

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΑΝΕΛ ΑΠΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ

Φοίβος Ε. Μπαρδόπουλος

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός, MSc

Σύμβουλος Μηχανικός

Τροντχάιμ, Νορβηγία

e-mail: mpardopoulos@gmail.com

Γεώργιος Α. Παπαγιαννόπουλος

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Ακαδημαϊκός Υπότροφος

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Πάτρα, Ελλάδα

e-mail : gparagia@upatras.gr

Γεώργιος Δ. Χατζηγεωργίου

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Αναπληρωτής Καθηγητής

Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

Πάτρα, Ελλάδα

e-mail : hatzigeorgiou@eap.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα κριτήρια σχεδιασμού για τυπικές συστοιχίες φωτοβολταϊκών πάνελ με μέλη από αλουμίνιο. Οι έλεγχοι των διατομών και των μελών γίνονται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 9, με βάση τις φορτίσεις ανέμου και χιονιού του Ευρωκώδικα 1 και σεισμού του Ευρωκώδικα 8. Βελτίωση στο σχεδιασμό της συστοιχίας αναζητείται αρχικά είτε μειώνοντας τις αποστάσεις των κατακόρυφων στηρίξεων των συστοιχιών, είτε αλλάζοντας το πάχος συγκεκριμένων διατομών. Κατόπιν διερευνάται η επιρροή των ατελειών των μελών και η ακαμψία των κόμβων τους μέσω απομειωμένων τιμών δυσκαμψίας και διαφορετικών τιμών στρωφικής ακαμψίας αντίστοιχα. Τέλος γίνεται έλεγχος εμφάνισης δυναμικής σύζευξης της συστοιχίας με ένα υπάρχον κτίριο θεωρώντας τοποθέτηση της στην πλάκα του τελευταίου ορόφου του.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αλουμίνιο έχει υιοθετηθεί από τη βιομηχανία ως το εναλλακτικό υλικό του γαλβανισμένου χάλυβα για τα πλαίσια των φωτοβολταϊκών πάνελ. Στην Φωτ.1 φαίνεται

μια τυπική συστοιχία φωτοβολταϊκών πάνελ από αλουμίνιο με πάσσαλο από γαλβανισμένο χάλυβα (αριστερά) και πλήρως από γαλβανισμένο χάλυβα (δεξιά).

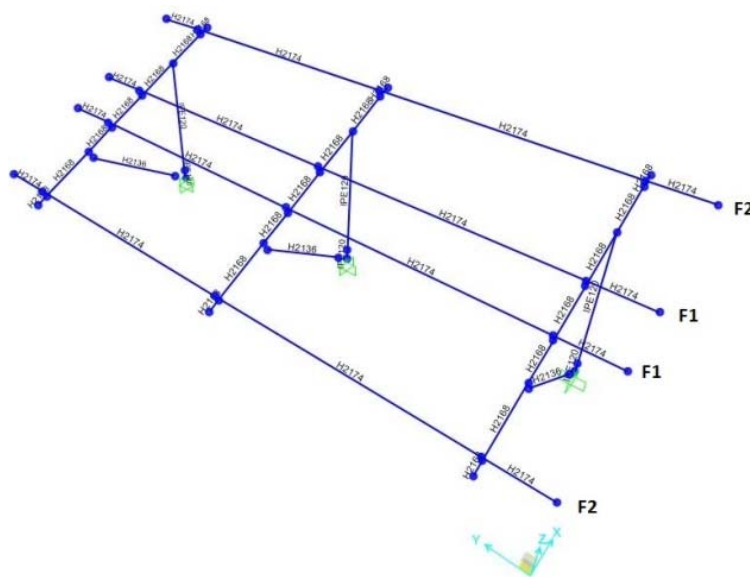


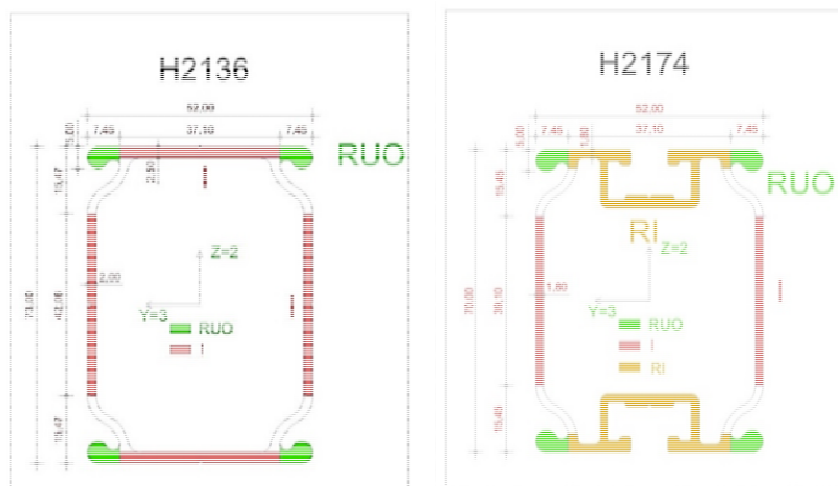
Φωτ. 1. Τυπική συστοιχία φωτοβολταϊκών πάνελ

Στην παρούσα εργασία μελετάται μια τυπική συστοιχία φωτοβολταϊκών πάνελ από αλουμίνιο με πάσσαλο από γαλβανισμένο χάλυβα, όπως αυτή της Φωτ.1, με σκοπό την παρουσίαση των κριτηρίων σχεδιασμού της και τον έλεγχο επάρκειας των μελών της για τις αναμενόμενες φορτίσεις. Επιδιώκεται κατόπιν βελτίωση του σχεδιασμού της.

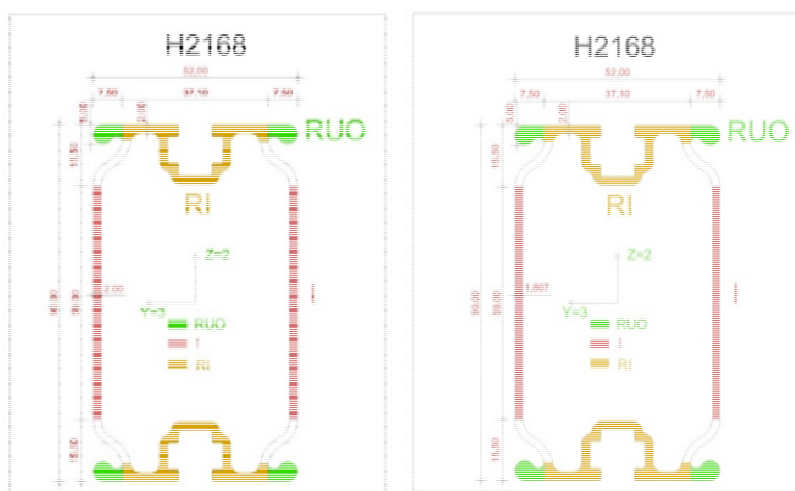
Η κατασκευή που επιλέχθηκε για ανάλυση και η εξιδανίκευση της με τη χρήση γραμμικών μελών δείχνεται στο Σχ. 1. Τα μέλη αυτής της κατασκευής είναι φτιαγμένα από το κράμα EN AW-6005A-T6, εκτός από τον πάσσαλο (διατομής IPE 120) που είναι από γαλβανισμένο χάλυβα ποιότητας S235. Οι χαρακτηριστικές τιμές του κράματος 6005A-T6 βρίσκονται στον EC9 [1]. Η γωνία κλίσης των διαδοκίδων H2168 είναι 25° ως προς το επίπεδο του εδάφους (βλέπε Σχ.1) και η οριζόντια απόσταση των πασσάλων είναι $2,5m$.

Οι φορτίσεις που καταπονούν την κατασκευή είναι το ίδιο βάρος των πάνελ και των μελών (G), το χιόνι (S), ο άνεμος (W) και ο σεισμός (E), σύμφωνα με τους EC1 και EC8 [2,3]. Η κατασκευή για τη φόρτιση ανέμου θεωρείται ως ανοικτό στέγαστρο και οι φορτίσεις συνδυάζονται κατά EC1 [2]. Ακολούθως η κατασκευή αναλύεται για τους συνδυασμούς αυτούς με το λογισμικό SAP2000 [4]. Επειδή το εν λόγω λογισμικό δεν προσφέρει έλεγχο διατομών και μελών αλουμινίου σύμφωνα με τον EC9 [1], για τους ελέγχους αυτούς αναπτύχθηκε ειδικό λογισμικό [5].





Σχ. 2. Διατομές H2136 και H2174, κατηγορίας 3 - Κορμός (I : Internal cross section part), προεξέχον τμήμα (RUO : Reinforced unsymmetrical part), πέλμα (RI : Reinforced Internal).



Σχ. 3. Διατομή H2168, κατηγορίας 4, αρχική (αριστερά) και ενεργός (δεξιά) - Κορμός (I : Internal cross section part), προεξέχον τμήμα (RUO : Reinforced unsymmetrical part), πέλμα (RI : Reinforced Internal).

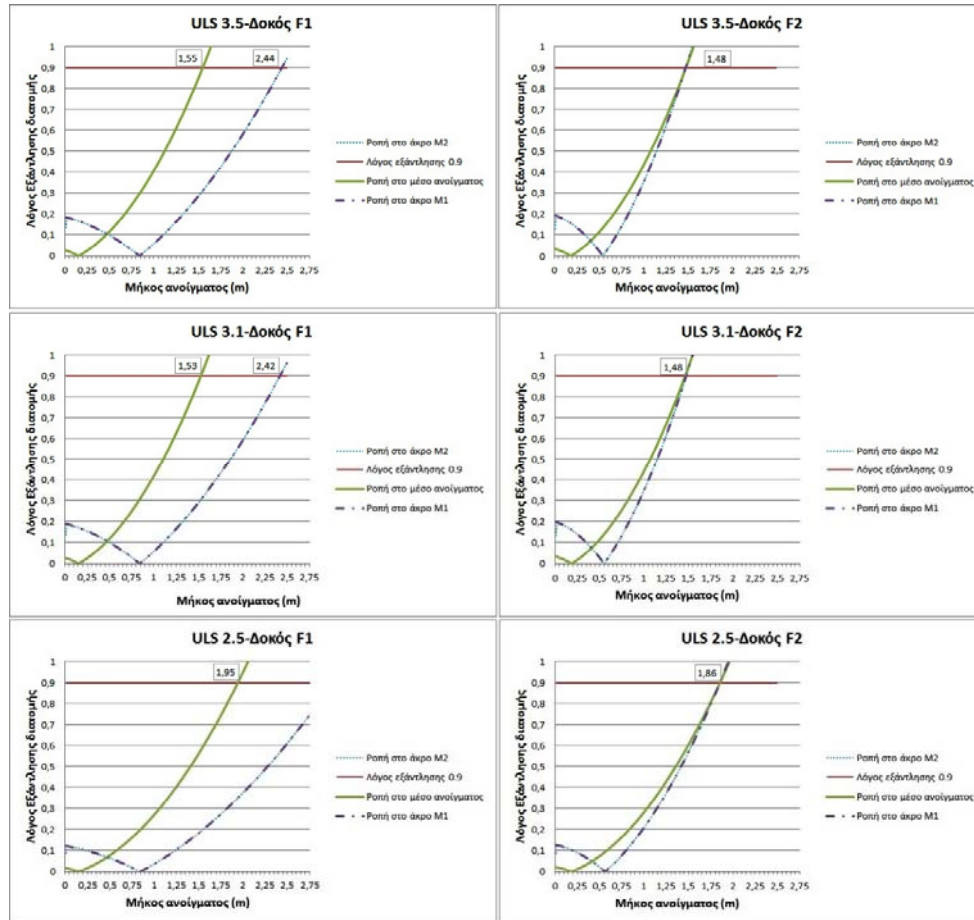
Οι διατομές των Σχ.2-3 κατηγοριοποιήθηκαν σύμφωνα με τον EC9 [1] για κορμό (κόκκινο χρώμα), πέλμα (κίτρινο χρώμα) και προεξέχοντα τμήματα (πράσινο χρώμα). Οι διατομές H2136 και H2174 του Σχ.2 προέκυψαν αμφότερες κατηγορίας 3, ενώ η διατομή H2168 του Σχ. 3 βρέθηκε κατηγορίας 4. Στο Σχ.3 δίνεται τόσο η αρχική όσο και η ενεργός (απομειωμένη) διατομή για την οποία υπολογίστηκαν νέα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ώστε να γίνουν οι έλεγχοι της [1,6]. Από τα αποτελέσματα των ελέγχων παρατηρήθηκε υπέρβαση της αντοχής των διατομών H2168 και H2174 σε κάμψη σε αρκετούς συνδυασμούς με δυσμενέστερους τους $1,35G+1,5S+0,9W$, $1,35G+0,75S+1,5W$ και $1,0G+1,5S+1,5W$. Τα σεισμικά φορτία δεν προκάλεσαν αστοχία.

3. ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

3.1. Ελάχιστο μήκος ανοίγματος

Η πρώτη λύση βελτίωσης του σχεδιασμού παρέχει την ελάχιστη απόσταση μεταξύ των τριγωνικών πλαισίων (βλέπε Σχ.1) που στηρίζουν το πάνελ, ώστε ο λόγος εξάντλησης σε

κάμψη της διατομής H2174 των δοκών F1 και F2 του Σχ.1 να λαμβάνει οριακά την τιμή $0,90$. Στο Σχ. 4 δίνεται ο λόγος αυτός, στα άκρα των δοκών F1 και F2 καθώς και στο μέσο των ανοιγμάτων τους, ως συνάρτηση του μήκους ανοίγματος. Από τα επιμέρους γραφήματα του Σχ.4, φαίνεται ότι οι δυσμενέστεροι συνδυασμοί φόρτισης $1,35G+1,5S+0,9W$ (ULS2.5), $1,35G+0,75S+1,5W$ (ULS3.5) και $1,0G+1,5S+1,5W$ (ULS3.1) επιβάλλουν ελάχιστο μήκος ανοίγματος (θέσεις των στηρίξεων) ανά $1,48m$.



Σχ. 4. Λόγος εξάντλησης ροπής για τους συνδυασμούς φόρτισης ULS2.5, ULS3.1 και ULS3.5.

3.2. Αλλαγή διατομών

Επειδή οι στηρίξεις ανά $1,48m$ είναι αρκετά πυκνές και τούτο έχει ως συνέπεια τη χρήση μεγάλης ποσότητας υλικού, διερευνάται η λύση της αλλαγής των γεωμετρικών ιδιοτήτων των διατομών H2174 και H2168 που αστοχούν σε κάμψη, μέσω της αύξησης του πάχους του κορμού τους. Συγκεκριμένα επιλέγονται i) για τη διατομή H2174 αύξηση του πάχους της από $t=1,80mm$ σε $t=2,50mm$ και ii) για τη διατομή H2168 αύξηση του πάχους της από $t=2,00mm$ σε $t=2,50mm$. Έτσι οι τροποποιημένες διατομές H2174 και H2168 γίνονται πλέον κατηγορίας 2 και 3, αντίστοιχα, από 3 και 4 που ήταν αρχικά.

Επιλύεται εκ νέου η κατασκευή του Σχ.1 θεωρώντας την αρχική απόσταση των πλαισίων που στηρίζουν το πάνελ, δηλαδή $2,5m$, με τις τροποποιημένες διατομές H2174 και H2168. Οι έλεγχοι μελών και διατομών ικανοποιούνται πλήρως αφού πλέον οι διατομές H2174 και H2168 αναβαθμίστηκαν κατά μια κατηγορία και έχουν μικρότερο λόγο εξάντλησης σε κάμψη. Συνεπώς, η αλλαγή πάχους του κορμού των διατομών H2174 και H2168 έδωσε επάρκεια με λιγότερη χρήση υλικού από την περίπτωση πυκνότερων θέσεων στηρίξεων.

3.3 Επιρροή ατελειών μελών και στρωφικής ακαμψίας κόμβων

Η επιρροή των ατελειών των μελών της κατασκευής θεωρείται μέσω μειωμένης δυσκαμψίας τους [6] σύμφωνα με την εξ.(1)

$$EI^* = \begin{cases} 0,8EI & \text{για } \frac{N^*}{N_y} \leq 0,5 \\ 0,8EI \left[4 \frac{N^*}{N_y} \left(1 - \frac{N^*}{N_y} \right) \right] & \text{για } \frac{N^*}{N_y} > 0,5 \end{cases} \quad (1)$$

όπου N^* είναι η αξονική δύναμη και N_y είναι η αξονική δύναμη διαρροής. Η ελαστική στρωφική ακαμψία $S_{j,btc}^{EC3-LB}$ ορίζεται στον Ευρωκώδικα 3 [7] ως

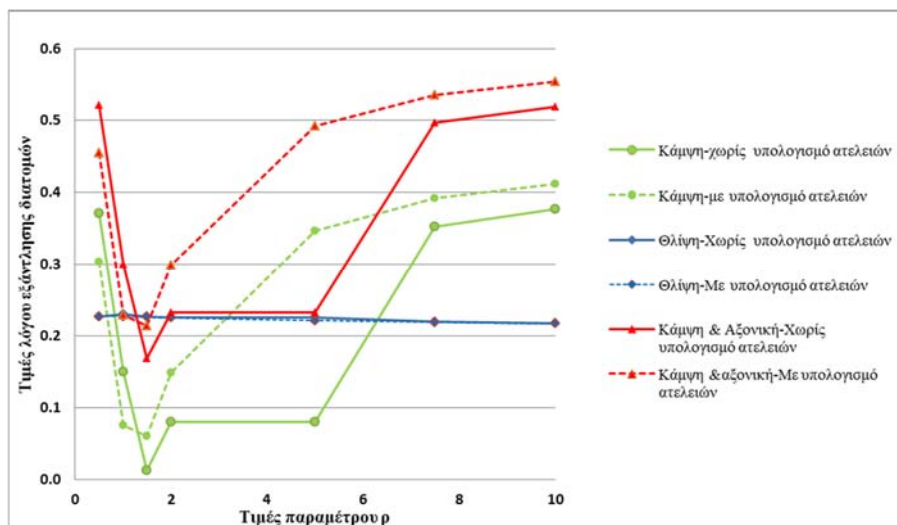
$$S_{j,btc}^{EC3-LB} = 0,5 \frac{E \cdot I_b}{L_b} \quad (2)$$

όπου E , I_b , L_b είναι το μέτρο ελαστικότητας, η ροπή αδράνειας και το μήκος του μέλους. Με χρήση του όρου ρ , η στρωφική ακαμψία των κόμβων μπορεί να θεωρηθεί [8]

$$S_{j,btc} = \rho \cdot S_{j,btc}^{EC3-LB} \quad (3)$$

Οι τιμές του όρου ρ θεωρείται ότι έχουν εύρος από 0,5 έως 10,0. Οι μικρές τιμές του όρου αυτού προσεγγίζουν τις αρθρωτές ή πρακτικά τις χωρίς κοχλίες συνδέσεις, ενώ οι μεγάλες τιμές του τις άκαμπτες συνδέσεις [8].

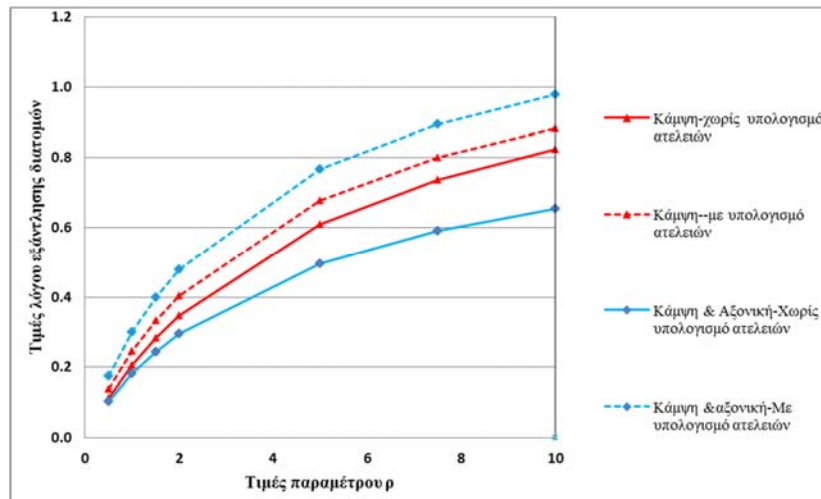
Με βάση τα ανωτέρω, επιλύεται η κατασκευή του Σχ.1 για τις τιμές 0,5 - 1,0 - 1,5 - 2,0 - 5,0 - 7,5 - 10,0 του όρου ρ σε όλους τους κόμβους εκτός αυτού στη θέση του πασσάλου. Στα Σχ. 5-6 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι λόγοι εξάντλησής των διατομών H2136 και H2174 σε κάμψη, θλίψη και κάμψη-αξονική δύναμη [1] για τις διάφορες τιμές του όρου ρ . Για λόγους σύγκρισης, στα Σχ.5-6 παρέχονται οι λόγοι εξάντλησης και για τις περιπτώσεις κατά τις οποίες η επιρροή των ατελειών αγνοήθηκε.



Σχ. 5. Λόγοι εξάντλησης της διατομής H2136 σε συνάρτηση με τον όρο ρ .

Στο Σχ.5 φαίνεται ότι το μέλος διατομής H2136, που συγκρατεί το πλαίσιο υπό γωνία, υπό την επίδραση ατελειών και για τιμές του όρου ρ από 2.0 έως 10.0, εμφανίζει σε σύγκριση με την περίπτωση μη-θεώρησης ατελειών και στρωφικής ακαμψίας μεγαλύτερες

τιμές του λόγου εξάντλησης σε κάμψη και σε κάμψη-αξονική, δίχως όμως να υπάρχει αστοχία.

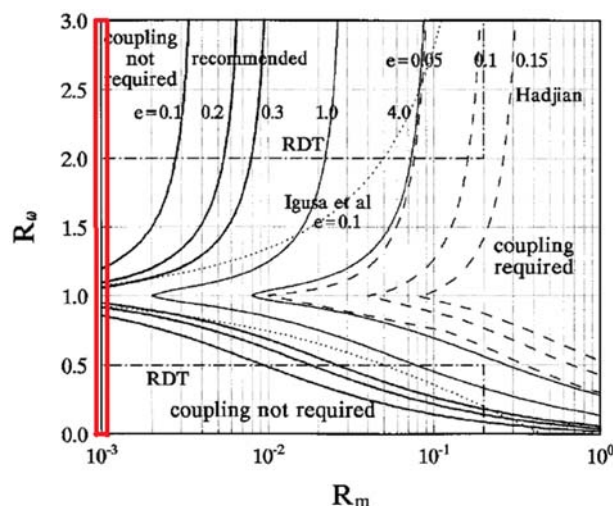


Σχ. 6. Λόγοι εξάντλησης της διατομής H2174 σε συνάρτηση με τον όρο ρ .

Στο Σχ.6 φαίνεται ότι για το μέλος διατομής H2174 (θεωρούμενη με το αρχικό της πάχος) υπάρχει συνεχής αύξηση του λόγου εξάντλησης σε κάμψη και σε κάμψη-αξονική δύναμη υπό την επιρροή των ατελειών και με αυξανόμενη τιμή του του όρου ρ . Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αστοχία της εν λόγω διατομής σε κάμψη που αναφέρθηκε στην ενότητα 2 επαληθεύεται για $\rho \approx 14,0$.

3.4. Έλεγχος δυναμικής σύζευξης

Για τον έλεγχο της δυναμικής σύζευξης της κατασκευής του Σχ.1 που τοποθετείται στην πλάκα του τελευταίου ορόφου ενός υφιστάμενου κτιρίου, χρησιμοποιήθηκαν τα κριτήρια των Chen και Wu [10]. Υποθέτοντας τρία τριώροφα συμβατικά κτίρια για τα οποία τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας τους δίνονται στην εργασία [5] και θεωρώντας τη μάζα της κατασκευής του Σχ.1 ίση με 372kgr, υπολογίζονται οι όροι R_ω και R_m [9]. Οι όροι R_m με αναφορά το Σχ.7 βρίσκονται εντός της περιοχής που δείχνεται με κόκκινο χρώμα (οι όροι R_ω ξεπερνούν μάλιστα την τιμή 3,0), φανερώνοντας ότι δεν υπάρχει δυναμική σύζευξη.



Σχ. 7. Έλεγχος δυναμικής σύζευξης κατά Chen and Wu [9].

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκαν τα κριτήρια σχεδιασμού για τυπικές συστοιχίες φωτοβολταϊκών πάνελ από αλουμίνιο. Οι έλεγχοι των διατομών και των μελών έγιναν σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 9 για τις φορτίσεις ανέμου, χιονιού και σεισμού των αντίστοιχων Ευρωκωδίκων.

Παρατηρήθηκε ότι τέτοιες συστοιχίες μπορεί να αστοχήσουν σε συνδυασμούς φορτίσεων ανέμου και χιονιού, ενώ τα σεισμικά φορτία έχουν μικρή επίδραση. Λόγω της εξάντλησης κάποιων διατομών σε κάμψη θεωρήθηκε αύξηση του πάχους του κορμού τους με αποτέλεσμα την μετέπειτα ικανοποίηση όλων των ελέγχων διατομής και μέλους κατά Ευρωκώδικα 9. Η θεώρηση της επιρροής των ατελειών των μελών δίνει γενικά μεγαλύτερες τιμές του λόγου εξάντλησης σε κάμψη και κάμψη-αξονική δύναμη σε σύγκριση με την περίπτωση μη-θεώρησης τους. Η αύξηση της στρωφικής ακαμψίας των κόμβων οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές του λόγου εξάντλησης σε κάμψη και σε κάμψη-αξονική δύναμη.

Τέλος, στην περίπτωση τοποθέτησης της συστοιχίας στον τελευταίο όροφο συμβατικής κατασκευής δεν εμφανίζεται δυναμική σύζευξη.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν την εταιρία ALUMIL για τα κατασκευαστικά σχέδια που τους παρείχε για το σκοπό της παρούσας εργασίας.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] EC9, “Eurocode 9 – Design of aluminum structures, Part 1-1: General structural rules”, *European Committee for Standardization (CEN)*, Brussels, 2009.
- [2] EC1, “Eurocode 1 – Actions on structures”, *European Committee for Standardization (CEN)*, Brussels, 2009.
- [3] EC8, “Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings”, *European Committee for Standardization (CEN)*, Brussels, 2009.
- [4] SAP 2000, “Static and Dynamic Finite Element Analysis of Structures, Version 19.0”, *Computers and Structures*, Berkeley, California, USA, 2010.
- [5] Μπαρδόπουλος, Φ., “Βέλτιστος σχεδιασμός συστοιχίας φωτοβολταϊκών πάνελ από αλουμίνιο και χάλυβα”, *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο*, 2016.
- [6] Rasmussen, K. J. R. and Gilbert, B. P., “Analysis-Based Design Provisions for Steel Storage Racks”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 139, No. 5, 2013, pp. 849-859.
- [7] EC3, “Eurocode 3 - Design of steel structures, Part 1-8: Design of joints”, *European Committee for Standardization (CEN)*, Brussels, 2009.
- [8] Bernuzzi, C., Gobetti, A., Gabbianelli, G. and Simoncelli, M., “Simplified Approaches to Design Medium-Rise Unbraced Steel Storage Pallet Racks. I: Elastic Buckling Analysis”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 141, No. 11, 2015, pp. 04015036.
- [9] Chen, G. and Wu, J. “Transfer-function-based criteria for decoupling of secondary systems”, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 125, No. 3, 1999, pp. 340-346.

DESIGN OF PHOTOVOLTAIC PANEL ARRAYS FROM ALUMINUM

Foivos E. Mpardopoulos

Civil Engineer, MSc

Engineer Consultant

Trondheim, Norway

e-mail: mpardopoulos@gmail.com

George A. Papagiannopoulos

Ph.D. Civil Engineer, University Fellow

University of Patras, Department of Civil Engineering

Patras, Greece

e-mail: gpapagia@upatras.gr

George D. Hatzigeorgiou

Ph.D. Civil Engineer, Associate Professor

School of Science and Technology, Hellenic Open University

Patras, Greece

e-mail: hatzigeorgiou@eap.gr

SUMMARY

This paper presents the design considerations for typical photovoltaic panel arrays having aluminum members. Section and member design checks are performed according to Eurocode 9 on the basis of the wind, snow and seismic loadings of Eurocodes 1 and 8. Improvements in design are initially sought either by reducing the distance between the vertical supports or by changing the thickness of specific sections. Then, the effects of member imperfections and connection flexibility are indirectly taken into account by using a reduced flexural rigidity and different values for the rotational stiffness, respectively. Finally, dynamic coupling criteria are checked when the array is placed on the top floor of an existing building.

Keywords: Photovoltaic arrays, aluminum, buckling, imperfections, connection flexibility, dynamic coupling