

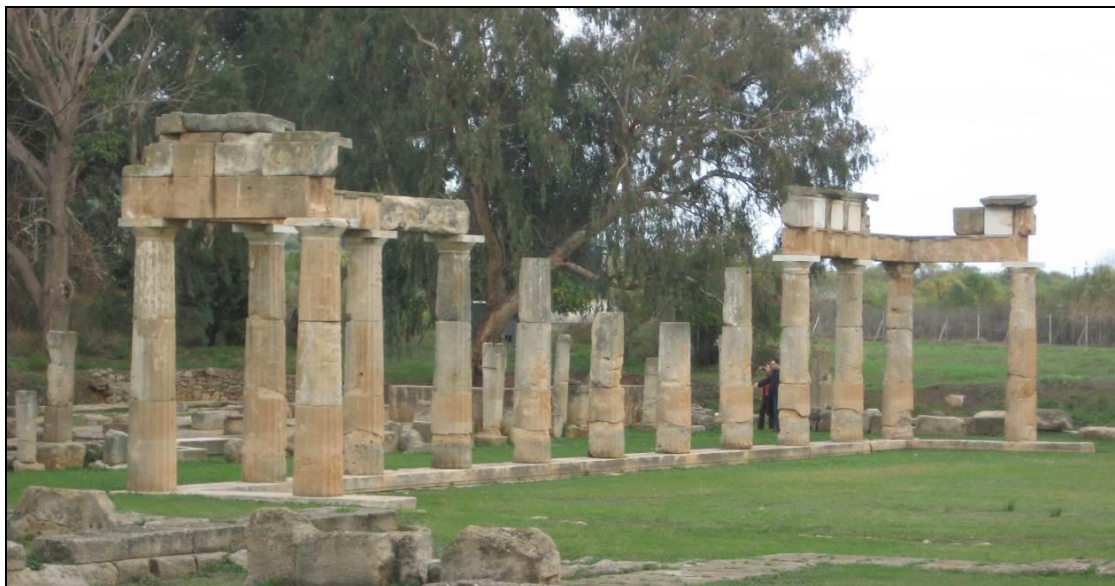


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Συμβολή στην μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς αρχαίων μνημείων

Κωνσταντίνου Παπαδόπουλου
Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.



ΑΘΗΝΑ 2017

**Συμβολή στην μελέτη
της σεισμικής συμπεριφοράς αρχαίων μνημείων**



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Συμβολή στην μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς αρχαίων μνημείων

Κωνσταντίνου Παπαδόπουλου
Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

Συμβουλευτική Επιτροπή: Ε. Βιντζηλαίου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. (επιβλέπουσα)

Θ.Π. Τάσιος, Ομ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ι.Ν. Ψυχάρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2017

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	11
1. ΑΡΧΑΙΑ ΜΝΗΜΕΙΑΚΑ ΚΤΗΡΙΑ	
1.1 Λίθινες κατασκευές στον ελλαδικό χώρο κατά τους προϊστορικούς χρόνους.....	15
1.2 Μνημειακά κτήρια αρχαϊκών, κλασικών και ελληνιστικών χρόνων	17
1.3 Οι αρχαίοι περίπτεροι ναοί.....	20
1.4 Σχεδιασμός και τρόπος δόμησης αρχαίων μνημειακών κτηρίων.....	22
1.5 Σεισμική συμπεριφορά αρχαίων μνημείων	25
1.6 Συντήρηση, επισκευές και καταρρεύσεις κτηρίων στην αρχαιότητα και στους πρώιμους χριστιανικούς χρόνους.....	29
1.7 Παράγοντες ερείπωσης των αρχαίων μνημειακών κατασκευών	32
1.8 Νεότερες επεμβάσεις για την στερέωση των αρχαίων μνημείων στον ελλαδικό χώρο.....	34
2. ΟΙ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΤΩΝ ΛΙΘΙΝΩΝ ΜΕΛΩΝ ΤΩΝ ΑΡΧΑΙΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ	
2.1 Γενικά.....	41
2.2 Τα μεταλλικά συνδετήρια στοιχεία των διατεταγμένων σε στρώσεις λίθων.....	43
2.2.1 Οι σύνδεσμοι και οι γόμφοι	43
2.2.2 Ο ρόλος του μολύβδου	45
2.2.3 Τρόπος κατασκευής των συνδέσμων	47
2.2.4 Θέση και λειτουργία.....	49
2.2.5 Σχεδιασμός των συνδέσεων	50
2.2.6 Άλλες συνδέσεις των λίθων	51
2.2.7 Σύγχρονοι σύνδεσμοι και γόμφοι από τιτάνιο	52
2.3 Συνδετήρια στοιχεία στις διεπιφάνειες των κιόνων	55
2.3.1 Οι ξύλινοι πόλοι και εμπόλια	55
2.3.2 Οι σιδερένιοι γόμφοι.....	58
2.3.3 Οι μπρούτζινοι πόλοι και εμπόλια των κιόνων της Στοάς του Φίλωνος.....	59
2.3.4 Σύγχρονοι πόλοι και εμπόλια.....	61
3. Η ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΡΧΑΙΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ – ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗΝ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	
3.1 Γενικά.....	63
3.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	66
3.3 Σύνοψη των κύριων συμπερασμάτων της επιστημονικής έρευνας.....	83

4. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ABAQUS ΝΑ ΠΡΟΒΛΕΠΕΙ ΤΗΝ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΞΗΡΟΛΙΘΟΔΜΗΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	
4.1	Περί του λογισμικού ABAQUS 85
4.1.1	<i>Η υπολογιστική μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων</i> 85
4.1.2	<i>Ο αλγόριθμος δυναμικής ανάλυσης του υποπρογράμματος ABAQUS/Explicit</i> 87
4.2	Συγκρίσεις θεωρητικών τιμών – αριθμητικών αποτελεσμάτων για την ελεύθερη ταλάντωση λικνιζόμενου σώματος 89
4.3	Αριθμητική αναπαραγωγή πειραμάτων δυναμικής απόκρισης ξηρολιθοδομών 92
4.3.1	<i>Συνοπτική περιγραφή των πειραμάτων</i> 92
4.3.2	<i>Τα αριθμητικά προσομοιώματα των διαφόρων δοκιμών</i> 94
4.3.3	<i>Βαθμονόμηση των παραμέτρων για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των διεπιφανειών</i> 95
4.3.4	<i>Συγκρίσεις πειραματικών δεδομένων – αριθμητικών προβλέψεων</i> 98
4.4	Συμπέρασμα 103
5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΑΡΧΑΙΩΝ ΚΙΟΝΩΝ	
5.1	Γενικά 105
5.2	Περί των μνημείων που ανήκουν οι υπό εξέταση κίονες 106
5.2.1	<i>Ο ναός της Αθηνάς στην Αρκαδική Αλίφειρα</i> 106
5.2.2	<i>Ο Παρθενώνας</i> 108
5.2.3	<i>Το στωικό κτήριο στο ιερό της Βραυρωνίας Αρτέμιδος</i> 109
5.2.4	<i>Ο ναός του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών</i> 111
5.2.5	<i>Ο ναός τα Αλέας Αθηνάς στην Τεγέα</i> 114
5.2.6	<i>Το πρόπυλο του τελετουργικού εστιατορίου στο Ασκληπιείο της Επιδαύρου</i> 117
5.3	Οι σεισμικές καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν για την διέγερση των αριθμητικών προσομοιωμάτων των κίωνων 119
5.4	Προκαταρκτικές διερευνήσεις για ένα κίονα του ναού του Επικούριου Απόλλωνα 124
5.4.1	<i>Τα διάφορα προσομοιώματα του κίονα</i> 124
5.4.2	<i>Παράμετροι προσομοιώσεων</i> 126
5.4.3	<i>Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός του τρόπου παρουσίασής τους</i> 128
5.4.4	<i>Σχολιασμός αριθμητικών αποτελεσμάτων</i> 140
5.5	Διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης οκτώ κίωνων 142
5.5.1	<i>Τα αριθμητικά προσομοιώματα των κίωνων</i> 142
5.5.2	<i>Αριθμητικά αποτελέσματα</i> 147

5.6 Διατύπωση κριτηρίων σεισμικής ευστάθειας κίωνων βάσει των αριθμητικών προβλέψεων	153
5.7 Συμπεράσματα.....	157

6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΠΟΛΩΝ ΑΠΟ ΤΙΤΑΝΙΟ ΣΤΗΝ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΕΝΟΣ ΑΡΧΑΙΟΥ ΚΙΟΝΑ

6.1 Γενικά.....	159
6.2 Βαθμονόμηση διαφόρων παραμέτρων προσομοίωσης.....	161
6.2.1 Εκτίμηση της συμπεριφοράς του τιτανίου <i>Grade B</i>	161
6.2.2 Τεκμηρίωση της αξιοπιστίας της προσομοίωσης σωληνωτών πólων.....	163
6.2.3 Αριθμητική εκτίμηση της τέμνουσας αστοχίας του συστήματος κολουροκωνικού πólου – ζεύγους εμπολίων.....	165
6.2.4 Πειραματικός έλεγχος των αριθμητικών προβλέψεων για την φέρουσα ικανότητα έναντι τέμνουσας του συστήματος κολουροκωνικού πólου –ζεύγους εμπολίων	166
6.3 Αριθμητικές προσομοιώσεις	169
6.3.1 Τα εισαγόμενα δεδομένα	169
6.3.2 Αριθμητικά αποτελέσματα.....	171
6.3.3 Διερεύνηση της επιρροής της πυκνότητας του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων στις αριθμητικές προβλέψεις	174
6.4 Συμπερασματικά σχόλια	176

7. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΑΡΧΑΙΩΝ ΚΙΟΝΟΣΤΟΙΧΙΩΝ

7.1 Τα αριθμητικά προσομοιώματα	179
7.2 Αριθμητικά αποτελέσματα.....	182
7.2.1 Έλεγχος της συγκρισιμότητας προβλέψεων διαφορετικών εκδόσεων του <i>ABAQUS</i>	182
7.2.2 Προβλέψεις για κιονοστοιχίες.....	184
7.3 Συμπερασματικά σχόλια	194

8. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

8.1 Ανακεφαλαίωση κύριων συμπερασμάτων.....	197
8.2 Σχόλια για την αξιοπιστία των αριθμητικών προβλέψεων	200
8.3 Συμβολή της εργασίας στην επιστήμη	202
8.4 Προτάσεις για την συνέχιση της έρευνας.....	204

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	205
----------------	-----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	209
-------------------	-----

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	223
-------------------------	-----

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	231
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	237

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι μνημειακές λίθινες κατασκευές των αρχαίων Ελλήνων που σώζονται έως σήμερα είναι, στην πλειονότητά τους, σε ερειπιώδη κατάσταση, με ιστάμενους μόνο μεμονωμένους κίονες ή συστοιχίες κίωνων συζευγμένων με ολίγους λίθους των υπερκείμενων στρώσεων του θριγκού. Λόγω του ότι τα μνημεία αυτά είναι διεσπαρμένα σε περιοχές με σημαντική σεισμική δραστηριότητα (όχι μόνο στον ελλαδικό χώρο αλλά και περί την Ανατολική Μεσόγειο), η μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς τους αποτελεί μία σημαντική διάσταση των προσπαθειών για την διατήρησή τους. Για αυτό άλλωστε κατά τις τελευταίες δεκαετίες, κυρίως στην χώρα μας αλλά και διεθνώς, έχουν πολλαπλασιαστεί οι ερευνητικές εργασίες που πραγματεύονται την λικνιστική συμπεριφορά ξηρολιθοδομών ή, ειδικότερα, την σεισμική απόκριση των εν λόγω μνημείων.

Η παρούσα μελέτη είναι άλλη μία εργασία αυτού του είδους, όπως άλλωστε μαρτυρεί και ο τίτλος της. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για μία, κατά το πλείστον, αριθμητική μελέτη που εστιάζει στην εξέταση της σεισμικής συμπεριφοράς αρχαίων κίωνων ελεύθερα ιστάμενων και συστοιχιών κίωνων που φέρουν λίθους επιστυλίου. Οι βασικοί στόχοι της ήταν αφενός να εξαγάγει αποτελέσματα, κατά το εφικτό αξιόπιστα, συμβάλλοντας στην περαιτέρω κατανόηση ενός πολύπλοκου και δύσκολου να περιγραφεί αναλυτικά φαινομένου, και αφετέρου να διατυπώσει συμπεράσματα όχι μόνο ποιοτικού αλλά και ποσοτικού χαρακτήρα, τα οποία να μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για την εκτίμηση της τρωτότητας και της σεισμικής διακινδύνευσης των εν λόγω αρχαίων μνημείων¹.

Για τους σκοπούς αυτούς πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές διερευνήσεις, για κάθε μία από τις οποίες εκτελέστηκαν πολυάριθμες αριθμητικές επιλύσεις με χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS/Explicit. Συγκεκριμένα αναφέρεται ότι διερευνήθηκε η επιρροή δεκαεπτά παραμέτρων (προσομοίωσης ή φυσικών) στην αριθμητική πρόβλεψη της σεισμικής απόκρισης αρχαίων κίωνων και κιονοστοιχιών², ενώ, οι αριθμητικές επιλύσεις, αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στο ανά χείρας τεύχος, είναι περισσότερες από επτακόσιες πενήντα. Αν και είναι μάλλον πρόδηλος, πρέπει να επισημανθεί ο σημαντικός

¹ Για το δεύτερο, βεβαίως, είναι απαραίτητο να συνδυαστούν και στοιχεία για την σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής που ευρίσκεται κάθε μνημείο.

² Οι παράμετροι που εξετάστηκαν αναφέρονται συγκεντρωτικά στον επίλογο, σελ. 197-198.

ρόλος του προαναφερθέντος λογισμικού κατά την εκπόνηση της μελέτης· οι πολλαπλές «δυνατότητές» του προσομοίωσης και αξιόπιστης αριθμητικής επίλυσης αποτέλεσαν καθοριστικό παράγοντα ώστε να επιχειρηθεί όσο το δυνατό ευρύτερη αριθμητική εξέταση του υπό μελέτη φαινομένου.

Η μελέτη απαρτίζεται από επτά, εν πολλοίς αυθύπαρκτα, κεφάλαια και έναν επίλογο. Η διάρθρωσή της, μάλιστα, «υποδηλώνει» και τα διαδοχικά στάδια εργασίας που ακολουθήθηκαν για την εκπόνησή της. Έτσι, μετά το παρόν προλογικό σημείωμα, παρατίθενται τα δύο πρώτα, εισαγωγικού χαρακτήρα, κεφάλαια, στα οποία παρουσιάζονται διάφορα στοιχεία (κατασκευαστικά, ιστορικά κ.α.) αναφορικά με τις μνημειακές λίθινες κατασκευές των Ελλήνων στους αρχαίους χρόνους. Στην συνέχεια, ακολουθεί το κεφάλαιο στο οποίο παρουσιάζονται, με συνοπτικό τρόπο, προγενέστερες εργασίες που έχουν συναφές αντικείμενο με την παρούσα, καθώς και τα βασικά ευρήματά τους. Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τις προκαταρκτικές αριθμητικές επιλύσεις που σκόπευαν στην τεκμηρίωση της αξιοπιστίας του λογισμικού ως προς την πρόβλεψη της δυναμικής απόκρισης ξηρολιθοδομών και την βαθμονόμηση των βασικών παραμέτρων προσομοίωσης του φαινομένου. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλύσεις που αφορούν την σεισμική συμπεριφορά οκτώ ελεύθερα ιστάμενων αρχαίων κίωνων με διαφορετικά χαρακτηριστικά, οι οποίες οδήγησαν, μεταξύ άλλων, στην διατύπωση γενικών κριτηρίων για την εκτίμηση της σεισμικής ευστάθειας των αρχαίων κίωνων. Το έκτο κεφάλαιο πραγματεύεται την επιρροή στην σεισμική απόκριση ενός μέσου μεγέθους αρχαίου κίονα, της τοποθέτησης στις διεπιφάνειες του κίονα νέων πόλων από τιτάνιο, δύο ειδών (σωληνωτών και κολουροκωνικών) Η επιρροή αυτή, σύμφωνα με την σχετική (περιορισμένου πάντως εύρους) αριθμητική διερεύνηση, εκτιμήθηκε ως θετική. Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται αριθμητικές διερευνήσεις της σεισμικής συμπεριφοράς διαφόρων διατάξεων κιονοστοιχιών, δύο αρχαίων ναών, οι οποίες κατέληξαν, μεταξύ άλλων ότι η σεισμική ευστάθεια των κιονοστοιχιών που εξετάστηκαν είναι της ίδιας τάξης μεγέθους ή μεγαλύτερη από αυτήν που θα διέθεταν οι κίονές τους ιστάμενοι ελεύθερα. Στον επίλογο γίνεται ανακεφαλαίωση των κύριων συμπερασμάτων της παρούσας εργασίας, παρατίθενται σχόλια για την αξιοπιστία των αριθμητικών προβλέψεων, αναφέρονται συνοπτικώς τα στοιχεία της μελέτης που, κατά τον γράφοντα, είναι πρωτότυπα, και, τέλος, παρουσιάζονται επιγραμματικώς προτάσεις για περαιτέρω σχετική έρευνα.

Αν και το μεγαλύτερο μέρος του κειμένου του ανά χείρας τεύχους, καθώς και η πλειονότητα των αριθμητικών επιλύσεων που παρουσιάζονται σε αυτό, διαμορφώθηκε και εκτελέστηκαν, αντίστοιχα, κατά την τελευταία τριετία, η εκπόνηση της παρούσας μελέτης ως διδακτορικής διατριβής δρομολογήθηκε το 2004. Όμως, η πρόθεση εκπόνησης διδακτορικής

διατριβής με θέμα απτόμενο της δομητικής συμπεριφοράς των αρχαίων μνημείων και ως εκ τούτου η μελέτη των σχετικών ερευνητικών εργασιών από τον γράφοντα άρχισε, ήδη, από το 1996, αμέσως μετά την ολοκλήρωση των βασικών σπουδών του. Από το 2000 και μετά, μάλιστα, «έβαινε» παράλληλα με την πολυετή συμμετοχή του στο έργο αποκατάστασης του ναού του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών -ενίοτε δε η μία ωφελούσε την άλλη και το αντίστροφο. Στο διάστημα που μεσολάβησε, αρκετά στάδια της παρούσας μελέτης, καθώς και άλλες συναφείς μελέτες μου για το μνημείο των Βασσών, παρουσιάστηκαν σε διάφορες επιστημονικές ανακοινώσεις³. Σε όλες αυτές τις ερευνητικές προσπάθειές μου ήταν πολλοί αυτοί (μέλη Δ.Ε.Π. του Ε.Μ.Π., καλοί φίλοι, στενοί συνεργάτες κ.α.) που με βοήθησαν με έμμεσο ή άμεσο τρόπο. Σε όλους αυτούς επιθυμώ να εκφράσω και από εδώ τις θερμότερες ευχαριστίες του.

Ξεχωριστή μνεία οφείλω σε αυτούς που με τίμησαν με τις συμβουλές τους και την καθοδήγησή τους κατά την περίοδο ολοκλήρωσης των σπουδών μου και έναρξης των επαγγελματικών ενασχολήσεών μου, στον κ. Στέλιο Κόλια, τότε Αν. Καθηγητή και Διευθυντή του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Ε.Μ.Π., και στον κ. Κώστα Ζάμπα, Δρ. πολιτικό μηχανικό, τότε Υπεύθυνο του Έργου Αποκατάστασης του Παρθενώνος.

Θέλω, επίσης, να αναφέρω ξεχωριστά τον κ. Κωνσταντίνο Συρμακέζη, τ. Καθηγητή Ε.Μ.Π., υπό την επίβλεψη του οποίου μελέτησα για πρώτη φορά την δομητική συμπεριφορά των αρχαίων μνημείων, και τον κ. Μανόλη Κορρέ, Ομότιμο Καθηγητή Ε.Μ.Π. και Ακαδημαϊκό, που αργότερα, για ένα βραχύ, αλλά σημαντικό για μένα, χρονικό διάστημα, στήριξε τις επαγγελματικές και κατ' επέκταση τις ερευνητικές προσπάθειές μου. Επίσης, τον πολιτικό μηχανικό Αναστάσιο Καραχάλιο, ο οποίος με διευκόλυνε καθοριστικά στην εκμάθηση του λογισμικού ABAQUS, τον Δρ. πολιτικό μηχανικό Κώστα Παπαντωνόπουλο, που μου διέθεσε τα πειραματικά δεδομένα σεισμικής απόκρισης ενός πολυσπόνδυλου κίονα βάσει των οποίων έγινε η πρώτη βαθμονόμηση του λογισμικού, και τον μεταλλειολόγο μηχανικό Σαράντο Μουγιάκο σε συνεννόηση με τον οποίο εκτελέστηκαν, στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, ολίγα (πρωτότυπης πάντως διάταξης) πειράματα.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω, επίσης, στα μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής της διατριβής: στην επιβλέπουσα, κ. Ελισάβετ Βιντζηλαίου, Καθηγήτρια και Διευθύντρια του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος του Ε.Μ.Π., για τον εποικοδομητικό έλεγχο και τις χρησιμότερες υποδείξεις της κατά την μακρά εκπόνηση της παρούσας μελέτης, καθώς και για την διαρκή και πολύτιμη ενθάρρυνσή της, στον κ. Θεοδόση

³ Για σχετικές βιβλιογραφικές αναφορές, βλέπε σελ. 216-217.

Π. Τάσιο, Ομότιμο Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την παραχώρηση πολύ ωφέλιμων οδηγιών, και στον κ. Ιωάννη Ν. Ψυχάρη, Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την πρόθυμη παροχή σημαντικών συμβουλών που οδήγησαν στην βελτίωση της παρούσας διατριβής.

Επιθυμώ, τέλος, να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε αυτούς που, με την αμέριστη αγάπη τους και την αταλάντευτη στήριξή τους, μου παρείχαν τα πολυτιμότερα εφόδια (και) για την εκπόνηση της παρούσας μελέτης: στους γονείς μου, Αναστάσιο και Παρασκευή Παπαδοπούλου, στην σύζυγό μου, Βασιλική Ξ. Σαββατιανού, και στα παιδιά μας Έκτορα και Δανάη. Σε αυτούς αφιερώνεται η παρούσα εργασία.

Κωνσταντίνος Παπαδόπουλος

Σεπτέμβριος 2017

1. ΑΡΧΑΙΑ ΜΝΗΜΕΙΑΚΑ ΚΤΗΡΙΑ

1.1 Λίθινες κατασκευές στον ελλαδικό χώρο κατά τους προϊστορικούς χρόνους

Οι απαρχές της οικοδομικής δραστηριότητας, όπως άλλωστε και των κατασκευών γενικότερα, χάνονται στα βάθη της προϊστορίας. Υπολογίζεται ότι μετά από το 20000 π.Χ. οι άνθρωποι εγκαταλείπουν τα σπήλαια ή τα προστατευμένα από τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες μέρη που χρησιμοποιούσαν για κατοικία, και αρχίζουν να κατασκευάζουν πρόχειρες καλύβες, ως προσωρινά καταλύματα. Με την πάροδο των χιλιετιών και την υποχώρηση και της πιο πρόσφατης εποχής των παγετώνων (περίπου το 8000 π.Χ.), που έδωσε τη θέση της στο κλίμα που γνωρίζουμε σήμερα, οι ανθρώπινες κοινωνίες αλλάζουν και αυτές θεαματικά, μια που οι άνθρωποι γνωρίζουν και, με σταδιακά αυξανόμενους ρυθμούς, ασκούν την γεωργία, με συνέπεια να εγκαθίστανται σε διάφορες περιοχές μόνιμα.

Η εμφάνιση της γεωργίας, και η συνακόλουθη αύξηση των νεολιθικών οικισμών στον ελλαδικό χώρο, τοποθετείται την περίοδο 5750-4550 π.Χ., που για την Ευρώπη είναι γνωστή ως η «κλιματικά βέλτιστη»⁴. Από τότε και έως το τέλος της νεολιθικής εποχής (το 2500 π.Χ. περίπου) αναπτύσσεται για πρώτη φορά η αρχιτεκτονική, η οποία είναι άλλοτε καθαρά ωφελιμιστική (κατοικίες κ.λπ.), και άλλοτε έχει χαρακτήρα θρησκευτικό και μνημειακό. Σε αυτή την περίοδο, γύρω από την λεκάνη της Μεσογείου, σε αντίθεση με άλλες περιοχές, επικρατεί ως βασικό υλικό δομής η πέτρα, σε συνδυασμό με τις ωμές πλίνθους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα οικισμών της μέσης νεολιθικής εποχής αποτελούν ο οικισμός στο Σέσκλο και αυτός στο Διμήνι, κοντά στο Βόλο. Εκεί, τα σπίτια θεμελιώθηκαν σε κτιστή βάση από ακατέργαστους πλακαρούς λίθους, ενώ οι τοίχοι κατασκευάστηκαν από ωμές πλίνθους. Αξιοσημείωτο είναι επίσης ότι οι οικισμοί περιβάλλονταν από χαμηλό τείχος⁵.

Εκείνη την περίοδο, μάλλον, κατασκευάζονται στον ελλαδικό χώρο και τα πρώτα μεγαλιθικά μνημεία (όπως είναι τα γνωστά ως «δρακόσπιτα» στη νότια Εύβοια), οικοδομημένα από ογκώδεις τετραγωνικούς, μακρόστενους και σχετικά μικρού πάχους λίθους, τοποθετημένους χωρίς συνδετικά υλικά, τα οποία έδωσαν αργότερα τη θέση τους στις

⁴ Φερεντίνος και Γκιώνη 2006, σελ. 26-27.

⁵ Χουρμουζιάδης 2007, σελ. 192-193.

μνημειώδεις λίθινες κατασκευές των Μινωιτών (20^{ός} αι. π.Χ. – τέλη 14^{ου} αι. π.Χ.) και των Μυκηναίων (1550 – 1100 π.Χ.). Οι μεν πρώτες, για την πολυπλοκότητά τους και τους αρχιτεκτονικούς εξωραϊσμούς (χρήση γυψόλιθου στις προσόψεις και στις παραστάδες θυρών, πλακοστρώσεις κ.α.), οι δε δεύτερες, για τον όγκο τους και την επιβλητικότητά τους (αποτελούνται από γιγαντιαίους ογκόλιθους κατάλληλα λαξευμένους και σχεδόν τέλεια συναρμοσμένους, Εικ. 1.1), εντυπωσιάζουν έως και σήμερα.



Εικ. 1.1: Στοά στην Μυκηναϊκή Ακρόπολη της Τίρυνθας.

Με δεδομένο ότι, σύμφωνα με τη σύγχρονη έρευνα, υπολογίζεται ότι κάθε 50 χρόνια καταγράφεται στον ελλαδικό χώρο ένας σεισμός μεγέθους 8 της κλίμακας Ρίχτερ, κάθε πέντε χρόνια ένας 7 Ρίχτερ, κάθε έξι μήνες ένας 6 Ρίχτερ και κάθε είκοσι ημέρες ένας 5 Ρίχτερ⁶, είναι ευνόητο ότι η τόσο συχνή εκδήλωση ισχυρών σεισμικών συμβάντων, ήταν σίγουρα γνωστή στους κατοίκους της περιοχής αυτής και κατά τους προϊστορικούς χρόνους, όπως γνωστές πρέπει να ήταν και οι επιπτώσεις που επιφέρουν οι σεισμοί στο (δομημένο και μη) περιβάλλον.

Αυτό, βεβαίως, υποστηρίζεται και από τη σύγχρονη επιστημονική έρευνα, διότι συχνά, η αρχαιολογική σκαπάνη φέρνει στο φως κατάλοιπα οικοδομημάτων από τους προϊστορικούς χρόνους, που είτε εμφανώς έχουν καταστραφεί από σεισμό, είτε έχουν υποστεί βλάβες που αποδίδονται σε σεισμικά πλήγματα, οι οποίες φαίνεται ότι αργότερα επισκευάστηκαν και έτσι τα οικοδομήματα συνέχισαν να είναι σε χρήση για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ως ένα από τα πιο χαρακτηριστικά, σχετικά, παραδείγματα, μπορεί να αναφερθεί το κεντρικό (πιθανότατα, ανακτορικό) κτήριο της μινωικής Ζωμίνθου, στον Ψηλορείτη της Κρήτης. Το κτήριο αυτό πιστεύεται ότι καταστράφηκε από σεισμό δύο φορές στα Μινωικά χρόνια (και μία στα Ρωμαϊκά), και παρ' όλα αυτά τα ανασκαφικά ευρήματα επιβεβαιώνουν ότι στην Ζώμινθο υπήρξε συνεχής κατοίκηση, τουλάχιστον, κατά τους προϊστορικούς χρόνους⁷.

⁶ Έτσι, η Ελλάδα συγκεντρώνει το 50% της σεισμικής ενέργειας που εκλύεται σε ολόκληρη την Ευρώπη, βρισκόμενη στην έκτη σχετική θέση στον κόσμο μετά την Ιαπωνία, τις Νέες Εβρίδες, το Περού, τα Νησιά Σολομώντα και τη Χιλή (Σταυρακάκης 1999, σελ. 12).

⁷ Σαπουνά-Σακελλαράκη 2012.

Εκείνο πάντως που ίσως προκαλεί έκπληξη και, σίγουρα, θαυμασμό, είναι ότι υπάρχει πληθώρα αρχαιολογικών στοιχείων που υποδηλώνουν ότι οι Μινωίτες, κυρίως, αλλά και οι Μυκηναίοι, είχαν τέτοια γνώση περί της στατικής και της δυναμικής σχετικά με την οικοδομική (περισσότερο, μάλιστα, από κάθε άλλο πολιτισμό της Ανατολικής Μεσογείου) που μπορεί να υποστηριχτεί ότι ελάμβαναν και ειδική μέριμνα για την αντισεισμική ενίσχυση των κτηρίων τους. Εδώ, τα πιο εντυπωσιακά παραδείγματα, χωρίς αμφιβολία, είναι τα διώροφα και τριώροφα κτήρια της σημαντικής πόλης της εποχής του Χαλκού, που έχει ανακαλυφθεί κοντά στο σημερινό χωριό Ακρωτήρι, στη Θήρα, τα οποία, λόγω του ότι είχαν ταφεί κάτω από παχιές ηφαιστειακές επιχώσεις, έχουν διατηρηθεί σε πολύ καλή κατάσταση. Πιο συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί στο Ακρωτήρι ότι σχεδόν αναπόσπαστο στοιχείο της αργολιθοδομής των τοίχων των κτηρίων αποτελούσαν «ξυλοδεσιές», δηλαδή οριζόντια (και σε κάποιες περιπτώσεις και κατακόρυφα) πλέγματα από ξύλινα επιμήκη στοιχεία, που ενσωματώνονταν στο πάχος των τοίχων, σε διάφορες στάθμες, προσδίδοντάς τους (μεταξύ άλλων) επιπλέον προστασία έναντι των οριζόντιων αδρανειακών δράσεων που τους προκαλούσαν οι σεισμοί^{8,9}.

Οι εν λόγω, καθόλα θαυμαστές, κατασκευές των Μινωιτών και των Μυκηναίων, με τον μνημειακό τους χαρακτήρα και την εξαιρετική επιμέλεια στην κατεργασία των λίθων τους, δεν μπορεί παρά να θεωρηθούν ως ο μακρινός προάγγελος των μνημειακών λίθινων κατασκευών των αρχαϊκών, και της φυσικής συνέχειάς τους, των κλασικών και των ελληνιστικών χρόνων, που σήμερα θεωρούνται ως το επιστέγασμα της αρχαίας Ελληνικής Αρχιτεκτονικής.

1.2 Μνημειακά κτήρια αρχαϊκών, κλασικών και ελληνιστικών χρόνων

Μετά από την λαμπρή εποχή του χαλκού, στους πρώιμους ιστορικούς χρόνους η μεγάλη αρχιτεκτονική στην Ελλάδα περιέπεσε (με ελάχιστες εξαιρέσεις) σε περίοδο παρακμής, ως συνέπεια των ανακατατάξεων πληθυσμών σε εκείνη την περίοδο και των δραματικών γεγονότων που ακολούθησαν¹⁰. Το διάστημα, πάντως, αυτών των «σκοτεινών χρόνων»

⁸ Παλυβού 1999, σελ. 71-89.

⁹ Υπάρχουν πάντως και πολλά άλλα παραδείγματα, όπως τα ανακτορικού τύπου κτήρια στην Κρήτη, η κατασκευαστική ανάλυση των οποίων ανέδειξε (και) τον αντισεισμικό ρόλο των οριζόντιων και κατακόρυφων ξύλινων συστημάτων ενίσχυσης των φερόντων οργανισμών τους (Τσακανίκα-Θεοχάρη 2006).

¹⁰ Εκτιμάται ότι περί 1250 π.Χ. επικράτησε στην ανατολική Μεσόγειο μία παρατεταμένη περίοδος υγρασίας η οποία οδήγησε σε δημογραφικές μεταναστεύσεις και επιδρομές στις παράκτιες πόλεις κυρίως, αλλά και στην ενδοχώρα. Τα γεγονότα αυτά πιθανότατα προκάλεσαν την σταδιακή παρακμή του μυκηναϊκού κόσμου

(1100-700 π.Χ.), όπως έχουν χαρακτηριστεί, ήταν προσωρινό και μάλλον περιορισμένο. Αφού ανιχνεύεται ότι κάπου στις αρχές του 8^{ου} π.Χ. αιώνα άρχισε και πάλι στην Ελλάδα η οικοδόμηση σημαντικών κατασκευών, τότε, δηλαδή, που εμφανίζονται οι πρωιμότεροι περίπτεροι ναοί, οι οποία σιγά-σιγά με το πέρασμα των χρόνων θα αποτελέσουν το αρχιτεκτονικό σύμβολο της (υπό διαμόρφωση τότε κοινωνικής και πολιτικής οντότητας) πόλης-κράτους.

Όπως είναι φυσικό, τα υλικά δομής εκείνης της, μεταβατικής, περιόδου είναι και πάλι «ταπεινά», το ξύλο και η ωμή πλίνθος. Όμως, ήδη από το 620 π.Χ. αρχίζει η εφαρμογή του λίθου στους ναούς των Ελλήνων. Ενώ, στον 6^ο αιώνα γενικεύεται η εγκατάλειψη του ξύλου και του ωμού πηλού ως κύριων δομικών υλικών, με αποτέλεσμα τα μεγάλα και σημαντικά μνημεία εκείνης της περιόδου να είναι λίθινα¹¹. Πολύ περισσότερο στους επόμενους αιώνες όταν κάθε κατασκευή κάποιας σημασίας, ανεξαρτήτως μεγέθους, κατασκευάζεται από πέτρα.

Η αρχική επιλογή υλικού των αρχαίων Ελλήνων, για τα πέτρινα οικοδομήματά τους, ήταν οι λίθοι που αφενός μπορούσαν να υποστούν κατεργασία με ευκολία, και αφετέρου βρισκόνταν σε αφθονία σε κοντινή περιοχή με το υπό κατασκευή οικοδόμημα. Κατά συνέπεια, ντόπιοι πωρόλιθοι¹² κάθε είδους, όταν πρόσφεραν την απαραίτητη αντοχή, χρησιμοποιούνταν στην οικοδόμηση χωρίς να λογαριάζεται η εξωτερική τους μορφή, γιατί αυτή καλυπτόταν από ασβεστοκονίαμα. Με την πάροδο, όμως, των δεκαετιών ο ασβεστόλιθος και το μάρμαρο εισάγονται και αυτά στην οικοδομική των αρχαίων Ελλήνων, συνήθως ξεχωριστά, χωρίς να είναι σπάνια, όμως, και η από κοινού χρήση τους. Έτσι, στις περιοχές όπου υπήρχαν λατομεία μαρμάρου, λόγω της εξαιρετικής υφής του (που συνδυάζεται με υψηλές μηχανικές αντοχές), το υλικό αυτό ήταν η πρώτη επιλογή, αλλά και σε άλλες περιοχές, όταν ήθελαν να προσδώσουν στο έργο ιδιαίτερη λαμπρότητα και τα οικονομικά μέσα που είχαν στη διάθεσή τους το επέτρεπαν, προτιμούσαν τη μαρμαρίνη κατασκευή ή συνδυασμό μαρμάρου για τα υψηλότερα τμήματα του κτηρίου, και φθηνότερου λίθου για τα υπόλοιπα μέρη της ανωδομής του και, φυσικά, για την τη θεμελίωσή του.

(Φερεντίνος και Γκιώνη 2006, σελ. 27). Άλλωστε έχει διαπιστωθεί ότι τα περισσότερα μυκηναϊκά ανάκτορα καταστράφηκαν από φωτιά, ενώ τουλάχιστον στο «παλάτι του Νέστορα», στην Πύλο, είχαν προηγηθεί οικοδομικές εργασίες για την καλύτερη προστασία του κεντρικού συγκροτήματος κτηρίων, γεγονός που μαρτυρεί ότι οι κάτοικοί του ένιωθαν ότι απειλούνταν από κάποιο εγγώριο ή μακρινό κίνδυνο (Blegen *et al.* 2001, p. 41).

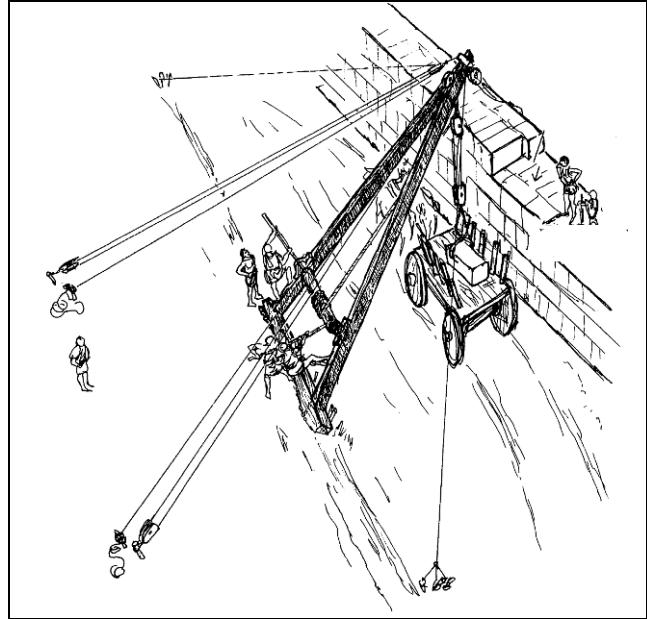
¹¹ Ο πρωιμότερος ολόλιθος περίπτερος ναός, σύμφωνα με όσα είναι γνωστά έως σήμερα, είναι ο ναός της Αρτέμιδος Γοργούς που κτίστηκε στην Κέρκυρα περίπου το 580 π.Χ.

¹² Ο όρος *πωρόλιθος* περιλαμβάνει κατά περιοχές πετρώματα διαφορετικής ποιότητας, τα οποία όλα είναι μαλακά και μπορούν εύκολα να υποστούν κατεργασία. Τα πετρώματα αυτά είναι ιζηματογενή με ενιαία μάζα, τόφφοι, απολιθωματοφόροι ασβεστόλιθοι κ.α., συνήθως υποκίτρινης ή κιτρινέρυθρης απόχρωσης. Δηλαδή, ο όρος *πωρόλιθος* αφορά κάθε μαλακό λίθο που δεν είναι σκληρός ασβεστόλιθος ή μάρμαρο.

Βεβαίως, δεν ήταν όλα τα μέρη των λίθινων κτηρίων των αρχαίων Ελλήνων από πέτρα. Απαραίτητη ήταν η ξυλεία για την οροφή και τον σκελετό της στέγης, και η κεραμική για την κεράμωση και τις υδρορρόες, όπως και η χρήση διαφόρων μετάλλων (σίδηρου, χαλκού και μολύβδου) για τις συνδέσεις των διαφόρων μελών των κτηρίων, τόσο των λίθινων όσο των ξύλινων και των πήλινων.

Αξίζει να αναφερθεί, επίσης, ότι η μετάβαση από τις ξύλινες στις λίθινες μνημειακές κατασκευές στην αρχαία Ελλάδα κατέστη δυνατή λόγω της ραγδαίας προόδου στα μαθηματικά, στον τεχνικό σχεδιασμό (ως συσσωρευμένη γνώση του οικοδομείν την οποία παρέλαβαν από τους προγόνους τους) και στην μεταλλουργία¹⁴, και, φυσικά, λόγω της εφεύρεσης, και διάδοσης της χρήσης, μηχανών για την ανύψωση βαρέων φορτίων (Εικ. 1.2).

Εκείνη την λαμπρή περίοδο, που πολύ αργότερα συμβατικά χωρίστηκε από τους ιστορικούς σε αρχαϊκούς (700-480 π.Χ.), κλασικούς (480-323 π.Χ.) και ελληνιστικούς χρόνους (323-146 π.Χ.), οι



Εικ. 1.2: Σκαρίφημα στο οποίο αναπαρίσταται ανυψωτική μηχανή (δίκωλος άλλως τρίςπαστος) της αρχαιότητας, κατά Βιτρούβιο¹³.

Έλληνες δημιουργούν πάμπολλα πέτρινα κτήρια μνημειακού χαρακτήρα. Έτσι, πάμπολλα θρησκευτικά οικοδομήματα (ναοί, βωμοί, τεμένη, θησαυροί, θόλοι, μαυσωλεία), διοικητικά και δημόσια κτήρια (εκκλησιαστήρια, βουλευτήρια, προπύλαια, γυμναστήρια, στάδια, ωδεία, θέατρα, ασκληπιεία, στοές), υδραυλικές κατασκευές (υδραγωγεία, κρήνες), εντυπωσιακά οδικά και λιμενικά έργα (δρόμοι, γέφυρες, λιμάνια, νεώσοικοι, σκευοθήκες), επιβλητικές οχυρώσεις, και, τέλος, ανάκτορα, επαύλεις και ιδιωτικές κατοικίες συνέθεταν τον πλούτο των λίθινων κατασκευών της αρχαίας Ελλάδας.

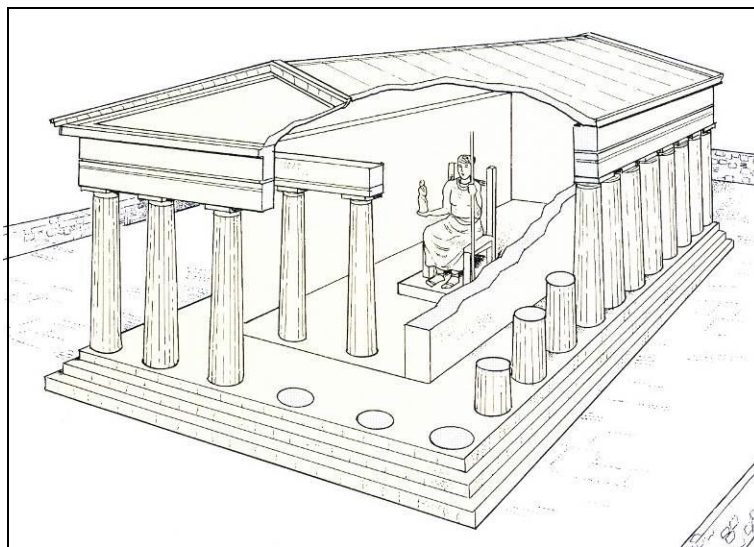
¹³ Από Rowland and Noble-Howe 1999, fig. 119, p. 294.

¹⁴ Υπολογίζεται ότι από τον 6^ο αιώνα π.Χ. μπόρεσαν οι Έλληνες να τήξουν το σίδηρο σε χαμηλά καμίνια (ύψους 0.8 έως 1.2 m, και διαμέτρου περίπου 0.15 m) που ήταν εφοδιασμένα με φυσερά, και με μια διαδικασία αποκάθαρσης (στόμωμα) να τον επεξεργαστούν σε σφυρήλατο σίδηρο ή ατσάλι. Η εν λόγω τεχνολογική εξέλιξη έδωσε τη δυνατότητα κατασκευής, μεταξύ άλλων (βλ. σχετ. και υποσημ. 22, σελ. 23), του πιο προηγμένου (επιθετικού και κυρίως αμυντικού) οπλισμού της εποχής, ο οποίος έπαιξε σημαντικότερο ρόλο στην επικράτηση των Ελλήνων στους Περσικούς Πολέμους (Πελεκίδης και Δεσποτόπουλος 1971).

1.3 Οι αρχαίοι περίπτεροι ναοί

Από τον πλούτο των λίθινων οικοδομημάτων των αρχαίων Ελλήνων, που προαναφερθήκαν, ξεχωρίζουν αναμφίβολα οι ναοί, τα κτήρια, δηλαδή, όπου οι Έλληνες λάτρευαν τους θεούς τους. Κάθε ναός ήταν ο τόπος κατοικίας ενός θεού, το άγαλμα του οποίου, σε όρθια ή καθιστή θέση, βρισκόταν στο εσωτερικό του ιερού κτηρίου (Εικ. 1.3). Για

περισσότερους από οκτώ αιώνες (έως, δηλαδή, τους ύστερους ρωμαϊκούς χρόνους, περί το 200 μ.Χ.), οι Έλληνες έκτιζαν τους σημαντικότερους ναούς τους με λίθους, ακολουθώντας ένα μοναδικό σχέδιο, που στην πλήρως ανεπτυγμένη μορφή του (περίπτερος ναός), περιλάμβανε δύο, σχεδόν ξεχωριστές¹⁶, δομικές ενότητες: Την περιμετρική κιονοστοιχία (περίσταση ή



Εικ. 1.3: Σκίτσο που παρουσιάζει την τυπική διαμόρφωση των χώρων σε ένα αρχαίο ελληνικό ναό¹⁵.

περιστύλιο), που ήταν διαρθρωμένη σε τρεις ζώνες καθ' ύψος (βαθμίδες, κίονες και θριγκό) και διαμόρφωνε, κατά μήκος, διαδοχικά πλαίσια σε περικλειστη ορθογώνια διάταξη, και το εσωτερικό κτήριο (κυρίως ναός) που είχε την μορφή, περίπου, ενός ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου κιβωτίου, και διέθετε ελάχιστα ανοίγματα, συνήθως μόνο μία ή δύο θύρες. Το όλο οικοδόμημα καλυπτόταν από αμφικλινή στέγη, με τριγωνικά αετώματα, με τέτοιο τρόπο ώστε να διαμορφώνεται στοά (πετρό) και στις τέσσερις πλευρές του.

Έτσι, μπορεί κάποιος να ισχυρισθεί ότι όλοι οι ελληνικοί ναοί της αρχαιότητας έμοιαζαν μεταξύ τους. Αυτό, πιθανότατα, διότι ο αρχαιοελληνικός ναός αποτελώντας το ισχυρότερο σύμβολο της θρησκευτικότητας των Ελλήνων, έπρεπε να αποτελεί ένα διακεκριμένο, απόλυτα αναγνωρίσιμο, κτίσμα, που να παραμένει αμετάβλητο όπου κι αν ήταν κτισμένο¹⁷.

¹⁵ Από Spawforth 2006, εικ. σελ. 87.

¹⁶ Μερική διαφραγματική σύνδεση μεταξύ περιστυλίου και κυρίως ναού παρείχαν (μέσω της τριβής) οι δοκοί και οι υπερκείμενες πλάκες οροφής που γεφύρωναν τις δύο κύριες δομικές ενότητες του κτηρίου.

¹⁷ Gruben 2000, σελ. 13-14. Όπως επίσης αναφέρει ο G. Gruben στο βιβλίο του για τα αρχαία ιερά των Ελλήνων «ο (αρχαίος) ναός είναι ένα εντελώς αυτόνομο και αυτόνομο κτίσμα. Οι βαθμίδες του τον διαχωρίζουν από το έδαφος και η κιονοστοιχία τον αντιδιαστέλλει με σαφήνεια προς το περιβάλλον του».

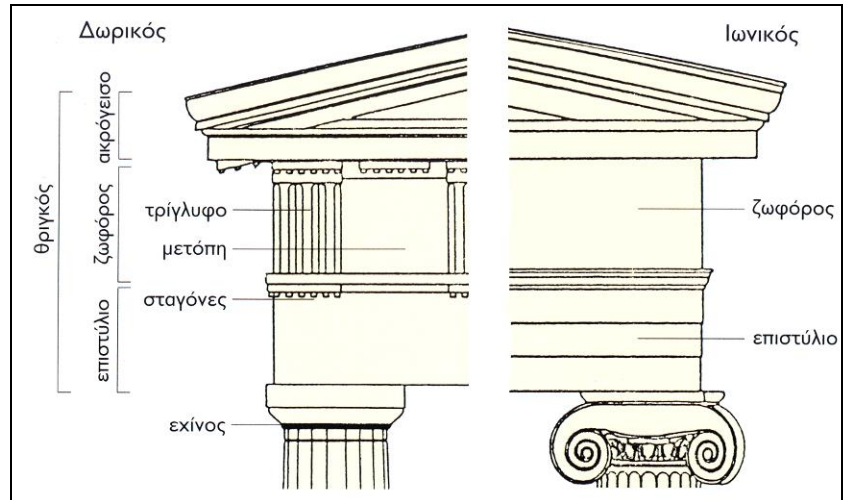
Βεβαίως, υπήρχαν, εξ αρχής, δύο διαφορετικοί τρόποι διακόσμησης (ρυθμοί) των ναών, ο δωρικός και ο ιωνικός¹⁹, στους οποίους αργότερα (στον 4^ο αιώνα π.Χ.) προστέθηκε και ένας τρίτος (ο κορινθιακός ρυθμός). Οι διαφορές, αρχιτεκτονικού χαρακτήρα, των ρυθμών εστιάζονται, κυρίως, στα

κιονόκρανα και στον υπερκείμενο θριγκό (Εικ. 1.4, 1.5), ενώ οι διαφορές, στατικού χαρακτήρα, έγκεινται στις αναλογίες διαστάσεων των κίωνων (Εικ. 1.5) και άλλων βασικών δομικών ενοτήτων (όπως π.χ. του θριγκού).

Πιθανώς, αυτές οι διαφορές να οφείλονται, όπως έχει

διατυπωθεί και από την αρχαιότητα²⁰, στο ότι τα κτήρια δωρικού ρυθμού κατασκευάζονταν έτσι ώστε να αποδίδουν τη δυναμική ύπαρξη του άνδρα, ενώ τα ιωνικά την εύκαμπτη γλυκύτητα της γυναίκας.

Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι οι κίονες του δωρικού ρυθμού, στην αρχή του 6^{ου} π.Χ. αιώνα, κατασκευάζονταν έτσι ώστε ο λόγος ύψους προς κάτω διάμετρο (ραδινότητα) να είναι ίσος με 4.2 έως 4.3, περί το μέσον του αιώνα και μετά, ίσος με 4.5 έως 4.9, στη μετέπειτα κλασική εποχή, 5.5 έως 5.7, ενώ στους ύστερους κλασικούς και στους ελληνιστικούς χρόνους οι δωρικοί κίονες κατασκευάζονταν με λυγρηρότητα περίπου ίση με 6.2 έως 6.8. Στις αντίστοιχες περιόδους, οι ιωνικοί κίονες κατασκευάζονταν, διαχρονικά, πολύ ραδινότεροι των δωρικών, με αναλογία ύψους προς κάτω διάμετρο, συνήθως, μεταξύ 9 και 12 περίπου, όπως, άλλωστε, αργότερα και οι κορινθιακοί κίονες²¹. Δηλαδή, οι δωρικοί κίονες κατά την αρχαϊκή περίοδο ήταν μάλλον κοντόχονδροι, και σιγά - σιγά εξελίχθηκαν σε ραδινούς, ενώ σε όλη την αρχαιότητα οι ιωνικοί κίονες διαμορφώνονταν απαρέγκλιτα πολύ ραδινότεροι από τους δωρικούς κίονες.



Εικ. 1.4: Κύριες διαφορές δωρικού και ιωνικού ρυθμού, και ονοματολογία βασικών αρχιτεκτονικών όρων¹⁸.

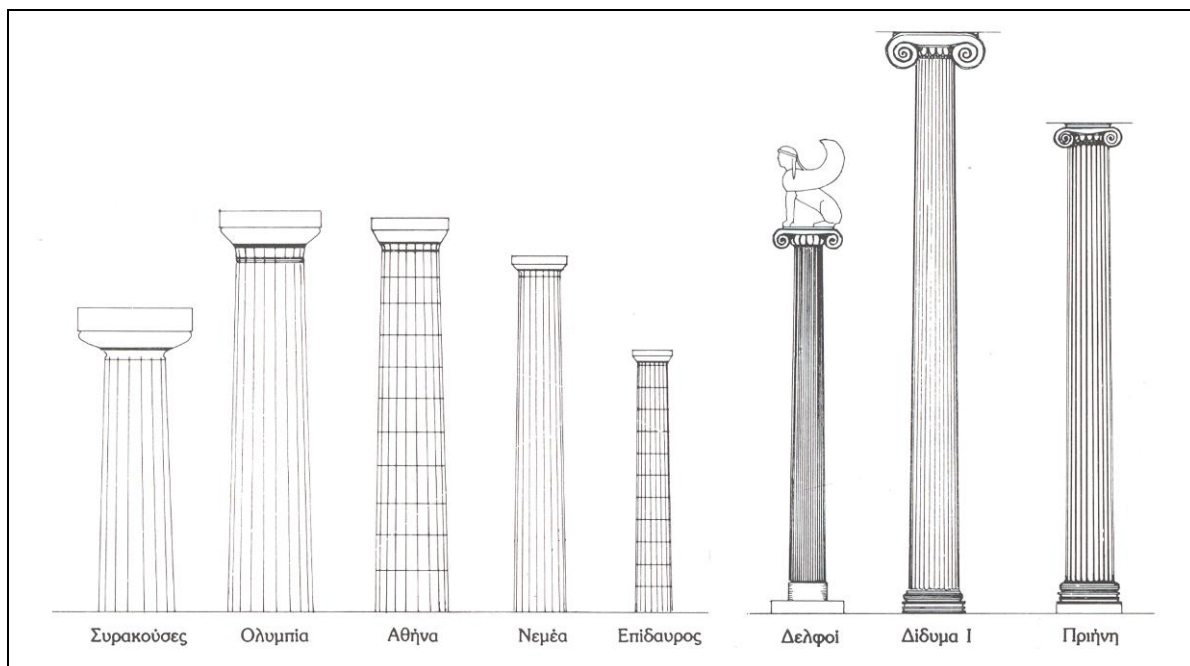
¹⁸ Από Spawforth 2006, εικόνα της σελ. 62.

¹⁹ Σύγχρονος με τους δύο βασικούς τρόπους διακόσμησης της ελληνικής ναοδομίας ήταν και ο «αιολικός», η εφαρμογή του οποίου όμως περιορίστηκε, σχεδόν αποκλειστικά, στην περιοχή του βορειοανατολικού Αιγαίου.

²⁰ Βιτρούβιος 4.1.6-8 (Λέφας 1996, τ.1, σελ. 232-233).

²¹ Muller-Wiener 1995, σελ. 123 και 133.

Αναλόγως, και το ύψος του θριγκού στα δωρικά κτήρια, κατά την αρχαϊκή περίοδο ήταν αρκετά μεγάλο σε σχέση με το ύψος των κίωνων (σε ποσοστό, περίπου, ίσο με 50%), κάτι που μειώθηκε σημαντικά κατά την κλασική (30-35%) και ελληνιστική περίοδο (20-25%) -όπως έγινε περισσότερο ομαλή η κλίση της στέγης- ενώ στα ιωνικά κτήρια ο λόγος ύψους θριγκού προς ύψος κίονα ήταν περίπου ίσος με 20 έως 25%²².



Εικ. 1.5: Αρχαίοι δωρικοί (οι πέντε πρώτοι από αριστερά) και ιωνικοί κίονες (κλ. 1:200)²³.

1.4 Σχεδιασμός και τρόπος δόμησης αρχαίων μνημειακών κτηρίων

Η αρχή της δόμησης των αρχαίων ελληνικών λίθινων κτηρίων μνημειακού χαρακτήρα από τους αρχαϊκούς έως και τους ρωμαϊκούς χρόνους, ήταν ίδια με αυτή των παλαιότερων μυκηναϊκών κατασκευών: λίθοι συναρμολογούνταν εν ξηρώ, αφού είχαν πρώτα υποστεί λάξευση, ώστε να συναρμόζονται οι επιφάνειές τους που θα ήταν σε επαφή στην τελική τους θέση στο κτήριο, κατά το δυνατόν, με μηδενικό κενό μεταξύ τους. Μεταξύ των δύο περιόδων, όμως, ενυπάρχει μία σημαντική διαφοροποίηση στην οικοδόμηση των μνημειακών κτηρίων, η οποία σχετίζεται με την μορφή των κατεργασμένων λίθων, σε συνδυασμό με τον σχεδιασμό των οικοδομημάτων. Πιο συγκεκριμένα, από τους πρώιμους αρχαϊκούς χρόνους και μετά, για πρώτη φορά στον ελλαδικό χώρο, οι λίθοι που χρησιμοποιούνται στην

²² Dinsmoor 1950, tables between p. 140 and 141.

²³ Από Muller-Wiener 1995, εικ. 70, σελ. 134.

οικοδόμηση διαμορφώνονται σε κανονικά πρίσματα, η μορφή των οποίων καθορίζεται από την ξεκάθαρη, και εκ των προτέρων δεδομένη, λειτουργία των λίθων στο κτήριο. Κατ' αυτόν τον τρόπο, κάθε λίθος αποτελούσε ένα διακριτό αρχιτεκτονικό μέλος²⁴, το μέγεθος του οποίου πολύ συχνά ήταν και αυτό προκαθορισμένο, ως απόρροια των δεδομένων επιμέρους αναλογιών των τμημάτων της κατασκευής. Επίσης, σχεδόν το σύνολο των λίθινων μελών των μνημειακών κτηρίων συνδέονταν μεταξύ τους με μεταλλικά στοιχεία, με μόνο λίγες εξαιρέσεις εκεί όπου τα συνδετήρια θεωρούνταν από τους οικοδόμους περιττά (π.χ. στους κίονες, όπου τοποθετούνταν συνήθως μόνο ξύλινα στοιχεία, για κατασκευαστικούς λόγους) ή επιβαρυντικά για την σεισμική απόκριση (π.χ. στις δοκούς και πλάκες οροφής των πτερών).

Όλα αυτά τα στοιχεία υποδεικνύουν την ανάγκη μεγάλης επιμέλειας και λεπτότητας στην λιθοξοϊκή εργασία (η οποία ήταν εφικτή και λόγω της απaráμιλλης μεταλλοτεχνικής ποιότητας των εργαλείων που χρησιμοποιούνταν για την κατεργασία των λίθων²⁵), καθώς και, κυρίως, την απαίτηση εξαιρετικά προσεκτικής μελέτης και σχεδίασης πριν από την έναρξη του οικοδομικού έργου²⁶. Άλλωστε, σήμερα είναι ευρύτατα αποδεκτό ότι οι αρχαίοι Έλληνες εμπλούτιζαν τα μνημειώδη κτήριά τους με εσωτερικές σχέσεις μεγεθών (*αναλογίες*) στοχεύοντας στην αρμονική σύνθεσή τους, στο πλαίσιο ενός αρχικού λεπτομερούς σχεδιασμού κάθε σημαντικού κτηρίου. Τούτο στηρίζεται όχι μόνο από τις πλείστες σχετικές αναφορές στο μοναδικό σωζόμενο αρχαίο σύγγραμμα που αποτελεί πολυτιμότετη πηγή γνώσεων και πληροφοριών για την αρχιτεκτονική των αρχαίων Ελλήνων²⁷, αλλά και από τις πολυάριθμες περιπτώσεις διατηρούμενων αρχαίων μνημείων, όπου η σύγχρονη έρευνα έχει οδηγήσει στην αναγνώριση στην κάτοψη και στην ανωδομή (αλλά και μεταξύ κάτοψης και ανωδομής) συζεύξεων μεταξύ διαφόρων οικοδομικών και σχεδιαστικών μέτρων, βάσει (συχνά συγγενικών) αριθμητικών αναλογιών²⁸ (Εικ. 1.6).

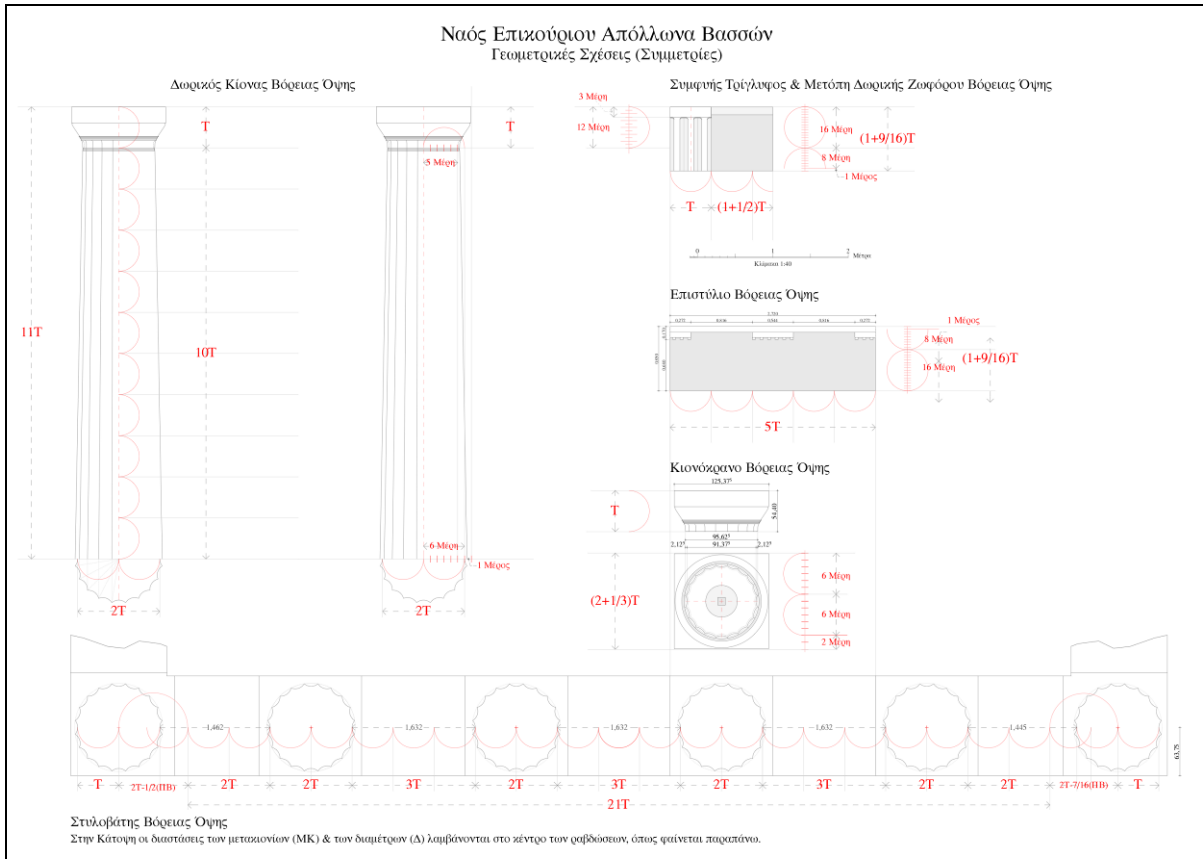
²⁴ Π.χ. σπόνδυλος = τμήμα κορμού κίονα κολουροκωνικού σχήματος με ραβδώσεις στη γενέτειρά του, κιονόκρανο = πεπλατυσμένη κεφαλή κίονα με μορφολογικές λεπτομέρειες ανάλογα με το ρυθμό του κίονα (βλ. Εικ. 1.3), επιστύλιο = δοκός επί δύο διαδοχικών κίωνων, γείσο = τμήμα μία εκ των πλευρών του τριγωνικού αετώματος, φατνωματική πλάκα = τμήμα οροφής, λιθόπλινθος = λίθος με σχήμα πλίνθου (δηλ. ορθοκανονικός) που αποτελεί συνήθως τμήμα τοίχου, κ.α.

²⁵ Έχει υποστηριχθεί ότι τα εργαλεία των αρχαίων ελλήνων λιθοξόνων υπερέχουν κατά πολύ των μεταγενέστερων αντίστοιχων (έως και των σύγχρονων) εργαλείων, με βάση την εκτίμηση ότι ήταν σκληρότερα αλλά και πιο άθραυστα, και άρα διαμορφώνονταν οξύτερα και ελαφρύτερα. Συνέπεια αυτών των χαρακτηριστικών τους, κατά τον ίδιο περιώνυμο μελετητή, ήταν η κίνησή τους κατά τη χρήση τους από τους λιθοξόους να είναι γρηγορότερη εκείνη την εποχή, και επομένως και ο ρυθμός των πληγμάτων τους στο λίθο να ήταν μεγαλύτερος, καθιστώντας έτσι ως τα πιο αποτελεσματικά (Κορρές 1994γ, σελ. 76-77).

²⁶ Είναι γνωστό, άλλωστε, ότι οι αρχιτέκτονες στην αρχαία Ελλάδα κατασκεύαζαν αφενός σχέδια και μακέτες (ινδάλματα) της κατασκευής, καθώς και πρότυπα αρχιτεκτονικά μέλη (παραδείγματα) τα οποία «αντέγραφαν» στη συνέχεια οι τεχνίτες (Μπούρας 1980, σελ. 192-193).

²⁷ Αναφερόμαστε, φυσικά, στα *Δέκα Βιβλία Περί Αρχιτεκτονικής* του Ρωμαίου αρχιτέκτονα Βιτρούβιου, για τη συγγραφή των οποίων ο συγγραφέας (όπως ο ίδιος αναφέρει) άντλησε μεγάλο μέρος των γνώσεων του από παλαιότερα ελληνικά εγχειρίδια (Βιτρ. 1.1.12, 3.3.9 και 7.προμ.12-14, Λέφας 1996, τ.1, σ. 45, 23, τ.2, σ. 83)

²⁸ Müller-Wiener 1995, σελ. 32-33.



Εικ. 1.6: Σχεδιαστική παρουσίαση των σχέσεων που συνδέουν βασικές διαστάσεις της πρόσοψης του ναού του Επικούριου Απόλλωνα²⁹.

Σχετικό παράδειγμα αποτελεί ο Παρθενώνας, όπου ο λόγος «διάμετρος κίονα προς μεταξόνιο» ισούται με 4 : 9, αριθμητική αναλογία που απαντάται και στην σχέση μεταξύ πλάτους και μήκους του στυλοβάτη (δηλαδή, στο κύριο ορθογώνιο της κάτοψης), καθώς και μεταξύ του ύψους (μέχρι και το γείσο) της πρόσοψης προς το μήκος αυτής³⁰, ενώ αξίζει να αναφερθεί ότι ως «κανόνας» για τον σχεδιασμό αρχαίων ναών δωρικού ρυθμού θεωρείται ότι ήταν ο ναός του Διός στην Ολυμπία, ενώ για τους ιωνικού ρυθμού ο ναός της Αθηνάς Πολιάδος στην Πριήνη της Μικράς Ασίας.

Παράλληλα, με αυτόν τον εκλεπτυσμένο αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, μπορεί να διατυπωθεί, επίσης, ότι τα σημαντικά κτήρια στην αρχαία Ελλάδα οικοδομούνταν και βάσει δομητικού σχεδιασμού, υποτυπώδους έστω, ο οποίος αν και, προδήλως, δεν περιλάμβανε αριθμητικούς υπολογισμούς, «εδραζόταν» στέρεα στην συσσωρευμένη εμπειρία. Η χρήση λίθων με μεγάλες αντοχές, η αξεπέραστη λιθοξοϊκή εργασία που εξασφάλιζε σχεδόν τέλειες εδράσεις, η αποφυγή έκκεντρων φορτίσεων, η συντηρητική αντίληψη των αρχαίων για την ασφάλεια (που οδηγούσε σε μεγάλες, υπερδιαστασιολογημένες, διατομές δομικών

²⁹ Από Παπαδόπουλος και Σαββατιανού 2015, σχέδιο Σ.3.2.

³⁰ Κορρές 1994α, σελ. 80.

στοιχείων), η τοποθέτηση μεταλλικών στοιχείων για την σύνδεση των λίθων, αποτελούν τους έμμεσους αλλά σαφείς μάρτυρες του εν λόγω δομητικού σχεδιασμού των σημαντικών κτηρίων στην αρχαία Ελλάδα, ο οποίος, κατά τα φαινόμενα, αποτελούσε αναπόσπαστο μέρος του σχεδιασμού κάθε μνημειακής κατασκευής εκείνης της περιόδου.

Η επιδίωξη των αρχαίων οικοδόμων για την δομητική επάρκεια των σημαντικών κτηρίων τους είναι πρόδηλη και στην επιμέλεια με την οποία κατασκευάζονταν τα θεμέλια. Όλα τα φέροντα στοιχεία (τοίχοι και κιονοστοιχίες) εδράζονταν επί θεμελίου που είχε διαμορφωθεί με την τοποθέτηση (σε στρώσεις) λίθων οι οποίοι, αν και κατώτερης ποιότητας από τους λίθους της ανωδομής, διέθεταν μεγάλη αντοχή εξασφαλίζοντας την μεταφορά των νεκρών φορτίων σε ισχυρό (ως επί το πλείστον βραχώδες) υπόβαθρο. Συχνά, δε, διαμορφώνονταν εσχάρες «θεμελιοδοκών» (όπως στον ναό του Απόλλωνα στους Δελφούς, και στον ναό του Διός στην Νεμέα), ενώ υπάρχει και ο Παρθενώνας, όπου κατασκευάστηκε το ιδανικό ενιαίο θεμέλιο.

1.5 Σεισμική συμπεριφορά αρχαίων μνημείων³¹

Όπως προαναφέρθηκε, τα σημαντικότερα μνημειακά κτήρια των αρχαίων Ελλήνων ήταν οι ναοί τους. Δεν είναι τυχαίο, άλλωστε, ότι οι λοιπές μνημειακές κατασκευές κτίζονταν στην αρχαία Ελλάδα σχεδόν πανομοιότυπα με τους ναούς, ούτε ότι η πλειονότητα των διατηρούμενων έως σήμερα οικοδομημάτων της αρχαιότητας είναι ναοί, ανεξαρτήτως, μάλιστα, της χρονικής περιόδου κατά την οποία ανεγέρθηκαν και του τόπου όπου ευρίσκονται στον ελλαδικό χώρο ή, εν γένει, γύρω από τη λεκάνη της Μεσογείου.

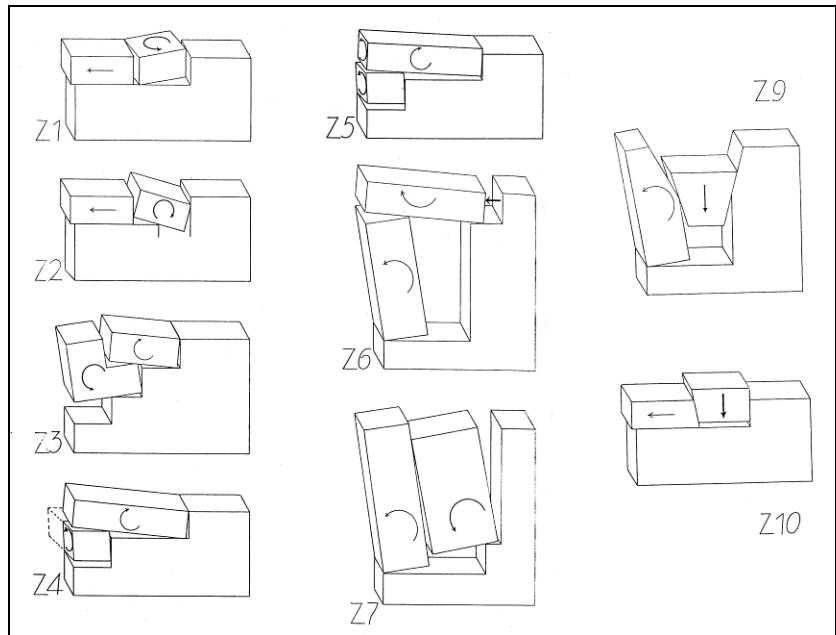
Λόγω του ότι ο τρόπος δόμησης των εν λόγω μνημειακών κτηρίων ήταν η συναρμολόγηση κατεργασμένων λίθων με ταυτόχρονη σύνδεση των λίθων με διάφορα (ως επί το πλείστον μεταλλικά) στοιχεία³², η συνοχή και η στερεότητα τους εξασφαλιζόνταν (και εξασφαλίζεται στα διατηρούμενα μνημεία) από τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις της τριβής στις διεπιφάνειες των αρχιτεκτονικών μελών τους, με την αρωγή των συνδετήριων στοιχείων των μελών τους. Κατ' επέκταση, ο δεσμός της τριβής και οι διάφοροι σύνδεσμοι αποτελούν και την άμυνα των αρχαίων μνημείων έναντι των δυναμικών δράσεων.

Οποιαδήποτε δυναμική δράση, για να επιφέρει (μερική ή ολική) παραμόρφωση σε ένα αρχαίο μνημείο πρέπει, σε πρώτο στάδιο, να υπερβεί το όριο αντίστασης της πρόσφυσης και

³¹ Εδώ το φαινόμενο περιγράφεται συνοπτικά. Για λεπτομερή παρουσίασή του, βλ. *κεφάλαιο 3*.

³² Βλ. σχετικά επόμενο κεφάλαιο.

πλοκής των αρχιτεκτονικών μελών του, και, στην συνέχεια, να υπερκεράσει τις αντοχές των συνδετήριων στοιχείων, τα οποία αρχίζουν να αντιστέκονται και αυτά (μαζί με τις δυνάμεις τριβής) στην παραμόρφωση όταν εκδηλώνονται οι πρώτες σχετικές μετακινήσεις των μελών. Φυσικά οι μετακινήσεις των λίθινων μελών είναι αλληλοεξαρτημένες (Εικ. 1.7), ενώ καθένα από αυτά



Εικ. 1.7: Οι δέκα απλοί μηχανισμοί παραμόρφωσης φυσικών (ρηγματομένων) ή τεχνητών (δομημένων) βράχων³³.

τείνει να παραμορφώσει την κατασκευή ή αντιστέκεται στην παραμόρφωση της κατασκευής ανάλογα με την θέση του και ανάλογα με την διεύθυνση της δυναμικής δράσης κάθε δεδομένη στιγμή. Κατά συνέπεια, η απόκριση των μνημειακών κτηρίων της αρχαιότητας είναι εντόνως μη-γραμμική.

Ειδικά κατά την απόκριση των αρχαίων μνημείων σε ισχυρά σεισμικά συμβάντα, παρουσιάζονται αλληπάλληλες σχετικές μετακινήσεις (μετατοπίσεις και περιστροφές ή λικνισμός) ανεξάρτητων τμημάτων τους ή ομάδων αρχιτεκτονικών μελών τους. Κατ' αυτόν τον τρόπο, λόγω της υπερνίκησης των δεσμών της τριβής και των κρούσεων των μελών, καθώς και των πλαστικών παραμορφώσεων των συνδέσμων, καταναλίσκονται μεγάλα ποσά από την εισαγόμενη ενέργεια. Έτσι, μετά από το πέρας της διέγερσης, εφόσον δεν έχει εκδηλωθεί μερική ή ολική κατάρρευση, τα αρχιτεκτονικά μέλη τους ηρεμούν σε θέσεις κάθε φορά διαφορετικές από αυτές που είχαν πριν από την εκδήλωση του φαινομένου. Συνήθως, οι παραμένουσες μετατοπίσεις των μελών είναι σημαντικά μικρότερες από τις μέγιστες που εκδηλώθηκαν κατά την διάρκεια της διέγερσης. Σ' αυτό δεν συντελεί μόνο η βαρύτητα με τις ροπές ευστάθειας που προκαλεί, αλλά και το ίδιο το σεισμικό συμβάν με την εναλλασσόμενη φορά της εδαφικής κίνησης³⁴.

³³ Από Κορρές 1995, εικ. 23, σελ. 518-519.

³⁴ Χαρακτηριστικό είναι το σχόλιο του πολύ γνωστού περιηγητή της ύστερης αρχαιότητας Πανσανία, ο οποίος στην αναφορά του για τον καταποντισμό της Αρχαίας Ελίκης το 373 π.Χ., σχολίασε, μεταξύ άλλων, ότι «ο πιο ήπιος σεισμός είναι –αν φυσικά προκειμένου για μία συμφορά του είδους αυτού μπορεί να γίνει λόγος για ηπιότητα- όταν η πρώτη κίνηση που έδωσε στα οικοδομήματα μία κλίση προς το έδαφος ακολουθείται από άλλη

Αυτές οι παραμένουσες παραμορφώσεις, δηλαδή οι κύριες βλάβες τις οποίες παρουσιάζει μετά από έναν ισχυρό σεισμό ένα αρχαίο μνημείο που δεν έχει καταρρεύσει, σε μικροσκοπικό επίπεδο, παρουσιάζουν μη κανονικότητα. Μακροσκοπικά, όμως, μπορούν να ομαδοποιηθούν ανάλογα με το σε ποια από τις δύο βασικές (διαφορετικής δυσκαμψίας) δομικές ενότητες έχουν εκδηλωθεί: στον εσωτερικό συμπαγή πυρήνα (κυρίως ναό) ή στην, πολύ πιο ευάλωτη στις παραμορφώσεις, περίσταση. Έτσι, στις λιθοπλίνθους του κυρίως ναού συνήθως εμφανίζονται μετατοπίσεις και στροφές μικρού μεγέθους, οι οποίες συνολικά δημιουργούν την εικόνα οριζόντιας ώθησης των τοίχων, εντονότερη περί το κέντρο των τοίχων (Εικ. 1.8).

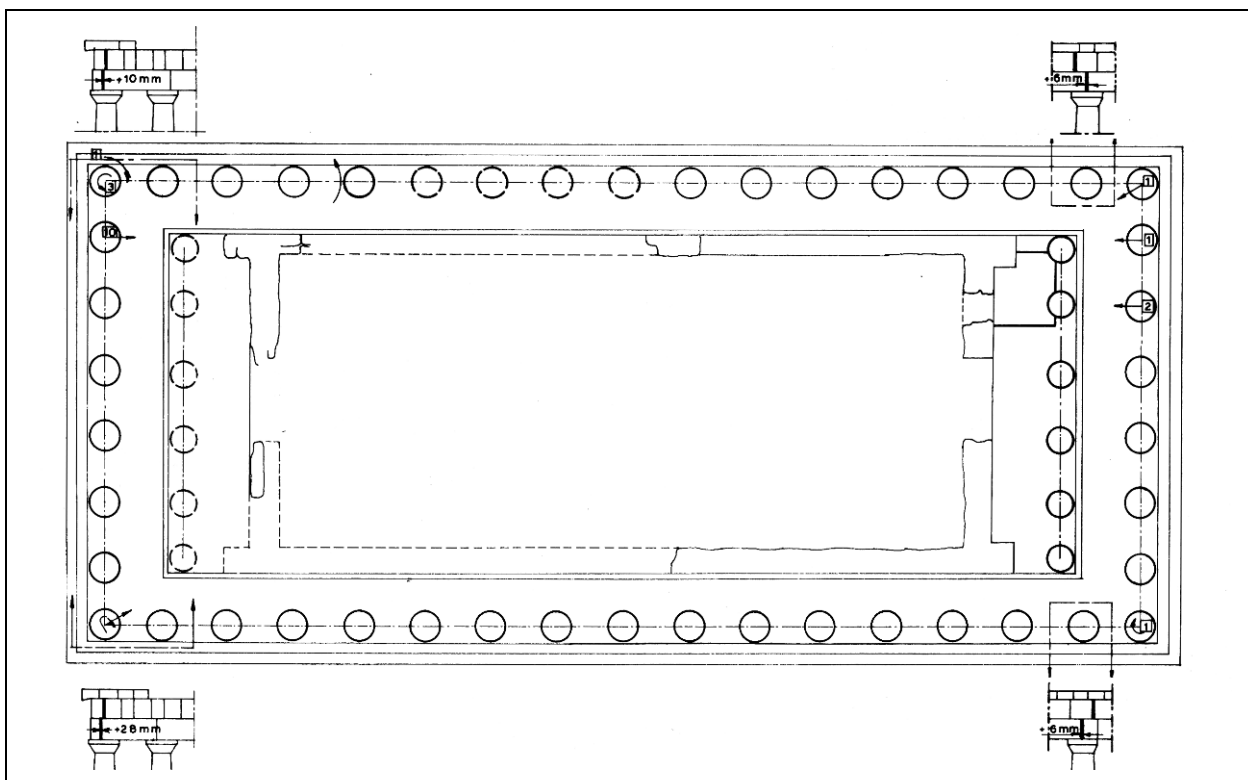


Εικ. 1.8: Παραμορφώσεις οπίσθιου τοίχου ναΐσκου του 3^{ου} αι. π.Χ. που έχει μετατραπεί σε εκκλησία αφιερωμένη στον Άγιο Νικόλαο στην Σαντορίνη.

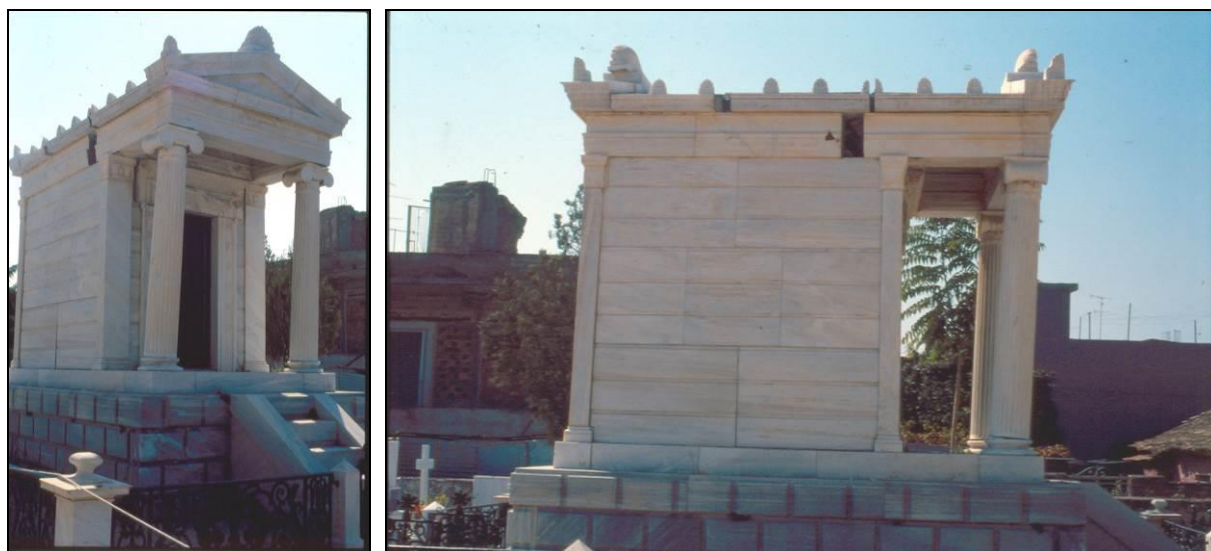
Αντίθετα, στο περιστύλιο οι βλάβες παρουσιάζονται, κυρίως, στις γωνίες του, και εκδηλώνονται με σχετικά μεγάλες διανοίξεις αρμών στα επιστύλια και στις υπερκείμενες στρώσεις (Εικ. 1.9). Βεβαίως, παρουσιάζονται επίσης, μετατοπίσεις και στροφές σπονδύλων στους κίονες, καθώς και απολεπίσεις σε ακμές της κάτω έδρας συνηθέστερα (αλλά όχι αποκλειστικά) στους κατώτατους σπονδύλους, ως αποτελέσματα της λικνιστικής απόκρισης των κίωνων.

Γενικώς, μπορεί να αναφερθεί για τους αρχαίους ναούς και τα ναόσχημα λίθινα κτήρια, ότι τα ανώτερα τμήματά τους (κεράμωση στέγης, θριγκός) είναι τα πιο ευπαθή σε βλάβες από σεισμούς (Εικ. 1.10), καθώς και ότι, όταν οι κατασκευές αυτές διατηρούν την πλήρη μορφή τους, οι βραχείες πλευρές του περιστυλίου τους είναι κατά το μάλλον ή ήττον οι πιο ευάλωτες, λόγω της ύπαρξης των αετωμάτων. Όμως, πρέπει να επισημανθεί, παράλληλα, ότι τα εν λόγω οικοδομήματα, λόγω του συστήματος δόμησής τους και του τρόπου με τον οποίον αποκρίνονται στους σεισμούς αποτελούσαν (και σε πολλές περιπτώσεις εξακολουθούν να αποτελούν) συμπαγείς και ανθεκτικές κατασκευές, οι οποίες για να υποστούν γενικευμένη κατάρρευση, λόγω σεισμικών δράσεων, πρέπει να διεγερθούν από πολύ ισχυρούς σεισμούς.

κίνηση αντίθετη, η οποία ξανασηκώνει όσα είχαν κλίνει προς το έδαφος· στον τύπο αυτό του σεισμού μπορεί να δει κανείς κίονες να ξανασηκώνονται όρθιοι, οι οποίοι λίγο έλειψε πριν, να πέσουν εντελώς στο έδαφος... και δοκάρια που η δόνηση τα είχε βγάλει από τη θέση τους να επανέρχονται στη θέση τους...», (Πausanias, Αρχαϊκά, VII, 24, 9-10, μετάφραση Ν. Παπαχατζή).



Εικ. 1.9: Οι κυριότερες βλάβες στον Παρθενώνα ως συνέπεια των σεισμών στις 24 και 25/2/1981³⁵.



Εικ. 1.10: Φωτογραφίες με την πλαγιομετωπική και πλάγια άποψη ναόσχημου σύγχρονου ταφικού μνημείου στην Καλαμάτα, όπου φαίνονται οι βλάβες που υπέστη το μνημείο από τους σεισμούς του Σεπτεμβρίου 1986.

³⁵ Από Ζάμπας 1983, σχ. 2.8, σελ. 622.

1.6 Συντήρηση, επισκευές και καταρρεύσεις κτηρίων στην αρχαιότητα και στους πρώιμους χριστιανικούς χρόνους

Παρά το γεγονός ότι, όπως προκύπτει από τις διατιθέμενες εργασίες, τα μνημειακά κτήρια στην αρχαία Ελλάδα διέθεταν μεγάλη φέρουσα ικανότητα, είχαν ανάγκη και από συντήρηση, για την προστασία τους έναντι των περιβαλλοντικών δράσεων, και από επισκευή βλαβών, οι οποίες προκαλούνταν από σεισμούς. Έτσι, για την φροντίδα και τις τυχόν επισκευές ορίζονταν διάφορες αρχές ή υπάλληλοι ως υπεύθυνοι για ένα κτήριο ή ομάδα κτηρίων. Στα ιερά ήταν οι ναοποιοί, στις πόλεις οι αστυνόμοι ή άλλοι δημοτικοί υπάλληλοι, ενώ στις περιφερειακές εγκαταστάσεις (π.χ. μεθοριακά φρούρια) οι εκάστοτε διοικητές τους³⁶.

Μία από τις πιο συνήθεις εργασίες συντήρησης των μνημειακών κτηρίων ήταν η ανανέωση του επιχρίσματος (συνήθως ασβεστοκονίαμα ή μαρμαροκονίαμα) το οποίο εφαρμοζόταν, τουλάχιστον, στις κιονοστοιχίες που δεν ήταν από μάρμαρο, με στόχο την προστασία τους έναντι διάβρωσης από τα όμβρια ύδατα, καθώς και για την πιο καλαίσθητη εμφάνισή τους.

Υπήρχαν και περιπτώσεις κατά τις οποίες οι εκάστοτε υπεύθυνοι έπρεπε να επέμβουν για την επισκευή εκτεταμένων βλαβών, οι οποίες οφείλονταν σε πυρκαγιά (καταστροφή μάλλον συνηθισμένη στους αρχαίους χρόνους³⁷) ή σε ισχυρό σεισμό που είχε πλήξει το κτήριο (ή τα κτήρια). Τότε, βεβαίως, ήταν αναγκαία πιο εκτεταμένη και ευρύτερη συλλογική προσπάθεια, που περιλάμβανε και έκτακτες συνεργασίες με ομάδες εξειδικευμένων τεχνιτών, πεπειραμένων στην οικοδόμηση των εν λόγω κτηρίων.

Τα παραπάνω είναι, κυρίως, γνωστά από επιγραφές, καθώς οι δαπάνες για την ανέγερση, συντήρηση και επισκευή των δημόσιων κατασκευών στην αρχαία Ελλάδα καταγράφονταν σε λίθινες πλάκες, ώστε να ενημερώνονται όλοι οι πολίτες. Ένα από τα πιο γνωστά και κατατοπιστικά σχετικά παραδείγματα αποτελεί η λεγόμενη «οικοδομική επιγραφή» που βρέθηκε δίπλα στο δυτικό ανάλημμα της Στοάς του ιερού της Αρτέμιδος Βραυρωνίας, και χρονολογείται μετά τα μέσα του 3^{ου} π.Χ. αιώνα. Η επιγραφή αυτή, που εκτίθεται στο αρχαιολογικό μουσείο της Βραυρώνας, αφορά την επείγουσα επισκευή όλων των κτηρίων του ιερού και κάθε εξακριβωμένης φθοράς στους εσωτερικούς χώρους. Σύμφωνα με το ψήφισμα των νομοθετών, καλείται εσπευσμένα ο αρχιτέκτονας από τους επιστάτες να

³⁶ Müller-Wiener 1995, σελ. 42-43.

³⁷ Πολλά παραδείγματα μνημειακών κτηρίων που υπέστησαν βλάβες από πυρκαγιά και επισκευάστηκαν (ή «αποκαταστάθηκαν» όπως στην περίπτωση του Ερεχθείου περί το 27 π.Χ.) παρουσιάζονται συνοπτικά και σχολιάζονται από τον Μ. Κορρέ στο άρθρο Korres 1997.

εκπονήσει εμπειριστατωμένα σχέδια, αφού δώσει απόλυτη προτεραιότητα στην επιμέλεια του λατρευτικού αγάλματος της Αρτέμιδος Βραυρωνίας.

Βεβαίως, υπάρχουν και πολλές πληροφορίες από αρχαίους συγγραφείς³⁸, οι οποίες όμως αφορούν γεγονότα που είχαν ευρεία επίδραση σε κατοίκους πόλεων ή και μεγαλύτερων περιοχών, όπως είναι ο μεγάλος σεισμός του 464 π.Χ. στην Λακωνία. Ο σεισμός αυτός, σύμφωνα με τον Πλούταρχο (*Κίμων*), τον Διόδωρο τον Σικελιώτη (*Βιβλίο 11*), τον Πausανία (*Λακωνικά*) και άλλους συγγραφείς, είχε ως αποτέλεσμα την ισοπέδωση της Σπάρτης (το Ωδείο και όλα τα σπίτια της πόλης, εκτός από πέντε, κατέρρευσαν) και την απώλεια της ζωής 20000 Λακεδαιμονίων.

Δεν είναι λίγες, πάντως, και οι περιπτώσεις κατά τις οποίες η σύγχρονη έρευνα (συμπληρωματικώς προς τις επιγραφικές μαρτυρίες και τις ιστορικές καταγραφές) έχει οδηγήσει στην αναγνώριση μνημείων στα οποία πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες επισκευές κατά την αρχαιότητα, όπως στον ναό Β στην Ακρόπολη της αρχαίας Αίγιρας (στο βορειοανατολικό άκρο του νομού Αχαΐας), ο οποίος κτίστηκε μάλλον περί το 650 π.Χ. Η στέγη του ναού αυτού επισκευάστηκε δύο φορές, γύρω στο 600 π.Χ. και 50 χρόνια αργότερα, ενώ φαίνεται ότι και στα τέλη του 5^{ου} π.Χ. αιώνα πραγματοποιήθηκαν και πάλι επισκευές στον ναό³⁹.

Σπανιότερες, αλλά εξόχως ενδιαφέρουσες, είναι οι περιπτώσεις κατά τις οποίες οι σύγχρονοι μελετητές αποδίδουν σε σεισμούς επισκευασμένες κατά την αρχαιότητα βλάβες ή μεταγενέστερες βλάβες ή καταρρεύσεις αρχαίων μνημείων, και επιχειρούν να αναλύσουν (ή ευλόγως εικάσουν) τα σχετικά γεγονότα που διαδραματίστηκαν⁴⁰. Αν και στις περιπτώσεις αυτές, τα συμπεράσματα των μελετητών δεν είναι τελεσίδικα (μια που τα στοιχεία που μελετώνται, συνήθως, επιδέχονται πολλαπλές ερμηνείες ή/και οδηγούν, συχνά, σε αντικρουόμενες εκτιμήσεις), οι εν λόγω μελέτες δεν παύουν να αποτελούν πολύτιμες πηγές άντλησης πληροφοριών, συνήθως συγκριτικού χαρακτήρα, σχετικών με την σεισμική συμπεριφορά των αρχαίων μνημείων.

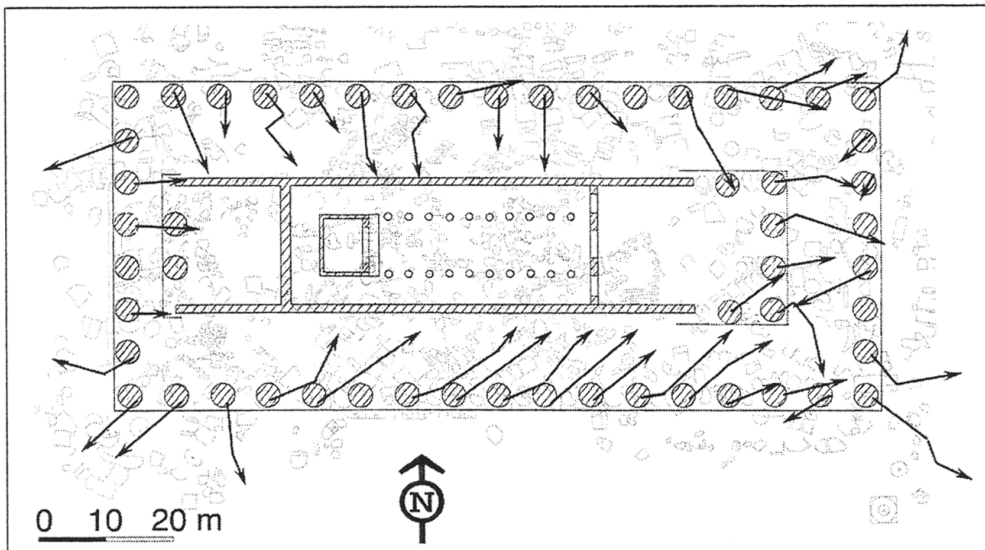
Πιθανότατα, η πιο εκτεταμένη, σχετική, εργασία είναι αυτή που αφορά την διερεύνηση των αιτιών κατάρρευσης των πολλών ναών και μνημειακών κτηρίων της αρχαίας πόλης του

³⁸ Από την μελέτη των αρχαίων πηγών, και όχι μόνο, προέκυψαν κατάλογοι με τους σεισμούς που συνέβησαν στον ελλαδικό χώρο και την ευρύτερη περιοχή (Παπαζάχος και Παπαζάχου 1989, Ambraseys 2009). Οι κατάλογοι αυτοί αποτελούν πολύτιμα εφόδια των επιστημόνων που μελετούν την σεισμική συμπεριφορά των αρχαίων μνημείων.

³⁹ Βόρδος και Κόλια 2008, σελ. 20-23.

⁴⁰ Αντιπροσωπευτικά, και επιπρόσθετα στις εργασίες που αναφέρονται σποραδικά στην παρούσα παράγραφο, σημειώνονται οι δημοσιεύσεις Korres 1996, Αλεξανδρή κ.α. 2001, Ψυχάρης κ.α. 2005, Papadopoulos and Vintzileou 2014.

Σελινούντος στην νοτιοδυτική Σικελία⁴¹. Σε αυτήν την μελέτη, τετραμελής ομάδα Ιταλών επιστημόνων αφού μελέτησε τα λείψανα δεκαέξι κτισμάτων (κυρίως τις κατευθύνσεις ανατροπής των φερόντων στοιχείων τους, Εικ. 1.11), καθώς και τα αρχαιολογικά δεδομένα από τις ανασκαφές εντός και περί τα κτίσματα αυτά, οδηγήθηκε στην εκτίμηση ότι δύο ισχυροί σεισμοί προκάλεσαν τις καταρρεύσεις των αρχαίων κτηρίων, οι οποίοι, μάλιστα, έλαβαν χώρα με αρκετούς αιώνες διαφορά μεταξύ τους, περί τον 4^ο ή 3^ο αιώνα π.Χ. ο πρώτος, και κάπου μεταξύ του 6^{ου} και του 13^{ου} αιώνα μ.Χ. ο δεύτερος.



Εικ. 1.11: Κάτοψη στην οποία παρουσιάζονται οι κατευθύνσεις κατάρρευσης των κίωνων του ναού G του Σελινούντα στη νοτιοδυτική Σικελία⁴².

Αξίζει να αναφερθούν, επίσης, και οι εργασίες που αποδίδουν στον μεγαλύτερο γνωστό σεισμό που έχει λάβει χώρα στις Μεσογειακές χώρες (στις 21 Ιουλίου του 365 μ.Χ., με επίκεντρο κοντά στο νοτιοδυτικό άκρο της Κρήτης⁴³) καταρρεύσεις κτισμάτων στον Κίσσαμο, την Ελεύθερνα και την Γόρτυνα στην Κρήτη⁴⁴, καθώς και βλάβες κτηρίων στην ευρύτερη περιοχή της Κορίνθου⁴⁵. Ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τα συμπεράσματα των επιστημόνων που διεξάγουν ανασκαφές στην αρχαία πρωτεύουσα της Μακεδονίας, την Πέλλα, σύμφωνα με τους οποίους η κατάσταση των ερειπίων των κτισμάτων, τα εγκαταλελειμμένα έπιπλα σε αυτά, και άλλα στοιχεία, υποδηλώνουν ότι ένας σεισμός κατέστρεψε την πόλη, περί τις αρχές του 1^{ου} αιώνα π.Χ., και παρ' όλο που μερικά κτήριά της φαίνεται ότι επισκευάστηκαν πρόχειρα και συνέχισαν να κατοικούνται μέχρι το τέλος της

⁴¹ Guidoboni et al. 2002.

⁴² Από Guidoboni et al. 2002, fig. 7b, p. 2974.

⁴³ Παπαζάχος και Παπαζάχου 1989, σελ. 172-173.

⁴⁴ Di Vita 1995, Stiros 2001.

⁴⁵ Rothaus 1996.

αρχαιότητας, το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού μετακινήθηκε δυτικά, στην θέση της σημερινής Νέας Πέλλας, όπου η πόλη συνέχισε την ύπαρξή της έως την σύγχρονη εποχή.

Η πιο γνωστή σχετική εργασία, πάντως, είναι πιθανότατα αυτή του William Bell Dinsmoor⁴⁶ για τον ναό του Διός στην Ολυμπία⁴⁷. Σε αυτή την εργασία του, ο επιφανής λόγιος συνδυάζοντας πλήθος τεκμηρίων που εντόπισε σε διάφορα τμήματα του κτηρίου, αναγνώρισε ότι έλαβαν χώρα στην αρχαιότητα⁴⁸ εκτεταμένες εργασίες επισκευής και των δύο βραχειών όψεων του μνημείου. Ο τρόπος, οι θέσεις και η έκταση των εργασιών επισκευής (που περιέλαβαν πλήρη αποσυναρμολόγηση αετωμάτων και θριγκού, καθώς και μερική αποσυναρμολόγηση πολλών κιόνων) «οδηγούν» εύλογα στο συμπέρασμα ότι ένας ισχυρός σεισμός, χωρίς να προκαλέσει κατάρρευση, επέφερε τόσο σημαντικές βλάβες στο κτήριο ώστε η επισκευή τους, αν και πάρα πολύ δαπανηρή, να είναι αναγκαία.

1.7 Παράγοντες ερείπωσης των αρχαίων μνημειακών κατασκευών

Είναι γνωστό ότι τα μνημειακά κτήρια της αρχαιότητας, με την επικράτηση του Χριστιανισμού (περί τον 5^ο μ.Χ. αιώνα) και μετά, είτε καταστράφηκαν είτε εγκαταλείφθηκαν στην φθορά του χρόνου και στις συγκυριακές βλάβες κατά το ρουν της ιστορίας. Μόλις στο δεύτερο μισό του 18^{ου} αιώνα, με την εμφάνιση του Ρομαντισμού στη Δυτική Ευρώπη, άρχισαν και πάλι να αποτελούν πόλους έλξης και θαυμασμού, καθώς και αντικείμενα μελέτες για πολλούς ερευνητές, με σταδιακά αυξανόμενο ενδιαφέρον έκτοτε. Έτσι, μοιάζει φυσικό το γεγονός ότι η συντριπτική πλειονότητα των διατηρούμενων αρχαίων μνημείων στον ελλαδικό χώρο (αλλά και γενικότερα περί τη μεσογειακή λεκάνη) σώζονται σε μορφή ερειπίου, με κατεδαφισμένα ή χαμένα μεγάλα τμήματα του φέροντος οργανισμού τους.

Οι παράγοντες που συντέλεσαν στην φθορά των αρχαίων μνημείων είναι αρκετοί και με διαφορετικό ποσοστό επιρροής σε κάθε ξεχωριστό κτίσμα. Μπορεί να αναφερθεί, πάντως, ότι συνολικά οι εν λόγω παράγοντες είναι αφενός αυτοί που επιδρούν κατ' εξακολούθηση στα οικοδομήματα, δηλαδή, το νερό της βροχής, ο παγετός, οι θερμοκρασιακές μεταβολές, οι άνεμοι και (την σύγχρονη εποχή) η ατμοσφαιρική ρύπανση, και αφετέρου αυτοί των οποίων η επίδραση είναι προσωρινή και οφείλονται είτε σε φυσικά αίτια, είτε σε ανθρώπινες

⁴⁶ Του σημαντικότερου, πιθανότατα, μελετητή αρχαίων Ελληνικών μνημείων κατά το πρώτο ήμισυ του περασμένου αιώνα.

⁴⁷ Dinsmoor 1941.

⁴⁸ Κατά τον 2^ο αιώνα μ.Χ., σύμφωνα με τον μελετητή, όμως για την χρονολόγηση αυτή υπάρχει και διαφορετική άποψη (Kunze and Weber 1948).

παρεμβάσεις. Ως προς την δεύτερη κατηγορία, οι φυσικές παροδικές επιδράσεις οφείλονται σε ανεμοθύελλες, καταιγίδες και σεισμούς, ενώ οι ανθρώπινες παρεμβάσεις στα αρχαία μνημεία προήλθαν από θρησκευτικό φανατισμό, βανδαλισμούς ή πολεμικές συγκρούσεις, πυρκαγιές οφειλόμενες σε ατύχημα, επιθυμία για δεύτερη χρήση του αυθεντικού δομικού υλικού (ως είχε ή στην περίπτωση του μαρμάρου, μετά από καύση του για την παραγωγή ασβέστη), και επιθυμία για προσπορισμό των γλυπτών διακόσμων ή/και του μετάλλου (συνηθέστερα σιδήρου και μολύβδου) των συνδέσεων των λίθων⁴⁹.

Αν και, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κάθε αρχαίο μνημείο αποτελεί ξεχωριστή περίπτωση, μπορεί να διατυπωθεί η άποψη ότι οι ανθρώπινες παρεμβάσεις αποτέλεσαν τον κυρίαρχο παράγοντα που οδήγησε στην ερείπωση των αρχαίων μνημειακών κτηρίων⁵⁰. Η κατάρρευση του αρχαίου κόσμου, με την επικράτηση της χριστιανικής θρησκείας, συμπεριέλαβε (αναπόφευκτα) και την καταστροφή των εμβληματικών κτηρίων του (ναών κ.α.). Η καταστροφή αυτή, μάλιστα, ήταν κατά κανόνα άμεση, ενώ, μόνο σε λίγες περιπτώσεις, επήλθε αργότερα, λόγω της εγκατάλειψης των εν λόγω κτισμάτων στην τύχη τους.

Ενδιαφέρον πολύ έχει, επίσης, ότι, κατά τις τελευταίες δεκαετίες, διατυπώνεται από ερευνητές, ολοένα και πιο συχνά, η άποψη ότι ορισμένοι αρχαίοι ναοί (και, πολύ πιθανώς, εν γένει τα μνημειακά κτήρια του αρχαίου ελληνικού κόσμου), εφόσον συνέχιζαν να υφίστανται τις πιο απλές εργασίες συντήρησης οικοδομημάτων (επισκευές στέγης, επιχρίσεις των επιφανειών που δέχονται απευθείας όμβρια ύδατα, εργασίες για την διατήρηση της στεγάνωσης της θεμελίωσης), θα παρέμεναν χωρίς σημαντικές βλάβες μέχρι σήμερα, ή, σε κάθε περίπτωση, για όσο διάστημα φρόντιζαν κάποιιοι για τις προαναφερθείσες εργασίες συντήρησής τους⁵¹.

Υπέρ αυτής της άποψης συνηγορούν τα ολίγα αρχαία κτήρια που συνέχισαν την λειτουργία τους ανά τους αιώνες, επειδή Χριστιανοί τους μετέτρεψαν σε εκκλησίες (όπως ο ναός του Ηφαίστου στην Αθήνα, και ο ναός F στον Ακράγαντα της Σικελίας⁵²), καθώς και ελάχιστα άλλα τα οποία βρίσκονταν μακριά από οικισμούς, και επομένως έγιναν μόνο μερικώς προϊόν ανθρώπινης εκμετάλλευσης (όπως ο ναός του Επικούριου Απόλλωνα στις Αρκαδικές Βάσσειες). Η επιβίωση αυτών των οικοδομημάτων, περίπου 2500 χρόνια μετά την κατασκευή τους, σε κατάσταση ουσιαστικής ακεραιότητας είναι αξιοσημείωτη.

⁴⁹ Παπαντωνόπουλος 2000, σελ. 1.11-1.22.

⁵⁰ Παπαντωνόπουλος 2000, σελ. 1.67-1.69.

⁵¹ Κορρές 1994β, σελ. 138, Papadopoulos 2010, pp. 251-253.

⁵² Αυτόν τον ναό μετέτρεψε σε εκκλησία ο Άγιος Γρηγόριος, ως επίσκοπος της περιοχής, το 597.

Όμως, και τα σωζόμενα ως ερείπια αρχαία οικοδομήματα συνηγορούν υπέρ της άποψης περί της δυνατότητας μακραίωνης επιβιώσής τους καθώς τα περισσότερα από αυτά, κατά τους τρεις τελευταίους αιώνες (από τότε που πρωτοαποτυπώθηκαν στην νεότερη εποχή έως σήμερα) διατηρούν την ίδια ή παρόμοια μορφή. Δυστυχώς, υπάρχουν και περιπτώσεις κατά τις οποίες επήλθε (και σε αυτό το χρονικό διάστημα) σημαντική επιδείνωση της κατάστασης αρχαίων μνημείων. Τούτο, πάντως, οφειλόταν κυρίως σε ανθρώπινη παρέμβαση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η καταστροφή το 1778 του μικρού ιωνικού ναού του Ιλισού (ο οποίος ομοιάζε με τον ναό της Αθηνάς Νίκης), προκειμένου το υλικό του να χρησιμοποιηθεί στην ανέγερση του νέου τείχους των Αθηνών⁵³.

1.8 Νεότερες επεμβάσεις για την στερέωση των αρχαίων μνημείων στον ελλαδικό χώρο

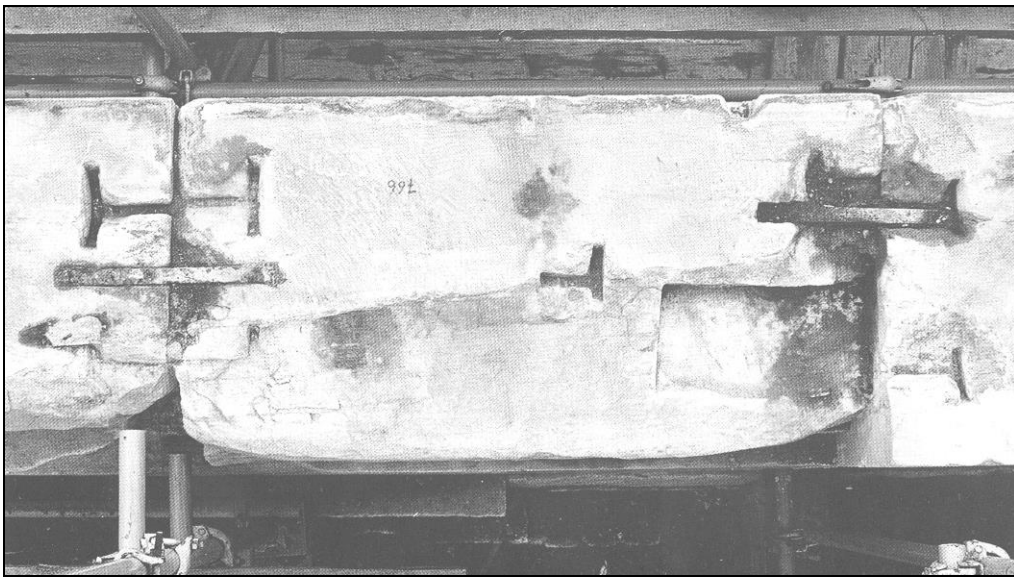
Κατά τους νεότερους χρόνους, ο θαυμασμός για τα αρχαία μνημεία οδήγησε από πολύ νωρίς στην μελέτη τους και στην συνακόλουθη επιθυμία για την προστασία τους και την βέλτιστη ανάδειξή τους. Η σχετική προσπάθεια στον ελλαδικό χώρο δρομολογήθηκε λίγο μετά από την δημιουργία του νεοελληνικού κράτους (για προφανείς ιστορικούς και συμβολικούς λόγους) και συνεχίζεται σχεδόν αδιάλειπτα μέχρι σήμερα. Οι δράσεις που έχουν πραγματοποιηθεί μπορούν να χωριστούν σε τρεις περιόδους (1834-1939, 1946-1974, 1975-σήμερα), ανάλογα με τις αρχές που διέπουν τις επεμβάσεις που υλοποιήθηκαν, καθώς και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και την τεχνολογία που εφαρμόστηκε⁵⁴.

Η πρώτη περίοδος μπορεί και αυτή να χωριστεί σε τρεις υποπεριόδους, η πρώτη από τις οποίες αφορά τα έργα που πραγματοποιήθηκαν κατά την Οθωνική περίοδο (από το 1834 έως το 1863). Εκείνα τα χρόνια καταρτίστηκαν μεγάλα σχέδια *περί ανεγέρσεως και συμπληρώσεως των εν Ελλάδι αρχαιοτήτων*, από τους συμμετέχοντες στην εν Αθήναις Αρχαιολογική Εταιρεία. Πάντως, η υλοποίηση αυτών των έργων περιορίστηκε (για οικονομικούς λόγους) στην Ακρόπολη των Αθηνών, όπου έλαβαν χώρα εκτεταμένες αναστηλώσεις των κατακείμενων αρχιτεκτονικών μελών σε όλα τα μνημεία.

⁵³ Ο ναός είχε διατηρηθεί έως τότε γιατί είχε μετατραπεί σε χριστιανική εκκλησία. Η αποδόμησή του έγινε με απόφαση του τότε βοεβόδα (διοικητή) των Αθηνών Χατζή Αλή Χασεκί.

⁵⁴ Μαλλούχου-Tufano 2008, 2014.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν, κυρίως, αργοί λίθοι ή οπτόπλινθοι για την κατασκευή τοιχαρίων, με σκοπό την στερέωση ή/και την συμπλήρωση δομικών ενοτήτων των κτηρίων (κυρίως τοίχων). Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν σιδερένια στοιχεία ως ελκυστήρες και ως συνδετήρια στοιχεία των λίθινων μελών (τα οποία, πάντως δεν είχαν τη μορφή των αρχαίων ούτε, φυσικά, τοποθετήθηκαν στις αρχαίες εντορμίες, Εικ. 1.12), καθώς και σιδερένιες στεφάνες για την περιδέση σπονδύλων των κίωνων. Οι τρόποι επέμβασης εκείνη την περίοδο ήταν μάλλον αυτοσχέδιοι και εμπειρικοί, ενώ την ευθύνη για τον σχεδιασμό και την υλοποίησή τους είχαν αποκλειστικά αρχαιολόγοι/αρχαιοδίφες⁵⁵.



Εικ. 1.12: Σύνδεσμοι σχήματος αβαθούς Π στο βόρειο τείχος του Ερεχθείου από την επέμβαση του Κυριακού Πιτάκη στο μνημείο την περίοδο 1837-1840⁵⁶.

Στις δύο επόμενες δεκαετίες (1864-1884), οπότε τα μεγαλεπήβολα σχέδια παραχώρησαν τη θέση τους σε καθαρά σωστικού χαρακτήρα επεμβάσεις (και μάλιστα σε συγκεκριμένα σημεία των μνημείων που χαρακτηρίζονταν ως τα πιο ετοιμόρροπα), πραγματοποιήθηκαν, κατά κανόνα, υποστηρίξεις και αντιστηρίξεις με ξύλινα στοιχεία ή οπτοπλινθοδομές, καθώς και περιδέσεις με μεταλλικά κυκλικά ή/και ευθύγραμμα στοιχεία, τόσο σε μνημεία στην Αττική, όσο και σε άλλες περιοχές της χώρας⁵⁷.

Ήδη από τα χρόνια αυτά, οι ελληνικοί φορείς είχαν αρχίσει σποραδικά να συνεργάζονται με ξένους επιστήμονες (τον Wilhelm Dörpfeld, τον Ερνέστρο Τσίλλερ κ.α.), κάτι που θα

⁵⁵ Μαλλούχου-Tufano 2008, σελ. 43-45.

⁵⁶ Από Μαλλούχου-Tufano 2008, εικ. 42, σελ. 40.

⁵⁷ Χαρακτηριστικές περιπτώσεις μπορούν να αναφερθούν η περιδέση πεσσών του ναού της Αθηνάς Νίκης το 1866, καθώς και η περιδέση κίωνων του ναού της Αφάιας στην Αίγινα με 18 σιδερένιες στεφάνες το 1873 (Μαλλούχου-Tufano 2014, σελ. 5).

ισχύσει πολύ περισσότερο κατά την επόμενη περίοδο (1885-1933), και θα οδηγήσει στην εφαρμογή νέων τεχνικών στερέωσης (κυρίως με τη ένθεση σιδηροδοκών, διατομής διπλού T, σε επιστύλια και άλλα ύπτια φέροντα στοιχεία) και στην χρήση του σκυροδέματος, οπλισμένου ή μη (για συμπληρώσεις των αρχιτεκτονικών μελών και την κάλυψη ή περιβολή των σιδηροδοκών). Τις νέες τεχνικές θα εφαρμόσει ευρύτατα και συστηματικά στα μνημεία της Αθηναϊκής Ακρόπολης, κυρίως (αλλά όχι αποκλειστικά), ο νομομηχανικός Νικόλαος Μπαλάνος, που ήταν ο υπεύθυνος των διάφορων έργων που πραγματοποιήθηκαν στον ιερό βράχο από το 1898 έως το 1939.

Αν και κατά την διάρκεια των έργων, οι νέες λύσεις που εφαρμόζονταν ήταν ευρέως αποδεκτές, και, κατά το μάλλον ή ήττον, θαυμάζονταν στην ελληνική επικράτεια (σε κάποιες περιπτώσεις, μάλιστα, εφαρμόστηκαν και στο εξωτερικό⁵⁸), ήδη από τη δεκαετία του 1940 άρχισαν να γίνονται εμφανείς οι αρνητικές συνέπειες της χρήσης ισχυρών (συχνά πολύ ισχυρότερων από όσο ήταν απαραίτητο) σιδερένιων στοιχείων για την στερέωση των αρχαίων μνημείων. Το κύριο πρόβλημα προερχόταν από την οξειδωση των σιδηροδοκών, την διόγκωσή τους λόγω οξειδωσης του σιδήρου, και την συνακόλουθη θραύση των γειτονικών σε αυτές αρχαίων αρχιτεκτονικών μελών.

Μετά από τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο έως και την έναρξη της μεταπολίτευσης (1946-1974), τα έργα αποκατάστασης των αρχαίων μνημείων στην Ελλάδα πραγματοποιούνται από την Υπηρεσία Αναστήλωσης Αρχαίων και Ιστορικών Μνημείων (ΥΠΑΝ) του Υπουργείου Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων, υπό τον Αναστάσιο Ορλάνδο, και τους συνεργάτες του. Τότε, και λόγω της εμφάνισης των προβλημάτων των έργων της προηγούμενης περιόδου, ακολουθείται μια πιο προσεκτική και, σχετικά, συντηρητική προσέγγιση, για την στερέωση των αρχαίων μνημείων, η οποία περιλαμβάνει την χρήση ορείχαλκου αντί σιδήρου, για την κατασκευή μικρών συνδετήριων στοιχείων των αρχιτεκτονικών μελών και ανοξειδώτου χάλυβα για τις συγκολλήσεις (μεγάλων) θραυσμάτων των αρχιτεκτονικών μελών.

Ένα έργο που ξεχωρίζει από την περίοδο αυτή είναι, χωρίς αμφιβολία, η αναστήλωση της στοάς της Βραυρώνας (Εικ. 1.13), που πραγματοποιήθηκε από τον Μάιο του 1961 έως τον Σεπτέμβριο του 1962, από τον Χαράλαμπο Μπούρα και τους συνεργάτες του⁵⁹. Το εν λόγω έργο εκτελείται μεν με την προσοχή και την επιμέλεια που χαρακτηρίζει τα έργα εκείνης της περιόδου, όχι όμως και με την συνήθη τότε επιφυλακτικότητα. Η φυσιογνωμία

⁵⁸ Το 1925-1926 ο Ιταλός μηχανικός F. Valenti εφαρμόζει τις τεχνικές Μπαλάνου στην αναστήλωση δώδεκα κίωνων της βόρειας πλευράς του ναού C του Σελινούντος (Μαλλούχου-Tufano 2014, σελ. 7).

⁵⁹ Κύριος συντελεστής της υλοποίησης του έργου ήταν ο γλύπτης Στέλιος Τριάντης, ενώ ο ανασκαφέας του αρχαιολογικού χώρου ήταν ο Ιωάννης Παπαδημητρίου (Μπούρας 1967).

του επικεφαλής του έργου, επέτρεψε να ακολουθηθούν αρχές και να εφαρμοστούν τεχνικές καινοφανείς στον ελλαδικό χώρο, οι οποίες, μάλιστα, θα θέσουν και τις βάσεις για το τι θα επακολουθήσει κατά την μεταπολίτευση.

Αναφέρεται ενδεικτικώς ότι στόχος κατά την αναστήλωση της στοάς στην Βραυρώνα ήταν να περιοριστούν οι επεμβάσεις στα αρχαία μέλη στο ελάχιστο αναγκαίο. Έτσι, για πρώτη φορά, οι συμπληρώσεις των λίθων γίνονται με την κατασκευή γύψινων εκμαγείων των επιφανειών θραύσης των λίθων, και λάξευση των συμπληρωμάτων τους με βάση τα εκμαγεία και με χρήση σημειοθέτη (πονταδόρου). Αυτή η τεχνική θα χρησιμοποιηθεί στις επόμενες δεκαετίες σχεδόν σε όλα τα έργα αποκατάστασης που υλοποιήθηκαν ή υλοποιούνται στην Ελλάδα.



Εικ. 1.13: Η αναστηλωμένη κιονοστοιχία της στοάς της Βραυρώνας, από ΝΔ.

Από το 1975 έως σήμερα, επικρατούν στην Ελλάδα οι τεχνικές και οι μεθοδολογίες που αναπτύσσονται (ή για πρώτη φορά χρησιμοποιούνται ευρέως) στα έργα αποκατάστασης στην Ακρόπολη των Αθηνών, υπό την εποπτεία και την επιστημονική καθοδήγηση της Επιτροπής Συντήρησης Μνημείων Ακροπόλεως (ΕΣΜΑ). Οι βελτιώσεις σε σχέση με τα έργα της προηγούμενης περιόδου είναι φυσικά πολλές, όμως θα μπορούσε κάποιος να ξεχωρίσει τρεις, ως τις πιο αντιπροσωπευτικές της πιο προσεκτικής και επιστημονικά πληρέστερης προσέγγισης.

Η πρώτη είναι, βεβαίως, η χρήση του τιτανίου για τις ράβδους οπλισμού των συγκολλήσεων τεμαχίων αρχιτεκτονικών μελών, για τα συνδετήρια στοιχεία των λίθινων

μελών, και, εν γένει, για τα μεταλλικά στοιχεία (π.χ. δοκούς υποστήριξης στεγών) που χρησιμοποιούνται για την στερέωση των αρχαίων κτηρίων. Ο λόγος της επιλογής του τιτανίου για όλες αυτές τις εφαρμογές ήταν η μεγάλη αντοχή του σε όλα τα είδη διάβρωσης, σε συνδυασμό με το ότι είναι συμβατό με το μάρμαρο και από άποψη φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων⁶⁰. Η χρήση του τιτανίου στα έργα της Ακρόπολης από το 1975 και μετά, εφαρμόστηκε μετά από πρόταση του καθ. Θ. Σκουλικίδη, μέλους της ΕΣΜΑ, και σχεδόν ταυτόχρονα άρχισε να εφαρμόζεται, επίσης, σχεδόν σε όλα τα υπόλοιπα έργα αποκατάστασης μνημείων που εκτελούνται στην Ελλάδα. Οι ελάχιστες σχετικές εξαιρέσεις αφορούν κυρίως έργα που έγινε χρήση στοιχείων από ανοξείδωτο χάλυβα, ή, ακόμη σπανιότερα, από κασσίτερο⁶¹. Το μόνο ίσως μειονέκτημα της ευρύτατης διάδοσης του τιτανίου είναι ότι δεν χρησιμοποιείται πια ο μόλυβδος για το υλικό που παρεμβάλλεται μεταξύ εντορμίας και συνδετήριου στοιχείου, αλλά τσιμεντοκονίαμα, ως απόρροια του κινδύνου της γαλβανικής διάβρωσης του τιτανίου στις περιπτώσεις που έρχεται σε επαφή με άλλα μέταλλα.

Η δεύτερη πολύ σημαντική βελτίωση του τρόπου υλοποίησης των έργων αποκατάστασης αρχαίων μνημείων έγκειται στην ελαχιστοποίηση των επεμβάσεων στα αρχαία αρχιτεκτονικά μέλη, η οποία συνδυάζεται αφενός με την ανάγκη για εξαντλητική τεκμηρίωση των αρχαίων μελών πριν από την όποια επέμβαση και, αφετέρου, με την επιλογή να διατηρηθεί η δομική αυτοτέλεια των ανεξάρτητων μελών. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι στόχοι αυτοί απορρέουν όχι μόνο από την επίγνωση των συντελεστών των έργων περί της καλλιτεχνικής και αρχαιολογικής αξίας καθενός αρχιτεκτονικού μέλους ξεχωριστά, αλλά και από την αναγνώριση της υψηλής δομητικής επάρκειας που διέθεταν εκ κατασκευής τα αρχαία κτήρια.

Ως εκ τούτου, οι επεμβάσεις που πραγματοποιούνται κατά τις τελευταίες δεκαετίες στοχεύουν και στην διατήρηση του αρχαίου φέροντος συστήματος των μνημείων, και μόνο στις περιπτώσεις κατά τις οποίες ειδικές στατικές και δυναμικές μελέτες αναδεικνύουν περιοχές των μνημείων όπου η δομή τους (λόγω της φθοράς και της ερειπιώδους κατάστασής τους) είναι εξασθετισμένη, επιτρέπεται η ενίσχυση των περιοχών αυτών με μεθόδους που πιθανώς αλλοιώνουν το αρχικό δομικό σύστημα των αρχαίων κτηρίων.

Η τρίτη βελτίωση, που είναι ίσως και η σημαντικότερη από όλες, είναι ότι κατά τις τελευταίες δεκαετίες αναγνωρίζεται και εφαρμόζεται η συνεργασία επιστημόνων πολλών

⁶⁰ Ζάμπας 1994, σελ. 153-154.

⁶¹ Σχετικά με το τελευταίο βλέπε και παράγραφο 2.3.4.

διαφορετικών ειδικοτήτων (αρχαιολόγων, αρχιτεκτόνων, μηχανικών, συντηρητών κ.α.) σε όλα τα έργα αποκατάστασης αρχαίων μνημείων στην Ελλάδα⁶².

⁶² Σε αυτήν την σημαντικότερη εξέλιξη τον βασικό ρόλο διαδραμάτισε, από τα μέσα της δεκαετίας του 1970 και μετά, ο θεσμός των Επιστημονικών Επιτροπών (πολύ αργότερα σημαντικότερη ήταν και η δημιουργία σχετικών μεταπτυχιακών κύκλων σπουδών στα δύο μεγαλύτερα Πολυτεχνεία της χώρας). Των ομάδων, δηλαδή, που ορίζονταν από τον εκάστοτε Υπουργό Πολιτισμού να εποπτεύουν τα μεγάλα αναστηλωτικά/αρχαιολογικά έργα, οι οποίες συγκροτούνταν από διακεκριμένους επιστήμονες διαφόρων (σχετικών, πάντως, με τα έργα που εκτελούνταν) ειδικοτήτων.

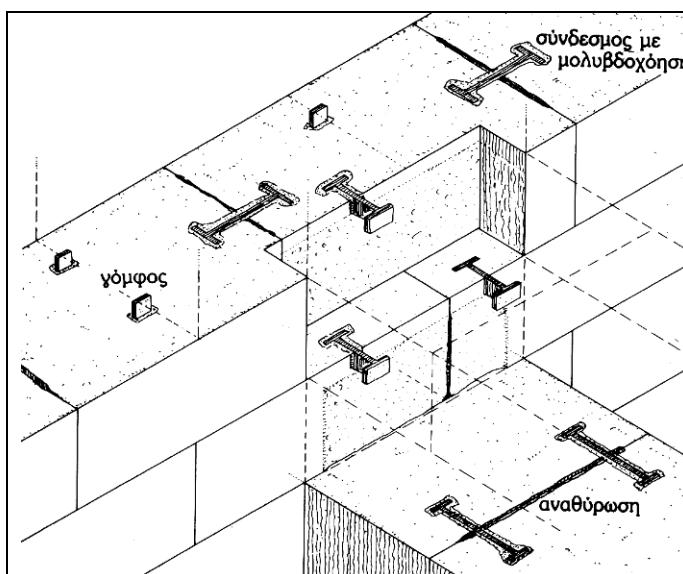
Ατυχώς κατά την κρίση του γράφοντα, οι Επιστημονικές Επιτροπές εδώ και, περίπου, δύο χρόνια έχουν καταργηθεί (εξαιρουμένης, μόνο, της Επιτροπής για τα μνημεία της Αθηναϊκής Ακρόπολης). Ας ευχηθούμε ότι όποιο είναι το διάδοχο καθεστώς θα είναι εξίσου αποτελεσματικό, και οι άνθρωποι που θα το υπηρετήσουν θα συνεχίσουν με αξιοσύνη και συνέπεια την εργασία των προκατόχων τους.

2. ΟΙ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΤΩΝ ΛΙΘΙΝΩΝ ΜΕΛΩΝ ΤΩΝ ΑΡΧΑΙΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ

2.1 Γενικά

Είναι ευνόητο ότι ο τρόπος δόμησης των σημαντικών λίθινων κτηρίων, από τους αρχαϊκούς έως και τους ελληνοιστικούς χρόνους, στον ιδιαίτερος σεισμολογικό χώρο, δηλαδή η απλή συνάρμωση κατεργασμένων λίθων, χωρίς την παρεμβολή κονιάματος στις διεπιφάνειες, απαιτούσε και την τοποθέτηση στοιχείων για την σύνδεση των λίθων μεταξύ τους.

Τα πρόσθετα στοιχεία που τοποθετούνταν από τους αρχαίους Έλληνες οικοδόμους για την σύνδεση των γειτονικών αρχιτεκτονικών μελών στις επάλληλες στρώσεις λιθοπλίνθων ονομάζονταν σύνδεσμοι και γόμφοι (όταν αφορούσαν την σύνδεση κατά μήκος ή καθ' ύψος των στρώσεων, αντίστοιχα), και ήταν μεταλλικά. Κατά κανόνα από σίδηρο, περιβεβλημένα από χυτό μόλυβδο (Εικ. 2.1), ενώ σπανίως από ορείχαλκο. Αντίθετα, στις διεπιφάνειες των σπονδύλων των κιόνων τοποθετούνταν, συνήθως, τρία στοιχεία, ένας πόλος και δύο εμπόλια, τα οποία κατασκευάζονταν από διάφορα είδη ξύλου, πιθανότατα διότι εξυπηρετούσαν κυρίως κατασκευαστικούς σκοπούς⁶⁴.



Εικ. 2.1: Διάταξη συνδέσμων και γόμφων στη συμβολή δύο τοίχων⁶³.

Τα εν λόγω συνδετήρια στοιχεία ήταν προϊόν της εξέλιξης της αρχαίας ελληνικής αρχιτεκτονικής, κατά την μετάβασή της από τα ξύλινα στα λίθινα μνημειακά κτήρια⁶⁵, ενώ

⁶³ Από Muller-Wiener 1995, εικ. 45, σελ. 96.

⁶⁴ Βλέπε σχετικά παράγραφο 2.3.1.

δεν αποκλείεται η τεχνική σύνδεσης λίθων στην οικοδομική, γενικότερα, να προήλθε από ένα άλλο πεδίο τεχνολογίας, την ναυπηγική, όπου πρωταγωνιστούσε η ξυλουργική τέχνη⁶⁶.

Ο ρόλος των συνδετήριων στοιχείων στα μνημειακά κτήρια της αρχαίας Ελλάδας ήταν να συγκρατούν (από κοινού με τους δεσμούς της τριβής) τα λίθινα αρχιτεκτονικά μέλη, ώστε αυτά να μην παρουσιάζουν μεγάλες σχετικές μετακινήσεις, όταν τα κτήρια καταπονούνταν από δυναμικά φορτία. Παρά το γεγονός ότι φαίνεται η βασική ανησυχία των αρχαίων κατασκευαστών να ήταν οι μελλοντικοί ισχυροί σεισμοί που πιθανώς θα έπλητταν τα κτίσματά τους, υπάρχουν και μνημεία στα οποία διαπιστώνεται ότι τα συνδετήρια στοιχεία τοποθετήθηκαν για να τα θωρακίσουν και έναντι άλλων ενδεχόμενων κινδύνων: π.χ. διαφορικές καθιζήσεις των θεμελίων τους, ως συνέπεια είτε ενός ισχυρού σεισμού⁶⁷ είτε, στις περιπτώσεις που τα θεμέλια τους εδράζονται σε μη συμπαγές υπόβαθρο (τεχνητές επιχώσεις ή αλλουβιακά εδάφη), λόγω ερπυστικών φαινομένων⁶⁸.

Στις ακόλουθες παραγράφους του παρόντος κεφαλαίου, παρουσιάζονται με συνοπτικό τρόπο τα κυριότερα είδη συνδετήριων στοιχείων των λίθινων μελών των μνημειακών κτισμάτων στην αρχαία Ελλάδα, όπως αυτά έχουν μελετηθεί στα μνημεία που έχουν διατηρηθεί έως την σύγχρονη εποχή. Παρουσιάζονται, επίσης, τα πιο διαδεδομένα νέα συνδετήρια στοιχεία από τιτάνιο, τα οποία χρησιμοποιούνται για την αντικατάσταση ή υποκατάσταση των αρχαίων, στα διάφορα έργα αποκατάστασης που εκτελούνται στην Ελλάδα τις τελευταίες δεκαετίες.

⁶⁵ Υπέρ αυτής της άποψης συνηγορεί και το ότι οι πρωιμότεροι μεταλλικοί σύνδεσμοι, οι πελεκίνοι (βλέπε Εικ. 2.2), έχουν ίδια μορφή με ξύλινους συνδέσμους που χρησιμοποιούνταν παλαιότερα στην κρητομυκηναϊκή αρχιτεκτονική (Ορλάνδος 1955-60, τ. 2, σελ. 179-180).

⁶⁶ Θεωρείται ότι κατά τους πρώτους χρόνους που οι άνθρωποι άρχισαν να ασκούν την οικοδομική τέχνη, εφάρμοσαν μεθόδους που προγενέστερα είχαν αναπτυχθεί για τις ανάγκες της ναυπηγικής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι συνδέσεις με βύσματα που πρωτοεμφανίστηκαν στα πλοίαρια των αρχαίων Αιγυπτίων και αργότερα χρησιμοποιήθηκαν στην οικοδομική (Ηλιόπουλος 1997, σελ. 15).

⁶⁷ Την πιο αντιπροσωπευτική σχετική περίπτωση αποτελεί ο αρχαϊκός ναός του Απόλλωνα στους Δελφούς [ο τρίτος στη θέση αυτή, σύμφωνα με τα ανασκαφικά ευρήματα, ο τέταρτος σύμφωνα με το μύθο (Gruben 2000, σελ. 86-93)], ο οποίος διαθέτει ένα από τα εκτεταμένα δίκτυα συνδετήριων στοιχείων στο κρηπίδωμά του. Όπως προκύπτει από τις σχετικές αναφορές των αρχαίων ιστορικών, στην περιοχή αυτή συνέβαιναν συχνά κατολισθήσεις λόγω σεισμικών δονήσεων. Επίσης, είναι πολύ πιθανό ο προγενέστερος ναός να καταστράφηκε από τον μεγάλο σεισμό του χειμώνα του το 373 π.Χ., ο οποίος είχε πολλές επιπτώσεις στις περιοχές περί τον Κορινθιακό κόλπο, με πιο καταστρεπτική (και πιο διάσημη) τον καταποντισμό της αρχαίας Ελικής (Πausanias, *Αχαϊκά*, VII, 24, 12-13).

Η σύγχρονη έρευνα έχει επιβεβαιώσει την μεγάλη σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής, καθώς διαπιστώθηκε στη δεκαετία του 1990 ότι οι Δελφοί είναι κτισμένοι επί της (χιαστί) συμβολής δύο ενεργών τεκτονικών ρηγμάτων. Τα ρήγματα αυτά, μάλιστα, πρέπει να ήταν και ο λόγος ύπαρξης του Μαντείου στη θέση αυτή, καθώς στην αρχαιότητα τα μαντεία θεμελιωνόνταν επί ρηγμάτων από τα οποία εκκλείονταν αέρια ή/και κοντά σε πηγές που ανέβλυζαν νερό.

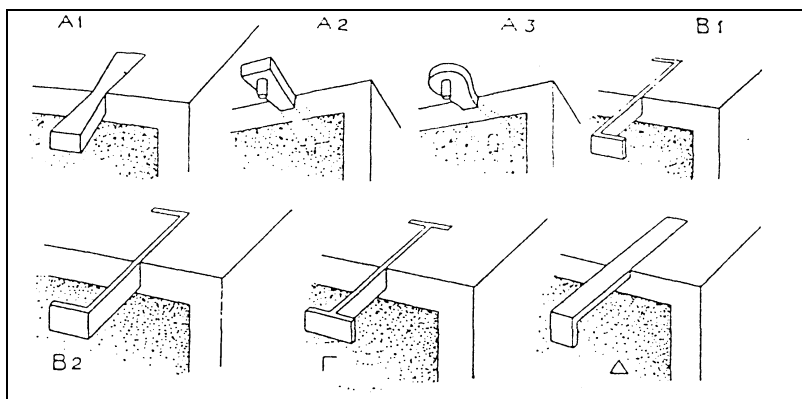
⁶⁸ Χαρακτηριστικό τέτοιο παράδειγμα είναι ο ναός του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών, ο οποίος είναι θεμελιωμένος στη νότια πλαγιά του όρους Κωτίλιου (στο νοτιοδυτικό άκρο της κεντρικής Πελοποννήσου). Στο κρηπίδωμά του υπάρχει επιμελημένη διασύνδεση των λιθοπλίνθων, και στις δύο κύριες διευθύνσεις του κτηρίου.

2.2 Τα μεταλλικά συνδετήρια στοιχεία των διατεταγμένων σε στρώσεις λίθων

2.2.1 Οι σύνδεσμοι και οι γόμφοι⁶⁹

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα μεταλλικά στοιχεία που καθιστούσαν δυνατή τη σύνδεση λίθων της ίδιας στρώσης (οριζόντια σύνδεση) στα αρχαιοελληνικά μνημειακά κτήρια, ονομάζονται

σύνδεσμοι, τοποθετούνταν στην άνω έδρα των συνδεόμενων λίθων, και το σχήμα τους διαφέρει ανάλογα με την εποχή κατασκευής τους (Εικ. 2.2). Έτσι, διακρίνονται οι πελεκίνοι της



Εικ. 2.2: Αρχαίοι σύνδεσμοι. Πελεκίνοι: A1 έως A3. Ζητάμορφοι: B1 και B2. Σχήματος διπλού T: Γ. Και σχήματος Π: Δ⁷⁰.

αρχαϊκής περιόδου, οι οποίοι ήταν ή αμιγώς από ξύλο ή

μόλυβδο (Εικ. 2.2, A1) ή έφεραν και σιδερένιο πειόμορφο πυρήνα (Εικ. 2.2, A2 και A3), οι ζητάμορφοι σύνδεσμοι (7^{ος} έως 4^{ος} π.Χ. αιώνας), οι σύνδεσμοι σχήματος διπλού T, οι οποίοι παρέχουν την βέλτιστη σύνδεση, και οι οποίοι εφαρμόζονταν από την αρχαϊκή εποχή (Εικ. 2.3) αλλά κυριάρχησαν κατά την κλασική εποχή. Τέλος, οι σύνδεσμοι σχήματος Π που χρησιμοποιούνταν κατά την κλασική και, πολύ περισσότερο, την ελληνιστική περίοδο.



Εικ. 2.3: Σύνδεσμοι διπλού T στη νοτιοδυτική γωνία του αρχαϊκού ναού στην περιοχή Τραπεζά Αγίου, ο οποίος χρονολογείται περί το 540 π.Χ.

⁶⁹ Λεπτομερής παρουσίαση των συνδετήριων στοιχείων των λίθινων μελών των αρχαίων μνημείων υπάρχει στο αναντικατάστατο σύγγραμμα του Αναστασίου Κ. Ορλάνδου περί των υλικών δομής των αρχαίων Ελλήνων (Ορλάνδος 1955-1960, τ. 2, σελ. 177-202), από όπου και η παρούσα εργασία αντλεί πολλά στοιχεία.

⁷⁰ Από Ορλάνδος 1955-1960, τ. 2, εικ. 135, σελ. 181.

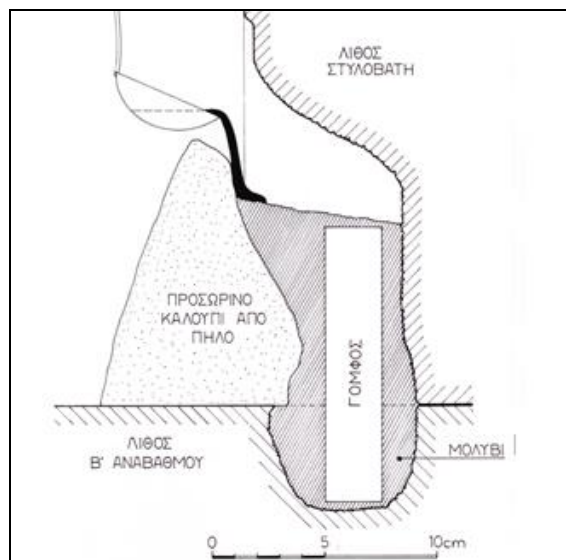
Αξίζει να αναφερθεί ότι σε σπάνιες περιπτώσεις έχουν χρησιμοποιηθεί και σύνδεσμοι με άλλη μορφή από αυτή των προαναφερθέντων, όπως είναι οι περίτεχνοι σιγμοειδείς σύνδεσμοι (διατηρούνται σε κτήριο στην αρχαία Δήλο⁷¹) ή οι στρεπτοσύνδεσμοι (που πιθανότατα είχαν εφαρμοστεί στο δυτικό αέτωμα του Παρθενώνα⁷²).

Διαπιστώνεται ότι η κύρια λειτουργία των συνδέσμων είναι εφελκυστική. Παράλληλα, όμως, υποβάλλονται και σε διάτμηση. Συνήθως το μήκος τους κυμαινόταν από 20 έως 30 εκατοστά (Εκ. 2.4). Κατά περίπτωση, , αλλά, κατά περίπτωση απαντώνται και σε μικρότερες διαστάσεις ή σε πολύ μεγαλύτερες (π.χ. στον Παρθενώνα φθάνουν τα 50 εκατοστά). Οι σύνδεσμοι προσέδιδαν (και προσδίδουν) στην σύνδεση⁷³ μεγάλη αντοχή, λόγω της κατάλληλης αγκύρωσής τους στα μέλη (κυρίως οι σύνδεσμοι σχήματος διπλού T) και παραμορφωσιμότητα λόγω της ολκιμότητάς τους.



Εικ. 2.4: Σύνδεσμος (και τμήματα του μολύβδου που τον περιέβαλλε) από την κρηπίδα του ναού του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών.

Για την κατακόρυφη σύνδεσή τους τα λίθινα μέλη των αρχαίων κτηρίων εφοδιάζονταν με γόμφους. Πρόκειται για, συνήθως, πεπλατυσμένα (και, ενίοτε, ραδινά) ορθογώνια πρίσματα τα οποία τοποθετούνταν περίπου κατά το ήμισυ του ύψους τους σε κοιλότητα στο κατώτατο σημείο πλευρικής επιφάνειας των λίθων τους οποίους προορίζονταν να συνδέσουν, και κατά το υπόλοιπο τμήμα τους σε κοιλότητα στην άνω έδρα των υποκείμενων λίθων (Εικ 2.1, 2.5). Οι διαστάσεις τους διέφεραν ανάλογα με το κτήριο στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν και την εποχή της κατασκευής τους. Συνήθως, το πάχος



Εικ. 2.5: Τρόπος τοποθέτησης αρχαίου γόμφου στο στυλοβάτη του ναού του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών⁷⁴.

⁷¹ Bruneau και Ducat 2010.

⁷² Ορλάνδος 1959-1960 σελ. 186-187, Μανιδάκη 2016.

⁷³ Ο όρος χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει το συνδετήριο στοιχείο και τις περιοχές των λίθων στις οποίες αυτό αγκυρώνεται.

⁷⁴ Από Παπαδόπουλος και Σαββατιανού 2015, εικ. 4.27, σελ.162.

τους ήταν περί το 1 εκατοστό, η βάση τους είχε μήκος ολίγων (συνήθως 3 έως 7) εκατοστών, ενώ το ύψος τους ήταν πολλαπλάσιο (συνηθέστερα 2, αλλά και 3 έως 4) της βάσης τους.

Οι γόμφοι τοποθετούνταν, κατά κανόνα, περί το μέσον της πλευρικής επιφάνειας των λίθων η οποία ήταν ελεύθερη κατά την διαδικασία τοποθέτησης των λίθων (ανά στρώση). Μερικές φορές τοποθετούνται και σε λίθους ειδικών θέσεων (π.χ. στους τοποθετημένους τελευταίους σε μία στρώση, ή στους γωνιαίους) ως εσωτερικοί-κρυφοί.

Οι γόμφοι καταπονούνται κυρίως διατμητικά, αφού παρεμποδίζουν τις σχετικές μετακινήσεις λίθων διαδοχικών στρώσεων. Όμως, λόγω του ότι είναι στερεωμένοι στις εντορμίες με μολύβι, σε κάποιες περιπτώσεις εντείνονται και εφελκυστικά. Από παρατηρήσεις σε αρχαία κτήρια έχει διαπιστωθεί ότι όταν η σύνδεση δεν αστοχούσε με θραύση του λίθου, οι γόμφοι (εξαιτίας της μεγάλης αντοχής τους) εξολκεύονταν.

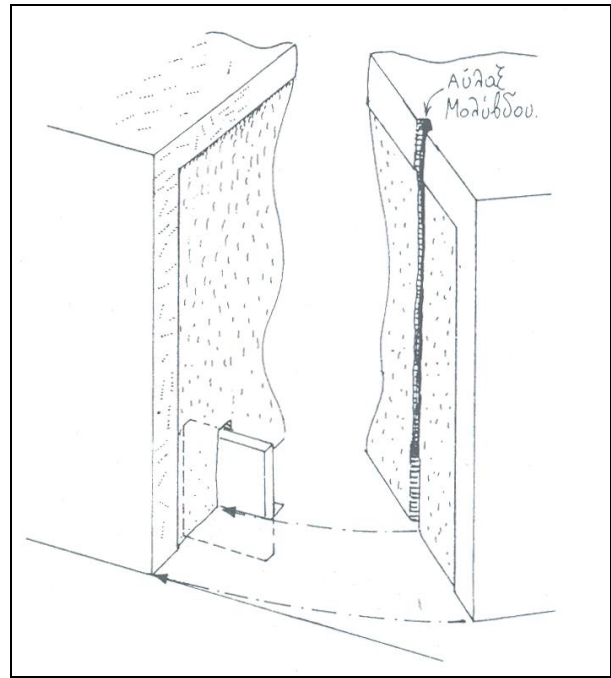
Συχνά υπήρχε οριζόντια (με συνδέσμους) και κατακόρυφη (με γόμφο/ους) σύνδεση των λίθων ενός κτηρίου (π.χ. στους τοίχους). Υπήρχαν όμως στο ίδιο κτήριο και λίθοι που είχαν μόνο τον ένα ή μόνο τον άλλο τρόπο σύνδεσης (π.χ. στην στρώση του στυλοβάτη δεν τοποθετούνταν σύνδεσμοι διότι θα ήταν ορατοί). Σημειώνεται, πάντως, ότι υπάρχουν παραδείγματα αρχαίων κτηρίων, στα οποία η γόμφωση των λίθων τους έχει παραλειφθεί σε τμήματά τους, στα οποία θα μπορούσε να έχει εφαρμοστεί. Εικάζεται ότι, σ' αυτές τις περιπτώσεις, η οριζόντια σύνδεση των λίθων θεωρήθηκε επαρκής.

2.2.2 Ο ρόλος του μολύβδου

Οι σύνδεσμοι και οι γόμφοι τοποθετούνταν σε εγκοπές (λαξευμένες κοιλότητες) των συνδεόμενων λίθων που ονομάζονται τóρμοι ή συνηθέστερα εντορμίες. Οι διαστάσεις των εντορμιών ήταν μεγαλύτερες από τις διαστάσεις των συνδετήριων στοιχείων τα οποία θα φιλοξενούσαν. Έτσι, το μεταξύ τους κενό πληρωνόταν με χυτό μολύβδο (Εικ. 2.5). Η κάλυψη των συνδετήριων στοιχείων των λίθων με μολύβδο είχε τρεις θετικές λειτουργίες: (α) Εξασφάλιζε πλήρη μηχανική συνέχεια ανάμεσα στο μεταλλικό στοιχείο και τους λίθους. (β) Χάρη στην εντόνως πλαστική συμπεριφορά του, το μολύβι απορροφούσε ένα μέρος από τους κραδασμούς και την ενέργεια που καλούνταν να παραλάβει η σύνδεση, ενώ εξασφάλιζε παράλληλα την ομοιόμορφη μεταβίβαση των τάσεων από τους λίθους στο συνδετήριό τους. Τέλος, (γ) ευεργετική ιδιότητα αποτελούσε η απομόνωση του σιδήρου από το περιβάλλον και η συνακόλουθη προστασία του από την οξειδωση.

Η σημασία την οποία απέδιδαν οι αρχαίοι κατασκευαστές στον ρόλο του μολύβδου τεκμηριώνεται και από την εξής παρατήρηση: Μερικές φορές οι αρχαίοι οικοδόμοι τοποθέτησαν εντός των εντορμιών και κάτω από τους συνδέσμους ξεχωριστά ψήγματα μολύβδου ως παρεμβλήματα, έτσι ώστε οι σύνδεσμοι να μην έρθουν σε επαφή με τον πυθμένα των εντορμιών και, άρα, να είναι εξασφαλισμένη η πλήρης περιβολή τους με τον μολύβδο κατά τη χύτευση του τελευταίου στις εντορμίες⁷⁵.

Ως προς τον τρόπο χύτευσης του μολύβδου στις εντορμίες των γόμφων, αυτός ελάμβανε χώρα, έως και την κλασική εποχή, μέσω της δημιουργίας προσωρινής φωλιάς με την κατασκευή πήλινου καλουπιού (Εικ. 2.5). Από την ελληνιστική εποχή, όμως, και μετά, λόγω του ότι ο τρόπος εφαρμογής των γόμφων άλλαξε, διαφοροποιήθηκε και ο τρόπος χύτευσης του μολύβδου προστασίας των. Πιο συγκεκριμένα, ο γόμφος σταθεροποιείτο με μολύβι στον άνω λίθο, πριν αυτός τοποθετηθεί στην τελική του θέση. Στην συνέχεια, μετά την εναπόθεση του λίθου επί του υποκείμενού του και την εισχώρηση του κάτω μισού τμήματος του γόμφου στην εντορμία επί της άνω έδρας του υποκείμενου λίθου, πραγματοποιείτο η μολυβδοχόηση του κάτω μισού τμήματος του γόμφου. Η μολυβδοχόηση ελάμβανε χώρα μέσω αυλακιού στην άνω έδρα του κάτω λίθου. Δεν ήταν σπάνιος, πάντως, και ένας τρίτος τρόπος που περιελάμβανε κατακόρυφο ή κεκλιμένο αυλάκι μολυβδοχόησης στην μάζα ή σε πλευρική επιφάνεια του υπερκείμενου λίθου (Εικ. 2.6). Σ' αυτές τις περιπτώσεις αυτές, είχε προηγηθεί η στερέωση του γόμφου στην εντορμία του υποκείμενου αρχιτεκτονικού μέλους.



Εικ. 2.6: Τρόπος γόμφωσης των άκρων των ορθοστατών του Παρθενώνα⁷⁶.

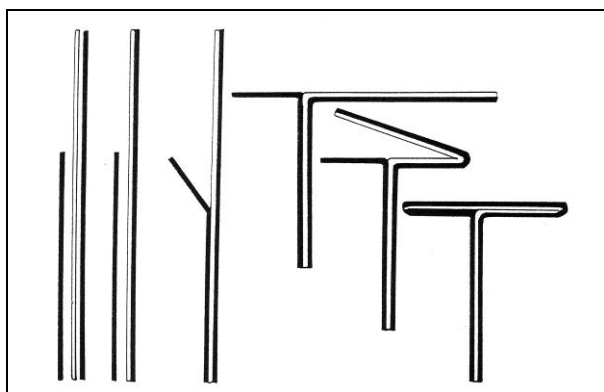
⁷⁵ Tanoulas 2006, σελ. 449.

⁷⁶ Από Κορρές και Μπούρας 1983, κάτω εικ. σελ. 111.

2.2.3 Τρόπος κατασκευής των συνδέσμων

Στο πλαίσιο διάφορων έργων αποκατάστασης που εκτελούνται ανά την Ελλάδα, κατά την διάρκεια αποσυναρμολογήσεων, αποκαλύπτονται πολλά συνδετήρια στοιχεία. Πέραν του ότι είναι, πράγματι, εντυπωσιακή η άριστη κατάσταση διατήρησής τους, δίνεται η δυνατότητα στους μελετητές διαφόρων ειδικοτήτων να εξετάσουν μεγάλο αριθμό αρχαίων συνδέσμων και γόμφων. Όμως, λόγω της ιστορικής και αρχαιολογικής αξίας τους, μικρός μόνον αριθμός από αυτούς έχει μελετηθεί και μέσω κατάλληλων καταστρεπτικών μεθόδων (ολίγοι σύνδεσμοι προερχόμενοι από τον Παρθενώνα, τον υστεροαρχαϊκό ναό της Τραπεζιάς Αιγίου και τον ναό του Επικούριου Απόλλωνα).

Η μελέτη αυτών έχει καταδείξει ότι οι αρχαίοι σύνδεσμοι μορφοποιούνταν μέσω της τεχνικής της θέρμανσης/αναθέρμανσης και σφυρηλασίας, και ενίοτε με την συγκόλληση⁷⁷ επιμέρους τεμαχίων τους (π.χ. οι μεγάλοι σύνδεσμοι διπλού T του Παρθενώνα διαθέτουν ίχνη που φανερώνουν συγκόλληση στην μέση του διαμήκου σκέλους τους). Τα εγκάρσια σκέλη των συνδέσμων προέκυπταν είτε από αναδίπλωση (Εικ. 2.7), είτε από διαμερισμό (Εικ. 2.8).



Εικ. 2.7: Εκτιμώμενα στάδια κατασκευής μισού συνδέσμου του Παρθενώνα. Με το μαύρο χρώμα επισημαίνονται τα στρώματα χάλυβα και με το λευκό του σιδήρου⁷⁸.



Εικ. 2.8: Σύνδεσμος από το ναό του Επικούριου Απόλλωνα, μετά από λείανση και χημική προσβολή του για την αποκάλυψη της εσωτερικής μακροδομής του⁷⁹.

Σε ότι αφορά την σύσταση των αρχαίων συνδέσμων, η μεταλλουργική μελέτη τους απέδειξε ότι οι σύνδεσμοι του Παρθενώνα περιλαμβάνουν σκοπίμως, εκτός από στρώματα μαλακού σιδήρου (με πολύ μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα), και στρώματα ή εγκλείσματα

⁷⁷ Πρόκειται φυσικά για αυτογενείς συγκολλήσεις, δηλαδή για συγκολλήσεις τεμαχίων του ίδιου μετάλλου που επιτυγχάνονται μόνο μέσω της ταυτόχρονης τήξης. Εκτιμάται ότι, ήδη, από τον 6^ο αιώνα π.Χ. οι αρχαίοι Έλληνες γνώριζαν την τεχνική της συγκόλλησης μετάλλων, η εφεύρεση της οποίας αποδίδεται στον Γλαύκο τον Χίον.

⁷⁸ Από Varoufakis 1992, fig. 11, p. 9.

⁷⁹ Από Δασαργύρη 2011, εικ. 3.11, σελ. 46.

σκληρού χάλυβα (δηλαδή κράματος σιδήρου και άνθρακα). Αυτό προκύπτει από την παράλληλα και εναλλάξ διάταξη των διαφορετικών στρωμάτων (Εικ. 2.7). Στους άλλους δύο ναούς, η παρόμοια σύσταση αποδίδεται μάλλον σε τυχαίο γεγονός κατά την μορφοποίησή τους. Από δύο συνδέσμους του Παρθενώνα απεκόπησαν 7 δοκίμια, τα οποία υποβλήθηκαν σε εργαστηριακές δοκιμές εφελκυσμού. Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσίασαν (όπως αναμενόταν και λόγω των εγκλεισμάτων σκουριάς τα οποία εμπεριείχαν) σημαντική διακύμανση. Αποτελούν, πάντως, πολύτιμα στοιχεία περί των μηχανικών ιδιοτήτων του αρχαίου δομικού σιδήρου που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή των μνημείων της Αθηναϊκής Ακρόπολης⁸⁰. Πιο συγκεκριμένα, η μέση τιμή που προέκυψε για το όριο διαρροής και την τάση θραύσης του αρχαίου σιδήρου είναι 265 MPa (min 218 MPa και max 356 MPa) και 428 MPa (min 335 MPa και max 538 MPa), αντίστοιχα. Για το μέτρο ελαστικότητάς του, μετρήθηκαν τιμές των οποίων ο μέσος όρος είναι 217000 MPa (min 193000 MPa και max 241000 MPa). Στο πλαίσιο της ίδιας μελέτης, ιδιαίτερος ενδιαφέροντα είναι και τα αποτελέσματα των πειραμάτων που διενεργήθηκαν σε ένα ακέραιο αρχαίο σύνδεσμο και πέντε μισά τεμάχια αρχαίων συνδέσμων, από τα οποία προκύπτει μέση τιμή τάσης θραύσης 236.5 MPa (min 206 MPa και max 296 MPa)⁸¹.

Αξίζει να αναφερθεί, επίσης, και το συμπέρασμα περί των παραγόντων που συνέβαλαν στην εξαιρετική ανθεκτικότητα των συνδέσμων και γόμφων του Παρθενώνα και του Ερεχθείου έναντι της οξειδωσης. Σύμφωνα με τον μελετητή καθ. Γ. Βαρουφάκη, το γεγονός αυτό οφείλεται: (α) στην καθαρή ατμόσφαιρα της προβιομηχανικής Αθήνας, (β) στην προστασία των στοιχείων από το μόλυβδο που τους περιέβαλε, καθώς στους ερμητικά κλειστούς αρμούς των λίθων που συνέδεαν, και (γ) στην χημική καθαρότητα των μετάλλων από τα οποία προήλθαν⁸².

Σε συνέχεια του προηγούμενου σχολίου, πρέπει να αναφερθεί, επίσης, ότι σύμφωνα με έρευνες του ίδιου μελετητή, η περιοχή της Ελλάδας όπου εξορύσσεται στους αρχαίους χρόνους το υψηλότερης ποιότητας σιδηρομέταλλευμα ήταν η Λακωνία (αν και δεν αποκλείεται να ήταν και η Λαυρεωτική). Ως εκ τούτου, διατύπωσε την θεωρία ότι το υλικό των συνδετήριων στοιχείων των λίθων των μνημείων της Αθηναϊκής Ακρόπολης, τα οποία αποκαλύπτονται σε άριστη κατάσταση προήλθε από τα μεταλλεία της Σπάρτης⁸³.

⁸⁰ Ζάμπας 1994, σελ. 94-103.

⁸¹ Ζάμπας 1994, σελ. 95.

⁸² Varoufakis 1992, p. 17.

⁸³ Varoufakis 1992, p. 15.

2.2.4 Θέση και λειτουργία

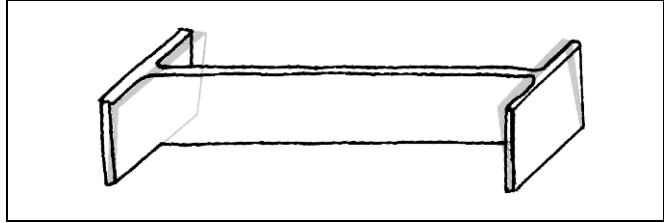
Με εξαίρεση την θεμελίωση και τους κίονες, στα υπόλοιπα λίθινα μέρη των σημαντικών κτηρίων της αρχαιότητας –κρηπίδα, θριγκός, τοίχοι, αετώματα– τοποθετούνταν μεταλλικά συνδετήρια στοιχεία (σύνδεσμοι ή/και γόμφος) στα αρχιτεκτονικά μέλη. Συχνά πάντως, παρατηρείται ότι είτε τα οριζόντια είτε τα κατακόρυφα συνδετήρια στοιχεία παραλείπονταν σε ορισμένες στρώσεις ή περιοχές ενός αρχαίου κτηρίου. Δεν λείπουν ούτε οι περιπτώσεις πλήρους απουσίας συνδετηρίων. Φαίνεται ότι τούτο συνέβαινε όταν η σύνδεση εθεωρείτο περιττή ή επιβαρυντική για την σεισμική απόκριση του κτηρίου, οπότε και η εσκεμμένη παράλειψη είχε ως στόχο τη δημιουργία οικοδομικού αντισεισμικού αρμού. Αυτή η υπόθεση εργασίας φαίνεται να επιβεβαιώνεται από το ότι έως και την κλασική εποχή, δεν τοποθετούνταν μεταλλικά στοιχεία στους κίονες. Επίσης, συνήθως στους αρχαίους ναούς οι φατνωματικές πλάκες της οροφής του περού, οι οποίες «γεφύρωναν» το σχετικά εύκαμπτο περιστύλιο με τον δύσκαμπτο σηκό, απλώς εναποτίθεντο.

Οι σύνδεσμοι και οι γόμφοι στα αρχαία κτήρια δεν υποβάλλονταν σε ένταση υπό τα συνήθη φορτία λειτουργίας. Κατ' αναλογία προς τις σύγχρονες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, η ολκιμότητα του σιδήρου τους αξιοποιείτο μόνον όταν επιβαλλόταν μία «τυχηματική» δράση (μετατόπιση φορτίου, υποχώρηση ή στροφή θεμελίου, σεισμική διέγερση). Σ' αυτήν την περίπτωση, όταν συνέβαινε υπέρβαση της πρόσφυσης μεταξύ των λίθων εκδηλώνονταν παραμορφώσεις. Τότε επιστρατεύονταν τα συνδετήρια στοιχεία προσφέροντας αντίσταση και παραμορφωσιμότητα. Με αυτόν τον τρόπο, οι σύνδεσμοι και οι γόμφοι –από κοινού με την τριβή στις διεπιφάνειες των λίθων– συμβάλλουν στην άμυνα των αρχαίων κατασκευών έναντι δυναμικών και άλλων τυχηματικών δράσεων.

Η λειτουργία των συνδετηρίων μπορεί να ερμηνευτεί ως πρόθεση των αρχαίων οικοδόμων να εφοδιάσουν τις κατασκευές τους με «σημειακή πλαστιμότητα» στις περιοχές των συνδέσεων των λίθων, δηλαδή με μία ιδιότητα που απουσιάζει από αυτές λόγω της αρθρωτής δομής τους. Σημειώνεται, πάντως, ότι οι συνδέσεις δεν υπηρετούσαν την κατασκευή μόνο σε οριακές καταστάσεις, αλλά συνέβαλλαν και στην καλή εμφάνισή της με την αποφυγή ανεπίτρεπτων, για την αρχαία αντίληψη της τέχνης, μετακινήσεις ακόμα και υπό συνήθεις καταπονήσεις.

Η πρόθεση/εμμονή των αρχαίων Ελλήνων για άρτιο αισθητικό αποτέλεσμα και ερμητικά κλειστούς αρμούς στις κατασκευές τους, καθώς και η γνώση που διέθεταν περί των μηχανικών χαρακτηριστικών των συνδέσεων των λίθων, τεκμηριώνονται πλήρως στο

οικοδομικό μεγαλούργημα της αρχαιότητας, τον Παρθενώνα, στον οποίο έχουν παρατηρηθεί σε ολίγες περιπτώσεις μέχρι και προεντεταμένοι σύνδεσμοι (Εικ. 2.9).



Εικ. 2.9: Τρόπος προέντασης συνδέσμων: με κεκλιμένες κεφαλές πριν από την τοποθέτησή του⁸⁴.

2.2.5 Σχεδιασμός των συνδέσεων

Τα συνδετήρια στοιχεία των λίθινων μελών των αρχαίων ελληνικών μνημείων προπαρασκευάζονταν στα εργαστήρια σιδήρου⁸⁵. Ενδεχομένως οι διαστάσεις τους ήταν λίγο έως πολύ τυποποιημένες. Σε κάθε περίπτωση, ήταν προκαθορισμένες. Προέκυπταν, όμως, οι διαστάσεις των εν λόγω στοιχείων βάσει σχεδιασμού, υποτυπώδους έστω; Αυτό δεν είναι δυνατόν να υποστηριχθεί με βεβαιότητα.

Διατίθενται, παρά ταύτα, στοιχεία τα οποία συνηγορούν υπέρ αυτής της άποψης: (α) Όπως προαναφέρθηκε, υπήρχαν θέσεις στα κτίσματα, όπου παραλειπόταν κάθε (ή κάποιο) είδος σύνδεσης των λίθινων αρχιτεκτονικών μελών, καθώς αυτή θεωρείτο επιβαρυντική. Επιπλέον, (β) οι γωνίες των κτηρίων διαμορφώνονταν, συνήθως, με υπερμεγέθεις λίθους, οι οποίοι έφεραν αυξημένο (έως και διπλάσιο) από το σύνθητες, πλήθος συνδετήριων στοιχείων (Εικ. 2.3). Έτσι, φανερώνεται η πρόθεση για ενίσχυση των γωνιών των κτηρίων. Επίσης, (γ) το μέγεθος των συνδετήριων στοιχείων είναι, κατά κανόνα, ανάλογο με το μέγεθος των κτηρίων. Δηλαδή, στα ογκωδέστερα μνημεία απαντώνται και οι μεγαλύτεροι σύνδεσμοι σε σχέση με τους (στις ομόλογες φυσικά θέσεις) συνδέσμους των μικρότερων διαστάσεων ναών. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στον Παρθενώνα και στον ναό του Διός στην Ολυμπία, δύο από τους μεγαλύτερους ναούς του αρχαίου κόσμου, στην στρώση των επιστυλίων οι σύνδεσμοι έχουν μήκος περί τα 40 με 50 cm, στον ναό του Επικούριου Απόλλωνα (μετρίων διαστάσεων αρχαίο ναό), λίγο κάτω από 30 cm, ενώ στον σχετικά μικρό ναό της Αθηνάς στην Αλίφειρα δεν είχαν τοποθετεί σύνδεσμοι στα επιστύλιά του. Αξίζει, τέλος να αναφερθεί ότι (δ) συνδετήρια ενός είδους παρουσιάζουν εντός του ίδιου κτηρίου μικρή διαφοροποίηση των διαστάσεών τους ή διαφορά στην μορφή ή/και στο υλικό τους, ανάλογα με την περιοχή του

⁸⁴ Από Παράσχη και Τογανίδης 2002, εικ. 51, σελ. 47.

⁸⁵ Έχουν διατηρηθεί αρχαία συνδετήρια στοιχεία που φέρουν εγχάρακτες σημάνσεις, προφανώς των μεταλλουργών που τα κατασκεύασαν, ως κωδικούς συμβολισμούς για το που προορίζονταν να τοποθετηθούν. Σχετικό παράδειγμα αποτελούν αρκετοί αρχαίοι σύνδεσμοι και γόμφοι που απεκαλύφθησαν στα Προπύλαια της Ακρόπολης των Αθηνών, οι οποίοι φέρουν χαραγμένη τη σήμανση *ΑΘΕ* (Tanoulas 2006, σελ. 450-451).

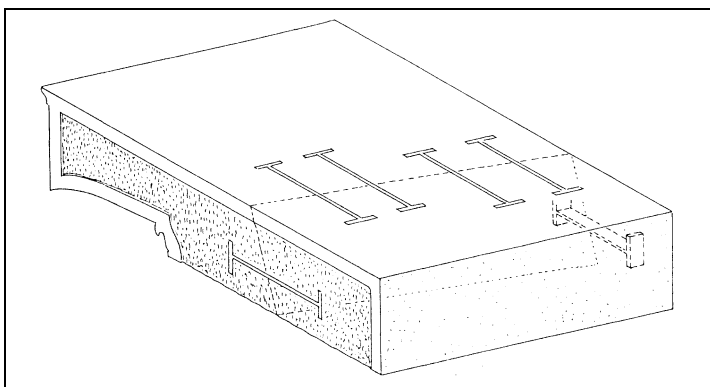
κτηρίου στην οποία είναι τοποθετημένα. Τα μεγαλύτερης αντοχής είναι τοποθετημένα στις θέσεις όπου οι σεισμικές διεγέρσεις προκαλούν μεγαλύτερες δράσεις. Ίσως το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα, από αυτήν την άποψη, αποτελεί ο κλασικός ναός της Νέμεσης στον Ραμνούντα Αττικής. Σε αυτόν τον ναό οι αρχαίοι κατασκευαστές τοποθέτησαν σιδερένιους συνδέσμους διπλού T στις στρώσεις λίθων πάνω από τους κίονες, ενώ στους ορθοστάτες (στην κατώτερη στρώση λίθων των τοίχων του σηκού δηλαδή) τοποθέτησαν ξύλινους πελεκίνους⁸⁶, και για λόγους οικονομίας των υλικών, αλλά και διότι εκεί πρέπει να ανέμεναν ότι θα είναι μικρότερες οι σεισμικές δράσεις.

Όλα τα προηγούμενα συνηγορούν υπέρ της ύπαρξης δομητικού σχεδιασμού των αρχαίων μνημείων από τους κατασκευαστές τους, ο οποίος περιελάμβανε και αδρομερή καθορισμό των διαστάσεων των συνδετήριων στοιχείων μεταξύ των λίθινων αρχιτεκτονικών μελών.

2.2.6 Άλλες συνδέσεις των λίθων

Για την οριζόντια αγκύρωση πρόσθετων στοιχείων (αγάλματα των αετωμάτων, ξύλινες θύρες και πλαίσια κ.α.) επάνω σε μόνιμα κατακόρυφα στοιχεία του κτηρίου, χρησιμοποιούνταν σύνδεσμοι, συχνά, διαφοροποιημένοι από την τυπική τους μορφή. Κατακόρυφες αγκυρώσεις, συνήθως είδους γόμφωσης, τοποθετούνταν στα βάθρα των ακρωτηρίων (δηλαδή των αγαλμάτων που τοποθετούνταν στις τρεις γωνιές των αετωμάτων) για την προστασία τους έναντι ολίσθησης ή ανατροπής.

Επίσης, σε περιπτώσεις κατά τις οποίες οι αρχαίοι κατασκευαστές χρησιμοποιούσαν λίθους με τεχνικώς ελαττωματικές περιοχές περιορισμένης έκτασης (δηλαδή κομμούς, ασυνέχειες υλικού κ.λπ.), τοποθετούσαν συνδέσμους σε αθέατες θέσεις για την ενίσχυση των λίθων. Οι ενισχύσεις αυτές είχαν, συνήθως, προληπτικό χαρακτήρα και σε σπάνιες περιπτώσεις επισκευαστικό. Τέτοιες ενισχύσεις λίθων έχουν παρατηρηθεί στον Παρθενώνα, στο κιονόκρανο του 7^{ου} ανατολικού κίονα, σ' ένα γείσο του δυτικού αετώματος (Εικ. 2.10) και σε



Εικ. 2.10: Ενισχύσεις με συνδέσμους γείσου του Παρθενώνα⁸⁷.

⁸⁶ Miles 1989.

⁸⁷ Από Κορρές 1994γ, άνω εικ., σελ. 110.

ένα (τελικώς μη τοποθετημένο στο κτήριο) υποδόκιο. Στα Προπύλαια, σ' ένα σπόνδυλο του 6^{ου} δυτικού κίονα και στο δάπεδο υπό το θρανίο της νότιας πτέρυγας. Στον ναό του Επικούριου Απόλλωνα, στον πρώτο σπόνδυλο του 2^{ου} από Β. κίονα της δυτικής πλευράς και αλλού.

Άλλα μεταλλικά στοιχεία που χρησιμοποιούνταν στα αρχαία κτήρια για τις συνδέσεις λίθων είναι οι παράγομοφοι. Πρόκειται για μικρά ραβδόμορφα προεντεταμένα στοιχεία που έμπαιναν δίπλα στους γόμφους για την ενσφήνωση των λίθων. Οι παράγομοφοι σφηνώνονταν με κτυπήματα σφυριού ανάμεσα σε αβαθή λοξή εντορμία της κάτω στρώσης και στο κάτω μέρος της επιφάνειας ώσεως του λίθου, παρέμεναν χωρίς κάλυψη μόλυβδου και ασκούσαν πίεση στους λίθους προς την κατεύθυνση της τοποθέτησής τους υπηρετώντας τη σφικτή δομή τους. Τα στοιχεία αυτά, όμως, έχουν παρατηρηθεί σε περιορισμένου πλήθους περιπτώσεις.

2.2.7 Σύγχρονοι σύνδεσμοι και γόμφοι από τιτάνιο

Εντός του πλαισίου των πρόσφατων (από τα τέλη της δεκαετίας του 1970 και μετά) έργων αποκατάστασης αρχαίων μνημείων τα οποία πραγματοποιούνται στην Ελλάδα, οι αρχαίοι σύνδεσμοι ή/και οι αρχαίοι γόμφοι, κατά κανόνα, αντικαθίστανται ή υποκαθίστανται από νέα στοιχεία κατασκευασμένα από τιτάνιο. Ο τύπος τιτανίου που χρησιμοποιείται είναι το τιτάνιο Grade 2 κατά ASTM B265 (για ελάσματα) και B348 (για ράβδους). Πρόκειται για καθαρό τιτάνιο, που παρουσιάζει επαρκή αντοχή και υψηλή ολκιμότητα, οι κυριότερες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του οποίου, σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

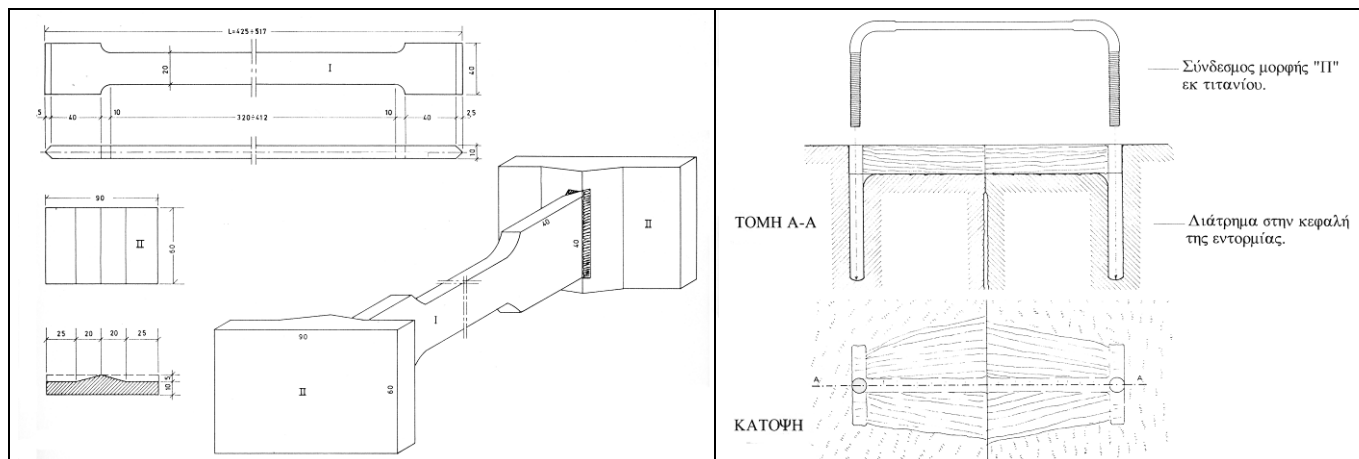
Πυκνότητα (gr/cm ³)	4.51
Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	105000
Λόγος του Poisson	0.32
Συντελεστής Θερμικής Διαστολής (grad ⁻¹)	9·10 ⁻⁶
Ελάχιστη Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	345
Ελάχιστο Όριο Διαρροής (MPa)	275
Ελάχιστη Επιμήκυνση θραύσης (%)	20

Πίν. 2.1: Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες τιτανίου Grade 2.

Τα νέα συνδετήρια στοιχεία από τιτάλιο λόγω του ότι δεν διαθέτουν ιστορική, καλλιτεχνική, οικονομική και οικοδομική αξία, εν αντιθέσει προς τα αρχαία αρχιτεκτονικά μέλη τα οποία συνδέουν, σχεδιάζονται έτσι ώστε σε περίπτωση αστοχίας της σύνδεσης, αυτή να εντοπίζεται στους συνδέσμους χωρίς βλάβη στα αρχαία μέλη.

Οι μορφές των νέων στοιχείων ακολουθούν εν γένει τις μορφές των αρχαίων συνδέσμων και γόμφων. Παρατηρούνται όμως διαφοροποιήσεις οι οποίες απορρέουν από την διαστασιολόγησή τους με βάση τον κανόνα που προαναφέρθηκε, καθώς και από τις ανάγκες αγκύρωσής τους που είναι συνήθως διαφορετικές, λόγω των ποικίλων φθορών που παρουσιάζουν τα αρχαία μέλη διαφόρων μνημείων. Για τους ίδιους λόγους, οι μορφές των νέων στοιχείων δεν είναι τυποποιημένες. Πρώτη φορά που χρησιμοποιήθηκαν σύνδεσμοι και γόμφοι από τιτάλιο ήταν για τις ανάγκες των έργων αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης των Αθηνών. Οι μορφές και οι τυπικές διαστάσεις αυτών των συνδέσμων φαίνονται στις Εικόνες 2.11 και 2.12.

Οι νέοι σύνδεσμοι σχεδιάστηκαν να έχουν μορφή διπλού T, και, στις περιπτώσεις που οι εντορμίες των συνδεόμενων μελών είναι κατεστραμμένες, μορφή Π. Όμως, εντός του πλαισίου των ίδιων έργων προέκυψε η ανάγκη για χρήση και συνδέσμων συνδυασμένης μορφής (Εικ. 2.13), γεγονός ενδεικτικό της ποικιλομορφίας των νέων στοιχείων από τιτάλιο που χρησιμοποιούνται στις αποκαταστάσεις.



Εικ. 2.11: Μορφή και τυπικές διαστάσεις συνδέσμων από τιτάλιο που τοποθετήθηκαν στα επιστύλια της ΒΑ γωνίας του Παρθενώνα⁸⁸.

Εικ. 2.12: Τρόπος τοποθέτησης συνδέσμου μορφής Π σε ζεύγος κατεστραμμένων εντορμιών λιθοπλίνθων του Παρθενώνα⁸⁹.

⁸⁸ Από Ζάμπας 1994, σχ. 7.1, σελ. 156.

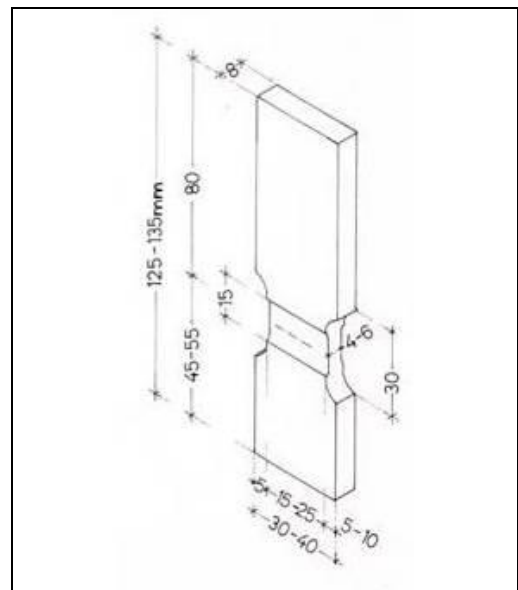
⁸⁹ Από Ζάμπας 1994, σχ. 7.2, σελ. 157.



Εικ. 2.13: Σύνδεσμοι από τιτάνιο διαφόρων μορφών που έχουν κατασκευαστεί για τα μνημεία της Αθηναϊκής Ακρόπολης.

Σημειώνεται ότι στα μνημεία που δεν είναι κατασκευασμένα από μάρμαρο, το συνηθέστερο είναι οι εντορμίες να μην σώζονται σε καλή κατάσταση και, ως εκ τούτου, χρησιμοποιούνται πολύ περισσότερο οι σύνδεσμοι μορφής Π ή σύνδεσμοι συνδυασμένης μορφής που περιλαμβάνουν και κατακόρυφα σκέλη.

Αναφορικά με τους νέους γόμφους, η μορφή τους συνήθως είναι η απλή του πεπλατυσμένου ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου. Όμως και για αυτή την κατηγορία των νέων συνδετήριων, υπάρχουν παραλλαγές, όπως είναι γόμφοι που χρησιμοποιούνται στο έργο αποκατάστασης του ναού του Επικούριου Απόλλωνα, οι οποίοι φέρουν απομείωση στο κεντρικό τμήμα τους, τέτοια ώστε δημιουργείται «λαιμός» με στόχο την συγκέντρωση των τάσεων και την δημιουργία οιονεί πλαστικής άρθρωσης (Εικ. 2.14).



Εικ. 2.14: Μορφή και τυπικές διαστάσεις νέων γόμφων από τιτάνιο του στυλοβάτη στο ναό του Επικούριου Απόλλωνα⁹⁰.

Σημειώνεται επίσης, ότι, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, για την πλήρωση των εντορμιών των νέων συνδετηρίων στοιχείων από τιτάνιο χυτεύονται τσιμεντοκονιάματα (και όχι, όπως στην αρχαιότητα, λιωμένο μολύβι).

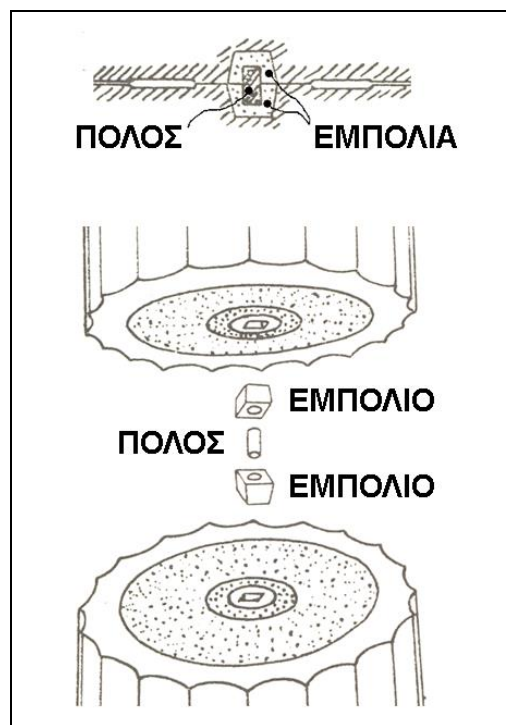
⁹⁰ Από Παπαδόπουλος και Σαββατιανού 2015, εικ. 4.28, σελ. 163.

2.3 Συνδετήρια στοιχεία στις διεπιφάνειες των κίωνων

2.3.1 Οι ξύλινοι πόλοι και εμπόλια

Κατά τους αρχαϊκούς και κλασικούς χρόνους στην Ελλάδα, οι οικοδόμοι τοποθετούσαν στις διεπιφάνειες των μελών (σπονδύλων, κιονόκρανου) των κίωνων ένα κυλινδρικό ξύλινο στοιχείο, τον πόλο, που περνούσε από τον άξονα του κίονα και ένα ζεύγος πρισματικών ξύλινων υποδοχέων, τα εμπόλια, με μορφή το καθένα (συνήθως) κόλλουρης πυραμίδας, τα οποία ήταν τοποθετημένα στο κέντρο των κυκλικών επιφανειών των σπονδύλων (Εικ. 2.15). Αυτή η πρακτική οικοδομικής εφαρμοζόταν σχεδόν απαρέγκλιτα, και αποσκοπούσε στην ακρίβεια της τοποθέτησης των σπονδύλων (του ενός πάνω στον άλλο, χωρίς εκκεντρότητα) κατά την ανέγερση των κίωνων. Εκτός αυτού, το σύστημα πόλου/εμπολίων είχε και άλλη μία κατασκευαστική χρησιμότητα: Διευκόλυνε την διαδικασία λείανσης των μικροεξαρμάτων στις διεπιφάνειες των κίωνων, η οποία περιλάμβανε πέρασμα χρωστικής ουσίας στην άνω έδρα του κάτω σπονδύλου, εναπόθεση του υπερκείμενου σπονδύλου και αμέσως μετά ανασήκωμά του και λείανση των σημείων στην κάτω έδρα του (ή/και στην άνω έδρα του υποκείμενου σπονδύλου) όπου υποδείκνυε η χρωστική ουσία ότι υπάρχουν ανωμαλίες, και εκ νέου εναπόθεση του σπονδύλου. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβανόταν όσες φορές κρινόταν αναγκαίο και, έτσι, ο πόλος αποτελούσε χρησιμότατο οδηγό τοποθέτησης του άνω σπονδύλου επί του κάτω⁹¹.

Οι διαστάσεις των αρχαίων πόλων που έχουν διατηρηθεί και καταγραφεί⁹² είναι από 27 mm έως και λίγο παραπάνω από 50 mm για την διάμετρο τους, και από 67 mm έως 120 mm για το ύψος τους, ενώ ο λόγος ύψους προς διάμετρο είναι συνήθως περίπου 2. Το ύψος των



Εικ. 2.15: Παρουσίαση σε σκαρίφημα του συστήματος πόλος/ζεύγος εμπολίων για τη σύνδεση μελών αρχαίων κίωνων.

⁹¹ Κατά ορισμένους παλαιότερους μελετητές, μάλιστα, κατά την τελική εναπόθεση του υπερκείμενου σπονδύλου, οι αρχαίοι οικοδόμοι περιστρέφανε τον σπόνδυλο αυτό σε σχέση με τον υποκείμενό του κατά λίγες μοίρες, με στόχο την οριστική λείανση της διεπιφάνειας και την επίτευξη σχεδόν τέλει επαφής. Όμως η θεωρία αυτή έχει και αρνητές, ενώ μακροχρόνια σχετική έρευνα από τον καθ. Μ. Κορρέ δεν έδωσε ευρήματα που να την αποδεικνύουν (Κορρές 1993, σελ. 108)

⁹² Ορλάνδος 1959-60, σελ. 192-195.

πρισματικών εμπολίων που έχουν αποτυπωθεί κυμαίνεται μεταξύ 47 mm και 78 mm, ενώ η ακμή της περίπου τετράγωνης μεγάλης βάσης τους (που φέρει την κοιλότητα εισχώρησης του πόλου) κυμαίνεται μεταξύ 63 mm και 135 mm. Οι μικρότερες διαστάσεις έχουν καταγραφεί σε πόλους και εμπόλια που έχουν διατηρηθεί στο ναό του Ποσειδώνα στο Σούνιο, ενώ οι μεγαλύτερες στους πόλους και τα εμπόλια των μνημείων στην Ακρόπολη των Αθηνών (Εικ. 2.16).



Εικ. 2.16: Αρχαίοι πόλοι και εμπόλια από τα μνημεία της Αθηναϊκής Ακρόπολης.

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι οι αρχαίοι πόλοι και εμπόλια κατασκευάζονταν από διαφορετικό είδος ξύλου. Από τις έως σήμερα σχετικές αναλύσεις⁹³ προκύπτει ότι οι πόλοι κατασκευάζονταν από πλατύφυλλα δένδρα, ενώ τα εμπόλια από κωνοφόρα, δηλαδή οι μεν πρώτοι από «σκληρό ξύλο», όπως συχνά χαρακτηρίζεται στη σύγχρονη οικοδομική η ξυλεία των πλατύφυλλων, τα δε δεύτερα από «μαλακό ξύλο».

Εντύπωση προκαλεί, επίσης, και η μέριμνα που ελάμβαναν οι κατασκευαστές ώστε αφενός οι πόλοι να προέρχονται πάντοτε κεντρικά από κορμό (ή μεγάλο κλάδο) με τέτοιο τρόπο ώστε ο κύριος άξονάς τους να περνά από το κέντρο των αυξητικών δακτυλίων (δηλαδή να ταυτίζονται, πρακτικά, άξονας πόλου και εντεριώνη), και αφετέρου τα εμπόλια να αποκόβονται χωρίς εξαίρεση από κορμό μεγάλης ηλικίας δένδρου, έτσι ώστε να είναι μακριά

⁹³ Τα αποτελέσματα αυτών των ολίγων, σχετικά, αναλύσεων αναφέρονται στη δημοσίευση Καρακίτσου και Κοντέας 2013, σελ. 12, ενώ γενικά για τα είδη των ξύλων που χρησιμοποιούσαν οι αρχαίοι Έλληνες οικοδόμοι βλ. Ορλάνδος 55-56, σελ. 6-36.

από την εντεριώνη, οι ίνες να είναι προσανατολισμένες σε ένα από τους δύο οριζόντιους άξονές τους και να μην εμπεριέχουν ρόζους.

Δεδομένου ότι οι πόλοι και τα εμπόλια παρέμειναν στη θέση τους μετά την ανέγερση των κίωνων, αποτελούσαν ένα σχετικά εύκαμπτο, χαμηλής αντοχής, σύστημα σύνδεσης των σπονδύλων. Υπό συνήθη φορτία το σύστημα αυτό παρέμενε ανενεργό, και επιστρατευόταν (συμπληρωματικά προς τους δεσμούς τριβής στις διεπιφάνειες) όταν δυναμικά φορτία είχαν ως αποτέλεσμα σχετικές μετατοπίσεις στα μέλη των κίωνων. Όταν συνέβαινε αυτό, λόγω του τρόπου κατασκευής τους, όλα τα μέρη της σύνδεσης ανέπτυσαν την μέγιστη αντοχή που μπορούσαν να διαθέτουν, ανάλογα με το ξύλο από το οποίο προήλθαν. Πιο συγκεκριμένα, ο πόλος μπορούσε να αναπτύξει την μέγιστη διατμητική αντοχή, ενώ τα εμπόλια την μέγιστη δυσκαμψία κατά την αντίστασή τους στη διατμητική παραμόρφωση του πόλου.

Πειράματα διάτμησης σε ξύλινα κυλινδρικά δοκίμια που απομιμούνταν αρχαίους ξύλινους πόλους⁹⁴, καθώς και διερεύνηση της πλούσιας βιβλιογραφίας περί των αντοχών της σύγχρονης δομικής ξυλείας έχουν οδηγήσει στην εκτίμηση ότι οι αρχαίοι πόλοι με διάμετρο από 40 mm έως 50 mm, μπορούσαν να αναπτύξουν μέγιστη φέρουσα ικανότητα έναντι τέμνουσας από 23 έως 36 kN⁹⁵.

Ενδιαφέρον, επίσης, έχει ότι πόλοι με τις προαναφερθείσες τιμές διαμέτρων έχουν διατηρηθεί (ή έχει εκτιμηθεί ότι είχαν τοποθετηθεί) σε κίονες μνημείων πολύ διαφορετικών μεγεθών, όπως είναι ο Παρθενώνας (με ύψος και βάρος τυπικού κίονα περίστασης 10.44 m και περίπου 60 t, αντίστοιχα) και ο ναός του Επικούριου Απόλλωνα (με ύψος και βάρος τυπικού κίονα στο περιστύλιό του ίσο με 15.97 m και 13 t, αντίστοιχα), όταν οι μεταλλικοί σύνδεσμοι είναι διαφορετικού μεγέθους, ανάλογα με τον όγκο κάθε κτηρίου.

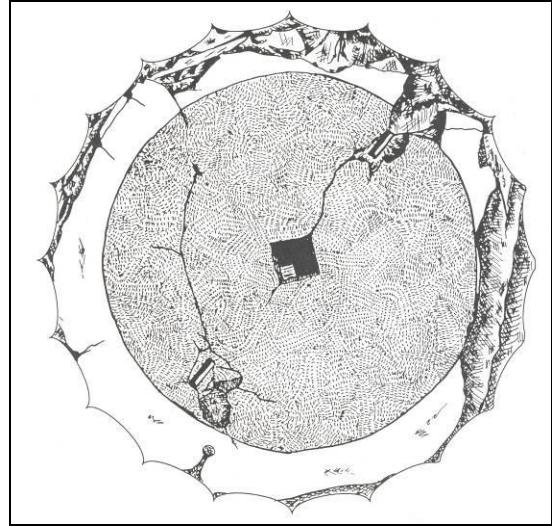
Η τελευταία παρατήρηση οδηγεί στην εκτίμηση ότι οι αρχαίοι ναοδόμοι, παρόλο που ήξεραν ότι τα ξύλινα στοιχεία που τοποθετούσαν στις διεπιφάνειες των κίωνων θα αντιστέκονταν και αυτά στις επιβαλλόμενες σχετικές παραμορφώσεις των μελών των κίωνων κατά την διάρκεια ισχυρών σεισμικών διεγέρσεων (για αυτό και φρόντιζαν να διαθέτουν την μέγιστη δυνατή σχετική αντίσταση), τα τοποθετούσαν με μόνο κύριο σκοπό την διευκόλυνσή τους κατά την ανέγερση των κίωνων, και όχι ως συνδετήρια στοιχεία. Για αυτό, τα εν λόγω στοιχεία δεν ήταν μεταλλικά και συνήθως δεν παρουσιάζουν διαβαθμισμένες διαστάσεις ανάλογα με τα μεγέθη των κίωνων στους οποίους έχουν τοποθετηθεί.

⁹⁴ Papadopoulos and Vintzileou 2013, 2016.

⁹⁵ Όπως προηγούμενη σημείωση.

2.3.2 Οι σιδερένιοι γόμφοι

Προς τα τέλη της κλασικής περιόδου και κατά την διάρκεια της ελληνοιστικής, στις διεπιφάνειες των κίωνων των μνημειακών κτηρίων, οι αρχαίοι κατασκευαστές τοποθετούσαν εκτός από τα ξύλινα στοιχεία (πόλο και ζεύγος εμπολίων) στο κέντρο των εδρών επαφής, και δύο ή τέσσερις σιδερένιους γόμφους, οι θέσεις των οποίων ήταν αντιδιαμετρικές ή σε σχήμα σταυρού, αντίστοιχα, και, σχετικώς, κοντά στην περιφέρεια των διεπιφανειών (Εικ. 2.17). Οι γόμφοι ήταν μολυβδοχορηγμένοι, και αποσκοπούσαν στην σύνδεση των σπονδύλων μεταξύ τους. Η εξέλιξη της αρχιτεκτονικής σε εκείνους τους χρόνους (που είχε ως αποτέλεσμα, μεταξύ άλλων, την ανέγερση κίωνων ραδιότερων), έκανε τους οικοδόμους να θεωρήσουν ότι οι κίονες που κατασκευάζουν είναι πιο τρωτοί στις παραμορφώσεις λόγω σεισμικών δράσεων (ή γενικότερα είχαν μικρότερη αντισεισμική ικανότητα) από αυτούς που κατασκευάζονταν μέχρι τότε. Αυτό τους οδήγησε να λαμβάνουν μέριμνα για την σύνδεση των μελών (σπονδύλων και κιονόκρανου) των κίωνων.



Εικ. 2.17: Άνω έδρα σπονδύλου προερχόμενου από κίονα του ναού της Αλέας Αθηνάς στην Τεγέα⁹⁶.

Τέτοιοι γόμφοι δεν έχουν διατηρηθεί σε αρκετά μνημεία, η ύπαρξή τους όμως υποδηλώνεται από τις χαρακτηριστικές εντομιές στις έδρες των σπονδύλων των κίωνων αρκετών ελληνοιστικών κτηρίων, όπως στον ναό της Αλέας Αθηνάς στην Τεγέα (Εικ. 2.17), στο Πρότυλο του Τελετουργικού Εστιατορίου στο Ασκληπιείο της Επιδαύρου, και αλλού. Δύο σημαντικές εξαιρέσεις σε αυτόν τον κανόνα αποτελούν οι δύο χορηγικοί κίονες που βρίσκονται στη νότια κλιτύ της Αθηναϊκής Ακρόπολης, όπου γόμφοι διατηρούνται σε κάθε διεπιφάνειά τους. Η οξείδωση ορισμένων από αυτούς τους γόμφους μάλιστα, έχει οδηγήσει και στην αποκάλυψη των αυλάκων μολυβδοχόησής τους (2.18).



Εικ. 2.18: Γόμφος σε διεπιφάνεια του Α. χορηγικού κίονα στη νότια κλιτύ⁹⁷.

⁹⁶ Από Pakkanen 1998, fig. 21, p. 60.

⁹⁷ Από Ζάμπας κ.α. 2011, εικ. 83.

2.3.3 Οι μπρούτζινοι πόλοι και εμπόλια των κίωνων της Στοάς του Φίλωνος

Μια μάλλον ξεχωριστή και εξόχως ενδιαφέρουσα περίπτωση παρουσιάζουν οι μπρούτζινοι πόλοι και τα μπρούτζινα εμπόλια που ήταν τοποθετημένοι/να στους κίονες της εμπρόσθιας στοάς (προστώο) του Τελεστηρίου στο αρχαίο ιερό της Ελευσίνας. Η στοά αυτή ανεγέρθηκε μεταξύ 330 και 310 π.Χ., ως πρόσκτισμα στην πρόσοψη του προϋπάρχοντος Τελεστηρίου του 5^{ου} αιώνα π.Χ. Αρχιτέκτονας της ήταν ο Ελευσίνιος Φίλων, όπως μας πληροφορεί ο Ρωμαίος αρχιτέκτων/συγγραφέας Βιτρούβιος⁹⁸. Τα συνδετήρια στοιχεία δεν έχουν διατηρηθεί. Όμως, γνωρίζουμε για αυτά από μία αρχαία ενεπίγραφη στήλη που ανακαλύφθηκε το 1894, από τον Δημήτριο Φίλιο, κατά την πρώτη ανασκαφή στην Ελευσίνα⁹⁹. Στην επιγραφή αυτή περιγράφονται λεπτομερώς οι προδιαγραφές των μπρούτζινων στοιχείων (σύνθεση υλικού, αναλογία χαλκού/κασσίτερου, προέλευση υλικού, μορφή και εξωτερικές διαστάσεις στοιχείων, ακριβείς θέσεις, ποιότητα και τρόπος διαμόρφωσης -για τους πόλους, μάλιστα, σύμφωνα με δείγμα¹⁰⁰), βάσει των οποίων εικάζεται ευλόγως ότι κατασκευάστηκαν οι πόλοι και τα εμπόλια για τους κίονες του προστώου του Τελεστηρίου.

Το περιεχόμενο της επιγραφής εντυπωσιάζει για πολλούς λόγους¹⁰¹. Ξεχωρίζει, σε κάθε περίπτωση, από την σκοπιά του Πολιτικού Μηχανικού, το ότι οι πόλοι και τα εμπόλια θα κατασκευάζονταν μπρούτζινοι και με διαστάσεις σταδιακά μειούμενες από τις κατώτερες προς τις ανώτερες περιοχές¹⁰². Αμφότερες οι επιλογές αυτές δε συνάδουν με την επικρατούσα σχετική οικοδομική πρακτική κατά την προηγούμενη (κλασική) περίοδο. Φαίνεται, λοιπόν, ότι ο Φίλων, σχεδιάζοντας τους κίονες σύμφωνα με το αρχιτεκτονικό ύφος του καιρού του,

⁹⁸ Βιτρούβιος 7.προιμ.17 (Λέφας 1998, том. 2, σελ. 85).

⁹⁹ Η στήλη αυτή εκτίθεται στο αρχαιολογικό μουσείο της Ελευσίνας, ενώ η επιγραφή της έχει την κωδική ονομασία IG II² 1675.

¹⁰⁰ Το μεγαλύτερο μέρος της επιγραφής έχει ως εξής: «θεο[ί]. εἰς τὸ ἱερὸν Ἐλευσινάδε τοῖς σφονδύλοις τῶν κίωνων τοῦ προστώου εἰς τοὺς ἄρμους πόλους ποῆσαι καὶ εμπόλια χαλκῶ, δύο εἰς ἕκαστον τὸν ἄρμον εμπόλια καὶ ἓνα πόλον, τὰ μὲν κάτω τὰ πρῶτα ἐγδάκτυλα πανταχῆ τετράγωνα, τὰ δὲ ἀνωτάτω πεντεδάκτυλα πανταχῆ, τὰ δὲ ἄλλα ἀμειβόμενα τὸ ἴσον ἀπὸ τοῦ μεγίστου εἰς τὸ ἐλάχιστον· τοὺς δὲ πόλους στρογγύλους τοῦ<ς> μὲν κάτω μῆκος πεντεδακτύλους, πάχος δὲ διδακτύλους, τοὺς δὲ ἄνω μῆκος μὲν παλαστιαίους, πάχος δὲ δακτύλου καὶ ἡμίσεος δακτύλου τοὺς δὲ ἄλλους ἀμειβομένους τῶι μῆκει καὶ τῶι πάχει τὸ ἴσον ἀπὸ τοῦ μεγίστου εἰς τὸν ἐλάχιστον· χαλκοῦ δὲ ἐργάσεται Μαριέως κεκραμένου τὴν δωδεκάτην, τὰ ἕνδεκα μέρη χαλκοῦ, τὸ δὲ δωδέκα τον καπιτέρον· καὶ ἀποδώσει τὰ μὲν εμπόλια ὀρθὰ καὶ ἀστραφῆ καὶ εὐγώνια τοὺς δὲ πόλους торνεύσει στρογγύλους πρὸς τὸ παράδειγμα καὶ ἐναρμόσει εἰς τὰ εμπόλια ἄρμόττοντας καὶ ὀρθοῦς καὶ ἐντόρνους πανταχῆ ὅπως ἂν τὸ αὐτὸ ποιῶσιν περιαγόμενοι».

¹⁰¹ Βλέπε σχετικά Βαρουφάκης 1996, καθώς και ιστοσελίδα Ελληνικού Οργανισμού Τυποποίησης, (<http://www.elot.gr>) όπου η επιγραφή χαρακτηρίζεται ως το πρώτο Ευρωπαϊκό Πρότυπο.

¹⁰² Ακμή κυβικών εμπολίων, στον κατώτατο αρμό: 6 δάκτυλοι (περί τα 11.3 cm)· στον ανώτατο αρμό: 5 δάκτυλοι (περί τα 9.4 cm)· στους ενδιάμεσους αρμούς: με γραμμική παρεμβολή, αναλόγως της θέσης. Διαστάσεις κυλινδρικών πόλων, κατώτατων: ύψος 5 δάκτυλοι (περί τα 9.4 cm), διάμετρος 2 δάκτυλοι (περί τα 3.8 cm)· ανώτατων: ύψος 4 δάκτυλοι (περί τα 7.5 cm), διάμετρος 1.5 δάκτυλοι (περί τα 2.8 cm)· ενδιάμεσων: με γραμμική παρεμβολή, αναλόγως της θέσης (βλ. και *υποσημ. 100*).

τους κάνει πιο ραδινούς (με λόγο ύψους προς διάμετρο βάσης ίσο περίπου με 5.9^{103}) από τους κίονες των μνημειακών κτηρίων των προηγούμενων εποχών¹⁰⁴, και, κατά συνέπεια κρίνει ότι πρέπει να τους ενισχύσει έναντι δυναμικών και πιο συγκεκριμένα σεισμικών δράσεων. Έτσι, επιλέγει τα συνδετήρια στοιχεία στις διεπιφάνειες των μελών τους να είναι μεταλλικά (και όχι ξύλινα), για να μπορούν να αναπτύξουν μεγάλη διατμητική αντοχή και άρα σε περίπτωση ισχυρού σεισμού να περιοριστούν οι σχετικές ολισθήσεις των μελών του κίονων.

Κατά συνέπεια, ο Φίλων έκανε μια συνειδητή επιλογή με βάση την αντισεισμική προστασία της κατασκευής. Ταυτόχρονα, για να συγκρατήσει κάπως το πολύ αυξημένο κόστος κατασκευής των μπρούτζινων πόλων και εμπολίων (έναντι του κόστους ξύλινων), επιλέγει το μέγεθός τους να μικραίνει από τις κατώτερες θέσεις προς τις ανώτερες. Όμως και η δεύτερη επιλογή του βασίζεται στην κρίση του ως *αρχιτέκτονα*¹⁰⁵, μια που φαίνεται ότι ο Φίλων πίστευε ότι οι δράσεις που θα εφαρμοστούν στα χαμηλότερα συνδετήρια θα είναι μεγαλύτερες από αυτές που θα καταπονήσουν τα υψηλότερα¹⁰⁶.

Το ότι τα προαναφερθέντα οφείλονται σε συνειδητό αντισεισμικό σχεδιασμό των συνδετηρίων στοιχείων των κίονων (και όχι σε μία αναίτια και πολύ σπάταλη «επιθυμία» του Φίλωνος) επιβεβαιώνεται από το γεγονός ότι μπρούτζινα στοιχεία τοποθετήθηκαν για να συνδεθούν και οι κατώτατοι σπόνδυλοι των κίονων με τους βατήρες τους εκεί, δηλαδή, που δεν ήταν αναγκαίοι για κατασκευαστικούς λόγους (για αυτό στα αντίστοιχα κτήρια που κατασκευάζονταν την κλασική εποχή δεν τοποθετούνταν).

Πάντως, η επιλογή του Φίλωνος μάλλον πρέπει να χαρακτηριστεί ως μία «ενδιάμεση» τεχνική λύση, αφού στην περίοδο που ακολούθησε, οπότε κατασκευάζονταν ραδινότεροι κίονες, η πρακτική που επικράτησε ήταν να τοποθετούνται ξύλινοι πόλοι και εμπόλια από κοινού με μολυβδοχομημένους σιδερένιους γόμφους στις διεπιφάνειες των κίονων (όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο), λύση που καθιστούσε τη σύνδεση των μελών των κίονων ισχυρότερη (κάτι που θεωρείτο αναγκαίο γιατί οι κίονες ήταν ραδινότεροι) με μικρότερο οικονομικό κόστος.

¹⁰³ Gruben 2000, σελ. 13.

¹⁰⁴ Βλέπε σχετικά και *υποκεφάλαιο 1.3*, σελ. 21.

¹⁰⁵ Ο όρος στην αρχαία εποχή σήμαινε (μεταξύ άλλων) και *μηχανικός* (βλ. Ματθαίου 2016, σελ. 99).

¹⁰⁶ Η εκτίμηση αυτή είναι εύλογη και εν γένει ορθή (βλέπε σχετικά και *κεφάλαιο 6*). Πάντως, παλαιότερη έρευνα έχει αναδείξει ότι στην περίπτωση που ένας αρχαίος κίονας διεγερθεί από ισχυρό μακροπερίοδο σεισμό είναι πιθανό να αστοχήσουν πόλοι περί το μέσο του κορμού του κίονα χωρίς να αστοχήσουν οι υποκείμενοι αυτόν (Papadopoulos and Vintzileou 2016, pp.758-760).

2.3.4 Σύγχρονοι πόλοι και εμπόλια

Οι νέοι πόλοι και εμπόλια που χρησιμοποιούνται στα διάφορα σύγχρονα έργα αποκατάστασης αρχαίων μνημείων στην Ελλάδα, είναι, κατά κανόνα, από τιτάνιο και η μορφή τους ποικίλλει στα διάφορα έργα. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, ακολουθούν αρκετά πιστά τα αντίστοιχα αρχαία στοιχεία. Η διατομή των νέων πόνων, σχεδόν απαρέγκλιτα, έχει προκύψει βάσει του κανόνα σχεδιασμού ότι οι νέοι πόλοι να διαθέτουν φέρουσα ικανότητα έναντι τέμνουσας περίπου ίση ή λίγο μικρότερη από εκείνην που διέθεταν οι αρχαίοι ξύλινοι πόλοι. Ενδιαφέρον έχει ότι σε αρκετά μνημεία έχουν τοποθετηθεί πόλοι σωληνωτής μορφής, όπως στον Παρθενώνα και στον ναό του Διός στην Ολυμπία, ενώ υπάρχουν και ολίγες περιπτώσεις κατά τις οποίες οι νέοι πόλοι είναι συμπαγείς κύλινδροι (όπως οι αρχαίοι ξύλινοι, μικρότερης φυσικά διαμέτρου), όπως στο παλάτι του Φιλίππου στις Αιγές.

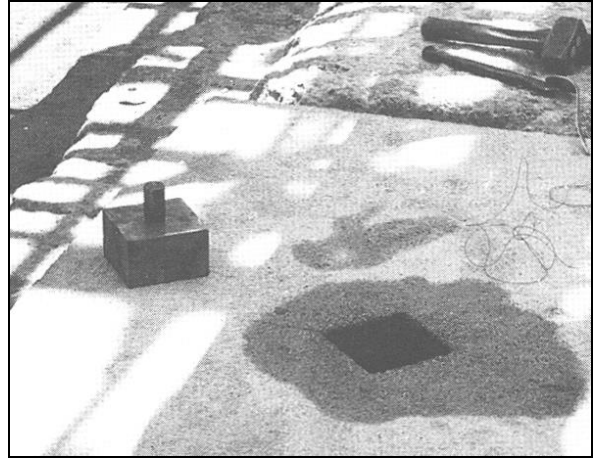
Είναι άξιο αναφοράς, επίσης, ότι η χρήση μεταλλικών πόνων και εμπολίων στα έργα αποκατάστασης αρχαίων μνημείων έχει υποστεί κριτική από διάφορους μελετητές οι οποίοι σε άρθρα τους έχουν διατυπώσει την εκτίμηση ότι μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της αντισεισμικής ικανότητας των κίωνων, μια που η δύσκαμτη σύνδεση σπονδύλων οδηγεί σε μονολιθική συμπεριφορά του κίονα¹⁰⁷. Ο αντίλογος αυτών που έχουν σχεδιάσει τα νέα στοιχεία στηρίζεται στο ότι θεωρείται ότι η νέα μορφή των νέων πόνων, η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι συμπαγής κύλινδρος, προσδίδει στη σύνδεση παραμορφωσιμότητα η οποία επιτρέπει, εντός ορισμένων ορίων, διαφορετικές μετακινήσεις σε γειτονικών σπονδύλους. Το πιο πρόσφατο σχετικό παράδειγμα αφορά τους νέους πόνους και εμπόλια από τιτάνιο που τοποθετήθηκαν στο ναό του Επικούριου Απόλλωνα (Εικ. 2.19).



Εικ. 2.19: Πόλος και εμπόλιο από τιτάνιο, λίγο πριν (αριστερά) και κατά την τοποθέτησή του σε κίονα της περιστάσης του ναού του Επικούριου Απόλλωνα.

¹⁰⁷ Βλέπε σχετικά και κεφάλαιο 3, σελ. 76-77.

Σε λίγες περιπτώσεις έχουν κατασκευαστεί και τοποθετηθεί σε αρχαία μνημεία πόλοι και εμπόλια από ορείχαλκο. Αυτές οι περιπτώσεις αφορούν την αναστήλωση της στοάς στη Βραυρώνα, καθώς και την αναστήλωση της ελληνιστικής στοάς στο αρχαίο ιερό της Αθηνάς στη Λύνδο της Ρόδου (Εικ. 2.20). Στην δεύτερη περίπτωση, η διάμετρος του πόλου επιλέχθηκε ίση με 14 mm, ενώ για την «διευκόλυνση» της σχετικής ολίσθησης των συνδεόμενων σπονδύλων, τα εμπόλια τοποθετήθηκαν σε κατακόρυφη απόσταση, μεταξύ τους, ίση με 10 mm. Στην περίπτωση του μνημείου στην Ρόδο, είναι αξιοσημείωτο ότι τοποθετήθηκαν στοιχεία από ορείχαλκο, παρά το γεγονός ότι υπήρχαν φόβοι για πιθανό χρωματισμό των σπονδύλων από τα (γαλάζιου χρώματος) προϊόντα διάβρωσης του χαλκού. Αυτό συνέβη διότι κρίθηκε από τους υπεύθυνους πιο σημαντικό να έχουν τα νέα συνδετήρια στοιχεία των σπονδύλων σημαντική παραμορφωσιμότητα, από τον κίνδυνο «λεκιάσματος» των σπονδύλων, έναντι του οποίου έλαβαν κατάλληλα μέτρα.



Εικ. 2.20: Ορειχάλκινος πόλος και εμπόλιο πριν από την τοποθέτησή τους σε βαθύρα της ελληνιστικής στοάς της Λίνδου¹⁰⁸.

¹⁰⁸ Από Ελευθερίου κ.α. 2002, εικ. 122, σελ. 169.

3. Η ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΡΧΑΙΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ – ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗΝ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

3.1 Γενικά

Τα μνημειακά κτήρια της αρχαιότητας που σώζονται έως σήμερα, ευρίσκονται, σχεδόν όλα, σε ερειπιώδη μορφή. Από αυτά τα μνημεία, ο κανόνας (πλην ελαχίστων εξαιρέσεων) είναι να διατηρούνται ιστάμενοι μόνον ολίγοι μεμονωμένοι κίονες τους ή μικρός αριθμός κίωνων μαζί με τις λίθινες δοκούς τους (επιστύλια)¹⁰⁹. Σε ορισμένες περιπτώσεις σώζονται και ολίγοι λίθοι ζωφόρου επί των επιστυλίων (Εικ. 3.1).



Εικ. 3.1: Τα ιστάμενα τμήματα του υστεροκλασικού ναού του Διός στην Νεμέα..

Οι αρχαίοι κίονες είναι σπανίως μονολιθικοί. Συνήθως, αποτελούνται από μεγαλύτερο ή μικρότερο πλήθος λίθινων κολουροκωνικών στοιχείων (τους σπονδύλους) και από μία λίθινη πεπλατυσμένη κεφαλή (το κιονόκρανο). Όλα τα λίθινα μέλη των κίωνων είναι καταλλήλως

λαξευμένα και συναρμολογημένα χωρίς την παρεμβολή συνδετικού κονιάματος. Έτσι, έχουν συνήθως πολύ καλή συναρμογή στις διεπεφάνειές τους, ενίοτε δε και σχεδόν τέλεια επαφή.

Οι κίονες των κλασικών χρόνων κατά κανόνα διέθεταν ως σύνδεση μεταξύ των διαδοχικών μελών τους μόνον ξύλινα στοιχεία (έναν πόλο και δύο εμπόλια). Υπάρχουν, παρά ταύτα, και περιπτώσεις (κυρίως προς τα τέλη της κλασικής περιόδου και ύστερα από αυτήν) κατά τις οποίες επί πλέον του πόλου και των εμπολίων, διατάσσονταν στις διεπιφάνειες των

¹⁰⁹ Στην αρχαιότητα το επιστύλιο αποτελούσαν, συνήθως, δύο λίθοι σε κάθε μεταξόνιο διάστημα, σπανίως ένας ή τρεις.

λίθων και δύο έως τέσσερις μεταλλικοί γόμφοι (διατμητικοί σύνδεσμοι)¹¹⁰. Σήμερα αυτά τα συνδετήρια στοιχεία δεν σώζονται, παρά μόνο σε πολύ λίγες από τις διατηρούμενες αρχαίες κατασκευές: Οι μεν πόλοι/εμπόλια διότι αποσυντέθηκαν στο πέρασμα των αιώνων, οι δε γόμφοι διότι σε κάποια ιστορική στιγμή εκλάπησαν από λαφυραγωγούς.

Οι αρχαίοι κίονες εδράζονται, χωρίς καμία σύνδεση, επί βάσης, απαρτιζόμενης από ισχυρά λίθινα πρισματικά στοιχεία, σε δύο ή τρεις στρώσεις (δίβαθμη ή τρίβαθμη κρηπίδα). Κάτω από την κρηπίδα υπάρχει η θεμελίωση, η οποία συνήθως αποτελείται και αυτή από καλοσυναρμοσμένους λίθους σε στρώσεις. Ομοίως, πάνω στους κίονες εδράζονται, σε απλή επαφή, λίθινες ισχυρές δοκοί (τα επιστύλια), κατασκευασμένες από το ίδιο υλικό με τους κίονες. Οι λίθοι της στρώσης του επιστυλίου συνδέονταν μεταξύ τους με μεταλλικά στοιχεία, τα οποία όμως και αυτά στις περισσότερες περιπτώσεις δεν έχουν διατηρηθεί.

Έτσι, η δομή των αρχαίων μνημείων που διατηρούνται έως σήμερα είναι μάλλον απλή: (α) Μεμονωμένοι στύλοι απαρτιζόμενοι από ισχυρά λίθινα τεμάχια, τα οποία είναι σε απλή επαφή μεταξύ τους και έχουν σχεδόν οριζόντιους αρμούς. Οι στύλοι αυτοί εδράζονται, χωρίς σύνδεση, σε δύσκαμπτη βάση. Και (β) επίπεδα πλαίσια εν σειρά, αποτελούμενα από τους προαναφερθέντες στύλους, οι οποίοι εδράζονται σε δύσκαμπτη βάση και φέρουν, ανά δύο, σχεδόν οριζόντια, ισχυρά, λίθινα τεμάχια.

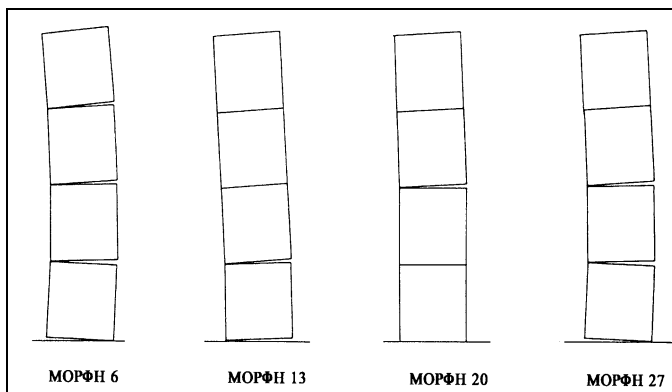
Την επάρκεια του δομικού συστήματος των αρχαίων μνημείων υπό στατικές συνθήκες εξασφαλίζουν οι μεγάλες διατομές των λίθινων μελών τους και τα σχετικώς μικρά ανοίγματα των καμπτόμενων δοκών τους. Επομένως, οι αναπτυσσόμενες τάσεις λειτουργίας είναι εν γένει μικρές, πολύ μικρότερες από τις αντοχές των λίθων. Τούτο, βεβαίως, ισχύει υπό την προϋπόθεση ότι το οικοδόμημα δεν έχει υποστεί σημαντικές παραμορφώσεις (π.χ. από υποχώρηση της θεμελίωσης).

Σε αντίθεση με την απλότητα του στατικού συστήματός τους έναντι συνήθων δράσεων, τα αρχαία μνημεία αποκρίνονται σε δυναμικές φορτίσεις με πολύπλοκο και έντονα μη-γραμμικό τρόπο, στον οποίο κυριαρχεί ο λικνισμός ή/και σχετικές ολισθήσεις των λίθινων μελών τους. Για να εκδηλωθεί αυτός ο τρόπος συμπεριφοράς, πάντως, απαιτείται έντονη εδαφική κίνηση. Πράγματι, όταν αρχαίοι κίονες ή κionoστοιχίες διεγείρονται από μικροδονήσεις τότε συμπεριφέρονται οιονεί ελαστικά ως πρόβολοι και η ταλάντωσή τους απέχει κατά πολύ από την μη-γραμμική ταλάντωση λόγω λικνισμού, η οποία ενδέχεται να επηρεάσει την ευστάθειά τους.

¹¹⁰ Βλ. σχετικά και προηγούμενο κεφάλαιο.

Όταν όμως ένας πολυσπόνδυλος κίονας, μεμονωμένος ή στοιχείο κιονοστοιχίας, αποκρίνεται σε ισχυρές σεισμικές διεγέρσεις τότε παρουσιάζονται σχετικές ολισθήσεις και περιστροφές ή λικνισμός των λίθινων μελών του (σπονδύλων και κionoκράνου). Αυτές οι μετακινήσεις μπορεί να εκδηλώνονται ξεχωριστά σε κάθε μέλος ή σε ομάδες μελών. Παρόμοια λικνιστική συμπεριφορά, με ολισθήσεις και στροφές, χαρακτηρίζει και μια κιονοστοιχία με επιστύλια. Μετά το τέλος της σεισμικής δόνησης, και εφόσον δεν έχει επέλθει μερική ή ολική ανατροπή του κίονα ή της κιονοστοιχίας, η τριβή κατά μήκος των επιφανειών των λίθων που ολισθαίνουν και οι κρούσεις στους λικνιζόμενους λίθους¹¹¹ συνεχίζουν να καταναλώνουν την κινητική ενέργεια του συστήματος, έως ότου αυτό να επανέλθει σε κατάσταση ηρεμίας. Έτσι, κατά κανόνα μετά από έναν ισχυρό σεισμό οι λίθοι ευρίσκονται σε θέσεις διαφορετικές από αυτές που είχαν πριν την εκδήλωση του φαινομένου (υπάρχουν, δηλαδή, παραμένουσες ολισθήσεις και στροφές).

Αυτός ο μηχανισμός δυναμικής απόκρισης προσδίδει στα αρχαία μνημεία σημαντική ασφάλεια έναντι σεισμικών δράσεων. Όμως η αναλυτική περιγραφή και μελέτη του είναι εξαιρετικά δύσκολη ακόμα και όταν αφορά ένα μεμονωμένο κίονα. Τούτο οφείλεται στο γεγονός ότι ένας πολυσπόνδυλος κίονας, όσο διαρκεί η σεισμική διέγερσή του, αλλάζει διαρκώς «μορφή» ταλάντωσης, με διαφορετικό πλήθος ανοικτών αρμών κάθε στιγμή (Εικ. 3.2). Ο αριθμός των δυνατών «μορφών» ταλάντωσης είναι ιδιαίτερα μεγάλος, εκθετικά αυξανόμενος με την



Εικ. 3.2: Τέσσερις από τις σαράντα δυνατές μορφές ταλάντωσης ενός τετράλιθου κίονα¹¹².

αύξηση του πλήθους των σπονδύλων. Έτσι, για τα συνήθη πλήθη σπονδύλων των κλασικών κίωνων, η αναλυτική επίλυση του συστήματος είναι πρακτικώς αδύνατη¹¹³.

Παρά ταύτα, η μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας αποδεικνύει ότι η διεθνής επιστημονική κοινότητα έχει σημειώσει κατά τις τελευταίες δεκαετίες σημαντική πρόοδο στην κατανόηση του φαινομένου της σεισμικής απόκρισης των αρχαίων μνημείων. Σύντομη αναδρομή της βιβλιογραφίας αυτής γίνεται στην παράγραφο που ακολουθεί.

¹¹¹ Θεωρούνται αμελητέες η συνεισφορά των αντιστάσεων και τριβών από τον ατμοσφαιρικό αέρα και η όποια ιξώδης (εσωτερική) απόσβεση του συστήματος.

¹¹² Από Ζάμπας 1994, σχ. 5.26, σελ. 139.

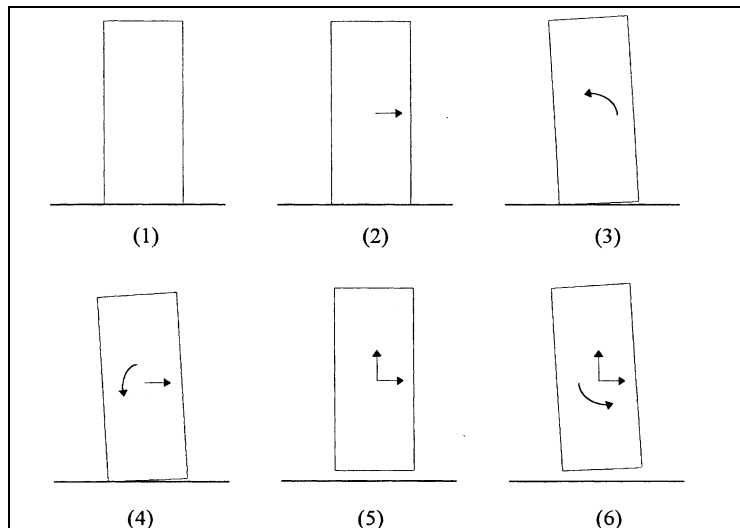
¹¹³ Για ένα οκτάλιθο κίονα της περίπτωσης του ναού του Επικούριου Απόλλωνα οι δυνατές μορφές ταλάντωσης του είναι 3280, ενώ για τους κίονες της περίπτωσης του Παρθενώνα, που αποτελούνται από δώδεκα τεμάχια μαρμάρου, 265720.

3.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Λόγω των δομητικών χαρακτηριστικών των αρχαίων μεμονωμένων κιόνων και κιονοστοιχιών, η απόκριση τους σε σεισμικές δονήσεις (παρότι είναι, όπως προαναφέρθηκε, ιδιαιτέρως πολύπλοκη και μη-γραμμική) διέπεται από τους ίδιους βασικούς κανόνες που διέπουν το φαινόμενο του λικνισμού ενός απολύτως στερεού σώματος. Και για αυτό το λόγο, άλλωστε, η κινηματική του απολύτως στερεού σώματος άρχισε να μελετάται από τους ειδικούς επιστήμονες (μηχανικούς, σεισμολόγους κ.α.) από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα, σχεδόν ταυτόχρονα με την γέννηση της σύγχρονης σεισμολογίας.

Είναι αξιοσημείωτο ότι, ήδη, στις πρώτες σχετικές δημοσιευμένες εργασίες Άγγλοι καθηγητές στην Σχολή Μηχανικής στο Τόκυο της Ιαπωνίας, διατύπωσαν εκτιμήσεις περί των κατώτατων ορίων των επιταχύνσεων και ταχυτήτων που χρειάζεται να διαθέτει ένας παλμός για να ανατρέψει ένα δισδιάστατο ορθογώνιο στερεό σώμα, το οποίο εδράζεται σε άκαμπτη, οριζόντια βάση (Milne 1881 και 1885, Perry 1881).

Αν και στις πρώτες έξι δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα συνεχίστηκαν να δημοσιεύονται σχετικές πρωτοποριακές μελέτες¹¹⁵ (οι περισσότερες Ιαπώνων επιστημόνων), η εργασία που συνόψισε τα μέχρι τότε συμπεράσματα, και ταυτόχρονα εμβάθυνε τη μελέτη του φαινομένου του λικνισμού του απολύτως στερεού σώματος ήταν η εργασία του G. Housner (1963). Σε αυτήν ο Housner μελέτησε την δυναμική απόκριση κατασκευών τύπου ανεστραμμένου εκκρεμούς (όπως αναφέρει), μέσω της δισδιάστατης ανάλυσης της κίνησης ενός απαραμόρφωτου σώματος με ραδινές διαστάσεις¹¹⁶. Το σώμα αυτό λικνίζεται χωρίς να ολισθαίνει επί απολύτως οριζόντιας και απαραμόρφωτης βάσης. Έτσι κατέληξε, μεταξύ άλλων, ότι το φαινόμενο επηρεάζεται από την



Εικ. 3.3: Η κινηματική του στερεού σώματος: (1) ακινησία, (2) ολίσθηση, (3) περιστροφή, (4) περιστροφική ολίσθηση, (5) μεταφορική αναπήδηση και (6) περιστροφική αναπήδηση¹¹⁴.

¹¹⁴ Από Ishiyama 1982, fig. 1, p. 636.

¹¹⁵ Επιγραμματική αναφορά των εργασιών αυτών και συνοπτική περιγραφή των συμπερασμάτων τους υπάρχει στη διατριβή του Κ. Παπαντωνόπουλου (2000, σελ. 2.1-2.2).

¹¹⁶ Δηλαδή το ύψος του να είναι τριπλάσιο (ή παραπάνω από τριπλάσιο) της βάσης του.

κλίμακα. Ότι δηλαδή το μεγαλύτερο από δύο γεωμετρικώς όμοια στερεά σώματα, είναι πιο ευσταθές από το μικρότερο. Επίσης, διατύπωσε και ένα κριτήριο ανατροπής σε σεισμική διέγερση, που δίνει τη στάθμη της φασματικής ταχύτητας για 50% πιθανότητα ανατροπής του σώματος.

Μετά την εργασία του Housner, το μαζικό (και συνεχές έκτοτε) ενδιαφέρον των μελετητών περί της δυναμικής απόκρισης ενός στερεού σώματος, και γενικότερα κατασκευών με παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτά των αρχαίων μνημείων, εκκινεί στη δεκαετία του 1980. Ήταν τότε που το πεδίο έρευνας διευρύνθηκε από τον απλό λικνισμό στην εν γένει κινηματική της επίπεδης κίνησης του στερεού σώματος (Ishiyama 1982) (Εικ. 3.3). Τότε, επίσης, για πρώτη φορά μελετήθηκε λεπτομερώς η συμπεριφορά του στερεού σώματος σε πολύμορφες αρμονικές ταλαντώσεις (Spanos and Koh 1984) καθώς και η επιρροή της ενδοτικότητας της θεμελίωσης (Psycharis and Jennings 1983, Koh et al. 1986).

Άξιο ξεχωριστής αναφοράς, αναφορικά με τις προαναφερθείσες εργασίες, είναι ότι ο Ιάπωνας ερευνητής Y. Ishiyama στηριζόμενος όχι μόνο σε αναλυτικές και αριθμητικές προσεγγίσεις, αλλά και σε αποτελέσματα σχετικής πειραματικής διερεύνησης (σε δοκίμια από πλαστικό και ξύλο, μικρών, πάντως, διαστάσεων) (α) διαπίστωσε ότι για να εκδηλωθεί ανατροπή ενός στερεού σώματος τόσο η οριζόντια επιτάχυνση της βάσης του όσο και η ταχύτητα της βάσης πρέπει να ξεπερνούν συγκεκριμένες τιμές, και (β) διατύπωσε κριτήρια ανατροπής βάσει των οποίων εκτιμώνται τα κατώτατα όρια μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης της (σεισμικής) διέγερσης της βάσης ενός στερεού σώματος, που οδηγούν στην ανατροπή του σώματος.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον από εκείνη την περίοδο έχει, επίσης, η εργασία των C.-S. Yim et al. (1980), η οποία εστίασε στη απόκριση των στερεών σωμάτων σε σεισμικές διεγέρσεις. Η εργασία αυτή ανέδειξε, μεταξύ άλλων, την μεγάλη ευαισθησία του φαινομένου ακόμα και σε μικρές αλλαγές των βασικών παραμέτρων του (μέγεθος και λυγηρότητα σώματος, εδαφική κίνηση), καθώς και ότι εάν μία σεισμική κίνηση ανατρέπει ένα στερεό σώμα δεν είναι απαραίτητο ότι μία άλλη μεγαλύτερης έντασης θα οδηγήσει και αυτή σε ανατροπή το ίδιο σώμα.

Περί την εναλλαγή της δεκαετίας, η εργασία των P. D. Spanos and A. S. Koh (1984) διευρύνεται σημαντικά από τον S. J. Hogan (1989, 1990), ενώ για πρώτη φορά εμφανίζονται και εργασίες που μελετούν την λικνιστική απόκριση σωμάτων σε τρεις διαστάσεις, και μάλιστα κυλινδρικής μορφής (Koh and Mustafa 1990, Koh and Hsiung 1991a και 1991b). Την ίδια περίπου περίοδο δημοσιεύονται για πρώτη φορά και εργασίες οι οποίες μελετούν το

πρόβλημα λικνισμού συστήματος στερών σωμάτων, επί ανένδοτης θεμελίωσης (Allen et al. 1986, Sinopoli 1989a, 1989b και 1991, Psycharis 1990).

Λίγα χρόνια αργότερα παρουσιάζεται άλλη μία ενδιαφέρουσα έρευνα της δυναμικής συμπεριφοράς συστήματος στερεών σωμάτων, η οποία συνδυάζοντας αποτελέσματα πειραμάτων σε ξύλινα δοκίμια (διαφόρων διαστάσεων) με τις προβλέψεις δισδιάστατων αναλύσεων και αριθμητικών επιλύσεων, κατέληξε στο εξής σημαντικό συμπέρασμα: προσομοιώσεις με χρήση της μεθόδου των διακριτών στοιχείων μπορούν να αποτελέσουν (εφόσον είναι καταλλήλως βαθμονομημένες) χρήσιμο εργαλείο για τη μελέτη της απόκρισης συστήματος στερών σωμάτων σε δυναμικές διεγέρσεις της βάσης του (Winkler et al. 1995).

Το 2000 η λικνιστική συμπεριφορά απαραμόρφωτων σωμάτων υπό τριγωνομετρικούς παλμούς και σεισμικές διεγέρσεις επανεξετάζεται σε βάθος (Makris and Roussos 2000), με συνέπεια νέα συμπεράσματα να εξαχθούν. Μεταξύ αυτών και ότι η ανατροπή μικρότερων σωμάτων προκύπτει από παλμούς με μεγάλη επιτάχυνση και μικρή διάρκεια, ενώ μεγαλύτερα σώματα ανατρέπονται από παλμούς μακράς διάρκειας.

Περί τα μέσα εκείνης της δεκαετίας, άλλη μία πειραματική διερεύνηση της δυναμικής συστημάτων λίθινων σωμάτων, εν ξηρώ συναρμοσμένων, έλαβε χώρα. Αυτή την φορά στο Εθνικό Εργαστήριο Πολιτικών Μηχανικών της Πορτογαλίας (Peña et al. 2006, 2008). Κατά την διερεύνηση αυτή, ο εντυπωσιακός αριθμός των 379 πειραμάτων έλαβαν χώρα. Έτσι εξετάστηκε η απόκριση τεσσάρων (διαφορετικών διαστάσεων) ραδινών μεμονωμένων πρισματικών σωμάτων, δύο πρισματικών σωμάτων, το ένα πάνω στο άλλο, και ενός τρίλιθου πλαισίου (όλα κατασκευασμένα από μπλε γρανίτη), σε ελεύθερο λικνισμό, και σε (μονοδιάστατες) αρμονικές και τυχαίες διεγέρσεις της βάσης τους. Πολλά από τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής συγκρίθηκαν με σχετικά αναλυτικά αποτελέσματα και ταυτόχρονα χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση αριθμητικών επιλύσεων οι οποίες εκτελέστηκαν με την χρήση της μεθόδου των διακριτών στοιχείων (Peña et al. 2007). Μεταξύ άλλων συμπερασμάτων, προέκυψε από ότι τα δοκίμια παρουσίασαν έντονη απόκριση και εκτός του επιπέδου της φόρτισης, γεγονός που αναδεικνύει τους περιορισμούς της αναλυτικής προσέγγισης και τα πλεονεκτήματα των, αρκούντως ικανοποιητικά βαθμονομημένων, αριθμητικών μοντέλων.

Περίπου την ίδια περίοδο, γνωστοποιήθηκε μία εργασία που εξέταζε παραμετρικώς την συμπεριφορά ενός απαραμόρφωτου σώματος εδραζόμενου είτε σε απαραμόρφωτη βάση είτε σε γραμμικώς ελαστική βάση, η οποία διεγείρεται από ισχυρούς σεισμικούς παλμούς (Apostolou et al. 2007). Για τις σεισμικές διεγέρσεις χρησιμοποιήθηκαν καταγραφές δύο πραγματικών σεισμών, παλμοί Ricker, καθώς και ημιτονοειδείς παλμοί ενός κύκλου. Οι

παραμετρικές διερευνήσεις που αφορούσαν την συμπεριφορά σωμάτων επί της ελαστική θεμελίωσης πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του προγράμματος Πεπερασμένων Στοιχείων ABAQUS. Η εργασία αυτή ανέδειξε, μεταξύ άλλων, ότι όταν πρόκειται για σώματα μεγάλου μεγέθους, η επιρροή του φαινομένου της κλίμακας (που είχε πρώτος επισημάνει ο Housner) στην ευστάθειά τους, είναι μεγαλύτερη της επιρροής του λόγου λυγηρότητάς τους. Δηλαδή, μεγάλα ραδινά σώματα δεν ανατρέπονται από σεισμικές διεγέρσεις που μπορούν να ανατρέψουν άλλα, ολιγότερο ραδινά, αλλά μικρότερα σώματα.

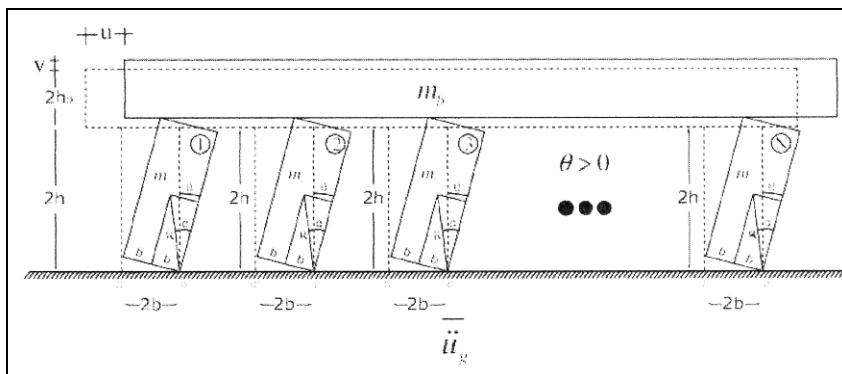
Σχετικά πρόσφατα δημοσιεύτηκαν δύο νέες αναλυτικές εργασίες του Ν. Μακρή και συνεργατών του, στις οποίες επανεξετάστηκε ο λικνισμός ραδινών απαραμόρφωτων σωμάτων. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτές τις εργασίες διερευνήθηκαν αφενός η επιρροή στην λικνιστική συμπεριφορά τους (και κατ' επέκταση στην ευστάθεια τους) της ύπαρξης σεισμικής μόνωσης κάτω από τη βάση τους (Vassiliou and Makris 2011), και αφετέρου ο λικνισμός και η ευστάθεια συστοιχίας ραδινών απαραμόρφωτων σωμάτων που φέρουν, χωρίς σύνδεση, ενιαία απαραμόρφωτη δοκό (Makris and Vassiliou 2013, Εικ. 3.4). Από την πρώτη

μελέτη προέκυψε ότι η σεισμική μόνωση έχει θετική επίδραση στην ευστάθεια μόνο μικρού μεγέθους σωμάτων, και άρα η χρήση της δεν ενδείκνυται στους κίονες των αρχαίων μνημείων.

Ενώ στη δεύτερη εργασία

διαφάνηκε ότι η συστοιχία ελεύθερα ιστάμενων σωμάτων που φέρουν δοκό, έχει όμοια λικνιστική συμπεριφορά με αυτήν ενός σώματος με την ίδια λυγηρότητα, το οποίο, όμως, είναι μικρότερου μεγέθους και άρα έχει μικρότερη ευστάθεια· κατ' επέκταση, όσο βαρύτερη η δοκός, τόσο πιο ευσταθής η συστοιχία, παρά το γεγονός ότι το κέντρο βάρους της πηγαίνει σε υψηλότερη θέση¹¹⁷.

Το 2012 δημοσιεύτηκε μια εργασία στην οποία, επίσης, επανεξετάστηκε σε βάθος το φαινόμενο του λικνισμού ενός απαραμόρφωτου σώματος το οποίο υποβάλλεται σε απλό τριγωνομετρικό παλμό (Dimitrakopoulos and DeJong 2012). Στην εργασία αυτή (παρομοίως με την παρεμφερή προαναφερθείσα εργασία, Vassiliou and Makris 2011) αναδείχθηκε ότι η



Εικ. 3.4: Στιγμιότυπο λικνισμού συστοιχίας ραδινών απαραμόρφωτων σωμάτων που φέρουν, χωρίς σύνδεση, ενιαία απαραμόρφωτη δοκό¹¹⁷.

¹¹⁷ Από Makris and Vassiliou 2013, fig. 1, p. 3.

¹¹⁸ Αυτό βεβαίως προέκυψε για φόρτιση εντός του επιπέδου της συστοιχίας.

διατύπωση των εξισώσεων κίνησης με την χρήση κανονικοποιημένων (αδιάστατων) παραμέτρων φανερώνει την ιδιότητα της αυτοομοιότητας¹¹⁹ την οποία παρουσιάζει το υπό εξέταση φαινόμενο. Κατ' επέκταση το φαινόμενο δύναται να οριστεί κλιμακούμενο μόνο από την ένταση και την συχνότητα της επιβαλλόμενης διέγερσης.

Σχετικά με την σεισμική συμπεριφορά αρχαίων κίωνων, οι πρώτες σχετικές μελέτες εμφανίστηκαν, μάλλον σποραδικά, στη δεκαετία του 1980. Αυτές αφορούσαν είτε συνολικά την σεισμική ευστάθεια των σωζόμενων αρχαίων κίωνων (Ambraseys 1985), είτε την σεισμική απόκριση συγκεκριμένου μνημείου, εν προκειμένω του Παρθενώνα (Ζάμπας 1983, Hanazato et al. 1989) και του Ολυμπίου (Theofanopoulos et al. 1989). Ειδικά η εργασία του Ν. Αμβράζη έχει μεγάλη σημασία, και διότι επιχείρησε να γνωστοποιήσει ευρέως στους επιστήμονες, διαφόρων ειδικοτήτων, που ασχολούνται με τα έργα αποκατάστασης αρχαίων μνημείων¹²⁰, ότι για την ανατροπή των αρχαίων κίωνων απαιτούνται σεισμικές δράσεις πολύ μεγάλης έντασης. Επομένως, στις περιπτώσεις που διατηρούνται όρθιοι κίονες, το γεγονός αυτό, όχι μόνο δεν σημαίνει αναγκαστικά ότι στις περιοχές που βρίσκονται οι εν λόγω κίονες δεν έχουν πραγματοποιηθεί μεγάλοι σεισμοί στο παρελθόν, αλλά και ότι είναι δυνατό να εξαχθούν εκτιμήσεις για τις μέγιστες τιμές των σεισμικών δράσεων που έπληξαν τις περιοχές από την μελέτη της κατάστασης διατήρησης των κίωνων.

Λίγο αργότερα δημοσιεύτηκε άλλη μία ενδιαφέρουσα εργασία του Κ. Ζάμπα (1994, σελ. 115-145) για τον Παρθενώνα. Σε αυτήν ο μελετητής, στηριζόμενος στην μέθοδο της επαλληλίας των ιδιομορφικών αποκρίσεων που χρησιμοποιείται στις σύγχρονες κατασκευές, διατύπωσε μία πρωτότυπη αναλυτική μέθοδος εκτίμησης της σεισμικής συμπεριφοράς των πολυσπόνδυλων κίωνων.

Την επόμενη χρονιά, γνωστοποιήθηκε η μελέτη του Κ. Παπαντωνόπουλου (1995) για την ευστάθεια των κίωνων του ναού του Επικούριου Απόλλωνα. Στην μελέτη αυτή έγινε εφαρμογή της θεωρίας του λικνισμού για ένα τυπικό κίονα του μνημείου, και έλεγχος σύμφωνα με τα κριτήρια ανατροπής υπό σεισμικές δράσεις των Housner και Ishiyama. Έτσι διαφάνηκε, μεταξύ άλλων, η μεγάλη σεισμική ευστάθεια των κίωνων του μνημείου των Βασσών, εφόσον είναι σε κατακόρυφη στάση και εδράζονται σε δύσκαμπτη βάση.

Στην τελευταία εικοσιπενταετία οι επιστημονικές δημοσιεύσεις οι οποίες πραγματεύονται το θέμα της σεισμικής απόκρισης αρχαίων κίωνων, ή γενικότερα αρχαίων μνημείων, έχουν πολλαπλασιαστεί. Στις μελέτες αυτές το θέμα εξετάζεται (συνήθως) μέσω

¹¹⁹ Αυτοομοιότητα παρουσιάζει ένα σύνολο (σχήμα, αντικείμενο, φαινόμενο) όταν τα επιμέρους τμήματά του είναι τέλεια ή κατά προσέγγιση αντίγραφα ολόκληρου του συνόλου ή τμημάτων του σε διαφορετική κλίμακα.

¹²⁰ Αυτό διότι η εργασία αυτή συμπεριλήφθηκε στα Πρακτικά της 2^{ης} Διεθνούς Συνάντησης για την Αποκατάσταση των Μνημείων Ακροπόλεως.

πειραματικών και αριθμητικών διερευνήσεων, παράλληλα ή συχνά σε συνδυασμό. Σε ότι αφορά τις εργασίες πειραματικού αντικειμένου, ξεχωρίζουν αναμφιβόλως οι πολυετείς εργασίες που πραγματοποιούνται στις δύο μεγαλύτερες σχολές πολιτικών μηχανικών της Ελλάδας.

Πιο συγκεκριμένα, από τις αρχές της δεκαετίας του 1990, με την χρήση της σεισμικής τράπεζας που διαθέτει το Εργαστήριο Αντοχής Υλικών και Κατασκευών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, οι Γ. Μάνος και Μ. Δημοσθένους, μαζί με συνεργάτες τους, μελετούν κατά καιρούς την δυναμική απόκριση ομοιωμάτων (μικρών, πάντως, διαστάσεων) αρχαίων κίωνων ή κιονοστοιχιών (Demosthenous and Manos 1992, Manos et al. 2001). Οι προσπάθειες των ερευνητών έχουν, μεταξύ άλλων, οδηγήσει στην ενδελεχή εξέταση της απόκρισης σε οριζόντιες (ημιτονοειδείς και σεισμικές) διεγέρσεις της βάσης μικρών δοκιμίων από χάλυβα, τα οποία είναι υποεικοσαπλάσια ομοιώματα αρχαίων κίωνων. Έχουν οδηγήσει, επίσης, στον έλεγχο κατά πόσο με το λογισμικό ABAQUS, είναι δυνατό να προβλεφτεί αξιόπιστα το υπό μελέτη φαινόμενο. (Manos et al. 2013).

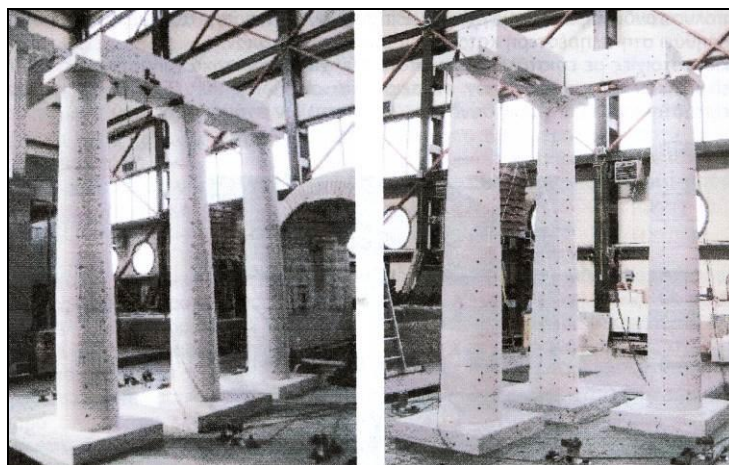
Άλλη μια σχετική εργασία αυτής της ερευνητικής ομάδας, αφορά την διερεύνηση της επιρροής της ύπαρξης πόλου και εμπολίων στην διεπιφάνεια των σπονδύλων αρχαίων κίωνων στην διατμητική σχετική ολίσθηση των γειτονικών σπονδύλων. Η εν λόγω διερεύνηση έλαβε χώρα μέσω σχετικών πειραμάτων σε ζεύγη μικρών δοκιμίων από χάλυβα και λευκό μάρμαρο. Σε κάποια πειράματα δεν είχε τοποθετηθεί συνδετήριο στοιχείο στην διεπιφάνεια των ζευγών δοκιμίων, ενώ σε άλλα πειράματα είχε τοποθετηθεί ξύλινος πόλος, εντός ξύλινου ή μολύβδινου εμπολίου (Manos et al. 2009). Και αυτή η πειραματική διερεύνηση συνοδεύτηκε από αριθμητική προσέγγιση, με την χρήση του λογισμικού ABAQUS. Από αυτή την μελέτη διαφάνηκε ότι η τοποθέτηση πόλου και εμπολίων στις διεπιφάνειες σπονδύλων μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση της αντίστασης τους έναντι ολίσθησης, και ότι η αύξηση εξαρτάται από τις διαστάσεις και το υλικό των συνδετήριων στοιχείων. Επίσης, ότι το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε μπόρεσε να αναπαρήγαγε την πειραματικώς παρατηρηθείσα συμπεριφορά του συστήματος σύνδεσης που εξετάστηκε.

Το διάστημα Οκτωβρίου-Νοεμβρίου 1995 έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου ένα εκτενές ερευνητικό πρόγραμμα, κατά το οποίο διερευνήθηκε η σεισμική συμπεριφορά ενός μαρμάρινου δοκιμίου κίονα. Το δοκίμιο προσομοίωνε (με μικρές διαφοροποιήσεις), σε κλίμακα 1/3, τον τυπικό κίονα του πρόναου του Παρθενώνα. Η εργασία αυτή, η οποία παρουσιάστηκε λεπτομερώς αργότερα στο επιστημονικό άρθρο των Η. Ρ. Mouzakis et al. (2002), ξεχωρίζει πολύ από παρόμοιες προσπάθειες. Αυτό ισχύει, όχι μόνο λόγω του σημαντικού μεγέθους του ομοιώματος του

δοκιμίου/κίονα (το συνολικό ύψος και η διάμετρο βάσης του δοκιμίου ισούνταν με 3.36 m και 0.57 m, αντιστοίχως), αλλά κυρίως διότι στα (συνολικώς) 19 πειράματα που διενεργήθηκαν, η διέγερση της βάσης του δοκιμίου έλαβε χώρα και στις τρεις κύριες διευθύνσεις, και μάλιστα με την χρήση καταγραφών τριών σεισμικών συμβάντων με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Πάντως, για λόγους προστασίας της σεισμικής τράπεζας, οι καταγραφές εισάγονταν στην σεισμική τράπεζα πολλαπλασιασμένες με κατάλληλους συντελεστές ώστε οι δονήσεις να προκαλούν μετακινήσεις και λικνισμό στους σπονδύλους του δοκιμίου, χωρίς όμως το δοκίμιο να κινδυνεύσει από κατάρρευση.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν από αυτήν την έρευνα είναι: (i) το περιεχόμενο των συχνοτήτων της σεισμικής διέγερσης είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για την απόκριση ενός πολυσπόνδου κίονα, (ii) η παραμορφωμένη κατάσταση ενός μεμονωμένου κίονα μετά από σεισμό δεν αποτελεί ένδειξη του μεγέθους των μετακινήσεων που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της δόνησης, και (iii) για καθαρά επίπεδη διέγερση, η κίνηση του κίονα δεν περιορίζεται στο επίπεδο της δόνησης αλλά προκύπτουν και σημαντικές μετακινήσεις εκτός επιπέδου.

Αυτή εργασία επεκτάθηκε προς το τέλος της δεκαετίας του 2000. Τότε που το προαναφερθέν ομοίωμα κίονα, μαζί και δύο νέα σχεδόν όμοια με αυτό, χρησιμοποιήθηκαν για μία νέα σειρά πειραμάτων (εννέα στο σύνολο) στο σεισμικό προσομοιωτήρα του Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. Τα νέα πειράματα περιλάμβαναν όχι μόνο την διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς των κίωνων μεμονωμένων, αλλά και συζευγμένων (σε ευθυγραμμία και υπό γωνία 90 μοιρών) με μαρμάρινα επιστύλια, από δύο σε κάθε μετακίονιο άνοιγμα (Εικ. 3.5). Τα επιστύλια ήταν ασύνδετα σε κάποια πειράματα, και σε κάποια άλλα ήταν συνδεδεμένα μεταξύ τους με χαλύβδινους συνδέσμους σχήματος διπλού ταυ. Σε αυτήν την διερεύνηση χρησιμοποιήθηκαν καταγραφές δύο σεισμών



Εικ. 3.5: Οι δύο διατάξεις κionoστοιχιών των οποίων η σεισμική συμπεριφορά εξετάστηκε στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π.¹²¹.

¹²¹ Από Δασίου κ.α. 2008, σχ. 4.

[της Καλαμάτας (13^{ης}/9^{ου}/1986) και της Λευκάδας (14^{ης}/8^{ου}/2003)], απομειωμένες (και πάλι) με κατάλληλους συντελεστές, ώστε κατά τα πειράματα να παρουσιαστεί λικνισμός, αλλά να αποφευχθεί κατάρρευση των ομοιομάτων. Η εν λόγω πειραματική διερεύνηση παρουσιάστηκε σε εγχώρια και σε διεθνή δημοσίευση της ερευνητικής ομάδας (Δασίου κ.α. 2008α, Dasiou et al. 2009a). Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή συνοψίζονται ως εξής:

Οι κιονοστοιχίες είναι πιο σταθερές από τους ανεξάρτητους κίονες, μια που η συμπεριφορά μιας κιονοστοιχίας ακόμα και με ασύνδετα επιστύλια δεν χαρακτηρίζεται από την έντονα μη-γραμμική συμπεριφορά που παρουσιάζουν οι μεμονωμένοι κίονες. Οι γωνίες των κιονοστοιχιών είναι τα πιο ευάλωτα τμήματά τους. Η επιρροή των συνδέσμων των επιστυλίων είναι διαφορετική στα διάφορα (καθ' ύψος) τμήματα μιας κιονοστοιχίας: οι μετατοπίσεις των σπονδύλων κατά την διάρκεια της σεισμικής διέγερσης και οι μόνιμες ολισθήσεις τους μετά το πέρας της διέγερσης είναι μεγαλύτερες στις περιπτώσεις που τα επιστύλια είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους, όμως οι μετατοπίσεις των επιστυλίων και, κατά συνέπεια, οι κρούσεις μεταξύ τους (που προκαλούν μικροζημιές στις ακμές τους) είναι σημαντικά μειωμένες, γεγονός που μειώνει τον κίνδυνο κατάρρευσης των επιστυλίων σε σχέση με τον κίνδυνο που θα είχαν τα επιστύλια εάν ήταν ασύνδετα. Η αύξηση του μεγέθους του σεισμού δεν οδηγεί απαραίτητα και σε αύξηση των μετατοπίσεων των κίωνων. Προϋπάρχουσες μετατοπίσεις σπονδύλων είναι δυνατό να επηρεάσουν σημαντικά τη δυναμική συμπεριφορά των κίωνων. Αναφορικά με ελεύθερα ιστάμενους κίονες, εάν οι κίονες παρουσιάζουν εκτός από μείωση (από κάτω προς τα πάνω) της διαμέτρου τους και ένταση¹²², τότε έχουν διαφορετική σεισμική συμπεριφορά από αυτήν που θα είχαν στην περίπτωση που δεν παρουσίαζαν ένταση.

Τελευταία χρονικά, αλλά κάθε άλλο παρά έσχατη σε ότι αφορά το ενδιαφέρον που παρουσιάζει, είναι η εκτενής πειραματική διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης δύο μαρμάρινων ομοιομάτων αρχαίων κίωνων, ελεύθερα ιστάμενων, αλλά και φερόντων μαρμάρينو επιστύλιο. Η διερεύνηση αυτή πραγματοποιήθηκε (σχετικώς πρόσφατα) στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής του Ε.Μ.Π. (Drosos and Anastasopoulos 2014). Το δοκίμιο (είτε ως ανεξάρτητοι κίονες είτε ως δικιόνιο πλαίσιο) προσομοίωσε, υπό κλίμακα 1/5, μία ιδεατή, τυπική κιονοστοιχία. Οι διαστάσεις της τυπικής κιονοστοιχίας βασίστηκαν σε διάφορα γεωμετρικά στοιχεία από το περιστύλιο του ναού του Επικούριου Απόλλωνα, τα οποία θεωρήθηκαν ως αντιπροσωπευτικά πολλών αρχαίων ναών. Είκοσι πέντε πειράματα

¹²² Δηλαδή, και ελαφρά διόγκωση των κορμών των κίωνων, με μεγαλύτερη τιμή (περίπου) στα 2/5 του ύψους τους, χωρίς καμία διάμετρος να είναι μεγαλύτερη άλλης χαμηλότερου ύψους.

πραγματοποιήθηκαν, στα οποία το δοκίμιο υποβλήθηκε σε φόρτιση εντός του επιπέδου του πλαισίου, με την χρήση παλμών Ricker καταγραφών διάφορων ισχυρών σεισμών. Τα αποτελέσματα και αυτής της εργασίας ανέδειξαν την ιδιαίτερα μεγάλη αντισεισμική αντοχή των αρχαίων κίωνων (όταν είναι, βεβαίως, στην ιδανική κατάσταση διατήρησής τους), η οποία είναι ακόμα μεγαλύτερη όταν οι κίονες φέρουν επιστύλια. Από την διερεύνηση προέκυψε, επιπλέον, ότι αν και οι μικροατέλειες στην επαφή των σπονδύλων (οι οποίες είναι πάντα διαφορετικές μετά από κάθε διέγερση των κίωνων) οδηγούν αναφορικά με τις παραμένουσες παραμορφώσεις σχεδόν σίγουρα σε διαφορετική απόκριση των κίωνων ή της κιονοστοιχίας, οι προαναφερθείσες μικροατέλειες δεν επηρεάζουν τόσο πολύ τις μέγιστες μετατοπίσεις και στροφές του συστήματος. Φάνηκε επίσης ότι, ενώ η μέγιστη επιτάχυνση της βάσης των κίωνων δεν μπορεί να συσχετιστεί ικανοποιητικά με την απόκριση των κίωνων, η μέγιστη φασματική μετατόπιση και το χαρακτηριστικό μήκος (L_p) της εδαφικής δόνησης είναι ικανοποιητικοί δείκτες.

Αναφορικά με τις αριθμητικές διερευνήσεις της δυναμικής απόκρισης των αρχαίων μνημείων, και οι εργασίες αυτές δύνανται να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: Αυτές που στηρίχθηκαν στην μέθοδο των διακριτών στοιχείων, στις οποίες χρησιμοποιήθηκε από τους ερευνητές το πρόγραμμα U-DEC ή 3-DEC (για τις δισδιάστατες ή τις τρισδιάστατες αναλύσεις, αντίστοιχα), Και αυτές που βασίστηκαν στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, κατά τις οποίες έγινε χρήση διαφόρων λογισμικών, όπως το ANSYS και (περισσότερο) το ABAQUS. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο προσεγγίσεων είναι ότι με την μέθοδο των διακριτών στοιχείων, τα μέλη (σπόνδυλοι και κιονόκρανο) των κίωνων θεωρούνται ως άκαμπτα σώματα, ενώ με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ως παραμορφώσιμα. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο να είναι απαραίτητος πολύ μεγαλύτερος υπολογιστικός χρόνος στις επιλύσεις που πραγματοποιούνται με τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων.

Πιθανώς για αυτό το λόγο οι εργασίες που βασίζονται στη μέθοδο των διακριτών στοιχείων είναι πολύ περισσότερες και, μάλιστα, άρχισαν να εμφανίζονται πρώτες, από τις αρχές της δεκαετίας του 1990. Η πρώτη σχετική δημοσίευση παρουσίαζε την, σε δύο διαστάσεις, αριθμητική διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς του τυπικού κίονα του ναού του Επικούριου Απόλλωνα, σε προκαταρκτικό βεβαίως στάδιο (Papastamatiou and Psyharis 1993). Παράλληλος σκοπός εκείνης της πρωτοποριακής προσπάθειας ήταν η ανάδειξη του λογισμικού UDEC ως χρήσιμου εργαλείου για τέτοιου είδους μελέτες .

Λίγα χρόνια αργότερα, άλλη μία δισδιάστατη μελέτη της ευστάθειας των κίωνων του ναού του Επικούριου Απόλλωνα παρουσιάστηκε, λεπτομερέστερη αυτή τη φορά, και

συνοδευόμενη από έλεγχο της ευστάθειας και του κίονα του ναού του Διός στην Νεμέα (Psycharis et al. 2000). Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν, ως δυναμικές φορτίσεις, αρμονικές διεγέρσεις, καθώς και καταγραφές έξι σεισμικών συμβάντων. Από τα αποτελέσματα των παραμετρικών αριθμητικών επιλύσεων διαφάνηκε, μεταξύ άλλων, ότι η σεισμική ευστάθεια ενός αρχαίου κίονα μειώνεται σημαντικά όσο μεγαλώνει η περίοδος της αρμονικής διέγερσης της βάσης του. Επίσης ότι δεν αποκλίνει πολύ η σεισμική συμπεριφορά ενός πολυσπόνδου κίονα από αυτή ενός μονόλιθου κίονα με όμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Λίγο αργότερα, το ίδιο πρόγραμμα, αλλά σε προηγμένη έκδοσή του (με την ονομασία 3DEC) η οποία δίνει τη δυνατότητα της τρισδιάστατης ανάλυσης, χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός κίονα και ενός ζεύγος κίωνων που φέρουν τρεις λίθους επιστυλίου του ναού του Διός στην Ολυμπία (Αλεξανδρής κ.α. 2001). Απώτερος στόχος της εργασίας αυτής ήταν να ελεγχθεί η θεωρία ότι το προαναφερθέν μνημείο κατέρρευσε από ένα καταστροφικό σεισμό στους πρώιμους βυζαντινούς χρόνους. Αν και από την αριθμητική μελέτη δεν προέκυψαν ισχυρά στοιχεία υπέρ ή κατά της υπό εξέταση θεωρίας, φάνηκε ότι, και για τις τρεις περιπτώσεις διεγέρσεων που μελετήθηκαν, ο μεμονωμένος κίονας του μνημείου ανατρέπεται από την βάση του και οι σπόνδυλοί του καταλήγουν σε μία διάταξη παραπλήσια με αυτήν που βρίσκονται σήμερα στον αρχαιολογικό χώρο. Φάνηκε, επίσης, ότι η μέγιστη τιμή της ταχύτητας της διέγερσης συσχετίζεται με την απόκριση του κίονα αρκετά καλύτερα από ότι η μέγιστη τιμή της επιτάχυνση της διέγερσης.

Το επόμενο έτος δημοσιεύτηκε η πρώτη εργασία που με ενδελεχή τρόπο διερευνούσε εάν το λογισμικό 3DEC μπορεί να προβλέψει αξιόπιστα την σεισμική συμπεριφορά ενός πολυσπόνδου κίονα (Papantonopoulos et al. 2002). Η εργασία αυτή είχε εκπονηθεί λίγο παλαιότερα ως ένα από τα βασικά μέρη της διατριβής του Κ. Παπαντωνόπουλου (2000). Η εν λόγω διερεύνηση πραγματοποιήθηκε μέσω συγκρίσεων σχετικών πειραματικών αποτελεσμάτων από την εργασία των Η. Ρ. Mouzakis et al. (2002) με αποτελέσματα από την προσομοίωση των πειραμάτων με το 3DEC. Από τις συγκρίσεις προέκυψε ότι το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να αναπαράξει με ικανοποιητική ακρίβεια το πολυσύνθετο φαινόμενο της λικνιστικής απόκρισης πολυσπόνδων κίωνων, εφόσον έχουν επιλεγεί οι κατάλληλες τιμές για τις παραμέτρους που περιγράφουν την συμπεριφορά στις διεπιφάνειες των κίωνων.

Μετά την εργασία η οποία τεκμηρίωσε την αξιοπιστία του 3DEC, πολλές μελέτες της σεισμικής απόκρισης αρχαίων μνημείων πραγματοποιήθηκαν (και συνεχίζουν να πραγματοποιούνται) με την χρήση του λογισμικού αυτού. Πιο συγκεκριμένα, το 2003

δημοσιεύτηκε μία λεπτομερής μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς τμήματος του Πρόναου του Παρθενώνα (Psycharis et al. 2003). Ενώ, το 2005 εκδόθηκε από το Ε.Μ.Π. η τελική έκθεση ερευνητικού προγράμματος που αφορούσε την μελέτη της σεισμική συμπεριφοράς των κίωνων του ναού του Ολυμπίου Διός, και την εκτίμηση των σεισμικών διεγέρσεων που έχουν πλήξει την Αθήνα από τότε που κτίστηκε το μνημείο έως σήμερα, με βάση τις μετατοπίσεις των σπονδύλων που ενυπάρχουν στους κίονες (Ψυχάρης κ.α. 2005).

Από την πρώτη εργασία προέκυψε ότι η σύνδεση με μεταλλικά στοιχεία των επιστυλίων βελτιώνει την σεισμική απόκριση της κιονοστοιχίας του Παρθενώνα που μελετήθηκε, αφού μειώνει τις παραμένουσες παραμορφώσεις. Επίσης, ότι η σύνδεση με διατμητικούς συνδέσμους των σπονδύλων των κίωνων δεν βελτιώνει σημαντικά την συμπεριφορά των κίωνων, ενώ για μεγάλες σεισμικές δράσεις ενδέχεται και να επιβαρύνει την ευστάθειά τους.

Από την μελέτη για το Ολυμπίο προέκυψε ότι ο κίνδυνος κατάρρευσης του μνημείου για σεισμικές δονήσεις με μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV) έως 60 cm/sec (δηλαδή για σεισμούς με εκτιμώμενη περίοδο επανάληψης στην Αθήνα 500 χρόνια) είναι γενικά μικρός. Ενώ για ισχυρότερες σεισμικές δονήσεις με μικρή πιθανότητα να συμβούν στην Αθήνα (εκτιμώμενη περίοδο επανάληψης 2000 χρόνια), οι ζημιές στο μνημείο θα είναι αρκετές, με πολύ πιθανή την κατάρρευση των επιστυλίων, χωρίς όμως να αναμένεται να ανατραπούν οι κίονες.

Την ίδια περίοδο δημοσιεύεται και μία εργασία που πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό Working Model 2D (Konstantinidis and Makris 2005), η οποία αφορούσε την δισδιάστατη ανάλυση της σεισμικής συμπεριφοράς ενός πολυσπόνδου κίονα που έχει τις διαστάσεις των κίωνων του ναού του Διός της Νεμέας. Ο κίονας αυτός προσομοιώθηκε να αποτελείται από τέσσερις σπονδύλους (αντί για δεκατρείς όπως στο προαναφερθέν μνημείο) και κιονόκρανο. Από την μελέτη εξήχθηκε ότι στις περισσότερες περιπτώσεις οι πολυσπόνδυλοι κίονες παρουσιάζουν πιο «ελεγχόμενη» σεισμική απόκριση από αυτή που θα είχαν εάν ήταν μονόλιθοι, λόγω των σχετικών παραμορφώσεων στις διεπιφάνειες των σπονδύλων τους. Επίσης, ότι η επιρροή των ξύλινων πόλων στην σεισμική συμπεριφορά των κίωνων μπορεί να θεωρηθεί ως αμελητέα, ενώ η εγκατάσταση νέων δύσκαμπτων μεταλλικών διατμητικών συνδέσμων μεταξύ των σπονδύλων είναι καλό να αποφεύγεται, διότι ενδέχεται να μειώνει την σεισμική ευστάθεια των κίωνων.

Το 2008 γνωστοποιήθηκε άλλη μία δισδιάστατη μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς αρχαίων κιονοστοιχιών (Papaloizou et al. 2008), η οποία πραγματοποιήθηκε με την χρήση εξειδικευμένου λογισμικού που αναπτύχθηκε για αυτό το σκοπό, το οποίο βασίζεται στη μέθοδο των διακριτών στοιχείων. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής ήρθαν ως επίρρωση

των συμπερασμάτων της αντίστοιχης μελέτης (που είχε διενεργηθεί παλαιότερα) με το λογισμικό UDEC των Psycharis et al. (2000).

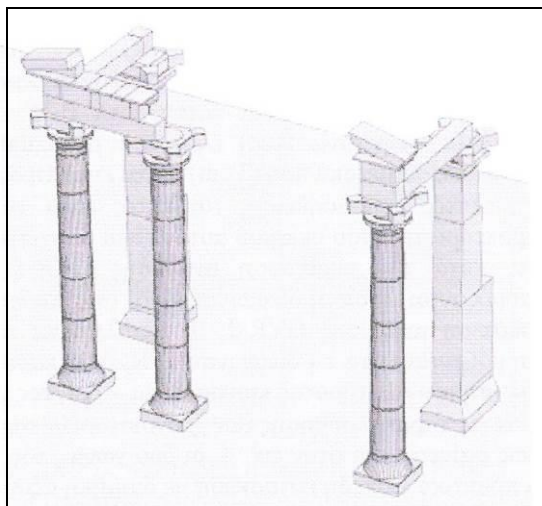
Το 2009 η αξιοπιστία του λογισμικού 3DEC επιβεβαιώθηκε εκ νέου (Dasiou et al. 2009b), αφού με το λογισμικό αυτό κατέστη δυνατή η αριθμητική αναπαραγωγή, με σχετικά ικανοποιητικό τρόπο, κάποιων από τα πειράματα που είχαν πραγματοποιηθεί σε μεμονωμένους κίονες και κιονοστοιχίες στο σεισμικό προσομοιωτήρα του Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. (Dasiou et al. 2009a).

Την ίδια χρονιά (και στο πλαίσιο του ίδιου διεθνούς Συνεδρίου) δημοσιεύτηκε άλλη μία μελέτη με το 3DEC, η οποία αφορούσε την σεισμική απόκριση του Παρθενώνα (Dasiou et al. 2009c). Πιο συγκεκριμένα, αφορούσε τρία τμήματα του μνημείου, τα οποία, στην παρούσα κατάστασή τους, παρουσιάζουν αυτόνομη συμπεριφορά: του περιστυλίου, της ιστάμενης κιονοστοιχίας του Προνάου, και των τοίχων του σηκού. Με την χρήση τεσσάρων καταγραφών σεισμών που συνέβησαν στον ελλαδικό χώρο, διάφορα σενάρια αναστήλωσης των εν λόγω δομικών ενοτήτων του μνημείου εξετάστηκαν, αξιολογήθηκαν, και, εν τέλει, τέθηκαν σε γνώση, όχι μόνο της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας, αλλά και των ιθυόντων και συντελεστών του έργου αποκατάστασης του μνημείου.

Το 2011 οι Ν. Αμβράζης και Ι. Ψυχάρης δημοσίευσαν μία εργασία τους η οποία διερευνά την σεισμική τρωτότητα αγαλμάτων που είναι τοποθετημένα πάνω σε μονολιθικούς ή πολυσπόνδουλους κίονες (Ambrassey and Psycharis 2011). Η εν λόγω εργασία εστίασε σε μία περίπτωση, το άγαλμα του Απόλλωνα, ύψους 3.60 m. Το άγαλμα αυτό ευρίσκεται μπροστά από την Ακαδημία των Αθηνών και εδράζεται επί κίονα, ύψους 11.74 m, ο οποίος αποτελείται από δεκαέξι σπονδύλους και ιωνικό κιονόκρανο. Από τις παραμετρικές αναλύσεις που διεξήχθησαν, προέκυψε ότι η ανατροπή του αγάλματος επέρχεται μετά από έντονο λικνισμό του. Αυτή, όμως, δεν συνοδεύεται απαραίτητα και από σημαντικό λικνισμό του υποκείμενου κίονα, οι μετατοπίσεις και στροφές των σπονδύλων του οποίου δύναται να είναι σχετικά μικρές. Επίσης, φάνηκε ότι ο συντελεστής τριβής στις διεπιφάνειες επηρεάζει την απόκριση του συστήματος (ειδικότερα τις παραμένουσες μετατοπίσεις), με συχνότερο εύρημα για μεγαλύτερο συντελεστή τριβής να μειώνονται οι παραμένουσες παραμορφώσεις, χωρίς όμως αυτό το εύρημα να προέκυψε σε όλες τις περιπτώσεις. Επιπλέον, διαφάνηκε ότι ο αριθμός των σπονδύλων του κίονα επιδρά στην ευστάθεια του αγάλματος, και πιο συγκεκριμένα, το άγαλμα ανετράπη σε επιλύσεις στις οποίες ο κίονας προσομοιώθηκε με τον πραγματικό αριθμό των σπονδύλων του, ενώ δεν ανετράπη σε άλλες προσομοιώσεις με μικρότερο και μεγαλύτερο από τον πραγματικό αριθμό σπονδύλων.

Άλλη μία πολύ ενδιαφέρουσα εργασία με το λογισμικό 3DEC παρουσιάστηκε την επόμενη χρονιά, στο 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αναστηλώσεων, και αφορούσε την παραμετρική διερεύνηση της σεισμικής ευστάθειας της προτεινόμενης προς αναστήλωση κιονοστοιχίας του ναού της Αφροδίτης στην Αμαθούντα της Κύπρου (Ψυχάρης και Τουμπακάρη 2012). Στην μελέτη αυτή, μετά την επιλογή των σεισμών σχεδιασμού, διερευνήθηκε αριθμητικά η σεισμική απόκριση ενός μεμονωμένου κίονα του ναού, καθώς και ενός προς αναστήλωση (σύμφωνα με την πρόταση των μελετητών) τμήματος του μνημείου,

το οποίο περιλαμβάνει τις δύο άκρες της ανατολικής κιονοστοιχίας και μέρη των γειτονικών απολήξεων των τοίχων του σηκού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αναστήλωση του μεμονωμένου κίονα είναι εφικτή, καθώς προέκυψε ότι παραμένει ευσταθής έναντι των σεισμικών δράσεων που ελήφθησαν υπόψη, παρουσιάζοντας πάντως μεγάλες παραμένουσες μετατοπίσεις. Ενώ, αν υλοποιηθεί πλήρως η αναστηλωτική πρόταση (Εικ. 3.6), προέκυψε ότι το συνθετότερο δομικό σύστημα θα είναι ευσταθέστερο. Αυτό διότι φάνηκε ότι το εύρος των ταλαντώσεων και οι



Εικ. 3.6: Το προσομοίωμα της τελικής αναστηλωτικής πρότασης για το ναό της Αφροδίτης στην Αμαθούντα της Κύπρου¹²³.

παραμένουσες παραμορφώσεις μειώνονται σημαντικά, με εξαίρεση τους ακραίους λίθους του αετώματος που είναι πιθανό να ανατραπούν. Για αυτό προτάθηκε, επιπροσθέτως, να συνδεθούν οι ακραίοι λίθοι του αετώματος με τα υποκείμενα αρχιτεκτονικά μέλη.

Την ίδια χρονιά παρουσιάστηκε και μία μελέτη, η οποία αποσκοπούσε στον έλεγχο της αποτελεσματικότητας των οπλισμών συγκολλήσεων θραυσμάτων και συμπληρωμάτων μελών δύο αρχαίων κίωνων -ενός κίονα του Πρόναου του Παρθενώνα και ενός κίονα της δυτικής κιονοστοιχίας της αρχαίας αγοράς στην Κώ- όπως σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν στο πλαίσιο των έργων αποκατάστασης των αντίστοιχων μνημείων (Dasiou et al. 2012). Ο εν λόγω έλεγχος έλαβε χώρα μέσω αριθμητικών επιλύσεων με την μέθοδο διακριτών στοιχείων, στις οποίες οι κίονες υποβλήθηκαν σε ισχυρές σεισμικές δονήσεις. Έτσι υπολογίστηκαν τα εντατικά μεγέθη που εμφανίστηκαν στις ράβδους οπλισμού των συγκολλήσεων, τα οποία στη συνέχεια συγκρίθηκαν με τις αντοχές των ράβδων. Από την διερεύνηση φάνηκε ότι οι τάσεις που επιβλήθηκαν στις ράβδους οπλισμού ήταν σε κάθε περίπτωση μικρότερες από τις

¹²³ Από Ψυχάρης και Τουμπακάρη 2012, εικ. 4.

αντοχές θραύσης των ράβδων, ενώ σε πολλές περιπτώσεις ήταν πολύ μικρότερες και από τις αντοχές διαρροής τους.

Το 2013 δημοσιεύτηκε μία εργασία στοχαστικής θεώρησης, στην οποία έγινε χρήση της μεθόδου Monte Carlo, και είχε ως στόχο την ποσοτική εκτίμηση της ευστάθειας ενός κίονα του Προνάου του Παρθενώνα, έναντι ισχυρών σεισμικών δονήσεων του εγγύς πεδίου (Psyharis et al. 2013). Για την διαμόρφωση του ντετερμινιστικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το 3DEC. Η πιθανοτική διερεύνηση έγινε με την βοήθεια δύο παραμέτρων: της μέγιστης μετατόπισης του κιονοκράνου, κανονικοποιημένης ως προς την διάμετρο της βάσης του κίονα, και της σχετικής παραμένουσας διολίσθησης γειτονικών σπονδύλων, κανονικοποιημένης ως προς την διάμετρο της διεπιφάνειας των σπονδύλων. Από την εργασία αυτή προέκυψε ότι το γενικό συμπέρασμα (πολλών προγενέστερων μελετών) ότι η πιθανότητα να ανατραπεί ένας αρχαίος κίονας μεγαλώνει όσο αυξάνει η δεσπόζουσα περίοδος της σεισμικής δόνησης που τον διεγείρει, δεν ισχύει για μεγάλες περιόδους. Ειδικά για τον κίονα του Προνάου του Παρθενώνα, δεν ισχύει για περιόδους μεγαλύτερες από 4 sec, οπότε η απόκριση του κίονα γενικώς μειώνεται όσο αυξάνεται η δεσπόζουσα περίοδος της διέγερσης. Επίσης, φάνηκε ότι αν και η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση και η μέγιστη εδαφική ταχύτητα δεν συσχετίζονται με κάποιο κανονικό τρόπο με τις δύο κανονικοποιημένες παραμέτρους που εξετάστηκαν, η μέγιστη εδαφική ταχύτητα παρουσιάζει, γενικώς, γραμμική σχέση με την απόκριση του κίονα, και πιο συγκεκριμένα με τις μέγιστες και παραμένουσες παραμορφώσεις των μελών του.

Το 2014 δημοσιεύτηκαν άλλες δύο μελέτες δυσδιάστατης σεισμικής ανάλυσης, με χρήση του λογισμικού UDEC, με την πρώτη να αφορά ρωμαϊκούς κίονες και να αναδεικνύει και πάλι ότι η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση δεν συσχετίζεται ικανοποιητικά με τη σεισμική απόκριση των κίωνων (Scandolo and Podestà 2014), και την δεύτερη να καταλήγει (μέσω παραμετρικών διερευνήσεων) στην διαμόρφωση καμπύλων σεισμικής τρωτότητας στις οποίες ποσοτικοποιείται η επιρροή πολλών παραμέτρων (εδάφους, ραδιότητας, ύψους και αριθμού σπονδύλων) (Pappas et al. 2014). Η δεύτερη εργασία, μάλιστα, παρουσιάστηκε πιο εκτεταμένα δύο χρόνια μετά (Pappas et al. 2016a).

Το 2016, επίσης, οι συντελεστές της τελευταίας δημοσίευσης, μαζί με ένα άλλο ερευνητή, παρουσίασαν άλλη μία ενδιαφέρουσα μελέτη, στην οποία (με το 3DEC αυτή τη φορά) ανέλυσαν την σεισμική συμπεριφορά ενός μονολιθικού κίονα της Ρωμαϊκής Αγοράς στην Θεσσαλονίκη, ο οποίος δεν ανετράπη από τον καταστροφικό σεισμό του 1978 (Pappas et al. 2016b). Αναφορικά με τον μονολιθικό κίονα προέκυψε, μεταξύ άλλων, ότι σημαντική επιρροή στην σεισμική απόκρισή του έχει η μέση συχνότητα (f_m) της διέγερσης.

Το 2016 δημοσιεύτηκε, επιπλέον, μία εργασία που με το UDEC διερευνούσε την στατική και δυναμική συμπεριφορά ενός τυπικού τμήματος μίας δίτονης (διώροφης) κιονοστοιχίας της αρχαίας αγοράς (Forum) της Πομπηίας (Sarhosis et al. 2016). Στην εργασία αυτή προέκυψε ότι μπορεί να συμβεί κατάρρευση της κιονοστοιχίας σε υψηλότερες γωνίες τριβής όταν το φορτίο της μειώνεται, και ως εκ τούτου υπάρχει κίνδυνος για αιφνίδια κατάρρευση του μνημείου στην περίπτωση που αυτό αποσυναρμολογηθεί. Επίσης, ότι η δυναμική απόκριση του μνημείου κυριαρχείται από λικνισμό όταν η διέγερση είναι μακροπερίοδη, ενώ για υψίσυχνες διεγέρσεις το μνημείο αποκρίνεται με λικνισμό και ολισθήσεις των επιμέρους στοιχείων του.

Η πρώτη αριθμητική εργασία που αφορούσε τη διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς αρχαίων πολυσπόνδυλων κίωνων, και βασιζόταν στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάστηκε από τους Ε. Μητσοπούλου και Β. Πασχαλίδη (1998, 2001). Η εργασία αυτή πραγματευόταν την δισδιάστατη απόκριση σε αρμονικές και σεισμικές διεγέρσεις ενός ραδινού μονόλιθου και ενός πολυσπόνδυλου στύλου, με γεωμετρικά χαρακτηριστικά παρόμοια με τον τυπικό κίονα δωρικού ρυθμού της κλασικής εποχής. Και η μελέτη αυτή κατέληξε σε παρόμοια συμπεράσματα με αυτά που είχαν προκύψει στην παρόμοια διερεύνηση που είχε πραγματοποιηθεί την ίδια περίπου περίοδο με το UDEC (Psyharis et al. 2000).

Το 2007 παρουσιάζεται μία αρκετά εκτεταμένη αριθμητική μελέτη της σεισμικής απόκρισης ενός κίονα της ελληνιστικής στοάς της Λίνδου της Ρόδου, με την χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ANSYS (Argyriou et al. 2007). Στην εργασία αυτή, η οποία είχε ως βασικό στόχο να διατυπωθούν εκτιμήσεις περί των κρίσιμων επιπέδων σεισμικής φόρτισης πέραν των οποίων ο κίονας ανατρέπεται, χρησιμοποιήθηκαν οι οριζόντιες συνιστώσες καταγραφών τριών πραγματικών σεισμών. Χρησιμοποιήθηκαν, επίσης, και διάφοροι κατάλληλοι δυναμικοί συντελεστές τριβής στις διεπιφάνειες των σπονδύλων, έτσι ώστε να εξεταστεί, παραλλήλως, και η επιρροή στην απόκριση του κίονα της ύπαρξης πόλων από ξύλο ή από τιτάνιο. Από τα αποτελέσματα φάνηκε ότι όσο αυξάνεται η ένταση της διέγερσης τόσο η σεισμική ενέργεια καταναλώνεται περισσότερο στις διεπιφάνειες των κατώτερων σπονδύλων του κίονα, και ότι οι πόλοι από τιτάνιο, σχεδόν κατά κανόνα, μειώνουν τις παραμορφώσεις του κίονα, όμως, για διεγέρσεις με μέγιστη επιτάχυνση μεγαλύτερη από 0.5g, οδηγούν σε μονολιθική ανατροπή του κίονα.

Την επόμενη χρονιά, παρουσιάζεται στο 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας μία εργασία (Δασίου κ.α. 2008β), στην οποία το λογισμικό ABAQUS χρησιμοποιήθηκε εναλλακτικά με το 3DEC για την προσομοίωση της

συμπεριφοράς των μεμονωμένων κίωνων και της κιονοστοιχίας που είχαν διεγερθεί στη σεισμική τράπεζα του Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π., λίγα χρόνια νωρίτερα. Από αυτήν την αριθμητική διερεύνηση προέκυψε ότι και τα δύο λογισμικά είναι αξιόπιστα, εφόσον είναι επαρκώς βαθμονομημένα, με το ABAQUS να υπερτερεί λίγο του 3DEC, αλλά να μειονεκτεί αναφορικά με τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο.

Στο ίδιο Συνέδριο παρουσιάστηκε και μία αριθμητική μελέτη της σεισμικής απόκρισης τριών κίωνων από το περιστυλίου του ναού του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών, για την εκπόνηση της οποίας χρησιμοποιήθηκε το ABAQUS (Παπαδόπουλος και Βιντζηλαίου 2008). Η μελέτη αυτή ανέδειξε ότι μετά την ολοκλήρωση του έργου αποκατάστασης του μνημείου, οι κίονες της περιστασής του θα είναι σε θέση να αντιστέκονται χωρίς ανατρέπονται, σε σημαντικές σεισμικές δράσεις, μεγαλύτερες από τις δράσεις που εφαρμόζουν σε αυτούς οι συνήθεις σεισμικές δονήσεις της περιοχής τους. Επίσης, ότι οι αποκλίσεις από την κατακόρυφο που παρουσιάζουν οι κίονες στην υπάρχουσα κατάσταση του μνημείου, επιδρούν επιβαρυντικά στην σεισμική αντοχή τους, και μάλιστα, η επιβάρυνση αυτή φθάνει στις περιπτώσεις με τις μεγαλύτερες τιμές αποκλίσεων, περίπου το 50% της σεισμικής ευστάθειας που θα διέθεταν οι κίονες εάν ίστανται κατακόρυφα.

Λίγα χρόνια αργότερα, οι ίδιοι ερευνητές γνωστοποίησαν σε δύο δημοσιεύσεις άλλη μία μελέτη τους η οποία αφορούσε τον ίδιο αρχαίο ναό, και πιο συγκεκριμένα τους νέους πόλους και εμπόλια από τιτάνιο που εγκαθίστανται στο μνημείο των Βασσών (Papadopoulos and Vintzileou 2013, 2016). Σε αυτήν την μελέτη χρησιμοποιήθηκε εκ νέου το ABAQUS, και έτσι διερευνήθηκε η επιρροή των νέων πόλων από τιτάνιο στην απόκριση σε σεισμικές διεγέρσεις ενός αρχαίου κίονα για πρώτη φορά με άμεσο τρόπο. Δηλαδή, με την εισαγωγή τρισδιάστων στοιχείων σε κοιλότητες των σπονδύλων του κίονα, τα οποία προσομοίωσαν με ικανοποιητική πιστότητα την μορφή των νέων πόλων και τις ιδιότητες του υλικού τους. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι για τα επίπεδα σεισμικών φορτίσεων που ελέγχθηκαν (τα οποία σχετίζονται με τις, σύμφωνα με τις σχετικές διατάξεις του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού, αναμενόμενες συνήθεις σεισμικές δράσεις στην περιοχή του μνημείου), οι νέοι πόλοι βελτιώνουν την δυναμική συμπεριφορά του κίονα, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις φάνηκε ότι περιορίζουν από λίγο έως σημαντικά, τις μέγιστες αλλά και τις παραμένουσες παραμορφώσεις των μελών του κίονα.

Αρκετά από τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, που περιλαμβάνονται στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο του ανά χείρας τεύχους, παρουσιάστηκαν (επεξεργασμένα σε προκαταρκτικό στάδιο) πρόσφατα σε Συνέδριο στο εξωτερικό (Papadopoulos and Vintzileou 2014), καθώς και στην χώρα μας (Παπαδόπουλος και Βιντζηλαίου 2015).

Στο ίδιο εγγώριο Συνέδριο παρουσιάστηκε και μία μελέτη στην οποία το λογισμικό ABAQUS χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της σεισμικής ευστάθειας του ιωνικού κίονα της αναστηλωμένης ελληνιστικής Στοάς στην Ακρόπολη της Λύνδου στην Ρόδο (Καραφαγκά κ.α. 2015). Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής έδειξαν ότι ο κίονας παραμένει ιστάμενος ακόμα και εάν διεγερθεί από σεισμική διέγερση με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ίση με 1.0g.

Καθώς το ABAQUS χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία, και μάλιστα όχι μόνο για την εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης αρχαίων κίωνων και κιονοστοιχιών, αλλά και για την διερεύνηση της επιρροής στην απόκριση των κίωνων της ύπαρξης πόλων από τιτάνιο στις διεπιφάνειες των μελών τους, κρίνεται χρήσιμο να αναφερθούν εδώ και οι ερευνητικές εργασίες στις οποίες το εν λόγω λογισμικό χρησίμευσε για την προσομοίωση της συμπεριφοράς υπό στατικές και ενίοτε δυναμικές φορτίσεις μεταλλικών συνδετήριων στοιχείων των αρχιτεκτονικών μελών αρχαίων μνημείων.

Πιο συγκεκριμένα, το 2006 δημοσιεύτηκε η μελέτη σχεδιασμού των νέων συνδέσμων από τιτάνιο για τους λίθους της κρηπίδας του ναού του Επικούριου Απόλλωνα. Η μελέτη περιελάμβανε και μία αριθμητική επίλυση με το ABAQUS, στην οποία ένας κίονας του μνημείου, μαζί με τους υποκείμενους του λίθους της κρηπίδας και της θεμελίωσης, διεγέρθηκε με την χρήση της καταγραφής του σεισμού του Αιγίου, αυξημένης κατά 50% (Papadopoulos 2006). Έτσι, προέκυψαν εκτιμήσεις περί των δράσεων στα νέα συνδετήρια στοιχεία των λίθων της κρηπίδας του μνημείου, σε περίπτωση ισχυρού σεισμού, οι οποίες ήταν σε κάθε περίπτωση μικρού μεγέθους (δεν ξεπερνούσαν τα 3500 Nt σε εφελκυσμό και τα 3000 Nt σε διάτμηση). Επίσης, από τις λοιπές αριθμητικές επιλύσεις της μελέτης (που εστίαζαν σε ένα λίθο που φέρει σύνδεσμο), προέκυψε ότι η βασική παράμετρος που επηρεάζει την φέρουσα ικανότητα του λίθου στην περιοχή της σύνδεσης είναι το βάθος της εντομίας του συνδέσμου.

Λίγα χρόνια αργότερα, το 2009, παρουσιάζεται σε ένα διεθνές συνέδριο για την προστασία ιστορικών κατασκευών (PROHITECH 09), μία εργασία η οποία πραγματευότανε πειραματικά και αριθμητικά το ζήτημα της εξόλκευσης χαλύβδινης ράβδου που έχει εμφυτευθεί με τσιμεντοπολτό σε μαρμάρινο τεμάχιο (Vayias et al. 2009). Στο ίδιο Συνέδριο παρουσιάστηκε και μία μελέτη που (επίσης) συνδύαζε πειραματικό και αριθμητικό μέρος, και αφορούσε την συμπεριφορά συνδέσεων με στοιχεία από ανοξείδωτο χάλυβα, μαρμάρινων επιστυλίων (Pavlonic et al. 2009), και εστίαζε στα νέα συνδετήρια στοιχεία που εγκαθίστανται στον Παρθενώνα (Εικ. 2.13 και 2.13). Η βαθμονόμηση των μοντέλων που διαμορφώθηκαν με το ABAQUS σε αυτές τις δύο εργασίες κρίθηκε ως μετρίως ικανοποιητική για την πρώτη εργασία, και ικανοποιητική για την δεύτερη. Ένα από τα κύρια

συμπεράσματα της πρώτης εργασίας είναι ότι η πυκνότητα του σπειρώματος αγκύρωσης της ράβδου είναι σημαντικός παράγοντας επιρροής της φέρουσα ικανότητας της σύνδεσης. Ενώ, από την δεύτερη εργασία προέκυψε ότι οι βασικές παράμετροι που καθορίζουν την αντοχή της σύνδεσης είναι το μήκος του κορμού και το βάθος των εντορμιών για συνδέσμους διπλού ταυ, και το μήκος του κορμού και το βάθος του κατακόρυφων σκελών αγκύρωσης για συνδέσμου μορφής πει.

Αναφέρεται, τέλος, ότι το 2015 δημοσιεύτηκε, άλλη μία εκτενής αριθμητική μελέτη που πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό ABAQUS και αφορούσε και αυτή την συμπεριφορά μεταλλικών συνδέσεων με στοιχεία μορφής διπλού ταυ επιστυλίων του Παρθενώνα (Kourkoulis and Pasiou 2015). Από την εργασία αυτή προέκυψε ότι ο μικρός χώρος που αφήνεται χωρίς κονίαμα στις εντορμίες των συνδέσμων (ως ανακουφιστικό κενό), κοντά στη διεπιφάνεια των συνδεόμενων λίθων, αποτελεί σημαντική παράμετρο που επηρεάζει και μάλιστα θετικά την συμπεριφορά της σύνδεσης. Επίσης, ότι το κονίαμα πλήρωσης των εντορμιών είναι και αυτό παράγοντας επιρροής και πιθανώς (σύμφωνα και με παλαιότερη σχετική εργασία, Kourkoulis et al. 2006) θα ήταν καλύτερα εάν για την πλήρωση των εντορμιών χρησιμοποιούνταν ένα όλκιμο υλικό.

3.3 Σύνοψη των κύριων συμπερασμάτων της επιστημονικής έρευνας

Τα γενικά συμπεράσματα στα οποία συγκλίνουν οι εργασίες που παρουσιάστηκαν προηγουμένως αναφέρονται επιγραμματικά ακολούθως.

- Το φαινόμενο της σεισμικής απόκρισης των αρχαίων μεμονωμένων κίωνων είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο ακόμα και σε πολύ μικρές μεταβολές των παραμέτρων του δομικού συστήματός τους ή της διέγερσης· οι αλλαγές αυτές μάλιστα, εάν εφαρμοστούν την κατάλληλη στιγμή, μπορούν να επιφέρουν δραστικές αλλαγές στην απόκριση των κίωνων.
- Η πιθανότητα ένας κίονας να καταρρεύσει από σεισμική διέγερση αυξάνει με την αύξηση της έντασης της διέγερσης, με την αύξηση της λυγηρότητας του κίονα και με τη μείωση του μεγέθους του (για τις ίδιες αναλογίες διαστάσεών του).
- Σημαντικό παράγοντα για την απόκριση και, κατ' επέκταση, την ευστάθεια ενός πολυσπόνδου κίονα αποτελεί το περιεχόμενο των συχνοτήτων της σεισμικής διέγερσης. Πιο συγκεκριμένα, οι δεσπόζουσες ιδιοπερίοδοι της διέγερσης έχουν

μεγαλύτερη σημασία από τις μέγιστες επιταχύνσεις, μια που υψίσυχνες σεισμικές διεγέρσεις οδηγούν στην εκδήλωση μετακινήσεων, σχετικά μικρών, στο ανώτερο τμήμα του κίονα και αδυνατούν να τον οδηγήσουν σε ανατροπή και για ιδιαίτερα υψηλές τιμές επιταχύνσεων, ενώ μακροπερίοδοι σεισμοί ενεργοποιούν σχεδόν όλους τους αρμούς του κίονα με σημαντικές στροφές περί τον κατακόρυφο άξονα, και φαίνεται ότι μπορούν να τον ανατρέψουν και για μέτριες τιμές επιταχύνσεων.

- Οι αρχαίοι κίονες, σχεδόν κατά κανόνα, εφόσον δεν παρουσιάζουν βλάβες, βρίσκονται σε κατακόρυφη στάση, και εδράζονται σε δύσκαμπτη βάση έχουν τη δυνατότητα να αντιστέκονται χωρίς να ανατρέπονται σε μεγάλες σεισμικές δράσεις. Όσο, πάντως, η κατάσταση ενός κίονα αποκλίνει από τις προαναφερθείσες προϋποθέσεις υψηλής ευστάθειας τόσο μειώνεται (κάποιες φορές εκθετικά) η αντισεισμική ικανότητά του.
- Οι παραμορφώσεις (δηλαδή οι παραμένουσες μετατοπίσεις και στροφές) που παρουσιάζει ένας κίονας μετά από ένα ισχυρό σεισμό δεν αποτελούν ένδειξη του μεγέθους των μετακινήσεων που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της δόνησης.
- Σε ό,τι αφορά την απόκριση των διατηρούμενων σήμερα αρχαίων κιονοστοιχιών (δηλαδή, των τμημάτων αρχαίων μνημείων που περιλαμβάνουν κίονες και λίθους επιστυλίου σε εν ξηρώ επαφή), τα προαναφερθέντα συμπεράσματα ισχύουν επίσης, με μία μικρή αλλά σημαντική διαφοροποίηση: η συμπεριφορά μιας κιονοστοιχίας ακόμα και με ασύνδετα επιστύλια δεν χαρακτηρίζεται από την έντονα μη-γραμμική συμπεριφορά που παρουσιάζουν οι μεμονωμένοι κίονες.
- Επιπλέον, η ύπαρξη συνδετήριων στοιχείων στα επιστύλια μειώνει την πιθανότητα ανατροπής των κιονοστοιχιών.
- Τέλος, οι γωνίες των κιονοστοιχιών αποτελούν τα πιο ευάλωτα τμήματά τους.

4. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ABAQUS ΝΑ ΠΡΟΒΛΕΠΕΙ ΤΗΝ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΞΗΡΟΛΙΘΟΔΜΗΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

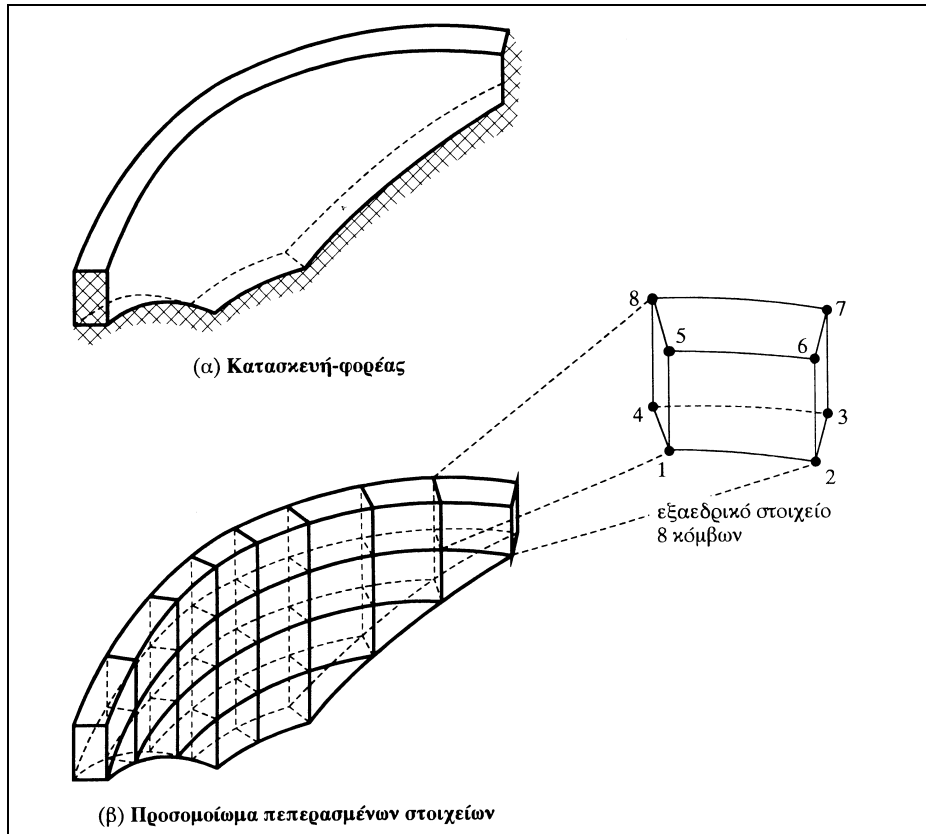
4.1 Περί του λογισμικού ABAQUS

4.1.1 Η υπολογιστική μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Στην παρούσα εργασία, το φαινόμενο της σεισμικής απόκρισης αρχαίων μνημείων διερευνάται αριθμητικά με την χρήση του λογισμικού ABAQUS/Explicit το οποίο βασίζεται στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως μια ειδική διατύπωση των μεθόδων Rayleigh-Ritz και σταθμικών υπολοίπων, είναι ίσως η πιο διαδεδομένη σύγχρονη προσεγγιστική μέθοδος για την επίλυση προβλημάτων της Μηχανικής.

Η μελέτη φαινομένων στην Φύση, όπως είναι η ανάλυση των φορέων στην Στατική και την Δυναμική, μέσω σύγχρονων υπολογιστικών μέσων ακολουθεί δύο βασικά στάδια: α) την μαθηματική διατύπωση του φαινομένου και β) την αριθμητική ανάλυση του μαθηματικού προσομοιώματος. Η μαθηματική διατύπωση βασίζεται σε διάφορες απλοποιητικές παραδοχές αναφορικά με την περιγραφή του εκάστοτε φαινομένου, ενώ η αριθμητική ανάλυση χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους, όπως είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, και τις δυνατότητες του υπολογιστή προκειμένου να δώσει λύση στην μαθηματική διατύπωση του εκάστοτε προβλήματος.

Η θεμελιώδης αρχή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στην αντικατάσταση του γεωμετρικά σύνθετου πεδίου του εκάστοτε προς μελέτη «φυσικού αντικειμένου» (π.χ. ενός φορέα) με ένα σύνολο απλών υποπεδίων τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία και συνδέονται μεταξύ τους μέσω κόμβων. Ο προς επίλυση φορέας, δηλαδή, διακριτοποιείται σε επί μέρους στοιχεία, τα οποία εφάπτονται μεταξύ τους και συνδέονται με τους κόμβους που βρίσκονται στα σύνορα τους. Έτσι, δημιουργείται το αριθμητικό προσομοίωμα του φορέα (Εικ. 4.1). Το σύνολο των πεπερασμένων στοιχείων ονομάζεται δίκτυο ή πλέγμα.



Εικ. 4.1: Προσομοίωση τοξωτού φράγματος με πεπερασμένα στοιχεία¹²⁴.

Η μέθοδος, η οποία δίνει την δυνατότητα επιβολής στον φορέα είτε δύναμης, είτε και μετατόπισης, βασίζεται σε συγκεκριμένο αλγόριθμο υπολογισμού. Ο αλγόριθμος καταλήγει σ' ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων των οποίων το πλήθος ταυτίζεται με το πλήθος των βαθμών ελευθερίας του προβλήματος. Έτσι ο αλγόριθμος μπορεί να επιλυθεί μόνο με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο, παρά το ότι η μέθοδος διατυπώθηκε πριν από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, η εφαρμογή και η εξέλιξή της ήταν ραγδαίες από την δεκαετία του 1960 και μετά, συμβαδίζοντας με την πρόοδο της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δίνονται υπό μορφή τάσεων και παραμορφώσεων στο σύνορο (ή και στο εσωτερικό) των στοιχείων.

Η βιβλιογραφία η σχετική με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι πολύ πλούσια. Μία πλήρης αναφορά της δεν είναι πρακτικώς εφικτή και όποια σχετική προσπάθεια ευρίσκεται εκτός των ορίων της παρούσας εργασίας. Σημειώνεται, πάντως, ότι το βασικό τυπολόγιο της μεθόδου μπορεί να βρεθεί είτε σε κάποιο από τα βασικά εγχειρίδια που παρουσιάζεται η μέθοδος (π.χ. Μ. Παπαδρακάκης 1996), είτε σε κάποιο από τα πρώτα άρθρα που επιχείρησαν να κάνουν ευρύτερα γνωστή την μέθοδο (π.χ. Δ. Ε. Μπέσκος 1993).

¹²⁴ Από Παπαδρακάκης 1996, σχ. iii, σελ. 4.

4.1.2 Ο αλγόριθμος δυναμικής ανάλυσης του υποπρογράμματος ABAQUS/Explicit

Το λογισμικό ABAQUS είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων H/Y, το οποίο δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει μεταξύ δύο τεχνικών ανάλυσης μέσω των υποπρογραμμάτων ABAQUS/Standard και ABAQUS/Explicit. Καταλληλότερο από τα δύο να επιλύει προβλήματα στα οποία ο φορέας υποβάλλεται σε δυναμικά φορτία, τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα σημαντικές μη-γραμμικές παραμορφώσεις, είναι το δεύτερο. Για αυτό και επιλέχθηκε για να χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

Ο αλγόριθμος που ακολουθείται από το υποπρόγραμμα ABAQUS/Explicit βασίζεται στην χρήση ενός κανόνα κεντρικών διαφορών (central difference rule) για την ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης αναλυτικά (explicit) με τον χρόνο, ο οποίος χρησιμοποιώντας τις κινηματικές καταστάσεις ενός επαυξητικού βήματος υπολογίζει τις κινηματικές καταστάσεις στο επόμενο επαυξητικό βήμα. Ο όρος “explicit” αναφέρεται στο γεγονός ότι η κατάσταση στο τέλος ενός επαυξητικού βήματος βασίζεται αποκλειστικά στις μετατοπίσεις, τις ταχύτητες και τις επιταχύνσεις της αρχής του επαυξητικού βήματος. Η μέθοδος ολοκληρώνει σταθερές επιταχύνσεις. Για να μπορούν τα αποτελέσματα να είναι ακριβή πρέπει το μέγεθος των επαυξητικών βημάτων να είναι μικρό έτσι ώστε οι επιταχύνσεις να είναι σταθερές κατά την διάρκεια του επαυξητικού βήματος.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στη μέθοδο explicit μπορεί να παρουσιαστεί συνοπτικώς ως ακολούθως:

Αρχικά για ένα επαυξητικό βήμα υπολογίζονται οι επιταχύνσεις των κόμβων της εξίσωσης:

$$\{\ddot{U}(t)\} = [M]^{-1} (\{P(t)\} - \{I(t)\})$$

όπου $[M]$ το μητρώο μάζας, $\{\ddot{U}(t)\}$ το διάνυσμα των επιταχύνσεων των κόμβων, $\{P\}$ το διάνυσμα των εξωτερικών δράσεων και $\{I\}$ το διάνυσμα των εσωτερικών δράσεων. Οι επιταχύνσεις ολοκληρώνονται με τον χρόνο χρησιμοποιώντας τον κανόνα κεντρικών διαφορών, ο οποίος υπολογίζει τη μεταβολή της ταχύτητας υποθέτοντας ότι οι επιταχύνσεις είναι σταθερές. Αυτή η μεταβολή προστίθεται στην τιμή που είχε η ταχύτητα στην μέση του προηγούμενου επαυξητικού βήματος ($t-\Delta t/2$), ώστε να υπολογισθεί η τιμή της ταχύτητας στην μέση του επόμενου ($t+\Delta t/2$).

$$\{\dot{U}(t+\Delta t/2)\} = \{\dot{U}(t-\Delta t/2)\} + \frac{\Delta t(t+\Delta t) + \Delta t(t)}{2} \{\ddot{U}(t)\}$$

Η ταχύτητα ολοκληρώνεται χρονικά και προστίθεται στην τιμή που έχει η μετατόπιση στην αρχή του βήματος για να υπολογισθεί η τιμή της μετατόπισης στο τέλος του βήματος:

$$U(t+\Delta t) = \{U(t)\} + \Delta t(t+\Delta t) \{ \dot{U} (t+\Delta t/2) \}$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται για τα πεπερασμένα στοιχεία οι επαυξητικές ανηγμένες παραμορφώσεις τους $d\epsilon$, οι τάσεις τους και η συνισταμένη εσωτερικών δυνάμεων των κόμβων, $\{I (t+\Delta t)\}$. Τέλος, για την συνέχιση των υπολογισμών στο επόμενο επαυξητικό βήμα αντικαθίσταται το t με $t+\Delta t$ και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Με την μέθοδο explicit, η κατάσταση του προσομοιώματος εξελίσσεται μέσα στο χρονικό διάστημα του επαυξητικού βήματος Δt , και εξαρτάται από την κατάσταση αυτού στην αρχή του επαυξητικού βήματος t . Η μέγιστη τιμή του Δt , η οποία είναι πολύ μικρή, είναι ο ελάχιστος χρόνος ο οποίος απαιτείται για να επιτευχθεί ισορροπία στο προσομοίωμα. Αν η διάρκεια ενός επαυξητικού βήματος είναι μεγαλύτερη από αυτή την μέγιστη τιμή, τότε θεωρείται ότι το επαυξητικό βήμα έχει ξεπεράσει το χρονικό όριο σταθεροποίησης (stability limit) και η ανάλυση θα δώσει ασταθή αποτελέσματα. Αυτό αποφεύγεται με τον ορισμό πολύ μικρού επαυξητικού βήματος (είτε αυτόματα από το πρόγραμμα, είτε με καθορισμό από τον χρήστη) και με διαμόρφωση δικτύου με ομοιόμορφα στοιχεία.

Βασικό πλεονέκτημα της explicit ανάλυσης είναι ότι αποτελεί τον καταλληλότερο τρόπο προσομοίωσης δυναμικών φαινομένων υψηλών ταχυτήτων στα οποία η απόκριση της κατασκευής αλλάζει ταχύτατα. Αυτό ισχύει διότι για την ακριβή παρακολούθηση των ταχύτατα μεταβαλλόμενων μεγεθών και της απόκρισης μιας κατασκευής απαιτούνται πολλά μικρά βήματα, τα οποία πετυχαίνονται με την εν λόγω ανάλυση. Σημειώνεται ότι τα επαυξητικά βήματα εξαρτώνται αποκλειστικά από την υψηλότερη συχνότητα του προσομοιώματος και ότι είναι ανεξάρτητα του είδους και της διάρκειας της φόρτισης, γιατί η λύση είναι δυνατή χωρίς επαναλήψεις (iterations) και χωρίς τον υπολογισμό των επαυξητικών μητρώων ακαμψίας.

Επίσης, η explicit ανάλυση δεν απαιτεί μεγάλη χωρητικότητα σκληρού δίσκου και μνήμη H/Y , ούτε έχει μεγάλο υπολογιστικό χρονικό κόστος, καθώς οι επιταχύνσεις των κόμβων εξαρτώνται αποκλειστικά από την μάζα και τις δράσεις οι οποίες εφαρμόζονται πάνω σε αυτούς, γεγονός που καθιστά τους υπολογισμούς των μεγεθών των κόμβων ιδιαίτερα γρήγορους. Θετικό είναι επίσης ότι ο υπολογιστικός χρόνος δεν αυξάνει γραμμικά με την αύξηση του μεγέθους των βαθμών ελευθερίας του προσομοιώματος, αλλά με ρυθμό αύξησης που φθίνει όσο μεγαλώνει το προσομοίωμα.

4.2 Συγκρίσεις θεωρητικών τιμών – αριθμητικών αποτελεσμάτων για την ελεύθερη ταλάντωση λικνιζόμενου σώματος

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ο πρώτος έλεγχος της ικανότητας του λογισμικού ABAQUS/Explicit να προβλέπει την δυναμική απόκριση λίθινων σωμάτων πραγματοποιήθηκε μέσω της σύγκρισης αποτελεσμάτων του με σχετικές θεωρητικές τιμές οι οποίες προκύπτουν από την θεμελιώδη εργασία του G. Housner (1963). Γι αυτόν τον έλεγχο επελέγη να προσομοιωθεί ο λικνισμός σώματος από γρανίτη εδραζόμενου σε βάση από γρανίτη, δεδομένου ότι για αυτό το στοιχείο διατίθενται πειραματικά αποτελέσματα. Έτσι, ήταν δυνατή -όπως θα φανεί στα επόμενα- όχι μόνον η σύγκριση των αποτελεσμάτων του ABAQUS με τις προβλέψεις Housner, αλλά και η σύγκριση των δύο με τα πειραματικά αποτελέσματα. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό ABAQUS περιγράφονται λεπτομερώς στην επόμενη παράγραφο, όπου παρουσιάζεται και η σύγκριση με τις πειραματικές μετρήσεις.

Οι προβλέψεις του Housner αφορούν την περίοδο ελεύθερης λικνιστικής ταλάντωσης ενός απαραμόρφωτου σώματος του οποίου το ύψος είναι τετραπλάσιο της βάσης του. Με βάση την διδιάστατη ανάλυση της κίνησης ενός απαραμόρφωτου σώματος με ραδινές διαστάσεις (δηλαδή με ύψος τρεις ή περισσότερες φορές τη βάση του), το οποίο ταλαντώνεται ελεύθερα μετά από την εκτροπή του κατά γωνία θ_0 , ο Housner έδειξε ότι η

περίοδος ταλάντωσης του σώματος (T) προκύπτει από την εξίσωση:
$$T = \frac{4}{p} \cosh^{-1} \left(\frac{1}{1 - \frac{\theta_0}{\theta_c}} \right),$$

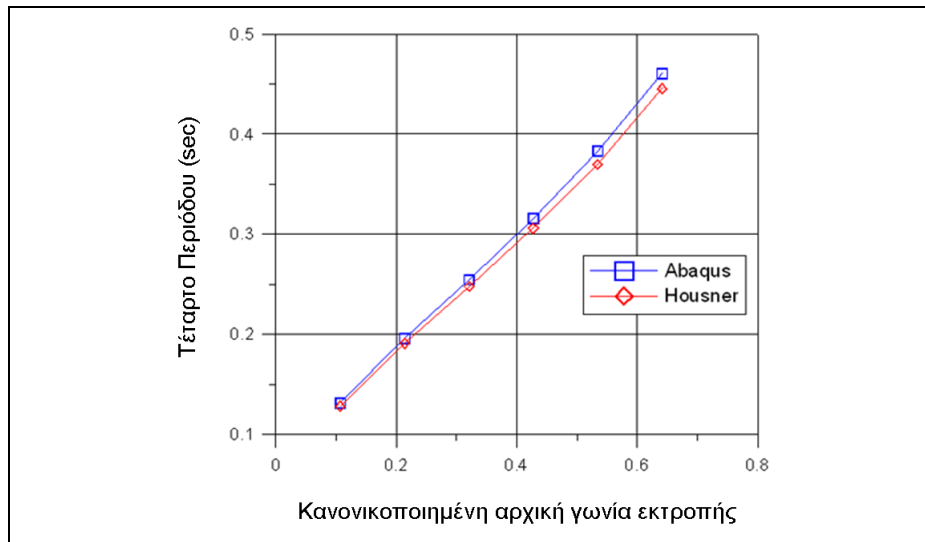
όπου $p = \sqrt{\frac{mgR}{I_0}}$, m η μάζα του σώματος, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, R η απόσταση του κέντρου μάζας του σώματος από το σημείο περιστροφής του, I_0 η μαζική ροπή αδράνειάς του ως προς το σημείο περιστροφής του, θ_0 η αρχική γωνία εκτροπής του και θ_c η (κρίσιμη) μέγιστη γωνία που μπορεί να εκτραπεί το σώμα χωρίς να ανατραπεί. Επομένως, η περίοδος ταλάντωσης του σώματος εξαρτάται από τα γεωμετρικά/αδρανειακά χαρακτηριστικά του, μέσω της παραμέτρου συχνότητας p , και από την κανονικοποιημένη γωνία εκτροπής θ_0 / θ_c .

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής των σχέσεων του Housner για την περιγραφή του λικνισμού ενός σώματος λυγηρότητας 4, το οποίο εκτρέπεται κατά γωνία κυμαινόμενη από 1.5° έως και 9° (με αυξητικό βήμα ίσο με 1.5°), παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 και στο Διάγραμμα 4.1. Στις ίδιες θέσεις έχουν περιληφθεί και τα αντίστοιχα αποτελέσματα προσομοιώσεων με το ABAQUS/Explicit. Η εφαρμογή αφορά την ελεύθερη ταλάντωση ενός τεμαχίου από γρανίτη, διαστάσεων $0.250 \times 1.000 \times 0.754$ [m], το οποίο λικνίζεται επί βάσης

επίσης από γρανίτη. Τα στοιχεία δείχνουν ότι οι θεωρητικές και οι αριθμητικές προβλέψεις πρακτικώς συμπίπτουν.

Αρχική γωνία εκτροπής (θ), σε μοίρες	Κανονικοποιημένη αρχική γωνία εκτροπής (θ/θ_c)	Τέταρτο περιόδου (T/4), σε sec		Ποσοστιαία (%) διαφορά, $[100*(T_H-T_A)/T_H]$
		Housner ($T_H/4$)	Abaqus ($T_A/4$)	
1.50	0.11	0.13	0.13	-2.37
3.00	0.21	0.19	0.20	-2.54
4.50	0.32	0.25	0.25	-2.69
6.00	0.43	0.31	0.32	-3.16
7.50	0.53	0.37	0.38	-3.54
9.00	0.64	0.45	0.46	-3.37

Πίν. 4.1: Θεωρητικές τιμές και αριθμητικές προβλέψεις: Περίοδοι ελεύθερης ταλάντωσης λίθινου σώματος με ύψος τετραπλάσιο της βάσης του, για διάφορες αρχικές γωνίες εκτροπής του σώματος.



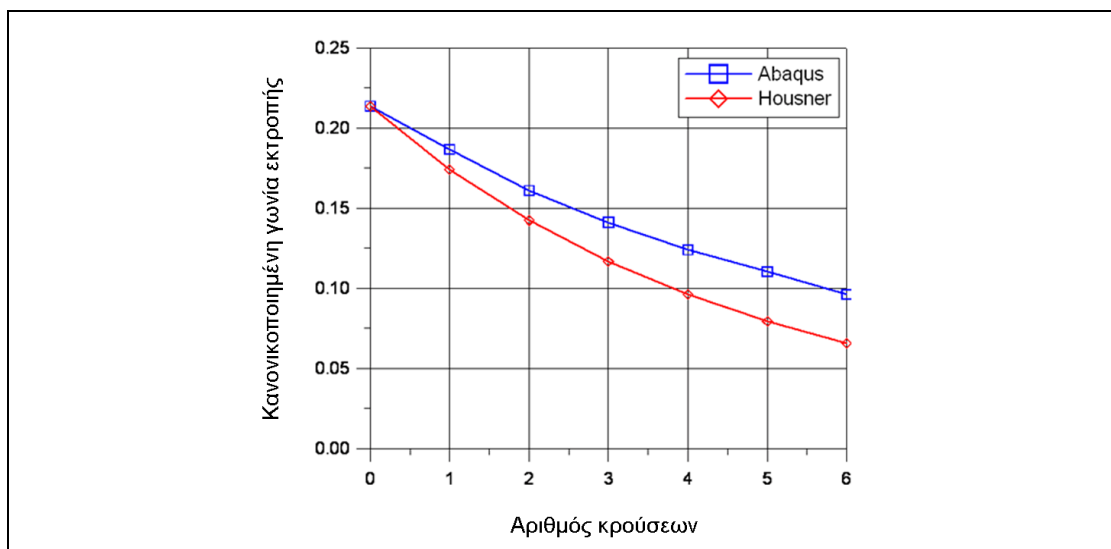
Διάγρ. 4.1: Σύγκριση θεωρητικών τιμών – αριθμητικών προβλέψεων: Περίοδοι ελεύθερης ταλάντωσης λίθινου σώματος με ύψος τετραπλάσιο της βάσης του, για διάφορες αρχικές γωνίες εκτροπής του σώματος.

Ο Housner διατύπωσε, επίσης, και την σχέση $\phi_n = 1 - \sqrt{1 - r^n [1 - (1 - \phi_0)^2]}$, όπου $r = (1 - \frac{2mR^2\theta_c^2}{I_0})^2$, σύμφωνα με την οποία υπολογίζεται η μέγιστη γωνία εκτροπής μετά από μία κρούση του λικνιζόμενου σώματος στην βάση του. Η εφαρμογή της σχέσης αυτής για αρχική γωνία εκτροπής ίση με 3° για το σώμα που αναφέρθηκε προηγουμένως, καθώς και τα αποτελέσματα που έδωσε η αντίστοιχη αριθμητική προσομοίωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2 και στο Διάγραμμα 4.2. Και αυτή η σύγκριση, αποδεικνύεται εν γένει ικανοποιητική. Παρά ταύτα, διαπιστώνεται ότι αυξανόμενου του πλήθους των κρούσεων του

λικνιζόμενου σώματος στην βάση του, αυξάνεται η διαφορά μεταξύ θεωρητικών και αριθμητικών προβλέψεων. Με άλλα λόγια, μολονότι και οι δύο προσεγγίσεις περιγράφουν ορθά την (μετά από κάθε κρούση) μείωση της γωνίας εκτροπής του ελευθέρως λικνιζόμενου σώματος, ο ρυθμός της μείωσης για τις δύο θεωρήσεις είναι διαφορετικός. Οι θεωρητικές σχέσεις υπολογίζουν μεγαλύτερη απόσβεση. Όμως, όπως θα δειχθεί στα επόμενα, οι αριθμητικές προβλέψεις προσεγγίζουν καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα (βλ. Διάγρ. 4.5). Αυτό ερμηνεύεται ως εξής: Σύμφωνα με την θεωρία, όλη η ενέργεια κάθε κρούσης μεταβιβάζεται στον ημιχώρο της θεμελίωσης, ενώ στην πραγματικότητα πάντα ένα ποσοστό της ενέργειας κρούσης (εξαρτώμενο από την ελαστικότητα του σώματος και της θεμελίωσής του) επιστρέφει στο λικνιζόμενο σώμα.

Α/Α κρούσης	Γωνία εκτροπής (θ_i), σε μοίρες		Κανονικοποιημένη γωνία εκτροπής ($\varphi_i = \theta_i / \theta_c$)		Ήμιση περιόδου ($T/2$), σε sec		Ποσοστιαία (%) διαφορά, $[100 * (\varphi_{i,H} - \varphi_{i,A}) / \varphi_{i,H}]$	Ποσοστιαία (%) διαφορά $[100 * (T_{i,H} - T_{i,A}) / T_{i,H}]$
	Housner	Abaqus	Housner ($\varphi_{i,H}$)	Abaqus ($\varphi_{i,A}$)	Housner ($T_{i,H}/2$)	Abaqus ($T_{i,A}/2$)		
0	3.00	3.00	0.21	0.21	0.38	0.39	0.00	-2.54
1	2.44	2.62	0.17	0.19	0.34	0.36	-7.31	-7.22
2	2.00	2.26	0.14	0.16	0.30	0.33	-13.18	-10.75
3	1.64	1.98	0.12	0.14	0.27	0.31	-20.82	-14.44
4	1.35	1.74	0.10	0.12	0.24	0.29	-29.01	-18.25
5	1.11	1.55	0.08	0.11	0.22	0.27	-39.35	-22.95
6	0.92	1.35	0.07	0.10	0.20	0.25	-46.93	-26.97

Πίν. 4.2: Θεωρητικές τιμές και αριθμητικές προβλέψεις: Σταδιακάς μειούμενη περίοδος ταλάντωσης λίθινου σώματος με ύψος τετραπλάσιο της βάσης του, το οποίο εκτρέπεται κατά γωνία 3.0° και αφήνεται ελεύθερα να λικνιστεί.



Διάγρ. 4.2: Σύγκριση θεωρητικών τιμών – αριθμητικών προβλέψεων: Απόσβεση της ταλάντωσης σώματος με ύψος τετραπλάσιο της βάσης του που είχε αρχικά εκτραπεί κατά γωνία 3.0° .

4.3 Αριθμητική αναπαραγωγή πειραμάτων δυναμικής απόκρισης ξηρολιθοδομών

4.3.1 Συνοπτική περιγραφή των πειραμάτων

Μετά από τους πρώτους ελέγχους της αποτελεσματικότητας του λογισμικού ABAQUS/Explicit, μέσω συγκρίσεων θεωρητικών προβλέψεων με αντίστοιχες αριθμητικές, ακολούθησαν άλλοι, στους οποίους συγκρίθηκαν πειραματικά αποτελέσματα με αντίστοιχες αριθμητικές προβλέψεις. Για τις ανάγκες των δεύτερων ελέγχων επελέγησαν διάφορα αποτελέσματα τα οποία προέρχονται από δύο εκτεταμένες πειραματικές διερευνήσεις:

1) Η πρώτη έλαβε χώρα στο Εθνικό Εργαστήριο Πολιτικών Μηχανικών της Πορτογαλίας (Peña et al. 2007, 2008). Σε αυτήν διερευνήθηκε (με την χρήση σεισμικής τράπεζας) η δυναμική απόκριση: (α) τεσσάρων πρισματικών (μονολιθικών) δοκιμίων, διαφορετικής ραδινότητας (Εικ. 4.2 αριστερά, και Πίν. 4.3), (β) ενός δίλιθου στύλου (Εικ. 4.2 κέντρο, Πίν. 4.3), και (γ) ενός τρίλιθου πλαισίου (Εικ. 4.2 δεξιά, Πίν. 4.3). Όλα τα δοκίμια ήταν κατασκευασμένα από γρανίτη (όπως και η βάση τους, που ήταν πακτωμένη στην σεισμική τράπεζα του εργαστηρίου), και είχαν κατασκευαστεί με μικρές αποτμήσεις των ακμών τους (γωνίας 45° και πλάτους 5 mm), για προστασία τους από μικροθραύσεις/απολεπίσεις κατά τον λικνισμό τους στα πειράματα. Τα δοκίμια αυτά υποβλήθηκαν σε πειράματα ελεύθερου λικνισμού, ή αρμονικών ή τυχαίων διεγέρσεων της βάσης τους. Όλες οι διεγέρσεις εφαρμόζονταν (σε μία διάσταση) παραλλήλως στο πλάτος των δοκιμίων.



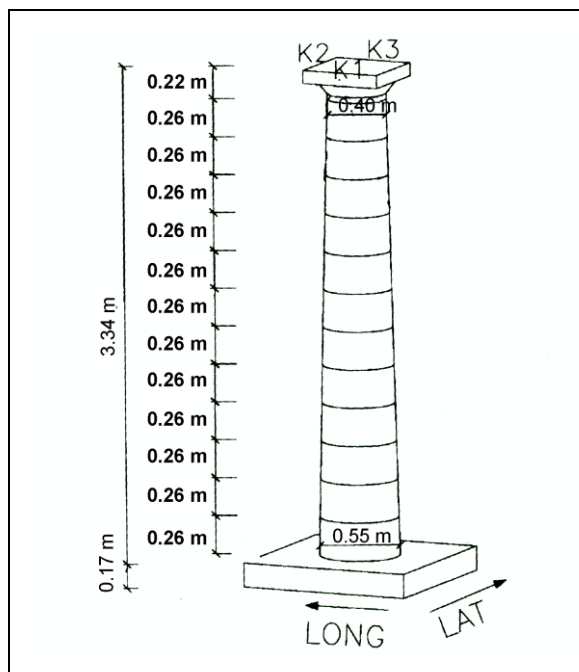
Εικ. 4.2: Φωτογραφίες των διαφόρων δοκιμίων από γρανίτη¹²⁵ των οποίων εξετάστηκε η δυναμική συμπεριφορά στο Εθνικό Εργαστήριο Πολιτικών Μηχανικών της Πορτογαλίας.

¹²⁵ Από Peña et al. 2008, fig. 1, p. 955.

Δοκίμιο	Πλάτος (m)	Ύψος (m)	Πάχος (m)
Μονολιθικό # 1	0.250	1.000	0.754
Μονολιθικό # 2	0.170	1.000	0.502
Δίλιθος στύλος (κάτω λίθος)	0.200	0.600	0.550
Δίλιθος στύλος (άνω λίθος)	0.150	0.600	0.400
Τρίλιθο πλαίσιο (πεσσοί)	0.220	0.800	0.650
Τρίλιθο πλαίσιο (δοκός)	1.020	0.150	0.650
Βάση	1.000	0.250	0.750

Πίν. 4.3: Διαστάσεις των δοκιμών από γρανίτη (Από Peña et al. 2007).

2) Η δεύτερη πειραματική διερεύνηση (της οποίας αποτελέσματα, επίσης, αξιοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη) πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου (Mouzakis et. al. 2002). Αυτή αφορούσε την σεισμική συμπεριφορά ενός δοκιμίου που προσομοίωνε (με πολύ μικρές διαφοροποιήσεις) τον τυπικό κίονα του πρόναου του Παρθενώνα, σε κλίμακα 1/3 (Εικ. 4.3). Πιο συγκεκριμένα, ο εν λόγω κίονας-δοκίμιο ήταν αράβδωτος, με μείωση, αλλά χωρίς ένταση. Αποτελούνταν από 12 ισοϋψείς σπονδύλους ύψους 0.26 m και ένα κιονόκρανο ύψους 0.22 m, ενώ εδραζόταν σε μαρμάρινη βάση η οποία ήταν πακτωμένη στη σεισμική τράπεζα του εργαστηρίου του Ε.Μ.Π. Με τον κίονα αυτό, διενεργήθηκαν συνολικά 19 πειράματα. Ως διεγέρσεις της βάσης του κίονα, χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα καταγραφές τριών σεισμικών συμβάντων του ελλαδικού χώρου με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Οι καταγραφές εισάγονταν πολλαπλασιασμένες με κατάλληλους συντελεστές, έτσι ώστε οι δονήσεις να προκαλούν σημαντικές μετακινήσεις και λικνισμό στους σπονδύλους του δοκιμίου, χωρίς όμως το δοκίμιο να κινδυνεύει από κατάρρευση.



Εικ. 4.3: Σκαρίφημα με την μορφή και τις βασικές διαστάσεις του μαρμάρινου ομοιώματος του αρχαίου πολυσπόνδουλου κίονα¹²⁶.

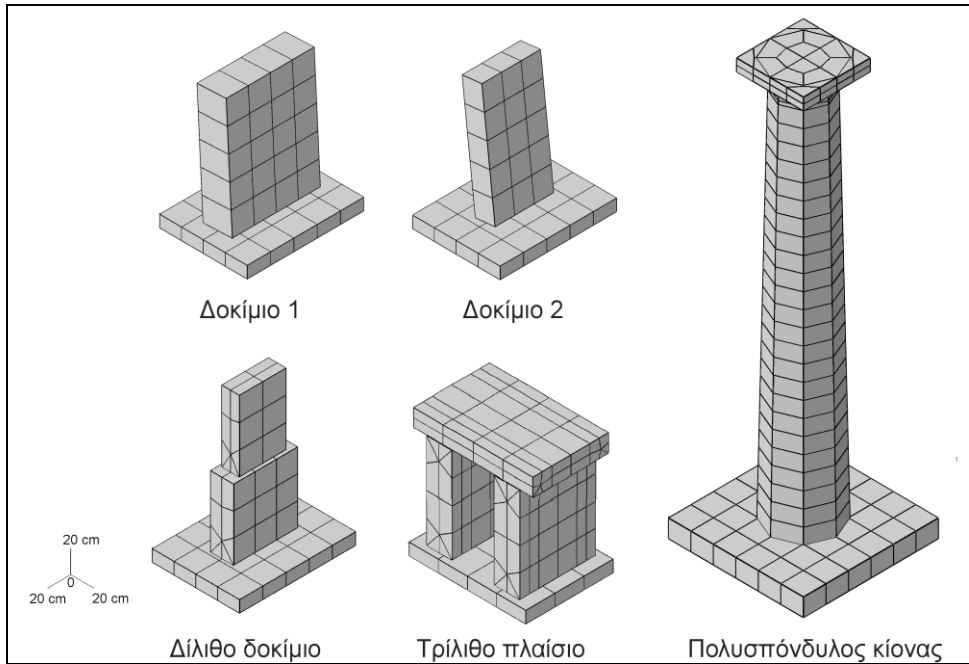
¹²⁶ Από Mouzakis et al. 2002, fig. 1b, p. 1683.

4.3.2 Τα αριθμητικά προσομοιώματα των διαφόρων δοκιμών

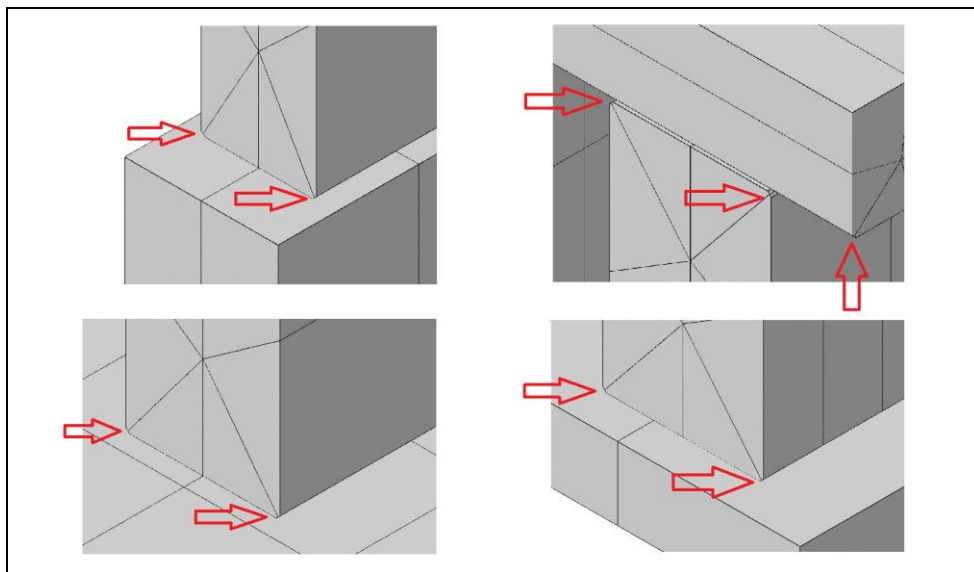
Με στόχο την αριθμητική αναπαραγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων, τόσο για τα δοκίμια από γρανίτη, όσο και για τον πολυσπόνδυλο κίονα, διαμορφώθηκαν με το λογισμικό ABAQUS, τρισδιάστατα αριθμητικά προσομοιώματα των διάφορων δοκιμών (Εικ. 4.4). Στα προσομοιώματα κάθε λίθινο τεμάχιο προσομοιώθηκε έτσι, ώστε να αποτελεί ξεχωριστό μέλος/«εξάρτημα». Η διακριτοποίηση όλων των προσομοιωμάτων έγινε με την χρήση τρισδιάστατων εξαεδρικών στοιχείων 8 κόμβων (Εικ. 4.4). Συνέπεια αυτής της επιλογής ήταν να διαφέρει ολίγον το προσομοίωμα του κίονα από το δοκίμιο, στο ότι η περιφέρεια του κορμού του ήταν πολυγωνική (Εικ. 4.4 δεξιά) και όχι κυλινδρική (Εικ. 4.3).

Σημειώνεται ότι η πυκνότητα των δικτύων των πεπερασμένων στοιχείων επιλέχθηκε να είναι μέτρια και η διάταξη των πεπερασμένων στοιχείων, κατά το δυνατόν, απλή, ώστε το υπολογιστικό κόστος (σε όρους χρόνου, κυρίως) των αριθμητικών επιλύσεων να μην απαγορεύει την πραγματοποίηση μεγάλου πλήθους παραμετρικών αναλύσεων. Αναφέρεται, επίσης, ότι οι αποτιμήσεις των ακμών στα διάφορα λίθινα τεμάχια των δοκιμών από γρανίτη αναπαρήχθησαν τόσο στο αριθμητικό προσομοίωμα του δίλιθου στύλου (Εικ. 4.5 αριστερά), όσο και σε αυτό του τρίλιθου πλαισίου (Εικ. 4.5 δεξιά). Αυτές οι αποτιμήσεις αγνοήθηκαν, αντιθέτως, στα προσομοιώματα των μονολιθικών δοκιμών. Η τελευταία επιλογή βασίστηκε στο ότι προκαταρκτικές αριθμητικές επιλύσεις έδειξαν ότι, σε αυτά τα ιδιαιτέρως απλής μορφής δοκίμια, οι αποτιμήσεις επηρεάζουν με αμελητέο τρόπο τα αποτελέσματα των επιλύσεων. Το υλικό των διαφόρων δοκιμών προσομοιώθηκε ως ελαστικό και ισότροπο με την χρήση των γνωστών ιδιοτήτων του γρανίτη ($\rho = 2670 \text{ kg/m}^3$, $E = 53000 \text{ MPa}$, $\nu = 0.20$) και του μαρμάρου ($\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$, $E = 80000 \text{ MPa}$, $\nu = 0.26$).

Όλα τα αριθμητικά μοντέλα φορτίστηκαν από το ίδιο βάρος τους. Οι διάφορες δυναμικές φορτίσεις εφαρμόστηκαν στις βάσεις των δοκιμών. Πιο συγκεκριμένα, με βάση τις γνωστές μετατοπίσεις των βάσεων των δοκιμών σε κάθε πείραμα, καθορίστηκαν σε κάθε επίλυση οι χρονοϊστορίες (και στις τρεις κύριες διευθύνσεις) των μετατοπίσεων των βάσεων των προσομοιωμάτων. Η μόρφωση του προσομοιώματος του πολυσπόνδυλου κίονα έγινε με τέτοιο τρόπο, ώστε η διεύθυνσή του 1 να ταυτίζεται με την κύρια οριζόντια διεύθυνση (δηλαδή, την διαμήκη) του κίονα κατά την διενέργεια των πειραμάτων [στο σκαρίφημα της Εικόνας 4.9 επισημαίνεται ως LONG(ITUDINAL)]. Στην διεύθυνση αυτή εφαρμόστηκε η μεγαλύτερη επιτάχυνση, όπως στα πειράματα. Η διεύθυνση 2 του προσομοιώματος ταυτίστηκε με την κατακόρυφη και, επομένως, η 3 με την δεύτερη οριζόντια [δηλαδή, την εγκάρσια/LAT(ERAL)].



Εικ. 4.4: Τα αριθμητικά προσομοιώματα των δοκιμών από γρανίτη και του πολυσπόνδουλου κίονα.



Εικ. 4.5: Οι αποτμήσεις ακμών (επισημασμένες με κόκκινα βέλη) στα τεμάχια του δίλιθου στύλου (αριστερά) και του τρίλιθου πλαισίου.

4.3.3 Βαθμονόμηση των παραμέτρων για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των διεπιφανειών

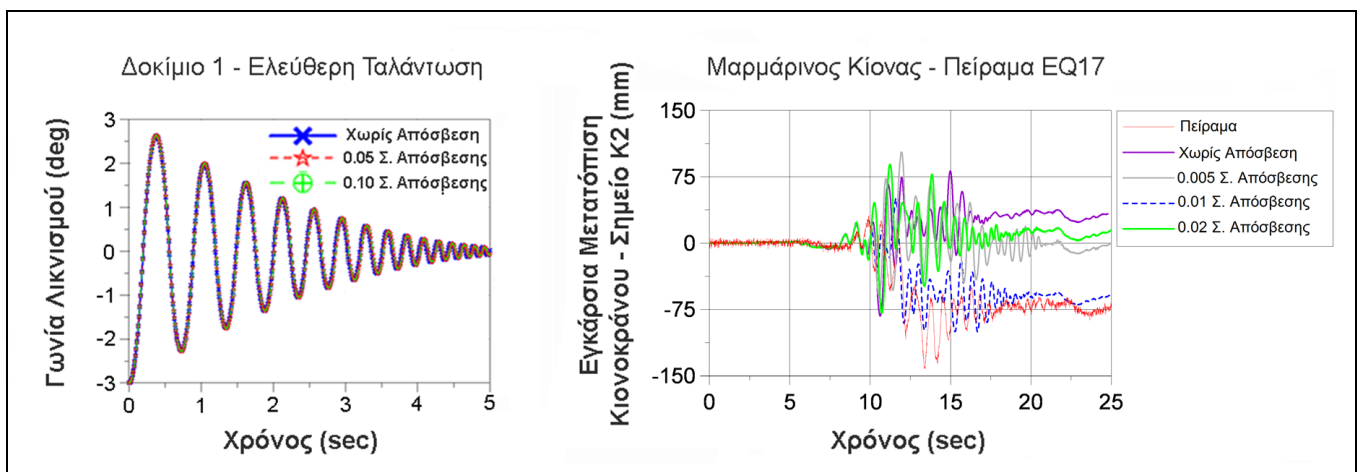
Η προσομοίωση της συμπεριφοράς των επιφανειών επαφής των διαφόρων λίθινων τεμαχίων έγινε με την χρήση κατάλληλων προσομοιωμάτων, τα οποία: (α) Κατά μήκος της διεπιφάνειας λαμβάνουν υπ' όψιν νόμο για τον μηχανισμό της τριβής καθώς και απόσβεση.

Προς τούτο, γίνεται χρήση κατάλληλων συντελεστών τριβής και απόσβεσης, αντιστοίχως. (β) Καθέτως προς την διεπιφάνεια, προβλέπουν την μεταβίβαση τάσεων, όταν οι επιφάνειες του αρμού ευρίσκονται σε επαφή, και τον μηδενισμό των τάσεων, όταν οι επιφάνειες διαχωρίζονται.

Οι συντελεστές τριβής που χρησιμοποιήθηκαν είναι 0.50 και 0.70 στις διεπιφάνειες γρανίτη και μαρμάρου, αντίστοιχα. Αυτοί επιλέχθηκαν σύμφωνα με τα στοιχεία της σχετικής βιβλιογραφίας.

Αναφορικά με τον συντελεστή απόσβεσης στις διεπιφάνειες, σημειώνεται ότι δεν συμπεριλήφθηκε στις προσομοιώσεις των πειραμάτων που αφορούσαν τα μονολιθικά δοκίμια και το δίλιθο στύλο από γρανίτη. Αυτό, διότι προκαταρκτική παραμετρική διερεύνηση της επιρροής του εν λόγω συντελεστή στην προσομοίωση του πειράματος ελεύθερης ταλάντωσης του δοκιμίου 1, με αρχική γωνία εκτροπής 3 μοίρες, έδειξε ότι η επιρροή του συντελεστή απόσβεσης στις αριθμητικές προβλέψεις είναι αμελητέα (Διαγρ. 4.3).

Αντιθέτως, χρησιμοποιήθηκε συντελεστής απόσβεσης στις διεπιφάνειες ίσος με 0.01 στην προσομοίωση: (i) ενός πειράματος αρμονικής διέγερσης του τρίλιθου πλαισίου, και (ii) ενός πειράματος σεισμικής διέγερσης του πολυσπόνδουλου κίονα. Η τιμή αυτή υιοθετήθηκε με βάση σχετική παραμετρική διερεύνηση που αφορούσε στην προσομοίωση του (πιο πολύπλοκου) πειράματος με τον κίονα. Κατά την διερεύνηση εξετάστηκαν τιμές του συντελεστή απόσβεσης ίσες με 0, 0.005, 0.01 και 0.02. Τα καλύτερα αποτελέσματα (τα οποία παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο) προέκυψαν από την προσομοίωση στην οποία ο συντελεστής απόσβεσης είχε τεθεί ίσος με 0.01 (Διαγρ. 4.4).



Διαγρ. 4.3 και 4.4: Αποτελέσματα διερεύνησης της επιρροής του συντελεστή απόσβεσης στις διεπιφάνειες των μελών των προσομοιωμάτων, τα οποία προέκυψαν από την προσομοίωση ενός πειράματος ελεύθερης ταλάντωσης μονολιθικού δοκιμίου (αριστερά) και ενός πειράματος σεισμικής διέγερσης πολυσπόνδουλου κίονα.

Διευκρινίζεται, επίσης, ότι τόσο στις αριθμητικές αναλύσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως, όσο και στις υπόλοιπες που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία, ο συντελεστής τριβής ολίσθησης (μ_k) έχει ορισθεί ίσος με τον συντελεστή στατικής τριβής (μ_s). Αν και αυτό, φυσικά, δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, οι διαφορές μεταξύ του στατικού και του κινηματικού συντελεστή τριβής δεν είναι μεγάλες (ειδικά όταν η κατακόρυφη τάση στις διεπιφάνειες είναι μεγάλη). Διάφορες πειραματικές διερευνήσεις σε δοκίμια μαρμάρου και ασβεστόλιθου έχουν δώσει αποτελέσματα που κατά μέσο όρο συγκλίνουν στις ακόλουθες τιμές: $\mu_s = 0.75 (\pm 0.05)$ και $\mu_k = 0.60 (\pm 0.10)$ ¹²⁷. Λόγω της αβεβαιότητας περί της ακριβούς τιμής του συντελεστή της τριβής ολίσθησης, συνήθως, οι ερευνητές που εκτελούν αριθμητικές αναλύσεις τον θέτουν ίσο με τον στατικό συντελεστή¹²⁸.

Αυτή η επιλογή ($\mu_s = \mu_k$) υιοθετήθηκε και στην παρούσα εργασία, ύστερα από (περιορισμένης έκτασης) προκαταρκτική διερεύνηση, η οποία έδειξε ότι διαφορετικοί συνδυασμοί τιμών μ_s και μ_k δεν επιφέρουν σημαντική διαφοροποίηση στα αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, η προσομοίωση του σεισμικού πειράματος στον πολυσπόνδυλο κίονα πραγματοποιήθηκε όχι μόνο για $\mu_s = \mu_k = 0.70$, αλλά και για άλλους τρεις συνδυασμούς συντελεστών τριβής: $\mu_s = 0.70 / \mu_k = 0.60$, και $\mu_s = 0.70 / \mu_k = 0.50$ $\mu_s = 0.70 / \mu_k = 0.40$ (και με συντελεστή απόσβεσης ίσο με 0.01)¹²⁹.



Διαγρ. 4.5 και 4.6: Αποτελέσματα διερεύνησης της επιρροής διαφόρων συνδυασμών τιμών συντελεστών τριβής στα αποτελέσματα της προσομοίωσης ενός πειράματος σεισμικής διέγερσης πολυσπόνδυλου κίονα.

¹²⁷ Ambraseys and Psycharis 2011, p. 697.

¹²⁸ Σπανίως, προβαίνουν σε παραμετρικές διερευνήσεις για διάφορες τιμές μ_k ή για διάφορους συνδυασμούς τιμών μ_s και μ_k .

¹²⁹ Το λογισμικό Abaqus, κατά την έναρξη της σχετικής ολίσθησης δύο επιφανειών σε επαφή, μειώνει εκθετικά την ορισμένη από τον χρήστη τιμή του συντελεστή στατικής τριβής (μ_s) έως την καθορισμένη τιμή του συντελεστή τριβής ολίσθησης (μ_k) μέσω της σχέσης: $\mu = \mu_k + (\mu_s - \mu_k)e^{-d\gamma}$ (όπου γ είναι ο ρυθμός ολίσθησης, ο οποίος υπολογίζεται από το λογισμικό και d συντελεστής απομείωσης, ο οποίος ορίζεται από τον χρήστη). Στις σχετικές αριθμητικές επιλύσεις που παρουσιάζονται στην παρούσα παράγραφο ο συντελεστής απομείωσης (d) είχε τεθεί ίσος με 0.01. Τούτο προέκυψε μετά από ξεχωριστή παραμετρική διερεύνηση στην οποία ελέχθησαν επίσης οι τιμές $d=0.10$ και $d=0.30$, και διαπιστώθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν για $d=0.01$.

Αξίζει να σημειωθεί, επίσης, ότι παρά το γεγονός ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν θεωρούνται παρόμοια για όλους τους εξετασθέντες συνδυασμούς (Διαγρ. 4.5 και 4.6), αυτά που είναι τα πιο κοντινά στα πειραματικά αποτελέσματα προέκυψαν από τις προσομοιώσεις που είχαν οριστεί $\mu_s = \mu_k = 0.70$ και $\mu_s = 0.70 / \mu_k = 0.40$.

4.3.4 Συγκρίσεις πειραματικών δεδομένων – αριθμητικών προβλέψεων

Τα πειραματικά δεδομένα τα οποία προέρχονται από τις διερευνήσεις στο Εθνικό Εργαστήριο Πολιτικών Μηχανικών της Πορτογαλίας και επιλέχθηκαν για σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αριθμητική αναπαραγωγή των διαφόρων πειραμάτων, είναι τα ακόλουθα:

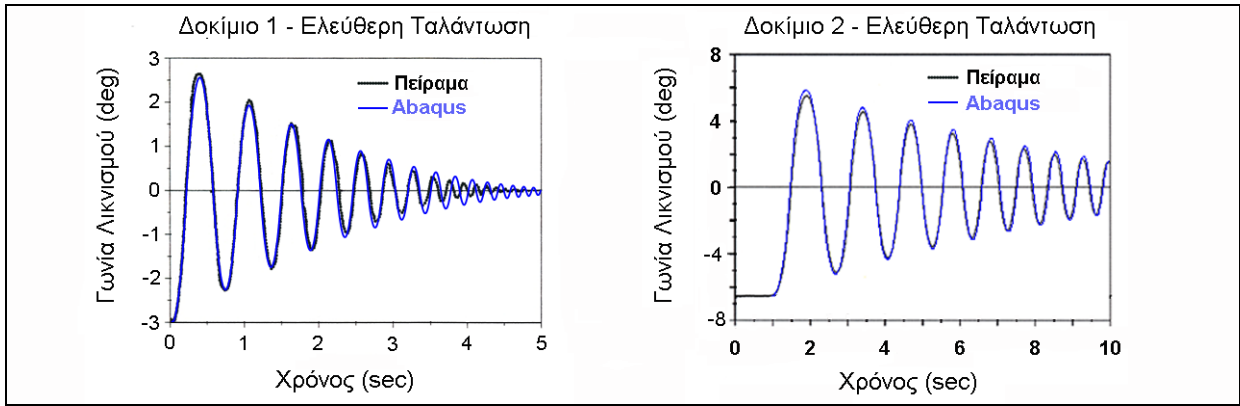
(i) Η χρονοϊστορία της γωνίας λικνισμού (στο επίπεδο της διέγερσης) κατά την ελεύθερη ταλάντωση του δοκιμίου 1, μετά την εκτροπή του δοκιμίου, κατά 3 μοίρες, από την θέση ηρεμίας και πλήρους έδρασης στην βάση του (Διάγρ. 4.7).

(ii) Η χρονοϊστορία της γωνίας λικνισμού (στο επίπεδο της διέγερσης) κατά την ελεύθερη ταλάντωση του δοκιμίου 2, μετά την εκτροπή του κατά 6.5 μοίρες (Διάγρ. 4.8).

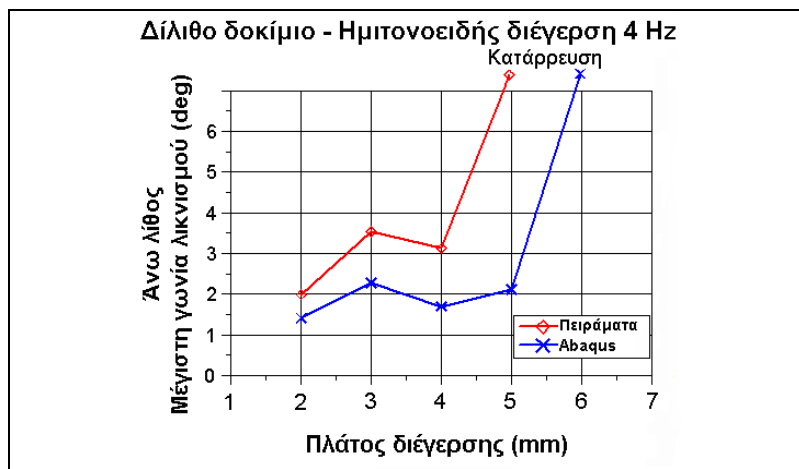
(iii) Η μέγιστη γωνία λικνισμού (στο επίπεδο της διέγερσης) του άνω λίθου του δίλιθου στύλου, όπως αυτή προέκυψε σε τέσσερα πειράματα ημιτονοειδούς διέγερσης του δοκιμίου. Στα πειράματα αυτά η συχνότητα της διέγερσης ήταν ίση με 4 Hz, ενώ το πλάτος της ήταν αυξανόμενο από πείραμα σε πείραμα κατά 1 mm (αρχής γενομένης από 2 mm), έως την κατάρρευση του δοκιμίου (Διάγρ. 4.9).

(iv) Οι χρονοϊστορίες των οριζόντιων μετατοπίσεων (στο επίπεδο της διέγερσης) των δύο πεσσών και της δοκού του τρίλιθου δοκιμίου, όπως αυτές προέκυψαν από πείραμα στο οποίο το πλαίσιο υποβλήθηκε σε ημιτονοειδή διέγερση της βάσης του με συχνότητα 3.3 Hz και πλάτος 5 mm (Διαγρ. 4.10 και 4.11).

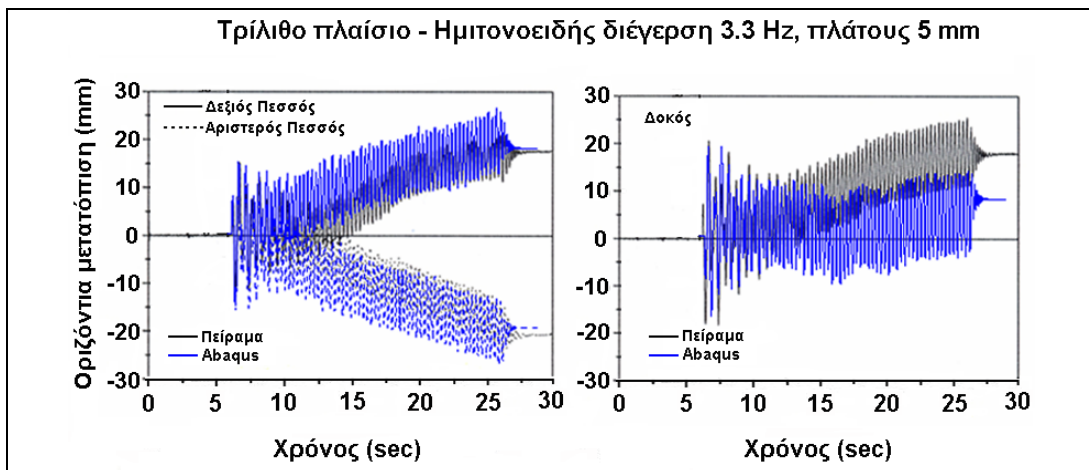
Είναι φανερό από την αντιπαραβολή πειραματικών στοιχείων και αριθμητικών αποτελεσμάτων ότι το λογισμικό προέβλεψε με σχεδόν απόλυτη ακρίβεια την ελεύθερη ταλάντωση των δύο μονολιθικών δοκιμίων από γρανίτη (Διαγρ. 4.7 και 4.8). Αναφορικά με την απόκριση του δίλιθου στύλου στις κλιμακούμενες αρμονικές διεγέρσεις, τα αριθμητικά αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν ως αρκετά ικανοποιητικά διότι: (α) αν και είναι μικρότερα από τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα, δεν υπολείπονται σημαντικά, και (β) ακολουθούν με σχετική ακρίβεια την διακύμανση των δεδομένων (Διάγρ. 4.9).



Διαγρ. 4.7 και 4.8: Συγκρίσεις αποτελεσμάτων πειραμάτων ελεύθερης ταλάντωσης δοκίμιου 1^{130} (αριστερά), και δοκίμιου 2^{131} , με σχετικές αριθμητικές προβλέψεις.



Διάγρ. 4.9: Συγκρίσεις αποτελεσμάτων πειραμάτων αρμονικής διέγερσης δίλιθου στύλου¹³² με σχετικές αριθμητικές προβλέψεις.



Διαγρ. 4.10 και 4.11: Συγκρίσεις αποτελεσμάτων πειραμάτων αρμονικής διέγερσης τρίλιθου πλαισίου¹³³ με σχετικές αριθμητικές προβλέψεις.

¹³⁰ Από Peña et al. 2007, fig. 4, p. 2392.

¹³¹ Από Peña et al. 2008, fig. 4a, p. 962.

¹³² Από Peña et al. 2008, table 5a p. 968.

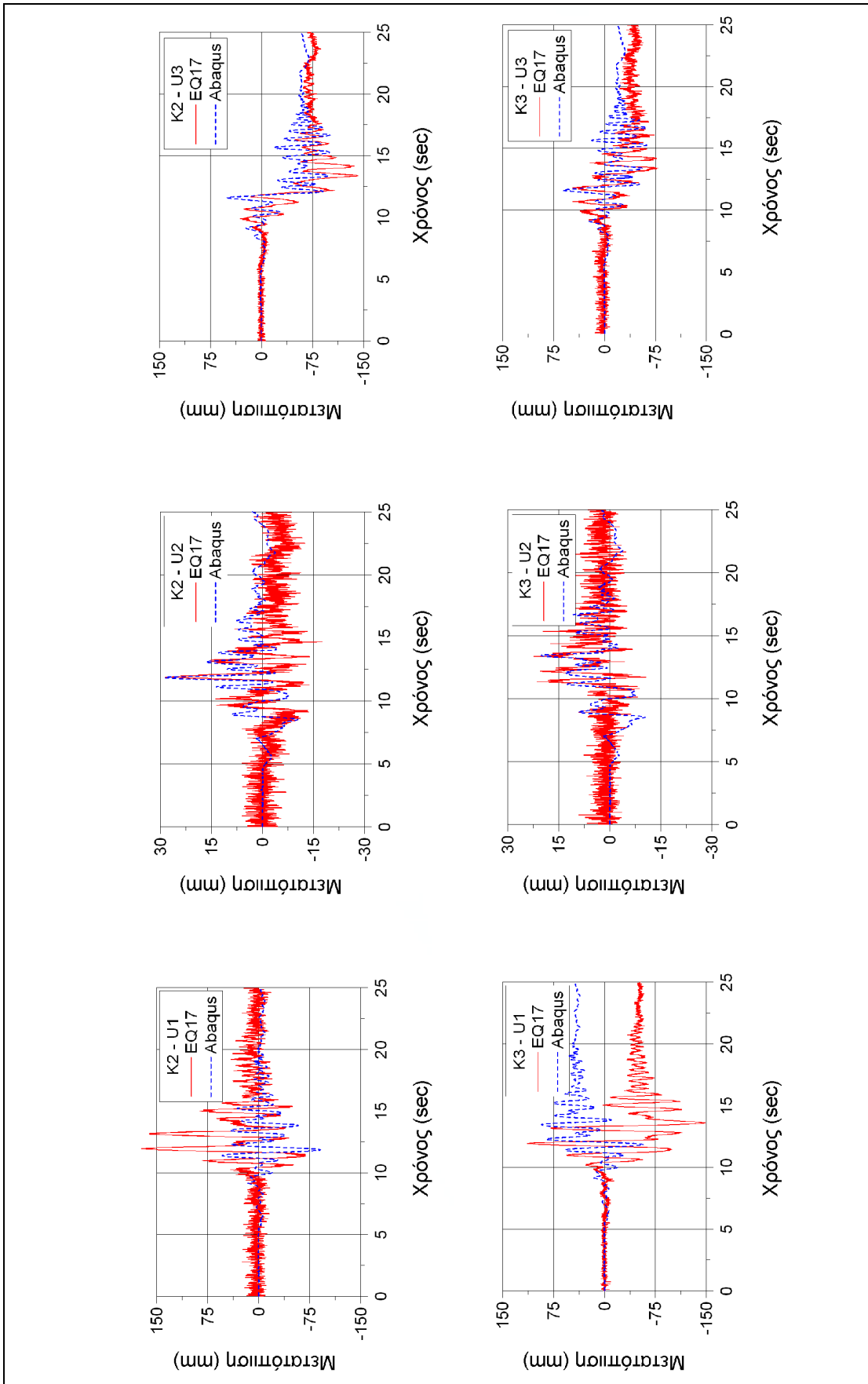
Ικανοποιητικά αποτελέσματα έδωσε και η προσομοίωση του πειράματος στο τρίλιθο πλαίσιο. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα για τις μετατοπίσεις των δύο πεσσών ήταν πολύ ικανοποιητικά (Διάγρ. 4.10), καθώς το λογισμικό προέβλεψε με επιτυχία όχι μόνο το περιεχόμενο των συχνοτήτων του λικνισμού των πεσσών και τις μέγιστες μετατοπίσεις τους στο πρώτο στάδιο του πειράματος, αλλά και τις σταδιακά αυξανόμενες ολισθήσεις τους (και, κατά συνέπεια, και τις τελικές, παραμένουσες μετατοπίσεις τους) κατά την υπόλοιπη διάρκεια του πειράματος. Μόνο οι συγκρίσεις που αφορούν την χρονοϊστορία της κύριας οριζόντιας μετατόπισης της δοκού (Διάγρ. 4.11) παρουσιάζουν αξιοσημείωτη διαφορά. Αλλά και αυτή δεν είναι μεγάλη, διότι η ολίσθηση της δοκού εμφανίστηκε και στην αριθμητική αναπαραγωγή του πειράματος, μόνο που εμφανίστηκε λίγο καθυστερημένα. Πάντως, τα υπόλοιπα καταγεγραμμένα χαρακτηριστικά της απόκρισης της δοκού προβλέφθηκαν ικανοποιητικά από το λογισμικό (όπως για τους πεσσούς).

Από τα πειραματικά δεδομένα που αφορούν την σεισμική απόκριση του ομοιώματος του μαρμάρινου πολυσπόνδουλου κίονα (η δυναμική συμπεριφορά του οποίου ελέγχθηκε στο Εργαστήριο του Ε.Μ.Π.), επιλέχθηκαν να συγκριθούν με αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα οι χρονοϊστορίες των μετατοπίσεων (και στις τρεις κύριες διευθύνσεις) δύο σημείων του κιονοκράνου του, όπως αυτές κατεγράφησαν στο πείραμα με ονομασία EQ17. Σημειώνεται ότι τα σημεία (των οποίων οι μετατοπίσεις κατεγράφησαν) ήταν στο κέντρο δύο διαδοχικών πλευρικών επιφανειών του άβακα του κιονοκράνου (Εικ. 4.3).

Το πείραμα EQ17 είναι ένα εκ των τριών πειραμάτων στα οποία έλαβε χώρα καταγραφή των μετατοπίσεων των δύο προαναφερθέντων σημείων του κιονοκράνου του δοκιμίου. Για την διέγερση της βάσης του δοκιμίου σε αυτό το πείραμα είχε εφαρμοστεί, διπλασιασμένη, η καταγραφή στην Έδεσσα του σεισμού που είχε πραγματοποιηθεί σε κοντινή περιοχή (Γρίβα) στις 21/12/1990. Ως εκ τούτου, οι μέγιστες επιταχύνσεις της σεισμικής τράπεζας (και άρα της βάσης του δοκιμίου) στις δύο κύριες οριζόντιες διευθύνσεις και στην κατακόρυφη διεύθυνση να ήταν 0.26g, 0.15g, και 0.09g, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι σε αυτό πείραμα είχαν καταγραφεί οι μεγαλύτερες μέγιστες και παραμένουσες παραμορφώσεις του κιονοκράνου του κίονα.

Οι συγκρίσεις των εν λόγω πειραματικών δεδομένων – αριθμητικών αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στα Διαγράμματα που ακολουθούν.

¹³³ Από Peña et al. 2008, fig. 11a, p. 970.

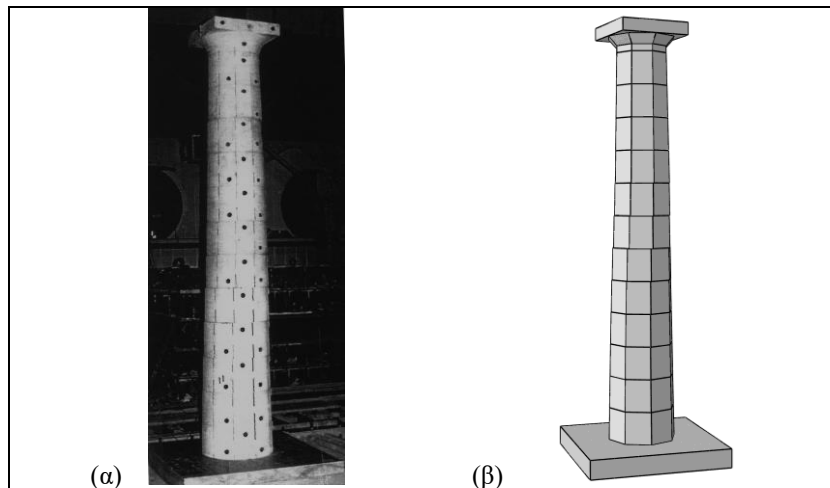


Διαγρ. 4.12 έως και 4.17: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων¹³⁴ και αριθμητικών προβλέψεων, αναφορικά με την μετατόπιση δύο σημείων του κινώκρανου (K2 και K3) του μαρμάρινου κίονα κατά την διαμήκη (αριστερά), κατακόρυφη (μέσο) και εγκάρσια διεύθυνση.

¹³⁴ Από Mouzakis et al. 2002, fig. 4, p. 1689.

Αναφορικά με το σημείο K2 (Διαγρ. 4.12 – 4.14), είναι φανερό ότι το λογισμικό προέβλεψε με αδρό αλλά ικανοποιητικό τρόπο την μορφή της ταλάντωσης του σημείου, καθώς και τις μέγιστες και τις παραμένουσες μετατοπίσεις του, και στις τρεις διευθύνσεις. Η μόνη αξιοσημείωτη διαφορά εμφανίζεται στην μέγιστη μετατόπιση του σημείου κατά τη διαμήκη διεύθυνση (Διάγρ. 4.12). Όμως και εδώ η παραμένουσα μετατόπιση που έδωσε το λογισμικό είναι σχεδόν ίση με το αντίστοιχο πειραματικό δεδομένο. Σε ό,τι αφορά το σημείο K3 (Διαγρ. 4.15 – 4.17), παρομοίως με το K2, η αριθμητική ανάλυση απέδωσε με επιτυχία αμφότερες την μορφή και το μέγεθος της ταλάντωσης του σημείου, με μόνο μία σημαντική διαφορά στην διαμήκη διεύθυνση (Διάγρ. 4.15) όπου οι παραμένουσες μετατοπίσεις έχουν αντίθετο πρόσημο. Όμως η ολίσθηση που τις προκάλεσε εκδηλώθηκε σχεδόν την ίδια χρονική στιγμή, και τα μεγέθη τους, σε απόλυτη τιμή, είναι σχεδόν ίσα (Διάγρ. 4.15).

Σημειώνεται, επίσης, ότι και οι παραμένουσες παραμορφώσεις των σπονδύλων του κίονα όπως προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση του πειράματος είναι ποιοτικά σύμφωνες με αυτές που εκδηλώθηκαν στα δύο όμοιας φόρτισης πειράματα (EQ17 και EQ18) τα οποία πραγματοποιήθηκαν με χρήση της σεισμικής καταγραφής της Έδεσσας (Mouzakis et al., 2002). Δηλαδή, και στη μία και στις άλλες περιπτώσεις, σχεδόν σε όλους τους αρμούς του κίονα εκδηλώθηκαν παραμένουσες ολισθήσεις και σημαντικότερες στροφές περί τον κατακόρυφο άξονα (Εικ. 4.6).



Εικ. 4.6: (α) Μετακινήσεις σπονδύλων του δοκιμίου του κίονα μετά από πείραμα στην σεισμική τράπεζα¹³⁵ και (β) η παραμορφωμένη στάση του αριθμητικού προσομοιώματος του κίονα, η οποία προέκυψε από την προσομοίωση του πειράματος EQ17.

¹³⁵ Από Παπαντωνόπουλος 2000, φωτ. 3.5, σελ. 3.12.

4.4 Συμπέρασμα

Εν κατακλείδι, μπορεί να διατυπωθεί ότι συνολικά από τις συγκρίσεις πειραματικών δεδομένων – αριθμητικών αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο, προκύπτει ότι με το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε κατέστη δυνατό να αναπαραχθούν υπολογιστικώς τα βασικά στοιχεία (περιεχόμενο συχνοτήτων, μέγιστες μετατοπίσεις, καθώς και παραμένουσες ολισθήσεις) της πειραματικής καταγεγραμμένης δυναμικής απόκρισης αρκετών λίθινων κατασκευών, εν ξηρώ συναρμολογημένων, διαφόρων μορφών και μεγεθών, συμπεριλαμβανομένου και ενός, τριών μέτρων ύψους, πολυσπόνδυλου μαρμάρινου κίονα.

Αξίζει να σημειωθεί, επίσης, ότι τα ικανοποιητικά αριθμητικά αποτελέσματα προέκυψαν μέσω επιλύσεων στις οποίες δεν είχαν μεταβληθεί, ουσιαστικώς, οι βασικές παράμετροι του προβλήματος, με συνέπεια να μπορεί να θεωρηθεί ότι η βαθμονόμηση του λογισμικού για την συγκεκριμένη χρήση είναι επαρκής.

Βάσει αυτών, κρίνεται ότι το λογισμικό ABAQUS/Explicit δύναται να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης κατασκευών ιδίου ή παρόμοιου χαρακτήρα, όπως είναι οι αρχαίοι κίονες ή γενικότερα αρχαίες κατασκευές από λαξευτούς λίθους εν ξηρώ συναρμολογημένους.

5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΑΡΧΑΙΩΝ ΚΙΟΝΩΝ

5.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι παραμετρικές αριθμητικές επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό ABAQUS/Explicit, για την διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης οκτώ πολυσπόνδουλων κίωνων, ελεύθερα ιστάμενων. Οι κίονες αυτοί είναι όλοι δωρικού ρυθμού και ανήκουν σε έξι αρχαία μνημεία, στα τέσσερα από τα οποία έχουν πραγματοποιηθεί ή πραγματοποιούνται εκτεταμένες εργασίες στερέωσης ή/και αναστήλωσής τους. Οι δύο από αυτούς μπορούν να χαρακτηριστούν ως μικρού μεγέθους (μια που έχουν ύψος περί τα 3 με 4 μέτρα), τέσσερις ως μεσαίου μεγέθους (αφού διαθέτουν ύψος περί τα 6 με 7 m) και δύο ως μεγάλου μεγέθους (διότι το ύψος τους είναι περί τα 9.5 με 10.5 m).

Οι εν λόγω κίονες είναι:

i) ο τυπικός κίονας της περίπτωσης του αρχαϊκού ναού της Αθηνάς στην Αρκαδική Αλίφειρα, όπως αναπαραστάθηκε από τον ανασκαφέα του μνημείου¹³⁶,

ii) ο τυπικών διαστάσεων και αριθμού σπονδύλων κίονας της περίπτωσης του Παρθενώνα,

iii) ο τυπικός κίονας του κλασικού στωικού κτηρίου στο ιερό της Αρτέμιδος στη Βραυρώνα της Αττικής, στις διαστάσεις που εκτίμησε ο μελετητής και αναστηλωτής του μνημείου¹³⁷,

iv), v) και vi) τρεις κίονες από το βόρειο πτερό του ναού του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών,

(vii) ο τυπικός κίονας του περιστυλίου του ναού της Αλέας Αθηνάς στην Τεγέα της Αρκαδίας, στη μορφή και τις διαστάσεις που προέκυψαν από σχετική, ειδική μελέτη¹³⁸, και

(viii) ο τυπικός κίονας του πρόπυλου του τελετουργικού εστιατορίου στο ιερό του Ασκληπιού στην αρχαία Επίδαυρο, όπως αναπαραστάθηκε από την υπεύθυνη του έργου αναστήλωσης του μνημείου¹³⁹.

¹³⁶ Ορλάνδος 1967-68, σελ. 60-67.

¹³⁷ Μπούρας 1967, σχ. 19, σελ. 33-46.

¹³⁸ Pakkanen 1998.

¹³⁹ Κυριάκη 1999,2006.

Οι κίονες αυτοί επιλέχθηκαν για να εξεταστεί η σεισμική συμπεριφορά τους διότι, ως απόρροια των διαφορετικών περιόδων που κατασκευάστηκαν, παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία γεωμετρικών χαρακτηριστικών (μεγέθους, ραδινότητας, αριθμού σπονδύλων). Ως εκ τούτου μπορούν να θεωρηθούν ως αντιπροσωπευτικοί ενός ευρύτατου φάσματος των αρχαίων κίωνων δωρικού ρυθμού που σώζονται σήμερα.

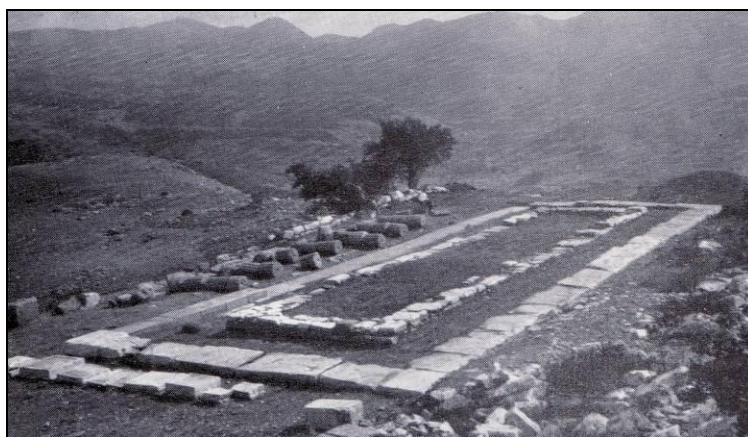
Ακολουθώς, και πριν από την παρουσίαση των αριθμητικών αναλύσεων, παρουσιάζονται, με συνοπτικό τρόπο, διάφορα στοιχεία που αφορούν τα έξι αρχαία μνημεία στα οποία ανήκουν οι προαναφερθέντες κίονες. Η σειρά παρουσίασης ακολουθεί (όπως η παραπάνω επιγραμματική αναφορά των κίωνων) την χρονολογική σειρά κατασκευής των μνημείων, από τους αρχαϊκούς έως και τους πρώιμους ελληνοιστικούς χρόνους.

5.2 Περί των μνημείων που ανήκουν οι υπό εξέταση κίονες

5.2.1 Ο ναός της Αθηνάς στην Αρκαδική Αλίφειρα

Την περίοδο 1932–1935, ο Αναστάσιος Ορλάνδος διενήργησε ανασκαφές στην αρχαία Αλίφειρα η οποία βρίσκεται στη δυτική Πελοπόννησο, νότια της κοιλάδας του Αλφειού ποταμού και στο όριο των περιοχών που στην αρχαιότητα αποτελούσαν την Αρκαδία και την Τριφυλία. Στο πλαίσιο αυτών των ανασκαφών διερεύνησε και τα αρχιτεκτονικά κατάλοιπα των δύο σπουδαιότερων ιερών που βρίσκονται στην Ακρόπολη της Αλίφειρας, της Αθηνάς (Εικ. 5.1) και του Ασκληπιού.

Για το πρώτο, τον ναό της Αθηνάς, ο αείμνηστος καθηγητής κατέληξε ότι πρόκειται για ένα κτήριο δωρικού ρυθμού, όχι νεότερο του 500 π.Χ., με εξωτερικές διαστάσεις (στο επίπεδο της ευθυνηρίας) 10.65x29.60 [m]. Η ανωδομή του ναού αυτού ήταν κατασκευασμένη από



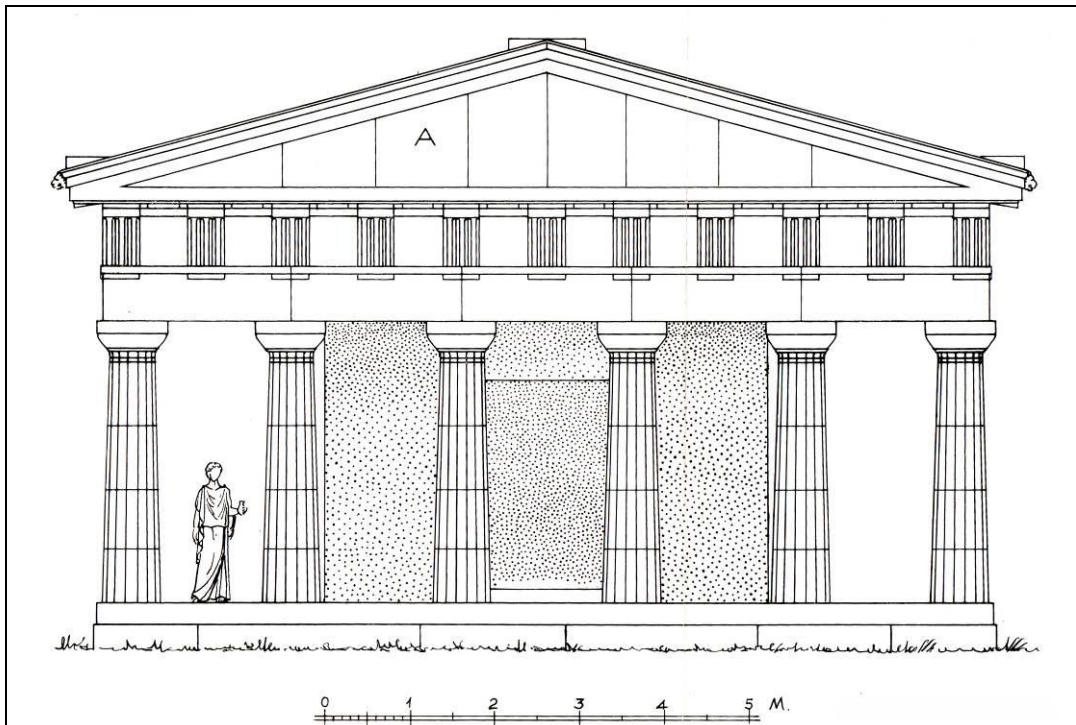
Εικ. 5.1: Τα κατάλοιπα του ναού της Αθηνάς στην αρχαία Αλίφειρα, μετά την ολοκλήρωση των ανασκαφών του Α. Ορλάνδου (άποψη από ΒΔ.)¹⁴⁰.

¹⁴⁰ Από Ορλάνδος 1967-68, εικ. 27, σελ. 46.

κογχυλιάτη λίθο. Με βάση τα ολίγα σωζόμενα μέλη του, ο μελετητής προέβη σε αρκετές σημαντικές παρατηρήσεις για την αρχιτεκτονική του μνημείου, καθώς και σε γραφική αποκατάστασή του (Εικ. 5.2).

Ειδικώς για τους, δωρικού ρυθμού, κίονες του ναού, από τους επτά σωζόμενους (επί συνόλου τριάντα οκτώ) διαπίστωσε ότι: α) αποτελούνταν από τέσσερις σπονδύλους και κιονόκρανο, β) είχαν ύψος περίπου 3.36 m, και διάμετρο βάσης 4.95 m. γ) εδράζονταν επί δίβαθμης κρηπίδας, ε) έφεραν δεκαέξι ραβδώσεις, και στ) ότι τα μέλη τους συνδέονταν με ξύλινους πόλους και εμπόλια (τα οποία δεν διασώθηκαν), οι κυβόσχημες εντορμίες των οποίων είχαν πλευρές 80 - 100 mm και βάθος 70 - 105 mm.

Αξιοσημείωτο είναι, επίσης, ότι οι κίονες, παρά το μικρό μέγεθός τους, είχαν, εκτός από μείωση, και ένταση στον κορμό τους η οποία ήταν μεγέθους λίγων χιλιοστών περίπου στα 2/5 από τη βάση του ύψους των κίωνων. Το ύψος της στρώσης των επιστυλίων ήταν ίσο με 0.68 m, και το πάχος της, το οποίο συντίθετο από δύο λίθους, ήταν περίπου ίσο με 0.672 m. Εντύπωση κάνει και το γεγονός της παντελούς έλλειψης συνδέσμων και της περιορισμένης χρήσης γόμφων στο μνημείο¹⁴¹, σύμφωνα, πάντα, με τα σχετικά στοιχεία στα ολίγα σωζόμενα μέλη.



Εικ. 5.2: Γραφική αναπαράσταση της πρόσοψης του ναού της Αθηνάς¹⁴².

¹⁴¹ Ορλάνδος 1967-68, σελ. 97.

¹⁴² Από Ορλάνδος 1967-68, πίν. 4.

Για το τι συνέβη στο αρχαίο κτήριο δεν υπάρχουν γραπτές πληροφορίες. Ο ανασκαφέας, πάντως, βλέποντας τους κίονες κατακείμενους σε κανονική διάταξη (παράλληλα μεταξύ τους, και κάθετα και προς τα έξω της κρηπίδας, Εικ. 5.1), όπως και τα δύο (μόνον) σωζόμενα επιστύλια (που ήταν δίπλα στα κιονόκρανα και κάθετα προς τους κίονες), διατύπωσε την εκτίμηση ότι ο ναός καταστράφηκε από ισχυρό σεισμό¹⁴³.

Η μορφή του μνημείου σήμερα είναι σχεδόν όμοια με αυτή που είχε μετά από την ανασκαφή του (Εικ. 5.1), καθώς έκτοτε μόνο εργασίες καθαρισμού και αποψίλωσης εκτελούνται κατά καιρούς στον αρχαιολογικό χώρο της Αλίφειρας με φροντίδα της αρμόδιας, τοπικής Εφορείας Αρχαιοτήτων.

5.2.2 Ο Παρθενώνας

Ο Παρθενώνας, το αξεπέραστο δημιούργημα της αρχαίας Ελληνικής Αρχιτεκτονικής, κατασκευάστηκε στην Ακρόπολη των Αθηνών, από το 447 έως το 438 π.Χ., και ήταν αφιερωμένος στην προστάτιδα θεά της πόλης, την Αθηνά. Το κτήριο, που ήταν ο μεγαλύτερος δωρικός ναός της αρχαιότητας, έχει γενικές διαστάσεις στην (τρίβαθμη) κρηπίδα του 33.68x72.31 [m], ενώ η ανωδομή του ήταν κατασκευασμένη εξολοκλήρου από το θαυμάσιο μάρμαρο του Πεντελικού Όρους.

Οι σαράντα έξι κίονες του περιστυλίου του έχουν ύψος ίσο με 10.43 m και κάτω διάμετρο ίση με 1.90 m, ενώ, σχεδόν όλοι, αποτελούνται από κιονόκρανο και ένδεκα σπονδύλους¹⁴⁴. Εκ της κατασκευής τους περιλαμβάνουν, εκτός από τις είκοσι ραβδώσεις, την μείωση και την ένταση στον κορμό τους, και μικροαποκλίσεις από την κατακόρυφο, ως τμήμα ενός πολύπλοκου συστήματος αρχιτεκτονικών εκλεπτύνσεων του κτηρίου στο σύνολό του. Το επιστύλιό τους, παρά το μέγεθός του, είναι μονόλιθο κατά το ύψος (≈ 1.35 m) και τρίλιθο κατά το πάχος (≈ 1.80 m).

Το μνημείο κατά την μακραίωνη ιστορία του δεν υπέστη σημαντικές φθορές από φυσικές δράσεις. Ειδικώς οι βλάβες που παρουσιάζει και αποδίδονται σε σεισμούς του αιώτερου παρελθόντος, αλλά και αυτές που εμφανίστηκαν ως απόρροια των δύο ισχυρών σεισμών που έπληξαν την Αθήνα σε πρόσφατες δεκαετίες (το 1981 και το 1999) περιορίζονται σε μετατοπίσεις λίγων εκατοστών και μικροστροφές στα μέλη των κίωνων και στα

¹⁴³ Ορλάνδος 1967-68, σελ. 61.

¹⁴⁴ Εξαιρουμένων μόνο δύο, του βορειοανατολικού και του δεύτερου από Α. της νότιας πλευράς που απαρτίζονται από κιονόκρανο και δέκα σπονδύλους ο πρώτος και από κιονόκρανο και δώδεκα σπονδύλους ο δεύτερος.

υπερκείμενα μέλη του θριγκού. Αυτές μπορούν να θεωρηθούν (σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα, πάντως, και όχι βάσει των αντιλήψεων των κατασκευαστών του¹⁴⁵) μικρές έως και αμελητέες.

Αντιθέτως, πολλές ζημιές «υπέφερε» από ανθρώπινες παρεμβάσεις (βανδαλισμούς, επισκευές και μετασκευές) με βλαπτικότερη την έκρηξη που προκλήθηκε στο εσωτερικό του, στις 26 Σεπτεμβρίου του 1687, όταν μία οβίδα των στρατευμάτων που πολιορκούσαν τότε την Ακρόπολη, υπό την αρχηγία του Ενετού Φραγκίσκου Μοροζίνη, ουσιαστικά κατέστρεψε το κτήριο. Έκτοτε διατηρείται ως ανοικτό ερείπιο, με μορφή αυτή που περίπου έχει και σήμερα.

Μετά τα ευρύτατα αναστηλωτικά προγράμματα που υλοποιήθηκαν στο μνημείο τις τέσσερις πρώτες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα, από τον Νικόλαο Μπαλάνο και τους συνεργάτες του, σημαντικότερες εργασίες αποκατάστασης εκτελούνται από το 1981 έως και σήμερα, υπό την εποπτεία της Επιτροπής Συντηρήσεως Μνημείων Ακροπόλεως. Τα έργα των τελευταίων δεκαετιών, αν και θα μπορούσε να διατυπωθεί ότι εκ του μακρόθεν πολλές πτυχές τους προσομοιάζουν στα έργα του Μπαλάνου, εκ του σύνεγγυς διαπιστώνεται ότι διαφέρουν σημαντικά από τα προγενέστερα, Αυτό διότι τα σύγχρονα έργα είναι κυρίως σωστικού χαρακτήρα και βασίζονται (όπως προαναφέρθηκε στην *παράγραφο 1.8.*) στην σύμπραξη μεγάλων ομάδων επιστημόνων, διαφορετικών ειδικοτήτων.

Στο πλαίσιο των, σε εξέλιξη, εργασιών αποκατάστασης του Παρθενώνα, οι αρχαίοι ξύλινοι πόλοι και εμπόλια των κίωνων του (κάποιοι από τους οποίους διατηρούνται σε πολύ καλή κατάσταση, Εικ. 2.18) αντικαθίστανται από νέα στοιχεία από τιτάνιο (Εικ. 2.17). Από τιτάνιο κατασκευάζονται, επίσης, και οι νέοι σύνδεσμοι και γόμφοι που τοποθετούνται για την σύνδεση των διατεταγμένων σε στρώσεις αρχιτεκτονικών μελών του (Εικ. 2.12-2.14).

5.2.3 Το στωικό κτήριο στο ιερό της Βραυρωνίας Αρτέμιδος

Στο ιερό της Αρτέμιδος στην Βραυρώνα της Ανατολικής Αττικής υπήρχε στην αρχαιότητα ένα οικοδόμημα που ήταν σχήματος Γ και περιελάμβανε τετράγωνα δωμάτια (έξι στο βόρειο σκέλος του, και τρία μαζί με μεγάλη είσοδο στο δυτικό) και δύο στοές. Αυτές ήταν μία προς το εξωτερικό του κτηρίου, ευθύγραμμη και παράλληλη στο βόρειο σκέλος του,

¹⁴⁵ Αυτό διότι μπορεί να «ανιχνευτεί» ακόμη και σήμερα σε πολλούς από τους σωζόμενους αρχαίους ναούς, όχι μόνο η συντηρητική αντίληψη περί αντοχής που είχαν οι αρχαίοι Έλληνες οικοδόμοι, αλλά και η πρόθεση/εμμονή τους για την επίτευξη άψογου αισθητικού αποτελέσματος.

και μία στο εσωτερικό. Η δεύτερη στοά ήταν σχήματος Π, και παρά το ότι αρχικώς σχεδιάστηκε με τα παράλληλα σκέλη της αρκετά μεγάλα, τελικώς κατασκευάστηκε να έχει σε αυτά από ένα μόνο κίονα. Στο τρίτο σκέλος της, που ήταν παράλληλο με το βόρειο σκέλος του κτηρίου, διέθετε ένδεκα κίονες σε μήκος 29.19 m. Η κίονες αυτής της στοάς είναι δωρικού ρυθμού, και σύμφωνα με τα μορφολογικά χαρακτηριστικά τους (αλλά και με βάση κάποιες επιγραφές), το κτήριο χρονολογείται στα τέλη του 5^{ου} π.Χ. αιώνα.

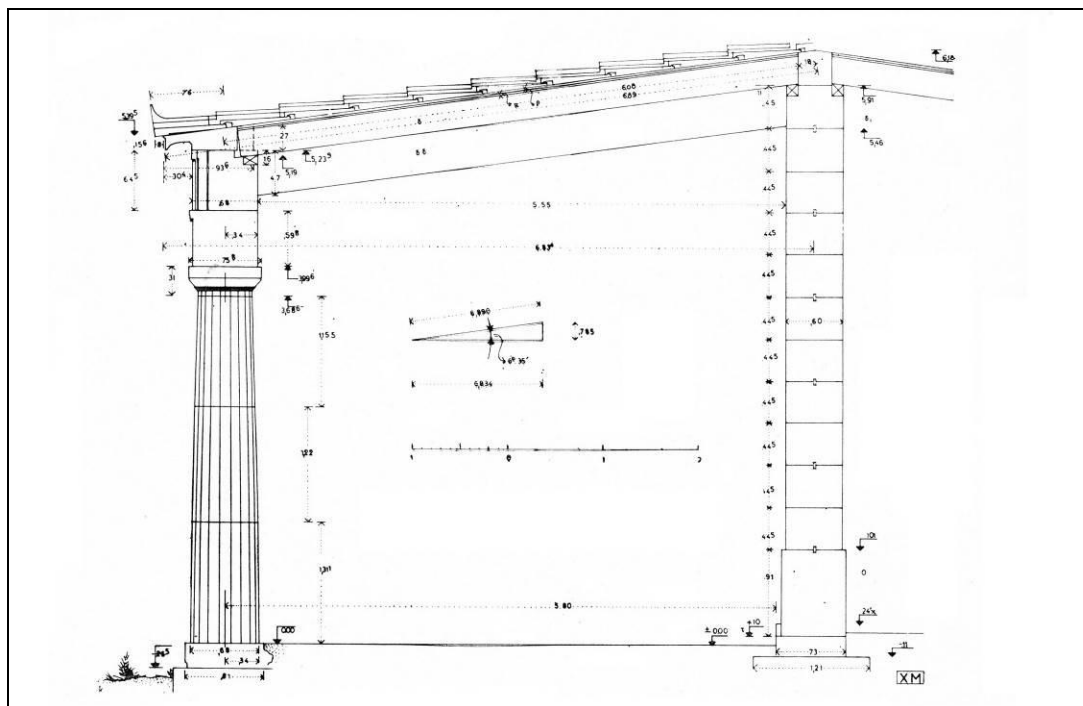
Η κιονοστοιχία της εσωτερικής στοάς, όπως προαναφέρθηκε¹⁴⁶, αναστηλώθηκε σε μεγάλο βαθμό την περίοδο 1961-62 (Εικ. 1.12), από την Διεύθυνση Αναστήλωσης με πρωταγωνιστές του έργου τον Χαράλαμπο Μπούρα (μελετητή και επικεφαλής) και τον γλύπτη του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου Στέλιο Τριάντη. Η αναστήλωση έλαβε χώρα μετά την μακρά ανασκαφική έρευνα του ιερού από τον Ιωάννη Παπαδημητρίου, η οποία άρχισε μετά από το τέλος του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου και συνεχίστηκε σποραδικά έως το Μάρτιο του 1963, όταν απεβίωσε ο ανασκαφέας.

Για την κατασκευή της στοάς που αναστηλώθηκε είχε χρησιμοποιηθεί κυρίως (όπως και για τα υπόλοιπα κτήρια του ιερού) ντόπιο ψαμμιτικό πέτρωμα, χρώματος ανοικτού καστανέρυθρου, χαμηλής αντοχής και σκληρότητας (σε κάθε περίπτωση, πάντως, ανθεκτικό σύμφωνα με τον αναστηλωτή). Επίσης, είχε χρησιμοποιηθεί λευκό πεντελικό μάρμαρο στα σημεία που υπήρχε απαίτηση υψηλότερης αντοχής -όπως στον στυλοβάτη- αλλά και στα αρχιτεκτονικά μέλη όπου ήταν απαραίτητη λεπτότερη κατεργασία -όπως στα κιονόκρανα και τις μετόπες. Τα ίδια υλικά χρησιμοποιήθηκαν και για τα απαραίτητα συμπληρωματικά τεμάχια των σωζόμενων αρχιτεκτονικών μελών (όπως και για τα εξολοκλήρου νέα μέλη) κατά τις εργασίες αναστήλωσης.

Οι κίονες της εν λόγω στοάς αποτελούνται από τρεις σπονδύλους και κιονόκρανο, έχουν ύψος ίσο με 3.996 m και η εξωτερική διάμετρος στη βάση του κατώτατου σπονδύλου τους είναι ίση με 0.68 m (Εικ. 5.3). Οι κίονες φέρουν είκοσι ραβδώσεις και παρουσιάζουν μείωση στον κορμό τους, καθώς και ένταση, η οποία δεν μετρήθηκε με ακρίβεια, ούτε εξακριβώθηκε η μορφή της, λόγω της φθοράς των σωζόμενων σπονδύλων¹⁴⁷. Οι κίονες ήσαν κατακόρυφοι, εδράζονταν σε στυλοβάτη, και στις διεπιφάνειες των μελών τους έφεραν ξύλινους πόλους και εμπόλια, οι οποίοι δεν διατηρήθηκαν. Κατά την αναστήλωση των κίωνων τοποθετήθηκαν νέοι πόλοι και εμπόλια από ορείχαλκο.

¹⁴⁶ Υποκεφάλαιο 1.8, σελ. 36-37.

¹⁴⁷ Σε μία περίπτωση, πάντως, ο μελετητής μπόρεσε να μετρήσει προσεγγιστικά το μέγιστο εύρος της έντασης, το οποίο ήταν ίσο με 10 mm και εμφανιζότανε λίγο πάνω από το μέσο του ύψους του κίονα (Μπούρας 1967, σελ. 38).



Εικ. 5.3: Τομή κατά πλάτος του μεγάλου βόρειου σκέλους της στοάς της Βραυρώνας¹⁴⁸.

Δύο μόλις τεμάχια επιστυλίου, και μάλιστα φθαρμένα, είχαν αποκαλυφθεί κατά τις ανασκαφικές διερευνήσεις. Όμως, το ένα εξ αυτών σωζόταν ακέραιο. Έτσι, διαπιστώθηκε ότι οι λίθοι επιστυλίου ήταν μονοί, ύψους 0.598 m και πάχους 0.68 m. Τα μήκη τους δεν ήταν ίσα μεταξύ τους (καθώς οι θέσεις των αρμών τους δεν συνέπιπταν υποχρεωτικά με το μέσο των κιονοκράνων), αλλά κυμαίνονταν λίγο μεγαλύτερα ή λίγο μικρότερα από το μεταξόνιο διάστημα, το οποίο εκτιμήθηκε ίσο με 2.84 m. Δεν διαπιστώθηκαν εντορμίες συνδέσμων στο σωζόμενο επιστύλιο, αλλά ο μελετητής δεν απέκλεισε την ύπαρξη συνδέσμων στην στρώση διότι τα σημεία της άνω έδρας του λίθου που θα ήταν οι εντορμίες ήταν ιδιαίτερος φθαρμένα.

Το αρχαίο επιστύλιο που αναστηλώθηκε, καθώς και τα έξι νέα που τοποθετήθηκαν (όλα, όπως προαναφέρθηκε, από τον ντόπιο ψαμίτη), ενισχύθηκαν με δύο ράβδους ανοξείδωτου χάλυβα, διαμέτρου μιας ίντσας (254 mm), για την αύξηση της καμπτικής αντοχής τους.

5.2.4 Ο ναός του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών

Στο τελευταίο τέταρτο του 5^{ου} π.Χ αιώνα θεωρείται ότι κτίστηκε και ο περίφημος ναός του Επικούριου Απόλλωνα. Ο ναός αυτός βρίσκεται στη νοτιοδυτική πλευρά της κεντρικής

¹⁴⁸ Από Μπούρας 1967, σχ. 19, σελ. 42.

Πελοποννήσου, σε ένα, εν πολλοίς, φυσικό πλάτωμα του όρους Κωτίλιου το οποίο από την αρχαιότητα ονομάζεται Βάσσεις.

Το μνημείο των Βασσών είναι ένα από τα σπουδαιότερα δείγματα της κλασικής αρχιτεκτονικής, καθώς συνδυάζει τον Δωρικό ρυθμό στο περιστύλιό του και τον Ιωνικό ρυθμό στο εσωτερικό του. Ταυτόχρονα, εσώκλειε το πρώτο καταγεγραμμένο στην ιστορία κορινθιακό κιονόκρανο. Κατά το μεγαλύτερο μέρος του, ο ναός είναι κατασκευασμένος από τον τοπικό λευκό-λευκότεφρο, πλακώδη, ασβεστόλιθο. Για ορισμένα διακεκριμένα αρχιτεκτονικά μέλη των υψηλότερων τμημάτων του, τον γλυπτό διάκοσμό του και την κεράμωση της στέγης του, χρησιμοποιήθηκε μάρμαρο το οποίο έχει (πιθανώς) προέλευση τα λατομεία του ακρωτήριου Ταίναρου.

Αν και παρουσιάζει πολλές φθορές και γεωμετρικές βλάβες (έντονες διαφορικές καθιζήσεις θεμελίων και δαπέδων, σημαντικές αποκλίσεις κίωνων από την κατακόρυφο κ.α.), αποτελεί εξαίρεση στον κανόνα της διατήρησης των αρχαίων μνημείων, καθώς εξακολουθεί να διαθέτει ένα υψηλό ποσοστό (μεγαλύτερο του 60%) του δομικού του υλικού στη θέση του, *in situ* ή αναστηλωμένο (Εικ. 5.4). Είναι προφανές ότι οτιδήποτε και να συνέβη στο μνημείο των Βασσών κατά τη μακραίωνη ιστορία του, η ανθεκτικότητά του είναι αυταπόδεικτη και αξιοθαύμαστη, καθώς το κτήριο στο μεγαλύτερο μέρος του έχει διατηρηθεί ιστάμενο, εικοσιπέντε αιώνες περίπου μετά από την κατασκευή του.



Εικ. 5.4: Το μνημείο των Βασσών από ΒΔ, το 1985¹⁴⁹.

¹⁴⁹ Από Παπαδόπουλος και Σαββατιανού 2015, φωτ. 1.1, σελ. 43.

Το περιστύλιο του ναού του Επικούριου Απόλλωνα συνθέτουν 38 κίονες (6 x 15) δωρικού ρυθμού. Οι διαστάσεις του στυλοβάτη του, στην αδιατάρακτη μορφή του, ήταν 14.558 x 38.308 [m]. Το ύψος των κορμών των κίωνων φθάνει τα 5.45 m (με εξαίρεση τους έξι της βόρειας όψης και τους οκτώ βόρειους της ανατολικής όψης οι οποίοι έχουν ύψος κορμού 5.425 m) και το συνολικό τους ύψος τα 5.97 m.

Οι κίονες της βόρειας πλευράς είναι παχύτεροι, με εξωτερική διάμετρο 1.16 m στην κάτω έδρα τους και 0.94 m στην άνω έδρα του τελευταίου σπονδύλου τους, έναντι 1.12 m και 0.92 m, αντίστοιχα, των υπολοίπων. Αναλόγως, τα κιονόκρανα της βόρειας πλευράς (και των επτά βόρειων της ανατολικής πλευράς) είναι μεγαλύτερα από αυτά των άλλων πλευρών, με ύψος 0.545 m και διαστάσεις άβακα 1.245 x 1.245 x 0.21 [m], ενώ τα υπόλοιπα έχουν ύψος 0.515 m και διαστάσεις άβακα 1.195 x 1.195 x 0.20 [m]. Οι κίονες φέρουν 20 ραβδώσεις και παρουσιάζουν ένταση με μέγιστο βέλος (περίπου στα 2/5 του ύψους τους) 8 mm στο βόρειο πτερό και περίπου 4 mm στο υπόλοιπο περιστύλιο.

Προφανώς για λόγους οικονομίας υλικού (και σε αντίθεση με την συνήθη αρχαία πρακτική), οι κίονες αποτελούνται από κιονόκρανο και μεταβλητό πλήθος ανισοϋψών σπονδύλων. Συγκεκριμένα, από τους 37 ιστάμενους σήμερα κίονες (από τους 38) του περιστυλίου του μνημείου, 4 κίονες διαθέτουν 5 σπόνδλους, 12 κίονες 6 σπόνδλους, 14 κίονες 7 σπόνδλους, 5 κίονες 8 σπόνδλους, 1 κίονας 9 σπόνδλους και 1 κίονας 10 σπόνδλους.

Σε κάθε διεπιφάνεια των μελών τους, οι κίονες έφεραν ξύλινο πόλο και ζεύγος ξύλινων εμπολίων, τα οποία έχουν από αιώνες αποσυντεθεί. Η αρχική ύπαρξή τους, όμως, μαρτυράτε από το ότι σε όλες τις περιπτώσεις που κάποιος κίονας του μνημείου έχει τμηματικά ή ολοκληρωτικά αποσυναρμολογηθεί έχουν αποκαλυφθεί λαξευμένες κοιλότητες στις έδρες των μελών του (σπονδύλων και κιονοκράνου) κατάλληλες για την τοποθέτηση εμπολίων. Οι κοιλότητες αυτές έχουν βάθος ίσο περίπου με 7 (έως 7.5) cm, ενώ τα ορθογωνικού σχήματος χείλη τους έχουν μήκος μικρότερης και μεγαλύτερης πλευράς ίσο περίπου με 9 (έως 11) cm και 10 (έως 12) cm, αντίστοιχα.

Το επιστύλιο της περίπτωσης αποτελείται κατά το πάχος του από δύο σειρές λίθων, με μία εξαίρεση το ακραίο προς βορά μονολιθικό της ανατολικής πλευράς του κτηρίου. Οι λίθοι που το αποτελούν δεν έχουν σταθερό πάχος, ενώ το συνολικό πάχος της στρώσης εκτιμάται ότι στην αρχαιότητα ήταν περίπου ίσο με 102,5 cm και το ύψος της ≈ 83.5 cm¹⁵⁰. Στην βόρεια

¹⁵⁰ Σύμφωνα με την πιο πρόσφατη μελέτη για το μνημείο, οι διαστάσεις αυτές ήταν 102 cm και 85 cm, αντίστοιχα (Παπαδόπουλος και Σαββατιανού 2015, σελ. 101, Εικ. 6.10, σελ. 203 και Σ.2.2).

όψη του μνημείου, οι λίθοι των διαμέσων μεταξονίων είχαν μήκος 2.732 m, ενώ στις μακρές πλευρές 2.6745 m¹⁵¹.

Καθένας λίθος επιστυλίου του ναού έφερε στην άνω έδρα του τέσερρεις συνδέσμους. Έτσι, συνδεόταν με τον συμπληρωματικό του (κατά την εγκάρσια διεύθυνσή του) λίθο με δύο συνδέσμους, και με κάθε γειτονικό λίθο (κατά τη διαμήκη διεύθυνσή του) με ένα σύνδεσμο. Οι σύνδεσμοι των λίθων του επιστυλίου έχουν από αιώνες κλαπεί. Ήταν, πάντως, (πιθανότατα) σιδερένιοι και μολυβδοχοημένοι (όπως οι σύνδεσμοι των λίθων της κρηπίδας), ενώ από τις εντομίες τους προκύπτει ότι κάποιιοι είχαν μορφή διπλού ταυ και άλλοι ζήτα.

Από το 2001 εκτελείται στο μνημείο ευρύ έργο αποκατάστασής του το οποίο στοχεύει, κυρίως, στην ενίσχυση των μηχανισμών άμυνας του κτηρίου έναντι των φυσικών δράσεων. Στο πλαίσιο του έργου έχει στερεωθεί το βόρειο πτερό του μνημείου, δηλαδή το τμήμα του που περιλαμβάνει την βόρεια όψη με τους έξι κίονες, τα βορειότερα τμήματα των μακρών πλευρών με από ένα κίονα, και τον χώρο που περικλείουν οι δέκα προαναφερθέντες κίονες. Για τις ανάγκες του έργου νέα συνδετήρια στοιχεία από τιτάνιο τοποθετούνται στα αρχιτεκτονικά μέλη του μνημείου (Εικ. 2.15), κάποια από τα οποία, όπως προαναφέρθηκε, έχουν πρωτότυπη μορφή (Εικ. 2.22).

Οι τρεις κίονες του μνημείου οι οποίοι επιλέχθηκαν για να διερευνηθεί η σεισμική συμπεριφορά τους, είναι όλοι από το αποκατεστημένο τμήμα του μνημείου και ο καθένας έχει διαφορετικό (από τους άλλους δύο) αριθμό σπονδύλων. Οι κίονες αυτοί είναι:

- α) ο βορειοδυτικός κίονας του περιστυλίου (με κωδική ονομασία ΚΒΔ), ο οποίος αποτελείται από πέντε σπονδύλους και κιονόκρανο,
- β) ο τέταρτος από ανατολικά κίονας της βόρειας όψης (κίονας ΚΒ4), ο οποίος απαρτίζεται από κιονόκρανο και επτά σπόνδυλους, και
- γ) ο δεύτερος από βόρεια κίονας της δυτικής πλευράς (κίονας ΚΔ2), ο οποίος είναι ο μοναδικός στο μνημείο που έχει 10 σπονδύλους (μαζί, φυσικά, με κιονόκρανο).

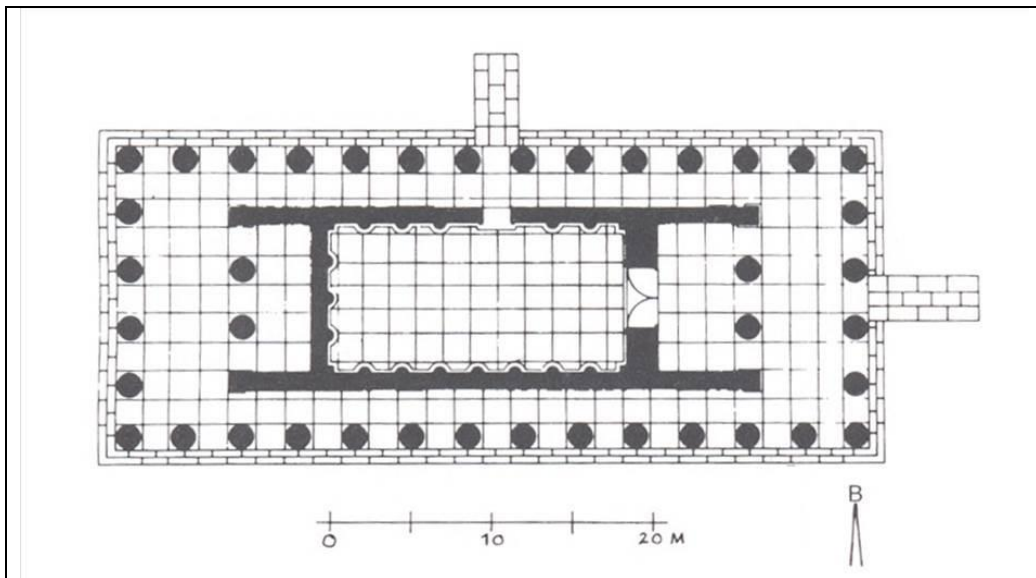
5.2.5 Ο ναός της Αλέας Αθηνάς στην Τεγέα

Περί το 365/360 π.Χ. στο τεγεατικό ιερό της Αλέας Αθηνάς (ένα από τα σημαντικότερα των αρχαίων Αρκάδων, γνωστό και ιδιαίτερα σεβαστό ως άσυλο) κτίστηκε ο μοναδικός στην Πελοπόννησο αρχαίος ναός του οποίου η ανωδομή ήταν εξολοκλήρου από μάρμαρο

¹⁵¹ Σύμφωνα με την νεότερη σχετική μελέτη ήταν 2.720 m και 2.788, αντίστοιχα (Παπαδόπουλος και Σαββατιανού 2015, σελ. 98, 100 και Εικ. 6.10, σελ. 203).

(Δολιανών). Για την θεμελίωσή του είχε χρησιμοποιηθεί κροκαλοπαγής λίθος και δομικό υλικό σε δεύτερη χρήση από τον προγενέστερο ναό του ιερού, ο οποίος είχε καταστραφεί από φωτιά το 395/4 π.Χ.

Ο ναός της Αλέας Αθηνάς αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους και γνωστότερους ναούς της κλασικής εποχής. Κυρίως λόγω του αρχιτέκτονα του και μεγάλου γλύπτη της αρχαιότητας, του Σκόπα από την Πάρο, ο ναός αυτός καταλαμβάνει εξέχουσα θέση στην εξέλιξη της μνημειακής αρχιτεκτονικής και γλυπτικής στον ελλαδικό χώρο. Πρόκειται για περίπτερο δωρικό ναό, με 6 x 14 κίονες στο περιστύλιο (διαστάσεις στυλοβάτη 47,55 x 19,19 μ.), του οποίου η κάτοψη (Εικ. 5.5) και το εσωτερικό του σηκού έχουν σαφείς επιδράσεις από το μνημείο των Βασσών και τα Προπύλαια της Ακρόπολης των Αθηνών.



Εικ. 5.5: Κάτοψη του ναού της Αλέας Αθηνάς¹⁵².

Ίσως ο ναός να σωζόταν ως τον 4ο αι. μ.Χ., πάντως τότε καταστράφηκε ολοσχερώς από τους βυζαντινούς αυτοκράτορες Μεγάλο Θεοδόσιο (379-395) και Θεοδόσιο Μικρό (408-450) και από τις επιδρομές των βάρβαρων Γόθων. Οι πρώτες ανασκαφές στο Ιερό της Αλέας Αθηνάς άρχισαν στα τέλη του προπερασμένου αιώνα, πρώτα από το Γερμανικό Αρχαιολογικό Ινστιτούτο και στη συνέχεια από την Γαλλική Αρχαιολογική Σχολή Αθηνών (με επικεφαλής τον Gustave Mendel). Ανασκαφές πραγματοποιούνταν, με διαλλείματα, μέχρι την δεκαετία του 1930. Στη δεύτερη περίοδο ανασκαφών του, σημαντικές παρατηρήσεις για την αρχιτεκτονική και το γλυπτό διάκοσμό του έκαναν ο Γάλλος Charles Dugas και ο Κωνσταντίνος Ρωμαίος.

¹⁵² Από Gruben 2000, εικ. 118, σελ. 145.

Οι ανασκαφές ξανάρχισαν το 1990 από το Νορβηγικό Αρχαιολογικό Ινστιτούτο και την Ε' Εφορεία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων. Στο πλαίσιο των τελευταίων ερευνών εκπονήθηκε νέα (ειδική) μελέτη για την, μεταξύ άλλων, εκτίμηση των μετρικών τιμών του τυπικού κίονα της περίπτωσης του μνημείου (Jari Pakkanen 1998). Στην μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν και στοχαστικές, αριθμητικές μέθοδοι με στόχο την αξιοποίηση των λιγοστών σχετικών στοιχείων που υπάρχουν στα εναπομείναντα διάσπαρτα μέλη. Έτσι υπολογίστηκε ότι οι κίονες του περιστυλίου είχαν ύψος κάπου μεταξύ 9.544 και 9.58 m, καθώς και κάτω και άνω διάμετρο στον κορμό τους κάπου μεταξύ 1.545-1.554 m και 1.196-1.213 m, αντίστοιχα. Επίσης, διαπιστώθηκε (εκ νέου) ότι οι κίονες είχαν και ένταση, η μέγιστη τιμή της οποίας παρουσιάζεται στο μέσο του κορμού κάθε κίονα και ισούται (περίπου) με 0.011 m.

Σημειώνεται ότι οι εν λόγω κίονες, παρά το μεγάλο μέγεθός τους, αποτελούνταν από κιονόκρανο και μόνο έξι σπονδύλους -προφανώς για λόγους εργονομικούς, μια που οι απαραίτητοι μεγάλοι όγκοι μαρμάρου διατίθεντο σε αφθονία, και μάλιστα σε κοντινή απόσταση). Επίσης, ότι οι αρχαίοι κατασκευαστές είχαν τοποθετήσει στις διεπιφάνειες των μελών των κίωνων, εκτός από το ξύλινο σύστημα πόλος/εμπόλια, και δύο μολυβδοχομημένους σιδερένιους γόμφους (Εικ. 2.19).

Αν και το αρχαίο ιερό απασχολεί έως και σήμερα σε μεγάλο βαθμό τους αρχαιολόγους και ερευνητές, δεν έχει γίνει ακόμα προσπάθεια αποκατάστασής του (Εικ. 5.6).



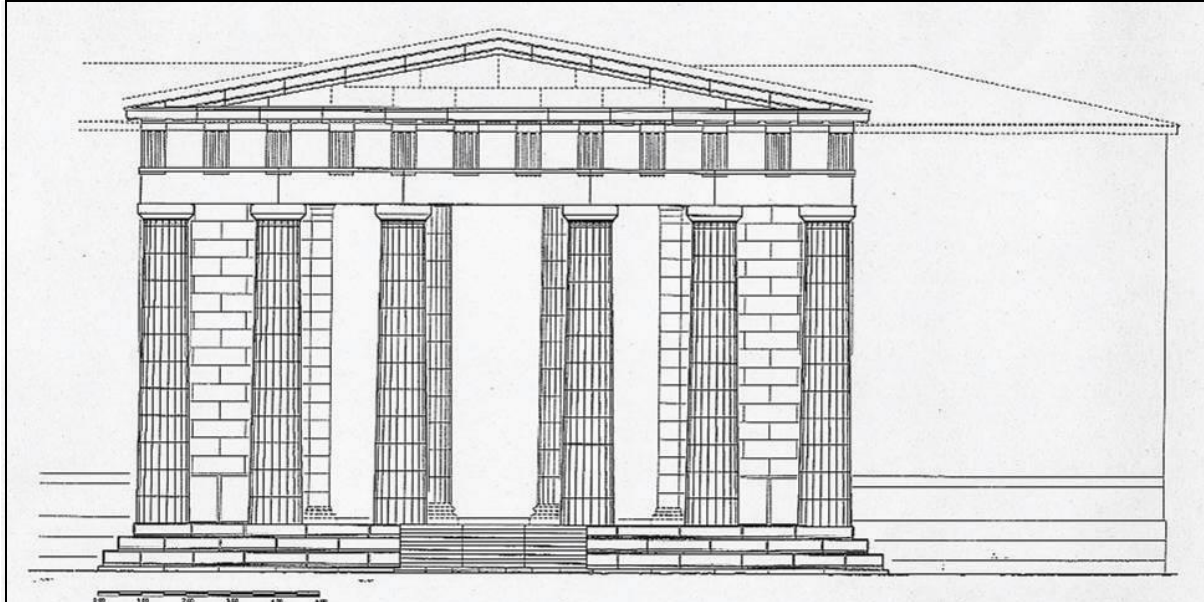
Εικ. 5.6: Τα αρχιτεκτονικά κατάλοιπα του ναού της Αλέας Αθηνάς στην Τεγέα.

5.2.6 Το πρόπυλο του τελετουργικού εστιατορίου στο Ασκληπιείο της Επιδαύρου

Στη νότια πλευρά του ιερού του Ασκληπιού στην Επίδαυρο κτίστηκαν περί το τέλος του 4^{ου} π.Χ. αιώνα ή την αρχή του 3^{ου} π.Χ. αιώνα ένα από τα μεγαλύτερα οικοδομήματα του Ασκληπιείου, το τελετουργικό εστιατόριο (γνωστό έως πρόσφατα ως γυμνάσιο)¹⁵³, καθώς και ένα (παρομοίως μνημειακού χαρακτήρα) πρόπυλο το οποίο αποτελούσε την κύρια είσοδο του εστιατορίου.

Το πρόπυλο, ειδικότερα, ήταν ένα πρόστυλο κτήριο με εξάστυλη δωρική κιονοστοιχία στη βόρεια πλευρά του (Εικ. 5.7), ενώ στην ανατολική και την δυτική πλευρά του έφερε τοίχους που το συνέδεαν με το κυρίως κτίσμα (το τελετουργικό εστιατόριο).

Το εν λόγω πρόπυλο ήταν κατασκευασμένο, για λόγους οικονομίας, από λίθους τριών διαφορετικών πετρωμάτων. Πιο συγκεκριμένα, στην θεμελίωσή του είχε χρησιμοποιηθεί μαλακός πωρόλιθος, στα χαμηλότερα και θεατά τμήματά του απολιθωματοφόρος ασβεστόλιθος, ενώ οι κίονες, ο θριγκός και οι τοίχοι του είχαν κατασκευαστεί από ένα πορώδες (αλλά αρκετά σκληρό) ασβεστολιθικό πέτρωμα, ανοικτοκάστανου χρώματος, η κοινή ονομασία του οποίου είναι τραβερτίνης.



Εικ. 5.7: Γραφική αποκατάσταση βόρειας όψης πρόπυλου τελετουργικού εστιατορίου Επιδαύρου¹⁵⁴

Κατά τους ρωμαϊκούς χρόνους, ένα τμήμα τουλάχιστον του τελετουργικού εστιατορίου είχε καταστραφεί, πιθανότατα από πυρκαγιά. Τότε το πρόπυλο μετατράπηκε σε ναό της

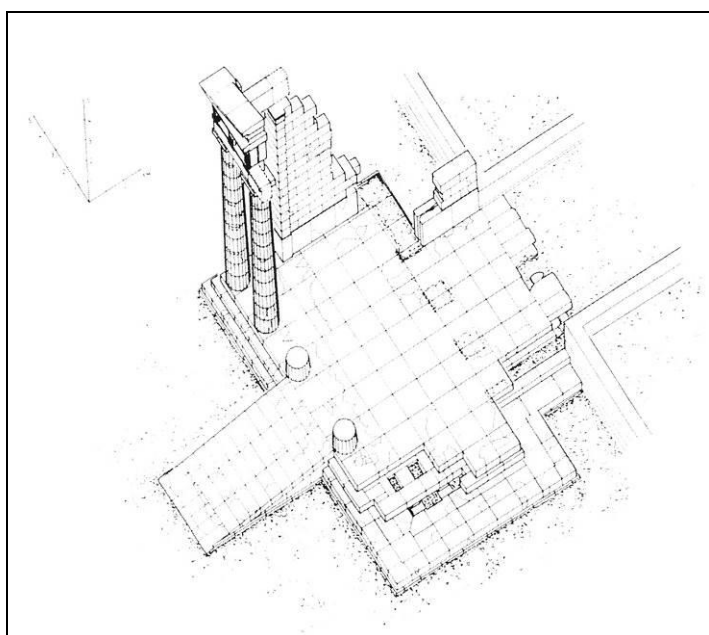
¹⁵³ Οι εξωτερικές διαστάσεις αυτού του κτηρίου ήταν περίπου 69x75 [m].

¹⁵⁴ Από Κυριάκη 2006, εικ. 2, σελ. 2.

Υγείας, χωρίς αλλαγή στο εμπρόσθιο τμήμα του, ενώ στην εσωτερική αυλή του εστιατορίου κατασκευάστηκε ωδείο. Το συγκρότημα, το οποίο εικάζεται ότι καταστράφηκε τον 6^ο μ.Χ. αιώνα από σεισμικά αίτια¹⁵⁵, αποκαλύφθηκε σταδιακά την περίοδο 1884-1899, με ανασκαφές της Αρχαιολογικής Εταιρείας επικεφαλής των οποίων ήταν ο Παναγιώτης Καββαδίας.

Από το 1984 έως και το 2015, πραγματοποιήθηκαν σημαντικές αναστηλωτικές επεμβάσεις σε διάφορα μνημεία του Ασκληπιείου της Επιδαύρου, όλες υπό την εποπτεία της Επιτροπής Συντήρησης Μνημείων Επιδαύρου. Στο πλαίσιο αυτών των προσπαθειών μελετήθηκε, μεταξύ άλλων, εκτενώς το σωζόμενο υλικό του εν λόγω μνημειώδους πρόπυλου, και αργότερα αναστηλώθηκαν στο πλήρες ύψος τους οι δύο ανατολικοί κίονες, τμήμα του ανατολικού τοίχου καθώς και του επιστέφοντος θριγκού (Εικ. 5.8).

Σημειώνεται ότι η γραφική αποκατάσταση και στην συνέχεια η αναστήλωση των δύο κίωνων είχαν πολλές δυσκολίες, καθώς από την κιονοστοιχία του πρόπυλου, σε σύνολο 66 σπονδύλων και 6 κιονοκράνων, σώζονται μόνο 18 ακέραιοι σφόνδυλοι ή θραύσματα μεγάλων διαστάσεων, συμπεριλαμβανομένου ενός μόνο κιονόκρανου. Με αφετηρία τα μετρητικά δεδομένα από τα διατηρούμενα μέλη, η μελετήτρια του μνημείου Σίσυ Κυριάκη, εξέτασε



Εικ. 5.8: Η πρόταση αναστήλωσης τμήματος του πρόπυλου του τελετουργικού εστιατορίου, σε αξονομετρικό σχέδιο¹⁵⁶.

ενδελεχώς τα διαφορετικά ενδεχόμενα και κατέληξε ότι το πιθανότερο είναι οι κίονες του πρόπυλου: (α) απαρτίζονταν από κιονόκρανο και ένδεκα σπονδύλους, (β) είχαν ύψος ίσο με 7.118 m, και (γ) είχαν κάτω διάμετρο ίση με 1.142 m.

Η μελετήτρια του μνημείου συμπέρανε ότι οι κορμοί των κίωνων παρουσίαζαν ένταση και ήταν λαξευμένοι με 20 ραβδώσεις σε όλο το ύψος τους. Επίσης, ότι τα μέλη των κίωνων συνδέονταν μεταξύ τους, όχι μόνο με ξύλινους πόλους και εμπόλια, στα κέντρα των διεπιφανειών τους, αλλά και με 4 ορθογώνιους μολυβδοχοημένους γόμφους, τοποθετημένους σε δύο κάθετες διαμέτρους.

¹⁵⁵ Κυριάκη 2009, σελ. 2.

¹⁵⁶ Από Κυριάκη 1999, σχ. 5, σελ. 37.

5.3 Οι σεισμικές καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν για την διέγερση των αριθμητικών προσομοιωμάτων των κίωνων

Στις αριθμητικές αναλύσεις που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο, χρησιμοποιήθηκαν, για την διέγερση προσομοιωμάτων αρχαίων κίωνων, οι καταγραφές τεσσάρων καταστρεπτικών σεισμών που έλαβαν χώρα στον ελλαδικό χώρο σε πρόσφατες δεκαετίες. Οι εν λόγω σεισμικές καταγραφές, οι οποίες έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, εφαρμόζονταν στις βάσεις των προσομοιωμάτων, διαβαθμισμένες με βάση την μέγιστη (καταγεγραμμένη σε μία διεύθυνση) εδαφική ταχύτητα¹⁵⁷, και κλιμακούμενες με την χρήση κατάλληλων πολλαπλασιαστικών συντελεστών. Οι συντελεστές αυτοί αυξάνονταν σταδιακά έως την κατάρρευση των προσομοιωμάτων των κίωνων¹⁵⁸. Το τυπικό αυξητικό βήμα των διεγέρσεων ήταν ίσο με 20 cm/sec και εφαρμοζόταν σε κάθε επόμενη αριθμητική επίλυση, κάθε επιμέρους παραμετρικής διερεύνησης. Στις κρίσιμες περιοχές φόρτισης των προσομοιωμάτων γινόταν πύκνωση των αυξητικών βημάτων έως την τιμή των 5 cm/sec, η οποία επιλέχθηκε ως η ελάχιστη του βήματος. Οι καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

α) Η καταγραφή του σεισμού ο οποίος συνέβη στην Καλαμάτα στις 13/9/86, είχε μέγεθος $M=6.0$ και επίκεντρο 12 km βόρεια της πόλης. Η καταγραφή αυτή παρουσιάζει μέγιστες τιμές οριζόντιων συνιστωσών επιτάχυνσης 0.27g και 0.23g, καθώς και διάρκεια ισχυρής δόνησης (δηλαδή χρονική διάρκεια με επιτάχυνση μεγαλύτερη ή ίση της 0.05g) 4 sec.

β) Η καταγραφή στην Έδεσσα, σεισμού με μέγεθος $M = 5.9$, ο οποίος συνέβη στις 21/12/90 και είχε επίκεντρο 31 km βορειοανατολικά της πόλης (στην περιοχή Γρίβα). Λόγω της μεγάλης απόστασης του επιταχυνσιογράφου από το επίκεντρο του σεισμού, η καταγραφή αυτή έχει χαμηλές επιταχύνσεις ($\approx 0.10g$), σε αντίθεση με τις ιδιοπεριόδους των οριζόντιων συνιστωσών οι οποίες, επηρεαζόμενες από τους μαλακούς σχηματισμούς του υπεδάφους, είναι αρκετά υψηλές ($T= 0.50 - 0.70$ sec). Παρά τις χαμηλές επιταχύνσεις, η διάρκεια της ισχυρής δόνησης προσεγγίζει τα 6.0 sec.

γ) Η καταγραφή του Αιγίου, η οποία προκλήθηκε από σεισμό στις 15/6/1995, μεγέθους $M=6.4$ και με επίκεντρο σε απόσταση 18 km βορειοδυτικά της πόλης. Το κύριο χαρακτηριστικό της δόνησης αυτής είναι η ύπαρξη παλμού μεγάλης επιτάχυνσης (μέγιστες τιμές οριζόντιων συνιστωσών 0.54g και 0.50g) και μακράς περιόδου (≈ 0.5 έως 0.6 sec).

¹⁵⁷ Αυτό διότι σε πολλές προγενέστερες σχετικές εργασίες διαφάνηκε ότι η σεισμική απόκριση ενός πολυσπόνδου κίονα συσχετίζεται μετρίως με την μέγιστη εδαφική ταχύτητα και όχι με την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (επιλεκτικά αναφέρονται Αλεξανδρής κ.α. 2001, Παπαδόπουλος και Βιντζηλαίου 2008, Psyharis et al. 2013, και Scandolo and Podestà 2014).

¹⁵⁸ Με τον όρο κατάρρευση κίονα στο παρόν αλλά και στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας μελέτης, εννοείται η κατάρρευση έστω μόνον του κιονοκράνου του ή (φυσικά) περισσότερων μελών του.

δ) Η καταγραφή του πιο πρόσφατου μεγάλου σεισμού της Αθήνας, ο οποίος συνέβη στις 7/9/99 και είχε μεγέθους $M=5.9$. Η καταγραφή αυτή πραγματοποιήθηκε στο κτήριο του Κ.Ε.Δ.Ε. (Πειραιώς 166), δηλαδή, ελήφθη σε απόσταση 11 km από το επίκεντρο του σεισμού. Παρουσιάζει μέγιστες τιμές οριζόντιων συνιστωσών επιτάχυνσης 0.30g και 0.26g, διάρκεια ισχυρής δόνησης 5.5 sec, και είναι υψίσυχη.

Η επιλογή των συγκεκριμένων καταγραφών σεισμών έγινε διότι θεωρούνται αντιπροσωπευτικές των σεισμικών κινήσεων του ελλαδικού χώρου, και ταυτόχρονα καλύπτουν και ένα (σχετικώς) ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Τα καταγραφέντα επιταχυνσιογραφήματα των σεισμών αυτών, μαζί με τις υπολογισθείσες χρονοϊστορίες ταχυτήτων και μετατοπίσεων παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 5.1, 5.2 και 5.3¹⁵⁹. Οι μέγιστες τιμές των επιταχύνσεων, των ταχυτήτων και των μετατοπίσεων των σεισμικών καταγραφών, παρατίθενται στον Πίνακα 5.1, ενώ οι δεσπόζουσες περίοδοι στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.

Σεισμική Καταγραφή	Μέγιστη Επιτάχυνση (g)				Μέγιστη Ταχύτητα (cm/sec)				Μέγιστη Μετατόπιση (cm)			
	Διαμήκης	Κατακόρ.	Εγκάρσια	Οριζόντια	Διαμήκης	Κατακόρ.	Εγκάρσια	Οριζόντια	Διαμήκης	Κατακόρ.	Εγκάρσια	Οριζόντια
Καλαμάτας	0.27	0.19	0.23	0.35 ¹⁶⁰	24.0	8.1	30.9	37.7	5.6	1.4	7.1	7.2
Έδεσσας	0.10	0.04	0.10	0.11	10.9	3.0	8.4	11.6	1.1	0.3	0.9	1.2
Αιγίου	0.54	0.20	0.50	0.54	48.1	14.5	43.4	48.3	6.1	2.6	6.7	6.9
Αθήνας	0.30	0.16	0.26	0.37	14.7	7.0	16.1	16.4	2.1	1.8	1.9	2.8

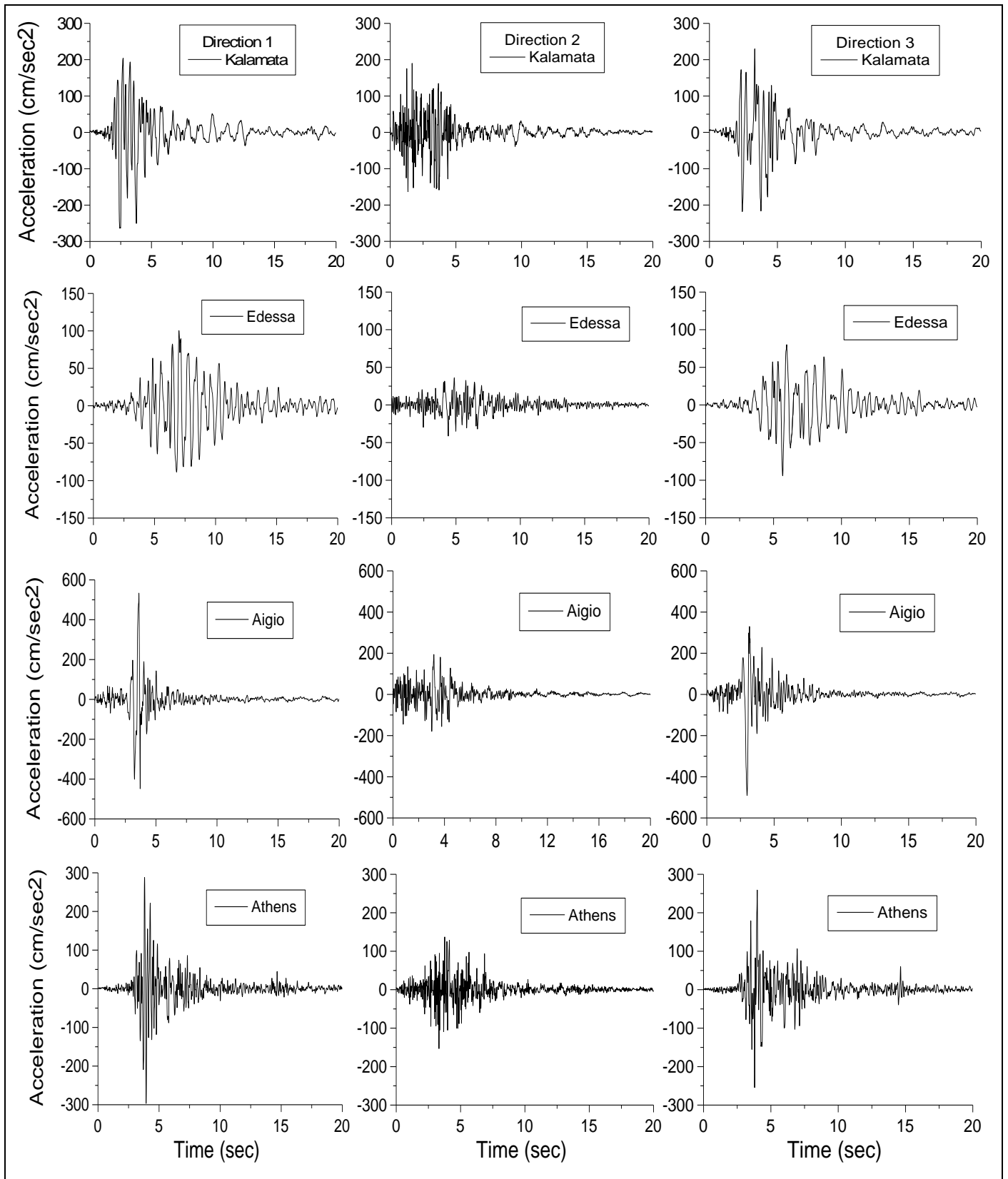
Πίν. 5.1: Οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις, ταχύτητες και μετατοπίσεις των σεισμικών καταγραφών, και στις τρεις διευθύνσεις.

Σεισμική Καταγραφή	Δεσπόζουσα περίοδος (sec)		
	Διαμήκης	Εγκάρσια	Μέση τιμή (T_g)
Καλαμάτας	0.60	0.65	0.625
Έδεσσας	0.70	0.70	0.70
Αιγίου	0.50	0.60	0.55
Αθήνας	0.25	0.70	0.475

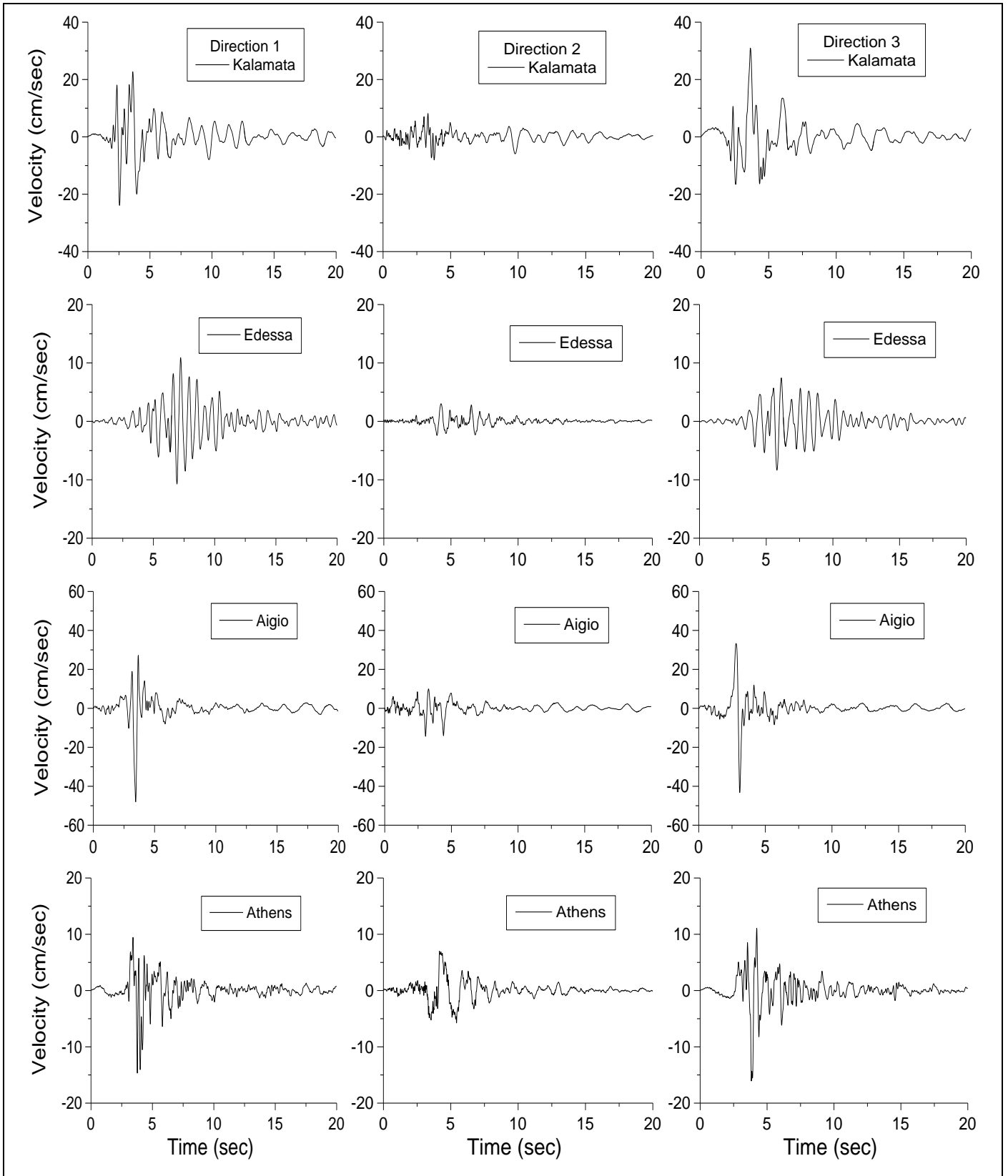
Πίν. 5.2: Οι δεσπόζουσες περίοδοι των σεισμικών καταγραφών, στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις.

¹⁵⁹ Οι χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων των καταγραφών της Καλαμάτας, της Έδεσσας και της Αθήνας, ελήφθησαν από την βάση δεδομένων των καταγραφών ισχυρών σεισμικών κινήσεων του Ινστιτούτου Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών. Οι χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων της καταγραφής του Αιγίου ελήφθη από την αντίστοιχη βάση δεδομένων του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Οι χρονοϊστορίες των ταχυτήτων και των μετατοπίσεων προέκυψαν με διαδοχικές ολοκληρώσεις των επιταχύνσεων.

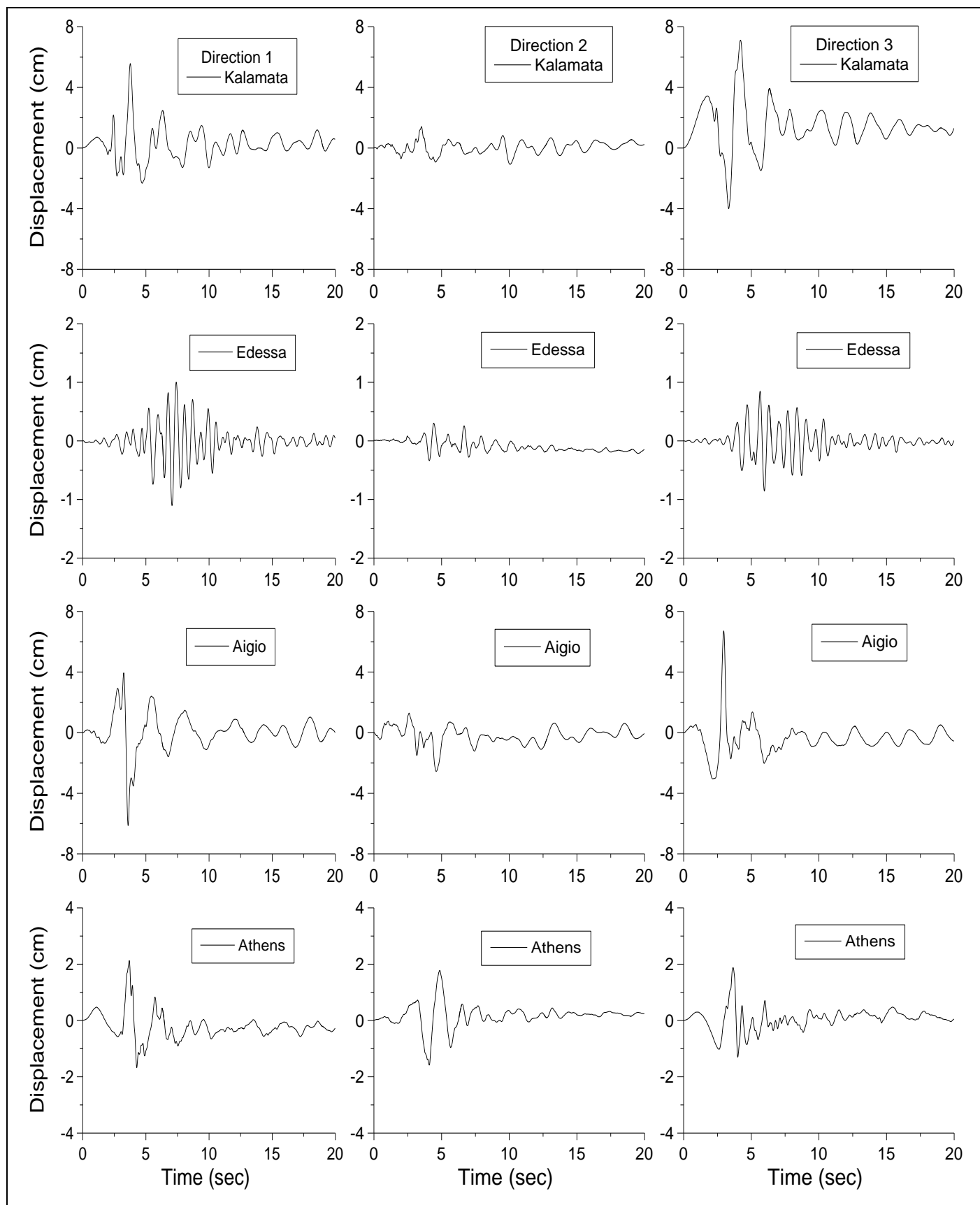
¹⁶⁰ Με έντονη και πλάγια γραφή παρουσιάζονται οι μέγιστες οριζόντιες επιταχύνσεις, ταχύτητες και μετατοπίσεις κάθε σεισμικής καταγραφής. Οι μέγιστες αυτές τιμές προέκυψαν από την με διανυσματικό τρόπο άθροιση (για κάθε στιγμή) των αντίστοιχων δεδομένων για την διαμήκη και την εγκάρσια διεύθυνση, και (ακολουθώς) την επιλογή του μέγιστου αθροίσματος.



Διαγρ. 5.1: Τα επιταχυνσιογραφήματα που κατεγράφησαν στην Καλαμάτα (1986), στην Έδεσσα (1990), στο Αίγιο (1995) και στην Αθήνα (1999).



Διαγρ. 5.2: Οι υπολογισθείσες εδαφικές ταχύτητες από τα επιταχυνσιογραφήματα που κατεγράφησαν στην Καλαμάτα (1986), στην Έδεσσα (1990), στο Αίγιο (1995) και στην Αθήνα (1999).



Διαγρ. 5.3: Οι υπολογισθείσες εδαφικές μετατοπίσεις από τα επιταχυνσιογραφήματα που κατεγράφησαν στην Καλαμάτα (1986), στην Έδεσσα (1990), στο Αίγιο (1995) και στην Αθήνα (1999).

5.4 Προκαταρκτικές διερευνήσεις για ένα κίονα του ναού του Επικούριου Απόλλωνα

5.4.1 Τα διάφορα προσομοιώματα του κίονα

Για την πραγματοποίηση προκαταρκτικών διερευνήσεων αναφορικά με την αριθμητική ανάλυση της σεισμικής απόκρισης ενός μεμονωμένου αρχαίου κίονα, καθώς και της επιρροής στα αποτελέσματα της ανάλυσης διαφόρων (σημαντικών) παραμέτρων, επιλέχθηκε ένας κίονας του ναού του Επικούριου Απόλλωνα. Η επιλογή του κίονα, ο οποίος είναι ο τέταρτος από ανατολικά της βόρειας όψης του μνημείου των Βασσών (κίονας KB4), βασίστηκε στο ότι: (α) είναι μεσαίου μεγέθους, συγκριτικά με τους άλλους αρχαίους κίονες δωρικού ρυθμού που έχουν διατηρηθεί μέχρι τις μέρες μας, (β) έχει τον συνήθη αριθμό σπονδύλων για το μέγεθός του, και (γ) λόγω του ότι είναι της κλασικής περιόδου, η ραδιονότητά του είναι μέτρια. Κατά συνέπεια, τα βασικά χαρακτηριστικά του κίονα αυτού είναι κοντά στους μέσες τιμές των χαρακτηριστικών των αρχαίων δωρικών κίωνων.

Πιο συγκεκριμένα, ο συγκεκριμένος κίονας απαρτίζεται όπως προαναφέρθηκε, από κιονόκρανο και επτά σπόνδυλους, το ύψος του ισούται με 5.97 m, ενώ η κάτω και η άνω διάμετρος του κορμού του είναι ίσες με 1.16 m και 0.94 m, αντίστοιχα. Οι σπόνδυλοί του είναι ανισουψείς, και το ύψος τους ισούται (από τον χαμηλότερο προς τον υψηλότερο) με 0.595 m, 1.080 m, 0.840 m, 0.785 m, 0.750 m, 0.745 m, και 0.630 m. Επίσης, ο κίονας είναι λαξευμένος στην περιφέρειά του όπως η πλειονότητα των κίωνων της ίδιας περιόδου, δηλαδή, με 20 ραβδώσεις (σε όλο το ύψος του) και με ένταση, της οποίας η μέγιστη τιμή εμφανίζεται περίπου στο μέσο του κορμού και ισούται περίπου με 8 mm.

Με την χρήση του λογισμικού ABAQUS/Explicit μορφώθηκαν τέσσερα διαφορετικά τρισδιάστατα προσομοιώματα του εν λόγω κίονα. Στο πρώτο (Α') προσομοίωμα, ο κίονας ήταν κατακόρυφα και ελεύθερα ιστάμενος επί πρισματικής ορθογώνιας βάσης. Η διακριτοποίηση του προσομοιώματος έλαβε χώρα με την χρήση εξαεδρικών στοιχείων (8 κόμβων) και με τέτοιο τρόπο ώστε το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων του να είναι μέτριας πυκνότητας. Έτσι, η περίμετρος του κορμού του κίονα σ' αυτό το προσομοίωμα διαμορφώθηκε οκταγωνική¹⁶¹ (Εικ. 5.9, αριστερά). Σημειώνεται ότι το προσομοίωμα Α' είναι ήταν το απλούστερο από τα τέσσερα και γι αυτό χαρακτηρίζεται ως το βασικό.

¹⁶¹ Όμοια με το δίκτυο του προσομοιώματος του πολυσπόνδου μαρμαρίνου δοκιμίου/κίονα κατά τις διερευνήσεις για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του λογισμικού που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

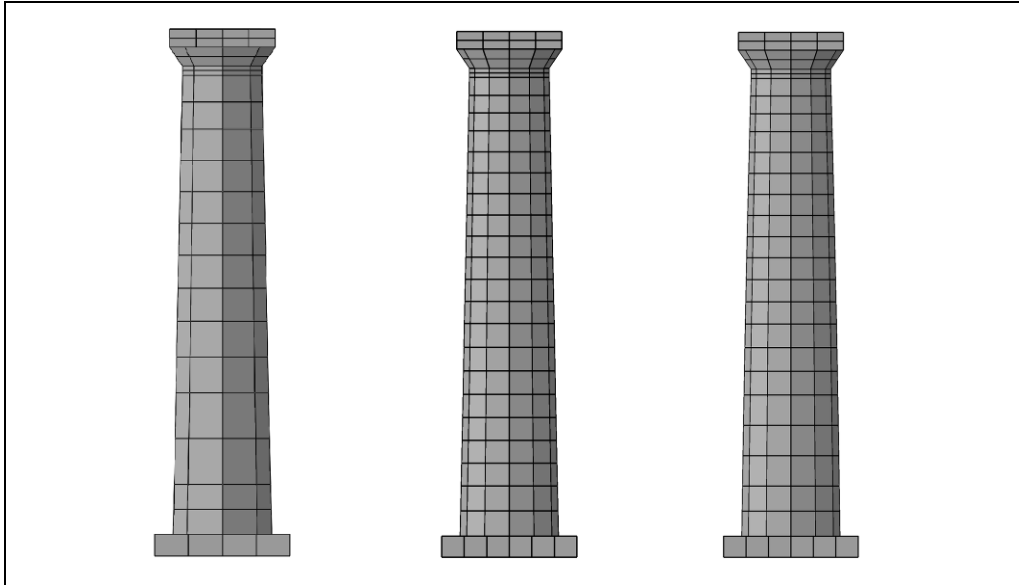
Το δεύτερο (Β') προσομοίωμα ήταν παρόμοιο με το πρώτο, με μόνη διαφορά ότι το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων του ήταν πυκνό (Εικ. 5.9, κέντρο). Έτσι, η περίμετρος του κορμού του προσομοιώματος αυτού διαμορφώθηκε δωδεκαγωνική και κάθε σπόνδυλος του ήταν «διαχωρισμένος» (κατά μέσο όρο) σε 60 ΠΣ. Συνολικά το προσομοίωμα διέθετε 616 ΠΣ, περιλαμβανομένων αυτών του κιονοκράνου (160) και της βάσης (36), έναντι των αντίστοιχων αριθμών ΠΣ, 24 και 280 (96 και 16), του Α'. Ο στόχος της δημιουργίας του Β' (σχεδόν «δίδυμου» με το Α') προσομοιώματος ήταν να διερευνηθεί κατά πόσο η πυκνότητα των πεπερασμένων στοιχείων επηρεάζει τα αποτελέσματα δύο, κατά τα άλλα όμοιων, προσομοιώσεων.

Το τρίτο (Γ') προσομοίωμα μορφώθηκε έτσι ώστε ο κίονας να έχει ένταση, το μέγιστο βέλος της οποίας να είναι ίσο με 10 mm και να εμφανίζεται στο μέσο του κορμού του κίονα. Και στο προσομοίωμα αυτό, το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων ήταν πυκνό, έτσι ώστε να μην αναιρείται από την διακριτοποίηση η ένταση στον κίονα (Εικ. 5.9, δεξιά). Ο πρόδηλος σκοπός αυτού του προσομοιώματος ήταν να εκτιμηθεί εάν η ύπαρξη έντασης σ' ένα αρχαίο κίονα οδηγεί σε διαφορετική σεισμική συμπεριφορά από αυτή που θα παρουσίαζε ο κίονας εάν δεν είχε ένταση.

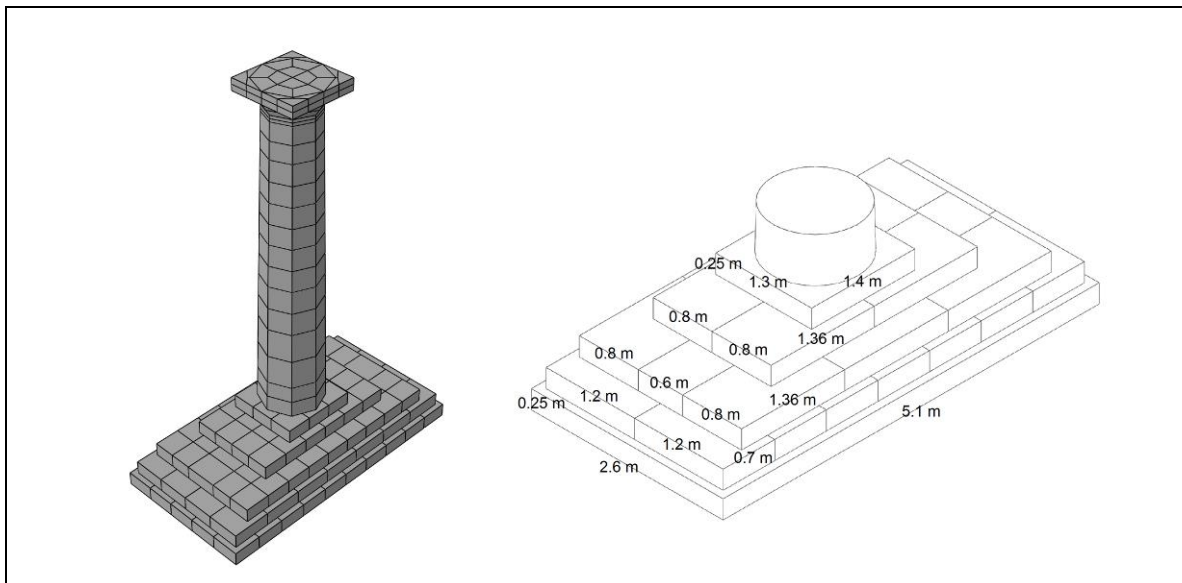
Βεβαίως, σε όλες τις αριθμητικές επιλύσεις και με τα τρία προαναφερθέντα προσομοιώματα, η δυναμική φόρτιση του κίονα προερχόταν από την σεισμική διέγερση της βάσης του η οποία συμπίπτει με τον βατήρα, δηλαδή, τον λίθο έδρασης του κίονα. Όμως, όπως είναι γνωστό, στα περισσότερα αρχαία μνημεία οι κίονες εδράζονται επί δύο ή (συνηθέστερα) τριών αναβαθμών της κρηπίδας και (ενίοτε ανισοϋψούς) θεμελίωσης.

Έτσι, για την εξέταση της επίδρασης της ύπαρξης υποκείμενων στρώσεων λίθων στην σεισμική απόκριση ενός αρχαίου κίονα, μορφώθηκε το τέταρτο (Δ') υπολογιστικό ομοίωμα του κίονα (KB4) του ναού του Επικούριου Απόλλωνα. Το προσομοίωμα Δ' περιελάμβανε, εκτός από τον κίονα και τον βατήρα του, και τους υποκείμενους λίθους της κρηπίδας και της ευθυντηρίας (της ανώτερης, δηλαδή, στρώσης της θεμελίωσης), οι οποίοι μεταβιβάζουν τα φορτία του κίονα στην θεμελίωση του μνημείου. Το προσομοίωμα περιελάμβανε και ορθογώνια παραλληλόγραμμη βάση (Εικ. 5.10), η οποία ήταν αυτή που διεγειρόταν απευθείας με την χρήση των σεισμικών καταγραφών.

Το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων του κίονα στο προσομοίωμα Δ', ήταν όμοιο με το δίκτυο στο Α' (βασικό) προσομοίωμα (πρβλ. Εικ. 5.9 αριστερά και Εικ. 5.10 αριστερά). Συνδετήρια στοιχεία για τους λίθους της κρηπίδας και της ευθυντηρίας δεν περιελήφθησαν στο τέταρτο (Δ') προσομοίωμα.



Εικ. 5.9: Τα τρία πρώτα αριθμητικά προσομοιώματα του κίονα KB4, διακριτοποιημένα (από αριστερά προς δεξιά: προσομοιώματα A', B' και Γ').



Εικ. 5.10: Το προσομοίωμα Δ' του κίονα KB4, διακριτοποιημένο (αριστερά), και τα υποκείμενα του κίονα μέλη του ίδιου προσομοιώματος, με τις διαστάσεις τους (δεξιά). Στο δεξί σχήμα δεν περιλαμβάνονται τα μέλη του κίονα (πλην του πρώτου σπονδύλου του), ούτε οι επαναλαμβανόμενες διαστάσεις των λίθων.

5.4.2 Παράμετροι προσομοιώσεων

Όλα τα προσομοιώματα μορφώθηκαν με βάση τις εξωτερικές διαστάσεις των μελών του κίονα (σπονδύλους, κιονόκρανο) και, για τους υποκείμενους του κίονα λίθους (στο πιο εκτεταμένο προσομοίωμα Δ'), σύμφωνα με τις τυπικές διαστάσεις των λίθων της κρηπίδας

και της ευθυντηρίας του μνημείου των Βασσών (Εικ. 5.10 δεξιά). Κατά συνέπεια, η μόνη αξιοσημείωτη διαφοροποίηση της γεωμετρίας των μελών των αριθμητικών προσομοιωμάτων από την γεωμετρία των αντίστοιχων αρχιτεκτονικών μελών του αρχαίου κτηρίου, αφορά μόνο τις πλευρικές επιφάνειες των σπονδύλων του κίονα, οι οποίες στα προσομοιώματα ήταν πολυγωνικές και όχι (όπως είναι στην πραγματικότητα) κυλινδρικές με ραβδώσεις.

Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα των προκαταρκτικών διερευνήσεων με αυτά των διερευνήσεων που επακολούθησαν και αφορούν κίονες και άλλων αρχαίων μνημείων, το υλικό και των τεσσάρων προσομοιωμάτων του κίονα του μνημείου των Βασσών θεωρήθηκε ότι είναι το πεντελικό μάρμαρο. Έτσι, με την χρήση των μοντέλων προσομοίωσης υλικού που είχαν προκύψει ως τα βέλτιστα κατά την βαθμονόμηση του λογισμικού, ορίστηκαν οι ακόλουθες ιδιότητες για το υλικό όλων των μελών και των τεσσάρων προσομοιωμάτων: πυκνότητα ίση με 2750 kg/m^3 , μέτρο ελαστικότητας ίσο με 80 GPa , λόγος του Poisson ίσος με 0.26 , συντελεστής στατικής τριβής ίσος με 0.7 (και ίσος με τον συντελεστή τριβής ολίσθησης, δηλαδή, $\mu_s = \mu_k = 0.70$), και συντελεστής απόσβεσης ίσος με 0.01 . Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν με βάση τις τιμές στις οποίες συγκλίνουν τα διατιθέμενα στοιχεία της σχετικής βιβλιογραφίας για την κύρια διεύθυνση του μαρμάρου. Σημειώνεται ότι, λόγω του τρόπου διαμόρφωσης και τοποθέτησης των σπονδύλων των αρχαίων κίωνων, η κύρια διεύθυνση του μαρμάρου είναι αυτή που (κυρίως) διέπει την σεισμική απόκριση των κίωνων.

Κάθε προσομοίωμα φορτίστηκε από το ίδιο βάρος του και από σεισμική διέγερση, η οποία εφαρμόζονταν ως επιβαλλόμενες μετατοπίσεις (και στις τρεις κύριες διευθύνσεις) της εκάστοτε βάσης του. Για τις σεισμικές διεγέρσεις των προσομοιωμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι χρονοϊστορίες των μετατοπίσεων των τεσσάρων καταγραφών σεισμικών συμβάντων (που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο), πολλαπλασιασμένες με, σταδιακά αυξανόμενους, συντελεστές, έως την κατάρρευση κάθε προσομοιώματος.

Σε όλες τις αριθμητικές επιλύσεις, τα προσομοιώματα προσανατολίστηκαν στο κύριο τρισορθογώνιο σύστημα αξόνων (όπως αυτό ορίζεται από το λογισμικό) με τέτοιο τρόπο ώστε: (α) η $1'$ (ή x) διεύθυνσή τους να είναι οριζόντια και παράλληλη με την διεύθυνση που η διέγερση παρουσιάζει την μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση (δηλαδή με την διαμήκη διεύθυνση της διέγερσης), (β) η $3'$ (ή z) διεύθυνσή τους να είναι η δεύτερη οριζόντια (δηλαδή, η παράλληλη με την εγκάρσια διεύθυνση της διέγερσης), και (γ) η $2'$ (ή y) διεύθυνσή τους να είναι κατακόρυφη, με τον αρνητικό ημιάξονά της να ορίζει την κατεύθυνση της βαρύτητας. Σημειώνεται ότι λόγω της ασυμμετρίας του τέταρτου προσομοιώματος, οι αριθμητικές επιλύσεις που διενεργήθηκαν με αυτό ήταν διπλάσιες, αφού περιελάμβαναν αναλύσεις με την διεύθυνση της διέγερσης με την μέγιστη επιτάχυνση να

συμπίπτει όχι μόνο με τον εγκάρσιο άξονα της κρηπίδας (προσομοίωμα Δ_1) αλλά και με τον διαμήκη άξονα της κρηπίδας (προσομοίωμα Δ_2).

Είναι γνωστό ότι στην βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες τιμές συντελεστή τριβής για τα βασικά δομικά υλικά των αρχαίων μνημείων (μάρμαρο, ασβεστόλιθος κ.α.). Επίσης, ότι ο συντελεστής τριβής σε μία διεπιφάνεια εξαρτάται και από το κατακόρυφο φορτίο, καθώς και ότι μειώνεται μετά την έναρξη της ολίσθησης. Αναφέρεται, επίσης, ότι υπάρχουν περιπτώσεις κίωνων αρχαίων μνημείων στις διεπιφάνειες των οποίων έχουν διεισδύσει σκόνη ή/και υγρασία και μικροοργανισμοί, με συνέπεια ο συντελεστής τριβής τους να είναι μειωμένος σε σχέση με αυτόν που διέθεταν οι διεπιφάνειες αυτές όταν κατασκευάστηκαν τα μνημεία, και (εν γένει) διαφορετικός από αυτούς που προκύπτουν από τις σχετικές πειραματικές διερευνήσεις. Ως εκ τούτου, ο συντελεστής τριβής στις διεπιφάνειες ενός αρχαίου κίονα υπό σεισμική διέγερση είναι ένα μέγεθος κυμαινόμενο και (αρκετά) αβέβαιο.

Για την εκτίμηση της επιρροής του συντελεστή τριβής στις διεπιφάνειες των μελών ενός κίονα, οι αριθμητικές επιλύσεις που αφορούσαν το βασικό προσομοίωμα (A') του κίονα KB4 πραγματοποιήθηκαν δύο φορές, με την δεύτερη φορά να έχουν οριστεί συντελεστές τριβής ίσοι με 0.4 ($\mu_s' = \mu_k' = 0.40$). Το προσομοίωμα με τους μικρότερους συντελεστές τριβής ονομάστηκε E' .

5.4.3 Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός του τρόπου παρουσιάσής τους

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται σε αρκετά διαγράμματα, αλλά και σε ολίγες εικόνες, τα κύρια αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προκαταρκτικές (του παρόντος κεφαλαίου) αριθμητικές διερευνήσεις αναφορικά με: (i) την σεισμική απόκριση του βασικού μοντέλου του κίονα του μνημείου των Βασσών στις διάφορες σεισμικές διεγέρσεις (Διαγρ. 5.4 έως και 5.6 και Εικ.5.11), (ii) την επιρροή της πυκνότητας του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων του προσομοιώματος του κίονα στα προκύπτοντα αποτελέσματα (Διάγρ. 5.7), (iii) με την επιρροή στην σεισμική απόκριση του κίονα της ύπαρξης έντασης σε αυτόν (Διάγρ. 5.8), (iv) με την επιρροή στην απόκριση του κίονα του της ύπαρξης κάτω από αυτόν τρίβαθμης κρηπίδας και ευθυντηρίας (Διάγρ. 5.9, 5.10, και Διαγρ. 5.11), και (v) με την επιρροή στην απόκριση του κίονα του συντελεστή τριβής στις διεπιφάνειες των μελών του (Διάγρ. 5.12 και Εικ.5.12).

Σε όλες τις περιπτώσεις, οι μετατοπίσεις οι οποίες παρουσιάζονται στα διαγράμματα αφορούν το κέντρο της άνω έδρας του εκάστοτε μέλους του κίονα και είναι απόλυτες ως προς

το κύριο σύστημα συντεταγμένων. Οι μέγιστες (διαμήκεις και εγκάρσιες) μετατοπίσεις παρουσιάζονται στα διαγράμματα με την απόλυτη τιμή τους. Οι μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις κιονοκράνου έχουν προκύψει από την, με διανυσματικό τρόπο, άθροιση των μετατοπίσεων του κέντρου της άνω έδρας του άβακα στις δύο κύριες διευθύνσεις (διαμήκη και εγκάρσια) και την μετέπειτα επιλογή του μέγιστου αθροίσματος.

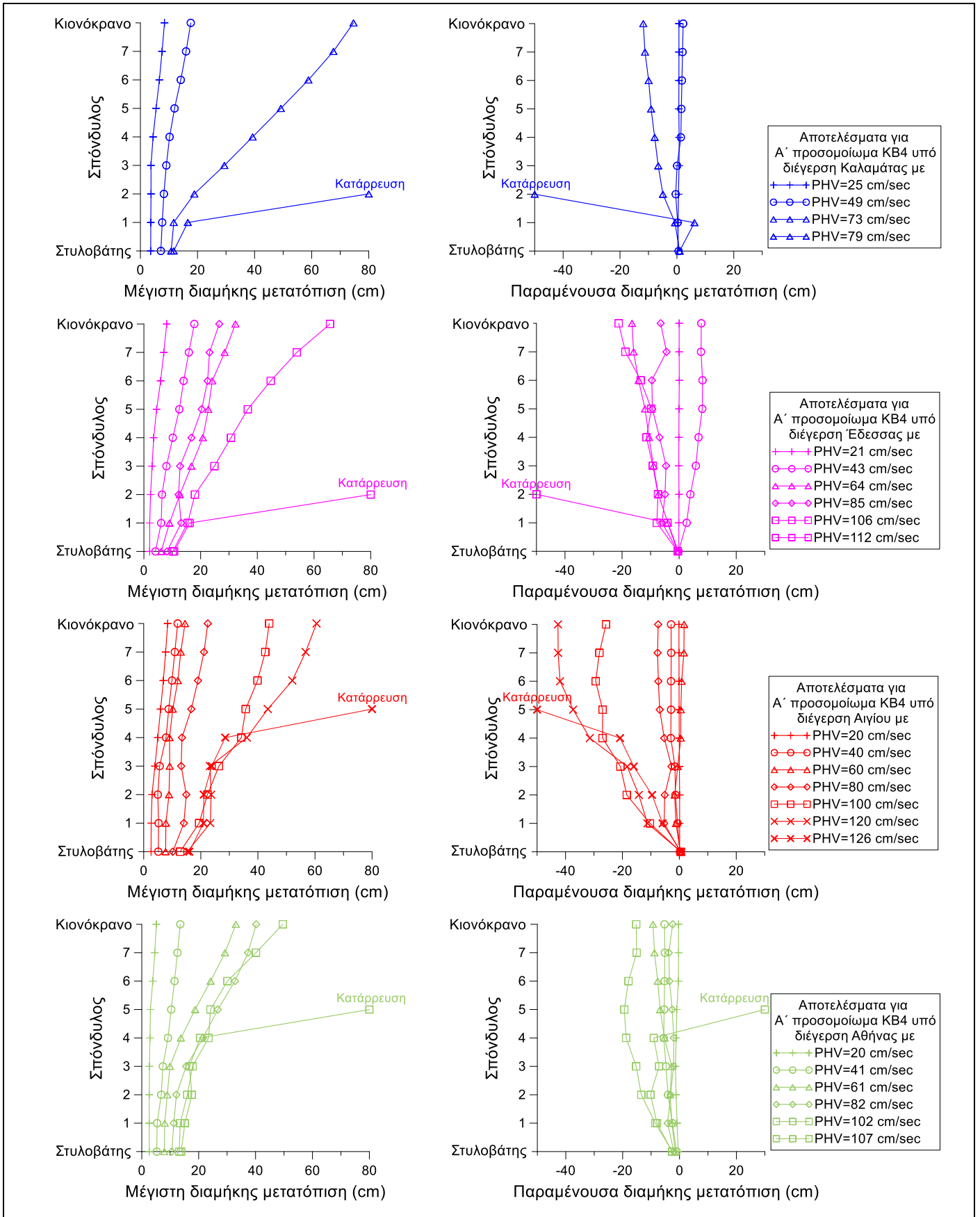
Για την ανάδειξη της επιρροής των παραμέτρων που εξετάστηκαν στην σεισμική συμπεριφορά του κίονα, συγκρίθηκαν οι προβλέψεις των διάφορων προσομοιώσεων για τις μέγιστες μετατοπίσεις της κορυφής του κίονα (πιο συγκεκριμένα, του κέντρου της άνω έδρας του κιονοκράνου του) (Διαγρ. 5.7 έως 5.10, και Διάγρ. 5.12). Μόνο για την εκτίμηση της επιρροής της κρηπίδας, συγκρίθηκαν και οι χρονοϊστορίες των μετατοπίσεων (και στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις) του κέντρου της άνω έδρας του κιονοκράνου και του κέντρου της άνω έδρας του βατήρα (Διαγρ. 5.11). Είναι πρόδηλο ότι η μέγιστη μετατόπιση της κορυφής ενός κίονα δεν είναι πλήρως αντιπροσωπευτική της όλης σεισμικής συμπεριφοράς του, καθώς συχνά συμβαίνουν σημαντικές αλληλοαναιρούμενες ολισθήσεις και στροφές στους σπονδύλους του, οι οποίες δεν απεικονίζονται στην τιμή της μετακίνησης της κορυφής του. Όμως, η μέγιστη μετατόπιση της κορυφής ενός κίονα, σε κάθε περίπτωση, δίνει την καλύτερη δυνατή εικόνα της σεισμικής συμπεριφοράς του που θα μπορούσε να αποδώσει ένα μέγεθος. Το τελευταίο ενισχύεται και από το ότι έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι οι μέγιστες μετατοπίσεις και στροφές των μελών των σεισμικά διεγερόμενων κίωνων δεν επηρεάζονται τόσο από τις μικροατέλειες στους αρμούς τους ή τις μικροδιαφοροποιήσεις στις διεγέρσεις τους όσο οι αντίστοιχες παραμένουσες παραμορφώσεις τους¹⁶².

Τα ακρωνύμια P_{HA}, P_{HV} και P_{HD} αντιπροσωπεύουν την μέγιστη τιμή στο οριζόντιο επίπεδο της επιτάχυνσης, της ταχύτητας και της μετατόπισης, αντίστοιχα, της επιβαλλόμενης σεισμικής διέγερσης. Οι τιμές των P_{HA}, P_{HV} και P_{HD} έχουν προκύψει μετά από την διανυσματική άθροιση των αντίστοιχων οριζοντίων συνιστωσών των σεισμικών καταγραφών (σε συνδυασμό, φυσικά, με τον εκάστοτε πολλαπλασιαστικό συντελεστή της καταγραφής).

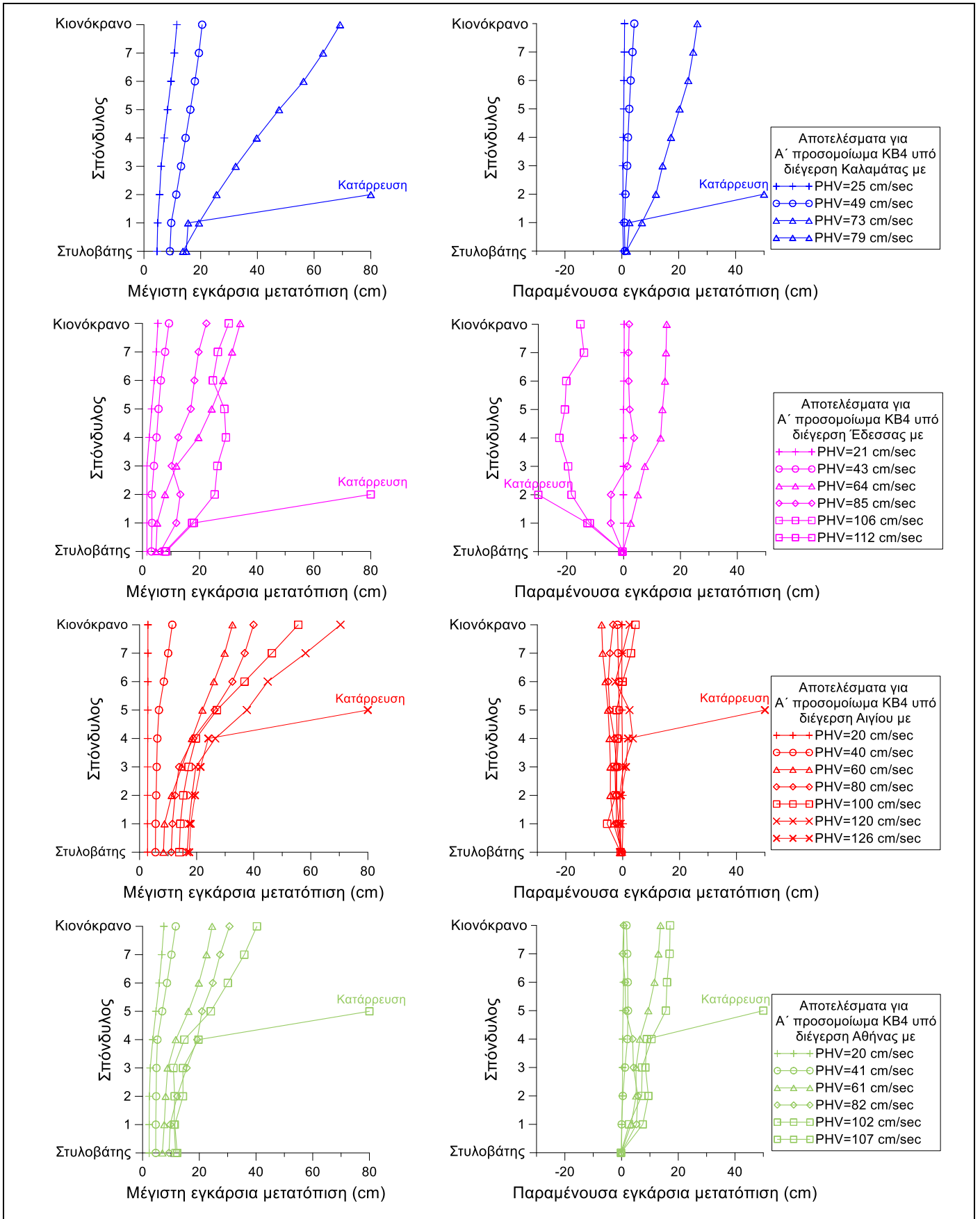
Από τα πρώτα αριθμητικά αποτελέσματα, τα οποία αφορούν το απλούστερο προσομοίωμα, προέκυψε ότι η σεισμική απόκριση του κίονα συσχετίζεται καλύτερα με την μέγιστη μετατόπιση της διεγερόμενης βάσης του (Διαγρ. 5.6). Γι αυτό επιλέχθηκε τα αποτελέσματα των λοιπών αναλύσεων να παρουσιαστούν συναρτώμενα μόνο με τις μέγιστες μετατοπίσεις των επιβαλλόμενων σεισμικών διεγέρσεων¹⁶³.

¹⁶² Drosos and Anastasopoulos 2014, p. 1721.

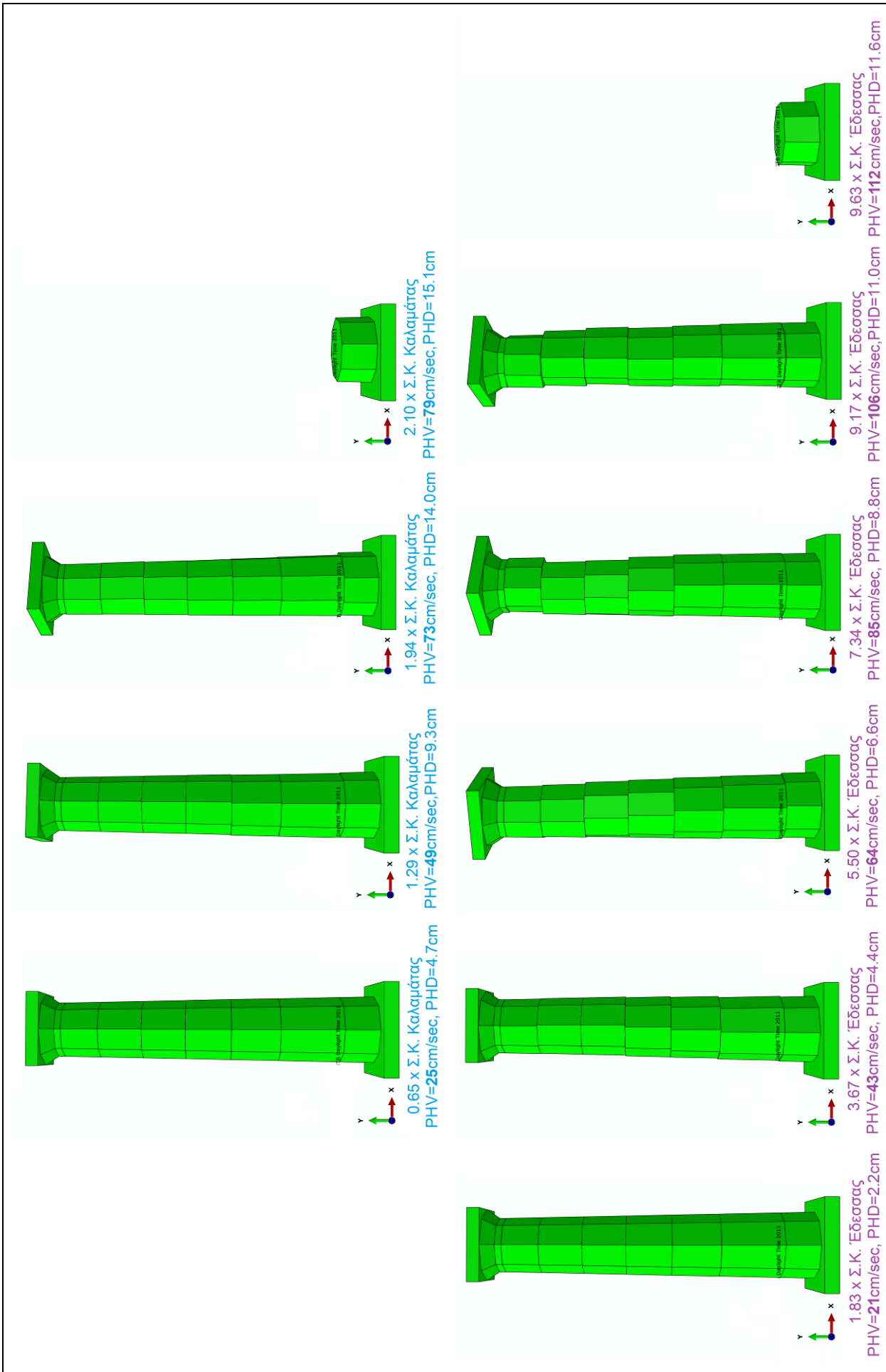
¹⁶³ Οι επεξηγήσεις και οι επισημάνσεις της παρούσας παραγράφου ισχύουν και για τις υπόλοιπες παρουσιάσεις παρόμοιων αριθμητικών αποτελεσμάτων στο ανά χείρας τεύχος, εκτός εάν διαφορετικά αναφέρεται στο κείμενο.



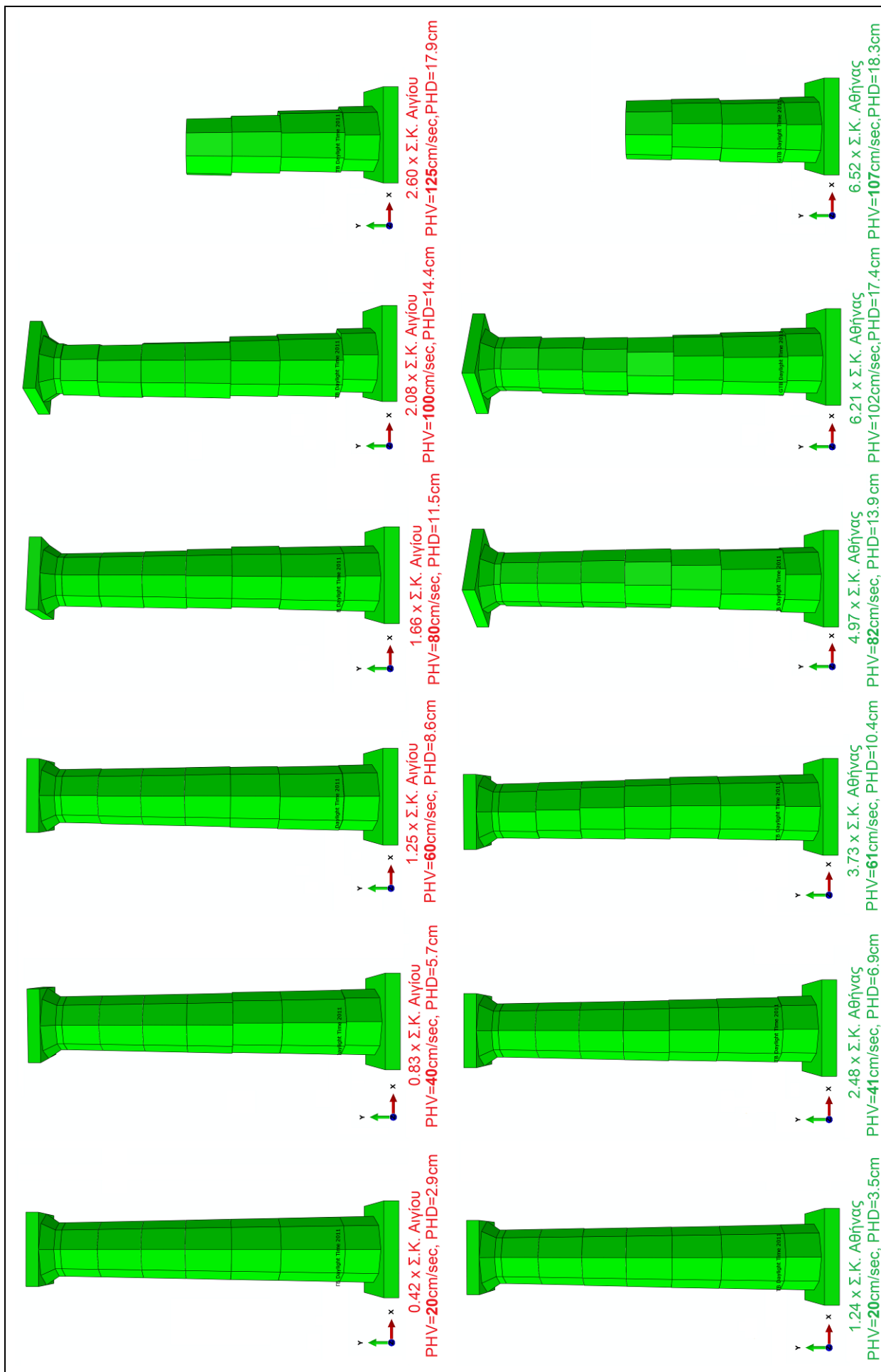
Διαγρ. 5.4: Μέγιστες (αριστερά) και παραμένουσες διαμήκεις μετατοπίσεις σπονδύλων και κιονοκράνου προσομοιώματος Α' κίονα KB4.



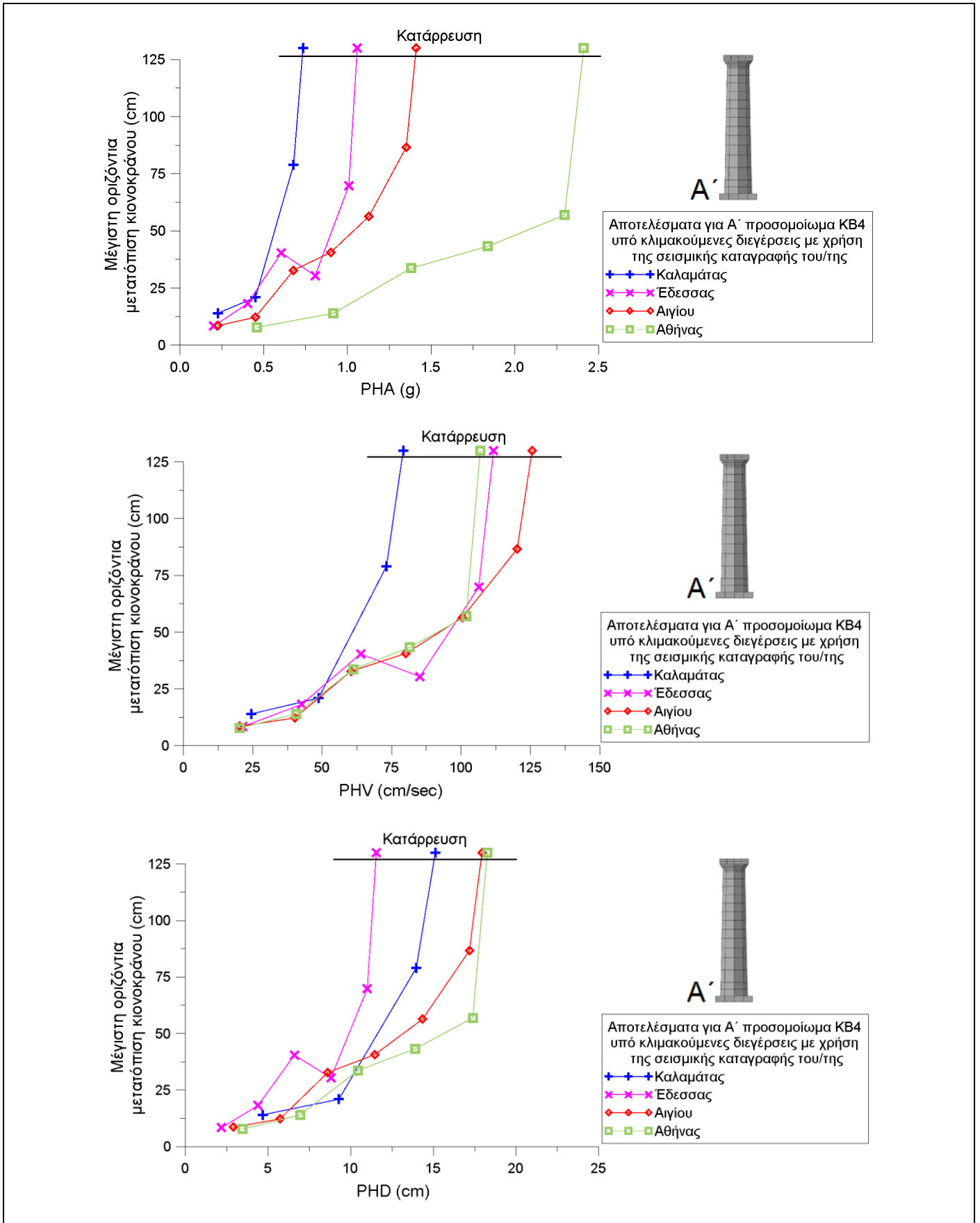
Διαγρ. 5.5: Μέγιστες (αριστερά) και παραμένουσες εγκάρσιες μετατοπίσεις σπονδύλων και κιονοκράνων προσομοιώματος Α' κίονα KB4.



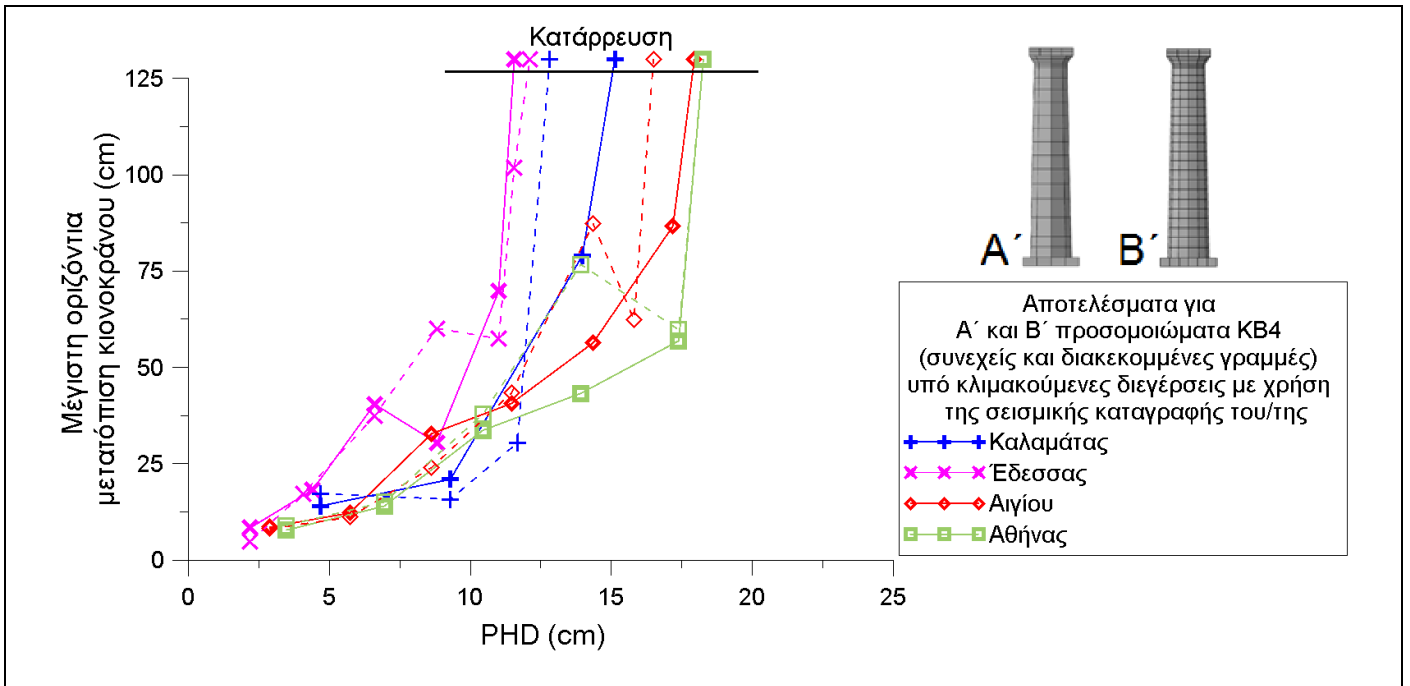
Εικ. 5.11: Οι παραμορφωμένες στάσεις του προσομοιώματος Α' του κίονα ΚΒ4, ως αποτέλεσμα κλιμακούμενων διεγερσέων του με την χρήση των σεισμικών καταγραφών της Καλαμάτας (άνω) και της Έδεσσας (κάτω).



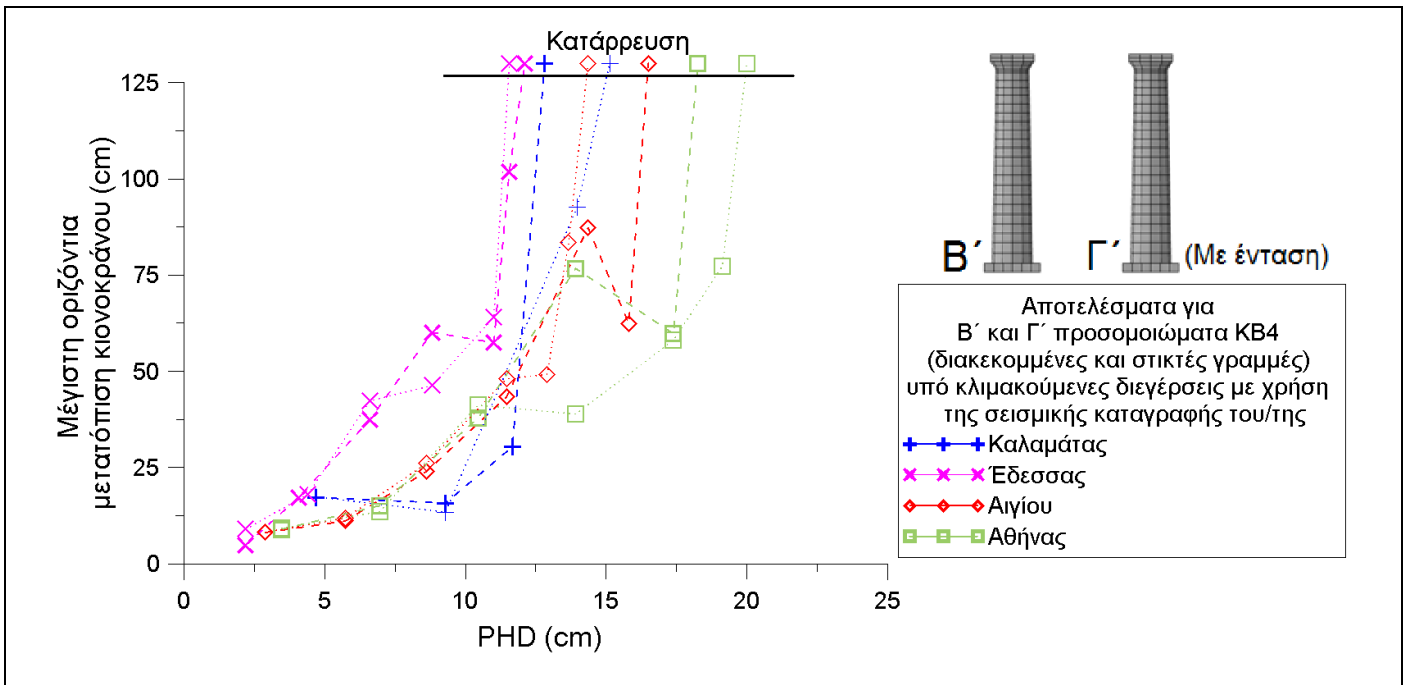
Εικ. 5.11 (συνέχεια): Οι παραμορφωμένες στάσεις του προσομοιώματος Α' του κίονα KB4, ως αποτέλεσμα κλιμακούμενων διεγέρσεων του με την χρήση των σεισμικών καταγραφών του Αιγίου (άνω) και της Αθήνας (κάτω).



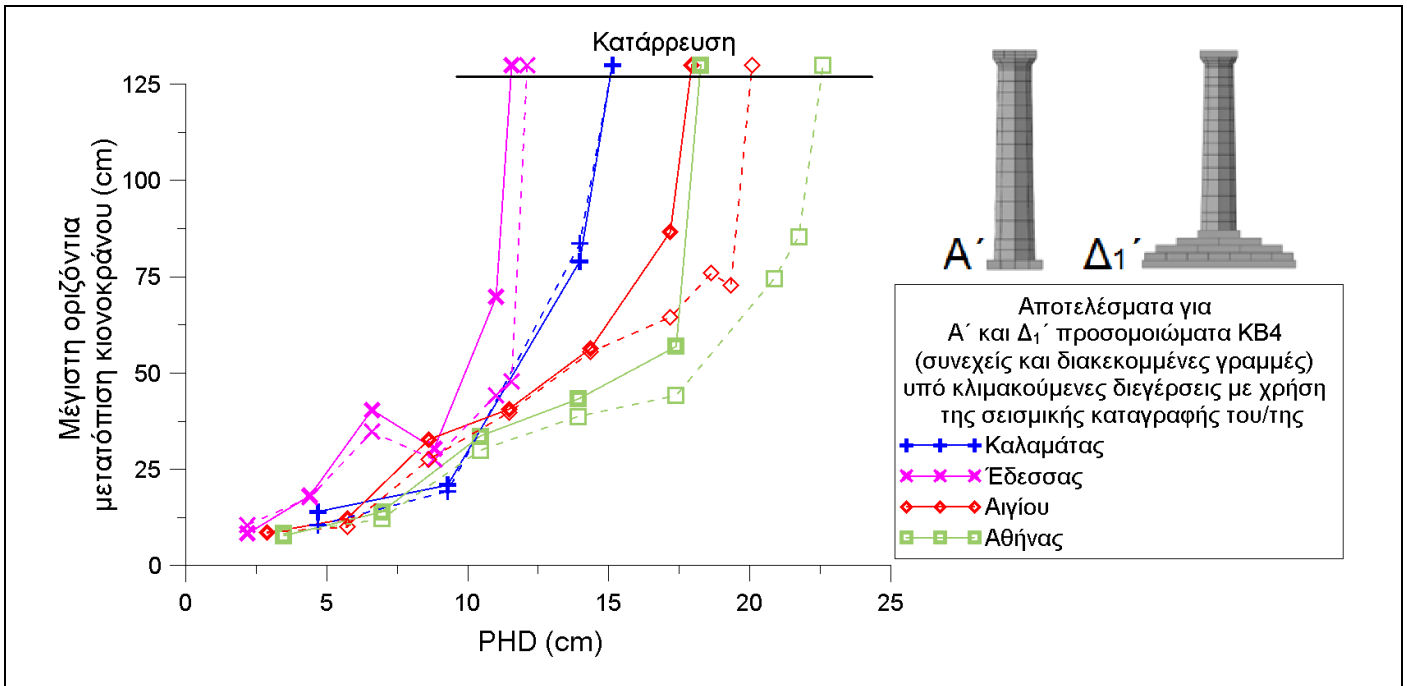
Διαγρ. 5.6: Συσχέτιση μέγιστων οριζόντιων μετατοπίσεων κιονοκράνου προσομοιώματος Α' κίονα KB4 με τις τιμές μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης (άνω), ταχύτητας (μέσο) και μετατόπισης (κάτω) των κλιμακούμενων σεισμικών διεγέρσεων.



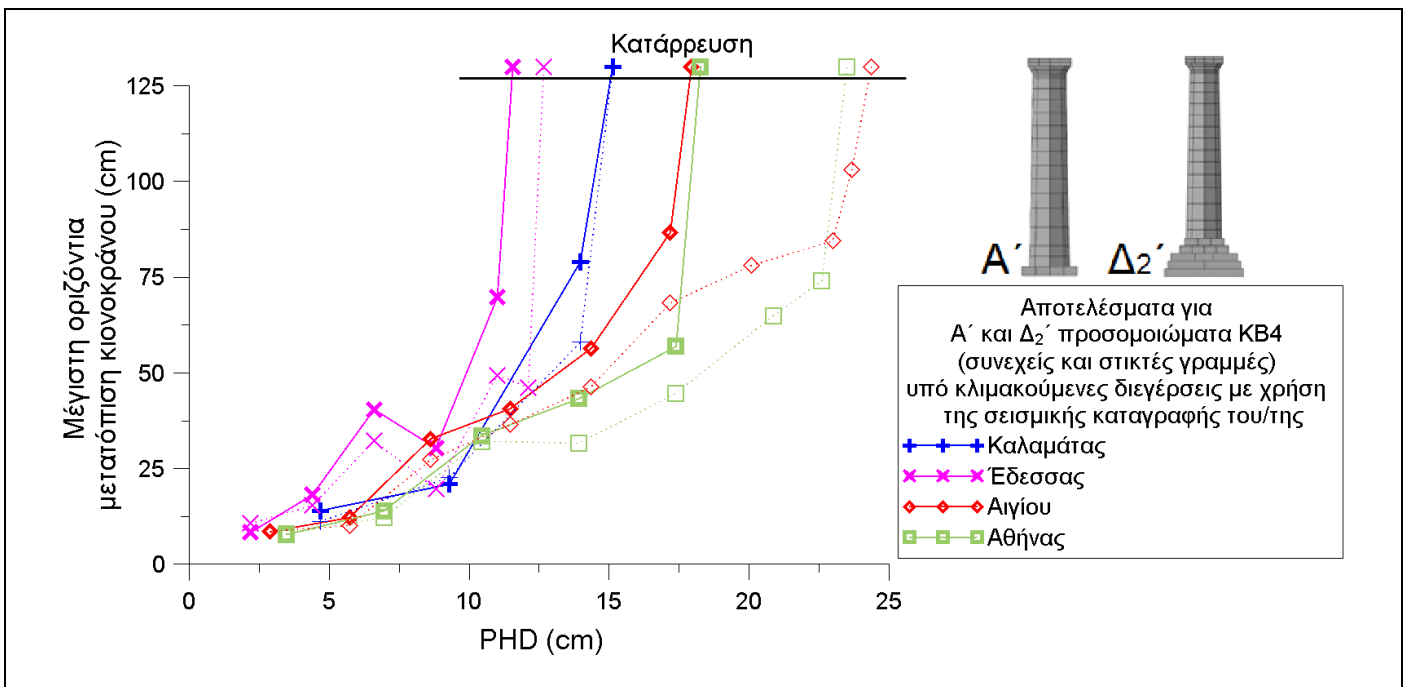
Διάγρ. 5.7: Σύγκριση αποτελεσμάτων που αφορούν το απλούστερο προσομοίωμα του κίονα KB4 (A') και το προσομοίωμα με το πυκνό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων (B').



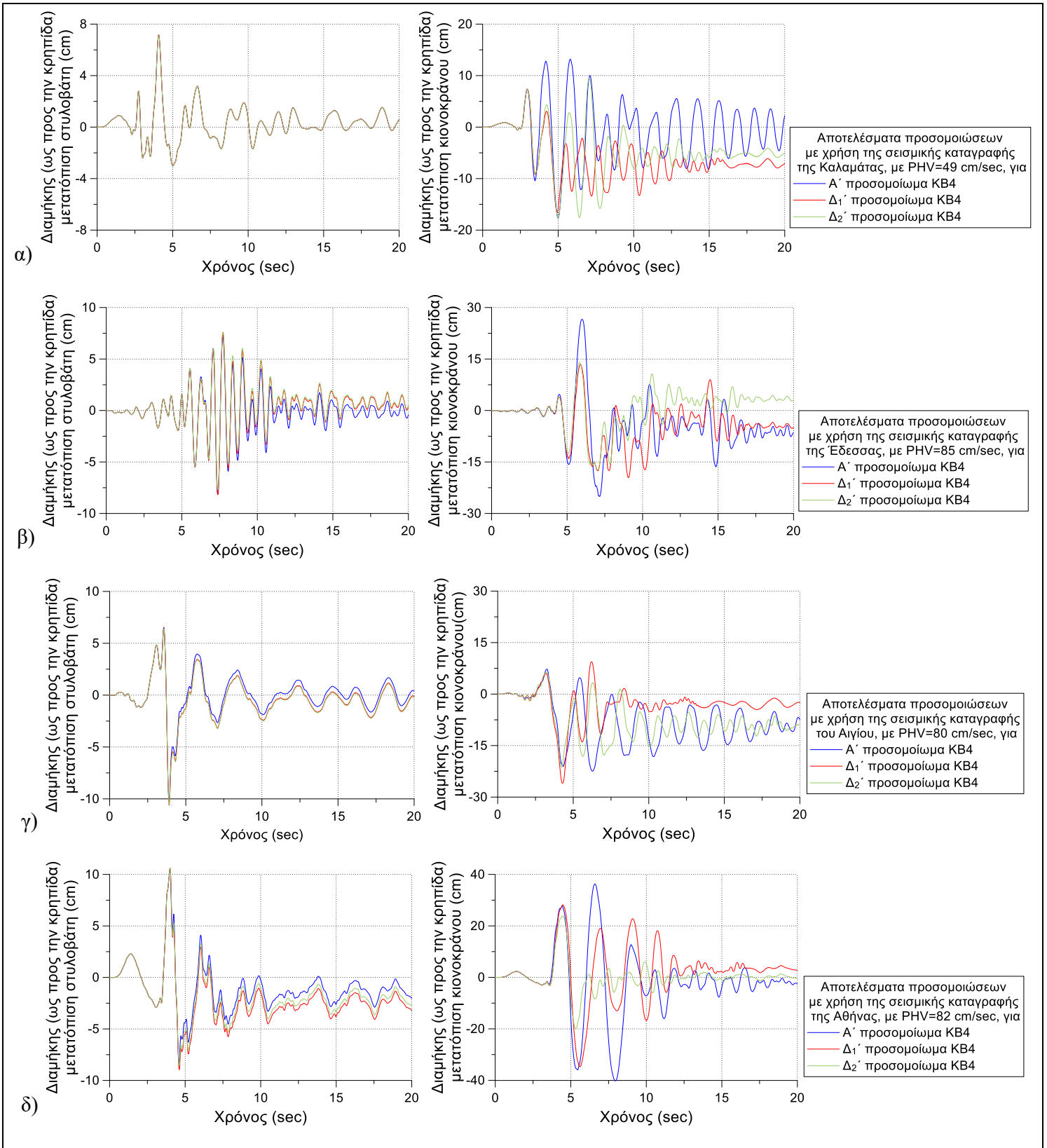
Διάγρ. 5.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων που αφορούν τα δύο προσομοιώματα του κίονα KB4 με το πυκνό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων, το ένα χωρίς ένταση στον κίονα (προσομοίωμα B') και το άλλο με ένταση (προσομοίωμα Γ').



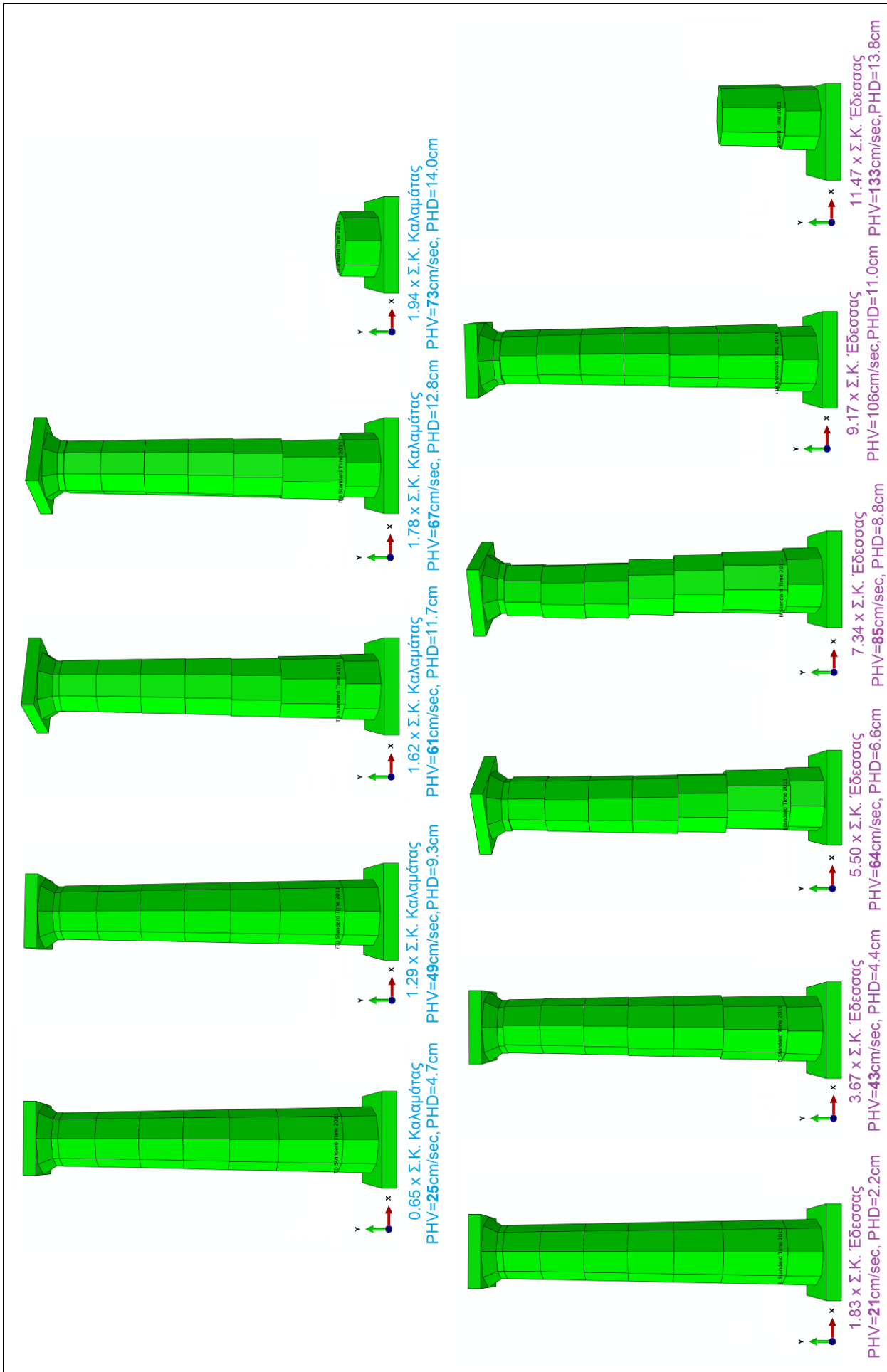
Διάγρ. 5.9: Σύγκριση αποτελεσμάτων που αφορούν το απλούστερο προσομοίωμα του κίονα KB4 (Α') και το πιο εκτεταμένο το οποίο διεγείρεται έτσι ώστε η μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης (καταγεγραμμένη σε μία διεύθυνση) να εφαρμόζεται εγκάρσιως της κρηπίδας (Δ1').



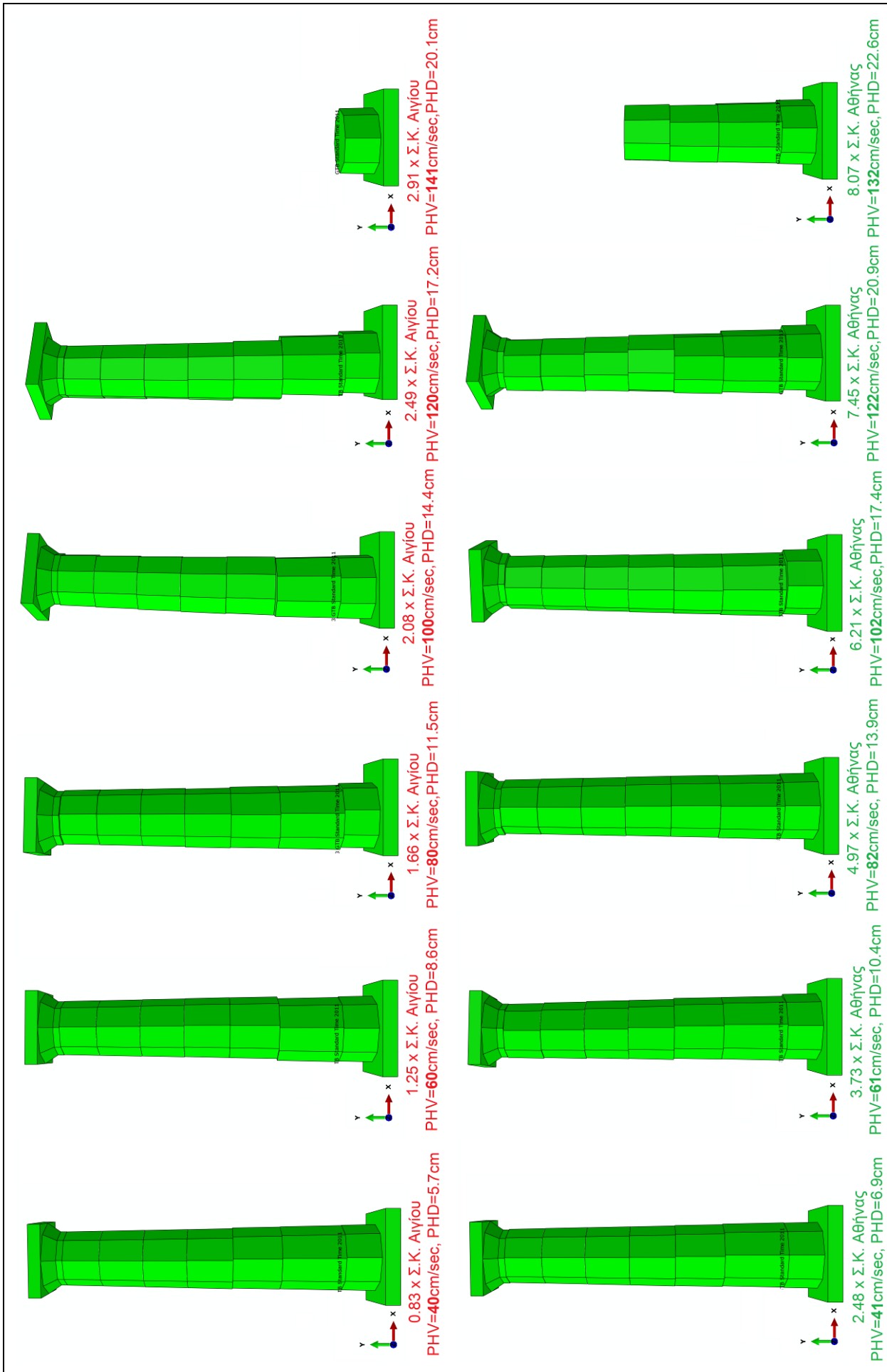
Διάγρ. 5.10: Σύγκριση αποτελεσμάτων που αφορούν το απλούστερο προσομοίωμα του κίονα KB4 (Α') και το πιο εκτεταμένο το οποίο διεγείρεται έτσι ώστε η μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης (καταγεγραμμένη σε μία διεύθυνση) να εφαρμόζεται παραλλήλως της κρηπίδας (Δ2').



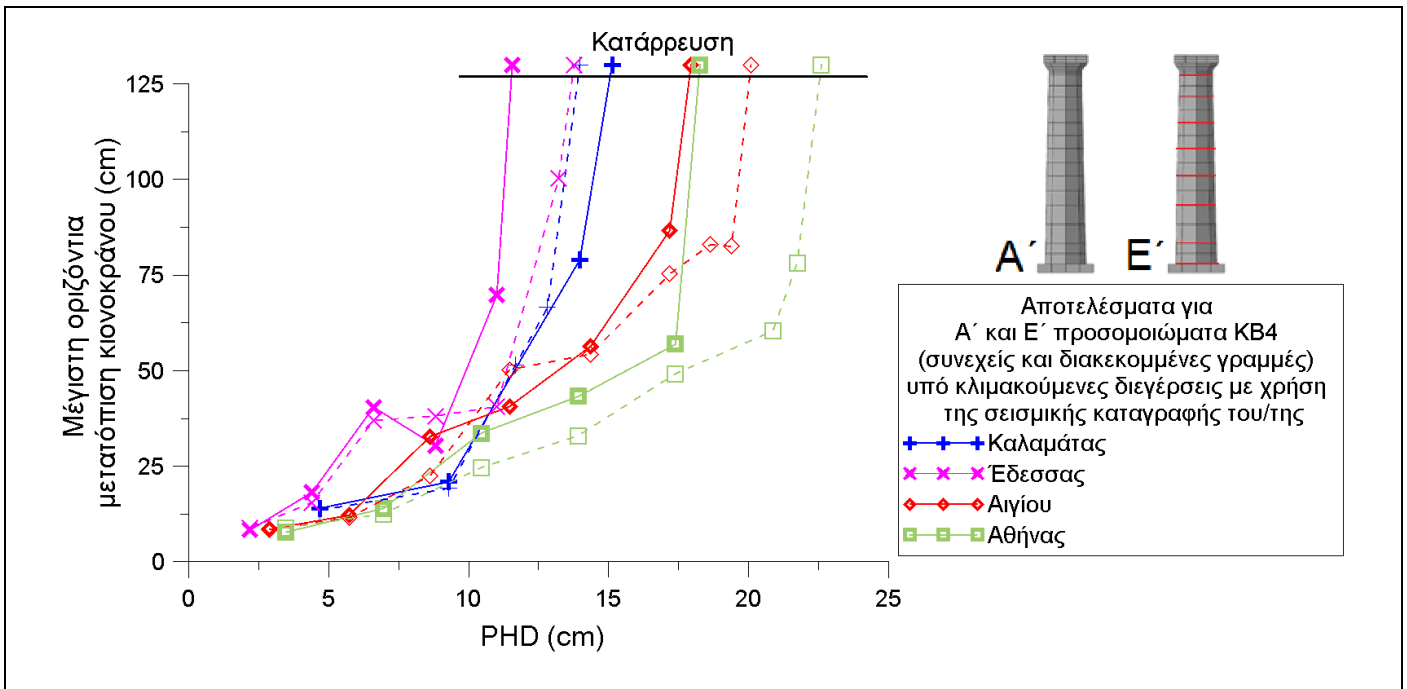
Διαγρ. 5.11: Οι χρονοϊστορίες των διαμηκών μετατοπίσεων του λίθου έδρασης (βατήρα) και του κιονοκράνου του κίονα KB4 (αριστερά και δεξιά, αντίστοιχα) όπως αυτές προέκυψαν από την διέγερση του απλούστερου (A') και των δύο πιο εκτεταμένων (Δ1' και Δ2') προσομοιωμάτων του κίονα KB4 με την χρήση των εξής σεισμικών καταγραφών: (α) της Καλαμάτας επί 1.29 (PHV=49 cm/sec), (β) της Έδεσσας επί 7.34 (PHV=85 cm/sec), (γ) του Αιγίου επί 1.66 (PHV=80 cm/sec), και (δ) της Αθήνας επί 4.97 (PHV=82 cm/sec).



Εικ. 5.12: Οι παραμορφωμένες στάσεις του προσομοιώματος E' του κίονα KB4, ως αποτέλεσμα κλιμακούμενων διεγέρσεων του με την χρήση των σεισμικών καταγραφών της Καλαμάτας (άνω) και της Έδεσσας (κάτω).



Εικ. 5.12 (συνέχεια): Οι παραμορφωμένες στάσεις του προσομοιώματος E' του κίονα KB4, ως αποτέλεσμα κλιμακούμενων διεγέρσεών του με την χρήση των σεισμικών καταγραφών του Αιγίου (άνω) και της Αθήνας (κάτω).



Διάγρ. 5.12: Σύγκριση αποτελεσμάτων που αφορούν το απλούστερο προσομοίωμα του κίονα KB4, στο οποίο είχε οριστεί συντελεστής τριβής στις διεπιφάνειες των μελών του κίονα ίσος με 0.7 (προσομοίωμα Α') και ίσος με 0.4 (προσομοίωμα Ε').

5.4.4 Σχολιασμός αριθμητικών αποτελεσμάτων

Από την αριθμητική διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης του απλούστερου (Α') προσομοιώματος του κίονα (KB4) του ναού του Επικούριου Απόλλωνα, διαφάνηκε ότι η πιο μακροπερίοδη σεισμική καταγραφή που χρησιμοποιήθηκε (της Έδεσσας) ήταν αυτή που συγκριτικά με τις άλλες (για παρόμοια επίπεδα έντασης) προκάλεσε τις μεγαλύτερες παραμένουσες μετατοπίσεις και στροφές περί το μέσο (και χαμηλότερα) του κορμού του κίονα (Διαγρ. 5.4, 5.5, Εικ. 5.11). Με άλλα λόγια, η πιο μακροπερίοδη σεισμική καταγραφή ενεργοποίησε (περισσότερο από τις υπόλοιπες) σχεδόν όλες τις διεπιφάνειες του κίονα.

Εν γένει διαφάνηκε, όπως προαναφέρθηκε, ότι η σεισμική απόκριση και το όριο ευστάθειας του κίονα συσχετίζονται καλύτερα με την μέγιστη εδαφική μετατόπιση, λιγότερο καλά με τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα και όχι με τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (Διαγρ. 5.6).

Η σύγκριση αντίστοιχων αποτελεσμάτων που αφορούν το απλούστερο προσομοίωμα (Α') και το προσομοίωμα (Β') με το πιο πυκνό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων, δείχνει ότι η αύξηση του αριθμού των πεπερασμένων στοιχείων (αν και όπως αναμενόταν διαφοροποίησε

τα αποτελέσματα¹⁶⁴) δεν μετέβαλε ουσιωδώς τις αριθμητικές προβλέψεις (Διάγρ. 5.7). Πάντως, παρουσιάστηκε μία μικρή τάση: το προσομοίωμα Β' να ανατρέπεται σε ολίγον χαμηλότερα επίπεδα σεισμικής έντασης

Παρομοίως, δεν προέκυψαν σημαντικές διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα που αφορούσαν το προσομοίωμα (Γ') του κίονα που διέθετε ένταση εν σχέσει με τα αποτελέσματα του ομολόγου προσομοιώματος (Β') (Διάγρ. 5.8).

Οι μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις προέκυψαν από τις συγκρίσεις αποτελεσμάτων για το απλούστερο προσομοίωμα του κίονα (Α') ως προς τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αναλύσεων με τα προσομοιώματα Δ_1 και Δ_2 , τα οποία περιελάμβαναν και υποκείμενες του κίονα στρώσεις λίθων. Πιο συγκεκριμένα, διαφάνηκε ότι η ύπαρξη των στρώσεων ευθυντηρίας και τρίβαθμης κρηπίδας μεταξύ κίονα και του διεγερόμενου υποβάθρου του, αυξάνει τα όρια ευστάθειας του κίονα όταν οι σεισμικές διεγέρσεις δεν είναι μακροπερίοδοι (Διαγρ. 5.9, 5.10). Η αύξηση αυτή προκύπτει από την ευνοϊκή διαφοροποίηση των μετατοπίσεων του λίθου έδρασης (βατήρα) του κίονα (Διαγρ. 5.11), λόγω της (πρόσθετης) κατανάλωσης ενέργειας από τις σχετικές μικρομετακινήσεις και κρούσεις στους λίθους της ευθυντηρίας και, περισσότερο, της κρηπίδας.

Η αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων που προέκυψαν για το βασικό προσομοίωμα του κίονα KB4 με τις δύο διαφορετικές τιμές συντελεστή τριβής στις διεπιφάνειες ($\mu_s = 0.70$ και $\mu_s' = 0.40$, προσομοιώματα Α' και Ε', αντίστοιχα) έδειξε ότι, αν και πάλι τα αποτελέσματα δεν ήταν πολύ διαφορετικά (πρβλ. Εικ. 5.11 με Εικ. 5.12), ο ορισμός μικρότερου συντελεστή τριβή οδήγησε στις περισσότερες περιπτώσεις σε προβλέψεις με μεγαλύτερα όρια σεισμικής ευστάθειας (Διάγρ. 5.12). Αντίθετο αποτέλεσμα έδωσαν μόνον οι επιλύσεις στις οποίες χρησιμοποιήθηκε η σεισμική καταγραφή της Καλαμάτας (Διάγρ. 5.12).

Βάσει των ανωτέρω, διαπιστώθηκε ότι αρκετές από τις παραδοχές που έγιναν για την απλοποίηση των αριθμητικών προσομοιώσεων της σεισμικής συμπεριφοράς του, υπό εξέταση, αρχαίου κίονα δεν επηρέασαν σημαντικά τις προβλέψεις του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε. Ως εκ τούτου, για τις διερευνήσεις που αφορούσαν τους οκτώ κίονες και παρουσιάζονται ακολούθως, υιοθετήθηκαν οι ίδιες παραδοχές στην πιο ευνοϊκή, ως προς το απαιτούμενο υπολογιστικό κόστος, εκδοχής τους.

¹⁶⁴ Καθώς πρόκειται για προσομοιώματα με σημαντική διαφορά στην γεωμετρία του κορμού τους. Στο ένα η περίμετρος του κορμού του είναι οκταγωνική, ενώ στο άλλο δωδεκαγωνική.

5.5 Διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης οκτώ κίωνων

5.5.1 Τα αριθμητικά προσομοιώματα των κίωνων

Για την διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης οκτώ αρχαίων πολυσπόνδουλων κίωνων πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αριθμητικές επιλύσεις με το λογισμικό ABAQUS/Explicit, μεγάλου πλήθους, στις οποίες τα υπολογιστικά ομοιώματα των κίωνων διεγείρονταν με κλιμακούμενη ένταση (από χαμηλά επίπεδα δυναμικής φόρτισης έως την κατάρρευσή τους), με τη χρήση των τεσσάρων σεισμικών καταγραφών που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη παράγραφο. Όπως αναφέρθηκε, και προκύπτει από τα στοιχεία που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3, οι εν λόγω κίονες είναι αντιπροσωπευτικοί μεγάλου μέρους των σωζόμενων σήμερα αρχαίων κίωνων, μια που τα βασικά χαρακτηριστικά τους (μέγεθος, ραδινότητα, αριθμός σπονδύλων) αφενός ποικίλουν και αφετέρου καλύπτουν πολύ μεγάλο φάσμα.

Για κάθε κίονα μορφώθηκε ξεχωριστό, τρισδιάστατο προσομοίωμα, χωρίς παραμορφώσεις ή βλάβες και χωρίς τις όποιες κατασκευαστικές μικροαποκλίσεις από την κατακόρυφο. Στις προσομοιώσεις παρελήφθησαν, επίσης, η ένταση και οι ραβδώσεις στον κορμό των κίωνων, καθώς και τα συνδεδημένα στοιχεία στις διεπιφάνειές τους.

Κίονας(ες) ναού ή κτηρίου	Περίοδος κατασκευής (π.Χ.)	Αριθμός σπονδύλων	Κάτω διάμετρος [d] (m)	Ύψος [H] (m)	Δείκτης ραδινότητας [$\rho_8=H/d$]	Βάρος προσομοιώματος (kN)
Αθηνάς, Αλίφειρας	τέλη 6 ^{ου} αιώνα	4	0.680	3.365	4.9	25.350
Στοάς Βραυρώνας	περί το 420	3	0.680	3.996	5.9	29.258
Επικούριου Απόλλωνα (Κ.ΒΔ)	425 - 400	5	1.165	5.970	5.1	131.435
Επικούριου Απόλλωνα (Κ.Β4)	425 - 400	7	1.160	5.970	5.1	130.184
Επικούριου Απόλλωνα (Κ.Δ2)	425 - 400	10	1.160	5.970	5.1	130.303
Πρόπυλου, Επιδαύρου	περί το 300	11	1.142	7.118	6.2	149.232
Αλέας Αθηνάς, Τεγέας	περί το 365/360	6	1.550	9.562	6.2	374.897
Παρθενώνα (περίστασης)	447 - 438	11	1.902	10.435	5.5	590.777

Πίν. 5.3: Στοιχεία περί των, υπό εξέταση, κίωνων και των αριθμητικών προσομοιωμάτων τους.

Με στόχο να είναι ευκολότερη η διαχείριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων διαμορφώθηκαν δύο γενικά προσομοιώματα. Το πρώτο περιλάμβανε πέντε κίονες (Εικ. 5.13) και το άλλο τους υπόλοιπους προς εξέταση τρεις (Εικ. 5.14). Ο διαχωρισμός έγινε έτσι ώστε και στα δύο γενικά προσομοιώματα να υπάρχουν, κατ' ελάχιστον, από ένας μικρού, μεσαίου και μεγάλου μεγέθους κίονας. Οι αναγκαίες διαστάσεις για την μόρφωση κάθε προσομοιώματος (Πίν. 5.4 και 5.5) αντλήθηκαν από τα διατιθέμενα στοιχεία της σχετικής βιβλιογραφίας¹⁶⁵. Κάθε προσομοίωμα κίονα εδραζόταν σε ξεχωριστή βάση (βατήρα) και για την διακριτοποίησή του χρησιμοποιήθηκαν τρισετάσια εξασδρικά στοιχεία 8 κόμβων (Εικ. 5.13β και 5.14β). Όπως και στις προκαταρκτικές διερευνήσεις με τον ένα κίονα του ναού του Επικούριου Απόλλωνα, έτσι και εδώ η πιο αξιοσημείωτη απλοποίηση στην γεωμετρία των προσομοιωμάτων αφορούσε την περίμετρο του κορμού των κίωνων, η οποία ήταν πολυγωνική και όχι (όπως είναι στην πραγματικότητα) κυλινδρική με ραβδώσεις.

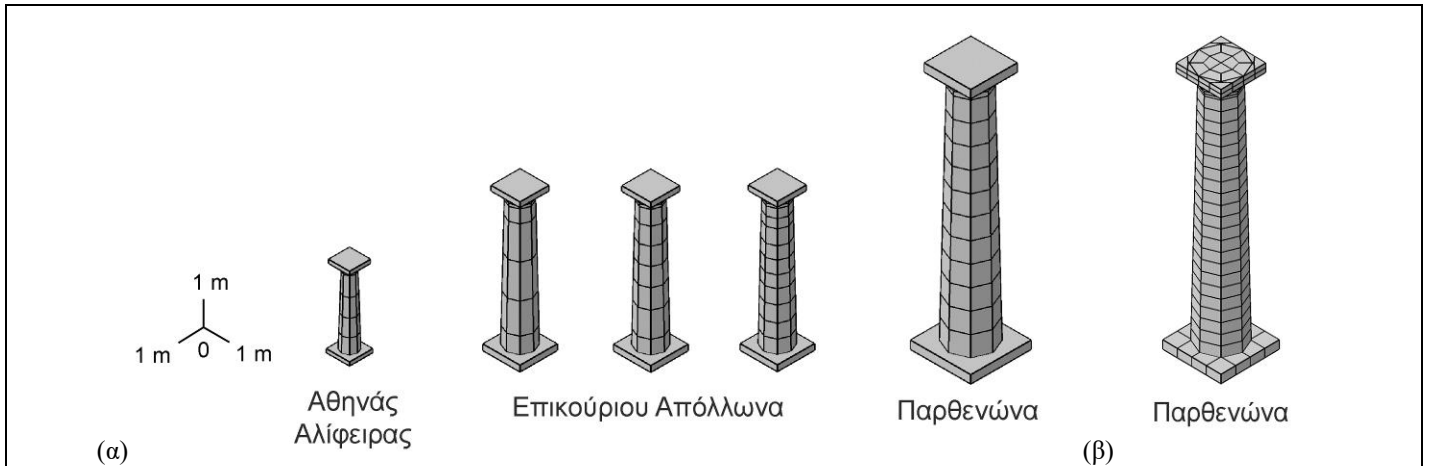
Επίσης, όπως στην πλειονότητα των προηγούμενων αναλύσεων, η πυκνότητα των δικτύων των πεπερασμένων στοιχείων των προσομοιωμάτων των κίωνων ήταν μέτρια με στόχο τον περιορισμό του απαιτούμενου χρόνου εκτέλεσης των αριθμητικών επιλύσεων¹⁶⁶. Απώτερος σκοπός ήταν, φυσικά, η διενέργεια πολύ μεγάλου πλήθους παραμετρικών αναλύσεων. Έτσι, η περίμετρος των κορμών των προσομοιωμάτων των κίωνων διαμορφώθηκε οκταγωνική, ενώ ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων κάθε σπονδύλου ήταν 24.

Εξαίρεση αποτέλεσε μόνο το προσομοίωμα του κίονα της ναού της Τεγέας. Λόγω του μεγάλου ύψους των σπονδύλων αυτού του κίονα (ως συνέπεια του γεγονότος ότι απαρτίζεται από λίγους, για το ύψος του, σπονδύλους), διαπιστώθηκε από τις πρώτες επιλύσεις ότι το προσομοίωμά του έπρεπε να διαθέτει πυκνότερο δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό ήταν απαραίτητο για την αποφυγή εξαγωγής αποτελεσμάτων που δεν έχουν φυσικό νόημα (εν προκειμένω, για την αποφυγή της διείδυσης ενός σπονδύλου σε άλλον). Έτσι, τελικώς, διαμορφώθηκε η περιφέρεια του προσομοιώματος αυτού του κίονα να έχει δώδεκα γωνίες και κάθε σπόνδυλός του να διαθέτει 80 πεπερασμένα στοιχεία¹⁶⁷.

¹⁶⁵ Μπούρας 1967, Ορλάνδος 1967-68, Κορρές και Μπούρας 1983, Σβολόπουλος 1995, Pakkanen 1998, Κυριάκη 2006.

¹⁶⁶ Με την χρήση ενός προσωπικού Η/Υ δεκαετίας, ο απαιτούμενος χρόνος για την εκτέλεση μίας αριθμητικής επίλυσης σεισμικής διέγερσης (διάρκειας 20 sec) του πρώτου γενικού προσομοιώματος ήταν από 3 έως 5 ώρες. Για το δεύτερο γενικό προσομοίωμα ο απαιτούμενος χρόνος ήταν περίπου ο μισός.

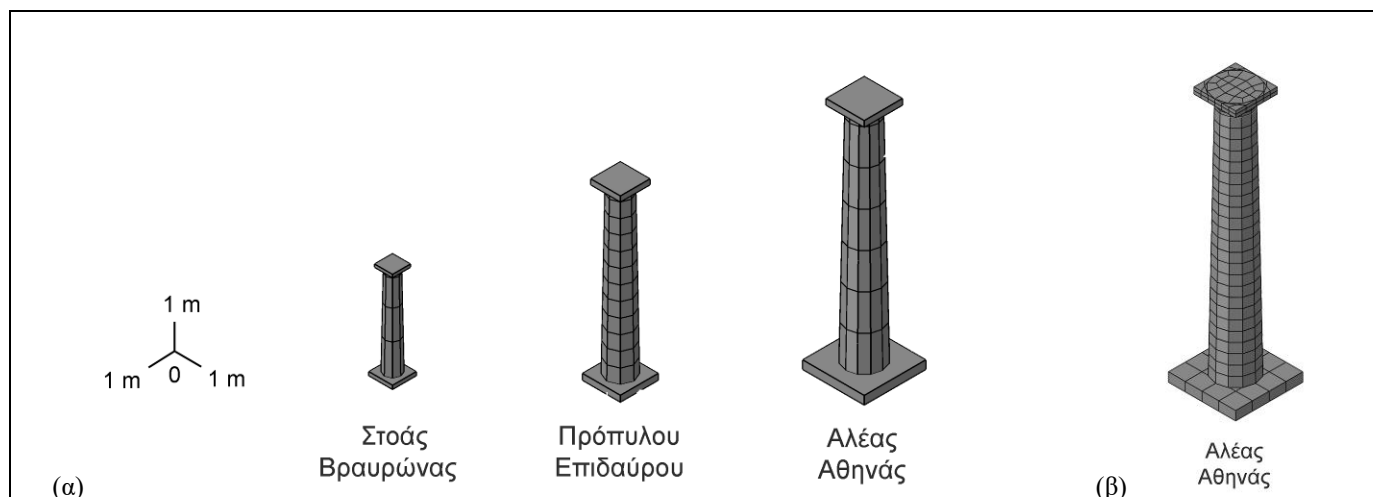
¹⁶⁷ Για λόγους σύγκρισης με τα δίκτυα ΠΣ των άλλων προσομοιωμάτων, σημειώνεται ότι εάν ο εν λόγω κίονας διέθετε διπλάσιο αριθμό σπονδύλων (δηλαδή τον «τυπικό» αριθμό) και το δίκτυο ΠΣ του προσομοιώματος του διαμορφωνόταν και πάλι με την ίδια (μεγάλη) πυκνότητα, κάθε σπόνδυλος του προσομοιώματος θα διέθετε 40 ΠΣ, έναντι των 24, των σπονδύλων των υπολοίπων προσομοιωμάτων με την μέτρια πυκνότητα δικτύου ΠΣ.



Εικ. 5.13: (α) Τα προσομοιώματα των κίωνων που αποτελούσαν το πρώτο γενικό προσομοίωμα των παραμετρικών αριθμητικών επιλύσεων, και (β) το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων του κίονα του Παρθενώνα.

	Κίονας ναού Αθηνάς, Αλίφειρας		Κίονας ναού Επικούριου Απόλλωνα (Κ.ΒΔ)		Κίονας ναού Επικούριου Απόλλωνα (Κ.Β4)		Κίονας ναού Επικούριου Απόλλωνα (Κ.Δ2)		Κίονας Παρθενώνα (περίστασης)	
	Κάτω Διάμ. (m)	Ύψος (m)	Κάτω Διάμ. (m)	Ύψος (m)	Κάτω Διάμ. (m)	Ύψος (m)	Κάτω Διάμ. (m)	Ύψος (m)	Κάτω Διάμ. (m)	Ύψος (m)
1 ^{ος} Σπ.	0.680	0.640	1.165	0.700	1.160	0.595	1.160	0.580	1.902	0.870
2 ^{ος} Σπ.	0.641	0.720	1.137	1.300	1.135	1.080	1.136	0.590	1.864	0.870
3 ^{ος} Σπ.	0.597	0.765	1.084	1.450	1.090	0.840	1.112	0.670	1.826	0.870
4 ^{ος} Σπ.	0.551	0.800	1.025	1.420	1.060	0.785	1.085	0.610	1.788	0.870
5 ^{ος} Σπ.	–	–	0.968	0.555	1.025	0.750	1.061	0.510	1.750	0.870
6 ^{ος} Σπ.	–	–	–	–	0.995	0.745	1.040	0.550	1.712	0.870
7 ^{ος} Σπ.	–	–	–	–	0.965	0.630	1.018	0.530	1.674	0.870
8 ^{ος} Σπ.	–	–	–	–	–	–	0.996	0.630	1.636	0.870
9 ^{ος} Σπ.	–	–	–	–	–	–	0.971	0.380	1.598	0.870
10 ^{ος} Σπ.	–	–	–	–	–	–	0.955	0.375	1.560	0.870
11 ^{ος} Σπ.	–	–	–	–	–	–	–	–	1.522	0.870
Κιονόκρ.	0.502	0.440	0.940	0.545	0.940	0.545	0.940	0.545	1.484	0.865
(Αβακας)	(0.904 ² x 0.155)		(1.245 ² x 0.210)		(1.245 ² x 0.210)		(1.245 ² x 0.210)		(2.000 ² x 0.350)	
Βάση	1.000 ² x 0.150		1.600 ² x 0.250		1.600 ² x 0.250		1.600 ² x 0.250		2.600 ² x 0.350	

Πίν. 5.4: Οι διαστάσεις των μελών των προσομοιωμάτων των κίωνων του πρώτου γενικού προσομοιώματος.



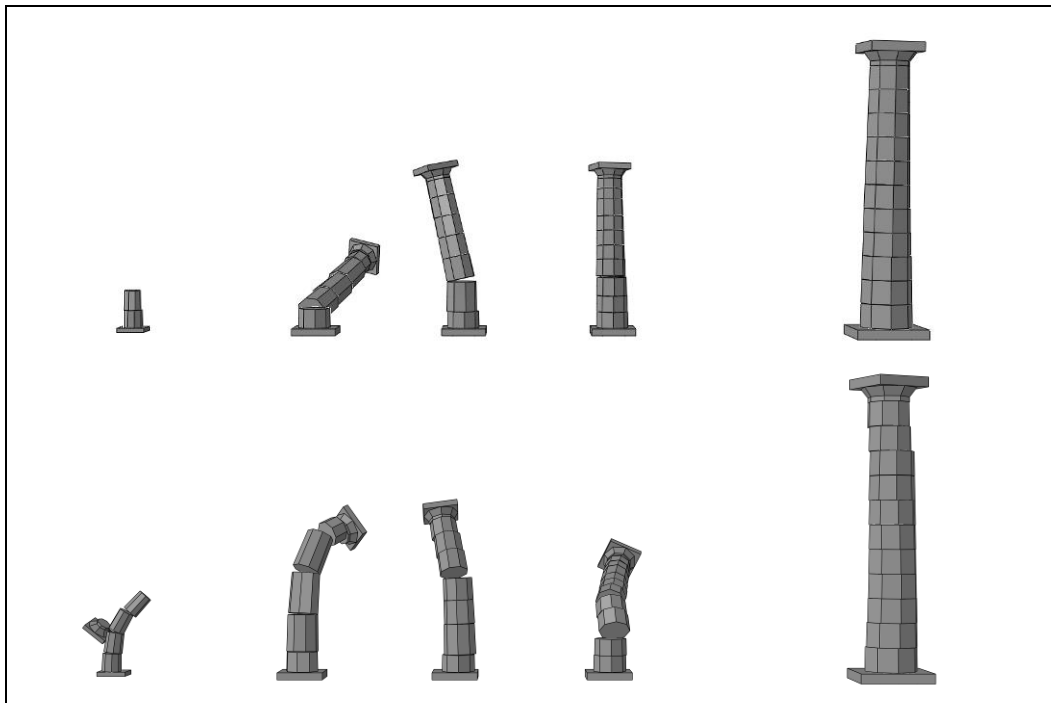
Εικ. 5.14: (α) Τα προσμοιόματα των κίωνων που αποτελούσαν το δεύτερο γενικό προσμοιόωμα και (β) το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων του κίονα του ναού της Αλέας Αθηνάς.

	Κίονας Στοάς Βραυρώνας		Κίονας Πρόπυλου, Επιδαύρου		Κίονας Αλέας Αθηνάς, Τεγέας	
	Κάτω Διάμ. (m)	Ύψος (m)	Κάτω Διάμ. (m)	Ύψος (m)	Κάτω Διάμ. (m)	Ύψος (m)
1 ^{ος} Σπ.	0.680	1.311	1.142	0.600	1.550	1.494
2 ^{ος} Σπ.	0.632	1.220	1.122	0.600	1.492	1.494
3 ^{ος} Σπ.	0.586	1.155	1.102	0.600	1.435	1.494
4 ^{ος} Σπ.	–	–	1.082	0.600	1.377	1.494
5 ^{ος} Σπ.	–	–	1.061	0.600	1.319	1.494
6 ^{ος} Σπ.	–	–	1.041	0.600	1.262	1.494
7 ^{ος} Σπ.	–	–	1.021	0.600	–	–
8 ^{ος} Σπ.	–	–	1.001	0.600	–	–
9 ^{ος} Σπ.	–	–	0.981	0.600	–	–
10 ^{ος} Σπ.	–	–	0.961	0.600	–	–
11 ^{ος} Σπ.	–	–	0.940	0.607	–	–
Κιονόκρ.	0.546	0.31	0.920	0.511	1.204	0.598
(Άβακας)	(0.758 ² x 0.118)		(1.250 ² x 0.218)		(1.612 ² x 0.242)	
Βάση	1.000 ² x 0.150		1.600 ² x 0.250		2.600 ² x 0.350	

Πίν. 5.5: Οι διαστάσεις των μελών των προσμοιωμάτων των κίωνων του δεύτερου γενικού προσμοιόωματος.

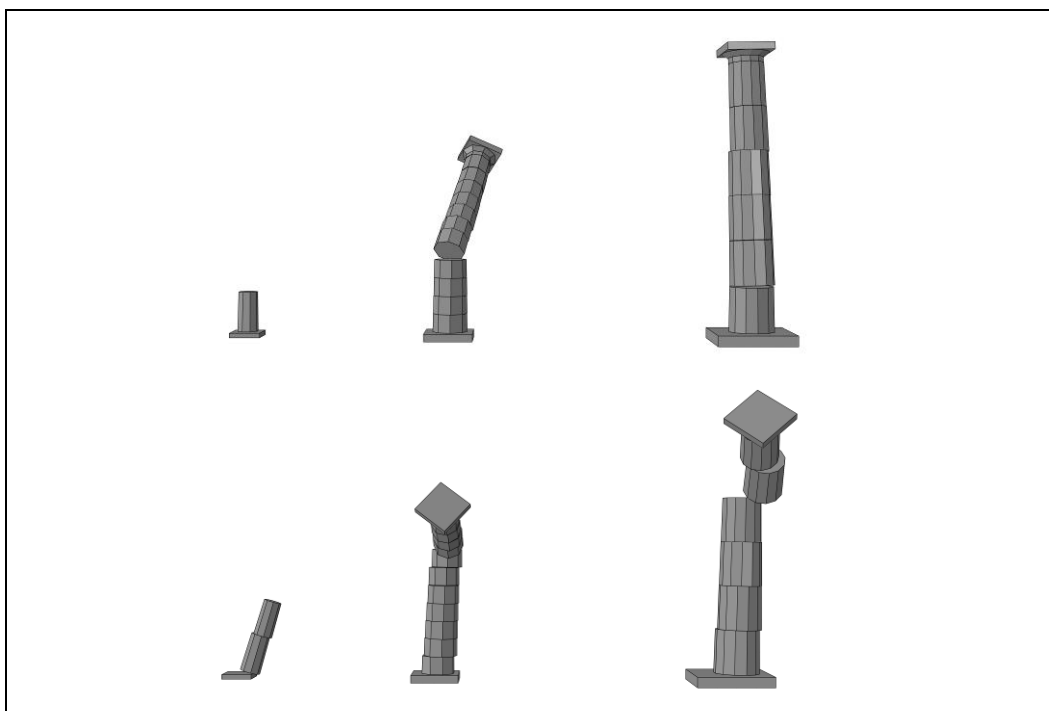
Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των διεπιφανειών των μελών των κίωνων χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες παραδοχές και διαδικασίες προσομοίωσης οι οποίες είχαν προκύψει ως οι βέλτιστες κατά την βαθμονόμηση του λογισμικού¹⁶⁸. Για να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους τα αριθμητικά αποτελέσματα όλων των διερευνήσεων που διενεργήθηκαν, το υλικό των κίωνων και των βατήρων τους και στα δύο γενικά προσομοιώματα θεωρήθηκε ίδιο: σαν να ήταν όλοι οι κίονες και οι βατήρες τους από πεντελικό μάρμαρο (όπως και για τον κίονα στις προκαταρκτικές διερευνήσεις). Ως εκ τούτου, για κάθε προσομοίωμα κίονα χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες ιδιότητες: για το υλικό, πυκνότητα ίση με 2750 kg/m^3 , μέτρο ελαστικότητας ίσο με 80 GPa , και λόγος του Poisson ίσος με 0.26 , ενώ για τις διεπιφάνειες των μελών των κίωνων, συντελεστής τριβής ίσος με 0.7 (δηλαδή, $\mu_s = \mu_k = 0.70$) και συντελεστής απόσβεσης ίσος με 0.01 .

Τα προσομοιώματα των κίωνων φορτίστηκαν από τα ίδια βάρη τους και από σεισμικές διεγέρσεις, οι οποίες εφαρμόζονταν ως επιβαλλόμενες μετατοπίσεις, και στις τρεις κύριες διευθύνσεις, στους βατήρες των κίωνων. Για τις σεισμικές διεγέρσεις χρησιμοποιήθηκαν οι χρονοϊστορίες των μετατοπίσεων των τεσσάρων σεισμικών καταγραφών που παρουσιάστηκαν στην σχετική παράγραφο, πολλαπλασιασμένες με συντελεστές, σταδιακώς αυξανόμενους έως την κατάρρευση όλων των κίωνων (Εικ. 5.15, 5.16).



Εικ. 5.15: Στιγμιότυπα απόκρισης του $1^{ου}$ γενικού προσομοιώματος. Άνω: Σεισμός Καλαμάτας επί 1.78 ($PHV=67 \text{ cm/sec}$), $t=8.1 \text{ sec}$. Κάτω: Σεισμός Έδεσσας επί 8.26 ($PHV=96 \text{ cm/sec}$), $t=8.7 \text{ sec}$.

¹⁶⁸ Βλέπε παράγραφο 4.3.3, σελ. 95-98.



Εικ. 5.16: Στιγμιότυπα απόκρισης του 2^{ου} γενικού προσομοιώματος. Άνω: Σεισμός Αγίου επί 2.08 (PHV=100 cm/sec), t=7.4 sec. Κάτω: Σεισμός Αθήνας επί 7.14 (PHV=117 cm/sec), t=8.84 sec.

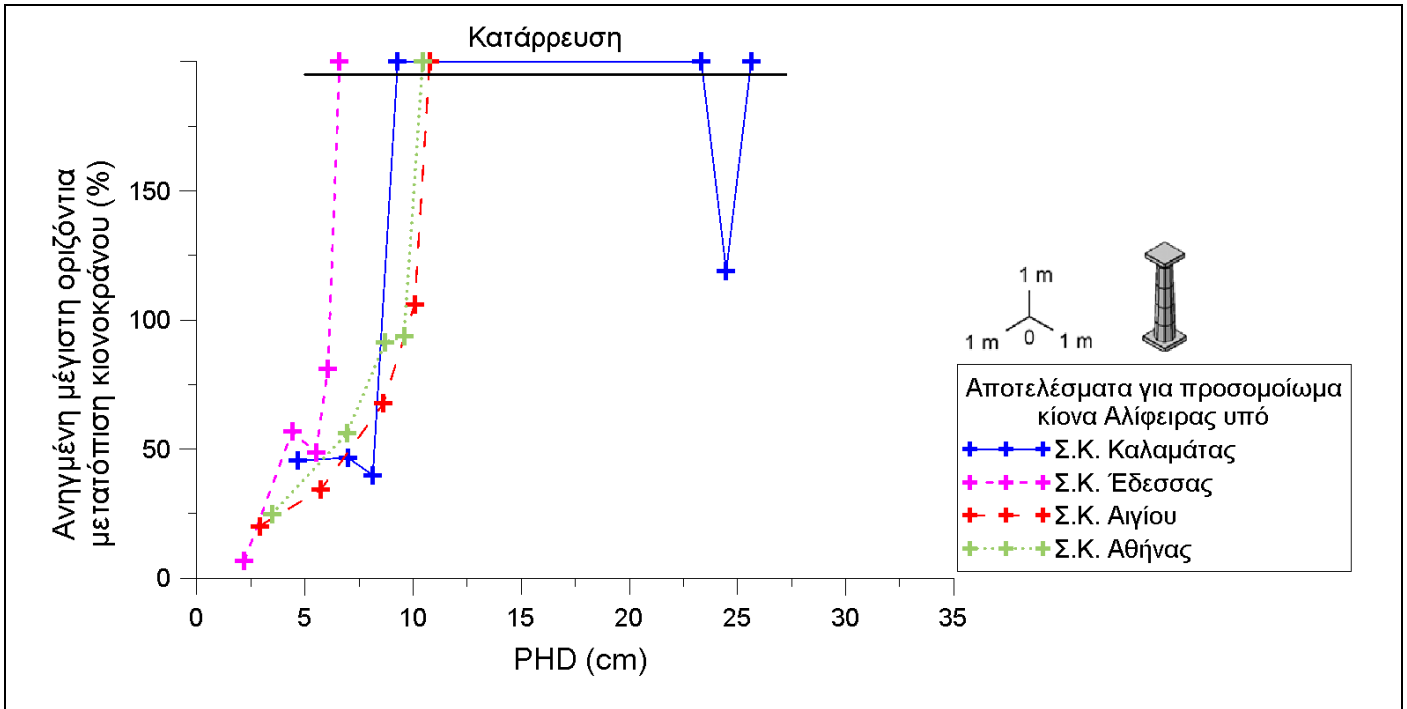
5.5.2 Αριθμητικά αποτελέσματα

Στα Διαγράμματα 5.13 έως και 5.20 παρουσιάζονται οι μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις της κορυφής των κίωνων (στο κέντρο της άνω έδρας του κιονοκράνου), κανονικοποιημένες ως προς την ακτίνα της κάτω έδρας των κίωνων $(d/2)^{169, 170}$, και συναρτώμενες με τις μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις των υπό διεγερση βατήρων τους, δηλαδή, με τα PHD των κλιμακούμενων σεισμικών καταγραφών.

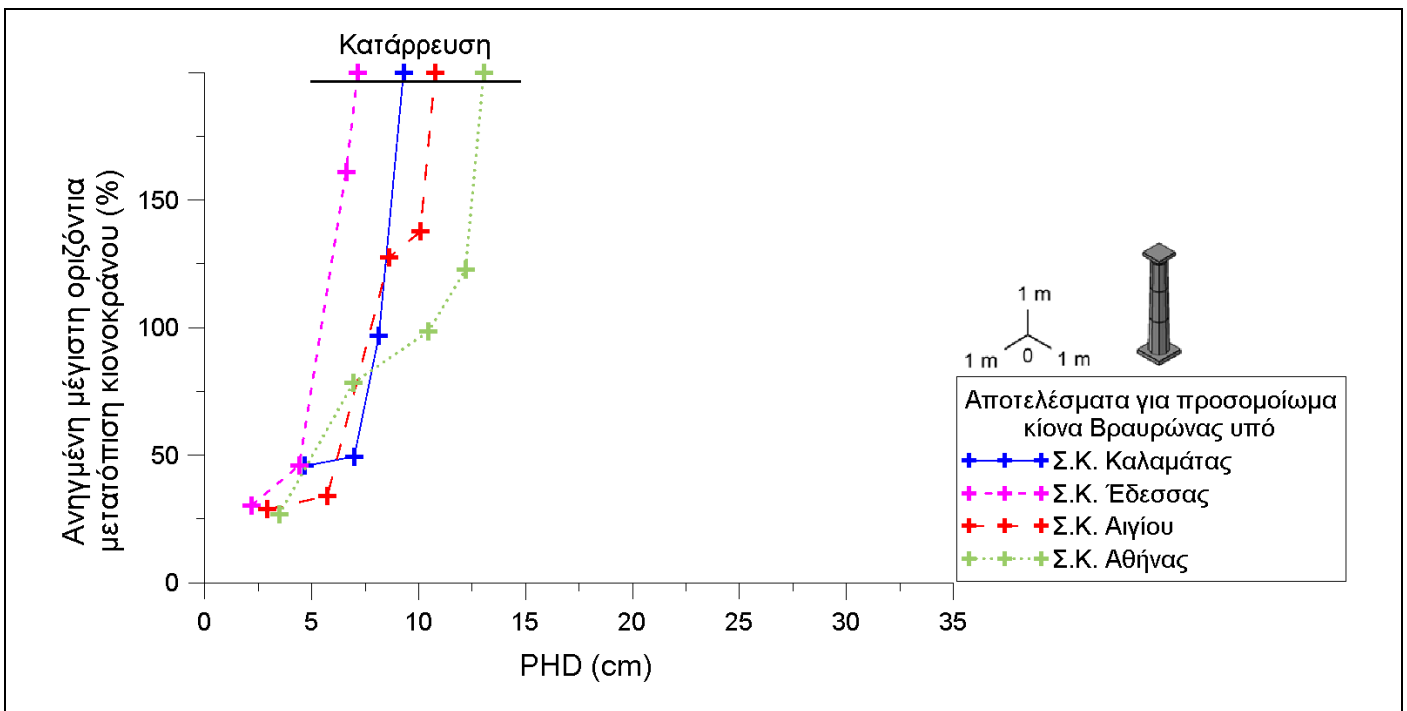
Στον Πίνακα 5.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τα κατώτατα όρια των σεισμικών διεγέρσεων που προκάλεσαν ανατροπή στα αριθμητικά προσομοιώματα των υπό εξέταση οκτώ κίωνων. Επίσης, στον Πίνακα αναφέρεται πόσα μέλη κατέρρευσαν από κάθε κίονα στις κρίσιμες διεγέρσεις.

¹⁶⁹ Βλέπε σχετικά Πίνακα 5.3 και Εικόνα 5.16.

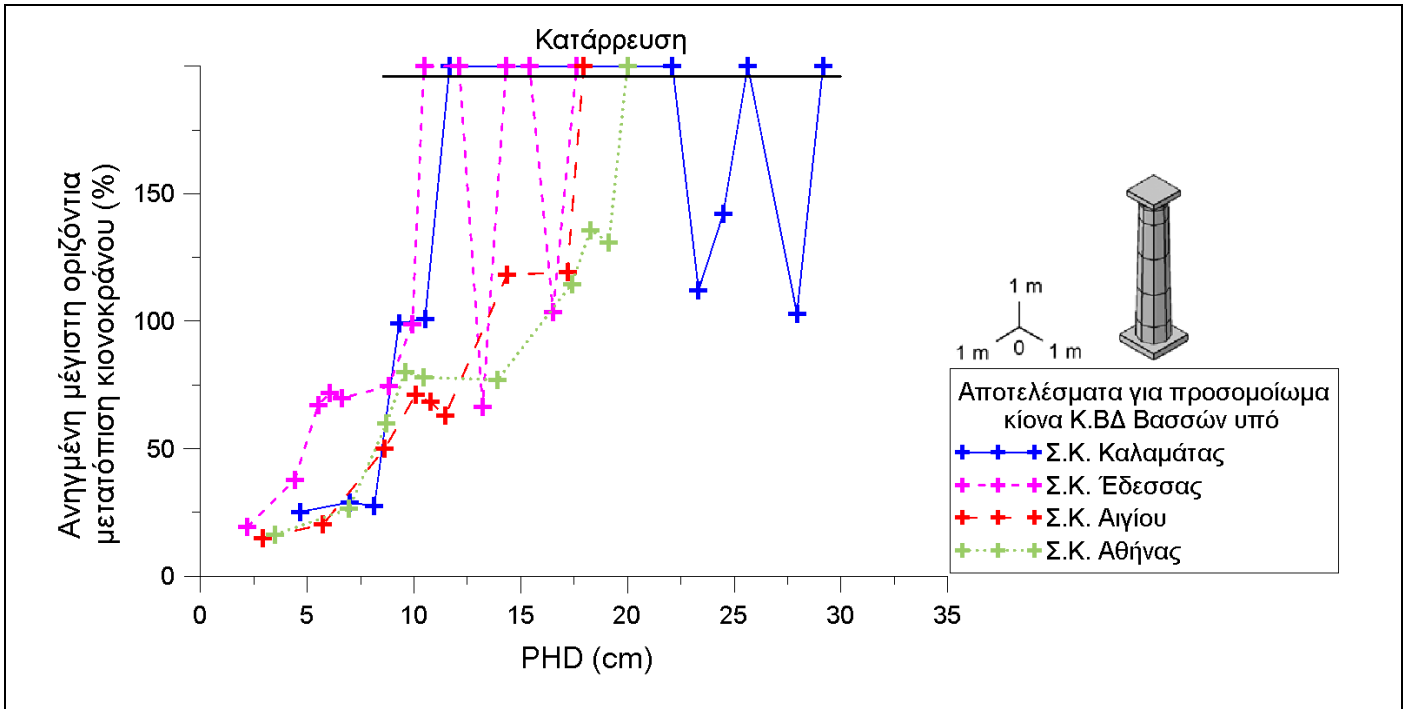
¹⁷⁰ Άλλως, την ακτίνα των κύκλων στους οποίους εγγράφονται οι πολυγωνικές κατώτατες επιφάνειες των αριθμητικών ομοιωμάτων των κίωνων.



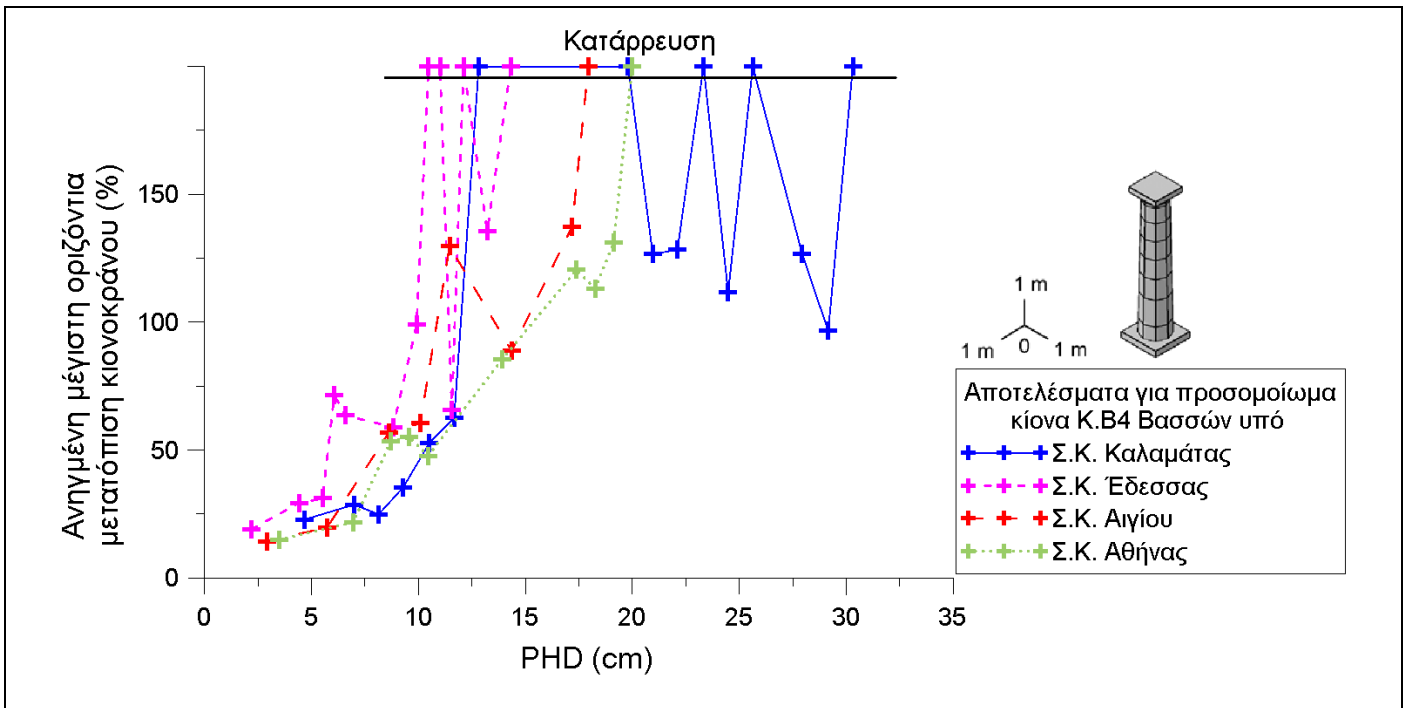
Διάγρ. 5.13: Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση κιονοκράνου προσομοιώματος κίονα Αλίφειρας (αδιάστατη ως προς την ακτίνα της κάτω έδρας του κίονα) συναρτήσεως της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης της σεισμικής διέγερσης.



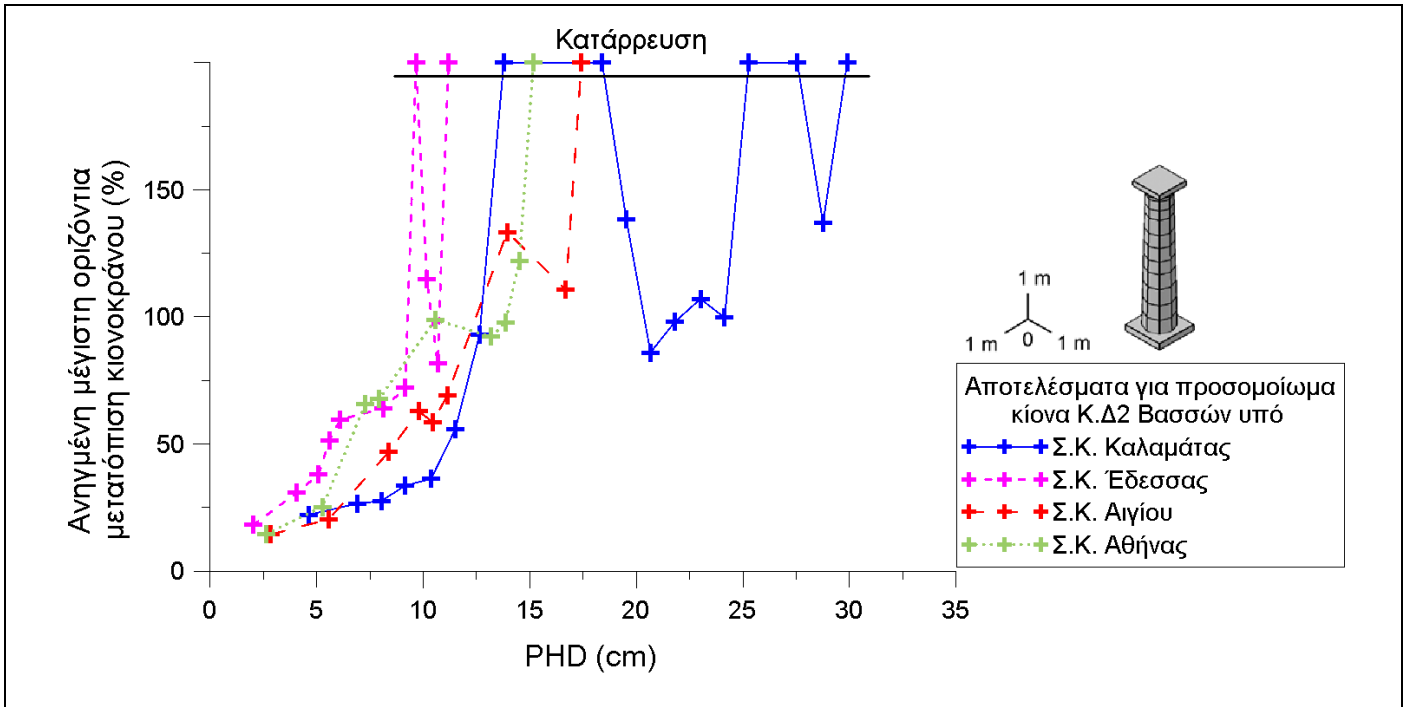
Διάγρ. 5.14: Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση κιονοκράνου προσομοιώματος κίονα Βραυρώνας (αδιάστατη ως προς την ακτίνα της κάτω έδρας του κίονα) συναρτήσεως της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης της σεισμικής διέγερσης.



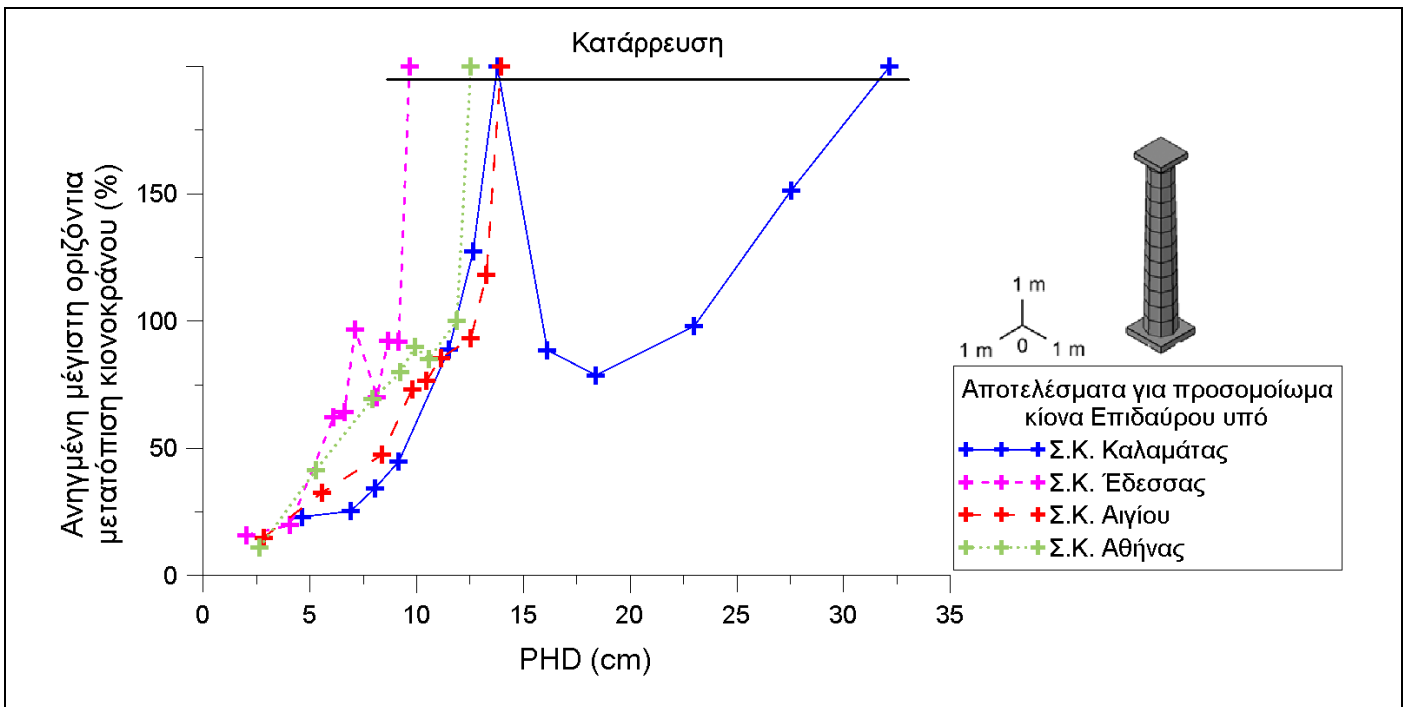
Διάγρ. 5.15: Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση κιονοκράνου προσομοιώματος κίονα Κ.ΒΔ Βασσών (αδιάστατη ως προς την ακτίνα της κάτω έδρας του κίονα) συναρτήσεως της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης της σεισμικής διέγερσης.



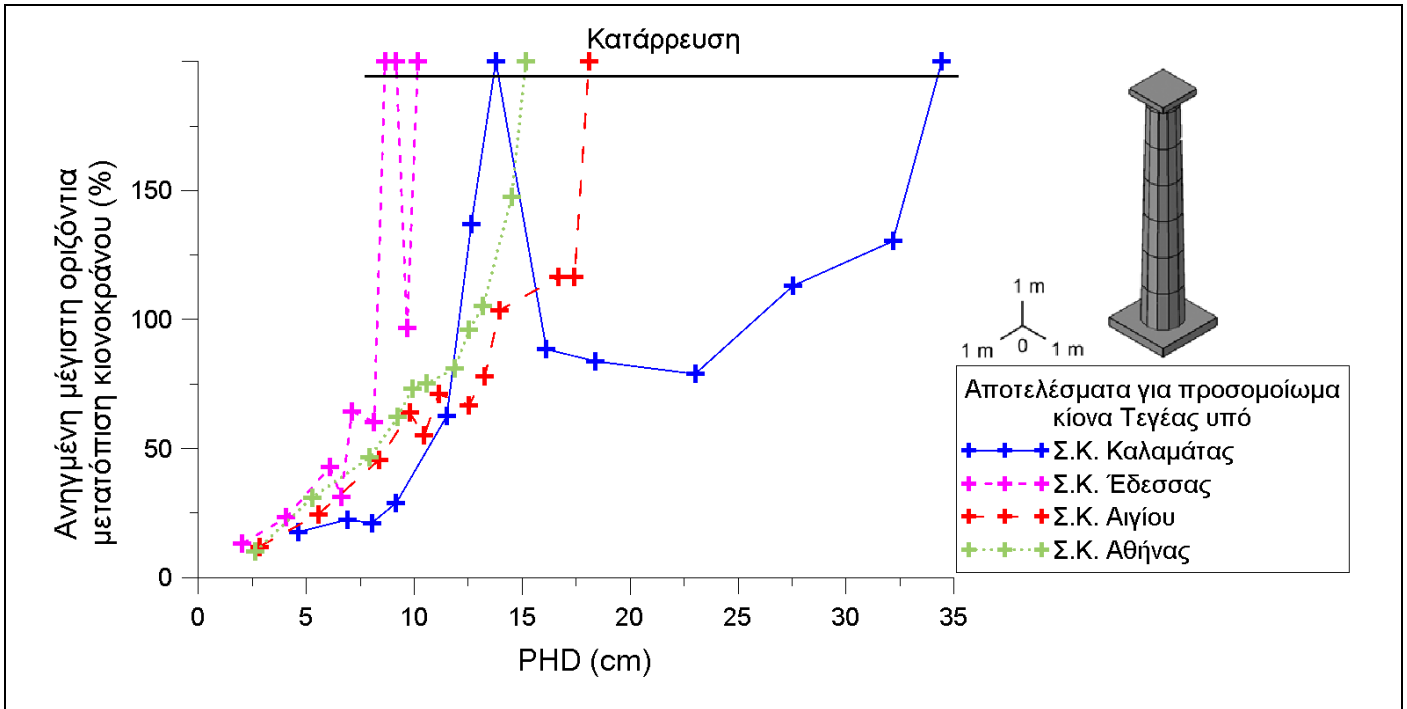
Διάγρ. 5.16: Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση κιονοκράνου προσομοιώματος κίονα Κ.Β4 Βασσών (αδιάστατη ως προς την ακτίνα της κάτω έδρας του κίονα) συναρτήσεως της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης της σεισμικής διέγερσης.



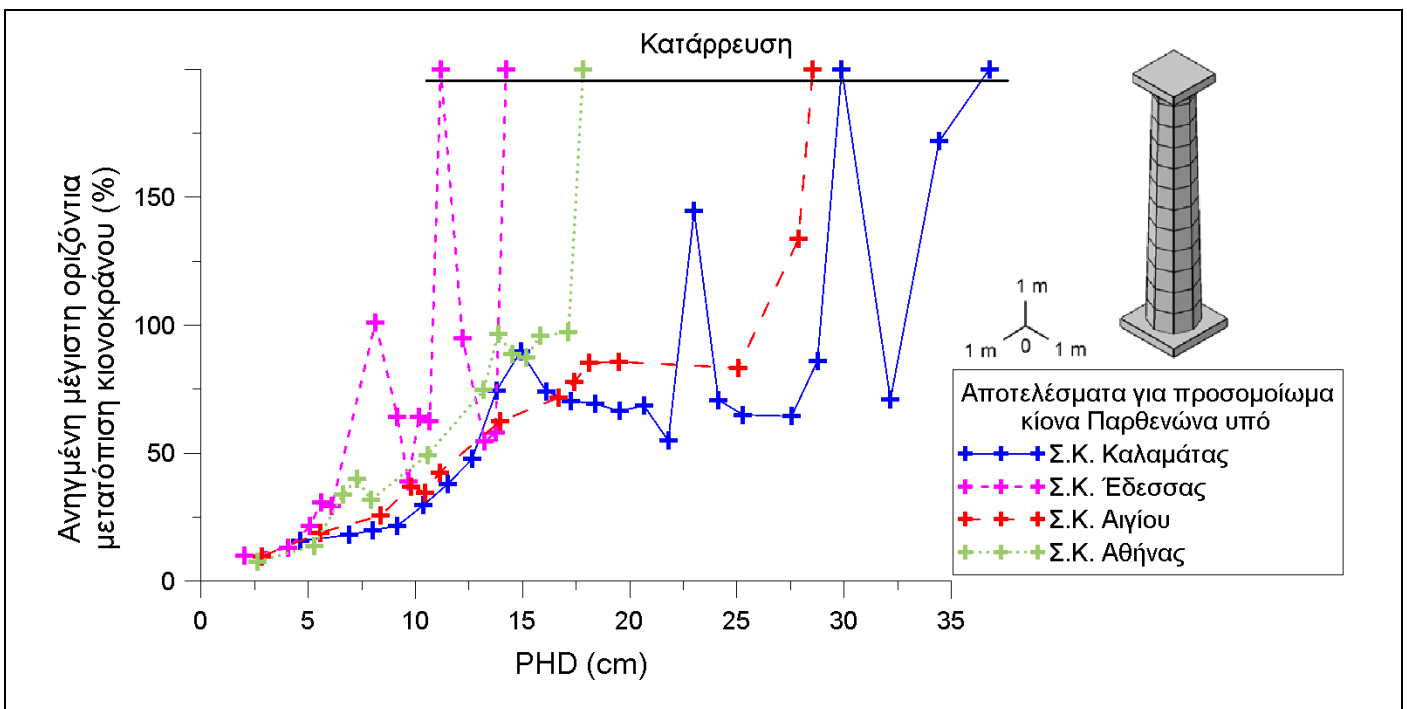
Διάγρ. 5.17: Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση κιονοκράνου προσομοιώματος κίονα Κ.Δ2 Βασσών (αδιάστατη ως προς την ακτίνα της κάτω έδρας του κίονα) συναρτήσεως της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης της σεισμικής διέγερσης.



Διάγρ. 5.18: Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση κιονοκράνου προσομοιώματος κίονα Επιδαύρου (αδιάστατη ως προς την ακτίνα της κάτω έδρας του κίονα) συναρτήσεως της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης της σεισμικής διέγερσης.



Διάγρ. 5.19: Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση κιονοκράνου προσομοιώματος κίονα Τεγέας (αδιάστατη ως προς την ακτίνα της κάτω έδρας του κίονα) συναρτήσσει της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης της σεισμικής διέγερσης.



Διάγρ. 5.20: Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση κιονοκράνου προσομοιώματος κίονα Παρθενώνα (αδιάστατη ως προς την ακτίνα της κάτω έδρας του κίονα) συναρτήσσει της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης της σεισμικής διέγερσης.

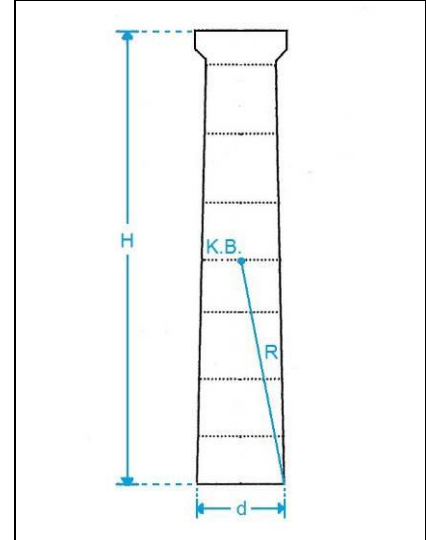
Προσομοίωμα κίονα του/της	Σεισμική καταγραφή	Πολλαπλ/κός συντελεστής	ΡΗΑ (g)	ΡΗV (cm/sec)	ΡΗD (cm)	Αποτέλεσμα: ανατροπή κιονοκράνου και
ναού της Αθηνάς στην Αλίφειρα	Καλαμάτας	1.29	0.45	49	9.3	3 από τους 4 σπ.
	Έδεσσας	5.50	0.61	64	6.6	1 από τους 4 σπ.
	Αιγίου	1.56	0.84	75	10.8	2 από τους 4 σπ.
	Αθήνας	3.73	1.38	61	10.4	3 από τους 4 σπ.
Στοάς στην Βραυρώνα	Καλαμάτας	1.29	0.45	49	9.3	2 από τους 3 σπ.
	Έδεσσας	5.96	0.66	69	7.2	2 από τους 3 σπ.
	Αιγίου	1.56	0.84	75	10.8	1 από τους 3 σπ.
	Αθήνας	4.66	1.72	76	13.0	1 από τους 3 σπ.
ναού του Επικούριου Απόλλωνα, με 5 σπονδύλους (Κ.ΒΔ)	Καλαμάτας	1.62	0.57	61	11.7	4 από τους 5 σπ.
	Έδεσσας	8.72	0.96	101	10.5	4 από τους 5 σπ.
	Αιγίου	2.60	1.40	126	17.9	4 από τους 5 σπ.
	Αθήνας	7.14	2.64	117	20.0	2 από τους 5 σπ.
ναού του Επικούριου Απόλλωνα, με 7 σπονδύλους (Κ.Β4)	Καλαμάτας	1.78	0.62	67	12.8	5 από τους 7 σπ.
	Έδεσσας	8.72	0.96	101	10.5	3 από τους 7 σπ.
	Αιγίου	2.60	1.40	126	17.9	4 από τους 7 σπ.
	Αθήνας	6.83	2.53	112	19.1	4 από τους 7 σπ.
ναού του Επικούριου Απόλλωνα, με 10σπονδύλους (Κ.Δ2)	Καλαμάτας	1.94	0.68	73	14.0	9 από τους 10 σπ.
	Έδεσσας	8.72	0.96	101	10.5	8 από τους 10 σπ.
	Αιγίου	2.60	1.40	126	17.9	4 από τους 10 σπ.
	Αθήνας	7.14	2.64	117	20.0	5 από τους 10 σπ.
Πρόπυλου στην Επίδαυρο	Καλαμάτας	1.94	0.68	73	14.0	6 από τους 11 σπ.
	Έδεσσας	8.72	0.96	101	10.5	6 από τους 11 σπ.
	Αιγίου	2.08	1.12	100	14.4	7 από τους 11 σπ.
	Αθήνας	5.90	2.18	97	16.5	5 από τους 11 σπ.
ναού της Αλέας Αθηνάς στην Τεγέα	Καλαμάτας	1.94	0.68	73	14.0	4 από τους 6 σπ.
	Έδεσσας	7.80	0.86	90	9.4	4 από τους 6 σπ.
	Αιγίου	2.70	1.46	130	18.6	2 από τους 6 σπ.
	Αθήνας	7.14	2.64	117	20.0	2 από τους 6 σπ.
Παρθενώνα	Καλαμάτας	4.21	1.47	159	30.3	2 από τους 11 σπ.
	Έδεσσας	12.84	1.41	149	15.4	2 από τους 11 σπ.
	Αιγίου	4.26	2.30	206	29.4	6 από τους 11 σπ.
	Αθήνας	8.39	3.10	138	23.5	5 από τους 11 σπ.

Πίν. 5.6: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα περί των κατώτατων ορίων των σεισμικών διεγέρσεων που προκάλεσαν την κατάρρευση των αριθμητικών προσομοιωμάτων των κίωνων.

5.6 Διατύπωση κριτηρίων σεισμικής ευστάθειας κίωνων βάσει των αριθμητικών προβλέψεων

Από τις πρώτες σχετικές αναλυτικές μελέτες που εξέτασαν σε βάθος την λικνιστική απόκριση ενός ραδινού στερεού σώματος προέκυψε ότι το φαινόμενο εξαρτάται από την ένταση της διέγερσης, από το μέγεθος του σώματος (που συνήθως αντιπροσωπεύεται από το μήκος της ημιδιαγωνίου του σώματος που συμβολίζεται με το « R », βλ. Εικ. 5.17), και από την γωνία ραδινότητας του (που συνήθως εκφράζεται με το σύμβολο « α » και φυσικά ισχύει ότι $\tan \alpha$ είναι ο λόγος βάσης-προς-ύψος του σώματος¹⁷¹). Επίσης, πρόσφατες αναλυτικές μελέτες¹⁷² έχουν αναδείξει τα πλεονεκτήματα της περιγραφής της λικνιστικής απόκρισης ελεύθερα ιστάμενων στύλων με διάφορες αδιάστατες μεταβλητές, και (παράλληλα) έχουν φανερώσει την ιδιότητα της αυτοομοιότητας που παρουσιάζει το εν λόγω φαινόμενο. Το τελευταίο σημαίνει ότι το φαινόμενο δύναται να οριστεί κλιμακούμενο μόνο από την ένταση και την συχνότητα της επιβαλλόμενης διέγερσης.

Με βάση αυτές τις μελέτες, διερευνήθηκε εάν τα αριθμητικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, τα οποία αφορούν τα κατώτατα όρια σεισμικών διεγέρσεων που προκάλεσαν κατάρρευση στα προσομοιώματα των οκτώ κίωνων, δύναται να παρουσιαστούν συγκεντρωτικά (και για τους οκτώ κίονες), χωρίς να παρουσιάζουν διάχυση. Έτσι, πρώτα υπολογίστηκαν διάφορα μεγέθη σχετικά με την γεωμετρία, την αδράνεια και την δυναμική των αριθμητικών προσομοιωμάτων των κίωνων¹⁷³ (Πίν. 5.7). Στην συνέχεια, με την χρήση των μέγιστων οριζόντιων επιταχύνσεων, ταχυτήτων και μετατοπίσεων των κρίσιμων διεγέρσεων (Πίν. 5.6), των δεσποζουσών περιόδων των διεγέρσεων, T_g (Πίν. 5.2), και τα βασικά χαρακτηριστικά των κίωνων [ραδινότητα (H/d), «ιδιοσυχνότητα», (p)¹⁷⁴ και μέγεθος (R)] καταρτίστηκαν τα Διαγράμματα 5.21 (όπου $\omega_g = 2\pi/T_g$), 5.22 και 5.23.



Εικ. 5.17: Σκαρίφημα με βασικά γεωμετρικά μεγέθη κίονα.

¹⁷¹ Στην παρούσα εργασία προτιμήθηκε η ραδινότητα των κίωνων να περιγράφεται με το λόγο ύψος-προς-κάτω διάμετρο και να αντιπροσωπεύεται με το διμερές σύμβολο ρ_δ (δηλαδή, $\rho_\delta = H/d$, βλ. σχετικά Πίν. 5.3 και Εικ. 5.17). Ο λόγος αυτός ονομάστηκε δείκτης ραδινότητας.

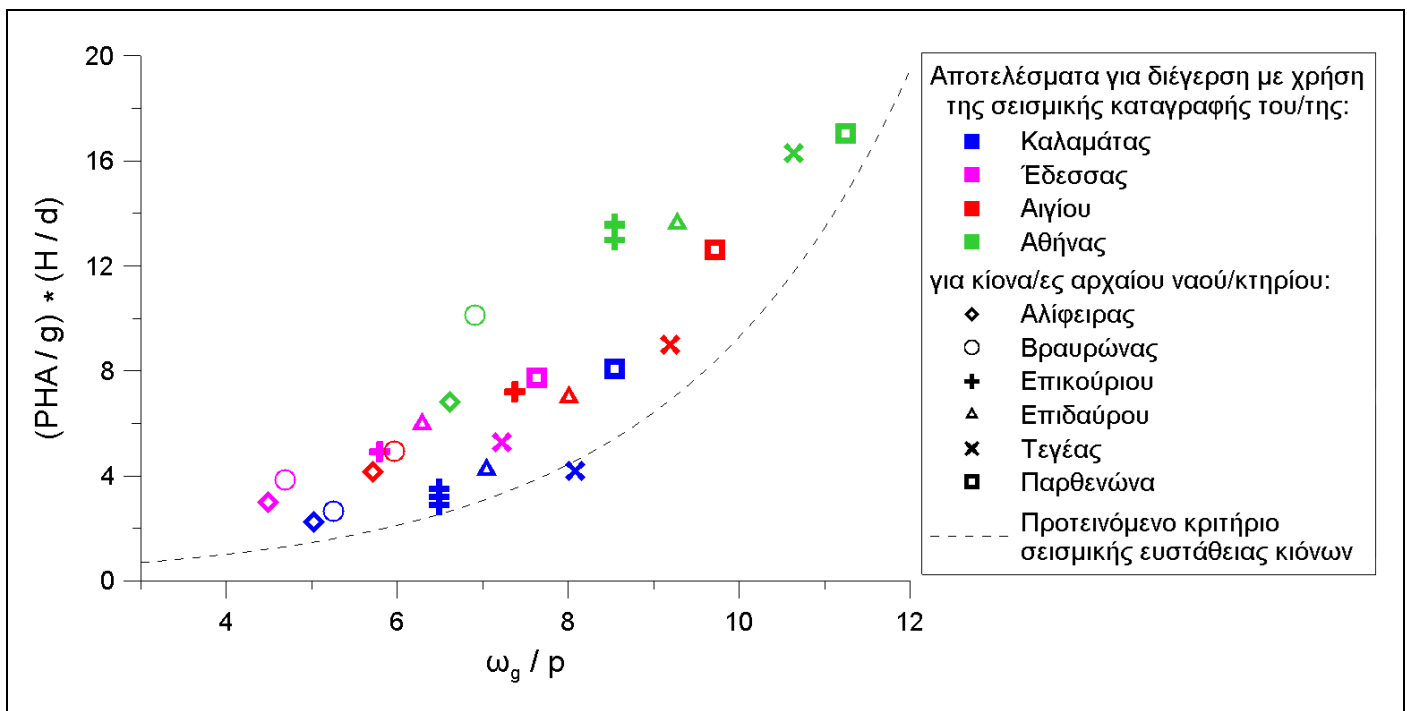
¹⁷² Vassiliou and Makris 2011, Dimitrakopoulos and DeJong 2012.

¹⁷³ Τα οποία, σε κάθε περίπτωση, διαφέρουν ελάχιστα από τα αντίστοιχα μεγέθη των πραγματικών κίωνων.

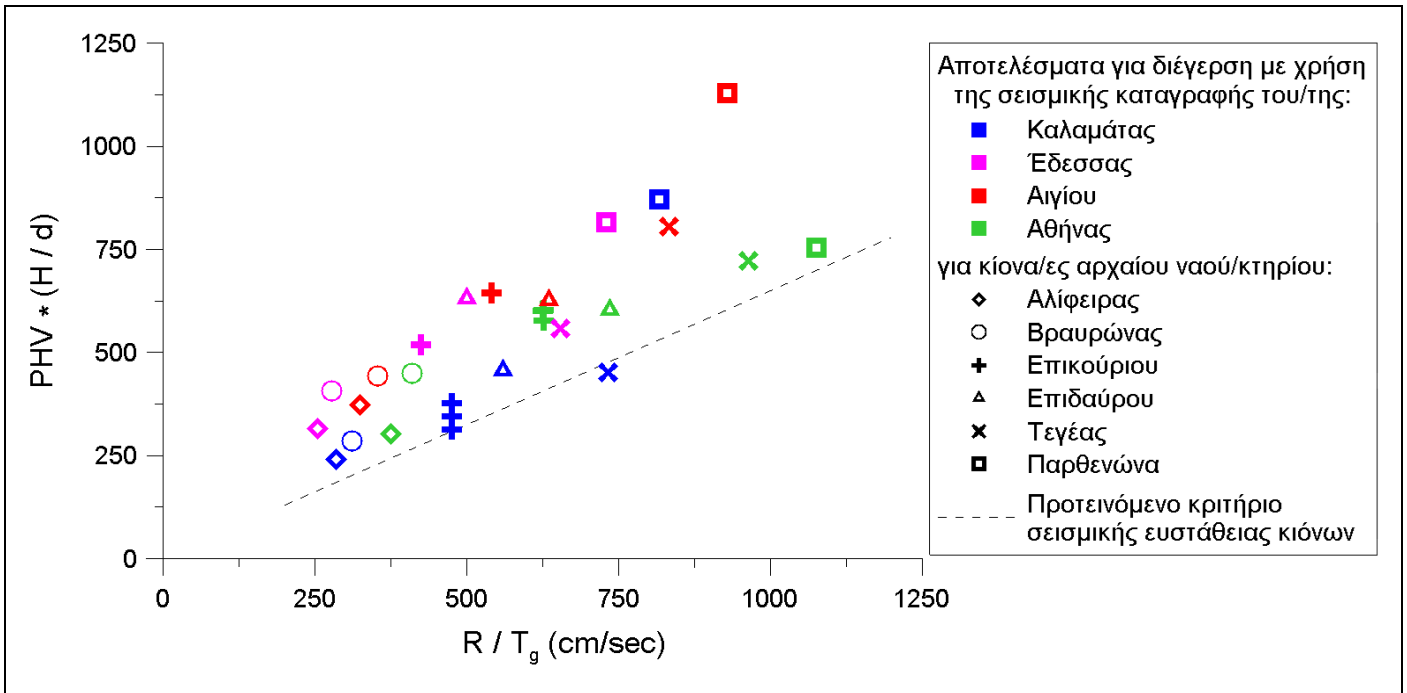
¹⁷⁴ Όπου $p = \sqrt{\frac{mgR}{I_0}}$, βλέπε σχετικά και παράγραφο 4.2, σελ. 89.

Προσομοίωμα κίονα ναού ή κτηρίου	Μάζα [M] (kg)	Απόσταση κέντρου μάζας από περιφέρεια βάσης [R] (m)	Ροή αδράνειας [I _o] (kg·m ²)	Παράμετρος συχνότητας [ρ] (rad/sec)
Αθηνάς, Αλίφειρας	2584.1	1.777	11252	2.001
Στοάς Βραυρώνας	2982.5	1.942	15511	1.914
Επικούριου Απόλλωνα με 5 σπονδύλους (Κ.ΒΔ)	13398.1	2.971	162569	1.550
Επικούριου Απόλλωνα με 7 σπονδύλους (Κ.Β4)	13270.5	2.973	161216	1.549
Επικούριου Απόλλωνα με 10 σπονδύλους (Κ.Δ2)	13282.7	2.972	161312	1.549
Πρόπυλου, Επιδαύρου	15212.2	3.495	256161	1.427
Αλέας Αθηνάς, Τεγέας	38215.8	4.581	1110000	1.244
Παρθενώνα (περίστασης)	60221.9	5.108	2180000	1.177

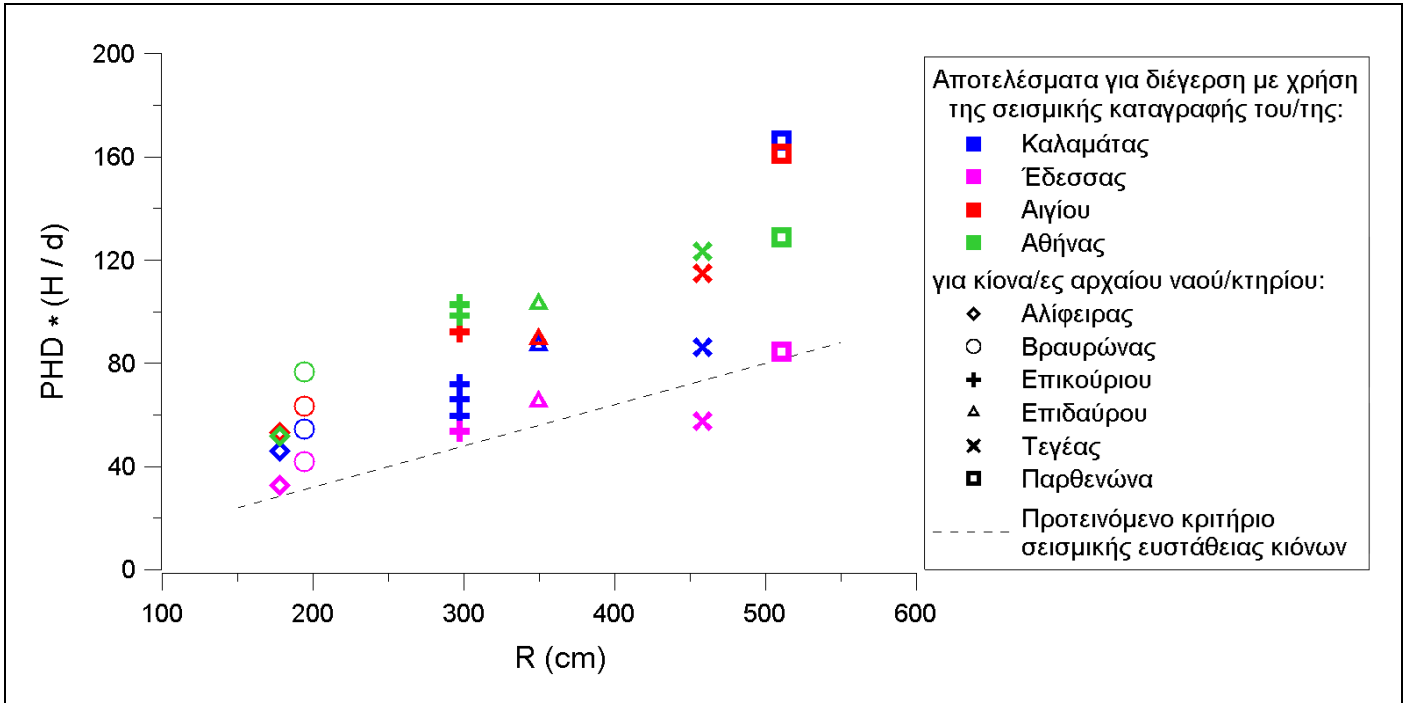
Πίν. 5.7: Στοιχεία περί των αριθμητικών προσομοιωμάτων των, υπό εξέταση, κίωνων.



Διάγρ. 5.21: Οι αριθμητικές προβλέψεις για τα κατώτατα όρια μέγιστης οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης που ανατρέπουν τους οκτώ κίονες, συσχετισμένα με την δεσπόζουσα περίοδο των διεγέρσεων καθώς και με τον δείκτη ραδιονότητας και την «ιδιοσυχνότητα» των κίωνων.



Διάγρ. 5.22: Οι αριθμητικές προβλέψεις για τα κατώτατα όρια μέγιστης οριζόντιας εδαφικής ταχύτητας που ανατρέπουν τους οκτώ κίονες, συσχετισμένα με την δεσπόζουσα περίοδο των διεγέρσεων καθώς και με τους δείκτες ραδιότητας και μεγέθους των κίωνων.



Διάγρ. 5.23: Οι αριθμητικές προβλέψεις για τα κατώτατα όρια μέγιστης οριζόντιας εδαφικής μετατόπισης που ανατρέπουν τους οκτώ κίονες, συσχετισμένα με τους δείκτες ραδιότητας και μεγέθους των κίωνων.

Με βάση τον συγκεντρωτικό τρόπο παρουσίασης των εν λόγω αριθμητικών προβλέψεων, και λαμβανομένων υπ' όψιν διαφόρων συναφών αποτελεσμάτων/συμπερασμάτων των προηγούμενων διερευνήσεων της παρούσας εργασίας¹⁷⁵, διατυπώνονται οι σχέσεις:

$$PHA_{crit} \geq \gamma 0.23 g (d/H) e^{0.37 \omega_g/p} \quad (5.1)$$

$$PHV_{crit} \geq \gamma 0.65 (d/H) (R/T_g) \quad (5.2)$$

$$PHD_{crit} \geq \gamma 0.16 (d/H) R \quad (\text{για } T_g \leq 0.7 \text{ sec}) \quad (5.3)$$

Οι σχέσεις αυτές (που παρουσιάζονται και στα Διαγράμματα 5.21-5.23, για $\gamma=1$) προτείνονται προς χρήση για τον προσεγγιστικό υπολογισμό της σεισμικής ευστάθειας των αρχαίων, ελευθέρα ιστάμενων, πολυσπόνδυλων κίωνων. Για αυτό, άλλωστε, περιλήφθηκε σε αυτές και ο μειωτικός συντελεστής (γ), η αναγκαιότητα του οποίου εξηγείται ακολούθως.

Το ότι στις αριθμητικές προσομοιώσεις δεν λαμβάνονται υπ' όψιν οι όποιες μικροατέλειες στις διεπιφάνειες των μελών των κίωνων (μικροαποτμήσεις ακμών, διεϊσδυση σκόνης στους αρμούς κ.α.), οι οποίες σε οριακές καταστάσεις είναι πολύ πιθανό να επηρεάζουν αρνητικά την σεισμική ευστάθεια των κίωνων, καθιστά (πιθανότατα) τις σχετικές αριθμητικές προβλέψεις μικρότερες των πραγματικών. Αυτό προκύπτει και από την σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων-αριθμητικών προβλέψεων για τα πειράματα αρμονικής διέγερσης του δίλιθου στύλου (Διάγρ. 4.9). Μάλιστα, βάσει της εν λόγω σύγκρισης δύναται να θεωρηθεί το 75% ως μία πρώτη, αδρομερής (καθώς βασίζεται σε πολύ περιορισμένα στοιχεία) προσέγγιση της τιμής του μειωτικού συντελεστή γ ¹⁷⁶.

Πρέπει να σημειωθεί και εδώ ότι στην παρούσα εργασία δεν εξετάστηκε η σεισμική απόκριση μονοσπόνδυλων κίωνων, ούτε πολυσπόνδυλων κίωνων πολύ μικρού ή γιγαντιαίου μεγέθους. Επίσης, ότι οι κίονες που εξετάστηκαν είχαν, σχεδόν όλοι, αριθμό σπονδύλων κοντά στον συνήθη, ανάλογα με το μέγεθός τους. Επομένως, τα βέλτιστα αποτελέσματα από την χρήση των παραπάνω κριτηρίων αναμένονται να προκύψουν για την εκτίμηση της σεισμικής ευστάθειας πολυσπόνδυλων κίωνων που έχουν: (i) συνολικό ύψος από περίπου ίσο με τρία μέτρα έως περίπου ίσο με ένδεκα μέτρα, (ii) αριθμό σπονδύλων περίπου ίσο με το ύψος των κίωνων σε μέτρα πλην μία μονάδα έως συν τρεις μονάδες, και (iii) υλικό με φυσικές ιδιότητες παρόμοιες σε αυτές του πεντελικού μαρμάρου. Εκτιμάται, πάντως, ότι εντός των

¹⁷⁵ Τα περισσότερα αποτελέσματα (βλ. Διάγρ. 4.9 και Διάγρ. 5.7) «απαγορεύουν» στο να διατυπωθούν τα προτεινόμενα κριτήρια πιο συντηρητικά εν σχέσει με τις προβλέψεις για την σεισμική ευστάθεια των οκτώ κίωνων. Λιγότερα (βλ. Διάγρ. 5.9) «υποστηρίζουν» το αντίθετο.

¹⁷⁶ Εφόσον η παρούσα προσπάθεια συνεχιστεί σε μελλοντικές (συναφούς αντικειμένου) εργασίες, είναι πιθανό να είναι δυνατή τότε, όχι μόνο (α) η προσαρμογή της τιμής του συντελεστή σε νέα δεδομένα για την εξαγωγή από τα εν λόγω κριτήρια πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων, αλλά και (β) η διεύρυνση της χρησιμότητας του συντελεστή έτσι ώστε τα κριτήρια να αφορούν και κίονες με χαρακτηριστικά που τους καθιστούν, προς το παρόν, εκτός των ορίων βέλτιστης ισχύος των κριτηρίων (τα όρια αυτά αναφέρονται παρακάτω στο κείμενο).

προαναφερθέντων ορίων βέλτιστης ισχύος των κριτηρίων «ευρίσκεται» (αν όχι η πλειονότητα) ένα πολύ μεγάλο μέρος των ελεύθερα ιστάμενων αρχαίων κίωνων που σώζονται μέχρι σήμερα.

5.7 Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα των προκαταρκτικών αριθμητικών διερευνήσεων που αφορούσαν ένα αρχαίο πολυσπόνδυλο κίονα, τυπικών χαρακτηριστικών, διαφάνηκε ότι αρκετές από τις παραδοχές που έγιναν για την απλοποίηση των αριθμητικών προσομοιώσεων της σεισμικής συμπεριφοράς του κίονα, δεν επηρέασαν σημαντικά τις αριθμητικές προβλέψεις. Αυτή η εκτίμηση, καθώς και τα ικανοποιητικά αποτελέσματα από την βαθμονόμηση του λογισμικού (η οποία παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο), συνηγορούν υπέρ της αξιοπιστίας των προβλέψεων των κύριων διερευνήσεων του παρόντος κεφαλαίου, οι οποίες αφορούν τη σεισμική απόκριση οκτώ αρχαίων πολυσπόνδυλων κίωνων, διαφόρων μεγεθών και ποικίλων λοιπών χαρακτηριστικών. Από τις τελευταίες προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Εν γένει, οι αρχαίοι πολυσπόνδυλοι κίονες, εφόσον διατηρούνται σε καλή κατάσταση (με σπονδύλους ακέραιους, χωρίς επικίνδυνες ρωγμές, και με άθικτες εδράσεις), σε κατακόρυφη στάση και εδράζονται σε δύσκαμπτη βάση, δύνανται να αντιστέκονται χωρίς να καταρρέουν σε σημαντικές σεισμικές δράσεις. Η αντισεισμική ικανότητα των αρχαίων κίωνων μεγάλου μεγέθους, μάλιστα, φαίνεται ότι είναι ανώτερη από τις αναμενόμενες μέγιστες σεισμικές δράσεις στον ελλαδικό χώρο, ακόμα και για σεισμούς των οποίων οι εκτιμώμενες περίοδοι επανάληψης υπερβαίνουν και την μακρά διάρκεια ζωής των αρχαίων μνημείων.
2. Το προηγούμενο συμπέρασμα, αφενός επιβεβαιώνεται από το ότι πολλοί αρχαίοι κίονες παραμένουν ιστάμενοι έως σήμερα (όχι μόνο στον ελλαδικό χώρο, αλλά και σε άλλες σεισμογενείς περιοχές περί την Μεσόγειο Θάλασσα), και αφετέρου καταδεικνύει ότι η αποκατάσταση των τυχόν βλαβών ενός αρχαίου πολυσπόνδυλου κίονα είναι πολύ πιθανό να εξασφαλίζει την σεισμική ευστάθεια του κίονα.
3. Όπως και σε προγενέστερες σχετικές αριθμητικές μελέτες, έτσι και στην παρούσα διαφάνηκε ότι είναι δυνατό μία σεισμική διέγερση να προκαλεί κατάρρευση σε ένα κίονα ενώ μία άλλη με παρόμοια χαρακτηριστικά αλλά με μεγαλύτερη ένταση να μην δύναται να επιφέρει κατάρρευση στον ίδιο κίονα. Από τα αποτελέσματα της παρούσας

εργασίας προκύπτει, επιπλέον, ότι το προαναφερθέν «οξύμωρο» ενδεχόμενο αφορά κυρίως μεσαίου και μεγάλου μεγέθους κίονες υπό μακροπερίοδες σεισμικές διεγέρσεις.

4. Ο διαφορετικός αριθμός των σπονδύλων των αρχαίων κίωνων, όταν είναι εντός των συνηθισμένων («τυπικών», ανάλογα με το μέγεθος των κίωνων) ορίων, προέκυψε ότι δεν επηρεάζει σημαντικά την σεισμική ευστάθεια των κίωνων. Όμως, στις (σχετικώς σπάνιες) περιπτώσεις που κίονες αποτελούνται από πολύ μικρό αριθμό λίθινων μελών (όπως είναι οι κίονες του ναού της Αλέας Αθηνάς, οι οποίοι παρά το μεγάλο μέγεθός τους απαρτίζονται από κιονόκρανο και μόνο έξι σπονδύλους), ο αριθμός των σπονδύλων μειώνει σημαντικά την αντισεισμική ικανότητα των κίωνων όταν αυτοί διεγείρονται από μακροπερίοδες διεγέρσεις.
5. Το μέγεθος των κίωνων αναδείχτηκε για μία ακόμα φορά ότι παίζει τον σημαντικότερο ρόλο στην ικανότητά τους να ανθίστανται, χωρίς να ανατρέπονται, σε ισχυρούς σεισμούς, καθώς οι μεγαλύτεροι κίονες που εξετάστηκαν, αν και όχι οι πιο ραδινοί, παρουσίασαν την μεγαλύτερη ευστάθεια.
6. Επίσης, διαφάνηκε από τα αποτελέσματα ότι η σεισμική απόκριση των κίωνων συσχετίζεται καλύτερα με την μέγιστη οριζόντια εδαφική μετατόπιση (PHD), λιγότερο καλά με την μέγιστη οριζόντια εδαφική ταχύτητα (PHV) και όχι καλά με την μέγιστη οριζόντια εδαφική επιτάχυνση (PHA).
7. Ωστόσο, κατέστη δυνατό να παρουσιαστούν χωρίς να εμφανίζουν μεγάλη διάχυση οι προβλέψεις του λογισμικού για τα ελάχιστα όρια σεισμικής ευστάθειας όλων των υπό εξέταση κίωνων, και για τις τρεις παραμέτρους πλάτους εδαφικών κινήσεων (PHD, PHV, PHA). Αυτό συνέβη διότι οι δείκτες αυτοί συσχετίστηκαν με τα βασικά δυναμικά χαρακτηριστικά των κίωνων (μέγεθος, ραδινότητα και «ιδιοσυχνότητα»), καθώς και (για τους PHV και PHA) με την δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής διέγερσης (T_g).
8. Έτσι, με βάση τις προαναφερθείσες αριθμητικές προβλέψεις, διατυπώθηκαν κριτήρια κατάρρευσης αρχαίων πολυσπόνδυλων κίωνων υπό σεισμικές δράσεις. Τα κριτήρια αυτά, εφόσον χρησιμοποιηθούν με τον αρμόζοντα κριτικό τρόπο, μπορούν να οδηγήσουν: (α) στην προσεγγιστική αποτίμηση του σεισμικού κινδύνου που διατρέχουν οι περισσότεροι ελεύθερα ιστάμενοι αρχαίοι κίονες που σώζονται μέχρι σήμερα, και (β) στην εκτίμηση των μέγιστων τιμών σεισμικών δράσεων που έπληξαν, από την αρχαιότητα έως σήμερα, περιοχές που διατηρούνται κατακείμενοι πολυσπόνδυλοι κίονες, μικρού, μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους.

6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΠΟΛΩΝ ΑΠΟ ΤΙΤΑΝΙΟ ΣΤΗΝ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΕΝΟΣ ΑΡΧΑΙΟΥ ΚΙΟΝΑ

6.1 Γενικά

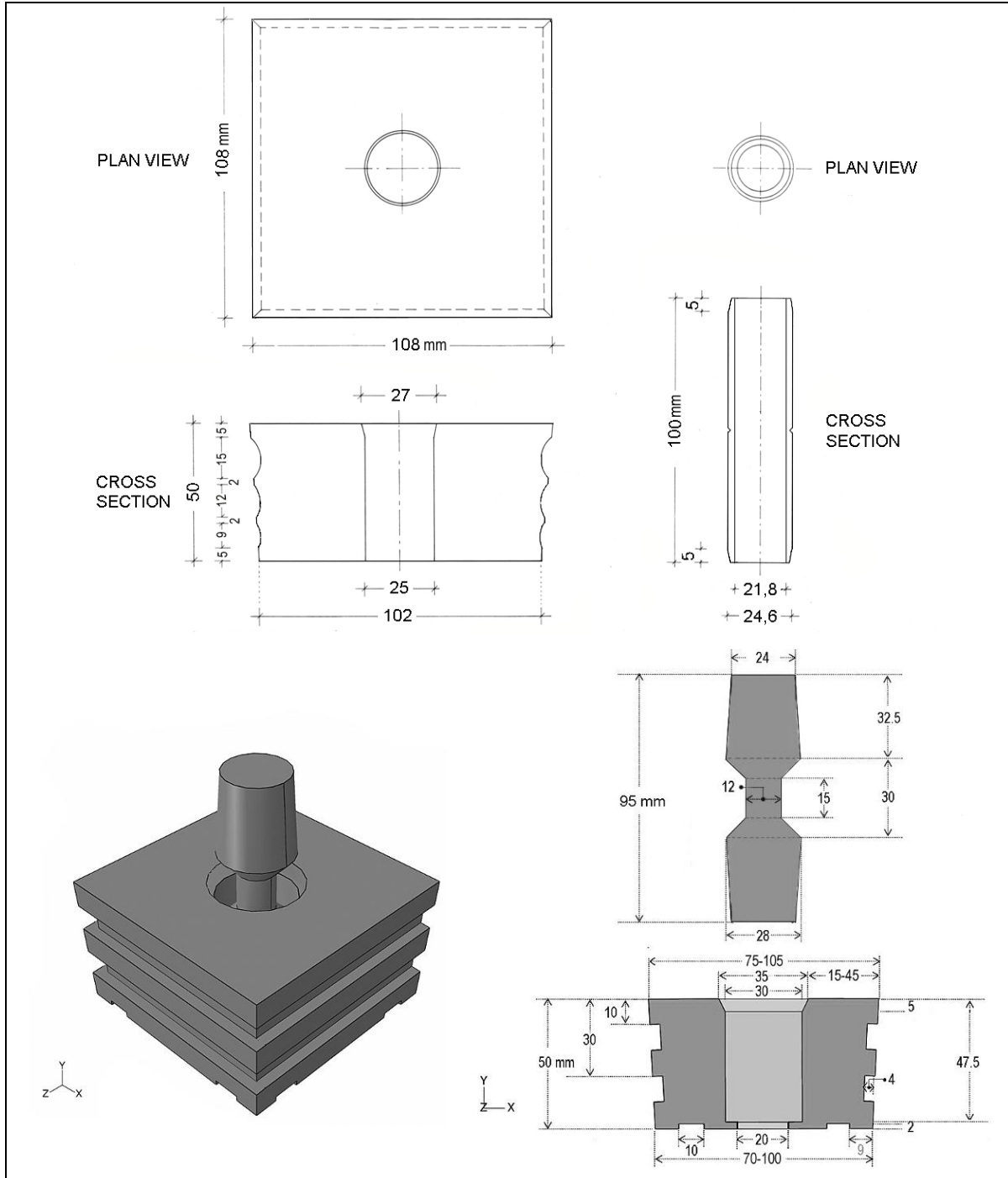
Όπως προαναφέρθηκε, το σύνηθες είναι να μην διατηρούνται συνδεδημένα στοιχεία (πόλοι, εμπόλια ή γόμφοι) στις διεπιφάνειες των κίωνων των αρχαίων μνημείων που σώζονται έως σήμερα, είτε διότι έχουν από αιώνες αποσυντεθεί, λόγω του ότι ήταν ξύλινα (πόλοι και εμπόλια), είτε διότι έχουν αφαιρεθεί από λαφυραγωγούς επειδή ήταν μεταλλικά και άρα κάποιας αξίας (γόμφοι και σε σπάνιες περιπτώσεις πόλοι και εμπόλια). Στις τελευταίες δύο δεκαετίες, είναι συνηθισμένο, επίσης, μέσα στο πλαίσιο εργασιών για την στερέωση ή/και την αναστήλωση ενός αρχαίου μνημείου, να αναπληρώνονται (ή, κάποιες φορές, να αντικαθίστανται) τα εν λόγω αρχαία στοιχεία από νέα κατασκευασμένα από τιτάνιο.

Τα νέα συνδεδημένα στοιχεία των κίωνων σχεδιάζονται έτσι ώστε να έχουν, σε γενικές γραμμές, την μορφή των αντίστοιχων αρχαίων. Ειδικώς οι νέοι πόλοι υπολογίζονται έτσι ώστε να αναπτύσσουν μέγιστη διατμητική αντοχή περίπου ίση ή λίγο μικρότερη από την εκτιμώμενη διατμητική αντοχή των αντίστοιχων αρχαίων ξύλινων. Αυτό το νέο συνδεδημένο σύστημα των μελών των κίωνων (πόλος-ζεύγος εμπολίων, από τιτάνιο), αν και μετά την τοποθέτησή του (κατά την αναστήλωση ενός κίονα) παραμένει ανενεργό, όταν κάποιο γεγονός έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση των κίωνων, συμμετέχει στους μηχανισμούς αντίστασης της παραμόρφωσης –όπως, άλλωστε, και τα αντίστοιχα αρχαία συνδεδημένα.

Κατά συνέπεια, εάν λάβουν χώρα σεισμικές διεγέρσεις ικανές να παραμορφώσουν αναστηλωμένους κίονες που εμπεριέχουν πόλους και εμπόλια από τιτάνιο, αναμένεται αυτά τα συνδεδημένα να έχουν επιρροή στην σεισμική απόκριση των κίωνων. Γι αυτό και στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε να διερευνηθεί, με αριθμητικό τρόπο, η επιρροή νέων πόλων¹⁷⁷ από τιτάνιο, δύο τύπων, σε ένα ελεύθερα ιστάμενο αρχαίο κίονα, τυπικών διαστάσεων και μέσου μεγέθους. Οι δύο τύποι νέων πόλων από τιτάνιο είναι ο σωληνωτός πόλος που έχει τοποθετηθεί σε κίονες του Παρθενώνα (στον πρόναο και στη βόρεια πλευρά),

¹⁷⁷ Δεν αναφέρονται τα εμπόλια διότι, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω στο κυρίως κείμενο, στο, προς εξέταση της σεισμικής απόκρισής του, αριθμητικό προσομοίωμα αρχαίου κίονα δεν περιλήφθηκαν τέτοια στοιχεία.

καθώς και άλλων μνημείων¹⁷⁸, και ο πόλος με κολουροκωνικά άκρα και λέπτυνση στο κεντρικό τμήμα του, ο οποίος έχει τοποθετηθεί σε κίονες του βόρειου πτερού του μνημείου των Βασσών (Εικ. 6.1).



Εικ. 6.1: Σχέδια που παρουσιάζουν τα νέα συνδετήρια στοιχεία μελών κίονα που τοποθετήθηκαν στους κίονες του πρόναου του Παρθενώνα¹⁷⁹ (άνω) και της περίστασης του ναού του Επικούριου Απόλλωνα¹⁸⁰.

¹⁷⁸ Όπως στο αναστηλωμένο τμήμα της δωρικής στοάς του Ασκληπείου στη νότια κλιτύ της Ακρόπολης.

¹⁷⁹ Βάσει μελέτης του γράφοντα για τους πόλους, και του αρχιτέκτονα Νίκου Τογανίδη για τα εμπόλια, την περίοδο 1999-2000.

6.2 Βαθμονόμηση διαφόρων παραμέτρων προσομοίωσης

6.2.1 Εκτίμηση της συμπεριφοράς του τιτανίου Grade B

Λόγω του ότι το τιτάνιο δεν είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται ευρέως στον κλάδο των κτηριακών κατασκευών, και ειδικότερα η ποιότητά του (Grade B) που χρησιμοποιείται για την διαμόρφωση των νέων συνδετήριων στοιχείων στα έργα αποκατάστασης αρχαίων μνημείων στην Ελλάδα βρίσκει σπάνια εφαρμογή αλλού, η συμπεριφορά του υλικού αυτού δεν έχει ενδελεχώς μελετηθεί, ούτε πειραματικώς ούτε αριθμητικώς. Ως εκ τούτου, κρίθηκε σκόπιμο να εξεταστεί, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, και ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να προσομοιωθεί αξιόπιστα η συμπεριφορά του υλικού αυτού.

Οι βασικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του τιτανίου τύπου Grade B, σύμφωνα με τα σχετικά Πρότυπα, παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 2.1. Στα Πρότυπα, όμως, ειδικώς για τις μηχανικές αντοχές του εν λόγω τύπου τιτανίου, αναφέρονται οι ελάχιστες τιμές. Επομένως, αυτές οι τιμές αντοχών δεν αντιπροσωπεύουν την πραγματική συμπεριφορά των νέων συνδετήριων στοιχείων από τιτάνιο υπό οριακές συνθήκες εντατικής κατάστασης, καθώς το πιθανότερο είναι κάτω από τέτοιες συνθήκες τα συνδετήρια θα αναπτύξουν πολύ υψηλότερες αντοχές από τις (αναφερόμενες στα Πρότυπα) ελάχιστες. Για την εκτίμηση των αντοχών αυτών, και εν γένει της συμπεριφοράς των νέων συνδετήριων στοιχείων από τιτάνιο, έγινε σχεδιασμός και εκτέλεση δοκιμών μικρού πλήθους.

Οι δοκιμές έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Μετάλλων του Κ.Ε.Δ.Ε. τον Μάιο του 2010¹⁸¹, και σ' αυτές μετρήθηκαν οι αντοχές εφελκυσμού διαφόρων στοιχείων τιτανίου (επιμήκη ελασμάτων και λείων ράβδων) προερχόμενων από το απόθεμα υλικού τιτανίου (ποιότητας Grade B) του έργου αποκατάστασης του ναού του Επικούριου Απόλλωνα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1. Με βάση (κυρίως αυτά) τα πειραματικά αποτελέσματα (καθώς και από την σύγκρισή τους με συναφή πειραματικά αποτελέσματα προγενεστέρων εργασιών¹⁸²) μπορεί να διατυπωθεί η εκτίμηση ότι οι πιο πιθανές τιμές για

¹⁸⁰ Σχέδια πόλου-εμπολίου μνημείου Βασσών από Παπαδόπουλος και Σαββατιανού 2015, εικ. 4.30, σελ. 168.

¹⁸¹ Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν από τους αρμόδιους εργαζόμενους στο Κ.Ε.Δ.Ε., τον πολιτικό μηχανικό Στέφανο Μονδέλο και τον τεχνικό Νίκο Αγγελόπουλο, μετά από σχετικές αρχικές συνηνοήσεις με τον μεταλλειολόγο μηχανικό Σαράντο Μουγιάκο. Ο γράφων τους ευχαριστεί θερμά για την καλή συνεργασία.

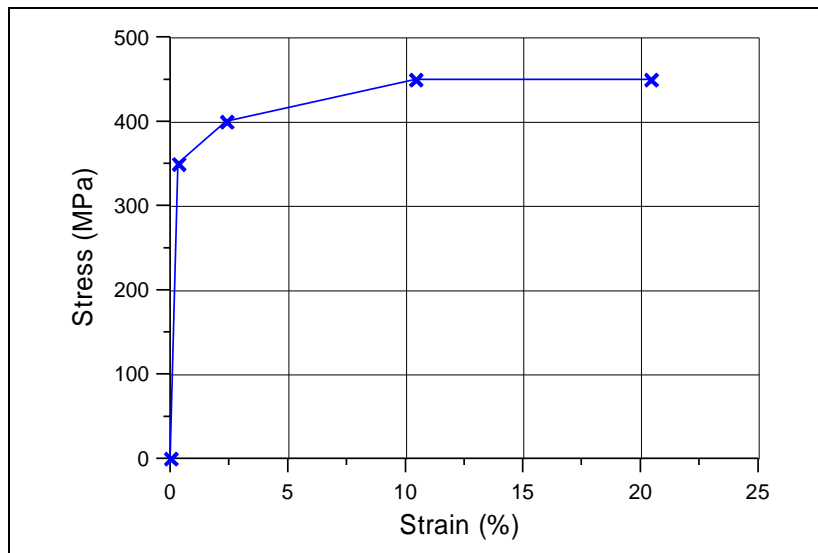
¹⁸² Τέσσερις δοκιμές εξόλκευσης κοχλιοτομημένων ράβδων τιτανίου που αστόχησαν με θραύση ράβδου, οι οποίες διενεργήθηκαν από τον Κ. Ζάμπα (1994, σελ. 147-149), δίνουν μέση τιμή εφελκυστικής αντοχής 561 MPa. Ενώ, από πέντε δοκιμές διάτμησης σωληνωτών στοιχείων από τιτάνιο (Παπαδόπουλος 2000), εξάγεται μέσος όρος αντοχής υλικού 536 MPa. Τέλος, από τριάντα ένα πειράματα αντοχής βλήτρων από τιτάνιο (Vintzelaïou & Papadopoulos 2001), υπολογίζεται μέση εφελκυστική αντοχή υλικού 489 MPa. Συνολικά από τα

την τάση διαρροής και την εφελκυστική αντοχή του συγκεκριμένου τύπου τιτανίου είναι 350 MPa και 450 MPa, αντίστοιχα. Βάσει αυτών των (ονομαστικών) τιμών, καθώς και των στοιχείων από τα Πρότυπα που αφορούν το μέτρο ελαστικότητας και την ανηγμένη μήκυνση θραύσης, καταρτίστηκε το εξιδανικευμένο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 6.1.

Τα στοιχεία που περιλαμβάνονται στο Διάγραμμα χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία για να προσομοιωθεί το υλικό ως ελαστικό-κρατυνόμενο, στις αριθμητικές διερευνήσεις που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο.

A/A Δοκιμίου	Διατομή Δοκιμίου	Πάχος ή διάμετρος διατομής (mm)	Εμβαδό Διατομής (mm ²)	Μήκος δοκιμίου (mm)	Όριο Διαρροής (MPa)	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	Ανηγμένη Μήκυνση Θραύσης (%)
I	Ορθογωνική	14.8	127.30	527	340	422	33
II	Ορθογωνική	15.7	136.28	527	352	426	28.5
III	Κυκλική	5.0	19.63	797	440	589	32
IV	Κυκλική	5.0	19.63	798	443	545	28
V	Κυκλική	7.8	47.78	800	369	471	29.5
VI	Κυκλική	7.8	47.78	802	371	469	-

Πίν. 6.1: Αποτελέσματα πειραμάτων εφελκυστικής αντοχής σε δοκίμια από τιτάνιο.



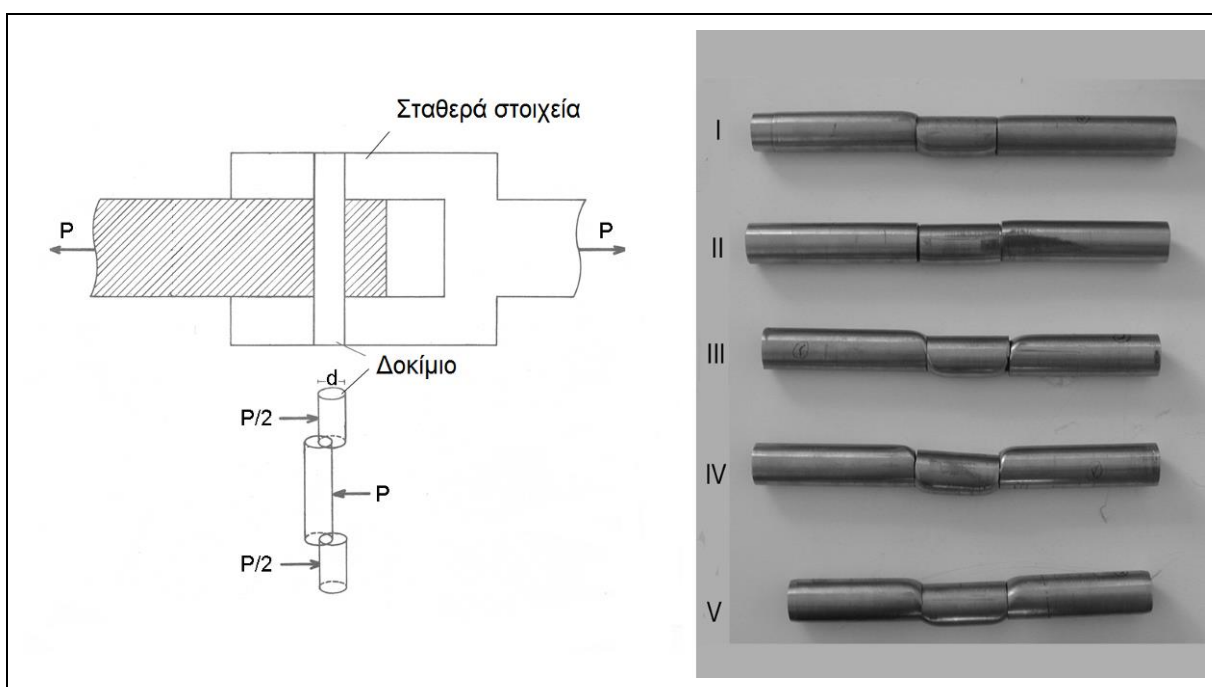
Διάγρ. 6.1: Εξιδανικευμένο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του τιτανίου τύπου Grade B.

προαναφερθέντα, υπολογίζεται μέση τιμή για την αντοχή του υλικού 502 MPa (με τυπική απόκλιση 61 MPa), και χαρακτηριστική τιμή (για 95% πιθανότητα υπέρβασης) 402 MPa.

6.2.2 Τεκμηρίωση της αξιοπιστίας της προσομοίωσης σωληνωτών πάλων

Για την εξέταση της αξιοπιστίας του λογισμικού ABAQUS κατά την προσομοίωση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς των σωληνωτών πάλων από τιτάνιο υπό οριακές συνθήκες διατμητικής φόρτισης, προσομοιώθηκαν τρεις δοκιμές διάτμησης σωληνωτών στοιχείων από τιτάνιο τύπου Grade B (από τις οποίες οι δύο ήταν όμοιες μεταξύ τους) και οι αριθμητικές προβλέψεις συγκρίθηκαν με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Οι εν λόγω δοκιμές είναι μέρος ενός συνόλου πέντε πειραμάτων διπλής διάτμησης του πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Αντοχής Υλικών του Ε.Μ.Π. τον Μάρτιο και τον Απρίλιο του 2000¹⁸³. Η πειρατική διάταξη της δοκιμών αυτών παρουσιάζεται στο σκαρίφημα της Εικόνας 6.2 (αριστερά). Η εξωτερική διάμετρος των δοκιμών, και στα πέντε πειράματα, ήταν ίση με 24.5 mm (Εικ. 6.2), ενώ στα τρία που επιλέχθηκε να αναπαραχθούν αριθμητικά, η εσωτερική διάμετρος των δοκιμών ήταν ίση με 22.0 mm (στα πειράματα III και IV) και 20.5 mm (στο πείραμα V). Τα «δίδυμα» πειράματα, III και IV αστόχησαν υπό τέμνουσα ίση με 26.75 kN και 24.75 kN, αντίστοιχα, ενώ στο πείραμα V, το παχύτερο δοκίμιο θραύστηκε υπό επιβαλλόμενη τέμνουσα ίση με 43.25 kN.



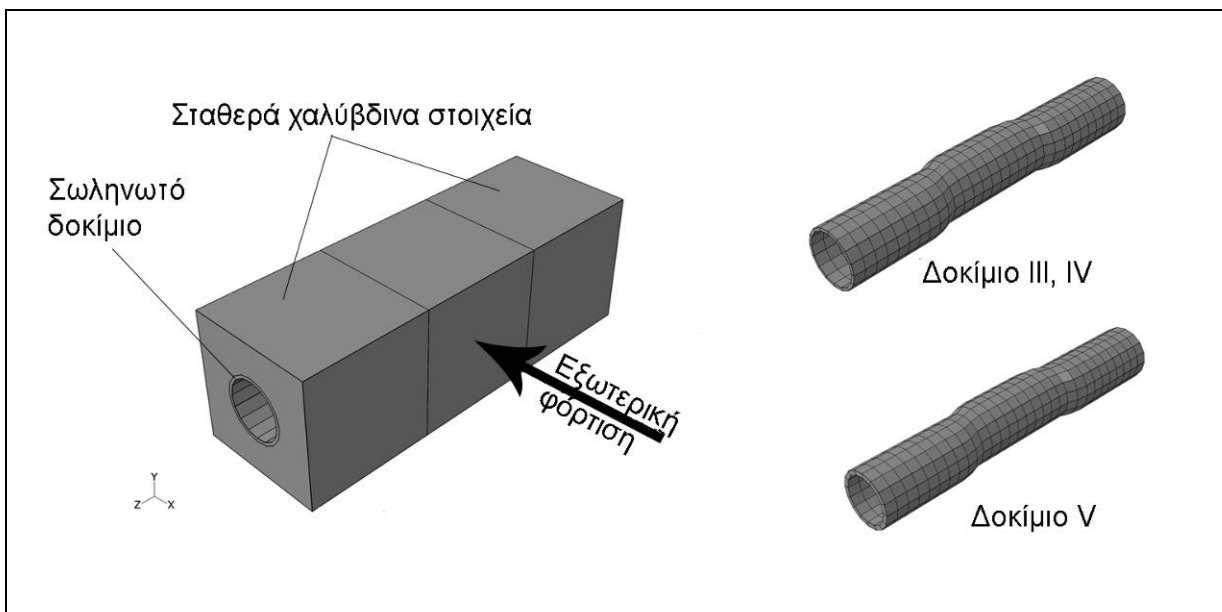
Εικ. 6.2: Σκαρίφημα που περιγράφει την δοκιμή διπλής διάτμησης (αριστερά,) και τα πέντε σωληνωτά δοκίμια τιτανίου μετά την υποβολή τους σε δοκιμή διπλής διάτμησης.

¹⁸³ Παπαδόπουλος 2000.

Για τις προσομοιώσεις των εν λόγω δοκιμών διαμορφώθηκαν δύο τρισδιάστατα υπολογιστικά ομοιώματα, τα οποία ακολουθούσαν (με ελάχιστες αποκλίσεις) τις διαστάσεις των δοκιμών και των στοιχείων της πειραματικής διάταξης (πρβλ. Εικόνες 6.2 και 6.3). Πιο συγκεκριμένα, κάθε προσομοίωμα αποτελείτο από τέσσερα ξεχωριστά στοιχεία (Εικ. 6.3 αριστερά): ένα στοιχείο που προσομοίωνε το κυλινδρικό δοκίμιο από τιτάνιο, και τρία που προσομοίωναν τα χαλύβδινα στοιχεία της μηχανής του εργαστηρίου.

Το υλικό των σωληνωτών δοκιμών προσομοιώθηκε ως ελαστικό-κρατυνόμενο, με την χρήση του μοντέλου που διαθέτει το λογισμικό ως το πιο κατάλληλο για την προσομοίωση μετάλλων (το οποίο έχει ως κριτήριο για τη διαρροή την επιφάνεια διαρροής του Mises), και με την εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων από τον Πίνακα 2.1 και το Διάγραμμα 6.1. Ενώ, για τα χαλύβδινα στοιχεία ορίστηκαν (στις προσομοιώσεις) ελαστική συμπεριφορά και παράμετροι υλικού $E = 210000 \text{ MPa}$ και $\nu = 0.32$. Ο συντελεστής τριβής στις διεπιφάνειες του αριθμητικού μοντέλου ορίστηκε ίσος με 0.25.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα ήταν πολύ ικανοποιητικά, καθώς το λογισμικό αναπαρήγαγε με ικανοποιητική ακρίβεια όχι μόνο την μορφή θραύσης των δοκιμών (πρβλ. Εικ. 6.1 δεξιά και 6.2 δεξιά), αλλά και τα φορτία αστοχίας. Πιο συγκεκριμένα, για τα πειράματα III και IV το αριθμητικό αποτέλεσμα για την διατμητική δύναμη κατά την θραύση των δοκιμών ήταν 25.50 kN, έναντι των καταγεγραμμένων στις δοκιμές 26.75 kN και 24.75 kN, ενώ για το πείραμα V υπολογίστηκε τέμνουσα αστοχίας ίση με 39.50 kN, έναντι της πειραματικής τιμής που ήταν ίση με 43.25 kN.

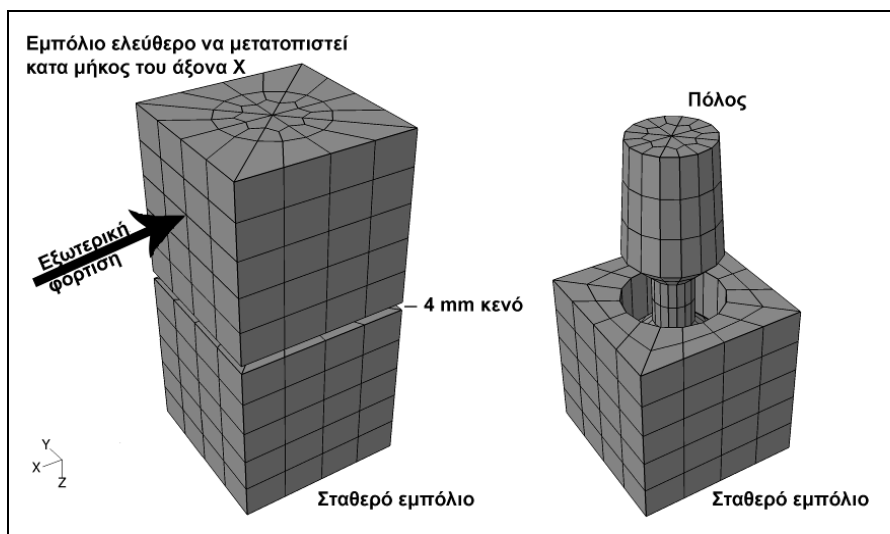


Εικ. 6.3: Το γενικό προσομοίωμα (αριστερά) και οι παραμορφώσεις των προσομοιωμάτων των σωληνωτών δοκιμών την τελευταία στιγμή πριν από την θραύση τους.

6.2.3 Αριθμητική εκτίμηση της τέμνουσας αστοχίας του συστήματος κολουροκωνικού πόλου – ζεύγους εμπολίων

Για την αριθμητική εκτίμηση της αντίστασης των κολουροκωνικών πώλων από τιτάνιο έναντι τέμνουσας (η οποία προκύπτει από την σχετική ολίσθηση διαδοχικών σπονδύλων), διαμορφώθηκε τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα που περιλάμβανε ένα πόλο εντός δύο εμπολίων, όπως τα στοιχεία αυτά τοποθετούνται για την επανασύνδεση μελών κίονα στον ναό του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών. Η μορφή και οι διαστάσεις των στοιχείων του υπολογιστικού ομοιώματος ήταν σχεδόν όμοιες (με ελάχιστες αποκλίσεις) με αυτές των νέων συνδετηρίων από τιτάνιο (πρβλ. Εικ. 6.1 κάτω με Εικ. 6.4). Στο προσομοίωμα η εξωτερική φόρτιση εφαρμοζόταν σταδιακά αυξανόμενη έως την αστοχία της σύνδεσης, κάθετα στην παράπλευρη επιφάνεια του άνω εμπολίου. Το εμπόλιο αυτό ήταν ελεύθερο να μετατοπιστεί μόνο κατά μήκος του οριζώντιου άξονα του προσομοιώματος. Το κάτω εμπόλιο ήταν σταθερό σε όλη τη διάρκεια της ανάλυσης, ενώ ο πόλος ήταν ελεύθερος να μετακινηθεί προς όλες τις κατευθύνσεις, εντός, πάντως, των εμπολίων που τον περιέβαλλαν.

Η προσομοίωση του τιτανίου πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις παραδοχές και με τους τρόπους προσομοίωσης υλικού που παρουσιάστηκαν στις παραπάνω παραγράφους, με μη-γραμμική συμπεριφορά για το υλικό του πόλου και για ελαστική συμπεριφορά για το υλικό των εμπολίων. Εξ άλλου, όμοιος με τις προηγούμενες αριθμητικές αναλύσεις της παρούσας εργασίας, ήταν και ο τρόπος προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης των εν επαφή επιφανειών των επιμέρους στοιχείων του προσομοιώματος. Ο συντελεστής τριβής ορίστηκε ίσος με 0.25 (όπως και στην τελευταία ανάλυση) διότι αφορά μεταλλικές διεπιφάνειες.



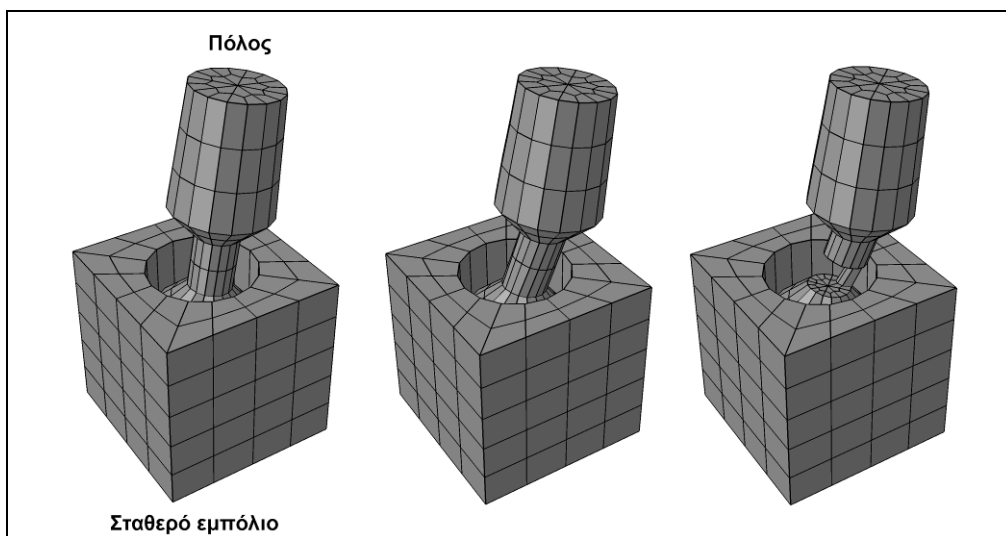
Εικ. 6.4: Το προσομοίωμα πόλων – ζεύγους εμπολίων (αριστερά), και το ίδιο προσομοίωμα με αθέατο το άνω εμπόλιο.

Τα κύρια αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης είναι τα ακόλουθα:

α) Ο πόλος άρχισε να αντιστέκεται στην ολίσθηση του άνω εμπόλιου, όταν αυτή έφθασε τα 7 mm (Εικ. 6.5 αριστερά).

β) Ο πόλος θραύστηκε όταν το άνω εμπόλιο είχε μετατοπιστεί σε σχέση με το κάτω κατά 12 mm και το εξωτερικό φορτίο ανήλθε στα 28 kN (Εικ. 6.5 δεξιά).

Η ίδια αριθμητική επίλυση επαναλήφθηκε με την παράμετρο του συντελεστή τριβής ίση με μηδέν και ίση με 0.75. Τα αποτελέσματα ήταν πρακτικώς ισοδύναμα και στις τρεις περιπτώσεις, κάτι που υποδηλώνει ότι η μεταφορά των δυνάμεων λαμβάνει χώρα (κυρίως) μέσω της αλληλεμπλοκής πόλου εμπολίων.



Εικ. 6.5: Στιγμιότυπα με την παραμορφωμένη κατάσταση του προσομοιώματος (με αθέατο το άνω εμπόλιο) όταν άρχισε να εντείνεται ο πόλος (αριστερά) και λίγο πριν και κατά τη θραύση του πόλου (μέσο και δεξιά, αντίστοιχα).

6.2.4 Πειραματικός έλεγχος των αριθμητικών προβλέψεων για την φέρουσα ικανότητα έναντι τέμνουσας του συστήματος κολουροκωνικού πόλου – ζεύγους εμπολίων

Τον Οκτώβριο του 2010 στο εργαστήριο μετάλλων του Κ.Ε.Δ.Ε. πραγματοποιήθηκαν δοκιμές διατμητικής αντοχής συστήματος κολουροκωνικού πόλου – ζεύγους εμπολίων, με την χρήση πρωτότυπης πειραματικής διάταξης, η οποία σχεδιάστηκε από τον γράφοντα¹⁸⁴. Η διάταξη περιελάμβανε:

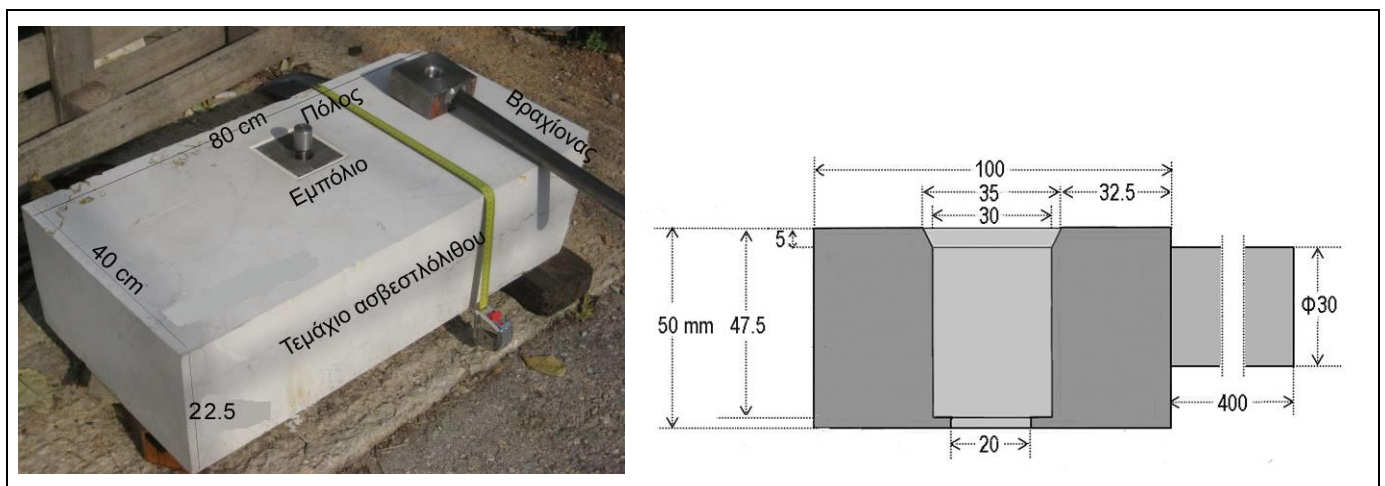
¹⁸⁴ Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν από τον γράφοντα, σε συνεργασία με τους αρμόδιους του εργαστηρίου, τον πολιτικό μηχανικό Στέφανο Μονδέλο, και τους τεχνικούς Νίκο Αγγελόπουλο και Βασίλη Τζιβιέρη. Ο γράφον τους ευχαριστεί θερμά για την βοήθειά τους και την καλή συνεργασία.

α) Πρισματικό ασβεστολιθικό τεμάχιο, διαστάσεων 80x40x22.5 [cm] (Εικ. 6.6 αριστερά), στην μία έδρα του οποίου είχε λαξευτεί εντορμιά. Εντός αυτής είχε πακτωθεί εμπόλιο από τιτάνιο τυπικών διαστάσεων (Εικ. 6.1 κάτω δεξιά).

β) Πόλο από χάλυβα (ποιότητας St37) που αναπτύσσει παρόμοιες αντοχές με αυτές που διαθέτει ο τύπος τιτανίου από το οποίο κατασκευάζονται οι νέοι πόλοι¹⁸⁵,

Και γ) ένα χαλύβδινο βραχίονα η άκρη του οποίου ήταν όμοια με εμπόλιο (Εικ. 6.6 δεξιά).

Για την εκτέλεση των δοκιμών, το λίθινο τεμάχιο είχε πακτωθεί στο κάτω τμήμα της μηχανής εφελκυστικών δοκιμών του εργαστηρίου (τύπου Satec Systems της INSTRON), με τέτοιο τρόπο ώστε η επιφάνειά του στην οποία είχε εμφυτευτεί το εμπόλιο να είναι κατακόρυφη. Στο κινητό άνω τμήμα της μηχανής είχε αγκυρωθεί το κυλινδρικό άκρο του βραχίονα. Τα δύο (άνω και κάτω) τμήματα της διάταξης συνδέονταν με τον πόλο που είχε εισαχθεί εντός της κοιλότητας του ελεύθερου άκρου του βραχίονα και της κοιλότητας του εμπολίου (Εικ. 6.7 αριστερά). Κατά την εκτέλεση της δοκιμής, το άνω τμήμα της μηχανής μετακινούσε προς τα άνω τον βραχίονα, ο οποίος συμπιέσσει τον πόλο, φορτίζοντάς τον με μικρής εκκεντρότητας τέμνουσα δύναμη. Η δύναμη αυτή και η κατακόρυφη μετατόπιση του βραχίονα καταγράφονταν κατά την διάρκεια της δοκιμής.



Εικ. 6.6: Φωτογραφία των βασικών στοιχείων της πειραματικής διάταξης (αριστερά), και σχεδιαστική παρουσίαση (σε τομή) του χαλύβδινου βραχίονα εφαρμογής της εξωτερικής φόρτισης.

Η απόσταση μεταξύ της άνω έδρας του εμπολίου και της αντίστοιχης επιφάνειας του ελεύθερου άκρου του βραχίονα ήταν, κατά την έναρξη της δοκιμής, ίση με 4 mm, όπως τοποθετούνται τα εμπόλια στις έδρες των μελών των κίωνων του ναού του Επικούριου

¹⁸⁵ Το όριο διαρροής και η εφελκυστική αντοχή του χάλυβα St37 είναι 275 MP και 345 MPa, αντίστοιχα.

Απόλλωνα των Βασσών. Η πάκτωση του εμπολίου στο ασβεστολιθικό τεμάχιο είχε γίνει με τον ίδιο τρόπο αγκύρωσης των εμπολίων στους κίονες του μνημείου των Βασσών, δηλαδή με χύτευση κονιάματος λευκού τσιμέντου και ασβεστολιθικής άμμου (σε αναλογία τσιμέντου/άμμου/ύδατος, 1/1/¾, κ.β.) στο κενό μεταξύ εμπολίου – εντορμίας.

Το μέγεθος της επικάλυψης του εμπολίου στο τεμάχιο ασβεστολίθου κατά μήκος της κατεύθυνσης εφαρμογής του εξωτερικού φορτίου (ίση με 20 cm), προέκυψε βάσει υπολογισμών, ώστε να επαρκεί για να αστοχήσει η σύνδεση με θραύση πόλου. Ταυτόχρονα δεν θα έπρεπε να οδηγεί σε όγκο ασβεστολιθικού τεμαχίου τόσο μεγάλο ώστε η δοκιμή να είναι πρακτικώς αδύνατη στην διατιθεμένη μηχανή του εργαστηρίου¹⁸⁶.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν τρία πειράματα. Σε όλα, η σύνδεση αστόχησε εξαιτίας θραύσης του πόλου (Εικ. 6.7 δεξιά). Κατά την αστοχία, το επιβαλλόμενο φορτίο ήταν 30.17 kN, 31.40 kN, και 32.40 kN, ενώ η κατακόρυφη μετατόπιση του βραχίονα ήταν ≈ 9 mm και στις τρεις περιπτώσεις. Το ασβεστολιθικό τεμάχιο, ίδιο σε όλα τα πειράματα, δεν παρουσίασε βλάβη, όπως ανέπαφο παρέμεινε το εμπόλιο και το κονίαμα πάκτωσής του.

Όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η αριθμητική προσομοίωση της συμπεριφοράς του συστήματος κολουροκωνικού πόλου – ζεύγους εμπολίων υπό συνθήκες σχετικής ολίσθησης διαδοχικών σπονδύλων, έδωσε τέμνουσα θραύσης και μετατόπιση θραύσης 28 kN και 12 mm, αντίστοιχα. Επομένως, τα πειραματικά αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η προαναφερθείσα προσομοίωση είναι αξιόπιστη.



Εικ. 6.7: Φωτογραφία της πειραματικής διάταξης, πριν από την έναρξη μιας δοκιμής (αριστερά), και φωτογραφία με την κατάσταση του εμπολίου, του περιβάλλοντος τμήματος του ασβεστολιθικού τεμαχίου και του πόλου, μετά την ολοκλήρωση μίας δοκιμής.

¹⁸⁶ Η εν λόγω επικάλυψη ήταν μικρότερη από την ελάχιστη επικάλυψη των εμπολίων (≈ 35 cm) στις διεπιφάνειες των μελών των κίωνων στο περιστύλιο του μνημείου των Βασσών.

6.3 Αριθμητικές προσομοιώσεις

6.3.1 Τα εισαγόμενα δεδομένα

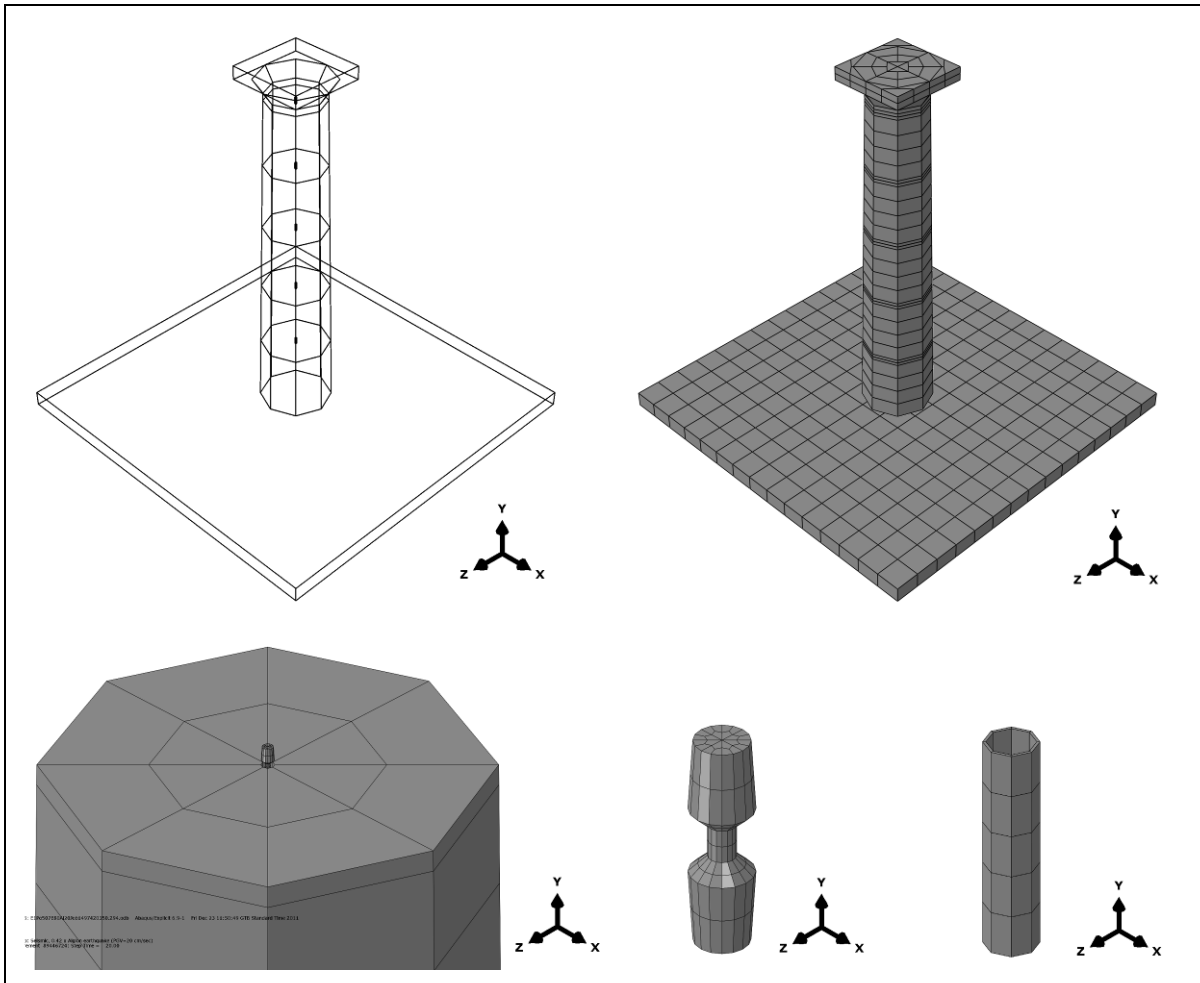
Για την εξέταση της επίδρασης των νέων πόλων από τιτάνιο στην σεισμική συμπεριφορά των αρχαίων κίωνων, μορφώθηκε με το λογισμικό ABAQUS/Explicit τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα ενός πολυσπόνδου δωρικού κίονα (Εικ. 6.8 άνω), μέσου μεγέθους και τυπικών διαστάσεων. Πιο συγκεκριμένα, το προσομοίωμα του κίονα είχε εξωτερικές διαστάσεις αυτές των κίωνων του περιστυλίου του ναού του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών¹⁸⁷, αποτελούνταν από κιονόκρανο και πέντε ισοΰψεις σπονδύλους ($h_{\sigma\pi\omega\nu\delta}=1.085$ m), και εδραζόταν σε βάση διαστάσεων 6.0x6.0x0.25 [m]. Οι διεπιφάνειες των μελών του κίονα διέθεταν κατάλληλες κοιλότητες εντός των οποίων ήταν τα στοιχεία που προσομοίωναν τους πόλους από τιτάνιο (Εικ. 6.8 κάτω αριστερά). Όπως προαναφέρθηκε εξετάστηκαν δύο τύποι νέων πόλων, ο σωληνωτός και ο κολουροκωνικός (Εικ. 6.8 κάτω).

Τα προσομοιώματα των πόλων μορφώθηκαν βάσει των διαστάσεων των αντίστοιχων στοιχείων από τιτάνιο, με μόνον μικρές διαφοροποιήσεις. Πιο συγκεκριμένα, στην προσομοίωση των σωληνωτών πόλων παραλήφθηκαν (λόγω του πολύ μικρού μεγέθους τους) η περιμετρική χαραγή στο μέσο του ύψους των πόλων και η λέπτυνση στα άκρα τους. Οι κοιλότητες στις έδρες των μελών του προσομοιώματος του κίονα είχαν τις διαστάσεις των κοιλοτήτων των αντίστοιχων εμπολίων (Εικ. 6.1), χωρίς να έχουν την διαπλάτυση των χειλέων τους (Εικ. 6.8 κάτω). Εμπόλια δεν περιλήφθηκαν στις προσομοιώσεις, με στόχο να μην αυξηθεί περαιτέρω το ήδη μεγάλο υπολογιστικό κόστος των αριθμητικών επιλύσεων¹⁸⁸. Αυτή η επιλογή εκτιμάται ότι δεν επηρέασε σημαντικά τα αριθμητικά αποτελέσματα, καθώς όπως διαπιστώθηκε στα σχετικά πειράματα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, τα εμπόλια και το κονίαμα που τα περιβάλλει συμπεριφέρονται ελαστικά έως και την θραύση του πόλου.

Συνολικά, δημιουργήθηκαν τέσσερα γενικά προσομοιώματα. Το δύο πρώτα περιελάμβαναν τα δύο διαφορετικά είδη πόλων, ενώ τα άλλα δεν είχαν πόλους και η (μόνη) μεταξύ τους διαφορά αφορούσε την διάμετρο των κοιλοτήτων στις έδρες των μελών του κίονα. Η διάμετρος αυτή ήταν ίση με 0.025 m στο τρίτο προσομοίωμα (ομοίως με το πρώτο που περιλάμβανε τους σωληνωτούς πόλους) και ίση με 0.030 m στο τέταρτο (ομοίως με το δεύτερο προσομοίωμα που είχε τους κολουροκωνικούς πόλους).

¹⁸⁷ Βλέπε Πίνακα 5.4, σελ. 144, όπου φαίνονται και οι διαστάσεις του κιονοκράνου.

¹⁸⁸ Με την χρήση ενός προσωπικού Η/Υ δεκαετίας, ο χρόνος που απαιτούνταν για την ολοκλήρωση μίας αριθμητικής επίλυσης σεισμικής διέγερσης (20 sec) του προσομοιώματος με τους σωληνωτούς πόλους ήταν 76 ώρες, ενώ για το μοντέλο που περιλάμβανε τους κολουροκωνικούς πόλους ήταν περίπου 198 ώρες.



Εικ. 6.8: Γενική άποψη του προσομοιώματος του κίονα με τους πόλους και της εξωτερικής όψης του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων του (άνω αριστερά και δεξιά, αντίστοιχα). Επίσης, λεπτομέρειες του δικτύου των Π.Σ. που δείχνουν την άνω έδρα ενός σπονδύλου (κάτω αριστερά), έναν κολουροκωνικό πόλο (κάτω μέσο) και έναν σωληνωτό πόλο (κάτω δεξιά).

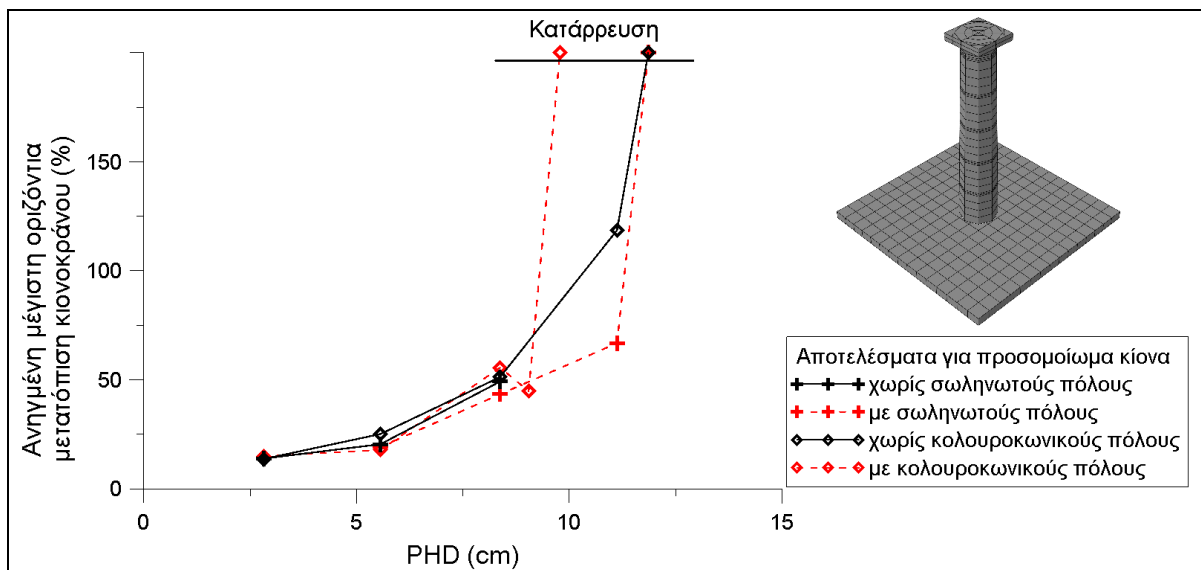
Ο κίονας και η βάση του θεωρήθηκε ότι είναι από μάρμαρο και το υλικό τους προσομοιώθηκε ως ελαστικό με τον ορισμό των εξής παραμέτρων: πυκνότητα ίση με 2750 kg/m^3 , μέτρο ελαστικότητας ίσο με 80 GPa , λόγος του Poisson ίσος με 0.26 . Το τιτάνιο των πόλων προσομοιώθηκε ως ελαστικό-κρατυνόμενο υλικό, βάσει των στοιχείων που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 6.1, καθώς και των γνωστών, από τα σχετικά πρότυπα, βασικών ιδιοτήτων του: πυκνότητα ίση με 4510 kg/m^3 , μέτρο ελαστικότητας ίσο με 105 GPa , λόγος του Poisson ίσος με 0.32 . Σε όλες τις διεπιφάνειες των μελών του κίονα και των πόλων ορίστηκε συντελεστής στατικής τριβής ίσος με 0.7 (και ίσος συντελεστής ολίσθησης, δηλαδή, $\mu_s = \mu_k = 0.70$), καθώς και συντελεστής απόσβεσης ίσος με 0.01 . Οι τιμές αυτές ορίστηκαν με βάση την γνωστή γωνία τριβής του μαρμάρου, καθώς και την διαπίστωση σχετικής αριθμητικής διερεύνησης (που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα) ότι η μεταφορά των δυνάμεων μεταξύ πόλου και εμπολίων συμβαίνει κυρίως μέσω της αλληλεμπλοκής τους.

Τα προσομοιώματα φορτίστηκαν από το ίδιο βάρος τους και από σεισμικές διεγέρσεις (με χρήση της σεισμικής καταγραφής του Αιγίου), κλιμακούμενες με κατάλληλους συντελεστές από χαμηλά επίπεδα σεισμικής φόρτισης έως τα επίπεδα που οδήγησαν σε κατάρρευση του κίονα σε κάθε γενικό προσομοίωμα.

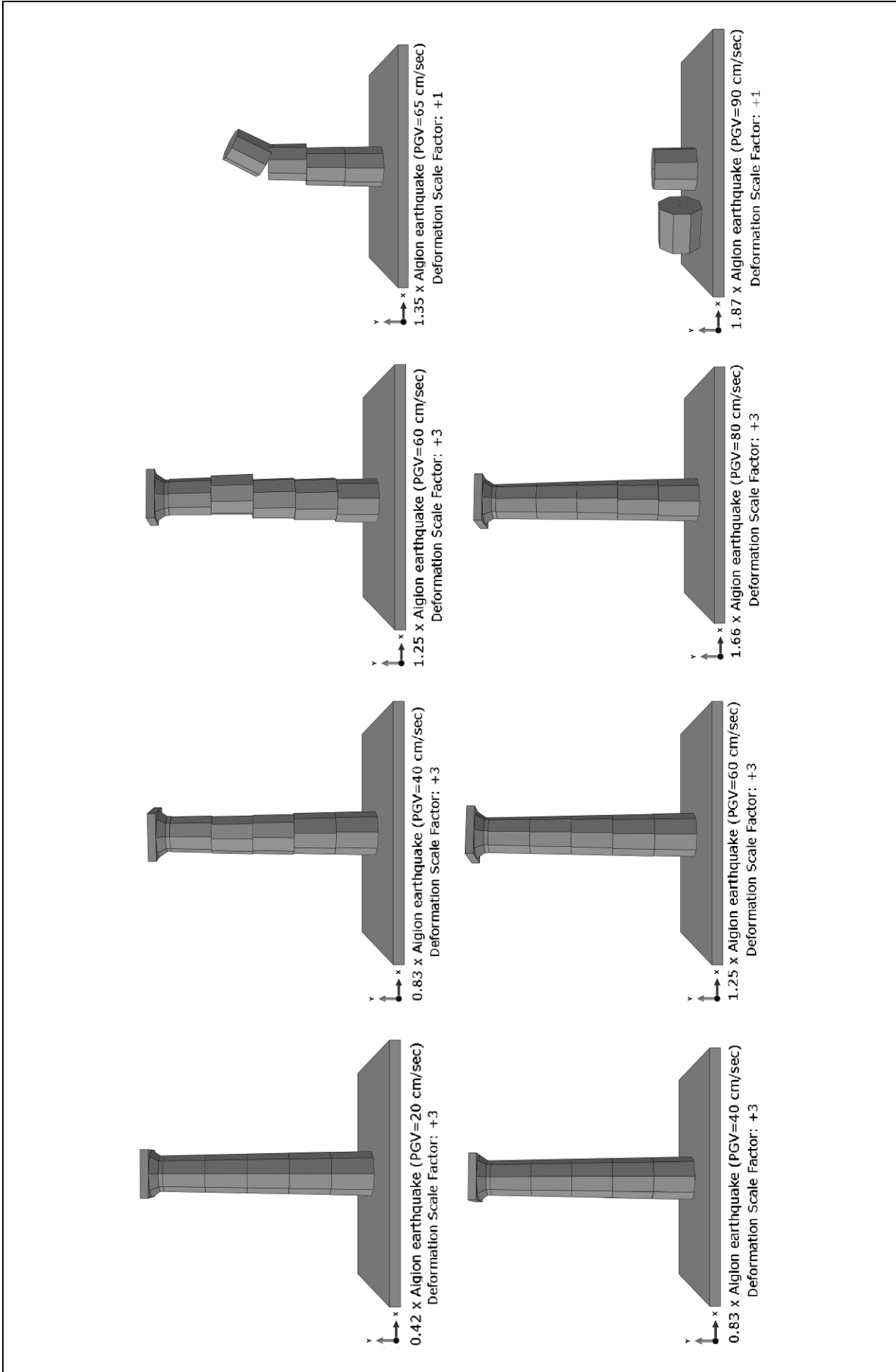
6.3.2 Αριθμητικά αποτελέσματα

Στο Διάγραμμα 6.2 παρουσιάζονται οι αριθμητικές προβλέψεις για τις μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις της κορυφής του κίονα (πιο συγκεκριμένα του κέντρου της άνω έδρας του άβακα), ανηγμένες ως προς την ημιδιάμετρο της κάτω έδρας του. Στις Εικόνες 6.9 και 6.10 παρουσιάζονται οι παραμορφωμένες στάσεις των τεσσάρων γενικών μοντέλων μετά το πέρας των σεισμικών διεγέρσεων (σε έξαρση). Στην Εικόνα 6.11 παρουσιάζονται και οι παραμορφώσεις των πólων (σε έξαρση) για δύο επίπεδα σεισμικής διέγερσης του κίονα.

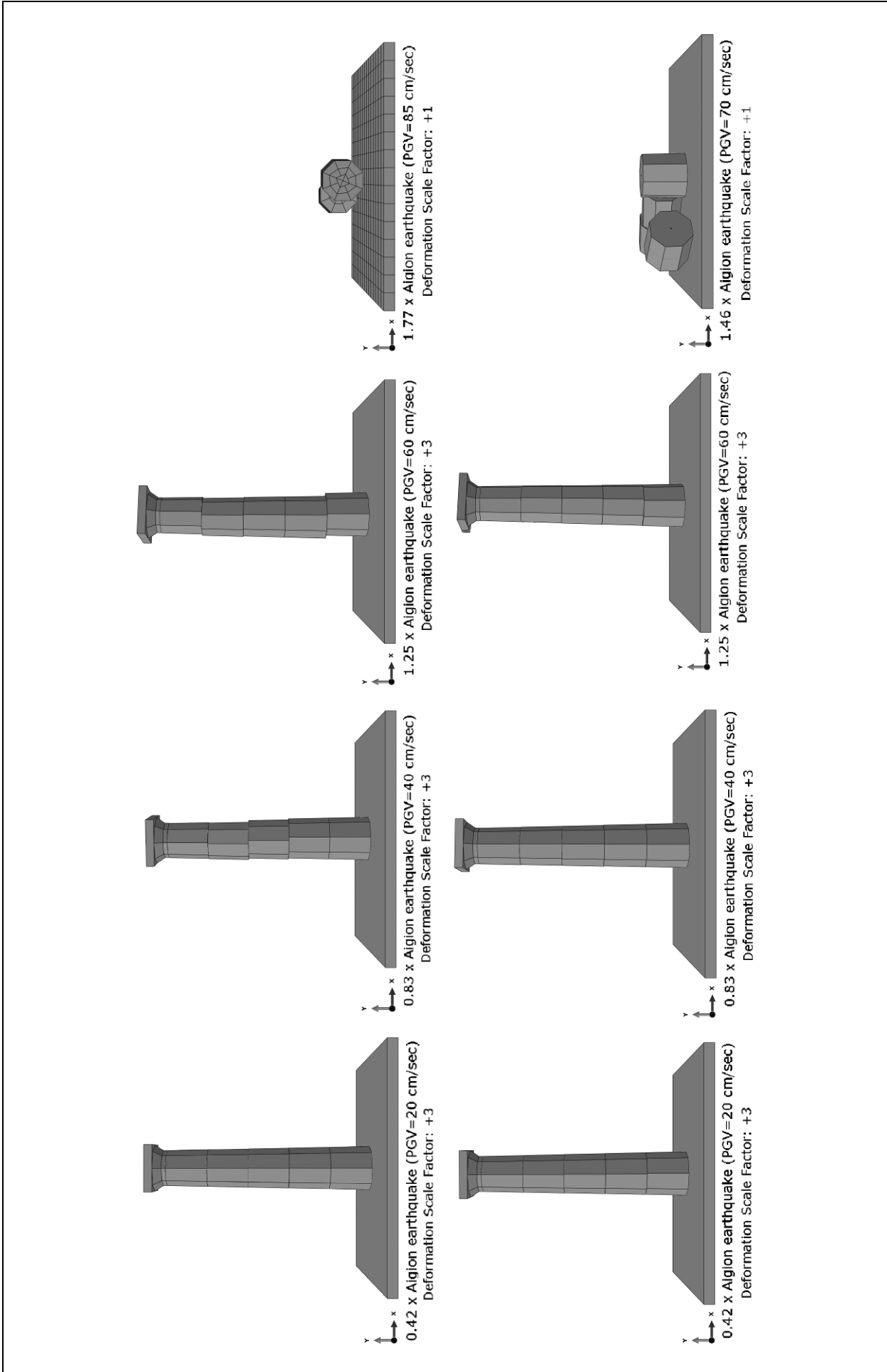
Σημειώνεται ότι στο (γενικό) προσομοίωμα του κίονα, το οποίο δεν διέθετε πólους και αντιστοιχούσε στο προσομοίωμα με τους σωληνωτούς πólους, προέκυψε κατάρρευση κίονα για σχετικώς μικρή σεισμική διέγερση. Όπως όμως φαίνεται και στην Εικόνα 6.9 (άνω δεξιά), η κατάρρευση αυτή προήλθε από υπολογιστική αδυναμία της προσομοίωσης (διείσδυση σπονδύλου στον υποκείμενο σπόνδυλο) και ως εκ τούτου δεν μπορεί να θεωρηθεί ως αξιόπιστη αριθμητική πρόβλεψη. Παρόμοιες καταρρεύσεις παρατηρήθηκαν και για φόρτιση του εν λόγω προσομοιώματος με ισχυρότερες διεγέρσεις. Για αυτό κρίθηκε σκόπιμο να μην περιληφθούν στο Διάγραμμα 6.2 αριθμητικά αποτελέσματα για το προσομοίωμα αυτό, πέραν της φόρτισής του με διέγερση της οποίας η μέγιστη εδαφική ταχύτητα είναι ίση με 60 cm/sec.



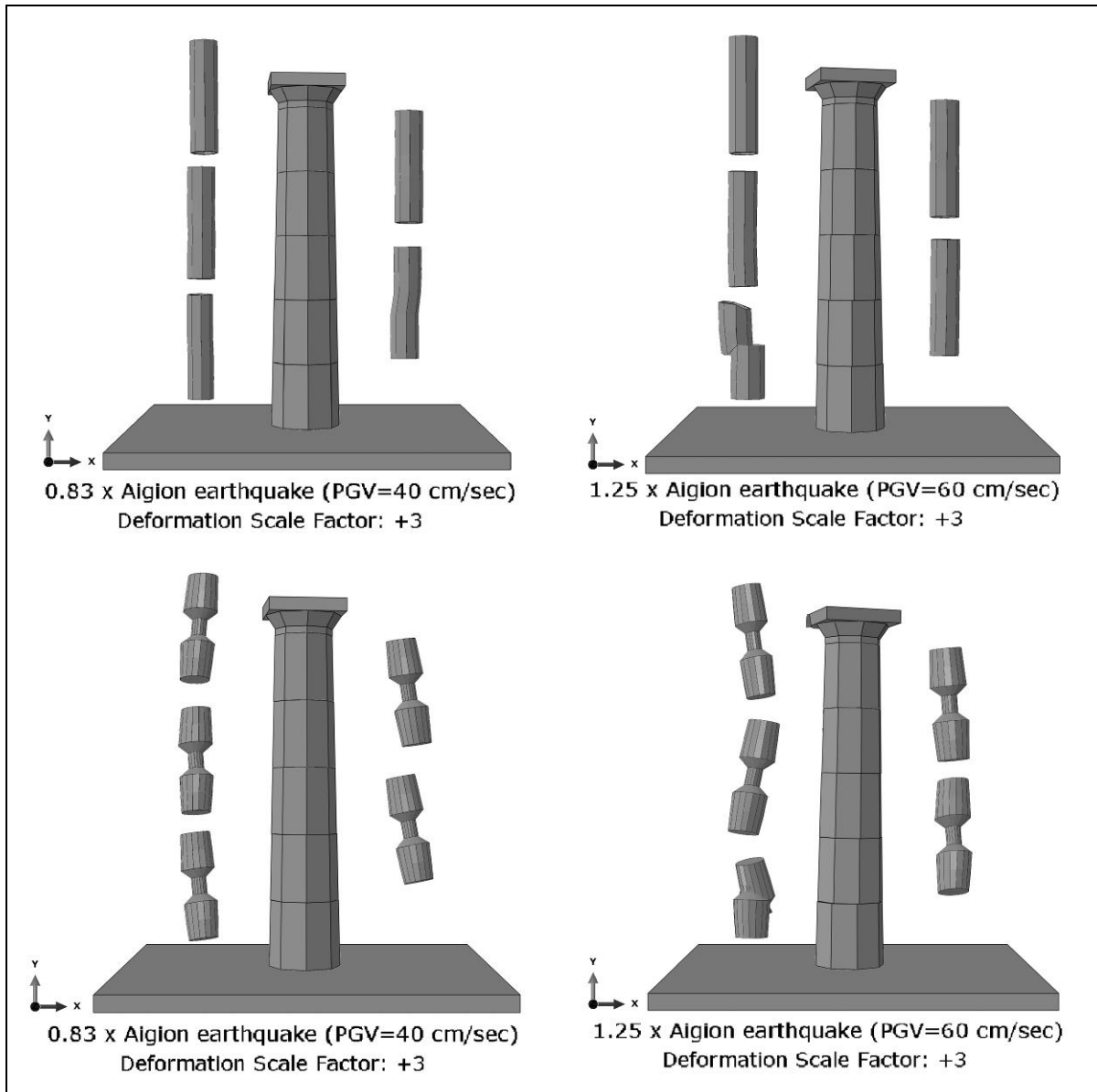
Διάγρ. 6.2: Συγκρίσεις αριθμητικών προβλέψεων για το προσομοίωμα αρχαίου κίονα τυπικών διαστάσεων, με και χωρίς πólους (σωληνωτούς ή κολουροκωνικούς) στις διεπιφάνειες των μελών του.



Εικ. 6.9: Οι παραμορφωμένες στάσεις των προσομοιωμάτων του κίονα με και χωρίς σαλινωτούς πόλους στις διεπιφάνειές του. Οι παραμορφώσεις των μελών του κίονα παρουσιάζονται σε έξαρση (τριπλάσιες των αντίστοιχων προβλέψεων), εξαιρουμένων αυτών που δείχνουν κατάρρευση κίονα.



Εικ. 6.10: Οι παραμορφωμένες στάσεις των προσομοιωμάτων του κίονα με και χωρίς κολουροκωνικούς πόλους στις διεπιφάνειές του. Οι παραμορφώσεις των μελών του κίονα παρουσιάζονται σε έξαρση (τριπλάσιες των αντίστοιχων προβλέψεων), εξαιρουμένων αυτών που δεικνύουν κατάρρευση κίονα.



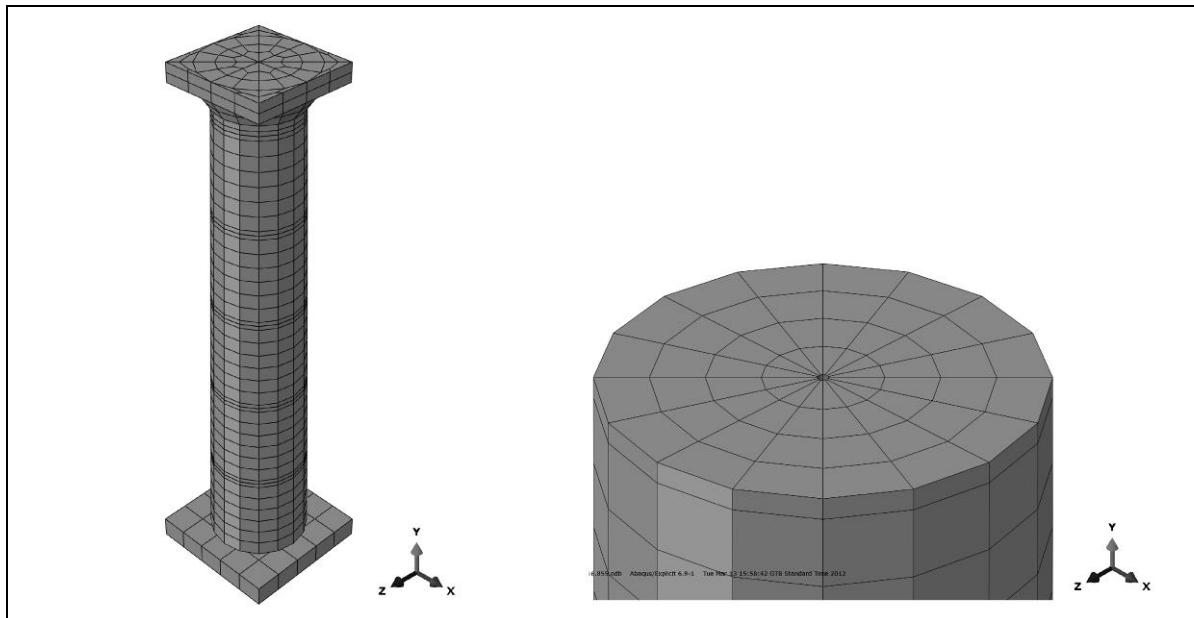
Εικ. 6.11: Οι παραμορφωμένες στάσεις των προσομοιωμάτων του κίονα με σωληνωτούς (άνω) και κολουροκωνικούς πόλους, καθώς και οι παραμορφώσεις των πόλων, για δύο επίπεδα σεισμικής διέγερσης του κίονα. Οι παραμορφώσεις των μελών του κίονα και των πόλων παρουσιάζονται σε έξαρση (τριπλάσιες των αντίστοιχων αριθμητικών προβλέψεων).

6.3.3 Διερεύνηση της επιρροής της πυκνότητας του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων στις αριθμητικές προβλέψεις

Απλή αντιπαραβολή των αριθμητικών προβλέψεων για την σεισμική ευστάθεια των κίωνων του ναού του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών, που παρατέθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (παρ. 5.4.3 και 5.5.2), με αυτές για τον κίονα με τις τυπικές διαστάσεις των κίωνων του μνημείου των Βασσών, που παρουσιάστηκαν παραπάνω,

αναδεικνύει σημαντικές αποκλίσεις. Βεβαίως, η διακριτοποίηση των προσομοιωμάτων των κίωνων στις δύο εν λόγω ξεχωριστές αριθμητικές διερευνήσεις είναι πολύ διαφορετικές. Στην δεύτερη περίπτωση, μάλιστα, υπάρχει αξιοσημείωτη ανομοιογένεια στο μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων του αριθμητικού προσομοιώματος, κάτι που συνήθως θέτει εν αμφιβόλω την αξιοπιστία των αριθμητικών αποτελεσμάτων.

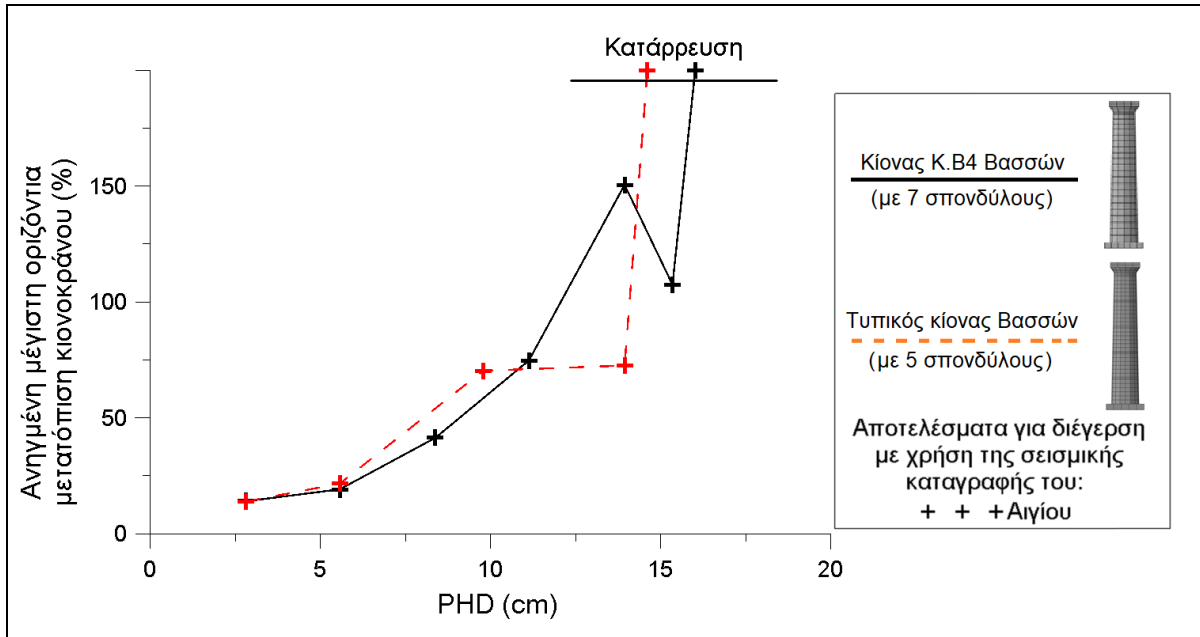
Για να διαπιστωθεί εάν πράγματι το δίκτυο ΠΣ του μοντέλου ήταν αυτό που οδήγησε σε προβλέψεις μικρότερης (έναντι των σχετικών προηγούμενων) σεισμικής ευστάθειας για τον κίονα, στις αναλύσεις που έγιναν για την εκτίμηση της επιρροής των πόλων, επαναλήφθηκαν οι αριθμητικές επιλύσεις για το προσομοίωμα χωρίς τους κολουροκωνικούς πόλους, τη δεύτερη φορά με πολύ πυκνό δίκτυο ΠΣ σε όλο το ύψος του κορμού του κίονα¹⁸⁹. Ευνόητο είναι ότι ο στόχος ήταν να εξαλειφθούν οι περιοχές του προσομοιώματος στις οποίες τα πεπερασμένα στοιχεία παρουσίαζαν μεγάλες διαφορές στα μεγέθη τους (Εικ. 6.12). Τα κύρια αποτελέσματα σχετικά με τις μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις της κορυφής του κίονα, ανηγμένες ως προς την ημιδιάμετρο της κάτω έδρας του, παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 6.3. Στο ίδιο Διάγραμμα περιλαμβάνονται και οι αντίστοιχες αριθμητικές προβλέψεις για τον κίονα Κ.Β4 του μνημείου των Βασσών, όπως προέκυψαν από το (Β') προσομοίωμά του με το πυκνό δίκτυο ΠΣ¹⁹⁰. Είναι φανερό ότι οι προβλέψεις είναι πολύ παρόμοιες.



Εικ. 6.12: Το προσομοίωμα του κίονα χωρίς τους κολουροκωνικούς πόλους με το πυκνό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων. Γενική άποψη (αριστερά) και λεπτομέρεια άνω έδρας σπονδύλου.

¹⁸⁹ Ταυτόχρονα έγινε προσπάθεια να επαναληφθούν και οι αριθμητικές προσομοιώσεις που αφορούσαν το προσομοίωμα που περιλάμβανε και τους κολουροκωνικούς πόλους, χωρίς αποτέλεσμα. Αυτό συνέβη, πιθανότατα, διότι το εξαιρετικά μεγάλο πλήθος ΠΣ του προσομοιώματος απαιτούσε υπολογιστική ικανότητα μεγαλύτερη από αυτή που διέθετε ο Η/Υ του γράφοντα.

¹⁹⁰ Βλέπε και Διάγραμμα 5.7.



Διάγρ. 6.3: Συγκρίσεις αριθμητικών προβλέψεων για το προσομοίωμα αρχαίου κίονα τυπικών διαστάσεων, χωρίς κολουροκωνικούς πόλους αλλά με πολύ πυκνό δίκτυο ΠΣ, και για το προσομοίωμα του κίονα Κ.Β4 του μνημείου των Βασσών με το πυκνό δίκτυο ΠΣ (Προσομοίωμα Β').

Προκύπτει, επομένως, από τα παραπάνω ότι από την αριθμητική διερεύνηση της επιρροής των νέων πόλων από τιτάνιο στην σεισμική συμπεριφορά των αρχαίων κίωνων δεν δύναται να εξαχθούν συμπεράσματα ποσοτικού χαρακτήρα αρκούντως αξιόπιστα.

Όμως, επιμέρους αποτελέσματα της διερεύνησης δύναται να φανούν χρήσιμα ως εξής. Αφενός, μέσω της μεταξύ τους σύγκρισης των αριθμητικών προβλέψεων για την σεισμική απόκριση του κίονα με και χωρίς πόλους στις διεπιφάνειες των μελών του, είναι δυνατόν να εξαχθούν ποιοτικά συμπεράσματα για την επιρροή των πόλων. Αφετέρου, βάσει των σχετικών αριθμητικών προβλέψεων δύναται να εκτιμηθούν αδρομερώς τα επίπεδα σεισμικής φόρτισης που οδηγούν σε αστοχία τους πόλους. Σχετικά σχόλια παρατίθενται στην παράγραφο που ακολουθεί.

6.4 Συμπερασματικά σχόλια

Από τις αριθμητικές προσομοιώσεις που αφορούσαν ένα μέσου μεγέθους και τυπικών διαστάσεων αρχαίο δωρικό κίονα υπό σεισμικές διεγέρσεις έως και ισχυρής έντασης (με μέγιστη εδαφική ταχύτητα έως 60 με 80 cm/sec), με και χωρίς πόλους από τιτάνιο δύο τύπων (σωληνωτών και κολουροκωνικών) στις διεπιφάνειές του, διαφάνηκαν τα εξής:

1. Η εγκατάσταση νέων πόλων από τιτάνιο στον κίονα δεν μεταβάλλει τα βασικά χαρακτηριστικά της λικνιστικής απόκρισής του.
2. Πάντως, η τοποθέτηση των νέων πόλων φαίνεται ότι επιφέρει μείωση, σχετικώς μικρή, στην σεισμική ευστάθεια του κίονα.
3. Ταυτόχρονα, όμως, η ύπαρξη νέων πόλων στις διεπιφάνειες του κίονα, αν και δεν μειώνει το εύρος της λικνιστικής απόκρισης του κίονα, περιορίζει σημαντικά τις παραμένουσες σχετικές μετατοπίσεις των μελών του. Αυτή η πρόβλεψη είναι πολύ θετική, καθώς φαίνεται ότι οι πόλοι δεν επιτρέπουν την αθροιστική συσσώρευση παραμορφώσεων στον κίονα στις περιπτώσεις διαδοχικών μέτριας και ισχυρής έντασης σεισμικών διεγέρσεων του.
4. Για μικρού και μεσαίου μεγέθους σεισμικές διεγέρσεις (με μέγιστη εδαφική ταχύτητα περί τα 40 cm/sec) είναι πιθανό την μεγαλύτερη παραμόρφωση να εμφανίσει κάποιος από τους ενδιάμεσους πόλους (ο δεύτερος ή ο τρίτος από κάτω). Για μεγαλύτερης έντασης σεισμικές διεγέρσεις (με $pgv \geq 60$ cm/sec) επέρχεται θραύση του κατώτατου πόλου και σημαντική πλαστική παραμόρφωση (για $pgv \approx 60$ cm/sec) έως και θραύση (για $pgv \geq 80$ cm/sec) του δεύτερου από κάτω πόλου.
5. Με βάση τα παραπάνω και δεδομένου ότι στον ελλαδικό χώρο σεισμικές δονήσεις με εδαφική ταχύτητα μεγαλύτερη από 60 cm/sec είναι εξαιρετικά σπάνιες¹⁹¹, μπορεί να διατυπωθεί ότι η τοποθέτηση σωληνωτών ή κολουροκωνικών πόλων στις διεπιφάνειες αρχαίων κίωνων μέσου μεγέθους, στο πλαίσιο των έργων αποκατάστασης αρχαίων μνημείων που εκτελούνται στην Ελλάδα, εκτιμάται ως θετική, καθώς για τους αναμενόμενους σεισμούς φαίνεται ότι οδηγεί στον περιορισμό των παραμενουσών παραμορφώσεων των κίωνων, χωρίς αστοχία των πόλων.

¹⁹¹ Σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό, σεισμικές δονήσεις με εδαφική ταχύτητα της τάξης των 40 έως 60 cm/sec (που αντιστοιχούν σε εδαφική επιτάχυνση 0.50 έως 0.80 g), έχουν περίοδο επανάληψης 500 έτη.

7. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΑΡΧΑΙΩΝ ΚΙΟΝΟΣΤΟΙΧΙΩΝ

7.1 Τα αριθμητικά προσομοιώματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι παραμετρικές αριθμητικές επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για την διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης συστοιχιών αρχαίων κίωνων επί των οποίων εδράζονται ελεύθερα, και χωρίς μεταξύ τους συνδετήρια στοιχεία, λίθοι επιστυλίου. Πιο συγκεκριμένα, με την χρήση του λογισμικού Abaqus δημιουργήθηκαν πέντε, ξεχωριστά, προσομοιώματα αρχαίων κιονοστοιχιών, τρία που αφορούν τον ναό της Αθηνάς της Αλίφειρας και δύο τον ναό του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών (Εικ. 7.1). Τα προσομοιώματα αυτά διεγέρθηκαν, σε διαδοχικές αριθμητικές επιλύσεις, με κλιμακούμενη σεισμική ένταση, έως την κατάρρευση τουλάχιστον ενός κιονά τους.

Τα τέσσερα από τα πέντε προσομοιώματα αποτελούνταν από τρεις κίονες σε ευθυγραμμία, και από τρεις κίονες σε διάταξη ορθής γωνίας, μαζί με τους βατήρες τους και με τους υπερκείμενους λίθους επιστυλίου τους (τέσσερεις λίθους για κάθε ομοίωμα, ανά δύο σε κάθε μεταξόνια απόσταση). Έτσι προσομοιώνονταν δύο βορινά και δύο βορειοδυτικά τμήματα των περιστυλίων των προαναφερθέντων αρχαίων ναών. Το πέμπτο υπολογιστικό ομοίωμα προσομοίωνε το όλον του περιστυλίου του ναού της Αθηνάς, και άρα αποτελείτο από τριάντα οκτώ κίονες, τους βατήρες τους, και εβδομήντα έξι λίθους επιστυλίου. Οι μορφές των προσομοιωμάτων (και η κωδική ονομασία των κίωνων) παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.1.

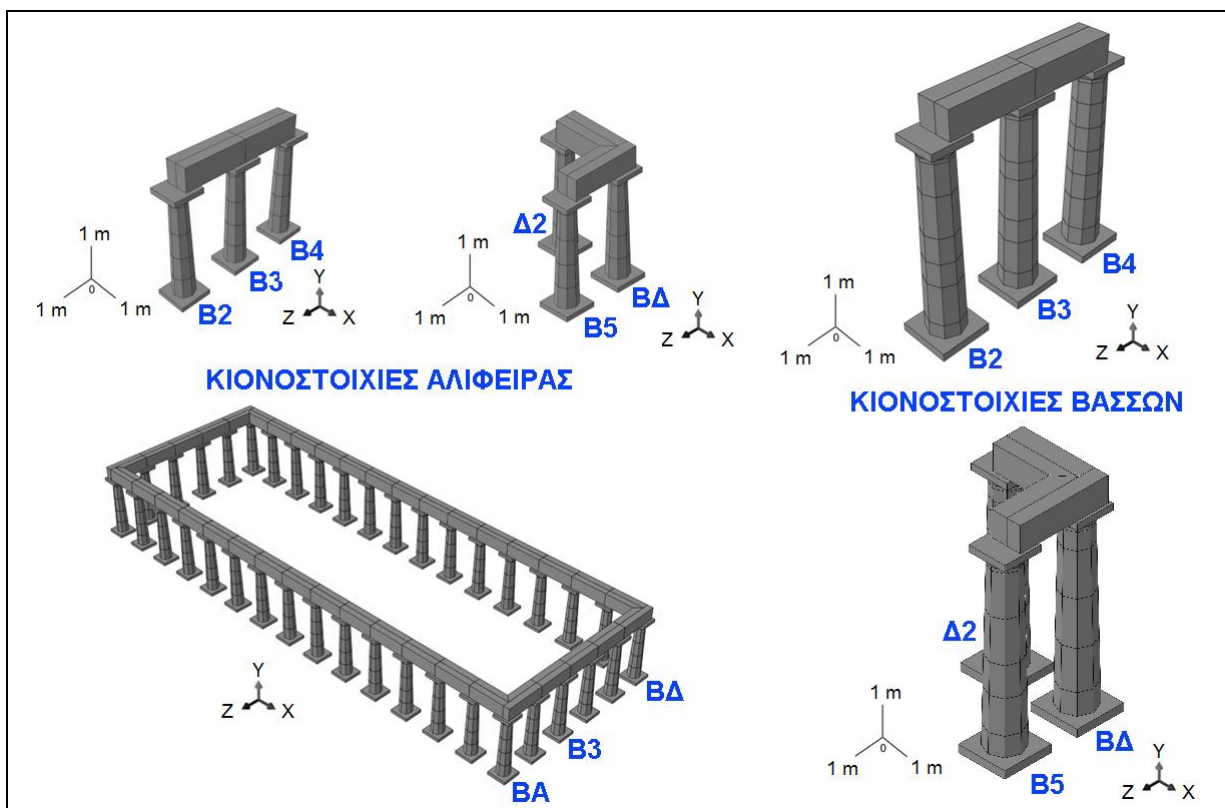
Δημιουργήθηκαν, επίσης, άλλα τέσσερα προσομοιώματα, καθένα από τα οποία αντιστοιχούσε σε ένα από τα προσομοιώματα με τις τρικιόνιες συστοιχίες. Τα επιπλέον προσομοιώματα διέφεραν από τα αντίστοιχά τους μόνον στο ότι δεν περιλάμβαναν επιστύλια.

Όλα τα προσομοιώματα μορφώθηκαν με βάση τις εξωτερικές διαστάσεις των πραγματικών αρχιτεκτονικών μελών και τις μεταξύ των μελών αποστάσεις στην αρχική, μη παραμορφωμένη κατάσταση των αρχαίων κτηρίων, όπως αυτές (διαστάσεις και αποστάσεις) έχουν μετρηθεί ή/και εκτιμηθεί από μελετητές των μνημείων¹⁹². Αυτά τα μετρικά στοιχεία παρουσιάζονται στους Πίνακες 7.1 έως και 7.3.

¹⁹² Ορλάνδος 1967-68, Σβολόπουλος 1995, για το ναό της Αθηνάς και το ναό του Απόλλωνα, αντίστοιχα.

Σημειώνεται ότι σε όλες τις προσομοιώσεις κιονοστοιχιών, το υλικό κάθε λίθινου μέλους (βατήρων, σπονδύλων, κιονοκράνων, και λίθων επιστυλίου), ανεξαρτήτως του υπό εξέταση μνημείου, προσομοιώθηκε με την χρήση των ιδιοτήτων του μαρμάρου. Αυτό για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματά τους με αυτά των προσομοιώσεων για τους ελεύθερα ιστάμενους κίονες. Γενικά μπορεί να αναφερθεί ότι η μεθοδολογία και οι παράμετροι προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν για τις κιονοστοιχίες ήταν όμοιες με αυτές για τους μεμονωμένους κίονες¹⁹³.

Παρομοίως, για την σεισμική διέγερση των προσομοιωμάτων των κιονοστοιχιών χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες τέσσερις καταγραφές σεισμικών συμβάντων, καθώς και ο ίδιος τρόπος κλιμάκωσής τους, όπως στις διερευνήσεις που αφορούσαν τους ελεύθερα ιστάμενους κίονες¹⁹⁴. Μόνο που, όπως προαναφέρθηκε, στην περίπτωση των κιονοστοιχιών, κάθε σειρά επιλύσεων με κλιμακούμενη την εκάστοτε σεισμική διέγερση σταματούσε όταν οι προβλέψεις έδιναν κατάρρευση (εκτός από λίθους επιστυλίου και) ενός, κατ' ελάχιστον, κίονα, και όχι υποχρεωτικώς όλων.



Εικ. 7.1: Τα αριθμητικά προσομοιώματα των συστοιχιών κίωνων φερόντων λίθους επιστυλίου (βουτροφηδόν): Ευθύγραμμη τρικιόνια ναού Αλίφειρας, τρικιόνια υπό ορθή γωνία ναού Αλίφειρας, ευθύγραμμη τρικιόνια ναού Βασσών, τρικιόνια υπό ορθή γωνία ναού Βασσών, και περιστύλιο ναού Αλίφειρας.

¹⁹³ Βλέπε σχετικά παραγράφους 5.4.2 και 5.5.1.

¹⁹⁴ Βλέπε υποκεφάλαιο 5.3.

	Κίονες ναού Αθηνάς, Αλίφειρας		Κίονας Κ.Β2 μνημείου Βασσών		Κίονας Κ.Β3 μνημείου Βασσών		Κίονας Κ.Β4 μνημείου Βασσών		Κίονας Κ.Β5 μνημείου Βασσών		Κίονας Κ.ΒΔ μνημείου Βασσών		Κίονας Κ.Δ2 μνημείου Βασσών	
	Κάτω Διάμ. (m)	Ύψος (m)	Κάτω Διάμ. (m)	Ύψος (m)	Κάτω Διάμ. (m)	Ύψος (m)	Κάτω Διάμ. (m)	Ύψος (m)	Κάτω Διάμ. (m)	Ύψος (m)	Κάτω Διάμ. (m)	Ύψος (m)	Κάτω Διάμ. (m)	Ύψος (m)
1 ^{ος}	0.680	0.640	1.160	0.460	1.16	0.55	1.160	0.595	1.160	0.635	1.165	0.700	1.160	0.580
2 ^{ος}	0.641	0.720	1.140	1.315	1.14	1.085	1.135	1.080	1.135	1.105	1.137	1.300	1.136	0.590
3 ^{ος}	0.597	0.765	1.090	0.730	1.095	0.735	1.090	0.840	1.090	0.980	1.084	1.450	1.112	0.670
4 ^{ος}	0.551	0.800	1.060	0.800	1.065	1.300	1.060	0.785	1.050	1.360	1.025	1.420	1.085	0.610
5 ^{ος}	–	–	1.025	1.225	1.010	0.530	1.025	0.750	0.995	1.345	0.968	0.555	1.061	0.510
6 ^{ος}	–	–	0.975	0.895	0.99	1.225	0.995	0.745	–	–	–	–	1.040	0.550
7 ^{ος}	–	–	–	–	–	–	0.965	0.630	–	–	–	–	1.018	0.530
8 ^{ος}	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.996	0.630
9 ^{ος}	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.971	0.380
10 ^{ος}	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.955	0.375
Κιον.	0.502	0.440	0.940	0.545	0.940	0.545	0.940	0.545	0.940	0.545	0.940	0.545	0.940	0.545
(Αβ.)	(0.904 ² x 0.155)		(1.245 ² x 0.210)		(1.245 ² x 0.210)		(1.245 ² x 0.210)		(1.245 ² x 0.210)		(1.245 ² x 0.210)		(1.245 ² x 0.210)	
Βάση	1.000 ² x 0.150		1.600 ² x 0.250		1.600 ² x 0.250		1.600 ² x 0.250		1.600 ² x 0.250		1.600 ² x 0.250		1.600 ² x 0.250	

Πίν. 7.1: Οι διαστάσεις των μελών των προσομοιωμάτων των κίωνων του μνημείου της Αλίφειρας και των Βασσών.

	Διαστάσεις λίθων επιστυλίου (m)					
	Ύψος	Συνολικό πάχος	Μήκος ενδιάμεσων, βραχέων πλευρών	Μήκος ακραίων, βραχέων πλευρών	Μήκος ενδιάμεσων, μακρών πλευρών	Μήκος ακραίων, μακρών πλευρών
Ναός Αθηνάς, Αλίφειρας	0.680	0.672	2.006	2.220	2.050	2.265
Ναός Επικούριου Απόλλωνα	0.835	1.025	2.732	3.027	-	2.481

Πίν. 7.2: Οι διαστάσεις των προσομοιωμάτων των λίθων επιστυλίου του μνημείου της Αλίφειρας και των Βασσών.

	Μεταξόνιες αποστάσεις (m)			
	Τυπική βραχέων πλευρών	Ακραία βραχέων πλευρών	Τυπική μακρών πλευρών	Ακραία μακρών πλευρών
Ναός Αθηνάς, Αλίφειρας	2.006	1.880	2.050	1.945
Ναός Επικούριου Απόλλωνα	2.732	2.490	-	2.411

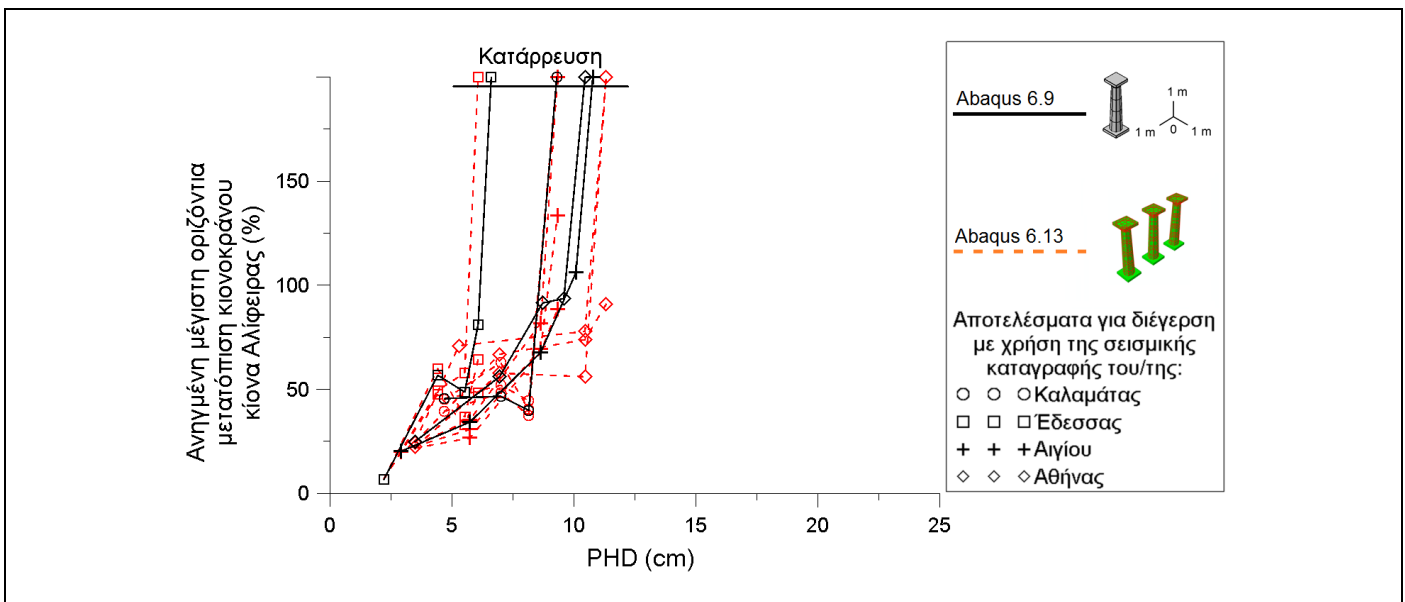
Πίν. 7.3: Αξονικές αποστάσεις κίωνων (και) με βάση τις οποίες μορφώθηκαν τα προσομοιώματα των κιονοστοιχιών.

7.2 Αριθμητικά αποτελέσματα

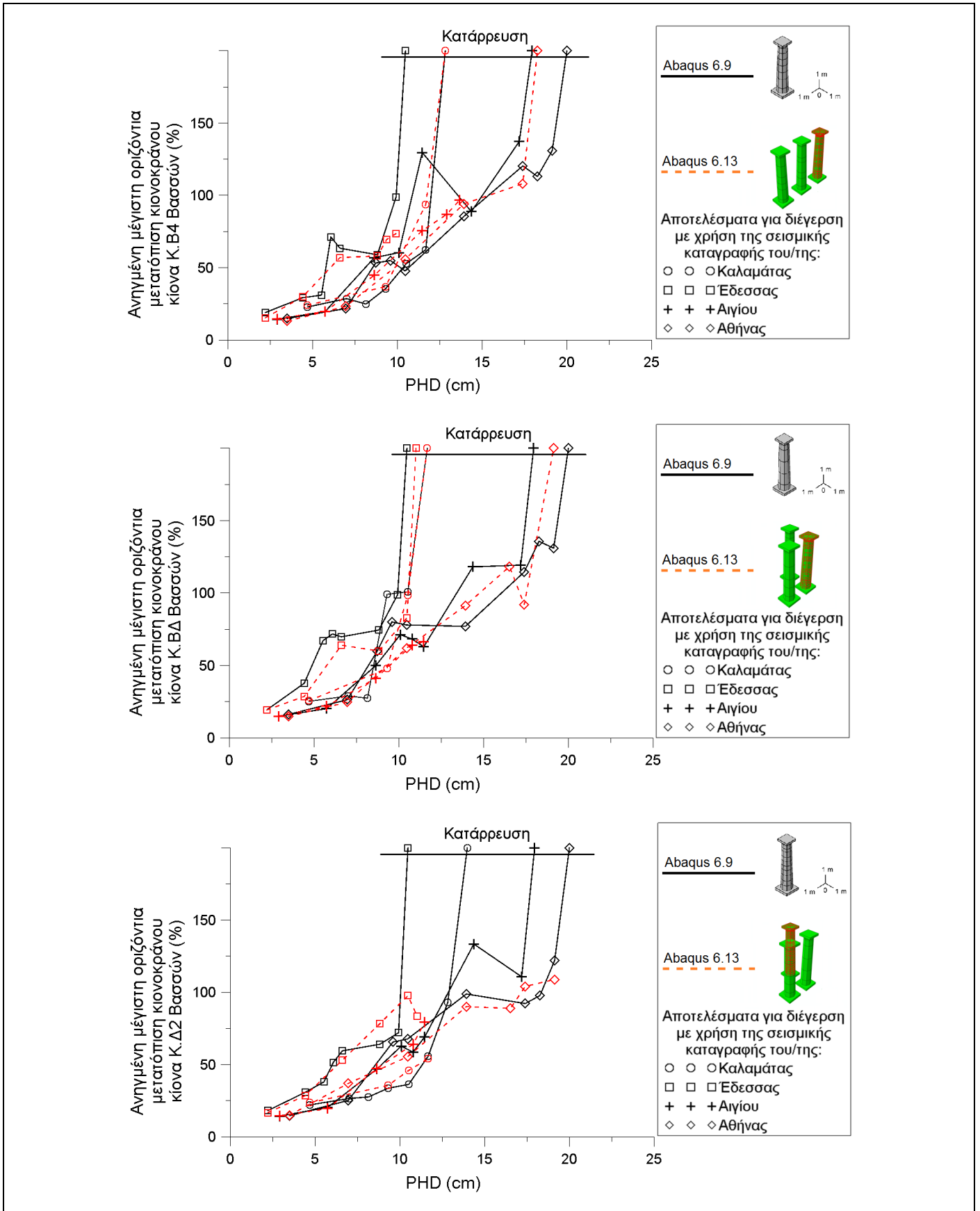
7.2.1 Έλεγχος της συγκρισιμότητας προβλέψεων διαφορετικών εκδόσεων του ABAQUS

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις που αφορούν στις κιονοστοιχίες πραγματοποιήθηκαν σε συνέχεια αυτών για τους μεμονωμένους κίονες. Λόγω της χρονικής διαφοράς μεταξύ των δύο ομάδων προσομοιώσεων, αυτές που αφορούν τις κιονοστοιχίες πραγματοποιήθηκαν σε νεότερο ηλεκτρονικό υπολογιστή και με την χρήση πιο σύγχρονης έκδοσης του λογισμικού Abaqus, αυτής με κωδική ονομασία 6.13 (αντί της 6.9).

Σημειώνεται ότι σε ό,τι αφορά τα επιμέρους προσομοιώματα των φυσικών παραμέτρων που είναι απαραίτητα για την μελέτη της σεισμικής απόκρισης κίωνων και κιονοστοιχιών (υλικά, συμπεριφορά διεπιφανειών κ.λπ.), δεν διαφέρουν οι δύο εκδόσεις του λογισμικού Abaqus που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Παρά ταύτα, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει σύγκριση αποτελεσμάτων που αφορούν ελευθέρως ιστάμενους κίονες, όπως αυτά προέκυψαν από την χρήση των δύο εκδόσεων του λογισμικού. Οι συγκρίσεις αυτές παρατίθενται στα Διαγράμματα 7.1 και 7.2, και, όπως αναμενόταν, δεν αναδεικνύουν ουσιώδεις διαφορές στις αντίστοιχες αριθμητικές προβλέψεις.



Διάγρ. 7.1: Σύγκριση αριθμητικών προβλέψεων που αφορούν την σεισμική απόκριση ελευθέρως ιστάμενου κίονα του περιστυλίου του ναού της Αθηνάς στην Αλίφειρα, όπως αυτές προέκυψαν από προσομοιώσεις με την χρήση δύο διαφορετικών εκδόσεων του λογισμικού Abaqus.



Διαγρ. 7.2: Σύγκριση αριθμητικών προβλέψεων που αφορούν την σεισμική απόκριση ελεύθερα ιστάμενων κίωνων του περιστυλίου του ναού του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών, όπως αυτές προέκυψαν από προσομοιώσεις με την χρήση δύο διαφορετικών εκδόσεων του λογισμικού Abaqus.

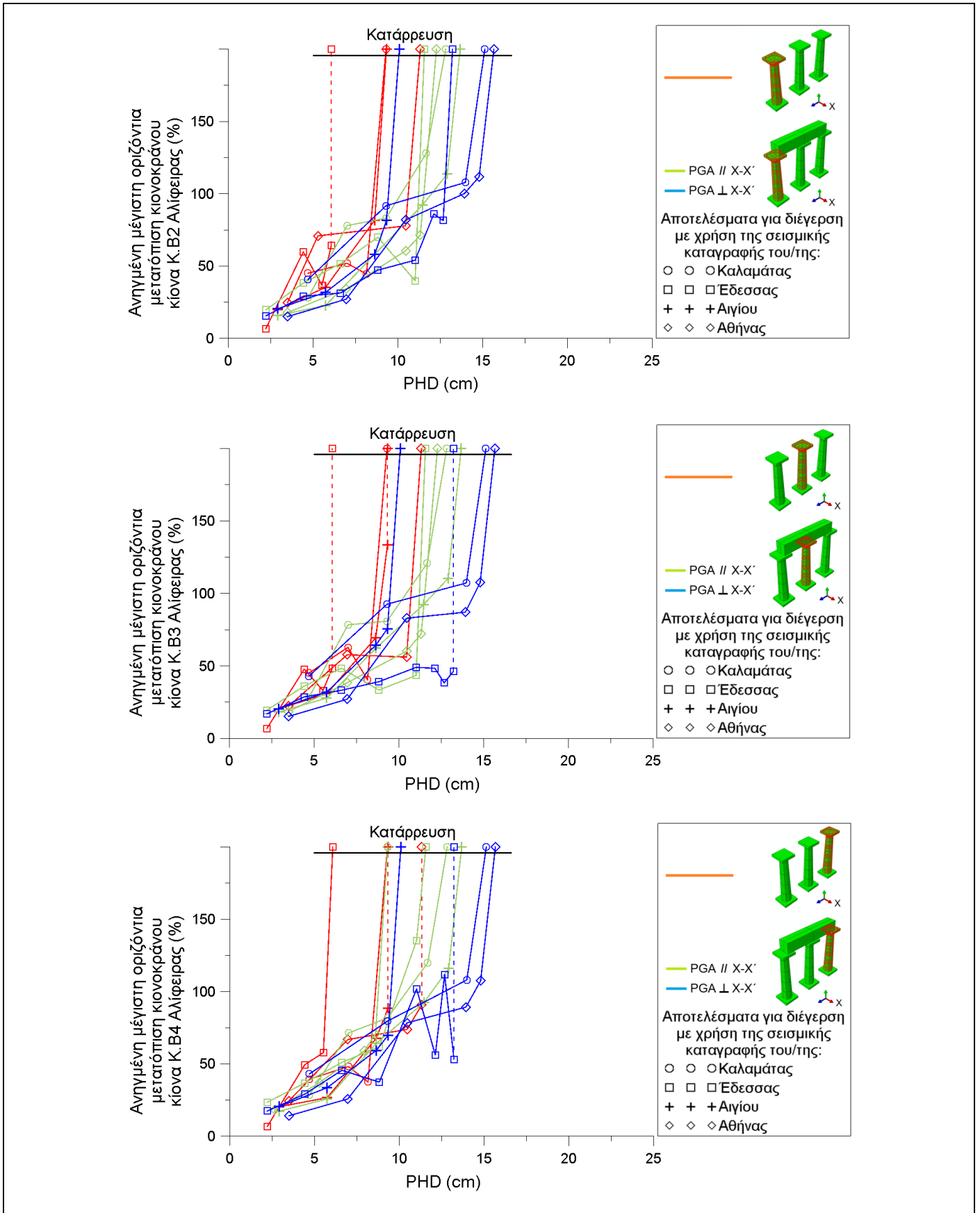
7.2.2 Προβλέψεις για κιονοστοιχίες

Για την συνοπτική παρουσίαση των αριθμητικών προβλέψεων της σεισμικής απόκρισης των υπό εξέταση αρχαίων κιονοστοιχιών, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν (όπως και στο κεφ. 5) τα αποτελέσματα για τις μέγιστες μετατοπίσεις της κορυφής των κίωνων, όπως αυτές προέκυψαν για κάθε ένα επίπεδο σεισμικής διέγερσης που εφαρμόστηκε στα προσομοιώματα. Για να είναι, μάλιστα, ευκόλως συγκρίσιμα μεταξύ τους τα εν λόγω αποτελέσματα (καθώς αφορούν κίνες διαφορετικών μεγεθών), παρουσιάζονται ανηγμένα ως προς την ημιδιάμετρο της κάτω έδρας κάθε κίονα. Παρατίθενται δε σε διαγράμματα συσχετισμένα με τις μέγιστες στο οριζόντιο επίπεδο των υπό διέγερση βαθύρων των κίωνων, δηλαδή, με τα εκάστοτε PHD των αντίστοιχων κλιμακούμενων σεισμικών καταγραφών.

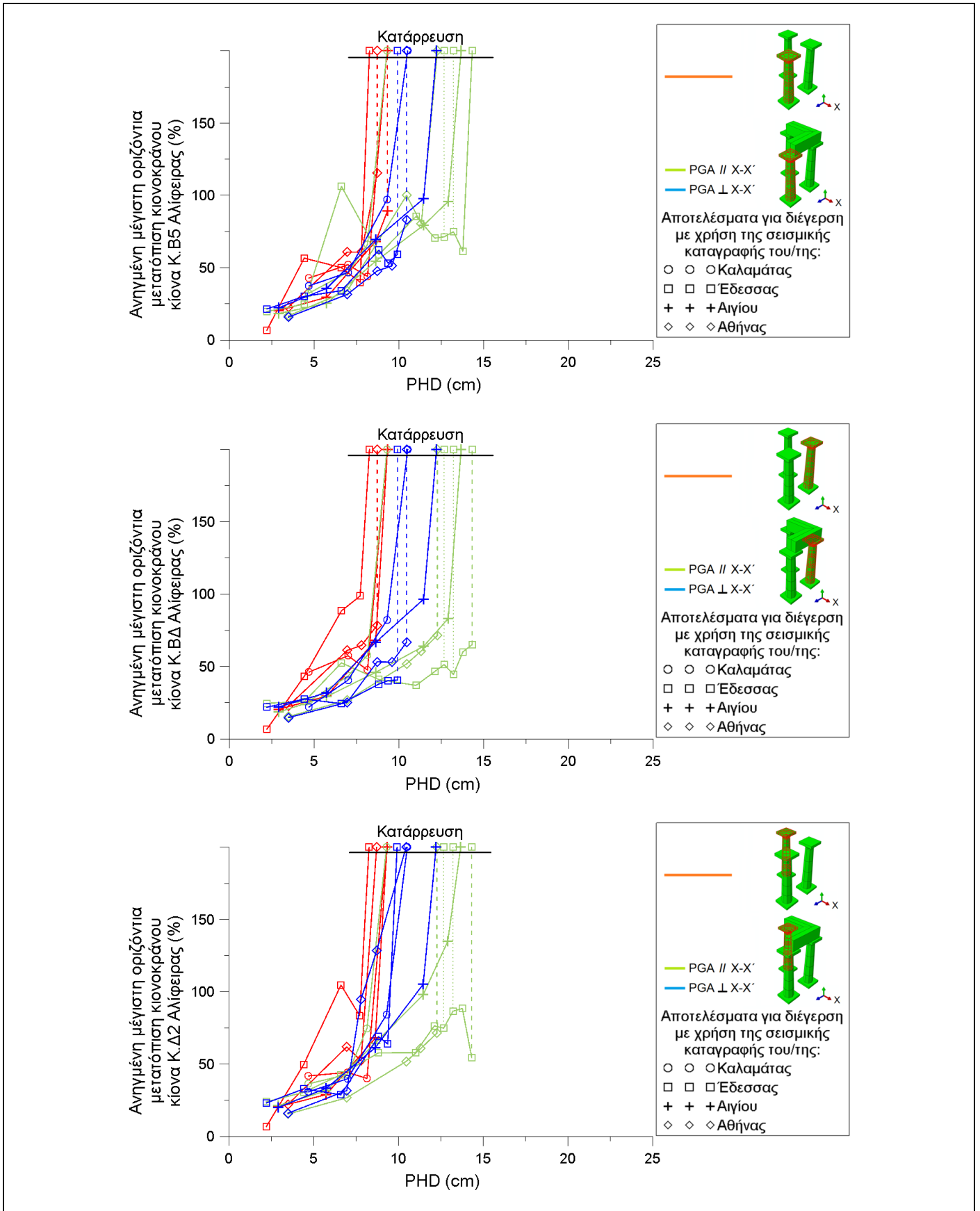
Πιο συγκεκριμένα, στα Διαγράμματα 7.3 έως και 7.7 παρουσιάζεται η επιρροή των (επί των κίωνων) λίθων επιστυλίου στην σεισμική απόκριση των κίωνων. Επίσης, σε αυτά τα διαγράμματα φαίνεται για κάθε μία διάταξη συστοιχίας κίωνων, εάν κάποια από τις δύο κύριες διευθύνσεις της είναι ισχυρότερη έναντι σεισμικών δράσεων. Στα Διαγράμματα 7.8 παρουσιάζεται η επιρροή της γεωμετρίας της κιονοστοιχίας στην σεισμική συμπεριφορά τους. Σημειώνεται ότι στα εν λόγω διαγράμματα παρουσιάζονται επίσης και οι προβλέψεις του λογισμικού για πτώση λίθου/ων επιστυλίου και για κατάρρευση γειτονικού/ών κίονα/ων με στικτές και διακεκομμένες γραμμές, αντίστοιχα.

Στα Διαγράμματα 7.8 έως και 7.10 παρουσιάζεται με συνοπτικό τρόπο το σύνολο των προβλέψεων που αφορούν τα κατώτατα όρια σεισμικής έντασης που προκαλεί κατάρρευση στους ελεύθερα ιστάμενους κίνες και στις κιονοστοιχίες του ναού της Αθηνάς της Αλίφειρας και του ναού του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών (εξαιρουμένων μόνο των προβλέψεων για το περιστύλιο του ναού της Αθηνάς). Οι προαναφερθείσες προβλέψεις είναι συσχετισμένες με τις δεσπόζουσες περιόδους των διεγέρσεων (T_g), και τα βασικά χαρακτηριστικά των κίωνων (ραδινότητα, H/d , «ιδιοσυχνότητα», p , και μέγεθος, R), κατ' αναλογίαν με τα Διαγράμματα 5.21-5.23. Σημειώνεται ότι στα διαγράμματα αυτά φαίνονται και πάλι οι συγκρίσεις των προβλέψεων των δύο διαφορετικών εκδόσεων του λογισμικού για τους μεμονωμένους κίνες. Επίσης, είναι εμφανής και η επιρροή της ύπαρξης επιστυλίων επί των κίωνων στην σεισμική ευστάθεια των κίωνων.

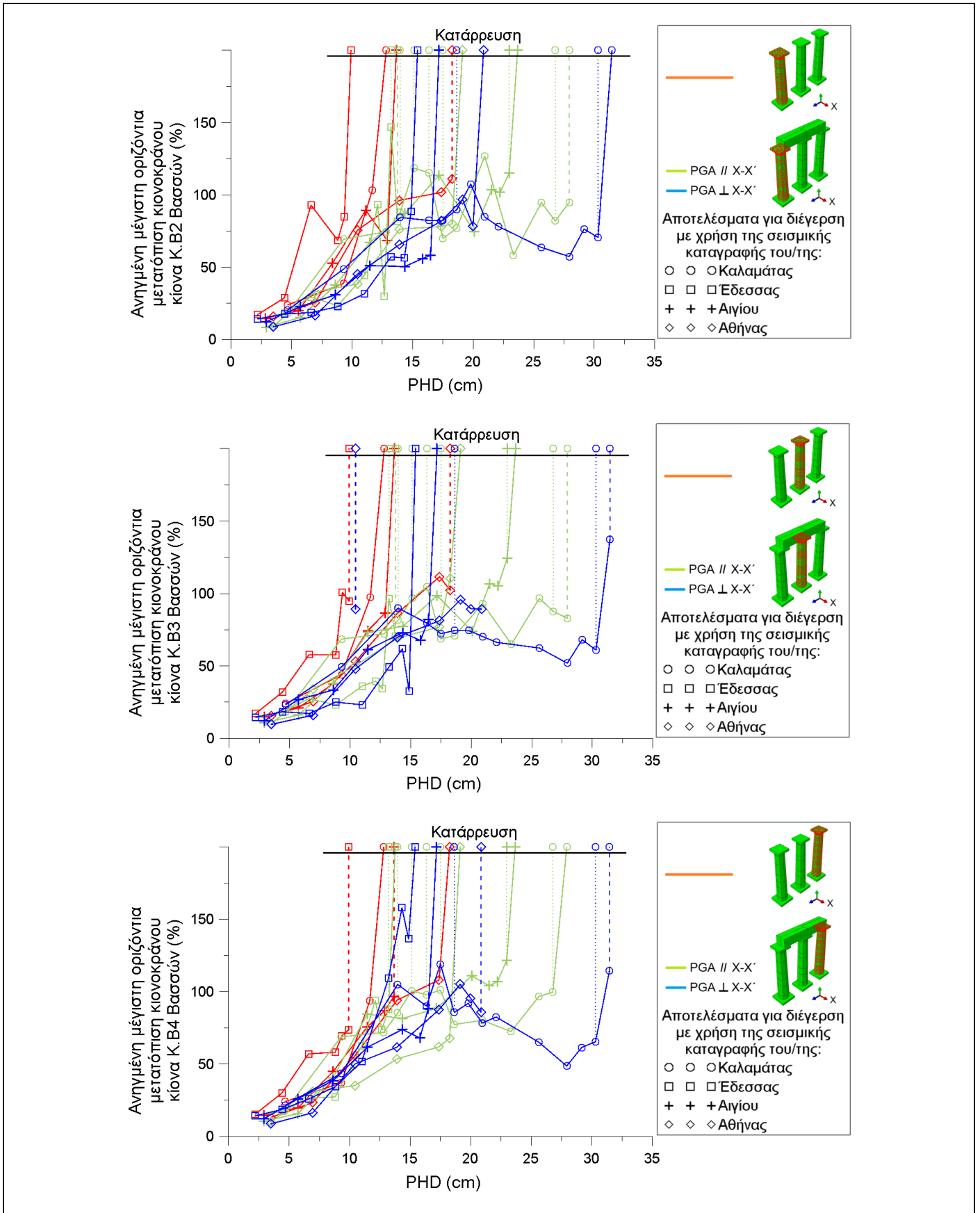
Τέλος, στην Εικόνα 7.2 παρουσιάζονται διάφορα στιγμιότυπα κατάρρευσης του πιο εκτεταμένου ομοιώματος κιονοστοιχίας, δηλαδή αυτού του περιστυλίου του ναού της Αθηνάς.



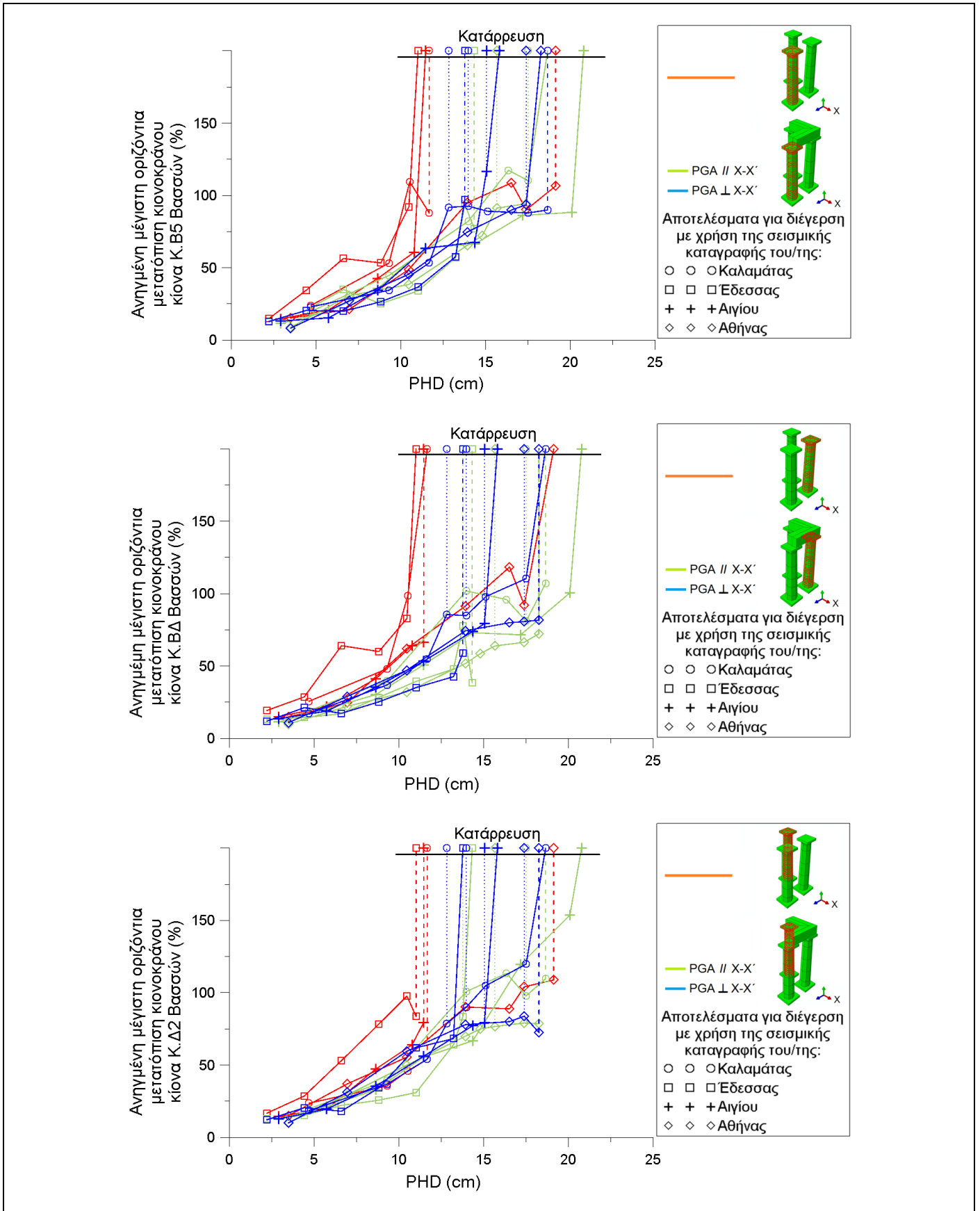
Διαγρ. 7.3: Συγκρίσεις αποτελεσμάτων που αφορούν τα προσομοιώματα της τρικιόνιας ευθύγραμμης συστοιχίας του ναού της Αθηνάς, με και χωρίς λίθους επιστυλίου. Οι διακεκομμένες γραμμές επισημαίνουν ανατροπή γειτονικού/ών κίονα/ων.



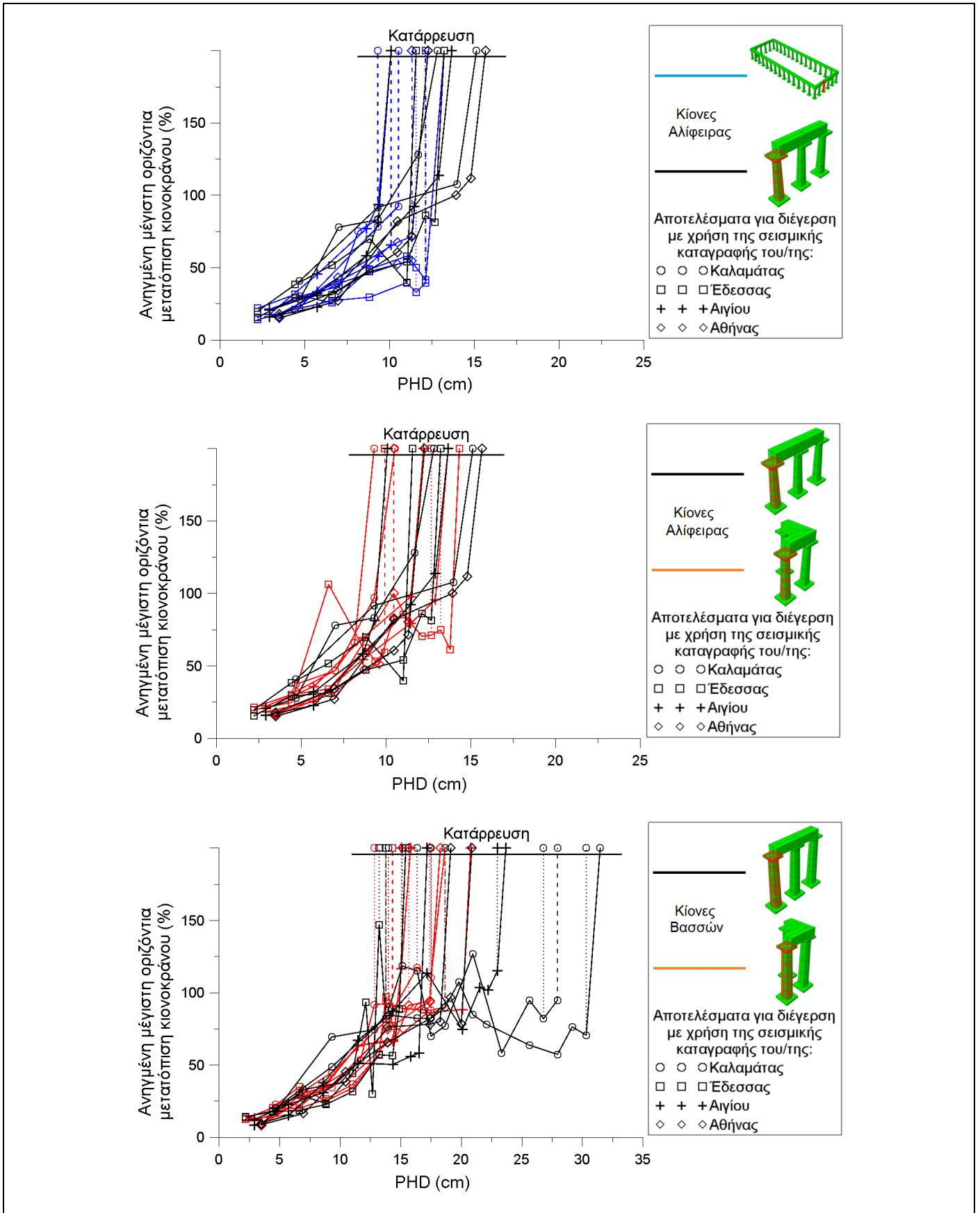
Διαγρ. 7.4: Συγκρίσεις αποτελεσμάτων που αφορούν τα προσομοιώματα της τρικίονιας υπό ορθή γωνία συστοιχίας του ναού της Αλιφειρας, με και χωρίς λίθους επιστυλίου. Οι στικτές γραμμές επισημαίνουν κατάρρευση λίθου/ων επιστυλίου ενώ οι διακεκομμένες ανατροπή γειτονικού/ών κίονα/ων.



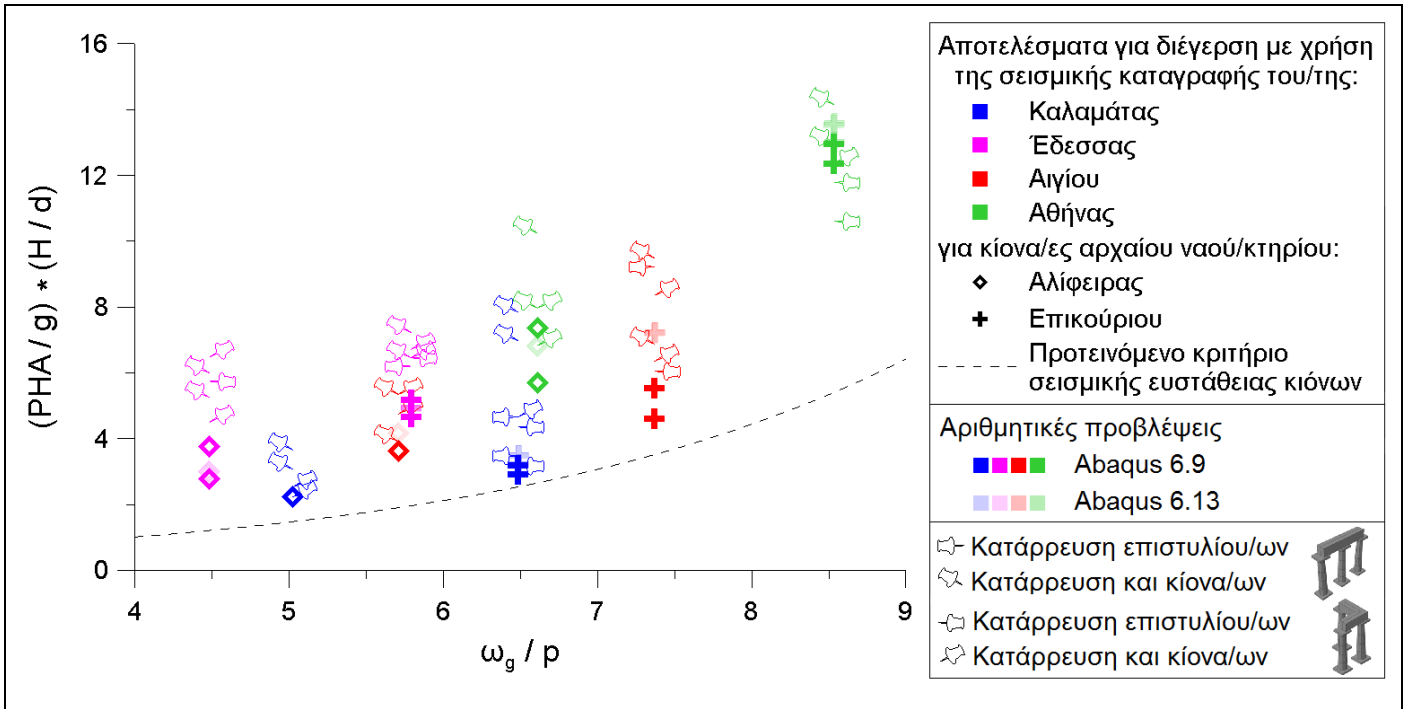
Διαγρ. 7.5: Συγκρίσεις αποτελεσμάτων που αφορούν τα προσομοιώματα της τρικίονιας ευθύγραμμης συστοιχίας του ναού των Βασσών, με και χωρίς λίθους επιστυλίου. Οι στικτές γραμμές επισημαίνουν κατάρρευση λίθου/ων επιστυλίου ενώ οι διακεκομμένες ανατροπή γειτονικού/ών κίονα/ων.



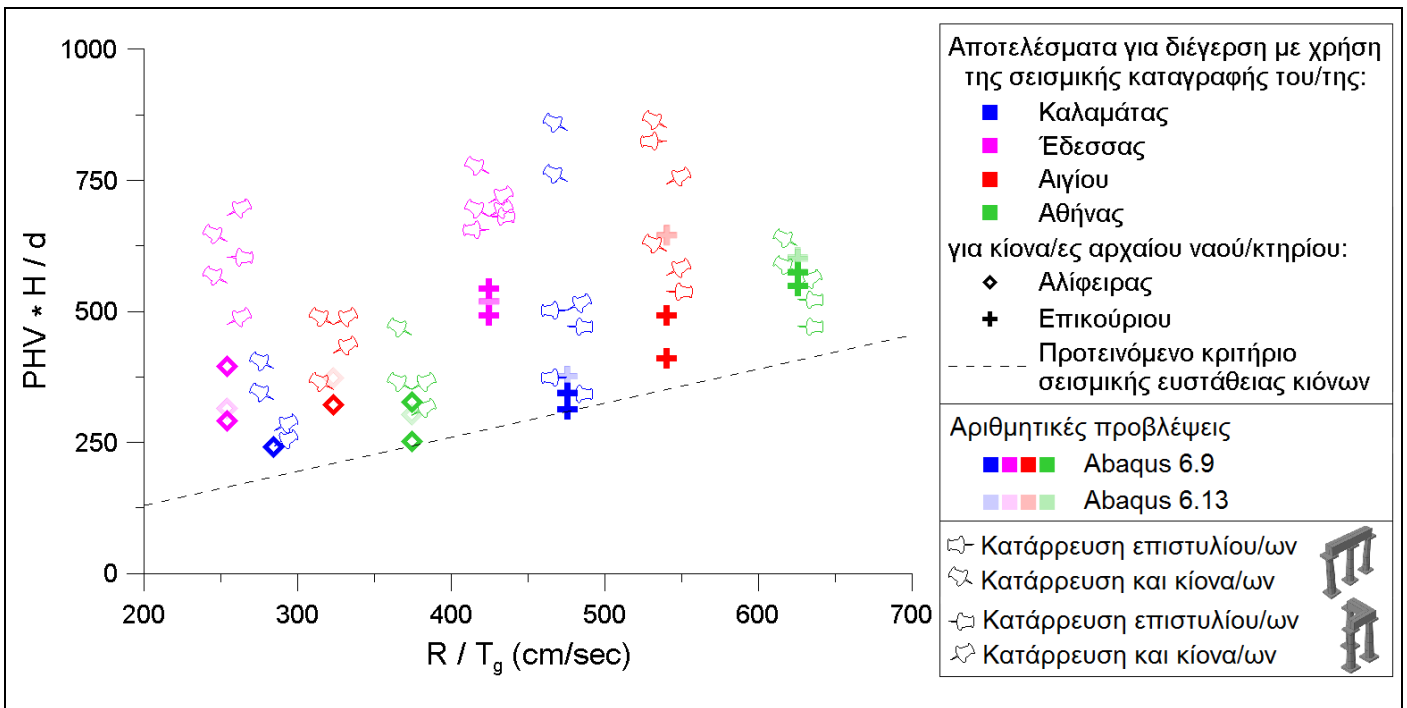
Διαγρ. 7.6: Συγκρίσεις αποτελεσμάτων που αφορούν τα προσομοιώματα της τρικιόνιας υπό ορθή γωνία συστοιχίας του ναού των Βασσών, με και χωρίς λίθους επιστυλίου. Οι στικτές γραμμές επισημαίνουν κατάρρευση λίθου/ων επιστυλίου ενώ οι διακεκομμένες ανατροπή γειτονικού/ών κίονα/ων.



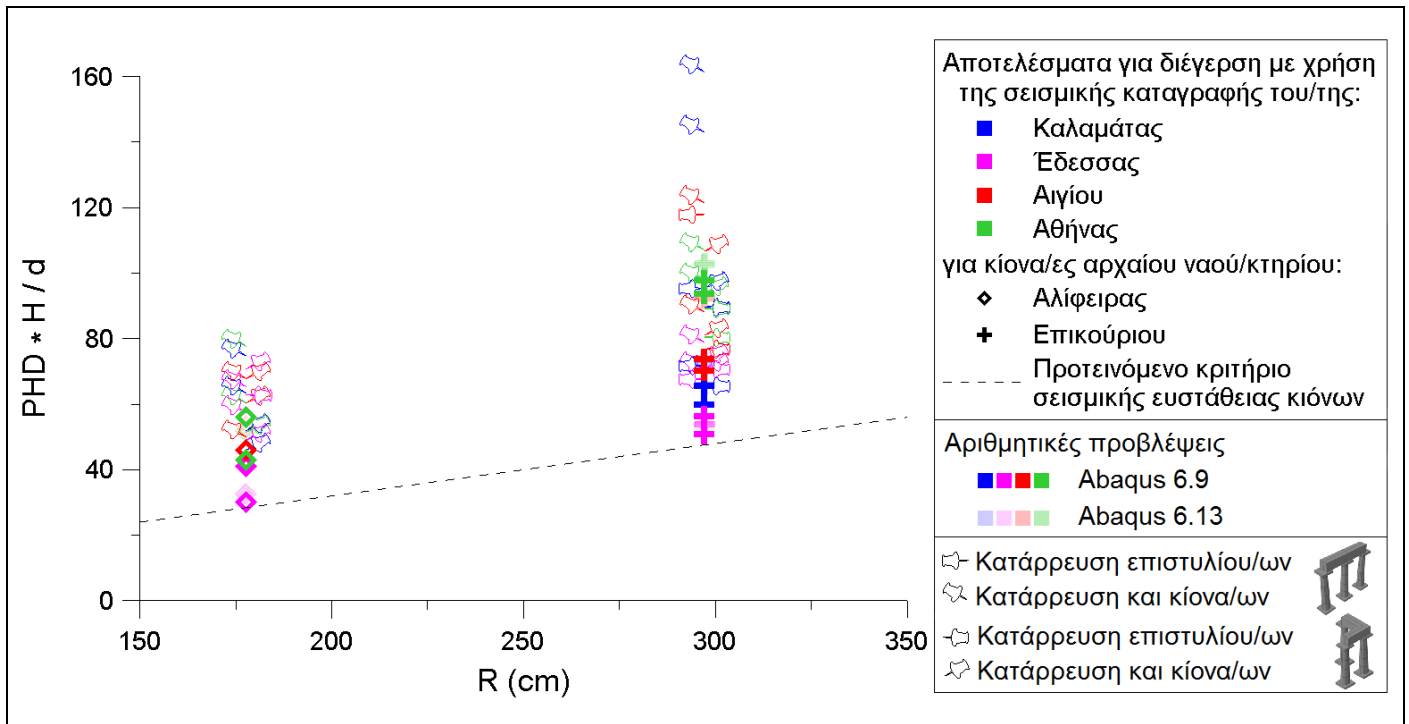
Διαγρ. 7.7: Σύγκριση αριθμητικών προβλέψεων που αφορούν την σεισμική απόκριση κίωνων που ανήκουν σε διαφορετικές διατάξεις κιονοστοιχιών. Οι στικτές γραμμές επισημαίνουν κατάρρευση λίθου/ων επιστυλίου ενώ οι διακεκομμένες ανατροπή γειτονικού/ών κίονα/ων.



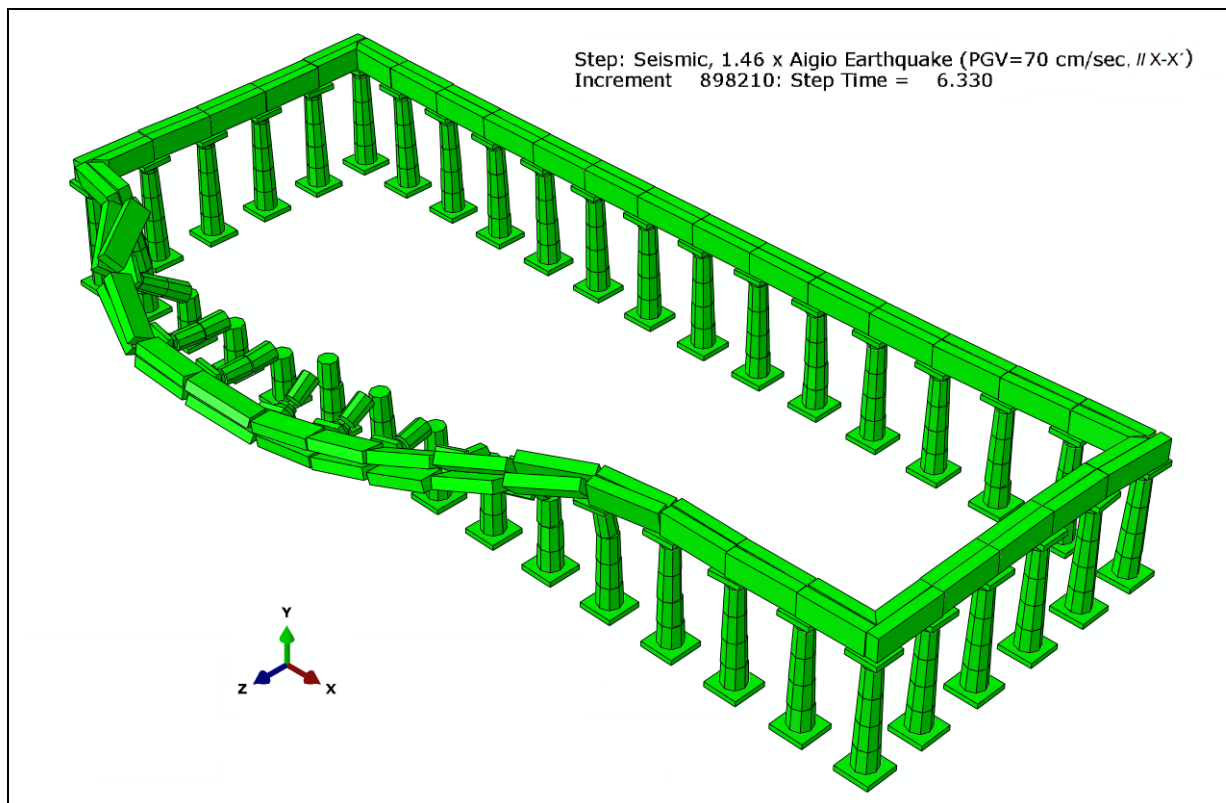
Διάγρ. 7.8: Οι αριθμητικές προβλέψεις για τα κατώτατα όρια μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης που προκαλούν κατάρρευση σε μεμονωμένους κίονες ή σε συστοιχίες κίωνων συζευγμένων με λίθους επιστυλίου, του ναού της Αθηνάς της Αλίφειρας και του ναού του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών. Τα προαναφερθέντα όρια είναι συσχετισμένα με την δεσπόζουσα περίοδο των διεγέρσεων καθώς και με τον δείκτη ραδινότητας και την «ιδιοσυχνότητα» των κίωνων.



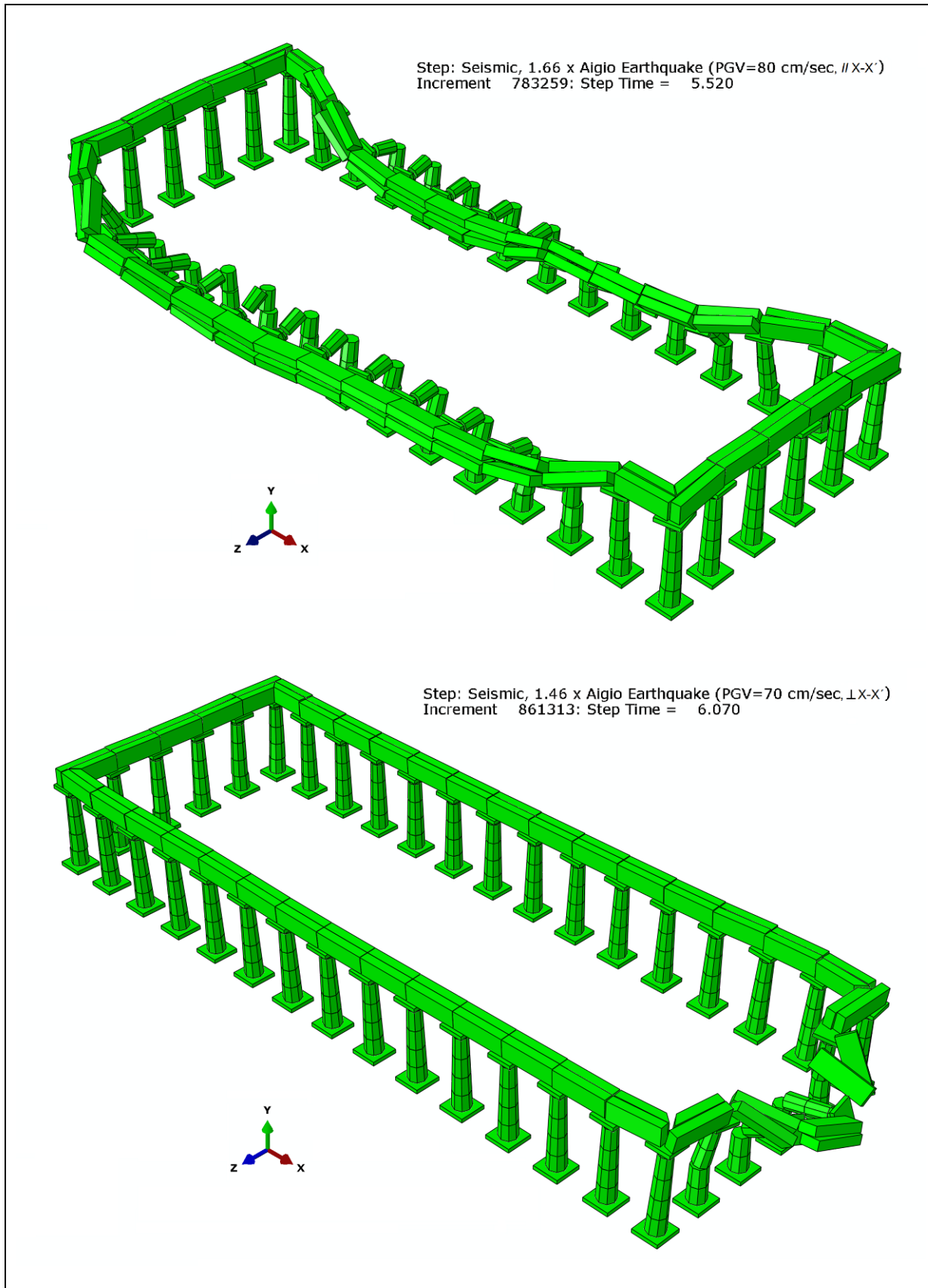
Διάγρ. 7.9: Οι αριθμητικές προβλέψεις για τα κατώτατα όρια μέγιστης εδαφικής ταχύτητας που προκαλούν κατάρρευση σε μεμονωμένους κίονες ή σε συστοιχίες κίωνων συζευγμένων με λίθους επιστυλίου, του ναού της Αθηνάς της Αλίφειρας και του ναού του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών. Τα προαναφερθέντα όρια είναι συσχετισμένα με την δεσπόζουσα περίοδο των διεγέρσεων καθώς και με τους δείκτες ραδινότητας και μεγέθους των κίωνων.



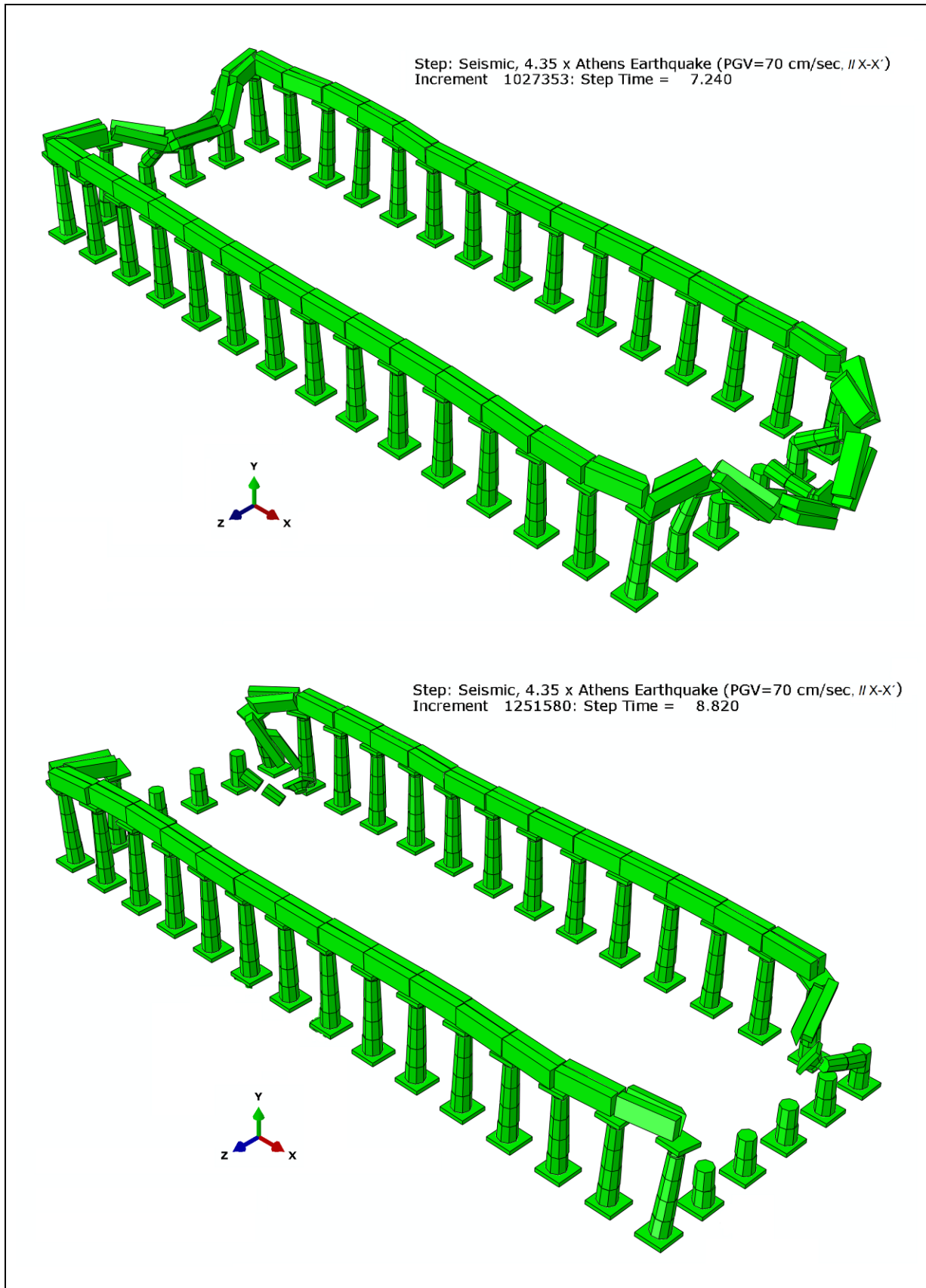
Διάγρ. 7.10: Οι αριθμητικές προβλέψεις για τα κατώτατα όρια μέγιστης εδαφικής μετατόπισης που προκαλούν κατάρρευση σε μεμονωμένους κίονες ή σε συστοιχίες κίωνων συζευγμένων με λίθους επιστυλίου, του ναού της Αθηνάς της Αλίφειρας και του ναού του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών. Τα προαναφερθέντα όρια είναι συσχετισμένα με τους δείκτες ραδιότητας και μεγέθους των κίωνων.



Εικ. 7.2: Στιγμιότυπο κατάρρευσης του προσομοιώματος του περιστυλίου του ναού της Αθηνάς της Αλίφειρας.



Εικ. 7.2 (Συνέχεια): Στιγμιότυπα κατάρρευσης του προσομοιώματος του περιστευλίου του ναού της Αθηνάς της Αλίφειρας.



Εικ. 7.2 (Συνέχεια): Στιγμιότυπα κατάρρευσης του προσομοιώματος του περιστυλίου του ναού της Αθηνάς της Αλίφειρας.

7.3 Συμπερασματικά σχόλια

Με βάση τις αριθμητικές προβλέψεις που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα μπορούν να διατυπωθούν τα ακόλουθα συμπερασματικά σχόλια:

1. Οι συγκρίσεις αντίστοιχων αριθμητικών αποτελεσμάτων όπως προέκυψαν από την χρήση δύο διαφορετικών εκδόσεων του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία (6.9 και 6.13 του Abaqus), δεν έδωσαν αξιοσημείωτες διαφορές. Ως εκ τούτου, δύνανται να συνδυαστούν οι προβλέψεις των δύο εκδόσεων του λογισμικού, για την εξαγωγή συνολικών συμπερασμάτων.
2. Η σεισμική ευστάθεια συστοιχιών κίωνων, οι οποίοι είναι μικρού έως και μεσαίου μεγέθους¹⁹⁵ και φέρουν (ασύνδετους μεταξύ τους) λίθους επιστυλίου¹⁹⁶, είναι της ίδιας τάξης μεγέθους ή μεγαλύτερη από αυτήν που θα διέθεταν οι ίδιοι κίονες ελεύθερα ιστάμενοι. Το αν είναι περίπου ίση ή μεγαλύτερη η σεισμική ευστάθεια μια κιονοστοιχίας από την ευστάθεια που θα διέθεταν οι κίονες της ελεύθερα ιστάμενοι, φαίνεται ότι εξαρτάται από το μέγεθος των κίωνων και από την δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής διέγερσης. Όσο μικρότερου μεγέθους είναι μία κιονοστοιχία και όσο πιο μακροπερίοδος είναι ο σεισμός που την διεγείρει, τόσο πιο μεγάλη είναι η ευστάθεια της κιονοστοιχίας έναντι των μεμονωμένων κίωνων της, και το αντίστροφο¹⁹⁷. Συνέπεια αυτών είναι, σύμφωνα πάντα με τις αριθμητικές προβλέψεις, ότι οι μεσαίου μεγέθους κιονοστοιχίες όταν διεγείρονται από υψίσυχνες δονήσεις κινδυνεύουν με κατάρρευση λίθου (ή λίθων) επιστυλίου και για ολίγο χαμηλότερα επίπεδα σεισμικής έντασης, από αυτά που θα ανέτρεπαν τους κίονες τους μεμονωμένους.
3. Αντίθετα με τις μεσαίου μεγέθους κιονοστοιχίες, στις μικρού μεγέθους δεν είναι πιθανή η κατάρρευση, λόγω σεισμικής διέγερσης, λίθου επιστυλίου χωρίς κατάρρευση κάποιου κίονα.
4. Η ευθύγραμμη διάταξη κιονοστοιχίας έχει σαφώς ισχυρό άξονα, τον εντός του επιπέδου της κιονοστοιχίας. Οι άλλες δύο διατάξεις που ελέγχθηκαν (υπό ορθή γωνία,

¹⁹⁵ Όπως προαναφέρθηκε (παράγραφος 5.1, σελ. 105), στην παρούσα εργασία χαρακτηρίζονται ως μικρού μεγέθους οι κίονες των οποίων το ύψος είναι περί τα 3 με 4 m, και μεσαίου μεγέθους οι κίονες που έχουν ύψος περί τα 6 με 7 m.

¹⁹⁶ Με τον όρο σεισμική ευστάθεια κιονοστοιχίας εννοείται το χαμηλότερο επίπεδο σεισμικής έντασης που προκαλεί στην κιονοστοιχία την οποιαδήποτε κατάρρευση, έστω και ενός, μόνο, λίθου του επιστυλίου της.

¹⁹⁷ Εννοείται, φυσικά, ότι, όπως και τα προηγούμενα σχόλια, έτσι και αυτό αφορά τα εύρη μεγεθών κίωνων και δεσποζουσών περιόδων σεισμικών διεγέρσεων που εξετάστηκαν.

περίκλειστη) δεν προέκυψε ότι έχουν ισχυρό άξονα σε μία από τις δύο κύριες διευθύνσεις τους.

5. Οι ευθύγραμμες κιονοστοιχίες φάνηκε ότι διαθέτουν παρόμοια ή μεγαλύτερη (όταν φορτίζεται περισσότερο ο ισχυρός άξονάς τους) σεισμική ευστάθεια από τις κιονοστοιχίες υπό γωνία και τις περίκλειστες που διαπιστώθηκαν ως περίπου ισοδύναμες.
6. Εν γένει οι αριθμητικές προβλέψεις για την σεισμική συμπεριφορά των αρχαίων κιονοστοιχιών που εξετάστηκαν συμφωνούν με τους βασικούς κανόνες Δυναμικής των κατασκευών, καθώς και με αντίστοιχα ευρήματα προγενέστερων σχετικών εργασιών. Το γεγονός αυτό συνηγορεί υπέρ της αξιοπιστίας τους.
7. Βάσει των προαναφερθέντων, προτείνεται η χρήση των κριτηρίων ευστάθειας για τους ελεύθερα ιστάμενους κίονες, τα οποία παρουσιάστηκαν στο τέλος του πέμπτου κεφαλαίου, και για την αδρομερή εκτίμηση του κατώτατου ορίου σεισμικής ευστάθειας συστοιχιών μικρού και μεσαίου μεγέθους κίωνων που φέρουν λίθους επιστυλίου, υπό την προϋπόθεση ότι οι κιονοστοιχίες αυτές διατηρούνται σε καλή κατάσταση.

8. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

8.1 Ανακεφαλαίωση κύριων συμπερασμάτων

Η σεισμική συμπεριφορά των αρχαίων μνημείων είναι ένα φυσικό φαινόμενο μη-γραμμικό και ιδιαίτερος πολύπλοκο. Αυτό ισχύει διότι, όταν απορρέει από διεγέρσεις μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους (οι οποίες είναι οι μόνες που μπορούν, πρακτικώς, να επηρεάσουν τα εν λόγω οικοδομήματα και να θέσουν σε κίνδυνο την ευστάθειά τους), διέπεται από μηχανισμούς λικνισμού και ολίσθησης δεκάδων έως και εκατοντάδων λίθινων τεμαχίων. Ως εκ τούτου, η αναλυτική μελέτη του φαινομένου εμπεριέχει αναγκαστικώς πολλές απλοποιήσεις, με συνέπεια τα αποτελέσματα που προκύπτουν να έχουν μόνον ποιοτικό χαρακτήρα.

Έτσι, για την εξαγωγή ποσοτικών συμπερασμάτων, έστω και ως προσεγγιστικών εκτιμήσεων, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν πειραματικές ή/και αριθμητικές εργασίες. Η παρούσα μελέτη ανήκει στην τελευταία κατηγορία, καθώς σε αυτήν διερευνήθηκε αριθμητικώς, με το λογισμικό ABAQUS/Explicit, η σεισμική απόκριση αρχαίων κίωνων και κιονοστοιχιών που ανήκουν σε έξι αρχαία μνημεία της Ελλάδας.

Παρά τις δυσκολίες μελέτης του φαινομένου, η ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας αποδεικνύει ότι η διεθνής επιστημονική κοινότητα έχει σημειώσει κατά τις τελευταίες δεκαετίες μεγάλη και σημαντική πρόοδο στην κατανόηση της σεισμικής απόκρισης των αρχαίων μνημείων. Ως εκ τούτου, τα συμπεράσματα στα οποία συγκλίνουν οι σχετικές εργασίες αποτελούν χρήσιμα στοιχεία σε όσους επιχειρούν να διεξάγουν περαιτέρω έρευνα στο εν λόγω επιστημονικό πεδίο.

Με βάση αυτά τα συμπεράσματα, κυρίως, σχεδιάστηκαν οι παραμετρικές διερευνήσεις της παρούσας εργασίας. Οι διερευνήσεις αφορούσαν αφενός την επιρροή πέντε παραμέτρων προσομοίωσης στην πρόβλεψη της σεισμικής συμπεριφοράς αρχαίων μνημείων και αφετέρου την επίδραση δώδεκα φυσικών παραμέτρων στο υπό μελέτη φαινόμενο.

Οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι οι εξής:

α) Η πυκνότητα του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων των προσομοιωμάτων.

β), γ) Οι συντελεστές τριβής και απόσβεσης στις διεπιφάνειες των μελών των προσομοιωμάτων.

δ) Ο ορισμός του κινηματικού συντελεστή τριβής ίσου με τον συντελεστή στατικής τριβής στις προσομοιώσεις.

ε) Η χρήση δύο διαφορετικών εκδόσεων του κύριου αριθμητικού εργαλείου της εργασίας.

στ) Η ύπαρξη έντασης στον κορμό των κίωνων.

ζ), η) Η ύπαρξη κρηπίδας υπό τους κίονες παράλληλης ή κάθετης στην διεύθυνση των σεισμικών διεγέρσεων με τη μεγαλύτερη ένταση.

θ) Η λυγηρότητα των κίωνων.

ι) Το μέγεθος των κίωνων.

ια) Ο αριθμός των σπονδύλων των κίωνων.

ιβ), ιγ) Η ύπαρξη στις διεπιφάνειες των κίωνων νέων πόλων από τιτάνιο, δύο τύπων (σωληνωτών και κολουροκωνικών).

ιδ) Το μέγεθος των κιονοστοιχιών.

ιε) Η μορφή της διάταξης των κιονοστοιχιών.

ιστ), και ιζ) Η ένταση και το συχνοτικό περιεχόμενο των σεισμικών διεγέρσεων.

Από τις προαναφερθείσες διερευνήσεις προέκυψαν τα παρακάτω κύρια συμπεράσματα:

1. Το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS/Explicit έχει την δυνατότητα να εξάγει αξιόπιστες προβλέψεις για την δυναμική απόκριση κατασκευών από λαξευτούς λίθους εν ξηρώ συναρμολογημένους, όπως είναι τα αρχαία ελληνικά μνημεία.
2. Οι αρχαίοι πολυσπόνδυλοι κίονες, εφόσον διατηρούνται χωρίς σημαντικές φθορές, σε κατακόρυφη στάση και εδράζονται σε δύσκαμπτη βάση, δύνανται να αντιστέκονται χωρίς να καταρρέουν σε σημαντικές σεισμικές δράσεις. Η αντισεισμική ικανότητα των αρχαίων κίωνων μεγάλου μεγέθους εκτιμάται ότι είναι ανώτερη από τις αναμενόμενες μέγιστες σεισμικές δράσεις στον ελλαδικό χώρο, ακόμα και για σεισμούς των οποίων οι εκτιμώμενες περίοδοι επανάληψης υπερβαίνουν και την μακρά διάρκεια ζωής των αρχαίων μνημείων.
3. Είναι δυνατό μία σεισμική διέγερση να προκαλέσει κατάρρευση σε ένα κίονα, ενώ μία άλλη με παρόμοια χαρακτηριστικά αλλά με μεγαλύτερη ένταση να μην επιφέρει κατάρρευση στον ίδιο κίονα ή σε όμοιό του. Αυτό το «οξύμωρο» ενδεχόμενο μπορεί να συμβεί, κυρίως, σε μεσαίου και μεγάλου μεγέθους κίονες υπό μακροπερίοδες σεισμικές διεγέρσεις.

4. Ο διαφορετικός αριθμός των σπονδύλων των αρχαίων κίωνων, όταν είναι εντός των συνηθισμένων («τυπικών», ανάλογα με το μέγεθος των κίωνων) ορίων, δεν επηρεάζει σημαντικά την σεισμική ευστάθεια των κίωνων. Όμως, στις (σχετικώς σπάνιες) περιπτώσεις που κίονες αποτελούνται από πολύ μικρό αριθμό λίθινων μελών, ο αριθμός των σπονδύλων μειώνει σημαντικά την αντισεισμική ικανότητα των κίωνων όταν αυτοί διεγείρονται από μακροπερίοδες διεγέρσεις.
5. Βάσει αριθμητικών προβλέψεων της παρούσας εργασίας, προτείνεται η χρήση των ακόλουθων σχέσεων για την εκτίμηση της σεισμικής ευστάθειας των ελευθέρως ιστάμενων αρχαίων (πολυσπόνδυλων) κίωνων, οι οποίοι διατηρούνται σε καλή κατάσταση:

$$PHA_{crit} \geq \gamma 0.23 g (d/H) e^{0.37 \omega_g/p}$$

$$PHV_{crit} \geq \gamma 0.65 (d/H) (R/T_g)$$

$$PHD_{crit} \geq \gamma 0.16 (d/H) R \quad (\text{για } T_g \leq 0.7 \text{ sec})$$

Όπου: PHA_{crit} , PHV_{crit} , PHD_{crit} , τα κατώτατα όρια σεισμικής διέγερσης που προκαλεί κατάρρευση στον υπό εξέταση κίονα.

γ , μειωτικός συντελεστής, ίσος με 0.75.

g , η επιτάχυνση της βαρύτητας.

d , η διάμετρος της κάτω έδρας του κίονα.

H , το ύψος του κίονα.

$\omega_g = 2\pi/T_g$, η δεσπόζουσα γωνιακή ταχύτητα της κρίσιμης σεισμικής διέγερσης.

T_g , η δεσπόζουσα περίοδος της κρίσιμης σεισμικής διέγερσης.

$$p = \sqrt{\frac{mgR}{I_0}}, \text{ η παράμετρος συχνότητας του κίονα.}$$

m , η μάζα του κίονα.

R , δείκτης μεγέθους του κίονα, ίσος με την απόσταση του κέντρου βάρους του κίονα από την περιφέρεια της κάτω έδρας του. Και

I_0 , η ροπή αδράνειας του κίονα ως προς ένα σημείο της περιφέρειας της κάτω έδρας του.

6. Εκτιμάται ότι η τοποθέτηση πólων, σωληνωτού ή κολουροκωνικού τύπου, στις διεπιφάνειες αρχαίων κίωνων μέσου μεγέθους, στο πλαίσιο των έργων αποκατάστασης αρχαίων μνημείων στην Ελλάδα, είναι θετική. Τούτο, διότι αφενός δεν μεταβάλλει τα βασικά χαρακτηριστικά της λικνιστικής απόκρισης των κίωνων, και αφετέρου φαίνεται ότι (για τους αναμενόμενους σεισμούς στον ελλαδικό χώρο) οδηγεί στον

περιορισμό των παραμενουσών παραμορφώσεων των κίωνων, χωρίς αστοχία των πólων.

7. Η σεισμική ευστάθεια των κιονοστοιχιών μικρού και μεσαίου μεγέθους είναι περίπου ίση ή μεγαλύτερη από αυτήν που θα διέθεταν οι κίονές τους ιστάμενοι ελεύθερα.
8. Οι ευθύγραμμες κιονοστοιχίες διαθέτουν περίπου ίση (ή μεγαλύτερη, όταν φορτίζεται περισσότερο ο εντός του επιπέδου τους άξονάς τους) σεισμική ευστάθεια από τις κιονοστοιχίες υπό γωνία και τις περικλειστες, οι οποίες είναι περίπου ισοδύναμες.
9. Προτείνεται η χρήση των ανωτέρω κριτηρίων ευστάθειας και για την αδρομερή εκτίμηση του κατώτατου ορίου σεισμικής ευστάθειας συστοιχιών μικρού και μεσαίου μεγέθους κίωνων φερόντων λίθους επιστυλίου, υπό την προϋπόθεση ότι οι κιονοστοιχίες αυτές διατηρούνται σε καλή κατάσταση.

8.2 Σχόλια για την αξιοπιστία των αριθμητικών προβλέψεων

Ο βασικός λόγος που επιλέχθηκε στην παρούσα εργασία να διερευνηθεί με αριθμητικό τρόπο η σεισμική συμπεριφορά των αρχαίων μνημείων είναι το ότι οι δυσχέρειες που επιφέρουν στην μελέτη του φαινομένου η μη-γραμμικότητα και η πολυπλοκότητά του μπορούν να ξεπεραστούν από επαρκώς βαθμονομημένες αριθμητικές προσομοιώσεις. Όμως, εκτός από την μη-γραμμικότητα και την πολυπλοκότητα, το υπό μελέτη φαινόμενο παρουσιάζει άλλο ένα χαρακτηριστικό το οποίο μπορεί να θέσει εν αμφιβόλω και τις αριθμητικές προσπάθειες πρόβλεψής του: την αστάθεια ως προς τα αρχικά δεδομένα¹⁹⁸. Για αυτό το λόγο κρίθηκε σκόπιμο να περιληφθεί στον επίλογο η παρούσα παράγραφος, στην οποία παρατίθενται σχόλια για την αξιοπιστία των αριθμητικών προβλέψεων της παρούσας μελέτης.

Σημειώνεται ότι η αστάθεια ως προς τα αρχικά δεδομένα που παρουσιάζει το υπό μελέτη φαινόμενο μπορεί να οδηγήσει στο να προκύπτουν διαφορετικά αποτελέσματα από αριθμητικές προσομοιώσεις του φαινομένου στις οποίες έχουν οριστεί εντελώς όμοια αρχικά δεδομένα. Έτσι, τα προκύπτοντα αποτελέσματα φαίνονται τυχαία¹⁹⁹ και, επομένως,

¹⁹⁸ Δηλαδή, οποιαδήποτε, έστω και πολύ μικρή, διαφοροποίηση (μετατόπιση) των «αρχικών» θέσεων των λίθινων μελών ενός μνημείου ενισχύεται κατά την κίνησή τους. Έτσι οι τροχιές που θα διανύσουν κατά την σεισμική απόκριση του μνημείου (και άρα οι θέσεις που θα καταλήξουν) μπορούν να διαφέρουν, ενίοτε σημαντικά, από τις αναμενόμενες.

¹⁹⁹ Ωστόσο, δεν είναι τυχαία (δηλαδή ανεξάρτητα, σε κάποιο βαθμό, από τις αρχικές συνθήκες) αποτελέσματα. Η εντύπωση περί του τυχαίου εμφανίζεται επειδή οι διαθέσιμες πληροφορίες στον ερευνητή δεν είναι πλήρεις, όπως εξηγείται στις επόμενες προτάσεις του κειμένου.

αναξιόπιστα. Αυτό συμβαίνει συνήθως όταν «όμοιες» αναλύσεις διενεργούνται σε διαφορετικούς υπολογιστές ή με διαφορετικές εκδόσεις ενός λογισμικού. Το «οξύμωρο» γεγονός οφείλεται στο ότι οποιαδήποτε μικροδιαφοροποίηση στους αλγόριθμους επίλυσης (όπως το να είναι διαφορετικός ο αριθμός των, κατά κανόνα, μεγάλου πλήθους δεκαδικών ψηφίων που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς) οδηγεί στο να είναι διαφορετικά τα δεδομένα των (επομένων του αρχικού) υπολογιστικών βημάτων. Άρα, όσο περισσότερα τα βήματα των επιλύσεων, τόσο μεγαλύτερες οι αποκλίσεις των τελικών αποτελεσμάτων.

Ωστόσο, και η δυσχέρεια αυτή μπορεί, υπό προϋποθέσεις, να περιοριστεί. Έχει δειχθεί με μαθηματικό τρόπο²⁰⁰ ότι είναι δυνατό να διατυπωθούν αξιόπιστες προβλέψεις για παρομοίως ασταθή φυσικά συστήματα, υπό την προϋπόθεση ότι οι προβλέψεις αφορούν την συμπεριφορά της γενικής μορφής του συστήματος (και όχι τις μεμονωμένες τροχιές των μελών του) σε βραχεία χρονικά διαστήματα²⁰¹.

Η απόκριση ενός μνημείου σε ένα σεισμικό συμβάν είναι μικρής χρονικής διάρκειας (λίγες δεκάδες δευτερολέπτων). Επομένως, με βάση την προαναφερθείσα (μαθηματική) διαπίστωση, συνάγεται ότι είναι εφικτό να διατυπωθούν αξιόπιστες αριθμητικές προβλέψεις για την σεισμική συμπεριφορά αυτόνομων δομικών συνόλων ενός μνημείου, όπως είναι μεμονωμένοι κίονες ή αυτοτελείς κιονοστοιχίες. Επίσης, ότι πρέπει να θεωρούνται (κατά κανόνα) ολιγότερο αξιόπιστες οι αριθμητικές προβλέψεις για την συμπεριφορά των ξεχωριστών λίθινων μελών (σπονδύλων, κιονοκράνων κ.λπ.) του μνημείου.

Βάσει των τελευταίων παρατηρήσεων επιλέχθηκε να παρουσιαστούν στο ανά χείρας τεύχος, ως επί το πλείστον, τα αριθμητικά αποτελέσματα που αφορούν την συνολική απόκριση κίωνων²⁰² (προδήλως, διότι αυτά θεωρούνται ότι είναι τα πιο αξιόπιστα).

Σημειώνεται επίσης ότι, πέραν των ειδικών ελέγχων της αξιοπιστίας του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε²⁰³, υπέρ της εξαγωγής από την παρούσα εργασία αξιόπιστων προβλέψεων για την σεισμική απόκριση συνολικώς για κάθε κίονα, συνηγορεί και το εξής: Στο πλαίσιο της εργασίας, διερευνήθηκε με δύο εκδόσεις του λογισμικού ABAQUS η σεισμική απόκριση τεσσάρων (διαφορετικών) κίωνων, ελεύθερα ιστάμενων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις ομόλογες αριθμητικές αναλύσεις, για την συνολική συμπεριφορά κάθε κίονα, συγκρίθηκαν και διαπιστώθηκε όταν δεν παρουσιάζουν ουσιώδεις διαφορές²⁰⁴.

²⁰⁰ Εκελάντ 1993, σελ. 117-118.

²⁰¹ Στην πράξη, το πιο χαρακτηριστικό σχετικό παράδειγμα είναι οι (κατά κανόνα) επιτυχημένες βραχυχρόνιες μετεωρολογικές προγνώσεις που αφορούν ευρείες περιοχές.

²⁰² Το μέγεθος το οποίο επιλέχθηκε ως το πιο αντιπροσωπευτικό για να περιγράψει την συνολική συμπεριφορά ενός κίονα είναι η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση της κορυφής του (βλέπε σχετικά παράγραφο 5.4.3, σελ. 129).

²⁰³ Βλέπε τέταρτο κεφάλαιο.

²⁰⁴ Βλέπε παράγραφο 7.2.1, σελ. 182-183.

Τέλος, αναφέρεται ότι εν γένει οι αριθμητικές προβλέψεις της παρούσας μελέτης συμφωνούν με τους βασικούς κανόνες Δυναμικής των κατασκευών, καθώς και με τα αντίστοιχα ευρήματα των προγενέστερων εργασιών της σχετικής βιβλιογραφίας. Το γεγονός αυτό αποτελεί άλλο ένα επιχείρημα υπέρ της αξιοπιστίας τους.

Με βάση τα προηγούμενα, εκτιμάται ότι τα κύρια ποσοτικά στοιχεία που εξήχθησαν από την παρούσα εργασία, τα οποία αφορούν την σεισμική ευστάθεια αρχαίων κίωνων και κιονοστοιχιών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για την εκτίμηση της τρωτότητας των αρχαίων μνημείων.

8.3 Συμβολή της εργασίας στην επιστήμη

Όπως προαναφέρθηκε, η διεθνής βιβλιογραφία η σχετική με το αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι πλούσια και σημαντική για πολλά από τα επί μέρους εξεταζόμενα αντικείμενα. Παρά ταύτα, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επιχειρήθηκε να εξεταστούν αρκετά από τα βασικά αντικείμενα εκ νέου, κατά το δυνατό σε μεγαλύτερο βάθος, καθώς και να διερευνηθούν και άλλα που η διεθνής βιβλιογραφία είτε δεν καλύπτει μέχρι τώρα, είτε καλύπτει εν μέρει.

Πιο συγκεκριμένα, εξ' όσων γνωρίζουμε, η παρούσα μελέτη εξέτασε για πρώτη φορά την επιρροή στην σεισμική συμπεριφορά αρχαίων κίωνων και κιονοστοιχιών:

- (α) της ύπαρξης κρηπίδας υπό τους κίονες,
- (β) της ύπαρξης στις διεπιφάνειες των κίωνων πόλων από τιτάνιο, σωληνωτής ή κολουροκωνικής μορφής²⁰⁵,
- (γ) του μεγέθους της κιονοστοιχίας, και
- (δ) της μορφής της διάταξης της κιονοστοιχίας.

Για πρώτη φορά, επίσης, σε μία μόνον αριθμητική μελέτη, τρισδιάστατης ανάλυσης, διερευνήθηκε η σεισμική συμπεριφορά οκτώ διαφορετικών αρχαίων κίωνων. Οι κίονες αυτοί ανήκουν σε έξι αρχαία μνημεία της Ελλάδας (τον Παρθενώνα, τον ναό του Επικούριου Απόλλωνα Βασσών, το πρόπυλο του τελετουργικού εστιατορίου στην Επίδαυρο, το στωικό κτήριο στην Βραυρώνα, τον ναό της Αθηνάς στην Αρκαδική Αλίφειρα, και τον ναό της Αλέας Αθηνάς στην Τεγέα) και είναι αντιπροσωπευτικοί ενός πολύ μεγάλου φάσματος των

²⁰⁵ Σε αυτές τις αριθμητικές επιλύσεις οι πόλοι προσομοιάζονταν με τρισδιάστατα στοιχεία τα οποία μπορούσαν να παρουσιάσουν και μη-γραμμική συμπεριφορά. Η εκλεπτυσμένη προσομοίωση των πόλων βαθμονομήθηκε και βάσει πρωτότυπων πειραμάτων ελέγχου της φέρουσας ικανότητας έναντι τέμνουσας του συστήματος κολουροκωνικού πόλου-ζεύγους εμπολίων.

διατηρούμενων έως σήμερα αρχαίων κίωνων. Κατ' αυτόν τον τρόπο εξετάστηκε παραμετρικώς, σε έκταση μεγαλύτερη από τις προηγούμενες σχετικές εργασίες, η επιρροή στο υπό εξέταση φαινόμενο:

- (i) της λυγηρότητας των κίωνων,
- (ii) του μεγέθους των κίωνων, και
- (iii) του αριθμού των σπονδύλων των κίωνων.

Αξίζει να σημειωθεί, επίσης, ότι εξαιρουμένων των κίωνων του Παρθενώνα και του ναού του Επικούριου Απόλλωνα, για τους κίονες των τεσσάρων άλλων μνημείων που εξετάστηκαν δεν έχει στο παρελθόν εκπονηθεί μελέτη που να αφορά την σεισμική απόκρισή τους. Έτσι, από την παρούσα εργασία προέκυψαν για πρώτη φορά ποσοτικά στοιχεία για την σεισμική ευστάθεια τεσσάρων αρχαίων μνημείων.

Επιπλέον, η εν λόγω ευρεία διερεύνηση του φαινομένου οδήγησε και σε άλλα νέα επιμέρους στοιχεία, τα οποία θεωρούνται χρήσιμα για την μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς των αρχαίων μνημείων. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται ακολούθως:

- Οι αριθμητικές προβλέψεις για την σεισμική ευστάθεια και των οκτώ κίωνων (και για τις τρεις παραμέτρους πλάτους εδαφικών κινήσεων, PHA, PHV και PHD) συσχετίστηκαν με ικανοποιητικό τρόπο με τα βασικά δυναμικά χαρακτηριστικά των κίωνων (μέγεθος, ραδιότητα και «ιδιοσυχνότητα») και με την δεσπόζουσα περίοδο της αντίστοιχης σεισμικής διέγερσης (T_g). Οι τρόποι συσχέτισης των παραμέτρων PHV και PHD των κρίσιμων εδαφικών κινήσεων με τα βασικά χαρακτηριστικά των κίωνων είναι πρωτότυποι.
- Από τις προαναφερθείσες συσχετίσεις, κατέστη δυνατό να διατυπωθούν γενικά κριτήρια για την πρόβλεψη των ορίων σεισμικών δράσεων που οδηγούν σε κατάρρευση τους μικρού, μεσαίου και μεγάλου μεγέθους αρχαίους πολυσπόνδουλους κίονες που διατηρούνται σε καλή κατάσταση. Είναι η πρώτη φορά που προτείνονται κριτήρια για την σεισμική ευστάθεια αρχαίων κίωνων με βάση αποτελέσματα τρισδιάστατων αριθμητικών προσομοιώσεων.
- Παραμετρικές αριθμητικές διερευνήσεις κιονοστοιχιών δύο αρχαίων ναών (του Επικούριου Απόλλωνα και της Αθηνάς στην Αλίφειρα), οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι τα προτεινόμενα κριτήρια σεισμικής ευστάθειας αρχαίων κίωνων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την εκτίμηση της σεισμικής ευστάθειας των κίωνων μικρού και μεσαίου μεγέθους που φέρουν λίθους επιστυλίου. Επομένως, για πρώτη φορά προκύπτουν από μία αριθμητική μελέτη κριτήρια σεισμικής ευστάθειας για κιονοστοιχίες.

8.4 Προτάσεις για την συνέχιση της έρευνας

Στην παρούσα τελευταία παράγραφο, παρουσιάζονται επιγραμματικώς μερικά από τα βασικότερα αντικείμενα στο οποία κρίνεται σκόπιμο να επεκταθεί η έρευνα που παρουσιάστηκε στην παρούσα μελέτη. Τα θέματα αυτά είναι τα ακόλουθα:

- Δεδομένης της μεγάλης επιρροής του μεγέθους των κίωνων στην σεισμική συμπεριφορά τους, θεωρείται χρήσιμη η επέκταση των αριθμητικών διερευνήσεων που αφορούν ελεύθερα ιστάμενους κίονες, με εξέταση κίωνων πολύ μικρού και γιγαντιαίου μεγέθους (δηλαδή, κίωνων με ύψος μικρότερο των δύο μέτρων και μεγαλύτερο των δώδεκα μέτρων, αντίστοιχα).
- Παρομοίως, είναι σκόπιμο να εμπλουτιστούν οι αριθμητικές διερευνήσεις της σεισμικής απόκρισης κιονοστοιχιών με αναλύσεις κιονοστοιχιών μεγάλου μεγέθους, καθώς και κιονοστοιχιών οι οποίες να περιλαμβάνουν και λίθους στρώσεων υπερκείμενων της στρώσης του επιστυλίου.
- Στις μέχρι τώρα αριθμητικές αναλύσεις, δεν έχουν περιληφθεί τα μεταλλικά στοιχεία τα οποία συνήθως συνδέουν του λίθους επιστυλίου που γεφυρώνουν τους αρχαίους κίονες. Επομένως, θεωρείται σκόπιμη η επέκταση των αριθμητικών διερευνήσεων της σεισμικής απόκρισης συστοιχιών κίωνων φερόντων λίθους επιστυλίου, με έλεγχο της επιρροής στην απόκριση των κιονοστοιχιών της ύπαρξης μεταλλικών συνδέσμων στα επιστύλια.
- Τέλος, σημειώνεται ότι παρά την συστηματική προσπάθεια ελέγχου της αξιοπιστίας των αριθμητικών αποτελεσμάτων στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας (εκτιμάται με καλά αποτελέσματα), παρατηρείται ότι το πλήθος και η ποικιλία των διατιθέμενων πειραματικών αποτελεσμάτων, μέσω των οποίων γίνεται η βαθμονόμηση των προσομοιωμάτων, παραμένουν διεθνώς περιορισμένα. Ως εκ τούτου, θεωρείται ότι σημαντική προσπάθεια της μελλοντικής έρευνας πρέπει να αφιερωθεί στον σχεδιασμό και την εκτέλεση κατάλληλων πειραματικών δοκιμών.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μελέτη πραγματεύεται την σεισμική συμπεριφορά ελεύθερα ιστάμενων αρχαίων κίωνων, καθώς και συστοιχιών αρχαίων κίωνων φερόντων λίθους επιστυλίου. Η μελέτη αποτελείται από επτά κεφάλαια και έναν επίλογο. Στα **δύο πρώτα**, εισαγωγικού χαρακτήρα, κεφάλαιά της παρουσιάζονται διάφορα στοιχεία (κατασκευαστικά, ιστορικά κ.α.) αναφορικά με τις μνημειακές λίθινες κατασκευές των αρχαίων Ελλήνων, ενώ στο **τρίτο** παρουσιάζονται, με συνοπτικό τρόπο, προγενέστερες συναφείς εργασίες, καθώς και τα βασικά ευρήματά τους.

Το **τέταρτο κεφάλαιό** της περιλαμβάνει προκαταρκτικές αριθμητικές επιλύσεις που σκόπευαν στην τεκμηρίωση της αξιοπιστίας του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS/Explicit ως προς την πρόβλεψη της δυναμικής απόκρισης ξηρολιθοδομών. Οι σχετικοί έλεγχοι έγιναν μέσω συγκρίσεων αριθμητικών προβλέψεων και σχετικών πειραματικών αποτελεσμάτων που αφορούν λικνιστικές αποκρίσεις: (α), (β) δύο πρισματικών δοκιμίων από γρανίτη, διαφορετικής λυγηρότητας, (γ) ενός δίλιθου δοκιμίου από γρανίτη, που το αποτελούσαν δύο πρίσματα το ένα πάνω στο άλλο, (δ) ενός τρίλιθου πλαισίου από γρανίτη, και (ε) ενός μαρμάρινου ομοιώματος (σε κλίμακα 1/3) κίονα του Πρόναου του Παρθενώνα. Από τις συγκρίσεις διαφάνηκε ότι το λογισμικό αναπαρήγαγε τα βασικά στοιχεία της πειραματικώς καταγεγραμμένης δυναμικής απόκρισης των προαναφερθέντων ξηρολιθοδομών (συμπεριλαμβανομένου και του, τριών μέτρων ύψους, πολυσπόνδυλου μαρμάρινου κίονα). Συνεπώς, το λογισμικό δύναται να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης κατασκευών ιδίου ή παρόμοιου χαρακτήρα. Τέτοιες κατασκευές είναι, βεβαίως, οι αρχαίοι κίονες και γενικότερα οι αρχαίες κατασκευές από λαξευτούς λίθους εν ξηρώ συναρμολογημένους

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται αναλύσεις που αφορούν την σεισμική συμπεριφορά οκτώ ελεύθερα ιστάμενων αρχαίων πολυσπόνδυλων κίωνων. Οι κίονες αυτοί είναι όλοι δωρικού ρυθμού και ανήκουν σε έξι αρχαία μνημεία: τον Παρθενώνα, τον ναό του Επικούριου Απόλλωνα Βασσών, το πρόπυλο του τελετουργικού εστιατορίου στην Επίδαυρο, το στωικό κτήριο στην Βραυρώνα, τον ναό της Αθηνάς στην Αρκαδική Αλίφειρα, και τον ναό της Αλέας Αθηνάς στην Τεγέα. Σχεδόν όλοι έχουν διαφορετική ραδινότητα και διαφορετικό

αριθμό σπονδύλων. Οι δύο από αυτούς (Βραυρώνας και Αλίφειρας) μπορούν να χαρακτηριστούν ως μικρού μεγέθους, μια που έχουν ύψος περί τα 3 με 4 μέτρα· άλλοι δύο (Παρθενώνα και Τεγέας) ως μεγάλου μεγέθους, διότι το ύψος τους είναι περίπου 9.5 και 10.5 μέτρα· ενώ, οι υπόλοιποι τέσσερις ως μεσαίου μεγέθους, αφού διαθέτουν ύψος περί τα 6 με 7 μέτρα. Για την διέγερση των υπολογιστικών ομοιωμάτων των κίωνων αυτών χρησιμοποιήθηκαν καταγραφές τεσσάρων σεισμών που έχουν λάβει χώρα στον ελλαδικό χώρο, με διαφορετικά χαρακτηριστικά (ένταση, συχνοτικό περιεχόμενο).

Από τις αριθμητικές διερευνήσεις προέκυψαν διάφορα συμπεράσματα, όπως ότι η αντισεισμική ικανότητα των αρχαίων κίωνων μεγάλου μεγέθους φαίνεται ότι είναι ανώτερη από τις αναμενόμενες μέγιστες σεισμικές δράσεις στον Ελλαδικό χώρο, ακόμα και για σεισμούς των οποίων οι εκτιμώμενες περίοδοι επανάληψης υπερβαίνουν και την πολύ μακρά διάρκεια ζωής των αρχαίων μνημείων. Ως εκ τούτου, η αποκατάσταση των τυχόν βλαβών ενός πολυσπόνδου αρχαίου κίονα από μόνη της είναι πολύ πιθανό να εξασφαλίζει την σεισμική ευστάθειά του.

Επίσης, κατέστη δυνατό να συσχετιστούν οι αριθμητικές προβλέψεις για την σεισμική ευστάθεια και των οκτώ κίωνων (και για τις τρεις παραμέτρους πλάτους εδαφικών κινήσεων, P_{HA}, P_{HV} και P_{HD}) με τα βασικά δυναμικά χαρακτηριστικά των κίωνων (μέγεθος, ραδιότητα και «ιδιοσυχνότητα») και με την δεσπόζουσα περίοδο της αντίστοιχης σεισμικής διέγερσης (T_g). Αυτό έδωσε την δυνατότητα να διατυπωθούν γενικά κριτήρια για την εκτίμηση της σεισμικής ευστάθειας των αρχαίων κίωνων, υπό την προϋπόθεση ότι οι κίονες διατηρούνται σε καλή κατάσταση (δηλαδή, είναι περίπου κατακόρυφοι, επί στέρεας βάσης, και τα μέλη τους δεν παρουσιάζουν σημαντικές φθορές ή βλάβες).

Το **έκτο κεφάλαιο** παρουσιάζει τα αποτελέσματα αριθμητικών διερευνήσεων της επιρροής νέων πόλων από τιτάνιο, δύο τύπων, στην σεισμική απόκριση ενός αρχαίου κίονα, μεσαίου μεγέθους. Οι δύο τύποι νέων πόλων είναι ο σωληνωτός που έχει τοποθετηθεί σε κίονες του Παρθενώνα καθώς και άλλων μνημείων (όπως της δωρικής στοάς του Ασκληπιείου στη νότια κλιτύ), και ο πόλος με κολουροκωνικά άκρα και λέπτυνση στο κεντρικό τμήμα του που έχει τοποθετηθεί σε κίονες του Ναού του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών. Από τις διερευνήσεις προέκυψε η εκτίμηση ότι η τοποθέτηση σωληνωτών ή κολουροκωνικών πόλων στις διεπιφάνειες αρχαίων κίωνων μεσαίου μεγέθους είναι θετική, καθώς φαίνεται ότι, για τους αναμενόμενους ισχυρούς σεισμούς στον ελλαδικό χώρο (με μέγιστη εδαφική ταχύτητα περί τα 40 cm/sec), οδηγεί στον περιορισμό των παραμενουσών παραμορφώσεων των κίωνων, χωρίς αστοχία των πόλων.

Στο **έβδομο κεφάλαιο** παρουσιάζονται παραμετρικές αριθμητικές επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για την διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης συστοιχιών αρχαίων κίωνων, φερόντων λίθων επιστυλίου, σε διάφορες διατάξεις (ευθύγραμμη, υπό ορθή γωνία και περικλειστη). Οι κιονοστοιχίες που προσομοιώθηκαν είναι τμήματα δύο αρχαίων ναών, μικρού και μεσαίου μεγέθους, του ναού της Αθηνάς στην Αρκαδική Αλίφειρα και του ναού του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών, αντίστοιχα. Τα αριθμητικά αποτελέσματα ανέδειξαν, μεταξύ άλλων, ότι η σεισμική ευστάθεια των κιονοστοιχιών που εξετάστηκαν είναι της ίδιας τάξης μεγέθους ή μεγαλύτερη από αυτήν που θα διέθεταν οι κίονές τους ιστάμενοι ελεύθερα.

Στον **επίλογο** γίνεται ανακεφαλαίωση των κύριων συμπερασμάτων της εργασίας, παρατίθενται σχόλια για την αξιοπιστία των αριθμητικών προβλέψεων, αναφέρονται συνοπτικώς τα στοιχεία της μελέτης που, κατά τον γράφοντα, είναι πρωτότυπα, και παρουσιάζονται επιγραμματικώς προτάσεις για περαιτέρω σχετική έρευνα.

Εν κατακλείδι αναφέρεται ότι, όπως προκύπτει και από τα παραπάνω, ο βασικός σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν να συμβάλει στην περαιτέρω κατανόηση της σεισμικής συμπεριφοράς των αρχαίων μνημείων, μέσω της παραμετρικής διερεύνησης του φαινομένου, το οποίο είναι πολύπλοκο και παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες κατά την προσομοίωση και την ανάλυση. Επί πλέον, η εργασία στόχευσε, μέσω της εξαγωγής αξιόπιστων αριθμητικών αποτελεσμάτων, στην διατύπωση συμπερασμάτων (όχι μόνον ποιοτικώς χρήσιμων, αλλά και) ποσοτικώς αξιοποιήσιμων. Εκτιμάται ότι πολλά από τα ποσοτικά στοιχεία που εξήχθησαν από την παρούσα εργασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για την εκτίμηση της τρωτότητας των αρχαίων μνημείων

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ABAQUS Version 6.9 User's Manual*. 2009. Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc.
- Αλεξανδρής Α.Π., Ι.Ν. Ψυχάρης, και Ε.Α. Πρωτόπαπα. 2001. Η κατάρρευση του ναού του Δία στην Ολυμπία. Ανάστροφες αναλύσεις με την μέθοδο του διακριτού στοιχείου. 2^ο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, Τ.Ε.Ε.-Ο.Α.Σ.Π.-Σ.Π.Μ.Ε.-Ι.Τ.Σ.Α.Κ., Θεσσαλονίκη, τομ. Α', σελ. 297-306.
- Allen R.H., I.J. Oppenheim, A.P. Parker, and J. Bielak. 1986. On the dynamic response of rigid bodies assemblies. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 14, pp. 861-876.
- Ambraseys N. 1985. On the protection of monuments and sites in seismic areas. In 2nd *International Meeting for the Restoration of the Acropolis Monuments*, Athens, Greece, pp. 207-228.
- Ambraseys N. 2009. *Earthquakes in the eastern Mediterranean and the Middle East: a multidisciplinary study of seismicity up to 1900*. Cambridge University Press.
- Ambraseys N., and I.N. Psycharis. 2011. Earthquake stability of columns and statues. *Journal of Earthquake Engineering*; Vol. 15, pp. 685-710.
- Apostolou M., G. Gazetas, and E. Garini. 2007. Seismic response of slender rigid structures with foundation uplifting. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 27, pp. 642–654.
- Argyriou N., O.-I. Ktenidou, M. Manakou, P. Apostolidis, F.J. Chavez Garcia, and K. Pitilakis. 2007. Seismic response analysis of ancient columns. In Proceedings of 4th International Conference on Geotechnical Engineering, Thessaloniki, Greece, June 25–28, 2007, Paper No. 1659
- ASTM B 265: Standard Specification for Titanium and Titanium Strip, Sheet and Plate*.
- ASTM B 348: Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Bars and Billet*.
- Bazant Z.P., R. Gettu, and M.T. Kazemi. 1991. 'Identification of nonlinear fracture properties from size effect tests and structural analysis based on geometry-dependent R-curves. *International Journal Rock Mechanics*, Vol. 28, No 1, pp. 43-51.

- Cooper F. (ed.). 1996. *The temple of Apollo Bassitas*, Vol. I-IV. The American School of Classical Studies at Athens, Princeton, New Jersey.
- Beranek W.J. 1988. Understanding of structures. *Stable - Unstable? Structural consolidation of ancient buildings*. Lemaire R.M., and I.K. Van Balen (eds). Leuven University Press, pp. 29-44.
- Blegen C.W., M. Rawson, J.L. Davis, and C.W. Shelmerdine. 2001. *A guide to the palace of Nestor, Mycenaean sites in its environs, and the Chora Museum*. The American School of Classical Studies at Athens.
- Βαρουφάκης Γ. 1996. *Αρχαία Ελλάδα και Ποιότητα. Η ιστορία και ο έλεγχος των υλικών*. Αίολος, Αθήνα.
- Βόρδος Α.Γ., και Ε.-Ι. Κόλια. 2008. *Αιγιάλεια. Αρχαίες πόλεις και μνημεία*. ΥΠ.ΠΟ. – ΣΤ' Ε.Π.Κ.Α., Πάτρα.
- Bruneau P., και J. Ducat. 2010. *Οδηγός της Δήλου*, (4^η έκδοση). Γαλλική σχολή Αθηνών, Αθήνα.
- Δασαργύρη Γ. 2011. *Συσχέτιση μεταλλουργικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων των σιδηρών συνδέσμων του ναού του Επικούριου Απόλλωνα*. Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π., επιβλέπων Φούρλαρης Γ., Αθήνα.
- Δασίου Μ.-Ε., Χ. Μουζάκης, Ι. Ψυχάρης, Κ. Παπαντωνόπουλος, και Ι. Βάγιας. 2008α. Πειραματική διερεύνηση κιόνων και κιονοστοιχιών αρχαίων ναών. 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας. Άρθρο 1833. Τ.Ε.Ε., Αθήνα.
- Δασίου Μ.-Ε., Ι. Ψυχάρης, και Ι. Βάγιας. 2008β. Ανάλυση σεισμικής συμπεριφοράς κιόνων και κιονοστοιχιών αρχαίων ναών. 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας. Άρθρο 1832. Τ.Ε.Ε., Αθήνα.
- Dasiou, M.-E., H.P. Mouzakis, I.N. Psycharis, C. Papantonopoulos, and I. Vayas. 2009a. Experimental investigation of the seismic response of parts of ancient temples. *Protection of Historical Buildings, Prohitech 09* - Mazzolani (ed), Taylor and Francis Group, London, pp. 1617-1622.
- Dasiou, M.-E., I.N. Psycharis, and I. Vayas 2009b, Verification of numerical models used for the analysis of ancient temples. *Protection of Historical Buildings, Prohitech 09* - Mazzolani (ed), Taylor and Francis Group, London, pp. 1269-1274.
- Dasiou, M.-E., I.N. Psycharis, and I. Vayas 2009c. Numerical investigation of the seismic response of Parthenon, Greece. *Protection of Historical Buildings, Prohitech 09* - Mazzolani (ed), Taylor and Francis Group, London, pp.1127-1132.

- Dasiou M.-E., I.N. Psycharis, and A. Vrouva. 2012. Numerical evaluation of the seismic efficiency of connections of fractures and complements of ancient colonnades. *Computational Methods in Earthquake Engineering*, Volume 30 of the series Computational Methods in Applied Sciences pp. 225-241.
- Demosthenous M., and G.C. Manos. 1992. Dynamic response of rigid bodies subjected to horizontal base motions, *Earthquake Engineering, Tenth World Conference*, Balkema, Rotterdam, 2817 – 2821.
- Dimitrakopoulos E.G., and M.J. DeJong. 2012. Revisiting the Rocking Block: Closed-form Solutions and Similarity Laws. *Proceedings of the Royal Society A* (doi: 10.1098/rspa.2012.0026).
- Dinsmoor W.B. 1941. An archaeological earthquake at Olympia. *American Journal of Archaeology*, Vol. 45, No. 3, pp. 339-427.
- Dinsmoor W.B. 1950. *The Architecture of Ancient Greece*, London.
- Di Vita A. 1995. Archaeologists and earthquakes: the case of 365 A.D. *Annali di Geofisica*, 38, pp. 971-976.
- Δρακόπουλος Ι., Γ. Σταυρακάκης, Δ. Παπαναστασίου, και Γ. Δρακάτος. 1991. *Μελέτη σεισμικότητας – σεισμικής επικινδυνότητας του ναού Επικούριου Απόλλωνα (Βάσσα)*. Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών – Γεωδυναμικό Ινστιτούτου, Αθήνα.
- Drosos, V., and I. Anastasopoulos. 2014. Shaking table testing of multidrum columns and portals. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 43, Iss. 11, pp. 1703–1723.
- Ελευθερίου Β., Μ. Πίκουλα, και Β. Παπαδημητρίου. 2002. *Αναστηλωτικές εργασίες στην Ακρόπολη της Λίνδου Ι. Η ελληνιστική στοά*. ΥΠ.ΠΟ. – Επιτροπή Στερεώσεως και Αναστηλώσεως Μνημείων Ακροπόλεως Λίνδου, Αθήνα.
- Gruben G. 2000. *Ιερά και Ναοί των Αρχαίων Ελλήνων*. Μετάφραση: Δ. Ακτσελή. Ινστιτούτο του Βιβλίου – Α. Καρδαμίτσα, Αθήνα.
- Guidoboni E., A. Muggia, C. Marconi, and E. Boschi. 2002. A case study in Archaeoseismology. The collapse of the Selinunte temples (Southwestern Sicily): Two earthquakes identified. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 92, No.8, pp. 2961-2982.
- Εκελάντ Ι. 1993. *Τα Μαθηματικά και το Απροσδόκητο*. Μετάφραση: Γ. Στρατή – Γ. Σαγιά. Εκδόσεις Δίαυλος, Αθήνα.
- Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000, 2003*, Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, Αθήνα.

- European Standard EN338. *Structural Wood – Strength Classes*. 2009. European Committee for Standardization (CEN), Brussels.
- Ζάμπας Κ. 1983. Το πρόβλημα της αντισεισμικής προστασίας του Παρθενώνος. Έλεγχος σε στάδιο προμελέτης της σημερινής κατάστασης και της πρότασης αποκατάστασης. *Μελέτη Αποκαταστάσεως του Παρθενώνος*, ΥΠ.ΠΟ. – Ε.Σ.Μ.Α., Αθήνα, σελ. 603-658.
- Ζάμπας Κ. 1989. Δομικά προβλήματα της αποκαταστάσεως του Παρθενώνος. *Μελέτη Αποκαταστάσεως του Παρθενώνος*, τόμος 2^ο. ΥΠ.ΠΟ. – Ε.Σ.Μ.Α., Αθήνα, σελ. 153-180.
- Ζάμπας Κ. 1994. Συμπεριφορά του Παρθενώνος σε σεισμική καταπόνηση. *Μελέτη αποκαταστάσεως του Παρθενώνος*, τόμος 3β. ΥΠ.ΠΟ.-Ε.Σ.Μ.Α., Αθήνα.
- Ζάμπας Κ., Ν. Αμβράζης, Κ. Μπολέτης, και Ι. Ζάμπα. 2011. *Οι δύο χορηγικοί κίονες της νότιας κλιτύς της Ακρόπολης ως μάρτυρες της σεισμικής ιστορίας του κέντρου των Αθηνών*. Κοινοφελές Ίδρυμα Ιωάννη Σ. Λάτση, Αθήνα.
- Hanazato T., N. Theofanopoulos, and M. Watabe. 1989. Seismic response analyses of Parthenon columns. *Proceedings of the 1st International Conference Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings*, Florence, Italy, pp. 339-348.
- Ηλιόπουλος Β. 1997. *Η μορφή στο σχεδιασμό των συνδέσεων. Μηχανικές σταθερές συνδέσεις των αρχιτεκτονικών κατασκευών (συμβατικές – ελαφρές κατασκευές) του σχεδιασμού επίπλου και του βιομηχανικού αντικειμένου*, Ίων, Αθήνα.
- Hogan S.J. 1989. On the dynamics of rigid-block motion under harmonic forcing. *Proceedings of the Royal Society A*, Vol. 425, Iss. 1869.
- Hogan S.J. 1990. The many steady state responses of a rigid block under harmonic forcing. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 19, pp. 1057-1071.
- Housner G.W. 1963. The behavior of inverter pendulum structures during earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 53, pp. 404-417.
- Ishiyama Y. 1982. Motions of rigid bodies and criteria for overturning by earthquake excitations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10, pp. 635-650.
- Καρακίτσου Ε., και Ζ. Κοντέας. 2013. Εμπόλια και πόλοι από τα μνημεία της Ακρόπολης. *Ενημερωτικές ειδήσεις από την αναστήλωση των μνημείων της Ακρόπολης*, 13, ΥΠ.ΠΟ. – Υ.Σ.Μ.Α., Αθήνα, σελ. 9-12.
- Καραφαγκά Σ.Β., Γ.Κ. Τσινίδης, Μ.Κ. Πίκουλα, και Κ.Δ. Πιτιλάκης. 2015 Ακρόπολη Λίνδου, Απόκριση και ευστάθεια πολυσπόνδου ιωνικού κίονα, υπό σεισμική φόρτιση και ανεμοπίεση. *Πρακτικά 4ου Πανελληνίου Συνεδρίου Αναστηλώσεων*. ΕΤΕΠΑΜ, Θεσσαλονίκη, σελ. 791-804.

- Koh A.S., P.D. Spanos, and J.M. Roesset. 1986. Harmonic rocking of rigid block on flexible foundation. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, Vol. 112, No. 11, pp.1165-1180.
- Koh A., and G. Mustafa. 1990. Free rocking of cylindrical structures. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 116 pp. 35–54.
- Koh, A., and C. Hsiung. 1991a. Base isolation benefits of 3D rocking and uplift. I: Theory. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 117, pp. 1–18.
- Koh, A., Hsiung, C. 1991b. Base isolation benefits of 3D rocking and uplift. II: Numerical example. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 117, pp. 19–31.
- Koliopoulos P.K., B.N. Margaris, and N.S. Klimis. 1998. Duration and energy characteristics of Greek strong motion records. *Journal of Earthquake Engineering*, 2, pp. 391-417.
- Konstantidis, D., and N. Makris. 2005. Seismic response analysis of multidrum classical columns. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 34, Iss. 10, pp. 1243–1270.
- Κορρές Μ., και Χ. Μπούρας. 1983. *Μελέτη Αποκαταστάσεως του Παρθενώνος*. ΥΠΠΟ – ΕΣΜΑ, Αθήνα.
- Κορρές Μ. 1992. *Οικοδομική των αρχαίων κίωνων*, Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Κορρές Μ. 1994α. Η αρχιτεκτονική του Παρθενώνα. *Ο Παρθενώνας και η ακτινοβολία του στα νεώτερα χρόνια*, Επιμέλεια: Π. Τουρνικιώτης. Εκδοτικός Οίκος «Μέλισσα», Αθήνα, σελ. 136-161.
- Κορρές Μ. 1994β. Ο Παρθενώνας από την αρχαία εποχή μέχρι τον 19^ο αιώνα. *Ο Παρθενώνας και η ακτινοβολία του στα νεώτερα χρόνια*, Επιμέλεια: Π. Τουρνικιώτης. Εκδοτικός Οίκος «Μέλισσα», Αθήνα, σελ. 54-97.
- Κορρές Μ. 1994γ. *Από την Πεντέλη στον Παρθενώνα. Τα αρχαία λατομεία και η ιστορία ενός ημιτελούς δωρικού κιονοκράνου του πρώτου μαρμάρινου Παρθενώνος*. Εκδοτικός Οίκος «Μέλισσα», Αθήνα.
- Κορρές Μ. 1995. Μεγάλες βλάβες στα Προπύλαια. *Πρακτικά 4^{ης} Διεθνούς Συνάντησης για την αποκατάσταση των μνημείων της Ακροπόλεως*, 27-29 Μαΐου 1994. ΥΠΠΟ – ΕΣΜΑ, Αθήνα, σελ. 463 - 522.
- Korres M. 1996. Seismic damage to the monuments of the Athenian Acropolis. *Archaeoseismology*. Eds S. Stiros and R.E. Jones. IGME-British School at Athens, Fitch Laboratory Occasional Paper, 7, pp. 69-74.
- Korres M. 1997. Restoration and reconstruction work on monuments in antiquity. *La reintegrazione nel restauro dell'antico*. Gangemi Editore, Roma, pp. 197 - 208.

- Kourkoulis S.K., and E.D. Pasiou. 2015. Interconnected Epistyles of Marble Monuments Under Axial Loads. *International Journal of Architectural Heritage*, Vol. 9, Issue 3, pp. 177-194.
- Kunze E., and H. Weber. 1948. The Olympian stadium, the Echo colonnade and an “an archaeological earthquake”. *American Journal of Archaeology*, 52, pp. 490-496.
- Λέφας Π. 1996. *Βιτρουβίου: Περί Αρχιτεκτονικής*, Τομ. 1-2. Πλέθρον, Αθήνα.
- Κυριάκη Β.Ε.Ε.Σ. 1999. Το συγκρότημα του «Γυμνασίου». *Το Ασκληπιείο της Επιδαύρου. Η έδρα του Θεού γιατρού της αρχαιότητας*. Περιφέρεια Πελοποννήσου, Αθήνα, σελ. 34-38 .
- Κυριάκη Β.Ε.Ε.Σ. 2006. Οικοδομικές παρατηρήσεις σε κτίρια του Ασκληπιείου της Επιδαύρου. *Πρακτικά του 2^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου: Αρχαία Ελληνική Τεχνολογία*. Ε.Μ.Α.Ε.Τ. – Τ.Ε.Ε., Αθήνα.
- Κυριάκη Β.Ε.Ε.Σ. 2009. Εργασίες αποκατάστασης στο Τελετουργικό Εστιατόριο-Γυμνάσιο του Ασκληπιείου της Επιδαύρου. *Πρακτικά 2^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Αναστηλώσεων*, 21 – 24 Μαΐου 2009, Ε.Τ.Ε.Π.Α.Μ., Αθήνα.
- Makris N., and Y. S. Roussos. 2000. Rocking response of rigid blocks under near-source ground motions. *Géotechnique*, Vol. 50, Iss. 3, pp. 243–262.
- Makris N., and M. Vassiliou. 2013. Rocking response and stability analysis of an array of free-standing columns capped with a free-standing rigid beam. *4th ECCOMAS Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2013)*, M. Papadrakakis, V. Papadopoulos, V. Plevris eds. Kos, Greece.
- Μαλλούχου-Tufano Φ. 1998. *Η αναστήλωση των αρχαίων μνημείων στη νεώτερη Ελλάδα (1834-1939)*. Βιβλιοθήκη της Εν Αθήναις Αρχαιολογικής Εταιρείας Αρ. 176, Εκδόσεις Καπόν, Αθήνα.
- Μαλλούχου-Tufano Φ. 2014. Ενισχύσεις αρχαίων μνημείων στην Ελλάδα και την Ιταλία. Ιστορική αναδρομή: διαφορές και ομοιότητες. *Πρακτικά Ημερίδας ‘Έμφανείς και αφανείς ενισχύσεις μνημείων*. ΕΤΕΠΑΜ, Θεσσαλονίκη.
- Μανιδάκη Β. 2016. Ένας γρίφος από το δυτικό αέτωμα του Παρθενώνα: Οι στρεπτοσύνδεσμοι στο σύστημα δόμησης του τυμπάνου. *Ο Αρχιτέκτων*. Τιμητικός τόμος στον Καθ. Μανόλη Κορρέ, Επιμέλεια: Κ. Ζάμπας, Β. Λαμπρινουδάκης, Ε. Σημαντώνη-Μπουρνιά, και Α. Onesorg. Εκδόσεις Μέλισσα, Αθήνα, σελ. 87-97.
- Manos G.C., M. Demosthenous, V. Kourtides, and A. Hatzigeorgiou. 2001. The Dynamic and Earthquake Behaviour of Ancient Columns and Colonnades with and without Shape Memory Alloy Devices. In *STREMAH 2001*, Florence, Italy.

- Manos G C., M. Demosthenous, E. Tsakmakides, and V. Kourtides. 2009. Experimental and numerical investigation of the sliding response for drums located at columns of ancient greek temples. In *Protection of Historical Buildings, PROHITECH09*, vol. 2, ed., F. M. Mazzolani. London, U.K.: Taylor & Francis Group, 1641-1646.
- Manos G.C., A. Petalas, M. Demosthenous. 2013. Numerical and experimental study of the rocking response of unanchored body to horizontal base excitation. 4th *ECCOMAS Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2013)*, M. Papadrakakis, V. Papadopoulos, V. Plevris eds. Kos, Greece.
- Ματθαίου Α.Π. 2016. Ως αν ο αρχιτέκτων κελεύη. Ο Αρχιτέκτων στην πόλη των Αθηνών τον 5^ο και 4^ο αι. π.Χ. *Ο Αρχιτέκτων*. Τιμητικός τόμος στον Καθ. Μανόλη Κορρέ, Επιμέλεια: Κ. Ζάμπας, Β. Λαμπρινουδάκης, Ε. Σημαντώνη-Μπουρνιά, και Α. Onesorg. Εκδόσεις Μέλισσα, Αθήνα, σελ. 99-113.
- Mitsopoulou E.N., I.N. Doudoumis and B. Paschalides. 1998. Numerical analysis of the dynamic seismic response of multi-block monumental structures. *Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering*, Paris, Balkema.
- Μητσοπούλου Ε., και Β. Πασχαλίδης. 2001. Αριθμητική ανάλυση της δυναμικής απόκρισης κίωνων της κλασικής περιόδου αποτελούμενων από έναν ή περισσότερους σπονδύλους. *Πρακτικά 2^ο Συνεδρίου Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας*, Τ.Ε.Ε.-Ο.Α.Σ.Π.-Σ.Π.Μ.Ε.-Ι.Τ.Σ.Α.Κ., Θεσσαλονίκη, τομ. Α', σελ. 287-296.
- Miles M.M. 1989. A reconstruction of the Temple of Nemesis at Rhamnous. *Hesperia: The journal of the American School of Classical Studies at Athens*. Vol. 58, No 2, pp. 132-248.
- Milne J. 1881. Experiments in observational seismology. *Transactions Seismological Society of Japan*, 3, pp.12-64.
- Milne J. 1885. Seismic experiments. *Transactions Seismological Society of Japan*, 8, pp. 1-82.
- Mouzakis H.P., I.N. Psycharis, D.Y. Papastamatiou, P.G. Carydis, C. Papantonopoulos, and C. Zambas. 2002. Experimental investigation of the earthquake response of a model of a marble classical column, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, pp. 1681-1698.
- Μπούρας Χ. 1967. *Η Αναστήλωση της Στοάς της Βραυρώνος – Τα Αρχιτεκτονικά της Προβλήματα*. Γενική Διεύθυνση Αρχαιοτήτων και Αναστήλώσεων. Δημοσιεύματα του Αρχαιολογικού Δελτίου, αρ. 11, Αθήνα.
- Μπούρας Χ. 1980. *Μαθήματα Ιστορίας της Αρχιτεκτονικής*, σε 2 τόμους. ΕΜΠ, Αθήνα.

- Μπέσκος Δ.Ε. 1993. Χρήση πεπερασμένων και συνοριακών στοιχείων στην ανάλυση μνημείων και ειδικών κτιρίων. *Δελτίο ΣΠΜΕ ΑΡ. 216*, σελ. 31-43.
- Muller-Wiener W. 1995. *Η αρχιτεκτονική στην αρχαία Ελλάδα*. Μετάφραση: Μπ. Σμίτ-Δούνα. University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Ορλάνδος Α.Κ. 1955-60. *Τα Υλικά Δομής των Αρχαίων Ελλήνων και οι τρόποι εφαρμογής αυτών κατά τους συγγραφείς, τας επιγραφάς και τα μνημεία*, Τομ. 1-2. Βιβλιοθήκη της Εν Αθήναις Αρχαιολογικής Εταιρείας, αριθμ. 37, Αθήνα.
- Ορλάνδος Α.Κ. 1967-68. *Η Αρκαδική Αλίφειρα και τα μνημεία της*. Βιβλιοθήκη της Εν Αθήναις Αρχαιολογικής Εταιρείας, αριθμ. 58, Αθήνα.
- Ορλάνδος Α.Κ. 1977-78. *Η Αρχιτεκτονική του Παρθενώνος*, σε 3 τόμους. Βιβλιοθήκη της εν Αθήναις Αρχαιολογικής Εταιρείας, αριθμ. 86, Αθήνα.
- Ορλάνδος Α.Κ. και Ι.Ν. Τραυλός. 1986. *Λεξικόν Αρχαίων Αρχιτεκτονικών Όρων*. Βιβλιοθήκη της Εν Αθήναις Αρχαιολογικής Εταιρείας, αριθμ. 94, Αθήνα.
- Pavloncic L., F. Sinur, and D. Beg. 2009. Analysis of architrave connection. *Protection of Historical Buildings, Prohitech 09*, F. Mazzolani (ed). Taylor and Francis Group, London, pp.1659-1664.
- Pakkanen J. 1998. *The temple of Athena Alea at Tegea. A reconstruction of the Peristyle Column*. Department of Art History at the University of Helsinki and the Foundation of the Finnish Institute at Athens, Helsinki.
- Παλυβού Κ. 1999. *Ακρωτήρι Θύρας. Η οικοδομική τέχνη*. Βιβλιοθήκη της Εν Αθήναις Αρχαιολογικής Εταιρείας Αρ. 183, Αθήνα.
- Παπαδόπουλος Κ. 1999. *Μελέτη των νέων πόλων και εμπολίων από τιτάνιο του Παρθενώνα*, κατατεθειμένη στην Ε.Σ.Μ.Α., Αθήνα.
- Παπαδόπουλος Κ. 2000. *Παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμών διάτμησης σε σωληνωτά δοκίμια τιτανίου*, τεχνική έκθεση κατατεθειμένη στην Ε.Σ.Μ.Α. (αρ. πρωτ. 91/24-5-2000), Αθήνα.
- Papadopoulos K. 2006. The restoration study of the connections between the stone blocks in the steps of the temple of Apollo Epikourios. *Proceedings of the 5th International Conference of Structural Analysis of Historical Constructions*, Vol.3, New Delhi, pp.1389-1396.
- Παπαδόπουλος Κ., 2006, Η δομική αποκατάσταση του βόρειου πτερού του ναού του Επικούριου Απόλλωνα, *1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αναστήλωσεων*, Εταιρεία Έρευνας και Προώθησης της Επιστημονικής Αναστήλωσης Μνημείων, Θεσσαλονίκη.

- Παπαδόπουλος Κ., και Ε. Βιντζηλαίου. 2008. Η σεισμική απόκριση των κιόνων της περίπτωσης του ναού του Επικούριου Απόλλωνα. *3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας*. Άρθρο 1870. Τ.Ε.Ε., Αθήνα.
- Papadopoulos K. 2009. The restoration of the north façade of the temple of Apollo Epikourios. *Protection of Historical Buildings, Prohitech 09* - Mazzolani (ed), Taylor and Francis Group, London, pp.971-975.
- Παπαδόπουλος Κ., 2009, Η αποκατάσταση της θεμελίωσης και η ανάταξη των λίθων στο βόρειο τμήμα του ναού του Επικούριου Απόλλωνα. *Πρακτικά 2^ο Πανελληνίου Συνεδρίου Αναστηλώσεων*, 21 – 24 Μαΐου 2009, Ε.Τ.Ε.Π.Α.Μ., Αθήνα.
- Papadopoulos K. 2010. The restoration of the north-side foundation of the temple of Apollo Epikourios. *International Journal of Architectural Heritage*, Vol. 4, Num. 3, p.p. 246-269.
- Papadopoulos K., and E. Vintzileou. 2013. The new “poles and empolia” for the columns of the ancient Greek temple of Apollo Epikourios, *Built Heritage Monitoring Conservation Management*, Milano, pp.759-766.
- Papadopoulos K., and V. Savvatiannou. 2014. Architectural and Structural Aspects of the Ancient Greek Temple of Apollo Epikourios. *PROHITECH'14*, F.M. Mazzolani and G. Altay (eds), Bogazici University Publishing, Istanbul, pp. 725-730.
- Papadopoulos K., and E. Vintzileou. 2014. The Collapse of Epistyle Beams from the North Side of the Classical Temple of Apollo Epikourios: Analysis and Numerical Approach. *PROHITECH'14*, F.M. Mazzolani and G. Altay (eds), Bogazici University Publishing, Istanbul, pp. 209-215.
- Papadopoulos K., and E. Vintzileou. 2014. Numerical investigation of the seismic behavior of ancient columns. *SAHC2014 - 9th International Conference of Structural Analysis of Historical Constructions*. F. Peña & M. Chávez (eds), Mexico City.
- Παπαδόπουλος Κ., και Β. Σαββατιανού. 2015. *Ναός Επικούριου Απόλλωνα Βασσών. Μελέτη επέμβασης στις μακρές πλευρές και αναστήλωσης λίθων στο βόρειο επιστύλιο*, ΥΠ.ΠΟ.Α. – Ε.Σ.Ν.Ε.Α., Αθήνα.
- Παπαδόπουλος Κ., και Ε. Βιντζηλαίου. 2015. Αριθμητική διερεύνηση της σεισμικής ευστάθειας αρχαίων κιόνων *Πρακτικά 4ου Πανελληνίου Συνεδρίου Αναστηλώσεων*. ΕΤΕΠΙΑΜ, Θεσσαλονίκη, σελ. 330-343.
- Papadopoulos K., and E. Vintzileou. 2016. New titanium connectors for the columns capitals of the classical temple of Apollo Epikourios. *International Journal of Architectural Heritage*, Vol. 10, Num. 6, pp. 749-765.

- Παπαδρακάκης Μ. 1996. *Ανάλυση φορέων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων*. ΕΜΠ, Αθήνα.
- Παπαζάχος Β., και Κ. Παπαζάχου. 1989. *Οι σεισμοί της Ελλάδας*. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.
- Papaloizou L., P. Polycarpou, and P. Komodromos.. 2008. Numerical analysis of ancient multi-drum columns with epistyles under dynamic loadings. In *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing.
- Papantonopoulos C.L. 1991. The earthquake resistance of Apollo Epikourios columns. *Proceedings of the 2nd International Conference Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings*, Seville, pp. 53-64.
- Papantonopoulos C.L. 1993. The ‘articulated’ structural system: Studying the earthquake response of a classical temple. *Proceedings of the 3rd International Conference Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings*, Bath, pp. 483-493.
- Παπαντωνόπουλος Κ. 1995. Η ευστάθεια των κίωνων της περίπτωσης. *Μελέτη δομικής αποκαταστάσεως ναού Επικουρίου Απόλλωνος Βασσών*, τ. 1. ΥΠ.ΠΟ. – Ε.Σ.Ν.Ε.Α., Αθήνα, σελ. 249-278.
- Παπαντωνόπουλος Κ. 2000. *Αρχαία μνημεία υπό σεισμική δράση*, Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Papantonopoulos C., I.N. Psycharis, D.Y. Papastamatiou, J.V. Lemos, and H.P. Mouzakis. 2002. Numerical prediction of the earthquake response of classical columns using the distinct element method. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31 pp. 1699-1717.
- Παπασταματίου Δ., Ι. Ψυχάρης, και Δ. Ηλίας. 1990. *Μελέτη στατικής επάρκειας ναού Επικούριου Απόλλωνα*, Αθήνα.
- Papastamatiou D., and I. Psycharis. 1993. Seismic Response of Classical Monuments - A Numerical Perspective Developed at the Temple of Apollo in Bassae, Greece. *Terra Nova*, Vol. 5, pp. 591-601.
- Papazachos B.C., P.E. Comninakis, G.F. Karakaisis, B.G. Karakostas, Ch.A. Papaioannou, C.B. Papazachos, and E.M. Scordilis. 2000. *A catalogue of earthquakes in Greece and surrounding area for the period 550BC-1999*, Publ. Geoph. Lab., Univ. of Thessaloniki.
- Παπαχατζής Ν.Δ. 1980. *Πανσανίου Ελλάδος Περιήγησις. Βιβλία 7 και 8. Αχαϊκά και Αρκαδικά*, Εκδοτική Αθηνών Α.Ε., Αθήνα
- Παπαχατζής Ν.Δ.. 1980. *Πανσανίου Ελλάδος Περιήγησις. Βιβλία 9 και 10. Βοιωτικά και Φωκικά*, Εκδοτική Αθηνών Α.Ε., Αθήνα.

- Pappas A., C. Previato, B.Q. Silva, F. da Porto, J. Bonetto, and C. Modena. 2014. Multi-parametric seismic vulnerability assessment of free-standing columns. *SAHC2014 - 9th International Conference of Structural Analysis of Historical Constructions*. F. Peña & M. Chávez (eds), Mexico City.
- Pappas A., F. da Porto, and C. Modena. 2016a Seismic Vulnerability Assessment Form for Free Standing Columns Based on a Simplified Numerical Analysis. *International Journal of Architectural Heritage*, Vol. 10, pp. 281–299.
- Pappas A., A. Sextos, F. da Porto, and C. Modena. 2016b. Efficiency of alternative intensity measures for the seismic assessment of monolithic freestanding columns. *Bulletin of Earthquake Engineering*, pp 1–25.
- Παράσχη Κ., και Ν. Τογανίδης. 2002. *Μελέτη Αποκαταστάσεως του Παρθενώνος*, τόμος 6. *Μελέτη αποκαταστάσεως του νότιου τοίχου του Παρθενώνος*, ΥΠ.ΠΟ.-Ε.Σ.Μ.Α., Αθήνα.
- Πελεκίδης Χ., και Α. Δεσποτόπουλος. 1971. Οι μεγάλοι εθνικοί πόλεμοι. *Ιστορία του ελληνικού έθνους. Τόμος Β΄: Αρχαϊκός ελληνισμός*. Εκδοτική Αθηνών Α.Ε., Αθήνα, σελ. 278-357.
- Peña F., F. Pietro, P.B. Lourenço, and A. Campos-Costa. 2006. Dynamic behavior of rigid block structures subjected to earthquake motion. *Proceedings of the 5th International Conference of Structural Analysis of Historical Constructions*, P.B. Lourenço, P. Roca, C. Modena, S. Agrawal (Eds.), New Delhi, pp.707-714.
- Peña F., P.B. Lourenço, A. Campos-Costa, and J.V. Lemos. 2007. On the dynamics of rocking motion of single rigid-block structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 36, pp.2383-2399.
- Peña F., P.B. Lourenço, and A. Campos-Costa. 2008. Experimental dynamic behavior of free-standing multi-block structures under seismic loadings. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 12, pp. 953-979.
- Perry J. 1881. Note on the rocking of a column. *Transactions Seismological Society of Japan* 3, pp. 103-106.
- Prigigine I. 2003. *Οι νόμοι του Χάους*. Μετάφραση: Π.Α. Χριστοδούλου, Επιστ. Επιμέλεια: Ι.Ε. Αντωνίου. Εκδοτικός Οίκος Π.ΤΡΑΥΛΟΣ, Αθήνα.
- Psycharis I.N., and P.C. Jennings. 1983. Rocking of slender rigid bodies allowed to uplift. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 11, pp. 57-76
- Psycharis I.N. 1990. Dynamic behavior of rocking two-block assemblies. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 19, pp. 555-575.

- Psycharis I.N., D.Y. Papastamatiou, and A.P. Alexandris. 2000. Parametric investigation of the stability of classical columns under harmonic and earthquake excitations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 29, pp. 1093-1109.
- Psycharis I.N., J.V. Lemos, D.Y. Papastamatiou, C. Zambas, and C. Papantonopoulos. 2003. Numerical study of the seismic behavior of a part of the Parthenon Pronaos. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32, pp. 2063-2084.
- Psycharis I.N., M. Fragiadakis, and I. Stefanou. 2013. Seismic reliability assessment of classical columns subjected to near-fault ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 42, pp. 2061–2079.
- Rothaus R.M. 1996. Earthquakes ad temples in late antique Corinth. *Archaeoseismology*, Eds S. Stiros and R.E. Jones. IGME-British School at Athens, Fitch Laboratory Occasional Paper, 7, pp. 105-112.
- Rowland I. D. (translation), and T. Noble-Howe (comments and illustrations). 1999. *Vitruvius: Ten Books on Architecture*, Cambridge University Press.
- Σαπουνά-Σακελλαράκη Ε. 2012. Ο πλούτος του Ψηλορείτη. Η Ζώμινθος. *Αρχαιολογία και τέχνες*, <http://www.archaiologia.gr/blog/2012/11/12/>.
- Sarhosis V., P. Asteris, T. Wang, W. Hu, and Y. Han. 2016. On the stability of colonnade structural systems under static and dynamic loading conditions. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 14, Issue 4, pp. 1131-1152.
- Σβολόπουλος Δ. 1995. *Αρχιτεκτονική μελέτη ναού Επικουρίου Απόλλωνος Βασσών*, τ. 1-2. ΥΠ.ΠΟ. – Ε.Σ.Ν.Ε.Α., Αθήνα.
- Scandolo L., and S. Podestà. 2014 Numerical seismic response analysis of multidrum ancient columns. *SAHC2014 - 9th International Conference of Structural Analysis of Historical Constructions*. F. Peña & M. Chávez (eds), Mexico City.
- Scarlatoudis A.A., C.B. Papazachos, B.N. Margaritis, N. Theodulidis, Ch. Papaioannou, I. Kalogeras, E.M. Scordilis, and V. Karakostas. 2003. Empirical peak ground-motion predictive relations for shallow earthquakes in Greece. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(6), pp. 2591-2603.
- Sinopoli A. 1989a. Dynamic evolution by earthquake excitation of multiblock structures. *Proceedings of International 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 Review ASME*, Vol. 42, Iss. 11S, S233-S244.

- Sinopoli A. 1991, Dynamic analysis of a stone column excited by a sine wave ground motion. *Applied Mechanics Review ASME*, Vol. 44, Iss. 11S, S246-S255.
- Spanos P.D., and A.S. Koh. 1984. Rocking of rigid bodies due to harmonic shaking. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, Vol. 110, No. 11, pp.1627-1642.
- Spawforth T. 2006. *Αρχαίοι Ελληνικοί Ναοί*, Μετάφραση Μ. Μαχαίρα. Γ.Κ. Ελευθερουδάκης Α.Ε., Αθήνα.
- Stiros S.C. 1995. Archaeological evidence of antiseismic constructions in antiquity. *Annali di Geofisica*, Vol. XXXVIII, N. 5-6, pp. 725-736.
- Stiros S.C. 2001. The AD 365 Crete earthquake and possible seismic clustering during the fourth to sixth centuries AD in the Eastern Mediterranean: a review of historical and archaeological data. *Journal of Structural Geology*, Vol. 23, pp. 545-562.
- Tanoulas A. 2006. About clamps and dowels at the central building of the Propylaia of the Athenian Acropolis. *Πρακτικά του 2^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου: Αρχαία Ελληνική Τεχνολογία*, Ε.Μ.Α.Ε.Τ. – Τ.Ε.Ε., Αθήνα, σελ. 448-456.
- Τάσιος Θ.Π. 2006. *Αξιολογικά προβλήματα κατά την δομητική αποκατάσταση των μνημείων*, Λύχνος ΕΠΕ, Αθήνα.
- Τζαναβάρα Χ. 1999. Ένας άγνωστος αλλάζει τη ζωή μας - Οι αρχαίοι σεισμολόγοι μας. *Σεισμοί. Η ιστορία και το μέλλον τους*. Αφιέρωμα της εφημ. Ελευθεροτυπία, 18 Σεπτεμβρίου 1999, σελ. 2-5.
- Theofanopoulos N., T. Hanazato, K. Matsukawa, and M. Watabe. 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 I*, Florence, Italy, pp. 319-328.
- Τσακανίκα-Θεοχάρη Ε. 2006. *Ο δομικός ρόλος του ξύλου στην τοιχοποιία των ανακτορικών τύπων κτιρίων της Μινωικής Κρήτης*, Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα
- Σταυρακάκης Γ. 1999. Ελλάδα: οι μισοί σεισμοί της Ευρώπης. *Σεισμοί η ιστορία και το μέλλον τους*, Ένθετο-Αφιέρωμα στην εφημ. Ελευθεροτυπία της 18^{ης} /9^{ου}/1999, σελ. 12-13.
- Varoufakis G. 1992. The iron clamps and dowels from the Parthenon and Erechthion. *The Journal of the Historical Metallurgy Society*, Vol. 26, p.p. 1-18.
- Vassiliou M., and N. Makris. 2011. The rocking response of seismically isolated, free-standing rigid blocks. *3rd ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPADYN 2011)*, M. Papadrakakis, M. Fragiadakis, V. Plevris eds., Corfu, Greece.

- Vayias I., A. Marinelli, S.K. Kourkoulis, and S.-A. Papanicolopoulos. 2009. The pull-out problem in restoring marble fragments. *Protection of Historical Buildings, Prohitech 09 - Mazzolani* (ed), Taylor and Francis Group, London, pp. 1357-1362.
- Vintzileou, E., Papadopoulos, K., 2001, “Dowel action of titanium bars connecting marble elements”, *Connections between Steel and Concrete*, Edited by R. Eligehausen, Stuttgart, Vol. 2, pp. 899-908.
- Winkler T., K. Meguro, and F. Yamazaki. 1995. Response of rigid bodies assemblies to dynamic excitations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 24, pp. 1389-1408.
- Wood Handbook* 2010. Madison: Forest Products Laboratory, U.S. Department of Agriculture, Forest Service.
- Φερεντίνος Γ., και Μ. Γκιώνη. 2006. Το φυσικό γεωγραφικό πλαίσιο της Ελλάδας από τους προϊστορικούς χρόνους μέχρι σήμερα. *Η ιστορία των Ελλήνων. Προϊστορικοί χρόνοι*, Εκδόσεις «Δομή» Α.Ε., σελ. 13-44.
- Χουρμουζιάδης Γ.Χ. 2007. Σέσκλο και Διμήνι. «Αι προϊστορικά ακροπόλεις». *Μεγάλες στιγμές της ελληνικής αρχαιολογίας*, Εκδόσεις Καπόν, σελ. 184 - 195.
- Ψυχάρης Ι., Μ. Κορρές, Κ. Παπαντωνόπουλος, Ι. Ταφλαμπάς, Σ. Σουάνης, και J.V. Lemos. 2005. *Μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς των στύλων του Ολυμπίου Διός – Εφαρμογή στη διερεύνηση της σεισμικής ιστορίας της Αθήνας*, Έκθεση Νο NTUA/LEE-05/01. Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Ψυχάρης Γ.Ν., και Ε.Ε. Τουμπακάρη 2012. Παραμετρική διερεύνηση της σεισμικής ευστάθειας της προτεινόμενης προς αναστήλωση κιονοστοιχίας του ναού της Αφροδίτης στην Αμαθούντα της Κύπρου. *Πρακτικά 3ου Πανελληνίου Συνεδρίου Αναστηλώσεων*. ΕΤΕΠΑΜ, Αθήνα.
- Yim C.-S., A.K. Chopra, and J. Penzien. 1980. Rocking response of rigid blocks to earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 8, pp. 565-587.
- Zambas, C., M. Ioannidou, and A. Papanikolaou. 1986. The use of titanium reinforcement for the restoration of marble architectural members of Acropolis monuments. *Proc. IIC Congress, Bologna*: 138-141.
- Zambas, C. 1988. Principles for the structural restoration of the Acropolis monuments. *The Engineering Geology of Ancient Works. Monuments and Historical Sites*, Edited by P. Marinos and G. C. Koukis, Balkema, Rotterdam, pp. 1813-1818.
- Zambas, C. 1992. Structural repairs to the monuments of the Acropolis - The Pathenon. *Proc. Instn. Civ. Engrs., Civ Engng* 92, Nov.: 166-176.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

1.1:Στοά στην Μυκηναϊκή Ακρόπολη της Τίρυνθας	16
1.2:Σκαρίφημα στο οποίο αναπαρίσταται ανυψωτική μηχανή (δίκωλος άλλως τρίςπαστος) της αρχαιότητας, κατά Βιτρούβιο (Από Rowland and Noble-Howe 1999, fig. 119).....	19
1.3:Σκίτσο που παρουσιάζει την τυπική διαμόρφωση των χώρων σε ένα αρχαίο ελληνικό ναό (Από Sprawforth 2006, εικόνα. σελ. 87).....	20
1.4:Κύριες διαφορές δωρικού και ιωνικού ρυθμού, και ονοματολογία βασικών αρχιτεκτονικών όρων (Από Sprawforth 2006, εικόνα της σελ. 62).....	21
1.5:Αρχαίοι δωρικοί (οι πέντε πρώτοι από αριστερά) και ιωνικοί κίονες (κλ. 1:200) (Από Muller-Wiener 1995, εικ. 70)	22
1.6:Σχεδιαστική παρουσίαση των σχέσεων που συνδέουν βασικές διαστάσεις της πρόσοψης του ναού του Επικούριου Απόλλωνα (Από Παπαδόπουλος και Σαββατιανού 2015, σχέδιο Σ.3.2)	24
1.7:Οι δέκα απλοί μηχανισμοί παραμόρφωσης φυσικών (ρηγματομένων) ή τεχνητών (δομημένων) βράχων (Από Κορρές 1995, εικ. 23).....	26
1.8:Παραμορφώσεις οπίσθιου τοίχου ναΐσκου του 3 ^{ου} αι. π.Χ. που έχει μετατραπεί σε εκκλησία αφιερωμένη στον Άγιο Νικόλαο στην Σαντορίνη (Φωτογράφηση: Κ. Παπαδόπουλος).....	27
1.9:Οι κυριότερες βλάβες στον Παρθενώνα ως συνέπεια των σεισμών στις 24 και 25/2/1981 (Από Ζάμπας 1983, σχ. 2.8)	28
1.10:Φωτογραφίες με την πλαγιομετωπική και πλάγια άποψη ναόσχημου σύγχρονου ταφικού μνημείου στην Καλαμάτα, όπου φαίνονται οι βλάβες που υπέστη το μνημείο από τους σεισμούς του Σεπτεμβρίου 1986 (Φωτογράφηση: Κ. Ζάμπας).....	28
1.11:Κάτοψη στην οποία παρουσιάζονται οι κατευθύνσεις κατάρρευσης των κίωνων του ναού G του Σελινούντα στη νοτιοδυτική Σικελία (Από Guidoboni et al. 2002, fig. 7b).....	31
1.12:Σύνδεσμοι σχήματος αβαθούς Π στο βόρειο τοίχο του Ερεχθείου από την επέμβαση του Κυριακού Πιττάκη στο μνημείο την περίοδο 1837-1840 (Από Μαλλούχου-Tufano 2008, εκ. 42).....	35

1.13: Η αναστηλωμένη κιονοστοιχία της στοάς της Βραυρώνας, από ΝΔ. (Φωτογράφιση: Κ. Παπαδόπουλος).....	37
2.1: Διάταξη συνδέσμων και γόμφων στη συμβολή δύο τοίχων (Από Muller-Wiener 1995, εικ. 45)	41
2.2: Αρχαίοι σύνδεσμοι. Πελεκίνοι: Α1 έως Α3. Ζητάμορφοι: Β1 και Β2. Σχήματος διπλού Τ: Γ. Και σχήματος Π: Δ (Ορλάνδος 1955-1960, τ. 2, εικ. 135)	43
2.3: Σύνδεσμοι διπλού Τ στη νοτιοδυτική γωνία του αρχαϊκού ναού στην περιοχή Τραπεζιά Αιγίου, ο οποίος χρονολογείται περί το 540 π.Χ. (Φωτογράφιση: Κ. Παπαδόπουλος).....	43
2.4: Σύνδεσμος (και τμήματα του μολύβδου που τον περιέβαλλε) από την κρηπίδα του ναού του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών (Φωτογράφιση: Κ. Παπαδόπουλος)....	44
2.5: Τρόπος τοποθέτησης αρχαίου γόμφου στο στυλοβάτη του ναού του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών (Από Παπαδόπουλος και Σαββατιανού 2015, εικ. 4.27)	44
2.6: Τρόπος γόμφωσης των άκρων των ορθοστατών του Παρθενώνα (Από Κορρές και Μπούρας 1983, κάτω εικ. σελ. 111).....	46
2.7: Εκτιμώμενα στάδια κατασκευής μισού συνδέσμου του Παρθενώνα. Με το μαύρο χρώμα επισημαίνονται τα στρώματα χάλυβα και με το λευκό του σιδήρου (Από Varoufakis 1992, fig. 11).....	47
2.8: Σύνδεσμος από το ναό του Επικούριου Απόλλωνα, μετά από λείανση και χημική προσβολή του για την αποκάλυψη της εσωτερικής μακροδομής του (Από Δασαργύρη 2011, εικ. 3.11).....	47
2.9: Τρόπος προέντασης συνδέσμου: με κεκλιμένες κεφαλές πριν από την τοποθέτησή του (Από Παράσχη και Τογανίδης 2002, εικ. 51, σελ. 47)	50
2.10: Ενισχύσεις με συνδέσμους γείσου του Παρθενώνα (Από Κορρές 1994γ, άνω εικ., σελ. 110)	51
2.11: Μορφή και τυπικές διαστάσεις συνδέσμων από τιτάνιο που τοποθετήθηκαν στα επιστύλια της ΒΑ γωνίας του Παρθενώνα (Από Ζάμπας 1994, σχ. 7.1).....	53
2.12: Τρόπος τοποθέτησης συνδέσμου μορφής Π σε ζεύγος κατεστραμμένων εντορμιών λιθοπλίνθων του Παρθενώνα (Από Ζάμπας 1994, σχ. 7.2).....	53
2.13: Σύνδεσμοι από τιτάνιο διαφόρων μορφών που έχουν κατασκευαστεί για τα μνημεία της Αθηναϊκής Ακρόπολης (Φωτογράφιση: Γ. Παρχαρίδης).....	54
2.14: Μορφή και τυπικές διαστάσεις νέων γόμφων από τιτάνιο του στυλοβάτη στο ναό του Επικούριου Απόλλωνα (Από Παπαδόπουλος και Σαββατιανού 2015, εικ. 4.28)	54

2.15:Παρουσίαση σε σκαρίφημα του συστήματος πόλος/ζεύγος εμπολίων για τη σύνδεση μελών αρχαίων κίωνων	55
2.16:Αρχαίοι πόλοι και εμπόλια από τα μνημεία της Αθηναϊκής Ακρόπολης (Φωτογράφιση: Κ. Παπαδόπουλος).....	56
2.17: Άνω έδρα σπονδύλου προερχόμενου από κίονα του ναού της Αλέας Αθηνάς στην Τεγέα (Από Pakkanen 1998, fig. 21)	58
2.18: Γόμφος σε διπεφάνεια του Α. χορηγικού κίονα στη νότια κλιτύ (Από Ζάμπας κ.α. 2011, εικ. 83)	58
2.19: Πόλος και εμπόλιο από τιτάνιο, λίγο πριν (αριστερά) και κατά την τοποθέτησή του σε κίονα της περίπτωσης του ναού του Επικούριου Απόλλωνα (Φωτογράφιση: Κ. Παπαδόπουλος).....	61
2.20:Ορειχάλκινος πόλος και εμπόλιο πριν από την τοποθέτησή τους σε βατήρα της ελληνιστικής στοάς της Λίνδου (Από Ελευθερίου κ.α. 2002, εικ. 122).....	62
3.1:Τα ιστάμενα τμήματα του υστεροκλασικού ναού του Διός στην Νεμέα (Φωτογράφιση: Κ. Παπαδόπουλος).....	63
3.2: Τέσσερις από τις σαράντα δυνατές μορφές ταλάντωσης ενός τετράλιθου κίονα (Από Ζάμπας 1994, σχ. 5.26).....	65
3.3:Η κινηματική του στερεού σώματος: (1) ακινησία, (2) ολίσθηση, (3) περιστροφή, (4) περιστροφική ολίσθηση, (5) μεταφορική αναπήδηση και (6) περιστροφική αναπήδηση (Από Ishiyama 1982, fig. 1)	66
3.4:Στιγμιότυπο λικνισμού συστοιχίας ραδινών απαραμόρφωτων σωμάτων που φέρουν, χωρίς σύνδεση, ενιαία απαραμόρφωτη δοκό (Από Makris and Vassiliou 2013, fig. 1). 69	
3.5: Οι δύο διατάξεις κιονοστοιχιών των οποίων η σεισμική συμπεριφορά εξετάστηκε στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. (Από Δασίου κ.α. 2008, σχ. 4)... 72	
3.6:Το προσομοίωμα της τελικής αναστηλωτικής πρότασης για το ναό της Αφροδίτης στην Αμαθούντα της Κύπρου (Από Ψυχάρης και Τουμπακάρη 2012, εικ. 4).....	78
4.1:Προσομοίωση τοξωτού φράγματος με πεπερασμένα στοιχεία (Από Παπαδρακάκης 1996, σχ. iii).....	86
4.2:Φωτογραφίες των διαφόρων δοκιμών από γρανίτη των οποίων εξετάστηκε η δυναμική συμπεριφορά στο Εθνικό Εργαστήριο Πολιτικών Μηχανικών της Πορτογαλίας (Από Peña et al. 2008, fig. 1)	92
4.3:Σκαρίφημα με την μορφή και τις βασικές διαστάσεις του μαρμάρινου ομοιώματος του αρχαίου πολυσπόνδου κίονα (Από Mouzakis et al. 2002, fig. 1b)	93

4.4:Τα αριθμητικά προσομοιώματα των δοκιμίων από γρανίτη και του πολυσπόνδουλου κίονα (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος)	95
4.5:Οι αποτμήσεις ακμών (επισημασμένες με κόκκινα βέλη) στα τεμάχια του δίλιθου στύλου (αριστερά) και του τρίλιθου πλαισίου (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος).....	95
4.6:(α) Μετακινήσεις σπονδύλων του δοκιμίου του κίονα μετά από πείραμα στην σεισμική τράπεζα (Από Παπαντωνόπουλος 2000, φωτ. 3.5) και (β) η παραμορφωμένη στάση του αριθμητικού προσομοιώματος του κίονα, η οποία προέκυψε από την προσομοίωση του πειράματος EQ17 (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος).....	102
5.1:Τα κατάλοιπα του ναού της Αθηνάς στην αρχαία Αλίφειρα, μετά την ολοκλήρωση των ανασκαφών του Α. Ορλάνδου (άποψη από ΒΔ.) (Από Ορλάνδος 1967-68, εικ. 27)...	106
5.2:Γραφική αναπαράσταση της πρόσοψης του ναού της Αθηνάς (Από Ορλάνδος 1967-68, πίν. 4)	107
5.3:Τομή κατά πλάτος του μεγάλου βόρειου σκέλους της στοάς της Βραυρώνας (Από Μπούρας 1967, σχ. 19).....	111
5.4:Το μνημείο των Βασσών από ΒΔ, το 1985 (Από Παπαδόπουλος και Σαββατιανού 2015, φωτ. 1.1).....	112
5.5:Κάτοψη του ναού της Αλέας Αθηνάς (Από Gruben 2000, εικ. 118).....	115
5.6:Τα αρχιτεκτονικά κατάλοιπα του ναού της Αλέας Αθηνάς στην Τεγέα.....	116
5.7:Γραφική αποκατάσταση βόρειας όψης πρόπυλου τελετουργικού εστιατορίου Επιδάουρου (Από Κυριάκη 2006, εικ. 2)	117
5.8:Η πρόταση αναστήλωσης τμήματος του πρόπυλου του τελετουργικού εστιατορίου, σε αξονομετρικό σχέδιο (Από Κυριάκη 2006, εικ. 2)	118
5.9:Τα τρία πρώτα αριθμητικά προσομοιώματα του κίονα KB4, διακριτοποιημένα (από αριστερά προς δεξιά: προσομοιώματα Α', Β' και Γ') (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος).....	126
5.10:Το προσομοίωμα Δ' του κίονα KB4, διακριτοποιημένο (αριστερά), και τα υποκείμενα του κίονα μέλη του ίδιου προσομοιώματος, με τις διαστάσεις τους (δεξιά). Στο δεξί σχήμα δεν περιλαμβάνονται τα μέλη του κίονα (πλην του πρώτου σπονδύλου του), ούτε οι επαναλαμβανόμενες διαστάσεις των λίθων (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος).....	126
5.11:Οι παραμορφωμένες στάσεις του προσομοιώματος Α' του κίονα KB4, ως αποτέλεσμα κλιμακούμενων διεγέρσεων του με την χρήση των σεισμικών	

καταγραφών της Καλαμάτας (άνω) και της Έδεσσας (κάτω). (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος).....	132
5.11(Συνέχεια): Οι παραμορφωμένες στάσεις του προσομοιώματος Α΄ του κίονα ΚΒ4, ως αποτέλεσμα κλιμακούμενων διεγέρσεων του με τη χρήση των σεισμικών καταγραφών του Αιγίου (άνω) και της Αθήνας (κάτω) (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος).....	133
5.12:Οι παραμορφωμένες στάσεις του προσομοιώματος Ε΄ του κίονα ΚΒ4, ως αποτέλεσμα κλιμακούμενων διεγέρσεων του με την χρήση των σεισμικών καταγραφών της Καλαμάτας (άνω) και της Έδεσσας (κάτω) (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος)	138
5.12(Συνέχεια): Οι παραμορφωμένες στάσεις του προσομοιώματος Ε΄ του κίονα ΚΒ4, ως αποτέλεσμα κλιμακούμενων διεγέρσεων του με την χρήση των σεισμικών καταγραφών του Αιγίου (άνω) και της Αθήνας (κάτω) (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος).....	139
5.13: (α) Τα προσομοιώματα των κίωνων που αποτελούσαν το πρώτο γενικό προσομοίωμα των παραμετρικών αριθμητικών επιλύσεων, και (β) το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων του κίονα του Παρθενώνα (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος)	144
5.14: (α) Τα προσομοιώματα των κίωνων που αποτελούσαν το δεύτερο γενικό προσομοίωμα και (β) το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων του κίονα του ναού της Αλέας Αθηνάς (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος).....	145
5.15: Στιγμιότυπα απόκρισης του 1 ^{ου} γενικού προσομοιώματος. Άνω: Σεισμός Καλαμάτας επί 1.78 (PHV=67 cm/sec), t=8.1 sec. Κάτω: Σεισμός Έδεσσας επί 8.26 (PHV=96 cm/sec), t=8.7 sec (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος)	146
5.16: Στιγμιότυπα απόκρισης του 2 ^{ου} γενικού προσομοιώματος. Άνω: Σεισμός Αιγίου επί 2.08 (PHV=100 cm/sec), t=7.4 sec. Κάτω: Σεισμός Αθήνας επί 7.14 (PHV=117 cm/sec), t=8.84 sec (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος)	147
5.17: Σκαρίφημα με βασικά γεωμετρικά μεγέθη κίονα (Σχεδίαση: Κ. Παπαδόπουλος).....	153
6.1: Σχέδια που παρουσιάζουν τα νέα συνδετήρια στοιχεία μελών κίονα που τοποθετήθηκαν στους κίονες του πρόναου του Παρθενώνα (άνω) (Μελέτη - Σχεδίαση: Κ. Παπαδόπουλος και Ν. Τογανίδης) και της περίπτωσης του ναού του Επικούριου Απόλλωνα (Από Παπαδόπουλος και Σαββατιανού 2015, εικ. 4.30)	160
6.2: Σκαρίφημα που περιγράφει την δοκιμή διπλής διάτμησης (αριστερά,) και τα πέντε σωληνωτά δοκίμια τιτανίου μετά την υποβολή τους σε δοκιμή διπλής διάτμησης (Φωτογράφιση: Κ. Παπαδόπουλος).....	163

- 6.3: Το γενικό προσομοίωμα (αριστερά) και οι παραμορφώσεις των προσομοιωμάτων των σωληνωτών δοκιμίων την τελευταία στιγμή πριν από την θραύση τους (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος) 164
- 6.4: Το προσομοίωμα πόλου – ζεύγους εμπολίων (αριστερά), και το ίδιο προσομοίωμα με αθέατο το άνω εμπόλιο (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος)..... 165
- 6.5: Στιγμιότυπα με την παραμορφωμένη κατάσταση του προσομοιώματος (με αθέατο το άνω εμπόλιο) όταν άρχισε να εντείνεται ο πόλος (αριστερά) και λίγο πριν και κατά τη θραύση του πόλου (μέσο και δεξιά, αντίστοιχα) (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος)..... 166
- 6.6: Φωτογραφία των βασικών στοιχείων της πειραματικής διάταξης (αριστερά) (Φωτογράφιση: Κ. Παπαδόπουλος), και σχεδιαστική παρουσίαση (σε τομή) του χαλύβδινου βραχίονα εφαρμογής της εξωτερικής φόρτισης (Σχεδίαση: Κ. Παπαδόπουλος)..... 167
- 6.7: Φωτογραφία της πειραματικής διάταξης, πριν από την έναρξη μιας δοκιμής (αριστερά), και φωτογραφία με την κατάσταση του εμπολίου, του περιβάλλοντος τμήματος του ασβεστολιθικού τεμαχίου και του πόλου, μετά την ολοκλήρωση μίας δοκιμής (Φωτογράφιση: Κ. Παπαδόπουλος)..... 168
- 6.8: Γενική άποψη του προσομοιώματος του κίονα με τους πόλους και της εξωτερικής όψης του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων του (άνω αριστερά και δεξιά, αντίστοιχα). Επίσης, λεπτομέρειες του δικτύου των Π.Σ. που δείχνουν την άνω έδρα ενός σπονδύλου (κάτω αριστερά), έναν κολουροκωνικό πόλο (κάτω μέσο) και έναν σωληνωτό πόλο (κάτω δεξιά) (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος)..... 170
- 6.9: Οι παραμορφωμένες στάσεις των προσομοιωμάτων του κίονα με και χωρίς σωληνωτούς πόλους στις διεπιφάνειές του. Οι παραμορφώσεις των μελών του κίονα παρουσιάζονται σε έξαρση (τριπλάσιες των αντίστοιχων προβλέψεων), εξαιρουμένων αυτών που δεικνύουν κατάρρευση κίονα. (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος)..... 172
- 6.10: Οι παραμορφωμένες στάσεις των προσομοιωμάτων του κίονα με και χωρίς κολουροκωνικούς πόλους στις διεπιφάνειές του. Οι παραμορφώσεις των μελών του κίονα παρουσιάζονται σε έξαρση (τριπλάσιες των αντίστοιχων προβλέψεων), εξαιρουμένων αυτών που δεικνύουν κατάρρευση κίονα. (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος)..... 173
- 6.11: Οι παραμορφωμένες στάσεις των προσομοιωμάτων του κίονα με σωληνωτούς (άνω) και κολουροκωνικούς πόλους, καθώς και οι παραμορφώσεις των πόλων, για δύο

επίπεδα σεισμικής διέγερσης του κίονα Οι παραμορφώσεις των μελών του κίονα και των πólων παρουσιάζονται σε έξαρση (τριπλάσιες των αντίστοιχων αριθμητικών προβλέψεων) (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος).....	174
6.12: Το προσομοίωμα του κίονα χωρίς τους κολουροκωνικούς πólους με το πυκνό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων. Γενική άποψη (αριστερά) και λεπτομέρεια άνω έδρας σπονδύλου (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος)	175
7.1: Τα αριθμητικά προσομοιώματα των συστοιχιών κίωνων φερόντων λίθους επιστυλίου (βουστροφηδόν): Ευθύγραμμη τρικιόνια ναού Αλίφειρας, τρικιόνια υπό ορθή γωνία ναού Αλίφειρας, ευθύγραμμη τρικιόνια ναού Βασσών, τρικιόνια υπό ορθή γωνία ναού Βασσών, και περιστύλιο ναού Αλίφειρας (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος).....	180
7.2: Στιγμιότυπο κατάρρευσης του προσομοιώματος του περιστυλίου του ναού της Αθηνάς της Αλίφειρας (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος)	191
7.2 (Συνέχεια): Στιγμιότυπα κατάρρευσης του προσομοιώματος του περιστυλίου του ναού της Αθηνάς της Αλίφειρας (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος).....	192
7.2 (Συνέχεια): Στιγμιότυπα κατάρρευσης του προσομοιώματος του περιστυλίου του ναού της Αθηνάς της Αλίφειρας (Αριθμητική μελέτη: Κ. Παπαδόπουλος).....	193

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

4.1: Σύγκριση θεωρητικών τιμών – αριθμητικών προβλέψεων: Περίοδοι ελεύθερης ταλάντωσης λίθινου σώματος με ύψος τετραπλάσιο της βάσης του, για διάφορες αρχικές γωνίες εκτροπής του σώματος.....	90
4.2: Σύγκριση θεωρητικών τιμών – αριθμητικών προβλέψεων: Απόσβεση της ταλάντωσης σώματος με ύψος τετραπλάσιο της βάσης του που είχε αρχικά εκτραπεί κατά γωνία 3.0°	91
4.3 και 4.4: Αποτελέσματα διερεύνησης της επιρροής του συντελεστή απόσβεσης στις διεπιφάνειες των μελών των προσομοιωμάτων, τα οποία προέκυψαν από την προσομοίωση ενός πειράματος ελεύθερης ταλάντωσης μονολιθικού δοκιμίου (αριστερά) και ενός πειράματος σεισμικής διέγερσης πολυσπόνδουλου κίονα.....	96
4.5 και 4.6: Αποτελέσματα διερεύνησης της επιρροής διαφόρων συνδυασμών τιμών συντελεστών τριβής στα αποτελέσματα της προσομοίωσης ενός πειράματος σεισμικής διέγερσης πολυσπόνδουλου κίονα.....	97
4.7 και 4.8: Συγκρίσεις αποτελεσμάτων πειραμάτων ελεύθερης ταλάντωσης δοκιμίου 1 (αριστερά), και δοκιμίου 2, με σχετικές αριθμητικές προβλέψεις.....	99
4.9: Συγκρίσεις αποτελεσμάτων πειραμάτων αρμονικής διέγερσης δίλιθου στύλου με σχετικές αριθμητικές προβλέψεις	99
4.10 και 4.11: Συγκρίσεις αποτελεσμάτων πειραμάτων αρμονικής διέγερσης τρίλιθου πλαισίου με σχετικές αριθμητικές προβλέψεις.....	99
4.12 έως και 4.17: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αριθμητικών προβλέψεων, αναφορικά με την μετατόπιση δύο σημείων του κιονόκρανου (K2 και K3) του μαρμάρινου κίονα κατά την διαμήκη (αριστερά), κατακόρυφη (μέσο) και εγκάρσια διεύθυνση.....	101
5.1: Τα επιταχυνσιογραφήματα που κατεγράφησαν στην Καλαμάτα (1986), στην Έδεσσα (1990), στο Αίγιο (1995) και στην Αθήνα (1999)	121
5.2: Οι υπολογισθείσες εδαφικές ταχύτητες από τα επιταχυνσιογραφήματα που κατεγράφησαν στην Καλαμάτα (1986), στην Έδεσσα (1990), στο Αίγιο (1995) και στην Αθήνα (1999)	122

- 5.3: Οι υπολογισθείσες εδαφικές μετατοπίσεις από τα επιταχυνσιογραφήματα που κατεγράφησαν στην Καλαμάτα (1986), στην Έδεσσα (1990), στο Αίγιο (1995) και στην Αθήνα (1999) 123
- 5.4: Μέγιστες (αριστερά) και παραμένουσες διαμήκεις μετατοπίσεις σπονδύλων και κionoκράνου προσομοιώματος Α' κίονα KB4 130
- 5.5: Μέγιστες (αριστερά) και παραμένουσες εγκάρσιες μετατοπίσεις σπονδύλων και κionoκράνου προσομοιώματος Α' κίονα KB4..... 131
- 5.6: Σύγκριση μέγιστων οριζόντιων μετατοπίσεων κionoκράνου μοντέλου Α' κίονα KB4 με τις τιμές μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης (άνω), ταχύτητας (μέσο) και μετατόπισης (κάτω) των κλιμακούμενων σεισμικών διεγέρσεων 134
- 5.7: Σύγκριση αποτελεσμάτων που αφορούν το απλούστερο προσομοίωμα του κίονα KB4 (Α') και το προσομοίωμα με το πυκνό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων (Β') 135
- 5.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων που αφορούν τα δύο προσομοιώματα του κίονα KB4 με το πυκνό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων, το ένα χωρίς ένταση στον κίονα (προσομοίωμα Β') και το άλλο με ένταση (προσομοίωμα Γ') 135
- 5.9: Σύγκριση αποτελεσμάτων που αφορούν το απλούστερο προσομοίωμα του κίονα KB4 (Α') και το πιο εκτεταμένο το οποίο διεγείρεται έτσι ώστε η μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης (καταγεγραμμένη σε μία διεύθυνση) να εφαρμόζεται εγκάρσιως της κρηπίδας (Δ_1')..... 136
- 5.10: Σύγκριση αποτελεσμάτων που αφορούν το απλούστερο προσομοίωμα του κίονα KB4 (Α') και το πιο εκτεταμένο το οποίο διεγείρεται έτσι ώστε η μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης (καταγεγραμμένη σε μία διεύθυνση) να εφαρμόζεται παραλλήλως της κρηπίδας (Δ_2') 136
- 5.11: Οι χρονοϊστορίες των διαμηκών μετατοπίσεων του λίθου έδρασης (βατήρα) και του κionoκράνου του κίονα KB4 (αριστερά και δεξιά, αντίστοιχα) όπως αυτές προέκυψαν από την διέγερση του απλούστερου (Α') και των δύο πιο εκτεταμένων (Δ_1' και Δ_2') προσομοιωμάτων του κίονα KB4 με την χρήση των εξής σεισμικών καταγραφών: (α) της Καλαμάτας επί 1.29 (PHV=49 cm/sec), (β) της Έδεσσας επί 7.34 (PHV=85 cm/sec), (γ) του Αιγίου επί 1.66 (PHV=80 cm/sec), και (δ) της Αθήνας επί 4.97 (PHV=82 cm/sec) 137
- 5.12: Σύγκριση αποτελεσμάτων που αφορούν το απλούστερο προσομοίωμα του κίονα KB4, στο οποίο είχε οριστεί συντελεστή τριβής στις διεπιφάνειες των μελών του κίονα ίσος με 0.7 (προσομοίωμα Α') και ίσος με 0.4 (προσομοίωμα Ε') 140

- 5.13: Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση κionoκράνου προσομοιώματος κίονα Αλίφειρας (αδιάστατη ως προς την ακτίνα της κάτω έδρας του κίονα) συναρτήσσει της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης της σεισμικής διέγερσης 148
- 5.14: Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση κionoκράνου προσομοιώματος κίονα Βραυρώνας (αδιάστατη ως προς την ακτίνα της κάτω έδρας του κίονα) συναρτήσσει της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης της σεισμικής διέγερσης 148
- 5.15: Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση κionoκράνου προσομοιώματος κίονα Κ.ΒΔ Βασσών (αδιάστατη ως προς την ακτίνα της κάτω έδρας του κίονα) συναρτήσσει της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης της σεισμικής διέγερσης 149
- 5.16: Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση κionoκράνου προσομοιώματος κίονα Κ.Β4 Βασσών (αδιάστατη ως προς την ακτίνα της κάτω έδρας του κίονα) συναρτήσσει της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης της σεισμικής διέγερσης 149
- 5.17: Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση κionoκράνου προσομοιώματος κίονα Κ.Δ2 Βασσών (αδιάστατη ως προς την ακτίνα της κάτω έδρας του κίονα) συναρτήσσει της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης της σεισμικής διέγερσης 150
- 5.18: Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση κionoκράνου προσομοιώματος κίονα Επιδαύρου (αδιάστατη ως προς την ακτίνα της κάτω έδρας του κίονα) συναρτήσσει της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης της σεισμικής διέγερσης 150
- 5.19: Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση κionoκράνου προσομοιώματος κίονα Τεγέας (αδιάστατη ως προς την ακτίνα της κάτω έδρας του κίονα) συναρτήσσει της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης της σεισμικής διέγερσης 151
- 5.20: Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση κionoκράνου προσομοιώματος κίονα Παρθενώνα (αδιάστατη ως προς την ακτίνα της κάτω έδρας του κίονα) συναρτήσσει της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης της σεισμικής διέγερσης 151
- 5.21: Οι αριθμητικές προβλέψεις για τα κατώτατα όρια μέγιστης οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης που ανατρέπουν τους οκτώ κίονες, συσχετισμένα με την δεσπόζουσα περίοδο των διεγέρσεων καθώς και με τον δείκτη ραδινότητας και την «αδισυχνότητα» των κίωνων 154
- 5.22: Οι αριθμητικές προβλέψεις για τα κατώτατα όρια μέγιστης οριζόντιας εδαφικής ταχύτητας που ανατρέπουν τους οκτώ κίονες, συσχετισμένα με την δεσπόζουσα περίοδο των διεγέρσεων καθώς και με τους δείκτες ραδινότητας και μεγέθους των κίωνων 155

5.23: Οι αριθμητικές προβλέψεις για τα κατώτατα όρια μέγιστης οριζόντιας εδαφικής μετατόπισης που ανατρέπουν τους οκτώ κίονες, συσχετισμένα με τους δείκτες ραδινότητας και μεγέθους των κίωνων	155
6.1: Εξιδανικευμένο διάγραμμα τάσεων–παραμορφώσεων για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του τιτανίου τύπου Grade B.....	162
6.2: Συγκρίσεις αριθμητικών προβλέψεων για το προσομοίωμα αρχαίου κίονα τυπικών διαστάσεων, με και χωρίς πόλους (σωληνωτούς ή κολουροκωνικούς) στις διεπιφάνειες των μελών του.....	171
6.3: Συγκρίσεις αριθμητικών προβλέψεων για το προσομοίωμα αρχαίου κίονα τυπικών διαστάσεων, χωρίς κολουροκωνικούς πόλους αλλά με πολύ πυκνό δίκτυο ΠΣ, και για το προσομοίωμα του κίονα K.B4 του μνημείου των Βασσών με το πυκνό δίκτυο ΠΣ (Προσομοίωμα Β΄)	176
7.1: Σύγκριση αριθμητικών προβλέψεων που αφορούν την σεισμική απόκριση ελευθέρως ιστάμενου κίονα του περιστυλίου του ναού της Αθηνάς στην Αλίφειρα, όπως αυτές προέκυψαν από προσομοιώσεις με την χρήση δύο διαφορετικών εκδόσεων του λογισμικού Abaqus	182
7.2: Σύγκριση αριθμητικών προβλέψεων που αφορούν την σεισμική απόκριση ελευθέρως ιστάμενων κίωνων του περιστυλίου του ναού του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών, όπως αυτές προέκυψαν από προσομοιώσεις με την χρήση δύο διαφορετικών εκδόσεων του λογισμικού Abaqus	183
7.3: Συγκρίσεις αποτελεσμάτων που αφορούν τα προσομοιώματα της τρικιόνιας ευθύγραμμης συστοιχίας του ναού της Αθηνάς, με και χωρίς λίθους επιστυλίου. Οι διακεκομμένες γραμμές επισημαίνουν ανατροπή γειτονικού/ών κίονα/ων	185
7.4: Συγκρίσεις αποτελεσμάτων που αφορούν τα προσομοιώματα της τρικιόνιας υπό ορθή γωνία συστοιχίας του ναού της Αλίφειρας, με και χωρίς λίθους επιστυλίου. Οι στικτές γραμμές επισημαίνουν κατάρρευση λίθου/ων επιστυλίου ενώ οι διακεκομμένες ανατροπή γειτονικού/ών κίονα/ων.....	186
7.5: Συγκρίσεις αποτελεσμάτων που αφορούν τα προσομοιώματα της τρικιόνιας ευθύγραμμης συστοιχίας του ναού των Βασσών, με και χωρίς λίθους επιστυλίου. Οι στικτές γραμμές επισημαίνουν κατάρρευση λίθου/ων επιστυλίου ενώ οι διακεκομμένες ανατροπή γειτονικού/ών κίονα/ων.....	187
7.6: Συγκρίσεις αποτελεσμάτων που αφορούν τα προσομοιώματα της τρικιόνιας υπό ορθή γωνία συστοιχίας του ναού των Βασσών, με και χωρίς λίθους επιστυλίου. Οι στικτές	

- γραμμές επισημαίνουν κατάρρευση λίθου/ων επιστυλίου ενώ οι διακεκομμένες ανατροπή γειτονικού/ών κίονα/ων..... 188
- 7.7: Σύγκριση αριθμητικών προβλέψεων που αφορούν τη σεισμική απόκριση κίωνων που ανήκουν σε διαφορετικές διατάξεις κιονοστοιχιών. Οι στικτές γραμμές επισημαίνουν κατάρρευση λίθου/ων επιστυλίου ενώ οι διακεκομμένες ανατροπή γειτονικού/ών κίονα/ων..... 189
- 7.8: Οι αριθμητικές προβλέψεις για τα κατώτατα όρια μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης που προκαλούν κατάρρευση σε μεμονωμένους κίονες ή σε συστοιχίες κίωνων συζευγμένων με λίθους επιστυλίου, του ναού της Αθηνάς της Αλίφειρας και του ναού του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών. Τα προαναφερθέντα όρια είναι συσχετισμένα με την δεσπόζουσα περίοδο των διεγέρσεων καθώς και με τον δείκτη ραδινότητας και την «ιδιοσυχνότητα» των κίωνων 190
- 7.9: Οι αριθμητικές προβλέψεις για τα κατώτατα όρια μέγιστης εδαφικής ταχύτητας που προκαλούν κατάρρευση σε μεμονωμένους κίονες ή σε συστοιχίες κίωνων συζευγμένων με λίθους επιστυλίου, του ναού της Αθηνάς της Αλίφειρας και του ναού του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών. Τα προαναφερθέντα όρια είναι συσχετισμένα με την δεσπόζουσα περίοδο των διεγέρσεων καθώς και με τους δείκτες ραδινότητας και μεγέθους των κίωνων..... 190
- 7.10: Οι αριθμητικές προβλέψεις για τα κατώτατα όρια μέγιστης εδαφικής μετατόπισης που προκαλούν κατάρρευση σε μεμονωμένους κίονες ή σε συστοιχίες κίωνων συζευγμένων με λίθους επιστυλίου, του ναού της Αθηνάς της Αλίφειρας και του ναού του Επικούριου Απόλλωνα των Βασσών. Τα προαναφερθέντα όρια είναι συσχετισμένα με τους δείκτες ραδινότητας και μεγέθους των κίωνων 191

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

2.1: Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες τιτάνιου Grade 2	52
4.1: Θεωρητικές τιμές και αριθμητικές προβλέψεις: Περίοδοι ελεύθερης ταλάντωσης λίθινου σώματος με ύψος τετραπλάσιο της βάσης του, για διάφορες αρχικές γωνίες εκτροπής του σώματος.....	90
4.2: Θεωρητικές τιμές και αριθμητικές προβλέψεις: Σταδιακώς μειούμενη περίοδος ταλάντωσης λίθινου σώματος με ύψος τετραπλάσιο της βάσης του, το οποίο εκτρέπεται κατά γωνία 3.0° και αφήνεται ελεύθερα να λικνιστεί	91
4.3: Διαστάσεις των δοκιμίων από γρανίτη (Από Peña et al. 2007)	93
5.1: Οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις, ταχύτητες και μετατοπίσεις των σεισμικών καταγραφών, και στις τρεις διευθύνσεις.....	120
5.2: Οι δεσπόζουσες περίοδοι των σεισμικών καταγραφών, στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις	120
5.3: Στοιχεία περί των, υπό εξέταση, κίωνων και των αριθμητικών προσομοιωμάτων τους..	142
5.4: Οι διαστάσεις των μελών των προσομοιωμάτων των κίωνων του πρώτου γενικού προσομοιώματος.....	144
5.5: Οι διαστάσεις των μελών των προσομοιωμάτων των κίωνων του δεύτερου γενικού προσομοιώματος.....	145
5.6: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα περί των κατώτατων ορίων των σεισμικών διεγέρσεων που προκάλεσαν την κατάρρευση των αριθμητικών προσομοιωμάτων των κίωνων ...	152
5.7: Στοιχεία περί των αριθμητικών προσομοιωμάτων των, υπό εξέταση, κίωνων	154
6.1: Αποτελέσματα πειραμάτων εφελκυστικής αντοχής σε δοκίμια από τιτάνιο	162
7.1: Οι διαστάσεις των μελών των προσομοιωμάτων των κίωνων του μνημείου της Αλίφειρας και των Βασσών	181
7.2: Οι διαστάσεις των προσομοιωμάτων των λίθων επιστυλίου του μνημείου της Αλίφειρας και των Βασσών	181
7.3: Αξονικές αποστάσεις κίωνων (και) με βάση τις οποίες μορφώθηκαν τα προσομοιώματα των κιονοστοιχιών	181

