

# **“ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ Ή ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΩΝ ΓΕΙΤΟΝΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΕ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ”**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο του παρόντος ερευνητικού έργου είναι η διερεύνηση του φαινομένου της άμεσης αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο ή περισσότερων γειτονικών κατασκευών (ή τμημάτων της ίδιας κατασκευής χωρισμένων με διαχωριστικούς αρμούς), σε σεισμικές διεγέρσεις μεγάλης έντασης. Για τη διατύπωση της κρουστικής αλληλεπίδρασης, αναπτύσσονται μέθοδοι με κατάλληλη προσομοίωση του φαινομένου κρούσης, καθώς και τεχνικές επίλυσης των χαρακτηριστικών εξισώσεων που προκύπτουν με θεώρηση ελαστικής και ανελαστικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων.

Στη φάση I διερευνάται η επίπεδη συμπεριφορά των κτιρίων με ανελαστική σχέση τεμνουσών δυνάμεων - εγκαρσίων μετατοπίσεων των υποστυλωμάτων τους. Τα κτίρια προσομοιώνονται με συστήματα πολλών βαθμών ελευθερίας, με θεώρηση διαφραγματικής λειτουργίας της πλάκας των ορόφων. Οι όροφοι των γειτονικών κτιρίων μπορεί να βρίσκονται στο ίδιο ή σε διαφορετικά ύψη.

Στη φάση II γίνονται παραμετρικές διερευνήσεις για την περίπτωση επίπεδης συμπεριφοράς των κτιρίων ως προς τα δυναμικά χαρακτηριστικά και τη διάταξη των κτιρίων, καθώς και ως προς τον βαθμό της ανελαστικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων, ώστε να κατανοηθεί ο ρόλος των παραμέτρων αυτών στην απόκριση των κατασκευών κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασης. Επίσης γίνεται μία στατιστική επεξεργασία των αποκρίσεων των αλληλο-συγκρουόμενων κατασκευών για διαφορετικές σεισμικές διεγέρσεις.

Στη φάση III διατυπώνεται αλγοριθμικά το φαινόμενο της κρούσης γειτονικών κτιρίων στο χώρο, με και χωρίς την παραδοχή της διαφραγματικής λειτουργίας. Στην περίπτωση αυτή, οι επιφάνειες των κτιρίων έχουν πιο σύνθετη μορφή, με πολλαπλές δυνατότητες επαφής στον χώρο των τριών διαστάσεων. Για τον σκοπό αυτό διατυπώνεται ένας αλγόριθμος διερεύνησης της γεωμετρίας, ο οποίος αναζητεί σημεία επαφής σε 3 διαστάσεις και αυτοματοποιεί τον προσδιορισμό της επαφής με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο. Για τη διακριτοποίηση των δομικών στοιχείων χρησιμοποιούνται επίπεδα τετραπλευρικά και στερεά εξαεδρικά ισοπαραμετρικά πεπερασμένα στοιχεία, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα συνδυασμού στοιχείων δοκού στον χώρο και επίπεδων πεπερασμένων στοιχείων.

Στη φάση IV μελετάται η επιρροή της διάδοσης των κρουστικών κυμάτων μέσα στην επιφάνεια του διαφράγματος, με την άρση του περιορισμού της διαφραγματικής λειτουργίας και την προσομοίωσή του με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία.

Στη φάση V διατυπώνονται πρακτικές οδηγίες για την αντιμετώπιση του προβλήματος της αλληλοσύγκρουσης γειτονικών κτιρίων σε επίπεδα πλαίσια.

Στη φάση VI μελετάται η επιρροή της ακανονικότητας της ακαμψίας στην κρουστική συμπεριφορά των κτιρίων σε τρεις διαστάσεις, καθώς και οι παραμορφώσεις-εντάσεις που αναπτύσσονται λόγω της στρέψης των κτιρίων.

Τέλος, στη φάση VII διατυπώνονται οδηγίες για την αξιόπιστη και οικονομική προσομοίωση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης κτιρίων, με πρόγραμμα δυναμικής ανάλυσης H/Y και ειδικότερα του προγράμματος Drain-Tabs για κτίρια με επίπεδη και χωρική συμπεριφορά.

Η σύζευξη των κτιρίων κατά την κρούση γίνεται με δύο διαφορετικές θεωρήσεις. Η πρώτη χρησιμοποιεί πρόσθετα στοιχεία κρούσης μεταξύ των κόμβων που έρχονται σε επαφή, σε συνδυασμό με μία ρητή (explicit) ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων κινήσεως, ενώ η δεύτερη κάνει χρήση των πολλαπλασιαστών Lagrange σε συνδυασμό με μία έμμεση (implicit) ολοκλήρωση των εξισώσεων κινήσεως.

Στην πρώτη θεώρηση, της σύζευξης των κτιρίων με χρήση πρόσθετων στοιχείων κρούσης, τα κτίρια προσομοιώνονται αρχικώς σαν διατμητικοί πρόβολοι. Μια τέτοια προσομοίωση όμως υπερεκτιμά τις ανελαστικές αποκρίσεις των κατωτέρων ορόφων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένα βελτιωμένο προσομοίωμα επιπέδου πλαισίου με στοιχεία δοκών και υποστυλωμάτων, τα οποία διαρρέουν με το σχηματισμό πλαστικών κόμβων στα άκρα τους. Έτσι, όταν σε κάποιο βήμα ολοκληρώσεως των εξισώσεων κινήσεως παρατηρηθεί για πρώτη φορά υπερκάλυψη της απόστασης των δύο γειτονικών κτιρίων, γίνεται η ενεργοποίηση του στοιχείου κρούσης, οπότε και επιτυγχάνεται η σύζευξη των κτιρίων.

Στη δεύτερη θεώρηση της σύζευξης των κτιρίων, γίνεται χρήση της μεθόδου των πολλαπλασιαστών Lagrange, οι οποίοι ενεργοποιούνται στη στιγμή της επαφής των γειτονικών κατασκευών. Η αδυναμία διεξόδου του ενός κτιρίου μέσα στο άλλο, τα αναγκάζει να εφάπτονται σε κάποιες περιοχές των συνόρων τους, οι οποίες δεν είναι εκ των προτέρων γνωστές και στις οποίες αναπτύσσονται άγνωστες δυνάμεις επαφής. Με τη θεώρηση αυτή επιχειρείται αρχικά ή εύρεση της θέσης ισορροπίας τη στιγμή της επαφής και στη συνέχεια των δυνάμεων επαφής. Η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων κινήσεως πραγματοποιείται με την έμμεση μέθοδο χρονικής ολοκλήρωσης Newmark, σε συνδυασμό με την τροποποιημένη μέθοδο Newton-Raphson, μέσα σε κάθε χρονικό βήμα, για την αντιμετώπιση της μη γραμμικής συμπεριφοράς της κατασκευής. Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόζεται για τη μελέτη του φαινομένου της αλληλεπίδρασης κτιρίων, τόσο στο επίπεδο όσο και στον χώρο.

#### Συμπεράσματα - Αξιοποίηση αποτελεσμάτων

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρούσα έρευνα, μπορούμε να διατυπώσουμε τα εξής συμπεράσματα :

1) Από την παραμετρική διερεύνηση της ελαστικής και ανελαστικής απόκρισης συστημάτων επιπέδων πλαισίων υπό κρούση, παρατηρήθηκε ότι οι σεισμικές συγκρούσεις έχουν δυσμενή επίδραση στην απόκριση του περισσότερο δύσκαμπτου κτιρίου, ιδίως όταν αυτό βρίσκεται στο άκρο της σειράς διάταξης (βλ. Φάση II). Τα αποτελέσματα είναι περισσότερο έντονα στην ανελαστική περίπτωση, κατά την οποία οι μέσες απαιτήσεις πλαστιμότητας στους ανώτερους ορόφους αυξάνονται λόγω των συγκρούσεων έως και 3 φορές. Τουναντίον, αμελητέες είναι οι αυξήσεις στις απαιτήσεις πλαστιμότητας του εύκαμπτου κτιρίου, όταν αυτό βρίσκεται στην άκρη της σειράς, ενώ αυτές μειώνονται όταν το κτίριο βρίσκεται στο ενδιάμεσο. Στην ελαστική απόκριση, οι αλληλοσυγκρούσεις μειώνουν γενικά τις τέμνουσες ορόφου

του εύκαμπτου κτιρίου και οι μειώσεις αυτές είναι μεγαλύτερες όταν το κτίριο είναι ενδιάμεσο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν προκύψει από στατιστική επεξεργασία και αναφέρονται στις μέσες τιμές των εξεταζόμενων περιπτώσεων για διαφορετικές σεισμικές διεγέρσεις και ότι για κάποια *συγκεκριμένη* διεγερση η επίδραση των αλληλοσυγκρούσεων μπορεί να είναι σημαντική.

2) Από την παραμετρική διερεύνηση της αλληλεπιδράσεως κτιρίων με ή χωρίς ακανονικότητες στην κατανομή της ακαμψίας (βλ. Φάση III και VI αντίστοιχα) και με απόκριση σε τρεις διαστάσεις, παρατηρήθηκε ότι ο συνδυασμός εύκαμπτων και δύσκαμπτων γειτονικών κτιρίων έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της καταπόνησης του δύσκαμπτου κτιρίου κατά τη διάρκεια της κρούσης για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, ιδιαίτερα όταν η διεγερση του εύκαμπτου κτιρίου βρίσκεται κοντά στο συντονισμό του. Αντίθετα, διαπιστώθηκε ότι το εύκαμπο κτίριο ανακουφίζεται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων που εξετάστηκαν. Επίσης παρατηρήθηκε ότι η ελαστική ενέργεια που απορροφάται από όλο το σύστημα κατά τη διάρκεια του φαινομένου της κρούσης συνήθως μειώνεται, σε σχέση με το άθροισμα των ενεργειών που απορροφώνται από τα κτίρια όταν δεν πραγματοποιείται η επαφή. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι το φαινόμενο της σύζευξης που συμβαίνει κατά την επαφή μεταβάλλει τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος των αλληλοσυγκρουόμενων κτιρίων. Έτσι, μία σεισμική διεγερση που προκαλεί συντονισμό σε μια κατάσκη, παύει να έχει το ίδιο αποτέλεσμα μετά τη σύζευξή της με ένα ή περισσότερα κτίρια. Παρόλ' αυτά, σε μερικές περιπτώσεις παρατηρήθηκε ότι η αλλαγή των δυναμικών χαρακτηριστικών του συστήματος λόγω του φαινομένου της κρούσης είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της ελαστικής ενέργειας του συστήματος σε σχέση με το άθροισμα των ελαστικών ενεργειών των κτιρίων χωρίς επαφή.

3) Από τη μελέτη της επίδρασης της διάδοσης των κρουστικών κυμάτων δια μέσου του διαφράγματος (βλ. Φάση IV), παρατηρήθηκε ότι για συνήθη οικοδομικά έργα η παραμορφωσιμότητα του διαφράγματος κατά την κρούση γειτονικών κτιρίων δεν αναμένεται να διαφοροποιήσει αισθητά την καταπόνηση η οποία προκύπτει με τη θεώρηση διαφραγματικής λειτουργίας.

4) Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας, διαπιστώθηκε η πολυπαραμετρικότητα του φαινομένου και η ευαισθησία στην απόκριση ενός συζευγμένου κρουστικώς συστήματος κτιρίων στις παραμέτρους που επηρεάζουν το φαινόμενο της κρούσης, όπως είναι τα χαρακτηριστικά των σεισμικών διεγέρσεων, τα δυναμικά χαρακτηριστικά, η σχετική διάταξη (τόσο μεταξύ τους όσο και ως προς τη διεύθυνση του σεισμού), η ύπαρξη και μη ακανονικοτήτων στην κατανομή της ακαμψίας των κτιρίων και ο βαθμός ανελαστικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων. Από τα παραπάνω είναι φανερό, πως ο πολυπαραμετρικός χαρακτήρας του φαινομένου για χωρική συμπεριφορά των κατασκευών καθιστά δύσκολη τη δημιουργία κανονιστικών διατάξεων, αλλά οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά περίπτωση για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων.

### Πρακτικές Οδηγίες

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διερεύνηση του φαινομένου της κρουστικής αλληλεπίδρασης στο παρόν ερευνητικό έργο, μπορούν να διατυπωθούν οι παρακάτω πρακτικές οδηγίες :

- 1) Το εύρος του διαχωριστικού αντισεισμικού αρμού, όπως προδιαγράφεται από τον Νέο Ελλην. Αντισεισμ. Κανονισμό (NEAK), φαίνεται επαρκές για την ασφαλή αντιμετώπιση του προβλήματος των αλληλοσυγκρούσεων κτιρίων με επίπεδη συμπεριφορά. Στην περίπτωση όμως χωρικής συμπεριφοράς των κτιρίων με σημαντική α-κανονικότητα μάζας ή/και ακαμψίας, θα πρέπει να διενεργείται εκτενέστερος έλεγχος.
- 2) Το πρόβλημα των αλληλοσυγκρούσεων ελαχιστοποιείται στην περίπτωση ισοσταθμίας των πλακών των δύο κτιρίων, η οποία πρέπει και να επιδιώκεται.
- 3) Οι αλληλοσυγκρούσεις μπορεί να έχουν δυσμενή αποτελέσματα όταν: (α) υπάρχει δυνατότητα εμβολισμού υποστυλωμάτων λόγω ανισοσταθμίας πλακών και (β) τα γειτονικά κτίρια διαφέρουν σημαντικά ως προς το ύψος τους, τη μάζα τους και τις ιδιοπεριόδους τους. Στις περιπτώσεις αυτές το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπισθεί απόδοτικα με την κατασκευή τοιχωμάτων “προσγκρουστήρων”, όπως προβλέπεται από τον NEAK και από τον Αντισεισμικό Προ-Ευρωκώδικα 8 (EC8).
- 4) Στις περιπτώσεις που είναι αδύνατη η πρόβλεψη πλήρους αντισεισμικού αρμού, το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπισθεί, λιγότερο αποτελεσματικά, με τη μείωση του εύρους του αρμού και την πλήρωσή του με κάποιο υλικό απορρόφησης κραδασμών.

### Δημοσιεύσεις που προέκυψαν από το παρόν ερευνητικό έργο

- 1) Papadrakakis, M., Mouzakis, H., Bitzarakis, S. and Plevris, N. (1991), “A Lagrange Multiplier Solution Method for Pounding of Buildings during Earthquakes”, Earth. Eng. Struct. Dynamics, 20, 981-998.
- 2) Papadrakakis, M. and Bitzarakis, S. (1992), “Interaction of adjacent buildings under seismic excitation”, 1<sup>st</sup> National Congress on Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Technical Chamber of Greece, Athens.
- 3) Papadrakakis, M., Apostolopoulou, C., Bitzarakis, S. and Zacharopoulos, A. (1993), “A 3D Model for the Analysis of Building Pounding during Earthquakes”, Structural Dynamics - EURO DYN '93, Moan et al. (eds), Balkema, Rotterdam.
- 4) Papadrakakis, M. and Mouzakis, H. (1995), “Earthquake Simulator Testing of the Pounding Phenomenon of Adjacent Buildings”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24, 811-834.
- 5) Papadrakakis, M., Apostolopoulou, C., Zacharopoulos, A. and Bitzarakis, S. (1994), “A 3-D computer simulation of building pounding under seismic excitation”, 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Computational Structures Technology CST'94, Athens, CIVIL-COMP Press, 177-190.