

**Σενάρια σεισμικής διακινδύνευσης του κτιριακού
αποθέματος της πόλης Düzce με τη χρήση
ολοκληρωμένου ηλεκτρονικού περιβάλλοντος**
Seismic risk scenarios for the building stock in the city of
Düzce through a comprehensive electronic environment

Ανδρέας Κάππος¹, Αναστάσιος Σέξτος², Βασίλειος Παπανικολάου³,
Λεωνίδας Κουρής⁴, Γεώργιος Παναγόπουλος⁵, Χρήστος Παναγιωτόπουλος⁶,
Κοσμάς Στυλιανίδης⁷

*Λέξεις κλειδιά: Σενάρια σεισμικής διακινδύνευσης, αποτίμηση,
κτιριακό απόθεμα, καμπύλες τρωτότητας, GIS, Düzce*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Η παρούσα εργασία αφορά στη μεθοδολογία και στο λογισμικό που αναπτύχθηκαν για τη διαχείριση σεισμικών σεναρίων και στα αποτελέσματα που προέκυψαν για την πόλη Düzce της Τουρκίας, η οποία επλήγη σημαντικά κατά το σεισμό του 1999. Για τη διαμόρφωση των σεισμικών σεναρίων, αξιοποιήθηκε και βελτιώθηκε το ολοκληρωμένο υβριδικό (βάση δεδομένων και GIS) περιβάλλον διαχείρισης προσεισμικού και μετασεισμικού ελέγχου που έχει αναπτυχθεί από το Εργαστήριο Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας (ΕΚΟΣΦΤ) του ΑΠΘ, με βάση το οποίο είναι δυνατή η ιεράρχηση των απαραίτητων μέτρων ενίσχυσης που απαιτούνται πριν ή μετά από ένα μεγάλο σεισμό. Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες τρωτότητας που έχουν υπολογιστεί βάσει της υβριδικής μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στο ΑΠΘ για την κατάστρωση μιας σειράς σεναρίων σεισμικής διακινδύνευσης για την πόλη της Düzce. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε περιβάλλον GIS και περιλαμβάνουν τις αναμενόμενες απώλειες για κάθε σεισμικό σενάριο καθώς και εκτιμήσεις για τον προβλεπόμενο χρόνο αποκατάστασης.

¹ Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ, email: ajkap@civil.auth.gr

² Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ, email: asextos@civil.auth.gr

³ Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, MSc DIC, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ, email: billy@civil.auth.gr

⁴ Πολιτικός Μηχανικός, ΜΔΕ, Υποψ. Διδάκτωρ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ, email: lakouris@civil.auth.gr

⁵ Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ, email: panagop@civil.auth.gr

⁶ Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ, email: pchr@civil.auth.gr

⁷ Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ, email: kcstyl@civil.auth.gr

ABSTRACT : The present work refers to the methodology and software that were developed for the management of seismic scenarios and the corresponding results for Düzce, Turkey, a city of that was heavily hit by the 1999 earthquake. The comprehensive (hybrid GIS-database) computational framework developed by the Laboratory of Reinforced Concrete and Masonry Structures of the Aristotle University of Thessaloniki (AUTH) for handling pre- and post earthquake assessment data for the city of Düzce, was utilized and further improved for the development of seismic risk scenarios. Fragility curves derived using the hybrid approach developed at AUTH were utilized for developing a series of seismic risk scenarios for the city of Düzce. Results are presented in GIS environment, and include loss estimates as well as required restoration times for each scenario.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία, η οποία αποτελεί ενιαίο σύνολο με τη συναφή εργασία των Κάππος και συν. (2009), βασίζεται στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του διεθνούς ερευνητικού προγράμματος Seismic Risk Management in Düzce – Grevena – Catania (SRM-DGC) που χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω του προγράμματος INTERREG IIIB ARCHIMED, για την ανάπτυξη σεναρίων σεισμικής διακινδύνευσης για τις πόλεις των Γρεβενών, της Düzce στην Τουρκία, και της Catania στη Σικελία. Το αντικείμενο της σεισμικής διακινδύνευσης, μέσω των οποίων υπολογίζονται οι αναμενόμενες οικονομικές απώλειες, ο πιθανός χαρακτηρισμός των κτιρίων μετά από ένα σεισμό και ο εκτιμώμενος χρόνος αποκατάστασης αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο προσεισμικής αναβάθμισης και ενίσχυσης των κτιρίων, ιδιαίτερα σε περιοχές υψηλής σεισμικότητας όπου έχουν συμβεί στο παρελθόν σημαντικοί σεισμοί. Παράλληλα, επιτρέπει τη λήψη ιεραρχημένων και ορθολογικών δράσεων καθώς και μια προεκτίμηση από μέρους της Πολιτείας του συνολικού κόστους ενός ενδεχόμενου σεισμού, γεγονός που αποτελεί εργαλείο για την αντισεισμική πολιτική και θωράκιση μιας χώρας. Όπως αναπτύσσεται και στην εργασία των Κάππος και συν. (2009) με αντικείμενο τα σενάρια σεισμικής διακινδύνευσης της πόλης των Γρεβενών, η ανάγκη προσεισμικής ενίσχυσης των κατασκευών, αν και κατ' αρχάς αυτονόητη, συχνά προσκρούει στην αδυναμία χρηματοδότησης ή ακόμα και εκτίμησης του συνεπαγόμενου κόστους, με αποτέλεσμα τελικά να αποτελεί ένα από τα πλέον αμφιλεγόμενα θέματα κοινωνικής πολιτικής.

Δεδομένης της διεξοδικής παρουσίασης του θεωρητικού υποβάθρου της ακολουθούμενης μεθοδολογίας αποτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης για την πόλη των Γρεβενών (Κάππος και συν., 2009), η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στις ειδοποιούς διαφορές της πόλης της Düzce αναφορικά με το διαθέσιμο κτιριακό απόθεμα και τις διαφορετικές παραδοχές περί της τυπολογίας των κτιρίων και της μεθόδου εκτίμησης της πιθανότητας βλάβης των κτιρίων που απορρέουν, παρά τις σημαντικές ομοιότητες, από τις εγγενείς ιδιαιτερότητες των πόλεων της τουρκικής περιφέρειας σε σχέση με τις αντίστοιχες ελληνικές. Τέλος παρατίθεται η αποτύπωση μέσω γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών (GIS), της χωρικής κατανομής των πιθανοτικών εκτιμώμενων βλαβών και απωλειών,

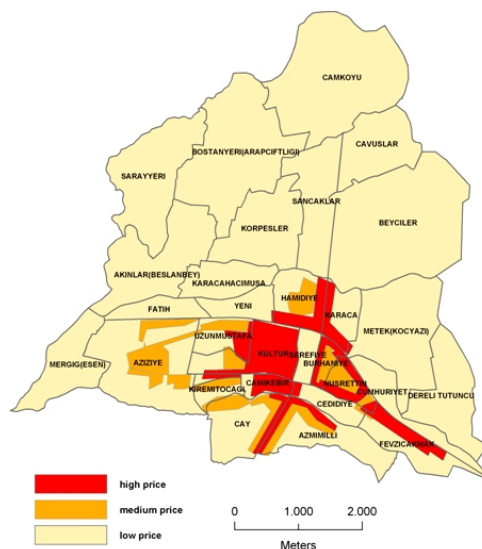
καθώς και του κόστους αποκατάστασης ανά ηλικία και υλικό κατασκευής των κτιρίων της πόλης της Düzce ενώ, όπου είναι εφικτό, πραγματοποιείται σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την πόλη των Γρεβενών.

ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΑΠΟΘΕΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΠΟΛΗΣ ΤΗΣ DÜZCE

Διαδικασία σύνθεσης του κτιριακού αποθέματος

Για τη διαμόρφωση των σεισμικών σεναρίων, αξιοποιήθηκε και βελτιώθηκε το ολοκληρωμένο περιβάλλον διαχείρισης προσεισμικού και μετασεισμικού ελέγχου που έχει αναπτυχθεί από το ΕΚΟΣΦΤ του ΑΠΘ στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος με τίτλο “Marmara Earthquake Rehabilitation Project – MERP: An integrated intervention for the rehabilitation of Düzce”. Μέσω του περιβάλλοντος αυτού είναι δυνατή η ιεράρχηση των απαραίτητων μέτρων ενίσχυσης που απαιτούνται πριν ή μετά από ένα μεγάλο σεισμό (Sextos et al., 2008). Στο σύστημα αυτό, του οποίου τα αποτελέσματα αποτυπώνονται και σε περιβάλλον GIS (MapInfo), υπήρχαν αρχειοθετημένα 17080 κτίρια συνολικά στην παλαιά (Σχήμα 1) και στη νεόδμητη πόλη της Düzce, διαφόρων δομικών τύπων οι οποίοι απαντώνται συχνά στην Τουρκία. Ωστόσο, λόγω των διαφορετικών στόχων μεταξύ των δύο ερευνητικών προγραμμάτων, απαιτήθηκε περαιτέρω συμπλήρωση υφισταμένων σειρών δεδομένων (σε περιπτώσεις για παράδειγμα όπου η δήλωση του δομικού τύπου ήταν αμφίσημη ή η τοπολογία του κτιρίου ασαφής). Είναι ενδεικτικό ότι από τις 17080 εγγραφές προσεισμικού ελέγχου, αρχικά αξιοποιήσιμες ήσαν πρακτικώς οι 152.

Λεπτομερέστερα δεδομένα συνεπώς εισήχθησαν στο σύστημα για 3025 ακόμη κτίρια, τα οποία είναι κυρίως συγκεντρωμένα στο κέντρο της παλαιάς πόλης της Düzce και αντιστοιχούν περίπου στο 30% του συνολικού αποθέματός της (η πόλη συνολικά αριθμεί περί τα 9000 κτίρια). Τα δεδομένα αυτά (δομικός τύπος, αριθμός ορόφων, δομημένη επιφάνεια και όγκος) συγκεντρώθηκαν ή συμπληρώθηκαν από μηχανικούς των υπηρεσιών του δήμου της Düzce σε στενή συνεργασία με τα μέλη του ΕΚΟΣΦΤ του ΑΠΘ κατόπιν επί τόπου επισκέψεων των τελευταίων. Δεδομένα επίσης συμπληρώθηκαν και με τη χρήση των φακέλων του Δήμου (με ευθύνη του Δήμου), ενώ πρόσθετες αυτοψίες πραγματοποιήθηκαν σε περιπτώσεις αμφιβολιών ή ελλিপών στοιχείων. Επιπρόσθετα πραγματοποιήθηκε προσαρμογή του συστήματος στις απαιτήσεις της αποτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης ώστε να επιτυγχάνεται πλήρης συνδεσιμότητα με το λογισμικό διαχείρισης των σεναρίων της πόλης των Γρεβενών. Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω, το ηλεκτρονικό περιβάλλον διαχείρισης της κτιριακών δεδομένων της πόλης της Düzce αναβαθμίστηκε σημαντικά ενώ για λόγους εποπτικότητας τα αποτελέσματα της καταγραφής του κτιριακού αποθέματος και της σεισμικής διακινδύνευσης καταστήθηκαν πλέον διαθέσιμα σε πλατφόρμα MapInfo αλλά και ArcGIS, γεγονός που επέτρεψε την άμεση και εύκολη σύγκριση των δεδομένων εισαγωγής, της πιθανότητας βλάβης και του κόστους αποκατάστασης μεταξύ των δύο υπό μελέτη πόλεων.



Σχήμα 1. Διοικητική διάρθρωση του Δήμου της Düzce σε επιμέρους συνοικίες (“mahalle”) και προσεγγιστική εκτίμηση αξίας γης.

Σύνθεση του κτιριακού αποθέματος

Το κτιριακό απόθεμα κατηγοριοποιείται με βάση το υλικό κατασκευής και τον αντισεισμικό κανονισμό που χρησιμοποιήθηκε κατά το σχεδιασμό όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2**, η δε χωρική κατανομή του εντός της πόλης φαίνεται στο **Σχήμα 3**. Σύμφωνα με τα δεδομένα που έχουν συγκεντρωθεί, ο κυρίαρχος (ποσοστό 68%) δομικός τύπος στην πόλη της Düzce, όπως άλλωστε και των περισσότερων επαρχιακών πόλεων της Τουρκίας, είναι αυτός της άοπλης τοιχοποιίας (MBr & MSt), ενώ τα υπόλοιπα είναι κυρίως κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος (R/C). Πρέπει να σημειωθεί ότι η παραπάνω σύνθεση είναι ουσιαδώς διαφορετική από την αντίστοιχη του κτιριακού αποθέματος των Γρεβενών, όπου τα κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος αποτελούν περίπου το 80% του αποθέματος. Η συντριπτική πλειοψηφία των κτιρίων της πόλης είναι χαμηλά (1 ή 2 όροφοι), και μόνο 6% έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με το σύγχρονο τούρκικο αντισεισμικό κανονισμό, ενώ είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι περίπου το 74% εξ αυτών δεν έχει σχεδιαστεί με κανέναν κανονισμό. Από την άλλη, η εικόνα αυτή αμβλύνεται όταν η κατανομή υπολογίζεται με βάση την ολική δομημένη επιφάνεια (**Σχήμα 3**, δεξιά) οπότε και η επιρροή των πολυώροφων κτιρίων από Ο/Σ είναι μεγαλύτερη. Επισημαίνεται τέλος ότι τα κτίρια στην πόλη της Düzce είναι θεμελιωμένα σε εδάφη Z3 και Z4, σύμφωνα με τη σχετική κατηγοριοποίηση του τουρκικού Κανονισμού, δηλαδή επί μαλακών έως πολύ μαλακών εδαφικών σχηματισμών (αντιστοιχούντων σε εδάφη Κατηγορίας C και D κατά EC8), γεγονός το οποίο όπως θα διαφανεί στις ενότητες που ακολουθούν έχει σημαντική επιρροή σε επίπεδο εκτιμώμενης σεισμικής διακινδύνευσης. Ενδεικτικές εικόνες χαρακτηριστικών δομικών τύπων παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4**.



Σχήμα 4. Τυπικές εικόνες πολυώροφων κτιρίων από Ο/Σ (άνω) και μονώροφων ή διώροφων κτιρίων από ξυλόπηκτη (κάτω αριστερά) και άοπλη τοιχοποιία.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

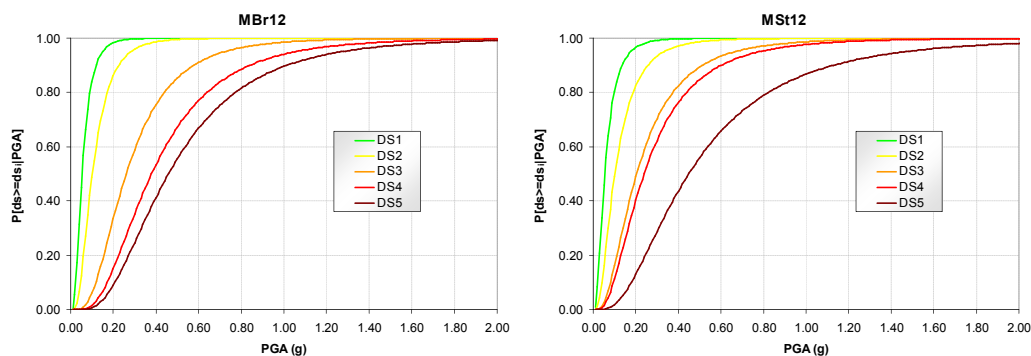
Η μεθοδολογία εκτίμησης των σεισμικών απωλειών η οποία αξιοποιήθηκε για την περίπτωση της πόλης των Γρεβενών και περιγράφεται αναλυτικά στην εργασία των Κάππος και συν. (2009) εν πολλοίς χρησιμοποιήθηκε και για την περίπτωση της πόλης της Düzce. Δεδομένου του γεγονότος ότι βασίζεται στο συνδυασμό των αποτελεσμάτων ανελαστικών αναλύσεων προσομοιωμάτων φορέων που είναι αντιπροσωπευτικοί για διάφορες τυπικές κατηγορίες κτιρίων στην Ελλάδα με τα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία από προγενέστερες σεισμικές διεγέρσεις, απαιτήθηκε κατάρχην η κατάλληλη αντιστοίχιση των δομικών τύπων που απαντώνται στην Τουρκία με τους αντίστοιχους ελληνικούς. Επειδή όμως σε γενικές γραμμές η κατηγοριοποίηση (Kappos et al., 2006) ως προς το στατικό σύστημα (πλαισιακό ή μικτό), το ύψος του κτιρίου (χαμηλό έως 3 ορόφους, μέσο από 4 έως 7, και υψηλό άνω των 8 ορόφων), τη διάταξη των τοιχοπληρώσεων (χωρίς τοιχοπληρώσεις, ομοιόμορφη διάταξη, πιλοτή) καθώς και τη χρήση αντισεισμικού κανονισμού (σύγχρονος, παλιότερος, πλέον παλαιός ή σχεδιασμός άνευ κανονισμού) ισχύουν εν πολλοίς για όλες της χώρες της ΝΑ Ευρώπης, κρίθηκε ότι οι ανωτέρω κατηγορίες διάκρισης των κτιρίων από Ο/Σ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την περίπτωση της πόλης της Düzce.

Αναφορικά με τα κτίρια από άοπλη τοιχοποιία, διατηρήθηκε η κατηγοριοποίηση με βάση υλικό κατασκευής (λιθοδομή ή οπτοπλινθοδομή), όμως ως προς το ύψος, θεωρήθηκαν ως χαμηλά τα μονώροφα κτίσματα και μέσου ύψους τα έχοντα δύο ορόφους (ουσιαστικά εξαιρώντας τα υψηλά κτίρια από Α.Τ. που ελήφθησαν υπόψη στην περίπτωση των Γρεβενών) με βάση προγενέστερη εμπειρία (Milutinovic et al. 2003, Mouroux et al. 2006, Kappos et al. 2007) και την

παρατήρηση ότι παρόμοια κτίρια σπανίζουν στις περισσότερες επαρχιακές πόλεις της Τουρκίας, συμπεριλαμβανομένης της Düzce.

Καμπύλες τρωτότητας συναρτήσει της PGA

Όπως και στην περίπτωση των Γρεβενών χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι καμπυλών τρωτότητας με βάση τη μέγιστη σεισμική επιτάχυνση (PGA) ή τη φασματική επιτάχυνση (S_d) οι τιμές των οποίων κατά περίπτωση αποτυπώνονται στον άξονα των τετμημένων. Και στις δύο περιπτώσεις, ο άξονας των τεταγμένων εκφράζει την πιθανότητα ένα κτίριο να βρίσκεται ή να υπερβαίνει μια συγκεκριμένη στάθμη βλάβης ds_i . Κατόπιν της αντιστοίχισης της κατηγοριοποίησης των κτιρίων των δύο υπό εξέταση πόλεων, οι καμπύλες τρωτότητας για τα κτίρια από Ο/Σ οι οποίες βασίζονται στην υβριδική μεθοδολογία που έχει αναπτυχθεί στο ΑΠΘ (Kappos, 2001, Kappos et al., 2006, Παναγόπουλος & Κάππος, 2006, Kappos & Panagopoulos, 2009) και χρησιμοποιήθηκαν για τα Γρεβενά, κρίθηκε ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την πόλη της Düzce. Ομοίως άμεσα αξιοποιήσιμες κρίθηκαν οι καμπύλες τρωτότητας για τα κτίρια από Α.Τ. (Σχήμα 5) οι οποίες έχουν προκύψει (Kappos et al., 2006) από την ανελαστική στατική ανάλυση κατάλληλων προσομοιωμάτων (Penelis, 2006) και της συσχέτισης των αποτελεσμάτων με στατιστικά στοιχεία βλαβών.

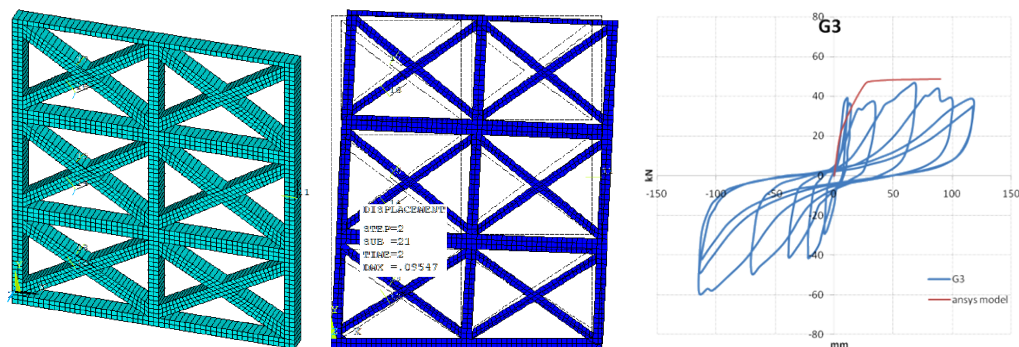


Σχήμα 5. Ενδεικτικές καμπύλες τρωτότητας συναρτήσει της PGA για κτίρια Α.Τ., MBr (αριστερά) και MSt και χαμηλού ύψους (1-2 ορόφων) που απαντώνται στην Düzce.

Ειδικότερη προσομοίωση ξυλόπηκτων κτιρίων που απαντώνται στην Düzce

Αξιοσημείωτη είναι η ύπαρξη σημαντικού αριθμού ξυλόπηκτων κτιρίων (συντιθέμενων από οπτόπλινθους, κονίαμα και ξύλο), κυρίως χαμηλού ύψους, τα οποία απαντώνται συχνά στην πόλη της Düzce, για τα οποία μάλιστα είναι περιορισμένος ο αριθμός των διαθέσιμων αναλυτικών μελετών στη διεθνή βιβλιογραφία, με εξαίρεση ίσως την αποτίμηση βλαβών από σεισμούς (Gülkan & Langenbach 2004, Doğangün et al. 2006, Kappos & Kouris 2008). Ως εκ τούτου κρίθηκε σκόπιμη η ενδεδειγμένη αριθμητική προσομοίωση των φορέων αυτών με τη χρήση του προγράμματος ANSYS (Σχήμα 6) και η μελέτη αφενός της μη-

γραμμικής συμπεριφοράς των υλικών και αφετέρου της αλληλεπίδρασης μεταξύ των συστημάτων που τους συνθέτουν. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής παρουσιάζονται αναλυτικά αλλού (Karpos & Kouris 2008). Σημειώνεται εδώ ότι τελικώς δεν κατέστη δυνατή η αξιοποίησή τους στην παρούσα μελέτη καθώς κατά τη συλλογή των δεδομένων από τις υπηρεσίες του Δήμου της Düzce δεν είχε πραγματοποιηθεί σαφής διάκριση ανάμεσα στα ξυλόπηκτα κτίρια και τα κτίρια από οπτοπλινθοδομή με αποτέλεσμα να μην μπορούν να διακριθούν τα μεν από τα δε στην ηλεκτρονική βάση δεδομένων.



Σχήμα 6. Προσομοίωση της μη-γραμμικής στατικής συμπεριφοράς υπό μελέτη δοκιμίου και κύκλος υστέρησης που προέκυψε πειραματικά υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Καμπύλες τρωτότητας συναρτήσει της S_d

Όπως προαναφέρθηκε, για λόγους σύγκρισης, στα σενάρια σεισμικής διακινδύνευσης θεωρήθηκε και μια δεύτερη μορφή καμπυλών τρωτότητας όπου ο άξονας των τετμημένων αντιστοιχεί στη φασματική μετακίνηση (S_d). Για το σκοπό αυτόν, χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες αντίστασης που υπολογίστηκαν μέσω ανελαστικών στατικών αναλύσεων για όλες τις προαναφερθείσες τυπολογίες κτιρίων της Düzce από τις οποίες και εξήχθησαν απευθείας οι καμπύλες τρωτότητας ορίζοντας τις στάθμες βλάβης βάσει του σημείου διαρροής και του σημείου θεωρητικής αστοχίας (Κάππος και συν., 2009). Σημειώνεται ότι όπως και στην περίπτωση των Γρεβενών, ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε κατά την εφαρμογή της μεθόδου του φάσματος απαίτησης – αντίστασης για τα τοιχοπληρωμένα κτίρια.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΕΝΑΡΙΟΥ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ

Περιγραφή του σεισμικού σεναρίου που καταστρώθηκαν

Με βάση τη μικροζωνική μελέτη (Pitilakis et al., 2008) που εκπονήθηκε για την πόλη της Düzce από το Εργαστήριο Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων του ΑΠΘ το βασικό σεισμικό σενάριο καταστρώθηκε πιθανοτικά και προέκυψε σε ικανοποιητική συμφωνία με τη διαθέσιμη καταγραφή του σεισμού της 12/11/1999. Το σενάριο αυτό χρησιμοποιήθηκε ως διέγερση βάσης για το κτιριακό απόθεμα της πόλης. Επιπρόσθετα, καταστρώθηκε και ένα εναλλακτικό

σενάριο με την υπόθεση μιας ενιαίας σε όλη την έκταση της πόλης τιμής μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (*PGA*) ίσης προς 0.40g, βάση του ισχύοντος τουρκικού αντισεισμικού κανονισμού και τη χρήση αποκλειστικά των καμπυλών τρωτότητας που προκύπτουν συναρτήσει της *PGA*. Σημειώνεται ότι η υιοθέτηση της πιθανοτικής προσέγγισης για την εκτίμηση των απωλειών του κτιριακού αποθέματος καθιστά υποχρεωτική τη χρήση δεδομένων πληθυσμού και όχι μεμονωμένων κτιρίων και ως εκ τούτου η σεισμική διακινδύνευση συνήθως εκτιμάται σε επίπεδο οικοδομικού τετραγώνου. Καθώς όμως η πληροφορία αυτή δεν ήταν διαθέσιμη στην υφιστάμενη ηλεκτρονική βάση δεδομένων της πόλης της Düzce, η αποτίμηση έλαβε χώρα σε επίπεδο συνοικίας (“mahalle”) οπότε τα αποτελέσματα που προέκυψαν και ακολουθούν έχουν αναχθεί στις επιμέρους συνοικίες της πόλης.

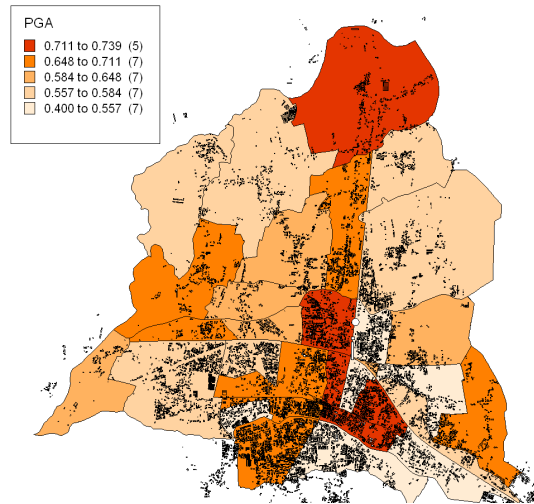
Χωρική κατανομή της σεισμικής διέγερσης στην παλαιά πόλη

Με βάση 10 αντιπροσωπευτικά εδαφικά προσομοιώματα σε 30 θέσεις στην παλαιά πόλη της Düzce επετεύχθη ο διαχωρισμός της περιοχής σε ζώνες όμοιας σεισμικής απόκρισης και ο υπολογισμός των αναμενόμενων σεισμικών δράσεων (σε φασματικές τιμές σε περιόδους 0.3, 0.6, 1.0, 1.5 και 2.0sec) στην επιφάνεια του εδάφους. Ακολούθως πραγματοποιήθηκε αντιστοίχιση των τιμών της σεισμικής διέγερσης σε κάθε συνοικία χρησιμοποιώντας κατάλληλες τεχνικές χωρικής παρεμβολής, γεγονός που οδήγησε στις τελικές τιμές εδαφικής απόκρισης του **Σχήματος 7** (Pitilakis et al., 2009).

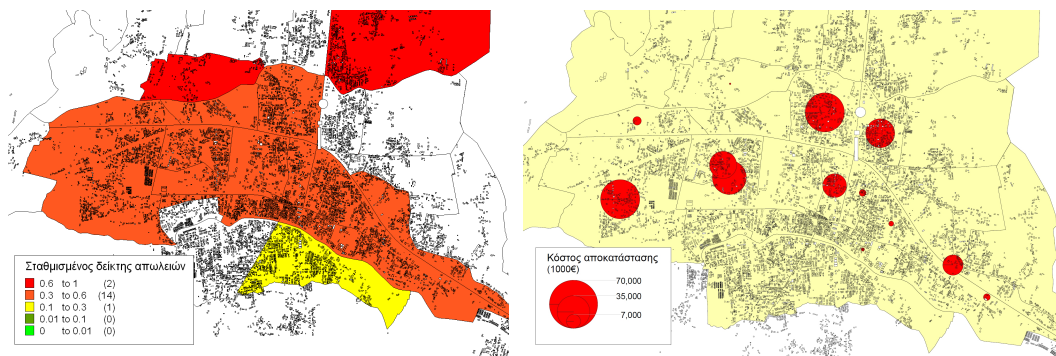
Σενάρια βάσει των καμπυλών τρωτότητας συναρτήσει της *PGA*

Με τη χρήση των καμπυλών τρωτότητας συναρτήσει της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης *PGA* εκτιμήθηκε, σε κάθε συνοικία, ο σταθμισμένος δείκτης απωλειών (το μέσο κόστος αντικατάστασης λήφθηκε ίσο με €500/m²), καθώς και η κατάταξη των κτιρίων στις συνήθεις κατηγορίες που χρησιμοποιούνται στο μετασεισμικό έλεγχο (Πράσινα – Κίτρινα – Κόκκινα). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε περιβάλλον GIS στο **Σχήμα 8**. Είναι φανερό ότι προκύπτουν σημαντικές βλάβες ιδιαίτερα για τις συνοικίες του κέντρου της πόλης, γεγονός που βρίσκεται σε συμφωνία με τις παρατηρηθείσες βλάβες του σεισμού του 1999 και οφείλεται στον τύπο των κτιρίων (κυρίως Α.Τ.), στην ένταση της σεισμικής διέγερσης και στους εν γένει μαλακούς εδαφικούς σχηματισμούς της περιοχής. Από την άλλη, παρά την ανωτέρω γενική και ποιοτική συμφωνία, η εικόνα σχεδόν καθολικής αστοχίας που προβλέπεται αναλυτικά αντιστοιχεί ίσως σε ένα άνω όριο δυσμενούς σεισμικής απόκρισης του κτιριακού αποθέματος. Μια πιθανή εξήγηση αποτελεί το γεγονός ότι για τους λόγους που προαναφέρθηκαν, δεν συνυπολογίστηκε η σχετικά ευμενέστερη συμπεριφορά των ξυλόπηκτων κατασκευών, ενώ σε κάποιο βαθμό η διαφορά αυτή είναι εγγενής καθώς έχει παρατηρηθεί και στο παρελθόν το φαινόμενο οι αναλυτικές (ακόμα και υβριδικές) μέθοδοι να υπερεκτιμούν τις προβλεπόμενες απώλειες (Yakut et al. 2006, Sucuoğlu et al. 2007). Σε κάθε περίπτωση, όπως ήταν αναμενόμενο (**Σχήμα 9**, αριστερά) εκτιμάται ότι οι μεγαλύτερες απώλειες αφορούν στα κτίρια μεγάλης ηλικίας, ενώ υπάρχει ουσιαστική βελτίωση με την πρόοδο της επιστημονικής

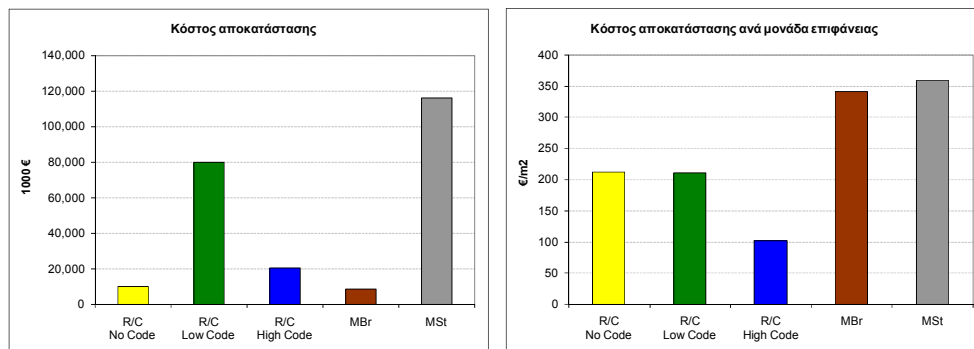
γνώσης και την εισαγωγή των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών, ενώ κατόπιν αναγωγής του κόστους στο εμβαδόν της δομημένης επιφάνειας προβλέπεται αυτό να είναι σημαντικότερο στις κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία (Σχήμα 9, δεξιά).



Σχήμα 7. Χωρική κατανομή της PGA σε κάθε συνοικία για το βασικό σεισμικό σενάριο.



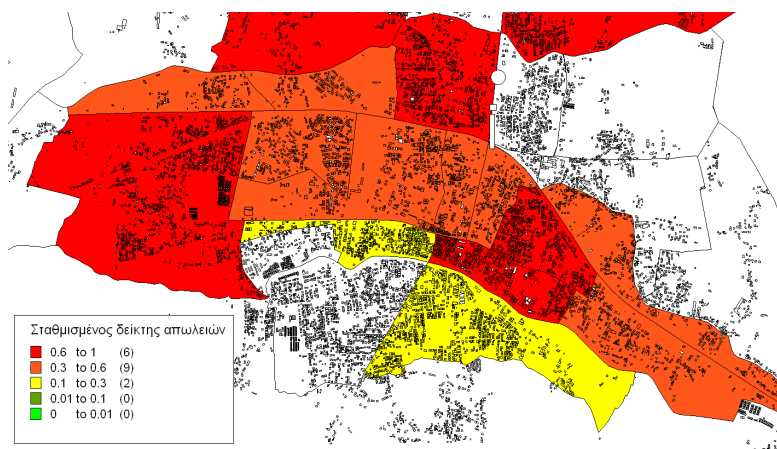
Σχήμα 8. Σταθμισμένος δείκτης απωλειών (αριστερά) για το βασικό σενάριο και εκτιμώμενο κόστος αποκατάστασης (δεξιά)



Σχήμα 9. Εκτιμώμενο κόστος αποκατάστασης ανά κανονισμό σχεδιασμού και υλικό κατασκευής σε απόλυτους αριθμούς (αριστερά) ή ανηγμένο στη δομημένη επιφάνεια.

Σενάρια βάσει των καμπυλών τρωτότητας συναρτήσει της S_d

Αντίστοιχη με την παραπάνω διαδικασία ακολουθήθηκε και στη δεύτερη σειρά σεναρίων σεισμικής διακινδύνευσης χρησιμοποιώντας τις καμπύλες τρωτότητας που προκύπτουν συναρτήσει της φασματικής μετακίνησης S_d . Στο **Σχήμα 10** παρουσιάζεται ενδεικτικά ο σταθμισμένος δείκτης απωλειών, ενώ στο **Σχήμα 11** ο εκτιμώμενος χαρακτηρισμός των κτιρίων με βάση το σενάριο που καταστρώθηκε (λεπτομέρειες δίνονται στο τελικό παραδοτέο του SRM-DGC, Karpos et al., 2009). Το εκτιμώμενο συνολικό κόστος αποκατάστασης ανέρχεται στο ποσό των 750Μ€..

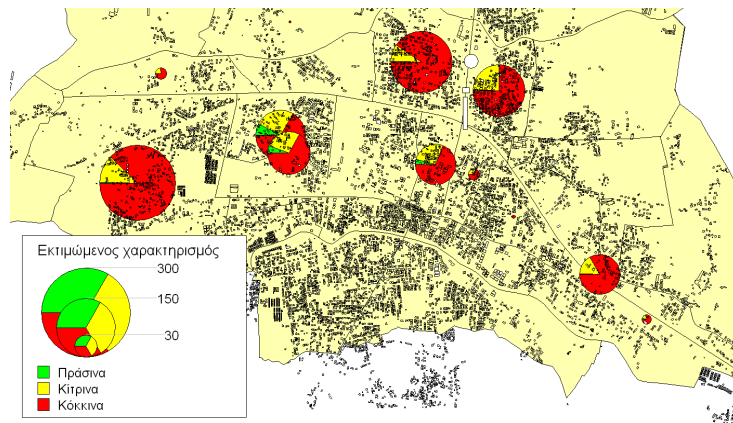


Σχήμα 10. Σταθμισμένος δείκτης απωλειών για το βασικό σεισμικό σενάριο βάσει των καμπυλών τρωτότητας που εκφράζονται συναρτήσει της S_d .

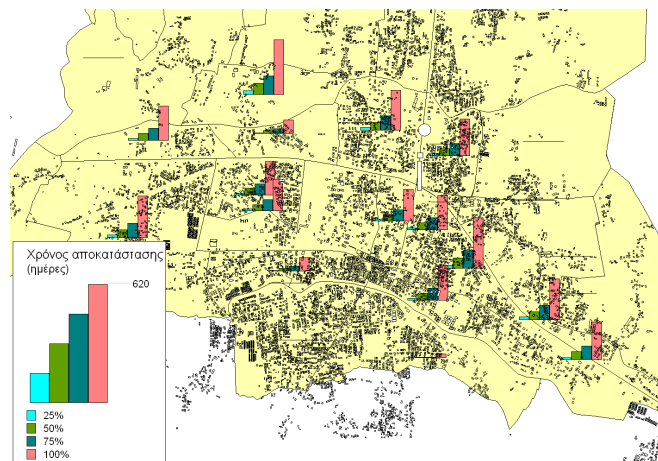
Σενάρια σεισμικής αποκατάστασης

Προκειμένου να εκτιμηθεί ο αναμενόμενος χρόνος αποκατάστασης των κτιρίων κάθε τυπολογίας για δεδομένη κάθε φορά στάθμη βλάβης χρησιμοποιήθηκαν καμπύλες αποκατάστασης που υπολογίστηκαν σε όρους μέγιστης εδαφικής

επιτάχυνσης (PGA), οι οποίες με τη σειρά τους εκτιμήθηκαν στο πλαίσιο του προγράμματος για όλες τις τυπολογίες κτιρίων συνεκτιμώντας στατιστικά στοιχεία από πραγματικούς χρόνους αποκατάστασης χαρακτηριστικών τύπων κτιρίων καθώς και την κρίση ειδικών. Οι σημαντικές αβεβαιότητες που υπεισέρχονται στο πρόβλημα διερευνήθηκαν στην περίπτωση των Γρεβενών (Κάππος και συν. 2009). Ο εκτιμώμενος χρόνος πλήρους αποκατάστασης παρουσιάζεται στο **Σχήμα 12**, που αναφέρεται στην περίπτωση όπου υπάρχει ένα διαθέσιμο συνεργείο αποκατάστασης για κάθε κτίριο που παρουσίασε βλάβες (‘αισιόδοξο σενάριο’).



Σχήμα 11. Εκτιμώμενος χαρακτηρισμός των κτιρίων για το βασικό σεισμικό σενάριο βάσει των καμπυλών τρωτότητας που εκφράζονται συναρτήσει της S_d .



Σχήμα 12. Εκτιμώμενος χρόνος για 25%, 50%, 75% και 100% αποκατάσταση της πληγείσας περιοχής

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, παρουσιάστηκαν τα κυριότερα σημεία μιας ολοκληρωμένης μελέτης τρωτότητας και σεισμικής διακινδύνευσης για το κτιριακό απόθεμα της πόλης της Düzce στην Τουρκία, η οποία είχε πληγεί σημαντικά κατά το σεισμό του 1999. Η έρευνα αυτή, η οποία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του διεθνούς ερευνητικού προγράμματος Seismic Risk Management in Düzce – Grevena – Catania (SRM-DGC) και χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση, σε συνδυασμό με το τμήμα που αφορούσε την εκτίμηση της σεισμικής διέγερσης αλλά και τα σενάρια σεισμικής διακινδύνευσης για τα δίκτυα κοινής ωφέλειας της Düzce, εκτιμάται μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο στα χέρια των τοπικών υπηρεσιών, για την ιεραρχημένη ανάλυση προσεισμικών δράσεων και την ορθολογική διαχείριση του σεισμικού κινδύνου. Επιπλέον η σημαντική βελτίωση της υφιστάμενης ηλεκτρονικής βάσης δεδομένων των στοιχείων του κτιριακού αποθέματος, ώστε εκτός της διαχείρισης του προσεισμικού και μετασεισμικού ταχέως οπτικού ελέγχου να επιτρέπει την αποτελεσματική κατάστρωση σεναρίων σεισμικής διακινδύνευσης, αποτελεί συμβολή στην ανάπτυξη ενός σύνθετου υπολογιστικού εργαλείου αντισεισμικής προστασίας και διαχείρισης κρίσεων το οποίο σήμερα δεν είναι ακόμα διαθέσιμο για τον ελληνικό χώρο.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- ANSYS. Inc. (2003) “The General Purpose Finite Element Software”, Version 8.0, Swanson Analysis Systems, Inc. International, USA, Houston.
- Doğangün, A., Tuluk, O.I., Livaoglu, R. and Acar, R. (2006) “Traditional wooden buildings and their damages during earthquakes in Turkey”, Eng. Fail. Anal., Vol. 13, pp. 981-996.
- Gulkan, P. and Langenbach, R. (2004), “The earthquake resistance of traditional timber and masonry dwellings in Turkey”, Proceedings of the 14 th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- Kappos, A.J. (2001) “Seismic vulnerability assessment of existing buildings in Southern Europe”, Keynote lecture, Convegno Nazionale “L’Ingegneria Sismica in Italia”, Potenza/Matera, Italy, CD ROM Proceedings
- Kappos, A.J. and Panagopoulos, G. (2009) “Fragility curves for reinforced concrete buildings in Greece ”, Structure and Infrastructure Engineering, in press, doi:10.1080/15732470802663771
- Kappos, A.J., Panagopoulos, G. and Penelis, G. (2008) “Development of a seismic damage and loss scenario for contemporary and historical buildings in Thessaloniki, Greece”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 28, No. 10-11, pp. 836-850.
- Kappos, A.J., Panagopoulos, G., Panagiotopoulos, C. and Penelis, G. (2006) “A hybrid method for the vulnerability assessment of R/C and URM buildings”, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 4, No. 4, pp. 391-413.

- Kappos, A.J., Stylianidis, K.C. and Pitilakis, K.D. (1998) "Development of seismic risk scenarios based on a hybrid method of vulnerability assessment", *Natural Hazards*, Vol. 17, No. 2, pp. 177-192.
- Kappos, A.J., Stylianidis, K.C., Sextos, A., Papanikolaou, V., Panagopoulos, G., Kouris, L., Goutzika, E., Panagiotopoulos, Ch. (2009) "SRM-DGC. Development and Proposition for Implementation of an Efficient Methodology and Appropriate Local Instruments for the Management, Prevention and Reduction of Seismic Risk in Düzce-Turkey, Grevena-Greece and Catania-Italy. D14: Vulnerability Analysis and Loss Estimation in Grevena", AUTH, Greece.
- Milutinovic Z. V. and Trendafiloski G. S. (2003) "WP4: Vulnerability of current buildings. Risk-UE Project: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications", <http://www.risk-ue.net>
- Mouroux. P. & Le Brun, B. (2006) "Presentation of RISK-UE Project", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 4, No. 4, pp. 323-339.
- Penelis, G.G. (2006) "An efficient approach for pushover analysis of unreinforced masonry (URM) structures", *Journal of earthquake engineering*, Vol. 10, No. 3, pp. 359-379.
- Pitilakis, K., Manou, D., Manakou, M. and Alexoudi, M. (2009) "SRM-DGC. Development and Proposition for Implementation of an Efficient Methodology and Appropriate Local Instruments for the Management, Prevention and Reduction of Seismic Risk in Düzce-Turkey, Grevena-Greece and Catania-Italy. D10: Microzonation study of Düzce", AUTH, Greece.
- Sextos, A., Kappos, A.J. and Stylianidis, K.-A. (2009) "Computer-aided Pre- and Post- earthquake assessment of buildings involving database compilation, GIS visualization and mobile data transmission", *Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 23, No.1, pp. 59-73.
- Sucuoğlu, H., Yazgan U., and Yakut A. (2007), "A Screening Procedure for Seismic Risk Assessment in Urban Building Stocks", *Earthquake Spectra*, Vol. 23, No. 2, pp. 441-458.
- Yakut, A., Özcebe, G. and Yucemen M.S. (2006), "Seismic vulnerability assessment using regional empirical data", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 35, No.10, pp. 1187-1202.
- Κάππος Α. Κουρής Λ., (2008) «Προσομοίωση παραδοσιακών κατασκευών από ξυλόπηκτη τοιχοποιία», 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, Αθήνα, εργ. αρ. 2013.
- Κάππος, Α. Σέξτος, Α., Παπανικολάου, Β., Κουρής, Λ., Παναγόπουλος, Γ., Στυλιανίδης, Κ. (2009) «Σενάρια σεισμικής διακινδύνευσης του κτιριακού αποθέματος της πόλης των Γρεβενών», 16^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Πάφος, Κύπρος, Οκτώβριος 2009.
- Κάππος, Α.Ι., Μορφίδης, Κ. και Χατζηνικολάου, Ν. (2001) «Μελέτη τρωτότητας και σεισμικής διακινδύνευσης της πόλης του Βόλου», 2^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, Θεσσαλονίκη, Τόμος Β, σελ. 163-172.
- Παναγόπουλος, Γ. και Κάππος, Α.Ι. (2006) «Υπολογισμός καμπυλών τρωτότητας για ελληνικά κτίρια από Ο/Σ», 15^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη, Τόμος Β, σελ. 564-576.