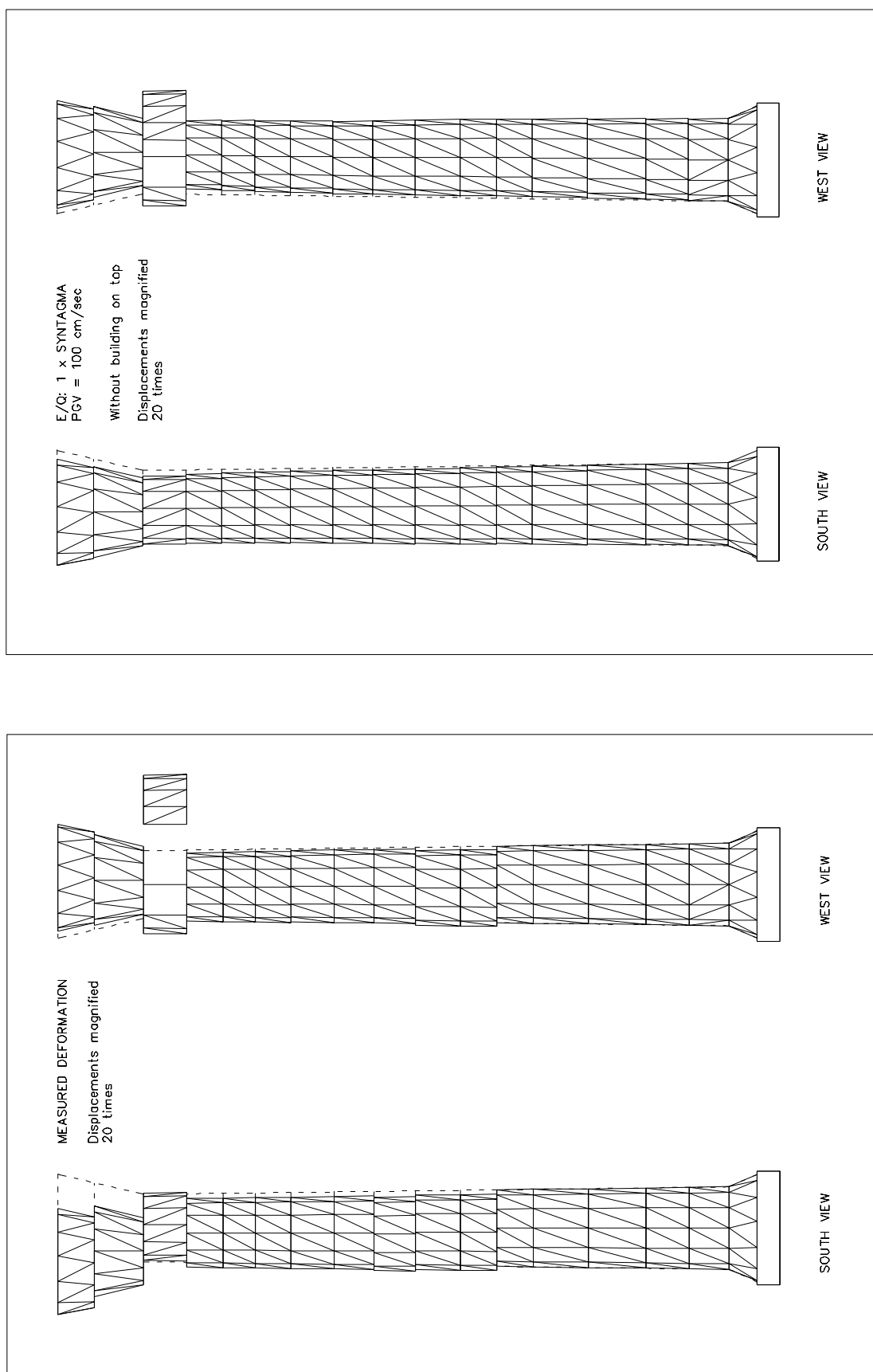




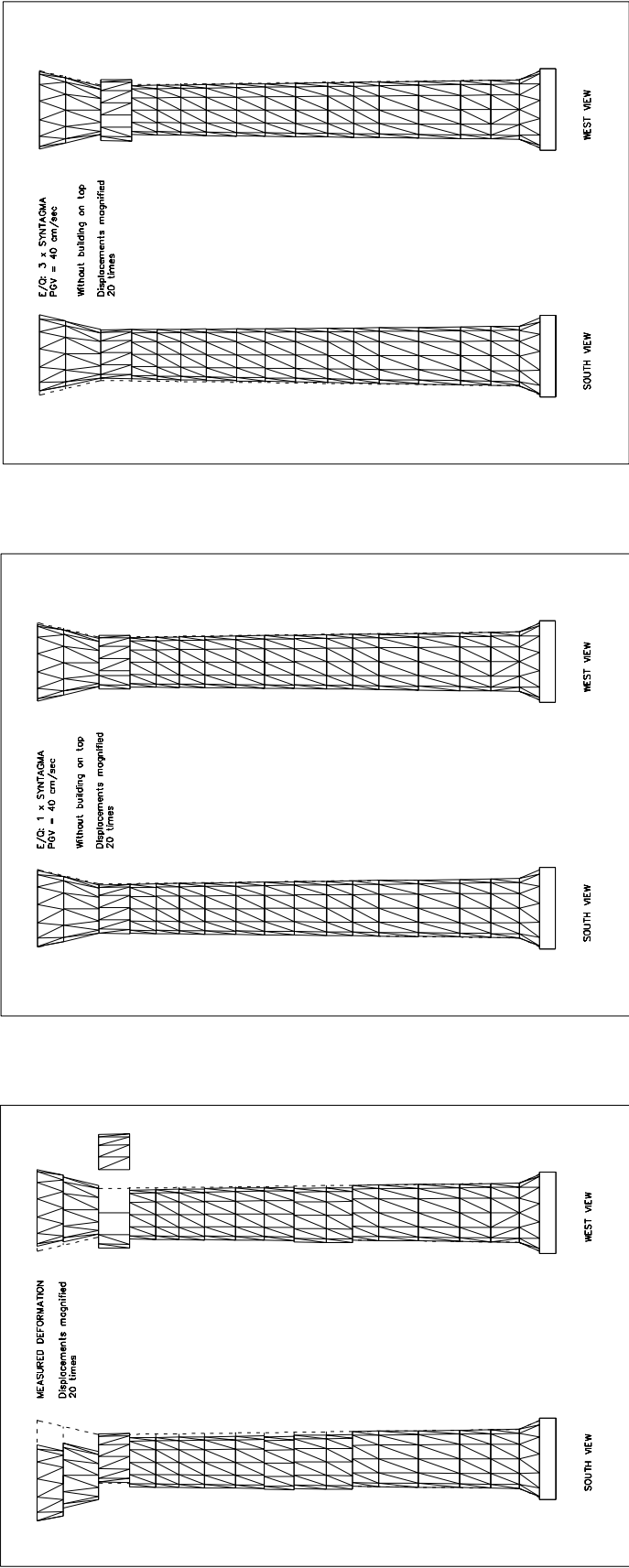
**Σχ. 5.47.** Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Αθήνας (Σύνταγμα) με  $PGV=60 \text{ cm/sec}$ .



Σχ. 5.48. Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Αθήνας (Σύνταγμα) με PGV=80 cm/sec.



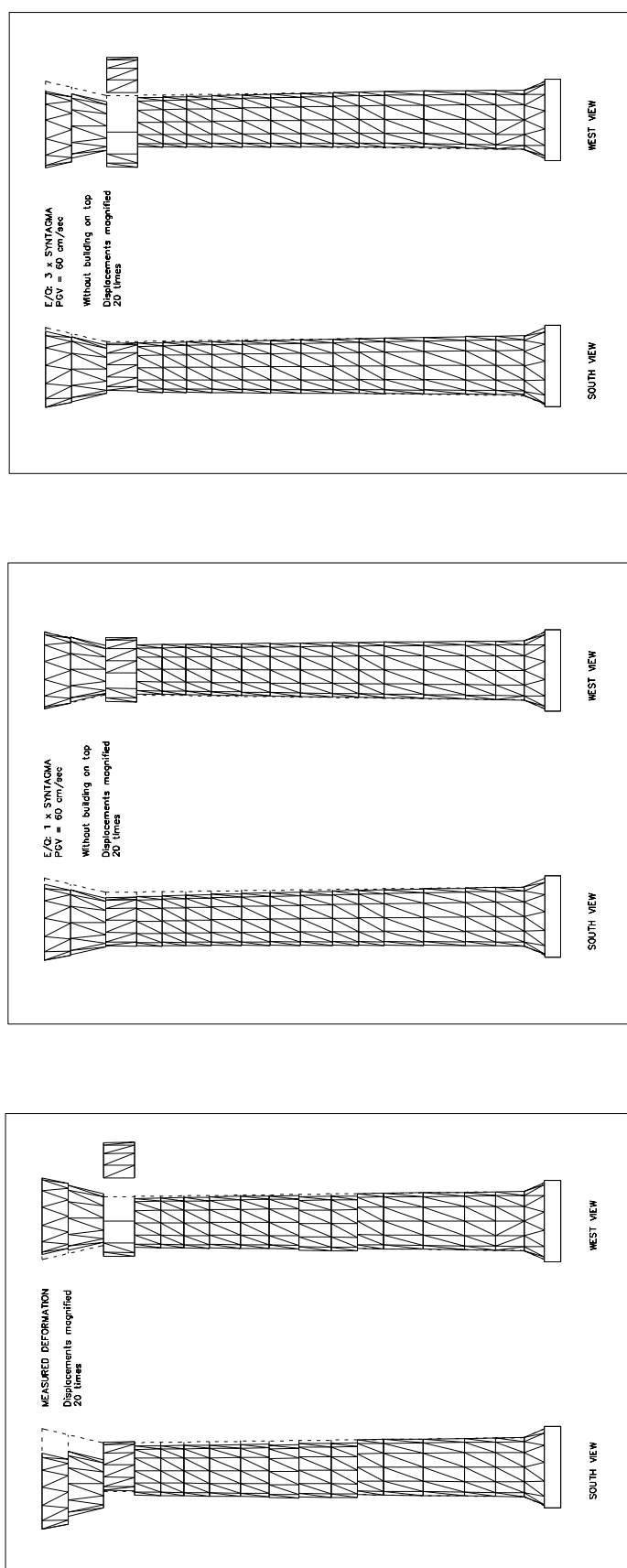
**Σχ. 5.49.** Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Αθήνας (Σύνταγμα) με PGV=100 cm/sec.



(α)

(β)

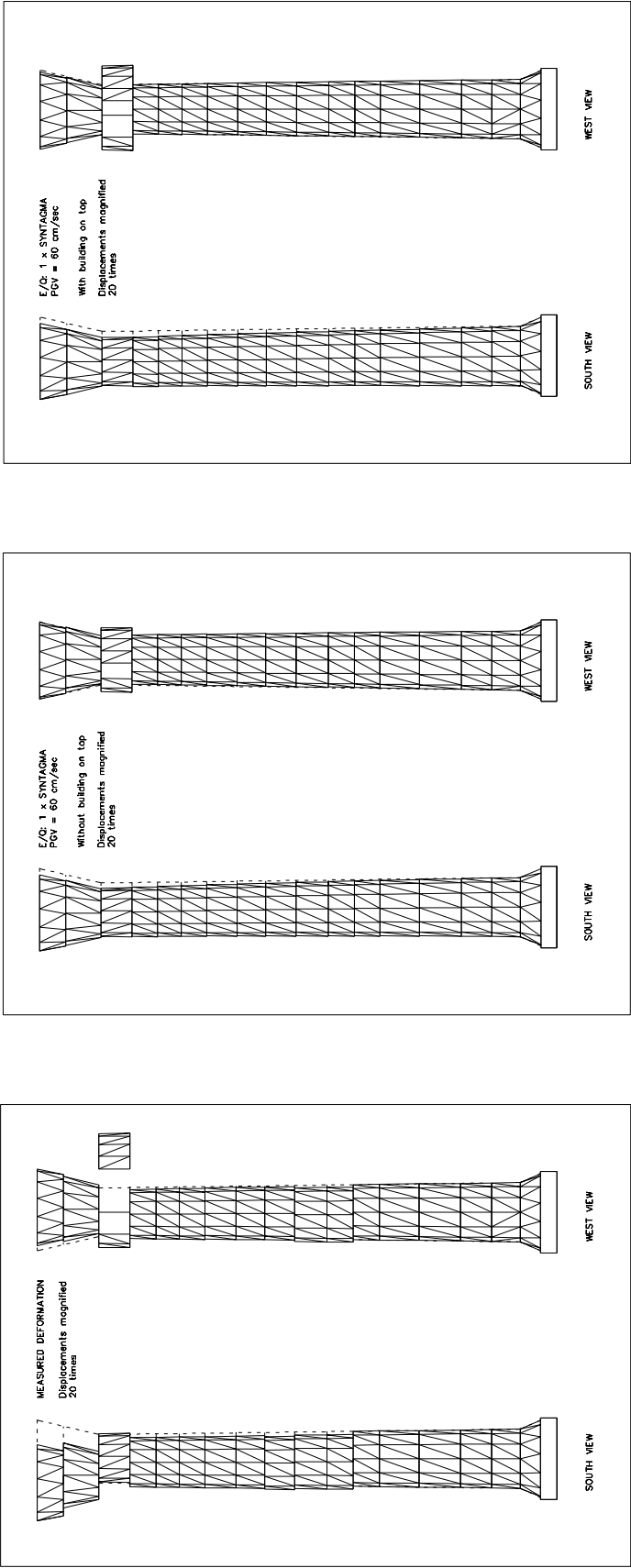
**Σχ. 5.50.** Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Αθήνας (Σύνταγμα) με PGV=40 cm/sec (α) για ένα μόνο σεισμό και (β) για ακολουθία 3 διαδοχικών σεισμικών διεγέρσεων.



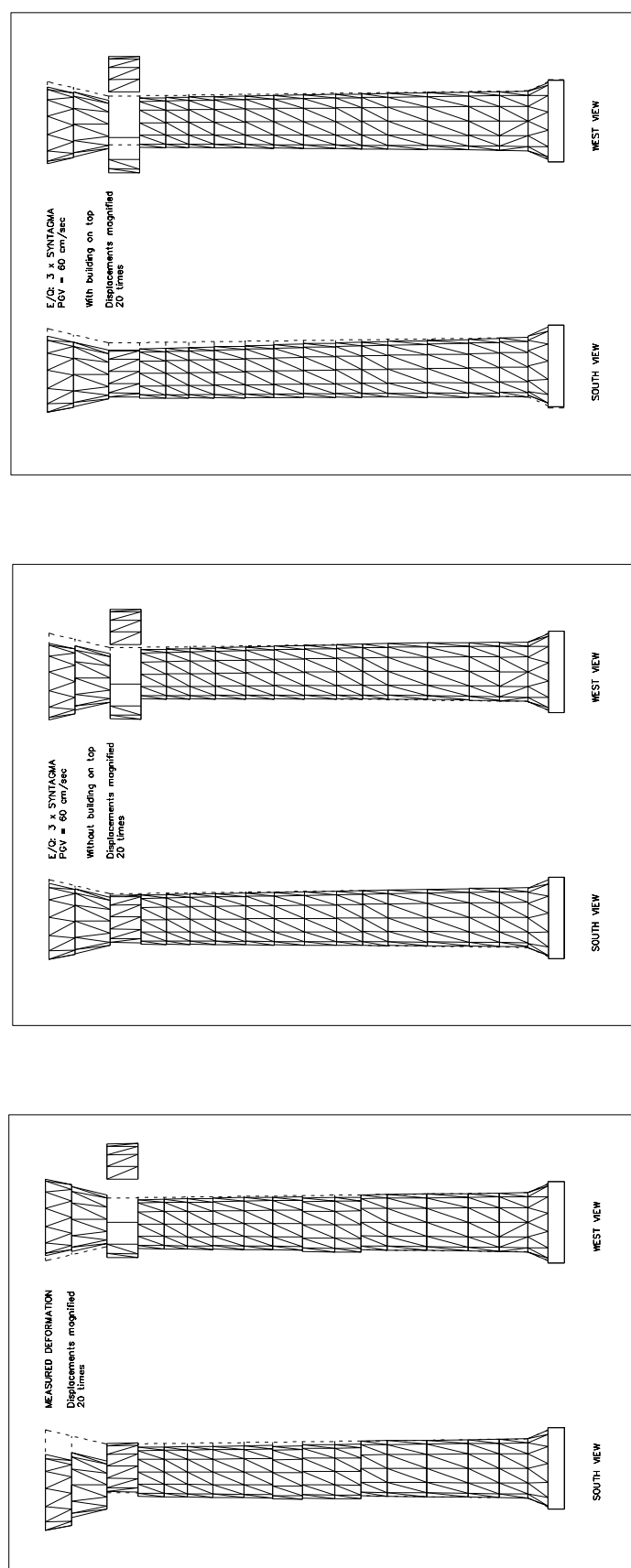
(α)

(β)

**Σχ. 5.51.** Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Αθήνας (Σύνταγμα) με  $PGV=60 \text{ cm/sec}$  (α) για ένα μόνο σεισμό και (β) για ακολουθία 3 διαδοχικών σεισμικών διεγέρσεων.



Σχ. 5.52. Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Αθήνας (Σύνταγμα) με PGV=60 cm/sec για ένα μόνο σεισμό (α) χωρίς κτίσμα και (β) με κτίσμα.



(α)

(β)

**Σχ. 5.53.** Σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων του κίονα 7.6 με αυτές που προκαλεί ο σεισμός της Αθήνας (Σύνταγμα) με  $PGV=60 \text{ cm/sec}$  σε ακολουθία 3 σεισμικών διεγέρσεων (α) χωρίς κτίσμα και (β) με κτίσμα.

Η καταπόνηση της κατασκευής με ακολουθία 3 σεισμικών δονήσεων με  $PGV=40$  cm/sec και  $PGV=60$  cm/sec οδηγεί στις παραμορφώσεις που δίνονται στα Σχ. 5.50 και 5.51 αντίστοιχα. Και στις δύο περιπτώσεις αυξάνονται οι μετατοπίσεις των σπονδύλων, ιδιαίτερα των δύο τμημάτων του σπασμένου σπονδύλου 14, σε σύγκριση με το μεμονωμένο σεισμό, αλλά η τελική κατάσταση εξακολουθεί να είναι απολύτως συμβατή με την πραγματική. Ιδιαίτερα για  $PGV=60$  cm/sec [Σχ. 5.51.(β)], η εικόνα του παραμορφωμένου κίονα είναι προσομοιάζει εξαιρετικά την υφιστάμενη.

Τέλος, η ύπαρξη του κτίσματος επί του επιστυλίου γενικώς αυξάνει λίγο τις μετατοπίσεις των σπονδύλων (Σχ. 5.52 και 5.53), χωρίς όμως να αλλάζει σημαντικά την τελική παραμόρφωση του κίονα.

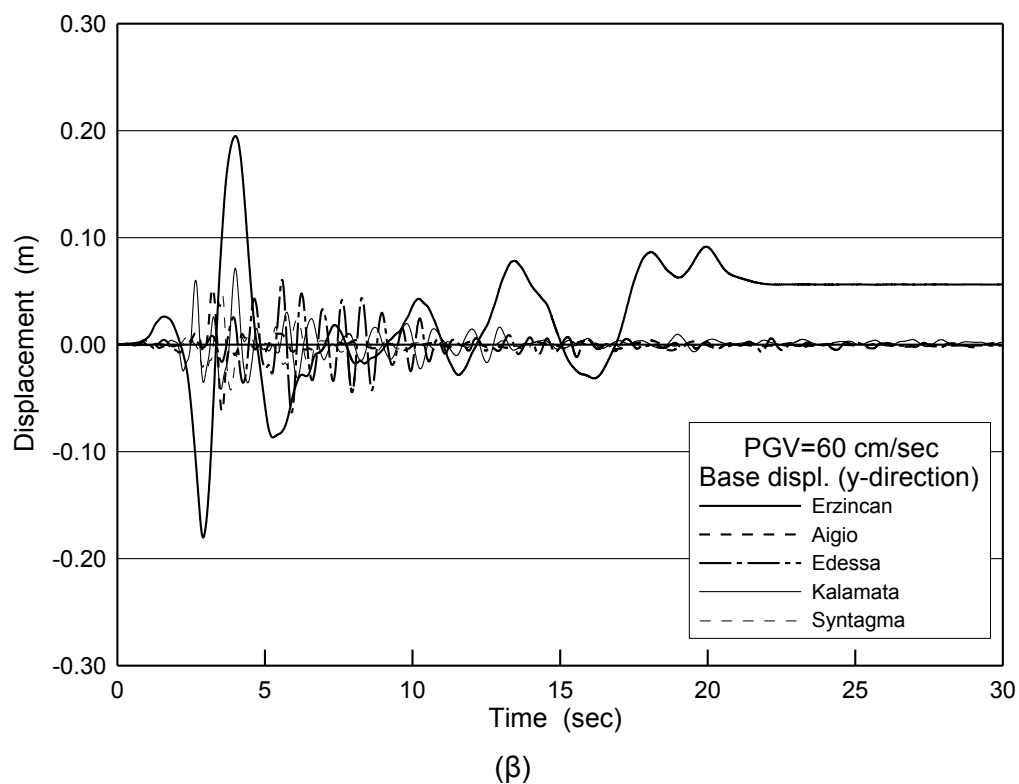
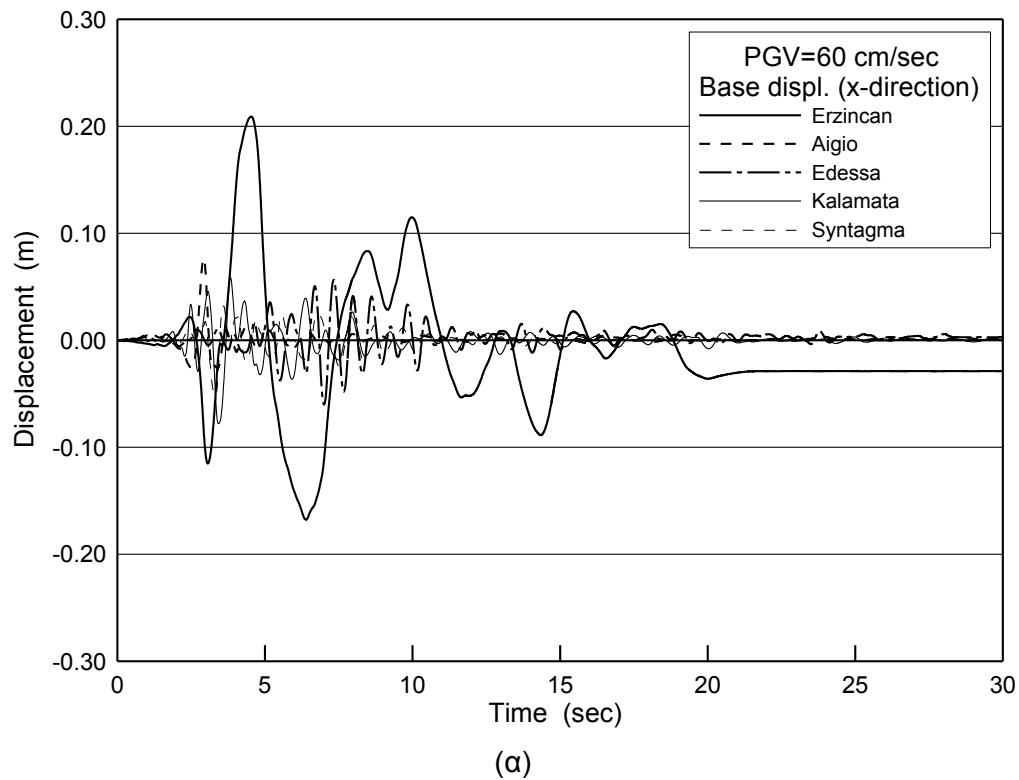
Συμπερασματικά, προκύπτει ότι οι σημερινές παραμορφώσεις του κίονα 7.6 θα μπορούσαν να έχουν προκληθεί από ένα μεμονωμένο σεισμό παρόμοιο με την καταγραφή του Συντάγματος, αλλά με μέγιστη εδαφική ταχύτητα μεγαλύτερη από 60 cm/sec, ή από μία ακολουθία 3-4 σεισμικών δονήσεων με ταχύτητα έως 60 cm/sec. Σημειωτέον ότι, τηρουμένης της αναλογίας μεταξύ εδαφικής ταχύτητας και εδαφικής επιτάχυνσης της καταγραφής, μία τέτοια σεισμική δόνηση με  $PGV=60$  cm/sec θα αντιστοιχούσε σε μέγιστη επιτάχυνση μεγαλύτερη από 0.80 g.

#### **Απόλυτες μετατοπίσεις κιόνων**

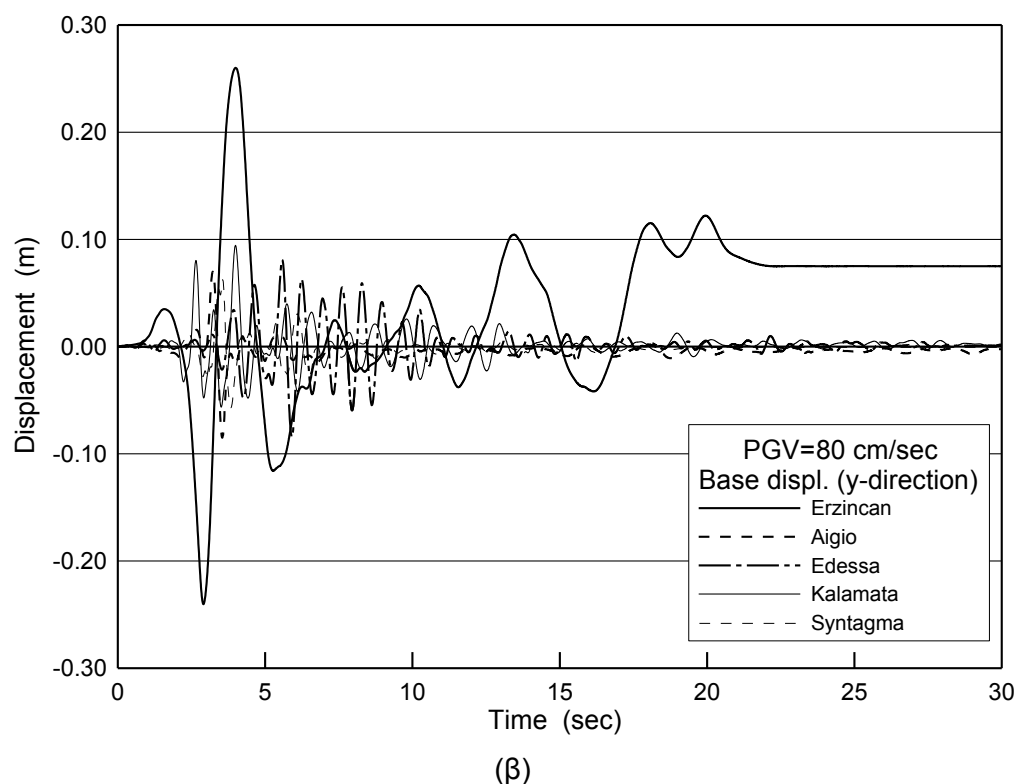
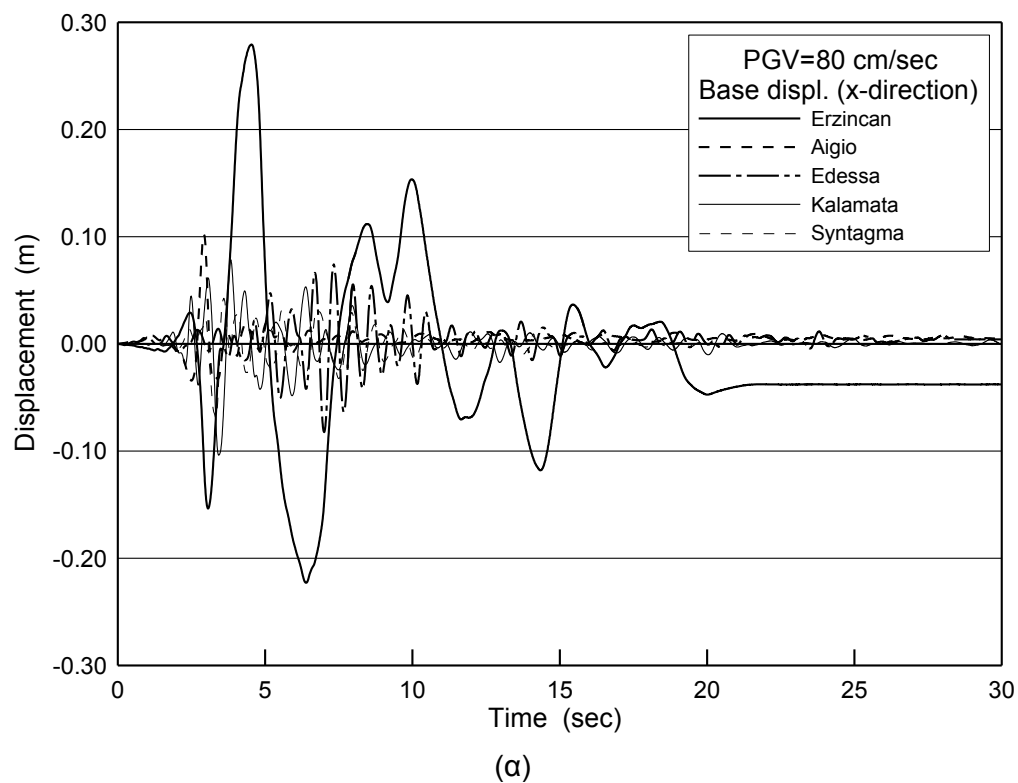
Όπως ήδη αναφέρθηκε, τα παραπάνω συμπεράσματα αφορούν τις σχετικές παραμένουσες μετακινήσεις των σπονδύλων ως προς τη βάση του κίονα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όμως, προκαλούνται και σημαντικές ολισθήσεις στη βάση των κιόνων, οι οποίες δεν είναι συμβατές με την υφιστάμενη κατάσταση. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι τυχόν υφιστάμενες μετατοπίσεις των κιόνων στη βάση τους δεν είναι δυνατόν να μετρηθούν. Επειδή όμως οι αποστάσεις μεταξύ των κιόνων δεν φαίνεται να έχουν μεταβληθεί σημαντικά στη διάρκεια της ζωής του μνημείου, εκτιμάται ότι οι μετακινήσεις αυτές είναι από πολύ μικρές έως μηδενικές. Επίσης, εκτιμάται ότι, εάν είχαν συμβεί ολισθήσεις κιόνων, θα είχαν αφήσει ίχνη στο στυλοβάτη, τα οποία, κατά πάσαν πιθανότητα, θα ήταν εμφανή. Τέτοια ίχνη δεν υπάρχουν στο μνημείο.

Οι μόνιμες μετατοπίσεις στη βάση των κιόνων, που προκαλούν οι σεισμικές διεγέρσεις που εξετάσαμε, δίνονται στους πίνακες 5.5 και 5.6. Είναι εμφανές από αυτούς τους πίνακες ότι σεισμικοί κραδασμοί τύπου Erzincan, οδηγούν σε μετακινήσεις της βάσης των κιόνων που φθάνουν τα 75 mm για ένα μόνο σεισμό με  $PGV=80$  cm/sec, ενώ πλησιάζουν τα 170 mm για ακολουθία 3 σεισμών με  $PGV=60$  cm/sec. Τέτοιες μετακινήσεις είναι ασύμβατες με την υφιστάμενη κατάσταση του μνημείου.





**Σχ. 5.54.** Χρονοϊστορίες της μετακίνησης: της βάσης του κίονα (α) στη διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση για όλες τις σεισμικές διεγέρσεις με  $PGV=60$  cm/sec (δυτικός κίονας 7.6, χωρίς κτίσμα επί του επιστυλίου).



**Σχ. 5.55.** Χρονοϊστορίες της μετακίνησης της βάσης του κίονα (α) στη διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση για όλες τις σεισμικές διεγέρσεις με  $PGV=80$  cm/sec (δυτικός κίονας 7.6, χωρίς κτίσμα επί του επιστυλίου).

Πίνακας 5.5

**Μόνιμες μετατοπίσεις (mm) της βάσης του κίονα 7.6  
για μία μόνο σεισμική διέγερση και κατασκευή χωρίς κτίσμα**

PGV (cm/sec)	Σεισμική διέγερση									
	Αίγιο		Γρίβα (Έδεσσα)		Καλαμάτα (Νομαρχία)		Erzincan		Αθήνα (Σύνταγμα)	
	Νότια όψη (διαμ. διεύθ.)	Δυτ. Όψη (εγκ. διεύθ.)	Νότια όψη (διαμ. διεύθ.)	Δυτ. Όψη (εγκ. διεύθ.)	Νότια όψη (διαμ. διεύθ.)	Δυτ. Όψη (εγκ. διεύθ.)	Νότια όψη (διαμ. διεύθ.)	Δυτ. Όψη (εγκ. διεύθ.)	Νότια όψη (διαμ. διεύθ.)	Δυτ. Όψη (εγκ. διεύθ.)
40	0.6	0.9	1.0	0.6	0.0	0.5	Κατάρρευση		0.6	0.2
60	1.2	0.9	2.9	0.8	0.5	1.7	28.9	56.3	1.4	0.7
80	5.1	2.4	4.2	0.9	0.2	1.8	37.8	75.0	0.8	0.0
100	7.7	4.1	4.3	2.4	2.7	3.7	Κατάρρευση		7.8	7.7

Πίνακας 5.6

**Σύγκριση μόνιμων μετατοπίσεων (mm) της βάσης του κίονα 7.6  
για σεισμικές διεγέρσεις με PGV=60 cm/sec**

Σεισμός	Μεμονωμένος σεισμός				Ακολουθία 2 σεισμών				Ακολουθία 3 σεισμών			
	Χωρίς κτίσμα		Με κτίσμα		Χωρίς κτίσμα		Με κτίσμα		Χωρίς κτίσμα		Με κτίσμα	
	Νότια όψη (διαμ. διεύθ.)	Δυτ. Όψη (εγκ. διεύθ.)	Νότια όψη (διαμ. διεύθ.)	Δυτ. Όψη (εγκ. διεύθ.)	Νότια όψη (διαμ. διεύθ.)	Δυτ. Όψη (εγκ. διεύθ.)	Νότια όψη (διαμ. διεύθ.)	Δυτ. Όψη (εγκ. διεύθ.)	Νότια όψη (διαμ. διεύθ.)	Δυτ. Όψη (εγκ. διεύθ.)	Νότια όψη (διαμ. διεύθ.)	Δυτ. Όψη (εγκ. διεύθ.)
Αίγιο	1.2	0.9	0.8	0.8	2.0	1.3	1.6	1.5	3.0	1.4	2.4	2.4
Γρίβα (Έδεσσα)	2.9	0.8	0.9	1.1	5.4	1.7	2.4	1.8	7.4	0.7	Κατάρρευση	
Καλαμάτα (Νομαρχία)	0.5	1.7	0.2	1.1	0.8	3.2	0.4	2.2	1.4	4.5	0.6	3.1
Erzincan	28.9	56.3	29.0	56.2	Κατάρρευση		57.8	112.4	Κατάρρευση		86.6	168.7
Αθήνα (Σύνταγμα)	1.4	0.7	0.6	0.3	3.0	1.2	1.6	0.6	4.0	1.5	2.3	1.0

Αντίθετα, για τους υπόλοιπους σεισμούς, η απόλυτη μετατόπιση του κίονα σε καμμία περίπτωση δεν υπερβαίνει τα 8 mm, ακόμη και για PGV=100 cm/sec ή για ακολουθία 3 σεισμικών διεγέρσεων με PGV=60 cm/sec. Η τιμή αυτή θεωρείται αποδεκτή για τόσο ισχυρές σεισμικές διεγέρσεις.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετακινήσεις που δίνονται στους πίνακες 5.5 και 5.6 είναι οι τελικές, μετά το πέρας του σεισμού. Κατά τη διάρκεια της σεισμικής δόνησης προκαλούνται αρκετά μεγαλύτερες μετακινήσεις της βάσης, οι οποίες μπορεί να

ξεπερνούν και τα 25 cm. Αυτό φαίνεται στα Σχ. 5.54 και 5.55, όπου δίνονται οι χρονοϊστορίες της μετακίνησης της βάσης του κίονα 7.6, για όλες τις σεισμικές διεγέρσεις που εξετάστηκαν και για  $PGV=60$  cm/sec και  $PGV=80$  cm/sec, αντίστοιχα. Είναι εμφανής η μεγάλη διαφορά μεταξύ των ολισθήσεων που προκαλεί ο σεισμός του Erzincan σε σύγκριση με όλους τους άλλους σεισμούς.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις σχετικά με τις ολισθήσεις στη βάση του κίονα αποτελούν έναν πρόσθετο λόγο, για τον οποίο θα πρέπει να αποκλεισθεί η πιθανότητα πολύ μακροπερίοδοι σεισμοί, τύπου Erzincan, να έχουν πλήξει την Αθήνα.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το Κεφάλαιο γίνεται μία προσπάθεια διερεύνησης της σεισμικής ιστορίας της Αθήνας με βάση την παραμόρφωση του δυτικού κίονα 7.6 του συστήματος των δύο κίωνων με επιστύλιο της εσωτερικής ΝΑ γωνίας. Για το σκοπό αυτό συγκρίνονται οι πραγματικές μετατοπίσεις των σπονδύλων αυτού του κίονα με αυτές που προκύπτουν από τις αναλύσεις για διάφορες σεισμικές διεγέρσεις, μεμονωμένα ή σε ακολουθία 2 ή 3 σεισμών. Επίσης εξετάστηκε η επιρροή του κτίσματος που υπήρχε πάνω στο επιστύλιο για αρκετές εκατονταετίες.

Αναλύσεις έγιναν για πέντε σεισμικές διεγέρσεις με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Σε αυτές περιλαμβάνεται και η καταγραφή του σεισμού της Αθήνας (1999) στο Σύνταγμα, η οποία είναι η πλησιέστερη στο μνημείο καταγραφή που υπάρχει. Οι εδαφικές δονήσεις κανονικοποιήθηκαν ως προς τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα,  $PGV$ , η τιμή της οποίας καθόριζε την ένταση του σεισμού σε κάθε περίπτωση. Σε όλες τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο οριζόντιες καταγραφές κάθε σεισμού, κανονικοποιημένες όμως στην ίδια τιμή  $PGV$ .

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, γενικώς, η επανάληψη της ίδιας σεισμικής δόνησης δύο ή τρεις φορές οδηγεί σε αύξηση της παραμόρφωσης του κίονα. Υπήρχαν όμως και περιπτώσεις που η επανάληψη του σεισμού αναιρούσε τις μετατοπίσεις που είχε προκαλέσει ο σεισμός στην πρώτη του εμφάνιση. Επίσης, η ύπαρξη του κτίσματος επί του επιστυλίου σε άλλες περιπτώσεις προκαλούσε μείωση της παραμόρφωσης και σε άλλες αύξηση.

Λόγω των πολλών αβεβαιοτήτων, όπως η κατάσταση που βρισκόταν το μνημείο σε κάθε φάση της ζωής του, η συσσωρευτική αύξηση των μετατοπίσεων που προκαλούνται από διαδοχικές σεισμικές διεγέρσεις, η επιρροή της θεμελίωσης, η οποία δεν διερευνήθηκε, η πιθανή πρόκληση ζημιών στον κίονα που εξετάστηκε κατά την κατάρρευση των γειτονικών του κίωνων ή της οροφής και ενός άλλου πλήθους (εν πολλοίς

αγνώστων) παραγόντων που μπορεί να επηρέασαν την παραμορφωμένη κατάσταση, στην οποία βρίσκεται σήμερα ο κίονας, είναι αναμενόμενο να μη μπορούν να εξαχθούν ακριβή συμπεράσματα. Κρίνοντας όμως από τη μορφή της παραμόρφωσης που προκαλεί κάθε σεισμός και το μέγεθος των σχετικών μετατοπίσεων ως προς τη βάση, αλλά και των απόλυτων μετακινήσεων του κίονα, προκύπτουν σημαντικές εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους σεισμούς που θα πρέπει να έχουν πλήξει την Αθήνα τα τελευταία 2000 χρόνια. Συνοψίζοντας τις παρατηρήσεις που αναπτύχθηκαν παραπάνω, μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Σεισμικές δονήσεις τύπου Αιγίου, Καλαμάτας και Συντάγματος, που είναι χαρακτηριστικές κοντινών σεισμών και περιέχουν ισχυρούς παλμούς με περιόδους από 0.20 έως 0.60 sec, δίνουν παρεμφερή αποτελέσματα και προκαλούν παρόμοιες μετατοπίσεις στους σπονδύλους του κίονα. Για να φθάσει ο κίονας στη σημερινή του παραμορφωμένη κατάσταση απαιτείται ένας μικρός αριθμός τέτοιων δονήσεων με εδαφική ταχύτητα της τάξης των 40 έως 60 cm/sec. Γι' αυτούς τους σεισμούς, η παραπάνω τιμή της εδαφικής ταχύτητας αντιστοιχεί σε εδαφική επιτάχυνση 0.50 έως 0.80 g περίπου. Μπορούμε επομένως να συμπεράνουμε ότι αυτό είναι το αναμενόμενο επίπεδο διέγερσης για σεισμούς με την περίοδο επανάληψης που ορίζει ο ΕΑΚ (500 χρόνια, δηλαδή περίπου 4 τέτοιοι σεισμοί στα 2000 χρόνια).

Ένα άλλο πιθανό σενάριο είναι, η παραμόρφωση να έχει προκληθεί από ένα μόνο, αλλά πολύ ισχυρό σεισμό, με εδαφική ταχύτητα μεγαλύτερη από 60 cm/sec και εδαφική επιτάχυνση μεγαλύτερη από 0.80 g. Ένας τέτοιος σεισμός θα αντιστοιχούσε σε περίοδο επανάληψης 2000 χρόνια, σύμφωνα με τη φιλοσοφία του ΕΑΚ.

Αντίθετα, δεν φαίνεται πολύ πιθανόν (αν και δεν θα πρέπει να αποκλεισθεί και αυτή η εκδοχή) η παραμόρφωση των κιόνων να έχει προκληθεί από πολλούς μικρότερους σεισμούς. Παρ' ότι δεν έγιναν αναλύσεις για σεισμούς με εδαφική ταχύτητα μικρότερη από 40 cm/sec, κρίνοντας από τα αποτελέσματα που προέκυψαν για  $PGV=40$  cm/sec, προκύπτει ότι θα απαιτούνταν πολλοί τέτοιοι σεισμοί για να φθάσει το μνημείο στη σημερινή του κατάσταση και επομένως η μέση περίοδος επανάληψης τέτοιων σεισμικών γεγονότων θα ήταν αρκετά μικρότερη από 500 χρόνια. Αυτό όμως δεν συμβαδίζει με τις πληροφορίες που έχουμε για τους γνωστούς σεισμούς που έχουν γίνει τα τελευταία 300 χρόνια και οι οποίοι δεν αναφέρεται να προκαλέσαν ουσιαστικές ζημιές στο μνημείο (εμφανείς ολισθήσεις σπονδύλων). Θεωρείται επομένως πιο πιθανό το σενάριο να έχουν συμβεί στην Αθήνα τα τελευταία 2000 χρόνια 3-4 σεισμοί με επιτάχυνση πιθανώς μεγαλύτερη από 0.50 g.

2. Σεισμοί της μορφής της καταγραφής της Έδεσσας, που χαρακτηρίζονται από αρκετούς επαναλαμβανόμενους παλμούς σχετικά μεγάλης περιόδου (περίπου 0.60 sec) προκαλούν αρκετά μεγάλες μετακινήσεις εάν επαναληφθούν μερικές φορές. Οι σχετικά σκληρές τοπικές εδαφικές συνθήκες στην περιοχή του μνημείου (αθηναϊκός σχιστόλιθος) δεν ευνοούν τη δημιουργία δονήσεων αυτής της μορφής από κοντινούς σεισμούς. Επομένως, τέτοιες εδαφικές κινήσεις θα μπορούσαν να δημιουργηθούν μόνο από ισχυρούς μακρινούς σεισμούς. Η παραμορφωμένη κατάσταση του κίονα θα μπορούσε να έχει προκληθεί είτε από έναν μόνο σεισμό με εδαφική ταχύτητα της τάξης των 60 cm/sec και εδαφική επιτάχυνση 0.60 g περίπου, που θα είχε μέση περίοδο επανάληψης της τάξης των 2000 χρόνων, είτε από περισσότερους μικρότερους σεισμούς με εδαφική ταχύτητα της τάξης των 40 cm/sec και εδαφική επιτάχυνση 0.40 g και με περίοδο επανάληψης της τάξης των 500 χρόνων.
3. Σεισμικές δονήσεις που περιέχουν κάποιο ισχυρό παλμό πολύ μεγάλης περιόδου, της τάξης του 1.50 έως 2.00 sec, όπως ο σεισμός του Erzincan, δεν φαίνεται πιθανόν να έχουν πλήξει την Αθήνα. Στην ίδια κατηγορία ανήκει και ο σεισμός του Βουκουρεστίου του 1977, ο οποίος, παρ' ότι δεν εξετάστηκε στην παρούσα εργασία, αναμένεται να δώσει παρόμοια αποτελέσματα. Σεισμοί αυτής της μορφής προκαλούν σημαντικές ολισθήσεις στη βάση των κίωνων, αρκετά μεγαλύτερες από τις σχετικές ολισθήσεις μεταξύ των σπονδύλων. Τέτοιες μετακινήσεις κίωνων, όμως, δεν φαίνεται να έχουν συμβεί στο ναό.

Τα παραπάνω συμπεράσματα δείχνουν ότι το κέντρο της Αθήνας είναι πιθανόν να έχει πληγεί από αρκετά ισχυρούς σεισμούς ( $PGA > 0.50$  g,  $PGV$  έως 60 cm/sec) μέσης περιόδου επανάληψης περίπου 500 χρόνων, δηλαδή ίσης με την περίοδο επανάληψης του σεισμού σχεδιασμού του ΕΑΚ. Ένα άλλο σενάριο, που δεν θα πρέπει να αποκλειστεί, είναι να έχει συμβεί στην Αθήνα ένας ακόμη ισχυρότερος σεισμός ( $PGA > 0.80$  g,  $PGV > 60$  cm/sec), αλλά μόνο μία φορά στα τελευταία 2000 χρόνια. Θα πρέπει να τονιστεί ότι τα συμπεράσματα αυτά έχουν προκύψει από εύλογες υποθέσεις, ως απόρροια των αριθμητικών αναλύσεων, οι οποίες υπόκεινται στις αβεβαιότητες που αναπτύχθηκαν στην αρχή του κεφαλαίου. Για να μπορέσουν να εξαχθούν περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα χρειάζονται περισσότερες αναλύσεις, οι οποίες θα πρέπει να περιλαμβάνουν και άλλους κίονες του ναού καθώς και άλλα μνημεία της περιοχής των Αθηνών.



# 6

## ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΕ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΥΣ ΣΕΙΣΜΟΥΣ

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια, τα αρχαία μνημεία, γενικώς, δεν κινδυνεύουν από σεισμούς, εφ' όσον βρίσκονται σε καλή κατάσταση. Η ευστάθειά τους όμως αυτή μπορεί να μειωθεί αρκετά όταν υπάρχουν ζημιές, όπως σπασμένοι σπόνδυλοι, κλίσεις κιόνων, ολισθήσεις σπονδύλων κλπ. Το γεγονός, επομένως, ότι, ένα μνημείο έχει επιβιώσει αρκετούς ισχυρούς σεισμούς στη μακρόχρονη ζωή του, δεν σημαίνει ότι δεν κινδυνεύει να υποστεί σοβαρές ζημιές ή ακόμη και κατάρρευση σε μελλοντικούς σεισμούς.

Στην ανάλυση που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η ΝΑ γωνία του μνημείου (Σχ. 6.1), η οποία αποτελείται από τρεις διαφορετικές ανεξάρτητες κατασκευές:

- Τους δύο κίονες 7.5 και 7.6 που είναι συνδεδεμένοι με επιστύλιο (για τον τρόπο αρίθμησης των κιόνων βλ. Κεφ. 3, Σχ. 3.10).
- Την εξωτερική γωνία, η οποία αποτελείται από τους κίονες 6.1, 7.1, 8.1, 8.2, 8.3 και 8.4, συνδεδεμένους με επιστύλια σε σχηματισμό Γ.
- Την εσωτερική γωνία, η οποία αποτελείται από τους κίονες 6.2, 6.3, 7.2, 7.3 και 7.4, συνδεδεμένους με επιστύλια σε σχηματισμό ενός διπλού Γ.

Η διάταξη των δύο γωνιών και η σύνδεση των κιόνων με τα επιστύλια, όπως σώζονται σήμερα, φαίνεται στο Σχ. 6.2.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι μία εμπειριστατωμένη ανάλυση του μελλοντικού σεισμικού κινδύνου θα έπρεπε να λάβει υπόψη της:



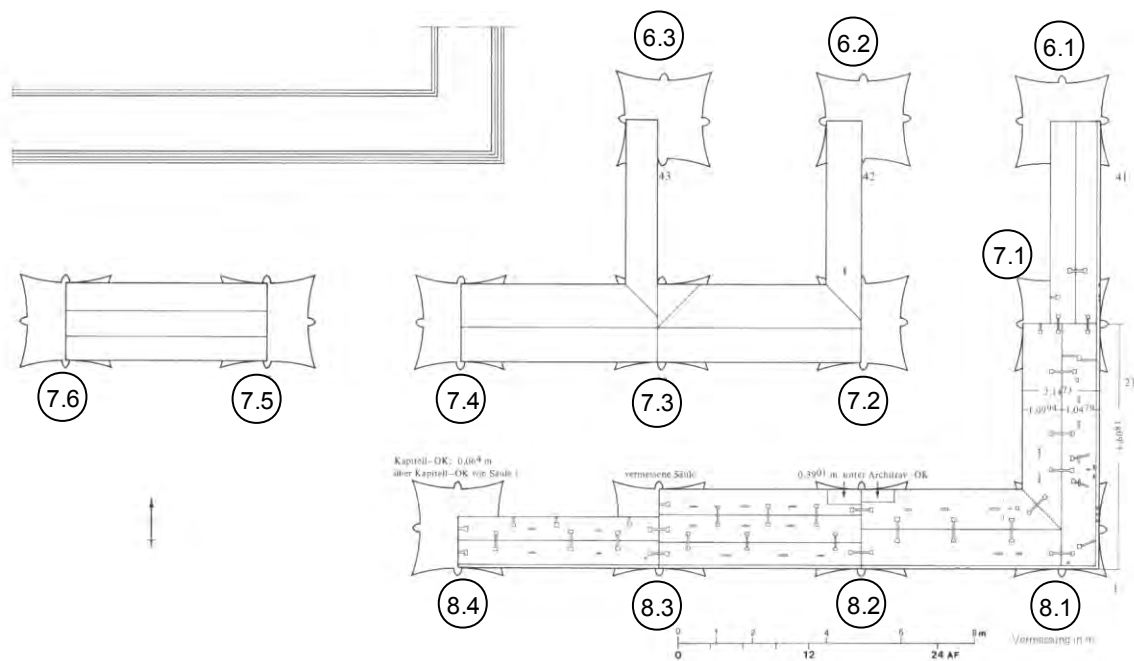
- α) την πραγματική κατάσταση των φερόντων στοιχείων της κατασκευής. Για το σκοπό αυτό θα απαιτείτο μία λεπτομερής αποτύπωση του μνημείου, συμπεριλαμβανομένων όλων των ζημιών που υπάρχουν σε αυτό.
- β) μία όσο το δυνατόν ακριβέστερη προσομοίωση της κατασκευής και των ζημιών στο υπολογιστικό μοντέλο.
- γ) μία συστηματική, αναλυτική διερεύνηση της συμπεριφοράς για ένα πλήθος σεισμικών διεγέρσεων, οι οποίες θα πρέπει να καλύπτουν όλους τους πιθανούς σεισμούς που αναμένεται να πλήξουν την περιοχή, τόσο όσον αφορά το φασματικό τους περιεχόμενο, όσο και όσον αφορά το επίπεδο της έντασής τους. Για τον προσδιορισμό αυτών των στοιχείων θα απαιτείτο κατάλληλη μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας.

Είναι προφανές ότι μία τέτοια ανάλυση υπερβαίνει τους σκοπούς του παρόντος ερευνητικού προγράμματος. Γι' αυτό και σε καμία περίπτωση η παρούσα μελέτη δεν επέχει θέση μελέτης ελέγχου της ευστάθειας του μνημείου, η οποία θα απαιτούσε πολύ περισσότερη ακρίβεια και πολύ περισσότερες αναλύσεις. Συνεπώς, τα παρακάτω αποτελέσματα πρέπει να θεωρούνται ενδεικτικά και παρουσιάζονται με επιφύλαξη, αφ' ενός λόγω της προσεγγιστικής προσομοίωσης της πραγματικής κατάστασης και των βλαβών και αφ' ετέρου λόγω του περιορισμένου αριθμού των σεισμικών διεγέρσεων που εξετάζονται. Είναι προφανές ότι, λόγω της μη-γραμμικότητας της συμπεριφοράς και της ευαισθησίας της σεισμικής απόκρισης, είναι πιθανόν να υπάρξουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά εάν αλλάξουν, έστω και όχι σημαντικά, οι παράμετροι που έχουν ληφθεί υπόψη. Παρ' όλα αυτά, πιστεύουμε ότι η παρούσα μελέτη δίνει αρκετές πληροφορίες για τον τρόπο συμπεριφοράς και αστοχίας των διαφόρων τμημάτων της κατασκευής και παρέχει μία πρώτη (προσεγγιστική) εκτίμηση της αναμενόμενης συμπεριφοράς του μνημείου σε μελλοντικούς σεισμούς. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως το μνημείο δεν κινδυνεύει άμεσα με κατάρρευση, μπορεί όμως να υποστεί σημαντικές ζημιές σε ένα ισχυρό σεισμό, κυρίως πτώσεις επιστυλίων και ολισθήσεις σπονδύλων.

Οι αναλύσεις που παρουσιάζονται παρακάτω δίνουν και αρκετές πληροφορίες για τη δυναμική συμπεριφορά συστοιχιών κίωνων σε σχηματισμούς γωνιών. Προκύπτει ότι τη μεγαλύτερη ταλάντωση υφίστανται οι ακραίοι κίονες των γωνιών, οι οποίοι κινδυνεύουν περισσότερο με κατάρρευση, ενώ οι κεντρικοί γωνιαίοι κίονες γενικώς δέχονται μικρότερη καταπόνηση.



Σχ. 6.1. Άποψη της ΝΑ γωνίας του μνημείου [Toelle–Kastenbein (1994)].



Σχ. 6.2. Κάτοψη της ΝΑ γωνίας και τα σωζόμενα σήμερα επιστύλια [Toelle–Kastenbein (1994)]. Η αρίθμηση των κιόνων είναι σύμφωνα με το Κεφ. 3.

## ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ

Για κάθε μία από τις τρεις ανεξάρτητες κατασκευές της ΝΑ γωνίας έγιναν ξεχωριστές αναλύσεις για την εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου. Τα προσομοιώματα υπολογισμού που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε περίπτωση δίνονται στα Σχήματα 6.3, 6.4 και 6.5. Και σε αυτές τις αναλύσεις ελήφθησαν υπόψη οι μεταλλικοί σύνδεσμοι μεταξύ των σπονδύλων των κιόνων. Δεν ελήφθησαν, όμως, υπόψη μεταλλικοί σύνδεσμοι στα επιστύλια, οι οποίοι γενικώς έχουν αφαιρεθεί και δεν υπάρχουν σήμερα στο μνημείο. Οι τιμές των παραμέτρων υπολογισμού που χρησιμοποιήθηκαν στις επιφάνειες επαφής δίνονται στο Κεφ. 3.

Στις αναλύσεις ελήφθησαν υπόψη, προσεγγιστικά, και οι βλάβες που υπάρχουν στους κίονες. Θεωρήθηκαν μόνο οι βλάβες που οφείλονται σε αποτμήσεις τμημάτων σπονδύλων, ενώ αμελήθηκαν οι υφιστάμενες μετατοπίσεις και οι στρογγυλεμένες επιφάνειες επαφών. Στους δύο κίονες 7.5 και 7.6, οι ζημιές δεν είναι σημαντικές και ελήφθη υπόψη μόνο η κατακόρυφη ρωγμή που υπάρχει στον σπόνδυλο 14 του κίονα 7.6 (Σχ. 5.4). Για τις δύο γωνίες, οι ζημιές ελήφθησαν υπόψη προσεγγιστικά, με αποτμήσεις τμημάτων των σπονδύλων. Ελείπει ακριβών στοιχείων, οι διαστάσεις των αποτεμνομένων τμημάτων υπολογίστηκαν κατ' εκτίμηση, με βάση τον οπτικό έλεγχο των κιόνων. Μία ακριβέστερη αποτύπωση των βλαβών, πιθανόν να τροποποιούσε τα αποτελέσματα, ιδιαίτερα όσον αφορά στην ευστάθεια της κατασκευής. Θα πρέπει να σημειωθεί, όμως, ότι η ακριβής γεωμετρία των ζημιών, η οποία περιλαμβάνει ακανόνιστες επιφάνειες θραύσεως, στρογγυλεμένες επιφάνειες επαφών, ρωγμές στους σπονδύλους κλπ, θα ήταν πρακτικά αδύνατον να ληφθεί υπόψη στην ανάλυση με όλες τις λεπτομέρειές της, ακόμη και αν ήταν γνωστή.

Λόγω των παραπάνω προσεγγίσεων της ανάλυσης και λαμβανομένης υπόψη και της ευαισθησίας της απόκρισης, τα συμπεράσματα του παρόντος κεφαλαίου, παρουσιάζονται με επιφύλλαξη.

Αναλύσεις έγιναν για τις σεισμικές διεγέρσεις της Έδεσσας, της Καλαμάτας και της Αθήνας (Σύνταγμα) για μέγιστες εδαφικές ταχύτητες  $PGV=60, 80$  και  $100 \text{ cm/sec}$ . Λεπτομέρειες για τις σεισμικές διεγέρσεις δίνονται στο Κεφ. 5. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Κεφ. 5, σεισμοί τύπου Erzincan είναι μάλλον απίθανο να έχουν συμβεί στην περιοχή των Αθηνών, γι' αυτό και τέτοιοι μακροπερίοδοι σεισμοί δεν ελήφθησαν υπόψη στην εκτίμηση του μελλοντικού σεισμικού κινδύνου, που επιχειρείται εδώ. Επίσης, και με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν στο Κεφ. 5, θεωρήθηκε ότι ένας σεισμός τύπου Αιγίου θα δώσει παρόμοια αποτελέσματα με αυτά που προκύπτουν για τις

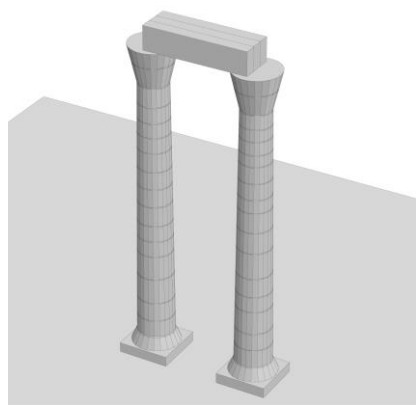
καταγραφές της Καλαμάτας και του Συντάγματος, γι' αυτό και τέτοιος ο σεισμός δεν μελετήθηκε.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι εδαφικές ταχύτητες που ελήφθησαν υπόψη στην ανάλυση ( $PGV=60, 80, 100 \text{ cm/sec}$ ) αντιστοιχούν σε αρκετά ισχυρούς σεισμούς. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου, η εδαφική ταχύτητα  $PGV=60 \text{ cm/sec}$  μπορεί να θεωρηθεί ως το άνω όριο για σεισμούς με μέση περίοδο επανάληψης 500 χρόνια περίπου. Αντίστοιχα, σεισμός με  $PGV=80 \text{ cm/sec}$  θα αντιστοιχούσε σε περίοδο επανάληψης της τάξης των 2000 ετών, ενώ σεισμός με  $PGV=100 \text{ cm/sec}$  αποτελεί εξαιρετικά ακραία περίπτωση, μάλλον απίθανη να συμβεί στην Αθήνα.

Για λόγους σύγκρισης, στον Πίνακα 6.1 δίνονται οι ταχύτητες των πραγματικών καταγραφών των σεισμών και οι συντελεστές μεγέθυνσης που αντιστοιχούν στις εδαφικές ταχύτητες που εξετάζονται.

**Πίνακας 6.1**  
**Μεγεθύνσεις σεισμικών διεγέρσεων**

Σεισμός	Long				Trans			
	Καταγραφή	Μεγέθυνση για			Καταγραφή	Μεγέθυνση για		
		PGV (cm/sec)	PGV=60 (cm/sec)	PGV=80 (cm/sec)	PGV=100 (cm/sec)	PGV=60 (cm/sec)	PGV=80 (cm/sec)	PGV=100 (cm/sec)
Γρίβα (Έδεσσα)	10.92	5.49	7.33	9.16	9.62	6.24	8.32	10.40
Καλαμάτα (Νομαρχία)	31.96	1.88	2.50	3.13	23.49	2.55	3.41	4.26
Αθήνα (Σύνταγμα)	12.63	4.75	6.33	7.92	13.46	4.46	5.94	7.43

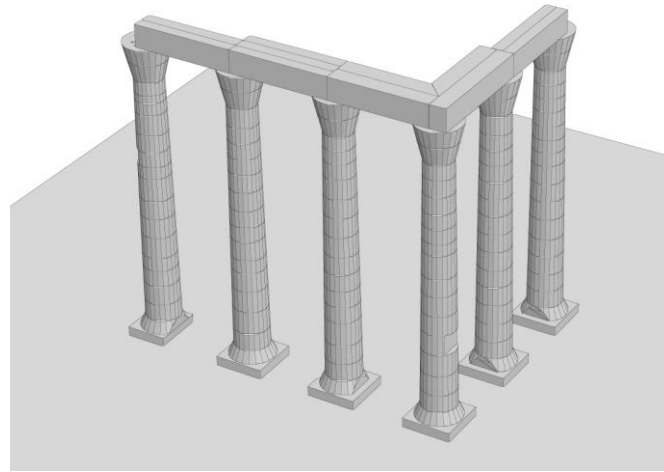


(α) ΝΑ όψη

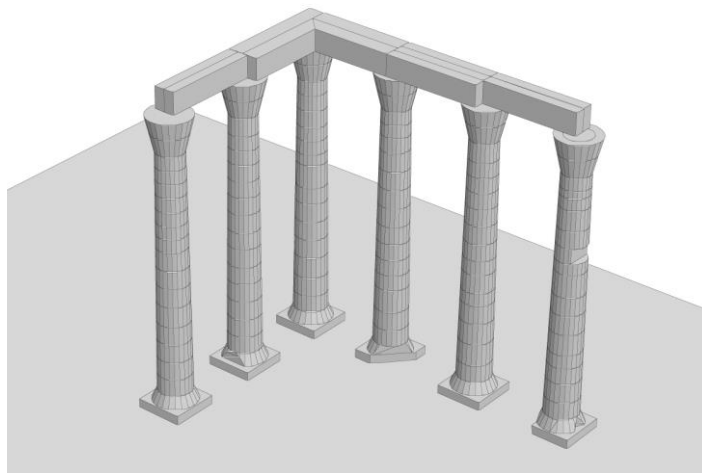


(β) Κάτοψη

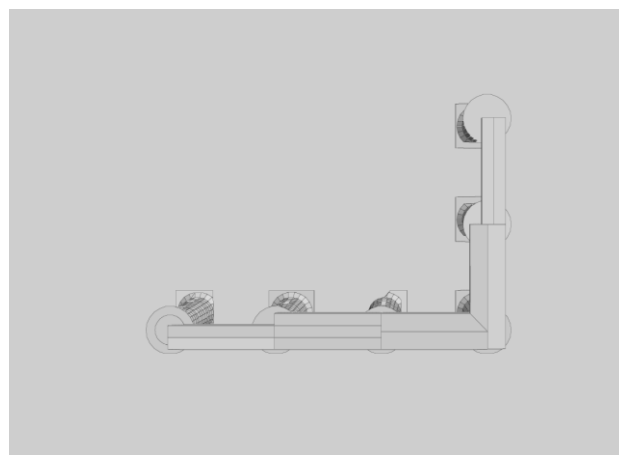
**Σχ. 6.3.** Προσομοίωμα υπολογισμού των κιόνων 7.5 και 7.6.



(α) ΝΑ όψη

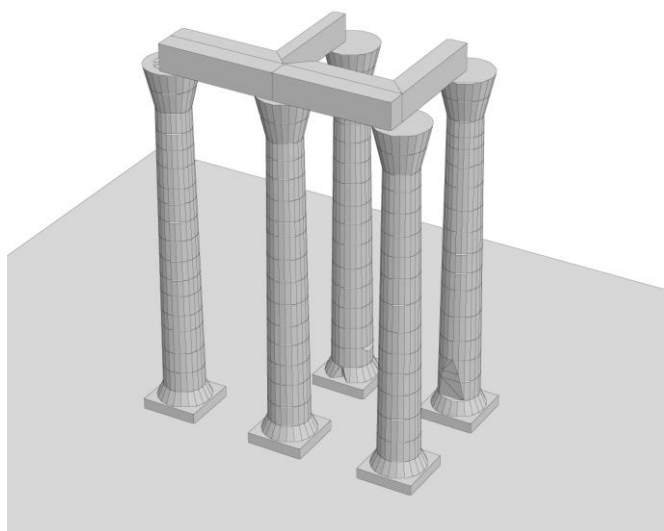


(β) ΒΔ όψη

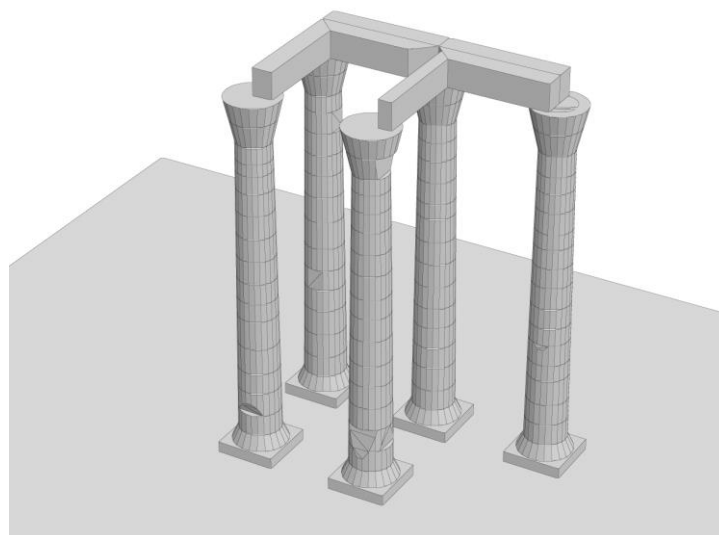


(γ) Κάτοψη

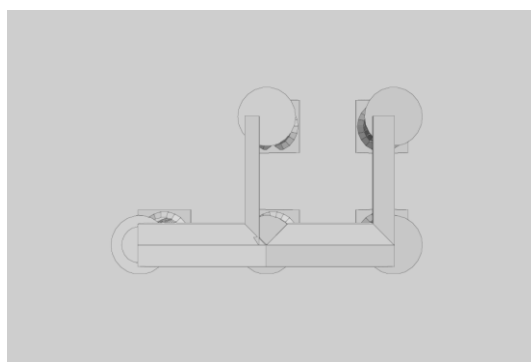
**Σχ. 6.4.** Προσομοίωμα υπολογισμού της εξωτερικής γωνίας και ζημιές που ελήφθησαν υπόψη.



(α) ΝΑ όψη



(β) ΒΔ όψη



(γ) Κάτοψη

**Σχ. 6.5.** Προσομοίωμα υπολογισμού της εσωτερικής γωνίας και ζημιές που ελήφθησαν υπόψη.

## ΚΙΟΝΕΣ 7.5 ΚΑΙ 7.6

Ο σχηματισμός των δύο κίωνων 7.5 και 7.6, που συνδέονται μεταξύ τους με επιστύλιο, παραμένει ευσταθής σε όλους τους σεισμούς. Σε ορισμένες όμως δονήσεις η κατασκευή παθαίνει αρκετές ζημιές, που εντοπίζονται κυρίως σε μεγάλες μετακινήσεις των δοκών του επιστυλίου και σε μόνιμες ολισθήσεις σπονδύλων, ενώ έντονη είναι και η απομάκρυνση των δύο τμημάτων του σπασμένου σπονδύλου. Η τελική παραμορφωμένη κατάσταση της κατασκευής μετά από κάθε σεισμό που εξετάστηκε δίνεται στα Σχ. 6.6, 6.7 και 6.8.

Εκτός από τις μόνιμες παραμορφώσεις που συμβαίνουν στην κατασκευή, ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι χρονοϊστορίες της απόκρισης, επειδή δίνουν αρκετές πληροφορίες για τη μέγιστη μετακίνηση που αναπτύχθηκε στους κίονες κατά τη διάρκεια κάθε σεισμού. Επίσης, από τις χρονοϊστορίες είναι εμφανείς και οι ολισθήσεις των σπονδύλων. Στα Σχ. 6.9 έως 6.14 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης της κορυφής κάθε κίονα (άνω τμήμα κιονοκράνου), που δίνουν μία συνολική εικόνα των παραμορφώσεων που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της σεισμικής δόνησης.

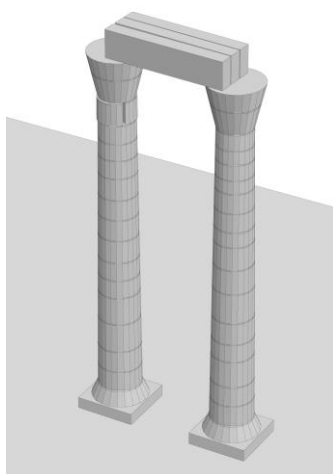
Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι:

- Για εδαφική ταχύτητα  $PGV=60$  cm/sec, κανένας σεισμός δεν προκαλεί έντονες ζημιές στην κατασκευή, εκτός από μικρές μετακινήσεις των δοκών του επιστυλίου και άνοιγμα της ρωγμής του σπασμένου σπονδύλου.

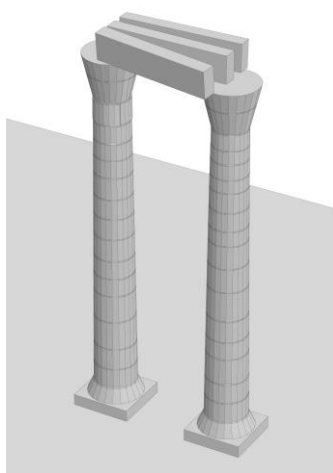
Για εδαφική ταχύτητα  $PGV=80$  cm/sec, οι δοκοί του επιστυλίου φθάνουν στα όρια κατάρρευσης για το σεισμό της Έδεσσας, ενώ για τους άλλους δύο σεισμούς οι αντίστοιχες μετακινήσεις είναι αρκετά μεγάλες, χωρίς όμως να κινδυνεύουν με κατάρρευση οι δοκοί. Και για τους τρεις σεισμούς υπάρχουν εμφανείς μόνιμες μετατοπίσεις σπονδύλων, κυρίως στη διαμήκη διεύθυνση, που αθροιστικά οδηγούν σε μετατόπιση των κιονοκράνων της τάξης κάποιων εκατοστών, ενώ συμβαίνει και απομάκρυνση των δύο τμημάτων του σπασμένου σπονδύλου (άνοιγμα ρωγμής).

Για εδαφική ταχύτητα  $PGV=100$  cm/sec, οι ζημιές της κατασκευής είναι αρκετά παρόμοιες με αυτές για  $PGV=80$  cm/sec.

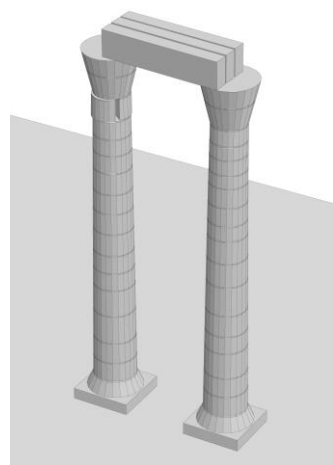
- Οι χρονοϊστορίες της απόκρισης για τους σεισμούς της Έδεσσας και της Καλαμάτας δείχνουν γενικώς εντονότερη ταλάντωση της κατασκευής στην εγκάρσια διεύθυνση (B-N) απ' ό,τι στη διαμήκη (A-Δ). Για το σεισμό όμως της Αθήνας, συμβαίνει το αντίστροφο φαινόμενο και η ταλάντωση στη διαμήκη διεύθυνση είναι εντονότερη απ' ό,τι στην εγκάρσια. Γενικώς, το εύρος ταλάντωσης



(α) PGV=60 cm/sec



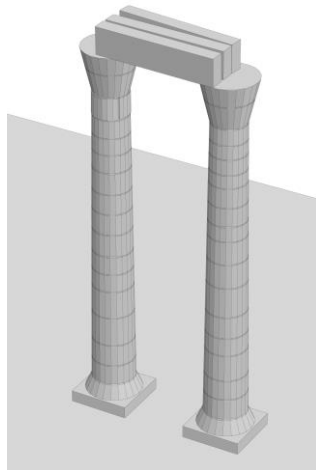
(β) PGV=80 cm/sec



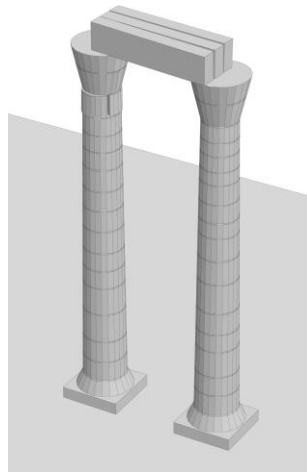
(γ) PGV=100 cm/sec

**Σχ. 6.6.** Ζημιές στους κίονες 7.5 και 7.6 από το σεισμό της Γρίβας (Εδεσσα).

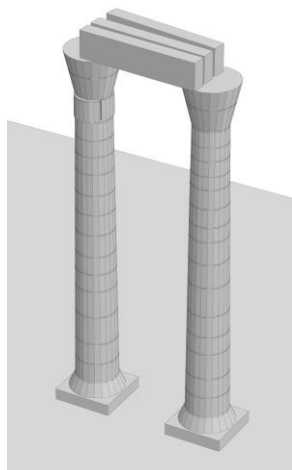




(α)  $PGV=60$  cm/sec

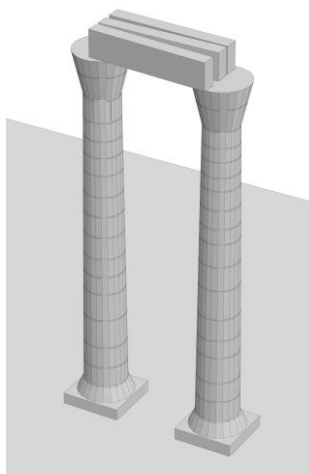


(β)  $PGV=80$  cm/sec

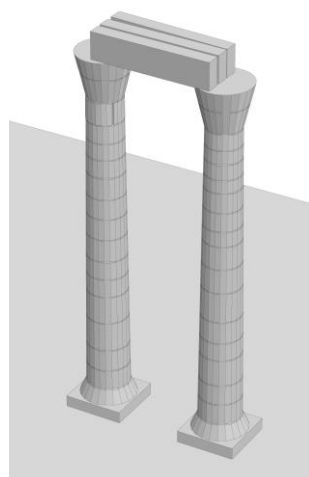


(γ)  $PGV=100$  cm/sec

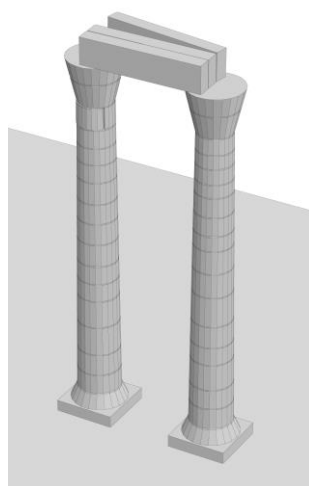
**Σχ. 6.7.** Ζημιές στους κίονες 7.5 και 7.6 από το σεισμό της Καλαμάτας.



(α) PGV=60 cm/sec

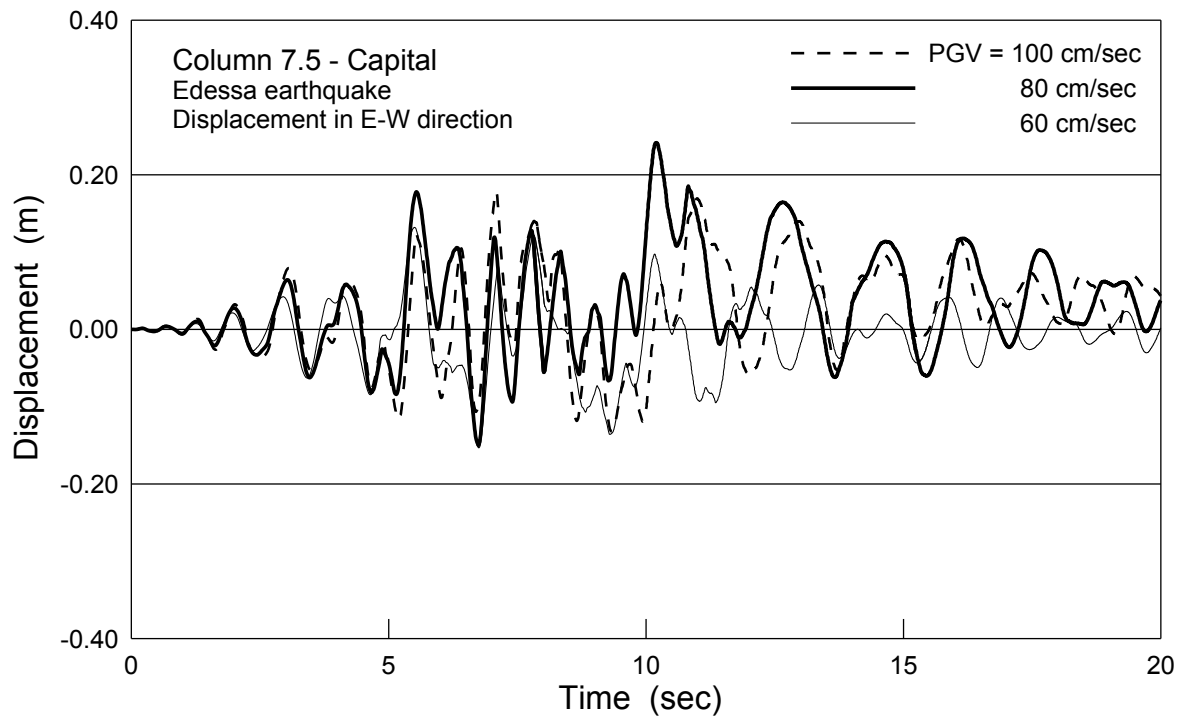


(β) PGV=80 cm/sec

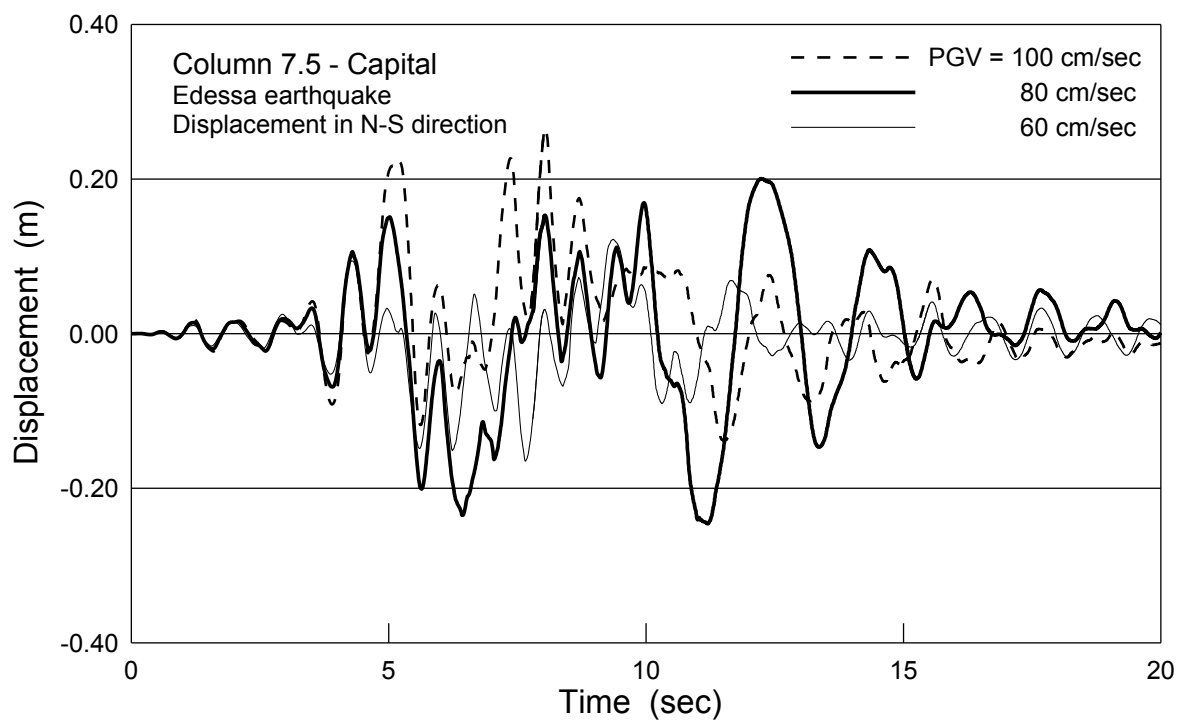


(γ) PGV=100 cm/sec

**Σχ. 6.8.** Ζημιές στους κίονες 7.5 και 7.6 από το σεισμό της Αθήνας (Σύνταγμα).

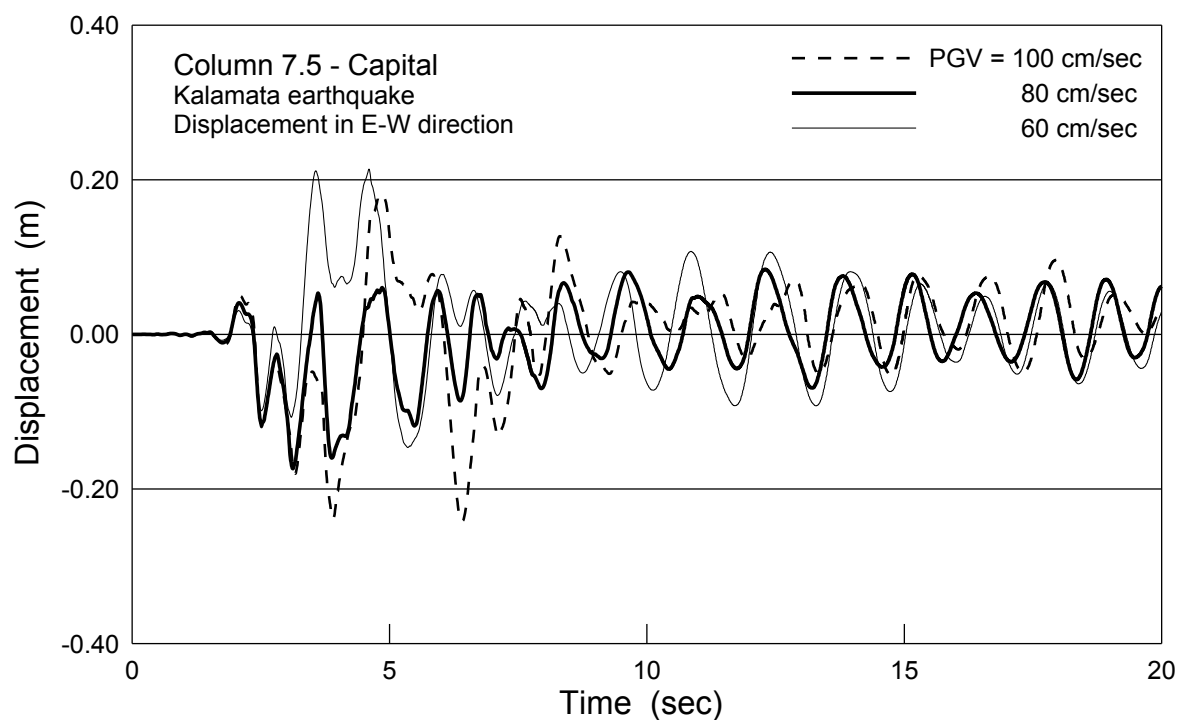


(α) Διαμήκης διεύθυνση (Α-Δ)

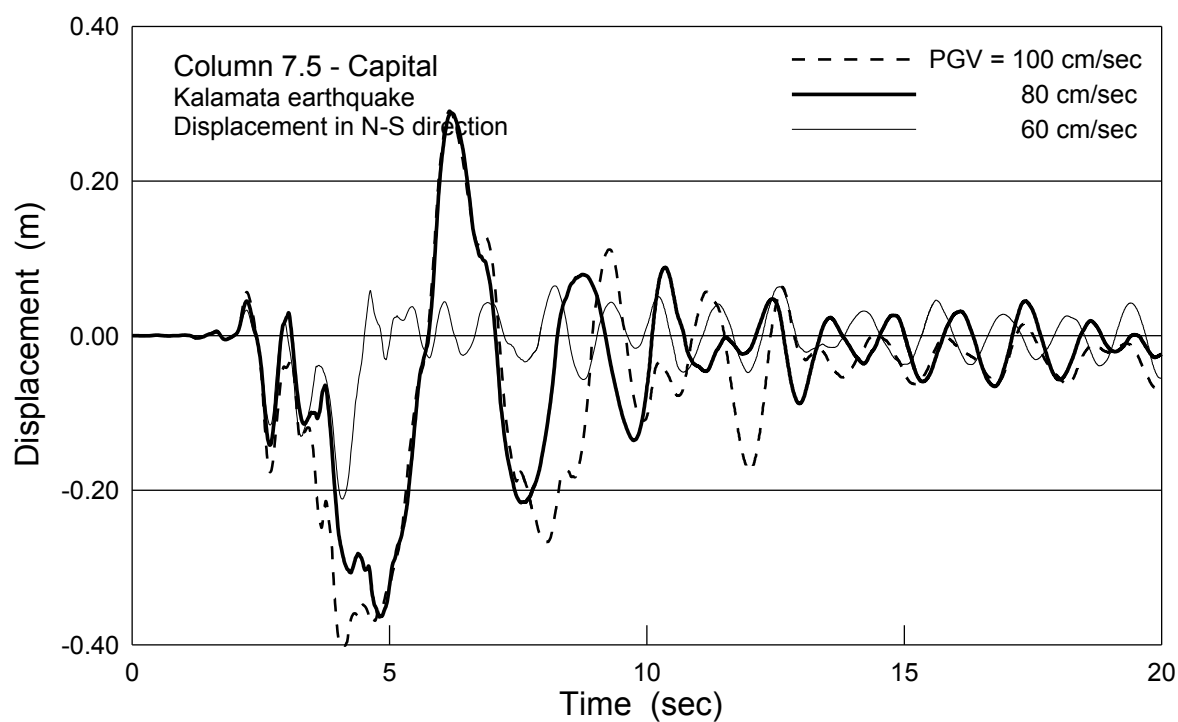


(β) Εγκάρσια διεύθυνση (Β-Ν)

**Σχ. 6.9.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 7.5 στο σεισμό της Γρίβας (Έδεσσα).

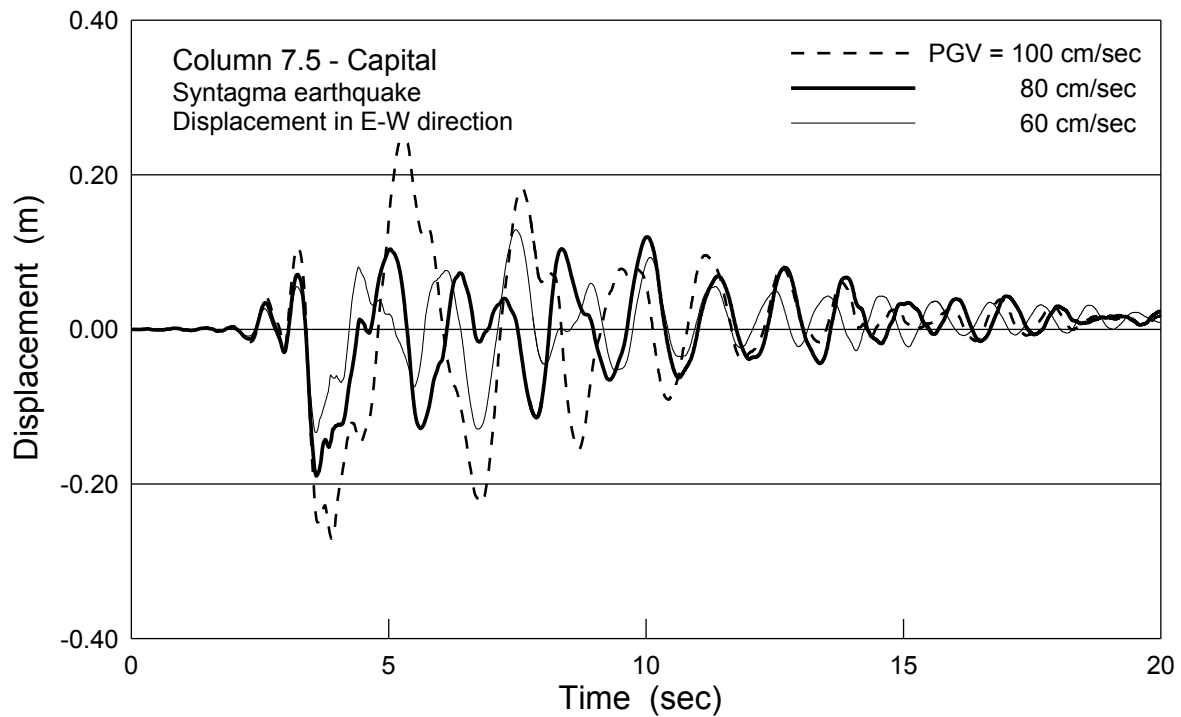


(α) Διαμήκης διεύθυνση (Α-Δ)

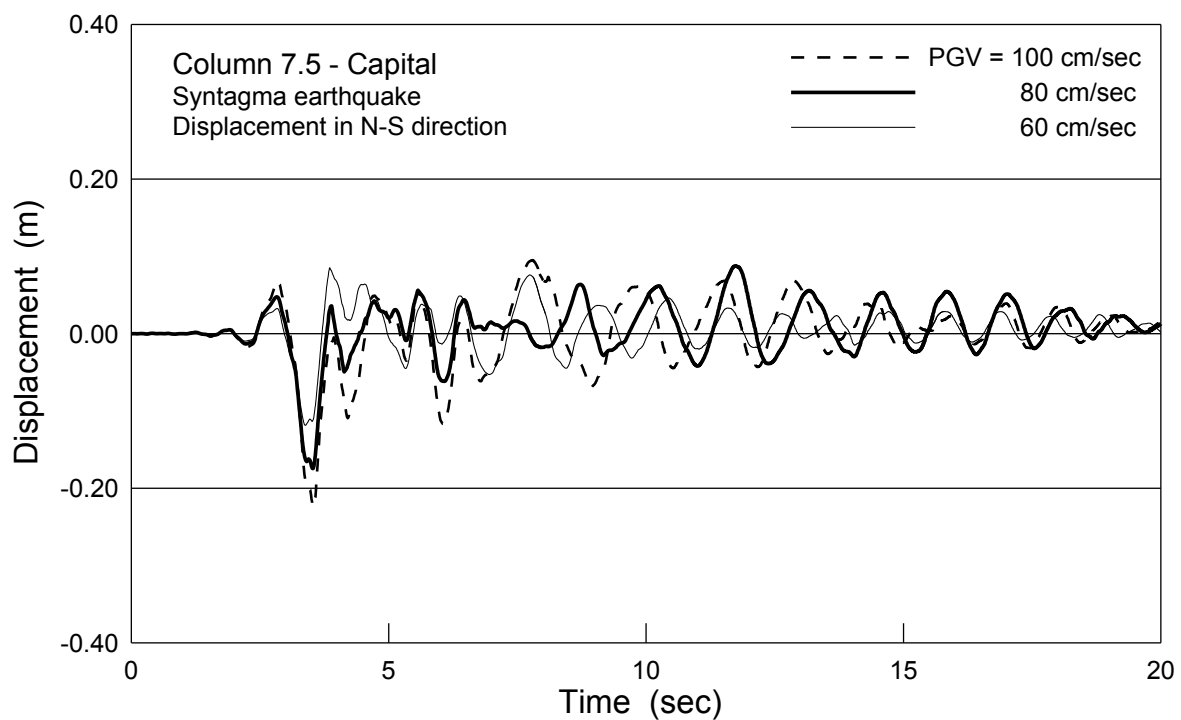


(β) Εγκάρσια διεύθυνση (Β-Ν)

**Σχ. 6.10.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 7.5 στο σεισμό της Καλαμάτας.

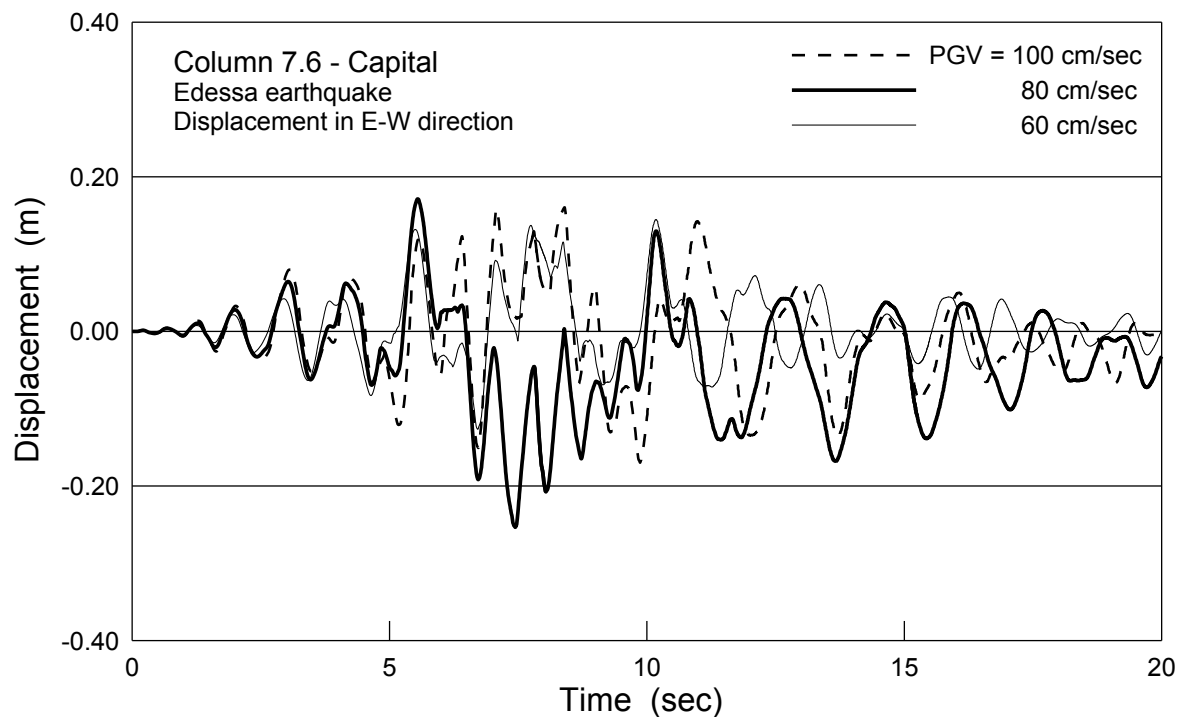


(α) Διαμήκης διεύθυνση (Α-Δ)

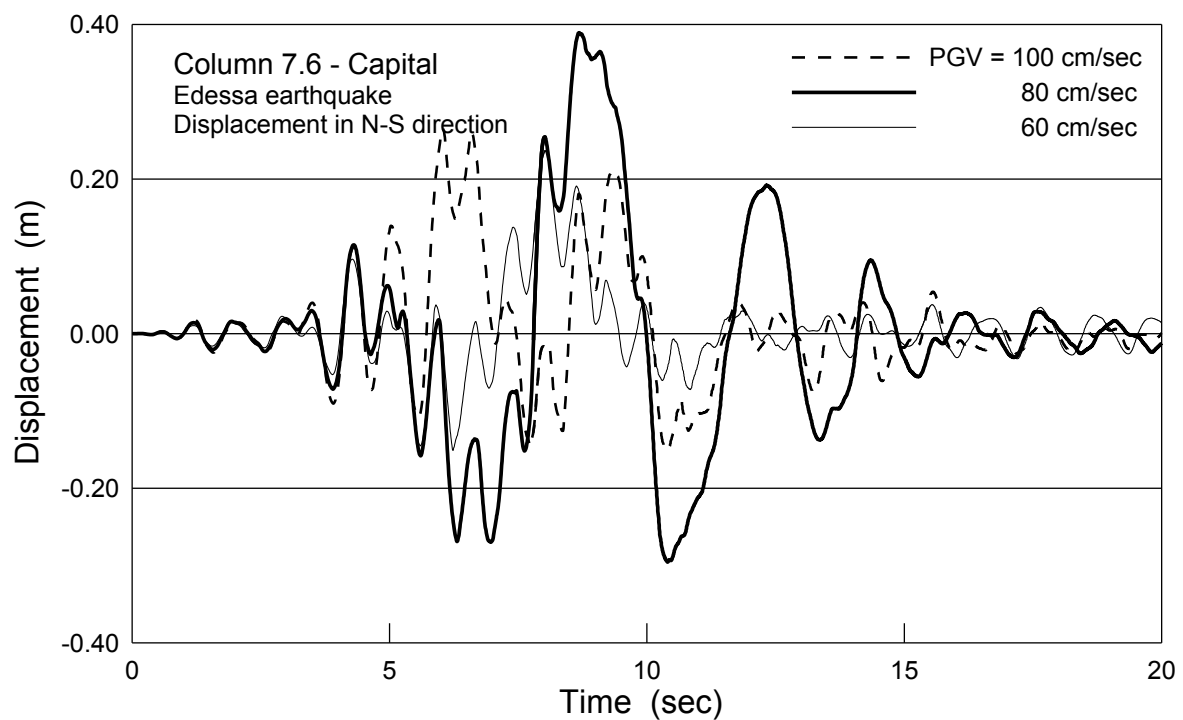


(β) Εγκάρσια διεύθυνση (Β-Ν)

**Σχ. 6.11.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 7.5 στο σεισμό της Αθήνας (Σύνταγμα).

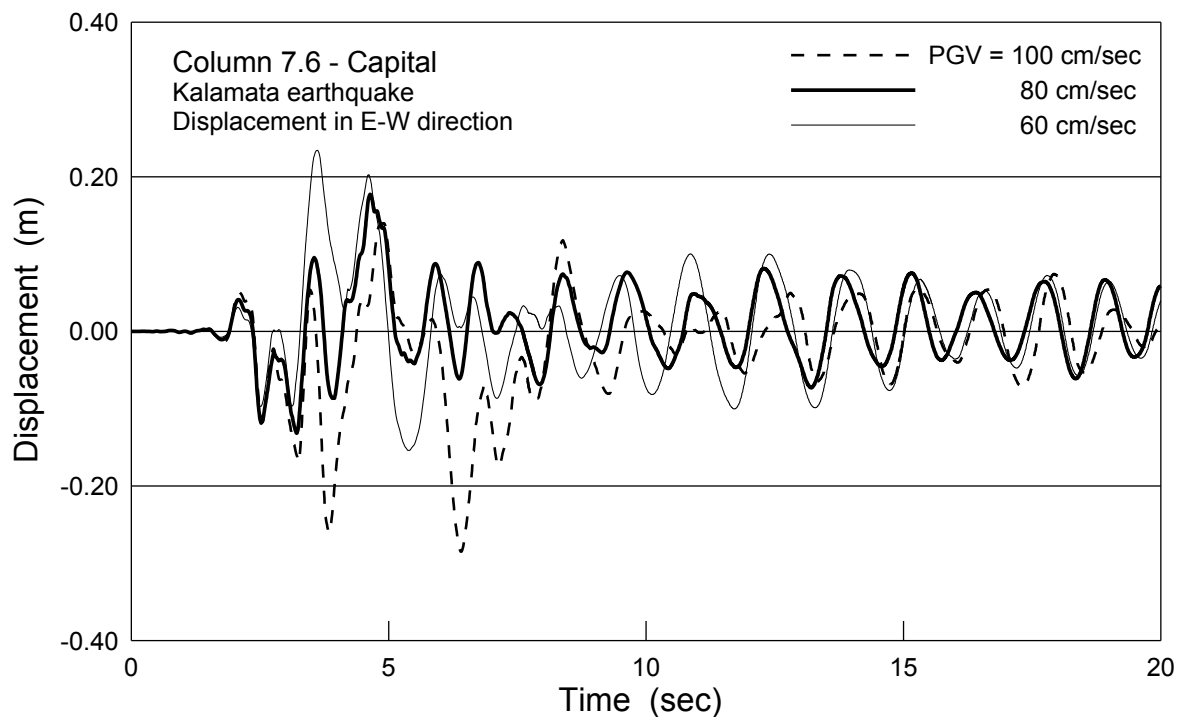


(α) Διαμήκης διεύθυνση (Α-Δ)

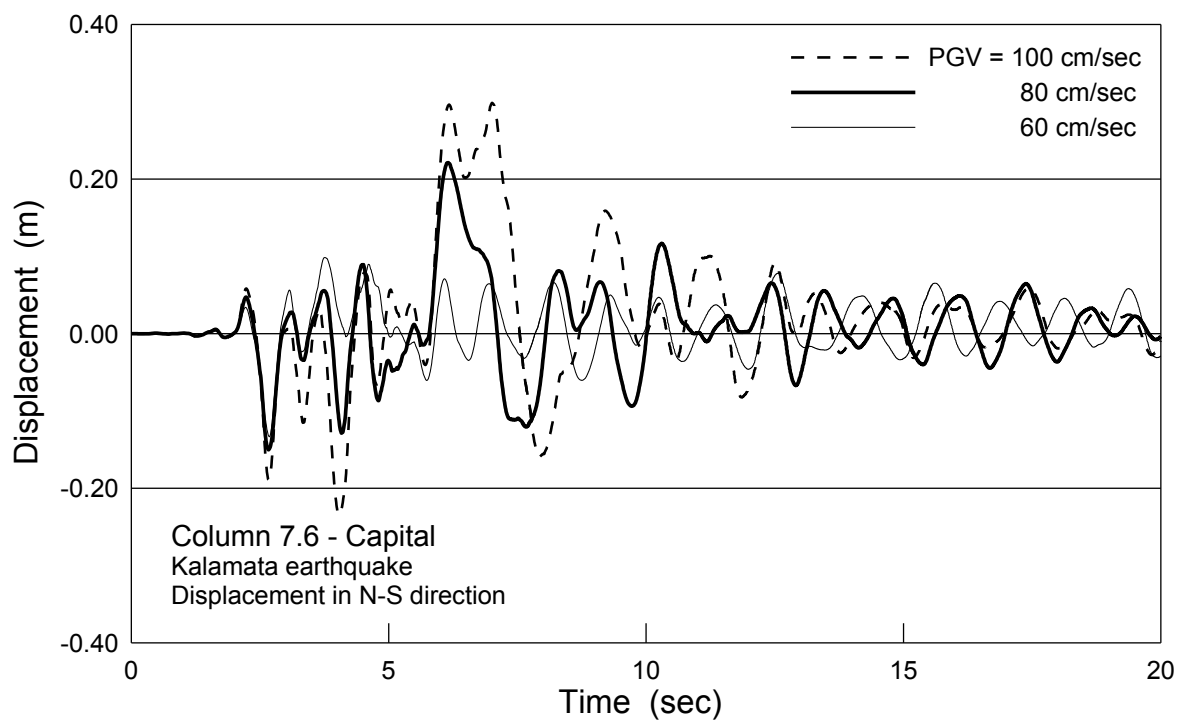


(β) Εγκάρσια διεύθυνση (Β-Ν)

**Σχ. 6.12.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 7.6 στο σεισμό της Γρίβας (Έδεσσα).

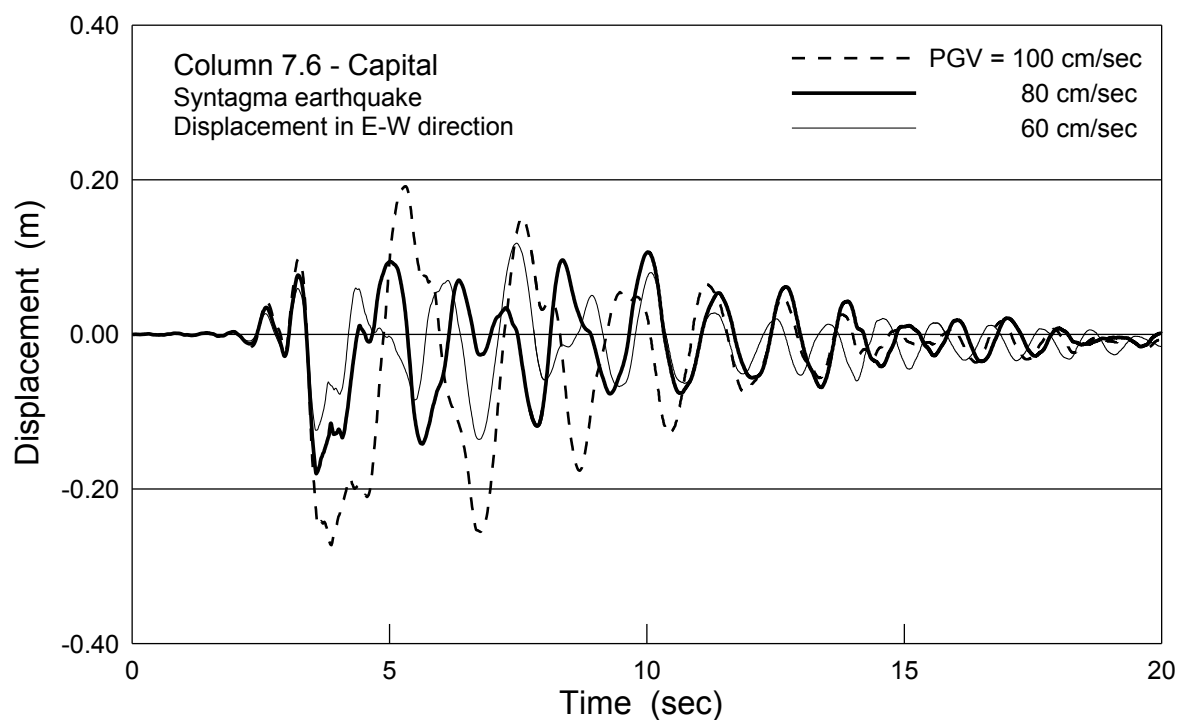


(α) Διαμήκης διεύθυνση (Α-Δ)

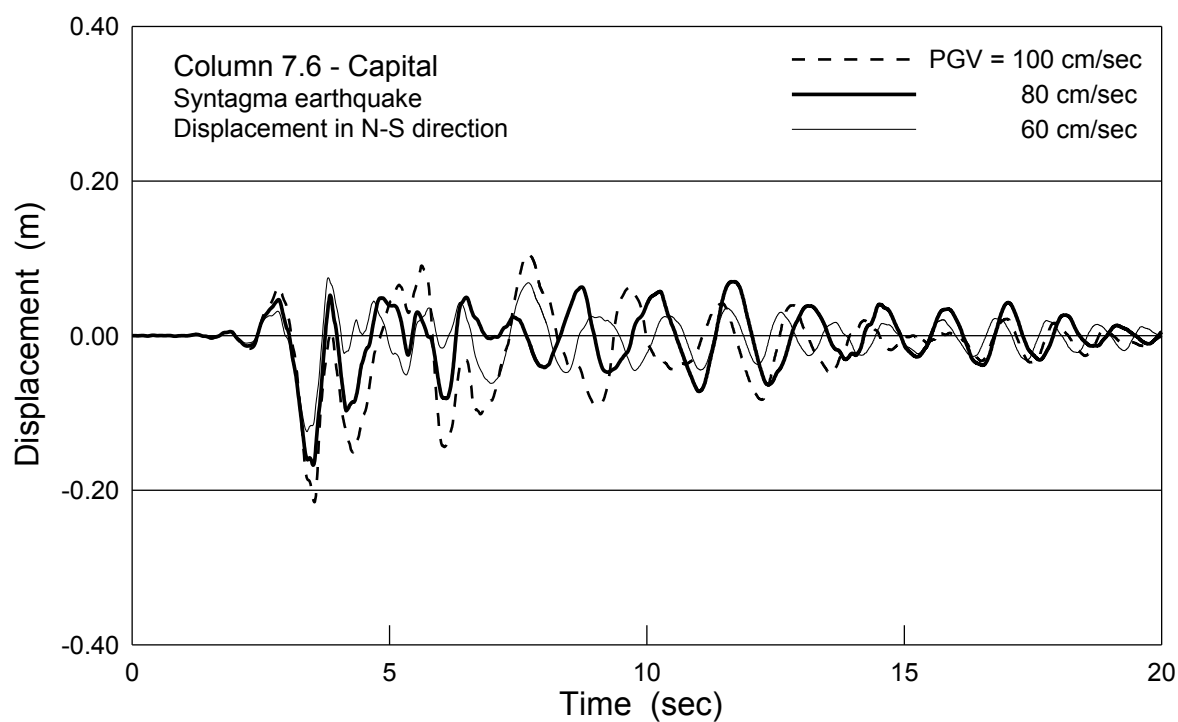


(β) Εγκάρσια διεύθυνση (Β-Ν)

**Σχ. 6.13.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 7.6 στο σεισμό της Καλαμάτας.



(α) Διαμήκης διεύθυνση (Α-Δ)



(β) Εγκάρσια διεύθυνση (Β-Ν)

**Σχ. 6.14.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 7.6 στο σεισμό της Αθήνας (Σύνταγμα).



Πίνακας 6.2

**Μέγιστες σχετικές (ως προς τη βάση) μετακινήσεις της κορυφής  
των δύο κίωνων, συζευγμένων με επιστύλιο**

**ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ (Α-Δ)**

PGV (cm/sec)	Σεισμική διέγερση					
	Γρίβα (Έδεσσα)		Καλαμάτα (Νομαρχία)		Αθήνα (Σύνταγμα)	
	$u_{max}$ (m)	$u_{max} / H$ (%)	$u_{max}$ (m)	$u_{max} / H$ (%)	$u_{max}$ (m)	$u_{max} / H$ (%)
	Κίονας 7.5					
60	0.15	0.9	0.21	1.3	0.13	0.8
80	0.24	1.4	0.17	1.0	0.19	1.1
100	0.18	1.1	0.24	1.4	0.27	1.6
	Κίονας 7.6					
60	0.14	0.9	0.23	1.4	0.14	0.8
80	0.25	1.5	0.18	1.1	0.18	1.1
100	0.17	1.0	0.29	1.7	0.27	1.6

**ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ (Β-Ν)**

PGV (cm/sec)	Σεισμική διέγερση					
	Γρίβα (Έδεσσα)		Καλαμάτα (Νομαρχία)		Αθήνα (Σύνταγμα)	
	$u_{max}$ (m)	$u_{max} / H$ (%)	$u_{max}$ (m)	$u_{max} / H$ (%)	$u_{max}$ (m)	$u_{max} / H$ (%)
	Κίονας 7.5					
60	0.16	1.0	0.21	1.3	0.12	0.7
80	0.25	1.5	0.36	2.2	0.17	1.0
100	0.27	1.6	0.40	2.4	0.22	1.3
	Κίονας 7.6					
60	0.24	1.4	0.13	0.8	0.12	0.7
80	0.39	2.3	0.22	1.3	0.17	1.0
100	0.27	1.6	0.30	1.8	0.22	1.3

είναι εξ' ίσου μεγάλο και στις δύο κατευθύνσεις, παρ' ότι η σύζευξη των δύο στύλων, που προσφέρει το επιστύλιο, λογικά επηρεάζει περισσότερο τη συμπεριφορά στη διαμήκη διεύθυνση. Αυτή η συμπεριφορά δείχνει ότι η σημαντικά διαφορετική γεωμετρία της κατασκευής στις δύο διευθύνσεις δεν φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο στην απόκριση.

- Παρά τη διαφορετική τους γεωμετρία (ο κίονας 7.5 έχει 15 σπονδύλους και ο κίονας 7.6 έχει 14 σπονδύλους), στις περισσότερες περιπτώσεις οι δύο στύλοι έχουν παρόμοια συμπεριφορά, ιδιαίτερα στη διαμήκη διεύθυνση, όπου η σύζευξη

τους με το επιστύλιο είναι εντονότερη. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις, στις οποίες η συμπεριφορά τους διαφοροποιείται σημαντικά. Αυτό συμβαίνει για παράδειγμα στο σεισμό της Έδεσσας για  $PGV=80$  cm/sec, για τον οποίο η απόκριση στην εγκάρσια διεύθυνση του δυτικού κίονα 7.6 [Σχ. 6.12.(β)] είναι πολύ πιο έντονη από την αντίστοιχη απόκριση του ανατολικού κίονα 7.5 [Σχ. 6.9.(β)]. Τουναντίον, για το σεισμό της Καλαμάτας με  $PGV=80$  cm/sec, η απόκριση του ανατολικού κίονα 7.5 στην εγκάρσια διεύθυνση [Σχ. 6.10.(β)] είναι πολύ πιο έντονη από την αντίστοιχη απόκριση του δυτικού κίονα 7.6 [Σχ. 6.13.(β)].

- Επαληθεύεται για άλλη μία φορά η έντονα μη-γραμμική συμπεριφορά αυτών των κατασκευών. Έτσι, σε ορισμένες περιπτώσεις αύξηση της εδαφικής ταχύτητας οδηγεί σε μείωση της απόκρισης [π.χ. Σχ. 6.10.(α) και 6.12.(β)]. Οι μέγιστες σχετικές μετακινήσεις της κορυφής κάθε κίονα, για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, δίνονται στον Πίνακα 6.2, απ'όπου προκύπτει ότι σε πολλές περιπτώσεις η σχέση των μετακινήσεων δεν ακολουθεί την αναλογία των εδαφικών ταχυτήτων.
- Το πλάτος ταλάντωσης των κίωνων (Πίνακας 6.2) είναι γενικώς μικρό, συγκρινόμενο με το ύψος τους ( $\approx 16.80$  m). Στη δυσμενέστερη περίπτωση, η μέγιστη μετακίνηση της κορυφής είναι 0.24 m για  $PGV=60$  cm/sec, 0.39 m για  $PGV=80$  cm/sec και 0.40 m για  $PGV=100$  cm/sec. Για τη μεγαλύτερη τιμή,  $u_{max}=0.40$  m, ο λόγος (drift)  $u_{max}/H$  προκύπτει 2.4%.

## ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΓΩΝΙΑ

Οι κίονες της εξωτερικής γωνίας, παρά τις αρκετές βλάβες που φέρουν, παραμένουν γενικώς όρθιοι σε όλους τους σεισμούς, εκτός από τη σεισμική διέγερση της Καλαμάτας για  $PGV=100$  cm/sec, για την οποία καταρρέει ο ακραίος κίονας 6.1. Σε ορισμένες όμως δονήσεις προκαλούνται αρκετές βλάβες, που εντοπίζονται κυρίως σε μεγάλες μετατοπίσεις δοκών επιστυλίων, οι οποίες οδηγούν σε κατάρρευση δοκών, και σε έντονες, μόνιμες ολισθήσεις σπονδύλων (έντονες είναι οι ολισθήσεις που συμβαίνουν στα 2/3 περίπου του ύψους του κίονα 6.1). Η τελική παραμορφωμένη κατάσταση της κατασκευής, μετά από κάθε σεισμό που εξετάστηκε, δίνεται στα Σχ. 6.15, 6.16 και 6.17.

Στα Σχ. 6.18 έως 6.26 δίνονται οι χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης των κορυφών (άνω τμήμα κionoκράνων) των δύο ακραίων κίωνων 6.1 και 8.4, οι οποίοι παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες μετακινήσεις, καθώς και του κεντρικού γωνιακού κίονα 8.1. Οι μετακινήσεις των ενδιάμεσων κίωνων είναι μικρότερες και παραλείπονται για λόγους οικονομίας χώρου.

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων προκύπτουν τα παρακάτω ενδιαφέροντα συμπεράσματα:

- Για εδαφική ταχύτητα  $PGV=60$  cm/sec προκαλούνται αρκετές ζημιές στην κατασκευή, που εντοπίζονται κυρίως σε μετατοπίσεις των δοκών των επιστυλίων και σε ολισθήσεις σπονδύλων. Οι ζημιές είναι μεγαλύτερες για τους σεισμούς της Έδεσσας και της Καλαμάτας απ' ό,τι για το σεισμό του Συντάγματος. Στο σεισμό της Καλαμάτας πέφτει η μία δοκός του επιστυλίου που ενώνει τους κίονες 8.2 και 8.3. Στις σεισμικές δονήσεις της Έδεσσας και της Καλαμάτας προκαλούνται σημαντικές μόνιμες παραμορφώσεις στον ακραίο κίονα 6.1, οι οποίες είναι της τάξης των 10-15 cm [Σχ. 6.18.(β) και 6.19.(β)].

Για εδαφική ταχύτητα  $PGV=80$  cm/sec, οι προκαλούμενες ζημιές είναι γενικώς μεγαλύτερες και αρχίζουν να γίνονται εμφανείς οι μετατοπίσεις των επιστυλίων ακόμη και για το σεισμό της Αθήνας. Στο σεισμό της Καλαμάτας πέφτει η μία δοκός του επιστυλίου 8.3 – 8.4. Έντονη είναι και πάλι η μετατόπιση του ανώτερου τμήματος του κίονα 6.1, η οποία φθάνει τα 20 cm για το σεισμό της Καλαμάτας [Σχ. 6.18.(β)]. Σε αυτή την περίπτωση, μόνιμη παραμόρφωση αυτού του κίονα εμφανίζεται και στο σεισμό της Αθήνας, αν και αρκετά μικρότερη [περίπου 5 cm, Σχ. 6.20.(α)].

Για εδαφική ταχύτητα  $PGV=100$  cm/sec, συμβαίνει κατάρρευση του κίονα 6.1 για το σεισμό της Καλαμάτας [Σχ. 6.16.(γ)]. Για τους άλλους σεισμούς, η μόνιμη μετατόπιση του ανώτερου τμήματος αυτού του κίονα είναι περίπου 10 cm [Σχ. 6.18.(β) και 6.20.(α)]. Σε όλους τους σεισμούς παρατηρούνται μεγάλες μετατοπίσεις των επιστυλίων, χωρίς όμως καταρρεύσεις δοκών.

- Οι χρονοϊστορίες της απόκρισης των ακραίων κίωνων 6.1 και 8.4 δείχνουν, γενικώς, ελαφρώς εντονότερη ταλάντωση στη διεύθυνση που είναι κάθετη στον άξονα του επιστυλίου που τους ενώνει με το διπλανό τους κίονα (διεύθυνση Α-Δ για τον κίονα 6.1 και Β-Ν για τον 8.4) απ' ό,τι στην παράλληλη προς αυτόν διεύθυνση [Σχ. 6.18-6.20 και 6.24-6.25]. Εξαίρεση αποτελεί μόνο η περίπτωση του κίονα 8.4 για το σεισμό του Συντάγματος (Σχ. 6.26), όπου η ταλάντωση στη διεύθυνση Α-Δ είναι εντονότερη από αυτήν στη διεύθυνση Β-Ν. Υπενθυμίζεται ότι ανάλογο φαινόμενο είχε προκύψει γι' αυτό το σεισμό και για το σύστημα των παρακείμενων δύο κίωνων 7.5 και 7.6 (Σχ. 6.11 και 6.14).



(α) PGV=60 cm/sec

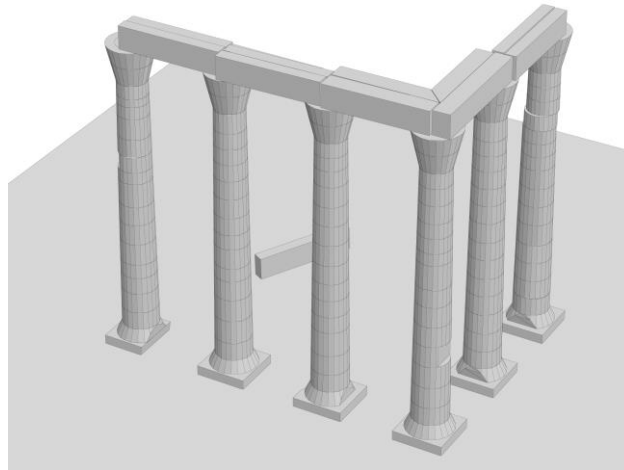


(β) PGV=80 cm/sec

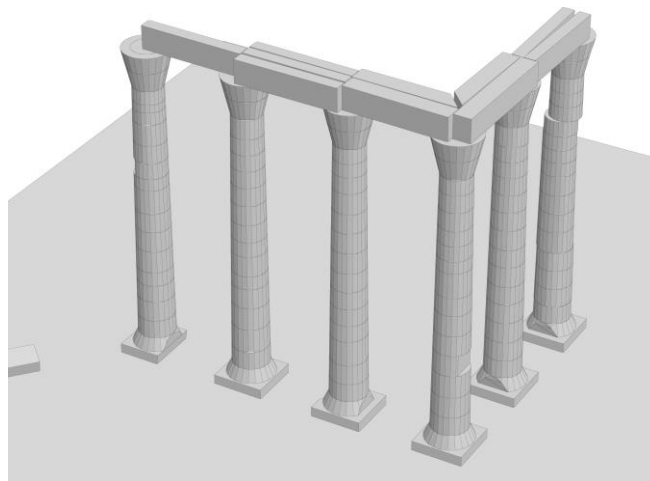


(γ) PGV=100 cm/sec

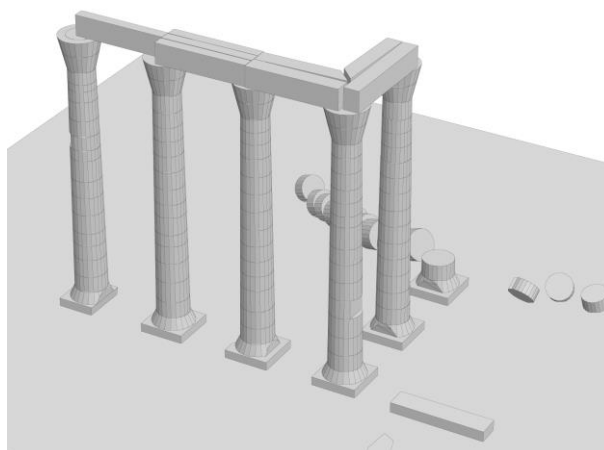
**Σχ. 6.15.** Ζημιές στην εξωτερική γωνία από το σεισμό της Γρίβας (Έδεσσα).



(α) PGV=60 cm/sec

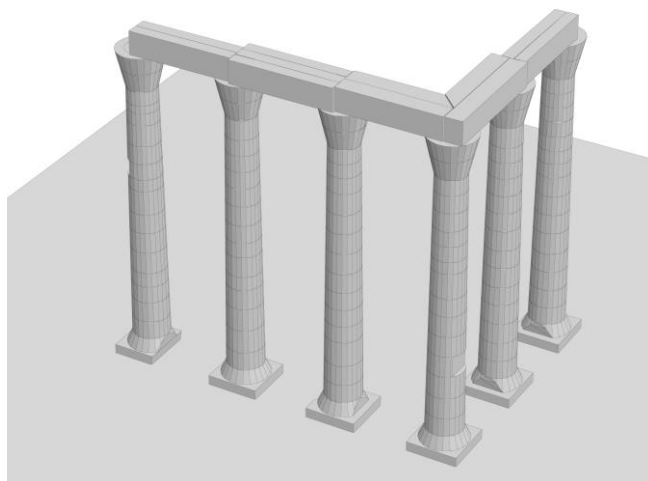


(β) PGV=80 cm/sec



(γ) PGV=100 cm/sec

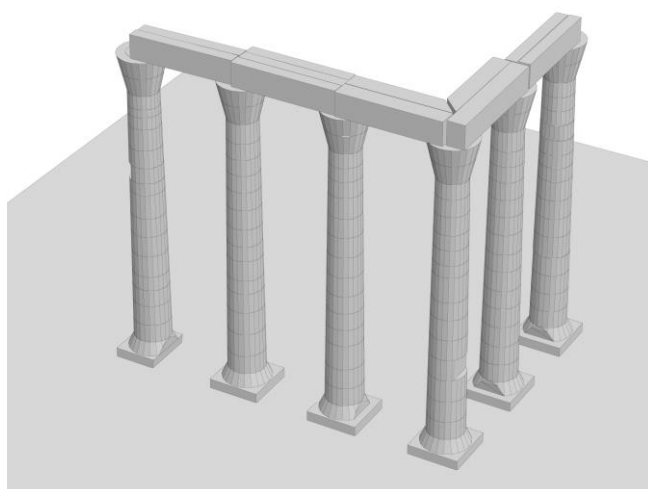
**Σχ. 6.16.** Ζημιές στην εξωτερική γωνία από το σεισμό της Καλαμάτας.



(α) PGV=60 cm/sec

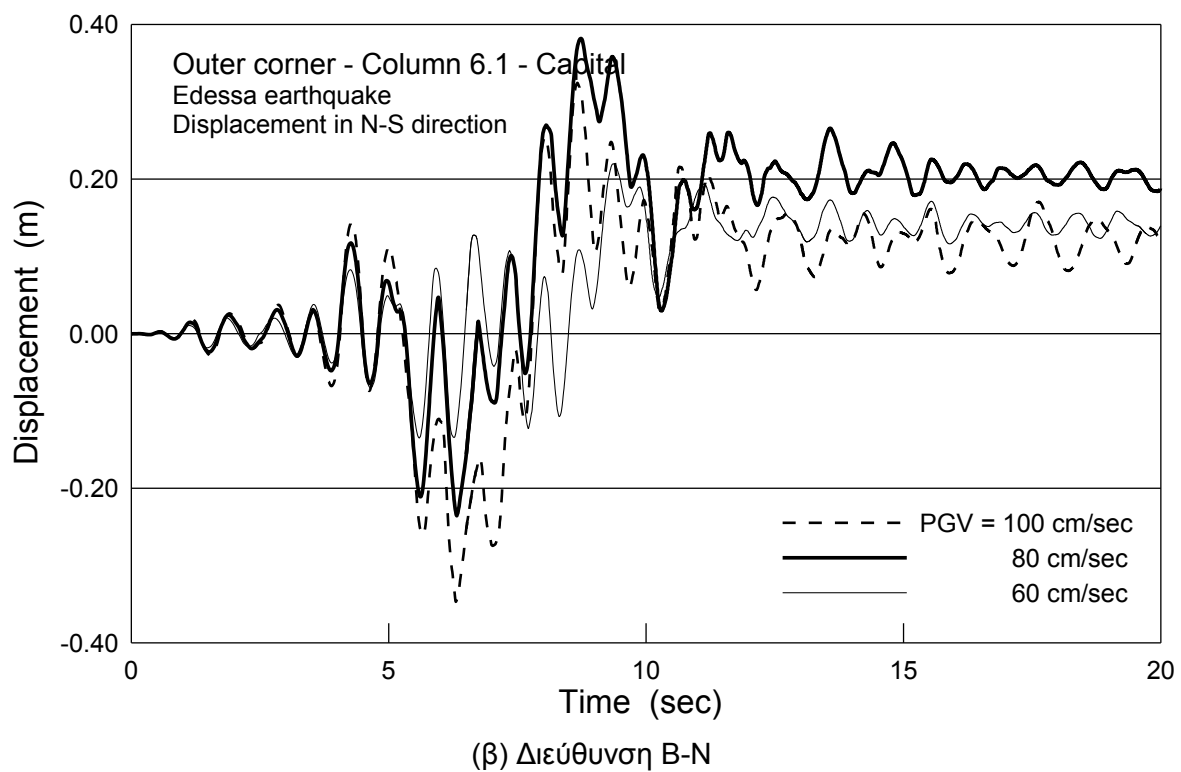
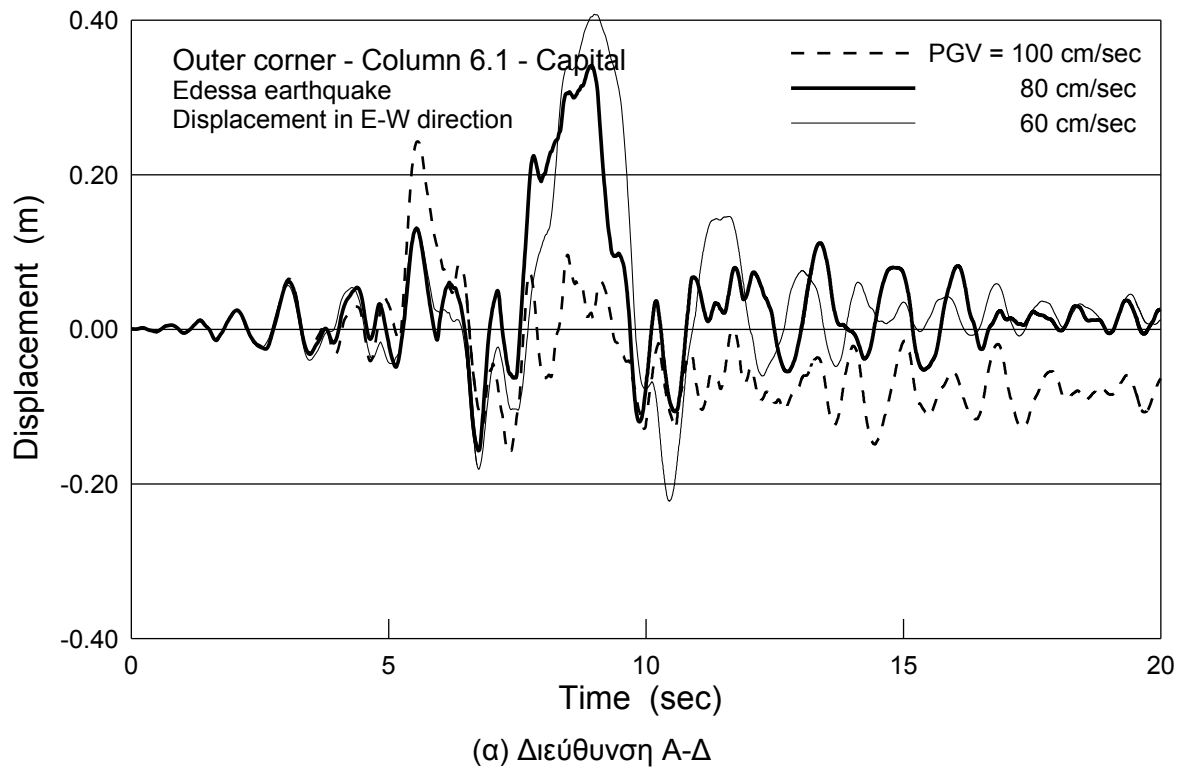


(β) PGV=80 cm/sec

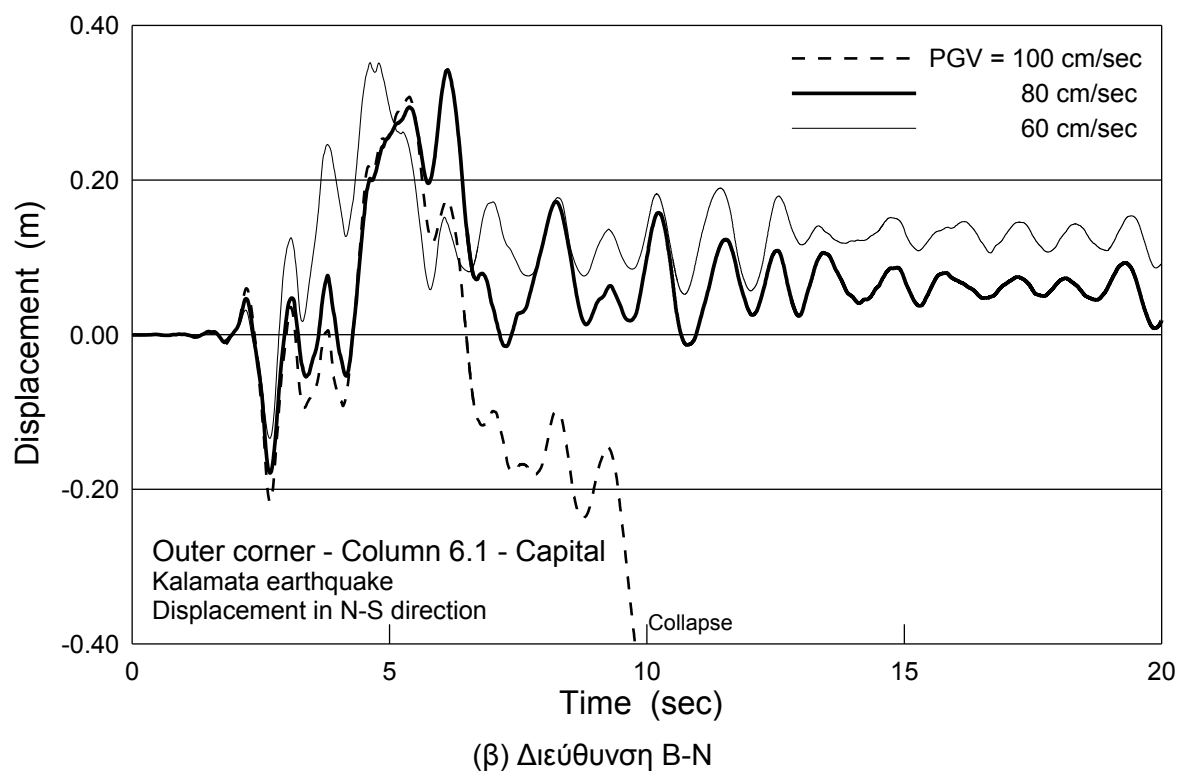
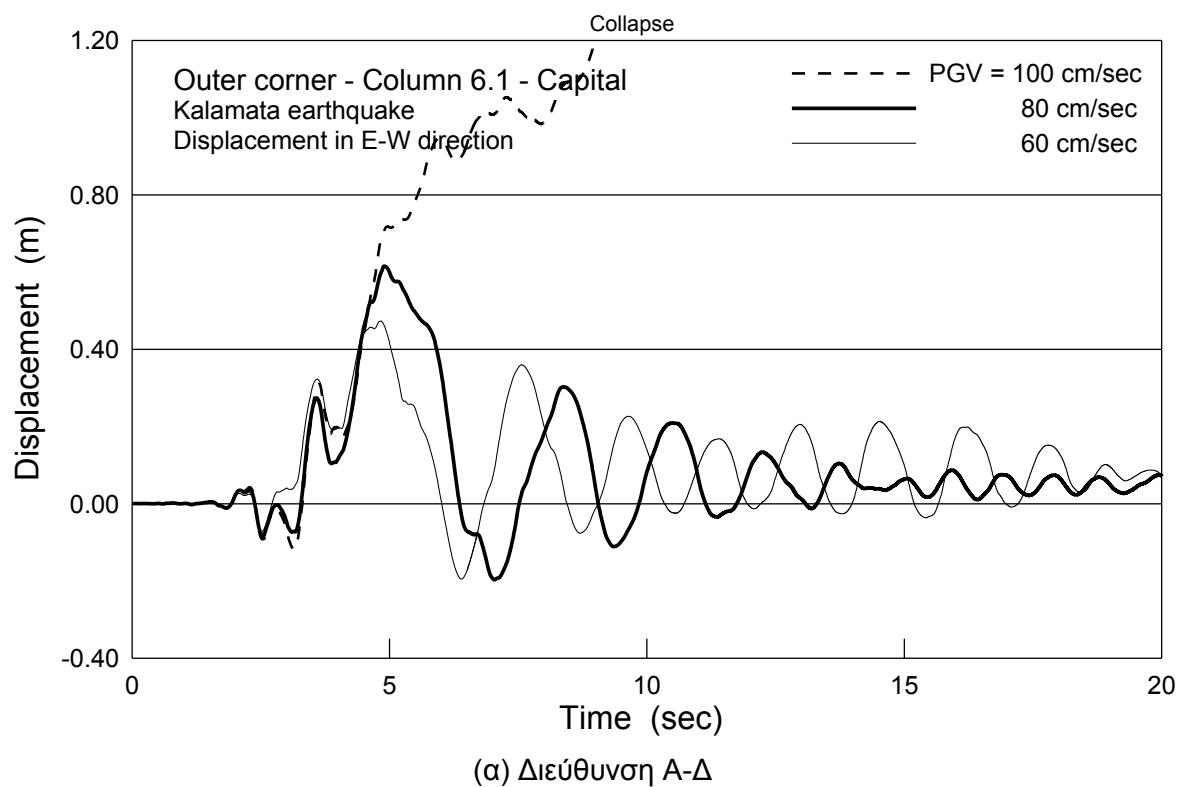


(γ) PGV=100 cm/sec

**Σχ. 6.17.** Ζημιές στην εξωτερική γωνία από το σεισμό της Αθήνας (Σύνταγμα).

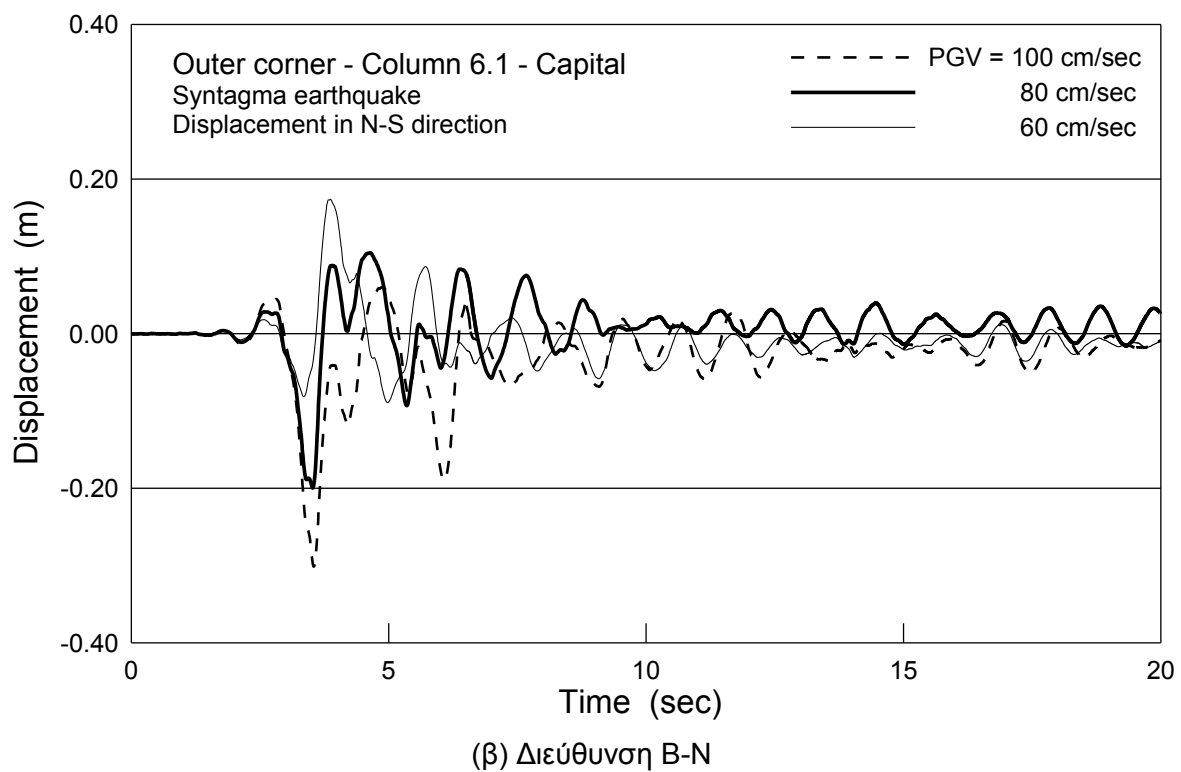
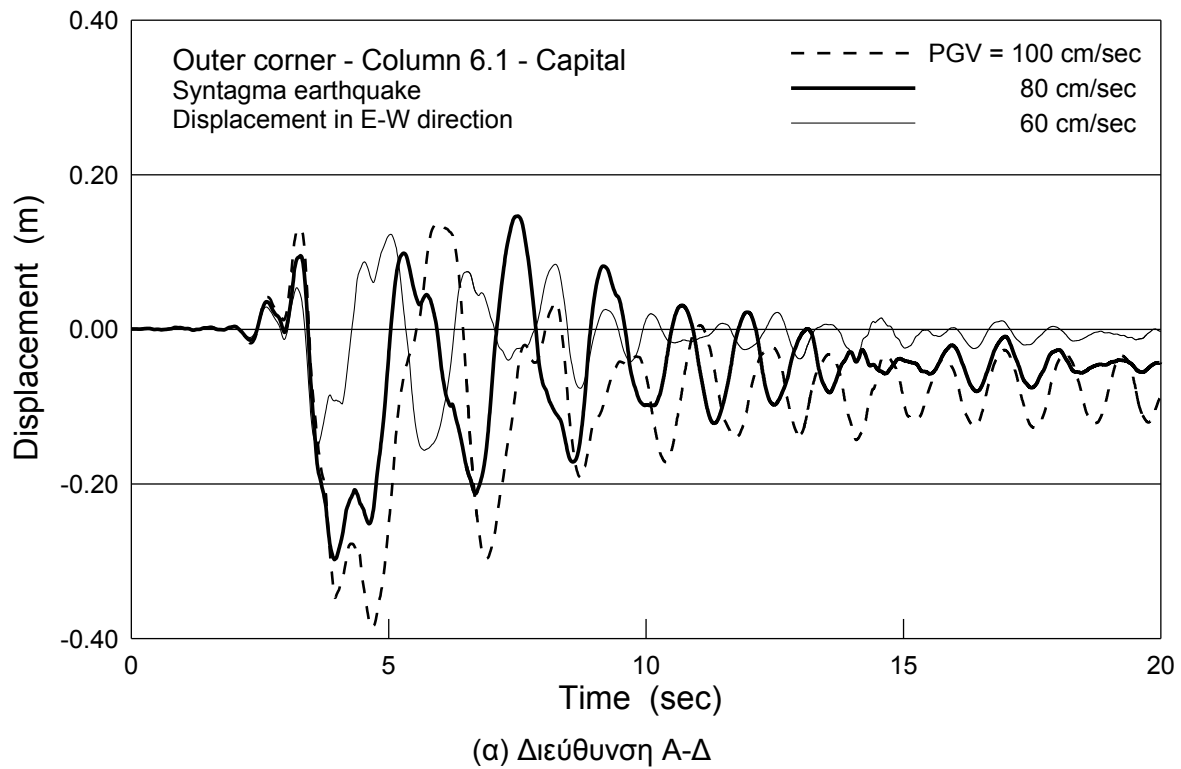


**Σχ. 6.18.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 6.1 στο σεισμό της Γρίβας (Έδεσσα).

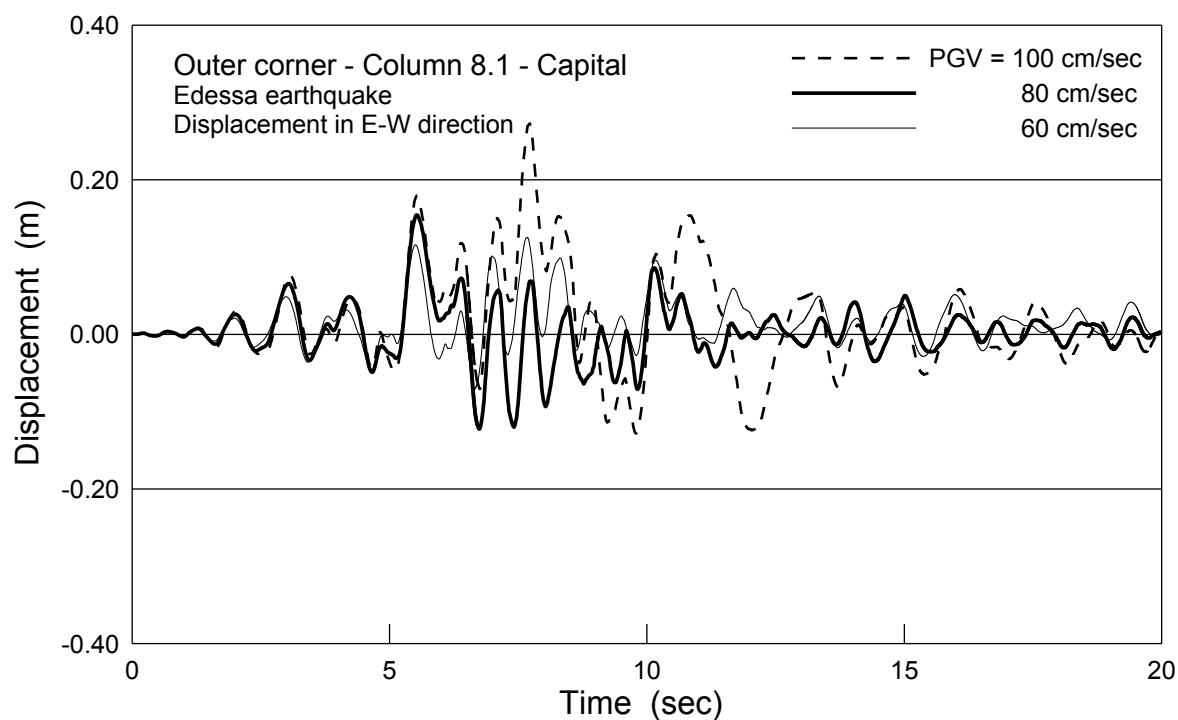


**Σχ. 6.19.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 6.1 στο σεισμό της Κалаμάτας (για PGV=100 cm/sec ο κίονας καταρρέει).

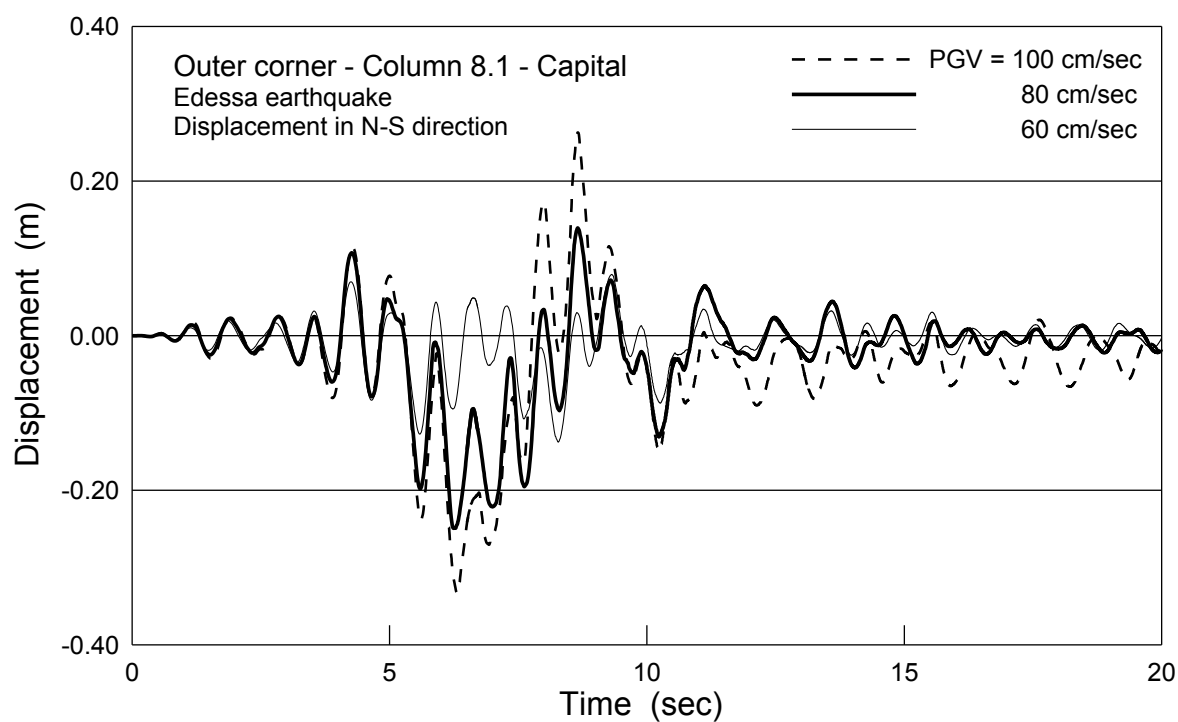




**Σχ. 6.20.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 6.1 στο σεισμό της Αθήνας (Σύνταγμα).

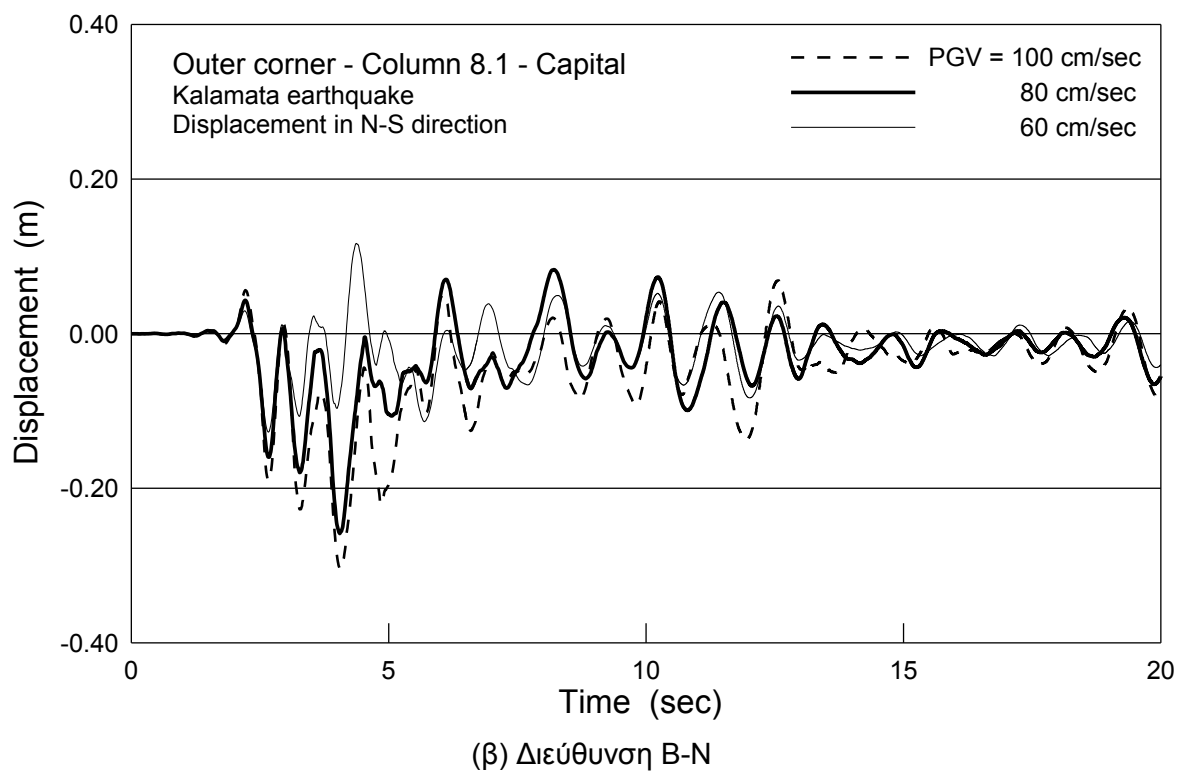
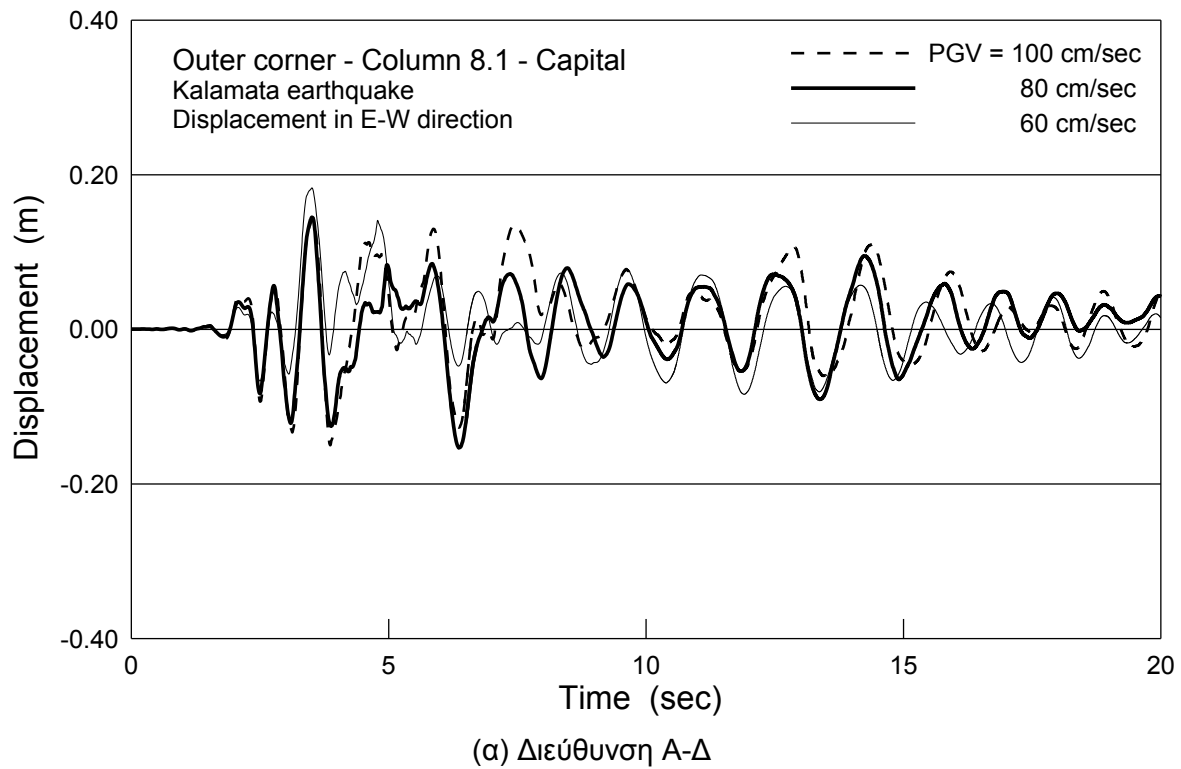


(α) Διεύθυνση Α-Δ

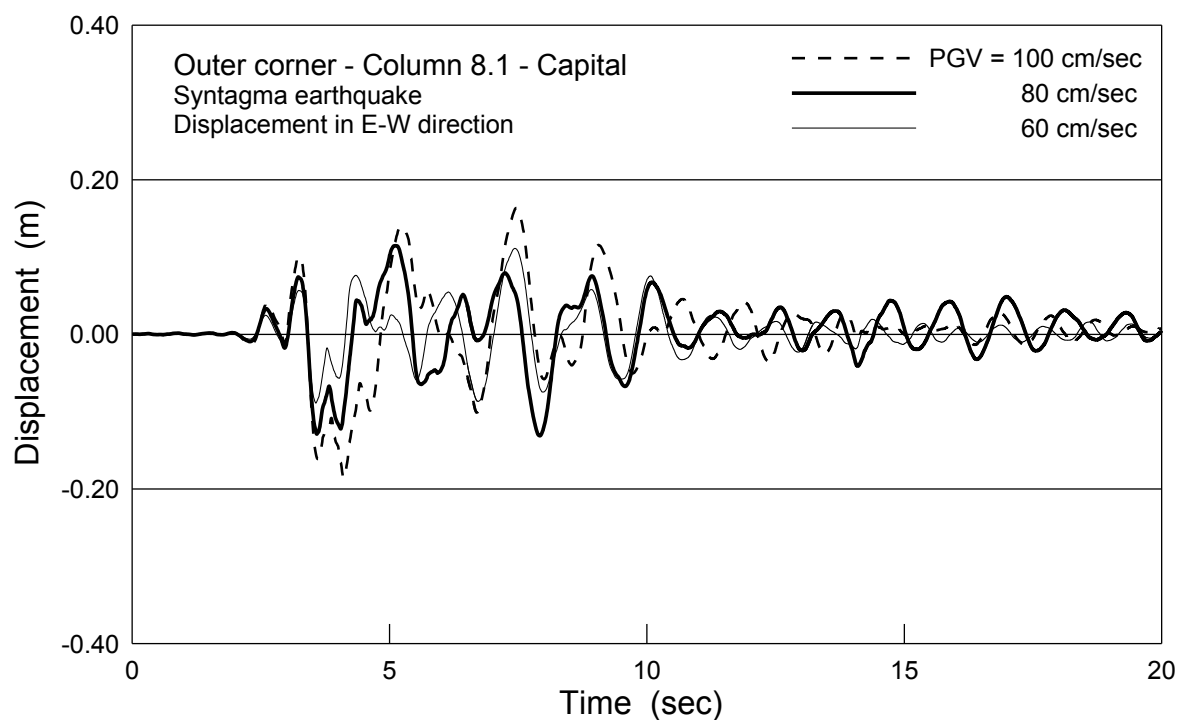


(β) Διεύθυνση Β-Ν

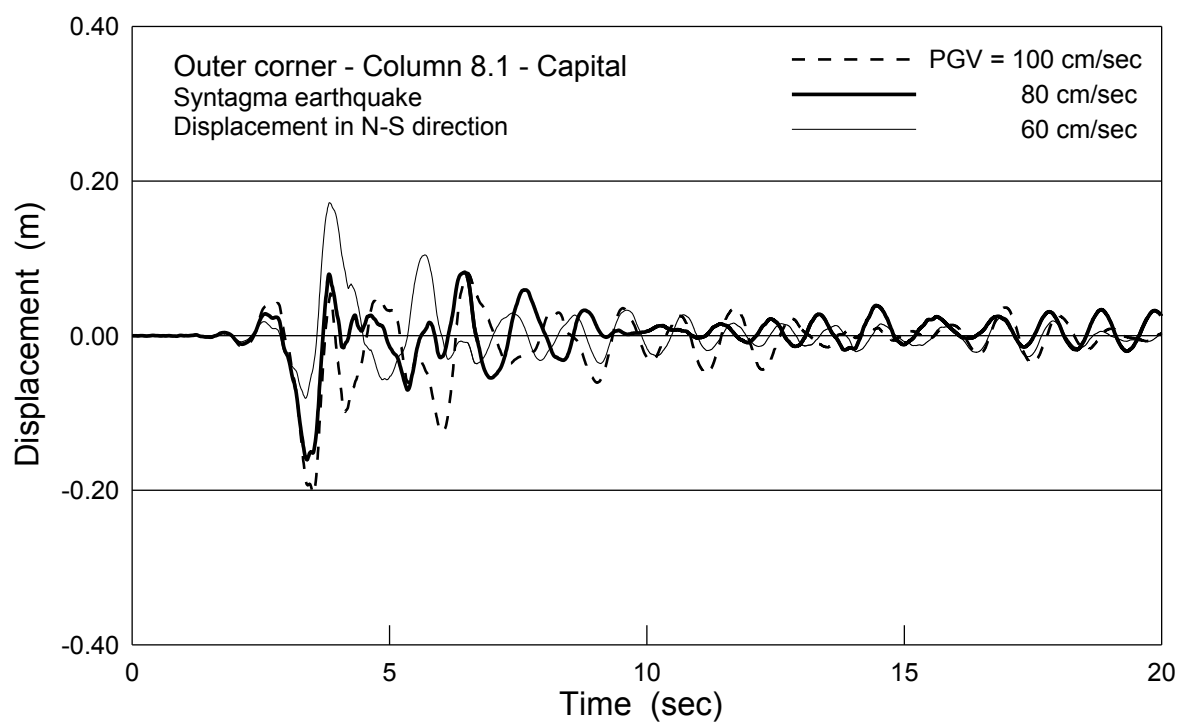
**Σχ. 6.21.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 8.1 στο σεισμό της Γρίβας (Έδεσσα).



**Σχ. 6.22.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 8.1 στο σεισμό της Καλαμάτας.

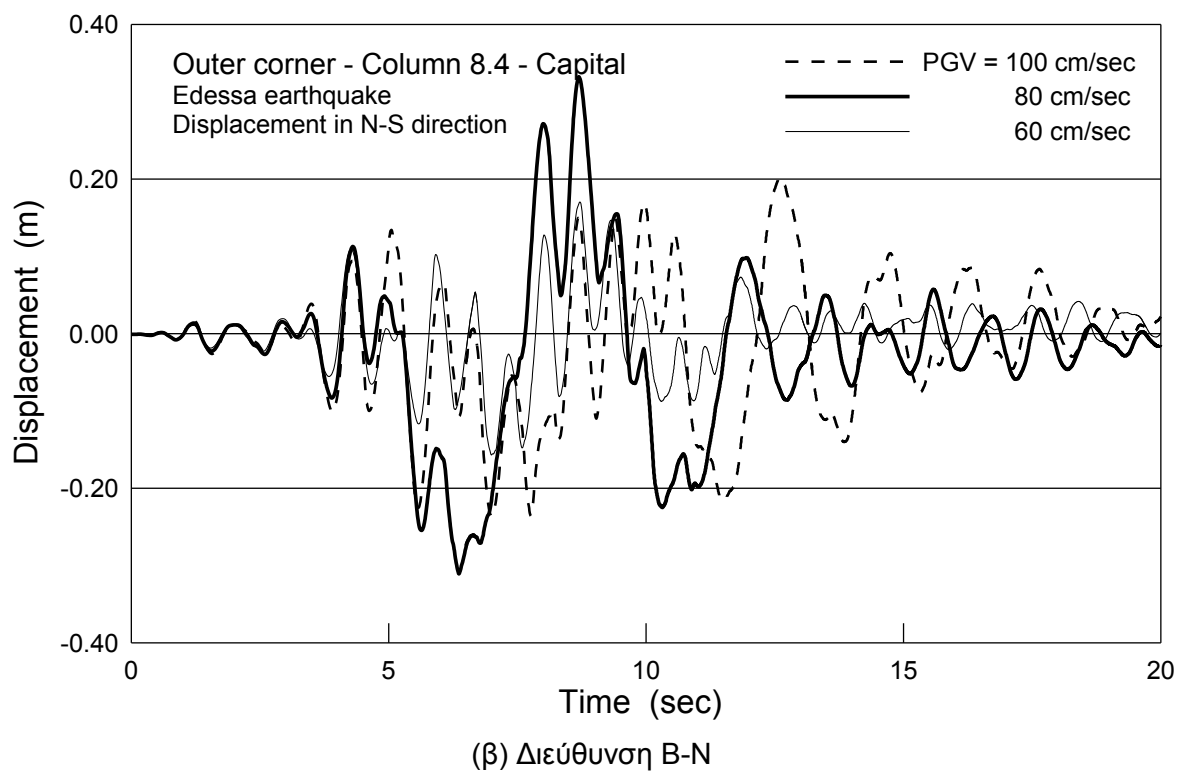
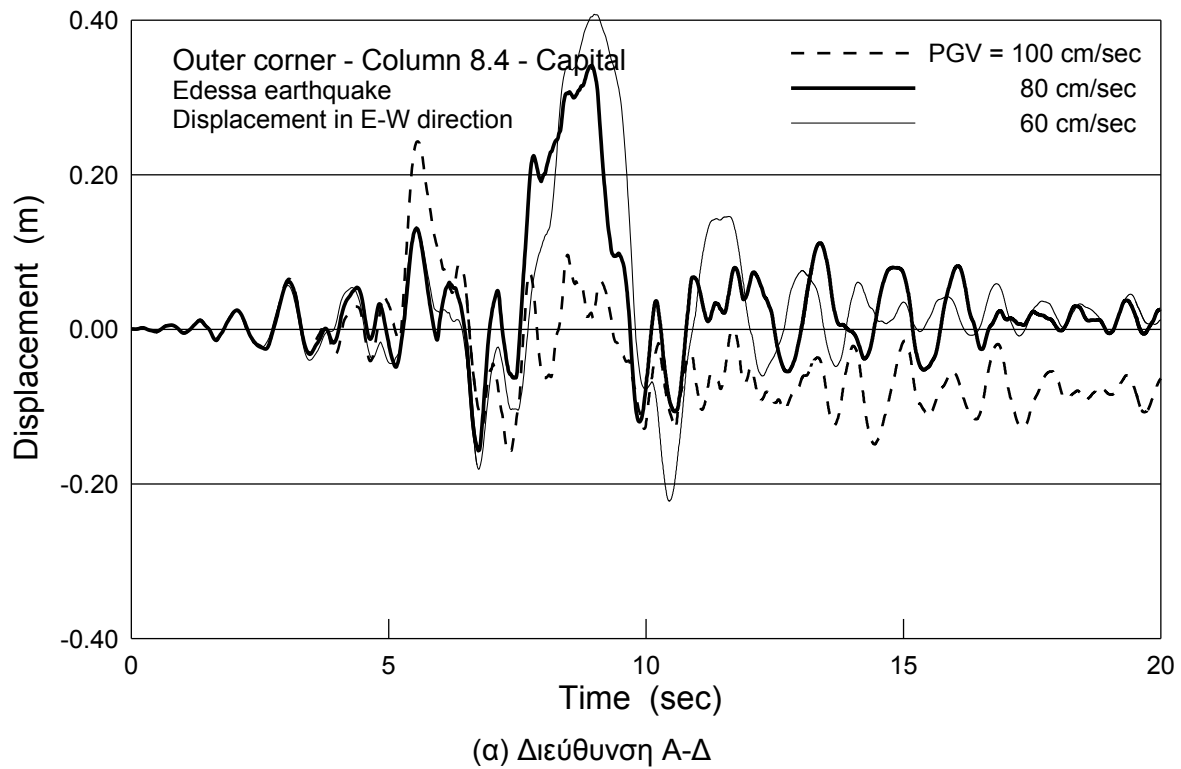


(α) Διεύθυνση Α-Δ

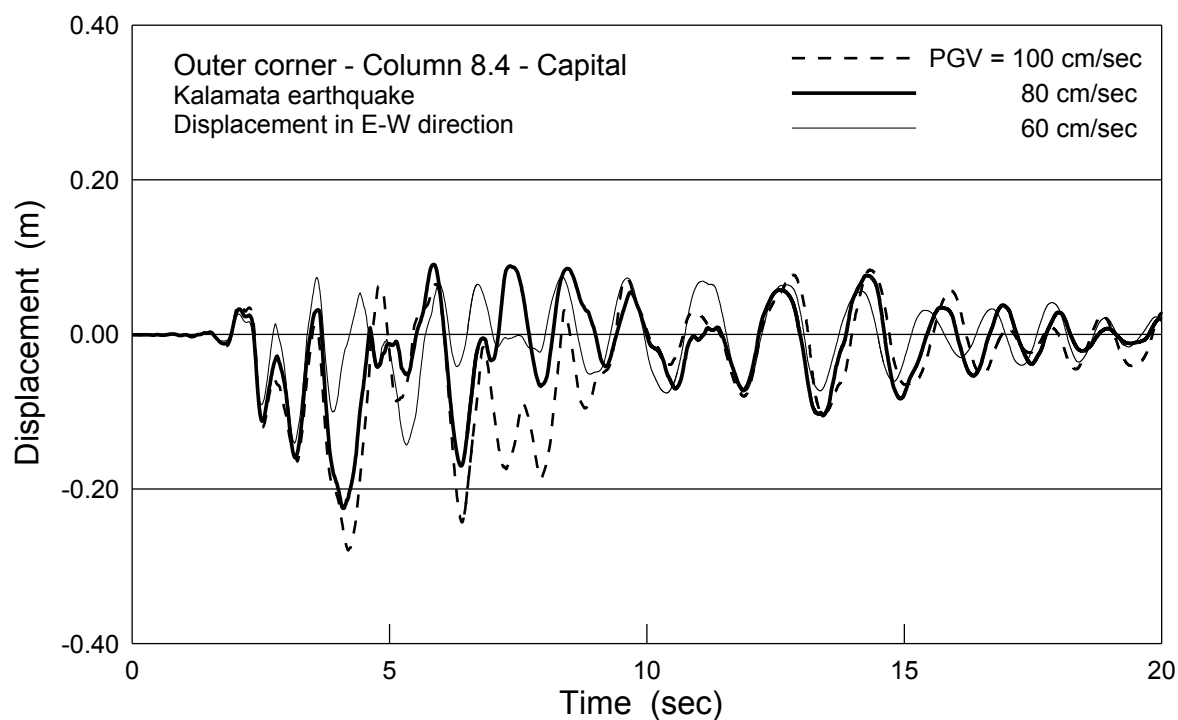


(β) Διεύθυνση Β-Ν

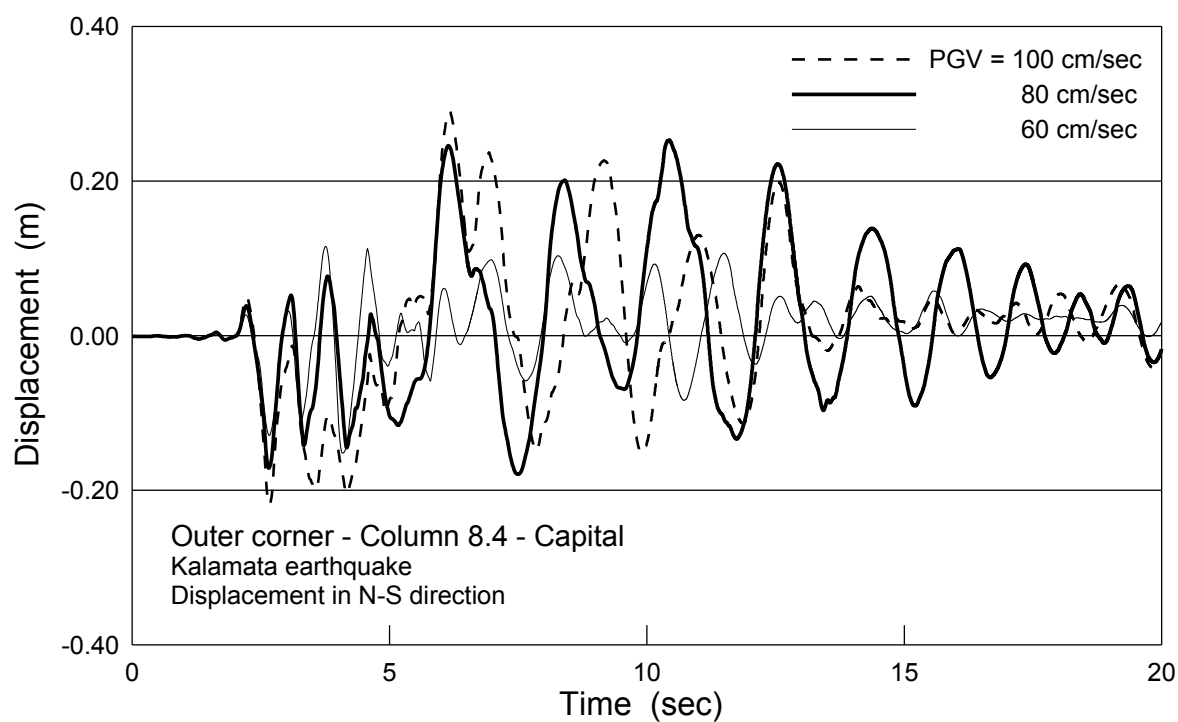
**Σχ. 6.23.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 8.1 στο σεισμό της Αθήνας (Σύνταγμα).



**Σχ. 6.24.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 8.4 στο σεισμό της Γρίβας (Έδεσσα).

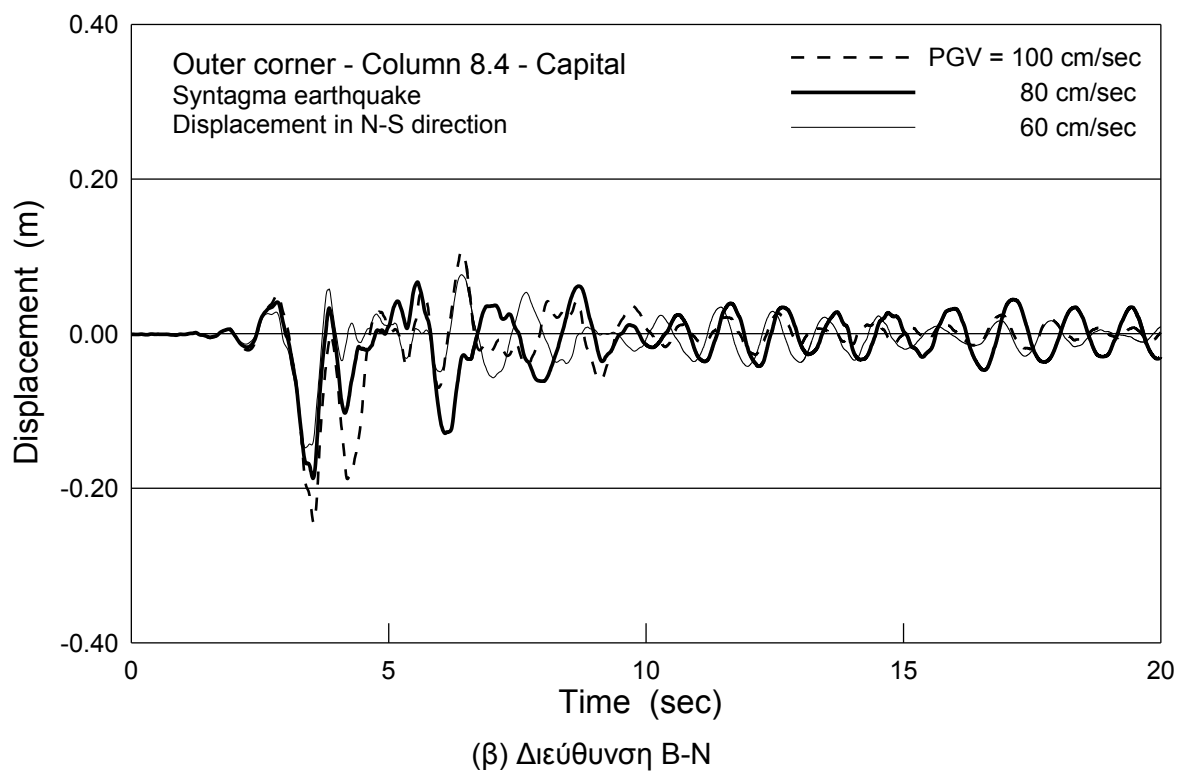
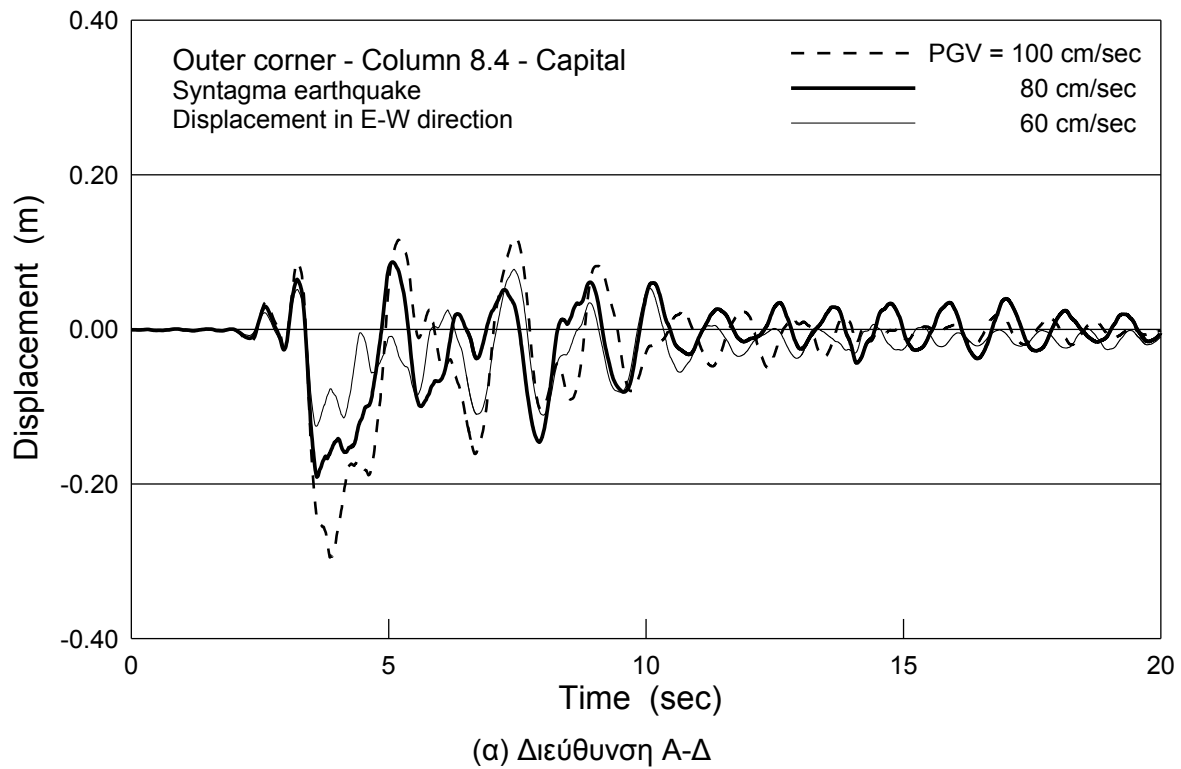


(α) Διεύθυνση Α-Δ



(β) Διεύθυνση Β-Ν

**Σχ. 6.25.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 8.4 στο σεισμό της Καλαμάτας.



**Σχ. 6.26.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 8.4 στο σεισμό της Αθήνας (Σύνταγμα).

- Αξίζει να σημειωθεί ότι η μεγαλύτερη ταλάντωση συμβαίνει στον κίονα 6.1, παρ' ότι αυτός απέχει λιγότερο από τον κεντρικό γωνιακό κίονα απ' ό,τι ο κίονας 8.4 (μικρότερος μοχλοβραχίονας). Είναι πιθανόν η συμπεριφορά αυτή να οφείλεται στις σημαντικά διαφορετικές ζημιές που έχουν ληφθεί υπόψη σε κάθε κίονα και να μη σχετίζεται με την τοπογραφική τους θέση, σε σχέση με τον κεντρικό κίονα της γωνίας.
- Ενδιαφέρον παρουσιάζει και το γεγονός ότι ο κεντρικός γωνιακός κίονας, γενικώς, κατά τη διάρκεια του σεισμού υπόκειται σε μικρότερες ταλαντώσεις απ' ό,τι οι ακραίοι και εμφανίζει μικρότερες μόνιμες παραμορφώσεις.
- Και σε αυτές τις επιλύσεις υπήρξαν περιπτώσεις που αύξηση της εδαφικής ταχύτητας οδηγούσε σε μείωση της απόκρισης λόγω της μη γραμμικής συμπεριφοράς. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις τέτοιου φαινομένου αποτελούν τα Σχ. 6.18.(α) και 6.24.(β).
- Οι μέγιστες σχετικές μετακινήσεις της κορυφής των κίωνων και οι αντίστοιχες τιμές drift δίνονται στον Πίνακα 6.3. Οι μέγιστες τιμές προκύπτουν για τον κίονα 6.1, θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι ένα τμήμα της μέγιστης μετακίνησης του κιονοκράνου οφείλεται στην ολίσθηση που συμβαίνει στα 2/3 του ύψους, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Αφαιρουμένης (προσεγγιστικά) αυτής της ολίσθησης, η μέγιστη μετακίνηση είναι περίπου 0.40-0.50 m ( $u_{max}/H < 3\%$ ), εκτός από την περίπτωση του κίονα που καταρρέει. Σύγκριση των αποκρίσεων των κίωνων της εξωτερικής γωνίας με τις αποκρίσεις των δύο κίωνων 7.5 και 7.6 (Πίνακας 6.2) δείχνει ότι το πλάτος ταλάντωσης είναι γενικώς παρόμοιο στις δύο περιπτώσεις.
- Ενδιαφέροντα συμπεράσματα, σχετικά με την ανατροπή των κίωνων, μπορούν να εξαχθούν από τη μελέτη της ιστορίας της μετακίνησης του κιονοκράνου του κίονα 6.1 για το σεισμό της Καλαμάτας με  $PGV=100$  cm/sec (Σχ. 6.19), σεισμική δόνηση για την οποία ο κίονας τελικά καταρρέει. Φαίνεται πως μέχρι τη χρονική στιγμή  $t \approx 8$  sec, η κατάρρευση θα μπορούσε να αποφευχθεί, εάν η εδαφική κίνηση συνέχιζε να δημιουργεί δυνάμεις επαναφοράς στον κίονα. Επειδή η μετακίνηση στη διεύθυνση Α-Δ αυτή τη στιγμή είναι περίπου 1.00 m [Σχ. 6.19.(α)], μπορούμε να υποθέσουμε ότι αυτό είναι περίπου και το όριο ευστάθειας του κίονα. Σε όρους drift, η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε  $u_{max}/H \approx 6\%$ . Σημειώνεται, όμως, ότι αυτό το όριο ευστάθειας είναι απλώς ενδεικτικό, αφού πολύ σημαντικό ρόλο στο εάν θα γίνει ανατροπή ή όχι παίζει η μορφή της δόνησης την κρίσιμη στιγμή και ιδιαίτερα το φασματικό της περιεχόμενο.



Πίνακας 6.3

Μέγιστες σχετικές (ως προς τη βάση) μετακινήσεις της κορυφής  
των ακραίων κίονων της εξωτερικής γωνίας

## ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ Α-Δ

PGV (cm/sec)	Σεισμική διέγερση					
	Γρίβα (Έδεσσα)		Καλαμάτα (Νομαρχία)		Αθήνα (Σύνταγμα)	
	u <sub>max</sub> (m)	u <sub>max</sub> / H (%)	u <sub>max</sub> (m)	u <sub>max</sub> / H (%)	u <sub>max</sub> (m)	u <sub>max</sub> / H (%)
	Κίονας 6.1					
60	0.41	2.4	0.47	2.8	0.16	0.9
80	0.34	2.0	0.62	3.7	0.30	1.8
100	0.24	1.4	Κατάρρευση		0.39	2.3
	Κίονας 8.1					
60	0.13	0.7	0.18	1.1	0.11	0.7
80	0.15	0.9	0.15	0.9	0.13	0.8
100	0.27	1.6	0.15	0.9	0.19	1.1
	Κίονας 8.4					
60	0.16	0.9	0.14	0.9	0.13	0.7
80	0.24	1.4	0.22	1.3	0.19	1.1
100	0.31	1.8	0.28	1.7	0.30	1.8

## ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ Β-Ν

PGV (cm/sec)	Σεισμική διέγερση					
	Γρίβα (Έδεσσα)		Καλαμάτα (Νομαρχία)		Αθήνα (Σύνταγμα)	
	u <sub>max</sub> (m)	u <sub>max</sub> / H (%)	u <sub>max</sub> (m)	u <sub>max</sub> / H (%)	u <sub>max</sub> (m)	u <sub>max</sub> / H (%)
	Κίονας 6.1					
60	0.22	1.3	0.35	2.1	0.17	1.0
80	0.38	2.3	0.34	2.0	0.20	1.2
100	0.35	2.1	Κατάρρευση		0.30	1.8
	Κίονας 8.1					
60	0.14	0.8	0.13	0.8	0.17	1.0
80	0.25	1.5	0.26	1.5	0.16	0.9
100	0.33	2.0	0.30	1.8	0.20	1.2
	Κίονας 8.4					
60	0.17	1.0	0.15	0.9	0.15	0.9
80	0.33	2.0	0.25	1.5	0.19	1.1
100	0.24	1.4	0.29	1.7	0.24	1.5

## ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΓΩΝΙΑ

Οι κίονες της εσωτερικής γωνίας παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με τους σχηματισμούς που εξετάστηκαν προηγούμενα. Οι ζημιές εντοπίζονται κυρίως σε μεγάλες μετατοπίσεις των δοκών των επιστυλίων, οι οποίες σε μία περίπτωση οδηγούν σε ανατροπή της δοκού, αλλά και σε κάποιες ολισθήσεις σπονδύλων, αρκετά μικρότερες όμως απ' ό,τι στον κίονα 6.1 της εξωτερικής γωνίας. Η τελική παραμορφωμένη κατάσταση της κατασκευής, μετά από κάθε σεισμό που εξετάστηκε, παρουσιάζεται στα Σχ. 6.27, 6.28 και 6.29.

Στα Σχ. 6.30 έως 6.38 δίνονται οι χρονοϊστορίες της μετακίνησης της κορυφής (άνω τμήμα των κιονοκράνων) των δύο ακραίων κίωνων 6.2 και 7.4 και του κεντρικού γωνιακού κίονα 7.2. Οι μετακινήσεις των υπολοίπων κίωνων είναι γενικώς μικρότερες και παραλείπονται για λόγους οικονομίας χώρου.

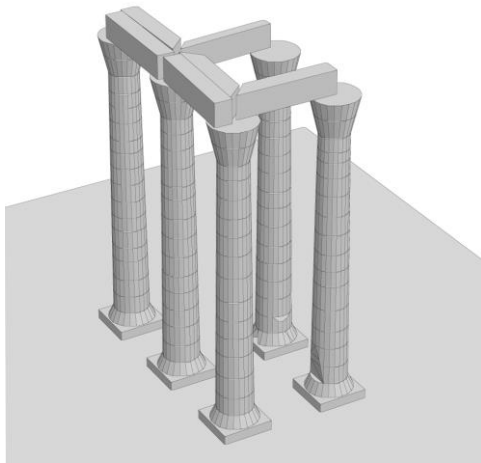
Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Για εδαφική ταχύτητα  $PGV=60$  cm/sec προκαλούνται μικρές ζημιές στην κατασκευή, που εντοπίζονται κυρίως σε μετατοπίσεις επιστυλίων και μικρές ολισθήσεις σπονδύλων, οι οποίες οδηγούν σε μόνιμες μετακινήσεις των κιονοκράνων το πολύ 1-2 cm, όπως προκύπτει από τις αντίστοιχες χρονοϊστορίες.

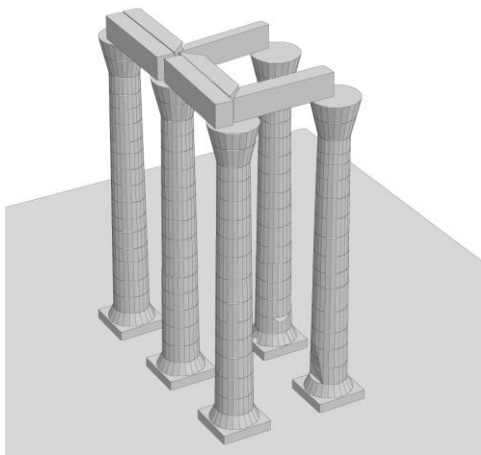
Για εδαφική ταχύτητα  $PGV=80$  cm/sec, οι προκαλούμενες ζημιές είναι γενικώς μεγαλύτερες με εμφανείς πλέον τις μετατοπίσεις των δοκών των επιστυλίων. Παρ' ό,τι η ταλάντωση των κίωνων είναι στις περισσότερες περιπτώσεις αρκετά πιο έντονη, οι ολισθήσεις σπονδύλων που συμβαίνουν είναι παρόμοιες με αυτές για  $PGV=60$  cm/sec.

Για εδαφική ταχύτητα  $PGV=100$  cm/sec, προκαλούνται επίσης μεγάλες μετατοπίσεις δοκών επιστυλίων. Στην περίπτωση του σεισμού της Έδεσσας, η δοκός που ενώνει τους κίονες 6.3 και 7.3 ανατρέπεται. Οι ολισθήσεις σπονδύλων δεν φαίνεται να επηρεάζονται ουσιαστικά, εκτός από τον κίονα 7.4, ο οποίος παρουσιάζει μία μετατόπιση του κιονοκράνου στη διεύθυνση B-N περίπου 0.10 m, για το σεισμό της Έδεσσας.

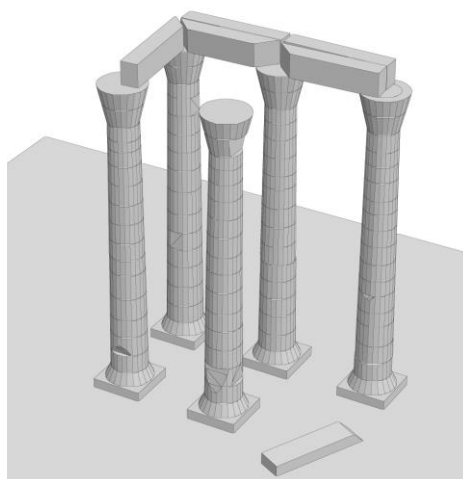
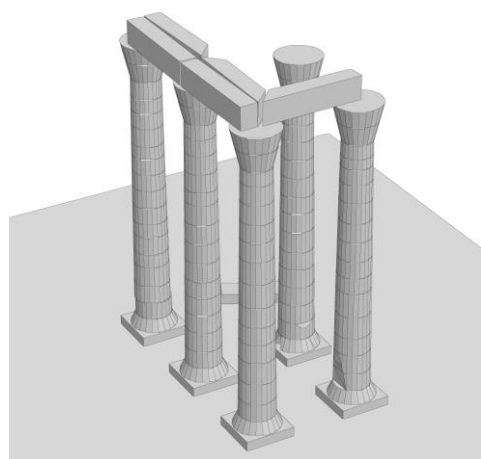
- Όπως συνέβαινε και στην περίπτωση της εξωτερικής γωνίας, οι χρονοϊστορίες της απόκρισης των ακραίων κίωνων 6.2 και 7.4 δείχνουν, γενικώς, ελαφρώς εντονότερη ταλάντωση στη διεύθυνση που είναι κάθετη στον άξονα του επιστυλίου που τους συνδέει με το διπλανό τους κίονα (διεύθυνση A-Δ για τον 6.2 και B-N για τον 7.4) απ' ό,τι στην παράλληλη προς αυτόν τον άξονα διεύθυνση (B-N για τον



(α) PGV=60 cm/sec

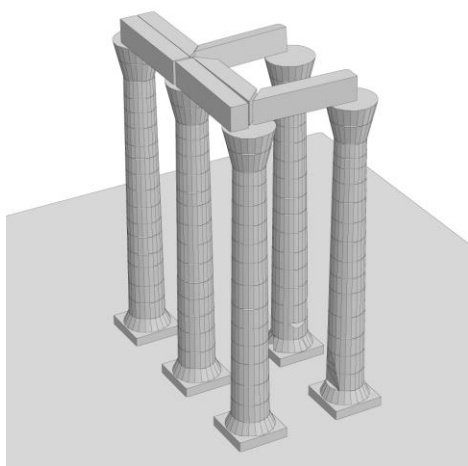


(β) PGV=80 cm/sec

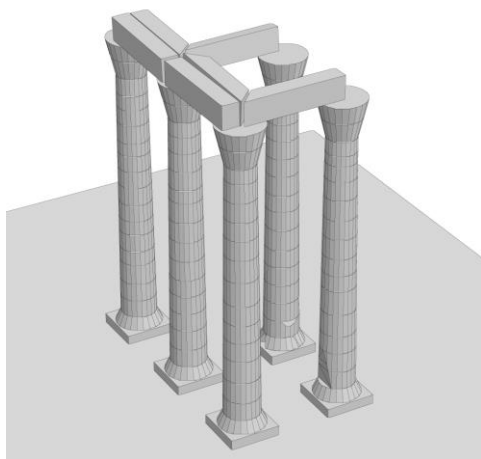


(γ) PGV=100 cm/sec

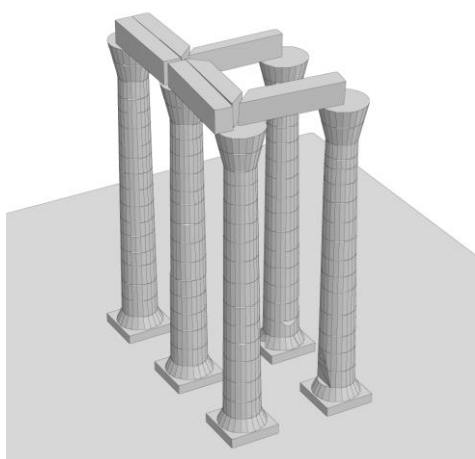
**Σχ. 6.27.** Ζημιές στην εσωτερική γωνία από το σεισμό της Γρίβας (Εδεσσα).



(α) PGV=60 cm/sec

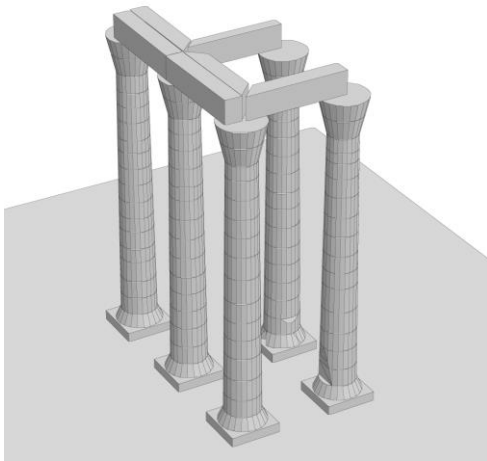


(β) PGV=80 cm/sec

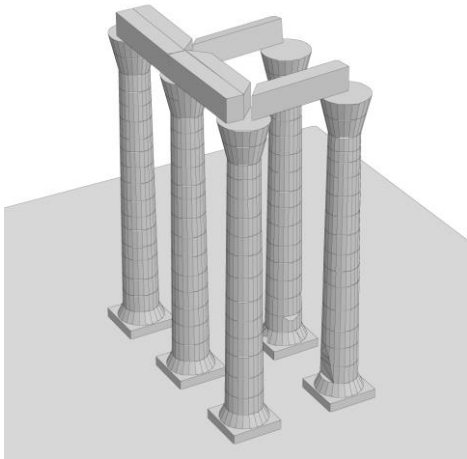


(γ) PGV=100 cm/sec

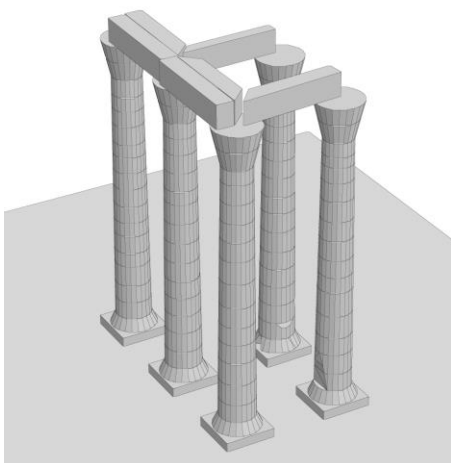
**Σχ. 6.28.** Ζημιές στην εσωτερική γωνία από το σεισμό της Καλαμάτας.



(α) PGV=60 cm/sec

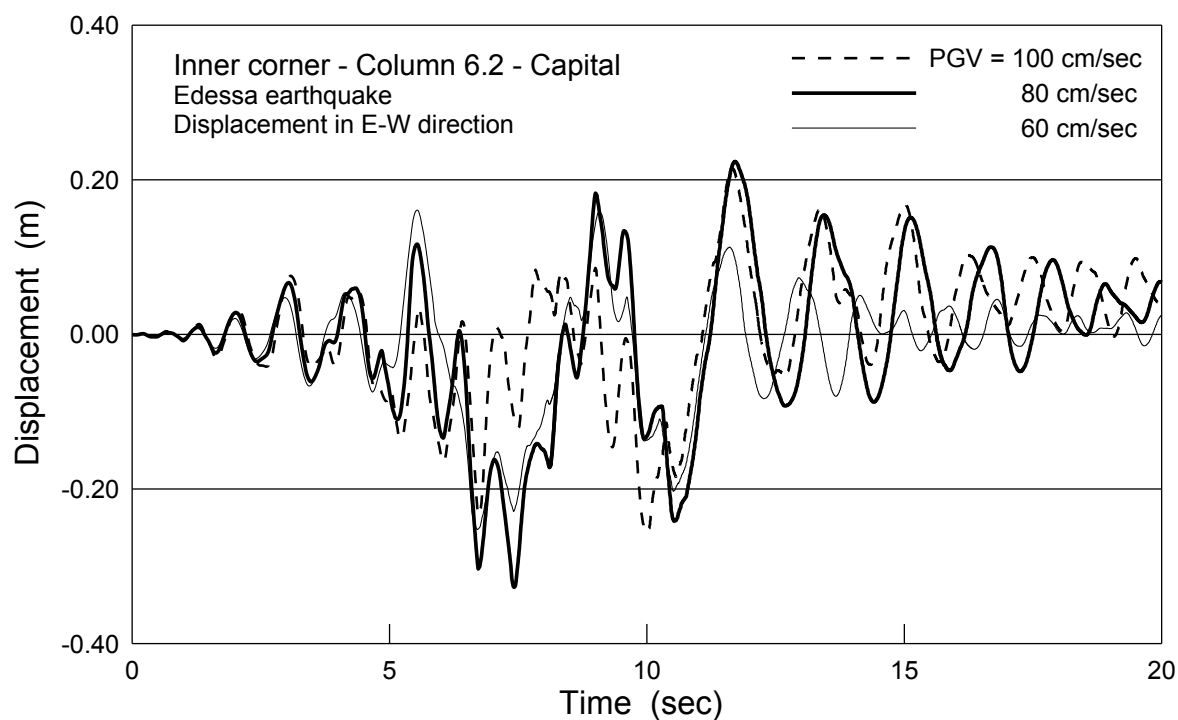


(β) PGV=80 cm/sec

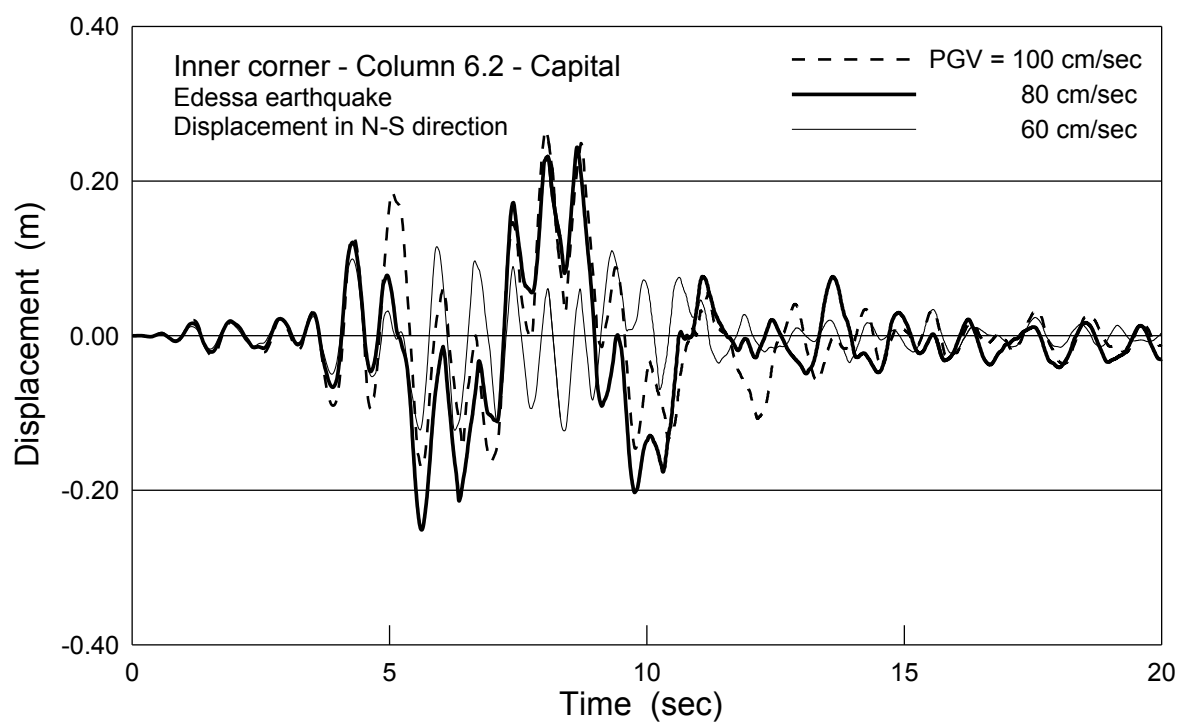


(γ) PGV=100 cm/sec

**Σχ. 6.29.** Ζημιές στην εσωτερική γωνία από το σεισμό της Αθήνας (Σύνταγμα).

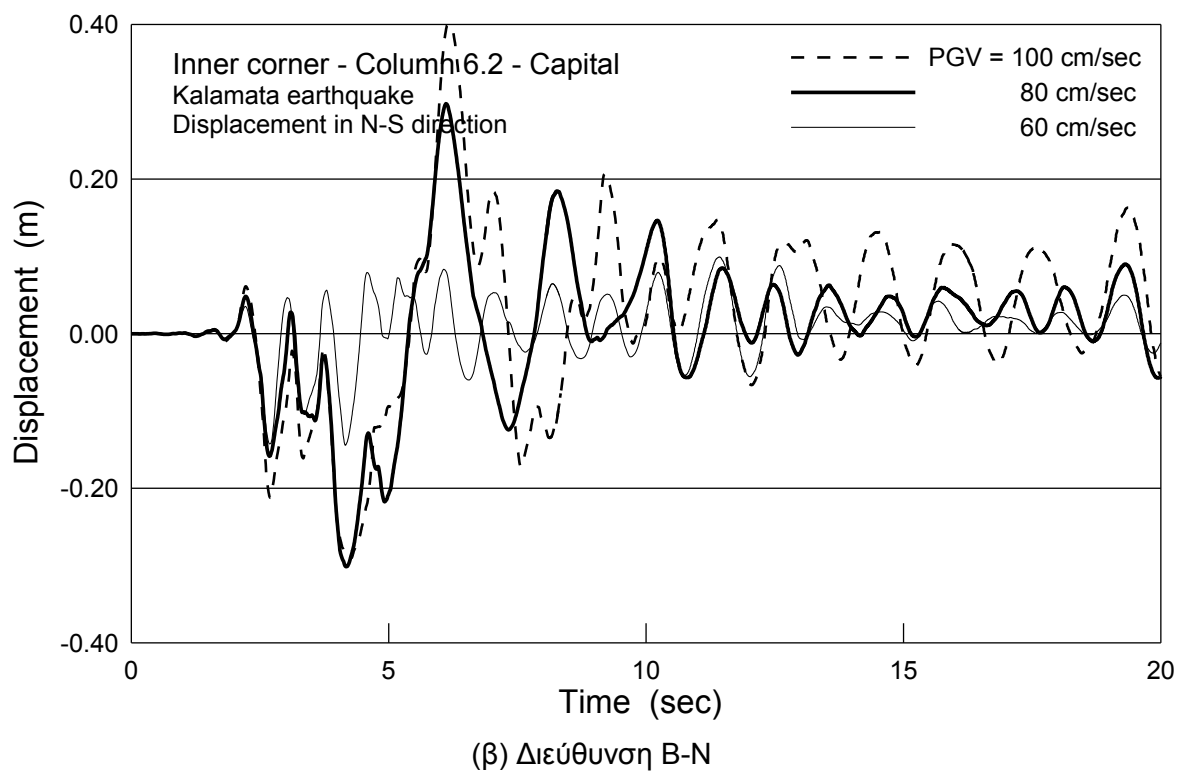
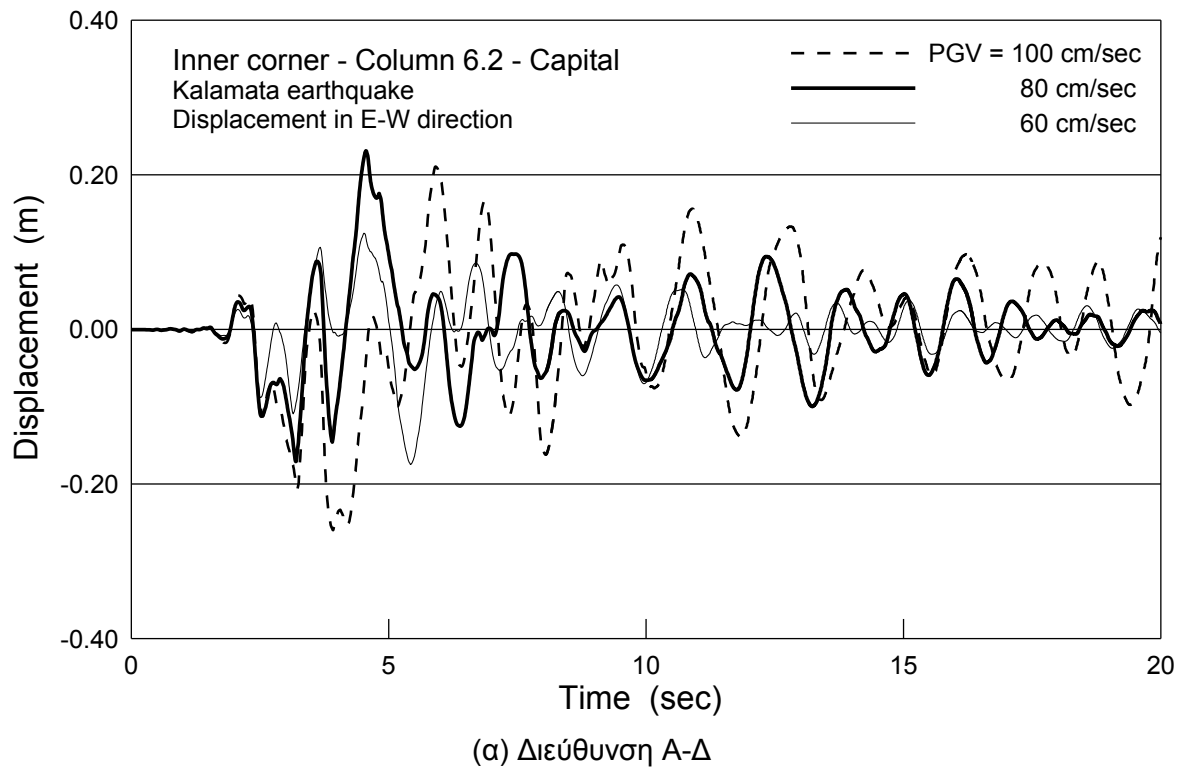


(α) Διεύθυνση Α-Δ

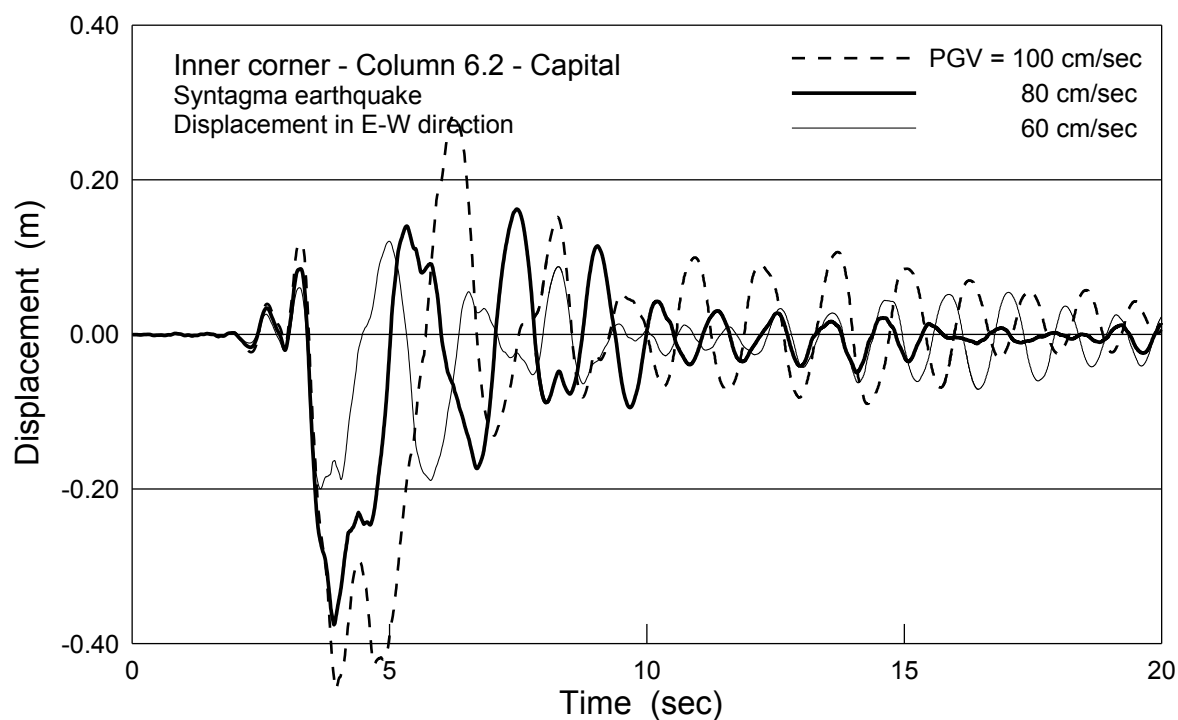


(β) Διεύθυνση Β-Ν

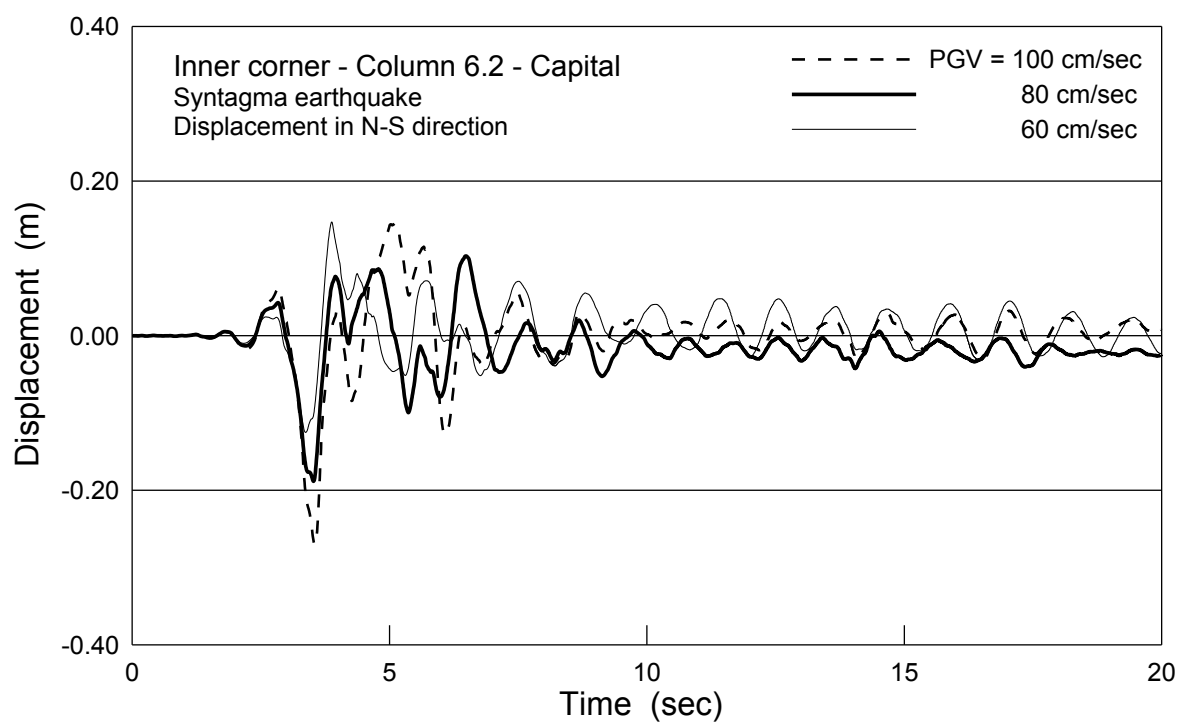
**Σχ. 6.30.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 6.2 στο σεισμό της Γρίβας (Έδεσσα).



**Σχ. 6.31.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 6.2 στο σεισμό της Καλαμάτας.



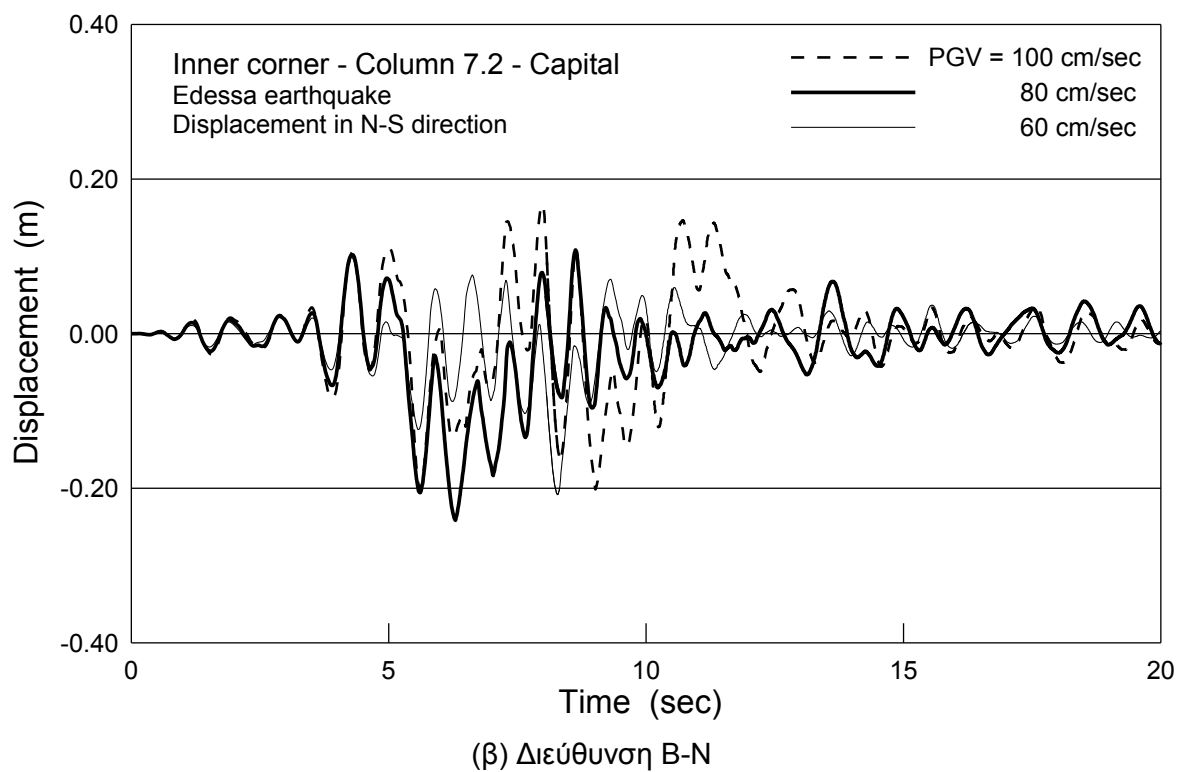
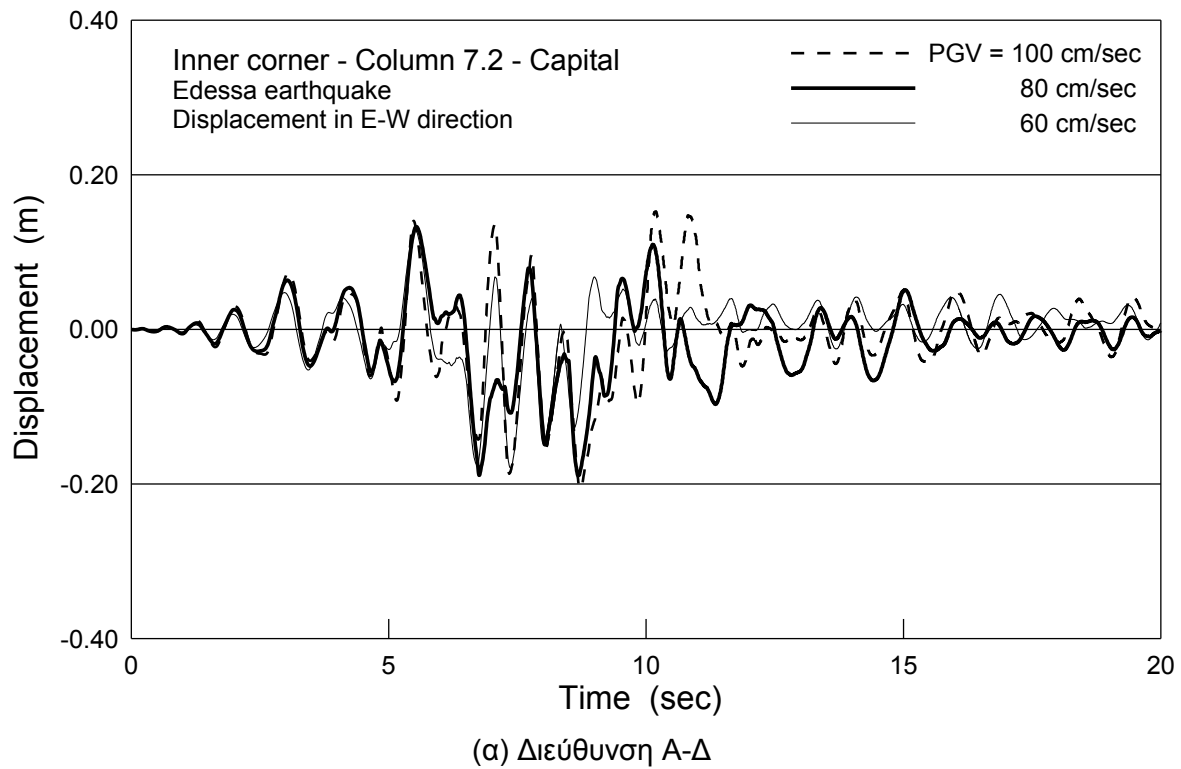
(α) Διεύθυνση Α-Δ



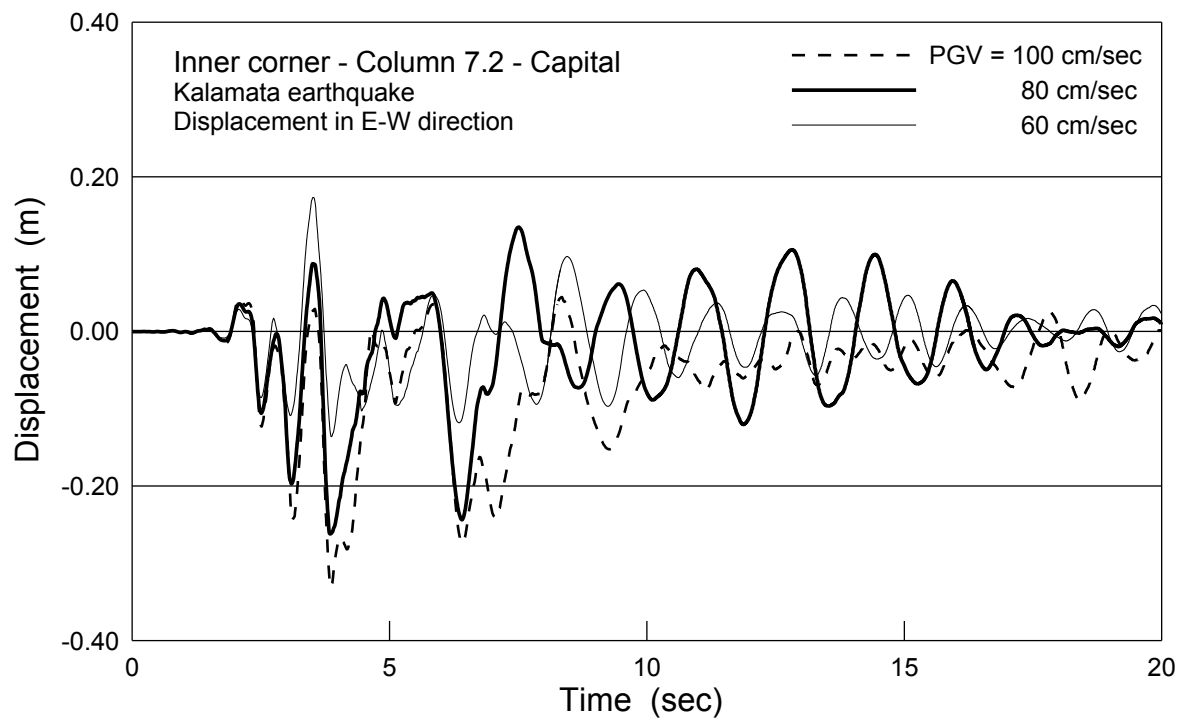
(β) Διεύθυνση Β-Ν

**Σχ. 6.32.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 6.2 στο σεισμό της Αθήνας (Σύνταγμα).

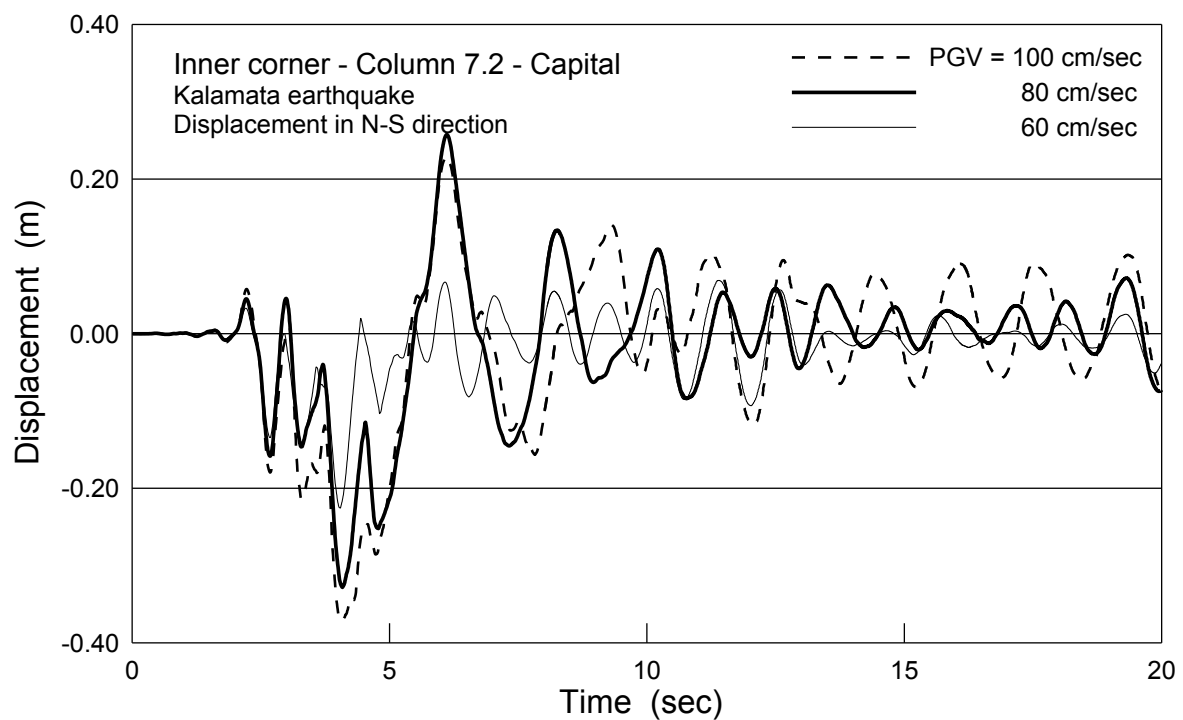




**Σχ. 6.33.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 7.2 στο σεισμό της Γρίβας (Έδεσσα).

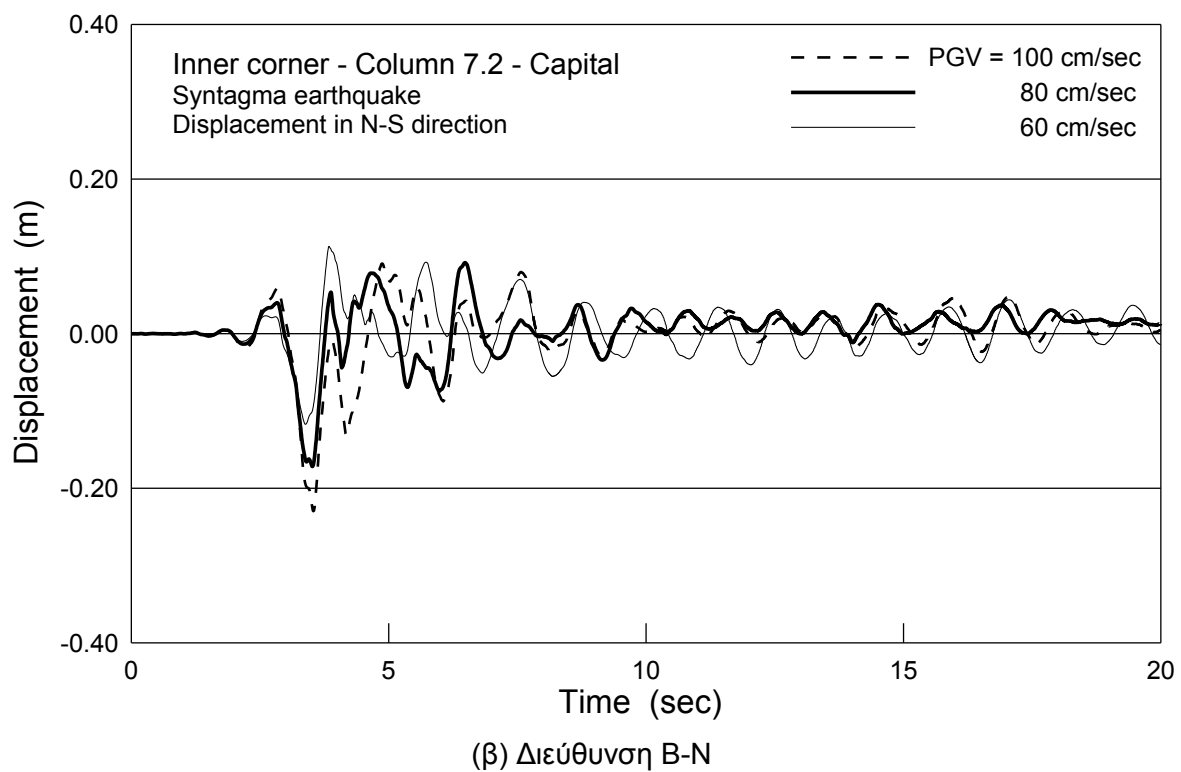
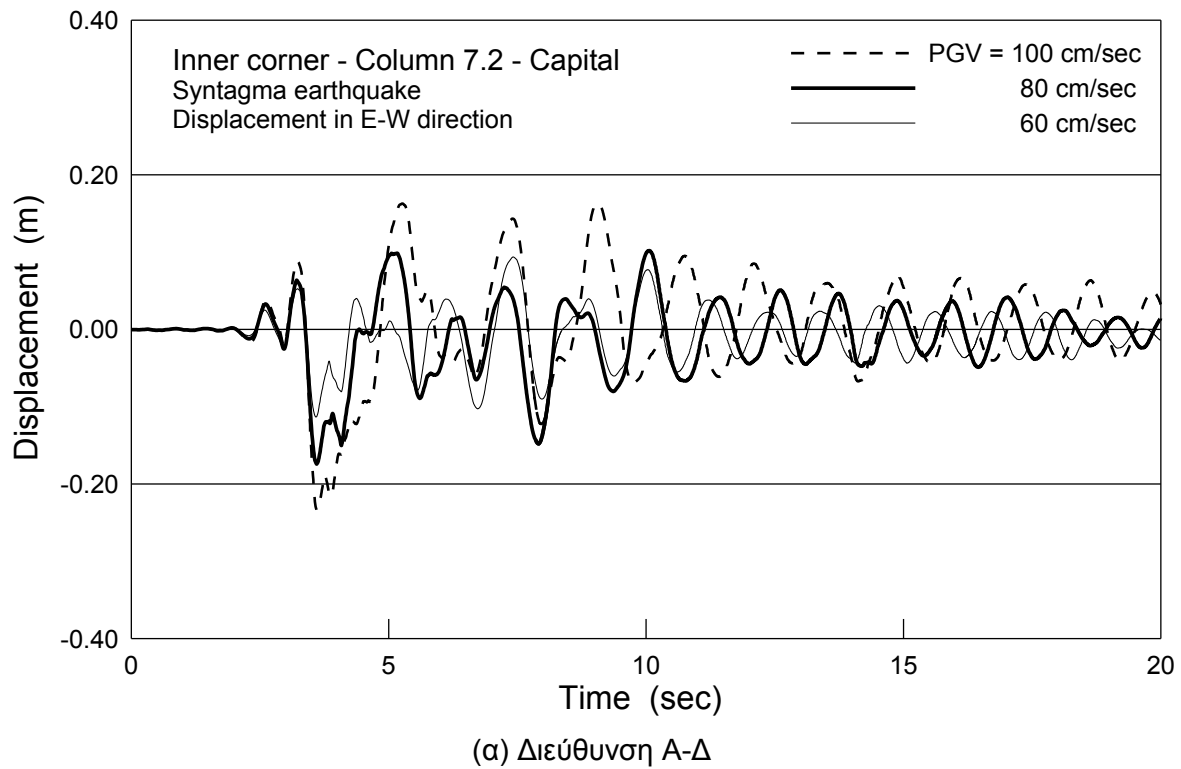


(α) Διεύθυνση Α-Δ

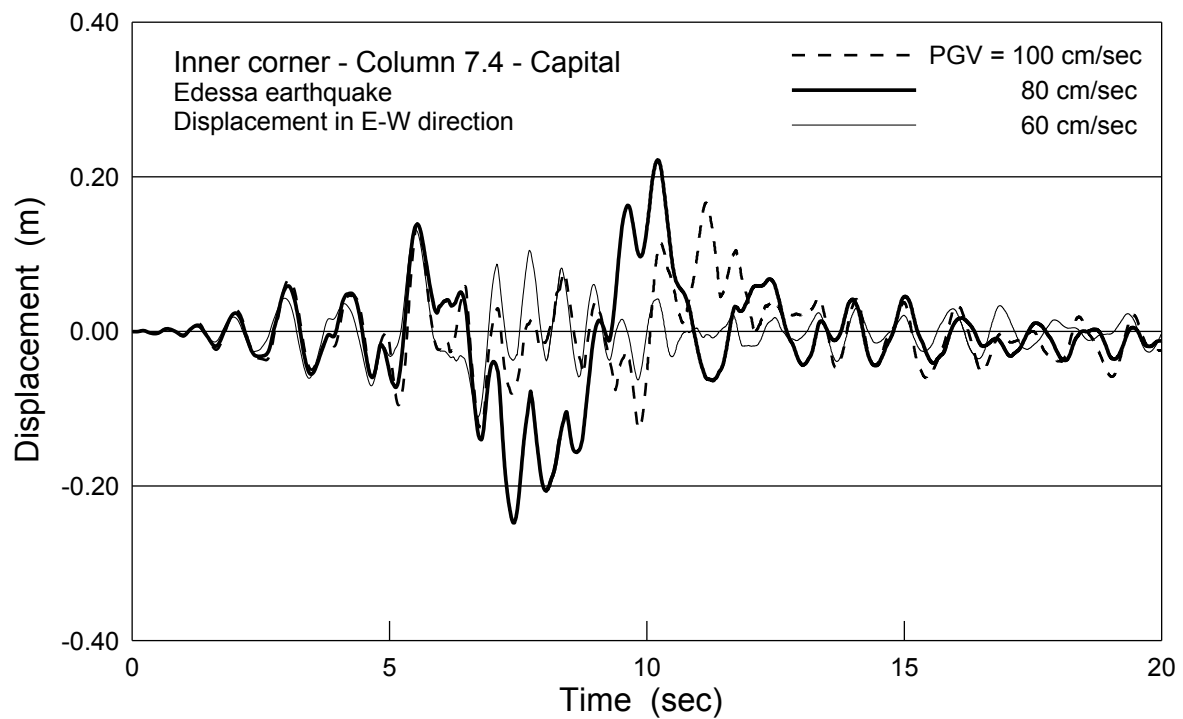


(β) Διεύθυνση Β-Ν

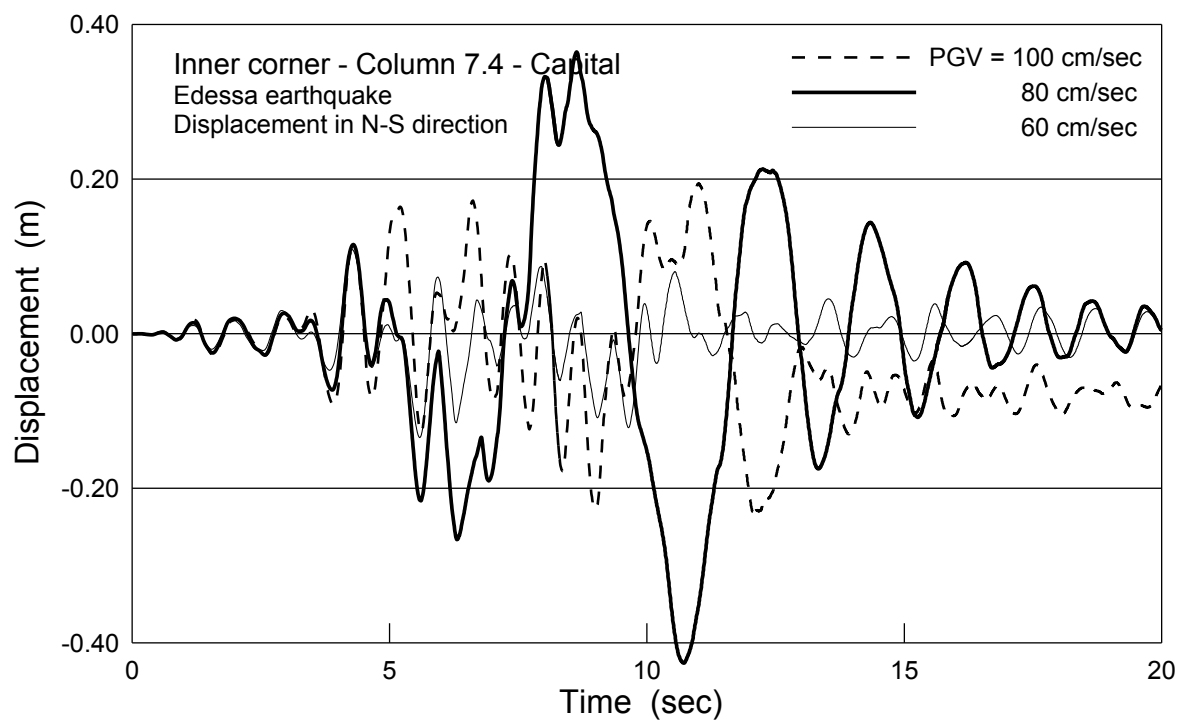
**Σχ. 6.34.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 7.2 στο σεισμό της Καλαμάτας.



**Σχ. 6.35.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 7.2 στο σεισμό της Αθήνας (Σύνταγμα).

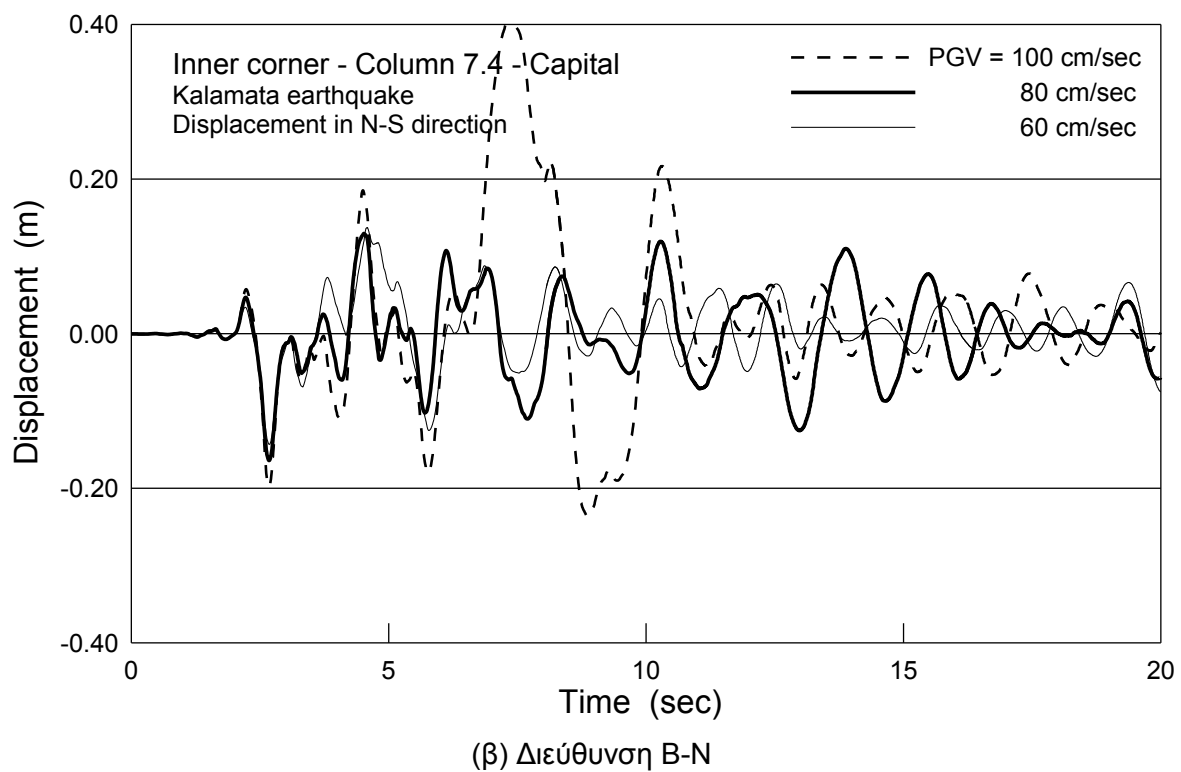
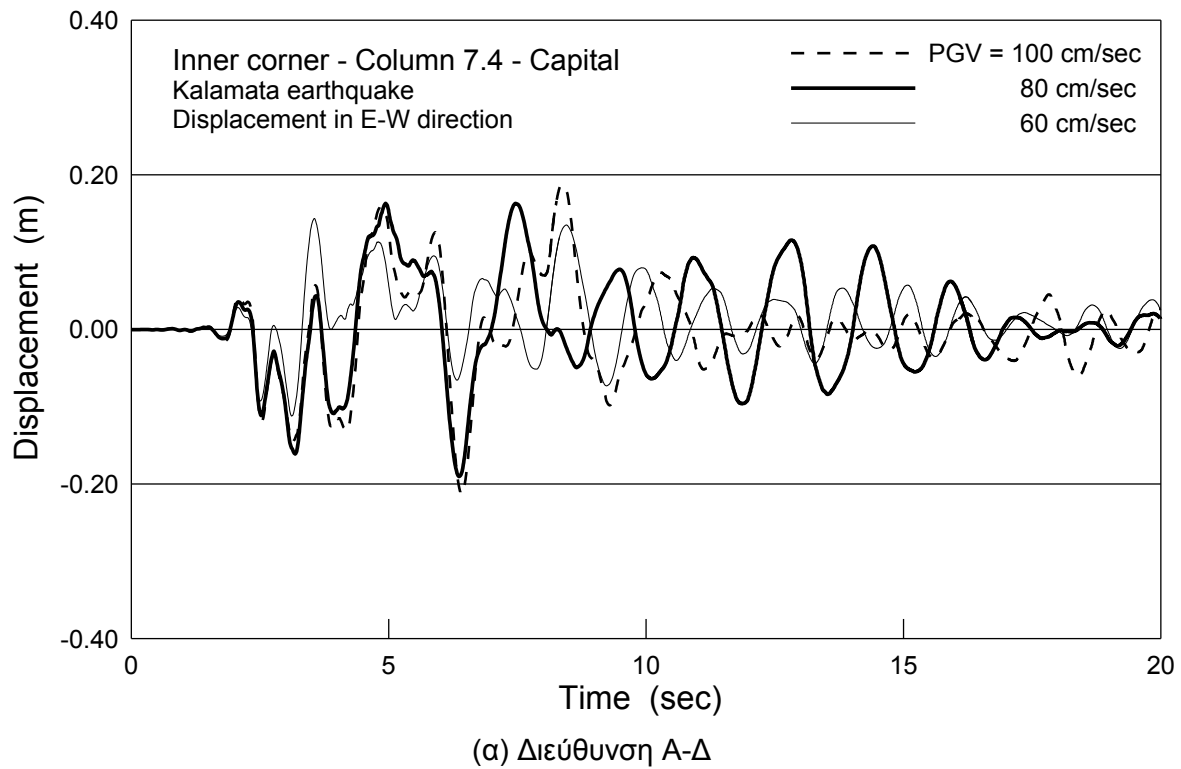


(α) Διεύθυνση Α-Δ

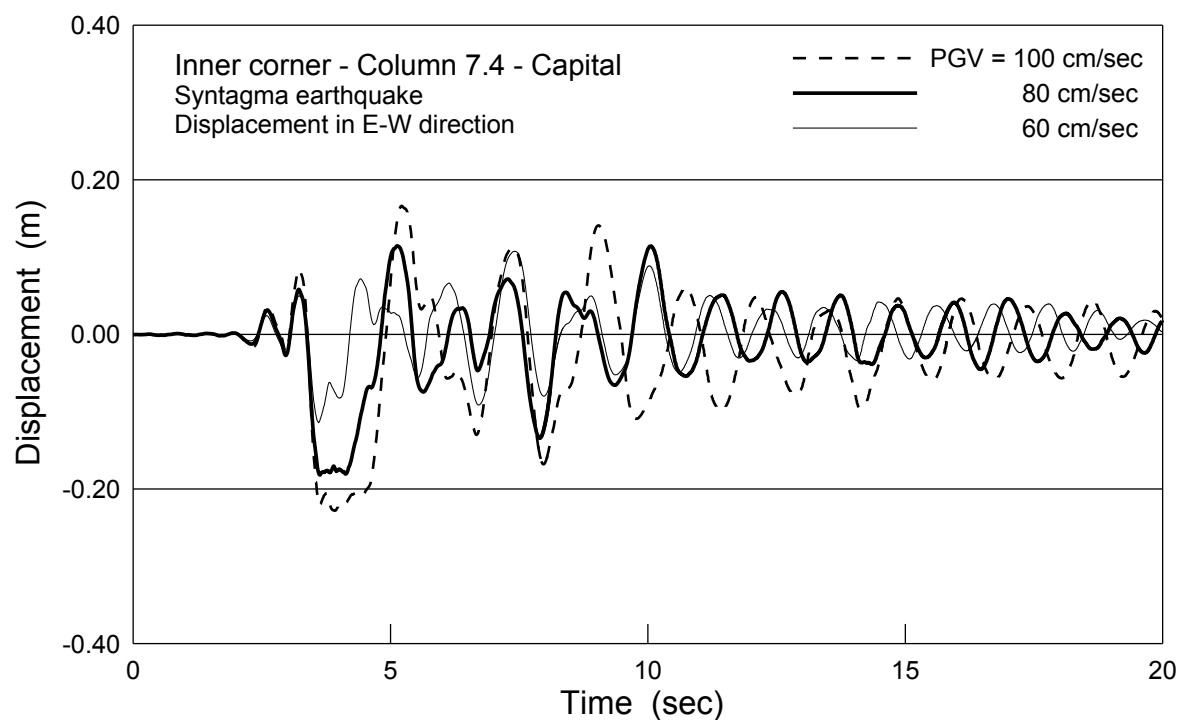


(β) Διεύθυνση Β-Ν

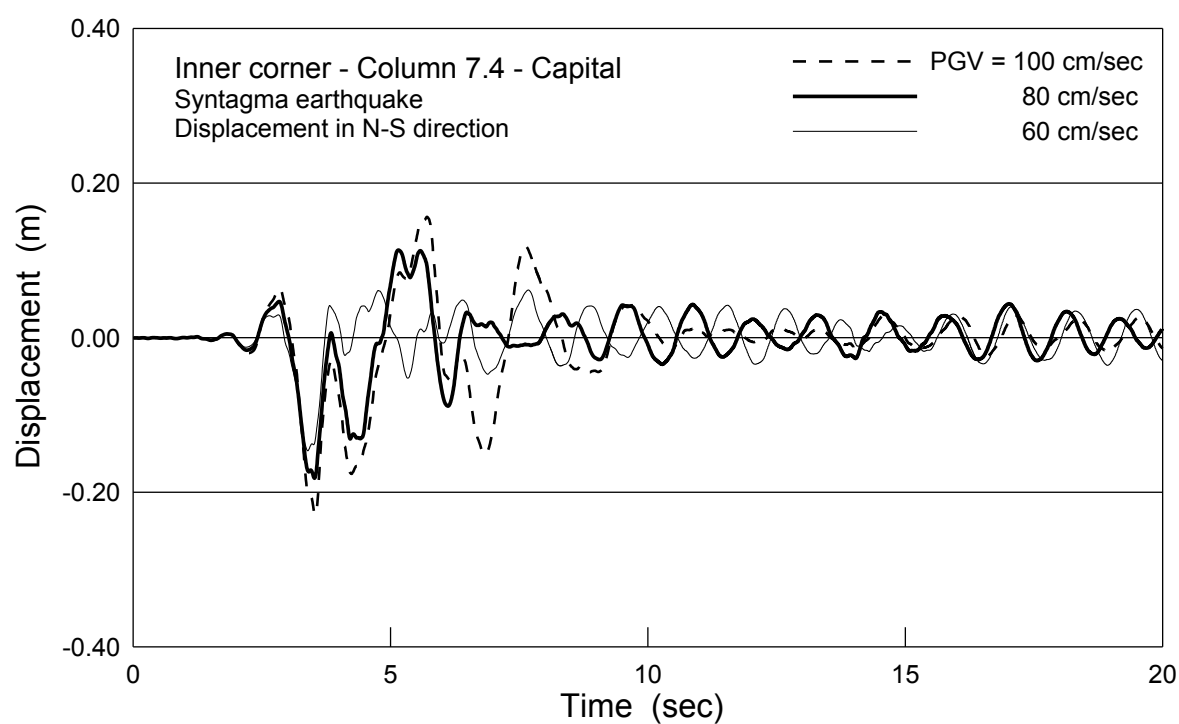
**Σχ. 6.36.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 7.4 στο σεισμό της Γρίβας (Έδεσσα).



**Σχ. 6.37.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 7.4 στο σεισμό της Καλαμάτας.



(α) Διεύθυνση Α-Δ



(β) Διεύθυνση Β-Ν

**Σχ. 6.38.** Χρονοϊστορίες της σχετικής (ως προς τη βάση) μετακίνησης του κιονόκρανου του κίονα 8.4 στο σεισμό της Αθήνας (Σύνταγμα).

Πίνακας 6.4

Μέγιστες σχετικές (ως προς τη βάση) μετακινήσεις της κορυφής  
των ακραίων κίωνων της εσωτερικής γωνίας

## ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ Α-Δ

PGV (cm/sec)	Σεισμική διέγερση					
	Γρίβα (Έδεσσα)		Καλαμάτα (Νομαρχία)		Αθήνα (Σύνταγμα)	
	$u_{\max}$ (m)	$u_{\max} / H$ (%)	$u_{\max}$ (m)	$u_{\max} / H$ (%)	$u_{\max}$ (m)	$u_{\max} / H$ (%)
	Κίονας 6.2					
60	0.24	1.5	0.17	1.0	0.20	1.2
80	0.33	1.9	0.23	1.4	0.38	2.2
100	0.26	1.5	0.26	1.5	0.46	2.7
	Κίονας 7.2					
60	0.18	1.1	0.17	1.0	0.11	0.7
80	0.19	1.1	0.26	1.6	0.17	1.0
100	0.21	1.2	0.33	2.0	0.23	1.4
	Κίονας 7.4					
60	0.13	0.8	0.14	0.8	0.11	0.7
80	0.25	1.5	0.19	1.1	0.18	1.1
100	0.17	1.0	0.21	1.3	0.23	1.4

## ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ Β-Ν

PGV (cm/sec)	Σεισμική διέγερση					
	Γρίβα (Έδεσσα)		Καλαμάτα (Νομαρχία)		Αθήνα (Σύνταγμα)	
	$u_{\max}$ (m)	$u_{\max} / H$ (%)	$u_{\max}$ (m)	$u_{\max} / H$ (%)	$u_{\max}$ (m)	$u_{\max} / H$ (%)
	Κίονας 6.2					
60	0.12	0.7	0.14	0.9	0.15	0.9
80	0.25	1.5	0.30	1.8	0.19	1.1
100	0.26	1.6	0.41	2.4	0.27	1.6
	Κίονας 7.2					
60	0.21	1.2	0.23	1.3	0.12	0.7
80	0.24	1.4	0.33	2.0	0.17	1.0
100	0.20	1.2	0.37	2.2	0.23	1.4
	Κίονας 7.4					
60	0.13	0.8	0.14	0.9	0.15	0.9
80	0.43	2.5	0.16	1.0	0.18	1.1
100	0.23	1.4	0.41	2.4	0.23	1.4

6.2 και A-Δ για τον 7.4), χωρίς όμως η συμπεριφορά αυτή να αποτελεί κανόνα. Έτσι, υπάρχουν και περιπτώσεις που εμφανίζεται το αντίθετο φαινόμενο, όπως π.χ. η περίπτωση του κίονα 6.2 στο σεισμό της Καλαμάτας, στην οποία εμφανίζεται έντονη ταλάντωση στη διεύθυνση B-N [Σχ. 6.31.(β)] και η περίπτωση του κίονα 7.4 στο σεισμό της Αθήνας, που δείχνει εντονότερη κίνηση στη διεύθυνση A-Δ απ' ό,τι στη διεύθυνση B-N (Σχ. 6.38).

- Και στις επιλύσεις της εσωτερικής γωνίας υπάρχουν περιπτώσεις, στις οποίες αύξηση της εδαφικής ταχύτητας οδηγεί σε μείωση της απόκρισης, δείγμα της μη γραμμικής συμπεριφοράς της κατασκευής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η απόκριση στη διεύθυνση B-N του κίονα 7.4 στο σεισμό της Έδεσσας, η οποία για  $PGV=80$  cm/sec έχει σημαντικά μεγαλύτερο εύρος ταλάντωσης απ' ό,τι για  $PGV=100$  cm/sec [Σχ. 6.36.(β)]. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζει γι' αυτή τη σεισμική δόνηση και ο κίονας 8.4 της εξωτερικής γωνίας.
- Σύγκριση των αποκρίσεων των κίωνων της εσωτερικής γωνίας με τις αποκρίσεις των κίωνων της εξωτερικής γωνίας (Πίνακες 6.3 και 6.4) δείχνει ότι το πλάτος ταλάντωσης των κίωνων είναι γενικώς παρόμοιο στις δύο περιπτώσεις, με ελαφρώς μικρότερες τιμές στην περίπτωση της εσωτερικής γωνίας. Η μεγαλύτερη μετακίνηση που συμβαίνει είναι 0.46 m με αντίστοιχη τιμή drift:  $u_{max}/H=2.7\%$ . Εάν θεωρήσουμε ότι το όριο κατάρρευσης είναι κοντά στο  $u_{max}/H \approx 6\%$ , όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι κίονες δεν φαίνεται να κινδυνεύουν άμεσα με ανατροπή σε καμία περίπτωση. Σημειώνεται, όμως, ότι λόγω της έντονα μη γραμμικής συμπεριφοράς, μικρές αλλαγές στις παραμέτρους μπορεί να οδηγήσουν σε αρκετά μεγαλύτερες μετακινήσεις και πιθανή κατάρρευση κάποιου τμήματος της κατασκευής.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζεται η σεισμική συμπεριφορά των σωζόμενων σήμερα συστοιχιών κίωνων της ΝΑ γωνίας του Ολυμπίου, με σκοπό μία πρώτη, προσεγγιστική διερεύνηση των αναμενόμενων ζημιών σε μελλοντικούς σεισμούς. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η γεωμετρία των κίωνων και οι βλάβες που παρουσιάζουν έχουν ληφθεί υπόψη προσεγγιστικά. Το γεγονός αυτό, καθώς και ο περιορισμένος αριθμός σεισμικών διεγέρσεων που εξετάζονται, καθιστούν τα αποτελέσματα ενδεικτικά μόνο της αναμενόμενης συμπεριφοράς και η πραγματική απόκριση της κατασκευής σε ένα ισχυρό μελλοντικό σεισμό μπορεί να διαφέρει από αυτή που παρουσιάστηκε παραπάνω. Σε καμία περίπτωση, η παρούσα ανάλυση δεν μπορεί να θεωρηθεί μελέτη σεισμικής



επικινδυνότητας του μνημείου. Μία τέτοια μελέτη θα απαιτούσε περισσότερο ακριβείς αναλύσεις και υπερβαίνει τους σκοπούς αυτής της εργασίας.

Όμως, παρά τις προσεγγιστικές θεωρήσεις της πραγματικής γεωμετρίας που περιλαμβάνει η ανάλυση, τα αποτελέσματα οδηγούν σε αρκετά συμπεράσματα και δίνουν ξεκάθαρα τη γενική εικόνα της σημαντικής ευστάθειας που παρουσιάζει η κατασκευή σε σεισμικές δονήσεις, παρά τις σημαντικές βλάβες που έχει. Επιπρόσθετα, τα αποτελέσματα δίνουν και σημαντικές πληροφορίες για την κατανόηση της δυναμικής απόκρισης τέτοιων κατασκευών, αφού, απ' ό,τι γνωρίζουμε, για πρώτη φορά γίνεται μελέτη της σεισμικής απόκρισης συστοιχιών κiónων σε σχηματισμούς γωνιών, σαν αυτούς που εξετάζονται εδώ. Συγκεντρωτικά, τα συμπεράσματα της ανάλυσης συνοψίζονται ως εξής:

1. Το πρώτο βασικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι οι ταλαντώσεις των κiónων είναι γενικώς “παρόμοιες” σε όλους τους διαφορετικούς σχηματισμούς (δύο κiónες με επιστύλιο, εξωτερική γωνία, εσωτερική γωνία). Βέβαια, υπάρχουν αρκετές διαφοροποιήσεις στην απόκριση των κiónων, αλλά οι διαφορές στις μετακινήσεις είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτές που παρατηρούνται και στις μετακινήσεις των κiónων του ίδιου σχηματισμού. Σε καμία περίπτωση, όμως, δεν παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση ή μείωση της ευστάθειας, που να οφείλεται στον τρόπο σύζευξης των επί μέρους κiónων με τα επιστύλια. Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα παρόμοιο συμπέρασμα είχε προκύψει και σε προηγούμενη εργασία [Psycharis et al (2000)] όπου είχε γίνει παραμετρική διερεύνηση του κινδύνου κατάρρευσης ενός μεμονωμένου κiónα και ενός σχηματισμού δύο κiónων με επιστύλιο. Σε αυτή την εργασία είχε βρεθεί ότι η συμπεριφορά των δύο κατασκευών είναι παρόμοια και ότι ο κίνδυνος κατάρρευσης είναι μεγαλύτερος τότε στη μία κατασκευή και τότε στην άλλη. Η παρατήρηση αυτή έχει και πρακτική σημασία, αφού φαίνεται πως αναλύσεις για απλούς σχηματισμούς, ακόμη και για έναν μεμονωμένο κiónα, μπορούν, σε πρώτη προσέγγιση, να δώσουν αρκετές πληροφορίες για τη σεισμική συμπεριφορά περισσότερο πολύπλοκων συστοιχιών κiónων.
2. Ειδικά για τη σεισμική συμπεριφορά σχηματισμών κiónων σε μορφή γωνίας, φαίνεται ότι οι πλέον απομακρυσμένοι από τη γωνία κiónες παρουσιάζουν ελαφρώς μεγαλύτερη ταλάντωση κατά τη διάρκεια του σεισμού απ' ό,τι οι ενδιάμεσοι κiónες και επομένως κινδυνεύουν περισσότερο με κατάρρευση. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το εύρος ταλάντωσης είναι μεγαλύτερο στη διεύθυνση που είναι κάθετη στον άξονα που τους συνδέει με τον κεντρικό γωνιαίο κiónα (εγκάρσια διεύθυνση), αλλά και η ταλάντωση στη διαμήκη διεύθυνση είναι γενικώς αρκετά ισχυρή. Θα πρέπει να

σημειωθεί ότι υπήρξαν και περιπτώσεις που η κίνηση στη διαμήκη διεύθυνση ήταν μεγαλύτερη απ' ό,τι στην εγκάρσια. Αντίστοιχα, ο κεντρικός γωνιακός κίονας, γενικώς υπόκειται σε μικρότερες ταλαντώσεις απ' ό,τι οι ακραίοι.

3. Επιβεβαιώθηκε για άλλη μία φορά η μη-γραμμική συμπεριφορά τέτοιου είδους σπονδυλωτών κατασκευών. Έτσι, σε πολλές περιπτώσεις αύξηση της τιμής της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας μιας σεισμικής διέγερσης οδηγούσε σε μείωση της απόκρισης.
4. Σε ό,τι αφορά τον κίνδυνο ζημιών ή κατάρρευσης κατά τη διάρκεια μελλοντικών σεισμών, μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:
  - (α) Οι αναμενόμενες ζημιές (ολισθήσεις) είναι περιορισμένες και ο κίνδυνος κατάρρευσης είναι γενικά μικρός για σεισμικές δονήσεις με μέγιστη εδαφική ταχύτητα PGV μέχρι 60 cm/sec. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή PGV=60 cm/sec αντιστοιχεί σε ισχυρές σεισμικές δονήσεις (2.0 περίπου φορές μεγέθυνση για το σεισμό της Καλαμάτας ή 4.5 φορές μεγέθυνση για την καταγραφή του σεισμού της Αθήνας στο Σύνταγμα), που σύμφωνα με την ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου εκτιμάται ότι έχουν περίοδο επανάληψης περίπου 500 χρόνια.
  - (β) Για ισχυρότερες σεισμικές δονήσεις, με μικρή πιθανότητα να συμβούν στην Αθήνα (με εκτιμώμενη περίοδο επανάληψης 2000 χρόνια), οι αναμενόμενες ζημιές στην κατασκευή γίνονται περισσότερο έντονες. Μεγάλες ζημιές παρατηρούνται στα επιστύλια, όπου οι μετακινήσεις των δοκών είναι σημαντικές και σε ορισμένες περιπτώσεις συμβαίνουν πτώσεις δοκών. Οι κίονες, όμως, γενικώς δεν καταρρέουν, παρ' ό,τι, σε ορισμένες περιπτώσεις, υφίστανται σημαντικές μόνιμες μετατοπίσεις σπονδύλων (στη χειρότερη περίπτωση, η μόνιμη μετατόπιση του κιονοκράνου ήταν 0.20 m). Κατάρρευση συμβαίνει μόνο στον κίονα 6.1 της εξωτερικής γωνίας για τη σεισμική διέγερση της Καλαμάτας με PGV=100 cm/sec, δηλαδή για εξαιρετικά ισχυρή δόνηση, που είναι μάλλον απίθανο να συμβεί στην Αθήνα. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις, στις οποίες η απόκριση ορισμένων κίωνων είναι αρκετά μεγάλη και επομένως, μικρές αλλαγές των παραμέτρων θα μπορούσαν να προκαλέσουν ανατροπή, δεδομένης της ευαισθησίας και της μη-γραμμικότητας της συμπεριφοράς.
5. Τα απόλυτα πλάτη ταλάντωσης των κίωνων, ακόμη και για τους εξαιρετικά ισχυρούς σεισμούς με PGV=100 cm/sec, δεν είναι μεγάλα, λαμβανομένου υπόψη του μεγέθους των κίωνων και της σπονδυλωτής δομής της κατασκευής. Για τους πιθανότερον να συμβούν σεισμούς με PGV=60 cm/sec, η ανηγμένη ως προς το ύψος μετακίνηση της

κορυφής των κιόνων (drift) δεν υπερβαίνει, γενικώς, την τιμή 1.5%. Εξαίρεση αποτελεί ο κίονας 6.1 της εξωτερικής γωνίας, ο οποίος παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μετακίνηση και φαίνεται να είναι αρκετά ευάλωτος, ιδιαίτερα στο σεισμό της Καλαμάτας (σε αυτή την περίπτωση προκύπτει  $u_{\max}/H=2.8\%$ ). Σε αυτόν τον κίονα συμβαίνει και η μέγιστη τιμή drift χωρίς κατάρρευση (σεισμός Καλαμάτας με  $PGV=80$  cm/sec), ίση με  $u_{\max}/H=3.7\%$ . Ο συγκεκριμένος κίονας καταρρέει για  $PGV=100$  cm/sec, και από τη χρονοϊστορία της απόκρισης προκύπτει ότι ανατροπή συμβαίνει για τιμές drift μεγαλύτερες από 6% περίπου. Η τιμή αυτή, όμως, είναι ενδεικτική και μπορεί να αλλάξει για άλλη σεισμική διέγερση.

# 7 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ

Στην παρούσα εργασία γίνεται διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης των κiónων του Ολυμπίου, στη μορφή που σώζονται σήμερα. Η μελέτη κινήθηκε σε τρεις κατευθύνσεις:

(α) Στη διερεύνηση της επιρροής διαφόρων παραμέτρων στη δυναμική συμπεριφορά των κiónων.

(β) Στην εκτίμηση των σεισμικών διεγέρσεων που έχουν πλήξει την Αθήνα από την εποχή της κατασκευής του μνημείου μέχρι σήμερα, με βάση τις μετατοπίσεις των σπονδύλων που παρατηρούνται στους κiónες.

(γ) Σε μία πρώτη διερεύνηση του μελλοντικού σεισμικού κινδύνου για την κατασκευή, λαμβάνοντας υπόψη και τις βλάβες που υπάρχουν στους κiónες.

Οπωσδήποτε, η εξάντληση όλων των παραπάνω θεμάτων δεν ήταν δυνατή μέσα στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος. Πιστεύουμε, όμως, ότι προέκυψαν αρκετά σημαντικά συμπεράσματα, τα οποία συνοψίζονται παρακάτω.

## ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Διερευνήθηκε η επιρροή διαφόρων παραμέτρων στη δυναμική απόκριση των κiónων για αρμονική διέγερση της βάσης. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν αφορούσαν τόσο τα χαρακτηριστικά της διέγερσης (περίοδος, πλάτος ταλάντωσης, διάρκεια δόνησης) όσο και τη γεωμετρία των κiónων (διαφορά στο πλήθος σπονδύλων και σύζευξη των κiónων με επιστύλιο).

Από τις αναλύσεις επαληθεύτηκε η σημαντική επιρροή της περιόδου της εδαφικής δόνησης. Έτσι, το πλάτος απόκρισης της κορυφής των κiónων μεγαλώνει σχεδόν γραμμικά με την περίοδο, για σταθερή εδαφική ταχύτητα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το γινόμενο της εδαφικής ταχύτητας επί την περίοδο φαίνεται πως είναι ένα κρίσιμο

μέγεθος που επηρεάζει σχεδόν γραμμικά την απόκριση, ανεξάρτητα από τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων.

Αντίθετα, η διάρκεια της εδαφικής κίνησης δεν φαίνεται να είναι σημαντική για τους συνήθεις σεισμούς, αλλά μόνο για ισχυρές δονήσεις με ταχύτητα μεγαλύτερη από 60 cm/sec.

Η απόκριση επηρεάζεται από την ακριβή γεωμετρία των κίωνων, ιδιαίτερα για ισχυρή εδαφική κίνηση. Οι διαφορές όμως στην απόκριση διαφορετικών κίωνων βρίσκονται μέσα στο εύρος των αβεβαιοτήτων των αποτελεσμάτων, δεδομένης και της ευαισθησίας της απόκρισης. Υπό αυτό το πνεύμα, η ακριβής γεωμετρία δεν φαίνεται να είναι τόσο σημαντική. Αυτό ισχύει και εάν δύο κίονες συνδεθούν με επιστύλιο, αφού ούτε τότε αλλάζει ουσιαστικά ο τρόπος ταλάντωσης.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, παρ' ότι οι σεισμικές δονήσεις δεν μπορούν να προσομοιαστούν ικανοποιητικά με τις απλές αρμονικές (ημιτονικές) συναρτήσεις που εξετάστηκαν στην εργασία, τα αποτελέσματα μπορούν να επεκταθούν και σε σεισμούς. Σε μια τέτοια αντιστοίχιση θα πρέπει η μέγιστη εδαφική ταχύτητα και η δεσπόζουσα περίοδος να είναι ίσες στους δύο τύπους διεγέρσεων.

## **ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΙΣΤΟΡΙΑΣ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ**

Με βάση την υφιστάμενη παραμορφωμένη κατάσταση, στην οποία βρίσκεται ο δυτικότερος των σωζωμένων κίωνων της ΝΑ γωνίας, η οποία εκτιμάται ότι έχει προέλθει από τις σεισμικές καταπονήσεις που έχει υποστεί η κατασκευή στα 2000 χρόνια της ζωής της, έγινε μία διερεύνηση της σεισμικής ιστορίας της Αθήνας. Συγκεκριμένα έγινε σύγκριση των πραγματικών μετατοπίσεων των σπονδύλων αυτού του κίονα με αυτές που προκύπτουν από τις αναλύσεις για διάφορες σεισμικές διεγέρσεις.

Οι αναλύσεις έγιναν για το σύστημα των δύο κίωνων 7.5 και 7.6, που είναι συζευγμένοι με το επιστύλιο, και για πέντε σεισμικές διεγέρσεις, συμπεριλαμβανομένης της καταγραφής του σεισμού της Αθήνας (1999) στο Σύνταγμα, η οποία είναι η πλησιέστερη στο μνημείο καταγραφή που υπάρχει. Χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο οριζόντιες καταγραφές κάθε σεισμού, οι οποίες πολλαπλασιάστηκαν με κατάλληλους συντελεστές (διαφορετικούς για κάθε διεύθυνση), ώστε η μέγιστη ταχύτητα PGV κάθε διεγέρσης να έχει δεδομένη τιμή. Επιλύσεις έγιναν για PGV = 40, 60, 80 και 100 cm/sec.

Οι σεισμικές διεγέρσεις εφαρμόστηκαν σε ακολουθία 3 ίδιων σεισμών και η σύγκριση των μετατοπίσεων έγινε τόσο για ένα μεμονωμένο σεισμικό γεγονός (τον πρώτο σεισμό της ακολουθίας) όσο και για το συσσωρευτικό αποτέλεσμα μετά και τους τρεις σεισμούς.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, γενικώς, η επανάληψη της ίδιας σεισμικής δόνησης δύο ή τρεις φορές οδηγεί σε αύξηση της παραμόρφωσης του κίονα. Υπήρχαν όμως και περιπτώσεις που η επανάληψη του σεισμού αναιρούσε τις μετατοπίσεις που είχε προκαλέσει ο προηγούμενος σεισμός.

Επίσης, εξετάστηκε η επιρροή ενός κτίσματος που υπήρχε πάνω στο επιστύλιο για αρκετές εκατονταετίες (κελί του “στυλίτη”), η οποία σε άλλες περιπτώσεις προκαλούσε μείωση της παραμόρφωσης και σε άλλες αύξηση.

Όπως ήταν αναμενόμενο, το φασματικό περιεχόμενο των σεισμών παίζει σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα. Έτσι, οι σεισμικές διεγέρσεις που εξετάστηκαν μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι καταγραφές του Αιγίου, της Καλαμάτας και του Συντάγματος, που είναι τυπικές καταγραφές κοντινού πεδίου με δεσπόζουσες περιόδους μεταξύ 0.20 και 0.60 sec και οι οποίες δίνουν παρεμφερή αποτελέσματα και προκαλούν παρόμοιες μετατοπίσεις στους σπονδύλους του κίονα. Τέτοιοι σεισμοί μπορούν να προκαλέσουν παραμόρφωση παρόμοια με την υφιστάμενη στον κίονα με δύο τρόπους: (α) με επανάληψη 3-4 σεισμικών γεγονότων με  $PGV=40\div60$  cm/sec και (β) με την εφαρμογή ενός μόνο σεισμού με  $PGV>60$  cm/sec. Διατηρώντας την αναλογία μεταξύ ταχύτητας και επιτάχυνσης των πραγματικών καταγραφών, η περίπτωση (α) αντιστοιχεί σε εδαφική επιτάχυνση 0.50 έως 0.60 g και η (β) σε επιτάχυνση περίπου 0.80 g. Δεδομένου ότι η παραμόρφωση του κίονα έχει συντελεστεί σε διάστημα 2000 ετών, η περίπτωση (α) αναφέρεται σε σεισμούς με μέση περίοδο επανάληψης περίπου 500 χρόνια (όση δηλαδή και ο σεισμός σχεδιασμού του ελληνικού αντισεισμικού κανονισμού), ενώ η περίπτωση (β) σε ένα εξαιρετικά σπάνιο σεισμικό γεγονός με μέση περίοδο επανάληψης 2000 χρόνια. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μικρότεροι σεισμοί, όπως οι γνωστοί σεισμοί που έχουν συμβεί στην Αθήνα τα τελευταία 300 χρόνια, δεν φαίνεται να είναι ικανοί να προκαλέσουν σημαντικές μετατοπίσεις σπονδύλων. Επομένως, δεν φαίνεται πιθανόν οι ζημιές στον κίονα να έχουν προκληθεί από πολλούς μικρότερους σεισμούς και ένα από τα παραπάνω σενάρια (α) και (β) θα πρέπει να ισχύει, με πιθανότερο, κατά τη γνώμη μας, το (α).

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκει η καταγραφή της Έδεσσας, που χαρακτηρίζεται από αρκετούς επαναλαμβανόμενους παλμούς σχετικά μεγάλης περιόδου (περίπου 0.60 sec). Όμως, οι σκληρές τοπικές εδαφικές συνθήκες στην περιοχή του μνημείου (Αθηναϊκός σχιστόλιθος) δεν ευνοούν τη δημιουργία δονήσεων αυτής της μορφής από κοντινούς σεισμούς. Επομένως, τέτοιες εδαφικές κινήσεις θα μπορούσαν να δημιουργηθούν μόνο από ισχυρούς μακρινούς σεισμούς. Η παραμορφωμένη κατάσταση του κίονα θα

μπορούσε να έχει προκληθεί είτε από ένα τέτοιο σεισμό με εδαφική ταχύτητα  $PGV \approx 60$  cm/sec και εδαφική επιτάχυνση  $PGA \approx 0.60$  g περίπου, είτε από περισσότερους μικρότερους σεισμούς με εδαφική ταχύτητα της τάξης των 40 cm/sec και εδαφική επιτάχυνση 0.40 g. Στην πρώτη περίπτωση, το σεισμικό γεγονός θα είχε περίοδο επανάληψης περίπου 2000 χρόνια και στη δεύτερη 500 χρόνια.

Στην τρίτη κατηγορία ανήκουν σεισμικές δονήσεις που περιέχουν κάποιο ισχυρό παλμό πολύ μεγάλης περιόδου, της τάξης του 1.50 έως 2.00 sec, όπως ο σεισμός του Erzincan που εξετάστηκε στη μελέτη ή ο σεισμός του Βουκουρεστίου του 1977, ο οποίος παρ' ότι δεν εξετάστηκε, αναμένεται να δώσει παρόμοια αποτελέσματα. Τέτοιοι σεισμοί μάλλον θα πρέπει να αποκλειστούν, επειδή προκαλούν σημαντικές ολισθήσεις στη βάση των κiónων, αρκετά μεγαλύτερες από τις ολισθήσεις μεταξύ των σπονδύλων. Τέτοιες μετατοπίσεις κiónων, όμως, δεν φαίνεται να έχουν συμβεί στο μνημείο.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι τα παραπάνω συμπεράσματα διατυπώνονται με επιφύλλαξη, λόγω των πολλών αβεβαιοτήτων που εμπεριέχει η ανάλυση, όπως η άγνοια της κατάστασης που βρισκόταν το μνημείο σε κάθε φάση της ζωής του, η πιθανή επιρροή της θεμελίωσης, η οποία δεν έχει ληφθεί υπόψη, αλλά και η ευαισθησία της δυναμικής συμπεριφοράς, που μπορεί να οδηγήσει σε κάπως διαφορετικά αποτελέσματα για μικρές αλλαγές των παραμέτρων, ιδιαίτερα όσον αφορά στη συσσώρευση βλαβών από διαδοχικά σεισμικά γεγονότα. Από την άλλη μεριά, το γεγονός ότι τα αποτελέσματα δείχνουν παρόμοιες μορφές παραμόρφωσης και για τους τρεις κοντινούς σεισμούς που εξετάστηκαν, οι οποίοι θεωρούνται και οι πλέον πιθανοί να έχουν συμβεί στο κέντρο της Αθήνας, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι υπολογιστικές παραμορφώσεις είναι αρκετά παρεμφερείς με την πραγματική κατάσταση, μας αναγκάζει να δούμε τα παραπάνω συμπεράσματα ως πιθανά, "λογικά" σενάρια. Δεν θα πρέπει, επομένως, να αποκλειστεί η πιθανότητα να έχουν συμβεί στην Αθήνα οι ισχυροί σεισμοί που αναφέρθηκαν παραπάνω, οι οποίοι, σημειωτέον, είναι πολύ ισχυρότεροι από αυτούς που προβλέπει ο ΕΑΚ2000. Η ανάλυση που έγινε στην παρούσα εργασία έδειξε ότι είναι δυνατόν να εξαχθούν συμπεράσματα για αυτό το εξαιρετικά ενδιαφέρον θέμα. Για να μπορέσουν, όμως, τα συμπεράσματα αυτά να είναι αξιόπιστα, χρειάζονται περισσότερες αναλύσεις, οι οποίες θα πρέπει να περιλαμβάνουν και άλλους κiónες του ναού καθώς και άλλα μνημεία της περιοχής των Αθηνών.

## ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΕ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΥΣ ΣΕΙΣΜΟΥΣ

Η διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς του μνημείου σε μελλοντικούς σεισμούς έγινε για τις τρεις, ανεξάρτητες μεταξύ τους, συστοιχίες κiónων της ΝΑ γωνίας.

Συγκεκριμένα μελετήθηκαν οι δύο κίονες με επιστύλιο, η εξωτερική γωνία, αποτελούμενη από 6 κίονες σε σχηματισμό Γ και η εσωτερική γωνία, αποτελούμενη από 5 κίονες σε σχηματισμό διπλού Γ. Η έρευνα αποσκοπούσε σε μία πρώτη, προσεγγιστική εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης, συμπεριλαμβανομένων και καταρρεύσεων σε τμήματα της κατασκευής, και γι' αυτό χρησιμοποιήθηκαν ισχυρές σεισμικές δονήσεις, ίσες ή ισχυρότερες από τις “πιθανές” διεγέρσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Η γεωμετρία των κίωνων και οι ζημιές που παρουσιάζουν ελήφθησαν υπόψη στις αναλύσεις, αλλά με προσεγγιστικό τρόπο. Το γεγονός αυτό, καθώς και ο περιορισμένος αριθμός σεισμικών διεγέρσεων που εξετάστηκαν, καθιστούν τα αποτελέσματα ενδεικτικά μόνο της αναμενόμενης συμπεριφοράς. Σε καμμία περίπτωση, η παρούσα ανάλυση δεν μπορεί να θεωρηθεί μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας του μνημείου.

Παρά τις προσεγγίσεις που έγιναν στα προσομοιώματα της ανάλυσης, ιδιαίτερα όσον αφορά την ακριβή γεωμετρία, τα αποτελέσματα δίνουν ξεκάθαρα τη γενική εικόνα της σημαντικής ευστάθειας που παρουσιάζει η κατασκευή σε σεισμικές δονήσεις, ακόμη και με τις σημαντικές βλάβες που έχει.

Επιπρόσθετα, τα αποτελέσματα δίνουν και σημαντικές πληροφορίες για την κατανόηση της δυναμικής απόκρισης συστοιχιών κίωνων σε σχηματισμούς γωνιών, θέμα που δεν έχει μελετηθεί στο παρελθόν. Προέκυψε ότι οι ταλαντώσεις των κίωνων είναι γενικώς παρόμοιες σε όλους τους διαφορετικούς σχηματισμούς που εξετάστηκαν. Η λέξη “παρόμοιες” χρησιμοποιείται εδώ με ευρεία έννοια και δηλώνει ότι δεν προέκυψε ιδιαίτερα διαφορετική συμπεριφορά για κάποιον από τους τρεις σχηματισμούς.

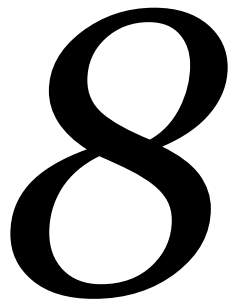
Υπήρχαν όμως αρκετές διαφοροποιήσεις στην απόκριση των κίωνων, οι οποίες ήταν εμφανείς ακόμη και μεταξύ των αποκρίσεων των κίωνων του ίδιου σχηματισμού. Έτσι, οι πλέον απομακρυσμένοι από τη γωνία κίονες παρουσιάζουν, γενικώς, ελαφρώς μεγαλύτερη ταλάντωση κατά τη διάρκεια του σεισμού απ' ό,τι οι ενδιάμεσοι και επομένως κινδυνεύουν περισσότερο με κατάρρευση. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το εύρος ταλάντωσης ήταν μεγαλύτερο στη διεύθυνση που είναι κάθετη στην ευθεία που τους συνδέει με τον κεντρικό γωνιαίο κίονα απ' ό,τι στη διαμήκη διεύθυνση, υπήρξαν όμως και περιπτώσεις που συνέβη το αντίθετο. Επίσης, οι κεντρικοί γωνιακοί κίονες των γωνιών παρουσιάζουν γενικώς μικρότερο εύρος ταλάντωσης.

Και σε αυτές τις αναλύσεις επιβεβαιώθηκε η μη-γραμμικότητα της συμπεριφοράς, αφού σε πολλές περιπτώσεις αύξηση της τιμής της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας μιας σεισμικής διέγερσης οδηγούσε σε μείωση της απόκρισης.



Τέλος, προέκυψε ότι, για σεισμικές δονήσεις με μέγιστη εδαφική ταχύτητα PGV μέχρι 60 cm/sec, οι ζημιές είναι περιορισμένες και ο κίνδυνος κατάρρευσης είναι γενικά μικρός. Η τιμή PGV=60 cm/sec αντιστοιχεί σε αρκετά ισχυρές σεισμικές δονήσεις, με εκτιμώμενη μέση περίοδο επανάληψης περίπου 500 σύμφωνα με τα παραπάνω. Για ισχυρότερες σεισμικές δονήσεις με μικρή πιθανότητα να συμβούν στην Αθήνα (εκτιμώμενη περίοδο επανάληψης 2000 χρόνια), οι ζημιές στην κατασκευή γίνονται περισσότερο έντονες. Μεγάλες ζημιές παρατηρούνται στα επιστύλια, όπου οι μετακινήσεις των δοκών είναι σημαντικές και σε αρκετές περιπτώσεις οδηγούν σε πτώση των δοκών. Οι κίονες, όμως, γενικώς δεν καταρρέουν, παρ' ό,τι σε ορισμένες περιπτώσεις υφίστανται σημαντικές μόνιμες μετατοπίσεις σπονδύλων, οι οποίες κατά μέγιστον φθάνουν τα 20 cm. Κατάρρευση κίονα συμβαίνει μόνο για τη σεισμική διέγερση της Καλαμάτας με PGV=100 cm/sec, δηλαδή εξωπραγματικά ισχυρή δόνηση. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις, στις οποίες η απόκριση ορισμένων κίωνων είναι αρκετά μεγάλη και μικρές αλλαγές των παραμέτρων θα μπορούσαν να προκαλέσουν ανατροπή.

Τα απόλυτα πλάτη ταλάντωσης των κίωνων δεν είναι μεγάλα, Από τη χρονοϊστορία της απόκρισης του κίονα που ανατρέπεται προκύπτει ότι κατάρρευση συμβαίνει για τιμές drift μεγαλύτερες από 6% περίπου. Η τιμή αυτή, όμως, θεωρείται ενδεικτική και μπορεί να μην είναι ίδια για όλες τις σεισμικές διεγέρσεις.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### ΕΛΛΗΝΙΚΗ

Bracken, C. (1983), "Κυνηγοί Αρχαιοτήτων 1800-1830", εκδ. Γεωργίου, Θεσσαλονίκη.

Ζάμπας, Κ. (1994), "Συμπεριφορά του Παρθενώνος σε σεισμική καταπόνηση", *Μελέτη αποκαταστάσεως του Παρθενώνος*, τόμος 3β., ΥΠ.ΠΟ., Επιτροπή Συντηρήσεως Μνημείων Ακροπόλεως, σελ. 115-144.

Κορρές, Μ. & Μπούρας, Χ. (1983), "Μελέτη αποκαταστάσεως του Παρθενώνος", ΥΠΠΟ-ΕΣΜΑ, Αθήνα.

Κορρές, Μ. (1993), "Από την Πεντέλη στον Παρθενώνα", εκδόσεις Μέλισσα, Αθήνα.

Κορρές, Μ. (1999), "Ολυμπειόν", *Ανθέμιο*, Ενημερωτικό Δελτίο της Ενώσεως Φίλων Ακροπόλεως, **5**, σελ. 27-29.

Κωνσταντινίδης, Δ. (1973), "Παραδόσεις Ιστορίας της Αρχιτεκτονικής", Μέρος Δεύτερον, Τεύχος Δεύτερον, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Λάμπρος, Σπ. (1881), "Σεισμοί εν Αθήναις προ του 1821", *Περιοδικόν Εστία*, **280** (10-5-1881), Αθήνα.

Μαλλούχου-Tufano, Φ. (1998), "Η αναστήλωση των αρχαίων μνημείων στη νεώτερη Ελλάδα (1834-1939)", *Βιβλιοθήκη της εν Αθήναις Αρχαιολογικής Εταιρείας*, αρ. 176.

Μπίρης, Κ. (1966), "Αι Αθήναι από του 19ου εις τον 20ον αιώνα", Β' έκδοση, εκδόσεις Μέλισσα, Αθήνα.

- Παχύγιαννη, Α. (1991), "Συμβολή στη Διερεύνηση της Σεισμικής Συμπεριφοράς των Αρχαίων Μνημείων", Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Παπαζάχος, Β., Παπαζάχου, Κ. (1989), "Οι σεισμοί της Ελλάδας", Εκδ. Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Παπαντωνόπουλος, Κ. (2000), "Αρχαία μνημεία υπό σεισμική δράση", Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Παπαχατζής, Μ. (1974), "Παυσανίου Ελλάδος περιήγησις – Αττικά", Εκδοτική Αθηνών, Αθήνα.
- Σπυρόπουλος, Π. (1997), "Χρονικό των σεισμών της Ελλάδος από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα", Εκδ. Δωδώνη, Αθήνα.
- Τραυλός, Ι. (1993), "Πολεοδομική εξέλιξις των Αθηνών", Β' έκδοση, εκδόσεις Καπόν & Α. Κόκκου, Αθήνα.
- Ψυχάρης Ι., Παπασταματίου Δ., Αλεξανδρής Α., Παπαντωνόπουλος Κ., Πλαίνη Α., Τσόγκα Κ. (1996), "Διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς αρχαίων μνημείων", Έκθεση Νο. NTUA/LEE-96/02, Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας Ε.Μ.Π., Αθήνα.

## ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

- Allen, R.H., Oppenheim, I.J., Parker A.P. and Bielak, J. (1986), "On the dynamic response of rigid body assemblies", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **14**, pp 861-876.
- Ambraseys, N. (1983), "On the protection of monuments and sites in seismic areas", *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Meeting for the Restoration of the Acropolis Monuments*, Athens, pp 207-228.
- Ambraseys, N. and Finkel, C. (1992), "The seismicity of the Eastern Mediterranean during the turn of the eighteenth century", *Istanbul Mitteilungen des Deutsches Archaeologisches Instituts*, **42**, pp 323-343.
- Ambraseys, N. (1996), "Material for the investigation of the Central Greece", *Archaeoseismology*, Ed. S. Stiros and R.E. Jones, pp 23-36.

- Angotti, F., Blasi, C., Chiarurgi, A. and Spinelli, P. (1985), "Studies of aggregation state of stone elements of the Temple of Saturn and Vespasian and of the Focas Column", *Proceedings of the V<sup>th</sup> International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Lausanne, pp 1093-1102.
- Aslam, M., Godden, W.G. and Scalise, D.T. (1980), "Earthquake rocking response of rigid bodies", *Journal of the Structural Division, ASCE*, **106** (ST2), pp 377-392.
- Blasi, C. and Spinelli, P. (1989), "Dynamic investigation techniques for restoration design: an application at the Temple of Castore and Polluce", *Proceedings of Int. Conference on Structural Conservation of Stone Masonry: Diagnosis, Repair and Strengthening*, Greek Ministry of Culture, Athens.
- Bouras, Ch. (1996), "The so-called Cell of the Athenian Stylite", *Architectural Studies in Memory of Richard Krautheimer*, C. L. Striker, ed., Verlag Philipp von Zabern.
- Cundall, P.A. (1971), "A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems", *Proceedings of the Symp. of the Intern. Soc. of Rock Mechanics*, Vol. 1, paper No. II-8, Nancy.
- Cundall, P.A. (1976), "Explicit Finite-Difference methods in geomechanics", *Proceedings of the EF Conference Numerical Methods in Geomechanics*, Blacksburg, pp 132-150.
- Cundall, P.A. and Strack, O.D.L. (1979), "A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies", *Geotechnique*, **29**, pp. 47-65.
- Giannini, R., Giuffrè, A. and Masiani, R. (1986), "La dinamica delle strutture composte di blocchi sovrapposti. Studi in corso sulla Colonna Antonina", *Proceedings VIII Congresso Nazionale AIMETA*, Torino.
- Gregorovius, F. (1889), "Geschichte der Stadt Athen im Mittelalter. Von der Zeit Justinians bis zur fraenkischen Eroberung", Stuttgart.
- Gruben, G. (1986), "Die Tempel der Griechen", Hirmer Verlag, Muenchen.
- Hanazato, T., Theofanopoulos, N., and Watabe, M. (1989), "Seismic response analyses of Parthenon columns", *Proceedings of the First International Conference on Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings*, Florence, Italy, pp 339-348.

- Herrmann, L.R. (1978) "Finite Element analysis of contact problems", *Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE*, **104** (EM5), pp 1043-1057.
- Housner, G.W. (1963), "The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **53** (2), pp 404-417.
- Ishiyama, Y. (1982) "Motion of rigid bodies and criteria for overturning by earthquake excitations", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **10**, pp 635-650.
- Itasca (1993), **Universal Distinct Element Code (UDEC)**, Vol. I: User's Manual, Itasca Consulting Group.
- Itasca (1998), **3 Dimensional Distinct Element Code (3DEC)**, Theory and Background, *Itasca Consulting Group*.
- Koh, A.S., Spanos, P.D. and Roesset, J.M. (1986), "Harmonic rocking of rigid block on flexible foundation", *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, **112** (11), pp 1165-1180.
- Koh, A.S. and Mustafa, G. (1990), "Free rocking of cylindrical structures", *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, **116** (1), pp 35-54.
- Koh, A.S. and Hsiung, C.M. (1991a), "Base isolation benefits of 3-D rocking and uplift. I: Theory", *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, **117** (1), pp 1-18.
- Koh, A.S. and Hsiung, C.M. (1991b), "Base isolation benefits of 3-D rocking and uplift. II: Numerical example", *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, **117** (1), pp 19-31.
- Korres, M. (1996), "Seismic damage to the monuments of the Athenian Acropolis", *Archaeoseismology*, Ed. S. Stiros and R.E. Jones, pp 69-74.
- Makris, N. and Chang, S.-P. (2000), "Effect of viscous, viscoplastic and friction damping on the response of seismic isolated structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **29**, pp 85-107.
- Makris, N. and Black, C.J. (2004a), "Dimensional analysis of rigid-plastic and elastoplastic structures under pulse-type excitations", *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, **130**, pp 1006-1018.
- Makris, N. and Black, C.J. (2004b), "Evaluation of peak ground velocity as a "good" intensity measure for near-source ground motions", *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, **130**, pp 1032-1044.

- Manos, G.C. and Demosthenous, M. (1992), "Dynamic response of rigid bodies subjected to horizontal base motion", *Proceedings of the 10<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, Spain, pp 2817-2821.
- Mavroeidis, G.P. and Papageorgiou, A.S. (2003), "A mathematical representation of near-fault ground motions", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**, pp 1099-1131.
- Meek, J.W. (1975), "Effects of foundation tipping on dynamic response", *Journal of Structural Division ASCE*, **101** (ST7), pp 141-150.
- Milne, J. (1881), "Experiments in observational Seismology", *Trans. Seism. Soc. Japan*, **3**, pp 12-64.
- Mouzakis, H., Psycharis, I. N., Papastamatiou, D. Y., Carydis, P. G., Papantonopulos, C. and Zambas, C. (2002), "Experimental investigation of the earthquake response of a model of a marble classical column", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **31**, pp 1681-1698.
- Patton, J. (1927), "The Erechtheum", *American School of Classical Studies*, 2 vols. Cambridge, Mass., Harvard Univ. Press.
- Penrose, F.C. (1851), "An investigation to the principles of the Athenian Architecture", London.
- Papantonopulos, C., Psycharis, I. N., Papastamatiou, D. Y., Lemos, J. V. and Mouzakis, H. (2002), "Numerical prediction of the earthquake response of classical columns using the Distinct Element Method", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **31**, pp 1699-1717.
- Perry, J. (1881), "Note on the rocking of a column", *Trans. Seism. Soc. Japan*, **3**, pp 103-106.
- Priestley, M.J.N., Evison, R.J. and Carr, A.J. (1978), "Seismic response of structures free to rock on their foundation", *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, **11** (3), pp 141-150.
- Psycharis, I.N., Jennings P.C. (1983a), "Rocking of slender rigid bodies allowed to uplift", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **11**, pp 57-76.

- Psycharis, I.N. (1983b), "Dynamics of flexible systems with partial lift-off", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **11**, pp 501-521.
- Psycharis, I.N. and Jennings, P.C. (1985), "Upthrow of objects due to horizontal impulse excitation", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **75** (2), pp 543-561.
- Psycharis, I.N. (1990), "Dynamic behaviour of rocking two-block assemblies", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **19**, pp 555-575.
- Psycharis, I.N. (1991), "Effect of base uplift to the dynamic response of SDOF structures", *Journal of Structural Engineering ASCE*, **117** (3), pp 733-754.
- 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, 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*, **29**, pp 1093-1109.
- Psycharis, I. N., Syngros, C., Mimoglou, P. and Taflambas, I. (2002), "Parametric investigation of the overturning of rigid blocks under dynamic loading", *12<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering*, London, 9-13 Sept.
- Psycharis, I. N., Lemos, J. V., Papastamatiou, D. Y., Zambas, C. and Papantonopoulos, C. (2003), "Numerical study of the seismic behaviour of a part of the Parthenon Pronaos", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **32**, pp 2063-2084.
- Sinopoli, A. (1989a), "Dynamic evolution by earthquake excitation of multiblock structures", *Proceedings of Int. Conference on Structural Conservation of Stone Masonry: Diagnosis, Repair and Strengthening*, Greek Ministry of Culture, Athens.
- Sinopoli, A. (1989b), "Kinematic Approach in the impact problem of rigid bodies", *Applied Mechanics Reviews*, **42** (11), Part 2, , S233-S244.
- Sinopoli, A. (1989c), "Dynamic analysis of a stone column excited by a sine wave ground motion", *Applied Mechanics Reviews*, **44** (11), Part 2, S246-S255.
- Spanos, P.D. and Koh, A.S. (1984), "Rocking of rigid bodies due to harmonic shaking", *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, **110** (11), pp 1627-1642.

- Theofanopoulos, N., Hanazato, T., Matsukawa, K. and Watabe, M. (1989), "Analysis of microtremor records at Zeus-Olympeion Athens and assessment of its safety by employing dynamic response analysis", *Proceedings of the First International Conference Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings*, Florence, Italy, pp 319-328.
- Toelle – Kastenbein, R. (1994), "Das Olympieion in Athen", *Boehlau Verlag*, Κολωνία.
- Tonki, K. and Miura, F. (1983), "Non-linear seismic response analysis of soil-structure interaction systems", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **11**, pp 77-89.
- Travlos, J. (1980), "Pictorial dictionary of ancient Athens", *Hacker Art Books*, New York.
- Tso, W.K. and Wong, C.M., (1989a), "Steady state rocking response of rigid blocks. Part 1: Analysis", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **18**, pp 89-106.
- Tso, W.K. and Wong, C.M., (1989b), "Steady state rocking response of rigid blocks. Part 2: Experiments", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **18**, pp 107-120.
- Ulm, F.J., Piau, J.M. (1993), "Fall of a Temple: Theory of contact applied to masonry joints", *Journal of Structural Engineering ASCE*, **119** (3), pp 687-697.
- Winkler, T., Meguro, K. and Yamazaki, F. (1995), "Response of rigid body assemblies to dynamic excitation", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **24**, pp 1389-1408.
- Wolf, J.P. (1976), "Soil-structure interaction with separation of base mat from soil (lifting-off) ", *Nuclear Engineering and design*, **38** (2), pp 357-384.
- Yim, C.S., Chopra, A.K. and Penzien, J. (1980), "Rocking response of rigid blocks to earthquakes", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **8**, pp 565-587.
- Yim C.S. and Chopra, A.K. (1984), "Dynamics of structures on two-spring foundation allowed to uplift", *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, **110** (7), pp 1124-1146.



