

Μέθοδοι υπολογισμού της ικανότητας κατασκευών  
από ΟΣ ενισχυμένων με  
Ινοπλισμένα Ανθρακονήματα

---

Η Διπλωματική Εργασία  
παρουσιάστηκε ενώπιον  
του Διδακτικού Προσωπικού του  
Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

---

Σε Μερική Εκπλήρωση  
των Απαιτήσεων για το Δίπλωμα του  
Πολιτικού Μηχανικού

---

του  
ΜΗΤΣΕΑ ΙΩΑΝΝΗ  
ΕΑΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ 2008



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 6702/1  
Ημερ. Εισ.: 15-01-2009  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΠΜ  
2008  
ΜΗΤ

Μέθοδοι υπολογισμού της ικανότητας κατασκευών  
από ΟΣ ενισχυμένων με  
Ινοπλισμένα Ανθρακονήματα

---

Η Διπλωματική Εργασία  
παρουσιάστηκε ενώπιον  
του Διδακτικού Προσωπικού του  
Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

---

Σε Μερική Εκπλήρωση  
των Απαιτήσεων για το Δίπλωμα του  
Πολιτικού Μηχανικού

---

του  
ΜΗΤΣΕΑ ΙΩΑΝΝΗ  
ΕΑΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ 2008

Η ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΔΙΔΑΣΚΟΝΤΩΝ ΕΠΙΚΥΡΩΝΕΙ  
ΤΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΤΟΥ ΜΗΤΣΕΑ ΙΩΑΝΝΗ:

---

ΔΡ. ΦΡΑΓΚΙΑΔΑΚΗΣ ΜΙΧΑΗΛ , Επιβλέπων  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

---

ΣΟΦΙΑΝΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ, Μέλος  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

---

ΤΣΟΠΕΛΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ, Μέλος  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΕΑΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ 2008

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής εργασίας αντικείμενο της οποίας γίνεται μια τριώροφη κατασκευή η οποία βρίσκεται υπο εξέταση στο εργαστήριο ELSA του Joint Research Center (JRC) στην Ιταλία, θα εκτιμήσουμε τη συμπεριφορά της χρησιμοποιώντας μέθοδο ανάλυσης που να προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο τη συμπεριφορά του φορέα κατά τη σεισμική δράση. Η εμφάνιση διαρροής του οπλισμού σε στοιχεία του φέροντος οργανισμού θα πρέπει να προσομοιωθεί με πλαστικές αρθρώσεις, που εμφανίζονται διαδοχικά με την αύξηση του φορτίου και οδηγούν σε ανακατανομές της εντατικής κατάστασης. Επομένως η χρήση μη γραμμικής μεθόδου ανάλυσης αποτελεί μονόδρομο.

Στόχος μας είναι να βάλλουμε τη κατασκευή με τρεις σεισμούς σχεδιασμού, πιθανότητας υπέρβασης 2%, 10% και 50% σε 50 έτη. Στα πλαίσια της ανάλυσης θα υπολογισθούν απαιτήσεις μέγιστων σχετικών μετακινήσεων οι οποίες ακολούθως θα αξιοποιηθούν δίνοντας μας εικόνα για το κόστος κύκλου ζωής της κατασκευής.

Εν συνεχεία θα κληθούμε να εντοπίσουμε τα σημεία τρωτότητας της κατασκευής και να προβούμε σε πράξεις ενίσχυσης της βληθείσας υφισταμένης κατασκευής αφού προηγουμένως από κατάλληλη διαδικασία θα έχουμε εκτιμήσει την απομείωση αντοχής της κατασκευής από το δυσμενέστερο προγενέστερο σεισμικό γεγονός. Η επέμβαση ενίσχυσης θα έχει επιπτώσεις όπως αναμένεται στο κόστος ζωής της κατασκευής (LCC) και θα πάρει τη μορφή ινοπλισμένων πολυμερών FRPs.

© 2008

του

ΜΗΤΣΕΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

## **ΑΦΙΕΡΩΣΕΙΣ**

Στην οικογένεια μου που χωρίς αυτή η παρούσα εργασία όπως και η εν γένει παρουσία μου στους ακαδημαϊκούς στίβους θα ήταν αδύνατη.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ευχαριστώ θερμά τον Δρ. Φραγκιαδάκη Μιχαήλ για τη καθοδήγηση και τη συμβουλευτική που μου παρείχε τόσο κατά τη διάρκεια της παρούσας Διπλωματικής εργασίας όσο και κατά τα χρόνια που υπήρξα φοιτητής του.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ σε δύο σπουδαίους ακαδημαϊκούς Δασκάλους μου τον Επίκουρο Καθηγητή Δρ.Σοφιανόπουλο Δημήτριο και τον αξιότιμο Καθηγητή Δρ.Λιακόπουλο Αντώνιο.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ΑΦΙΕΡΩΣΕΙΣ.....	iv
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	v
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	x
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	xi
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ FRP (ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ)

1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Υλικά.....	1
1.3 Ιδιότητες.....	3
1.4 Συστήματα Ενίσχυσης.....	4
1.5 Τεχνικές Εφαρμογής.....	5
1.5.1 Βασική Τεχνική.....	5
1.5.2 Ειδικές Τεχνικές.....	5
1.6 Προδιαγραφές – Κανονισμοί	
1.6.1 Επικόλληση.....	5
1.6.2 Προσωπικό – Εξοπλισμός.....	6
1.6.3 Προσωρινή Αποθήκευση.....	6
1.7 Ενδεικτικές Εφαρμογές	
1.7.1 Καμπτική Ενίσχυση.....	6
1.7.1.1 Φύση Προβλήματος – Απαιτήσεις.....	6
1.7.1.2 Πρόταση.....	7
1.7.1.3 Εφαρμογή.....	7
1.7.1.4 Παρατηρήσεις.....	7
1.7.2 Ενίσχυση σε Τέμνουσα.....	8
1.7.2.1 Φύση Προβλήματος – Απαιτήσεις.....	8
1.7.2.2 Πρόταση.....	8
1.7.2.3 Εφαρμογή.....	9
1.7.2.4 Παρατηρήσεις.....	10
1.7.3 Περίσφιξη Υποστυλώματος.....	10
1.7.3.1 Φύση Προβλήματος – Απαιτήσεις.....	10
1.7.3.2 Πρόταση.....	11
1.7.3.3 Εφαρμογή.....	11
1.7.3.4 Παρατηρήσεις.....	12
1.7.4 Επισκευή Στοιχείων μετά από σεισμό.....	12
1.7.4.1 Τυπικοί βαθμοί βλάβης που επισκευάζονται με εφαρμογές FRP.....	12
1.7.4.2 Μέθοδοι επισκευών με FRP.....	12
1.7.4.3 Παρατηρήσεις.....	13
1.8 Απαιτήσεις Ποιοτικών Ελέγχων και Δοκιμών	
1.8.1 Οπτικός έλεγχος.....	13
1.8.2 Κρουστικός Έλεγχος.....	13
1.8.3 Έλεγχος Πρόσφυσης.....	13
Βιβλιογραφία.....	19



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ-ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

2.1 Εισαγωγή.....	1
2.2 Αποτίμηση Σεισμικής Βλάβης.....	2
2.3 Πιθανοτική Εξάρτηση Επιπέδων Επικινδυνότητας.....	4
2.4 Βασικό Κριτήριο.....	5
2.5 Ανάλυση βάση Επιβολής Μετακινήσεων σε Διάφορα Επίπεδα Επινδυνότητας.....	6
2.6 Γενική Διαδικασία Ανάλυσης.....	7
Βιβλιογραφία.....	11

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΣΤΑΤΙΚΗ ΥΠΕΡΩΘΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – PUSH OVER

3.1 Εισαγωγή.....	1
3.2 Στατική Μη-Γραμμική (Υπερωθητική) Ανάλυση.....	1
3.2.1 Περιγραφή της Μεθόδου.....	2
3.2.2 Στοχευόμενη Μετακίνηση.....	3
3.2.2.1 Μέθοδος του συντελεστή μετακίνησης.....	4
3.2.2.2 Διγραμμική απεικόνιση καμπύλης ικανότητας.....	6
3.3 Κριτική ματιά στη Στατική Μη-Γραμμική Ανάλυση.....	6
3.4 Γενικές παρατηρήσεις σχετικά με τις μεθόδους ανάλυσης.....	8
Βιβλιογραφία.....	10

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΚΟΣΤΟΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (LIFE CYCLE COST)

4.1 Εισαγωγή.....	1
4.2 Ορισμοί.....	1
4.3 Υπολογισμός του Κόστους Κύκλου Ζωής.....	2
Βιβλιογραφία.....	5

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΕΦΑΡΜΟΓΗ

5.1 Εισαγωγή.....	1
5.2 Είσοδος Γεωμετρίας και Ιδιοτήτων Υλικών Κατασκευής στο SeismoStruct .....	3
5.3 Αποτελέσματα Αναλύσεων για την υφισταμένη κατάσταση.....	5
5.3.1 Αποτελέσματα Push Over αναλύσεων σε όρους μετακινήσεων.....	5
5.3.2 Καμπύλη ικανότητας της κατασκευής.....	6
5.3.3 Υπολογισμός του Κόστους Κύκλου ζωής της Κατασκευής.....	7

5.4 Απομείωση αντοχής υφισταμένης κατασκευής.....	8
5.4.1 Απαίτηση Καμπυλότητας από Στοιχεία της Κατασκευής.....	8
5.4.2 Εφαρμογή προγράμματος XTRACK της Imbsen software systems.....	9
5.4.3 Επεξεργασία – Αξιοποίηση αποτελεσμάτων XTRACK.....	9
5.5 Είσοδος Απομειωμένου Φορέα στο SeismoStruct.....	10
5.6 Αποτελέσματα Αναλύσεων για την Απομειωμένη κατάσταση.....	10
5.6.1 Αποτελέσματα Push Over αναλύσεων σε όρους μετακινήσεων.....	10
5.6.2 Καμπύλη ικανότητας της βληθείσας κατασκευής.....	11
5.6.3 Υπολογισμός του Κόστους Κύκλου ζωής της Βληθείσας Κατασκευής.....	12
5.7 Ενίσχυση βληθείσας κατασκευής με χρήση ινοπλισμένων πολυμερών FRPs.....	13
5.7.1 Λεπτομέρειες υπολογισμού στρώσεων φύλλων FRPs.....	15
5.8 Ανάπτυξη Σεναρίων επέμβασης.....	15
5.8.1 Ανάπτυξη Πρώτου Σεναρίου.....	15
5.8.1.1 Αποτελέσματα Αναλύσεων για την Ενισχυμένη κατάσταση.....	16
5.8.1.2 Καμπύλη ικανότητας της ενισχυμένης κατασκευής (Σενάριο Α).....	17
5.8.1.3 Υπολογισμός του Κόστους Κύκλου ζωής της Ενισχυθείσας Κατασκευής.....	17
5.8.2 Ανάπτυξη Δευτέρου Σεναρίου.....	18
5.8.2.1 Αποτελέσματα Αναλύσεων για την Ενισχυμένη κατάσταση.....	19
5.8.2.2 Καμπύλη ικανότητας της ενισχυμένης κατασκευής (Σενάριο Β).....	20
5.8.2.3 Υπολογισμός του Κόστους Κύκλου ζωής της Ενισχυθείσας Κατασκευής.....	20
5.8.3 Ανάπτυξη Τρίτου Σεναρίου.....	21
5.8.3.1 Αποτελέσματα Αναλύσεων για την Ενισχυμένη κατάσταση.....	22
5.8.3.2 Καμπύλη ικανότητας της ενισχυμένης κατασκευής (Σενάριο Γ).....	22

5.8.3.3 Υπολογισμός του Κόστους Κύκλου ζωής της Ενισχυθείσας Κατασκευής .....	23
5.8.4 Ανάπτυξη Τέταρτου Σεναρίου.....	21
5.8.4.1 Αποτελέσματα Αναλύσεων για την Ενισχυμένη κατάσταση.....	25
5.8.4.2 Καμπύλη ικανότητας της ενισχυμένης κατασκευής (Σενάριο Δ).....	25
5.8.4.3 Υπολογισμός του Κόστους Κύκλου ζωής της Ενισχυθείσας Κατασκευής .....	26
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΚΡΙΣΕΙΣ</b>	
6.1 Ανασκόπηση - Συμπεράσματα.....	1
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>1</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι – ΣΧΕΔΙΑ ΖΟΡΟΦΗΣ.....</b>	<b>1</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ – ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SEISMOSTRUCT.....</b>	<b>1</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ – ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ XTRACT.....</b>	<b>1</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙV – ΑΠΟΜΕΙΩΣΕΙΣ ΚΑΜΠΤΙΚΩΝ ΔΥΣΚΑΜΨΙΩΝ.....</b>	<b>1</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Ενδεικτικές ιδιότητες ιών (πηγή Τριανταφύλλου,2004). . . . .	1-3
Πίνακας 1.2: Ενδεικτικές ιδιότητες εποξειδικών ρητινών σύγκριση με σκυρόδεμα και χάλυβα .	1-3
Πίνακας 2.1: Περιγραφή των επιπέδων συμπεριφοράς. . . . .	2-4
Πίνακας 2.2: Πιθανοτικά σεισμικά συμβάντα (SEOC2). . . . .	2-5
Πίνακας 3.1: Τιμές Συντελεστού Μετατροπής C0 – FEMA 356. . . . .	3-4
Πίνακας 3.2: Τιμές Συντελεστού Μετατροπής C2 (πηγή FEMA 356) . . . . .	3-5
Πίνακας 4.1 Καταστάσεις βλάβης, όρια μέγιστων σχετικών μετακινήσεων και κόστος για κάθε οριακή κατάσταση ( $\Delta \equiv \theta$ ) . . . . .	4-3
Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα Push over analysis (μετακινήσεις) - 50% σε 50 έτη. . . . .	5-5
Πίνακας 5.2 Συνδυασμοί Δράσεων – εφαρμογή SRSS. . . . .	5-5
Πίνακας 5.3 Συνολική παρουσίαση max Drifts υφισταμένης κατάστασης. . . . .	5-5
Πίνακας 5.4 Υπολογισμός του Κόστους Κύκλου Ζωής της Κατασκευής. . . . .	5-7
Πίνακας 5.5 Αποτελέσματα απαίτησης καμπυλότητας για το δυσμενέστερο σεισμικό γεγονός στην ασθενέστερη κατεύθυνση εξέτασης NX. (πολλαπλ. x 100) . . . . .	5-8
Πίνακας 5.6 Συνολική παρουσίαση max Drifts υφισταμένης κατάστασης. . . . .	5-10
Πίνακας 5.7 Υπολογισμός του Κόστους Κύκλου Ζωής της Βληθείσας Κατασκευής. . . . .	5-12
Πίνακας 5.8 Συνολική παρουσίαση max Drifts ενισχυμένης κατάστασης. . . . .	5-16
Πίνακας 5.9 Κόστος Κύκλου Ζωής της Ενισχυθείσας Κατασκευής. . . . .	5-18
Πίνακας 5.10 Συνολική παρουσίαση max Drifts ενισχυμένης κατάστασης. . . . .	5-19
Πίνακας 5.11 Κόστος Κύκλου Ζωής της Ενισχυθείσας Κατασκευής. . . . .	5-20
Πίνακας 5.12 Συνολική παρουσίαση max Drifts ενισχυμένης κατάστασης. . . . .	5-22
Πίνακας 5.13 Κόστος Κύκλου Ζωής της Ενισχυθείσας Κατασκευής. . . . .	5-23
Πίνακας 5.14 Συνολική παρουσίαση max Drifts ενισχυμένης κατάστασης. . . . .	5-25
Πίνακας 5.15 Κόστος Κύκλου Ζωής της Ενισχυθείσας Κατασκευής. . . . .	5-26

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

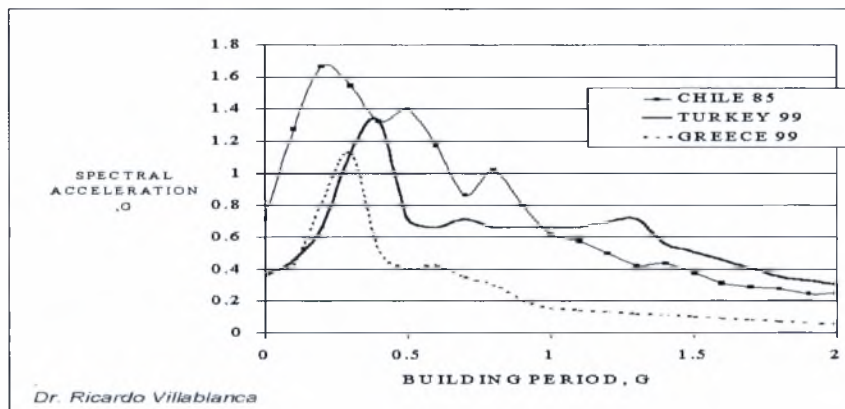
<b>Σχήμα 1.1:</b> Συνήθειες ίνες άνθρακα και γυαλιού και ινοπλισμένα πολυμερή (FRP). . . . .	1-2
<b>Σχήμα 1.2 :</b> Σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης σε εφελκυσμό, για σύνθετα υλικά και χάλυβα. . . .	1-4
<b>Σχήμα 1.3:</b> Αστοχία υποστυλώματος - Συμπεριφορά ενισχυμένου υποστυλώματος. . . . .	1-5
<b>Σχήμα 1.4:</b> Διατάξεις Μανδύων από FRP. . . . .	1-12
<b>Σχήμα 1.5:</b> Τοποθέτηση υφάσματος FRP. . . . .	1-13
<b>Σχήμα 1.6:</b> Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων (σ-ε) για σκυρόδεμα περισφιγμένο με FRP ή χαλύβδινα στοιχεία. . . . .	1-15
<b>Σχήμα 2.1:</b> Στόχος Συμπεριφοράς από το Vision 2000 του SEAOC [2] – Επίπεδα επιτελεστικότητας για διάφορα επίπεδα έντασης, ο μη αποδεκτή συμπεριφορά,,* αποδεκτή συμπεριφορά. .	2-5
<b>Σχήμα 2.2:</b> Καθορισμός Ποσοστιαίας Σχετικής Μετακίνησης Ορόφου. . . . .	2-8
<b>Σχήμα 2.3:</b> Επιβολή πλευρικών δυνάμεων ανα κόμβο. . . . .	2-9
<b>Σχήμα 2.4 :</b> Φάσματα Σχεδιασμού Σεισμικών φαινομένων με πιθανότητες υπέρβασης 2% , 10% και 50% στα 50 έτη. . . . .	2-10
<b>Σχήμα 2.5:</b> Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Στόχου για τρία επίπεδα Επιτελεστικότητας. .	2-10
<b>Σχήμα 3.1</b> Καμπύλη Αντίστασης – <i>Capacity Curve</i> . . . . .	3-3
<b>Σχήμα 3.2:</b> Μετατροπή της καμπύλης ικανότητας σε διγραμμική καμπύλη (πηγή FEMA 356) .	3-6
<b>Σχήμα 5.1 (a) Πρόοψη, (b) Κάτοψη.</b> . . . . .	5-1
<b>Σχήμα 5.2 (a) Τυπική όπλιση δοκών και υποστυλωμάτων.</b> . . . . .	5-2
<b>Σχήμα 5.3:</b> 3Δ Απεικόνιση του υπό εξέταση 3-ορόφου μοντέλου - Εργαστήριο Trees. . . . .	5-2
<b>Σχήμα 5.4</b> Γράφημα μετακινήσεων υφισταμένης κατάστασης για κάθε σεισμικό φαινόμενο (αξονας εξέτασης <i>NX</i> ). . . . .	5-6
<b>Σχήμα 5.5</b> Καμπύλη Ικανότητας 3όροφης κατασκευής. . . . .	5-6
<b>Σχήμα 5.6</b> Υπολογισμός ετήσιας πιθανότητας υπέρβασης για κάθε επίπεδο επικινδυνότητας. .	5-7
<b>Σχήμα 5.7</b> Αρίθμηση Υποστυλωμάτων και Δοκών μεταξύ Ισογείου και 1 <sup>ου</sup> ορόφου. . . . .	5-9
<b>Σχήμα 5.8</b> Γράφημα μετακινήσεων απομειωμένης κατάστασης για κάθε σεισμικό φαινόμενο (αξονας εξέτασης <i>NX</i> ) . . . . .	5-11
<b>Σχήμα 5.9</b> Καμπύλη Ικανότητας 3όροφης βληθείσας κατασκευής. . . . .	5-11
<b>Σχήμα 5.10</b> Καμπύλες Ικανότητας 3όροφης κατασκευής. . . . .	5-12
<b>Σχήμα 5.11</b> Υπολογισμός ετήσιας πιθανότητας υπέρβασης κάθε επίπεδο επικινδυνότητας. .	5-13
<b>Σχήμα 5.12</b> Τα ακραία υποστυλώματα στα οποία εκλέχθηκε να εφαρμοσθούν ινοπλισμένα πολυμερή FRPs (Σενάριο Α). . . . .	5-14
<b>Σχήμα 5.13</b> Εισαγωγή παραμέτρων για εύρεση πάχους ενίσχυσης. . . . .	5-15
<b>Σχήμα 5.14</b> Εξαγωγή ορισμένων στοιχείων. . . . .	5-16
<b>Σχήμα 5.15</b> Εξαγωγή αριθμού στρώσεων που πρέπει να εφαρμοσθεί επι της διατομής. . . . .	5-16

<b>Σχήμα 5.16</b> Γράφημα μετακινήσεων ενισχυμένης κατάστασης για κάθε σεισμικό φαινόμενο (αξονας εξέτασης $NX$ ) (A) . . . . .	5-17
<b>Σχήμα 5.17</b> Καμπύλες Ικανότητας βληθείσας και ενισχυμένης κατασκευής. . . . .	5-17
<b>Σχήμα 5.18</b> Εισαγωγή παραμέτρων για εύρεση πάχους ενίσχυσης. . . . .	5-18
<b>Σχήμα 5.19</b> Εξαγωγή ορισμένων στοιχείων. . . . .	5-18
<b>Σχήμα 5.20</b> Εξαγωγή αριθμού στρώσεων που πρέπει να εφαρμοσθεί επι της διατομής. . . . .	5-19
<b>Σχήμα 5.21</b> Γράφημα μετακινήσεων ενισχυμένης κατάστασης για κάθε σεισμικό φαινόμενο (αξονας εξέτασης $NX$ ) (B) . . . . .	5-19
<b>Σχήμα 5.22</b> Καμπύλες Ικανότητας βληθείσας και ενισχυμένης κατασκευής. . . . .	5-20
<b>Σχήμα 5.23</b> Εισαγωγή παραμέτρων για εύρεση πάχους ενίσχυσης. . . . .	5-21
<b>Σχήμα 5.24</b> Εξαγωγή ορισμένων στοιχείων. . . . .	5-21
<b>Σχήμα 5.25</b> Εξαγωγή αριθμού στρώσεων που πρέπει να εφαρμοσθεί επι της διατομής. . . . .	5-21
<b>Σχήμα 5.26</b> Γράφημα μετακινήσεων ενισχυμένης κατάστασης για κάθε σεισμικό φαινόμενο (αξονας εξέτασης $NX$ ) (Γ) . . . . .	5-22
<b>Σχήμα 5.27</b> Καμπύλες Ικανότητας βληθείσας και ενισχυμένης κατασκευής. . . . .	5-22
<b>Σχήμα 5.28</b> Εισαγωγή παραμέτρων για εύρεση πάχους ενίσχυσης. . . . .	5-23
<b>Σχήμα 5.29</b> Εξαγωγή ορισμένων στοιχείων. . . . .	5-23
<b>Σχήμα 5.30</b> Εξαγωγή αριθμού στρώσεων που πρέπει να εφαρμοσθεί επι της διατομής. . . . .	5-24
<b>Σχήμα 5.31</b> Απεικόνιση των τριών υπο ενίσχυση υποστυλωμάτων. . . . .	5-24
<b>Σχήμα 5.32</b> Γράφημα μετακινήσεων ενισχυμένης κατάστασης για κάθε σεισμικό φαινόμενο (αξονας εξέτασης $NX$ ) (Δ) . . . . .	5-25
<b>Σχήμα 5.33</b> Καμπύλες Ικανότητας βληθείσας και ενισχυμένης κατασκευής. . . . .	5-25
<b>Σχήμα 6.1</b> Καμπύλες Ικανότητας όλων των υπο εξέταση σεναρίων επέμβασης. . . . .	6-1
<b>Σχήμα 6.2</b> Προφίλ Σχετικών μετακινήσεων όλων των σεναρίων ενίσχυσης (ασθενέστερος άξονας $NX$ , 2%_50). . . . .	6-2



## Εισαγωγικό Σημείωμα

Ο τελευταίος σεισμός της Αθήνας το Σεπτέμβριο του 99 μας θύμισε οτι ένας σημαντικός αριθμός κτιρίων παρουσιάζει μειωμένη ανθεκτικότητα, είτε λόγω σχεδιασμού τους (μαλακοί όροφοι, παλαιοί κανονισμοί κλπ.), είτε λόγω κατασκευής (ποιότητα ή και κατάσταση υλικών). Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο σεισμός αυτός, συγκρινόμενος με άλλους στην ευρύτερη περιοχή π.χ. σεισμός της Τουρκίας, ήταν σχετικά μικρός και σε φασματική επιτάχυνση και σε διάρκεια, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι θα πρέπει οπωσδήποτε να ξεκινήσουμε τώρα μια προσπάθεια για την αύξηση της ασφάλειας των κατασκευών μας και την αντιμετώπιση του θέματος από μια γενικότερη οπτική, αυτή του συνολικού κόστους κατασκευής ,συμπεριλαμβανομένου του αρχικού αλλά και του κόστους κύκλου ζωής. Οι άξονες που θα κινηθούμε θα πρέπει να είναι πρώτα ο εντοπισμός της τρωτότητας των κατασκευών και εν συνεχεία ο προσδιορισμός των κατάλληλων επεμβάσεων ενίσχυσης ουτως ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή σχέση οικονομίας και ασφάλειας. Φυσικά οι ανωτέρω περιγραφθείσες διαδικασίες θα αξιολογηθούν υπο το πρίσμα του συνολικού κόστους ζωής (Life Cycle Cost).



Σχήμα 1: Φασματικές αποκρίσεις Αθήνας 99, Τουρκίας 99 και Χιλής 85

Στα πλαίσια αυτής της προσπάθειας εκπονείται η παρούσα Διπλωματική εργασία αντικείμενο της οποίας γίνεται μια τριώροφη κατασκευή η οποία βρίσκεται υπο εξέταση στο εργαστήριο ELSA του Joint Research Center (JRC) στην Ιταλία. Πρόκειται για μια τυπική παλαιά ευρωπαϊκή κατασκευή, η οποία οικοδομήθηκε



προκειμένου να ανταπεξέλθει σε απαιτήσεις περασμένων κανονισμών. Η εκλογή ωστόσο του συγκεκριμένου δείγματος μόνο τυχαία δε μπορεί να θεωρηθεί, μιας και η κατασκευή παρουσιάζει πλήθος τυπικών προβλημάτων όπως έλλειψη οπλισμών, ανεπάρκεια περίσφιγξης, α-κανονικότητα και αδυνάτους κόμβους. Το κτήριο κατασκευάστηκε για φορτία βαρύτητας λαμβάνοντας για τα μεν μόνιμα φορτία τιμή ίση με  $0.5 \text{ kN/m}^2$  για τα δε κινητά τιμή ίση με  $2.0 \text{ kN/m}^2$ . Η φιλοσοφία σχεδιασμού του υπό όψη κτηρίου είναι αντιπροσωπευτική παλαιότερων κατασκευών που ανεγέρθησαν στη χώρα μας μεταξύ 1954 και 1985.

Προκειμένου δε να εκτιμήσουμε τη συμπεριφορά της θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μεθόδους ανάλυσης που να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τη συμπεριφορά του φορέα κατά τη σεισμική δράση. Άρα η χρήση απλής ελαστικής ανάλυσης δεν αρκεί. Η εμφάνιση διαρροής του οπλισμού σε στοιχεία του φέροντος οργανισμού θα πρέπει να προσομοιωθεί με πλαστικές αρθρώσεις, που εμφανίζονται διαδοχικά με την αύξηση του φορτίου και οδηγούν σε ανακατανομές της εντατικής κατάστασης. Επίσης θα πρέπει να εκτιμηθούν τα μεγέθη των σχετικών μετακινήσεων και να συγκριθούν με τα αποδεκτά όρια ουτως ώστε να εφοδιαστούμε με μια εικόνα του κόστους των ζημιών από τα σεισμικά γεγονότα που αναμένεται να πλήξουν τη κατασκευή.

Στόχος μας είναι να βάλλουμε τη κατασκευή με τρεις σεισμούς σχεδιασμού, πιθανότητας υπέρβασης 2%, 10% και 50% σε 50 έτη. Στα πλαίσια της ανάλυσης θα υπολογισθούν μέγιστες σχετικές παρατηρημένες μετακινήσεις οι οποίες ακολούθως θα αξιοποιηθούν δίνοντας μας εικόνα για το κόστος κύκλου ζωής της κατασκευής.

Εν συνεχεία θα κληθούμε να εντοπίσουμε τα σημεία τρωτότητας της κατασκευής και να προβούμε σε πράξεις ενίσχυσης της βληθείσας υφισταμένης κατασκευής αφού προηγουμένως από κατάλληλη διαδικασία θα έχουμε εκτιμήσει την απομείωση αντοχής της κατασκευής από το δυσμενέστερο σεισμικό γεγονός. Η επέμβαση ενίσχυσης θα έχει επιπτώσεις όπως αναμένεται στο κόστος ζωής της κατασκευής (LCC).

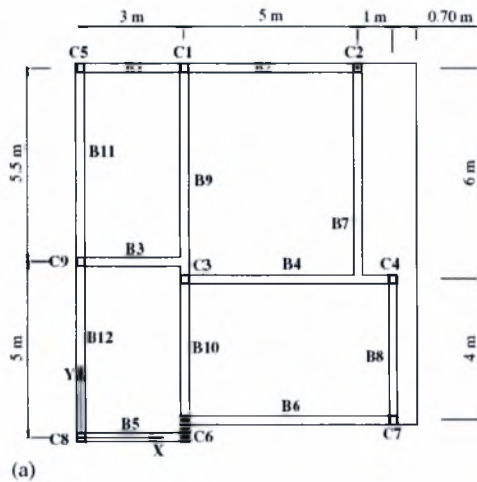
Τα τελευταία χρονιά έχουν αναπτυχθεί οικονομικές μέθοδοι επεμβάσεων είτε περιορισμένης έκτασης, είτε ευρύτερης, που συμβάλλουν στη βελτίωση της συμπεριφοράς του φορέα. Κλασσικά παραδείγματα κατασκευών που χρήζουν ενίσχυσης βάσει γενικότερου ανασχεδιασμού είναι οι τύπου pilotis χωρίς στοιχεία δυσκαμψίας (τοιχώματα), άλλα και οι εύκαμπτες πλαισιακές κατασκευές, κυρίως σε περίπτωση που έχουν μεγάλη μάζα. Μια τρίτη κατηγορία είναι αυτές που εμφανίζουν





στροφική συμπεριφορά και όχι μεταθετική, λόγω έκκεντρης θέσης στην κάτοψη των στοιχείων δυσκαμψίας που διαθέτουν (απόσταση του κέντρου μάζας από το κέντρο δυσκαμψίας). Στη παρούσα Διπλωματική εργασία η επέμβαση αυτή πήρε τη μορφή χρήσης ινοπλισμένων πολυμερών FRP , μιας μεθόδου σχετικώς καινούρια για τα ελληνικά δρώμενα, η οποία αποσκοπεί αποκλειστικά στην αύξηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας της κατασκευής. Η συνεισφορά της εν λόγω τεχνικής στη δυσκαμψία της κατασκευής θεωρείται ελάχιστη και ως εκ τούτου δε προσδωκούμε ούτε επιδιώκουμε βελτίωση στη δυσκαμψία της.

Ως εργαλεία ανάλυσης θα χρησιμοποιηθούν τα προγράμματα SeismoStruct της SeismoSoft, το XTract της TRC και το FRPs strength του Πανεπιστημίου Πατρών.



Σχήμα 1: (a) Κάτοψη (b) 3Δ Απεικόνιση της υπο εξέταση 3-όροφης οικοδομής

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ FRP (ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ)

#### 1.1 Εισαγωγή

Η ενίσχυση – αποκατάσταση της φέρουσας ικανότητας κατασκευών από σκυρόδεμα μέχρι πρόσφατα αποτελούσε μείζον πρόβλημα, καθώς απαιτούσε σημαντικό χρόνο, χώρο και κόπο για να επιλυθεί. Κύριο μειονέκτημα των έως τώρα επεμβάσεων ήταν η δυσκολία εφαρμογής τους. Η επιστημονική έρευνα στο πεδίο αυτό κατέληξε στην ανάπτυξη μιας νέας τεχνικής ενίσχυσης με χρήση σύνθετων υλικών που αποτελούνται από το συνδυασμό ινών (π.χ. άνθρακα, γυαλιού, αραμιδίου) σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης ή πλεγμένες σε ύφασμα ώστε να σχηματίζουν αντίστοιχα δύσκαμπτα ελάσματα ή εύκαμπτα υφάσματα μίας ή δύο διευθύνσεων (Ινοπλισμένα πολυμερή – Fiber Reinforced Polymers- FRP). Η ενίσχυση με FRP μπορεί να εφαρμοσθεί σε στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως δοκοί, πλακοδοκοί πλάκες, υποστυλώματα, τοιχία, κόμβοι, σε στοιχεία από φέρουσα τοιχοποιία καθώς και σε στοιχεία από ξύλο. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τένοντες ή ως μέσο ενίσχυσης στο σκυρόδεμα, είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό με προεντεταμένο χάλυβα ή χάλυβα οπλισμού. Η εφαρμογή τους ως οπλισμός ενίσχυσης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος ή φέρουσας τοιχοποιίας συνίσταται στην μέσω εποξειδικών ρητινών επικόλληση τους σε εξωτερικές επιφάνειες δομικών μελών με προσανατολισμό ινών τέτοιο ώστε να παραλαμβάνουν εφελκυστικές δυνάμεις.

#### 1.2 Υλικά

Τα βασικά συστατικά των σύνθετων υλικών ως σύστημα ενίσχυσης είναι: οι ίνες (Σχ.1) σε πολυμερική μήτρα και η κόλλα εφαρμογής τους σε επιφάνειες σκυροδέματος ή τοιχοποιίας. Πιο αναλυτικά:

## Ίνες

Στον κλάδο των οικοδομικών και τεχνικών έργων οι πιο κοινές χρησιμοποιούμενες ίνες διαμέτρου 5-25 $\mu\text{m}$  είναι (Πιν.1):

α) Οι ίνες γυαλιού (με πυκνότητα 2300-2400 kg/m<sup>3</sup>). Υπάρχουν 4 τύποι υαλονημάτων: τύπου E με μειονέκτημα τη μείωση της αντοχής στο αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος, τύπου Z ή AR με μεγάλη αντοχή σε αλκαλικό περιβάλλον, τύπου S με υψηλή αντοχή και υψηλό μέτρο ελαστικότητας.

β) Οι ίνες άνθρακα (με πυκνότητα 1800-1900 kg/m<sup>3</sup>). Οι τύποι των ανθρακονημάτων διαφέρουν ανάλογα αν παρασκευάζονται από θερμική κατεργασία του πολυακρυλονιτριλίου (υψηλής εφελκυστικής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας) είτε μέσω απόσταξης κάρβουνου. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωριστά ή από κοινού με τις ίνες γυαλιού ως υβρίδιο για να αυξηθεί η ακαμψία ενός δομικού μέλους.

γ) Οι ίνες αραμιδίου (με πυκνότητα 1450 kg/m<sup>3</sup>)- διακρίνονται ανάλογα αν προέρχονται από αρωματικό πολυαμίδιο (Κέβλαρ 29-χαμηλού μέτρου ελαστικότητας, Κέβλαρ 49-υψηλού μέτρου ελαστικότητας) ή αρωματικό πολυαιθεραμίδιο, με κύριο πλεονέκτημα την πολύ καλή συμπεριφορά σε κρουστικά φορτία.



**Σχήμα 1.1:** Συνήθεις ίνες άνθρακα και γυαλιού και ινοπλισμένα πολυμερή (FRP)

## Μήτρα

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι πολυμερών που χρησιμοποιούνται ως μήτρες: θερμοσκληρυνόμενα και θερμοπλαστικά. Τα θερμοσκληρυνόμενα χρησιμοποιούνται στον κλάδο των οικοδομικών και τεχνικών έργων και είναι οι εποξειδικές ρητίνες και σπανιότερα ο πολυεστέρας ή βινυλεστέρας. Οι εποξειδικές ρητίνες υπερέχουν των άλλων τύπων μήτρας λόγω των εξαιρετικών μηχανικών χαρακτηριστικών και της μεγάλης ανθεκτικότητας σε δυσμενείς περιβαλλοντικές επιδράσεις (Πιν.2).

Προσφάτως έχουν γίνει προσπάθειες αντικατάστασης των πολυμερικών μητρών με υλικά βασισμένα στο τσιμέντο (τσιμεντο- κονιάματα τροποποιημένα με πολυμερή, TRM).

### Κόλλα

Κατά κανόνα χρησιμοποιείται ως κόλλα εποξειδική ρητίνη δυο συστατικών που εφαρμόζεται μεταξύ του υποστρώματος και του σύνθετου υλικού, εξασφαλίζοντας έτσι τη συνεργασία τους και τη μεταφορά τάσεων από το πρώτο στο δεύτερο. Η χρήση εποξειδικών ρητινών στις κατασκευές προϋποθέτει την κατανόηση τριών βασικών εννοιών: χρόνος εργασιμότητας (pot life), χρόνος εφαρμογής (open time), θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης  $T_g$  (glass transition temperature).

**Πίνακας 1.1:** Ενδεικτικές ιδιότητες ινών (πηγή Τριανταφύλλου, 2004)

	Μέτρο ελαστικότητας( $\text{KN/mm}^2$ )	Εφελκυστική αντοχή( $\text{N/mm}^2$ )	Οριακή παραμόρφωση εφελκυστικής αστοχίας (%)
<b>Ανθρακας</b>			
Υψηλής αντοχής	215-235	3500-4800	1.4-2.0
Υπερ-υψηλής αντοχής	215-235	3500-6000	1.5-2.3
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	350-500	2500-3100	0.5-0.9
Υπερ-υψηλού μέτρου ελασ/τας	500-700	2100-2400	0.2-0.4
<b>Γυαλί</b>			
E	70-75	1900-3000	3.0-4.5
Z	70-75	1900-3000	3.0-4.5
S	85-90	3500-4800	4.5-5.5
<b>Αραμίδιο</b>			
Χαμηλού μέτρου ελαστικότητας(Κέβλαρ 29)	70-80	3500-4100	4.3-5.0
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας(Κέβλαρ 49. Twaron)	115-130	3500-4000	2.5-3.5

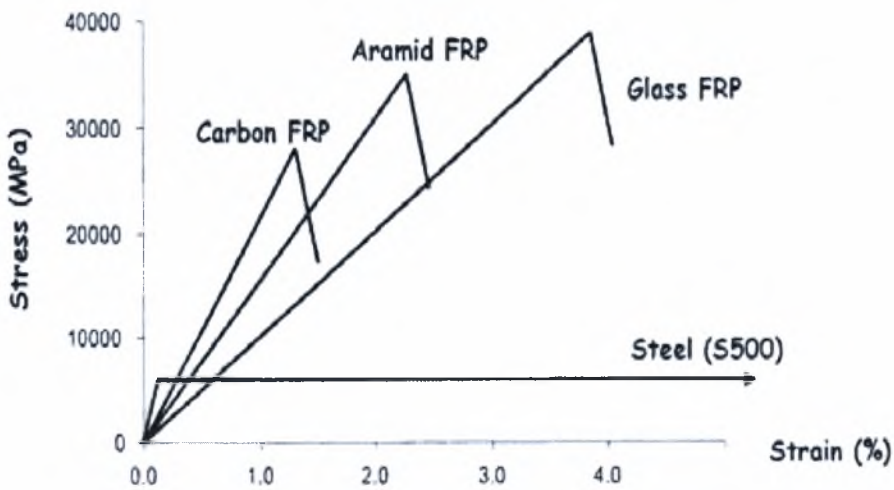
**Πίνακας 1.2:** Ενδεικτικές ιδιότητες εποξειδικών ρητινών και σύγκριση με σκυρόδεμα και χάλυβα

Ιδιότητα (σε 20°C)	Εποξειδική ρητίνη	Σκυρόδεμα	Χάλυβας
Πυκνότητα ( $\text{kg/m}^3$ )	1100-1700	2350	7800
Μέτρο ελαστικότητας ( $\text{KN/mm}^2$ )	0.5-20	20-50	205
Μέτρο διάτμησης ( $\text{KN/mm}^2$ )	0.2-8.0	8-21	80
Λόγος Poisson	0.3-0.4	0.2	0.3
Εφελκυστική αντοχή ( $\text{N/mm}^2$ )	9-30	1-4	200-600
Διατμητική αντοχή ( $\text{N/mm}^2$ )	10-30	2-5	150-400
Θλιπτική αντοχή ( $\text{N/mm}^2$ )	55-110	25-150	200-600
Οριακή παραμόρφωση σε εφελκυσμό(%)	0.5-5	0.015	20-25
Ενέργεια θραύσης ( $\text{Jm}^{-2}$ )-κατά προσέγγιση	200-1000	100	$10^5$ - $10^6$
Συντελεστής θερμικής διαστολής ( $10^{-6}/^\circ\text{C}$ )	25-100	11-13	10-15
Υδατοαπορροφητικότητα: 7ημ.-25°C (%κ.β.)	0.1-3	5	0
Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης( $^\circ\text{C}$ )	50-80	/	/

### 1.3 Ιδιότητες

Η μέθοδος εφαρμογής ενισχύσεων με σύνθετα υλικά πλεονεκτεί έναντι των συμβατικών μεθόδων (Σχ.2) διότι τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν:

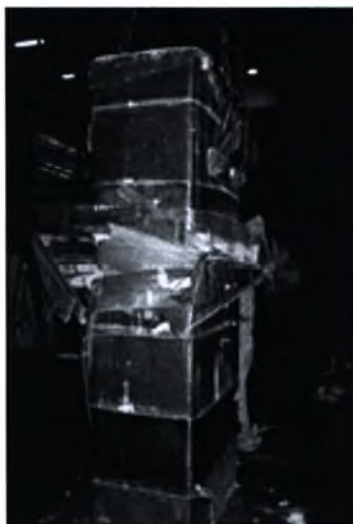
- Εξαιρετικά μεγάλη εφελκυστική αντοχή, (πολλαπλάσια του χάλυβα)
- Μικρό βάρος(1/4-1/5 του βάρους του χάλυβα)
- Αύξηση αντοχής και παραμορφωσιμότητας της κατασκευής δίχως μεταβολή της γεωμετρίας ή της δυσκαμψίας της
- Ανθεκτικότητα σε διαβρωτικά περιβάλλοντα και μεγάλη διάρκεια ζωής
- Διαθεσιμότητα σε πολύ μεγάλα μήκη



**Σχήμα 1.2 :** Σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης σε εφελκυσμό, για σύνθετα υλικά και χάλυβα

Με τη χρήση σύνθετων υλικών σε κατασκευές είναι δυνατή η αύξηση της αντοχής σε κάμψη και διάτμηση καθώς και η περίσφιξη θλιβομένων στοιχείων (αύξηση παραμορφωσιμότητας και αντοχής σκυροδέματος) (Σχ.3). Επίσης επιτυγχάνεται αύξηση της πλαστιμότητας περιοχών πλαστικών αρθρώσεων και ικανοποίηση των απαιτήσεων για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (μείωση των βελών κάμψης και της αναμενόμενης ρηγμάτωσης).

Επιπροσθέτως έχει αποδειχθεί ότι η αποκατάσταση και επανακατοίκηση κτιρίων συμφέρει να γίνεται με FRP κυρίως λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής που παρουσιάζουν και του ελάχιστου κόστους συντήρησης.



**Σχήμα 1.3:** Αστοχία υποστρώματος - Συμπεριφορά ενισχυμένου υποστρώματος

#### 1.4 Συστήματα Ενίσχυσης

Τα συστήματα ενίσχυσης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος ή φέρουσας ικανότητας με σύνθετα υλικά είναι γενικά δύο τύπων; α. “υγρής εφαρμογής”( ή επί τόπου σκλήρυνσης της μήτρας) και β. προκατασκευασμένα” (η σκλήρυνση τη μήτρας έχει προηγηθεί της εφαρμογής). Παρακάτω γίνεται συνοπτικά η παρουσίαση αυτών των συστημάτων.

Συστήματα υγρής εφαρμογής:

- Φύλλα (sheets) ή υφάσματα (fabrics) αποτελούμενα από συνεχείς ίνες μιας (κυρίως) διεύθυνσης, χωρίς μήτρα.
- Υφάσματα (fabrics) αποτελούμενα από συνέχεις ίνες σε δύο τουλάχιστον διευθύνσεις, χωρίς μήτρα.
- Φύλλα (sheets) ή υφάσματα (fabrics) αποτελούμενα από συνεχείς ίνες μίας διεύθυνσης προεμποτισμένα με ρητίνη σε μη σκληρυμένη μορφή.
- Φύλλα (sheets) ή υφάσματα (fabrics) αποτελούμενα από συνεχείς ίνες σε τουλάχιστον δύο διευθύνσεις, προεμποτισμένα με ρητίνη σε μη σκληρυμένη μορφή.
- Συνεχείς ίνες χωρίς μήτρα, συγκεντρωμένες σε μορφή νήματος, το οποίο εμποτίζεται με ρητίνη ενώ τυλίγεται στο υπό ενίσχυση δομικό μέλος.
- Προεμποτισμένες συνεχείς ίνες, συγκεντρωμένες σε μορφή νήματος (tow), το οποίο ενώ τυλίγεται στο υπό ενίσχυση δομικό μέλος, υφίσταται ενδεχομένως και πρόσθετο οπλισμό.

Προκατασκευασμένα Υλικά :

- Προκατασκευασμένα ευθύγραμμα ελάσματα (strips), τα οποία επικολούνται μέσω ρητίνης. Τα ελάσματα διατίθενται συνήθως σε μορφή ρολών “κουλούρες”, και παράγονται με τη μέθοδο εξελασης ή σπανιότερα της στρωμάτωσης.
- Προκατασκευασμένες ράβδοι (bars) κυκλικής ή συνήθως ορθογωνικής διατομής, οι οποίες τοποθετούνται σε επιφανειακές εγχοπές γεμισμένες με ρητίνη ή πολυμερή κονίαμα.
- Προκατασκευασμένα κελύφη (shells), μανδύες (jackets) ή γωνίες (angles), τα οποία επικολλούνται μέσω ρητίνης.

Σε γενικές γραμμές τα προκατασκευασμένα ελάσματα προτιμώνται έναντι των υφασμάτων (ή φύλλων) όταν η εφαρμογή γίνεται σε επίπεδες επιφάνειες (π.χ. καμπτική ενίσχυση δοκών ή πλακών, χιαστί ή οριζόντια διάταξη για τοιχοποιίες σε εντός επιπέδου τέμνουσα) και απαιτούνται σημαντικά πάχη, ενώ σε άλλες περιπτώσεις (π.χ. μανδύες υποστυλωμάτων, διατμητική ενίσχυση δοκών) η εφαρμογή υφασμάτων μέσω της υγρής μεθόδου είναι προτιμητέα.

### 1.5 Τεχνικές Εφαρμογής

Η επιλογή του τύπου, της μορφής και της μεθόδου εφαρμογής των σύνθετων υλικών εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως η γεωμετρία και οι διαστάσεις των ως προς ενίσχυση στοιχείων, το είδος της εντατικής τους καταπόνησης, οι περιβαλλοντικές συνθήκες, η εμπειρία του μηχανικού και του εργατικοτεχνικού προσωπικού καθώς και ο προϋπολογισμός της επέμβασης.

#### 1.5.1 Βασική Τεχνική

Η βασική τεχνική, η οποία είναι και η πλέον συνηθισμένη, περιλαμβάνει την δια χειρός επικόλληση είτε υφασμάτων (προεμποτισμένων με ρητίνη ή μη), είτε προκατασκευασμένων στοιχείων (π.χ. ελάσματα) σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος ή τοιχοποιίας, μέσω εποξειδικών ρητινών.

#### 1.5.2 Ειδικές Τεχνικές

Ακολουθώς παρατείθενται μερικές τέτοιες ειδικές τεχνικές:

- Αυτοματοποιημένη περιτύλιξη
- Εφαρμογή με προένταση
- Επιταχυμένη σκλήρυνση με θέρμανση

- Προκατασκευασμένα στοιχεία
- Εφαρμογή ράβδων εγκοπής
- Μηχανική στερέωση ελασμάτων με αγκύρια
- Πλέγματα συνεχών ινών σε ανόργανη μήτρα

## 1.6 Προδιαγραφές – Κανονισμοί

### 1.6.1 Επικόλληση

Αποδεκτά υλικά:

A. Για την εξομάλυνση της επιφάνειας του υποστρώματος, χρησιμοποιούνται μη συρικνούμενα τσιμεντοειδή κονιάματα ή εποξειδικές πάστες με συνάφεια και εφελκυστική αντοχή, τουλάχιστον κατά 50% μεγαλύτερη από την εφελκυστική αντοχή του υποστρώματος. Τα υλικά πρέπει να συνοδεύονται από αναλυτικά τεχνικά φυλλάδια του παραγωγού, υπόκειται σε έγκριση της Υπηρεσίας.

B. Η χρήση ελασμάτων από ανθρακονήματα υψηλού μέτρου ελαστικότητας δε συνίσταται, επειδή τα υλικά αυτά έχουν μικρή παραμορφωσιμότητα. Κρίσιμος παράγων είναι η θερμική αντοχή των ελασμάτων, η οποία ορίζεται ως η θερμοκρασία άνω της οποίας το πολυμερές και το συγκολλητικό υλικό αρχίζουν να αποδομούνται και να χάνουν τις μηχανικές τους ιδιότητες. Η κρίσιμη θερμοκρασία για τα ελάσματα CFRP κυμαίνεται μεταξύ 100°C - 300°C. Από θερμικής άποψης ασθενέστερο είναι το συγκολλητικό υλικό. Ο προσδιορισμός της θερμικής διαστολής των ελασμάτων γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο EN 1770:1998. Επισημαίνεται ότι η ενίσχυση με ινοπλισμένα πολυμερή δεν αίρει τυχόν άλλα προβλήματα του στοιχείου από οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως π.χ. διάβρωση του οπλισμού.

Γ. Για την επικόλληση των ινοπλισμένων υφασμάτων θα χρησιμοποιούνται εποξειδικές κόλλες χωρίς ανενεργούς διαλύτες με τα εξής χαρακτηριστικά:

- α) Εποξειδικές κόλλες δυο συστατικών (ρητίνη, σκληρυντής)
- β) Η κατ' όγκον αναλογία ανάμειξης σκληρυντή προς ρητίνη θα υπερβαίνει το 1:3
- γ) Το μέτρο ελαστικότητας του σκληρυμένου μίγματος δε θα είναι μικρότερο από το 1/30 του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος.
- δ) Οι αντοχές της κόλλας σε θλίψη και εφελκυσμό θα είναι τουλάχιστον 50% μεγαλύτερες των αντίστοιχων αντοχών του σκυροδέματος.

Οι απαιτήσεις για τα συγκολλητικά υλικά πρέπει να είναι σύμφωνα με το πρότυπο του EN 1504-4:2004 και το Δελτίο της FIB (Federation International du Beton).



### 1.6.2 Προσωπικό – Εξοπλισμός

Το τεχνικό προσωπικό που θα ασχοληθεί με την εφαρμογή της μεθόδου πρέπει να έχει αποδεδειγμένη εμπειρία (βεβαιώσεις) εργοδοτών, σε έργα επισκευών και ενισχύσεων. Πριν την έναρξη των εργασιών να γίνεται δοκιμαστική εφαρμογή, προκειμένου η προϊσταμένη αρχή να διαπιστώσει την ικανότητα του συνεργείου, το οποίο πρέπει να είναι πλήρως εξοπλισμένο.

### 1.6.3 Προσωρινή Αποθήκευση/ Φύλαξη

Ιδιαίτερη μέριμνα πρέπει να λαμβάνεται στην αποθήκευση των FRPs πριν την χρήση τους. Πρέπει να αποφεύγεται η άμεση τοποθέτησή τους σε έδαφος ή δάπεδο κυρίως σε εξωτερικό περιβάλλον ενώ ένα κατάλληλο κάλυμμα κρίνεται απαραίτητο. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες θα πρέπει να λαμβάνονται επίσης υπόψη (όπως υψηλές ή πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, ακτίνες, χημικές ουσίες κτλ) τόσο κατά την αποθήκευση όσο και κατά τη χρήση και εφαρμογή τους. Τα FRP είναι επιρρεπή σε επιφανειακές φθορές και τομές με αιχμηρά αντικείμενα καταστάσεις που μπορούν να μειώσουν την αντοχή τους. Γίνεται σαφές επομένως ότι ενδείκνυται η φύλαξη στο εργοτάξιο για όσο το δυνατόν μικρότερο χρονικό διάστημα.

## 1.7 Ενδεικτικές Εφαρμογές

### 1.7.1 Καμπτική Ενίσχυση

Σχετικά υλικά:

- Ελάσματα από ίνες άνθρακα
- Εποξειδική πάστα επικόλλησης δύο συστατικών
- Ύφασμα από ίνες άνθρακα σε μία διεύθυνση
- Εποξειδική ρητίνη εμποτισμού δύο συστατικών
- Εποξειδική πάστα δύο συστατικών
- Ινοπλισμένο, επισκευαστικό τσιμεντοκονίαμα υψηλών αντοχών

#### 1.7.1.1 Φύση του Προβλήματος – Απαιτήσεις

Η απαίτηση αύξησης της καμπτικής αντοχής δοκού ή πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος, μπορεί να παρουσιαστεί στις εξής περιπτώσεις:

- Αύξηση των φορτίων ή αλλαγή χρήσης του χώρου.
- Ανάγκη προσαρμογής παλαιών κατασκευών σε νέους κανονισμούς.

- Γήρανση των δομικών υλικών, διάβρωση του οπλισμού ή/και κατασκευαστικών ελαττωμάτων.
- Ανάγκη αποκατάστασης μετά από σεισμό.

#### 1.7.1.2 Πρόταση

Η ενίσχυση σε κάμψη στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα (δοκοί, πλάκες, τοιχία κλπ.) επιτυγχάνεται με την εξωτερική επικόλληση σύνθετων υλικών στο εφελκόμενο πέλμα των παραπάνω στοιχείων. Κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται για τη χρήση αυτή βιομηχανικά ελάσματα από ίνες άνθρακα, καθώς επίσης και υφάσματα από ανθρακονήματα μίας διεύθυνσεως, τα οποία τοποθετούνται με τις ίνες τους κατά την διεύθυνση του οπλισμού του στοιχείου.

Με την εν λόγω ενίσχυση επιτυγχάνεται:

- Αύξηση της καμπτικής αντοχής.
- Αύξηση της καμπτικής ακαμψίας (μείωση των παραμορφώσεων).
- Μείωση της αναμενόμενης ρηγμάτωσης.
- Βελτίωση της συμπεριφοράς σε κόπωση.

Σε σχέση με τις συμβατικές επεμβάσεις ενίσχυσης, όπως είναι η επικόλληση χαλύβδινων ελασμάτων, τα ελάσματα ανθρακονημάτων παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- Έχουν μικρό βάρος, διατίθενται σε ρολά και κόβονται επιτόπου στο επιθυμητό μήκος. Γενικά, η εφαρμογή τους είναι εύκολη, γρήγορη και οικονομική.
- Αντέχουν στο χρόνο, την κόπωση, την υγρασία και τη διάβρωση.
- Έχουν μικρό πάχος και καλύπτονται/βάφονται πολύ εύκολα.

#### 1.7.1.3 Εφαρμογή

Το υπόστρωμα καθαρίζεται επιμελώς από χαλαρά τμήματα, σοβάδες, χρώματα, κλπ. και στη συνέχεια τρίβεται καλά με σκληρή βούρτσα. Η επιφάνεια που θα γίνει η επικόλληση πρέπει να είναι επίπεδη. Τυχόν επιδιορθώσεις στην επιπεδότητα του υποστρώματος γίνονται με τη βοήθεια του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος ή της εποξειδικής πάστας. Κατόπιν αφαιρείται η ενσωματωμένη ταινία από τη μια επιφάνεια του υφάσματος και στην επιφάνεια αυτή εφαρμόζεται με σπάτουλα η εποξειδική πάστα. Η επάλειψη της πάστας στο έλασμα θα πρέπει να γίνεται έτσι ώστε περίσσεια υλικού να συγκεντρώνεται στον άξονα του ελάσματος και όχι στις άκρες. Στη συνέχεια το έλασμα τοποθετείται στην καθαρή επιφάνεια και

πέζεται σταθερά με πλαστικό ρολό έτσι ώστε να υπερχειλίσει η πάστα από τις άκρες και να μην μείνει εγκλωβισμένος αέρας μεταξύ της πάστας και του σκυροδέματος. Το συνολικό πάχος της εποξειδικής πάστας μετά την άσκηση πίεσης πρέπει να είναι 0,5-2 mm. Μετά την τοποθέτηση του ελάσματος στην επιφάνεια εφαρμογής γίνεται έλεγχος εντοπισμού τυχόν εγκλωβισμένου αέρα, με ελαφριά χτυπήματα πάνω στο έλασμα (ηχητικός έλεγχος). Σε περίπτωση που προβλέπεται βελτίωση της αγκύρωσης των ελασμάτων στα άκρα της δοκού, αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση λωρίδων από σύνθετα υλικά τα οποία λειτουργούν και ως οπλισμός διάτμησης.

#### 1.7.1.4 Παρατηρήσεις

Τα στοιχεία προς ενίσχυση θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν αποφορτισμένα δεδομένου ότι τα σύνθετα υλικά αρχίζουν να ενεργούν με την αύξηση της υπάρχουσας παραμόρφωσης. Η βέλτιστη δυνατή συγκόλληση του ελάσματος (άριστη προετοιμασία υποστρώματος), καθώς και η επαρκής αγκύρωσή του (πέραν της περιοχής που απαιτείται καμπτική ενίσχυση), είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη μέγιστη δυνατή αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης. Συνιστάται να αποφεύγονται οι ματίσεις, οι οποίες ούτως ή άλλως δεν είναι απαραίτητες λόγω της διαθεσιμότητας των υλικών σε μεγάλα μήκη, ενώ επιτρέπονται οι διασταυρώσεις ελασμάτων ή υφασμάτων (με επικόλληση στις επιφάνειες επαφής). Εάν απαιτείται έλεγχος αντοχής του υποστρώματος, αυτός γίνεται με τη μέθοδο Pulloff. Τα ελάσματα έχουν ενσωματωμένη ειδική ταινία και στις δύο επιφάνειές τους, που αφαιρείται λίγο πριν την εφαρμογή και διασφαλίζει χωρίς καθάρισμα και τρίψιμο, μια αδρή και απόλυτα καθαρή επιφάνεια, για καλύτερη πρόσφυση τόσο της ρητίνης, όσο και της τελικής τσιμεντοειδούς επικάλυψης. Για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας της εφαρμογής θα μπορούσαν να τοποθετηθούν 1-2 επιπλέον της στατικής μελέτης ελάσματα τα οποία θα ελεγχθούν με τη μέθοδο Pulloff αμέσως μετά την σκλήρυνση του συστήματος ή περιοδικά στη διάρκεια ζωής της ενίσχυσης. Ο χρόνος κατεργασίας των εποξειδικών συστημάτων μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Επειδή κατά την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στην κατασκευή (π.χ. περιπτώσεις πυρκαγιάς), μειώνεται σημαντικά η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης, είναι απαραίτητη η εξωτερική προστασία του μανδύα σύνθετων υλικών (ειδικά επιχρίσματα, γυψοσανίδες κλπ.). Η προστασία είναι απαραίτητη και σε περιπτώσεις έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία. Η θερμοκρασία της επιφάνειας του

σκυροδέματος κατά την ενίσχυση με σύνθετα υλικά δεν πρέπει να είναι μικρότερη των  $+5^{\circ}\text{C}$ .

### 1.7.2 Ενίσχυση σε Τέμνουσα

Σχετικά υλικά:

- Ύφασμα από ίνες άνθρακα σε μία διεύθυνση
- Εποξειδική ρητίνη εμποτισμού 2 συστατικών
- Εποξειδική πάστα 2 συστατικών
- Ινοπλισμένο, επισκευαστικό τσιμεντοκονίαμα υψηλών αντοχών

#### 1.7.2.1 Φύση του Προβλήματος – Απαιτήσεις

Η απαίτηση αύξησης της αντοχής δοκών οπλισμένου σκυροδέματος σε τέμνουσα, μπορεί να παρουσιαστεί στις εξής περιπτώσεις:

- Αύξηση των φορτίων ή αλλαγή χρήσης του χώρου.
- Ανάγκη προσαρμογής παλαιών κατασκευών σε νέους κανονισμούς.
- Γήρανση των δομικών υλικών, διάβρωση του οπλισμού ή/και κατασκευαστικών ελαττωμάτων.
- Ανάγκη αποκατάστασης μετά από σεισμό.

#### 1.7.2.2 Πρόταση

Μέσω της επικόλλησης του υφάσματος σε διεύθυνση κάθετη προς αυτή των δοκών, επιτυγχάνεται:

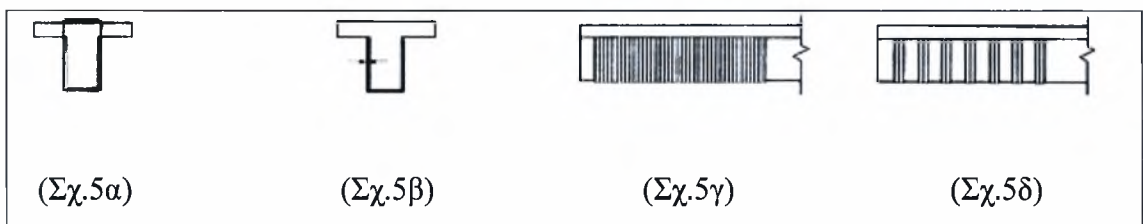
- Αύξηση της διατμητικής αντοχής.
- Δραστική μείωση της πιθανότητας ψαθυρής αστοχίας.
- Σημαντική βελτίωση της συμπεριφοράς των δοκών σε ανακυκλιζόμενες φορτίσεις (σεισμούς) και αύξηση της πλαστιμότητας.

Η ενίσχυση μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη μορφή:

- Συνεχών μανδυών (Σχ. 5γ) ή λωρίδων ανά διαστήματα (Σχ. 5δ).
- Κλειστών μανδυών (περιβάλλουν εντελώς τη δοκό) ή μανδυών ανοιχτού τύπου (λωρίδες με αγκύρωση στα άκρα τους, κατά προτίμηση στη θλιβόμενη ζώνη της δοκού). Αν και οι κλειστοί μανδύες αποτελούν τη βέλτιστη λύση από άποψη μηχανικής συμπεριφοράς (Σχ. 5α), αυτό δεν είναι εφικτό στις περισσότερες περιπτώσεις δοκών, λόγω της ύπαρξης πλακών και άλλων στοιχείων στηριζόμενων σε αυτές που δεν επιτρέπουν το τύλιγμα του υφάσματος γύρω από την άνω παρειά

της δοκού. Έτσι, σε περίπτωση πλακοδοκών, ο συνήθης τρόπος ενίσχυσης είναι με το σύνθετο υλικό σε σχήμα U στις πλευρές και στην κάτω παρειά του στοιχείου (Σχ. 5β). Σε σχέση με τις συμβατικές επεμβάσεις ενίσχυσης, όπως είναι οι μεταλλικοί μανδύες ή οι μανδύες από οπλισμένο σκυρόδεμα, οι μανδύες από FRP παρουσιάζουν τα εξής προτερήματα:

- Ευκολία και ταχύτητα εφαρμογή.
- Αύξηση της αντοχής των δομικών στοιχείων χωρίς μεταβολή της γεωμετρίας ή αύξηση της δυσκαμψίας τους.
- Ανθεκτικότητα στο χρόνο και προστασία του οπλισμού από την υγρασία και τη διάβρωση.



**Σχήμα 1.4:** Διατάξεις Μανδρών από FRP

### 1.7.2.3 Εφαρμογή

Το υπόστρωμα καθαρίζεται επιμελώς από χαλαρά τμήματα, σοβάδες, χρώματα, λίπη κλπ. και στη συνέχεια τρίβεται καλά με σκληρή βούρτσα. Υφιστάμενες ρηγματώσεις αποκαθίστανται με τη βοήθεια ρητινένεσεων.

Οι επιφάνειες εφαρμογής πρέπει να είναι απόλυτα επίπεδες. Τυχόν επιδιορθώσεις στην επιπεδότητα του υποστρώματος πραγματοποιούνται με τη βοήθεια του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος ή της εποξειδικής πάστας. Η σωστά προετοιμασμένη επιφάνεια επαλείφεται με την εποξειδική ρητίνη. Το ύφασμα ανθρακονημάτων κόβεται με ψαλίδι στις απαιτούμενες διαστάσεις, τοποθετείται προσεκτικά (Σχ.6), καλά τεντωμένο στη νωπή επίστρωση και πατιέται σχολαστικά με πλαστικό ρολό, για καλύτερη επαφή με το υπόστρωμα, πλήρη εμποτισμό του και απομάκρυνση των φυσαλίδων αέρα. Εάν παρά το σχολαστικό πάτημα, παραμένουν στεγνά σημεία στο ύφασμα, τα σημεία αυτά επαλείφονται και εξωτερικά με εποξειδική ρητίνη (ώστε ολόκληρο το ύφασμα να είναι όσο το δυνατόν καλύτερα εμποτισμένο). Εφόσον η μελέτη προβλέπει περισσότερες στρώσεις, η παραπάνω διαδικασία εφαρμογής επαναλαμβάνεται. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει η προηγούμενη επίστρωση με εποξειδική ρητίνη να μην έχει στεγνώσει εντελώς,

ειδάλλως απαιτείται καλό τρίψιμο της επιφάνειας πριν τη νέα εφαρμογή. Η τελευταία στρώση επαλείφεται επίσης με εποξειδική ρητίνη και στη νωπή ακόμα τελική επάλειψη γίνεται επίταση χαλαζιακής άμμου προκειμένου να ακολουθήσει αργότερα προστατευτική τσιμεντοειδής επικάλυψη.



**Σχήμα 1.5:** Τοποθέτηση υφάσματος FRP

#### 1.7.2.4 Παρατηρήσεις

Σε κάθε περίπτωση, η βέλτιστη δυνατή συγκόλληση του μανδύα (άριστη προετοιμασία υποστρώματος), καθώς και η επαρκής αγκύρωση (στα άκρα του) είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας της ενίσχυσης. Εάν απαιτείται έλεγχος αντοχής του υποστρώματος, αυτός γίνεται με τη συσκευή Pulloff. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται κατά την κοπή του υφάσματος ώστε να μη δημιουργηθούν διπλώσεις και τσακίσεις στο ύφασμα, ενώ η επιφάνεια του υφάσματος πρέπει να είναι καθαρή κατά την τοποθέτησή του.

Ο χρόνος κατεργασίας των εποξειδικών συστημάτων μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία της επιφάνειας του σκυροδέματος κατά την ενίσχυση με σύνθετα υλικά δεν πρέπει να είναι μικρότερη των  $+5^{\circ}\text{C}$ .

Για λόγους "αναπνοής" των δομικών στοιχείων (ώστε να διευκολύνεται η έξοδος τυχόν εγκλωβισμένης υγρασίας) καλό είναι να διακόπτεται η κατά μήκος του στοιχείου συνέχεια του μανδύα περίπου κάθε 600 mm. Επειδή κατά την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στην κατασκευή (π.χ. περιπτώσεις πυρκαγιάς), μειώνεται σημαντικά η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης, είναι πάντα απαραίτητη η εξωτερική προστασία του μανδύα σύνθετων υλικών (ειδικά επιχρίσματα, γυψοσανίδες κλπ.). Η προστασία είναι απαραίτητη και σε περιπτώσεις έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία. Κατά την εφαρμογή είναι απαραίτητη η χρήση προστατευτικού εξοπλισμού (γάντια, γυαλιά κλπ.).

### 1.7.3 Περίσφιγξη Υποστυλώματος

Σχετικά υλικά:

- Ύφασμα από ίνες άνθρακα σε μία διεύθυνση
- Εποξειδική ρητίνη εμποτισμού 2 συστατικών
- Εποξειδική πάστα 2 συστατικών
- Ινοπλισμένο, επισκευαστικό τσιμεντοκονίαμα υψηλών αντοχών

#### 1.7.3.1 Φύση του Προβλήματος – Απαιτήσεις

Τα υποστυλώματα μίας κατασκευής είναι πιθανό υπό κάποιες συνθήκες να παρουσιάσουν ανεπάρκεια αντοχής ή/και πλαστιμότητας (δυνατότητα να δεχτούν αυξημένες παραμορφώσεις σε περιπτώσεις σεισμών και άλλων έκτακτων φορτίων), με αποτέλεσμα να γίνεται επιτακτική η ανάγκη ενίσχυσής τους.

Ενίσχυση των υποστυλωμάτων γίνεται στις εξής περιπτώσεις:

- Προσαρμογής παλαιών κατασκευών σε νέους κανονισμούς.
- Γήρανσης των δομικών υλικών και διάβρωσης του οπλισμού.
- Κατασκευαστικών ελαττωμάτων (π.χ. ανεπαρκής αριθμός, κατανομή και τοποθέτηση των συνδετήρων).
- Αύξησης των φορτίων ή αλλαγής χρήσης του χώρου.
- Αποκατάστασης μετά από σεισμό.

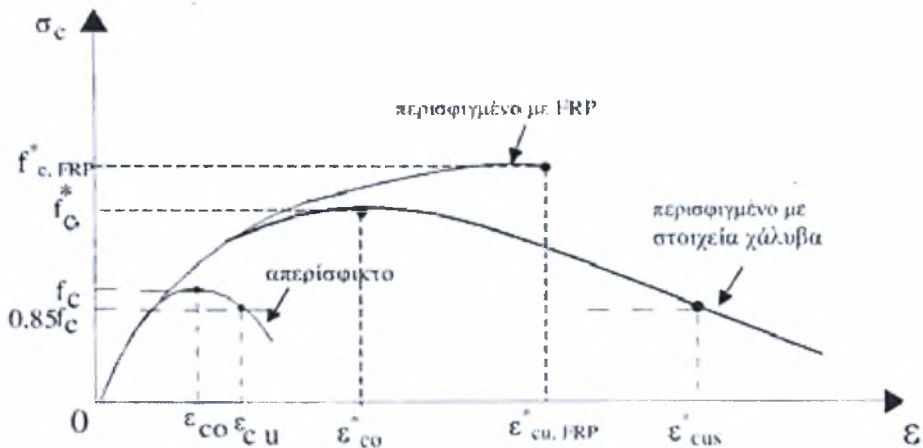
#### 1.7.3.2 Πρόταση

Ο εγκιβωτισμός του σκυροδέματος μέσω μανδύα επιφέρει:

- Αύξηση της παραμορφωσιμότητας (π.χ. σε περιοχές πλαστικών αρθρώσεων).
- Αύξηση της θλιπτικής αντοχής.
- Μείωση της πιθανότητας τοπικού λυγισμού των οπλισμών.
- Βελτίωση της συνάφειας σε κρίσιμες περιοχές ενώσεων οπλισμών με μάτιση.

Σε σχέση με τις συμβατικές επεμβάσεις ενίσχυσης (Σχήμα 7), όπως είναι οι χαλύβδινοι μανδύες ή οι μανδύες από οπλισμένο σκυρόδεμα, οι μανδύες παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- Ευκολία και ταχύτητα εφαρμογής.
- Αύξηση της αντοχής και της πλαστιμότητας, χωρίς μεταβολή της γεωμετρίας ή αύξηση της δυσκαμψίας τους.
- Ανθεκτικότητα στο χρόνο και προστασία του οπλισμού από την υγρασία και τη διάβρωση.



**Σχήμα 1.6:** Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) για σκυρόδεμα περισφιγμένο με FRP ή χαλύβδινα στοιχεία

### 1.7.3.3 Εφαρμογή

Το υπόστρωμα καθαρίζεται επιμελώς από χαλαρά τμήματα, σοβάδες, χρώματα, λίπη κλπ. και στη συνέχεια τρίβεται καλά με σκληρή βούρτσα. Υφιστάμενες ρηγματώσεις αποκαθίστανται με τη βοήθεια ρητινένεσεων. Οι εξωτερικές γωνίες στρογγυλεύονται σε ακτίνα 10-30 mm. Οι επιφάνειες εφαρμογής πρέπει να είναι επίπεδες. Τυχόν επιδιορθώσεις στην επιπεδότητα του υποστρώματος γίνονται με τη βοήθεια του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος ή της εποξειδικής πάστας. Η σωστά προετοιμασμένη επιφάνεια επαλείφεται με την εποξειδική ρητίνη. Το ύφασμα κόβεται με ψαλίδι στις απαιτούμενες διαστάσεις, τοποθετείται προσεκτικά, καλά τεντωμένο στη νωπή επίστρωση και πατιέται σχολαστικά με πλαστικό ρολό, για καλύτερη επαφή με το υπόστρωμα, πλήρη εμποτισμό του και απομάκρυνση των φυσαλίδων αέρα. Εάν παρά το σχολαστικό πάτημα, αραμένουν στεγνά σημεία στο ύφασμα, τα σημεία αυτά επαλείφονται και εξωτερικά με εποξειδική ρητίνη (ώστε ολόκληρο το ύφασμα να είναι τέλεια εμποτισμένο). Κατά την περιτύλιξη υποστυλωμάτων απαιτείται επικάλυψη των δύο άκρων της λωρίδας κατά 15-20 cm. Εφόσον η μελέτη προβλέπει περισσότερες στρώσεις, η παραπάνω διαδικασία εφαρμογής επαναλαμβάνεται. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει η προηγούμενη επίστρωση με εποξειδική ρητίνη να μην έχει στεγνώσει εντελώς, ειδάλλως απαιτείται καλό τρίψιμο της επιφάνειας πριν τη νέα εφαρμογή. Η τελευταία στρώση επαλείφεται επίσης με εποξειδική ρητίνη και στη νωπή ακόμα τελική



επάλειψη γίνεται επίταση χαλαζιακής άμμου, προκειμένου να ακολουθήσει αργότερα προστατευτική τσιμεντοειδής επικάλυψη.

#### 1.7.3.4 Παρατηρήσεις

Η αποδοτικότητα της περίσφιγξης καθορίζεται από το λόγο πλευρών της διατομής του υποστυλώματος (μεγαλύτερος λόγος πλευρών συνεπάγεται μικρότερο συντελεστή απόδοσης), καθώς και την ακτίνα καμπυλότητας στις γωνίες (μεγαλύτερη καμπυλότητα συνεπάγεται καλύτερη απόδοση της περίσφιγξης). Εάν απαιτείται έλεγχος αντοχής του υποστρώματος, αυτός γίνεται με τη συσκευή Pulloff. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται κατά την κοπή του υφάσματος ώστε να μη δημιουργηθούν διπλώσεις και τσακίσεις στο ύφασμα. Επίσης, η επιφάνεια των υφασμάτων πρέπει να είναι καθαρή κατά την τοποθέτησή τους χωρίς σκόνη, γράσα κλπ. Κατά την περιτύλιξη των υποστυλωμάτων δεν απαιτείται αλληλοεπικάλυψη μεταξύ δύο διαδοχικών καθ' ύψος λωρίδων. Η απόστασή τους ωστόσο δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 10 mm. Ο χρόνος εφαρμογής των εποξειδικών συστημάτων μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία της επιφάνειας του σκυροδέματος κατά την ενίσχυση με σύνθετα υλικά δεν πρέπει να είναι μικρότερη των +5°C. Επειδή κατά την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στην κατασκευή (π.χ. περιπτώσεις πυρκαγιάς), μειώνεται σημαντικά η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης, είναι απαραίτητη η εξωτερική προστασία του μανδύα σύνθετων υλικών (ειδικά επιχρίσματα, γυψοσανίδες κλπ.). Επίσης προστατευμένη πρέπει να είναι η τελική επισκευασμένη επιφάνεια και σε περιπτώσεις έκθεσης αυτής σε ηλιακή ακτινοβολία. Κατά την εφαρμογή είναι απαραίτητη η χρήση προστατευτικού εξοπλισμού (γάντια, γυαλιά κλπ.).

### 1.8 Επισκευή Στοιχείων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα Μετά από Σεισμό

1.8.1 Τυπικοί βαθμοί βλάβης που επισκευάζονται με εφαρμογές FRP είναι:

- Απλή ρηγμάτωση (πάχος ρωγμής: για δοκούς 2-5 mm, για υποστυλώματα 0.5-3 mm). Οι βλάβες σε αυτό το βαθμό αποκαθίστανται με χρήση εποξειδικών ρητινών και επικόλληση ελασμάτων ή σύνθετων υλικών στο σκυρόδεμα.
- Μερική Αποδιοργάνωση. Οι βλάβες αυτού του βαθμού αποκαθίστανται με μερική καθαίρεση του βλαμμένου σκυροδέματος και αντικατάσταση αυτού με νέο

σκυρόδεμα, ενίσχυση με νέους οπλισμούς ή επικόλληση χαλύβδινων ελασμάτων ή σύνθετων υλικών ή προσθήκη εξωτερικού μανδύα σκυροδέματος.

### 1.8.2 Μέθοδοι επισκευών με FRP

- Επικόλληση Ελασμάτων σε Σκυρόδεμα (beton plaque)

Η επικόλληση γίνεται με εποξειδική ρητίνη στο εφελκυτόμο πέλμα των δοκών, στις κατακόρυφες παρειές των δοκών ή στους κόμβους. Τα ελάσματα πρέπει να είναι λεπτά (συνήθως 1 έως 1.5 mm) για να περιορισθεί η τάση αποκολλήσεως και επίσης για να είναι εύκαμπτα ώστε να κολλήσουν καλά και να συνεργαστούν με την παλαιά δοκό.

- Επισκευή με Σύνθετα Υλικά από Ίνες Υάλου Υψηλής Αντοχής. Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από ίνες υάλου υψηλής αντοχής «συραμμένες ή πλεγμένες» σε μορφή «υφάσματος». Τα «υφάσματα» ινών, αφού εμποτιστούν με ειδικές εποξειδικές ρητίνες, σχηματίζουν ένα σύνθετο υλικό υψηλής αντοχής το οποίο επικολλάται στις κατάλληλα προετοιμασμένες επιφάνειες του δομικού στοιχείου αποτελώντας μόνιμη επένδυση επισκευής και ενίσχυσής του. Η χρήση των σύνθετων υλικών μπορεί να θεωρηθεί ως εξέλιξη των ενισχύσεων με μεταλλικά ελάσματα

- Σύνθετα υλικά ινών υάλου υψηλής αντοχής εμποτισμένων με κατάλληλες εποξειδικές ρητίνες. Τα σύνθετα υλικά εφαρμόζονται σε δομικά στοιχεία των οποίων οι ρηγματώσεις έχουν προετοιμασθεί με τσιμεντενέσεις, τσιμεντοκονιάματα, εποξειδικές ρητίνες ή εποξειδικά κονιάματα. Η εφελκυστική αντοχή των σύνθετων υλικών πρέπει να είναι τουλάχιστον 500 Μpa στην κύρια διεύθυνση των ινών υάλου. Λόγω του μικρού τους πάχους (περίπου 1.3 mm ανά στρώση) οι διαστάσεις του δομικού στοιχείου παραμένουν πρακτικά αμετάβλητες, και το πρόσθετο βάρος στην κατασκευή είναι ουσιαστικά αμελητέο.

### 1.8.3 Παρατηρήσεις

Ο μελετητής μηχανικός πρέπει να έχει υπόψη του ότι η επισκευή ενός κτιρίου με βλάβες από σεισμό που επηρεάζουν γενικότερα την ασφάλειά του αποτελεί ειδικό πρόβλημα που χρειάζεται βαθιά και εμπειριστατωμένη μελέτη για να καταλήξει σε λύση επιστημονικά, τεχνικά αλλά και οικονομικά αποδεκτή. Ιδιαίτερη σημασία έχει η συστηματική επίβλεψη καθώς και αυστηροί ποιοτικοί έλεγχοι τόσο για τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν όσο και για τις τεχνικές που θα εφαρμοστούν.

## 1.9 Απαιτήσεις Ποιτικών Ελέγχων και Δοκιμών για τη Παραλαβή

Για την διαπίστωση της ορθής εφαρμογής των ινοπλισμένων πολυμερών πρέπει να διεξάγονται οι ακόλουθοι έλεγχοι:

### 1.9.1 Οπτικός Έλεγχος

Ο οπτικός έλεγχος αποσκοπεί στον εντοπισμό κακοτεχνιών (π.χ. ύπαρξη πτυχώσεων, φθορών ή τραυματισμών εγκλωβισμός αέρα μεταξύ υφάσματος και υποστρώματος ή μεταξύ υφασμάτων, ο ελλιπής εμποτισμός των υφασμάτων, η ανομοιομορφία της κατεύθυνσης των ινών, η δημιουργία πτυχώσεων, ο ελλιπής πολυμερισμός της εποξειδικής κόλλας, η μειωμένη συγκολλητική ικανότητα της εποξειδικής κόλλας, το ανεπαρκές μήκος αλληλοκάλυψης των υφασμάτων κλπ). Κατά την διάρκεια της επικόλλησης, θα ελέγχεται η εφαρμογή των κανόνων έντεχνης εκτέλεσης της υγρασίας ώστε τυχόν κακοτεχνίες να εντοπίζονται έγκαιρα και να αίρονται πριν από την ολοκλήρωση της εργασίας.

### 1.9.2 Κρουστικός Έλεγχος

Ο κρουστικός έλεγχος γίνεται στο τέλος ή και σε ενδιάμεσα στάδια εκτέλεσης της εργασίας για την διαπίστωση της στερεότητας και της συνοχής της επέμβασης με ελαφριές κρούσεις με σφυρί πλαστικής ή ελαστικής επαφής με στρογγυλεμένα άκρα, με προσοχή ώστε να μην τραυματιστεί το ύφασμα. Υπόκωφος ήχος συνεπάγεται πλημμελή συγκόλληση, εγκλωβισμό αέρα, μη τήρηση των χρονικών ορίων εφαρμογής της κόλλας.

### 1.9.3 Έλεγχος Πρόσφυσης

Η πρόσφυση των υφασμάτων επί του σκυροδέματος πρέπει να ελέγχεται με δοκιμή αποκόλλησης δείγματος. Η δοκιμή θεωρείται επιτυχής όταν κάθε δοκίμιο που ελέγχεται δεν εμφανίζει αστοχία στην επιφάνεια υφάσματος και υποστρώματος ή την διεπιφάνεια μεταξύ των υφασμάτων.

**BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Τριανταφύλλου Αθ., 'Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας με Σύνθετα Υλικά', Πάτρα, 2006.

Δρίτσος Σ.Η., 'Ενισχύσεις / Επισκευές Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα', Πάτρα, 2006.

Berg, Adam, C., Bank, Lawrence, C., Oliva, Michael, G., Russell, Jeffrey, S., 'Construction and Cost Analysis of an FRP Reinforced Concrete Bridge Deck', Construction and Building Materials 20 (2006) 515-526

Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., Ινστιτούτο Οικονομίας Κατασκευών (Ι.Ο.Κ.), ΠΙΕΤΕΠ, 14-01-08-01: 'Strengthening of Concrete Structures Using Externally Bonded Preformed FRP Fabrics, Επικόλληση Υφασμάτων', Έκδοση 1η, [www.iok.gr](http://www.iok.gr)

Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., Ινστιτούτο Οικονομίας Κατασκευών (Ι.Ο.Κ.), ΠΙΕΤΕΠ, 14-01-08-02: Strengthening of Concrete Structures Using Externally Bonded Preformed FRP Laminates, Επικόλληση Ελασμάτων, Έκδοση 1 η, [www.iok.gr](http://www.iok.gr)

Αφιερώματα ΤΕΕ, Τεύχος 2072, 'Συνοπτικές Διαδικασίες για την Επισκευή του Φέροντος Οργανισμού Κτιρίων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα με Βλάβες από Σεισμό'

[www.tee.gr](http://www.tee.gr)

Τριανταφύλλου Αθ., 'Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος Με Σύνθετα Υλικά (Ινοπλισμένα Πολυμερή), Πάτρα 2004

[www.isomat.eu](http://www.isomat.eu)

[www.kemlite.com](http://www.kemlite.com)

Τριανταφύλλου, Αθ. Χ., Παπανικολάου, Αικ. Γ., Μπουρνάς, Δ., Λόντου, Π., 'Νέα γενιά συνθέτων υλικών ανόργανης μήτρας (TRM) για την ενίσχυση κατασκευών

οπλισμένου σκυροδέματος'' 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, 25-27 Οκτ.,  
Αλεξανδρούπολη, 2006

[www.fib.org](http://www.fib.org)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

#### 2.1 Εισαγωγή

Στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι να παρουσιάσει το πλαίσιο των σύγχρονων μεθόδων ανάλυσης για τον προσδιορισμό της απόκρισης ενός φορέα. Γίνεται χρήση μη-γραμμικών διαδικασιών ανάλυσης οι οποίες μπορούν να προσομοιώσουν με υψηλότερη ακρίβεια την απόκριση ενός φορέα. Τα τελευταία χρόνια οι διαδικασίες αυτές χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για την αποτίμηση της ικανότητας υφισταμένων κτηρίων.

Οι σύγχρονες μέθοδοι ανάλυσης έχουν ως στόχο τον σχεδιασμό με βάση την επιτελεστικότητα (*performance based design*). Η απόκριση του φορέα ελέγχεται για διάφορα επίπεδα επιτελεστικότητας με τη χρησιμοποίηση στατικών ή δυναμικών μεθόδων ανάλυσης. Στη παρούσα εργασία γίνεται χρήση μιας εκ των μη-γραμμικών μεθόδων ανάλυσης οι οποίες και επιτρέπουν τον άμεσο προσδιορισμό της απόκρισης χωρίς τη μεσολάβηση απλοποιητικών παραδοχών που συχνά οδηγούν σε συντηρητικές λύσεις. Οι έλεγχοι βάσει των οποίων μπορεί ο μηχανικός να αποφανθεί εάν για κάποιο επίπεδο επιτελεστικότητας η απόκριση της κατασκευής είναι ικανοποιητική διαφέρουν ανάλογα με τη μέθοδο ανάλυσης που επιλέγεται. Έτσι, οι έλεγχοι του Ευρωκώδικα που βασίζονται σε γραμμικές αναλύσεις εξετάζουν τις επιτρεπόμενες αντοχές, ενώ οι μη-γραμμικές μέθοδοι ανάλυσης χρησιμοποιούν ελέγχους που βασίζονται στις ανελαστικές μετατοπίσεις.

Οι εκτεταμένες βλάβες που παρατηρήθηκαν σε σχετικά πρόσφατους σεισμούς στις ΗΠΑ και την Ιαπωνία έκαναν τους μηχανικούς να αναρωτηθούν για την ορθότητα των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών. Παρά το ότι ο αριθμός των ανθρωπίνων ζωών που χάθηκαν ήταν σχετικά μικρός, το οικονομικό κόστος ήταν πολύ σημαντικό. Δεδομένου ότι ο πρωταρχικός στόχος των σημερινών αντισεισμικών κανονισμών είναι η προστασία της ανθρώπινης ζωής, προκύπτει το συμπέρασμα ότι και άλλοι στόχοι θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό. Προκειμένου να βελτιωθούν οι κανονισμοί προς αυτή την κατεύθυνση, τα τελευταία χρόνια έχει εισαχθεί η έννοια του σχεδιασμού με βάση την επιτελεστικότητα (*performance based design*).

Ο σχεδιασμός με βάση την επιτελεστικότητα παρουσιάζεται σε διάφορες οδηγίες που έχουν εκδοθεί κυρίως στις ΗΠΑ (π.χ. FEMA-356 (2000), Vision (2000), ATC-40 (1996)), ενώ για την Ελλάδα υπάρχει ο νέος Κανονισμός Επεμβάσεων και Ενισχύσεων (ΚΑΝΕΠΕ) (2002). Οι οδηγίες αυτές παρουσιάζουν διαφορές όσον αφορά στις λεπτομέρειές τους αλλά στην ουσία εισάγουν τις ίδιες έννοιες (Krawinkler (1999)). Ο σκοπός των οδηγιών είναι να διαμορφώσουν το πλαίσιο ώστε να είναι εφικτή η αποτίμηση της ικανότητας νέων κτηρίων ή κτηρίων που έχουν ήδη κατασκευαστεί για κάθε επίπεδο σεισμικής φόρτισης. Ο σχεδιασμός με βάση την επιτελεστικότητα επιτρέπει οι κατασκευές να σχεδιάζονται ώστε να έχουν αξιόπιστη και ποσοτικοποιήσιμη συμπεριφορά σε διάφορα επίπεδα σεισμικής έντασης. Ως εκ τούτου ορίζονται διάφορα επίπεδα επιτελεστικότητας σε αντιστοιχία με τον ορισμό των οριακών καταστάσεων του Ευρωκώδικα 8 (ΕΚ8) (1992), όπου για κάθε οριακή κατάσταση ορίζεται ο μέγιστος βαθμός επιτρεπόμενων βλαβών. Βασική απαίτηση είναι να δίνεται η δυνατότητα στον μηχανικό να επιλέξει την επιθυμητή συμπεριφορά του κτηρίου για κάθε επίπεδο επιτελεστικότητας. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να γίνει εφικτή η επιλογή μιας λύσης όπου λαμβάνεται υπόψη τόσο το αρχικό κόστος κατασκευής όσο και το συνολικό κόστος κατά τον κύκλο ζωής του έργου.

## 2.2 Αποτίμηση σεισμικής βλάβης

Η διαδικασία σχεδιασμού με βάση τον ΕΚ8 βασίζεται στον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών (*force based design*) και κατά συνέπεια οι αντίστοιχοι έλεγχοι αφορούν μέγιστες επιτρεπόμενες αντοχές. Αντίθετα οι διαδικασίες που αναπτύσσονται στην FEMA-356 βασίζονται κυρίως σε ελέγχους μετατοπίσεων (*displacement based design*). Ο σχεδιασμός με βάση τα εντατικά μεγέθη είναι κατάλληλος για το σχεδιασμό μελών υπό μόνιμες, συνήθως κατακόρυφες, δράσεις, όπου κάθε μέλος διαστασιολογείται με βάση την πλαστική αντοχή. Ο αντισεισμικός σχεδιασμός ιστορικά αναπτύχθηκε ως ένα στοιχείο που προστέθηκε στον σχεδιασμό με τις μέγιστες επιτρεπόμενες δράσεις και κατά συνέπεια βασίζεται σε μία αντίστοιχη λογική, όπου στην κατασκευή επιβάλλονται οι αδρανειακές δυνάμεις λόγω της σεισμικής φόρτισης. Στη φύση όμως ο σεισμός επιβάλλει στην κατασκευή μετατοπίσεις και κατά συνέπεια οι βλάβες σε μία κατασκευή σχετίζονται άμεσα με την απαίτηση σε μετατοπίσεις (παραμορφώσεις, καμπυλότητες, στροφές και σχετικές μετατοπίσεις).

Εφόσον τα κριτήρια του σχεδιασμού βασίζονται στις απαιτούμενες μετατοπίσεις, συχνά η σεισμική απαίτηση και η ικανότητα ενός φορέα εκφράζονται ως

προς της σχετικές μετακινήσεις ή τις πλαστικές στροφές. Γενικά η διαφορά μεταξύ απαιτούμενων πλαστικών στροφών και απαιτούμενων σχετικών μετακινήσεων δύο ορόφων είναι μικρή. Οι πλαστικές στροφές περιγράφουν καλύτερα την απαίτηση σε πλαστική στροφή στις ακραίες διατομές του μέλους, αλλά γενικά είναι σχετικά δύσκολο να καθοριστεί αυτή η απαίτηση διότι σημαντικό ποσοστό της διαρροής λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό του κόμβου. Παράλληλα, η συνολική ευστάθεια μίας κατασκευής σχετίζεται περισσότερο με την απαίτηση σε σχετικές μετατοπίσεις. Τιμές για την ελαχίστη ικανότητα σε πλαστική στροφή ή σε σχετική μετακίνηση δίνονται στις οδηγίες της FEMA και του ATC (FEMA-356, FEMA-350, ATC-40). Οι τιμές αυτές διαφέρουν ανάλογα με το επίπεδο επιτελεστικότητας και έχουν χαρακτήρα συμπληρωματικό στην περίπτωση που δεν υπάρχουν πειραματικές ή άλλες τιμές.

Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής εργασίας ως μέτρο σεισμικής βλάβης επελέγη η μέγιστη σχετική μετακίνηση. Η σχετική μετακίνηση δύο ορόφων ορίζεται ως η διαφορά της οριζόντιας μετατόπισης κάθε ορόφου προς την υψομετρική διαφορά τους. Για κάθε όροφο υπολογίζεται η τιμή του λόγου και η μέγιστη τιμή αποτελεί την μέγιστη σχετική μετακίνηση και συμβολίζεται με  $\Delta_{max}$ .

Για την αξιολόγηση της μη γραμμικής σεισμικής συμπεριφοράς των δομικών πλαισίων, έγινε χρήση της υπερωθητικής ανάλυσης. Η ανάλυση push over είναι μια απλουστευμένη στατική μη γραμμική διαδικασία στην οποία ένα προκαθορισμένο σχέδιο δυναμικών φορτίσεων εφαρμόζεται επαυξητικά στις κατασκευές έως ότου επιτυγχάνεται ένας πλαστικός μηχανισμός κατάρρευσης. Η ανάλυση push over υιοθετεί γενικά μια προσέγγιση συσσώρευσης-πλαστικότητας που ακολουθεί το σχηματισμό της πλαστικής παραμόρφωσης στις πλαστικές αρθρώσεις κατά τη διάρκεια της επαυξητικής διαδικασίας φόρτισης. Η ανάλυση push over παρέχει αποτελεσματικά μέσα μεταξύ της καλής και κακής απόδοσης των κατασκευών κατά τη διάρκεια των ισχυρών σεισμών.

Ο βασισμένος στην επιτελεστικότητα σχεδιασμός χρησιμοποιεί πολλαπλά επίπεδα σεισμικών διεγέρσεων και επιπέδων συμπεριφοράς της κατασκευής. Ως επίπεδα συμπεριφοράς ονομάζονται διάφορες καταστάσεις παραμόρφωσης (Πίνακας 2.1) που αντιστοιχούν σε διαφορετικές συμπεριφορές της κατασκευής.



**Πίνακας 2.1** Περιγραφή των Επιπέδων Συμπεριφοράς

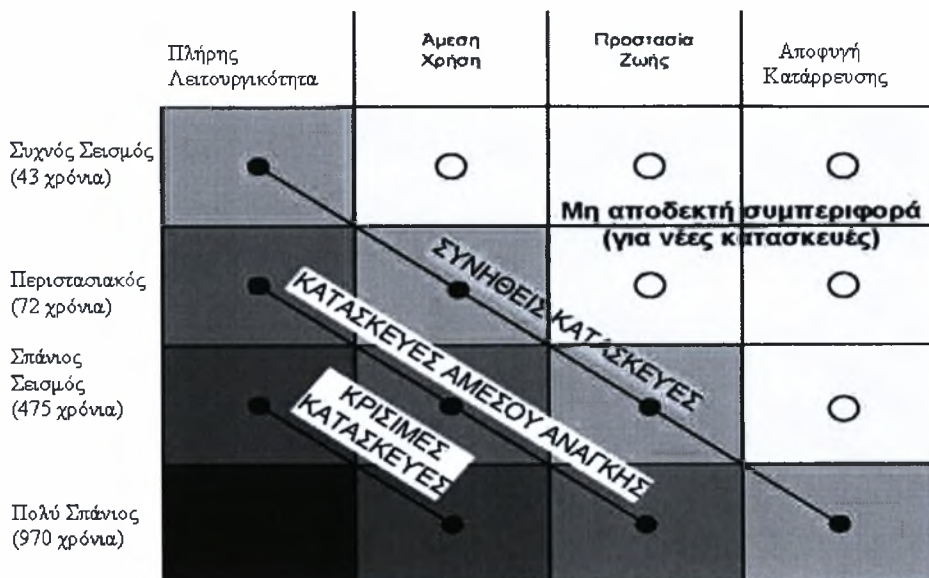
Επίπεδα Συμπεριφοράς	Περιγραφή
Πλήρης Λειτουργικότητα (Fully Operational)	Καμία σημαντική βλάβη δεν έχει παρουσιαστεί σε δομικά ή μη στοιχεία. Το κτίριο είναι ασφαλές για άμεση κατάληψη και χρήση.
Άμεση Χρήση (Operational)	Πολύ περιορισμένες ζημιές έχουν σημειωθεί στην κατασκευή, η οποία διατηρεί σχεδόν όλη την προ του σεισμού αντοχή και δυσκαμψία.
Προστασία Ζωής (Life Safety)	Σημαντικές ζημιές έχουν υποστεί τα κύρια δομικά στοιχεία της κατασκευής με ταυτόχρονη μείωση της δυσκαμψίας. Παρόλα αυτά υπάρχει ακόμα περιθώριο έναντι κατάρρευσης. Το κτίριο δε δίδεται προς χρήση έως ότου επισκευασθούν οι ζημιές.
Αποφυγή Κατάρρευσης (Near Collapse)	Ο φέρων οργανισμός του κτιρίου είναι στα πρόθυρα της κατάρρευσης. Η αντοχή και η δυσκαμψία της κατασκευής έχουν υποστεί σημαντική μείωση. Το κτίριο διατηρεί την ευστάθεια του αλλά υπάρχει σοβαρός κίνδυνος τραυματισμών από πτώσεις συντριμμιών. Οι επισκευές που πρέπει να γίνουν για να κατοικηθεί το κτίριο είναι πολλές και συχνά ασύμφορες.

Αντίστοιχα τα Επίπεδα Επικινδυνότητας (Hazard Levels) αναφέρονται στην ένταση και στη πιθανότητα εμφάνισης ενός σεισμικού γεγονότος (Πίνακας 2.2)

Πίνακας 2.2 Πιθανοτικά Σεισμικά Συμβάντα (SEAOC 2)

Σεισμικό Γεγονός	Συχνότητα Επανάληψης	Πιθανότητα Υπέρβασης
Συχνά	Ανά 43 έτη	50% στα 30 έτη
Περιστασιακά	Ανά 72 έτη	50% στα 50 έτη
Σπάνια	Ανά 475 έτη	10% στα 50 έτη
Πολύ Σπάνια	Ανά 970 έτη	10% στα 100 έτη

Ο συνδυασμός των αναμενομένων επιπέδων συμπεριφοράς της κατασκευής για τα επίπεδα επικινδυνότητας χαρακτηρίζεται ως Στόχος Συμπεριφοράς



**Σχήμα 2.1:** Στόχος Συμπεριφοράς από το Vision 2000 του SEAOC [2] – Επίπεδα επιτελεσματικότητας για διάφορα επίπεδα έντασης, ο μη αποδεκτή συμπεριφορά, • αποδεκτή συμπεριφορά

Στο σχήμα 2.3 φαίνεται το διάγραμμα συνδυασμών των επιπέδων συμπεριφοράς με τα επίπεδα επικινδυνότητας, όπως ορίστηκαν από το Vision 2000 (1995) του SEAOC [2] που είναι και το πρώτο επίσημο έγγραφο που επιχείρησε να δώσει τέτοιους ορισμούς.

### 2.3 Πιθανοτική Εξάρτηση Επιπέδων Επικινδυνότητας

Ο σκοπός των διατάξεων των κανονισμών είναι να ικανοποιούν τα ελάχιστα κριτήρια μελέτης, δικαιολογημένα απλά και οικονομικά, για την προστασία της αφάλειας ζωής των κτιρίων που υπόκεινται στους σεισμούς. Αν και η αβεβαιότητα των σεισμικών φορτίσεων έχει αναγνωριστεί καλά από την επιστημονική κοινότητα, η ενσωμάτωση της αβεβαιότητας στους περισσότερους αντισεισμικούς κανονισμούς έχει περιοριστεί στην επιλογή του σεισμικού σχεδιασμού βασισμένη στην πιθανότητα. Τα επίπεδα επικινδυνότητας κατά κάποιο τρόπο παρέχουν τα κατάλληλα μέσα ενσωμάτωσης των πιθανοτικών πληροφοριών στην επεξεργασία σχεδιασμού. Στην παρούσα Διπλωματική εργασία, η συμπεριφορά της κατασκευής θα προσδιορισθεί για τρία διαφορετικά επίπεδα επικινδυνότητας. Ο πρώτος σεισμός έχει 50% πιθανότητα να υπερβεί την ένταση του σεισμού στα 50 χρόνια (50% in 50 years) και περίοδο επαναφοράς  $T = 72$  έτη.

π.χ. 50% η πιθανότητα υπέρβασης στον 1 χρόνο. Συνεπώς στα 50 χρόνια η πιθανότητα είναι :  $0.50 = 1 - P_i^{50} \Rightarrow P_i = \sqrt[50]{1 - 0,50} = 0.9862$

και η περίοδο επαναφοράς είναι:

$$T = \frac{1}{1 - P_i} = 72 \text{ έτη}$$

Από γεωλογικές μελέτες έχει εκτιμηθεί η αντιστοιχία μέγιστης επιτάχυνσης του εδάφους σε σχέση με τα επίπεδα επικινδυνότητας για διάφορες περιοχές. Ο δεύτερος σεισμός έχει 10% πιθανότητα να υπερβεί την κλίμακα του σεισμού στα 50 χρόνια (10% in 50 years). Ο τρίτος σεισμός έχει 2% πιθανότητα να υπερβεί τη κλίμακα του σεισμού στα 50 χρόνια (2% in 50 years). Ο πρώτος σεισμός (50% in 50 years) ανήκει στους ασθενείς σεισμούς, ο δεύτερος (10% in 50 years) ανήκει στους μεγάλους σεισμούς, ενώ ο τρίτος στους ισχυρούς.

### 2.4 Βασικό Κριτήριο

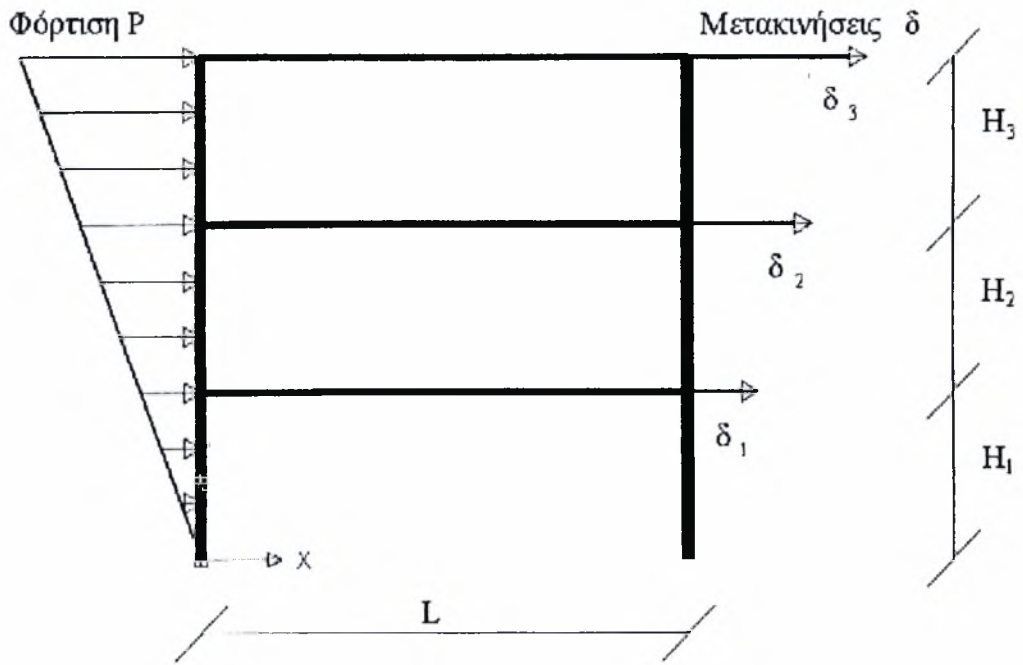
Έχει αναγνωριστεί ότι η μετατόπιση ή η σχετική μετακίνηση ενός πολυωρόφου κτιρίου μπορεί να είναι ένα πολύ καλό κριτήριο αξιολόγησης των επιπέδων ζημίας του κτηρίου κάτω από τα διάφορα επίπεδα επικινδυνότητας. Τα άρθρα του αντισεισμικού κανονισμού βασισμένου στην συμπεριφορά για πολυώροφα

κτίρια μπορούν να βασιστούν στον έλεγχο της σχετικής μετακίνησης ορόφου για την περιγραφή της κατάστασης των ορίων κάτω από τα διαφορετικά επίπεδα σχεδιασμού για σεισμούς.

Αν και η σχετική μετακίνηση ορόφου είναι μια κύρια ανησυχία στο σεισμικό σχεδιασμό των κτιρίων, ο οικονομικός σχεδιασμός των στοιχείων των κατασκευών για τα διάφορα επίπεδα ελαστικής και ανελαστικής πλευρικής απόδοσης σχετικής μετακίνησης ορόφου κάτω από τα πολλαπλά επίπεδα δυναμικών φορτίσεων είναι γενικά ένας μάλλον δύσκολος και προκλητικός στόχος. Ο σχεδιασμός βάση πλευρικής σχετικής μετακίνησης ορόφου απαιτεί την εκτίμηση μιας κατάλληλης κατανομής της ακαμψίας όλων των δομικών στοιχείων, ενός ισχυρού σεισμικού γεγονότος και επίσης την εμφάνιση και την ανακατανομή της πλαστικότητας στα δομικά στοιχεία. Οι πολιτικοί μηχανικοί βρίσκονται αντιμέτωποι με το πρόβλημα της αποτελεσματικότητας των υλικών σε όλη τη δομή για να περιορίσουν τις ελαστικές και ανελαστικές αποκρίσεις μετακίνησης των δομών.

## **2.5 Ανάλυση για Επιβολή Μετακινήσεων σε Διάφορα Επίπεδα Επικινδυνότητας**

Μια μεθοδολογία τριών-επιπέδων σεισμικού σχεδιασμού προτείνεται για τα κτίρια, βασισμένη στην εκτίμηση της αξιοπιστίας ενάντια στα επιτρεπόμενα όρια, μέσω επιβολής μετακινήσεων (base displacement design). Στη μέθοδο αυτή το βασικό κριτήριο σχεδιασμού για τα διάφορα επίπεδα σεισμού είναι οι μετακινήσεις της κατασκευής και κατά συνέπεια οι μέγιστες σχετικές μετακινήσεις (interstorey displacements) να περιορίζονται μεταξύ των τιμών που επιβάλλει ο κανονισμός. Η μέθοδος καταδεικνύεται από τη βαθμονόμηση του συντελεστή σεισμικών φορτίων και του ορίου μετακίνησης. Η συμπεριφορά της κατασκευής προσδιορίζεται με τη χρήση της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης (push over). Εάν η μέγιστη μετακίνηση οροφής καθοριστεί χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο μονοβάθμιο μοντέλο τότε η εκτίμηση της μέγιστης σχετικής μετακίνησης μπορεί να ληφθεί από τα ακόλουθα



**Σχήμα 2.2:** Καθορισμός Ποσοστιαίας Σχετικής Μετακίνησης Ορόφου

Η ποσοστιαία σχετική μετακίνηση ορόφου δίνεται στην εξίσωση (2.1):

$$\Delta = \frac{\delta_i - \delta_j}{H_{ij}} \%$$

όπου:

$\delta_j - \delta_i$  η σχετική μετακίνηση δύο διαδοχικών ορόφων  
και  $H_{ij}$  το ύψος μεταξύ των δύο ορόφων

### Πλευρική Φόρτιση

Για την υπολογισμό των τιμών των ποσοστιαίων σχετικών μετακινήσεων μέσω της μη γραμμικής στατικής (push over) ανάλυσης εφαρμόστηκε και για τα τρία επίπεδα σεισμικών δράσεων οριζόντια πλευρική φόρτιση. Η φόρτιση αυτή επιβλήθηκε *ισοκατανεμημένα* σε όλους τους κόμβους και εξαρτάται από την τέμνουσα βάσης, η οποία είναι ίση με 1 για τη διεύθυνση X και με 0,3 για τη διεύθυνση Y. Η δύναμη που μεταφέρεται σε κάθε κόμβο δίνεται από την εξίσωση (2.2)

$$P_i = V \frac{m_i \cdot z_i}{\sum_i^n (m_i \cdot z_i)} \cdot \frac{1}{k_i}$$

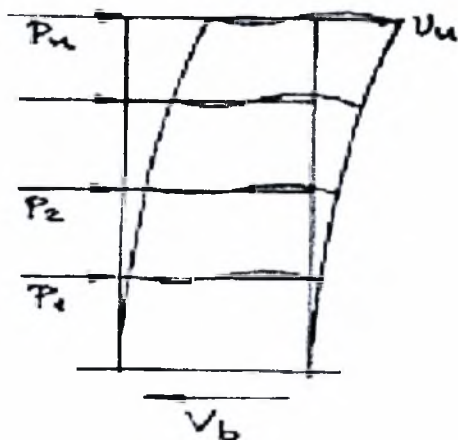
όπου:

$V$  η τέμνουσα βάσης

$m_i$  η μάζα του ορόφου  $i$

$z_i$  το ύψος του ορόφου  $i$  (από την στάθμη του εδάφους)

$k_i$  ο αριθμός των κόμβων ανά στάθμη

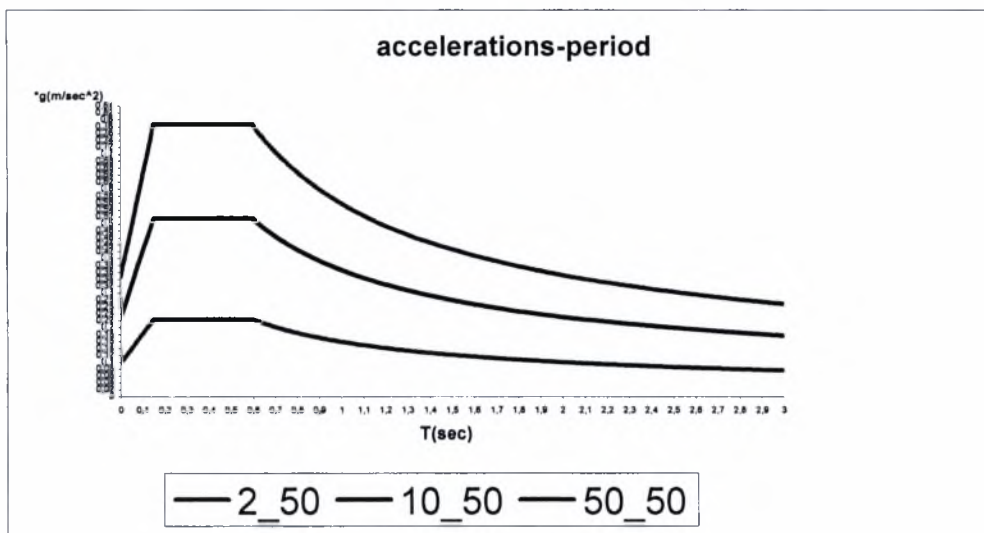


Σχήμα 2.3: Επιβολή πλευρικών δυνάμεων ανα κόμβο

## 2.6 Γενική διαδικασία ανάλυσης

Η γενική διαδικασία ανάλυσης για τις πλευρικές ελαστικές και ανελαστικές σχετικές μετακινήσεις μιας δομής κτιρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα παρατίθεται ακολούθως

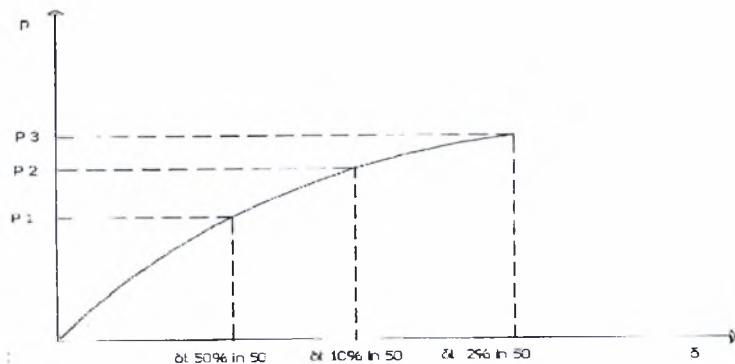
Βήμα 1<sup>ο</sup> : Καθορίζουμε τα φάσματα σχεδιασμού που αντιστοιχούν στους ασθενείς, μέτριους και ισχυρούς σεισμούς. Η σεισμική επικινδυνότητα αντιπροσωπεύεται από μια καμπύλη επικινδυνότητας με τις μέγιστες τιμές επίγειας επιτάχυνσης 0.35g, 0.23g, και 0.10g για τους σεισμούς 2%, 10% και 50% σε 50 έτη αντίστοιχα. Τα φάσματα σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σε ευθεία γραμμή με τις επιταγές της οδηγίας Vision 2000. Στο διάγραμμα που έπεται παρατίθενται τα εν λόγω φάσματα.



**Σχήμα 2.4 :** Φάσματα Σχεδιασμού Σεισμικών φαινομένων με πιθανότητες υπέρβασης 2% , 10% και 50% στα 50 έτη

Βήμα 2<sup>ο</sup> : Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τη μη γραμμική στατική μέθοδο ανάλυσης (push over), επιβάλλουμε στην κατασκευή μας για κάθε επίπεδο επικινδυνότητας την μέγιστη επιθυμητή μετακίνηση  $\delta_t$  (target displacement) η οποία θα μας καθορίσει, έμμεσα και τη μέγιστη σχετική μετακίνηση ορόφων (displacements  $\Delta\%$ ). Σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι ο υπολογισμός της καμπύλης ικανότητας (γραφική αναπαράσταση φορτίου-μετατόπισης) και τον επακριβή προσδιορισμό των στοχευόμενων μετακινήσεων (Σχήμα 2.7).

Τα παραπάνω βήματα σχεδιασμού μπορούν να κατανοηθούν καλλίτερα μέσω του παρακάτω διαγράμματος. Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται για τα τρία επίπεδα επικινδυνότητας οι στοχευόμενες μετακινήσεις  $\delta_t$  βάση των επαυξητικών δυνάμεων  $P_i$ .



**Σχήμα 2.5:** Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Στόχου για τα τρία επίπεδα Επιτελεστικότητας

***BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ***

ATC (1997b). NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 273; ATC-33), Building seismic safety council, Washington, D.C

SEAOC Vision 2000, 1995: A framework of performance based seismic engineering of buildings, Structural Engineers Association of California, Sacramento, California



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΣΤΑΤΙΚΗ ΥΠΕΡΩΘΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – PUSH OVER

#### 3.1 Εισαγωγή

Για τον άμεσο καθορισμό του επιπέδου βλάβης σε κάθε επίπεδο επιτελεστικότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι ανάλυσης. Η FEMA-356 προτείνει τέσσερις μεθόδους ανάλυσης: γραμμική στατική, γραμμική δυναμική, μη-γραμμική στατική και μη-γραμμική δυναμική ανάλυση. Οι γραμμικές μέθοδοι είναι αντίστοιχες εκείνων που προτείνει ο ΕΚ8 (απλοποιημένη φασματική και δυναμική φασματική μέθοδος). Η μη-γραμμική στατική μέθοδος είναι επίσης γνωστή και ως υπερωθητική ανάλυση (*push over*). Στις δυναμικές μεθόδους η απόκριση καθορίζεται με τη χρονική ολοκλήρωση της εξίσωσης κίνησης επιβάλλοντας στην κατασκευή σεισμικές καταγραφές.

Οι γραμμικές μέθοδοι ανάλυσης χρησιμοποιούν δράσεις σχεδιασμού προερχόμενες από το άθροισμα των δράσεων των φορτίων βαρύτητας και των σεισμικών φορτίων. Οι μη-γραμμικές μέθοδοι ανάλυσης επιτρέπουν τη χρησιμοποίηση ελέγχων ανώτερου επιπέδου (Foley (2002)). Οι έλεγχοι αυτοί αναφέρονται συνήθως σε πλαστικές στροφές ή σε σχετικές μετακινήσεις, ενώ υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν έλεγχοι ακόμα και για τις παραμορφώσεις (*Strains*) ανάλογα με το υλικό. Οι έλεγχοι αυτοί βασίζονται στην καλύτερη γνώση της συμπεριφοράς της κατασκευής και μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση του συνολικού κόστους μιας κατασκευής σε σχέση με τις στατικές μεθόδους ανάλυσης. Όσον αφορά στην ευστάθεια του φορέα, εφόσον η μη-γραμμική ανάλυση λαμβάνει υπόψη την παραμορφωμένη γεωμετρία, οι επιπλέον μετατοπίσεις λόγω φαινομένων δευτέρας τάξεως λαμβάνονται υπόψη άμεσα.

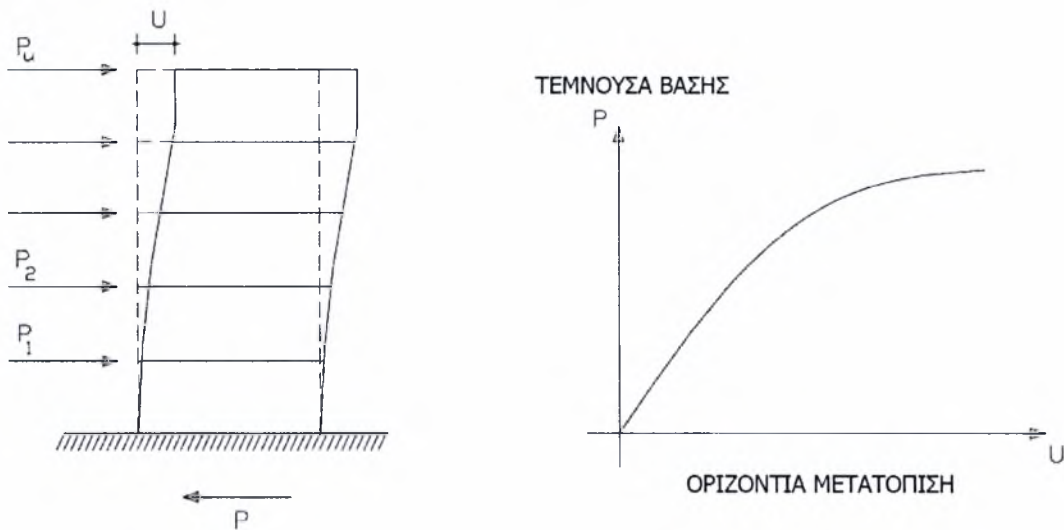
#### 3.2 Στατική Μη-Γραμμική (Υπερωθητική) Ανάλυση

Μία στατική μη γραμμική (ανελαστική) μέθοδος ανάλυσης που χρησιμοποιείται ήδη σήμερα για κατασκευές χαμηλής επιτελεστικότητας είναι η «στατική» υπερωθητική ανάλυση. Ο χαρακτηρισμός «στατική» αφήνει να εννοηθεί ότι έχουν προταθεί και άλλα είδη υπερωθητικής ανάλυσης, όπως π.χ. η «ιδιομορφική» [Chopra & Goel (2002)] και η «φασματική» [Αναστασιάδης 2001]. Η

Στατική Προσαυξητική μέθοδος Ανάλυσης (ΣΠΑ) γνωστή και ως υπερωθητική μέθοδος ανάλυσης (*push over analysis*) είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μη-γραμμική μέθοδος υπολογισμού της σεισμικής απαίτησης. Η μέθοδος είναι προσεγγιστική, αφού ο σεισμός είναι ένα δυναμικό φαινόμενο, αλλά δεδομένου ότι είναι μη-γραμμική μέθοδος η ανάλυση λαμβάνει υπόψη άμεσα την μη-γραμμικότητα του υλικού και της γεωμετρίας. Σκοπός της υπερωθητικής ανάλυσης είναι ο ρεαλιστικότερος σε σχέση με τις τρέχουσες γραμμικές μεθόδους προσδιορισμός της σεισμικής απόκρισης των κατασκευών που σχεδιάζονται για χαμηλά επίπεδα επιτελεστικότητας με χρήση απλούστερων διαδικασιών από εκείνες που θα απαιτούσε μία δυναμική μη γραμμική ανάλυση. «Ρεαλιστικότερος» σημαίνει εν προκειμένω, ότι η εκτίμηση των αναμενόμενων σεισμικών απαιτήσεων λαμβάνει καλύτερα - αν και πάντα προσεγγιστικά - υπόψη τις ανακατανομές των εσωτερικών δυνάμεων λόγω των προκαλούμενων βλαβών, δηλαδή λόγω της εισόδου της κατασκευής στην ανελαστική περιοχή.

### 3.2.1 Περιγραφή της μεθόδου

Το μαθηματικό μοντέλο της κατασκευής «σπρώχνεται» από μία κατανομή οριζόντιων πλευρικών φορτίων (Σχήμα 3.1). Τα οριζόντια φορτία εφαρμόζονται ενώ η κατασκευή φορτίζεται και με τα κατακόρυφα φορτία βαρύτητας σύμφωνα με τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης που καθορίζει ο αντισεισμικός κανονισμός (ΕΚ8 (2003), IBC (2000)). Τα φορτία της κατανομής αυξάνονται ανάλογα μέχρι η μετατόπιση του χαρακτηριστικού κόμβου να γίνει ίση με τη στοχευόμενη μετατόπιση. Ως χαρακτηριστικός κόμβος λαμβάνεται κάποιος κόμβος του φορέα που βρίσκεται στο κέντρο μάζας της οροφής του κτηρίου. Η στοχευόμενη μετατόπιση είναι η μετατόπιση του χαρακτηριστικού κόμβου κατά τον σεισμό σχεδιασμού και ο υπολογισμός της παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων (σχετικές μετακινήσεις) συνδυάζονται με τη μέθοδο SRSS.



**Σχήμα 3.1** Καμπύλη Αντίστασης – Capacity Curve

### 3.2.2 Στοχευόμενη Μετακίνηση

Προκειμένου να ελεγχθεί για κάθε επίπεδο επιτελεστικότητα εάν η απαίτηση είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την ικανότητα, πρέπει να καθοριστεί η στοχευόμενη μετακίνηση (target displacement). Η στοχευόμενη μετακίνηση είναι η μετακίνηση του χαρακτηριστικού κόμβου για τον σεισμό σχεδιασμού. Ο υπολογισμός της στοχευόμενης μετακίνησης μπορεί να γίνει προσεγγιστικά με μία από τις παρακάτω μεθόδους:

- i. Μέθοδος του φάσματος ικανότητας (Capacity Spectrum Method)
- ii. Μέθοδος του συντελεστή μετακίνησης (Displacement coefficient Method)
- iii. Μέθοδος των ίσων μετακινήσεων (Equal Displacement Method)

Στη παρούσα εργασία η στοχευόμενη μετακίνηση δόθηκε υπολογίστηκε κάνοντας χρήση της μεθόδου του συντελεστή μετακίνησης (Displacement coefficient Method). Ως εκ τούτου κρίθηκε σκόπιμο να γίνει ιδιαίτερη αναφορά μονάχα αυτής της μεθόδου.

## 3.2.2.1 Μέθοδος του συντελεστή μετακίνησης (Displacement coefficient Method)

Η χρησιμοποίηση αυτής της μεθόδου συνίσταται από την FEMA-356. Το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου βασίζεται στη στατιστική επεξεργασία αποτελεσμάτων από μονοβάθμια συστήματα με χρονοϊστορίες και αποτελεί μία άμεση διαδικασία υπολογισμού της απαίτησης σε μετακίνηση. Η στοχευόμενη μετακίνηση  $\delta_i$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta_i = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_a \cdot \frac{T_e^2}{4\pi^2} \cdot g \quad (3.1)$$

όπου  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ , είναι διορθωτικοί συντελεστές και  $S_a$  η φασματική επιτάχυνση που αντιστοιχεί στην ισοδύναμη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο  $T_e$  της υπόψη υπολογιζομένης διεύθυνσης. Συγκεκριμένα:

$C_0$ : συντελεστής που συσχετίζει την απόκριση του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος με την μετατόπιση του πολυβάθμιου συστήματος. Ο συντελεστής αυτός λαμβάνεται ίσος με το ποσοστό συμμετοχής της θεμελιώδους ιδιομορφής ή από τον πίνακα 3.2 της FEMA-356.

**Πίνακας 3.1:** Τιμές Συντελεστού Μετατροπής  $C_0$  – FEMA 356

Αριθμός Ορόφων	Συντελεστή Μετατροπής $C_0$
1	1.0
2	1.2
3	1.3
5	1.4
10+	1.5

$C_1$ : συντελεστής που συσχετίζει τις αναμενόμενες μέγιστες ανελαστικές μετατοπίσεις με τις μετατοπίσεις που προέκυψαν από τη γραμμική ελαστική ανάλυση, όπου:

$$C_1 = \begin{cases} 1.0, & T_e \geq T_s \\ 1.0 + (R-1)T_s/T_e & T_e < T_s \end{cases}$$

$T_s$  είναι η χαρακτηριστική περίοδος του φάσματος σχεδιασμού που αντιστοιχεί στο σημείο τομής του φάσματος επιταχύνσεων με το φάσματα ταχυτήτων. Η παράμετρος  $R$  ονομάζεται πηλίκο αντοχής και δίνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{S_a}{V_y/W} C_m$$

$C_2$ : συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την επιρροή του σχήματος του βρόγχου υστέρησης, τη μείωση της στιβαρότητας, και την ελάττωση της αντοχής. Τιμές του συντελεστή δίνονται στον πίνακα 3-3 της FEMA-356, διαφορετικά μπορεί να ληφθεί ίσος με τη μονάδα.

**Πίνακας 3.2:** Τιμές Συντελεστού Μετατροπής  $C_2$  (πηγή FEMA 356)

Κατασκευαστικό Επίπεδο Λειτουργίας	T=0.1sec		T≥TS	
	Πλαίσιο Τύπου 1	Πλαίσιο Τύπου 2	Πλαίσιο Τύπου 1	Πλαίσιο Τύπου 2
Άμεση Χρήση (λειτουργικότητα)	1.0	1.0	1.0	1.0
Συντελεστής Ασφαλείας	1.3	1.0	1.1	1.0
Αποφυγή Κατάρρευσης	1.5	1.0	1.2	1.0

$C_3$ : συντελεστής τροποποίησης που απεικονίζει τις αυξημένες μετακινήσεις που οφείλονται στα φαινόμενα δευτέρας τάξεως.

- $C_3=1.0$  για κτήρια με θετική μετελαστική ακαμψία

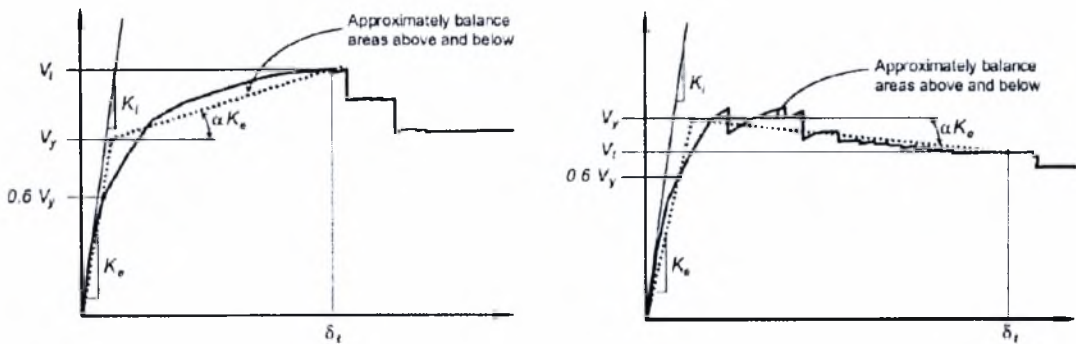
- $C_3 = 1 + \frac{|a|(R-1)^{3/2}}{T_e}$  για κτήρια με αρνητική μετελαστική ακαμψία

όπου το  $a$  υπολογίζεται από την μετατροπή της καμπύλης ικανότητας σε μία διγραμμική καμπύλη. Τα  $a$  είναι ο λόγος της στιβαρότητας του μετελαστικού προς τη στιβαρότητα του ελαστικού τμήματος της διγραμμικής καμπύλης ικανότητας.

### 3.2.2.2 Διγραμμική απεικόνιση της καμπύλης ικανότητας

Στη μέθοδο του συντελεστή μετακίνησης, είναι αναγκαίο η καμπύλη ικανότητας να μετατραπεί προσεγγιστικά σε μία διγραμμική καμπύλη προκειμένου να υπολογιστούν διάφορες παράμετροι όπως η ισοδύναμη στιβαρότητα  $K_B$ , η τέμνουσα διαρροής  $V_y$ , η ισοδύναμη ελαστική περίοδος  $T_e$  ή ο συντελεστής  $a$ .

Η διγραμμική προσέγγιση της καμπύλης ικανότητας γίνεται έτσι ώστε να προκύπτουν ίσα εμβαδά πάνω και κάτω από τα σημεία τομής της πραγματικής και της εξιδανικευμένης καμπύλης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Το σημείο τομής των δύο κλάδων της διγραμμικής καμπύλης δίνει την τέμνουσα βάσης διαρροής  $V_y$ , ενώ η ισοδύναμη στιβαρότητα  $K_e$  προκύπτει ως η τέμνουσα στιβαρότητα για τέμνουσα βάσης ίση με το 60% της  $V_y$ .



**Σχήμα 3.2:** Μετατροπή της καμπύλης ικανότητας σε διγραμμική καμπύλη (πηγή FEMA 356)

Αν  $K_i$  είναι η αρχική ελαστική στιβαρότητα και  $T_i$  είναι η αντίστοιχη θεμελιώδης ιδιοπερίοδος, τότε η ισοδύναμη περίοδος δίνεται από την σχέση:

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}}$$

### 3.3 Κριτική ματιά στη Στατική Μη-Γραμμική (Υπερωθητική) Ανάλυση

Η Push over ανάλυση μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στον υπολογισμό της σεισμικής απαίτησης. Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου (Krawinkler and Seneviratna (1998)):

- Ρεαλιστικός υπολογισμός της απαίτησης σε εν δυνάμει ψαθυρά μέλη, όπως η αξονική απαίτηση σε κολώνες, η απαίτηση ροπής σε συνδέσεις δοκού-στύλου ή οι διατμητικές δυνάμεις σε τοιχία και σε κοντά υποστυλώματα.
- Εκτίμηση της απαίτησης σε μετακίνηση στοιχείων που παραμορφώνονται ανελαστικά προκειμένου να απορροφήσουν τη σεισμική ενέργεια και άμεσος υπολογισμός των σχετικών μετατοπίσεων, επιτρέποντας τον έλεγχο και τον περιορισμό των βλαβών στα μη φέροντα στοιχεία. Επίσης δίνεται η δυνατότητα να λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά και των μη-φερόντων στοιχείων στην ικανότητα.
- Εκτίμηση των συνεπειών της μείωσης της αντοχής κάποιων μελών στη συνολική φέρουσα ικανότητα του φορέα.
- Αναγνώριση των κρίσιμων περιοχών, όπου οι ανελαστικές παραμορφώσεις αναμένονται να είναι υψηλές. Κατά τον υπολογισμό της καμπύλης ικανότητας προσδιορίζεται η σειρά σχηματισμού των πλαστικών αρθρώσεων μέχρι τη δημιουργία κάποιου μηχανισμού κατάρρευσης.

Πέρα από τα παραπάνω πλεονεκτήματα η υπερωθητική ανάλυση έχει και μία σειρά από μειονεκτήματα.

- Το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου είναι ελλιπές και σε πολλές περιπτώσεις είναι δύσκολο να υποστηριχθεί. Η κύρια υπόθεση ότι η απόκριση ενός συστήματος πολλών βαθμών ελευθερίας μπορεί να συσχετιστεί με την απόκριση ενός μονοβάθμιου συστήματος που αποκρίνεται με βάση την πρώτη ιδιομορφή σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι εφαρμόσιμη. Επίσης, η θεμελιώδης ιδιομορφή δεν είναι σταθερή και αλλάζει ανάλογα με της ανελαστικές παραμορφώσεις. Έτσι, σε περιπτώσεις που η συμμετοχή των ανώτερων ιδιομορφών είναι σημαντική η μέθοδος μπορεί να δώσει παραπλανητικά αποτελέσματα.
- Υπάρχει δυσκολία στην εφαρμογή της μεθόδου σε χωρικούς φορείς και ιδιαίτερα σε φορείς με μη-κανονική κάτοψη. Γενικά δεν υπάρχει συμφωνία στην ερευνητική κοινότητα για τον τρόπο εφαρμογής των οριζόντιων πλευρικών φορτίων σε χωρικά πλαίσια.

- Η κατανομή των οριζόντιων πλευρικών φορτίων δε λαμβάνει υπόψη τη μείωση της στιβαρότητας και κατά συνέπεια την τροποποίηση της θεμελιώδους ιδιομορφής καθώς αυξάνεται η ένταση της φόρτισης.
- Κατά την ΣΠΑ θεωρείται ότι η ενέργεια που απορροφάται μόνο μέσω των ανελαστικών παραμορφώσεων και η αγνοείται η απορρόφηση ενέργειας λόγω υστερητικής συμπεριφοράς. Επίσης, αγνοείται η επιρροή της διάρκειας του σεισμού και του πλήθους των κύκλων φόρτισης.
- Η ικανότητα της κατασκευής και η σεισμική απαίτηση λαμβάνονται χωριστά υπόψη κατά την υπερωθητική ανάλυση, ενώ είναι γνωστό ότι η απαίτηση εξαρτάται πάντα από τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής.

### 3.4 Γενικές παρατηρήσεις σχετικά με τις μεθόδους ανάλυσης

Στη συνήθη καθημερινή πράξη, ο Έλληνας μηχανικός χρησιμοποιεί κατά κανόνα γραμμικές μεθόδους (είτε τη δυναμική φασματική μέθοδο είτε την απλοποιημένη φασματική μέθοδο) ανεξάρτητα από την τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς  $q$  που θα επιλέξει. Επιλογή όμως της τιμής  $q=3.5$  σημαίνει ότι αποδεχόμαστε (και επιδιώκουμε) την είσοδο της κατασκευής στην ανελαστική περιοχή (χαμηλή επιτελεστικότητα), ενώ η επιτρεπτή από τον ΕΑΚ2000 επιλογή  $q=1.5$  ή  $q=1$  σημαίνει ότι σχεδιάζουμε την κατασκευή έτσι ώστε να παραμείνει σχεδόν ελαστική υπό τον σεισμό σχεδιασμού (υψηλή επιτελεστικότητα).

Μετά τα όσα εκτέθηκαν παραπάνω γίνεται εύκολα αντιληπτό, ότι η αξιοπιστία των χρησιμοποιούμενων γραμμικών μεθόδων διαφοροποιείται σημαντικά σε εξάρτηση από την στάθμη επιτελεστικότητας (επίδοσης), δηλαδή σε εξάρτηση από την επιλεγείσα τιμή του  $q$  : Η αξιοπιστία των γραμμικών μεθόδων είναι μικρή στην περίπτωση  $q=3.5$  , ενώ είναι ικανοποιητική στην περίπτωση  $q=1.5$  ή  $q=1$ . Γιαντό άλλωστε, μεταξύ άλλων, και ο κανονισμός απαιτεί στην πρώτη περίπτωση πρόσθετους ιδιαίτερους ελέγχους (.ικανοτικός σχεδιασμός.), ενώ στη δεύτερη περίπτωση όχι. Προφανώς, στην περίπτωση που το κτίριο παραμένει (σχεδόν) ελαστικό, τα συνήθη υπολογιστικά γραμμικά και επιφανειακά προσομοιώματα που χρησιμοποιούνται κατά τη μελέτη του είναι κατά πολύ πιο αξιόπιστα από ό,τι στην περίπτωση που γίνεται αποδεκτή η εμφάνιση βλαβών.

Είναι σαφές, ότι στις περιπτώσεις κατασκευών που σχεδιάζονται για μικρή επιτελεστικότητα (π.χ. για  $q=3.5$ ), ο ισχύων κανονισμός κινείται στο «πνεύμα μιας



μέγιστης απλούστευσης» της πραγματικής κατάστασης. Η ανελαστική απόκριση της κατασκευής υπολογίζεται όχι μέσω μιας μη γραμμικής (ανελαστικής) ανάλυσης, αλλά μέσω μιας «ισοδύναμης» γραμμικής (ελαστικής) ανάλυσης με τη βοήθεια κατάλληλα απομειωμένου (διαίρεση διά  $q$ ) και τροποποιημένου φάσματος σχεδιασμού. Η γραμμικοποίηση του όλου προβλήματος βασίζεται σε μία ολόκληρη σειρά παραδοχών και απλουστεύσεων (βλ. ΕΑΚ/2000, Σχόλια, παράγρ. Σ .3.1.1). Το «τίμημα» που καταβάλλεται για την αποφυγή μη γραμμικών αναλύσεων συνίσταται εν προκειμένω στην αναγκαιότητα ενός επάλληλου σταδίου σχεδιασμού, εκείνο του ικανοτικού σχεδιασμού, μέσω του οποίου θεωρείται ότι καλύπτονται οι «ανεπάρκειες» της «ισοδύναμης» γραμμικής ανάλυσης. Κλείνοντας την παράγραφο αυτή των παρατηρήσεων σχετικά με τις τρέχουσες μεθόδους ανάλυσης, θα ήθελα να υπενθυμίσω και να τονίσω τα ακόλουθα. Σχεδιασμός και υπολογισμός μιας κατασκευής για χαμηλή επιτελεστικότητα με  $q=3.5$  σημαίνει, ότι υπό τον σεισμό σχεδιασμού θα πρέπει να ενεργοποιηθούν όλοι οι προβλεπόμενοι ελαστοπλαστικοί μηχανισμοί προς κατανάλωση του  $(1-1/q)*100\% = 71\%$  της εισερχόμενης σεισμικής ενέργειας. Μερική ή ολική μη ενεργοποίησή τους (π.χ. λόγω υπερδιαστασιολόγησης των κρίσιμων περιοχών που οφείλουν να διαρρεύσουν πρώτες) σημαίνει (α) ότι ο υπολογισμός με  $q=3.5$  ήταν ασυνεπής, και ότι ως εκ τούτου (β) οι μηχανισμοί διαρροής καθίστανται αναξιόπιστοι, (γ) η είσοδος στην ανελαστική περιοχή δεν είναι πλέον ελεγχόμενη και (δ) η πιθανότητα κατάρρευσης είναι πλέον κάθε άλλο παρά επαρκώς μικρή.

Με δύο λόγια: Οι ελαστοπλαστικοί μηχανισμοί μιας κατασκευής μικρής επιτελεστικότητας είναι οι ασφάλειες του συστήματος και πρέπει να λειτουργήσουν (να καούν) στον σεισμό σχεδιασμού. Διότι αν δεν καούν οι ασφάλειες, καίγεται το σύστημα. Φορείς που μελετήθηκαν για  $q=3.5$ , αλλά στη συνέχεια (για διάφορους λόγους) υπερδιαστασιολογήθηκαν και διαθέτουν σημαντικές υπεραντοχές, εισέρχονται λίγο μόνον ή και καθόλου στην ανελαστική περιοχή υπό τον σεισμό σχεδιασμού, γεγονός που αφενός αντιφάσκει με την φιλοσοφία σχεδιασμού τους και αφετέρου εγκυμονεί σοβαρούς κινδύνους αστοχιών (λόγω, π.χ., τυχαίας και ανομοιόμορφης κατανομής των "αθέλητων" και άδηλων υπεραντοχών).

**BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

ATC, 1988. Rapid visual screening of buildings for potential hazards: a Handbook. Applied Technology Council (rep. ATC - 21), Redwood City, California.

BSSC, 1992b. NEHRP Handbook for the seismic evaluation of existing buildings. Building Seismic Safety Council For the Federal Emergency Management Agency (FEMA rep. 178) Washington D.C.

Fajfar P., and Gaspersic P., 1996. The N2 method for the seismic damage of RC buildings. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 25, pp. 31-46.

Freeman S.A., Nicoletti J.P. and Tyrell J.V., 1975. Evaluation of existing buildings for seismic risk - A case study of Puget Sound Naval Shipyard Bremerton, Washington. Proceedings of the United States National Conference on Earthquake Engineering, Berkeley, pp . 113-22.

Krawinkler H. and Seneviratna G.D.P.K., 1998. Pros and Cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation. Engineering Structures, Vol. 20, No. 4-6, pp. 452-464

Lawson R.S., Vance V. and Krawinkler H., 1994. Nonlinear static push-over analysis - why, when and how? Proceedings of the Fifth U.S. National conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Inst., Oakland, California, Vol. I, pages 283-292.

SEAOC, 1995. Performance based seismic engineering of buildings. Vision 2000 Committee, Structural Engineers Association of California, Sacramento, California

UNIDO, 1983. Building Construction Under Seismic Conditions in the Balkan Region, Vol. 4: Post-earthquake damage evaluation and strength assessment of buildings under seismic conditions. United Nations Industrial Developing Organisation, UNDP / UNIDO project RER/79/015, Vienna, Austria.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΚΟΣΤΟΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (LIFE CYCLE COST)

#### 4.1 Εισαγωγή

Η διαδικασία σχεδιασμού και ανάλυσης οφείλει μέσα σε ένα προκαθορισμένο κοινωνικό πλαίσιο να λαμβάνει υπόψη τόσο τις άμεσες οικονομικές απώλειες όσο και τις απώλειες σε ανθρώπινες ζωές (Sanchez-Silva and Rackwitz (2004)). Με βάση την παραπάνω απαίτηση, ίσως η πιο αντιπροσωπευτική αντικειμενική συνάρτηση για πραγματικά προβλήματα βέλτιστου σχεδιασμού είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους κατά την διάρκεια ζωής μιας κατασκευής. Το συνολικό κόστος κατά την διάρκεια ζωής μιας κατασκευής μπορεί να οριστεί ως το άθροισμα του αρχικού κόστους και του κόστους κύκλου ζωής (*life-cycle cost*). Ο όρος κόστος κύκλου ζωής συνήθως αναφέρεται στην μείωση με την πάροδο του χρόνου της φέρουσας ικανότητας των μελών ενός φορέα λόγω διαφόρων παραμέτρων όπως για παράδειγμα λόγω διάβρωσης (Frangopol *et al.* (1997)). Ο όρος μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και για την διακινδύνευση (ρίσκο) που προκύπτει λόγω φυσικών καταστροφών όπως είναι ο άνεμος ή ο σεισμός. Σε αυτή την περίπτωση, το κόστος κύκλου ζωής αναφέρεται στις πιθανές απώλειες λόγω μη ικανοποιητικής συμπεριφοράς της κατασκευής κάποια στιγμή κατά την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής της, λόγω δράσεων που έχουν τυχαία ένταση και πιθανότητα εμφάνισης.

#### 4.2 Ορισμοί

Το αρχικό κόστος μιας νέας κατασκευής αναφέρεται στο κόστος του κτηρίου κατά τη φάση κατασκευής. Για πλαισιωτές κατασκευές από χάλυβα συχνά το κόστος αυτό λαμβάνεται ως ποσοστό του συνολικού βάρους. Το αρχικό κόστος συνήθως επηρεάζεται και από άλλες παραμέτρους όπως το κόστος των συνδέσεων ή άλλων λεπτομερειών που μπορεί να επηρεάζουν την απόδοση της κατασκευής. Απλοποιητικά όλες αυτές οι παράμετροι μπορούν να ληφθούν υπόψη με τη βοήθεια κατάλληλων συντελεστών. Επίσης, παράμετροι που επηρεάζουν το αρχικό κόστος, όπως το κόστος μη-φερόντων στοιχείων, η επένδυση έναντι πυρκαγιάς και διάβρωσης, το κόστος των ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων ή το κόστος άλλων αισθητικών παραμέτρων, δεν λαμβάνονται υπόψη.

Με τον όρο κόστος κύκλου ζωής αναφερόμαστε στο πιθανό κόστος λόγω καταστροφών από μελλοντικούς σεισμούς. Το κόστος αυτό αναφέρεται στο κόστος επισκευής μετά τον σεισμό, στην απώλεια περιεχομένων, στο κόστος που συνεπάγεται ο τραυματισμός ή στην απώλεια της ζωής των ενοίκων καθώς και σε άλλες έμμεσες ή άμεσες οικονομικές απώλειες. Άλλα έξοδα που μπορεί να προκύψουν κατά την διάρκεια ζωής του έργου, π.χ. έξοδα συντήρησης, αλλά δεν σχετίζονται με βλάβες λόγω σεισμού, δεν λαμβάνονται υπόψη. Η ποσοτικοποίηση των απωλειών με οικονομικούς όρους εξαρτάται από διάφορες οικονομικοκοινωνικές παραμέτρους. Για παράδειγμα, υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις για τον υπολογισμό του κόστους απώλειας μιας ανθρώπινης ζωής. Οι προσεγγίσεις αυτές ποικίλουν από καθαρά οικονομικές προσεγγίσεις σε περισσότερο ευαίσθητες προσεγγίσεις οι οποίες θεωρούν την απώλεια ενός ατόμου αναντικατάστατη (Warszawski *et al.* (1996)). Οι συγκεκριμένες διαφοροποιήσεις έχουν ως συνέπεια το κόστος υπέρβασης της αποφυγής κατάρρευσης να διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με την μέθοδο που επιλέγεται.

#### 4.3 Υπολογισμός του Κόστους Κύκλου Ζωής

Στην παρούσα Διπλωματική εργασία το κόστος υπέρβασης μιας οριακής κατάστασης υπολογίζεται ως ποσοστό του αρχικού κόστους χρησιμοποιώντας παραμέτρους που δίνονται από τους πίνακες του ATC-13 (1985). Για τον υπολογισμό του κόστους κύκλου ζωής χρησιμοποιείται η διαδικασία που προτάθηκε από τους Wen και Kang (2001). Το κόστος  $C_{LC}$  δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$C_{LC} = \frac{V}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \sum_{i=1}^N C_i P_i \quad (4.1)$$

όπου  $N$  είναι το πλήθος των οριακών καταστάσεων που λαμβάνονται υπόψη. Ισχύει επίσης:

$$\begin{aligned} P_i &= P_i(\theta > \theta_i) - P_{i+1}(\theta > \theta_{i+1}) \\ P_i(\theta > \theta_i) &= \left(-\frac{1}{t}\right) \ln[1 - \bar{P}_i(\theta > \theta_i)] \end{aligned} \quad (4.2)$$

όπου  $P_i$  είναι η δεσμευμένη πιθανότητα υπέρβασης της οριακής κατάστασης  $i$  και  $C_i$  είναι το αντίστοιχο κόστος (Πίνακας 4.1, στήλη 2). Επίσης,  $(iP_{\theta\theta>})$  είναι η ετήσια

πιθανότητα υπέρβασης της μέγιστης σχετικής μετακίνησης  $\theta_1$ . Σημειώνεται ότι στις παραπάνω σχέσεις για λόγους απλότητας ο κάτω δείκτης 'max' στο  $\theta_{\max}$  παραλήφθηκε. Η παράμετρος  $\nu$  αντιστοιχεί στον ετήσιο ρυθμό με τον οποίο λαμβάνουν χώρα σημαντικοί σεισμοί και θεωρείται ότι ακολουθεί την κατανομή Poisson, ενώ  $t$  είναι η διάρκεια ζωής μιας νέας κατασκευής ή ο χρόνος ζωής που απομένει σε μία υπάρχουσα κατασκευή που έχει επισκευαστεί. Στην σχέση (4.1) το πρώτο μέρος αποτελείται από έναν εκθετικό όρο προκειμένου το  $C_{LC}$  να εκφραστεί σε τρέχουσες τιμές. Σε αυτό τον όρο η παράμετρος  $\lambda$  συμβολίζει το τρέχων ετήσιο επιτόκιο προεξόφλησης (*annual momentary discount rate*) το οποίο θεωρείται ότι είναι σταθερό και ίσο με 5%. Θεωρείται, επίσης, ότι μετά από έναν σεισμό η κατασκευή επισκευάζεται πλήρως και επανέρχεται στην αρχική της κατάσταση.

**Πίνακας 4.1** Καταστάσεις βλάβης, όρια μέγιστων σχετικών μετακινήσεων και κόστος για κάθε οριακή κατάσταση ( $\Delta \equiv \theta$ )

Performance level	Damage state	Interstorey drift (%)	Cost (% of initial cost)
1	None	$\Delta < 0.1$	0
2	Slight	$0.1 < \Delta < 0.2$	0.5
3	Light	$0.2 < \Delta < 0.4$	5
4	Moderate	$0.4 < \Delta < 1.0$	20
5	Heavy	$1.0 < \Delta < 1.8$	45
6	Major	$1.8 < \Delta < 3.0$	80
7	Destroyed	$3.0 < \Delta$	100

Κάθε κατάσταση βλάβης ορίζεται από την τιμή της μέγιστης σχετικής μετακίνησης,  $\theta_{\max}$  (Πίνακας 4.1, στήλη 3). Όταν η σχετική μετακίνηση υπερβεί την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή, τότε θεωρείται ότι έχουμε υπέρβαση της αντίστοιχης οριακής κατάστασης. Η ετήσια πιθανότητα υπέρβασης ( $iP_{\theta\theta}$ ) της οριακής κατάστασης  $i$  υπολογίζεται από μία σχέση της μορφής:

$$\overline{P}_i(\theta > \theta_i) = ae^{-\beta\theta} \quad (4.3)$$

Η παραπάνω σχέση σε λογαριθμικό γράφημα είναι γραμμική με κλίση  $-\beta$  και τέμνει τον κατακόρυφο άξονα στην τιμή  $\ln(a)$ . Οι παράμετροι  $a$  και  $\beta$  υπολογίζονται με γραμμική παλινδρόμηση από γνωστές τιμές ζευγών  $iP_{\theta\theta}$ . Τα ζεύγη αυτά αντιστοιχούν σε σεισμούς με πιθανότητες υπέρβασης 2, 10 και 50 τοις εκατό στα 50 χρόνια. Σύμφωνα με τον νόμο Poisson η ετήσια πιθανότητα εμφάνισης ενός σεισμού με πιθανότητα υπέρβασης  $p$  σε  $t$  χρόνια δίνεται από την σχέση:

$$\bar{P} = \left(-\frac{1}{t}\right) \ln(1-p) \quad (4.4)$$

Για παράδειγμα ο σεισμός 2% στα 50 χρόνια έχει ετήσια πιθανότητα υπέρβασης ίση με  $P_{2\%} = -\ln(1-0.02)/50 = 4.04 \times 10^{-4}$ . Οι τιμές των μέγιστων σχετικών μετακινήσεων υπολογίζονται με τη βοήθεια του προγράμματος SeismoStruct και τη χρήση Στατικής Προσαυξητικής Ανάλυσης (Push Over).

**BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

AISC (2001). Manual of steel construction, load and resistance factor design (3rd ed.), AISC Inc., USA.

ATC-13 (1985). Earthquake damage evaluation data for California. Applied Technology Council, Redwood City, California.

ATC-40 (1996). Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. California Seismic Safety Commission, Report No. SSC 96-01, Applied Technology Council, Redwood City, California, USA.

Balling, R.J. and Yao, X. (1997). "Optimization of Reinforced Concrete Frames." Journal of Structural Engineering, Vol. 123(2), pp. 193-202.

Balling, R.J., Ciampi, V., Pister, K.S. and Polak, E. (1981). "Optimal design of seismic-resistant planar steel frames." Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. Report No. UCB/EERC-81/20.

Beck, J.L., Chan, E., Irfanoglu A. and Papadimitriou, C. (1999). "Multi-criteria optimal structural design under uncertainty." Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 28, pp. 741-761.

Benjamin, J.R. and Cornell, C.A. (1970). "Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers." McGraw-Hill: New York.

Bhatti, M.A. and Pister, K.S. (1981). "A dual criteria approach for optimal design of earthquake resistant structural systems." Earthquake Engineering and Structural Dynamics Vol. 9, pp. 557-572.

C. Lee, P.E and Ahn, J. (2003). "Flexural Design of Reinforced Concrete Frames by Genetic Algorithm." Journal of Structural Engineering, Vol. 129(6), pp. 762-774.

Camp, C.V., Pezeshk, S. and Hansson, H (2003). “Flexural Design of Reinforced Concrete Frames Using a Genetic Algorithm.” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129(1), pp. 105-115.

Chan, C-M. and Zou X-K. (2004). “Elastic and inelastic drift performance optimization for reinforced concrete buildings under earthquake loads.” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol. 33, pp. 929–950.

Cheng, F.Y., Li, D. and Ger, J. (2000). “Multiobjective optimization of seismic structures.” In Elgaaly M. (Ed.) *ASCE Structures 2000 Conference Proceedings*. Philadelphia, Pennsylvania, USA, Paper No. 24.

Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ) (2000). *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ)*, Αθήνα.

FEMA-356 (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. Federal Emergency Management Agency, Washington DC, SAC Joint Venture.

Foley, C.M. (2002). “Optimized performance-based design for buildings.” In Burns S.A. (Ed.) *Recent Advances in Optimal Structural Design*, ASCE Publications, pp. 169-240.

Eurocode 8 (2003). *Design of structures for earthquake resistance, Part 1*, European standard, CEN 1998-1, Draft No. 6, European Committee for Standardization, Brussels

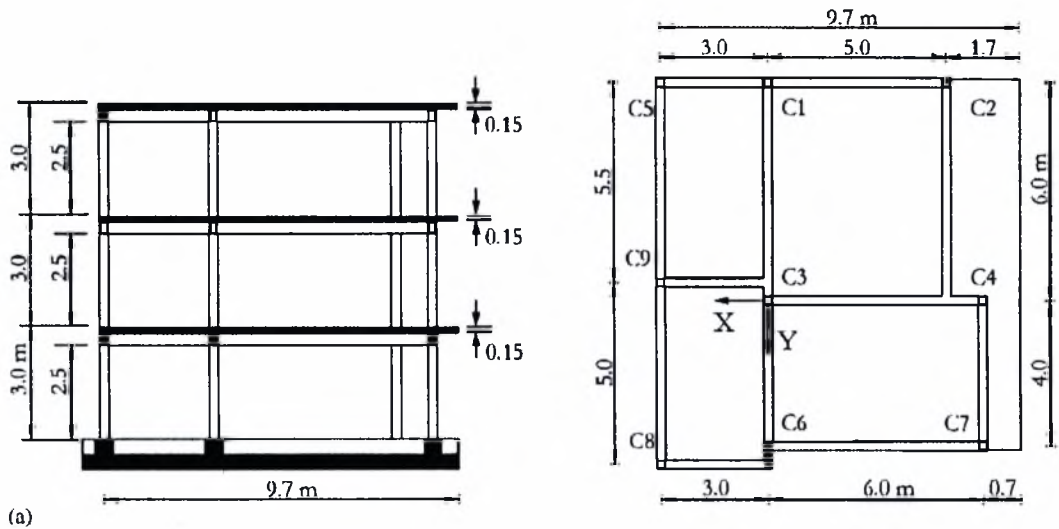


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

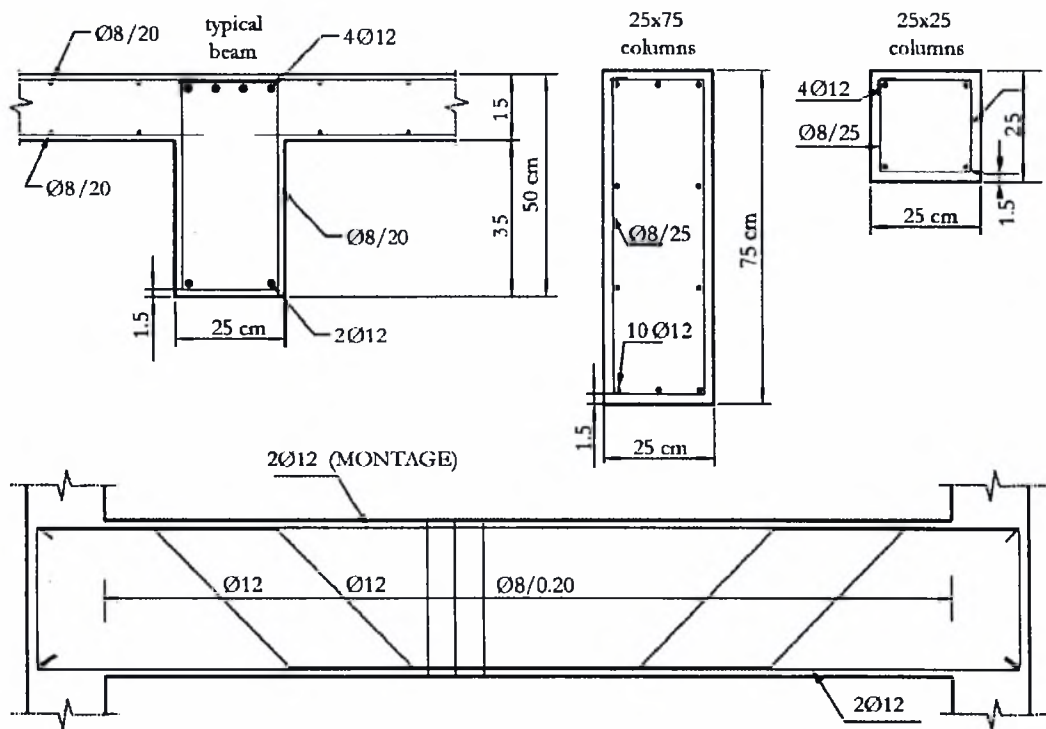
### ΕΦΑΡΜΟΓΗ

#### 5.1 Εισαγωγή

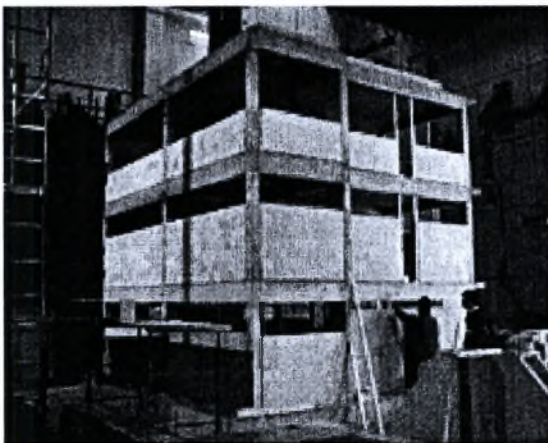
Για τις ανάγκες της προσομοίωσης και της πειραματικής εξέτασης της συμπεριφοράς της κατασκευής αναπτύχθηκε στο εργαστήριο TREES μοντέλο υπό κλίμακα 1:2. Στα πλαίσια αυτής της Διπλωματικής εργασίας εισήχθη στο Seismostruct το μοντέλο του εργαστηρίου TREES προκειμένου να προσδιοριστεί μέσω στατικής μη γραμμικής (Υπερωθητικής) Ανάλυσης (Push over Analysis) η συμπεριφορά του. Οι διαστάσεις και οι οπλισμοί που εισήχθησαν στο μοντέλο που δημιουργήσαμε παρουσιάζονται λεπτομερώς στο Παράρτημα Β.



Σχήμα 5.1 (α) Πρόοψη, (β) Κάτοψη



Σχήμα 5.2 (α) Τυπική όπλιση δοκών και υποστρωμάτων



Σχήμα 5.3: 3Δ Απεικόνιση του υπό εξέταση 3-ορόφου μοντέλου - Εργαστήριο Trees

## 5.2 Είσοδος Γεωμετρίας και Ιδιοτήτων Υλικών Κατασκευής στο SeismoStruct

Εισήχθησαν τα χαρακτηριστικά των υλικών (πρόκειται για μια κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος) η γεωμετρία των διατομών και οι λεπτομέρειες όπλισης των φέροντων στοιχείων της υπο όψη κατασκευής. Η δημιουργία του φορέα έγινε με χρήση του λογισμικού SeismoStruct της εταιρίας SeismoSoft και στο παράρτημα Β παρατίθενται λεπτομέρειες σχετικά με τη χρήση του εν λόγω προγράμματος.

Παρατηρήσεις επί του συνόλου της κατασκευής:

- Η ανεπάρκεια περίσφιξης που παρουσίαζε η κατασκευή μας επέβαλλε να εισάγουμε τον ίδιο βαθμό περίσφιξης τόσο στο απερίσφικτο σκυρόδεμα όσο και στο περισφιγμένο. Ουσιαστικά αμελήθηκε η συνεισφορά της περίσφιξης στη κατασκευή των υποστυλωμάτων (λόγο της πολύ περιορισμένης, έως ανύπαρκτης συνεισφορά της).
- Οι στηρίξεις θεωρήθηκαν πακτώσεις.
- Ως χαρακτηριστικός κόμβος, εκλέχθη ο κόμβος 40 διότι ευρίσκεται πλησιέστερα στο κέντρο μάζας της κατασκευής.

Προκείμενου δε να εκτιμήσουμε τη συμπεριφορά της θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μεθόδους ανάλυσης που να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τη συμπεριφορά του φορέα κατά τη σεισμική δράση. Άρα η χρήση απλής ελαστικής ανάλυσης δεν αρκεί. Η εμφάνιση διαρροής του οπλισμού σε στοιχεία του φέροντος οργανισμού θα πρέπει να προσομοιωθεί με πλαστικές αρθρώσεις, που εμφανίζονται διαδοχικά με την αύξηση του φορτίου και οδηγούν σε ανακατανομές της εντατικής κατάστασης. Επίσης θα πρέπει να εκτιμηθούν τα μεγέθη των σχετικών μετακινήσεων και να συγκριθούν με τα αποδεκτά όρια ουτως ώστε να εφοδιαστούμε με μια εικόνα του κόστους των ζημιών από τα σεισμικά γεγονότα που αναμένεται να πλήξουν τη κατασκευή.

Στόχος μας είναι να βάλλουμε τη κατασκευή με τρεις σεισμούς σχεδιασμού, πιθανότητας υπέρβασης 2%, 10% και 50% σε 50 έτη. Στα πλαίσια της ανάλυσης θα υπολογισθούν μέγιστες σχετικές παρατηρημένες μετακινήσεις οι οποίες ακολούθως θα αξιοποιηθούν δίνοντας μας εικόνα για το κόστος κύκλου ζωής της κατασκευής. Η Στατική Προσαυξητική μέθοδος Ανάλυσης (ΣΠΑ) γνωστή και ως υπερωθητική

μέθοδος ανάλυσης (*push over analysis*) είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μη-γραμμική μέθοδος υπολογισμού της σεισμικής απαίτησης. Η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί είναι προσεγγιστική, αφού ο σεισμός είναι ένα δυναμικό φαινόμενο, αλλά δεδομένου ότι είναι μη-γραμμική μέθοδος η ανάλυση λαμβάνει υπόψη άμεσα την μη-γραμμικότητα του υλικού και της γεωμετρίας. Σκοπός της υπερωθητικής ανάλυσης είναι ο ρεαλιστικότερος σε σχέση με τις τρέχουσες γραμμικές μεθόδους προσδιορισμός της σεισμικής απόκρισης των κατασκευών που σχεδιάζονται για χαμηλά επίπεδα επιτελεστικότητας με χρήση απλούστερων διαδικασιών από εκείνες που θα απαιτούσε μία δυναμική μη γραμμική ανάλυση. «Ρεαλιστικότερος» σημαίνει εν προκειμένω, ότι η εκτίμηση των αναμενόμενων σεισμικών απαιτήσεων λαμβάνει καλύτερα - αν και πάντα προσεγγιστικώς - υπόψη τις ανακατανομές των εσωτερικών δυνάμεων λόγω των προκαλούμενων βλαβών, δηλαδή λόγω της εισόδου της κατασκευής στην ανελαστική περιοχή.

Της εισαγωγής του φορέα στο πρόγραμμα ανάλυσης Seismostruct έπεται επιβολή *push over analysis*. Για κάθε ένα από τα αναμενόμενα σεισμικά φαινόμενα πλήξης της κατασκευής εφαρμόσαμε υπερωθητική ανάλυση, αφού προηγουμένως είχαμε ορίσει τα  $\delta_t$  (*target displacements*) για κάθε ένα από τα τρία σεισμικά γεγονότα προσβολής της κατασκευής. Εφαρμόσαμε υπερωθητική ανάλυση για κάθε μία από τις τέσσερις κατευθύνσεις εξέτασης της κατασκευής. Επομένως προβήκαμε σε τέσσερις αναλύσεις (μία ανα κατεύθυνση) για κάθε ένα από τα σεισμικά φαινόμενα επιβολής. Ακολούθως ορίσαμε συνδυασμούς δράσεων και αξιοποιήσαμε τα αποτελέσματα με χρήση τετραγωνικής επαλληλίας των αποκρίσεων.

### 5.3 Αποτελέσματα Αναλύσεων για την υφισταμένη κατάσταση

#### 5.3.1 Αποτελέσματα Push Over αναλύσεων σε όρους μετακινήσεων.

**Πίνακας 5.1** Αποτελέσματα Push over analysis (μετακινήσεις) - 50% σε 50 έτη

PX	0,00703128	0,00732839	0,00460199
NX	0,00696854	0,00730908	0,00468403
PY	0,0043067	0,00560733	0,00447007
NY	0,00425723	0,00557713	0,00454974

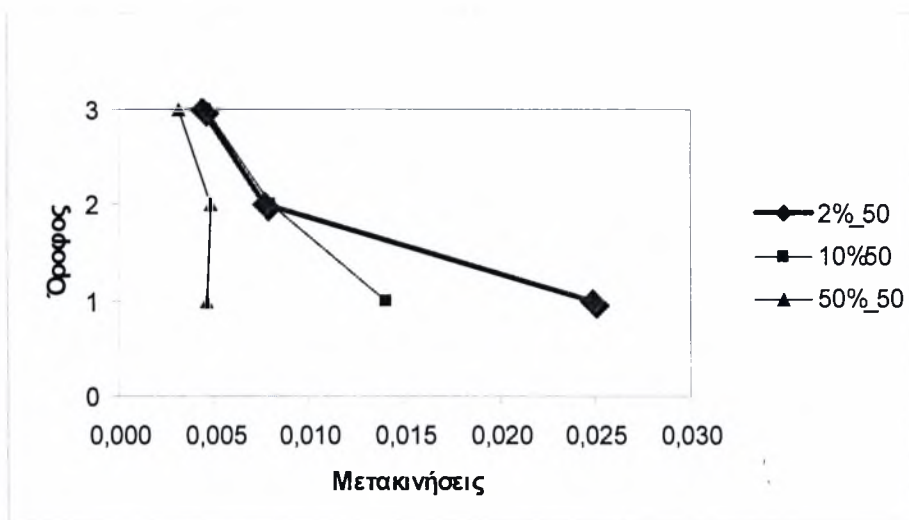
**Πίνακας 5.2** Συνδυασμοί Δράσεων – εφαρμογή SRSS

1st case	PX+0.30PY	0,00477	0,00501	0,00320	0,005012655
2nd case	PX+0.30NY	0,00476	0,00501	0,00320	0,005011307
3rd case	NX+0.30NY	0,00472	0,00500	0,00325	0,004998757
4th case	NX+0.30PY	0,00472	0,00500	0,00325	0,005000109
5th case	NY+0.30PX	0,00317	0,00400	0,00317	0,003996546
6th case	NY+0.30NX	0,00316	0,00400	0,00317	0,003995131
7th case	PY+0.30PX	0,00320	0,00402	0,00312	0,004015283
8th case	PY+0.30NX	0,00319	0,00401	0,00312	0,004013875
<b>Μέγιστο όλων των συνδυασμών</b>					<b>0,00501265</b>

Ομοίως χειριστήκαμε τα σεισμικά επεισόδια με πιθανότητα υπέρβασης 10% και 2% στα 50 χρόνια. Ακολούθως παρατίθενται συνολικά μέγιστες μετακινήσεις που έδωσαν οι συνδυασμοί επιβολής φορτίσεων στη κατασκευή για κάθε ένα από τα τρία σεισμικά γεγονότα.

**Πίνακας 5.3** Συνολική παρουσίαση max Drifts υφισταμένης κατάστασης

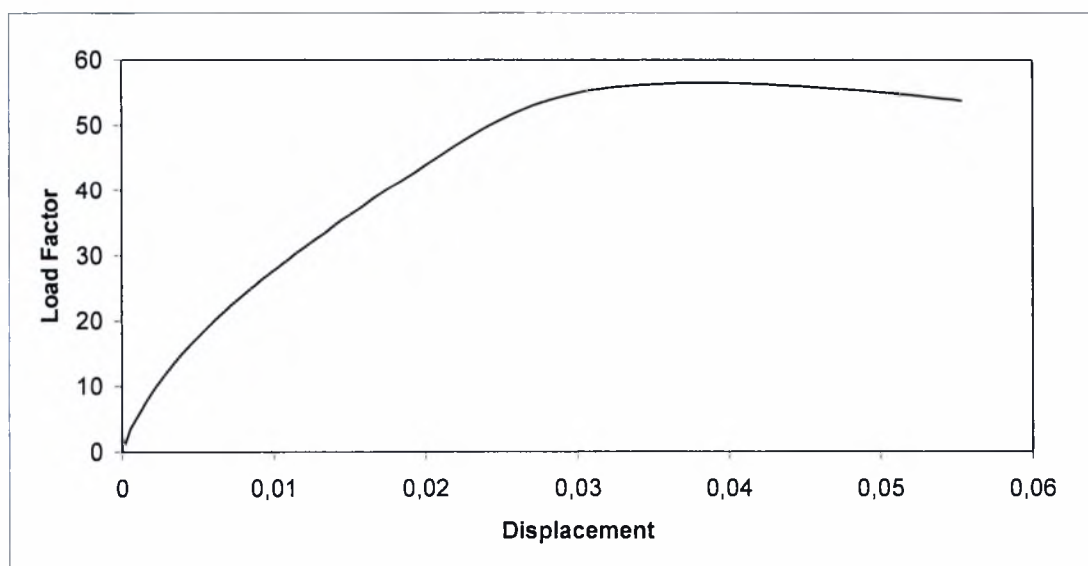
Μέγιστο όλων των συνδυασμών	0,025184719	2%
Μέγιστο όλων των συνδυασμών	<b>0,0143552</b>	10%
Μέγιστο όλων των συνδυασμών	0,005012655	50%



**Σχήμα 5.4** Γράφημα μετακινήσεων υφισταμένης κατάστασης για κάθε σεισμικό φαινόμενο (αξονας εξέτασης NX)

Παρατήρηση: Στην κατεύθυνση NX της κατασκευής παρατηρήσαμε τις μεγαλύτερες σχετικές μετακινήσεις. Η παρατήρηση αυτή ήταν αναμενόμενη και εύλογη λόγω της παρουσίας τοιχώματος C6 στη κατεύθυνση YY (βλέπε Σχήμα 5.1(b)). Η παρουσία τοιχώματος στη διεύθυνση YY τη καθιστά ισχυρό άξονα της κατασκευής. Αξίζει να αναφερθεί ότι η εξέταση της παρούσας κατασκευής γίνεται για τέσσερις κατευθύνσεις λόγω της απουσίας άξονος συμμετρίας.

### 5.3.2 Καμπύλη ικανότητας της κατασκευής



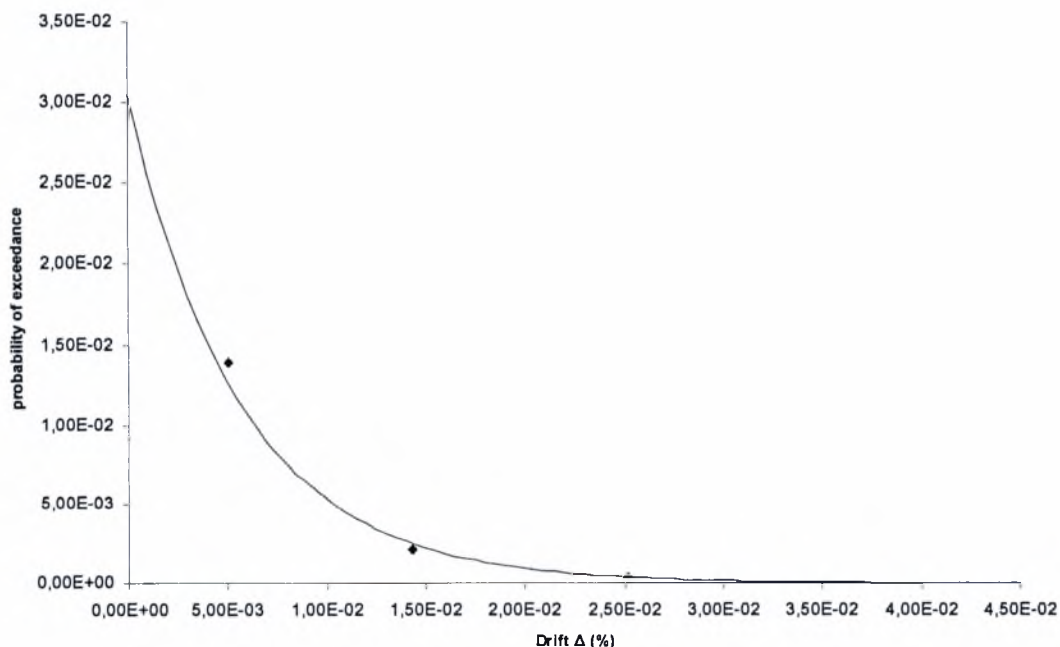
**Σχήμα 5.5** Καμπύλη Ικανότητας 3όροφης κατασκευής

## 5.3.3 Υπολογισμός του Κόστους Κύκλου ζωής της Κατασκευής

Στον πίνακα που έπεται παρατίθενται όλοι οι υπολογισμοί που απαιτούνται προκειμένου να πάρουμε μια εικόνα οικονομικής φύσεως για τη κατασκευή.

**Πίνακας 5.4** Υπολογισμός του Κόστους Κύκλου Ζωής της Κατασκευής

Damage State	Drift	Pbar	Pi	Pi+1	P	Cost	PxCi
1	0	0,0305174	-0,0309928	-0,02596	0,005035	0	0
2	0,1	0,0256234	-0,0259574	-0,02175	0,004208	0,5	0,002104
3	0,2	0,0215142	-0,0217491	-0,01528	0,006466	5	0,032328
4	0,4	0,0151672	-0,0152834	-0,00533	0,009955	20	0,1991
5	1	0,0053142	-0,0053284	-0,00131	0,004015	45	0,180669
6	1,8	0,0013127	-0,0013135	-0,00016	0,001152	80	0,092189
7	3	0,0001611	-0,0001612		0,000161	100	0,016116
							0,522506
							<b>9,592313</b>



**Σχήμα 5.6** Υπολογισμός της ετήσιας πιθανότητας υπέρβασης ( $P$ ) για κάθε επίπεδο επικινδυνότητας

## 5.4 Απομείωση αντοχής υφισταμένης κατασκευής

Η παρούσα ενότητα σκοπό έχει να συστηματοποιήσει εκείνες τις διαδικασίες που απαιτούνται προκειμένου να έχουμε εικόνα για τη μείωση της δυσκαμψίας κάθε μέλους ξεχωριστά και κατά συνέπεια ολόκληρης της κατασκευής.

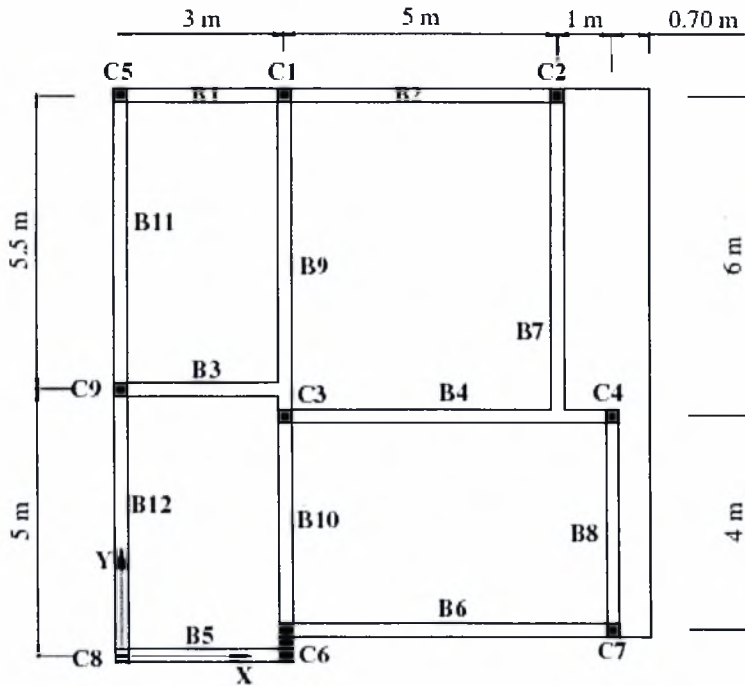
### 5.4.1 Απαίτηση Καμπυλότητας από Στοιχεία της Κατασκευής

Θεωρήθηκε σκόπιμο να υπολογισθεί η απαίτηση σε καμπυλότητα για το δυσμενέστερο σεισμικό γεγονός (2% πιθανότητα υπέρβασης σε 50 έτη). Επιπροσθέτως εξετάστηκαν μόνο στοιχεία υποστυλωμάτων που βρίσκονταν εντός Λκρ. Η κατεύθυνση εξέτασης ήταν ο ασθενέστερος άξονας NX της κατασκευής. Εκεί αναμέναμε τις μεγαλύτερες απαιτήσεις καμπυλότητας. Παρατίθενται σχετικός πίνακας

**Πίνακας 5.5** Αποτελέσματα απαίτησης καμπυλότητας για το δυσμενέστερο σεισμικό γεγονός στην ασθενέστερη κατεύθυνση εξέτασης NX. (πολλαπλ. x 100)

Πόδας Υπ/τος		Κορυφή Υπ/τος	
Col1	14,62	Col1	12,69
Col2	14,40	Col2	12,29
Col3	15,73	Col3	8,59
Col4	13,07	Col4	11,12
Col5	13,76	Col5	12,07
Col6	11,02	Col6	8,95
Col7	11,30	Col7	9,80
Col8	10,60	Col8	9,82
Col9	12,33	Col9	10,24
Col10	3,67	Col10	3,30
Col11	2,52	Col11	2,61
Col12	2,55	Col12	2,33
Col13	3,54	Col13	3,31
Col14	2,51	Col14	2,31
Col15	1,81	Col15	1,79
Col16	2,30	Col16	2,16
Col17	2,38	Col17	1,93
Col18	2,02	Col18	1,85
Col19	1,79	Col19	1,63
Col20	1,39	Col20	1,46
Col21	1,38	Col21	1,36
Col22	2,14	Col22	2,08
Col23	1,14	Col23	1,15
Col24	1,00	Col24	1,05
Col25	1,35	Col25	1,39
Col26	1,08	Col26	1,03
Col27	0,92	Col27	0,96





**Σχήμα 5.7** Αρίθμηση Υποστυλωμάτων και Δοκών μεταξύ Ισογείου και 1<sup>ου</sup> ορόφου

#### 5.4.2 Εφαρμογή προγράμματος XTRACK της Imbsen software systems

Κατόπιν τούτου αποφασίσθη να γίνει χρήση του προγράμματος XTRACK προκειμένου να λάβουμε οπτικοποιημένα αποτελέσματα ροπών-καμπυλοτήτων. Το εν λόγω πρόγραμμα απαιτεί εισαγωγή κάποιων γεωμετρικών χαρακτηριστικών και ακολούθως κάποιων χαρακτηριστικών όπλισης και ιδιοτήτων υλικών. Τα γραφήματα που λάβαμε σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις καμπυλότητας για το δυσμενέστερο σεισμικό γεγονός μας κατέδειξαν τις μειώσεις δυσκαμψίας κάθε μιας διατομής ξεχωριστά.

#### 5.4.3 Επεξεργασία – Αξιοποίηση αποτελεσμάτων XTRACK

Η πορεία μας μέσω του προγράμματος αυτού, σκοπό είχε να καταδείξει τα στοιχεία εκείνα τα οποία χρειαζόμαστε προκειμένου να υπολογίσουμε την απομείωση αντοχής που υφίσταται η κατασκευή λόγω του δυσμενέστερου σεισμικού γεγονότος. Από τα γραφήματα που έπονται διακρίνεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για τις νέες τιμές καμπτικής δυσκαμψίας που θα έπρεπε να εισαχθούν σε ένα νέο πλέον μοντέλο της κατασκευής ούτως ώστε

να έχουμε τη σωστή εικόνα γύρω από την επιθυμητή συνεισφορά των FRPs στη βληθείσα κατασκευή τόσο από οικονομική όσο και από απόψεως αντοχής. Η χρήση του προγράμματος XTRACT παρουσιάζεται στο Παράρτημα Γ. Οι νέες απομειωμένες τιμές καμπτικής δυσκαμψίας καθώς και ο τρόπος υπολογισμού τους παρουσιάζονται λεπτομερώς στο Παράρτημα Δ.

### 5.5 Είσοδος Απομειωμένου Φορέα στο SeismoStruct

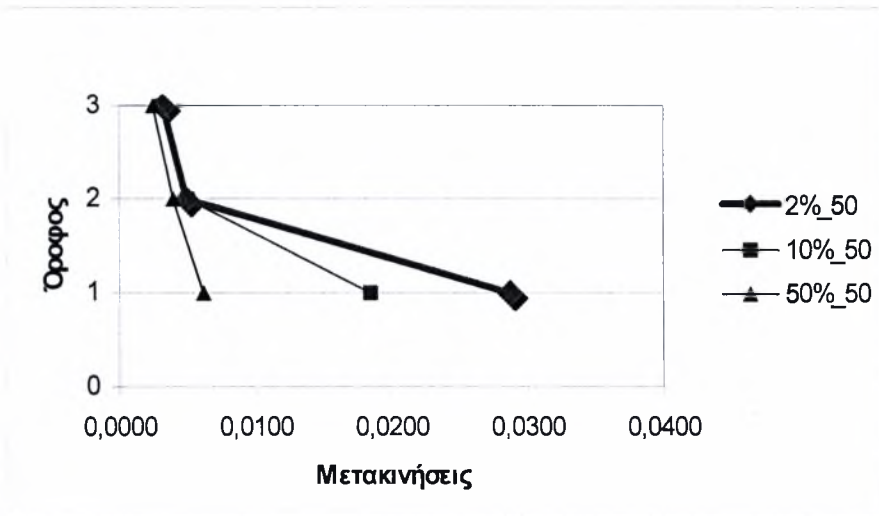
Ουσιαστικά εισάγουμε ένα μοντέλο ίδιας γεωμετρίας με το αρχικό αλλά με απομειωμένες καμπτικές δυσκαμψίες στις όποιες διατομές υποστυλωμάτων. Για κάθε διατομή ξεχωριστά και βάση της ιδιαίτερης φόρτισης της έχουμε ορίσει νέες τιμές καμπτικών δυσκαμψιών. Επι τις ουσίας αυτό γίνεται αντιληπτό από το πρόγραμμα Seismostruct εισάγοντας του ,στα απομειωμένα από απόψεως δυσκαμψίας υποστυλώματα, μικρότερης εναπομείνουσας θλιπτικής αντοχής σκυρόδεμα. Κατά αυτό τον τρόπο επιφέρουμε αλλαγή στη δυσκαμψία των μελών και προσομοιώνουμε κατά το καλύτερο δυνατό τρόπο τη κατάσταση της απομειωμένης πλέον κατασκευής.

### 5.6 Αποτελέσματα Αναλύσεων για την Απομειωμένη κατάσταση

#### 5.6.1 Αποτελέσματα Push Over αναλύσεων σε όρους μετακινήσεις

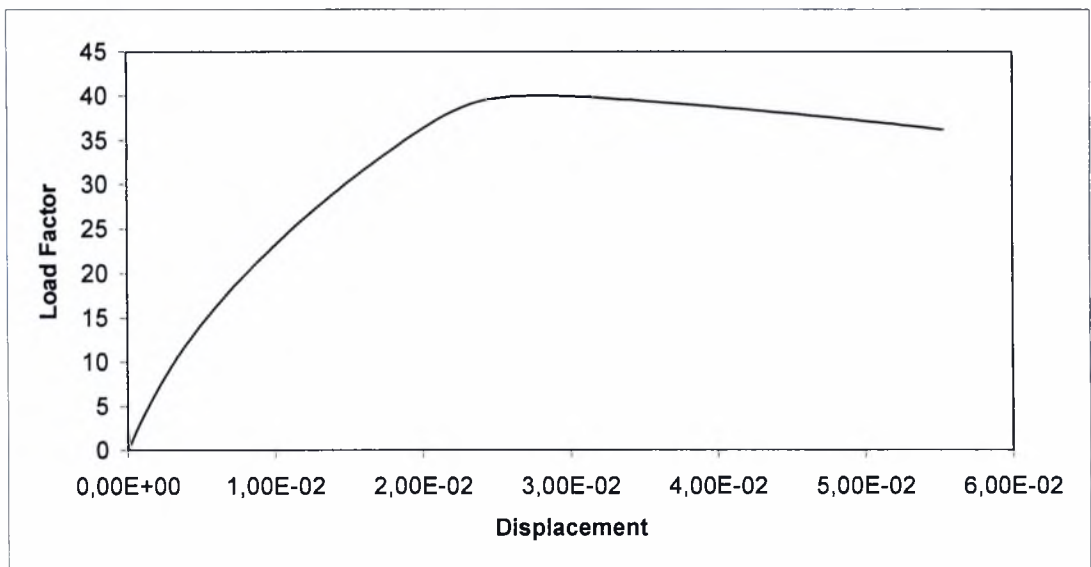
**Πίνακας 5.6** Συνολική παρουσίαση *max Drifts* υφισταμένης κατάστασης

Μέγιστο όλων των συνδυασμών	0,02915207
Μέγιστο όλων των συνδυασμών	0,02914343
Μέγιστο όλων των συνδυασμών	0,02915207

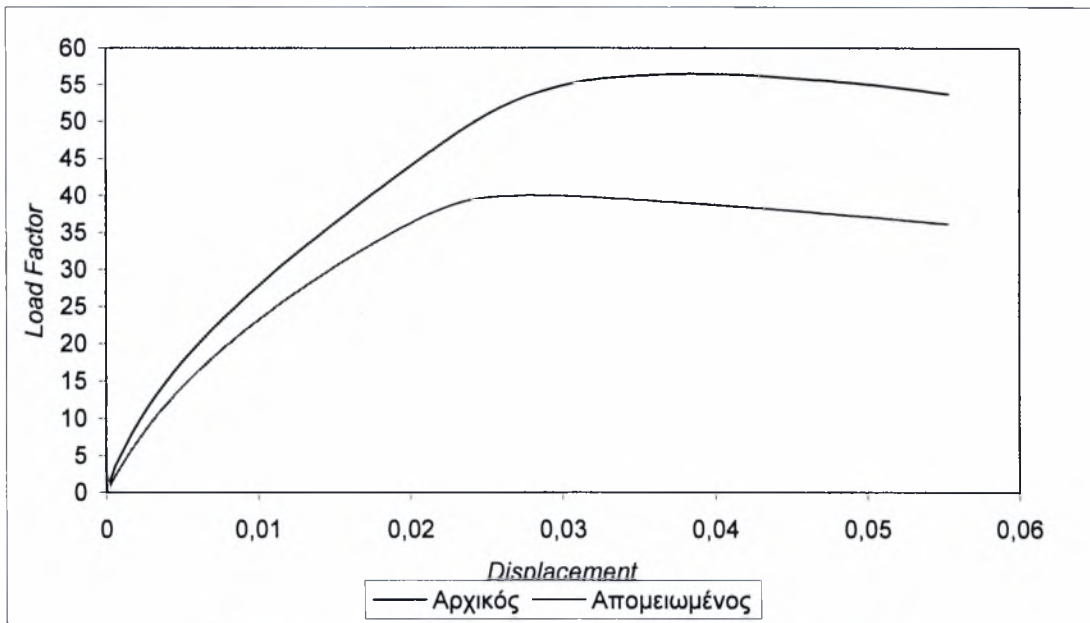


Σχήμα 5.8 Γράφημα μετακινήσεων απομειωμένης κατάστασης για κάθε σεισμικό φαινόμενο (αξονας εξέτασης NX)

5.6.2 Καμπύλη ικανότητας της βληθείσας κατασκευής



Σχήμα 5.9 Καμπύλη Ικανότητας 3όροφης βληθείσας κατασκευής



Σχήμα 5.10 Καμπύλες Ικανότητας 3όροφης κατασκευής

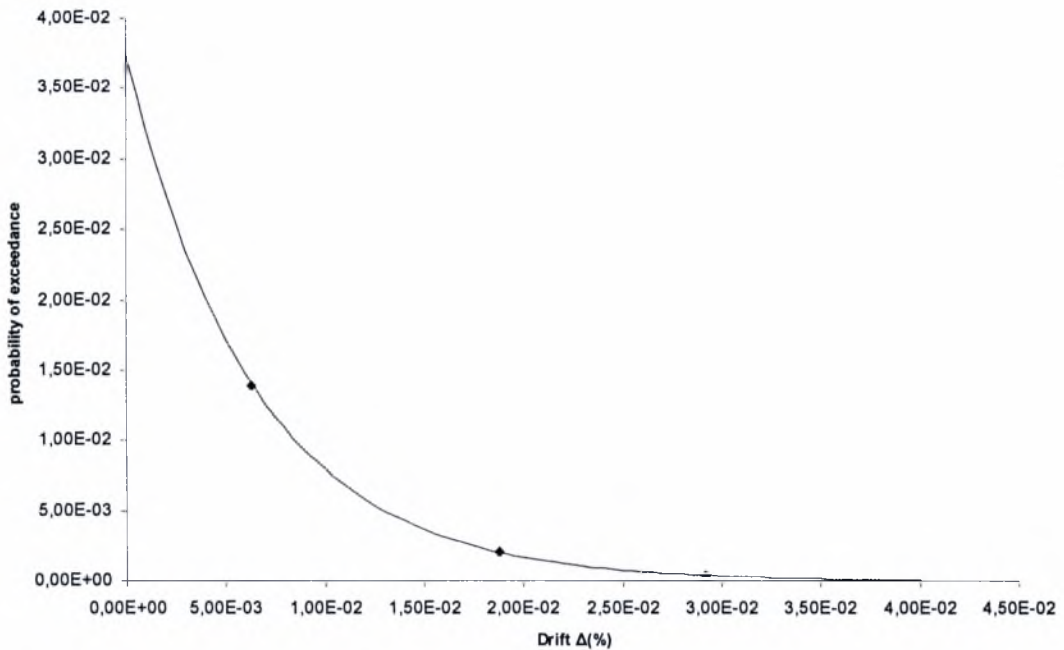
Παρατηρήσεις: Από το γράφημα είναι εμφανής αφενός μια μείωση δυσκαμψίας (κλίση), αφετέρου μια μείωση αντοχής.

### 5.6.3 Υπολογισμός του Κόστους Κύκλου ζωής της Βληθείσας Κατασκευής

Στον πίνακα που έπεται παρατίθενται όλοι οι υπολογισμοί που απαιτούνται προκειμένου να πάρουμε μια εικόνα οικονομικής φύσεως για τη κατασκευή.

Πίνακας 5.7 Υπολογισμός του Κόστους Κύκλου Ζωής της Βληθείσας Κατασκευής

Damage State	Drift	Pbar	Pi	Pi+1	P	Cost	PxCi
1	0	0,03748457	-0,03821	-0,03263	0,005571	0	0
2	0,1	0,03210779	-0,03263	-0,02789	0,004747	0,5	0,002374
3	0,2	0,02750225	-0,02789	-0,02038	0,007503	5	0,037514
4	0,4	0,02017826	-0,02038	-0,008	0,012383	20	0,247664
5	1	0,00796949	-0,008	-0,00231	0,005689	45	0,256022
6	1,8	0,00230937	-0,00231	-0,00036	0,001952	80	0,156139
7	3	0,00036024	-0,00036		0,00036	100	0,03603
							0,735743
							13,507



**Σχήμα 5.11** Υπολογισμός της ετήσιας πιθανότητας υπέρβασης ( $P$ ) για κάθε επίπεδο επικινδυνότητας

### 5.7 Ενίσχυση βληθείσας κατασκευής με χρήση ινοπλισμένων πολυμερών FRPs.

Ο τρόπος επέμβασης είναι η χρήση FRPs. Στη παρούσα Διπλωματική εκλέχθηκε εξ'αρχής να ενισχυθεί ο φορέας κατά αυτό τον τρόπο και να εξαχθούν τελικώς συμπεράσματα για την συνεισφορά τους καθώς και για το συνολικό κόστος κύκλου ζωής της κατασκευής. Τα FRPs θα εφαρμοσθούν με γνώμονα την ενίσχυση της περισφιγξης και με παράλληλη απαίτηση αύξησης της αντοχής. Η τελική κρίση των σεναρίων που έπονται θα γίνει λαμβάνοντας υπόψη τρεις κύριες παραμέτρους:

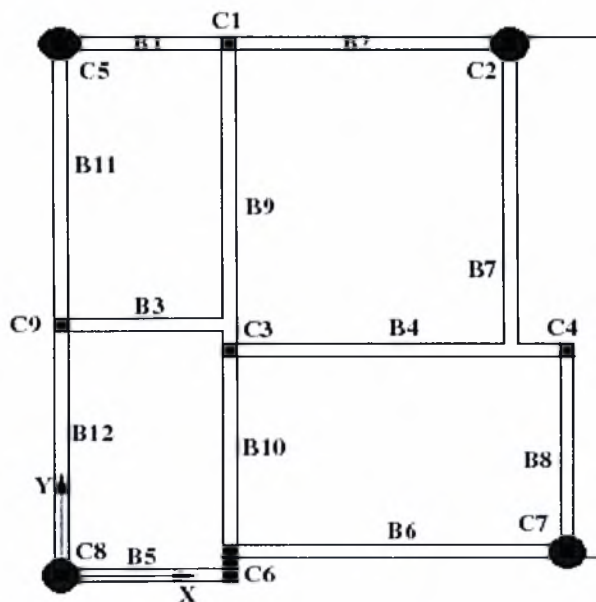
- i. Τη καμπύλη ικανότητας του ενισχυμένου φορέα
- ii. Το κόστος κύκλου ζωής της κατασκευής
- iii. Τα προφίλ των σχετικών μετακινήσεων για το δυσμενέστερο σεισμικό γεγονός (max Drifts)

Παρατήρηση: Όσο αναφορά τον ενισχυμένο φορέα στο κόστος κύκλου ζωής θα εισαχθούν και τα κόστη των FRPs. Οι τιμές είναι τρέχουσες και αφορούν συγκεκριμένο προϊόν της αγοράς (MegaWrap-200 Isomat)

Στη παρούσα Διπλωματική εργασία αποφασίσθη να προχωρήσουμε στα παρακάτω σενάρια ενίσχυσης της κατασκευής:

- i. Ενίσχυση των ακραίων υποστυλωμάτων μεταξύ ισογείου και 1<sup>ου</sup> ορόφου (4στρώσεις).
- ii. Ενίσχυση όλων των υποστυλωμάτων μεταξύ ισογείου και 1<sup>ου</sup> ορόφου (1στρώση).
- iii. Ενίσχυση όλων των υποστυλωμάτων μεταξύ ισογείου και 1<sup>ου</sup> ορόφου (2στρώσεις).
- iv. Ενίσχυση των τριών πιο καταπονημένων υποστυλωμάτων από απόψεως απαιτήσεως καμπυλότητας (2 στρώσεις). (βλέπε πίνακα 5.5)

Παρατήρηση: Η περιτύλιξη με το ανθρακούφασμα αφορά αποκλειστικά τη κρίσιμη περιοχή των υποστυλωμάτων



**Σχήμα 5.12** Τα ακραία υποστυλώματα στα οποία εκλέχθηκε να εφαρμοσθούν ινοπλισμένα πολυμερή FRPs (Σενάριο Α).

### 5.7.1 Λεπτομέρειες υπολογισμού στρώσεων φύλλων FRPs

Το κτήριο κατασκευάστηκε για φορτία βαρύτητας λαμβάνοντας για τα μεν μόνιμα φορτία τιμή ίση με  $0.5 \text{ kN/m}^2$  για τα δε κινητά τιμή ίση με  $2.0 \text{ kN/m}^2$ . Η φιλοσοφία σχεδιασμού του υπό όψη κτηρίου είναι αντιπροσωπευτική παλαιότερων κατασκευών που ανεγέρθησαν στη χώρα μας μεταξύ 1954 και 1985. Παρουσιάζει ασυμμετρίες και πληθώρα κατασκευαστικών ατελειών.

Η απόπειρα ενίσχυσης μας έγινε με γνώμονα την αύξηση της αντοχής με μια διαφορετική κάθε φορά απαίτηση για αύξηση της τιμής της. Για τον υπολογισμό του πάχους της ενίσχυσης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό FRPs strength που αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο Πατρών.

## 5.8 Ανάπτυξη Σεναρίων επέμβασης

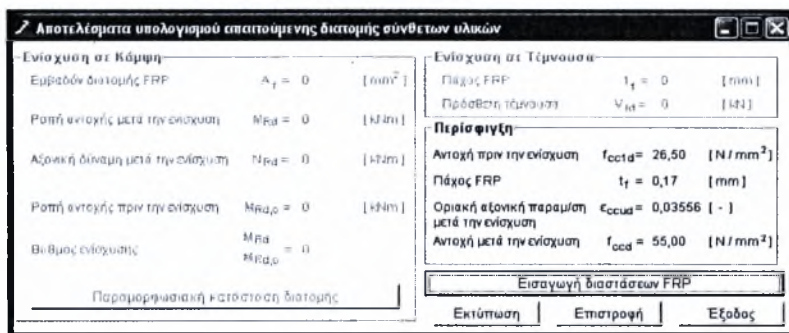
### 5.8.1 Ανάπτυξη Πρώτου Σεναρίου

The screenshot shows the 'Εισαγωγή Διδακτών' (FRP Reinforcement Input) window of the 'Αυματοποιημένη Διαστασιολόγηση Στοιχείων Ο. Σ. Ενισχυμένων με Σύνθετα Υλικά (FRP)' software. The window is divided into several sections for data entry:

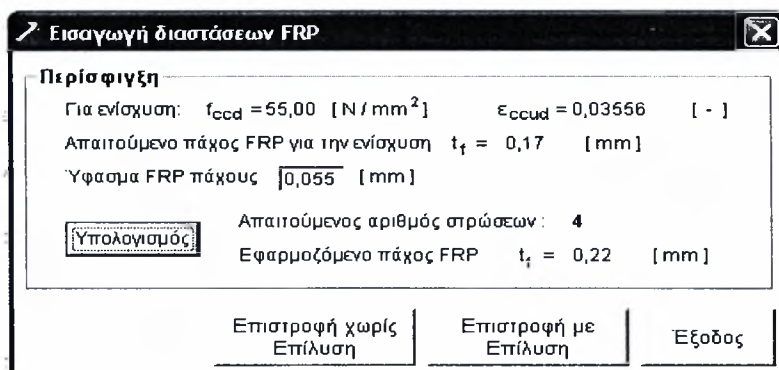
- Εισαγωγή Διδακτών:** Includes a diagram of a rectangular section with dimensions  $b$ ,  $h$ , and  $R$ , and a label for FRP reinforcement.
- Σκυρόδεμα:**
  - Κατηγορία: C12/15
  - Αντοχή σχεδιασμού  $f_{cd} = 26.5 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
- Σύνθετο Υλικό:**
  - Μέτρο ελαστικότητας  $E_f = 235 \text{ [kN/mm}^2\text{]}$
  - Αντοχή σχεδιασμού  $f_{fd} = 3800 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
  - Ενεργή αντοχή σχεδιασμού  $f_{fde} = 0.8 \times f_{fd}$
- Οπλισμοί Διατομής:**
  - Χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα  $f_{yk} = 371 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
  - Απόσταση συνδετήρων  $s = 0.07 \text{ [m]}$
  - Εμβαδόν συνδετήρων ανά διεύθυνση  $A_{st} = 0 \text{ [mm}^2\text{]}$
  - Επικάλυψη οπλισμών  $c = 0.01 \text{ [m]}$
- Ζητούμενα Προβλήματος:**
  - Αξονική καταπόνηση:**
    - Αύξηση αντοχής  $f_{add} = 55 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
    - Αύξηση αξονικής πίεσης  $\epsilon_{add} = 0$
  - Οριζόντια καταπόνηση παράλληλα στην:**
    - μικρή πλευρά
    - μεγάλη πλευρά
  - Αύξηση δείκτη πλαστικότητας  $\mu_d = 0$
- Γεωμετρία Διατομής:**
  - Πλάτος  $b = 0.125 \text{ [m]}$
  - Ύψος  $h = 0.125 \text{ [m]}$
  - Ακτίνα καμπύλης γωνίας  $R = 0.03 \text{ [m]}$
  - Διάμετρος  $\phi = 0 \text{ [m]}$
- Τύπος Διατομής:**
  - Ορθογώνιο υποσέλιμα
  - Κυκλικό υποσέλιμα

At the bottom, there are buttons for 'Επιλογές', 'Σχετικά με', and 'Εξοδος', along with fields for 'Έργο:', 'Όνομα:', 'Εισαφείς:', and a date/time stamp '10/10/2008 12:57 μμ'.

Σχήμα 5.13 Εισαγωγή παραμέτρων για εύρεση πάχους ενίσχυσης



Σχήμα 5.14 Εξαγωγή ορισμένων στοιχείων



Σχήμα 5.15 Εξαγωγή αριθμού στρώσεων που πρέπει να εφαρμοσθεί επι της διατομής

Στο σενάριο αυτό εκλέχθηκε η επέμβαση να λάβει τη μορφή τεσσάρων στρώσεων στα ακραία υποστρώματα μεταξύ ισογείου και 1<sup>ου</sup> ορόφου.

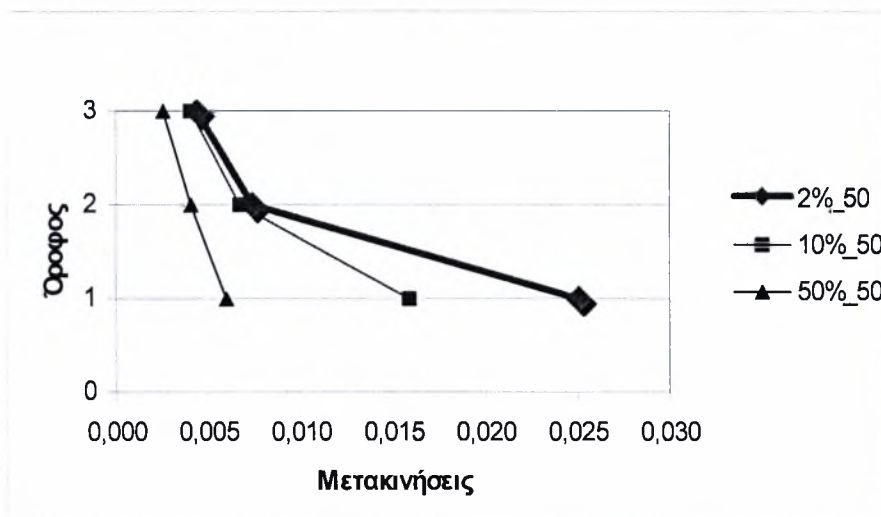
### 5.8.1.1 Αποτελέσματα Αναλύσεων για την Ενισχυμένη κατάσταση

Αποτελέσματα Push Over αναλύσεων σε όρους μετακινήσεις

Πίνακας 5.8 Συνολική παρουσίαση max Drifts ενισχυμένης κατάστασης

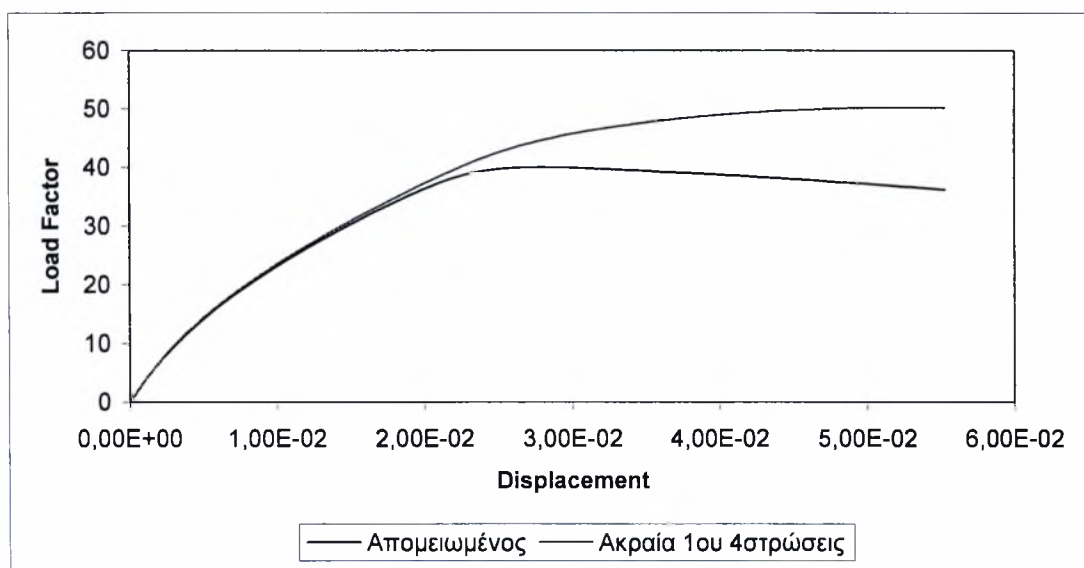
Μέγιστο όλων των συνδυασμών	0,0255717	2%
Μέγιστο όλων των συνδυασμών	0,02556562	10%
Μέγιστο όλων των συνδυασμών	0,0255717	50%





**Σχήμα 5.16** Γράφημα μετακινήσεων ενισχυμένης κατάστασης για κάθε σεισμικό φαινόμενο (αξονας εξέτασης NX) (A)

#### 5.8.1.2 Καμπύλη ικανότητας της ενισχυμένης κατασκευής (Σενάριο A)



**Σχήμα 5.17** Καμπύλες Ικανότητας βληθείσας και ενισχυμένης κατασκευής

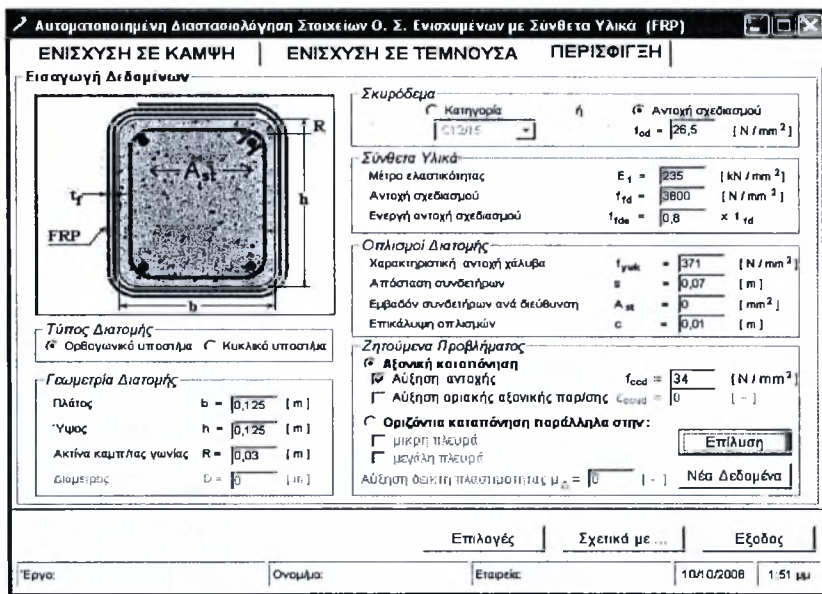
#### 5.8.1.3 Υπολογισμός του Κόστους Κύκλου ζωής της Ενισχυθείσας Κατασκευής

Στον πίνακα που έπεται παρατίθενται όλοι οι υπολογισμοί που απαιτούνται προκειμένου να πάρουμε μια εικόνα οικονομικής φύσεως για τη κατασκευή.

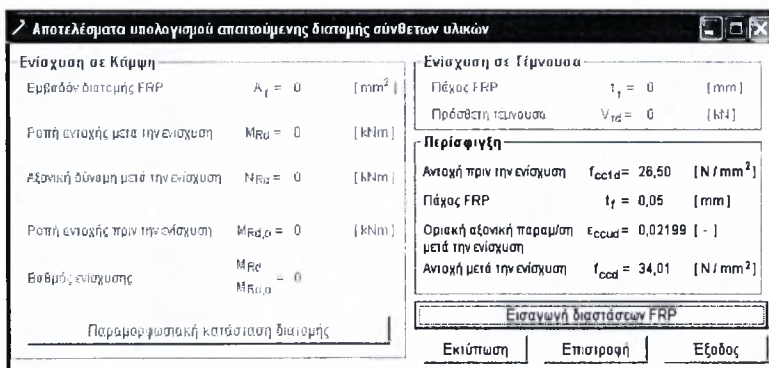
Πίνακας 5.9 Κόστος Κύκλου Ζωής της Ενισχυθείσας Κατασκευής

Damage State	Drift	Pbar	Pi	Pi+1	P	Cost	PxCi
1	0	0,04171559	-0,04261	-0,03539	0,007218	0	0
2	0,1	0,03477381	-0,03539	-0,02942	0,005977	0,5	0,002989
3	0,2	0,02898719	-0,02942	-0,02035	0,009067	5	0,045337
4	0,4	0,02014252	-0,02035	-0,00678	0,013567	20	0,271338
5	1	0,00675829	-0,00678	-0,00158	0,005204	45	0,234194
6	1,8	0,00157568	-0,00158	-0,00018	0,0014	80	0,111962
7	3	0,00017738	-0,00018		0,000177	100	0,01774
							0,68356
							12,549

5.8.2 Ανάπτυξη Δευτέρου Σεναρίου



Σχήμα 5.18 Εισαγωγή παραμέτρων για εύρεση πάχους ενίσχυσης



Σχήμα 5.19 Εξαγωγή ορισμένων στοιχείων

**Εισαγωγή διαστάσεων FRP**

Περίσφιγξη

Για ενίσχυση:  $f_{ccud} = 34,01$  [N/mm<sup>2</sup>]       $\epsilon_{ccud} = 0,02199$  [-]

Απαιτούμενο πάχος FRP για την ενίσχυση  $t_f = 0,05$  [mm]

Ύψος FRP πάχους  $\sqrt{0,055}$  [mm]

     Απαιτούμενος αριθμός στρώσεων: 1

Εφαρμοζόμενο πάχος FRP  $t_f = 0,06$  [mm]

**Σχήμα 5.20** Εξαγωγή αριθμού στρώσεων που πρέπει να εφαρμοσθεί επι της διατομής

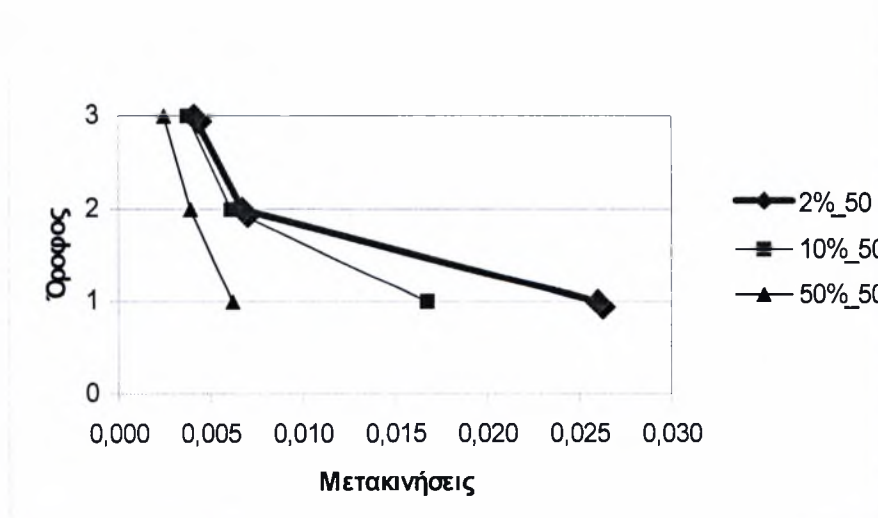
Στο σενάριο Β εκλέχθηκε η επέμβαση να λάβει τη μορφή μίας στρώσης με εφαρμογή σε όλα τα υποστυλώματα μεταξύ ισογείου και 1<sup>ου</sup> ορόφου.

### 5.8.2.1 Αποτελέσματα Αναλύσεων για την Ενισχυμένη κατάσταση

Αποτελέσματα Push Over αναλύσεων σε όρους μετακινήσεις

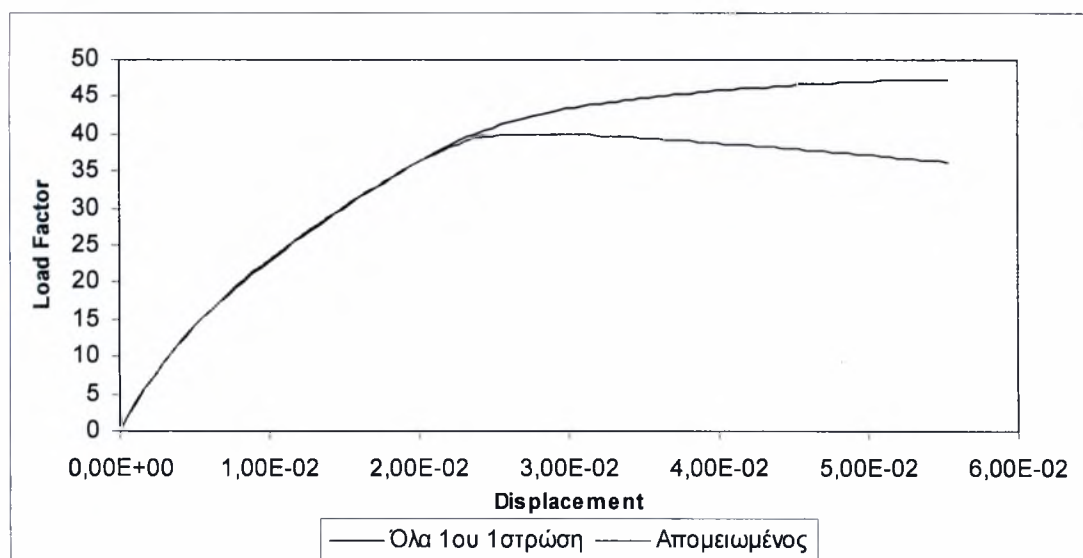
**Πίνακας 5.10** Συνολική παρουσίαση max Drifts ενισχυμένης κατάστασης

Μέγιστο όλων των συνδυασμών	<b>0,02641732</b>
Μέγιστο όλων των συνδυασμών	<b>0,02640874</b>
Μέγιστο όλων των συνδυασμών	<b>0,02641732</b>



**Σχήμα 5.21** Γράφημα μετακινήσεων ενισχυμένης κατάστασης για κάθε σεισμικό φαινόμενο (αξονας εξέτασης NX)(B)

## 5.8.2.2 Καμπύλη ικανότητας της ενισχυμένης κατασκευής (Σενάριο Β)



**Σχήμα 5.22** Καμπύλες Ικανότητας βληθείσας και ενισχυμένης κατασκευής

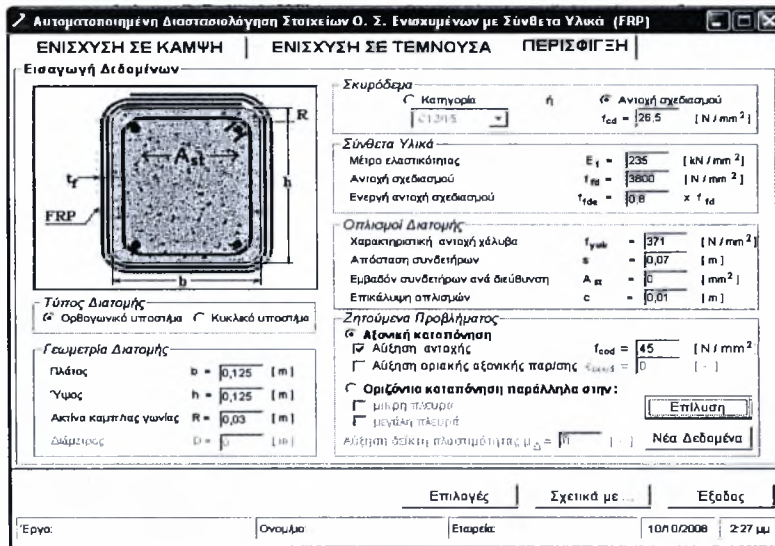
## 5.8.2.3 Υπολογισμός του Κόστους Κύκλου ζωής της Ενισχυθείσας Κατασκευής

Στον πίνακα που έπεται παρατίθενται όλοι οι υπολογισμοί που απαιτούνται προκειμένου να πάρουμε μια εικόνα οικονομικής φύσεως για τη κατασκευή.

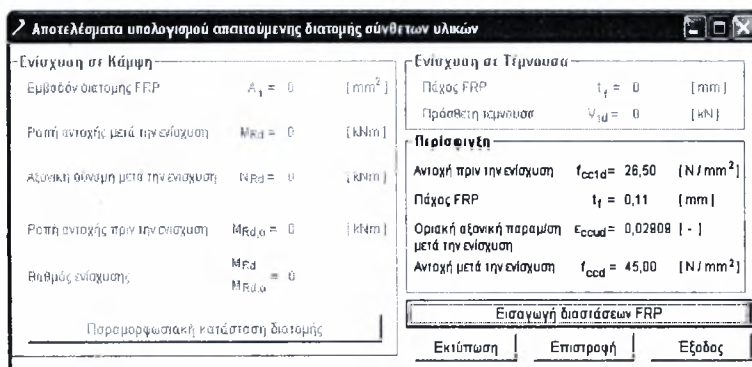
**Πίνακας 5.11** Κόστος Κύκλου Ζωής της Ενισχυθείσας Κατασκευής

Damage State	Drift	Pbar	Pi	Pi+1	P	Cost	PxCi
1	0	0,04251374	-0,04344	-0,0363	0,007149	0	0
2	0,1	0,03564452	-0,0363	-0,03034	0,005954	0,5	0,002977
3	0,2	0,02988521	-0,03034	-0,02123	0,009109	5	0,045546
4	0,4	0,02100793	-0,02123	-0,00732	0,013908	20	0,278153
5	1	0,00729734	-0,00732	-0,00178	0,005541	45	0,249329
6	1,8	0,00178186	-0,00178	-0,00022	0,001568	80	0,125474
7	3	0,000215	-0,00022		0,000215	100	0,021502
							0,722981
							<b>13,2727</b>

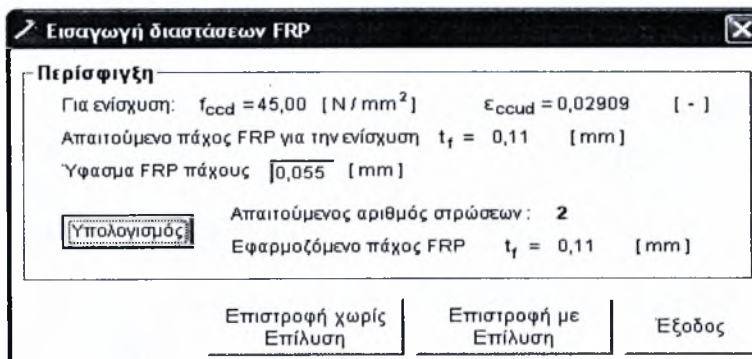
5.8.3 Ανάπτυξη Τρίτου Σεναρίου



Σχήμα 5.23 Εισαγωγή παραμέτρων για εύρεση πάχους ενίσχυσης



Σχήμα 5.24 Εξαγωγή ορισμένων στοιχείων



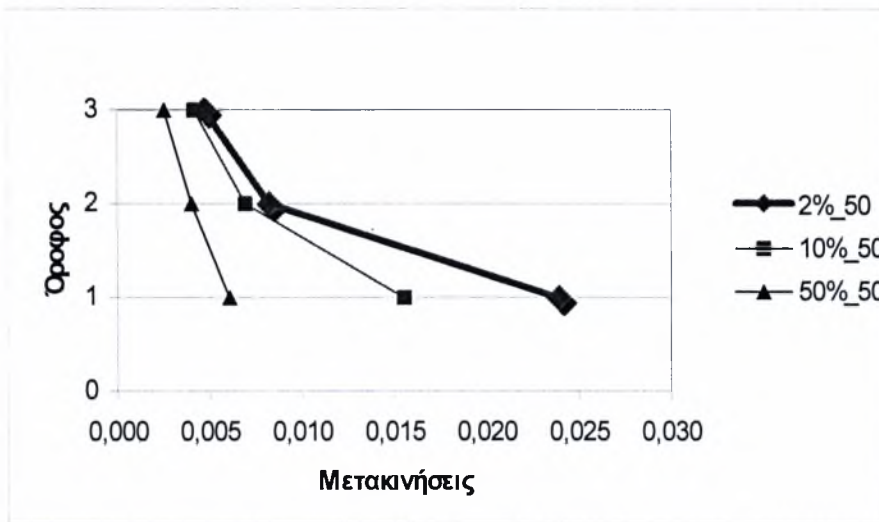
Σχήμα 5.25 Εξαγωγή αριθμού στρώσεων που πρέπει να εφαρμοσθεί επι της διατομής

Στο σενάριο Γ εκλέχθηκε η επέμβαση να λάβει τη μορφή δύο στρώσεων με εφαρμογή σε όλα τα υποστυλώματα μεταξύ ισογείου και 1<sup>ου</sup> ορόφου.

5.8.3.1 Αποτελέσματα Αναλύσεων για την Ενισχυμένη κατάσταση  
 Αποτελέσματα Push Over αναλύσεων σε όρους μετακινήσεις

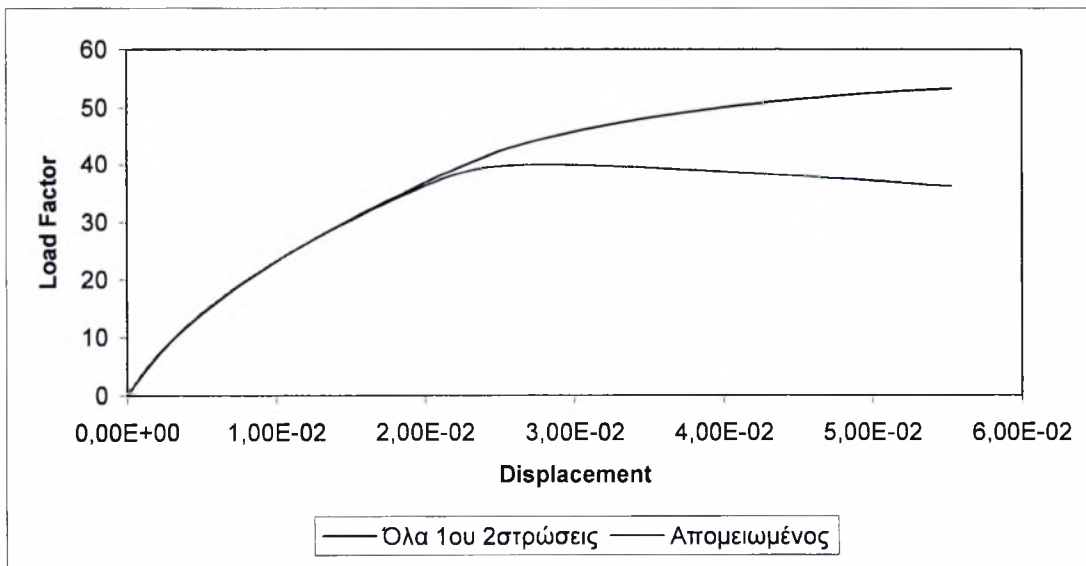
Πίνακας 5.12 Συνολική παρουσίαση max Drifts ενισχυμένης κατάστασης

Μέγιστο όλων των συνδυασμών	0,02436283
Μέγιστο όλων των συνδυασμών	0,0243556
Μέγιστο όλων των συνδυασμών	0,02436283



Σχήμα 5.26 Γράφημα μετακινήσεων ενισχυμένης κατάστασης για κάθε σεισμικό φαινόμενο (αξονας εξέτασης NX)(Γ)

5.8.3.2 Καμπύλη ικανότητας της ενισχυμένης κατασκευής (Σενάριο Γ)



Σχήμα 5.27 Καμπύλες Ικανότητας βληθείσας και ενισχυμένης κατασκευής

## 5.8.3.3 Υπολογισμός του Κόστους Κύκλου ζωής της Ενισχυθείσας Κατασκευής

Στον πίνακα που έπεται παρατίθενται όλοι οι υπολογισμοί που απαιτούνται προκειμένου να πάρουμε μια εικόνα οικονομικής φύσεως για τη κατασκευή.

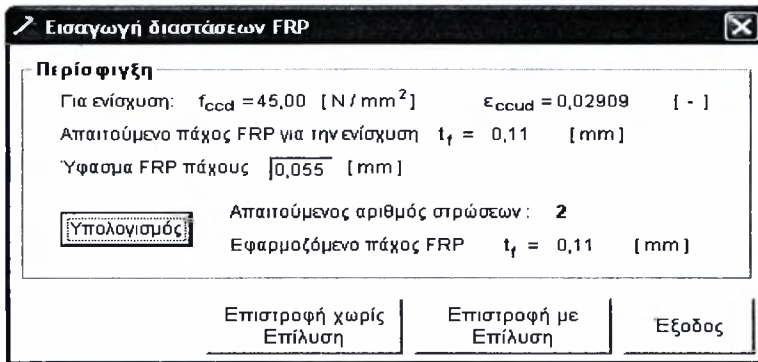
Πίνακας 5.13 Κόστος Κύκλου Ζωής της Ενισχυθείσας Κατασκευής

Damage State	Drift	Pbar	Pi	Pi+1	P	Cost	PxCi
1	0	0,04650967	-0,04763	-0,03902	0,008603	0	0
2	0,1	0,03827184	-0,03902	-0,032	0,007024	0,5	0,003512
3	0,2	0,03149309	-0,032	-0,02156	0,010444	5	0,05222
4	0,4	0,02132492	-0,02156	-0,00664	0,014913	20	0,298257
5	1	0,00662069	-0,00664	-0,00139	0,00525	45	0,236245
6	1,8	0,00139185	-0,00139	-0,00013	0,001259	80	0,100692
7	3	0,00013416	-0,00013		0,000134	100	0,013417
							0,704344
							12,93055

## 5.8.4 Ανάπτυξη Τέταρτου Σεναρίου

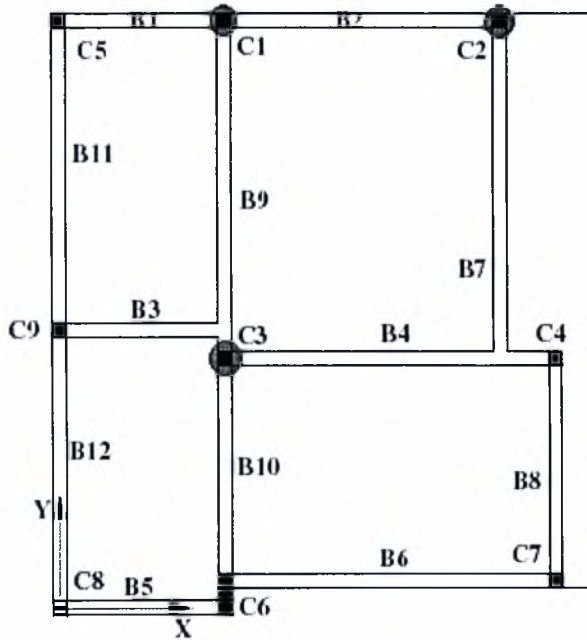
Σχήμα 5.28 Εισαγωγή παραμέτρων για εύρεση πάχους ενίσχυσης

Σχήμα 5.29 Εξαγωγή ορισμένων στοιχείων



Σχήμα 5.30 Εξαγωγή αριθμού στρώσεων που πρέπει να εφαρμοσθεί επι της διατομής

Στο σενάριο Δ εκλέχθηκε η επέμβαση να λάβει τη μορφή δύο στρώσεων με εφαρμογή σε εκείνα τα υποστυλώματα στα οποία παρατηρήθηκαν οι μεγαλύτερες απαιτήσεις καμπυλότητας. Η επέμβαση θα περιορισθεί σε υποστυλώματα μεταξύ ισογείου και 1<sup>ου</sup> ορόφου. Βάση του πίνακα 5.5 και με το σκεπτικό ενίσχυσης τριών υποστυλωμάτων εκλέγουμε να ενισχύσουμε τα εξής: col1, col2 και col3.



Σχήμα 5.31 Απεικόνιση των τριών υπο ενίσχυση υποστυλωμάτων.

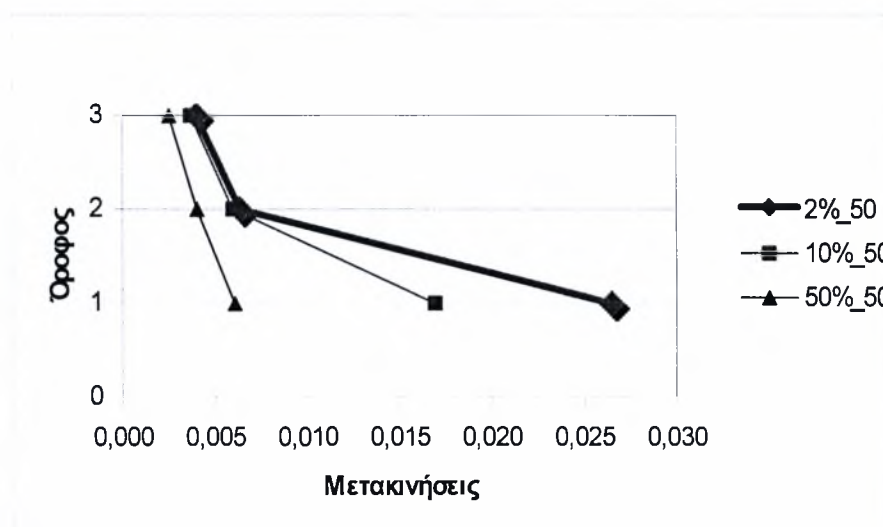
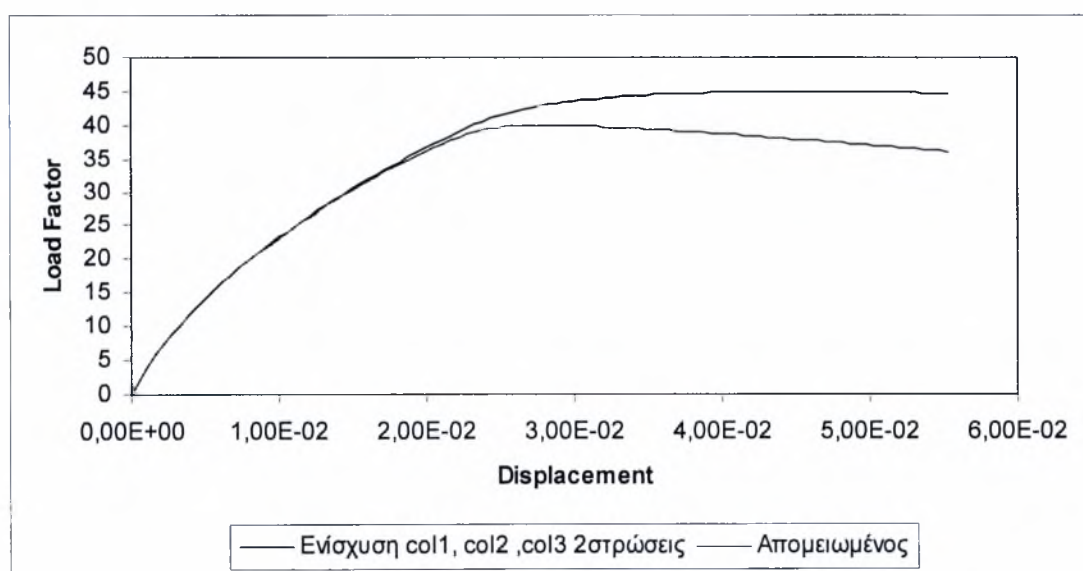


## 5.8.4.1 Αποτελέσματα Αναλύσεων για την Ενισχυμένη κατάσταση

Αποτελέσματα Push Over αναλύσεων σε όρους μετακινήσεις

Πίνακας 5.14 Συνολική παρουσίαση *max Drifts* ενισχυμένης κατάστασης

Μέγιστο όλων των συνδυασμών	0,02690202
Μέγιστο όλων των συνδυασμών	0,02689437
Μέγιστο όλων των συνδυασμών	0,02690202

Σχήμα 5.32 Γράφημα μετακινήσεων ενισχυμένης κατάστασης για κάθε σεισμικό φαινόμενο (αξονας εξέτασης *NX*)( $\Delta$ )5.8.4.2 Καμπύλη ικανότητας της ενισχυμένης κατασκευής (Σενάριο  $\Delta$ )

Σχήμα 5.33 Καμπύλες Ικανότητας βληθείσας και ενισχυμένης κατασκευής

## 5.8.4.3 Υπολογισμός του Κόστους Κύκλου ζωής της Ενισχυθείσας Κατασκευής

Στον πίνακα που έπεται παρατίθενται όλοι οι υπολογισμοί που απαιτούνται προκειμένου να πάρουμε μια εικόνα οικονομικής φύσεως για τη κατασκευή.

**Πίνακας 5.15** Κόστος Κύκλου Ζωής της Ενισχυθείσας Κατασκευής

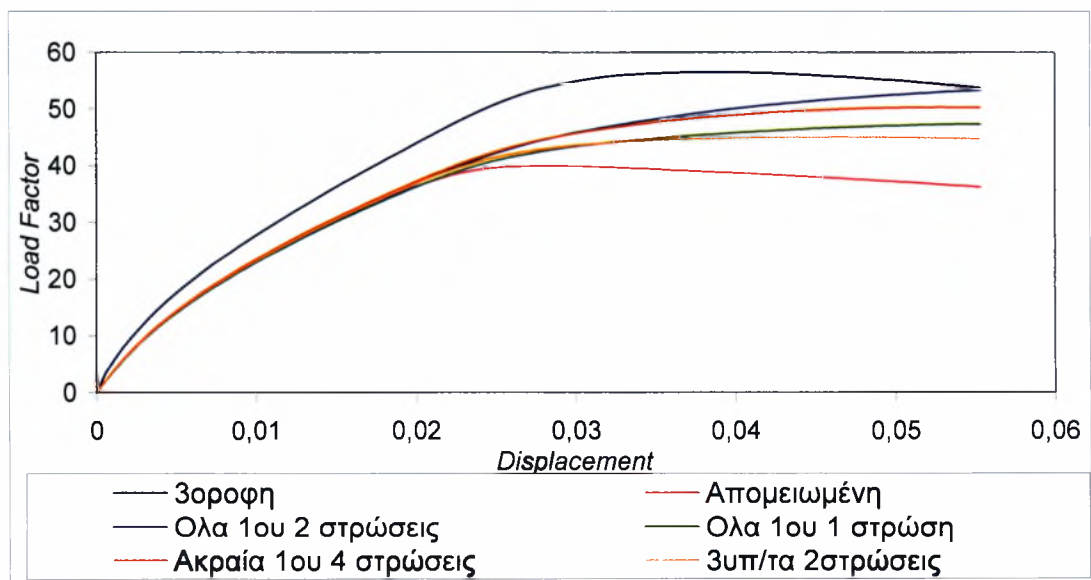
Damage State	Drift	Pbar	Pi	Pi+1	P	Cost	PxCi
1	0	0,04016913	-0,041	-0,03444	0,006554	0	0
2	0,1	0,0338579	-0,03444	-0,02895	0,005491	0,5	0,002745
3	0,2	0,02853827	-0,02895	-0,02048	0,00847	5	0,04235
4	0,4	0,0202751	-0,02048	-0,0073	0,013186	20	0,263726
5	1	0,00727057	-0,0073	-0,00185	0,005443	45	0,244941
6	1,8	0,00185229	-0,00185	-0,00024	0,001616	80	0,129263
7	3	0,00023819	-0,00024		0,000238	100	0,023822
							0,706847
							12,97652

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΚΡΙΣΕΙΣ

#### 6.1 Ανασκόπηση - Συμπεράσματα

Στο κάτωθι γράφημα είναι εμφανής αφενός η μείωση δυσκαμψίας, αφετέρου η μείωση αντοχής που επήλθε στο φορέα λόγω του δυσμενέστερου σεισμικού φαινομένου που αναμένεται να πλήξει τη κατασκευή στον αναμενόμενο χρόνο ζωής της. Από τη βιβλιογραφία είναι γνωστό ότι η προσθήκη ινοπλισμένων πολυμερών αναμένεται να συνεισφέρει ουσιαστικά στην αύξηση της αντοχής της κατασκευής ωστόσο η προσφορά τους στο τομέα της δυσκαμψίας είναι σχεδόν ανύπαρκτη (Τριανταφύλλου). Είναι επομένως λογικό να περιμένουμε από τις αναλύσεις καμπύλες ικανότητας ενισχυμένων φορέων στις οποίες η δυσκαμψία (κλίση) θα είναι σχεδόν αμετάβλητη σε σχέση με εκείνη του απομειωμένου φορέα ενώ η αντοχή θα "πιάσει" μεγαλύτερες τιμές. Το γράφημα που ακολουθεί πιστοποιεί τα ανωτέρω.



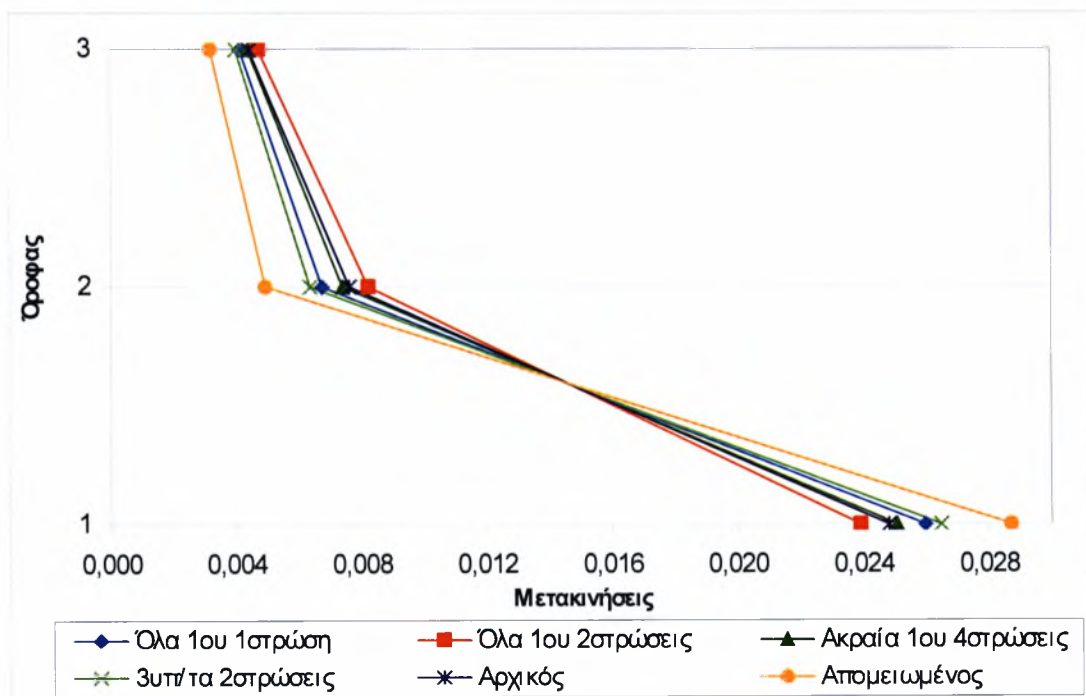
**Σχήμα 6.1** Καμπύλες Ικανότητας όλων των υπο εξέταση σεναρίων επέμβασης

Η κρίση των τεσσάρων σεναρίων επέμβασης έγινε λαμβάνοντας υπόψη τρεις κύριες παραμέτρους:

- i. Την αύξηση της αντοχής της κατασκευής
- ii. Το προφίλ των σχετικών μετακινήσεων για κάθε σενάριο ενίσχυσης
- iii. Το κόστος κύκλου ζωής της κατασκευής (LCC)

Σκοπός τις παρούσας Διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση μιας υπάρχουσας κατασκευής, ο υπολογισμός της απομείωσης αντοχών και δυσκαμψιών που υφίσταται και ακολούθως η αξιολόγηση διαφόρων σεναρίων επέμβασης. Σκοπό δεν έχει να καταδείξει τη καλύτερη λύση αλλά να αξιολογήσει σενάρια επέμβασης με πέραν του ενός κριτηρίου. Κατά αυτό τον τρόπο η κρίση δεν θα είναι μονόπλευρη και η επιλογή θα είναι βασισμένη σε μια ποικιλία πληροφοριών.

Το γράφημα 6.1 καταδुकνύει ως τη πιο προσοδοφόρα λύση από απόψεως αντοχής την εφαρμογή δύο στρώσεων FRPs επι όλων των υποστυλωμάτων μεταξύ ισογείου και πρώτου ορόφου. Ακολουθεί η λύση της εφαρμογής τεσσάρων στρώσεων στα γωνιακά υποστυλώματα. Εξετάζοντας τα προφίλ των σχετικών μετακινήσεων των ενισχυμένων πλέον φορέων αποκτούμε μια ακόμα εικόνα της συμπεριφοράς του κτηρίου στο δυσμενέστερο αναμενόμενο σεισμικό γεγονός.



**Σχήμα 6.2** Προφίλ Σχετικών μετακινήσεων όλων των σεναρίων ενίσχυσης (ασθενέστερος άξονας NX, 2%\_50).

Παρατηρούμε στον απομειωμένο φορέα ότι μια ενδεχόμενη νέα πλήξη από ισχυρότατο σεισμικό φαινόμενο θα εμφανίσει πολύ μεγάλες μετακινήσεις στη πλάκα του 1<sup>ου</sup> ορόφου με ορατό κίνδυνο δημιουργίας μηχανισμού ορόφου (πρόβλημα *pilotis*). Τα σενάρια "όλα 1<sup>ου</sup> 2στρώσεις" και "ακραία 1<sup>ου</sup> 4στρώσεις" φαίνεται να

προσφέρουν στη κατασκευή πιο ομοιόμορφες κατανομές απαιτήσεων σε σχετική μετακίνηση και με τιμές ελαφρώς μικρότερες.

Το σενάριο εφαρμογής δύο στρώσεων σε συγκεκριμένα τρία υποστυλώματα της κατασκευής θα εμφανίσει τις μεγαλύτερες απαιτήσεις σχετικών μετακινήσεων πρώτου ορόφου μεταξύ όλων των σεναρίων ενίσχυσης. Το σενάριο εφαρμογής δύο στρώσεων σε όλα τα υποστυλώματα μεταξύ ισογείου και 1<sup>ου</sup> ορόφου εμφανίζει μια αρμονικότερη και ηπιότερη συμπεριφορά των απαιτήσεων σχετικών μετακινήσεων καθ' ύψος.

**Πίνακας 6.1** Σύνοψη αποτελεσμάτων αναλύσεως κόστους κύκλου ζωής LCC

Σενάριο	Load Factor	Αύξηση Load Factor	Μήκος FRPs (m)	$C_{LS}$
Αρχικός	53,8205297			9,5923
Απομειωμένος	36,18675551			13,5070
<b>Σενάρια Επέμβασης</b>				
Όλα 1ου 1 στρώση	47,3210205	11,13426499	10	13,2727
Όλα 1ου 2 στρώσεις	53,3579324	17,17117689	20	12,9305
Ακραία 1ου 4στρώσεις	50,2120345	14,02527899	16	12,5490
3υπ/τα 2στρώσεις	44,7076271	8,52087159	6	12,97652

Εφόσον αντιμετωπίζουμε την ίδια κατασκευή και στα τέσσερα σενάρια επέμβασης εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι το αρχικό κόστος κατασκευής  $C_{in}$  θα είναι κοινό. Ισχύει  $C_{tot(t,s)} = C_{in(s)} + C_{LS(t,s)}$ , επομένως κριτήριο θα αποτελέσει το  $C_{LS}$  δηλαδή το κόστος επαναφοράς της κατασκευής στη κατάσταση εκκίνησης. Από το πίνακα 6.1 είναι σαφές ότι το σενάριο των τεσσάρων στρώσεων στα γωνιακά υποστυλώματα έχει ένα προβάδισμα ,ακολουθεί εκείνο των δύο στρώσεων σε όλα τα υποστυλώματα μεταξύ ισογείου και πρώτου.

Ολοκληρώνοντας θα μπορούσε να προκριθεί το σενάριο των δύο στρώσεων εφαρμογής σε όλα τα υποστυλώματα μεταξύ ισογείου και 1<sup>ου</sup> ορόφου ως λογική συνέπεια των ανωτέρω .

---

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ

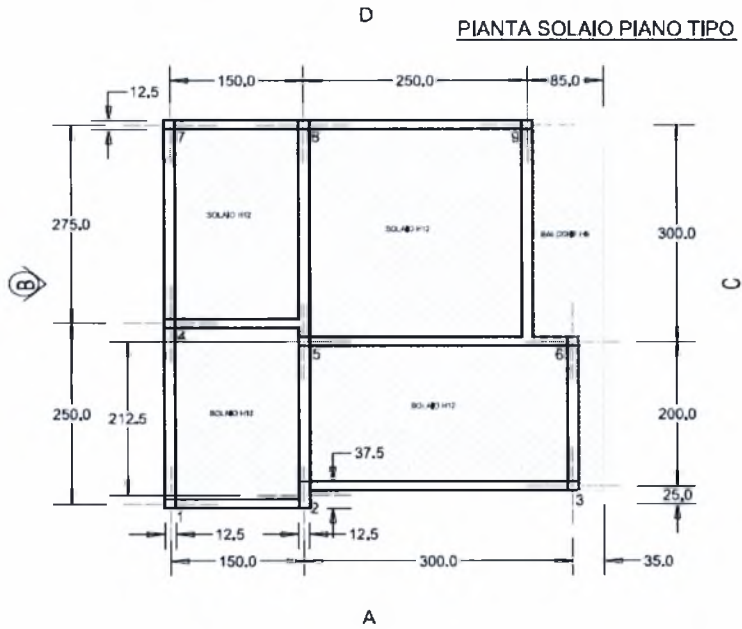
---

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

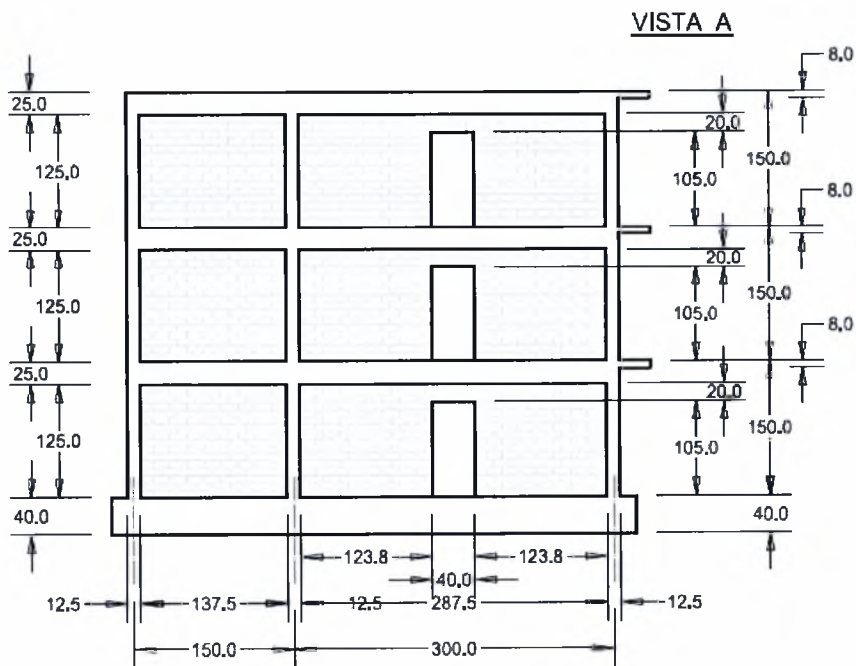
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ- ΣΧΕΔΙΑ ΟΠΛΙΣΗΣ

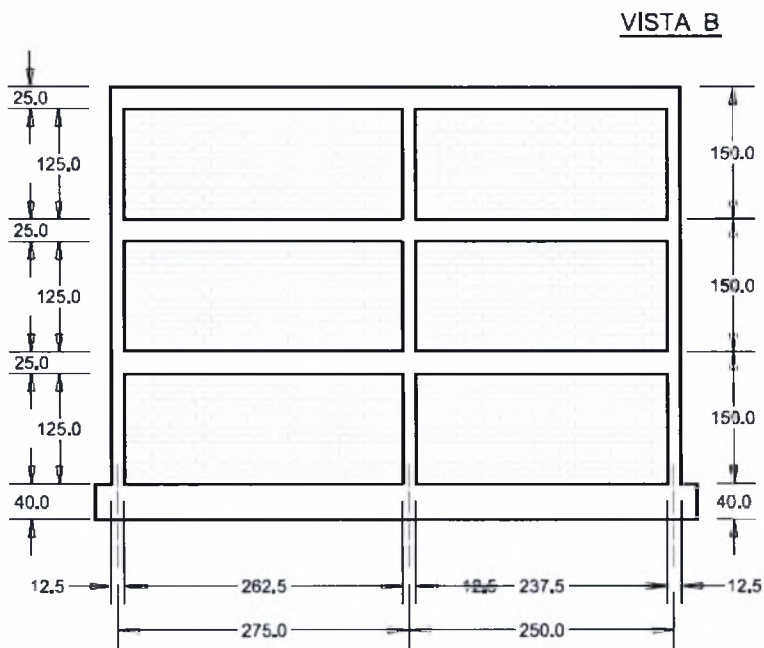
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Σχέδια Ζορόφου υπό κλίμακα Μοντέλου που εισήχθη στο SeismoStruct

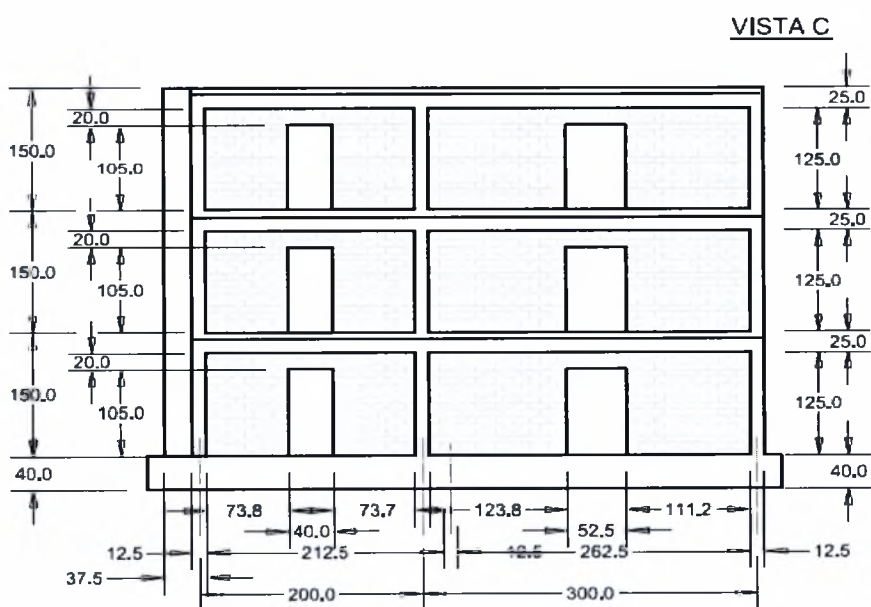


Σχέδιο A.1: Κάτοψη του υπό μελέτη μοντέλου



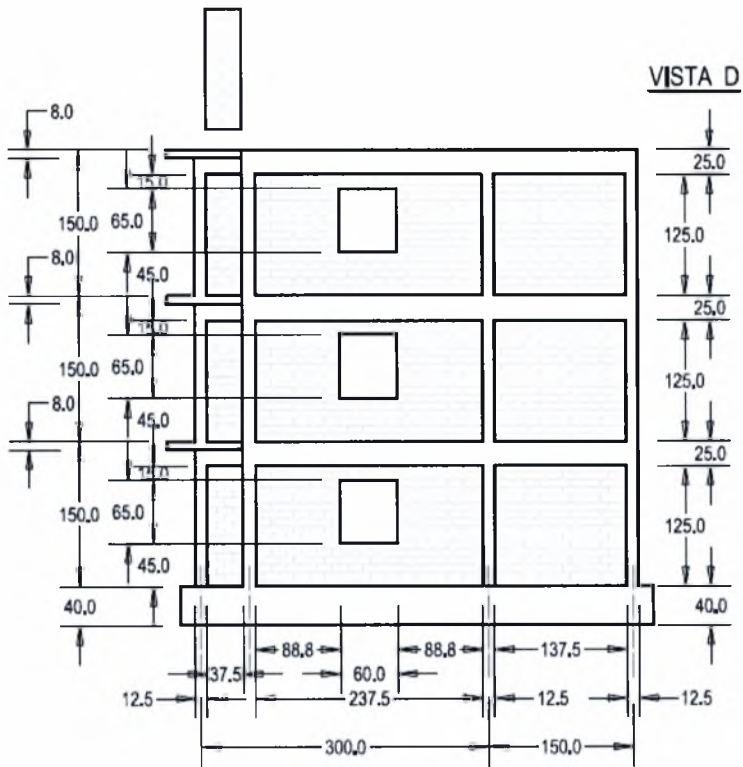


Σχέδιο Α.3: Όψη Β του υπό μελέτη μοντέλου



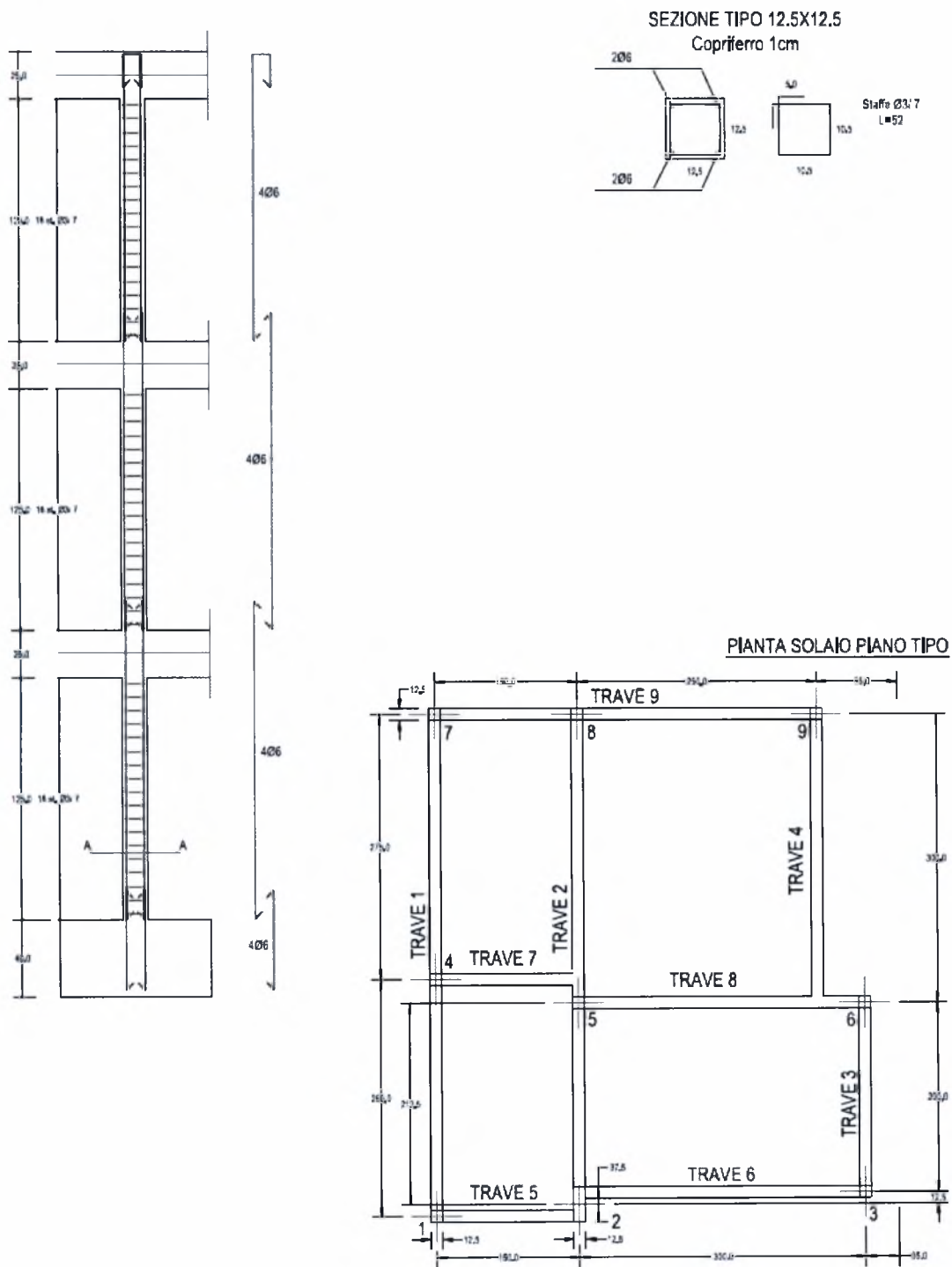
Σχέδιο Α.4: Όψη C του υπό μελέτη μοντέλου



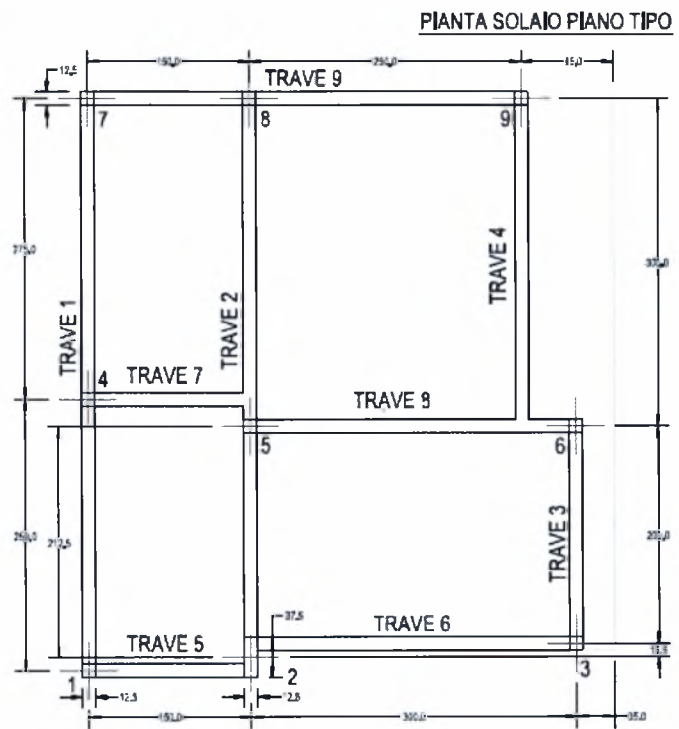
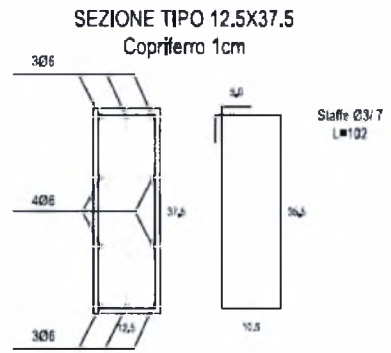
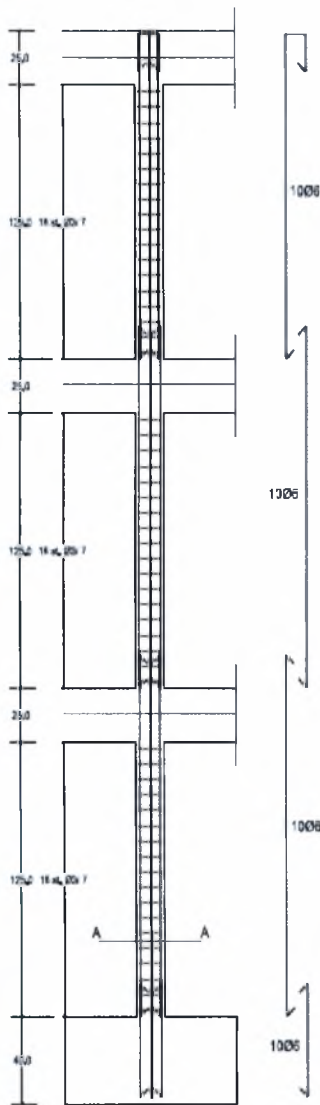


Σχέδιο Α.5: Όψη D της υπό μελέτη κατασκευής

## 5.2 Σχέδια Οπλισμών - Λεπτομερειών

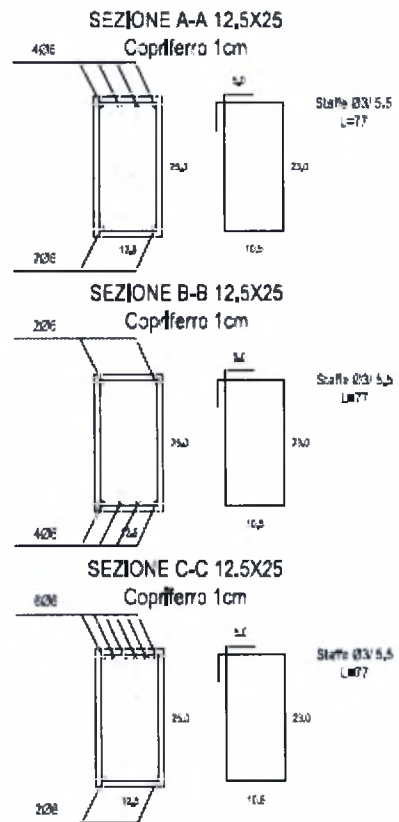
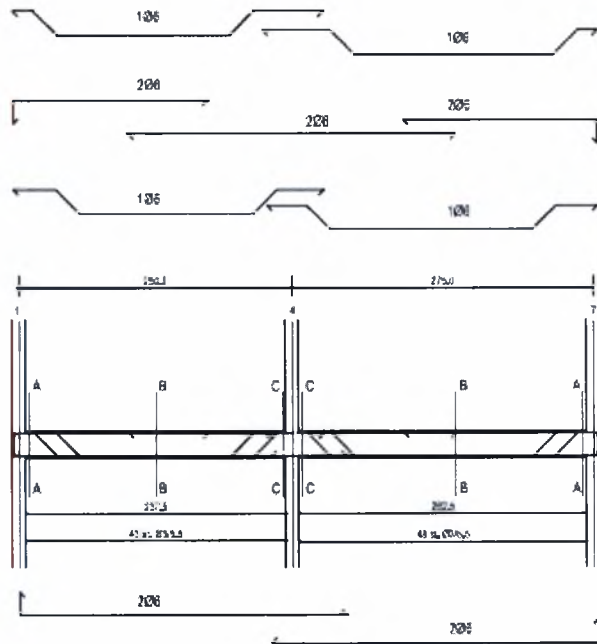


Σχέδιο Α.6: Οπλισμοί υποστυλωμάτων (C1,C2,C3,C4,C5,C7,C8,C9)

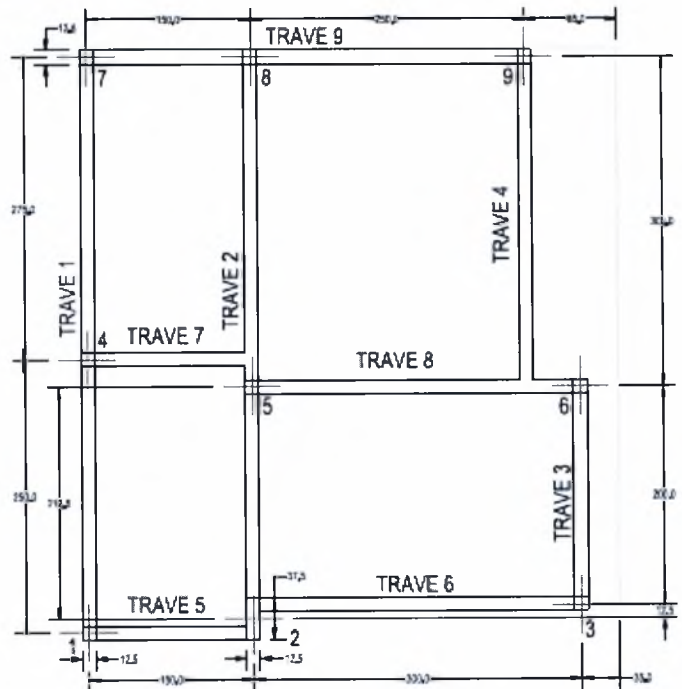


Σχέδιο A.7: Οπλισμός υποστυλώματος C6

Trave N.1

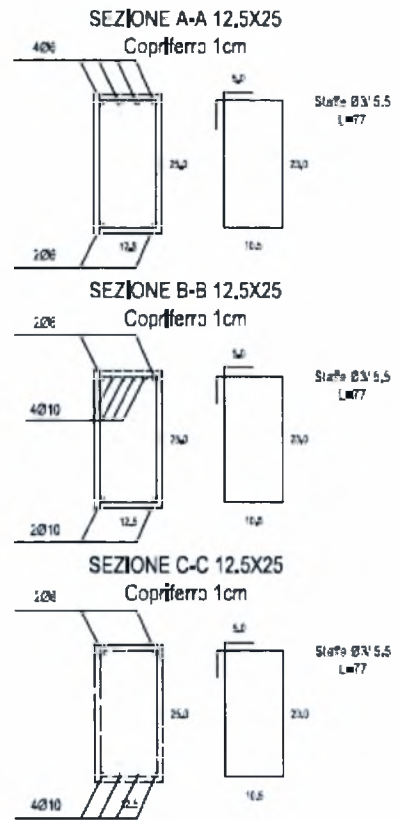
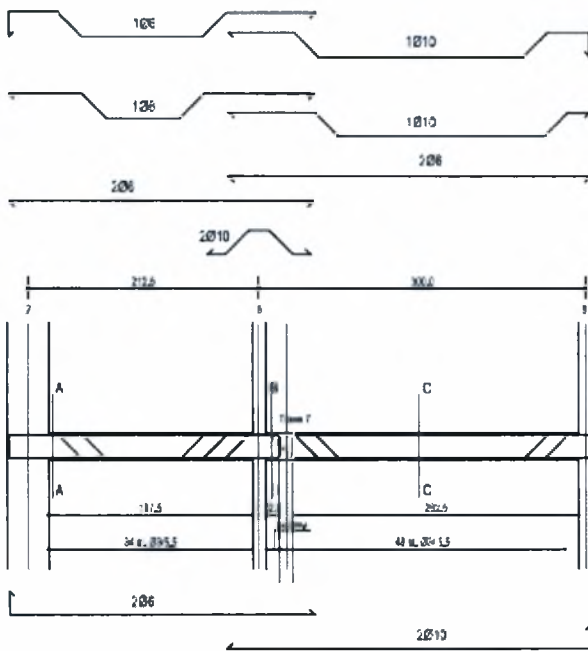


PIANTA SOLAIO PIANO TIPO

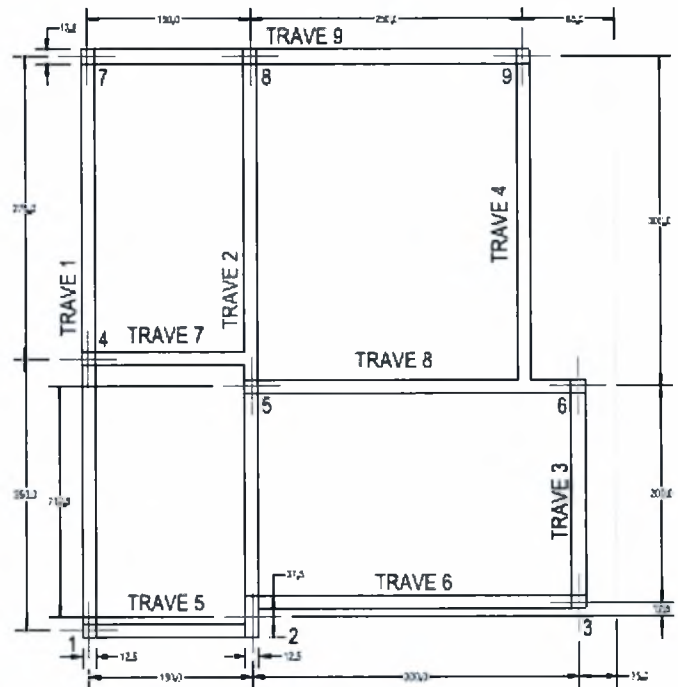


Σχέδιο A.8: Οπλισμός δοκού TRAVE\_1

Trave N.2

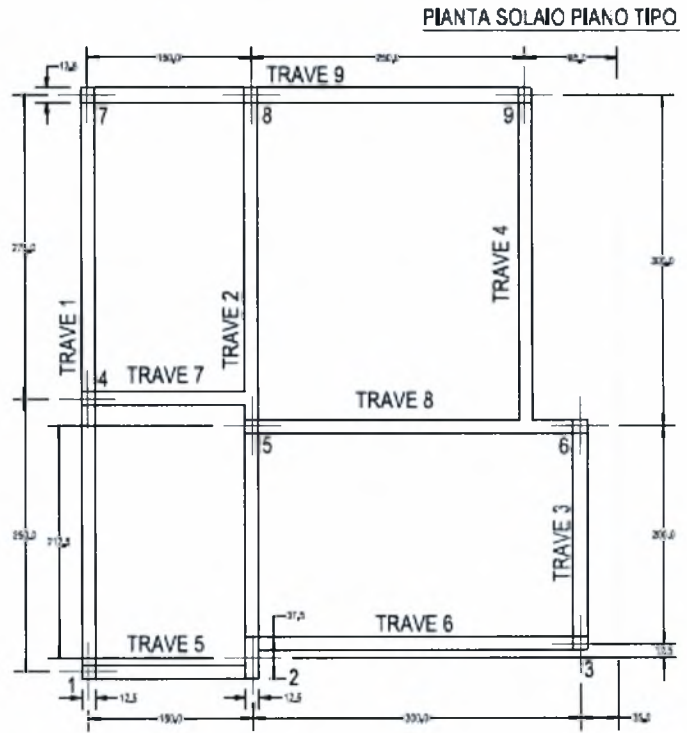
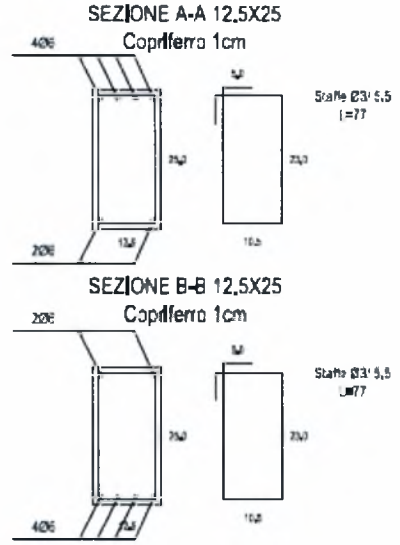
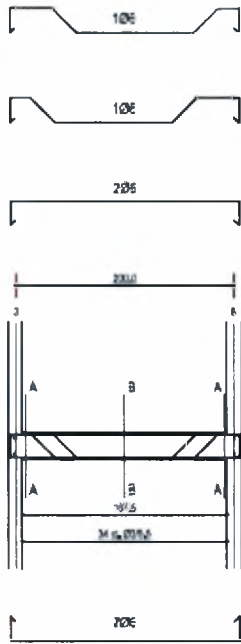


PIANTA SOLAIO PIANO TIPO



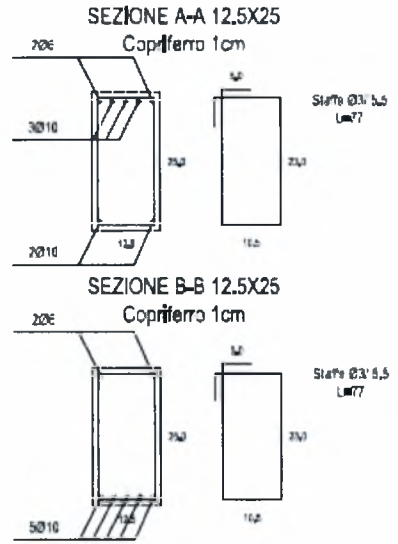
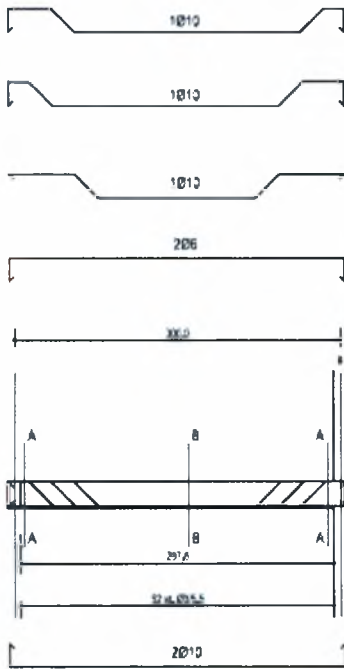
Σχέδιο Α.9: Οπλισμός δοκού TRAVE\_2

Trave N.3

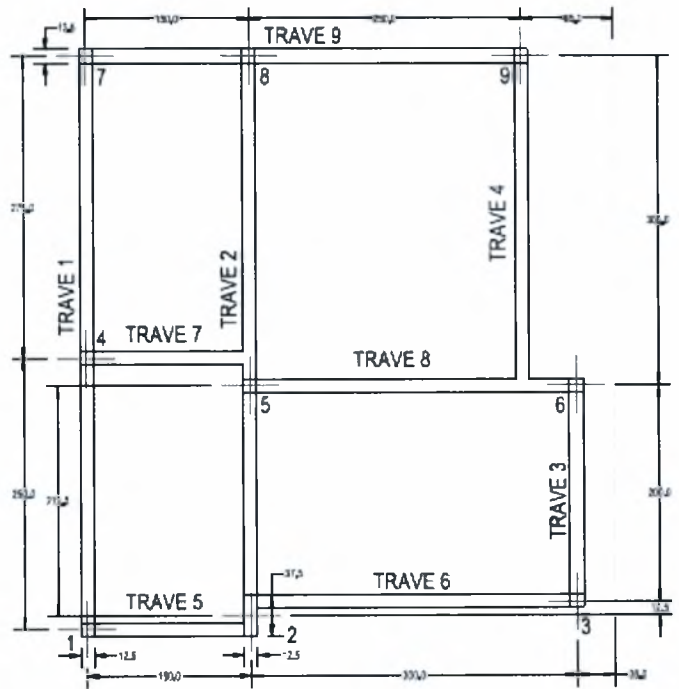


Σχέδιο Α.10: Οπλισμός δοκού TRAVE\_3

Trave N.4

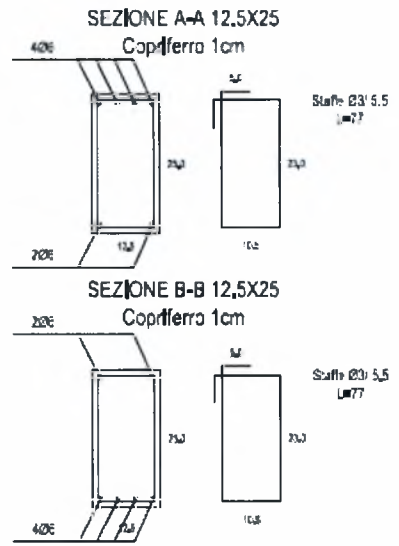
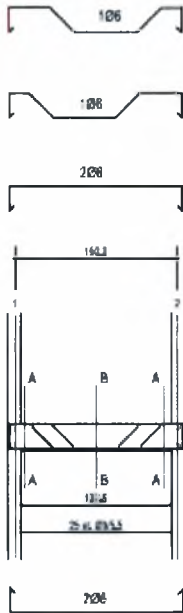


PIANTA SOLAIO PIANO TIPO

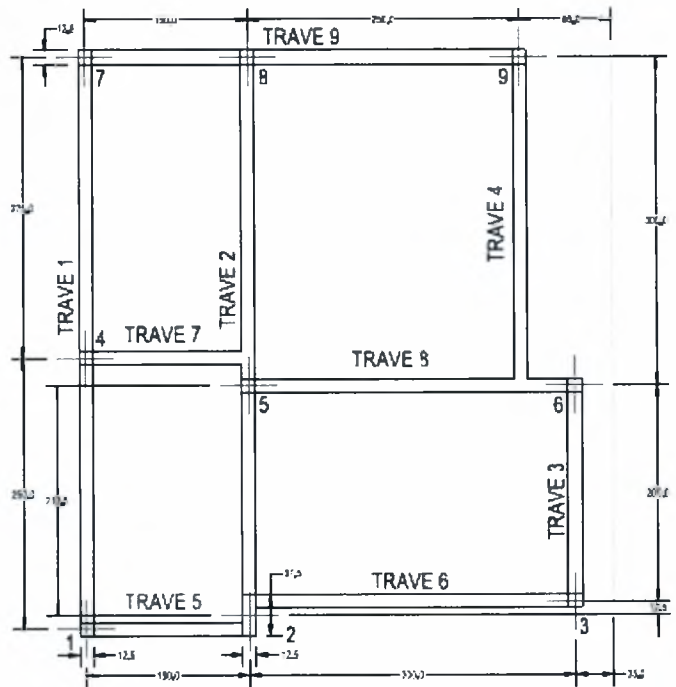


Σχέδιο A.11: Οπλισμός δοκού TRAVE\_4

Trave N.5



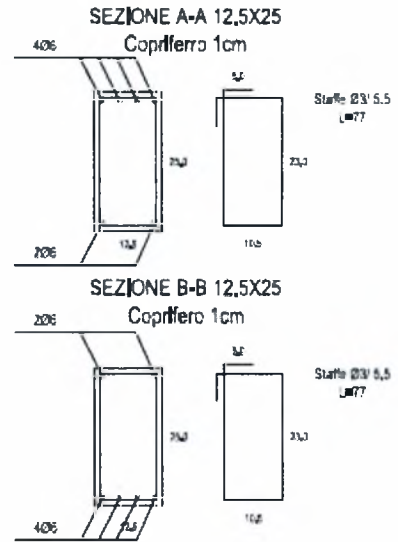
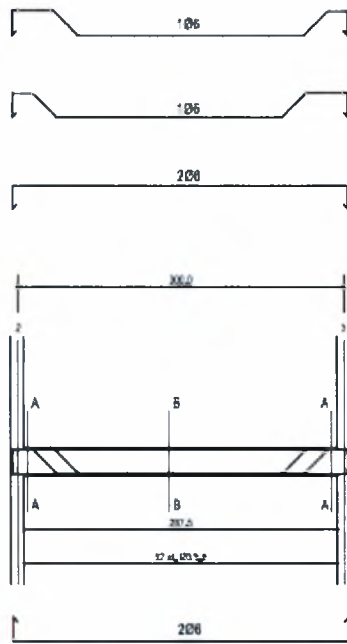
PIANTA SOLAIO PIANO TIPO



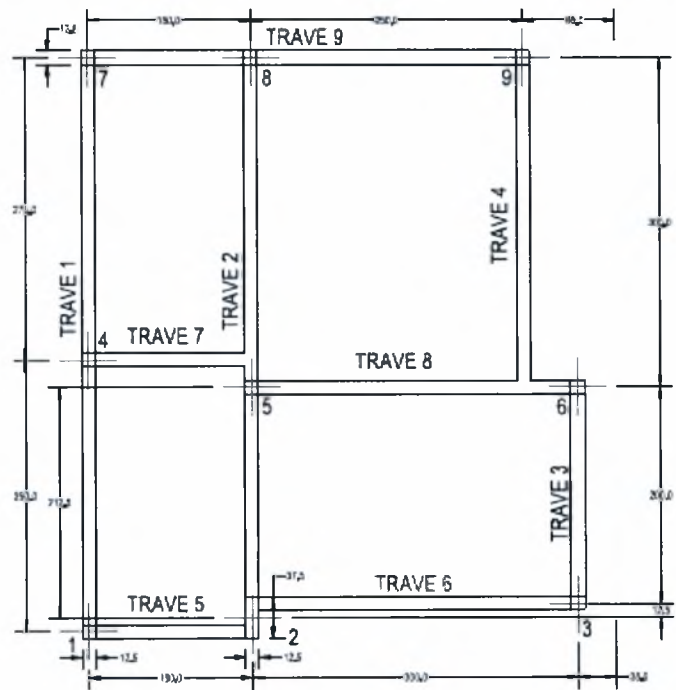
Σχέδιο A.12: Οπλισμός δοκού TRAVE\_5



Trave N.6

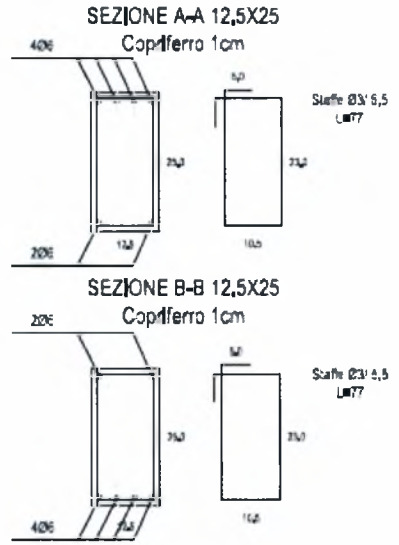
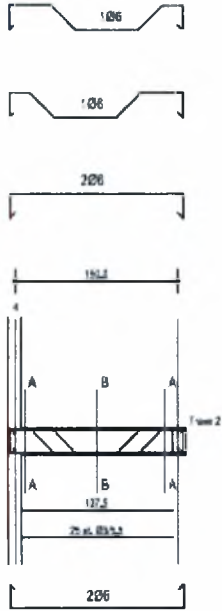


PIANTA SOLAIO PIANO TIPO

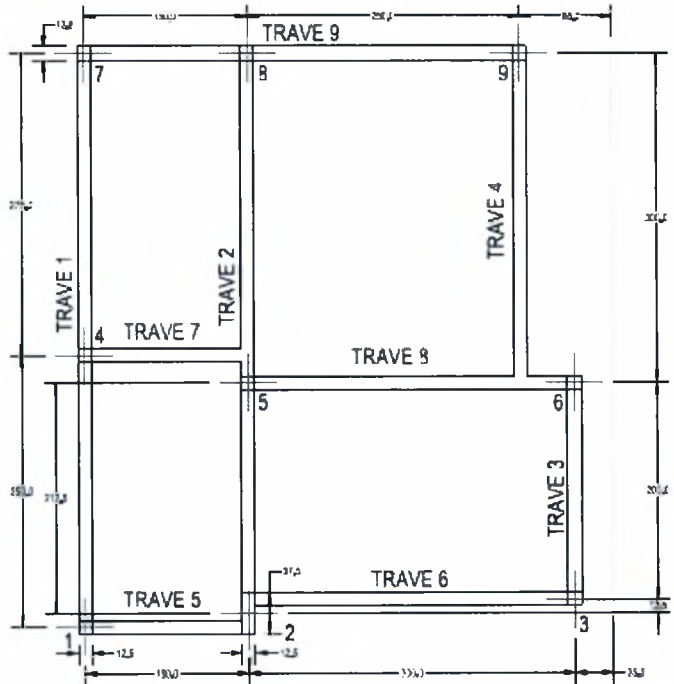


Σχέδιο A.13: Οπλισμός δοκού TRAVE\_6

Trave N.7

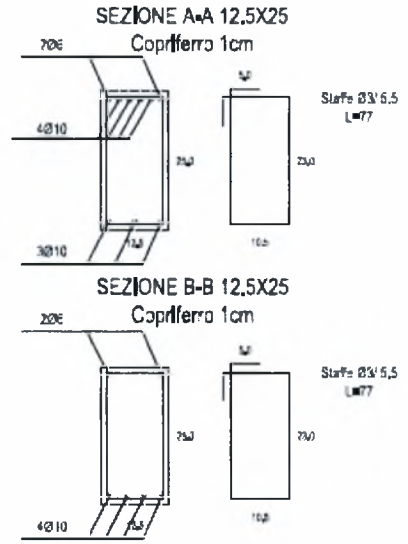
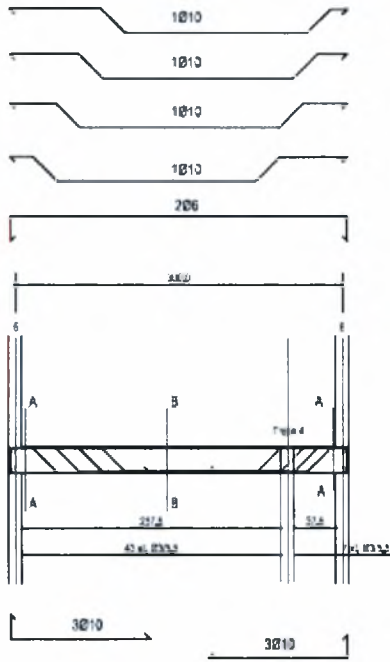


PIANTA SOLAIO PIANO TIPO

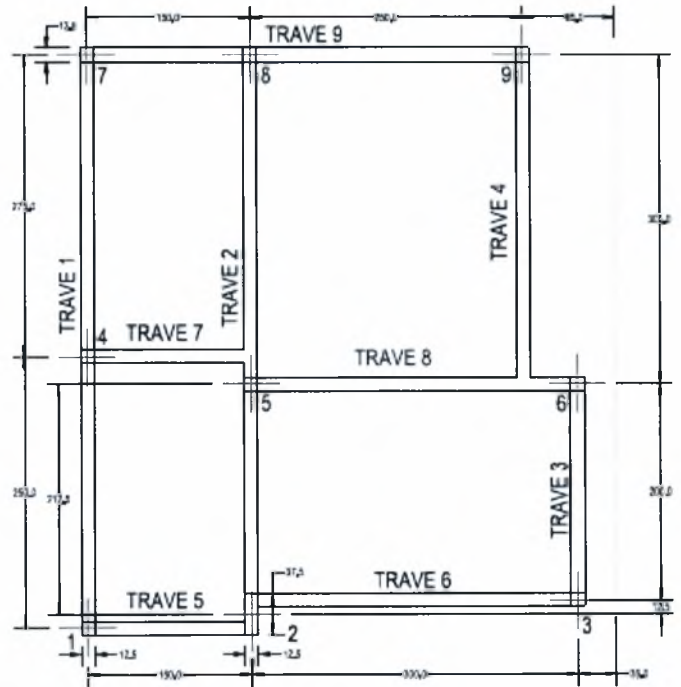


Σχέδιο A.14: Οπλισμός δοκού TRAVE\_7

Trave N.8



PIANTA SOLAIO PIANO TIPO



Σχέδιο A.15: Οπλισμός δοκού TRAVE\_8



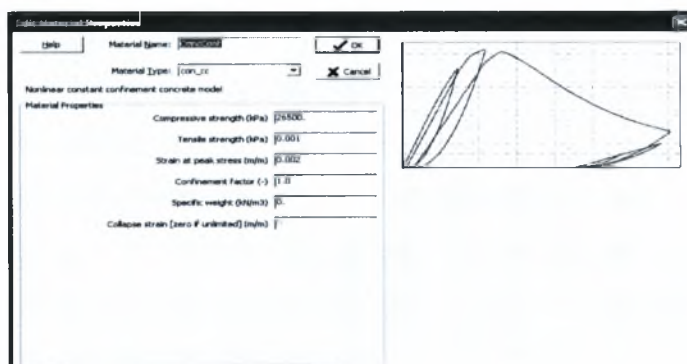
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β  
ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SEISMOSTRUCT  
(SEISMOSOFT)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

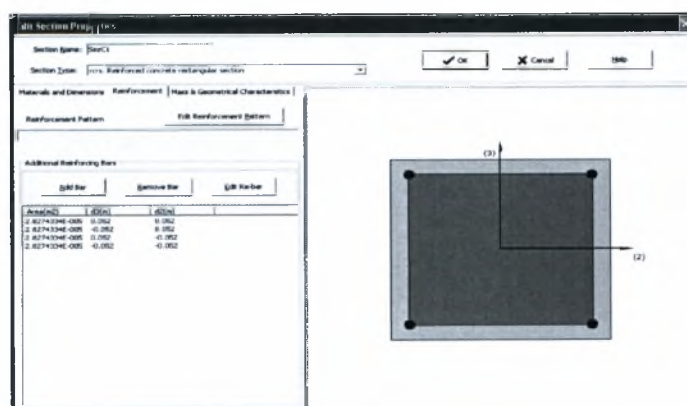
## Είσοδος Γεωμετρίας και Ιδιοτήτων Υλικών Κατασκευής στο SeismoStruct

Ακολουθώς παρατίθεται ενδεικτικά η πορεία δημιουργίας ενός στοιχείου τύπου υποστυλώματος (επί παραδείγματι C1).

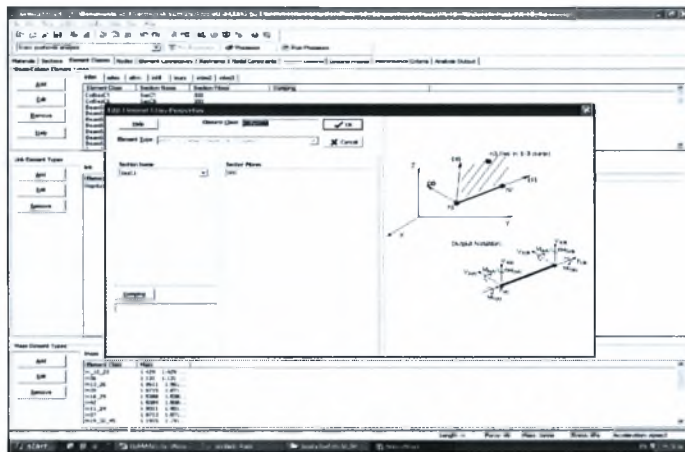
Βήμα 1<sup>ο</sup> : Εισήχθησαν τα χαρακτηριστικά των υλικών (πρόκειται για μια κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος). Η διάρθρωση των υλικών είχε ως εξής: περισφιγμένο σκυρόδεμα, απερίσφικτο και χάλυβας. (Καρτέλα Materials)



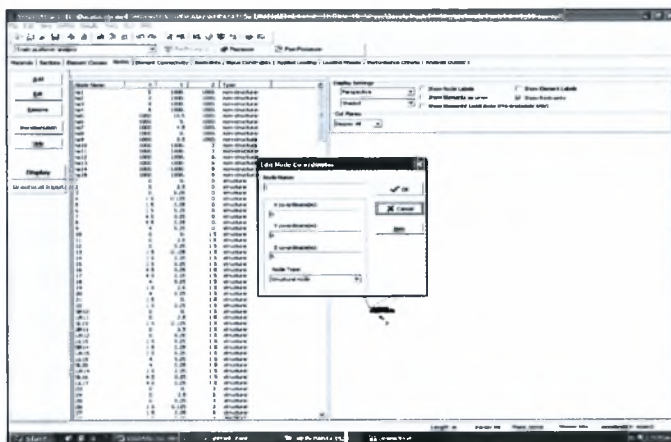
Βήμα 2<sup>ο</sup> : Εισήχθησαν οι διαστάσεις της διατομής και οι φέροντες οπλισμοί (σύμφωνα με τα σχέδια 5.7). (Καρτέλα Sections)



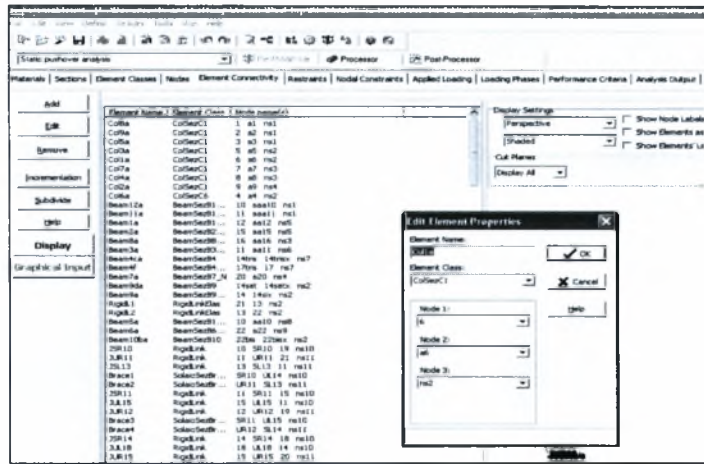
Βήμα 3<sup>ο</sup> : Καθορίστηκαν τα στοιχεία εκείνα που θα έχουν τη παραπάνω διατομή καθώς και ο τύπος του υπό κατασκευή στοιχείου. (Καρτέλα Element Classes)



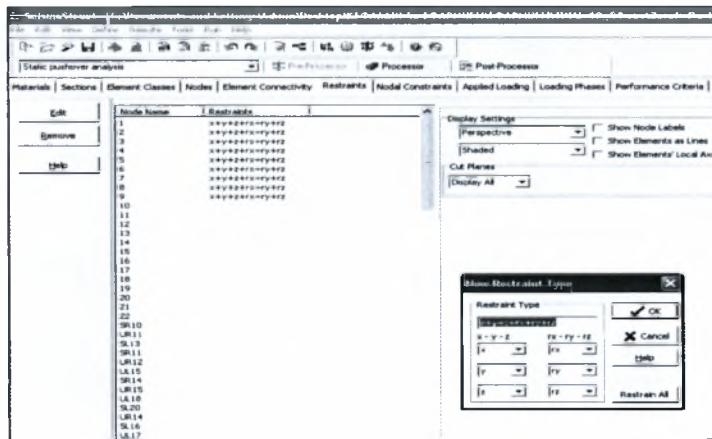
Βήμα 4<sup>ο</sup> : Ορίστηκαν οι κόμβοι της κατασκευής. (Καρτέλα Nodes)



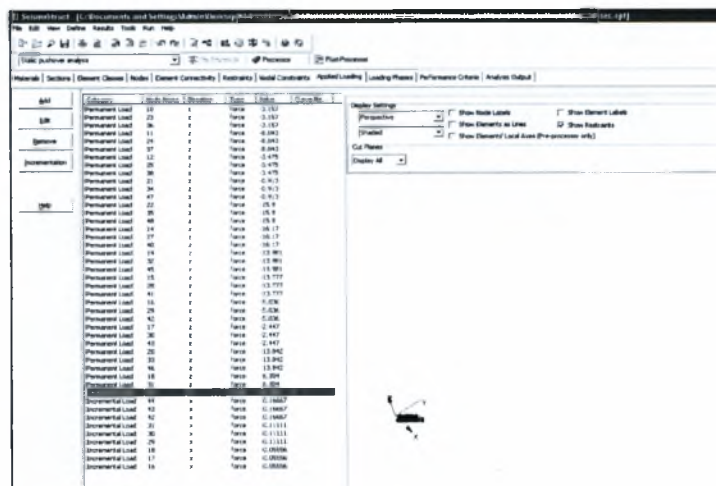
Βήμα 5<sup>ο</sup> : Καθορίστηκαν οι κόμβοι τους οποίους θα συνδέει το παρών στοιχείο. (Καρτέλα Element Connectivity)



Βήμα 6<sup>ο</sup> : Καθορίστηκαν οι περιορισμοί (βαθμοί ελευθερίας) των υπόψη κόμβων. (Καρτέλα Restraints).

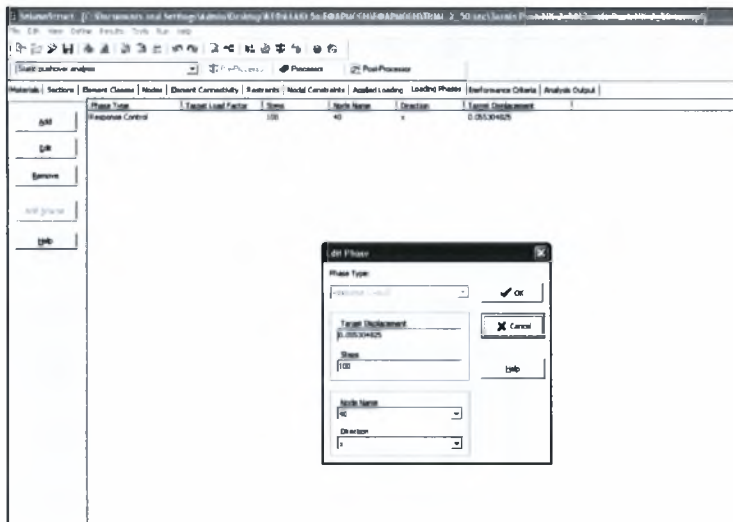


Βήμα 7<sup>ο</sup> : Καθορίστηκαν τα μόνιμα και τα επαυξητικά φορτία (Θεώρηση συγκεντρωμένων μαζών στους κόμβους) (Καρτέλα Applied Loading)





Βήμα 8<sup>ο</sup> : Εισήχθησαν οι στοχευόμενες μετακινήσεις που είχαν υπολογιστεί με τη Μέθοδο του συντελεστή μετακίνησης (Displacement coefficient Method). (Καρτέλα Loading Phases)



Παρατηρήσεις επί του συνόλου της κατασκευής:

- Η ανεπάρκεια περίσφιγξης που παρουσίαζε η κατασκευή μας επέβαλλε να εισάγουμε τον ίδιο βαθμό περίσφιγξης τόσο στο απερίσφικτο σκυρόδεμα όσο και στο περισφιγμένο. Ουσιαστικά αμελήθηκε η συνεισφορά της περίσφιγξης στη κατασκευή των υποστυλωμάτων.
- Οι στηρίξεις θεωρήθηκαν πακτώσεις.
- Ως χαρακτηριστικός κόμβος, εκλέχθη ο κόμβος 40 διότι ευρίσκεται πλησιέστερα στο κέντρο μάζας της κατασκευής.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ  
ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ XTRACT  
(Imbsen software systems)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

**Χρήση προγράμματος XTRACT**

Αρχικά απαιτείται ο καθορισμός των τιμών των ιδιοτήτων των υλικών κάθε μοντέλου κατασκευής για την εύρεση των αντίστοιχων καμπυλών τάσης– παραμόρφωσης. Έτσι για τη δημιουργία της καμπύλης τάσης–παραμόρφωσης του απερίσφικτου σκυροδέματος αλλά και του χάλυβα διαμήκη οπλισμού στο πλαίσιο σκυροδέματος, είναι αναγκαία:

*Απερίσφικτο σκυρόδεμα*

- θλιπτική αντοχή σκυροδέματος 28 ημερών
- εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος
- παραμόρφωση σύνθλιψης σκυροδέματος
- παραμόρφωση θρυμματισμού σκυροδέματος
- εναπομένουσα αντοχή μετά τον θρυμματισμό
- παραμόρφωση αστοχίας σκυροδέματος
- μέτρο ελαστικότητας

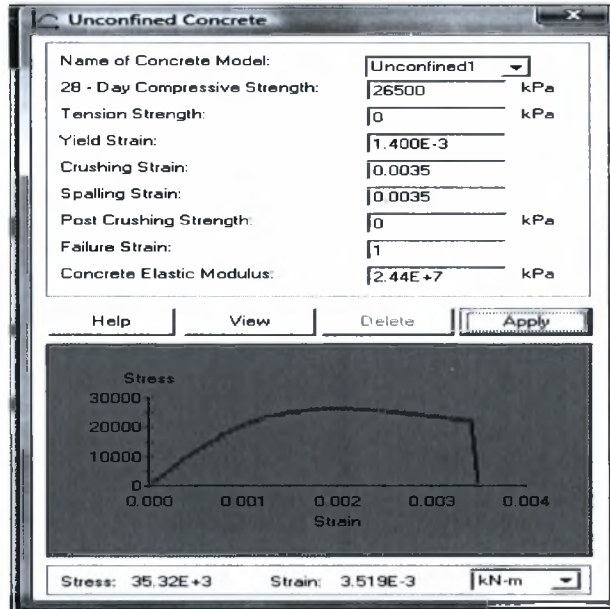
*Χάλυβας διαμήκη οπλισμού*

- τάση διαρροής χάλυβα
- τάση θραύσης χάλυβα
- παραμόρφωση χάλυβα κατά τη διαρροή
- παραμόρφωση χάλυβα κατά την έναρξη κράτυνσης
- παραμόρφωση χάλυβα κατά την αστοχία
- μέτρο ελαστικότητας

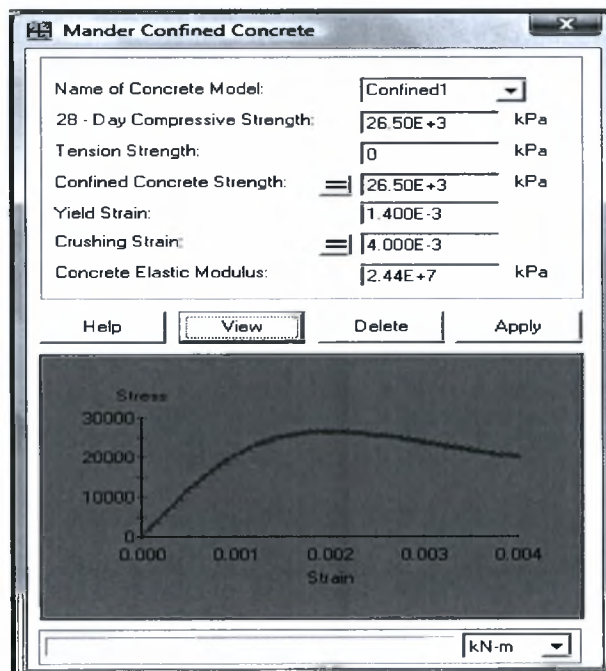
*Περισφιγμένο σκυρόδεμα*

- θλιπτική αντοχή σκυροδέματος 28 ημερών
- εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος
- αντοχή περισφιγμένου σκυροδέματος
- παραμόρφωση θρυμματισμού σκυροδέματος

- μέτρο ελαστικότητας

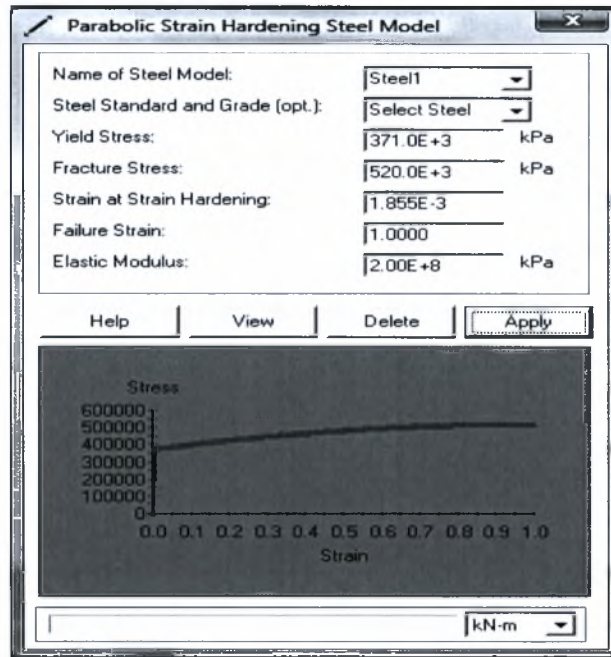


Σχήμα Γ.1 Εισαγωγή ιδιοτήτων απερίσφιγκτου σκυροδέματος στο πρόγραμμα xtract για την εξαγωγή καμπυλών  $\sigma$ - $\epsilon$

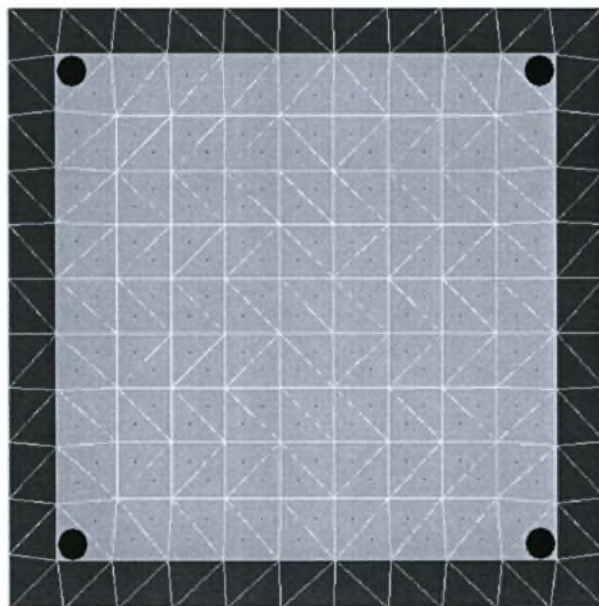


Σχήμα Γ.2 Εισαγωγή ιδιοτήτων περισιφιγμένου σκυροδέματος στο πρόγραμμα xtract για την εξαγωγή καμπυλών  $\sigma$ - $\epsilon$

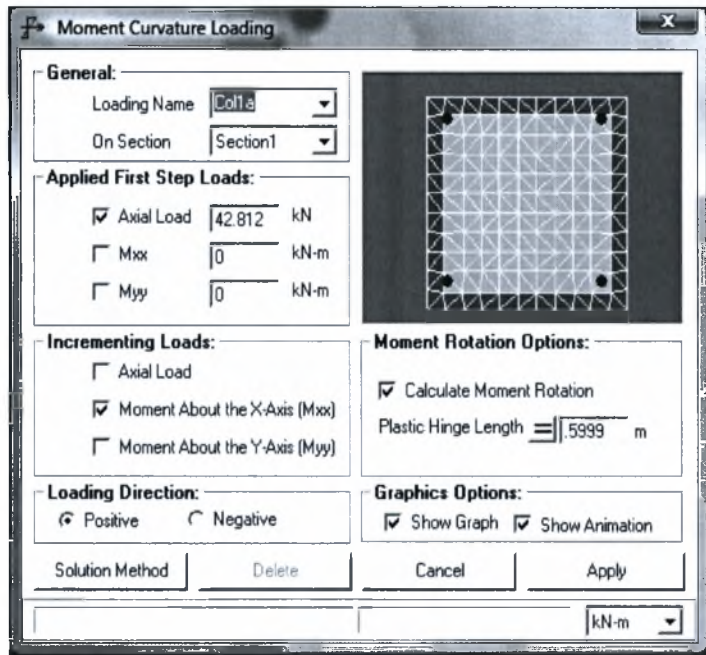
Παρατήρηση: Η θλιπτική αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος θεωρήθηκε ίση με την ονομαστική θλιπτική αντοχή του. Αυτός ο ισχυρισμός είναι απότοκο της κακής περισφιγξης της κατασκευής και προσομοιώνει σε καλύτερο βαθμό την αναμενόμενη συμπεριφορά της υπό όψη κατασκευής.



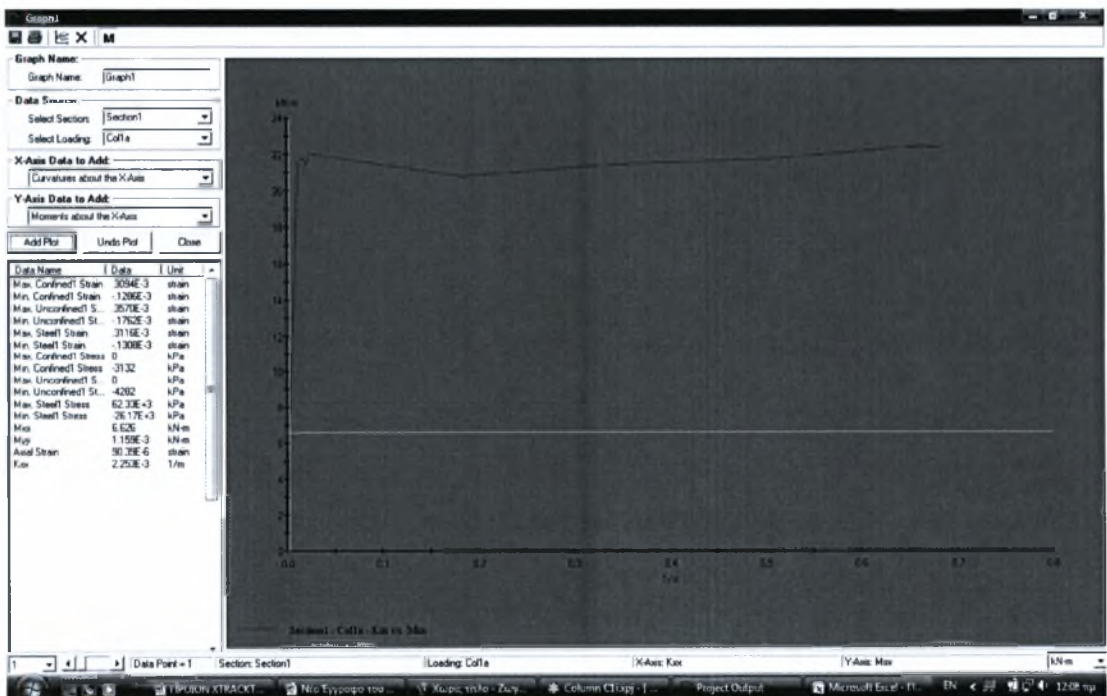
Σχήμα Γ.3 Εισαγωγή ιδιοτήτων διαμήκους χάλυβα οπλισμού στο πρόγραμμα xtract για την εξαγωγή καμπυλών  $\sigma$ - $\epsilon$



Σχήμα Γ.4 Εισαγωγή γεωμετρίας διατομής – επι παραδείγματι είσοδος υποστυλώματος τύπου C1



Σχήμα Γ.5 Εισαγωγή παραμέτρων φόρτισης – επι παραδείγματι για το υποστύλωμα με κωδική ονομασία coll1



Σχήμα Γ.6 Εξαγωγή καμπύλης ροπών - καμπυλοτήτων

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ  
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΙΚΑΝΟΤΗΤΩΝ  
ΡΟΠΩΝ - ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ  
ΧΤΡΑСТ ΣΕ ΠΕΡΙΒΒΑΛΜΟΝ ΕΧCΕL

### Επεξεργασία αποτελεσμάτων Xtract

Η διαδικασία που περιγράφηκε στη παραπάνω παράγραφο εφαρμόστηκε για καθένα από τα εικοσι-επτά υποστυλώματα της κατασκευής με αποτέλεσμα να λάβουμε εικοσι-επτά διαγράμματα ικανότητας ροπών-καμπυλοτήτων. Η επεξεργασία που ακολουθήθηκε έγινε σε περιβάλλον Microsoft excel και σκοπό είχε να καταδείξει τις νέες απομειωμένες καμπτικές δυσκαμψίες κάθε υποστυλώματος της κατασκευής λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη καμπύλη ικανότητας της διατομής όσο και την απαίτηση καμπυλότητας λόγω του προγενέστερου σεισμικού φαινομένου ούτως ώστε να υπολογισθεί η απομένουσα ικανότητα της διατομής (μείωση δυσκαμψίας).

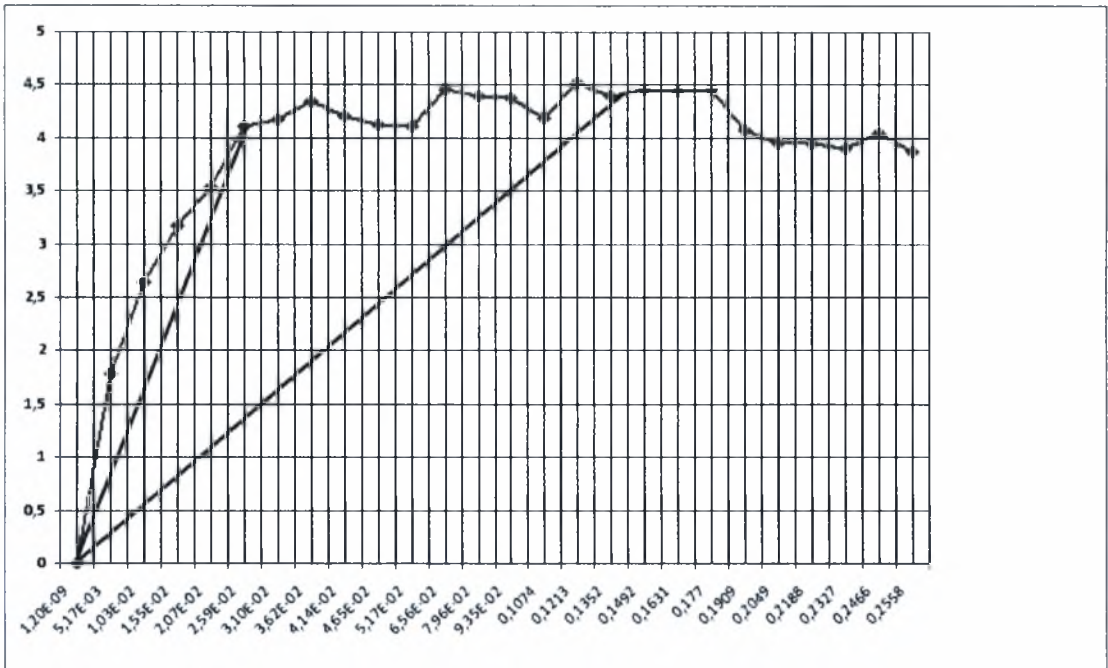
Παρατίθενται ακολούθως τα διαγράμματα υπολογισμού των νέων απομειωμένων δυσκαμψιών για όλα τα υποστυλώματα της κατασκευής.

### Παρατηρήσεις

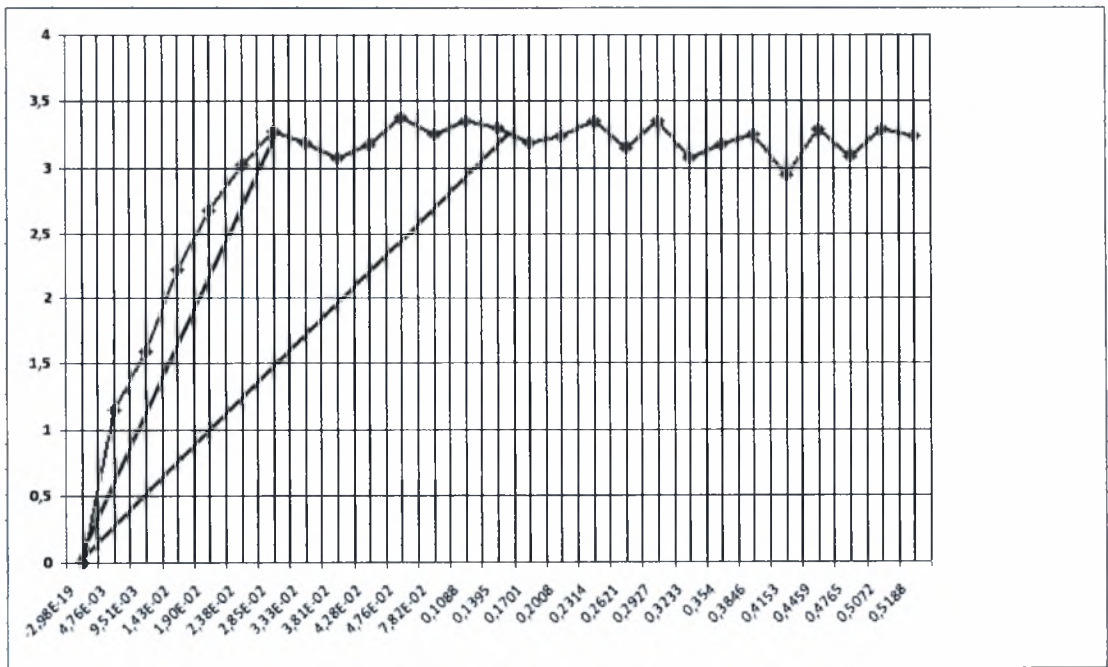
Ως αρχική μέση δυσκαμψία της διατομής εκλέχθηκε η εφαπτομένη της γωνίας κλίσης της πράσινης ευθείας. Ακολούθως και βάση των απαιτήσεων καμπυλότητας που υπολογίσθηκαν στη παράγραφο 5.5.1 φέραμε την κόκκινη ευθεία. Η λογική έγκειται στο ότι ένα μέρος καμπυλότητας δεσμεύτηκε (απαίτηση καμπυλότητας) από το προηγούμενο δυσμενέστερο σεισμικό φαινόμενο και ότι η διατομή πλέον μπορεί να προσφέρει σε ένα ενδεχόμενο νέο σεισμικό γεγονός μειωμένη ικανότητα. Προσπαθήσαμε βάση του λόγου της νέας (κόκκινης) προς την αρχική (πράσινης) δυσκαμψία να ορίσουμε έναν απομειωτικό συντελεστή ούτως ώστε να αποκτήσουμε εικόνα για τις νέες απομειωμένες δυσκαμψίες του φορέα.

Όπου η απαίτηση καμπυλότητας ήταν μικρότερη της μέσης αρχικής δυσκαμψίας δεν επιφέραμε καμία μείωση στη δυσκαμψία της εν λόγω διατομής.

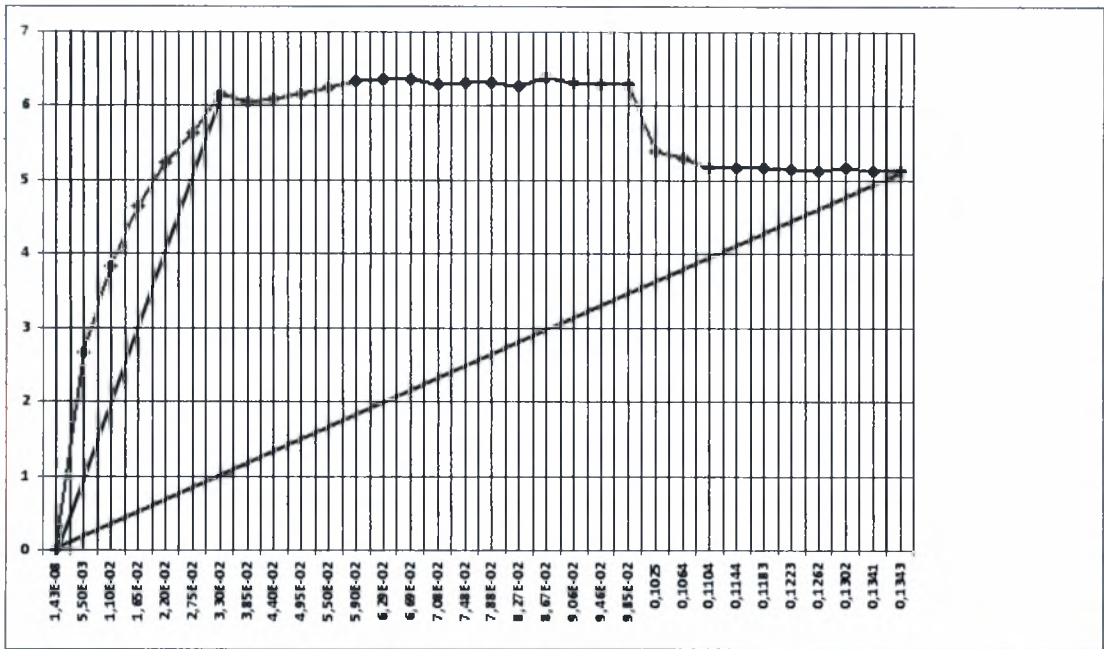




Γράφημα Δ.1 Καμπύλη ροπών Mxx–καμπυλοτήτων Kxx - Υποστυλώματος col1



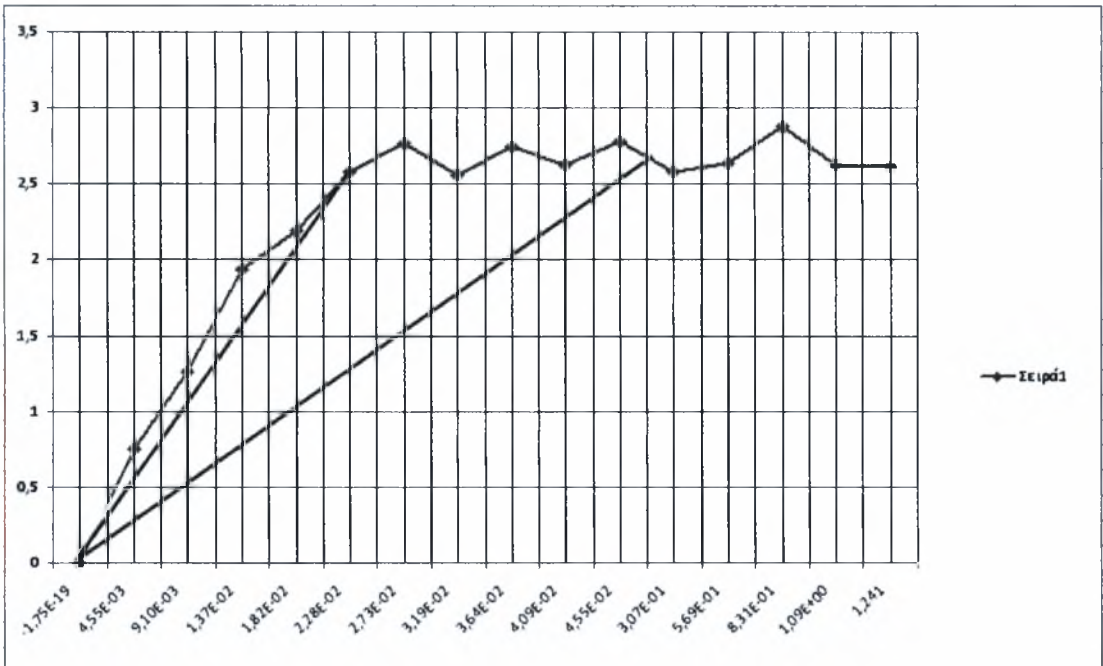
Γράφημα Δ.2 Καμπύλη ροπών Mxx–καμπυλοτήτων Kxx - Υποστυλώματος col2



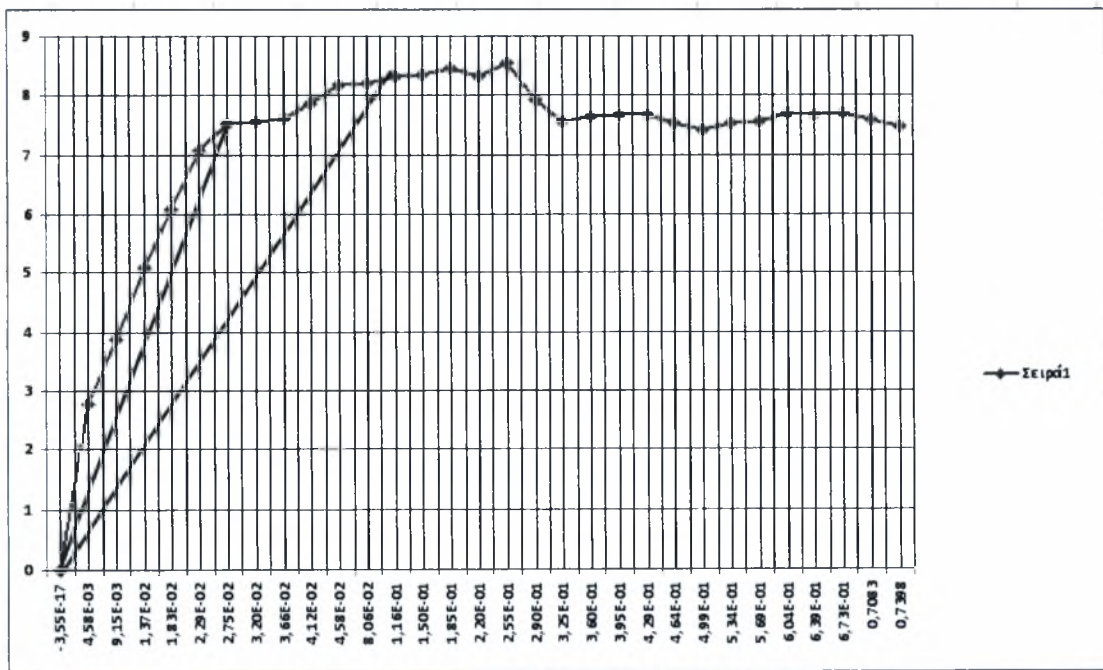
Γράφημα Δ.3 Καμπύλη ροπών  $M_{xx}$ –καμπυλοτήτων  $K_{xx}$  - Υποστυλώματος col3



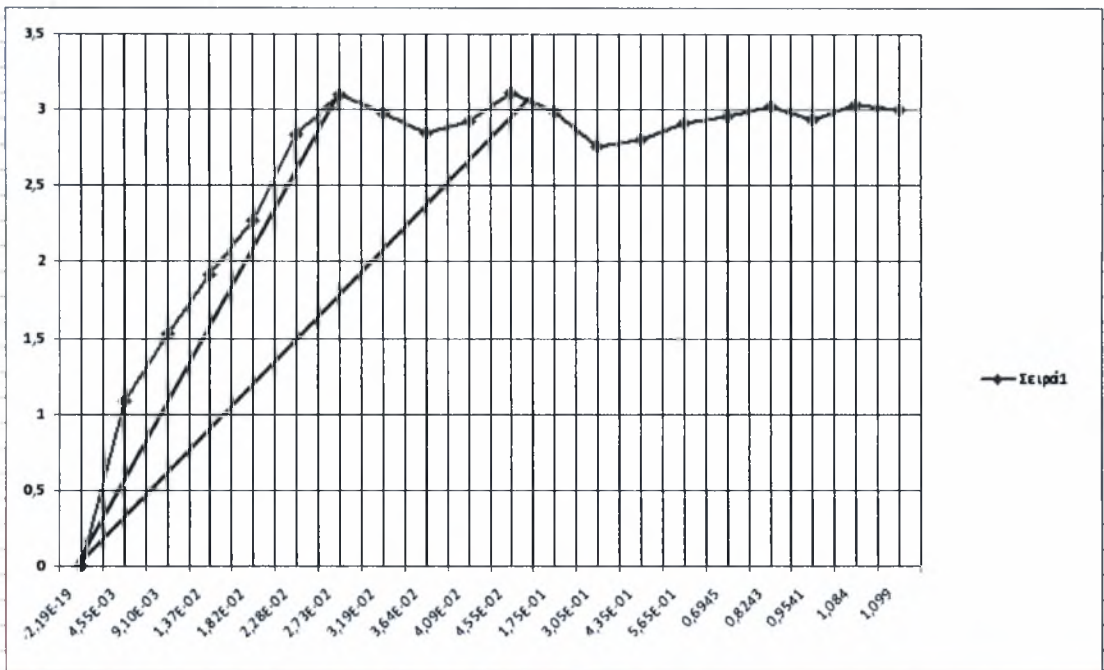
Γράφημα Δ.4 Καμπύλη ροπών  $M_{xx}$ –καμπυλοτήτων  $K_{xx}$  - Υποστυλώματος col4



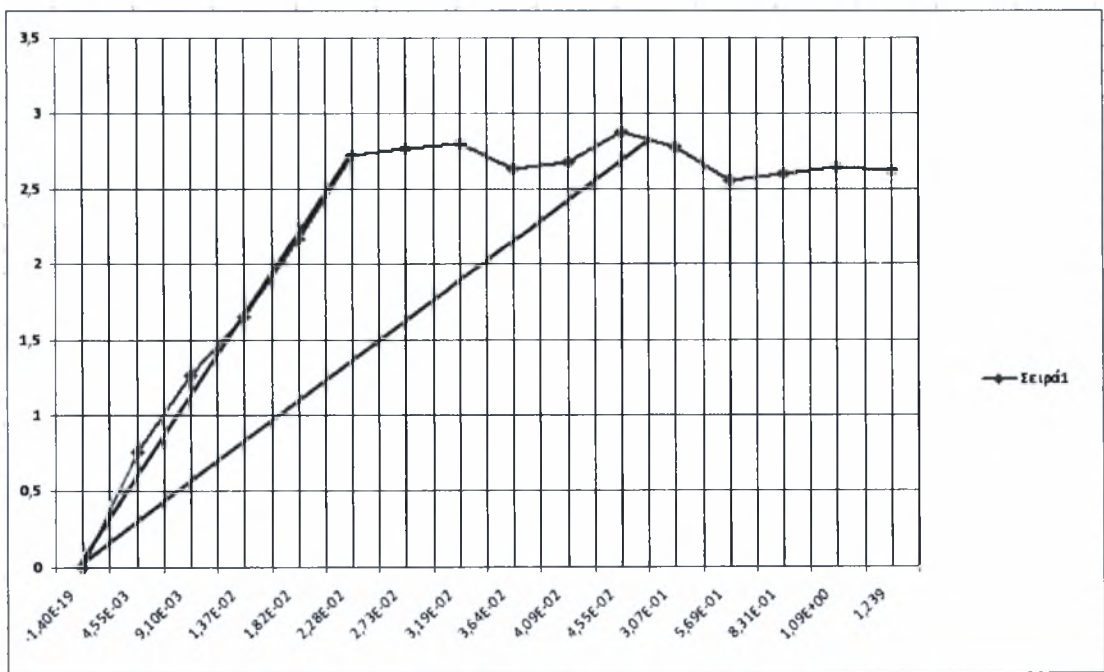
Γράφημα Δ.5 Καμπύλη ροπών  $M_{xx}$ -καμπυλοτήτων  $K_{xx}$  - Υποστυλώματος col5



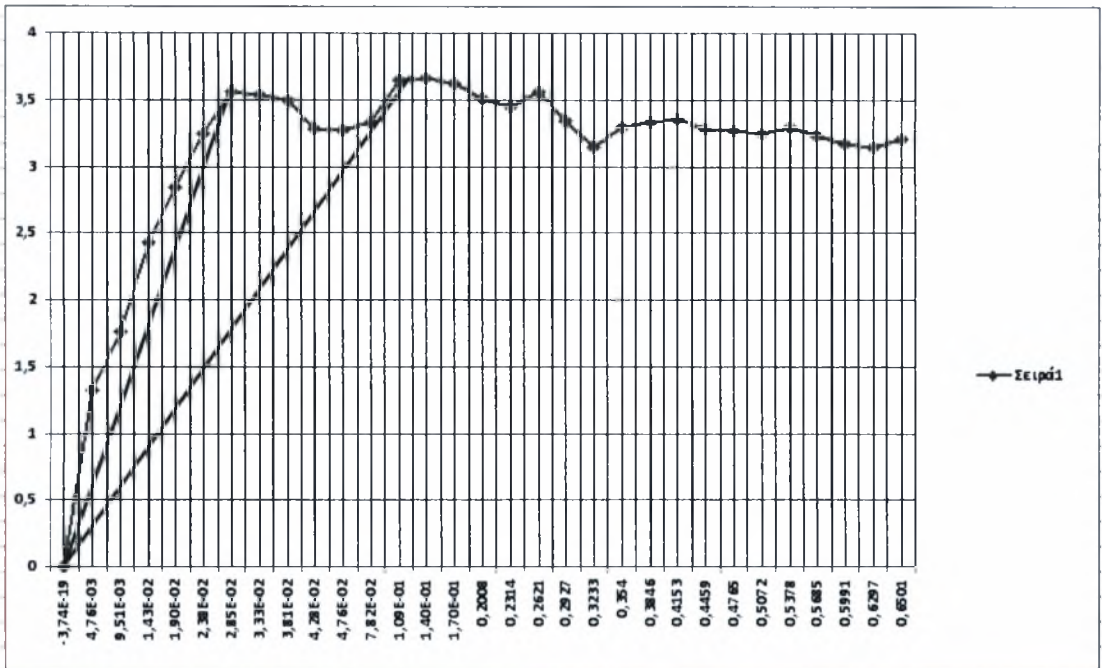
Γράφημα Δ.6 Καμπύλη ροπών  $M_{xx}$ -καμπυλοτήτων  $K_{xx}$  - Υποστυλώματος col6



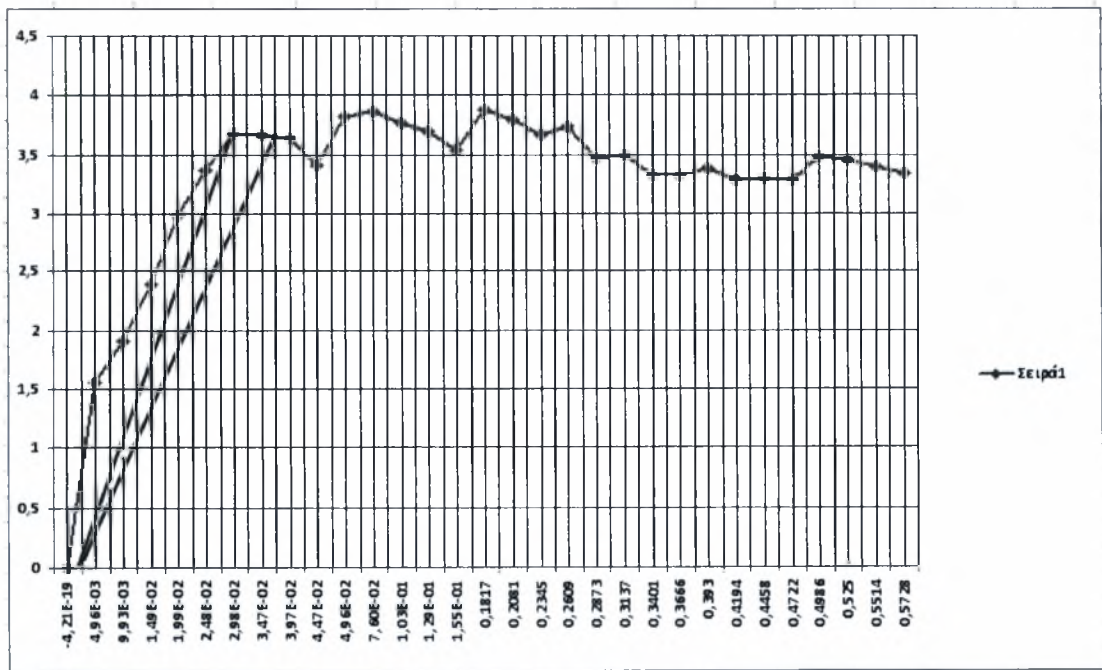
Γράφημα Δ.7 Καμπύλη ροπών Mxx-καμπυλοτήτων Kxx - Υποστυλώματος col7



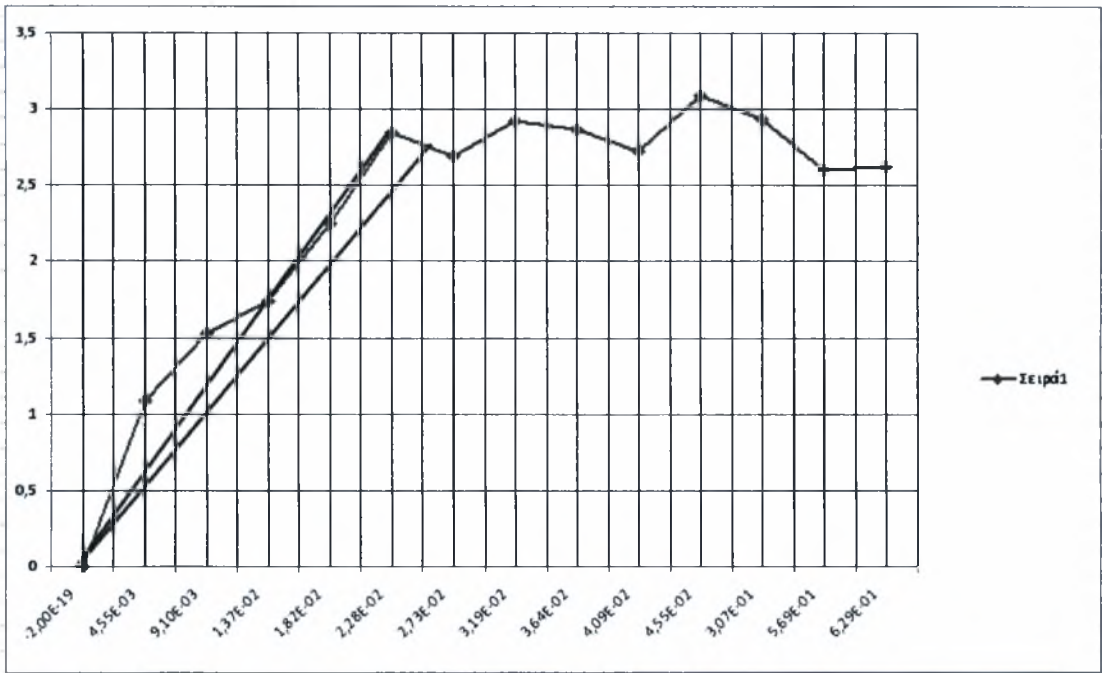
Γράφημα Δ.8 Καμπύλη ροπών Mxx-καμπυλοτήτων Kxx - Υποστυλώματος col8



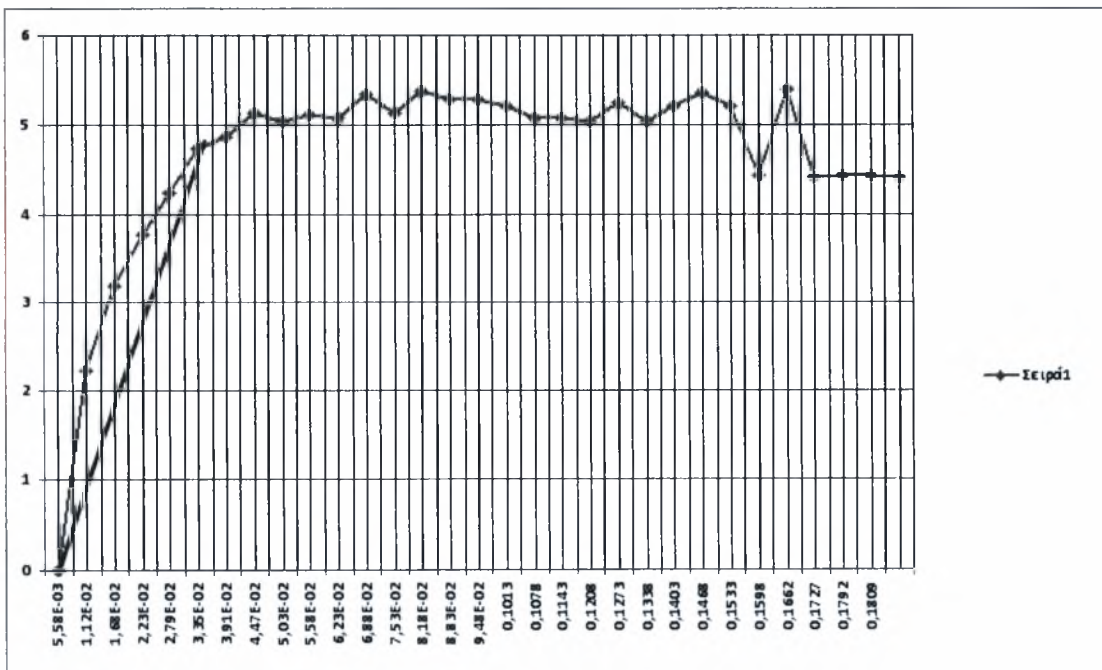
Γράφημα Δ.9 Καμπύλη ροπών Μxx–καμπυλοτήτων Κxx - Υποστυλώματος col9



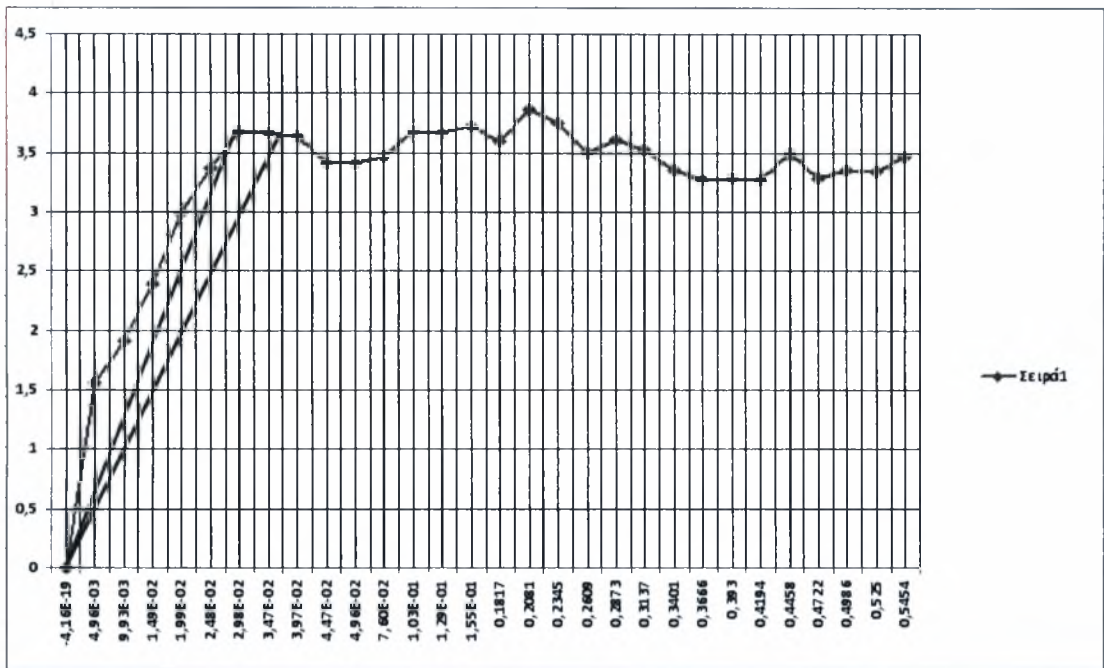
Γράφημα Δ.10 Καμπύλη ροπών Μxx–καμπυλοτήτων Κxx - Υποστυλώματος col10



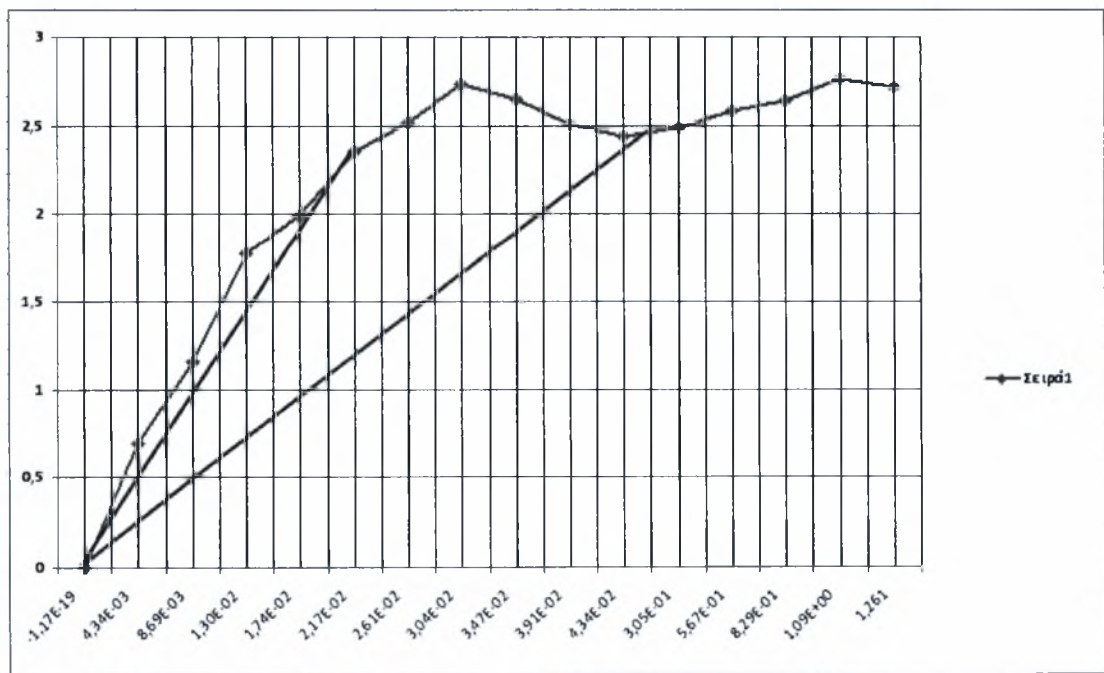
Γράφημα Δ.11 Καμπύλη ροπών  $M_{xx}$ -καμπυλοτήτων  $K_{xx}$  - Υποστυλώματος col11



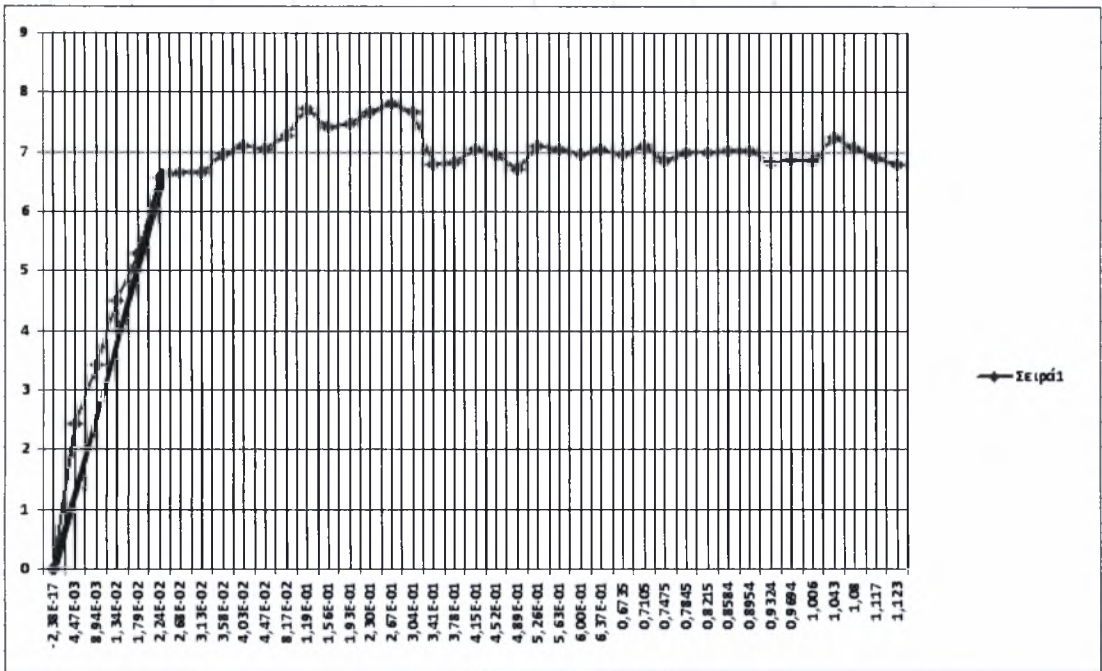
Γράφημα Δ.12 Καμπύλη ροπών  $M_{xx}$ -καμπυλοτήτων  $K_{xx}$  - Υποστυλώματος col12



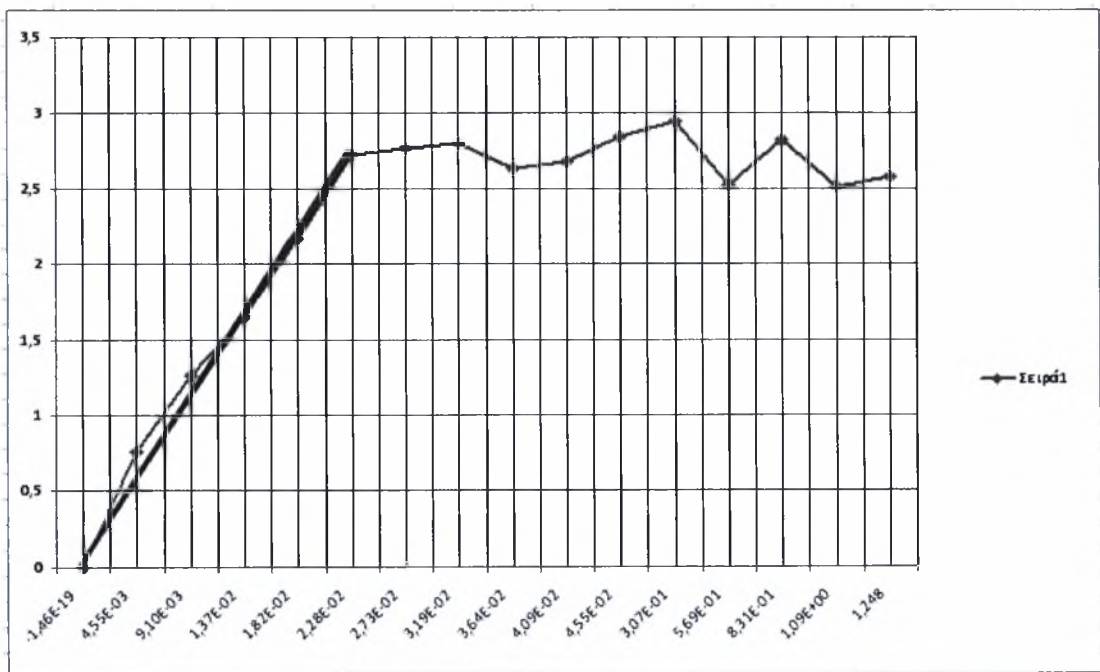
Γράφημα Δ.13 Καμπύλη ροπών Mxx–καμπυλοτήτων Kxx - Υποστυλώματος col13



Γράφημα Δ.14 Καμπύλη ροπών Mxx–καμπυλοτήτων Kxx - Υποστυλώματος col14

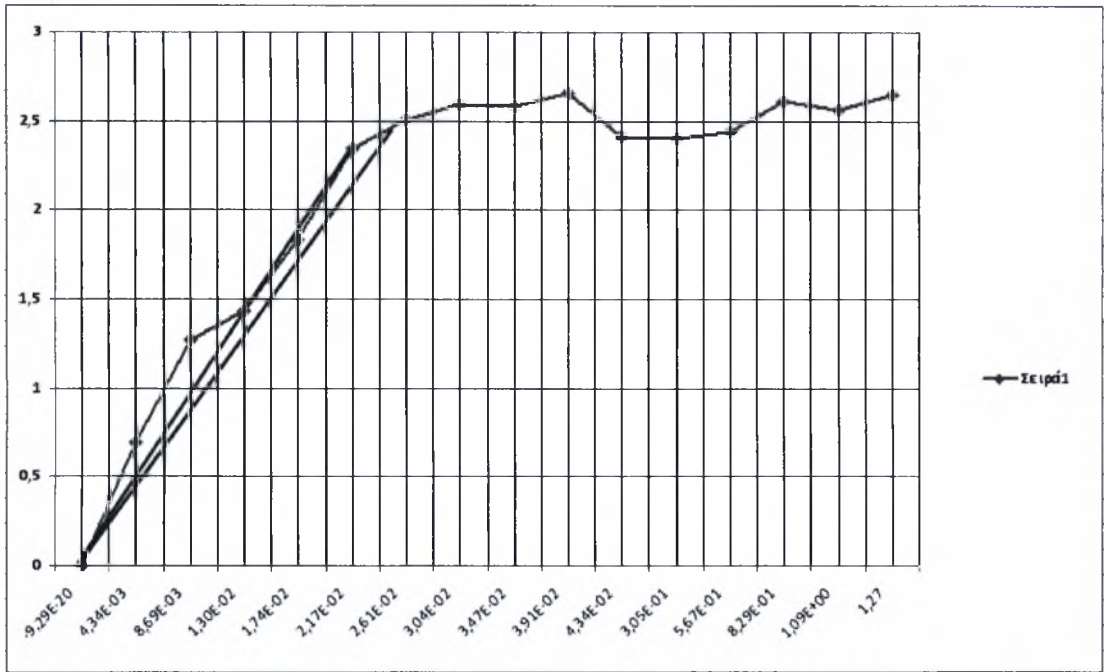


Γράφημα Δ.15 Καμπύλη ροπών  $M_{xx}$ -καμπυλοτήτων  $K_{xx}$  - Υποστυλώματος col15

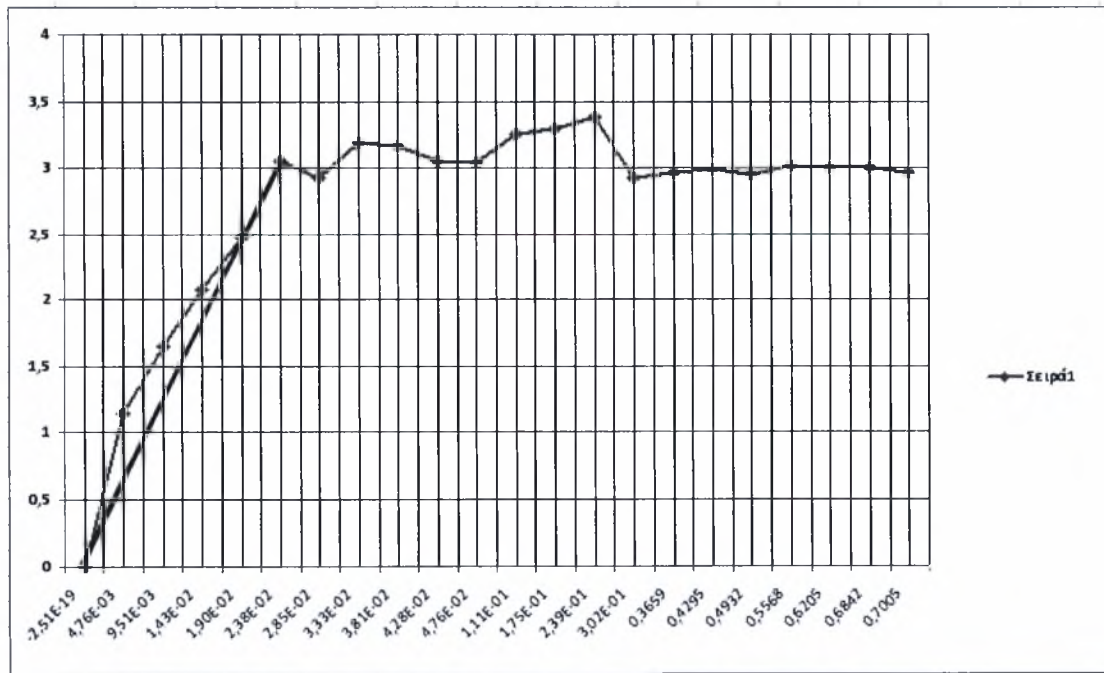


Γράφημα Δ.16 Καμπύλη ροπών  $M_{xx}$ -καμπυλοτήτων  $K_{xx}$  - Υποστυλώματος col16

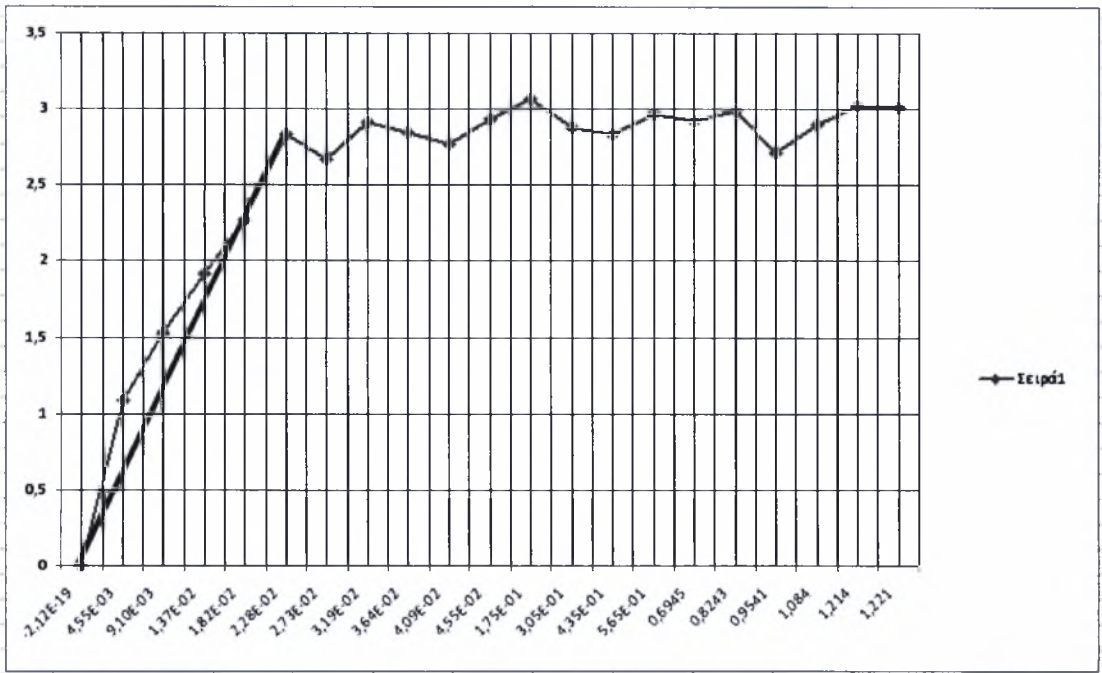




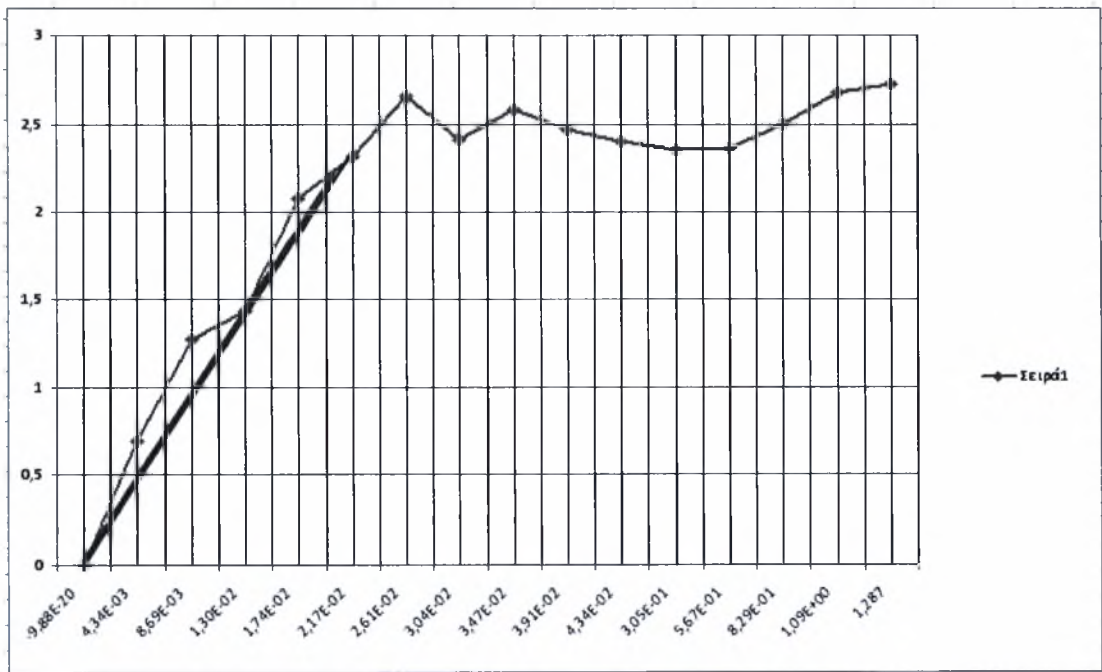
Γράφημα Δ.17 Καμπύλη ροπών  $M_{xx}$ -καμπυλοτήτων  $K_{xx}$  - Υποστυλώματος col17



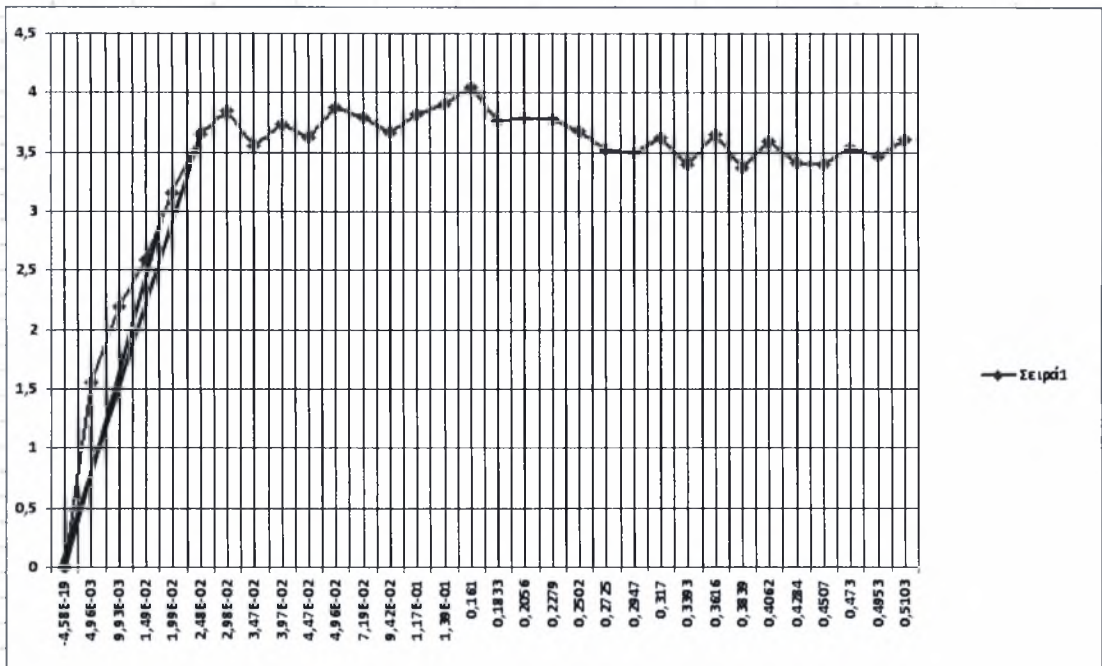
Γράφημα Δ.18 Καμπύλη ροπών  $M_{xx}$ -καμπυλοτήτων  $K_{xx}$  - Υποστυλώματος col18



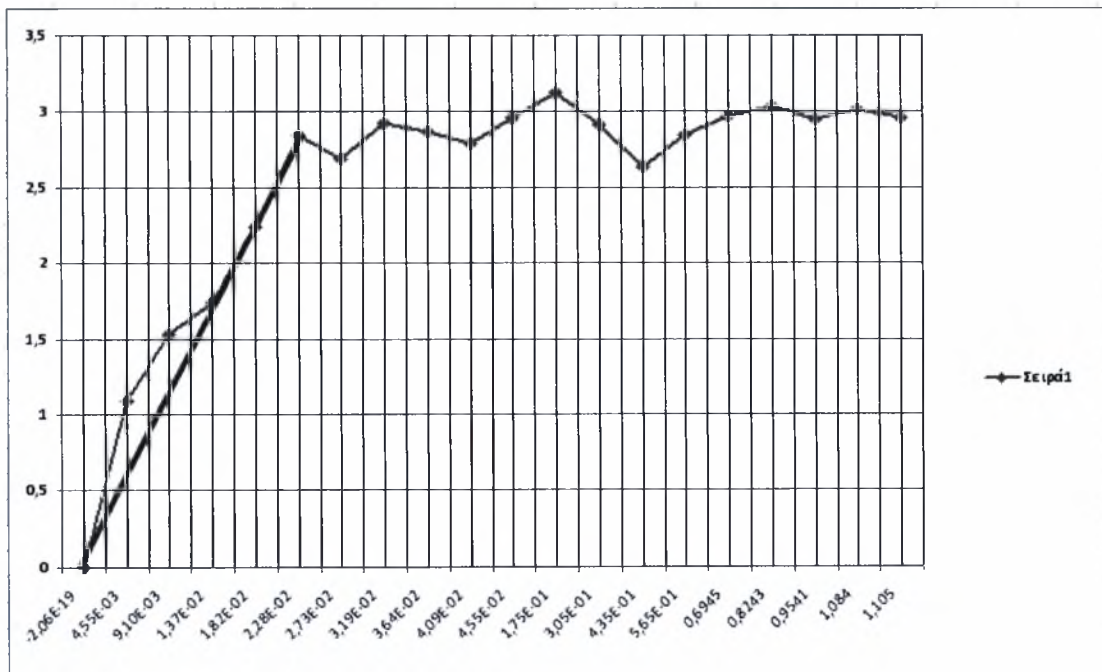
Γράφημα Δ.19 Καμπύλη ροπών Mxx–καμπυλοτήτων Kxx - Υποστυλώματος col19



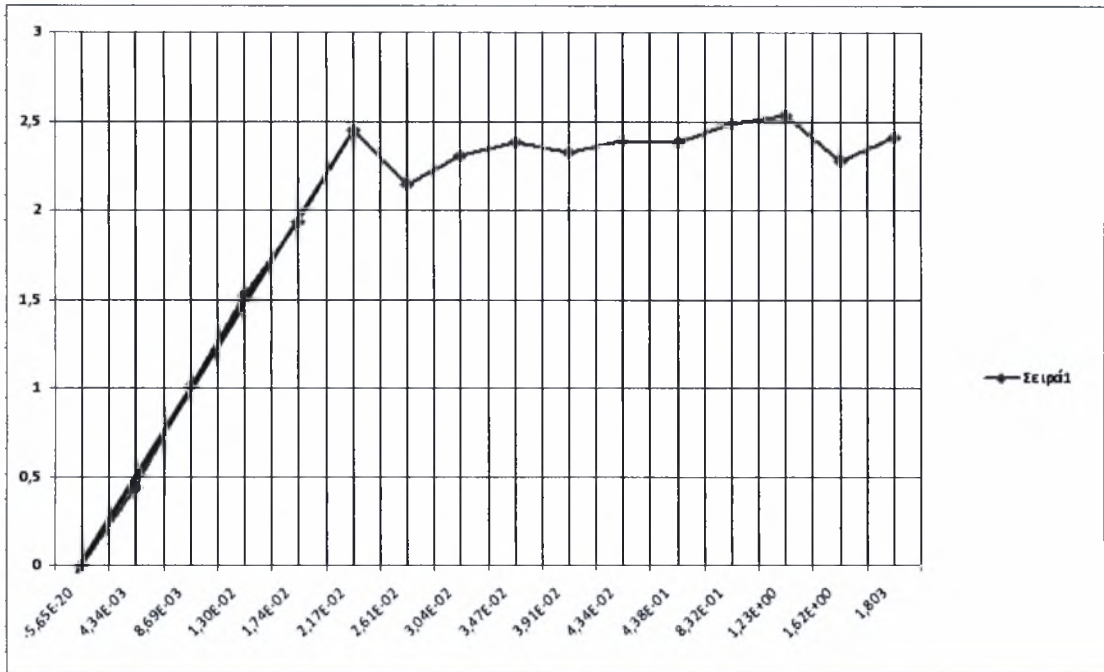
Γράφημα Δ.20 Καμπύλη ροπών Mxx–καμπυλοτήτων Kxx - Υποστυλώματος col20



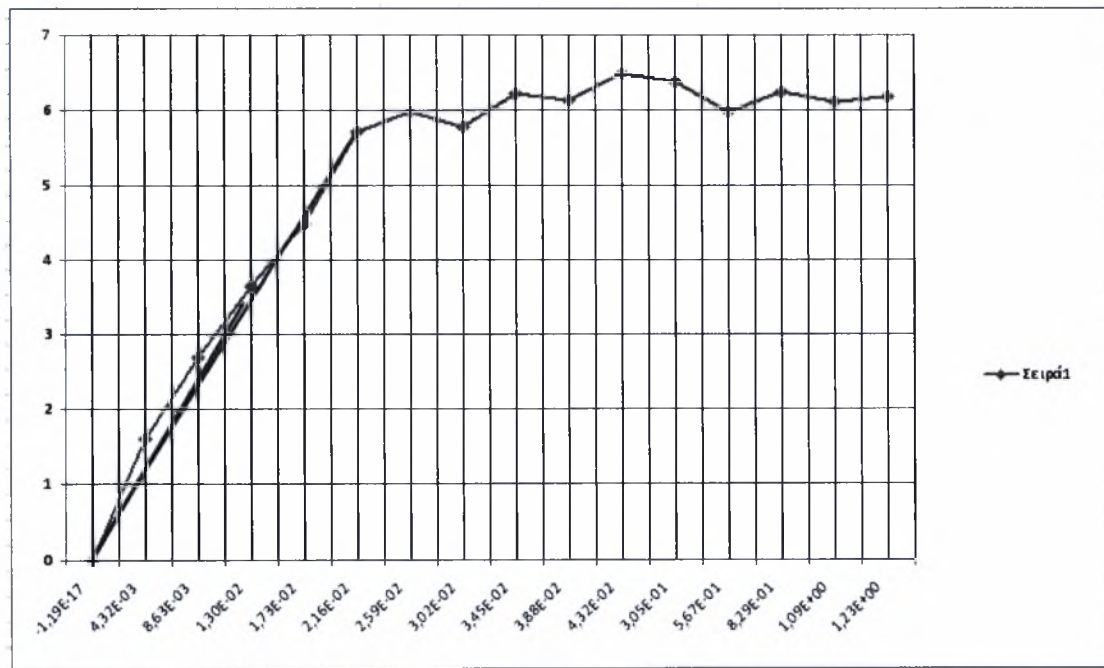
Γράφημα Δ.21 Καμπύλη ροπών Mxx-καμπυλοτήτων Kxx - Υποστυλώματος col21



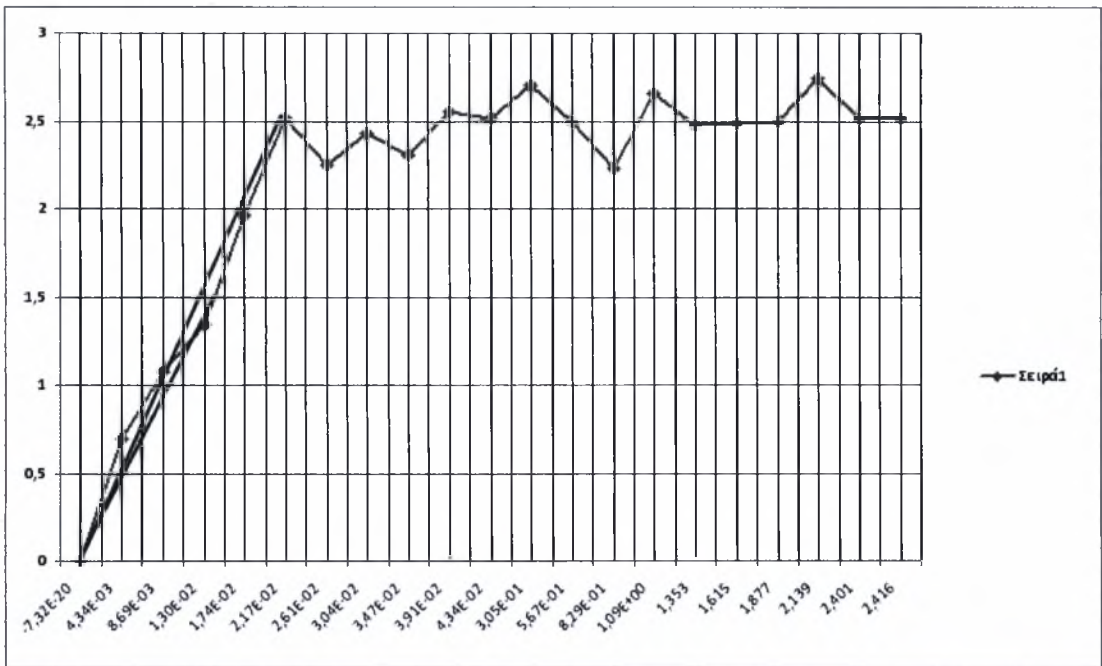
Γράφημα Δ.22 Καμπύλη ροπών Mxx-καμπυλοτήτων Kxx - Υποστυλώματος col22



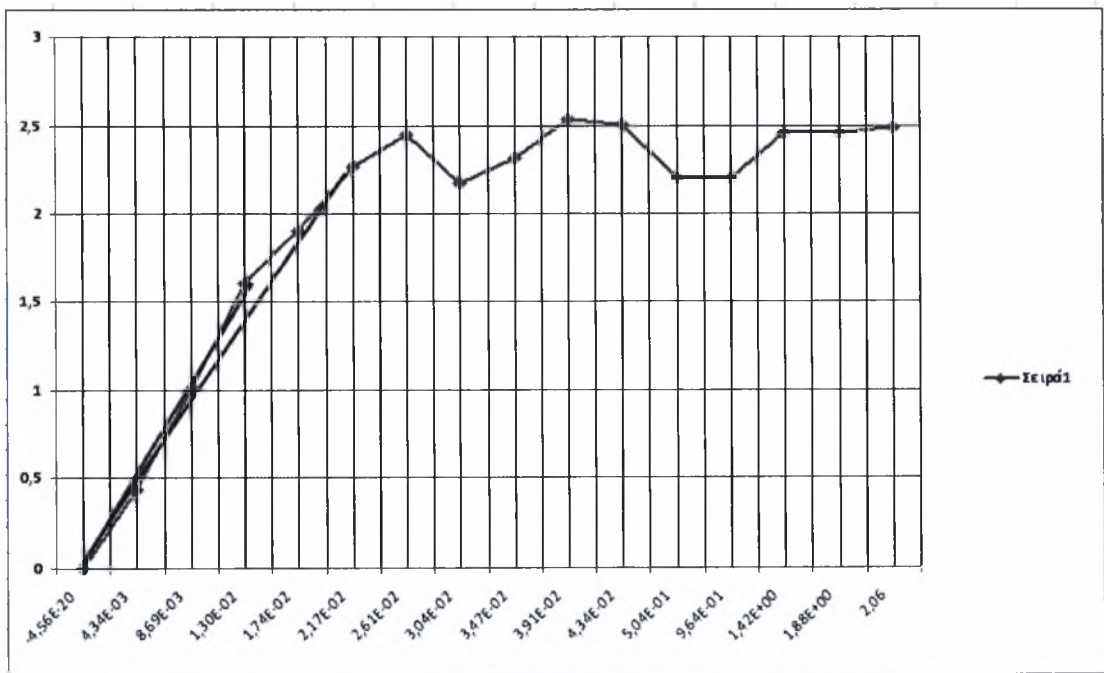
Γράφημα Δ.23 Καμπύλη ροπών Mxx-καμπυλοτήτων Kxx - Υποστυλώματος col23



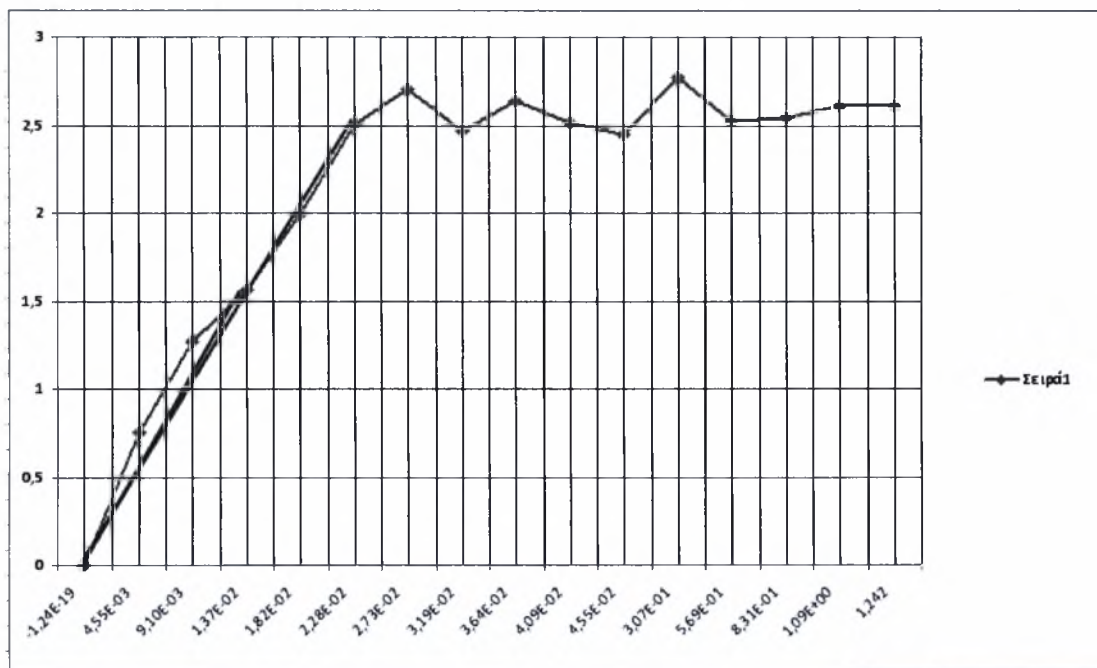
Γράφημα Δ.24 Καμπύλη ροπών Mxx-καμπυλοτήτων Kxx - Υποστυλώματος col24



Γράφημα Δ.25 Καμπύλη ροπών Mxx-καμπυλοτήτων Kxx - Υποστυλώματος col25



Γράφημα Δ.26 Καμπύλη ροπών Mxx-καμπυλοτήτων Kxx - Υποστυλώματος col26



Γράφημα Δ.27 Καμπύλη ροπών  $M_{xx}$ -καμπυλοτήτων  $K_{xx}$  - Υποστυλώματος col27

## **ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ**

### **ΜΗΤΣΕΑΣ Π. ΙΩΑΝΝΗΣ**

Ο κ.Μητσέας Ιωάννης απεφοίτησε από το 1<sup>ο</sup> Ενιαίο Λυκείο Νέας Χαλκηδόνας. Ακολούθως επέτυχε την εισαγωγή του στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Ομιλεί απταισίτως την αγγλική γλώσσα, είναι κάτοχος Proficiency in English CPE από το πανεπιστήμιο του Cambridge καθώς και του Michigan Proficiency in English ECPE από το πανεπιστήμιο του Michigan. Ακόμη χειρίζεται αρκετά καλά τη γαλλική και γερμανική γλώσσα. Ο κ. Μητσέας Ιωάννης έγινε δεκτός με πολύ καλή σειρά επιτυχίας από το μεταπτυχιακό πρόγραμμα του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου Ε.Μ.Π "Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών" το οποίο και παρακολουθεί μέχρι σήμερα.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000091706