



**ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ**

**ΠΕΙΡΑΙΑ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ**

**ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ  
ΕΔΑΦΟΥΣ - ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ  
ΣΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΤΙΡΙΩΝ  
ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΚΑΛΑΜΑΡΑ ΠΟΥΛΥΤΙΜΗ  
ΑΜ 37575**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΡΕΠΑΠΗΣ ΚΩΝ/ΝΟΣ**

**ΜΑΪΟΣ 2012, ΑΘΗΝΑ**



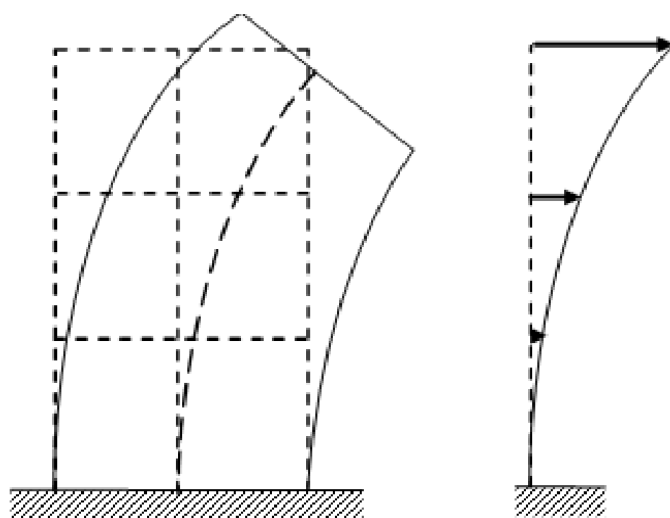


**ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ**

**ΠΕΙΡΑΙΑ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ**



**ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΑΡΑΣΗΣ ΕΛΑΦΟΥΣ - ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ  
ΣΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΤΙΡΙΩΝ  
ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΚΑΛΑΜΑΡΑ ΠΟΛΥΤΙΜΗ**

**ΜΑΪΟΣ 2012, ΑΘΗΝΑ**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη βελτίωση των μεθόδων μέσω των οποίων μπορεί να προβλεφθεί η σεισμική συμπεριφορά των δομημάτων, με τη βοήθεια των κατάλληλων προγραμμάτων και αναλύσεων. Αυτές οι προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στην αναμενόμενη συμπεριφορά των νέων δομημάτων. Παρόλα αυτά μεγάλο μέρος των υφιστάμενων κτιρίων έχει κατασκευαστεί χωρίς την ικανοποίηση των απαιτούμενων βασικών αρχών και κριτηρίων σχεδιασμού.

Για αυτόν τον λόγο στην παρούσα πτυχιακή εργασία διερευνάται η σεισμική συμπεριφορά κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Γίνεται η αποτίμηση της συμπεριφοράς ενός πενταώροφου κτιρίου, το οποίο κατασκευάστηκε σύμφωνα με τον Κανονισμό του 1959. Γνωρίζουμε ότι το είδος και η σύσταση του εδάφους επηρεάζει σημαντικά την συμπεριφορά του δομήματος κατά τη διάρκεια των σεισμικών δονήσεων. Ωστόσο ο 'γυμνός' φορέας παρουσιάζει μία εντελώς διαφορετική συμπεριφορά από ένα κτίριο που είναι ενισχυμένο ή τοιχοπληρωμένο. Έτσι θα εξετάσουμε τον φορέα συνδυάζοντας και τις τρεις περιπτώσεις για να μπορούμε να αποκτήσουμε μία γενικότερη εικόνα για την σεισμική συμπεριφορά των υφιστάμενων δομημάτων.

Για την αποτίμηση πραγματοποιείται μη γραμμική στατική ανελαστική ανάλυση υπό αυξανόμενη ένταση ή αλλιώς ανάλυση pushover με τη βοήθεια του προγράμματος ETABS. Ελέγχεται η μετακίνηση του κτιρίου και εάν αποκλίνει από τα προβλεπόμενα όρια, καθώς γίνεται σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που δίνουν οι αναλύσεις.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δείχνουν ότι το υφιστάμενο κτίριο είναι ιδιαίτερα ευάλωτο σε σεισμικές δονήσεις, αφού παρουσιάζει καμπτικές και διατμητικές βλάβες στα υποστυλώματα και τις δοκούς. Η ενίσχυση με τοίχωμα βελτιώνει την συμπεριφορά του, όπως και η παρουσία τοίχων πληρώσεως. Στην περίπτωση της πυλωτής, η συμπεριφορά του, είναι ιδιαίτερα δυσμενής. Η παρουσία μαλακού εδάφους βοηθάει τον φορέα δίνοντας του τη δυνατότητα να εκτελέσει μια πιο ελαστική άρα και πιο ομαλή ταλάντωση σε αντίθεση με το σκληρό ή βραχώδες που το καθιστούν πιο δύσκαμπτο.

Έχοντας πλέον αποσαφηνίσει τον τρόπο με τον οποίο η κατασκευή αποκρίνεται στα σεισμικά φορτία σε κάθε περίπτωση ξεχωριστά, είμαστε σε θέση να προβλέψουμε τις αστοχίες που θα παρουσιαστούν και να προχωρήσουμε στην ορθή ενίσχυσή του.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου και Επιβλέποντα της παρούσας εργασίας **κ.Κωνσταντίνο Ρεπαπή**, Επίκουρο καθηγητή του ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ, Πολιτικό Μηχανικό ΕΜΠ, για τη συνεχή καθοδήγησή του, τις πολύτιμες συμβουλές του, τη συμπαράσταση, την υποστήριξή του αλλά και το άριστο κλίμα συνεργασίας καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## Κεφάλαιο 1

1	Εισαγωγή.....	8
1.1	Διάγραμμα εργασίας.....	8
1.2	Γενικά.....	9
1.3	Περιγραφή προβλήματος.....	10

## Κεφάλαιο 2

2	Υφιστάμενα κτίρια.....	11
2.1	Ισχύοντες κανονισμοί.....	11
2.2	Χαρακτηριστικά υφιστάμενων κτιρίων.....	13

## Κεφάλαιο 3

3	Ανελαστικές αναλύσεις.....	15
3.1	Μη γραμμική στατική ανελαστική ανάλυση.....	16
3.2	Μέθοδοι αποτίμησης συμπεριφοράς.....	20
3.3	Στάθμες επιτελεστικότητας.....	22

## Κεφάλαιο 4

4	Εφαρμογή σε υφιστάμενα κτίρια.....	26
4.1	Περιγραφή κτιρίου.....	26
4.2	Προσομοίωση κτιρίου.....	32
4.3	Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής.....	32
4.4	Στατική ανελαστική ανάλυση.....	39

## Κεφάλαιο 5

5	Αποτελέσματα.....	40
5.1	Γυμνός φορέας.....	40
5.2	Φορέας ενισχυμένος με τοίχωμα.....	45
5.3	Φορέας με πυλωτή.....	51
5.4	Φορέας πλήρως τοιχοπληρωμένος.....	56
5.5	Γυμνό-κτίριο με τοίχωμα.....	61
5.6	Γυμνό-κτίριο με πυλωτή.....	63
5.7	Γυμνό-τοιχοπληρωμένο.....	65

## Κεφάλαιο 6

6	Συμπεράσματα.....	67
---	-------------------	----

ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	69
---------------	----

# Κεφάλαιο 1

## 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στον Τομέα του **Δομοστατικού Σχεδιασμού** με σκοπό τη μελέτη απόκρισης της σεισμικής συμπεριφοράς ενός υφιστάμενου κτιρίου που θεμελιώνεται σε διαφορετικές ποιότητες εδάφους.

### 1.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο **Κεφάλαιο 1** αναφέρονται γενικά στοιχεία σχετικά με το αντικείμενο της εργασίας. Παράλληλα, συμπεριλαμβάνεται το διάγραμμα της εργασίας και η περιγραφή του προβλήματος.

Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφονται τα υφιστάμενα κτίρια, τα χαρακτηριστικά τους καθώς και οι ισχύοντες κανονισμοί.

Στο **Κεφάλαιο 3** δίνονται πληροφορίες σχετικά με τις ανελαστικές αναλύσεις και τις μεθόδους αποτίμησης της ανελαστικής συμπεριφοράς.

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφεται το κτίριο, γίνεται η προσομοίωση του και τέλος περιγράφεται αναλυτικά η μέθοδος της στατικής ανελαστικής ανάλυσης σε συνδυασμό με την αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής κατά την εφαρμογή της.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για κάθε μία από τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν με την μεθοδολογία της **pushover analysis**.

Στο **Κεφάλαιο 6** παραθέτονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις.



## 1.2 ΓΕΝΙΚΑ

Εκτός των στατικών μεθόδων ανάλυσης ενός φορέα, από τους οποίους προκύπτει ένας αρχικός προσδιορισμός των διατομών και των μαζών του, θεμελιώδη σημασία έχει και ο δυναμικός χαρακτήρας της κατασκευής.

Η δυναμική απόκριση μιας κατασκευής είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τον τρόπο προσομοίωσης της σεισμικής διέγερσης και των χαρακτηριστικών της. Είναι αλήθεια ότι ο σεισμός αποτελεί έναν ξεχωριστό τύπο φόρτισης, εξαιτίας της πολυθεματικότητάς του αλλά και λόγω της αβεβαιότητας σχετικά με τη φύση και τη δράση του. Έτσι το ενδιαφέρον εστιάζεται τόσο στην εκτίμηση των χαρακτηριστικών του αναμενόμενου σεισμού με βάση τα γνωστά σεισμολογικά, γεωτεχνικά και εδαφολογικά δεδομένα όσο και στο μηχανισμό δράσης του πάνω στις κατασκευές.

Η σεισμική δράση αποδίδεται ως μια δυναμικά επιβαλλόμενη μετακίνηση που ωθεί την κατασκευή να εκτελέσει μια εξαναγκασμένη ταλάντωση. Αναλυτικότερα, κατά τη διάρκεια ενός σεισμού τα επιφανειακά κύματα προκαλούν κίνηση στο έδαφος και τη θεμελίωση της κατασκευής με εναλλασσόμενο πρόσημο, γύρω από μια αρχική θέση ηρεμίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι η δόνηση και κατ' επέκταση η ενέργεια που μεταφέρεται από το πέτρωμα στη θεμελίωση, ενισχύεται ή απομειώνεται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των επάλληλων εδαφικών στρώσεων που παρεμβάλλονται. Στην πραγματικότητα, ερευνάται η σεισμική συμπεριφορά ολόκληρου του συμπλέγματος έδαφος – θεμελίωση – ανωδομή κατασκευής.

Η αναπτυσσόμενη εδαφική κίνηση αποτελείται από τρεις ανεξάρτητες συνιστώσες: δύο οριζόντιες (κάθετες μεταξύ τους) και μια κατακόρυφη. Λαμβάνουμε υπόψη τα επιταχυνσιακά μεγέθη της κίνησης, διότι η επιτάχυνση ενεργοποιεί τις μάζες οι οποίες με την σειρά τους αναπτύσσουν αδρανειακές δυνάμεις. Η αδράνεια της μάζας της ανωδομής οδηγεί στην ύπαρξη δύο διαφορετικών ταλαντώσεων μεταξύ βάσης και ανωδομής. Κατά συνέπεια, προκύπτουν σχετικές παραμορφώσεις και εντάσεις οι οποίες αποτελούν τις εσωτερικές αντιδράσεις της κατασκευής και εξαρτώνται από την ακαμψία και την αντοχή της.

### 1.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Σε αυτήν την εργασία θα μελετήσουμε τη σεισμική συμπεριφορά μίας υφιστάμενης κατασκευής (αποτίμηση με στατική ανελαστική ανάλυση) από οπλισμένο σκυρόδεμα, καθώς και πως αυτή επηρεάζεται από την αλληλεπίδραση μεταξύ του εδάφους και της κατασκευής.

Πιο συγκεκριμένα θα μελετήσουμε το ποσοστό επιρροής της ανελαστικής συμπεριφοράς της κατασκευής ενός υφιστάμενου κτιρίου όταν αυτό είναι πακτωμένο στη βάση του, αλλά και στην περίπτωση που προσομοιώνουμε την θεμελίωση του με ελατήρια.

Η διαδικασία της προσομοίωσης και της ανάλυσης πραγματοποιείται με τη χρήση του προγράμματος ETABS.

## Κεφάλαιο 2

### **2. ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΑ ΚΤΙΡΙΑ**

Μεγάλο ποσοστό των οικοδομών στη χώρα μας έχουν μελετηθεί και κατασκευαστεί πριν το 1984, δηλαδή πριν την πρώτη βασική τροποποίηση του Αντισεισμικού Κανονισμού του 1954, ο οποίος στην ουσία αντανakλούσε γνώσεις της δεκαετίας του 1920-30. Κατά την δεκαετία του '60 και '70 επικράτησε έντονη ανοικοδόμηση που είχε ως αποτέλεσμα ένα τεράστιο τμήμα του δομικού πλούτου της Ελλάδας (~70%) και κυρίως των μεγάλων αστικών κέντρων, να αποτελείται από κτίρια αυτής της κατηγορίας. Ταυτόχρονα, η ποιότητα των υλικών, οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες που εφαρμόστηκαν, όπως η χρήση καμπτόμενων ράβδων οπλισμού και η ανεπαρκής αγκύρωση τους στις δοκούς, η χρήση λείου χάλυβα και συνδετήρων μικρής διαμέτρου αραιά τοποθετημένων, αποτελούν σημαντικές πηγές αβεβαιότητας. Επιπλέον, πέραν της έλλειψης αντισεισμικού σχεδιασμού, η δομική μορφολογία της πλειοψηφίας των κατασκευών αυτών ευνοεί την ανάπτυξη στρεπτικής απόκρισης κατά το σεισμό, καθιστώντας ακόμα πιο δυσμενή την κατάσταση τους.

Έτσι η έλλειψη επαρκών στοιχείων είχε ως αποτέλεσμα την ανέγερση οικοδομών που δεν είχαν την ελάχιστη επαρκή ενίσχυση για την αντιμετώπιση μίας ισχυρής σεισμικής δόνησης. Αλλά η απουσία ισχυρών σεισμικών γεγονότων, όπως αυτών που ακολούθησαν στις επόμενες δεκαετίες (80', 90') έδωσαν την δυνατότητα αποκάλυψης των εγγενών αδυναμιών των ισχυουσών κανονιστικών διατάξεων και των πρακτικών σχεδιασμού δόμησης εκείνης της περιόδου.

#### **2.1 ΙΣΧΥΟΝΤΕΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ**

Πλέον η συσσωρευμένη γνώση, η γνώση που συνεχώς παράγεται από αφοσιωμένους επιστήμονες σε όλα τα επιστημονικά ιδρύματα (Πανεπιστήμια, Ερευνητικά Κέντρα, Εργαστήρια) και η εμπειρία σε συνδυασμό με την πρωτοπορία στην έρευνα έχουν χαρίσει στην χώρα μας ποιότητα και ασφάλεια στις νέες κατασκευές.

Οι Οργανισμοί Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.) και ο Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδος (Σ.Π.Μ.Ε.) είναι υπεύθυνοι για την ενημέρωση

των Ελλήνων Μηχανικών για την ενίσχυση, παραγωγή σύγχρονων αλλά και ασφαλών κατασκευών με την βελτίωση της ποιότητας των παραγόμενων Τεχνικών Έργων. Έτσι εκδίδουν :

Τον **Ελληνικό Κανονισμό Ωπλισμένου Σκυροδέματος 2000** (ΕΚΩΣ 2000)

Τον **Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό 2000** (ΕΑΚ 2000)

Τον **Κανονισμό Τεχνολογίας Χάλυβα** (ΚΤΧ 2008)

Τον **Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος** (ΚΤΣ 1997 )

Και τον **Κανονισμό Επεμβάσεων** (ΚΑΝΕΠΕ)

Κοινός σκοπός όλων των κανονισμών είναι η προώθηση των ορθών μεθόδων κατασκευής κτιρίων και η πρακτική εφαρμογή τους. Οι Δομικοί Κανονισμοί αναθεωρούνται κατά τακτά χρονικά διαστήματα με βάση την εμπειρία, σημαντικές παρατηρήσεις, σχόλια και επιστημονικές απόψεις που διατυπώνονται από την εφαρμογή τους στην πράξη, την πρόοδο της Επιστήμης και την προσαρμογή στους αντίστοιχους Ευρωκώδικες. Έτσι ο ΕΑΚ αποτελεί αναθεώρηση του ΝΕΑΚ μετά από 4 χρόνια εφαρμογής του, ενώ ο ΕΚΩΣ έπρεπε να προσαρμόσει την πληθώρα των αντισεισμικών διατάξεων που περιέχει, στον πρόσφατα εγκριθέντα ΕΑΚ 2000. Σε ότι αφορά τώρα, τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, ο ΕΚΩΣ όφειλε να προσαρμοστεί στους αντίστοιχους κανονισμούς σε θέματα υλικών που εγκρίθηκαν τα τελευταία χρόνια και ειδικότερα στον ΚΤΣ 1997 και στον ΚΤΧ 2000.

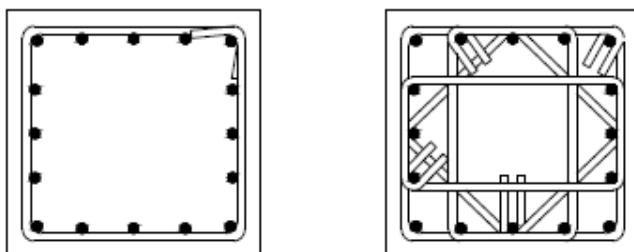
Ο **ΕΚΩΣ** ισχύει για κατασκευές από οπλισμένο ή προεντεταμένο σκυρόδεμα με συνήθη αδρανή, όπως ορίζονται στον ΚΤΣ 1997 και καλύπτει την περίπτωση σχεδιασμού για συνήθεις δράσεις (μόνιμα και μεταβλητά φορτία, θερμοκρασιακές δράσεις περιβάλλοντος, χρόνια συμπεριφορά σκυροδέματος, χρόνια συμπεριφορά οπλισμών κτλ). Για ορισμένα ειδικά έργα όπως γέφυρες, φράγματα, θαλάσσια έργα κτλ οι διατάξεις του κανονισμού πρέπει να προσαρμόζονται και να συμπληρώνονται με τους κατάλληλους επιμέρους κανονισμούς.

Ο **ΕΑΚ** στη συνέχεια, αφορά τον σχεδιασμό δομημάτων έναντι σεισμού. Οι κανόνες και τα κριτήρια του έχουν γενικότερη εφαρμογή και αναφέρονται στα κτίρια. Δεν καλύπτει τα έργα για τα οποία προβλέπεται μερική ή πλήρης αντισεισμική μόνωση ή ειδικές κατηγορίες δομημάτων και πρέπει να λαμβάνονται υπ όψιν οι πρόσθετες διατάξεις.

Τέλος, ο **ΚΑΝΕΠΕ** περιέχει κριτήρια για την αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας υφιστάμενων δομημάτων και κανόνων εφαρμογής τόσο για το σχεδιασμό όσο και για τις ενδεχόμενες επεμβάσεις, επισκευές ή ενισχύσεις.

## 2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ

Τα κτίρια, τα οποία κατασκευάστηκαν μεταξύ της δεκαετίας του 1960 και μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 1980, έχουν μελετηθεί με τον Παλιό Κανονισμό Ω.Σ. του 1954 για χαμηλότερο σεισμικό συντελεστή, με απλοποιημένα προσομοιώματα ανάλυσης (Σχήμα 1α) και χωρίς τις ειδικές πρόσφατες διατάξεις για ικανοτικό σχεδιασμό και όπλιση των κρίσιμων περιοχών. Στο τέλος αυτής της περιόδου (1980) οι σεισμικοί συντελεστές παραμένουν ίδιοι, αλλά εισάγεται ο ικανοτικός έλεγχος (Σχήμα 1α) και μετά το 1984 και πριν απ' την εφαρμογή του ΕΑΚ γίνεται χρήση των απλοποιημένων διατάξεων για τα κτίρια (Σχήμα 1β).



**Σχήμα 1 - α.** Σχεδιασμός προ 1984

**β.** Σύγχρονος αντισεισμικός σχεδιασμός

Οι Κανονισμοί, όπως έχει προαναφερθεί, αντανακλούσαν γνώσεις προηγούμενων δεκαετιών που αφορούσαν κυρίως μονώροφες κατασκευές και όχι πολυκατοικίες. Έτσι η ανάλυση και ο έλεγχος βασιζόταν στο μοντέλο του μονώροφου. Ο έλεγχος γινόταν για κάθε όροφο ξεχωριστά, με θεώρηση ελαστικής στήριξης για τα υποστυλώματα, χωρίς να λαμβάνεται υπ όψιν η πλαίσιακή λειτουργία και η συμμετοχή των δοκών στην ανάληψη σεισμικής έντασης. Οι σεισμικοί συντελεστές που είχαν υιοθετηθεί είχαν ως επακόλουθο οι σεισμικές δράσεις που λαμβάνονταν κατά την ανάλυση να είναι αρκετά μειωμένες, σχεδόν ανύπαρκτες. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την απουσία μίας ισχυρής σεισμικής

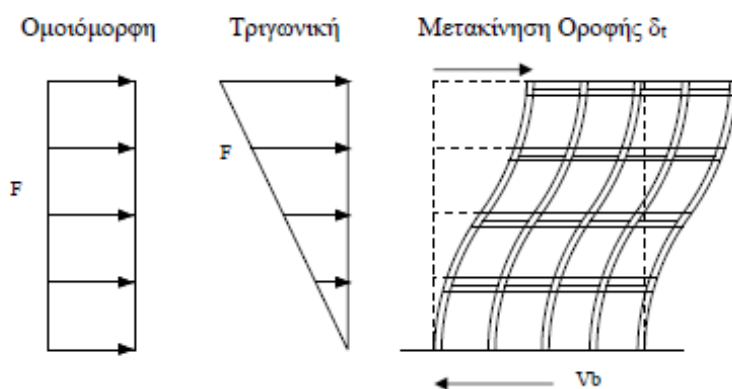
δραστηριότητας για μεγάλο χρονικό διάστημα είχε ως επακόλουθο να μην γίνει αντιληπτό ότι ο σχεδιασμός ήταν ελλιπέστατος.

## Κεφάλαιο 3

### 3. ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Οι ανελαστικές αναλύσεις, στατική και δυναμική, χρησιμοποιούνται για την μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς των κτιρίων και ακολουθούν την ίδια λογική. Η μόνη τους διαφορά είναι ότι στην δυναμική ανάλυση απαιτείται πλήρης ιδιομορφική ανάλυση του φορέα καθώς και ιδιομορφική επαλληλία. Αυτό προϋποθέτει αξιόπιστη προσομοίωση της συμπεριφοράς των μελών καθώς είναι ευαίσθητη στα χαρακτηριστικά της εδαφικής διέγερσης. Για αυτό και προσεγγίζει με μεγάλη αμεσότητα την ανελαστική απόκριση της κατασκευής κατά την διάρκεια του σεισμού. Παρόλα αυτά υπάρχουν ακόμα επιφυλάξεις γιατί είναι αρκετά πολύπλοκη και οδηγεί στη αύξηση των υπολογιστικών απαιτήσεων της μεθόδου και έτσι την καθιστούν μη εφαρμόσιμη σε συνήθεις περιπτώσεις σχεδιασμού.

Αντιθέτως, η στατική ανελαστική ανάλυση κατά την οποία επιβάλλεται μονοτονικά αυξανόμενη πλευρική φόρτιση (Σχήμα 2) αποτελεί μία απλή εναλλακτική δυνατότητα για την εκτίμηση της απόκρισης μιας κατασκευής στην μετελαστική περιοχή.



**Σχήμα 2** - Μετακίνηση της οροφής κατά τη μη γραμμική στατική ανελαστική ανάλυση υπό ομοιόμορφη ή τριγωνική κατανομή αυξανόμενης έντασης

Είναι δυνατό να μας δώσει και άλλες πληροφορίες με τον απλούστερο τρόπο για αυτό προτείνεται ως εργαλείο για τον σχεδιασμό και την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς υφιστάμενων κτιρίων. Όμως είναι αναγκαία η χρήση διαφόρων κατανομών

οριζόντιας δράσης, η οποία και αναγνωρίζεται ως μία σοβαρή αδυναμία της μεθόδου, αφού τα αποτελέσματα της επηρεάζονται από την επιβαλλόμενη κατανομή.

Η εκδήλωση της ανελαστικής συμπεριφοράς των κατασκευών είναι αναπόφευκτη όταν αυτές υποβάλλονται σε ισχυρούς σεισμούς. Είναι λοιπόν αναγκαία η χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων για την παρακολούθηση της, ώστε να αποκαλυφθούν οι αδυναμίες, η δημιουργία μηχανισμού ορόφου, οι αυξημένες απαιτήσεις μετακινήσεων, η καθ' ύψος ακανονικότητες της αντίστασης, καθώς και η πιθανή συγκέντρωση ανελαστικότητας σε ψαθυρά στοιχεία.

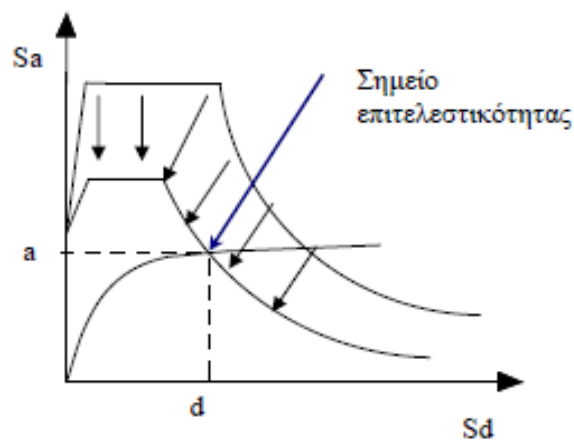
Έτσι λαμβάνοντας υπ' όψιν μας την σπουδαιότητα της αποτίμησης των κατασκευών, κυρίως των υφιστάμενων, σε συνδυασμό με την πολυπλοκότητα της χρήσης των μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων στην καθημερινή πρακτική, η μη γραμμική στατική ανάλυση υπό μονοτονικά αυξανόμενη ένταση φαίνεται να αποτελεί ένα ελκυστικό εναλλακτικό εργαλείο. Οι δυνατότητες της μεθόδου έχουν αναγνωριστεί και παρόλα τα προβλήματα της, έχει ενσωματωθεί σε διάφορες σεισμικές οδηγίες.

### 3.1 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Μία ευρέως γνωστή εφαρμογή της ανελαστικής στατικής ανάλυσης είναι η μέθοδος **Pushover**, η οποία μαζί με τη μέθοδο των σταθμών επιτελεστικότητας αποτελούν το βασικό κορμό αρκετών διεθνών κανονισμών επεμβάσεων, π.χ. EC-8, ΚΑΝ.ΕΠΕ., FEMA 356, ATC-40 κ.τ.λ. Σε αντίθεση με την κλασική μέθοδο σχεδιασμού που εξετάζει τη συμπεριφορά της κατασκευής μέχρι να αρχίσουν οι ζημιές (ελαστική απόκριση), η μεθοδολογία της Pushover analysis και των σταθμών επιτελεστικότητας εξετάζουν τον πραγματικό τρόπο που θα συμπεριφερθεί η κατασκευή σε διάφορα επίπεδα ισχύος της σεισμικής δόνησης σχεδιασμού και το αντίστοιχο αναμενόμενο επίπεδο ζημιών. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ο βέλτιστος συνδυασμός ασφάλειας και οικονομίας.

Απαραίτητο στοιχείο της εφαρμογής της μεθοδολογίας των σταθμών επιτελεστικότητας είναι η εύρεση της στοχευόμενης μετακίνησης της κατασκευής (**target displacement**) (Σχήμα 3).





**Σχήμα 3** - Προσδιορισμός απαιτούμενης μετακίνησης

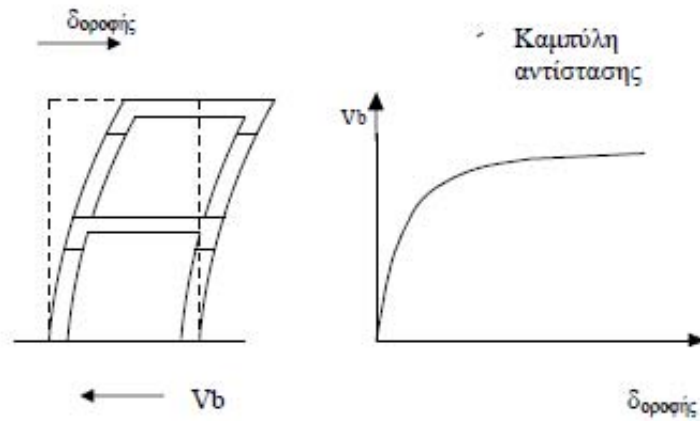
Αυτή η στοχευόμενη μετακίνηση είναι η αναμενόμενη μετακίνηση κορυφής της κατασκευής για δεδομένη περίοδο επανάληψης του σεισμού ή αλλιώς για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης του συγκεκριμένου σεισμού κατά τη διάρκεια ζωής της κατασκευής και βρίσκεται με διάφορες μεθόδους (όπως με τις μεθόδους ATC-40, N2, μέθοδος συντελεστών κ.ά.). Τελικά γίνεται σύγκριση μεταξύ της στοχευόμενης μετακίνησης και της αντίστοιχης επιθυμητής στάθμης επιτελεστικότητας πάνω στην καμπύλη αντίστασης της κατασκευής (Σχήμα 3). Αυτή η σύγκριση φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα καμπύλης αντίστασης (Σχήμα 4).



**Σχήμα 4** - Σύγκριση στοχευόμενης μετακίνησης και αντίστοιχης στάθμης επιτελεστικότητας

Η Pushover ανάλυση εφαρμόζεται για τον έλεγχο και την ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών ή ακόμα και για τον έλεγχο μίας νέας ήδη διαστασιολογημένης κατασκευής. Μπορεί να δείξει τις πιθανές ασθενείς περιοχές της κατασκευής, να παρακολουθεί την αλληλουχία με την οποία διαρρέουν ή και αστοχούν τα μέλη, καθώς και την εξέλιξη της καμπύλης αντίστασης όλου του δομήματος. Υπολογίζει την μετακίνηση που αναμένεται στον σεισμό σχεδιασμού, στην περίπτωση σχεδιασμού νέας κατασκευής, ή την μετακίνηση που αντιστοιχεί στην αστοχία, στην περίπτωση αποτίμησης με επιβολή οριζόντιου φορτίου που κατανέμεται με καθορισμένο τρόπο καθ' ύψος και οριζόντιες δυνάμεις που αυξάνονται μονοτονικά με σταθερή αναλογία. Ελέγχονται οι μετακινήσεις στην οροφή της κατασκευής μέχρι αυτή να φτάσει ένα συγκεκριμένο όριο (Σχήμα 4). Η οριακή αυτή τιμή είναι η μετακίνηση.

Κατά την εφαρμογή λοιπόν της Pushover analysis η κατασκευή εξωθείται σταδιακά με μονότονα αυξανόμενη πλευρική φόρτιση (Σχήμα 5) μέχρι να φτάσει στην αστοχία.



**Σχήμα 5** - Ανάπτυξη καμπύλης αντίστασης της κατασκευής

Σταδιακά σχηματίζονται πλαστικές αρθρώσεις κατά μήκος οποιουδήποτε στοιχείου-μέλους (δοκού, υποστυλώματος, τοιχώματος). Αυτές σχηματίζονται καθώς απομειώνεται σταδιακά η αντοχή των κόμβων που έχουν οριστεί ως ενδεχόμενες θέσεις σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων κατά μήκος των στοιχείων-μελών. Μπορούμε να θεωρήσουμε τη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στην αρχή και στο τέλος του μήκους του στοιχείου. Τελικά θα δημιουργηθεί μηχανισμός κατάρρευσης από τις σχηματιζόμενες πλαστικές αρθρώσεις στα δομικά στοιχεία της κατασκευής, των οποίων οι πλαστικές παραμορφώσεις θα είναι τέτοιες, που τα στοιχεία δεν θα μπορούν να παραλάβουν περαιτέρω ένταση και η κατασκευή θα οδηγηθεί στην αστοχία.

### 3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι για την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς υφιστάμενων κατασκευών, τόσο ελαστικές όσο και ανελαστικές, ανάλογα με την περίοδο σχεδιασμού τους και βάσει των χαρακτηριστικών τους τα οποία απορρέουν από τον εκάστοτε κανονισμό.

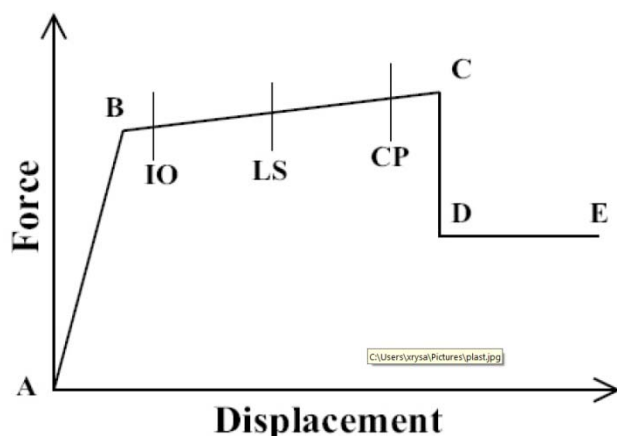
Για να γίνει η αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς ενός κτιρίου, εφαρμόζονται μέθοδοι υπολογισμού της μετελαστικής συμπεριφοράς του. Οι μέθοδοι αυτές έχουν έως τώρα εφαρμοστεί για την αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας υφιστάμενων κατασκευών και τον έλεγχο των παραδοχών που έγιναν κατά τον σχεδιασμό τους. Οι μέθοδοι αποτίμησης της σεισμικής συμπεριφοράς διακρίνονται σε στατικές και δυναμικές ανάλογα με τον τρόπο επιβολής της διέγερσης. Στην Προσαυξητική Στατική Ανάλυση (ΠΣΑ) (static pushover) το αποτέλεσμα της σεισμικής δράσης προσομοιώνεται με στατικά επιβαλλόμενες μετατοπίσεις ή στατικά φορτία σταδιακά αυξανόμενα έως την κατάρρευση. Ενώ στην Προσαυξητική Δυναμική Ανάλυση (ΠΔΑ) (incremental dynamic analysis) επιβάλλονται σεισμικές δράσεις η ένταση των οποίων αυξάνεται σταδιακά μέχρι την κατάρρευση.

Οι αντισεισμικοί κανονισμοί, μεταξύ των οποίων και ο ΕΑΚ, επιτρέπουν τον σχεδιασμό των κατασκευών με «ισοδύναμες» ελαστικές αναλύσεις επειδή ο σχεδιασμός με σεισμικά φορτία και δυναμική μη γραμμική ανάλυση της κατασκευής με σεισμικά φορτία είναι πολύπλοκος και απαιτεί υπερβολικό υπολογιστικό χρόνο ακόμα και για τις συνήθεις κατασκευές. Για τον λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί προσεγγιστικές μέθοδοι αποτίμησης-ελέγχου της σεισμικής συμπεριφοράς των κτιρίων οι οποίες μετατρέπουν το ανελαστικό δυναμικό πρόβλημα σε ανελαστικό στατικό μέσω των οποίων υπολογίζονται χαρακτηριστικές παράμετροι της απόκρισης της κατασκευής (μετακινήσεις, στροφές εντατικά μεγέθη, κτλ). Οι τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων, όπως υπολογίζονται από τις αναλύσεις αυτές, αντιστοιχούν στις διατιθέμενες τιμές της κατασκευής οι οποίες συγκρίνονται με τις απαιτούμενες τιμές που προκύπτουν λογιστικά μέσω των κανονιστικών διατάξεων.

Δύο προσεγγιστικές μέθοδοι με ευρεία αποδοχή, οι οποίες βασίζονται στην προσαυξητική στατική ανάλυση, είναι η μέθοδος της σεισμικής αποτίμησης και σχεδιασμού με επιβολή μετατοπίσεων και η μέθοδος της φασματικής ικανότητας με επιβολή δυνάμεων. Η μέθοδος της φασματικής ικανότητας βασίζεται στην στατική ανελαστική ανάλυση και θεωρείται ότι είναι πιο κοντά στη δυναμική ανάλυση στην οποία επιβάλλονται αδρανειακές δυνάμεις. Η μέθοδος αυτή έχει υιοθετηθεί από τους αμερικάνικους κανονισμούς ATC-40, και FEMA 273 (μέθοδος συντελεστών μετακίνησης). Ο ΚΑΝΕΠΕ υιοθετεί τη μέθοδο υπολογισμού της στοχευόμενης μετακίνησης σχεδόν όμοια με τη μέθοδο της FEMA.

### 3.3 ΣΤΑΘΜΕΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Για την εξυπηρέτηση ευρύτερων κοινωνικό-οικονομικών αναγκών, ορίζονται διάφορες «στάθμες επιτελεστικότητας» (στοχευόμενες συμπεριφορές) (Σχήμα 6).



**Σχήμα 6** – Τα σημεία A-B-C-D-E στο διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης

Ο ίδιος τύπος καμπύλης χρησιμοποιείται για το διάγραμμα Ροπής-Στροφής

Για αυτόν τον λόγο ο σχεδιασμός με στάθμες επιτελεστικότητας είναι απαραίτητος, μας δίνει τη δυνατότητα να προσδιορίσουμε το αποδεκτό επίπεδο βλαβών στο φέροντα και στον μη φέροντα οργανισμό για σεισμικές δονήσεις διαφορετικής έντασης. Αυτά συνεισφέρουν στο βέλτιστο συνδυασμό ασφάλειας και οικονομίας με ιδιαίτερη εφαρμογή σε έργα όπου βλάβες ακίνδυνες για τη σωματική ακεραιότητα των ενοίκων μπορεί να συνεπάγονται με τεράστια οικονομική ή άλλου είδους απώλεια (πχ μουσεία, μνημεία αρχιτεκτονικής κληρονομιάς κτλ.).

Η μεθοδολογία των σταθμών επιτελεστικότητας εφαρμόζεται για την αποτίμηση και τον ανασχεδιασμό υφιστάμενων κατασκευών, καθώς προσφέρει τη δυνατότητα παρακολούθησης της ανελαστικής συμπεριφοράς, του μηχανισμού κατάρρευσης και του καθορισμού διαφόρων τρόπων ανασχεδιασμού. Κανονισμοί που ακολουθούν αυτή τη μέθοδο ως βασικό τους κορμό είναι τα κείμενα FEMA 365 και ATC 40, Ευρωκώδικας 8 Μέρος 3 και ο ελληνικός Κανονισμός Επεμβάσεων ΚΑΝΕΠΕ.

Οι στάθμες επιτελεστικότητας του φέροντος οργανισμού είναι τρεις και ορίζονται ως εξής:

- **Άμεση χρήση** (immediate occupancy), (Σχήμα 6) μετά το σεισμό είναι μια κατάσταση όπου αναμένεται ότι καμιά λειτουργία του κτιρίου δεν διακόπτεται κατά τη διάρκεια αλλά και μετά τον σεισμό σχεδιασμού, εκτός ενδεχομένως από δευτερεύουσας σημασίας λειτουργίες. Ενδεχομένως να παρουσιασθούν μικρές τριχοειδείς ρωγμές (κυρίως καμπτικού χαρακτήρα) στον φέροντα οργανισμό, περιορισμένες αποκολλήσεις του σκυροδέματος επικάλυψης γύρω από τους κόμβους κτλ. Παρόλα αυτά, καμιά παραμόρφωση δεν επιτρέπεται να επηρεάσει την ικανότητα της κατασκευής να παραλαμβάνει κατακόρυφα και οριζόντια φορτία. Τα μη φέροντα στοιχεία μπορεί να υποστούν βλάβες που όμως δεν επηρεάζουν τη λειτουργία του κτιρίου. Οι προσβάσεις (κλιμακοστάσια, ανελκυστήρες, πόρτες) και τα συστήματα ασφαλείας (πυρασφάλεια, γεννήτριες) παραμένουν ανέπαφα και λειτουργικά εφόσον δεν έχει διακοπεί η ηλεκτροδότηση στην περιοχή.
- **Προστασία ζωής** (life safety), (Σχήμα 6) είναι μια κατάσταση όπου κατά τον σεισμό σχεδιασμού αναμένεται να παρουσιασθούν επισκευάσιμες βλάβες στον φέροντα οργανισμό του κτιρίου, χωρίς όμως να προκύψει θάνατος ή σοβαρός τραυματισμός εξαιτίας των βλαβών αυτών, και χωρίς να συμβούν ουσιώδεις βλάβες στην οικοσκευή ή τα αποθηκευόμενα στο κτίριο υλικά. Δηλαδή παρατηρούνται μόνιμες οριζόντιες παραμορφώσεις σε υποστυλώματα, τοιχώματα, δοκούς και κατακόρυφες παραμορφώσεις στις πλάκες στην περιοχή των στηρίξεων, αποκολλήσεις του σκυροδέματος επικάλυψης στους κόμβους των υποστυλωμάτων και καμπτικές και διατμητικές ρηγματώσεις στη βάση των τοιχωμάτων, ρηγματώσεις στις πλάκες κοντά στις στηρίξεις κ.τ.λ. Παραμένει βέβαια η ικανότητα παραλαβής των κατακόρυφων φορτίων. Όσον αφορά τα μη φέροντα στοιχεία της κατασκευής, αναμένονται βλάβες οι οποίες όμως δεν είναι επικίνδυνες για τον τραυματισμό ανθρώπων (περισσότερες από τις εξωτερικές πόρτες λειτουργούν κανονικά, μερική πτώση ψευδοροφών, εκτεταμένες ρηγματώσεις σε εσωτερικά χωρίσματα, ανελκυστήρες τίθενται εκτός λειτουργίας κ.τ.λ.). Τα μη φέροντα στοιχεία θα υποστούν βλάβες οι οποίες δεν αποτελούν κίνδυνο εντός ή εκτός του κτιρίου π.χ. πτώση αντικειμένων, αστοχία υπό πίεση, πυρκαγιά κτλ.

- **Οιονεί κατάρρευση** (collapse prevention), (Σχήμα 6) είναι μια κατάσταση που κατά τον σεισμό σχεδιασμού αναμένεται να παρουσιαστούν εκτεταμένες σοβαρές (μη επισκευάσιμες κατά πλειονότητα) βλάβες στον φέροντα οργανισμό, ο οποίος όμως έχει ακόμη την ικανότητα να φέρει τα προβλεπόμενα κατακόρυφα φορτία (και για ένα διάστημα μετά τον σεισμό), χωρίς να διαθέτει άλλο ουσιαστικό περιθώριο ασφαλείας έναντι ολικής ή μερικής κατάρρευσης. Έτσι παρατηρούνται, αποδιοργάνωση σκυροδέματος στο εσωτερικό των κόμβων, δημιουργία μόνιμων οριζόντιων παραμορφώσεων, διατμητικές και καμπτικές ρηγματώσεις σε όλο το ύψος των τοιχωμάτων, θραύση των συνδετήρων κοντά στους κόμβους υποστυλωμάτων-δοκών κ.τ.λ.. Επίσης υπάρχει ο κίνδυνος τραυματισμού ανθρώπων από πτώση δομικών στοιχείων της κατασκευής. Όσον αφορά τα μη φέροντα στοιχεία της κατασκευής, αναμένεται κίνδυνος τραυματισμού από πιθανή πτώση τους (θραύση υαλοπινάκων, πτώση ψευδοροφών, μπλοκάρισμα πόρτας, ο ανελκυστήρας τίθεται εκτός λειτουργίας κ.τ.λ.).

Ο συνδυασμός της στάθμης επιτελεστικότητας και της πιθανότητας υπέρβασης της σεισμικής δράσης ορίζει το στόχο της σεισμικής συμπεριφοράς. Οι στόχοι της σεισμικής ικανότητας ορίζονται για τα φέροντα και τα μη φέροντα στοιχεία της κατασκευής αλλά και γίνονται συνδυασμοί αυτών που εκφράζουν το επίπεδο βλάβης της κατασκευής συνολικά. Σε ένα δόμημα όλα τα φέροντα στοιχεία είναι κρίσιμα για τη σεισμική συμπεριφορά του, όταν λοιπόν το πρώτο στοιχείο υπερβεί δεδομένη στάθμη επιτελεστικότητας θεωρούμε ότι η κατασκευή υπερέβη συνολικά τη στάθμη επιτελεστικότητας. Ωστόσο, είναι δυνατόν κάποια στοιχεία να εμφανίζουν νωρίτερα σοβαρές βλάβες, αλλά η συνολική φέρουσα ικανότητα της κατασκευής να μην επηρεάζεται.

Γενικά επιδιώκεται να δίνεται πλαστιμότητα σε όλα τα δομικά στοιχεία και στους κόμβους έτσι ώστε αυτά να συνεχίσουν να παραμορφώνονται και μετά την εξάντληση της αντοχής τους, χωρίς να σπάνε (πέραν του ορίου διαρροής). Πλάστιμα γενικά θεωρούνται τα μέλη που διαρρέουν σε κάμψη πριν να διαρρέουν σε διάτμηση. Αντίθετα ψαθυρά θεωρούνται τα μέλη που διαρρέουν πρώτα σε διάτμηση.



Όταν επιβάλλουμε μια στάθμη επιτελεστικότητας, ελέγχουμε τη δυνατότητα αντίστασης όλων των στοιχείων της κατασκευής πρωτεύοντων και δευτερευόντων σε δυνάμεις, αν τα μέλη συμπεριφέρονται ως ψαθυρά και σε μετατοπίσεις εφόσον πρόκειται για μέλη με πλάστιμη συμπεριφορά. Πρωτεύοντα είναι εκείνα τα στοιχεία που συνεισφέρουν σημαντικά στην αντοχή της κατασκευής κατά τη σεισμική διέγερση. Από τα μέλη που προσφέρουν στην απόκριση της κατασκευής, πρωτεύοντα θεωρούνται τα υποστυλώματα, οι δοκοί, τα τοιχώματα κτλ. Αντίθετα, τα στοιχεία με μικρή δυσκαμψία, αντοχή και πλαστιμότητα, όπως π.χ. οι τοίχοι πληρώσεως αποτελούν τα δευτερεύοντα. Για κάθε στάθμη επιτελεστικότητας, οι παραμορφώσεις και οι αναμενόμενες βλάβες που αντιστοιχούν στα δευτερεύοντα στοιχεία είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές των πρωτεύοντων. Ωστόσο δεν παύει να απαιτείται σε κάθε περίπτωση η εξασφάλιση της ασφαλούς μεταφοράς των κατακόρυφων φορτίων του ίδιου βάρους υπό τη μέγιστη πλευρική παραμόρφωση εξαιτίας του σεισμού σχεδιασμού.

## Κεφάλαιο 4

### **4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΑ ΚΤΙΡΙΑ**

Τα υφιστάμενα κτίρια είναι κατασκευές συνεχώς μειούμενης επάρκειας. Έτσι οι σύγχρονες τεχνολογίες βρίσκουν εφαρμογή σε υφιστάμενα δομήματα προκειμένου να βελτιώσουν τα χαρακτηριστικά τους.

Στην περίπτωση μας, σκοπός είναι να εξετάσουμε τη συμπεριφορά του φορέα κάτω από την επιβολή σεισμικών δυνάμεων αφού το ενισχύσουμε.

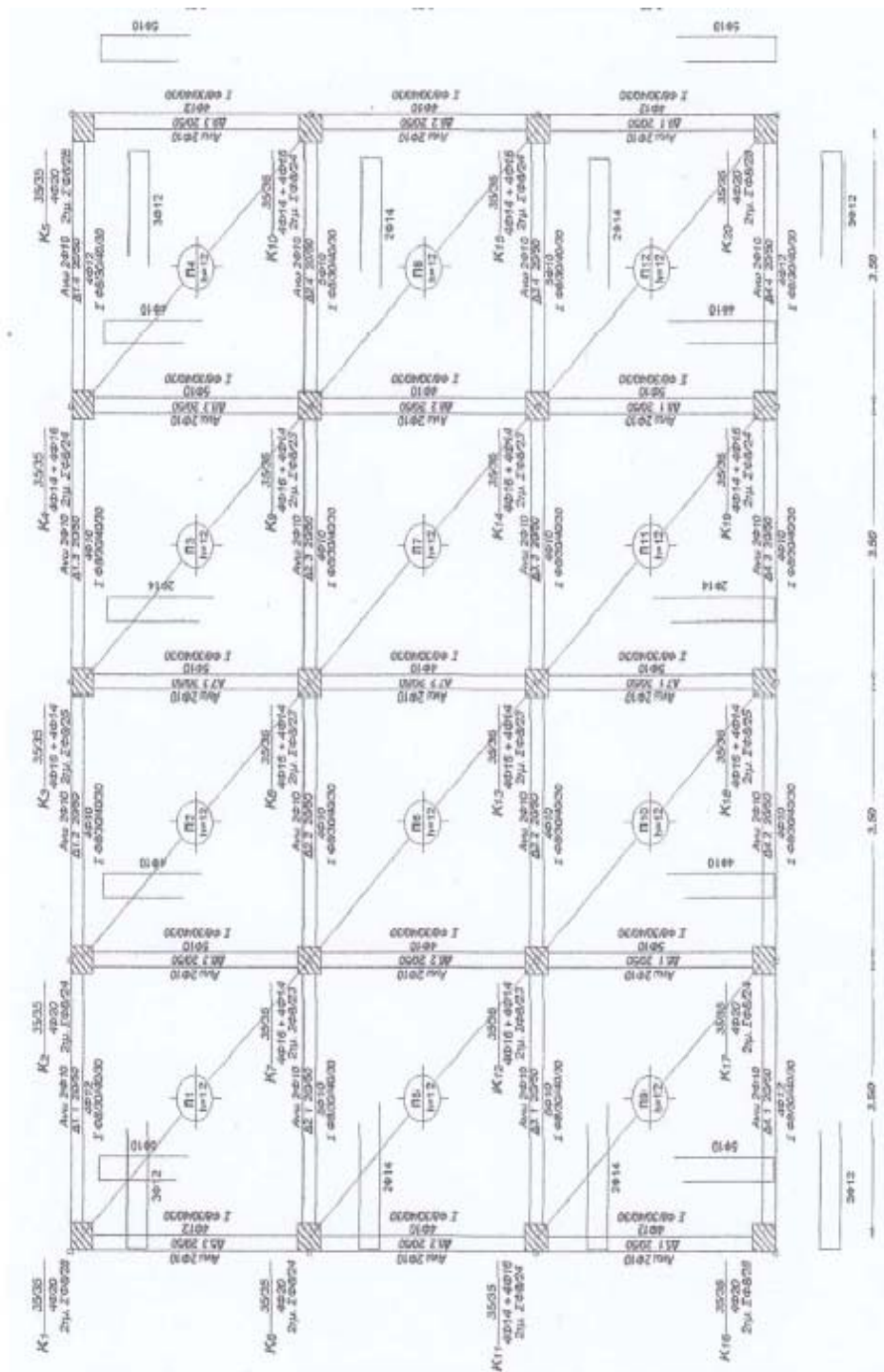
#### **4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΤΙΡΙΟΥ**

Το κτίριο που επιλέχθηκε να εξεταστεί είναι πενταώροφο με διαστάσεις (14m x 10.5m) από οπλισμένο σκυρόδεμα και κατασκευάστηκε το 1960 με την ισχύ του Αντισεισμικού Κανονισμού του 1959. Χαρακτηριστικό γνώρισμα είναι η πυκνή διάταξη των υποστυλωμάτων και των τοιχοποιιών. Το ύψος των ορόφων είναι σταθερό στα 3.0m και το μήκος των φατνωμάτων είναι 3.5m και στις δύο διευθύνσεις.

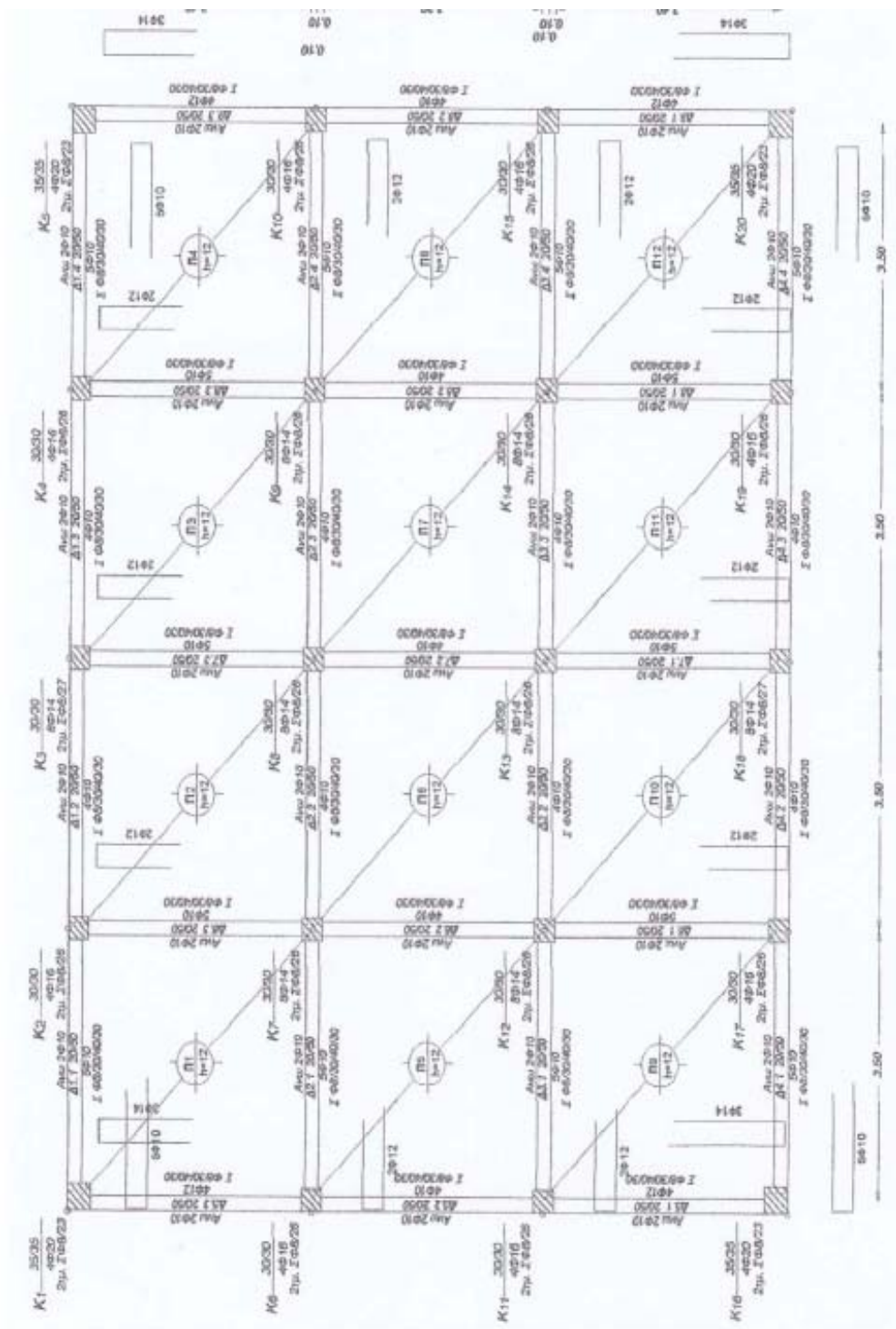
Ο απαιτούμενος διατμητικός οπλισμός είναι μικρότερος από αυτόν που απαιτούν οι σύγχρονοι Κανονισμοί. Έτσι οι συνδετήρες είναι τοποθετημένοι ανά μεγάλες αποστάσεις και στις δοκούς ο κάτω διαμήκης οπλισμός κάμπτεται στην περιοχή των στηρίξεων. Τα υλικά καθορίζονται από τον εκάστοτε ισχύοντα Κανονισμό. Το σκυρόδεμα είναι κατηγορίας B160 (C12/15) και ο χάλυβας που χρησιμοποιείται για τον διαμήκη οπλισμό και τους συνδετήρες είναι St I (S220).

Το κτίριο έχει τετραγωνικά υποστυλώματα. Στον πρώτο όροφο είναι 35/35 cm, τα οποία μειώνονται στον επόμενο όροφο. Τα υποστυλώματα του δευτέρου ορόφου έχουν διαστάσεις 30/30 cm εκτός από το γωνιακά που είναι 35/35 cm. Ο τρίτος όροφος λειτουργεί κατά τον ίδιο τρόπο με τα γωνιακά να είναι 30/30 cm και όλα τα υπόλοιπα 25/25 cm. Ο τέταρτος και πέμπτος όροφος έχουν την ίδια δομή υποστυλωμάτων με τον τρίτο. Οι διαστάσεις των δοκαριών παραμένουν σταθερές 20/50 cm.

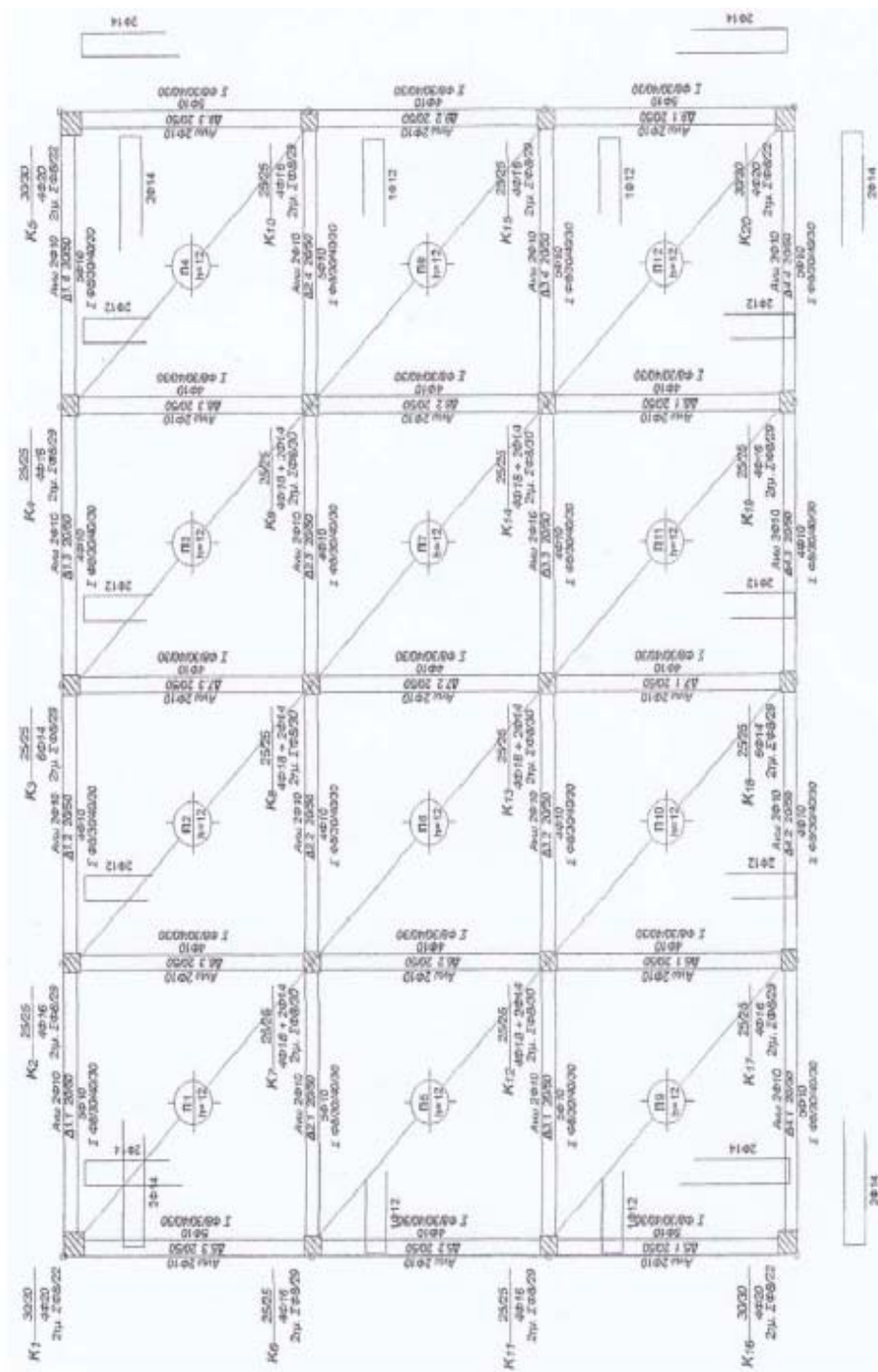
**Παρακάτω δίνονται οι ξυλότυποι του κτιρίου (Σχήματα 7 έως 11):**



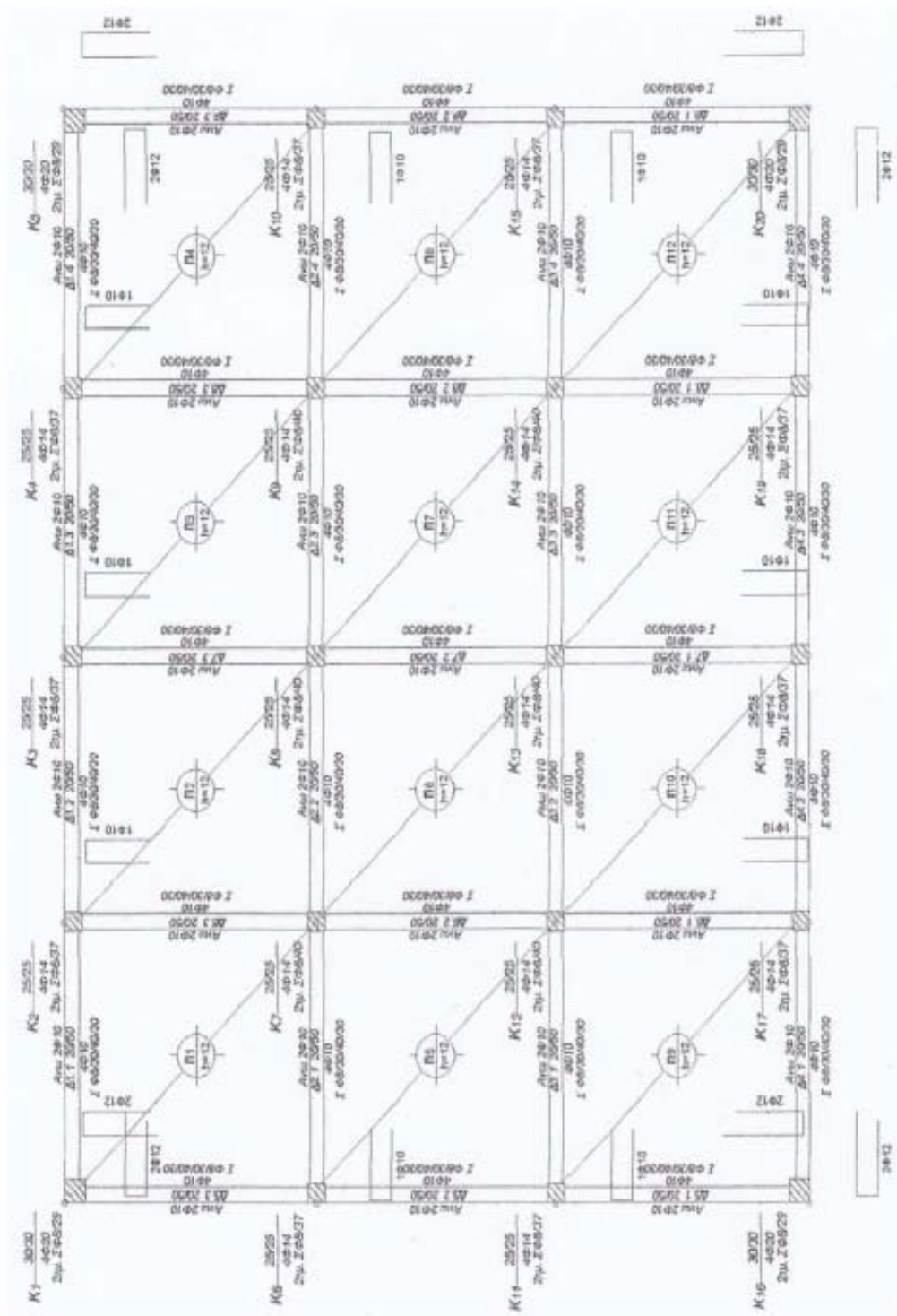
Σχήμα 7 - Ξυλότυπος 1<sup>ου</sup> ορόφου



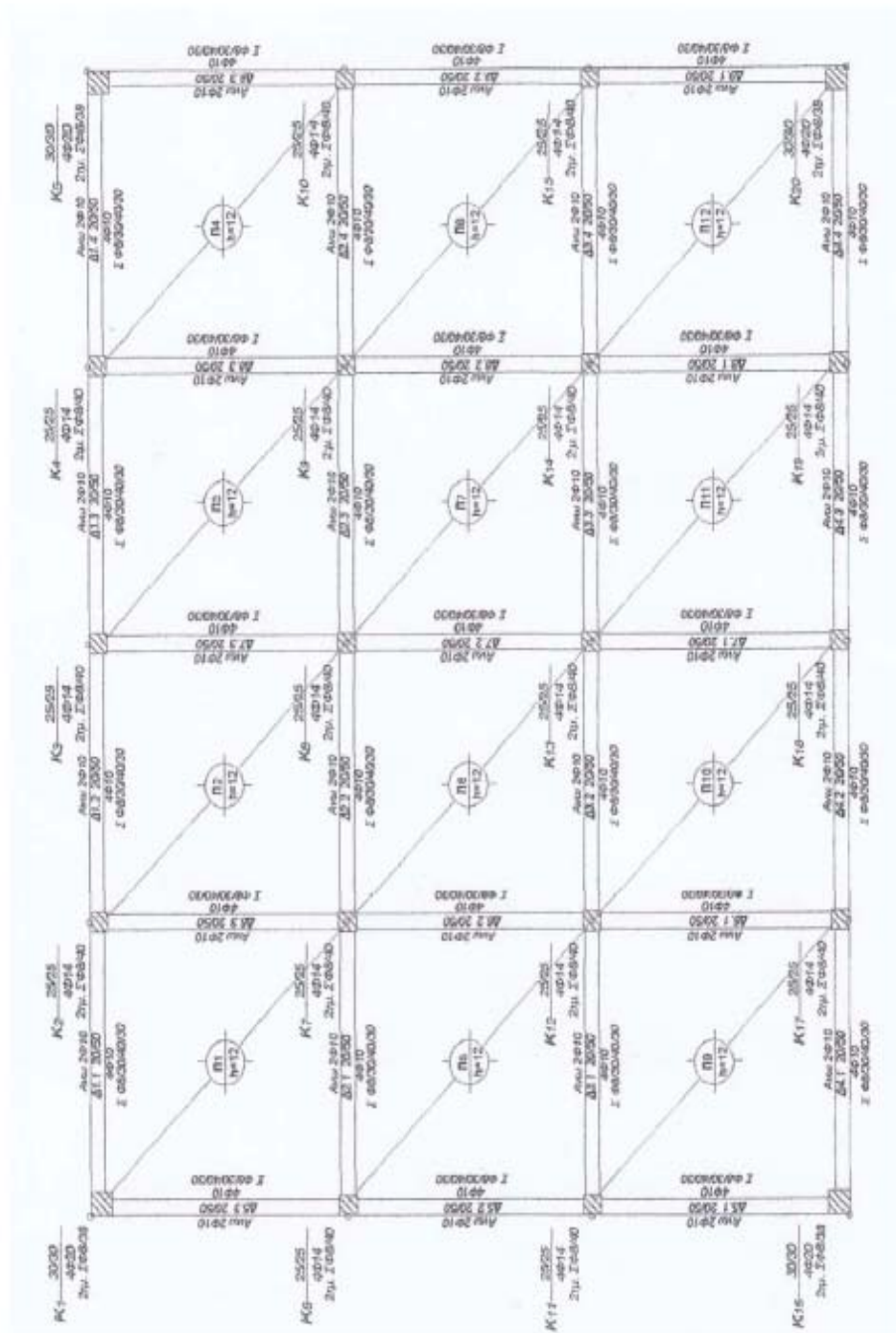
Σχήμα 8 - Ξυλότυπος 2<sup>ου</sup> ορόφου



Σχήμα 9 - Ξυλότυπος 3<sup>ου</sup> ορόφου



Σχίμα 10 - Ευλότυπος 4<sup>ο</sup> ορόφου



Σχήμα 11 - Ευλότυπος 5<sup>ου</sup> ορόφου

## 4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ

Μετά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται η αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς του κτιρίου ώστε να διαπιστώσουμε ποια μέθοδος ενίσχυσης του είναι πιο αποτελεσματική.

Ο φορέας που θα μελετηθεί είναι ένα πλαίσιο και όχι ολόκληρο το κτίριο. Το πλαίσιο αυτό έχει πέντε ορόφους και αποτελείται από την πρώτη σειρά των υποστυλωμάτων με μήκος 14m και ύψος ορόφου 3m. Το πλαίσιο φέρει τα στοιχεία του φορέα. Τα υποστυλώματα είναι τετραγωνικά, οι διαστάσεις των οποίων κυμαίνονται σε κάθε όροφο. Τα δοκάρια έχουν σταθερή διάσταση και ο διατμητικός οπλισμός φαίνεται στα σχέδια των ξυλοτύπων όπως και άλλα χαρακτηριστικά του. Τα στοιχεία που μας δίνονται τα περνάμε στο πρόγραμμα ώστε να γίνει η προσομοίωση της κατασκευής και έπειτα να υποβληθεί σε σεισμικές δονήσεις, στατικής ανελαστικής ανάλυσης (μέθοδος pushover).

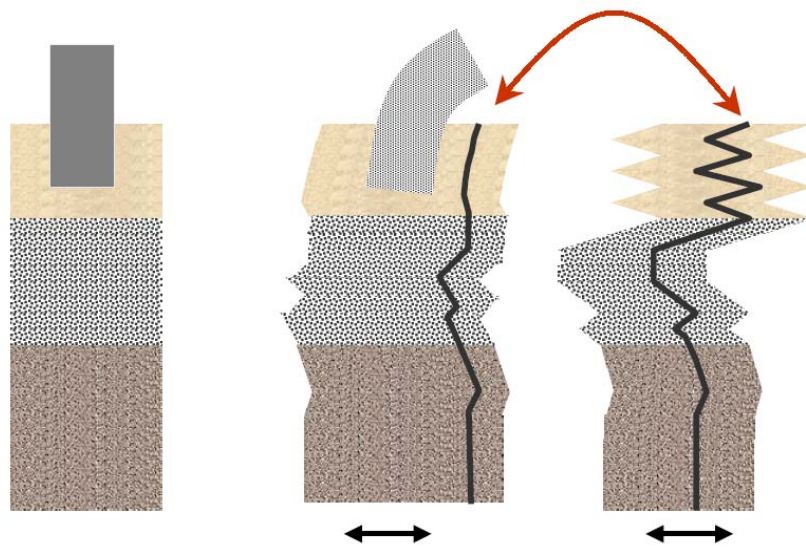
Καλό είναι να γίνει και διάκριση των στοιχείων σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα, δηλαδή εάν η αστοχία των στοιχείων είναι κρίσιμη για την αντισεισμική συμπεριφορά του φορέα και στοιχεία των οποίων η αστοχία ή η υπέρβαση κάποιας στάθμης επιτελεστικότητας δεν επηρεάζει την φέρουσα ικανότητα του φορέα.

## 4.3 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Η αλληλεπίδραση του εδάφους με την θεμελίωση επηρεάζουν την σεισμική συμπεριφορά ολόκληρου του συστήματος. Το έδαφος παίζει καθοριστικό ρόλο στην ταλάντωση της κατασκευής και αποτελεί κυματικό φίλτρο, που ενισχύεται λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων. Έχει την ικανότητα να τροποποιεί τα προσπίπτοντα κύματα και κατά επέκταση τον σεισμικό κραδασμό με αποτέλεσμα η δόνηση στην επιφάνεια του εδάφους να είναι ιδιαίτερα δυσμενής και να επιδρά στην δυναμική απόκριση της κατασκευής (Σχήμα 12).



## Διαφέρουν = Αλληλεπίδραση Εδάφους-Ανωδομής



Σχήμα 12 – Οπτική απεικόνιση της αλληλεπίδρασης

Η αλληλεπίδραση αυτή μπορεί να εκφραστεί ως η διαφορά στην απόκριση της κατασκευής με το έδαφος της θεμελίωσης, η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης του ελεύθερου πεδίου, τις φυσικές και γεωμετρικές ιδιότητες της κατασκευής και του εδάφους θεμελίωσης. Έτσι συμπεραίνουμε ότι η αλληλεπίδραση εδάφους κατασκευής είναι η τροποποίηση των σεισμικών κινήσεων του εδάφους εξαιτίας της παρουσίας του κτιρίου (Σχήμα 12) όπου διακρίνονται δυο μηχανισμοί αλληλεπίδρασης, η αδρανειακή και η κινηματική.

Στην αδρανειακή αλληλεπίδραση τα σεισμικά κύματα που φθάνουν κάτω από το κτίριο υποχρεώνονται να μετακινήσουν τη μάζα του, ενώ εκείνα που αντιστοιχούν στο ελεύθερο χώρο, το ελεύθερο πεδίο, υποχρεώνονται να μετακινήσουν την αντίστοιχη μάζα εδάφους. Οι απαιτούμενες δυνάμεις είναι διαφορετικές άρα συνεπάγονται διαφορετικές τάσεις και παραμορφώσεις. Επιπλέον, αρχίζει ένας κύκλος μετατοπίσεων. Αρχικά ο φορέας κινείται ακολουθώντας τις κινήσεις του εδάφους στα σημεία επαφής του με το έδαφος. Έπειτα αναπτύσσονται αδρανειακές δυνάμεις, αρχίζει τη σεισμική του απόκριση και ασκεί με τη σειρά του δυνάμεις και ροπές στο έδαφος που εξαρτώνται από τα δυναμικά χαρακτηριστικά του. Έτσι η κατασκευή ανατροφοδοτεί το έδαφος με κινήσεις οι οποίες συναντούν τα σεισμικά κύματα που συνεχίζουν να φθάνουν. Τα φαινόμενα αυτά δεν συμβαίνουν στο ελεύθερο πεδίο με αποτέλεσμα να προκαλείται διαφοροποίηση μεταξύ των κινήσεων.

Στην κινηματική αλληλεπίδραση τα σεισμικά κύματα που διατρέχουν το έδαφος, προκαλούν παραμορφώσεις που είναι το αποτέλεσμα της σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων. Η αλληλεπίδραση μεταξύ εδάφους-θεμελίου, ακόμα και χωρίς την παρουσία ανωδομής οφείλεται στο μη συμβιβασμό των σεισμικών παραμορφώσεων του ελεύθερου πεδίου και των μετατοπίσεων του στερεού της θεμελίωσης. Σε αυτή την περίπτωση οι κόκκοι του εδάφους που είναι σε επαφή με την κατασκευή οφείλουν να συμμορφωθούν με την παραμόρφωση των δομικών στοιχείων. Οι κόκκοι ούτε θα εισβάλλουν στο σκυρόδεμα ή στο χάλυβα, ούτε θα απομακρυνθούν ώστε να δημιουργήσουν κενό. Επομένως, η απαίτηση για συμβατότητα των παραμορφώσεων οδηγεί σε τροποποίηση των κινήσεων που συμβαίνουν όταν δεν υπάρχει κτίριο.

Είναι φανερό ότι εάν το έδαφος θεμελίωσης είναι εξαιρετικά δύσκαμπτο, δηλαδή υγιής βράχος, η ανατροφοδότηση από την κατασκευή δεν προκαλεί ουσιώδεις μετακινήσεις και συνεπώς η αλληλεπίδραση είναι ασήμαντη. Αυτό συμβαίνει γιατί σημαντικό μέρος της δυναμικής του ενέργειας διαχέεται στο έδαφος με ακτινοβολία, δηλαδή τα κύματα τα οποία διαδίδονται προς το άπειρο δεν επιστρέφουν και εμφανίζεται απώλεια ενέργειας που ισοδυναμεί με την αυξημένη απόσβεση των ταλαντώσεων. Άμεση συνέπεια αυτού είναι ότι ακόμα και εάν το έδαφος ήταν ιδανικά γραμμικά ελαστικό υλικό και πάλι η απόκριση του κτιρίου θα ήταν αποσβυόμενη. Επιπλέον, επειδή το έδαφος είναι έντονα ανελαστικό υλικό εμφανίζεται και αξιόλογη απόσβεση λόγω της υστερητικής συμπεριφοράς του. Ωστόσο, όταν το κτίριο είναι θεμελιωμένο σε μαλακό έδαφος εμφανίζονται σημαντικές περιστροφές οι οποίες προκαλούν πρόσθετες οριζόντιες μετακινήσεις στις μεταφορικές. Ως συμπέρασμα, η αλληλεπίδραση είναι όλο και πιο έντονη όσο περισσότερο παραμορφώσιμο είναι το έδαφος.

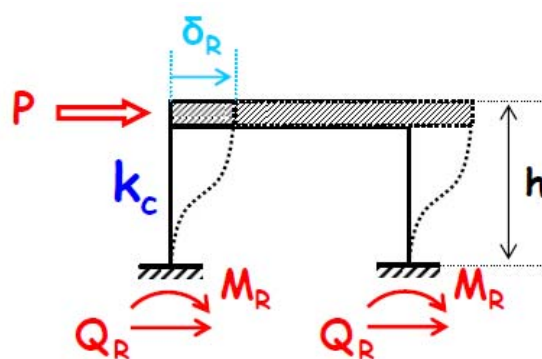
Αντίθετα, στην ελαστικά εδραζόμενη κατασκευή, ένα μέρος της ενέργειας ταλαντώσεως διαχέεται στο περιβάλλον με την ακτινοβολία των κυμάτων και με την ανελαστική υστερητική δράση. Τέτοια απώλεια δεν δημιουργείται στην άκαμπτα θεμελιωμένη πακτωμένη στη βάση της κατασκευής. Έτσι η σχετικώς δύσκαμπτη θεμελίωση της ανωδομής επηρεάζει σημαντικά και αυτή την σεισμική διέγερση στην βάση του δομήματος. Τα προσπίπτοντα σεισμικά κύματα ανακλώνται στην δύσκαμπτη θεμελίωση, διασκορπίζονται στο έδαφος και δημιουργούν έναν νέο κραδασμό στην βάση, ο οποίος είναι διαφορετικός από την εδαφική ταλάντωση στο ελεύθερο πεδίο και γενικώς δεν περιέχει συνιστώσες στρέψης και λικνισμού εκτός από τρεις παλινδρομικές συνιστώσες.

Υπάρχουν αρκετοί ακόμα παράγοντες που επηρεάζουν την αλληλεπίδραση του εδάφους με την κατασκευή που εξαρτώνται από το έδαφος, την σεισμική δόνηση και από τον ίδιο τον φορέα. Μερικοί από αυτούς είναι: η στρωματογραφία, η δυστημήςια, η απόσβεση των

εδαφικών στρώσεων του εδάφους, η ένταση της σεισμικής δόνησης, τα δεσπόζοντα κύματα καθώς και οι γωνίες πρόσπτωσης τους, η δυσκαμψία, η αδράνεια και η γεωμετρία της ανωδομής, το μέγεθος σε κάτοψη του θεμελίου και ο βαθμός δυστρεψιάς του, το βάθος και ο βαθμός εγκιβωτισμού της θεμελίωσης καθώς τα αδρανειακά χαρακτηριστικά, η λυγιρότητα και οι πρώτες ιδιοπερίοδοι της κατασκευής.

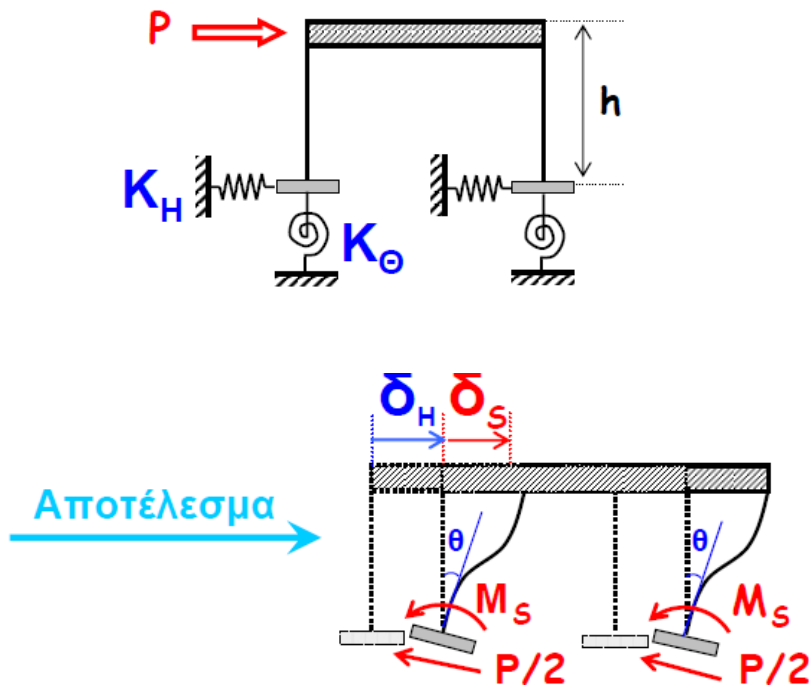
Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι είναι δύσκολο να υπολογίσουμε την ανελαστική συμπεριφορά ενός κτιρίου λαμβάνοντας υπ' όψιν μας τόσους πολλούς παράγοντες. Έτσι η ανάλυση απλών εξιδανικευμένων συστημάτων, τα οποία παρομοιάζουν μερικές μόνο από τις κυριότερες παραμέτρους του προβλήματος, έχει συμβάλει σημαντικά στην κατανόηση της αλληλεπίδρασης εδάφους κατασκευής.

Η ανάλυση και ο σχεδιασμός μίας κατασκευής υπό την επίδραση σεισμικών διεγέρσεων γίνονται συνήθως με παραδοχή πλήρους πάκτωσης (Σχήμα 13) του φορέα για το απαραμόρφωτο έδαφος.



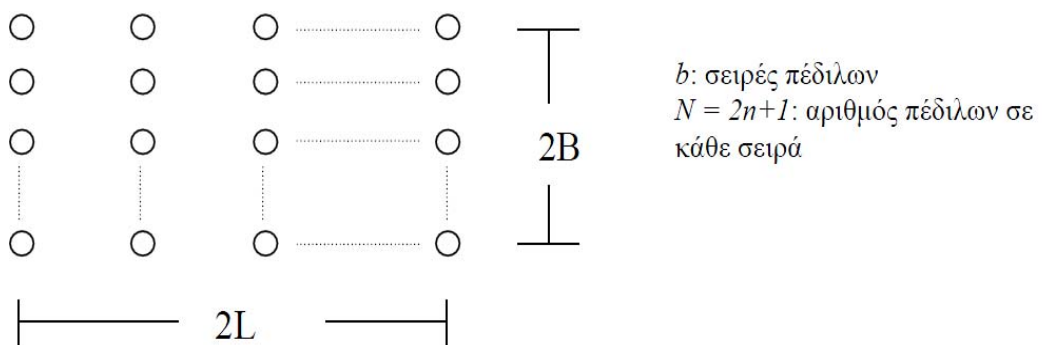
Σχήμα 13 - Συμβατική θεώρηση:πάκτωση στη βάση

Όμως η κλασική προσέγγιση για την δυναμική ανάλυση της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής στοχεύει στην αντικατάσταση της πραγματικής κατασκευής με ένα ισοδύναμο σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας, το οποίο εδράζεται σε ελατήρια εξαρτώμενα από τη συχνότητα διέγερσης (Σχήμα 14). Τα εδαφικά ελατήρια αντιστοιχούν στην δυσκαμψία του εδαφικού υλικού και αντικατοπτρίζουν την αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής για διαμήκη οριζόντια, εγκάρσια οριζόντια και κατακόρυφη κίνηση.



Σχήμα 14 - Συμβατική θεώρηση για ενδόσιμο έδαφος

Θεωρούμε λοιπόν μια μονώροφη κατασκευή ύψους  $h$  και μάζας  $m$  (Σχήμα 15). Η κατασκευή στηρίζεται σε  $b(2n+1)$  υποστυλώματα και πέδιλα της ίδιας δυσκαμψίας.

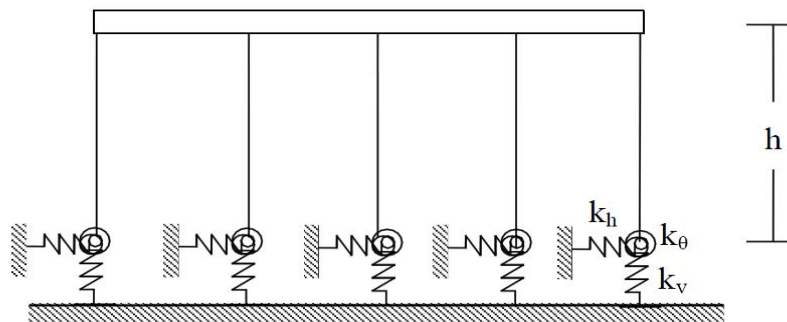


Σχήμα 15 – Θεμελίωση κατασκευής

Η δυσκαμψία του κάθε υποστυλώματος  $k$  και η ιδιοπερίοδος (χωρίς απόσβεση) της κατασκευής  $T$  δίνεται από τον τύπο:

$$k = \frac{12EI}{h^3}; \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{b(2n+1)k}}$$

Η δυσκαμψία του εδάφους προσομοιώνεται με ελατήρια για κάθε πιθανή διεύθυνση κίνησης. Οι ακαμψίες των ελατηρίων για την οριζόντια, την περιστροφική και την κατακόρυφη διεύθυνση είναι  $k_h$ ,  $k_\theta$ ,  $k_v$  και αντίστοιχα (Σχήμα 16).



**Σχήμα 16** – Απεικόνιση της θεμελίωσης με ελατήρια

Αν στην ακαμψία του υποστυλώματος περιλάβουμε την τοπική στροφή του πέδιλου αποκτάμε την ενεργό δυσκαμψία του υποστυλώματος  $kr$  που μετά από μαθηματικούς χειρισμούς δίνεται από τον τύπο:

$$k_r = \frac{1 + \frac{12k_\theta}{kh^2}}{4 + \frac{12k_\theta}{kh^2}}$$

Η δυσκαμψία επηρεάζεται από το πάχος του εδαφικού στρώματος και την σύσταση του. Αναλυτικότερα η στατική δυσκαμψία  $K$  σε ομοιογενή ημιχώρο είναι ανάλογη του σχήματος του πέδιλου, το οποίο μπορεί να είναι κυκλικό, λωριδωτό, τετραγωνικό ή και ασταθών διαστάσεων (2B, 2L,  $A_b$ ).

Τα πέδιλα του κτιρίου που εξετάζουμε είναι τετραγωνικού σχήματος. Οπότε η δυσκαμψία  $K$  ορίζεται :

κατακόρυφη  $z$

$$K_z = \frac{4.54 G B}{1 - \nu}$$

οριζόντια  $x$

όπου  $K_x = K_y$

$$K_y = \frac{9 G B}{2 - \nu}$$

περιστροφική  $gy$

όπου  $K_{\theta,rx} = K_{\theta,rx}$

$$K_{\theta,rx} = \frac{3.6 G B^3}{1 - \nu}$$

#### 4.4 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Κύριος στόχος της στατικής ανελαστικής ανάλυσης, ευρύτερα γνωστής ως pushover analysis, είναι ο προσδιορισμός των ανελαστικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στα δομικά στοιχεία κατά τη σεισμική φόρτιση. Τα φορτία που καταπονούν τον φορέα επιβάλλονται ως στατικά φορτία σταδιακά μέχρι το πλήρες μέγεθός τους. Αποτέλεσμα της στατικής ανελαστικής ανάλυσης είναι η καμπύλη αντίστασης ή αλλιώς η καμπύλη pushover από την οποία είναι εμφανής η σχέση δύναμης-μετακίνησης, η οποία συσχετίζει την τέμνουσα της βάσης με τις μετατοπίσεις συγκεκριμένου σημείου ελέγχου της κατασκευής που συνήθως βρίσκεται στη κορυφή του δομήματος.

Η στατική ανελαστική ανάλυση αποτελεί προσεγγιστική μέθοδο ανελαστικής ανάλυσης, αφού δεν λαμβάνει υπ' όψιν τον ανακυκλικό χαρακτήρα της σεισμικής φόρτισης, αλλά επιβάλλει τα φορτία μονότονα. Για οριζόντια σεισμικά φορτία διακρίνεται ανάλογα με την κατανομή των επιβαλλόμενων φορτίων. Σε κάθε περίπτωση τα φορτία επιβάλλονται στις στάθμες των διαφραγμάτων (πλάκα ορόφου). Η κατανομή των δυνάμεων κατακόρυφα βασίζεται πολύ συχνά στην υπόθεση ότι η ταλάντωση του φορέα ακολουθεί το σχήμα της πρώτης ιδιομορφής, το οποίο είναι αρκετά ακριβές για κατασκευές περιόδου μέχρι ένα δευτερόλεπτο. Σε πιο εύκαμπτες κατασκευές ίσως θα πρέπει να εξετάζεται και η συμμετοχή ανώτερων ιδιομορφών

## Κεφάλαιο 5

### 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της εργασίας πραγματοποιήθηκε μη γραμμική στατική ανελαστική ανάλυση για :

- 1) γυμνό φορέα
- 2) φορέα ενισχυμένο με τοίχωμα
- 3) φορέα με πυλωτή και
- 4) φορέα πλήρως τοιχοπληρωμένο,

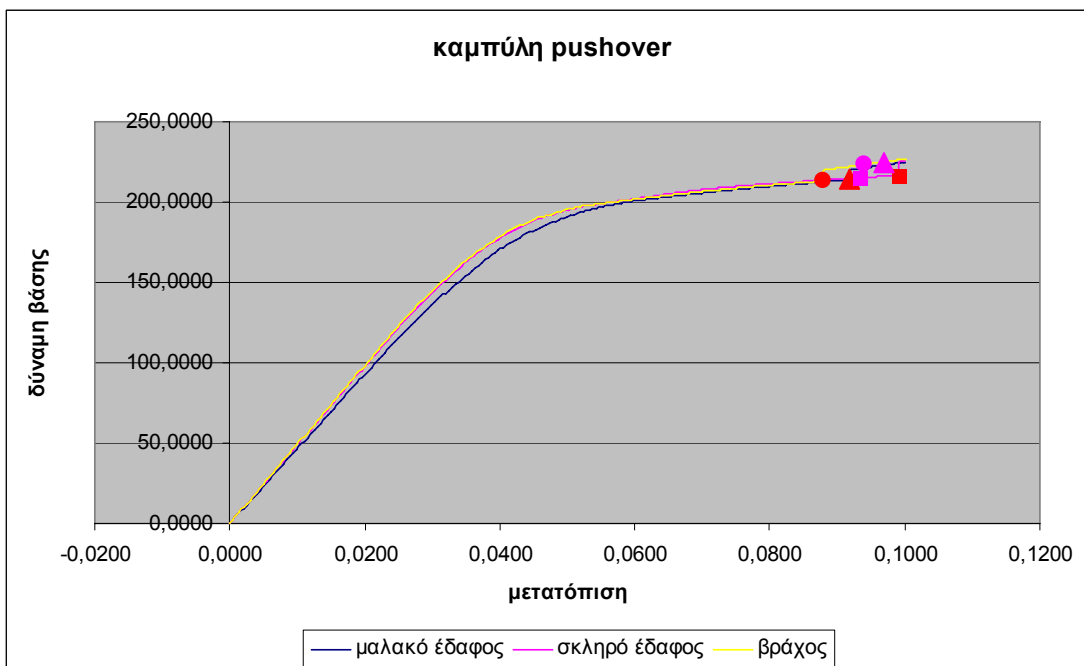
που εδράζονται σε μαλακό, σκληρό ή και βραχώδες έδαφος, με στόχο την αποτίμηση της συμπεριφοράς τους σε κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις.

Εξετάζουμε το φορέα διαφόρων κτιρίων γιατί θέλουμε να παρατηρήσουμε τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρονται κατά την διάρκεια του σεισμού και ποια είναι η ιδανικότερη μορφή.

#### 5.1 ΓΥΜΝΟΣ ΦΟΡΕΑΣ

Όσον αφορά τον γυμνό φορέα και οι τρεις περιπτώσεις θεμελίωσης της κατασκευής μας (Σχήμα 17) παρουσιάζουν περίπου την ίδια συμπεριφορά, με **λιγότερο ιδανική την συμπεριφορά του κτιρίου που εδράζεται στο σκληρό και στο βραχώδες έδαφος.**

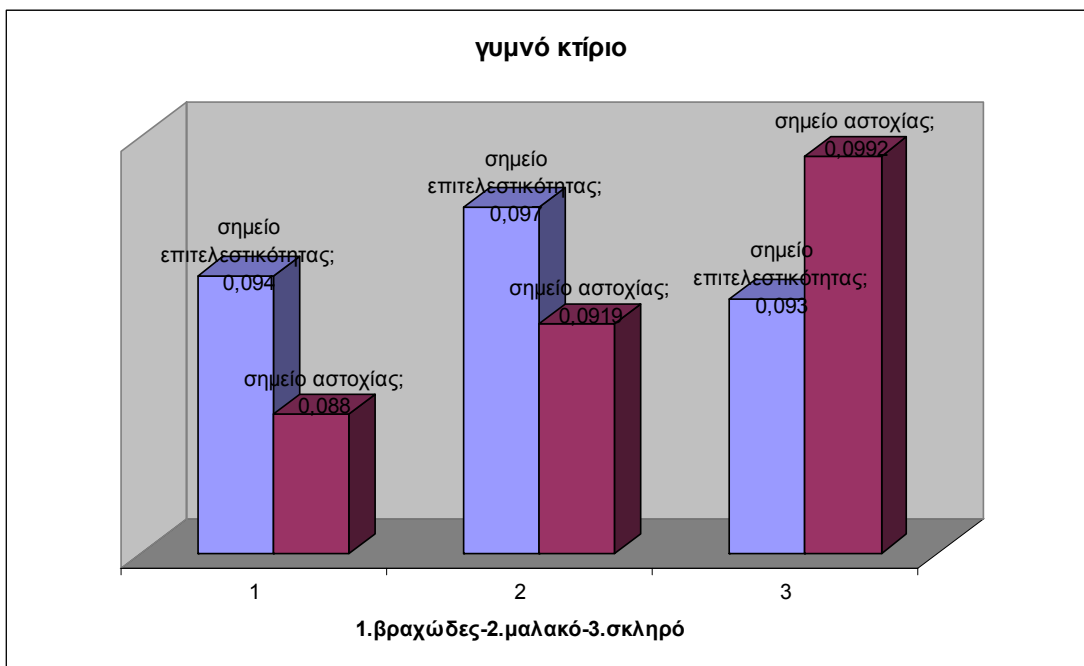




	σημείο επιτελεστικότητας	σημείο αστοχίας
μαλακό έδαφος	▲	▲
σκληρό έδαφος	■	■
βράχος	◆	◆

**Σχήμα 17** – Καμπύλη pushover για τον γυμνό φορέα

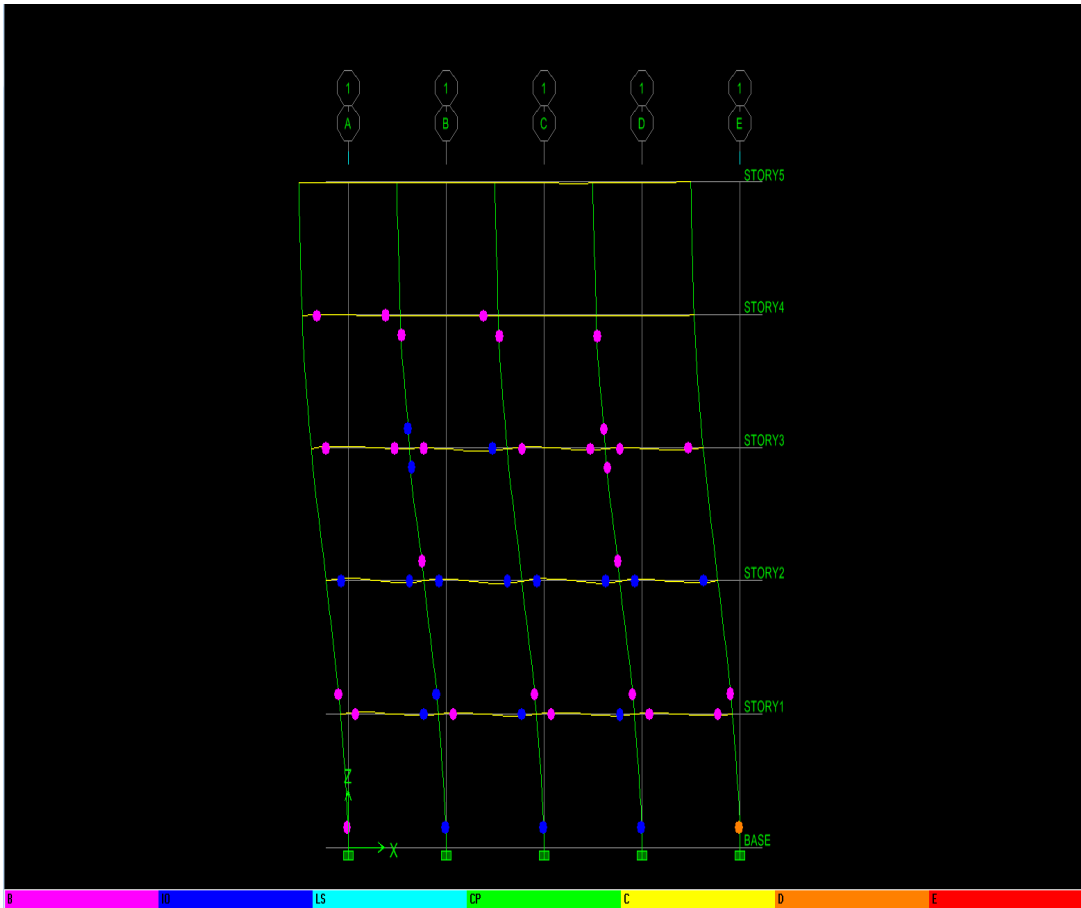
Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 18) απεικονίζονται γραφικά, το σημείο επιτελεστικότητας και το σημείο αστοχίας.



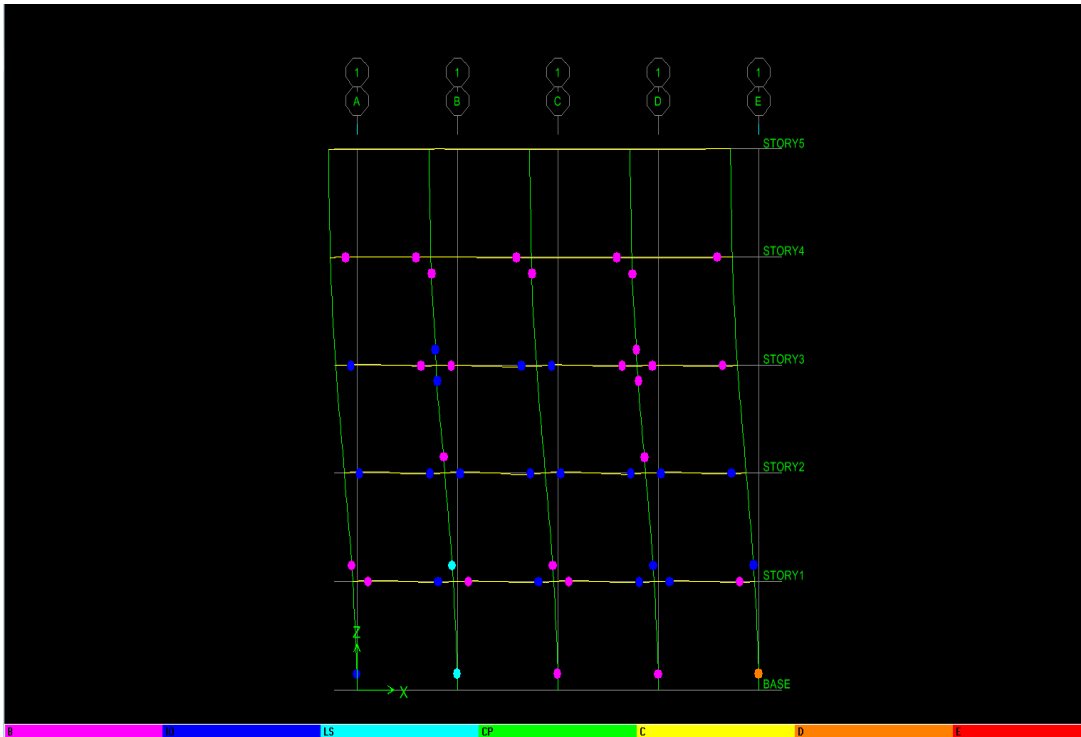
**Σχήμα 18** – Γραφική απεικόνιση των σημείων επιτελεστικότητας και των σημείων αστοχίας του γυμνού κτιρίου για το κάθε ένα από τα είδη εδάφους

Η κατασκευή που εδράζεται σε βραχώδες και μαλακό έδαφος αστοχεί σε σύντομο χρονικό διάστημα, πολύ πριν το σημείο επιτελεστικότητας, ενώ η κατασκευή στο σκληρό έδαφος παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά κατά την διάρκεια του σεισμού.

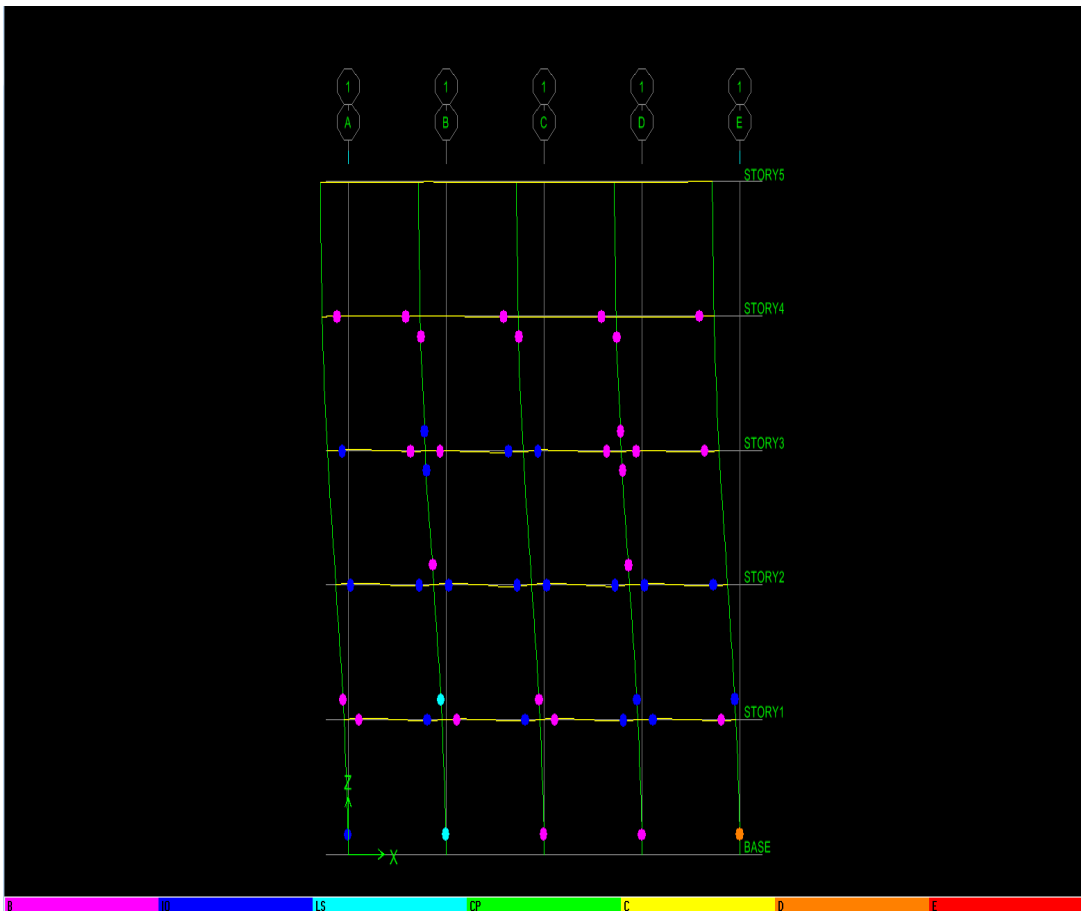
Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η κατανομή των πλαστικών αρθρώσεων στο σημείο αστοχίας. (Σχήματα 19 έως 21).



Σχήμα 19 - Εικόνα πλαστικών αρθρώσεων για το γυμνό κτίριο στο βραχώδες έδαφος



Σχήμα 20 - Εικόνα των πλαστικών αρθρώσεων για το γυμνό κτίριο στο σκληρό έδαφος



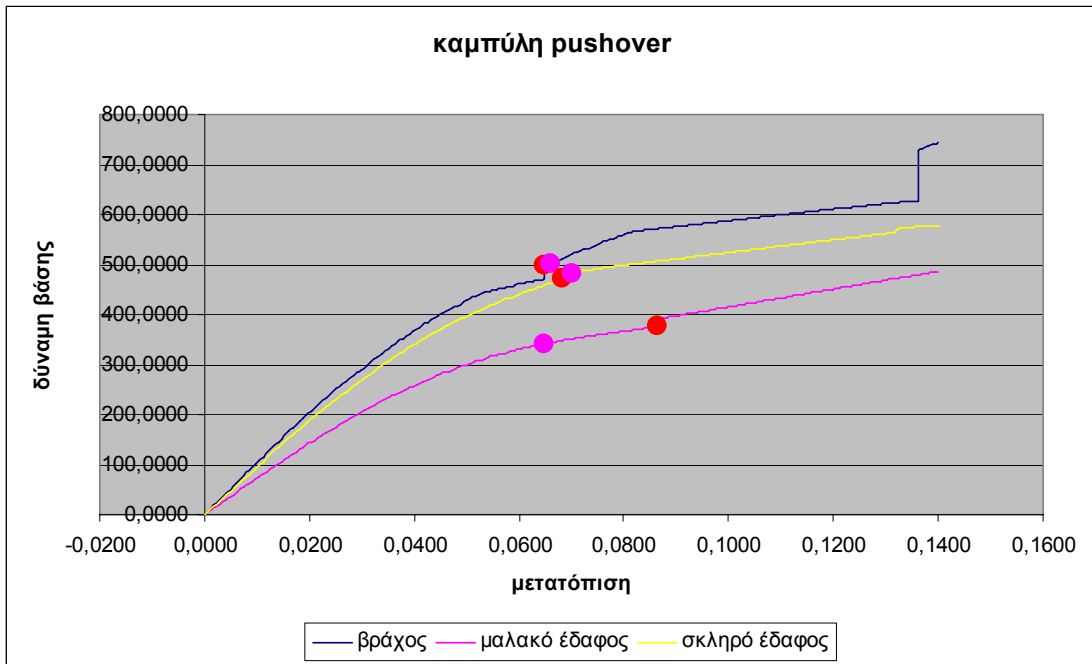
Σχήμα 21 - Εικόνα των πλαστικών αρθρώσεων για το γυμνό κτίριο στο μαλακό έδαφος

Από τις εικόνες (Σχήματα 19 έως 21) είναι εμφανές ότι ο φορέας που μετακινείται περισσότερο είναι αυτός με το βραχώδες έδαφος, ενώ και στις τρεις περιπτώσεις δημιουργείται περίπου ο ίδιος αριθμός πλαστικών αρθρώσεων. Ο τελευταίος όροφος δεν επηρεάζεται και η αστοχία που καθιστά την κατασκευή ακατάλληλη γίνεται στα υποστυλώματα του ισογείου.

Το τελικό συμπέρασμα για το γυμνό φορέα είναι ότι την καλύτερη απόκριση στη σεισμική δόνηση έχει το σκληρό έδαφος, που αποτελεί την μέση λύση στην σκληρότητα του εδάφους θεμελίωσης.

## **5.2 ΦΟΡΕΑΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΣ ΜΕ ΤΟΙΧΩΜΑ**

Έπειτα ενισχύουμε τον φορέα μας τοποθετώντας στο μεσαίο υποστύλωμα τοίχωμα. Οι καμπύλες απόκρισης του, είναι διαφορετικές μεταξύ τους (Σχήμα 22). Η δύναμη της βάσης του κάθε δομήματος αυξάνεται όσο πιο σκληρό είναι το έδαφος θεμελίωσης και τόσο πιο γρήγορα φτάνει στην αστοχία.



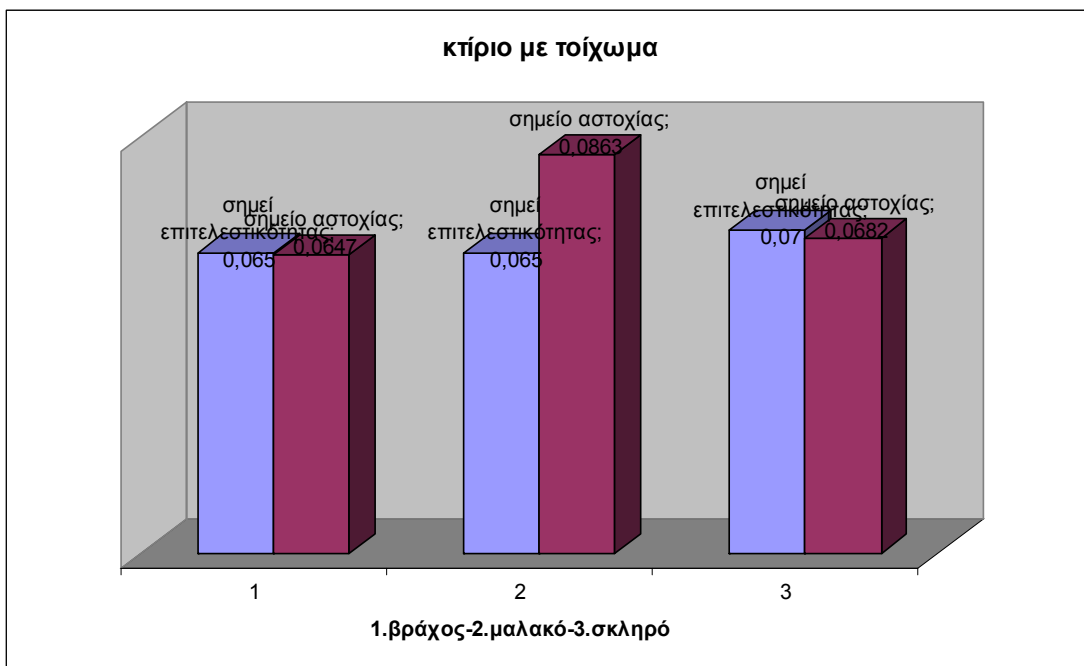
σημείο επιτελεστικότητας



σημείο αστοχίας

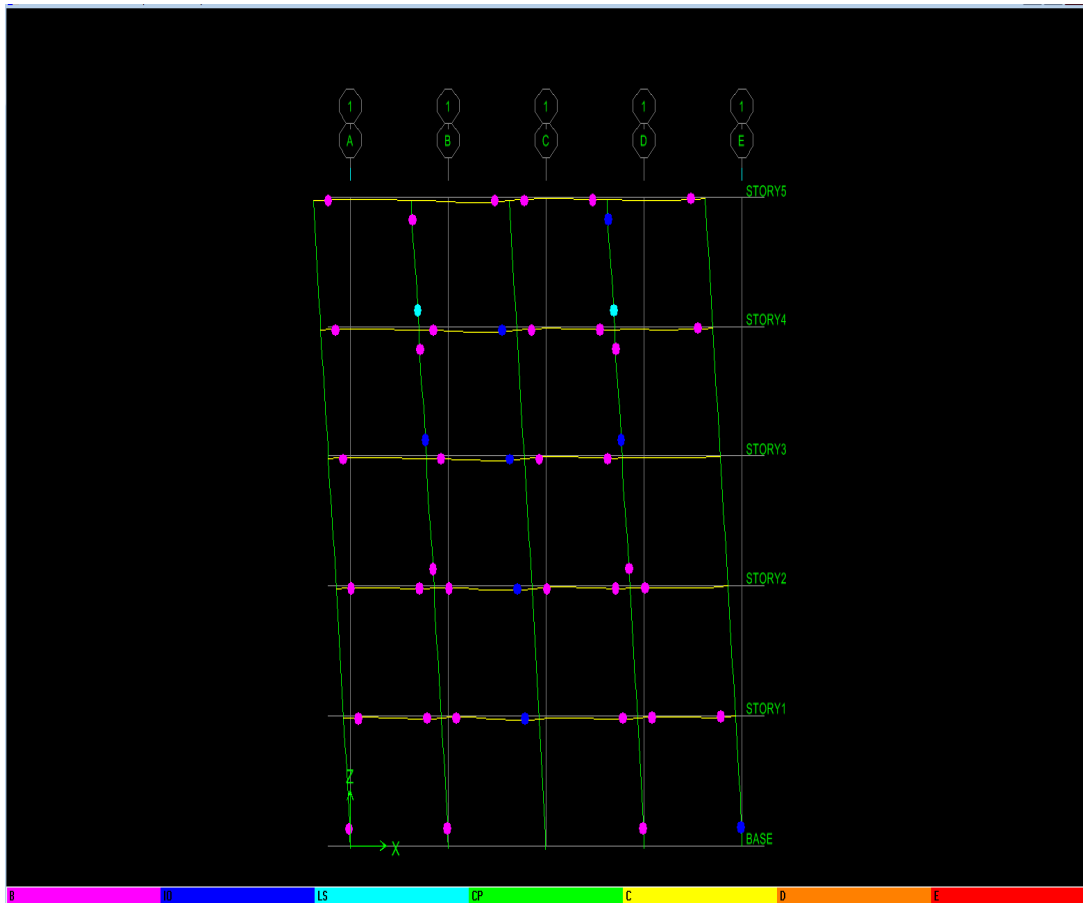


**Σχήμα 22** – Καμπύλη pushover για το ενισχυμένο με τείχωμα κτίριο



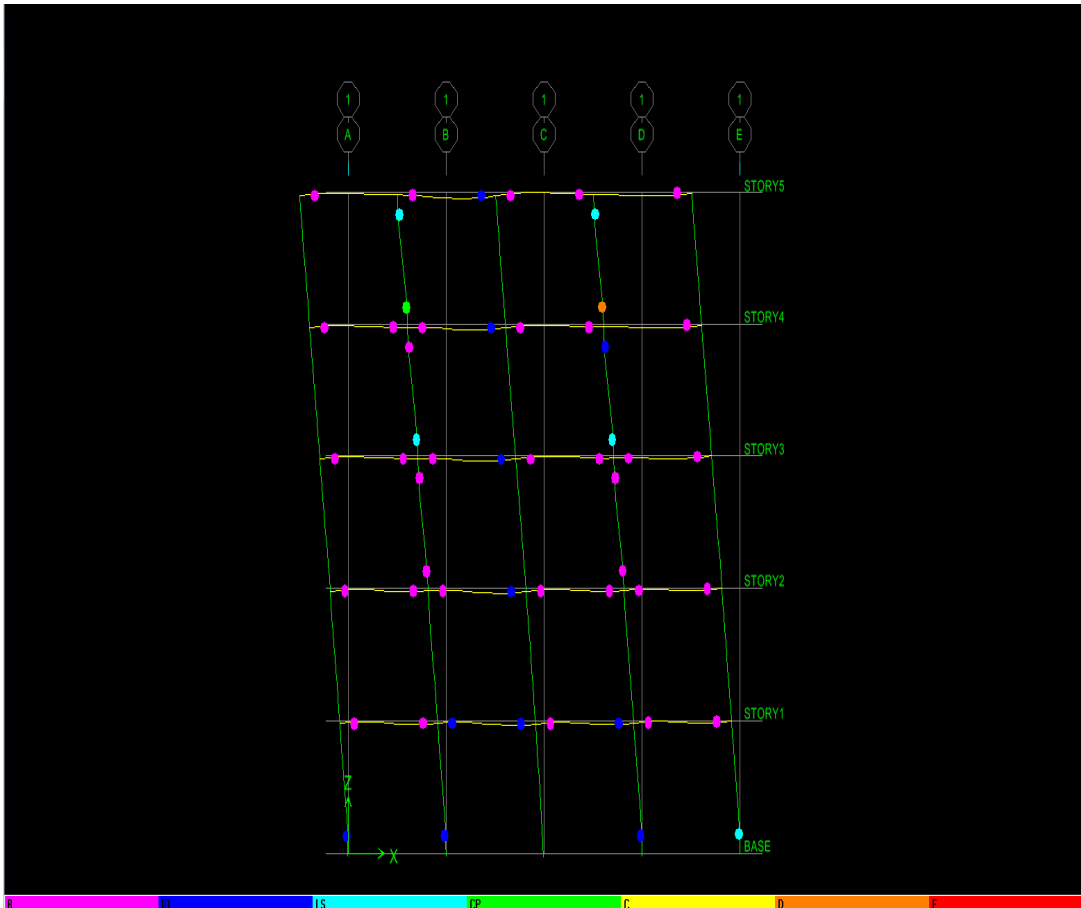
**Σχήμα 23** – Γραφική απεικόνιση των σημείων επιτελεστικότητας και των σημείων αστοχίας του ενισχυμένου με τοίχωμα κτιρίου για το κάθε ένα από τα είδη εδάφους

Από τα παραπάνω διαγράμματα (Σχήματα 22 και 23) συμπεραίνουμε ότι **την ιδανικότερη συμπεριφορά παρουσιάζει η κατασκευή που εδράζεται στο μαλακό έδαφος**, ενώ η κατασκευή που είναι θεμελιωμένη στο σκληρό και το βραχώδες έδαφος αστοχεί πολύ γρήγορα και δεν ξεπερνά το σημείο επιτελεστικότητας.

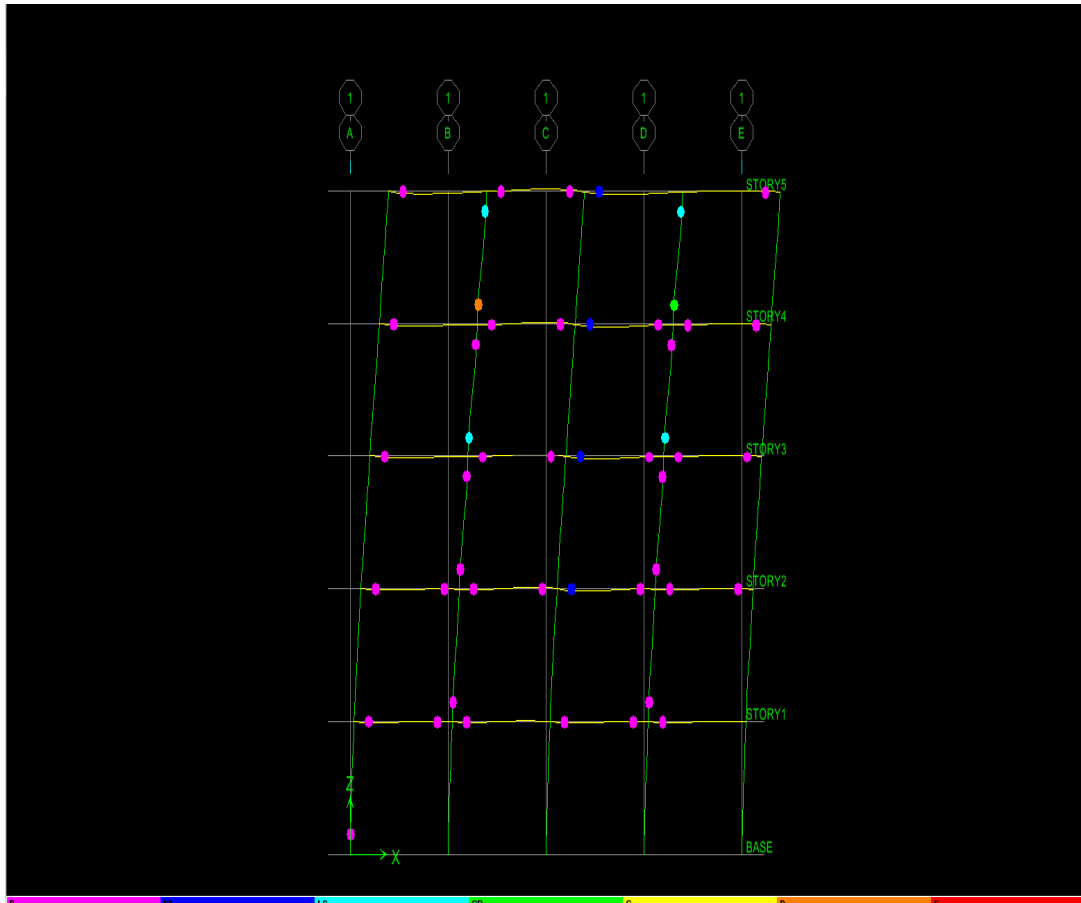


Σχήμα 24 - Εικόνα πλαστικών αρθρώσεων για το ενισχυμένο με τοίχωμα κτίριο στο βραχώδες έδαφος





Σχήμα 25 - Εικόνα πλαστικών αρθρώσεων για το ενισχυμένο με τοίχωμα κτίριο στο μαλακό έδαφος



**Σχήμα 26** - Εικόνα πλαστικών αρθρώσεων για το ενισχυμένο με τοίχωμα κτίριο στο σκληρό έδαφος

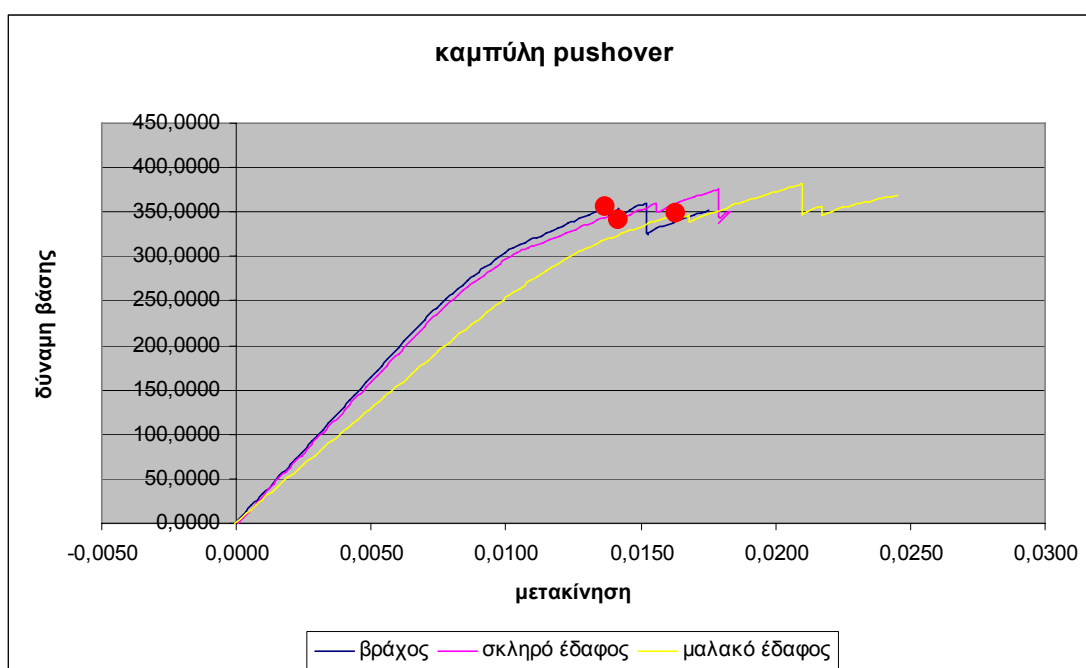
Από τις εικόνες (Σχήματα 24 έως 26) φαίνεται ότι ο φορέας παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά. Οι πλαστικές αρθρώσεις είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες σε όλους τους ορόφους, ενώ τα υποστυλώματα του ισογείου παραμένουν άθικτα. Η αστοχία παρατηρείται σε υποστύλωμα ορόφου που αυτό είναι σαφέστατα ευνοϊκότερο από την αστοχία των υποστυλωμάτων του ισογείου στο γυμνό κτίριο.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι μία κατασκευή ενισχυμένη με τοίχωμα έχει καλύτερη συμπεριφορά στο σεισμό όταν είναι θεμελιωμένη σε ένα μαλακό έδαφος διότι αναπτύσσει μικρότερη δύναμη στη βάση της, παρουσιάζει μικρότερη μετακίνηση με αποτέλεσμα να έχει την μεγαλύτερη αντοχή στο σεισμό.

### 5.3 ΦΟΡΕΑΣ ΜΕ ΠΥΛΩΤΗ

Πολλές είναι οι κατασκευές που διαθέτουν μαλακό όροφο. Συνήθης μορφή είναι τα κτίρια με πυλωτή. Γι' αυτό και θα τα εξετάσουμε.

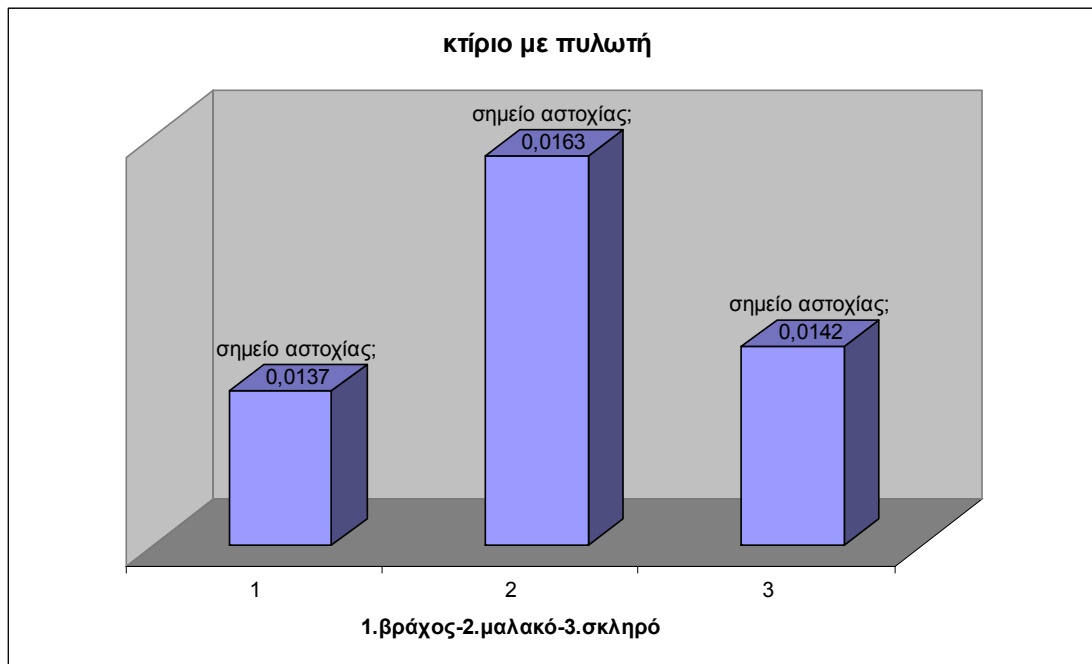
Τα κτίρια αυτά δεν δίνουν σημείο επιτελεστικότητας γιατί αστοχούν σε σύντομο χρονικό διάστημα (Σχήμα 27) και δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη αντοχή έναντι σεισμικών δονήσεων.



σημείο αστοχίας

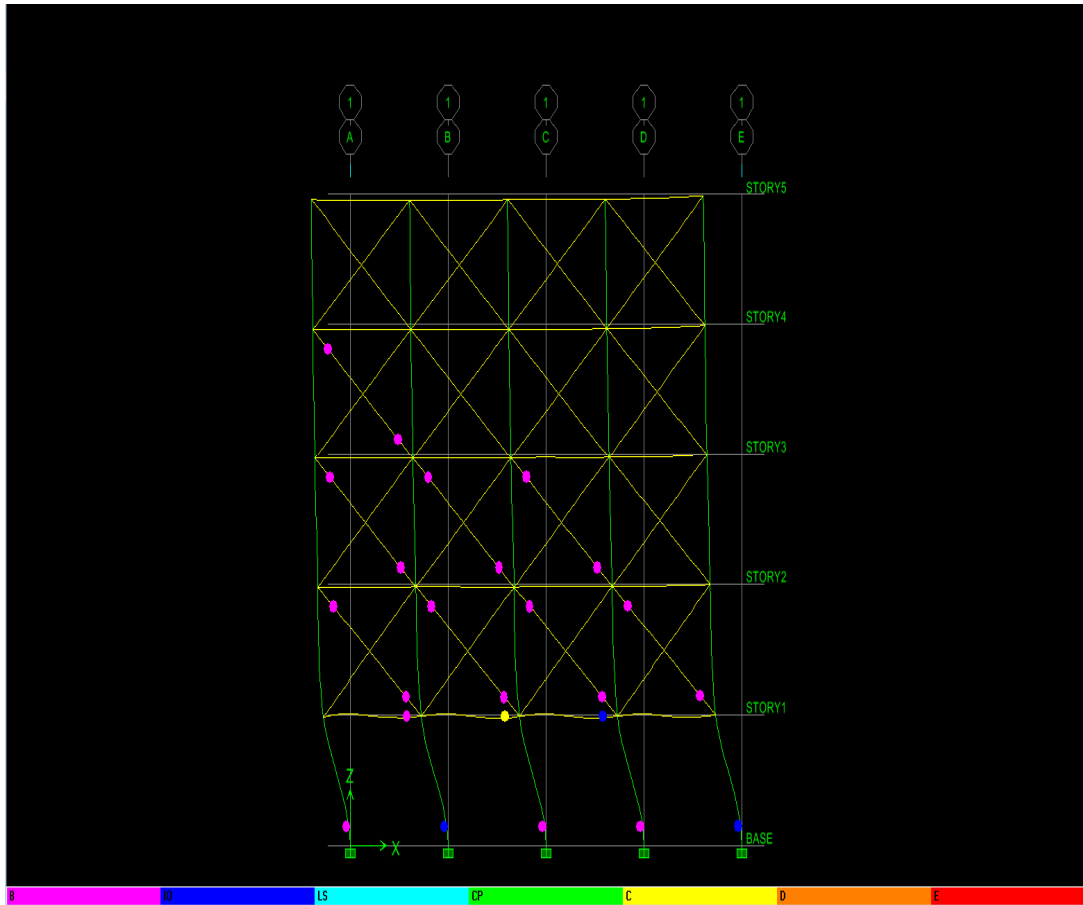


Σχήμα 27 – Καμπύλη pushover για το κτίριο με πυλωτή

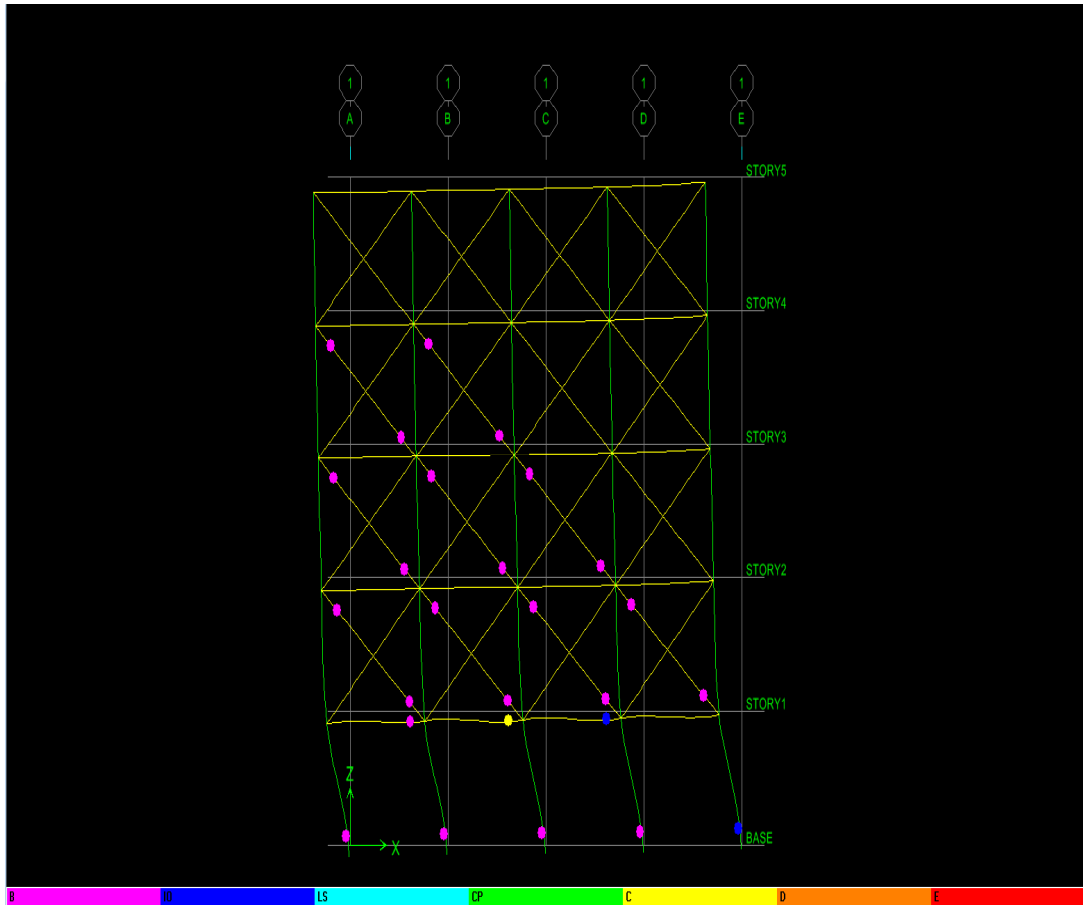


**Σχήμα 28** - Γραφική απεικόνιση των σημείων αστοχίας του κτιρίου με πυλωτή για το κάθε ένα από τα είδη εδάφους

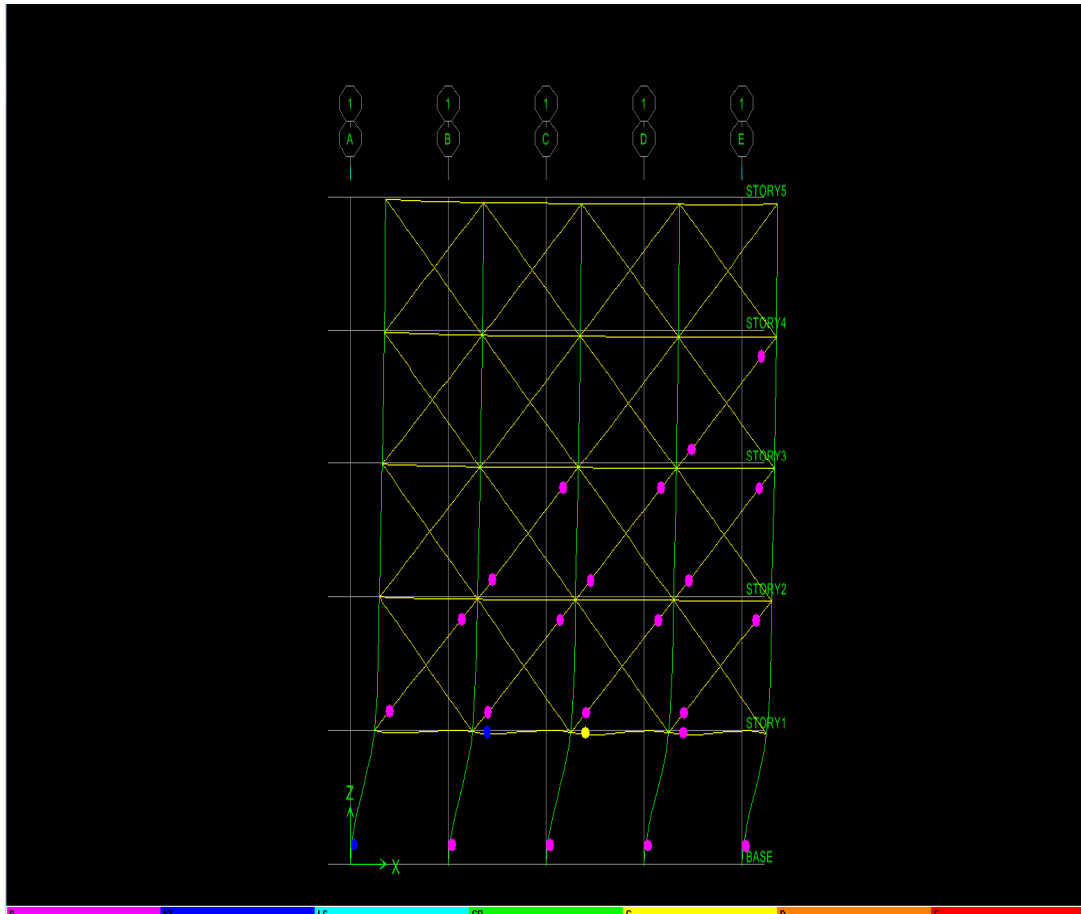
Από την καμπύλη pushover (Σχήμα 27) είναι εμφανές ότι το δόμημα από τη στιγμή που αστοχεί και μετά παρουσιάζει μία ιδιαίτερη συμπεριφορά με καλύτερη εκείνη του μαλακού εδάφους (μικρότερη δύναμη βάσης, περισσότερη διάρκεια στην μετακίνηση) καθώς δεν αστοχεί σε τόσο μικρό χρονικό διάστημα (Σχήματα 27 και 28).



Σχήμα 29 - Εικόνα πλαστικών αρθρώσεων για το κτίριο με πυλωτή στο βραχώδες έδαφος



Σχήμα 30 - Εικόνα πλαστικών αρθρώσεων για το κτίριο με πυλωτή στο μαλακό έδαφος



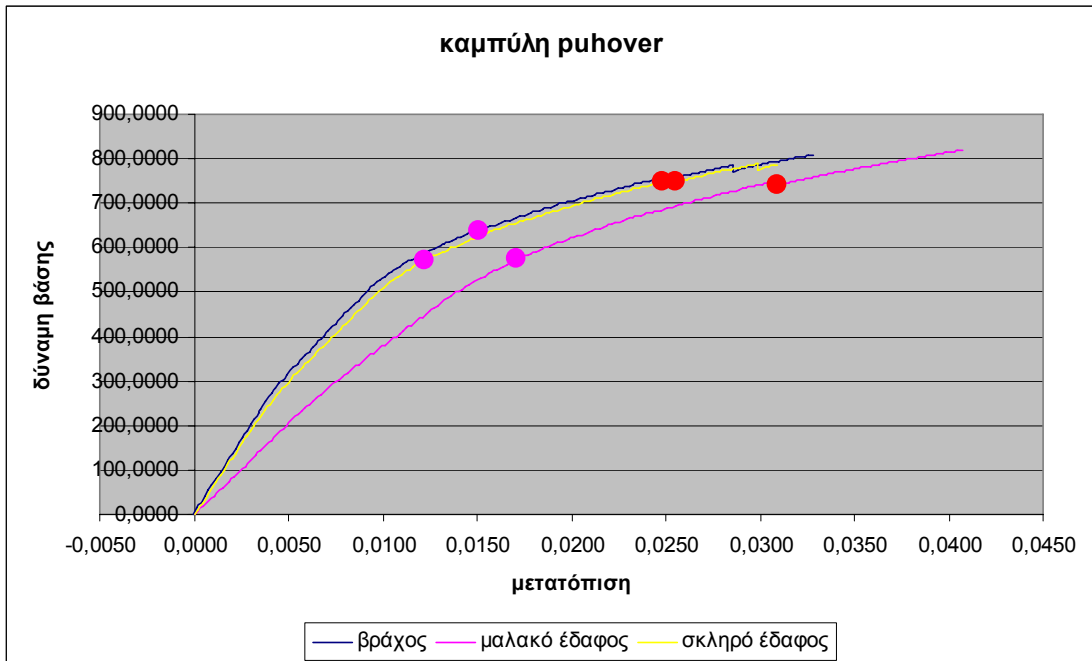
Σχήμα 31 - Εικόνα πλαστικών αρθρώσεων για το κτίριο με πυλωτή στο σκληρό έδαφος

Ο φορέας με την πυλωτή παρουσιάζει τριγωνική κατανομή των πλαστικών αρθρώσεων καθώς μειώνονται σε κάθε όροφο του, μετακινείται από την βάση του και η πρώτη αστοχία παρατηρείται σε δοκάρι του ισογείου. Η αστοχία αυτή, δεν συνδέεται με την άμεση κατάρρευση του, όπως συμβαίνει με το υποστύλωμα (κυρίως του ισογείου) (Σχήματα 29 έως 31).

Για άλλη μία φορά **το μαλακό έδαφος αποτελεί το καλύτερο έδαφος θεμελίωσης** διότι **δίνει τη δυνατότητα να κινηθεί από τα θεμέλια και να εκτελέσει μια πιο ομαλή ταλάντωση** σε αντίθεση με το σκληρό ή βραχώδες που κρατούν σταθερή τη θεμελίωση του με αποτέλεσμα να καταρρέει σε σύντομο χρονικό διάστημα.

#### 5.4 ΦΟΡΕΑΣ ΠΛΗΡΩΣ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΜΕΝΟΣ

Ο πλήρως τοιχοπληρωμένος φορέας αποτελεί τον πιο συνηθισμένο τύπο κτιρίου.



σημείο επιτελεστικότητας

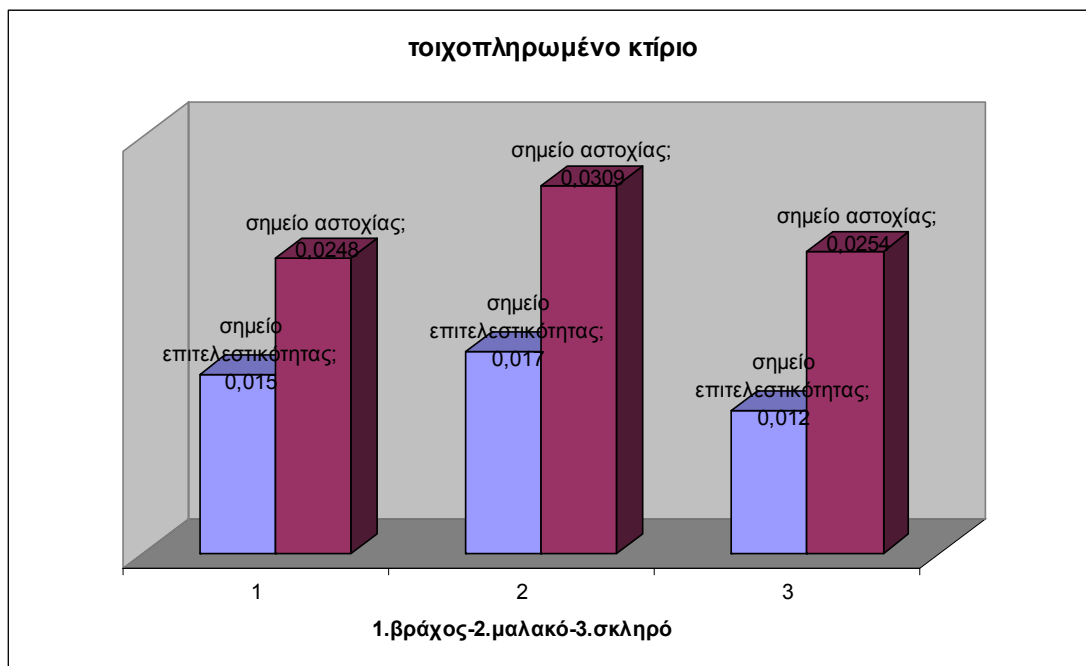


σημείο αστοχίας



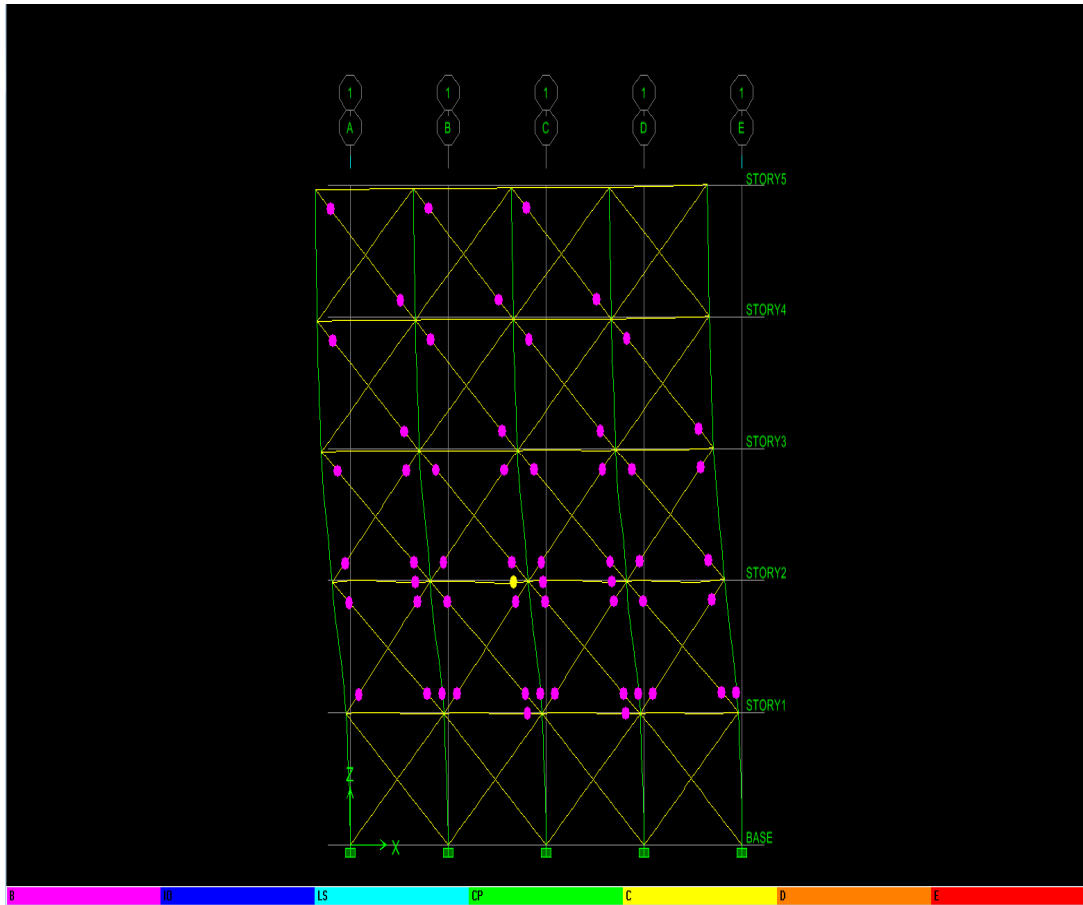
**Σχήμα 32** – Καμπύλη pushover για το τοιχοπληρωμένο κτίριο



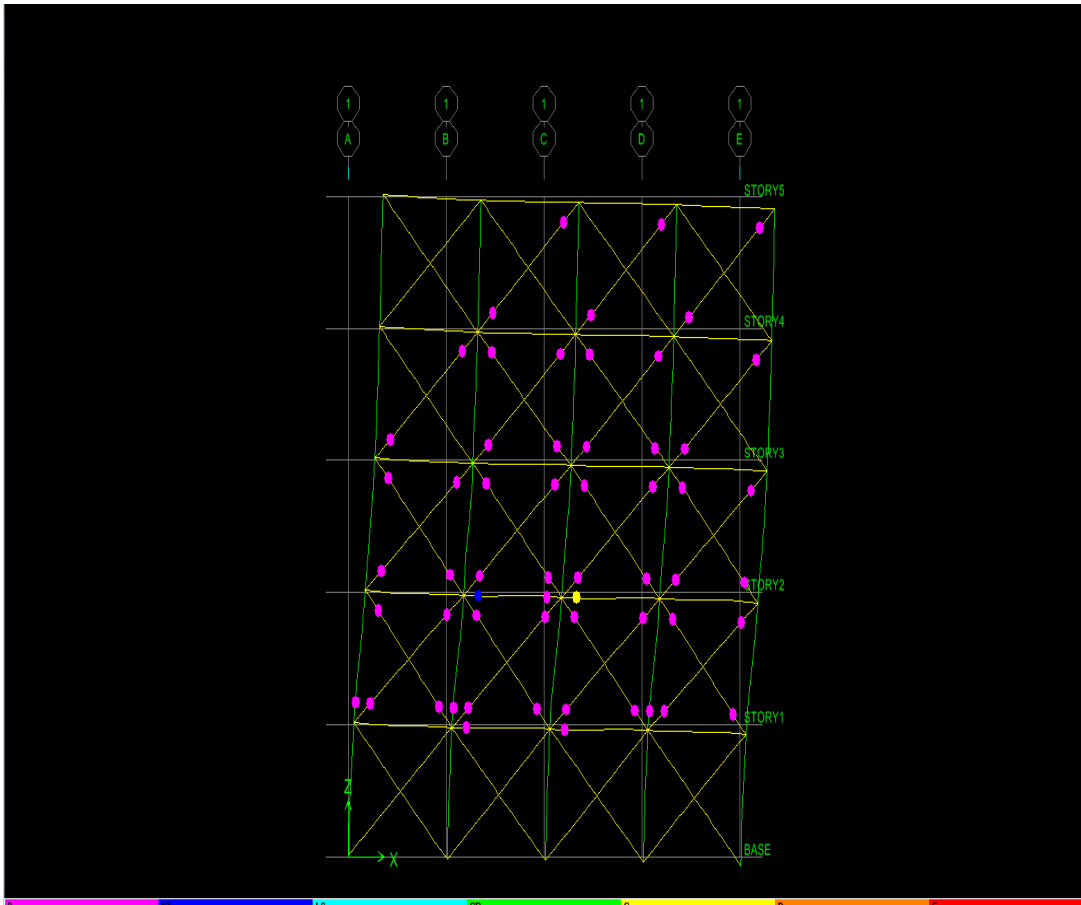


**Σχήμα 33** - Γραφική απεικόνιση των σημείων επιτελεστικότητας και των σημείων αστοχίας του τοιχοπληρωμένου κτιρίου για το κάθε ένα από τα είδη εδάφους

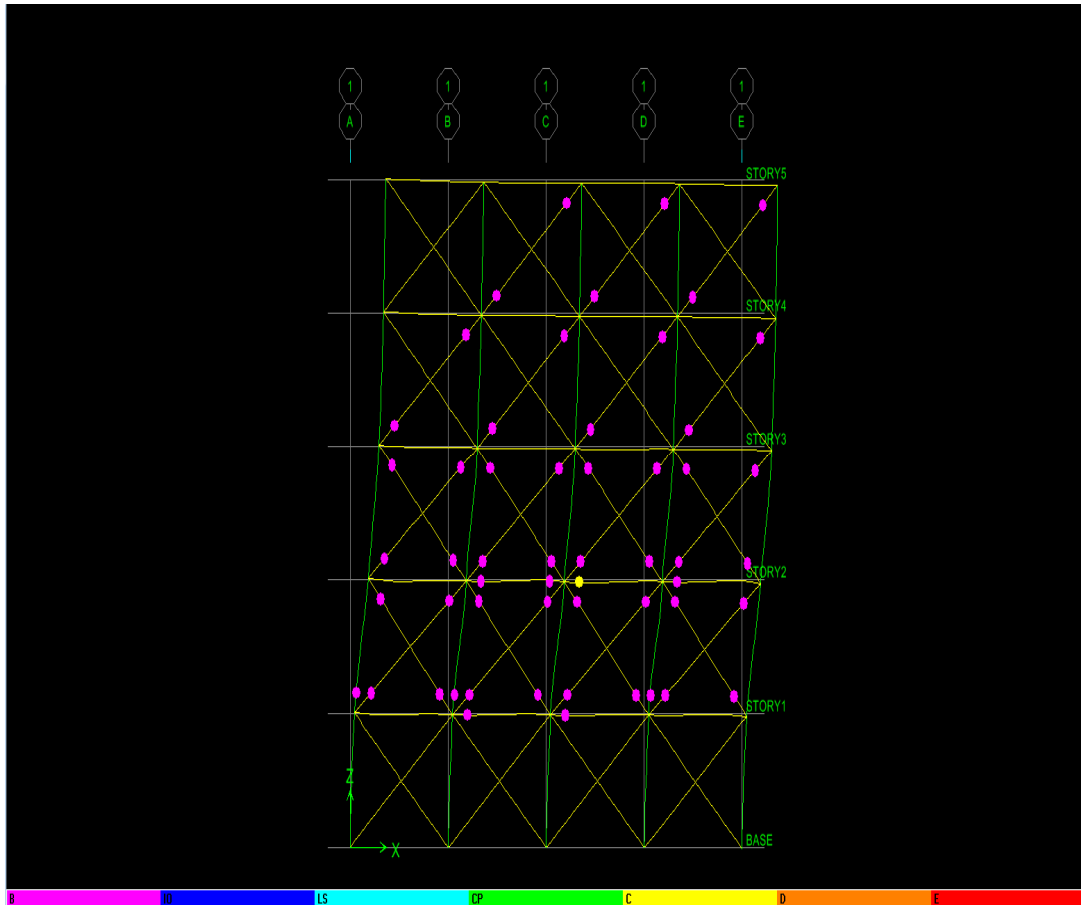
Σύμφωνα με τα παραπάνω (Σχήματα 32 και 33) η κατασκευή στο σκληρό ή βραχώδες έδαφος δίνει μεγαλύτερη δύναμη βάσης και καταρρέει σε μικρότερο χρονικό διάστημα από το μαλακό έδαφος. Και τα τρία δομήματα αστοχούν μετά το σημείο επιτελεστικότητάς τους με αυτά των δύο τύπων σκληρού εδάφους να είναι παρόμοια.



**Σχήμα 34** - Εικόνα πλαστικών αρθρώσεων για το τοιχοπληρωμένο κτίριο στο βραχώδες έδαφος



**Σχήμα 35** - Εικόνα πλαστικών αρθρώσεων για το τοιχοπληρωμένο κτίριο στο μαλακό έδαφος



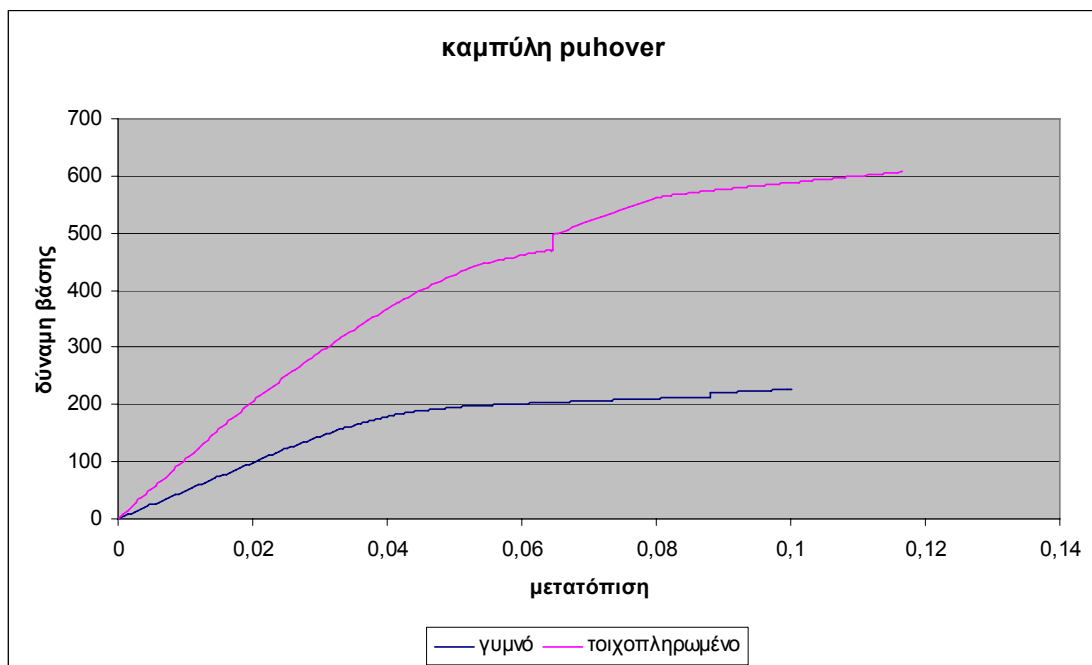
**Σχήμα 36** - Εικόνα πλαστικών αρθρώσεων για το τοιχοπληρωμένο κτίριο στο σκληρό έδαφος

Και στην περίπτωση του πλήρως τοιχοπληρωμένου φορέα η κατανομή των πλαστικών αρθρώσεων είναι τριγωνική αλλά με πιο ομοιόμορφη κατανομή. Στο ισόγειο δεν δημιουργούνται πλαστικές αρθρώσεις και η πρώτη αστοχία γίνεται σε δοκάρι ορόφου. Το γεγονός ότι δεν αστοχεί το ισόγειο αποτελεί σημαντικό στοιχείο απόκρισης ενός δομήματος έναντι του σεισμού γιατί προστατεύεται η ανθρώπινη ζωή περισσότερο από τις άλλες περιπτώσεις (Σχήματα 34 έως 36) .

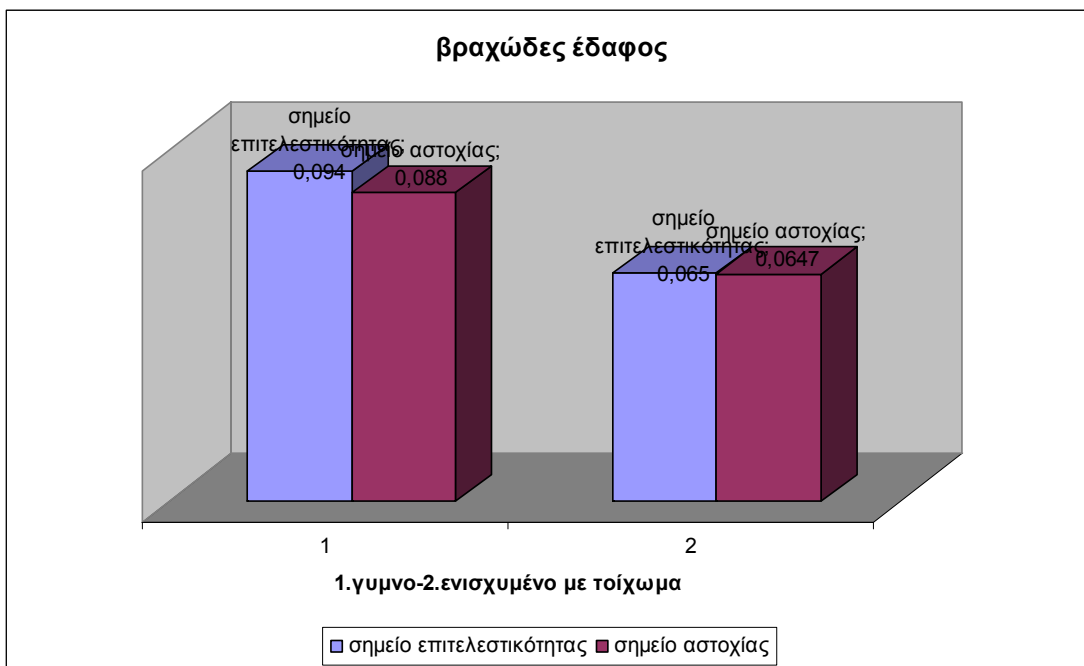
Τέλος θα δείξουμε πως αντιδρούν το γυμνό κτίριο με :

- 1) το κτίριο με τοίχωμα
  - 2) το κτίριο με πυλωτή και
  - 3) το πλήρως τοιχοπληρωμένο
- που είναι θεμελιωμένα σε βραχώδες έδαφος.

### 5.5 GYMNO-KTIPIO ME TOIXΩMA



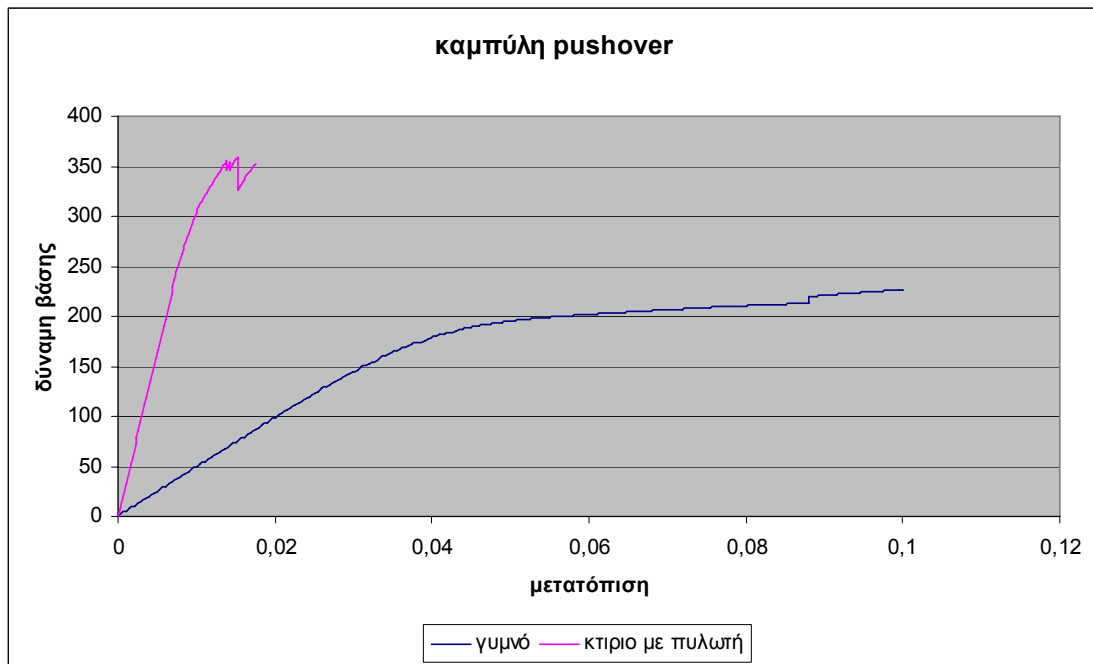
Σχήμα 37 – Καμπύλη pushover για το γυμνό κτίριο και το κτίριο με τοίχωμα



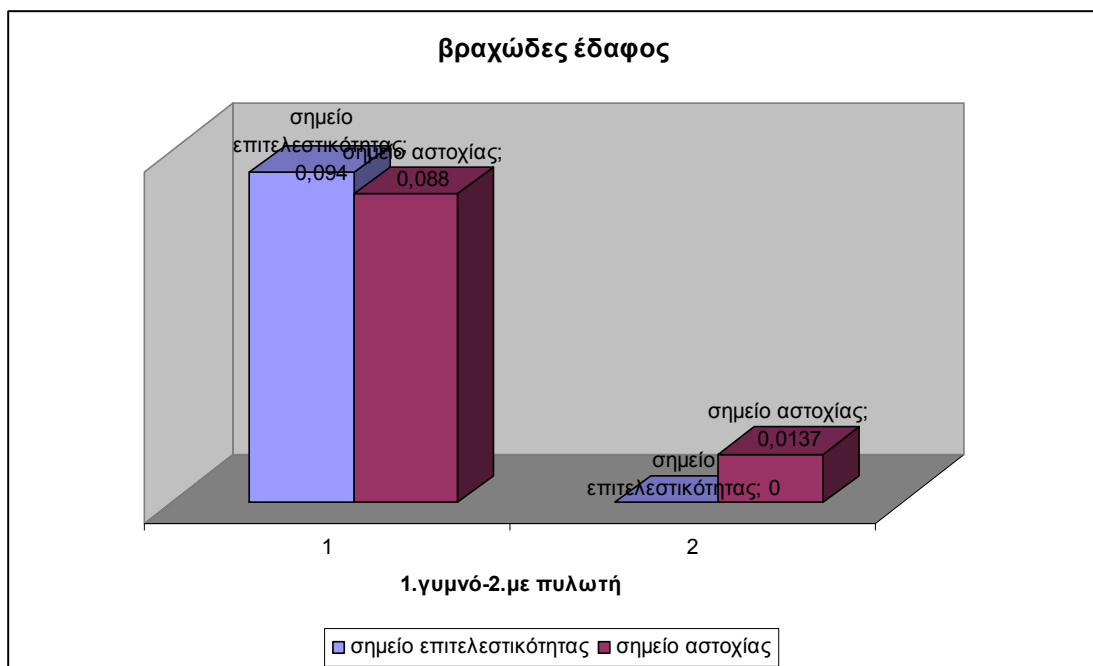
**Σχήμα 38** - Γραφική απεικόνιση των σημείων επιτελεσματικότητας και των σημείων αστοχίας του γυμνού κτιρίου και του κτιρίου με τοίχωμα για το βραχώδες εδάφους

Ο τοιχοπληρωμένος φορέας παρουσιάζει μεγαλύτερη δύναμη βάσης και αντοχή έως το σημείο κατάρρευσης και καικαταρρέει μετά από το γυμνό. (Σχήμα 37) Αντιθέτως, ο γυμνός φορέας παρουσιάζει το σημείο επιτελεσματικότητας και αστοχίας σε μεγαλύτερη μετακίνηση, δηλαδή αστοχεί σε μεγαλύτερη μετακίνηση βάσης, αλλά πριν το σημείο επιτελεσματικότητας του.(Σχήματα 37 και 38).

## 5.6 ΓΥΜΝΟ-ΚΤΙΡΙΟ ΜΕ ΠΥΛΩΤΗ



Σχήμα 39 – Καμπύλη pushover για το γυμνό κτίριο και το κτίριο με πυλωτή

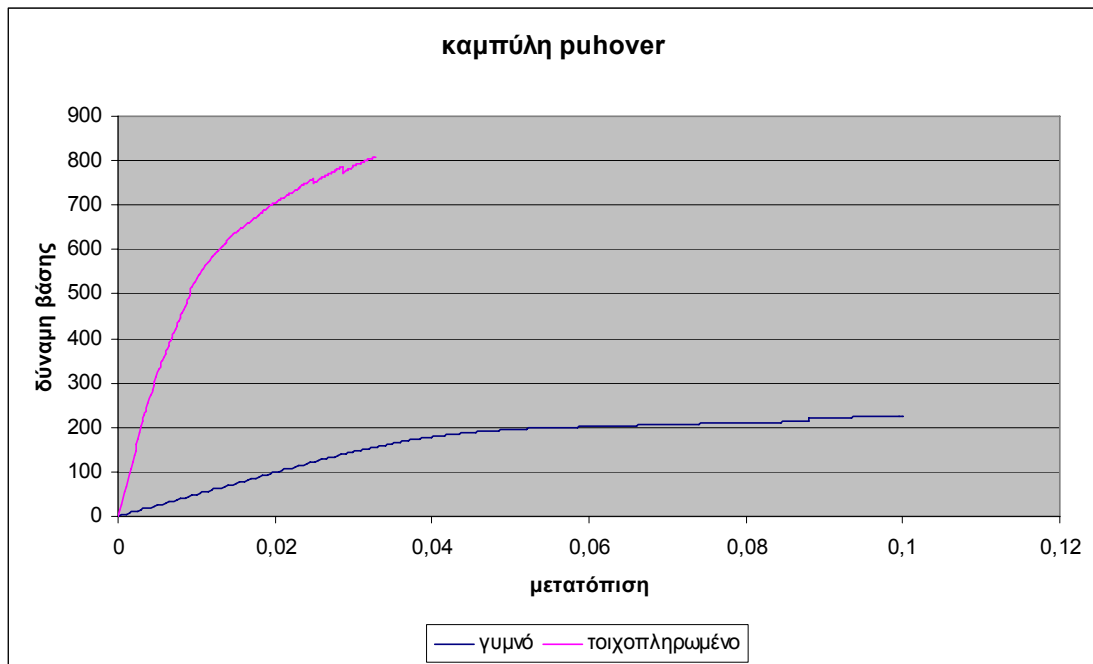


Σχήμα 40 - Γραφική απεικόνιση των σημείων επιτελεσματικότητας και των σημείων αστοχίας του γυμνού κτιρίου και του κτιρίου με πυλωτή για το βραχώδες εδάφους

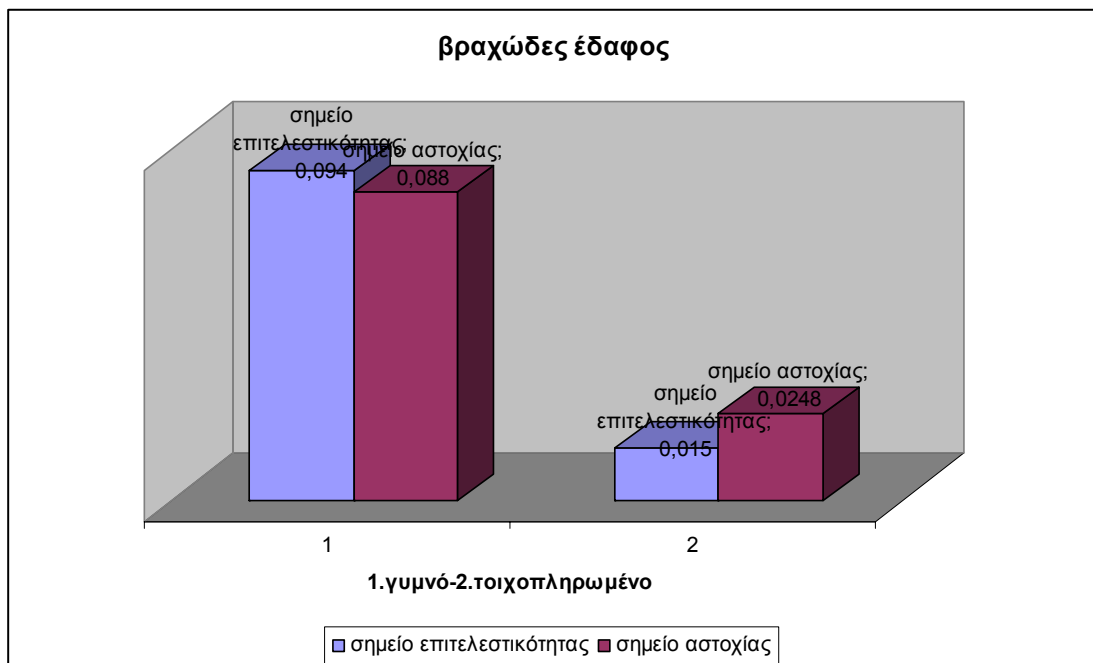
Η δύναμη βάσης του φορέα με πλωτή είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή του γυμνού και καταρρέει σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Το γεγονός ότι δεν μας δίνει σημείο επιτελεστικότητας και το σημείο αστοχίας γίνεται σε πολύ μικρή μετακίνηση μας δείχνει ότι το κτίριο δεν παρουσιάζει κανέναν είδους αντοχή σε σεισμικές δονήσεις (Σχήματα 39 και 40).



## 5.7 ΓΥΜΝΟ-ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΜΕΝΟ



Σχήμα 41 - Καμπύλη pushover για το γυμνό κτίριο και το τοιχοπληρωμένο κτίριο



Σχήμα 42 - Γραφική απεικόνιση των σημείων επιτελεστικότητας και των σημείων αστοχίας του γυμνού κτιρίου και του τοιχοπληρωμένου κτιρίου για το βραχώδες έδαφος

Ο γυμνός φορέας παρουσιάζει μικρότερη δύναμη βάσης, μεγαλύτερη αντοχή έναντι της κατάρρευσης και μεγαλύτερη μετακίνηση πριν την πρώτη αστοχία. Όλα τα παραπάνω συντελούν στο γεγονός ότι το γυμνό κτίριο αποκρίνεται καλύτερα έναντι σεισμικών δονήσεων (Σχήματα 41 και 42).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διεξαγωγή των αναλύσεων του εξεταζόμενου κτιρίου από την διερεύνηση των προσομοιωμάτων συμπεριφοράς, μας δίνει την δυνατότητα να εκτιμήσουμε τη σεισμική συμπεριφορά του και την επιρροή των παραμέτρων σε αυτή.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα καθώς και παρατηρήσεις που αναφέρονται στη σεισμική συμπεριφορά του υφιστάμενου κτιρίου όπως προέκυψαν σε κάθε περίπτωση :

- Το έδαφος επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την απόκριση της κατασκευής. Το μαλακό έδαφος είναι αυτό που ασκεί μεγαλύτερη επιρροή στην κατασκευή κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης. Το μαλακό έδαφος μπορεί να υποστεί παραμορφώσεις που θα επηρεάσουν τη ευστάθεια της θεμελίωσης και ανατροφοδοτεί το κτίριο προκαλώντας ουσιώδεις μετακινήσεις. Παρόλα αυτά δίνει τη δυνατότητα στον φορέα να κινηθεί πιο ελαστικά. Το σκληρό έδαφος παρουσιάζει παρόμοια αποτελέσματα με το βραχώδες. Το σκληρό έδαφος δεν παρουσιάζει τις αδυναμίες παραμόρφωσης και ανατροφοδότησης, αλλά κρατά την κατασκευή ακλόνητη από τη βάση της με αποτέλεσμα να προκαλεί εξίσου σημαντικές βλάβες στον φορέα.
- Το είδος του φορέα παίζει και αυτό καθοριστικό ρόλο στην σεισμική συμπεριφορά της κατασκευής. Το γυμνό κτίριο αστοχεί σε μικρότερη μετακίνηση από την αναμενόμενη και παρουσιάζει την πρώτη αστοχία σε υποστύλωμα του ισογείου με αποτέλεσμα να καταρρεύσει ολόκληρο ή τμήμα του. Ο ενισχυμένος με τοίχωμα φορέας παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά αφού αστοχεί σε μεγαλύτερη μετακίνηση και σε υποστύλωμα ορόφου. Στον τοιχοπληρωμένο φορέα παρατηρείται σημαντική βελτίωση αφού δημιουργούνται λιγότερες, πιο ασήμαντες αστοχίες ομοιόμορφα κατανεμημένες. Η βασική αστοχία παρατηρείται σε δοκάρι ορόφου, ευνοϊκότερη από αυτή των υποστυλωμάτων. Αντίθετα στην περίπτωση της πυλωτής η συμπεριφορά είναι δυσμενής.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι κάθε είδους ενίσχυση μπορεί να βελτιώσει τη συμπεριφορά της κατασκευής έναντι του σεισμού ώστε να μειωθεί η πιθανότητα κατάρρευσης και ο τραυματισμός ή η απώλεια της ανθρώπινης ζωής, τα οποία είναι και τα από τα βασικά μελήματα ενός μηχανικού.

Πρέπει να αναφέρουμε ότι όλα τα συμπεράσματα έχουν προκύψει από τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα επηρεάζονται από τις παραμέτρους της παραδοχής, της προσομοίωσης και της ανάλυσης τα οποία μπορεί να περιέχουν ανακρίβειες αλλά και λάθη.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Γκαζέτας Γ. & Καββαδάς [2010], ‘Αλληλεπίδραση Εδάφους- Κατασκευής’ Εκδόσεις Πολυτεχνείου
- Χατζηκυριάκος Ε. [2011], ‘Ελαστική και Ανελαστική Ανάλυση Φορέα από Οπλισμένο Σκυρόδεμα Ενισχυμένου με Μεταλλικά Υποστυλώματα’, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Δομοστατικής, Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- ΕΑΚ [2000], ΦΕΚ 2184 Β/20 – 12 – 1999 , Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός.
- ΚΑΝ.ΕΠΕ. [2010], Κανονισμός Επεμβάσεων, Τελικό Σχέδιο Κειμένου 3, Ο.Α.Σ.Π.
- Ρεπαπής Κ. [2007], ‘Αποτίμηση της Σεισμικής Συμπεριφοράς Υφιστάμενων Κτιρίων από Ω.Σ.’, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Δομοστατικής, Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Μουστακάτου Δ. [2009] , ‘Αποτίμηση Σεισμικής Απόκρισης Κτιρίου με Κατανεμημένη και Συγκεντρωμένη Πλαστικότητα’ , Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Δομοστατικής, Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Αντωνόπουλος Θ. [2008] , ‘Σεισμική Συμπεριφορά Παλαιών Κτιρίων με Pilotis και Πρακτικές Προτάσεις Βελτίωσης της’, Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Εκπαίδευσης, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Κατασκευών, Πολυτεχνική Σχολή, Πάτρα.
- Ρεπαπής Κ., Βιντζηλαίου Ε. και Ζέρης Χ. [2006] , ‘Εκτίμηση Συμπεριφοράς Υφισταμένων Κτιρίων από Ω.Σ με Χρήση Δυναμικών Αναλύσεων Αυξανόμενης Έντασης’, 15<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη.

Σοφοκλέους Α. [1999] , ‘Δυναμική Ελαστοπλαστική Ανάλυση Δομικών Συστημάτων με Ανάλυση Δομικών Συστημάτων με Στοιχεία Μεταβλητών Χαρακτηριστικών.’ , Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Δομοστατικής, Εργαστήριο Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Παπαδρακάκης Μ. [2003] , ‘Μαθήματα Στατικής V, Πλαστική ανάλυση Ραβδωτών Φορέων, Σύγχρονες Μέθοδοι (Μέρος 2<sup>ο</sup>)’, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Καθηγητής Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα.

Μπέσκος Δ. [2003] , ‘Δυναμική Ανάλυση Κατασκευών, Τόμος Β, Ειδικά θέματα Δυναμικής των Κατασκευών και Σεισμικής Μηχανικής’ , Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Γκαζέτας Γ. [1996] , Εδαφομηχανική και Σεισμική Μηχανική, καθηγητής Ε.Μ.Π