

**Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την εκτίμηση της δυναμικής  
ανελαστικής συμπεριφοράς τρισδιάστατων κατασκευών  
από οπλισμένο σκυρόδεμα σε κατάσταση προοδευτικής  
κατάρρευσης**

**Inelastic analysis of three-dimensional reinforced  
concrete buildings under progressive collapse**

**Μαρία Χατζηβασιλείου<sup>1</sup>, Γεώργιος Χατζηγεωργίου<sup>2</sup>**

*Λέξεις κλειδιά: Τρισδιάστατες κατασκευές, οπλισμένο σκυρόδεμα, σεισμικές  
ακολουθίες, κατάρρευση.*

*Key words: Three-dimensional structures, reinforced concrete, seismic sequences,  
collapse.*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Η προοδευτική κατάρρευση (progressive collapse) των κατασκευών είναι ένας από τους λιγότερο διερευνημένους τομείς της μηχανικής των κατασκευών, παρόλο που οι επιπτώσεις είναι ιδιαίτερα σημαντικές σε έμψυχο και άψυχο υλικό.

Στα πλαίσια της παρούσας ερευνητικής πρότασης, αναπτύσσεται μεθοδολογία για τον υπολογισμό των μεγεθών απόκρισης των εξεταζόμενων φορέων, που βρίσκονται σε κατάσταση προοδευτικής κατάρρευσης. Για την εύρεση αξιόπιστων αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων εξετάζεται μεγάλος αριθμός τρισδιάστατων φορέων από οπλισμένο σκυρόδεμα και υπό τρισδιάστατη σεισμική καταπόνηση. Επίσης, θα εξεταστεί η ρεαλιστική αστοχία μέλους ή μελών των κατασκευών εν αντιθέσει με την πλειοψηφία των υφιστάμενων εργασιών, όπου η προοδευτική κατάρρευση προσομοιώνεται με την αφαίρεση μελών από τις υπό εξέταση κατασκευές. Για την εις βάθος διερεύνηση του φαινομένου πραγματοποιούνται δυναμικές ανελαστικές αναλύσεις, κατά τις οποίες οι κατασκευές υπόκεινται σε πραγματικές σεισμικές ακολουθίες.

**ABSTRACT:** The inelastic response of three-dimensional reinforced concrete (RC) buildings under progressive collapse is examined in this paper. Three 3-storey and three 5-storey buildings, regular and irregular, are subjected to real strong seismic sequences. One or more members considered under collapse and nonlinear

---

<sup>1</sup> Υποψήφια Διδάκτωρ, Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, email: [xatzmar@ath.forthnet.gr](mailto:xatzmar@ath.forthnet.gr)

<sup>2</sup> Αναπληρωτής Καθηγητής, Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, email: [hatzigeorgiou@eap.gr](mailto:hatzigeorgiou@eap.gr)

dynamic analyses have been carried out to evaluate the effect of the phenomenon on the whole structure.

Various parameters are investigated as the maximum displacements, maximum residual displacements, maximum interstorey drift ratio, maximum residual interstorey drift ratio, damage indices, ductility demands, time history of displacements occurring in the top of the structures etc.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στον ελληνικό χώρο, ο σεισμός αποτελεί την κρισιμότερη φόρτιση για το σχεδιασμό μιας κατασκευής, ειδικά για τις κτιριακές κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα οι οποίες αποτελούν και τη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων. Για το λόγο αυτό και στην παρούσα ερευνητική πρόταση εξετάζεται η προοδευτική κατάρρευση των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα υπό ισχυρή σεισμική δράση.

Οι καταστροφικοί, σε ανθρώπινα θύματα και οικονομικές ζημιές, σεισμοί των τελευταίων δεκαετιών ανά τον κόσμο (Northridge/Καλιφόρνια 1994, Kobe/Ιαπωνία 1995, Fukushima/ Ιαπωνία 2011) και στον ελλαδικό χώρο (Θεσσαλονίκη 1978, Αλκωνίδες 1981, Καλαμάτα 1986, Κοζάνη 1995, Αίγιο 1995, Αθήνα 1999), προβλημάτισαν έντονα την επιστημονική κοινότητα σχετικά με το φαινόμενο της κατάρρευσης των κατασκευών.

Το φαινόμενο της προοδευτικής κατάρρευσης αρχικά προσέλκυσε το ενδιαφέρον των μηχανικών, μετά την κατάρρευση 22όροφου κτιρίου διαμερισμάτων στο Λονδίνο το 1968. Μετά την κατάρρευση των Δίδυμων Πύργων το Σεπτέμβριο του 2001, όλο και περισσότεροι ερευνητές επικεντρώνονται στα αίτια του φαινομένου και στην ανάπτυξη μεθόδων για την αξιολόγηση της απόκρισης των κατασκευών σε ακραία, τυχαία γεγονότα (UFC-DoD, 2005).

Στην παρούσα μελέτη αναλύεται η ανελαστική συμπεριφορά τρισδιάστατων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα σε προοδευτική κατάρρευση, οι οποίες υπόκεινται σε πραγματικές σεισμικές ακολουθίες. Τα σεισμικά γεγονότα έχουν καταγραφεί από τον ίδιο σταθμό σε σύντομο χρονικό διάστημα, έως τρεις ημέρες. Οι ανελαστικές αναλύσεις πραγματοποιούνται με το λογισμικό Ruaumoko (Carr, 2008) και υπολογίζονται κρίσιμες παράμετροι όπως δείκτες βλάβης, μέγιστες μετακινήσεις, μέγιστες σχετικές μετακινήσεις κ.λ.π.. Επιπρόσθετα, μελετάται η επίδραση των τοιχοπληρώσεων, της παραμορφωσιμότητας του εδάφους και της αβεβαιότητας που υπεισέρχεται στις κατασκευές λόγω των ιδιοτήτων των υλικών.

## 2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

### Γενικές παραδοχές

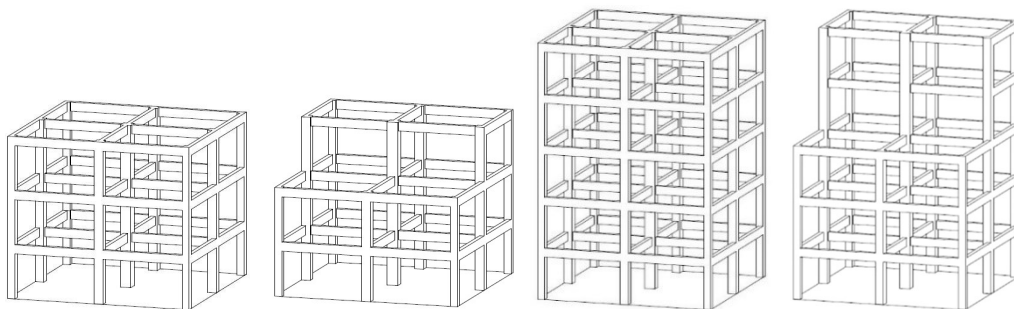
Οι κατασκευές διαστασιολογήθηκαν με το λογισμικό Fespa, σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες (EC2, 2004), (EC8, 2005) και με τον Παλιό Αντισεισμικό

Κανονισμό του 1959 (ΦΕΚ.36/Α΄/59) και τον Κανονισμό Ωπλισμένου Σκυροδέματος του 1954 (ΦΕΚ.160/Α΄/54). Συγκεκριμένα, πρόκειται για περιπτώσεις με τις οποίες εξετάζονται:

- α) κανονικές και μη κανονικές κατά EC8 πλαισιωτές κατασκευές,
  - β) ποικίλος αριθμός ορόφων,
  - γ) απαραμόρφωτο έδαφος αλλά και έδαφος με παραμορφωσιμότητα, όπου λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής,
  - δ) αριθμός των ανοιγμάτων των πλαισιωτών κατασκευών,
  - ε) κατασκευές, όπου προσομοιώνονται οι τοιχοπληρώσεις, δεν προσομοιώνονται καθόλου οι τοιχοπληρώσεις (γυμνό πλαίσιο) ή λαμβάνονται υπόψη τοιχοπληρώσεις σε όλους τους ορόφους εκτός του ισογείου (pilotis).
  - στ) ποικίλες τιμές εδαφικής επιτάχυνσης σχεδιασμού ενώ διερευνάται εάν έχει σχεδιαστεί η κατασκευή με τον Παλιό Αντισεισμικό Κανονισμό του 1959 ή με βάση τους Ευρωκώδικες.
- Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά το σχεδιασμό, δεν προσομοιώθηκε η παραμορφωσιμότητα του εδάφους ούτε η ύπαρξη τοίχων πλήρωσης.

### Περιγραφή των κατασκευών

Έχουν επιλεγεί κανονικές και μη κανονικές κατά EC8 κατασκευές τριών και πέντε ορόφων, με 2 ή 4 ίσα ανοίγματα σε κάθε διεύθυνση. Το ύψος του ορόφου είναι ίσο με 3μ.. Ενδεικτικά επισυνάπτεται η τρισδιάστατη απεικόνιση ορισμένων φορέων, στο **Σχήμα 1**.



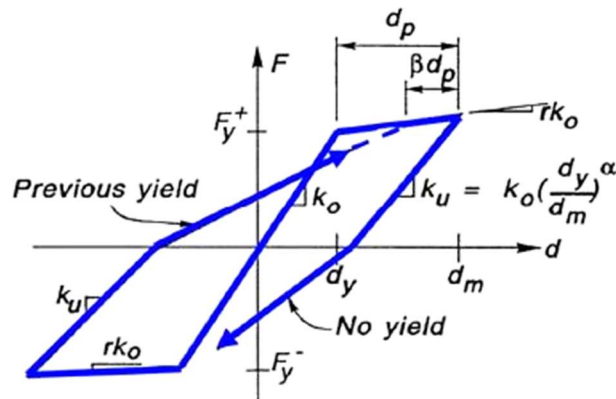
**Σχήμα 1.** Απεικόνιση ορισμένων από τους εξεταζόμενους φορείς.

Τα υποστυλώματα έχουν τετραγωνικές διατομές με διαστάσεις 40x40, 50x50 και 60x60 σε όλους τους φορείς. Οι δοκοί στις κανονικές κατασκευές έχουν διαστάσεις 25x50 και στις μη κανονικές κατασκευές 25x50, 25x55 και 25x60.

### Ανελαστική συμπεριφορά

Στην παρούσα μελέτη, οι κατασκευές προσομοιώνονται με τρισδιάστατα μοντέλα και αναλύονται με το λογισμικό Ruaumoko 3D. Για την ανελαστική συμπεριφορά των μελών, χρησιμοποιήθηκε το υστερητικό μοντέλο Takeda θεωρώντας τις

παρακάτω παραμέτρους: παράμετρος αποφόρτισης  $\alpha=0.25$  για τις δοκούς και  $\alpha=0.50$  για τα υποστυλώματα, παράμετρος επαναφόρτισης  $\beta=0$  για δοκούς και υποστυλώματα και κλίση μετελαστικού κλάδου  $r=0.01$ . Το μοντέλο υστέρησης Takeda απεικονίζεται στο **Σχήμα 2**.



**Σχήμα 2.** Μοντέλο υστέρησης Takeda

Το μήκος πλαστικής άρθρωσης για κάθε μέλος έχει ληφθεί ίσο με το μισό του ύψους  $H$  της διατομής του, δηλαδή  $|r| = 0.5 * H$ . Η ενεργός ροπή αδράνειας  $I_{eff}$ , σε σύγκριση με τη ροπή αδράνειας της αρηγμάτωτης διατομής  $I_g$ , λαμβάνεται για τις δοκούς μορφής Γ ή Τ και για τα υποστυλώματα ίση με  $I_{eff} = 0.50 * I_g$ .

### 3. ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΑΚΟΛΟΥΘΙΕΣ

Για την παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν 5 πραγματικές σεισμικές ακολουθίες, οι οποίες είναι: Mammoth Lakes (Μάιος 1980 – 5 σεισμικά γεγονότα), Chalfant Valley (Ιούλιος 1986 - 2 σεισμικά γεγονότα), Coalinga (Ιούλιος 1983 - 2 σεισμικά γεγονότα), Imperial Valley (Οκτώβριος 1979 - 2 σεισμικά γεγονότα) and Whittier Narrows (Οκτώβριος 1987 - 2 σεισμικά γεγονότα) και έχουν ληφθεί από τη βάση δεδομένων του Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) . Κάθε καταγραφή περιλαμβάνει τρία επιταχυνσιογραφήματα, τα οποία αντιστοιχούν στις δύο οριζόντιες και στην κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού. Η οριζόντια συνιστώσα του σεισμού με τη μεγαλύτερη εδαφική επιτάχυνση ονομάζεται συνιστώσα 1, ενώ η κατακόρυφη συνιστώσα αντιστοιχεί στη συνιστώσα 3. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των διεγέρσεων. Στον πίνακα αναφέρονται οι κωδικές ονομασίες των σεισμών πχ. CO1, CO2, οι οποίες αντιστοιχούν στο 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> σεισμικό γεγονός Coalinga αντίστοιχα. Η σεισμική ακολουθία Coalinga συμβολίζεται ως COT (COT=CO1+CO2) και διαμορφώνεται ως εξής: παρατίθενται τα ανεξάρτητα σεισμικά γεγονότα με την πραγματική

χρονική σειρά και μεταξύ τους παρεμβάλλεται χρονικό διάστημα ίσο με 20sec, κατά τη διάρκεια του οποίου οι εδαφικές επιταχύνσεις είναι μηδενικές.

**Πίνακας 1.** Σεισμικά γεγονότα

a/a	Σεισμός	Σταθμός καταγραφής	Δ/ση	Κωδική ονομασία	Ημερομηνία (ώρα)	Μέγεθος	max PGA (g)
1	Mammoth Lakes	54099 Convict Creek	N-S	MA1	1980/05/25 (16:34)	6.06	0.442
				MA2	1980/05/25 (16:49)	5.69	0.178
				MA3	1980/05/25 (19:44)	5.91	0.219
				MA4	1980/05/25 (20:35)	5.70	0.432
				MA5	1980/05/27 (14:51)	5.94	0.316
2	Chalfant Valley	54428 Zack Brothers Ranch	E-W	CH1	1986/07/20 (14:29)	5.77	0.285
				CH2	1986/07/21 (14:42)	6.19	0.447
3	Coalinga	46T04 CHP	N-S	CO1	1983/07/22 (02:39)	5.77	0.605
				CO2	1983/07/25 (22:31)	5.21	0.733
4	Imperial Valley	5055 Holtville P.O.	HPV315	IM1	1979/10/15 (23:16)	6.53	0.253
				IM2	1979/10/15 (23:19)	5.01	0.211
5	Whittier Narrows	24401 San Marino	N-S	WI1	1987/10/01 (14:42)	5.99	0.204
				WI2	1987/10/04 (10:59)	5.27	0.212

#### 4. ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

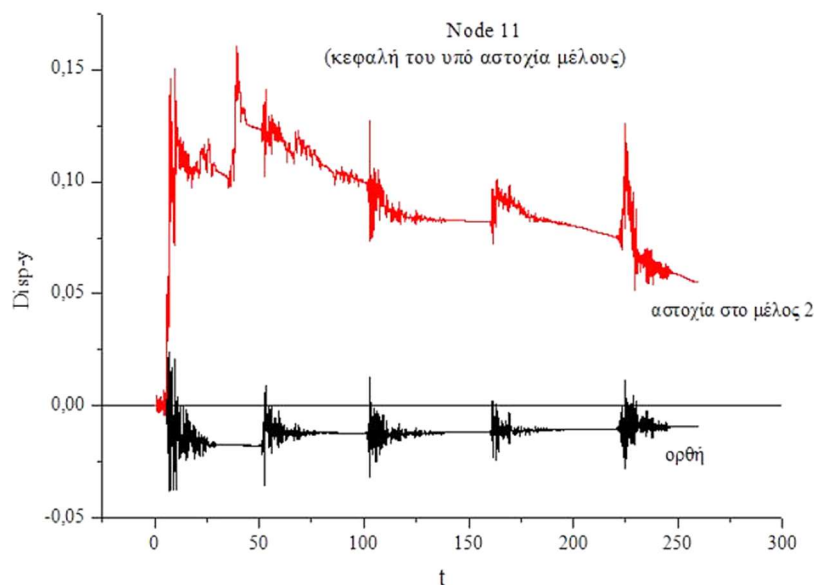
Οι κατασκευές υποβάλλονται σε ανελαστικές δυναμικές αναλύσεις για τις επιλεγμένες σεισμικές ακολουθίες, οι οποίες ανακλιμακώνονται με διάφορους συντελεστές. Επισημαίνεται ότι όλες οι αναλύσεις πραγματοποιούνται με τη βοήθεια αξιόπιστων και ευρέως χρησιμοποιούμενων προγραμμάτων. Σε πρώτο στάδιο, για τις ανελαστικές δυναμικές αναλύσεις οι φορείς θεωρούνται άρτιοι και ορθά κατασκευασμένοι, ενώ στη συνέχεια ένα ή περισσότερα μέλη τους θεωρείται ότι αστόχησαν και ακολουθεί εκτίμηση της συνολικής απόκρισης του φορέα.

Επιπρόσθετα στο σημείο αυτό, μελετάται η επίδραση των τοιχοπληρώσεων, της παραμορφωσιμότητας του εδάφους και της αβεβαιότητας που υφίσταται στις κατασκευές λόγω των ιδιοτήτων των υλικών.

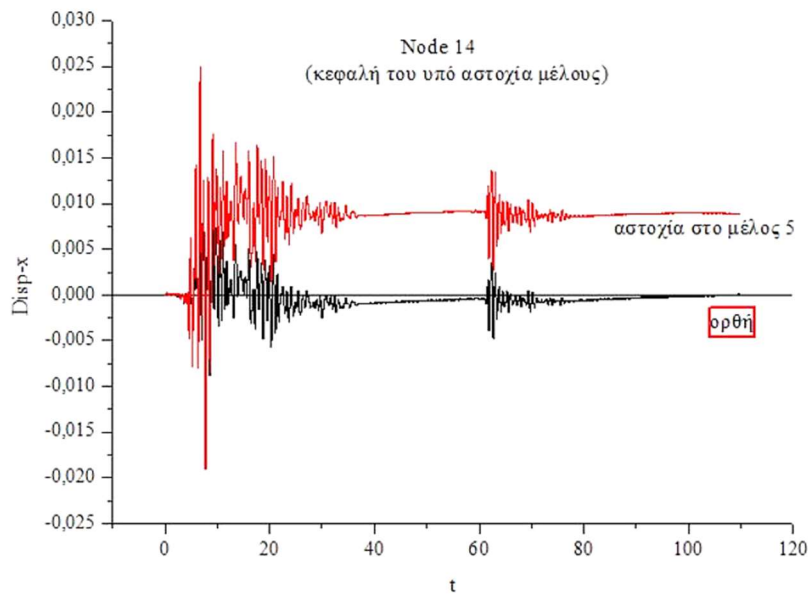
Για καθεμία από τις περιπτώσεις, υπολογίζονται μεγέθη απόκρισης, όπως μετακινήσεις κόμβων, παραμένουσες μετακινήσεις κόμβων, παραμένουσες σχετικές μετακινήσεις, μέγιστες σχετικές μετακινήσεις, δείκτες βλάβης και απαιτήσεις σε πλαστιμότητα.

#### 5. ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Παρατίθενται επιλεκτικά γραφήματα για κάποιες περιπτώσεις.



**Σχήμα 3.** Μετακινήσεις για την περίπτωση I3F2B24\_MAT\_1.50 στην κεφαλή του μέλους 2.



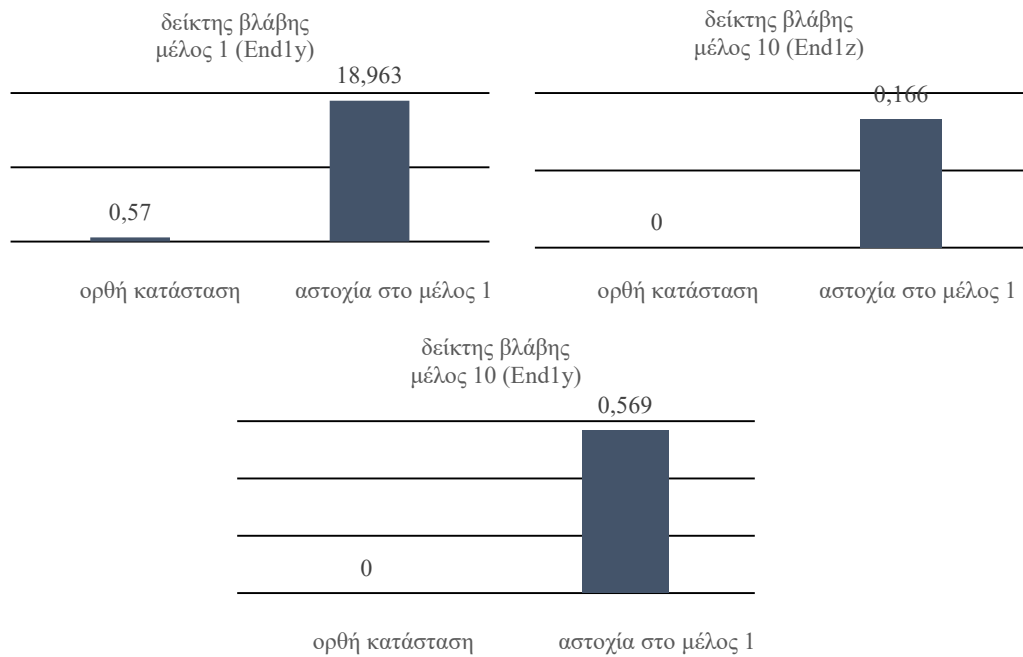
**Σχήμα 4.** Μετακινήσεις για την περίπτωση R5F2B36\_IMT\_1.25 στην κεφαλή του μέλους 5.

Για παράδειγμα, για την κατασκευή με κωδική ονομασία I3F2B24\_MAT\_1.50, η οποία είναι μη κανονική με τρεις ορόφους, έχει 2 ανοίγματα ανά διεύθυνση, σχεδιάστηκε με εδαφική επιτάχυνση 0.24g και υποβάλλεται στη σεισμική ακολουθία Mammoth Lakes για συντελεστή ανακλιμάκωσης 1.50 παρατίθεται το γράφημα στο **Σχήμα 3**. Απεικονίζεται η χρονοϊστορία μετακινήσεων που σημειώνονται στην κεφαλή του μέλους 2, για: α. ορθή κατάσταση και β. αστοχία του μέλους 2.

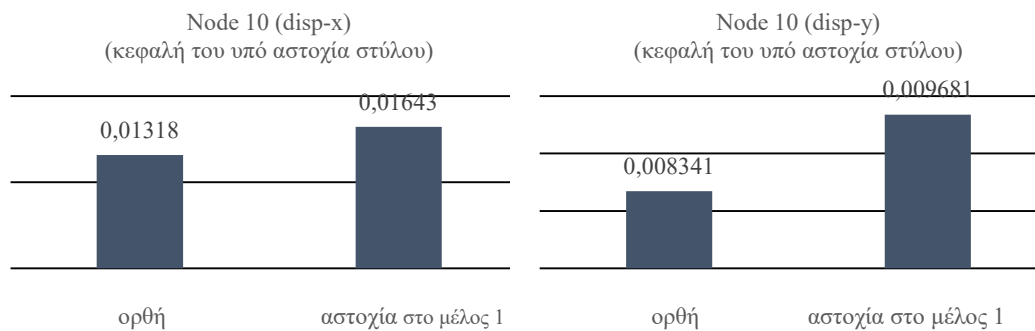
Για την κατασκευή με κωδική ονομασία R5F2B36\_IMT\_1.25, η οποία είναι κανονική με πέντε ορόφους, έχει 2 ανοίγματα ανά διεύθυνση, σχεδιάστηκε με εδαφική επιτάχυνση 0.36g και υποβάλλεται στη σεισμική ακολουθία Imperial Valley για συντελεστή ανακλιμάκωσης 1.25, παρατίθεται το γράφημα στο **Σχήμα 4**. Απεικονίζεται η χρονοϊστορία μετακινήσεων που σημειώνονται στην κεφαλή του μέλους 5, για: α. ορθή κατάσταση και β. αστοχία του μέλους 5.

Επίσης, για την κατασκευή με κωδική ονομασία R3F2B24\_CHT\_0.50, η οποία είναι κανονική με τρεις ορόφους, έχει 2 ανοίγματα ανά διεύθυνση, σχεδιάστηκε με εδαφική επιτάχυνση 0.24g και υποβάλλεται στη σεισμική ακολουθία Chalfant για συντελεστή ανακλιμάκωσης 0.50 παρατίθενται τα γραφήματα στο **Σχήμα 5** και στο **Σχήμα 6**.

Στη συνέχεια η ίδια κατασκευή υποβάλλεται στη σεισμική ακολουθία Coalinga, για συντελεστή ανακλιμάκωσης 0.50 και παρατίθενται τα σχετικά γραφήματα στο **Σχήμα 7**.

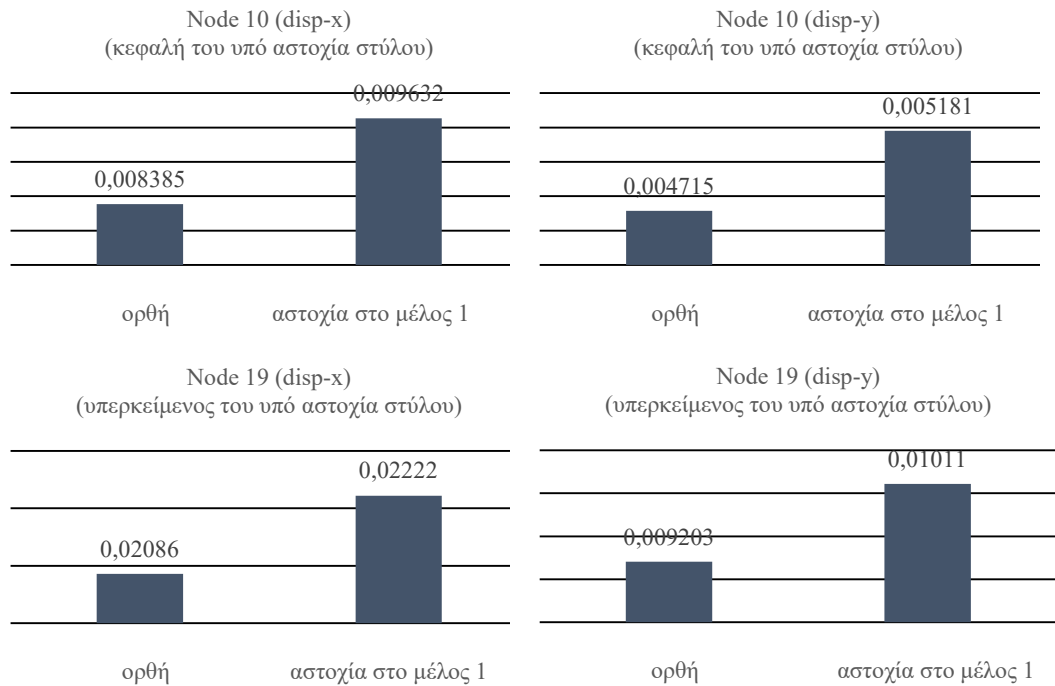


**Σχήμα 5.** Δείκτες βλάβης για την περίπτωση R3F2B24\_CHT\_0.50 στον πόδα του υποστυλώματος 1 και στον πόδα του υπερκείμενου υποστυλώματος (μέλος 10).



**Σχήμα 6.** Μέγιστες μετακινήσεις για την περίπτωση R3F2B24\_CHT\_0.50.





**Σχήμα 7.** Μέγιστες μετακινήσεις για την περίπτωση R3F2B24\_COT\_0.50.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η αστοχία ενός ή περισσοτέρων δομικών μελών, επηρεάζει σημαντικά την απόκριση ολόκληρου του φορέα, ανάλογα πάντα με τη φύση και τη θέση του μέλους που αστόχησε. Μόνο η τρισδιάστατη προσομοίωση και ανάλυση των κατασκευών μπορεί να οδηγήσει σε ρεαλιστικά αποτελέσματα με ταυτόχρονη τη τρισδιάστατη σεισμική φόρτιση. Χωρίς αυτές τις θεωρήσεις, φαινόμενα όπως η στρεπτική καταπόνηση και η ασυμμετρία, δεν είναι δυνατόν να διερευνηθούν.
- Η παρουσία των τοιχοπληρώσεων σε μια κατασκευή συνεισφέρει στην υπεραντοχή, στην πλευρική δυσκαμψία της και στην αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας. Στις αρνητικές επιπτώσεις των τοιχοπληρώσεων καταγράφονται η δημιουργία «μαλακού ορόφου», είτε στο ισόγειο (πilotή ή καταστήματα χωρίς τοιχοπληρώσεις), είτε σε ενδιάμεσο μη τοιχοπληρωμένο όροφο, καθώς και η δημιουργία κοντών υποστλωμάτων.
- Η αλληλεπίδραση του εδάφους και της κατασκευής έχει ως αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση της απόκρισης του συστήματος σε δυναμική φόρτιση. Το έδαφος και η θεμελίωση δεν είναι απλοί αποδέκτες φορτίων της ανωδομής, αλλά με την ενδοσιμότητα και την ευκαμψία τους επηρεάζουν την ένταση, τις παραμορφώσεις και την ιδιοπερίοδο της ανωδομής. Η αλληλεπίδραση

του εδάφους και της κατασκευής μπορεί να είναι άλλοτε θετική και άλλοτε αρνητική, καθώς εξαρτάται τόσο από τα δυναμικά χαρακτηριστικά του εδάφους και του υπό μελέτη συστήματος όσο και από τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης.

- Η παρουσία μετασεισμών είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για τις κατασκευές οι οποίες έχουν ήδη υποστεί βλάβες από τους ισχυρούς σεισμούς που έχουν υποστεί. Επειδή οι μετασεισμοί συμβαίνουν συνήθως λίγες ώρες ή ημέρες μετά τον κύριο σεισμικό συμβάν, πρακτικά δεν είναι εφικτή η αποκατάσταση των βλαβών σε μια επιβαρυσμένη κατασκευή και οι μετασεισμοί οδηγούν σε συσσώρευση της δομικής ή της μη-δομικής βλάβης.

## 7. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Carr, A.J. (2008), RUAUMOKO – Inelastic Dynamic Analysis Program, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

European Committee for Standardization, Eurocode 2: design of concrete structure; part 1-1: general rules and rules for buildings; EN 1992-1-1, Brussels. 2004.

European Committee for Standardization, Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance; part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings, EN 1998-1; EN 1998-1, Brussels. 2005

Pacific Earthquake Engineering Research Center. PEER Strong Motion Database. <<http://www.peer.berkeley.edu/smcat>>.

Unified Facilities Criteria (UFC)-DoD. Design of buildings to resist progressive collapse. Department of Defense; 2005

Β.Δ.«Περί αντισεισμικού Κανονισμού οικοδομικών έργων» (ΦΕΚ.36/Α'/'59).

Β.Δ.«Περί Κανονισμών δια την μελέτην και εκτέλεσιν οικοδομικών έργων εξ ωπλισμένου σκυροδέματος» (ΦΕΚ.160/Α'/'54).