



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

**Αποτίμηση φέρουσας ικανότητας και ενίσχυση γέφυρας από
οπλισμένο σκυρόδεμα**



Δανιήλ Μαρία-Άννα

Επιβλέπων: Β. Παπαδόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

**Αποτίμηση φέρουσας ικανότητας και ενίσχυση γέφυρας από
οπλισμένο σκυρόδεμα**

Δανιήλ Μαρία-Άννα

Επιβλέπων: Β. Παπαδόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2020

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται σχεδιασμός και ανάλυση οδικής γέφυρας από οπλισμένο σκυρόδεμα με ολόσωμη πλάκα καταστρώματος. Η προσομοίωση του τρισδιάστατου μοντέλου έγινε με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Ο σχεδιασμός πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες και η αποτίμηση έγινε με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. Τα αποτελέσματα της αποτίμησης καταδεικνύουν την επάρκεια του φορέα για επιβολή σεισμικού φορτίου και καθορίζουν την ενδεχόμενη απαίτηση ενίσχυσης ή επισκευής του. Στο τέλος της εργασίας παρουσιάζεται ο τρόπος ενίσχυσης της κεφαλής των πασσάλων θεμελίωσης της γέφυρας.

Αναλυτικότερα στη συνέχεια παρουσιάζονται η γεωμετρία της γέφυρας, τα φορτία και οι κανονισμοί που εφαρμόστηκαν, καθώς και πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο που προσομοιώθηκε το μοντέλο στο πρόγραμμα SAP2000. Πραγματοποιείται ελαστική ανάλυση στο τρίτο κεφάλαιο με σκοπό την όπλιση του φορέα ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο ελέγχεται η επάρκεια της κατασκευής με τη μέθοδο της ανελαστικής στατικής ανάλυσης pushover. Από τα αποτελέσματά της γίνεται η αποτίμηση της κατασκευής, με βάση την οποία κρίνεται η απαίτηση επεμβάσεων.

Τέλος πραγματοποιείται η απαιτούμενη ενίσχυση και παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα και τα κυριότερα συμπεράσματα της μελέτης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. κύριο Βησσαρίων Παπαδόπουλο, επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για την άψογη συνεργασία και την πολύτιμη καθοδήγηση που μου προσέφερε.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον υποψήφιο διδάκτορα Ε.Μ.Π. κύριο Ιωάννη Καλογερό για τις συμβουλές του σχετικά με το λογισμικό του προγράμματος SAP2000 αλλά και για τη συνολική του βοήθεια σχετικά με την αποπεράτωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου για την ψυχολογική και οικονομική συμπαράσταση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, χωρίς την στήριξη της οποίας τίποτα δεν θα είχε γίνει πραγματικότητα.

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	I
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	II
Ευρετήριο Εικόνων.....	V
1 Εισαγωγή	9
1.1 Αντικείμενο Εργασίας.....	9
1.2 Μέθοδοι Ανάλυσης και Κανονισμοί.....	10
1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας	10
2 Μόρφωση Φορέα Γέφυρας	12
2.1 Γεωμετρία Φορέα.....	12
2.2 Υλικά.....	14
2.3 Δράσεις	14
2.3.1 Μόνιμες Δράσεις	15
2.3.2 Επιβαλλόμενες (Μεταβλητές) Δράσεις	15
2.3.2.1 Φορτία Κυκλοφορίας Οδικών Γεφυρών	16
2.3.2.2 Θερμοκρασιακές Μεταβολές	23
2.3.2.3 Ωθήσεις Γαιών	26
2.3.3 Σεισμικές Δράσεις	28
2.4 Συνδυασμοί Δράσεων	31
2.4.1 Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ).....	32
2.4.2 Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ).....	34
3 Ελαστική Ανάλυση	35
3.1 Παρουσίαση προγράμματος προσομοίωσης (SAP2000).....	35
3.2 Παρουσίαση Προσομοιώματος στο SAP2000.....	36
3.3 Αποτελέσματα.....	39
4 Ανελαστική Στατική Ανάλυση (Pushover).....	42
4.1 Εισαγωγή	42
4.2 Ιδεατή Καμπύλη Παραμόρφωσης F-δ Δομικού Στοιχείου	43
4.3 Στάθμες Επιτελεστικότητας Κατασκευής.....	44
4.4 Στάθμη Αξιοπιστίας Δεδομένων.....	46
4.5 Συντελεστές Ασφαλείας για τις Δράσεις	47
4.6 Υπολογισμός Γωνίας Στροφής Χορδής - Διαρροής (θ_y)	48
4.7 Υπολογισμός Γωνίας Στροφής Χορδής - Αστοχίας (θ_u).....	50
4.8 Εφαρμογή Ανάλυσης Pushover στο SAP2000	51

4.9	Μέθοδος ATC-40.....	62
4.10	Αποτελέσματα ανάλυσης Pushover.....	67
5	Ενίσχυση Πασσάλων Θεμελίωσης	75
5.1	Εισαγωγή	75
5.2	Κατασκευή μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος.....	76
5.3	Κατασκευαστικές διατάξεις.....	77
5.4	Παραδοχές.....	78
5.5	Μεταφορά δυνάμεων μεταξύ παλαιού και νέου στοιχείου.....	78
5.6	Συνάφεια υποστρώματος – σύνθετων υλικών	79
5.7	Μηχανισμοί αστοχίας	82
5.7.1	Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα – σύνθλιψη σκυροδέματος.....	82
5.7.2	Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα - αποκόλληση ή θραύση σύνθετων υλικών 84	
5.7.3	Σύνθλιψη σκυροδέματος	84
5.8	Εφαρμογή ενισχύσεων.....	84
5.9	Αποτελέσματα ενίσχυσης	86
6	Συμπεράσματα	89
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	90

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1 Κάτοψη γέφυρας.....	12
Εικόνα 2.2 Πλάγια όψη γέφυρας	13
Εικόνα 2.3 Παράδειγμα αρίθμησης λωρίδων	17
Εικόνα 2.4 Εφαρμογή συστήματος δίδυμου άξονα για τοπικούς ελέγχους	19
Εικόνα 2.5 Εφαρμογή της πρότυπης φόρτισης 1	19
Εικόνα 2.6 Διανομή συγκεντρωμένων φορτίων μέσα από το οδόστρωμα και την πλάκα σκυροδέματος	19
Εικόνα 2.7 Δυσμενέστερη φόρτιση UDL στο άκρο - Δυσμενέστερη φόρτιση TS στο άνοιγμα.....	20
Εικόνα 2.8 Δυσμενέστερη φόρτιση UDL στο άκρο - Δυσμενέστερη φόρτιση TS στο άκρο	20
Εικόνα 2.9 Δυσμενέστερη φόρτιση UDL στο άνοιγμα - Δυσμενέστερη φόρτιση TS στο άνοιγμα.....	21
Εικόνα 2.10 Δυσμενέστερη φόρτιση UDL στο άνοιγμα - Δυσμενέστερη φόρτιση TS στο άκρο.....	21
Εικόνα 2.11 Συνιστώσες θερμοκρασιακού προφίλ	23
Εικόνα 2.12 Σχέση μεταξύ ελάχιστης/μέγιστης θερμοκρασίας περιβάλλοντος υπό σκιά (T_{min} / T_{max}) και ελάχιστης/μέγιστης συνιστώσας ομοιόμορφης θερμοκρασίας γέφυρας ($T_{e,min} / T_{e,max}$)	24
Εικόνα 2.13 Στατικές ωθήσεις ηρεμίας σε ακρόβαθρο σύμφωνα με τον ΕΚ8-2.....	26
Εικόνα 2.14 Ελαστικό φάσμα σχεδιασμού ΕΚ8-1	29
Εικόνα 2.15 Ανελαστικό φάσμα σχεδιασμού Ευρωκώδικα 8 για $q = 4$ και αντίστοιχο ελαστικό φάσμα	30
Εικόνα 3.1 Ιδιότητες σκυροδέματος C30/37.....	36
Εικόνα 3.2 Χαρακτηριστικά πλάκας καταστρώματος	37
Εικόνα 3.3 Χαρακτηριστικά οπλισμών της πλάκας σκυροδέματος.....	37
Εικόνα 3.4 Προσομοίωμα γέφυρας στο SAP2000	38
Εικόνα 3.5 Τρόπος όπλισης λοξής πλάκας καταστρώματος.....	38
Εικόνα 3.6 Απαιτούμενος διαμήκης κάτω οπλισμός καταστρώματος (σε m^2/m).....	39
Εικόνα 3.7 Απαιτούμενος εγκάρσιος κάτω οπλισμός καταστρώματος (σε m^2/m)	39
Εικόνα 3.8 Απαιτούμενος διαμήκης άνω οπλισμός καταστρώματος (σε m^2/m)	40
Εικόνα 3.9 Απαιτούμενος εγκάρσιος άνω οπλισμός καταστρώματος (σε m^2/m)	40

Εικόνα 4.1 Κατασκευή της καμπύλης ικανότητας της κατασκευής	42
Εικόνα 4.2 Ιδεατή καμπύλη $F - \delta$ δομικών στοιχείων.....	43
Εικόνα 4.3 Προσομοίωμα φορέα για ανάλυση <i>Pushover</i>	51
Εικόνα 4.4 Ιδιότητες σκυροδέματος.....	52
Εικόνα 4.5 Μη γραμμικές ιδιότητες σκυροδέματος.....	52
Εικόνα 4.6 Ιδιότητες χάλυβα σπλισμού.....	53
Εικόνα 4.7 Μη γραμμικές ιδιότητες χάλυβα σπλισμού.....	53
Εικόνα 4.8 Διατομή καταστρώματος	54
Εικόνα 4.9 Λεπτομέρεια διατομής καταστρώματος.....	54
Εικόνα 4.10 Αξονική δύναμη - βάση αριστερού βάθρου.....	55
Εικόνα 4.11 Αξονική δύναμη - κορυφή αριστερού βάθρου.....	55
Εικόνα 4.12 Αξονική δύναμη - κορυφή δεξιού βάθρου.....	56
Εικόνα 4.13 Αξονική δύναμη - βάση δεξιού βάθρου	56
Εικόνα 4.14 Προσδιορισμός συμμετρίας και αξονικών φορτίων για διατομή πασσάλων	57
Εικόνα 4.15 Διάγραμμα ροπής - στροφής χορδής για διατομή βάθρου για κάμψη κατά τον άξονα 2.....	58
Εικόνα 4.16 Διάγραμμα ροπής - στροφής χορδής για διατομή βάθρου για κάμψη κατά τον άξονα 3.....	58
Εικόνα 4.17 Εισαγωγή πλαστικών αρθρώσεων στην κεφαλή των πασσάλων.....	59
Εικόνα 4.18 Καθορισμός του Νόμου Συμπεριφοράς των πλαστικών αρθρώσεων.....	59
Εικόνα 4.19 Καθορισμός <i>load case</i> που περιέχει την απαιτούμενη πλευρική δύναμη ..	60
Εικόνα 4.20 Καθορισμός μετακίνησης ελέγχου	60
Εικόνα 4.21 Αποθήκευση των επιμέρους βημάτων της <i>Pushover</i> ανάλυσης	61
Εικόνα 4.22 Καθορισμός μη γραμμικών παραμέτρων.....	61
Εικόνα 4.23 Μετατροπή ελαστικού φάσματος σχεδιασμού σε μορφή <i>ADRS</i>	62
Εικόνα 4.24 Εύρεση πρώτου σημείου δοκιμών	63
Εικόνα 4.25 Κατασκευή διγραμμικού φάσματος ικανότητας	63
Εικόνα 4.26 Υπολογισμός υστερικής απόσβεσης κατά <i>Chopra</i>	64
Εικόνα 4.27 Κατασκευή ελαστικού φάσματος απόκρισης για $\zeta = \zeta_{eff}$ και εύρεση νέου σημείου επιτελεστικότητας	66
Εικόνα 4.28 Καμπύλη αντίστασης φορέα.....	67
Εικόνα 4.29 Σημείο επιτελεστικότητας πρώτου συνδυασμού	68

<i>Εικόνα 4.30</i> Σημείο επιτελεστικότητας δεύτερου συνδυασμού.....	68
<i>Εικόνα 4.31</i> Σημείο επιτελεστικότητας τρίτου συνδυασμού	69
<i>Εικόνα 4.32</i> Σημείο επιτελεστικότητας τέταρτου συνδυασμού	69
<i>Εικόνα 4.33</i> Διάγραμμα M3 – θ κόμβου 209.....	70
<i>Εικόνα 4.34</i> Παραμορφωμένος φορέας με τις πλαστικές αρθρώσεις που έχουν αναπτυχθεί.....	70
<i>Εικόνα 4.35</i> Διάγραμμα M2 – θ κόμβου 209.....	71
<i>Εικόνα 4.36</i> Διάγραμμα M3 – θ κόμβου 201.....	71
<i>Εικόνα 4.37</i> Διάγραμμα M3 – θ κόμβου 201.....	72
<i>Εικόνα 4.38</i> Διάγραμμα M2 – θ κόμβου 44.....	73
<i>Εικόνα 4.39</i> Διάγραμμα M3 – θ κόμβου 44.....	73
<i>Εικόνα 4.40</i> Διάγραμμα M3 – θ κόμβου 134.....	74
<i>Εικόνα 4.41</i> Διάγραμμα M3 – θ κόμβου 134.....	74
<i>Εικόνα 5.1</i> Σχήμα 5.1 Μανδύας οπλισμένου σκυροδέματος σε (α) εσωτερικό υποστύλωμα και (β) περιμετρικό υποστύλωμα	75
<i>Εικόνα 5.2</i> Προσωρινή υποστύλωση και αποφόρτιση	76
<i>Εικόνα 5.3</i> Κατασκευή μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα	77
<i>Εικόνα 5.4</i> Λειτουργία αγκυρίου.....	78
<i>Εικόνα 5.5</i> Διατμητικός σύνδεσμος - βλήτρο	79
<i>Εικόνα 5.6</i> Δοκιμή συνάφειας υποστρώματος – σύνθετων υλικών.....	79
<i>Εικόνα 5.7</i> Ενδεχόμενη αποκόλληση σύνθετων υλικών σε θέση ρωγμής.....	80
<i>Εικόνα 5.8</i> Σχέση τάσης συνάφειας και ολίσθησης.....	80
<i>Εικόνα 5.9</i> Σχέση της δύναμης αποκόλλησης των σύνθετων υλικών και του μήκους επικόλλησης.....	81
<i>Εικόνα 5.10</i> Ανάλυση διατομής σε οριακή κατάσταση αντοχής. (α) Γεωμετρικά χαρακτηριστικά, (β) Κατανομή των παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής, (γ) Κατανομή των εσωτερικών δυνάμεων.....	82
<i>Εικόνα 5.11</i> Νέα διατομή μετά την ενίσχυση	85
<i>Εικόνα 5.12</i> Νέα καμπύλη αντίστασης φορέα.....	86
<i>Εικόνα 5.13</i> Εύρεση σημείου επιτελεστικότητας	86
<i>Εικόνα 5.14</i> Διάγραμμα M3 – θ κόμβου 44.....	87
<i>Εικόνα 5.15</i> Διάγραμμα M2 – θ κόμβου 44.....	87
<i>Εικόνα 5.16</i> Διάγραμμα M3 – θ κόμβου 134.....	88
<i>Εικόνα 5.17</i> Διάγραμμα M2 – θ κόμβου 134.....	88

1 Εισαγωγή

Η δια ξηράς κυκλοφορία και μεταφορά ανθρώπων και αγαθών δημιούργησε από πολύ παλιά την ανάγκη υπερβάσεως των φυσικών ή των τεχνητών κωλυμάτων που παρεμβάλλονται σε μία αρτηρία μεταφορών. Με σκοπό την αποκατάσταση της ζητούμενης συνέχειας, η οποία διακόπτονταν, ο άνθρωπος αναγκάστηκε να κατασκευάσει γέφυρες από τους προϊστορικούς ακόμα χρόνους.

Ως γέφυρα ορίζεται η κατασκευή με την οποία επιτυγχάνεται ζεύξη δύο ή περισσότερων σημείων υπεράνω μεσολαβούντος εμποδίου φυσικού ή τεχνητού, με σκοπό την επαναφορά της γραμμής επικοινωνίας, όπως μιας οδού, ενός σιδηροδρόμου, μιας ροής πεζών ή ενός αγωγού.

Σε μία ιστορική αναδρομή στην πορεία της κατασκευής των γεφυρών στον Ελληνικό χώρο, μπορούν να διακριθούν τρεις φάσεις οι οποίες κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τα χρησιμοποιηθέντα δομικά υλικά. Το πρώτο στάδιο μονοπωλεί η χρήση κορμών δέντρων, πέτρινων πλακών και ογκολίθων. Η περάτωση της προκείμενης φάσης έρχεται περί το 200 π.Χ., όταν οι Ρωμαίοι εισήγαγαν τις επεξεργασμένες πέτρινες πλάκες και την χαρακτηριστική ασίδα με ημικυκλικό τόξο στην κατασκευή των γεφυρών. Ακολούθως, το τρίτο στάδιο το οποίο χρονολογείται από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα έως και σήμερα, χαρακτηρίζεται από την εισαγωγή των τεχνικά αρτιότερων πλήρως κατεργασμένων υλικών, όπως ασφάλι και οπλισμένο σκυρόδεμα.

Τη σημερινή εποχή, η Γεφυροποιία αποτελεί το δεύτερο σε επενδυτική δραστηριότητα αλλά τον πρώτο αναμφισβήτητα σε δυσκολία κλάδο των κατασκευών.

1.1 Αντικείμενο Εργασίας

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί ο σχεδιασμός, η ανάλυση και η εκτίμηση της σεισμικής ικανότητας και συμπεριφοράς μίας γέφυρας από οπλισμένο σκυρόδεμα μέσω ελαστικών και ανελαστικών μεθόδων, όπως επίσης και η πιθανή ενίσχυση αυτής. Η προσομοίωση και η ανάλυση της κατασκευής έγινε στο λογισμικό SAP2000.

Προκειμένου να υλοποιηθούν τα παραπάνω, γίνεται διερεύνηση της βιβλιογραφίας, έτσι ώστε να συλλεχθούν τα θεωρητικά στοιχεία τα οποία κρίνονται απαραίτητα για την υλοποίηση της μεθόδου.

1.2 Μέθοδοι Ανάλυσης και Κανονισμοί

- Για την εύρεση του οπλισμού του καταστρώματος θα πραγματοποιηθεί στατική ελαστική ανάλυση.
- Για την αποτίμηση της κατασκευής θα γίνει ανελαστική υπερωθητική ανάλυση (Pushover) σύμφωνα με τον ελληνικό κανονισμό επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ) σε συνδυασμό με τη μέθοδο του φάσματος ικανότητας ATC-40.
- Η ενίσχυση του φορέα θα πραγματοποιηθεί και αυτή σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

Το συγκεκριμένο υπό-κεφάλαιο θα ασχοληθεί με την παρουσίαση της δομής της διπλωματικής εργασίας, καθώς και θα πραγματοποιηθεί μια συνοπτική περιγραφή των κεφαλαίων, που την απαρτίζουν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Αρχικά γίνεται μία γενική αναφορά στην χρησιμότητα της .Ακολούθως, περιγράφεται συνοπτικά το αντικείμενο της παρούσας εργασίας καθώς και οι κανονισμοί που εφαρμόστηκαν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία εκτενής περιγραφή της γεωμετρίας του φορέα της γέφυρας, των υλικών που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή της και των φορτίων που έχουν ληφθεί υπόψη σύμφωνα με τους αντίστοιχους κανονισμούς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται γραμμική ελαστική ανάλυση. Επιπλέον, παρουσιάζεται και αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο προσομοιώθηκε το μοντέλο στο πρόγραμμα SAP2000.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Στο Κεφάλαιο 4 πραγματοποιείται ανελαστική στατική ανάλυση του φορέα , από τα αποτελέσματα της οποίας γίνεται η αποτίμηση της κατασκευής και ακολούθως κρίνεται η απαίτηση επεμβάσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και προτείνονται μέθοδοι ενίσχυσης στην κορυφή των πασσάλων θεμελίωσης της κατασκευής με σύνθετα υλικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Στο έκτο κεφάλαιο αναφέρονται τα κυριότερα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν κατά τη μελέτη της κατασκευής και τη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας, καθώς και τα στοιχεία που απαιτούν περαιτέρω έρευνα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Στη συνέχεια, αναφέρεται η πλήρης βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

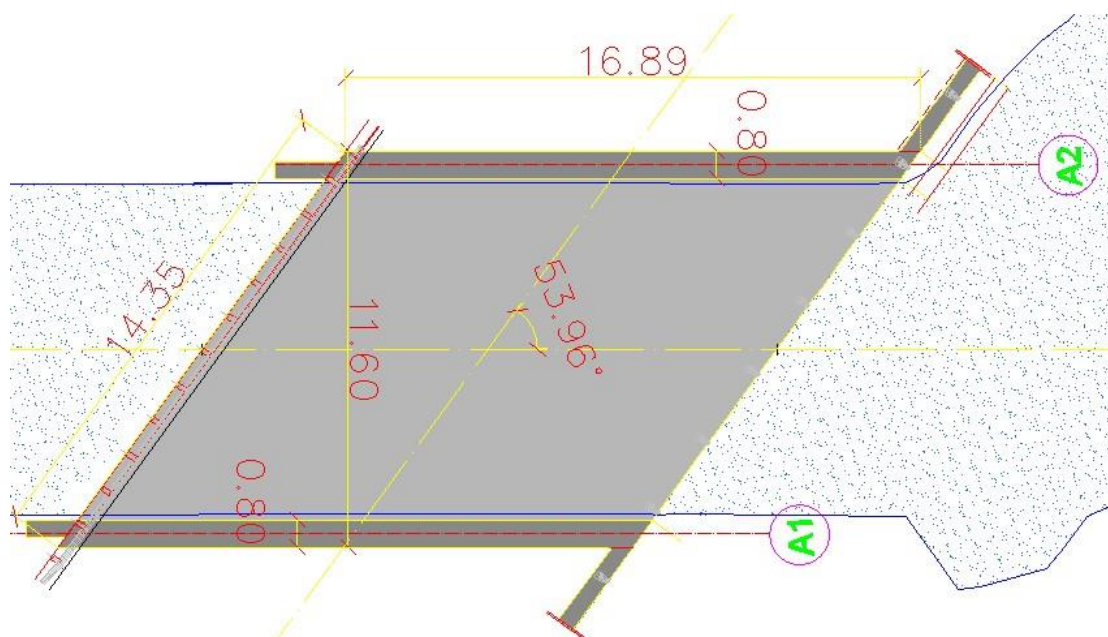
Τέλος, στο παράρτημα παρατίθενται αναλυτικά τα φύλλα υπολογισμού.

2 Μόρφωση Φορέα Γέφυρας

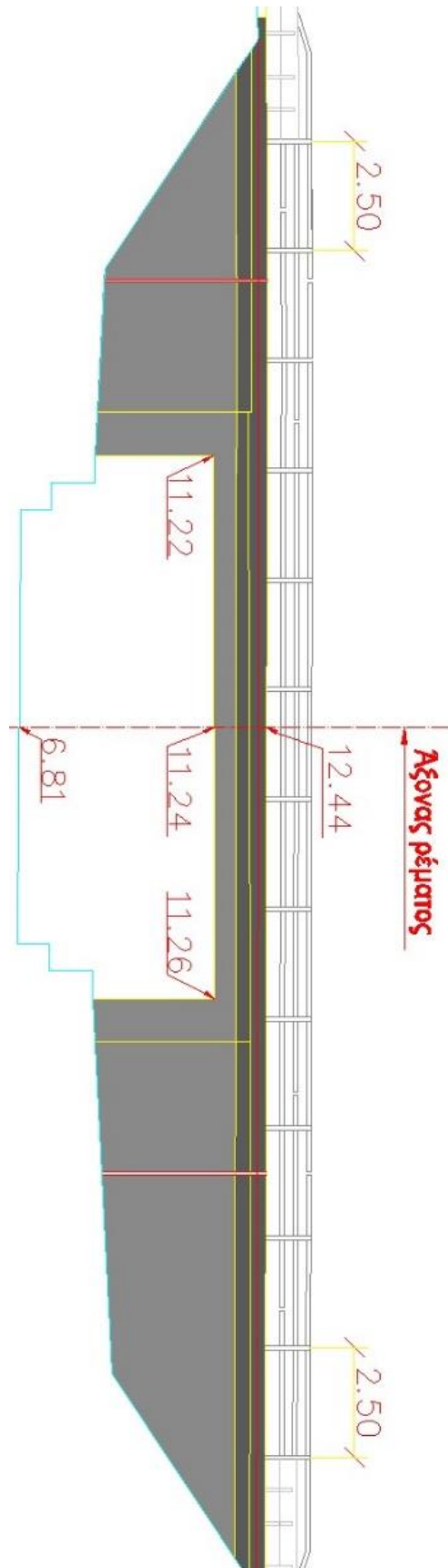
Στο παρόν κεφάλαιο προκειμένου να γίνει κατανοητή η μεθοδολογική προσέγγιση και ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας, παρατίθενται αναλυτικά η γεωμετρία του φορέα, βασικές έννοιες που θα χρησιμοποιηθούν καθώς και το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση αυτών.

2.1 Γεωμετρία Φορέα

Ο φορέας είναι μία γέφυρα από οπλισμένο σκυρόδεμα, με λοξότητα φ ίση με $53,96^\circ$, ένα άνοιγμα κάθετα στις στηρίξεις ίσο με $14,35$ m και διατομή καταστρώματος όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1. Η σύνδεση του καταστρώματος με τα ακρόβαθρα είναι μονολιθική ενώ τα ακρόβαθρα εδράζονται στο έδαφος.



Εικόνα 2.1 Κάτοψη γέφυρας



Εικόνα 2.2 Πλάγια όψη γέφυρας

2.2 Υλικά

Ο φορέας της γέφυρας είναι κατασκευασμένος από σκυρόδεμα κατηγορίας C30/37 και ο χάλυβας οπλισμού είναι B500C. Τα χαρακτηριστικά των παραπάνω υλικών φαίνονται στους Πίνακες 2.1 και 2.2 αντίστοιχα.

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά αντοχής σκυροδέματος

	f_{ck} [Mpa]	f_{cm} [Mpa]	f_{ctm} [Mpa]	$f_{ctk\ 0.05}$ [Mpa]	$f_{ctk\ 0.95}$ [Mpa]	E_{cm} [Gpa]
C30/37	30	37	2,9	2	3,8	33

Άλλα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- η θλιπτική αντοχή σχεδιασμού $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$, όπου $\gamma_c=1.5$
- το ειδικό βάρος $\gamma_{con}=25\text{kN/m}^3$
- ο συντελεστής θερμικής διαστολής $\alpha_t=10^{-5}/^\circ\text{C}$

Πίνακας 2.2 Χαρακτηριστικά αντοχής χάλυβα οπλισμού

	f_{yk} [Mpa]	f_{tk} / f_{yk}	ϵ_{uk} (%)	E_s [Gpa]	ν_s
B500C	500	$\geq 1,15$ $< 1,15$	$\geq 7,5$	200	0,3

2.3 Δράσεις

Ένας φορέας πρέπει να σχεδιάζεται και να κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε με κατάλληλο βαθμό αξιοπιστίας και κατά τρόπο οικονομικό να αντιμετωπίζει όλες τις δράσεις (φορτία) και τις επιδράσεις από το περιβάλλον, οι οποίες είναι πιθανόν να εμφανιστούν κατά την εκτέλεση και τη διάρκεια ζωής. Ανάλογα με τη χρήση και τη μορφή του έργου, προσδιορίζονται οι δράσεις με βάση τις οποίες ο μελετητής θα προβεί στην ανάλυση του φορέα, για να προσδιορισθούν τα δυσμενέστερα εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη των μελών του.

Σύμφωνα με τον EN 1990, οι δράσεις κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη διάρκεια και την πιθανότητα εμφάνισής τους, ως εξής:

- **Μόνιμες G:** δράσεις που παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες κατά την περίοδο αναφοράς.

-
- **Μεταβλητές Q:** δράσεις που μεταβάλλονται σημαντικά κατά τη διάρκεια της ζωής του έργου.
 - **Τυχηματικές A:** δράσεις με μικρή πιθανότητα εμφάνισης και μικρή διάρκεια.
 - **Σεισμικές Ae:** αναπτυσσόμενες δράσεις κατά την εμφάνιση ενός σεισμικού γεγονότος.

Επίσης, οι δράσεις διακρίνονται ανάλογα με το είδος τους σε:

- **Άμεσες:** δράσεις οι οποίες περιλαμβάνουν τα επιβαλλόμενα φορτία, όπως τα ίδια βάρη, τα φορτία κυκλοφορίας και τον άνεμο.
- **Έμμεσες:** δράσεις οι οποίες αναπτύσσονται λόγω επιβαλλόμενων παραμορφώσεων ή επιταχύνσεων. Ως έμμεσες δράσεις θεωρούνται οι δράσεις λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών, ερπυσμού, καθιζήσεων, συστολής ξήρανσης και σεισμού.

2.3.1 Μόνιμες Δράσεις

Με τον όρο μόνιμες δράσεις ή "νεκρά φορτία" χαρακτηρίζονται όλες οι δράσεις των οποίων η διαφοροποίηση στο χρόνο είναι αμελητέα. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται το ίδιο βάρος της κατασκευής, των κιγκλιδωμάτων, των στηθαίων αναχαίτισης και της ασφαλτόστρωσης καθώς και η δράση λόγω συστολής ξήρανσης. Ακολουθώς περιγράφονται ακολούθως τα πρόσθετα μόνιμα φορτία:

- Πεζοδρόμια: λαμβάνεται ύψος ίσο με 15 cm και ειδικό βάρος ίσο με 25 kN/m³.
- Ασφαλτικές στρώσεις: θεωρείται συνολικό πάχος 10 cm και ειδικό βάρος ίσο με 24 kN/m³.
- Φορτίο εξομάλυνσης: ισοδυναμεί με μία ομοιόμορφη στρώση πάχους 2 cm, η οποία χρησιμοποιείται για την επιπεδοποίηση της πλάκας σκυροδέματος και λαμβάνεται φορτίο 0,5 kN/m² σε όλο το πλάτος της γέφυρας.
- Κιγκλιδώματα: ορίζεται το βάρος τους ως ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο ίσο με 0,5 kN/m ενώ το βάρος των στηθαίων αναχαίτισης ίσο με 1 kN/m.
- Συστολή ξήρανσεως: λαμβάνεται δράση λόγω συστολής ξήρανσης του σκυροδέματος που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία -20°C.

2.3.2 Επιβαλλόμενες (Μεταβλητές) Δράσεις

Με τον όρο επιβαλλόμενες ή μεταβλητές δράσεις χαρακτηρίζονται τα κατακόρυφα φορτία που προκύπτουν από τη χρήση της κατασκευής και προέρχονται από την παρουσία ανθρώπων, κινητού εξοπλισμού, οχημάτων κλπ. Λόγω της φύσεως των φορτίων αυτών, δεν είναι επακριβές το βάρος και η θέση τους, γι' αυτό και προσδιορίζονται στατιστικά, οι δε τιμές εφαρμογής τους (χαρακτηριστικές τιμές) δίνονται από τους κανονισμούς.

2.3.2.1 Φορτία Κυκλοφορίας Οδικών Γεφυρών

Σύμφωνα με τον EN 1991-2 ορίζονται οι δράσεις και οι πρότυπες φορτίσεις για τις οδικές γέφυρες.

1. Υποδιαίρεση οδοστρώματος σε ονομαστικές λωρίδες

Το πλάτος του οδοστρώματος w υπολογίζεται μεταξύ των εσωτερικών ορίων των συστημάτων αναχαίτισης και δεν περιλαμβάνει κράσπεδα κεντρικής νησίδας ούτε το πλάτος των στηθαίων. Το πλάτος αυτό υποδιαιρείται σε ονομαστικές λωρίδες, το πλάτος και ο αριθμός των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3 Αριθμός και πλάτος λωρίδων κυκλοφορίας

Πλάτος οδοστρώματος w	Αριθμός ονομαστικών λωρίδων	Πλάτος ονομαστικής λωρίδας w_l	Πλάτος εναπομένουσας επιφάνειας
$w < 5,4 \text{ m}$	$n_l = 1$	3 m	$w - 3 \text{ m}$
$5,4 \text{ m} \leq w < 6 \text{ m}$	$n_l = 2$	$\frac{w}{2}$	0
$6 \text{ m} \leq w$	$n_l = \text{Int}\left(\frac{w}{3}\right)$	3 m	$w - 3 \times n_l$

ΣΗΜΕΙΩΣΗ Για παράδειγμα, για πλάτος οδοστρώματος ίσο με 11m, $n_l = \text{Int}\left(\frac{w}{3}\right) = 3$, και το πλάτος της εναπομένουσας επιφάνειας είναι $11 - 3 \times 3 = 2\text{m}$.

Παραδείγματος χάρη, ο αριθμός των ονομαστικών λωρίδων κυκλοφορίας καθορίζεται ως εξής:

$n_l=1$ όπου $w < 5,4 \text{ m}$

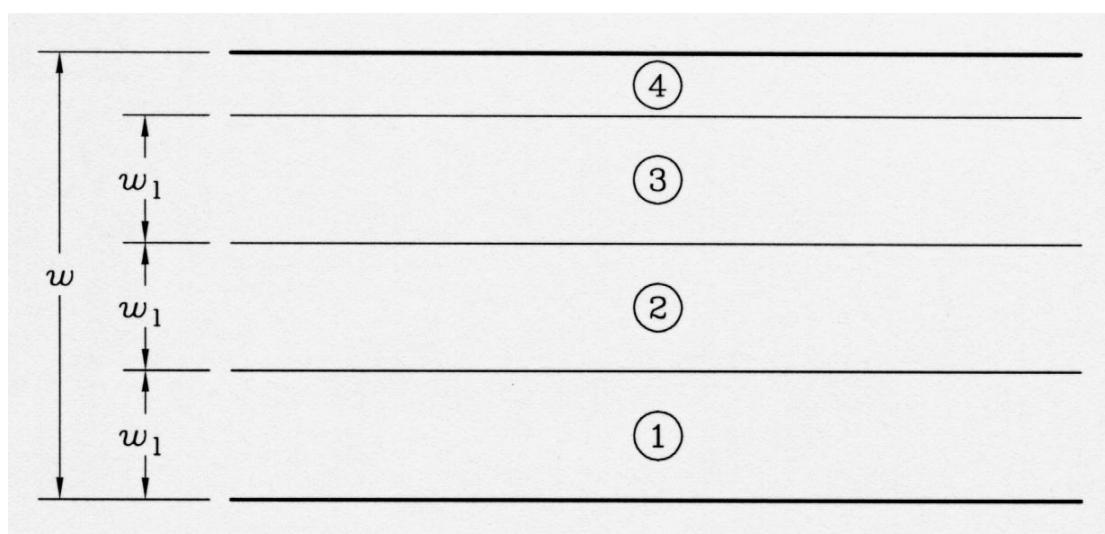
$n_l=2$ όπου $5,4 \leq w < 9 \text{ m}$

$n_l=3$ όπου $9 \text{ m} \leq w < 12 \text{ m}$, κλπ.

Η γέφυρα που μελετάται στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει καθαρό πλάτος καταστρώματος $w=12,20 \text{ m}$. Επομένως ο αριθμός των λωρίδων κυκλοφορίας ορίζεται ίσος με $n_l=4$ και το πλάτος της εναπομένουσας επιφάνειας ισούται με $0,20 \text{ m}$.

2. Θέση και αρίθμηση των ονομαστικών λωρίδων κυκλοφορίας

Η λωρίδα που δίνει τα δυσμενέστερα εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις ονομάζεται Λωρίδα 1, η λωρίδα κυκλοφορίας που προκαλεί τα δεύτερα λιγότερο δυσμενέστερα εντατικά μεγέθη αριθμείται ως Λωρίδα 2 κ.ο.κ. Η θέση τους στο κατάστρωμα της γέφυρας δεν θα πρέπει αναγκαστικά να σχετίζεται με την αρίθμησή τους. Για κάθε μεμονωμένο έλεγχο (π.χ. για τον έλεγχο της οριακής κατάστασης αστοχίας μιας διατομής σε κάμψη), ο αριθμός των λωρίδων που πρέπει να ληφθούν υπόψη ως φορτιζόμενες, η θέση τους στο οδόστρωμα και η αρίθμησή τους θα πρέπει να επιλέγεται έτσι, ώστε τα εντατικά μεγέθη από τα προσομοιώματα φόρτισης να είναι τα δυσμενέστερα.



Εικόνα 2.3 Παράδειγμα αρίθμησης λωρίδων

Όπου:

w πλάτος οδοστρώματος

w_1 πλάτος ονομαστικής λωρίδας

1 Ονομαστική Λωρίδα 1

2 Ονομαστική Λωρίδα 2

3 Ονομαστική Λωρίδα 3

4 Εναπομένουσα επιφάνεια

3. Κατακόρυφα φορτία οδοστρώματος – Πρότυπη φόρτιση 1 (LM1)

Όπως περιγράφεται στον EN1991-2, η κυκλοφοριακή φόρτιση καλύπτεται από πρότυπες φορτίσεις (Load Models–LM), οι οποίες ισχύουν για φορτιζόμενα μήκη έως 200m.

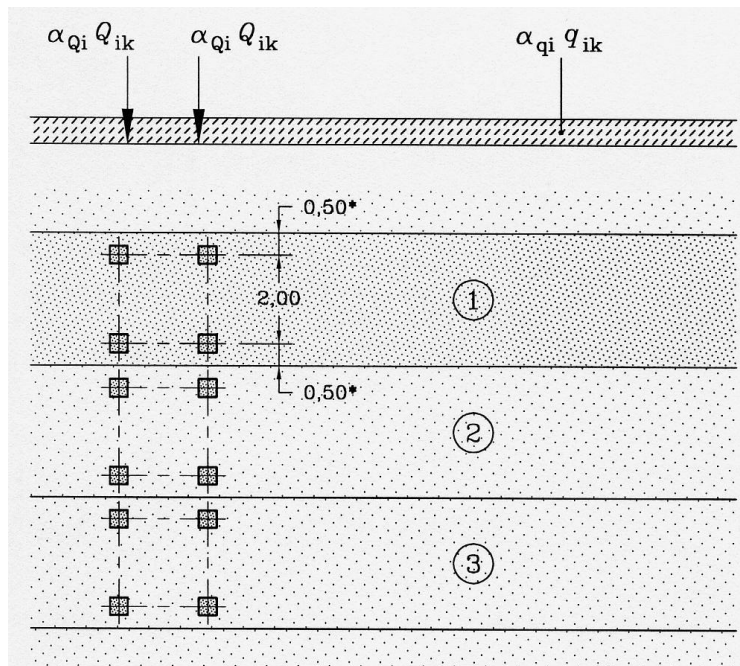
Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε η Πρότυπη φόρτιση 1. Η συγκεκριμένη φόρτιση χρησιμοποιείται για τοπικούς και καθολικούς ελέγχους και αποτελείται από δύο επιμέρους συστήματα:

- **Διαξονικά συγκεντρωμένα φορτία** (σύστημα δίδυμου άξονα: **TS**), με τον κάθε άξονα να έχει βάρος ίσο με $\alpha_Q \cdot Q_k$, όπου $\alpha_Q=0,9$ είναι συντελεστές προσαρμογής. Το φορτίο μοιράζεται εξίσου στους δύο τροχούς, η επιφάνεια των οποίων θεωρείται τετραγωνική διαστάσεων $0,4 \cdot 0,4 \text{ m}^2$.
- **Ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία** (σύστημα **UDL**), τα οποία διαθέτουν βάρος ανά τετραγωνικό μέτρο ονομαστικής λωρίδας κυκλοφορίας ίσο με $\alpha_Q \cdot q_k$, όπου $q_k=1$ είναι συντελεστής προσαρμογής. Επισημαίνεται επίσης ότι τα ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία θα εφαρμόζονται μόνο στα δυσμενή τμήματα της επιφάνειας επιρροής, κατά τη διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση.

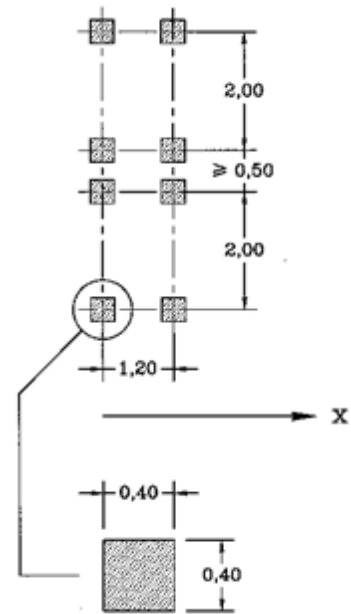
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές τιμές των Q_k και q_k για κάθε λωρίδα και για την εναπομένουσα επιφάνεια.

Πίνακας 2.4 Πρότυπη φόρτιση 1 - Χαρακτηριστικές τιμές

Θέση	Σύστημα δίδυμου άξονα <i>TS</i>	Σύστημα <i>UDL</i>
	Αξονικά Φορτία Q_{ik} (kN)	q_{ik} (ή q_{ik}) (kN/m ²)
Λωρίδα 1	300	9
Λωρίδα 2	200	2,5
Λωρίδα 3	100	2,5
Λοιπές λωρίδες	0	2,5
Εναπομένουσα επιφάνεια (q_{ik})	0	2,5



Εικόνα 2.5 Εφαρμογή της πρότυπης φόρτισης 1



Εικόνα 2.4 Εφαρμογή συστήματος δίδυμου άξονα για τοπικούς ελέγχους

Όπου:

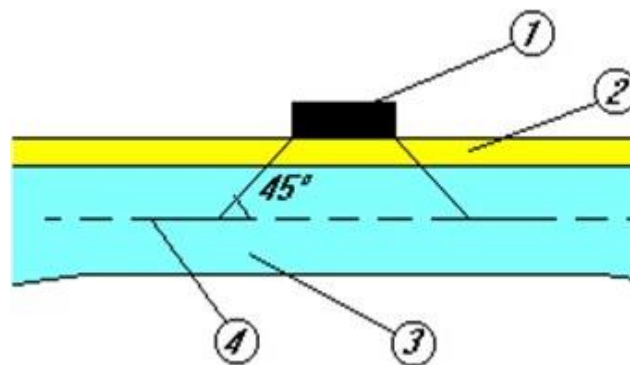
(1) Λωρίδα 1 : $Q_{1k} = 300 \text{ kN}$; $q_{1k} = 9 \text{ kN/m}^2$

(2) Λωρίδα 2 : $Q_{2k} = 200 \text{ kN}$; $q_{2k} = 2,5 \text{ kN/m}^2$

(3) Λωρίδα 3 : $Q_{3k} = 100 \text{ kN}$; $q_{3k} = 2,5 \text{ kN/m}^2$

* Για $w_l = 3,00 \text{ m}$

Τα συγκεντρωμένα φορτία TS που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τοπικούς ελέγχους, θα πρέπει να λαμβάνονται ως ομοιόμορφα κατανεμημένα σε όλη την επιφάνεια επαφής τους με την κατανομή που περιγράφεται στην εικόνα 2.4.



Εικόνα 2.6 Διανομή συγκεντρωμένων φορτίων μέσα από το οδόστρωμα και την πλάκα σκυροδέματος

Όπου:

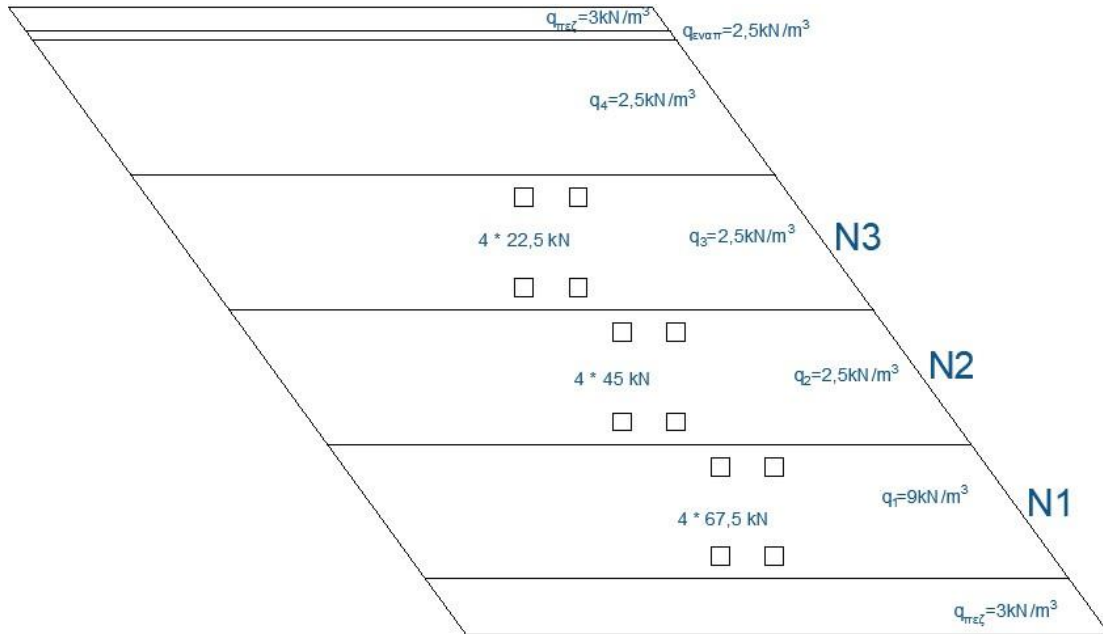
(1) Πίεση επαφής τροχού

(2) Οδόστρωμα

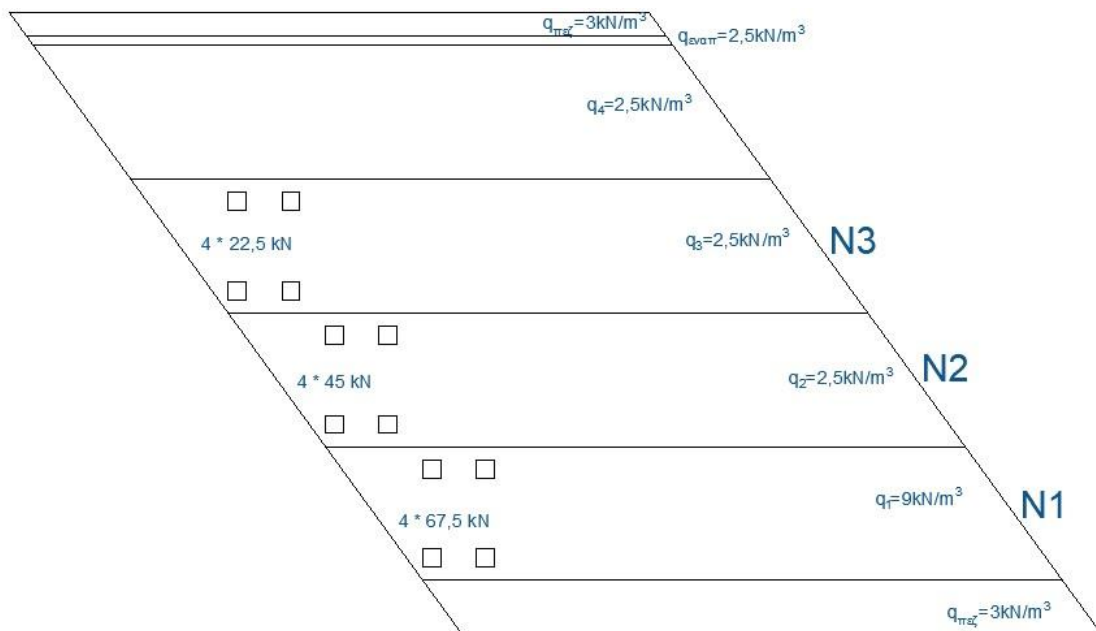
(3) Πλάκα σκυροδέματος

(4) Μέση επιφάνεια της πλάκας σκυροδέματος

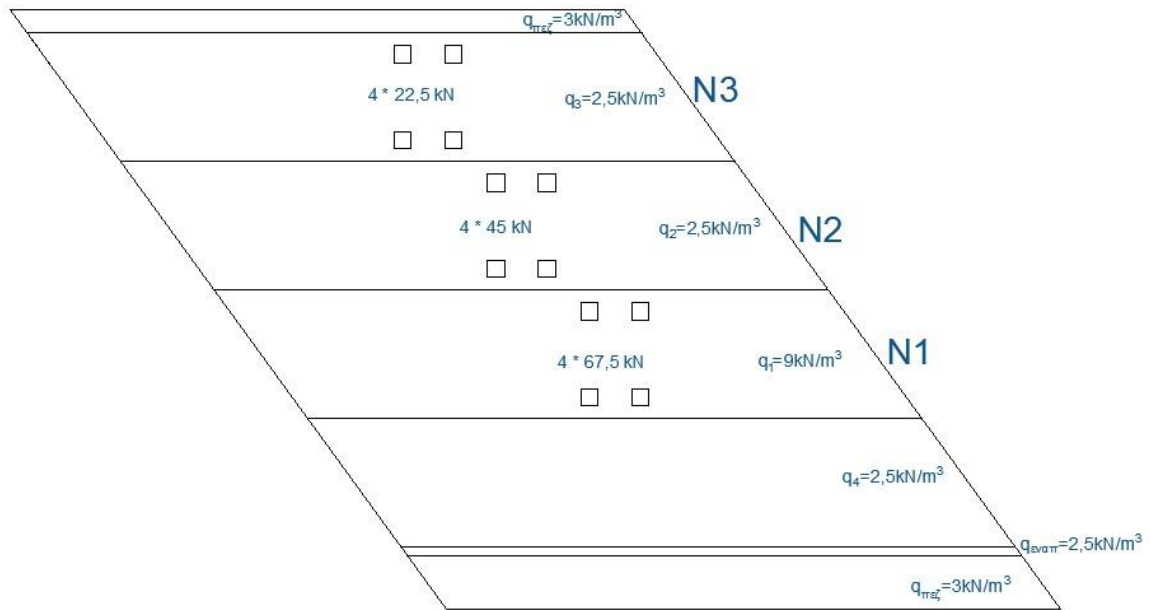
- ❖ Ακολούθως, παρατίθενται ενδεικτικά οι δυσμενέστεροι συνδυασμοί της Πρότυπης Φόρτισης 1 που μελετήθηκαν για τη συγκεκριμένη εργασία:



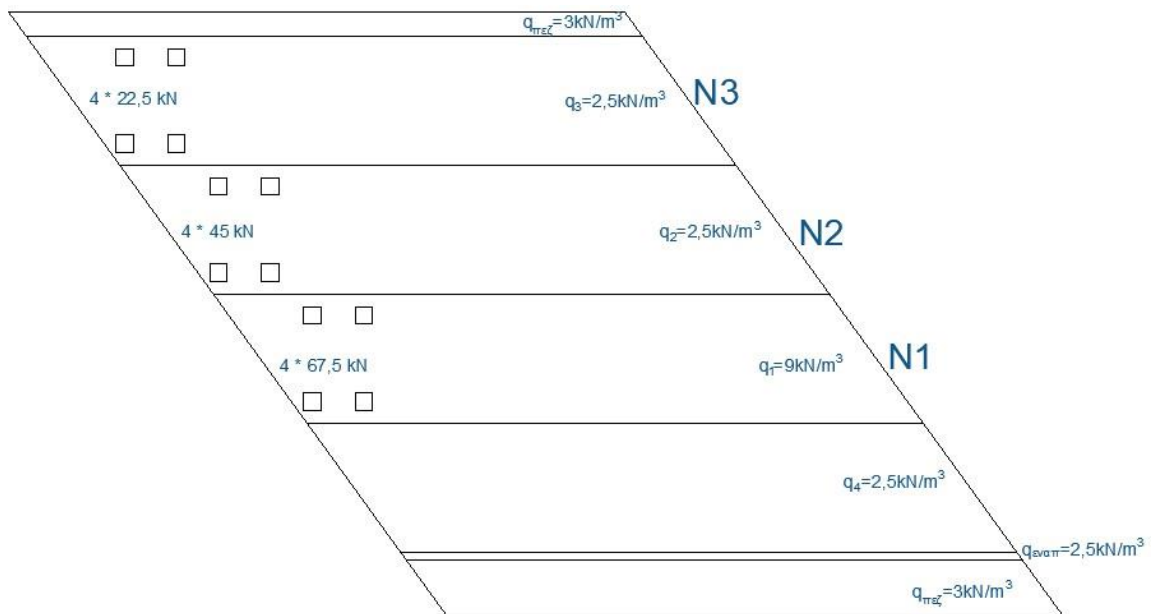
Εικόνα 2.7 Δυσμενέστερη φόρτιση UDL στο άκρο - Δυσμενέστερη φόρτιση TS στο άνοιγμα



Εικόνα 2.8 Δυσμενέστερη φόρτιση UDL στο άκρο - Δυσμενέστερη φόρτιση TS στο άκρο



Εικόνα 2.9 Δυσμενέστερη φόρτιση UDL στο άνοιγμα - Δυσμενέστερη φόρτιση TS στο άνοιγμα



Εικόνα 2.10 Δυσμενέστερη φόρτιση UDL στο άνοιγμα - Δυσμενέστερη φόρτιση TS στο άκρο

4. Οριζόντια φορτία καταστώματος – Δυνάμεις πέδησης και επιτάχυνσης

Ως δύναμη πέδησης Q_{ik} λαμβάνεται μια διαμήκης δύναμη ασκούμενη στο επίπεδο της επιφάνειας του οδοστρώματος. Μεταφέρεται στους αρμούς διαστολής, στα εφέντρανα και στην υποδομή. Η χαρακτηριστική της τιμή για ολόκληρο το πλάτος του οδοστρώματος λαμβάνεται ίση με:

$$Q_{ik} = 0,6\alpha_{Q1}(2Q_{1k}) + 0,10\alpha_{q1}q_{1k}w_1L$$
$$180\alpha_{Q1} (kN) \leq Q_{ik} \leq 900 (kN)$$

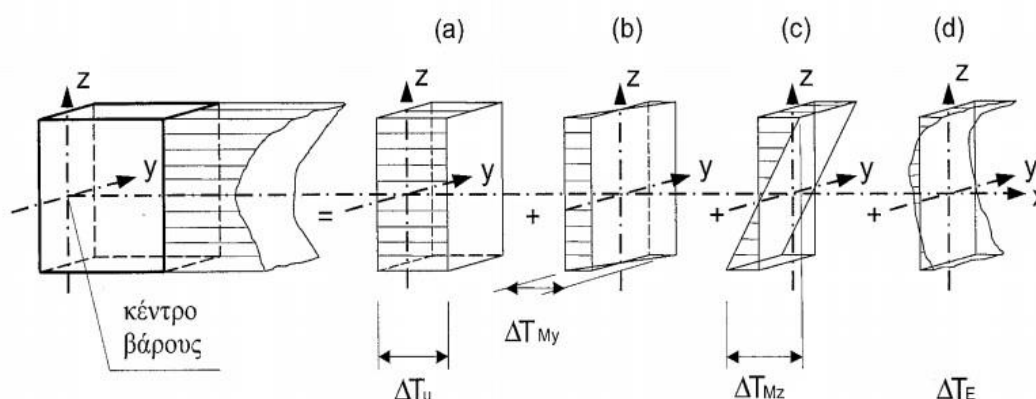
Όπου L = το μήκος του οδοστρώματος ή του υπό εξέταση τμήματος αυτού.

- ❖ Επομένως για τη γέφυρα της παρούσας μελέτης οι δυνάμεις πέδησης είναι:
 - Ονομαστική λωρίδα 1:
 $Q_{1k} = 0,6 \cdot 0,9 \cdot (2 \cdot 300) + 0,10 \cdot 1 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 14,35 = 362,75 \text{ kN}$
Και: $180 \cdot 0,9 = 162 \text{ kN} \leq 391,5 \text{ kN} \leq 900 \text{ kN}$
 - Ονομαστική λωρίδα 2:
 $Q_{2k} = 0,6 \cdot 0,9 \cdot (2 \cdot 200) + 0,10 \cdot 1 \cdot 2,5 \cdot 3 \cdot 14,35 = 226,77 \text{ kN}$
Και: $180 \cdot 0,9 = 162 \text{ kN} \leq 234,75 \text{ kN} \leq 900 \text{ kN}$
 - Ονομαστική λωρίδα 3:
 $Q_{3k} = 0,6 \cdot 0,9 \cdot (2 \cdot 100) + 0,10 \cdot 1 \cdot 2,5 \cdot 3 \cdot 14,35 = 118,77 \text{ kN}$
Επειδή δεν ικανοποιείται η συνθήκη:
 $180 \cdot 0,9 = 162 \text{ kN} \leq 118,77 \text{ kN} \leq 900 \text{ kN}$
 $Q_{3k} = 162 \text{ kN}$

- ❖ Οι δυνάμεις επιτάχυνσης είναι ίσες και αντίθετες των δυνάμεων πέδησης, με αποτέλεσμα να ισχύει:
 - $Q_{1k} = -362,75 \text{ kN}$
 - $Q_{2k} = -226,77 \text{ kN}$
 - $Q_{3k} = -162 \text{ kN}$

2.3.2.2 Θερμοκρασιακές Μεταβολές

Οι θερμοκρασιακές δράσεις θεωρούνται στον EN1991-1-5 παράγραφος 6 ως μεταβλητές και έμμεσες, ενώ πρόσθετα στοιχεία δίνονται και στο Εθνικό Προσάρτημα. Παρακάτω παρατίθεται η υποδιαίρεση του «πραγματικού» θερμοκρασιακού προφίλ σε τέσσερις ανεξάρτητες συνιστώσες:



Εικόνα 2.11 Συνιστώσες θερμοκρασιακού προφίλ

- Συνιστώσα ομοιόμορφης θερμοκρασίας ΔT_U .
- Γραμμική συνιστώσα θερμοκρασιακής μεταβολής περί τον άξονα z-z ΔT_{My} .
- Γραμμική συνιστώσα θερμοκρασιακής μεταβολής περί τον άξονα y-y ΔT_{Mz} .
- Μη γραμμική συνιστώσα θερμοκρασιακής μεταβολής ΔT_E , η οποία οδηγεί σε ένα σύστημα αυτοϊσορροπων τάσεων που δεν οφείλεται σε εξωτερική ένταση του στοιχείου.

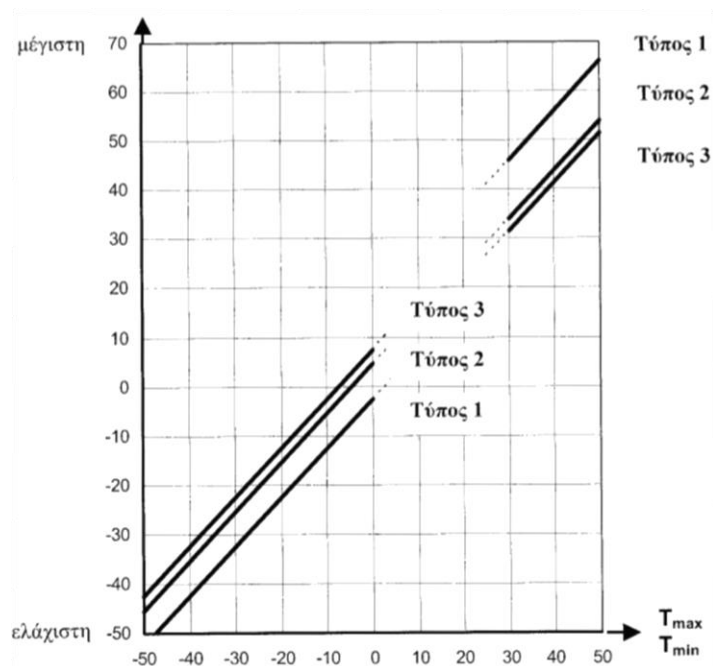
Για τις θερμοκρασιακές μεταβολές στις γέφυρες ο Ευρωκώδικας κατατάσσει τα καταστρώματα των γεφυρών σε 3 τύπους:

- Τύπος 1: Χαλύβδινο δάπεδο επί κιβωτοειδών ή ανοικτών δοκών ή δικτυωτών δοκών από χάλυβα.
- Τύπος 2: Δάπεδο από σκυρόδεμα επί κιβωτοειδών ή ανοικτών δοκών ή δικτυωτών δοκών από χάλυβα.
- Τύπος 3: Δάπεδο από σκυρόδεμα επί ανοικτών ή κιβωτοειδών δοκών από σκυρόδεμα.

- ❖ Η γέφυρα της συγκεκριμένης μελέτης κατατάσσεται στον Τύπο 3 και εξετάζεται για την ομοιόμορφη και τη γραμμική κατανομή της θερμοκρασίας.

1. Συνιστώσα ομοιόμορφης θερμοκρασίας ΔT_U

Προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ της μέσης θερμοκρασίας T ενός μέλους και της αρχικής του θερμοκρασίας T_0 . Στην ομοιόμορφη συνιστώσα προσδιορίζονται από εθνικούς ισοθερμικούς χάρτες η ελάχιστη (T_{min}) και η μέγιστη (T_{max}) θερμοκρασία περιβάλλοντος υπό σκιά. Στη συνέχεια, προσδιορίζονται η ελάχιστη ($T_{e,min}$) και η μέγιστη ($T_{e,max}$) ενεργός θερμοκρασία της γέφυρας.



Εικόνα 2.12 Σχέση μεταξύ ελάχιστης/μέγιστης θερμοκρασίας περιβάλλοντος υπό σκιά (T_{\min}/T_{\max}) και ελάχιστης/μέγιστης συνιστώσας ομοιόμορφης θερμοκρασίας γέφυρας ($T_{e,\min}/T_{e,\max}$)

Επιπρόσθετα, οι χαρακτηριστικές τιμές του μέγιστου εύρους της συνιστώσας ομοιόμορφης θερμοκρασίας της γέφυρας για τη συστολή $\Delta T_{U,\text{con}}$ και για τη διαστολή $\Delta T_{U,\text{exp}}$ αντίστοιχα ορίζονται από τις σχέσεις:

$$\Delta T_{U,\text{con}} = T_0 - T_{e,\min} \quad \text{και} \quad \Delta T_{U,\text{exp}} = T_{e,\max} - T_0$$

Όπου ως T_0 ορίζεται η θερμοκρασία κατά το στάδιο της κατασκευής της γέφυρας και για την παρούσα μελέτη λαμβάνεται ίση με $T_0 = 10^\circ\text{C}$.

❖ Τελικά, τα εύρη των ομοιόμορφων θερμοκρασιών λαμβάνονται ίσα με:

$$\Delta T_{U,\text{con}} = -30^\circ\text{C} \quad \text{και} \quad \Delta T_{U,\text{exp}} = 20^\circ\text{C}$$

2. Γραμμική συνιστώσα θερμοκρασιακής μεταβολής ΔT_M

Προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών εξωτερικής και εσωτερικής επιφάνειας μιας διατομής ή των επιφανειών των επιμέρους στρώσεων περί τον άξονα z-z. Η συνιστώσα αυτή περιλαμβάνει μία συνιστώσα γραμμικής μεταβολής της θερμοκρασίας ως προς τον οριζόντιο άξονα, μία αντίστοιχη συνιστώσα ως προς τον κατακόρυφο άξονα και μία μη γραμμική συνιστώσα θερμοκρασίας που προκαλεί αυτεντατική κατάσταση. Από τις τρεις αυτές συνιστώσες, συνήθως μόνο η πρώτη λαμβάνεται υπόψη και συμβολίζεται στο EN 1991-1-5 ως Προσέγγιση 1.

Σε μία χρονική περίοδο ψύξης και θέρμανσης του καταστρώματος μιας γέφυρας προκύπτουν δύο θερμοκρασιακές διαφορές, την $\Delta T_{M,\text{heat}}$ όταν η άνω επιφάνεια είναι θερμότερη από την κάτω και την $\Delta T_{M,\text{cool}}$ όταν η κάτω επιφάνεια είναι θερμότερη από την

άνω. Αυτές οι θερμοκρασιακές διαφορές μπορούν να προκαλέσουν στον φορέα επιπτώσεις όπως:

- Παρεμπόδιση ελεύθερης καμπύλωσης λόγω του είδους του φορέα.
- Τριβή σε εφάδρανα κύλισης.
- Μη γραμμικά γεωμετρικά φαινόμενα.

Σύμφωνα με την Προσέγγιση 1 του EN 1991-1-5, θα πρέπει να εφαρμόζονται οι προαναφερθείσες τιμές μεταξύ της άνω και κάτω επιφάνειας του καταστρώματος, οι χαρακτηριστικές τιμές των οποίων δίνονται παρακάτω από τον πίνακα.

Πίνακας 2.5 Συνιστάμενες τιμές των $\Delta T_{M,heat}$ και $\Delta T_{M,cool}$ για γέφυρες

Ομάδα καταστρώματος		Θετική διαφορά θερμοκρασίας	Αρνητική διαφορά θερμοκρασίας
		$\Delta T_{M,pos}$ (C)	$\Delta T_{M,neg}$ (C)
1		18	-13
2		15	-18
3	Κιβωτοειδής δοκός	10	-5
	Λοιπές μορφές	15	-8

Πρέπει να σημειωθεί ωστόσο, πως οι τιμές του πίνακα αντιστοιχούν σε σιδηροδρομικές και οδικές γέφυρες με πάχος επιφανειακής στρώσεως 50 mm. Σε περίπτωση επιφανειακής στρώσεως διαφορετικού πάχους, οι τιμές πολλαπλασιάζονται με τον συντελεστή k_{sur} , του οποίου οι συνιστάμενες τιμές παρουσιάζονται ακολούθως στον πίνακα .

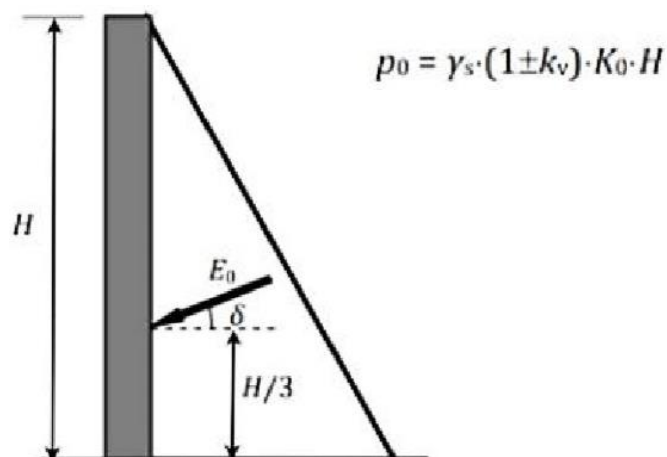
Πίνακας 2.6 Συνιστάμενες τιμές του συντελεστή k_{sur}

Road, foot and railway bridges						
Surface Thickness	Type 1		Type 2		Type 3	
	Top warmer than bottom	Bottom warmer than top	Top warmer than bottom	Bottom warmer than top	Top warmer than bottom	Bottom warmer than top
[mm]	k_{sur}	k_{sur}	k_{sur}	k_{sur}	k_{sur}	k_{sur}
unsurfaced	0,7	0,9	0,9	1,0	0,8	1,1
water-proofed ¹⁾	1,6	0,6	1,1	0,9	1,5	1,0
50	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
100	0,7	1,2	1,0	1,0	0,7	1,0
150	0,7	1,2	1,0	1,0	0,5	1,0
ballast (750 mm)	0,6	1,4	0,8	1,2	0,6	1,0
¹⁾ These values represent upper bound values for dark colour						

❖ Επομένως, στη μελετώμενη γέφυρα προκύπτει:

$$\Delta T_{M,heat} = 10,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{και} \quad \Delta T_{M,cool} = -8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2.3.2.3 Ωθήσεις Γαιών



Εικόνα 2.13 Στατικές ωθήσεις ηρεμίας σε ακρόβαθρο σύμφωνα με τον ΕΚ8-2

Η συνισταμένη στατική ώθηση των γαιών, για τριγωνικό διάγραμμα, στους τοίχους αντιστήριξης και στους πασσάλους θεμελίωσης δίνεται ως εξής:

$$E_0 = \frac{1}{2} \cdot \gamma_s \cdot (1 \pm k_v) \cdot K_0 \cdot H^2$$

Όπου:

- γ_s : ειδικό βάρος εδάφους
- $k_v = \pm 0,5 \cdot k_h$: σεισμικός συντελεστής για κατακόρυφο σεισμό
- $k_h = \alpha \cdot \frac{S}{r}$: σεισμικός συντελεστής για οριζόντιο σεισμό
- $K_0 = 1 - \sin\varphi$: συντελεστής ωθήσεων ηρεμίας
- φ : γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους
- H : ύψος του τοίχου

- S : συντελεστής εδάφους (πίνακας 2.7)

Πίνακας 2.7 Τιμές συντελεστή εδάφους S

Κατηγορία Εδάφους	S
A	1.00
B	1.20
C	1.15
D	1.35
E	1.40

- $\alpha = \frac{\alpha g}{g}$: ανηγμένη επιτάχυνση του εδάφους για έδαφος κατηγορίας A

Πίνακας 2.8 Τιμές ενεργούς επιτάχυνσης σεισμικών ζωνών Ελλάδας

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας	Εδαφική επιτάχυνση αναφοράς a_{gR} (g)
Z1	0.16
Z2	0.24
Z3	0.36

- r : συντελεστής που εξαρτάται από το μέγεθος της μόνιμης μετακίνησης που επιτρέπεται να συμβεί για τον σεισμό σχεδιασμού (Πίνακας 2.9)

Πίνακας 2.9 Τιμές συντελεστή r

Τύπος κατασκευής - αποδεκτή μετακίνηση	r
Ελεύθεροι τοίχοι βαρύτητας που επιτρέπεται να ολισθήσουν έως $d_r=300 \cdot \alpha \cdot S$ (mm)	2.0
Ελεύθεροι τοίχοι βαρύτητας που επιτρέπεται να ολισθήσουν έως $d_r=200 \cdot \alpha \cdot S$ (mm)	1.5
Τοίχοι χωρίς δυνατότητα ολίσθησης και ακρόβαθρα γεφυρών	1.0

Η αλληλεπίδραση εδάφους – βάθρου προσομοιώνεται με τη χρήση ελατηρίων καθ' ύψος των βάθρων, η δυσκαμψία των οποίων λαμβάνεται σύμφωνα με τον E39/99 ως:

$$K_x(y) = \frac{2,4 \cdot E_s \cdot y}{H^2} \cdot A$$

Όπου:

- E_s : μέτρο συμπίεσεως του εδάφους
- A : εμβαδόν φορτιζόμενης επιφάνειας

❖ Για τη μελέτη της συγκεκριμένης γέφυρας προκύπτουν:

$$K_0 = 1 - \sin\varphi = 1 - \sin 20 = 0,5 \quad k_h = 0,24 \cdot \frac{1,15}{1} = 0,275 \quad k_v = \pm 0,5 \cdot k_h = \pm 0,138$$

Καθώς, οι ζητούμενοι συντελεστές είναι:

$$r=1$$

$$\gamma_s = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$S = 1,15$$

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z_2

$$\alpha_{gR} = 0,24g$$

$$\varphi = 30^\circ$$

$$E_s = 10.000 \text{ kN/m}^2$$

2.3.3 Σεισμικές Δράσεις

1. Ελαστικό φάσμα σχεδιασμού ΕΚ8

Οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί λαμβάνουν υπόψη τους την επιρροή των ιδιοτήτων του εδάφους στη μορφή του φάσματος τροποποιώντας τις χαρακτηριστικές περιόδους T_B και T_C που καθορίζουν την έναρξη της περιοχής σταθερής φασματικής επιτάχυνσης και σταθερής φασματικής ταχύτητας, αντίστοιχα. Επισημαίνεται ότι η χαρακτηριστική περίοδος T_D που ορίζει την έναρξη της περιοχής σταθερής φασματικής μετακίνησης δεν εξαρτάται από το έδαφος. Στον Πίνακα 2.10 δίνονται οι τιμές των χαρακτηριστικών περιόδων για κάθε κατηγορία εδάφους.

Πίνακας 2.10 Συντελεστής εδάφους και χαρακτηριστικές περίοδοι φάσματος σχεδιασμού

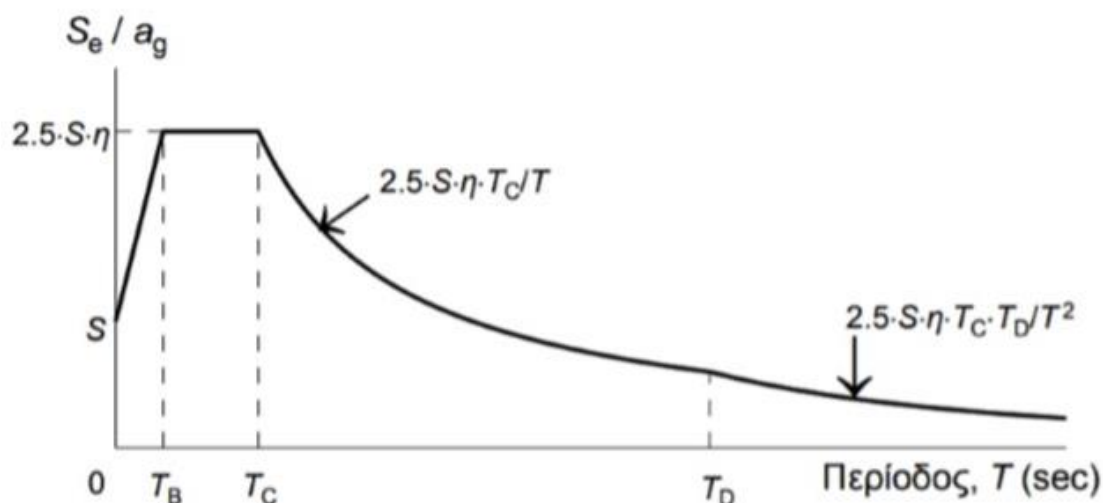
Κατηγορία εδάφους	S	T_B (sec)	T_C (sec)	T_D (sec)
A	1.00	0.15	0.40	2.50
B	1.20	0.15	0.50	2.50
C	1.15	0.20	0.60	2.50
D	1.35	0.20	0.80	2.50
E	1.40	0.15	0.50	2.50

Οι αναλυτικές σχέσεις που δίνουν την ελαστική φασματική επιτάχυνση S_e σε κάθε περιοχή είναι:

- Για $0 \leq T \leq T_B$:
$$S_e(T) = \alpha_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (2,5 \cdot \eta - 1) \right]$$
- Για $T_B \leq T \leq T_C$:
$$S_e(T) = \alpha_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5$$
- Για $T_C \leq T \leq T_D$:
$$S_e(T) = \alpha_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \frac{T_C}{T}$$
- Για $T_D \leq T$:
$$S_e(T) = \alpha_g \cdot S \cdot 2,5 \cdot \eta \cdot \frac{T_C \cdot T_D}{T^2}$$

Όπου:

- $\eta = \sqrt{\frac{0,10}{0,05+\zeta}}$: συντελεστής απόσβεσης
- ζ : ποσοστό ιξώδους απόσβεσης επί %
- $\alpha_g = \gamma_1 \cdot \alpha_{gR}$: μέγιστη επιτάχυνση εδάφους για έδαφος κατηγορίας A
- γ_1 : συντελεστής σπουδαιότητας (πίνακας 2.11)
- α_{gR} : τιμή αναφοράς της μέγιστης επιτάχυνσης εδάφους
- S : συντελεστής εδάφους (πίνακας 2.10)
- T : θεμελιώδης ιδιοπερίοδος του φορέα σε sec
- T_B, T_C, T_D : χαρακτηριστικές περίοδοι του φάσματος ως συνάρτηση των εδαφικών συνθηκών σε sec (πίνακας 2.10)
- q : συντελεστής συμπεριφοράς



Εικόνα 2.14 Ελαστικό φάσμα σχεδιασμού ΕΚ8-1

Για $T \leq T_B$ η φασματική επιτάχυνση σχεδιασμού S_e παρουσιάζει ανοδική πορεία με την αύξηση της περιόδου.

- Για $T_B \leq T \leq T_C$ η φασματική επιτάχυνση παραμένει σταθερή.
- Για $T_C \leq T \leq T_D$ η φασματική ταχύτητα παραμένει σταθερή και επομένως η φασματική επιτάχυνση μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την αύξηση της ιδιοπεριόδου της κατασκευής.
- Για $T_D \leq T$ η φασματική μετακίνηση παραμένει σταθερή και επομένως η φασματική επιτάχυνση μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της ιδιοπεριόδου της κατασκευής.

Πίνακας 2.11 Τιμές συντελεστή σπουδαιότητας γ_I κατά ΕΚ8

Κατηγορία σπουδαιότητας	Συντελεστής σπουδαιότητας
I (μικρή σπουδαιότητα)	0.8
II (συνήθης σπουδαιότητα)	1.0
III (μεγάλη σπουδαιότητα)	1.2
IV (πολύ μεγάλη σπουδαιότητα)	1.4

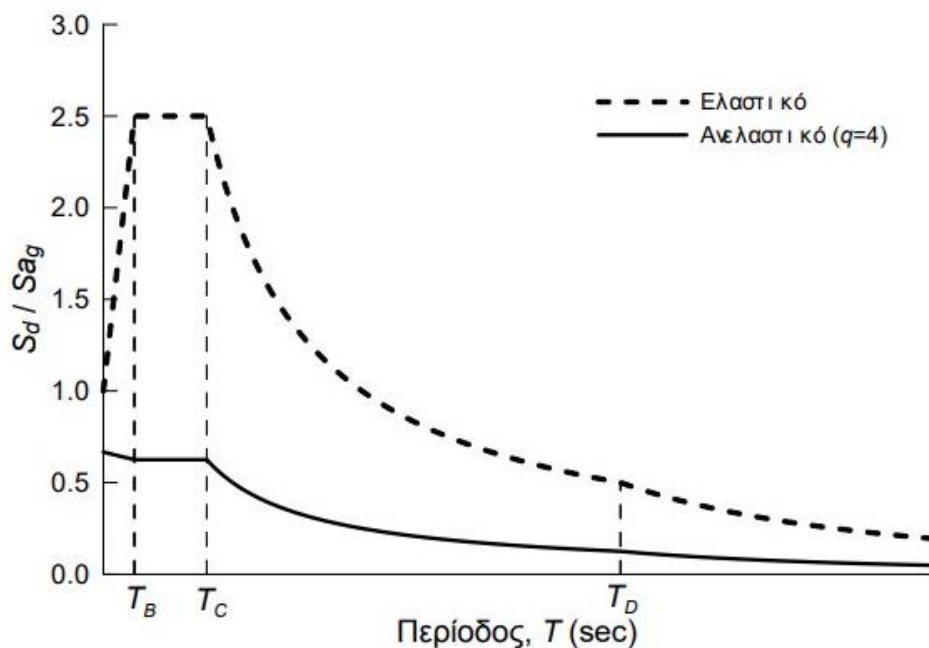
2. Ανελαστικό φάσμα σχεδιασμού ΕΚ8

Στον Ευρωκώδικα 8, το ανελαστικό φάσμα σχεδιασμού ορίζεται διαιρώντας το αντίστοιχο ελαστικό φάσμα με το συντελεστή συμπεριφοράς q , εκτός από την περιοχή περιόδων $0 < T < T_B$ όπου θεωρείται μία γραμμική συνάρτηση για την επιτάχυνση σχεδιασμού. Συγκεκριμένα, στις διάφορες χαρακτηριστικές περιοχές του φάσματος ισχύουν οι εξής σχέσεις:

- Για $0 \leq T \leq T_B$:
$$S_a(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{1}{1,5} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2,5}{q} - \frac{1}{1,5} \right) \right]$$
- Για $T_B \leq T \leq T_C$:
$$S_a(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q}$$
- Για $T_C \leq T \leq T_D$:
$$S_a(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \frac{T_C}{T} \geq \beta \cdot a_g$$
- Για $T_D \leq T$:
$$S_a(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \frac{T_C \cdot T_D}{T} \geq \beta \cdot a_g$$

Όπου:

- $\beta = 0,2$: κάτω όριο του οριζόντιου φάσματος σχεδιασμού



Εικόνα 2.15 Ανελαστικό φάσμα σχεδιασμού Ευρωκώδικα 8 για $q = 4$ και αντίστοιχο ελαστικό φάσμα

- ❖ Στα πλαίσια της εργασίας και για την συγκεκριμένη περιοχή επιλέχθηκαν:

Δείκτης συμπεριφοράς $q=1,5$

Κατηγορία εδάφους C, άρα $T_B = 0,20 \text{ sec}$, $T_C = 0,60 \text{ sec}$, $T_D = 2,5 \text{ sec}$, $S = 1,15$

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z2, άρα $\alpha_{gR} = 0,24g$

Κατηγορία σπουδαιότητας II άρα $\gamma_1 = 1,30$

2.4 Συνδυασμοί Δράσεων

Οι καταστάσεις σχεδιασμού ταξινομούνται σύμφωνα με το μέρος 1 του Ευρωκώδικα 1 ως ακολούθως:

- Καταστάσεις διαρκείας (persistent situations), οι οποίες αντιστοιχούν σε φυσιολογικές συνθήκες χρήσης.
- Παροδικές καταστάσεις (transient), οι οποίες αντιστοιχούν σε παροδικές συνθήκες όπως κατά τη φάση ανέγερσης ή επισκευών.
- Τυχηματικές καταστάσεις (accidental), οι οποίες αντιστοιχούν σε εξαιρετικές συνθήκες όπως πυρκαγιά, έκρηξη ή πρόσκρουση.
- Σεισμικές καταστάσεις (seismic), οι οποίες αντιστοιχούν σε συνθήκες επιβολής σεισμικής καταπόνησης στην κατασκευή.

Οριακές καταστάσεις είναι εκείνες, πέραν των οποίων η κατασκευή δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις ασφάλειας και λειτουργικότητας του σχεδιασμού και διακρίνονται σε:

- Οριακές καταστάσεις αστοχίας (ultimate limit states)
- Οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας (serviceability limit states)

Οι οριακές καταστάσεις αστοχίας αντιστοιχούν σε κατάρρευση ή άλλου είδους αστοχίες που θέτουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές, ενώ οι οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας είναι εκείνες, πέραν των οποίων δεν ικανοποιούνται τα κριτήρια λειτουργικότητας της κατασκευής (μεγάλες παραμορφώσεις ή μετακινήσεις που προκαλούν βλάβες στα στοιχεία πλήρωσης, ή ταλαντώσεις ενοχλητικές για τους χρήστες). Ανάλογα με το είδος, τη μορφή και τη θέση της κατασκευής, προσδιορίζονται οι διάφορες χαρακτηριστικές τιμές των δράσεων, οι οποίες επενεργούν επί της κατασκευής. Προκειμένου να ελεγχθεί η επάρκεια της κατασκευής στην οριακή κατάσταση αστοχίας και λειτουργικότητας, χρησιμοποιούνται συνδυασμοί των δράσεων αυτών, οι οποίοι καλύπτουν όλες τις καταστάσεις σχεδιασμού (καταστάσεις διαρκείας, παροδικές, τυχηματικές και σεισμικές) και περιέχουν δράσεις που εκδηλώνονται ταυτόχρονα.

2.4.1 Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ)

Οι συνδυασμοί των δράσεων για την οριακή κατάσταση αστοχίας είναι οι εξής:

- Βασικός συνδυασμός

$$\sum \gamma_{Gj} \cdot G_{kj} + \gamma_P \cdot P_k + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \sum \gamma_{Q0i} \cdot \psi_{01} \cdot Q_{ki} \quad i > 1 \quad j \geq 1$$

- Τυχηματικός συνδυασμός

$$\sum \gamma_{GAj} \cdot G_{kj} + \gamma_{PA} \cdot P_k + A_d + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \sum \psi_{2i} \cdot Q_{ki} \quad i > 1 \quad j \geq 1$$

- Σεισμικός συνδυασμός

$$\sum G_{kj} + P_k + \gamma_1 \cdot A_{Ed} + \sum \psi_{2i} \cdot Q_{ki} + Q_2 \quad i > 1 \quad j \geq 1$$

Όπου:

Το σύμβολο (+) συμβολίζει επαλληλία

G_{kj} : χαρακτηριστική τιμή μόνιμων δράσεων

P_k : χαρακτηριστική τιμή προέντασης

Q_{ki} : χαρακτηριστική τιμή μεταβλητής δράσης i

A_d : τιμή σχεδιασμού τυχηματικής δράσης

A_{Ed} : τιμή σχεδιασμού σεισμικής δράσης

Q_2 : δράσεις μεγάλης διάρκειας, όπως ωθήσεις γαιών και άνωση

γ_{Gj} , γ_{GAj} : επιμέρους συντελεστές ασφάλειας μόνιμης δράσης j

γ_P , γ_{PA} : επιμέρους συντελεστές ασφάλειας προέντασης

γ_{Qi} : επιμέρους συντελεστής ασφάλειας μεταβλητής δράσης i

γ_1 : συντελεστής σπουδαιότητας

ψ_{0i} , ψ_{1i} , ψ_{2i} : συντελεστές σχεδιασμού μεταβλητών δράσεων

Ο συντελεστής σπουδαιότητας γ_1 εξαρτάται από την σπουδαιότητα της κατασκευής, ενώ οι συντελεστές ψ_{0i} , ψ_{1i} , ψ_{2i} χρησιμοποιούνται για να συμπεριληφθεί η μικρότερη πιθανότητα συνύπαρξης των δυσμενέστερων τιμών των ανεξάρτητων δράσεων. Ο συντελεστής ψ_{2i} είναι ίσος με 0,2 για οδικές γέφυρες και με 0,3 για σιδηροδρομικές.

Στον Πίνακα 2.12 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι βασικοί συνδυασμοί που χρησιμοποιούνται στην οριακή κατάσταση αστοχίας.

Πίνακας 2.13 Προτεινόμενες τιμές των συντελεστών γ και ψ για οδικές γέφυρες (ΟΚΑ)

Δράσεις		Επίδραση		Συντελεστής Ψ_0
		Ευμενής	Δυσμενής	
Μόνιμες δράσεις	G: γ_G	1,0	1,35	-
Συστολή ξήρασης ¹	S: γ_S	1,0	1,0	(μόνιμη δράση)
Φορτία κυκλοφορίας	Q: γ_Q	0	1,35	TS: 0,75 UDL: 0,40 Πεζ-ποδ: 0,40
Προένταση με υποχώρηση στηρίξεων	P: γ_P	1,0	1,1	(μόνιμη δράση)
Διαφορικές καθιζήσεις	G_{set} : γ_G	0	0^2 ή $1,2^3$	0
Θερμοκρασία	T: γ_Q	0	0^2 ή $1,5^3$	0^2 ή $0,6^3$ (φορέας ανωδομής)
Άνεμος	W: γ_Q	0	1,5	0,6
Παρατηρήσεις: ¹ Στην Ο.Κ.Α. λαμβάνονται υπόψη μόνο οι δευτερογενείς επιρροές της συστολής ξήρασης. ² Ισχύει για διατομές κατηγορίας 1 ή 2 χωρίς απαίτηση ελέγχου στρεπτοκαμπτικού λυγισμού. ³ Ισχύει για διατομές κατηγορίας 3 και 4 και για τον έλεγχο της σύνδεσης σιδηροδοκού με διαδοκίδες από σκυρόδεμα.				

Πίνακας 2.12 Βασικοί συνδυασμοί δράσεων για έλεγχο οδικών γεφυρών (ΟΚΑ)

Νο	G+C _{σκ}	S _{σκ}	Q	T	W	G _{set}
	Μόνιμες και δευτερογενείς επιρροές ερπυσμού	Συστολή ξήρασης δευτερογενείς επιρροές	Φορτία κυκλοφορίας	Θερμοκρασία	Άνεμος	Διαφορικές καθιζήσεις
1	1.35	1.0	$gr1a \cdot 1.35$	0	1.5 · 0.6 or $1.5 \cdot F_{W}^*$	1.2 ή 1.35
2	1.35	1.0	$1.35 \cdot (TS \cdot 0.75 + UDL \cdot 0.4 + q_{sk}^* \cdot 0.4)$	1.5	0	1.2 ή 1.35
3	1.35	1.0	$1.35 \cdot (TS \cdot 0.75 + UDL \cdot 0.4 + q_{sk}^* \cdot 0.4)$	0	1.5 φορτισμένη γέφυρα	1.2 ή 1.35
4	1.35	1.0	0	0	1.5 αφόρτιστη γέφυρα	1.2 ή 1.35

2.4.2 Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ)

Οι συνδυασμοί των δράσεων για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας είναι οι εξής:

- Χαρακτηριστικός συνδυασμός

$$\sum G_{kj} + P_k + Q_{k1} + \sum \psi_{01} \cdot Q_{ki} \quad i > 1 \quad j \geq 1$$

- Συχνός συνδυασμός

$$\sum G_{kj} + P_k + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \sum \psi_{2i} \cdot Q_{ki} \quad i > 1 \quad j \geq 1$$

- Οιονεί μόνιμος συνδυασμός

$$\sum G_{kj} + P_k + \sum \psi_{2i} \cdot Q_{ki} \quad i > 1 \quad j \geq 1$$

Πίνακας 2.14 Συντελεστές συνδυασμού ψ_1 και ψ_2 για οδικές γέφυρες (ΟΚΛ)

Οδικές γέφυρες		ψ_1	ψ_2
Φορτία κυκλοφορίας	gr1a:		
	TS	0.75	0
	UDL	0.4	0
	Πεζόδρομοι, ποδηλατόδρομοι	0.4	0
	gr1b	0.75	0
	gr2	0	0
Άνεμος	gr3	0	0
	gr4	0.75	0
	gr5	0	0
	Κατάστ. λειτουργίας	0.2	0
	Φάσεις κατασκευή F_w^*	-	0
Θερμοκρασία	T	0.6	0.5
Φορτία κατασκευής	Q_c	-	1.0
Χιόνι (κατά τη διάρκεια κατασκευής)	S_c	-	-

3 Ελαστική Ανάλυση

Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται γραμμική ελαστική ανάλυση με σκοπό τον υπολογισμό του απαιτούμενου οπλισμού του καταστρώματος. Ο οπλισμός αυτός είναι αναγκαίος για την αποτίμηση και την ενίσχυση της κατασκευής και προσδιορίζεται εμμέσως με τον ίδιο τρόπο με τον οποίο θα σχεδιαζόταν το κατάστρωμα. Για τον σκοπό αυτό ο σχεδιασμός του καταστρώματος θα πραγματοποιηθεί για τους βασικούς συνδυασμούς σε οριακή κατάσταση αστοχίας.

3.1 Παρουσίαση προγράμματος προσομοίωσης (SAP2000)

Το πρόγραμμα SAP2000 αποτελεί ένα από τα κορυφαία προγράμματα της εταιρίας CSI, παραμένοντας συνώνυμο των πιο σύγχρονων αναλυτικών μεθόδων για πάνω από 30 χρόνια. Διαθέτει ένα εξελιγμένο και ευέλικτο περιβάλλον εργασίας, ένα ασυναγώνιστο μηχανισμό ανάλυσης, καθώς και ιδανικά εργαλεία σχεδιασμού για όλους τους μηχανικούς.

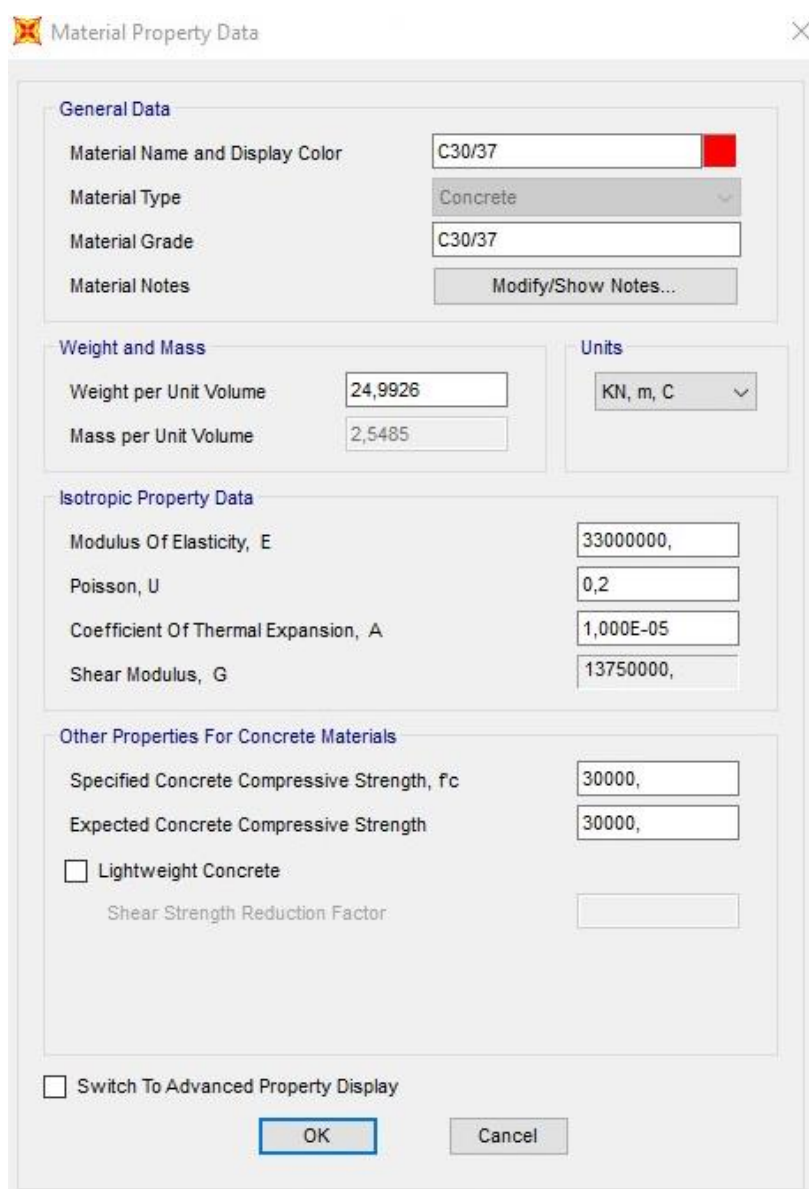
Στο πρόγραμμα υπάρχει βιβλιοθήκη υλικών σκυροδέματος, χάλυβα και ξύλου, σύμφωνα με μεγάλο πλήθος κανονισμών: παλιοί γερμανικοί (DIN 1045,4227) και νέοι (DIN 1045-1, Fachberichte), ευρωκώδικες (EC2) κ.α. Τα διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων των υλικών μπορούν να είναι διαφορετικά για τις οριακές καταστάσεις αστοχίας και λειτουργικότητας ή και να εξαρτώνται από τη θερμοκρασία.

Σε έναν φορέα ή σε μία διατομή υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα μεγάλο πλήθος υλικών. Μη γραμμικές ιδιότητες υλικών μπορούν να ληφθούν κατ' ευθείαν από τους κανονισμούς ή να δοθούν από τον χρήστη. Περιλαμβάνονται τυπικές διατομές, όπως ορθογωνικές, πλακοδοκοί, κυκλικές καθώς και κιβωτοειδείς, σύμμικτες ή λεπτότοιχες, ενώ παράλληλα δίνει την ευχέρεια σχεδίασης στον χρήστη οποιαδήποτε διατομής επιθυμεί. Υπολογίζονται ελαστικά και πλαστικά μεγέθη της διατομής αλλά και μεγέθη για τον υπολογισμό των αξονικών και διατμητικών τάσεων. Ιδιαίτερα, οι σύμμικτες διατομές μπορούν να αποτελούνται από οποιοδήποτε συνδυασμό τμημάτων οπλισμένου σκυροδέματος, προεντεταμένου σκυροδέματος και χάλυβα. Δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των διατομών που δέχεται το πρόγραμμα.

3.2 Παρουσίαση Προσομοιώματος στο SAP2000

Σε πρώτο στάδιο σχεδιάζεται ο φορέας στο πρόγραμμα AutoCad. Έπειτα σχεδιάζεται ο κάναβος και μεταφέρεται η γεωμετρία του φορέα στο πρόγραμμα SAP2000. Η γέφυρα προσομοιώνεται εξ' ολοκλήρου με επιφανειακά στοιχεία. Η διατομή του καταστρώματος και των βάρων προσομοιώνονται ως τρεις συμπαγείς πλάκες, όπου το πάχος κάθε πλάκας ορίζεται 0,80 m. Ακολούθως σχεδιάζεται ένας κεφαλόδεσμος πάχους 0,80 m και πλάτους 1,20 m σε κάθε πτερυγότοιχο, με τον οποίο συνδέονται οι πάσσαλοι της θεμελίωσης, διαμέτρου 1 m και ύψους 10 m, με καθαρή απόσταση 2 m μεταξύ τους.

Τέλος, ορίζονται τα υλικά της κατασκευής, οι διατομές και η συνθήκη στήριξης των πασσάλων στο έδαφος ως άρθρωση.



The image shows a software dialog box titled "Material Property Data" for a material named "C30/37". The dialog is organized into several sections:

- General Data:** Material Name and Display Color is "C30/37" with a red color swatch. Material Type is "Concrete". Material Grade is "C30/37". There is a "Modify/Show Notes..." button.
- Weight and Mass:** Weight per Unit Volume is 24,9926. Mass per Unit Volume is 2,5485.
- Units:** The unit system is set to "KN, m, C".
- Isotropic Property Data:** Modulus Of Elasticity, E is 33000000. Poisson, U is 0,2. Coefficient Of Thermal Expansion, A is 1,000E-05. Shear Modulus, G is 13750000.
- Other Properties For Concrete Materials:** Specified Concrete Compressive Strength, f_c is 30000. Expected Concrete Compressive Strength is 30000. There is an unchecked checkbox for "Lightweight Concrete" and a corresponding empty field for "Shear Strength Reduction Factor".

At the bottom, there is an unchecked checkbox for "Switch To Advanced Property Display" and "OK" and "Cancel" buttons.

Εικόνα 3.1 Ιδιότητες σκυροδέματος C30/37

Shell Section Data

Section Name: SHELL 1

Section Notes: Modify/Show...

Display Color: ■

Type:

- Shell - Thin
- Shell - Thick
- Plate - Thin
- Plate Thick
- Membrane
- Shell - Layered/Nonlinear

Modify/Show Layer Definition...

Thickness:

Membrane: 0,8

Bending: 0,8

Material:

Material Name: + C30/37

Material Angle: 0,

Time Dependent Properties:

Set Time Dependent Properties...

Concrete Shell Section Design Parameters:

Modify/Show Shell Design Parameters...

Stiffness Modifiers:

Set Modifiers...

Temp Dependent Properties:

Thermal Properties...

OK Cancel

Εικόνα 3.2 Χαρακτηριστικά πλάκας καταστρώματος

Concrete Shell Section Design Parameters

Section Name: SHELL 1

Rebar Material:

Material: + A615Gr60

Rebar Layout Options:

- Default
- One Layer
- Two Layers

Cover to Centroid of Steel:

Top Bar - Direction 1: 0,055

Top Bar - Direction 2: 0,075

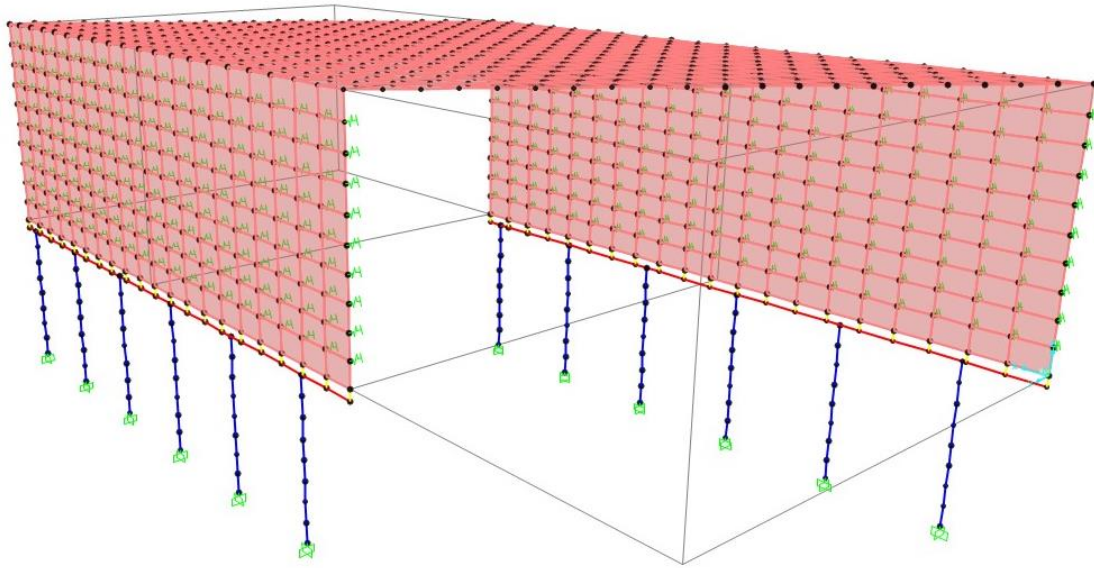
Bottom Bar - Direction 1: 0,055

Bottom Bar - Direction 2: 0,075

OK Cancel

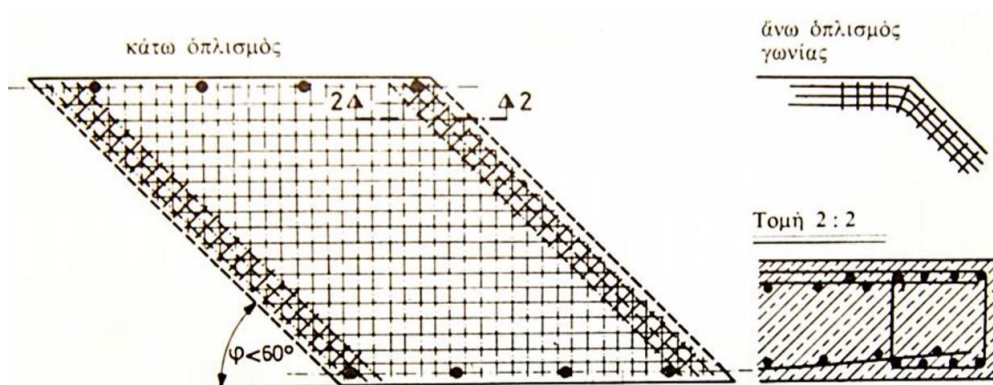
Εικόνα 3.3 Χαρακτηριστικά οπλισμών της πλάκας σκυροδέματος

Ακολούθως, παρουσιάζεται το στατικό προσομοίωμα του φορέα της γέφυρας στο πρόγραμμα SAP2000.



Εικόνα 3.4 Προσομοίωμα γέφυρας στο SAP2000

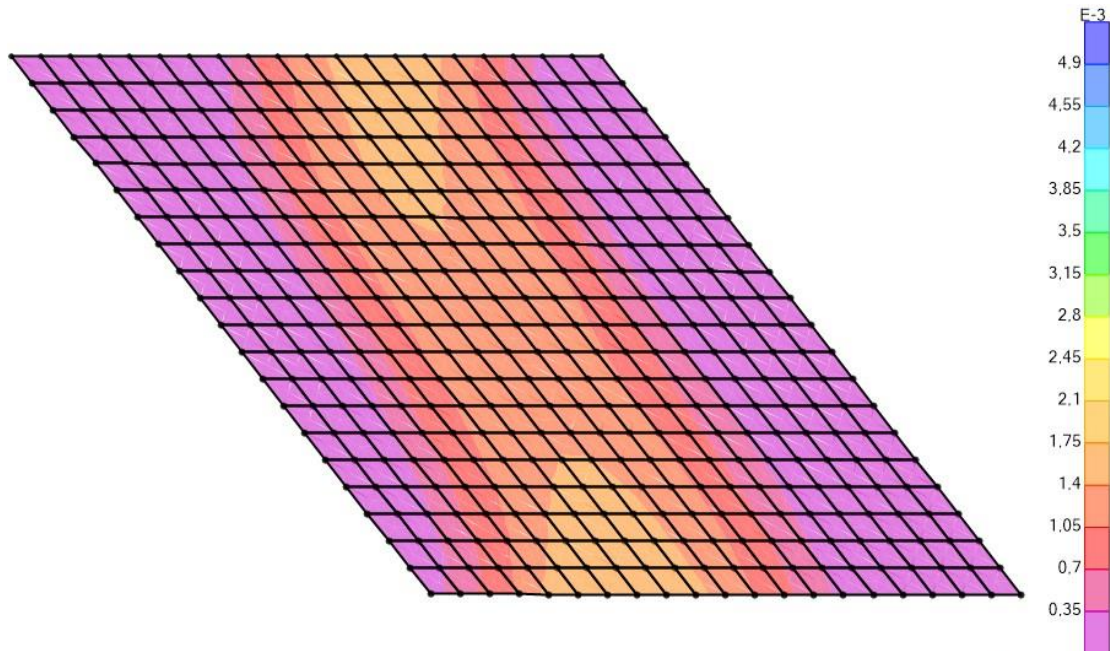
Λόγω της γεωμετρίας της γέφυρας ο διαμήκης οπλισμός τοποθετείται κάθετα προς τις παρειές έδρασης, ενώ ο εγκάρσιος παράλληλα. Οι ελεύθερες παρυφές δένονται με συνδετήρες αλλά και διαμήκεις οπλισμούς δημιουργώντας δύο διαμήκεις κρυφοδοκούς μέσα στα ελεύθερα ακραία τμήματα της πλάκας. Στις αμβλείες γωνίες ο διαμήκεις οπλισμός των κρυφοδοκών κάμπτεται προκειμένου να παραλάβει γωνιακές ροπές πάκτωσης.



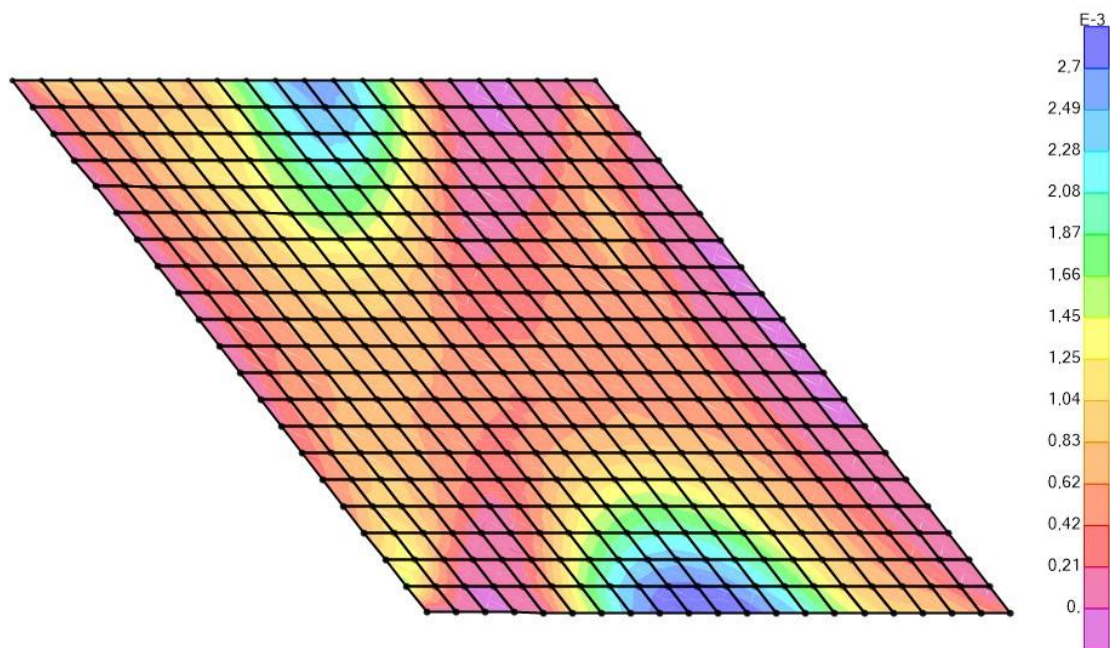
Εικόνα 3.5 Τρόπος όπλισης λοξής πλάκας καταστρώματος

3.3 Αποτελέσματα

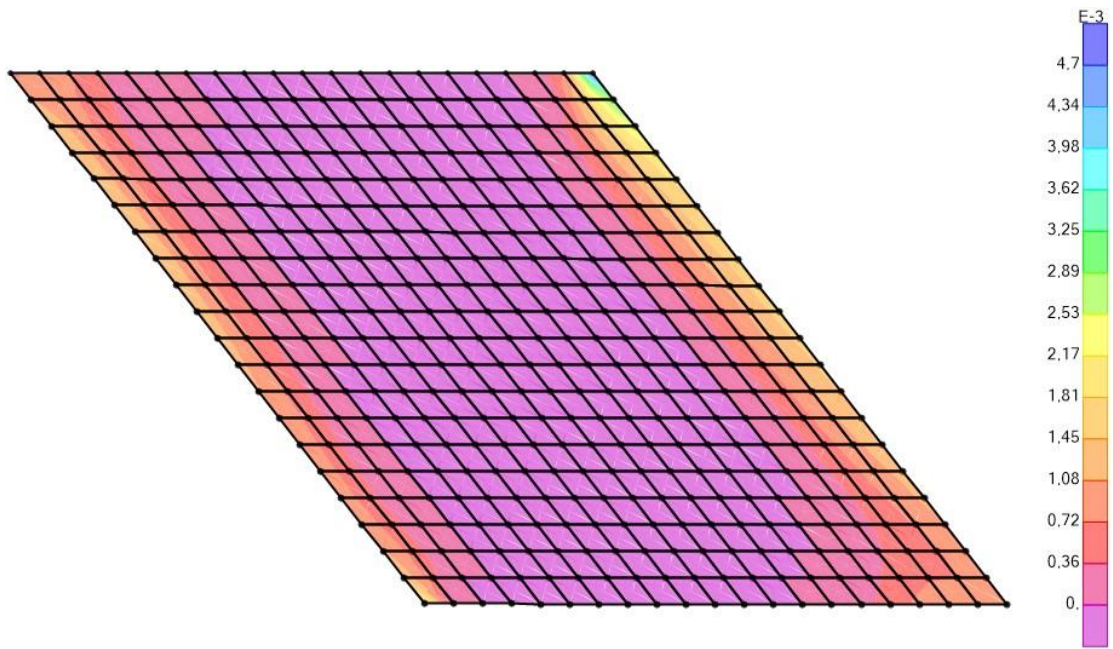
Στις επόμενες εικόνες φαίνονται τα αποτελέσματα τις γραμμικής ελαστικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του προγράμματος SAP2000.



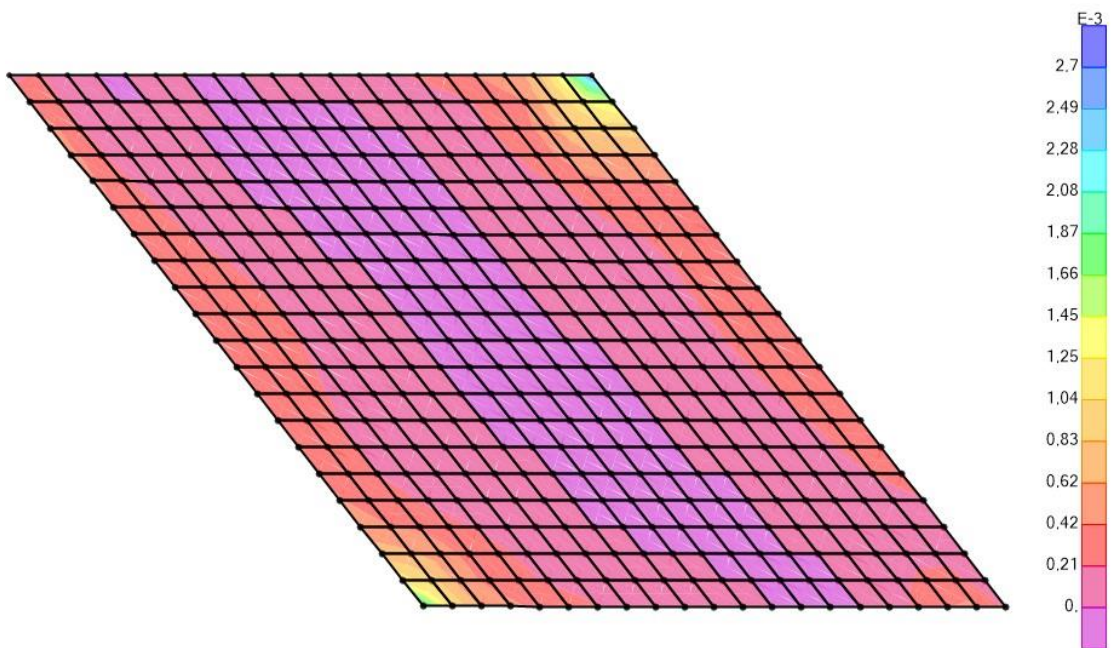
Εικόνα 3.6 Απαιτούμενος διαμήκης κάτω οπλισμός καταστρώματος (σε m^2/m)



Εικόνα 3.7 Απαιτούμενος εγκάρσιος κάτω οπλισμός καταστρώματος (σε m^2/m)



Εικόνα 3.8 Απαιτούμενος διαμήκης άνω οπλισμός καταστρώματος (σε m^2/m)



Εικόνα 3.9 Απαιτούμενος εγκάρσιος άνω οπλισμός καταστρώματος (σε m^2/m)

Τα αποτελέσματα της ελαστικής ανάλυσης και οι τοποθετούμενοι οπλισμοί του καταστρώματος παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα ως εξής:

Πίνακας 3.1 Απαιτούμενος και τοποθετούμενος οπλισμός καταστρώματος

	Άνω οπλισμός (cm ² /m)		Κάτω οπλισμός (cm ² /m)	
	Διαμήκη διεύθυνση	Εγκάρσια διεύθυνση	Διαμήκη διεύθυνση	Εγκάρσια διεύθυνση
Απαιτούμενος οπλισμός	47 cm ² /m	27 cm ² /m	49 cm ² /m	28 cm ² /m
Τοποθετούμενος οπλισμός	∅25/10	∅18/9	∅25/9,5	∅18/9

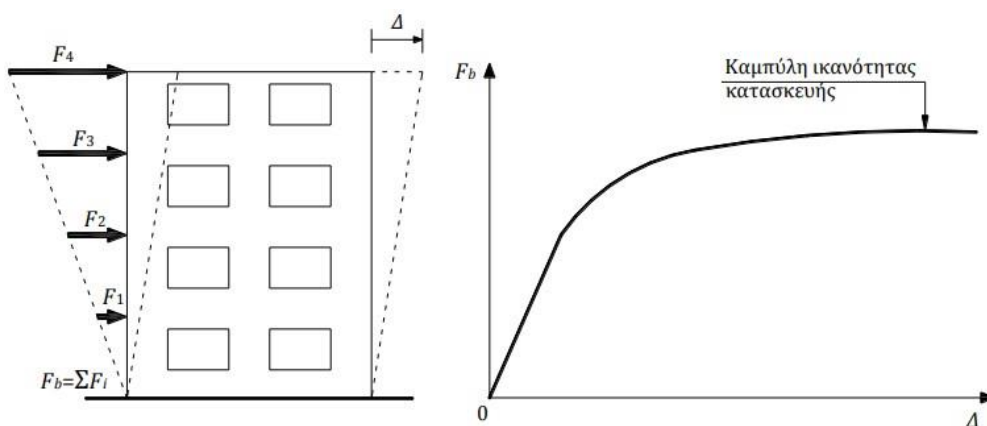
4 Ανελαστική Στατική Ανάλυση (Pushover)

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται ανελαστική στατική ανάλυση του φορέα, από τα αποτελέσματα της οποίας γίνεται η αποτίμηση της κατασκευής με σκοπό την περαιτέρω διερεύνηση για απαίτηση επεμβάσεων.

4.1 Εισαγωγή

Στην ανελαστική στατική ανάλυση Pushover χρησιμοποιείται ένα προσομοίωμα του φορέα το οποίο λαμβάνει υπόψη ανελαστικούς νόμους φορτίου – παραμόρφωσης για τα επιμέρους δομικά στοιχεία της κατασκευής. Το προσομοίωμα φορτίζεται με οριζόντια φορτία, τα οποία αυξάνουν μονότονα καθ' ύψος (τριγωνική κατανομή) και αναπαριστούν τις αδρανειακές δυνάμεις που εμφανίζονται στα διάφορα επίπεδα της κατασκευής κατά τη διάρκεια του σεισμού. Η συγκεκριμένη ανάλυση διενεργείται μέχρι να σημειωθεί αστοχία του φορέα. Η συνηθέστερη μορφή αστοχίας είναι η αστοχία σε κάμψη μίας κρίσιμης διατομής (ο ικανοτικός σχεδιασμός που επιβάλλουν οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί εξασφαλίζει η καμπτική αστοχία να προηγείται πάντοτε της διατμητικής) ή η μετατροπή του φορέα σε μηχανισμό, τοπικά ή συνολικά.

Η μη-γραμμική σχέση μεταξύ του επιβαλλόμενου οριζόντιου φορτίου και της μετατόπισης της κορυφής της κατασκευής κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας Pushover εκφράζεται από την καμπύλη ικανότητας.

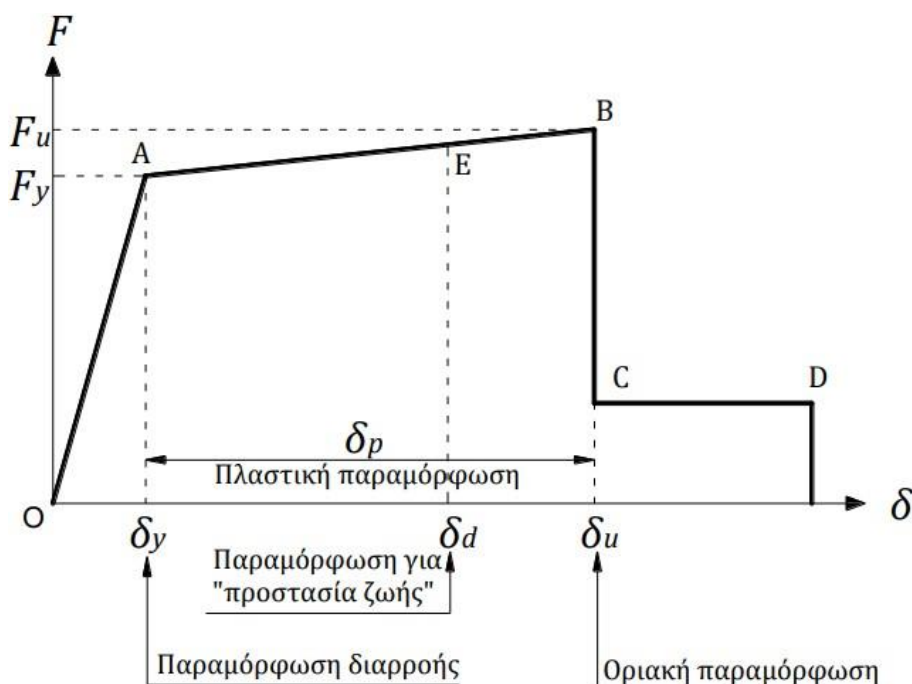


Εικόνα 4.1 Κατασκευή της καμπύλης ικανότητας της κατασκευής

Η μέθοδος στατικής ανάλυσης Pushover χρησιμοποιείται κυρίως στην αποτίμηση και στον έλεγχο της φέρουσας ικανότητας υπάρχοντων κατασκευών, σε σχέση με κάποια καθορισμένη στάθμη επιτελεστικότητας, σύμφωνα πάντα με τα όσα προβλέπει ο νέος κανονισμός επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.). Ως αποτίμηση ορίζεται η εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας που διαθέτει η κατασκευή μέσω κριτηρίων που καθορίζονται από τους κανονισμούς και ο έλεγχος ότι ικανοποιούνται οι ελάχιστες υποχρεωτικές απαιτήσεις φέρουσας ικανότητας.

4.2 Ιδεατή Καμπύλη Παραμόρφωσης F-δ Δομικού Στοιχείου

Η συμπεριφορά του φορέα για το συνεχώς αυξανόμενο οριζόντιο φορτίο εξαρτάται από την πορεία πλαστικοποίησης των πλαστικών αρθρώσεων που ορίζονται στη βάση και την κορυφή του κάθε βάρου. Για τον σκοπό αυτό δημιουργούνται τα διαγράμματα εντατικού μεγέθους F – παραμόρφωσης δ για τις κρίσιμες διατομές. Όταν κατά την ανελαστική συμπεριφορά καθοριστική είναι η κάμψη, επιλέγονται διαγράμματα ροπής κάμψης M – καμπυλότητας $1/r$ (ή στροφής θ).



Εικόνα 4.2 Ιδεατή καμπύλη $F - \delta$ δομικών στοιχείων

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι κλάδοι αυτού του διαγράμματος:

- Τμήμα OA

Ο πρώτος κλάδος του διαγράμματος αντιπροσωπεύει την ελαστική-γραμμική συμπεριφορά που παρουσιάζουν τα δομικά στοιχεία μέχρι το θεωρητικό σημείο διαρροής. Η κλίση της ευθείας ορίζει την δυσκαμψία K_e του μέλους που μελετάται.

- Τμήμα AB

Ο δεύτερος κλάδος του διαγράμματος εκφράζει τη μετελαστική συμπεριφορά του μέλους, κατά την οποία εξακολουθεί να παραμορφώνεται ακόμα και μετά τη διαρροή, έως και τη θεωρητική αστοχία (σημείο B).

- Τμήμα BC

Ο τρίτος κλάδος του διαγράμματος δηλώνει την ικανότητα του μέλους να διατηρήσει ένα ποσοστό της αντοχής του μετά την παραμόρφωση αστοχίας του.

- Τμήμα CD

Ο τέταρτος και τελευταίος κλάδος του διαγράμματος αντιπροσωπεύει την απομένουσα ικανότητα του μέλους. Συνήθως, μετά την παραμόρφωση αστοχίας, δ_u , η ικανότητα ενός μέλους να παραλάβει σεισμικά φορτία μειώνεται σημαντικά, αλλά δεν μηδενίζεται και έτσι το στοιχείο μπορεί να εξακολουθήσει να παραλαμβάνει κατακόρυφα φορτία. Η τιμή της απομένουσας αντοχής συνήθως λαμβάνεται ίση με $0,2 \cdot F_u$. Στο σημείο D, θεωρείται ότι το στοιχείο χάνει την ικανότητα να παραλαμβάνει και κατακόρυφα φορτία.

4.3 Στάθμες Επιτελεστικότητας Κατασκευής

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ ορίζονται τρεις βασικές στάθμες επιτελεστικότητας για το φέροντα οργανισμό της κατασκευής, ανάλογα με το επίπεδο βλαβών. Με βάση τις αντίστοιχες παραμορφώσεις, δ_d , ορίζονται οι ίδιες στάθμες στην καμπύλη F- δ του δομικού στοιχείου.

Πίνακας 4.1 Στάθμες επιτελεστικότητας

Πιθανότητα υπέρβασης σεισμικής δράσης εντός του συμβατικού χρόνου ζωής των 50 ετών	Στάθμη επιτελεστικότητας φέροντος οργανισμού		
	Άμεση χρήση μετά τον σεισμό	Προστασία ζωής	Αποφυγή οιονεί κατάρρευσης
1. 10%	A1	B1	Γ1
2. 50%	A2	B2	Γ2

Αναλυτικότερα:

- Άμεση Χρήση μετά το σεισμό (A)

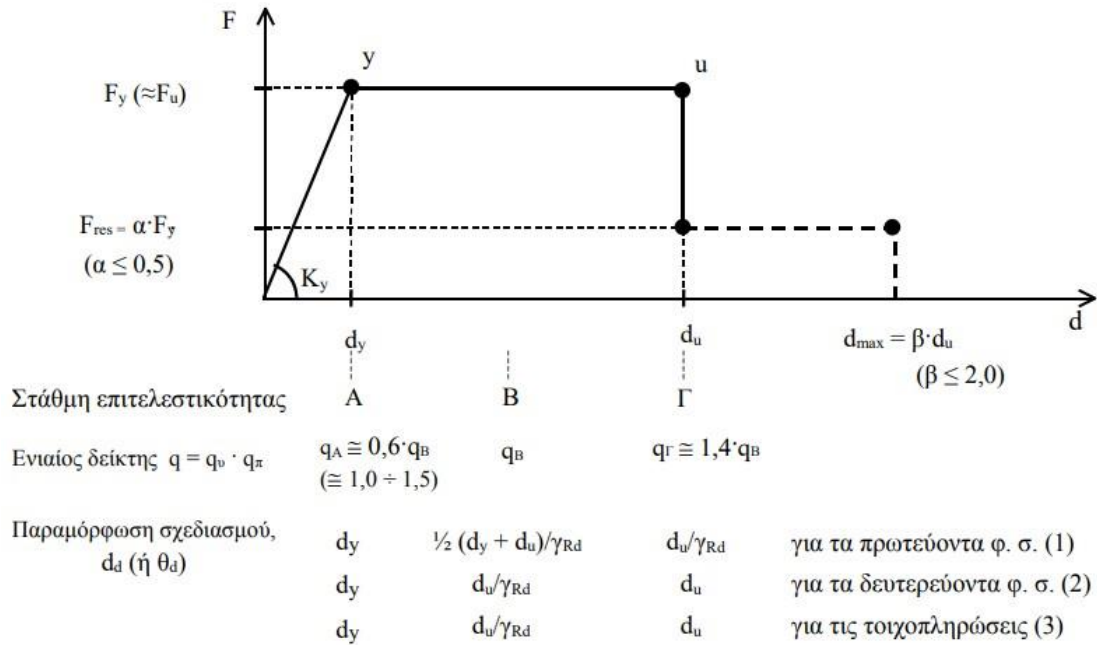
Αν ικανοποιείται η στάθμη επιτελεστικότητας Άμεση Χρήση, συνεπάγεται ότι το επίπεδο βλαβών είναι αρκετά χαμηλό ώστε να μην εμποδίζει τη λειτουργία της κατασκευής μετά το πέρας του σεισμού. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι επιτρέπονται μόνο μερικές αραιές τριχοειδείς ρωγμές καμπτικού χαρακτήρα και η κατασκευή δεν χάνει την ικανότητά της να φέρει κατακόρυφα και οριζόντια φορτία.

- Προστασία Ζωής (B)

Αν ικανοποιείται η στάθμη επιτελεστικότητας Προστασία Ζωής, αναμένεται να εμφανιστούν επισκευάσιμες βλάβες, οι οποίες ωστόσο δεν αποτελούν αιτία απώλειας της στατικής ευστάθειας της κατασκευής και κυριότερα κάποιου σοβαρού τραυματισμού ατόμων.

- Οιονεί Κατάρρευση (Γ)

Αν, τέλος, ικανοποιείται η στάθμη επιτελεστικότητας Οιονεί Κατάρρευση, είναι πιθανό να εμφανιστούν εκτεταμένες και μη επισκευάσιμες βλάβες στην κατασκευή. Αναμένεται ο φέροντας οργανισμός να μην μπορεί να παραλάβει πλέον τα οριζόντια φορτία, για αυτό και η κατασκευή δεν διαθέτει περιθώρια ασφαλείας σε τυχόν μετασεισμό.



4.4 Στάθμη Αξιοπιστίας Δεδομένων

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ, πριν από κάποια μελέτη ή επέμβαση πρέπει να διερευνούνται και να τεκμηριώνεται ο φορέας σε βάθος έτσι ώστε τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη να είναι όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα. Σε ό,τι αφορά τα γεωμετρικά δεδομένα του δομήματος, η στάθμη αξιοπιστίας δεδομένων (Σ.Α.Δ.) καθορίζεται από την προέλευση του δεδομένου και χαρακτηρίζονται κατά περίπτωση ως ανεκτή, ικανοποιητική ή υψηλή. Αναλυτικότερα παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 4.2 Στάθμη αξιοπιστίας γεωμετρικών δεδομένων

ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΟΥ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	ΔΕΔΟΜΕΝΑ									
		ΕΙΔΟΣ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΦΟΡΕΑ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ Ή ΑΝΩΔΟΜΗΣ			ΠΑΧΗ, ΒΑΡΗ κ.λπ. ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΣΕΩΝ, ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ, ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ κ.λπ.			ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΟΠΛΙΣΗΣ			
		Ανεκτή	Ικανοποιητική	Υψηλή	Ανεκτή	Ικανοποιητική	Υψηλή	Ανεκτή	Ικανοποιητική	Υψηλή	
1	Δεδομένο που προέρχεται από σχέδιο της αρχικής μελέτης η οποία έχει αποδεδειγμένα εφαρμοστεί, χωρίς τροποποιήσεις	(1)			✓			✓			✓
2	Δεδομένο που προέρχεται από σχέδιο της αρχικής μελέτης η οποία έχει εφαρμοστεί με λίγες τροποποιήσεις	(2)			✓			✓		✓	
3	Δεδομένο που προέρχεται από αναφορά (π.χ. υπόμνημα σε σχέδιο της αρχικής μελέτης)	(3)	✓				✓			✓	
4	Δεδομένο που έχει διαπιστωθεί ή/και μετρηθεί ή/και αποτυπωθεί αξιόπιστα	(4)		✓			✓			✓	
5	Δεδομένο που έχει προσδιοριστεί με έμμεσον αλλά επαρκώς αξιόπιστον τρόπο	(5)	✓	✓			✓	✓		✓	✓
6	Δεδομένο που έχει ευλόγως θεωρηθεί κατά την κρίση Μηχανικού	(6)	✓	✓			✓	✓		✓	✓

Ακολούθως παρουσιάζονται οι τιμές ιδιοτήτων των υλικών (που διαμορφώνουν τις κάθε είδους αντιστάσεις) και οι αντίστοιχοι επιμέρους συντελεστές ασφαλείας γ'_m . Ο υπόψη πίνακας ισχύει για σκυρόδεμα και χάλυβα οπλισμού, καθώς και για νέα προστιθέμενα υλικά, είτε καλύπτονται από Κανονισμούς είτε όχι.

Πίνακας 4.3 Τιμές ιδιοτήτων των υλικών και αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας γ'_m

	ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ¹					
	ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ ⁶	ΣΕ ΟΡΟΥΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ²		ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ	ΣΕ ΟΡΟΥΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ³	
		ΠΡΟΣΤΙΘΕΜΕΝΑ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ			ΠΡΟΣΤΙΘΕΜΕΝΑ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ	
		Ναι	Όχι		Ναι	Όχι
Αντιπροσωπευτικές τιμές ⁵	— X - s	X _k	X _k	— X	X	X
Επιμέρους συντελεστές ασφαλείας γ'_m ⁴	Αναλόγως ΣΑΔ $\gamma'_{cs} = 1,30 \pm 0,15$ $\gamma'_{sc} = 1,15 \pm 0,10$	Αναλόγως διατομής ή / και προσπελασιμότητας $\gamma'_m = (1,05 \text{ ή } 1,20)$	Αυξημένοι	Αναλόγως ΣΑΔ $\gamma'_m = 1,10 \pm 0,10$	Αναλόγως διατομής ή / και προσπελασιμότητας $\gamma'_m = 1,15 \text{ ή } 1,25$	$\gamma'_m = 1,15 \text{ ή } 1,25$

Όπου:

- \bar{X} = μέση τιμή
- X_k = χαρακτηριστική τιμή
- S = τυπική απόκλιση

- ❖ Για τη συγκεκριμένη γέφυρα, λαμβάνοντας υπόψιν ότι υπήρχαν τα σχέδια της αρχικής μελέτης:

Η στάθμη αξιοπιστίας των δεδομένων χαρακτηρίζεται ως “Υψηλή” και ακολούθως οι συντελεστές των υλικών προκύπτουν:

$$\gamma'_c = 1,30$$

$$\gamma_s = 1,15$$

$$\gamma'_m = 1,10$$

Καθώς πραγματοποιείται έλεγχος σε όρους παραμορφώσεων, ως αντιπροσωπευτικές τιμές, αντοχής ή διαρροής, των υλικών λαμβάνονται οι μέσες τιμές διαιρεμένες με τον συντελεστή $\gamma_m = 1,10$.

$$f_c = \frac{f_{cm}}{\gamma_m} = \frac{38}{1,10} = 34,545 \text{ MPa}$$

$$f_y = \frac{f_{ym}}{\gamma_m} = \frac{500}{1,10} = 454,545 \text{ MPa}$$

4.5 Συντελεστές Ασφαλείας για τις Δράσεις

Οι συντελεστές ασφαλείας γ_f και ψ_i των μεταβλητών δράσεων που χρησιμοποιούνται είναι οι καθιερωμένες τιμές κατά τους κανονισμούς. Για τις μόνιμες δράσεις σε οριακή κατάσταση αστοχίας (ΟΚΑ) οι τιμές γ_g προκύπτουν από τον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4.4 Τιμές γ_g μόνιμων δράσεων σε ΟΚΑ

	Στάθμη Αξιοπιστίας	γ_g
Βασικοί συνδυασμοί	Υψηλή	1,20
	Ικανοποιητική	1,35
	Ανεκτή	1,50
Υπόλοιπες περιπτώσεις συνδυασμών	Υψηλή	1,00
	Ικανοποιητική	1,10
	Ανεκτή	1,20

Η ανελαστική στατική ανάλυση διεξάγεται για τα μόνιμα φορτία του φορέα, τα φορτία κυκλοφορίας, τις ωθήσεις των γαιών και για μία οριζόντια δύναμη κατά τη διαμήκη διεύθυνση της γέφυρας.

4.6 Υπολογισμός Γωνίας Στροφής Χορδής - Διαρροής (θ_y)

Η γωνία στροφής χορδής διαρροής θ_y , για τοιχώματα, προκύπτει σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ:

$$\theta_y = (1/r)y \cdot \frac{L_s + \alpha_v \cdot z}{3} + 0,0013 + \frac{(1/r)y \cdot d_b \cdot f_b}{8\sqrt{f_c}}$$

Όπου:

$(1/r)_y$: καμπυλότητα διαρροής
 L_s : ο λόγος M/V στην ακραία διατομή του στοιχείου
 z : μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων
 d_b : διάμετρος διαμήκων ράβδων οπλισμού
 f_y : όριο διαρροής ράβδου
 f_c : θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

Ο συντελεστής α_v λαμβάνεται ίσος με 1 αν η τέμνουσα $V_{R,c}$ που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση του στοιχείου είναι μικρότερη της τέμνουσας κατά την καμπτική διαρροή $V_{Mu} = \frac{M_y}{L_s}$ και 0 αν είναι μεγαλύτερη.

Η τέμνουσα $V_{R,c}$ κατά τον ΚΑΝ.ΕΠΕ προκύπτει:

$$V_{R,c} = \max \left[180 \cdot (100 \cdot \rho_{tot})^{\frac{1}{3}}, 35 \sqrt{1 + \sqrt{\frac{0.2}{d}} \cdot f_c^{\frac{1}{6}}} \right] \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{0.2}{d}} \right) \cdot f_c^{\frac{1}{3}} + 0.15 \cdot \frac{N}{A_c}$$

Όπου:

ρ_{tot} : συνολικό ποσοστό του διαμήκους οπλισμού
 d : στατικό ύψος
 N : αξονική δύναμη (σε kN, θετική για θλίψη)
 A_c : εμβαδόν διατομής (σε m²)

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ, το L_s για τοιχώματα μπορεί να λαμβάνεται σε κάθε όροφο διαφορετικό και ίσο με το μισό της απόστασης της διατομής βάσης ορόφου από την κορυφή του τοιχώματος στο κτίριο. Επομένως, για τα βάθρα το L_s λαμβάνεται ίσο με το μισό του ύψους των βάθρων.

Λόγω της ρηγμάτωσης του σκυροδέματος εξαιτίας των εφελκυστικών τάσεων, επιβάλλεται από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ η χρήση της ενεργούς δυσκαμψίας των στοιχείων αντί της γεωμετρικής δυσκαμψίας.

Η ενεργός δυσκαμψία του στοιχείου μήκους L_s , σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ, ισούται με:

$$K = \frac{M_y \cdot L_s}{3 \cdot \theta_y}$$

Απλοποιητικά, οι τιμές της ενεργούς δυσκαμψίας μπορούν να ληφθούν και από τον ακόλουθο πίνακα όπως δίνεται από τον κανονισμό.

Πίνακας 4.5 Τιμές δυσκαμψίας

A/α	Δομικό στοιχείο	Δυσκαμψία
1.1	Υποστύλωμα εσωτερικό	0,8*(E _c I _g)
1.2	Υποστύλωμα περιμετρικό	0,6*(E _c I _g)
2.1	Τοίχωμα, μή - ρηγματωμένο	0,7*(E _c I _g)
2.2	Τοίχωμα, ρηγματωμένο (1)	0,5*(E _c I _g)
3	Δοκός (2)	0,4*(E _c I _g)

Η τιμή της αξονικής δύναμης που χρησιμοποιείται για κάθε διατομή προκύπτει από τον ακόλουθο συνδυασμό φόρτισης:

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + \sum_{i > 1} \psi_{2i} \cdot Q_{k1} + Q_2$$

Σε περίπτωση που η τέμνουσα αντοχής του στοιχείου V_{Rd} είναι μικρότερη της τιμής της τέμνουσας κατά την καμπτική διαρροή V_{Mu}, τότε καθοριστική της διαρροής είναι η διάτμηση. Επομένως η παραμόρφωση διαρροής προκύπτει ως το γινόμενο της καμπυλότητας (1/r)_y ή της γωνίας στροφής χορδής θ_y επί (V_{Rd} · $\frac{L_s}{M_y}$), ανάλογα με το νόημα της παραμόρφωσης δ.

Η τέμνουσα αντοχής V_{Rd} προκύπτει σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Ωπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΚΩΣ) ως εξής:

$$V_{Rd} = V_{Rd1} + V_{wd}$$

Με:

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd} \cdot k \cdot (1,20 + 40 \cdot \rho_l) + 0,15 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d$$

Όπου:

$\tau_{Rd} = 0,25 \cdot f_{ctd}$: τιμή σχεδιασμού διατμητικής αντοχής (kPa)

b_w : πλάτος στοιχείου

$k = 1,60 - d \geq 1$ (d σε μέτρα)

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{sd}}{A_c}$$

N_{sd} : ορθή δύναμη λόγω φόρτισης και προέντασης

A_{sl} : διατομή διαμήκους εφελκόμενου οπλισμού

d : στατικό ύψος

V_{wd} : τέμνουσα που αναλαμβάνουν οι συνδετήρες

Λόγω έλλειψης γνώσεων σχετικά με οπλισμό διάτμησης, λαμβάνεται V_{wd} = 0.

Για $v = \frac{N_{sd}}{A_c \cdot f_c} > -0,10$ λαμβάνεται απομείωση κατά τον ΕΚΩΣ για τοιχώματα

$$V_{cd} = 0,25 \cdot V_{Rd1}$$

Και για $v = \frac{N_{sd}}{A_c \cdot f_c} \leq -0,10$ λαμβάνεται απομείωση για τοιχώματα $V_{cd} = 0,7 \cdot V_{Rd1}$

4.7 Υπολογισμός Γωνίας Στροφής Χορδής - Αστοχίας (θ_u)

Επίσης η μέση τιμή της γωνίας στροφής χορδής κατά την αστοχία δοκών ή υποστυλωμάτων με τον διαμήκη οπλισμό των οποίων να είναι νευρογάλυβας και που έχουν διαστασιολογηθεί και κατασκευαστεί με τις μετά το 1985 διατάξεις για αντισεισμικότητα, δίνεται ως εξής:

$$\theta_{um} = 0,016 \cdot 0,3^v \cdot \left[\frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega - \omega')} \cdot f_c \right]^{0,225} \cdot a_s^{0,35} \cdot 25^{a \rho_s} \cdot \frac{f_{yw}}{f_c} \cdot (1,25^{100 \cdot \rho_d})$$

Όπου:

$$a_s = \frac{M}{V} \cdot h : \text{λόγος διάτμησης}$$

ω , ω' : ολικό μηχανικό ποσοστό οπλισμού και μηχανικό ποσοστό θλιβόμενου οπλισμού

$$v = \frac{N}{b \cdot h \cdot f_c} : (\text{b πλάτος θλιβόμενης ζώνης})$$

$\rho_s = \frac{A_{sh}}{b_w \cdot s_h}$: γεωμετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού παράλληλα στη διεύθυνση της φόρτισης

ρ_d : γεωμετρικό ποσοστό τυχόν δισδιαγώνιου οπλισμού

Η μέση τιμή του πλαστικού τμήματος της μέσης γωνίας στροφής χορδής κατά την αστοχία του στοιχείου δίνεται ως εξής:

$$\theta_{um}^{pl} = \theta_u - \theta_y$$

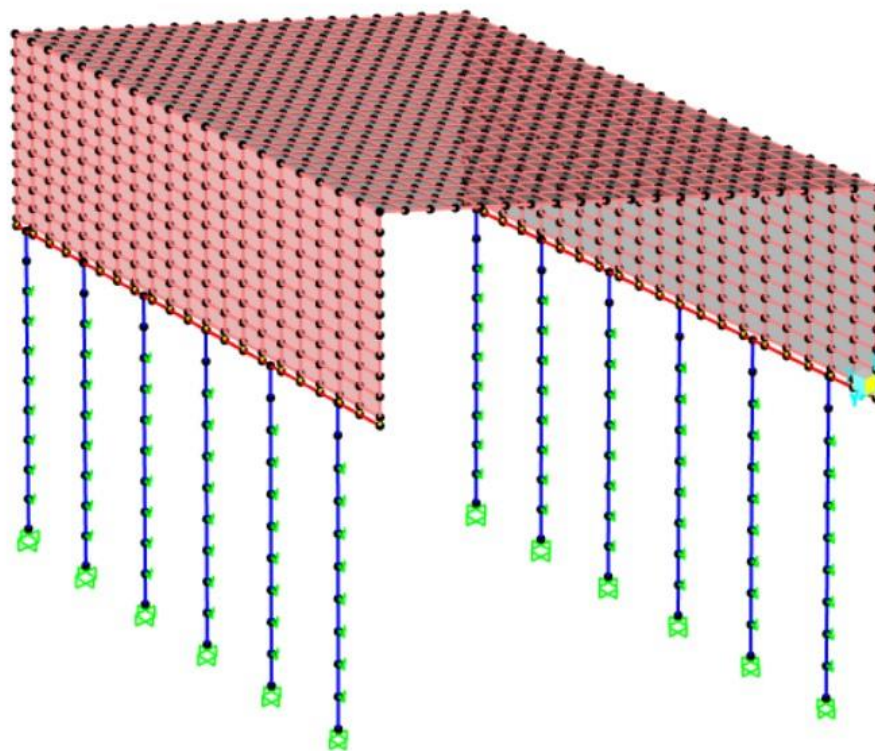
Ο έλεγχος των διαθέσιμων γωνιών στροφής κάθε μέλους κανονικά γίνεται με τις τιμές της αξονικής δύναμης και του λόγου διάτμησης που παρουσιάζονται σταδιακά κατά τις φορτίσεις που λαμβάνονται υπόψη κατά τη δημιουργία της καμπύλης αντίστασης. Απλοποιητικά όμως, ο έλεγχος μπορεί να πραγματοποιηθεί για τις τιμές που υφίστανται στο μέλος κατά τη στιγμή της κρίσιμης μετακίνησης του φορέα.

Για τοιχώματα που έχουν διαστασιολογηθεί και κατασκευαστεί με τις μετά το 1985 διατάξεις για αντισεισμικότητα, το 2ο μέλος της εξίσωσης της θ_{um} πολλαπλασιάζεται επί 0,625 για τοιχώματα ορθογωνικής διατομής και 0,7 για τοιχώματα μη-ορθογωνικής διατομής.

Για στοιχεία που έχουν διαστασιολογηθεί και κατασκευαστεί με βάση τους κανονισμούς που ίσχυαν στην Ελλάδα πριν το 1985 με χρήση νευροχαλύβων οι τιμές των θ_{um} και θ_{um}^{pl} πρέπει να διαιρεθούν δια 1,2.

4.8 Εφαρμογή Ανάλυσης Pushover στο SAP2000

Ακολούθως παρουσιάζεται η προσομοίωση του φορέα της γέφυρας, με σκοπό την ανελαστική στατική ανάλυσή του.



Εικόνα 4.3 Προσομοίωμα φορέα για ανάλυση Pushover

Τα πρώτα στάδια που ακολουθούνται είναι όμοια με την ελαστική ανάλυση. Ορίζονται οι ιδιότητες του σκυροδέματος και του χάλυβα οπλισμού. Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος λαμβάνεται ίσο με 21 GPa.

Το SAP2000 έχει τη δυνατότητα να προσδιορίσει τις τιμές των ροπών κάμψης διαρροής και αστοχίας καθώς και τις αντίστοιχες καμπυλότητες για συγκεκριμένη αξονική δύναμη. Ως πιθανή θέση σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης ορίζεται η κεφαλή του κάθε πασσάλου.

Material Property Data

Material Name: Material Type: Symmetry Type:

Modulus of Elasticity: E Weight and Mass: Weight per Unit Volume Mass per Unit Volume Units:

Poisson: U Other Properties For Concrete Materials: Specified Concrete Compressive Strength, f_c Expected Concrete Compressive Strength Lightweight Concrete Shear Strength Reduction Factor

Coeff of Thermal Expansion: A

Shear Modulus: G

Advanced Material Property Data:

Εικόνα 4.4 Ιδιότητες σκυροδέματος

Nonlinear Material Data

Material Name: Material Type:

Hysteresis Type: Drucker-Prager Parameters: Friction Angle Dilatational Angle Units:

Stress-Strain Curve Definition Options: Parametric User Defined Mander

Parametric Strain Data: Strain At Unconfined Compressive Strength, f_c Ultimate Unconfined Strain Capacity Final Compression Slope (Multiplier on E)

Εικόνα 4.5 Μη γραμμικές ιδιότητες σκυροδέματος

Material Property Data

Material Name: Rebar

Material Type: Rebar

Symmetry Type: Uniaxial

Modulus of Elasticity: E1 = 1,999E+08

Weight and Mass: Weight per Unit Volume = 76,9729; Mass per Unit Volume = 7,849

Units: KN, m, C

Poisson: U12 = 0,

Coeff of Thermal Expansion: A1 = 1,170E-05

Shear Modulus: G12 = 0,

Other Properties For Rebar Materials:

Minimum Yield Stress, Fy	413685,5
Minimum Tensile Stress, Fu	620528,2
Expected Yield Stress, Fye	455054,
Expected Tensile Stress, Fue	682581,

Advanced Material Property Data:

Buttons: Nonlinear Material Data..., Material Damping Properties..., Time Dependent Properties..., Thermal Properties...

Buttons: OK, Cancel

Εικόνα 4.6 Ιδιότητες χάλυβα σπλισμού

Nonlinear Material Data

Edit

Material Name: Rebar

Material Type: Rebar

Hysteresis Type: Kinematic

Drucker-Prager Parameters: Friction Angle, Dilatational Angle

Units: KN, m, C

Stress-Strain Curve Definition Options:

Parametric User Defined

Simple

Convert To User Defined

Parametric Strain Data:

Strain At Onset of Strain Hardening	0,02
Ultimate Strain Capacity	0,11
Final Slope (Multiplier on E)	-0,1

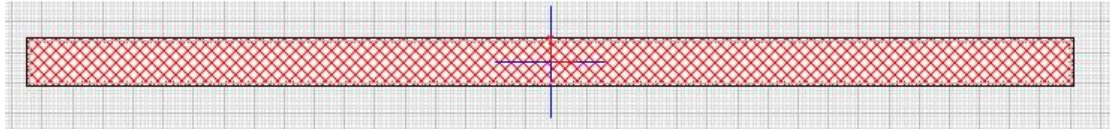
Use Caltrans Default Controlling Strain Values (Bar Size Dependent)

Show Stress-Strain Plot...

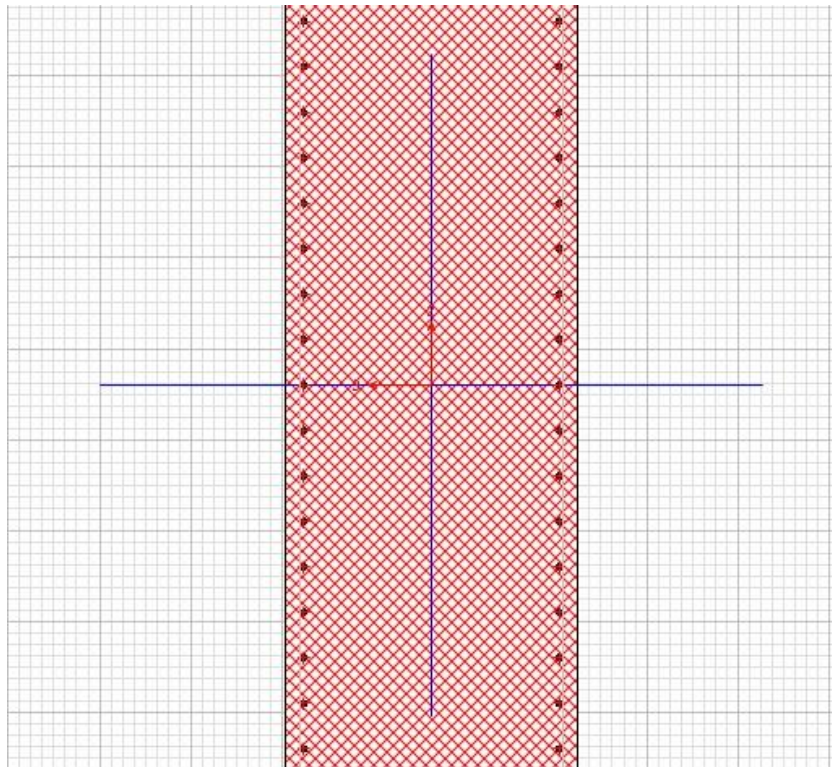
Buttons: OK, Cancel

Εικόνα 4.7 Μη γραμμικές ιδιότητες χάλυβα σπλισμού

Για τη σχεδίαση των διατομών των μελών είναι υποχρεωτική η γνώση των οπλισμών τους. Το κατάστρωμα σχεδιάζεται με διαμήκη οπλισμό όπως προέκυψε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η διατομή του καταστρώματος είναι μορφής πλάκας.



Εικόνα 4.8 Διατομή καταστρώματος

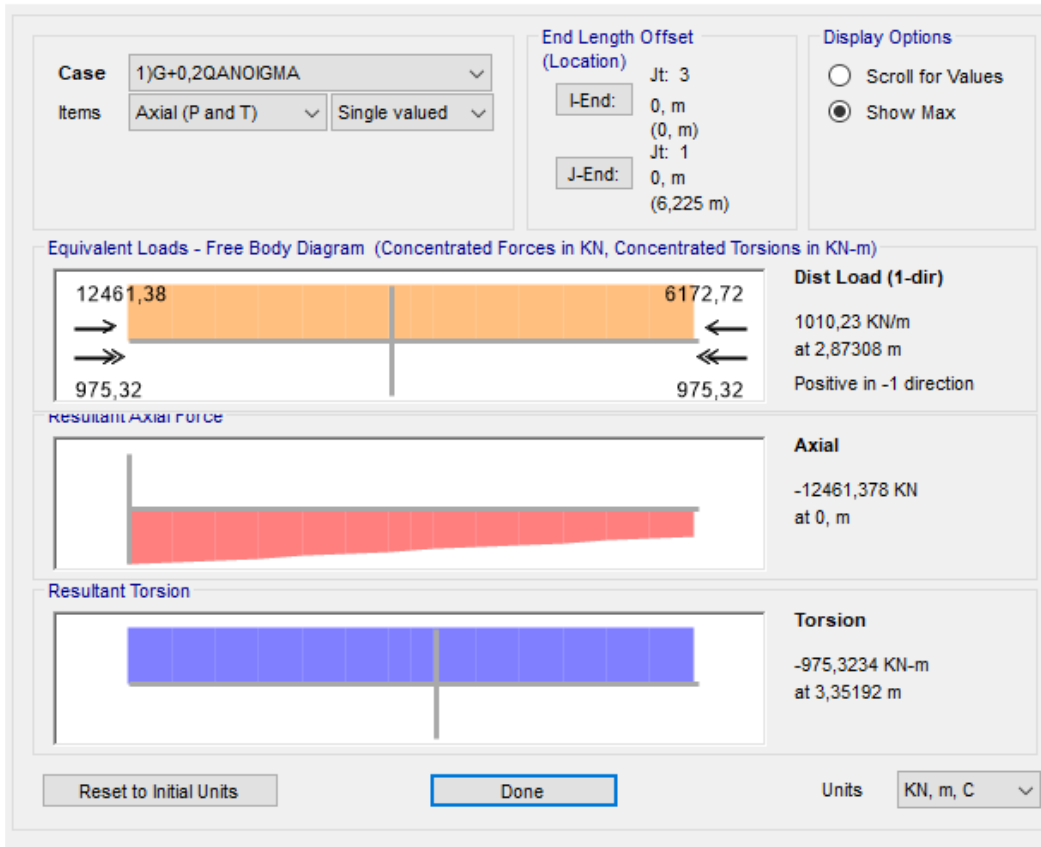


Εικόνα 4.9 Λεπτομέρεια διατομής καταστρώματος

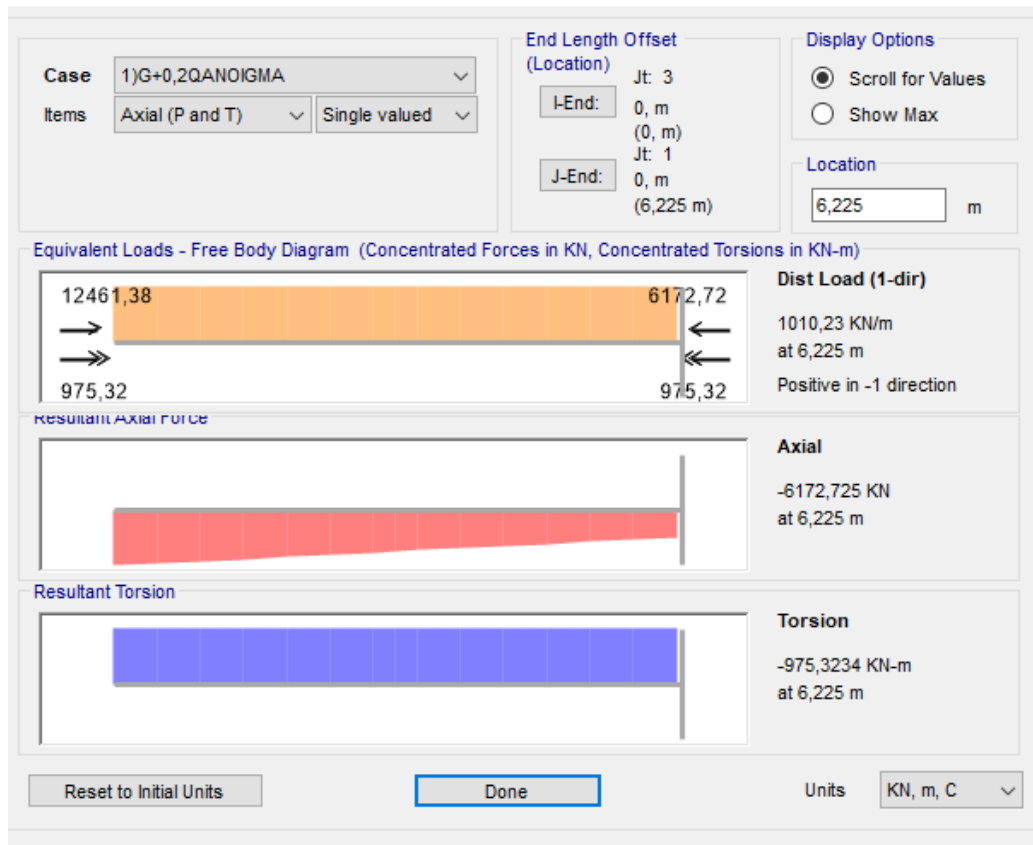
Από τα αποτελέσματα της ελαστικής ανάλυσης για τον συνδυασμό

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + \sum_{i > 1} \psi_{2i} \cdot Q_{k1} + Q_2$$

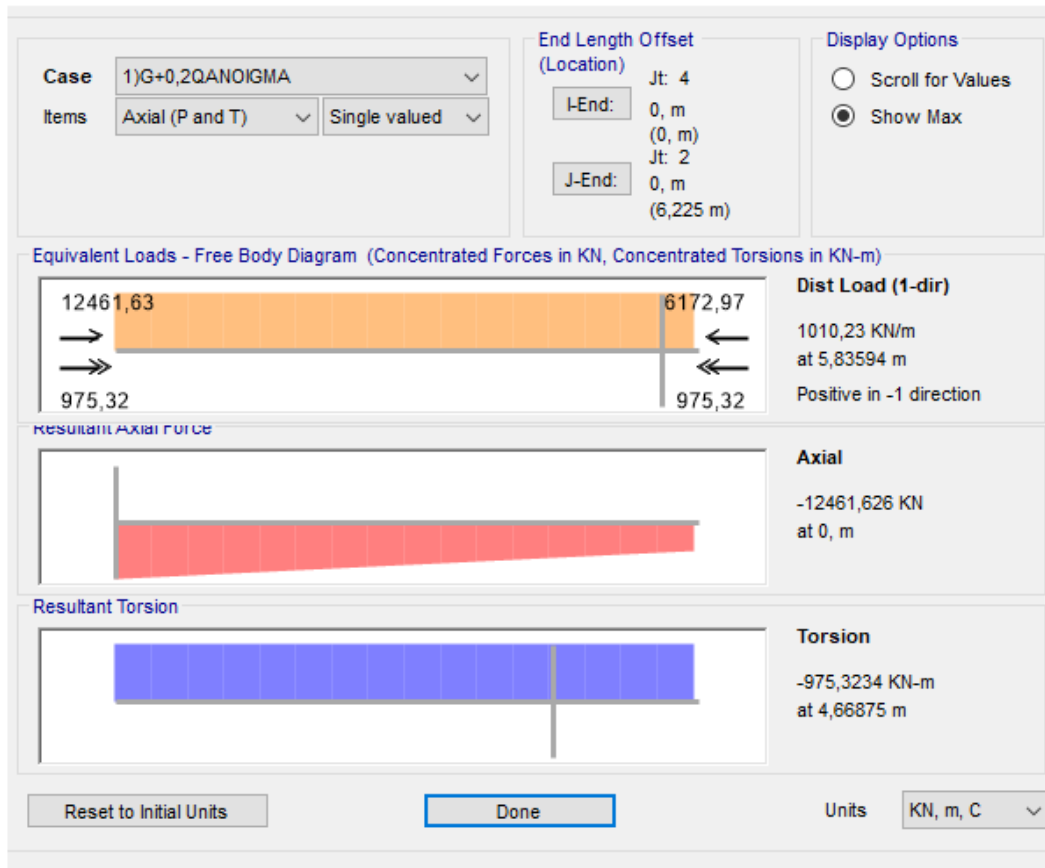
προκύπτουν οι τιμές των αξονικών δυνάμεων που επιδρούν στις κρίσιμες διατομές.



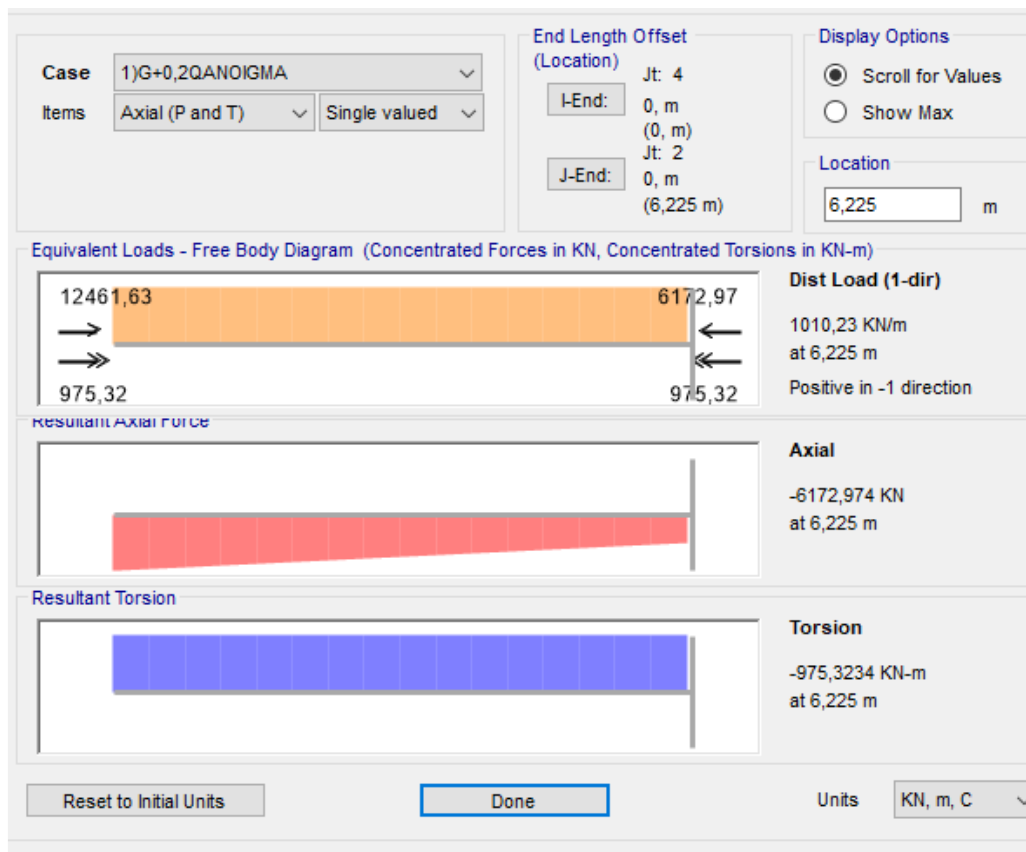
Εικόνα 4.10 Αξονική δύναμη - βάση αριστερού βάθρου



Εικόνα 4.11 Αξονική δύναμη - κορυφή αριστερού βάθρου



Εικόνα 4.13 Αξονική δύναμη - βάση δεξιού βάθρου

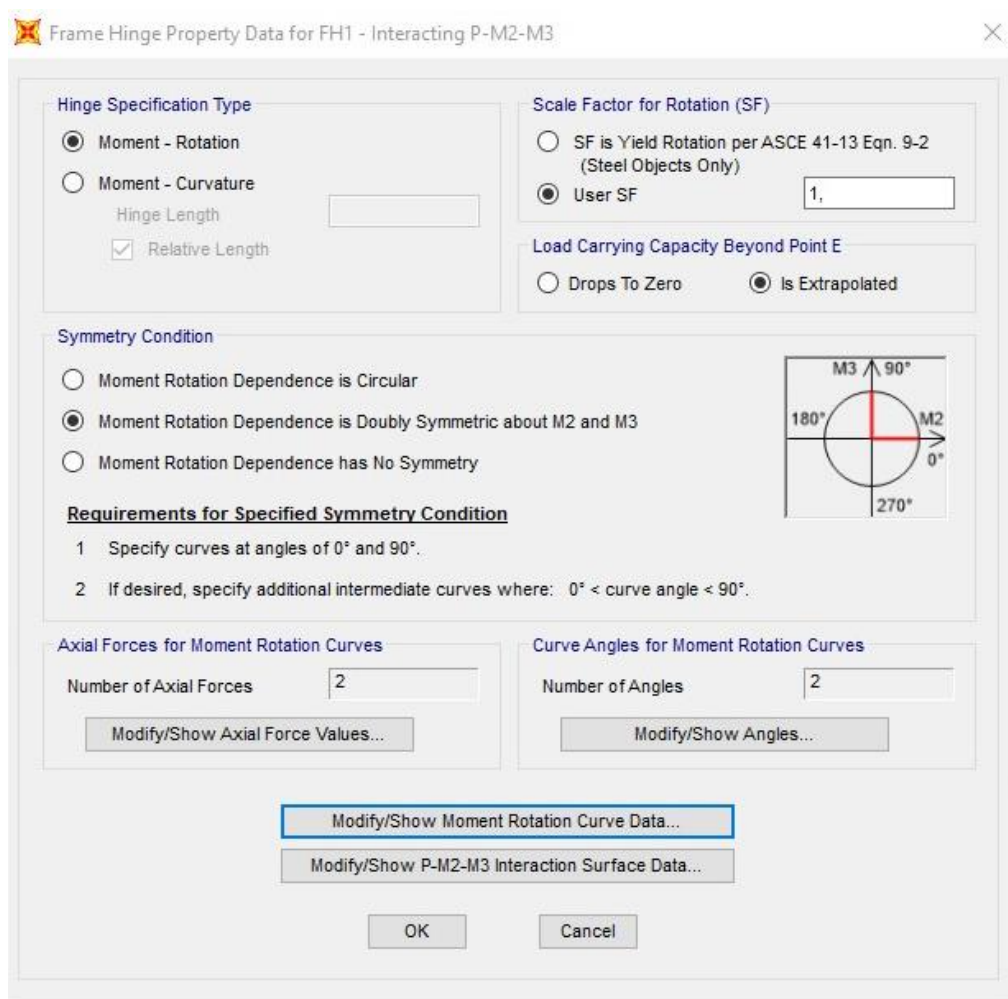


Εικόνα 4.12 Αξονική δύναμη - κορυφή δεξιού βάθρου

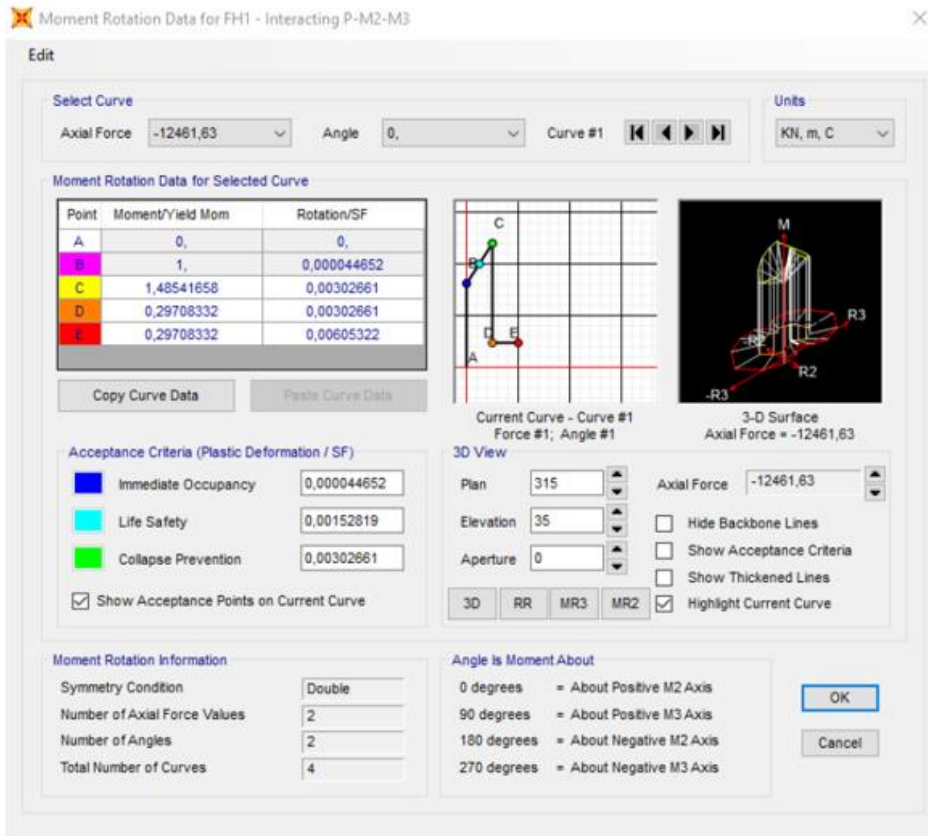
Ο υπολογισμός των γωνιών στροφής χορδής θ_y , θ_u , θ_{um}^{pl} , που απαιτούνται για τον προσδιορισμό των διαγραμμάτων ροπών κάμψης $M - \sigma$ στροφών χορδής θ , γίνεται με χρήση του προγράμματος Excel.

Όπως αναλυτικά περιεγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους, οι πλαστικές αρθρώσεις όλων των διατομών εισάγονται στο πρόγραμμα με την απαραίτητη επεξεργασία των διαγραμμάτων ροπών κάμψης $M - \sigma$ στροφών χορδής θ .

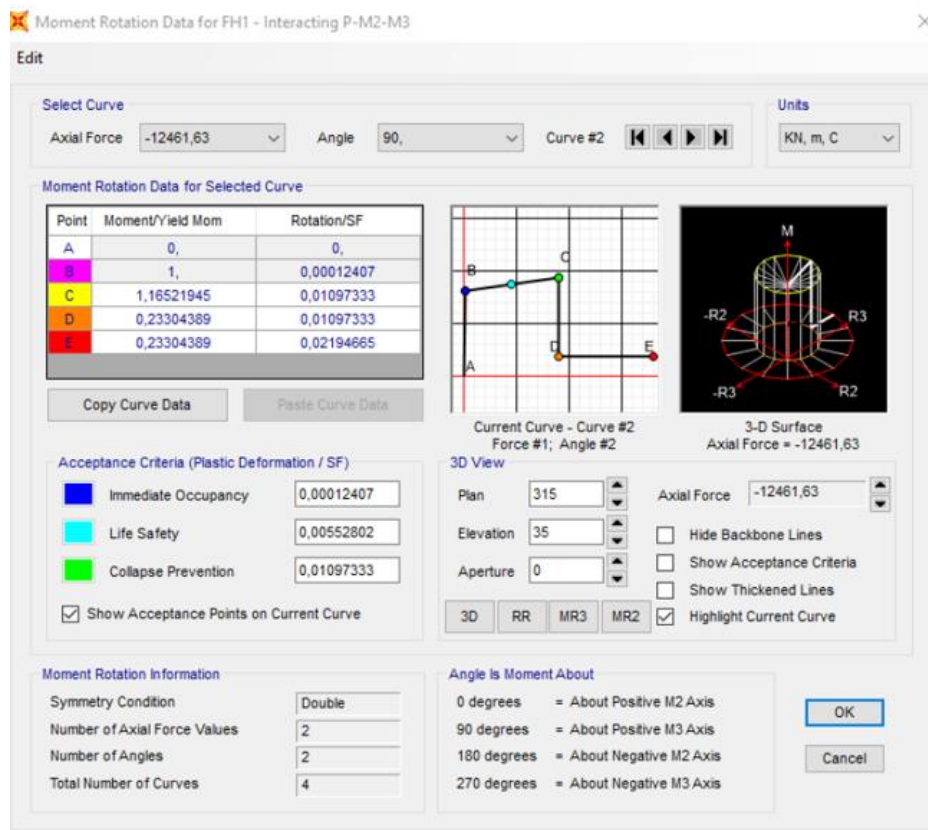
Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία όπως πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα SAP2000.



Εικόνα 4.14 Προσδιορισμός συμμετρίας και αξονικών φορτίων για διατομή πασσάλων



Εικόνα 4.15 Διάγραμμα ροπής - στροφής χορδής για διατομή βάρου για κάμψη κατά τον άξονα 2



Εικόνα 4.16 Διάγραμμα ροπής - στροφής χορδής για διατομή βάρου για κάμψη κατά τον άξονα 3

Auto Hinge Assignment Data

Auto Hinge Type
From Tables In ASCE 41-13

Select a Hinge Table
Table 10-8 (Concrete Columns)

Degree of Freedom
 M2 P-M2 Parametric P-M2-M3
 M3 P-M3
 M2-M3 P-M2-M3

P and V Values From
 Case/Combo COMB1
 User Value P
V2 V3

Concrete Column Failure Condition
 Condition i - Flexure Condition iv - Development
 Condition ii - Flexure/Shear
 Condition iii - Shear

Shear Reinforcing Ratio $p = A_v / (b_w * s)$
 From Current Design
 User Value

Deformation Controlled Hinge Load Carrying Capacity
 Drops Load After Point E
 Is Extrapolated After Point E

OK Cancel

Εικόνα 4.18 Καθορισμός του Νόμου Συμπεριφοράς των πλαστικών αρθρώσεων

Assign Frame Hinges

Frame Hinge Assignment Data

Hinge Property	Relative Distance
Auto	0
Auto M3	1

Add Hinge...
Modify/Show Auto Hinge...
Delete Hinge

Current Hinge Information
Type: From Tables In ASCE 41-13
Table: Table 10-8 (Concrete Columns)
DOF: M3

Options
 Add Specified Hinge Assigns to Existing Hinge Assigns
 Replace Existing Hinge Assigns with Specified Hinge Assigns

Existing Hinge Assignments on Currently Selected Frame Objects
Number of Selected Frame Objects: 0
Total Number of Hinges on All Selected Frame Objects: 0

Fill Form with Hinges on Selected Frame Object

OK Close Apply

Εικόνα 4.17 Εισαγωγή πλαστικών αρθρώσεων στην κεφαλή των πασσάλων

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: PUSH Set Def Name Modify/Show...

Notes

Load Case Type: Static Design...

Initial Conditions

Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Continue from State at End of Nonlinear Case GRAV

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case

All Modal Loads Applied Use Modes from Case MODAL

Loads Applied

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	LATERAL	1
Load Pattern	LATERAL	1

Add Modify Delete

Analysis Type

Linear

Nonlinear

Nonlinear Staged Construction

Geometric Nonlinearity Parameters

None

P-Delta

P-Delta plus Large Displacements

Mass Source

Previous

Other Parameters

Load Application: Displ Control Modify/Show...

Results Saved: Final State Only Modify/Show...

Nonlinear Parameters: Default Modify/Show...

OK Cancel

Εικόνα 4.19 Καθορισμός load case που περιέχει την απαιτούμενη πλευρική δύναμη

Load Application Control for Nonlinear Static Analysis

Load Application Control

Full Load

Displacement Control

Control Displacement

Use Conjugate Displacement

Use Monitored Displacement

Load to a Monitored Displacement Magnitude of 0,250

Monitored Displacement

DOF U1 at Joint 1085

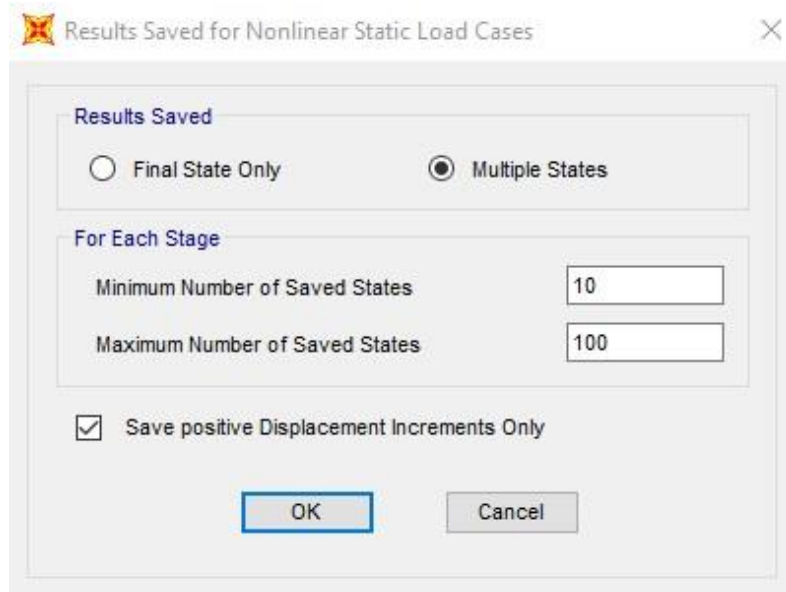
Generalized Displacement

Additional Controlled Displacements

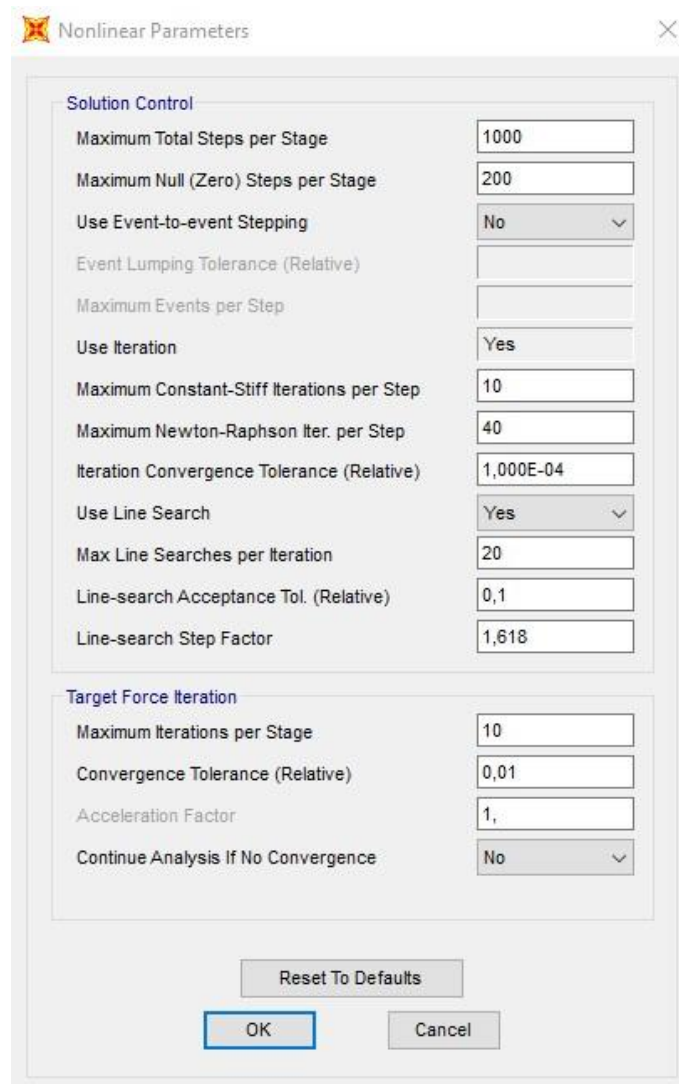
None Modify/Show...

OK Cancel

Εικόνα 4.20 Καθορισμός μετακίνησης ελέγχου



Εικόνα 4.21 Αποθήκευση των επιμέρους βημάτων της Pushover ανάλυσης



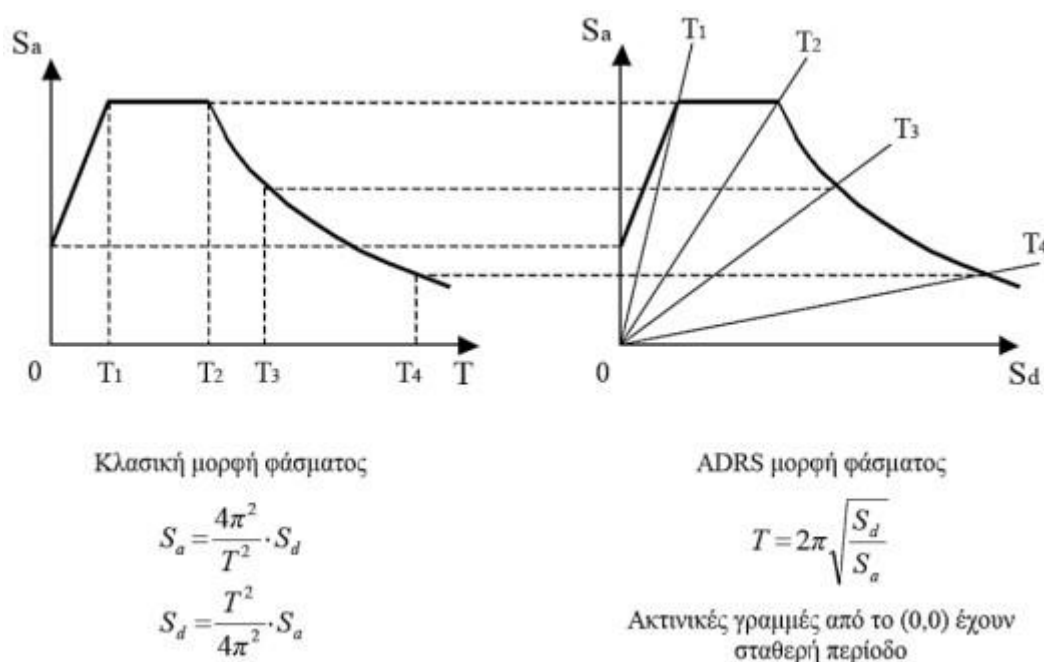
Εικόνα 4.22 Καθορισμός μη γραμμικών παραμέτρων

4.9 Μέθοδος ATC-40

Η αποτίμηση της συμπεριφοράς του φορέα της συγκεκριμένης γέφυρας έναντι σεισμού πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο του φάσματος ικανότητας ATC-40. Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού του σημείου επιτελεστικότητας σύμφωνα με τη προαναφερθείσα μεθοδολογία.

Ωστόσο, το λογισμικό του προγράμματος SAP2000 υπολογίζει αυτόματα τη στοχευμένη μετακίνηση και την καμπύλη αντίστασης του φορέα μέσω μίας επαναληπτικής διαδικασίας προσδιορίζεται στα διαγράμματα ADRS το σημείο επιτελεστικότητας του φορέα και ορίζεται ως το σημείο για το οποίο εξισορροπούνται η απαίτηση για το φάσμα σχεδιασμού που προβλέπεται, με την αντοχή του φορέα και αποτελεί δείκτη της σεισμικής συμπεριφοράς του.

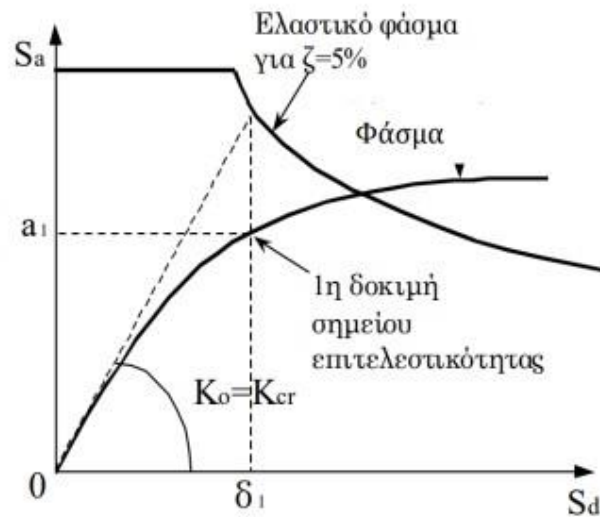
Η μετακίνηση της κατασκευής υπολογίζεται από τη μετακίνηση του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος. Αρχικά πραγματοποιείται η μετατροπή του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού για $\zeta=5\%$ σε μορφή ADRS.



Εικόνα 4.23 Μετατροπή ελαστικού φάσματος σχεδιασμού σε μορφή ADRS

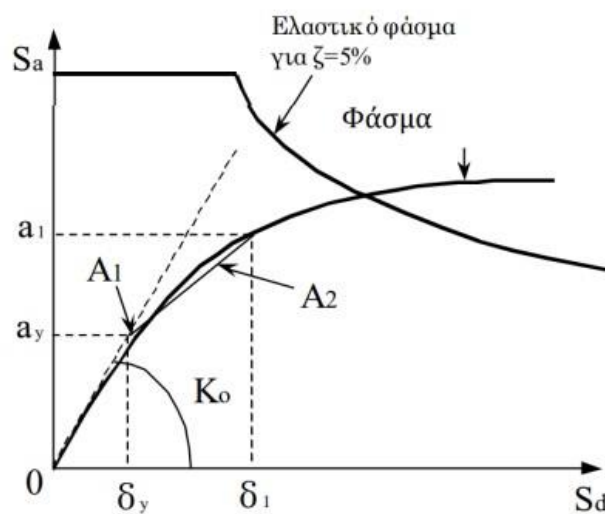
Έπειτα κατασκευάζεται η Καμπύλη Ικανότητας (capacity curve) και το Φάσματος Ικανότητας (capacity spectrum). Η κατασκευή της καμπύλης γίνεται με υπολογισμό της μετακίνησης της κορυφής για διάφορες τιμές της τέμνουσας βάσης, θεωρώντας κατανομή των φορτίων καθ' ύψος συμβατή με την αναμενόμενη μορφή μετακινήσεων. Στη συνέχεια, η καμπύλη αυτή μετατρέπεται σε φάσμα ικανότητας του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος.

Από το ελαστικό φάσμα για απόσβεση $\zeta=5\%$ υπολογίζεται η μετακίνηση δ_1 για τη δυσκαμψία που αντιστοιχεί σε ρηγματωμένες διατομές (τέμνουσα δυσκαμψία στο θεωρητικό σημείο διαρροής). Για τη μετακίνηση αυτή υπολογίζεται η πρώτη εκτίμηση του σημείου επιτελεστικότητας πάνω στο φάσμα ικανότητας και η αντίστοιχη επιτάχυνση a_1 . Η μετακίνηση δ_1 είναι η τιμή που θα προέκυπτε από τη θεώρηση ίσης μετακίνησης μεταξύ του ελαστικού και ανελαστικού συστήματος. Αυτό αποτελεί και το πρώτο σημείο των δοκιμών.



Εικόνα 4.24 Εύρεση πρώτου σημείου δοκιμών

Για την κατασκευή του διγραμμικού φάσματος ικανότητας σχεδιάζεται η ευθεία για την οποία τα εμβαδά A_1 και A_2 είναι περίπου ίσα. Η ευθεία ξεκινά από το πρώτο σημείο δοκιμών. Ορίζεται επίσης το σημείο τομής αυτής της ευθείας, με την ευθεία που αντιστοιχεί στην αρχική δυσκαμψία. Αυτό το σημείο αντιστοιχεί στη διαρροή σύμφωνα με τη διγραμμική καμπύλη συμπεριφοράς και η προβολή του στους άξονες S_a και S_d ορίζει την επιτάχυνση διαρροής, a_y και τη μετακίνηση διαρροής, δ_y αντίστοιχα.



Εικόνα 4.25 Κατασκευή διγραμμικού φάσματος ικανότητας

Η ενεργός απόσβεση μπορεί να γραφτεί ως:

$$\zeta_{eff} = \zeta_{ελ} + \zeta_{υστ}$$

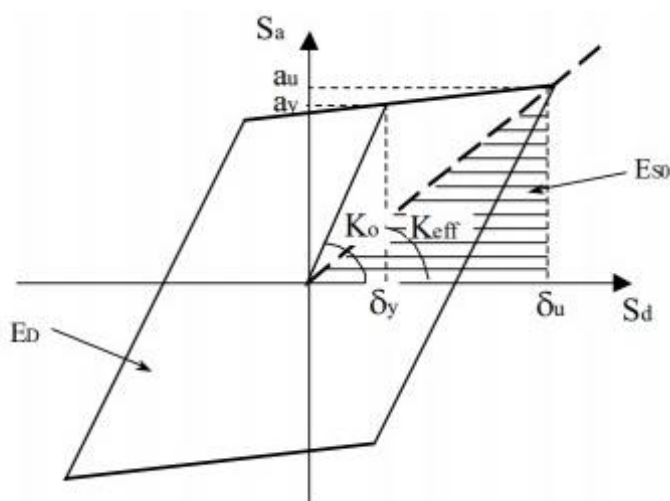
Όπου:

$\zeta_{ελ}$: η απόσβεση κατασκευής για ελαστική συμπεριφορά (=0.05 για Ω.Σ.)

$\zeta_{υστ}$: η υστερητική απόσβεση λόγω ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς

Για τον υπολογισμό της υστερητικής απόσβεσης προτείνεται η σχέση του Chopra (1995), η οποία βασίζεται στη σχέση των ενεργειών του ελαστοπλαστικού και του ισοδύναμου ελαστικού συστήματος:

$$\zeta_{υστ} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{SD}} \quad \text{ή} \quad \zeta_{υστ} = \frac{0,637 \cdot (a_y \cdot \delta_u - \delta_y \cdot a_u)}{a_u \cdot \delta_u}$$



Εικόνα 4.26 Υπολογισμός υστερητικής απόσβεσης κατά Chopra

Η σχέση του Chopra υπερεκτιμά την υστερητική απόσβεση για σεισμούς μεγάλης διάρκειας και κατασκευές χωρίς καλή πλάστιμη συμπεριφορά. Γι' αυτό, στο ATC-40 προτείνεται η χρήση ενός διορθωτικού συντελεστή κ, ο οποίος εξαρτάται από την ποιότητα της κατασκευής σε συνδυασμό με την αναμενόμενη σεισμική διέγερση.

Οι τύποι συμπεριφοράς, καθώς και οι τιμές του συντελεστή κ, φαίνονται παρακάτω.

Πίνακας 4.7 Τύποι συμπεριφοράς κτιρίων

Διάρκεια σεισμού	Νέες, καλές αντισεισμικές κατασκευές	Μέτριες αντισεισμικά κατασκευές	Φτωχές αντισεισμικά κατασκευές
Μικρή (κοντά στο επίκεντρο)	A	B	C
Μεγάλη (μακριά από επίκεντρο, γενικώς για ζώνες III & IV)	B	C	C

Πίνακας 4.6 Τιμές διορθωτικού συντελεστή κ

Τύπος συμπεριφοράς	$\zeta_{\text{ιστ}}$ (%)	κ
A	≤ 16.25	1.00
	> 16.25	$1.13 - \frac{0.51 \cdot (a_y \cdot \delta_u - \delta_y \cdot a_u)}{a_u \cdot \delta_u}$
B	< 25	0.67
	> 25	$0.845 - \frac{0.446 \cdot (a_y \cdot \delta_u - \delta_y \cdot a_u)}{a_u \cdot \delta_u}$
C	Όλες οι τιμές	0.33

Θέτοντας στην παραπάνω σχέση $a_u = a_1$ και $\delta_u = \delta_1$ προκύπτει:

$$\zeta_{\text{eff}}(\%) = 5 + \frac{63,7 \cdot \kappa \cdot (a_y \cdot \delta_1 - \delta_y \cdot a_1)}{a_1 \cdot \delta_1}$$

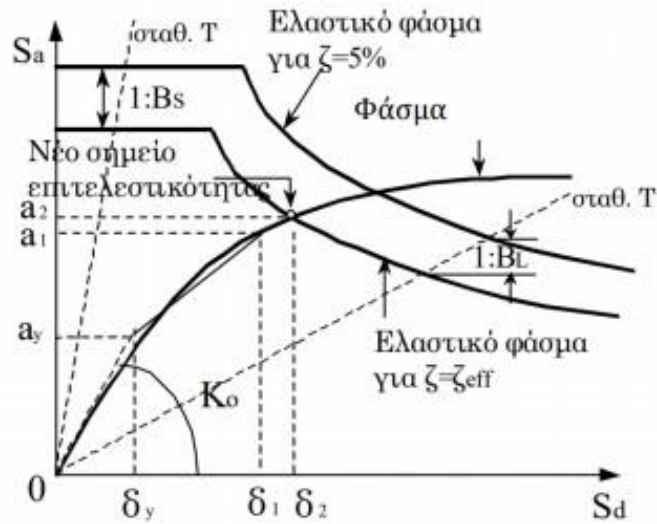
Στη συνέχεια υπολογίζεται το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού που αντιστοιχεί σε απόσβεση $\zeta = \zeta_{\text{eff}}$ με πολλαπλασιασμό των τιμών του φάσματος για $\zeta = 5\%$ με τους συντελεστές SR_A και SR_V στα τμήματα που αντιστοιχούν σε σταθερή επιτάχυνση και σταθερή ταχύτητα, αντίστοιχα.

$$SR_A = \frac{1}{B_S} = \frac{3.21 - 0.68 \cdot \ln \zeta_{\text{eff}}}{2.12} \geq SR_{A,\min} \quad SR_V = \frac{1}{B_L} = \frac{2.31 - 0.41 \cdot \ln \zeta_{\text{eff}}}{1.65} \geq SR_{V,\min}$$

Πίνακας 4.8 Ελάχιστες τιμές μειωτικών συντελεστών απόσβεσης

Τύπος συμπεριφοράς	$SR_{A,\min}$	$SR_{V,\min}$
A	0.33	0.50
B	0.44	0.56
C	0.56	0.67

Το σημείο τομής μεταξύ του φάσματος σχεδιασμού για $\zeta = \zeta_{eff}$ και του φάσματος ικανότητας ορίζει το νέο σημείο επιτελεσματικότητας. Η προβολή αυτού του σημείου στους άξονες S_a και S_d ορίζει την νέα επιτάχυνση, a_2 και τη νέα μετακίνηση, δ_2 αντίστοιχα.



Εικόνα 4.27 Κατασκευή ελαστικού φάσματος απόκρισης για $\zeta = \zeta_{eff}$ και εύρεση νέου σημείου επιτελεσματικότητας

Τέλος, εφαρμόζοντας την παραπάνω επαναληπτική διαδικασία, θεωρούμε ότι η επιθυμητή σύγκλιση έχει επιτευχθεί όταν:

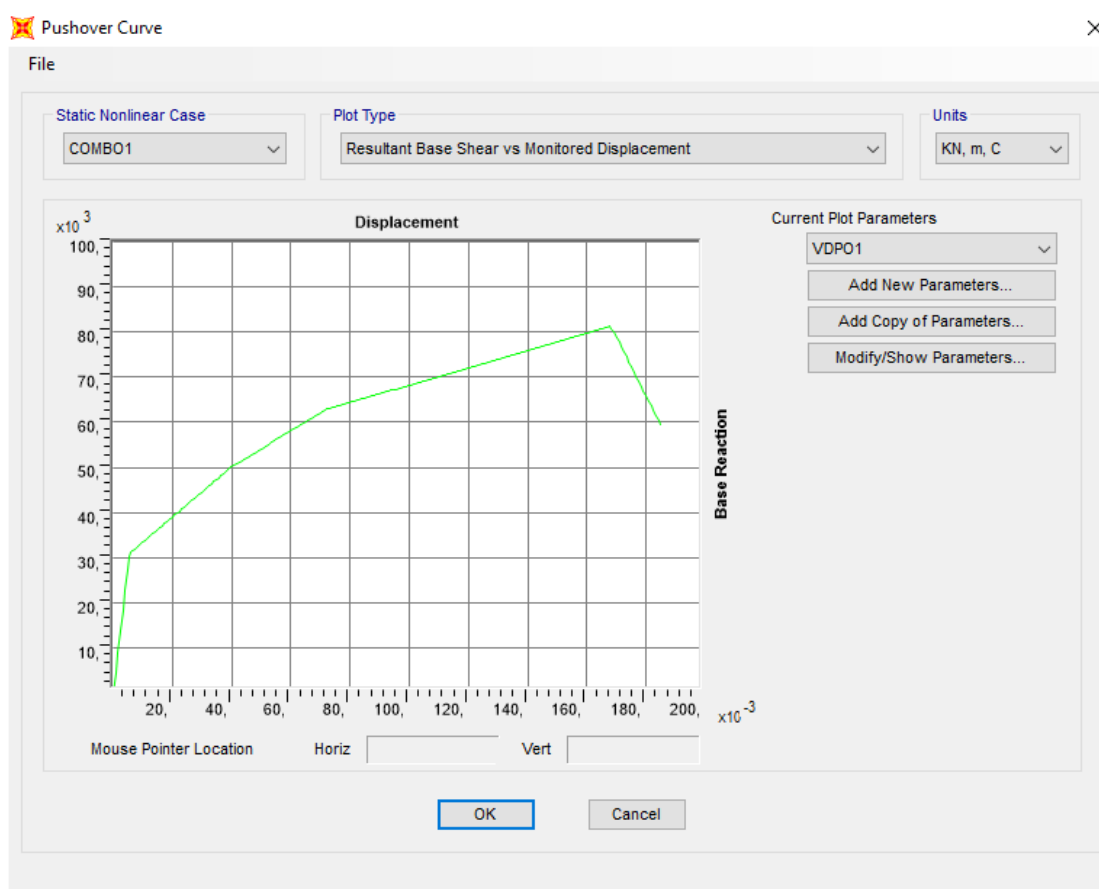
$$0,95 \cdot \delta_1 < \delta_2 < 1,05 \cdot \delta_1$$

Εάν το κριτήριο δεν ικανοποιείται, θέτουμε $a_1 = a_2$ και $\delta_1 = \delta_2$ και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία. Εάν ικανοποιείται, η μετακίνηση δ_2 αντιστοιχεί στη μέγιστη αναμενόμενη μετακίνηση δ^* του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος (στοχευμένη μετακίνηση).

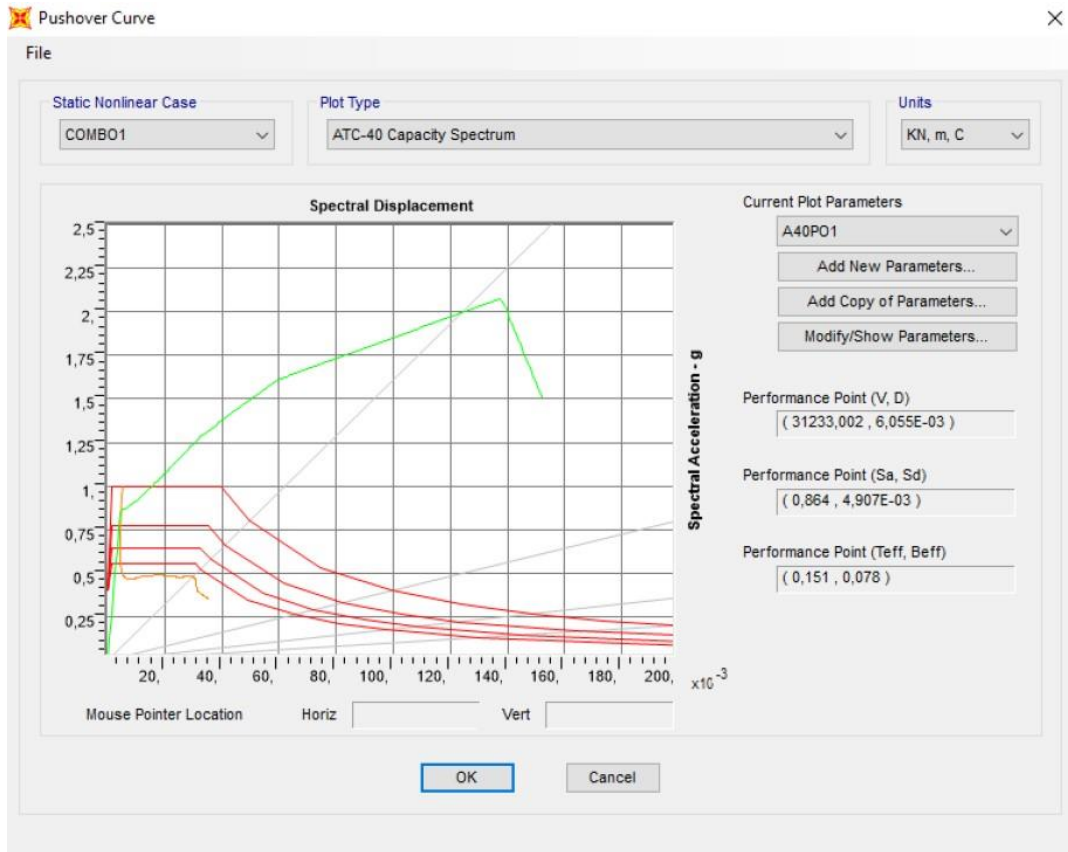
4.10 Αποτελέσματα ανάλυσης Pushover

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για τους δυσμενέστερους συνδυασμούς φορτίσεων που επιβάλλονται στη γέφυρα, οι οποίοι παρουσιάστηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα για τον κάθε συνδυασμό ξεχωριστά, η συμπεριφορά του φορέα δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις, επομένως παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα μόνο από την δυσμενέστερη φόρτιση.

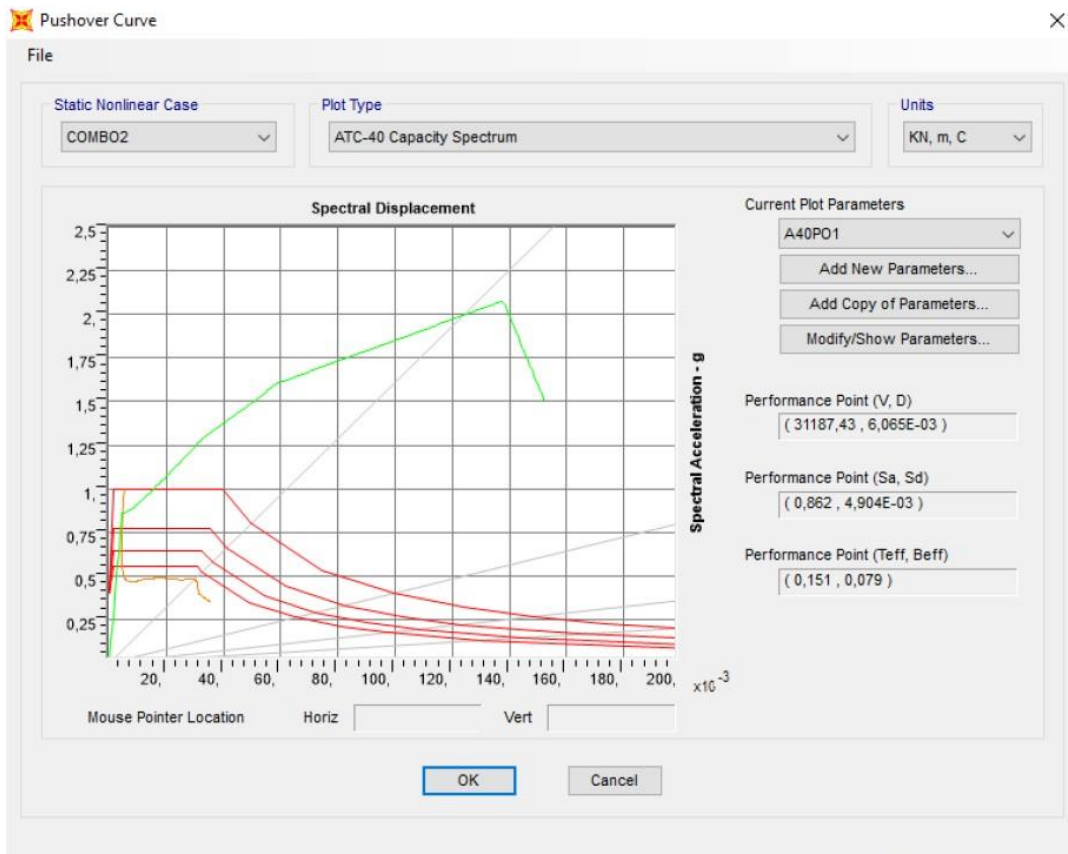
Παρακάτω παρουσιάζεται η καμπύλη αντίστασης του φορέα, όπως αυτή υπολογίστηκε από την ανελαστική στατική ανάλυση για το συνδυασμό με τα φορτία στο άνοιγμα. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η μετακίνηση του σημείου επιτελεσματικότητας, όπως υπολογίστηκε από τη μέθοδο ATC-40, και είναι ίση με 6 mm.



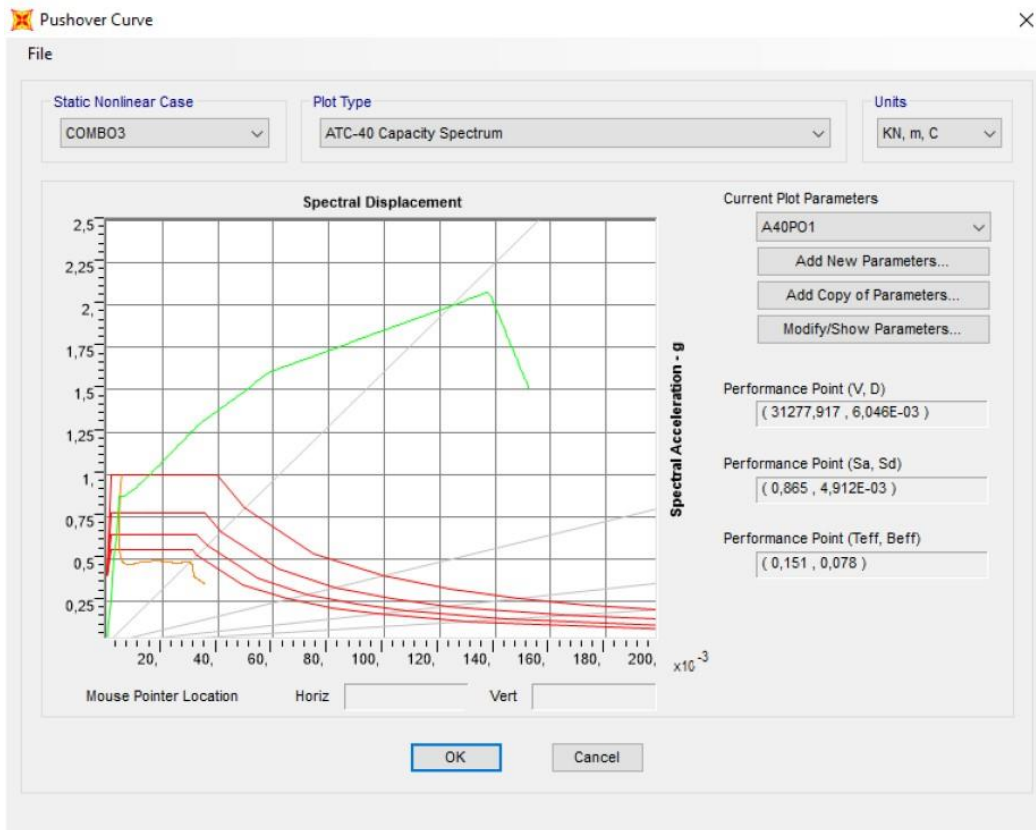
Εικόνα 4.28 Καμπύλη αντίστασης φορέα



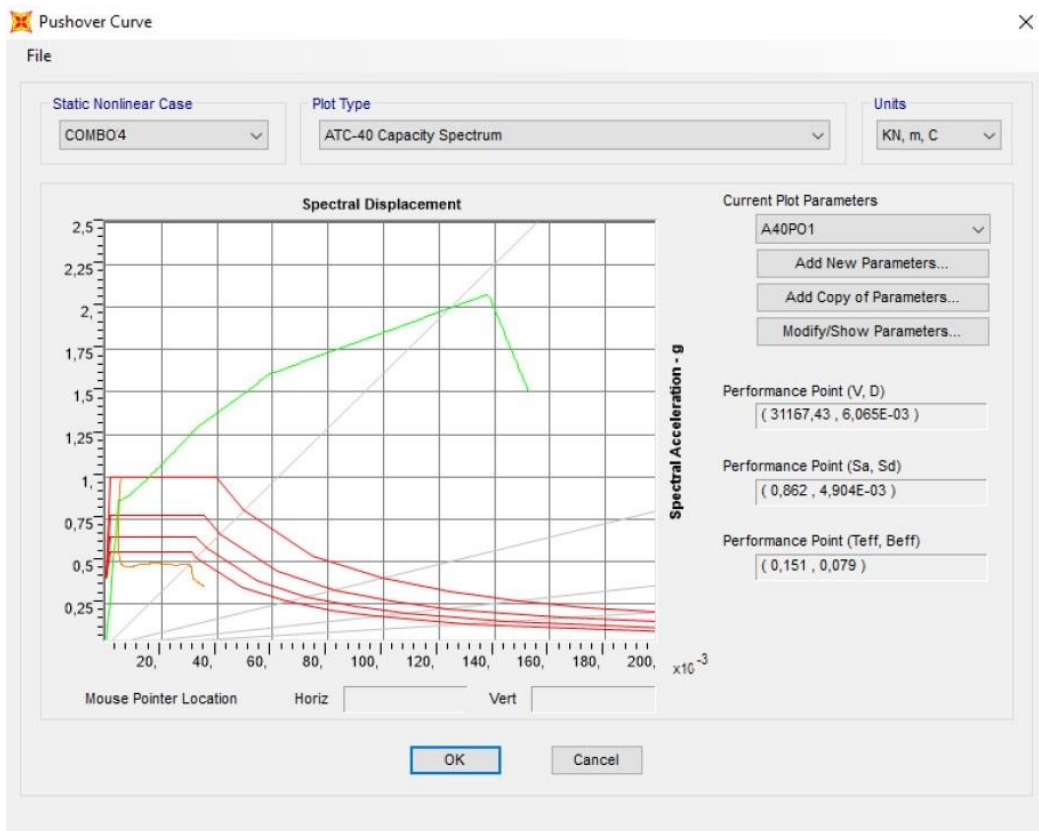
Εικόνα 4.29 Σημείο επιτελεστικότητας πρώτου συνδυασμού



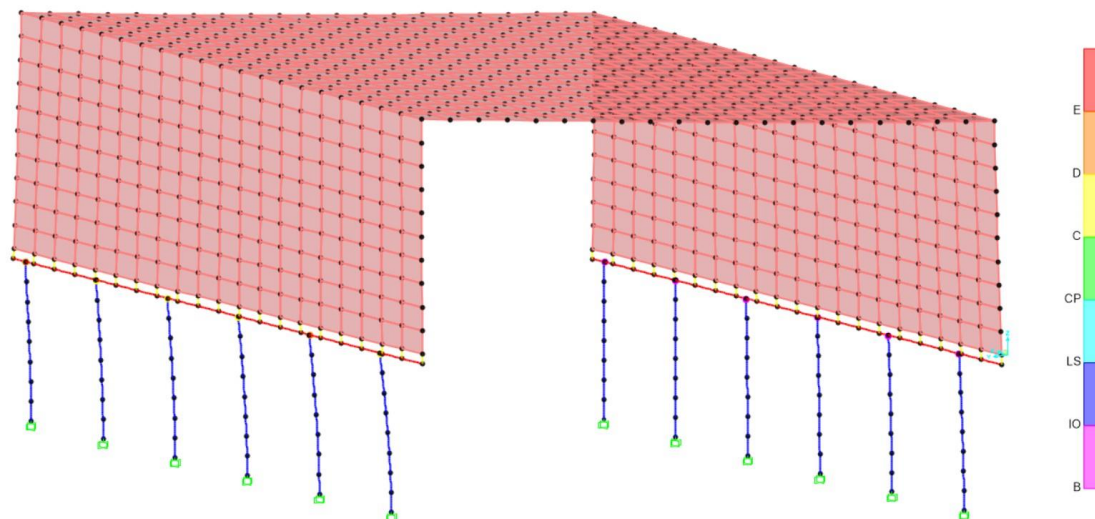
Εικόνα 4.30 Σημείο επιτελεστικότητας δεύτερου συνδυασμού



Εικόνα 4.31 Σημείο επιτελεσματικότητας τρίτου συνδυασμού

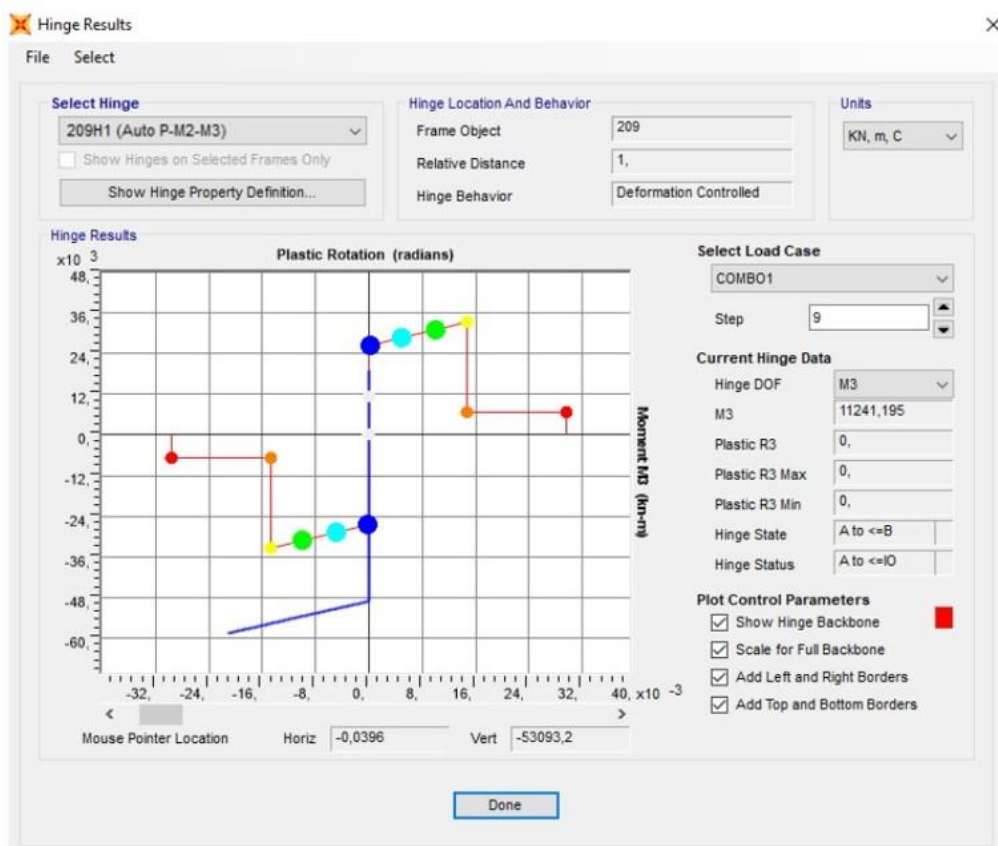


Εικόνα 4.32 Σημείο επιτελεσματικότητας τέταρτου συνδυασμού

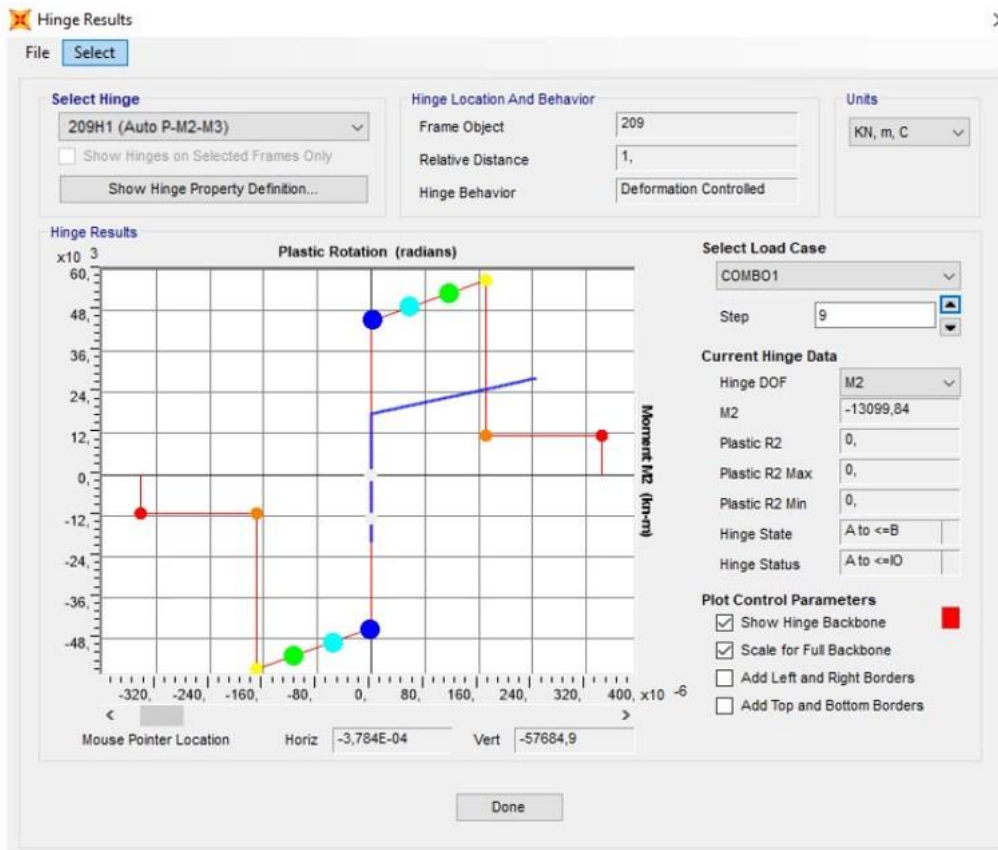


Εικόνα 4.34 Παραμορφωμένος φορέας με τις πλαστικές αρθρώσεις που έχουν αναπτυχθεί

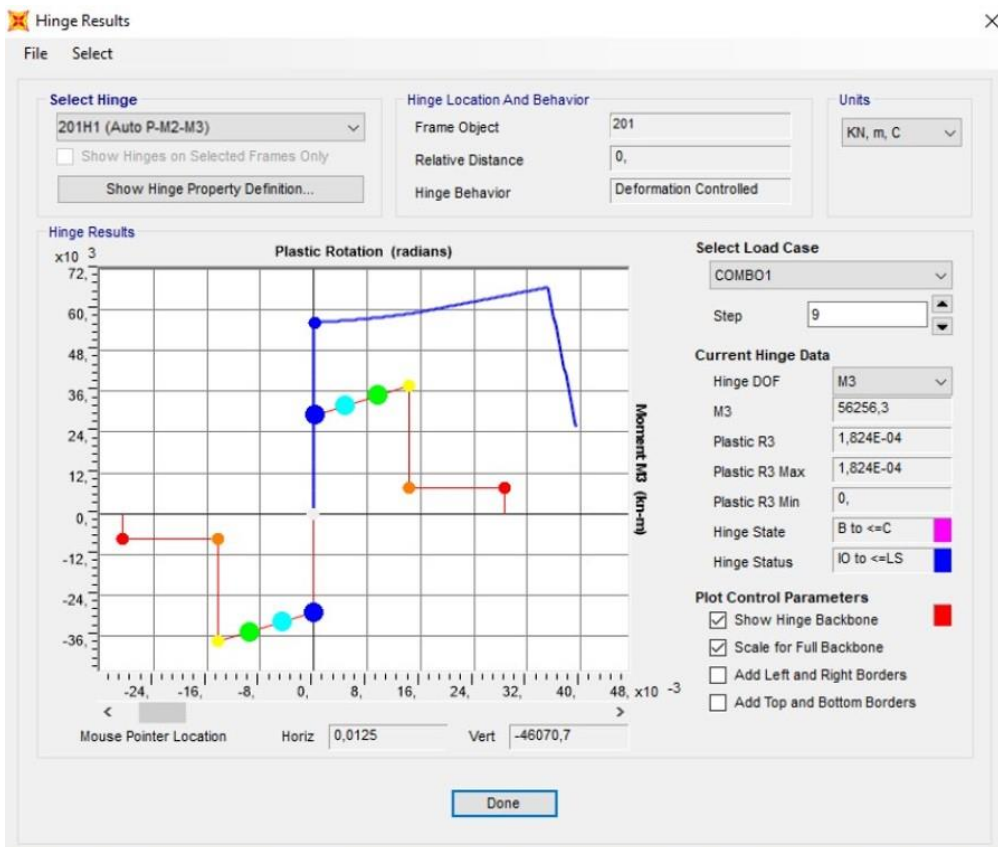
Τέλος, παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα για δύο πλαστικές αρθρώσεις της γέφυρας από τον κρίσιμο συνδυασμό. Παρατηρείται ότι για τις περισσότερες πλαστικές αρθρώσεις για την μετακίνηση του σημείου επιτελεσματικότητας ικανοποιείται τουλάχιστον η στάθμη Προστασία Ζωής.



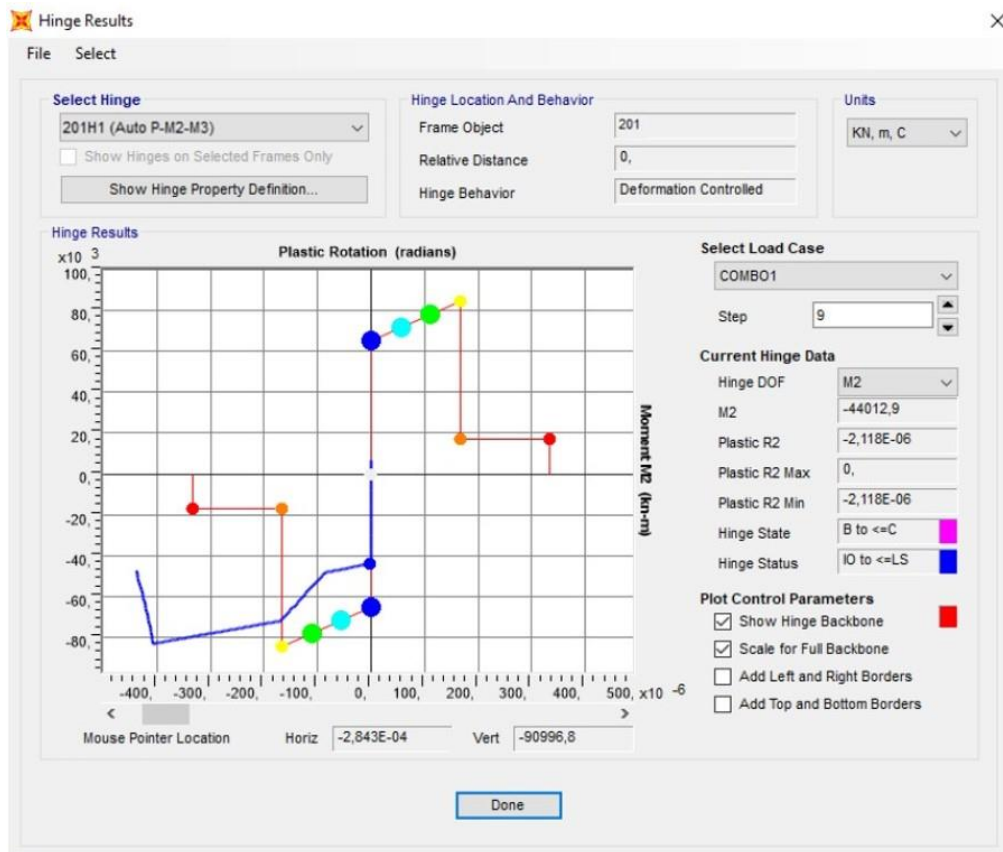
Εικόνα 4.33 Διάγραμμα $M_3 - \theta$ κόμβου 209



Εικόνα 4.35 Διάγραμμα M2 – θ κόμβου 209



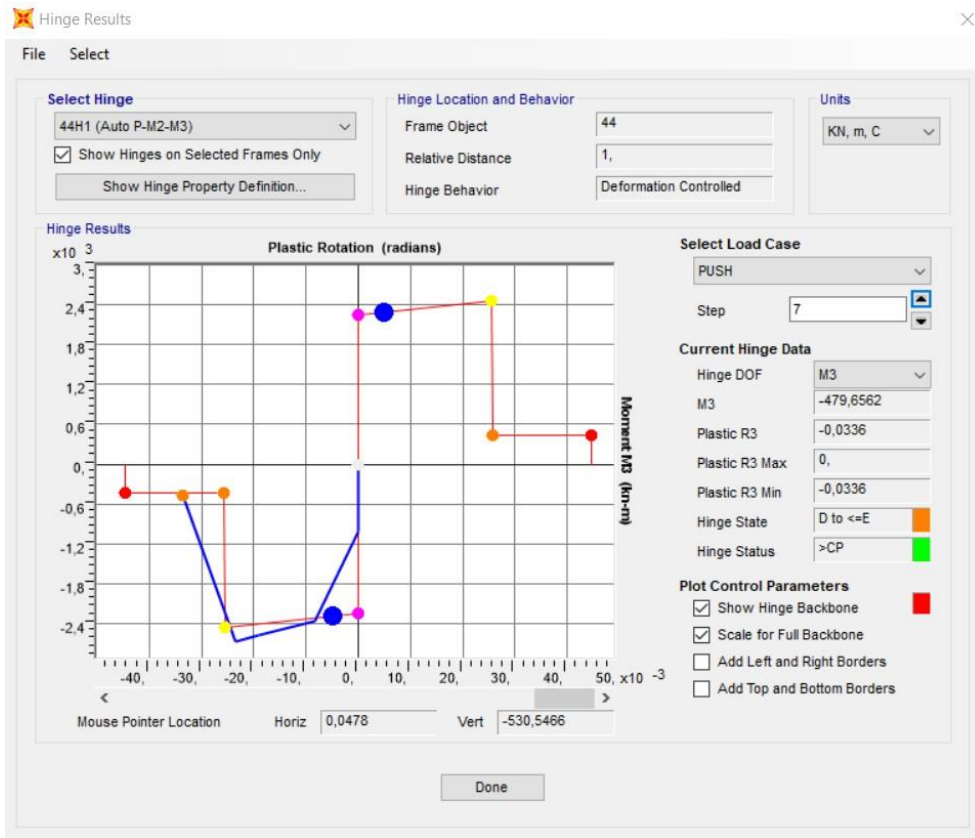
Εικόνα 4.36 Διάγραμμα M3 – θ κόμβου 201



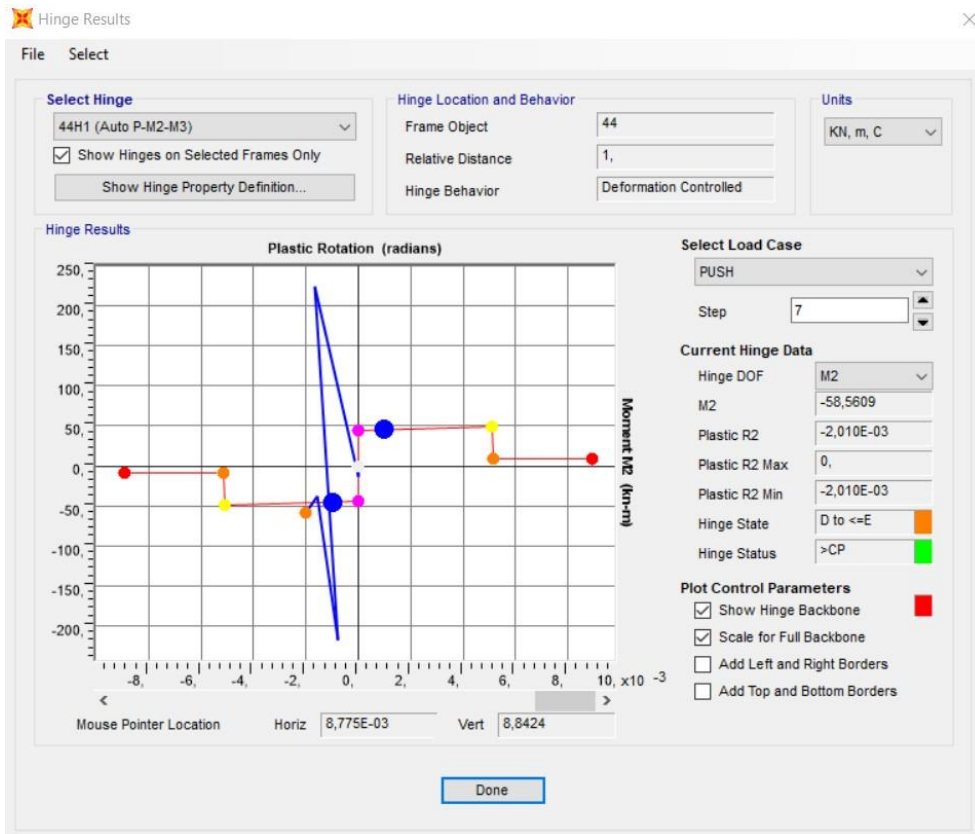
Εικόνα 4.37 Διάγραμμα $M3 - \theta$ κόμβου 201

Ωστόσο στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται ενδεικτικά δύο πλαστικές αρθρώσεις του φορέα οι οποίες ξεπερνούν την κρίσιμη στάθμη επιτελεστικότητας Προστασία Ζωής.

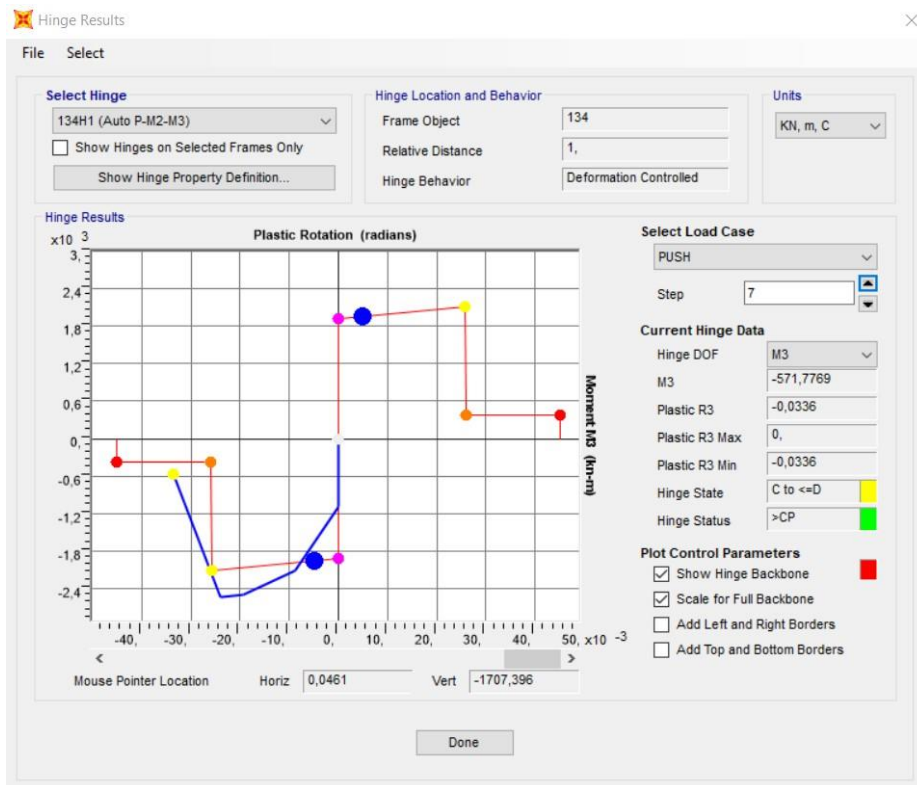
Κρίνεται συνεπώς αναγκαία η ενίσχυση του φορέα.



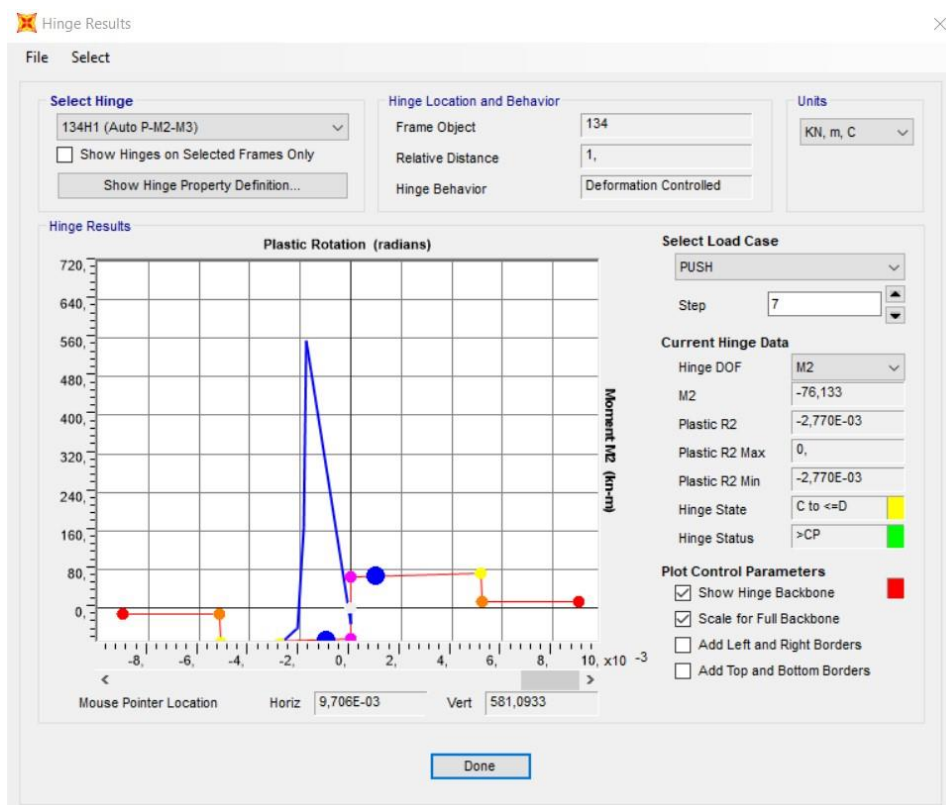
Εικόνα 4.39 Διάγραμμα M3 – θ κόμβου 44



Εικόνα 4.38 Διάγραμμα M2 – θ κόμβου 44



Εικόνα 4.40 Διάγραμμα M3 – θ κόμβου 134



Εικόνα 4.41 Διάγραμμα M2 – θ κόμβου 134

5 Ενίσχυση Πασσάλων Θεμελίωσης

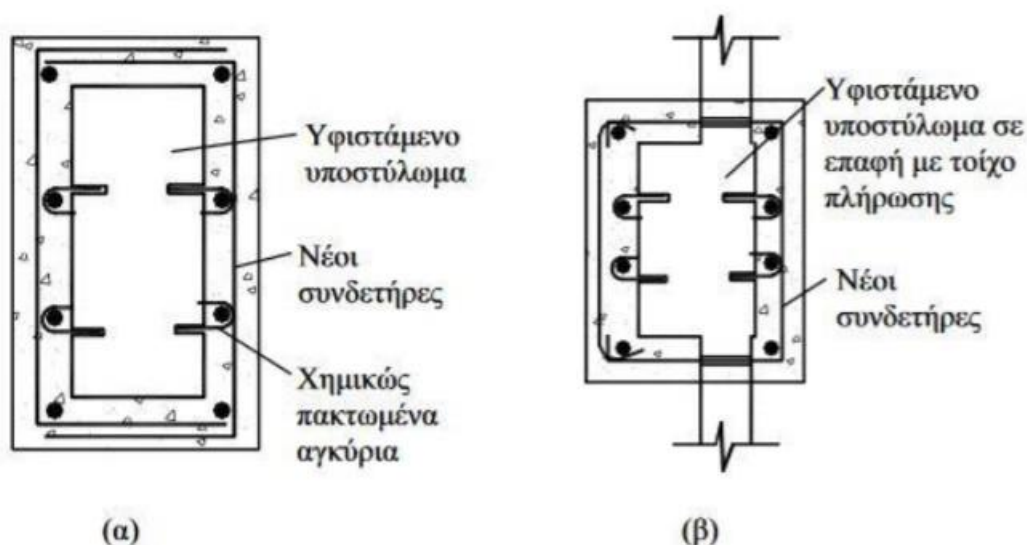
Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται ενίσχυση της κεφαλής των πασσάλων θεμελίωσης της γέφυρας. Αρχικά γίνεται η παρουσίαση των ιδιοτήτων και των κατασκευαστικών λεπτομερειών των σύνθετων υλικών. Ύστερα παρατίθεται η συμπεριφορά τους σεισμικές δράσεις.

5.1 Εισαγωγή

Η ενίσχυση κατακόρυφων στοιχείων με μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος αποτελεί μια συνήθη μέθοδο ενδυνάμωσης των κατασκευών που εφαρμόζεται με επιτυχία και έχει μελετηθεί εκτεταμένα. Πρόκειται στην ουσία για πρόσθετη στρώση σκυροδέματος που κατασκευάζεται περιμετρικά του υπάρχοντος υποστύλωματος και το εσωκλείει.

Με τη νέα στρώση σκυροδέματος αυξάνεται η διατομή του στοιχείου και δίνεται η δυνατότητα όπλισής της με νέες διαμήκεις και εγκάρσιες ράβδους χάλυβα. Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται αύξηση της αντοχής του στοιχείου, της δυσκαμψίας και της πλαστιμότητας ενώ συντελείται και περίσφιγξη του υπάρχοντος στοιχείου λόγω της εξωτερικής μανδύωσής του που αυξάνει ακόμη περισσότερο την αντοχή και την πλαστιμότητα. Μια άλλη εφαρμογή που έχει η μέθοδος αυτή είναι στην επισκευή υποστυλωμάτων με σοβαρές ή και μικρότερες βλάβες. Ακόμα, εφαρμόζεται για την ενίσχυση δοκών όταν απαιτείται αύξηση της διατομής της δοκού και σε κόμβους δοκών υποστυλωμάτων.

Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η καλή γνώση των ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιούνται (σκυρόδεμα, χάλυβας) και η μακροχρόνια εφαρμογή τους στην πράξη. Ενώ, ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι διατηρείται αμετάβλητη η κατασκευή από αρχιτεκτονικής άποψης ενώ με τη νέα στρώση σκυροδέματος παρέχεται πυροπροστασία στο στοιχείο στο οποίο εφαρμόζεται.

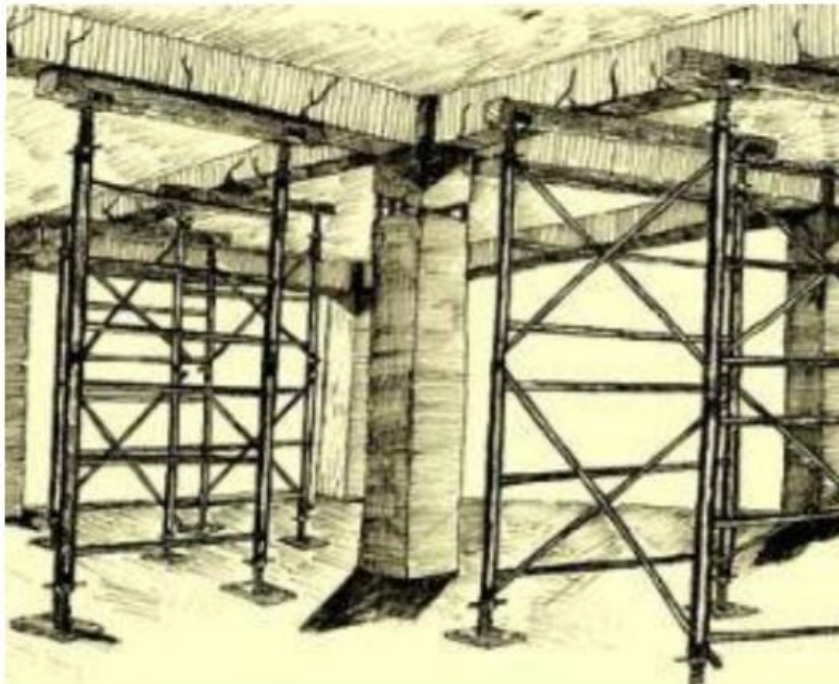


Εικόνα 5.1 Σχήμα 5.1 Μανδύας οπλισμένου σκυροδέματος σε (α) εσωτερικό υποστύλωμα και (β) περιμετρικό υποστύλωμα

5.2 Κατασκευή μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος

Οι μανδύες κατασκευάζονται στην πλειονότητά τους είτε με έγχυτο σκυρόδεμα είτε με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Η 1η περίπτωση εφαρμόζεται για κατασκευή μανδύων πάχους μεγαλύτερου από οχτώ εκατοστά (8 cm) ενώ η 2η για μανδύες των οποίων το πάχος δεν υπερβαίνει τα δέκα εκατοστά (10 cm). Για την κατασκευή μανδύων με έγχυτο σκυρόδεμα είναι αναγκαία η χρήση ξυλότυπων σε αντίθεση με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ενώ η 1^η μέθοδος μειονεκτεί κατά τη σκυροδέτηση (δυσκολία στην κατασκευή του μανδύα στην κορυφή του υποστυλώματος) και η 2η απαιτεί ειδική μέριμνα κατά τη συντήρηση.

Η διαδικασία που ακολουθείται για την κατασκευή μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα απαιτεί προσωρινή υποστήλωση του στοιχείου που πρόκειται να υποστεί την επέμβαση ούτως ώστε να αποφορτισθεί, απομάκρυνση του αποδιοργανωμένου σκυροδέματος, αν υπάρχει, και επισκευή τυχόν κατεστραμμένων, από οξείδωση ή άλλους παράγοντες, ράβδων οπλισμού. Ακολούθως, εκτραχύνεται το σκυρόδεμα και καθαρίζεται με νερό υπό πίεση ενώ διατάσσονται και συγκολλούνται οι νέοι οπλισμοί και οι αναρτήσεις. Τέλος τοποθετείται ο ξυλότυπος και γίνεται η σκυροδέτηση του νέου σκυροδέματος.



Εικόνα 5.2 Προσωρινή υποστήλωση και αποφόρτιση



Εικόνα 5.3 Κατασκευή μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα

5.3 Κατασκευαστικές διατάξεις

Σύμφωνα με τους κανονισμούς, το ελάχιστο πάχος για μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος που κατασκευάζεται με έγχυτο σκυρόδεμα πρέπει να είναι 80 – 120 mm ενώ το ελάχιστο πάχος μανδύα από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πρέπει να είναι 50 mm.

Για τους νέους οπλισμούς που θα τοποθετηθούν ισχύουν οι διατάξεις που αφορούν τα υποστυλώματα γενικότερα ενώ ορίζονται ελάχιστα για τους διατμητικούς συνδέσμους που θα χρησιμοποιηθούν στη διεπιφάνεια παλαιού και νέου σκυροδέματος και για τις αποστάσεις μεταξύ των βλήτρων.

Ακόμα, η επιφάνεια του νέου σκυροδέματος δεν πρέπει να ξεπερνά το διπλάσιο της επιφάνειας της διατομής του υπάρχοντος υποστυλώματος ($A_{c'} < 2 \cdot A_c$) και η αντοχή του νέου σκυροδέματος πρέπει να είναι μια κατηγορία μεγαλύτερη από την αντοχή του παλαιού σκυροδέματος.

5.4 Παραδοχές

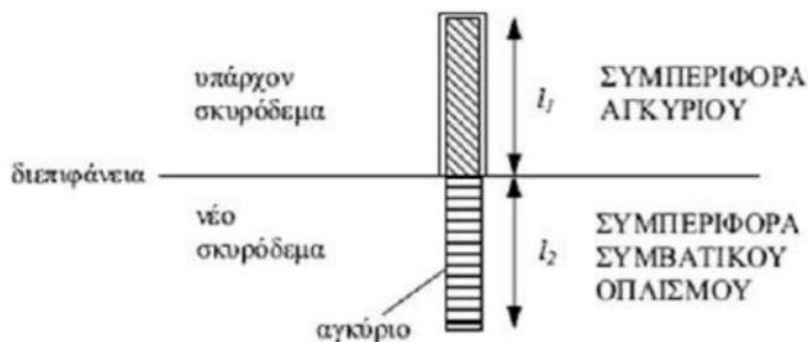
Η λογική που ακολουθείται στην ενίσχυση των υποστυλωμάτων στην παρούσα εργασία είναι αυτή της « ενεργητικής ενίσχυσης », η ενίσχυση δηλαδή γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε τα στοιχεία που θα προστεθούν να είναι ικανά να παραλάβουν τόσο τα μελλοντικά (κινητά, επικαλύψεις κ.α.) όσο και τα υπάρχοντα (μόνιμα) φορτία. Βάσει αυτής της λογικής θεωρούμε ότι το σύνολο της ροπής που καταπονεί το κάθε υποστυλώμα θα αναληφθεί από τους οπλισμούς του μανδύα που θα προστεθεί. Για το λόγο αυτό δεν χρησιμοποιούνται, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, οι συντελεστές μονολιθικότητας k_k , k_r και k_m .

Για τις ιδιότητες των υλικών, γίνεται η παραδοχή ότι η χαρακτηριστική αντοχή του σκυροδέματος του νέου υποστυλώματος μετά την ενίσχυση προκύπτει ως σταθμισμένος μέσος των αντοχών του παλιού και του νέου σκυροδέματος και υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση.

$$f_{ck}' = \frac{(f_{ck,υπαρχον} * A_{υπαρχον} + f_{ck,νεο} * A_{νεο})}{A_{συνολικό}}$$

5.5 Μεταφορά δυνάμεων μεταξύ παλαιού και νέου στοιχείου

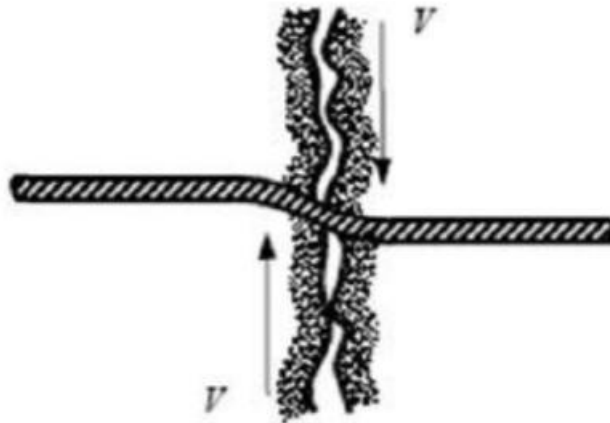
Η μεταφορά των δυνάμεων από το υπάρχον υποστυλώμα στο μανδύα επιτυγχάνεται με καλή σύνδεση μεταξύ των παλαιών και των νέων στοιχείων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται μεταλλικά στοιχεία σε μορφή ράβδων τα οποία τοποθετούνται κάθετα στη διεύθυνση του υποστυλώματος και λειτουργούν είτε ως διατμητικοί σύνδεσμοι (βλήτρα), είτε ως αγκύρια. Τα μεταλλικά αυτά στοιχεία τοποθετούνται σε οπές που ανοίγονται στο υπάρχον υποστυλώμα και αγκυρώνονται με χρήση εποξειδικής κόλλας ή ειδικού κονιάματος.



Εικόνα 5.4 Λειτουργία αγκυρίου

Η διαδικασία τοποθέτησης περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

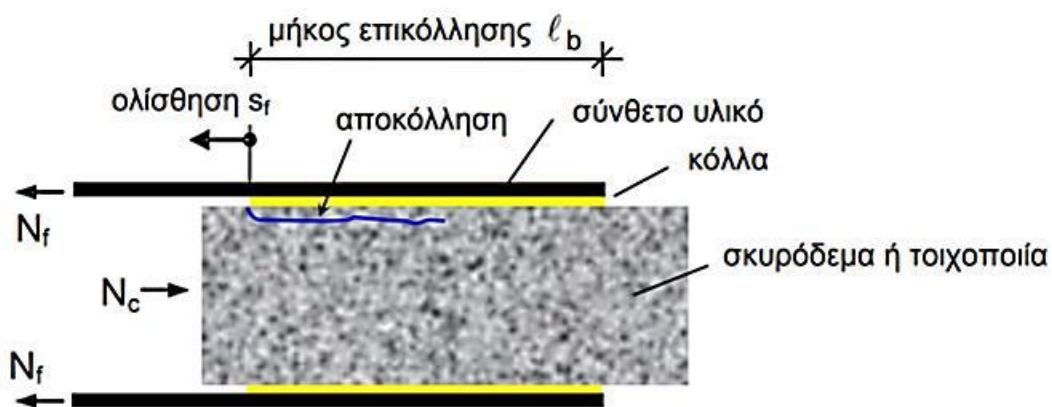
- Αρχικά ανοίγεται η τρύπα στο υπάρχον στοιχείο με τρυπάνι (η τρύπα πρέπει να είναι 6 mm μεγαλύτερη από τη διάσταση της μεταλλικής ράβδου που θα εισαχθεί).
- Εν συνεχεία, καθαρίζεται η οπή και τοποθετείται ο μεταλλικός σύνδεσμος οπότε και διογκώνεται αν πρόκειται για μηχανικό σύνδεσμο ή πληρώνεται η οπή με κατάλληλη ποσότητα ρητίνης αν πρόκειται για χημική αγκύρωση.



Εικόνα 5.5 Διατμητικός σύνδεσμος - βλήτρο

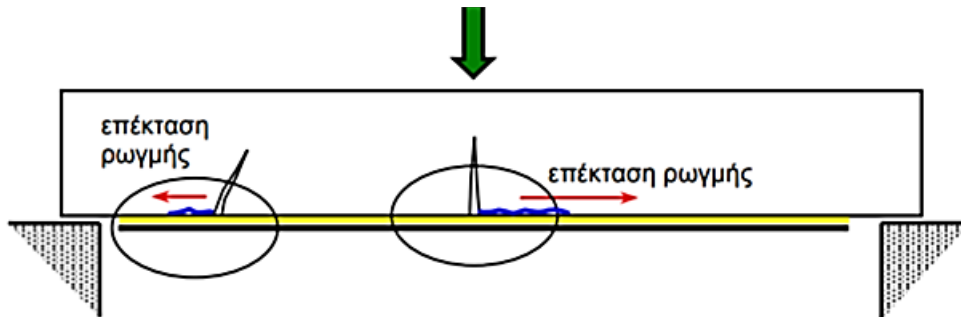
5.6 Συνάφεια υποστρώματος – σύνθετων υλικών

Για την κατανόηση της συμπεριφοράς του δεσμού του υποστρώματος με τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται απλές δοκιμές συνάφειας. Μία τέτοια δοκιμή παρουσιάζεται παρακάτω και αντιπροσωπεύει την παραμορφωσιακή και εντατική κατάσταση σε περιοχή ρωγμής.



Εικόνα 5.6 Δοκιμή συνάφειας υποστρώματος – σύνθετων υλικών

Στις περιοχές όπου αναπτύσσονται ρωγμές, όπως αυτές στο ακόλουθο σχήμα, τα σύνθετα υλικά παραλαμβάνουν εφελκυστική δύναμη N_f , που μέσω διάτμησης μεταφέρεται στο υπόστρωμα.



Εικόνα 5.7 Ενδεχόμενη αποκόλληση σύνθετων υλικών σε θέση ρωγμής

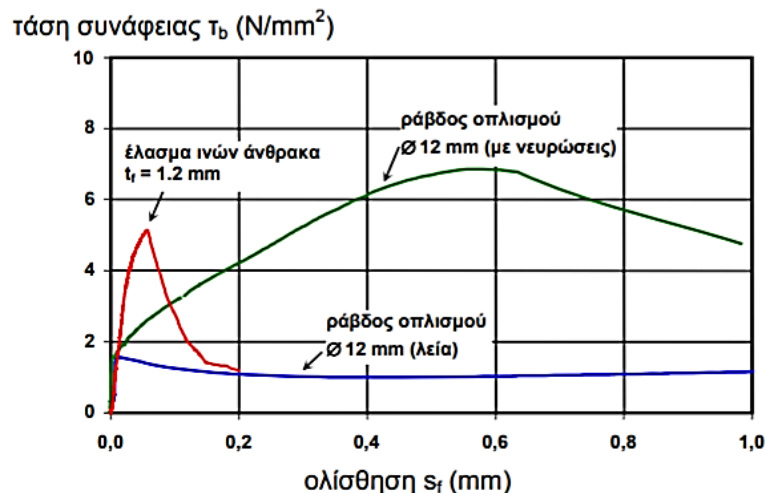
Η διατμητική τάση τ_b που παρουσιάζεται στη διεπιφάνεια των σύνθετων υλικών και του υποστρώματος ισούται με:

$$\tau_b = \frac{N_f}{l_b \times b_f}$$

Όπου:

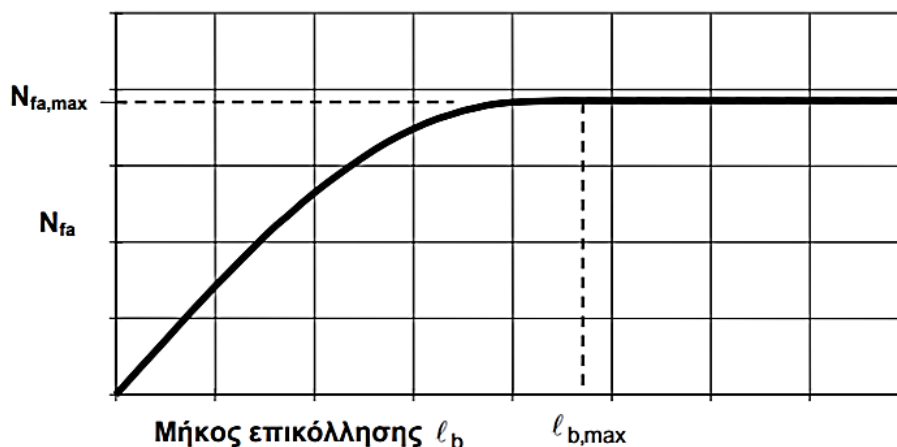
- b_f : πλάτος ελάσματος
- l_b : μήκος επικόλλησης
- N_f : εφελκυστική δύναμη

Η σχέση της διατμητικής τάσης και της ολίσθησης s_f εξαρτάται από την αντοχή του υποστρώματος, την ποιότητα της χρησιμοποιούμενης κόλλας, από τα χαρακτηριστικά των επιλεγμένων σύνθετων υλικών καθώς και από το μήκος επικόλλησής τους. Ακολούθως παρουσιάζεται γραφικά η σχέση των δύο αυτών μεγεθών για τα σύνθετα υλικά καθώς και η αντίστοιχη ενδεικτική σχέση για ράβδους οπλισμού σε σκυρόδεμα, λείες και με νευρώσεις.



Εικόνα 5.8 Σχέση τάσης συνάφειας και ολίσθησης

Η συμπεριφορά του δεσμού υποστρώματος με σύνθετα υλικά χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι συνηθέστερα η αποκόλληση προηγείται της θραύσης των σύνθετων υλικών. Η απαιτούμενη δύναμη για να πραγματοποιηθεί η αποκόλληση N_{fa} , αυξάνεται με την αύξηση του μήκους επικόλλησης l_b . Όταν το μήκος επικόλλησης φτάσει ή ξεπεράσει την οριακή τιμή $l_{b,max}$, η δύναμη αποκόλλησης θεωρείται σταθερή και ίση με $N_{fa,max}$.



Εικόνα 5.9 Σχέση της δύναμης αποκόλλησης των σύνθετων υλικών και του μήκους επικόλλησης

Για σύνθετα υλικά και υπόστρωμα από σκυρόδεμα, η σχέση της δύναμης αποκόλλησης και του μήκους επικόλλησης δίνεται ως εξής:

$$\text{Για } l_b \geq l_{b,max} : \quad N_{fa} = N_{fa,max} = b_f \cdot \sqrt{0,6 \cdot k_b \cdot E_f \cdot f_{ctm} \cdot t_f} \quad (N)$$

$$\text{Για } l_b < l_{b,max} : \quad N_{fa} = N_{fa,max} \cdot \frac{l_b}{l_{b,max}} \cdot \left(2 - \frac{l_b}{l_{b,max}} \right) \quad (N)$$

$$l_{b,max} = 0,6 \cdot \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{f_{ctm} \cdot k_b}} \quad (mm)$$

Όπου k_b : συντελεστής κάλυψης

$$k_b = \sqrt{\frac{1,5 \cdot \left(2 - \frac{b_f}{b} \right)}{1 + \frac{b_f}{100}}} \geq 1$$

- b_f : πλάτος ελάσματος σε mm
- b : πλάτος διατομής στοιχείου σε mm
- f_{ctm} : μέση εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος σε N/mm^2
- E_f : μέτρο ελαστικότητας των σύνθετων υλικών σε N/mm^2
- t_f : πάχος ελάσματος των σύνθετων υλικών σε mm

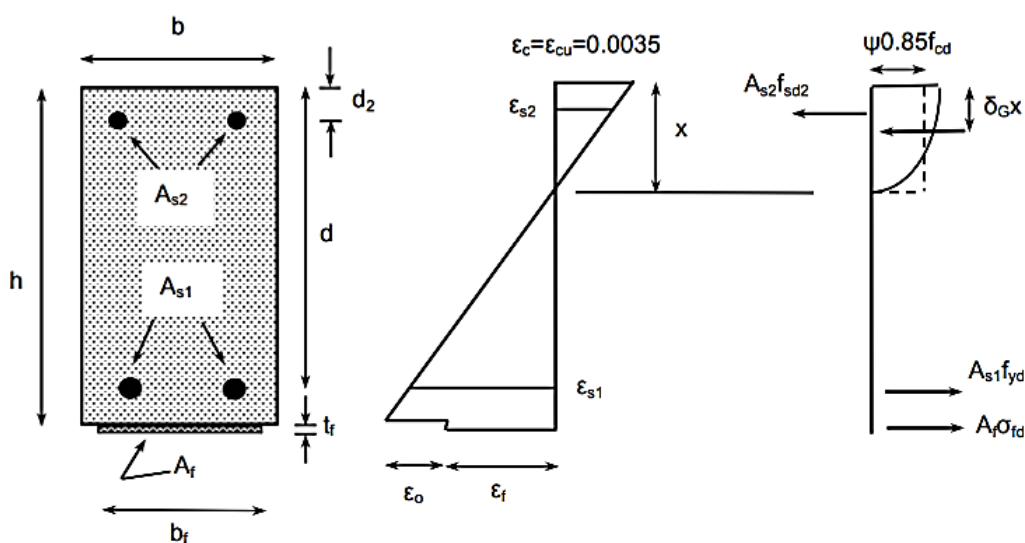
5.7 Μηχανισμοί αστοχίας

Η εφαρμογή σύνθετων υλικών για ενισχύσεις έναντι κάμψης γίνεται μέσω ελασμάτων ή υφασμάτων τα οποία επικολλούνται στο εφελκόμενο πέλμα με διεύθυνση των ινών τέτοια ώστε να παραλαμβάνουν τις λόγω κάμψης εφελκυστικές δυνάμεις. Η εφαρμογή σε υποστυλώματα όμως με τους δύο παραπάνω τρόπους είναι γενικά δύσκολη, δεδομένου ότι στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να εξασφαλισθεί η αγκύρωση των οπλισμών εντός των κόμβων. Στη περίπτωση που θα χρησιμοποιήσουμε ράβδους FRP θα πρέπει να επικαλυφθεί με σκυρόδεμα ώστε να υπάρξει συνεργασία με το στοιχείο προς ενίσχυση. Στην ουσία δηλαδή θα δημιουργηθεί ένας οπλισμένος μανδύας με FRP αντί για χάλυβα. Ο μηχανισμός αστοχίας σε κάμψη υπό την προϋπόθεση επαρκούς αγκύρωσης θα είναι:

1. Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα - σύνθλιψη σκυροδέματος
2. Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα - αποκόλληση ή θραύση σύνθετων υλικών
3. Σύνθλιψη σκυροδέματος

5.7.1 Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα – σύνθλιψη σκυροδέματος

Ο πιο επιθυμητός τρόπος αστοχίας είναι ο πρώτος σύμφωνα με τον οποίο έχουμε πρώτα διαρροή του διαμήκους οπλισμού σε εφελκυσμό και ακολούθως σύνθλιψη του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη, χωρίς να υπάρχει αστοχία ή κάποιου είδους αποκόλληση στα σύνθετα υλικά. Ο υπολογισμός της ροπής αντοχής στην κρίσιμη διατομή του υποστυλώματος (στην βάση του δηλαδή) για αυτό το μηχανισμό αστοχίας γίνεται βάσει ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων και του αΤΤσυμβιβαστού των παραμορφώσεων:



Εικόνα 5.10 Ανάλυση διατομής σε οριακή κατάσταση αντοχής. (α) Γεωμετρικά χαρακτηριστικά, (β) Κατανομή των παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής, (γ) Κατανομή των εσωτερικών δυνάμεων

Το ύψος της θλιβόμενης ζώνης προκύπτει ως εξής:

$$\psi \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x + A_{S2} \cdot f_{sd2} = A_{S1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot \sigma_{fd}$$

Όπου:

- f_{cd} : τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος
- f_{yd} : τιμή σχεδιασμού της τάσης διαρροής του χάλυβα
- A_f : εμβαδόν διατομής των σύνθετων υλικών
- f_{sd2} : τάση θλιβόμενου χάλυβα, η οποία δεν ξεπερνάει την τιμή f_{yd}
- σ_{fd} : τάση σύνθετων υλικών

$$f_{sd2} = E_s \cdot \left(\varepsilon_c \cdot \frac{x - d_2}{x} \right) \qquad \sigma_{fd} = E_f \cdot \left(\varepsilon_c \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \right)$$

Όπου:

- $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} = 3,5 \text{ ‰}$: οριακή παραμόρφωση σκυροδέματος
- ε_0 : αρχική παραμόρφωση ακραίας εφελκόμενης ίνας

Η τιμή σχεδιασμού της καμπτικής αντίστασης προκύπτει:

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [A_{S1} \cdot f_{yd} \cdot (d - \delta_G \cdot x) + A_f \cdot \sigma_{fd} \cdot (h - \delta_G \cdot x) + A_{S2} \cdot f_{sd2} \cdot (\delta_G \cdot x - d_2)]$$

Για την εφαρμογή των προηγούμενων σχέσεων, απαραίτητη προϋπόθεση είναι ότι έχει διαρρεύσει ο εφελκόμενος χάλυβας και η παραμόρφωση των σύνθετων υλικών είναι μικρότερη από την οριακή, $\varepsilon_{f,lim}$. Δηλαδή:

$$\varepsilon_{S1} = \varepsilon_c \cdot \frac{d - x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s}$$
$$\varepsilon_f = \varepsilon_c \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{f,lim}$$

5.7.2 Διαρροή εφελκυόμενου χάλυβα - αποκόλληση ή θραύση σύνθετων υλικών

Ο μηχανισμός αυτός είναι γενικά σπάνιος και ενδέχεται να εμφανιστεί σε περιπτώσεις που το εμβαδόν διατομής σύνθετων υλικών είναι πολύ μικρό. Η ανάλυση για την κρίσιμη διατομή πραγματοποιείται όπως στην προηγούμενη μέθοδο με τις ακόλουθες τροποποιήσεις στους συντελεστές ψ και δ_G :

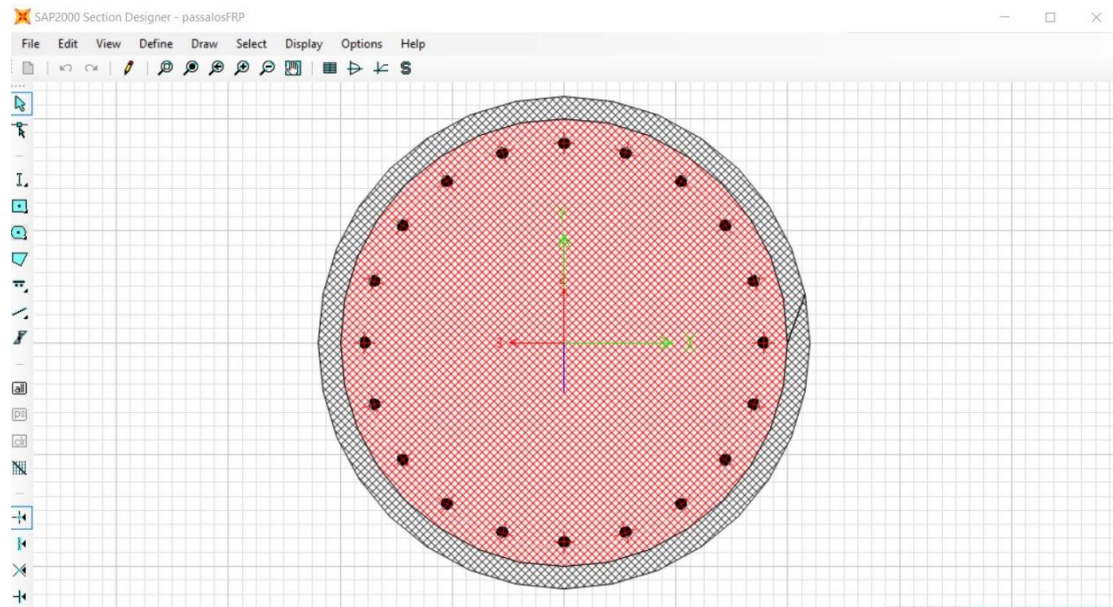
$$\psi = \begin{cases} 1.000 \cdot \varepsilon_c \cdot \left(0,5 - \frac{1.000}{12} \cdot \varepsilon_c\right) & \text{για } \varepsilon_c \leq 0,002 \\ 1 - \frac{2}{3.000 \cdot \varepsilon_c} & \text{για } 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases}$$
$$\delta_G = \begin{cases} \frac{8 - 1.000 \cdot \varepsilon_c}{4 \cdot (6 - 1.000 \cdot \varepsilon_c)} & \text{για } \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{1.000 \cdot \varepsilon_c \cdot (3.000 \cdot \varepsilon_c - 4) + 2}{2.000 \cdot \varepsilon_c \cdot (3.000 \cdot \varepsilon_c - 2)} & \text{για } 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases}$$

5.7.3 Σύνθλιψη σκυροδέματος

Ο μηχανισμός αυτός κατά τον οποίο πραγματοποιείται θραύση του σκυροδέματος πριν από οποιαδήποτε άλλη αστοχία οδηγεί σε ψαθυρή συμπεριφορά. Για αυτόν τον λόγο, θεωρείται μη αποδεκτός μηχανισμός και αποφεύγεται η περαιτέρω ανάλυση του. Για να μην ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός αυτός, το εμβαδόν της διατομής των σύνθετων υλικών δεν πρέπει να ξεπερνάει μία κρίσιμη τιμή για να μπορέσει ο εφελκυόμενος χάλυβας να διαρρεύσει.

5.8 Εφαρμογή ενισχύσεων

Για την ενίσχυση της συγκεκριμένης κατασκευής στους πασσάλους της θεμελίωσης έναντι κάμψης, ενισχύω τα υποστυλώματα με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος και αποκτά διάμετρο $d=1,16$ m. Οι μανδύες θεωρείται ότι κατασκευάζονται από έγχυτο σκυρόδεμα και τοποθετούνται σε δύο μέτρα βάθος. Τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν είναι σκυρόδεμα κατηγορίας C 30/37 με χαρακτηριστική αντοχή κυβικού δοκιμίου $f_{ck} = 30$ MPa και χάλυβας κλάσης B500 C με χαρακτηριστική αντοχή $f_s = 500$ MPa και μέτρο ελαστικότητας $E_s = 200$ GPa

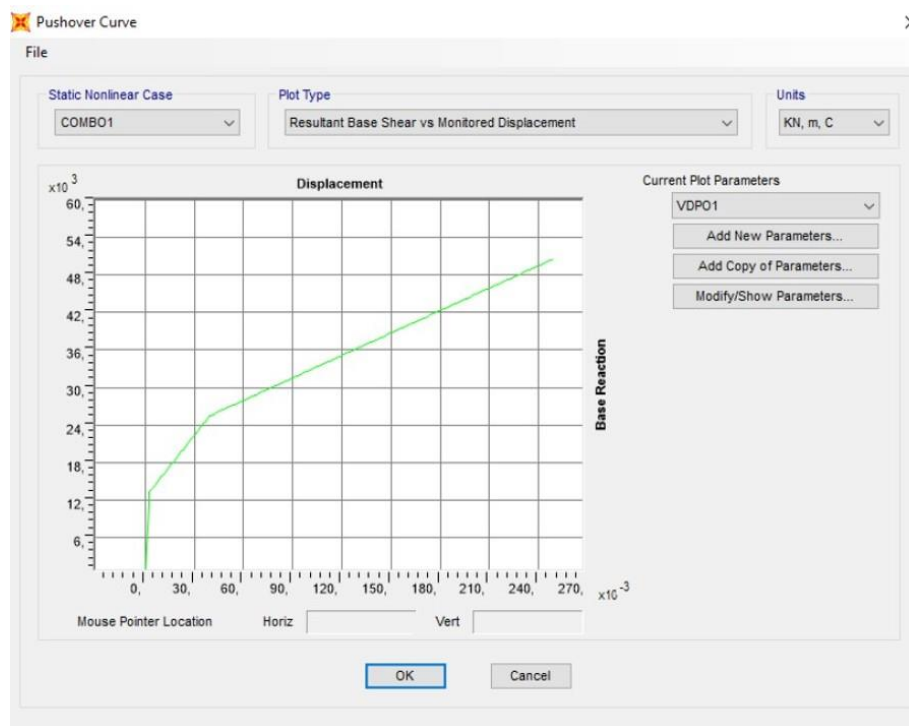


Εικόνα 5.11 Νέα διατομή μετά την ενίσχυση

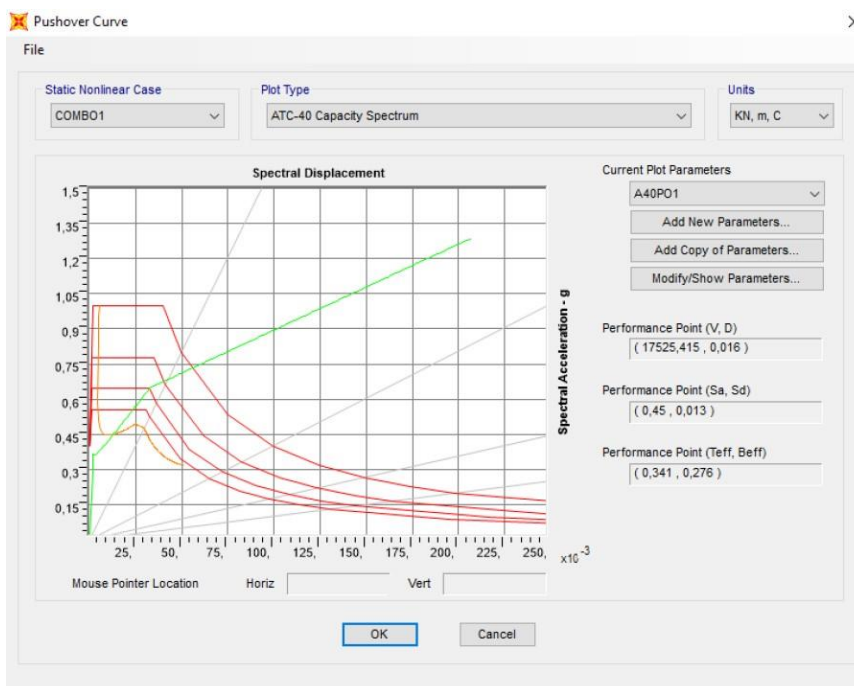
Ως οπλισμός διάτμησης τοποθετούνται ράβδοι διαμέτρου 10 mm ανά 8 εκατοστά ($\Phi 10/8$) για αύξηση της πλαστιμότητας. Καλύπτονται οι διατάξεις του Ευρωκώδικα που ορίζουν ελάχιστη διάμετρο ράβδου 6 mm ή $db/4$ και οι απαιτήσεις για ικανοτικό σχεδιασμό έναντι τέμνουσας, με μηχανισμό αστοχίας του υποστρώματος πρώτα σε κάμψη και στη συνέχεια σε τέμνουσα.

5.9 Αποτελέσματα ενίσχυσης

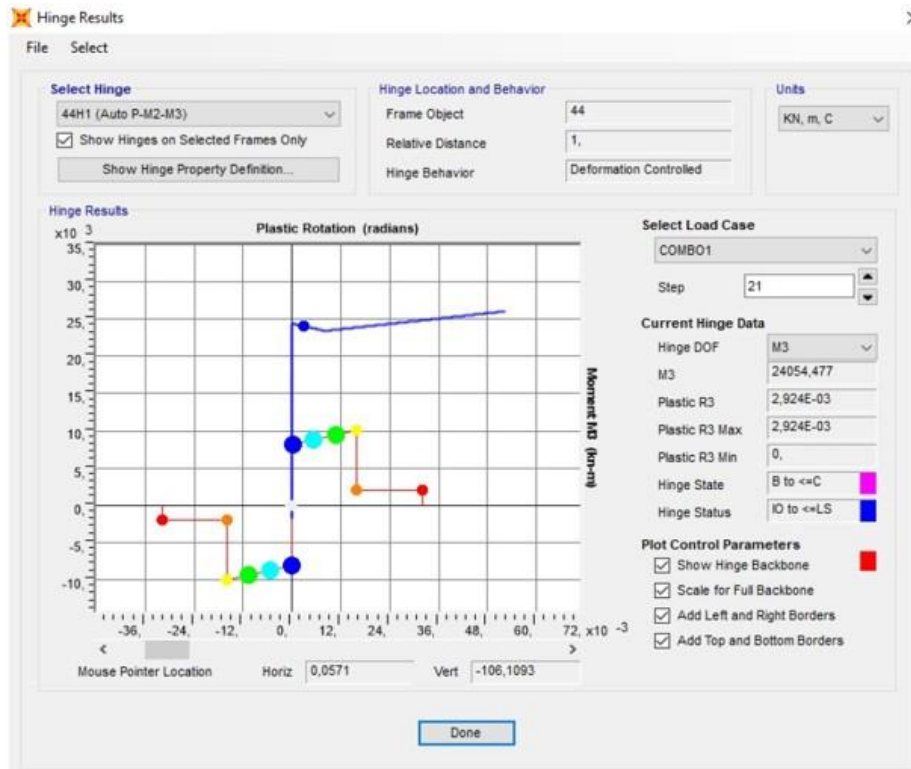
Ακολούθως παρουσιάζεται η νέα καμπύλη αντίστασης του φορέα για τα ενισχυμένα μέλη του.



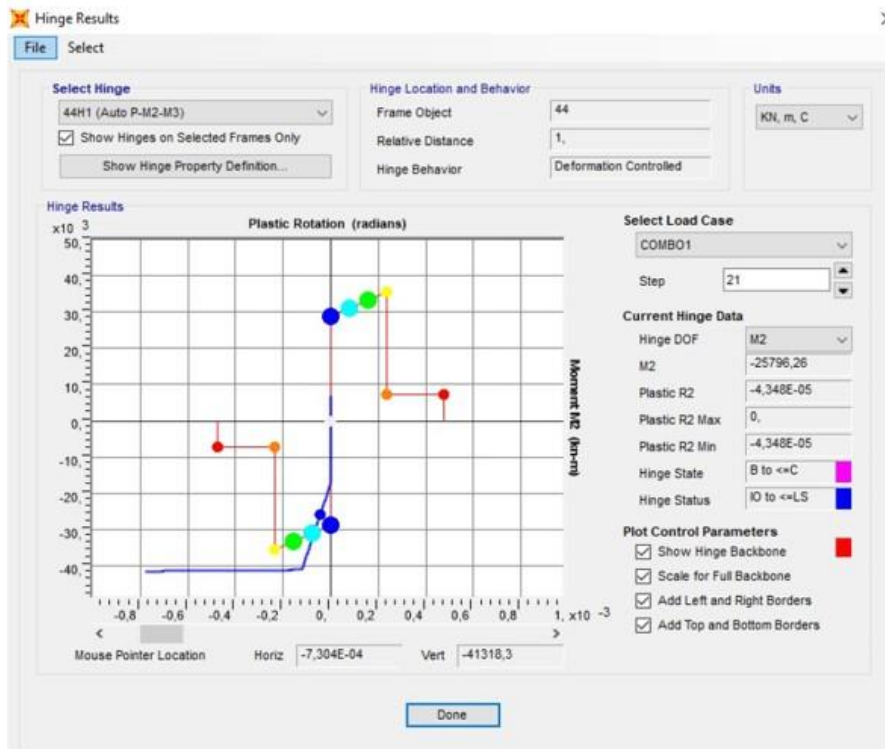
Εικόνα 5.12 Νέα καμπύλη αντίστασης φορέα



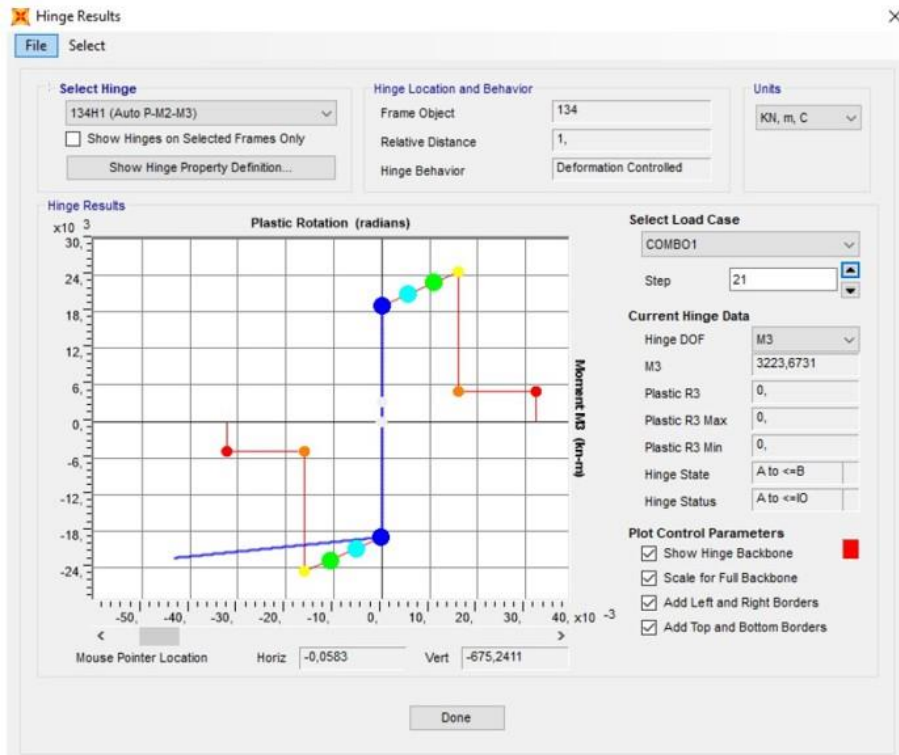
Εικόνα 5.13 Εύρεση σημείου επιτελεστικότητας



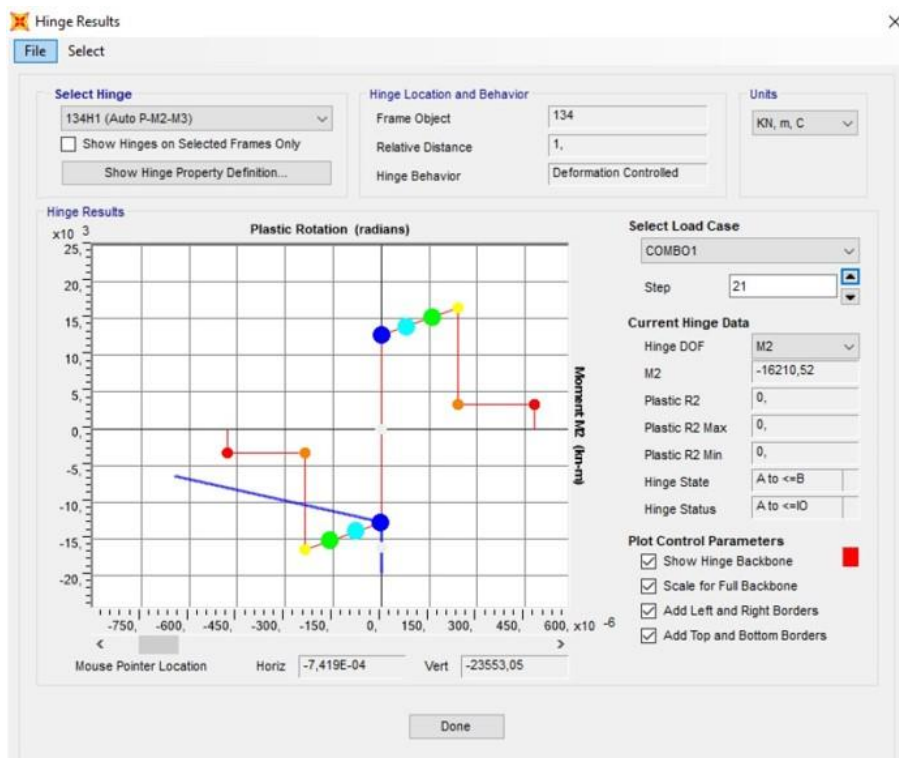
Εικόνα 5.14 Διάγραμμα $M_3 - \theta$ κόμβου 44



Εικόνα 5.15 Διάγραμμα $M_2 - \theta$ κόμβου 44



Εικόνα 5.16 Διάγραμμα $M_3 - \theta$ κόμβου 134



Εικόνα 5.17 Διάγραμμα $M_2 - \theta$ κόμβου 134

6 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία η γέφυρα μελετήθηκε με σκοπό την αποτίμηση της συμπεριφοράς της έναντι σεισμικού φορτίου. Από τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων συμπεραίνονται τα εξής:

- Ο φορέας δεν παρουσιάζει σημαντικές βλάβες.
- Για τα πιθανά ενδεχόμενα της όπλισης της γέφυρας που μελετήθηκαν, οι περισσότερες πλαστικές αρθρώσεις ικανοποιούν τη στάθμη επιτελεστικότητας « Προστασία Ζωής».
- Έγινε ενίσχυση των πασσάλων σε βάθος δύο μέτρων με χρήση μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος καθώς ορισμένοι ξεπερνούν τη στάθμη « Οιονεί κατάρρευση». Από την επέμβαση επιτεύχθηκε αύξηση της αντοχής των στοιχείων του φέροντος οργανισμού και της δυσκαμψίας της κατασκευής συνολικά.
- Για την ενίσχυση δεν προτιμήθηκε η χρήση σύνθετων υλικών λόγω μεγάλου κόστους.
- Η ποσότητα του οπλισμού των βάθρων έχει κομβική σημασία για τη συμπεριφορά της κατασκευής έναντι σεισμού και η ελάττωσή της οδηγεί σε όλο και μεγαλύτερες παραμορφώσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. European Standard **EN 1990:2001** Eurocode 0: Basis of Structural Design, Brussels
2. European Standard **EN 1991** – Climatic actions & Elaboration of maps for climatic actions in Greece
3. European Standard **EN 1991-1-1:2001** Eurocode 1: Action on Structures, Part 1.1: General Actions- Densities, self-weight, imposed loads for buildings, Brussels
4. European Standard **EN 1991-2:2002** Eurocode 1: Action on structures, Part 2: Traffic Loads on Bridges, Brussels
5. European Standard **EN 1991-1-5:2003** Eurocode 1: Action on Structures, Part 1.5: Thermal Actions, Brussels
6. European Standard **EN 1992-1-1:2004** Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings, Brussels
7. Σημειώσεις για τη χρήση των ευρωκωδίκων EN 1990 : Βάσεις Σχεδιασμού των Φερουσών Κατασκευών EN1991: Δράσεις επί των κατασκευών
8. Βάγιας Ι., Ηλιόπουλος Α., Θανόπουλος Π. (2016), «Σχεδιασμός συμμίκτων γεφυρών από χάλυβα και οπλισμένο σκυρόδεμα», Εκδόσεις Κλειδάριθμος
9. Ιωάννης Α. Τέγος (2007), «Ολόσωμες γέφυρες», Εκδόσεις Γ. Δεδούση
10. Ο.Α.Σ.Π., 2001, «Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΚΩΣ 2000)»
11. Ψυχάρης Ι., «Αντισεισμικός Σχεδιασμός Γεφυρών», Σημειώσεις μαθήματος «Ειδικά Θέματα Αντισεισμικής Τεχνολογίας», Αθήνα, 2016
12. Ψυχάρης Ι. «Σημειώσεις Αντισεισμικής Τεχνολογίας», Αθήνα, 2015
13. Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών - Μέρος 3: Αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας κτιρίων και επεμβάσεις , ΕΛΟΤ EN 1998-3
14. Εθνικό Προσάρτημα στο ΕΛΟΤ EN **1998-3:2005** Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών - Μέρος 3: Αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας κτιρίων και επεμβάσεις, ΕΛΟΤ **EN 1998-3:2005/ NA**
15. Ο.Α.Σ.Π., ΚΑΝ.ΕΠΕ. (2013), Κανονισμός Επεμβάσεων, Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, 1η Αναθεωρημένη Έκδοση Ιούλιος 2013
16. Τροποποίηση κανονισμών που αφορούν σε ειδικές περιπτώσεις επεμβάσεων σε υπάρχοντα κτίρια, ΦΕΚ Β' 350/17-02-16
17. Αποστολία Αναστασία Β. (2017), «Σχεδιασμός σύμμικτης οδικής γέφυρας και διερεύνηση εναλλακτικών συστημάτων σεισμικής μόνωσης», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
18. Παναγιώτης Τ. (2015), «Σχεδιασμός καλωδιωτής πεζογέφυρας επί της λεωφόρου Ποσειδώνος», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
19. «Ενίσχυση δομικών μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα και φέρουσα τοιχοποιία με ινοπλισμένα πολυμερή », Χιώτης Δημήτριος , Μεταπτυχιακή εργασία, Αθήνα 2012

20. «Έλεγχος επάρκειας και ενίσχυση σχολικού κτιρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα», Κοκκινάκος Δημήτριος, Μεταπτυχιακή εργασία, Αθήνα 2011
21. «Αποτίμηση και ενίσχυση υφιστάμενου κτιρίου βάσει ΚΑΝ.ΕΠΕ.», Μητρολιού Σοφία, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Θεσσαλονίκη 2015.
22. . «Έλεγχος Υφιστάμενων Κατασκευών σύμφωνα με τον νέο Κανονισμό Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.)», Παπαχρηστίδης Αριστείδης, Βαδαλούκας Γεώργιος, Σεμινάριο ΚΑΝ.ΕΠΕ., Χαλκίδα, Δεκέμβριος 2009.

