

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



## Πτυχιακή εργασία

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ 40 ΟΡΟΦΩΝ

Στυλιανός Λιασίδης

Λεμεσός 2016



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

## Πτυχιακή εργασία

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ 40 ΟΡΟΦΩΝ

Στυλιανός Λιασίδης

Σύμβουλος καθηγητής  
Δρ. Κρίστης Χρυσοστόμου

# Λεμεσός 2016

## **Πνευματικά δικαιώματα**

Copyright © Στυλιανός Λιασίδης, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Καθηγητή Δρ Κρίστη Χρυσοστόμου, για την καθοδήγηση και στήριξή του καθώς και το Δρ Νικόλα Κυριακίδη, για την πολύτιμη βοήθεια και στήριξή του

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής μελέτης είναι η μελέτη των παραγόντων που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ανάλυση και σχεδιασμό ψηλών κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα στους πυρήνες των πόλεων. Προσομοίωμα 40ώροφης κατασκευής αναλύθηκε τόσο με γραμμικές όσο και με μη γραμμικές μεθόδους ανάλυσης. Έγινε σύγκριση μέσα από τα αποτελέσματα των διαφόρων μεθόδων ανάλυσης και εξήχθηκαν συμπεράσματα.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι γενικές αρχές σχεδιασμού ψηλών κτιρίων όπως αυτές εφαρμόζονται σήμερα με βάση την προηγμένη τεχνολογία. Εξετάζονται όλες οι πτυχές της κατασκευής τέτοιων έργων ξεκινώντας από την μελέτη και σχεδιασμό μέχρι και την αποπεράτωση της κατασκευής του.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέθοδοι ανάλυσης που ακολουθήθηκαν για την ανάλυση του μοντέλου εργασίας. Για τις γραμμικές μεθόδους χρησιμοποιήθηκε η Γραμμική-ελαστική ανάλυση, ενώ για τις μη γραμμικές μεθόδους έγιναν αναλύσεις με τη μέθοδο Μη γραμμικότητας υλικού και πλήρους μη γραμμικότητας όπου συνυπολογίστηκαν τόσο η μη γραμμικότητα υλικού όσο και αυτή της γεωμετρίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι παράμετροι που καθορίστηκαν για τις αναλύσεις. Καθορίζονται οι ιδιότητες των υλικών του φορέα, που πρόκειται για το σκυρόδεμα και το χάλυβα οπλισμού.

Στο τέταρτο κεφάλαιο προδιαστασιολογήθηκαν τα μέλη του 40ώροφου κτιρίου με απλές μεθόδους, καθορίζοντας τις τετραγωνικές διατομές των υποστυλωμάτων, οι οποίες μεταβάλλονται ανά 10 ορόφους. Επίσης καθορίζεται και η ορθογωνική διατομή των δοκών για όλους τους ορόφους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η δημιουργία του προσομοιώματος του κτιρίου σε δισδιάστατο πλαίσιο με τη χρήση του λογισμικού SAP 2000 v14.0.0.

Στο έκτο κεφάλαιο, γίνεται περιγραφή των αποτελεσμάτων των γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων και ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα για τη σύγκριση των μεθόδων και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται η εκπόνηση των συμπερασμάτων από τη σύγκριση των μεθόδων ανάλυσης αλλά και από την όλη μελέτη. Παρουσιάζονται οι βασικές διαφορές των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν και σχολιάζονται τα αποτελέσματα.

**Λέξεις κλειδιά:** ανάλυση, γραμμικότητα, μέθοδοι, ψηλά κτίρια

## **ABSTRACT**

The purpose of this thesis is the study of the factors that should be taken into consideration for the analysis and design of tall buildings at the downtown areas of cities. A model of a 40-storey structure was analyzed using both, linear and nonlinear analysis methods. In the end, the results of these methods of analysis are compared and conclusions are drawn.

In the first chapter the general principles for design of tall buildings, as they are currently applied based on the state of the art technology, are presented. All the stages needed for the construction of such structures are examined, including the preliminary study and design stages up to the completion of the construction.

In the second chapter the methods of analysis which were used for the analysis of the structural model of the building are presented. For the Linear methods, Linear-elastic analysis was used, while for the nonlinear analysis methods the material nonlinear method was used as well as the Full Nonlinear method which took into account both material and geometric nonlinearity.

In the third chapter all the analysis parameters are defined. The properties of the structural materials, such as concrete and reinforcing steel are defined.

In the fourth chapter the pre-dimensioning of the structural members of the building following simple methods is presented. Here the square sections of the columns, which change every 10 floors, are defined along with the dimensions of the rectangular section of the beams for all floors.

In the fifth chapter the two-dimensional model of the structure is presented, using the software SAP 2000 v14.0.0.

In the sixth chapter the results that were obtained from the linear and nonlinear analysis are presented. Based on the results the two methods of analysis were compared and conclusions were drawn.

In the seventh chapter the final conclusions from the entire study and the comparison of the analytical methods are presented. The basic differences among the methods used are outlined and the results are discussed.



**Keywords:** analysis, linearity, methods, high-rise buildings

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	iv
ABSTRACT .....	vi
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	xiii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ .....	xiv
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ .....	xvii
ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ .....	xviii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	xix
1 Γενικές αρχές σχεδιασμού .....	1
1.1 Επεξήγηση «ψηλού» κτιρίου .....	1
1.2 Μεθοδολογία σχεδιασμού.....	1
1.3 Δομικό σύστημα.....	3
1.3.1 Συντονισμός και ενοποίηση εργασιών.....	4
1.3.2 Υπηρεσίες .....	4
1.3.3 Μηχανική κελύφους κτιρίου .....	5
1.3.4 Σχεδιασμός πυρήνα.....	6
1.3.5 Τοιχεία διάτμησης .....	6
1.3.6 Επίδραση χρήσης του κτιρίου .....	7
1.3.7 Μεταφορά εντός του κτιρίου .....	8
1.3.8 Προστασία από τη φωτιά.....	8
1.3.9 Πλευρική μετατόπιση κτιρίου .....	9
1.3.10 Δυναμική Απόκριση .....	9
1.3.11 Κίνδυνος από ατύχημα .....	10
1.4 Πλαισιακά συστήματα.....	10

1.4.1	Τύπος 1-Σύστημα Πλαισίου.....	12
1.4.2	Τύπος 2- Τοιχεία Διάτμησης.....	12
1.4.3	Τύπος 3-Συνδυασμός Τοιχείων διάτμησης και πλαισιακού συστήματος.....	13
1.4.4	Τύπος 4-Περιμετρικό πλαίσιο.....	14
1.4.5	Τύπος 5-Σύστημα tube-in-tube.....	15
1.4.6	Τύπος 6-Σπονδυλωτό πλαισιακό σύστημα.....	15
1.4.7	Τύπος 7- Περιμετρικό Πλαισιακό σύστημα με διαγώνια στοιχεία.....	16
1.4.8	Τύπος 8-Σύστημα σύνδεση κεντρικού πυρήνα με εξωτερικό πλαίσιο.....	17
1.5	Δομικά στοιχεία φορέα κατασκευής.....	17
1.5.1	Πλάκες.....	18
1.5.2	Υποστυλώματα.....	19
1.5.3	Τοιχεία.....	23
1.6	Θεμελιώσεις.....	25
1.6.1	Έρευνα εδάφους.....	25
1.6.2	Αλληλεπίδραση εδάφους.....	26
1.6.3	Πέδιλα.....	27
1.6.4	Πασσαλώσεις.....	27
1.6.5	Κατασκευή Υπογείου.....	28
1.7	Οικοδόμηση.....	28
1.7.1	Κατασκευή πυρήνα.....	28
1.7.2	Κατασκευή πλακών.....	29
1.7.3	Μεταφορά σκυροδέματος.....	30
1.8	Φορτία.....	30
1.8.1	Φορτία βαρύτητας.....	30
1.8.2	Φορτία ανέμου.....	31
1.8.3	Σεισμικά φορτία.....	31

1.8.4	Μόνιμα και Μεταβλητά φορτία .....	31
1.8.5	Συνδυασμοί φορτίσεων.....	32
1.8.6	Φορτία κατά την κατασκευή .....	32
1.8.7	Τυχηματικά φορτία και δυσανάλογη κατάρρευση.....	33
1.8.8	Θερμοκρασιακά φορτία .....	33
1.9	Δυναμική κτιρίου .....	34
1.9.1	Απόσβεση.....	35
1.9.2	Κριτήρια άνεσης ενοίκων .....	36
1.9.3	Αντίληψη των ενοίκων .....	37
1.9.4	Επιταχύνσεις κτιρίου .....	37
1.10	Μηχανική του ανέμου .....	38
1.10.1	Κλίμα ανέμου.....	39
1.10.2	Μετρίαση της φόρτισης του ανέμου.....	40
1.10.3	Αεροδυναμική σήραγγα (wind tunnel test).....	40
1.11	Σεισμική Μηχανική .....	41
1.11.1	Αντισεισμικός σχεδιασμός.....	42
1.11.2	Μοντελοποίηση .....	46
1.11.3	Σχεδιασμός.....	48
1.11.4	Σεισμικοί αποσβεστήρες.....	51
1.11.5	Τυπικές λεπτομέρειες .....	51
1.11.6	Δοκοί.....	51
1.11.7	Υποστυλώματα.....	52
1.11.8	Τοιχεία .....	52
1.12	Συμπεριφορά εξαρτημένη από το χρόνο .....	53
1.12.1	Αξονική συρρίκνωση.....	53
1.12.2	Ασυμβατότητα διαστάσεων .....	55

1.12.3	Ανάλυση σταδίων κατασκευής .....	56
1.12.4	Έλεγχος υλικών για ερπυσμό και συρρίκνωση.....	56
1.12.5	Βελτιστοποίηση σχεδιασμού και γεωμετρίας .....	58
1.12.6	Συνδέσεις μελών.....	59
1.13	Υλικά .....	59
1.13.1	Σκυρόδεμα.....	60
1.13.2	Οπλισμός.....	61
2	Μέθοδοι ανάλυσης .....	62
2.1	Γραμμική ανάλυση.....	63
2.2	Μη γραμμική ανάλυση .....	64
2.3	Βασικές διαφορές γραμμικής και μη γραμμικής ανάλυσης .....	65
2.4	Γεωμετρική μη γραμμικότητα (Geometric Nonlinearity) .....	67
2.4.1	Επιρροή φαινομένων γεωμετρικής μη γραμμικότητας.....	69
2.4.2	Ανάλυση P-δέλτα .....	73
2.5	Μη γραμμικότητα υλικού (Material Nonlinearity) .....	74
3	Παράμετροι μελέτης.....	77
3.1	Ιδιότητες υλικών των δομικών μελών .....	79
3.1.1	Σκυρόδεμα.....	79
3.1.2	Δομικός χάλυβας (ράβδοι οπλισμού) τύπου B500C .....	80
3.2	Δράσεις .....	80
3.2.1	Υπολογισμός μόνιμων και κινητών φορτίων.....	81
4	Προδιαστασιολόγηση μελών.....	82
4.1	Αναλυτικός έλεγχος δυσμενέστερου υποστυλώματος.....	82
5	Προσομοίωση φορέα .....	85
5.1	Λογισμικό SAP 2000.....	85
5.1.1	Γραφικό περιβάλλον με χρήστη .....	85

5.1.2	Διαδικασία ανάλυσης .....	85
5.1.3	Στοιχεία Μοντέλου .....	86
5.1.4	Φορτίσεις και Αποτελέσματα.....	86
5.2	Μεθοδολογία ανάλυσης.....	87
5.2.1	Προσομοίωμα.....	87
5.2.2	Ιδιότητες υλικών.....	87
5.2.3	Ιδιότητες διατομής.....	88
5.2.4	Πλαστικές αρθρώσεις .....	88
5.2.5	Επιβολή φορτίων .....	91
6	Αποτελέσματα .....	94
6.1	Γραμμική-Ελαστική Ανάλυση.....	95
6.1.1	Αξονικές δυνάμεις .....	95
6.1.2	Διατμητικές δυνάμεις.....	96
6.1.3	Ροπές.....	97
6.2	Μη γραμμική μέθοδος- Μη γραμμικότητα υλικού .....	98
6.2.1	Αξονικές δυνάμεις .....	99
6.2.2	Διατμητικές Δυνάμεις.....	100
6.2.3	Ροπές.....	101
6.2.4	Τέμνουσα βάση.....	102
6.3	Μη γραμμική μέθοδος- Μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας.....	102
6.3.1	Αξονικές Δυνάμεις .....	103
6.3.2	Διατμητικές Δυνάμεις.....	104
6.3.3	Ροπές.....	105
6.3.4	Τέμνουσα βάση.....	106
6.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	106
7	Συμπεράσματα.....	109

## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

Πίνακας 1 Ερμηνεία «Ψηλού» Κτιρίου (Banks et al. 2014).....	1
Πίνακας 2 Ιδιότητες για Σκυρόδεμα (Ευρωκώδικας 2).....	79
Πίνακας 3 Αποτελέσματα μετρήσεων και από τις 3 μεθόδους.....	108

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1 Τυπικές διατάξεις κτιρίων: Κατοικία-Γραφεία (Truby 2014).....	8
Διάγραμμα 2 Τύποι δομικών συστημάτων (Truby 2014).....	11
Διάγραμμα 3 Τύπος 1-Σύστημα Πλαισίου (Truby 2014) .....	12
Διάγραμμα 4 Τύπος 2- Τοιχεία Διάτμησης (Truby 2014) .....	13
Διάγραμμα 5 Τύπος 3- Συνδυασμός Τοιχείων διάτμησης και πλαισιακού συστήματος (Truby 2014) .....	14
Διάγραμμα 6 Τύπος 4-Περιμετρικό πλαίσιο (Truby 2014) .....	14
Διάγραμμα 7 Τύπος 5-Σύστημα tube-in-tube (Truby 2014) .....	15
Διάγραμμα 8 Τύπος 6-Σπονδυλωτό πλαισιακό σύστημα (Truby 2014).....	16
Διάγραμμα 9 Τύπος 7- Περιμετρικό Πλαισιακό σύστημα με διαγώνια στοιχεία (Truby 2014) .....	16
Διάγραμμα 10 Τύπος 8-Σύστημα σύνδεση κεντρικού πυρήνα με εξωτερικό πλαίσιο (Truby 2014) .....	17
Διάγραμμα 11 Σύνθετα υποστυλώματα (Banks et al. 2014).....	22
Διάγραμμα 12 Χρήση γερανών (Burj Khalifa Tower) (Nikolova 2012).....	33
Διάγραμμα 13 Vortex-shedding (Siqueira 2005) .....	39
Διάγραμμα 14 Προσομοίωμα κτιρίου για δοκιμή αεροδυναμικής σήραγγας (Autodesk Inc. 2016) .....	41
Διάγραμμα 15 Ελαστικό φάσμα απόκρισης (Ευρωκώδικας 8).....	44
Διάγραμμα 16 Φάσμα απόκρισης ελαστικής παραμόρφωσης για μεγάλες περιόδους (Ευρωκώδικας 8) .....	45
Διάγραμμα 17 Σχέση δύναμης-παραμόρφωσης για πλαστικές αρθρώσεις (Banks et al. 2014) .....	47
Διάγραμμα 18 Σύστημα σύνδεσης κεντρικού πυρήνα με εξωτερικό πλαίσιο (Gunel 2014)...	49
Διάγραμμα 19 Τριγωνικά μέλη 30 St Mary Axe London (Gunel 2014) .....	50



Διάγραμμα 20 Διαγώνιες αντηρίδες οπλισμού (Truby 2014) .....	51
Διάγραμμα 21 Ενσύρματος αισθητήρας μετακίνησης (Surechem 2016) .....	58
Διάγραμμα 22 Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης των τύπων σκυροδέματος (Ευρωκώδικας 2) .....	61
Διάγραμμα 23 Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης με μη γραμμική ανάλυση (Πουλοκέφαλος 2014) .....	65
Διάγραμμα 24 Φαινόμενο P-Δ σε υποστύλωμα (Konapure et al. 2015) .....	69
Διάγραμμα 25 Φαινόμενο P-Δ (Konapure et al. 2015).....	70
Διάγραμμα 26 Επιρροή φαινομένου P-Δ για δυναμική αστάθεια (Πουλοκέφαλος 2014) .....	71
Διάγραμμα 27 Φαινόμενο P-δ και φαινόμενο P-Δ (Dobson 2003).....	72
Διάγραμμα 28 Φαινόμενο P-Δ (με διαγράμματα ροπών) (Konapure et al. 2015) .....	72
Διάγραμμα 29 Επιπρόσθετες ροπές λόγω μετακίνησης των ορόφων (Gunel 2014).....	73
Διάγραμμα 30 Διάγραμμα Δύναμης-Παραμόρφωσης υλικού για ανελαστική συμπεριφορά (Abell 2014) .....	75
Διάγραμμα 31 Κάτοψη κατασκευής.....	77
Διάγραμμα 32 Πρόσοψη πλαισίου κατασκευής 40ώροφου κτιρίου .....	78
Διάγραμμα 33 Διατομή δοκού.....	84
Διάγραμμα 34 Διατομές υποστυλωμάτων .....	84
Διάγραμμα 35 Προσομοίωμα φορέα πλαισίου στο SAP 2000 .....	87
Διάγραμμα 36 Εισαγωγή ιδιοτήτων υλικών.....	88
Διάγραμμα 37 Εισαγωγή ροπών και καμπυλότητας στο λογισμικό .....	91
Διάγραμμα 38 Περιορισμός μετατόπισης κόμβου 41.....	92
Διάγραμμα 39 Καμπύλη Push over .....	93
Διάγραμμα 40 Διάγραμμα Τέμνουσας βάσης-Μετατόπισης Κορυφής V-D .....	94
Διάγραμμα 41 Διαγράμματα αξονικών δυνάμεων φορέα.....	95
Διάγραμμα 42 Διαγράμματα διατμητικών δυνάμεων φορέα .....	96

Διάγραμμα 43 Διαγράμματα ροπών φορέα.....	97
Διάγραμμα 44 Διαγράμματα αξονικών δυνάμεων φορέα.....	99
Διάγραμμα 45 Διαγράμματα διατμητικών δυνάμεων φορέα.....	100
Διάγραμμα 46 Διαγράμματα ροπών φορέα.....	101
Διάγραμμα 47 Διαγράμματα αξονικών δυνάμεων φορέα.....	103
Διάγραμμα 48 Διαγράμματα διατμητικών δυνάμεων φορέα.....	104
Διάγραμμα 49 Διαγράμματα ροπών φορέα.....	105
Διάγραμμα 50 Δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στο φορέα.....	107

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ΟΣ:	Οπλισμένο Σκυρόδεμα
ΕΚ:	Ευρωκώδικας
P-Δ:	Φαινόμενο P-Δέλτα
FEM:	Finite Elements Model: Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων
EN:	European Standard: Ευρωπαϊκό Πρότυπο

## ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ

Lobbies	Χώροι υπηρεσιών/παροχών
Tube	Σύστημα κτιρίου σωλήνα
Tube-in-tube	Σύστημα κτιρίου διπλού σωλήνα
Vortex-shedding	Στροβιλισμός ανέμου γύρω από το κτίριο

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σωστός σχεδιασμός και η ανάλυση ενός κτιρίου αποτελεί ένα μέλημα πρώτιστης σημασίας για ένα Πολιτικό Μηχανικό. Καθήκον του Πολιτικού Μηχανικού είναι η μελέτη και ο σχεδιασμός μίας ασφαλούς κατασκευής, με το ελάχιστο δυνατό κόστος μέσα από τη μέγιστη εξοικονόμηση δομικών υλικών. Όπως είναι ευνόητο, μετά από ένα ισχυρό σεισμικό επεισόδιο, ακραίο φαινόμενο ή ατύχημα, η οριακή κατάσταση αστοχίας της κατασκευής δεν πρέπει να ξεπεραστεί, έχοντας δυσμενείς συνέπειες οι οποίες μπορούν να επιφέρουν ακόμη και απώλεια ανθρώπινων ζώων. Η προηγμένη τεχνολογία και η καινοτομία στα δομικά υλικά δίνουν τη δυνατότητα στον Πολιτικό Μηχανικό να χρησιμοποιήσει σύγχρονες μεθόδους για την ανάλυση καθώς και δομικά υλικά με μεγαλύτερη ποιότητα και αντοχή για την κατασκευή.

Ο Μηχανικός, εκμεταλλευόμενος αυτά τα πλεονεκτήματα, έχει τη δυνατότητα σχεδιασμού των δομικών μελών του φορέα σε κάθε επιθυμητό σχήμα και διάσταση. Ωστόσο αυτό δημιουργεί ένα πιο εύκαμπτο φορέα στην κατασκευή τόσο σε επίπεδο μέλους, όσο και σε επίπεδο διατομής. Εξαιτίας αυτού, παρουσιάζονται μεγαλύτερες παραμορφώσεις κατά τη φόρτιση του φορέα. Οι παραμορφώσεις αυτές έχουν ως συνέπεια ότι επηρεάζεται σημαντικά η παραμορφωμένη γεωμετρία του φορέα σε σχέση με την απαραμόρφωτη. Η ανάγκη για ακριβέστερα αποτελέσματα ανάλυσης απαιτεί ιδιαίτερες μεθόδους στατικής και δυναμικής ανάλυσης, οδηγώντας σε χρήση της μη-γραμμικής συμπεριφορά των υλικών και της παραμορφωμένης γεωμετρίας του φορέα.

Η ραγδαία ανάπτυξη στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές επιτρέπει στο μελετητή την εκτέλεση ακριβέστερων μεθόδων ανάλυσης σε λιγότερο χρόνο με προηγμένα λογισμικά συστήματα ανάλυσης, επιτρέποντας του να εκμεταλλεύεται στο έπακρο την αντοχή και τις άλλες ιδιότητες του υλικού, όσο αφορά γραμμικές και μη γραμμικές μεθόδους ανάλυσης.

Σήμερα είναι σχεδόν αδύνατο να φανταστεί κανείς μια μεγάλη πόλη χωρίς ψηλά κτίρια. Τα ψηλά και πολώροφα κτίρια κατέχουν εξαιρετική σπουδαιότητα τόσο στην κοινωνία όσο και στην οικονομία μιας χώρας. Τα ψηλά κτίρια έχουν γίνει σύμβολα προηγμένης τεχνολογίας και εθνικής υπερηφάνειας, και έχουν αλλάξει την έννοια της σύγχρονης πόλης. Καθώς

αυξάνεται η αστικοποίηση σε όλο τον κόσμο, οι κατασκευές ψηλών κτιρίων σε σεισμικές περιοχές γίνονται όλο και πιο συχνές. Τα ψηλά κτίρια επικρατούν όλο και περισσότερο στις μεγαλουπόλεις, προσφέροντας με αυτό τον τρόπο πυκνωση του πληθυσμού αλλά και αειφόρο σχεδιασμό στις πόλεις. Ψηλά κτίρια κοσμούν τον ορίζοντα πολλών μεγαλουπόλεων ανά την υφήλιο.

Ένα από τα υλικά που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα. Πρόκειται για ένα υλικό με διάρκεια, μεγάλη θλιπτική αντοχή, αλλά και οικονομικό για τη κατασκευή τέτοιου είδους έργων, ενώ ανταποκρίνεται άριστα στις απαιτήσεις για τη λειτουργία των πλακών, δοκών, υποστυλωμάτων, τοιχείων και θεμελίων της κατασκευής.

Η κατασκευή ενός ψηλού κτιρίου απαιτεί ένα δομικό σύστημα το οποίο να καταστεί αρκετά οικονομικό στην κατασκευή, αλλά και να αντιστέκεται στις πλευρικές δυνάμεις λόγω του ανέμου ή του σεισμού εντός των καθορισμένων κριτηρίων για τη αντοχή του φορέα και της άνεσης των ενοίκων του κτιρίου. Η επιλογή του δομικού συστήματος επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση ενός κτιρίου έναντι στα πλευρικά φορτία. Ο σχεδιασμός των ψηλών κτιρίων απαιτεί ότι οι Μηχανικοί έχουν μια βασική κατανόηση των δομικών συστημάτων και της αεροδυναμικής των κτιρίων, και ότι κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού εργάζονται από κοινού με εμπειρογνώμονες σε άλλα συναφή πεδία.

Ο φορέας των ψηλών κτιρίων υποβάλλεται συχνά σε πλευρικά φορτία όπου αναπτύσσονται δευτερογενείς ροπές λόγω της κίνησης του σημείου εφαρμογής των κατακόρυφων φορτίων. Αυτή η δευτερογενής επίδραση, κοινώς γνωστή ως φαινόμενο P-Δέλτα, παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάλυση της κατασκευής. Η ανάλυση του φαινομένου P-Δέλτα συνιστάται από αρκετούς κώδικες σχεδιασμού για πιο ρεαλιστικό υπολογισμό των δυνάμεων και ροπών και συνυπολογίζονται από τη γεωμετρική μη γραμμικότητα.

Σήμερα πλέον, λόγω της αυξανόμενης ανάγκης για οικονομικότερες και ανθεκτικότερες κατασκευές αλλά και λόγω των αυξανόμενων διατάξεων των κανονισμών, επιβάλλεται να λαμβάνονται υπόψη οι μη γραμμικότητες γεωμετρίας και υλικού όσον αφορά το σχεδιασμό και μελέτη μίας κατασκευής. Ωστόσο αυτό, από υπολογιστικής άποψης δεν είναι απλό, εφόσον πρέπει να συμπεριληφθούν φυσικά φαινόμενα όπως η αστάθεια του υλικού και οι

επιδράσεις της γεωμετρίας. Αυτό όμως οδηγεί σε πιο ακριβή αποτελέσματα της συμπεριφοράς μιας κατασκευής. Μέσα από τα αποτελέσματα αυτών των μεθόδων ανάλυσης θα διαφανεί ποιά είναι η επίδραση φαινομένων δευτέρας τάξης στην απόκριση της κατασκευής κατά τη γραμμική και μη γραμμική ανάλυση. Τα φαινόμενα αυτά είναι πολύ εντονότερα όταν πρόκειται για πολυώροφα κτίρια.

Πάντα πρέπει να υπάρχει κατά νου, ότι στόχος της ανάλυσης κατασκευών δεν είναι να προβλεφτεί η ακριβής συμπεριφορά μιας κατασκευής, αφού η πρόβλεψη της ακριβούς συμπεριφοράς για μια πραγματική κατασκευή είναι κυριολεκτικά αδύνατη. Κύριος στόχος είναι να εκπονηθούν χρήσιμα αποτελέσματα και συμπεράσματα που θα βοηθήσουν στη λήψη αποφάσεων σχεδιασμού από τη μελετητική ομάδα.

# 1 Γενικές αρχές σχεδιασμού

Ο σχεδιασμός και η διαστασιολόγηση των ψηλών κτιρίων απαιτεί την άριστη γνώση, εμπειρία και την δέουσα τεχνογνωσία για την κατανόηση του τρόπου συμπεριφοράς τους. Ο σχεδιασμός αυτός καθορίζεται από διεθνείς κώδικες και πρότυπα (codes and standards). Ο τρόπος που συμπεριφέρονται αυτά τα κτίρια αλλά και οι περιορισμοί που τίθενται, αναθεωρούνται συνεχώς, με τους μηχανικούς, αρχιτέκτονες και κατασκευαστές να προσπαθούν να φτάσουν τα όρια του μέγιστου δυνατού.

Η στρατηγική που ακολουθείται για το σχεδιασμό και την κατασκευή αυτών των κτιρίων απαιτεί τον ενοποιημένο σχεδιασμό και μελέτη προσεγγίζοντας σχεδόν όλους τους τομείς του έργου.

## 1.1 Επεξήγηση «ψηλού» κτιρίου

Η επεξήγηση του όρου «ψηλό» κτίριο δεν είναι απόλυτη. Όταν ο λόγος του ύψους του κτιρίου προς το συνολικό μήκος της πλευράς του χαμηλότερου σημείου του κτιρίου (της ισόγειας βάσης) είναι μεγαλύτερο του 5:1, τότε το κτίριο θεωρείται ψηλό. Ως επί το πλείστον για τα ψηλά κτίρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι λέξεις ουρανοξύστης, πολυώροφο ή πύργος (Banks et al. 2014).

**Πίνακας 1 Ερμηνεία «Ψηλού» Κτιρίου (Banks et al. 2014)**

Χρήση (ύψος ορόφου)	Ψηλό	Υπερ-υψηλό
Οικιστικό (3.0 m)	Μέχρι 100 ορόφους (300 m)	Περισσότερο από 100 ορόφους (300 m)
Γραφεία (4.0 m)	Μέχρι 75 ορόφους (300 m)	Περισσότερο από 75 ορόφους (300 m)

## 1.2 Μεθοδολογία σχεδιασμού

Η μελέτη και σχεδιασμός των ψηλών κτιρίων ακολουθεί την ίδια μεθοδολογία με τη μελέτη και σχεδιασμό για τα χαμηλά κτίρια, ωστόσο, υπάρχει ένας αριθμός σημαντικών παραγόντων που πρέπει να ληφθούν υπόψη.



Ανεξάρτητα από τη χρήση, ένα κτίριο πρέπει να πληροί του πιο κάτω γενικούς επιθυμητούς στόχους:

- Λειτουργικότητα
- Προστασία του όλου κτιρίου από εξωτερικούς παράγοντες (σεισμό, άνεμο κ.α.)
- Συνθήκες υγιούς διαβίωσης
- Μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και φυσικών πόρων
- Συνθήκες άνεσης στους χρήστες, οπτικά και ακουστικά
- Ελάχιστο κόστος κύκλου ζωής του κτιρίου

Στην προκειμένη περίπτωση όπου το 40ώροφο κτίριο θα χρησιμοποιείται ως συγκρότημα γραφείων, με τα κτίρια γραφείων να αποτελούν ειδική κατηγορία κτιρίων. Στα κτίρια γραφείων πρέπει να πληρούνται στο μέγιστο οι απαιτήσεις για οπτική και ακουστική άνεση, αυξημένες τιμές εναλλαγής του περιβάλλοντα αέρα αλλά και θερμική άνεση, κυρίως για δροσισμό του χώρου εφόσον αναπτύσσονται υψηλά εσωτερικά θερμικά φορτία.

Ο άριστος σχεδιασμός για ένα ψηλό κτίριο απαιτεί τη συνεργασία μεταξύ ειδικών επαγγελματιών που να εξειδικεύονται (Banks et al. 2014).:

- Στην πρόσοψη-περίβλημα (Façade)
- Στα φορτία Ανέμου
- Στα γεωτεχνικά
- Στα σεισμικά
- Στους ανελκυστήρες
- Στα θέματα πυρασφάλειας
- Κατασκευαστικούς συμβούλους

Ένας από τους παράγοντες και η κυριότερη διαφορά μεταξύ ανάλυσης χαμηλών και ψηλών κτιρίων είναι η επιρροή από την επιβολή πλευρικών φορτίων. Για το σχεδιασμό χαμηλών κτιρίων υπάρχει τεχνογνωσία από τους περισσότερους σχεδιαστές για την ανάλυσή τους, θέτοντας άκαμπτα κάθετα στοιχεία που να τίθενται σε λειτουργία σε συνδυασμό με τα οριζόντια διαφράγματα.

Στα ψηλά κτίρια το μέγεθος των πλευρικών φορτίων αυξάνεται σημαντικά ανάλογα με το ύψος του κτιρίου. Τα φορτία ανέμου τείνουν να αυξάνονται με τη διαφορά ύψους από το έδαφος και σε συνδυασμό με την μεγάλη επιφάνεια των όψεων του κτιρίου, επηρεάζει το σχεδιασμό και διαστασιολόγηση πολλών δομικών στοιχείων, κυρίως των εσωτερικών τοιχείων και των υποστυλωμάτων. Η πλευρική μετατόπιση υπολογίζεται από τους μελετητές και πρέπει να περιοριστεί. Η υπερβολική πλευρική μετατόπιση μπορεί να παραμορφώσει μόνιμα τα εσωτερικά και εξωτερικά δομικά στοιχεία.

Τα φορτία από τον άνεμο και το σεισμό εμφανίζονται με ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων και η απόκριση του κτιρίου επηρεάζεται από τη φυσική του συχνότητα και τον βαθμό απόσβεσής του. Αν η φυσική συχνότητα του κτιρίου είναι κοντά στη συχνότητα από την επιβολή σεισμού ή ανέμου, τότε παρουσιάζεται ενίσχυση, έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση της ταλάντωσης του κτιρίου, των δυνάμεων και της μετατόπισης, η οποία μπορεί να επιφέρει δυσμενείς καταστάσεις και αποτελέσματα.

Στις περιπτώσεις όπου η επιτάχυνση και οι μετατοπίσεις του κτιρίου είναι μεγάλες, αυτό έχει ως αποτέλεσμα να προκληθεί στους χρήστες του κτιρίου ναυτία, κυρίως στους τελευταίους ορόφους, λόγω της μη ομαλής ταλάντωσης της κατασκευής. Με αυτό τον τρόπο καταργείται η αίσθηση άνεσης των χρηστών του κτιρίου, που αποτελεί μία από τις θεμελιώδεις αρχές γενικού σχεδιασμού των ειδικών κτιρίων, όπως τα γραφεία.

Ο λόγος λεπτότητας του κτιρίου είναι ο λόγος που εκφράζει το πόσο ισχυρά θα λειτουργήσει το δομικό σύστημα. Είναι το πηλίκο της διαίρεσης του ολικού ύψους διά τη μικρότερη πλευρά βάσης. Όταν ο λόγος αυτό είναι  $H/6$  θεωρείται ιδανικό. Μέσω αυτού του λόγου μπορεί να προσδιοριστεί και το κατάλληλο δομικό σύστημα για το κτίριο, ανταποκρινόμενο στη δυναμική συμπεριφορά του (Banks et al. 2014).

### **1.3 Δομικό σύστημα**

Σκοπός του σχεδιασμού του δομικού συστήματος των ψηλών κτιρίων (Banks et al. 2014) είναι να δοθεί δύναμη και ακαμψία, ώστε το κτίριο να αντιστέκεται στα ισχυρά πλευρικά φορτία περιορίζοντας τις πλευρικές μετακινήσεις και επιταχύνσεις, δίνοντας στο κτίριο το κατάλληλο δομικό πλαισιακό σύστημα. Το επιλεγόμενο δομικό σύστημα θα πρέπει να προσφέρει την κατάλληλη ακαμψία στο φορέα κατά την επιβολή των πλευρικών φορτίων αλλά και την άριστη λειτουργικότητα του οικοδομήματος.

Ο μελετητής με τη σειρά του θα πρέπει να παρουσιάσει και να εξηγήσει στους υπόλοιπους μηχανικούς και εμπλεκόμενα μέλη της μελετητικής ομάδας τους λόγους για τους οποίους επέλεξε το συγκεκριμένο δομικό σύστημα για το κτίριο. Μέσα από συζήτηση μεταξύ των μελών της μελετητικής και κατασκευαστικής ομάδας και σε συνδυασμό των ιδεών και εμπειριών τους θα αποικοδομηθεί μια βελτιστοποιημένη πρόταση για το έργο. Παρουσιάζοντας μια έκθεση, κατασκευαστικά σχέδια (sketches) ή ακόμη και τρισδιάστατα μοντέλα θα αποδείξει ότι ο ίδιος κατανόησε τον τρόπο λειτουργίας-συμπεριφοράς του κτιρίου και με τη σειρά του το παρουσιάζει στην υπόλοιπη ομάδα.

### **1.3.1 Συντονισμός και ενοποίηση εργασιών**

Ο κύριος μηχανικός του έργου είναι υπεύθυνος για το συντονισμό και ενοποίηση των εργασιών του έργου. Ο δομοστατικός μηχανικός του έργου πρέπει να έχει στενή και συνεχή συνεργασία με τους μηχανικούς των άλλων τομέων του έργου (μηχανολόγους, γεωλόγους, ηλεκτρολόγους κ.α.). Μια αυτό τον τρόπο θα γίνει ένας σωστός και ολοκληρωμένος σχεδιασμός.

Οι ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις ενός ψηλού κτιρίου διαφέρουν κατά πολύ από αυτές των χαμηλών κτιρίων και υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό τους, γι'αυτό και χρειάζεται η σωστή κατανομή των υπηρεσιών.

Όσον αφορά τις υπηρεσίες υδροδότησης, δεν υπάρχει πάντοτε υψηλή πίεση νερού για όλους τους ορόφους των ψηλών κτιρίων και κυρίως τους τελευταίους, γι'αυτό το λόγο απαιτείται τοποθέτηση δεξαμενών νερού ανά διάστημα 30 ορόφων. Στην περίπτωση των ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων, η ηλεκτρική τάση μπορεί να είναι ανεπαρκής για ύψη άνω των 100 μέτρων γι'αυτό απαιτείται η εγκατάσταση υποσταθμών ανά ορισμένο αριθμό ορόφων. Το ίδιο ισχύει για τη μεταφορά δεδομένων, όπου απαιτείται η τοποθέτηση διαμετακομιστικών σταθμών ανά 90 μέτρα ύψος και η χρήση καλωδίων οπτικών ινών (Banks et al. 2014).

### **1.3.2 Υπηρεσίες**

Η κατασκευή η οποία θα αναλύσουμε, προβλέπεται να χρησιμοποιηθεί ως χώροι γραφείων. Τα κτίρια γραφειακών εγκαταστάσεων κατατάσσονται σε μία ειδική κατηγορία κτιρίων. Στα κτίρια αυτά απαιτούνται μεγάλες ποσότητες καθαρού αέρα για αερισμό του κτιρίου, εφόσον λόγω της μεγάλης πρόσοψης του κτιρίου, αναπτύσσονται υψηλά θερμικά φορτία από την ακτινοβολία του ήλιου αλλά και τις συσκευές υπηρεσιών (Banks et al. 2014). Για να

αποφεύγεται η τοποθέτηση αεραγωγών μεγάλου μεγέθους, τα συστήματα αερισμού χωρίζονται σε ζώνες και υπάρχουν αρκετά δωμάτια αερισμού (plant rooms) ανά συγκεκριμένο αριθμό ορόφων. Ωστόσο ο χώρος των δωματίων αερισμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλες υπηρεσίες, οι οποίες θα αναφερθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Τα δωμάτια υπηρεσιών, ως συνήθως στα ψηλά κτίρια μέχρι 200 μέτρα, βρίσκονται στο υπόγειο και ισόγειο του κτιρίου καθώς και στην κορυφή του κτιρίου (διαμοιράζοντας έτσι τις αποστάσεις παροχών μέχρι τα 100 μέτρα). Για ψηλότερα κτίρια απαιτείται η ύπαρξη τους και σε ενδιάμεσους ορόφους. Όταν ένα κτίριο έχει χρήση για κατοίκηση και γραφεία, οι υπηρεσίες για κάθε χρήση πρέπει να διαχωρίζονται. Τα δωμάτια αυτά, που συνήθως καταλαμβάνουν έκταση ενός ορόφου, δίνουν τη δυνατότητα στο Μηχανικό να τοποθετήσει επιπρόσθετα δομικά στοιχεία ή να μεγαλώσει τις διαστάσεις στα υπάρχοντα μέλη του συγκεκριμένου ορόφου, προσδίδοντας περισσότερη δύναμη και ακαμψία στο κτίριο (Sarkisian 2012). Είναι σημαντικό για το μελετητή μηχανικό να κατανοήσει τις απαιτήσεις των υπηρεσιών του κτιρίου για να τις προσαρμόσει στο σχεδιασμό του.

### **1.3.3 Μηχανική κελύφους κτιρίου**

Ο σχεδιασμός του κελύφους απαντά στις απαιτήσεις αισθητικής που καθορίζει ο αρχιτέκτονας. Για το σχεδιασμό του κελύφους πρέπει να ληφθούν οι πιο κάτω παράγοντες:

- Σχεδιαστικοί περιορισμοί-Περιορισμός ύψους
- Συμμόρφωση με τα πρότυπα και τους κώδικες
- Οικονομικό-Διαθέσιμος προϋπολογισμός
- Προγραμματισμός εργασιών
- Ενεργειακή απόδοση
- Άνεση για τους ενοίκους
- Προσφερόμενος χώρος για ενοικίαση/πώληση

Η μετατόπιση του φορέα του κτιρίου, είτε οριζόντια λόγω κάμψης και διάτμησης, είτε κάθετη λόγω ερπυσμού μπορεί να επηρεάσει τους κόμβους όπου συνδέονται τα μέλη του κελύφους. Τα ενδιάμεσα και κεντρικά μέλη του κελύφους είναι επιρρεπή στις υψηλές πιέσεις ανέμου και τις καταιγίδες, γι' αυτό απαιτείται ο σχεδιασμός εξωτερικών τοιχείων για την εξουδετέρωσή τους. Αυτό ελέγχεται με την προσομοίωση του μοντέλου σε τρισδιάστατο

μοντέλο υπό κλίμακα για τον έλεγχο της συμπεριφοράς του σε ανάλογα φαινόμενα. Η μέθοδος αυτή συνήθως είναι η μέθοδος της Αεροδυναμικής σήραγγας (wind tunnel test) (Sarkisian 2012).

Οι απαιτήσεις του κελύφους πρέπει να ληφθούν υπόψη στα αρχικά στάδια σχεδιασμού με εξειδικευμένο μηχανικό. Το όλο σύστημα του κελύφους καθώς και τα πάνελ πρέπει να εγκαθίσταται εύκολα και να είναι συμβατά με τη δομή του κτιρίου και μπορεί να τοποθετηθεί αμέσως μετά την ολοκλήρωση των εξωτερικών τοιχείων. Τα διάφορα μηχανικά συστήματα επηρεάζουν το κέλυφος του κτιρίου όπως και το αντίθετο. Ο φυσικός αερισμός και τα ανοιγόμενα παράθυρα δεν είναι ιδανικά για ψηλά κτίρια.

#### **1.3.4 Σχεδιασμός πυρήνα**

Το πιο σημαντικό και θεμελιώδες στοιχείο κατά τη διαδικασία σχεδιασμού ενός ψηλού κτιρίου είναι αναμφισβήτητα ο πυρήνας του. Ο πυρήνας ενός ψηλού κτιρίου αποτελεί τη ραχοκοκαλιά του (Banks et al. 2014) καθώς μεταφέρει ένα μεγάλο ποσοστό των κάθετων φορτίων όπως και το μεγαλύτερο μέρος των πλευρικών φορτίων που επιβάλλονται στο φορέα.

Η μελέτη και ο σχεδιασμός του πυρήνα πρέπει να γίνει με τη συμμετοχή του δομοστατικού μηχανικού, των ηλεκτρομηχανολόγων, του αρχιτέκτονα καθώς και των ειδικών σε θέμα πυρασφάλειας και ανελκυστήρων. Με τη συμμετοχή όλων των αρμόδιων φορέων στο σχεδιασμό του πυρήνα θα εξεταστούν όλες ανεξαιρέτως οι πτυχές του έργου και θα γίνει ορθότερος και αποτελεσματικός σχεδιασμός. Ο αποτελεσματικός σχεδιασμός του πυρήνα θα προσδώσει γρηγορότερο χρόνο κατασκευής, καλύτερη ποιότητα, περισσότερο διαθέσιμο χώρο, άρα και μειωμένο κόστος.

#### **1.3.5 Τοιχεία διάτμησης**

Τα τοιχεία διάτμησης προτιμώνται περιμετρικά του πυρήνα, όπου θα περικλείονται οι ανελκυστήρες, τα κλιμακοστάσια καθώς και τα lobbies των υπηρεσιών. Για να επιτευχθεί το μέγιστο της αποδοτικότητας, τα τοιχεία θα πρέπει να έχουν το μέγιστο δυνατό μήκος και να τοποθετηθούν συμμετρικά ως προς το κέντρο βάρους του κτιρίου.

Το πάχος των τοιχείων ποικίλει μεταξύ 350-600mm για κτίρια μέχρι 200 μέτρα ύψος, λόγω του ότι τα τοιχεία αυτά διαστασιολογούνται για να παραλαμβάνουν τα επιβαλλόμενα φορτία (Smith et al. 1991). Ο μελετητής θα πρέπει από νωρίς να κάνει τον υπολογισμό αυτών των παχών για να μπορέσει και ο αρχιτέκτονας με τη σειρά του να σχεδιάσει τις κατάλληλες

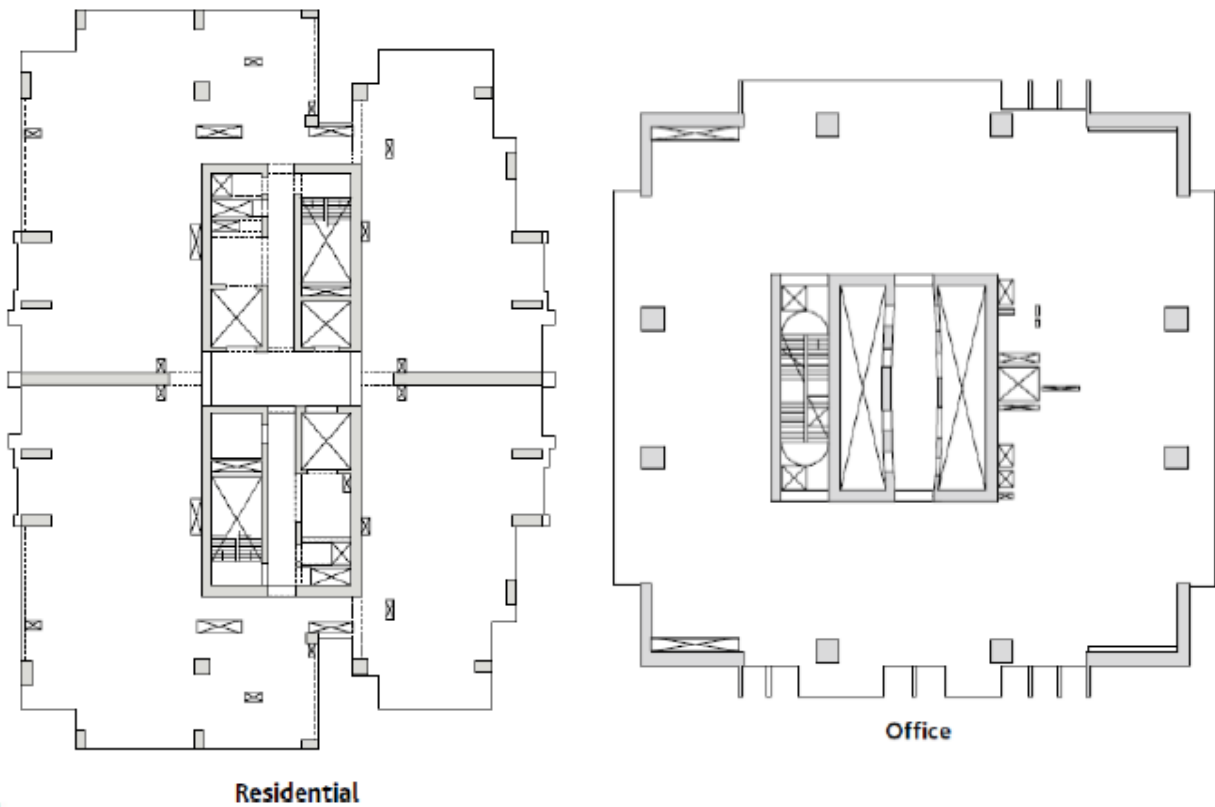
δομικές ζώνες. Πρέπει να γίνεται ο κατάλληλος σχεδιασμός των τοιχείων του πυρήνα να μεγιστοποιείται η παραλαβή και μεταφορά κάθετων φορτίων. Αυτό επίσης θα επηρεάσει και την τελική διάταξη των υποστυλωμάτων των ορόφων.

Η τοποθέτηση των αγωγών και σωληνώσεων για την παροχή των υπηρεσιών πρέπει να προσαρμόζεται ώστε να αποφεύγονται οποιεσδήποτε οπές και διατρήσεις πάνω στα τοιχεία του πυρήνα, αφού αυτό θα μειώσει την ακαμψία και ικανότητα του τοιχείου ενώ θα επιφέρει δυσκολίες και καθυστερήσεις κατά την κατασκευή. Προς αποφυγή αυτού, οι σωληνώσεις και αγωγοί για τα ψηλά κτίρια, τοποθετούνται στις ζώνες διαδρόμου όπου είναι ευκολότερη η παροχή τους στους ορόφους. Επίσης πρέπει να αποφεύγονται τα μεγάλα ανοίγματα στις πλάκες στις σημαντικές ζώνες. Στις περιπτώσεις ωστόσο που θα είναι αναγκαία η διάτρηση στα τοιχεία του πυρήνα, τότε αυτή θα γίνεται στο κέντρο του μήκους του τοιχείου, αποφεύγονται ακρινά σημεία (Banks et al. 2014).

### **1.3.6 Επίδραση χρήσης του κτιρίου**

Το είδος χρήσης του κτιρίου επιδρά στο σχεδιασμό του πυρήνα όπως και ολόκληρου του κτιρίου, το κόστος αλλά και την αποδοτικότητα του. Η διάταξη, το ύψος ορόφων και η ηχομόνωση, καθώς και ο συντελεστής χρήσης προσαρμόζονται στην εκάστοτε χρήση του κτιρίου. Όπως για παράδειγμα, (Banks et al. 2014) ένα τυπικό ψηλό κτίριο με καθαρό εμβαδόν ορόφου 1000 m<sup>2</sup>. Για χρήση ως κατοικία θα υπάρχουν 20-30 άτομα στον όροφο, 35-40 άτομα αν πρόκειται για ξενοδοχείο και 80-120 άτομα αν πρόκειται για γραφεία. Δηλαδή ο συνολικός αριθμός ατόμων σε ένα 40ώροφο κτίριο κυμαίνεται από 800 για κατοίκηση μέχρι 4000 άτομα για γραφεία.

Ο αριθμός των ανελκυστήρων εξαρτάται πρωτίστως από τη χρήση του κτιρίου καθώς και την ταχύτητα του ανελκυστήρα. Σε περίπτωση που σε ένα κτίριο υπάρχει μικτή χρήση (κατοίκηση και γραφεία), τότε οι ανελκυστήρες για κάθε χρήση πρέπει να διαχωρίζονται για λόγους ασφαλείας. Ασφαλέστατα τα μεταβλητά φορτία κατά τη μελέτη για τα κτίρια που χρησιμοποιούνται σαν γραφεία είναι μεγαλύτερα από αυτά για κτίρια κατοίκησης.



Διάγραμμα 1 Τυπικές διατάξεις κτιρίων: Κατοικία-Γραφεία (Truby 2014)

### 1.3.7 Μεταφορά εντός του κτιρίου

Ο αριθμός των ανελκυστήρων διαφέρει αναλόγως της χρήσης του κτιρίου, του σχεδιασμού του κτιρίου και του χρόνου αναμονής. Σε ορισμένα κτίρια, οι όροφοι χωρίζονται σε ζώνες. Κάθε ζώνη έχει τους δικούς της ανελκυστήρες. Ενδιάμεσα των ζωνών υπάρχουν τα sky lobbies. Οι ανελκυστήρες μεταξύ των lobbies είναι γρηγορότεροι και οδηγούν τους χρήστες στην κατάλληλη ζώνη ορόφων για τη χρήση του τοπικού ανελκυστήρα της ζώνης. Οι ανελκυστήρες μπορεί να εξυπηρετούν τους ορόφους με ζυγό ή μονό αριθμό, αναλόγως, προσφέροντας έτσι ταχύτητα χωρίς να κάνουν στάση ανά ένα όροφο. Αυτοματοποιημένα συστήματα μπορούν να οδηγήσουν το χρήστη στην επιλογή του γρηγορότερου ανελκυστήρα για τον προορισμό του, απλά με τη χρήση της ταυτότητάς του. Για τον υπολογισμό του αριθμού καθώς και της ταχύτητας των ανελκυστήρων απαιτείται ειδικός μελετητής στους ανελκυστήρες.

### 1.3.8 Προστασία από τη φωτιά

Συνήθης χρόνος για πυραντίσταση για μεγάλα κτίρια είναι τα 90 λεπτά, ωστόσο για ορισμένα μέρη του κτιρίου όπως το υπόγειο μπορεί να απαιτείται περισσότερος χρόνος. Για τη σωστή διαφυγή σε περίπτωση πυρκαγιάς πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη μελέτη η τοποθεσία, ο

αριθμός και το πλάτος των σκαλών διαφυγής, η ύπαρξη συστημάτων πυρόσβεσης (πίδακες, λάστιχα) και σύστημα ανίχνευσης και ελέγχου καπνού καθώς και η εφαρμογή πυρίμαχων θυρών και ανελκυστήρων.

### 1.3.9 Πλευρική μετατόπιση κτιρίου

Η κατασκευή ενός ψηλού κτιρίου αποτελεί μια τεράστια επένδυση για τους κατασκευαστές. Ο πυρήνας του κτιρίου κατασκευάζεται ως συνήθως στην καρδιά του οικοδομήματος. Αποτελεί το σημείο πρόσβασης στο κτίριο κατά την κατασκευή, γι' αυτό απαιτείται η γρήγορη κατασκευή του. Πρέπει να ληφθεί η απόφαση για τον κύκλο εργασιών που θα ακολουθείται για κάθε όροφο και η μέθοδος κατασκευής των δομικών στοιχείων.

Στα ψηλά κτίρια παρουσιάζονται πλευρικές μετακινήσεις λόγω των φορτίων ανέμου και σεισμού. Ο Πολιτικός Μηχανικός προσπαθεί κατά το σχεδιασμό να μειώσει το μέγεθος των μετακινήσεων. Οι πλευρικές μετακινήσεις  $u$  του κτιρίου δεν πρέπει να ξεπερνούν την τιμή του «ολικού ύψους του κτιρίου/500», εξίσωση (1).

$$u \leq H/500 \quad (1)$$

Στις σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των ορόφων  $\delta$ , το όριο είναι εξίσου σημαντικό και δεν πρέπει ούτε αυτό να ξεπερνά την τιμή του «ολικού ύψους του κτιρίου/300», εξίσωση (2).

$$\delta \leq H/300 \quad (2)$$

Οι πλευρικές μετακινήσεις σχετίζονται με τη δυναμική απόκριση του κτιρίου. Η δυναμική απόκριση εξαρτάται από τη δυναμική συμπεριφορά του κτιρίου που επηρεάζεται από το βαθμό απόσβεσης των ταλαντώσεων του (Banks et al. 2014).

### 1.3.10 Δυναμική Απόκριση

Όλα τα κτίρια έχουν δυναμική απόκριση στην αλλαγή των φορτίων και τη δική τους φυσική συχνότητα. Όταν στο κτίριο εφαρμόζονται στατικά φορτία, δηλαδή φορτία λόγω βαρύτητας τότε η φυσική συχνότητα δεν έχει επιρροή στα φορτία και τις μετατοπίσεις της κατασκευής. Ωστόσο, όταν εφαρμόζονται σε αυτό δυναμικά φορτία, δηλαδή φορτία λόγω της δράσης σεισμού ή ανέμου, τότε η συχνότητα της κατασκευής πρέπει να υπολογιστεί. Όταν η συχνότητα που προκαλείται λόγω των δυναμικών φορτίων είναι κοντά στη φυσική συχνότητα της απόκρισης της κατασκευής, τότε έχουμε ισχυρή συνολική μετατόπιση που μπορεί να ενισχύσει τις δυνάμεις και μετακινήσεις του κτιρίου.



Απόσβεση είναι η ικανότητα της κατασκευής να απορροφά μέρος της ενέργειας που προκαλείται λόγω των δυναμικών φορτίων και να περιορίζει τις πλευρικές μετακινήσεις. Η απόσβεση είναι ένα ποσοστό της κρίσιμης απόσβεσης που απαιτείται για να επαναφέρει το κτίριο σε ηρεμία μετά από μία ταλάντωση. Η αύξηση της απόσβεσης με μηχανικά μέσα θα επιφέρει πρακτικά και οικονομικά μειονεκτήματα. Τα ψηλά κτίρια τα οποία κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα, το οποίο εκχύνεται επί τόπου, προσφέρουν ένα βαθμό φυσικής απόσβεσης.

Η δυναμική ανάλυση των κτιρίων γίνεται στα αρχικά στάδια μελέτης, χρησιμοποιώντας ένα εύρος τιμών απόσβεσης που να ανταποκρίνονται στην απόκριση του κτιρίου. Για την ανάγκη ύπαρξης περαιτέρω απόσβεσης στην κατασκευή, όταν γίνεται νωρίς στη μελέτη, δίνεται ο χρόνος για τη βέλτιστη λύση και την προσαρμογή στα οικονομικά δεδομένα. Η δημιουργία δοκιμαστικών μοντέλων είναι απαραίτητη για τα λεπτά κτίρια (Banks et al. 2014) .

### **1.3.11 Κίνδυνος από ατύχημα**

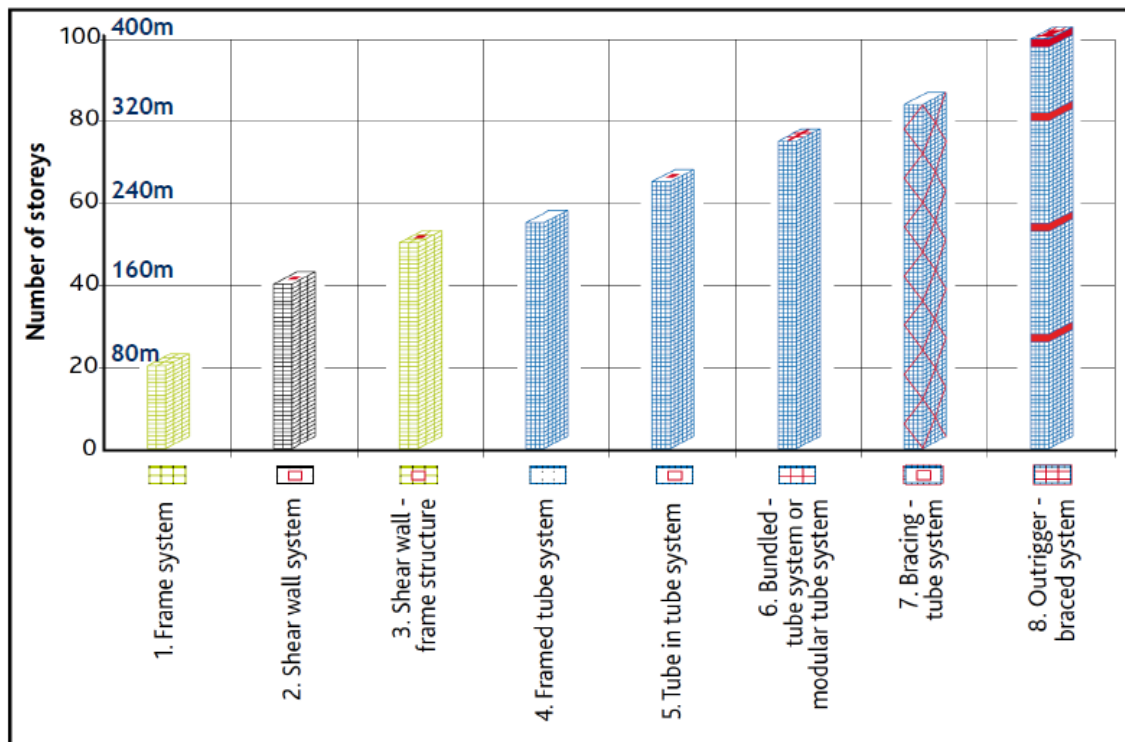
Όλα τα κτίρια σχεδιάζονται για να αποδίδουν λειτουργικότητα. Όμως στην περίπτωση ενός ατυχήματος ή έκρηξης, το κτίριο θα πρέπει και πάλι να μεταφέρει τα φορτία στα θεμέλια. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την υπερστατικότητα της κατασκευής, ώστε να υπάρχουν αρκετές δίοδοι μεταφοράς των φορτίων προς το έδαφος. Στα ψηλά κτίρια, λόγω της ύπαρξης του κεντρικού πυρήνα ο οποίος είναι φτιαγμένος από πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος, δίνεται τεράστια αντοχή έναντι της πλαστικής παραμόρφωσης ενώ προσδίδεται και αντίσταση στη φωτιά. Επίσης τα υποστυλώματα μεταφέρουν τα αξονικά φορτία και ο σχεδιασμός τους υπόκειται στους διεθνείς κώδικες.

## **1.4 Πλαισιακά συστήματα**

Η επιλογή του κατάλληλου δομικού συστήματος για ένα κτίριο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η γεωγραφική τοποθεσία, οι δεξιότητες κατασκευής από τον κατασκευαστή, το ύψος και οι διαστάσεις του κτιρίου, το είδος χρήσης του κτιρίου όπως και οι απαιτήσεις των αρχιτεκτονικών σχεδίων για την οπτική εμφάνιση του. Οι παράμετροι αυτοί είναι εκτός του ελέγχου του μελετητή (Banks et al. 2014) .

Τα ψηλά κτίρια από σκυρόδεμα σχεδόν πάντα σχεδιάζονται με κεντρικό πυρήνα που τους προσφέρει σταθερότητα στις πλευρικές μετακινήσεις και στη συστροφή. Όταν ο πυρήνας τοποθετείται έκκεντρα, τότε πρέπει να προστεθούν τοιχεία για αντίσταση στην περιστροφή

του κτιρίου κατά τους σεισμούς. Όλα τα δομικά συστήματα βασίζονται στο σκυρόδεμα που εκχύνεται επί τόπου στο εργοτάξιο, με βοηθητικά συστήματα απόσβεσης για τις μετατοπίσεις και τις επιταχύνσεις.

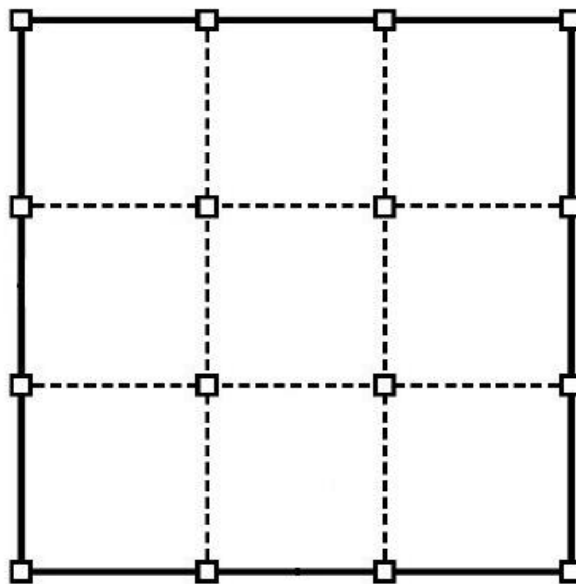


**Διάγραμμα 2** Τύποι δομικών συστημάτων (Truby 2014)

Στο διάγραμμα 2 παρουσιάζονται διάφοροι τύποι δομικών συστημάτων των ψηλών κτιρίων και ο αντίστοιχος μέγιστος αριθμός ορόφων για το κάθε δομικό σύστημα. Όλα τα σύγχρονα ψηλά κτίρια διαθέτουν ένα από αυτά τα δομικά συστήματα. Πολλά κτίρια έχουν ένα συνδυασμό δομικών συστημάτων (Sarkisian 2012). Ο μελετητής χρειάζεται αρκετό χρόνο για να προσδιορίσει το κατάλληλο δομικό σύστημα για κάθε περίπτωση, μέσα από την εμπειρία του. Η επιλογή του κατάλληλου πλαισιακού συστήματος του κτιρίου εναπόκειται στο δομοστατικό μηχανικό μελετώντας το κόστος και την αποδοτικότητα. Ωστόσο για κτίρια με ύψος άνω των 200 μέτρων, το δομικό πλαισιακό σύστημα θα επηρεάσει την αισθητική όψη του κτιρίου γι'αυτό είναι αναγκαία η στενότερη συνεργασία με τον αρχιτέκτονα.

### 1.4.1 Τύπος 1-Σύστημα Πλαισίου

Το πιο απλό δομικό σύστημα, όπου οι δοκοί και τα υποστυλώματα συνδέονται άκαμπτα αποτελώντας ένα πλαίσιο στις δύο κατευθύνσεις, αποτρέποντας τις πλευρικές μετακινήσεις και μεταφέροντας τα φορτία βαρύτητας προς το έδαφος. Το πλαίσιο λαμβάνει ένα μεγάλο ποσοστό των πλευρικών δυναμικών φορτίων (Taranath 2012). Όταν απαιτείται μεγαλύτερο ύψος για το κτίριο, τότε το μέγεθος των στοιχείων του πλαισίου πρέπει να αυξηθεί για να ανταποκρίνονται στην ακαμψία και να αποτρέπουν πλευρικές μετακινήσεις. Πλεονέκτημα του συστήματος αυτού, με έγχυτο επί τόπου οπλισμένο σκυρόδεμα, είναι η συνοχή μεταξύ των μελών, που καθιστά τα μέλη και τους κόμβους άκαμπτους (Banks et al. 2014).



Διάγραμμα 3 Τύπος 1-Σύστημα Πλαισίου (Truby 2014)

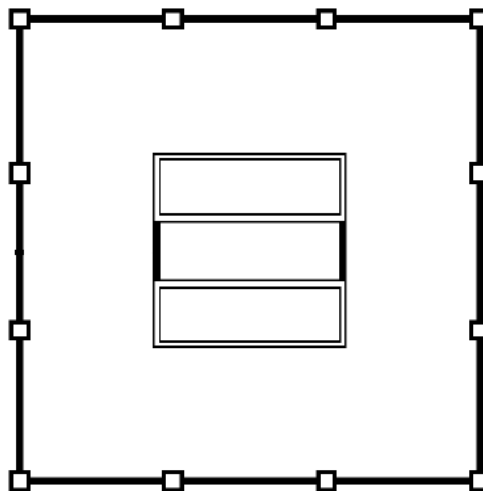
### 1.4.2 Τύπος 2- Τοιχεία Διάτμησης

Το σύστημα αυτό αποτελείται από τοιχεία διάτμησης τα οποία τοποθετούνται στο κέντρο της κατασκευής, στο χώρο του πυρήνα του κτιρίου, όπου φιλοξενούνται οι ανελκυστήρες και τα κλιμακοστάσια. Παραλαμβάνουν οριζόντια φορτία και από τις δύο κατευθύνσεις. Συχνά αποτελούν τον πυρήνα και λειτουργούν ως κάθετοι πρόβολοι με ακαμψία στη στροφή κάμψη και πλευρική μετατόπιση.

Τα τοιχεία πρέπει να τοποθετούνται συμμετρικά και στις δύο κατευθύνσεις, ως προς τις διαστάσεις και την τοποθεσία τους ώστε να αντιπαραβάλλουν τη συστρόφη του κτιρίου. Έντονη προσοχή πρέπει να δίνεται στις περιπτώσεις όπου τα τοιχεία τοποθετούνται εκτός του κέντρου μάζας, για την περίπτωση του σεισμού και εκτός του γεωμετρικού κέντρου για

την περίπτωση του ανέμου. Τα τοιχεία παραλαμβάνουν όλα τα πλευρικά φορτία λόγω της πολύ μεγάλης ακαμψίας τους. Με αυτό τον τρόπο τα υποστυλώματα στο κτίριο μεταφέρουν μόνο τα φορτία βαρύτητας καθιστώντας έτσι απλή τη μελέτη και κατασκευή των πλακών χωρίς δοκούς. Στα ψηλά κτίρια, συνηθίζεται να συνδέονται τα τοιχεία μαζί με τις άκαμπτες πλάκες κάθε ορόφου και συνδετικές δοκούς που αυτό προσφέρει μεγαλύτερη ακαμψία στο φορέα (Banks et al. 2014). Η μελέτη και ο σχεδιασμός για τις συνδετικές δοκούς είναι περίπλοκος, ωστόσο υπάρχουν πλεονέκτημα ως προς τη μετατόπιση, αφού την μειώνουν.

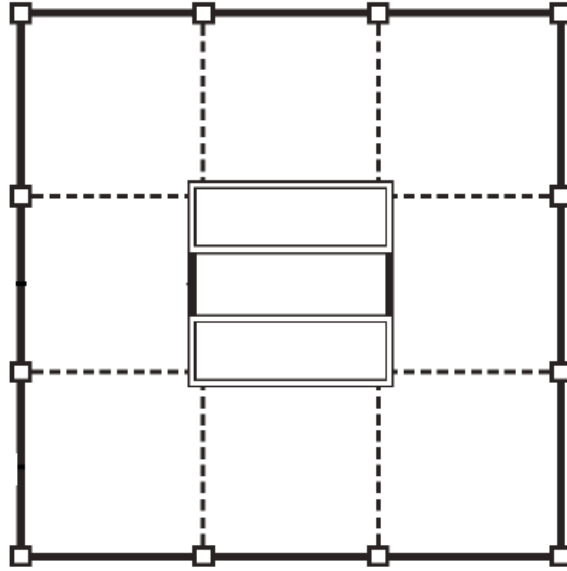
Με αυτά τα συστήματα μπορούν να προκύψουν μεγάλες εφελκυστικές δυνάμεις στις θεμελιώσεις, ως αποτέλεσμα των ροπών ανατροπής, λόγω των πλευρικών φορτίων στη κορυφή του κτιρίου. Αυτό το σύστημα είναι εφαρμόσιμο για κτίρια μέχρι 120 μέτρα ύψος. Μπορεί να εφαρμοστεί και για πιο ψηλά κτίρια μεγαλώνοντας τις διαστάσεις των μελών, ωστόσο υπάρχουν πιο οικονομικά συστήματα.



Διάγραμμα 4 Τύπος 2- Τοιχεία Διάτμησης (Truby 2014)

### 1.4.3 Τύπος 3-Συνδυασμός Τοιχείων διάτμησης και πλαισιακού συστήματος

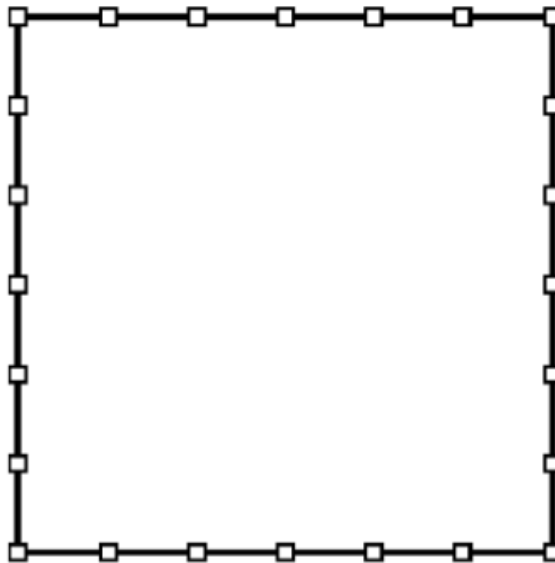
Αυτό το σύστημα αποτελεί συνδυασμό των προαναφερθέντων συστημάτων και επιτρέπει το σχεδιασμό κτιρίων μέχρι 160 μέτρα. Αυτό χρησιμοποιείται κυρίως σε ψηλά κτίρια που χρησιμοποιούνται για κατοικίες, με την παρουσία δοκών στην οροφή. Το βασικό πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι στην κορυφή του κτιρίου, τα τοιχεία διάτμησης συγκρατούνται από τα πλαίσια, ενώ αντίστροφα, στα χαμηλά επίπεδα του κτιρίου, τα πλαίσια συγκρατούνται από τα τοιχεία. Αυτό προσδίδει περισσότερη αντοχή και περιορίζει τις πλευρικές μετακινήσεις εντός των επιτρεπτών σχεδιαστικών ορίων (Truby 2014).



Διάγραμμα 5 Τύπος 3- Συνδυασμός Τοιχείων διάτμησης και πλαισιακού συστήματος (Truby 2014)

#### 1.4.4 Τύπος 4-Περιμετρικό πλαίσιο

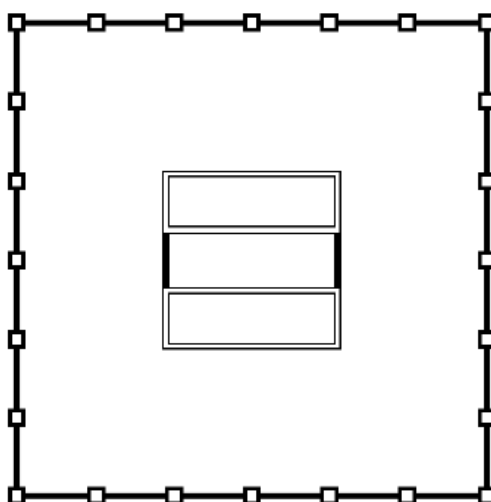
Βασίζεται στο σχεδιασμό σωλήνα (tube), έχοντας τα μέλη που βρίσκονται σε εφελκυσμό σε μεγάλη απόσταση από τα μέλη που βρίσκονται σε θλίψη. Το περίβλημα του πλαισίου βρίσκεται κάθετα ως προς τον άνεμο. Η κατασκευή αυτή λειτουργεί ως κάθετος πρόβολος με διάκενο στο κέντρο. Κατά τη μελέτη γίνεται η σωστή διαστασιολόγηση των περιμετρικών υποστρωμάτων καθώς και η απόσταση μεταξύ τους που κυμαίνεται μεταξύ 2-4 μέτρων και συνδέονται με δοκούς. Προσφέρει ακαμψία και στις δύο κατευθύνσεις και αντιστέκεται στη ροπή ανατροπής. Με αυτό το σύστημα, η κατασκευή είναι απλή και γρήγορη, ωστόσο επηρεάζει την αρχιτεκτονική αισθητική. Είναι ιδανικό για κτίρια ύψους 150-170 μέτρα (Banks et al. 2014).



Διάγραμμα 6 Τύπος 4-Περιμετρικό πλαίσιο (Truby 2014)

#### 1.4.5 Τύπος 5-Σύστημα tube-in-tube

Το σύστημα αυτό συνδυάζει την ακαμψία που προσφέρεται από το περιμετρικό πλαίσιο (τύπος 4) και τα εσωτερικά τοιχεία του πυρήνα. Η τελική διάταξη του εξωτερικού πλαισίου και του εσωτερικού πυρήνα, καθώς και ο βαθμός συνδυασμού τους καθορίζεται από την απαιτούμενη αντοχή του κτιρίου. Απαραίτητη είναι η συνεργασία μεταξύ όλων των συντελεστών του έργου για την οικονομικότερη επιλογή. Όπως και στο σύστημα του τύπου 4, ενδέχεται να επηρεαστεί η εμφάνιση του κτιρίου. Χρησιμοποιείται για σχεδιασμό κτιρίων από 180-200 μέτρα (Banks et al. 2014).

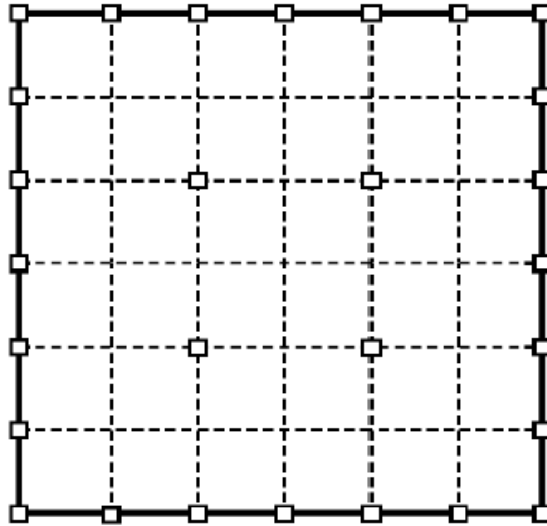


Διάγραμμα 7 Τύπος 5-Σύστημα tube-in-tube (Truby 2014)

Για κτίρια ύψους άνω των 200 μέτρων, τα δομικά συστήματα που είναι ιδανικά είναι τα ακόλουθα:

#### 1.4.6 Τύπος 6-Σπονδυλωτό πλαισιακό σύστημα

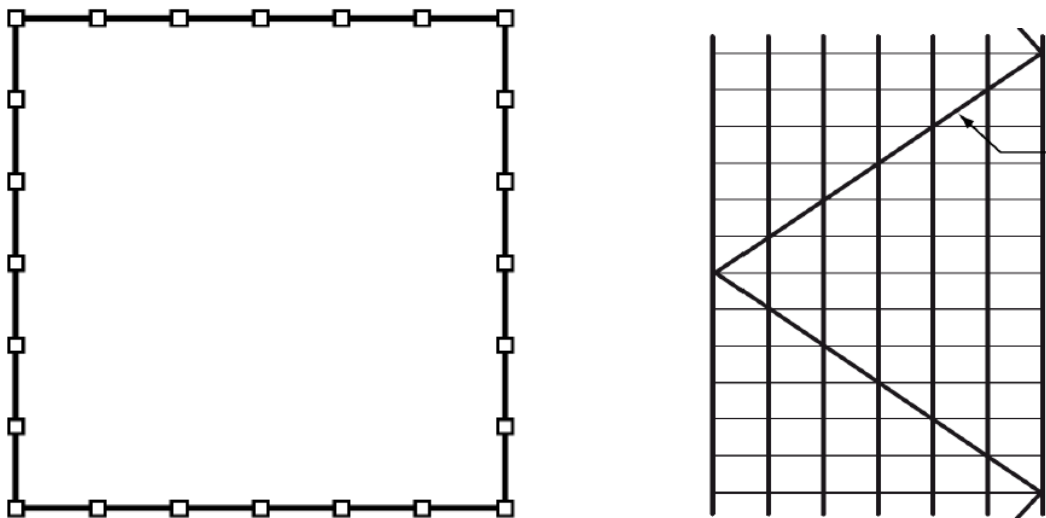
Είναι ιδανικό για κτίρια άνω των 70 ορόφων. Όπως και στο σύστημα σωλήνα (tube), όμως με αυξημένο αριθμό εσωτερικών πλαισίων συνδεδεμένα μεταξύ τους σε δίκτυο. Με αυτό τον τρόπο τα πλευρικά φορτία κατανομούνται σε όλο το πλάτος του κτιρίου και στις δύο κατευθύνσεις. Αυτό το σύστημα επιτρέπει την περαιτέρω αραίωση των εξωτερικών υποστυλωμάτων. Επιτρέπει την ανέγερση κτιρίων μέχρι 225 μέτρα (Truby 2014).



Διάγραμμα 8 Τύπος 6-Σπονδυλωτό πλαισιακό σύστημα (Truby 2014)

#### 1.4.7 Τύπος 7- Περιμετρικό Πλαισιακό σύστημα με διαγώνια στοιχεία

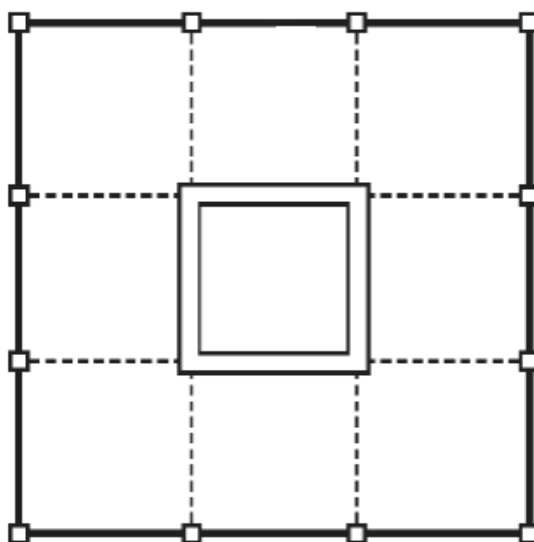
Αποτελεί το περιμετρικό πλαισιακό σύστημα, το οποίο ενισχύεται με διαγώνια στοιχεία, αυξάνοντας την πλευρική ακαμψία της κατασκευής, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα αραίωσης των εξωτερικών υποστυλωμάτων, αλλά και περισσότερη καθαρή επιφάνεια για το κέλυφος του κτιρίου. Τα εξωτερικά διαγώνια στοιχεία μεταφέρουν τα πλευρικά φορτία στις θεμελιώσεις και κατανέμουν τα διάφορα φορτία από διάφορες δόδους, προσφέροντας υπερστατικότητα στο κτίριο. Είναι κατάλληλο για κτίρια άνω των 300 μέτρων (Truby 2014).



Διάγραμμα 9 Τύπος 7- Περιμετρικό Πλαισιακό σύστημα με διαγώνια στοιχεία (Truby 2014)

#### 1.4.8 Τύπος 8-Σύστημα σύνδεση κεντρικού πυρήνα με εξωτερικό πλαίσιο

Δομικό σύστημα στο οποίο υπάρχει κεντρικός πυρήνας ο οποίος συνδέεται με δοκούς από σκυρόδεμα ή με μεταλλικά δικτυώματα, με τα εξωτερικά υποστυλώματα του πλαισίου. Αυτό το σύστημα δοκών ή δικτυωμάτων μπορεί να λαμβάνει ύψος μέχρι δύο ορόφων. Σε αυτές τις ζώνες κατασκευάζονται εξωτερικά τοιχεία για να συνδέουν τις δοκούς ή δικτυώματα με τα εξωτερικά υποστυλώματα (Taranath 2012). Με αυτό το σύστημα περιορίζονται κατά πολύ η ανατροπή στη βάση καθώς και οι πλευρικές μετακινήσεις εφόσον ο πυρήνας συγκρατείται από το εξωτερικό πλαίσιο. Ο πυρήνας επιβάλλεται να είναι πολύ μεγάλος και ισχυρός για να επιτρέπει την ανέγερση κτιρίου μέχρι 350 μέτρα (Truby 2014).



Διάγραμμα 10 Τύπος 8-Σύστημα σύνδεση κεντρικού πυρήνα με εξωτερικό πλαίσιο (Truby 2014)

### 1.5 Δομικά στοιχεία φορέα κατασκευής

Σήμερα, ο μελετητής ενός ψηλού κτιρίου μπορεί να χρησιμοποιήσει διάφορα λογισμικά προγράμματα δισδιάστατου και τρισδιάστατου σχεδιασμού υιοθετώντας διάφορες τεχνικές μοντελοποίησης ακόμη και την τεχνική των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Αυτά τα λογισμικά προγράμματα βοηθούν το μελετητή να κατανοήσει πλήρως τη συμπεριφορά της κατασκευής σε οποιαδήποτε επιβολή φορτίων. Ο μελετητής με την εμπειρία του θα ελέγξει αν η ανάλυση που δίνεται από το πρόγραμμα είναι ορθή. Αυτό μπορεί να γίνει με έλεγχο συγκεκριμένων αποτελεσμάτων της ανάλυσης του προγράμματος μέσω απλών υπολογισμών και της παραδοσιακής προσέγγισης, για τα συνολικά κάθετα φορτία, την οριζόντια μετατόπιση στη κορυφή του κτιρίου ή την περίοδο ταλάντωσης και εκτίμηση της μέγιστης επιτάχυνσης του κτιρίου. Δημιουργώντας ένα μοντέλο που να παρουσιάζει τα γεωμετρικά



χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων αλλά και τις μηχανικές ιδιότητες και τη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά του οπλισμένου σκυροδέματος, απαιτείται ξεχωριστή μοντελοποίηση για τη συμπεριφορά κατασκευής και εδάφους.

### **1.5.1 Πλάκες**

Σκοπός της πλάκας είναι να παραλαμβάνει τα επιβαλλόμενα φορτία και να τα κατανέμει στα τοιχεία που την στηρίζουν ή απευθείας στα υποστυλώματα. Σε μερικές περιπτώσεις, η πλάκα υποστηρίζεται από δοκούς που αυξάνουν τη ακαμψία και την αντοχή σε επιβολή φορτίου. Ανάλογα με το δομικό σύστημα, η πλάκα μπορεί να συμβάλει στην παραλαβή και μεταφορά πλευρικών φορτίων μέσω διαφραγμάτων ή άλλων σύνθετων τρόπων.

Η πλάκα υποβάλλεται σε αξονικά, διατμητικά και φορτία ροπής και πρέπει να παραμορφώνεται και ταλαντώνεται εντός των επιτρεπτών ορίων. Οι πλάκες για όλους τους ορόφους είναι οι ίδιες. Με αυτό τον τρόπο, μια μικρή εξοικονόμηση πάχους της πλάκας, θα επιφέρει εξοικονόμηση χρημάτων λόγω εξοικονόμησης σκυροδέματος αλλά και κέρδος ύψους για επιπλέον όροφο στο συνολικό ύψος του κτιρίου. Η μείωση του βάρους των πλακών εξυπακούει και μικρότερο μέγεθος στα κάθετα στοιχεία και τις θεμελιώσεις και επιτάχυνση των εργασιών κατασκευής.

#### **1.5.1.1 Ταχύτητα κατασκευής**

Η ταχύτητα κατασκευής κρίνει τη βιωσιμότητα του έργου, εφόσον το ολικό κόστος καθορίζεται από το χρόνο κατασκευής. Βασικό στοιχείο για τον κατασκευαστή, για να προχωρά γοργά τις εργασίες, είναι ο χρονικός κύκλος κατασκευής του κάθε ορόφου. Αυτός ο χρόνος καθορίζεται στις 4-7 μέρες και εντός αυτού του διαστήματος πρέπει να κατασκευαστούν τα τοιχεία και υποστυλώματα κάθε ορόφου (Banks et al. 2014). Αυτό εξαρτάται από παράγοντες όπως το ποσοστό μέγιστης αντοχής του σκυροδέματος και η τοποθέτηση του οπλισμού της κατασκευής, δηλαδή αν αυτή είναι έτοιμη σε κλωβούς.

#### **1.5.1.2 Ερπυσμός**

Ο ερπυσμός του σκυροδέματος παρουσιάζεται σε όλα τα κτίρια ωστόσο παρατηρείται περισσότερο όταν το ύψος του κτιρίου αυξάνεται. Ο ερπυσμός είναι πιο έντονος στα υποστυλώματα λόγω αξονικής θλίψης και λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό των ορόφων. Τα υποστυλώματα, σε αντίθεση με τα τοιχεία του πυρήνα (Smith et al. 1991), σχεδιάζονται όσον το δυνατόν με μικρότερες διαστάσεις, για λόγους καλαισθησίας, που αυτό

έχει ως αποτέλεσμα να λαμβάνουν μεγαλύτερη καταπόνηση. Τα υποστυλώματα και ο πυρήνας επιδέχονται ελαστικό ερπυσμό σε διάφορους βαθμούς.

### **1.5.1.3 Συστήματα πλακών**

Για τα συστήματα πλακών χρησιμοποιείται το οπλισμένο σκυρόδεμα (ΟΣ) και το προεντεταμένο σκυρόδεμα. Το προεντεταμένο σκυρόδεμα στις πλάκες ορόφων μειώνει σημαντικά το πάχος και βάρος της πλάκας ενώ επιταχύνει το χρόνο κατασκευής. Αυτή η μέθοδος απαιτεί χώρο στην περίμετρο του κάθε ορόφου όπου θα γίνεται περίσφιξη της προέντασης, όπως και στον πυρήνα όπου θα βρίσκεται η άλλη άκρη του τένοντα. Ωστόσο τα στοιχεία με προένταση σχεδιάζονται για να παραλαμβάνουν μόνο φορτία βαρύτητας, σε αντίθεση με τα στοιχεία από ΟΣ που μπορούν να παραλάβουν οποιαδήποτε φορτία που θα προκληθούν από πλευρική φόρτιση.

Η χρήση προκατασκευασμένων πλακών προσφέρει επιτάχυνση των εργασιών καθώς και μεγαλύτερα ανοίγματα στις πλάκες. Παράλληλα επιλύει προβλήματα όπως αυτό της σκυροδέτησης σε πολύ μεγάλα ύψη και της στήριξης των πλακών. Ο μελετητής θα πρέπει να διασφαλίσει ότι με την τοποθέτηση των προκατασκευασμένων στοιχείων, η όλη κατασκευή θα ανταποκρίνεται ολικά σε τυχηματικά φορτία. Κατά την κατασκευή του κτιρίου όμως θα απαιτηθεί η εντατική χρήση γερανών και θα πρέπει να δίνεται η συναίνεση του εκάστοτε κατασκευαστή.

Κατά το σχεδιασμό στο μοντέλο οι πλάκες θα πρέπει να είναι πακτωμένες στα τοιχεία του πυρήνα, έχοντας περιορισμούς στη διάμετρο και αποστάσεις του οπλισμού αναμονής από τον πυρήνα. Επίσης η ρηγμάτωση θα επηρεάσει την ακαμψία της πλάκας και οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών πρέπει να ληφθούν υπόψη στο μοντέλο. Στις πλάκες όπου υπάρχουν δοκοί πρέπει να συνυπολογίζονται η εκκεντρότητα της δοκού και η κεντρική γραμμή της πλάκας. Σημαντικές δυνάμεις εντός της πλάκας μπορεί να επιφέρουν κάμψη στα στοιχεία (Banks et al. 2014).

### **1.5.2 Υποστυλώματα**

Κύριος σκοπός των υποστυλωμάτων είναι να στηρίζουν την πλάκα οροφής και να μεταφέρουν τα κάθετα φορτία στο έδαφος. Τοποθετούνται περιμετρικά της κατασκευής, όμως στις περιπτώσεις που έχουμε μεγάλη πλάκα, απαιτείται και η ύπαρξη εσωτερικών υποστυλωμάτων για περαιτέρω στήριξη. Ο πυρήνας του κτιρίου θα σχεδιαστεί ώστε να

παραλαμβάνει το 60% των κάθετων φορτίων, ενώ το υπόλοιπο 40% θα παραλαμβάνεται από τα υποστυλώματα (Banks et al. 2014). Για το λόγο αυτό θα πρέπει να υπάρχει η μέγιστη απόσταση μεταξύ πυρήνα και υποστυλωμάτων.

Τα υποστυλώματα υποβάλλονται κυρίως σε αξονική θλίψη. Οι παράγοντες που πρέπει να λάβει υπόψη του ο μελετητής είναι όσον το δυνατόν μικρότερες γεωμετρικές διαστάσεις ώστε να υπάρχει περισσότερος ωφέλιμος χώρος στον όροφο, αλλά και καθαρή επιφάνεια κελύφους (όψης ορόφου), ευκολία σύνδεσης των μελών του δομικού συστήματος των ορόφων, ταχύτητα κατασκευής, αντοχή στοιχείου και πυραντίσταση.

Το σκυρόδεμα είναι ένα οικονομικό υλικό που μπορεί να αποδώσει μεγάλη αντοχή στη θλίψη ενώ μπορεί να αντληθεί σε μεγάλα ύψη (μέχρι 614 μέτρα στην περίπτωση του Burj Khalifa). Όμως η μείωση της διατομής των υποστυλωμάτων απαιτεί σκυρόδεμα με μεγαλύτερη αντοχή για την πλάκα που αυτό εξυπακούει περισσότερο κόστος.

#### **1.5.2.1 Μοντελοποίηση υποστυλωμάτων**

Όταν το υποστυλώμα αλλάζει διαστάσεις μεταξύ δύο επιπέδων, τότε η ροπή που αναπτύσσεται στο στοιχείο πρέπει να θεωρείται αμελητέα. Αυτό συμβαίνει με τα υποστυλώματα των τελευταίων ορόφων που οι διαστάσεις τους είναι μικρότερες. Όπου υπάρχουν μεταβατικά υποστυλώματα, αναπτύσσονται εσωτερικές πλευρικές δυνάμεις στα στοιχεία.

#### **1.5.2.2 Αποστάσεις υποστυλωμάτων**

Οι αποστάσεις των υποστυλωμάτων καθορίζονται έπειτα από συνεννόηση με τον αρχιτέκτονα και τους εργοδότες. Λόγω του ότι τα υποστυλώματα των ψηλών κτιρίων έχουν μεγάλες διαστάσεις, δεν μπορούν να κρυφτούν μέσα στους τοίχους. Οι αποστάσεις μεταξύ των στοιχείων κυμαίνονται μεταξύ 6 και 10 μέτρων, που αυτό επιφέρει οικονομικές διαστάσεις υποστυλωμάτων και πάχος πλάκας. Η αραιή απόσταση είναι ιδανική για τις περιπτώσεις που υπάρχουν γραφεία στο κτίριο, ενώ η πιο πυκνή απόσταση είναι κατάλληλη στις περιπτώσεις κατοίκησης. Στις περιπτώσεις όπου αλλάζει η χρήση του κτιρίου με το ύψος, τότε δημιουργείται ένας μεταβατικός όροφος, όπου σχεδιάζεται για τη σταθερότητα του κτιρίου αλλά και ως όροφος υπηρεσιών.

Στις περιπτώσεις όπου πρέπει να μετακινηθεί η αρχική θέση του υποστυλώματος από όροφο σε όροφο, τότε κατασκευάζονται «μεταβατικά» υποστυλώματα για σταδιακή αλλαγή της

θέσης ανά όροφο. Η εκκεντρότητα των κάθετων στοιχείων (Banks et al. 2014) προκαλεί εσωτερικές θλιπτικές και εφελκυστικές δυνάμεις στις πλάκες, γι' αυτό οι πλάκες πρέπει να σχεδιάζονται και να οπλίζονται για να παραλαμβάνουν αυτά τα φορτία, όπως και τα κάθετα επιβαλλόμενα και βαρύτητας αλλά και τα πλευρικά φορτία.

Οι αποστάσεις των κάθετων στοιχείων περιμετρικά της κατασκευής επηρεάζονται και από το επιλεγόμενο κέλυφος. Στα μοντέρνα κτίρια οι αποστάσεις των κάθετων στοιχείων μεγιστοποιούνται για να υπάρχει περισσότερη καθαρή επιφάνεια κελύφους. Στις περιπτώσεις όπου το δομικό πλαίσιακό σύστημα του κτιρίου είναι τύπου σωλήνα (tube), τότε τα εξωτερικά υποστυλώματα τοποθετούνται πυκνότερα, σε απόσταση 2-4 μέτρα, αφού παραλαμβάνουν και πλευρικά δυναμικά φορτία και θα συνδεθούν με άκαμπτες δοκούς.

### **1.5.2.3 Διαστασιολόγηση**

Παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διαστασιολόγηση των υποστυλωμάτων είναι οι αξονικές και τέμνουσες δυνάμεις, η αναλογία ύψους-πλάτους υποστυλώματος, η πυραντίσταση και το πάχος κάλυψης οπλισμού με βάση πρότυπα. Για τα ψηλά κτίρια πρέπει να λαμβάνονται υπόψη επίσης και η κατανομή της θλιπτικής δύναμης ώστε να μειωθούν οι επιδράσεις συρρίκνωσης.

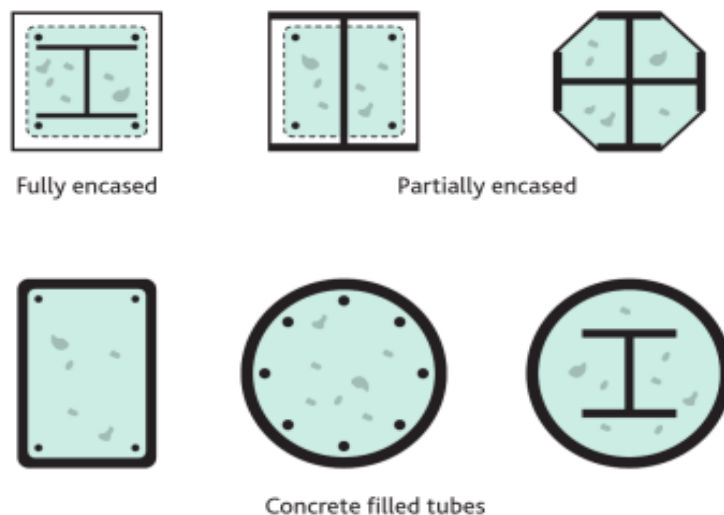
Η αλλαγή τύπου σκυροδέματος μεταξύ των στοιχείων δεν πρέπει να γίνεται απότομα, π.χ. θα υπάρξει πρόβλημα όταν μια πλάκα από σκυρόδεμα C40/50 βρίσκεται μεταξύ δύο υποστυλωμάτων από σκυρόδεμα C80/95. Όπως και το να ληφθεί υπόψη η διαφορά θερμοκρασίας που επέρχεται στα εξωτερικά υποστυλώματα λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας.

Οποιοσδήποτε αλλαγές στη διατομή των υποστυλωμάτων θα επιφέρουν επιπλέον κόστος και περισσότερο χρόνο εργασιών κατασκευής. Οι αλλαγές στη διατομή πρέπει να περιορίζονται και να επιχειρούνται το ελάχιστο κάθε 5 ορόφους. Οι αλλαγές στη διαστασιολόγηση των στοιχείων επιφέρουν επιπλέον τοπικές καμπτικές δυνάμεις, όταν οι κεντρικές γραμμές των υποστυλωμάτων αλλάζουν (δεν είναι σε σωστή διάταξη), αλλάζοντας έτσι τη γραμμή δράσης των κάθετων φορτίων. Οι αλλαγές αυτές πρέπει να λαμβάνονται υπόψη με τυπικές λεπτομέρειες στα σημεία αυτά για περισσότερη τοποθέτηση οπλισμού.

Όσον αφορά το σκυρόδεμα, είναι σύνηθες να χρησιμοποιείται για υποστυλώματα σκυρόδεμα μεγάλης θλιπτικής αντοχής μέχρι και  $80 \text{ N/mm}^2$ . Σε μερικά ψηλά κτίρια χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα μέχρι και  $120 \text{ N/mm}^2$ . Η συμπεριφορά αυτού του σκυροδέματος στη φωτιά είναι

διαφορετική, γι' αυτό πρέπει πάντοτε να επιβεβαιώνεται η πυραντίστασή του. Στις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται σκυρόδεμα μεγάλης θλιπτικής αντοχής για υποστυλώματα, χρειάζεται προσοχή για στο σχεδιασμό της πλάκας μεταξύ των υποστυλωμάτων. Δεν είναι σίγουρο ότι τα φορτία θα μεταβιβαστούν επαρκώς από τη ζώνη της πλάκας στα υποστυλώματα όταν υφίσταται μεγάλη διαφορά την αντοχή σκυροδέματος. Αυτό θα απαιτήσει περισσότερη τοποθέτηση οπλισμού σε αυτή τη ζώνη ή να χρησιμοποιηθεί σκυρόδεμα μεγαλύτερης θλιπτικής αντοχής στη ζώνη της πλάκας που γειτνιάζει με το υποστυλώμα. Η διαφορά της θλιπτικής αντοχής τους σκυροδέματος περιορίζεται με βάση τα εθνικά πρότυπα (Banks et al. 2014).

Στην κατασκευή ψηλών κτιρίων χρησιμοποιούνται επίσης και τα σύνθετα υποστυλώματα (Taranath 2012) στα οποία εγκλωβίζεται εντός του σκυροδέματος μεταλλική διατομή θερμής έλασης, η οποία προσδίδει στο υποστυλώμα αυξημένη αντοχή στα αξονικά φορτία με μειωμένο εμβαδόν διατομής του υποστυλώματος. Επίσης η μεταλλική διατομή μπορεί να είναι πλήρως καλυμμένη με σκυρόδεμα, να είναι μερικώς καλυμμένη και να φαίνεται επιφανειακά ή να δημιουργεί περίσφιγξη του στοιχείο τοποθετημένη περιμετρικά του. Η μέθοδος αυτή προτιμάται μόνο στην περίπτωση που το μέγεθος κατασκευής του υποστυλώματος από ΟΣ θεωρείται αντισυμβατικό.



Διάγραμμα 11 Σύνθετα υποστυλώματα (Banks et al. 2014)

#### **1.5.2.4 Φορτίσεις - Κάθετα φορτία και οριζόντιες δυνάμεις**

Οι θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσονται στα υποστυλώματα μπορούν να υπολογιστούν προσθέτοντας το συνολικό κάθετο φορτίο από όροφο σε όροφο και το ανάλογο εμβαδόν που λαμβάνει κάθε υποστυλώμα από την πλάκα. Ένας σωστός τρόπος ανάλυσης είναι να συγκριθούν οι τιμές που δίνει το λογισμικό πρόγραμμα με τις τιμές που υπολογίστηκαν στο χέρι, που αυτό θα προσδιορίσει και τη σωστή κατανομή μεταφοράς των φορτίων.

#### **1.5.3 Τοιχεία**

Κύριος σκοπός λειτουργίας των τοιχείων είναι να αντιστέκονται εξ' ολοκλήρου στα πλευρικά φορτία και να παραλαμβάνουν το 60% των συνολικών κάθετων φορτίων του κτιρίου. Τα τοιχεία ενός πυρήνα συνδέονται μέσω δοκών με τα χωριστά τοιχεία του κτιρίου, προσφέροντας έτσι μεγαλύτερη ακαμψία στο κτίριο.

Κατά το σχεδιασμό, οι παράγοντες που πρέπει να συνυπολογίζονται οι μηχανικοί είναι το όσο δυνατό μικρότερο μέγεθος για το τοιχείο για να υπάρχει περισσότερο ωφέλιμο εμβαδόν σε κάθε όροφο, η εύκολη σύνδεση στο δομικό σύστημα ορόφου, η ταχύτητα εργασιών με αυτοαναρριχώμενο ξυλότυπο, η αντοχή των τοιχείων και η πυραντίσταση τους. Το σκυρόδεμα είναι το ιδανικότερο υλικό για τοιχεία ψηλών κτιρίων με αντοχή στις διατμητικές και θλιπτικές δυνάμεις. Δεν είναι αναγκαία η χρήση σκυροδέματος με πολύ υψηλή θλιπτική αντοχή, εκτός αν πρόκειται για κατασκευή άνω των 300 μέτρων.

Τα τοιχεία θα πρέπει να τοποθετούνται συμμετρικά γύρω από το κέντρο μάζας του κτιρίου ως προς του δύο κύριους άξονες, μειώνοντας στο ελάχιστο τη στροφή του κτιρίου λόγω επιβολής πλευρικών φορτίων (Banks et al. 2014). Τοποθετώντας τα τοιχεία ώστε να τέμνονται ορθογώνια, αυξάνεται η συνολική ακαμψία και σταθερότητα για την παραλαβή των πλευρικών φορτίων. Για τα ψηλά κτίρια, τα κύρια τοιχεία τοποθετούνται περιμετρικά του κεντρικού πυρήνα, ωστόσο η τελική διάταξη των τοιχείων εξαρτάται και από την επιλογή του δομικού συστήματος της κατασκευής.

##### **1.5.3.1 Διαστασιολόγηση**

Παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διαστασιολόγηση είναι οι αξονικές και τέμνουσες δυνάμεις, η συνολική ακαμψία για αντίσταση στα πλευρικά φορτία και περιορισμός των μετακινήσεων που προκαλούν, αντίσταση στο λυγισμό όταν πρόκειται για πολύ ψηλά κτίρια, η πυραντίσταση και το βάθος κάλυψης οπλισμού (με βάση πρότυπα).

Κυρίως για τα ψηλά κτίρια πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η κατανομή της θλιπτικής δύναμης ώστε να μειωθούν οι επιδράσεις ερπυσμού και η ελαχιστοποίηση των περιπτώσεων αλλαγής της θέσης των τοιχείων από την αρχική καθώς η συνισταμένη οριζόντια συνιστώσα θα διαφοροποιείται.

Το μήκος των τοιχείων καθορίζεται από τα αρχιτεκτονικά σχέδια ή από παράγοντες όπως ο αριθμός των ανελκυστήρων που απαιτούνται εντός του πυρήνα. Ο μηχανικός με τη σειρά του θα πετύχει την απαραίτητη ακαμψία στο τοίχειο προσδίδοντάς του το κατάλληλο πάχος, όπου στα ψηλά κτίρια συναντώνται πάχη τοιχείων από 350 μέχρι 800 χιλιοστά.

Οι αλλαγές στο πάχος των τοιχείων θα προκαλέσει δευτερογενείς ροπές, αν το τοίχειο αποκλίνει από την κεντρική του γραμμή. Αλλάζοντας τις διαστάσεις των τοιχείων αλλά και την κεντρική γραμμή τους, τότε αλλάζει και η γραμμή δράσης των κάθετων φορτίων προκαλώντας μεγάλες ροπές κάμψης. Θα χρειαστούν τυπικές λεπτομέρειες για τον τοπικό οπλισμό των σημείων όπου θα παρατηρηθούν επιπλέον ροπές λόγω των αλλαγών μεγέθους (Smith et al 1991).

#### **1.5.3.2 Φορτίσεις - Κάθετα φορτία και οριζόντιες δυνάμεις**

Οι τάσεις που αναπτύσσονται λόγω των πλευρικών φορτίων στα τοιχεία μπορούν να υπολογιστούν με απλές μεθόδους στο χέρι και να συγκριθούν οι τιμές με αυτές που δίνει το ίδιο μοντέλο ανάλυσης με το λογισμικό πρόγραμμα.

Η όλη ανάλυση του κτιρίου έγινε για συνθήκες φόρτισης για ολόκληρο το κτίριο όταν αυτό ολοκληρωθεί αγνοώντας καταστάσεις φόρτισης κατά τη διαδικασία κατασκευής. Πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και η συμπεριφορά και δύναμη των τοιχείων από τις διαφορετικές καταστάσεις φόρτισης κατά την διαδικασία κατασκευής, αφού σε πολλές περιπτώσεις η κατασκευή των τοιχείων του πυρήνα μπορεί να βρίσκεται μέχρι και 10 ορόφους μπροστά από το υπόλοιπο δομικό σύστημα.

Οποιαδήποτε ανοίγματα ή οπές στα τοιχεία θα επηρεάσουν την ακαμψία τους. Όμως στις περιπτώσεις όπου επιβάλλονται οπές λόγω των μηχανολογικών υπηρεσιών τότε αυτές μπορούν να γίνονται κατά την κατασκευή, και στο κέντρο της επιφάνεια του τοιχείου κάθε ορόφου και όχι στα άκρα. Στις περιπτώσεις των ανοιγμάτων για τις θύρες των ανελκυστήρων, θα πρέπει να υπάρχουν συνδετικές δοκοί που να συνδέουν τα δύο μέρη του

τοιχείου και να είναι αρκετά δυνατές για να μεταφέρουν μεγάλες διατμητικές δυνάμεις (Banks et al. 2014).

## **1.6 Θεμελιώσεις**

Τα πρώτα ψηλά κτίρια κατασκευάστηκαν σε περιοχές όπως το Σικάγο και η Νέα Υόρκη, όπου οι συνθήκες εδάφους ήταν κατάλληλες για παραλαβή υψηλών κτιριακών φορτίων. Ψηλά κτίρια όμως κατασκευάζονται και σε περιοχές όπου συνθήκες εδάφους αποτελούν πρόκληση. Διάφορες λύσεις μέσω των θεμελιώσεων του κτιρίου έρχονται να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα του εδάφους από την παρουσία αδύνατων ιζημάτων. Δυνατό το παράδειγμα της Σαγκάη (Banks et al. 2014) όπου το έδαφος είναι ιζήματα από το δέλτα ποταμού και υπάρχουν πάρα πολλά ψηλά κτίρια. Ένας γεωτεχνικός μηχανικός θα είναι σύμβουλος για το σχεδιασμό των θεμελιώσεων των ψηλών κτιρίων.

Σχεδόν όλα τα ψηλά κτίρια διαθέτουν υπόγειους ορόφους, οι οποίοι σε πολλές περιπτώσεις εκτείνονται και πέραν της κάτοψης του ισογείου του κτιρίου. Ωστόσο, συχνά η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, βρίσκεται ψηλότερα από τη στάθμη του υπογείου και προκαλεί πίεση ανύψωσης. Γι' αυτό το λόγο, οι βάσεις του υπογείου πρέπει να στηριχθούν σε κεφαλοπασσάλους ή άγκιστρα και το υπόγειο θα πρέπει να αποστραγγίζεται.

Στην περίπτωση των υπόγειων ορόφων, τα περιμετρικά τοιχεία έχουν να αντισταθούν στην πίεση του νερού και του εδάφους και στηρίζονται με άγκιστρα. Για το λόγο αυτό τα πλευρικά φορτία σε αυτούς τους ορόφους, θα πρέπει να παραλαμβάνονται από τις πλάκες. Οι πλάκες θα πρέπει να είναι συνεχείς και απαιτούν μεγάλα ανοίγματα λόγω του ότι χρησιμοποιούνται αυτοί οι όροφοι ως χώροι στάθμευσης. Όμως πρέπει να βεβαιωθεί ότι η συρρίκνωση και ο ερπυσμός των πλακών δεν θα επηρεάζει τα τοιχεία.

### **1.6.1 Έρευνα εδάφους**

Για το σχεδιασμό των θεμελιώσεων θα πρέπει να γίνει μια προκαταρκτική έρευνα για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του εδάφους με τη διεξαγωγή ερευνών στο πεδίο. Χρησιμοποιώντας εμπειρικές μεθόδους αλλά τίθενται περιορισμοί αφού περιορίζονται τώρα κτίζονται ψηλότερα και βαρύτερα κτίρια από αυτά που υπήρχαν κατά την εκπόνηση των ιστορικών εμπειρικών μεθόδων.



Χωρίς έρευνα στο πεδίο, γίνεται μια πολύ συντηρητική μελέτη. Ο μηχανικός πρέπει να προσδιορίσει τη γεωλογία της περιοχής για αδύνατα και προβληματικά στρώματα εδάφους ή εδάφη με επικινδυνότητα για κατολισθήσεις και άλλα. Πρέπει να λάβει δείγματα εδάφους με γεωτρήσεις για έλεγχο των στρωμάτων εδάφους που υπάρχουν. Η λήψη του δείγματος θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτική με όλα τα υλικά που υπάρχουν στο έδαφος (κατά τις γεωτρήσεις σημαντικό ποσοστό χάνεται). Σωστότερη θα ήταν η λήψη πυρήνων εδάφους αντί η αυθαίρετη δειγματοληψία, γιατί είναι σωστότερος οπ προσδιορισμός της συνεκτικότητας του εδάφους. Με τη λήψη των εργαστηριακών αποτελεσμάτων από τους ελέγχους, θα πρέπει να γίνεται και ένας επιτόπου έλεγχος στο πεδίο για σύγκρισή των αποτελεσμάτων. Σε αδύνατα εδάφη, οι κεφαλοπάσσαλοι μπορούν να φτάσουν μέχρι και 100 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της γης (Sarkisian 2012).

Πρέπει να γίνεται σωστός προσδιορισμός της στάθμης του νερού και αυτό να ελεγχτεί την κατάλληλη εποχή όπου η στάθμη του νερού ανέρχεται στα ψηλότερα της επίπεδα. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη και η διαπερατότητα των στρωμάτων του εδάφους για τον έλεγχο της αποστράγγισης του υπογείου κατά την κατασκευή του υπογείου αλλά και κατά τη λειτουργία.

### **1.6.2 Αλληλεπίδραση εδάφους**

Τα ψηλά κτίρια προσομοιάζουν ως κάθετοι πρόβολοι πακτωμένοι στη βάση τους, στο έδαφος. Οποιαδήποτε αδυναμία του εδάφους θα ήταν επιζήμια για την όλη κατασκευή. Για το λόγο αυτό το κτίριο θα πρέπει να εδραιώνεται σε ισχυρές θεμελιώσεις ή πασσαλώσεις, όπου αυτό επιβάλλεται.

Η αλληλεπίδραση του εδάφους θα έχει επιρροή στην κατανομή των φορτίων στο έδαφος και τις τάσεις που αναπτύσσονται στην κατασκευή, στο σχεδιασμό των θεμελιώσεων, στην καθίζηση του εδάφους και στη δυναμική συμπεριφορά του κτιρίου.

Η διατμητική αστοχία του εδάφους μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολική παραμόρφωση του κτιρίου ακόμη και κατάρρευση. Η υπερβολική καθίζηση εδάφους μπορεί να οδηγήσει σε δομικές ζημιές και ρωγμές αλλά και υπερβολική φθορά ή βλάβη του εξοπλισμού από την κακή ευθυγράμμιση που θα προκύψει. Είναι αναγκαίο να διερευνηθεί η τελική φέρουσα ικανότητα και η καθίζηση για κάθε στρώση (Banks et al. 2014).

Τα θεμέλια των ψηλών κτιρίων μεταφέρουν όπως είναι αναμενόμενο, πολύ μεγάλα φορτία. Πολύ συχνά προτιμάται η λύση των πασσαλώσεων που μεταφέρουν τα φορτία σε μια επαρκή στρώση. Εν τούτοις, με ένα σωστό προσδιορισμό της συμπεριφοράς του εδάφους και των πετρωμάτων, ο μηχανικός μπορεί να έχει αρκετές επιλογές για ένα ασφαλές και οικονομικό σύστημα θεμελιώσεων. Όταν πρόκειται για συμπαγές έδαφος, χρησιμοποιούνται πέδιλα ή πασσαλώσεις ή συνδυασμός και των δύο.

### **1.6.3 Πέδιλα**

Τα πέδιλα χρησιμοποιούνται κατά κόρον όταν πρόκειται για ψηλά κτίρια. Το πάχος του πέδιλου διαφοροποιείται αναλόγως, για αντίσταση στη διάτρηση του θεμελίου από τα υποστυλώματα λόγω μεγάλων φορτίων.

Όταν προσδιοριστεί η αλληλεπίδραση του εδάφους και του πέδιλου, το πρόβλημα των θεμελιώσεων αναλύεται με τη μέθοδο των ελατηρίων σε όλη την επιφάνεια του πέδιλου. Η κάτοψη του πέδιλου χωρίζεται σε ζώνες με τα ισοδύναμα φορτία. Εναλλακτικός τρόπος ανάλυσης είναι με τη χρήση λογισμικού προγράμματος δισδιάστατης μοντελοποίησης, με δομοστατικό πρόγραμμα για ελατήρια εδάφους και γεωτεχνικό λογισμικό για τις καθιζήσεις στις περιοχές φόρτισης.

### **1.6.4 Πασσαλώσεις**

Για τα ψηλά κτίρια χρησιμοποιούνται είτε μονοί είτε ομάδα πασσάλων. Οι μεμονωμένοι πάσσαλοι συγκρατούνται από την τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ της επιφάνεια του και του εδάφους και από την αντοχή του εδάφους που βρίσκεται κάτω από τη βάση του (Sarkisian 2012). Στις ομάδες πασσάλων, οι πάσσαλοι περικλείουν μεγάλο όγκο εδάφους και λειτουργούν σε συνδυασμό. Όπως και στο πέδιλο, έτσι και εδώ η ομάδα πασσάλων θα συγκρατηθεί από μία επαρκή στρώση εδάφους.

Η χρήση πέδιλου υποβοηθούμενο από πασσάλους περιορίζει σημαντικά το βαθμό καθίζησης και τοποθετείται κάτω από υποστυλώματα που μεταφέρουν πολύ μεγάλο φορτίο. Η ανάλυση αυτή γίνεται σε τρεις πτυχές, μεταφορά των φορτίων της κατασκευής στο πέδιλο, από εκεί στους πασσάλους και από εκεί στο έδαφος. Αυτός ο συνδυασμός αποτελεί μια οικονομική λύση για τις θεμελιώσεις.

### **1.6.5 Κατασκευή Υπογείου**

Τα πλείστα από τα ψηλά κτίρια διαθέτουν υπόγειο. Πολλά από τα κτίρια διαθέτουν πέραν τους ενός υπόγειου ορόφου. Τα βασικά μέτρα που πρέπει να παρθούν για την κατασκευή υπογείου είναι, αρχικά η συγκράτηση των εδαφών περιμετρικά μετά από την εκσκαφή αλλά και μετά την κατασκευή. Επίσης να επιβεβαιωθεί ότι η εκσκαφή δεν θα δημιουργήσει πρόβλημα σε γειτονικές κατασκευές ή υποδομές, ενώ θα πρέπει να ελέγχεται η εισροή του υπόγειου νερού καθώς και η πίεση που προκαλεί κατά την κατασκευή και να ληφθούν πρόνοιες για υδατοστεγή υποδομή (Sarkisian 2012, Banks et al. 2014). Επίσης η υπόγεια δομή θα πρέπει να έχει αντοχή στην πίεση του υπόγειου νερού ή να γίνεται αποστράγγισή του καθώς και να φέρει αντίσταση σε μακροχρόνια ανύψωση που προκαλείται από το έδαφος

Οι πλάκες του υπογείου πρέπει να είναι συνεχείς και να αντιστέκονται στα πλευρικά φορτία από το έδαφος και την πίεση του νερού. Επίσης η συστολή και ο ερπυσμός της πλάκας κινεί τα περιμετρικά τοιχεία του υπογείου προς τα μέσα. Σημαντική είναι η κατασκευή ζωνών μετάβασης στο πέδιλο και την πλάκα για αποφυγή των τοπικών ρηγματώσεων.

## **1.7 Οικοδόμηση**

Η συνεχής συνεργασία μεταξύ κατασκευαστή και μελετητικής ομάδας θα δώσει την βέλτιστη αλληλουχία κατά την κατασκευή που θα αναπτυχθεί από όλα τα μέλη της ομάδας. Μερικοί από τους κύριους στόχους του κατασκευαστή είναι η ασφάλεια και υγεία των εργατών και του κοινού, η χρησιμοποίηση γερανών, εσωτερικοί χώροι φύλαξης και αποθήκευσης υλικοτεχνικού εξοπλισμού, εύκολη μετακίνηση υλικών και προσωπικού καθώς και η τυποποίηση των δομικών μελών για επαναλαμβανόμενη χρήση των ξυλοτύπων.

### **1.7.1 Κατασκευή πυρήνα**

Το σύστημα ξυλοτύπων για την κατασκευή του πυρήνα εξαρτάται από τον τύπο γερανού και τον υλικοτεχνικό εξοπλισμό. Αν ο γερανός θα στηριχθεί στον πυρήνα τότε και τα δύο θα προχωρούν μαζί, διαφορετικά αν ο γερανός στηριχθεί στις πλάκες τότε η πρόοδος του πυρήνα και γερανού θα βασίζονται στην πρόοδο κατασκευής των πλακών. Θα πρέπει να εξεταστεί από την αρχή κατά πόσο ύψος ψηλότερα θα βρίσκεται η κατασκευή του πυρήνα από αυτή των προηγούμενων ορόφων. Επίσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό του συστήματος θεμελιώσεων αφού θα προκληθούν διαφορετικές συνθήκες φόρτισης όταν η

κατασκευή του πυρήνα προπορεύεται της κατασκευής του υπόλοιπου κτιρίου (Banks et al. 2014).

Η τυποποίηση των εργασιών θα προσδώσει επανάληψη των εργασιών σε κάθε όροφο, ποιότητα και αποδοτική παραγωγή. Απαραίτητη είναι η παρουσία ειδικού στις κατασκευαστικές λεπτομέρειες του οπλισμού του πυρήνα. Η χρησιμοποίηση προκατασκευασμένων μελών θα επισπεύσει το χρονικό κύκλο κάθε ορόφου.

Τα προκατασκευασμένα επιφέρουν οφέλη ως προς το χρόνο άρα και μείωση κόστους αλλά αποφεύγεται και το ρίσκο ύπαρξης δυσμενών καιρικών συνθηκών κατά την ημέρα της σκυροδέτησης στο εργοτάξιο. Ευκολότερο θα ήταν η προκατασκευή των μανδύων οπλισμού και η μεταφορά τους με γερανό αφού γίνουν προπαραγγελία και να κατασκευαστούν εκτός εργοταξίου.

Όσον αφορά τα υποστυλώματα, θα πρέπει να αποφεύγεται η μείωση του εμβαδού διατομής τους για να χρησιμοποιούνται συνεχώς οι ίδιοι ξυλότυποι σε όλους τους ορόφους. Εναλλακτικές λύσεις της μείωσης της διατομής είναι η διατήρηση του εμβαδού διατομής μειώνοντας τον οπλισμό ή την αντοχή σκυροδέματος. Στα τοιχεία, το πάχος θα πρέπει να παραμένει το ίδιο καθ' όλο το ύψος.

### **1.7.2 Κατασκευή πλακών**

Η έγχυση σκυροδέματος στο εργοτάξιο κατά την κατασκευή είναι συνήθης για ψηλά κτίρια. Ωστόσο υπάρχουν και οι προκατασκευασμένες πλάκες με όλα τα οφέλη που έχουμε προαναφέρει, όμως θα πρέπει να συνυπολογίζεται και ο απαιτούμενος χρόνος και κόστος για τη μεταφορά τους με γερανό. Το πάχος της πλάκας θα πρέπει να είναι το ελάχιστον δυνατό για τη εξοικονομούνται υλικά, χρήματα αλλά και να μειώνεται το βάρος.

Για την κατασκευή πλακών υπάρχει το οπλισμένο σκυρόδεμα και το προεντεταμένο σκυρόδεμα. Για προεντεταμένο σκυρόδεμα είναι αναγκαία η ύπαρξη προσωρινών αρμών για έλεγχο της προέντασης, αλλά και ο ερπυσμός πλάκας μπορεί να προκαλέσει ρηγματώσεις στα ακρινά υποστυλώματα. Αυτή η μέθοδος προτιμάται από τους εργολάβους αφού μειώνεται ο χρόνος χρήσης των κριωμάτων αλλά και η ποσότητα οπλισμού στις πλάκες. Για την τελική επιλογή τύπου όπλισης και σκυροδέτησης των μελών, σημαντικό ρόλο θα παίξει η ανάλυση κόστους και ο χρόνος.

### **1.7.3 Μεταφορά σκυροδέματος**

Η σκυροδέτηση του πυρήνα γίνεται από αυτοανυψώμενη αντλία χρησιμοποιώντας σκυρόδεμα υψηλής αντοχής (C50/60) και ταχύπηκτο σκυρόδεμα. Για τις πλάκες χρησιμοποιείται στατική αντλία στηριζόμενη στον πυρήνα. Επίσης θετικό θα ήταν η χρησιμοποίηση συστημάτων παρακολούθησης της θερμοκρασίας της πλάκας για αφαίρεση του ξυλοτύπου το συντομότερο και όχι πέραν των 4 ημερών (Banks et al. 2014). Επίσης η χρήση ελαφριών αδρανών στο σκυρόδεμα θα είναι προβληματική όταν πρόκειται για αντλήσεις μεγάλων αποστάσεων. Όλα τα πιο πάνω θα πρέπει να καθορίζονται εξ'αρχής μεταξύ μηχανικών, εργολάβου και προμηθευτή σκυροδέματος.

## **1.8 Φορτία**

Τα επικρατέστερα φορτία που ασκούνται πάνω στα ψηλά κτίρια είναι τα οριζόντια πλευρικά φορτία λόγω ανέμου και σεισμού. Ο σωστός προσδιορισμός αυτών των φορτίων θα ληφθεί υπόψη στην επιλογή του κατάλληλου πλαισιακού δομικού συστήματος αλλά και του κατάλληλου μεγέθους των δομικών στοιχείων του κτιρίου.

Τα κάθετα στοιχεία, υποστυλώματα και τοιχεία, σχεδιάστηκαν για να παραλαμβάνουν τον δυσμενέστερο συνδυασμό φορτίων βαρύτητας και πλευρικών φορτίων. Αρκετά μεγάλα φορτία βαρύτητας λόγω των πολλών ορόφων και αρκετά μεγάλα πλευρικά φορτία αφού το κτίριο λειτουργεί ως κάθετη δοκός ενάντια στον άνεμο και το σεισμό.

Στα αρχικά στάδια μελέτης, οι μηχανικοί από την εμπειρία τους και με ένα προκαταρκτικό υπολογισμό των φορτίων, θα προσδιορίσουν το μέγεθος και την διάταξη των μελών του δομικού συστήματος του κτιρίου μαζί με τους αρχιτέκτονες. Οι μελετητές και σχεδιαστές θα πρέπει να συνυπολογίσουν όλα τα μόνιμα και επιβαλλόμενα φορτία της κατασκευής, ακόμα και αυτά από παραμορφώσεις ή θερμοκρασιακές επιδράσεις (Smith et al. 1991).

### **1.8.1 Φορτία βαρύτητας**

Τα φορτία βαρύτητας διακρίνονται σε στατικά και δυναμικά. Τα στατικά φορτία παραμένουν σταθερά καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της κατασκευής. Τα δυναμικά φορτία είναι μεταβλητά στο χρόνο και μπορούν να πάρουν διάφορες αυξομειώσεις και χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της δυναμικής συμπεριφοράς του κτιρίου. Τα στατικά φορτία αποτελούνται από τα μόνιμα φορτία που είναι το (ίδιο βάρος των μελών της κατασκευής και από τα μεταβλητά

φορτία που προκαλούνται από τη χρήση του κτιρίου και αποτελούν κυρίως το βάρος μετακινούμενων αντικειμένων. Το βάρος χιονιού δεν είναι βαρυσήμαντο για τα ψηλά κτίρια, λόγω της μικρής έκτασης της οροφής του κτιρίου, αλλά λαμβάνεται υπόψη για τις περιπτώσεις προεξεχουσών πλακών των ορόφων.

### **1.8.2 Φορτία ανέμου**

Στον αρχικό υπολογισμό των φορτίων ανέμου λαμβάνονται τιμές από τους τοπικούς κώδικες. Για περαιτέρω ανάλυση και όταν το έργο παρουσιάζει κάποιες ιδιαιτερότητες γίνεται η δοκιμή αεροδυναμικής σήραγγας (wind tunnel test). Τα κάθετα στοιχεία αποδίδουν και στην αντοχή της κατασκευής να αντιστέκεται σε δυνάμεις ανατροπής στη βάση. Το βάρος και η συνάφεια των ψηλών κατασκευών από σκυρόδεμα θωρακίζει το κτίριο με μεγάλο βαθμό απόσβεσης, εξασθενώντας τις ταλαντώσεις από τα πλευρικά φορτία (Taranath 2012).

### **1.8.3 Σεισμικά φορτία**

Κατά το σεισμό το κτίριο δέχεται δυνάμεις στην οριζόντια και κάθετη κατεύθυνση. Αυτό που επηρεάζει περισσότερο το κτίριο είναι τα οριζόντια φορτία τα οποία εκλαμβάνονται ως ισοδύναμες στατικές διατμητικές δυνάμεις, ενώ για ψηλότερα κτίρια εκλαμβάνονται ως φάσμα απόκρισης.

### **1.8.4 Μόνιμα και Μεταβλητά φορτία**

Τα μόνιμα φορτία μπορούν να υπολογιστούν με μεγάλη ακρίβεια κατά το στάδιο του σχεδιασμού. Αποτελούν το ίδιο βάρος των δομικών μελών του κτιρίου και τον υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του. Το βάρος των δομικών μελών δίνεται από τον όγκο του τρισδιάστατου μεγέθους και την πυκνότητα του υλικού. Στα μόνιμα φορτία περιλαμβάνονται και τα τελειώματα του κτιρίου, επενδύσεις και εντοιχισμένες υπηρεσίες. Οι σχεδιαστές συνυπολογίζουν μια μικρή αύξηση στα φορτία αυτά για λόγους ασφαλείας.

Ο προσδιορισμός των μεταβλητών φορτίων δεν είναι γενικός για όλους τους ορόφους, αφού εξαρτάται από το ελεύθερο εμβαδόν και χρήση κάθε ορόφου (όροφος υπηρεσιών ή στάθμευσης). Οι μελετητές θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη του τα μεταβλητά φορτία από κώδικες και οδηγούς ανάλογα με τη χρήση του κτιρίου.

### **1.8.5 Συνδυασμοί φορτίσεων**

Οι κατασκευές υποβάλλονται στα βαρυτικά φορτία που δρουν προς τα κάτω και τα πλευρικά φορτία που δρουν σε διάφορες οριζόντιες κατευθύνσεις. Πρέπει να εξετάζονται όλοι οι συνδυασμοί των δυσμενέστερων περιπτώσεων φόρτισης. Με βάση το συνδυασμό για την τελική οριακή κατάσταση, η τελική σχεδιαστική αντοχή θα πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίστηκε από τη δυσμενέστερη φόρτιση.

Από την εμπειρία των μηχανικών θα προκύψουν πολλοί συνδυασμοί φορτίσεων με διάφορους συντελεστές φόρτισης. Ωστόσο όλοι οι συνδυασμοί πρέπει να ελέγχονται στο στάδιο του λεπτομερούς σχεδιασμού μέσα από ανάλυση. Ο κρίσιμος συνδυασμός φορτίσεων για τα ψηλά κτίρια βασίζεται στο πλαίσιο του κτιρίου και τα χαρακτηριστικά των μελών. Όταν ένα στοιχείο βρίσκεται σε δυσμενή συνδυασμό δεν σημαίνει απαραίτητα ότι βρίσκεται και ένα άλλο στοιχείο. Για τα πολύ ψηλά και λεπτά κτίρια (Sarkisian 2012), η δοκιμή αεροδυναμικής σήραγγας (wind tunnel test), θα δώσει και τους κατάλληλους συντελεστές φόρτισης για να χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς.

### **1.8.6 Φορτία κατά την κατασκευή**

Σε πολλές περιπτώσεις τα φορτία κατά την κατασκευή ξεπερνούν τα φορτία κατά τη λειτουργία του κτιρίου, κυρίως το ισόγειο και το υπόγειο που χρησιμοποιούνται ως χώροι φύλαξης υλικών και μηχανημάτων κατά την κατασκευή.

Η επίδοση μεγαλύτερης αντοχής για την επίδοση επιβολής μεγαλύτερου μεταβλητού φορτίου επιτρέπει την ταχύτερη αφαίρεση των κριωμάτων στήριξης απελευθερώνοντας χώρο για περαιτέρω εργασίες και επιδιώκοντας την αποπεράτωση του κύκλου κατασκευής ενός ορόφου στις 4 μέρες. Μία φρεσκοκατασκευασμένη πλάκα ενός ορόφου δεν έχει την δύναμη να στηρίξει το βάρος του ξυλότυπου και των στηρίξεων του και του νωπού σκυροδέματος του άνωθεν ορόφου. Πρέπει να οριστεί εξαρχής η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί για μετριασμό του ρίσκου καταστροφής της πλάκας. Ακόμη και στη κατασκευή του πυρήνα που προπορεύεται των ορόφων πρέπει να γίνει σωστός προσδιορισμός των προσωρινών φορτίσεων που μπορεί να αλλάξουν τον σχεδιασμό των μελών.

Η προσωρινή τοποθέτηση του γερανού στην κατασκευή επηρεάζει τον σχεδιασμό διάφορων στοιχείων της κατασκευής. Ο γερανός φέρει αρκετά μεγάλα φορτία κατά την λειτουργία του. Αρχικά στηρίζεται σε πασσαλώσεις στο χώρο του υπογείου και αργότερα στερεώνεται στον

πυρήνα ή στις πλάκες. Ο εργολάβος, ο ειδικός επαγγελματίας για το γερανό καθώς και η μελετητική ομάδα θα πρέπει από τα αρχικά στάδια σχεδιασμού να καθορίσουν τους παράγοντες για την τοποθέτηση του γερανού και τη μεθοδολογία κατασκευής, για να μην γίνονται μετέπειτα αλλαγές στο σχεδιασμό (Banks et al. 2014).



Διάγραμμα 12 Χρήση γερανών (Burj Khalifa Tower) (Nikolova 2012)

### **1.8.7 Τυχηματικά φορτία και δυσανάλογη κατάρρευση**

Οι κώδικες απαιτούν την εκτίμηση των ρίσκων στην περίπτωση τυχηματικής καταστροφής κατά το σχεδιασμό του έργου. Κύριος στόχος είναι η αποφυγή απώλειας ανθρώπινων ζωών. Η όλη κατασκευή πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να παραμένει σταθερή με την καταστροφή ή μετακίνηση οποιουδήποτε δομικού στοιχείου από ατύχημα. Κάθε κύριο δομικό στοιχείο πρέπει να σχεδιάζεται ώστε να διασφαλίζεται η σταθερότητά του σε περίπτωση ατυχήματος.

#### **1.8.7.1 Στατική ανάλυση δομοστατικού μοντέλου**

Απαραίτητη είναι η στατική ανάλυση του μοντέλου του κτιρίου, με την αφαίρεση ενός κύριου δομικού στοιχείου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται συντελεστής δυναμικής μεγέθυνσης των φορτίων στους υπολογισμούς. Ένα κύριο δομικό στοιχείο σχεδιάζεται ώστε να αντέχει στις ψηλές φορτίσεις λόγω τυχηματικών φορτίων. Σε διαφορετική περίπτωση, η καταστροφή ενός κύριου στοιχείου θα επιφέρει κατάρρευση της κατασκευής ή μέρους της.

### **1.8.8 Θερμοκρασιακά φορτία**

Τα θερμοκρασιακά φορτία παρουσιάζονται στα στοιχεία που βρίσκονται περιμετρικά του κτιρίου, και παρατηρείται μεταβολή της θερμοκρασίας, ημερήσια ή εποχιακά. Ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή που βρίσκεται το κτίριο αλλά και τη έκθεση των στοιχείων σε



θερμοκρασίες μπορεί μέσω των θερμοκρασιακών φορτίων να επιφέρει στη χειρότερη περίπτωση τάσεις και ροπές στα στοιχεία. Δημιουργούνται ρηγματώσεις λόγω των επιπλέον τάσεων που αναπτύσσονται από τα θερμοκρασιακά φορτία (Banks et al. 2014).

Η όλη κατασκευή πρέπει να σχεδιάζεται ώστε τα μέλη να αντιστέκονται σε αυτού του είδους φορτία, αποφεύγοντας τη συστολή και διαστολή των αρθρώσεων/κόμβων των μελών, σε ένα θερμικά ελεγχόμενο περιβάλλον. Αν αυτό δεν είναι εφικτό, τότε πρέπει να γίνει προσδιορισμός των τάσεων λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμική συμπεριφορά της ακαμψίας των υλικών.

## **1.9 Δυναμική κτιρίου**

Κύριο στοιχείο για τον τελικό σχεδιασμό του κτιρίου είναι η τελική αντοχή ορίου λειτουργικότητας του κτιρίου. Τα δομικά στοιχεία σχεδιάζονται για να παραλαμβάνουν τα πλευρικά φορτία, προσφέροντας λειτουργικότητα στο κτίριο. Οι σύγχρονες τεχνικές και η χρήση νέων υλικών βοηθούν στην κατασκευή πιο ελαστικών κτιρίων όπως και στην περίπτωση των ψηλών κτιρίων.

Τα φορτία ανέμου είναι συχνότερα από αυτά του σεισμού και λαμβάνονται κατά πολύ υπόψη στα όρια λειτουργικότητας και αστοχίας. Ο μελετητής πρέπει να προσδιορίσει τη συμπεριφορά του εκάστοτε κτιρίου. Τα ψηλά κτίρια λειτουργούν ως κάθετοι πρόβολοι, και δεχόμενοι πλευρικά φορτία κινούνται στην κατεύθυνση αυτών των φορτίων. Λόγω του ότι τα πλευρικά φορτία δεν είναι στατικά, το κτίριο μπαίνει σε ένα κύκλο ταλαντώσεων. Τα πλευρικά φορτία έχουν διάφορες εντάσεις και διάρκειες. Είτε τα φορτία αυτά είναι μεμονωμένα είτε συνεχή ή επαναλαμβανόμενα και πρέπει να προσδιοριστεί η κίνηση του κτιρίου κατά το στάδιο του σχεδιασμού. Σημαντικό ρόλο σε αυτό έχουν το δομικό σύστημα και το βάρος του κτιρίου, η κατεύθυνση και η ένταση της δύναμης των φορτίων, το ύψος του κτιρίου και οι θεμελιώσεις του.

Το έγχυτο οπλισμένο σκυρόδεμα στα ψηλά κτίρια προσδίδει ένα σημαντικό βαθμό φυσικής απόσβεσης στην κατασκευή, δίνοντας την ικανότητα στο κτίριο να αποσβέσει την ενέργεια. Η φυσική απόσβεση παίζει σημαντικό ρόλο στην συμπεριφορά και απόκριση του κτιρίου. Η απόσβεση εκφράζει ένα ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης, για την οποία η κίνηση του κτιρίου επανέρχεται σε ηρεμία έπειτα από μία ταλάντωση (Banks et al. 2014).

Στα αρχικά στάδια της μελέτης πρέπει να γίνει ένα απλοποιημένο μοντέλο ανάλυσης του κτιρίου για προσδιορισμό των συχνοτήτων και της τυπικής απόκρισής του, μέσα από υπολογισμούς στο χέρι μέχρι και τρισδιάστατα μοντέλα ανάλυσης. Σε πολλές περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται βοηθητικοί μηχανισμοί απόσβεσης (αποσβεστήρες), για να εξυπηρετήσουν το όριο λειτουργικότητας της κατασκευής. Αυτό όμως εξαρτάται από το δομικό σύστημα του κτιρίου, το διαθέσιμο προϋπολογισμό και τη λειτουργικότητα που θα προσφέρουν στους ενοίκους.

### **1.9.1 Απόσβεση**

Τα ψηλά κτίρια από έγχυτο οπλισμένο σκυρόδεμα έχουν μεγαλύτερο βαθμό φυσικής απόσβεσης σε σύγκριση με κτίρια κατασκευασμένα από χάλυβα ή σύμμεικτες κατασκευές. Η απόσβεση παίζει σημαντικό ρόλο στη δυναμική απόκριση του κτιρίου και είναι το κριτήριο που περιορίζει τις μεγάλες μετακινήσεις του κτιρίου λόγω των δυναμικών φορτίων. Παράγοντες που συνεισφέρουν στη φυσική απόσβεση της κατασκευής είναι η απόσβεση που προσφέρουν τα υλικά στα μεγάλα στοιχεία από σκυρόδεμα προσδίδοντάς τους ελαστική παραμόρφωση, η μηχανική απόσβεση που προσφέρεται λόγω της ανελαστικής παραμόρφωσης από τη ρηγμάτωση των συνδετικών δοκών, η απόσβεση που προσφέρεται από μη δομικά μέλη του κτιρίου όπως η εξωτερική επένδυση και τα εσωτερικά διαχωριστικά τοιχεία. Ακόμη και μια πιθανή αεροδυναμική απόσβεση από την αλληλεπίδραση του ανέμου, που όμως σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να είναι αρνητική (Smith et al. 1991, Banks et al. 2014).

Για να μειωθεί η επιτάχυνση της ταλάντωσης του κτιρίου όταν σε αυτό ασκούνται δυναμικά πλευρικά φορτία, θα πρέπει να αυξηθεί η ακαμψία του κτιρίου, αλλάζοντας την αεροδυναμική του, ακόμη και το σχήμα του. Για αυτό απαιτείται από τα αρχικά στάδια η συνεργασία των αρχιτεκτόνων με τους μελετητές μηχανικούς. Ιστορικές και σύγχρονες μελέτες κατέδειξαν ότι ο βαθμός απόσβεσης μπορεί να ποικίλει στα ψηλά κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η απόσβεση μειώνεται με την αύξηση του ύψους.

#### **1.9.1.1 Φυσική απόσβεση κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα**

Τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα έχουν μεγαλύτερη φυσική απόσβεση από τα κτίρια από χάλυβα, αφού οι ρηγματώσεις στο σκυρόδεμα απορροφούν ενέργεια. Οι μεγάλοι πλάτους μετακινήσεις δημιουργούν περισσότερες ρηγματώσεις, άρα περισσότερη ενέργεια απορροφάται, άρα μεγαλώνει και ο βαθμός φυσικής απόσβεσης.

Εξετάζοντας το όριο λειτουργικότητας, χρησιμοποιούνται διάφορες τιμές απόσβεσης, ενώ οι μελέτες βασίζονται στα συχνά φαινόμενα φορτίων ανέμου με μικρή περίοδο επαναφοράς (Smith et al. 1991). Ωστόσο για το όριο αστοχίας όπου υπάρχουν ρηγματώσεις στην κατασκευή, βασίζονται στα ακραία φαινόμενα φορτίων ανέμου με μεγάλη περίοδο επαναφοράς.

Οι μηχανικοί προσπαθούν να αποδίδουν με ευαισθησία την κατάλληλη τιμή απόσβεσης. Όπως συνηθίζεται, χρησιμοποιούνται τιμές απόσβεσης μεταξύ 2 και 5 % της κρίσιμης απόσβεσης. Η τιμή της απόσβεσης εξαρτάται από το δομικό σύστημα του κτιρίου, τον τύπο θεμελιώσεων και τις συνθήκες του εδάφους, ενώ μειώνεται όσο αυξάνεται το ύψος του κτιρίου. Στα πρώτα στάδια, οι μελετητές συνήθως χρησιμοποιούν για την τιμή απόσβεσης τιμές 1-1.5% για γεγονότα με μικρή επαναφορά, ενώ για γεγονότα με μεγάλη επαναφορά χρησιμοποιούν 2-2.5% της κρίσιμης απόσβεσης (Banks et al. 2014) . Επιλέγεται η τιμή απόσβεσης βασιζόμενοι στη διατμητική παραμόρφωση, την κάμψη του προβόλου ή συνδυασμό των δύο. Αυτές οι τιμές χρησιμοποιούνται ως καθοδήγηση.

Οι εξωτερικοί μηχανισμοί απόσβεσης ενισχύουν το βαθμό απόσβεσης της κατασκευής, όμως δεν αποτελούν την πρώτη επιλογή όταν πρόκειται να περιορίσουν την κίνηση του κτιρίου. Παρόλα αυτά χρησιμοποιούνται πάρα πολύ για τα ψηλά κτίρια, ανταποκρινόμενοι στη λειτουργικότητα του κτιρίου. Ενεργητικό σύστημα αποσβεστήρων λειτουργούν όπου απαιτείται έλεγχος της σεισμικής απόκρισης του κτιρίου. Παθητικό σύστημα αποσβεστήρων τοποθετούνται στην επιβολή φορτίων ανέμου μειώνοντας την απόκριση. Μειώνουν τη δυναμική απόκριση του κτιρίου και τις αδρανειακές δυνάμεις. Ωστόσο απαιτούν κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Οι αποσβεστήρες θα πρέπει να έχουν αρκετή μάζα για να αντιστέκονται στη κίνηση του κτιρίου, γύρω στο 1% της μάζας του κτιρίου έκαστος και πρέπει να τοποθετούνται και τροποποιούνται κατά το στάδιο της κατασκευής.

### **1.9.2 Κριτήρια άνεσης ενοίκων**

Η λειτουργικότητα των ψηλών κτιρίων σχετίζεται με το γεγονός της αντίληψης των ενοίκων στην πλευρική μετακίνηση του κτιρίου. Η φυσική ιδιοπερίοδος ταλάντωσης των κτιρίων μπορεί να υπολογιστεί μέσα από εμπειρικούς κανόνες που την ορίζουν ίση με το «ύψος του κτιρίου» /46 ή με τον «αριθμό των ορόφων»/10 (Banks et al. 2014).

Το μοντέλο ανάλυσης θα αφορά μόνο τα μέλη που αντιστέκονται στα πλευρικά φορτία και δεν πρέπει να είναι περίπλοκο, δίνοντας προσοχή στην ακαμψία των αρθρώσεων, στις

ρηγματώσεις, την παραμόρφωση P-Δ, την ακαμψία των θεμελιώσεων αλλά και την ολική μάζα του κτιρίου.

Ωστόσο υπάρχει μεγάλη μεταβλητότητα στην ακαμψία των κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα, λόγω του ότι το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος αλλάζει με την πάροδο του χρόνου και δεν μπορεί εύκολα να υπολογιστεί το μέγεθος ρηγμάτωσης στα μέλη με την εναλλαγή των φορτίσεων και την επίδραση του ερπυσμού και της συρρίκνωσης. Με υποεκτίμηση της ακαμψίας του κτιρίου γίνεται συντηρητική εκτίμηση των δυναμικών φορτίων του ανέμου.

### **1.9.3 Αντίληψη των ενοίκων**

Τα φυσικά και ψυχολογικά χαρακτηριστικά των ατόμων επηρεάζουν την αντίληψη και ευαισθησία τους στις κινήσεις και δονήσεις του κτιρίου, καθώς και στο πως αντιλαμβάνονται το φόβο κινδύνου ή τραυματισμού. Σημαντικό ρόλο παίζουν και οι ενέργειες των ατόμων κατά τη κίνηση του κτιρίου, όπως το αν είναι όρθιοι, κάθονται ή ξαπλώνουν. Οι επιταχύνσεις και μετακινήσεις του κτιρίου πρέπει να περιορίζονται σε βαθμό ώστε να μην θεωρούνται μη άνετες για τους ενοίκους. Στη Β. Αμερική χρησιμοποιούνται ως όρια κίνησης του κτιρίου για κατοίκηση 10-15 εκατομμυριοστά της επιτάχυνσης της γης, ενώ για γραφεία 20-30 εκατομμυριοστά (Banks et al. 2014).

### **1.9.4 Επιταχύνσεις κτιρίου**

Τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα έχουν μεγάλη μάζα, μεγάλη ακαμψία και πρόνοιες για απόσβεση μειώνοντας τις κινήσεις του κτιρίου. Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στα πολύ ψηλά και λεπτά κτίρια. Η δοκιμή αεροδυναμικής σήραγγας θα δώσει τα ακριβέστερα αποτελέσματα όσον αφορά την επιτάχυνση του κτιρίου λαμβάνοντας υπόψη την αεροδυναμική του κτιρίου, δηλαδή τη δυναμική του απόκριση και την αλληλεπίδρασή του στον άνεμο.

#### **1.9.4.1 Κριτήρια περιορισμού ταλάντωσης**

Αν κατά τους αρχικούς υπολογισμούς προκύψει ότι οι επιταχύνσεις που προκαλούνται από πλευρικά φορτία είναι μεγαλύτερες των επιτρεπόμενων, τότε οι μελετητές θα πρέπει να εφαρμόσουν κάποιες επιλογές για μείωση των επιταχύνσεων. Μια εξ αυτών των επιλογών είναι να αυξηθεί η ακαμψία των μελών που παραλαμβάνουν τα πλευρικά φορτία. Επίσης η αύξηση της ολικής μάζας του κτιρίου, η οποία πρέπει να συνυπολογιστεί με την ολική

ακαμψία του κτιρίου, η οποία μπορεί να αλλάξει ως αποτέλεσμα της αυξημένης μάζας και διαφορετικής περιόδου ταλάντωσης. Η διατομή όλου του κτιρίου καθώς και το κέλυφος του έχουν επιρροή στην αεροδυναμική του κτιρίου (Sarkisian 2012). Αυτό μπορεί να προσδιοριστεί με τη δοκιμή wind tunnel και οι όποιες αλλαγές να γίνουν με τη σύμφωνο γνώμη του αρχιτέκτονα.

## 1.10 Μηχανική του ανέμου

Στο μοντέρνο σχεδιασμό ψηλών κτιρίων, τα κτίρια είναι ψηλότερα, λεπτότερα και ελαφρύτερα και γι' αυτό το λόγω είναι πιο επιρρεπή στον άνεμο. Η επιλογή του δομικού συστήματος επηρεάζουν σημαντικά την αντίσταση ενός κτιρίου προς τα πλευρικά φορτία. Ο σχεδιασμός των ψηλών κτιρίων (Banks et al. 2014) προαπαιτεί ότι οι αρχιτέκτονες και μηχανικοί έχουν μια βασική κατανόηση των δομικών συστημάτων και των αεροδυναμικών μορφών των κτιρίων, και ότι κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού εργάζονται από κοινού με εμπειρογνώμονες σε άλλα συναφή πεδία, ειδικά όσον αφορά το φορέα κατασκευής και την αεροδυναμική.

Ο άνεμος επηρεάζει το σχεδιασμό των ψηλών κτιρίων ως προς:

- Το σχεδιασμό των θεμελιώσεων για αντίσταση στα πλευρικά φορτία
- Τον έλεγχο της πλευρικής μετακίνησης και της σχετικής μετακίνησης μεταξύ των ορόφων
- Την ύπαρξη άνεσης για τους ενοίκους των τελευταίων ορόφων
- Το κατάλληλο σχεδιασμό του κτιριακού περιβλήματος

Η όλη μελέτη της μηχανικής του ανέμου γίνεται κατά τα αρχικά στάδια μελέτης για να επιτευχθεί δύναμη, αντοχή και εξυπηρετικότητα του κτιρίου.

Την ευαισθησία του κτιρίου στον άνεμο, καθορίζει:

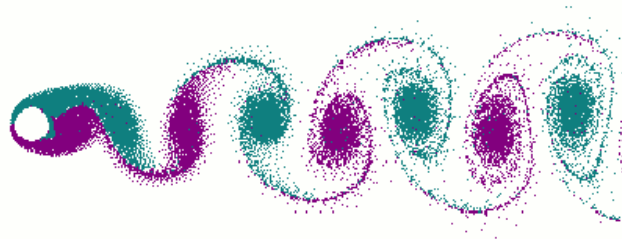
- Ο λόγος λυγρότητας του κτιρίου:  $h/d > 5$  όπου  $h$  το ολικό ύψος του κτιρίου και  $d$  η μικρότερη διάσταση της βάσης του
- Η συχνότητα του κτιρίου η οποία πρέπει να είναι μικρότερη από τον εμπειρικό τύπο  $46/h$  όπου  $h$  το ολικό ύψος του κτιρίου.
- Η μορφή ταλάντωσης, αν η μορφή της κινείται στις τρεις διαστάσεις

- Η δομή της γύρω περιοχής, αν το κτίριο βρίσκεται κοντά σε άλλα ψηλά κτίρια

### 1.10.1 Κλίμα ανέμου

Υπάρχουν δύο ειδών καταιγίδες που λαμβάνονται υπόψη στην κατασκευή. Πρώτο, οι συνοπτικοί άνεμοι, που τους υπολογίζουμε με βάση τη συνοπτική εικόνα των χαρτών καιρού και η θεώρησή τους βοηθάει στην πληρέστερη εικόνα του πεδίου του ανέμου σε μια ευρεία γεωγραφική περιοχή, με γεωγραφικό πλάτος 40 μέχρι 60 (Banks et al. 2014) . Και δεύτερος τύπος καταιγίδας είναι οι τροπικές καταιγίδες που συναντούνται σε περιοχές με τροπικό κλίμα. Στην περίπτωση της Κύπρου, η συνοπτική εικόνα είναι ήπιοι άνεμοι. Η αεροδυναμική δύναμη εκφράζει την αλληλεπίδραση του εξωτερικού σχήματος του κτιρίου με τον άνεμο.

Το Vortex-shedding (διάγραμμα 13) συμβαίνει όταν ο άνεμος χτυπά σε μια κατασκευή, που προκαλεί εναλλαγή στροβίλων που σχηματίζονται σε μια ορισμένη συχνότητα. Όταν η συχνότητα αυτή είναι κοντά στην τιμή της συχνότητας του κτιρίου, τότε αυτό αναγκάζει το σύστημα να διεγείρεται και να παράγεται δόνηση, όταν ο βαθμός απόσβεσης είναι χαμηλός. Με τη σύγχρονη τεχνολογία και τις νέες τεχνικές πρακτικές, η ανάλυση είναι ένα πολύτιμο εργαλείο που χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό των ψηλών κτιρίων.



**Διάγραμμα 13 Vortex-shedding (Siqueira 2005)**

Η κρίσιμη ταχύτητα του ανέμου για στροβιλίσματα δίνεται από την εξίσωση (3)

$$V_c = \frac{n \cdot D}{St} \quad (3)$$

Όπου  $n$  η συχνότητα του κτιρίου,  $D$  το πλάτος της πλευράς του κτιρίου όπου κτυπούν οι άνεμοι και  $St$  ο αριθμός με βάση το σχήμα της διατομής του κτιρίου, 0.1 για τετράγωνο και 0.2 για κύκλο.

### 1.10.2 Μετρίαση της φόρτισης του ανέμου

Η συνιστώσα από φορτία ανέμου μπορεί να μειωθεί:

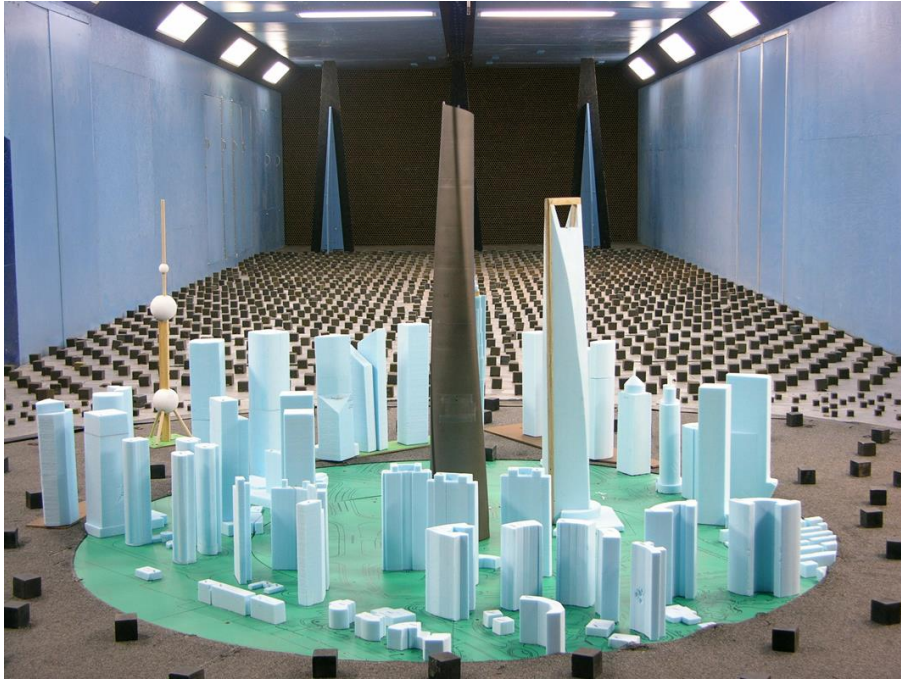
- Αυξάνοντας την ακαμψία του κτιρίου που αυτό θα αυξήσει τη συχνότητά του
- Αυξάνοντας τη μάζα στην κορυφή του κτιρίου, αυξάνοντας όμως την αντοχή για να μειωθεί η απώλεια συχνότητας
- Αυξάνοντας το βαθμό απόσβεσης, χρησιμοποιώντας εξωτερικό εξοπλισμό απόσβεσης, παθητικό ή ενεργητικό σύστημα
- Αλλάζοντας την αεροδυναμική του κτιρίου, με ορισμένες αλλαγές στην εξωτερική μορφή του όπως γωνίες και ανοίγματα

Είναι πολύ περιορισμένες οι οδηγίες που δίνονται από τους κώδικες παγκοσμίως για την απόκριση των ψηλών κτιρίων στον άνεμο.

### 1.10.3 Αεροδυναμική σήραγγα (wind tunnel test)

Η δοκιμή αεροδυναμικής σήραγγας γίνεται για να προσδιοριστούν οι σχεδιαστικές δυνάμεις, η απόκριση και η συμπεριφορά του κτιρίου. Η ατμοσφαιρική ζώνη, η ζώνη της τροπόσφαιρας που αναπτύσσεται 2-3 χιλιόμετρα πάνω από την επιφάνεια της γης, όπου η ταχύτητα και η ένταση του ανέμου επηρεάζεται από την τοπογραφική διάταξη της επιφάνεια της γης.

Στη δοκιμή αεροδυναμικής σήραγγας το προσομοίωμα του κτιρίου βρίσκεται σε κλίμακα από 1:200 μέχρι 1:500 και στο μοντέλο βρίσκονται και τα υπόλοιπα κτίρια που βρίσκονται γύρω από το υπό εξέταση κτίριο (διάγραμμα 14). Θα πρέπει να μοντελοποιηθούν όλα τα κτίρια που βρίσκονται σε ακτίνα 500 μέτρων γύρω από το κτίριο, αλλά και σημαντικά κτίρια εκτός αυτής της εμβέλειας (Sarkisian 2012). Επίσης θα πρέπει να συμπεριληφθούν στο μοντέλο κτίρια ή υποδομές που βρίσκονται σε μελλοντικά σχέδια για ανέγερση. Για την ανάπτυξη του μοντέλου για τα γύρω κτίρια θα χρειαστούν πληροφορίες σε ηλεκτρονική μορφή για τους τοπογραφικούς χάρτες της περιοχής, ύψος κτιρίων και αριθμός ορόφων, φωτογραφίες και σχέδια για μελλοντικά έργα. Ανάλογα με τον τύπο της δοκιμή αεροδυναμικής σήραγγας ίσως χρειαστούν περισσότερες τυπικές λεπτομέρειες για τα κτίρια. Ο σχεδιασμός του προσομοιώματος και μοντέλου της δοκιμή αεροδυναμικής σήραγγας, οι παράμετροι και η εκτέλεση της δοκιμής πρέπει να γίνουν υπό τον έλεγχο μηχανικού εξειδικευμένου στη μηχανική του ανέμου, όπως και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων (Banks et al. 2014).



**Διάγραμμα 14 Προσομοίωμα κτιρίου για δοκιμή αεροδυναμικής σήραγγας (Autodesk Inc. 2016)**

Ο εξειδικευμένος μηχανικός μελέτης του ανέμου, μέσω της μελέτης της αεροδυναμικής σήραγγας, μπορεί να προσδιορίσει τις διατμήσεις, την ροπή ανατροπής στη βάση καθώς και τη συστροφή λόγω ανέμου (Banks et al. 2014). Οι μετρήσεις που λήφθηκαν όσον αφορά τα φορτία ανέμου, θα επεξεργαστούν μαζί με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του κτιρίου, όπως η μάζα, η εκκεντρότητα, η συχνότητα και η ροπή αδρανείας. Οι τιμές των δράσεων του ανέμου που λαμβάνονται για το σχεδιασμό των θεμελιώσεων, υπολογίζονται για ταχύτητες ανέμου με περίοδο επαναφοράς τα 50 χρόνια.

Ο εξειδικευμένος μηχανικός μελέτης του ανέμου και οι μελετητές μηχανικοί προβαίνουν σε ένα εύρος ευαίσθητων αναλύσεων όσον αφορά αβεβαιότητες για τις δομοστατικές παραμέτρους της κατασκευής όπως η συχνότητα, η απόσβεση και η ροπή αδρανείας.

### **1.11 Σεισμική Μηχανική**

Η σεισμική μηχανική περιλαμβάνεται στην όλη μελέτη και σχεδιασμό της κατασκευής, ώστε αυτή να αντέχει σε σεισμικά γεγονότα ποικίλων εντάσεων και συχνοτήτων. Οι παραδοσιακοί κώδικες δεν ανταποκρίνονται στο σχεδιασμό ψηλών κτιρίων, εφόσον χρησιμοποιούν ανάλυση ελαστικής απόκρισης και δεν συμφωνούν με την μη γραμμική συμπεριφορά των ψηλών κτιρίων.



Μοναδικά χαρακτηριστικά της σεισμικής απόκρισης των ψηλών κτιρίων:

- Η δόνηση των 2 δευτερολέπτων θεωρείται υπέρβαση
- Η σημαντικότητα της μάζας και της απόκρισης της πλευρικής μετατόπισης στις υψηλές δονήσεις
- Η αντίσταση του συστήματος των τοιχείων στην πλευρική μετατόπιση λόγω πλευρικών φορτίων

Οι δυνητικές εντάσεις που χρησιμοποιούνται για τους σεισμούς στο σχεδιασμό των ψηλών κτιρίων προσδιορίστηκαν μέσα από στατιστικά και ιστορικά γεγονότα καθώς και από αποδεκτά επίπεδα ρίσκου. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό πινάκων και χαρτών όπου σχεδιάζονται οι ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας με μια συγκεκριμένη τιμή σεισμικής επιτάχυνσης για κάθε ζώνη (Banks et al. 2014). Κάθε μια από αυτές τις ζώνες με ένα σεισμικό γεγονός με συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς. Ο Ευρωκώδικας 8 όπως και το Council on Tall Buildings and Urban Habitat αναφέρονται στον Αντισεισμικό σχεδιασμό των ψηλών κτιρίων.

### **1.11.1 Αντισεισμικός σχεδιασμός**

Συγκεκριμένα, για τα ψηλά κτίρια πρέπει να προσδιορίζονται δύο ή περισσότερα επίπεδα απόκρισης του κτιρίου. Ο ΕΚ 8 προϋποθέτει δύο βασικές απαιτήσεις. Πρώτον, περιορισμό των ζημιών όταν το κτίριο υποβάλλεται σε σεισμική δράση με περίοδο επαναφοράς τα 95 χρόνια και δεύτερον, η κατασκευή να μην καταρρεύσει έπειτα από ακραία σεισμική δράση με περίοδο επαναφοράς τα 475 χρόνια.

Το Council on Tall Buildings and Urban Habitat προϋποθέτει τρεις περιπτώσεις. Πρώτον, στους συχνούς σεισμούς, περιόδου επαναφοράς τα 95 χρόνια, θα πρέπει να μην υπάρχουν σχεδόν καθόλου ζημιές στην κατασκευή, η αντοχή του κτιρίου να παραμένει άθικτη και το κτίριο να βρίσκεται στην ελαστική συμπεριφορά. Δεύτερη περίπτωση, σε σπάνιους σεισμούς με περίοδο επαναφορά τα 475 χρόνια, να παραμένει η αντοχή του κτιρίου στα φορτία ωστόσο οι ζημιές θα είναι μεγάλου βαθμού, ενώ για πολύ σημαντικά κτίρια θα πρέπει να παραμένει η ελαστική συμπεριφορά. Τέλος, στην πολύ σπάνια περίπτωση σεισμικού γεγονότος επαναφορά 2475 χρόνων, οι καταστροφές θα είναι έντονες ενώ το κτίριο θα πρέπει να αντέξει μέχρι την πλήρη εκκένωση του (Banks et al. 2014). Και στους δύο πιο πάνω κώδικες καθορίζονται περιορισμοί ως προς την παραμόρφωση. Οι οριακές τιμές ωστόσο

μπορούν να καθοριστούν από πιο προχωρημένους κώδικες ή και ακόμα από συμφωνία μεταξύ πελάτη και μελετητή.

Ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός όλων των κατασκευών επηρεάζει άμεσα την απόκριση του κτιρίου σε ένα σεισμικό γεγονός. Πρέπει να αποφεύγονται περίπλοκες γεωμετρίες και διατάξεις. Πρέπει να αποφεύγονται μεγάλες αλλαγές στην ακαμψία και τη μάζα του κτιρίου, η δημιουργία δυνάμεων διάτμησης λόγω εκκεντροτήτων καθώς και η περιορισμένη σύνδεση των μελών για το διάφραγμα κάθε ορόφου. Αρχικό βήμα στον αντισεισμικό σχεδιασμό της κατασκευής είναι ο προσδιορισμός των ζωνών ή μελών όπου αναμένεται μη γραμμική απόκριση.

#### **1.11.1.1 Τοπικές επιδράσεις του εδάφους**

Το στρώμα εδάφους κάτω από την κατασκευή παίζει σημαντικότατο ρόλο στην ένταση της σεισμικής επιτάχυνσης του εδάφους. Ένα ασθενές εδαφικό στρώμα επιφέρει αύξηση της επιτάχυνσης του εδάφους στην επιφάνεια. Τα σεισμικά γεγονότα μακράς περιόδου ενισχύονται σε ασθενή εδάφη λόγω της φυσικής περιόδου του εδάφους.

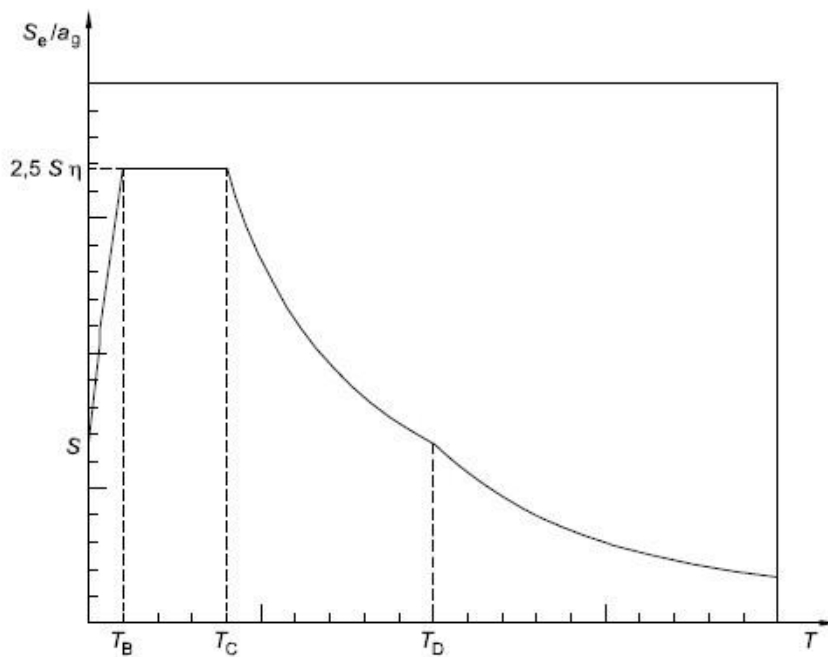
Διάφορα άλλα προβλήματα που μπορούν να προκύψουν είναι η κατολίσθηση, η καθίζηση και η υγροποίηση εδάφους. Επίσης πρέπει να εξετάζονται και οι επιρροές για κατασκευή πάνω σε βράχο ή σε γνωστό σεισμικό ρήγμα. Η υγροποίηση εδάφους είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης μονοδιάστατων κόκκων και μεγάλου πορώδους στο έδαφος με το νερό να ανυψώνεται και να υγροποιείται το έδαφος (Sarkisian 2012). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια της φέρουσας ικανότητας του εδάφους. Μπορεί να αντιμετωπιστεί με βαθιές θεμελιώσεις σε υγιή στρώματα εδάφους.

#### **1.11.1.2 Σεισμική δράση**

Ο σεισμικός σχεδιασμός για τα ψηλά κτίρια χαρακτηρίζεται σε δύο επίπεδα: να υπάρχει λειτουργικότητα με ελεγχόμενες ζημιές και να μην υπάρχει κατάρρευση έπειτα από ισχυρό σεισμό. Η σεισμική επικινδυνότητα στους κώδικες καθορίζεται από την επιτάχυνση αιχμής του εδάφους που σχετίζεται με τον τύπο και τη ζώνη εδάφους που βρίσκεται η κατασκευή. Για πιο εξειδικευμένη ανάλυση (Banks et al. 2014) χρησιμοποιούνται η πιθανολογική ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας όπως και η ντετερμινιστική ανάλυση για περιοχές κοντά σε ενεργά σεισμικά ρήγματα (λιγότερα των 10 χιλιομέτρων).

Το φάσμα του διαγράμματος 15 δίδεται σε σχέση με ιξώδη απόσβεση 5%. Στην περίπτωση των ψηλών κτιρίων αυτή η τιμή θεωρείται μεγάλη, εφόσον η ιξώδης απόσβεση είναι στο  $\xi=2.5$  και ο αυξητικός παράγοντας του φάσματος θα είναι ίσως με 1.15. Αυτό ελέγχεται με την πιο κάτω εξίσωση (4):

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0.55 \quad (4)$$



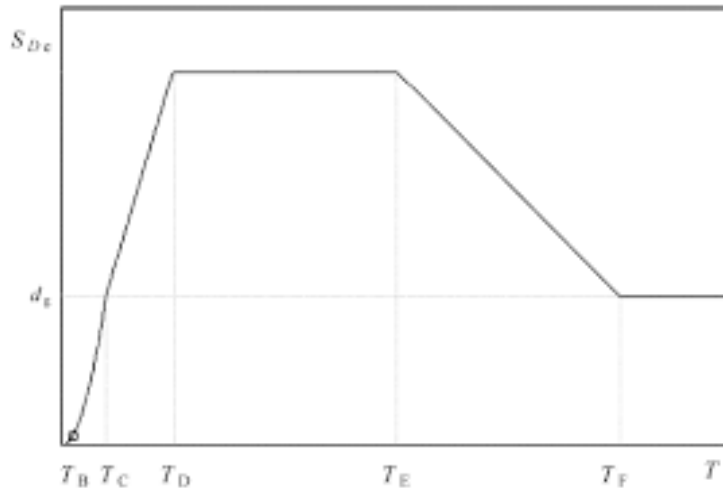
**Διάγραμμα 15** Ελαστικό φάσμα απόκρισης (Ευρωκώδικας 8)

Το τυπικό σχήμα του φάσματος έχει δύο φθίνοντα μέρη:

- Για  $T_c \leq T \leq T_D$  όπου η επιτάχυνση είναι ανάλογη του  $1/T$
- Για  $T \geq T_D$  όπου η επιτάχυνση είναι ανάλογη του  $1/T^2$

Σύμφωνα με τον ΕΚ8, και με βάση τον τύπο εδάφους, το  $T_c$  παίρνει τιμές από 0.4 μέχρι 1.0 δευτερόλεπτα και το  $T_D$  ισούται με 2.0 δευτερόλεπτα. Τα ψηλά κτίρια φυσιολογικά έχουν ιδιοπερίοδο πέραν των 2.0 δευτερολέπτων, άρα η επιτάχυνσή τους είναι ανάλογη του  $1/T^2$ .

Για τα ψηλά κτίρια χρησιμοποιείται ειδικό φάσμα απόκρισης, αφού έχουν μεγάλες περιόδους δόνησης. Χρησιμοποιείται γράφημα απόκρισης φάσματος ελαστικής παραμόρφωσης με περιόδους μέχρι 10 δευτερόλεπτα.



**Διάγραμμα 16 Φάσμα απόκρισης ελαστικής παραμόρφωσης για μεγάλες περιόδους (Ευρωκώδικας 8)**

Με την αύξηση του μεγέθους του σεισμού στην υπερισχύουσα περίοδο, το φάσμα μετακινείται σε υψηλότερες τιμές. Το ίδιο συμβαίνει και όταν αυξάνεται η απόσταση από το επίκεντρο του σεισμού και το έδαφος είναι μαλακό (Kalkan and Chopra 2010). Έτσι τα ψηλά κτίρια είναι περισσότερο επιρρεπή σε μακρινούς σεισμούς μεγάλου μεγέθους όταν το έδαφος είναι μαλακό.

### 1.11.1.3 Χρονοϊστορία

Η σεισμική κίνηση παρουσιάζεται με την χρονοϊστορία της επιτάχυνσης του εδάφους, την ταχύτητα και τις μετατοπίσεις. Η μοντελοποίηση της κίνησης του σεισμού γίνεται με τεχνητά επιταχυσιογραφήματα και προσδιορίζονται η διάρκεια και το μέγεθος του γεγονότος. Η επιλογή του μοντέλου γίνεται από εξειδικευμένο μηχανικό στη σεισμική μηχανική.

### 1.11.1.4 Σεισμική δυναμική συμπεριφορά

Τα φορτία ανέμου αποτελούν την κύρια δράση πάνω στα ψηλά κτίρια ακόμα και στις σεισμογενείς περιοχές. Σε περιοχές με μέτριους σεισμούς, τα κτίρια σχεδιάζονται ώστε να συμπεριφέρονται επαρκώς στα φορτία ανέμου, με μικρές προσαρμογές για τα φορτία του σεισμού. Η ροπή ανατροπής από τον άνεμο μπορεί να ξεπεράσει τη ροπή ανατροπής από το

σεισμό αναλύοντας την αντοχή των χαμηλών ορόφων. Γι' αυτό το λόγο, η ανάλυση για τα φορτία ανέμου θα πρέπει να γίνεται παράλληλα με την σεισμική ανάλυση.

Η ελαστική ανάλυση και η ανάλυση με γραμμική απόκριση ανταποκρίνεται στους σεισμούς στους οποίους έπειτα από το σεισμικό γεγονός υπάρχει λειτουργικότητα στο κτίριο. Αντιθέτως, η μη-γραμμική ανάλυση απαιτείται στην έσχατη περίπτωση της μη κατάρρευσης του κτιρίου έπειτα από το μέγιστο υπολογιζόμενο σεισμό και απαιτεί γνώσεις για τον οπλισμό στις μη ελαστικές ζώνες. Η ανάλυση αυτή χωρίζεται σε δύο φάσεις:

1. Ανάλυση μέσω του φάσματος απόκρισης, με απλή μέθοδο, λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμική συμπεριφορά της κατασκευής με τη χρήση συντελεστή τροποποίησης απόκρισης. Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται ο οπλισμός της κατασκευής
2. Η μη γραμμική ανάλυση δεδομένου του οπλισμού που υπολογίστηκε προηγουμένως, εξετάζει την επίδοση του κτιρίου

### **1.11.2 Μοντελοποίηση**

Τα μαθηματικά μοντέλα παρουσιάζουν την κατανομή της μάζας και ακαμψίας του κτιρίου. Μια αρχική προσέγγιση πρέπει να γίνεται με τα γραμμικά μοντέλα για κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς του κτιρίου κατά το σεισμό. Τα γραμμικά μοντέλα χρησιμοποιούν εκτιμήσεις της ακαμψίας οι οποίες αναμένονται για την οριακή κατάσταση λειτουργίας της κατασκευής.

Όλοι οι κώδικες καθοδηγούν τους μελετητές μέσω οριακών τιμών για τις δύο οριακές καταστάσεις: την Οριακή Κατάσταση Λειτουργίας (ΟΚΛ) και την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ).

Τα ψηλά κτίρια αποτελούν πολύπλοκα δυναμικά συστήματα. Σκοπός είναι ο προσδιορισμός όλων των περιοχών της κατασκευής με ανελαστική συμπεριφορά, όπως για παράδειγμα η κάμψη που προκαλείται στα υποστύλωματα των μεσαίων και ανώτερων ορόφων.

Ο βαθμός απόσβεσης ενός κτιρίου εκφράζει την ικανότητά του να μειώνει το πλάτος κατά την ταλάντωσή του. Η απόσβεση εξουδετερώνει ενέργεια μέσω των εσωτερικών τριβών των κόμβων. Το ποσοστό της κρίσιμης απόσβεσης βασίζεται στον τρόπο ανάλυσης. Για τη μη-γραμμική ανάλυση συνήθως χρησιμοποιείται το 2.5% (Banks et al. 2014).

### 1.11.2.1 Ανάλυση απόκρισης φάσματος

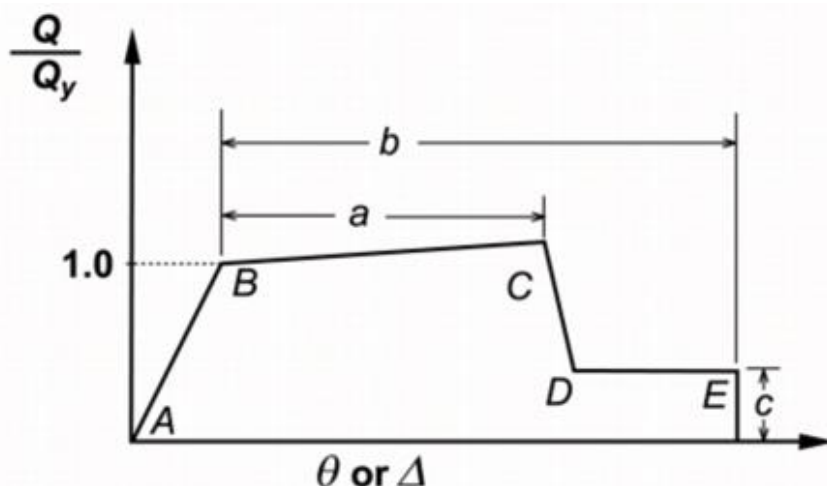
Η ανάλυση ελαστικού φάσματος απόκρισης είναι κατάλληλη όταν επιβαλλόμενη δύναμη στα μέλη είναι μικρότερη από τη σχεδιαστικής και είναι επιθυμητό το κτίριο να φτάσει στην Οριακή κατάσταση λειτουργίας. Χρησιμοποιώντας την ανάλυση φάσματος απόκρισης περιλαμβάνεται το 95% της ολικής μάζας σε κάθε άξονα.

### 1.11.2.2 Χρονοϊστορική γραμμική ανάλυση

Στη Χρονοϊστορική γραμμική ανάλυση χρησιμοποιούνται καταγεγραμμένοι ή τεχνητοί σεισμοί για τη γενική δυναμική ανάλυση της κατασκευής, και η απόκριση της στους διάφορους τύπους δονήσεων καταγράφεται. Η απόκριση είναι συνάρτηση του χρόνου και καταγράφεται η χρονοϊστορία της απόκρισης για τα διάφορα σεισμικά γεγονότα. Τα αποτελέσματα της ελαστικής συμπεριφοράς συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της φασματικής ανάλυσης.

### 1.11.2.3 Χρονοϊστορική μη γραμμική ανάλυση

Στην Χρονοϊστορική (Banks et al. 2014) μη γραμμική ανάλυση προσδιορίζεται η μη γραμμική απόκριση της κατασκευής μέχρι να φτάσει στην Οριακή κατάσταση Αστοχίας, χωρίς να καταρρεύσει. Στην ανάλυση αυτή περιλαμβάνονται φαινόμενα δεύτερης τάξης και όλα τα κάθετα φορτία περιλαμβανομένου και ενός μέρους των μεταβλητών φορτίων. Με αυτή την ανάλυση προσδιορίζεται η συμπεριφορά του κτιρίου μετά που τα υλικά ξεπερνούν το όριο διαρροής τους, σε διάφορες κινήσεις εδάφους. Είναι σύνηθες η χρήση της καμπύλης Δύναμης-Παραμόρφωσης για μοντελοποίηση των μελών του πλαισιακού συστήματος.



Διάγραμμα 17 Σχέση δύναμης-παραμόρφωσης για πλαστικές αρθρώσεις (Banks et al. 2014)

Για τις δοκούς, η τοπική πλαστικότητα απεικονίζεται με την τοποθέτηση πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα της δοκού. Η γωνία της πλαστικής παραμόρφωσης εξαρτάται από τον εγκάρσιο οπλισμό και τη διάταξή του και το μέγεθος της διατμητικής δύναμης, ενώ στα υποστυλώματα εξαρτάται από τις αξονικές δυνάμεις.

Ένα μέρος της μάζας και της ελαστικότητας του συστήματος θεμελιώσεων θα επιδρά στην φυσική περίοδο και ταλάντωση της κατασκευής. Η ενέργεια από την δόνηση του κτιρίου θα μεταφέρεται στο έδαφος και θα αποσβένεται από αυτό. Η ακαμψία των θεμελιώσεων μειώνει τις σεισμικές δονήσεις στο κτίριο όταν πρόκειται για κύματα μικρής περιόδου, όταν αυτά δεν φτάσουν σε όλα τα σημεία των θεμελιώσεων ταυτόχρονα.

### **1.11.3 Σχεδιασμός**

Τα ψηλά κτίρια σχεδιάζονται με αποδοχή σημαντικές ζημιές και ανελαστική συμπεριφορά των μελών. Η φιλοσοφία αυτού του σχεδιασμού επιτρέπει την ελεγχόμενη παραμόρφωση των πλαστικών αρθρώσεων των μελών επιτρέποντας στο κτίριο να κινείται πλευρικά μέσω στροφής των αρθρώσεων, χωρίς να επιβαρύνεται από επιπλέον καμπτικές ή διατμητικές δυνάμεις. Ειδικά συστήματα και μέλη για τα ψηλά κτίρια αποτελούν ο πυρήνας, τα τοιχεία, τα εξωτερικά διαφράγματα, τα διαγώνια στοιχεία, οι ενδιάμεσοι όροφοι μεταφοράς και η υπόγεια κατασκευή.

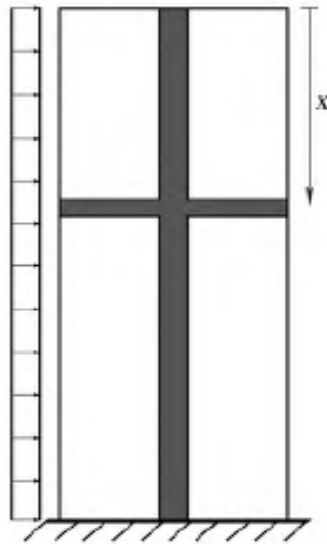
Ο πυρήνας και τα τοιχεία αποτελούν τους κύριους συντελεστές για αντίσταση στα οριζόντια φορτία για τα ψηλά κτίρια και αναμένεται να παρουσιαστεί κάποια μη γραμμική συμπεριφορά σε αυτά τα μέλη. Τα μέλη αυτά πρέπει να παρουσιάζουν πλαστικότητα και η καμπτική τους διαρροή στις ζώνες πλαστικότητας να ελέγχει τη δύναμη, την ανελαστική παραμόρφωση και την απορρόφηση της ενέργειας του κτιρίου (Smith et al. 1991). Η ενέργεια θα πρέπει να απορροφάται κυρίως από τη διαρροή του οπλισμού κάμψης στις πλαστικές αρθρώσεις των τοιχείων, αλλά όχι στη βάση τους. Όπως επίσης και από την καμπτική διαρροή των συνδετικών δοκών. Αστοχίες μπορούν να προκληθούν εξαιτίας διατμητικών δυνάμεων, λόγω της αστάθειας των λεπτών τοίχων ή της μη επαρκούς ύπαρξης συνδετήρων, λόγω αδυναμίας των κόμβων και αστοχίας συγκολλήσεων ή αγκυρώσεων του οπλισμού.

Τα τοιχεία σχεδιάζονται ώστε να έχουν τη βέλτιστη απόκριση και να μην επιφέρουν οποιαδήποτε αστοχία στην επιβολή διατμητικών δυνάμεων. Αξίζει να σημειωθεί πως οι

διατμητικές δυνάμεις στη βάση ενός κτιρίου υπολογίζονται μέσω μη γραμμικής ανάλυσης αφού υπερβαίνουν αυτές της γραμμικής ανάλυσης.

### 1.11.3.1 Σύστημα σύνδεσης κεντρικού πυρήνα με εξωτερικό πλαίσιο

Είναι το σύστημα όπου ο κεντρικό πυρήνας συνδέεται μέσω δοκών ή μεταλλικών δικτυωμάτων με το εξωτερικό πλαίσιο του κτιρίου. Αυτού του είδους δομικό σύστημα, απαιτεί μεγάλη αντοχή σε διατμητικές και αξονικές δυνάμεις και δεν ανταποκρίνεται επαρκώς έναντι της καμπτικής διαρροής, έχοντας ως αποτέλεσμα τη μόνιμη παραμόρφωση των μελών (Gunel 2014). Για το σχεδιασμό του απαιτείται λεπτομερής και εξειδικευμένη ανάλυση για την πλαστικότητα των μελών.



Διάγραμμα 18 Σύστημα σύνδεσης κεντρικού πυρήνα με εξωτερικό πλαίσιο (Gunel 2014)

### 1.11.3.2 Διαγώνια στοιχεία

Αυτό το σύστημα είναι πιο αποτελεσματικό από το προηγούμενο δομικό σύστημα, εφόσον η διάταξη των διαγώνιων τριγωνικών μελών παρέχει περισσότερες διόδους μεταφοράς των φορτίων και απορροφούν ενέργεια από την επιβολή σεισμικών φορτίων μέσω του αυξημένου ορίου διαρροής τους (Gunel 2014). Ωστόσο απαιτούν εξειδικευμένη ανάλυση όσον αφορά τη μη γραμμική συμπεριφορά τους.

Τα διαγώνια στοιχεία τα οποία τοποθετούνται ομοκεντρικά (χιαστί) έχουν περιορισμένη πλαστικότητα σε αντίθεση με τα έκκεντρα διαγώνια στοιχεία, λόγω του ότι τα άκρα τους που είναι ανεξάρτητα στηριγμένα προσδίδουν περισσότερη πλαστικότητα στα άκρα, επιτρέποντας έτσι στα διαγώνια μέλη να παραμένουν στην ελαστική τους συμπεριφορά.





**Διάγραμμα 19** Τριγωνικά μέλη 30 St Mary Axe London (Gunel 2014)

### **1.11.3.3 Ενδιάμεσοι όροφοι μεταφοράς**

Τα στοιχεία αυτής της κατασκευής υποβάλλονται σε μεγάλες διατμητικές δυνάμεις και σχεδιάζονται ώστε οι σεισμικές παραμορφώσεις να μην επηρεάσουν την αντοχή τους έστω και με κατάρρευση την υποστηριζόμενης κατασκευής και να η σεισμική τους συμπεριφορά να παραμένει στην ελαστική τους φύση. Οι ενισχυτικές κατασκευές στην βάση και το υπόγειο μπορούν να επαυξήσουν την ακαμψία των ψηλών κτιρίων.

### **1.11.3.4 Πλάκες**

Οι πλάκες κάθε ορόφου λειτουργούν ως οριζόντια διαφράγματα παραλαμβάνοντας την οριζόντια συνιστώσα του σεισμού και αντιστέκονται στα πλευρικά φορτία. Πρέπει να έχουν αυξημένη αντοχή στην παραλαβή πλευρικών φορτίων γι'αυτό οι δυνάμεις αυτές υπολογίζονται συντελεστή επαύξησης. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίδεται στις συνδέσεις των πλακών με το υπόλοιπο σύστημα. Προσοχή συνίσταται και όταν υπάρχουν μεγάλα ανοίγματα στις πλάκες, ενώ οι πλάκες χωρίς δοκούς πρέπει να αποφεύγονται όπου είναι δυνατόν.

Όσον αφορά τα αρχιτεκτονικά στοιχεία, όπως οι εσωτερικοί διαχωρισμοί και οι επενδύσεις, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι παραμορφώσεις που μπορεί να επιφέρει μία δόνηση λόγω σεισμού, θέτοντας τους σωστούς αρμούς εκεί όπου εφάπτονται οι εσωτερικοί διαχωρισμοί με τα δομικά στοιχεία. Όταν σε κάποιο δομικό στοιχείο προστεθούν εσωτερικοί διαχωρισμοί ή επένδυση και τα οποία δεν λήφθηκαν υπόψη στο σχεδιασμό, τότε μπορεί να επέλθει τοπική αστοχία (Sarkisian 2012).

#### 1.11.4 Σεισμικοί αποσβεστήρες

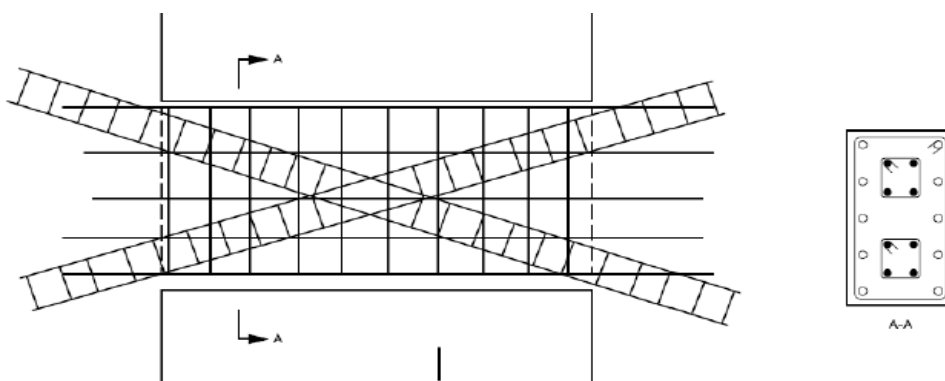
Για την μείωση των επιπτώσεων από τις δυναμικές ενισχύσεις ταλάντωσης απαιτείται η τοποθέτηση μηχανισμών απόσβεσης. Οι μηχανισμοί απόσβεσης για το σεισμό μπορεί να είναι υδραυλικοί ιξώδεις, ιξωδοελαστικοί, αποσβεστήρες ως διαγώνια στηρίγματα, οι οποίοι θα ελέγχουν την απόσβεση ενέργειας. Κατά τη μοντελοποίηση θα πρέπει να συνυπολογίζονται στη μελέτη τα μέγιστα και ελάχιστα όρια των χαρακτηριστικών των μηχανισμών απόσβεσης (Banks et al. 2014).

#### 1.11.5 Τυπικές λεπτομέρειες

Οι τυπικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες είναι ζωτικής σημασίας για τη σεισμική μηχανική εφόσον επιβεβαιώνουν ότι η κατασκευή θα παραμορφωθεί ανελαστικά. Οι τυπικές λεπτομέρειες όσον αφορά τις αποστάσεις αλλά και τις αγκυρώσεις του οπλισμού της κατασκευής εξασφαλίζουν ότι ο οπλισμός θα φτάσει στο όριο εφελκυσμού του αλλά και ότι τα δομικά στοιχεία θα πρέπει να φτάνουν στο όριο της πλαστικής του παραμόρφωσης.

#### 1.11.6 Δοκοί

Οι δοκοί αποτελούν τους μηχανισμοί που παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες στροφές στις αρθρώσεις, γ'αυτό απαιτείται λεπτομερής σχεδιασμός ώστε οι μηχανισμοί αυτοί να παρουσιάζουν κάμψη χωρίς διατμητική αστοχία. Στις δοκούς με μικρό λόγο ανοίγματος-βάθους, που χρησιμοποιούνται στα ψηλά κτίρια, η συμπεριφορά τους υπακούει στη διάτμηση απ'ότι στην κάμψη. Η διάτμηση μεταφέρεται διαγώνια με υψηλή θλίψη σε συνδυασμό με κάθετο εφελκυσμό. Για επαύξηση της διατμητικής αντοχής και πλαστικότητας των δοκών των ψηλών κτιρίων και αποφυγή αστοχίας, τοποθετούνται διαγώνιες αντηρίδες οπλισμού (Truby 2014).



Διάγραμμα 20 Διαγώνιες αντηρίδες οπλισμού (Truby 2014)

### **1.11.7 Υποστυλώματα**

Λόγω των ανελαστικών μετακινήσεων, οι σημαντικές δυνάμεις στα υποστυλώματα πρέπει να περιορίζονται και αυτό γίνεται μέσα από την επιβεβαίωση ότι αναπτύσσεται η απαιτούμενη δύναμη, με θρυμματισμό της κάλυψης της δοκού αλλά και επιβεβαίωση του μεγέθους της τάσης που απαιτείται για να αναπτυχθεί η πλαστική συμπεριφορά.

Όπου χρησιμοποιείται σκυρόδεμα υψηλής αντοχής στις μη ελαστικές ζώνες, απαιτείται υψηλή συγκράτηση οπλισμού για να υπάρχει επαρκής πλαστικότητα και αντοχή. Μειώνοντας τις αποστάσεις των ράβδων οπλισμού περιμετρικά του υποστυλώματος είναι προς όφελος δύναμης και αντοχής, ενώ πυκνώνοντας τους συνδετήρες αυξάνεται η συγκράτηση του πυρήνα του σκυροδέματος, αποτρέποντας το λυγισμό του κάθετου οπλισμού λόγω θλίψης.

Οι σπειροειδείς ή κυκλικοί συνδετήρες είναι αποδοτικότεροι από τους ορθογώνιους ή τετράγωνους συνδετήρες αφού προσδίδουν ομοιόμορφη συγκράτηση περιμετρικά του υποστυλώματος παρά μόνο στις γωνίες, κατανέμοντας περιμετρικά τις τάσεις. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί και στους ορθογώνιους ή τετράγωνους συνδετήρες με την τοποθέτηση επιπλέον κάθετου συνδετήρα (Banks et al. 2014).

### **1.11.8 Τοιχεία**

Στις περιοχές με χαμηλή ή μέτρια σεισμικότητα, οι πλαστικές αρθρώσεις σχεδιάζονται ώστε να αναπτύσσονται πρωτίστως στις δοκούς. Για τις ισχυρές σεισμικές ζώνες, η απορρόφηση ενέργειας από την πλαστικότητα των δοκών δεν είναι επαρκής και απαιτείται επιπλέον πλαστικότητα από τα τοιχεία. Γι' αυτό το λόγο χρειάζεται λεπτομερής σχεδιασμός των τοιχείων με κύριο μηχανισμό τον οπλισμό των τοιχείων ο οποίος πρέπει να αντισταθεί και στις μεγάλες διατμητικές δυνάμεις επιπλέον. Η τοποθέτηση διαγώνιων ράβδων οπλισμού θα αντιμετωπίσει τη διάτμηση και στις δύο κατευθύνσεις. Στις άκριες των τοιχείων όπου αναπτύσσονται μεγάλες θλιπτικές τάσεις, απαιτείται ισχυρή συγκράτηση οπλισμού και οι ζώνες αυτές εΐθισται να γίνονται παχύτερες (Banks et al. 2014).

Η ακεραιότητα του κτιρίου σε ένα μεγάλο σεισμό επιτυγχάνεται με την κατάλληλη σύνδεση της πλάκας με τα υποστυλώματα. Οι συνδέσεις αυτές υπόκεινται σε πλευρικές παραμορφώσεις, όπου αναπτύσσονται ροπές και διατμητικές δυνάμεις. Αυτό είναι κρίσιμο και βασίζεται στη διαρροή του οπλισμού της πλάκας.

Ωστόσο και στα κτίρια που στηρίζονται από πυρήνες και τοιχεία, η σύνδεση των τοιχείων με τις πλάκες παίζει καθοριστικό ρόλο στην συμπεριφορά του κτιρίου. Μεγάλες στροφές προκαλούνται στις συνδέσεις πλακών και τοιχείων λόγω της ταλάντωσης των τοιχείων που προκαλούν επιμήκυνση και συρρίκνωση των τοιχείων καθ'όλο το ύψος λόγω των καμπτικών δυνάμεων.

## **1.12 Συμπεριφορά εξαρτημένη από το χρόνο**

Ένα δομικό στοιχείο είναι πιθανόν να παρεκκλίνει των θεωρητικών του διαστάσεων και της θεωρητικής του θέσης. Αυτό παρατηρείται στα ψηλά κτίρια λόγω των μετακινήσεων που παρατηρούνται μετά την κατασκευή των μελών, από τη φυσική δράση της βαρύτητας και της έκκεντρης φόρτισης ως αποτέλεσμα του μεγέθους και του σχήματος του κτιρίου.

Μετακινήσεις παρατηρούνται στον κάθε άξονα λόγω αξονικής συρρίκνωσης/shortening, καθώς και στον οριζόντιο άξονα, παρέκκλιση από την καθετότητα λόγω ερπυσμού και συρρίκνωσης. Αυτές οι μετακινήσεις είναι απαραίτητο να συνυπολογίζονται κατά τη μελέτη και πριν την κατασκευή, για δομοστατικούς και μη υπολογισμούς και αποφυγή σχετικών προβλημάτων. Παρακάτω θα αναλυθούν εσωτερικές δυνάμεις που προκαλούνται ως αποτέλεσμα των ιδιοτήτων των υλικών που εξαρτούνται από το χρόνο.

### **1.12.1 Αξονική συρρίκνωση**

Η αξονική συρρίκνωση είναι το σύνολο των αξονικών παραμορφώσεων των κάθετων στοιχείων κάθε ορόφου. Στα κάθετα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα παρατηρείται ελαστική παραμόρφωση λόγω των επιβαλλόμενων φορτίων, η οποία συνδυάζεται από επιπλέον παραμόρφωση η οποία είναι μεγαλύτερη σε μέγεθος λόγω ερπυσμού και συρρίκνωσης του σκυροδέματος. Για παράδειγμα, σε ένα ψηλό κτίριο ύψους 200 μέτρων, τα υποστυλώματα από σκυρόδεμα θα υποστούν στο σύνολο όλου του ύψους του κτιρίου συνολική ελαστική παραμόρφωση 100 χιλιοστά το οποίο πρόκειται να διπλασιαστεί στην πορεία του χρόνου λόγω ερπυσμού και συρρίκνωσης.

Ωστόσο παρουσιάζονται διαφορετικές συρρικνώσεις στα κάθετα μέλη λόγω των διαφορετικών αξονικών τάσεων μεταξύ των υποστυλωμάτων και των τοιχείων. Αυτό οφείλεται και στη διαφορά εμβαδού διατομή, εφόσον η διατομή των υποστυλωμάτων δέχεται περισσότερη θλίψη. Ωστόσο διαφορετικές συρρικνώσεις συμβαίνουν και μεταξύ των υποστυλωμάτων, αναλόγως της θέσης που βρίσκονται, εσωτερικά, εξωτερικά ή γωνιακά.

Η μεγαλύτερη διαφορά στις συρρικνώσεις μεταξύ υποστυλωμάτων και τοιχείων παρατηρείται μεταξύ των 2/3 και 3/4 του ύψους των ψηλών κτηρίων (Banks et al. 2014).

Παράγοντες που επηρεάζουν την αξονική συρρίκνωση:

- Σκυροδέμα: θλιπτική αντοχή, μέτρο ελαστικότητας, ερπυσμός, συρρίκνωση
- Τοιχεία και υποστυλώματα: Εμβαδόν διατομής, εγκάρσιος οπλισμός, ποσότητα ενσωματωμένου χάλυβα στα σύνθετα μέλη, λόγος όγκου προς επιφάνεια
- Φορτία: κατασκευαστική ακολουθία, περιβαλλοντικές συνθήκες (παρουσία υγρασίας)
- Απόκλιση καθετότητας των μελών

Όταν στα ψηλά κτίρια υπάρχουν έκκεντρα ή ακανόνιστα σχήματα καθέτων, τότε η κατασκευή υπόκειται σε διαφορετική συρρίκνωση, η οποία μπορεί να προκαλέσει μόνιμη κλίση στο κτίριο ή απόκλιση της καθετότητας των κάθετων μελών, κατά το στάδιο της κατασκευής και μετά τη χρήση. Επίσης η απόκλιση της καθετότητας μπορεί να παρατηρηθεί και σε κτίρια με συμμετρικό σχήμα αλλά υπάρχει ασύμμετρη αλληλουχία κατασκευαστικών εργασιών, κι αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη πριν την κατασκευή και να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα για αποφυγή (Smith et al. 1991).

Κατά τις μελέτες πρέπει να προσδιοριστεί και η χρονική στιγμή κατά την οποία θα επέλθει η συρρίκνωση στο κτίριο. Η κίνηση αυτή του κτιρίου θα συμβεί ως αποτέλεσμα τις επίδρασης των συσσωρευμένων φορτίων και της έρπυσης και συρρίκνωσης του σκυροδέματος. Ο χρόνος αυτός μπορεί να είναι τουλάχιστον 3 χρόνια μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, που αναπτύσσεται σχεδόν όλο το φαινόμενο του ερπυσμού και της συρρίκνωσης του σκυροδέματος, έπειτα από τη λειτουργία του κτιρίου (Banks et al. 2014) . Διαφορετικός χρόνος θα πρέπει να υπολογίζεται σε ειδικές περιόδους όπως η εγκατάσταση των ανελκυστήρων.

Οι διαφορετικές συρρικνώσεις που παρατηρούνται στα κάθετα στοιχεία και κυρίως στις περιπτώσεις μεταξύ των τοιχείων του πυρήνα και των περιμετρικών υποστυλωμάτων έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση ρηγματώσεων στην πλάκα και ανακατανομή των εσωτερικών δυνάμεων, αλλά και παραμόρφωση της πλάκας μεταξύ τοιχείου και υποστυλώματος.

Οι διαφορετικές συρρικνώσεις προκαλούν σταδιακή μεταβολή της ανακατανομής των καμπτικών ροπών και των διατμητικών δυνάμεων στα δομικά στοιχεία της πλάκας. Η ανακατανομή αυτή πρέπει να αναγνωρίζεται κατά το στάδιο του σχεδιασμού των πλακών και να τοποθετείται ο κατάλληλος οπλισμός για τα οριζόντια μέλη. Παρόμοια προβλήματα μπορούν να προκαλέσουν και οι καθιζήσεις των στηρίξεων του κτιρίου. Επιπλέον, οι διαφορετικές συρρικνώσεις των κάθετων μελών, μπορούν να προκαλέσουν κλίση στις δοκούς (Smith et al. 1991). Επίσης θα προκληθούν σχεδιαστικά προβλήματα στα μέλη τα οποία προσδίδουν πλευρική αντίσταση στην κατασκευή αλλάζοντας και την δομική αντοχή του πλαισιακού συστήματος. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να γίνουν οι κατάλληλες σχεδιαστικές αλλαγές.

### **1.12.2 Ασυμβατότητα διαστάσεων**

Οι συρρικνώσεις αυτές στα ψηλά κτίρια επιφέρουν προβλήματα κατά την κατασκευή και λειτουργία του κτιρίου, όσον αφορά την συμβατότητα των διαστάσεων μεταξύ του φορέα της κατασκευής και μη-δομικών στοιχείων. Τα μέλη τα οποία υφίστανται αξονική κάθιση μεταφέρουν θλιπτικές δυνάμεις σε γειτονικά τους μη δομικά μέλη όπως εσωτερικοί διαχωρισμοί, επενδύσεις, σωληνώσεις και ράγα-οδηγο του ανελκυστήρα, τα οποία δεν είναι σχεδιασμένα να λαμβάνουν κάθετες δυνάμεις.

Οι παραμορφώσεις στα ψηλά κτίρια προκαλούν παραμορφώσεις και παρεκκλίσεις στο φρεάτιο του ανελκυστήρα, μειώνοντας τον ωφέλιμο χώρο για τον ανελκυστήρα. Στα κτίρια όπου παρουσιάζεται υπερβολική απόκλιση από την καθετότητα των τοιχείων του πυρήνα, οι ράγες-οδηγοί του ανελκυστήρα που βρίσκονται στερεωμένες στα τοιχεία, παραμορφώνονται, προκαλώντας μείωση της μέγιστης ταχύτητας του ανελκυστήρα και πρόωρη φθορά σε εξαρτήματα και μέλη του ανελκυστήρα. Η ασυμβατότητα των διαστάσεων είναι πιο έντονη στους τελευταίους ορόφους, λόγω της διαφορετικής κάθισης μεταξύ δομικών και μη μελών. Αυτού του είδους καθίσεις και παραμορφώσεις στα ψηλά κτίρια πρέπει να προνοούνται κατά το σχεδιασμό ώστε να αποφεύγεται επιπτώσεις στη λειτουργικότητα και αρχιτεκτονική του κτιρίου.

Η αξονική συρρίκνωση είναι το σύνολο της ελαστικής παραμόρφωσης και των παραμορφώσεων λόγω ερπυσμού και συρρίκνωσης και βασίζεται στην ακολουθία κατασκευής (Fintel et al. 1986).

Η αξονική συρρίκνωση ενός υποστυλώματος μπορεί να υπολογιστεί με επαναλαμβανόμενες πράξεις σε υπολογιστικά φύλλα με υπολογισμούς όσον αφορά τις ιδιότητες των υλικών σύμφωνα με τους κώδικες ή τα πρότυπα, τα γεωμετρικά στοιχεία του μέλους, τα επιβαλλόμενα φορτία τις συνθήκες περιβάλλοντος καθώς και τα στάδια κατασκευής. Αυτός αποτελεί τον παραδοσιακό τρόπο εφόσον σήμερα για την ανάλυση κατασκευών χρησιμοποιούνται τρισδιάστατα λογισμικά προγράμματα με βάση την χρονοϊστορική ανάλυση.

### **1.12.3 Ανάλυση σταδίων κατασκευής**

Η ανάλυση σταδίων κατασκευής ακολουθείται από τη χρονοϊστορική ανάλυση που γίνεται σε τρισδιάστατο μοντέλο για την ζωή λειτουργίας του κτιρίου. Η μέθοδος αυτή δίνει ακριβέστερα και πιο περιεκτικά αποτελέσματα από την παραδοσιακή μέθοδο, συνυπολογίζοντας και την επίδραση των ιδιοτήτων τους σκυροδέματος που μεταβάλλονται με τον χρόνο στην απόκριση της κατασκευής.

Μέσω αυτής της ανάλυσης προβλέπονται όλες οι οριζόντιες και κάθετες μετακινήσεις του κτιρίου σε οποιοδήποτε στάδιο της κατασκευής, ενώ μπορούν να επεξεργαστούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης και να παρουσιαστούν αμέσως τα νέα αποτελέσματα μέσω γραφικής απεικόνισης. Προσδιορίζονται οι μετακινήσεις όλων των μελών καθώς και οι επιδράσεις τους στα μη δομικά στοιχεία.

Η ανάλυση σταδίων κατασκευής εκτελείται για συγκεκριμένη χρονική στιγμή της ζωής του κτιρίου, ωστόσο τα διάφορα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορούν να συγκριθούν με τις μετρήσεις στο πεδίο του εργοταξίου ενώσω προχωρά η κατασκευή. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ανανεώνονται με βάση τη σύγκριση με τις μετρήσεις στο πεδίο. Οι συγκρίσεις αποτελεσμάτων (Banks et al. 2014) μπορούν να συνεχιστούν και μετά το πέρας της κατασκευής για τη χρονοϊστορική ανάλυση για καλύτερες προβλέψεις της απόκρισης του κτιρίου. Επίσης η ανάλυση σταδίων κατασκευής θα πρέπει να συνδυάζεται με την ανάλυση του εδάφους, για το λόγο ότι οι διαφορικές καθιζήσεις των θεμελίων επηρεάζουν άμεσα την απόκριση του κτιρίου.

### **1.12.4 Έλεγχος υλικών για ερπυσμό και συρρίκνωση**

Οι ιδιότητες του σκυροδέματος που εξαρτώνται από το χρόνο, όπως οι τάσεις λόγω ερπυσμού και οι τάσεις λόγω συρρίκνωσης χρησιμοποιούνται κατά την ανάλυση των

μετακινήσεων του κτιρίου και βασίζονται σε δείγματα πρόβλεψης που εισηγούνται οι σχεδιαστικοί κώδικες και οδηγοί. Ωστόσο μερικά δείγματα μπορεί να είναι ανεπαρκή για τύπους σκυροδέματος υψηλής αντοχής που χρησιμοποιούνται σε ψηλά κτίρια, 120 MPa. Για αντιπροσωπευτικά και ακριβή δείγματα ελέγχου για ερπυσμό και συρρίκνωση θα πρέπει να χρησιμοποιείται δείγμα από το σκυρόδεμα που εκχύνεται στην κατασκευή και να γίνει ένας βραχυπρόθεσμος εργαστηριακός έλεγχος ενός με τριών μηνών (Banks et al. 2014).

Κατά το στάδιο της κατασκευής, γίνεται επιτόπου καταγραφή των πραγματικών μετακινήσεων που υπέστη η κατασκευή και συγκρίνονται με τις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς. Η επιτόπια παρακολούθηση μπορεί να επεκταθεί μέχρι τον προβλεπόμενο χρόνο για τις μακροχρόνιες επιδράσεις του σκυροδέματος. Αν οι πιο πάνω πραγματικές μετρήσεις διαφέρουν από αυτές που έχουν προβλεφτεί, τότε ο προβλεπόμενος χρόνος και οι τιμές μελέτης πρέπει να τροποποιηθούν.

Υπάρχουν δύο τρόποι μέτρησης των μετακινήσεων και παραμορφώσεων των μελών. Ο πρώτος είναι με την τοποθέτηση αισθητήρα μετακινήσεων σε κάθε μέλος που θα ελέγχεται ενσωματωμένο στον οπλισμό του μέλους. Ο δεύτερος τρόπος είναι με χωρομέτρηση, καταμετρώντας τις μεταβολές κατά το χρόνο των τριών διαστάσεων του μέλους. Ωστόσο αυτή η μέθοδος είναι αρκετά χρονοβόρα.

Επιλέγονται ορισμένα υποστυλώματα και τοιχεία σε συγκεκριμένους ορόφους για παρακολούθηση. Προτιμότερο, είναι να παίρνονται μετρήσεις από τους πρώτους ορόφους, όπου η συρρίκνωση από την επιβολή φορτίων μπορεί να καταγραφεί από το ξεκίνημα μέχρι το τέλος της κατασκευής. Επιπλέον οι όροφοι πρέπει να παρακολουθούνται όταν υπάρχει αλλαγή σχεδιασμού σε αυτούς ή αλλαγή υλικού, από σκυρόδεμα σε χάλυβα.

Για την καταμέτρηση της κάθισης, χρησιμοποιούνται ενσύρματοι αισθητήρες μετακίνησης, οι οποίοι ενσωματώνονται μέσα στο μέλος πριν τη σκυροδέτηση, είτε τοποθετούνται εξωτερικά, στην επιφάνεια του μέλους έπειτα από την αφαίρεση του ξυλότυπου. Αν είναι εφικτό να τοποθετηθούν αισθητήρες σε κάθε υποστυλώμα από το υπόγειο μέχρι την οροφή, τότε η ολική κάθιση του κτιρίου θα υπολογιστεί με το σύνολο των καθίσεων σε όλους τους ορόφους. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και αισθητήρες LVDT για καταγραφή της παραμόρφωσης ή στροφής των μελών (Banks et al. 2014).



Οι μετρήσεις μπορούν να λαμβάνονται με φορητό σύστημα καταγραφής δεδομένων ή να αποτελούν μέρος ενός αυτοματοποιημένου συστήματος. Τα σύγχρονα συστήματα είναι ασύρματα και μπορούν να λαμβάνουν διάφορες μετρήσεις σε διάφορα χρονικά διαστήματα και να αποστέλλουν τις μετρήσεις στο μελετητικό γραφείο.

Η χωρομέτρηση για τη μεταβολή των διαστάσεων των μελών συνήθως γίνεται από επαγγελματίες τοπογράφους ανά ορισμένα διάστημα, π.χ. ανά 5 ορόφους, μέχρι την ολοκλήρωση της κατασκευής. Σύγχρονα τεχνολογικά συστήματα όπως ο τρισδιάστατος σαρωτής laser και άλλα δορυφορικά συστήματα αυξάνουν την ακρίβεια στις χωρομετρήσεις του κτιρίου και μειώνοντας τα σφάλματα κατά τις μετρήσεις.



**Διάγραμμα 21** Ενσύρματος αισθητήρας μετακίνησης (Surechem 2016)

Τα διορθωτικά μέτρα είναι προτιμότερο να λαμβάνονται κατά το στάδιο της μελέτης επικεντρώνοντας στη γενική επίλυση του προβλήματος της μετακίνησης του κτιρίου. Μερικά μέτρα είναι η τοποθέτηση αρμών, χρήση υλικών με μικρότερες μετακινήσεις, ακόμη και τροποποίηση του σχεδιασμού.

#### **1.12.5 Βελτιστοποίηση σχεδιασμού και γεωμετρίας**

Με βάση τον προκαταρκτικό σχεδιασμό, πρέπει να επιλέγονται υλικά με ιδιότητες τέτοιες ώστε να περιορίζουν τις μετακινήσεις του κτιρίου και ώστε τα μέλη να έχουν μετακινήσεις της ίδιας έντασης. Ο προκαθορισμός και οι κατασκευαστικές προσαρμογές γίνονται για να προσδώσουν στο κτίριο έναν καλύτερο γεωμετρικό σχεδιασμό για τη διάρκεια λειτουργίας του.

Το πρόβλημα των διαφορετικών ελαστικών καθίσεων των κάθετων στοιχείων μπορεί να αμβλυνθεί ή να αποφευχθεί εξασφαλίζοντας παρόμοια επίπεδα αξονικής θλίψης και με παρόμοιο μέτρο ελαστικότητας σε γειτονικά υποστυλώματα. Ωστόσο αυτό αποδεικνύεται ανέφικτο σε μερικές περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα σε ένα μεταβατικό όροφο, όπου

αλλάζει το σχέδιο ή το σχήμα του κτιρίου και ένα υποστύλωμα να παραλαμβάνει πολύ μεγαλύτερο φορτίο από ένα γειτονικό του. Τα φαινόμενα ερπυσμού και συρρίκνωσης μπορούν να μειωθούν με την προσθήκη επιπλέον οπλισμού και με τη χρήση μειγμάτων σκυροδέματος με χαμηλή συρρίκνωση (Smith et al. 1991).

Αυξάνοντας το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος, μειώνονται η ελαστικές παραμορφώσεις και ελαχιστοποιούνται τα φαινόμενα ερπυσμού και συρρίκνωσης. Ωστόσο αυτό εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε τσιμέντο, τέφρα ή πυριτική παιπάλη και στην αντοχή των αδρανών (Banks et al. 2014).

#### **1.12.6 Συνδέσεις μελών**

Υπάρχει η τάση στο στάδιο του σχεδιασμού να αποφεύγονται οι συνδέσεις αμετάθετου πλαισίου στους ορόφους και αμετάθετες συνδέσεις δοκών με τον πυρήνα και τα υποστυλώματα και αντ'αυτού χρησιμοποιούνται αρθρώσεις στις συνδέσεις. Αυτό μειώνει την υπερστατικότητα του κτιρίου, συνεπώς και την ακαμψία και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας στην επιβολή δυναμικών φορτίων.

Εντούτοις, το πρόβλημα της διαφορετικής κάθισης των κάθετων στοιχείων μειώνεται στην περίπτωση όπου το ψηλό κτίριο αποτελείται από πυρήνα με οπλισμένο σκυρόδεμα και μεταλλικά υποστυλώματα. Οι οριζόντιες και κάθετες μετακινήσεις που παρουσιάζονται στα ψηλά κτίρια, προϋποθέτουν και την ύπαρξη διαχωριστικών αρμών στα μη δομικά στοιχεία, όπως για προστασία των εξωτερικών επενδύσεων, των εσωτερικών και εξωτερικών τοίχων αλλά και του περιβλήματος του κτιρίου (Smith et al. 1991). Όλα τα πιο πάνω όπως και η διαστασιολόγηση του φρεατίου του ανελκυστήρα προσδιορίζονται στη φάση του λεπτομερούς σχεδιασμού και έκδοσης των τυπικών λεπτομερειών.

### **1.13 Υλικά**

Με την πρόοδο και ανάπτυξη της τεχνολογίας των υλικών επετράπη στην κατασκευαστική βιομηχανία η αύξηση της αποδοτικότητας των υλικών προς τη συμπεριφορά του κτιρίου. Πόσο μάλλον η βελτίωση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος που επιτρέπει τη χρήση του στην κατασκευή ψηλών κτιρίων. Στα θεμέλια των ψηλών κτιρίων απαιτείται μεγάλος όγκος έγχυτου σκυροδέματος. Οι αρχές τάσεις που επιβάλλονται στα θεμέλια είναι σημαντικά χαμηλότερες από τις μόνιμες υπολογιζόμενες τάσεις. Είναι φυσικό το σκυρόδεμα να αποκτά το μέγιστο τις αντοχής του στις 28 μέρες.

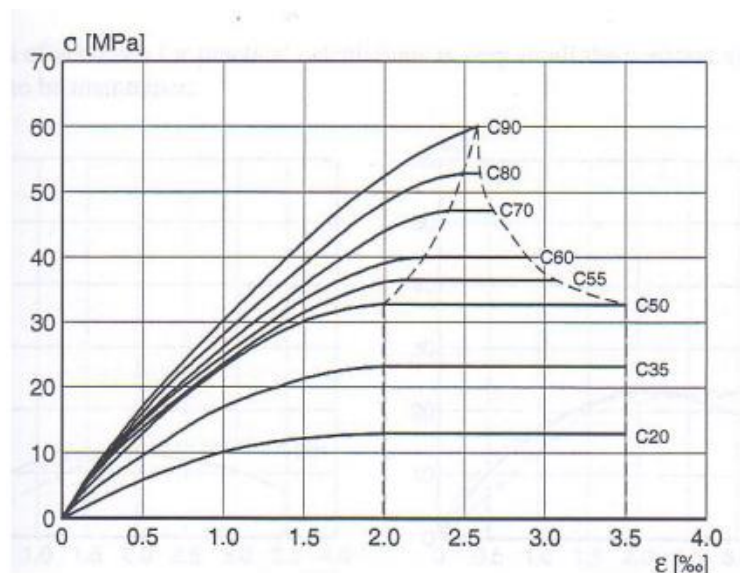
### 1.13.1 Σκυρόδεμα

Για την κατασκευή ψηλών κτιρίων άνω των 30 ορόφων χρησιμοποιείται, όπου είναι απαραίτητο, σκυρόδεμα υψηλής αντοχής από C50/60 και άνω. Χρησιμοποιείται στη σκυροδέτηση των κάθετων στοιχείων περισσότερο, για μείωση του εμβαδού διατομής των στοιχείων και εξοικονόμηση του ωφέλιμου χώρου, έχοντας ωστόσο υψηλή θλιπτική αντοχή (Banks et al. 2014) .

Η χρήση σκυροδέματος υψηλής αντοχής επιφέρει αρκετά πλεονεκτήματα. Το εμβαδόν της διατομής των υποστυλωμάτων μπορεί να μειωθεί μέχρι και 40% με τον διπλασιασμό της αντοχής του σκυροδέματος (Banks et al. 2014). Τα τοιχεία δεν απαιτούν σκυρόδεμα υψηλής αντοχής, εφόσον τα φορτία που λαμβάνουν διαδίδονται σε όλη την επιφάνεια του τοιχείου. Επίσης το σκυρόδεμα υψηλής αντοχής έχει μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας, άρα λαμβάνει και μικρότερες τάσεις, ενώ τα φαινόμενα ερπυσμού και συρρίκνωσης είναι μικρότερα.

Για αποφυγή διαφορετικών συρρικνώσεων μεταξύ υποστυλωμάτων και τοιχείων πρέπει να χρησιμοποιείται σκυρόδεμα διαφορετικής αντοχής στο κάθε στοιχείο όταν οι τάσεις που δέχονται είναι διαφορετικές. Στις περιπτώσεις όπου για τα κάθετα στοιχεία χρησιμοποιείται σκυρόδεμα υψηλής αντοχής ενώ για τα οριζόντια στοιχεία κανονικό σκυρόδεμα, τότε θα πρέπει αυτό να ληφθεί υπόψη για τις συνδέσεις πλάκας-υποστυλώματος ή δοκού-υποστυλώματος. Η σύνδεση των δύο μελών σκυροδετείται κατά τη σκυροδέτηση των οριζόντιων μελών, άρα χρησιμοποιείται το σκυρόδεμα κανονικής αντοχής για τη σύνδεση. Το σκυρόδεμα υψηλής αντοχής είναι λιγότερο πλαστικό από το κανονικό σκυρόδεμα, γι' αυτό ο οπλισμός πρέπει να προσδίδει πλαστικότητα στις συνδέσεις για τα υποστυλώματα και τα τοιχεία. Το πρόβλημα της έλλειψης πλαστικότητας επιλύθηκε με την προσθήκη ιών χάλυβα στο σκυρόδεμα επιπλέον του κανονικού οπλισμού (Banks et al. 2014).

Σύμφωνα με τις παραμέτρους του Ευρωκώδικα 2, με διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης, αποδεικνύεται ότι όσο αυξάνεται η αντοχή του σκυροδέματος, τόσο μειώνεται η πλαστική του περιοχή μέχρι τη θραύση.



Διάγραμμα 22 Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης των τύπων σκυροδέματος (Ευρωκώδικας 2)

Στον Ευρωκώδικα 2 EN 1992-1-2 δίνεται η συνιστώμενη δοσολογία για προσθήκη ινών πολυπροπυλίνης στο σκυρόδεμα για μείωση της πιθανότητας θρυμματισμού στο σκυρόδεμα υψηλής αντοχής. Η προσθήκη ινών επηρεάζει την αντοχή αλλά και την αντλησιμότητα του σκυροδέματος σε μεγάλα ύψη και πρέπει αυτό να ληφθεί υπόψη. Αν ο οπλισμός στα ψηλά κτίρια είναι πολύ πυκνός, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα.

### 1.13.2 Οπλισμός

Η παραγωγή οπλισμού κατασκευής ποικίλει ανά το παγκόσμιο και μπορεί να εισαχθεί ανάλογα με τις προδιαγραφές που απαιτούνται. Οι κύριες ιδιότητες των υλικών που ενδιαφέρουν περισσότερο τους μηχανικούς είναι η αντοχή και πλαστικότητα. Η πλαστικότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική στις σεισμογενείς ζώνες. Σημαντικές ιδιότητες επίσης είναι η πρόσφυση και η συγκολλησιμότητα των υλικών. Ωστόσο σε όλες τις περιπτώσεις, ο οπλισμός θα πρέπει να είναι σύμφωνος με πρότυπα σχεδιασμού του σκυροδέματος.

Είναι πάρα πολλοί οι παράγοντες που ο Πολιτικός Μηχανικός πρέπει να λάβει υπόψη του. Οι πιο πάνω αρχές σχεδιασμού ψηλών κτιρίων βοηθούν στον ορθότερο σχεδιασμό και μελέτης μια πολυώροφης κατασκευής, μέσα από μελέτη σε βάθος των διαφόρων παραμέτρων που επηρεάζουν όλο τον κύκλο ζωής του κτιρίου, από τη σύλληψη της ιδέας κατασκευής του μέχρι και την αστοχία του ως κατασκευή.

## 2 Μέθοδοι ανάλυσης

Σήμερα πλέον, λόγω της αυξανόμενης ανάγκης για οικονομικότερες και ανθεκτικότερες κατασκευές αλλά και λόγω των αυξανόμενων διατάξεων των κανονισμών, επιβάλλεται να λαμβάνονται υπόψη οι γραμμικότητες γεωμετρίας και υλικού όσον αφορά το σχεδιασμό και μελέτη μίας κατασκευής. Ωστόσο αυτό, από υπολογιστικής άποψης δεν είναι απλό, εφόσον πρέπει να συμπεριληφθούν φυσικά φαινόμενα όπως η αστάθεια του υλικού και οι επιδράσεις της γεωμετρίας.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στη γεωμετρική μη γραμμικότητα και στη μη γραμμικότητα υλικού, οι οποίες επηρεάζουν τη μη γραμμική ανάλυση της κατασκευής και οδηγούν σε πιο ακριβή αποτελέσματα της απόκρισης μιας κατασκευής. Τα φαινόμενα αυτά είναι πολύ εντονότερα όταν πρόκειται για ανάλυση πολύώροφων κτιρίων.

Μέσα από τα αποτελέσματα αυτών των μεθόδων ανάλυσης θα διαφανεί ποιά είναι η επίδραση φαινομένων δευτέρας τάξης στην απόκριση της κατασκευής κατά τη μη γραμμική ανάλυση. Οι αναλύσεις της κατασκευής θα γίνουν με τη χρήση του λογισμικού προγράμματος SAP 2000 v14.0.0.

Τα σύγχρονα λογισμικά προγράμματα ανάλυσης κτιρίων, δίνουν τη δυνατότητα στο μελετητή, να προσεγγίσει τη γραμμική θεωρία αλλά και τη μη γραμμική. Η απλούστερη δυνατή συμπεριφορά μιας κατασκευής αντιπροσωπεύεται από τη γραμμική θεωρία. Ωστόσο στη μη γραμμική θεωρία, κατά την ανάλυση, λαμβάνονται υπόψη η γεωμετρική μη γραμμικότητα και η μη γραμμικότητα του υλικού, που με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνονται ακριβέστερα αποτελέσματα. Η μη γραμμική δυναμική ανάλυση είναι εφικτή για ψηλά κτίρια, και μπορεί να γίνει για λογικό κόστος.

Με τη σημαντική αύξηση των παραμορφώσεων στο φορέα, η γραμμική θεωρία δεν αντιπροσωπεύει πλέον την πραγματική συμπεριφορά του φορέα και πλέον η σχέση εξωτερικών δυνάμεων και παραμορφώσεων γίνεται μη γραμμική, και παρουσιάζεται πλέον η γεωμετρική μη γραμμικότητα. Το ίδιο συμβαίνει και στη συμπεριφορά του υλικού, στο οποίο όταν εφαρμοστεί τάση μεγαλύτερη του ορίου διαρροής του, τότε έχουμε μη γραμμικότητα υλικού και η συμπεριφορά του υλικού περιγράφεται από τη μη γραμμική σχέση τάσεων – παραμορφώσεων.

Συμπερασματικά από τα πιο πάνω, για να υπάρχει γραμμική συμπεριφορά θα πρέπει:

- το υλικό να συμπεριφέρεται ως γραμμικά ελαστικό μέσο και
- οι μετακινήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο φορέα να είναι πολύ μικρές

Σε μερικές περιπτώσεις όμως οι παραμορφώσεις μπορεί να είναι αρκετά μεγάλες (γεωμετρική μη-γραμμικότητα) και η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων να γίνεται μη γραμμική (μη γραμμικότητα υλικού) καθώς παραμορφώνεται το υλικό. Και οι δύο αυτές περιπτώσεις εισάγουν μη-γραμμικότητα στο σύστημα, η οποία ενδεχομένως να πρέπει να ληφθεί υπόψη στην ανάλυση κατασκευών που παραμορφώνονται στη μετελαστική (πλαστική) περιοχή, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση μίας ισχυρής σεισμικής διέγερσης (Πουλοκέφαλος 2014).

Το μοντέλο ανάλυσης είναι ευέλικτο και επιτρέπει στο χρήστη μια πλήρη μη γραμμική ανάλυση, λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμικότητα του υλικού και της γεωμετρίας, ή εξετάζοντας τη γραμμική ελαστική ανάλυση για τη μελέτη των διαφόρων τύπων ανάλυσης της απόκρισης μίας κατασκευής. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο για τη δυναμική ανάλυση όπου γίνεται σύγκριση μεταξύ γραμμικής και μη γραμμικής ανάλυσης για την επιλογή των δυνάμεων που θα χρησιμοποιηθούν κατά το σχεδιασμό της κατασκευής.

## **2.1 Γραμμική ανάλυση**

Γραμμική (ελαστική) ανάλυση είναι αυτή που βασίζεται στην υπόθεση ότι η σχέση τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων του υλικού είναι γραμμική, όποια και να είναι η τιμή της τάσης. Αυτή η υπόθεση μπορεί να διατηρείται και για τις δύο πρώτης τάξης και δεύτερης τάξης ελαστική ανάλυση, ακόμα και όπου η αντοχή της διατομής βασίζεται στη πλαστική της αντοχή.

Όταν η ανάλυση βασίζεται σε μια στατική γραμμική διαδικασία κατά την οποία τα δομικά στοιχεία προσδιορίζονται έτσι ώστε να μην υπερβαίνουν τις ελαστικές τους ικανότητες κατά τις συνθήκες φόρτωσης, η μέθοδος ανάλυσης αυτή είναι πιο απλουστευμένη και λιγότερο χρονοβόρα. Ωστόσο τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου δεν αντιπροσωπεύουν την απόκριση μιας πραγματικής κατασκευής (Πουλοκέφαλος 2014).

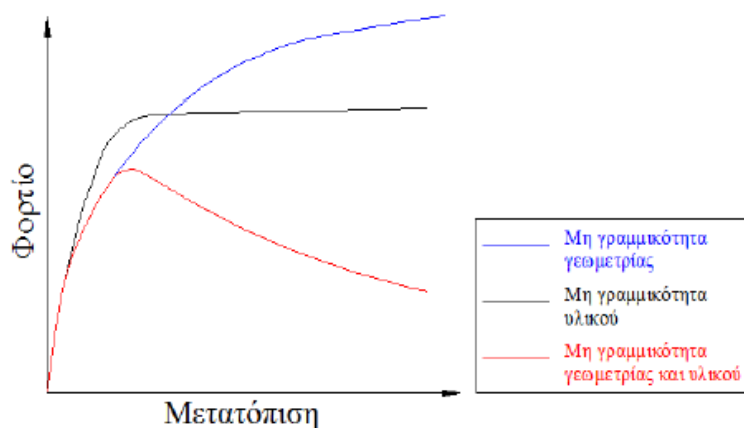
## 2.2 Μη γραμμική ανάλυση

Χρησιμοποιώντας για ανάλυση τη μη γραμμική συμπεριφορά της κατασκευής, γίνεται μια πιο ρεαλιστική προσομοίωση της συμπεριφοράς της κατασκευής, η οποία αποδίδει μία καλύτερη προσέγγιση της ορθής απόκρισης της. Η μοντελοποίηση της μη γραμμικής συμπεριφοράς είναι ουσιώδης για τη δυναμική ανάλυση, καθώς ελέγχει την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας της κατασκευής (Chysostomou 1990).

Οι γραμμικές (ελαστικές) μέθοδοι ανάλυσης επικεντρώνονται στην περιγραφή της ελαστικής συμπεριφοράς των μελών του φορέα μέχρι τη διαρροή τους. Όμως ο φορέας ακόμη και αν ένας αριθμός των μελών του έχει διαρρεύσει βρίσκεται σε θέση να αναλάβει επιπλέον πλευρικά φορτία μέσω των παραμορφώσεων των μελών, μέχρι βέβαια αυτά να αστοχήσουν. Δηλαδή η πλαστιμότητα, η ικανότητα μη γραμμικής παραμόρφωσης του φορέα, είναι καθοριστικός παράγοντας του σχεδιασμού και μελέτης της κατασκευής. Με τις σύγχρονες αντισεισμικές αντιλήψεις και κανονισμούς, όταν το πλευρικό φορτίο αφορά σεισμό, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η πλαστιμότητα του κάθε μέλους του φορέα καθώς και του φορέα ως σύνολο (καθολικός δείκτης συμπεριφοράς  $q$ ), εκφρασμένος είτε με όρους δυνάμεων-μετακινήσεων είτε ροπών-παραμορφώσεων.

Οι μη γραμμικές μέθοδοι ανάλυσης εφαρμόζονται καλύτερα όταν συνυπολογίζονται κατά τη μοντελοποίηση και ανάλυση, είτε η γεωμετρική μη γραμμικότητα, είτε η μη γραμμικότητα του υλικού.

Στην περίπτωση που το υλικό δε συμπεριφέρεται ως γραμμικά ελαστικό μέσο, η συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από μη γραμμικότητα υλικού. Στην περίπτωση που οι μετακινήσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι μεγάλες, παρατηρείται μη γραμμικότητα γεωμετρίας. Εάν συμβαίνουν και οι δυο πιο πάνω περιπτώσεις, υπάρχει ταυτόχρονα μη γραμμικότητα υλικού και μη γραμμικότητα γεωμετρίας (Πουλοκέφαλος 2014). Το διάγραμμα Φορτίου- Μετατόπισης των πιο πάνω περιπτώσεων φαίνεται στο διάγραμμα 23.



**Διάγραμμα 23** Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης με μη γραμμική ανάλυση (Πουλοκέφαλος 2014)

Η γεωμετρική μη γραμμικότητα εξετάζεται από την επίδραση του φαινομένου P - Δέλτα που σχετίζονται με την εφαρμογή της εξωτερικής φόρτισης στην παραμορφωμένη θέση του φορέα μιας κατασκευής. Η μη γραμμικότητα του υλικού συμβάλλει στην οριακή κατάσταση συμπεριφοράς, μαζί με το χρονικό διάστημα που εξαρτάται από φαινόμενα όπως ο ερπυσμός και η συρρίκνωση σε φορείς από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η μη γραμμικότητα υλικού αφορά την ανελαστική απόκριση των κατασκευών κατά την οποία η συμπεριφορά ενός δομικού στοιχείου ή φορέα αποκλίνει από την αρχική του χαρακτηριστική ακαμψία ξεπερνώντας την ελαστική του συμπεριφορά (Smith et al. 1991). Ο σχηματισμός πλαστικής άρθρωσης σε κάμψη των μελών μπορεί να καθορίζεται σύμφωνα με τα πρότυπα του κώδικα στα οποία βασίζεται ο σχεδιασμός ή με εμπειρικά δεδομένα. Περαιτέρω επεξήγηση των προαναφερθέντων μεθόδων ανάλυσης θα γίνει στη συνέχεια του κεφαλαίου για την κάθε μια μέθοδο ξεχωριστά.

Οι μηχανικοί μπορούν να χρησιμοποιούν οποιαδήποτε από αυτές τις μεθόδους ανάλυσης για να αποκτήσουν εικόνα για τη συμπεριφορά και απόκριση μιας κατασκευής και να εξαγάγουν χρήσιμες πληροφορίες για τη διαδικασία σχεδιασμού και λήψης αποφάσεων.

### **2.3 Βασικές διαφορές γραμμικής και μη γραμμικής ανάλυσης**

Κατά τη γραμμική ανάλυση όλες οι συνιστώσες θεωρούνται ελαστικές, και μόνο οι ελαστικές ιδιότητες των υλικών συνυπολογίζονται στην ανάλυση. Όσον αφορά τη μη γραμμική ανάλυση, ορισμένα στοιχεία μπορεί να ξεπεράσουν το όριο διαρροής τους, και



επιπλέον εφαρμόζονται οι ανελαστικές τους ιδιότητες. Αυτές οι ιδιότητες είναι περισσότερο περίπλοκες από τις ελαστικές ιδιότητες.

Ένα γραμμικό μοντέλο ανάλυσης συνήθως απαιτεί μόνο μερικά είδη μελών του φορέα όπως οι δοκοί, τα υποστυλώματα, το κέλυφος. Για ένα μη γραμμικό μοντέλο, απαιτείται η επιλογή των μελών και συνυπολογίζονται και οι τύποι μη γραμμικής συμπεριφοράς των υλικών των μελών αυτών. Για τα μέλη που συμπεριφέρονται ελαστικά, οι σημαντικές τους ιδιότητες είναι οι ελαστικές δυσκαμψίες, όπως η  $EI$  και  $EA$ , οι οποίες είναι αρκετά καλά τυποποιημένες. Για μέλη με μη γραμμική συμπεριφορά, οι σημαντικές ιδιότητες τους περιλαμβάνουν το όριο διαρροής, τη συμπεριφορά μετά την διαρροή και την υποβάθμιση της δυσκαμψίας (Powell 2013).

Η μη γραμμική μοντελοποίηση (Powell 2013) είναι πιο περίπλοκη από ότι η γραμμική. Απαιτεί περισσότερη κρίση και μια βαθύτερη κατανόηση της δομικής συμπεριφοράς. Επιπλέον, η μη γραμμική ανάλυση απαιτεί πολύ περισσότερο χρόνο υπολογισμών στο λογισμικό. Είναι λογικό να αναμένεται ότι μία μη γραμμική ανάλυση θα δώσει καλύτερη πληροφόρηση από μια γραμμική ανάλυση, απλά επειδή είναι πιο ορθολογική. Η μη γραμμική ανάλυση χρησιμοποιείται σήμερα ως επί το πλείστον, όπου η ανάλυση συμπεριφοράς μπορεί να είναι περίπλοκη, ωστόσο μπορεί να δικαιολογήσει τα πρόσθετα έξοδα ανάλυσης. Η μη γραμμική ανάλυση παρέχει τη δυνατότητα για πολύ καλύτερη πληροφόρηση για την πρόβλεψη των ζημιών, και ως εκ τούτου, για την εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου.

Εκ των οποίων ουκ άνευ για τη μη γραμμική μοντελοποίηση είναι η κατανόηση της συμπεριφοράς των στοιχείων διαφόρων τύπων. Δεν είναι απαραίτητο να έχουμε μια λεπτομερή κατανόηση των στρατηγικών για μη γραμμική ανάλυση. Η τεκμηρίωση ενός προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή θα πρέπει να περιγράφει τα μη γραμμικά στοιχεία σε μια μορφή που μπορεί να γίνει κατανοητή από ένα απλό Μηχανικό. Πάντα πρέπει να υπάρχει κατά νου, ότι ο στόχος της δομικής ανάλυσης είναι να εκπονηθούν χρήσιμα αποτελέσματα και συμπεράσματα που θα βοηθήσουν στη λήψη αποφάσεων σχεδιασμού (Carvalho et al. 2012). Δεν αποτελεί μοναδικό στόχο να προβλεφτεί η ακριβής συμπεριφορά μιας κατασκευής, αφού η πρόβλεψη της ακριβούς συμπεριφοράς για μια πραγματική κατασκευή είναι κυριολεκτικά αδύνατη.

Ένα λογιστικό πρόγραμμα αναλύει μέσω της μη γραμμικής ανάλυσης ένα προσομοίωμα κατασκευής και όχι την πραγματική κατασκευή. Ο κάθε Πολιτικός Μηχανικός ξεχωριστά μπορεί να κάνει διαφορετικές υποθέσεις μοντέλων για μία κατασκευή. Ωστόσο διαφορετικά μοντέλα ανάλυσης για την ίδια κατασκευή ενδέχεται να έχουν διαφορετικά αποτελέσματα. Επίσης, η απόκριση μιας κατασκευής μπορεί να είναι ευαίσθητη στις δυνάμεις και τις δυσκαμψίες των στοιχείων της, καθώς και οι πραγματικές ιδιότητες των υλικών και στοιχείων που έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα δεν μπορούν να είναι γνωστές με ακρίβεια. Παρόλα αυτά η σχεδιαστική ικανότητα μπορεί να μειώσει σημαντικά την αβεβαιότητα.

Όταν παρουσιάζεται ανελαστική συμπεριφορά, τότε μια μη γραμμική ανάλυση είναι πιο πιθανό να δώσει αξιόπιστες πληροφορίες για το σχεδιασμό από μια γραμμική ανάλυση. Μπορεί να υπάρχουν μικρότερη μεταβλητότητα στα αποτελέσματα των αναλύσεων γραμμικής, αλλά αυτό είναι απατηλό διότι η γραμμική ανάλυση είναι εγγενώς αβέβαιη.

Συνοψίζοντας, μια μη γραμμική δυναμική ανάλυση μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερο σχεδιασμό. Οι διαδικασίες που απαιτούνται για τη μοντελοποίηση και ανάλυση είναι δύσκολες αλλά εφικτές, οι οποίες ωστόσο απαιτούν τη κατανόηση της συμπεριφοράς του φορέα κατασκευής καθώς και τη διαδικασία σχεδιασμού. Ο Πολιτικός Μηχανικός μπορεί να έχει στη διάθεσή του αρκετά λογισμικά προγράμματα για την ανάλυση κατασκευών. Μέσα από τη δομική ανάλυση μιας κατασκευής, κύριος στόχος είναι να παρθούν πληροφορίες για τη λήψη αποφάσεων σχεδιασμού και όχι κατ'ανάγκη να προβλεφτεί η ακριβής συμπεριφορά μιας κατασκευής.

## **2.4 Γεωμετρική μη γραμμικότητα (Geometric Nonlinearity)**

Καθήκον του Πολιτικού Μηχανικού είναι η μελέτη και ο σχεδιασμός μίας ασφαλούς κατασκευής, με το ελάχιστο δυνατό κόστος μέσα από τη μέγιστη εξοικονόμηση δομικών υλικών. Η τελευταία λέξη της τεχνολογίας και η καινοτομία στα δομικά υλικά, μέσα από τεχνικές, δίνουν τη δυνατότητα στον Πολιτικό Μηχανικό να χρησιμοποιήσει σύγχρονες μεθόδους και δομικά υλικά με μεγαλύτερη ποιότητα και αντοχή. Με αυτό τον τρόπο του παρέχεται η δυνατότητα σχεδιασμού των δομικών μελών του φορέα σε κάθε επιθυμητό σχήμα και πάχος. Επίσης η ραγδαία ανάπτυξη στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές επιτρέπει στο μελετητή την εκπόνηση ακριβέστερων μεθόδων ανάλυσης σε λιγότερο χρόνο, επιτρέποντας του να εκμεταλλεύεται στο έπακρο την αντοχή και τις άλλες ιδιότητες του υλικού.

Ωστόσο αυτό δημιουργεί ένα πιο εύκαμπτο φορέα στην κατασκευή τόσο σε επίπεδο μέλους, όσο και σε επίπεδο διατομής. Εξαιτίας αυτού παρουσιάζονται μεγαλύτερες παραμορφώσεις κατά τη φόρτιση του φορέα. Οι παραμορφώσεις αυτές έχουν ως συνέπεια ότι επηρεάζεται σημαντικά η παραμορφωμένη γεωμετρία του φορέα σε σχέση με την απαραμόρφωτη. Η ανάγκη διατύπωσης των εξισώσεων ισορροπίας στην παραμορφωμένη κατάσταση, η οποία δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων, απαιτεί ιδιαίτερες μεθόδους στατικής και δυναμικής ανάλυσης, οδηγώντας σε κατάργηση της αναλογίας μεταξύ φορτίων και παραμόρφωσης. Απλά μιλώντας, αν η σχέση φορτίου-παραμόρφωσης είναι μη γραμμική, τότε έχουμε γεωμετρική μη γραμμικότητα. Η ανάλυση της γεωμετρικής μη γραμμικότητας γίνεται συνυπολογίζοντας το φαινόμενο P-Δ και τις μεγάλες μετατοπίσεις (Konarure et al. 2015).

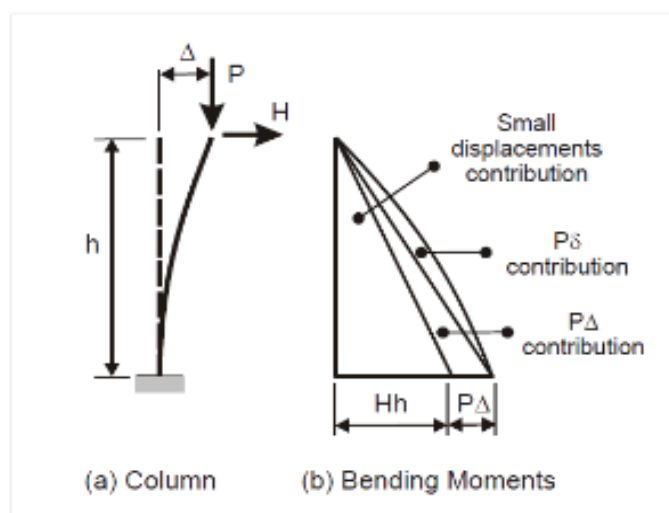
Ένας σημαντικός παράγοντας για μια ακριβέστερη μοντελοποίηση μιας κατασκευής είναι και η μελέτη της γεωμετρικής μη γραμμικότητας. Όταν λαμβάνεται υπόψη η μη γραμμικότητα του υλικού, τότε μειώνονται οι μεγάλες παραμορφώσεις. Ωστόσο, όταν οι παραμορφώσεις της κατασκευής γίνονται μεγάλες, τότε οι πλευρικές μετατοπίσεις και οι αξονικές δυνάμεις που επιδρούν, οδηγούν σε μεγέθυνση της παραμόρφωσης και των δυνάμεων των μελών (Chrysostomou 1990).

Η κατάργηση της αναλογίας μεταξύ φορτίων και παραμόρφωσης συνεπάγεται και τη γεωμετρική μη γραμμική συμπεριφορά. Στη γεωμετρική μη γραμμικότητα θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η αλλαγή της γεωμετρίας του φορέα κατά την ανάλυση. Εάν η επιφορτιζόμενη διατομή αλλάξει διαστάσεις κατά τη φόρτιση, τότε η τάση θα πρέπει να υπολογίζεται ως η επιβαλλόμενη δύναμη / νέα επιφάνεια διατομής. Ένας γενικός κανόνας (Powell 2013) είναι ότι θα πρέπει να χρησιμοποιήσετε η γεωμετρική μη γραμμικότητα, όταν η αλλαγή στη διατομή υπερβαίνει το 5% .

Ως ένα απλό παράδειγμα της γεωμετρικής μη γραμμικότητας, μπορούμε να αναφέρουμε την περίπτωση του ελαστικού λυγισμού ενός υποστυλώματος. Στην περίπτωση αυτή η παραμόρφωση του υποστυλώματος όταν λυγίζει είναι τόσο υψηλή, όπου η ύπαρξη των δευτερογενών ροπών που οφείλονται στην αξονική δύναμη, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

Η μη γραμμική ανάλυση καθίσταται αναγκαία όταν η ακαμψία των μελών του φορέα αλλάζει υπό τις συνθήκες λειτουργίας του. Εάν οι αλλαγές στην δυσκαμψία προέλθουν μόνο από αλλαγές στο σχήμα της διατομής, τότε η μη γραμμική συμπεριφορά ορίζεται ως γεωμετρική

μη γραμμικότητα. Τέτοιες αλλαγές στην ακαμψία λόγω αλλαγής της διατομής μπορούν να συμβούν όταν ένα τμήμα έχει μεγάλες παραμορφώσεις που είναι ορατές με γυμνό μάτι. Ένας γενικά αποδεκτός εμπειρικός κανόνας προτείνει τη διεξαγωγή μιας γεωμετρικής μη γραμμικής ανάλυσης, όταν οι παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερο από το  $1/20$  της μεγαλύτερης διάστασης του μέλους του φορέα. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που πρέπει να αναγνωρίσουμε είναι ότι σε περιπτώσεις μεγάλων παραμορφώσεων, η κατεύθυνση του φορτίου μπορεί να αλλάξει, όπως το μοντέλο παραμορφώνεται. Αλλαγές στην ακαμψία λόγω του σχήματος μπορεί επίσης να προκύψουν και όταν οι παραμορφώσεις είναι μικρές.

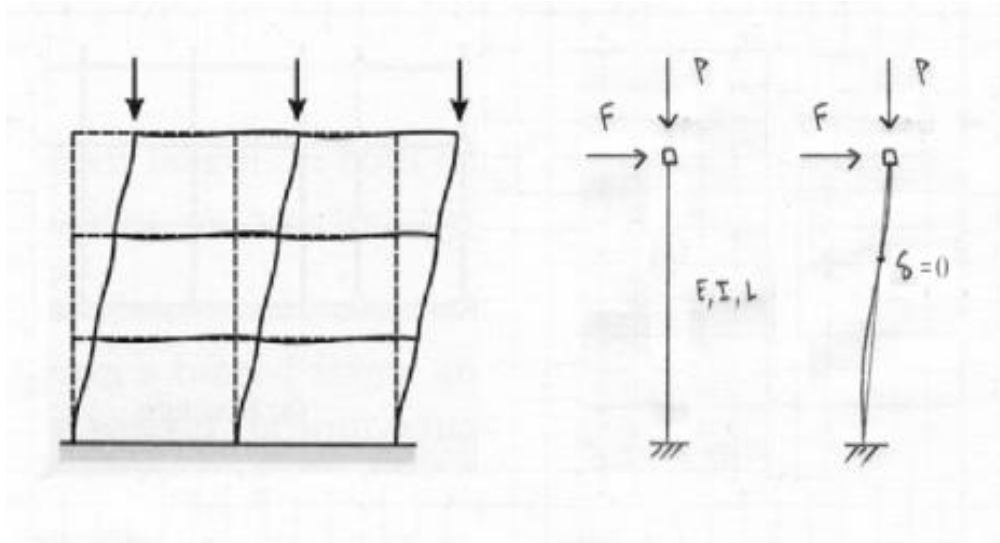


Διάγραμμα 24 Φαινόμενο P-Δ σε υποστήλωμα (Konarpure et al. 2015)

#### 2.4.1 Επιρροή φαινομένων γεωμετρικής μη γραμμικότητας

Κατά την εφαρμογή της ανελαστικής ανάλυσης, υπάρχει η δυνατότητα να ληφθούν υπόψη φαινόμενα γεωμετρικής μη-γραμμικότητας (*Geometric Nonlinearity*) όπως τα φαινόμενα P-Δ και τα μη-γραμμικά φαινόμενα λόγω μεγάλων μετακινήσεων. Όταν η απόκριση ενός φορέα αναμένεται να δεχθεί έντονη επιρροή από τέτοια φαινόμενα, που στη δική μας περίπτωση ένα ψηλό κτίριο δέχεται έντονη επιρροή από αυτά τα φαινόμενα, πρέπει αυτά να λαμβάνονται υπόψη. Για τα ψηλά κτίρια (Konarpure et al. 2015) είναι απαραίτητο να εξεταστεί η επίδραση του φαινομένου P-Δ. Αυτό εξηγεί το γεγονός ότι η ισορροπία της κατασκευής θα πρέπει να εξεταστεί υπό το παραμορφωμένο σχήμα του φορέα και όχι στο αρχικό μη παραμορφωμένο σχήμα. Συστήνεται ωστόσο ο συνυπολογισμός τους να γίνεται σταδιακά. Αυτό προτείνεται καθώς, με τη συμμετοχή των φαινομένων μη-γραμμικότητας, αυξάνονται οι παράγοντες που πιθανόν οδηγούν την ανάλυση σε αδυναμία σύγκλισης. Είναι συνεπώς σκόπιμο να διασφαλίζεται η ομαλή εξέλιξη της ανάλυσης υπό τις κλασσικές

συνθήκες, και σε δεύτερη φάση να αντιμετωπίζεται η συμμετοχή πρόσθετων παραμέτρων. Η εξέταση της επίδρασης του φαινομένου P-Δ δεν επηρεάζει ιδιαίτερα το χρόνο υπολογισμού που απαιτείται για την ανάλυση.



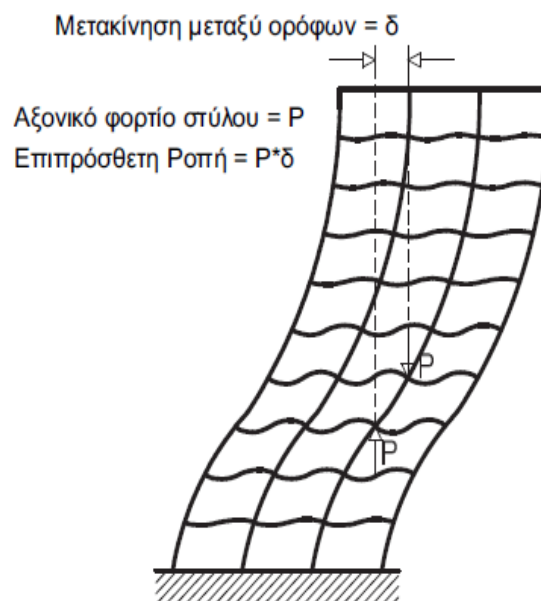
Διάγραμμα 25 Φαινόμενο P-Δ (Konarpure et al. 2015)

Το φαινόμενο P-Δ πρέπει να λαμβάνεται έντονα υπόψη από τους πολιτικούς μηχανικούς. Για τις κατασκευές, η μάζα, η οποία προκαλεί το φαινόμενο P-Δ, είναι σταθερή ανεξάρτητα από τα πλευρικά φορτία και τις μετατοπίσεις. Αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται για τη γραμμικοποίηση του αποτελέσματος P-Δ και για να λυθεί το πρόβλημα "ακριβώς", ικανοποιώντας την ισορροπία του φορέα στην παραμορφωμένη θέση.

Το φαινόμενο P-Δ, κύριος παράγοντας για τη γεωμετρική μη γραμμικότητα, περιλαμβάνει την ισορροπία και τη συμβατότητα των σχέσεων της φόρτισης ενός δομικού φορέα σε σχέση με την παραμορφωμένης διαμόρφωσή του. Ιδιαίτερης σημασίας είναι η πρόκληση της εφαρμογής του φορτίου βαρύτητας στους πλαγίως μετατοπισμένους φορείς πολυώροφων κτιρίων. Αυτή η κατάσταση δυσχεραίνει τις μηχανικές συμπεριφορές των υλικών με παράλληλη μείωση της ικανότητας παραμόρφωσης (Davidson et al. 1992). Το P-Δ περιλαμβάνει συνήθως μεγάλες εξωτερικές δυνάμεις με σχετικά μικρές μετατοπίσεις. Αν οι παραμορφώσεις γίνουν αρκετά μεγάλες ώστε το υλικό να ξεφύγει από τις γραμμικές σχέσεις, καθίσταται αναγκαίος ο συνυπολογισμός και των μεγάλων μετατοπίσεων κατά την ανάλυση.

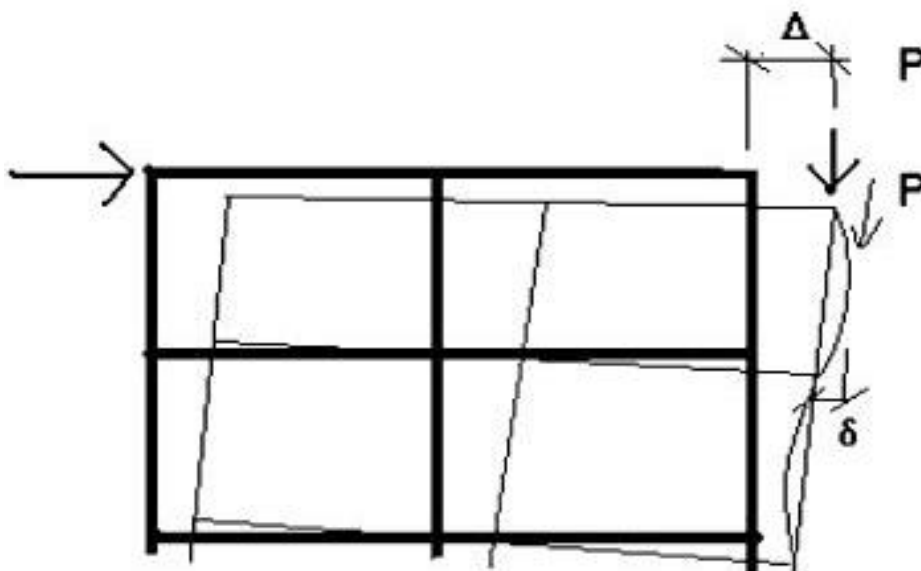
Οι δύο πηγές του φαινομένου P-Δ περιγράφονται ως εξής:

- P-δ (μικρό δέλτα), σχετίζεται με την τοπική παραμόρφωση σε σχέση με την χορδή του στοιχείου μεταξύ των ακραίων κόμβων. Συνήθως, το P-Δ γίνεται σημαντικό μόνο σε αδικαιολόγητα μεγάλες τιμές μετατόπισης, ή σε ιδιαίτερα λεπτά υποστυλώματα. Εφόσον μια κατασκευή τηρεί τις απαιτήσεις λυγερότητας σύμφωνα με τη σεισμική μηχανική, δεν είναι σκόπιμη η μοντελοποίηση σε P-δ, επειδή μπορεί να αυξήσει σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο χωρίς να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες (Powell 2013).



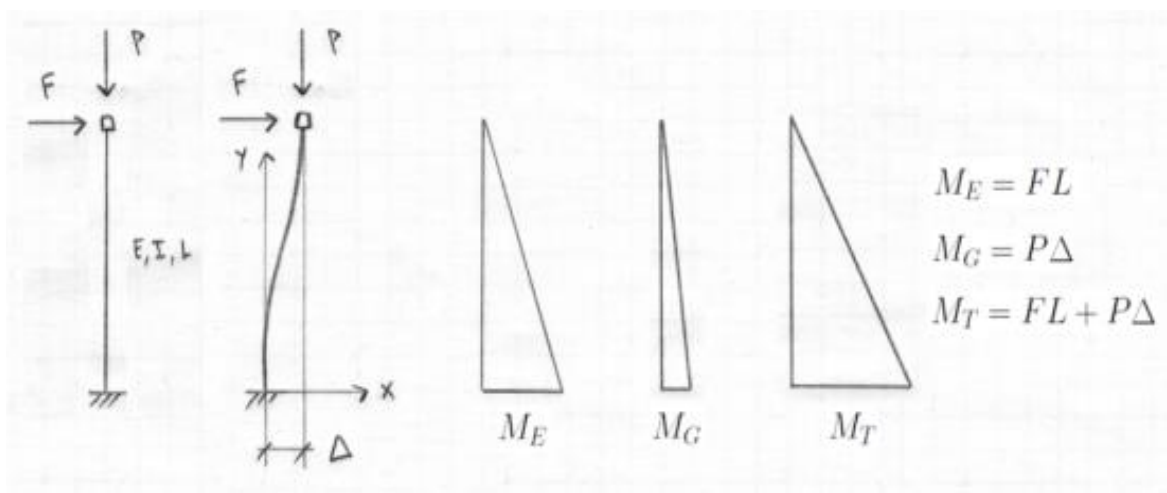
Διάγραμμα 26 Επιρροή φαινομένου P-Δ για δυναμική αστάθεια (Πουλοκέφαλος 2014)

- P-Δ (μεγάλο δέλτα), συνδέεται με τις μετατοπίσεις του άκρου του μέλους. Σε αντίθεση με το P-δ, αυτό το φαινόμενο P-Δ είναι κρίσιμο για τη μη γραμμική μοντελοποίηση και ανάλυση. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα 26, τα φορτία βαρύτητας θα επηρεάσουν την απόκριση του φορέα, όταν υπάρχει σημαντική πλευρική μετατόπιση. Το φαινόμενο P-Δ μπορεί να συμβάλει στην απώλεια της πλευρικής αντίστασης της κατασκευής. Η εφαρμογή του φαινομένου κατά την ανάλυση θα προκαλέσει ελάχιστη αύξηση σε υπολογιστικό χρόνο, ωστόσο τα αποτελέσματα θα είναι πιο ακριβή (Powell 2013).



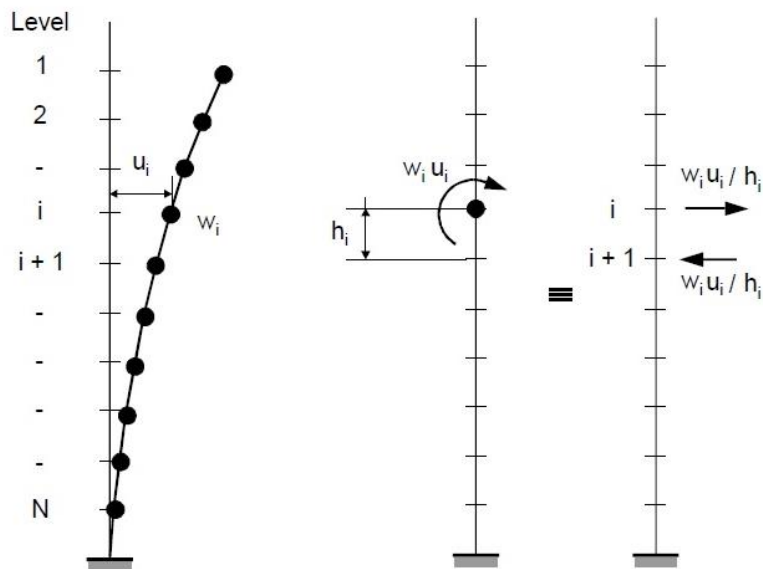
Διάγραμμα 27 Φαινόμενο P-δ και φαινόμενο P-Δ (Dobson 2003)

Η εξέταση του φαινομένου P-δ συνήθως δεν είναι απαραίτητη. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει στο παραμορφωμένο σχήμα του φορέα για μεμονωμένα υποστυλώματα, επιτρέποντας παραμορφώσεις εντός του μήκους του υποστυλώματος. Εκτός από τα πολύ λεπτά υποστυλώματα, αυτές οι μετατοπίσεις είναι τόσο μικρές ώστε να έχουν αμελητέα επίδραση. Η θεωρία για το φαινόμενο P-δ είναι πολύπλοκη. Αν και οι συνέπειες του φαινομένου P-δ ενδέχεται να είναι σημαντικές σε κάθε υποστύλωμα, η απλούστερη προσέγγιση είναι να προστεθούν κόμβοι σε όλο το μήκος του υποστυλώματος, διαιρώντας το υποστύλωμα σε έναν αριθμό στοιχείων. Αυτό μετατρέπει την επίδραση P-δ στο υποστύλωμα σε ένα φαινόμενο P-Δ για όλη την κατασκευή (Konarpure et al. 2015).



Διάγραμμα 28 Φαινόμενο P-Δ (με διαγράμματα ροπών) (Konarpure et al. 2015)

Το φαινόμενο P-δ είναι πολύ λιγότερο έντονο. Ωστόσο, αυτό που είναι συχνά σημαντικό, είναι το φαινόμενο P-Δ. Αν και η μετατόπιση αποκλίνει από τη χορδή του στοιχείου πολύ λιγότερο, η πλευρική μετατόπιση που συνδέεται με την μετατόπιση ορόφου είναι σημαντική (Wilson 2002). Όσο αυξάνεται το ύψος του κτιρίου, αυξάνεται και μετατόπιση του φορέα και το φορτίο βαρύτητας έχει μεγαλύτερη επίδραση στη μηχανική συμπεριφορά του φορέα, όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα 29. Το φαινόμενο P-Δ πρέπει να συνυπολογίζεται κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού, για στατική ή δυναμική, γραμμική ή μη γραμμική ανάλυση.



Διάγραμμα 29 Επιπρόσθετες ροπές λόγω μετακίνησης των ορόφων (Gunel 2014)

#### 2.4.2 Ανάλυση P-δέλτα

Κάθε συνδυασμός φόρτισης μπορεί να αναλυθεί μη γραμμικά ώστε να προκύψει η επιρροή των φαινομένων P-Δ. Τα φαινόμενα P-Δ λαμβάνονται υπόψη για όλα τα δομικά στοιχεία του κυρίου φορέα και ενσωματώνονται στο πλαίσιο την ανάλυσης και του σχεδιασμού.

Οι οριζόντιες μετατοπίσεις προκαλούν τη δημιουργία ροπών λόγω βαρύτητας. Στην ελαστική ανάλυση οι ροπές αυτές είναι μικρές αλλά στη μη γραμμική ανάλυση το γινόμενο των φορτίων λόγω ίδιου βάρους επί την οριζόντια παραμόρφωση είναι σημαντικό ποσοστό της ροπής ανατροπής λόγω σεισμού και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της καμπύλης ροπών-μετακινήσεων το φαινόμενο P-Δ (Dobson 2003). Αυτό γίνεται με ακρίβεια καθώς ο υπολογισμός αποκρίσεων που συνδέονται με την αστάθεια αποτελεί κύριο αντικείμενο λογισμικών προγραμμάτων, που κάνουν μη γραμμική ανάλυση.



Στις καμπύλες M-φ αποτυπώνονται με ακρίβεια οι θέσεις απόθλιψης του σκυροδέματος, η διαδοχική διαρροή των ράβδων οπλισμού και του σκυροδέματος και τελικά η αστοχία της διατομής. Οι καμπύλες αυτές μετατρέπονται σε ισοδύναμες διγραμμικές με προσδιορισμό της θέσης διαρροής της διατομής  $M_y-\phi_y$  (Powell 2013).

Η χρήση των μητρώων γεωμετρικής δυσκαμψίας είναι μια γενική προσέγγιση για να συμπεριληφθούν οι δευτερογενείς επιδράσεις στη στατική και δυναμική ανάλυση όλων των τύπων δομικών συστημάτων. Ωστόσο, η ανάλυση φαινομένου P-Δέλτα βασίζεται σε μια πιο φυσική προσέγγιση. Για παράδειγμα, σε ανάλυση κτιρίου, η πλευρική μετακίνηση μιας μάζας ορόφου σε μια παραμορφωμένη θέση παράγει ροπές δεύτερης τάξης. Αυτή η συμπεριφορά δεύτερης τάξης, το φαινόμενο P-Δέλτα, είναι οι επιπρόσθετες ροπές στο κτίριο που είναι ίσες με το συνολικό άθροισμα του γινομένου του βάρους κάθε ορόφου, "P", επί την πλευρική μετατόπιση κάθε ορόφου, "Δ".

$$\text{Δευτερογενείς Ροπές} = \sum P_i * \Delta_i$$

όπου

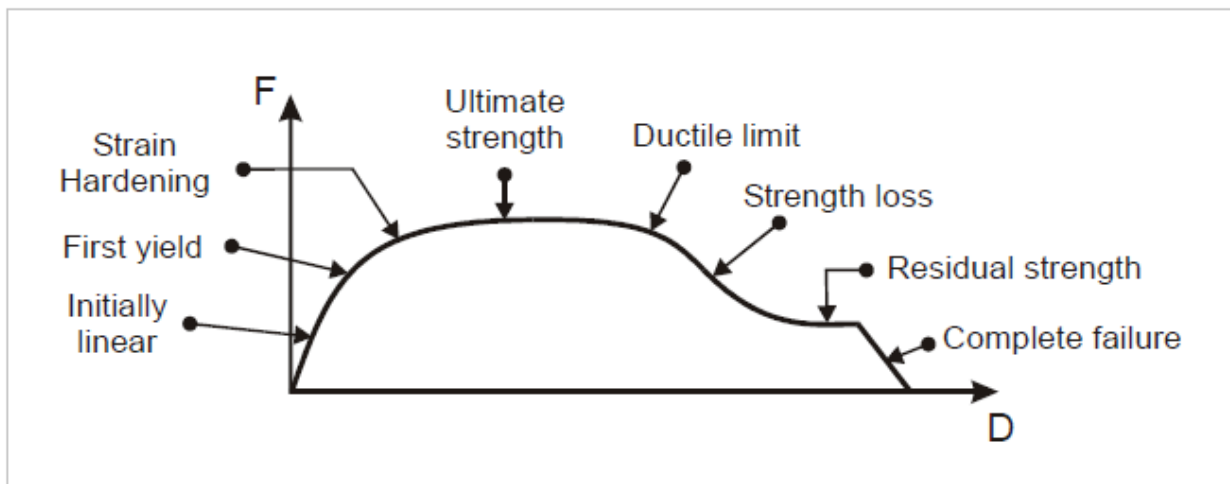
$P_i$	βάρους ορόφου $i$
$\Delta_i$	πλευρική μετατόπιση ορόφου $i$

Οι περισσότερες παραδοσιακές μεθόδους για την ενσωμάτωση του φαινομένου P-Δ σε ανάλυση κτιρίου βασίζονται σε επαναληπτικές μεθόδους. Οι τεχνικές αυτές είναι χρονοβόρες. Γενικά, χρησιμοποιούνται μόνο για στατική ανάλυση. Για κατασκευές κτιρίων, τη μάζα, η οποία προκαλεί το φαινόμενο του P-Δ, είναι σταθερή ανεξάρτητα από τα πλευρικά φορτία και μετατοπίσεις. Αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται για τη γραμμικοποίηση του αποτελέσματος P-Δ για κτίρια και να λύσει το πρόβλημα "ακριβώς", ικανοποιώντας ισορροπία στην παραμορφωμένη θέση χωρίς επαναλήψεις. Αυτή η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την στατική και δυναμική ανάλυση (Konarure et al. 2015).

## 2.5 Μη γραμμικότητα υλικού (Material Nonlinearity)

Όταν προκύπτουν αλλαγές της ακαμψίας του υλικού, αυτό οφείλεται στις αλλαγές των ιδιοτήτων των υλικών υπό συνθήκες λειτουργίας, και αυτό αποτελεί το πρόβλημα της μη γραμμικότητας υλικού. Ένα μοντέλο γραμμικού ελαστικού υλικού υποθέτει ότι η

επιβαλλόμενη δύναμη στο υλικό είναι ανάλογη με την παραμόρφωση του. Με βάση αυτή την προϋπόθεση, αυτό σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο που εφαρμόζεται, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η παραμόρφωση, ανάλογη με τις αλλαγές στο φορτίο. Προϋποθέτει επίσης ότι δεν υπάρχουν μόνιμες παραμορφώσεις έπειτα της φόρτισης, και ότι μόλις το φορτίο αφαιρεθεί, το μοντέλο θα επιστρέφει στην αρχική του μορφή. Αυτό ωστόσο δεν δίνει ακριβή και αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα κατά τις αναλύσεις (Πουλοκέφαλος 2014). Γι'αυτό το λόγο πρέπει να συνυπολογίζεται και η μη γραμμικότητα του υλικού όταν αυτή παρουσιάζεται.



**Διάγραμμα 30** Διάγραμμα Δύναμης-Παραμόρφωσης υλικού για ανελαστική συμπεριφορά (Abell 2014)

Αν και αυτή η απλοποίηση είναι αποδεκτή, εάν τα φορτία είναι αρκετά υψηλά ώστε να προκαλέσουν κάποιες μόνιμες παραμορφώσεις, όπως συμβαίνει με τα περισσότερα πλαστικά υλικά, ή αν οι παραμορφώσεις είναι πολύ μεγάλες, τότε πρέπει να χρησιμοποιείται ένα μοντέλο με μη γραμμικότητα υλικού (Abell 2014). Με την ανάλυση ενός μοντέλου με ελαστοπλαστικού υλικού, ένα υλικό δηλαδή που έχει χάσει κάθε δυνατότητα να επιστρέψει στο αρχικό του σχήμα μετά από μεγάλη παραμόρφωση, η επιβαλλόμενη δύναμη παραμένει σταθερή έπειτα από μια ορισμένη τιμή της παραμόρφωσης .

Η μη γραμμικότητα του υλικού (Abell 2014) συνδέεται με την ανελαστική συμπεριφορά ενός μέλους ή του συστήματος. Η ανελαστική συμπεριφορά μπορεί να χαρακτηρίζεται από μία σχέση δύναμης-παραμόρφωσης (F-D), η οποία παρουσιάζει τη δύναμη σε σχέση με την πλευρική παραμόρφωση. Η γενική σχέση F-D, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 30, παρουσιάζει ότι μόλις ένα υλικό ξεπεράσει το όριο αντοχής του  $f_y$ , η οποιαδήποτε επιπλέον

φόρτιση δύναμης θα παρεκκλίνει το υλικό από την αρχική του δυσκαμψία και την ελαστική του συμπεριφορά. Μια μη γραμμική απόκριση μπορεί να αναπτυχθεί στη συνέχεια με τη σκλήρυνση του υλικού σε ένα οριακό σημείο πριν την αποσκλήρυνση του υλικού και την τελική αστοχία.

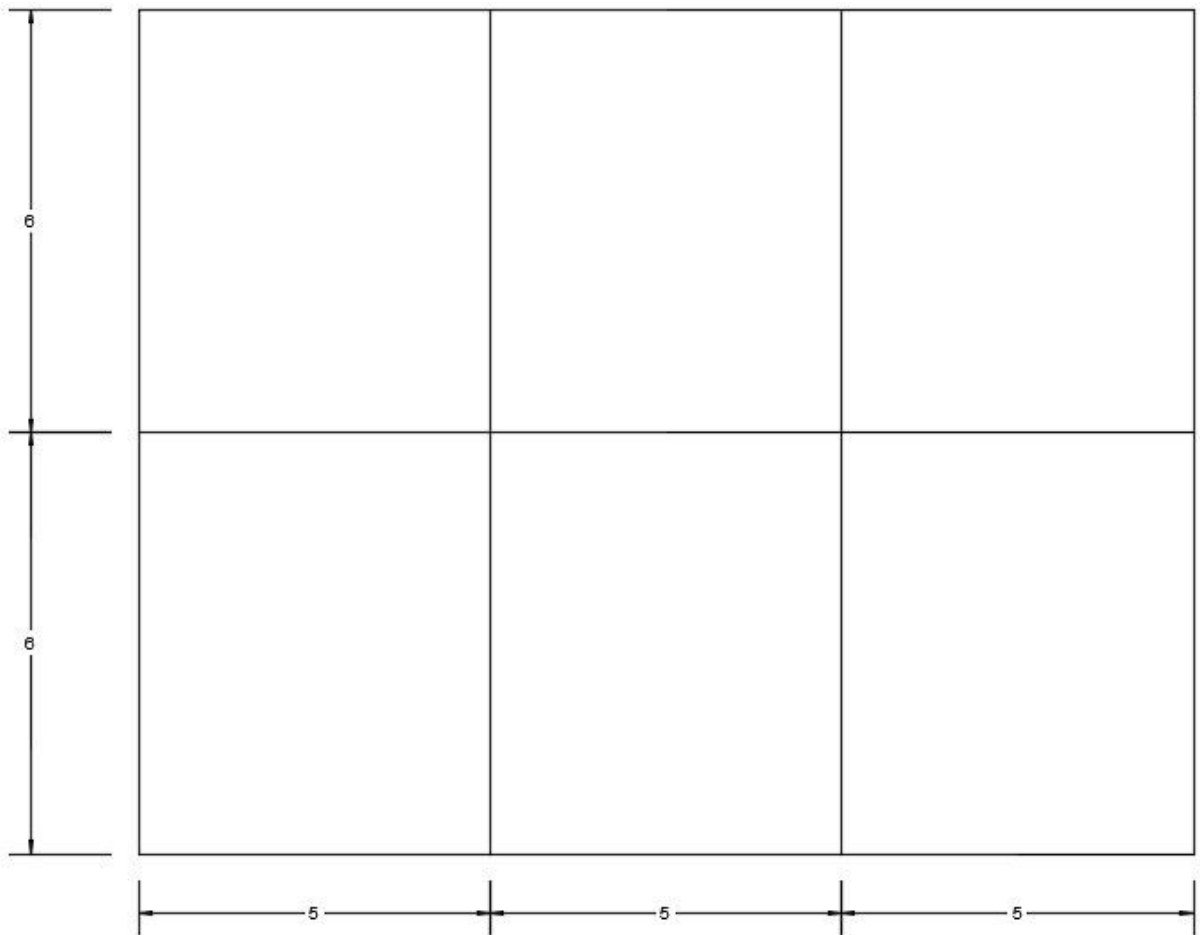
### 3 Παράμετροι μελέτης

Η κατασκευή αποτελείται από πλαισιακό δομικό σύστημα. Θα προσομοιωθεί το κεντρικό πλαίσιο του φορέα και θα αναλυθεί.

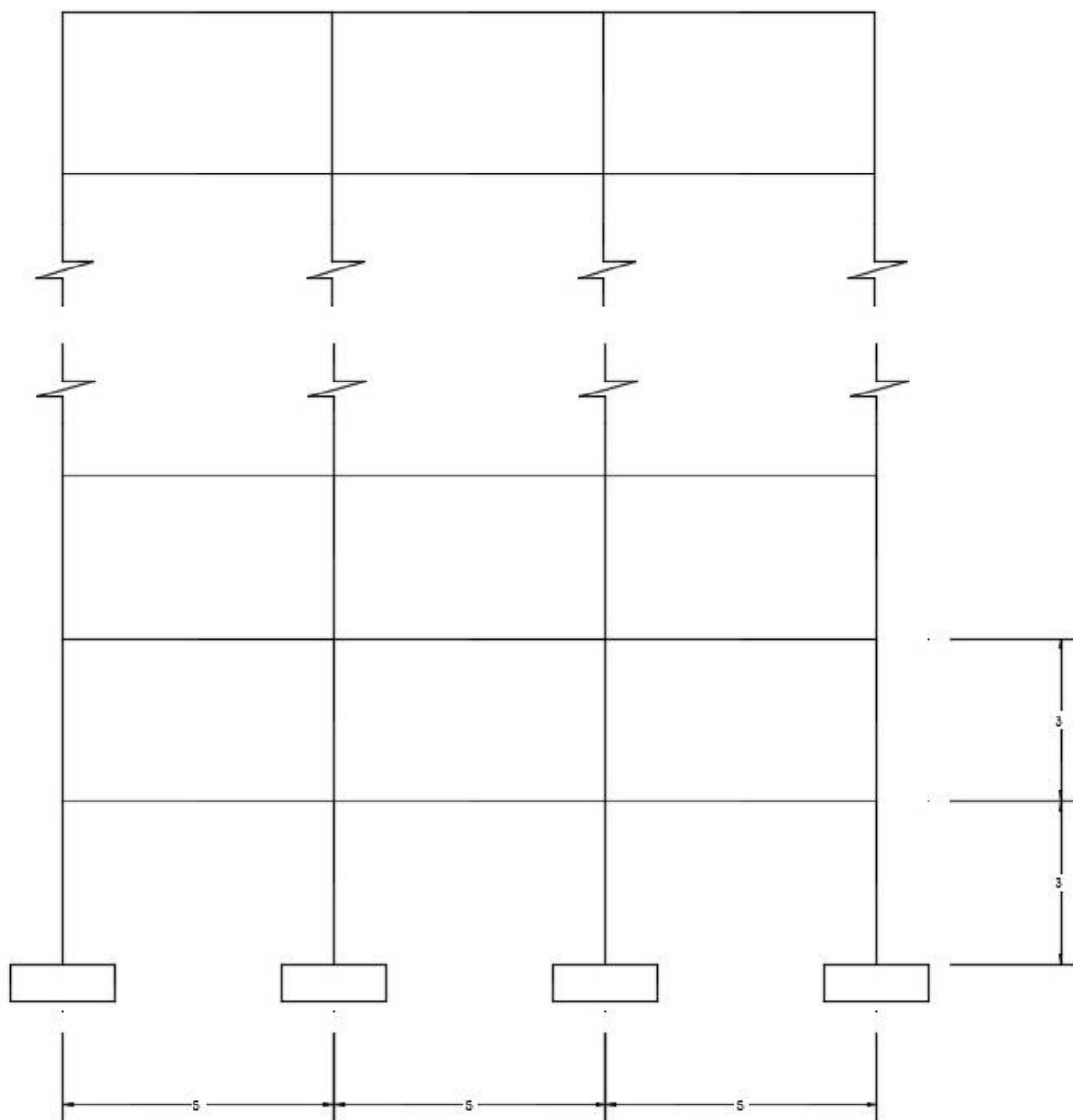
Στην πρόσοψη του φορέα υπάρχουν 3 ανοίγματα πλάτους 5 m.

Στην πλάγια όψη υπάρχουν 2 ανοίγματα πλάτους 6 m

Ορίστηκαν 40 όροφοι με ύψος 3 m ο κάθε όροφος, άρα συνολικό ύψος κτιρίου τα 120m.



Διάγραμμα 31 Κάτοψη κατασκευής



Διάγραμμα 32 Πρόσοψη πλαισίου κατασκευής 40ώροφου κτιρίου

### 3.1 Ιδιότητες υλικών των δομικών μελών

#### 3.1.1 Σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα πρόκειται για ένα υλικό με διάρκεια, μεγάλη θλιπτική αντοχή, αλλά και οικονομικό για τη κατασκευή τέτοιου είδους έργων, ενώ ανταποκρίνεται άριστα στις απαιτήσεις για τη λειτουργία των δομικών στοιχείων της κατασκευής. Αποτελεί το κύριο υλικό του φορέα της κατασκευής. Στην κατασκευή μας χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα με τις πιο κάτω προδιαγραφές:

- Ποιότητα: C 60/75
- Θλιπτική αντοχή κυλίνδρου  $f_{cd}=60 \text{ N/ mm}^2$
- Μέτρο Ελαστικότητας  $E = 39000000 \text{ KN/m}^2$  (πίνακας του Ευρωκώδικα 2)
- Μέτρο διάτμησης  $G = 16250000 \text{ KN/m}^2$
- Ειδικό βάρος  $\gamma = 24 \text{ KN/m}^3$

Πίνακας 2 Ιδιότητες για Σκυρόδεμα (Ευρωκώδικας 2)

Κατηγορίες σκυροδέματος														Αναλυτική σχέση / Εξήγηση	
$f_{ck}$ (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,calc}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
$f_{cm}$ (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
$f_{ctm}$ (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck,cm} \leq C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 \ln(1 + (f_{cm}/10)) > C50/60$
$f_{ctk,0.05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk,0.05} = 0,7 \times f_{ctm}$ 5% οριακό ποσοστό (fractile)
$f_{ctk,0.95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ctk,0.95} = 1,3 \times f_{ctm}$ 95% οριακό ποσοστό (fractile)
$E_{cm}$ (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22[(f_{cm}/10)]^{0,5}$ ( $f_{cm}$ σε MPa)
$\epsilon_{t1}$ (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	βλ. Σχήμα 3.2 $\epsilon_{t1} (\text{‰}) = 0,7 f_{cm}^{0,31} < 2,8$
$\epsilon_{t12}$ (‰)					3,5					3,2	3,0	2,8	2,8	2,8	βλ. Σχήμα 3.2 για $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$ $\epsilon_{t12} (\text{‰}) = 2,8 + 27[(90 - f_{cm})/100]^4$
$\epsilon_{t2}$ (‰)					2,0					2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	βλ. Σχήμα 3.3 για $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$ $\epsilon_{t2} (\text{‰}) = 2,0 + 0,085(f_{ck} - 50)^{0,55}$
$\epsilon_{t12}$ (‰)					3,5					3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	βλ. Σχήμα 3.3 για $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$ $\epsilon_{t12} (\text{‰}) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4$
$n$					2,0					1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	για $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$ $n = 1,4 + 23,4[(90 - f_{ck})/100]^4$
$\epsilon_{t3}$ (‰)					1,75					1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	βλ. Σχήμα 3.4 για $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$ $\epsilon_{t3} (\text{‰}) = 1,75 + 0,55 [(f_{ck} - 50)/40]$
$\epsilon_{t13}$ (‰)					3,5					3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	βλ. Σχήμα 3.4 για $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$ $\epsilon_{t13} (\text{‰}) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4$

### 3.1.2 Δομικός χάλυβας (ράβδοι οπλισμού) τύπου B500C

Οι τιμές των μέτρων του υλικού που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς για χάλυβες του Ευρωκώδικα 2 είναι οι εξής:

Ειδικό βάρος:  $\gamma = 76.97 \text{ KN/m}^3$

Μέτρο Ελαστικότητας:  $E = 200000000 \text{ KN/m}^2$

Λόγος Poisson στην ελαστική περιοχή  $\nu = 0,3$

Συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής  $\alpha = 12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Για τον οπλισμό των μελών χρησιμοποιήθηκε χάλυβας ποιότητας B500C με

- όριο διαρροής  $f_y = 500 \text{ N/mm}^2$  και
- όριο θραύσης  $f_u = 575 \text{ N/mm}^2$

Σημαντικό θα ήταν να επισημάνουμε ότι η αντοχή και τα άλλα δεδομένα για το σκυρόδεμα καθορίζονται βάσει τυποποιημένων δοκιμών. Η πραγματική συμπεριφορά του σκυροδέματος στην κατασκευή ενδέχεται να είναι διαφορετική από αυτήν που προσδιορίζεται μέσω τυποποιημένων δοκιμών, δεδομένου ότι το σκυρόδεμα σε ένα υλικό που αφενός μεν δεν καταπονείται με τον ίδιο τρόπο όπως στις τυποποιημένες δοκιμές, αφετέρου δε διαφέρει και από άποψη ποιότητας, διαστάσεων, σχήματος, ηλικίας και συντηρήσεως.

## 3.2 Δράσεις

Μια δράση είναι είτε άμεση, δηλαδή μια δύναμη που εφαρμόζεται στην κατασκευή, είτε έμμεση, δηλαδή μια επιβαλλόμενη ή παρεμποδιζόμενη παραμόρφωση ή μια επιβαλλόμενη επιτάχυνση. Οι δράσεις διακρίνονται σε:

- μόνιμες δράσεις (G) που προέρχονται από τα ίδια βάρη,
- μεταβλητές δράσεις (Q) που οφείλονται σε επιβαλλόμενα φορτία, σε φορτία άνεμου ή σε φορτία χιονιού και
- τυχαματικές δράσεις (A) όπως εκρήξεις ή πρόσκρουση οχήματος.

Ασφαλέστατα τα μεταβλητά φορτία κατά τη μελέτη για τα κτίρια που χρησιμοποιούνται σαν γραφεία είναι μεγαλύτερα από αυτά για κτίρια κατοίκησης.

### 3.2.1 Υπολογισμός μόνιμων και κινητών φορτίων

Στα μόνιμα φορτία περιλήφθηκε και το ίδιο βάρος όλων των στοιχείων της κατασκευής, που είναι το ίδιο βάρος των πλακών, των δοκών και των υποστυλωμάτων. Το λογισμικό πρόγραμμα λαμβάνει απευθείας υπόψη το ίδιο βάρος των δοκών και των υποστυλωμάτων, όπως αυτά ορίστηκαν με τις ιδιότητες των υλικών και των διαστάσεων των διατομών τους. Τα υπόλοιπα φορτία μεταβιβάστηκαν ως γραμμικό φορτίο κατά μήκους των δοκών.

Μόνιμα φορτία πλακών                      3 KN/m<sup>2</sup>

Κινητά φορτία πλακών                      2 KN/m<sup>2</sup>

Το πάχος των πλακών καθορίστηκε στα 0.2 m. Η μεταβίβαση των φορτίων των πλακών στις δοκούς έγινε με καταμερισμό των πλακών στις επιφάνειες φόρτισης των δοκών.

Μετά από υπολογισμούς το γραμμικό φορτίο των δοκών ορίστηκε ως εξής:

Μόνιμα φορτία - γραμμικό φορτίο    48.6 KN/m

Κινητά φορτία - γραμμικό φορτίο    12 KN/m

Οι στηρίξεις του πλαισίου θεωρήθηκαν πακτώσεις.



## 4 Προδιαστασιολόγηση μελών

Αρχικά έγιναν υπολογισμοί με συνδυασμό φόρτισης  $1.35 G + 1.5Q$  για να προσδιοριστούν το βάρος κάθε ορόφου και εν συνεχεία το αξονικό φορτίο που θα μεταφέρει το κεντρικό υποστύλωμα κάθε ορόφου το δυσμενέστερο υποστύλωμα ορόφου. Οι υπολογισμοί έγιναν σε λογιστικά φύλλα Excel. Το αξονικό φορτίο των κεντρικών υποστυλωμάτων κάθε ορόφου επαληθεύτηκε και μέσω του σχεδιασμού που έγινε από το πρόγραμμα από την επιλογή Design.

Η διαστασιολόγηση των μελών έγινε μέσω της εξίσωσης (5) όπως αυτή δίδεται από τον Ευρωκώδικα 2.

$$v = \frac{N}{f_{cd} \cdot A_c} \quad (5)$$

Όπου

N αξονική δύναμη υποστυλώματος

v συντελεστής 0.65 (από Ευρωκώδικα 8)

$f_{cd}$  θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

$A_c$  εμβαδόν διατομή υποστυλώματος

### 4.1 Αναλυτικός έλεγχος δυσμενέστερου υποστυλώματος

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται ο αναλυτικός έλεγχος του δυσμενέστερου υποστυλώματος, αυτού δηλαδή που εμφανίζει τον μεγαλύτερο λόγο απόδοσης σε σχέση με τα υπόλοιπα υποστυλώματα. Πρόκειται για τα υποστυλώματα 41 και 81, τα υποστυλώματα που υπέδειξε και το SAP2000 ως δυσμενέστερα, και φέρουν ίσο αξονικό φορτίο λόγω συμμετρίας του φορέα, και βρίσκονται στο κέντρο του ισόγειου ορόφου.

Οι διατομές των υποστυλωμάτων χωρίστηκαν σε ομάδες ανά ύψος 10 ορόφων. Όσο αυξανόταν το ύψος του κτιρίου, μειωνόταν και το εμβαδόν διατομής του υποστυλώματος της κάθε ομάδας.

- Για τους ορόφους 1-10 ορίστηκε διατομή υποστυλώματος 900mm x 900mm
- Για τους ορόφους 11-20 ορίστηκε διατομή υποστυλώματος 825mm x 825mm
- Για τους ορόφους 21-30 ορίστηκε διατομή υποστυλώματος 750mm x 750mm
- Για τους ορόφους 31-40 ορίστηκε διατομή υποστυλώματος 675mm x 675mm

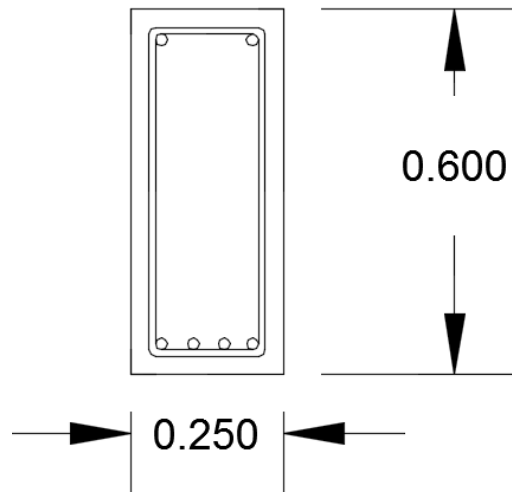
Οι δοκοί, ως δευτερεύοντα μέλη, διαστασιολογήθηκαν με πλάτος 250mm και ύψος 600mm για όλους τους ορόφους.

Οι πιο πάνω προδιαγραφές εφαρμόστηκαν στο προσομοίωμα ανάλυσης της κατασκευής στο πρόγραμμα SAP2000, όπου το πρόγραμμα κατέδειξε τα ίδια αξονικά φορτία με τους υπολογισμούς μας.

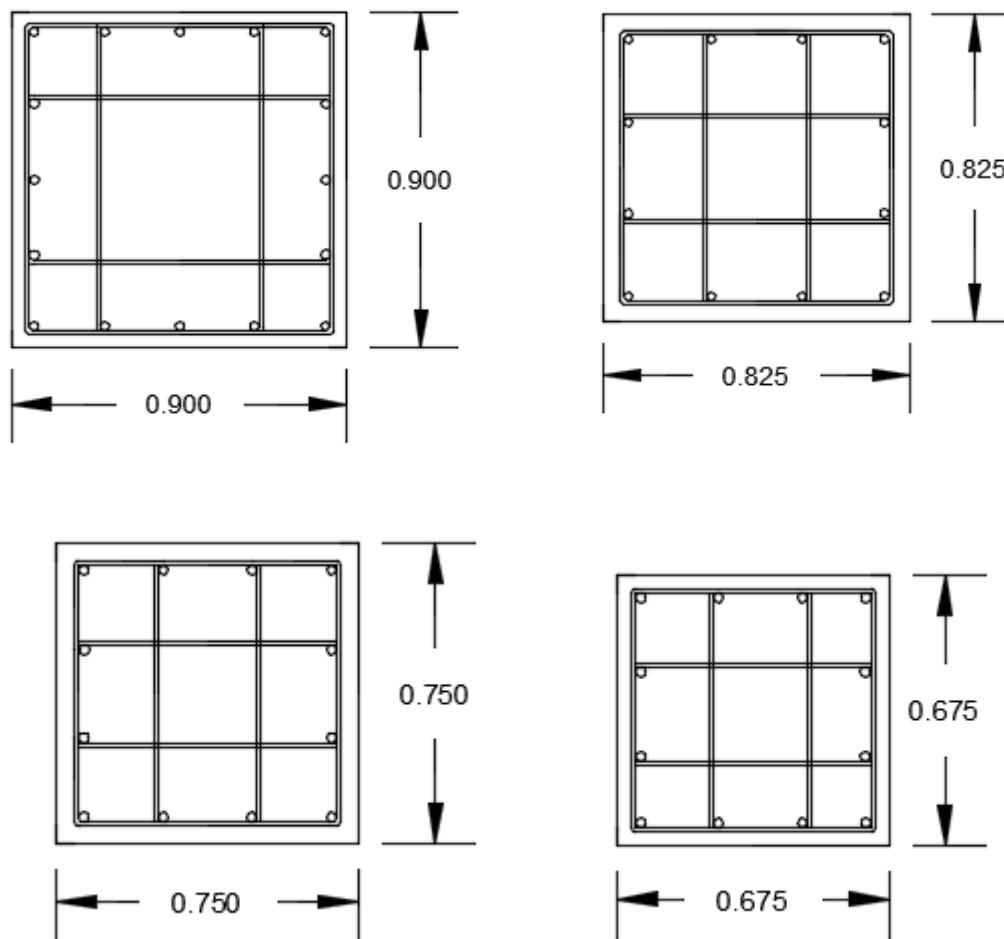
Στο προσομοίωμα έγινε ανάλυση και σχεδιασμός με την επιβολή του ιδίου βάρους και των κινητών φορτίων, όπου η φόρτιση ήταν 1.35 G +1.5Q. Από την ανάλυση και σχεδιασμό που προέκυψε, πήραμε πληροφορίες ως προς το αξονικό φορτίο των υποστυλωμάτων και των δοκών καθώς και τον απαιτούμενο οπλισμό.

Με τη χρήση των πινάκων ράβδων οπλισμού του Ευρωκώδικα 2, και το απαιτούμενο εμβαδόν οπλισμού για τα μέλη, προέκυψαν οι πιο κάτω οπλισμοί για τις διατομές:

- Για τη διατομή υποστυλώματος 900mm x 900mm
  - 16 ράβδοι Φ25, σε διάταξη 5x5
- Για τη διατομή υποστυλώματος 825mm x 825mm
  - 14 ράβδοι Φ25, σε διάταξη 4x4
- Για τη διατομή υποστυλώματος 750mm x 750mm
  - 12 ράβδοι Φ25, σε διάταξη 4x4
- Για τη διατομή υποστυλώματος 675mm x 675mm
  - 10 ράβδοι Φ25, σε διάταξη 4x4
- Για τις δοκούς διατομής 250mm x 600mm
  - άνω οπλισμός 2 ράβδοι Φ20 και κάτω οπλισμός 4 ράβδοι Φ20



Διάγραμμα 33 Διατομή δοκού



Διάγραμμα 34 Διατομές υποστυλωμάτων

## **5 Προσομοίωση φορέα**

### **5.1 Λογισμικό SAP 2000**

Το πρόγραμμα SAP2000 (Computers and Structures Inc.) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για στατική και δυναμική ανάλυση κατασκευών οποιουδήποτε τύπου. Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα στατικής και δυναμικής ανάλυσης, τόσο γραμμικής όσο και μη γραμμικής ανάλυσης όπως επίσης και συνδυασμό διαφορετικών ειδών ραβδωτών, πλαισιακών και πεπερασμένων στοιχείων. Κατά την ανάλυση μπορούν να επιβληθούν διαφορετικά είδη δράσεων, όπως φορτία βαρύτητας, κατανεμημένα φορτία και φορτία επί των κόμβων (CSI, 2009).

Στη μελέτη θα γίνει ανάλυση πλαισίου κατασκευής 40-ώροφου κτιρίου. Η ανάλυση του πλαισίου θα γίνει στον δισδιάστατο χώρο. Το μοντέλο θα αναλυθεί γραμμικά αλλά και σε μη γραμμική ανάλυση όσον αφορά τη μη γραμμικότητα του υλικού και τη γεωμετρία της κατασκευής.

#### **5.1.1 Γραφικό περιβάλλον με χρήστη**

Στο λογισμικό SAP 2000 μπορούν να καθοριστούν σχετικές παράμετροι για την πραγματοποίηση των αναλύσεων και αξιοποίηση των αποτελεσμάτων. Τα τρία βασικά μεγέθη στα οποία βασίζεται το SAP2000, η δύναμη, το μήκος και η θερμοκρασία έχουν οριστεί με τις αντίστοιχες μονάδες μέτρησης, νιούτον N (newton), μέτρα m (meters) και βαθμοί Κελσίου C (Celsius).

Το ίδιο βάρος δίνεται σε μονάδες δύναμης, ενώ η μάζα δίνεται σε μονάδες μάζας (χρησιμοποιείται μόνο για τον υπολογισμό των αδρανειακών δυνάμεων λόγω επιταχύνσεων του εδάφους). Οι μετρήσεις γωνιών γίνονται σε ακτίνια (radians) για τις μετακινήσεις στροφής και σε μοίρες (degrees) όσον αφορά στη διεύθυνση ενός άξονα.

Για την περιγραφή ενός φορέα στο χώρο απαιτούνται οι συντεταγμένες X, Y, Z. Στο SAP2000 όλες οι συντεταγμένες, οι συνιστώσες των διανυσμάτων, δυνάμεων και μετατοπίσεων περιγράφονται σε δεξιόστροφα συστήματα καρτεσιανών συντεταγμένων.

#### **5.1.2 Διαδικασία ανάλυσης**

Το πρόγραμμα επιλέγει αυτόματα την κατάλληλη σειρά με την οποία θα εκτελέσει τις αναλύσεις που έχουν επιλεγεί από το χρήστη, ώστε εάν υπάρχει η δυνατότητα, να

αξιοποιήσει τα αποτελέσματα μιας περίπτωσης ανάλυσης σε μια άλλη. Μετά από την εκτέλεση μιας ανάλυσης το μοντέλο ασφαλίζεται αυτόματα για να αποτραπούν οποιεσδήποτε αλλαγές που θα ακύρωναν τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Έπειτα από την ανάλυση, τα αποτελέσματα μπορούν να αποθηκευτούν ή να παρουσιαστούν ως δισδιάστατα και τρισδιάστατα γραφικά, ενώ παράλληλα μπορούν να εξαχθούν σε αρχείο κειμένου Word, υπολογιστικό φύλλο Excel ή αρχείο βάσης δεδομένων Access, όπως επίσης και σε μορφές αποθήκευσης κοινών σχεδιαστικών προγραμμάτων.

Μεταξύ άλλων, μπορούν να παρουσιαστούν γραφικά παραμορφωμένες μορφές της κατασκευής που αναλύθηκε, αντιδράσεις στις στηρίξεις, διαγράμματα εντατικών μεγεθών και χωρικών στοιχείων. Δίνει επίσης τη δυνατότητα να κατασκευαστούν γραφικές παραστάσεις συναρτήσεων δίνοντας τιμές μιας μεταβλητής συναρτήσεως κάποιας άλλης.

### **5.1.3 Στοιχεία Μοντέλου**

Τα φυσικά δομικά στοιχεία της κατασκευής που αναλύθηκε αντιπροσωπεύονται από αντικείμενα (objects) τα οποία είναι τα σημειακά αντικείμενα (point objects) που αφορούν τους κόμβους (joint objects) και τα γραμμικά ή μονοδιάστατα αντικείμενα που αφορούν τα πλαίσια αντικείμενα (frame objects), τα δομικά συστήματα του φορέα.

Οι κόμβοι (joints) είναι βασικό μέρος ενός δομικού στοιχείου αφού εκεί ορίζονται οι βαθμοί ελευθέριας που είτε πρέπει να υπολογιστούν είτε είναι δεδομένες οι αντίστοιχες μετακινήσεις. Οι κόμβοι ορίζονται σε όλα τα σημεία σύνδεσης στοιχείων και στα άκρα και τις γωνίες όλων των στοιχείων, αλλά και στα σημεία στήριξης της κατασκευής όπου χρησιμοποιήθηκαν δεσμεύσεις.

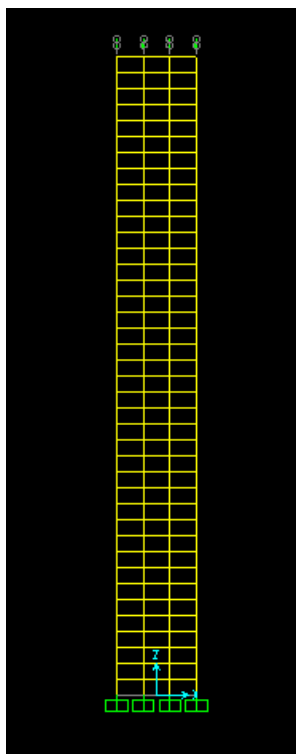
### **5.1.4 Φορτίσεις και Αποτελέσματα**

Η κάθε περίπτωση φόρτισης πρέπει να έχει μοναδικό όνομα, και συγκεκριμένο τύπο, αν πρόκειται δηλαδή για μόνιμο ή κινητό φορτίο, σεισμικό φορτίο ή φορτίο ανέμου. Κατά την εκτέλεση της ανάλυσης, το πλευρικό φορτίο αυξάνεται σταδιακά μέχρι η κατασκευή να αναπτύξει μέγιστη μετακίνηση οροφής ίση με τη μετακίνηση ελέγχου που έχει επιλέγει. Αφού ολοκληρωθεί η ανάλυση μιας κατασκευής είναι διαθέσιμα τα εντατικά μεγέθη σε οποιαδήποτε διατομή κατά μήκος οποιουδήποτε μέλους (Computers and Structures Inc. 2010).

## 5.2 Μεθοδολογία ανάλυσης

### 5.2.1 Προσομοίωμα

Σε πρώτο στάδιο προσομοιώθηκε το μοντέλο ανάλυσης σύμφωνα με τα δεδομένα που καθορίστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Η μορφή του προσομοιώματος του φορέα στο λογισμικό SAP 2000 φαίνεται στο διάγραμμα.



Διάγραμμα 35 Προσομοίωμα φορέα πλαισίου στο SAP 2000

### 5.2.2 Ιδιότητες υλικών

Αρχικά γίνεται τροποποίηση του υφιστάμενου υλικού από το Define → Materials, όπου γίνονται οι επιβαλλόμενες τροποποιήσεις και καθορίζεται και ο τύπος του υλικού. Ακολούθως, στην επιλογή Modify/Show Material Properties, τίθενται οι τιμές των ελαστικών αλλά και ανελαστικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος, με βάση τις ιδιότητές του, όπως καθορίστηκαν από τις παραμέτρους στο κεφάλαιο 3.

Ορίζεται ως νέο υλικό, για να προσομοιωθεί το υλικό του χάλυβα οπλισμού, από την εντολή Define → Materials → Add New Material, όπου γίνονται οι επιβαλλόμενες τροποποιήσεις και καθορίζεται και ο τύπος του υλικού (*Material Type: Steel*). Ακολούθως, στην επιλογή Modify/Show Material Properties, τέθηκαν οι τιμές των ελαστικών αλλά και ανελαστικών χαρακτηριστικών του χάλυβα ράβδων οπλισμού B500C.

Διάγραμμα 36 Εισαγωγή ιδιοτήτων υλικών

### 5.2.3 Ιδιότητες διατομής

Τα είδη διατομών των υποστυλωμάτων και δοκού προδιαστασιολογήθηκαν όπως περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η τροποποίηση των διατομών γίνεται μέσω της εντολής *Define* → *Section Properties* → *Frame Sections*, όπου εισάγεται και το υλικό της διατομής. Από την επιλογή *Concrete Reinforcement* ορίζεται όπως αυτός προέκυψε από τον απαιτούμενο οπλισμό στο *Design* που έγινε για το φορέα τις κατασκευής. Για τα υποστυλώματα έχουν τοποθετηθεί ράβδοι διαμέτρου 25mm (25M) και συνδετήρες διαμέτρου 10mm (10M), ενώ για τις δοκούς έχουν τοποθετηθεί ράβδοι διαμέτρου 20mm (20M) και συνδετήρες διαμέτρου 10mm (10M). Τέλος, επιλέγεται το *Reinforcements to be Checked*, για να γίνει χρήση όλων των δεδομένων στον υπολογισμό των ιδιοτήτων της διατομής.

### 5.2.4 Πλαστικές αρθρώσεις

Προκειμένου να προχωρήσουμε σε μη γραμμική ανάλυση του φορέα της κατασκευής, θα πρέπει να καθοριστεί η ανελαστική συμπεριφορά των διατομών οπλισμένου σκυροδέματος των δομικών μελών του φορέα. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να προσδιοριστούν οι τιμές της ροπής διαρροής  $M_y$  καθώς και η καμπυλότητα διαρροής  $\phi_y$  για κάθε μια από τις διατομές. Ο καθορισμός της κύριας μορφής ανελαστικής παραμόρφωσης των διατομών των δομικών

μελών είναι πρώτιστης σημασίας για τη μη γραμμική ανάλυση, εφόσον σχετίζεται με την ανάπτυξη πλαστικών αρθρώσεων στα μέλη λόγω καμπτικής ροπής. Το λογισμικό SAP 2000 μπορεί αυτόματα να υπολογίσει τα διαγράμματα ροπής-καμπυλότητας  $M_y-\phi_y$ , στη δική μας ανάλυση ωστόσο, οι πλαστικές αρθρώσεις θα οριστούν από το χρήστη.

Κατά τη σεισμική φόρτιση ή την επιβολή κάποιου άλλου πλευρικού φορτίου, ως θέσεις πιθανής ανάπτυξης πλαστικών αρθρώσεων ορίζονται οι διατομές στην αρχή και στο τέλος των δομικών στοιχείων, καθώς πρόκειται για τα σημεία του φορέα όπου αναπτύσσονται οι μέγιστες καμπτικές ροπές. Μόνο στην περίπτωση όπου η ροπή από την ανάλυση ξεπεράσει την αντίστοιχη ροπή διαρροής, εμφανίζεται πλαστική άρθρωση σε μια διατομή. Σε κάθε άλλη περίπτωση, το συγκεκριμένο δομικό στοιχείο συμπεριφέρεται ελαστικά και οι πλαστικές αρθρώσεις που έχουν τοποθετηθεί δε λαμβάνονται καθόλου υπόψη.

Στην συγκεκριμένη ανάλυση του 4ώροφου κτιρίου, υπολογίστηκαν η ροπή διαρροής και η καμπυλότητα διαρροής κάθε διατομής ξεχωριστά, μέσω της εξίσωσης (Biskinis and Fardis 2010a), που αναφέρθηκε προηγουμένως στο κεφάλαιο. Με βάση τις ιδιότητες των υλικών και την αναλυτική περιγραφή των διατομών που εισήχθησαν, το πρόγραμμα μπορεί να υπολογίσει τις ιδιότητες των πλαστικών αρθρώσεων.

Στο προσομοίωμα κατασκευής πέραν του ιδίου βάρους, θα επιβληθεί οριζόντιο πλευρικό.

Έχοντας ως κύρια μεταβλητή τον άνεμο, ο δυσμενής συνδυασμός που προκύπτει είναι 1.35 G +1.5 W, όπου G τα μόνιμα φορτία και W το φορτίο ανέμου. Το φορτίο ανέμου επιβλήθηκε ως πλευρικό οριζόντιο σημειακό φορτίο στον κάθε όροφο.

Στο προσομοίωμα έγινε ανάλυση με την επιβολή μόνο του ιδίου βάρους, όπου η φόρτιση ήταν 1.35 G. Από την ανάλυση που προέκυψε, πήραμε πληροφορίες ως προς το αξονικό φορτίο των υποστυλωμάτων και των δοκών.

Το αξονικό φορτίο των υποστυλωμάτων που προέκυψε από την ανάλυση του συνδυασμού 1.35 G, καθώς και ο οπλισμός των μελών που προέκυψε από την ανάλυση και σχεδιασμό του συνδυασμού 1.35 G +1.5Q, χρησιμοποιήθηκαν για υπολογισμό της ροπής και καμπυλότητας των μελών.

Η ροπή και καμπυλότητα στα μέλη χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό των πλαστικών αρθρώσεων. Για τον υπολογισμό της ροπής και της καμπυλότητας χρησιμοποιήθηκε η



εξίσωση (Biskinis and Fardis 2010a) παίρνοντας από την εξίσωση (6) την καμπυλότητα από το χάλυβα και από την εξίσωση (7) την καμπυλότητα από το σκυρόδεμα.

$$\varphi_y = \frac{f_y}{E_s (1 - \xi_y) d} \quad (6)$$

$$\varphi_y = \frac{\varepsilon_c}{\xi_y d} \approx \frac{1.8 f_c}{E_c \xi_y d} \quad (7)$$

Η μικρότερη τιμή  $\varphi_y$  από τις εξισώσεις (6) και (7) είναι η καμπυλότητα διαρροής του μέλους.

Με τη μικρότερη τιμή  $\varphi_y$  χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ροπή διαρροής  $M_y$  με την εξίσωση (8) (Biskinis and Fardis 2010a):

$$M_y = b d^3 \varphi_y \left\{ E_c \frac{\xi_y^2}{2} \left( \frac{1 + \delta_1}{2} - \frac{\xi_y}{3} \right) + \frac{E_s (1 - \delta_1)}{2} \left[ (1 - \xi_y) \rho_1 + (\xi_y - \delta_1) \rho_2 + \frac{\rho_v}{6} (1 - \delta_1) \right] \right\} \quad (8)$$

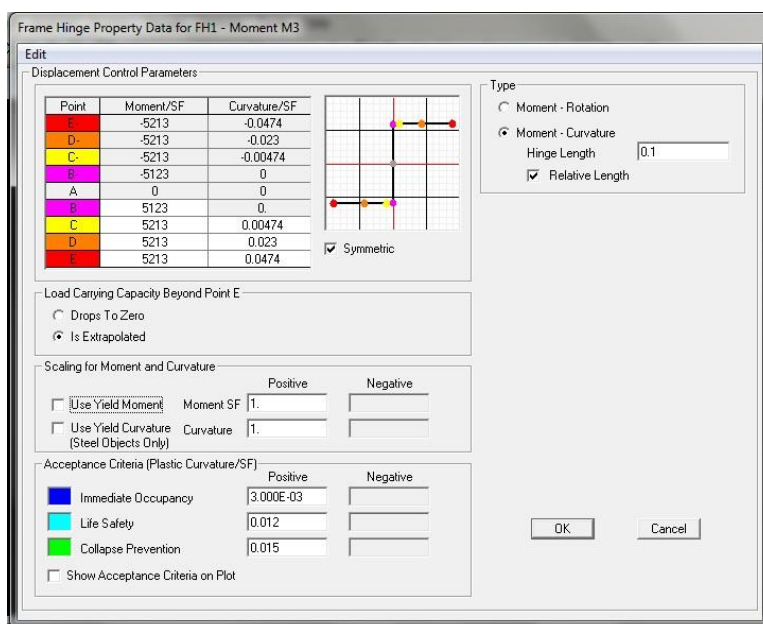
Οι πράξεις έγιναν σε υπολογιστικά φύλλα Excel όπου με βάση τον οπλισμό κάθε μέλους και το αξονικό του φορτίο καθώς και τις ιδιότητες του σκυροδέματος, του χάλυβα οπλισμού αλλά και της διατομής, υπολογιζόταν και η ανάλογη καμπυλότητα  $\varphi_y$  του κάθε μέλους, παίρνοντας τη μικρότερη τιμή μεταξύ της τιμής  $\varphi_y$  που προκύπτει από τη διαρροή σκυροδέματος της τιμής  $\varphi_y$  που προκύπτει από τη διαρροή του οπλισμού. Ακολούθως η τιμή  $\varphi_y$  χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ροπής διαρροής  $M_y$  μέσω της εξίσωσης (8).

Οι τιμές που προέκυψαν για τις διατομές από τους πιο πάνω υπολογισμούς έχουν ως εξής:

- Για τη διατομή υποστυλώματος 900mm x 900mm
  - $M_y = 5213 \text{ KNm}$
  - $\varphi_y = 4.74 \times 10^{-6}$
- Για τη διατομή υποστυλώματος 825mm x 825mm
  - $M_y = 3546 \text{ KNm}$
  - $\varphi_y = 4.97 \times 10^{-6}$
- Για τη διατομή υποστυλώματος 750mm x 750mm
  - $M_y = 2313 \text{ KNm}$
  - $\varphi_y = 5.17 \times 10^{-6}$

- Για τη διατομή υποστυλώματος 675mm x 675mm
  - $M_y = 1293 \text{ KNm}$
  - $\phi_y = 5.22 \times 10^{-6}$
- Για τις δοκούς διατομής 250mm x 600mm
  - $M_y = 267 \text{ KNm}$
  - $\phi_y = 4.99 \times 10^{-6}$

Ακολούθως τα αποτελέσματα της ροπής  $M_y$  και της καμπυλότητας  $\phi_y$  εισήχθησαν στο πρόγραμμα SAP2000 για το σχηματισμό των πλαστικών ροπών (διάγραμμα 37).



Διάγραμμα 37 Εισαγωγή ροπών και καμπυλότητας στο λογισμικό

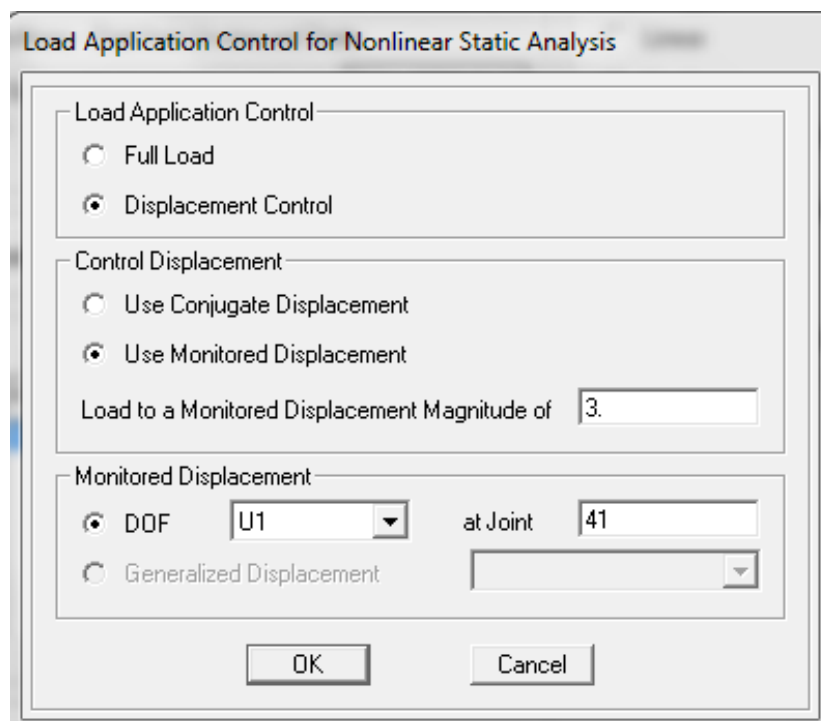
### 5.2.5 Επιβολή φορτίων

Με την επιβολή του πλευρικού φορτίου στο φορέα, θα πρέπει να δρουν ήδη τα κατακόρυφα μόνιμα φορτία, για την εκτέλεση της ανελαστικής ανάλυσης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τον ορισμό μιας πρώτης ανελαστικής στατικής ανάλυσης όπου υπάρχουν μόνο τα κατακόρυφα φορτία που ασκούνται στον φορέα κατά της επιβολής φορτίου ανέμου (1.35G). Η ανελαστική ανάλυση με τα οριζόντια φορτία ακολουθεί την προηγούμενη ανάλυση που αφορά τα κατακόρυφα φορτία, ώστε να συνυπολογιστούν και αυτά στην τελική απόκριση.

Define → Load Cases → Επιλογή FULL NONLINEAR → Modify/Show Load Case, και ακολούθως να οριστεί η ανάλυση ως μη γραμμική → Analysis Type σε Nonlinear.

Define → Load Cases → Επιλογή Proportional → Modify/Show Load Case και ακολούθως να οριστεί η ανάλυση ως μη γραμμική → Analysis Type σε Nonlinear.

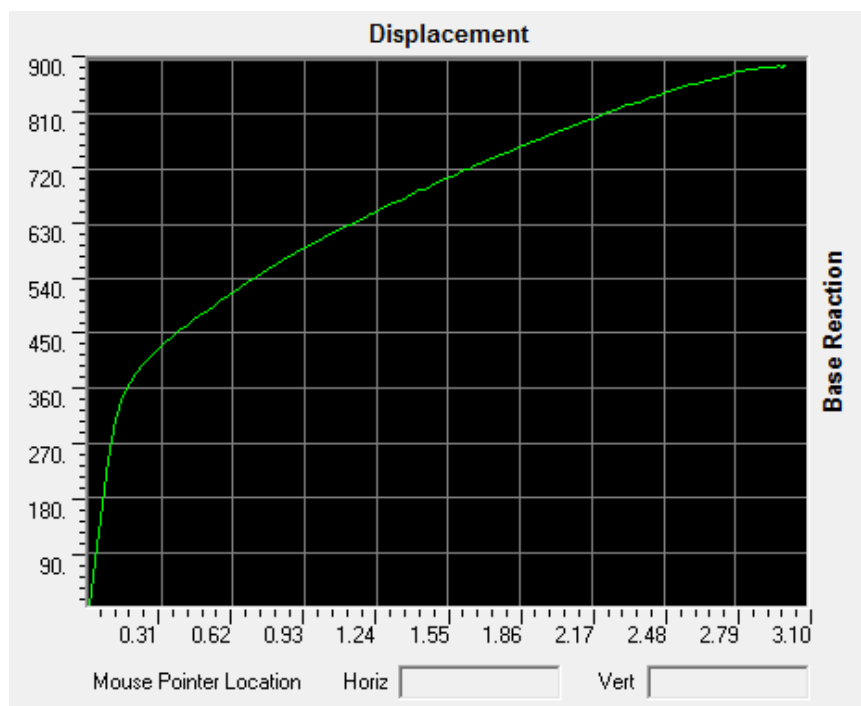
Επισημαίνεται ότι κατά την τελική ανάλυση θα συνυπολογιστούν και τα αποτελέσματα από την αρχική ανάλυση FULL NONLINEAR, όπου αυτό θα γίνει με την επιλογή Continue from State at End of Nonlinear Case : FULL NONLINEAR για να ξεκινήσει η στατική ανελαστική ανάλυση αφού πρώτα επιβληθούν τα αρχικά φορτία βαρύτητας. Για να είναι εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων ανάλυσης, στην επιλογή Load Application → Modify/Show επιλέγηκε Displacement Control, όπου η φόρτιση θα γίνεται με βάση τις μετακινήσεις, και με την επιλογή Use Monitored Displacement. Η επιβολή φορτίου καθώς και η ανάλυση θα σταματήσουν όταν επιτευχθεί η προκαθορισμένη μετακίνηση που επιλέγηκε από το χρήστη. Με τη ρύθμιση Load to a Monitored Displacement Magnitude of: 3 m, προκαθορίστηκε ότι η επιβολή φόρτισης θα σταματήσει σε οριζόντια μετακίνηση 3 μέτρων → Monitored Displacement: DOF U1 at Joint 41 όπου αυτό αφορά την οριζόντια μετακίνηση του πάνω αριστερά κόμβου του φορέα, τον κόμβο 41.



Διάγραμμα 38 Περιορισμός μετατόπισης κόμβου 41

Επίσης επιλέγηκε η καταγραφή πολλαπλών βημάτων (Multiple States)- Results Saved → Modify/Show, με ελάχιστο αριθμό βημάτων 100 και μέγιστο 1000, για να προκύψει πιο λεπτομερής καμπύλη αντίστασης. Ακολούθως προχωρούμε στην επίλυση : Analyze → Run Analysis → Run Now, όπου επιλέγηκαν για ανάλυση η μέθοδος FULL NONLINEAR και Proportional (για επιβολή πλευρικού φορτίου).

Τα αποτελέσματα και η καμπύλη αντίστασης εμφανίζεται από την επιλογή Display → Show Static Pushover Curve (διάγραμμα 39). Ο πίνακας αποτελεσμάτων εξήχθη σε αρχείο υπολογιστικών φύλλων Excel, τα αποτελέσματα των αναλύσεων των τριών μεθόδων παρουσιάστηκαν στο ίδιο διάγραμμα για να συγκριθούν. Πέραν της σύγκρισης ποσοτικού χαρακτήρα μεταξύ των καμπυλών αντίστασης των μεθόδων ανάλυσης, μπορεί να γίνει και ποιοτική σύγκριση που αφορά τη διαδικασία σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων στο φορέα. Από την επιλογή *Display* → *Show Deformed Shape* παρουσιάζεται ο παραμορφωμένος φορέας, όπου είναι δυνατή η σταδιακή εμφάνιση των πλαστικών αρθρώσεων που σχηματίζονται βήμα προς βήμα (Κάππος Α. 2012).

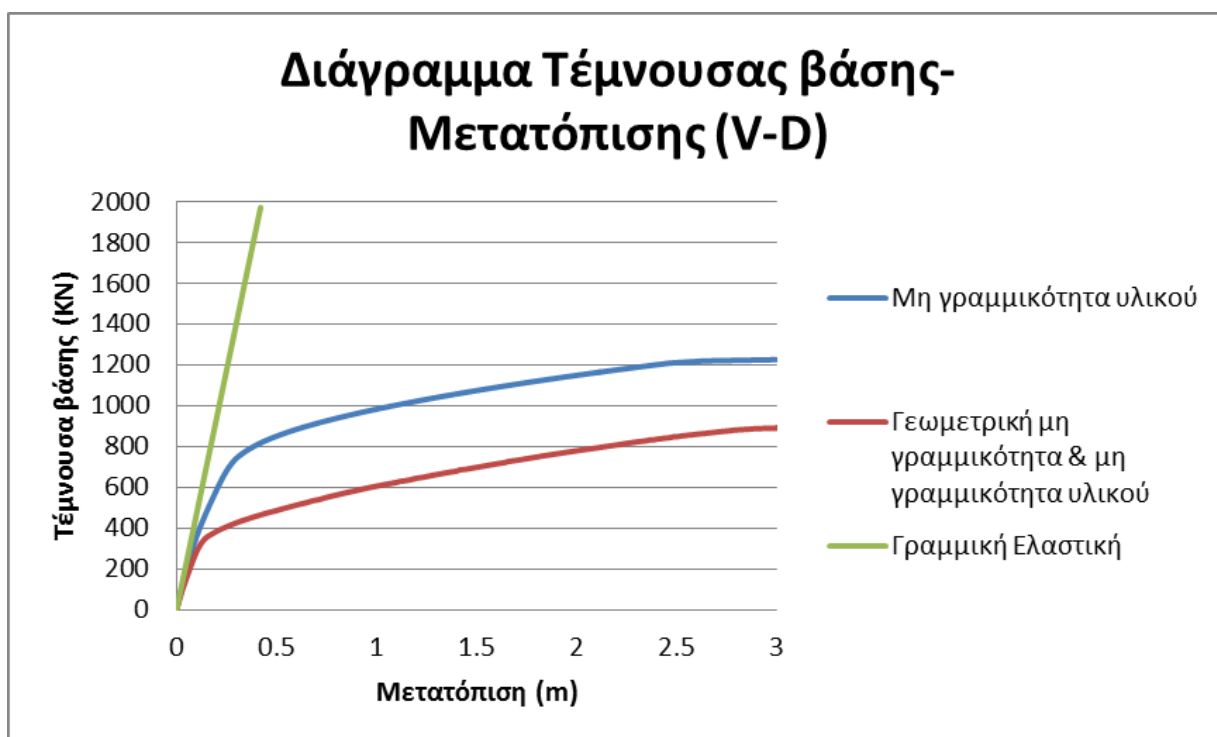


Διάγραμμα 39 Καμπύλη Push over

## 6 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα από τις τρεις μεθόδους ανάλυσης που έγιναν για το φορέα της 40ώροφης κατασκευής παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο.

Οι τιμές των αποτελεσμάτων, οι τιμές της μετατόπισης  $\delta$  και η αντίστοιχη Τέμνουσα βάσης για το κάθε βήμα και από τις τρεις μεθόδους, χρησιμοποιήθηκαν σε αρχείο Excel όπου δημιουργήσαμε το διάγραμμα Τέμνουσας βάσης-Μετατόπισης V- $\delta$  του φορέα, όπου  $\delta$  η πλευρική μετατόπιση του ψηλότερου κόμβου του φορέα κατασκευής (κόμβος 41).



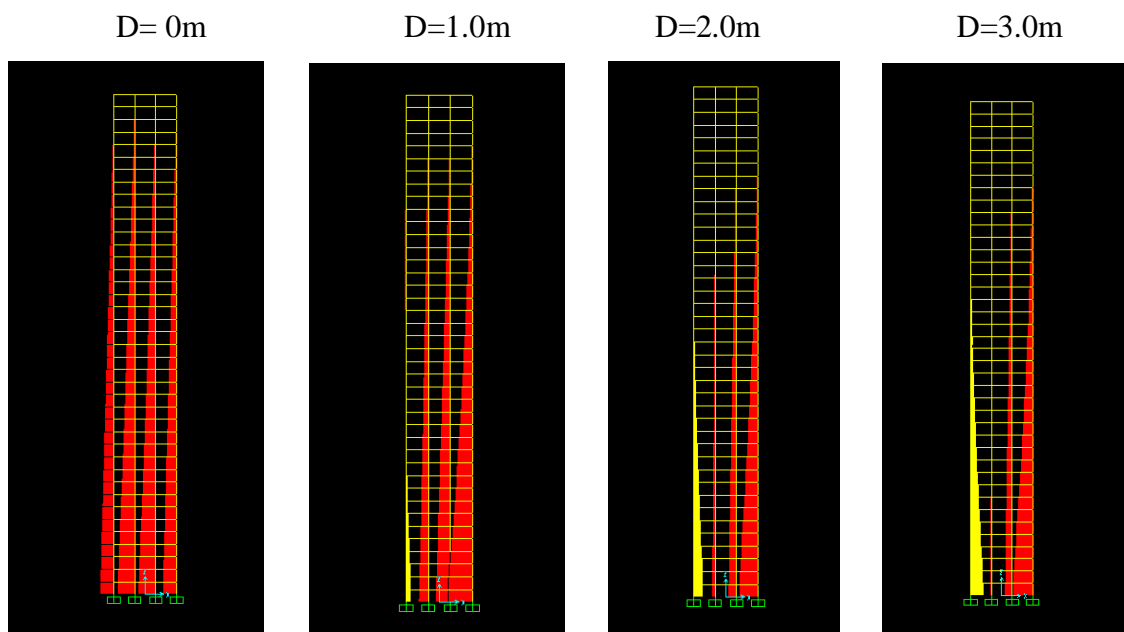
Διάγραμμα 40 Διάγραμμα Τέμνουσας βάσης-Μετατόπισης Κορυφής V-D

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα διαγράμματα των εντατικών μεγεθών από τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Παρουσιάζονται, για κάθε μέθοδο ανάλυσης ξεχωριστά, τα διαγράμματα επί του φορέα της κατασκευής για 4 διαφορετικές φάσεις της επιβολής του πλευρικού φορτίου με βάση την πλευρική μετατόπιση για 0m, 1.0m, 2.0m και 3.0m. Η πλευρική μετατόπιση 0m αντιστοιχεί στην εφαρμογή των κατακόρυφων φορτίων και προηγείται της εφαρμογής των πλευρικών φορτίων. Όλες οι μετρήσεις παρουσιάζονται στον πίνακα 3.

## 6.1 Γραμμική-Ελαστική Ανάλυση

Όπως αποδεικνύεται και από το διάγραμμα Τέμνουσας βάσης-Παραμόρφωσης (V-D) για τη Γραμμική-Ελαστική ανάλυση, η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να προσφέρει χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά την ανάλυση πολυώροφων κτιρίων. Η γραμμική-ελαστική ανάλυση δεν είναι μια αντιπροσωπευτική μέθοδος της συμπεριφοράς του φορέα ενός κτιρίου, πόσο μάλλον όταν πρόκειται για ψηλά κτίρια. Για τα ψηλά κτίρια επιβάλλεται η μη γραμμική ανάλυση συμπεριλαμβανομένων όλων των παραγόντων που θα επηρεάσουν τη συμπεριφορά του φορέα κατά την επιβολή πλευρικού φορτίου.

### 6.1.1 Αξονικές δυνάμεις



Διάγραμμα 41 Διαγράμματα αξονικών δυνάμεων φορέα

#### 6.1.1.1 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

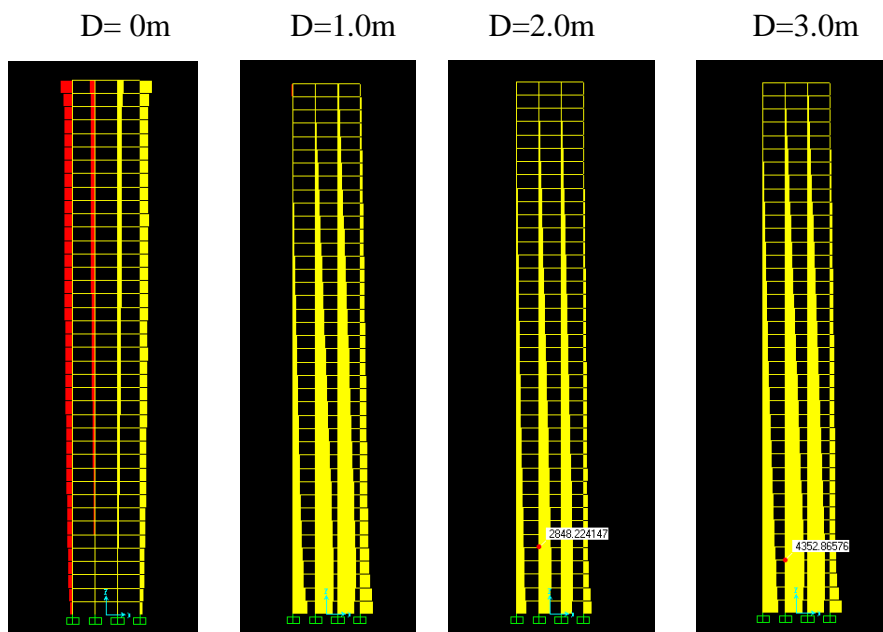
D=0 m : Η μέγιστη τιμή αξονικού φορτίου καταγράφεται στα υποστυλώματα του ορόφου 1 και συγκεκριμένα τα δυο κεντρικά υποστυλώματα φέρουν δύναμη ίση με  $P=14207$  KN.

D=1.0 m : Παρατηρείται αύξηση του αξονικού φορτίου που φέρουν τα υποστυλώματα που βρίσκονται στη δεξιά πλευρά του φορέα, με μέγιστο φορτίο αυτό του υποστυλώματος 121 (δεξιά εξωτερικό υποστυλώμα ορόφου 1) με τιμή  $P=27790$  KN. Στο αριστερό μέρος του φορέα, τα αξονικά φορτία των υποστυλωμάτων μειώνονται, ενώ στα αριστερά εξωτερικά υποστυλώματα των πρώτων 10 ορόφων παρατηρείται αξονική δύναμη αντίθετη από τη φορά της βαρύτητας (εφελκυστική δύναμη).

$D=2.0$  m : Παρατηρείται αύξηση του αξονικού φορτίου που φέρουν τα υποστυλώματα που βρίσκονται στη δεξιά πλευρά του φορέα, με μέγιστο φορτίο αυτό του υποστυλώματος 121 (δεξιά εξωτερικό υποστυλώμα ορόφου 1) με τιμή  $P=44911$  KN. Ενώ στα αριστερά εξωτερικά υποστυλώματα αυξάνεται η δύναμη ανύψωσης.

$D=3.0$  m : Με ένα εκ των δύο κεντρικών υποστυλωμάτων του ορόφου 1 να μην μεταφέρει σημαντικές αξονικές δυνάμεις, συνεχίζεται η αύξηση των αξονικών δυνάμεων των εξωτερικών υποστυλωμάτων των πρώτων 20 ορόφων. Μέγιστο αξονικό φορτίο στο δεξιά εξωτερικό υποστυλώμα του ορόφου 1 με τιμή  $P=61529$  KN και στο αριστερά εξωτερικό υποστυλώμα εφελκυστική δύναμη  $P=39193$  KN.

### 6.1.2 Διατμητικές δυνάμεις



Διάγραμμα 42 Διαγράμματα διατμητικών δυνάμεων φορέα

#### 6.1.2.1 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

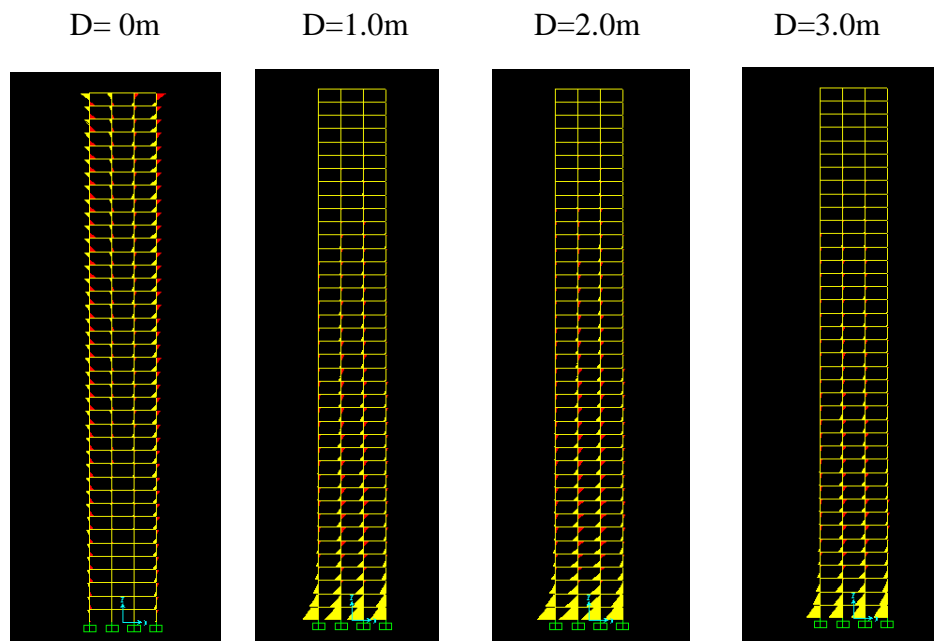
$D=0$  m : Με την επιβολή μόνο των κατακόρυφων φορτίων, τέμνουσες δυνάμεις παρουσιάζονται σχεδόν σε όλα τα υποστυλώματα του φορέα. Οι τέμνουσες δυνάμεις παρουσιάζουν μείωση από πάνω προς τα κάτω ανά ομάδα 10 ορόφων, με διαφοροποίηση της τέμνουσας δύναμης όπου αλλάζει η διατομή των υποστυλωμάτων. Η μέγιστη τιμή τέμνουσας δύναμης καταγράφεται στα εξωτερικά υποστυλώματα του τελευταίου ορόφου και φέρουν δύναμη ίση με  $P=131$  KN.

$D=1.0\text{ m}$  : Η κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων αλλάζει άρδην με την επιβολή του πλευρικού φορτίου. Τώρα πλέον οι τέμνουσες δυνάμεις στα υποστυλώματα των τελευταίων ορόφων είναι μικρές, ενώ οι δυνάμεις αυτές είναι μεγαλύτερες στα υποστυλώματα των πρώτων ορόφων, με κλιμακωτή μείωση των τεμνουσών δυνάμεων από κάτω προς τα πάνω. Η μέγιστη τέμνουσα δύναμη παρουσιάζεται στο αριστερά κεντρικό υποστυλώμα (υποστυλώμα 42) του ορόφου 4 με τιμή  $P=1285\text{ KN}$ .

$D=2.0\text{ m}$  : Συνεχίζεται η αύξηση των τεμνουσών δυνάμεων των μελών του φορέα με την ίδια διάταξη όπως προηγουμένως και με πάλιν τη μέγιστη τιμή στο αριστερά κεντρικό υποστυλώμα (υποστυλώμα 42) του ορόφου 4 με τιμή  $P=2848\text{ KN}$ . Ωστόσο στα δεξιά εξωτερικά υποστυλώματα του φορέα παρατηρείται αλλαγή των δυνάμεων και αύξηση όπου υπάρχει αλλαγή διατομής του υποστυλώματος.

$D=3.0\text{ m}$  : Όπως και στην προηγούμενη μετατόπιση, συνεχίζεται η αύξηση των τεμνουσών δυνάμεων των μελών του φορέα. Η μέγιστη τιμή παρουσιάζεται στο ίδιο υποστυλώμα του ορόφου 4 με τιμή  $P=4352\text{ KN}$ . Ωστόσο στα δεξιά εξωτερικά υποστυλώματα του φορέα παρατηρείται φθίνουσα πορεία στη τιμή των δυνάμεων από κάτω προς τα πάνω με μία μικρή αύξηση στο μέσο του φορέα, στον όροφο 20

### 6.1.3 Ροπές



Διάγραμμα 43 Διαγράμματα ροπών φορέα



### 6.1.3.1 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

$D=0$  m : Παρατηρείται ανάπτυξη ροπών στα εξωτερικά υποστυλώματα του φορέα, με τις ροπές να μειώνονται κινούμενοι από πάνω προς τα κάτω ανά ομάδα 10 ορόφων. Η ροπή αυξάνεται και πάλι όπου παρατηρείται αλλαγή διατομής των υποστυλωμάτων. Οι μέγιστες ροπές καταγράφονται στα εξωτερικά υποστυλώματα του τελευταίου ορόφου  $M=265$  KNm.

$D=1.0$  m : Αναπτύσσονται μικρές ροπές στα εσωτερικά υποστυλώματα των ορόφων. Πλέον παρουσιάζονται μικρές ροπές στα υποστυλώματα των τελευταίων ορόφων σε σχέση με αυτά των πρώτων ορόφων, όπου στα υποστυλώματα των πρώτων ορόφων αναπτύσσονται πολύ μεγάλες ροπές, με μέγιστη αυτή στο υποστυλώμα 41 (κεντρικό υποστυλώμα ορόφου 1) με  $M=5742$  KNm.

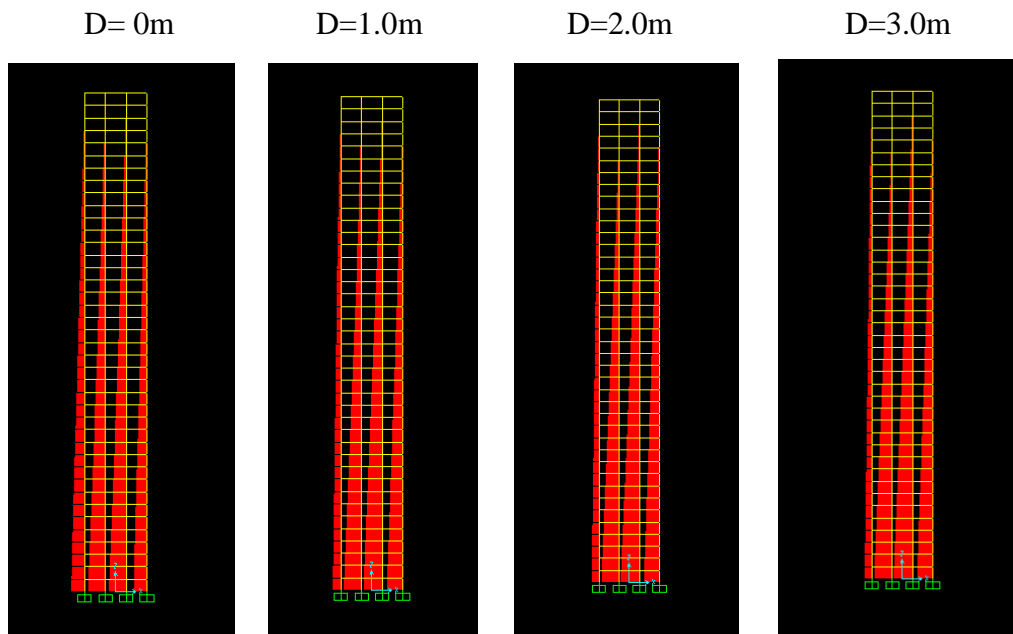
$D=2.0$  m : Όπως και στην προηγούμενη μετατόπιση, αυξάνονται οι ροπές στα εσωτερικά υποστυλώματα των ορόφων. Πολύ μικρές είναι και πάλι οι ροπές στα υποστυλώματα των τελευταίων ορόφων, ενώ αναπτύσσονται περισσότερο οι ροπές στα υποστυλώματα των πρώτων ορόφων, με μέγιστη αυτή στο υποστυλώμα 41 με  $M=11682$  KNm. Αύξηση ροπών στα δεξιά εξωτερικά υποστυλώματα.

$D=3.0$  m : Συνεχίζεται η αύξηση των ροπών στα ίδια μέλη του φορέα όπως και πριν με τη μέγιστη ροπή στο κεντρικό υποστυλώμα του ορόφου 1 να φτάνει  $M=17465$  KNm.

## 6.2 Μη γραμμική μέθοδος- Μη γραμμικότητα υλικού

Σε αυτή τη μη γραμμική μέθοδο ανάλυσης, συνυπολογίζεται η μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού όπως αυτή προδιαγράφεται από τις ιδιότητες του υλικού. Οι μετελαστικές ιδιότητες των υλικών του φορέα οδηγούν στην αλλαγή της όλης συμπεριφοράς του.

## 6.2.1 Αξονικές δυνάμεις



Διάγραμμα 44 Διαγράμματα αξονικών δυνάμεων φορέα

### 6.2.1.1 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

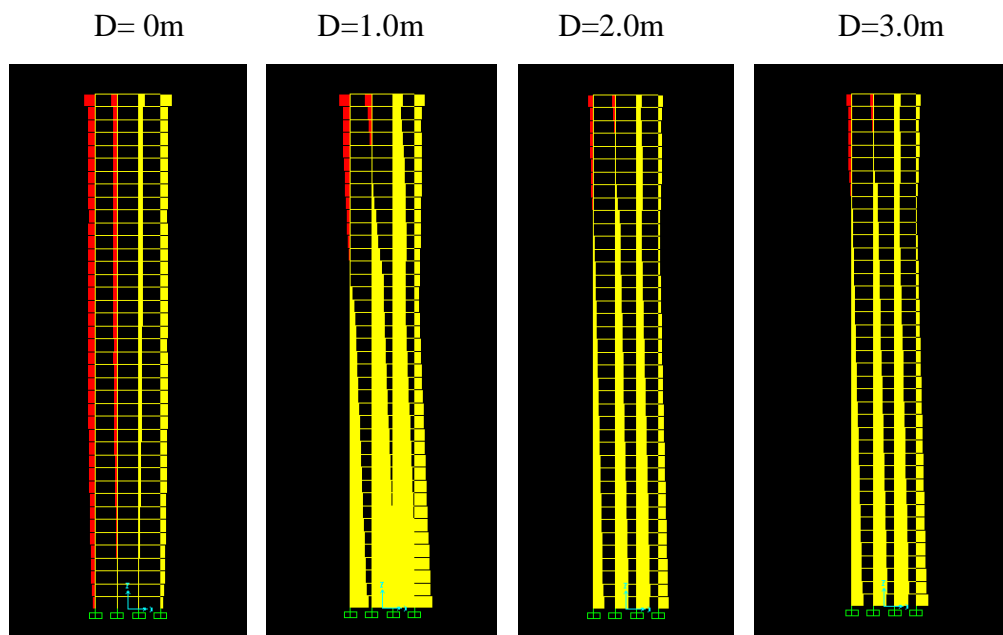
D=0 m : Η μέγιστη τιμή αξονικού φορτίου καταγράφεται στα κεντρικά υποστυλώματα του ορόφου 1 (υποστυλώματα 41 και 81) με δύναμη  $P=14207$  KN.

D=1.0 m : Παρατηρείται αύξηση του αξονικού φορτίου που φέρουν τα υποστυλώματα εκτός των αριστερά εξωτερικών, με μέγιστο φορτίο αυτό του υποστυλώματος 81 (δεξιά κεντρικό υποστυλώμα ορόφου 1) με τιμή  $P=15562$  KN. Στα αριστερά εξωτερικά υποστυλώματα παρατηρείται μείωση της αξονικής δύναμης.

D=2.0 m : Συνεχίζεται η αύξηση του αξονικού φορτίου που φέρουν τα υποστυλώματα εκτός των αριστερά εξωτερικών, όπου μειώνεται περαιτέρω.

D=3.0 m : Ακολουθεί μικρή αύξηση του αξονικού φορτίου που φέρουν τα υποστυλώματα εκτός των αριστερά εξωτερικών, όπου μειώνεται και πάλι. Μέγιστο αξονικό φορτίο στο υποστυλώμα 81 με  $P=15789$  KN.

## 6.2.2 Διατμητικές Δυνάμεις



Διάγραμμα 45 Διαγράμματα διατμητικών δυνάμεων φορέα

### 6.2.2.1 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

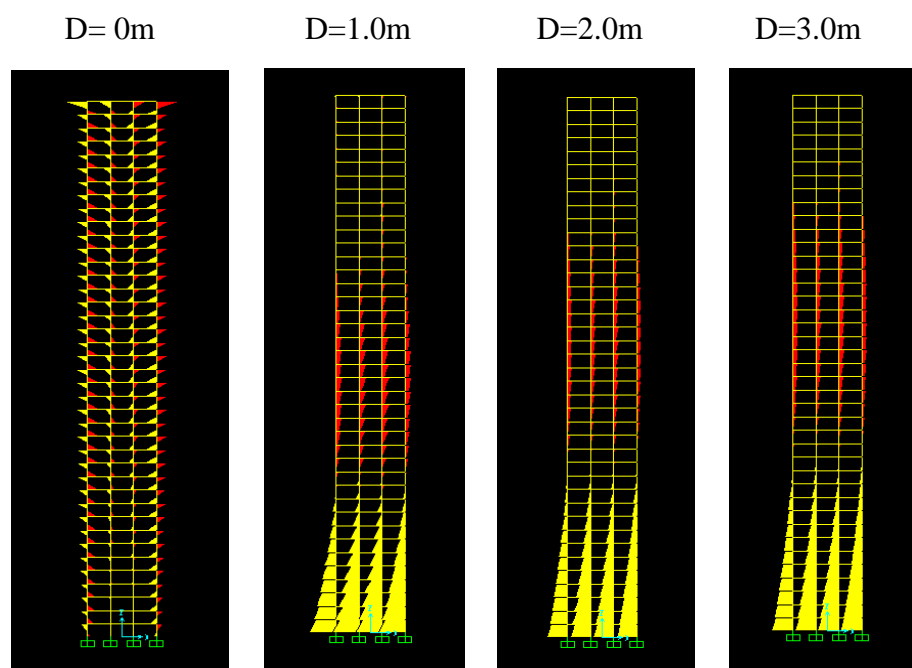
$D=0$  m : Με την επιβολή μόνο των κατακόρυφων φορτίων, τέμνουσες δυνάμεις παρουσιάζονται σχεδόν σε όλα τα υποστυλώματα του φορέα. Οι τέμνουσες δυνάμεις παρουσιάζουν μείωση από πάνω προς τα κάτω ανά ομάδα 10 ορόφων, με διαφοροποίηση της τέμνουσας δύναμης όπου αλλάζει η διατομή των υποστυλωμάτων. Η μέγιστη τιμή τέμνουσας δύναμης καταγράφεται στα εξωτερικά υποστυλώματα του τελευταίου ορόφου και φέρουν δύναμη ίση με  $P=131$  KN.

$D=1.0$  m : Η κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων αλλάζει άρδην με την επιβολή του πλευρικού φορτίου. Και πάλιν παρουσιάζονται τέμνουσες δυνάμεις σχεδόν σε όλα τα υποστυλώματα του φορέα, ενώ οι δυνάμεις αυτές είναι μεγαλύτερες στα υποστυλώματα των πρώτων μισών ορόφων. Επίσης στα εξωτερικά υποστυλώματα παρατηρείται ότι από τη βάση του φορέα μέχρι το μέσο του υπάρχει μείωση των τιμών των τεμνουσών δυνάμεων, ενώ από το μέσο μέχρι την κορυφή αυξάνεται η τιμή των δυνάμεων. Στο αριστερό μέρος του φορέα παρουσιάζεται και αλλαγή της φοράς της τέμνουσας δύναμης. Μικρές αλλαγές στις ροπές παρατηρούνται όπου αλλάζει η διατομή του υποστυλώματος. Η μέγιστη τέμνουσα δύναμη παρουσιάζεται στο αριστερά κεντρικό υποστυλώμα (υποστυλώμα 42) του ορόφου 2 με τιμή  $P=276$  KN. Διαφοροποιημένη η κατάσταση στους τελευταίους 10 ορόφους.

$D=2.0\text{ m}$  : Οι τέμνουσες δυνάμεις παρουσιάζονται στην ίδια διάταξη με την προηγούμενη μετατόπιση του φορέα, με μία μικρή αύξηση στις τιμές τους. Μικρές αλλαγές στις τέμνουσες παρατηρούνται όπου αλλάζει η διατομή του υποστυλώματος. Η μέγιστη τέμνουσα δύναμη παρουσιάζεται στο αριστερά κεντρικό υποστύλωμα (υποστύλωμα 42) του ορόφου 2 με τιμή  $P=327\text{ KN}$ .

$D=3.0\text{ m}$  : Όπως και στην προηγούμενη μετατόπιση, συνεχίζεται η αύξηση των τεμνουσών δυνάμεων των μελών του φορέα. Η μέγιστη τιμή παρουσιάζεται στο ίδιο υποστύλωμα του ορόφου 2 με τιμή  $P=343\text{ KN}$ .

### 6.2.3 Ροπές



Διάγραμμα 46 Διαγράμματα ροπών φορέα

#### 6.2.3.1 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

$D=0\text{ m}$  : Παρατηρείται ανάπτυξη ροπών στα εξωτερικά υποστυλώματα του φορέα, με τις ροπές να μειώνονται κινούμενοι από πάνω προς τα κάτω ανά ομάδα 10 ορόφων. Η ροπή αυξάνεται και πάλι όπου παρατηρείται αλλαγή διατομής των υποστυλωμάτων. Ροπές επίσης παρατηρούνται και στα εσωτερικά υποστυλώματα του φορέα, εκτός των πρώτων ορόφων. Οι μέγιστες ροπές καταγράφονται στα εξωτερικά υποστυλώματα του τελευταίου ορόφου (υποστυλώματα 40 και 160) με  $M=265\text{ KNm}$ .

$D=1.0$  m : Σε αυτή τη μετακίνηση παρουσιάζονται μικρές ροπές στα υποστυλώματα των τελευταίων ορόφων σε σχέση με αυτά των πρώτων, όπου στα υποστυλώματα των πρώτων 10 ορόφων αναπτύσσονται πολύ μεγάλες ροπές, με μέγιστη αυτή στο κεντρικό υποστυλώμα του ορόφου 1 με  $M=2909$  KNm, με την τιμή να είναι σχεδόν ίση και στα υπόλοιπα υποστυλώματα του ορόφου. Επίσης ροπές αναπτύσσονται και στα υποστυλώματα των μεσαίων ορόφων, μεταξύ ορόφου 15 και ορόφου 25, με τη ροπή να εναλλάσσεται όπου αλλάζουν διατομή τα υποστυλώματα.

$D=2.0$  m : Ισχύει όπως και στην προηγούμενη μετατόπιση, με αύξηση των τιμών των ροπών στα μέλη που αναφέραμε και στην προηγούμενη μετατόπιση, με μέγιστη αυτή στο κεντρικό υποστυλώμα του ορόφου 1 με  $M=4489$  KNm. Αύξηση ροπών στα δεξιά εξωτερικά υποστυλώματα.

$D=3.0$  m : Συνεχίζεται η αύξηση των ροπών στα ίδια μέλη του φορέα όπως και πριν με τη μέγιστη ροπή στο κεντρικό υποστυλώμα του ορόφου 1 να φτάνει  $M=5166$  KNm.

#### **6.2.4 Τέμνουσα βάσης**

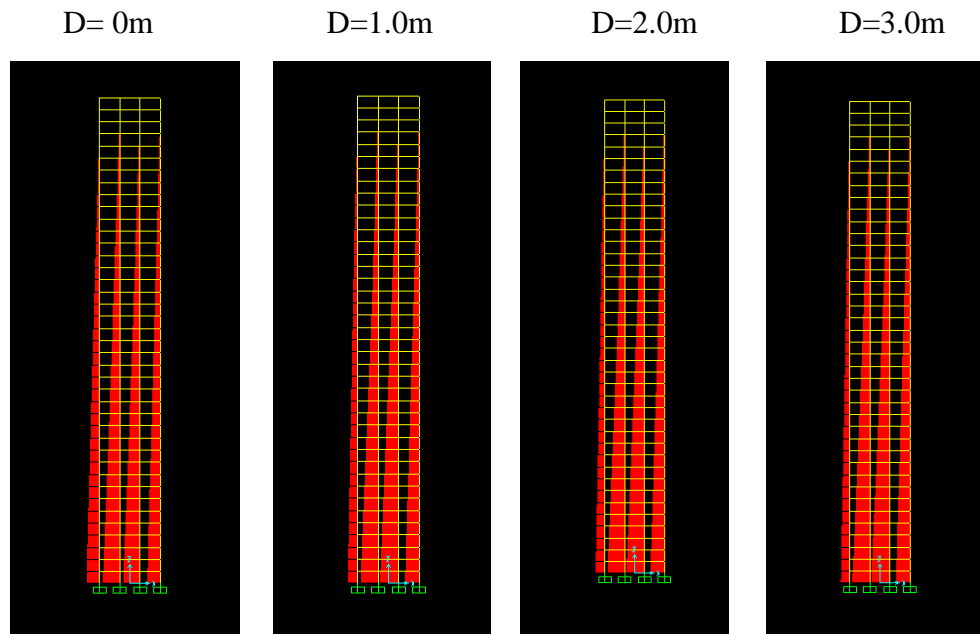
Από αυτή τη μέθοδο και το διάγραμμα Τέμνουσας βάσης-Παραμόρφωσης (V-D) (διάγραμμα 40) φαίνεται πως η καμπύλη στο διάγραμμα αρχίζει όταν η τιμή της Τέμνουσας βάσης γίνει ίση με 709 KN και ενώ η μετατόπιση του τελευταίου κόμβου, κόμβος 41, είναι ίση με 0.27 m. Ωστόσο, η μέγιστη τιμή τέμνουσας βάσης για το φορέα, όπως ορίζεται από το διάγραμμα, είναι τα 1224 KN όπως αυτά ορίζονται στο τελευταίο βήμα (βήμα 961) της ανάλυσης.

### **6.3 Μη γραμμική μέθοδος- Μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας**

Με αυτή τη μέθοδο, συνυπολογίζονται στην ανάλυση τόσο η μη γραμμικότητα στη γεωμετρία όσο και η μη γραμμικότητα του υλικού. Όταν ο φορέας έχει παραμορφωμένο σχήμα τότε προκαλούνται δευτερογενείς ροπές λόγω του φαινομένου P-Δ. Αυτή η μέθοδος αποτελεί μια από τις ακριβέστερες όσον αφορά τα αποτελέσματα ανάλυσης. Προσφέρει πιο ακριβή αποτελέσματα και αποδίδει μία συμπεριφορά στο φορέα προσομοίωσης αρκετά κοντά σε αυτή της πραγματικής κατασκευής.

Είναι φανερό από το διάγραμμα Τέμνουσας βάσης-Παραμόρφωσης (V-D) (διάγραμμα 40), πως η αντοχή του φορέα μειώνεται σε σχέση με την ανάλυση όπου λήφθηκε υπόψη μόνο μη γραμμικότητα του υλικού.

### 6.3.1 Αξονικές Δυνάμεις



Διάγραμμα 47 Διαγράμματα αξονικών δυνάμεων φορέα

#### 6.3.1.1 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου είναι σχεδόν εξίσου τα ίδια με της μεθόδου μη γραμμικότητας υλικού.

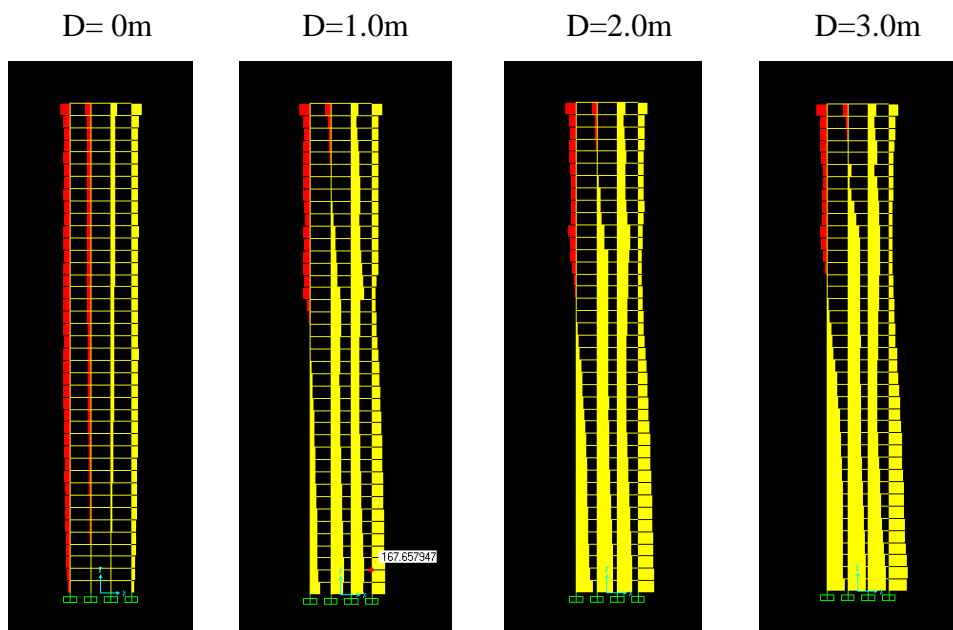
D=0 m : Η μέγιστη τιμή αξονικού φορτίου καταγράφεται στα κεντρικά υποστυλώματα του ορόφου 1 (υποστυλώματα 41 και 81) με δύναμη  $P=14207$  KN.

D=1.0 m : Παρατηρείται αύξηση του αξονικού φορτίου που φέρουν τα υποστυλώματα εκτός των αριστερά εξωτερικών, με μέγιστο φορτίο αυτό του υποστυλώματος 81 (δεξιά κεντρικό υποστυλώμα ορόφου 1) με τιμή  $P=15562$  KN. Στα αριστερά εξωτερικά υποστυλώματα παρατηρείται μείωση της αξονικής δύναμης.

D=2.0 m : Συνεχίζεται η αύξηση του αξονικού φορτίου που φέρουν τα υποστυλώματα εκτός των αριστερά εξωτερικών, όπου μειώνεται περαιτέρω.

D=3.0 m : Ακολουθεί μικρή αύξηση του αξονικού φορτίου που φέρουν τα υποστυλώματα εκτός των αριστερά εξωτερικών, όπου μειώνεται και παλι. Μέγιστο αξονικό φορτίο στο υποστυλώμα 81 με  $P=15754$  KN.

### 6.3.2 Διατμητικές Δυνάμεις



Διάγραμμα 48 Διαγράμματα διατμητικών δυνάμεων φορέα

#### 6.3.2.1 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

D=0 m : Με την επιβολή μόνο των κατακόρυφων φορτίων, τέμνουσες δυνάμεις παρουσιάζονται σχεδόν σε όλα τα υποστυλώματα του φορέα. Οι τέμνουσες δυνάμεις παρουσιάζουν μείωση από πάνω προς τα κάτω ανά ομάδα 10 ορόφων, με διαφοροποίηση της τέμνουσας δύναμης όπου αλλάζει η διατομή των υποστυλωμάτων. Η μέγιστη τιμή τέμνουσας δύναμης καταγράφεται στα εξωτερικά υποστυλώματα του τελευταίου ορόφου και φέρουν δύναμη ίση με  $P=131$  KN.

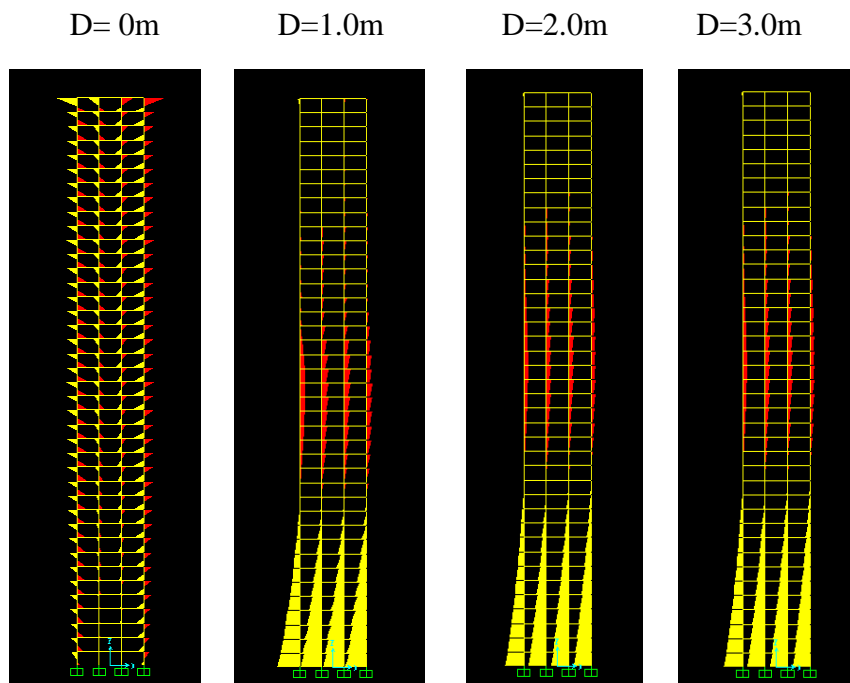
D=1.0 m : Η κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων αλλάζει άρδην με την επιβολή του πλευρικού φορτίου. Επίσης στα εξωτερικά υποστυλώματα παρατηρείται ότι από τη βάση του φορέα μέχρι το μέσο του υπάρχει μείωση των τιμών των τεμνουσών δυνάμεων, ενώ από το μέσο μέχρι την κορυφή αυξάνεται η τιμή των δυνάμεων. Στο αριστερό μέρος του φορέα παρουσιάζεται και αλλαγή της φοράς της τέμνουσας δύναμης. Μικρές αλλαγές στις ροπές παρατηρούνται όπου αλλάζει η διατομή του υποστυλώματος. Η μέγιστη τέμνουσα δύναμη παρουσιάζεται στο δεξιά εξωτερικό υποστυλώμα (υποστυλώμα 122) του ορόφου 2 με τιμή  $P=167$  KN. Μεγάλες τέμνουσες δυνάμεις και στα υποστυλώματα των τελευταίων ορόφων. Έντονες τέμνουσες δυνάμεις στα κεντρικά υποστυλώματα.

D=2.0 m : Οι τέμνουσες δυνάμεις παρουσιάζονται στην ίδια διάταξη με την προηγούμενη μετατόπιση του φορέα, με μία μικρή αύξηση στις τιμές τους. Μικρές αλλαγές στις τέμνουσες

παρατηρούνται όπου αλλάζει η διατομή του υποστυλώματος. Η μέγιστη τέμνουσα δύναμη παρουσιάζεται στο δεξιά εξωτερικό υποστύλωμα (υποστύλωμα 42) του ορόφου 2 με τιμή  $P=202$  KN.

$D=3.0$  m : Όπως και στην προηγούμενη μετατόπιση, συνεχίζεται η αύξηση των τεμνουσών δυνάμεων των μελών του φορέα. Η μέγιστη τιμή παρουσιάζεται στο ίδιο υποστύλωμα του ορόφου 2 με τιμή  $P=230$  KN. Έντονες τέμνουσες δυνάμεις στα κεντρικά υποστυλώματα.

### 6.3.3 Ροπές



Διάγραμμα 49 Διαγράμματα ροπών φορέα

#### 6.3.3.1 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

$D=0$  m : Παρατηρείται ανάπτυξη ροπών στα εξωτερικά υποστυλώματα του φορέα, με τις ροπές να μειώνονται κινούμενοι από πάνω προς τα κάτω ανά ομάδα 10 ορόφων. Η ροπή αυξάνεται και πάλι όπου παρατηρείται αλλαγή διατομής των υποστυλωμάτων. Ροπές επίσης παρατηρούνται και στα εσωτερικά υποστυλώματα του φορέα, εκτός των πρώτων ορόφων. Οι μέγιστες ροπές καταγράφονται στα εξωτερικά υποστυλώματα του τελευταίου ορόφου (υποστυλώματα 40 και 160) με  $M=265$  KNm.

$D=1.0$  m : Τα υποστυλώματα των τελευταίων ορόφων σε αυτή τη μετακίνηση παρουσιάζουν μικρές ροπές, ενώ πολύ μεγάλες ροπές αναπτύσσονται στα υποστυλώματα των πρώτων 10 ορόφων, με μέγιστη αυτή στο αριστερά εξωτερικό υποστύλωμα του ορόφου 1 με  $M=2569$



KNm, με μειωμένη τιμή στα υπόλοιπα υποστυλώματα του ορόφου. Επίσης ροπές αναπτύσσονται και στα υποστυλώματα των μεσαίων ορόφων, μεταξύ ορόφου 15 και 25, με τη ροπή να εξαλλάσσεται όπου αλλάζουν διατομή τα υποστυλώματα.

D=2.0 m : Ισχύει όπως και στην προηγούμενη μετατόπιση, με αύξηση των τιμών των ροπών στα μέλη που αναφέραμε και στην προηγούμενη μετατόπιση, με μέγιστη αυτή στο αριστερά εξωτερικό υποστυλώμα του ορόφου 1 με  $M=4336$  KNm. Αυξάνονται οι τιμές των ροπών των δεξιά εξωτερικών υποστυλωμάτων.

D=3.0 m : Συνεχίζεται η αύξηση των ροπών στα ίδια μέλη του φορέα όπως και πριν με τη μέγιστη ροπή στο αριστερό υποστυλώμα του ορόφου 1 να φτάνει  $M=5214$  KNm.

#### **6.3.4 Τέμνουσα βάση**

Στην πλήρη μη γραμμική ανάλυση, όπου συνυπολογίζονται η μη γραμμικότητα γεωμετρίας και υλικού, παρατηρείται από το διάγραμμα η ελαστική περιοχή για το φορέα τερματίζεται όταν η τέμνουσα βάση φτάσει τη τιμή των 307 KN (διάγραμμα 40).

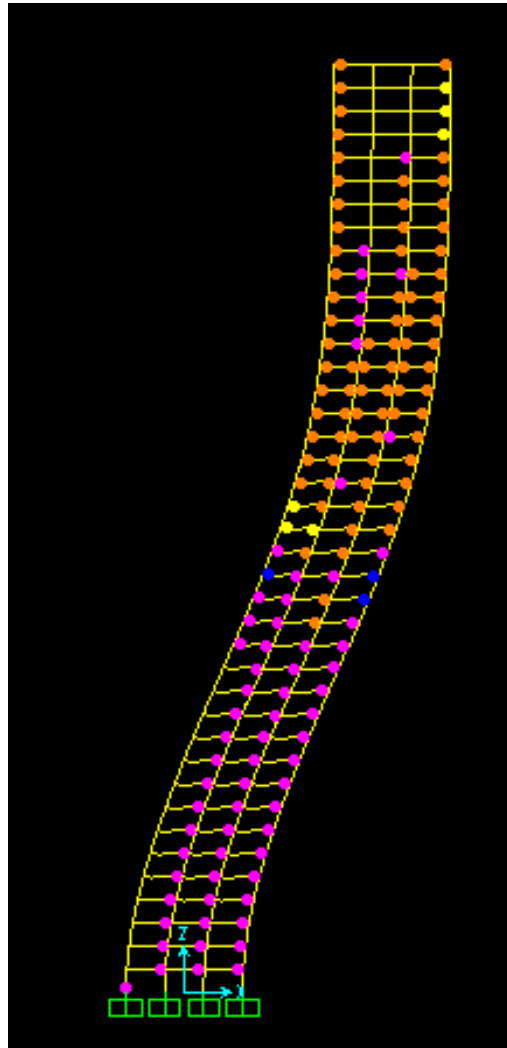
Έχοντας θέσει περιορισμό στη μέγιστη μετατόπιση του κόμβου του τελευταίου ορόφου (κόμβος 41) τα 3 μέτρα, ο φορέας σε αυτή τη θέση παίρνει την μέγιστη τιμή τέμνουσας βάσης έχοντας τιμή τα 892 KN. Παρατηρείται μειωμένη τιμή και σε αυτή την περίπτωση, συγκρινόμενη με την τιμή της μεθόδου με μη γραμμικότητα υλικού.

### **6.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων**

Όπως προαναφέραμε, η γραμμική μέθοδος είναι εξωπραγματική για ανάλυση ψηλού κτιρίου. Συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους μη γραμμικής ανάλυσης, όπως τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 3, αποδεικνύεται πως στην μέθοδο όπου συνυπολογίζονται η μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας, η αντοχή του φορέα του κτιρίου είναι μικρότερη από αυτή της μεθόδου όπου υπολογίζεται μόνο η μη γραμμικότητα υλικού. Επίσης τα μέλη του φορέα στην πλήρη μη γραμμική μέθοδο ανάλυσης οδηγούνται σε δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων νωρίτερα από ότι στην πρώτη μέθοδο, λόγω της ύπαρξης των φαινομένων δεύτερης τάξης. Η μέγιστη αξονική δύναμη υποστυλώματος παρουσιάζεται στην μη γραμμικότητα υλικού, πολύ ελάχιστα ωστόσο μεγαλύτερη από αυτή της πλήρους μη γραμμικότητας.

Δυσμενέστερα αποτελέσματα από τις μεθόδους ανάλυσης προκύπτουν από τις μη γραμμικές μεθόδους και πιο συγκεκριμένα από τη μέθοδο πλήρους μη γραμμικότητας όπου

συνυπολογίζονται η μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας. Με αυτό τον τρόπο προσεγγίζεται καλύτερα η συμπεριφορά της κατασκευής έχοντας πιο ακριβείς υπολογισμούς.



**Διάγραμμα 50** Δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στο φορέα

Πίνακας 3 Αποτελέσματα μετρήσεων και από τις 3 μεθόδους

Μέγεθος	Μέθοδος Ανάλυσης											
	Γραμμική - Ελαστική				Μη-γραμμικότητα υλικού				Πλήρης μη-γραμμική			
D (m)	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
Μέγιστη Αξονική (KN)	14207	27790	44911	61529	14207	15562	15716	15789	14207	15562	15681	15754
Μέγιστη Τέμνουσα (KN)	131	1285	2848	4352	131	276	324	343	131	167	202	230
Μέγιστη ροπή (KNm)	265	5742	11682	17465	265	2909	4489	5166	265	2569	4336	5214
Όριο ελαστικής περιοχής (KN)	>2000 (πάρα πολύ μεγάλη τιμή)				709				307			
Μέγιστη αντοχή (KN)	>2000 (πάρα πολύ μεγάλη τιμή)				1224				892			

## 7 Συμπεράσματα

Η παρούσα πτυχιακή μελέτη είχε ως σκοπό τη μελέτη των παραγόντων που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ανάλυση και σχεδιασμό κτιρίων 40 ορόφων στους πυρήνες των πόλεων. Η γενική πορεία που ακολουθήθηκε ήταν η μελέτη των γενικών αρχών σχεδιασμού ψηλών κτιρίων, η μελέτη συγκεκριμένων γραμμικών και μη γραμμικών μεθόδων ανάλυσης ψηλών κτιρίων, η προδιαστασιολόγηση των μελών και η προσομοίωση του φορέα σε λογισμικό πρόγραμμα και τέλος η ανάλυση του με τις γραμμικές και μη γραμμικές μεθόδους και η εξαγωγή συμπερασμάτων.

Το δομικό σύστημα που χρησιμοποιείται σε ένα ψηλό κτίριο πρέπει να είναι αρκετά δύσκαμπτο για να του αποδίδει αντίσταση στα πλευρικά φορτία ανέμου αλλά και αρκετά πλαστικό για να απορροφάται η ενέργεια από το σεισμό. Μέσα από τις αναλύσεις αποδεικνύεται πως τα πλευρικά φορτία του ανέμου αποτελούν την κύρια οριζόντια φόρτιση στα ψηλά κτίρια.

Κατά την προδιαστασιολόγηση, χωρίς κάποιο ακολουθούμενο πρότυπο μελέτης σχεδιασμού, συμπεραίνεται ότι πρέπει να γίνεται ο οικονομικότερος σχεδιασμός από πλευράς υλικών για τα μέλη, εξοικονομώντας χώρο από τις διαστάσεις των διατομών αλλά και φορτία βαρύτητας από την όλη κατασκευή, απαιτώντας όμως τη μέγιστη απόδοση αντοχής ως προς την οριακή κατάσταση αστοχίας.

Από τα αποτελέσματα των μεθόδων ανάλυσης, δυσμενέστερα αποτελέσματα προκύπτουν από τις μη γραμμικές μεθόδους και πιο συγκεκριμένα από τη μέθοδο πλήρους μη γραμμικότητας όπου συνυπολογίζονται η μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας. Με αυτό τον τρόπο προσεγγίζεται καλύτερα η συμπεριφορά της κατασκευής έχοντας πιο ακριβείς υπολογισμούς. Από το διάγραμμα Τέμνουσας βάσης - Μετατόπισης κορυφής (V-D) (διάγραμμα 40) όπου συγκρίνονται τα αποτελέσματα και των 3 μεθόδων ανάλυσης, συμπεραίνεται ότι η αντοχή του φορέα μειώνεται στις μη γραμμικές μεθόδους. Μέσα από τις αναλύσεις από την συσχέτιση των αποτελεσμάτων προκύπτει πως υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ των καμπυλών Τέμνουσας βάσης - Μετατόπισης κορυφής των τριών μεθόδων ως προς τα κύρια σημεία δημιουργίας καμπύλης στα διαγράμματα.

Κατά κύριο λόγο τα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης δεν αντιπροσωπεύουν τη συμπεριφορά μιας πολυώροφης κατασκευής. Τη μικρότερη αντοχή παρουσιάζει η μέθοδος

πλήρους μη γραμμικότητας με μέγιστη τιμή τέμνουσας βάσης  $V=892$  KN σε σύγκριση με  $V=1224$  KN της μεθόδου μη γραμμικότητας υλικού. Όπως μικρότερη ήταν και η τιμή της τέμνουσας βάσης για την ίδια μετατόπιση κορυφής στο σημείο όπου παρουσιάζεται η πρώτη καμπύλη στο διάγραμμα, με τη μη γραμμικότητα υλικού να καταγράφει τιμή  $V=709$  KN σε σύγκριση με  $V=307$  KN της πλήρους μη γραμμικότητας. Ο συνυπολογισμός όλων των μη γραμμικών παραμέτρων στην ανάλυση, μειώνει και την αντοχή της κατασκευής.

Η πιο αξιόπιστη μέθοδος ανάλυσης θεωρείται η μέθοδος πλήρους μη γραμμικότητας (Full Nonlinear), εφόσον λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση οι δύο κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη μη γραμμικότητα του φορέα ενός ψηλού κτιρίου. Πρόκειται για τη μη γραμμικότητα του υλικού και τη γεωμετρική μη γραμμικότητα που γίνεται πιο έντονη στα πολυώροφα κτίρια λόγω του φαινομένου P-Δ και των μεγάλων μετατοπίσεων του φορέα. Οι δευτερογενείς ροπές που παρατηρούνται είναι εντονότερες όταν πρόκειται για ψηλά κτίρια. Το φαινόμενο P-Δ και οι μεγάλες μετατοπίσεις γίνονται μεγαλύτερες όσο ψηλότερο είναι το κτίριο, επιβαρύνοντας με επιπρόσθετες ροπές τη βάση του κτιρίου. Η γραμμική-ελαστική ανάλυση είναι εξωπραγματική για πολυώροφα κτίρια και δεν μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα από αυτή. Τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου δεν μπορούν να είναι συγκρίσιμα με αυτά των μη γραμμικών μεθόδων. Επίσης αναμένεται μάλιστα πως με τη χρήση μιας πιο λεπτομερούς προσομοίωσης, όπου θα λαμβάνονται υπόψη όλοι οι μηχανισμοί τοπικών αστοχιών, ότι θα υπάρχει ακόμη μεγαλύτερη διασπορά μεταξύ των αποτελεσμάτων.

Όπως αποδείχτηκε από τη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων, η πλαστικοποίηση των αρθρώσεων των δοκών προηγείται αυτής των υποστυλωμάτων, ικανοποιώντας έτσι την απαίτηση ικανοτικού σχεδιασμού. Αυτό επιτυγχάνεται με σχεδιασμό ισχυρών υποστυλωμάτων και αδύνατων δοκών, όπως προβλέπεται από τον Ευρωκώδικα 8. Παρόλο που τα υποστυλώματα των τελευταίων ορόφων δεν φέρουν μεγάλα αξονικά φορτία, ο σωστός σχεδιασμός τους είναι πολύ σημαντικός εφόσον αναπτύσσονται σε αυτά τέμνουσες δυνάμεις χωρίς την επιβολή οποιουδήποτε πλευρικού φορτίου.

Η πλήρης μη γραμμική ανάλυση αποδίδει ακριβέστερα αποτελέσματα ανάλυσης, εφόσον συνυπολογίζει όλους τους παράγοντες. Ωστόσο απαιτείται αρκετός υπολογιστικός χρόνος και γι' αυτό το λόγο αποφεύγεται από τους μελετητές. Όμως όταν πρόκειται για πολυώροφα ψηλά κτίρια, η χρήση της καθίσταται απαραίτητη για την ορθή προσομοίωση της συμπεριφοράς τέτοιων κτιρίων.

Ο Πολιτικός Μηχανικός, με τη χρήση οποιουδήποτε λογισμικού προγράμματος ανάλυσης, είναι ο μόνος υπεύθυνος για τυχόν λάθη που θα παρουσιάσει το πρόγραμμα στα αποτελέσματα, αφού πρέπει να γνωρίζει με βεβαιότητα τι δεδομένα εισάγει σε αυτό. Μέσα από την εμπειρία του θα πρέπει να προσδιορίσει αν τα αποτελέσματα ανάλυσης που του παρουσιάζει το πρόγραμμα είναι ορθά και αποδεκτά. Όπου είναι εφικτό, είναι ορθότερο να γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του λογισμικού προγράμματος με υπολογισμούς που έγιναν στο χέρι.

Σημαντικό να σημειωθεί ότι ο στόχος της ανάλυσης κατασκευών είναι να εκπονηθούν αποτελέσματα και χρήσιμα συμπεράσματα που θα βοηθήσουν στη λήψη αποφάσεων σχεδιασμού. Ο στόχος δεν είναι κατά απόλυτη ανάγκη να προβλεφτεί η ακριβής συμπεριφορά μιας κατασκευής, αφού η πρόβλεψη της ακριβούς συμπεριφοράς για μια πραγματική κατασκευή είναι κυριολεκτικά αδύνατη.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abell, M. (2014). Material Nonlinearity. Computers and Structures Inc., <<https://wiki.csiamerica.com>> (Feb. 16, 2016)

Autodesk Inc. (2016). The Gallery. Shanghai Tower.< <http://www.autodesk.com/> > (Jan. 18, 2016)

Banks, C. et al. (2014). “Tall buildings: Structural design of concrete buildings up to 300m tall”. *Bulletin No 73*, Federation Internationale du beton, Laussane, Switzerland

Biskinis, D. and Fardis, M.N. (2010a). Flexure-controlled ultimate deformations of members with continuous or lap-spliced bars. *Structural concrete*, 11:2, 93-108.

Carvalho, G., Bento, R., and Bhatt, C. (2012). “Earthquake and Structures”. *Nonlinear static and dynamic analyses of reinforced concrete buildings - comparison of different modelling approaches*. Technical University of Lisbon, Lisboa, Portugal

CEN (2004). *EN 1992–1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardisation.

CEN (2004). *EN 1998–1: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardisation.

Chrysostomou, C. Z. (1990). “The effects of degrading infill walls on the nonlinear seismic response of two-dimensional steel frames.” *Dissertations*, Cornell University, USA, 159-171.

Computers and Structures Inc. (2010). *CSI Analysis reference manual for SAP2000, ETABS, and SAFE*. Berkeley, California, USA.

Davidson, B. J., Fenwick, R. C., and Chung, B. T. (1992). “P-delta effect in multi -storey structural design.” *Earthquake Engineering*, Tenth World Conference Balkema, Rotterdam.

Dobson, R. (2003). “P-Delta analysis.” *New steel construction*, 11(1), 30–31.

- Fintel, M., Ghosh, S.K., Iyengar, H. (1986). "Column Shortening in tall structures-prediction and compensation". Portland Cement Association, USA
- Gunel, H., and Ilgin, H. E. (2014). "Tall Buildings: Structural Systems and Aerodynamic Form". Routledge, New York, USA
- Kalkan, E., Chopra, A. (2010). "Practical Guidelines to Select and Scale Earthquake Records for Nonlinear Response History Analysis of Structures". *U.S. Geological Survey Open-File Report 2010*, USA
- Konapure, G. et al. (2015). "Effect of P-Delta Action on Multi-Storey Buildings". *International Journal of Engineering Research & Technology*, <<http://www.ijert.org>> (Mar. 10, 2016)
- Nikolova, N. (2012). Burj Khalifa. Open buildings. <<http://openbuildings.com/>> (Dec.21, 2015)
- Powell, G. H. (2013). Nonlinear dynamic analysis capabilities and limitations. Computers and Structures Inc., <<https://wiki.csiamerica.com>> (Feb. 25, 2016)
- Sarkisian, M. (2012). "Designing tall Buildings". *Structure as Architecture*. Routledge, New York, USA
- Siqueira, C. (2005). Vortex shedding. University of São Paulo. <<http://www.mcef.ep.usp.br>> (Jan. 7, 2016)
- Smith, B. S. et al. (1991). "Tall Building Structures." *Analysis and Design*, Wiley Interscience, USA
- Surechem (2016). Strain Gauges. <<http://www.surechem.com.my/>> (Jan. 7, 2016)
- Taranath, B. S. (2012). "Structural Analysis and Design of Tall Buildings". CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton. Florida, USA
- Truby, A. (2014). "Structural Systems for Tall Buildings." *Council on Tall Buildings and Urban Habitat*. USA



Wilson, E. L. (2002). “Geometric Stiffness and P- DELTA EFFECTS.” *Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures: A physical approach with emphasis on earthquake Engineering*, 1–14.

Κάππος, Α. (2012). “Ανελαστική Ανάλυση Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα”. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

Πουλοκέφαλος, Α. Γ. (2014). “Μη γραμμική ανάλυση ευστάθειας χαλύβδινων πλαισίων με αριθμητικές μεθόδους.” Πτυχιακή διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα