

# Αξιολόγηση Σεισμικής Τρωτότητας Κατασκευών από Τοιχοποιία

## Seismic Vulnerability Assessment of Masonry Structures

Μαρία Γ. ΔΟΥΒΙΚΑ<sup>1</sup>, Αθανασία ΣΚΕΝΤΟΥ<sup>1</sup>, Μαρία  
ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΥ<sup>2</sup>, Αντωνία ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ<sup>2</sup>, Παναγιώτης Γ.  
ΑΣΤΕΡΗΣ<sup>1</sup>

*Λέξεις κλειδιά: Καμπύλες Θραυστότητας (Fragility Curves), Κατασκευές από  
Τοιχοποιία (Masonry Structures), Κριτήριο Αστοχίας (Failure Criterion),  
Μνημειακές Κατασκευές (Monumental Structures), Σεισμική Τρωτότητα (Seismic  
Vulnerability), Στάθμη Επιτελεστικότητας (Structural Performance Levels)*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μία μεθοδολογία για την εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας των κατασκευών από τοιχοποιία. Αυτό το είδος των κατασκευών, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται και οι μνημειακές κατασκευές, επιδεικνύουν υψηλή τρωτότητα υπό σεισμικές καταπονήσεις. Για το σκοπό αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντική η διατύπωση μιας αναλυτικής μεθοδολογίας για τον προσδιορισμό και την αξιολόγηση της φέρουσας ικανότητας αυτών των κατασκευών. Κύριο εργαλείο της μεθοδολογίας αποτελούν οι καμπύλες θραυστότητας (fragility curves), για την εξαγωγή των οποίων γίνεται χρήση αναλυτικών καταστατικών νόμων με σκοπό την προσομοίωση της αστοχίας της τοιχοποιίας (failure criteria). Η όλη μεθοδολογία παρουσιάζεται διεξοδικά και σε βάθος μέσω της παρουσίασης της εφαρμογής αυτής τόσο σε θεωρητικές όσο και σε πραγματικές μνημειακές κατασκευές από τοιχοποιία.

**ABSTRACT:** In this paper, a methodology is presented aiming to predict the vulnerability of masonry structures under seismic action. Masonry structures, among which many are cultural heritage assets, present high vulnerability under earthquake. Reliable simulations of their response to seismic stresses are exceedingly difficult because of the complexity of the structural system and the anisotropic and brittle behavior of the masonry materials. Within this framework, a detailed analytical methodological approach for assessing the seismic vulnerability of masonry historical and monumental structures is presented, taking

---

<sup>1</sup> Εργαστήριο Υπολογιστικής Μηχανικής, Ανώτατη Σχολή Παιδαγωγικής & Τεχνολογικής Εκπαίδευσης, email: mariadouvika7@gmail.com; athanasiaskentou@hotmail.gr; panagiotisasteris@gmail.com

<sup>2</sup> Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., email: mairi\_apostol@hotmail.com; amoropul@central.ntua.gr

into account the probabilistic nature of the input parameters by means of analytically determining fragility curves. The emerged methodology is presented in detail and in depth through application on theoretical and built cultural heritage real masonry structures.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τοιχοποιία συγκαταλέγεται μεταξύ των αρχαιότερων δομικών συστημάτων και υλικών. Αυτό εξηγεί και το ότι οι μνημειακές κατασκευές, είναι στη συντριπτική τους πλειοψηφία κατασκευές από τοιχοποιία, δηλαδή λιθосώματα συνδεδεμένα μεταξύ τους με κονίαμα. Το πολύμορφο και πολύτροπο, αφενός του υλικού και αφετέρου του δομικού συστήματος της τοιχοποιίας, καθορίζουν εν πολλοίς και τη σεισμική απόκριση (seismic response) των μνημειακών κατασκευών. Ειδικότερα, κύριο χαρακτηριστικό των κατασκευών αυτών αποτελεί η υψηλή σεισμική τρωτότητα (seismic vulnerability) που επιδεικνύουν όταν υπόκεινται σε σεισμικές διεγέρσεις και που οφείλεται στην έντονα ψαθυρή συμπεριφορά και στη σχετικά ελάχιστη εφελκυστική αντοχή του υλικού της τοιχοποιίας.

Η πολιτισμική, κοινωνική και αρχιτεκτονική αξία των ιστορικών κατασκευών, επιβάλλει το σεβασμό της ιδιαιτερότητάς τους. Κατά συνέπεια, οποιαδήποτε μέτρα προστασίας με στόχο τη μείωση της τρωτότητας, πρέπει να υπακούουν στις αρχές της αντιστρεψιμότητας (reversibility) και της συμβατότητας (compatibility). Για τον λόγο αυτόν, απαιτείται η αυστηρή τήρηση των κανονιστικών πλαισίων που διέπουν αυτές τις κατασκευές, τόσο σε εθνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο.

Από τις αρχές του προηγούμενου αιώνα διατυπώθηκαν και έγιναν αποδεκτά κανονιστικά πλαίσια για την προστασία αυτών των κατασκευών, όπως αποτελεί η πρόταση της επιστημονικής επιτροπής ISCARSAH (International Scientific Committee of the Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage) του ICOMOS το 2001 και συγκεκριμένα η Χάρτα του ICOMOS (Principles for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage, ISCARSAH Principles). Το κανονιστικό αυτό πλαίσιο οριοθετείται από τις αρχές της έρευνας και της τεκμηρίωσης, της αυθεντικότητας και της ακεραιότητας, της αισθητικής αρμονίας, της ελάχιστης επέμβασης και της αντιστρεψιμότητας, οι οποίες είναι σε συμφωνία και με τις επιταγές της Χάρτας των Αθηνών και της Βενετίας, καθώς επίσης και με τα αρχές που τέθηκαν από τους [Morton & Hume, 1979] (The Secretary of the Interior's Standards for Historic Preservation Projects). Επίσης, αναγκαία προϋπόθεση για την επιτυχή προστασία αυτών των κατασκευών αποτελεί η διεπιστημονική προσέγγιση και αντιμετώπιση κατά τη διερεύνηση οποιουδήποτε επισκευαστικού σεναρίου.

Η αξιόπιστη διατύπωση μιας μεθοδολογίας για την εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας των ιστορικών/μνημειακών κατασκευών από τοιχοποιία προϋποθέτει την επιτυχή προσομοίωση του δομικού συστήματος καθώς και του υλικού της τοιχοποιίας μέσω της διατύπωσης κατάλληλων αναλυτικών καταστατικών νόμων.

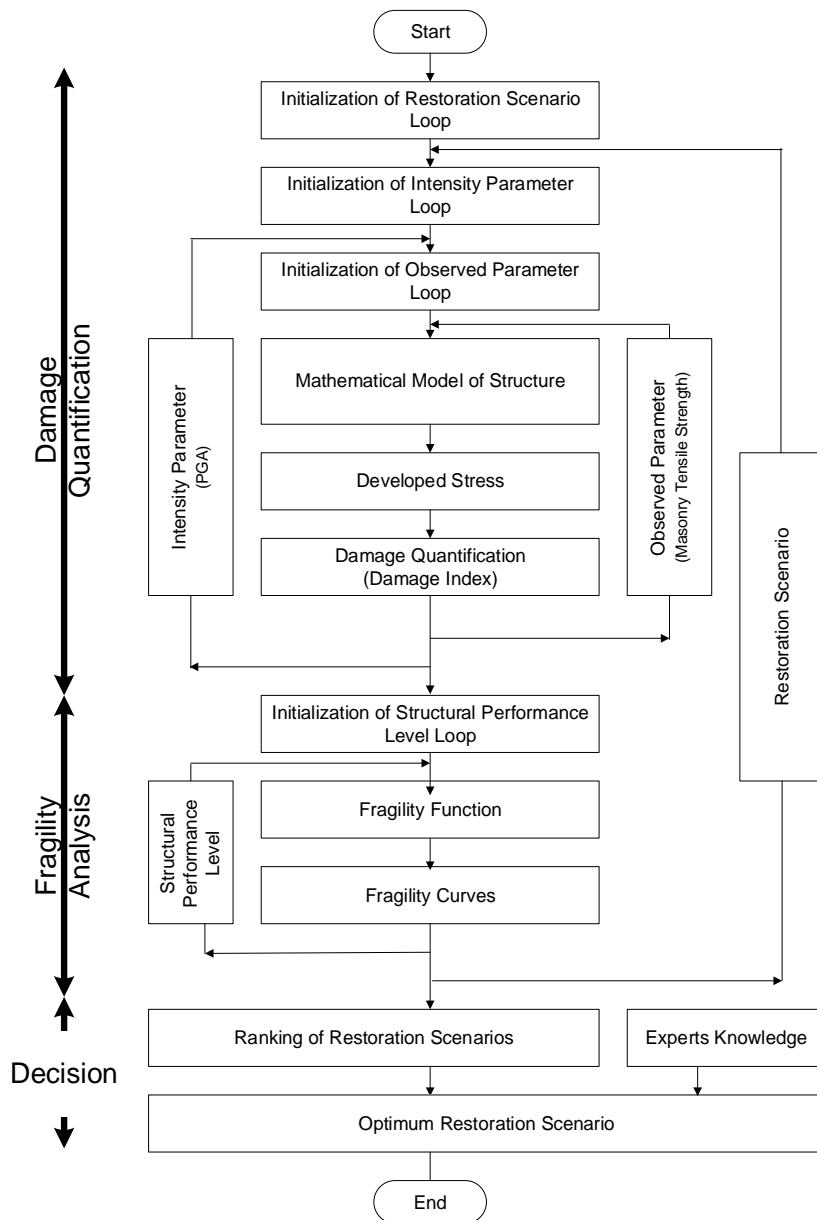
Στην κατεύθυνση αυτή όμως, η περίπλοκη μηχανική συμπεριφορά της τοιχοποιίας, η οποία αποτελεί ένα υλικό πολυφασικό, δημιουργεί σοβαρά εμπόδια. Επιπλέον, μια πρόσθετη και συνάμα κύρια δυσκολία για τη διατύπωση μιας τέτοιας μεθοδολογίας αποτελεί ο πιθανοτικός χαρακτήρας των παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των κατασκευών από τοιχοποιία. Στις παραμέτρους αυτές συγκαταλέγονται οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών (λόγω της μεγάλης διασποράς τους στο σύνολο της κατασκευής ή λόγω της έλλειψης ακρίβειας στις μεθόδους εκτίμησης και οργάνων). Επίσης δεν θα πρέπει να αγνοηθεί και ο τυχηματικός χαρακτήρας του σεισμού ο οποίος είναι άμεσα συνδεδεμένος με ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων. Λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας των παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των κατασκευών από τοιχοποιία, η αποτίμηση της τρωτότητας δε μπορεί να υλοποιηθεί σε όρους ντετερμινιστικής θεώρησης. Αντιθέτως, μία πιθανοτική προσέγγιση είναι περισσότερο κατάλληλη, ώστε να εφαρμοστεί στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η απόκριση της κατασκευής εκτιμάται και συγκρίνεται με οριακές καταστάσεις, όπως συγκεκριμένες οριακές τιμές ποσοτήτων απόκρισης που σχετίζονται άμεσα με τις δομικές βλάβες.

Στο πλαίσιο των παραπάνω ιδιαιτεροτήτων, η παρούσα εργασία, παρουσιάζει μια αναλυτική μεθοδολογία για την εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας των κατασκευών από τοιχοποιία λαμβάνοντας υπόψη τον πιθανοτικό χαρακτήρα των παραμέτρων που υπεισέρχονται στο πρόβλημα μέσω της ανάπτυξης αναλυτικών καμπυλών θραυστότητας (fragility curves).

## ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Με βάση τις αρχές και τις υποθέσεις τόσο του ICOMOS όσο και παρόμοιων εργασιών [Syrmakezis et al. 1995, 1997, Binda et al. 2000, Lourenço 2006, Asteris 2008, Onaka 2009, Tassios 2010, Chronopoulos et al. 2012, Asteris et al. 2005, 2014, 2015 και 2016, Apostolopoulou et al. 2017], έχει αναπτυχθεί συγκεκριμένη μεθοδολογία για την αποκατάσταση ιστορικών κατασκευών από τοιχοποιία, της οποίας το διάγραμμα ροής απεικονίζεται στο **Σχήμα 1**.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία αποτελείται από διακριτά βήματα. Ειδικότερα, περιλαμβάνει την εκτίμηση ή/και προσδιορισμό των Μηχανικών Χαρακτηριστικών των Υλικών, την Προσομοίωση του Δομικού Συστήματος και των Δράσεων, την Ανάλυση της Κατασκευής για τις δεδομένες φορτίσεις, τον προσδιορισμό των Περιοχών Αστοχίας της κατασκευής και των αντίστοιχων Δεικτών Βλάβης τόσο για το προσομοίωμα της υπάρχουσας κατάστασης της κατασκευής όσο και για το προσομοίωμα που αντιστοιχεί σε κάθε ένα επισκευαστικό σενάριο. Τέλος, με βάση τους δείκτες βλαβών κατασκευάζονται οι καμπύλες θραυστότητας οι οποίες, όπως και θα καταδειχθεί σε επόμενη παράγραφο, συντελούν στην ποσοτική εκτίμηση της τρωτότητας του κτιρίου της υπάρχουσας κατάστασης αυτού, καθώς και στην αξιολόγηση των σεναρίων επέμβασης.



**Σχήμα 1.** Διάγραμμα ροής προτεινόμενης μεθοδολογίας

Στις αμέσως επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται διεξοδικά οι κυριότεροι αναλυτικοί καταστατικοί νόμοι που απαιτούνται για την επιτυχή εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας, όπως είναι τα κριτήρια αστοχίας, οι δείκτες βλαβών, οι στάθμες επιτελεστικότητας και το μαθηματικό υπόβαθρο των καμπυλών θραυστότητας.

## Δείκτης Βλάβης

Ο έλεγχος των βλαβών σε ένα κτίριο είναι ένα πολύπλοκο έργο, ειδικά υπό σεισμική δράση. Για την περίπτωση των κατασκευών από τοιχοποιία, έχει προταθεί (Asteris, 2008) ένας νέος δείκτης βλάβης (damage index), ο οποίος χρησιμοποιεί ως παράμετρο απόκρισης το ποσοστό της περιοχής της κατασκευής που αστοχεί σε σχέση με τη συνολική της επιφάνεια. Ο προτεινόμενος δείκτης βλαβών (DI), για μια κατασκευή από τοιχοποιία μπορεί να εκτιμηθεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$[DI] = \frac{A_{fail}}{A_{tot}} \times 100 \quad (1)$$

όπου  $A_{fail}$  είναι η επιφάνεια της κατασκευής που έχει αστοχήσει και  $A_{tot}$  η συνολική επιφάνεια της κατασκευής.

## Κριτήρια Αστοχίας

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο για τον προσδιορισμό του δείκτη βλάβης απαιτείται ο προσδιορισμός του ποσοστού της κατασκευής που αστοχεί. Στην παρούσα εργασία για τον προσδιορισμό της αστοχίας των κατασκευών από τοιχοποιία γίνεται χρήση του κριτηρίου αστοχίας των Kupfer et al., 1969, καθώς επίσης και του Τροποποιημένου Κριτηρίου αστοχίας του Von Mises, το οποίο έχει προταθεί από τους Syrmakizis et al, 1995 και 1997.

## Στάθμες Επιτελεστικότητας

Ο σύγχρονος αντισεισμικός σχεδιασμός κατασκευών με στάθμες επιτελεστικότητας λαμβάνει υπόψη τόσο τις απαιτήσεις όσο και τους στόχους αντισεισμικής ικανότητας. Θεωρούνται τρεις στάθμες επιτελεστικότητας “Πίνακας 1” : α) σοβαρές β) μέτριες γ) ασήμαντες βλάβες, με παρόμοιο τρόπο με εκείνον που υιοθετεί η Federal Emergency Management Agency [FEMA 273 1997].

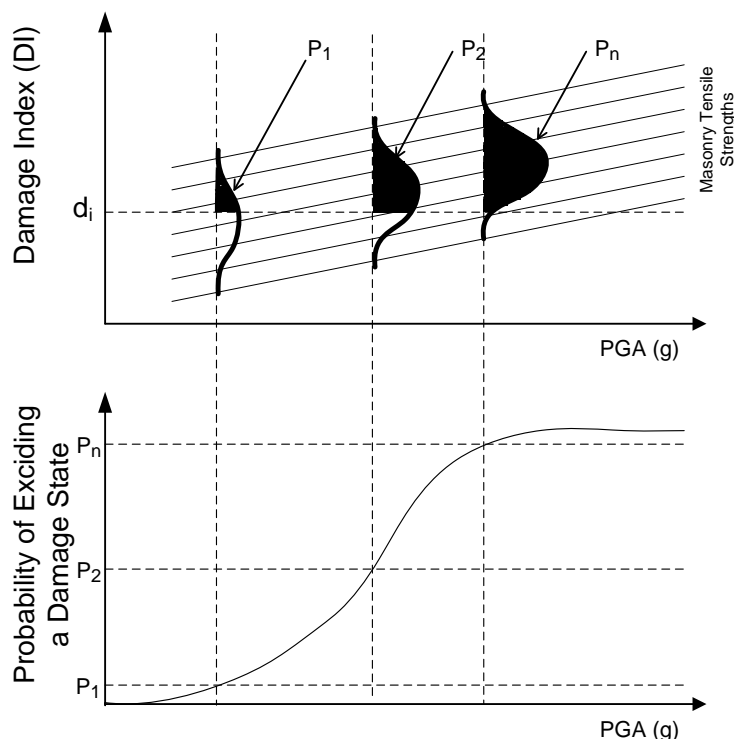
**Πίνακας 1.** Προτεινόμενες στάθμες επιτελεστικότητας για άοπλη τοιχοποιία

Στάθμη Βλαβών	Σοβαρές Βλάβες	Μέτριες Βλάβες	Ασήμαντες Βλάβες
	Εκτεταμένες ρηγματώσεις, αποκολλήσεις της επιφάνειας των πλίνθων και της επικάλυψης. Ορατές παραμορφώσεις τόσο εντός όσο και εκτός επιπέδου.	Εκτεταμένες ρηγματώσεις. Ορατές εντός επιπέδου παραμορφώσεις της τοιχοποιίας και περιορισμένες οι αντίστοιχες εκτός επιπέδου.	Περιορισμένες ρηγματώσεις στην επικάλυψη. Περιορισμένες ρωγμές σε μερικές γωνίες ανοιγμάτων. Μη ορατές εκτός επιπέδου παραμορφώσεις.
[DI]	$\geq 25\%$	$15\% \leq \sim < 25\%$	$< 15\%$
	Οιονεί Κατάρρευση	Προστασία Ζωής	Άμεση Χρήση

## Καμπύλες Θραυστότητας

Για τον σχεδιασμό των κατασκευών, αλλά και την αποτελεσματική εφαρμογή διαδικασιών αποκατάστασης και αξιολόγησή τους, απαιτείται η εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητάς τους. Προς την κατεύθυνση αυτή, το πιο σημαντικό εργαλείο είναι η ανάλυση τρωτότητας, η οποία εκτιμά το περιθώριο ασφαλείας της κατασκευής ως προς τη στάθμη επιτελεστικότητας και το επίπεδο κινδύνου. Αρκετές μεθοδολογίες ανάλυσης τρωτότητας έχουν προταθεί, όπως οι απλοποιημένες των [Kircher et al., 1997], οι οποίες ενσωματώθηκαν στο HAZUS99 [FEMA, 1999] και θεωρούν λογαριθμοκανονική κατανομή για τις φασματικές τιμές και λογαριθμική τυπική απόκλιση για τη μεταβλητότητα.

Οι καμπύλες θραυστότητας για δομικά συστήματα προσδιορίζονται με βάση πληροφορίες σχετικές τόσο με τη σεισμική ικανότητα αυτών όσο και με τη σεισμική επικινδυνότητα των περιοχών στις οποίες έχουν ανεγερθεί. Λόγω του ότι οι δύο παράγοντες είναι έντονα αβέβαιοι, η αποτίμηση της τρωτότητας δεν μπορεί να υλοποιηθεί σε όρους ντετερμινιστικής θεώρησης. Αντιθέτως, για την εκτίμηση της απόκρισης της κατασκευής θα πρέπει να χρησιμοποιείται μια πιθανοτική προσέγγιση και να συγκρίνεται με «οριακές καταστάσεις» που εμπεριέχουν συσχετισμό της βλάβης με την σεισμική απόκριση της κατασκευής. Στο **Σχήμα 2** παρουσιάζεται η διαδικασία ανάπτυξης των καμπυλών θραυστότητας.



**Σχήμα 2.** Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας εξαγωγής καμπυλών θραυστότητας.

Ως θραυστότητα ορίζεται η πιθανότητα η βλάβη της κατασκευής να φτάσει ή να ξεπεράσει ένα ορισμένο όριο βλάβης  $d_i$  (επίπεδο βλάβης) υπό σεισμική φόρτιση δεδομένης εντάσεως (μέγιστη επιτάχυνση του εδάφους (PGA)). Αυτή γενικά αυξάνεται καθώς τα επίπεδα έντασης του σεισμού αυξάνονται.

Η θραυστότητα αξιολογείται ως η συνολική πιθανότητα της παραμέτρου απόκρισης  $R$  να υπερβαίνει την επιτρεπόμενη τιμή απόκρισης  $r_{lim}$  (οριακή κατάσταση), για διάφορες σεισμικές εντάσεις  $I$ . Σε μαθηματική μορφή, είναι απλά μια αθροιστική πιθανότητα (Barron-Corvera 2000, Reinhorn et al. 2001) που δίνεται από την παρακάτω Εξίσωση:

$$Fragility = P[R \geq r_{lim} | I] = \sum_j^3 P[R \geq r_{lim} | I, C] P(C = c_j) \quad (2)$$

όπου  $P(C = c_j)$  η πιθανότητα να εξασφαλιστεί σεισμική ικανότητα  $c_j$ .

## ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

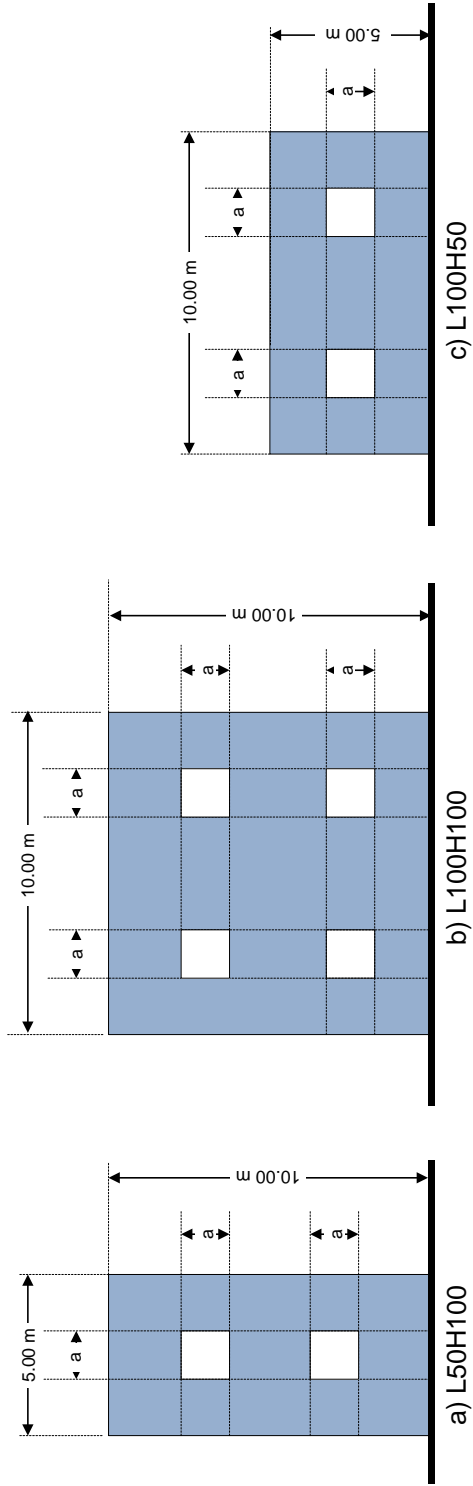
Με στόχο την αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η εφαρμογή αυτής τόσο σε θεωρητικές όσο και σε πραγματικές κατασκευές.

### Επίπεδοι τοίχοι από τοιχοποιία

Επιλέχθηκε να μελετηθεί η συμπεριφορά τριών επιπέδων τοίχων τοιχοποιίας με τετραγωνικά ανοίγματα των οποίων η γεωμετρία απεικονίζεται στο **Σχήμα 3**. Το ποσοστό των ανοιγμάτων (επιφάνεια ανοιγμάτων/επιφάνεια τοίχου) λαμβάνει τιμές 0, 16, 36 και 64%. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού της τοιχοποιίας παρουσιάζονται στον “Πίνακας 2”. Αξίζει να σημειωθεί, ότι τα δεδομένα αυτά θεωρούνται κλασσικά και αναφέρονται σε πειραματική εργασία του Page η οποία πραγματοποιήθηκε το 1981 (Page 1981) και τα αποτελέσματα αυτής έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως από την πλειονότητα των ερευνητών που διερευνούν είτε σε πειραματικό είτε σε αναλυτικό επίπεδο τη συμπεριφορά της τοιχοποιίας.

**Πίνακας 2.** Μηχανικά χαρακτηριστικά τοιχοποιίας (Page 1981)

Παράμετρος	Τιμή
Μέτρο Ελαστικότητας κατά τη διεύθυνση x	4.3625 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας κατά τη διεύθυνση y	7.5550 MPa
Θλιπτική Αντοχή κατά τη διεύθυνση x	4.3625 MPa
Θλιπτική Αντοχή κατά τη διεύθυνση y	7.5550 MPa
Εφελκυστική Αντοχή κατά τη διεύθυνση x	0.40 MPa
Εφελκυστική Αντοχή κατά τη διεύθυνση y	0.10 MPa
Λόγος Poisson στο επίπεδο xy	0.20
Λόγος Poisson στο επίπεδο yx	0.20
Ειδικό Βάρος	20 kN/m <sup>3</sup>



**Σχήμα 3.** Περιπτώσεις επιπέδων τοίχων που μελετήθηκαν.



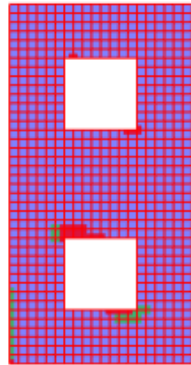
Στο **Σχήμα 4** παρουσιάζονται οι περιοχές αστοχίας του επιπέδου τοίχου L50H100 ο οποίος έχει δυο ανοίγματα συνολικού ποσοστού 16% με χρήση δύο διαφορετικών κριτηρίων αστοχίας και μάλιστα για τρεις διαφορετικές τιμές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (0.24, 0.32 & 0.40g). Τα διαγράμματα αυτά καθίστανται ιδιαίτερα χρήσιμα για τον προσδιορισμό των περιοχών της κατασκευής που αστοχούν, καθώς και για την επιλογή των βέλτιστων επισκευαστικών μέτρων για την αποκατάστασή τους. Ειδικότερα, οι περιοχές αστοχίας προσδιορίζονται με χρωματική διάκριση της εντατικής κατάστασης υπό την οποία λαμβάνουν χώρα. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, διαφορετικά μέτρα επισκευής απαιτούνται όταν η αστοχία λαμβάνει χώρα υπό διαξονική θλίψη, διαφορετικά για την περίπτωση του διαξονικού εφελκυσμού και διαφορετικά για την περίπτωση της ετερόσημης έντασης. Στο **Σχήμα 5** κατ' αντιστοιχία παρουσιάζονται οι περιοχές αστοχίας του επιπέδου τοίχου L100H100 για τρία διαφορετικά ποσοστά ανοιγμάτων (0, 16 και 36%) με χρήση δύο διαφορετικών κριτηρίων αστοχίας και για τιμή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης  $PGA=0.32g$ .

Στο **Σχήμα 6** παρουσιάζονται οι καμπύλες θραυστότητας της υπάρχουσας κατάστασης του επιπέδου τοίχου L50H100 με χρήση του κριτηρίου αστοχίας Syrmakizis et al. 1995 και ποσοστό ανοίγματος 16% τόσο για κανονική (normal) όσο και λογαριθμοκανονική (lognormal) κατανομή. Στο **Σχήμα 7** παρουσιάζονται οι καμπύλες θραυστότητας της υπάρχουσας κατάστασης του επιπέδου τοίχου L50H100 με χρήση του κριτηρίου αστοχίας Kupfer et al. 1969, τέσσερα διαφορετικά ποσοστά ανοίγματος (0, 16, 36 & 64%), λογαριθμοκανονική (lognormal) κατανομή και στάθμη επιτελεστικότητας Moderate Damage.

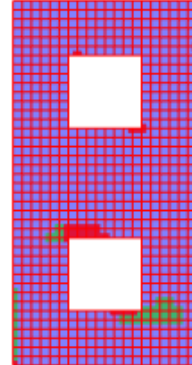
Στο **Σχήμα 8** παρουσιάζονται οι καμπύλες θραυστότητας της υπάρχουσας κατάστασης για τρεις διαφορετικούς επιπέδους τοίχους με ποσοστό ανοίγματος 16%, χρήση του κριτηρίου αστοχίας Syrmakizis et al. 1995, λογαριθμοκανονική (lognormal) κατανομή και στάθμη επιτελεστικότητας Heavy Damage. Από το σχήμα αυτό προκύπτει με ιδιαίτερα έντονο τρόπο η δυνατότητα των καμπυλών θραυστότητας να ποσοτικοποιούν την τρωτότητα των κατασκευών και μάλιστα η ταξινόμηση με βάση την υψηλότερη τιμή της τρωτότητας.

Στο **Σχήμα 9** απεικονίζονται οι καμπύλες θραυστότητας για την περίπτωση επιπέδου τοίχου L50H100 με χρήση του κριτηρίου αστοχίας Syrmakizis et al. 1995, για την υπάρχουσα κατάσταση και τρία διαφορετικά επισκευαστικά κονιάματα M5, M10 και M15 με χρήση λογαριθμοκανονική (lognormal) κατανομή και στάθμη επιτελεστικότητας Moderate Damage.

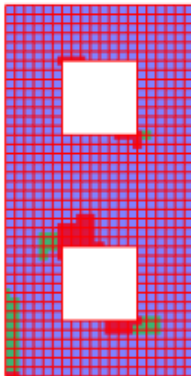
Με βάση τα **Σχήματα 8 και 9**, φαίνεται ότι η προτεινόμενη προσέγγιση προσφέρει μια μέθοδο κατάταξης, που βοηθά τις αρχές να βελτιστοποιήσουν τις αποφάσεις τους σχετικά με την επιλογή, ανάμεσα σε μια πληθώρα κατασκευών, αυτής που χρήζει άμεσης ενίσχυσης, καθώς επίσης να συμβάλει και στην επιλογή του βέλτιστου επισκευαστικού σεναρίου.



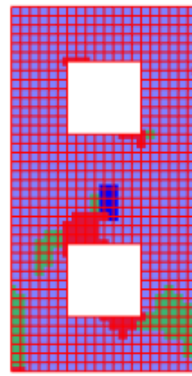
PGA=0.24g-Syrmakezis et al. 1995



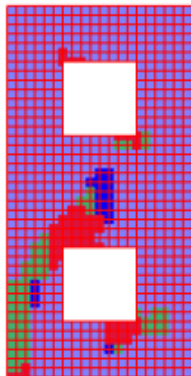
PGA=0.24g-Kupfer et al. 1969



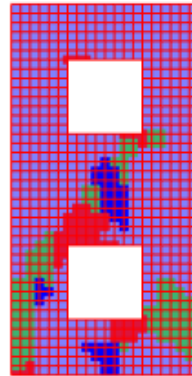
PGA=0.32g-Syrmakezis et al. 1995



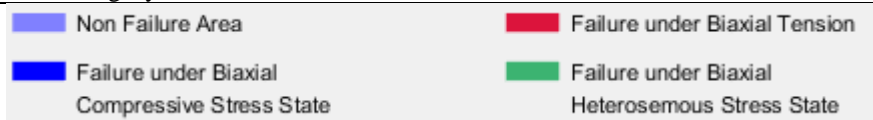
PGA=0.32g-Kupfer et al. 1969



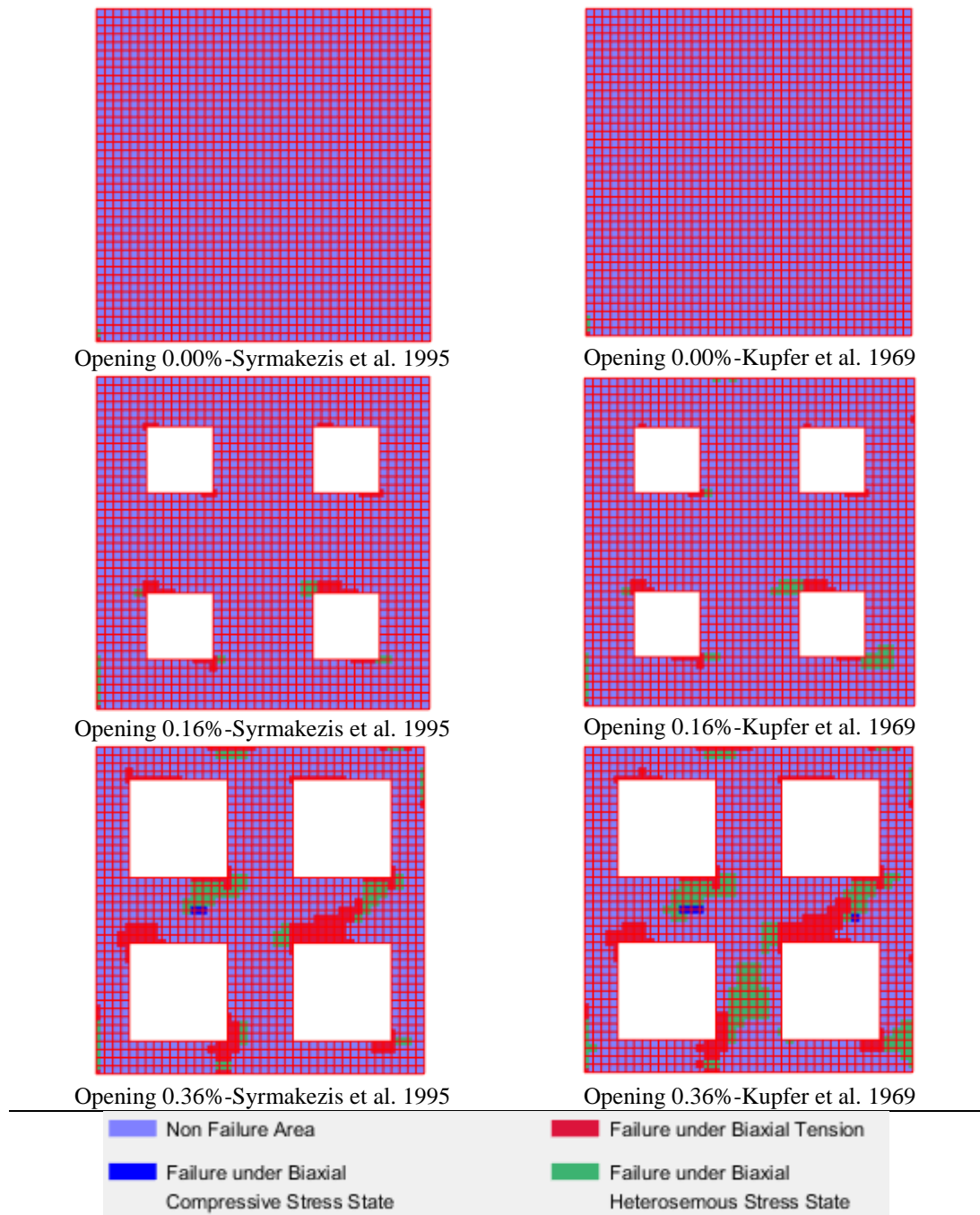
PGA=0.40g-Syrmakezis et al. 1995



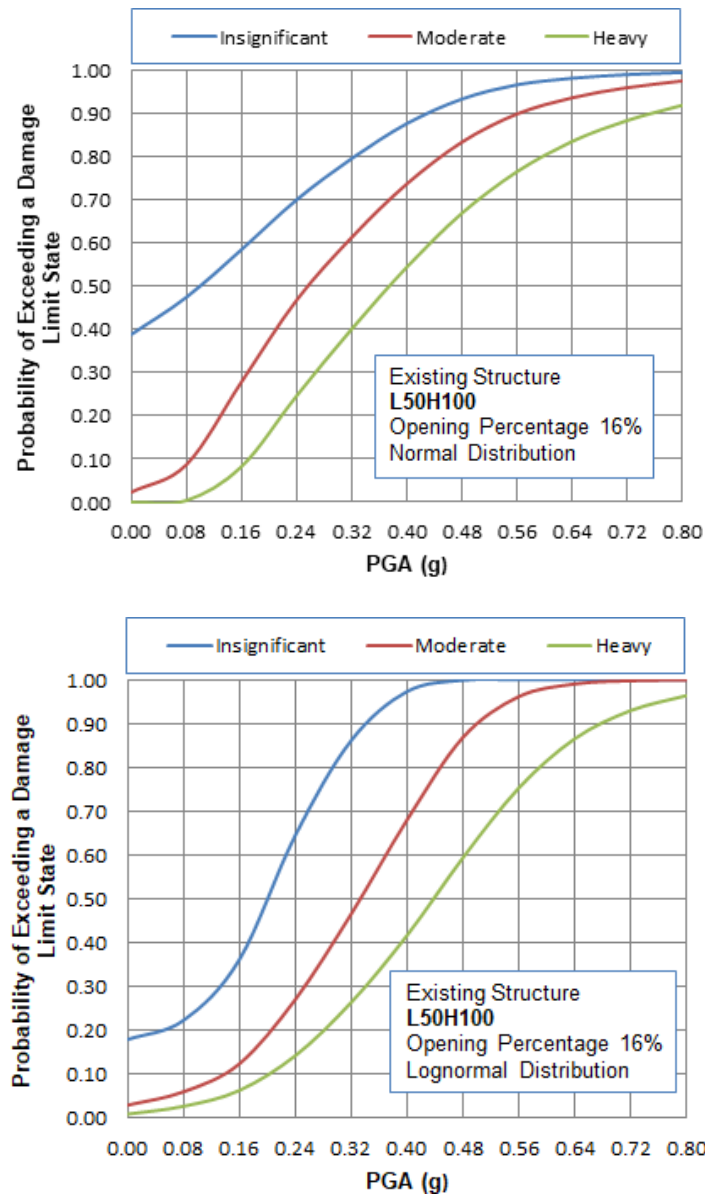
PGA=0.40g-Kupfer et al. 1969



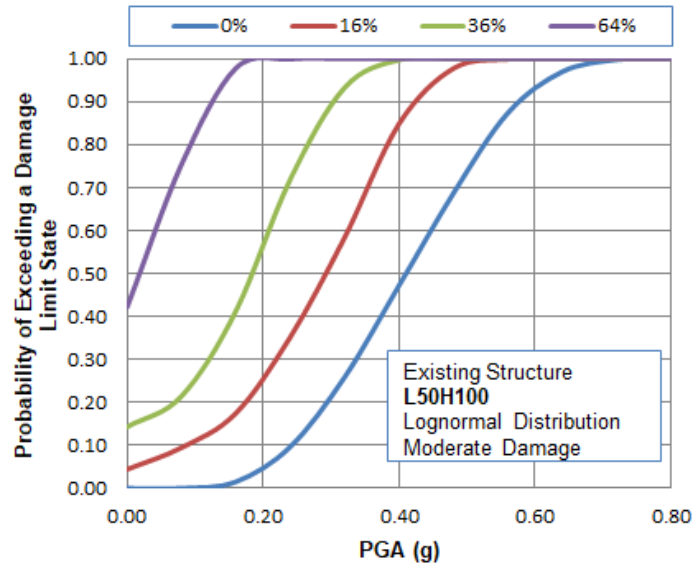
**Σχήμα 4.** Αστοχία επιπέδου τοίχου L50H100 με δυο ανοίγματα, δύο διαφορετικά κριτήρια αστοχίας και τρεις διαφορετικές τιμές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης.



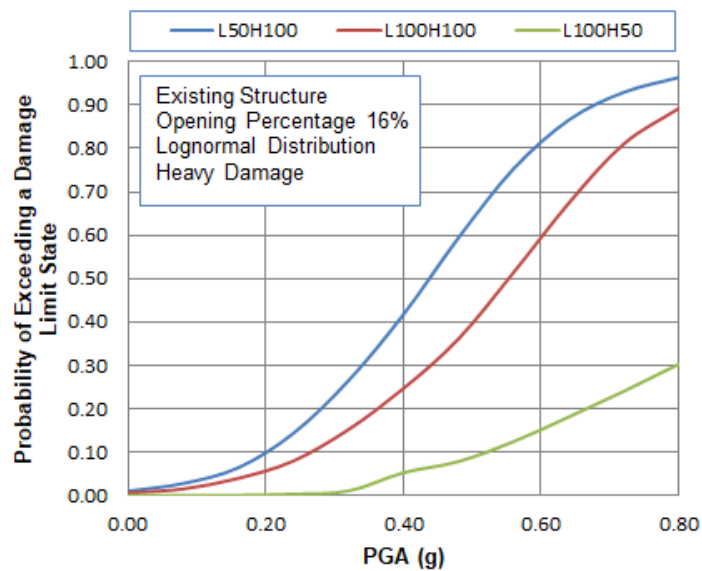
**Σχήμα 5.** Αστοχία επίπεδου τοίχου L100H100 για τρία διαφορετικά ποσοστά ανοίγματος, δύο διαφορετικά κριτήρια αστοχίας και για τιμή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης  $PGA=0.32g$ .



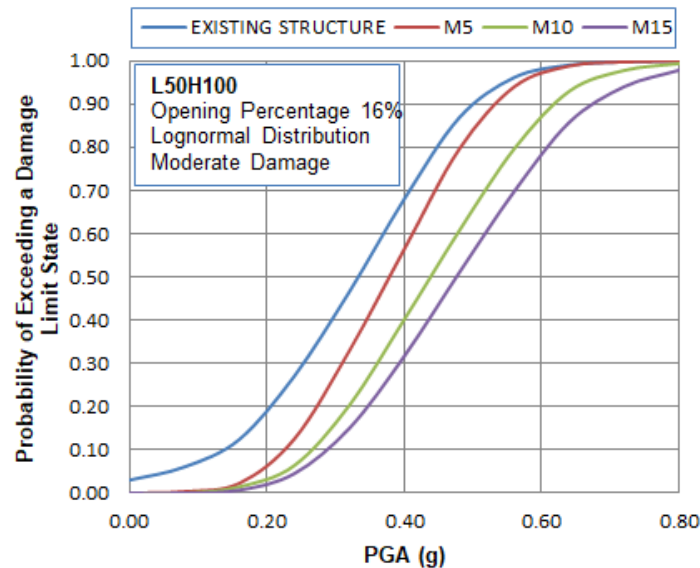
**Σχήμα 6.** Καμπύλες Θραυστότητας υπάρχουσας κατάστασης επιπέδου τοίχου L50H100 με χρήση του κριτηρίου αστοχίας Syrmakezis et al. 1995 και ποσοστό ανοίγματος 16%. α) κανονική (normal) κατανομή, β) λογαριθμοκανονική (lognormal) κατανομή.



**Σχήμα 7.** Καμπύλες Θραυστότητας υπάρχουσας κατάστασης επιπέδου τοίχου L50H100 με χρήση του κριτηρίου αστοχίας Kupfer et al. 1969, τέσσερα διαφορετικά ποσοστά ανοίγματος (0, 16, 36 & 64%), λογαριθμοκανονική (lognormal) κατανομή και στάθμη επιτελεστικότητας Moderate Damage.



**Σχήμα 8.** Καμπύλες Θραυστότητας υπάρχουσας κατάστασης για τρεις διαφορετικούς επιπέδους τοίχους με ποσοστό ανοίγματος 16%, χρήση του κριτηρίου αστοχίας Symakezis et al. 1995, λογαριθμοκανονική (lognormal) κατανομή και στάθμη επιτελεστικότητας Heavy Damage.



**Σχήμα 9.** Καμπύλες Θραυστότητας επιπέδου τοίχου L50H100 με χρήση του κριτηρίου αστοχίας Syrmakizis et al. 1995, για την υπάρχουσα κατάσταση και τρία διαφορετικά επισκευαστικά κονιάματα M5, M10 και M15, χρήση λογαριθμοκανονική (lognormal) κατανομή και στάθμη επιτελεστικότητας Moderate Damage.

### Μνημειακές Κατασκευές από Τοιχοποιία

Στη παράγραφο αυτή παρουσιάζεται συνοπτικά η αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθοδολογίας μέσω της εφαρμογής αυτής σε δύο πραγματικές μνημειακές κατασκευές από τοιχοποιία. Ειδικότερα με χρήση της μεθοδολογίας έχει διερευνηθεί η τρωτότητα δυο πραγματικών μνημειακών κατασκευών από τοιχοποιία. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη κατασκευή αφορά στο καθολικό της Μονής Καισαριανής, (**Σχήμα 10**) που χτίστηκε στην Αθήνα στα τέλη του 11<sup>ου</sup> με αρχές του 12<sup>ου</sup> αιώνα, ενώ η δεύτερη αφορά στο Παλάτι στα Χανιά της Κρήτης (**Σχήμα 11**), το οποίο χτίστηκε στη Χαλέπα της Κρήτης το 1882. Το 1898, όταν η Κρήτη αποκτά αυτονομία, ηγεμόνα και Σύνταγμα, έρχεται στα Χανιά ο Πρίγκιπας Γεώργιος ως ύπατος Αρμοστής της Κρήτης. Αυτό το αρχοντικό επιλέγεται ως το πιο κατάλληλο για να γίνει η κατοικία του.

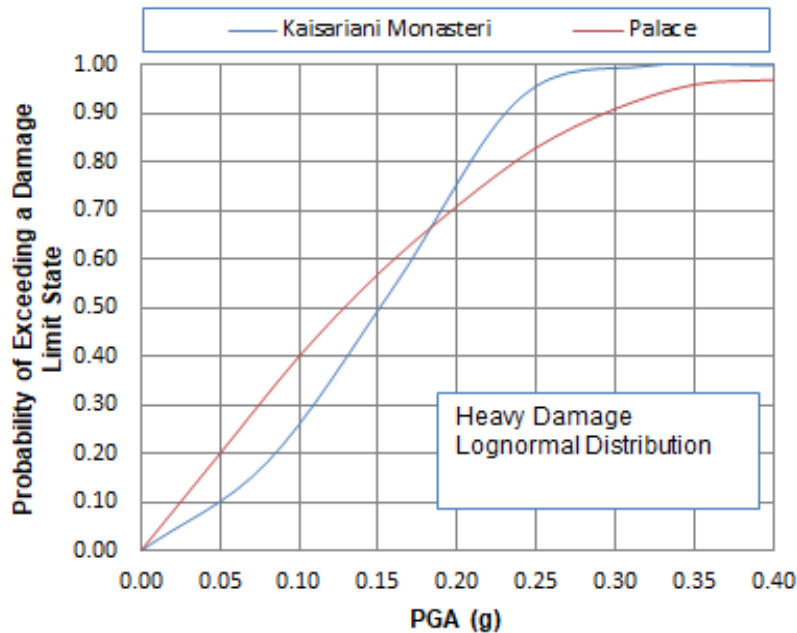
Στο **Σχήμα 12** παρουσιάζονται οι καμπύλες θραυστότητας της υπάρχουσας κατάστασης για τις δυο μνημειακές κατασκευές και μάλιστα για λογαριθμοκανονική (lognormal) κατανομή και στάθμη επιτελεστικότητας Heavy Damage. Επίσης το σχήμα αυτό καταδεικνύει τη δυνατότητα των καμπυλών θραυστότητας να ποσοτικοποιούν την τρωτότητα των κατασκευών και μάλιστα να τις ταξινομούν αυτές με βάση την υψηλότερη τιμή της τρωτότητας. Με βάση το σχήμα αυτό προκύπτει ότι για τιμές μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης μικρότερες του 0.20g το καθολικό της Μονής Καισαριανής επιδεικνύει μικρότερη σεισμική τρωτότητα σε σχέση με το Παλάτι, ενώ ισχύει το αντίστροφο για τιμές μεγαλύτερες του 0.20g.



Σχήμα 10. Πρόσοψη του Καθολικού της Μονής Καισαριανής



Σχήμα 11. Πρόσοψη του Παλατιού.



**Σχήμα 12.** Καμπύλες Θραυστότητας υπάρχουσας κατάστασης για δύο πραγματικές μνημειακές κατασκευές με λογαριθμοκανονική (lognormal) κατανομή.

Διεξοδικά τα αποτελέσματα για τις δυο μνημειακές κατασκευές τόσο για την εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας όσο και την επιλογή βέλτιστων επισκευαστικών σεναρίων έχουν παρουσιαστεί στη μεταπτυχιακή εργασία της πρώτης των συγγραφέων (Δουβίκα 2017) και στις εργασίες Asteris et al. 2014, 2016, 2017, Moropoulou et al. 2016, Douvika et al. 2016 και Apostolopoulou et al. 2017.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτήν την εργασία παρουσιάστηκε μία μεθοδολογία για την εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας κατασκευών από τοιχοποιία λαμβάνοντας υπόψη τον πιθανοτικό χαρακτήρα των παραμέτρων που εμπλέκονται στη προσομοίωση της κατασκευής, καθώς και των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών και των σεισμικών δράσεων. Στα κυριότερα συμπεράσματα συγκαταλέγονται η αξιολόγηση της τρωτότητας των κατασκευών καθώς επίσης και η αξιολόγηση σειράς σεναρίων επέμβασης και η επιλογή του βέλτιστου μεταξύ αυτών. Επιπλέον, η προτεινόμενη προσέγγιση μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για τις αρχές, καθώς προσφέρει μια μέθοδο κατάταξης, η οποία μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στην βελτιστοποίηση των αποφάσεων τους, αφενός σε σχέση με την επιλογή, ανάμεσα σε μια πληθώρα κατασκευών, αυτής που χρήζει άμεσης ενίσχυσης, αφετέρου στην επιλογή του βέλτιστου επισκευαστικού σεναρίου.



## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Apostolopoulou, M., Aggelakopoulou, E., Siouta, L., Bakolas, A., Douvika, M., Asteris, P.G., Moropoulou, A. (2017). A methodological approach for the selection of compatible and performable restoration mortars in seismic hazard areas, *Construction and Building Materials*, 155, pp. 1-14.
- Asteris, P.G. (2008). On the structural analysis and seismic protection of historical masonry structures. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 2(1), 124-133.
- Asteris, P.G., Tzamtzis, A.D., Vouthouni P.P., Sophianopoulos, D.S. (2005). Earthquake Resistant Design and Rehabilitation of Masonry Historical Structures. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, (ASCE), 10(1), 49-55.
- Asteris, P.G., Chronopoulos, M.P., Chrysostomou, C.Z., Varum, H., Plevris, V., Kyriakides, N., & Silva, V. (2014). Seismic vulnerability assessment of historical masonry structural systems. *Engineering Structures*, 62-63, 118-134. doi: 10.1016/j.engstruct.2014.01.031
- Asteris, P.G., Sarhosis, V., Mohebkhah, A., Plevris, V., Papaloizou, L., Komodromos, P., Lemos, J.V. (2015). Numerical Modeling of Historic Masonry Structures. *Handbook of Research on Seismic Assessment and Rehabilitation of Historic Structures* (V. P. Panagiotis G. Asteris Ed.).
- Asteris P.G., Douvika M., Karakitsios P., Moundoulas P., Apostolopoulou M., Moropoulou A. A Stochastic Computational Framework for the Seismic Assessment of Monumental Masonry Structures. 5th International Conference on Integrity, Reliability and Failure of Engineering, 2016, U. Porto.
- Asteris, P.G., Douvika, M.G., Apostolopoulou, M., Moropoulou, A. (2017). Seismic and restoration assessment of monumental masonry structures, *Materials*, 10(8), 895, pp. 895.
- Barron-Corverra R.(2000). Spectral evaluation of seismic fragility in structures. PhD dissertation. Department of Civil, Structural & Environmental Engineering, University at Buffalo, The State University of New York, Buffalo, NY.
- Binda, L., Saisi, A., Tiraboschi, C. (2000). Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries, . *Construction and Building Materials*, 14(4), 199-233.
- Chronopoulos, P.M., Zigouris, N., Asteris, P.G. (2012). Investigation/Documentation and Aspects of Seismic Assesment and Redesign of Traditional Masonry Buildings in Greece, 5th European Conference on Structural Control (EACS 2012 ), Genoa, Italy, 18-20 June 2012.
- Douvika, M.G., Apostolopoulou, M., Moropoulou, A., Asteris, P.G. (2016). Seismic Vulnerability Assessment of Monumental Masonry Structures (in greek). 17th Panhellenic Concrete Conference, Thessaloniki, Greece, 11/2016
- FEMA-273. NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings. Federal Emergency Management Agency; 1997.
- ICOMOS1931. (1931). The Athens Charter for the Restoration of Historic Monuments. Paper presented at the First International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments, Athens, Greece. [http://www.icomos.org/athens\\_charter.html](http://www.icomos.org/athens_charter.html)

ICOMOS1964. (1964). The Venice Charter for the Restoration of Historic Monuments. Paper presented at the Second International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments, Venice, Italy. [http://www.international.icomos.org/charters/venice\\_e.htm](http://www.international.icomos.org/charters/venice_e.htm)

Kircher CA, Nasser AA, Kutsu O, Holmes WT. Developing of building damage functions for earthquake loss estimation. *Earthq Spectra* 1997;13(4): 664–81.

Kupfer H., Hilsdorf H.K., Rusch H. Behavior of concrete under biaxial stresses. *Journal of the American Concrete Institute*, 1969, 66(8).

Lourenço, P.B. (2006). Recommendations for restoration of ancient buildings and the survival of a masonry chimney. *Construction and Building Materials*, 20(4), 239-251. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.08.026

Moropoulou A., Apostolopoulou M., Moundoulas P., Karoglou M., Delegou E., Lampropoulos K., Gritsopoulou M., Bakolas A., "The combination of NDTs for the diagnostic study of historical buildings: The case study of Kaisariani Monastery", *COMPdyn 2015 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering Crete Island, Greece, 25–27 May 2015*, p. 2321-2336.

Morton B, Hume GL. (1979). The Secretary of the Interior's standards for historic preservation projects with guidelines for applying the standards, U.S. Dept. of the Interior, Heritage Conservation and Recreation Service.

Reinhorn AM, Barron-Corverra R, Ayala AG. (2001). Spectral evaluation of seismic fragility of structures. In: *Proceedings ICOSAR 2001*, Newport Beach CA.

Onaka T. (2009). A study of the documentation process for conservation of architectural heritage sites: illustrated by examples from Egypt and Belgium. In: *22nd CIPA symposium*, October 11–15, 2009, Kyoto, Japan.

Page A.W. (1981). The biaxial compressive strength of brick masonry. *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, 71(2), p. 893-906.

Syrmakezis, C.A., Asteris, P.G., Sophocleous, A. A. (1997). Earthquake resistant design of masonry tower structures. *Proceedings, 5 STREMA Conference on Structural Studies*, 1, 377-386.

Syrmakezis C.A., Chronopoulos M.P., Sophocleous A.A., Asteris P.G. (1995). Structural analysis methodology for historical buildings. *Architectural Studies, Materials and Analysis*, 1, p. 373-382.

Tassios, T.P. (2010). Seismic engineering of monuments. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8(6), 1231-1265.