

## ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΙΣ ΠΑΡΑΚΕΙΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΛΟΓΩ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

ΓΕΩΡΓΙΑΔΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ  
ΓΙΟΥΝΗ ΕΛΙΣΑΒΕΤ

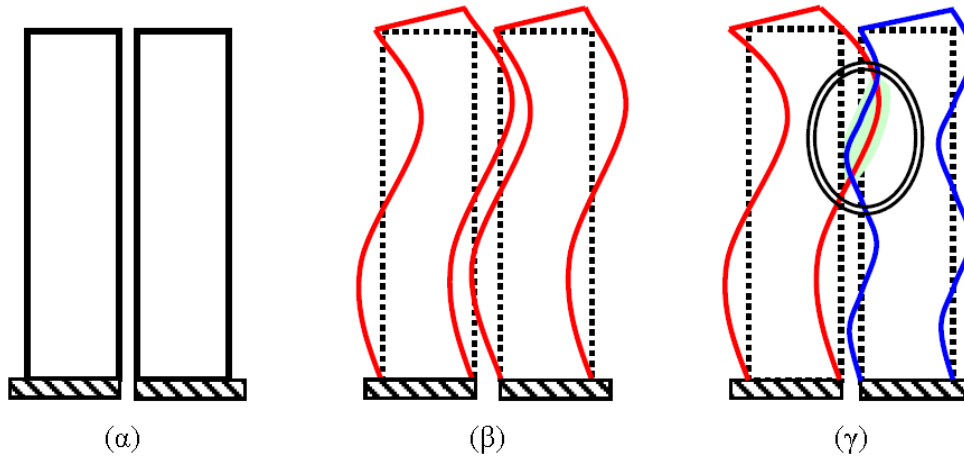
### Περίληψη

Σε αυτήν την εργασία παρατίθεται και αναλύεται το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης κατασκευών. Στο πρώτο μέρος της εργασίας γίνεται μία βιβλιογραφική έρευνα που περιέχει πορίσματα από τις σημαντικότερες μελέτες των τελευταίων 20 χρόνων και έχει στόχο την παρουσίαση και κατανόηση του φαινομένου και των παραμέτρων που το επηρεάζουν. Επίσης γίνεται αναφορά στις συστάσεις των κανονισμών ΕΑΚ, ΕΚ8, ΚΑΝ.ΕΠΕ. για την αντιμετώπιση του φαινομένου. Στο δεύτερο μέρος παρατίθενται τρεις συγκριτικές αναλύσεις χρονοϊστορίας σε δύο γειτονικά κτίρια διαφορετικού ύψους με μεταβαλλόμενη ενδιάμεση απόσταση, που πραγματοποιήθηκαν από τους συγγραφείς με το λογισμικό SAP2000. Στόχος των αναλύσεων είναι η παρουσίαση των συνεπειών της αλληλεπίδρασης στην απόκριση των κατασκευών και ο έλεγχος της αποτελεσματικότητας των μέτρων προστασίας των κτιρίων που προτείνονται από τους κανονισμούς.

### Α. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

#### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το φαινόμενο αλληλεπίδρασης κατασκευών (structural pounding) αναφέρεται σε οριζόντιες συγκρούσεις γειτονικών κτιρίων ως αποτέλεσμα έντονων σεισμικών διεγέρσεων. Παρατηρείται σε διπλανά κτίρια που ταλαντώνονται εκτός φάσης (Σχήμα 1), εξαιτίας των διαφορετικών δυναμικών τους χαρακτηριστικών, με ανεπαρκές ενδιάμεσο κενό για την σχετική τους μετακίνηση [1].



(α) Σε ηρεμία, (β) Ταλάντωση εντός φάσης, (γ) Ταλάντωση εκτός φάσης

Σχήμα 1: Σεισμική συμπεριφορά παρακείμενων κτιρίων

Οι ισχυρές δυνάμεις που δημιουργούνται κατά τις συγκρούσεις εφαρμόζονται για πολύ μικρό χρονικό διάστημα δημιουργώντας κύματα καταπόνησης και πίεσης που ταξιδεύουν μακριά από την περιοχή επαφής των κατασκευών, επηρεάζοντας τόσο τοπικά όσο και συνολικά την απόκρισή τους. Οι κατασκευές, λοιπόν, καλούνται να ανταπεξέλθουν στα φορτία του σεισμού και συγχρόνως στα επιπρόσθετα λόγω των συγκρούσεων, τα οποία όμως δεν έχουν συμπεριληφθεί στον σχεδιασμό τους, με αποτέλεσμα πιθανόν να υπερβούν τα όρια αντοχής τους [2].

Οι διαφορές μεταξύ καταστροφών λόγω αλληλεπίδρασης των κατασκευών σε σχέση με άλλες ζημιές λόγω σεισμών είναι ότι οι δυνάμεις πρόσκρουσης μπορεί να προκαλέσουν άμεση κατάρρευση και μείωση των πιθανοτήτων επιβίωσης των ενοίκων [3]. Αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης μπορεί να είναι, επίσης, τεράστια δομική καταστροφή, αστοχία και πτώση εξαρτημάτων του κτιρίου με κίνδυνο για τους περαστικούς, βλάβη στα μηχανολογικά, ηλεκτρολογικά και πυροσβεστικά συστήματα, αρχιτεκτονικές και μη δομικές μικρές ζημιές. Σε δημόσια κοινωφελή κτίρια και εγκαταστάσεις όπως νοσοκομεία, πυροσβεστική και κτίρια τηλεπικοινωνιών αυτές οι δευτερεύουσες καταστροφές μπορούν να οδηγήσουν σε αναστολή των υπηρεσιών και καθυστέρηση ανάκαμψης μετά από το σεισμό [4].

Οι καταγραφές και οι επί τόπου παρατηρήσεις μετά από καταστρεπτικούς σεισμούς σε όλο τον κόσμο έχουν επιβεβαιώσει τη σημαντική επιρροή της αλληλεπίδρασης των κατασκευών στη σεισμική τους απόκριση. Σημαντικά φαινόμενα αλληλεπίδρασης έχουν καταγραφεί στους παρακάτω σεισμούς ([2], [4], [5], [6]) :

1964 Αλάσκα, όπου ο πύργος του Anchorage Westward Hotel καταστράφηκε όταν συγκρούστηκε με το τριώροφο κτίριο δεξιώσεων του ίδιου ξενοδοχείου,

1967 Venezuela,

1971 San Fernando, όπου το Olive View Hospital συγκρούστηκε με το εξωτερικό κλιμακοστάσιο και ο πρώτος του όροφος με μία γειτονική αποθήκη,

1972 Managua, 1977 Romania, 1977 Θεσσαλονίκη, 1981 Κεντρική Ελλάδα,

1985 Mexico, όπου τουλάχιστον το 15% από τα 330 κτίρια που κατέρρευσαν είχαν ως αιτία τις συγκρούσεις μεταξύ τους,

1989 Loma Prieta San Francisco, όπου καταγράφηκαν 200 περιστατικά που αφορούσαν πάνω από 500 κτίρια,

1999 Πάρνηθα, όπου τμήματα σχολείου στην Αθήνα συγκρούστηκαν με αποτέλεσμα την κατάρρευση του παραπετάσματος της στέγης,

2010 Darfield New Zealand.

Για την πρόληψη του φαινομένου οι κώδικες προβλέπουν διαχωρισμό των κατασκευών, που όμως δεν είναι πάντοτε αποτελεσματικός ή εφαρμοστέος. Αυτό συμβαίνει γιατί οι αποστάσεις είναι ανεπαρκείς και αντιφατικές με την φιλοσοφία των μοντέρνων κωδίκων που υπαινίσσονται ότι μεγάλες παραμορφώσεις μπορούν να συμβούν σε μεγάλους σεισμούς λόγω ανελαστικής απόκρισης. Επίσης, το υψηλό κόστος γης και τα μικρά οικόπεδα στα κέντρα πόλεων κάνουν την εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης δύσκολη, εφόσον η γη είναι ένα ακριβό αγαθό το οποίο οι κάτοχοί του το χρησιμοποιούν στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό μεγαλώνοντας την έκταση των οικοδομημάτων για οικονομικούς λόγους [7]. Πρόβλημα λόγω της αλληλεπίδρασης έχουν, τέλος, και τα κτίρια που είναι κατασκευασμένα με τους κανονισμούς προ του 1995, όπου δεν προβλεπόταν αντισεισμικός αρμός.

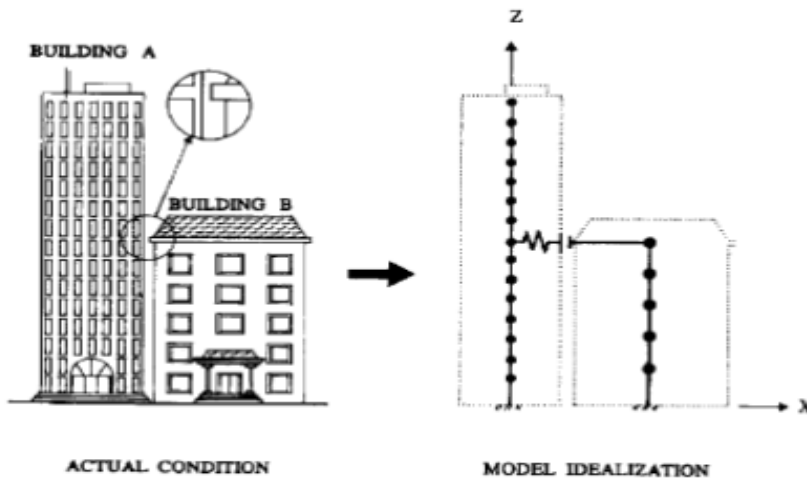
Η αλληλεπίδραση των κατασκευών είναι ένα φαινόμενο εξαιρετικά ενδιαφέρον αλλά και περίπλοκο, που ενώ επηρεάζει σημαντικά τόσο τα μελλοντικά όσο και τα υφιστάμενα κτίρια, δεν δέχεται επαρκή προσοχή από τους μηχανικούς στο σχεδιασμό των κτιρίων.

## 2. ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

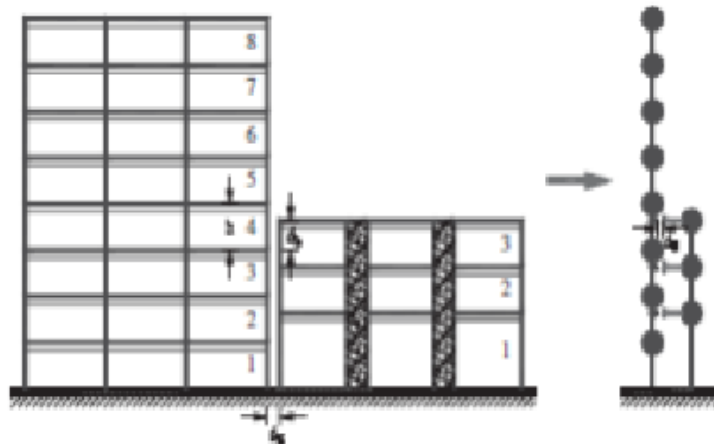
Οι μελέτες για τις συγκρούσεις κατασκευών που έχουν γίνει μέχρι σήμερα εστιάζουν σε τέσσερις τομείς [1]:

- στην παρατήρηση καταστροφών και ζημιών
- σε αναλυτικές μελέτες της δυναμικής του φαινομένου, με στόχο την κατανόηση της συμπεριφοράς των κατασκευών μακροσκοπικά και εξαγωγή ποιοτικών αποτελεσμάτων με χρήση συστημάτων ενός βαθμού ελευθερίας για απλοποίηση του προβλήματος
- σε συγκεκριμένες αναλύσεις κατασκευών, με σκοπό την αποτύπωση της απόκρισης πραγματικών κατασκευών με χρήση συστημάτων περισσότερων βαθμών ελευθερίας (Σχήμα 2,3)
- στον έλεγχο μεθόδων άμβλυνσης του φαινομένου

Τα σενάρια αλληλεπίδρασης που εξετάζονται διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη ζημιά που προκαλούν. Πρώτον, σε αυτά όπου οι συγκρούσεις γίνονται μεταξύ των πλακών ορόφων (Σχήμα 2) και δεύτερον σε αυτά όπου οι συγκρούσεις γίνονται μεταξύ πλάκας και υποστυλώματος (Σχήμα 3). Στην πρώτη περίπτωση η ζημιά είναι συνολική και προκαλείται από την μεταφερόμενη ενέργεια και ορμή λόγω της σύγκρουσης αυξάνοντας την απόκριση της κατασκευής. Στην δεύτερη η ζημιά είναι τοπική και προκαλείται από την φυσική επαφή των δύο κτιρίων [8].



Σχήμα 2: Εξειδανίκευση αλληλεπίδρασης πλάκας με πλάκα [1]



Σχήμα 4: Εξειδανίκευση αλληλεπίδρασης πλάκας με υποστύλωμα [7]

## 2.1. ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΕΠΑΦΗΣ

Η αλληλεπίδραση είναι πολύπλοκο φαινόμενο που εμπεριέχει πλαστικές παραμορφώσεις στα σημεία επαφής, τοπικές ρηγματώσεις, συνθλίψεις και αστοχίες λόγω της πρόσκρουσης και της τριβής. Η διαδικασία μεταφοράς ενέργειας είναι αρκετά περίπλοκη και κάνει την μαθηματική ανάλυση ακόμα πιο σύνθετη [2].

### 2.1.1. ΣΥΓΚΡΟΥΣΗ ΠΛΑΚΩΝ

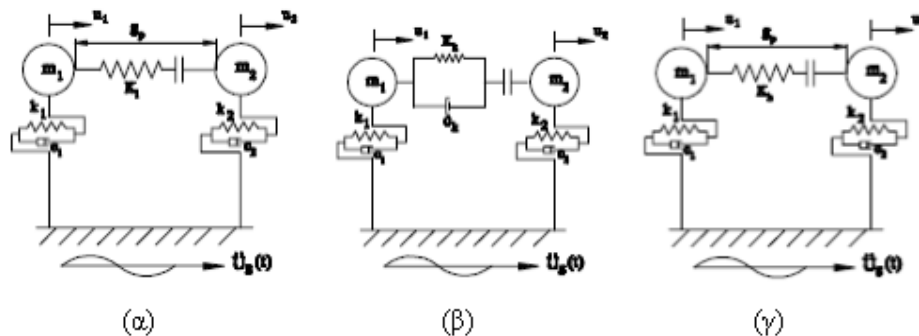
Δύο βασικές μέθοδοι αναπτύσσονται στη βιβλιογραφία για την προσομοίωση του φαινομένου η στερεομηχανική μέθοδος και η μέθοδος του στοιχείου επαφής.

#### Στερεομηχανική μέθοδος

Αυτή η προσέγγιση του φαινομένου υποθέτει στιγμιαία επαφή των κτιρίων και χρησιμοποιεί την διατήρηση της ορμής και τον συντελεστή αποκατάστασης για τον προσδιορισμό των ταχυτήτων μετά την πρόσκρουση. Με τη χρήση αυτού του συντελεστή συνυπολογίζονται οι μόνιμες παραμορφώσεις που προκαλεί η κρούση. Αυτή η μέθοδος δεν χρησιμοποιείται ευρέως διότι δεν μπορούν να υπολογιστούν οι δυνάμεις πρόσκρουσης, οι επιταχύνσεις και η διάρκεια επαφής και κατ' επέκταση δεν μπορεί να ενσωματωθεί σε μία ανάλυση χρονοϊστορίας [8].

#### Μέθοδος στοιχείου επαφής

Σε αυτήν την μέθοδο το πρόβλημα μοντελοποιείται με τη χρήση ενός στοιχείου που ενεργοποιείται όταν οι κατασκευές έρχονται κοντά. Ένα ελατήριο με υψηλή δυσκαμψία είναι το κατάλληλο για τον προσδιορισμό της δύναμης πρόσκρουσης, για την εξασφάλιση επαφής σύντομης διάρκειας και για να περιορίσει τη μετακίνηση. Αυτή η μέθοδος προσεγγίζει καλύτερα το φαινόμενο με την προϋπόθεση ότι χρησιμοποιούνται οι κατάλληλες ιδιότητες του ελατηρίου. Εντούτοις, αυτές οι ιδιότητες είναι αρκετά ασαφής και έτσι προσδιορίζονται δύσκολα, αλλά οι αναλύσεις αποδεικνύουν ότι μεγάλη αλλαγή των τιμών τους δεν επηρεάζει ουσιαστικά την απόκριση των κατασκευών, παρά μόνο τις δυνάμεις πρόσκρουσης [8]. Διατίθενται τέσσερα μοντέλα [9]:



(α) Γραμμικό ελατήριο, (β) Μοντέλο Kelvin, (γ) Μοντέλο Hertz

Σχήμα 3: Στοιχεία επαφής [9]

#### Γραμμικό ελατήριο

Είναι η πιο απλή μέθοδος και μπορεί να εκτελεστεί εύκολα και σε λογισμικό, αλλά δεν προσομοιώνονται οι απώλειες ενέργειας (Σχήμα 3(α)).

#### Μοντέλο Kelvin

Σε αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται ένα γραμμικό ελατήριο μαζί με ένα αποσβεστήρα. Η σταθερά απόσβεσης εκφράζει την ποσότητα απώλειας ενέργειας αλλά το ιξώδες στοιχείο παραμένει ενεργοποιημένο και μετά την επαφή (Σχήμα 3(β)).

### Μοντέλο Hertz

Σε αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται ένα μη γραμμικό ελατήριο. Η προσέγγιση είναι ρεαλιστική, αλλά δεν μοντελοποιείται η απώλεια ενέργειας και η εφαρμογή του σε λογισμικό είναι ιδιαίτερα περίπλοκη (Σχήμα 3(γ)).

### Μοντέλο Hertzdamp

Σε αυτό το μοντέλο συνδυάζεται το μη γραμμικό ελατήριο Hertz με έναν μη γραμμικό αποσβεστήρα, ώστε να προσδιορίζεται η απώλεια ενέργειας. Αποτελεί την πιο αντιπροσωπευτική εξιδανίκευση.

## **2.1.2. ΣΥΓΚΡΟΥΣΗ ΠΛΑΚΑΣ ΥΠΟΣΤΗΛΩΜΑΤΟΣ**

Σε αυτές τις μελέτες χρησιμοποιείται ένα γραμμικό στοιχείο επαφής χωρίς απόσβεση γιατί την πλειοψηφία της πλαστικής δράσης την αναλαμβάνει το υποστύλωμα [8].

## **2.2. ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΓΙΑ ΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

### Διαφράγματα

Όλες οι έρευνες μέχρι σήμερα έχουν γίνει με θεώρηση άκαμπτων διαφραγμάτων. Στην πραγματικότητα, όμως, τα διαφράγματα έχουν και αξονική δυσκαμψία και κατανεμημένες μάζες [8].

### Έδαφος

Ο ρόλος του εδάφους στο φαινόμενο δεν έχει μελετηθεί αρκετά. Ενώ η επίδρασή του είναι δεδομένη ο τρόπος επιρροής δεν είναι ακόμη σαφώς προσδιορισμένος. Από τη μία το μαλακό έδαφος αυξάνει την περίοδο των κτιρίων και προκαλεί μεγαλύτερου πλάτους αποκρίσεις και άρα αυξάνει τις πιθανότητες συγκρούσεων [10] και από την άλλη μετά από ανάλυση δύο κτιρίων προέκυψε ότι ο συνυπολογισμός του μαλακού εδάφους ήταν ευνοϊκός διότι μείωσε την τέμνουσα βάσης και τη δύναμη πρόσκρουσης [11].

### Τρεις διαστάσεις

Μόνο δύο έρευνες με τρισδιάστατο κτίριο έχουν πραγματοποιηθεί με αποτέλεσμα να μην έχει εξεταστεί ουσιαστικά το ενδεχόμενο επιβαλλόμενης στρέψης λόγω των συγκρούσεων, ενώ είναι γνωστό από τους ερευνητές ότι αποτελεί πιθανή αιτία δημιουργίας μηχανισμού αστοχίας [8].

## **3. ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΑ**

Παρ' όλο που βρέθηκαν μοντέλα για να παρασταθεί το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης των κατασκευών, δεν έχουν επισημοποιηθεί απλοποιημένα μοντέλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον σχεδιαστή μηχανικό [8].

Από συγκριτική μελέτη ελαστικών και ανελαστικών αναλύσεων συμπεραίνεται ότι η ελαστική συμπεριφορά στις συγκρούσεις είναι πιο συντηρητική. Αυτό εξηγεί γιατί εφαπτόμενα κτίρια που έχουν διαφορετικές περιόδους και δεν διαχωρίζονται από αρμό συμπεριφέρθηκαν ικανοποιητικά στους προηγούμενους σεισμούς. Η απόκριση στην ανελαστική ανάλυση είναι μεγαλύτερη, αλλά η ταχύτητα, η επιτάχυνση και η δύναμη πρόσκρουσης πολύ μικρότερη. Επίσης, τα συμβάντα αλληλεπίδρασης στην ανελαστική ανάλυση είναι λιγότερα από ότι στην ελαστική [4].

Τελικά, η ανελαστική μελέτη είναι απαραίτητη για τον οικονομικό σχεδιασμό της κατασκευής και αποτελεί το κατάλληλο εργαλείο για την μελέτη εύρεσης μεθόδου μείωσης της αλληλεπίδρασης εκτός τους αντισεισμικού αρμού [4].

### **3.1. ΣΥΓΚΡΟΥΣΗ ΠΛΑΚΩΝ**

Το μόνο εργαλείο διαθέσιμο στο μηχανικό είναι η μη γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας των δύο κτιρίων [8].

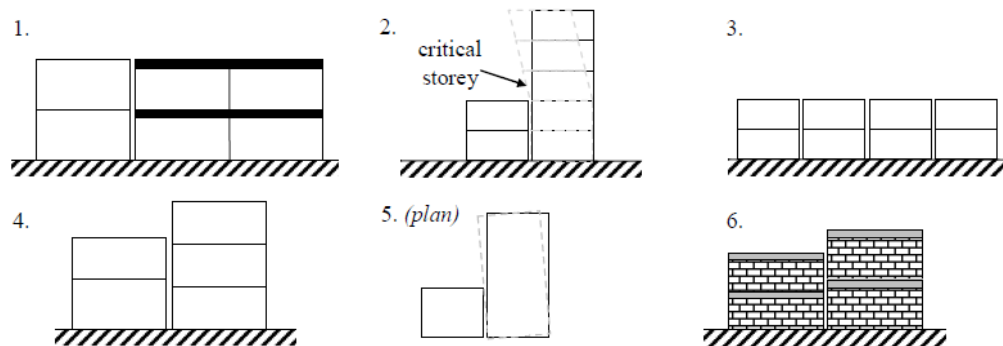
### 3.2. ΣΥΓΚΡΟΥΣΗ ΠΛΑΚΑΣ ΥΠΟΣΤΗΛΩΜΑΤΟΣ

Για την εύρεση των απαιτήσεων πλαστιμότητας και διάτμησης στο υποστήλωμα επαφής πρέπει να γίνει μη γραμμική push-over ανάλυση στις δύο κατασκευές [8].

Και στις δύο περιπτώσεις τα αποτελέσματα δεν ανταποκρίνονται στο απαιτούμενο επίπεδο λεπτομέρειας και απαιτείται περαιτέρω μελέτη [8].

### 4. ΕΥΑΛΩΤΑ ΚΤΙΡΙΑ

Η αλληλεπίδραση κατασκευών λόγω σεισμού εξαρτάται από τις ιδιότητες της μεμονωμένης κατασκευής αλλά και σε σχέση με τις ιδιότητες των γειτονικών της. Οι παρακάτω συνδυασμοί δυναμικών χαρακτηριστικών, δομικής διάταξης και δομικού τύπου κάνουν τις κατασκευές περισσότερο ευάλωτες στις συγκρούσεις (Σχήμα 5).



Σχήμα 5: Περιπτώσεις ευάλωτων κτιρίων [8]

#### 1. Κτίρια με μεγάλη διαφορά μάζας

Όταν η διαφορά μάζας είναι μεγάλη η ορμή που μεταφέρεται από το βαρύτερο κτίριο θα αυξήσει πολύ την ταχύτητα στο ελαφρύτερο και το ελαφρύ θα είναι ευάλωτο σε κατάρρευση [8].

#### 2. Κτίρια με διαφορετικά ύψη

Όταν δύο κτίρια με διαφορετικά ύψη συγκρούονται η δυσκαμψία του χαμηλότερου καθορίζει το πώς θα επηρεαστούν αυτά από την πρόσκρουση. Εάν το χαμηλότερο είναι εύκαμπτο τότε βρίσκεται σε δυσμενέστερη κατάσταση λόγω της διαφοράς ιδιοπεριόδου και μάζας σε σχέση με το ψηλότερο και μεγαλύτερο. Τα πράγματα γίνονται δύσκολα για το ψηλότερο κτίριο όταν το χαμηλό είναι δύσκαμπτο με μεγάλη μάζα. Τότε το επίπεδο σύγκρουσης του ψηλού συγκρατείται και η υπόλοιπη κατασκευή τραντάζεται μέχρι την κορυφή. Το τράνταγμα μπορεί να γίνει τόσο βίαιο που να είναι καταστροφικό. Αυτό προκαλεί μεγάλες απαιτήσεις σε διάτμηση και πλαστιμότητα στο ψηλότερο μέρος του κτιρίου, όπου οι τέμνουσες και οι ροπές ανατροπής είναι πολύ μεγαλύτερες από ότι θα ήταν χωρίς την αλληλεπίδραση. Η σύγκρουση μειώνει την οριζόντια απόκλιση κορυφής καθ' όλο το ύψος της κατασκευής. Οι συγκρούσεις στα υψηλότερα επίπεδα μειώνουν προοδευτικά την οριζόντια απόκλιση της κατασκευής και παράλληλα αυξάνουν την τέμνουσα βάσης. Αυτό συμβαίνει διότι η ταχύτητα ταλάντωσης του κτιρίου αυξάνεται προς την κορυφή και επομένως αυτές οι μεγαλύτερες ταχύτητες οδηγούν σε μεγαλύτερες δυνάμεις πρόσκρουσης ([6], [15]).

#### 3. Εξωτερικά κτίρια συνεχούς κτιριακού συστήματος

Το συνεχές κτιριακό σύστημα αποτελεί την κυρίαρχη πρακτική σε μεγάλες πόλεις, όπου το κάθε κτίριο είναι σε πλήρη ή μερική επαφή σε μία ή στις δύο απέναντι πλευρές με τα γειτονικά κτίρια. Σε αυτήν την περίπτωση, τα εξωτερικά κτίρια θα υποφέρουν λόγω της ορμής που θα μεταφερθεί από τα εσωτερικά, ενώ τα εσωτερικά

θα υποστούν ελάχιστη ζημιά. Αυτό μπορεί να έχει μια εύληπτη εξήγηση: ένα ακριανό κτίριο ενώ χτυπά από τη μία πλευρά από την άλλη είναι ελεύθερο να ταλαντωθεί. Το ίδιο συμβαίνει και σε γωνιακά κτίρια όπου οι συγκρούσεις συμβαίνουν σε δύο κατακόρυφες διευθύνσεις. Εάν ένα κτίριο βρίσκεται ανάμεσα σε δύο άλλα θα προσκρούσει και στις δύο πλευρές με αποτέλεσμα να περιορίζεται η κίνησή του και στις δύο διευθύνσεις. Αποτελεί παρόμοιο σενάριο με την κούνια του Νεύτωνα [12].

#### 4. Σύγκρουση πλάκας υποστύλωματος

Η σύγκρουση πλάκας υποστύλωματος συμβαίνει σε διπλανά κτίρια που έχουν διαφορετικό ύψος ορόφων και σε κτίρια που βρίσκονται σε έδαφος με κλίση και οι στάθμες των πλακών διαφέρουν. Σε κάθε περίπτωση εμβολισμού το υποστύλωμα βρίσκεται σε κρίσιμη κατάσταση διατμητικής αστοχίας και συχνά οι απαιτήσεις πλαστιμότητας υπερβαίνονται. Όταν υπάρχει δε επαφή των κτιρίων έχουμε και καμπτική αστοχία. Αξίζει να σημειωθεί, όμως, ότι μεγάλη αύξηση στους ορόφους του ψηλού κτιρίου έχει ως αποτέλεσμα το μέγεθος των αναπτυσσόμενων απαιτήσεων σε πλαστιμότητα και διατμητική αντοχή του υποστύλωματος που δέχεται την πρόσκρουση να μειωθεί σημαντικά. Η μείωση αυτή ήταν αρκετή ώστε τελικά οι αναπτυσσόμενες απαιτήσεις να μην επηρεάζονται από την αλληλεπίδραση των κατασκευών [13].

#### 5. Στρεπτική δράση λόγω αλληλεπίδρασης

Κάποιες διατάξεις ή η ίδια η ασυμμετρία της κατασκευής μπορούν να τη προκαλέσουν.

#### 6. Κτίρια από ψαθυρά υλικά

Η μη ενισχυμένη τοιχοποιία είναι ιδιαίτερα ευάλωτη σε οποιοδήποτε οριζόντιο φορτίο. Η πολύ υψηλή στιγμιαία δύναμη λόγω της σύγκρουσης μπορεί να προκαλέσει εκρηκτική αστοχία των ψαθυρών δομικών στοιχείων [8].

Τα κτίρια που είναι επιρρεπή στις συγκρούσεις εάν δεν ικανοποιούν τα παραπάνω κριτήρια θα επιβιώσουν κατά τη διάρκεια ενός μεγάλου σεισμού [8].

### **5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ**

Εξαιτίας του κόστους των καταστρεπτικών πειραμάτων, μόλις τέσσερα πειράματα έχουν πραγματοποιηθεί. Τα δείγματα είναι κτίρια ίδιου ύψους και διαφορετικής δυσκαμψίας που τοποθετούνται σε σεισμική τράπεζα και διεγείρονται κατά το πλείστον από ημιτονοειδής διεγέρσεις. Τα συμπεράσματα των πειραμάτων συνέκλιναν στο ότι οι εύκαμπτες κατασκευές είναι πιο ευάλωτες από τις δύσκαμπτες. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι κατά την αλληλεπίδραση η απόκριση των εύκαμπτων μειωνόταν και των δύσκαμπτων αυξανόταν. Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις επιβεβαίωσαν αυτά που είχαν προβλεφθεί από τις αναλυτικές μελέτες που έκανε ο κάθε μελετητής, με εξαίρεση της μελέτης που το στοιχείο επαφής προσομοιώθηκε με γραμμικό ελαστικό ελατήριο και οι τιμές της επιτάχυνσης δεν συνέκλιναν με τις πραγματικές [14].

### **6. ΑΜΒΛΥΝΣΗ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ**

Οι μέθοδοι άμβλυνσης της αλληλεπίδρασης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τον τρόπο που προσεγγίζουν το πρόβλημα. Έτσι διακρίνονται σε αυτές που στόχο έχουν:

- την αποφυγή των συγκρούσεων
- την ενίσχυση της κατασκευής
- την βελτίωση της συμπεριφοράς των κατασκευών κατά την αλληλεπίδραση

## **6.1. ΑΠΟΦΥΓΗ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΩΝ**

Η αποφυγή ή περιορισμός των συγκρούσεων επιτυγχάνεται με δύο τρόπους με την εφαρμογή του αντισεισμικού αρμού και με την αύξηση της δυσκαμψίας της κατασκευής.

### **6.1.1. ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΑΡΜΟΣ**

Το ελάχιστο επιτρεπτό διάκενο για να αποφευχθεί η σύγκρουση είναι το άθροισμα των μέγιστων μετατοπίσεων των ανεξάρτητων αποκρίσεων των δύο κατασκευών. Όμως, επειδή είναι απίθανο να συμβεί αυτό ταυτόχρονα ένα μικρότερο κενό θα ήταν αρκετό για να αποφευχθεί η πρόσκρουση. Η τεχνική SRSS που βασίζεται στην θεωρία των τυχαίων δονήσεων, αναφέρεται στην τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των μέγιστων σεισμικών μετακινήσεων των δύο κτιρίων και έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική από τις αναλυτικές μελέτες που έχουν γίνει ([1], [8]). Επίσης, η χρήση κάποιου μαλακού υλικού στα κενά μεταξύ των κατασκευών μπορεί να αποσβέσει αρκετά τις συγκρούσεις. Αυτό βέβαια δεν πρέπει να χρησιμοποιηθεί ως μηχανισμός μείωσης της απόκρισης της ταλάντωσης [12].

### **6.1.2 ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ**

Αυξάνοντας τη δυσκαμψία του κτιρίου μειώνουμε το εύρος ταλάντωσης του και εξασφαλίζοντας ικανοποιητικό κενό μειώνουμε τις αρνητικές συνέπειες της αλληλεπίδρασης. Επίσης, μπορούμε να ρυθμίσουμε τα δυναμικά χαρακτηριστικά των δύο κατασκευών ώστε να ταλαντώνονται στην ίδια φάση και έτσι να αποφευχθούν οι προσκρούσεις [8].

## **6.2. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ**

Η ενίσχυση της κατασκευής επιτυγχάνεται με δύο τρόπους, με την ενίσχυση στοιχείων της κατασκευής και με συμπληρωματική απόσβεση ενέργειας.

### **6.2.1. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ**

Σε αυτήν την περίπτωση στα πιθανά σημεία αλληλεπίδρασης ενισχύουμε εκείνα τα στοιχεία που μπορεί να αστοχήσουν λόγω των συγκρούσεων, όπως τα ακραία υποστρώματα [18].

### **6.2.2. ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΣΒΕΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Η απόκριση των κατασκευής ελέγχεται με παθητικές ή ενεργητικές μηχανές που αυξάνουν την απόσβεση της και βελτιώνουν συνολικά τη συμπεριφορά της. Επίσης, σε περίπτωση πολύ υψηλής απόσβεσης τα γειτονικά κτίρια ταλαντώνονται εντός φάσης παρόλο που έχουν διαφορετικές ιδιοπεριόδους [4].

## **6.3. ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

Η συμπεριφορά των κατασκευών μπορεί να βελτιωθεί είτε με τη χρήση στοιχείων πρόσκρουσης είτε με την ένωση των κτιρίων.

### **6.3.1. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ**

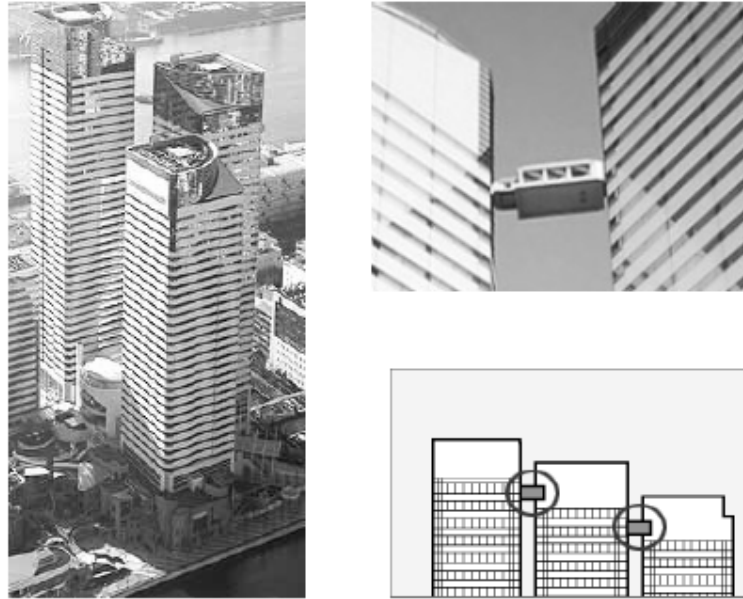
Με αυτό το μέτρο στα σημεία σύγκρουσης δημιουργούμε μεγάλα και δυνατά τοιχεία που θα δεχτούν την δύναμη πρόσκρουσης βελτιώνοντας την συμπεριφορά της κατασκευής [18].

### **6.3.2. ΕΝΩΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ**

Σε αυτήν την περίπτωση ενώνουμε τα κτίρια με αποσβεστήρες ενέργειας για να



μειώσουμε την σοβαρότητα των συγκρούσεων (Σχήμα 6). Αυτή η μέθοδος όμως φέρνει πολλά τεχνικά και μη προβλήματα. Κτίρια με μικρό κενό ανάμεσα δεν διαθέτουν χώρο για την εγκατάσταση των στοιχείων απόσβεσης. Επίσης, αλλάζει η κατανομή του φορτίου και οι δυναμικές ιδιότητες των κατασκευών και άρα οι απαιτήσεις των δοκών και υποστυλωμάτων σε όλη την κατασκευή. Τέλος, η ένωση κτιρίων με διαφορετικούς ιδιοκτήτες αποτελεί κοινωνικό και νομοθετικό εμπόδιο γιατί θα απαιτηθούν αλλαγές και στα δύο κτίρια [8].



Σχήμα 6: Ένωση κτιρίων, Triton square office complex (2001)

## 7. ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

Σε έρευνα όπου μελετήθηκε η πιθανότητα εμφάνισης της αλληλεπίδρασης σε σχέση με την ιδιοπερίοδο της κατασκευής και το λόγο των ιδιοπεριόδων γειτονικών κτιρίων, παρατηρήθηκε ότι όσο οι περίοδοι των κατασκευών διαφοροποιούνται τόσο μειώνεται και η πιθανότητα σύγκρουσης. Επίσης, η πιθανότητα αλληλεπίδρασης κτιρίων με ίδιο ύψος είναι μεγαλύτερη από ότι με διαφορετικό. Το πιο πιθανό σενάριο αλληλεπίδρασης είναι διπλανά κτίρια με περιόδους παρόμοιες αλλά όχι ίσες και συγχρόνως κοντά στην περίοδο του εδάφους. Συμπερασματικά, η εμφάνιση των ακίνδυνων και ελαφρών μορφών συγκρούσεων είναι πολύ πιο πιθανή από ότι των επικίνδυνων και καταστρεπτικών. Αυτός είναι και ένας λόγος για τον οποίο τα σοβαρά περιστατικά αλληλεπίδρασης που παρατηρούνται στους μεγάλους σεισμούς δεν είναι πάρα πολλά [16]. Εντούτοις, τα κτίρια ευάλωτα στην αλληλεπίδραση σε μία σεισμογενή χώρα όπως η Ελλάδα, πρέπει να προστατεύονται από αυτό το φαινόμενο το οποίο μπορεί να αποβεί καταστροφικό για αυτά, διαφορετικά ο σχεδιασμός τους δεν είναι υπέρ της ασφάλειας.

## 8. ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΚΩΔΙΚΩΝ

Οι κανονισμοί ΕΚ8 και ΕΑΚ προτείνουν για την αποφυγή της αλληλεπίδρασης δημιουργία αντισεισμικού αρμού. Συγκεκριμένα αναφέρουν:

### ΕΚ8

Για κτίρια που δεν ανήκουν στο ίδιο οικόπεδο, η απόσταση από την γραμμή του οικοπέδου πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη οριζόντια μετατόπιση  $d_s$

(όπου  $d_s = q \cdot d_e$ , όπου  $q$  ο συντελεστής συμπεριφοράς της κατασκευής και  $d_e$  η ελαστική μετατόπιση του κτιρίου κατά το σεισμό σχεδιασμού).

Για κτίρια που ανήκουν στο ίδιο οικοπέδο, η απόσταση μεταξύ τους πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των δύο μέγιστων οριζόντιων μετατοπίσεων των κτιρίων.

Εάν το ύψος των ορόφων του υπό σχεδιασμού κτιρίου είναι ίδιο με αυτό του διπλανού κτιρίου, τότε η ελάχιστη απόσταση μπορεί να μειωθεί κατά 0,7.

### **ΕΑΚ**

Στην περίπτωση όπου υπάρχει πιθανότητα εμβολισμού υποστυλωμάτων του ενός κτιρίου από πλάκες ή άλλα στοιχεία του παρακειμένου, το προστατευτικό μέτρο είναι η πρόβλεψη σεισμικού αρμού πλήρους διαχωρισμού. Αν δεν γίνει ακριβέστερος υπολογισμός ο σεισμικός αρμός πλήρους διαχωρισμού μπορεί να έχει εύρος ίσο με την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των μεγίστων σεισμικών μετακινήσεων ( $\Delta = q \Delta_{ελ}$ ) των δύο κτιρίων στις θέσεις των επικίνδυνων υποστυλωμάτων, συμπεριλαμβανομένης και της επίδρασης της στροφής περί τον κατακόρυφο άξονα.

Όταν δεν υπάρχει πιθανότητα εμβολισμού υποστυλωμάτων σε κανένα από τα δύο κτίρια, μπορεί να καθορίζεται με βάση τον συνολικό αριθμό των υπέρ το έδαφος εν επαφή ορόφων ως εξής:

4 cm για επαφή μέχρι και 3 ορόφους

8cm για επαφή από 4 έως 8 ορόφους

10cm για επαφή σε περισσότερους από 8 ορόφους

Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. προτείνει για την ενίσχυση των κατασκευών:

### **ΚΑΝ.ΕΠΕ.**

Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες μεταξύ γειτονικών κτιρίων δεν υπάρχει απόσταση μεγαλύτερη του εύρους του αντισεισμικού αρμού υπολογισμένου σύμφωνα με τον ΕΚ8-1 και δεν υπάρχει πιθανότητα εμβολισμού υποστυλώματος από πλάκα, δεν είναι αναγκαία η λήψη ειδικότερων μέτρων έναντι σύγκρουσης. Όταν υπάρχει πιθανότητα εμβολισμού υποστυλώματος από πλάκα, συνίσταται η ενίσχυση των ως άνω ακραίων υποστυλωμάτων σε ολόκληρο το ύψος τους μέχρι τη θεμελίωση αυξάνοντας 100% τη σεισμική ένταση ανασχεδιασμού των εν λόγω υποστυλωμάτων. Εναλλακτικά, συνίσταται η εμφάνιση κατάλληλου τοιχώματος ή πτερυγίου πίσω από τα υπό κρούση ακραία υποστυλώματα, μέσα στο πρώτο φάτνωμα κατά τη διεύθυνση της πιθανολογούμενης κρούσης.

Στην περίπτωση ομόρων κτιρίων με διαφορά αριθμού ορόφων ίση ή μεγαλύτερη από 2 ή του 50% συνίσταται να λαμβάνεται υπόψη το ενδεχόμενο της εντός ή εκτός φάσης σεισμικής σύγκρουσης. Προς τούτου κατά την ενίσχυση οποιουδήποτε από τα δύο αυτά κτίρια, είναι δυνατόν να λαμβάνεται υπόψη το εν λόγω ενδεχόμενο αυξάνοντας κατά 50% τη συνολική σεισμική ένταση ανασχεδιασμού του κτιρίου.

## **9. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΡΩΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ**

Για σκοπούς σχεδιασμού των τελευταίων προτάσεων μείωσης του φαινομένου της αλληλεπίδρασης, βασική προϋπόθεση είναι η γνώση του μεγέθους της δύναμης σύγκρουσης που αναμένεται κατά τη διάρκεια του σεισμού. Η εύρεση της δύναμης είναι αρκετά περίπλοκη γιατί απαιτεί την ανάλυση και των δύο κατασκευών. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το φάσμα της δύναμης πρόσκρουσης που έχει προταθεί από τελευταία έρευνα και περιλαμβάνει τρισδιάστατα διαγράμματα της ενδεχόμενης δύναμης σε συνάρτηση με τους κύριους προάγοντες που την επηρεάζουν. Οι παράγοντες αυτοί είναι η δομική διάταξη, το ενδιάμεσο κενό, η απόσβεση, η μάζα και η πλαστιμότητα των δύο κατασκευών [17]. Μέχρι τώρα δεν

υπάρχει κάποια πρόταση από τους κανονισμούς για τον υπολογισμό αυτής της δύναμης. Η καθοδήγηση των κανονισμών για τη διαστασιολόγηση των στοιχείων που θα δεχθούν τις συγκρούσεις είναι μόνο από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. όπου προτείνει αύξηση της σεισμικής έντασης κατά 100% για τα υποστυλώματα που θα δεχθούν τη δύναμη, 50% αύξηση της σεισμικής έντασης για τη διαστασιολόγηση ανασχεδιασμού κτιρίων με σημαντική διαφορά ύψους, ενώ δεν αναφέρει κάτι για τον σχεδιασμό των τοιχείων πρόσκρουσης που προτείνει.

## B. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΓΕΙΤΟΝΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ SAP2000

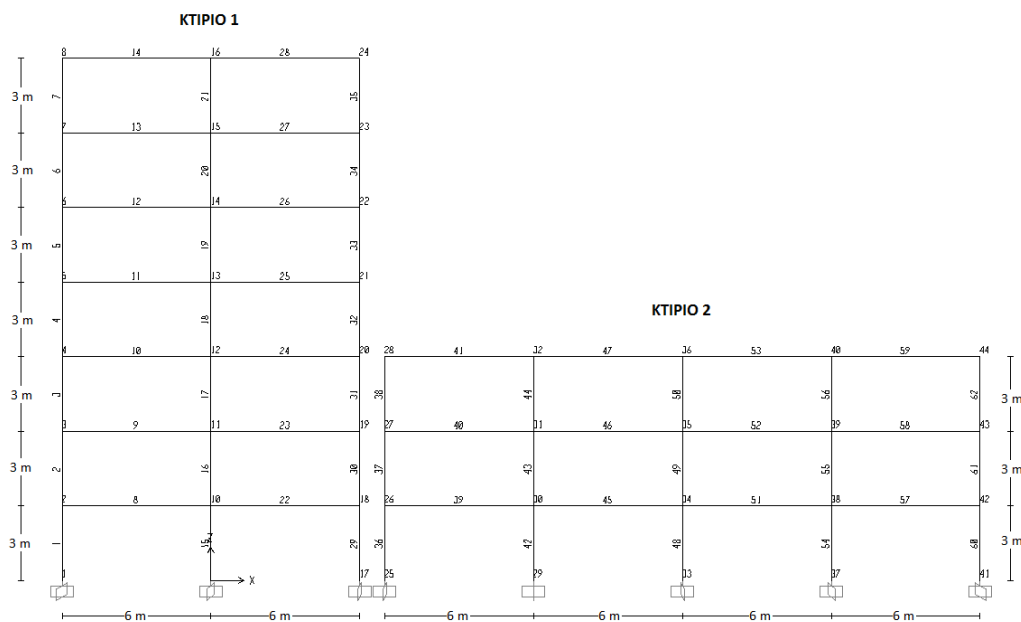
### 1. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Εξετάζεται η περίπτωση αλληλεπίδρασης δύο κτιρίων με ίδιο ύψος ορόφων αλλά με διαφορετικό συνολικό ύψος. Αυτό σημαίνει πως η πιθανή σύγκρουση μπορεί να γίνει μόνο στις στάθμες των πλακών (σύγκρουση πλάκα με πλάκα). Δημιουργήθηκαν μοντέλα στις δύο διαστάσεις  $x, z$ . Οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν τον κίνδυνο των συγκρούσεων είναι ο τύπος των κτιρίων, η επιτάχυνση του εδάφους, το είδος του εδάφους και η απόσταση μεταξύ των κτιρίων. Στη συγκεκριμένη ανάλυση θεωρούμε: Τύπος κτιρίων: Έχουμε ένα 7όροφο κτίριο (κτίριο 1) συνολικού ύψους 21m και ένα 3όροφο κτίριο (κτίριο 2) ύψους 9m (σχήμα 7). Πρόκειται για πλαισιακές κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα με ίσα ανοίγματα 6m και ίσα ύψη ορόφων 3m.

Επιτάχυνση εδάφους: Η επιτάχυνση του εδάφους ενεργεί μόνο στην διεύθυνση  $x$  και θεωρούμε ότι μετακινήσεις και στροφές εκτός επιπέδου  $x, z$  είναι αμελητέες.

Είδος εδάφους: Χάριν απλότητας οι ιδιότητες του εδάφους δεν λήφθηκαν υπόψη στην συγκεκριμένη εργασία.

Απόσταση μεταξύ των κτιρίων: Αναλύθηκαν 3 διαφορετικά μοντέλα όπου τα κτίρια: α) βρίσκονται εξαρχής σε επαφή ( $e=0$  cm), β) έχουν ενδιάμεση απόσταση ορισμένη από ΕΑΚ ( $e=4$  cm) (βλ. §3), γ) βρίσκονται στην ελάχιστη δυνατή απόσταση όπου δεν αλληλεπιδρούν ( $e=8$  cm).



Σχήμα 7: Μόρφωση κτιρίων 1,2

## 2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΤΙΡΙΩΝ

Τα δύο κτίρια σχεδιάστηκαν σύμφωνα με τον ΕΚΩΣ και τον ΕΑΚ. Για τα κατακόρυφα φορτία έγινε γραμμική ελαστική ανάλυση για τους εξής συνδυασμούς φόρτισης:

- Οριακή κατάσταση αστοχίας:  $1,35G+1,5Q$
- Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας:  $G+Q$

Για τα οριζόντια φορτία (σεισμική φόρτιση) έγινε μια “ισοδύναμη” γραμμική φασματική ανάλυση όπου εφαρμόστηκαν οι εξής παράμετροι:

- Μέγιστη επιτάχυνση εδάφους  $0,24g$
- Τύπος εδάφους B
- Συντελεστής συμπεριφοράς της κατασκευής  $\eta=3,5$

Τελικώς τα κτίρια σχεδιάστηκαν με κατακόρυφα στοιχεία διαστάσεων  $45 \times 45$  cm και οριζόντια στοιχεία διαστάσεων  $30 \times 45$  cm. Ο οπλισμός λήφθηκε υπόψη δημιουργώντας ισοδύναμες δυσκαμψίες στα μέλη. Συγκεκριμένα, για τις αναλύσεις των οριζόντιων δράσεων ο ΕΑΚ προτείνει οι δυσκαμψίες των στοιχείων να υπολογίζονται με παραδοχή σταδίου II (ρηγματωμένες διατομές). Για τα υποστυλώματα η δυσκαμψία επιτρέπεται να λαμβάνεται ίση με αυτήν του σταδίου I, χωρίς τον συνυπολογισμό της συμβολής του οπλισμού, ενώ για τα δοκάρια ίση με το  $1/2$  του σταδίου I, χωρίς τον συνυπολογισμό της συμβολής του οπλισμού. Επιπλέον οι σεισμικές αποκρίσεις έχουν ελεγχθεί και δεν παρουσιάζονται φαινόμενα 2<sup>ης</sup> τάξης. Οι μέγιστες σεισμικές αποκρίσεις από την φασματική ανάλυση ανά όροφο φαίνονται στον πίνακα 1.

Όροφος	Μετακίνηση (m)	
	Κτίριο 1	Κτίριο 2
7	0,049	-
6	0,045	-
5	0,040	-
4	0,033	-
3	0,024	0,018
2	0,014	0,013
1	0,005	0,005

Πίνακας 1: Μέγιστες σεισμικές αποκρίσεις ανά όροφο

## 3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΑΡΜΟΥ

Όλοι οι κώδικες προτείνουν ακριβή υπολογισμό της απόστασης του κενού για την πλήρη αποφυγή συγκρούσεων με βάση την φασματική ανάλυση. Στην συγκεκριμένη ανάλυση έχουμε:  $e=d1+d2=0,04m$ , όπου  $d1=0,024m$  η μέγιστη απόκριση του κτιρίου 1 στον 3<sup>ο</sup> όροφο και  $d2=0,018m$  η μέγιστη απόκριση του κτιρίου 2 στον 3<sup>ο</sup> όροφο.

Σε περίπτωση όπου δεν γίνεται ακριβής υπολογισμός οι κώδικες προτείνουν:

ΕΑΚ: για επαφή μέχρι και 3 ορόφους  $0,04m$ .

ΕΚ8:  $SRSS=\sqrt{d1^2+d2^2}=0,03$  m και επειδή έχουμε ίδια ύψη ορόφων η τιμή μειώνεται κατά 30%, δηλαδή περίπου  $0,02m$ .

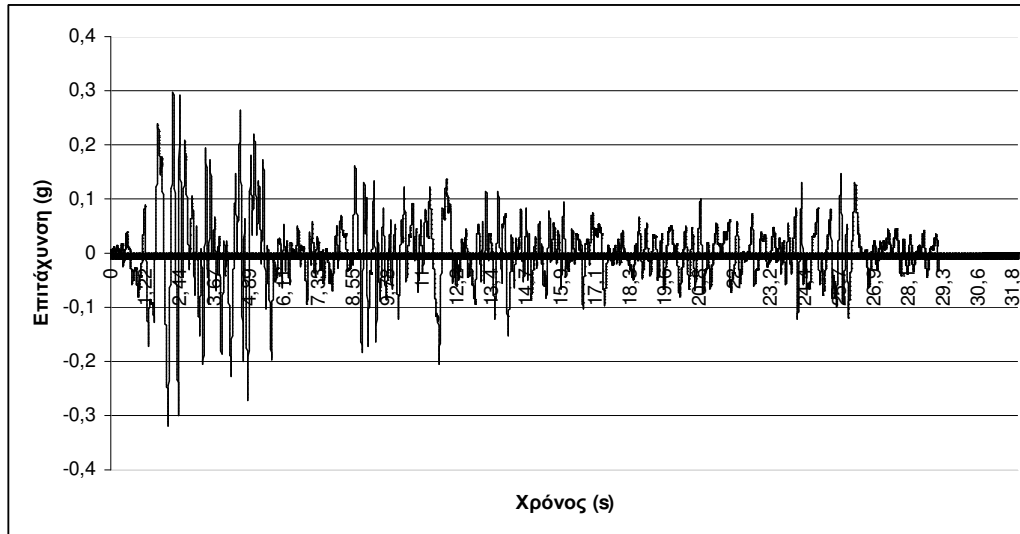
Επιλέγουμε για την ανάλυση την τιμή του ΕΑΚ ως πιο συντηρητική.

## 4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

### 4.1. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ

Η ανάλυση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης των κτιρίων έγινε με την μέθοδο της ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης χρονοϊστορίας. Η σεισμική διέγερση που

χρησιμοποιήθηκε είναι ο σεισμός του El Centro διάρκειας 30 δευτερολέπτων, που συνέβη στο Mexico το 1940, με μέγιστη σεισμική επιτάχυνση 0,32g. Το επιταχυνσιογράφημα φαίνεται στο σχήμα 8. Ο συντελεστής απόσβεσης λήφθηκε ως  $\xi=0,05$ .



Σχήμα 8: Επιταχυνσιογράφημα El Centro 1940

#### 4.2. ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

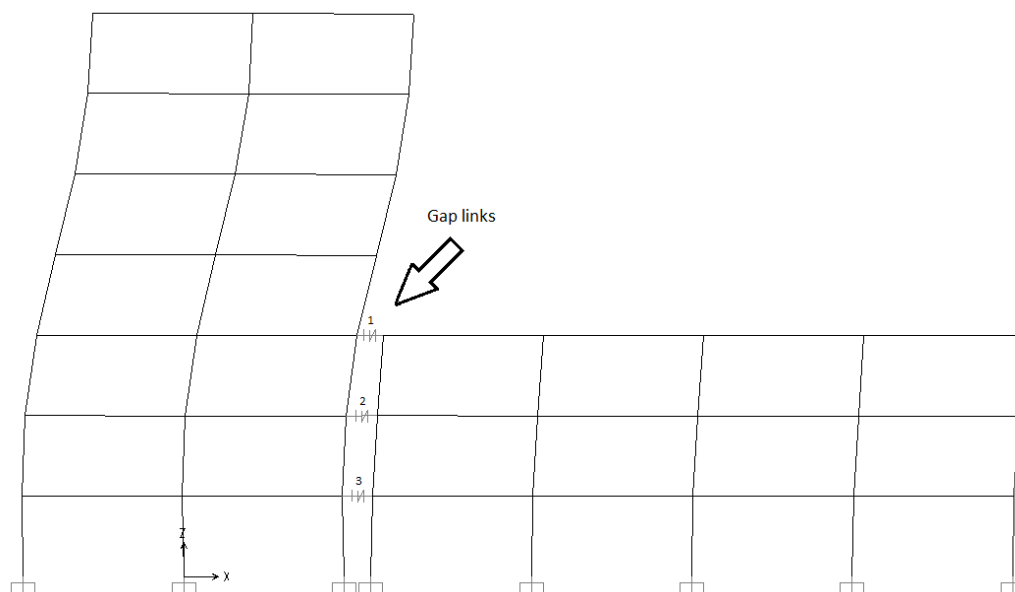
Κατά την σεισμική διέγερση τα φαινόμενα σύγκρουσης των δύο κτιρίων μπορεί να συμβούν σε κάθε όροφο στο ύψος της πλάκας. Συγκεκριμένα έχουμε 3 πιθανά σημεία σύγκρουσης, στον 1<sup>ο</sup>, 2<sup>ο</sup> και 3<sup>ο</sup> όροφο. Η μοντελοποίηση του φαινομένου της σύγκρουσης γίνεται με την βοήθεια κάποιων συνδέσμων (στοιχεία επαφής) τα οποία το SAP ονομάζει gap links. Πρόκειται για ελατήρια τα οποία ενεργοποιούνται μόνο σε θλίψη όταν η συνολική απόκριση των κτιρίων ξεπεράσει το ενδιάμεσο κενό (σχήμα 9). Αυτό σημαίνει ότι τα κτίρια μπορούν ελεύθερα να απομακρυνθούν το ένα με το άλλο (σχήμα 10). Η δυσκαμψία του ελατηρίου θεωρήθηκε ίση με 10.000.000 kN/m, τιμή που χρησιμοποίησαν οι Maison, Kasai [1] και βρίσκεται εντός ορίων τιμών που προτείνει το Sap [19]. Τέλος, θεωρούμε ότι σε κάθε στάθμη ορόφου υπάρχουν πλάκες από οπλισμένο σκυρόδεμα οι οποίες επιβάλλουν διαφραγματική λειτουργία. Έτσι οι δυνάμεις κρούσης κατανέμονται σε όλα τα μέλη που συνδέονται με την στάθμη ορόφου.

#### 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

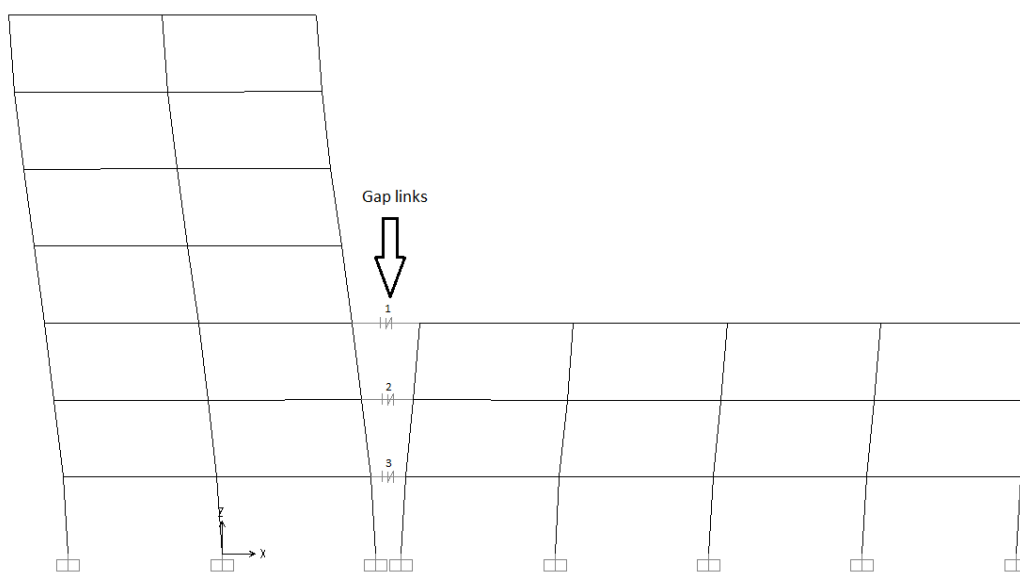
Έγιναν συνολικά 3 αναλύσεις χρονοϊστορίας, μια για κάθε περίπτωση απόστασης των κτιρίων: α) 0cm, β) 4cm και γ) 8cm. Φαινόμενα αλληλεπίδρασης παρατηρήθηκαν μόνο στις περιπτώσεις α και β, ενώ στην περίπτωση γ τα κτίρια ταλαντώνονταν ανεξάρτητα. Τα παρακάτω αποτελέσματα αφορούν το κτίριο 1, καθώς το κτίριο 2 ως πιο δύσκαμπτο θεωρούμε ότι έχει μικρές επιπτώσεις από τις συγκρούσεις.

##### 5.1. ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΕΙΣ

Στο σχήμα 11 βλέπουμε την μέγιστη μετατόπιση ανά όροφο του κτιρίου 1 για τις 3 περιπτώσεις. Στην αριστερή πλευρά όπου υπάρχει ελευθερία κίνησης, δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές. Αντίθετα, στην δεξιά πλευρά οι διαφορές είναι πιο έντονες. Η απόκριση στην περίπτωση μηδενικού κενού είναι η μικρότερη



Σχήμα 9: Λειτουργία των στοιχείων επαφής κατά την σύγκρουση των κτιρίων

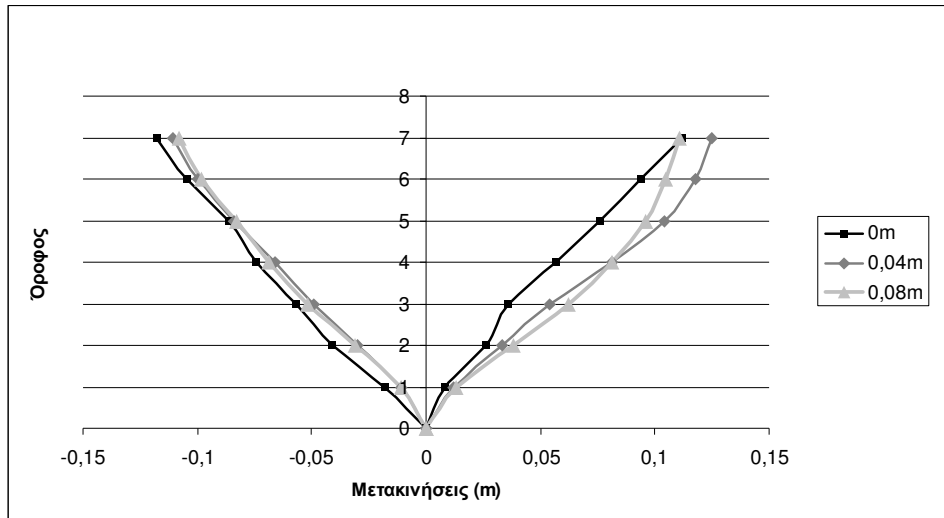


Σχήμα 10: Λειτουργία των στοιχείων επαφής κατά την απομάκρυνση των κτιρίων

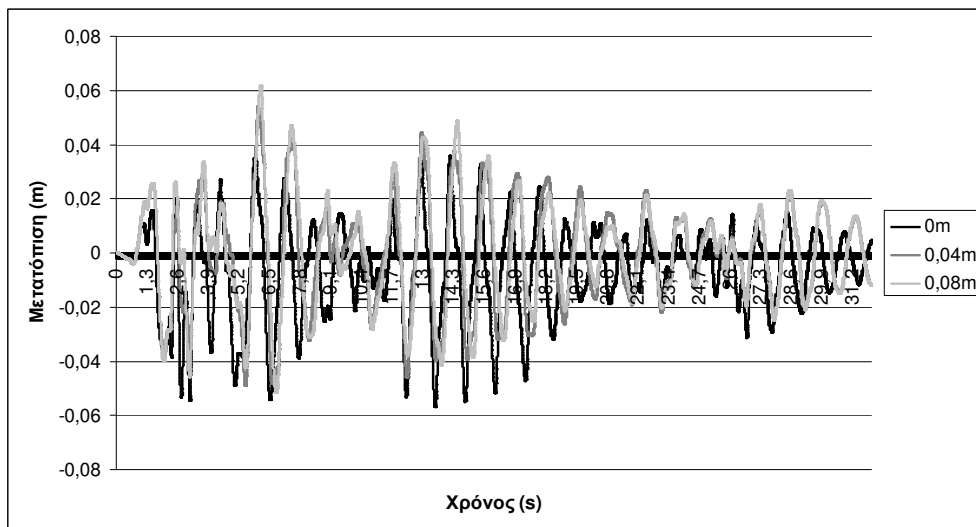
εφόσον εμποδίζεται από το κτίριο 2. Στο σημείο σύγκρουσης (όροφος 3) έχουμε μέγιστη απόκριση στην ελεύθερη ταλάντωση, και ελάχιστη στο μηδενικό κενό όπως αναμενόταν. Στην κορυφή (όροφος 7) μέγιστη μετακίνηση έχουμε στην περίπτωση κενού 4cm, με μικρή διαφορά σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις.

Στο σχήμα 12 βλέπουμε την απόκριση του 3<sup>ου</sup> ορόφου του κτιρίου 1 καθ' όλη την διάρκεια του σεισμού για τις 3 περιπτώσεις. Στον 3<sup>ο</sup> όροφο παρατηρούμε ότι για μηδενική απόσταση μεταξύ των κτιρίων έχουμε μετατόπιση του διαγράμματος προς τα κάτω. Αυτό σημαίνει αύξηση των μετατοπίσεων προς τα αριστερά και μείωση προς τα δεξιά λόγω του κτιρίου 2 που το εμποδίζει.

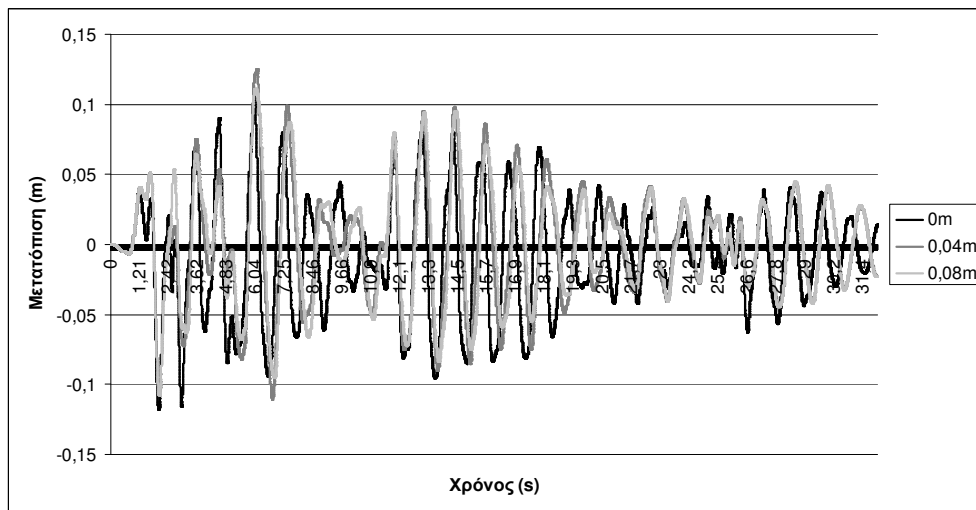
Στο σχήμα 13 βλέπουμε αντίστοιχα τις μετατοπίσεις για τον 7<sup>ο</sup> όροφο. Οι διαφορές στις μετατοπίσεις του 7<sup>ου</sup> ορόφου δεν είναι σημαντικές.



Σχήμα 11: Μέγιστες αποκρίσεις καθ' ύψος του κτιρίου 1



Σχήμα 12: Απόκριση 3<sup>ου</sup> ορόφου, κτιρίου 1 κατά την διάρκεια του σεισμού

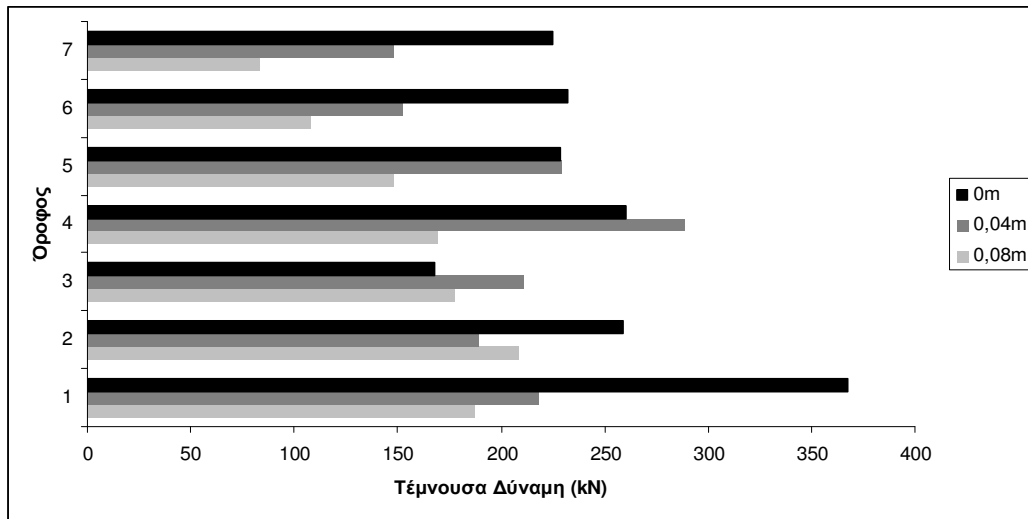


Σχήμα 13: Απόκριση 7<sup>ου</sup> ορόφου, κτιρίου 1 κατά την διάρκεια του σεισμού

## 5.2. ΤΕΜΝΟΥΣΑ ΔΥΝΑΜΗ

Η σύγκρουση των κτιρίων αυξάνει σημαντικά την τέμνουσα δύναμη που δρα στο κτίριο 1, και η κατανομή της φαίνεται στο σχήμα 14. Τα υποστυλώματα που καταπονούνται περισσότερο είναι αυτά του 1ου ορόφου και αυτά των ορόφων πάνω από το επίπεδο πρόσκρουσης. Στον 1<sup>ο</sup> όροφο η δυσμενέστερη περίπτωση είναι αυτή κατά την οποία δεν υπάρχει κενό ανάμεσα στα κτίρια, όπου η τέμνουσα βάση διπλασιάζεται. Στους ορόφους πάνω από το σημείο πρόσκρουσης, παρατηρούμε μεγάλες αυξήσεις των τεμνουσών λόγω του τραντάγματος. Στον 4<sup>ο</sup> όροφο έχουμε μέγιστη τέμνουσα για την περίπτωση κενού 4cm. Στους ορόφους 6 και 7 η δυσμενέστερη περίπτωση είναι αυτή του μηδενικού κενού που προκαλεί διπλασιασμό της τέμνουσας.

Παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις αλληλεπίδρασης τα αποτελέσματα είναι δυσμενή. Ο αντισεισμικός αρμός των 4cm που πρότεινε ο ΕΑΚ δεν απέτρεψε τελικά τις συγκρούσεις μεταξύ των κατασκευών. Ειδικά στον 4<sup>ο</sup> όροφο αυτή η περίπτωση είναι και η δυσμενέστερη.



Σχήμα 14: Μέγιστες τέμνουσες δυνάμεις καθ' ύψος του κτιρίου 1

## 5.3. ΔΥΝΑΜΗ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ

Ο πίνακας 2 περιέχει τις μέγιστες δυνάμεις πρόσκρουσης στις στάθμες των τριών πρώτων ορόφων. Παρατηρείται ότι στην περίπτωση μηδενικής απόστασης η δύναμη πρόσκρουσης αυξάνεται όσο ανεβαίνουμε επίπεδο. Αυτό ήταν αναμενόμενο δεδομένου ότι στους ψηλότερους ορόφους έχουμε και μεγαλύτερη ορμή. Επίσης φαίνεται ότι η δύναμη πρόσκρουσης αυξάνεται όσο η απόσταση των κτιρίων μειώνεται. Τα μηδενικά υποδεικνύουν ότι δεν υπήρξε επαφή στον συγκεκριμένο όροφο κατά την διάρκεια του σεισμού.

Όροφος	Δύναμη Πρόσκρουσης (kN)		
	e=0cm	e=4cm	e=8cm
3	1402,4	1037,2	0
2	972,5	0	0
1	407,1	0	0

Πίνακας 2: Δύναμη πρόσκρουσης ανά όροφο



### Γ.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αλληλεπίδραση παρακείμενων κατασκευών είναι ένα φαινόμενο που παρατηρείται όταν ισχυροί σεισμοί πλήττουν μεγάλες πόλεις και πυκνοκατοικημένες περιοχές. Η μελέτη του έχει απασχολήσει πολλούς μελετητές τα τελευταία 20 χρόνια, οι οποίοι αντιπαρατίθενται σε κάποιο βαθμό. Στα σημεία που συμφωνούν, όμως, είναι ότι πρόκειται για ένα πολύπλοκο πρόβλημα που απαιτεί ακόμα αρκετή μελέτη και έρευνα, και το οποίο όταν αμελείται στο σχεδιασμό των κτιρίων οδηγεί σε μη συντηρητικές κατασκευές. Οι κώδικες δεν βοηθούν, όμως, σε αυτό εφόσον προτείνουν γενικευμένες παραδοχές που δεν καλύπτουν τις διάφορες περιπτώσεις αλληλεπίδρασης και δεν καθοδηγούν καθόλου τους μηχανικούς για κάποια σχετική ανάλυση. Σε αυτό οφείλεται και το γεγονός ότι δεν έχουν επισημοποιηθεί απλοποιημένα μοντέλα για την εξιδανίκευση των συγκρούσεων. Εντούτοις, από τα πορίσματα ερευνών μπορούν να αντληθούν χρήσιμες οδηγίες για την προστασία και ενίσχυση κτιρίων που είναι ευάλωτα στην αλληλεπίδραση. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων χρονοϊστορίας που πραγματοποιήθηκαν για την περίπτωση αλληλεπίδρασης δύο κτιρίων ίδιου ύψους ορόφων και διαφορετικού συνολικού ύψους για ενδιάμεσο κενό 0 cm, 4 cm και 8 cm, οδήγησαν στα παρακάτω συμπεράσματα:

- το ψηλό και εύκαμπτο κτίριο είναι το ευάλωτο όταν αλληλεπιδρά με κοντό και δύσκαμπτο.
- η μεγαλύτερη μεταβολή στην απόκριση του ψηλού κτιρίου παρατηρήθηκε στην περίπτωση μηδενικού κενού μεταξύ των κατασκευών, όπου είχαμε μείωση συγκριτικά με αυτήν της ελεύθερης ταλάντωσης.
- η επίδραση των συγκρούσεων προκάλεσε μεγάλη αύξηση (έως και διπλασιασμό) των τεμνουσών δυνάμεων στο επίπεδο του ισογείου και στα επίπεδα πάνω από την στάθμη επαφής των κτιρίων (3<sup>ος</sup> όροφος).
- η δύναμη πρόσκρουσης μειώθηκε με την αύξηση του κενού μεταξύ των κατασκευών.
- το προτεινόμενο μήκος αντισεισμικού αρμού του ΕΑΚ (4 cm) αποδείχθηκε ανεπαρκές για την αποφυγή των προσκρούσεων για έναν πιθανό μεγάλο σεισμό. Μάλιστα, στο επίπεδο 4<sup>ου</sup> ορόφου προκάλεσε τη μεγαλύτερη διατμητική δύναμη από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

### Δ. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Bruce F. Maison and Kazuhiko Kasai, “Dynamics of pounding when two buildings collide”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 21, (1992)
- [2] Robert Jankowski, “Earthquake induces pounding between equal height buildings with substantially different dynamic properties”, Engineering Structures 30 (2008)
- [3] V. Jeng and W.L. Tzeng, “Assessment of seismic pounding hazard for Taipei City”, Engineering Structures 22 (2000)
- [4] C.P. Pantelides and X. Ma, “Linear and nonlinear pounding of structural systems”, Computers & Structures Vol.66, No 1, pp. 79-92 1998
- [5] Cole,Dhakal,Carr,Bull, “Case studies of observed pounding damage during the 2010 Darfield earthquake”, Ninth Pacific Conf. on Earthquake Engineering, April 2010
- [6] Maison,Kasai, ”Analysis for type of structural pounding” J.Struct.Eng.116,(1990)

- [7] Karayannis, Favvata, "Earthquake-induced interaction between adjacent reinforced concrete structures with non-equal heights", *Earthquake Engin & Struct Dyn*, 2005
- [8] Cole, G., Dhakal, R.P., Carr, A.J., Bull, D., "Building pounding state of the art: Identifying structures vulnerable to pounding damage", (NZSEE) Conference, 2010
- [9] Muthukumar, DesRoches, "Evaluation of impact models for seismic pounding", 13th World Conf. on Earthquake Engineering Vancouver, 2004 Paper No. 235
- [10] Chouw, "Influence of soil-structure interaction on pounding response of adjacent buildings due to near-source earthquakes", *Journal of Applied Mechanics*, Vol.5(2002)
- [11] Shakya, Ohmachi, "Mid-column seismic pounding of R.C. buildings in a row considering effects of soil", 14th World Conf. on Earthquake Engineering 2008
- [12] Anagnostopoulos, "Pounding of buildings in series during earthquakes", *Earthquake Engin. And Struct. Dyn*, Vol.16 (1988)
- [13] Φαββάτα, "Διερεύνηση σεισμικής συμπεριφοράς και ικανότητας πολυόροφων Κ.Ω.Σ.", *Τεχνικά Χρονικά* 2007
- [14] Uliege 2007, «Analysis of hammering problems», 6th Framework Programme
- [15] Anagnostopoulos, "An investigation of earthquake induced pounding between adjacent buildings", *Earthquake Eng and Struct Dyn*, VOL. 21, 289-302 (1992)
- [16] Jeng-Hsiang Lin<sup>1</sup> and Cheng-Chiang Weng<sup>2</sup>, "Probability analysis of seismic pounding of adjacent buildings", *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 2001; 30
- [17] Robert Jankowski, "Pounding force response spectrum under earthquake excitation", *Engineering Structures* 28 (2006) 1149–1161
- [18] ΚΑΝ.ΕΠΕ. ΟΑΣΠ 2010-11, "4.8 Σεισμική αλληλεπίδραση γειτονικών κτιρίων"
- [19] CSI, "Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS and SAFE", 2007