

**Επίδραση της Τοπολογίας των Τοιχοπληρώσεων στην
Σεισμική Απόκριση Πλαισιακών Κατασκευών
Οπλισμένου Σκυροδέματος**
Influence of Infill Walls Topology on the Seismic Response
of Reinforced Concrete Structures

Νίκος Νάνος¹, Εμμανουήλ Ελένας²

Λέξεις κλειδιά: Τοπολογία Τοιχοπληρώσεων, Δείκτες Βλάβης, Σεισμική Διέγερση
Infill Walls Topology, Damage Indices, Seismic Excitation

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Η εργασία προβάλλει την επίδραση της τοπολογίας των τοιχοπληρώσεων στην απόκριση ενός πλαισίου οπλισμένου σκυροδέματος υπό σεισμική διέγερση. Η διαστασιολόγηση του πλαισίου βασίζεται στον Ευρωκώδικα 2 και στον ΕΑΚ. Για την ανάλυση της κατασκευής εφαρμόζονται μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις και χρησιμοποιούνται 30 επιταχυνσιογραφήματα. Η απόκριση της κατασκευής υπολογίστηκε για ένα πλαίσιο χωρίς τοιχοπληρώσεις και για τέσσερα πλαίσια με εναλλακτικές θέσεις των τοιχοπληρώσεων. Η προσοχή εστιάστηκε στους ολικούς δείκτες βλάβης (δ.β.) της κατασκευής. Έτσι, επιλέχθηκαν ο δ.β. κατά Park/Ang και η μέγιστη ανηγμένη σχετική μετατόπιση των ορόφων. Στόχος είναι ο αριθμητικός προσδιορισμός της επιρροής της τοπολογίας των τοιχοπληρώσεων στην σεισμική απόκριση της κατασκευής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τοιχοπληρώσεις ευνόησαν την σεισμική απόκριση του πλαισίου, μειώνοντας σημαντικά τους δ.β. συγκριτικά με το αντίστοιχο πλαίσιο χωρίς τοιχοπληρώσεις. Τέλος, η συσχέτιση των δ.β. και της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, προσδιόρισαν ποσοτικά την αλληλεξάρτησή τους.

ABSTRACT : This paper provides a procedure to quantify the influence of masonry infill walls topology on the structural damage of an r/c building suffers from seismic events. Initially, 30 artificial accelerograms have been composed. The peak ground acceleration (PGA) has been chosen as seismic intensity parameter. The examined r/c frame is designed according to the rules of the recent design codes. The initial bare frame has been examined having 4 different layouts of infill walls. Nonlinear dynamic analyses have been carried out to evaluate the

¹ Senior Lecturer, University of Portsmouth, School of Civil Engineering, PO1 3AH Portsmouth, England, email: nikos.nanos@port.ac.uk

² Civil Engineer, University of Portsmouth, School of Civil Engineering, PO1 3AH Portsmouth, England, email: emm.elenas@gmail.com

overall structure damage indices (OSDIs), expressed by the model of Park/Ang and by the maximum inter-storey drift ratio (MISDR). The results show that infill walls reduce the mean value of the examined DIs between the bare frame, and its infill wall reinforced counterpart. A statistical study provided a medium correlation between the OSDIs and PGA for all the frame types.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι φορείς οπλισμένου σκυροδέματος με τοιχοπληρώσεις αποτελούν έναν τυπικό φορέα για πολυώροφες κτηριακές και άλλες κατασκευές. Οι τοιχοπληρώσεις, ανάλογα με τις αρχιτεκτονικές απαιτήσεις παρουσιάζουν είτε μερική είτε ολική κάλυψη του φαντώματος. Συνήθως, η προσομοίωση του στατικού φορέα αγνοεί τις τοιχοπληρώσεις, οι οποίες εμφανίζονται απλώς ως επιπλέον μόνιμο φορτίο, χωρίς να συνυπολογίζονται στη στιβαρότητα του κτηρίου. Από την άλλη πλευρά, είναι γνωστό από παρατηρήσεις μετά από καταστροφικούς σεισμούς, από πειραματικές και από υπολογιστικές μελέτες ότι οι τοιχοπληρώσεις ενός κτηρίου επηρεάζουν σημαντικά την σεισμική απόκριση μιας κατασκευής. Ως αιτίες αυτής της επιρροής θεωρούνται η επίδραση των τοιχοπληρώσεων στη στιβαρότητα του φορέα, στην ιδιοπερίοδο και στην απόσβεση της κατασκευής. Στην παρούσα εργασία προσδιορίζεται αριθμητικά η επίδραση της τοπολογίας των τοιχοπληρώσεων στην σεισμική απόκριση μιας κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος, εστιάζοντας στην χρήση ολικών δεικτών βλάβης. Αυτοί, έχουν το πλεονέκτημα να προσδιορίζουν την κατάσταση βλάβης μιας κατασκευής, με μια (μοναδική) αριθμητική τιμή. Επιπλέον, η παρούσα εργασία παρουσιάζει τον ποσοτικό προσδιορισμό της αλληλεξάρτησης μεταξύ της μέγιστης εδαφικής σεισμικής επιτάχυνσης και των ολικών δεικτών βλάβης της κατασκευής, χρησιμοποιώντας τους συντελεστές συσχέτισης κατά Pearson και κατά Spearman, συνυπολογίζοντας την τοπολογία των τοιχοπληρώσεων.

ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ

Οι σεισμικές διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν στις μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις της παρούσας εργασίας προσομοιώθηκαν με τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα, συμβατά με το φάσμα απόκρισης του ισχύοντα αντισεισμικού κανονισμού. Στην διαδικασία που εφαρμόστηκε, δημιουργήθηκε ένα σύνολο 30 σεισμικών επιταχυνσιογραφημάτων, ώστε να προκύψει ένα αξιόπιστο στατιστικό δείγμα. Επιπλέον, όλα τα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα είναι συμβατά με τις αναμενόμενες διεγέρσεις βάσει του ισχύοντος αντισεισμικού κανονισμού. Με παραλλαγή διαφόρων παραμέτρων δημιουργήθηκαν τα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα, συμβατά με τα φάσματα απόκρισης του ΕΑΚ (2004). Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα H/Y SIMQKE (Gasparini, 1976). Ως παράμετροι χρησιμοποιήθηκαν η μέγιστη σεισμική επιτάχυνση του εδάφους (PGA), η συνολική διάρκεια της διέγερσης (Total Duration (TD): 10 s, και 20 s), η ενεργός εδαφική επιτάχυνση για την ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II ($\alpha = 0.24g$) και για κατηγορία εδάφους B.

Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε η μέγιστη επιτάχυνση του εδάφους (PGA), ως μια απλή εντασιακή σεισμική παράμετρος. Η συγκεκριμένη παράμετρος επιλέχθηκε λόγω της απλότητάς της και της πολύ διαδεδομένης χρήσης της από ερευνητές ως χαρακτηριστικό μέγεθος περιγραφής μιας σεισμικής δόνησης (Elenas, 2000) (Meskouris 2000).

ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΒΗΣ

Ως ολικοί δείκτες βλάβης (overall structure damage indices, OSDIs) της κατασκευής χρησιμοποιήθηκαν το τροποποιημένο μοντέλο κατά Park/Ang (Park, 1985) και η μέγιστη ανηγμένη σχετική μετακίνηση των ορόφων. Ο τοπικός δ.β. κατά Park/Ang δίνεται από την σχέση (1):

$$DI_L = \frac{\theta_m - \theta_r}{\theta_u - \theta_r} + \frac{\beta}{M_y \cdot \theta_u} \cdot E_h \quad (1)$$

όπου, DI_L ο τοπικός δ.β. κατά Park/Ang, θ_m η μέγιστη στροφή της διατομής λόγω σεισμικής φόρτισης, θ_u η αντοχή της διατομής σε στροφή, θ_r η ανακτώμενη στροφή της διατομής κατά την αποφόρτιση, β παράμετρος μείωσης της αντοχής που προσδιορίζεται πειραματικά, M_y ροπή διαρροής της διατομής, E_h η απορροφηθείσα υστερητική ενέργεια.

Από τους τοπικούς δείκτες βλάβης στις ακραίες διατομές των δομικών στοιχείων του συνολικού φορέα, προκύπτει ο ολικός δ.β. κατά Park/Ang από την σχέση (2):

$$DI_G = \frac{\sum_{i=1}^n (DI_{L,i} \cdot E_i)}{\sum_{i=1}^n E_i} \quad (2)$$

όπου, DI_G ο ολικός δ.β. κατά Park/Ang, $DI_{L,i}$ ο τοπικός δ.β. κατά Park/Ang στη διατομή i , E_i η απορροφηθείσα υστερητική ενέργεια στη διατομή i , n ο συνολικός αριθμός θέσεων που υπολογίστηκε τοπικός δείκτης βλάβης.

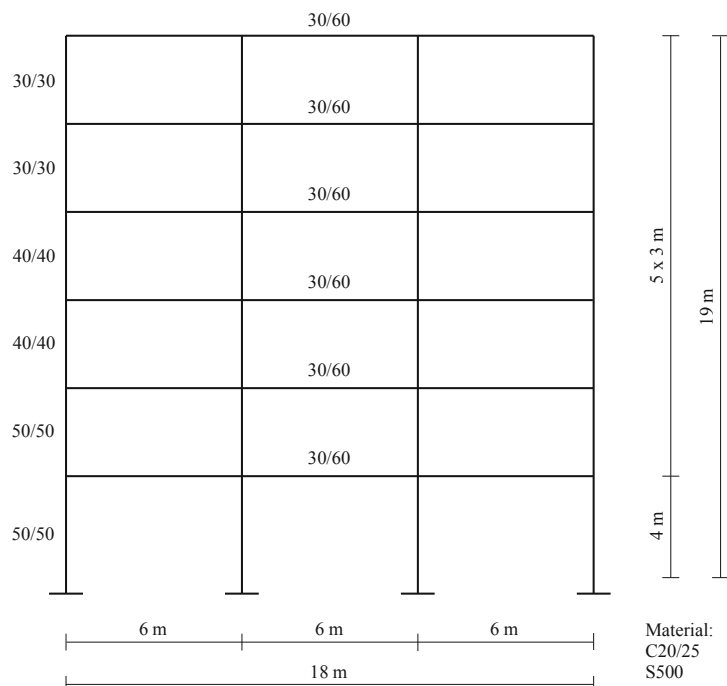
Η μέγιστη ανηγμένη σχετική μετατόπιση των ορόφων (maximum inter-storey drift ratio, MISDR) (Meskouris, 2000) προσδιορίζεται από την σχέση (3):

$$ISDR_i = \frac{u_i - u_{i-1}}{h_i} 100 [\%] \quad (3)$$

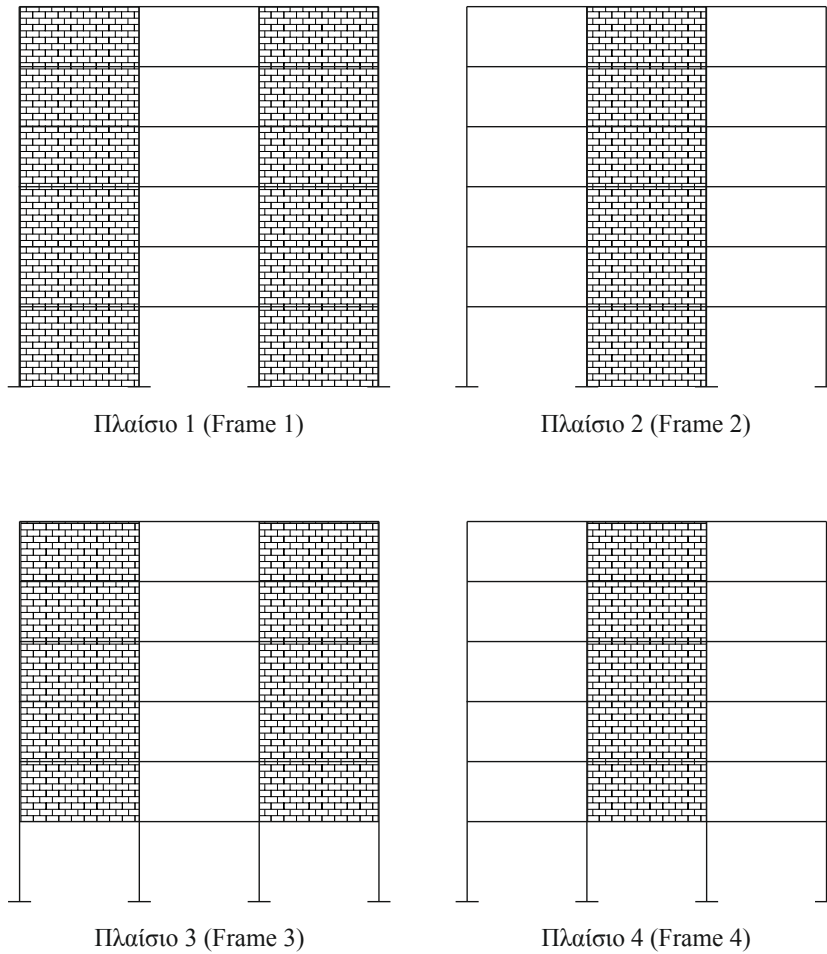
όπου, $ISDR_i$ η ανηγμένη σχετική μετατόπιση του ορόφου i , u_i η μετατόπιση ορόφου i , u_{i-1} η μετατόπιση ορόφου $i-1$, h_i το ύψος του ορόφου i .

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Το Σχήμα 1 παρουσιάζει το πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος χωρίς τοιχοπληρώσεις το οποίο ονομάστηκε Πλαίσιο 0 (Frame 0) και εξετάστηκε στην παρούσα μελέτη. Η διαστασιολόγηση πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τους κανόνες που ορίζουν ο Ευρωκώδικας 2 (CEN, 2004) και ο ΕΑΚ (ΟΑΣΠ, 2004) για κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος και αντισεισμικές κατασκευές, αντίστοιχα. Το πάχος της πλάκας είναι 20 cm. Η κατασκευή υπολογίστηκε με συντελεστή σπουδαιότητας 2 (συνήθη κτήρια), μικρή πλαστιμότητα (συντελεστής συμπεριφοράς $q = 1.5$), κατηγορία εδάφους Β και σεισμική ζώνη ΙΙ ($\alpha = 0.24g$) σύμφωνα με τον ΕΑΚ (2004). Επιπλέον, λήφθηκαν υπόψη τα κινητά φορτία, το φορτίο χιονιού, το φορτίο ανέμου και η απόκλιση των υποστυλωμάτων από την κατακόρυφο. Η τοιχοποιία έχει πάχος 25 cm, η αντοχή σε θλίψη των οπτοπλίνθων ισούται με 5 MPa και του κονιάματος ισούται με 10 MPa.



Σχήμα 1. Πλαισιακή κατασκευή χωρίς τοιχοπληρώσεις.



Σχήμα 2. Εναλλακτικές θέσεις τοιχοπληρώσεων.

Στη συνέχεια, μορφώθηκαν 4 διαφορετικές περιπτώσεις τοιχοπληρώσεων που διαφέρουν μεταξύ τους στην τοπολογία (Πλαίσια 1 έως 4 (Frame 1-4), στο Σχήμα 2). Ακολούθως, πραγματοποιήθηκαν και για τα 5 πλαίσια μια σειρά από μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις με χρήση των τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων, που προαναφέρθηκαν. Η δυναμική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό IDARC (Reinhorn, 2009), στο οποίο είναι ενσωματωμένη η μικραυξητική διαδικασία κατά Newmark, συνοδευόμενη από μια επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης της λύσης ανά χρονικό βήμα κατά Newton/Raphson. Η διαδικασία επίλυσης έλαβε υπόψη τη μη γραμμική συμπεριφορά του οπλισμένου σκυροδέματος με ένα τροποποιημένο μοντέλο των Takeda/Powell, με

τριγωνική περιβάλλουσα (Reinhorn, 2009). Επιπλέον, λαμβάνεται υπόψη η μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας των στοιχείων και η ολίσθηση του οπλισμού υπό ανακυκλιζόμενη καταπόνηση (Reinhorn, 2009).

Οι τοιχοπληρώσεις λήφθηκαν υπόψη με τη χρήση διαγωνίων θλιπτικών ράβδων στα αντίστοιχα φατνώματα. Για το υλικό των τοιχοπληρώσεων υπό μονότονη φόρτιση, χρησιμοποιήθηκε ένας μη γραμμικός νόμος τάσεων-παραμορφώσεων και δύναμης-μετακίνησης. Ως νόμος δύναμης-μετακίνησης υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση χρησιμοποιήθηκε το μη-γραμμικό μοντέλο κατά Bouc/Wen (Reinhorn, 2009). Τέλος, στην απόκριση της πλαισιακής κατασκευής, για όλα τα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα που εξετάστηκαν, η προσοχή εστιάστηκε στον ολικό δείκτη βλάβης κατά Park/Ang και στη μέγιστη ανηγμένη σχετική μετατόπιση των ορόφων (maximum inter-storey drift ratio, MISDR), λόγω του πλεονεκτήματος να προσδιορίζεται η κατάσταση δομικής βλάβης, με μια (μοναδική) αριθμητική τιμή.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τα μέγιστα, ελάχιστα και τους μέσους όρους των ολικών δ.β. της κατασκευής και την ποσοστιαία τους μεταβολή σε σχέση με το πλαίσιο χωρίς τοιχοπληρώσεις (Πλαίσιο 0). Έτσι, τα πλαίσια με τοιχοπληρώσεις παρουσιάζουν ένα ποσοστό μείωσης έως 60.3% της μέγιστης τιμής του δ.β. κατά Park/Ang, σε σχέση με το πλαίσιο χωρίς τοιχοπληρώσεις. Ενώ, η αντίστοιχη μείωση της μέσης τιμής είναι έως 56.6%. Ανάλογα αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τον δ.β. MISDR. Εδώ, η μείωση της μέσης τιμής ανέρχεται έως 20.633%. Σε όλες τις περιπτώσεις, η μέγιστη μείωση παρατηρείται στα πλαίσια με τις περισσότερες τοιχοπληρώσεις (Πλαίσια 1 και 3).

Πίνακας 1. Στατιστικές τιμές αποτελεσμάτων.

Frame	OSDI Park/Ang					Rate of change in respect of Frame 0 [%]			
	0	1	2	3	4	1	2	3	4
Min	0.077	0.069	0.075	0.077	0.079	-10.390	-2.597	0.000	2.597
Max	1.0	0.397	0.58	0.399	0.615	-60.300	-42.000	-60.100	-38.500
Mean	0.424	0.184	0.224	0.184	0.222	-56.604	-47.170	-56.604	-47.642
Frame	MISDR [%]					Rate of change in respect of Frame 0 [%]			
	0	1	2	3	4	1	2	3	4
Min	0.65	0.57	0.61	0.59	0.61	-12.308	-6.154	-9.231	-6.154
Max	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	0.000	0.000	0.000	0.000
Mean	1.895	1.544	1.65	1.504	1.628	-18.522	-12.929	-20.633	-14.090

Για τον προσδιορισμό της αλληλεξάρτησης μεταξύ των δεικτών βλάβης και της μέγιστης εδαφικής σεισμικής επιτάχυνσης PGA, υπολογίστηκαν οι συντελεστές συσχέτισης (σ.σ., correlation coefficients) κατά Pearson και κατά Spearman (Ryan, 2007). Ο πρώτος δηλώνει τον βαθμό της γραμμικής συμμεταβολής δύο μεγεθών, ενώ ο δεύτερος τον βαθμό της ιεραρχικής συμμεταβολής. Συντελεστές συσχέτισης με απόλυτες τιμές έως 0.5, δηλώνουν μικρή αλληλεξάρτηση των εξεταζόμενων μεγεθών, ενώ τιμές από 0.5 έως 0.8, δηλώνουν μέτρια συσχέτιση. Τέλος, αριθμητικές τιμές του σ.σ. από 0.8 έως 1.0, δηλώνουν ισχυρή αλληλεξάρτηση των μεγεθών. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα των συντελεστών συσχέτισης κατά Pearson και κατά Spearman, μεταξύ των ολικών δ.β. και της μέγιστης εδαφικής σεισμικής επιτάχυνσης PGA.

Πίνακας 2. Συντελεστές συσχέτισης κατά Pearson και κατά Spearman.

		Correlation coefficients				
		Frame 0	Frame 1	Frame 2	Frame 3	Frame 4
PGA - OSDI Park/Ang	Pearson	0.613	0.616	0.596	0.658	0.588
	Spearman	0.713	0.749	0.759	0.739	0.743
PGA - MISDR	Pearson	0.643	0.695	0.726	0.694	0.694
	Spearman	0.717	0.701	0.748	0.722	0.731

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα, διακρίνεται ότι η τοπολογία των τοιχοπληρώσεων δεν παρουσιάζει σημαντική μεταβολή στην συσχέτιση μεταξύ της μέγιστης εδαφικής σεισμικής επιτάχυνσης PGA και των δ.β. που εξετάστηκαν. Έτσι, οι συντελεστές συσχέτισης σε όλες τις περιπτώσεις έδειξαν μέτρια συσχέτιση, με αριθμητικές τιμές μεταξύ 0.588 και 0.759 τόσο για τους σ.σ. κατά Pearson όσο και κατά Spearman.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εργασία παρουσίασε μια διαδικασία ποσοτικού προσδιορισμού της αλληλεξάρτησης μεταξύ της τοπολογίας των τοιχοπληρώσεων μιας πλαισιακής κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος αφενός, των σεισμικών παραμέτρων και των δεικτών βλάβης αφετέρου. Αρχικά, δημιουργήθηκαν 30 τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα συμβατά με τα φάσματα απόκρισης του ΕΑΚ (2004). Ακολούθως, προσδιορίστηκε η μέγιστη εδαφική σεισμική επιτάχυνση PGA για όλα τα επιταχυνσιογραφήματα και οι ολικοί δ.β. (κατά Park/Ang και MISDR). Τα αριθμητικά αποτελέσματα έδειξαν σημαντική μείωση των δ.β. των πλαισίων με τοιχοπληρώσεις συγκριτικά με το αντίστοιχο χωρίς τοιχοπληρώσεις. Τα πλαίσια

με τοιχοπληρώσεις συμπεριφέρθηκαν ευνοϊκότερα σε όλες τις περιπτώσεις, σε σχέση με το αντίστοιχο χωρίς τοιχοπληρώσεις. Η μέγιστη μείωση στους ολικούς δείκτες βλάβης που εξετάστηκαν, παρουσιάστηκαν στα πλαίσια με τον μέγιστο αριθμό τοιχοπληρώσεων (Πλαίσια 1 και 3). Τέλος, οι συντελεστές συσχέτισης έδειξαν μέτρια συσχέτιση μεταξύ της μέγιστης εδαφικής σεισμικής επιτάχυνσης PGA και των ολικών δεικτών βλάβης, σε όλες τις περιπτώσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

CEN, "EN 1992: Eurocode 2 - Design of concrete structures", European Committee for Standardization, Brussels (2004)

Elenas A., "Correlation between seismic acceleration parameters and overall structural damage indices of structures", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 20, No 1 (2000) 93-100.

Gasparini D.A. & Vanmarcke E.H., "SIMQKE, a program for artificial motion generation, user's manual and documentation", Publication No. R76-4, Department of Civil Engineering, MIT, Cambridge, Massachusetts (1976)

Gunturi S.K.V. & Shah H.C. "Building specific damage estimation", Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering (1992) 6001-6006

Meskouris K. "Structural dynamics", Ernst & Sohn, Berlin (2000)

ΟΑΣΠ, "Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός", Αθήνα (2003)

Park Y.J. & Ang A. H.-S., "Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete", Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No 4 (1985) 722-739

Reinhorn A.M., Roh H., Sivaslvan M., Kunnath S.K., Valles R.E., Madan A., Li C., Lobo R. & Park Y.J., "IDARC 2D Version 7.0: A program for the inelastic damage analysis of structures", Technical Report MCEER-09-0006, State University of New York, Buffalo, NY (2009)

Ryan T.P. "Modern Engineering Statistics", John Wiley & Sons, Hoboken (2007)