

## **ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΜΝΗΜΕΙΩΝ – ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ**

**ΓΚΟΓΚΟΥ ΡΕΒΕΚΚΑ  
ΚΟΛΙΟΥ ΜΑΡΙΑ**

### **Περίληψη**

*Η παρούσα εργασία αποτελείται από δύο θεματικές ενότητες που αφορούν τις μνημειακές κατασκευές. Η πρώτη έχει ως στόχο την αναλυτική παρουσίαση της σεισμικής απόκρισης τόσο μνημείων από τοιχοποιία (ιστορικές κατασκευές) όσο και μνημείων από μάρμαρο (αρχαία μνημεία). Όσον αφορά τη δεύτερη παρουσιάζει τους τρόπους και τις διαδικασίες επισκευής και ενίσχυσης των κατασκευών αυτών.*

### **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η πολιτισμική κληρονομιά κάθε χώρας αποτελεί ένα πολύ σημαντικό παράγοντα καθώς αντικατοπτρίζει το ιστορικό της παρελθόν και την αντίστοιχη κουλτούρα της. Όπως όλοι γνωρίζουμε ο πολιτισμός αυτός διαφαίνεται μέσω των μνημειακών κατασκευών. Με τον όρο μνημειακές κατασκευές εννοούμε κάθε κατασκευή ιδιαίτερα σημαντική από αρχαιολογικής, ιστορικής και κοινωνικής απόψεως.

Ωστόσο το γεγονός ότι μια ιστορική δομή έχει επιζήσει στο παρελθόν, δεν εγγυάται ότι θα επιζήσει και στο μέλλον. Η πολιτιστική αξία μιας ιστορικής δομής, και η επιθυμία να συντηρηθεί για το μέλλον, απαιτεί μια προστασία υψηλού επιπέδου ενάντια σε οποιαδήποτε πιθανή μελλοντική καταστροφή, πρωταρχικό αίτιο της οποίας είναι ο σεισμός. Για έναν μηχανικό, που συμμετέχει στη διαδικασία αποκατάστασης και ενίσχυσης μιας ιστορικής δομής, σημαίνει κυρίως να ενεργήσει έτσι ώστε να καταστήσει τη δομή ικανή να αντιμετωπίσει πιθανούς μελλοντικούς σεισμούς με το ελάχιστο πιθανό ποσό ζημίας, συντηρώντας τα χαρακτηριστικά και τις τιμές που καθιστούν αυτό το κτίριο μερικές φορές μοναδικό και αντάξιο προσοχής.

### **2. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ**

Ο σεισμός αποτελεί ίσως την πιο καταστροφική αιτία που προξένησε βλάβες, ικανές να οδηγήσουν έως και την κατάρρευση του μνημείου. Στις σεισμογενείς χώρες (όπως η Ελλάδα) οι αντοχές των μνημείων δοκιμάζονται συνεχώς από σεισμούς, όπου λόγω των υλικών τους είναι αδύνατα σε εφελκυστικές τάσεις.

Η σεισμική συμπεριφορά των μνημείων εξαρτάται από την ένταση του σεισμού, τη συχνότητά του, τη διάρκειά του, την απόσταση από το πιθανό επίκεντρο και τον τύπο του εδάφους.

#### **2.1. ΜΝΗΜΕΙΑ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ**

Η κύρια δομή των κατασκευών από τοιχοποιία αποτελείται από πέτρα, οπτόπλινθους (τούβλα) και κονίαμα. Για όλες τις ιστορικές κατασκευές αυτού του τύπου, που βρίσκονται σε ζώνες υψηλής σεισμικότητας, ο σεισμός αποτελεί έναν σημαντικό εχθρό, εξαιτίας της αρνητικής σεισμικής τους απόκρισης (δηλαδή παρουσιάζουν ιδιαίτερη τρωτότητα).

Οι βλάβες που παρουσιάζουν εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τα υλικά τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του κτιρίου και διακρίνονται σε έμμεσες και άμεσες. Έμμεσες είναι οι βλάβες δευτερευόντων κατασκευαστικών στοιχείων, όπως εσωτερικοί διαχωριστικοί τοίχοι, σκαλοπάτια και οι οποίες δεν επηρεάζουν την γενικότερη στατική λειτουργία του κτιρίου. Άμεσες είναι οι βλάβες της φέρουσας τοιχοποιίας οι οποίες

διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη στατική συμπεριφορά του κτιρίου και δημιουργούνται από μετακινήσεις, παραμορφώσεις ή ρηγματώσεις του.

Η διεύθυνση του σεισμού σε σχέση με τους τοίχους της κατασκευής παίζει σημαντικό ρόλο. Πιο συγκεκριμένα, οι τοίχοι που είναι παράλληλοι στη διεύθυνση του σεισμού, έχουν καλύτερη σεισμική συμπεριφορά από αυτούς που είναι κάθετοι, όπου παρατηρούνται ρωγμές εξαιτίας των καμπτικών δυνάμεων.

Οι χαρακτηριστικές ζημιές που παρατηρούνται είναι οι εξής:

- ο Για τοίχους παράλληλους στην διεύθυνση του σεισμού :

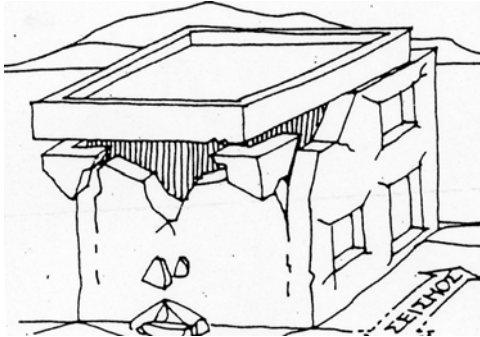
A) ρωγμές τύπου X (διατμητικές ρωγμές) ,

B) εάν υπάρχουν ανοίγματα παρατηρούνται ρωγμές γύρω από αυτά (καμπτική αστοχία) .

- ο Για τοίχους κάθετους στην διεύθυνση του σεισμού :

Ρωγμές στα σημεία ένωσης με εγκάρσιους τοίχους.

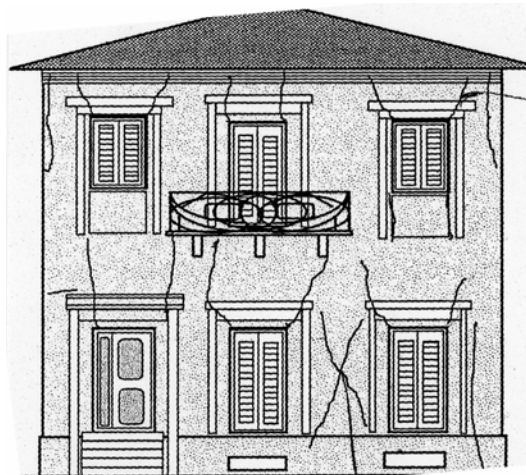
Επίσης εκτός από τις ρηγματώσεις οι πιθανές ζημιές είναι αποκόλληση τμήματος της κατασκευής ή κατάρρευση ολόκληρου του οικοδομήματος.



Σχήμα 1α: Αστοχία τοίχων (κατάρρευση) ανάλογα με τη διεύθυνση του σεισμού [3].



Σχήμα 1β: Αστοχία τοίχων (κατάρρευση) ανάλογα με τη διεύθυνση του σεισμού [3].



Σχήμα 2: Απεικόνιση χαρακτηριστικών ρωγμών [7].

Τελικώς να επισημανθεί ότι στον ελλαδικό χώρο τα κτίρια τα οποία είχαν μεγαλύτερη αντοχή σε σεισμικές δράσεις είναι τα νεοκλασικιστικά κτίρια, το στατικό σύστημα των οποίων είναι μικτές κατασκευές.

## 2.2. ΜΝΗΜΕΙΑ ΑΠΟ ΜΑΡΜΑΡΟ (ΑΡΧΑΙΑ ΜΝΗΜΕΙΑ)

Η μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς αρχαίων μνημείων είναι ένα δύσκολο πρόβλημα, λόγω της σπονδυλωτής τους κατασκευής, αλλά και πολύ σημαντικό για την αναστήλωση και τη συντήρηση και μπορεί να αντιμετωπισθεί μόνο με αριθμητικές μεθόδους.

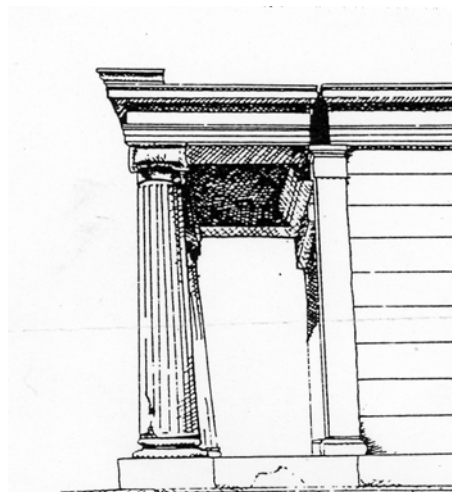
Οι κατασκευές αυτές είναι γενικώς πολύ ανθεκτικές σε σεισμικές δονήσεις εάν δεν έχουν υποστεί σημαντικές ζημιές, γεγονός που αποδεικνύεται και από το ότι πολλές από αυτές παραμένουν όρθιες για σχεδόν 2500 χρόνια. Η φθορά όμως, που έχουν υποστεί πολλά μνημεία, μειώνει σημαντικά την ευστάθειά τους, με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

Τα κατακόρυφα φέροντα στοιχεία των κλασικών μνημείων (κίονες, τοίχοι) αποτελούνται από ανεξάρτητα δομικά υλικά (σπόνδυλοι, λίθοι), που τοποθετούνται το ένα επάνω στο άλλο, χωρίς συνδετικό κονίαμα. Για το λόγο αυτό, κατά τη διάρκεια ενός σεισμού τα στοιχεία αυτά μπορούν να ολισθήσουν μεταξύ τους και να λικνιστούν, ανεξάρτητα ή σε ομάδες. Η σχετική ολίσθηση των στήλων συμβαίνει όταν η επιτάχυνση του εδάφους είναι μικρότερη από τον συντελεστή τριβής –  $\mu$  – των διεπιφανειών.

Η δυναμική απόκριση ενός τέτοιου συστήματος στερεών σωμάτων είναι έντονα μη γραμμική και πολύπλοκη, επειδή η κατασκευή συνεχώς αλλάζει «μορφή» ταλάντωσης κατά τη διάρκεια της δόνησης, με διαφορετικούς αρμούς να είναι ανοικτοί κάθε στιγμή. Το πλήθος των δυνατών «μορφών» ταλάντωσης αυξάνεται εκθετικά με τον αριθμό των σωμάτων που αποτελούν την κατασκευή. Για το λόγο αυτό, η αναλυτική επίλυση ενός συστήματος πολλών σωμάτων είναι πρακτικά αδύνατη [10].

Από μελέτες έχουν προκύψει τα παρακάτω συμπεράσματα :

- Μία τυπική κλασική στήλη μπορεί να «επιβιώσει» από τη σεισμική δράση μεγέθους  $M_w = 6.0 - 7.4$  [2].
- Οι κλασικές αρχαίες στήλες έχουν καλύτερη σεισμική συμπεριφορά από ότι οι μονολιθικές του ίδιου μεγέθους και λεπτότητας [2].
- Η επίδραση των ξύλινων συνδέσμων, που είχαν εγκατασταθεί κατά την αρχαιότητα, στην τροποποίηση της σεισμικής συμπεριφοράς των στήλων είναι οριακή [2].
- Οι μεταλλικοί σύνδεσμοι που τοποθετούνται για ενίσχυση (κυρίως από τιτάνιο) δεν βελτιώνουν σημαντικά τη σεισμική συμπεριφορά των στήλων και σε ορισμένες περιπτώσεις υποβιβάζουν την αντοχή τους [2].
- Η πιθανότητα αστοχίας αυξάνεται σημαντικά για διεγέρσεις μεγάλης περιόδου.



Σχήμα 3: Ζημιές στο μνημείο από το σεισμό της Καλαμάτας [3].

Τελικώς η σεισμική απόκριση αυτού του είδους των κτισμάτων δεν έχει πολλές ομοιότητες με την σεισμική απόκριση των νεότερων κατασκευών, οι οποίες επιδεικνύουν ανελαστική και πλάστιμη συμπεριφορά.

### 3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

#### 3.1. ΜΝΗΜΕΙΑ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ

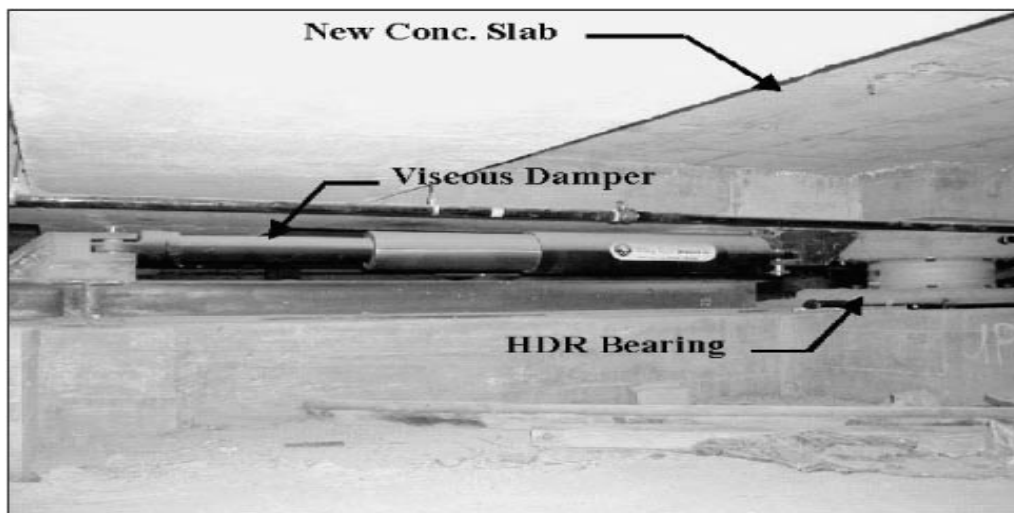
Για την αποκατάσταση μνημείων από τοιχοποιία πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ένα πλήθος παραγόντων, όπως η αρχιτεκτονική της κατασκευής (η οποία και πρέπει να διατηρηθεί), τα μηχανικά χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας και διάφοροι κώδικες, όπως ο Χάρτης της Βενετίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών είναι δύσκολος, λόγω του ότι στην τοιχοποιία δεν υπάρχει ομογένεια. Ο κύριος λόγος, για τον οποίο τα οικοδομήματα αυτού του είδους χρειάζονται επισκευή και ενίσχυση είναι ο σεισμός.

#### 3.1.1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

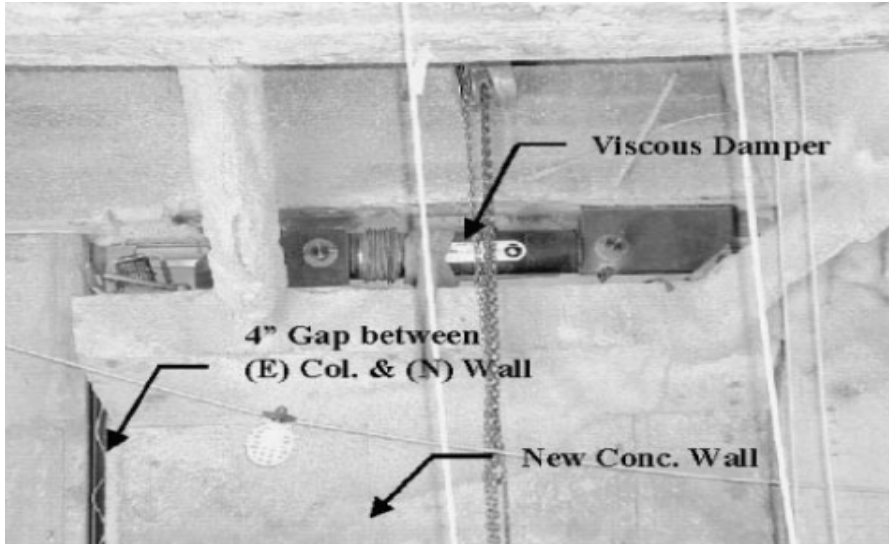
##### 3.1.1.1. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ (ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΙΞΩΔΟΥΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ)

Οι ενεργειακοί απορροφητές είναι μια νέα τεχνική ενίσχυσης με την οποία επιτυγχάνεται καλύτερη συμπεριφορά των κτιρίων σε σεισμό και διαφαίνεται ότι θα έχει ευρύτερη χρήση στο μέλλον. Πρόκειται για μια λύση με την οποία επιτυγχάνεται μείωση της επιτάχυνσης των ορόφων κατά τη σεισμική δράση καθώς επίσης και μείωση των ζημιών σε ιστορικά και εύθραυστα δομικά στοιχεία.

Η σεισμική αποκατάσταση αποτελείται από την απομόνωση των βάσεων σε σχέση με τα τοιχώματα και τις ιξώδεις διατάξεις απόσβεσης στην κορυφή και την βάση του κτιρίου. Υιοθετείται σεισμική απομόνωση για να μειωθεί η ενέργεια που διαβιβάζεται στο οικοδόμημα. Τα τοιχώματα χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την αντοχή, να ανακατανεύμουν τις δυνάμεις και να μειώσουν την αποτελεσματικότητα του κτιρίου κατά την περίοδο της δόνησης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το δημαρχείο του Λος Άντζελες.



Σχήμα 4<sub>α</sub> : Δημαρχείο Λος Άντζελες : ενεργοποιημένη διάταξη ιξώδους απόσβεσης στη φάση της απομόνωσης [4].



Σχήμα 4β: Δημαρχείο Λος Άντζελες : ενεργοποιημένη διάταξη ιξώδους απόσβεσης του 24<sup>ου</sup> ορόφου στην κορυφή του νέου τοίχου από σκυρόδεμα [4].

Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα.

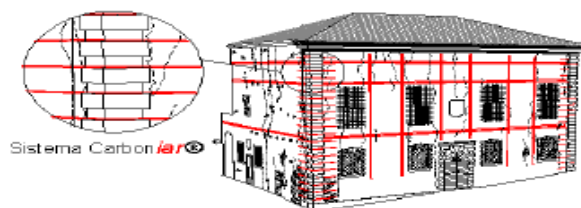
**Πλεονεκτήματα:** α) σχετικά οικονομική μέθοδος, β) καμία κατανάλωση εξωτερικής ενέργειας και γ) αποτελεσματική κατά τη διάρκεια ισχυρού σεισμού ή αέρα.

**Μειονεκτήματα:** Ένα βασικό μειονέκτημα που παρουσιάζεται σε περίπτωση πολυόροφου κτιρίου είναι η σύζευξη που εμφανίζεται μεταξύ των υψηλότερων ορόφων του οικοδομήματος και των απομονωμένων στη βάση. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της ενέργειας που διαβιβάζεται στο οικοδόμημα.

### 3.1.1.2. ΙΝΟΠΛΑΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ FRP

Τα FRP είναι κατά την άποψη της επιστημονικής κοινότητας τα ιδανικότερα υλικά για την ενίσχυση κι επισκευή των μνημείων. Τα τελευταία χρόνια πάρα πολλά μνημεία (θόλοι, τρούλοι, καμπαναριά εκκλησιών και ιστορικές κατασκευές) έχουν ενισχυθεί με τη χρήση συνθετικών υλικών. Ως μηχανικοί κατά την ενίσχυση των ιστορικών κατά βάση κτιρίων επιζητούμε την ανάληψη των φορτίων που επιφέρουν εφελκυστικές τάσεις και επιπλέον την εξασφάλιση επαρκούς διαπνοής έτσι ώστε να αποφεύγονται βλάβες σε επιζωογραφίες και τοιχογραφίες. Άρα χρειαζόμαστε χρήση υλικών που να εκπληρώνουν αυτές τις προϋποθέσεις όπως είναι τα CFRP (πολυμερή οπλισμένα με ίνες άνθρακα). Τα CFRP αποτελούνται από ανθρακονήματα κι εποξειδική ρητίνη η οποία έχει ως σκοπό την ανακατανομή των τάσεων που οφείλονται σε εξωτερικά φορτία.

Τα εφελκυστικά φορτία μπορούν να επιφέρουν διάφορες συνέπειες όπως απόκλιση από την κατακόρυφη λόγω καθίζησης των θεμελίων, έλλειψη αντίδρασης στις ωθήσεις της στέγης, εφελκυστικά φορτία σε θόλους, τρούλους, κτλ. Τα ανθρακονήματα θα πρέπει να είναι σε θέση να παραλαμβάνουν όλες τις τάσεις που δεν παραλαμβάνουν τα παραδοσιακά υλικά (κυρίως εφελκυστικές) [6].



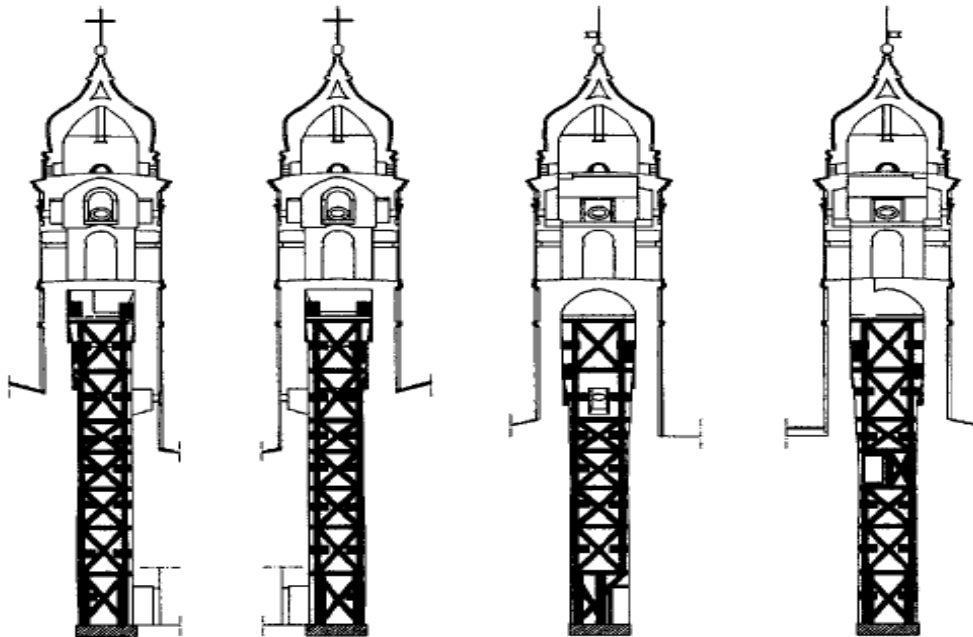
Σχήμα 5: Ενίσχυση ιστορικής κατασκευής με CFRP [6].

Τα πλεονεκτήματα που έχουν τα FRP όχι μόνο υπερέχουν σε σχέση με τα ελάχιστα μειονεκτήματα που έχουν αλλά και σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους που χρησιμοποιούνται στο χώρο των ενισχύσεων και επισκευών.

Τα σημαντικότερα από τα πλεονεκτήματα που έχουν είναι τα παρακάτω:

- ο Ασφάλεια από διάβρωση.
- ο Υψηλή εφελκυστική αντοχή και αύξηση ολκιμότητας (τόσο για μονοτονική όσο και για ανακυκλιζόμενη φόρτιση).
- ο Οικονομικό στην εφαρμογή. Δεν απαιτούνται βαριά μηχανήματα για την εφαρμογή.
- ο Εφαρμογή σε οποιοδήποτε μήκος.
- ο Ελάχιστο προστιθέμενο βάρος.
- ο Αντιστρεψιμότητα του αποτελέσματος.
- ο Εξαιρετική αντοχή σε κόπωση.

Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγεται το κόστος του υλικού, αν και δεν επηρεάζει σημαντικά το συνολικό προϋπολογισμό του έργου αφού μειώνεται το κόστος εξοπλισμού και τα εργατικά περίπου στο μισό. Ένα επιπλέον μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι δεν είναι ακριβώς καθορισμένος ο τρόπος της αγκύρωσης και η δημιουργία των θέσεων της αγκύρωσης στις εκατέρωθεν πλάκες. Η παρέμβαση αυτή στις πλάκες και ιδιαίτερα σε μια παλιά κατασκευή, πιθανόν να έχει αρνητικές συνέπειες όσον αφορά τη φέρουσα ικανότητα και τη στατική λειτουργία τους. Τέλος κατά τη διάρκεια των επισκευών παίζει σημαντικό ρόλο εάν πρόκειται για σκληρά και διαβρωτικά περιβάλλοντα και εάν υπάρχει έκθεση σε ακτινοβολία UV, όπου είναι πιθανόν να επέλθουν αρνητικές συνέπειες.



Σχήμα 6 :Καμπαναριό στη Σέρα Αγ. Κυρίκιου: στάδια ενίσχυσης με ινοπλισμένα πολυμερή [1].

### 3.2. ΜΝΗΜΕΙΑ ΑΠΟ ΜΑΡΜΑΡΟ (ΑΡΧΑΙΑ ΜΝΗΜΕΙΑ)

Τα αρχαία μνημεία έχουν επιδείξει μεγάλη ανθεκτικότητα κατά τη διάρκεια των αιώνων, παρά τις φυσικές καταστροφές, τους σεισμούς και τις ανθρώπινες επεμβάσεις που έχουν υποστεί. Τις μεγαλύτερες καταστροφές δεν τις έχουν επιφέρει οι σεισμοί, αλλά ο άνθρωπος, σύμφωνα με τους επιστήμονες. Το μυστικό της αντοχής τους δεν βρίσκεται, σαφέστατα, στα υλικά της οικοδόμησής τους, καθώς ο λίθος, το ξύλο και τα κονιάματα δεν μπορούν να

θεωρηθούν ασυνήθιστα, πόσο μάλλον πρωτότυπα. Εκείνο που διαφέρει, λένε σήμερα οι μελετητές της αρχαίας αρχιτεκτονικής, είναι ο τρόπος με τον οποίο αυτά χρησιμοποιούνταν. Λύσεις απλές, απλοϊκές ενδεχομένως για τις σύνθετες, σύγχρονες κατασκευαστικές αντιλήψεις οδηγούσαν ωστόσο στο πλέον σταθερό αποτέλεσμα. Όπως για παράδειγμα, η κατασκευή των μεγάλων οικοδομημάτων της κλασικής εποχής από ογκώδεις λίθους, που είχαν ως μόνο προσόν τους την τέλεια λάξευση και εν συνεχεία την δόμησή τους χωρίς καν την χρήση κονιάματος, αλλά μόνο με την τέλεια εφαρμογή τους.

### 3.2.1. ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΘΟΡΩΝ : ΜΟΡΦΗ ΚΑΙ ΑΙΤΙΑ

Οι φθορές που παρατηρούνται στο πεντελικό μάρμαρο (που είναι το κύριο δομικό υλικό των μνημείων με κύριο συστατικό το ανθρακικό ασβέστιο) και τα υλικά θεμελίωσης των μνημείων (πωρόλιθος) οφείλονται στη μεμονωμένη ή συνδυασμένη επίδραση περιβαλλοντικών συνθηκών, μηχανικών, φυσικοχημικών και βιολογικών παραγόντων, σε συνδυασμό με την εσωτερική δομή του μαρμάρου και τις ανθρώπινες επεμβάσεις. Από την μορφολογία τους οι φθορές διακρίνονται ως εξής:

*«Ζαχαροειδής» ή περικρυσταλλική φθορά*



Σχήμα 7 : «Ζαχαροειδής» ή περικρυσταλλική φθορά [5].

Εμφανίζεται στις περιοχές της επιφάνειας, που είναι εκτεθειμένες στη βροχή. Οφείλεται στην όξινη προσβολή του μαρμάρου από τους ατμοσφαιρικούς ρύπους (οξείδια του άνθρακα, του θείου και του αζώτου) που, παρουσία του νερού της βροχής, μετατρέπονται σε αραιά οξέα (όξινη βροχή). Η φθορά αυτή εκδηλώνεται με την προσβολή των κόκκων του μαρμάρου, που οδηγεί στην απώλεια της συνοχής τους και την τελική τους πτώση.

*Γυψοποίηση*



Σχήμα 8 : Γυψοποίηση [5].

Στις περιοχές, που δεν έρχονται σε επαφή με το νερό της βροχής, εμφανίζεται το φαινόμενο της γυψοποίησης ή θείωσης του μαρμάρου κατά την οποία το ανθρακικό ασβέστιο του μαρμάρου μετατρέπεται σε γύψο, που παραμένει στην επιφάνεια και μέχρι ένα ορισμένο πάχος διατηρεί το ανάγλυφό της.

*Επικαθίσεις αιωρουμένων σωματιδίων*



Σχήμα 9 : Επικαθίσεις αιωρουμένων σωματιδίων [5].



Στις περιοχές, που παραμένουν στεγασμένες από το νερό της βροχής παρατηρούνται οι επικαθίσεις αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας, όπως η αιθάλη, οι υδρογονάνθρακες, τα οξείδια των μετάλλων στα οποία οφείλεται η χρωματική αλλοίωση της επιφάνειας. Η επάλληλη εναπόθεση γύψου επικαθίσεων και ανακρυσταλλωμένου ανθρακικού ασβεστίου σχηματίζει τις μαύρες κρούστες.

#### *Θραύσεις*



Σχήμα 10 : Θραύσεις [5].

Πολλά μέλη είναι θραυσμένα με αποτέλεσμα την αλλοίωση της μορφολογίας και της γεωμετρίας τους. Η διάδοση και ο προσανατολισμός των θραύσεων εμφανίζεται είτε με την μορφή ρηγματώσεων ή με την μορφή αποφλοιώσεων, που είναι η απόσχιση – απόσπαση μεγάλων τεμαχίων από την επιφάνεια του μαρμάρου. Οι περισσότερες ρωγμές έχουν προκληθεί από την οξείδωση και διόγκωση των σιδερένιων συνδέσμων. Επίσης εμφανίζονται ρωγμές, που οφείλονται στην ορυκτολογική ετερογένεια του μαρμάρου και σε μηχανικά και θερμικά αίτια (όπως οι σεισμοί, η πυρκαγιά αρχαίων χρόνων).

#### *Αποσάρθρωση και απολεπίσεις*



Σχήμα 11 : Αποσάρθρωση και απολεπίσεις [5].

Αποσάρθρωση και απολεπίσεις παρατηρούνται σε περιοχές της επιφάνειας, όπου το μάρμαρο παρουσιάζει μειωμένη συνοχή, με συνέπεια την διεύδυση και συγκράτηση αυξημένης ποσότητας νερού.

#### *Διαφορική διάβρωση*



Σχήμα 12 : Διαφορική διάβρωση [5].

Διαφορική διάβρωση είναι η ανομοιόμορφη απομείωση της επιφάνειας του μαρμάρου που οφείλεται στην ορυκτολογική ετερογένεια του υλικού.



### *Κυψελοειδής διάβρωση*



Σχήμα 13 : Κυψελοειδής διάβρωση [5].

Κυψελοειδής διάβρωση εμφανίζεται με την μορφή οπών σποραδικά ή σε συστάδες. Οφείλεται στη δράση μικροοργανισμών, η ανάπτυξη των οποίων ευνοείται από την αυξημένη υγρασία. Παρατηρείται κυρίως στις βόρειες όψεις των μνημείων και είναι εντονότερη στις ζώνες των αργιλοπυριτικών φλεβών.

### *Αστοχία παλαιότερων επεμβάσεων συντήρησης*



Σχήμα 14 : Αστοχία παλαιότερων επεμβάσεων συντήρησης [5].

Εκτός από τα προβλήματα που, δημιουργήθηκαν από την οξείδωση των σιδηρών στοιχείων, αστοχίες παρουσίασαν και τα κονιάματα που τοποθετήθηκαν σε παλαιότερες επεμβάσεις συντήρησης, με σκοπό τη συγκόλληση θραυσμάτων και τις σφραγίσεις ρωγμών.

### *Βιολογική φθορά*



Σχήμα 15 : Βιολογική Φθορά [5].

Η έρευνα των βιολόγων μελετητών αποκάλυψε την παρουσία ποικίλων μικροβιακών πληθυσμών, βακτηρίων, μυκητών και λειχήνων. Διαπιστώθηκε ότι σημαντική είναι η συμβολή του βιολογικού παράγοντα στη φυσικοχημική φθορά του μαρμάρου. Η επιλιθική και ενδολιθική μικροχλωρίδα αλλοιώνει χρωματικά την επιφάνεια των μνημείων, η έκκριση διαβρωτικών ενώσεων από ορισμένους μικροοργανισμούς οδηγεί σε διάλυση το ανθρακικό ασβέστιο και μεγάλη μερίδα της μικροχλωρίδας εξασκεί μικροπιέσεις με αποτέλεσμα την φθορά της επιφάνειας [5].

### **3.2.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ**

Τα υλικά επισκευής είναι ανόργανα, ασβεστικής σύστασης, ειδικά σχεδιασμένα ως προς τις φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες, ώστε να είναι συμβατά με το καταπονημένο μάρμαρο. Όπου απαιτείται ενίσχυση με μεταλλικές καρφίδες χρησιμοποιούνται καρφίδες από

τιτάνιο. Τα οργανικά υλικά έχουν αποκλειστεί, διότι έχουν περιορισμένο χρόνο ζωής, επηρεάζονται από την υπερϊώδη ακτινοβολία και δεν είναι συμβατά με το μάρμαρο.

### 3.2.2.1. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΤΙΤΑΝΙΟ

#### Τιτάνιο

Το εμπορικώς καθαρό τιτάνιο χρησιμοποιείται για την κατασκευή συνδέσμων ενώ οι ράβδοι τιτανίου είναι οι οπλισμοί συγκόλλησης των μαρμάρων. Η επιλογή του τιτανίου έγινε με κριτήριο την εξαιρετική αντοχή του σε όλα τα είδη διάβρωσης, αλλά και με κριτήριο τις φυσικές και μηχανικές του ιδιότητες είναι κατάλληλο για την σύνδεση των αρχαίων μαρμάρων. Οι κυριότερες ιδιότητες δίνονται στον ακόλουθο πίνακα :

1. Πυκνότητα (gr/dm <sup>3</sup> )	4510
2. Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	105000
3. Συντελεστής Poisson	0,32
4. Συντελεστής θερμικής διαστολής (10 <sup>-6</sup> / °C)	9
5. Θερμοαγωγιμότητα (cal/cm*grad*sec)	0,007
6. Σκληρότητα (HB)	130
7. Εφελκυστική αντοχή (MPa)	420
8. Όριο διαρροής (MPa)	300
9. Επιμήκυνση θραύσεως (%)	20-22

Πίνακας 1 : Ιδιότητες Τιτανίου [9].

Η διαδικασία που ακολουθείται για τη ενίσχυση με τιτάνιο είναι:

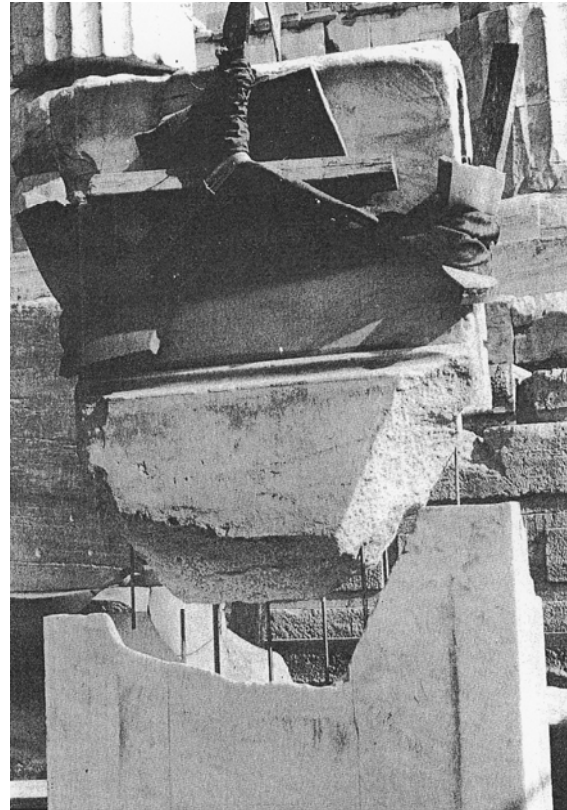
- Απομάκρυνση παλαιών μεταλλικών καρφίδων: Οι διαβρωμένες σιδερένιες ή ορειγάλκινες καρφίδες, που τοποθετήθηκαν για τη συγκράτηση θραυσμάτων, στο πλαίσιο παλαιότερων επεμβάσεων, αφαιρούνται και αντικαθίστανται, όπου χρειάζεται, με τιτάνιο.
- Απομάκρυνση παλαιών κονιαμάτων: Αφαιρούνται με μηχανικά μέσα τα παλαιότερα κονιάματα, που έχουν αστοχήσει ή έχουν προκαλέσει ρηγματώσεις και παραπροϊόντα. Δεν αφαιρούνται τα κονιάματα σε τμήματα της επιφάνειας, όπου μπορούν να προκληθούν περαιτέρω φθορές στο μάρμαρο.
- Καθαρισμός ρωγμών και εσωτερικών επιφανειών: Καθαρισμός ρωγμών, εσωτερικών κενών και επιφανειών θραύσης γίνεται για την απομάκρυνση σαθρών τμημάτων, σωματιδίων και μικροοργανισμών.
- Στερέωση επιφάνειας: Γίνεται στερέωση της επιφάνειας, που έχει υποστεί περικρυσταλλική διάβρωση ή έντονη αποσάθρωση, για την επιβράδυνση του φαινομένου.
- Αποκόλληση και επανασυγκόλληση θραυσμάτων: Για τα θραύσματα που είναι ετοιμόρροπα ή παραμένουν σε παραμόρφωση επάνω στην επιφάνεια, εξετάζεται κατά περίπτωση και κατά θέση, το ενδεχόμενο αποκόλλησής τους. Κριτήρια είναι η διατήρηση του υλικού και η μη αλλοίωση της γεωμετρίας της επιφάνειας, κατά την επανασυγκόλλησή τους. Όπου απαιτείται μεγαλύτερη ενίσχυση (προκειμένου για μεγαλύτερα θραύσματα) τοποθετούνται επιλεκτικά αφανείς καρφίδες τιτανίου των οποίων η διαστασιολόγηση γίνεται με την υπόδειξη πολιτικού μηχανικού. Σε περίπτωση μικρών θραυσμάτων (ψηγμάτων) χρησιμοποιείται ασθενέστερο μηχανικά κονίαμα με προσθήκη ασβέστη.
- Ενίσχυση συγκόλλησης: Γίνεται με καρφίδες τιτανίου.
- Πλήρωση ρωγμών και εσωτερικών κενών: Η πλήρωση ρωγμών και εσωτερικών κενών εξασφαλίζει τη στατική επάρκεια των αρχιτεκτονικών μελών και πραγματοποιείται με τη διοχέτευση ενέσιμου κονιάματος με σύστημα διασωλήνωσης.

Το υλικό πληρώσεως είναι λευκό τσιμέντο με προσθήκη ασβέστη, ανάλογα με τις απαιτήσεις αντοχής του κονιάματος στο σημείο εφαρμογής, ή λεπτόρρευστο ένεμα λευκού τσιμέντου Portland/θηραϊκής γης για τις περιπτώσεις, που οι ρωγμές είναι διαμερείς ή επεκτείνονται στο εσωτερικό του μέλους με διακλαδώσεις.

- ο Σφράγιση: Η σφράγιση των αρμών είναι η τελική φάση και γίνεται για την αποτροπή της εισόδου στερεών σωματιδίων, την απορροή των ομβρίων υδάτων και την αισθητική αποκατάσταση των επεμβάσεων [5].



Σχήμα 16: Συγκόλληση δύο τμημάτων του εξωτερικού επιστυλίου με οπλισμούς τιτανίου [8].



Σχήμα 17: Συγκόλληση αυθεντικού προέχοντος τμήματος καταπέτρου γείσου με συμπλήρωμα από νέο μάρμαρο που αντικαθιστά συμπλήρωμα από οπλισμένο σκυρόδεμα προηγούμενης αναστήλωσης [8].

#### *Σύνδεση των θραυσμάτων μαρμάρινων δοκών με δοκό τιτανίου*

Η συγκόλληση με δοκό τιτανίου παρουσιάζει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα.

Πλεονεκτήματα: α) Όλες οι βλάβες που προξενούνται στις δοκούς προέρχονται από την οξείδωση των σιδηροδοκών και όχι από κακό σχεδιασμό της συνδέσεως, β) για την πραγματοποίηση της συγκόλλησης δεν απαιτείται καμμία επί πλέον λάξευση του αρχαίου υλικού πέραν αυτής που έχει γίνει κατά τη διάρκεια παλαιότερης αναστήλωσης.

Μειονεκτήματα: α) Η ανάρτηση των θραυσμάτων των δοκών από δοκό τιτανίου αποτελεί αλλαγή του δομικού συστήματος του μνημείου, γεγονός που αντίκειται στις αρχές του Χάρτη της Βενετίας. Η αλλαγή του δομικού συστήματος οδηγεί πιθανόν σε ανομοιομορφία συμπεριφοράς τμημάτων της δοκού σε περίπτωση έντονης καταπόνησης, β) για την πραγματοποίηση της λύσης αυτής απαιτείται μεγάλη ποσότητα υλικού ξένου προς το μάρμαρο. Από αυτή την άποψη η λύση είναι αντιοικονομική, όχι τόσο από υλική θεώρηση αλλά από άποψη σχεδιασμού, γ) η κατασκευή μιας ολόσωμης δοκού τιτανίου δεδομένου ότι δεν παρέχεται στο εμπόριο δοκός εξ' ελάσεως παρουσιάζει σημαντικές τεχνικές δυσκολίες.

Η κατασκευή αυτή πρέπει να γίνει με συγκόλληση ελασμάτων τιτανίου σε όλο το μήκος του σε ατμόσφαιρα αργού, μέθοδος η οποία θα παρουσιάσει προβλήματα στρέβλωσης των διατομών [9].

#### *Σύνδεση θραυσμάτων των μαρμάρινων δοκών με οπλισμό τιτανίου*

Οι οπλισμοί είναι ράβδοι τιτανίου κυκλικής διατομής στην εξωτερική επιφάνεια των οποίων διαμορφώνεται σπείρωμα. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η συνάφεια των ράβδων με τον τσιμεντοπολτό. Οι οπλισμοί θα εμφυτευθούν σε διατρίμματα που θα ανοιχτούν στην μάζα του μαρμάρου. Η συγκόλληση θα γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε η πήξη του τσιμεντοπολτού να γίνεται υπό πίεση ώστε να μειωθεί η πιθανότητα ύπαρξης κενών. Το τμήμα της δοκού που έχει λαξευτεί για την τοποθέτηση των σιδηροδοκών θα καλυφθεί με δοκό από μάρμαρο η οποία θα συμπληρώσει το κενό και θα συμβάλει στην αύξηση της ακαμψίας της δοκού.

**Πλεονεκτήματα :** α) Η συγκόλληση με οπλισμό τιτανίου εξασφαλίζει τη μονολιθικότητα της δοκού και την συμπεριφορά της με αντίστοιχο τρόπο με την αρχική χωρίς ρηγματώσεις στη δοκό και στη φάση λειτουργίας αλλά και σε περίπτωση έντονων καταπονήσεων, β) η ποσότητα του νέου υλικού που θα χρησιμοποιηθεί είναι πολύ μικρή και συνακόλουθα η φθορά του αρχαίου υλικού πολύ μικρή σε σχέση με το συνολικό.

**Μειονεκτήματα :** Το μόνο που θα μπορούσε να αναφερθεί σαν μειονέκτημα είναι η συγκόλληση θραυσμάτων από τα οποία μερικά δεν συνανήκουν με μία μέθοδο της οποίας η αναστρεψιμότητα δεν είναι προφανής. Η αναζήτηση όμως των αυθεντικών θραυσμάτων είναι θεωρητική, αφού η πιθανή τοποθέτησή τους στις αρχικές τους θέσεις θα απαιτούσε νέες λαξεύσεις και συμπληρώσεις με νέο μάρμαρο με αμφίβολο αισθητικό αποτέλεσμα [9].

#### **4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Τα μνημεία είτε είναι κατασκευασμένα από τοιχοποιία είτε από μάρμαρο παρουσιάζουν ιδιαίτερη «ευαισθησία» κατά τη διάρκεια σεισμικής δράσης, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Για το λόγο αυτό πρέπει να εφαρμόζονται οι μέθοδοι επισκευής και ενίσχυσης που αναφέρθηκαν. Όσον αφορά τα μνημεία από τοιχοποιία η αποτελεσματικότερη μέθοδος που εφαρμόζεται είναι η ενίσχυση με ινοπλισμένα πολυμερή. Ταυτόχρονα οι απορροφητές ενέργειας είναι μια καινούργια τεχνική με πολύ καλές προδιαγραφές για το μέλλον. Αντιθέτως στην περίπτωση των μνημείων από μάρμαρο επικρατεί κατά κύριο λόγο μία και μοναδική τεχνική, η ενίσχυση με τιτάνιο. Η τεχνική αυτή σε ορισμένες περιπτώσεις επιδεικνύει μεγάλη αποτελεσματικότητα και σε άλλες, σύμφωνα με μελέτες, οριακή.

#### **5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Cosenza E., Iervolino I., “Case Studie : Seismic Retrofitting of Medieval Bell Tower with FRP”, Journal of Composites for Construction ASCE May- June 2007, pp.319 – 327.
- [2] Konstantinidis D., Macris N., “Seismic Response Analysis of Multidrum Classical Columns”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2005, Vol. 34, pp.1243 - 1270.
- [3] Petrini V., Save M. , “Protection of Architectural Heritage Against Earthquake”, CISM Courses and Lectures No 359 Intrnational Centre for Mechanical Sciences, SpringerWienNewYork, pp.62, 65, 67.
- [4] Youssef N., “Viscous Dampers at Multiple Levels for the Historic Preservation of Los Angeles City Hall”, The Structural Design of Tall Buildings 2001, Vol.10, pp.339 - 350.
- [5] ysm.a.culture.gr
- [6] Θεοδωράτος Α., Παπαδόπουλος Α., “Ιστορικά κτίρια : Ενίσχυση και Επισκευή τους με χρήση FRP”, 8<sup>ο</sup> Φοιτητικό Συνέδριο Επισκευές Κατασκευών, Μάρτιος 2002, εργασία Ν<sup>ο</sup> 20, σελ. 233 – 242.
- [7] Καραντώνη Τρ., “Φέρουσες τοιχοποιίες”, Πάτρα 2007, σελ. 171.

- [8] Κορρές Μ., Τογανίδης Ν., Ζάμπας Κ., Σκουλικίδης Κ., “Μελέτη Αποκαταστάσεως του Παρθενώνα”, Τόμος 2<sup>α</sup>, Αθήνα 1989, σελ.158.
- [9] Τανούλας Τ., Ιωαννίδου Μ., Μωραΐτου Α., “Μελέτη Αποκαταστάσεως των Προπυλαίων”, Τόμος 1, Αθήνα 1994, σελ. 345 - 351.
- [10] Ψυχάρης Ι., Παπασταματίου Δ., Καρύδης Π., Παπαντωνόπουλος Κ., Αλεξανδρής Α., Μουζάκης Χ, Ζάμπας Κ., Lemos J.V., “Αριθμητική και Πειραματική Διερεύνηση της Σεισμικής Συμπεριφοράς Αρχαίων Μνημείων”, 2<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνεδρίο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, Θεσσαλονίκη 2001, Τόμος α , σελ. 277 - 286.