

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Α. Π. Θ.**

**ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΑΙ  
ΨΕΥΔΟΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ**

**ΕΚΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

**ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΩΣ ΥΠΕΥΘΥΝΟΙ**

*Καρακώστας Χρήστος, Κύριος Ερευνητής ΙΤΣΑΚ (Συντονιστής)  
Κάππος Ανδρέας, Καθηγητής ΑΠΘ*

**ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2003**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΨΕΥΔΟΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ**

**(Θεματικές ενότητες: Αντισεισμική Τεχνολογία – Αντισεισμικός σχεδιασμός κατασκευών, Σεισμική αποτίμηση κατασκευών, Υποστήριξη και τεκμηρίωση του ΕΑΚ)**

**Εισαγωγή**

Το ερευνητικό πρόγραμμα με τίτλο : ‘**Ανάπτυξη Ανελαστικών Φασμάτων Μετακινήσεων και Ψευδοεπιταχύνσεων για τον Ελληνικό Χώρο**’ ανατέθηκε από τον Οργανισμό Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ) από κοινού στο Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ) και στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (ΤΠΜ-ΑΠΘ). Η συμβατική ημερομηνία έναρξης της εκπόνησης του ερευνητικού προγράμματος ήταν η 1/12/2000, και η συνολική διάρκεια του 24 μήνες.

Η ομάδα εργασίας του ερευνητικού προγράμματος συγκροτήθηκε από Ερευνητές του Ινστιτούτου Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών και μέλη ΔΕΠ του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ., όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί.

| Φορέας  | Ερευνητής                                | Ειδικότητα                     |
|---|--|--------------------------------|
| Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ) | Καρακώστας Χρήστος, Δρ. Πολιτικός Μηχ.   | Κύριος Ερευνητής, Δν/ση Α.Κ.*  |
|   | Λεκίδης Βασίλης, Δρ. Πολιτικός Μηχ.      | Κύριος Ερευνητής, Δν/ση Α.Κ.*  |
|   | Κλήμης Νικόλαος, Δρ. Πολιτικός Μηχ.      | Κύριος Ερευνητής, Δν/ση Εδ.*   |
|   | Μάργαρης Βασίλης, Δρ. Σεισμολόγος        | Κύριος Ερευνητής, Δν/ση Τ.Σ.*  |
|   | Θεοδουλίδης Νικόλαος, Δρ. Σεισμολόγος    | Κύριος Ερευνητής, Δν/ση Τ.Σ.*  |
| Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.                                      | Κάππος Ανδρέας, Δρ. Πολιτικός Μηχ.       | Καθηγητής, Ε.Σ.Σ.**            |
|   | Αθανασιάδου Χριστίνα, Δρ. Πολιτικός Μηχ. | Επιστημονικός Συνεργ, Ε.Σ.Σ.** |

\*Διευθύνσεις ΙΤΣΑΚ : Α.Κ. – Αντισεισμικών Κατασκευών

Εδ. – Εδαφοδυναμικής

Τ. Σ. – Τεχνικής Σεισμολογίας

\*\* Ε.Σ.Σ. – Εργαστήριο Σιδηροπαγούς Σκυροδέματος Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

Επιστημονικώς υπεύθυνοι του προγράμματος ήσαν εκ μέρους του ΙΤΣΑΚ ο κ. Καρακώστας Χρήστος (συντονιστής του προγράμματος), ενώ εκ μέρους του ΤΠΜ-ΑΠΘ ο κ. Κάππος Ανδρέας.

## Αντικείμενο της ερευνητικής πρότασης

Η παρούσα πρόταση εστιάζεται στην ανάπτυξη κατάλληλων για τον Ελληνικό χώρο ελαστικών και ανελαστικών φασμάτων ψευδοεπιταχύνσεων και μετακινήσεων, καθώς και των αντίστοιχων συντελεστών συμπεριφοράς ( $q_u$ ) και αναγωγής της μετακίνησης ( $\eta$ ). Τα αποτελέσματα του προγράμματος μπορεί να χρησιμοποιηθούν τόσο για το σχεδιασμό νέων κατασκευών (υποστήριξη - τεκμηρίωση του ΕΑΚ), όσο και για την αποτίμηση υφισταμένων κατασκευών με βάση σύγχρονες υπολογιστικές μεθόδους (προσαρμογή στα ελληνικά δεδομένα – τεκμηρίωση του Αμερικανικού Κανονισμού FEMA 273). Η πρόταση εστιάζεται σε σεισμικές κινήσεις τυπικές για τον Ελληνικό χώρο, ενώ τμήματα των αποτελεσμάτων της (κυρίως τα αναφερόμενα στα φάσματα μετακινήσεων σχεδιασμού και στο συντελεστή  $\eta$ ) αποτελούν πρωτότυπες συμβολές στη διεθνή βιβλιογραφία.

## Σύντομη επισκόπηση γνωστικού πεδίου

Παρότι η έννοια του ανελαστικού φάσματος ψευδοεπιταχύνσεων για σταθερή πλαστιμότητα (‘φάσμα αντοχής’) είναι γνωστή από τη δεκαετία του ’60 και (αμέσως ή εμμέσως) έχει χρησιμοποιηθεί για τον ορισμό του φάσματος σχεδιασμού σε πολλούς κανονισμούς (μεταξύ των οποίων και ο ΕΑΚ), η επικέντρωση του ενδιαφέροντος στα ανελαστικά φάσματα μετακινήσεων για σταθερή πλαστιμότητα είναι πολύ πρόσφατη. Μια συστηματική διερεύνηση του προβλήματος των ανελαστικών φασμάτων για καταγραφές σε διάφορες εδαφικές συνθήκες παρουσιάστηκε από τον Miranda (1993), με έμφαση και πάλι στα φάσματα αντοχής, αλλά και κάποια στοιχεία για τα φάσματα μετακινήσεων.

Τα τελευταία χρόνια (δεκαετία ’90) τίθενται διεθνώς ως προτεραιότητες του αντισεισμικού προβλήματος δύο ζητήματα:

- Ο σχεδιασμός για ελεγχόμενο επίπεδο παραμόρφωσης και με τις μετακινήσεις ως κύρια παράμετρο (deformation controlled design, displacement based design)
- Η αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς υφισταμένων κατασκευών με τη βοήθεια σύγχρονων υπολογιστικών εργαλείων, με έμφαση στην ανελαστική στατική (pushover) ανάλυση.

Το φάσμα των μετακινήσεων (ελαστικό και ανελαστικό) παίζει καθοριστικό ρόλο σε σχέση και με τα δύο παραπάνω ζητήματα. Στο σχεδιασμό με βάση τις μετακινήσεις η βάση του σχεδιασμού είναι μια σειρά φασμάτων μετακινήσεων για διάφορα επίπεδα απόσβεσης (κατά κανόνα πολύ ψηλότερα του 5% που χρησιμοποιούν ο ΕΑΚ και οι λοιποί σύγχρονοι κανονισμοί), ενώ η ανελαστική στατική ανάλυση έχει νόημα όταν αναφέρεται σε μια μετακίνηση της κατασκευής που ρεαλιστικά μπορεί να εκτιμηθεί μόνο από ένα κατάλληλο φάσμα μετακινήσεων. Οι πρόσφατες εργασίες των Bommer & Elnashai (1999) και Tolis and Faccioli (1999) αποτελούν τις πρώτες ουσιαστικές συμβολές προς την πρώτη κατεύθυνση, ενώ η επίσης πρόσφατη εργασία του Fajfar (1999) αποτελεί μία σε βάθος διερεύνηση του προβλήματος του συνδυασμού της ανελαστικής στατικής ανάλυσης με κατάλληλα ανελαστικά φάσματα μετακινήσεων.

Τέλος, μια κρίσιμη παρατήρηση σε σχέση με τον Ελληνικό χώρο, είναι ότι η δουλειά πάνω στα ανελαστικά φάσματα με βάση ελληνικές καταγραφές είναι αρκετά περιορισμένη και εστιασμένη κυρίως στα φάσματα ψευδοεπιταχύνσεων. Η σχετική δημοσιευμένη δουλειά περιλαμβάνει πρόσφατες εργασίες με καθοριστική συμβολή μελών της παρούσας ερευνητικής ομάδας (Karros et al. 1998, Koliopoulos et al. 1998, Karros 1999).

## Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθείται στο παρόν έργο μπορεί να συνοψισθεί στις παρακάτω φάσεις:

1. Βασικής σημασίας για την επιτυχή εκπλήρωση του παραπάνω στόχου είναι η κατάλληλη επιλογή ενός αντιπροσωπευτικού δείγματος επιταχυνσιογραφημάτων του Ελληνικού χώρου (1η φάση του Έργου). Με βάση τόσο τη διεθνή, όσο και την προσωπική εμπειρία των μελών της ερευνητικής ομάδας σε σχετικά αντικείμενα, κρίθηκε ότι η επιλογή των επιταχυνσιογραφημάτων από τη βάση δεδομένων που διαθέτει το ΙΤΣΑΚ πρέπει να γίνει με τα παρακάτω κριτήρια :
  - Μέγεθος σεισμού ( $M_w$ ) μεγαλύτερο του 5.0 και αποστάσεις από τη σεισμική πηγή μεταξύ ~5km και ~100km.
  - Η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση να είναι μεγαλύτερη ή ίση του 0.10g ή/και ο σεισμός να έχει προκαλέσει πλησίον της καταγραφής βλάβες.
  - Με βάση τα γεωτεχνικά δεδομένα που θα συλλεχθούν, να είναι εφικτή η κατηγοριοποίηση των εδαφικών συνθηκών κατά ΕΑΚ 2000, έτσι ώστε να υπάρξουν 3 έως 4 κατηγορίες συμβατές με τον Ελληνικό Κανονισμό.

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια, προέκυψαν από τις διαθέσιμες στο ΙΤΣΑΚ βάσεις δεδομένων καταγραφών ισχυρής κίνησης 67 καταγραφές από τους 24 ισχυρούς σεισμούς των τελευταίων 20 ετών οι οποίοι έπληξαν τον Ελληνικό χώρο και καταγράφηκαν από 20 συνολικά σταθμούς του δικτύου επιταχυνσιογράφων του ΙΤΣΑΚ

2. Το δείγμα των επιταχυνσιογραφημάτων που έχει επιλεγεί κατά την 1η φάση, υφίσταται κατάλληλη επεξεργασία με βάση νεότερες τεχνικές, που σκοπό έχουν την ελαχιστοποίηση των διαφόρων σφαλμάτων που υπεισέρχονται κατά το στάδιο της ψηφιοποίησης, καθώς και αυτών που οφείλονται στον εισαγόμενο (από τα ίδια τα όργανα καθώς και το περιβάλλον) θόρυβο. Η επεξεργασία αυτή αποτελεί αντικείμενο της 2ης φάσης του Έργου
3. Κατά την επόμενη, τρίτη φάση του έργου, οι επιλεγείσες καταγραφές ταξινομούνται με βάση τις εδαφικές συνθήκες στο σταθμό καταγραφής. Από τα συλλεχθέντα γεωτεχνικά στοιχεία κατέστη δυνατή η ταξινόμηση των καταγραφών σε 3 κατηγορίες εδαφικών συνθηκών, συμβατές με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ 2000). Για λόγους πληρότητας, γίνεται επίσης μία συγκριτική παρουσίαση και αλληλοσυσχέτιση των εδαφικών κατηγοριών σε κάθε σταθμό καταγραφής τόσο σύμφωνα με τον ΕΑΚ2000 όσο και με τους UBC/97 και Ευρωκώδικα 8 (σχέδιο 2000). Για τους ίδιους λόγους παρατίθεται επίσης η – ήδη καθιερωμένη από παλαιότερα - απλοποιημένη κατηγοριοποίηση των καταγραφών για δύο γενικότερες βασικές κατηγορίες εδαφικών συνθηκών (για σκληρό πέτρωμα και αλλουβιακές αποθέσεις).
4. Αντικείμενο της επόμενης, 4ης φάσης του προγράμματος είναι ο υπολογισμός των ελαστικών φασμάτων ψευδοεπιταχύνσεων ( $S_{pa}$ ), ψευδοταχυτήτων ( $S_{pv}$ ) και μετακινήσεων ( $S_d$ ) για τις καταγραφές που επιλέχθηκαν και έτυχαν επεξεργασίας στις προηγούμενες του προγράμματος. Τα τελικά αποτελέσματα της παρούσας φάσης παρουσιάζονται με τη μορφή μέσων φασμάτων ή/και μέσων συν μία τυπική απόκλιση φασμάτων (ποσοστημόριο 84%), για διάφορες τιμές απόσβεσης και για διάφορες κατηγορίες εδάφους. Επιπλέον γίνονται συγκρίσεις με τα φάσματα σχεδιασμού του ισχύοντος Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (ΕΑΚ 2000).
5. Κατά την 5η φάση του προγράμματος, υπολογίζονται, με τη βοήθεια κατάλληλα ανεπτυγμένου λογισμικού, τα ανελαστικά φάσματα αντοχής ( $C_y$ ) και μετακίνησης ( $S_d$ ) για

όλα τα επιλεχθέντα επιταχυνσιογραφήματα. Τα ανελαστικά φάσματα υπολογίζονται για τέσσερις τιμές του δείκτη πλαστιμότητας  $\mu$ , ήτοι 1.0 (ελαστική συμπεριφορά), 2.0 (χαμηλή πλαστιμότητα), 3.5 (μέση πλαστιμότητα) και 5.0 (υψηλή πλαστιμότητα). Τα φάσματα υπολογίζονται για ανελαστική συμπεριφορά σύμφωνα με το μοντέλο φθίνουσας δυσκαμψίας (πολύ αντιπροσωπευτικότερο της πραγματικής συμπεριφοράς των κατασκευών απ' ό,τι το ελαστοπλαστικό). Όπως και στην περίπτωση των ελαστικών φασμάτων, τα τελικά αποτελέσματα της παρούσας φάσης παρουσιάζονται με τη μορφή μέσων φασμάτων ή/και μέσων συν μία τυπική απόκλιση φασμάτων (ποσοστημόριο 84%), για διάφορες τιμές απόσβεσης και για διάφορες κατηγορίες εδάφους. Παράλληλα, για λόγους μελέτης της επιρροής του μοντέλου υστερητικής συμπεριφοράς στα αποτελέσματα, υπολογίζονται, για ένα μεγάλο υποσύνολο του όλου δείγματος, τα ανελαστικά φάσματα και με χρήση του ελαστοπλαστικού μοντέλου με κράτυνση 5% και συγκρίνονται με αυτά που προέκυψαν με χρήση του μοντέλου φθίνουσας δυσκαμψίας.

6. Αντικείμενο της 6ης φάσης του προγράμματος είναι ο υπολογισμός της συνιστώσας  $q_m$  του δείκτη συμπεριφοράς ( $q$ ), η οποία εξαρτάται από την πλαστιμότητα και προκύπτει από τη διαίρεση των τεταγμένων των ελαστικών και ανελαστικών φασμάτων αντοχής. Με βάση τις υπολογισθείσες από τις καταγραφές τιμές, προτείνεται κατόπιν αναλύσεων με κατάλληλο λογισμικό, μία προσεγγιστική έκφραση για το  $q_m$ , σχετικά απλής μορφής, η οποία είναι δυνατόν να εφαρμοσθεί – με τη χρήση κατάλληλων κάθε φορά συντελεστών - τόσο για το σύνολο των καταγραφών (ανεξαρτήτως εδαφικών συνθηκών), όσο και για τα αποτελέσματα που προκύπτουν θεωρώντας ξεχωριστά τις καταγραφές που αντιστοιχούν σε εδαφικές συνθήκες Α, Β ή Γ (κατά ΕΑΚ2000).
7. Στην τελευταία (7η) φάση του προγράμματος γίνεται ο υπολογισμός του συντελεστή αναγωγής της μετακίνησης  $\eta$  (ή  $\Delta_\mu$  ή  $C_\mu$ ), που προκύπτει από τη διαίρεση των τεταγμένων των ανελαστικών προς τις αντίστοιχες των ελαστικών φασμάτων μετακινήσεων. Όπως και στην περίπτωση του συντελεστή  $q_m$ , με βάση τις υπολογισμένες από τις καταγραφές τιμές, προτείνεται μία προσεγγιστική έκφραση για το  $\eta$ , η οποία είναι δυνατόν να εφαρμοσθεί – με τη χρήση κατάλληλων κάθε φορά συντελεστών - τόσο για το σύνολο των καταγραφών (ανεξαρτήτως εδαφικών συνθηκών), όσο και για τα αποτελέσματα που προκύπτουν θεωρώντας ξεχωριστά τις καταγραφές που αντιστοιχούν σε εδαφικές συνθήκες Α, Β ή Γ (κατά ΕΑΚ2000).

### **Αποτελέσματα του προγράμματος**

Με βάση τα βήματα που περιγράφηκαν προηγουμένως, τα κυριότερα αποτελέσματα του παρόντος προγράμματος είναι τα εξής:

- Δημιουργία στο ΙΤΣΑΚ ψηφιακής βάσης δεδομένων με τυπικά επιταχυνσιογραφήματα του Ελληνικού χώρου, ταξινομημένα κατά κατηγορία εδάφους, που μπορεί να αξιοποιηθεί και για αναλύσεις χρονοϊστορίας (ανελαστική δυναμική ανάλυση) στα πλαίσια μελετών αποτίμησης υφισταμένων κατασκευών ή μελετών σεισμικής μόνωσης. Η εν λόγω βάση δεδομένων είναι διαθέσιμη σε οιοδήποτε ενδιαφερόμενο δημόσιο ή ιδιωτικό φορέα, σύμφωνα με την υφιστάμενη πολιτική διάθεσης δεδομένων του ΙΤΣΑΚ.
- Τυπικά ελαστικά φάσματα ψευδοεπιταχύνσεων, ψευδοταχυτήτων και μετακινήσεων για ευρεία περιοχή συντελεστών απόσβεσης, για χρήση, τόσο για το 'συμβατικό' σχεδιασμό, όσο και το σχεδιασμό με βάση τις μετακινήσεις.

- Τυπικά ανελαστικά φάσματα αντοχής και μετακίνησης (για διάφορους τύπους υστερητικής συμπεριφοράς) για τον Ελληνικό χώρο.
- Εμπειρικές σχέσεις για την εκτίμηση των συντελεστών  $q_{\mu}$  και  $\eta$ .

Παράλληλα τα αποτελέσματα του προγράμματος, λόγω του ιδιαίτερου επιστημονικού και πρακτικού ενδιαφέροντος τους, θα ανακοινωθούν σε συνέδρια τόσο του εσωτερικού όσο και του εξωτερικού.

### Βιβλιογραφικές παραπομπές

- Bommer, J.J. and Elnashai, A.S. (1999) Displacement spectra for seismic design, *J. of Earthquake Engineering*, **3** (1), 1-32.
- Boore, D.D. (1999). Effect of baseline corrections on response spectra for two recordings of the 1999, Chi-Chi, Taiwan, earthquake, U.S. Geological Survey, Open-file rept 99-545,1-37
- Fajfar, P. (1999) Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **28** (9), Sept. 1999, 979-993.
- FEMA (1997) NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA-273, Washington D.C.
- Kappos, A.J. (1999) Evaluation of behaviour factors on the basis of ductility and overstrength studies, *Engineering Structures*, **21** (9), 823-835.
- Kappos A.J., Kyriakakis, P. and Athanassiadou, C.J. (1998) Site-dependent inelastic spectra and ductility-based behaviour factors for Greece, *11th European Conference on Earthquake Engineering*, Paris, CD ROM Proceedings, Balkema.
- Klimis, N.S., B.N. Margaris, P.K. Koliopoulos (1999). Site-dependent amplification functions and response spectra in Greece, *J. of Earthquake Engineering*, **3**,237-270.
- Koliopoulos, P.K., Margaris, B.N., and Klimis, N.S. (1998) Inelastic strength and hysteretic energy demand spectra of recent Greek earthquakes, *11th European Conference on Earthquake Engineering*, Paris, CD ROM Proceedings, Balkema.
- Miranda, E. (1993) Evaluation of site-dependent inelastic seismic design spectra, *J. Struct. Engineering*, ASCE, **119** (5), 1319-1338.
- Theodulidis, N.P. and Papazachos, B.C (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, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **11**, 387-402.
- Tolis, S.V. and Faccioli, E. (1999) Displacement Design Spectra, *J. of Earthquake Engineering*, **3** (1), 107-125.