

# ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΚΟΜΒΩΝ ΚΑΙ ΡΑΒΔΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΩΜΑΤΑ

**Αθανάσιος Στάμος**

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, ΕΕΔΙΠ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Ελλάδα

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

## 1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαμόρφωση της τοπολογίας των δικτυωμάτων, η θέση των κόμβων καθώς επίσης και η διατομή των ράβδων, είναι κρίσιμη για την ασφάλεια και την οικονομικότητα της κατασκευής. Συνήθως, πέρα από την αρχική επιλογή τοπολογίας δεν γίνεται συστηματική προσπάθεια μείωσης κόστους. Σε αυτή την εργασία η θέση των κόμβων και οι διατομές των ράβδων θεωρούνται μεταβλητές. Οι βέλτιστες τιμές των μεταβλητών για την ελαχιστοποίηση του κόστους/βάρους προσδιορίζονται αυτόματα με τη στοχαστική αριθμητική μέθοδο προσομοίωσης απόπτησης (ΜΠΑ). Η μέθοδος μπορεί να βελτιστοποιήσει προβλήματα μεγάλης κλίμακας, με αυθαίρετους περιορισμούς, στα οποία το απόλυτο ελάχιστο μπορεί να κρύβεται ανάμεσα σε πολλά τοπικά ακρότατα. Η βελτιστοποίηση του δικτύωματος γίνεται ταυτόχρονα για όλες τις μεταβλητές και για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης που, όπως προκύπτει, επιδρούν αποφασιστικά στη βέλτιστη μορφολογία. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε διδιάστατα δικτυώματα και δίνει ενθαρρυντικά αποτελέσματα για περαιτέρω έρευνα.

## 2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαμόρφωση της τοπολογίας των δικτυωμάτων, η θέση των κόμβων καθώς επίσης και η διατομή των ράβδων, είναι κρίσιμη για την ασφάλεια και την οικονομικότητα της κατασκευής. Παραδοσιακά ο μηχανικός, βασιζόμενος στην εμπειρία του, επιλέγει τη μορφολογία του δικτύωματος, δηλαδή την συνδεσμολογία και τις διαστάσεις του. Δίνοντας κάποιες αρχικές διατομές στις ράβδους, μπορεί να γίνει η στατική επίλυση του δικτύωματος και να προκύψουν οι τελικές διατομές των ράβδων. 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, μέσω πολλαπλών στατικών επιλύσεων, να γίνει η βέλτιστη επιλογή των διατομών των ράβδων και της θέσης των κόμβων του δικτύωματος. Η βέλτιστη επιλογή οδηγεί σε

ελάχιστο βάρος του δικτύωματος και συνεπώς στο ελάχιστο κόστος του, όχι όμως εις βάρος της ασφάλειας. Η εύρεση της βέλτιστης θέσης των κόμβων είναι ισχυρά μη γραμμικό πρόβλημα το οποίο επιλύεται με αριθμητικές μεθόδους. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται διδιάστατα δικτυώματα που καταπονούνται από ωφέλιμα και σεισμικά φορτία. Η βέλτιστη επιλογή των διατομών και των θέσεων των κόμβων υπολογίζεται με τη στοχαστική μέθοδο προσομοίωσης ανόπτωσης (ΜΠΑ) [1]. Άλλες μέθοδοι όπως οι γενετικοί και εξελικτικοί αλγόριθμοι έχουν χρησιμοποιηθεί σε κατασκευές [2]. Ο [3] έκανε σύγκριση γενετικών αλγορίθμων και της ΜΠΑ και κατέληξε ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι πιο γρήγοροι αλλά η ΜΠΑ δίνει καλύτερα αποτελέσματα. Ο [4] πρότεινε μια πολύπλοκη μεθοδολογία που βασίζεται στην ΜΠΑ. Σε αντίθεση, στην παρούσα εργασία δείχνεται ότι η βασική ΜΠΑ, με κατάλληλες (και απλές) μεταβολές διάταξης, μπορεί να οδηγήσει σε βελτιστοποίηση. Επίσης δείχνεται ότι τα σεισμικά φορτία παίζουν αποφασιστικό ρόλο στη βέλτιστη θέση των κόμβων, και είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη με εναλλασσόμενο πρόσημο προκειμένου να οδηγήσουν σε ρεαλιστική τοπολογία του δικτύωματος. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε διδιάστατα δικτυώματα 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 ανόπτωσης, 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 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 μορφολογία του δικτύωματος. Στη συνέχεια δοκιμάζει τυχαίες μεταβολές στην αρχική μορφολογία όπως μετακίνηση ενός κόμβου ή μεταβολή 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 [5]:

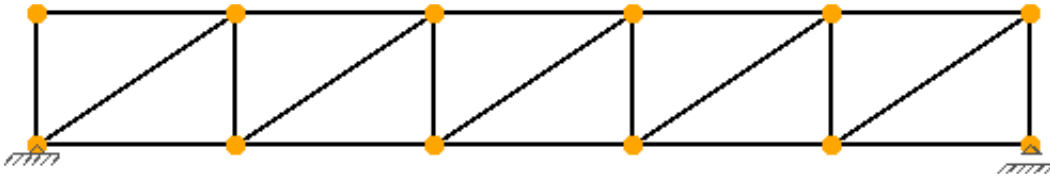
$$P_r = e^{(-\Delta t/T)} \quad , \quad \Delta t = t_2 - t_1 > 0 \quad (1)$$

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 [6]. 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 συντεταγμένες  $y_j$  των κόμβων του δικτυώματος που βρίσκονται στην άνω σειρά, και επίσης οι διατομές των ράβδων. Οι συντεταγμένες  $y_j$  και οι διατομές αποτελούν της μεταβλητές του προβλήματος και το πλήθος τους 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  $x$  των κόμβων της άνω σειράς και οι συντεταγμένες  $x, y$  των κόμβων της κάτω σειράς, καθώς επίσης και η συνδεσμολογία των ράβδων μπορούν να είναι οποιοσδήποτε. Ομοίως, οι στηρίξεις μπορεί να είναι αρθρώσεις ή κυλήσεις και μπορεί να είναι οποιοδήποτε. Οι διατομές των ράβδων είναι τετραγωνικές με διαστάσεις που κυμαίνονται από 30mm έως 160mm με βήμα 10mm, για λόγους ευκολίας. Οι συντεταγμένες  $y_j$  των κόμβων της άνω σειράς χρησιμοποιούνται ως αρχική μορφολογία στη μέθοδο εξομοίωσης απόπτωσης, και για λόγους ευστάθειας της μεθόδου υπόκεινται στον περιορισμό  $y_{\min} \leq y_j \leq y_{\max}$ . Τα όρια είναι αυθαίρετα.

### 4.2 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.

### 4.3 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

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

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

και  $\alpha=0,49$  για κατηγορία λυγηρότητας C,  $E=210\text{GPa}$  το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα,  $l_{cr}$  το κρίσιμο μήκος λυγισμού της ράβδου και  $\gamma_{M1}=1,1$  συντελεστής ασφαλείας για γέφυρες.

#### 4.4 Βελτιστοποίηση και φορτία

Η βελτιστοποίηση της μορφολογίας, που στην παρούσα εργασία αντιπροσωπεύεται από τις συντεταγμένες  $y_j$  των κόμβων της άνω σειράς, γίνεται με την ΜΠΑ. Το είδος των φορτίων επηρεάζει τη βέλτιστη μορφολογία του δικτύωματος, ιδιαίτερα αν το δικτύωμα δεν είναι συμμετρικό (Σχ. 1). Προκειμένου να βρεθεί η επίδραση των φορτίων στη μορφολογία του δικτύωματος γίνονται δοκιμές με κατακόρυφα φορτία (ίδιο βάρος και ωφέλιμα), με κατακόρυφα και θετικά σεισμικά φορτία, με κατακόρυφα και αρνητικά σεισμικά φορτία, και με κατακόρυφα, θετικά και αρνητικά σεισμικά φορτία.

### 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:

- i. Συντεταγμένη  $y_j$  ενός κόμβου  $j$ . Επιλέγεται τυχαία ένας από τους κόμβους  $j$  της άνω σειράς του δικτύωματος. Στη συντεταγμένη  $y_j$  του κόμβου προστίθεται ένας τυχαίος αριθμός  $\Delta y$ . Για αποφυγή αστάθειας τίθενται όρια στη μεταβολή  $-1\text{m} \leq \Delta y \leq 1\text{m}$ . Επίσης για τη συντεταγμένη  $y_j$  ισχύει ο περιορισμός  $y_{min} \leq y_j \leq y_{max}$  όπου  $y_{min}=1\text{m}$  και  $y_{max}=20\text{m}$ .
  - ii. Διατομή μίας ράβδου. Επιλέγεται τυχαία μία από τις ράβδους  $i$  του δικτύωματος. Οι διαστάσεις της τετραγωνικής διατομής αυξάνονται ή μειώνονται κατά  $10\text{mm}$ , υπό την προϋπόθεση ότι δεν γίνονται μικρότερες από  $30\text{mm}$  και μεγαλύτερες από  $160\text{mm}$ .
- Η επιλογή για το είδος της μεταβολής που πρόκειται να γίνει, γίνεται πάλι τυχαία.

#### 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 μορφολογία (συντεταγμένες  $y_j$  των κόμβων της άνω σειράς) ορίζεται το βάρος του δικτύωματος.

$$t_c = g_{st} \sum_i b_i^2 L_i$$

όπου  $b_i$  είναι η πλευρά της τετραγωνικής διατομής της ράβδου  $i$ ,  $L_i$  είναι το μήκος της και  $g_{st}=77\text{kN/m}^3$  είναι το ειδικό βάρος του χάλυβα. 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  $i$  ορίζεται:

$$f_i = 1 \quad \text{αν} \quad N_i \leq N_{i,Rd} \quad \text{και} \quad f_i = \frac{N_i}{N_{i,Rd}} \quad \text{αν} \quad N_i > N_{i,Rd}$$

Τότε το ποσό της ενέργειας λόγω των διατομών ορίζεται ως:

$$t_s = \sum_i (f_i - 1)t_B$$

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

$$t = t_c + t_s = g_{st} \sum_i b_i^2 L_i + \sum_i (f_i - 1)t_B \quad (4)$$

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 ποινής). 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  $\Delta t$  μπορεί να βρεθεί ως ο μέσος όρος των  $\Delta t > 0$  που προκύπτουν από ένα σημαντικό 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 [6]:

$$N_M = 100N_d$$

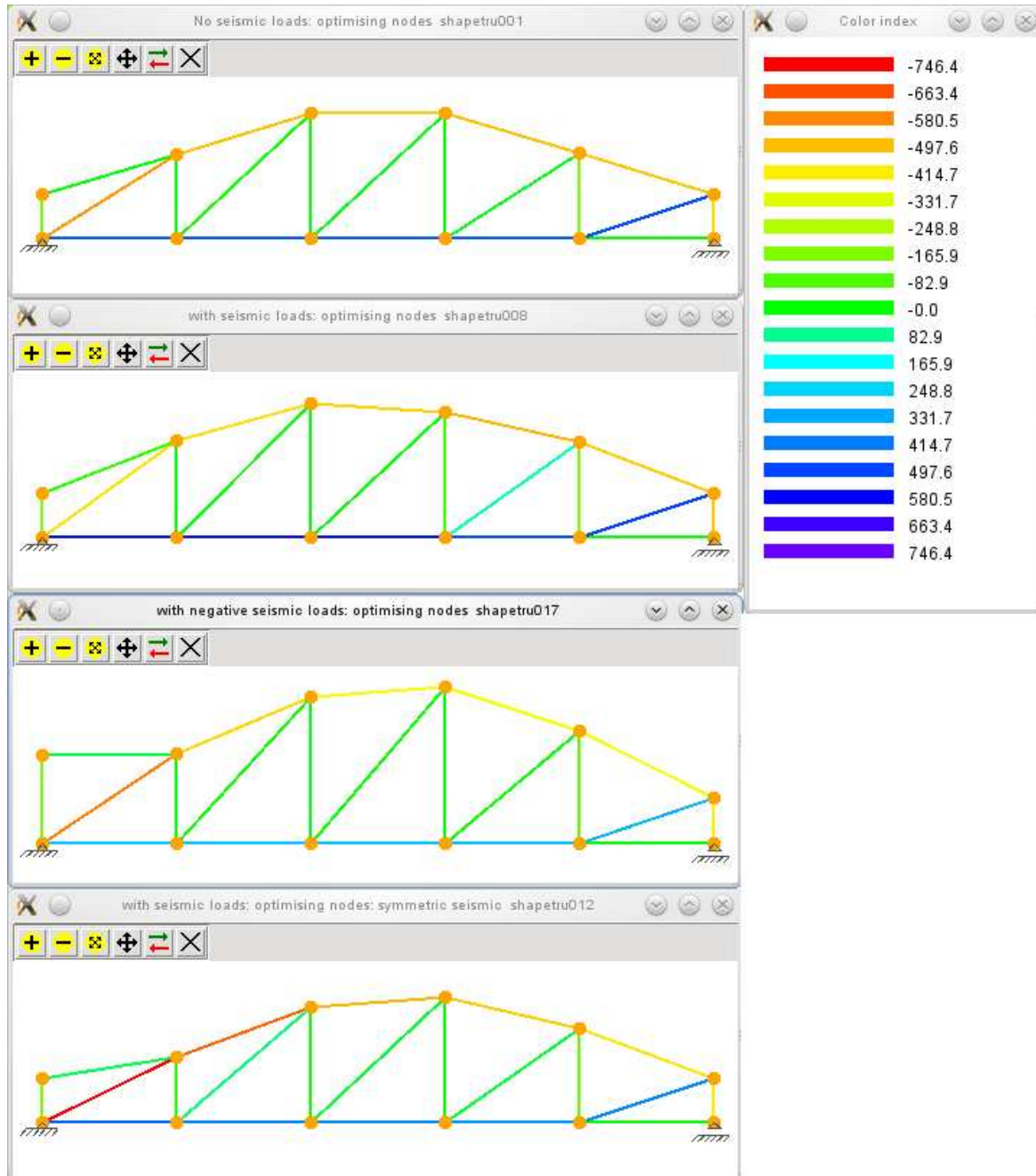
όπου  $N_d$  είναι η διάσταση του προβλήματος, δηλαδή το πλήθος των κόμβων της άνω σειράς του δικτύωματος (Σχ. 1) συν το πλήθος των ράβδων. Η μείωση της θερμοκρασίας σε κάθε βήμα δίνεται από:

$$T_i = 0.7T_{i-1}$$

## 6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Η προτεινόμενη μέθοδος υλοποιήθηκε σε C++ και για λόγους φιλικότητας προς τον χρήστη, ευελιξίας και αποτελεσματικότητας ενσωματώθηκε στο ελεύθερο λογισμικό

ηλεκτρονικής σχεδίασης [7]. Η μέθοδος εφαρμόστηκε για την βελτιστοποίηση του μη συμμετρικού δικτύωματος που φαίνεται στο Σχ. 1. Το δικτύωμα έχει 5 ανοίγματα μήκους 3m και αρχικό ύψος 2m. Έγιναν 4 δοκιμές, με τα κατακόρυφα φορτία, με τα κατακόρυφα φορτία και θετικά σεισμικά φορτία, με τα κατακόρυφα φορτία και αρνητικά σεισμικά φορτία, και με τα κατακόρυφα συνδυασμένα με θετικά και αρνητικά σεισμικά φορτία (Σχ. 2).



Σχ. 2. Μορφολογία και καταπόνηση δικτυωμάτων (kN). Από πάνω προς τα κάτω δοκιμές με φορτία: κατακόρυφα, κατακόρυφα και θετικά σεισμικά, κατακόρυφα και αρνητικά σεισμικά, κατακόρυφα και θετικά/αρνητικά

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

προκύπτει από τη βελτιστοποίηση φαίνεται στον Πιν. 1 και συγκρίνεται με το βάρος με το αρχικό δικτύωμα του Σχ. 1. Στο ίδιο πίνακα φαίνεται το μέγιστο ύψος του δικτυώματος σε κάθε δοκιμή. Από το Σχ. 2 και τον Πιν. 1 φαίνεται ότι το είδος των φορτίων επηρεάζει αποφασιστικά τη βέλτιστη μορφολογία των δικτυωμάτων. Η βελτιστοποίηση επιτυγχάνει περίπου 20% μείωση του βάρους.

Δοκιμή (φορτία)	Βάρος μη βελτιστ. μορφολογίας (kN)	Βάρος βελτιστ. μορφολογίας (kN)	Μέγιστο ύψος (m)
Κατακόρυφα	16,34	12,68	2,87
Κατ., θετικά σεισμικά	16,84	13,63	3,05
Κατ., αρνητικά σεισμικά	16,41	12,65	3,57
Κατ., θετ./αρν. σεισμικά	16,63	13,9	2,85

Πίν. 1. Βάρος και μέγιστο ύψος δικτυωμάτων

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μια μέθοδος βελτιστοποίησης μορφολογίας και διατομών δικτυωμάτων. Η μέθοδος βασίζεται στον βασικό, χωρίς πολύπλοκες επεκτάσεις, αλγόριθμο προσομοιωμένης ανόπτησης και δίνει ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Το είδος των φορτίων, και ειδικότερα τα σεισμικά φορτία με εναλλασσόμενο πρόσημο, επιδρούν αποφασιστικά στη βέλτιστη μορφολογία του δικτυώματος, και συνεπώς πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης ώστε να προκύψει ρεαλιστική τοπολογία.

## 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] Lamberti L. "An efficient simulated annealing algorithm for design optimization of truss structures", *Computers & Structures*, Vol. 86, 2008, pp. 1936-1953.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Stamos A.A. "ThanCad: a 2dimensional CAD for engineers", *Proceedings of the Europython2007 Conference*, Vilnius, Lithuania, 2007.

## **OPTIMIZATION OF JOINT TOPOLOGY AND BARS IN TRUSSES**

**Athanassios Stamos**

Dr. Civil Engineer

School of Civil Engineering, National Technical University of Athens  
Athens, Greece

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

### **SUMMARY**

The configuration of the topology of trusses, the position of the joints as well as the sections of the bars, is critical to the safety and the cost of the structure. Usually, apart from the choice of the initial topology, there is no systematic effort to reduce the cost. In this paper the position of joints and the sections of the bars are variables. The optimal values of the variables, in order to minimize the cost / weight, are determined automatically by the stochastic numerical method of simulated annealing (MSE). This method can optimize large-scale problems with arbitrary constraints in which the absolute minimum can be hidden among many local extrema. The optimization of the truss is made simultaneously for all the variables and all combinations of load, which, as it is shown, act decisively in the optimum morphology of the truss. The method is applied to two-dimensional trusses and gives promising results for further research.