

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΡΑΦΙΩΝ ΥΠΟ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ

Αδαμάκος Κωνσταντίνος¹, Βάγιας Ιωάννης²

¹Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, ²Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Ηρώων πολυτεχνείου 9, Ζωγράφου 15780
kadamakos@hotmail.com, vastahl@central.ntua.gr

Περίληψη

Τα βιομηχανικά ράφια αποθήκευσης συναντώνται κυρίως σε αποθήκες logistics και χρησιμοποιούνται για την ασφαλή και εύκολη αποθήκευση των προϊόντων. Είναι μεταλλικές κατασκευές που αποτελούνται κυρίως από λεπτότοιχες διατομές ψυχρής ελάσεως οι οποίες καθορίζουν την συμπεριφορά του συστήματος. Αν και υπάρχουν κανονιστικά κείμενα για τον σχεδιασμό τέτοιων κατασκευών, η έρευνα στην οποία βασίζονται αυτοί οι κανονισμοί είναι περιορισμένη. Ράφια τα οποία επλήγησαν από ισχυρούς σεισμούς έχουν δείξει μορφές αστοχίας οι οποίες τονίζουν την τρωτότητα των κατασκευών αλλά και την ανάγκη συμπλήρωσης των κανονισμών. Στο παρόν άρθρο τονίζονται κάποιες ελλείψεις των κανονισμών όσον αφορά κυρίως τις δοκούς των ραφιών και γίνονται προτάσεις για βελτίωση του σχεδιασμού.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα βιομηχανικά ράφια είναι μεταλλικές κατασκευές αποτελούμενες συνήθως από λεπτότοιχες διατομές ψυχρής ελάσεως. Τα συστήματα αυτά έχουν δύο κύριες και χαρακτηριστικές διευθύνσεις, την επιμήκη και την εγκάρσια. Στην επιμήκη διεύθυνση έχουν λειτουργία πλαισίου, όπου οι συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος και υποστυλώματος-εδάφους θεωρούνται ημιάκαμπτες, ενώ η πλαισιωτή λειτουργία υποστηρίζεται πολλές φορές από χιαστί συνδέσμους. Η εγκάρσια διεύθυνση αποτελείται από δύο υποστυλώματα τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με διαγώνια μέλη. Όλα τα μέλη της κατασκευής αν και κατατάσσονται κυρίως στις κατηγορίες 3 και 4 καλούνται να απορροφήσουν ενέργεια κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, όμως διαθέτουν περιορισμένη πλαστιμότητα και εμφανίζουν προβλήματα, τα οποία μέχρι σήμερα δεν έχουν επισημανθεί και αντιμετωπιστεί συστηματικά. Οι δοκοί συγκεκριμένα αστοχούν τοπικά και οι παλέτες ολισθαίνουν με κίνδυνο πτώσης στο έδαφος.

2. ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ

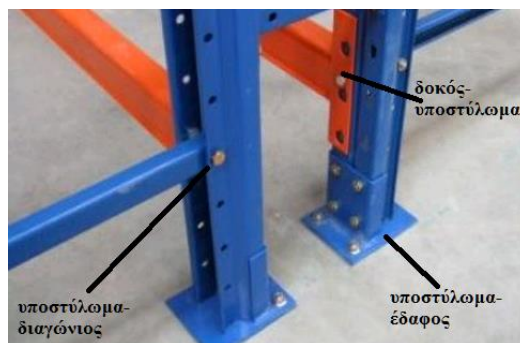
Η τυπική μορφολογία ενός συστήματος αποθήκευσης φαίνεται στο Σχήμα 1. Παρατηρείται η επιμήκης και η εγκάρσια διεύθυνση, καθώς και τα διάφορα μέλη του συστήματος. Τυπικές διατομές για τα υποστυλώματα και τις δοκούς παρουσιάζονται στο Σχήμα 2, ενώ το Σχήμα 3 δείχνει τυπικές συνδέσεις α) δοκού-υποστυλώματος, β) υποστυλώματος-εδάφους και γ) διαγώνιων μελών-υποστυλώματος. Οι συγκεκριμένες συνδέσεις αποτελούν σημαντική παράμετρο στον σχεδιασμό βιομηχανικών ραφιών αφού καθορίζουν την δυσκαμψία της κατασκευής αλλά ταυτόχρονα δεν υπακούουν σε κάποια θεωρητική σχέση για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων τους.



Σχήμα. 1 Τυπική μορφή συστήματος αποθήκευσης



Σχήμα 2 Τυπικές διατομές α) υποστυλώματος β) δοκού



Σχήμα 3 Τυπικές συνδέσεις σε βιομηχανικά ράφια αποθήκευσης

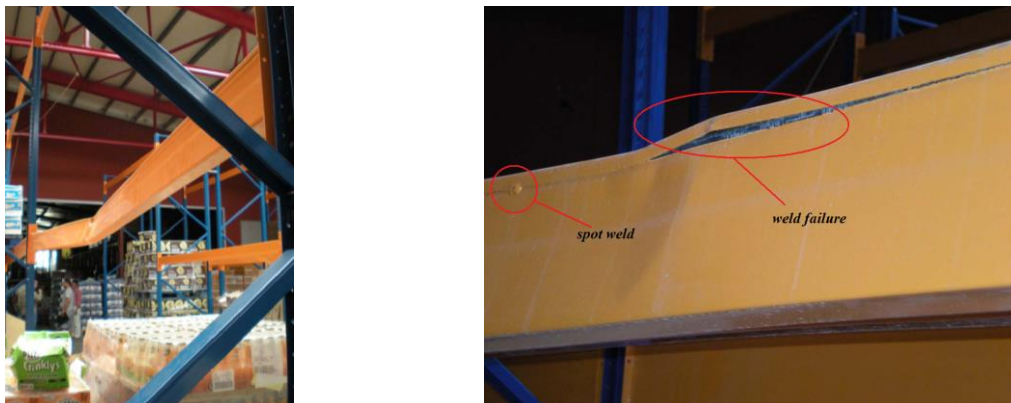
3. ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ- ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΔΟΚΩΝ

Τα οριζόντια φορτία των παλετών λόγω των σεισμικών φορτίων, ασκούνται στο κέντρο μάζας της κάθε παλέτας, το οποίο εμφανίζει σημαντική εκκεντρότητα από την βάση της

παλέτας. Αυτή η εκκεντρότητα προκαλεί μια ροπή ανατροπής, η οποία μεταφράζεται σε ζεύγος αντίρροπων δυνάμεων στις δοκούς. Έτσι οι δοκοί, εκτός από την οριζόντια δύναμη του σεισμού δέχονται και επιπλέον κατακόρυφη δύναμη, η οποία λαμβάνεται επιπρόσθετα υπόψη από τον κανονισμό για τον έλεγχο των δοκών, χωρίς όμως να προσομοιώνεται και να υπολογίζεται πάντα από τα αριθμητικά μοντέλα.

Μία ακόμα ιδιαιτερότητα των δοκών είναι το γεγονός ότι τα οριζόντια φορτία των παλετών μεταφέρονται στο άνω πέλαμα των δοκών, προκαλώντας μια ροπή στρέψης. Αυτή η στρέψη δεν λαμβάνεται άμεσα υπόψη από τον κανονισμό και προκαλεί επιπρόσθετες καταπονήσεις που αν αμεληθούν δύνανται να οδηγήσουν σε αστοχία.

Το Σχήμα 4 απεικονίζει ένα περιστατικό αστοχίας δοκού. Με αφορμή αστοχίες σαν και αυτή, πραγματοποιείται μια πρόταση ενός ικανοτικού σχεδιασμού για τις διατμητικές τάσεις στην δοκό, και παρουσιάζεται στην επομένη παράγραφο.



Σχήμα 4 Αστοχία δοκών ύστερα από σεισμό α) εικόνα δοκού β) λεπτομέρεια

4. ΙΚΑΝΟΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΚΟΥ ΕΝΑΝΤΙ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Η διατομή μιας δοκού, όπως φάνηκε στο Σχήμα 3β, αποτελείται συνήθως από δύο ανοιχτές λεπτότοιχες διατομές, η μια μέσα στην άλλη, οι οποίες συγκολλούνται εξωτερικά ανά διαστήματα. Οι διατομές αυτές καταπονούνται από διατμητικές τάσεις οι οποίες προκαλούνται από τις τέμνουσες λόγω κατακόρυφων φορτίων, τις τέμνουσες λόγω των οριζόντιων κατά μήκος φορτίων του σεισμού και τις στρεπτικές ροπές λόγω των οριζόντιων εγκάρσιων φορτίων. Όλα αυτά τα μεγέθη δημιουργούν μια διατμητική ροή στο εσωτερικό της διατομής, την οποία η διατομή καλείται να αναλάβει αποτελεσματικά, αφού η αστοχία των συγκολλήσεων της διατομής όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 4, επιφέρει ένα βίαιο αποτέλεσμα όπου η κλειστή διατομή μετατρέπεται σε ανοιχτή, αλλάζοντας σημαντικά τα αδρανειακά χαρακτηριστικά της.

Τα μέγιστα κατά μήκος οριζόντια σεισμικά φορτία που ασκούνται στη δοκό, εμφανίζονται όταν οι συνδέσεις δοκού υποστυλώματος αγγίζουν τις αντοχές τους σε θετικές και αρνητικές ροπές, $M_{Pl,Rd}^+$ και $M_{Pl,Rd}^-$ αντίστοιχα. Η αντίστοιχη τέμνουσα που αναπτύσσεται

στη δοκό $V_{ED,CD}$, δίνεται από τη εξ. (1) και η αναπτυσσομένη διατμητική ροή q_{CD} από τη εξ.(2). Τα κατακόρυφα φορτία από τις παλέτες, προκαλούν μια τέμνουσα δύναμη $V_{ED,G}$ και μια διατμητική ροή q_G οι οποίες δίνονται από τις εξ.(3) και (4) αντίστοιχα.

$$V_{Ed,CD} = \frac{M_{PL,Rd}^+ + M_{PL,Rd}^-}{l} \quad (1)$$

$$q_{CD} = \frac{V_{Ed,CD} S}{I} \quad (2)$$

$$V_{Ed,G} = wl/2 \quad (3)$$

$$q_G = \frac{V_{Ed,G} S}{I} \quad (4)$$

όπου S είναι η στατική ροπή αδρανείας ως προς το σημείο της διατομής όπου συνδέονται τα δύο λεπτότοιχα μέρη της κλειστής διατομής, I είναι η ροπή αδρανείας της διατομής, w το κατακόρυφο κατανεμημένο φορτίο λόγω των παλετών και l το μήκος της δοκού.

Τα Σχήματα 5 και 6 δείχνουν τη μεταβολή των διαμητικών ροών κατά μήκος της δοκού λόγω οριζοντίων (κατά μήκος) φορτίων και λόγω κατακόρυφων φορτίων, αντίστοιχα, σε σημείο της διατομής που συγκολλούνται τα δύο επιμέρους στοιχεία της.

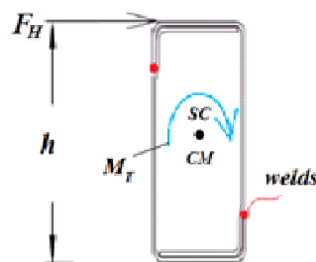


Σχήμα 5 Διατμητική ροή κατά μήκος της δοκού λόγω οριζόντιων σεισμικών δυνάμεων



Σχήμα 6 Διατμητική ροή κατά μήκος της δοκού λόγω κατακόρυφων φορτίων

Τα εγκάρσια οριζόντια φορτία όμως των παλετών προκαλούν μια στρεπτική ροπή στην δοκό όπως φαίνεται στο Σχήμα7, αφού δεν ασκούνται στο κέντρο διάτμησης της διατομής.



Σχήμα 7 Εντατικά μεγέθη στη διατομή της δοκού

Η οριζόντια δύναμη F_H που αναπτύσσεται σε μια δοκό οριοθετείται από τη δύναμη τριβής σύμφωνα με τον κανονισμό. Η δύναμη αυτή δίνεται από την εξ.(5) και η ροπή που προκαλεί στη δοκό από την εξ.(6). Αν θεωρηθεί ότι αυτή η ροπή ασκείται κατανεμημένα στο μήκος της δοκού τότε η κατανεμημένη αυτή ροπή στρέψης, που δίνεται στην εξ.(7), προκαλεί μια διατμητική ροή σύμφωνα με τον 1^ο τύπο του Bredt, για κλειστές διατομές που δίνεται στην εξ.(8).

$$F_H = C_{\mu,H} \mu W \quad (5)$$

$$M_T = \frac{F_H h}{2} \quad (6)$$

$$m_T = \frac{F_H h}{2l} \quad (7)$$

$$q_T = \frac{M_T}{2A_0} = \frac{m_T l}{4A_0} \quad (8)$$

όπου, $C_{\mu,H}$ είναι συντελεστής ασφαλείας του συντελεστή τριβής και ισούται με 1,5, μ είναι ο συντελεστής τριβής παλέτας-δοκού, h είναι το ύψος της δοκού, l το μήκος της δοκού, M_T η στρεπτική ροπή, m_T η ισοδύναμη κατανεμημένη ροπή στρέψης, και A_0 είναι το κλειστό εμβαδό της μέσης γραμμής της διατομής. Το Σχήμα 8 δείχνει τη μεταβολή της διατμητικής ροής λόγω στρέψης κατά μήκος της δοκού.



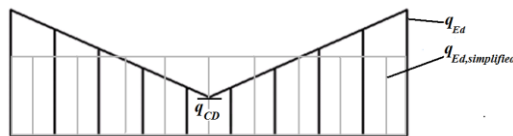
Σχήμα 8 Διατμητική ροή κατά μήκος της δοκού λόγω στρεπτικής ροπής

Η συνολικά μέγιστη διατμητική ροή που εμφανίζεται στη σύνθετη διατομή της δοκού, q_{Ed} , δίνεται στην εξ.(9). Η μεταβολή της μέγιστης αυτής διατμητικής ροής κατά μήκος της δοκού απεικονίζεται στη Σχήμα 9. Επειδή όμως, η μέγιστη εγκάρσια οριζόντια δύναμη F_H και η μέγιστη τέμνουσα δύναμη $V_{ED,CD}$, δεν συνυπάρχουν, ως σεισμικά φόρτια διαφορετικής διεύθυνσης, προτείνεται η απλοποιημένη εξ.(10) για τη μέγιστη διατμητική ροή.



Σχήμα 9 Μεταβολή μέγιστης διατμητικής ροής κατά μήκος δοκού

$$q_{Ed} = q_{CD} + q_G + q_T \quad (9)$$



Σχήμα 10 Μέγιστη διατμητική ροή και προτεινόμενη διατμητική ροη σχεδιασμού κατά μήκος της δοκού

$$q_{Ed,simplified} = q_{CD} + (q_G + q_T)/2 \quad (10)$$

Η προτεινόμενη διατμητική ροή, δίνει στο μηχανικό τη δυνατότητα να υπολογίσει τον αριθμό, το είδος και το μήκος των συγκολλήσεων πάνω σε κάθε δοκό, ώστε η σύνθετη διατομή να εξασφαλίζει τη συνέχεια της.

5. ΜΕΓΙΣΤΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΥΝΑΜΗ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

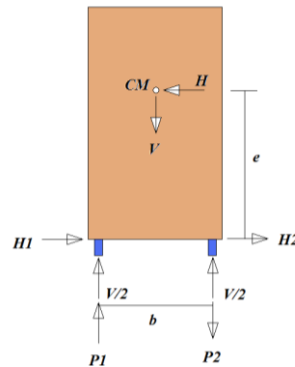
Η οριζόντια σεισμική δύναμη που δρα στις μάζες των παλετών στην εγκάρσια διεύθυνση του συστήματος, μεταφέρεται στο καθολικό σύστημα μέσω των δοκών. Η δύναμη αυτή όμως οριοθετείται από την δύναμη τριβής. Στη συνέχεια εκτιμάται η μέγιστη δύναμη που προκαλεί ολίσθηση ώστε οι δοκοί να σχεδιαστούν ικανοποιητικά και να φέρουν τα φορτία ακόμα και μετά από ένα τέτοιο συμβάν.

Έστω μια παλέτα βάρους V , η οποία στηρίζεται σε δύο δοκούς που απέχουν απόσταση b και δέχεται μια οριζόντια δύναμη H (Σχήμα 11). Κάθε δοκός δέχεται μια κατακόρυφη δύναμη $V/2$ και μια οριζόντια $H_1=H_2=H/2$. Η οριζόντια δύναμη H ασκείται στο κέντρο

βάρους της παλέτας (CM) το οποίο είναι σε μια απόσταση e από το άνω πέλμα της δοκού προκαλώντας μια ροπή ανατροπής. Η ισορροπία ροπών ως προς το άνω πέλμα της αριστερής δοκού (εξ.11), δίνει την τιμή του ζεύγους δυνάμεων $P_1=P_2$, που ασκείται στις δοκούς για να ισορροπήσουν την αναπτυσσόμενη αυτή ροπή ανατροπής.

$$He = P_2 b \rightarrow P_2 = \frac{He}{b} = P_1 \quad (11)$$

Κάθε οριζόντια δύναμη στην δοκό πρέπει να είναι μικρότερη από την τριβή, δλδ. $H_i < \mu N_i$. Ως δύναμη N_i λαμβάνεται το άθροισμα των κατακόρυφων αντιδράσεων της παλέτας, επομένως η αντιδράσεις των δοκών είναι $N_1 = P_1 + V/2$ και $N_2 = P_2 - V/2$ στην αριστερή και δεξιά δοκό, αντίστοιχα. Για να είναι οι αντιδράσεις αυτές μικρότερες της αναπτυσσόμενης τριβής πρέπει να ισχύουν οι εξ. (12α) και (12β).



Σχήμα 11 Τυπικό μοντέλο παλέτας-δοκών

$$H_1 < \left(\frac{V}{2} + \frac{He}{b}\right)\mu \quad (12\alpha) \quad H_2 < \left(\frac{V}{2} - \frac{He}{b}\right)\mu. \quad (12\beta)$$

όπου V το βάρος της παλέτας, μ ο συντελεστής τριβής παλέτας-δοκού, e η εκκεντρότητα του κέντρου βάρους της παλέτας από το άνω πέλμα της δοκού και b η απόσταση των δοκών.

Πριν την ολίσθηση των παλετών γίνεται η παραδοχή ότι $H_1 = H_2$. Έτσι, στη δεξιά δοκό που δέχεται μικρότερη κατακόρυφη δύναμη, θα εμφανιστεί η πρώτη ολίσθηση. Η μέγιστη οριζόντια δύναμη που θα αναπτυχθεί πρέπει να ικανοποιεί τη εξ. (13).

$$H_2 = \frac{H}{2} = \frac{V}{2}\mu - \frac{He}{b}\mu \quad (13)$$

Λύνοντας ως προς την οριζόντια δύναμη $H/2 = H_2$ έχουμε

$$H_2 = \frac{Vb\mu}{2(b+2e\mu)} \quad (14)$$

Σύμφωνα με το κριτήριο Coulomb για την τριβή, μετά την ολίσθηση η δοκός διατηρεί σταθερή δύναμη, ίση με την δύναμη τριβής, σαν ελαστικό-πλήρως πλαστικό μοντέλο δύναμης-μετακίνησης. Η παλέτα όμως δύναται να δεχτεί μεγαλύτερη οριζόντια δύναμη η οποία αναλαμβάνεται εξολοκλήρου από την αριστερή δοκό, η οποία δεν έχει ολισθήσει.

Η συνολική δύναμη της αριστερής δοκού πρέπει να είναι και αυτή μικρότερη της δύναμης τριβής. Αντικαθιστώντας στην εξ.(12α) το γεγονός ότι $H = H_1 + H_2$, έχουμε

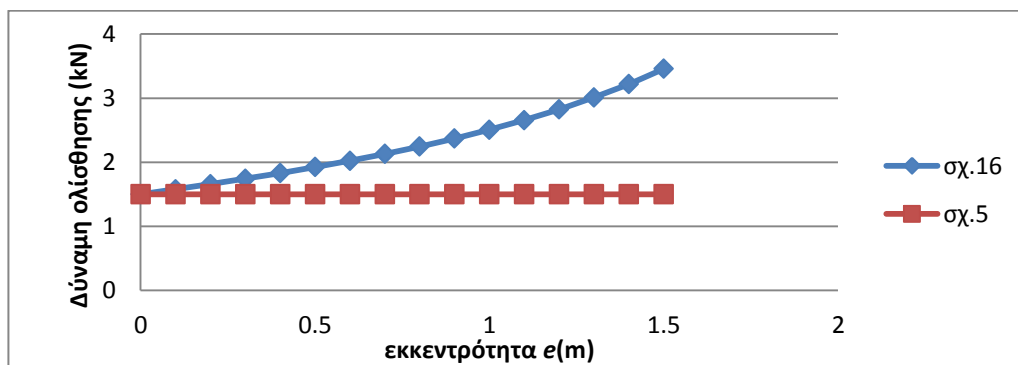
$$H_1 = \left(\frac{V}{2} + \frac{He}{b}\right)\mu \rightarrow H_1 = \frac{V}{2}\mu + \frac{(H_1 + H_2)e}{b}\mu \rightarrow 2H_1 b = Vb\mu + 2H_1 e\mu + 2H_2 e\mu \quad (15)$$

Αντικαθιστώντας την H_2 από την εξ.(14) και λύνοντας ως προς H_1 υπολογίζεται η μέγιστη δύναμη που απαιτείται για να ολισθήσει η παλέτα και επί της δεύτερης δοκού.

$$H_1 = \frac{Vb\mu}{4(b-e\mu)} \frac{2b+5e\mu}{(b+2e\mu)} \quad (16)$$

Οι δυνάμεις H_1 και H_2 δίνουν τις δυνάμεις για τις οποίες κάθε δοκός πρέπει να σχεδιάζεται ώστε να μην κινδυνεύει, η ίδια, ακόμα και σε περίπτωση ολίσθησης των παλετών.

Για να γίνει αντιληπτή η διαφορά της προτεινόμενης μέγιστης δύναμης ολίσθησης, H_1 , και της αντίστοιχης του κανονισμού, παρουσιάζεται μια αριθμητική εφαρμογή για μια παλέτα βάρους 800kg, απόσταση δοκών b 1100mm και συντελεστή τριβής $\mu=0,375$. Το σχήμα 12 δείχνει την δύναμη ολίσθησης για τη μια δοκό βάση των εξ.(5) και (16) για διάφορες τιμές της εκκεντρότητας e . Για λόγους άμεσης σύγκρισης στην εξ.(5) χρησιμοποιείται ο συντελεστής ασφαλείας $C_{\mu,H}=1$, επειδή αυτός δεν χρησιμοποιείται στην εξ.(16).



Σχήμα 12 Δύναμη ολίσθησης που μεταφέρεται σε μια δοκό συναρτήσει της εκκεντρότητας e

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των βιομηχανικών ραφιών που βρίσκουν ολοένα και μεγαλύτερη εφαρμογή. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία μέθοδος ικανοτικού σχεδιασμού των δοκών έναντι διάτμησης η οποία εφαρμόζεται στον έλεγχο των συγκολλήσεων σύνθετων κλειστών διατομών που συντίθενται από δύο ανοικτές. Προτείνεται μία σχέση για την μέγιστη οριζόντια δύναμη που εμφανίζεται κατά την ολίσθηση μιας παλέτας, με σκοπό τον σχεδιασμό των δοκών έναντι των μέγιστων αναπτυσσόμενων οριζοντίων δυνάμεων. Η προτεινόμενη σχέση δείχνει ότι η ανάλογη σχέση του κανονισμού υποεκτιμά την δύναμη που θα αναπτυχθεί σε μια δοκό όσο ψηλότερα βρίσκεται το κέντρο βάρους μιας παλέτας

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] EN 15512:2009 Steel static storage systems. Adjustable pallet racking systems. Principles for structural design
- [2] EN 16681. Steel static storage systems. Adjustable pallet racking systems. Principles for seismic design
- [3] ADAMAKOS K., VAYAS I., Tragverhalten von Palettenregalsystemen unter Erdbebenbeanspruchung, Stahlbau, DOI:10.1002/stab.201490001, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, vol. 1, p.35-46, 2014

STATIC AND SEISMIC BEHAVIOR OF STEEL STORAGE PALLET RACKS

Konstantinos Adamakos¹, Ioannis Vayas²

¹Civil Engineer, ²Dr.-Ing. Civil Engineer, NTUA Professor
Institute of Steel Structures, School of Civil Engineering
National Technical University of Athens
Zografou Campus, 15780, Greece
kadamakos@hotmail.com, vastahl@central.ntua.gr

ABSTRACT

The steel storage pallet racks are structures that are mainly used in logistics in order to manage a safe and comfortable transportation and storage of goods. These structures are commonly made of thin-walled sections, which govern the global and local structural behavior. Although, there are normative documents which an engineer can follow to design a racking system, the research beyond these documents is limited. Racks which have been suffered by intense ground motions have proved the vulnerability of these structures and the need of enhancement of the normative documents. The present paper focuses on the pallet-beams, proposing some relations for a safer design procedure, regarding the sliding of a pallet over a pallet-beam and the high shear stresses developed on the section of these beams.