

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Θεωρία και Εφαρμογές στη Σεισμική Μηχανική

3^η Αμερικάνικη Έκδοση 2007

Anil K. Chopra

*Πανεπιστήμιο της California
στο Berkeley*

Απόδοση: **Ηρώ Μάρκου**
Χρήστος Μπούρας
Κων/νος Βασιλόπουλος
Πολιτικοί Μηχανικοί MSc ΕΜΠ

Επιμέλεια Επιστημονικής Απόδοσης:
Σταύρος Α. Αναγνωστόπουλος
Καθηγητής Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστήμιο Πατρών

 **Εκδόσεις: Μ. Γκιούρδας**

Ζωοδόχου Πηγής 70-74 - Τηλ.: 210 3630219

106 81 Αθήνα, 2008

www.mgiurdas.gr

Τίτλος Πρωτοτύπου:

DYNAMICS OF STRUCTURES

Theory and Applications to Earthquake Engineering

ISBN 0-13-156174-X

Copyright © 2007, 2001, 1995 by Pearson Education Inc.

Pearson Prentice Hall

Pearson Education Inc.

Upper Saddle River, NJ 07458

Αποκλειστικότητα για την Ελληνική Γλώσσα

Εκδόσεις: **Μόσχος Γκιούρδας**



Ζωοδόχου Πηγής 70-74

Τηλ.: 210 3630219 - Fax: 210 3303126

106 81 Αθήνα, 2008

www.mgiurdas.gr

ISBN: 960-512-541-2

Επιμέλεια κειμένων: Γιάννης Καρούζος

Desktop Publishing: Κ. Καλαϊτζής, τηλ.: 210 2811662

Εκτύπωση: Μητρόπολις Α.Ε.

Βιβλιοδεσία: Στάμου Κ. & ΣΙΑ Ο.Ε., τηλ.: 210 2821113

Αναδημοσίευση του βιβλίου σε οποιαδήποτε μορφή, ολόκληρου ή μέρους, καθώς και των περιεχομένων προγραμμάτων, δεν επιτρέπεται χωρίς την έγγραφη εξουσιοδότηση του εκδότη.

**PRENTICE-HALL INTERNATIONAL SERIES
IN CIVIL ENGINEERING AND ENGINEERING MECHANICS**
William J. Hall, Editor

Au and Christiano, *Structural Analysis*
Bathe, *Finite Element Procedures*
Biggs, *Introduction to Structural Engineering*
Chopra, *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, 2/e*
Cooper and Chen, *Designing Steel Structures*
Cording et al., *The Art and Science of Geotechnical Engineering*
Hendrickson and Au, *Project Management for Construction, 2/e*
Higdon et al., *Engineering Mechanics, 2nd Vector Edition*
Hultz and Kovacs, *Introduction in Geotechnical Engineering*
Johnston, Lin, and Galambos, *Basic Steel Design, 3/e*
Kelkar and Sewell, *Fundamentals of the Analysis and Design of Shell Structures*
Kramer, *Geotechnical Earthquake Engineering*
MacGregor, *Reinforced Concrete: Mechanics and Design, 3/e*
Melosh, *Structural Engineering Analysis by Finite Elements*
Nawy, *Prestressed Concrete: A Fundamental Approach, 3/e*
Nawy, *Reinforced Concrete: A Fundamental Approach, 4/e*
Ostwald, *Construction Cost Analysis and Estimating*
Pfeffer, *Solid Waste Management*
Popov, *Engineering Mechanics of Solids, 2/e*
Popov, *Mechanics of Materials, 2/e*
Schneider and Dickey, *Reinforced Masonry Design, 3/e*
Wang and Salmon, *Introductory Structural Analysis*
Weaver and Johnson, *Structural Dynamics by Finite Elements*
Wolf, *Dynamic Soil–Structure Interaction*
Young et al., *The Science and Technology of Civil Engineering Materials*

Αφιερωμένο στους Hamida και Nasreen με ευγνωμοσύνη για την υπόδειξη της ιδέας συγγραφής ενός βιβλίου και με εκτίμηση που υπομονετικά ανέχθηκαν και μοιράσθηκαν αυτά τα χρόνια προπαρασκευής μαζί μου, ειδικά τον τελευταίο ενάμιση χρόνο. Η παρουσία τους και η ενθάρρυνσή τους έκαναν αυτή την ιδέα πραγματικότητα.

Συνοπτικά περιεχόμενα

| | |
|---|------------|
| ΜΕΡΟΣ Ι ΜΟΝΟΒΑΘΜΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ | 1 |
| 1 <i>Εξισώσεις Κίνησης, Διατύπωση του Προβλήματος, και Μέθοδοι Επίλυσης</i> | 3 |
| 2 <i>Ελεύθερη Ταλάντωση</i> | 39 |
| 3 <i>Απόκριση σε Αρμονικές και Περιοδικές Διεγέρσεις</i> | 65 |
| 4 <i>Απόκριση σε Αυθαίρετες, Βαθμιδωτές και Παλμικές Διεγέρσεις</i> | 125 |
| 5 <i>Αριθμητικός Υπολογισμός Δυναμικής Απόκρισης</i> | 165 |
| 6 <i>Σεισμική Απόκριση Γραμμικών Συστημάτων</i> | 197 |
| 7 <i>Σεισμική Απόκριση Ανελαστικών Συστημάτων</i> | 257 |
| 8 <i>Γενικευμένα Μονοβάθμια Συστήματα</i> | 305 |
| ΜΕΡΟΣ ΙΙ ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ | 343 |
| 9 <i>Εξισώσεις Κίνησης, Διατύπωση Προβλήματος, και Μέθοδοι Επίλυσης</i> | 345 |
| 10 <i>Ελεύθερη Ταλάντωση</i> | 401 |

| | | |
|----|---|-----|
| 11 | <i>Απόσβεση στις Κατασκευές</i> | 447 |
| 12 | <i>Δυναμική Ανάλυση και Απόκριση Γραμμικών Συστημάτων</i> | 467 |
| 13 | <i>Σεισμική Ανάλυση Γραμμικών Συστημάτων</i> | 507 |
| 14 | <i>Μείωση Βαθμών Ελευθερίας</i> | 593 |
| 15 | <i>Αριθμητικός Υπολογισμός Δυναμικής Απόκρισης</i> | 609 |
| 16 | <i>Συστήματα με Κατανεμημένη Μάζα και Ελαστικότητα</i> | 629 |
| 17 | <i>Εισαγωγή στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων</i> | 661 |

**ΜΕΡΟΣ ΙΙΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ
ΠΟΛΥΩΡΟΦΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ**

| | | |
|----|--|-----|
| | | 687 |
| 18 | <i>Σεισμική Απόκριση Γραμμικώς Ελαστικών Κτιρίων</i> | 689 |
| 19 | <i>Σεισμική Απόκριση Ανελαστικών Κτιρίων</i> | 707 |
| 20 | <i>Σεισμική Δυναμική Κτιρίων με Μονωμένη Βάση</i> | 741 |
| 21 | <i>Δυναμική των Κατασκευών σε Κτιριακούς Κανονισμούς</i> | 767 |
| 22 | <i>Δυναμική των Κατασκευών σε Οδηγίες για Σεισμική Αποτίμηση Κτιρίων</i> | 795 |
| A | <i>Μέθοδος Ανάλυσης Απόκρισης στο Πεδίο των Συχνοτήτων</i> | 815 |
| B | <i>Πίνακες Συμβόλων</i> | 837 |
| Γ | <i>Απαντήσεις σε Επιλεγμένα Προβλήματα</i> | 849 |
| | <i>Ευρετήριο</i> | 865 |

Περιεχόμενα

| | |
|------------------------------------|---------------|
| <i>Πρόλογος Ελληνικής έκδοσης</i> | <i>xix</i> |
| <i>Προοίμιο</i> | <i>xxi</i> |
| <i>Πρόλογος</i> | <i>xxiii</i> |
| <i>Πρόλογος στη Δεύτερη Έκδοση</i> | <i>xxv</i> |
| <i>Πρόλογος στην Πρώτη Έκδοση</i> | <i>xxvii</i> |
| <i>Ευχαριστίες</i> | <i>xxxiii</i> |

| | |
|---|----------|
| ΜΕΡΟΣ Ι ΜΟΝΟΒΑΘΜΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ | 1 |
| 1 Εξισώσεις Κίνησης, Διατύπωση του Προβλήματος, και Μέθοδοι Επίλυσης | 3 |
| 1.1 Απλές Κατασκευές | 3 |
| 1.2 Μονοβάθμιο Σύστημα | 7 |
| 1.3 Σχέση Δύναμης-Μετατόπισης | 8 |
| 1.4 Δύναμη Απόσβεσης | 12 |
| 1.5 Εξίσωση Κίνησης: Εξωτερική Δύναμη | 14 |
| 1.6 Σύστημα Μάζας- Ελατηρίου-Αποσβεστήρα | 19 |
| 1.7 Εξίσωση Κίνησης: Σεισμική Διέγερση | 23 |
| 1.8 Διατύπωση του Προβλήματος και Εντατικά Μεγέθη Μελών | 26 |
| 1.9 Επαλληλίζοντας Στατική και Δυναμική Απόκριση | 28 |
| 1.10 Μέθοδοι Επίλυσης της Διαφορικής Εξίσωσης | 28 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 1.11 | Μελέτη Μονοβάθμιων Συστημάτων: Οργάνωση | 33 |
| | <i>Παράρτημα 1: Συντελεστές Δυσκαμψίας Καμπτόμενου Μέλους</i> | 33 |
| 2 | <i>Ελεύθερη Ταλάντωση</i> | 39 |
| 2.1 | Ελεύθερη Ταλάντωση χωρίς Απόσβεση | 39 |
| 2.2 | Ελεύθερη Ταλάντωση με Ιξώδη Απόσβεση | 48 |
| 2.3 | Ενέργεια στην Ελεύθερη Ταλάντωση | 56 |
| 2.4 | Ελεύθερη Ταλάντωση με Απόσβεση Coulomb | 57 |
| 3 | <i>Απόκριση σε Αρμονικές και Περιοδικές Διεγέρσεις</i> | 65 |
| | Μέρος Α: Συστήματα με Ιξώδη Απόσβεση: Βασικά Αποτελέσματα | 66 |
| 3.1 | Αρμονική Ταλάντωση Συστημάτων Χωρίς Απόσβεση | 66 |
| 3.2 | Αρμονική Ταλάντωση με Ιξώδη Απόσβεση | 72 |
| | Μέρος Β: Συστήματα με Ιξώδη Απόσβεση: Εφαρμογές | 85 |
| 3.3 | Απόκριση σε Γεννήτρια Ταλαντώσεων | 85 |
| 3.4 | Ιδiosisυχνότητα και Απόσβεση από Αρμονικά Πειράματα | 87 |
| 3.5 | Μετάδοση Δυνάμεων και Μόνωση Ταλαντώσεων | 90 |
| 3.6 | Απόκριση σε Εδαφική Κίνηση και Μόνωση Ταλαντώσεων | 91 |
| 3.7 | Μετρητές Ταλαντώσεων | 95 |
| 3.8 | Απώλεια Ενέργειας λόγω Ιξώδους Απόσβεσης | 99 |
| 3.9 | Ισοδύναμη Ιξώδης Απόσβεση | 103 |
| | Μέρος Γ: Συστήματα με μη ιξώδη Απόσβεση | 105 |
| 3.10 | Αρμονική Ταλάντωση με Απόσβεση Ανεξάρτητη της Συχνότητας | 105 |
| 3.11 | Αρμονική Ταλάντωση με Τριβή Coulomb | 109 |
| | Μέρος Δ: Απόκριση σε Περιοδική Διέγερση | 113 |
| 3.12 | Παρουσίαση Σειρών Fourier | 114 |
| 3.13 | Απόκριση σε Περιοδική Δύναμη | 114 |
| | <i>Παράρτημα 3: Χαρτί Τετραλογαριθμικών Διαγραμμάτων</i> | 118 |
| 4 | <i>Απόκριση σε Αυθαίρετες, Βαθμιδωτές και Παλμικές Διεγέρσεις</i> | 125 |
| | Μέρος Α: Απόκριση σε Δυνάμεις Αυθαίρετα Μεταβαλλόμενες με το Χρόνο | 125 |
| 4.1 | Απόκριση σε Μοναδιαία Ωστική Δύναμη (Unit Impulse) | 126 |
| 4.2 | Απόκριση σε Αυθαίρετη Δύναμη | 127 |

Μέρος Β: Απόκριση σε Βαθμιδωτές και Γραμμικώς Κλιμακούμενες Δυνάμεις 129

- 4.3 Βαθμιδωτή Δύναμη 129
- 4.4 Ομαλά Κλιμακούμενη ή Γραμμικά Αυξανόμενη Δύναμη 131
- 4.5 Βαθμιδωτή Δύναμη με Πεπερασμένο Χρόνο Ανάπτυξης 132

Μέρος Γ: Απόκριση σε Παλμικές Διεγέρσεις 135

- 4.6 Μέθοδοι Επίλυσης 135
- 4.7 Ορθογωνικός Παλμός 137
- 4.8 Παλμός Μισού Κύκλου Ημιτόνου 143
- 4.9 Συμμετρικός Τριγωνικός Παλμός 148
- 4.10 Επίδραση της Μορφής του Παλμού στην Απόκριση και Προσεγγιστική Ανάλυση για Βραχείς Παλμούς 151
- 4.11 Επίδραση της Ιξώδους Απόσβεσης 154
- 4.12 Απόκριση σε Εδαφική Κίνηση 155

5 Αριθμητικός Υπολογισμός Δυναμικής Απόκρισης 165

- 5.1 Μέθοδοι Χρονικών Βημάτων 165
- 5.2 Μέθοδοι Βασισμένες σε Παρεμβολή της Διέγερσης 167
- 5.3 Μέθοδος Κεντρικής Διαφοράς 171
- 5.4 Μέθοδος Newmark 174
- 5.5 Ευστάθεια και Υπολογιστικά Σφάλματα 180
- 5.6 Ανάλυση μη Γραμμικής Απόκρισης: Μέθοδος Κεντρικής Διαφοράς 184
- 5.7 Ανάλυση μη Γραμμικής Απόκρισης: Μέθοδος Newmark 184

6 Σεισμική Απόκριση Γραμμικών Συστημάτων 197

- 6.1 Σεισμική Διέγερση 197
- 6.2 Εξίσωση Κίνησης 203
- 6.3 Μεγέθη Απόκρισης 204
- 6.4 Χρονο-ιστορία Απόκρισης 205
- 6.5 Έννοια του Φάσματος Απόκρισης 207
- 6.6 Φάσματα Απόκρισης Μετατόπισης, Ψευδο-ταχύτητας, και Ψευδο-επιτάχυνσης 208
- 6.7 Μέγιστη Απόκριση της Κατασκευής από το Φάσμα Απόκρισης 217

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.8 | Χαρακτηριστικά του Φάσματος Απόκρισης | 222 |
| 6.9 | Ελαστικό Φάσμα Σχεδιασμού | 230 |
| 6.10 | Σύγκριση των Φασμάτων Σχεδιασμού και Απόκρισης | 239 |
| 6.11 | Διάκριση Φασμάτων Σχεδιασμού και Απόκρισης | 241 |
| 6.12 | Φάσματα Απόκρισης Ταχύτητας και Επιτάχυνσης | 242 |
| | <i>Παράρτημα 6: El Centro, η Εδαφική Κίνηση του 1940</i> | 246 |
| 7 | <i>Σεισμική Απόκριση Ανελαστικών Συστημάτων</i> | 257 |
| 7.1 | Σχέσεις Δύναμης-Μετατόπισης | 258 |
| 7.2 | Κανονικοποιημένη Αντοχή Διαρροής, Μειωτικός Συντελεστής Αντοχής, και Δείκτης Πλαστιμότητας | 264 |
| 7.3 | Εξίσωση Κίνησης και Παράμετροι Επιρροής | 265 |
| 7.4 | Επιρροή της Διαρροής | 266 |
| 7.5 | Φάσμα Απόκρισης Μετατόπισης Διαρροής και το Αντοχής Διαρροής | 273 |
| 7.6 | Αντοχή και Μετατόπιση Διαρροής από το Φάσμα Απόκρισης | 277 |
| 7.7 | Σχέση Αντοχής Διαρροής-Πλαστιμότητας | 277 |
| 7.8 | Σχετική Επιρροή Διαρροής και Απόσβεσης | 279 |
| 7.9 | Αναλισκόμενη Ενέργεια | 280 |
| 7.10 | Μηχανισμοί Ανάλωσης Ενέργειας | 283 |
| 7.11 | Ανελαστικό Φάσμα Σχεδιασμού | 288 |
| 7.12 | Εφαρμογές του Φάσματος Σχεδιασμού | 295 |
| 7.13 | Σύγκριση Φασμάτων Σχεδιασμού και Απόκρισης | 301 |
| 8 | <i>Γενικευμένα Μονοβάθμια Συστήματα</i> | 305 |
| 8.1 | Γενικευμένα Μονοβάθμια Συστήματα | 305 |
| 8.2 | Συνθέσεις Απολύτως Στερεών Σωμάτων | 307 |
| 8.3 | Συστήματα με Κατανεμημένη Μάζα και Ελαστικότητα | 309 |
| 8.4 | Συστήματα Συγκεντρωμένων Μαζών: Κτίρια Τύπου Διατμητικής Δοκού | 321 |
| 8.5 | Ιδιοσυχνότητα Ταλάντωσης κατά τη Μέθοδο Rayleigh | 328 |
| 8.6 | Επιλογή της Συνάρτησης Σχήματος | 332 |
| | <i>Παράρτημα 8: Αδρανειακές Δυνάμεις Απολύτως Στερεών Σωμάτων</i> | 336 |

| | | |
|---|--|------------|
| ΜΕΡΟΣ II ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ | 343 | |
| 9 | <i>Εξισώσεις Κίνησης, Διατύπωση Προβλήματος, και Μέθοδοι Επίλυσης</i> | 345 |
| 9.1 | Απλό Σύστημα: Διώροφο Διατηρητικό Κτίριο | 345 |
| 9.2 | Γενική Μεθοδολογία για Γραμμικά Συστήματα | 350 |
| 9.3 | Στατική Συμπύκνωση | 367 |
| 9.4 | Επίπεδα Συστήματα Ή Συστήματα Συμμετρικής Κατόψεως: Εδαφική Κίνηση | 370 |
| 9.5 | Κτίρια Μη Συμμετρικής Κατόψεως: Εδαφική Κίνηση | 375 |
| 9.6 | Κτίρια Συμμετρικής Κατόψεως: Στρεπτική Διέγερση | 383 |
| 9.7 | Πολλαπλές Διεγέρσεις Στηρίξεων | 384 |
| 9.8 | Ανελαστικά Συστήματα | 389 |
| 9.9 | Διατύπωση του Προβλήματος | 389 |
| 9.10 | Δυνάμεις (Εντατικά Μεγέθη) των Στοιχείων | 390 |
| 9.11 | Μέθοδοι Επίλυσης των Εξισώσεων Κίνησης: Γενική Θεώρηση | 390 |
| 10 | <i>Ελεύθερη Ταλάντωση</i> | 401 |
| Μέρος Α: Ιδιοσυχνότητες και Ιδιομορφές (ή Κανονικές Μορφές) Ταλάντωσης | | 402 |
| 10.1 | Συστήματα χωρίς Απόσβεση | 402 |
| 10.2 | Ιδιοσυχνότητες και Ιδιομορφές Ταλάντωσης | 404 |
| 10.3 | Ιδιομορφικά και Φασματικά Μητρώα | 406 |
| 10.4 | Ορθογωνικότητα των Ιδιομορφών | 407 |
| 10.5 | Ερμηνεία της Ορθογωνικότητας των Ιδιομορφών | 408 |
| 10.6 | Κανονικοποίηση των Ιδιομορφών | 408 |
| 10.7 | Ιδιομορφική Ανάπτυξη των Μετατοπίσεων | 418 |
| Μέρος Β: Απόκριση Ελεύθερης Ταλάντωσης | | 419 |
| 10.8 | Επίλυση των Εξισώσεων Ελεύθερης Ταλάντωσης: Συστήματα χωρίς Απόσβεση | 419 |
| 10.9 | Ελεύθερη Ταλάντωση Συστημάτων με Απόσβεση | 422 |
| 10.10 | Επίλυση των Εξισώσεων Ελεύθερης Ταλάντωσης: Συστήματα με Κλασσική Απόσβεση | 426 |
| Μέρος Γ: Υπολογισμός των Ιδιοτήτων Ταλάντωσης | | 428 |
| 10.11 | Μέθοδοι Επίλυσης για το Πρόβλημα Ιδιοτιμών | 428 |
| 10.12 | Το Πηλίκο του Rayleigh | 430 |

| | | |
|--|--|------------|
| 10.13 | Μέθοδος Αντίστροφης Διανυσματικής Επανάληψης | 430 |
| 10.14 | Διανυσματική Επανάληψη με Μεταθέσεις: Προτιμώμενη Διαδικασία | 435 |
| 10.15 | Μετασχηματισμός της $\mathbf{k}\phi = \omega^2\mathbf{m}\phi$ στην Τυπική Μορφή | 440 |
| 11 | <i>Απόσβεση στις Κατασκευές</i> | 447 |
| Μέρος Α: Πειραματικά Δεδομένα και Συνιστώμενοι Ιδιομορφικοί Λόγοι Απόσβεσης 447 | | |
| 11.1 | Ιδιότητες Ταλάντωσης του Κτιρίου της Βιβλιοθήκης Millikan | 447 |
| 11.2 | Εκτίμηση Ιδιομορφικών Λόγων Απόσβεσης | 452 |
| Μέρος Β: Μόρφωση του Μητρώου Απόσβεσης 454 | | |
| 11.3 | Μητρώο Απόσβεσης | 454 |
| 11.4 | Κλασσικό Μητρώο Απόσβεσης | 455 |
| 11.5 | Μη Κλασσικό Μητρώο Απόσβεσης | 463 |
| 12 | <i>Δυναμική Ανάλυση και Απόκριση Γραμμικών Συστημάτων</i> | 467 |
| Μέρος Α: Συστήματα Δύο Βαθμών Ελευθερίας 467 | | |
| 12.1 | Ανάλυση Συστημάτων Δύο Βαθμών Ελευθερίας χωρίς Απόσβεση | 467 |
| 12.2 | Αποσβεστήρας Ταλαντώσεων ή Αποσβεστήρας Ρυθμιζόμενης Μάζας | 470 |
| Μέρος Β: Ιδιομορφική Ανάλυση 472 | | |
| 12.3 | Ιδιομορφικές Εξισώσεις για Συστήματα χωρίς Απόσβεση | 472 |
| 12.4 | Ιδιομορφικές Εξισώσεις για Συστήματα με Απόσβεση | 475 |
| 12.5 | Απόκριση Μετατόπισης | 476 |
| 12.6 | Εντατικά Μεγέθη Στοιχείων | 477 |
| 12.7 | Ιδιομορφική Ανάλυση: Περίληψη | 477 |
| Μέρος Γ: Συμβολές Ιδιομορφικής Απόκρισης 482 | | |
| 12.8 | Ιδιομορφική Ανάπτυξη του Διανύσματος Διέγερσης $\mathbf{p}(t) = \mathbf{s} p(t)$ | 482 |
| 12.9 | Ιδιομορφική Ανάλυση για $\mathbf{p}(t) = \mathbf{s} p(t)$ | 486 |
| 12.10 | Συντελεστές Ιδιομορφικής Συμμετοχής | 487 |
| 12.11 | Ιδιομορφικές Αποκρίσεις και Απαιτούμενος Αριθμός Ιδιομορφών | 489 |
| Μέρος Δ: Ειδικές Μέθοδοι Ανάλυσης 496 | | |
| 12.12 | Μέθοδος Στατικής Διόρθωσης | 496 |

| | | | |
|--|---|-----|------------|
| 12.13 | Μέθοδος Ιδιομορφών-Επιτάχυνσης | 499 | |
| 12.14 | Ανάλυση Συστημάτων με μη Κλασσική Απόσβεση | 500 | |
| 13 | <i>Σεισμική Ανάλυση Γραμμικών Συστημάτων</i> | | 507 |
| Μέρος Α: Ανάλυση Χρονο-ιστορίας Απόκρισης 508 | | | |
| 13.1 | Ιδιομορφική Ανάλυση | 508 | |
| 13.2 | Πολυώροφα Κτίρια με Συμμετρική Κάτοψη | 514 | |
| 13.3 | Πολυώροφα Κτίρια με Μη Συμμετρική Κάτοψη | 533 | |
| 13.4 | Στρεπτική Απόκριση Κτιρίων Συμμετρικής Κάτοψης | 544 | |
| 13.5 | Ανάλυση Απόκρισης για Πολλαπλές Διεγέρσεις Στηρίξεων | 548 | |
| 13.6 | Προσομοίωση της Κατασκευής και Σεισμική Απόκριση | 554 | |
| Μέρος Β: Φασματική Δυναμική Ανάλυση 555 | | | |
| 13.7 | Μέγιστη Απόκριση από το Φάσμα Σεισμικής Απόκρισης | 555 | |
| 13.8 | Πολυώροφα Κτίρια με Συμμετρική Κάτοψη | 560 | |
| 13.9 | Πολυώροφα Κτίρια με Μη Συμμετρική Κάτοψη | 572 | |
| 14 | <i>Μείωση Βαθμών Ελευθερίας</i> | | 593 |
| 14.1 | Κινηματικοί Περιορισμοί | 594 | |
| 14.2 | Συγκέντρωση της Μάζας σε Επιλεγμένους Βαθμούς Ελευθερίας | 595 | |
| 14.3 | Μέθοδος Rayleigh-Ritz | 595 | |
| 14.4 | Επιλογή των Διανυσμάτων Ritz | 599 | |
| 14.5 | Δυναμική Ανάλυση με Χρήση Διανυσμάτων Ritz | 604 | |
| 15 | <i>Αριθμητικός Υπολογισμός Δυναμικής Απόκρισης</i> | | 609 |
| 15.1 | Μέθοδοι Χρονικών Βημάτων | 609 | |
| 15.2 | Ανάλυση Γραμμικών Συστημάτων με μη Κλασσική Απόσβεση | 611 | |
| 15.3 | Ανάλυση μη Γραμμικών Συστημάτων | 618 | |
| 16 | <i>Συστήματα με Κατανεμημένη Μάζα και Ελαστικότητα</i> | | 629 |
| 16.1 | Εξίσωση Κίνησης χωρίς Απόσβεση: Επιβαλλόμενες Δυνάμεις | 630 | |
| 16.2 | Εξίσωση Κίνησης χωρίς Απόσβεση: Διέγερση Στηρίξεων | 631 | |
| 16.3 | Ιδιοσυχρότητες και Ιδιομορφές Ταλάντωσης | 632 | |

| | | |
|--|--|------------|
| 16.4 | Ορθογωνικότητα των Ιδιομορφών | 639 |
| 16.5 | Ιδιομορφική Δυναμική Ανάλυση Απόκρισης σε Επιβαλλόμενη Φόρτιση | 641 |
| 16.6 | Ανάλυση Χρονο-ιστορίας Σεισμικής Απόκρισης | 648 |
| 16.7 | Φασματική Δυναμική Ανάλυση Σεισμικής Απόκρισης | 653 |
| 16.8 | Δυσκολία στην Ανάλυση Πρακτικών Συστημάτων | 656 |
| 17 | <i>Εισαγωγή στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων</i> | 661 |
| Μέρος Α: Η Μέθοδος Rayleigh-Ritz 661 | | |
| 17.1 | Κατάστροφη με Χρήση της Αρχής Διατήρησης της Ενέργειας | 661 |
| 17.2 | Κατάστροφη με Χρήση της Αρχής των Δυνατών Έργων | 665 |
| 17.3 | Μειονεκτήματα της Μεθόδου Rayleigh-Ritz | 667 |
| Μέρος Β: Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων 667 | | |
| 17.4 | Προσέγγιση με Πεπερασμένα Στοιχεία | 667 |
| 17.5 | Διαδικασία Ανάλυσης | 669 |
| 17.6 | Βαθμοί Ελευθερίας Στοιχείου και Συναρτήσεις Παρεμβολής | 671 |
| 17.7 | Μητρώο Δυσκαμψίας Στοιχείου | 672 |
| 17.8 | Μητρώο Μάζας Στοιχείου | 673 |
| 17.9 | Διάνυσμα Φόρτισης Στοιχείου | 675 |
| 17.10 | Σύγκριση Λύσεων με Πεπερασμένα Στοιχεία με Ακριβείς Λύσεις | 679 |
| 17.11 | Δυναμική Ανάλυση Συνεχών Κατασκευών | 680 |
| ΜΕΡΟΣ ΙΙΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ | | |
| ΠΟΛΥΩΡΟΦΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ | | |
| | | 687 |
| 18 | <i>Σεισμική Απόκριση Γραμμικώς Ελαστικών Κτιρίων</i> | 689 |
| 18.1 | Εξεταζόμενα Συστήματα, Φάσμα Σχεδιασμού, και Μεγέθη Απόκρισης | 689 |
| 18.2 | Επίδραση των T_1 και ρ στην Απόκριση | 694 |
| 18.3 | Συντελεστές Ιδιομορφικής Συμμετοχής | 695 |
| 18.4 | Επίδραση του T_1 στην Απόκριση Ανώτερων Ιδιομορφών | 697 |
| 18.5 | Επίδραση του ρ στην Απόκριση Ανώτερων Ιδιομορφών | 700 |
| 18.6 | Μεταβολή Καθ' Ύψος της Απόκρισης Ανώτερων Ιδιομορφών | 701 |
| 18.7 | Πόσες Ιδιομορφές να Περιληφθούν | 703 |

| | | |
|--|--|------------|
| 19 | Σεισμική Απόκριση Ανελαστικών Κτιρίων | 707 |
| Μέρος Α: Μη Γραμμική Ανάλυση Χρονο-ιστορίας Απόκρισης 708 | | |
| 19.1 | Εξισώσεις Κίνησης: Κατάστροψη και επίλυση | 708 |
| 19.2 | Υπολογισμός Σεισμικών Απαιτήσεων: Παράγοντες που πρέπει να ληφθούν Υπόψη | 709 |
| 19.3 | Απαιτήσεις Σχετικών Μετατοπίσεων Ορόφων | 713 |
| 19.4 | Απαιτήσεις Αντοχής για Μονοβάθμια και Πολυβάθμια Συστήματα | 719 |
| Μέρος Β: Προσεγγιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης 720 | | |
| 19.5 | Κίνητρα και Βασική Ιδέα | 720 |
| 19.6 | Ασύζευκτη Ιδιομορφική Ανάλυση Χρονο-ιστορίας Απόκρισης | 722 |
| 19.7 | Ιδιομορφική Ανάλυση Οριακής Ύψησης | 729 |
| 19.8 | Αξιολόγηση της Ιδιομορφικής Ανάλυσης Οριακής Ύψησης | 734 |
| 19.9 | Απλοποιημένη Ιδιομορφική Ανάλυση Οριακής Ύψησης για Πρακτικές Εφαρμογές | 739 |
| 20 | Σεισμική Δυναμική Κτιρίων με Μονωμένη Βάση | 741 |
| 20.1 | Συστήματα Σεισμομόνωσης | 741 |
| 20.2 | Μονώροφα Κτίρια με Σεισμομόνωση Βάσης | 744 |
| 20.3 | Αποτελεσματικότητα της Σεισμομόνωσης Βάσης | 750 |
| 20.4 | Πολυώροφα Κτίρια με Σεισμικά Μονωμένη Βάση | 754 |
| 20.5 | Εφαρμογές της Σεισμομόνωσης Βάσης | 760 |
| 21 | Δυναμική των Κατασκευών σε Κτιριακούς Κανονισμούς | 767 |
| Μέρος Α: Κτιριακοί Κανονισμοί και Δυναμική των Κατασκευών 768 | | |
| 21.1 | Διεθνής Κτιριακός Κανονισμός (<i>International Building Code</i> - ΗΠΑ), 2006 | 768 |
| 21.2 | Εθνικός Κτιριακός Κανονισμός του Καναδά, 2005 | 771 |
| 21.3 | Κανονισμός Ομοσπονδιακής Περιοχής του Μεξικό, 2004 | 773 |
| 21.4 | Ευρωκώδικας 8, 2004 | 775 |
| 21.5 | Δυναμική των Κατασκευών στους Κτιριακούς Κανονισμούς | 778 |
| Μέρος Β: Αξιολόγηση των Κτιριακών Κανονισμών 784 | | |
| 21.6 | Τέμνουσα Βάσης | 784 |
| 21.7 | Τέμνουσες Ορόφων και Ισοδύναμες Στατικές Δυνάμεις | 788 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 21.8 | Ροπές Ανατροπής | 790 |
| 21.9 | Συμπερασματικά Σχόλια | 793 |
| 22 | <i>Δυναμική Κατασκευών σε Οδηγίες για Σεισμική Αποτίμηση Κτιρίων</i> | 795 |
| 22.1 | Μη Γραμμική Δυναμική Διαδικασία: Σύγχρονη Πρακτική | 796 |
| 22.2 | Υπολογισμός της Μετατόπισης Κορυφής με Μονοβάθμιο Σύστημα | 797 |
| 22.3 | Προσέγγιση της Παραμόρφωσης Μονοβάθμιων Ανελαστικών Συστημάτων | 799 |
| 22.4 | Μη Γραμμική Στατική Διαδικασία | 806 |
| 22.5 | Συμπερασματικά Σχόλια | 812 |
| A | <i>Μέθοδος Ανάλυσης Απόκρισης στο Πεδίο των Συχνοτήτων</i> | 815 |
| B | <i>Πίνακες Συμβόλων</i> | 837 |
| Γ | <i>Απαντήσεις σε Επιλεγμένα Προβλήματα</i> | 849 |
| | <i>Ευρετήριο</i> | 865 |

Πρόλογος Ελληνικής έκδοσης

Η έντονη και συχνή σεισμική δραστηριότητα στον ελληνικό χώρο απαιτεί να δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην αντισεισμικότητα των κατασκευών και για το λόγο αυτό η Δυναμική των Κατασκευών και η Σεισμική Μηχανική αποτελούν βασικά μαθήματα στα Τμήματα Πολιτικών Μηχανικών των ελληνικών πανεπιστημίων. Η σχετική όμως ελληνική βιβλιογραφία είναι μάλλον πτωχή καθ' όσον δεν υπάρχει κάποιο σύγγραμμα που να καλύπτει επαρκώς όλη την αναγκαία ύλη, περιλαμβανομένων και των σύγχρονων σχετικών εξελίξεων. Το ίδιο, αλλά σε μικρότερο βαθμό, ισχύει στη διεθνή βιβλιογραφία, όπου μπορεί μεν κανείς να βρει πληθώρα βιβλίων για τη Δυναμική των Κατασκευών και αρκετά για τη Σεισμική Μηχανική, κανένα όμως που να καλύπτει ικανοποιητικά αμφότερα τα αντικείμενα. Ακριβώς την ανάγκη αυτή ήρθε να καλύψει το ανά χείρας βιβλίο του Anil K. Chopra, «Δυναμική των Κατασκευών: Θεωρία και Εφαρμογή στη Σεισμική Μηχανική», το οποίο κυκλοφόρησε σε πρώτη έκδοση το 1995. Εκείνο το οποίο κάνει το βιβλίο τούτο να ξεχωρίζει από άλλα βιβλία Δυναμικής των Κατασκευών είναι ότι η ανάπτυξη του αντικειμένου εστιάζεται σε σεισμικές διεγέρσεις, με παράλληλη διεξοδική παρουσίαση των ιδιοτήτων τους, των εργαλείων που άμεσα σχετίζονται με αυτές (φάσματα απόκρισης και σχεδιασμού) και εν γένει στοιχείων και μεθόδων που αφορούν κυρίως ή αποκλειστικά τη σεισμική απόκριση. Επί πλέον, η σχετική ύλη είναι εμπλουτισμένη με πληθώρα αριθμητικών παραδειγμάτων και εφαρμογών, έτσι ώστε να γίνεται πλήρως κατανοητή από τον αναγνώστη.

Για τη μελέτη του βιβλίου απαιτείται το σύνθητες υπόβαθρο μαθηματικών, μηχανικής και στατικής των κατασκευών, που παρέχεται στα 3 πρώτα έτη σπουδών των ελληνικών τμημάτων Πολιτικών Μηχανικών, στο οποίο περιλαμβάνεται και κάποια εξοικείωση με τη μητρική στατική, χωρίς όμως ιδιαίτερες απαιτήσεις. Οι επιλεγμένοι τρόποι ανάπτυξης των επί μέρους αντικειμένων είναι αυτοί με τους οποίους οι σπουδαστές Πολιτικοί Μηχανικοί είναι εξοικειωμένοι από τα μαθήματα στατικής, γεγονός που, συνδυαζόμενο με την πληθώρα των συνοδευτικών αριθμητικών εφαρμογών και σχετικών προβλημάτων σε κάθε Κεφάλαιο, καθιστά το βιβλίο ένα πλήρες βοήθημα, κατάλληλο ακόμα και για ανεξάρτητη μελέτη. Στο βιβλίο έχει περιληφθεί ένα ενδιαφέρον κεφάλαιο όπου οι βασικές διατάξεις τεσσάρων από τους γνωστότερους Αντισεισμικούς Κανονισμούς διαφόρων χωρών συγκρίνονται με τις θεωρητικές προβλέψεις, έτσι ώστε ο αναγνώστης να γνωρίζει αφ' ενός μεν το υπόβαθρο των απλουστεύσεων των Κανονισμών, αφ' ετέρου δε τις

σχετικές προσεγγίσεις για την ασφαλή και ορθή εφαρμογή των αντίστοιχων κανονιστικών διατάξεων. Στο ίδιο πάντα πνεύμα, το βιβλίο έχει εμπλουτισθεί στη δεύτερη και τρίτη έκδοσή του με τις πλέον πρόσφατες εξελίξεις στη σεισμική μηχανική, σε περιοχές προς τις οποίες έχει στραφεί το ενδιαφέρον των περισσότερων ερευνητών του κλάδου κατά την τελευταία 20ετία. Οι περιοχές αυτές είναι η σεισμική μόνωση και η αποτίμηση της σεισμικής ικανότητας υφισταμένων κατασκευών με ανελαστικές στατικές μεθόδους τύπου πλευρικής οριακής ώθησης (αναλύσεις pushover) και με την εισαγωγή κριτηρίων επιτελεστικότητας (performance criteria). Έτσι, με το υλικό αυτό το βιβλίο αποκτά μια πληρότητα που το καθιστά εξαιρετικά χρήσιμο όχι μόνο για τους φοιτητές αλλά και για τους μηχανικούς της πράξης.

Η σκέψη για τη χρησιμότητα της μετάφρασης του βιβλίου αυτού στα Ελληνικά γεννήθηκε όταν ξεφύλλισα για πρώτη φορά το αντίτυπο της πρώτης έκδοσης του βιβλίου που μου είχε στείλει το 1995 ο εκδότης (Prentice Hall), για σχολιασμό. Οι πρώτες επαφές με Έλληνες εκδότες δεν τελεσφόρησαν. Ένα βασικό εμπόδιο ήταν και το γεγονός ότι το σύστημα μονάδων του βιβλίου ήταν το αγγλο-σαξωνικό και όχι το διεθνές SI. Το μειονέκτημα αυτό δυστυχώς παραμένει μέχρι σήμερα και στην ανά χείρας ελληνική έκδοση. Ακολούθησε η δεύτερη έκδοση του βιβλίου στα Αγγλικά και αυτή τη φορά η παρότρυνσή μου για μετάφραση και ελληνική έκδοση του βιβλίου, έστω και χωρίς μετατροπή των αριθμητικών δεδομένων στο σύστημα SI, έγινε κατ' αρχήν δεκτή, αν και με κάποιους ενδοιασμούς, από τις εκδόσεις Μ. Γκιούρδα. Το βαρύ φορτίο της πρώτης μετάφρασης - το βιβλίο έχει 876 σελίδες - επωμίσθηκε η διπλ. Πολ. Μηχανικός κ. Ηρώ Μάρκου, έργο το οποίο ολοκλήρωσε επιτυχώς και με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Θεωρώ ότι χωρίς την κ. Μάρκου η ελληνική έκδοση του βιβλίου αυτού ίσως να μην πραγματοποιείτο ποτέ, γιατί είναι αμφίβολο εάν κάποιος άλλος θα τόλμιζε να ξεκινήσει το επίπονο αυτό έργο. Ο υπογράφων ανέλαβε την ανασκόπηση της μετάφρασης, τον έλεγχο και τις διορθώσεις της τεχνικής ορολογίας και τις αναγκαίες επεμβάσεις στη διατύπωση και τη γλώσσα, όπου αυτό κρινόταν αναγκαίο, τόσο για την πιστότερη απόδοση του αγγλικού κειμένου όσο και για την επίτευξη ενός βελτιωμένου, γλωσσικά, αποτελέσματος. Καταβλήθηκε προσπάθεια η γλώσσα να είναι η καθομιλουμένη, ενώ ως προς τους τεχνικο-επιστημονικούς όρους, όπου μεν αυτοί έχουν καθιερωθεί χρησιμοποιήθηκαν χωρίς περαιτέρω σκέψη, ενώ για τους όρους που δεν έχουν ακόμα καθιερωθεί έγινε προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν οι ευρύτερα γνωστές εκδοχές τους. Αφού είχε αρχίσει η μετάφραση, κυκλοφόρησε ήδη και η τρίτη έκδοση του βιβλίου με πρόσθετη ύλη. Έτσι η παρούσα μετάφραση είναι η μετάφραση της τελευταίας (τρίτης) έκδοσης. Με 4 ήδη μεταφράσεις - στα Ιαπωνικά, Κινεζικά, Κορεατικά και Περσικά - η Ελληνική έκδοση αποτελεί την πέμπτη, ενώ ετοιμάζεται και μετάφραση στα Τουρκικά. Το γεγονός αυτό και μόνο υποδηλώνει την διεθνή αναγνώριση της αξίας και χρησιμότητας του βιβλίου. Πιστεύουμε πως η κυκλοφορία του στην ελληνική γλώσσα θα συμβάλει στην καλύτερη κατάρτιση των μηχανικών στη χώρα μας, σε ένα αντικείμενο που η σημασία του είναι γνωστή σε όλους και γίνεται επίκαιρο κάθε φορά που κάποιος καταστροφικός σεισμός προκαλεί θανάτους και κατα-

Σταύρος Α. Αναγνωστόπουλος
Καθηγητής Πολιτικών Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Πατρών

Προοίμιο

Η ανάγκη ενός εγχειριδίου στην αντισεισμική μηχανική είχε πρώτη φορά επισημανθεί από τον διαπρεπή σύμβουλο μηχανικό, John R. Freeman (1855-1932), ο οποίος μετά τον καταστροφικό σεισμό στη Santa Barbara, California, το 1925, άρχισε να ενδιαφέρεται για το θέμα και αναζήτησε στη Δημοτική Βιβλιοθήκη της Βοστώνης σχετική βιβλιογραφία. Βρήκε ότι όχι απλώς δεν υπήρχε κάποιο εγχειρίδιο στην αντισεισμική μηχανική, αλλά και ότι δεν γινόταν καμία νύξη επί του θέματος στα βιβλία της δομικής μηχανικής. Κοιτάζοντας πίσω, μπορούμε να δούμε ότι η εκπαίδευση των μηχανικών το 1925 δεν ήταν αρκετά εξελιγμένη, με τους υπολογισμούς να γίνονται με χρήση του λογαριθμικού κανόνα, ενώ τα μαθήματα δεν προετοιμάζαν το σπουδαστή να κατανοήσει τη δυναμική των κατασκευών. Στην πραγματικότητα, δεν είχαν αναπτυχθεί όργανα για την καταγραφή ισχυρών εδαφικών κινήσεων, και η κοινωνία φαινόταν να αδιαφορεί για το σεισμικό κίνδυνο.

Τα τελευταία χρόνια έχουν εκδοθεί βιβλία για τη σεισμική μηχανική και τη δυναμική των κατασκευών, αλλά το παρόν βιβλίο του Καθηγητή Anil K. Chopra καλύπτει ένα κενό που υφίσταται μεταξύ των περισσότερο στοιχειωδών βιβλίων και των βιβλίων για προχωρημένες μεταπτυχιακές σπουδές. Ο συγγραφέας είναι ένας αναγνωρισμένος ειδικός στη σεισμική μηχανική και στη δυναμική των κατασκευών, και το βιβλίο του θα είναι πολύτιμο σε σπουδαστές όχι μόνο σε σειсмоγόνες περιοχές αλλά επίσης και σε άλλα μέρη του κόσμου, διότι η γνώση της δυναμικής των κατασκευών είναι απαραίτητη για το σύγχρονο μηχανικό. Το βιβλίο περιλαμβάνει υλικό για την ταλάντωση και τη δυναμική των κατασκευών και παρουσιάζει την εφαρμογή σε κινήσεις κατασκευών που προκαλούνται από σεισμική εδαφική κίνηση. Το υλικό στο βιβλίο παρουσιάζεται με ευκρίνεια με πολυάριθμα λυμένα επεξηγηματικά παραδείγματα έτσι ώστε ακόμα και ένας σπουδαστής σε ένα πανεπιστήμιο όπου ένα τέτοιο μάθημα δεν διδάσκεται να μπορεί να μελετήσει το βιβλίο από μόνος του. Αναγνώστες οι οποίοι ασκούν το επάγγελμα του μηχανικού δεν πρέπει να έχουν δυσκολίες στη μελέτη του αντικειμένου μέσω αυτού του βιβλίου. Ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον γνώρισμα του βιβλίου είναι η εφαρμογή της θεωρίας της δυναμικής των κατασκευών σε σημαντικά θέματα στη σεισμική απόκριση και στο σχεδιασμό πολυ-

ώροφων κτιρίων. Οι πληροφορίες που παρουσιάζονται στο βιβλίο θα είναι πολύτιμες στους μηχανικούς που ασχολούνται με τον πραγματικό αντισεισμικό σχεδιασμό και επιθυμούν να κατανοήσουν περισσότερο το θέμα.

Παρότι το υλικό σε αυτό το βιβλίο οδηγεί στη σεισμική μηχανική, οι παρουσιαζόμενες πληροφορίες είναι επίσης σχετικές και με ταλαντώσεις κατασκευών λόγω ανέμου, όπως επίσης και με κινήσεις ανθρώπινης προέλευσης όπως αυτές που προκαλούνται από δομικά μηχανήματα ή βαριά κυκλοφορία οχημάτων. Ως εγχειρίδιο στην ταλάντωση και τη δυναμική των κατασκευών, αυτό το βιβλίο δεν έχει ανταγωνιστές και συνιστάται στο σοβαρό σπουδαστή. Πιστεύω ότι αυτό είναι το βιβλίο που αναζητούσε ο R. Freeman.

*George W. Housner
California Institute of Technology*

Πρόλογος

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΤΡΙΤΗΣ ΕΚΔΟΣΗΣ

Η *Δυναμική των Κατασκευών* έχει τύχει καλής αποδοχής στα 11 χρόνια από την πρώτη έκδοση. Συνεχίζει να χρησιμοποιείται σαν εγχειρίδιο σε Πανεπιστήμια στις Ηνωμένες Πολιτείες και σε πολλές άλλες χώρες και καλύπτει επίσης ένα ευρύ αναγνωστικό κοινό. Έχουν εκδοθεί μεταφράσεις στα Ιαπωνικά, Κορεάτικα, Περσικά και Ελληνικά και ετοιμάζονται μεταφράσεις στα Τουρκικά και στα Κινεζικά. Η προετοιμασία για την Τρίτη Έκδοση μου παρείχε την ευκαιρία να βελτιώσω, να επεκτείνω και να ανανεώσω το βιβλίο.

Εκτενέστερα άλλαξαν τα Κεφάλαια 19 και 21 και προστέθηκε το Κεφάλαιο 22. Το Κεφάλαιο 19 γράφτηκε πάλι από την αρχή για να ενσωματώσει την πρόσφατη πρόοδο στη σεισμική ανάλυση και απόκριση των ανελαστικών κτιρίων, ένα θέμα για το οποίο από το 1990 γίνεται συνεχής και ανανεωμένη έρευνα. Το Κεφάλαιο 21 έχει υποστεί μεγάλη αλλαγή με την ενσωμάτωση των πρόσφατων εκδόσεων τεσσάρων κτιριακών κανονισμών. Η προσθήκη του Κεφαλαίου 22 είχε ως αιτία τις αλλαγές στο επάγγελμα του πολιτικού μηχανικού και στην πρακτική άσκηση του που συνέβησαν την τελευταία δεκαετία. Οδηγίες για την αποτίμηση υπαρχόντων κτιρίων θεωρούν σαφώς ανελαστική συμπεριφορά για τον προσδιορισμό των σεισμικών απαιτήσεων για επίπεδα επιτελεστικότητας όπως η ασφάλεια της ζωής και η αποφυγή κατάρρευσης. Στο Κεφάλαιο 22, επιλεγμένες πτυχές αυτών των οδηγιών αποτίμησης για τον προσδιορισμό των σεισμικών απαιτήσεων μελετώνται υπό το πρίσμα της θεωρίας της δυναμικής των κατασκευών που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7 και στο νέο Κεφάλαιο 19.

Τα Κεφάλαια 6, 7 και 13 έχουν υποστεί μικρή αλλά σημαντική μετατροπή. Με αφορμή τις πρόσφατες καταγραφές εδαφικών κινήσεων σε εγγύς του ρήγματος περιοχές, το Κεφάλαιο 6 αναγνωρίζει τώρα τα ειδικά χαρακτηριστικά των εγγύς του ρήγματος εδαφικών κινήσεων και τις συγκρίνει με τις συνήθεις κινήσεις μακριά από το ρήγμα, ένα θέμα που επίσης καλύπτεται στο Κεφάλαιο 22. Το Κεφάλαιο 7 παρέχει τώρα μια πληρέστερη μελέτη των εννοιών που συμπεριλαμβάνονται στην κατασκευή του ανελαστικού φάσματος σχεδιασμού. Στο Κεφάλαιο 13, η συζήτηση για τα σφάλματα της επαλληλίας των

ιδιομορφών στη διαδικασία της ιδιομορφικής ανάλυσης απόκρισης έχει επικαιροποιηθεί με βάση πρόσφατα αποτελέσματα ερευνών.

Η Τρίτη έκδοση περιλαμβάνει 357 προβλήματα στο τέλος των Κεφαλαίων. Οι λύσεις των προβλημάτων είναι διαθέσιμες μαζί με πολλά σχήματα σε μεγέθυνση, κατάλληλα για χρήση στις αίθουσες διδασκαλίας.

Ο Πρόλογος για την Πρώτη Έκδοση παραμένει έγκυρος και για αυτή την έκδοση και σας συνιστώ να τον διαβάσετε. Ιδιαίτερως, το *Σημείωμα για Επαγγελματίες Μηχανικούς* ισχύει ακόμα, εκτός από το ότι το Κεφάλαιο 22 θα πρέπει να προστεθεί στον κατάλογο για ανάγνωση. Το *Σημείωμα για Εκπαιδευτικούς* ισχύει επίσης, με μια προσθήκη: το Κεφάλαιο 22 και το Παράρτημα Α ανήκουν σε μια δεύτερη σειρά μαθημάτων για τη δυναμική των κατασκευών και τη σεισμική μηχανική.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Είμαι ευγνώμων σε αρκετούς ανθρώπους που βοήθησαν να προετοιμαστεί αυτή η έκδοση: οι Rakesh K. Goel και Chatran Chintanarakdee ανέπτυξαν και εφάρμοσαν το απαραίτητο λογισμικό για τη δημιουργία των αριθμητικών αποτελεσμάτων και πολλών από τα νέα σχήματα. Οι Akshay Gupta και Aladdin Nassar παρείχαν αριθμητικά αποτελέσματα από την έρευνα τους, η οποία έχει δημοσιευθεί, για αρκετά σχήματα του Κεφαλαίου 19, τα οποία προετοιμάστηκαν από τον Gabriel Hurtado. Ο Charles D. James του Κέντρου Ερευνών Σεισμικής Μηχανικής, Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια, Μπέρκλεϊ, βοήθησε στη επιλογή και τη συλλογή των νέων φωτογραφιών. Η Claire Johnson προετοίμασε το κείμενο και τα αναθεωρημένα τμήματα του χειρογράφου. Η Barbara Zeiders ήταν υπεύθυνη και για την παρούσα έκδοση, όπως και για τις δύο προηγούμενες.

Επιπλέον, πέντε ειδικοί βοήθησαν στην ερμηνεία των ανανεωμένων εκδόσεων των τεσσάρων κτιριακών κανονισμών που περιλαμβάνονται στο Κεφάλαιο 21: ο Ronald O. Hamburger (*International Building Code-Διεθνής Κτιριακός Κανονισμός*), ο Jagmohan L. Humar (*National Building Code of Canada-Εθνικός Κτιριακός Κανονισμός του Καναδά*), ο Eduardo Miranda (*Mexico Federal District Code-Κανονισμός της Ομοσπονδιακής Περιοχής του Μεξικό*) και ο Μιχάλης Ν. Φαρδής και ο Peter Fajfar (*Ευρωκώδικας*).

ΟΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΑΣ ΕΙΝΑΙ ΕΥΠΡΟΣΔΕΚΤΕΣ

Επαναλαμβάνω την παράκλησή μου προς τους καθηγητές, φοιτητές και επαγγελματίες μηχανικούς να μου απευθύνονται (chopra@ce.berkeley.edu) αν έχουν προτάσεις για βελτιώσεις ή για διασαφηνίσεις, ή αν εντοπίσουν λάθη. Σας ευχαριστώ εκ των προτέρων για τον χρόνο και το ενδιαφέρον σας.

Anil K. Chopra

Πρόλογος στη Δεύτερη Έκδοση

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΠΑΝΕΚΔΟΣΗΣ

Η *Δυναμική των Κατασκευών* συνάντησε καλή ανταπόκριση στα πέντε χρόνια από την έκδοσή της. Χρησιμοποιήθηκε σαν εγχειρίδιο σε πανεπιστήμια στις Ηνωμένες Πολιτείες και αλλού, ενώ διαβάζεται ευρέως και από επαγγελματίες. Οι κριτικές από ακαδημαϊκούς και επαγγελματίες ήταν γενικά ευνοϊκές. Η προετοιμασία της δεύτερης έκδοσης μου παρείχε την ευκαιρία να βελτιώσω, ελαφρώς επεκτείνω, και να ενημερώσω το βιβλίο.

Συνολικά ο αναγνώστης θα βρει μία ποικιλία φρέσκου υλικού. Παρακινούμενος από το πρόσφατο ενδιαφέρον στη σεισμική συμπεριφορά των γεφυρών, πολλά κεφάλαια τώρα συμπεριλαμβάνουν παραδείγματα στη δυναμική των γεφυρών και τη σεισμική τους απόκριση. Το Κεφάλαιο 7 επεκτείνει την περιγραφή των μηχανισμών ανάλωσης ενέργειας που χρησιμοποιούνται για να ενισχύσουν σεισμικά τρωτές κατασκευές. Σε ανταπόκριση στην αυξανόμενη ανάγκη για απλοποιημένες μεθόδους δυναμικής ανάλυσης κατάλληλες για σεισμική μηχανική με βάση την απόδοση της κατασκευής, το Κεφάλαιο 7 επίσης παρέχει μία βαθύτερη συζήτηση που συσχετίζει τις παραμορφώσεις των ανελαστικών και ελαστικών συστημάτων, και περιλαμβάνει ένα νέο εδάφιο για τις εφαρμογές του ανελαστικού φάσματος σχεδιασμού στον υπολογισμό της κατασκευής για επιτρεπτή πλαστιμότητα, σεισμική εκτίμηση υφισταμένων κατασκευών, και σχεδιασμό της κατασκευής με βάση τη μετατόπιση. Το Κεφάλαιο 20 συνδυάζει πρόσθετη περιγραφή συστημάτων σεισμικής μόνωσης βάσης και πρόσφατες εφαρμογές αυτών των συστημάτων για την ενίσχυση παλιών και το σχεδιασμό νέων κατασκευών. Το Κεφάλαιο 21 έχει υποστεί μεγάλη αναθεώρηση και συνδυάζει τις σύγχρονες εκδόσεις των κτιριακών κανονισμών: Ο Διεθνής Κτιριακός Κανονισμός έχει αντικαταστήσει τον Ενιαίο Κτιριακό Κανονισμό και έχει προστεθεί ο Ευρωκώδικας.

Η μέθοδος δυναμικής ανάλυσης στο πεδίο των συχνοτήτων τώρα πλέον περιλαμβάνεται, όπως ζητήθηκε από πολλούς αναγνώστες, αλλά παρουσιάζεται ως παράρτημα αντί να παρατίθεται στην πορεία του βιβλίου. Αυτή η απόφαση ενισχύθηκε από την

επιθυμία μου να κρατηθούν τα μαθηματικά όσο πιο απλά επιτρέπει το σχετικό θέμα, κάνοντας επομένως τη δυναμική των κατασκευών εύκολα προσβάσιμη σε σπουδαστές και επαγγελματίες μηχανικούς.

Χρησιμοποιώντας το βιβλίο στη διδασκαλία μου και ξανακοιτώντας το πέντε χρόνια αργότερα, προέκυψε η ανάγκη βελτιώσεων. Το κείμενο έχει ξεκαθαριστεί και τελειοποιηθεί, πολλές ενότητες έχουν ανασυνταχθεί, λυμένα παραδείγματα έχουν προστεθεί, και νέα σχήματα έχουν αναπτυχθεί για να εμπλουτιστεί η αποτελεσματικότητα της παρουσίασης.

Σε ανταπόκριση προτάσεων καθηγητών που υιοθέτησαν το βιβλίο στη διδασκαλία τους, έχουν προστεθεί πολλά νέα προβλήματα στο τέλος κάθε κεφαλαίου. Υπάρχουν 357 προβλήματα στη δεύτερη έκδοση, αυξημένα άνω του 50% σε σχέση με την αρχική έκδοση. Λύσεις σε αυτά τα προβλήματα είναι διαθέσιμες από τον εκδότη, μαζί με μεγεθυμένες εκδοχές των σχημάτων, κατάλληλες για τη δημιουργία διαφανειών για χρήση στην τάξη.

Τα εισαγωγικά στην πρώτη έκδοση ισχύουν και για αυτήν την επανέκδοση, και σας συνιστώ να τα διαβάσετε. Πιο συγκεκριμένα, η *Σημείωση για Επαγγελματίες Μηχανικούς* ακόμα ισχύει, όπως και η *Σημείωση για Εκπαιδευτικούς* αλλά με ένα παράρτημα: το Παράρτημα Α: Μέθοδος Ανάλυσης στο Πεδίο των Συχνοτήτων, το οποίο κατά τη γνώμη μου ανήκει σε ένα προχωρημένο μεταπτυχιακό μάθημα της δυναμικής των κατασκευών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Είμαι ευγνώμων σε πολλούς ανθρώπους που βοήθησαν στην προετοιμασία αυτής της επανέκδοσης: ο Καθηγητής Rakesh K. Goel βοήθησε με πολλούς τρόπους και έπαιξε έναν σημαντικό ρόλο, όπως έκανε και στην πρώτη έκδοση. Πιο συγκεκριμένα, ανέπτυξε και εκτέλεσε το απαραίτητο λογισμικό για τη δημιουργία των νέων σχημάτων. Πολλοί σπουδαστές, σύγχρονοι και παλιότεροι, βοήθησαν στην ετοιμασία των λύσεων για τα λυμένα παραδείγματα και τα προβλήματα στο τέλος των κεφαλαίων: Shraf Ayoub, Ushnish Basu, Shih-Po Chang, Garrett Hall, Petros Keshishian, Allen Kwan, Wen-Hsiung Lin, και Charles Menun. Ο Eric Eisman έκανε την επεξεργασία του κειμένου του νέου υλικού και τις αλλαγές του κειμένου στο TEX. Η Janine Hannel ετοίμασε πολλές φωτογραφίες για την έκδοση. Η Claire Johnson συνέθεσε και εξέδωσε το Εγχειρίδιο Λύσεων. Πέρα από πολλές ανώνυμες κριτικές, οι Καθηγητές M. C. Constantinou, Takeru Igusa, Eduardo Miranda, και C. C. Tung παρείχαν αποφασιστική κριτική και προτάσεις για βελτίωση. Πολλά άτομα (σπουδαστές, καθηγητές, και επαγγελματίες μηχανικοί)- πάρα πολλοί για να αναφερθούν εδώ- προσέφεραν πολύτιμα σχόλια.

ΤΑ ΣΧΟΛΙΑ ΣΑΣ ΕΙΝΑΙ ΕΥΠΡΟΣΔΕΚΤΑ

Επαναλαμβάνω την επιθυμία μου εκπαιδευτικοί, σπουδαστές, και επαγγελματίες μηχανικοί να μου γράψουν (chopra@ce.berkeley.edu) εάν έχουν προτάσεις για βελτίωση ή διευκρινίσεις, ή εάν εντοπίσουν σφάλματα. Σας ευχαριστώ εκ των προτέρων για την ώρα και το ενδιαφέρον σας.

Anil K. Chopra

Πρόλογος στην Πρώτη Έκδοση

ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΙ ΣΤΟΧΟΙ

Το βιβλίο αυτό της Δυναμικής των Κατασκευών προήλθε από μια ιδέα για ένα εγχειρίδιο για μαθήματα σε πολιτικούς μηχανικούς. Περιέχει πολλά θέματα που αφορούν στη θεωρία της δυναμικής των κατασκευών, και εφαρμογές αυτής της θεωρίας στη σεισμική ανάλυση, απόκριση, και σχεδιασμό των κατασκευών. Καμία προηγούμενη γνώση πάνω στη δυναμική των κατασκευών δεν είναι απαραίτητη, έτσι ώστε το βιβλίο αυτό να είναι κατάλληλο και για τον αναγνώστη που πρώτη φορά ασχολείται με το θέμα. Η παρουσίαση του υλικού είναι επαρκώς λεπτομερής και προσεκτικά ολοκληρωμένη με παραπομπές ώστε να είναι το βιβλίο κατάλληλο και για προσωπική μελέτη. Αυτό το χαρακτηριστικό του βιβλίου, σε συνδυασμό με μία προσεκτική επιλογή θεμάτων, θα πρέπει να ενδιαφέρει επαγγελματίες μηχανικούς, ιδιαίτερα αυτούς που ασχολούνται με την ανάλυση και το σχεδιασμό κατασκευών σε σεισμογόνες χώρες.

Κατά την ανάπτυξη του βιβλίου, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στο να γίνει η δυναμική των κατασκευών εύκολα προσβάσιμη σε σπουδαστές και επαγγελματίες μηχανικούς επειδή πολλοί θεωρούν αυτό το θέμα δύσκολο. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, η παρουσίαση διαρθρώνεται γύρω από πολλά χαρακτηριστικά: Τα μαθηματικά έχουν μείνει όσο απλά επιτρέπει το κάθε θέμα. Αναλυτικές διαδικασίες έχουν συνοψισθεί ώστε να δοθεί έμφαση στα επιμέρους βήματα και να διευκολυνθεί η εκτέλεσή τους από τον αναγνώστη. Αυτές οι διαδικασίες επεξηγούνται με πάνω από 100 λυμένα παραδείγματα, που περιλαμβάνουν πολλά λεπτομερή και ρεαλιστικά παραδείγματα όπου τονίζεται η φυσική ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Γύρω στα 400 σχήματα έχουν προσεκτικά σχεδιασθεί ώστε να είναι εκπαιδευτικώς αποτελεσματικά, ενώ πολλά από αυτά προέρχονται από εκτεταμένες προσομοιώσεις σε ηλεκτρονικό υπολογιστή της δυναμικής απόκρισης κατασκευών. Επίσης περιλαμβάνονται φωτογραφίες από κατασκευές και κινήσεις κατασκευών που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια σεισμών ώστε να σχετισθεί η παρουσίαση με την πραγματικότητα.

Η προετοιμασία αυτού του βιβλίου είχε πολλούς αντικειμενικούς σκοπούς:

- Να σχετίσει τις προσομοιώσεις των κατασκευών που μελετώνται με τις ιδιότητες πραγματικών κατασκευών.
- Να παρουσιάσει τη θεωρία της δυναμικής απόκρισης των κατασκευών με έναν τρόπο που να δίνει έμφαση στη φυσική διαίσθηση πάνω σε αναλυτικές διαδικασίες.
- Να κάνει κατανοητές τις εφαρμογές της θεωρίας σε επιλύσεις προβλημάτων που προκύπτουν σε πρακτικές εφαρμογές.
- Να ερμηνεύσει τα θεωρητικά αποτελέσματα ώστε να γίνει κατανοητή η απόκριση των κατασκευών σε ποικίλες δυναμικές καταπονήσεις, με έμφαση στις σεισμικές διεγέρσεις.
- Να εφαρμόσει τη θεωρία της δυναμικής των κατασκευών στη διενέργεια παραμετρικών μελετών που θα αναδείξουν πολλά θεμελιώδη ζητήματα στη σεισμική απόκριση και το σχεδιασμό πολυωρόφων κτιρίων.

Αυτή η μορφή παρουσίασης θα πρέπει να βοηθήσει τον αναγνώστη να αποκτήσει μία βαθύτερη γνώση του αντικειμένου και να εφαρμόσει με σιγουριά τη θεωρία της δυναμικής των κατασκευών στην επίλυση πρακτικών προβλημάτων, ιδιαίτερα στη σεισμική ανάλυση και το σχεδιασμό των κατασκευών, μειώνοντας επομένως την απόσταση ανάμεσα στη θεωρία και την πράξη.

ΘΕΜΑΤΑ ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΖΟΝΤΑΙ

Το βιβλίο οργανώνεται σε τρία μέρη: I. Μονοβάθμια Συστήματα, II. Πολυβάθμια Συστήματα, και III. Σεισμική Απόκριση και Σχεδιασμός Πολυώροφων Κτιρίων.

Το Μέρος I περιλαμβάνει οκτώ κεφάλαια. Στο εναρκτήριο κεφάλαιο διατυπώνεται το πρόβλημα της δυναμικής των κατασκευών για απλές ελαστικές και ανελαστικές κατασκευές, που μπορούν να προσομοιωθούν ως μονοβάθμια συστήματα, ενώ τέσσερις μέθοδοι για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης που ελέγχει την κίνηση της κατασκευής εξετάζονται σύντομα. Στη συνέχεια μελετάμε τη δυναμική απόκριση γραμμικών ελαστικών συστημάτων (1) σε ελεύθερη ταλάντωση (Κεφάλαιο 2), (2) σε αρμονικές και περιοδικές διεγέρσεις (Κεφάλαιο 3), και (3) σε βηματικούς αυξανόμενες και παλμικές διεγέρσεις (Κεφάλαιο 4). Στα Κεφάλαια 2 και 3 περιλαμβάνεται η δυναμική μονοβάθμιων συστημάτων με την απόσβεση Coulomb, ένα θέμα που συνήθως δεν αναφέρεται σε κείμενα πολιτικού μηχανικού, αλλά που έχει γίνει σχετικό με τη σεισμική μηχανική, επειδή μηχανισμοί ανάλωσης ενέργειας που βασίζονται στην τριβή χρησιμοποιούνται σε αντισεισμικές κατασκευές. Μετά την παρουσίαση αριθμητικών μεθόδων χρονικών βημάτων για τον υπολογισμό της δυναμικής απόκρισης συστημάτων (Κεφάλαιο 5), μελετάται η σεισμική απόκριση γραμμικών ελαστικών και ανελαστικών συστημάτων στα Κεφάλαια 6 και 7, αντίστοιχως. Η κάλυψη αυτών των θεμάτων είναι περισσότερο κατανοητή σε σύγκριση με άλλα διαθέσιμα βιβλία: περιλαμβάνονται λεπτομέρειες για την κατασκευή φασμάτων απόκρισης και σχεδιασμού, για την επιρροή της απόσβεσης και της διαρροής, όπως επίσης και η διάκριση μεταξύ φασμάτων απόκρισης και σχεδιασμού. Η ανάλυση πολύπλοκων συστημάτων που αντιμετωπίζονται ως γενικευμένα μονοβάθμια συστήματα αποτελεί το θέμα του Κεφαλαίου 8.

Το Μέρος II περιλαμβάνει τα Κεφάλαια 9 έως 17 για τη δυναμική ανάλυση πολυβάθμιων συστημάτων. Στο εναρκτήριο κεφάλαιο του Μέρους II διατυπώνεται το πρόβλημα της δυναμικής των κατασκευών που προσομοιώνονται ως συστήματα με πεπερασμένο αριθμό βαθμών ελευθερίας και επεξηγείται με πολυάριθμα παραδείγματα. Επίσης περι-

λαμβάνεται μία σύνοψη των μεθόδων επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων που ελέγχουν την κίνηση της κατασκευής. Το Κεφάλαιο 10 ασχολείται με την ελεύθερη ταλάντωση συστημάτων με κλασική απόσβεση και με τον αριθμητικό υπολογισμό των ιδιοσυχνοτήτων και των ιδιομορφών ταλάντωσης της κατασκευής. Επίσης περιλαμβάνονται οι διαφορές μεταξύ της ελεύθερης ταλάντωσης συστημάτων με κλασική απόσβεση και αυτής συστημάτων με μη κλασική απόσβεση, ένα θέμα που συνήθως δεν εξετάζεται σε σχετικά εγχειρίδια. Το Κεφάλαιο 11 αναφέρεται σε διάφορα ζητήματα που σχετίζονται με τον καθορισμό των ιδιοτήτων απόσβεσης των κατασκευών, συμπεριλαμβανομένων πειραματικών δεδομένων- από πειράματα εξαναγκασμένης ταλάντωσης σε κατασκευές και από καταγεγραμμένες κινήσεις κατασκευών κατά τη διάρκεια σεισμών- που παρέχουν μία βάση για την εκτίμηση των ιδιομορφικών λόγων απόσβεσης, καθώς και αναλυτικών διαδικασιών για την κατασκευή του μητρώου απόσβεσης, εάν αυτό είναι αναγκαίο. Το Κεφάλαιο 12 ασχολείται με τη δυναμική γραμμικών συστημάτων, όπου δίνεται έμφαση στη μέθοδο της κλασικής ιδιομορφικής ανάλυσης. Το Μέρος Γ αυτού του κεφαλαίου παρουσιάζει έναν «νέο» τρόπο αντιμετώπισης της ιδιομορφικής ανάλυσης που διευκολύνει στην κατανόηση του πως οι συνεισφορές των ιδιομορφών στην απόκριση επηρεάζονται από τη χωρική κατανομή και τη χρονική μεταβολή των εφαρμοζόμενων δυνάμεων, οδηγώντας σε πρακτικά κριτήρια όσον αφορά τον αριθμό των ιδιομορφών που πρέπει να ληφθούν υπόψη στον υπολογισμό της απόκρισης. Στο Κεφάλαιο 13 αναπτύσσονται διαδικασίες ιδιομορφικής ανάλυσης για τη σεισμική ανάλυση κατασκευών: παρουσιάζονται τόσο η Χρονική ανάλυση σεισμικής απόκρισης όσο και η φασματική δυναμική ανάλυση, με έναν τρόπο που παρέχει φυσική ερμηνεία. Η παρουσίαση και η εφαρμογή των κανόνων συνδυασμού των ιδιομορφών για τον υπολογισμό της μέγιστης απόκρισης πολυβάθμιων συστημάτων απευθείας από το φάσμα σεισμικής απόκρισης ή από το φάσμα σχεδιασμού είναι περισσότερο κατανοητή σε σχέση με υπάρχοντα εγχειρίδια. Οι διαδικασίες εμπλουτίζονται με πολυάριθμα παραδείγματα, συμπεριλαμβανομένης της συνδυασμένης πλευρικής και στρεπτικής απόκρισης κτιρίων μη συμμετρικής κάτοψης και της στρεπτικής απόκρισης ονομαστικά συμμετρικών κτιρίων.

Το Κεφάλαιο 14 είναι αφιερωμένο στο πρακτικό υπολογιστικό θέμα της μείωσης των απαιτούμενων βαθμών ελευθερίας προσομοιούμενο για τις στατικές αναλύσεις της κατασκευής ώστε να αναγνωρισθεί ότι η δυναμική απόκριση πολλών κατασκευών μπορεί να αντιπροσωπευθεί από τις λίγες πρώτες ιδιομορφές. Στο Κεφάλαιο 15 παρουσιάζονται αριθμητικές μέθοδοι χρονικών βημάτων για πολυβάθμια συστήματα που δεν υπάγονται στην κλασική ιδιομορφική ανάλυση: συστήματα με μη κλασική απόσβεση ή συστήματα που αποκρίνονται στην περιοχή της μη γραμμικής συμπεριφοράς. Το Κεφάλαιο 16 ασχολείται με κλασικά προβλήματα δυναμικής συστημάτων με κατανεμημένη μάζα. Συμπεριλαμβάνονται μονάχα μονοδιάστατα συστήματα. Στο Κεφάλαιο 17 παρουσιάζονται δύο μέθοδοι για τη διακριτοποίηση μονοδιάστατων συστημάτων με κατανεμημένη μάζα: η μέθοδος Rayleigh-Ritz και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Εισάγεται το μητρώο συνεχούς μάζας, και επιδεικνύεται η ακρίβεια και η σύγκλιση των προσεγγιστικών τιμών των ιδιοσυχνοτήτων μίας δοκού-προβόλου που προκύπτουν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Το Μέρος III του βιβλίου περιέχει τέσσερα κεφάλαια που ασχολούνται με τη σεισμική απόκριση και το σχεδιασμό πολυώροφων κτιρίων, ένα θέμα που συνήθως δεν συμπεριλαμβάνεται σε βιβλία δυναμικής των κατασκευών. Αναπτύσσονται πολλά σημαντικά και πρακτικά ζητήματα με τη χρήση αναλυτικών μεθόδων που αναπτύχθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 18 παρουσιάζεται η σεισμική απόκριση γραμμικώς ελαστικών πολυώροφων κτιρίων για ένα μεγάλο εύρος δύο σημαντικών παραμέτρων: της θεμε-

λιώδους ιδιοπεριόδου ταλάντωσης και του λόγου δυσκαμψίας δοκού-υποστυλώματος. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα κατανοούμε τον τρόπο με τον οποίο αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν τη σεισμική απόκριση των κτιρίων και, πιο συγκεκριμένα, τη σχετική συνεισφορά στην απόκριση των διάφορων ιδιομορφών, οδηγώντας σε πρακτικές πληροφορίες για τον αριθμό των ανώτερων ιδιομορφών που πρέπει να ληφθούν υπόψη στους υπολογισμούς της σεισμικής απόκρισης. Το Κεφάλαιο 19 ασχολείται με το σημαντικό ζήτημα της σεισμικής απόκρισης πολυώροφων κτιρίων που παραμορφώνονται στην ανελαστική τους περιοχή. Περιλαμβάνει συζήτηση για την καθ' ύψος των ορόφων μεταβολή της απαίτησης πλαστιμότητας, στη μεγάλη απαίτηση πλαστιμότητας στον πρώτο όροφο εάν αυτός είναι «ασθενής» ή «μαλακός» σε σχέση με τους ανώτερους ορόφους, στην απαίτηση πλαστιμότητας κτιρίων που μελετώνται σύμφωνα με την κατανομή πλευρικής δύναμης του *Ενιαίου Κτιριακού Κανονισμού* του 1994, και πως αυτές οι απαιτήσεις συγκρίνονται με την επιτρεπόμενη πλαστιμότητα. Το επί του παρόντος ενεργό και αναπτυσσόμενο ζήτημα της σεισμικής μόνωσης βάσης αποτελεί το θέμα του Κεφαλαίου 20. Ο στόχος μας είναι να μελετήσουμε τη δυναμική συμπεριφορά κτιρίων που εδράζονται επί συστημάτων σεισμικής μόνωσης βάσης με τον περιορισμένο αντικειμενικό σκοπό να κατανοήσουμε γιατί και κάτω από ποιες συνθήκες η σεισμική μόνωση είναι αποτελεσματική στη μείωση των σεισμικών δυνάμεων σε μία κατασκευή. Στο Κεφάλαιο 21 παρουσιάζουμε τις διατάξεις για τη σεισμική δράση σε τρεις κτιριακούς κανονισμούς- στον *Ενιαίο Κτιριακό Κανονισμό* (Ηνωμένες Πολιτείες), στον *Εθνικό Κτιριακό Κανονισμό του Καναδά*, και στον *Ομοσπονδιακό Κανονισμό του Μεξικού*- μαζί με τη σχέση τους με τη θεωρία της δυναμικής των κατασκευών που αναπτύχθηκε στα Κεφάλαια 6, 7, 8, και 13. Στη συνέχεια, οι διατάξεις των κανονισμών αποτιμώνται λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης κτιρίων που παρουσιάστηκαν στα Κεφάλαια 18 και 19.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟΥΣ

Αυτό το βιβλίο είναι κατάλληλο για μαθήματα σε μεταπτυχιακό επίπεδο και σε ανώτερο προπτυχιακό επίπεδο. Δεν απαιτείται καμία προηγούμενη γνώση πάνω στη δυναμική των κατασκευών. Το απαραίτητο υπόβαθρο είναι διαθέσιμο από τα συνηθή μαθήματα του προπτυχιακού κύκλου σπουδών πολιτικού μηχανικού. Αυτά περιλαμβάνουν:

- Στατική ανάλυση κατασκευών, που περιλαμβάνει υπερστατικές κατασκευές και μη-τρωική μέθοδο ανάλυσης (απαιτείται κυρίως για το Μέρος II)
- Σχεδιασμός κατασκευών
- Δυναμική στερεού σώματος
- Μαθηματικά: συνήθεις διαφορικές εξισώσεις (για το Μέρος I), γραμμική άλγεβρα (για το Μέρος II), και μερικές διαφορικές εξισώσεις (μόνο για το Κεφάλαιο 16)

Παρέχοντας μία στοιχειώδη αλλά λεπτομερή αντιμετώπιση ενός μεγάλου αριθμού θεμάτων, αυτό το βιβλίο επιτρέπει ευελιξία στην επιλογή του περιεχομένου του μαθήματος πέρα από το συνηθισμένο, κατά τη κρίση του διδάσκοντος. Πολλά μαθήματα μπορούν να αναπτυχθούν με βάση το υλικό αυτού του βιβλίου. Ακολουθούν μερικά παραδείγματα.

Σχεδόν ολόκληρο το βιβλίο μπορεί να καλυφθεί σε ένα διδακτικό έτος:

- *Τίτλος*: Δυναμική των Κατασκευών I (ένα εξάμηνο)

Πρόγραμμα: Κεφάλαια 1 και 2, Μέρη Α και Β του Κεφαλαίου 3, Κεφάλαιο 4, επιλεγμένα θέματα από το Κεφάλαιο 5, Ενότητες 1 έως 7 από το Κεφάλαιο 6, Ενότητες 1 έως 7 από το Κεφάλαιο 7, επιλεγμένα θέματα από το Κεφάλαιο 8, Ενότητες 1 έως 4 και

8 έως 11 από το Κεφάλαιο 9, Μέρη Α και Β του Κεφαλαίου 10, Μέρη Α και Β του Κεφαλαίου 12, Ενότητες 1, 2, 7, και 8 από το Κεφάλαιο 13, και επιλεγμένα θέματα από το Μέρος Α του Κεφαλαίου 21.

- *Τίτλος:* Δυναμική των Κατασκευών II (ένα εξάμηνο)

Πρόγραμμα: Κεφάλαιο 6 (περιλαμβάνοντας περίληψη των Ενοτήτων 1 έως 7), Κεφάλαιο 7 (περιλαμβάνοντας περίληψη των Ενοτήτων 1 έως 7), Ενότητες 5 έως 7 από το Κεφάλαιο 9, Μέρος Γ του Κεφαλαίου 10, Κεφάλαιο 11, Μέρη Γ και Δ του Κεφαλαίου 12, Ενότητες 3 έως 9 από το Κεφάλαιο 13, και Κεφάλαια 14 έως 21.

Η επιλογή των θεμάτων για το πρώτο μάθημα έχει εν μέρει υπαγορευθεί από την ανάγκη της παροχής κατανοητής ύλης, συμπεριλαμβανομένης της δυναμικής και σεισμικής ανάλυσης πολυβάθμιων συστημάτων, για σπουδαστές που θα πάρουν μόνο ένα μάθημα.

Μία συντομευμένη εκδοχή του παραπάνω σχεδιαγράμματος που θα καλύπτει δύο τρίμηνα μπορεί να οργανωθεί ως ακολούθως:

- *Τίτλος:* Δυναμική των Κατασκευών I (ένα τρίμηνο)

Πρόγραμμα: Κεφάλαιο 1, Ενότητες 1 και 2 από το Κεφάλαιο 2, Ενότητες 1 έως 4 από το Κεφάλαιο 3, Ενότητες 1 έως 5 από το Κεφάλαιο 4, επιλεγμένα θέματα από το Κεφάλαιο 5, Ενότητες 1 έως 7 από το Κεφάλαιο 6, Ενότητες 1 έως 7 από το Κεφάλαιο 7, επιλεγμένα θέματα από το Κεφάλαιο 8, Ενότητες 1 έως 4 και 8 έως 11 από το Κεφάλαιο 9, Μέρη Α και Β του Κεφαλαίου 10, Μέρη Α και Β του Κεφαλαίου 12, Ενότητες 1, 2, 7, και 8 (αφαιρώντας τη μέθοδο CQC) από το Κεφάλαιο 13, και επιλεγμένα θέματα από το Μέρος Α του Κεφαλαίου 21.

- *Τίτλος:* Δυναμική των Κατασκευών II (ένα τρίμηνο)

Πρόγραμμα: Κεφάλαιο 6 (περιλαμβάνοντας περίληψη των Ενοτήτων 1 έως 7), Κεφάλαιο 7 (περιλαμβάνοντας περίληψη των Ενοτήτων 1 έως 7), Ενότητες 5 έως 7 από το Κεφάλαιο 9, Κεφάλαιο 11, Μέρη Γ και Δ του Κεφαλαίου 12, Ενότητες 3 έως 9 από το Κεφάλαιο 13, και Κεφάλαια 18 έως 21.

Ένα μάθημα ενός εξαμήνου με έμφαση στη σεισμική μηχανική μπορεί να οργανωθεί ως ακολούθως:

- *Τίτλος:* Δυναμική των Κατασκευών και Σεισμική Μηχανική

Πρόγραμμα: Κεφάλαιο 1, Ενότητες 1 και 2 από το Κεφάλαιο 2, Ενότητες 1 έως 4 από το Κεφάλαιο 3, Ενότητες 1 έως 5 από το Κεφάλαιο 4, Κεφάλαια 6 και 7, επιλεγμένα θέματα από το Κεφάλαιο 8, Ενότητες 1 έως 4 και 8 έως 11 από το Κεφάλαιο 9, Μέρη Α και Β του Κεφαλαίου 10, Μέρος Α του Κεφαλαίου 11, Μέρη Α και Β του Κεφαλαίου 12, Ενότητες 1, 2, 7, και 8 από το Κεφάλαιο 13, και το Μέρος Α του Κεφαλαίου 21.

Όπως γνωρίζει κάθε διδάσκων, η επίλυση προβλημάτων είναι απαραίτητη για σπουδαστές που διδάσκονται τη δυναμική των κατασκευών. Για αυτό το λόγο τα πρώτα 17 κεφάλαια περιέχουν 233 προβλήματα. Τα Κεφάλαια 18 έως 21 δεν περιέχουν προβλήματα, για δύο λόγους: (1) καμία καινούρια διαδικασία δυναμικής ανάλυσης δεν εισάγεται σε αυτά τα κεφάλαια, (2) το υλικό αυτό από μόνο του δεν μπορεί να περιοριστεί σε σύντομα και ευνόητα παραδείγματα. Ο αναγνώστης, ωστόσο, θα το βρει διδακτικό να επεξεργαστεί τα παραδείγματα στα Κεφάλαια 18 έως 21 και να αναπαραγάγει μερικά από τα

αποτελέσματα. Τα περισσότερα από τα προβλήματα μπορούν να επιλυθούν με υπολογιστή τσέπης και επαρκή αποθέματα υπομονής και επιμονής - ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής είναι βέβαια πιο χρήσιμος. Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής είναι απαραίτητος για την επίλυση κάποιων από τα προβλήματα, και αυτά επισημαίνονται. Στην επίλυση αυτών των προβλημάτων, θεωρείται ότι ο σπουδαστής θα έχει πρόσβαση σε προγράμματα ηλεκτρονικού υπολογιστή όπως η MATLAB ή το CAL. Επίσης είναι διαθέσιμο ένα εγχειρίδιο με τις λύσεις.

Στα μαθήματά μου στο Berkeley χρησιμοποιώ διαφάνειες των σχημάτων του βιβλίου. Οι εκπαιδευτικοί που θέλουν να χρησιμοποιήσουν τέτοια οπτικά μέσα μπορούν να φτιάξουν διαφάνειες από τις μεγεθυμένες εκδοχές των σχημάτων που είναι διαθέσιμες από τον εκδότη.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ

Πολλοί επαγγελματίες μηχανικοί με είχαν συμβουλέψει να ετοιμάσω ένα βιβλίο περισσότερο κατανοητό από το *Dynamics of Structures, A Primer*, μία μονογραφία που εκδόθηκε το 1981 από το Ινστιτούτο Έρευνας Αντισεισμικής Μηχανικής. Αυτή η ανάγκη, ελπίζω, να καλύπτεται από το παρόν βιβλίο. Έχοντας γραφεί ως εγχειρίδιο, περιλαμβάνει όλους τους τύπους και τις λεπτομέρειες που είναι απαραίτητες για τους σπουδαστές, αλλά αυτά τα χαρακτηριστικά δεν πρέπει να αποθαρρύνουν τον επαγγελματία μηχανικό από το να χρησιμοποιήσει αυτό το βιβλίο επειδή η φιλοσοφία του και το ύφος του είναι, όσο το δυνατόν, παρόμοιο με αυτά της μονογραφίας.

Για τους επαγγελματίες μηχανικούς που ενδιαφέρονται για τη σεισμική ανάλυση, απόκριση, και σχεδιασμό των κατασκευών, προτείνω την ακόλουθη πορεία μελέτη του βιβλίου: Κεφάλαια 1 και 2, Μέρη Α και Β του Κεφαλαίου 3, Κεφάλαια 6 έως 9, Μέρη Α και Β του Κεφαλαίου 10, Μέρος Α του Κεφαλαίου 11, και Κεφάλαια 13, 18, 19, 20, και 21.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Σε αυτό το εισαγωγικό κείμενο είναι ανέφικτο να αναγνωρίσω τις πηγές για τις πληροφορίες που παρουσιάζονται. Οι αναφορές έχουν παραληφθεί για να αποφύγω να εκτρέψω την προσοχή του αναγνώστη. Ωστόσο, έχω συμπεριλάβει σποραδικά σχόλια για να προσθέσω ιστορική προοπτική και, στο τέλος σχεδόν κάθε κεφαλαίου, ένα σύντομο κατάλογο κατάλληλων δημοσιεύσεων για επιπλέον μελέτη.

ΤΑ ΣΧΟΛΙΑ ΣΑΣ ΕΙΝΑΙ ΕΥΠΡΟΣΔΕΚΤΑ

Από τη στιγμή που αυτό είναι ένα νέο βιβλίο, θα παρακαλούσα εκπαιδευτικοί, σπουδαστές, και επαγγελματίες μηχανικοί να μου γράψουν (chopra@ce.berkeley.edu) εάν έχουν απορίες, προτάσεις για βελτίωση ή διευκρινίσεις, ή εάν εντοπίσουν σφάλματα. Σας ευχαριστώ εκ των προτέρων για την ώρα και το ενδιαφέρον σας.

Anil K. Chopra

Ευχαριστίες

Ευγνωμονώ πολλούς ανθρώπους που με βοήθησαν στην ετοιμασία αυτού του βιβλίου.

- Ο Δρ. Rakesh K. Goel, ένας συνεργάτης από την αρχή ως το τέλος, βοήθησε με πολλούς τρόπους και έπαιξε ένα σημαντικό ρόλο. Η πιο σημαντική του συνεισφορά ήταν η ανάπτυξη και η εκτέλεση του απαραίτητου λογισμικού για την παραγωγή των αριθμητικών αποτελεσμάτων και τη δημιουργία παραπάνω από 450 σχημάτων.
- Ο Καθηγητής Gregory L. Fenves διάβασε το πρώτο πρόχειρο κείμενο, συζήτησε μαζί μου για αυτό σε εβδομαδιαία βάση, και παρείχε ουσιώδεις προτάσεις για βελτίωση.
- Έξι κριτικοί- οι Καθηγητές Luis Esteva, William J. Hall, George W. Housner, Donald E. Hudson, Rafael Riddell, και C. C. Tung- εξέτασαν το τελικό πρόχειρο κείμενο. Παρείχαν ενθάρρυνση και παρατηρητικά σχόλια για βελτίωση.
- Ο Καθηγητής W. K. Tso μελέτησε το Κεφάλαιο 21 και με συμβούλευσε για την ερμηνεία του *Εθνικού Κτιριακού Κανονισμού του Καναδά*.
- Ο αποθανών Καθηγητής Emilio Rosenblueth παρείχε πολλές πολύτιμες συμβουλές και υπόβαθρο για τον κτιριακό κανονισμό της Ομόσπονδης Περιφέρειας του Μεξικού.
- Πολλοί σπουδαστές, σύγχρονοι και παλιότεροι, βοήθησαν στην ετοιμασία των λύσεων για τα λυμένα παραδείγματα και τα προβλήματα στο τέλος των κεφαλαίων: Juan Chavez, Juan Carlos De la Llera, Rakesh K. Goel, και Tsung-Li Tai. Ο Han-Chen Tan έκανε την επεξεργασία του κειμένου και τα γραφικά για το Εγχειρίδιο Λύσεων.
- Οι Julie Reynolds και Eric Eisman έκαναν την επεξεργασία του κειμένου στο TEX. Ο κος Eisman βοήθησε επίσης στην προκαταρκτική έκδοση ορισμένου από το υλικό.
- Η κα Katherine Frohberg βοήθησε στην επιλογή και συλλογή αρκετών φωτογραφιών.
- Ο Καθηγητής Joseph Penzien ανέλαβε τα καθήκοντά μου ως Βοηθός Εκδότης του *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* από τον Ιούνιο του 1993 έως τον Αύγουστο του 1994 ενώ δούλευα πάνω στο βιβλίο.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τη βαθύτατη εκτίμησή μου στους Καθηγητές Ray W. Clough, Jr., Joseph Penzien, Emilio Rosenblueth, και Α. Σ. Βελέτσο για την επιρροή που είχαν στην επαγγελματική μου ανάπτυξη. Στις αρχές της δεκαετίας του 1960, οι Καθηγητές Clough, Penzien, και Rosenblueth μου εξέθεσαν τις φωτισμένες τους απόψεις και τα θαυμάσια οργανωμένα τους μαθήματα πάνω στη δυναμική των κατασκευών και την σεισμική μηχανική. Στη συνέχεια, ο Καθηγητής Βελέτσο, μέσα από την έρευνα, τα γραπτά του, και τα μαθήματά του, επηρέασε την προσωπική μου φιλοσοφία διδασκαλίας και έρευνας. Η εργασία του, σε συνεργασία με τον αποθανόντα Καθηγητή Nathan M. Newmark, καθόρισε την προσέγγιση που ακολουθήθηκε στα Κεφάλαια 6 και 7.

Αυτό το βιβλίο έχει επηρεαστεί από την προσωπική μου ερευνητική εμπειρία σε συνεργασία με τους σπουδαστές μου. Από το 1969, πολλοί οργανισμοί στήριξαν την έρευνά μου στη σεισμική μηχανική, μεταξύ των οποίων το Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, το Μηχανικό του Αμερικάνικου Στρατού, και το Πρόγραμμα Καταγραφής Ισχυρών Δονήσεων στην Καλιφόρνια. Ευγνωμονώ ιδιαίτερα το Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, και πιο συγκεκριμένα το Δρα. S. C. Liu, για τη μακρά υποστήριξη.

Αυτό το βιβλίο ετοιμάστηκε κατά τη διάρκεια ενός χρόνου εκπαιδευτικής άδειας, ένα προνόμιο για το οποίο ευγνωμονώ το Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια στο Berkeley.

Anil K. Chopra