

Σύγχρονες Προσεγγίσεις για την Αντισεισμική Προστασία Κτισμάτων Πολιτιστικής Κληρονομιάς - Ανασκόπηση - Πρόταση

Κωνσταντίνος Χ. Σπυράκος

Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Δ/ντής Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Υπάρχει έλλειψη μιας κοινής προσέγγισης για την εκτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης κτισμάτων πολιτιστικής κληρονομιάς. Η εξισορρόπηση μεταξύ της ασφάλειας και της διατήρησης των αρχιτεκτονικών και καλλιτεχνικών χαρακτηριστικών των κτισμάτων πολιτιστικής κληρονομιάς παραμένει μια πρόκληση, αλλά ταυτόχρονα και ένα ζήτημα το οποίο χρήζει άμεσης αντιμετώπισης. Σχεδόν στην πλειονότητα των περιπτώσεων οι περιορισμοί που απορρέουν από την υλοποίηση των παρεμβάσεων σε ιστορικά κτίσματα και μνημεία, ώστε να είναι *συμβατές* με τις διεθνώς αποδεκτές κατευθυντήριες γραμμές και αρχές, π.χ., Χάρτης της Αθήνας [1], Χάρτης της Βενετίας [2], Διακήρυξη του Άμστερνταμ [3], δεν επιτρέπουν την ικανοποίηση του επιπέδου ασφάλειας που επιβάλλεται σε νέες κατασκευές. Για το λόγο αυτό η γενικά αποδεκτή πρακτική είναι η εφαρμογή επεμβάσεων με στόχο τη συντήρηση ή/και την περιορισμένη μείωση της τρωτότητας του κτίσματος.

Σε σειсмоγενείς περιοχές, ο σεισμός αποτελεί την κυριότερη αιτία αστοχιών και κατάρρευσης ιστορικών κατασκευών. Η αντισεισμική προστασία κτισμάτων πολιτιστικής κληρονομιάς απαιτεί τον προσδιορισμό της σεισμικής τους διακινδύνευσης προκειμένου να ληφθούν κατάλληλα μέτρα. Η σεισμική διακινδύνευση προκύπτει ως συνδυασμός τεσσάρων παραγόντων: (i) της σεισμικής επικινδυνότητας (πιθανότητα εμφάνισης ενός σεισμού δεδομένης έντασης στη θέση του κτίσματος), (ii) της τρωτότητας (προδιάθεση του δομήματος να υποστεί βλάβες από σεισμό), (iii) της επισκεψιμότητάς του από το κοινό (δηλαδή των συνθηκών χρήσης και της παρουσίας κοινού) και (iv) της μνημειακής σπουδαιότητας του κτίσματος καθώς και των καλλιτεχνικών στοιχείων που περιέχει. Η αντισεισμική προστασία των κτισμάτων πολιτιστικής αξίας αφορά όχι μόνο στην ασφάλεια του κοινού και στις οικονομικές επιπτώσεις που προκύπτουν από τη βλάβη του, αλλά και ιδιαίτερα στη διατήρηση αυτής καθεαυτής της πολιτιστικής κληρονομιάς από ενδεχόμενη απώλειά του.

Η ανάπτυξη που ακολουθεί παρουσιάζει μία μεθοδολογία η οποία οδηγεί σε εφαρμόσιμες επεμβάσεις εξισορροπώντας τις απαιτήσεις της ασφάλειας και του σεβασμού των πολιτιστικών και αρχαιολογικών χαρακτηριστικών του δομήματος. Στην εργασία [4] παρουσιάζονται σε έκταση ενόητες σχετικά με τις υπολογιστικές μεθόδους ανάλυσης ιστορικών κατασκευών, τη συνεκτίμηση των φαινομένων κοντινού πεδίου, καθώς και ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα στο οποίο εφαρμόζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία [5-8].

2. ΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

Οι σύγχρονοι κανονισμοί αντισεισμικού σχεδιασμού για νέες κατασκευές, καθώς και οι συστάσεις/κανονισμοί για την αξιολόγηση και την πραγματοποίηση επεμβάσεων σε υφιστάμενες, βασίζονται στην αποτίμηση της συμπεριφοράς τους με βάση την επιτελεστικότητα (performance based assessment), η οποία αποσκοπεί στην εκπλήρωση ορισμένων στοχευόμενων επιπέδων συμπεριφοράς (οριακές καταστάσεις) σε αντιστοιχία με προκαθορισμένες σεισμικές δράσεις (design earthquake) [9-14]. Η διαδικασία αυτή υιοθετείται από πολλούς σύγχρονους κανονισμούς, όπως ο Ελληνικός Κανονισμός Επεμβάσεων [15], ο Ευρωκώδικας 8 [12] και ο Ιταλικός Κανονισμός [13].

2.1 Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.)

Για μία κατασκευή με συμβατικό χρόνο ζωής $T_L=50$ έτη οι στάθμες επιτελεστικότητας σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013 [15] και τον υπό ανάπτυξη Κ.Α.Δ.Ε.Τ. 2014 [16] ορίζονται ως εξής: «Περιορισμένες βλάβες» (Α), «Σημαντικές βλάβες» (Β) και «Οιονεί κατάρρευση» (Γ).

Σύμφωνα με την [15] υιοθετούνται δύο επίπεδα σεισμικής επικινδυνότητας: (α) Συχνή σεισμική διέγερση: με πιθανότητα εμφάνισης $P_R=50\%$ στα 50 χρόνια και μέση περίοδο επαναφοράς $T_{RL}=72$ έτη, και (β) Σπάνια σεισμική διέγερση: με $P_R=10\%$ και $T_{RL}=475$ έτη. Αποδεχόμενοι ότι τα κτίσματα πολιτιστικής κληρονομιάς ανήκουν στις κατηγορίες σπουδαιότητας III και IV [4], τότε σύμφωνα με πρόταση της Επιτροπής Υποστήριξης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. δύνανται να υιοθετηθούν οι ακόλουθοι στόχοι αποτίμησης και ανασχεδιασμού: A1, A2, B1. Οι στόχοι αυτοί, όπως προκύπτουν από ένα πλήθος συνδυασμών των σταθμών επιτελεστικότητας και των επιπέδων σεισμικής διέγερσης, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Στόχοι αποτίμησης ή ανασχεδιασμού φέροντος οργανισμού [15]

P_R για $T_L=50$	Στάθμη επιτελεστικότητας φέροντος οργανισμού		
	Περιορισμένες βλάβες (A)	Σημαντικές βλάβες (B)	Οιονεί κατάρρευση (Γ)
10%	A1	B1	Γ1
50%	A2	B2	Γ2

2.2 Ευρωκώδικας EC8-3 [12]

Το τρίτο μέρος του Ευρωκώδικα 8, EC8-3 [12] αναφέρεται στα ίδια επίπεδα επιτελεστικότητας του ΚΑΝ.ΕΠΕ. [15] με τις ακόλουθες διαφορές: (α) η οριακή κατάσταση «περιορισμένες βλάβες» συνδυάζεται με πιθανότητα υπέρβασης $P_R=20\%$ για την οποία αντιστοιχεί μέση περίοδος επαναφοράς $T_{RL}=225$ έτη, και (β) συμπεριλαμβάνει ένα επιπλέον επίπεδο σεισμικής επικινδυνότητας: «οιονεί κατάρρευση» (NC) με πιθανότητα υπέρβασης $P_R=2\%$ για την οποία αντιστοιχεί μέση περίοδος επαναφοράς $T_{RL}=2475$ έτη. Επιπλέον ο EC8-1 [11], όπως και ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. [15], καθορίζει τέσσερις κατηγορίες σπουδαιότητας, I, II, III και IV για τις οποίες ορίζει αντίστοιχους συντελεστές σπουδαιότητας $\gamma_I=0.8, 1.0, 1.2$ και 1.4 . Οι κατηγορίες I, II, III και IV ορίζονται ως ακολούθως:

- I Κτίρια δευτερεύουσας σημασίας για τη δημόσια ασφάλεια, π.χ. γεωργικά κτίρια, κλπ.
- II Συνήθη κτίρια, που δεν ανήκουν στις άλλες κατηγορίες.
- III Κτίρια των οποίων η σεισμική ασφάλεια είναι σημαντική, λαμβάνοντας υπόψη τις συνέπειες κατάρρευσης, π.χ. σχολεία, αίθουσες συνάθροισης, πολιτιστικά ιδρύματα κλπ.
- IV Κτίρια των οποίων η ακεραιότητα κατά τη διάρκεια σεισμών είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία των πολιτών, π.χ. νοσοκομεία, πυροσβεστικοί σταθμοί, σταθμοί παραγωγής ενέργειας¹, κλπ.

Συνεπώς υιοθετώντας την οριακή κατάσταση «περιορισμός βλαβών» κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. και προσθέτοντας την οριακή κατάσταση NC, οδηγούμαστε στην προσθήκη μιας επιπλέον σειράς, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2. Επισημαίνεται ότι οι στόχοι A3, B3 και Γ3 που περιλαμβάνονται ως δυνατότητα στον Πίνακα 2 ελέγχονται κατά την κρίση του μηχανικού. Υπονοείται ότι στην περίπτωση των μνημείων παραμένει στη διακριτική ευχέρεια της Δημόσιας Αρχής καθώς και του κυρίου του έργου η επιβολή εφαρμογής των στόχων A3, B3 και Γ3.

2.3 Ιταλικός Κανονισμός για Μνημεία DR 226/02/2011 [14]

Ο ιταλικός κανονισμός για τα μνημεία [14] καθορίζει πέντε οριακές καταστάσεις: SLC, SLV, SLD, SLO και SLA. Οι τρεις πρώτες αντιστοιχούν στις οριακές καταστάσεις του EC8 με αντίστοιχες πιθανότητες υπέρβασης: $P_R=5\%, 10\%$ και 63% . Η τέταρτη καθορίζει «οιονεί ελαστική συμπεριφορά» με πιθανότητα υπέρβασης 81% . Επισημαίνεται ότι για δομικά μέλη και αντικείμενα καλλιτεχνικής

¹ [στην Τροποποίηση των διατάξεων του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού, ΕΑΚ 2000 [17], στην κατηγορία αυτή συμπεριλαμβάνονται και κτίρια που στεγάζουν έργα μοναδικής καλλιτεχνικής αξίας, όπως μουσεία, αποθήκες μουσείων, κ.λ.π.]

αξίας ο ιταλικός κανονισμός ορίζει επιπλέον την οριακή κατάσταση SLA, η οποία συναρτάται με τη λειτουργικότητα και την πολιτιστική αξία τους.

Οι πιθανότητες υπέρβασης συνδυάζονται με τη διάρκεια αναφοράς (V_R). Η V_R μπορεί να υπολογιστεί από την ονομαστική διάρκεια ζωής της κατασκευής (V_N), η οποία για ένα συνηθισμένο κτίσμα θεωρείται $V_N = 50$ χρόνια, και το συντελεστή σπουδαιότητας (C_U) με εφαρμογή της σχέσης $V_R = V_N \times C_U$. Ο κανονισμός προσδιορίζει τέσσερις κατηγορίες σπουδαιότητας προβλέποντας σε κάθε κατηγορία διαφορετική τιμή για το συντελεστή σπουδαιότητας (C_U), (ήτοι 0.7, 1.0, 1.5 και 2.0) σε αντιστοιχία με το συντελεστή σπουδαιότητας γ_1 του EC8.

Πίνακας 2. Στόχοι σχεδιασμού φέροντος οργανισμού

P_R για $T_L=50$	Στάθμη επιτελεσματικότητας φέροντος οργανισμού		
	Περιορισμένες βλάβες (Α)	Σημαντικές βλάβες (Β)	Οιονεί κατάρρευση (Γ)
$P_R=10\%$ ($T_{RL}=475$ έτη)	A1	B1	Γ1
$P_R=50\%$ ($T_{RL}=72$ έτη)	A2	B2	Γ2
$P_R=2\%$ ($T_{RL}=2475$ έτη)	A3	B3	Γ3

(T_{RL} : Περίοδος επαναφοράς)

2.4 Σύγχρονες Προτάσεις για Μνημεία στην Ελλάδα

Σήμερα στην Ελλάδα δεν υπάρχει ακόμη κανονισμός για την αντισεισμική προστασία των μνημείων, αν και έχουν πραγματοποιηθεί αξιολογικές προσπάθειες, π.χ., [18, 19]. Ως παράδειγμα, στην εργασία [18] προτείνονται σεισμικές δράσεις σχεδιασμού, καθώς και αποδεκτά επίπεδα βλάβης με βάση τη σπουδαιότητα του μνημείου. Καθορίζονται τρία επίπεδα σπουδαιότητας για τα μνημεία: παγκόσμιας (I1), εθνικής (I2), και τοπικού ενδιαφέροντος (I3).

Επίσης προτείνεται να κατατάσσονται τα μνημεία στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες ανάλογα με την επισκεψιμότητά τους:

C1: Σχεδόν συνεχής παρουσία κοινού ή συχνή παρουσία μεγάλων ομάδων κοινού: (i) κατοικημένα κτίρια στο ιστορικό κέντρο των πόλεων, (ii) μνημεία που χρησιμοποιούνται ως μουσεία, και (iii) μνημεία που χρησιμοποιούνται συνεχώς ως χώροι λατρείας.

C2: περιστασιακή χρήση ή σποραδική παρουσία μικρών ομάδων κοινού: (i) μνημεία τα οποία είναι επισκέψιμα μόνο κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, και (ii) μνημεία σε απομακρυσμένες περιοχές ή μνημεία σπανίως επισκέψιμα.

C3: μνημεία στα οποία η είσοδος επιτρέπεται μόνο σε προσωπικό υπηρεσίας.

Συγκρίνοντας τις τρεις κατηγορίες με αυτές που καθορίζονται κατά EC8 [11] ή ΚΑΝ.ΕΠΕ. [15], συνάγεται ότι όσον αφορά στην επισκεψιμότητά τους, οι C2 και C3 δύνανται να αντιστοιχιστούν με την κατηγορία Σπουδαιότητας II ενώ η C1 με την κατηγορία Σπουδαιότητας III, ή IV.

3. ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ

3.1. Συνήθης Πρακτική

Τα κτίσματα πολιτιστικής κληρονομιάς πρέπει να αποτιμώνται για μεγάλες σεισμικές απαιτήσεις και σεισμικές δράσεις που χαρακτηρίζονται από μεγάλη περίοδο επαναφοράς [11, 14]. Συνεπώς, η διατήρησή τους σε πολλές περιπτώσεις θα οδηγούσε σε σημαντικές παρεμβατικές επεμβάσεις προκειμένου να ικανοποιηθούν οι «προδιαγραφές ασφαλείας» οι οποίες ισχύουν για νέα κτίρια. Η πρακτική όμως, σύμφωνα με τις αρχές των επεμβάσεων σε μνημεία, επιβάλλει λιγότερο εκτεταμένες επεμβάσεις, οι οποίες, παρ' όλα αυτά, επιθυμείται να εξασφαλίζουν σε κάποιο βαθμό την ασφάλεια του κτίσματος, π.χ., [1-3, 20-22]. Σε γενικές γραμμές, οι επεμβάσεις στα κτίσματα πολιτιστικής

κληρονομιάς θα πρέπει να πληρούν τις ακόλουθες τρεις αρχές: (i) αναστρεψιμότητα, (ii) διατηρησιμότητα (στο χρόνο), και (iii) εφαρμοσιμότητα της προτεινόμενης λύσης.

Οι κατά κανόνα εφαρμοζόμενες επεμβάσεις σε κτίσματα πολιτιστικής κληρονομιάς μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκουν σε δύο κατηγορίες: (i) «*Συνολική Βελτίωση*» η οποία επιχειρεί να βελτιώσει την ασφάλεια έναντι σεισμού του συνόλου του δομήματος μέσω εκτεταμένων αλλά μη παρεμβατικών επεμβάσεων επιτυγχάνοντας ένα στόχο χαμηλότερο από εκείνο που καθορίζεται για νέες κατασκευές και (ii) «*Τοπική Βελτίωση*», η οποία βελτιώνει την απόκριση της κατασκευής μέσω τοπικών επεμβάσεων χωρίς όμως να επηρεάζεται η συνολική συμπεριφορά της κατασκευής. Αν και οι δύο εναλλακτικές λύσεις αποτελούν τον κανόνα, δυστυχώς σε πολλές περιπτώσεις εφαρμόζονται σε κτίσματα πολιτισμικής κληρονομιάς στη χώρα μας χωρίς την πραγματοποίηση αναλύσεων με τις οποίες να καθορίζεται η αποτελεσματικότητα της επέμβασης.

3.2 Μέτρα Επέμβασης Καθορισμένης Διάρκειας - Πρόταση

Στην ενότητα αυτή αναπτύσσεται μεθοδολογία για την εφαρμογή *Συνολικής Βελτίωσης* σε κτίσματα πολιτιστικής κληρονομιάς. Αποσκοπεί στην εφαρμογή επεμβάσεων που πληρούν μια προκαθορισμένη οριακή κατάσταση για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, μετά το πέρας του οποίου επιβάλλεται να πραγματοποιηθεί εκ νέου αποτίμηση του κτίσματος και ανάλογα με τα αποτελέσματα να επανεξεταστεί η λήψη κατάλληλων μέτρων. Η μεθοδολογία απαιτεί: (i) την εισαγωγή του όρου «*συμβατική διάρκεια επέμβασης*», T_{Δ} , η οποία ορίζεται ως ο χρόνος για τον οποίο η επέμβαση εξασφαλίζει ένα επιλεγμένο στόχο, π.χ., B1 για $P_R=10\%$ και A2 για $P_R=50\%$, και (ii) τη χρήση είτε μιας σχέσης εξασθένησης είτε φασμάτων σχεδιασμού [11, 23].

Εφαρμόζονται οι ακόλουθες σχέσεις εξασθένησης, καθώς αποτελούν τη βάση για τον υπολογισμό της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης αναφοράς a_{gR} για τα φάσματα σχεδιασμού στη χώρα μας σύμφωνα με τον EC8-1 [11]. Δεδομένου ότι η Ελλάδα χωρίζεται σε τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας, Z_i , ($i= 1, 2, 3$), κάθε εξίσωση προσδιορίζει την αντίστοιχη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση αναφοράς a_{gR} συναρτήσει της περιόδου επαναφοράς T_{RL} [23]:

$$\text{Ζώνη Z1: } \log a_{gR} \approx 0.277 \log T_{RL} + 1.579 \quad (1)$$

$$\text{Ζώνη Z2: } \log a_{gR} \approx 0.264 \log T_{RL} + 1.739 \quad (2)$$

$$\text{Ζώνη Z3: } \log a_{gR} \approx 0.240 \log T_{RL} + 2.015 \quad (3)$$

Υιοθετώντας κατανομή Poisson για τους σεισμούς, δηλαδή την υπόθεση ότι τα σεισμικά γεγονότα είναι στατιστικά ανεξάρτητα, η T_{Δ} συνδέεται με την περίοδο επαναφοράς T_{RL} και την πιθανότητα υπέρβασης P_R , μέσω της σχέσης

$$T_{RL} = -\frac{T_{\Delta}}{\ln(1-P_R)} \approx \frac{T_{\Delta}}{P_R} \quad (4)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η a_{gR} που προκύπτει από τις εξισώσεις (1) έως (3) μειώνεται κατά 20% πριν από την εφαρμογή της στα φάσματα του κανονισμού [23].

Εάν η σεισμική δράση ορίζεται με βάση τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση αναφοράς a_{gR} , η τιμή του συντελεστή σπουδαιότητας γ_i ο οποίος πολλαπλασιάζει τη σεισμική δράση αναφοράς για την επίτευξη της ίδιας πιθανότητας υπέρβασης σε χρόνο T_{Δ} , όπως και στα $T_{\Delta R}$ έτη για τα οποία ορίζεται η σεισμική δράση αναφοράς, μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση

$$\gamma_i \approx (T_{\Delta R} / T_{\Delta})^{-1/k} \quad (5)$$

όπου το k είναι της τάξης του 3. Η παραπάνω σχέση προκύπτει με τη θεώρηση ότι το ετήσιο ποσοστό υπέρβασης $H(a_{gR})$, της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης αναφοράς a_{gR} μπορεί να ληφθεί ότι μεταβάλλεται με την a_{gR} σύμφωνα με τη σχέση $H(a_{gR}) \sim k_0 \times a_{gR}^{-k}$ [11].

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται διαγράμματα για $\gamma_i=1.0, 1.2$ και 1.4 , τα οποία προκύπτουν εφαρμόζοντας τις σχέσεις (1-5). Με χρήση των διαγραμμάτων επιτυγχάνεται άμεση επιλογή του T_{Δ} με δεδομένα: την εδαφική επιτάχυνση a_{gR} για έδαφος κατηγορίας A, τη στάθμη επιτελεστικότητας και την πιθανότητα υπέρβασης P_R . Για διαφορετική κατηγορία εδάφους ο υπολογισμός του T_{Δ} προκύπτει από τα ίδια διαγράμματα διαιρώντας την a_{gR} με το συντελεστή εδάφους S κατά EC8-1 [11].

Προτείνεται:

- (i) Η T_{Δ} να υπερβαίνει τα 50 έτη για στόχο A2.
- (ii) Η T_{Δ} να προσεγγίζει τα 50 έτη ή τουλάχιστον να μην υπολείπεται των 20 ετών για στόχο B1.
- (iii) Μετά το πέρας της χρονικής διάρκειας που ορίζει το T_{Δ} για στάθμη B1 να αποτιμάται εκ νέου η σεισμική επικινδυνότητα του κτίσματος.
- (iv) Εάν και με τις προτεινόμενες επεμβάσεις προκύψει ότι δεν ικανοποιούνται τα ελάχιστα όρια για το T_{Δ} που ορίζονται στα (i) και (ii), το κτίσμα θα πρέπει να θεωρείται ότι ανήκει στην κατηγορία C3 (παράγραφος §2.4 του παρόντος).

Με το πρώτο κριτήριο, (i), επιτρέπεται το κτίσμα να υποστεί ελαφριές βλάβες σε ένα συχνό σεισμό, ενώ με το δεύτερο κριτήριο, (ii), επιτρέπεται οι ενδεχόμενες βλάβες, αν είναι σημαντικές, να είναι επισκευάσιμες [14].

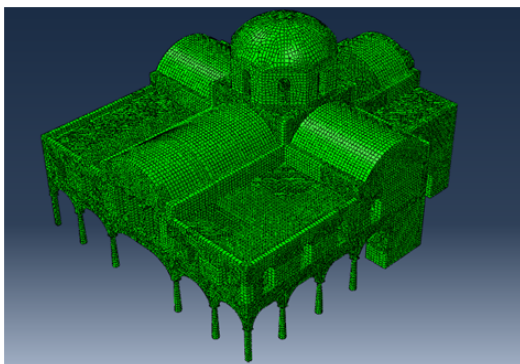
3.3 Παράδειγμα Εφαρμογής

Το παράδειγμα εφαρμογής αφορά στην εκκλησία του Αγίου Δημητρίου, τρίκλιτη βασιλική με τρούλο και ξύλινη στέγη η οποία κατασκευάστηκε το 1892 στη Λήμνο περιοχή η οποία ανήκει σε ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z2. Η κάτοψη είναι ορθογωνική με μήκος και πλάτος 25 και 21 μέτρα, αντίστοιχα. Το ύψος μέχρι τη βάση του τρούλου είναι 12 μέτρα. Η δομή της τοιχοποιίας είναι μικτή με τμήματα από οπτοπλινθοδομή και αργολιθοδομή με λαξευτούς γωνιόλιθους. Στο παράδειγμα το μνημείο θεωρείται ότι θεμελιώνεται σε έδαφος κατηγορίας A και επιδιώκεται να επιτευχθούν οι στόχοι B1 και A2 λαμβάνοντας επεμβατικά μέτρα «Συνολικής Βελτίωσης» για κατηγορία Σπουδαιότητας III ($\gamma_I=1.2$).

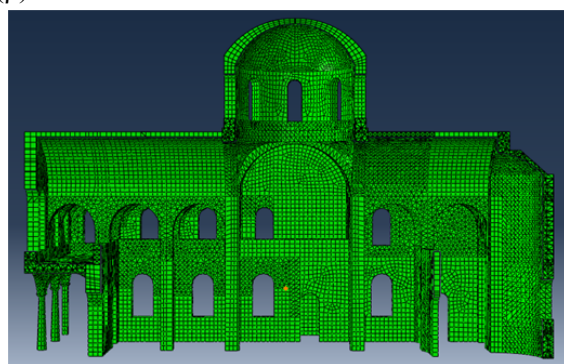
Στις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας όπως αυτά προέκυψαν από τα πειραματικά αποτελέσματα και τις επί τόπου ενόργανες μετρήσεις [8, 22]. Πραγματοποιήθηκαν δύο τύποι ανάλυσης:

- (i) ανάλυση θεωρώντας το σύνολο της κατασκευής ως ένα συνεχές μέσο, όπου όλα τα επιμέρους τμήματα δρουν και παραμορφώνονται από κοινού κατά τη διάρκεια της διέγερσης (Σχήμα 1). Πραγματοποιήθηκε χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων [24, 25].
- (ii) τοπικές αναλύσεις μελετώντας τμήματα του δομήματος για τα οποία θεωρείται ότι μπορούν να κινηθούν ανεξάρτητα από το συνολικό φέροντα οργανισμό (Σχήμα 2). Τα επιμέρους αυτά τμήματα καλούμενα και μακροστοιχεία (macroelements) προσδιορίζονται με αποδεκτή αξιοπιστία βάσει της λεπτομερούς οπτικής επιθεώρησης και αποτύπωσης [8, 26].

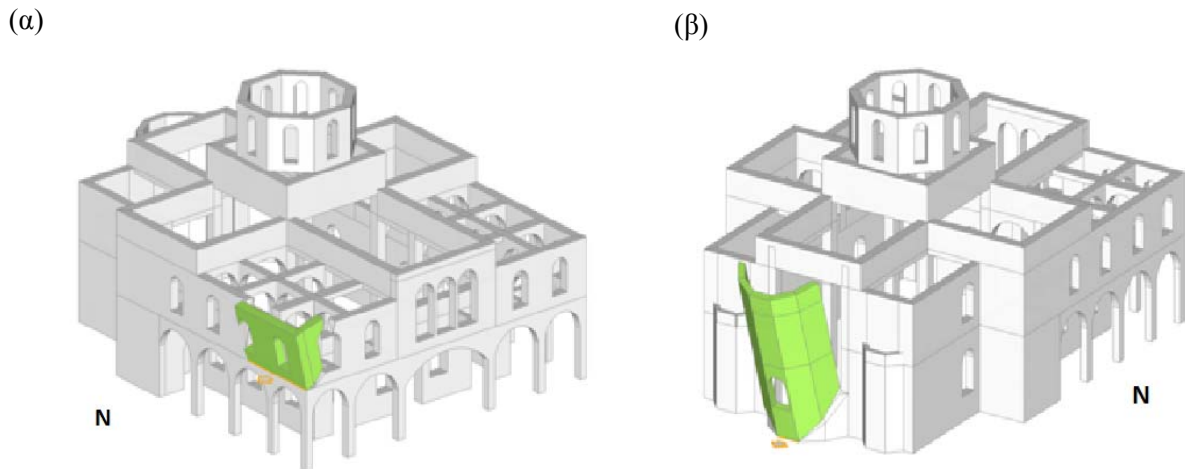
(α)



(β)



Σχήμα 1: Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων: (α) τρισδιάστατη απεικόνιση, (β) τομή κατά μήκος της διεύθυνσης δύσης – ανατολής.



Σχήμα 2: Έλεγχος μακροστοιχείων: (α) ανατροπή τμήματος της βόρειας όψης, (β) ανατροπή της κεντρικής κόγχης στην ανατολική όψη.

Στο σημείο αυτό αξίζει να επισημανθεί ότι σχεδόν στην πλειονότητά τους κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία αναπτύσσουν στους σεισμούς τοπικούς μηχανισμούς αστοχίας, όπως περιγράφονται από επιμέρους μακροστοιχεία. Στην αποτίμηση της συμπεριφοράς κτηρίων από τοιχοποιία η επιλογή και αξιολόγηση των διαφόρων πιθανών μηχανισμών κατάρρευσης είναι ένα ζήτημα ιδιαίτερης σημασίας, π.χ., [26, 27]. Η προσομοίωση με μακροστοιχεία επιτρέπει την πραγματοποίηση είτε κινηματικής ανάλυσης ή μη-γραμμικής στατικής ανάλυσης [14, 28-30].

Με την εφαρμογή επεμβάσεων σύμφωνα με τους αρχαιολογικούς/αρχιτεκτονικούς περιορισμούς [1-3], τις αναλύσεις (εντός και εκτός επιπέδου ελέγχους με κατάλληλα προσομοιώματα μακροστοιχείων και πεπερασμένων στοιχείων) και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι η στάθμη επιτελεστικότητας «Σημαντικές Βλάβες: Β» επιτυγχάνεται για το φάσμα σχεδιασμού του EC8-1 [11] με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση $a_{gRL} = 0,211$ g, ενώ η στάθμη επιτελεστικότητας «Περιορισμένες Βλάβες: Α» επιτυγχάνεται με $a_{gRL} = 0,165$ g.

Για να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (2), η a_{gRL} πρέπει να διαιρεθεί με 0,8 οπότε προκύπτει $a_{gRL} = 0,264$ g για στάθμη Β και $a_{gRL} = 0,206$ g για στάθμη Α. Με αντικατάσταση των a_{gRL} στην εξίσωση (2) προκύπτει περίοδος επαναφοράς $T_{RL} = 361$ έτη για τη στάθμη Β και $T_{RL} = 143$ έτη για τη στάθμη Α. Ακολουθώντας, για $P_R=10\%$ αντικαθιστώντας διαδοχικά στην εξ. (4) την $T_{RL} = 361$ έτη για τη Β και $T_{RL} = 143$ έτη για την Α: προκύπτει: (i) $T_{\Delta}=38$ έτη για «B1», και (ii) $T_{\Delta}=99$ έτη για «A2». Τα ίδια αποτελέσματα προκύπτουν άμεσα και με χρήση των διαγραμμάτων του Σχήματος 3(α) για $a_{gR} = 0,211$ g (στάθμη Β) και του Σχήματος 3(β) για $a_{gR} = 0,165$ g (στάθμη Α).

Εάν στο μνημείο επιτρέπεται η χρήση όπως αυτή καθορίζεται για την κατηγορία C2 ή C3 της παραγράφου §2.4, δηλαδή για $\gamma_I=1.0$, τότε η συμβατική διάρκεια των επεμβάσεων για B1 και A2 προκύπτει 38 και 99 έτη, αντίστοιχα. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

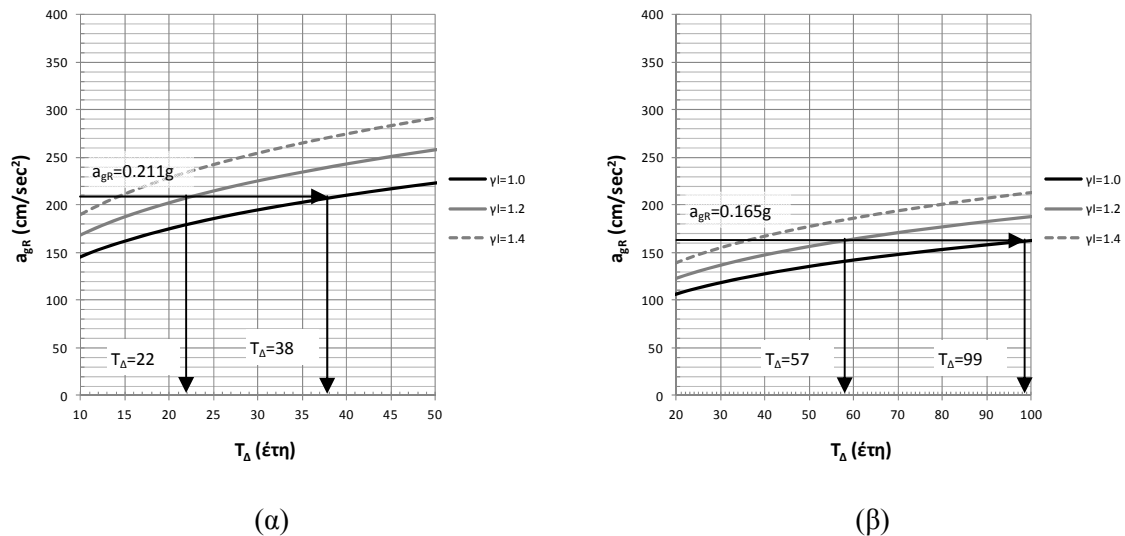
Από τον Πίνακα 3 προκύπτει ότι:

(1) Ικανοποιούνται τα κριτήρια (i) και (ii) που προτάθηκαν στην ενότητα 3.2.

(2) Μετά το πέρας των $T_{\Delta}=22$ ετών θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μια νέα αποτίμηση και ανάλογα με τα αποτελέσματά της θα επιλεγεί μία από τις ακόλουθες εναλλακτικές:

(α) εφαρμογή επεμβάσεων για την εκ νέου επίτευξη του στόχου B1. Με τον τρόπο αυτό παρέχεται η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν νέα επιστημονικά δεδομένα τα οποία ενδεχομένως θα επιτρέψουν και περαιτέρω μείωση της σεισμικής διακινδύνευσης του κτίσματος, ή

(β) περιορισμός της επισκεψιμότητας του μνημείου για επιπλέον 16 έτη, δηλαδή προσωρινή θεώρηση του μνημείου ως κατηγορία Σπουδαιότητας II και πραγματοποίηση επανέλεγχου μετά το πέρας των $T_{\Delta}=38$ ετών.



Σχήμα 3: Διαγράμματα υπολογισμού συμβατικής διάρκειας ζωής, T_{Δ} , για ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z2 και για πιθανότητες υπέρβασης: (α) $P_R=10\%$, και (β) $P_R=50\%$.

Πίνακας 3. Υπολογισμός διάρκειας T_{Δ} για σπουδαιότητα II και III.

	Σπουδαιότητα II $\gamma_I=1.0$				Σπουδαιότητα III $\gamma_I=1.2$			
	Περιορισμένες βλάβες		Σημαντικές βλάβες (B)		Περιορισμένες βλάβες (A)		Σημαντικές βλάβες (B)	
P_R	A	T_{Δ}	B	T_{Δ}	A	T_{Δ}	B	T_{Δ}
10%	A1	-	B1	38	A1	-	B1	22
50%	A2	99	B2	-	A2	57	B2	-

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία με την εισαγωγή της έννοιας της «συμβατικής διάρκειας επέμβασης, T_{Δ} » προτείνει μια εύχρηστη διαδικασία η οποία:

- Εναρμονίζει τη σύγχρονη φιλοσοφία των αντισεισμικών κανονισμών με την πρακτική των επεμβάσεων σε κτίσματα πολιτιστικής κληρονομιάς.
- Αποτρέπει την άμεση εφαρμογή παρεμβατικών επεμβάσεων οι οποίες δεν ικανοποιούν αφενός μεν αισθητικά και αρχαιολογικά κριτήρια και αφετέρου τις βασικές αρχές των επεμβάσεων σε μνημεία.
- Παρέχει τη δυνατότητα εφαρμογής των επεμβάσεων σε μελλοντικό χρόνο με χρήση των επιστημονικών δεδομένων και τεχνικών που θα είναι τότε διαθέσιμα.
- Καθορίζει χρονικά όρια μετά την πάροδο των οποίων η σεισμική επικινδυνότητα του κτίσματος θα πρέπει να επανεξετάζεται.

5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος «ΘΑΛΗΣ - ΕΜΠ - Αντισεισμική Προστασία Μνημείων και Ιστορικών Κατασκευών - SEISMO» (ιστοσελίδα: <http://www.seismo-ntua.eu/>) [31].

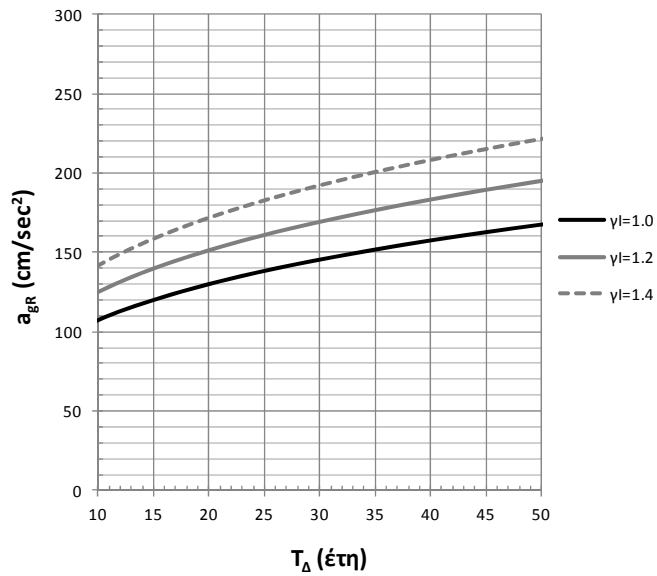
6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ / ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] The Athens Charter for the Restoration of Historic Monuments. First International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments, Athens, 1931.

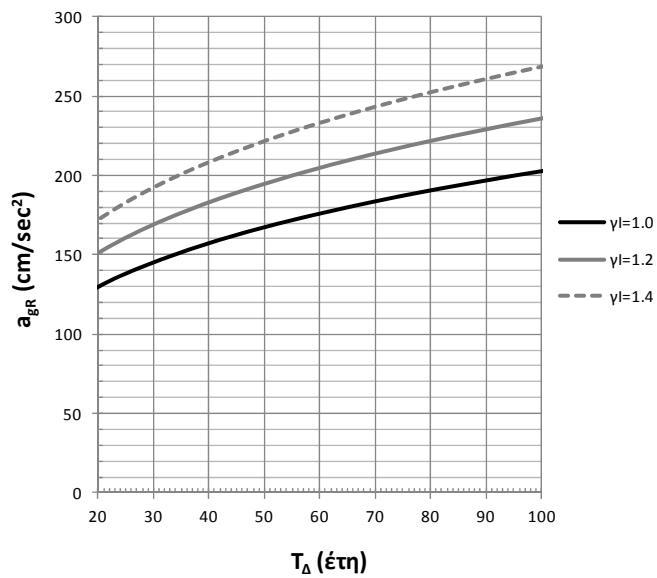
- [2] International Council on Monuments and Sites – ICOMOS. *International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites* (The Venice Charter 1964). Second International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments, Venice, 1964.
- [3] Congress on the European Architectural Heritage, 21 - 25 October 1975: The Declaration of Amsterdam.
- [4] Spyrakos C.C., Seismic Risk of Historic Structures and Monuments: A need for a unified policy. In proceedings of *COMPDYN 2015, 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Crete, 2015.
- [5] Spyrakos C.C., Maniatakis C.A., Taflambas J., Evaluation of near source seismic records based on damage potential parameters: Case study: Greece. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28, 738-753, 2008.
- [6] Spyrakos C.C., Toulitatos P., Patsilivas D., Pelekis G., Xampesis A., Maniatakis C.A., Seismic analysis and retrofit of a historic masonry building, In S. Syngellakis Editor, *Retrofitting of Heritage Structures - Design and evaluation of strengthening techniques* (pp. 65-74). Southampton, UK: Wessex Institute of Technology Press, 2013.
- [7] Spyrakos C.C., Maniatakis C.A., Taflambas J., Critical evaluation of near field seismic records in Greece. In Syngellakis S. eds. *Earthquake Ground Motion - Input Definition for Aseismic Design*. Southampton, UK: Wessex Institute of Technology Press; 2015 (pp. 1-10).
- [8] Spyrakos C.C., Maniatakis C.A., Kiriakopoulos P., Francioso A., Taflampas I.M., Performance of a post-Byzantine triple-domed basilica under near and far fault seismic loads: Analysis and intervention. In Asteris P.G. and Plevris V. eds. *Handbook of Research on Seismic Assessment and Rehabilitation of Historic Structures*. IGI Global Editions, 2015; Vol. II: 831-867.
- [9] ASCE/SEI 41/06: *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*.
- [10] FEMA 356, 2000: *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, prepared by American Society of Civil Engineers for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- [11] Comité Européenne de Normalisation (CEN). Eurocode 8 (EC8-1), 2005: Design of structures for earthquake resistance *Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*.
- [12] Comité Européenne de Normalisation (CEN). Eurocode 8 (EC8-3), 2005: Design of structures for earthquake resistance *Part 3: Assessment and retrofitting of buildings*.
- [13] Circolare. n. 617 del 02/02/2009. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Istruzioni per l'applicazione delle Nuove Norme Tecniche per le costruzioni, §C8A.4, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 47 del 26 febbraio 2009, Supplemento ordinario n.27.
- [14] DR (226/02/2011): Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008.
- [15] Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, ΟΑΣΠ (2013). Ομάδα μελέτης για τη σύνταξη κανονισμού επεμβάσεων σε κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα - Ομάδα εναρμόνισης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. με τους Ευρωκώδικες: Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.), 1η Αναθεώρηση 2013. ΦΕΚ 2187Β, 05/09/2013.
- [16] Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, ΟΑΣΠ (2014). Ομάδα Μελέτης για τη σύνταξη Κανονισμού για Αποτίμηση και Δομητικές Επεμβάσεις Τοιχοποιίας (Κ.Α.Δ.Ε.Τ.).
- [17] ΦΕΚ Β' 270/16.03.2010, Δ17α/10/44/ΦΝ275/3-3-10, «Τροποποίηση της απόφασης έγκρισης του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού – ΕΑΚ 2000».
- [18] Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ) και Ευρωπαϊκό Κέντρο Πρόληψης και Πρόγνωσης Σεισμών (ΕΚΠΠΣ): *Προσχέδιο Ρυθμιστικού Πλαισίου για τις Δομητικές Επεμβάσεις και την Αντισεισμική Προστασία των Μνημείων*, 2010.
- [19] Earthquake Planning Protection Organization (EPPO) and European Centre on Prevention and Forecasting of Earthquakes (ECPFE): *Draft Framework regulatory document for structural interventions and seismic protection of monuments*, 2011.

- [20] Borri A., *Strutturisti e Restauratori: Sicurezza Vs Conservazione? Problemi, dubbi e proposte, anche alla luce di esperienze successive al terremoto dell' Aquila. XVI Congresso Nazionale "L' Ingegneria Sismica in Italia"*, L' Aquila, 13–17 Settembre 2015.
- [21] Lagomarsino S., *La prevenzione sismica come strumento di conservazione dei beni culturali. Ingenio* Ottobre 2014; 26.
- [22] Σπυράκος Κ., *Ενίσχυση Κατασκευών για Σεισμικά Φορτία*. Αθήνα: Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, 2004.
- [23] Papazachos B.C., Papaioannou Ch.A., Margaris B.N., Theodulidis N.P., *Regionalization of Seismic Hazard in Greece Based on Seismic Sources. Natural Hazards*, 8, 1-13, 1993.
- [24] Spyarakos C.C., *Finite Element Modeling in Engineering Practice*. Pittsburg, PA, USA: Algor Publishing Division, 1995.
- [25] Spyarakos C.C., Raftoyiannis J. *Linear and Nonlinear Finite Element Analysis*. Pittsburg, PA, USA: Algor Publishing Division, 1997.
- [26] D' Ayala D., Speranza E., *Definition of collapse mechanisms and seismic vulnerability of historic masonry buildings. Earthquake Spectra*, 19(3), 479–509, 2003.
- [27] Giuffrè A., *Lecture sulla meccanica delle murature storiche*. Roma: Edizioni Kappa, 1991.
- [28] Spyarakos C.C., Kiriakopoulos P.D., Smyrou E., *Seismic Strengthening of the Historic Church of Sts Helen and Constantine in Piraeus*. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering COMPDYN 2011*. Corfu, Greece; ECCOMAS. M. Papadrakakis, M. Fragiadakis, V. Plevris eds. *COMPDYN 2011, 3rd ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering 2011*, Corfu, Greece, 25-28 May, 2011; 2401-2413.
- [29] Spyarakos C.C., Francioso A., Kiriakopoulos P.D., Papoutsellis S., *Seismic evaluation of the historic church of St. Nicholas in Piraeus before and after interventions*. M. Papadrakakis, V. Papadopoulos, V. Plevris eds. *COMPDYN 2013, 4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering 2013*, Kos Island, Greece, 12–14 June 2013; 3015-3029.
- [30] Spyarakos C.C., Pugi F., Maniatakis C.A., Francioso A., *Evaluation of the Dynamic Response for a Historic Byzantine crossed-dome church through Block joint and Kinematic analysis*. In *proceedings of COMPDYN 2015, 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering 2015*, Crete island, Greece, 25-27 May 2015.
- [31] SEISMO - Seismic Protection of Monuments and Historic Structures. Thales Context - Greek Ministry of Education and Religions - The European Union, Operational Programme - Education and Lifelong Learning, NSRF 2007-2013. (Ιστοσελίδα: <http://www.seismo-ntua.eu/>)

7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

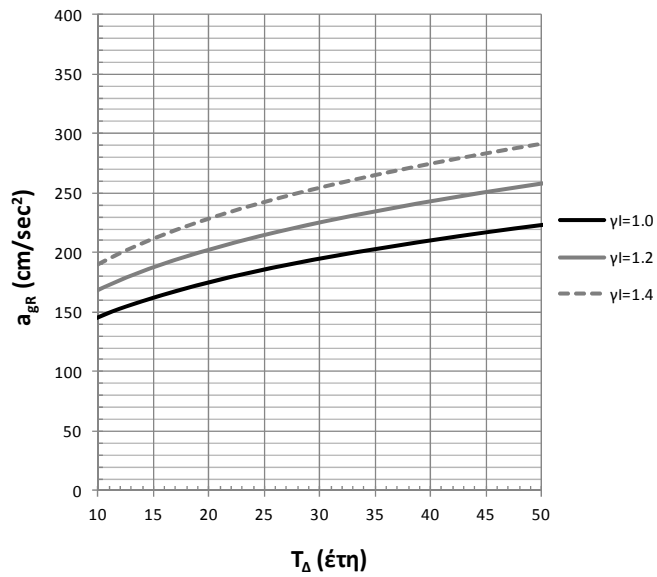


(α)

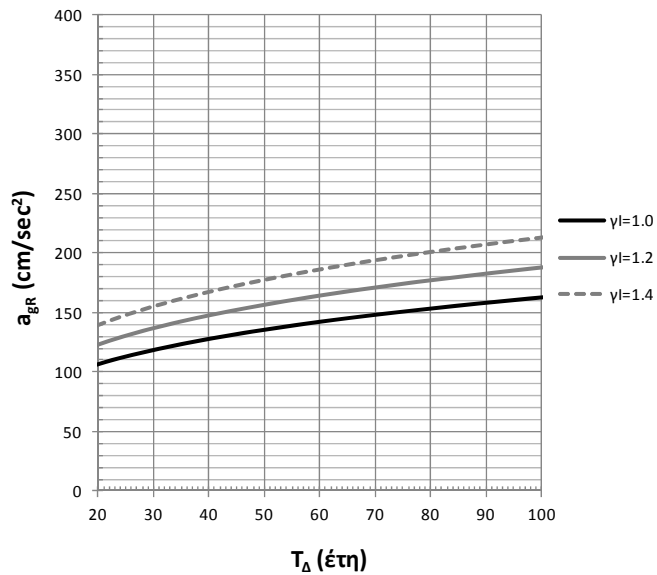


(β)

Σχήμα Π1: Διαγράμματα υπολογισμού συμβατικής διάρκειας ζωής, T_{Δ} , για ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z1 και για πιθανότητες υπέρβασης: (α) $P_R=10\%$, και (β) $P_R=50\%$.

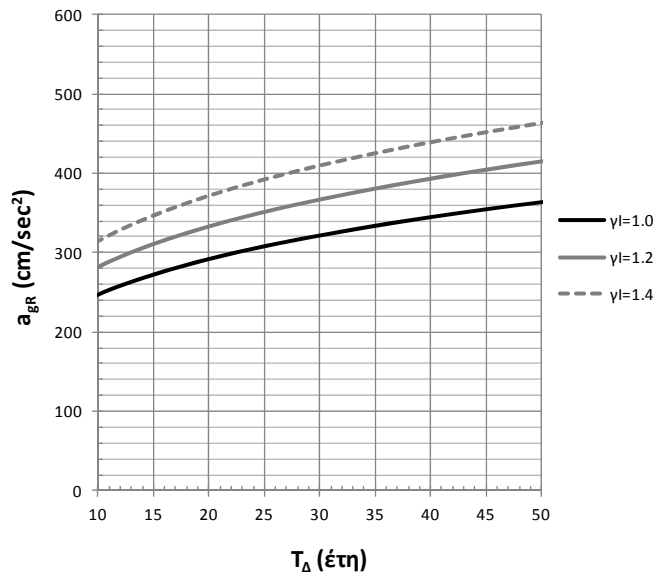


(α)

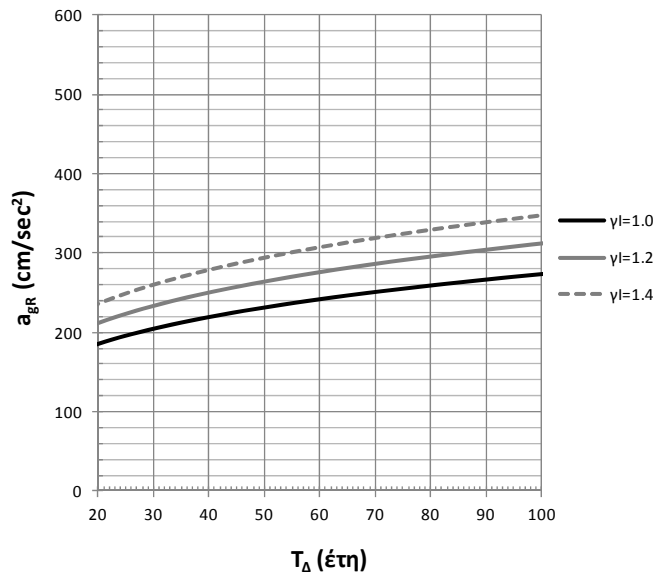


(β)

Σχήμα Π2: Διαγράμματα υπολογισμού συμβατικής διάρκειας ζωής, T_{Δ} , για ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z2 και για πιθανότητες υπέρβασης: (α) $P_R=10\%$, και (β) $P_R=50\%$.



(α)



(β)

Σχήμα Π3: Διαγράμματα υπολογισμού συμβατικής διάρκειας ζωής, T_{Δ} , για ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z3 και για πιθανότητες υπέρβασης: (α) $P_R=10\%$, και (β) $P_R=50\%$.

Modern Approaches for the Earthquake Protection of Cultural Heritage Structures - Review and Proposal

Constantine C. Spyrakos

Professor, School of Civil Engineering NTUA, Director of the Laboratory for Earthquake Engineering

ABSTRACT

There is lack for a common approach on the assessment of seismic risk for historic structures and monuments. The challenge of balancing safety versus maintenance of architectural and artistic features of historic structures remains a pressing issue to address. In most cases limitations stemming from the implementation of interventions on historic structures and monuments that do not comply with internationally accepted guidelines, e.g., Carta di Venezia, Athens Charter, Amsterdam Charter, do not allow fulfilling the safety level of new constructions. Furthermore, new developments on seismic hazard and interventions related to near-source phenomena are scarcely considered in the literature.

Earthquake protection of cultural heritage assets can be realized through a preventive knowledge of the seismic risk in order to plan mitigation strategies and schedule the necessary strengthening measures to reduce vulnerability. Seismic risk is the outcome of four different factors: (i) seismic hazard (probability of occurrence of an earthquake of a given intensity at a certain site); (ii) vulnerability (predisposition of the building to be damaged by an earthquake); (iii) exposure related to the conditions of use and presence of public; (iv) the historical and architectural importance of the building and the artistic assets that contains. Clearly, the earthquake protection of cultural heritage assets is a task that involves not only safety and economic issues, but also the conservation of the cultural properties of the assets.

This work presents a methodology that leads to interventions balancing the demands of security and respect for the cultural and archaeological characteristics of the structure. In the paper entitled: “Seismic risk of historic structures and monuments: a need for a unified policy” [4], issues related to computational analysis methods and near-fault effects are presented more extensively. The paper also presents a representative monument to which the proposed methodology is applied.

Keywords: Historic structures, Monuments, Seismic Risk, Interventions, Safety levels, Nominal life, Near-source phenomena.