

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΡΑΒΔΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΩΜΑΤΑ

Θανάσης Στάμος

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός – ΕΔΙΠ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: stamthan@central.ntua.gr

Μανόλης Βουγιούκας

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός – Λέκτορας
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: manolis@central.ntua.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η επιλογή των διατομών των ράβδων ενός δικτύωματος είναι κρίσιμη για την ασφάλεια και την οικονομικότητα της κατασκευής. Παραδοσιακά το είδος των διατομών και οι αρχικές διαστάσεις τους επιλέγονται από τον μηχανικό και οι τελικές διαστάσεις προκύπτουν από την επίλυση του δικτύωματος. Σε αυτή την εργασία οι διατομές των ράβδων θεωρούνται μεταβλητές, τόσο από άποψη διαστάσεων όσο και άποψη είδους διατομών. Το είδος και οι διαστάσεις των διατομών προσδιορίζονται αυτόματα. Λόγω της απειρίας των αποδεκτών τιμών επιλέγονται οι βέλτιστες, δηλαδή αυτές που ελαχιστοποιούν το βάρος ή το κόστος του δικτύωματος, με την προϋπόθεση ότι είναι επαρκείς για τα φορτία του δικτύωματος. Σε αντίθεση με παλαιότερες εργασίες η βελτιστοποίηση γίνεται ταυτόχρονα για όλες τις μεταβλητές και για όλους τους συνδυασμούς φορτίσεων, συμπεριλαμβανομένων των σεισμικών. Ο προσδιορισμός των βέλτιστων τιμών γίνεται με τη στοχαστική αριθμητική μέθοδο προσομοίωσης ανόπτησης. Η μέθοδος μπορεί να βελτιστοποιήσει προβλήματα μεγάλης κλίμακας, με αυθαίρετους περιορισμούς, στα οποία το απόλυτο ελάχιστο μπορεί να κρύβεται ανάμεσα σε πολλά τοπικά ακρότατα. Περιορισμοί όπως ελάχιστες και μέγιστες διαστάσεις ράβδων και επιλογή είδους διατομής από συγκεκριμένο σύνολο λαμβάνονται υπόψη. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε διδιάστατα δικτύωματα και δίνει ενθαρρυντικά αποτελέσματα για περαιτέρω έρευνα.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επιλογή των διατομών των ράβδων ενός δικτύωματος είναι κρίσιμη για την ασφάλεια και την οικονομικότητα της κατασκευής. Παραδοσιακά ο μηχανικός, βασιζόμενος στην εμπειρία του, επιλέγει τον τύπο της διατομής (ΙΡΕ, RΗS κλπ) για κάθε ράβδο και δίνει αρχικές διαστάσεις στις διατομές αυτές. Με τη στατική επίλυση του δικτύωματος

προσδιορίζονται οι τελικές διαστάσεις των διατομών. Η παραδοσιακή μεθοδολογία, παρόλο που είναι ανεκτίμητη για την ασφάλεια της κατασκευής έναντι των φορτίων και ιδιαίτερα για τη σεισμική φόρτιση, δεν δίνει το χαμηλότερο δυνατό κόστος, πράγμα που τα τελευταία χρόνια έχει γίνει επιτακτική ανάγκη για την Ελλάδα αλλά και παγκοσμίως.

Με την υπολογιστική ισχύ των σημερινών ηλεκτρονικών υπολογιστών (H/Y) είναι δυνατό να προσδιοριστεί αυτόματα και ο τύπος και οι διαστάσεις των διατομών. Σε αυτή την εργασία οι διατομές των ράβδων θεωρούνται μεταβλητές, τόσο από άποψη διαστάσεων όσο και άποψη τύπου διατομών. Παρόλο που το πλήθος των πρότυπων μεταλλικών διατομών είναι πεπερασμένο, είναι αρκετά μεγάλο έτσι ώστε οι δυνατοί συνδυασμοί τύπου και διαστάσεων διατομής σε όλες τις ράβδους του δικτύματος να είναι πρακτικά άπειροι. Από τους δυνατούς συνδυασμούς επιλέγεται ο βέλτιστος, δηλαδή αυτός που α) έχει επαρκείς διατομές για τα φορτία και β) ελαχιστοποιεί το βάρος ή το κόστος του δικτύματος. Σε αντίθεση με παλαιότερες εργασίες η βελτιστοποίηση γίνεται ταυτόχρονα για όλες τις μεταβλητές και για όλους τους συνδυασμούς φορτίσεων, συμπεριλαμβανομένων των σεισμικών.

Η βελτιστοποίηση των διατομών γίνεται με τη στοχαστική μέθοδο προσομοίωσης ανόπτησης (ΜΠΑ) [1]. Άλλες μέθοδοι όπως οι γενετικοί και εξελικτικοί αλγόριθμοι έχουν χρησιμοποιηθεί σε κατασκευές [2]. Ο [3] και πιο πρόσφατα ο [4] έκαναν σύγκριση γενετικών αλγορίθμων και της ΜΠΑ και κατέληξαν ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι πιο γρήγοροι αλλά η ΜΠΑ δίνει καλύτερα αποτελέσματα. Οι [5] και [6] πρότειναν μια πολύπλοκη μεθοδολογία που βασίζεται στην ΜΠΑ. Σε αντίθεση, η παρούσα εργασία δείχνει ότι η βασική ΜΠΑ, με κατάλληλες (και απλές) μεταβολές διάταξης, μπορεί να οδηγήσει σε βελτιστοποίηση όχι μόνο στις διαστάσεις των διατομών αλλά και στον τύπο των διατομών. Οι διατομές είναι οι προτυποποιημένες διατομές που είναι διαθέσιμες εμπορικά και το πλήθος τους είναι ιδιαίτερα μεγάλο (1416). Η εργασία δείχνει επίσης ότι τα σεισμικά φορτία, εκτός από τις διαστάσεις των διατομών, καθορίζουν αποφασιστικά και τη βέλτιστη επιλογή του τύπου των διατομών, και είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη με εναλλασσόμενο πρόσημο. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε διδιάστατα δικτύματα και δίνει ενθαρρυντικά αποτελέσματα για περαιτέρω έρευνα.

3. Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΟΠΤΗΣΗΣ

Ο αλγόριθμος της ΜΠΑ (Simulated Annealing Algorithm) είναι ένας γενικός στοχαστικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος αναπτύχθηκε από τους [1]. Ο αλγόριθμος της ΜΠΑ είναι κατάλληλος για προβλήματα βελτιστοποίησης μεγάλης κλίμακας, ειδικά σε περιπτώσεις όπου μία επιθυμητή ακραία τιμή είναι κρυμμένη μεταξύ άλλων ακραίων τοπικών τιμών. Το όνομα καθώς και η ιδέα δημιουργίας του αλγορίθμου της ΜΠΑ προέρχονται από τη διαδικασία της ανόπτησης, μιας τεχνικής που αφορά στην θέρμανση και την ελεγχόμενη ψύξη ενός υλικού. Με την θέρμανση προκαλείται η μετακίνηση των ατόμων του υλικού από την αρχική τους θέση (θέση ελάχιστης εσωτερικής ενέργειας) σε θέσεις υψηλότερης ενέργειας, ως αποτέλεσμα της τυχαίας περιφοράς τους λόγω της θέρμανσης. Στη συνέχεια με αργή ψύξη του υλικού δίνονται στα άτομα πολλές ευκαιρίες να μετακινηθούν και να καταλήξουν σε διατάξεις με την ελάχιστη εσωτερική ενέργεια. Βασική έννοια του αλγορίθμου της ΜΠΑ είναι η ενέργεια που έχει (ή η ποινή που επιβάλλεται σε) μία δυνατή διάταξη του συστήματος προς βελτιστοποίηση. Η ενέργεια εκφράζει πόσο διαφέρει η διάταξη από τη βέλτιστη. Όσο μεγαλύτερη η διαφορά τόσο μεγαλύτερη και η ενέργεια. Ο αλγόριθμος ξεκινά από μία αρχική διάταξη του

δικτυώματος. Στη συνέχεια δοκιμάζει τυχαίες μεταβολές στην αρχική διάταξη όπως μεταβολή των διαστάσεων ή του τύπου μίας διατομής. Αν μία μεταβολή μειώνει την ενέργεια (θετική μεταβολή), γίνεται δεκτή. Αν όμως η μεταβολή αυξάνει την ενέργεια (αρνητική μεταβολή), η μεταβολή μπορεί πάλι να γίνει δεκτή με πιθανότητα που υπολογίζεται από [7]:

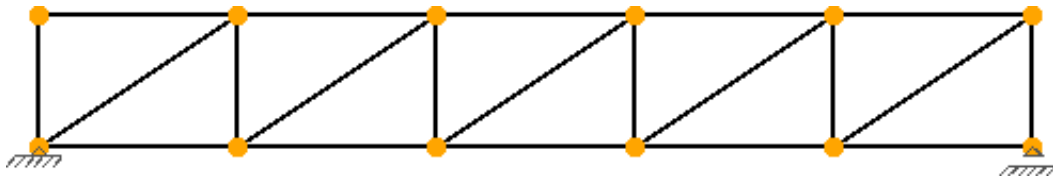
$$P_r = e^{(-\Delta t/T)} \quad , \quad \Delta t = t_2 - t_1 > 0 \quad (1)$$

όπου t_1 είναι η ενέργεια πριν τη μεταβολή, t_2 η ενέργεια μετά τη μεταβολή και T είναι η θερμοκρασία του συστήματος η οποία εκφράζει την ενεργητικότητα του συστήματος (όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία τόσο περισσότερες αρνητικές μεταβολές γίνονται δεκτές). Η ανορθόδοξη αυτή τακτική επιτρέπει στη μέθοδο να αποφύγει τον εγκλωβισμό σε τοπικά ελάχιστα [8]. Η θερμοκρασία μειώνεται σταδιακά και όλη η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε θερμοκρασία. Μικρότερη θερμοκρασία σημαίνει λιγότερες αποδεκτές αρνητικές μεταβολές. Έτσι, όταν οι μεταβολές μηδενιστούν τότε έχει βρεθεί η βέλτιστη λύση.

4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

4.1 Δικτύωμα

Το δικτύωμα προς βελτιστοποίηση αποτελείται από δύο σειρές κόμβων που συνδέονται με ράβδους (Σχ. 1). Στην παρούσα εργασία βελτιστοποιούνται οι μεταβλητές του δικτυώματος: α) ο τύπος των διατομών β) οι διαστάσεις των διατομών όλων των ράβδων του δικτυώματος. Το πλήθος τους, το οποίο είναι διπλάσιο του πλήθους των ράβδων, είναι η διάσταση N_d του προβλήματος. Ένα σύνολο από συγκεκριμένες τιμές για τις μεταβλητές αποτελούν μία διάταξη του προβλήματος.



Σχ. 1. Δικτύωμα προς βελτιστοποίηση.

Οι συντεταγμένες των κόμβων καθώς επίσης και η συνδεσμολογία των ράβδων μπορούν να είναι οποιεσδήποτε. Ομοίως, οι στηρίξεις μπορεί να είναι αρθρώσεις ή κυλίσεις και μπορεί να είναι οπουδήποτε. Οι διατομές των ράβδων μπορεί να είναι οι προτυποποιημένες διατομές IPE, IPN, HE, HL, HD, HP, UPE, UPN, U, L, FL, SQ, R, T, IFB, SFB ή RHS. Λαμβάνοντας υπόψη και τις διαστάσεις, το πλήθος των δυνατών διατομών για μία ράβδο είναι 1416, και το πλήθος των δυνατών συνδυασμών (διατάξεων) για τις 21 ράβδους του δικτυώματος αστρονομικός: $1416^{21} = 1,5 \cdot 10^{66}$. Είναι φανερό ότι δεν είναι δυνατό να ελεγχθούν όλοι οι συνδυασμοί και μία αριθμητική μέθοδος όπως η ΜΠΑ είναι απαραίτητη.

4.2 Περιορισμοί

Για κατασκευαστικούς λόγους σε κάποιες ράβδους μπορεί να τεθεί περιορισμός να παίρνουν διατομές από ένα υποσύνολο των τύπων διατομών που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Επίσης μπορεί να τεθεί ο περιορισμός ότι όλες οι ράβδοι του πάνω ή/και του κάτω

πέλματος να έχουν ενιαία διατομή (πχ IPE) για κατασκευαστικούς λόγους και για λόγους στιβαρότητας.

4.3 Φορτία

Το δικτύωμα φορτίζεται με το ίδιο βάρος των ράβδων, που θεωρείται οι ασκείται στους κόμβους των ράβδων, και με το ωφέλιμο φορτίο δύο φορτηγών αυτοκινήτων βάρους 60t και 30t αντίστοιχα. Το δικτύωμα επίσης φορτίζεται με ισοδύναμο οριζόντιο σεισμικό φορτίο που λαμβάνεται ως ποσοστό της συνισταμένης των κατακόρυφων φορτίων. Το σεισμικό φορτίο και το ωφέλιμο φορτίο μοιράζεται ομοιόμορφα στους κόμβους της άνω σειράς του δικτυώματος.

Το είδος και η φορά των φορτίων επηρεάζει τη βέλτιστη μορφολογία (διαστάσεις και τύπος διατομής) του δικτυώματος. Προκειμένου να βρεθεί η επίδραση των φορτίων στη μορφολογία του δικτυώματος γίνονται δοκιμές με κατακόρυφα φορτία (ίδιο βάρος και ωφέλιμο), με κατακόρυφα και θετικά σεισμικά φορτία, και με κατακόρυφα και αρνητικά σεισμικά φορτία.

4.4 Διαστασιολόγηση διατομών

Η διαστασιολόγηση των διατομών γίνεται με τον Ευρωκώδικα 3. Το υλικό των ράβδων είναι EN10025 S355. Σε περίπτωση εφελκυσμού, σε κάθε ράβδο πρέπει να ισχύει:

$$N \leq N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} \quad (2)$$

όπου N η αξονική δύναμη που καταπονεί τη ράβδο, A το εμβαδό διατομής της ράβδου, $f_y=355$ MPa η αντοχή του χάλυβα και $\gamma_{M0}=1$ συντελεστής ασφαλείας. Σε θλίψη πρέπει να ληφθεί υπόψη και ο λυγισμός:

$$N \leq N_{b,Rd} = \chi \frac{Af_y}{\gamma_{M1}} \quad (3)$$

όπου

$$\chi = \frac{1}{f + \sqrt{f^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1, \quad f = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2], \quad \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1},$$

$$\lambda = \frac{l_{cr}}{i}, \quad i = \sqrt{\frac{I_{\min}}{A}}, \quad \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

και $\alpha=0,21, 0,34, 0,49$ και $0,76$ ο συντελεστής ατελειών ανάλογα με την καμπύλη λυγισμού στην οποία η διατομή αντιστοιχεί, $E=210$ GPa το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα, l_{cr} το κρίσιμο μήκος λυγισμού της ράβδου και $\gamma_{M1}=1,1$ συντελεστής ασφαλείας για γέφυρες.

5. ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ ΑΝΟΠΤΗΣΗΣ

5.1 Είδη μεταβολών διάταξης

Η βελτιστοποίηση επιτυγχάνεται μέσω δυνατών μεταβολών που μπορούν να γίνουν στη διάταξη του προβλήματος. Οι δυνατές μεταβολές είναι:

- Αλλαγή διαστάσεων διατομής S_j μίας ράβδου j . Επιλέγεται τυχαία μια ράβδος j του δικτυώματος και από τη διατομή της S_j προσδιορίζεται ο τύπος της διατομής (πχ IPE).

Επιλέγεται τυχαία μία διατομή S'_j που να έχει τον ίδιο τύπο (πχ ΙΡΕ), η οποία τίθεται ως η νέα διατομή της ράβδου j . Είναι πιθανό ότι η νέα διατομή δεν είναι επαρκής, ή αντίθετα είναι υπερεπαρκής, για τα φορτία του δικτύωματος. Και οι δύο περιπτώσεις αντιμετωπίζονται μέσω της ενέργειας, ή ποινής, όπως αναπτύσσεται στο επόμενο εδάφιο.

- ii. Αλλαγή τύπου διατομής S_j μίας ράβδου j . Επιλέγεται τυχαία μία ράβδος j του δικτύωματος. Επιλέγεται τυχαία μία διατομή S'_j που έχει τυχαίο τύπο, η οποία τίθεται ως η νέα διατομή της ράβδου j . Αν υπάρχει περιορισμός στη ράβδο να παίρνει διατομές από συγκεκριμένο υποσύνολο τύπων διατομών, η διατομή S'_j λαμβάνεται τυχαία από αυτό το υποσύνολο.
- iii. Αλλαγή διαστάσεων/τύπου διατομής ράβδου στο άνω ή στο κάτω πέλμα. Αν υπάρχει περιορισμός ενιαίας διατομής στο άνω ή στο κάτω πέλμα, στα εδάφια i και ii όλες οι ράβδοι του άνω ή του κάτω πέλματος θεωρούνται ως μία.

5.2 Υπολογισμός ενέργειας (ποινής) t

Η ενέργεια t μίας διάταξης του δικτύωματος είναι το μέτρο του πόσο πολύ διαφέρει η διάταξη από τη βέλτιστη διάταξη. Η ενέργεια t μπορεί να θεωρηθεί και ως η ποινή που επιβάλλεται σε μία διάταξη διότι δεν είναι η βέλτιστη. Ως ενέργεια που οφείλεται στη διάταξη ορίζεται το βάρος του δικτύωματος.

$$t_C = g_{st} \sum_{j=1}^N A_j L_j$$

όπου A_j είναι το εμβαδόν της διατομής της ράβδου j , L_j είναι το μήκος της, $g_{st}=78,5\text{kN/m}^3$ είναι το ειδικό βάρος του χάλυβα και N το πλήθος των ράβδων. Καθώς η ΜΠΑ ελαχιστοποιεί την ενέργεια t , ελαχιστοποιεί και το βάρος του δικτύωματος. Επίσης ελαχιστοποιεί και τις διατομές αφού μικρότερες διατομές οδηγούν σε μικρότερο βάρος. Βέβαια η διατομή πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη έτσι ώστε να μπορεί να φέρει το αξονικό φορτίο της ράβδου N , δηλαδή πρέπει να ικανοποιούνται οι εξ. (2) και (3). Έτσι για να εξασφαλιστεί ότι η διατομή πρέπει να μπορεί να φέρει το αξονικό φορτίο N , αν $N > N_{Rd}$ πρέπει η ενέργεια της διάταξης να αυξηθεί σημαντικά, και η αύξηση πρέπει να είναι ανάλογη με το πόσο πολύ παραβιάζεται η εξ. (2) ή (3). Ως σημαντικό ποσό ενέργειας t_B μπορεί να ληφθεί το βάρος του δικτύωματος πριν τη βελτιστοποίηση. Ως μέτρο παραβίασης της εξ. (2) ή (3) για τη ράβδο j ορίζεται:

$$f_j = 1 \quad \text{αν} \quad N_j \leq N_{j,Rd} \quad \text{και} \quad f_j = \frac{N_j}{N_{j,Rd}} \quad \text{αν} \quad N_j > N_{j,Rd}$$

Τότε το ποσό της ενέργειας λόγω των διατομών ορίζεται ως:

$$t_S = \sum_{j=1}^N (f_j - 1) \cdot t_B$$

Η ολική ενέργεια για μία διάταξη για ένα συνδυασμό φόρτισης (πχ για τα κατακόρυφα φορτία), είναι το άθροισμα της ενέργειας της διάταξης και των διατομών:

$$t = t_C + t_S = g_{st} \sum_{j=1}^N A_j L_j + \sum_{j=1}^N (f_j - 1) \cdot t_B \quad (4)$$

Όταν η ΜΠΑ εφαρμόζεται για 2 η περισσότερους συνδυασμούς φορτίσεων, πρέπει να βελτιστοποιείται η διάταξη για όλους τους συνδυασμούς. Έτσι ως ολική ενέργεια τίθεται το άθροισμα των ενεργειών που προκύπτουν από την εξ. (4) όταν αυτή εφαρμόζεται για κάθε συνδυασμό φόρτισης.

5.3 Θερμοκρασία T

Η έννοια της θερμοκρασίας είναι ο ρυθμός με τον οποίο επιτρέπονται μεταβολές που αυξάνουν την ενέργεια του συστήματος (αρνητικές μεταβολές). Η αρχική θερμοκρασία T_1 πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, έτσι ώστε να επιτρέπονται πολλές μεταβολές που προκαλούν αύξηση της ενέργειας (η ποιής). Η θερμοκρασία μπορεί να βρεθεί επιλύοντας ως προς T τον τύπο του Metropolis, εξ. (1):

$$T_1 = -\frac{\Delta t}{\ln(P_r)} \quad , \quad \Delta t = t_2 - t_1 > 0$$

όπου P_r είναι αρκετά μεγάλη πιθανότητα (πχ $P_r=90\%=0,9$) και η Δt μπορεί να βρεθεί ως ο μέσος όρος των $\Delta t > 0$ που προκύπτουν από ένα σημαντικό αριθμό δοκιμαστικών μεταβολών που γίνονται πριν την εφαρμογή της ΜΠΑ.

5.4 Βήματα θερμοκρασίας

Ο αλγόριθμος της ΜΠΑ παράγει ένα πλήθος N_M δοκιμαστικές μεταβολές και αποδέχεται τις θετικές μεταβολές και τις αρνητικές με πιθανότητα που δίνεται από την εξ. (1) με βάση την αρχική θερμοκρασία T_1 . Στη συνέχεια η θερμοκρασία μειώνεται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Το πλήθος των δοκιμών πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο και εμπειρικά δίνεται από [8]:

$$N_M = 100N_d$$

όπου N_d είναι η διάσταση του προβλήματος, δηλαδή το πλήθος των ράβδων επί δύο, αφού δύο είναι οι δυνατές μεταβολές (διαστάσεις και τύπος). Η μείωση της θερμοκρασίας σε κάθε βήμα δίνεται από:

$$T_i = 0,5T_{i-1}$$

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Η προτεινόμενη μέθοδος υλοποιήθηκε σε Python και για λόγους φιλικότητας προς τον χρήστη, ευελιξίας και αποτελεσματικότητας ενσωματώθηκε στο ελεύθερο λογισμικό ηλεκτρονικής σχεδίασης [9]. Η μέθοδος εφαρμόστηκε για την βελτιστοποίηση του μη συμμετρικού δικτύωματος που φαίνεται στο Σχ. 1. Το δίκτυωμα έχει 5 φατνώματα μήκους 3m και ύψος 2m. Έγιναν 3 δοκιμές με περιορισμούς και χωρίς:

- Κοινή διατομή IPE στις οριζόντιες ράβδους και κοίλες διατομές RHS στις υπόλοιπες (για κατασκευαστικούς λόγους)
- Όπως και η δοκιμή a) αλλά με διαφορετική διατομή IPE σε κάθε οριζόντια ράβδο.
- Οποιαδήποτε από τις 1416 διατομές της παραγράφου 4.1 σε κάθε ράβδο.

Δοκιμή	Παραδοσιακή Βάρος (kN)	ΜΠΑ Βάρος (kN)	Μείωση βάρους (%)
a) Κοινή διατομή IPE, και RHS	23,16	21,85	6 %
b) Διατομές IPE και κοίλες RHS	19,95	18,16	9 %
c) Οποιοσδήποτε διατομές	19,95	13,39	33 %

Πίν. 1. Βάρος δικτυωμάτων για κάθε δοκιμή

Λόγω του στοχαστικού χαρακτήρα της ΜΠΑ έγιναν πολλαπλές εκτελέσεις του προγράμματος για κάθε δοκιμή, και λήφθηκαν αυτές με το λιγότερο βάρος. Σε κάθε

εκτέλεση του προγράμματος έγιναν περίπου 230000 στατικές αναλύσεις του δικτύωματος για τις ανάγκες της ΜΠΑ. Εξαιτίας του μη συμμετρικού δικτύωματος έγιναν ξεχωριστές στατικές αναλύσεις για θετικά και αρνητικά σεισμικά φορτία, συνδυασμένα με τα κατακόρυφα φορτία.

Στον Πίν. 1 φαίνεται το βάρος του δικτύωματος για κάθε δοκιμή και όπως υπολογίζεται με την παραδοσιακή μέθοδο (δηλαδή με την επιλογή της ελάχιστης διατομής που επαρκεί για την αξονική δύναμη κάθε ράβδου) και με την ΜΠΑ της παρούσας εργασίας. Η μείωση του βάρους είναι μέτρια αλλά υπολογίσιμη. Στην τρίτη δοκιμή (c) φαίνεται σημαντική μείωση του βάρους, η οποία όμως αντισταθμίζεται από το αυξημένο κόστος συνδέσεων, καθώς οι διατομές των ράβδων είναι ετερόκλητες (Πίν. 2).

Στον Πίν. 2 φαίνονται οι διατομές σε κάθε ράβδο όπως προέκυψαν από 5 διαφορετικές εκτελέσεις του προγράμματος με την ΜΠΑ. Είναι χαρακτηριστικό ότι παρότι το μεγάλο αριθμό διατομών (1416) και το στοχαστικό χαρακτήρα της ΜΠΑ, οι διατομές των ράβδων αλλάζουν ελάχιστα σε κάθε εκτέλεση του προγράμματος. Επίσης υπάρχει μία προτίμηση για τις κοίλες διατομές RHS, που εξηγείται από τη μεγάλη ροπή αδρανείας των διατομών σε σχέση με το βάρος τους. Σε περαιτέρω δοκιμές χωρίς τα σεισμικά φορτία, οι διατομές που προέκυψαν είναι τελείως διαφορετικές από αυτές του Πίν. 2, που σημαίνει ότι τα σεισμικά φορτία είναι καθοριστικά για τον τύπο των διατομών που ελαχιστοποιούν το βάρος.

	Εκτέλεση 1	Εκτέλεση 2	Εκτέλεση 3	Εκτέλεση 4
Βάρος (kN)	13,387	13,398	13,387	13,497
Ράβδος				
πλάγια02	RHS 150 x 150 x 4.0	RHS 150 x 150 x 4.0	RHS 150 x 150 x 4.0	RHS 150 x 150 x 4.0
πλάγια03	UPN 200	UPN 200	UPN 200	UPN 200
πλάγια06	RHS 120 x 120 x 4.0	RHS 120 x 120 x 4.0	RHS 120 x 120 x 4.0	RHS 120 x 120 x 4.0
πλάγια07	FL 65 x 8	FL 35 x 15	FL 65 x 8	FL 65 x 8
πλάγια10	UPN 140	UPN 140	UPN 140	UPN 140
πλάγια11	RHS 40 x 40 x 2.0	RHS 40 x 40 x 2.0	RHS 40 x 40 x 2.0	RHS 40 x 40 x 2.0
πλάγια14	U 65 x 42 x 5.5	U 65 x 42 x 5.5	L 60 x 60 x 8	L 60 x 60 x 8
πλάγια15	UPN 240	UPN 220	UPN 240	UPN 220
πλάγια18	R 46	R 46	R 46	R 46
πλάγια19	RHS 110 x 110 x 3.0	RHS 120 x 100 x 3.0	RHS 140 x 80 x 3.0	RHS 120 x 100 x 3.0
πλάγια21	RHS 120 x 120 x 4.0	RHS 120 x 120 x 4.0	RHS 120 x 120 x 4.0	RHS 100 x 100 x 5.0
οριζόντια κάτω01	FL 50 x 35	FL 50 x 35	FL 70 x 25	FL 50 x 35
οριζόντια κάτω05	L 125 x 75 x 12	L 120 x 80 x 12	L 120 x 80 x 12	L 125 x 75 x 12
οριζόντια κάτω09	RHS 140 x 140 x 4.0	RHS 180 x 100 x 4.0	RHS 140 x 140 x 4.0	RHS 180 x 100 x 4.0
οριζόντια κάτω13	RHS 160 x 80 x 3.0	RHS 160 x 80 x 3.0	RHS 120 x 120 x 3.0	RHS 120 x 120 x 3.0
οριζόντια κάτω17	R 10	FL 20 x 5	R 10	R 10
οριζόντια πάνω04	UPN 120	UPN 100	UPN 120	RHS 60 x 60 x 2.0
οριζόντια πάνω08	RHS 140 x 140 x 4.0	RHS 140 x 140 x 4.0	RHS 180 x 100 x 4.0	RHS 180 x 100 x 4.0
οριζόντια πάνω12	RHS 160 x 160 x 4.0	RHS 160 x 160 x 4.0	RHS 160 x 160 x 4.0	RHS 160 x 160 x 4.0
οριζόντια πάνω16	RHS 160 x 160 x 4.0	RHS 160 x 160 x 4.0	RHS 160 x 160 x 4.0	RHS 160 x 160 x 4.0
οριζόντια πάνω20	RHS 120 x 120 x 4.0	RHS 120 x 120 x 4.0	RHS 120 x 120 x 4.0	RHS 110 x 110 x 5.0

Πίν 2. Το βάρος και οι διατομές κάθε ράβδου του δικτύωματος για 4 διαφορετικές εκτελέσεις της ΜΠΑ στη δοκιμή c).

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μια μέθοδος βελτιστοποίησης του τύπου και των

διαστάσεων των διατομών δικτυωμάτων. Οι διατομές επιλέγονται από εκτεταμένο σύνολο προτυποποιημένων διατομών, με δυνατότητα περιορισμών σε κάθε ράβδο. Η μέθοδος βασίζεται στον βασικό, χωρίς πολύπλοκες επεκτάσεις, αλγόριθμο προσομοιωμένης ανόπτησης και δίνει ενθαρρυντικά αποτελέσματα παρά τον ισοστατικό χαρακτήρα του δικτυώματος. Τα σεισμικά φορτία με εναλλασσόμενο πρόσημο επιδρούν αποφασιστικά στη βέλτιστη διάταξη του δικτυώματος, και συνεπώς πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Kirkpatrick S., Gelatt C.D. and Vecchi M.P. “Optimization by Simulated Annealing”, *Science*, Vol. 220, 1983, pp. 671–680.
- [2] Lagaros N.D., Papadrakakis M. and Kokossalakis G. “Structural optimization using evolutionary algorithms”, *Computers & Structures*, Vol. 80, 2002, pp. 571–589.
- [3] Degertekin S. “A comparison of simulated annealing and genetic algorithm for optimum design of nonlinear steel space frames”, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 34, 2007, pp. 347–359.
- [4] Λυριτζής Γ. “Βέλτιστη χωροθέτηση υποστυλωμάτων σε πλαίσια υπό σεισμική φόρτιση με γενετικούς αλγόριθμους”, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Ε.Α.Π., Πάτρα, 2013.
- [5] Lamberti L. “An efficient simulated annealing algorithm for design optimization of truss structures”, *Computers & Structures*, Vol. 86, 2008, pp. 1936–1953.
- [6] Oğuzhan Hasançebi, Fuat Erbatur, Layout optimisation of trusses using simulated annealing, *Advances in Engineering Software*, Volume 33, Issues 7–10, July–October 2002.
- [7] Metropolis N., Rosenbluth A.W., Rosenbluth M.N., Teller A.H. and Teller E. “Equations of State Calculations by Fast Computing Machines”, *Journal of Chemical Physics*, Vol. 21, 1953, pp. 1087–1092.
- [8] Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A. and Vetterling W.T. “Numerical Recipes in FORTRAN: The Art of Scientific Computing”, 2nd ed., *Cambridge University Press*, Cambridge, 1992.
- [9] Stamos A.A. “ThanCad: a 2dimensional CAD for engineers”, *Proceedings of the Europython2007 Conference*, Vilnius, Lithuania, 2007.

OPTIMISATION OF JOINT TOPOLOGY AND BARS IN TRUSSES

Thanasis Stamos

Dr. Civil Engineer – Senior teaching fellow
School of Civil Engineering, National Technical University of Athens
Athens, Greece
e-mail: stamthan@central.ntua.gr

Manolis Vougioukas

Dr. Civil Engineer – Lecturer
School of Civil Engineering, National Technical University of Athens
Athens, Greece
e-mail: manolis@central.ntua.gr

SUMMARY

The choice of bar section profiles of a truss is critical to the safety and the cost of the structure. Traditionally the engineer selects the section profiles and their initial dimensions, and the final dimensions are obtained by the static analysis of the truss. In this paper both the section profiles of the bars and their dimensions are considered as variables to be computed automatically. As the number of feasible solutions are practically infinite, the values which minimise the weight or the cost of the truss are selected, on the condition that they are sufficient for the loadings of the truss. In contrast to earlier works, all the variables are optimised simultaneously for all the load combinations, including seismic loads. The numerical stochastic method of simulated annealing is used for the optimisation. The method can optimize large-scale problems with arbitrary constraints in which the absolute minimum can be hidden among many local extrema. Constraints such as minimum and maximum section dimensions, and selection of section profiles from an arbitrary subset of all profiles are supported. The method is applied to two-dimensional trusses and gives promising results for further research.