

# ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΕΛΩΝ ΑΠΟ ΓΩΝΙΑΚΑ ΨΥΧΡΗΣ ΕΛΑΣΗΣ ΜΕ ΚΟΧΛΙΩΣΗ ΣΤΟ ΕΝΑ ΣΚΕΛΟΣ ΤΟΥΣ

**Ιωάννης Γ. Ραυτογιάννης**  
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Ζωγράφου 15780  
e-mail : [rafto@central.ntua.gr](mailto:rafto@central.ntua.gr)

## 1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι εν ψυχρώ διαμορφωμένες χαλύβδινες διατομές KL σε συνδυασμό με αντίστοιχες πρότυπες χρησιμοποιούνται εκτενώς ως μέλη σε πύργους μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας δικτυωτού τύπου. Η σύνδεση των μελών αυτών με γειτονικά γίνεται μέσω κοχλίωσης στο ένα σκέλος. Στην εργασία αυτή διερευνάται η συμπεριφορά μελών KL ψυχρής έλασης υπό εφελκυστικά και θλιπτικά φορτία μέσω αριθμητικών μοντέλων. Φαινόμενα αστάθειας όπως στρέβλωση και λυγισμός λόγω έκκεντρης φόρτισης μπορούν να μειώσουν σημαντικά τη φέρουσα ικανότητα των μελών αυτών. Παρουσιάζονται αποτελέσματα από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων όσον αφορά στην επίδραση των οπών στην εφελκυστική και θλιπτική αντοχή των μελών. Τα αριθμητικά μοντέλα που υιοθετούνται στην ανάλυση αυτή ενσωματώνουν τη χρήση τρισδιάστατων στοιχείων που προσομοιώνουν το μέλος και τον κοχλία σύνδεσης σε συνδυασμό με μη-γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας. Διερευνήθηκαν διάφορες περιπτώσεις διατομών και μήκη μελών ενώ θεωρήθηκε σταθερή η διάμετρος οπής και η απόσταση από το άκρο του μέλους. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν την ικανότητα των αριθμητικών μοντέλων να προβλέψουν τους τρόπους και τα αντίστοιχα φορτία αστοχίας σε σύγκριση με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 - Μέρος 1.3. Τέλος, παρουσιάζονται συστάσεις σχετικά με τη βελτίωση των κανονιστικών διατάξεων που απεικονίζουν τα συμπεράσματα από αυτήν την μελέτη.

## 2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην εργασία αυτή διερευνάται η συμπεριφορά μελών από διατομή γωνιακού KL ψυχρής έλασης υπό εφελκυστικά και θλιπτικά φορτία μέσω αριθμητικών μοντέλων.

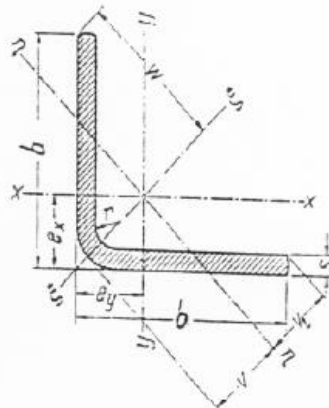
Τα μέλη ψυχρής έλασης που εξετάζονται είναι από γωνιακές διατομές υψηλής αντοχής, της σειράς KL. Αυτές οι διατομές είναι κατά βάση λεπτότοιχες, δηλαδή έχουν μεγάλο πλάτος σε σχέση με το πάχος τους. Εξετάζονται εννέα διαφορετικές διατομές γωνιακών, οι οποίες είναι οι ακόλουθες: KL35x35x3, KL40x40x3, KL50x50x3, KL60x60x3, KL41x41x4, KL51x51x4, KL61x61x4, KL71x71x4 και KL81x81x4.

Στις παρακάτω εικόνες (Σχ. 1) φαίνονται δικτυωτοί πυλώνες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, όπου χρησιμοποιούνται μέλη από τέτοιου τύπου διατομές.



Σχήμα 1. Δικτυωτοί πυλώνες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο Σχήμα 2 φαίνεται η διατομή μη-πρότυπων γωνιακών ψυχρής έλασης KL που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.



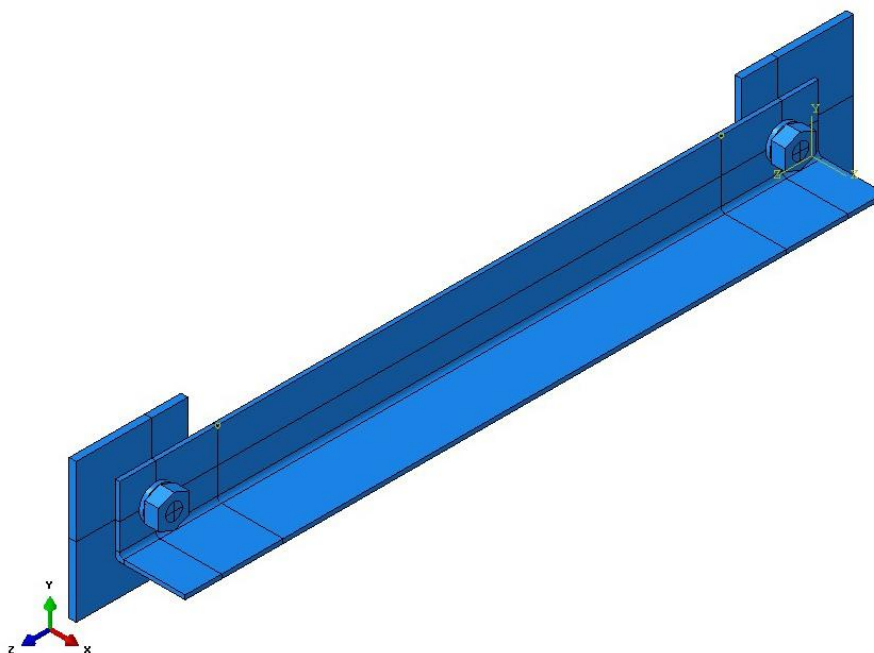
Σχήμα 2. Διατομή γωνιακού KL από ψυχρή έλαση

### 3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ FEM

Τα υπολογιστικά προσομοιώματα των γωνιακών διατομών διαμορφώνονται με τη χρήση του προγράμματος Abaqus 6.10-1, μέσω του οποίου πραγματοποιούνται μη γραμμικές αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Το υπολογιστικό προσομοίωμα για καθεμία από τις γωνιακές διατομές αποτελείται από το γωνιακό μέλος στο οποίο υπάρχουν δύο οπές (μια οπή στο δεξί και μια στο αριστερό του άκρο) και δύο πλάκες με μια οπή η καθεμία, οι οποίες συνδέονται με το γωνιακό μέλος μέσω κοχλιών (Σχ. 3).

Για την περίπτωση που το προσομοίωμα υποβάλλεται σε εφελκυσμό το συνολικό μήκος του γωνιακού μέλους είναι  $L=0.50\text{m}$ , ενώ για την περίπτωση που το προσομοίωμα υποβάλλεται σε θλίψη είναι  $L=1.00\text{m}$ . Οι οπές απέχουν από το αριστερό και δεξί άκρο του γωνιακού απόσταση ίση με  $2d_0$  (όπου  $d_0$  η διάμετρος της οπής που αντιστοιχεί στο εκάστοτε γωνιακό). Το κέντρο των οπών βρίσκεται στο μέσο του ύψους των γωνιακών.



Σχήμα 3. Υπολογιστικό προσομοίωμα στο πρόγραμμα Abaqus

Η διατομή του γωνιακού προσομοιώνεται λεπτομερώς καθώς σχεδιάζονται και οι στρογγυλεμένες γωνίες της διατομής με βάση τις ακτίνες προσαρμογής.

Οι πλάκες (ελάσματα στήριξης) που διαμορφώνουν το προσομοίωμα επιλέγονται να έχουν ύψος ίσο με το διπλάσιο ύψος του αντίστοιχου γωνιακού ( $h_{πλ}=2h$ ), πάχος ίσο με το πάχος του αντίστοιχου γωνιακού αυξημένο κατά 2mm ( $t_{πλ}=t+2$ ) και πλάτος περίπου ίσο με  $6d_0$ . Η επιλογή των διαστάσεων της πλάκας γίνεται με κριτήριο έτσι ώστε να προηγηθεί η αστοχία του γωνιακού της αστοχίας της πλάκας.

Στο υπολογιστικό προσομοίωμα έχουν επίσης προσομοιωθεί ο κοχλίας που αποτελείται από τον κορμό και την κεφαλή καθώς και τα εξαρτήματά του, τα οποία είναι το περικόχλιο και οι δακτύλιοι. Οι κοχλίες που συνδέουν το γωνιακό με τις πλάκες είναι M12 για τις διατομές KL35x35x3, KL40x40x3, KL50x50x3, KL60x60x3, KL41x41x4, KL51x51x4 και M20 για τις διατομές KL61x61x4, KL71x71x4 και KL81x81x4. Η ανοχή για τους κοχλίες M12 είναι 1mm και η ανοχή για τους κοχλίες M20 είναι 2mm. Οι διαστάσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί για τον κοχλία και τα εξαρτήματά του είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές του DIN18800.

Η κεφαλή του κοχλία είναι εξαγωνική. Για κοχλίες M12 η κεφαλή έχει πάχος  $t=8\text{mm}$ , πλάτος  $s=22\text{mm}$  και μέγιστο ύψος  $e=23,91\text{mm}$ . Αντίστοιχα για κοχλίες M20 η κεφαλή έχει πάχος  $t=13\text{mm}$ , πλάτος  $s=32\text{mm}$  και μέγιστο ύψος  $e=35,03\text{mm}$ . Ο κορμός έχει κυκλική διατομή διαμέτρου  $d=12\text{mm}$  για κοχλίες M12, ενώ για τους κοχλίες M20 η διάμετρος είναι  $d=20\text{mm}$ . Το περικόχλιο είναι εξαγωνικό. Για κοχλίες M12 το περικόχλιο έχει πάχος  $t=10\text{mm}$ , πλάτος  $s=22\text{mm}$ , μέγιστο ύψος  $e=23,91\text{mm}$  και διάμετρο οπής  $R=12\text{mm}$ . Αντίστοιχα για κοχλίες M20 το περικόχλιο έχει πάχος  $t=16\text{mm}$ , πλάτος  $s=32\text{mm}$ , μέγιστο ύψος  $e=35,03\text{mm}$  και διάμετρο οπής  $R=20\text{mm}$ . Οι δακτύλιοι παρεμβάλλονται μεταξύ του περικοχλίου και των ελασμάτων και μεταξύ των ελασμάτων και της κεφαλής του κοχλία. Για τους κοχλίες M12 ο δακτύλιος έχει πάχος  $t=3\text{mm}$ , εξωτερική διάμετρο  $D_{εξ}=24\text{mm}$  και εσωτερική διάμετρο  $D_{εσ}=13\text{mm}$ . Αντίστοιχα για τους κοχλίες M20 ο δακτύλιος έχει πάχος  $t=4\text{mm}$ , εξωτερική διάμετρο  $D_{εξ}=37\text{mm}$  και εσωτερική διάμετρο  $D_{εσ}=22\text{mm}$ .

Για την προσομοίωση χρησιμοποιούνται τρισδιάστατα παραμορφώσιμα στερεά στοιχεία (τύπου 3D-Deformable Solid Extrusion).

Ο χάλυβας των ελασμάτων (των πλακών και των γωνιακών) είναι ποιότητας S355 με όριο διαρροής  $f_y=355\text{MPa}$  και αντοχή θραύσης  $f_u=510\text{MPa}$ . Αντίστοιχα ο χάλυβας των κοχλιών είναι ποιότητας 8.8 με όριο διαρροής  $f_{yb}=640\text{MPa}$  και εφελκυστική αντοχή  $f_{ub}=800\text{MPa}$ . Το μέτρο ελαστικότητας λαμβάνεται  $E=210000\text{MPa}$ , το μέτρο διάτμησης  $G=81000\text{MPa}$  και ο λόγος του Poisson  $\nu=0.3$ .

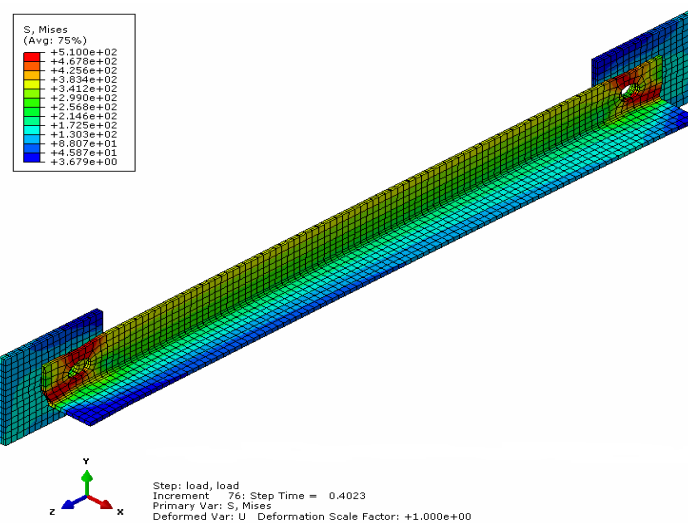
Η επιβολή του εφελκυσμού στο υπολογιστικό προσομοίωμα γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο: Πακτώνεται το αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας και επιβάλλεται μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z και με κατεύθυνση τον αρνητικό άξονα z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας του προσομοιώματος. Για τη σωστή λειτουργία του προσομοιώματος δεσμεύονται επιπλέον οι μετακινήσεις κατά x και y του δεξιού και του αριστερού άκρου του γωνιακού, της κάτω πλευράς της αριστερής πλάκας (στην οποία επιβάλλεται η μετακίνηση) και των άκρων των κοχλιών. Η επιβολή της θλίψης στο υπολογιστικό ομοίωμα γίνεται με τον ίδιο τρόπο με τη διαφορά ότι επιβάλλεται μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z και με κατεύθυνση τον θετικό άξονα z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας του προσομοιώματος.

#### 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ – ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΜΕ EC3

Εξετάζονται μέλη από διατομές γωνιακού ψυχρής έλασης τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη. Στο Σχήμα 4 φαίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για μια εφελκυσόμενη ράβδο διατομής KL 35.35.3



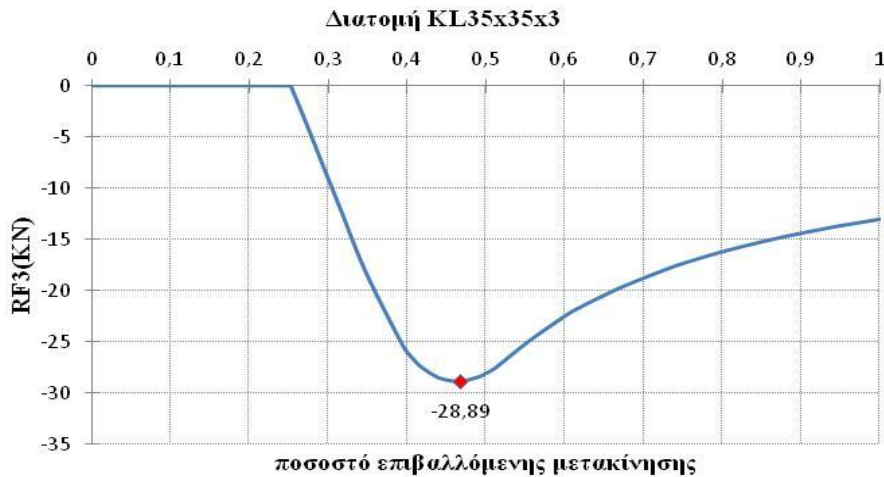
Σχήμα 4. Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης εφελκυσόμενης ράβδου διατομής KL 35.35.3



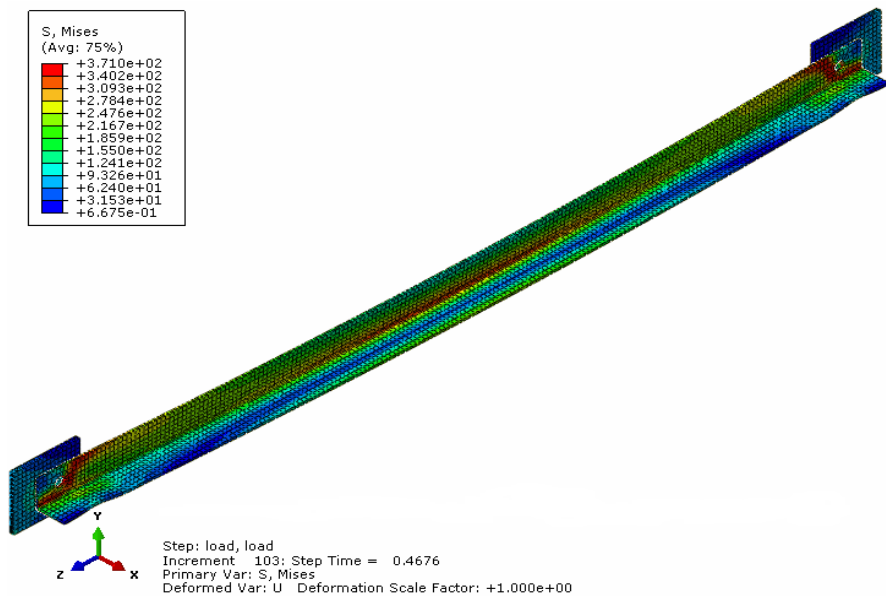
Σχήμα 5. Παραμορφωμένη εικόνα και κατανομή τάσεων von-Mises

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 5 φαίνεται η παραμορφωμένη εικόνα του μοντέλου και η κατανομή των τάσεων von-Mises για την ίδια ράβδο.

Στο Σχήμα 6 φαίνεται η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για μια θλιβόμενη ράβδο διατομής KL 35.35.3 ενώ στο Σχήμα 7 φαίνεται η παραμορφωμένη εικόνα του μοντέλου και η κατανομή των τάσεων von-Mises για την ίδια ράβδο.



Σχήμα 6. Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης θλιβόμενης ράβδου διατομής KL 35.35.3



Σχήμα 7. Παραμορφωμένη εικόνα και κατανομή τάσεων von-Mises

Η διαδικασία προσομοίωσης επαναλήφθηκε για μια σειρά ράβδων διατομής γωνιακού ψυχρής έλασης, οι οποίες αναλύθηκαν υπό εφελκυστικό και υπό θλιπτικό φορτίο. Στις περιπτώσεις θλιπτικού φορτίου δεν χρησιμοποιήθηκαν αρχικές ατέλειες (initial bow), ενώ διαπιστώθηκε ότι προηγείται ο καμπτικός λυγισμός της αστοχίας υλικού.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων συνοψίζονται στους Πίνακες 1 και 2 όπου γίνεται και σύγκριση με τις αντοχές που προκύπτουν με βάση τις διατάξεις του EC3 – Μέρος 1.3. Συγκεκριμένα, στον Πίνακα 1 φαίνονται οι αντοχές μέλους και σύνδεσης κατά EC3-Μέρος 1.3, παρ. 6.1.2 (όπου ετέθη  $f_{ya}=f_{yb}$ ) και παρ. 8.3-Πίνακας 8.4 καθώς και κατά FEM. Στον Πίνακα 2 φαίνονται οι θλιπτικές αντοχές μελών κατά FEM και σύμφωνα με τις

διατάξεις του EC3 – Μέρος 1.3. Έγινε επίσης σύγκριση και βάσει των διατάξεων του EC3 – Μέρος 1.1 διότι ορισμένες διατομές έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τις αντίστοιχες πρότυπες. Στους υπολογισμούς των αντοχών κατά EC3 ετέθησαν συντελεστές υλικού ίσοι με τη μονάδα ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα με αυτά της FEM.

Πίνακας 1. Εφελκυστική αντοχή μελών από γωνιακά ψυχρής έλασης

| Διατομή γωνιακού     | $N_{u,Rd}$ (kN) | $N_{pl,Rd}$ (kN) | $F_{v,Rd}$ (kN) | $F_{b,Rd}$ (kN) | $N_{Rd}$ (kN) | Εφελκ. Αντοχή FEM (kN) | Λόγος FEM/ $N_{Rd}$ |
|----------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|---------------|------------------------|---------------------|
| KL35x35x3            | 29.07           | 69.23            | 54.26           | 21.37           | 21.37         | 45.04                  | 2.11                |
| KL40x40x3            | 41.31           | 80.23            | 54.26           | 30.60           | 30.60         | 49.70                  | 1.62                |
| KL40x40x3<br>S355 MC | 34.83           | 80.23            | 54.26           | 25.80           | 25.80         | 42.40                  | 1.64                |
| KL50x50x3            | 56.61           | 101.18           | 54.26           | 30.60           | 30.60         | 50.31                  | 1.64                |
| KL60x60x3            | 71.91           | 122.48           | 54.26           | 30.60           | 30.60         | 51.40                  | 1.68                |
| KL41x41x4            | 57.12           | 106.50           | 54.26           | 40.80           | 40.80         | 66.98                  | 1.64                |
| KL51x51x4            | 77.52           | 134.90           | 54.26           | 40.80           | 40.80         | 67.00                  | 1.64                |
| KL61x61x4            | 79.56           | 163.30           | 150.72          | 59.35           | 59.35         | 104.67                 | 1.76                |
| KL71x71x4            | 99.96           | 191.70           | 150.72          | 68.00           | 68.00         | 108.67                 | 1.60                |
| KL81x81x4            | 120.36          | 220.10           | 150.72          | 68.00           | 68.00         | 111.43                 | 1.64                |

Πίνακας 2. Θλιπτική αντοχή μελών από γωνιακά ψυχρής έλασης

| Διατομή γωνιακού | Θλιπτική αντοχή FEM (kN) | Θλιπτική αντοχή EC3-1.1 (μόνο θλίψη) $N_{b,Rd}$ (KN) | Θλιπτική αντοχή EC3-1.3 (θλίψη & κάμψη) $N_{sd}$ (KN) | Θλιπτική αντοχή EC3-1.1 (θλίψη & κάμψη) $N_{sd}$ (KN) |
|------------------|--------------------------|--|---|---|
| KL35x35x3        | 28.89                    | 15.04  | 9.01  | 12.05   |
| KL40x40x3        | 33.81                    | 21.62  | 12.47   | 16.18   |
| KL50x50x3        | 39.49                    | 36.50  | 16.80   | 20.87   |
| KL60x60x3        | 42.54                    | 37.81  | 20.54   | 24.25   |
| KL41x41x4        | 51.95                    | 31.12  | 21.03   | 22.65   |
| KL51x51x4        | 55.64                    | 52.04  | 27.56   | 34.15   |
| KL61x61x4        | 77.61                    | 73.69  | 33.75   | 40.15   |
| KL71x71x4        | 81.41                    | 71.64  | 38.17   | 44.02   |
| KL81x81x4        | 83.33                    | 68.57  | 42.10   | 47.51   |

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από τις ανωτέρω αναλύσεις είναι τα ακόλουθα:

- Διαπιστώνεται ότι οι διατάξεις του EC3 για τον υπολογισμό της αντοχής των λεπτοτοιχών γωνιακών σε εφελκυσμό και θλίψη είναι συντηρητικές, καθώς οι αντοχές που προέκυψαν σύμφωνα με τον EC3 είναι αρκετά μικρότερες από τις αντοχές που προέκυψαν από τις αναλύσεις FEM. Πιο συγκεκριμένα:

- Η εφελκυστική αντοχή των γωνιακών που προέκυψε στο πρόγραμμα Abaqus είναι 1.60-2.11 φορές μεγαλύτερη από αυτή που προέκυψε σύμφωνα με τον EC3.
- Η θλιπτική αντοχή των γωνιακών που προέκυψε στο πρόγραμμα Abaqus είναι 1.05-1.92 φορές μεγαλύτερη από αυτή που προέκυψε σύμφωνα με τον EC3 αγνοώντας τις ροπές λόγω έκκεντρης θλίψης και τις παρασιτικές ροπές.
- Η θλιπτική αντοχή των γωνιακών που προέκυψε στο πρόγραμμα Abaqus είναι 2.02-3.21 φορές μεγαλύτερη από αυτή που προέκυψε σύμφωνα με τον EC3 Μέρος 1-3 λαμβάνοντας υπόψη τις ροπές λόγω έκκεντρης θλίψης και τις παρασιτικές ροπές.
- Η θλιπτική αντοχή των γωνιακών που προέκυψε στο πρόγραμμα Abaqus είναι 1.63-2.40 φορές μεγαλύτερη από αυτή που προέκυψε σύμφωνα με τον EC3 Μέρος 1-1 λαμβάνοντας υπόψη τις ροπές λόγω έκκεντρης θλίψης και τις παρασιτικές ροπές.
- Διαπιστώνεται ότι για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής των λεπτοτοιχών γωνιακών σύμφωνα με τον EC3 μπορούν να αγνοηθούν οι ροπές λόγω έκκεντρης θλίψης και οι παρασιτικές ροπές, καθώς η θεώρηση καθαρής θλίψης έναντι της θεώρησης συνδυασμού κάμψης και θλίψης, δίνει και πάλι συντηρητικές τιμές αντοχής σε σχέση με τις αντοχές που προέκυψαν από τις αναλύσεις FEM.
- Αποδεικνύεται ότι το κριτήριο με συνδυασμό θλίψης και κάμψης στο Μέρος 1-3 του EC3 είναι πολύ συντηρητικό, ενώ λιγότερο συντηρητικό είναι το αντίστοιχο κριτήριο στο Μέρος 1-1 του EC3.
- Διαπιστώνεται ότι οι διατάξεις του EC3 για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής γωνιακών είναι αυστηρότερες για διατομές με μικρούς λόγους b/t (όπως οι KL35x35x3 και KL41x41x4) καθώς παρουσιάζουν τους μεγαλύτερους λόγους θλιπτικής αντοχής FEM προς θλιπτική αντοχή EC3.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Βάγιας Ι, Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Ι., «Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα, με βάση τα τελικά κείμενα των Ευρωκωδίκων», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2005
- [2] Βάγιας Ι, «Σιδηρές Κατασκευές, Ανάλυση και διαστασιολόγηση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2003
- [3] Βάγιας Ι, Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Ι., «Σιδηρές Κατασκευές, Παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, Τόμος Ι» Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2005
- [4] Ευρωκώδικας 3: «Σχεδιασμός Κατασκευών από χάλυβα», Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια, CEN, EN 1993-1-1, 2005
- [5] Ευρωκώδικας 3: «Σχεδιασμός Κατασκευών από χάλυβα», Μέρος 1-3: Γενικοί κανόνες- Συμπληρωματικοί κανόνες για λεπτότοιχα μέλη με έλαση εν ψυχρώ και επικαλύψεις, CEN, ENV 1993-1-3, 1996
- [6] Ευρωκώδικας 3: «Σχεδιασμός Κατασκευών από χάλυβα», Μέρος 1-5: Μέλη από επίπεδα ελάσματα, CEN, EN 1993-1-5, 2006
- [7] Ευρωκώδικας 3: «Σχεδιασμός Κατασκευών από χάλυβα», Μέρος 1-8: Σχεδιασμός κόμβων, CEN, EN 1993-1-8, 2005
- [8] Μιχάλτσος Γ. «Ελαφρές Μεταλλικές Κατασκευές, Μέθοδοι υπολογισμού», Εκδόσεις Συμεών, 2009
- [9] Μιχάλτσος Γ. «Ελαφρές Μεταλλικές Κατασκευές Θεωρία και Εφαρμογές», Εκδόσεις Συμεών, 2008

# **NUMERICAL SIMULATION OF TENSION AND COMPRESSION SINGLE BOLTED MEMBERS WITH COLD-FORMED L-SECTIONS**

**Ioannis G. Raftoyiannis**

Associate Professor

National Technical University of Athens, Department of Civil Engineering

9 Iroon Polytechniou St., Zografou Campus, Athens 15780

e-mail : [rafto@central.ntua.gr](mailto:rafto@central.ntua.gr)

## **ABSTRACT**

Cold-formed members with L-shaped cross-section are widely used in combination with standard L-sections in power transmission towers. A single bolted connection is designed to connect such members to each other. In this work, the behavior of this type of members under tension and compression is thoroughly investigated. Detailed numerical models utilizing the FEM have been constructed and non-linear analyses have been performed to study the behavior of tension and compression L-section members. A comparison between numerical results and analytical strengths according to the provisions of EC3 for cold-formed members is presented showing that EC3 is very conservative.