

## ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΤΟΧΩΝ ΤΕΓΙΔΩΝ ΨΥΧΡΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΘΕΡΜΗΣ ΕΛΑΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ

Αναστάσιος Σ. Δερβέναγας<sup>a</sup>, Δημήτριος Θ. Παχούμης<sup>b</sup>, Χρήστος Ε. Σοφίας<sup>b</sup>, Χρίστος Ν. Κάλφας<sup>c</sup>

<sup>a</sup> MSc. Πολιτικός Μηχανικός Δ.Π.Θ.

<sup>b</sup> Δρ MSc. Πολιτικός Μηχανικός Δ.Π.Θ.

<sup>c</sup> Καθηγητής Δ.Π.Θ.

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών Δ.Π.Θ.

Ξάνθη, Ελλάδα

e-mail: [msslgroup@civil.duth.gr](mailto:msslgroup@civil.duth.gr)

### 1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη μελέτη τεγίδων από λεπτότοιχες διατομές ψυχρής διαμόρφωσης. Η χρήση των διατομών αυτών ως δομικά στοιχεία, κερδίζει ολοένα και περισσότερο έδαφος στα τεχνικά έργα. Λόγω του χαμηλού τους βάρους καθίστανται εύχρηστες και ενδεχομένως οικονομικότερες σε σχέση με τις εν θερμώ ελατές διατομές. Έτσι μελετάται για την ίδια εντατική κατάσταση, η αντοχή τεγίδων προφίλ μορφής C και Z, για το σχεδιασμό των οποίων έχουν καταστρωθεί προγράμματα Excel σύμφωνα τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3. Ακολουθεί η διαστασιολόγηση τεγίδας από διατομές θερμής έλασης, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον σε χαλύβδινα κτιριακά έργα, με τη βοήθεια του λογισμικού Robot Structural Analysis. Όλες οι τεγίδες διαμορφώνονται με το ίδιο στατικό σύστημα. Κατόπιν γίνεται σύγκριση μεταξύ των διατομών που προέκυψαν, για διαφορετικές τιμές ανοιγμάτων, από άποψη κόστους στοιχείου ανά φάτνωμα.

### 2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα κτίρια από χάλυβα, οι τεγίδες αποτελούν σημαντικό τμήμα του δομικού συστήματος. Ως στοιχεία, εξυπηρετούν βασικές λειτουργίες τόσο για την παραλαβή και μεταβίβαση φορτίων, όσο και για τη συνολική ευστάθεια της κατασκευής. Έτσι οι τεγίδες:

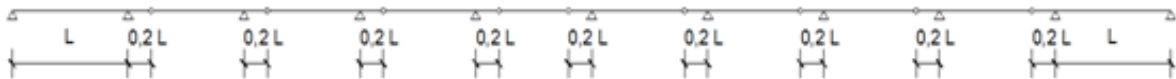
1. παραλαμβάνουν τα κατακόρυφα φορτία από το επιστέγασμα και τα μεταβιβάζουν στα πλαίσια πάνω στα οποία επικάθονται,
2. συμβάλλουν στην εκτός επιπέδου των πλαισίων ευστάθεια του δομήματος,
3. προσφέρουν στο άνω πέλμα των δοκών των πλαισίων (ολόσωμος ή δικτυωτός φορέας) εξασφάλιση έναντι πλευρικού λυγισμού.

Οι διατομές τους που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι υψίκορμες εν θερμώ ελατές διατομές. Τα τελευταία χρόνια όμως, έχει τεθεί σε εφαρμογή η χρήση τυποποιημένων διατομών ψυχρής διαμόρφωσης μορφής C, Z και Σ. Το κύριο πλεονέκτημα των παραπάνω προφίλ είναι το χαμηλό τους βάρος.

Στην παρούσα εργασία γίνεται σύγκριση, από άποψη κόστους, αντοχών διατομών τεγίδων θερμής ελάσεως και διατομών ψυχρής διαμόρφωσης προφίλ C και Z. Η σύγκριση γίνεται για ανοίγματα τεγίδων 4.50 m, 5.00 m, 5.50 m και 6.00 m. Για τη διαστασιολόγηση των λεπτότοιχων διατομών έχουν καταστρωθεί προγράμματα σε φύλλα excel, όπου πραγματοποιείται ο σχεδιασμός των τεγίδων διατομών C και Z, σύμφωνα με τα μέρη 1.1 και 1.3 του EC 3. Για τον υπολογισμό των φορτίων θεωρήθηκε η Ξάνθη ως τόπος κατασκευής, η απόσταση μεταξύ των τεγίδων 1.70 m και η κλίση της στέγης 6.8°.




### 3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΕΓΙΔΩΝ ΑΠΟ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΘΕΡΜΗΣ ΕΛΑΣΕΩΣ

Η διαστασιολόγηση των τεγίδων από εν θερμώ ελατές διατομές πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Robot Structural Analysis. Το συνολικό δομικό σύστημα είναι ισοστατικό και διαμορφώνεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη εκμετάλλευση της διατομής. Δηλαδή, επιδιώκεται οι ροπές και κατά τους δύο άξονες στο άνοιγμα και στη στήριξη να είναι κατ' απόλυτη τιμή σχεδόν ίσες [5]. Προς τούτο, η τεγίδα διαμορφώνεται ως σύστημα δοκού Gerber, με τα ακραία στοιχεία να αποτελούν μονοπροέχουσες δοκούς και στα υπόλοιπα ανοίγματα μήκους L, να τοποθετούνται αρθρώσεις σε μήκος 0,2 L από την πλησιέστερη στήριξη όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1.



Σχ.1: Επίπεδο στατικό σύστημα τεγίδας ως δοκού Gerber.

Οι διατομές θερμής ελάσεως που εξετάζονται για τις τεγίδες, παρατίθενται στον Πιν.1.

IPE	HEA	UPE
		

Πιν.1: Εξεταζόμενες διατομές θερμής ελάσεως.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη διατομή για τεγίδες, είναι η υψίκορμη τύπου IPE. Για λόγους πληρότητας, εξετάζεται η πλατύπελμη τύπου HEA και η τύπου καναλιού σειράς UPE. Σε όλες τις περιπτώσεις διατομών, ο κρίσιμότερος έλεγχος, με βάση τον οποίον προκύπτει το μέγεθος της διατομής, είναι η διαξονική κάμψη υπό πλάγιοστρεπτικό λυγισμό που παρουσιάζεται στην κάτωθι εξίσωση:

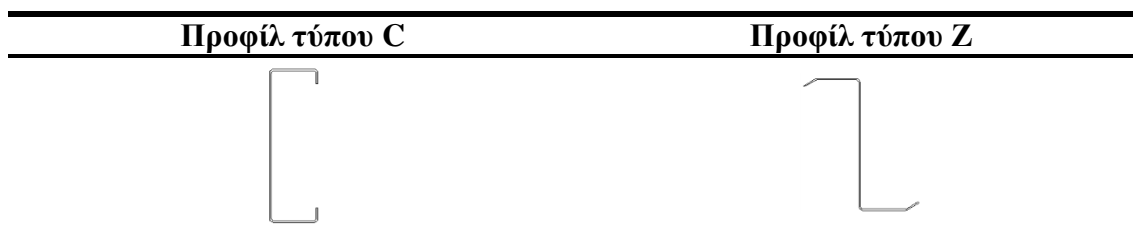
$$\frac{\sigma_{bEd}}{f_{yb}} = \frac{M_{chy, Ed} + \Delta M_{chy, Ed}}{\chi_{LT} M_{yRd} / \gamma_{M1}} + \frac{M_{chz, Ed} + \Delta M_{chz, Ed}}{M_{zRd} / \gamma_{M1}} \leq 1 - \rho_{max} \quad (1)$$

Η μη ικανοποίηση του ανωτέρω ελέγχου δεν οδηγεί απαραίτητα σε αλλαγή της διατομής της τεγίδας. Ο έλεγχος της αντοχής της τεγίδας μετά την τοποθέτηση ελκυστήρων (ντίξεις) στα ανοίγματα, για τη μείωση του πλάγιοστρεπτικού λυγισμού, ενδέχεται τελικά να οδηγήσει σε επάρκεια.

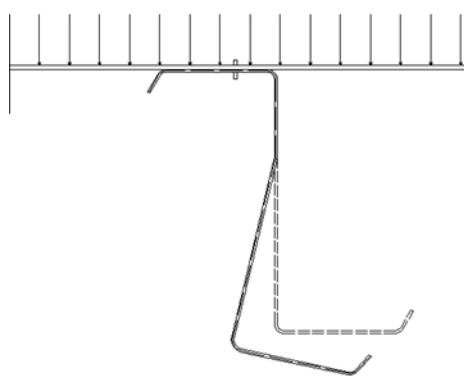
#### 4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΕΓΙΔΩΝ ΑΠΟ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΨΥΧΡΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Λεπτότοιχες διατομές τεγίδων, προφίλ C και Z (πιν. 2), εξετάζονται για τις τιμές των φαινομάτων που αναφέρθηκαν ανωτέρω. Το στατικό σύστημα παραμένει το ίδιο, αυτό που απεικονίζεται στο σχήμα 1, ανεξάρτητα από την τιμή του ανοίγματος. Τα εντατικά μεγέθη υπολογίζονται με τη βοήθεια του λογισμικού Robot Structural Analysis ενώ η τελική διαστασιολόγηση των στοιχείων αυτών πραγματοποιείται σε προγράμματα excel που καταστρώθηκαν για το σκοπό αυτό.

Τα προγράμματα αυτά λαμβάνουν υπ' όψιν ότι οι λεπτότοιχες διατομές λόγω του μικρού τους πάχους κατατάσσονται στην κλάση 4 και ως εκ τούτου θα πρέπει να υπολογιστούν τα ενεργά αδρανειακά και γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά. Επιπλέον, λόγω του μικρού πάχους τους το ελεύθερο πέλμα των στοιχείων αυτών είναι ευαίσθητο έναντι μίας ειδικής μορφής στρεπτικής καταπόνησης, την εγκάρσια κάμψη του ελευθέρου πέλματος, όπως αναφέρεται και στο μέρος 1.3 του EC3. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να συνυπολογιστεί στις σύνθετες καταπονήσεις. Στο σχήμα 2 απεικονίζεται η παραμόρφωση της τεγίδας λόγω εγκάρσιας κάμψης για φορά φορτίου προς τα κάτω.



Πίν.2: Εξεταζόμενες διατομές ψυχρής ελάσεως.



Σχ.2: Εγκάρσια κάμψη ελευθέρου πέλματος υπό φορτία βαρύτητας.

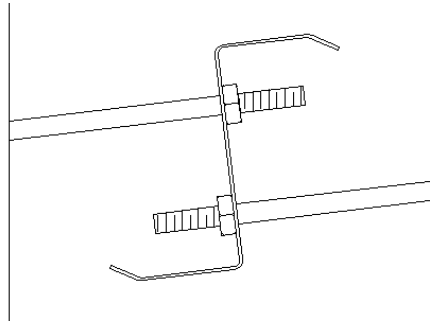
Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, το δυσμενέστερο έλεγχο για αυτής της μορφής τις τεγίδες, για το άνοιγμα αποτελεί η διαξονική κάμψη με πλάγιοστρεπτικό λυγισμό και εγκάρσια κάμψη ελευθέρου πέλματος με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$\left( \frac{\sigma_{bEd}}{f_{yb}} \right) = \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{yRd} / \gamma_{M1}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{zRd} / \gamma_{M1}} + \frac{M_{fzEd}}{M_{fzRd} / \gamma_{M1}} \leq 1 - \rho_{max} \quad (2)$$

Για την περιοχή της στήριξης, στις πλείστες των περιπτώσεων και εξαιτίας του μικρού πάχους κορμού, ο δυσμενέστερος έλεγχος είναι η συνδυασμένη διαξονική κάμψη και συγκεντρωμένη δύναμη, που δίνεται από το μέρος 1.3 του EC3, σύμφωνα με την κάτωθι σχέση:

$$\frac{(M_{Edy} + \Delta M_{Edy})}{M_{yRdcom}} + \frac{(M_{Edz} + \Delta M_{Edz})}{M_{zRdcom}} + \frac{F_{Edz}}{R_{w, Rd}} \leq 1.25 \quad (3)$$

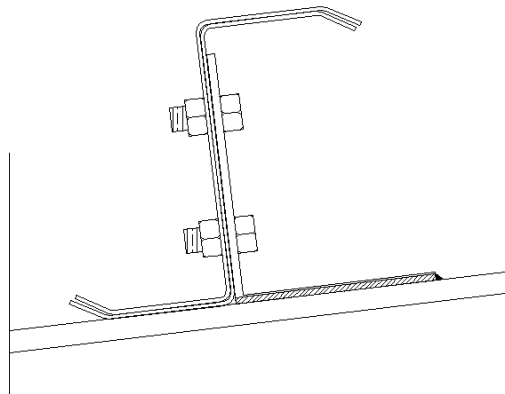
Όπως και στις εν θερμώ ελατές διατομές έτσι και στην προκειμένη περίπτωση, η μη ικανοποίηση του ανωτέρω ελέγχου οδηγεί στην τοποθέτηση ελκυστήρων όπως φαίνεται στο σχήμα 3.



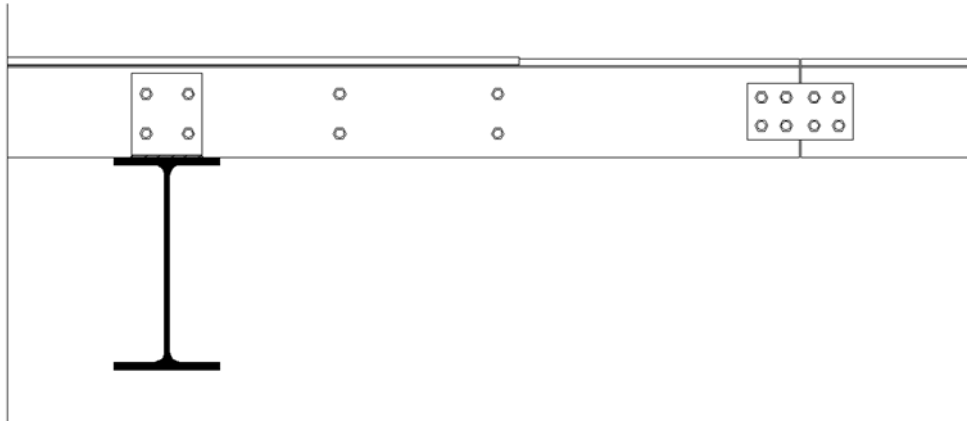
Σχ.3: Εξασφάλιση τεγίδας έναντι πλευρικού λυγισμού με χρήση ελκυστήρων (ντιζών).

Από τις διατομές αυτές, η τύπου C είναι συμμετρική ως προς τον ισχυρό άξονα με τα πέλματα να είναι ίσα. Η διατομή τύπου Z δεν παρουσιάζει συμμετρία ως προς κανέναν άξονα και τα πέλματά της είναι άνισα. Το τελευταίο προσφέρει τη δυνατότητα υπερκάλυψης των στοιχείων στις στηρίξεις, κάτι που δεν μπορεί να υλοποιηθεί με την προαναφερόμενη διατομή C. Με την υπερκάλυψη των στοιχείων στις στηρίξεις επιτυγχάνεται καλύτερη σύνδεση μεταξύ των μελών ενώ ταυτόχρονα διπλασιάζεται η αντοχή στη θέση της στήριξης όπου και γίνεται συνήθως η υπερκάλυψη.

Στο σχήμα 4 απεικονίζεται η σύνδεση της τεγίδας τύπου Z επί του πλαισίου και στο σχήμα 5 η όψη της στήριξης με τη μάτιση της τεγίδας. Η υπερκάλυψη γίνεται σε μήκος 0.1 L εκατέρωθεν του άξονα της στήριξης. Το μήκος αυτό είναι το ελάχιστο απαιτούμενο για να διπλασιαστεί η αντοχή της διατομής [1].



Σχ.4: Λεπτομέρεια στήριξης τεγίδας τύπου Z με υπερκάλυψη.



Σχ.5: Όψη στήριξης με υπερκάλυψη (μάτιση) τειγίδας διατομής Z και διαμόρφωση άρθρωσης.

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Προκειμένου να υπολογιστούν τα τελικά κόστη, πραγματοποιείται διαστασιολόγηση των στοιχείων με βάση τα όσα αναφέρθηκαν ανωτέρω, υπολογίζονται τα βάρη των στοιχείων με τις διαφορετικές διατομές και στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός του συνολικού κόστους των στοιχείων με τις τιμές ανά κιλό όπως είναι διαμορφωμένες την τρέχουσα περίοδο. Υπολογίζεται το κόστος σε ενδιάμεσο φάτνωμα. Επισημαίνεται ότι λαμβάνεται υπ' όψιν και το πρόσθετο βάρος λόγω της υπερκάλυψης στην περίπτωση της διατομής τύπου Z, καθώς και το κόστος του ελκυστήρα στην περίπτωση που απαιτείται η τοποθέτησή του. Στον πιν. 3 παρατίθενται οι τιμές των στοιχείων ανά μονάδα βάρους.

<b>Μήκος ελκυστήρα (m) :</b>	1.80
<b>Εμβαδό διατομής ελκυστήρα <math>\Phi 12</math> (cm<sup>2</sup>) :</b>	1.13
<b>Κόστος ελκυστήρα ανά κιλό (€ / kg) :</b>	1.00
<b>Κόστος εν θερμώ ελατών διατομών (€ / kg) :</b>	0.72
<b>Κόστος διατομών ψυχρής διαμόρφωσης (€ / kg) :</b>	0.94

Πίν.3: Κόστος στοιχείων ανά μονάδα βάρους.

Στους κάτωθι πίνακες παρουσιάζονται τα κόστη των διατομών που αντιστοιχούν σε κάθε άνοιγμα και προκύπτει το γράφημα κόστους – μήκους φαντώματος, που απεικονίζεται στο σχήμα 6. Από τους πίνακες γίνεται αντιληπτό ότι τόσο η πλατύπελμη διατομή τύπου Η όσο και η διατομή σειράς UPE, ανεβάζουν το κόστος κατά πολύ, οπότε σε κάθε περίπτωση καθίστανται ασύμφορες. Αντίθετα για διαφορετικές τιμές ανοιγμάτων, όπως άλλωστε φαίνεται και από το σχήμα 6, συμφέρουσες αποδεικνύονται τόσο οι διατομές ψυχρής διαμόρφωσης, όσο και η διατομή τύπου IPE. Τονίζεται ότι με τη χρήση διατομής προφίλ Z, λόγω της υπερκάλυψης στη στήριξη, αφενός εξοικονομείται βάρος και αφετέρου για μήκη φαντωμάτων έως 6.00 m, ελαχιστοποιείται το κόστος.

Η διατομή τύπου C, κυρίως εξαιτίας της αδυναμίας υπερκάλυψης, έχει υψηλότερο κόστος και η τιμή της δεν είναι σταθερή σε σχέση με τη διατομή IPE. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι για φαντώματα έως και 5.00 m επαρκεί η διατομή IPE100 ενώ για μεγαλύτερα απαιτείται αύξηση του μεγέθους της. Η αύξηση κατά μια τάξη μεγέθους οδηγεί σε αύξηση του βάρους ανά μήκος της διατομής IPE, ενώ το μέγεθος της διατομής τύπου C, για μήκος

φατνώματος έως 5.50 m παραμένει σταθερό. Πρέπει βεβαίως να επισημανθεί ότι η δυσκολία υλοποίησης σύνδεσης σε διατομές IPE100 οδηγεί αρκετούς μελετητές στη χρήση I-PE120, με αποτέλεσμα η διατομή τύπου C ενδεχομένως να καθίσταται συμφέρουσα για φατνώματα έως 5.50 m. Για μεγαλύτερες τιμές φατνωμάτων η τυποποιημένη C δεν επαρκεί και απαιτείται αύξηση των διαστάσεων των πελμάτων και κατά συνέπεια του βάρους ανά μέτρο, οπότε η διατομή IPE είναι φθηνότερη, ακόμα και από τη διατομή Z.

Διατομή	Ντίζες στο άνοιγμα	Βάρος (kg)	Συνολικό κόστος (€)
HEA 100	0	75.03	54.02
UPE 100	0	44.16	31.79
IPE 100	0	36.46	26.25
<b>Z 140-2</b>	1	23.92	<b>24.08</b>
C 210-2	2	25.75	27.40

Πίν.4: Αποτελέσματα για ενδιάμεσο φάτνωμα 4.50 m.

Διατομή	Ντίζες στο άνοιγμα	Βάρος (kg)	Συνολικό κόστος (€)
HEA 100	0	83.37	60.02
UPE 100	2	49.06	38.52
IPE 100	2	40.51	32.36
<b>Z 180-2</b>	1	31.60	<b>31.30</b>
C 210-2	2	35.76	36.80

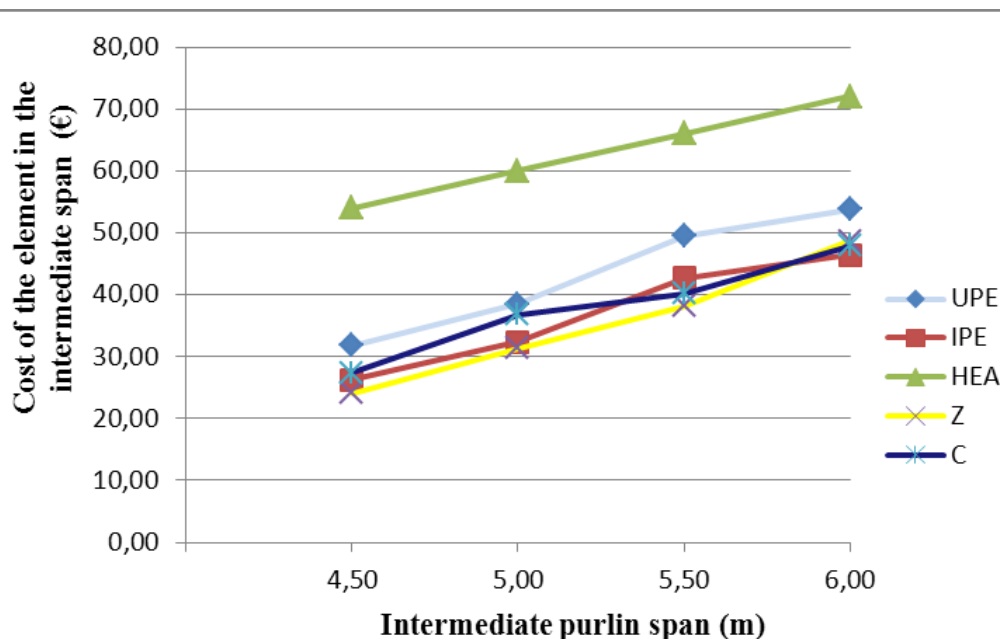
Πίν.5: Αποτελέσματα για ενδιάμεσο φάτνωμα 5.00 m.

Διατομή	Ντίζες στο άνοιγμα	Βάρος (kg)	Συνολικό κόστος (€)
HEA 100	0	91.70	66.03
UPE 120	1	66.49	49.47
IPE 120	1	57.03	42.66
<b>Z 210-2</b>	2	37.20	<b>38.16</b>
C 210-2,5	2	39.33	40.17

Πίν.6: Αποτελέσματα για ενδιάμεσο φάτνωμα 5.50 m.

Διατομή	Ντίζες στο άνοιγμα	Βάρος (kg)	Συνολικό κόστος (€)
HEA 100	0	100.04	72.03
UPE 120	1	72.53	53.82
<b>IPE 120</b>	1	62.22	<b>46.39</b>
Z 210-2	1	50.06	48.65
C 210-2,5	2	47.52	47.87

Πίν.7: Αποτελέσματα για ενδιάμεσο φάτνωμα 6.00 m.



Σχ.6: Διαγράμματα κόστους – φαινόματος για διαφορετικούς τύπους διατομών.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις παραπάνω συγκρίσεις εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η σωστή εκμετάλλευση των διατομών ψυχρής διαμόρφωσης στο δομικό σύστημα τις καθιστά σε μεγάλο βαθμό συμφέρουσες. Αυτό επαληθεύεται κατ' αρχάς από το ότι τόσο η διατομή C όσο και η Z, με την κατάλληλη μείωση του μήκους λυγισμού (τοποθέτηση ελκυστήρων) αποδίδουν χαμηλό βάρος χωρίς σημαντική αύξηση του κόστους. Επιπλέον, η απλή διατομή Z για να επαρκέσει καθίσταται αντικοινομική. Πραγματοποιώντας όμως υπερκάλυψη στη στήριξη, η διατομή ενισχύεται, έτσι ώστε με το ελάχιστο βάρος και κόστος επιτυγχάνεται η επιθυμητή αντοχή.
- Για ορισμένες τιμές ανοιγμάτων, οι διατομές ψυχρής διαμόρφωσης, ιδιαίτερα οι τύπου Z, καθίστανται οικονομικότερες σε σχέση με τις εν θερμώ ελατές. Αυξάνοντας όμως το φάτνωμα πάνω από 5.80 m περίπου, η διατομή σειράς IPE αποδεικνύεται φθηνότερη έναντι της Z, κάτι που καταδεικνύεται και στο διάγραμμα στο σχήματος 6.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Dubina D., Ungureanu V., Landolfo R.: “Design of cold formed steel structures”, ECCS European Convention of Constructional Steelwork, 2012.
- [2] EN 1993 Eurocode 3 - Design of steel structures: Part 1.3: “General rules Supplementary rules for cold formed members and sheeting:”
- [3] Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ.: “Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα, με βάση τα τελικά κείμενα των ευρωκωδίκων”, εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, 2008.
- [4] Γαλούσης Ε.: “Υπολογισμός και διαμόρφωση κατασκευών από χάλυβα”, εκδόσεις Αιβάζη – Ζουμπούλη, Ξάνθη, 1985.
- [5] Κάλφας Χ.: “Κατασκευές από χάλυβα – Διαστασιολόγηση δομικών στοιχείων από χάλυβα, σύμφωνα με τους ευρωκώδικες”, εκδόσεις iCON, Ξάνθη, 2010.

## COMPARISON OF STRENGTH BETWEEN COLD FORMED AND HOT ROLLED PURLINS FOR DIFERRENT SPAN MAGNITUDES

**Anastasios S. Dervenagas<sup>a</sup>, Dimitrios T. Pachoumis<sup>b</sup>, Christos E. Sofias<sup>b</sup>, Christos N. Kalfas<sup>c</sup>**

<sup>a</sup> MSc. Civil Engineer DUTH

<sup>b</sup> Dr. MSc. Civil Engineer DUTH

<sup>c</sup> Professor DUTH

Steel Structures Laboratory DUTH

Xanthi, Greece

e-mail: [mslgroup@civil.duth.gr](mailto:mslgroup@civil.duth.gr)

### SUMMARY

This paper compares the strength between purlins with sections of hot rolled and cold formed profiles. Nowadays the use of cold formed sections as purlins is very common because of their low weight. The design of the elements has been made according to EC 3. The purlins with hot rolled sections are calculated in Robot Structural Analysis software. The elements with thin gauge profile, are designed in excel programs, which have been devised for this purpose. In every case, the purlin has been configured as Gerber beam. The whole structure is supposed to be constructed in the region of Xanthi and the gravity loads are too high. The distance of the purlins is 1,70 m. Members with spans of 4,50 m, 5,00 m, 5,50 m and 6,00 m are tested. The sections that are examined, are the hot rolled profiles HEA, UPE, IPE and the cold formed, type C and Z. In Z profile, the flanges are not equal. This offers the advantage of overlap at the supports and the increase in strength. The criterion of the suitability of a section is the cost, which must be as low as possible. It is emphasized that in the cold formed purlins, the torsional deformation of the free flange, must be taken into account. The results show that the cold formed profiles and particularly the section type Z, because of the overlap, are cheaper in comparison with the other sections as far as the span is approximately up to 5.80 m. If the length becomes greater, the IPE profile is more suitable.