

# Τρωτότητα κτιρίων από ΟΣ και εκτίμηση του σεισμικού κίνδυνου στην Κύπρο

## Vulnerability of RC buildings and risk assessment for Cyprus

Κυριακίδης Ν.<sup>1</sup>, Πηλακούτας Κ.<sup>2</sup>, Χρυσστόμου Κ.<sup>3</sup>

*Λέξεις κλειδιά: σεισμική τρωτότητα, ψαθυρές αστοχίες, δυναμική μη-γραμμική ανάλυση, δείκτης αποτίμησης ζημιάς*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Η δημιουργία καμπύλων τρωτότητας για κτίρια από ΟΣ στην Κύπρο κρίνεται επιτακτική λόγω κυρίως του ότι ο μεγαλύτερος αριθμός των κτιρίων έχουν κατασκευαστεί χωρίς αντισεισμικό σχεδιασμό. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τον αυξημένο σεισμικό κίνδυνο που παρατηρείται τα τελευταία 10 χρόνια δημιουργεί την ανάγκη εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας για σκοπούς πρόληψης και προετοιμασίας αντιμετώπισης τυχόν ζημιών από μελλοντικούς σεισμούς. Ένα ευρύ φάσμα τύπων αστοχίας κτιρίων από ΟΣ προσομοιώθηκαν με τη χρησιμοποίηση εξειδικευμένων αναλυτικών γραμμικών μοντέλων. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στην αναλυτική προσομοίωση ψαθυρών τύπων αστοχίας που έχουν παρατηρηθεί σε κτίρια χωρίς αντισεισμικό σχεδιασμό. Τα κτίρια χωρίστηκαν σε 2 κατηγορίες με βάση το ύψος τους (2 και 4 ορόφους) και σε 3 κατηγορίες σχεδιασμού, που κυμαίνονται από πλήρη έλλειψη αντισεισμικού σχεδιασμού (“Pre”) μέχρι και αντισεισμικού σχεδιασμού βασισμένου στον Ευρωκώδικα 8. Οι αναλυτικές καμπύλες τρωτότητας παρουσιάζουν αύξηση στη ζημιά των κτιρίων χωρίς αντισεισμικό σχεδιασμό πολύ προτού το προσδοκώμενο όριο αστοχίας σε κάμψη. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι αυτό οφείλεται στην κυριαρχία των μη πλάστιμων τύπων αστοχίας. Επίσης, το σχήμα των καμπύλων τρωτότητας βρέθηκε να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το επιλεγμένο φάσμα απόκρισης του σεισμικού κινδύνου.

**ABSTRACT:** The single most important issue for analytical vulnerability assessment is the definition of an appropriate structural model, which requires sophisticated modeling capabilities to simulate brittle failure modes. A variety of failure modes were simulated by using relatively simple element models, which were calibrated based on experimental data and expert judgment. A modified capacity-spectrum procedure was developed for the estimation of structural

---

<sup>1</sup> Μεταδιδακτορικός Ερευνητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχ. Γεωπληροφορικής, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, email: [nicholas.kyriakides@cut.ac.cy](mailto:nicholas.kyriakides@cut.ac.cy)

<sup>2</sup> Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο του Sheffield, email: [k.pilakoutas@sheffield.ac.uk](mailto:k.pilakoutas@sheffield.ac.uk)

<sup>3</sup> Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχ. Γεωπληροφορικής, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, email: [c.chrysostomou@cut.ac.cy](mailto:c.chrysostomou@cut.ac.cy)

response and verified against time-history results. Key design parameters from capacity models were treated probabilistically and analytical vulnerability curves were derived for two building types and three design levels. A rapid increase in damage takes place well before the anticipated flexural failure threshold is observed in “Pre” and “Basic” design buildings. This occurs due to the dominance of brittle failure modes.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πρόσφατη παγκόσμια εμπειρία δείχνει ότι, ακόμα κι αν οι νέοι κώδικες σχεδιασμού έχουν εισαχθεί στις περισσότερες σεισμικές περιοχές, δεν συνέβαλαν στη μείωση της σεισμικής επικινδυνότητας λόγω του ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των υφιστάμενων κτιρίων έχει κατασκευαστεί πριν την εφαρμογή των σύγχρονων κωδίκων σχεδιασμού. Κατά την τελευταία δεκαετία του 20<sup>ου</sup> αιώνα το μέγεθος της σεισμικής επικινδυνότητας έφτασε τα US\$20 δισεκατομμύρια το χρόνο παγκοσμίως. Για να είναι δυνατή η πρόβλεψη και αντιμετώπιση των συνεπειών του σεισμού σε μια συγκεκριμένη περιοχή, επιβάλλεται ο καθορισμός του σεισμικού κινδύνου και της τρωτότητας των κτιρίων που βρίσκονται στην περιοχή. Ο σεισμικός κίνδυνος αφορά όλα τα φυσικά φαινόμενα που είναι αποτέλεσμα του σεισμού (όπως η ισχυρή επίγεια κίνηση, η ρευστοποίηση, τα tsunamis, οι καθιζήσεις εδάφους, ή ακόμα και οι προσκληθείσες πυρκαγιές). Η τρωτότητα ενός κτιρίου αφορά το μέγεθος της ζημιάς που είναι δυνατό να υποστεί το κτίριο από ένα δεδομένο σεισμό, και εκφράζεται ως η αναλογία του κόστους επιδιόρθωσης της ζημιάς με το κόστος αντικατάστασης του κτιρίου.

Όσον αφορά τον καθορισμό του σεισμικού κινδύνου στην Κύπρο, η διδακτορική εργασία της Κυθρεώτη (2002), που έγινε στο Πανεπιστήμιο του Sheffield, κατέληξε σε μεθοδολογία η οποία στηρίζεται στον ιστορικό κατάλογο με τους καταγεγραμμένους σεισμούς των τελευταίων 100 χρόνων. Η μεταβλητότητα των μελλοντικών σεισμών σε σχέση με τους ιστορικούς σεισμούς εισάγεται στη μεθοδολογία με πιθανολογικές μεθόδους. Για τη διαδικασία δημιουργίας μελλοντικών σεισμών χρησιμοποιούνται ως μεταβλητές, το επίκεντρο ( $\pm 15\text{km}$ ), το εστιακό βάθος ( $\pm 20\text{km}$ ) και το μέγεθος ( $\pm 0.2$ ) των σεισμών του ιστορικού καταλόγου. Το μέγεθος του σεισμικού κινδύνου σε κάθε σημείο (πόλη ή χωριό) της Κύπρου από κάθε προσομοιωμένο σεισμό υπολογίζεται με βάση τις σχέσεις απόσβεσης της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), όπως αυτές καθορίστηκαν από το Θεοδουλίδη και Παπαζάχο (1992) για τον ελλαδικό χώρο.

Μετά την εγκαθίδρυση του δικτύου επιταχυνσιογράφων στην Κύπρο το 1996, παρατηρήθηκε ένας μικρός αριθμός καταγραφών οι οποίες δόθηκαν από το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης της Κύπρου και χρησιμοποιήθηκαν σε μια προσπάθεια προσαρμογής των σχέσεων απόσβεσης στα Κυπριακά δεδομένα. Ακολουθήθηκε η διαδικασία δημιουργίας της σχέσης απόσβεσης όπως καθορίστηκε από το Θεοδουλίδη και Παπαζάχο (1992) η οποία οδήγησε στην πιο κάτω σχέση (εξίσωση 1):

$$\text{LnPGA} = 0.405 + 1.596M_s - 1.301\text{Ln}(R + 15) + 0.484S + 0.54P \quad (1)$$

Η πιο πάνω σχέση για τον καθορισμό του σεισμικού κινδύνου στην Κύπρο επιδέχεται βελτίωση στο μέλλον, αφού παρουσιαστούν περισσότερες καταγραφές. Όσον αφορά στις καμπύλες τρωτότητας των κτιρίων της Κύπρου, που αποτελούν το δεύτερο συστατικό της διαδικασίας αποτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας, η αξιολόγηση των δεδομένων από τις καταγεγραμμένες ζημιές μετά από τους πρόσφατους σεισμούς (1995 στη Λεμεσό, 1996 στην Πάφο και 1999 στη Γεράσα), δεν πρόσφεραν τις απαραίτητες πληροφορίες για τη δημιουργία τους. Επομένως, κρίθηκε επιβεβλημένη η δημιουργία τέτοιων καμπύλων βασισμένων σε αναλυτικές μεθόδους.

## **ΚΤΙΡΙΑ ΑΠΟ ΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ**

Η δημιουργία μιας μεθοδολογίας για τον καθορισμό αναλυτικών καμπύλων τρωτότητας για τα κτίρια της Κύπρου απαιτεί αρχικά τη διερεύνηση της συμπεριφοράς τέτοιων κτιρίων όπως επίσης και τον καθορισμό των αναλυτικών μεθόδων προσομοίωσης και αποτίμησης της τρωτότητας τους.

Η σημαντικότερη παράμετρος για την ακριβή προσομοίωση της μη γραμμικής σεισμικής συμπεριφοράς των πλαισίων από ΟΣ είναι η λεπτομερής μοντελοποίηση των δομικών στοιχείων με σκοπό την προσομοίωση των συνηθισμένων τύπων αστοχίας που παρουσιάζονται. Τέτοιες αστοχίες είναι η δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα στοιχείων του πλαισίου, η ολίσθηση του οπλισμού λόγω μειωμένης συνάφειας, οι διατμητικές αστοχίες, ο τοπικός λυγισμός του οπλισμού κ.α

Για να εξεταστεί πειραματικά η συμπεριφορά των κτιρίων με ελλιπή αντισεισμικό σχεδιασμό και να διασφαλιστεί η δυνατότητα αναλυτικής προσομοίωσής τους, η ερευνητική ομάδα 'Καινοτομία Κατασκευών' (Construction Innovation) του Πανεπιστημίου του Sheffield δέχθηκε χορηγία από την Ευρωπαϊκή Ένωση, για να συμμετάσχει στη σεισμική δοκιμή ενός δώροφου πλαισίου από ΟΣ (ECOLEADER PROJECT No 2 - SEISMIC TESTS ON A REINFORCED CONCRETE BARE FRAME WITH FRP RETROFITTING, 2004). Η δοκιμή έγινε στο εργαστήριο σεισμικών ερευνών EMSI (d'Etudes De Mecanique Sismique) στο σεισμικό κέντρο CEA (Commissariat à l'Energie Atomique) στο Saclay της Γαλλίας (Chaudat, 2005).

Το πλαίσιο σχεδιάστηκε, για να αντιπροσωπεύει τα κτίρια που κατασκευάστηκαν χωρίς αντισεισμικό σχεδιασμό. Τέτοια κτίρια αποτελούν την πλειονότητα των κατασκευών σε πολλές μεσογειακές χώρες, όπως και η Κύπρος. Εξαιτίας των ελλείψεων στο σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση των στοιχείων τους, τα κτίρια αυτά παρουσιάζουν αυξημένη τρωτότητα. Μετά από πρόσφατους σεισμούς παρατηρήθηκε ότι τα πλαίσια χωρίς αντισεισμικό σχεδιασμό, παρουσιάζουν ψαθυρές αστοχίες, όπως αυτές που αναφέρονται στην αρχή της ενότητας. Επομένως, η αναλυτική προσομοίωση της συμπεριφοράς του συγκεκριμένου πλαισίου και η σύγκρισή του με τα εργαστηριακά αποτελέσματα, αναμένεται να

πιστοποιήσει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης αναλυτικών μεθόδων για τη δημιουργία καμπύλων τρωτότητας.

### **Λεπτομέρειες σχεδιασμού του πλαισίου**

Η γεωμετρία του πλαισίου συνοψίζεται ως εξής:

- Συνολικό ύψος του δείγματος: 6.87m
- 4 τετραγωνικές στήλες: τμήμα 260mm
- 2 τετραγωνικές πλάκες: πάχος 120mm και πλάτος 4.26m
- 4 ακτίνες ανά πλάκα: πάχος 400mm και πλάτος 260mm

Το βάρος του πλαισίου υπολογίστηκε γύρω στους 20 τόνους. Πρόσθετες μάζες τοποθετήθηκαν στο κτίριο για τη δοκιμή υπό μορφή δύο χαλύβδινων πλακών, με μάζα ίση με 9 τόνους έκαστη, και συνδέθηκαν με το πλαίσιο με σκοπό να επιτρέπεται η ελεύθερη περιστροφή της πλάκας. Επομένως, η ακαμψία των επιρόσθετων πλακών δεν αποτρέπει την παραμόρφωση της πλάκας και κατά συνέπεια και των δοκών. Ο οπλισμός των μελών του πλαισίου φαίνεται στα πιο κάτω σημεία:

- Κυρίως οπλισμός:
  - Κολώνες: 1<sup>ος</sup> όροφος: 3φ14 + 2φ14 + 3φ14
  - 2<sup>ος</sup> όροφος: 2φ14 + 2φ14
  - Δοκοί: πάνω και κάτω οπλισμός: 8φ14
- Διατμητικός οπλισμός:
  - Κολώνες: συνδετήρες φ 6/200
  - Δοκοί: συνδετήρες φ 8/300
- Οπλισμός πλάκας: # φ9 mm/100

Όπως φαίνεται στα πιο πάνω σημεία, ο μεν οπλισμός τόσο στις κολώνες, όσο και στις δοκούς δεν ακολουθεί τα ελάχιστα επιτρεπτά όρια των σύγχρονων αντισεισμικών κωδίκων. Ο υπολογισμός τους δεν λαμβάνει υπόψη σεισμικά φορτία, αφού σε τέτοια περίπτωση ο απαιτούμενος οπλισμός, κυρίως στις κολώνες, θα ήταν περισσότερος και δεν θα υπήρχε μείωση οπλισμού στον 2<sup>ο</sup> όροφο. Επίσης, οι διαστάσεις των μελών (κολώνες και δοκοί) που φαίνονται στην αρχή της υποενότητας δεν ακολουθούν τις διατάξεις του αντισεισμικού σχεδιασμού, που επιβάλλουν μεγαλύτερη αντοχή στις κολώνες σε σχέση με τις δοκούς. Επίσης, η αγκύρωση του οπλισμού των κολώνων, που φαίνεται στο σχήμα 1 με τη συγκόλληση ράβδων οπλισμού, δεν συνάδει με τις διατάξεις του μοντέρνου αντισεισμικού σχεδιασμού.

Ο ανεπαρκής σχεδιασμός του πλαισίου ο οποίος βασίστηκε σε παλιούς Ιταλικούς κώδικες σχεδιασμού, θεωρείται αντιπροσωπευτικός της διαδικασίας σχεδιασμού και της διαστασιολόγησης που χρησιμοποιήθηκε στην Κύπρο τη δεκαετία του '70 και '80, κατά την οποία κατασκευάστηκε το μεγαλύτερο μέρος του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος.



**Σχήμα 1.** Λεπτομέρεια αγκύρωσης του κυρίως οπλισμού των κολώνων στο πάνω μέρος των κόμβων του κάθε ορόφου.

Λεπτομερέστερη περιγραφή της εργαστηριακής δοκιμής στο πλαίσιο υπάρχει στην εργασία του Κυριακίδη (2007).

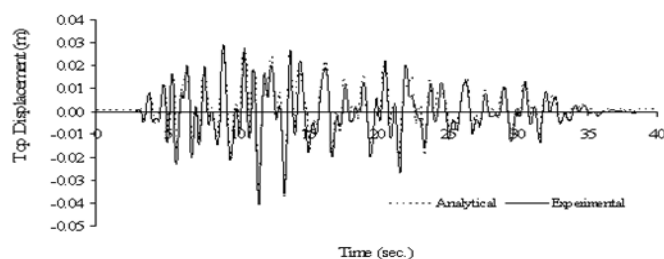
### **Προσομοίωση πειραματικών αποτελεσμάτων**

Η πειραματική δοκιμή του πλαισίου έγινε για πέντε επίπεδα μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (0.05g, 0.1g, 0.2g, 0.3g και 0.4g). Η αναλυτική προσομοίωση των αποτελεσμάτων έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού DRAIN-3d. Το συγκεκριμένο λογισμικό προσφέρει τη δυνατότητα προσομοίωσης των μελών αλλά και των κόμβων με μικρό-μοντέλα (micro models) δύναμης-παραμόρφωσης. Η καμπτική συμπεριφορά του κάθε μέλους υπολογίζεται από το πρόγραμμα με βάση τη διαστασιολόγηση της διατομής (fibre element) και τα μοντέλα συμπεριφοράς των υλικών (οπλισμού και σκυροδέματος). Το κάθε μέλος χωρίζεται σε μικρότερα κομμάτια για την καλύτερη προσομοίωση των πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα. Ο κύριος λόγος όμως που επιλέχθηκε το συγκεκριμένο λογισμικό είναι η δυνατότητα προσομοίωσης με μικρο-μοντέλα δύναμης-παραμόρφωσης των επιπρόσθετων παραμορφώσεων, λόγω διατμητικών δυνάμεων και λόγω μείωσης της συνάφειας μεταξύ των υλικών. Η διαβάθμιση των μικρο-μοντέλων αντοχής για τις πιο πάνω αστοχίες απαιτεί τον καθορισμό της αντοχής τους με βάση τη διαστασιολόγηση των μελών και την αντοχή των υλικών αλλά και την μετέπειτα φθίνουσα συμπεριφορά τους. Λεπτομερής περιγραφή των μικρο-μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του πλαισίου περιέχεται στην εργασία του Κυριακίδη (2007).

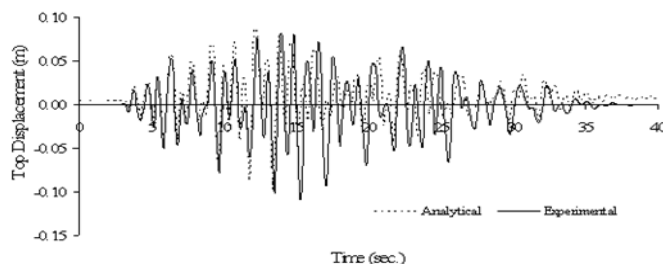
### **Σύγκριση αποτελεσμάτων δυναμικής ανάλυσης**

Στο σχέδιο 2 γίνεται σύγκριση της ιστορίας των πειραματικών με τα αναλυτικά αποτελέσματα της μετατόπισης του κόμβου στο 2<sup>ο</sup> όροφο για τη δοκιμή σε 0,1g. Όπως φαίνεται από το σχέδιο, τα αναλυτικά αποτελέσματα ακολουθούν με μεγάλη ακρίβεια τα πειραματικά. Δυστυχώς η ταύτιση αυτή δεν παρουσιάζεται στη σύγκριση της δόκιμης σε 0,2g. Είναι εμφανές από το σχέδιο 3 ότι λίγο μετά το 15<sup>ο</sup> δευτερολεπτο τα αναλυτικά αποτελέσματα αποτυγχάνουν να

ακολουθήσουν τόσο το μέγεθος της μετατοπίσης, όσο και την περίοδο ταλάντωσης της κατασκευής. Επομένως, γίνεται μια πιο λεπτομερής εξέταση της συμπεριφοράς στο σημείο αυτό με τη βοήθεια των αναλυτικών παραμορφώσεων του 2<sup>ου</sup> ορόφου, που φαίνονται στο σχέδιο 4. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4, λίγο πριν το 15<sup>ο</sup> δευτερολεπτο οι κολώνες του 2<sup>ου</sup> ορόφου έχουν φτάσει στο όριο διαρροής του οπλισμού. Το γεγονός ότι η αναλυτική απόκριση του πλαισίου δεν ακολουθεί την πειραματική μετά από αυτό το σημείο ίσως να οφείλεται στη μείωση της συνάφειας του οπλισμού στις κολώνες του 2<sup>ου</sup> ορόφου. Επομένως, οι επιπλέον παραμορφώσεις, λόγω της μειωμένης συνάφειας, συμπεριλήφθηκαν στο προσομοίωμα με τη βοήθεια μικρο-μοντέλου στο πάνω μέρος των κολώνων του 2<sup>ου</sup> ορόφου και η ανάλυση επαναλήφθηκε.

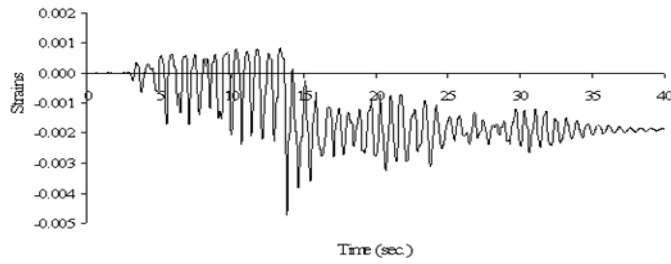


**Σχήμα 2.** Σύγκριση αναλυτικών-πειραματικών αποτελεσμάτων για τη δόκιμη σε 0.1g

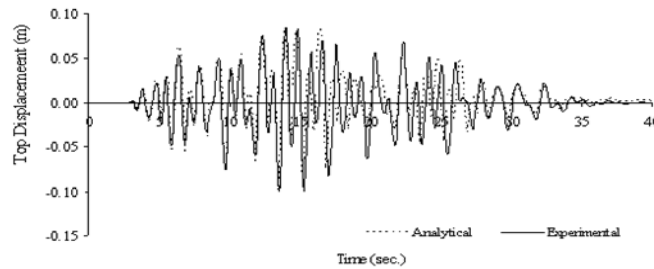


**Σχήμα 3.** Σύγκριση αναλυτικών-πειραματικών αποτελεσμάτων για τη δόκιμη σε 0.2g

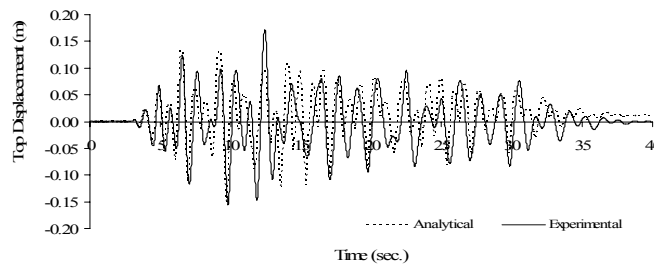
Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη χρήση του μικρο-μοντέλου (micro model) συνάφειας στα άκρα των κολώνων φαίνεται στο σχέδιο 5. Η αναλυτική απόκριση του πλαισίου παρουσιάζει ικανοποιητική ταύτιση με την πειραματική, κάτι που ενισχύει την παραδοχή ότι η συνάφεια μειώνεται μετά τη διαρροή του οπλισμού. Η εγκυρότητα της παραδοχής αυτής θα εξεταστεί με βάση τα αποτελεσματα της επόμενης δόκιμης. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων για τη δόκιμη σε 0,3g φαίνεται στο σχέδιο 6. Η ασυμφωνία των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αναλυτικά είναι εμφανής τόσο όσον αφορά στο μέγεθος της απόκρισης όσο και όσον αφορά στην περίοδο ταλάντωσης του πλαισίου



**Σχήμα 4.** Χρονοϊστορία παραμόρφωσης σε κολώνα του 2<sup>ου</sup> ορόφου για τη δόκιμη σε 0.2g

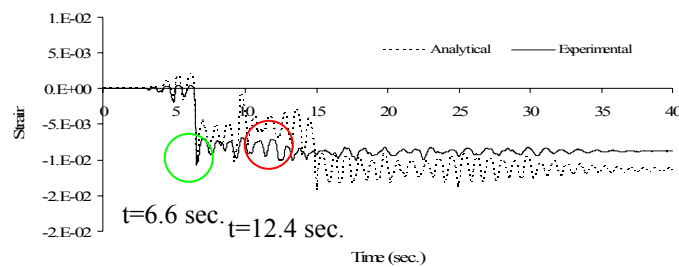


**Σχήμα 5.** Σύγκριση αναλυτικών-πειραματικών αποτελεσμάτων για τη δόκιμη σε 0.2g συμπεριλαμβανομένων των μετατοπίσεων, λόγω μειωμένης συνάφειας.



**Σχήμα 6.** αναλυτικών-πειραματικών αποτελεσμάτων για τη δόκιμη σε 0.3g

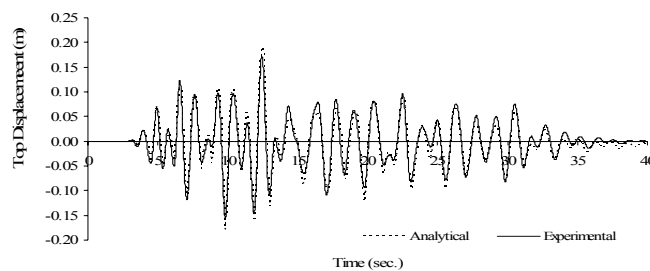
Σύγκριση



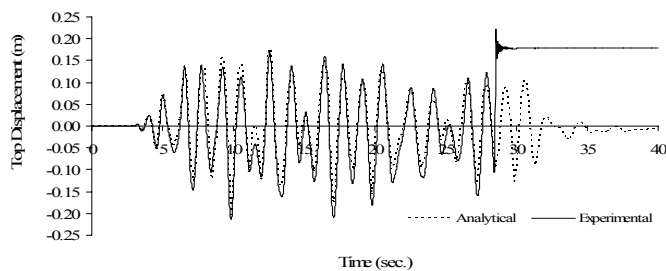
**Σχήμα 7.** Χρονοϊστορία παραμόρφωσης σε κολώνα του 2<sup>ου</sup> ορόφου για τη δόκιμη σε 0.3g

Όπως και στη σύγκριση της προηγούμενης δόκιμης, γίνεται έλεγχος των παραμορφώσεων του οπλισμού στο πάνω μέρος των κολώνων του 2<sup>ου</sup> ορόφου. Η σύγκριση των παραμορφώσεων στο σχέδιο 7 δείχνει ότι, ενώ η ανάλυση ακολουθεί σωστά τη διαρροή του οπλισμού γύρω στο 6<sup>ο</sup> δευτερολεπτο, κατά την επόμενη περίπτωση μέγιστης μετατόπισης, οι πειραματικές παραμορφώσεις είναι σημαντικά μικρότερες από τις αναλυτικές. Η παρατήρηση αυτή ενισχύει την προηγούμενη παραδοχή για ύπαρξη μειωμένης συνάφειας του οπλισμού των κολώνων του 2<sup>ου</sup> ορόφου. Η επανάληψη της ανάλυσης με την προσθήκη του μικρο-μοντέλου συνάφειας δείχνει βελτίωση στην ταύτιση των αποτελεσμάτων των μετατοπίσεων (εικόνα 8). Η σύγκριση των αποτελεσμάτων για την τελευταία δόκιμη σε 0,4g παρουσίασε τα ίδια προβλήματα με τις προηγούμενες. Η προσομοίωση της συμπεριφοράς του πλαισίου κατέστη δυνατή με την προσθήκη του μικρο-μοντέλου συνάφειας και φαίνεται στο σχήμα 9.

Με δεδομένη πλέον τη δυνατότητα προσομοίωσης της συμπεριφοράς κτιρίων από ΟΣ με τα μοντέλα αστοχιών που περιέχονται στο DRAIN-3d και κυρίως κτιρίων χωρίς αντισεισμικό σχεδιασμό, που αποτελούν την πλειονότητα, η εργασία προχωρά στη δημιουργία καμπύλων τρωτότητας.



**Σχήμα 8.** Σύγκριση αναλυτικών-πειραματικών αποτελεσμάτων για τη δόκιμη σε 0.3g συμπεριλαμβανομένων των μετατοπίσεων, λόγω μειωμένης συνάφειας.



**Σχήμα 9.** Σύγκριση αναλυτικών-πειραματικών αποτελεσμάτων για τη δόκιμη σε 0.3g συμπεριλαμβανομένων των μετατοπίσεων, λόγω μειωμένης συνάφειας



## ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ

Η μεθοδολογία για τη δημιουργία καμπύλων τρωτότητας χωρίζεται σε 2 κύρια σημεία:

1. ο καθορισμός της διαδικασίας για την ακριβή πρόβλεψη της απόκρισης κτιρίων από ΟΣ για διάφορα επίπεδα σεισμικού κινδύνου και
2. ο καθορισμός του δείκτη αποτίμησης της ζημιάς με βάση την απόκριση του κτιρίου σε κάθε επίπεδο σεισμικού κινδύνου.

Για τον αναλυτικό καθορισμό της απόκρισης του κτιρίου για ένα συγκεκριμένο επίπεδο σεισμικού κινδύνου, η δυναμική μη-γραμμική ανάλυση, όπως χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, αποτελεί την πιο ακριβή μέθοδο. Στην περίπτωση όμως της δημιουργίας αναλυτικών καμπύλων τρωτότητας για ένα εύρος επιπέδων σεισμικού κινδύνου, η μέθοδος αυτή κρίνεται χρονοβόρα και περίπλοκη, καθότι απαιτεί τη χρησιμοποίηση ενός μεγάλου αριθμού επιταχυνσιογραφημάτων. Η εναλλακτική μέθοδος που καθιερώθηκε από το Freeman και βασίζεται στη σύγκριση της καμπύλης αντοχής του κτιρίου με το φάσμα απόκρισης του σεισμικού κινδύνου στην υπό εξέταση περιοχή, αποτελεί πλέον τη συνήθη διαδικασία για τον καθορισμό της σεισμικής απόκρισης κτιρίων. Η πιο διαδεδομένη παραλλαγή αυτής της μεθόδου με κωδικό ονομασίας «μέθοδος N2» έχει προταθεί από το Fajfar (1999) και χρησιμοποιεί το ανελαστικό φάσμα απόκρισης. Σε πρώτο στάδιο η ελαστική απόκριση του κτιρίου υπολογίζεται ως το σημείο επαφής της ευθείας που αντιπροσωπεύει την αρχική περίοδο ταλάντωσης του κτιρίου με το ελαστικό φάσμα απόκρισης. Σε δεύτερο στάδιο υπολογίζεται η μείωση της σεισμικής καταπόνησης με βάση την πλαστιμότητα του κτιρίου, για να καθοριστεί το σημείο πάνω στην καμπύλη αντοχής που αντιπροσωπεύει την πραγματική απόκριση του κτιρίου στο συγκεκριμένο φάσμα.

Μια πρόσφατη παραλλαγή της μεθόδου παρουσιάζεται στο FEMA 440 (2005) με την ονομασία «μέθοδος MADRS». Η λεπτομερής διαδικασία που ακολουθείται περιγράφεται στην εργασία του Κυριακίδη (2007). Η κύρια διαφορά της από την μέθοδο του Fajfar (1999) εστιάζεται στη διαδικασία μείωσης της σεισμικής καταπόνησης η οποία βασίζεται από τη μια στην πλαστιμότητα του κτιρίου κι από την άλλη στην αύξηση της ιξώδους απόσβεσης του κτιρίου που παρατηρείται με την αύξηση της ζημιάς στο κτίριο.

Μετα από σύγκριση των αποτελεσμάτων των δυο αυτών μεθόδων με ακριβή αποτελεσματα από δυναμική μη-γραμμική ανάλυση (Κυριακίδης, 2007) η μέθοδος του FEMA 440 (2005) παρουσιάζει αυξημένη ακρίβεια στην πρόβλεψη της απόκρισης του κτιρίου. Επομένως, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό των καμπύλων τρωτότητας.

### Δείκτης αποτίμησης ζημιάς

Για τον καθορισμό του μεγέθους της ζημιάς σε κάθε σημείο απόκρισης πάνω στην καμπύλη αντοχής του κτιρίου υπολογίζεται η ελαστική περίοδος του αντιστοίχου μονοβάθμιου συστήματος (SDOF) με βάση την εξίσωση 2.

$$T_{\text{sec}} = 2\pi \sqrt{\left(\frac{SD_i}{SA_i}\right)} \quad (2)$$

Το μέγεθος της ζημιάς σε κάθε σημείο απόκρισης καθορίζεται ως ο λόγος της υπολογιζόμενης περιόδου με την εξίσωση 2 ως προς την αρχική ελαστική περίοδο του κτιρίου. Η μορφή του δείκτη ζημιάς φαίνεται στην εξίσωση 3.

$$DI = 100 \left( \frac{T_{\text{sec}} - T_{\text{initial}}}{T_{100} - T_{\text{initial}}} \right) \quad (3)$$

Επειδή ο δείκτης ζημιάς αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της απόκρισης του κτιρίου (λόγω της εκθετικής αύξησης της περιόδου  $T_{\text{sec}}$ ), θεωρείται ότι είναι αντίστοιχος με το επίπεδο της ζημιάς. Με άλλα λόγια, όταν ο δείκτης είναι ίσος με  $DI=100$  το κτίριο χρειάζεται αντικατάσταση, ενώ για την τιμή  $DI=0$  δεν επιβάλλεται καμία επιδιόρθωση. Οι ενδιάμεσες τιμές του  $DI$  δείχνουν το λόγο του κόστους επιδιόρθωσης σε σχέση με το κόστος αντικατάστασης.

### Δημιουργία πιθανολογικών καμπύλων τρωτότητας

Η διαδικασία δημιουργίας καμπύλων τρωτότητας εφαρμόστηκε σε 2 πρότυπα προσομοιώματα κτιρίων με ύψος 2 και 4 ορόφων. Ο σχεδιασμός των προσομοιωμάτων έγινε, για να αντιπροσωπεύει 3 περιόδους κώδικων σχεδιασμού. Τα προσομοιώματα αφορούν κτίρια με πλήρη έλλειψη αντισεισμικού σχεδιασμού ("Pre"), κτίρια που σχεδιάστηκαν με χαμηλό επίπεδο αντοχής σε οριζόντιες δυνάμεις ("Basic"), και κτίρια που σχεδιάστηκαν και διαστασιολογήθηκαν με βάση τον μοντέρνο Ευρωπαϊκό Κανονισμό (EC8, 2004). Οι βασικοί πιθανοτικοί παράμετροι σχεδιασμού επιλέχθηκαν με βάση τα αναλυτικά μοντέλα των διαφόρων τύπων αστοχίας (καμπτική, διατμητική, έλλειψη συνάφειας, τοπικός λυγισμός κ.α). Το σύνολο των παραγόντων για τη δημιουργία των προσομοιωμάτων φαίνεται στον Πίνακα 1. Για κάθε βασική παράμετρο καθορίστηκαν τιμές για τη δημιουργία της στατιστικής κατανομής του οι οποίες είναι αντιπροσωπευτικές της περιόδου σχεδιασμού. Στον πίνακα 2 φαίνεται ο μέσος όρος και η διασπορά για την αντοχή σκυροδέματος.

Οι στατιστικές κατανομές τους καθορίστηκαν με τη βοήθεια της προχωρημένης δειγματοληπτικής τεχνικής «Latin Hypercube Sampling».

**Πίνακας 1.** Παράμετροι διαβάθμισης επιλεγμένων τύπων αστοχίας

Τύπος αστοχίας	Πιθανοτικοί παράμετροι	Προσδιοριστικοί παράμετροι
Καμπτική:	$f_c, f_y$	$b, d, k = \frac{f_{ult}}{f_y}, \epsilon_{su}$
Διατμητική:	$f_c, s$	$b, d, f_{yw}, \text{saturated displacements (SC and ST)}$
Συνάφεια:	$f_{ct}, s, l$	Saturated slip (SC and ST)
Λυγισμός:	$s, f_y$	$f_{yw}, d_{bw}$

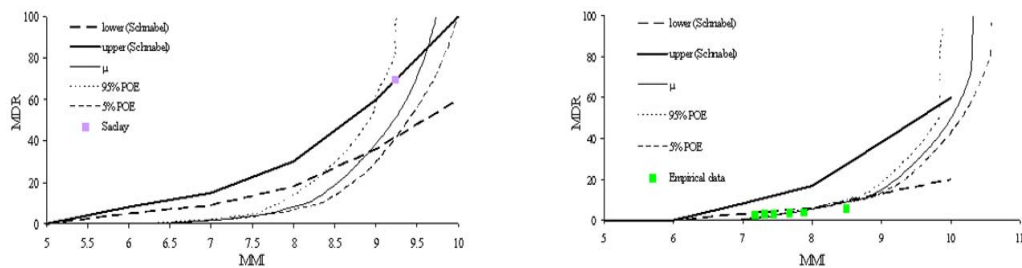
**Πίνακας 2.** Στατιστικά δεδομένα της αντοχής σκυροδέματος ανά περίοδο

		$f_c$ (MPa)			
		(normal distribution)			
	Design	Mean ( $\mu$ )	$\sigma$	min	max
Pre-seismic	20	30	8	$\mu-3.1\sigma$	$\mu+3.1\sigma$
Basic seismic	25	35	7	$\mu-3.1\sigma$	$\mu+3.1\sigma$
Modern seismic	35	45	6	$\mu-3.1\sigma$	$\mu+3.1\sigma$

Η λεπτομερειακή επεξήγηση της διαδικασίας δημιουργίας πιθανολογικών καμπύλων τρωτότητας υπάρχει στην εργασία του Κυριακίδη (2007).

## ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ

Οι αναλυτικές καμπύλες τρωτότητας παρουσιάζουν αυξημένη ζημιά στα κτίρια χωρίς αντισεισμικό σχεδιασμό πολύ πριν το προσδοκώμενο όριο αστοχίας σε κάμψη. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι αυτό οφείλεται στην κυριαρχία των μη πλαστικών τύπων αστοχίας. Επίσης, το σχήμα των καμπύλων τρωτότητας βρέθηκε να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το επιλεγμένο φάσμα απόκρισης του σεισμικού κινδύνου. Η χρησιμοποίηση του φάσματος Type 2 (EC8, 2004) βρέθηκε να αντιπροσωπεύει καλύτερα το σεισμικό κίνδυνο στην Κύπρο.



**Σχήμα 10.** Σύγκριση καμπύλων τρωτότητας για «Pre» και «Basic» κτίρια με τις αντίστοιχες του Schnabel.

Στο σχήμα 10 φαίνεται η σύγκριση των αναλυτικών καμπύλων τρωτότητας κτιρίων χωρίς αντισεισμικό και με ελάχιστο αντισεισμικό σχεδιασμό με τις μοναδικές καμπύλες τρωτότητας που δημιουργήθηκαν στο παρελθόν για την Κύπρο. Οι καμπύλες αυτές είναι αποτέλεσμα της εργασίας του Schnabel (1987). Και στις δυο περιπτώσεις οι καμπύλες του Schnabel (1987) υποτιμούν την ραγδαία αύξηση της ζημιάς (μετα το  $MDR=50\%$ ) που παρατηρείται σε τέτοια κτίρια λόγω της παρουσίας ψαθυρών αστοχιών πολύ πριν φτάσουν την καμπτική αντοχή των κολώνων. Επομένως, η χρησιμοποίηση μικρο-μοντέλων για την προσομοίωση των ψαθυρών αστοχιών κτιρίων από ΟΣ χωρίς αντισεισμικό σχεδιασμό φαίνεται να είναι το πιο σημαντικό στοιχείο για την ακριβή αποτύπωση του σχήματος των καμπύλων τρωτότητας.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Chaudat T., Garnier C., and Poupin S. (2005) Ecoleader project No.2-Seismic tests on an RC frame with FRP retrofitting-Tests report. SEMT/EMSI/RT/05-006/A.

Fajfar P. (1999) Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 28, 979-993.

FEMA 440 (2005) Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, Applied Technology Council (ATC-55 Project), Redwood City, California.

Schnabel W.E. (1987) The Accumulation of potential in Cyprus. Paper presented at the Number 13: Earthquake risk and insurance - e.g. in Cyprus. Nicosia, Cyprus.

Θεοδουλίδης Ν. και Παπαζάχος Β. (1992) Dependence of strong ground motion on magnitude-distance, site geology and macroseismic intensity for shallow earthquakes in Greece: I, Peak horizontal acceleration, velocity and displacement, *journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 11, 387-402

Κυριακίδης, Ν., «Vulnerability of RC buildings and Risk Assessment for Cyprus», Διδακτορική Διατριβή (υπό την επίβλεψη του Καθ. Κ. Πιλακούτα), Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Πανεπιστήμιο του Sheffield, Ην. Βασίλειο (2007).

Κυθρεώτη, Στ., «Earthquake Risk Assessment and Management», Διδακτορική Διατριβή (υπό την επίβλεψη του Καθ. Κ. Πιλακούτα), Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Πανεπιστήμιο του Sheffield, Ην. Βασίλειο (2002).