



Ειδική Υπηρεσία Διαχείρισης και Εφαρμογής Δράσεων
στους τομείς Έρευνας, Τεχνολογικής Ανάπτυξης και Καινοτομίας

ΕΝΙΑΙΑ ΔΡΑΣΗ ΚΡΑΤΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ
ΕΡΕΥΝΑΣ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
& ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑΣ

ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ – ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ

ΕΝΟΤΗΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 3: ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

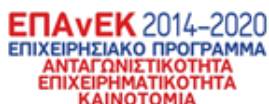
Π3.1 Εφαρμογή της διαδικασίας βελτιστοποίησης τοπολογίας στο HP-OCP

Κωδικός Έργου: T1ΕΔΚ-05603

Τίτλος Έργου: Ολιστική Υπολογιστική Πλατφόρμα
Βελτιστοποίησης Υψηλών Επιδόσεων – HP-
OCP

Φορείς: ΕΜΠ-ISAAR,
ACE HELLAS ΑΕ, DBC Α.Ε.

Χρόνος Από το πρόγραμμα: Μ24
Παράδοσης: Υλοποιήθηκε: Μ24 (Σεπτέμβριος 2020)



Εισαγωγή

Το συγκεκριμένο παραδοτέο αποτελεί την παρουσίαση της διερεύνησης των δυνατοτήτων παραμετρικής βελτιστοποίησης που έχουν αναπτυχθεί στην παρούσα φάση ως ανεξάρτητο λογισμικό ως μέρος του Π3.1 Έφαρμογή της διαδικασίας βελτιστοποίησης τοπολογίας στο HP-OCP, (M24 ACE HELLAS AE), για να ενσωματωθεί στην συνέχεια ως ενιαίο λογισμικό στο HP-OCP. Πιο συγκεκριμένα γίνεται διερεύνηση αποδοτικότητας του λογισμικού Βελτιστοποίησης Τοπολογίας κατασκευών.

Στον σύνδεσμο αυτό: <http://users.ntua.gr/nlagaros/topology.mp4>, παρουσιάζεται σε μορφή video η χρήση του λογισμικού βελτιστοποίησης, τοπολογίας κατασκευών ενώ υπάρχει δυνατότητα παροχής πρόσβασης για δοκιμή σε Η/Υ στον οποίο είναι εγκατεστημένο. Γραφικό περιβάλλον χρήσης (GUI) αναπτύσσεται στα πλαίσια Π5.1 που αφορά την ανάπτυξη του ενιαίου λογισμικού HP-OCP.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

Τη σημερινή εποχή, μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στον κατασκευαστικό κλάδο είναι η μείωση των υλικών που χρησιμοποιούνται σε μια κατασκευή και ταυτόχρονα η κατανομή του υλικού να έχει γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι πιο στιβαρή. Η βελτιστοποίηση τοπολογίας είναι μια διαδικασία σχεδιασμού που χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο, για τη δημιουργία βελτιστοποιημένων κατασκευών σε διάφορους τομείς της μηχανικής όπως η αεροναυπηγική, η αυτοκινητοβιομηχανία και η αεροδιαστημική. Κατά συνέπεια, όλα τα εμπορικά προγράμματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων που έχουν ενσωματώσει τη δυνατότητα της βελτιστοποίησης τοπολογίας, είναι λογισμικά που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μηχανολόγου μηχανικού. Ενδεικτικά κάποια παραδείγματα είναι το OptiStruct της Altair, το Tosca Dassault Systems που συνδέεται με το ABAQUS και το MSC Nastran καθώς και οι σουίτες βελτιστοποίησης τοπολογίας των προγραμμάτων ANSYS και SOLIDWORKS. Η βασική καινοτομία της σουίτας βελτιστοποίησης τοπολογίας που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος HP-OCP είναι ότι είναι ανεξάρτητη από το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο τη διασύνδεσή του με προγράμματα πολιτικού μηχανικού. Πιο συγκεκριμένα η σουίτα έχει συνδεθεί επιτυχώς με το SAP2000 και το ETABS της CSI, προγράμματα ευρέως διαδεδομένα στον πολιτικούς μηχανικούς.

Η βασική ιδέα της βελτιστοποίησης τοπολογίας είναι η εύρεση του σχήματος μιας κατασκευής με κατανομή του υλικού μέσω ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Η πιο διαδεδομένη προσέγγιση για την αντιμετώπιση των προβλημάτων βελτιστοποίησης τοπολογίας, η οποία υλοποιήθηκε στα πλαίσια του συγκριμένου ερευνητικού προγράμματος, είναι η μέθοδος SIMP (Solid Isotropic Material with Penalisation). Η μαθηματική διατύπωση της βελτιστοποίησης τοπολογίας που έχει αντικειμενική συνάρτηση την ενδοσιμότητα της κατασκευής είναι:

$$\min C(x) = F^T \cdot u(x) \quad (1a)$$

s.t.

$$K(x) \cdot u(x) = F \quad (1b)$$

$$\frac{V(x)}{V_0} = f \quad (1c)$$

$$0 < x_{min} \leq x \leq 1 \quad (1d)$$

όπου το C είναι η ενδοσιμότητα, F είναι το μητρώο των δυνάμεων, u το μητρώο των μετατοπίσεων, K το μητρώο δυσκαμψίας και f η τιμή του τελικού όγκου της κατασκευής. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η ελαχιστοποίηση της ενδοσιμότητας και οι περιορισμοί είναι η επίλυση της εξίσωσης ισορροπίας μέσω της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και το ποσοστό του όγκου που καλύπτει η τελική κατασκευή σε σχέση με την αρχική. Οι μεταβλητές σχεδιασμού είναι οι πυκνότητες των πεπερασμένων στοιχείων και το εύρος των τιμών τους είναι $(0,1]$, όπου το 1 υποδεικνύει ότι το υλικό υπάρχει ενώ το 0 ότι δεν υπάρχει. Στη μαθηματική διατύπωση αντί για την τιμή 0 προσδιορίζεται μια πολύ μικρή ποσότητα x_{min} προκειμένου να αποφευχθεί το φαινόμενο της μοναδικότητας. Η παραπάνω διατύπωση μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας διάφορους μαθηματικούς αλγορίθμους όπως η Optimality Criteria (OC), Sequential Linear Programming (SLP) και Method of Moving Asymptotes (MMA). Σε αυτήν την έκδοση του λογισμικού έχουν αναπτυχθεί η OC και η MMA. Κρίσιμο στοιχείο όλων των προαναφερθεισών αλγορίθμων είναι ο υπολογισμός της μερικής παραγώγου της ενδοσιμότητας ως προς τη μεταβλητή σχεδιασμού. Από την κλασική διατύπωση βλέπουμε ότι πρέπει να είναι γνωστό το μητρώο δυσκαμψίας της κατασκευής:

$$\frac{\partial C(x)}{\partial x_e} = -u_e(x)^T \frac{\partial k_e(x)}{\partial x_e} u_e(x) \quad (2)$$

Όμως κανένα λογισμικό δεν δίνει αυτή την πληροφορία σε εξωτερικούς χρήστες μέσω API (Application Programming Interface). Στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού προγράμματος υλοποιήθηκε μια πραγματικά καινοτόμα μαθηματική διατύπωση:

$$k_e(x_e) = x_e^p \cdot k_e^0 \Leftrightarrow k_e^0 = \frac{k_e(x_e)}{x_e^p} \quad (3)$$

$$\frac{\partial k_e(x_e)}{\partial x_e} = p \cdot x_e^{p-1} \cdot k_e^0 = p \cdot x_e^{p-1} \cdot \frac{k_e(x_e)}{x_e^p} = p \cdot \frac{k_e(x_e)}{x_e} \quad (4)$$

$$\frac{\partial C(x)}{\partial x_e} = -u_e(x)^T \cdot p \cdot \frac{k_e(x)}{x_e} u_e(x) = -p \frac{F^T u_e(x)}{x_e} = -\frac{p \cdot C_e}{x_e} \quad (5)$$

Με αυτόν τον τρόπο η παράγωγος υπολογίζεται γνωρίζοντας μόνο την ενδοσιμότητα κάθε πεπερασμένου στοιχείου, μέγεθος το οποίο μπορούμε να υπολογίσουμε από οποιοδήποτε στατικό πρόγραμμα.

Ως προς τη δομή της σουίτας βελτιστοποίησης τοπολογίας της υπολογιστικής πλατφόρμας HP-OCP, υπάρχουν δύο βασικά στάδια από τα οποία αποτελείται, η προ επεξεργασία και η επαναληπτική διαδικασία. Και στα δύο μέρη υπάρχουν δύο ανεξάρτητες διαδικασίες που εκτελούνται. Αρχικά η πλατφόρμα πρέπει να ανακτήσει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες της κατασκευής από το εκάστοτε στατικό εμπορικό πρόγραμμα. Τη συγκεκριμένη απαίτηση την καλύψαμε με τη δημιουργία κατάλληλων *delegate* συναρτήσεων, οι οποίες συνδέονται με τα στατικά προγράμματα μέσω των API τους. Με τον τρόπο αυτό η βιβλιοθήκη μας συλλέγει μόνο τα απαραίτητα δεδομένα ενώ ταυτόχρονα οι συναρτήσεις αυτές είναι ανεξάρτητες των στατικών προγραμμάτων με αποτέλεσμα την εύκολη διασύνδεση με οποιοδήποτε στατικό πρόγραμμα. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα διασύνδεσης της σουίτας του HP-OCP με τα στατικά προγράμματα όχι μόνο μέσω API αλλά και μέσω XML ή οποιοδήποτε άλλο τύπο αρχείου ανταλλαγής δεδομένων. Οι επιθυμητές πληροφορίες είναι ορισμένες βασικές λειτουργίες, όπως το άνοιγμα, η αποθήκευση και το κλείσιμο του στατικού προγράμματος και ορισμένες προχωρημένες λειτουργίες όπως η λήψη του ονόματος των πεπερασμένων στοιχείων, η προσθήκη ενός υλικού ή η τροποποίηση του μέτρου ελαστικότητας ενός υλικού. Κατά τη διάρκεια του επαναληπτικού μέρους υπάρχει πάντα αλληλεπίδραση μεταξύ του στατικού προγράμματος και της σουίτας μας, γιατί μετά από κάθε ανάλυση πρέπει να ανακτηθούν τα ανανεωμένα αποτελέσματα της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων.

Το πρώτο βήμα είναι η ανάκτηση όλων των γεωμετρικών πληροφοριών της κατασκευής μας. Δημιουργούνται οι κατάλληλες βιβλιοθήκες που περιέχουν τα ονόματα και τις συντεταγμένες των κόμβων, τα ονόματα και την ενδοσιμότητα των πεπερασμένων στοιχείων και τα ονόματα των συνδυασμών φόρτισης. Το επόμενο βήμα είναι ο ορισμός των πεπερασμένων στοιχείων και η εφαρμογή του προβλήματος βελτιστοποίησης τοπολογίας. Αξιοσημείωτος είναι ο τρόπος με τον οποίο εφαρμόζεται στο σημείο αυτό η μέθοδος SIMP. Για να προσδιορίσουμε οποιοδήποτε είδος πεπερασμένου στοιχείου (2D ή 3D) σε κάθε στατικό πρόγραμμα, πρώτα πρέπει να δημιουργηθούν οι αντίστοιχες διατομές και τα αντίστοιχα υλικά. Κάθε υλικό παράγεται από την εξίσωση SIMP και στη συνέχεια αναθέτεται σε μια διατομή. Ειδικότερα, το μέτρο ελαστικότητας τροποποιείται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$E_i = E_{min} + (E_0 - E_{min}) \cdot \frac{i}{k} \quad (6)$$

όπου το E_0 είναι το αρχικό μέτρο ελαστικότητας, συνήθως βάζουμε μονάδα, το E_{min} είναι ένας μικρός αριθμός για την αποφυγή του φαινομένου της μοναδικότητας και k είναι ο αριθμός των διαφορετικών διατομών και υλικών που έχουν παραχθεί. Στο σημείο αυτό είναι σημαντική η επιλογή του χρήστη της εφαρμογής καθώς όσο πιο μεγάλος είναι αυτό ο αριθμός τόσο πιο ακριβής προσέγγιση έχουμε. Όμως αν είναι πολύ μεγάλος αυξάνεται χωρίς νόημα το υπολογιστικό

κόστος. Επομένως εδώ είναι κρίσιμη η εμπειρία του χρήστη στην αντιμετώπιση προβλημάτων βελτιστοποίησης τοπολογίας. Με την προαναφερθείσα διαδικασία έχουμε δημιουργήσει ένα πεπερασμένο αριθμό υλικών όμως η μεταβλητή σχεδιασμού παραμένει συνεχής. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με τη δημιουργία της συνάρτησης:

$$index = Convert.ToInt32(x^p \cdot (k - 1)) \quad (7)$$

όπου ο χρήστης πρέπει να ορίσει τον αριθμό p που παίρνει τιμές από 1 έως 4 ενώ και πάλι η σωστή επιλογή προκύπτει από την εμπειρία του χρήστη.

Στο σημείο αυτό θα περιγράψουμε δύο επιπλέον δυνατότητες του λογισμικού που αναπτύχθηκε. Η πρώτη είναι η επιλογή ενός φίλτρου στην κατασκευή μας προκειμένου να αποφύγουμε το φαινόμενο της σκακιέρας. Στο σημείο αυτό ο χρήστης το μόνο που πρέπει να δηλώσει είναι η ακτίνα του φίλτρου που θέλει να εφαρμόσει ανάλογα με τις απαιτήσεις της κατασκευής. Η επόμενη σημαντική δυνατότητα που προσφέρεται από το παρόν λογισμικό είναι η αντιμετώπιση προβλημάτων βελτιστοποίησης τοπολογίας έχοντας ορίσει ορισμένα τμήματα της αρχικής κατασκευής που δεν θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε, είτε επειδή απαιτούμε να υπάρχει πάντα υλικό είτε το αντίθετο. Στην περίπτωση που θέλουμε να εφαρμόσουμε την συγκεκριμένη δυνατότητα, ο χρήστης πρέπει να δημιουργήσει στο στατικό πρόγραμμα ένα γκρουπ με το όνομα “NonOptimized” και στη συνέχεια να αναθέσει στις περιοχές που επιθυμεί το συγκεκριμένο γκρουπ. Επίσης πρέπει να δηλώσει αν θέλει η περιοχή αυτή να έχει υλικό ή όχι. Έχοντας ορίσει όλα τα απαραίτητα μεγέθη που περιγράψαμε από πάνω το λογισμικό ξεκινάει την επαναληπτική διαδικασία στην οποία ο χρήστης δεν παρεμβαίνει.

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τρία ενδεικτικά παραδείγματα που υλοποιήθηκαν από το λογισμικό HP-OCP μέσω της διασύνδεσής του με το SAP2000. Στο πρώτο παράδειγμα βλέπουμε ένα τυπικό πρόβλημα βελτιστοποίησης τοπολογίας. Η κατασκευή αποτελείται από $n_{el} = 4800$ πεπερασμένα στοιχεία με $n_{elx} = 120$ στοιχεία στην οριζόντια και $n_{ely} = 40$ στην κατακόρυφη κατεύθυνση. Θεωρούμε ότι στην αριστερή μεριά έχουμε πάκτωση ενώ στο δεξί κάτω τμήμα εφαρμόζουμε μια μοναδιαία φόρτιση. Σαν χρήστες επιλέγουμε ότι το ποσοστό του αρχικού όγκου που θέλουμε να καλύπτει η τελική κατασκευή είναι $volfrac = 0.3$, ο αριθμός διαφορετικών διατομών και υλικών είναι $k = 500$ ενώ το επιπλέον όριο που χρησιμοποιείται για την διαγραφή των πεπερασμένων στοιχείων που θεωρούμε ότι κάτω από αυτή την πυκνότητα δεν υπάρχουν είναι $D_{lim} = 0.4$. Τέλος για να αποφύγουμε το πρόβλημα της σκακιέρας θέτουμε την ακτίνα του φίλτρου $R = 3$. Στην εικόνα 1 βλέπουμε πράγματι ότι το αποτέλεσμα είναι το αναμενόμενο ενώ τονίζεται και η σωστή εφαρμογή του φίλτρου.

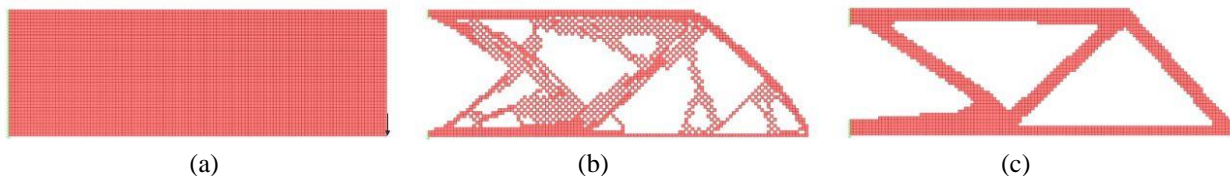


Figure 1. Cantilever beam: (a) Αρχική κατασκευή, Βελτιστοποιημένη κατασκευή (b) χωρίς φίλτρο, (c) με φίλτρο

Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο κατασκευές πολιτικού μηχανικού και τονίζεται η εφαρμοσιμότητα του λογισμικού σε κατασκευές πολιτικού μηχανικού. Αρχικά στις εικόνες 2 (a,b) βλέπουμε μια γέφυρα, στην οποία έχουμε καθορίσει ότι το πάνω μέρος που προσομοιώνει το οδόστρωμα θέλουμε να υπάρχει πάντα ενώ όλα τα δεδομένα που εισάγει ο χρήστης είναι: $volfrac = 0.3, k = 500, D_{lim} = 0.5, R = 3$. Στις εικόνες 2 (c,d) βλέπουμε μια κατασκευή MRF (Moment-resisting frames) η οποία χρησιμοποιείται σαν πλευρική στήριξη σε ουρανοξύστες και ψηλά κτίρια. Τα δεδομένα του χρήστη σε αυτή την εφαρμογή είναι $volfrac = 0.3, k = 500, D_{lim} = 0.2, R = 3$.

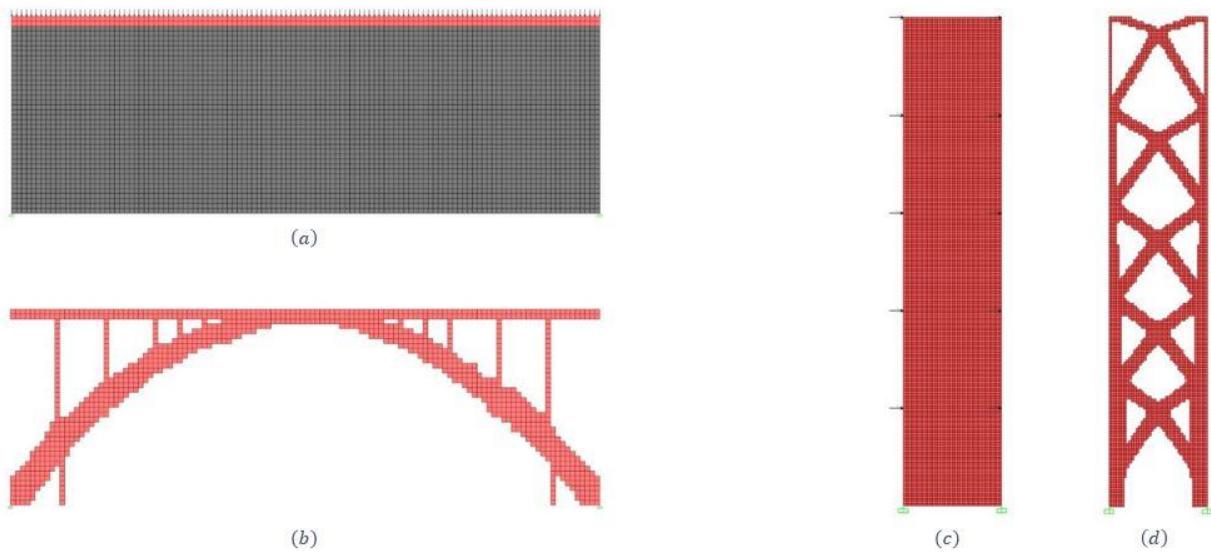


Figure 2. (a) Αρχική και (b) βελτιστοποιημένη κατασκευή για τη γέφυρα, (c) Αρχική και (d) βελτιστοποιημένη κατασκευή για το MRF

Με τα δύο τελευταία παραδείγματα γίνεται ξεκάθαρο ότι η σουίτα της βελτιστοποίησης τοπολογίας που αναπτύχθηκε στην υπολογιστική πλατφόρμα HP-OCP βρίσκει άμεση εφαρμογή σε προβλήματα πολιτικού μηχανικού ενώ η ευκολία διασύνδεσής της με διάφορα στατικά προγράμματα τη καθιστά πρωτοπόρα στο χώρο αυτό.

Σχόλια - Προβλήματα - Παρατηρήσεις

Δεν υπήρχαν παρατηρήσεις

	Επιστημονικός Υπεύθυνος Έργου	Συντονιστής Έργου
Υπογραφή:		
Όνοματεπώνυμο :	N. ΛΑΓΑΡΟΣ	Χ. ΚΩΣΤΟΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ
Ημ/νία :	10/09/2020	10/09/2020