

## ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΑΚΕΙΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

### 1. Το πρόβλημα των παρακειμένων κατασκευών

Στο συνεχές σύστημα δομήσεως που συνήθως εφαρμόζεται στις αστικές περιοχές και ιδιαίτερα στο κέντρο των πόλεων, οι κατασκευές κτίζονται σε επαφή ή με κάποιο μικρό αρμό μεταξύ τους. Σε αυτές τις περιπτώσεις κατά τη διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων είναι προφανές ότι αναμένεται να υπάρχει αλληλεπίδραση των παρακειμένων κατασκευών η οποία εκδηλώνεται υπό μορφή συνεχών κρούσεων μεταξύ τους στις θέσεις των πλακών. Οι κρούσεις αυτές είναι δυνατόν να προκαλέσουν σημαντικές βλάβες ή ακόμη και να αποδειχθούν κρίσιμες και για την ασφάλεια των κατασκευών.

Η σημαντική επιρροή της αλληλεπίδρασης των κατασκευών στην σεισμική τους απόκριση έχει επιβεβαιωθεί διεθνώς από καταγραφές και επί τόπου παρατηρήσεις μετά από καταστρεπτικούς σεισμούς σε όλο τον κόσμο (Arnold & Reitherman 1982, Rosenblueth & Meli 1986). Το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης παρατηρήθηκε κυρίως σε περιπτώσεις ισχυρών σεισμικών δονήσεων σε μεγάλες πόλεις και πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές. Σε τέτοιες περιπτώσεις, έχει καταγραφεί στη βιβλιογραφία, ότι η αλληλεπίδραση παρακειμένων κατασκευών αποτελεί συχνά αιτία πρόκλησης βλαβών ενώ έχει καταγραφεί ακόμη και ως βασική αιτία για την έναρξη καταρρέσεων. Ειδικότερα, στον καταστρεπτικό σεισμό του Μεξικού το 1985, έχει υποστηριχθεί (Bertero 1986, Rosenblueth & Meli 1986) ότι το 40% από τα 330 κτίρια που υπέστησαν σοβαρές βλάβες ή κατέρρευσαν και το 15% των περιπτώσεων που κατέληξαν σε κατάρρευση, οφείλονταν στη πρόσκρουση μεταξύ παρακειμένων κατασκευών. Παρ' όλον ότι μόνο στον σεισμό του Μεξικού παρατηρήθηκε τόσο μεγάλος αριθμός περιπτώσεων αλληλεπίδρασης που προκάλεσαν σοβαρές βλάβες και καταρρεύσεις και μπορεί ο αριθμός τους να θεωρείται από ορισμένους μελετητές ως υπερβολικός (Anagnostopoulos 1995), είναι γεγονός ότι σε όλους τους ισχυρούς σεισμούς που έγιναν τις τελευταίες δεκαετίες σε αστικές περιοχές, οι κατασκευές παρουσίασαν σε όλες τις περιπτώσεις προβλήματα αλληλεπίδρασης.

Διεθνώς οι σύγχρονοι κανονισμοί (ACI 318, EC8) αλλά και ο Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ-2000) προβλέπουν σεισμικούς αρμούς πλήρους διαχωρισμού μεταξύ των παρακειμένων κατασκευών προκειμένου να αντιμετωπίσουν το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης κατά την διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων.

Δεδομένου όμως, ότι το μεγαλύτερο μέρος των κατασκευών των πόλεων έχει κατασκευασθεί με το συνεχές σύστημα δομήσεως πριν από την εφαρμογή των διατάξεων αυτών, γίνεται αντιληπτό ότι το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης των παρακειμένων κατασκευών υπάρχει σχεδόν παντού στις πόλεις.

Ωστόσο, θα πρέπει να αναφερθεί ότι και σε νεώτερες κατασκευές πολλές φορές υπάρχουν παράγοντες που δεν επιτρέπουν την εφαρμογή σεισμικών αρμών πλήρους διαχωρισμού. Παράγοντες όπως το υψηλό κόστος της γης στις πυκνοκατοικημένες μεγαλουπόλεις και το μικρό μέγεθος των οικοπέδων δεν επιτρέπουν πάντα την πλήρη εφαρμογή του κανονισμού. Ακόμη και η ερμηνεία των σχετικών διατάξεων έχει μερικές φορές ως αποτέλεσμα η απόσταση μεταξύ των κτιρίων να είναι ανεπαρκής και ασυμβίβαστη με τη φιλοσοφία των σύγχρονων κανονισμών που προβλέπουν ανελαστική απόκριση των κατασκευών με μεγάλες μετατοπίσεις κατά την διάρκεια ισχυρών σεισμικών διεγέρσεων.

Πέραν των παραπάνω υπάρχει και το επιχείρημα ότι κατά τη σεισμική διεγερση μη ισχυρά κτίρια των οικοδομικών τετραγώνων είναι δυνατόν, υπό ορισμένες συνθήκες, να ωφεληθούν από την επαφή τους με τα πιο ισχυρά, θεωρώντας βέβαια ότι η τοπική βλάβη από τη σύγκρουση μεταξύ τους δεν θα είναι τόσο σοβαρή ώστε να οδηγήσει σε αστοχία (Athnasiadou et al. 1994, Anagnostopoulos 1995).

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί και εναλλακτικές μέθοδοι για την αποφυγή ή τον περιορισμό της επιρροής της αλληλεπίδρασης στις κατασκευές. Ο Anagnostopoulos (1988) προτείνει στη περίπτωση που υπάρχει μια μικρή απόσταση μεταξύ των κατασκευών αυτή να γεμίζεται με υλικό που να απορροφά τις δονήσεις (χρήση αποσβεστήρων). Ο Westermo (1989) μελέτησε τη χρήση μόνιμων συνδέσεων μεταξύ των παρακειμένων κατασκευών προκειμένου να αποφευχθεί η σύγκρουση μεταξύ τους. Ο Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ-2000) και ο **Ευρωκώδικας 8 (EC8)** προτείνουν για τον περιορισμό της

μεγάλης επιρροής της αλληλεπίδρασης μεταξύ παρακείμενων κατασκευών τη χρήση ισχυρών διατμητικών τοιχωμάτων.

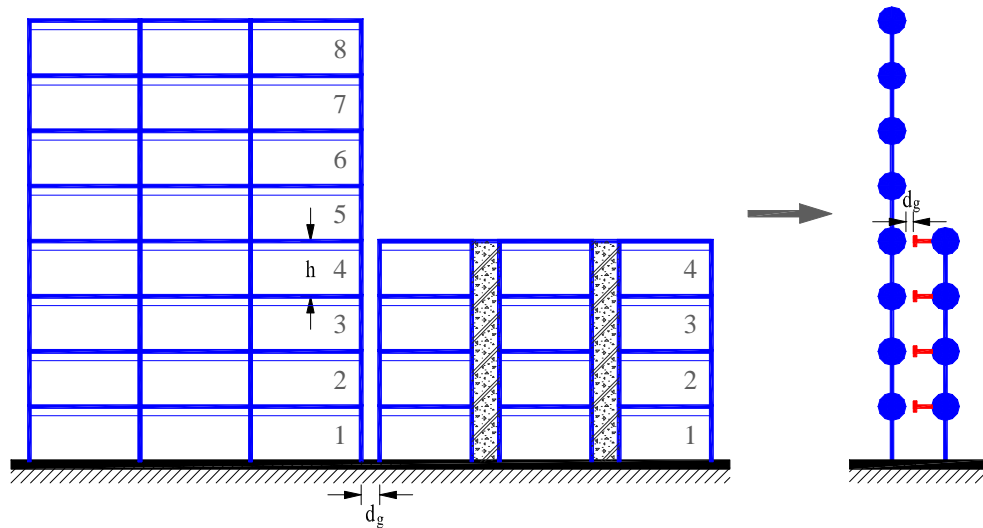
Τις τελευταίες δύο δεκαετίες το πρόβλημα πρόσκρουσης γειτονικών κτιρίων κατά την διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων αποτελεί συχνά πεδίο έρευνας των επιστημόνων. Στην αρχή οι προσπάθειες βασίσθηκαν στην απόκριση ζεύγους ή σειράς μονοβάθμιων ταλαντωτών που έρχονται σε επαφή κατά την διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων (Anagnostopoulos 1988, Athanasiadou et al 1994).

Αναφέρονται διεθνώς και προσπάθειες διερεύνησης του προβλήματος αλληλεπίδρασης παρακείμενων κατασκευών με συστήματα πολυβαθμίων ταλαντωτών. Η διερεύνηση περιλαμβάνει κατασκευές με ίσο ύψος ορόφων. Με χρήση πολυβάθμιων συστημάτων οι Anagnostopoulos & Spiliopoulos (1992), μελέτησαν τις επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης παρακείμενων κατασκευών με την συμπεριφορά ομοίων 5ορόφων κατασκευών που ήταν σε σειρά διάταξη 2, 3 και 4 κτιρίων. Επί πλέον, διερευνήθηκε η επιρροή της πρόσκρουσης δύο κατασκευών με διαφορετικό συνολικό ύψος ορόφων. Σύμφωνα με τους συγγραφείς σ' αυτήν τη περίπτωση η αλληλεπίδραση μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες. Τέλος, οι Rahman κ.ά. (2001) μελέτησαν την επιρροή του εδάφους θεμελίωσης στην αλληλεπίδραση παρακείμενων πλαισιωτών κατασκευών ωπλισμένου σκυροδέματος, με χρήση ανελαστικής σεισμικής συμπεριφοράς. Η διερεύνηση έγινε για συγκεκριμένη περίπτωση αλληλεπίδρασης 12όροφου με 6όροφο. Σε όλες τις περιπτώσεις το ύψος των ορόφων των παρακείμενων κατασκευών ήταν ίσο και άρα οι προσκρούσεις γινόντουσαν μεταξύ των μαζών των ορόφων (σχ. 1).

Ακόμη έχουν αναφερθεί και βελτιωμένες αριθμητικές τεχνικές για την καλλίτερη προσέγγιση του προβλήματος πρόσκρουσης δυο κατασκευών κατά την διάρκεια σεισμικής διέγερσης, οι οποίες εστιάζονται κυρίως σε βελτιωμένες μεθόδους επίλυσης των σχετικών εξισώσεων (Liolios 1990, Papadrakakis et al 1991, Maison and Kasai 1990 & 1992).

Σε όλες τις προηγούμενες διερευνήσεις το πρόβλημα μελετήθηκε με μονοβάθμια ή πολυβάθμια θεωρητικά συστήματα και όχι μεταξύ κατασκευών που έχουν σχεδιασθεί με συγκεκριμένους κανονισμούς. Οι Karayannis & Fotopoulou (1998) διερεύνησαν διάφορες περιπτώσεις πρόσκρουσης πολύροφων κατασκευών ωπλισμένου σκυροδέματος που είχαν σχεδιασθεί με τους Ευρωκώδικες 2 & 8. Η έρευνα έγινε με δυναμική ανελαστική βήμα προς βήμα ανάλυση και είχε ως στόχο (α) να παρουσιάσει αρχικά αποτελέσματα επιρροής κάποιων κρίσιμων πα-

ραμέτρων της αλληλεπίδρασης των κατασκευών στις απαιτήσεις πλαστιμότητας των υποστρωμάτων και ( $\beta$ ) να εξετάσει την πιθανότητα οι παράμετροι αυτοί να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό των κατασκευών με τους Ευρωκώδικες 2 & 8 με χρήση ειδικών συντελεστών υπερκαταπόνησης. Σε όλες τις περιπτώσεις οι κατασκευές που έρχονται σε επαφή είχαν διαφορετικό συνολικό ύψος αλλά το ίδιο ύψος ορόφων (σχ. 1).



(α) Παρακείμενες κατασκευές – Πραγματική κατάσταση

(β) Προσομοίωση

Σχ. 1 *Αλληλεπίδραση παρακειμένων κατασκευών με διαφορετικό συνολικό ύψος αλλά ίσο ύψος ορόφων.* Η πραγματική κατάσταση (α) και η προσομοίωση (β).

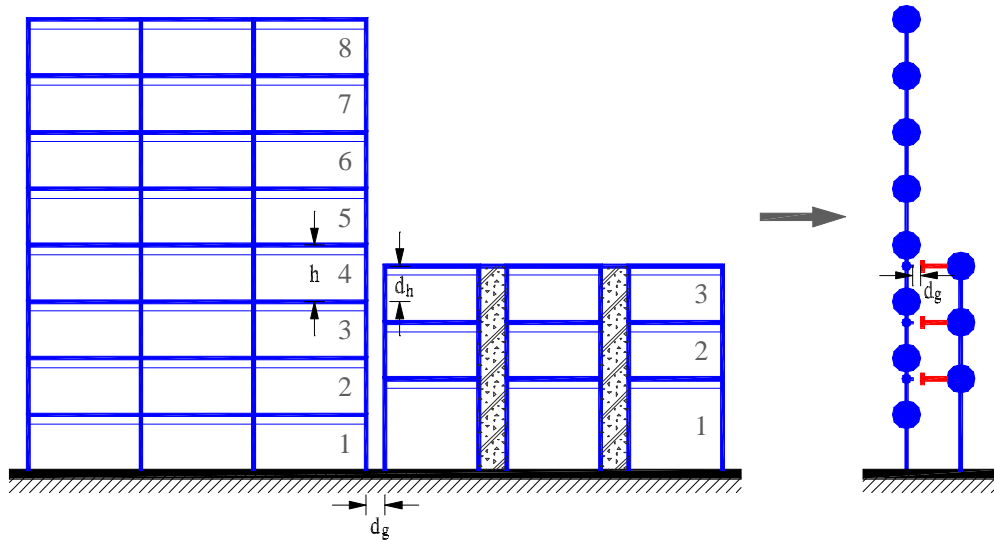
Η περίπτωση αλληλεπίδρασης μεταξύ παρακειμένων πολυωρόφων κατασκευών οι οποίες έχουν διαφορετικό ύψος ορόφων (σχ. 2) παρ' όλον ότι είναι αφ' ενός πολύ κοινή και αφ' ετέρου η πλέον δυσμενής για την ασφάλεια των κατασκευών, μόλις προσφάτως έχει αρχίσει να μελετάται στη διεθνή βιβλιογραφία (Karayannis & Favvata 2005a, 2005b).

## 2. Σεισμικός αρμός πλήρους διαχωρισμού

### 2.1. Γενικά στοιχεία

Οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί (EAK-2000, EC8, ACI-318), όπως έχει ήδη αναφερθεί, προβλέπουν σεισμικούς αρμούς πλήρους διαχωρισμού μεταξύ των παρακειμένων κατασκευών προκειμένου να αντιμετωπίσουν τις

συνέπειες της αλληλεπίδρασης κατά τη διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων. Ο προσδιορισμός του ελάχιστου εύρους του αρμού πλήρους διαχωρισμού εξαρτάται κυρίως από την δυσκαμψία των παρακειμένων κατασκευών και τη δυνατότητά τους για πλευρική μετατόπιση.



(α) Παρακειμένες κατασκευές – Πραγματική κατάσταση

(β) Προσομοίωση

Σχ. 2 **Αλληλεπίδραση παρακειμένων κατασκευών με διαφορετικό συνολικό ύψος αλλά και διαφορετικό ίσο ύψος ορόφων.** Η πραγματική κατάσταση (α) και η προσομοίωση (β). Οι πλάκες της μίας κατασκευής εμβολίζουν τα υποστυλώματα της άλλης. Το κυριώτερο πρόβλημα παρατηρείται στο υποστύλωμα της πολυώροφης κατασκευής που υφίσταται πλήγμα από την πλάκα του ανωτέρου ορόφου της χαμηλότερης και περισσότερη δύσκαμπτης κατασκευής.

## 2.2. Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ-2000)

Αν δεν γίνεται ακριβέστερος υπολογισμός ο σεισμικός αρμός πλήρους διαχωρισμού  $\Delta_{\text{αρμου}}$  μπορεί να υπολογίζεται ως

$$\Delta_{\text{αρμου}} = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2} \quad (1)$$

όπου  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$  οι μέγιστες σεισμικές μετατοπίσεις των δύο παρακειμένων κτιρίων στις θέσεις των επικίνδυνων υποστυλωμάτων συμπεριλαμβανομένης και της επίδρασης της στροφής. Η μέγιστη σεισμική μετατόπιση λαμβάνεται ως

$$\Delta = q \Delta_{\text{ελ}} \quad (2)$$

όπου  $\Delta_{\text{ελ}}$  η μέγιστη ελαστική σεισμική μετατόπιση και  $q$  ο συντελεστής συμπεριφοράς της κατασκευής. Αν δεν είναι δυνατή ακριβέστερη εκτίμηση των μετακινήσεων του υφισταμένου κτιρίου (παλιό κτίριο με άγνωστο δομικό

σύστημα) μπορούν αυτές να ληφθούν ίσες με τις αντίστοιχες του υπό μελέτη κτιρίου. Σε αυτή τη περίπτωση  $\Delta_{\text{αρμού}} = \Delta_1 \sqrt{2}$ .

Σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει πιθανότητα εμβολισμού υποστυλωμάτων σε κανένα από τα δύο κτίρια (ίσο ύψος ορόφων), το εύρος του αντίστοιχου αρμού, εφ' όσον δεν γίνεται ακριβέστερος υπολογισμός, είναι δυνατόν να καθορίζεται με βάση τον συνολικό αριθμό των υπέρ το έδαφος εν επαφή ορόφων ως εξής :

- i) Πλάτος αρμού 4 cm για επαφή μέχρι 4 ορόφους.
- ii) Πλάτος αρμού 8 cm για επαφή από 4 μέχρι 8 ορόφους.
- iii) Πλάτος αρμού 10 cm για επαφή σε περισσότερους από 8 ορόφους.

Στους υπογείους ορόφους (και τη θεμελίωση) δεν είναι υποχρεωτική η πρόβλεψη αντισεισμικού αρμού.

### 2.3. Ευρωκώδικας 8 (EC8)

Αναγνωρίζει το πρόβλημα και επιβάλλει την αντιμετώπισή του με την ίδια μεθοδολογία όπως και ο ΕΑΚ-2000. Αναφέρεται ότι :

i) Η κατασκευή στα σημεία πιθανής κρούσης με την κατασκευή της παρακείμενης ιδιοκτησίας, θα πρέπει να απέχει από τη γραμμή ιδιοκτησίας όχι λιγότερο από τη μέγιστη σεισμική οριζόντια μετατόπιση  $d_s$  της κατασκευής.

ii) Η απόσταση μεταξύ κατασκευών που ανήκουν στην ίδια ιδιοκτησία δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από

$$d = \sqrt{d_{s1}^2 + d_{s2}^2} \quad (3)$$

όπου  $d_{s1}$ ,  $d_{s2}$  οι μέγιστες σεισμικές οριζόντιες μετατοπίσεις των δύο παρακείμενων κατασκευών.

iii) Αν τα ύψη των ορόφων δύο παρακείμενων κατασκευών είναι ίσα μεταξύ τους τότε η παραπάνω αναφερομένη ελάχιστη απόσταση μεταξύ των κατασκευών μπορεί να μειωθεί πολλαπλασιαζόμενη επί τον συντελεστή 0.7 .

Στις παραπάνω σχέσεις η μέγιστη σεισμική μετατόπιση της κατασκευής  $d_s$  λαμβάνεται ως

$$d_s = q_d d_e \quad (4)$$

όπου  $q_d$  ο συντελεστής συμπεριφοράς κατά EC8 και  $d_e$  η μετακίνηση όπως αυτή υπολογίζεται από ελαστική ανάλυση.

### 3. Αλληλεπίδραση μεταξύ κατασκευών με ίσο ύψος ορόφων

#### 3.1. Γενικές διερευνήσεις

Η αλληλεπίδραση μεταξύ κατασκευών των οποίων οι όροφοι βρίσκονται στο ίδιο ύψος έχει μελετηθεί διεθνώς σε αρκετή έκταση. Οι αρχικές διερευνήσεις έγιναν με μονοβάθμιους ταλαντωτές σε σειρά. Ο Anagnostopoulos (1988) διερεύνησε το πρόβλημα με διάφορα ελαστικά και ανελαστικά μονοβάθμια συστήματα σε σειρά. Χρησιμοποιήθηκαν πέντε πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις ενώ διερευνήθηκαν πολλές παράμετροι του προβλήματος. Μεταξύ των συμπερασμάτων που εξήχθησαν από τα αποτελέσματα, ήταν και ότι οι εξωτερικοί από τους μονοβάθμιους ταλαντωτές που ευρίσκοντο σε σειρά, κατεπονούντο από την πρόσκρουση περισσότερο από τους εσωτερικούς. Επί πλέον, παρατηρήθηκε μείωση της έντασης της απόκρισης των εσωτερικών συστημάτων σε σχέση με την ένταση της σεισμική τους απόκρισης χωρίς την αλληλεπίδραση των γειτονικών. Στο ίδιο πλαίσιο έρευνας, μελετήθηκε από την Athanasiadou et al (1994) η επιρροή της διαφοράς φάσεως στη ταλάντωση σχηματισμών σε σειρά, με παρεμφερή συμπεράσματα.

Στη δεκαετία 1990 αναφέρονται προσπάθειες για τη διερεύνηση πολυβαθμίων συστημάτων καθώς και πολυβαθμίων συστημάτων με διαφορετικό συνολικό ύψος (Anagnostopoulos & Spiliopoulos 1992). Στις περιπτώσεις αυτές, οι κατασκευές προσομοιώνονται με συγκεντρωμένες μάζες, που συνδέονται με συνδέσμους διατμητικού τύπου με διγραμμικά χαρακτηριστικά δύναμης - παραμόρφωσης. Μελετήθηκαν οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης παρακείμενων κατασκευών με την συμπεριφορά ομοίων 5-ορόφων κατασκευών που ήταν σε σειρά διάταξη 2, 3 και 4 κτιρίων. Επί πλέον, διερευνήθηκε η επιρροή της πρόσκρουσης δύο κατασκευών με διαφορετικό συνολικό ύψος ορόφων. Σύμφωνα με τους συγγραφείς σ' αυτήν τη περίπτωση η αλληλεπίδραση μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες. Ακόμη, βελτιωμένες μέθοδοι για τη διερεύνηση των πολυβαθμίων συστημάτων προτείνονται από τους Maison and Kasai (1990 & 1992).

Σε αυτές τις εργασίες το πρόβλημα διερευνάται μεταξύ μονοβαθμίων ή πολυβαθμίων θεωρητικών συστημάτων και όχι μεταξύ κατασκευών που έχουν μελετηθεί με συγκεκριμένο κανονισμό ωπλισμένου σκυροδέματος και έχουν σχεδιασθεί με συγκεκριμένο αντισεισμικό κανονισμό. Κατ' αυτόν τον τρόπο δεν λαμβάνονται υπόψη τα δυναμικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες απόκρισης των

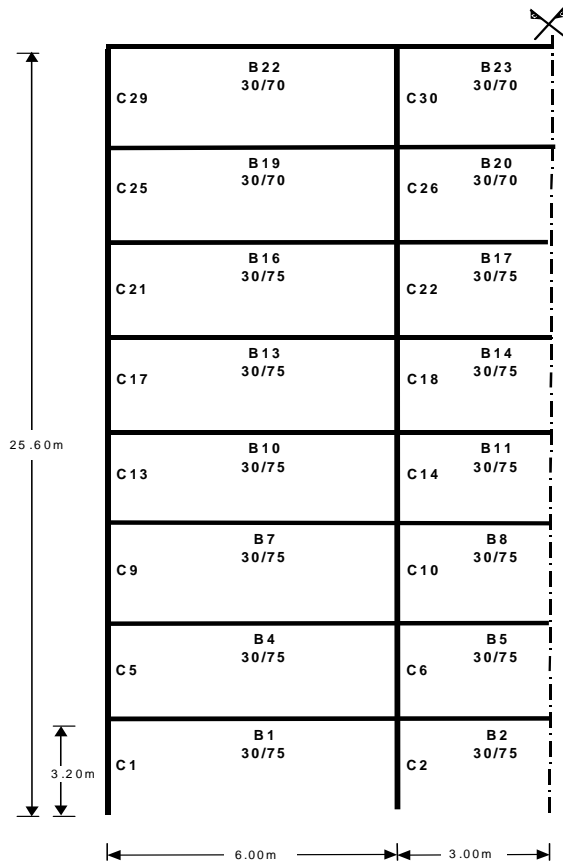
υλικών και των στοιχείων των πραγματικών κατασκευών ωπλισμένου σκυροδέματος.

### 3.2. Διερεύνηση αλληλεπίδρασης σε κατασκευές ωπλισμένου σκυροδέματος

Προσφάτως δημοσιεύθηκαν εργασίες (Karayannis & Fotopoulou 1998, Karayannis & Favvata 2005) στις οποίες διερευνώνται περιπτώσεις αλληλεπίδρασης μεταξύ πολυωρόφων κατασκευών ωπλισμένου σκυροδέματος που έχουν σχεδιασθεί με βάση τους Ευρωκώδικες EC2 και EC8. Σε αυτές τις προσπάθειες λαμβάνονται υπ' όψη τα πραγματικά χαρακτηριστικά των στοιχείων από ωπλισμένο σκυροδέμα των κατασκευών όπως η ποσότητα και η θέση των οπλισμών, η αντοχή και οι νόμοι απόκρισης του χάλυβα και του σκυροδέματος καθώς και η πραγματική γεωμετρία των κατασκευών.

Οι υπό εξέταση κατασκευές έχουν διαφορετικό συνολικό ύψος αλλά τα ύψη ορόφων είναι ίσα και έτσι οι κρούσεις γίνονται μεταξύ των μαζών των ορόφων τους (σχ. 1). Παρακάτω παρουσιάζονται αποτελέσματα καθώς και χρήσιμα συμπεράσματα από τη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης οκταώρων πλαισίων (σχ. 3 και 4) με πιο δύσκαμπτες κατασκευές χαμηλότερου συνολικού ύψους. Χρησιμοποιήθηκαν δύο οκταώρες πλαισιωτές κατασκευές που έχουν σχεδιασθεί με βάση τους Ευρωκώδικες 2 και 8 (EC2 και EC8), η πρώτη για μέσο επίπεδο πλαστιμότητας (Ductility Class Medium – DCM) και η δεύτερη για υψηλό επίπεδο πλαστιμότητας (Ductility Class High – DCH). Η μορφή και οι διαστάσεις των δύο 8-ορόφων πλαισίων παρουσιάζονται στο σχ. 3α ενώ οι διαστάσεις και οι οπλισμοί των υποστυλωμάτων για το πλαίσιο DCM δίδονται στο σχ. 3β. Αντίστοιχα οι διαστάσεις και οι οπλισμοί των υποστυλωμάτων για το πλαίσιο με υψηλό επίπεδο πλαστιμότητας (DCH) δίδονται στο σχ.4. Σημειώνεται ότι στην αρχή οι Ευρωκώδικες 2 και 8 προέβλεπον σχεδιασμό για τρία επίπεδα πλαστιμότητας (χαμηλό, μέσο και υψηλό επίπεδο, συμβολικά DCL, DCM και DCH, αντίστοιχα), οι σήμερα ισχύοντες Ευρωκώδικες προβλέπουν πλέον μόνο το μέσο και το υψηλό επίπεδο πλαστιμότητας (DCM και DCH) και τέλος οι Ελληνικοί κανονισμοί (ΕΚΩΣ-2000 και ΕΑΚ-2000) προβλέπουν ένα επίπεδο πλαστιμότητας το οποίο ενώ δέχεται συντελεστή συμπεριφοράς αντίστοιχο με εκείνους του μέσου επιπέδου πλαστιμότητας (DCM) των Ευρωκωδίκων υιοθετεί τις περισσότερες από τις (αυστηρές) διατάξεις του υψηλού επιπέδου πλαστιμότητας (DCH).





ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ Κατά EC2 & EC8 για μέση πλαστιμότητα (DCM)			
Εξωτερικά		Εσωτερικά	
<b>C29</b>	<b>30/30 cm</b> 6 $\varnothing$ 14	<b>C30</b>	<b>35/35 cm</b> 8 $\varnothing$ 14
<b>C25</b>	<b>30/30</b> 4 $\varnothing$ 20+2 $\varnothing$ 14	<b>C26</b>	<b>35/35</b> άνω 6 $\varnothing$ 20 κάτω $\varnothing$ 20+4 $\varnothing$ 16
<b>C21</b>	<b>30/30</b> άνω 4 $\varnothing$ 20+2 $\varnothing$ 16 κάτω $\varnothing$ 20+2 $\varnothing$ 12	<b>C22</b>	<b>40/40</b> άνω 10 $\varnothing$ 20 κάτω $\varnothing$ 20+6 $\varnothing$ 14
<b>C17</b>	<b>30/30</b> άνω 4 $\varnothing$ 20+4 $\varnothing$ 18 κάτω $\varnothing$ 20+4 $\varnothing$ 16	<b>C18</b>	<b>40/40</b> άνω 12 $\varnothing$ 20 κάτω $\varnothing$ 20+4 $\varnothing$ 18
<b>C13</b>	<b>35/35</b> 4 $\varnothing$ 20+2 $\varnothing$ 14	<b>C14</b>	<b>45/45</b> 8 $\varnothing$ 20+2 $\varnothing$ 16
<b>C9</b>	<b>45/45</b> 4 $\varnothing$ 20+4 $\varnothing$ 16	<b>C10</b>	<b>45/45</b> 8 $\varnothing$ 20+4 $\varnothing$ 18
<b>C5</b>	<b>50/50</b> 8 $\varnothing$ 20	<b>C6</b>	<b>50/50</b> 8 $\varnothing$ 20+2 $\varnothing$ 18
<b>C1</b>	<b>50/50</b> άνω 8 $\varnothing$ 20 κάτω $\varnothing$ 20+2 $\varnothing$ 14	<b>C2</b>	<b>50/50</b> άνω 8 $\varnothing$ 20 κάτω 12 $\varnothing$ 20

β. Διαστάσεις και οπλισμοί του 8-ορόφου πλαισίου για σχεδιασμό για μέσο επίπεδο πλαστιμότητας (DCM) κατά EC2 & EC8

α. Γεωμετρία και διαστάσεις 8-ορόφου πλαισίου σχεδιασμένου κατά EC2 και EC8.

Σχ. 3 Γεωμετρία (α), διαστάσεις και οπλισμοί υποστυλωμάτων (β) οκταορόφου πλαισίου σχεδιασμένου με βάση τους Ευρωκώδικες 2 και 8 για μέσο επίπεδο πλαστιμότητας (Karayannis & Fotopoulou 1998, Karayannis & Favvata 2005a).

Διερευνήθηκε η περίπτωση αλληλεπίδρασης των 8-ορόφων πλαισίων με 4-όροφες και με 2-όροφες κατασκευές. Από τις δύο 4-όροφες κατασκευές που χρησιμοποιήθηκαν η μία είναι πλαισιωτή και σχετικά εύκαμπτη ενώ η άλλη πιο δύσκαμπτη με δυαδικό δομικό σύστημα δηλαδή πλαίσιο με τοιχώματα. Αντίστοιχα, χρησιμοποιήθηκαν δύο 2-όροφες κατασκευές από τις οποίες η μία είναι πλαισιωτή και η άλλη πιο δύσκαμπτη με δομικό σύστημα από πλαίσιο με τοιχώματα.

Εξετάσθηκαν οι περιπτώσεις αλληλεπίδρασης των 8-ορόφων με τις 4-όροφες και τις 2-όροφες, σε κάθε μία από τις οποίες μελετήθηκε και η επιρροή της απόστασης των δύο κατασκευών κατά την έναρξη της σεισμικής διεγέρσεως.

Συγκεκριμένα μελετήθηκε η αλληλεπίδραση όταν οι δύο κατασκευές είναι σε επαφή από την αρχή δηλαδή με εύρος αρμού  $d_g=0$  καθώς και όταν υπάρχει μικρή απόσταση μεταξύ των κατασκευών ( $d_g = 0.5, 1, 2, 3$  cm).

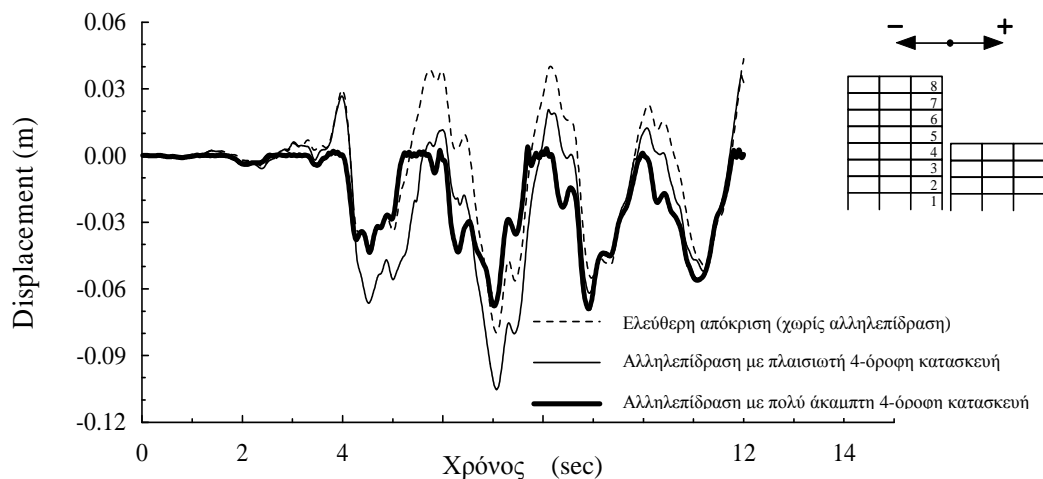
Ως σεισμικές διεγέρσεις κατά τη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης των κατασκευών ελήφθησαν (α) ο σεισμός της Κορίνθου (Αλκυονίδες) 1981 με μέγιστη επιτάχυνση  $a_{max}=0.296g$  και διάρκεια 12 sec, και (β) ο σεισμός του El Centro 1940 με  $a_{max}=0.318g$  και διάρκεια 15 sec.

Για τις βήμα-προς-βήμα σεισμικές αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης DRAIN-2DX (Prakash et al 1993).

Στο σχ. 5 παρουσιάζεται η απόκριση μετατοπίσεων του 4ου ορόφου της 8-ορόφου (DCM) κατασκευής για τρεις περιπτώσεις σεισμικής απόκρισης. Στη μία περίπτωση η κατασκευή αποκρίνεται ελεύθερα (διακεκομμένη γραμμή), στη δεύτερη υπάρχει αλληλεπίδραση με τη παρακείμενη 4-όροφη πλαισιωτή κατασκευή με την οποία είναι σε επαφή (συνεχής λεπτή γραμμή) και στη τρίτη περίπτωση υπάρχει αλληλεπίδραση με τη παρακείμενη 4-όροφη πολύ άκαμπτη κατασκευή (πρακτικά άκαμπτο εμπόδιο) με την οποία είναι σε επαφή (έντονη συνεχής γραμμή).

ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ			
Κατά EC2 & EC8 για υψηλή πλαστιμότητα (DCH)			
Εξωτερικά		Εσωτερικά	
C29	<b>30/30 cm</b> 6 $\varnothing$ 14	C30	<b>35/35 cm</b> 8 $\varnothing$ 14+2 $\varnothing$ 12
C25	<b>30/30</b> άνω 6 $\varnothing$ 14 κάτω 4 $\varnothing$ 16+2 $\varnothing$ 14	C26	<b>35/35</b> 8 $\varnothing$ 14+2 $\varnothing$ 12
C21	<b>30/30</b> 4 $\varnothing$ 14	C22	<b>40/40</b> άνω 4 $\varnothing$ 20+4 $\varnothing$ 16 κάτω $\varnothing$ 20+2 $\varnothing$ 18
C17	<b>35/35</b> άνω 4 $\varnothing$ 18+2 $\varnothing$ 16 κάτω $\varnothing$ 18+2 $\varnothing$ 12	C18	<b>40/40</b> 4 $\varnothing$ 20+6 $\varnothing$ 16
C13	<b>40/40</b> 4 $\varnothing$ 20+2 $\varnothing$ 16	C14	<b>45/45</b> 4 $\varnothing$ 20+4 $\varnothing$ 16
C9	<b>45/45</b> 4 $\varnothing$ 20+4 $\varnothing$ 16	C10	<b>50/50</b> 8 $\varnothing$ 20
C5	<b>50/50</b> 8 $\varnothing$ 20	C6	<b>50/50</b> 8 $\varnothing$ 20
C1	<b>50/50</b> 8 $\varnothing$ 20	C2	<b>55/55</b> 8 $\varnothing$ 20+2 $\varnothing$ 18

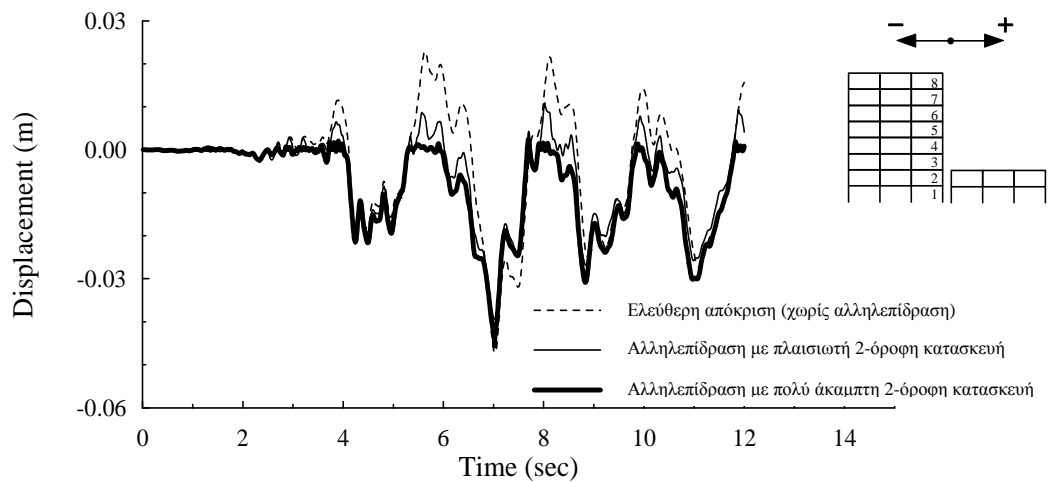
Σχ. 4 Διαστάσεις και οπλισμοί υποστυλωμάτων 8-ορόφου πλαισίου σχεδιασμένου με βάση τους EC2, EC8 για υψηλό επίπεδο πλαστιμότητας (DCH). Η γεωμετρία είναι ίδια με αυτή του πλαισίου DCM και φαίνεται στο σχ. 3α.



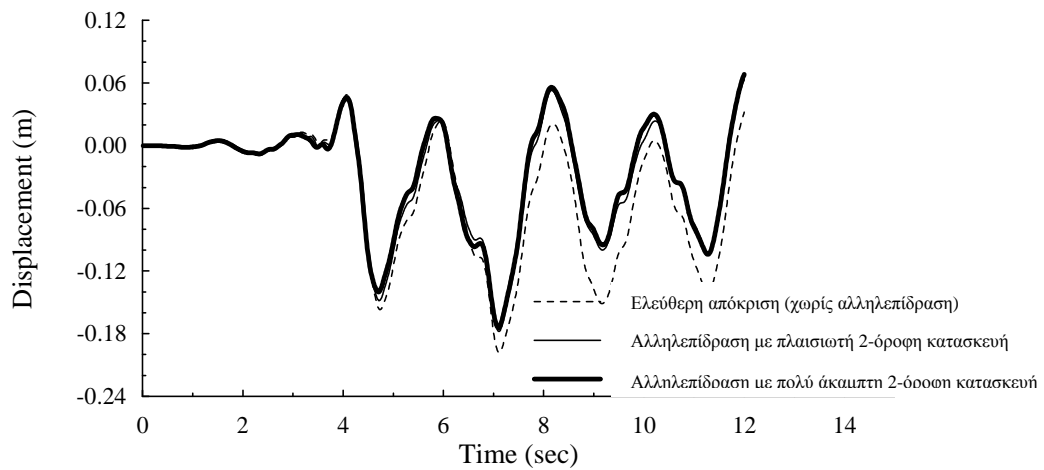
Σχ. 5 **Αλληλεπίδραση 8-ορόφου (DCM) πλαισίου με 4-όροφες κατασκευές.** Παρουσιάζεται η απόκριση μετατοπίσεων του 4ου ορόφου (χρονική ιστορία μετατοπίσεων) για τρεις περιπτώσεις: Ελεύθερη απόκριση, αλληλεπίδραση με πλαισιωτή 4-όροφη κατασκευή, αλληλεπίδραση με πολύ άκαμπτη 4-όροφη κατασκευή.

Στο σχ. 6 παρουσιάζονται αποτελέσματα από την μελέτη της αλληλεπίδρασης του 8-ορόφου πλαισίου (DCM) με τις διώροφες κατασκευές. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται συγκριτικά οι αποκρίσεις μετατοπίσεων του 2ου (σχ. 6α) και του 8ου (σχ. 6β) ορόφου του 8-ορόφου πλαισίου για τις περιπτώσεις: (α) η κατασκευή αποκρίνεται ελεύθερα (διακεκομμένη γραμμή), (β) υπάρχει αλληλεπίδραση με τη παρακείμενη 2-όροφη πλαισιωτή κατασκευή με την οποία είναι σε επαφή (συνεχής λεπτή γραμμή) και (γ) υπάρχει αλληλεπίδραση με τη παρακείμενη 2-όροφη πολύ άκαμπτη κατασκευή με την οποία είναι σε επαφή (έντονη συνεχής γραμμή).

Κατά τη διερεύνηση των απαιτήσεων σε πλαστιμότητα φάνηκε ότι από την αλληλεπίδραση των κατασκευών αυξάνουν οι απαιτήσεις σε πλαστιμότητα των στοιχείων του 8-ορόφου πλαισίου. Ιδιαίτερη αύξηση παρουσιάζεται στο υποστύλωμα της 8-ορόφου κατασκευής στον όροφο επάνω από τη θέση της ανώτερης κρούσης των δύο κατασκευών. Για τη καλλίτερη αντίληψη των αποτελεσμάτων και την άμεση ποσοτικοποίησή τους χρησιμοποιείται ο συντελεστής  $\gamma_{\mu}$  που χαρακτηρίζει την αύξηση των απαιτήσεων σε πλαστιμότητα λόγω της αλληλεπίδρασης και ο οποίος μπορεί να ορισθεί ως  $\gamma_{\mu} = \mu_{\phi, dg} / \mu_{\phi}$  όπου  $\mu_{\phi, dg}$  η απαίτηση σε πλαστιμότητα καμπυλοτήτων του υπό εξέταση υποστυλώματος λαμβάνοντες υπ' όψη την αλληλεπίδραση των κατασκευών οι οποίες απέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με  $d_g$  (εύρους αρμού) και  $\mu_{\phi}$  η απαίτηση σε πλαστιμότητα του



α. Χρονική απόκριση των μετατοπίσεων του 2ου ορόφου της 8-όροφης κατασκευής



β. Χρονική απόκριση των μετατοπίσεων του 8ου ορόφου της 8-όροφης κατασκευής

Σχ. 6 **Αλληλεπίδραση 8-ορόφου (DCM) πλαισίου με 2-όροφες κατασκευές.** Παρουσιάζεται η απόκριση μετατοπίσεων του 2ου και του 8ου ορόφου (χρονική ιστορία μετατοπίσεων) για τρεις περιπτώσεις: Ελεύθερη απόκριση, αλληλεπίδραση με πλαισιωτή 2-όροφη κατασκευή, αλληλεπίδραση με πολύ άκαμπτη 2-όροφη κατασκευή.

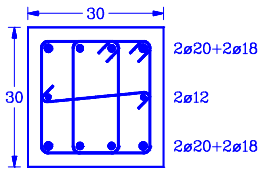
ιδίου στοιχείου όταν το κτίριο αποκρίνεται στον ίδιο σεισμό χωρίς την επιρροή της παρακείμενης κατασκευής (χωρίς αλληλεπίδραση). Στον πίνακα του σχ. 7 δίδονται συντελεστές  $\gamma_{\mu}$  για την περίπτωση αλληλεπίδρασης του 8-ορόφου πλαισίου με 4-όροφες και 2-όροφες κατασκευές διαφορετικής δυσκαμψίας. Ο  $\gamma_{\mu}$  αναφέρεται στην απαίτηση σε πλαστιμότητα καμπυλοτήτων του υποστυλώματος επάνω από τη ανώτερη θέση κρούσεων των δύο κατασκευών.

Συντελεστές $\gamma_{\mu}$ για το υποστύλωμα του 5ου ορόφου επάνω από την περιοχή (κόμβο) κρούσεως του 8-ορόφου πλαισίου για κατασκευές σε επαφή $d_g=0$ .						
8-όροφο πλαίσιο	Αλληλεπίδραση με 4-όροφο Υποστύλωμα 5ου ορόφου (άνω/κάτω)			Αλληλεπίδραση με 2-όροφο Υποστύλωμα 3ου ορόφου (άνω/κάτω)		
	πλαίσιο ΔΣυ	μεικτό ΔΣυ	άκαμπτο ΔΣυ	πλαίσιο ΔΣυ	μεικτό ΔΣυ	άκαμπτο ΔΣυ
DCM	1.95/2.14	2.49/2.78	2.85/4.39	1.22/1.31	1.30/1.38	1.41/1.42
DCH	1.00/1.26	1.63/1.98	2.42/4.78	1.17/1.10	1.38/1.21	1.40/1.31

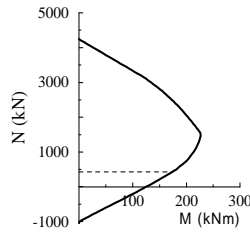
Σχ. 7 Συντελεστής  $\gamma_{\mu}$  για αλληλεπίδραση 8-ορόφου (DCM) πλαισίου με 4-όροφες και 2-όροφες κατασκευές οι οποίες έχουν διαφορετική δυσκαμψία. Ο  $\gamma_{\mu}$  αναφέρεται στην απαίτηση σε πλαστιμότητα καμπυλοτήτων του υποστυλώματος επάνω από τη ανώτερη θέση κρούσεων των δύο κατασκευών.

Ακόμη, στα σχήματα 8 και 9 παρουσιάζονται διαγράμματα τιμών του συντελεστή  $\gamma_{\mu}$  όπως αυτά υπολογίσθηκαν από παραμετρική δυναμική ανελαστική ανάλυση για αλληλεπίδραση του 8-ορόφου πλαισίου με 4-όροφες κατασκευές διαφορετικής δυσκαμψίας.

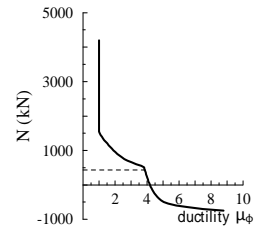
Από τα σχήματα 8 και 9 φαίνεται ότι η απόσταση μεταξύ των κατασκευών (εύρος αρμού –  $d_g$ ) επηρεάζει σημαντικά την ένταση της αλληλεπίδρασης. Η δυσμενέστερη είναι η περίπτωση κατά την οποία οι κατασκευές εφάπτονται ( $d_g=0$ ). Ιδιαίτερη σημασία για την επιρροή της αλληλεπίδρασης αποδεικνύεται ότι έχει και η δυσκαμψία του χαμηλότερου κτιρίου. Όσο περισσότερο δύσκαμπτο είναι τόσο αυξάνει ο συντελεστής  $\gamma_{\mu}$  και άρα η αύξηση των απαιτήσεων σε πλαστιμότητα λόγω της αλληλεπίδρασης. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι από τα διαγράμματα (σχ. 8δ, 9δ) φαίνεται ότι σε όλες τις συνηθισμένες περιπτώσεις αλληλεπίδρασης παρακειμένων κατασκευών με ίσα ύψη ορόφων, οι τιμές που προκύπτουν από την αύξηση της απαίτησης σε πλαστιμότητα καλύπτονται από τις διαθέσιμες τιμές. Αυτό δείχνει ότι η αλληλεπίδραση παρακειμένων κατασκευών σχεδιασμένων με σύγχρονους κανονισμούς προκαλεί αυξήσεις των απαιτήσεων σε πλαστιμότητα στη περιοχή των κρούσεων, αλλά συνήθως αυτές καλύπτονται, έστω και οριακά, από τις διαθέσιμες τιμές. Έτσι, στις περιπτώσεις αυτές αναμένονται σημαντικές μεν, αλλά κυρίως τοπικές, βλάβες του δομικού συστήματος της πολυώροφης και περισσότερο εύκαμπτης κατασκευής.



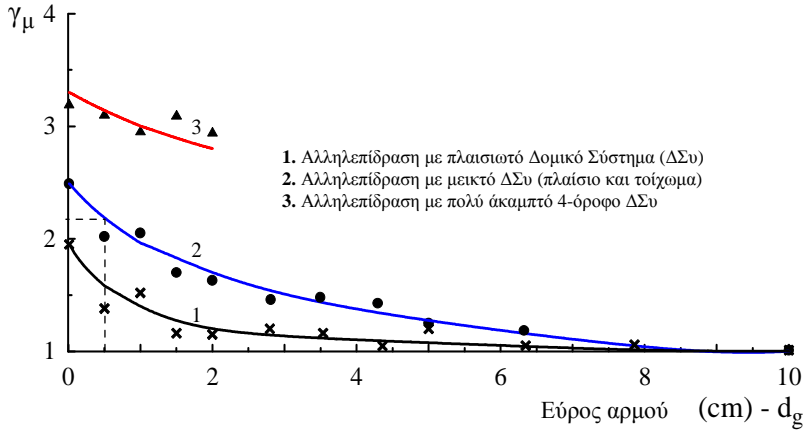
α. Διατομή



β. Διάγραμμα αντοχής M+N



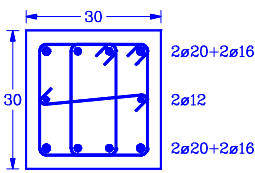
γ. Διαθέσιμη πλαστιμότητα  
 $\mu_{\phi,av} = 3.87$  (καμπυλοτήτων)



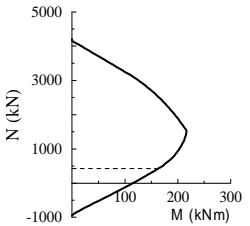
Απαίτηση πλαστιμότητας

- χωρίς αλληλεπίδραση  
 $\mu_{\phi,req} = 1.22$
- αλληλεπίδραση με μεικτό 4-όροφο για  $d_g=0.5$  cm  
 $\mu_{\phi,req,dg} = \gamma_\mu \cdot \mu_{\phi,req} = 2.25 \cdot 1.22 = 2.75$

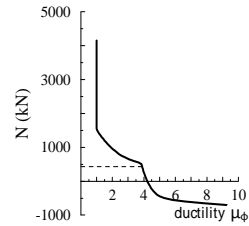
δ. Συντελεστές  $\gamma_\mu$  υπολογισμένοι από δυναμικές ανελαστικές αναλύσεις (8-όροφο με 4-όροφες κατασκευές)  
 Σχήμα 8. Υποσύλλωμα του 5ου ορόφου επάνω από την περιοχή κρούσεων (άνω τμήμα)



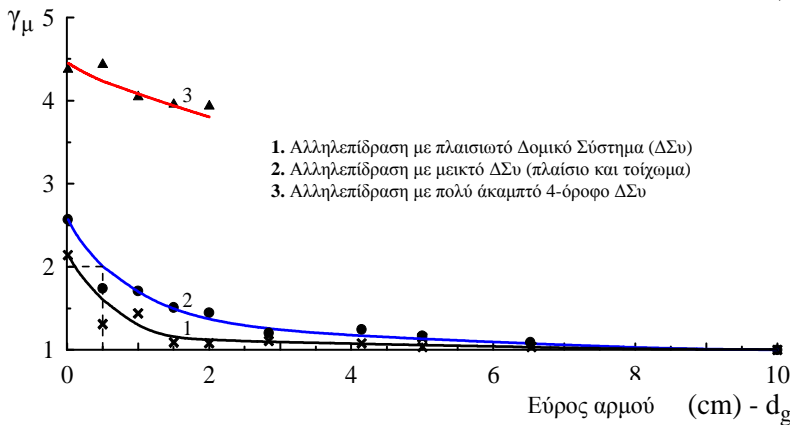
α. Διατομή



β. Διάγραμμα αντοχής M+N



γ. Διαθέσιμη πλαστιμότητα  
 $\mu_{\phi,av} = 3.84$  (καμπυλοτήτων).



Απαίτηση πλαστιμότητας

- χωρίς αλληλεπίδραση  
 $\mu_{\phi,req} = 1.65$
- αλληλεπίδραση με μεικτό 4-όροφο για  $d_g=0.5$  cm  
 $\mu_{\phi,req,dg} = \gamma_\mu \cdot \mu_{\phi,req} = 2.00 \cdot 1.65 = 3.30$

δ. Συντελεστές  $\gamma_\mu$  υπολογισμένοι από δυναμικές ανελαστικές αναλύσεις (8-όροφο με 4-όροφες κατασκευές)  
 Σχήμα 9. Υποσύλλωμα του 5ου ορόφου επάνω από την περιοχή κρούσεων (κάτω τμήμα)

## 4. Αλληλεπίδραση μεταξύ κατασκευών με διαφορετικές στάθμες ορόφων

### 4.1. Ο χαρακτήρας της αλληλεπίδρασης

Σε όλες τις εργασίες διεθνώς, όπως και στις παραπάνω αναφερόμενες διερευνήσεις, η μελέτη της αλληλεπίδρασης παρακειμένων κατασκευών περιορίζεται στη περίπτωση που υπάρχει ισοσταθμία μεταξύ των ορόφων των παρακειμένων κτιρίων. Έτσι η πρόσκρουση των κατασκευών γίνεται στην στάθμη των πλακών και δεν διερευνάται η περίπτωση εμβολισμού υποστυλώματος από πλάκα του παρακειμένου κτιρίου. Στη συνηθισμένη περίπτωση, όμως, κατά την οποία η παρακείμενη χαμηλότερη κατασκευή έχει διαφορετικές στάθμες ορόφων είναι πολύ πιθανόν να παρατηρηθούν κρούσεις των πλακών σε ενδιάμεσα σημεία του ύψους των υποστυλωμάτων.

Σε ένα υποστύλωμα που υφίσταται κρούσεις από πλάκα της παρακείμενης κατασκευής η αναπτυσσόμενη εντατική κατάσταση ανάλογα με τη θέση στην οποία το υποστύλωμα υφίσταται το πλήγμα, είναι δυνατόν να είναι:

(α) πρωτίστως καμπτικού χαρακτήρα, όποτε αυξάνονται πάρα πολύ οι απαιτήσεις σε πλαστιμότητα (περίπτωση υψηλών υποστυλωμάτων με πλήγμα περί το μέσον του ύψους - σπάνια περίπτωση)

(β) διατμητικού κυρίως χαρακτήρα και δευτερευόντως καμπτικού. Στις συνηθισμένες περιπτώσεις η αναπτυσσόμενη εντατική κατάσταση όταν ένα υποστύλωμα υποστεί πλήγμα από πλάκα παρακείμενης κατασκευής είναι διατμητικού χαρακτήρα οπότε οδηγούμεθα σε ανεξέλεγκτες ψαθυρές τοπικές αστοχίες που μπορεί να αποτελέσουν και αρχή γενικής αστοχίας ή και κατάρρευσης.

Παρουσιάζονται αποτελέσματα από πρόσφατες προσπάθειες (Karayannis & Favvata 2005a, 2005β) διερεύνησης της επιρροής της αλληλεπίδρασης στις απαιτήσεις πλαστιμότητας καθώς και στη συνολική σεισμική συμπεριφορά κατασκευής ωπλισμένου σκυροδέματος, που έρχεται σε επαφή με δομικά συστήματα μικρότερου συνολικού ύψους και με διαφορετικό ύψος ορόφων.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη διερεύνηση της ικανότητας του υποστυλώματος της πολυώροφης πλαισιωτής κατασκευής που εμβολίζεται από τη πλάκα του ανώτερου ορόφου της παρακείμενης πιο δύσκαμπτης κατασκευής με μικρότερο ύψος από αυτή. Η περίπτωση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως η πιο κρίσιμη περίπτωση αλληλεπίδρασης παρακειμένων κατασκευών. Σημειώνεται,

ότι μέχρι σήμερα παρ' όλων που η περίπτωση εμβολισμού υποστυλώματος από πλάκα παρακείμενης κατασκευής κατά την διάρκεια σεισμικής διεγέρσεως είναι πολύ συνηθισμένη στην πράξη δεν έχει ακόμα μελετηθεί. Παρακάτω, σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, ερευνάται και η επιρροή της απόστασης μεταξύ των παρακείμενων κατασκευών.

## 4.2. Διερεύνηση αλληλεπίδρασης κατασκευών με διαφορετικές στάθμες

### 4.2.1. Εξεταζόμενες περιπτώσεις

Μελετώνται τριάντα έξι (36) περιπτώσεις αλληλεπίδρασης κατασκευών με διαφορετικές στάθμες ορόφων όπου υπάρχει αυξημένη πιθανότητα εμβολισμού των υποστυλωμάτων του υψηλού εύκαμπτου κτιρίου από τις πλάκες της παρακείμενης κατασκευής. Η κάθε περίπτωση, εξετάζεται για δυο διαφορετικές σεισμικές διεγέρσεις. Συγκεκριμένα διερευνάται η σεισμική απόκριση του 8-όροφου πλαισίου του σχ. 3 που έχει σχεδιασθεί κατά EC2 και EC8 για μέσο επίπεδο πλαστιμότητας (DCM) και η αλληλεπίδραση του με 3-όροφες κατασκευές διαφόρων δυσκαμψιών που έχουν και διαφορετικές στάθμες ορόφων.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην διερεύνηση της απόκρισης των στοιχείων στη θέση όπου οι δυο κατασκευές έρχονται σε επαφή. Στις εξεταζόμενες περιπτώσεις το συνολικό ύψος των 3-όροφων κατασκευών είναι μεγαλύτερο από το συνολικό ύψος των τριών πρώτων ορόφων του 8-όροφου πλαισίου και μικρότερο ή ίσο από το συνολικό ύψος των τεσσάρων πρώτων ορόφων του. Έτσι το σημείο επαφής των δυο κατασκευών θα βρίσκεται είτε μεταξύ 3ου και 4ου ορόφου της 8-όροφης κατασκευής με αποτέλεσμα να έχουμε εμβολισμό υποστυλώματος, είτε στη στάθμη του 4ου ορόφου όποτε η σύγκρουση γίνεται μεταξύ των πλακών. Εξετάζονται οι περιπτώσεις αλληλεπίδρασης του 8-όροφου πλαισίου με: (α) τη 3-όροφη μεικτή κατασκευή και (β) ένα 3-όροφο πολύ δύσκαμπτο κτίριο που προσομοιώνεται με άκαμπτη μονόπλευρη στήριξη στο σημείο επαφής των κατασκευών. Η κάθε περίπτωση μελετάται για 3 θέσεις πρόσκρουσης ως εξής:

- (α) το ανώτερο σημείο επαφής βρίσκεται στο  $1/3$  του καθαρού ύψους ( $h$ ) του υποστυλώματος του 4ου ορόφου της 8-όροφης πλαισιωτής κατασκευής ( $h_A=1/3h$ ).
- (β) το ανώτερο σημείο επαφής βρίσκεται στα  $2/3$  του καθαρού ύψους ( $h$ ) του υποστυλώματος του 4ου ορόφου της 8-όροφης πλαισιωτής κατασκευής ( $h_A=2/3h$ ).



(γ) το συνολικό ύψος των 3-όροφων κατασκευών είναι ίσο με το συνολικό ύψος των τεσσάρων πρώτων ορόφων της 8-όροφης. Έτσι το ανώτερο σημείο επαφής βρίσκεται στη στάθμη του 4ου ορόφου του 8-όροφου πλαισίου και η σύγκρουση γίνεται μεταξύ των πλακών.

Ακόμη, για κάθε μία από τις μελετώμενες περιπτώσεις αλληλεπίδρασης εξετάζεται και η *επιρροή της αρχικής απόστασης  $d_g$  μεταξύ των κτιρίων*. Έτσι για την εξέταση της επιρροής της απόστασης  $d_g$  μεταξύ των παρακείμενων κτιρίων, οι παραπάνω περιπτώσεις αλληλεπίδρασης μελετώνται όταν  $d_g=0.0\text{cm}$  (κατασκευές σε επαφή),  $d_g=2.0\text{cm}$  και  $d_g=5.0\text{cm}$  οπότε οι κατασκευές ταλαντώνονται ελεύθερα (χωρίς επιρροή αλληλεπίδρασης).

Όλες οι παραπάνω αναφερόμενες περιπτώσεις μελετήθηκαν για 2 φυσικές σεισμικές διεγέρσεις: το σεισμό του El Centro το 1940, διάρκειας 15sec και με μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.318g$  και το σεισμό της Κορίνθου το 1981, διάρκειας 12sec και με μέγιστη σεισμική επιτάχυνση  $a_{\max}=0.306g$ . Η μέγιστη σεισμική επιτάχυνση ( $a_{\max}$ ) των διεγέρσεων αυτών είναι σχεδόν ίση με την επιτάχυνση σχεδιασμού του εξεταζόμενου πολυώροφου πλαισίου ( $A=0.3g$ ).

#### 4.2.2. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα των αναλύσεων περιλαμβάνουν κατ' αρχήν αποτελέσματα και παρατηρήσεις σχετικά με την επιρροή της αλληλεπίδρασης στην συνολική σεισμική απόκριση του 8-όροφου πλαισίου καθώς και στις αναπτυσσόμενες απαιτήσεις σε πλαστιμότητα καμπυλοτήτων των υποστυλωμάτων τους. Ιδιαίτερη όμως σημασία έχει το μέρος των αποτελεσμάτων που επικεντρώνεται στην συμπεριφορά του υποστυλώματος του 4ου ορόφου του 8-όροφου πλαισίου το οποίο υφίσταται την πρόσκρουση (εμβολισμό) από τη πλάκα του ανωτέρου ορόφου της παρακείμενης κατασκευής.

Συγκεκριμένα, διερευνάται η επιρροή της παρακείμενης κατασκευής στις απαιτήσεις σε πλαστιμότητα  $\mu_\phi$  των υποστυλωμάτων του 8-όροφου πλαισίου όταν αυτό έρχεται σε επαφή είτε με την 3-όροφη μεικτή κατασκευή είτε με το 3-όροφο άκαμπτο κτίριο. Στα σχ. 10 και 11 παρουσιάζονται οι απαιτήσεις σε πλαστιμότητα των εξωτερικών υποστυλωμάτων από την πλευρά της επαφής των κατασκευών, του 8-όροφου πλαισίου για τις περιπτώσεις αλληλεπίδρασης :

- (α) με την 3-όροφη μεικτή κατασκευή και
- (β) με την 3-όροφη άκαμπτη κατασκευή.

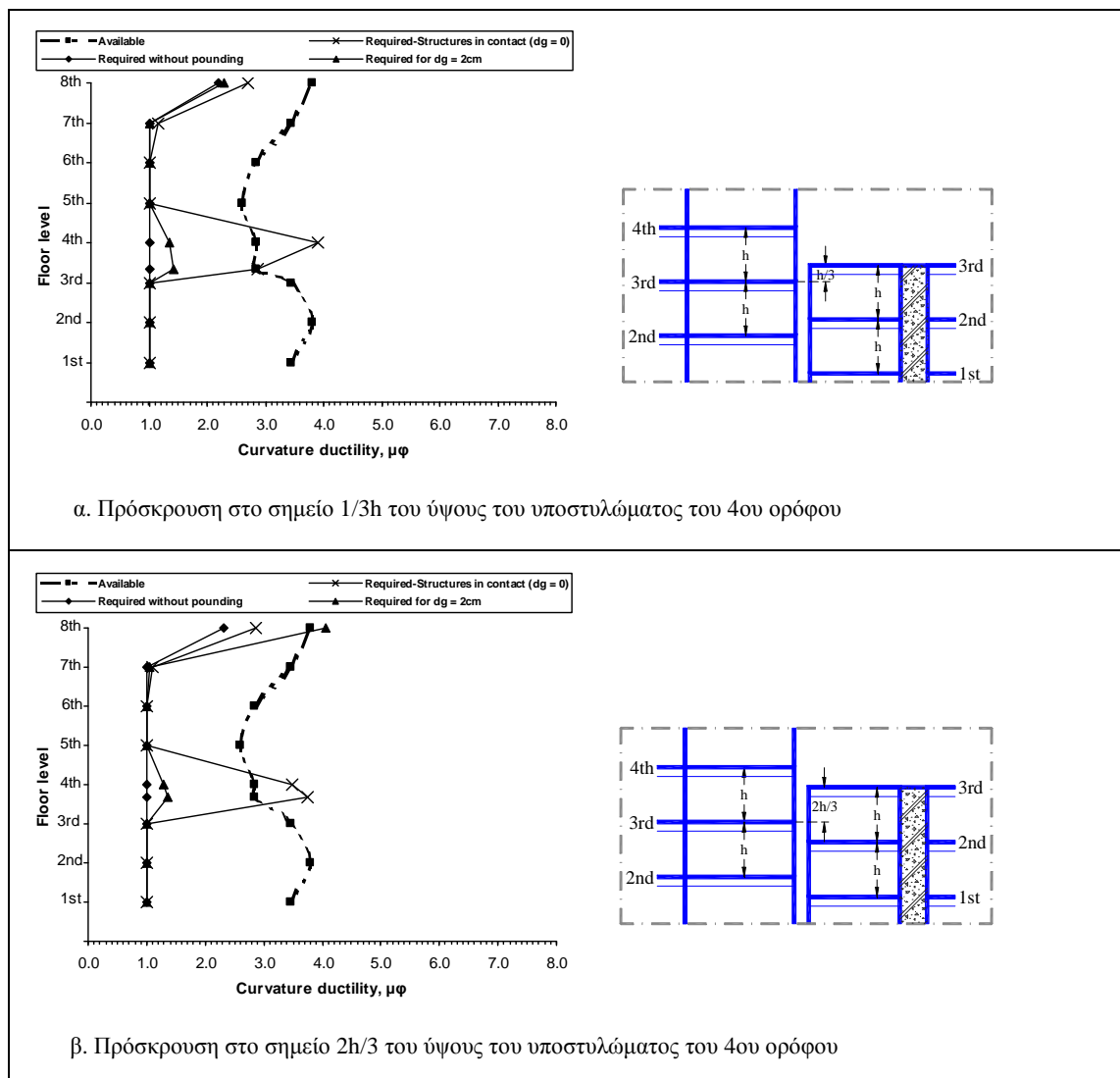
Η κάθε μία από τις περιπτώσεις αυτές μελετάται για 2 θέσεις πρόσκρουσης ως εξής:

(α) το ανώτερο σημείο επαφής βρίσκεται στο 1/3 του καθαρού ύψους (h) του υποστυλώματος του 4ου ορόφου της 8-όροφης κατασκευής ( $h_A=1/3h$ )

(σχ. 10α και 11α) και

(β) το ανώτερο σημείο επαφής βρίσκεται στα 2/3 του καθαρού ύψους (h) του υποστυλώματος του 4ου ορόφου της 8-όροφης κατασκευής ( $h_A=2/3h$ )

(σχ. 10β και 11β).



Σχ. 10 Αλληλεπίδραση του 8-όροφου πλαισίου (DCM) με 3-όροφη κατασκευή με μεικτό δομικό σύστημα. Απαιτήσεις σε πλαστιμότητα καμπυλοτήτων των εξωτερικών υποστυλωμάτων του 8-ορόφου από τη πλευρά της επαφής των κτιρίων (σεισμική διέγερση EI Centro 1940)

Επί πλέον κάθε περίπτωση αλληλεπίδρασης εξετάζεται όταν οι δυο κατασκευές είναι (σχήματα 10 και 11):

(α) *σε επαφή από την αρχή* ( $d_g=0.0\text{cm}$ ),

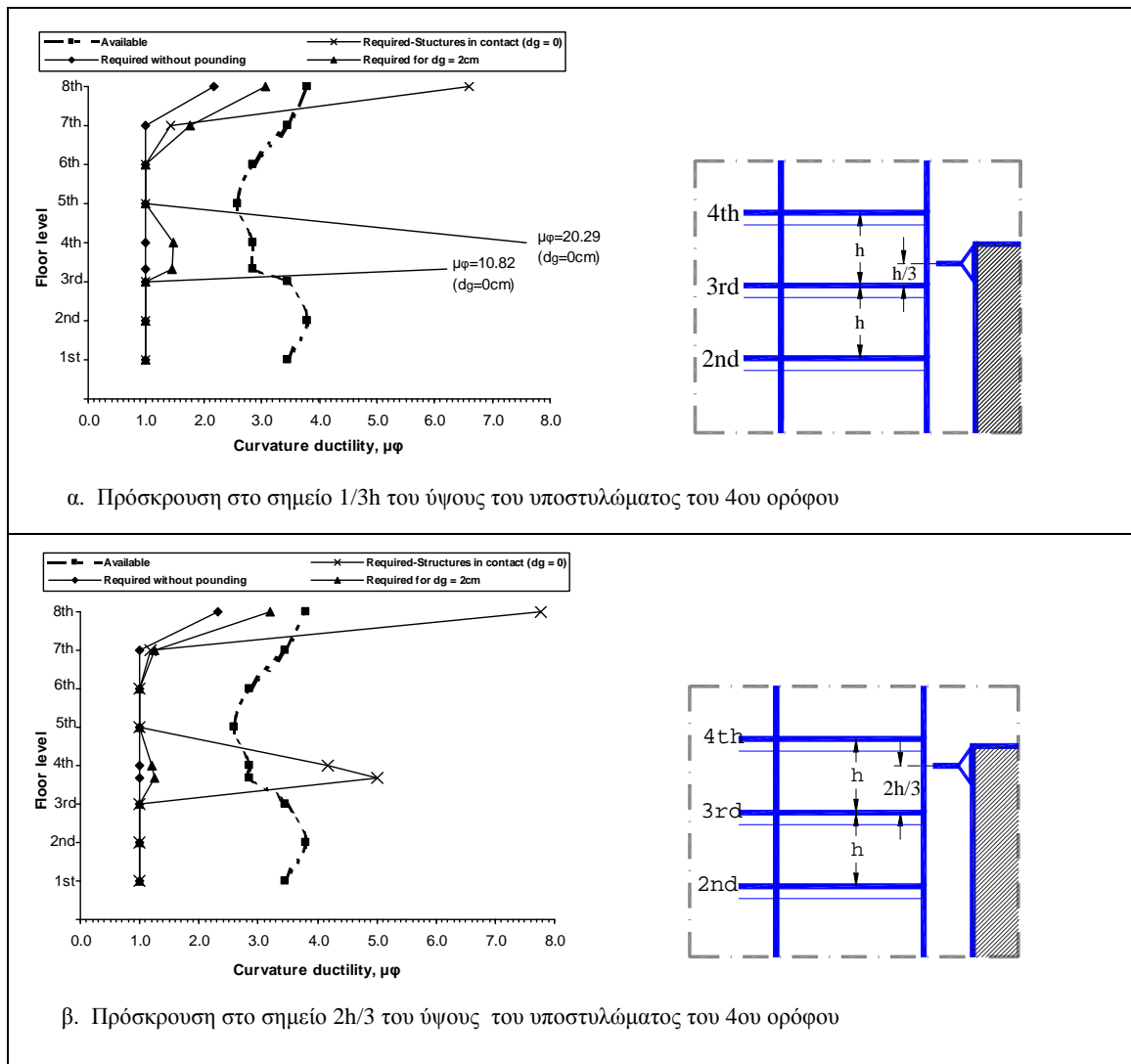
(β) *όταν απέχουν μεταξύ τους*  $d_g=2.0\text{cm}$  καθώς και

(γ) για ελεύθερη απόκριση (χωρίς αλληλεπίδραση).

Στα σχήματα 10 και 11 παρουσιάζονται και οι τιμές της διαθέσιμης πλαστιμότητας των υποστυλωμάτων για λόγους σύγκρισης. Γενικά, παρατηρείται ότι οι απαιτήσεις σε πλαστιμότητα των υποστυλωμάτων της 8-όροφης πλαισιωτής κατασκευής που έρχεται σε επαφή με την 3-όροφη μεικτή κατασκευή, αυξάνονται αφ' ενός στο υποστύλωμα που υφίσταται την κρούση καθώς και στους ανωτέρους ορόφους της κατασκευής (πάνω από το σημείο επαφής, στάθμη 4ου ορόφου). Στη περίπτωση που η 8-όροφη αλληλεπιδρά με την 3-όροφη άκαμπτη κατασκευή οι αντίστοιχες απαιτήσεις σε πλαστιμότητα καμπυλοτήτων είναι πολύ μεγαλύτερες.

Στις περιπτώσεις αλληλεπίδρασης που μελετώνται δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη μελέτη της τοπικής συμπεριφοράς του υποστυλώματος που υφίσταται την κρούση (εμβολίζεται) από τη πλάκα της παρακείμενης με μικρότερο συνολικό ύψος κατασκευής. Οι συνέπειες της πρόσκρουσης αυτής μπορεί να είναι πολύ σοβαρές για την ικανότητα του υποστυλώματος. Για καλύτερη και πιο αξιόπιστη προσέγγιση των συνεπειών της πρόσκρουσης στην τοπική συμπεριφορά αυτού του υποστυλώματος χρησιμοποιούνται δυο ειδικά στοιχεία "κατανεμημένης πλαστικότητας" (DRAIN-2DX).

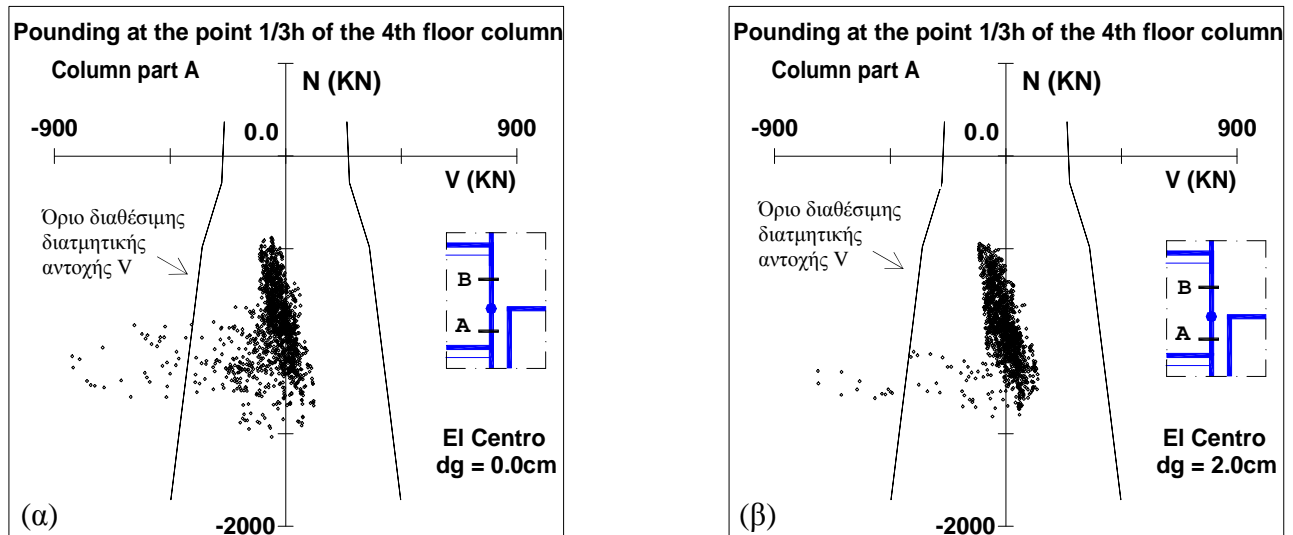
Παρουσιάζονται αποτελέσματα των καμπτικών και διατμητικών απαιτήσεων του υποστυλώματος της 8-όροφης πλαισιωτής κατασκευής που υφίσταται την πρόσκρουση και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες διαθέσιμες τιμές για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις αλληλεπίδρασης. Παρατηρείται από τα σχήματα 10 και 11 ότι, όταν το υποστύλωμα εμβολίζεται από τη πλάκα της παρακείμενης κατασκευής έχει μεγαλύτερες απαιτήσεις σε πλαστιμότητα καμπυλοτήτων συγκριτικά με αυτές που αναπτύσσει όταν η κατασκευή ταλαντώνεται ελεύθερα. Μάλιστα, όταν οι δυο κατασκευές βρίσκονται από την αρχή σε επαφή ( $d_g= 0.0\text{cm}$ ) η απαίτηση σε πλαστιμότητα ξεπερνάει την διαθέσιμη, ενώ όταν η μεταξύ τους απόσταση είναι  $d_g=2.00\text{cm}$  η απαίτηση σε πλαστιμότητα είναι επίσης μεγαλύτερη από αυτή χωρίς την επιρροή της αλληλεπίδρασης αλλά καλύπτεται από την διαθέσιμη.



Σχ. 11 Αλληλεπίδραση του 8-όροφου πλαισίου (DCM) με 3-όροφη κατασκευή με άκαμπτο δομικό σύστημα. **Απαιτήσεις σε πλαστιμότητα καμπυλοτήτων** των εξωτερικών υποστυλωμάτων του 8-όροφου από τη πλευρά της επαφής των κτιρίων (σεισμική διέγερση El Centro 1940)

Η διατμητική συμπεριφορά που εμφανίζει στο κρίσιμο τμήμα του, το υποστυλώματος της 8-όροφης πλαισιωτής κατασκευής για τις περιπτώσεις που το σημείο επαφής των δυο κτιρίων είναι στη θέση  $h_A=1/3h$ , παρουσιάζεται στα σχήματα 12 και 13 για αλληλεπίδραση με πλαισιωτή 3-όροφη κατασκευή και με τελείως άκαμπτη κατασκευή, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα είναι για τη σεισμική διέγερση του El Centro 1940, και περιλαμβάνουν τη περίπτωση που οι παρακείμενες κατασκευές είναι σε επαφή από την αρχή  $d_g=0.0\text{cm}$  (σχ. 12α, σχ.13α) και τη περίπτωση που η μεταξύ τους απόσταση είναι  $d_g=2.0\text{cm}$  (σχ. 12β,

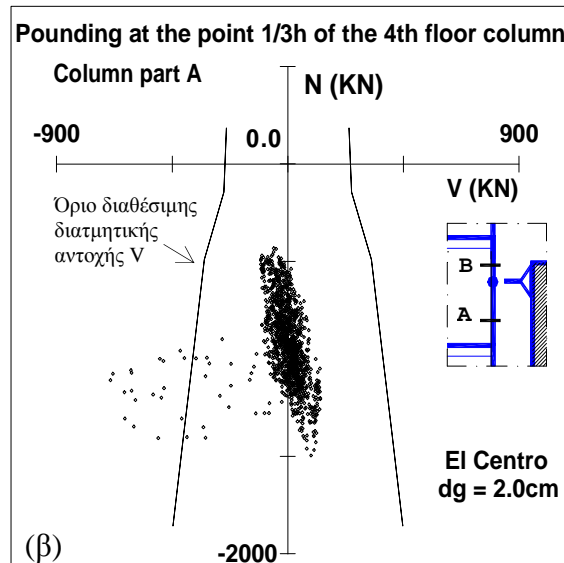
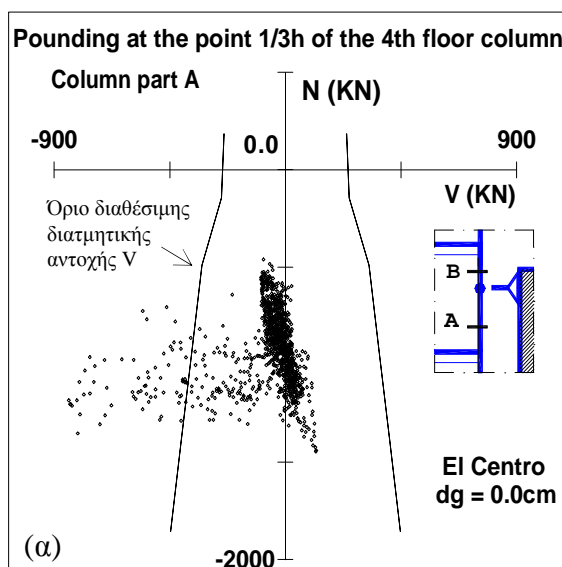
σχ.13β). Παρατηρείται ότι σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, οι αναπτυσσόμενες διατμητικές δυνάμεις ξεπερνούν την διατμητική αντοχή του υποστυλώματος.



◊ Κάθε σημείο αντιπροσωπεύει ένα ζεύγος διατμητικής δύναμης – αξονικής δύναμης (V-N) ενός βήματος κατά τη σεισμική ανάλυση

Σχ. 12 Αλληλεπίδραση του 8-ορόφου πλαισίου (DCM) με 3-όροφη πλαισιωτή κατασκευή με διαφορετικές στάθμες ορόφων, για τη περίπτωση (α) που είναι σε επαφή  $d_g=0$  και (β) για αρχικό αρμό  $d_g=2\text{cm}$ . **Εμβολισμός του εξωτερικού υποστυλώματος του 4ου ορόφου**, στο 1/3 του ύψους του, από την πλάκα του ανωτέρου ορόφου του 3-ορόφου. Στα διαγράμματα παρουσιάζονται τα ζεύγη τιμών τέμνουσας V και αντίστοιχης αξονικής N του υποστυλώματος για όλα τα βήματα της σεισμικής ανάλυσης και συγκρίνονται με τα όρια της διαθέσιμης αντοχής. Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται ότι υπάρχουν ζεύγη τιμών V-N που είναι έξω από τα όρια της διαθέσιμης αντοχής. Υπάρχουν, δηλαδή, χρονικά διαστήματα κατά την απόκριση στα οποία οι αναπτυσσόμενες τιμές τέμνουσας είναι μεγαλύτερες από την αντίστοιχη αντοχή και άρα είναι πιθανή τοπική ψαθυρή διατμητική αστοχία του υποστυλώματος στο κάτω τμήμα του.

Στις περιπτώσεις αυτές γίνεται στη πραγματικότητα εμβολισμός του εξωτερικού υποστυλώματος του 4ου ορόφου, στο 1/3 του ύψους του, από την πλάκα του ανωτέρου ορόφου του 3-ορόφου. Στα διαγράμματα των σχημάτων 12 και 13 παρουσιάζονται τα ζεύγη τιμών τέμνουσας V και αντίστοιχης αξονικής N του υποστυλώματος για όλα τα βήματα της σεισμικής ανάλυσης και συγκρίνονται με τα όρια της διαθέσιμης αντοχής. Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται ότι υπάρχουν ζεύγη τιμών V-N που είναι έξω από τα όρια της διαθέσιμης αντοχής. Αυτό σημαίνει ότι κατά την απόκριση υπάρχουν χρονικά διαστήματα στα οποία οι αναπτυσσόμενες τιμές τέμνουσας είναι μεγαλύτερες από την αντίστοιχη αντοχή σε



- ◊ Κάθε σημείο αντιπροσωπεύει ένα ζεύγος διατμητικής δύναμης – αξονικής δύναμης (V-N) ενός βήματος κατά τη σεισμική ανάλυση

Σχ. 13 Αλληλεπίδραση του 8-ορόφου πλαισίου (DCM) με 3-όροφη άκαμπτη κατασκευή με διαφορετικές στάθμες ορόφων, για τη περίπτωση (α) που είναι σε επαφή  $d_g=0$  και (β) για αρχικό αρμό  $d_g=2\text{cm}$ . **Εμβολισμός του εξωτερικού υποστυλώματος του 4ου ορόφου**, στο  $1/3$  του ύψους του, από την ανώτερη στάθμη του 3-ορόφου. Στα διαγράμματα παρουσιάζονται τα ζεύγη τιμών τέμνουσας V και αντίστοιχης αξονικής N του υποστυλώματος για όλα τα βήματα της σεισμικής ανάλυσης και συγκρίνονται με τα όρια της διαθέσιμης αντοχής. Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται ότι υπάρχουν ζεύγη τιμών V-N που είναι έξω από τα όρια της διαθέσιμης αντοχής. Υπάρχουν, δηλαδή, χρονικά διαστήματα κατά την απόκριση στα οποία οι αναπτυσσόμενες τιμές τέμνουσας είναι μεγαλύτερες από την αντίστοιχη αντοχή και άρα είναι πιθανή τοπική ψαθυρή διατμητική αστοχία του υποστυλώματος στο κάτω τμήμα του.

τέμνουσα λαμβάνοντας υπ' όψιν και την αξονική N. Συμπεραίνεται έτσι ότι στις εξεταζόμενες περιπτώσεις η επιρροή της παρακείμενης κατασκευής είναι πιθανόν να προκαλέσει τοπική ψαθυρή διατμητική αστοχία του υποστυλώματος στο κάτω τμήμα του και να έχει έτσι ως αποτέλεσμα την έναρξη γενικής αστοχίας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. – “Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ-2000)”, ΟΑΣΠ, Αθήνα, Σεπτ.1999.
2. – “Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος 2000 (ΕΚΩΣ-2000)”, ΦΕΚ 1329 Β’/6-11-2000, έκδοση ΟΑΣΠ – ΣΠΜΕ, Απρίλιος 2001.
3. – “Eurocode 8 : Design of Structures for earthquake resistance - Part 1 General rules,

*seismic actions and rules for Buildings*”, CEN, EN 1998-1, Dec. 2004.

4. – “Eurocode 2 : Design of Concrete Structures - Part 1 General Rules and Rules for Building”, CEN, EN 1992-1-1, Dec. 2004.
5. **ACI Committee 318** : “Building code requirements for structural concrete (ACI 318-95) and commentary (318R-95)”, ACI Manual of Concrete Practice, 2002.
6. **CEB – FIP** : “Model Code 1990”, T. Telford Ltd, 1993.
7. **NZS 3101:1982 and 3101**: “The Design of Concrete Structures. Standards New Zealand”, Wellington, 1995.
8. **Anagnostopoulos S.A.** : “Earthquake induced pounding: State of the art”, Proc. 10th European Conference on Earthquake Engineering, Vol. 2, pp. 897-905, 1995.
9. **Anagnostopoulos S.A.**: “Pounding of buildings in series during earthquakes”, J. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 16, pp. 443-456, 1988.
10. **Anagnostopoulos S.A., Spiliopoulos K.V.** : “An Investigation of Earthquake induced pounding between adjacent Buildings”, J. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 21, pp. 289-302, 1992.
11. **Arnold C., Reitherman R.**: “Building Configuration & Seismic Design“, John Wiley & Sons, 1982.
12. **Athanasiadou C.J., Penelis G.G., Kappos A.J.** : “Seismic response of adjacent buildings with similar or different dynamic characteristics”, J. Earthquake Spectra, Vol. 10, 1994.
13. **Bertero V.V.**: “Observations on structural pounding”, Proc. Intern. Conf. Mexico Earthquakes ASCE , pp. 264-287, 1986.
14. **Efraimiadou S., Hatzigeorgiou G.D., Beskos D.E.**: “Structural pounding between adjacent buildings subjected to strong ground motions: Part I: The effect of different structures arrangement”, J. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 42, No. 10, pp. 1509-1528, 2013.
15. **Καραγιάννη Χρ.** : “Επιρροή της Μορφολογίας στη Σεισμική Ικανότητα Κατασκευών Ωπλισμένου Σκυροδέματος” , Διδακτορική διατριβή, 1984.
16. **Karayannis C.G., Fotopoulou M.G.**: “Pounding of multistory RC structures designed to EC8 & EC2”, 11th European Conference on Earthquake Engineering (Proc. in CD form), BALKEMA, ISBN 90 5410 982 3, 1998.
17. **Καραγιάννης Χρ., Φαββατά Μ.**: “Εμβολισμός Υποστυλωμάτων Ω.Σ. από Πλάκες Παρακειμένων Κατασκευών με Διαφορετικό Ύψος Ορόφων”, Επιστημονική Έκδοση Κτίριο, Τεύχος 1-2, 2004.
18. **Karayannis C.G., Favvata M.J.**: “Earthquake induced interaction between adjacent reinforced concrete structures with non-equal heights”, J. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 34, pp. 1-20, 2005a.
19. **Karayannis C.G., Favvata M.J.**: “Inter-story pounding between multistory reinforced concrete structures”, J. Structural Engineering and Mechanics, Vol. 20, No. 5, pp. 505-526, 2005b.
20. **Liolios A.A.**: “A Numerical Approach to Seismic Interaction between adjacent Buildings under hardening and softening Unilateral Contact”, Proc. 9th European Conf. on Earthquake Engineering, Vol. 7A, pp. 20-25, 1990.

21. **Maison B.F., Kasai K.:** “*Analysis for type of Structural Pounding*”, J. of Structural Engineering ASCE, Vol. 116, No. 4, pp. 957-977, 1990.
22. **Maison B.F., Kasai K.:** “*Dynamics of pounding when two buildings collide*”, J. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 21, pp. 957-977, 1992.
23. **Papadrakakis M, Mouzakis H, Plevris N, Bitzarakis S.:** “*A Lagrange multiplier solution method for pounding of buildings during earthquakes*”, J. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 20, pp. 981-998, 1991.
24. **Prakash V., Powell G.H., Gampbell S.:** “*DRAIN-2DX base program description and user’s guide*”, UCB/SEMM Report No. 17/93, Univ. of California, 1993.
25. **Rahman AM, Carr AJ, Moss PJ. :** “*Seismic Pounding of a Case of Adjacent Multiple-Storey Buildings of differing total Heights considering Soil Flexibility Effects*”, Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, Vol. 34, No. 1, pp. 40-59, 2001.
26. **Rosenblueth E, Meli R.:** “*The 1985 Earthquake: Causes and Effects in Mexico City*”, Concrete International ACI , Vol. 8, No.5, pp. 23-24, 1986.
27. **Westermo B.D.:** “*The Dynamics of Interstructural Connection to prevent Pounding*”, J. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 18, pp. 687-699, 1989.