Κλίμακες Σεισμικής Βλάβης σε Κατασκευές Ωπλισμένου Σκυροδέματος

Α. Κ. ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΔΟΥ Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Επιστημονικός συνεργάτης εργαστηρίου ΩΣ/ΔΠΘ

Α. Ι. ΚΑΡΑΜΠΙΝΗΣ

Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής τμήματος ΠΜ/ΔΠΘ

Περίληψη

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας που παρουσιάζονται αφορούν στην πρόταση βαθμονόμησης της σεισμικής βλάβης οικοδομικών κατασκευών ωπλισμένου σκυροδέματος και στην συγκριτική διερεύνηση της κατάταζης της βλάβης βάσει διαφορετικών μεθόδων. Για την υλοποίηση των παραπάνω στόχων χρησιμοποιήθηκαν στατιστικά στοιχεία με καταγραφές βλαβών σε πραγματικές κατασκευές που προήλθαν από διάφορα σεισμικά γεγονότα της τελευταίας τριακονταετίας, τα οποία σγετίζονται με τα σεισμολογικά δεδομένα και το σύστημα δόμησης του ελλαδικού χώρου. Γίνεται συσχέτιση μεταξύ των υφιστάμενων κλιμάκων βλάβης και της κλίμακας βλαβών που χρησιμοποιήθηκε τελευταία στην Ελλάδα και ταυτόχρονα ενοποίηση των υφιστάμενων κλιμάκων μέσω μιας νέας προτεινόμενης κλίμακας βλάβης, η οποία ορίζει με περιγραφικούς όρους τη δομική βλάβη σε 7 στάθμες επιτελεστικότητας, την οποία και βαθμονομεί τόσο με βάση τον οικονομικό, όσο και τον δομικό δείκτη βλάβης ανάλογα με τη σοβαρότητα της. Επιπλέον, η διαβάθμιση της βλάβης σχετίζεται με την καμπύλη αντίστασης για τυπικές κατηγορίες κτιρίων και συγκρίνεται με τις στάθμες επιτελεστικότητας που ορίζει η FEMA 273.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι υφιστάμενες κλίμακες σεισμικής βλάβης κατασκευών ωπλισμένου σκυροδέματος (ΩΣ) συνήθως εμφανίζουν αδυναμία στη μεταξύ τους σύγκριση, αλλά και στον συνδυασμό των στατιστικών στοιχείων μετασεισμικών ελέγχων που βασίζονται σε αυτές λόγω της ετερογένειας των πολλαπλών παραγόντων που τις διαμορφώνουν. Οι παράγοντες αυτοί αφορούν στον τρόπο εκτίμησης της βλάβης (ποιοτικά ή ποσοτικά), στην ιδιομορφία των τύπων των κατασκευών και των υλικών που χρησιμοποιούνται, στον σεισμικό κίνδυνο, στις εδαφικές συνθήκες και στην παράμετρο μέτρησης της εδαφικής κίνησης ή της εδαφικής διέγερσης, στους τύπους των κτιρίων και στους κανονισμούς σχεδιασμού, καθώς και στις στάθμες επιτελεστικότητας που τίθενται. Η κατά τόπο λοιπόν υιοθέτηση και εφαρμογή των κλιμάκων βλάβης και η γενίκευση της χρήσης τους καθίσταται δυσχερής, με αποτέλεσμα να χρειάζεται κάποια ομογενοποίηση στον τρόπο καταγραφής των συνεπειών ενός σεισμικού γεγονότος, ώστε Υποβλήθηκε: 1.12.2008 Εγινε δεκτή: 7.4.2010

να είναι δυνατή στη συνέχεια η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων [1].

Στόχος της εργασίας είναι η δημιουργία κατάλληλου θεωρητικού υποβάθρου και η πρόταση μιας ενοποιημένης κλίμακας τα βασικά χαρακτηριστικά της οποίας θα είναι η εύκολη, ταχεία και αξιόπιστη αποτίμηση της δομικής βλάβης οικοδομικών κατασκευών μετά από ένα σεισμό και η οποία, πέρα από τη μέχρι πρόσφατα ποιοτική καταγραφή (πράσινα-κίτρινα-κόκκινα), θα περιέχει μια βαθμονομημένη κατάταξη της βλάβης με κάποιον προσεγγιστικά μετρήσιμο βαθμό βλάβης.

Παρουσιάζεται η βαθμονόμηση των επιπέδων βλάβης της κλίμακας τόσο με οικονομικό όσο και με δομικό δείκτη βλάβης, ενώ ο δεύτερος σχετίζεται με την καμπύλη αντίστασης για τυπικές κατηγορίες κτιρίων. Επιπλέον, προκειμένου να είναι δυνατή η συσχέτιση των στατιστικών στοιχείων μετασεισμικών ελέγχων που στηρίχθηκαν σε διαφορετικές μεθόδους κατάταξης της σεισμικής βλάβης, γίνεται περιληπτική αναφορά και συσγέτιση των σπουδαιότερων υφιστάμενων κλιμάκων βλάβης που χρησιμοποιούνται διεθνώς. Παράλληλα, εκτιμάται ο βαθμός βλάβης κτιρίων που προήλθαν από την επεξεργασία στατιστικών στοιχείων παλαιότερων μετασεισμικών ελέγχων, αφενός συμπληρώνοντας τα έντυπα της μεθόδου Ταχέως Οπτικού Ελέγχου (Τ.Ο.Ε.) που χρησιμοποιήθηκε στο σεισμό της Αθήνας (7/9/1999) και αφετέρου βάσει της προτεινόμενης κλίμακας βλάβης για κτίρια με βλάβες από τον σεισμό της Καλαμάτας το 1986. Τελικά, από την επεξεργασία του στατιστικού δείγματος προκύπτουν 3 τρόποι ταξινόμησης της σεισμικής βλάβης: βάσει της αρχικής κατανομής της βλάβης από τα έντυπα μετασεισμικού ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν στις αυτοψίες μετά τον σεισμό, 2. βάσει της μεθόδου του ΤΟΕ και 3. βάσει της προτεινόμενης μεθόδου. Με τον τρόπο αυτό από τη μια υπολογίστηκε ο βαθμός βλάβης με δύο μεθόδους κατάταξης προκειμένου να διερευνηθεί και να συσχετισθεί η προτεινόμενη κλίμακα βλάβης με την πρόσφατη εφαρμοζόμενη μεθοδολογία εκτίμησης της βλάβης στην Αθήνα και από την άλλη επιτεύχθηκε η σύγκριση του τρόπου κατάταξης της σεισμικής βλάβης σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Επιπλέον, η προτεινόμενη κλίμακα εφαρμόστηκε σε κτίρια που παρουσίασαν βλάβες μετά τον σεισμό της 8^{ης} Ιουνίου του 2008 στην Ανδραβίδα. Τέλος, το επίπεδο της αναπτυχθείσας βλάβης συσχετίστηκε με διάφορες παραμέτρους που έχει αναγνωριστεί πως επηρεάζουν δυνητικά τη σεισμική τρωτότητα.

2 ΚΛΙΜΑΚΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΒΛΑΒΗΣ

2.1 Διεθνείς κλίμακες σεισμικής βλάβης:

Οι κλίμακες σεισμικής έντασης και βλαβών ποσοτικοποιούν το μέγεθος της σεισμικής βλάβης προκειμένου να είναι εφικτός ο προσδιορισμός της σεισμικής έντασης. Η ευκολία της χρήσης των κλιμάκων έντασης και η απαλλαγή από την απαίτηση εξειδικευμένων οργάνων μέτρησης είναι οι κύριοι λόγοι για τους οποίους έχουν αναχθεί σε σημαντικότατο εργαλείο καταγραφής σεισμών διαχρονικά. Στην Ελλάδα, όπως και στην υπόλοιπη Ευρώπη, για την εκτίμηση των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται κυρίως η τροποποιημένη δωδεκαβάθμια κλίμακα Mercalli-Sieberg, καθώς, και η κλίμακα Medvedev-Sponheur-Karnik-MSK. Πέραν αυτών, ευρέως διαδεδομένη είναι η Ευρωπαϊκή μακροσεισμική κλίμακα EMS98.

Η δωδεκαβάθμια κλίμακα Mercalli είναι ημι-ποσοτική γραμμική και χρησιμοποιείται κυρίως στις ΗΠΑ, τη Νότια Ευρώπη, την Αυστραλία και τη Νέα Ζηλανδία. Η διαβάθμιση των βλαβών που παρουσιάζεται στην κλίμακα αυτή, αφορά σε ελαφριές βλάβες στα επιχρίσματα, που αντιστοιχεί σε ένταση V έως καθολική κατάρρευση οικοδομών μέχρι τα θεμέλια σε επίπεδο έντασης XII.

Η κλίμακα MSK64, γνωστή και ως κλίμακα Medvedev-Sponheuer-Karnik από τους δημιουργούς της, χρησιμοποιήθηκε ευρέως από το 1964 σε Ευρώπη και Ινδία. Περιγράφει τις δομικές βλάβες σε κατασκευές από μικρές ρηγματώσεις σε επιχρίσματα σε ένταση VI μέχρι την καθολική κατάρρευση κτιρίων και τεχνικών έργων σε ένταση XII για δώδεκα επίπεδα σεισμικής έντασης. Το 1981 τροποποιήθηκε (MSK81), όμως, η εφαρμογή της περιορίστηκε με την εισαγωγή της επίσης δωδεκαβάθμιας ευρωπαϊκής κλίμακας EMS98. Στην κλίμακα EMS98 παρατηρείται ανάλογη διακύμανση της δομικής βλάβης από ελαφριά ρηγμάτωση επιχρισμάτων σε επίπεδο έντασης VI έως το σημείο που σχεδόν όλες οι κατασκευές έχουν καταρρεύσει ή υποστεί ανεπανόρθωτες βλάβες σε ένταση XII.

Στην Ιαπωνία, η επταβάθμια κλίμακα Omori συσχετίζει τη σεισμική βλάβη με τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση και χρησιμοποιείται κυρίως για τυπικές ιαπωνικές κατασκευές με διακύμανση στις βλάβες από ρωγμές τοιχοποιιών, από κακή οπτοπλινθοδομή σε ένταση Ι έως την καταστροφή σχεδόν όλων των κτιρίων εκτός από κάποια ξύλινα καλής κατασκευής, σε ένταση VII [1]. Στον Πίνακα 1 γίνεται σύγκριση μεταξύ των εντάσεων για πέντε από τις προαναφερθείσες κλίμακες.

Modified Mercalli	EMS	MSK	Rossi-Forel	Omori	
Ι	Ι	Ι	Ι	0	
П	II	II	I-II	Ι	
III	III	III	Ш	II	
IV	IV	IV	IV-V	II-III	
V	V	V	V-VI	III	
VI	VI	VI	VI-VII	IV	
VII	VII	VII	VIII-	IV-V	
VIII	VIII	VIII	VIII+ to IX-	V	
IX	IX	IX	IX+	V-VI	
Х	Х	Х	Х	VI	
XI	XI	XI	-	VII	
XII	XII	XII	-	-	

Πίνακας 1: Σύγκριση μεταξύ πέντε κλιμάκων εντάσεως. Table 1: Comparison of five existing intensity scales.

Στις ΗΠΑ, η αποτίμηση της βλάβης επιτυγχάνεται μέσω καθορισμένων κριτηρίων επιτελεστικότητας, ορίζοντας περιγραφικά τα στάδια της επιδιωκόμενης απόκρισης των κατασκευών σε όρους δομικής βλάβης. Τα κριτήρια αυτά σχετίζονται, κυρίως, με την επιθυμητή συμπεριφορά της κατασκευής (αντίσταση) μετά από έναν σεισμό, σε αντίθεση με τις προηγούμενες κλίμακες, που αφορούν στο αποτέλεσμα της σεισμικής διέγερσης (ένταση των δράσεων) πάνω στην κατασκευή. Ωστόσο, στο πλαίσιο ομογενοποίησης του τρόπου καταγραφής των συνεπειών ενός σεισμικού γεγονότος, ενδιαφέρει ο τρόπος κατάταξης και αξιολόγησης της βλάβης.

Σύμφωνα με την FEMA 273 [2] τρία βασικά επίπεδα επιτελεστικότητας και δύο ενδιάμεσα ορίζουν τη συμπεριφορά των δομικών στοιχείων μέσω αποδεκτών κριτηρίων που σχετίζονται με τις επιτρεπόμενες εισε-ρχόμενες σεισμικές δυνάμεις και παραμορφώσεις τόσο για τις υφιστάμενες, όσο και για τις νέες κατασκευές. Οι περιγραφές για τα επίπεδα βλαβών του ATC 40 [3] είναι παρόμοιες μ' αυτές της FEMA 273 (ATC 1996a) και της Vision Progress Report (SEAOC 1995b) [4]. Στο πρόγραμμα HAZUS99 [5], τα επίπεδα βλάβης αναγνωρίζονται χωριστά για τα δομικά και τα μη φέροντα στοιχεία και διαβαθμίζονται σε διαφορετικά (5) επίπεδα σεισμικής βλάβης, όπως και αλλού [6, 7], μέσω συγκεκριμένων τιμών της μέγιστης σχετικής μετατόπισης μεταξύ διαδοχικών ορόφων. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται η συσχέτιση των επιπέδων βλάβης της FEMA 273 με την κλίμακα βλαβών του ΟΑΣΠ (Οργανισμός Αντισεισμικής Προστασίας).

2.2 Χαρακτηρισμός σεισμικής βλάβης κτιρίων στην Ελλάδα:

Στην Ελλάδα, η κατάταξη των βλαβών από τις επιτροπές του πρωτοβάθμιου αλλά και του δευτεροβάθμιου ελέγχου γίνεται σύμφωνα με τις οδηγίες του ΟΑΣΠ [8, 9, 10], που αφορούν στην ενδεικτική περιγραφή των βλαβών και είναι: α) Πράσινο, κτίριο που δεν έχει βλάβες ή κτίριο που η αντισεισμική του ικανότητα δεν έχει μειωθεί. Ενδεικτικά μπορεί να εμφανίζει τριχοειδείς μη διαγώνιες ρωγμές σε οριζόντια στοιχεία του φέροντος οργανισμού (Φ.Ο.) από ΩΣ ή ελαφρές ρωγμές στις τοιχοποιίες πλήρωσης (Τ.Π.). β) Κίτρινο, κτίριο που η αντισεισμική του ικανότητα έχει μειωθεί. Στο κτίριο αυτό παρατηρούνται ελαφρές ή σοβαρές βλάβες στον φέροντα οργανισμό και βλάβες στις Τ.Π. γ) Κόκκινο, κτίριο που έχει υποστεί πολύ σοβαρές βλάβες (φέροντα στοιχεία ή και κόμβοι έχουν μεγάλες βλάβες και παραμορφώσεις, ολική ή μερική κατάρρευση του κτιρίου) και υπάρχει πιθανότητα μερικής ή ολικής κατάρρευσης.

Πίνακας 2: Προσεγγιστική σύγκριση των σταθμών επιτελεστικό-τητας βάσει του ΟΑΣΠ [8, 9, 10] και της FEMA [2].

Table 2: Approximate comparison between the performance levels proposed by EPPO (Earthquake Planning & Protection Organization) [8, 9, 10] and FEMA [2].

FEMA 273	Άμεσης Επανάχρησης	Περιορισμένης Βλάβης	; Ασφάλειας Ζωής	Περιορισμένης Ασφάλειας	K	Αποφυγή ατάρρευσης	Κατάρρευση
ЕЛЛАДА	ΠΡΑΣΙ	NA	Kľ	ΓΡΙΝΑ		KOKKINA	МАҮРА

Με βάση τη μέθοδο Τ.Ο.Ε. είναι δυνατόν μετά από μακροσκοπική επιθεώρηση του κτιρίου να οριστεί για τα τυπικά κτίρια κάθε κατηγορίας μία Αρχική Βαθμολογία Σεισμικού Κινδύνου (Α.Β.Σ.Κ.) που εξαρτάται από τις αναμενόμενες για την κατηγορία αυτή σεισμικές επιπονήσεις (Πίνακας 3). Η Α.Β.Σ.Κ. τροποποιείται κατάλληλα λαμβάνοντας υπ' όψιν τη σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής και βασικά δομικά χαρακτηριστικά (pilotis, κοντά υποστυλώματα, τοιγοπλήρωση) και προκύπτει η Βασική Βαθμολογία Σεισμικού Κινδύνου (Β.Β.Σ.Κ.). Αυτή η Β.Β.Σ.Κ. αντιπροσωπεύει την εκτιμώμενη πιθανότητα σημαντικής βλάβης ενός τυπικού κτιρίου της κατηγορίας αυτής με δεδομένο το σεισμικό περιβάλλον της. Πέραν των βασικών δομικών χαρακτηριστικών υπάρχουν σημαντικοί παράγοντες που μπορούν να επιδράσουν αρνητικά στη σεισμική συμπεριφορά ή επάρκεια ενός κτιρίου. Για να ληφθούν υπόψη αυτοί οι παράγοντες ορίζεται μία σειρά Τροποποιητικών Συντελεστών Συμπεριφοράς (Τ.Σ.Σ.), οι οποίοι, αν αφαιρεθούν από τη Βασική Βαθμολογία Σεισμικού Κινδύνου, καταλήγουν σε μία τελική Δομική Βαθμολογία (ΔΒ) για το εξεταζόμενο κτίριο, που αποτελεί το βασικό κριτήριο του βαθμού επάρκειας του κτιρίου και μπορεί να συσχετιστεί με την πιθανότητα σημαντικής βλάβης.

Για τον υπολογισμό της δομικής βλάβης ακολουθείται η υπουργική απόφαση 5172/AZ5β/18-10-99 [11], όπως τροποποιήθηκε με την απόφαση 330/AZ5β/16-1-2001 [12], που περιγράφει τη μεθοδολογία υπολογισμού της απώλειας φέρουσας ικανότητας στοιχείου και στάθμης, βάσει της οποίας καθορίζονται τα κριτήρια κατάταξης των κτιρίων με βάση την επιρροή των βλαβών στη γενική ευστάθεια του κτιρίου. Όταν οι βλάβες βρίσκονται μόνο στις πλάκες και στις δοκούς (ελαφρές ή σοβαρές), στο 30% των κατακόρυφων στοιχείων (ελαφρές βλάβες) και στους τοίχους πλήρωσης (ελαφρές ή σοβαρές), θεωρείται ότι δεν επηρεάζεται η ευστάθεια της κατασκευής. Στην περίπτωση σοβαρότερων βλαβών, επηρεάζεται. Αν η κατάταξη του κτιρίου δεν είναι δυνατή από την παρατήρηση των βλαβών, υπολογίζεται η απομένουσα φέρουσα ικανότητα στην κρίσιμη στάθμη. Έτσι, θεωρείται ότι έχει επηρεαστεί η γενική ευστάθεια ενός κτιρίου, όταν η απώλεια φέρουσας ικανότητάς του είναι μεγαλύτερη από: 10% για κτίρια μικρής ηλικίας (≤25 ετών) και >15% για κτίρια μεγάλης ηλικίας. Μικρής ηλικίας είναι τα κτίρια της τελευταίας 25ετίας και μεγάλης τα κτίρια παλαιότερα της 30ετίας.

Πίνακας 3: Έντυπο Τ.Ο.Ε. του ΟΑΣΠ. Table 3: Rapid Visual Screening questionary by EPPO.

L		ΔΟΜΙΚΕΣ ΒΑΘΜ	ολογι	ΕΣ ΚΑΙ	троп	опоінт		YNTEA	εΣΤΕΣ								
	Αοιθυός			(0Σα)	(ΟΣβ)	(ΟΣν)									
ΧΡΗΣΗ	Χοηστών	Δομικός Τύπος	ΩΣ1	ΩΣ2	, ΩΣ3	ΩΣ4	ΩΣ5	ΩΣ6/7	AT	ΔΤ	от	ET	ΠΣ1	ΠΣ2			
Κατοικία		Αρχική Βασική Βαθμολ.	2.5	2.5	3.0	3.0	3.0	4.5	2.0	3.0	3.5	3.0	1.5	2.5			
Γραφεία	0-10	pilotis η/και κοντά υποστ.	-1.5	-1.5	-1.0	-1.5	-0.5	-0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
Βιομηχανικό		κανονική διάταξη Τοιχ.Πληρ.	0.5	0.5	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
Συγκ.κοινού		Ανευ Αντ. Κανονισμού	-0.5	-0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	0.0	0.0			
Σχολείο	11-100	Κακή Κατάσταση	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5			
Δημόσιο κτίρι	D	Προηγούμενες επιβαρύνσεις	-1.0	-1.0	-1.0	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-1.0	-1.0			
Εκτακτ.ανάγκ	η	Μεγάλο ύψος (>5 ορόφους)	-1.0	-1.0	-1.0	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-1.0	-1.0	-0.5	-0.5			
Ιστορικό κτίρι	100+	Μη κανονικότητα καθ'ύψος	-1.0	-1.0	-1.0	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-1.0	-1.0			
		Οριζόντια μη κανονικότητα	-1.0	-1.0	-1.0	-0.5	-0.5	-0.5	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0			
Σπουδαιότητ	α	Στρέψη	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0			
		Κρούση με γειτονικά	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.5	-0.5			
ΚΙΝΔΥΝΟΣ Π	ταΣΗΣ ΜΗ	Βαρειές επικαλύψεις	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ		Εδαφος ΕΔ2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3			
		Εδαφος ΕΔ3	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6			
ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ 2	ΕΤΟΙΧΕΙΩΝ	ΕΔ3 και άνω των 5 ορόφων	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8			
ΜΓ=Μη Γνωσ	то	Εδαφος Χ	Απαιτε	ίται λετ	гтоµεрг	ς έλεγχ	ος (για	όλους τι	ους δομ	ικούς ΄	ιύπου	ς)	0 -0.5 -0 0 0.0 0. 3 -0.3 -0 6 -0.6 -0 8 -0.8 -0				
Μη αντικειμ.																	
Στοιχεία		ΤΕΛΙΚΗ ΒΑΘΜΟΛΟΓΙΑ															
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ Απαιτείται λεπτομερής								is								
											έλεγ	χος					
											NAI		OXI				

2.3 Κατάταξη της βλάβης, βάσει παλαιότερου ερευνητικού προγράμματος:

Η αποτίμηση της σεισμικής βλάβης που βασίζεται σε μετασεισμικούς ελέγχους υφιστάμενων κατασκευών λόγω της ύπαρξης στατιστικών στοιχείων από πραγματικούς σεισμούς που συνέβησαν στη χώρα μας αποτελεί πλέον συνήθη πρακτική [13, 14, 15, 16]. Στο πλαίσιο συγκριτικής διερεύνησης της κατάταξης της βλάβης βάσει διαφορετικών μεθόδων χρησιμοποιήθηκαν τα πορίσματα παλαιότερου ερευνητικού προγράμματος του ΟΑΣΠ, που εκπονήθηκε στο εργαστήριο ωπλισμένου σκυροδέματος (ΩΣ) του ΔΠΘ και αφορούσε στην αποτίμηση της σεισμικής ικανότητας υφιστάμενων κατασκευών, που υπέστησαν διαφόρου τύπου και έκτασης βλάβες από τον σεισμό της Καλαμάτας. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται ορισμένοι παράμετροι που καταγράφονται σ' ένα έντυπο μετασεισμικού ελέγχου. Βάσει της συγκεκριμένης μεθοδολογίας η βασική σεισμική ικανότητα (c) διακρίνεται σε τοπική (μεμονωμένων δομικών φερόντων ή μη στοιχείων) και ολική (δομικού συστήματος & μη φερόντων στοιχείων) και είναι συνάρτηση της δυσκαμψίας (k), αντοχής (R), κρατύνσεως (R_{μ}/R_{μ}) και ολκιμότητας (μ) καιαναφέρεται σε συγκεκριμένο μηχανισμό αποκρίσεως (Ν, M, V, T, N+M, V+M+N, $\kappa\lambda\pi$).





Πρέπει να σημειωθεί πως παρά το γεγονός ότι η μέθοδος αυτή οδηγεί σε αξιόπιστα αντικειμενικά αποτελέσματα, είναι σχετικά χρονοβόρα (1-3 ώρες ανά συνήθη οικοδομή) και επίπονη, λαμβάνοντας υπόψη αρκετές παραμέτρους για τον απλοποιητικό αλλά συνάμα αναλυτικό υπολογισμό της σεισμικής ικανότητας και επομένως δεν ενδείκνυται η εφαρμογή της κατά τη διενέργεια της 1^{ης} φάσης καταγραφής των ζημιών σε πολυπληθείς κατασκευές μετά από κάποιο σεισμό [17, 18].

3 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΩΝ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΛΙΜΑΚΩΝ ΒΛΑΒΗΣ

Η συμπεριφορά των κατασκευών ωπλισμένου σκυροδέματος (ΚΩΣ) κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμών αποτελεί πείραμα σε φυσική (1:1) κλίμακα και αποτελεί τον αντικειμενικότερο έλεγχο ορθότητας των κανονισμών σχεδιασμού, της μελέτης και της εκτέλεσης της κατασκευής. Εντούτοις, ο αξιόπιστος τρόπος περιγραφής της δομικής απόκρισης εξαρτάται και από τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο καταγραφής της βλάβης, η οποία ενδέχεται να ποικίλει σε λεπτομέρεια (χονδρική, φαινομενολογική, αναλυτική προσεγγιστική, αναλυτική λεπτομερής) και έκταση (πλήθος κατασκευών, ομάδα κατασκευών, μεμονωμένο κτίριο) [18].

ΕΠΙΠΕΔΟ		•	ГҮПОІ ВЛА	Ελαφριά ρηγμάτωση στις τοιχοποίες πλήρωσης και στα επιχρίσματα, χωρίς βλάβες τα φέροντα στοιχεία Δεν ΑΣΙΝΑ Ελαφριά ρηγμάτωση στις τοιχοποίες πλήρωσης και στα επιχρίσματα, χωρίς βλάβες τα φέροντα στοιχεία Δεν Σοβαρές ρωγμές σε τοιχοποίες πλήρωσης, τριχοειδείς ρωγμές σε δοκούς-υποστυλώματα που οφείλονται σε τοπικές αδυναμίες Δεν Σοβαρές βλάβες σε δοκούς και πλάκες, αποδιοργάνωση σκυροδέματος, πολλές καμπτικές ή μεμονωμένες διατμητικές ρωγμές σε υποστυλώματα χωρίς μετακινήσεις Επηρ γενική ευστά ΤΡΙΝΑ Χιαστί λοξές διατμητικές ρωγμές σε υποστυλώματα, αποδιοργάνωση σκυροδέματος, μικρές παραμένουσες παραμορφώσεις, ρωγμές σε τοιχώματα και κόμβους Επηρ γενική ευστά ΚΚΙΝΑ Λυγισμός των ράβδων υποστυλωμάτων και πλήρης απομορφώσεις, σοβαρή αποδιοργάνωση σε κόμβους Επηρ γενική ευστά Κάθε παραπάνω βλάβη με επιπλέον σημαντικές μετακινήσεις είναι ένα επίπεδο παραπάνω, μερική η Επηρ	
ΒΛΑΒΗΣ		ΟΔΗΓΙΕΣ 1984 [8]		ΟΔΗΓΙΕΣ 1997-2001 [9&10]	
Καμμία		Καμμία		Καμμία	
ΕΠΠΕΔΟ ΒΛΑΒΗΣ Καμμία Μηδαμινή Μικρή Μέτρια Εκτεταμένη Μερική κατάρρευση		Λεπτές ρωγμές στις τοιχοποίες πλήρωσης και στα επιχρίσματα, χωρίς βλάβες τα φέροντα στοιχεία		Ελαφριά ρηγμάτωση στις τοιχοποίες πλήρωσης και στα επιχρίσματα, χωρίς βλάβες τα φέροντα στοιχεία	Δεν
Μηδαμινή	ΠΡΑΣΙΝΑ	Ρωγμές σε τοιχοποίες πλήρωσης και επιχρίσματα, μεγάλες βλάβες σε καμινάδες-στηθαία, αμελητέες βλαβες σε φέροντα στοιχεία	ΠΡΑΣΙΝΑ	Σοβαρές ρωγμές σε τοιχοποίες πλήρωσης, τριχοειδείς ρωγμές σε δοκούς-υποστυλώματα που οφείλονται σε τοπικές αδυναμίες	επηρρεάζεται η γενική ευστάθεια
Μικρή		Διαγώνιες ρωγμες σε τοιχοποίες πλήρωσης, μερική ή ολική κατάρρευση καμινάδων, ρωγμές σε φέροντα στοιχεία		Σοβαρές βλάβες σε δοκούς και πλάκες, αποδιοργάνωση σκυροδέματος, πολλές καμπτικές ή μεμονωμένες διατμητικές (<0.5mm) σε υποστυλώματα	
Μέτρια	KITPINA	Μεγάλες ρωγμές σε δοκούς-υποστυλώματα-	KITPINA	χωρίς μετακινήσεις	
Μέτρια		τοιχώματα, μικρή παραμόρφωση φερόντων στοιχείων ή κτιρίου, αποδιοργάνωση σκυροδέματος, θρυμμάτισμα τούβλων		Χιαστί λοξές διατμητικές ρωγμές σε υποστυλώματα, αποδιοργάνωση σκυροδέματος, μικρές παραμένουσες παραμορφώσεις, ρωγμές σε τοιχώματα και κόμβους	
Εκτεταμένη	KOKKINA	Μεγάλες βλάβες-παραμορφώσεις φερόντων στοιχείων, σοβαρές βλάβες στους κόμβους, σημαντικές παραμορφώσεις, στρέβλωση στέγης, αρκετά θρυμματισμένα στοιχεία	KOKKINA	Αυγισμός των ράβδων υποστυλωμάτων και πλήρης αποδιοργάνωση σκυροδέματος, διαρροή ή θραύση συνδετήρων, ασυνέχεια του στοιχείου, σχετικά μικρές παραμορφώσεις, σοβαρή αποδιοργάνωση σε κόμβους	Επηρρεάζεται η γενική ευστάθεια
Μερική κατάρρευση		Αστοχία φερόντων στοιχείων, μεγάλες παραμορφώσεις, μερική κατάρρευση		Κάθε παραπάνω βλάβη με επιπλέον σημαντικές μετακινήσεις είναι ένα επίπεδο παραπάνω, μερική η πλήρης κατάρρευση υποστυλωμάτων	
Κατάρρευση	MAYPA	Ολική ή επικείμενη κατάρρευση	MAYPA	Ολική ή επικείμενη κατάρρευση	

Πίνακας 5: <i>Σύ</i>	νκριση των διατάζεω	ν ΥΠΕΧΩΔΕ-ΟΑΣΠ	1984 &	1997-2001 και βαθ	θμονόμηση της	ς βλάβης βάσει	ι προτεινόμενη	ς κλίμακ	ας.
Table 5: Com	parison of the instru	ctions of Ministry o	f Public	Works-Earthquake	Planning an	nd Protection	Organization	(EPPO)	1984
&19	7-2001 and seismic	damage calibration	accordin	ng to the suggested	damage scale	е.			

Πίνακας 6: Σύγκριση των βαθμών βλάβης κατακόρυφων στοιχείων του $OA\Sigma\Pi$ [11&12] με τις στάθμες επιτελεστικότητας της FEMA [2]. Table 6: Comparison of the EPPO [11&12] damage levels with the FEMA [2] performance levels for the vertical structural elements.

	ΒΑΘΜΟΣ ΒΛΑΒΗΣ Α	ΒΑΘΜΟΣ ΒΛΑΒΗΣ Β	ΒΑΘΜΟΣ ΒΛΑΒΗΣ C	ΒΑΘΜΟΣ	ΒΛΑΒΗΣ D	ΒΑΘΜΟΣ ΒΛΑΒΗΣ Ε	
ΟΑΣΠ [11&12]	Μεμονωμένες οριζόντιες ρωγμές με πλάτος λιγότερο από 1-2 mm, με την προϋπόθεση ότι οφείλονται σε τοπικές αδυναμίες.	Αρκετές πλατιές καμπτικές ρωγμές ή μεμονωμένες λοξές διατμητικές ρωγμές με πλάτος μικρότερο από 0.5 mm, υπό τον όρο ότι δεν παρατηρούνται εναπομένουσες μετακινήσεις.	Χιαστί λοξές διατμητικές ρωγμές ή έντονη τοπική σύνθλιψη και αποδιοργάνωση του σκυροδέματος, υπό τον όρο ότι δεν παρατηρούνται σημαντικές εναπομένουσες μετακινήσεις. Ρηγματώσεις στους κόμβους.	Πλήρης αποδιος σκυροδέματος σ βλάβης, λυγισμό ράβδων, διαρρο συνδετήρων, ασ περιοχή χωρίς κ υποστυλώματος εναπομένουσες που παρατηρούν και ιδιαίτερα οι είναι σχετικά μιι αποδιοργάνωση	γάνωση του στην περιοχή ός διαμήκων ή ή θραύση των υνέχεια στην ατάρρευση του . Οι μετακινήσεις γται (οριζόντιες κατακόρυφες) κρές. Σοβαρή κόμβων.	Πλήρης κατάρρευση του υποστυλώματος. Χιαστί λοξές διατμητικές ρωγμές ή έντονη τοπική σύνθλιψη και αποδιοργάνωση του σκυροδέματος χωρίς όμως να τηρούνται οι προβλεπόμενες συνθήκες για τις εναπομένουσες μετακινήσεις.	
FEMA [2]	Άμεσης Ε	πανάχρησης	Ασφάλειας	Ζωής	Αποφυγή Κατάρρευσης		

Οι τυπικοί βαθμοί βλάβης συνδέονται άμεσα με την απομένουσα φέρουσα ικανότητα και τα διαθέσιμα περιθώρια ασφάλειας των βλαβέντων δομικών στοιχείων και της κατασκευής ως συνόλου. Η απομένουσα φέρουσα ικανότητα ενός κτιρίου θεωρείται ότι καθορίζεται από την απομένουσα φέρουσα ικανότητα της στάθμης του κτιρίου που εμφανίζει τη μεγαλύτερη απώλεια. Στον Πίνακα 5 γίνεται συσχέτιση της περιγραφής των βλαβών βάσει των οδηγιών του ΟΑΣΠ σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, ενώ προτείνεται βαθμονόμηση της σοβαρότητας της βλάβης σε επτά στάθμες επιτελεστικότητας, οι οποίες αναφέρονται στη συνέχεια σε προτεινόμενη κλίμακα καταγραφής των βλαβών. Από τον Πίνακα αυτό διαπιστώνεται πως ο τρόπος ταξινόμησης της βλάβης εξελίσσεται και αναπροσαρμόζεται στις ανάγκες των συνθηκών. Επίσης, στον Πίνακα 6 αναφέρονται οι χαρακτηριστικοί βαθμοί βλάβης κατακόρυφων στοιχείων, όπως ορίζονται από τον ΟΑΣΠ και συγκρίνονται με τα επίπεδα επιτελεστικότητας της FEMA.

Vision 200	0	FEMA 273		HAZUS	66	MS	К	EMS5	98	ATCI.	3	0AZI (2001&20	1 006)	Ross ette Elnashai (2	0 & 2002)	Кάππο <u>ς</u> (200	et al. 2)	Κλίμακ Ομογενοποί	a նլցել
								ληλ	δενική Ι	Βλάβη (0)									
Πλήρης Δατοιοτικότητα	0-2	Λεπουργικότητα	0-1	Ασήμαντη	0-2	B1 (0-1	3αθμός 1	0-1	Ασήμαντη	0-1	Ασήμαντη	0-1			Πράσινα	0-1	Μηδαμινή	0-1
verio opyikoriju												_		۸ حشارین سا	010				
Λειτουργικότητα	2-10	Άμεσης Επανάχρησης	1-10	Микрή	2-10	B2 1	-11	3αθμός 2	1-11	Ελαφριά	1-10	Ελαφριά	1-10	luvulluv	01-0	Κίτρινα	1-30	Μικρή	1-10
		المحموثا فالع																	
Ασφάλεια Ζωής	10-50	Ασφαλεία Ζωής	10-30	Μέτρια	10-50	D3 1	1 50 1	0.0.6.2	11 50	Μέση	10-30	Μέση	10-30	Mukpή	10-40			Μέτρια	10-30
						-	- DC-1	c Sontone	00-11	Βασιά	30-60	Βαριά	30-60					Бистати	30-60
							\uparrow			mdoor	20-02	mdna	20-0-	Μέτρια	40-70			Twentinghout	200
		Αποφυγή	20 100													Κότσοτια	20 100		
Μερική Κατάρρευση	50-100	Κατάρρευσης	001-00	Εκτεταμένη	50-100	B4 50	-100	3αθμός 4	50-100	Μεγάλη	60-100	Μεγάλη	60-100	Εκτεταμένη	70-90	NUNNIVU	001-00	Мерикή	60-100
														Μερική Κατάρρευση	90-100			Natappenoil	
								Kα	κτάρρευ	ծղ (100)									

Πίνακας 7: Προσεγγιστική συσχέτιση μεταξύ των υφιστάμενων κλι-

Table 7: Correlation between the existing damage scales and the

proposed scale.

μάκων βλάβης και της προτεινόμενης κλίμακας.

Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, τεύχ. 3 2010 Tech. Chron. Sci. J. TCG, No 3

Προκειμένου να είναι δυνατή η επεξεργασία των στατιστικών στοιχείων από άλλες κλίμακες και η σύγκριση μεταξύ των βαθμών βλάβης διαφόρων χωρών συντάχθηκε ο Πίνακας 7, ο οποίος συσχετίζει τις πλέον επικρατέστερες υφιστάμενες κλίμακες βλάβης μεταξύ τους [19] με την κλίμακα που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα κατά τη διεξαγωγή των μετασεισμικών ελέγχων και τα επίπεδα βαθμονόμησης της βλάβης της προτεινόμενης κλίμακας, τα οποία έγουν τροποποιηθεί από παλαιότερη εργασία που αναφερόταν σ' έναν γενικά μετρήσιμο δείκτη βαθμονόμησης της βλάβης [1]. Η προτεινόμενη διαβάθμιση σχετικά με τα επίπεδα βλάβης βάσει των οικονομικών απωλειών σκόπιμα δεν αποκλίνει από τη μέχρι τώρα ταξινόμηση της σεισμικής βλάβης στη χώρα μας [20, 21]. Καθίσταται έτσι δυνατή η αξιολόγηση αλλά και σύγκριση των αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει από στοιχεία μετασεισμικών ελέγχων που βασίστηκαν σε διαφορετικές κλίμακες βλάβης. Επιπλέον, μπορούν να καθοριστούν, αλλά και να αναχθούν τα επίπεδα βλάβης από τη μια κλίμακα στην άλλη [22, 23].

4 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΚΛΙΜΑΚΑ ΒΛΑΒΗΣ

Η διαφορετικότητα των τύπων των κατασκευών από περιοχή σε περιοχή, τα τοπικά γεωλογικά χαρακτη-ριστικά, οι διαφορετικές πρακτικές δόμησης και η υποκειμενικότητα που αναπόφευκτα συνοδεύει την αξιολόγηση και κατάταξη της βλάβης, δημιουργούν εξαρχής ένα πρόβλημα αξιοπιστίας της επεξεργασίας στατιστικών στοιχείων, ως μέσο πρόβλεψης των συνεπειών ενός ενδεχόμενου σεισμού. Εφόσον οι κλίμακες ιεράρχησης των βλαβών διαφέρουν μεταξύ τους, χωρίς να υπάρχει μια ενιαία βάση αναφοράς, δεν είναι δυνατός ο αξιόπιστος συνδυασμός των στατιστικών στοιχείων ή τα αποτελέσματα της επεξεργασίας αυτών, τα οποία προήλθαν από τις παραπάνω κλίμακες. Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος προέκυψε η ανάγκη συσχέτισης και ενοποίησης των βαθμών βλάβης των κατασκευών ΩΣ, μέσω μιας νέας προτεινόμενης ενιαίας κλίμακας βλάβης (Πίνακας 8).

Διάφορες παράμετροι έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς σε όρους οικονομικών και δομικών απωλειών για την περιγραφή των βαθμών βλάβης. Επιπλέον, η τυπική διαδικασία αποτίμησης της σεισμικής επάρκειας μιας υφιστάμενης κατασκευής προϋποθέτει αφενός τον ορισμό των επιπέδων σεισμικής έντασης για τα οποία διεξάγονται οι έλεγχοι επιτελεστικότητας και αφετέρου την εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου σε όρους μετατοπίσεων. Στην πρώτη περίπτωση συσχετίζεται ο βαθμός βλάβης που θεωρείται αποδεκτός με την αντίστοιχη ένταση της σεισμικής διέγερσης, ενώ στη δεύτερη προσδιορίζεται ποσοτικά η αναμενόμενη σεισμική μετακίνηση του δομήματος ως σύνολο για τα διάφορα επίπεδα σεισμικής έντασης. Στις οδηγίες της FEMA ορίζονται πέντε οριακά επίπεδα επιτελεστι-κότητας (performance levels – PL) στα οποία βαθμο-νομείται η βλάβη ως προς τη συνολι-

IIPOT KA	EINOMENH AMAKA						ΔΟΜΙΚΟΙ ΤΥΠΟ	Ι ΚΑΤΑΣΚΕΥ	ΏΝ ΩΣ		
OIKONO-		ЕЛЛАЛА	FEMA	ΠΛΑΣΤΙΜ	ΟΣ ΠΛΑΙΣΙΑΚΟΣ	ΜΗ-ΠΛΑΣΤΙ	ΙΜΟΣ ΠΛΑΙΣΙΑΚΟΣ	тоіхопа/	ΝΟΣ ΠΛΑΙΣΙΑΚΟΣ		ΜΙΚΤΟΣ
ΜΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΒΛΑΒΗΣ	ΕΠΙΠΕΛΟ ΒΛΑΒΗΣ			ΔΟΜΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΒΛΑΒΗΣ	ПЕРІГРАФН	ΔΟΜΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΒΛΑΒΗΣ	ПЕРІГРАФН	ΔΟΜΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΒΛΑΒΗΣ	ПЕРІГРАФН	ΔΟΜΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΒΛΑΒΗΣ	ПЕРІГРАФН
0%	Καμμία	Καμμία	Καμμία	0.0%	Καμμία	0.0%	Καμμία	0.00%	Καμμία	0.00%	Καμμία
0-1%	Μηδαμινή	Πράσινα	Λειτουργικότητας	<0.20%	Ελαφριά ρηγμάτωση τοιχοπληρώσεων και επιχρισμάτων	<0.10%	Ελαφριά ρηγμάτωση τοιχοπληρώσεων και επιχρισμάτων	<0.10%	Ελαφριά ρηγμάτωση τοιχοπληρώσεων και επιχρισμάτων	<0.20%	Ελαφριά ρηγμάτωση τοιχοπληρώσεων και επιχρισμάτων
1-10%	Μικρή		Άμεσης Επανάχρησης	0.4%	Τριχοειδείς ρωγμές σε δοκούς- υποστυλώματα κοντά στους κόμβους (<1mm)	0.2%	Τριχοειδείς ρωγμές σε δοκούς- υποστυλώματα κοντά στους κόμβους (<1mm)	0.20%	Ρωγμές από αλληλεπίδραση τοιχοποιών-πλιαισίου, διαγώνιες ρωγμές των τοιχομάτων, περιορισμένη θραύση τούβλων στους κόμβους δοκού- υποστυλώματος	0.40%	Τριχοειδείς ρωγμές τοιχωμάτων και συζωγμάνων δοκών, έναψξη αισδοιογάνωσης σκυροδέματος
10-30%	Μέτρια	Κίτρινα	Ασφάλεια; Ζωής	<1.00%	Ρωγμές στην πλειονότητα δοκού- υποστυλώματος, διαρροή αε μικρό αριθμό φερόντων στοιχείων, μεγαλύτερες καμετικές ρογμές και έναρξη ακολοιργάνοσης σκυροδέματος	<0.50%	Καμπτικές & διατμητικές δρογμές στην πλειονότητα δοκού- υποστυλόματος, διαρροή σε μικρό αρθμό φερόντων στοιχείων, περιορισμένη διατμητική ρηγμάτωση και αποδιοργάνινοση σκυροδέματος	<0.40%	Έντονη θραύση τούβλων στις συνδέσεις δοκού- υποστιλόματος, έναρξη της δομικής βλάβης, μερική διατμητική ρηγμάτοση σε δομικά στοιχεία κυρίως των εξωτερικών πλαισίων	<0.90%	Ρωγμές στα περισσότερα τοιχόματα- κάτοια φτάνουν στην ικανότητα διαφροής, αυξημάνη διατμητική οηγμάτοση και αποδιοργάνωση σκυροδέματος στις γωνίες τοιχωμάτων
30-60%	Εκτεταμένη	Κόκανα	Αποφυγή Κατάρρευσης	>1.00%	Κάποια φέροντα στοιχεία έχουν φτάσει το όριο αντοχής, μεγάλες καιροδέματος και λυγισμός των ράβδων, αστοχία κοντών υποστυλωμάτων	>0.50%	Εζόλκευση ράβδων, θραύση συνδετήρων, λνησιρός κύριου στλισμού, διατμητική αστοχία στοιχείων	>0.40%	Εκτεταμένη ρηγμάτοση τούβλωνι, επόση τούβλωνι, μερική αστοχία πολλών τοιχοποιών, μαρύτερη βλάβη σε στοιχεία των πλαισίων, μερική διατμητική αστοχία	>0.90%	Τα περισσότερα τουχώματα έχουν υπερβεί το όριο ώαροδις-κάταια έχουν φτασει το όριο αντοχής, καταπόνηση περιμετρικών φερόντων στοιχείων, λυγπαμός φάβδων, εκτεταιμένη ρηγμάτωση τουχοιμάτων, μερική διατιμητική αστοχία
60-100%	Μερική κατάρρευση			1.8%	Κατάρρευση μερικών υποστυλωμάτων, κλίση ορόφου ή κτιρίου	0.8%	Διατμητική αστοχία πολλών υποστυλωμάτων, επικείμενη αστοχία μαλακού ορόφου	0.70%	Διατμητική αστοχία δοκών &/ή υποστυλωμάτων προκάλώντας μερική κατάρρευση, σχεδόν ολική αστοχία τοιχοποιίας	1.65%	Αποδιοργάνωση δοκών σύζευξης- τοιχωμάτων και αστοχία κάποιων τοιχωμάτων
100%	Κατάρρευση	Μαύρα	Κατάρρευση	>3.00%	Ολική ή επικείμενη κατάρρευση	>1.00%	Ολική ή μαλακού ορόφου αστοχία ισογείου	>0.80%	Ολική ή επικείμενη κατάρρευση	>2.75%	Ολική ή επικείμενη κατάρρευση

Πίνακας 8: Προτεινόμενη κλίμακα βλαβών και σύγκριση με τη βαθμονόμηση της βλάβης της FEMA [2] και του $OA\Sigma\Pi$ [8, 9, 10]. Table 8: Proposed damage scale and comparison with the damage calibration by FEMA [2] and EPPO [8, 9, 10].

κή σεισμική μετακίνηση του κτιρίου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1, και εμμέσως ως προς το κόστος απωλειών [24].

Η προτεινόμενη κλίμακα δεν απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις, ενώ η διαβάθμιση της ως προς τον οικονομικό δείκτη βλάβης, λόγω απουσίας οικονομικών στοιχείων, δεν αποκλίνει από τη μέχρι τώρα αξιολόγηση της μετασεισμικής βλάβης. Συντείνει μάλιστα στην ενοποίηση και διεύρυνση της κρατούσας μεθόδου. Η καινοτομία που εισάγει, έγκειται στη βαθμονόμηση της βλάβης μέσω ενός προσεγγιστικά μετρήσιμου συντελεστή, ήδη από τον χώρο της διενέργειας αυτοψίας του κτιρίου, κάτι που απουσίαζε από τις υφιστάμενες κλίμακες βλαβών. Η κλίμακα προχωρά ένα βήμα παραπέρα από τον μέχρι πρόσφατα ποιοτικό χαρακτηρισμό της βλάβης από τον ΟΑΣΠ (πράσινα, κίτρινα, κόκκινα) με την προσεγγιστικά μετρήσιμη ταξινόμηση της σεισμικής βλάβης. Επιπλέον, συγκριτικά με το παλαιότερο χρονικά ερευνητικό πρόγραμμα που αναφέρθηκε η παρούσα κλίμακα, πέραν της μετρήσιμης βαθμονόμησης, απαιτεί λιγότερο χρόνο (άρα και πιο χονδρική αποτύπωση) και συνεπώς συνίσταται η χρήση της κατά την 1^η φάση καταγραφής των βλαβών σε πολυπληθείς κατασκευές. Διαχωρίζει τις κατασκευές ανά δομικό σύστημα και διακριτοποιεί τη βλάβη ανά δομικό τύπο, παρεμβάλλοντας, εμμέσως, δύο παραμέτρους επιρροής στη σεισμική τρωτότητα: 1. το δομικό σύστημα και 2. την κανονιστική περίοδο σχεδιασμού (πλάστιμος & μη-πλάστιμος). Είναι σημαντικό πως η εφαρμογή της είναι εύκολη και ταχεία, ενώ παράλληλα μπορούν να μετριαστούν οι χρονοβόροι κατοπινοί, δειγματοληπτικοί και διεξοδικότεροι έλεγχοι των σεισμόπληκτων κατασκευών.

Η κλίμακα που παρουσιάζεται διαιρείται σε επτά επίπεδα βλάβης, καθένα από τα οποία αναφέρεται σε όρους δομικής ή μη βλάβης, που ενδέχεται να παρουσιαστούν στις κατασκευές μετά από κάποιο τυχαίο σεισμό, ενώ αναφέρεται σε τέσσερις από τους πιο χαρακτηριστικούς τύπους κτιρίων που απαντώνται στη Νότια Ευρώπη. Προκειμένου να ληφθούν υπόψη τα διάφορα στάδια των βλαβών για καθορισμένα δομικά συστήματα ανάληψης των πλευρικών δυνάμεων ώστε τα χαρακτηριστικά της καμπύλης να εξαρτώνται απ' ευθείας από τον τύπο του κτιρίου, η κλίμακα βαθμονομείται με κάποιο μετρήσιμο συντελεστή σεισμικής απόκρισης με βάση τον δομικό δείκτη βλάβης, σε όρους σχετικής μετακίνησης των ορόφων, ανάλογα με τη σοβαρότητα της, που αντιστοιχεί βαθμιαία, ως προς τις στάθμες επιτελεστικότητας σε επίπεδο «καμιάς βλάβης» και «κατάρρευσης» αντίστοιχα. Τα όρια των κατωφλίων βλάβης για τις διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας έχουν υιοθετηθεί από πειραματικά αποτελέσματα και θεωρητικές αναλύσεις [25]. Παράλληλα, η κλίμακα βαθμονομείται με τον οικονομικό δείκτη βλάβης σε όρους κόστους απωλειών και παρουσιάζεται στον ίδιο πίνακα ώστε να μπορεί να γίνει η συσγέτιση με τον δομικό δείκτη βλάβης. Στον Πίνακα 8 γίνεται συγχρόνως η σύγκριση με την κλίμακα βλάβης της FEMA και του ΟΑΣΠ [26].

Η περιγραφή των βλαβών σε κάθε επίπεδο επιτελεστικότητας βασίστηκε στις κυριότερες υφιστάμενες κλίμακες βλάβης. Η προτεινόμενη διαβάθμιση που έχει επιλεγεί για τα επίπεδα βλάβης βάσει των οικονομικών απωλειών, και παρατηρώντας τον Πίνακα 7, σκόπιμα δεν αποκλίνει από τη μέχρι τώρα ταξινόμηση της σεισμικής βλάβης. Η καινοτομία, όπως αναφέρθηκε, έγκειται στη μετρήσιμη βαθμονόμηση της βλάβης τόσο με βάση τον οικονομικό όσο και τον δομικό δείκτη βλάβης. Οι μέθοδοι των μετασεισμικών ελέγχων που εφαρμόζονται στη χώρα μας, υιοθετήθηκαν σε μεγάλο βαθμό από τις προτεινόμενες διαδικασίες που ισχύουν στις ΗΠΑ. Το ίδιο συμβαίνει, αν παρατηρήσει κανείς, τις στάθμες βλαβών, που καθορίζει ο ΟΑΣΠ και το ΑΤC13. Επομένως, η απόκλιση από τα συνήθη όρια των επιπέδων βλαβών θα ήταν ενάντια σε όλες τις προγενέστερες μελέτες εκτίμησης της σεισμικής βλάβης.

Επιπλέον, η διαβάθμιση του βαθμού βλάβης (BB) βάσει της προτεινόμενης κλίμακας αναπαριστάται και σχετίζεται με την καμπύλη αντίστασης μιας κατασκευής (τέμνουσα βάσης V – σχετική μετακίνηση ορόφου Δ/Η_{ορ}), ορίζοντας πάνω σ'αυτήν τα επίπεδα βλάβης και παράλληλα συγκρίνεται με τις στάθμες επιτελεστικότητας (PL), που ορίζει η FEMA (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Ορισμός επιπέδων βλάβης της προτεινόμενης κλίμακας στην καμπύλη αντίστασης και συσχέτιση με τα στάδια επιτελεστικότητας της FEMA.

Figure 1: Definition of damage levels of the proposed damage scale on the performance curve and correlation with the performance levels of FEMA.

Στο Σχήμα 1. παρατηρείται η διαβάθμιση της βλάβης για τον πλάστιμο πλαισιακό τύπο. Για τους υπόλοιπους δομικούς τύπους η διαβάθμιση της βλάβης ακολουθεί τα κατώφλια των τιμών των σχετικών μετακινήσεων των ορόφων βάσει της προτεινόμενης κλίμακας (Πίνακας 8). Ως καμπύλη αντίστασης έχει επιλεγεί αυτή του πλαισιακού φορέα. Η τιμή της μετατόπισης διαρροής Δy και αστοχίας Δu, όπως είναι φυσικό, διαφοροποιείται για κάθε δομικό τύπο.

Επίσης, τα φυσικά προσομοιώματα των δυναμικών χαρακτηριστικών συνήθων οικοδομών ωπλισμένου σκυροδέματος μπορούν να αναπαρασταθούν συναρτήσει της έντασης διέγερσης και του βαθμού βλάβης, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους μεταβολής της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου Τ και της αποσβέσεως β [27]. Οι χαρακτηριστικές τιμές των παραμέτρων πάνω στην καμπύλη αντίστασης αντιστοιχούν σε στάδιο πριν από τη ρηγμάτωση στη φάση λειτουργίας (Τ και β) και κατά την αστοχία (Τ, και β). Κατά τη σταδιακή αύξηση της έντασης η μεταβολή των Τ και β οφείλεται σε: συμμετοχή για μεγάλα εύρη ταλαντώσεων της τοιχοποιίας πλήρωσης στη δυσκαμψία και απόσβεση του συστήματος, 2. διαρροή των στοιχείων του δομικού συστήματος, 3. διαρροή (αστοχία) της τοιχοποιίας πλήρωσης με ταυτόχρονη απότομη μείωση της δυσκαμψίας και της ικανότητας για ανάληψη εντάσεως του δομικού συστήματος, 4. διαδοχική διαρροή των υπόλοιπων στοιχείων του δομικού συστήματος, 5. αστοχία του δομικού συστήματος.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται ενδεικτικά η συσχέτιση των επιπέδων βλάβης πάνω στην καμπύλη αντίστασης βάσει του δομικού δείκτη βλάβης και των επιπέδων βλάβης πάνω σε μια πρωτογενή καμπύλη τρωτότητας (primary vulnerability curve) βάσει του οικονομικού δείκτη βλάβης. Σημειώνεται ότι στα Σχήματα 1 και 2 παρουσιάζεται μια γενική ποιοτική και όχι ποσοτική κατάταξη της βλάβης για κάποιον δομικό τύπο.

5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ

Ο συστηματικός μετασεισμικός έλεγχος των κατασκευών ΩΣ μετά τους τελευταίους σεισμούς (Βόλβη 1978, Αλκυονίδες 1981, Καλαμάτα 1986, Αίγιο 1995, Αθήνα 1999) δείχνει ότι υπάρχουν ορισμένοι τύποι βλάβης των ελληνικών κατασκευών ΩΣ, που επαναλαμβάνονται συστηματικά και πιθανόν να οφείλονται στα ίδια συστηματικά αίτια βλάβης.



- Σχήμα 2: Συσχέτιση των επιπέδων βλάβης της προτεινόμενης κλίμακας στην καμπύλη αντίστασης και στην πρωτογενή καμπύλη τρωτότητας.
- Figure 2: Correlation of damage levels of the proposed damage scale on the performance curve and on the primary vulnerability curve.

Η συλλογή και επεξεργασία στατιστικών στοιχείων μετασεισμικών ελέγχων είναι για πολλούς λόγους σημαντική. Εντούτοις, η παρούσα έρευνα δεν στοχεύει στη στατιστική επεξεργασία απλοϊκών, ασαφών και υποκειμενικών στοιχείων βλάβης ενός μεγάλου αριθμού κατασκευών, αλλά στην ανάπτυξη αντικειμενικής μεθόδου και κριτηρίων συλλογής και επεξεργασίας λεπτομερών, αντικειμενικών και σαφών βλαβών. Στόχος της εργασίας είναι η δημιουργία κατάλληλου θεωρητικού υπόβαθρου και η πρόταση μιας ενοποιημένης κλίμακας βαθμονόμησης της δομικής βλάβης οικοδομικών κατασκευών μετά από έναν σεισμό για την εύκολη, γρήγορη και αξιόπιστη καταγραφή των βλαβών. Η εφαρμογή της μεθόδου σε επαρκή αριθμό κατασκευών είναι χρήσιμη και απαραίτητη, αλλά ενδεχομένως όχι εφικτή λόγω αδυναμίας συλλογής επαρκών αξιόπιστων στοιχείων (πρόβλημα που είναι σύνηθες στις εμπειρικές μεθόδους σεισμικής τρωτότητας).

5.1 Σεισμός Καλαμάτας (13-09-1986):

Η προτεινόμενη κλίμακα εφαρμόστηκε σε 50 κατασκευές (για 5 εκ των οποίων δεν υπήρχε επαρκής περιγραφή), με καταγραφές βλαβών από τον σεισμό της Καλαμάτας (13/ 9/1986), οι οποίες προήλθαν κυρίως με επί τόπου συλλογή των στοιχείων από παλαιότερο ερευνητικό πρόγραμμα, που εκπονήθηκε από το εργαστήριο ΩΣ του ΔΠΘ [17, 18], από το αρχείο του ΟΑΣΠ. Τα κτίρια αυτά, λόγω της ημερομηνίας του σεισμού, θεωρήθηκαν είτε ότι ήταν σχεδιασμένα βάσει του αντισεισμικού κανονισμού του 1959 είτε χωρίς αντισεισμικό κανονισμό. Τα έντυπα μετασεισμικών βλαβών που συλλέχθηκαν, διέφεραν από τα πρόσφατα προτεινόμενα δελτία καταγραφής της μετασεισμικής βλάβης από τον ΟΑΣΠ.

Προκειμένου να υπάρξει ομογενοποίηση με τη σημερινή μεθοδολογία κατάταξης της βλάβης τα κτίρια της Καλαμάτας ταξινομήθηκαν αφενός συμπληρώνοντας τα έντυπα της μεθόδου Ταχέως Οπτικού Ελέγχου

(Τ.Ο.Ε.), που χρησιμοποιήθηκε στον σεισμό της Αθήνας (7/9/1999) και αφετέρου βάσει της προτεινόμενης κλίμακας βλάβης. Από την επεξεργασία του δείγματος προέκυψαν 3 τρόποι ταξινόμησης της βλάβης: 1. βάσει της αρχικής κατανομής της βλάβης από τα έντυπα μετασεισμικού ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν στις αυτοψίες μετά τον σεισμό, 2. βάσει της μεθόδου του Τ.Ο.Ε. και 3. βάσει της προτεινόμενης μεθόδου. Υπολογίστηκε αφενός ο βαθμός βλάβης με δύο τρόπους προκειμένου να διερευνηθεί και να συσχετισθεί η προτεινόμενη κλίμακα βλάβης με την πρόσφατη εφαρμοζόμενη μεθοδολογία εκτίμησης της βλάβης στην Αθήνα και αφετέρου επιτεύχθηκε η σύγκριση του τρόπου κατάταξης της σεισμικής βλάβης σε διαφορετικές χρονικές περιόδους.

Τα αρχικά έντυπα που ήταν διαθέσιμα και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, προήλθαν από την επεξεργασία των στατιστικών στοιχείων εμπεριέχοντας πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο συλλογής του τύπου, βαθμού και έκτασης της βλάβης ανά δομικό στοιχείο (ΔΣτ). Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε κατά την υλοποίηση του ερευνητικού προγράμματος, πρότεινε τη συμπλήρωση ενός εντύπου καταγραφής προβλημάτων τοπικής υπερκαταπόνησης (TYK), ενός εντύπου καταγραφής προβλημάτων τοπικής μειώσεως ικανότητας (TMI) και δύο εντύπων καταγραφής δομικών βλαβών (ένα για τα περιμετρικά και ένα για τα εσωτερικά ΔΣτ της κατασκευής). Από τα αποτελέσματα του προγράμματος διαπιστώθηκε πολύ μικρή διαφορά στη συμπεριφορά μεταξύ περιμετρικών και εσωτερικών ΔΣτ, πράγμα που σημαίνει πως είναι δυνατή στατιστικά η σχετική αξιόπιστη αποτίμηση του βαθμού βλάβης των κατασκευών ωπλισμένου σκυροδέματος (ΚΩΣ) με βάση μόνο τα περιμετρικά ΔΣτ. Κατά τη συλλογή των στοιχείων δεν ήταν διαθέσιμα τα έντυπα ΤΥΚ και TMI για κάθε κατασκευή, οπότε παραλήφθηκαν.

Στα σχήματα 3 και 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των κτιρίων της Καλαμάτας βάσει του παλαιότερου ερευνητικού προγράμματος. Συγκεκριμένα, στο σχήμα 3α παρουσιάζεται η κατανομή του χαρακτηρισμού της βλάβης ανάλογα με τη μορφή του ισογείου. Στο σχήμα 3β γίνεται συσχέτιση μεταξύ του υπολογισθέντος γενικού βαθμού βλάβης (ΓΓΒ) και του δομικού τύπου (ΔΤ), ενώ στο σχήμα 3γ γίνεται συσχέτιση μεταξύ του γενικού βαθμού βλάβης (ΓΓΒ) και του χαρακτηρισμού της βλάβης, αντίστοιχα. Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται ακόμη ο τρόπος καταγραφής της βλάβης στα διάφορα δομικά στοιχεία. Σύμφωνα με αυτόν υπήρχε μια διαβάθμιση της σοβαρότητας της βλάβης, από μηδέν έως πέντε, ορίζοντας πέντε επίπεδα βλαβών, από το μικρότερο στο μεγαλύτερο, ενώ γίνονται εμφανή τα στοιχεία, δομικά και μη, για τα οποία καταγράφονταν οι βλάβες.

Με βάση την περιγραφή των κατασκευών και των βλαβών που περιείχαν τα έντυπα που συλλέχθηκαν, συμπληρώθηκαν στη συνέχεια τα έντυπα του Ταχέως Οπτικού Ελέγχου (ΤΟΕ.). Δημιουργήθηκε έτσι μια νέα βάση δεδομένων, που αφορούσε μεν στα ίδια στατιστικά στοιχεία, αλλά διέφερε ως προς τον τρόπο καταγραφής της βλάβης. Με τον τρόπο αυτόν επιτεύχθηκε η αναγωγή των στατιστικών στοιχείων της Καλαμάτας στη μεθοδολογία ταξινόμησης της βλάβης, που εφαρμόστηκε κατά τους μετασεισμικούς ελέγχους μετά τον σεισμό της Αθήνας (7/9/1999).

Έγινε εκ νέου ποιοτική κατάταξη της βλάβης (πράσινακίτρινα-κόκκινα) βάσει των οδηγιών του ΟΑΣΠ και υπολογίστηκε η δομική βαθμολογία (ΔΒ). Λόγω της ημερομηνίας του σεισμού, τα κτίρια θεωρήθηκαν πως ήταν πλασιακά (ΩΣ1) ή μεικτά (ΩΣ2), σχεδιασμένα με τον αντισεισμικό κανονισμό (ΑΚ) του 1959 ή χωρίς ΑΚ.



Σχήμα 3: Κατανομή του (a) χαρακτηρισμού της βλάβης ανάλογα με τη μορφή του ισογείου, (b) ΓΒΒ ανά Δ.Τ. της κλίμακας MSK, (c) χαρακτηρισμού της βλάβης ανά ΓΒΒ.

Figure 3: Distribution of (a) damage characterization according to the type of ground floor; (b) General Degree of Damage (GDD) according to the structural types of MSK scale, (c) damage characterization according to the GDD.



Σχήμα 4: Κατανομή του πλήθους των κτιρίων που ανέπτυζαν βλάβη σε διάφορα στοιχεία βάσει παλαιότερου ερευνητικού προγράμματος. Figure 4: Distribution of number of buildings that developed damage in several elements according to older research programme.

Στο Σχήμα 5 διακρίνεται η κατάταξη της βλάβης ανά Δομικό Τύπο (a) και Δομική Βαθμολογία (b). Στο Σχήμα 6 διακρίνονται οι παράμετροι τρωτότητας που λήφθηκαν υπόψη κατά τον υπολογισμό της ΔB με βάση τον T.O.E.



Σχήμα 5: Κατανομή του χαρακτηρισμού της βλάβης ανά (a) Δ.Τ. και (b) ΔB βάσει του T.O.E. Figure 5: Distribution of damage characterization according to (a) the structural type and (b) the structural grade according to R.V.S.

Η συσχέτιση της ΔB αφενός με την αναπτυχθείσα βλάβη και αφετέρου με παραμέτρους επιρροής στη σεισμική τρωτότητα καθιστά δυνατή τη σύγκριση εμμέσως της βλάβης με τις παραμέτρους αυτές. Επιπρόσθετα, μπορεί να αποτελέσει ενδεικτικό κριτήριο για τις υπολογισθείσες τιμές της ΔΒ και τη βαρύτητα της βλάβης στις προηγούμενες τιμές.



Σχήμα 6: Κατανομή της ΔB για διάφορες παραμέτρους τρωτότητας βάσει του T.O.E. Figure 6: Distribution of structural grade for several vulnerability parameters according to R.V.S.



Σχήμα 7: Κατανομή του επιπέδου βλάβης για διάφορους ΔT βάσει της προτεινόμενης κλίμακας. Figure 7: Distribution of damage level for several ST according to the proposed damage scale.



Σχήμα 8: Κατανομή του βαθμού βλάβης για διάφορους ΔT βάσει της προτεινόμενης κλίμακας. Figure 8: Distribution of damage grade for several ST according to the proposed damage scale.

Τέλος, η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε με εφαρμογή της προτεινόμενης κλίμακας βλάβης. Με βάση την περιγραφή των κατασκευών και των βλαβών που περιείχαν τα αρχικά έντυπα που συλλέχθηκαν, ακολούθησε μια τρίτη κατανομή του επιπέδου (Σχήμα 7) και του βαθμού της βλάβης (Σχήμα 8) βάσει του οικονομικού δείκτη βλάβης της προτεινόμενης κλίμακας.

Δημιουργήθηκε έτσι μια τρίτη βάση δεδομένων, που αφορούσε μεν στα ίδια στατιστικά στοιχεία, αλλά διέφερε ως προς τον τρόπο καταγραφής και ταξινόμησης της βλάβης. Επιτεύχθηκε αφενός η αναγωγή της κατάταξης της σεισμικής βλάβης από τις πληροφορίες των κτιρίων της Καλαμάτας στην προτεινόμενη μεθοδολογία και αφετέρου η συσχέτιση και σύγκριση των αποτελεσμάτων από την καταγραφή της βλάβης βάσει τριών μεθοδολογιών. Οι ΔΤ στην περίπτωση αυτή περιελάμβαναν μη-πλάστιμες πλαισιακές, τοιχοπλη ρωμένες πλαισιακές και μεικτές κατασκευές. Η διαβάθμιση ως προς τη σοβαρότητα των βλαβών αφορούσε στα επτά επίπεδα επιτελεστικότητας της προτεινόμενης κλίμακας, ενώ συσχετίστηκε η κατανομή του επιπέδου της σεισμικής βλάβης με τους παραπάνω δομικούς τύπους (Σχήμα 7). Τέλος, υπολογίστηκε ο βαθμός βλάβης κάθε κατασκευής βάσει των διατιθέμενων πληροφοριών και της προτεινόμενης κλίμακας και συσχετίστηκε με τους συγκεκριμένους δομικούς τύπους προκειμένου να ληφθεί υπόψη ο ρόλος του δομικού συστήματος στην ανάπτυξη της βλάβης (Σχήμα 8).

5.2 Σεισμός Ανδραβίδας (8-06-2008):

Η προτεινόμενη κλίμακα εφαρμόστηκε, επίσης, σε κτίρια που ανέπτυζαν βλάβες από τον πρόσφατο σεισμό της $8^{η_5}$ Ιουνίου 2008 με επίκεντρο την Ανδραβίδα και μέγεθος $M_w = 6.4$ R. Ο σεισμός αυτός προκάλεσε γενικά σημαντικές βλάβες σε περιορισμένο αριθμό κατασκευών ωπλισμένου σκυροδέματος και μια κατάρρευση. Μετά τη διενέργεια επί τόπου αυτοψιών στους νομούς Αχαΐας – Ηλείας εφαρμόζοντας την προτεινόμενη κλίμακα συλλέχθηκαν στοιχεία σχετικά με την παρατηρούμενη σεισμική βλάβη στις κατασκευές με στόχο τη διερεύνηση και εμπειρική αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας. Από την επεξεργασία των εντύπων με πληροφορίες δομικής και μη δομικής τρωτότητας για



 Σ χήμα 9: Κατανομή των κτιρίων με βλάβες από τον σεισμό της Ανδραβίδας για διάφορες παραμέτρους τρωτότητας. Figure 9: Distribution of damaged buildings after the earthquake in Andravida for several vulnerability parameters.



Σχήμα 10: Βαθμονόμηση της σεισμικής βλάβης κτιρίων μετά τον σεισμό της Ανδραβίδας σύμφωνα με την προτεινόμενη κλίμακα. Figure 10: Calibration of the seismic damage of buildings after the earthquake in Andravida according to the proposed scale.

31 κατασκευές ΩΣ προέκυψαν στοιχεία σχετικά με το είδος, την έκταση και τα πιθανά αίτια της σεισμικής βλάβης. Οι παράγοντες που επέδρασαν στην ανάπτυξη της σεισμικής βλάβης στα υπό έρευνα κτίρια και συσχετίζονται άμεσα με τη σεισμική τρωτότητα παρουσιάζονται στο Σχήμα 9. Στις περισσότερες κατασκευές εμφανίστηκε ο ισόγειος όροφος άνευ τοιχοπληρώσεων (ύπαρξη pilotis), ενώ περίπου τα μισά κτίρια κατασκευάστηκαν χωρίς αντισεισμικό αρμό και εμφάνισαν κρούση με τις παρακείμενες κατασκευές. Πολλά ακόμη κτίρια είχαν στοιχεία ασυμμετρίας ως προς τη μόρφωση τους (κυρίως οριζόντια μη κανονικότητα) και σε κάποια εμφανίστηκαν διαβρωμένοι οπλισμοί.

Βαθμονομήθηκε για τις υπό αυτοψία κατασκευές το επίπεδο της βλάβης εφαρμόζοντας την προτεινόμενη κλίμακα βλάβης του Πίνακα 8 (Σχήμα 10). Μετά τη βαθμονόμηση προέκυψε πως η πλειονότητα των κατασκευών εμφάνισε μικρές και μέτριες βλάβες. Εντούτοις, υπήρχαν κτίρια στα οποία παρατηρήθηκαν σημαντικές βλάβες, ενώ σημειώθηκε και μία κατάρρευση. Τέλος, στο Σχήμα 11 παρουσιάζονται φωτογραφίες μιας κατασκευής από τους μετασεισμικούς ελέγχους στην Ανδραβίδα, που υπέστη σοβαρές βλάβες.

6 ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συσγετίστηκαν οι πιο διαδεδομένες υφιστάμενες κλίμακες βλάβης μεταξύ τους και με την κλίμακα βλαβών που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διενέργεια πρόσφατων μετασεισμικών ελέγχων στην Ελλάδα. Διαπιστώθηκε πως ο τρόπος ταξινόμησης της βλάβης εξελίσσεται και προσαρμόζεται κατά την πάροδο του γρόνου στις ανάγκες των συνθηκών. Μετά τη συσχέτιση των κλιμάκων βλάβης είναι δυνατή η επεξεργασία και σύγκριση των αποτελεσμάτων από στατιστικά δείγματα που βασίστηκαν σε διαφορετικές κλίμακες, αφού επιτυγχάνεται η αναγωγή των επιπέδων βλάβης από τη μια κλίμακα στην άλλη. Προτάθηκε, επίσης, κλίμακα βλάβης που ομογενοποιεί τις υφιστάμενες κλίμακες και η οποία ορίζει με περιγραφικούς όρους σε 7 επίπεδα επιτελεστικότητας τη δομική βλάβη, την οποία και βαθμονομεί τόσο με βάση τον οικονομικό, όσο και τον δομικό δείκτη βλάβης ανάλογα με τη σοβαρότητα της.



Σχήμα 11: Κατασκευή ΩΣ με σοβαρές βλάβες στην Ανδραβίδα. Figure 11: A RC building with heavy damages in Andravida.

Η καινοτομία που εισάγει έγκειται στη βαθμονόμηση της βλάβης μ' έναν ποιοτικά μετρήσιμο δείκτη βλάβης ήδη από τον χώρο της διενέργειας αυτοψίας του κτιρίου. Η παρουσίαση του δομικού και οικονομικού δείκτη στην ίδια κλίμακα και η σχέση τους με τη φυσική περιγραφή της βλάβης επιτρέπει τη μεταξύ τους συσχέτιση. Επιπλέον, η διαβάθμιση της βλάβης σχετίζεται με την καμπύλη αντίστασης μιας κατασκευής και συγκρίνεται με τα επίπεδα επιτελεστικότητας που ορίζει η FEMA 273.

Εκτιμήθηκε ο βαθμός βλάβης μέσω τριών διαφορετικών μεθόδων ταξινόμησης της σεισμικής βλάβης χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα από την επεξεργασία στατιστικών στοιγείων παλαιότερων μετασεισμικών ελέγχων από τον σεισμό της Καλαμάτας (13-9-1984). Επιτεύχθηκε η σύγκριση του τρόπου κατάταξης της σεισμικής βλάβης σε διαφορετικές χρονικές περιόδους και υπολογίστηκε ο βαθμός βλάβης προκειμένου να διερευνηθεί και να συσχετιστεί η προτεινόμενη κλίμακα βλάβης με την πρόσφατη εφαρμοζόμενη μεθοδολογία αποτίμησης της σεισμικής τρωτότητας στον σεισμό της Αθήνας (7-9-1999). Από την επεξεργασία του δείγματος διαπιστώθηκε πως οι περισσότερες κατασκευές ήταν σχεδιασμένες με βάση το ΒΔ του 1959 και η πλειονότητα του δείγματος αφορούσε σε δυαδικό δομικό σύστημα με υποστυλώματα και τοιχώματα. Πολλές κατασκευές εμφάνισαν αυξημένο βαθμό βλάβης (κόκκινο). Κύρια αίτια για την ανάπτυξη της βλάβης αποτέλεσαν: 1. Η ύπαρξη pilotis ή κοντών υποστυλωμάτων στο ισόγειο. 2. Η έκκεντρη διάταξη των κατακόρυφων δομικών στοιχείων. 3. Οι ανεπαρκείς και κακά τοποθετημένοι συνδετήρες ή ανεπαρκείς αγκυρώσεις/ επιμηκύνσεις του κύριου οπλισμού. 4. Η ύπαρξη ισχυρών δοκών - ασθενών υποστυλωμάτων.

Από τη συγκριτική διερεύνηση της εφαρμογής των προαναφερόμενων μεθοδολογιών προέκυψε: 1. οι κατασκευές με μορφή βιτρίνας ή pilotis ανέπτυξαν μεγάλη βλάβη, 2. βαριές βλάβες εμφανίστηκαν σε τοιχοποιίες πληρώσεως, λοιπά αρχιτεκτονικά στοιχεία και περισσότερο σε κατακόρυφα παρά σε οριζόντια δομικά στοιχεία, 3. οι πλέον συχνοί παράμετροι τρωτότητας που απαντήθηκαν ήταν η στρέψη, η ύπαρξη pilotis, η κακή κατάσταση και η οριζόντια μη κανονικότητα, 4. οι περισσότερες κατασκευές εμφάνισαν μέτριο επίπεδο βλάβης σύμφωνα με την προτεινόμενη κλίμακα ενώ αρκετές ήταν και αυτές με μικρή ή βαριά βλάβη, κάτι που βρίσκεται σε συμφωνία με τις άλλες δύο κλίμακες, 5. υπήρχε γενικά καλή συσχέτιση των κλιμάκων κατά την εκτίμηση του βαθμού βλάβης. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός πως η εφαρμογή της προτεινόμενης κλίμακας δεν απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις βαθμονομεί προσεγγιστικά τη βλάβη μ' έναν μετρήσιμο συντελεστή ήδη από τη διενέργεια της αυτοψίας, ενώ η χρήση της είναι ταχύτερη σε σύγκριση με άλλες μεθόδους κατάταξης της σεισμικής βλάβης παρέχοντας συνάμα παραπλήσια με αυτές αποτελέσματα και ενδείκνυται η χρήση της σε πολυπληθείς κατασκευές κατά την 1^η φάση των μετασεισμικών ελέγχων μετριάζοντας τους κατοπινούς διεξοδικότερους ελέγχους, αναδεικνύεται η αξιοπιστία της κλίμακας αυτής και ενισχύεται η δυνατότητα εφαρμογής της. Από τη συσχέτιση του εύρους της βαθμονομημένης βλάβης, βάσει της προτεινόμενης κλίμακας του Πίνακα 8 πάνω στην καμπύλη αντίστασης βάσει του δομικού δείκτη βλάβης και των επιπέδων βλάβης με τις τιμές των κατωφλίων σε όρους σχετικής μετακίνησης των ορόφων ανά δομικό τύπο κτιρίου προκύπτει μια εικόνα από την άμεση αποτίμηση της αναπτυχθείσας βλάβης αναφορικά με τον δείκτη αυτό.

 Η προτεινόμενη κλίμακα βλάβης εφαρμόστηκε σε ένα επιπλέον στατιστικό δείγμα με κτίρια που υπέστησαν διαφόρου τύπου και έκτασης βλάβες μετά από πρόσφατο σεισμό. Για τον σκοπό αυτό διενεργήθηκαν επί τόπου αυτοψίες μετά τον σεισμό της Ανδραβίδας (8-6-2008) στους νομούς Αχαΐας - Ηλείας και συλλέχθηκαν στοιχεία σχετικά με την παρατηρούμενη σεισμική βλάβη στις κατασκευές με στόχο τη διερεύνηση και εμπειρική αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας. Μετά τη βαθμονόμηση της βλάβης για 31 κατασκευές ΩΣ εφαρμόζοντας την προτεινόμενη κλίμακα βλάβης του Πίνακα 8 προέκυψε πως η πλειονότητα των κατασκευών εμφάνισε μικρές και μέτριες βλάβες. Εντούτοις, υπήρχαν κτίρια στα οποία παρατηρήθηκαν σημαντικές βλάβες, ενώ σημειώθηκε και μία κατάρρευση.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Καραμπίνης Α.Ι., Ελευθεριάδου Α.Κ., "Συσχέτιση και Ομογενοποίηση των Υφιστάμενων Κλιμάκων Βλάβης σε Κατασκευές Ωπλισμένου Σκυροδέματος", Πρακτικά 15^{ου} Συνεδρίου Σκυροδέματος, Αρ. Β3.25, Αλεξανδρούπολη, 2006.
- FEMA 273, "NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings", Funding by Federal Emergency Management Agency, Building Seismic Safety Council, Washington, D.C., 1997.
- ATC-40, Applied Technology Council, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings", Vol.I, Rep. SSC 96-01, Redwood City, California, 1996.
- SEAOC, "Performance based seismic engineering of buildings (Vision 2000)", Seismology Committee, Structural Engineering Association of California, Sacramento, CA, 1995.
- HAZUS^R99 (SR2), "Earthquake Loss Estimation Methodology", Advanced Engineering Building Module, Technical and User's Manual, Federal Emergency Management Agency, National Institute of Building Sciences, Washington, D.C., 1999.
- ATC-13, Applied Technology Council, "Earthquake Damage Evaluation Data for California", Redwood City, California, 1985.
- 7. AIJ, "Preliminary Report of the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake", Architectural Institute of Japan, 1995.
- Ο.Α.Σ.Π.-Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ, "Μετασεισμικός Έλεγχος Κτιρίων", Αθήνα, 1984.
- Ο.Α.Σ.Π., "Οδηγίες και Έντυπα για τη Διενέργεια Άμεσου Πρωτοβάθμιου Μετασεισμικού ελέγχου Καταλληλότητας των Κτιρίων για Χρήση", Αθήνα, 1997.
- Ο.Α.Σ.Π-Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., "Συστάσεις για προσεισμικές και μετασεισμικές επεμβάσεις σε κτίρια", Αθήνα, 2001.
- 11. Απόφαση 5172/AZ5β/18-10-99 Υφυπουργού ΠΕΧΩΔΕ,

"Καθορισμός ελαχίστων υποχρεωτικών απαιτήσεων για τη σύνταξη των μελετών αποκατάστασης των κτιρίων που έχουν υποστεί βλάβες από το σεισμό της 7/9/99 και έκδοση των σχετικών οικοδομικών αδειών επισκευής /ενίσχυσης", Αθήνα, 1999.

- Απόφαση ΥΑΣ 330/ΑΖ5β/16-1-2001. "Τροποποίηση και συμπλήρωση της Υπουργικής Απόφασης 5172//ΑΖ5β/18-10-99", Αθήνα, 2001.
- Καραντώνη, Φ.Β, Φαρδής, Μ.Ν, "Ανάλυση βλαβών κτιρίων από σκυρόδεμα στο σεισμό του Αιγίου (1995)", Πρακτικά 15^{ου} Συνεδρίου Σκυροδέματος, Αρ. B3.31, Αλεξανδρούπολη, 2006.
- 14. Καρέλα, Ν. Π, Δρίτσος, Σ.Η, "Δείκτης κόστους αποκατάστασης και βαθμός βλάβης κτιρίων μετά από σεισμικές καταπονήσεις", Πρακτικά 15^{ου} Συνεδρίου Σκυροδέματος, Αρ. B3.32, Αλεξανδρούπολη, 2006.
- 15. Καραμπίνης, Α.Ι., Μπαλτζοπούλου, Α.Δ., (2006). "Συσχέτιση βαθμού βλάβης και κόστους αποκατάστασης των κατασκευών από το σεισμό της Αθήνας της 7^{ης}-9-1999", Πρακτικά 15^{ου} Συνεδρίου Σκυροδέματος, Αρ. Β3.26, Αλεξανδρούπολη, 2006.
- 16. ΙΤΣΑΚ-Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ, "Ο Σεισμός της Αθήνας 7-9-99: Εκτίμηση της τρωτότητας στην πλειόσειστη περιοχή και σύγκριση με την πραγματική κατανομή των βλαβών των κατασκευών από το Σεισμό", Τελική έκθεση του ερευνητικού προγράμματος, ΟΑΣΠ, Θεσσαλονίκη 2004.
- 17. Καλευρά Βλ., Καραμπίνη Αθ., "Συστηματική Διερεύνηση Τύπων, Βαθμών και Εκτάσεως Βλάβης Κατασκευών Ωπλισμένου Σκυροδέματος Καλαμάτας", Τελική Έκθεση Ερευνητικού Προγράμματος για λογαριασμό και με χρηματοδότηση ΟΑΣΠ, Αθήνα, 1987.
- 18. Καλευράς Βλ., Καραγιάννης Χρ., "Ερευνα Συμπεριφοράς Τυπικών Κατασκευών Ωπλισμένου Σκυροδέματος κατά τους Σεισμούς της Καλαμάτας Σεπτέμβριος 1986", Τελική Έκθεση Ερευνητικού Προγράμματος για λογαριασμό και με χρηματοδότηση ΟΑΣΠ, Αθήνα, 1987.
- Rossetto T., Elnashai A., "Derivation of Vulnerability Functions for RC Buildings based on Observational Data", SAFERR, European Commission Community Research, 2002.
- Kappos A.J., Pitilakis K., Morfidis K., Hatzinikolaou N., "Vulnerability and risk study of Volos (Greece) metropolitan area", Proceedings of the 12th ECEE, Paper no.74, London, UK, 2002.
- Ο.Α.Σ.Π (ΕΠΑΝΤΥΚ) ΤΕΕ, "Προσεισμική Ενίσχυση Υφιστάμενων Κατασκευών", Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, Αθήνα, 2006.
- Sarabandi P., Pachakis D., King S., Kiremidjian A., "Development of Empirical Building Performance Functions Data from Past Earthquakes", Proceedings of ICASP-9, pp. 629-635, San Francisco, CA, 2003.
- 23. Rota M., Penna A., Strobbia C., "Typological Fragility Curves from Italian Earthquake Damage Data", Proceedings of the 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, 2006.
- 24. Πανταζοπούλου, Σ., "Αποτίμηση της Αντισεισμικής Επάρκειας Υφιστάμενων Κατασκευών ", Περιοδικό ΥΛΗ & ΚΤΙΡΙΟ, τεύχος 57, σελ. 129-136, 2002.
- Ghobarah, Ahm., "On Drift Limits Associated with Different Damage Levels", International Workshop on Performance-Based Seismic Design, Bled, Slovenia, 2004.
- 26. Ελευθεριάδου, Α.Κ, "Συμβολή στην Αποτίμηση της Σεισμικής Τρωτότητας Κατασκευών από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα",

Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΔΠΘ, Ξάνθη, 2009.

27. Καραμπίνης, Α.Ι., "Συμβολή στην Μελέτη των Δυναμικών

Χαρακτηριστικών Κατασκευών από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα", Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΔΠΘ, Ξάνθη, 1986.

Anastasía K. Ελευθεριάδου, Διδάκτωρ Πολ/κος Μηχ/κος, MSc, ΔΠΘ . Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Ω/Σ , B.Σοφίας 12, Ξάνθη 67100, <u>aelefthe@civil.duth.gr</u>

Αθανάσιος Ι. Καραμπίνης, Καθηγητής ΔΠΘ, Δρ. Πολ/κος Μηχ/κος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Ω/Σ, Β.Σοφίας 12, Ξάνθη 67100, <u>karabin@civil.duth.gr</u>

Seismic Damage Scales in Reinforced Concrete Structures

A.K. ELEFTHERIADOU PhD Civil Engineer,

Scientific collaborator, Laboratory of RC/D.U.TH.

A.I. KARABINIS

PhD Civil Engineer, Professor, Depart. of Civil Engineering/D.U.TH.

Abstract

In the present paper the most significant damage scales are presented in order to calibrate the levels of damage based on post-earthquake surveys. The qualitative characterization of damage refers mostly to RC structures. Due to the heterogeneity of the parameters that influence the various damage scales, it is difficult to make a comparison between them and to combine statistical data derived from different sources. A correlation of the existing damage scales is presented and a new unified damage scale is proposed which is subdivided into 7 damage levels, based on descriptive terms of structural damage. The scale quantifies the severity of damage using a structural and, as well, a cost damage index. The damage levels are also presented on the typical capacity curve for reinforced concrete structures. The new scale is applied to statistical data that have been derived from previous earthquakes. The degree of damage is evaluated by using the proposed scale as well as the existing Greek method for the recording of damage. The comparison of damage estimates, using various damage scales, is thus achieved, in order to combine various existing data as well as analysis results.

1 INTRODUCTION

Damage scales cannot be easily compared given a wide extent of parameters that affect them, such as building types, seismic design codes, soil conditions, seismic hazard, calculation of ground motion, performance levels, e.t.c. Furthermore, it is extremely difficult to make a comparison between them and to combine statistical data derived from different sources [1].

In order to be able to implement a correlation analysis, a unified damage scale should be obtained. This scale has to measure structural damage based on quantitative damage levels, in addition to the descriptive terms of damage, thus producing a structural damage classification. The proposed scale can be easily and rapidly applied and while it is approximate, it is rational. The scale quantifies the severity of damage using a structural and, as well, a cost damage index. The damage levels of the proposed scale are also presented on the typical capacity curve for reinforced concrete structures. *Submitted: Dec.1.2008* Accepted: Apr. 7, 2010

Furthermore, a correlation of the existing damage scales that are used worldwide is presented. Finally, the new scale is applied to statistical data derived from previous earthquake (Kalamata 13-9-1986) and the degree of damage is evaluated by using 1. the instructions used during the post-earthquake surveys in the referring seismic event for the recording of damage, 2. the existing Greek method for the estimation of damage and 3. the proposed scale. The comparison of damage estimates, using various damage scales, is thus achieved, in order to combine various existing data as well as analysis results. In addition, the proposed scale is applied for the calibration of damage during the autopsies that were conducted in a recent earthquake (Andravida 8-6-2008).

2 SEISMIC DAMAGE SCALES

2.1 International seismic damage scales

Whereas the damage scales constitute tools of registration of the catastrophic consequences of an earthquake, the seismic hazard describes the phenomenon itself. The use and application of intensity scales has been historically important because no instrumentation is necessary, while at the same time useful measurements of an earthquake can be made by an unequipped observer.

The first damage scales, which were developed and quantified the seismic damage, were created in order to estimate the severity of the ground motion of a seismic event. In Greece and in Southern Europe, the modified Mercalli-Sieberg Scale and the Scale of Medvedev-Sponheur-Karnik-MSK are very familiar. Apart from those, the European Macroseismic Scale EMS98 is widely used.

The twelve-degree Modified Mercalli-Sieberg scale is mostly used in USA, Southern Europe, Australia and N.Zealand. The scale presents the range of the severity of damage from the weakest (minor cracking in ceilings in intensity level V) to the most calamitous (collapse in intensity level XII). The MSK 64 scale, known as Medvedev-Sponheur-Karnik scale has been widely applied in Europe and India. The definition of damage levels describe qualitatively the structural damage ranging from minor cracking in ceilings in intensity level VI to the complete collapse in intensity level XII. In 1981 it was revised and its application was reduced due to the development of the twelve-degree European Macroseismic scale EMS98. In EMS98 Scale the range of the severity of damage is presented in a similar way minor cracking in ceilings in intensity level VI to the complete collapse or irreparable damages in intensity level XII.

The Omori scale has seven degree levels and can be applied only to the local structural types of Japan. The definition of damage levels according to the Omori scale range from cracking in badly constructed masonries in intensity level I to the complete collapse of all buildings, except of some wooden structures, in intensity level VII.

In USA, the estimation of damage is based on several performance levels which pre-define descriptively the levels of the building's response in terms of structural damage. The performance levels express basically the desirable behaviour (resistance) of the structure after an earthquake. In contrast, the damage scales are connected to the results of the severity of the seismic motion (magnitude of earth-induced forces) on the structure.

According to FEMA 273 [2], three discrete Structural Performance Levels and two intermediate Structural Performance Ranges are defined, each one corresponding to certain acceptance criteria relating to the permissible earth-induced forces and deformations for the various elements of the building, both existing and new. The descriptions of acceptable damage at various performance levels of ATC 40 [3] are similar to those used in FEMA 273. These descriptions are also similar in concept, if not in terminology, to those proposed in the Vision 2000 Progress Report (SEAOC 1995b) [4]. According to HAZUS99 [5], five damage states are identified: None, Slight, Moderate, Extensive and Complete. An approximate comparison between the performance levels proposed by Earthquake Planning and Protection Organization-OASP and FEMA, is presented in Table 2.

2.2 Characterization of earthquake damage in Greece:

In Greece, the classification of structural types in based on the instructions provided by the Earthquake Planning and Protection Organization - EPPO [8, 9, 10]. These instructions refer to the qualitative characterization of damage level by the inspection crews as a) Green: building with no or light damage or building whose earthquake resistance has not been reduced, b) Yellow: building with moderate damage and reduced earthquake resistance, c) Red: building with very heavy damage or partial collapse and d) Collapse: building that has collapsed or is under demolition. The estimation of structural damage is also based on Decree 5172/AZ5b/1810-99 of Vice Minister of Public Works «Minimum standard requirements for the rehabilititation of damaged structures after the 7/9/99 Athens earthquake» [11] and its revision into the Decree 330/AZ5b/16-1-2001 [12]. The latter describes the methodology to estimate the loss of bearing ability of a critical element and floor, and subsequently estimate the influence of such loss, on the general stability of the structure. In Table 3 a Rapid Visual Screening questionary is presented used lately by EPPO.

2.3 Characterization of earthquake damage based on an older research programme:

In Table 4 a questionary is presented for the estimation of seismic damage based on an older research programme [17, 18] funded by Earthquake Planning and Protection Organization (EPPO). The evaluation of damage description/ classification of the 1984 and 1997-2001 EPPO documents is presented in Table 5. A correlation of these descriptions with the proposed here damage scale, is also presented in Table 5. A comparison of the EPPO damage levels to the FEMA performance levels, associated with the vertical structural elements, is presented in Table 6.

3 CORRELATION OF THE EXISTING DAMAGE SCALES

The seismic behavior of the structures during an earthquake represents an experiment in a physical scale (1: 1) and constitutes the most objective examination of the sufficiency of seismic codes and construction techniques. However, the reliable estimation of buildings response depends on the used method for the recording of seismic damage. The latter may vary in detail (approximate, analytical, e.t.c.) and extent (numerous buildings, group of buildings or a single structure) [18].

Due to the different parameters that influence the existing damage scales (building types, seismic design codes, soil conditions, seismic hazard, calculation of ground motion, performance levels, e.t.c.) these cannot be easily compared nor is it easy to combine and compare statistical data derived from different damage scales. Table 7 has been created in order to be able to implement a correlation analysis. Table 7 correlates the most important existing damage scales [19], with the existing method used for the recording and classification of damage in Greece [20, 21] and the proposed damage scales can thus be correlated [22, 23]. It must be mentioned that the limits of the measurable damage index of the proposed scale have been modified compared to earlier research [1].

4 THE PROPOSED DAMAGE SCALE

In order to be able to implement a correlation analysis, a homogeneous measurable damage scale should be obtained for RC structures [Table 8]. The use of the new scale does not require specialized knowledge, and is intentionally quite similar to the familiar to many engineers, manner of estimation of post-earthquake damage. The scale is approximate but rational and can be easily and rapidly applied. The novelty of the new scale is that it introduces an empirical measurable damage index, which depends on the severity and the extent of damage, right from the field where in situ inspection is conducted. This characteristic is lacking from the existing scales of measurement. Its inclusion may potentially increases the level of empiricism, but it also decreases the need for second round time-consuming sampling inspections of damaged buildings.

The new scale defines 7 damage levels associated to the structural and non-structural damage expected in the four main structural RC building types that are met in Europe, which would be expected in a future seismic event. The performance levels, including indirectly the monetary loss, according to FEMA 273 [2] can be defined on the capacity curve, relating to the permissible earth-induced forces and deformations for the various elements of the building and [24]. The definition of damage levels of the proposed scale and the performance levels of FEMA are presented and compared on a typical performance curve for RC buildings in Figure 1. In order to consider the different damage rates of distinct lateralload systems and hence relate the vulnerability curves to the building type, the scale must be calibrated to a measurable structural response parameter. Therefore the performance levels of the proposed scale are defined in terms of a measurable structural and cost damage index (Damage Index-DI) and range from «None» to «Collapse» performance levels respectively. The correlation of structural and cost damage index is thus achieved. The interstory drift thresholds, referring to the structural damage index, for the several damage levels have been based on experimental data and theoretical analyses [25]. The description of damage in every performance level is based on the main existing damage scales. Besides, most of the methods for the recording of seismic damage, including the instructions proposed by EPPO, have been adopted by FEMA and ATC. The comparison of the proposed damage scale with FEMA and EPPO is also presented in Table 8 [26].

Furthermore, the damage levels can be correlated on a typical performance curve for ductile moment resisting RC frames to the fundamental period T and the damping β [27].

After the building classification into a specific structural type and the description of damage it is possible to identify the point of structural damage on the capacity curve. In Figure 2 the damage levels of the proposed scale in terms of structural damage index on the performance curve are correlated qualitatively to the damage levels in terms of monetary loss on a primary vulnerability curve.

5 APPLICATION OF THE PROPOSED DAMAGE SCALE

The results of the post-earthquake surveys after the recent seismic events of Volvi 1978, Alkionides 1981, Kalamata 1986, Aigio 1995, Athens 1999 and others, reveal that some damage types are repeated, probably due to the fact that they are due the same causes. The present research does not intend to apply a simplified, unclear and subjective estimation of damage to a large statistical database. Instead, it aims to develop an objective and accurate method for the damage estimation based on a limited number of buildings.

Thus, the proposed scale has been applied to 50 buildings which were derived after the earthquake of Kalamata. Due to the date of the seismic event, the buildings are considered to have been designed without a seismic code or with the seismic code of 1959 [Greek Royal Decree of 1959]. The forms of post-earthquake surveys differed from those proposed by EPPO. In order to compare the degree of damage, new forms were completed using the method of Rapid Visual Screening (R.V.S.). This method was used in order to define whether the seismic behavior of the building is adequate and the structure is able to resist the expected seismic force after the Athens earthquake. After processing the database, the degree of damage has been estimated based on: 1. the initial forms used in Kalamata's earthquake, 2. the R.V.S. forms, and 3. the proposed damage scale. In this way, by estimating the degree of damage according to different post-earthquake methods, which are associated to different seismic earthquakes and dates, it was possible to compare and correlate the produced results. In addition, the reliability of the proposed scale is confirmed by comparing it to the R.V.S. method applied in the Athens (7/9/1999) earthquake. Important conclusions are drawn on several parameters that affect the vulnerability functions, pointing out their effect in the structure's seismic response. The results of the pre-described process are presented in Figures 3 through 8.

In addition, the proposed scale has been applied to 31 RC buildings which were derived after the recent earthquake of Andravida (8/6/2008). Autopsies were conducted in the disaster area for the recording of the seismic damage. Figures 9 and 10 present the results after the elaboration of the post earthquake data. Finally, Figure 10 pictures a reinforced concrete building with heavy damages in Andravida.

6 CONCLUSIONS

In the present paper the most significant damage scales are presented in order to calibrate the levels of damage based on post-earthquake surveys. The qualitative characterization of damage refers mostly to RC structures. Due to the heterogeneity of the parameters that influence the various damage scales, it is difficult to make a comparison between them and to combine statistical data derived from different sources. A correlation of the existing damage scales is presented and a new unified damage scale is proposed which is subdivided into 7 damage levels, based on descriptive terms of structural damage. The scale quantifies the severity of damage using a structural and, as well, a cost damage index. The damage levels are also presented on the typical capacity curve for reinforced concrete structures. The new scale is applied to statistical data that have been derived from previous earthquakes. The degree of damage is evaluated by using the proposed scale as well as the existing Greek method for the recording of damage. The comparison of damage estimates, using various damage scales, is thus achieved, in order to combine various existing data as well as analysis results.

After processing the statistical sample, the main causes for the development of structural damage have been identified as follows: 1. The existence of ground floor without masonry infills (pilotis) or short columns. 2. The existence of eccentric rotational stiffness due to the improper placement of the vertical structural elements. 3. The inadequate existence or badly placed ties or the inadequate length of development of longitudinal reinforcing bars. 4. The existence of strong beam-weak column designs.

From the analysis of the produced diagrams it is concluded that: 1. The majority of the buildings belong to mixed-building types consisting of both moment resisting frames and shear-walls. 2. Many buildings developed heavy damage (red). 3. Many structures with ground floor with pilotis or shop windows developed heavy damage. 4. Heavy damage was developed in many masonries and non-structural elements, while most structural damage was observed in vertical rather than horizontal structural elements. 5. Among the parameters that influence vulnerability, the most frequent were the existence of torsion, pilotis, bad condition and horizontal irregularity. 6. Most structures developed moderate damage although a significant amount of light or heavy damage has also been recorded, which is in agreement with the results of the other two methods used for the calibration of damage. 8. In general, there is a good correlation of the three presented methods to evaluate the post-earthquake damage, which confirms, in practice, the reliability of the proposed scale.

Considering that the proposed damage scale can be easily and rapidly applied, it can become an important and useful tool for the calibration of seismic damage in situ where inspection is conducted, reducing the need for a second round time-consuming sampling inspections of damaged buildings.

Anastasia K. Eleftheriadou, PhD Civil Engineer, MSc, D.U.TH. Department of Civil Engineering, Laboratory of Reinforced Concrete, B.Sofias 12, Xanthi 67100, aelefthe@civil.duth.gr

Athanasios I. Karabinis, Professor D.U.TH., PhD Civil Engineer, Department of Civil Engineering, Laboratory of Reinforced Concrete, B.Sofias 12, Xanthi 67100, <u>karabin@civil.duth.gr</u>