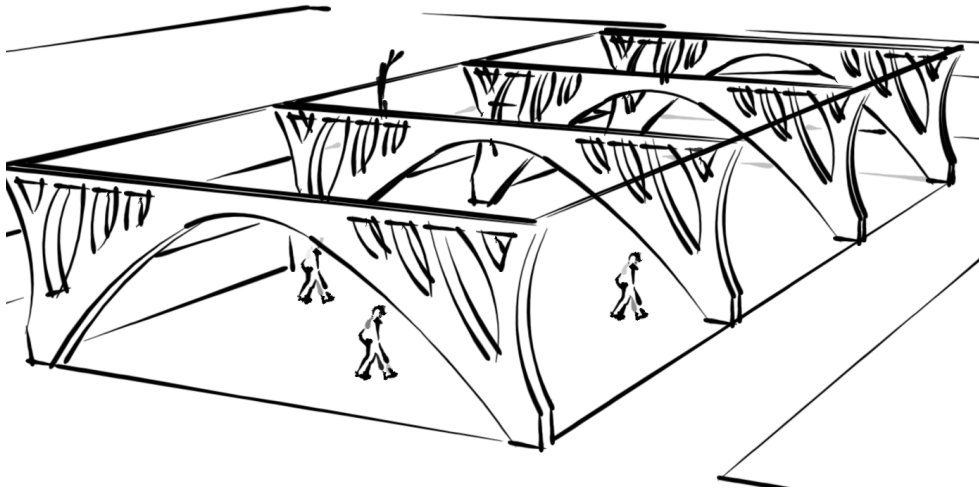




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΣΕ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ:
ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥΣ
Ή ΡΑΒΔΩΤΟΥΣ ΦΟΡΕΙΣ**



Διπλωματική Εργασία
Μπαδογιάννης Νικόλαος

Επιβλέπων
Λαγαρός Νικόλαος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Συνεπιβλέπων
Μιχαηλίδης Γεώργιος, SIMaP, INP Grenoble

Αθήνα, Ιούλιος 2015

Copyright © Νικόλαος Μπαδογιάννης, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον κ. Νικόλαο Λαγαρό, επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε, το ειλικρινές ενδιαφέρον που έδειξε για την πορεία μου και την εμπιστοσύνη στο πρόσωπό μου. Οι γνώσεις που αποκόμισα από αυτόν στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., και η σχέση που αναπτύξαμε, αποτελούν πολύ σημαντικό εφόδιο για τη μελλοντική επαγγελματική και προσωπική μου πορεία.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον κ. Γεώργιο Μιχαηλίδη, συνεπιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, χωρίς την συνεισφορά του οποίου θα ήταν αδύνατη η σύλληψη και η ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας. Η σπικτική του πάνω στα ακαδημαϊκά θέματα και η συνύπαρξη μαζί του με έκανε να αναθεωρήσω την σκέψη μου πάνω στο επάγγελμα του πολιτικού μηχανικού.

Ακόμα, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην εταιρεία ACE HELLAS για τη δωρεάν παραχώρηση του λογισμικού SCADA PRO V15 και για την καθοδήγηση πάνω στη χρήση του. Ειδικότερα, χωρίς τη βοήθεια του κ. Χρήστου Κωστοπαναγιώτη, υπεύθυνου ανάπτυξης λογισμικού και της κ. Αμαλίας Μπαγουρδή-Δέγκλερη, υπεύθυνης υποστήριξης λογισμικού, η αντιμετώπιση διαφόρων προβλημάτων και η προσέγγιση πολλών ιδιαίτερων σημείων της διπλωματικής μου εργασίας δεν θα ήταν εφικτές.

Στη συνέχεια, ιδιαίτερες ευχαριστίες μεταφέρω στους φίλους και τις φίλες μου για την ψυχολογική και όχι μόνο υποστήριξη σε κάθε βήμα της προσωπικής και ακαδημαϊκής μου πορείας και ιδιαίτερα στον φίλο και νέο συνάδελφο Στέφανο Μαργαρίτη για την παράλληλη εργασία και τη βοήθεια για την υλοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ οφείλω στους γονείς μου Γεώργιο και Σταματίνα και στην αδερφή μου, Δήμητρα, για την αμέριστη συμπαράσταση, την ψυχολογική υποστήριξη και για όσα ανεκτίμητα μου έχουν προσφέρει σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και όχι μόνο.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η πρόταση μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για εφαρμογή βελτιστοποίησης τοπολογίας σε έργα πολιτικού μηχανικού. Η κατασκευή που προκρίθηκε προς μελέτη ήταν μια πλαισιακή στήριξη στεγάστρου υπαίθριου εκθεσιακού χώρου και η ερμηνεία της έγινε τόσο ως ολόσωμη κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα, αλλά και ως ραβδωτή μεταλλική κατασκευή. Για τον σκοπό αυτό, επιλέχθηκαν τέσσερεις απλοί φορείς οι οποίοι με τη χρήση του κώδικα MATLAB SIMP88 της μεθόδου SIMP, βελτιστοποιήθηκαν ως προς την τοπολογία τους. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα μεταφέρθηκαν σε σχεδιαστικό περιβάλλον AutoCAD και ερμηνεύτηκαν περαιτέρω ως προς την αποτύπωσή τους. Τέλος, τα σχέδια έγιναν εισαγωγή στο πρόγραμμα στατικής ανάλυσης και ελέγχου SCADA PRO V15 και έγινε εξαγωγή των αποτελεσμάτων των εντατικών μεγεθών. Με βάση αυτά, έγινε ενδεικτικός οπλισμός, διαστασιολόγηση και υπολογισμός ενδεικτικού κόστους των κατασκευών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν πλήρως οκτώ προσομοιώματα, τέσσερα ως ολόσωμες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα και τέσσερα ως μεταλλικές ραβδωτές κατασκευές, για το σύνολο της προτεινόμενης μεθοδολογίας της εφαρμογής της βελτιστοποίησης τοπολογίας.

ABSTRACT

The subject of this thesis is to propose a complete methodology for topology optimization in civil engineering structures. The final construction selected in order to be studied is a frame structure which supports the shelter of an outdoor gallery. The frame is examined not only as a structure made completely of reinforced concrete but also as a ribbed steel construction. In order to accomplish that, four simple static models were chosen. By using the code SIMP88 written in MATLAB, the topology optimization method named SIMP was applied on those models. The results that have been at first exported from MATLAB were then transferred in the design environment of AutoCad and interpreted furthermore in means of design. Lastly, the designs from AutoCad were imported and examined in a structural analysis software called SCADA PRO V15. The results of the static analysis were used in order to suggest an indicative reinforcement of the concrete structures and selection of the steel parts, along with a primary cost calculation. In this thesis 8 models have been fully studied, 4 as concrete structures and 4 as steel structures, completing the work flow of applying topology optimization.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σύντομη περιγραφή διπλωματικής εργασίας - Ανάλυση στόχων	1
1.2 Μεθοδολογία	2
1.3 Δομή	3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Στόχος βιβλιογραφικής επισκόπησης	5
2.2 Κεντρική ιδέα	5
2.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση στη βελτιστοποίηση τοπολογίας	8
2.4 Αποτελέσματα βιβλιογραφικής επισκόπησης	9
2.5 Βελτιστοποίηση τοπολογίας - εφαρμογές πολιτικού μηχανικού	10
2.6 Κώδικες Βελτιστοποίησης γραμμένοι σε MATLAB	18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

3.1 Εισαγωγή	19
3.2 Βέλτιστος σχεδιασμός κατασκευών	20
3.3 Μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης	21
3.3.1 Μεταβλητές Σχεδιασμού	22
3.3.2 Αντικειμενική Συνάρτηση	23
3.3.3 Συναρτήσεις Περιορισμού	23
3.3.4 Τοπικά & καθολικά ελάχιστα	25
3.4 Ιδιότητες αλγορίθμων βελτιστοποίησης	25
3.5 Κατηγορίες αλγορίθμων βελτιστοποίησης	26
3.5.1 Μαθηματικές μέθοδοι βελτιστοποίησης	26
3.5.2 Μεταεურιστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης	28
3.6 Κατηγορίες Βελτιστοποίησης Κατασκευών	29
3.6.1 Βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης διατομής (sizing optimization)	29
3.6.2. Βελτιστοποίηση σχήματος κατασκευής (shape optimization)	30
3.6.3 Βελτιστοποίηση τοπολογίας κατασκευής (topology optimization)	32
3.7 Αρχιτεκτονική και βελτιστοποίηση τοπολογίας	33

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ SIMP ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΩΔΙΚΑ MATLAB

4.1 Εισαγωγή	35
4.2 Η μέθοδος SIMP	36

4.2.1 Μέθοδοι βελτιστοποίησης τοπολογίας	36
4.2.2 Βασική ιδέα της μεθόδου SIMP	37
4.2.3 Το πρόβλημα της σκακιέρας - checkerboard problem	38
4.3 SIMP 99	39
4.4 Απλά παραδείγματα εφαρμογής του κώδικα SIMP 99	42
4.4.1 Εφαρμογή της μεθόδου SIMP σε ειδικότερες κατασκευές	43
4.4.2 Αντιμετώπιση προβλημάτων και αναζήτηση εναλλακτικών	47
4.5 Κώδικας SIMP88	48
4.5.1 Ο κώδικας SIMP88	48
4.5.2 Τελική επιλογή	52
4.6 Σύνδεση αποτελεσμάτων MATLAB με σχεδιαστικό πρόγραμμα τύπου CAD	53
4.7 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	57
4.8 Επιλογή προσομοιωμάτων προς μελέτη	62

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΕ ΣΧΕΔΙΑΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΥΠΟΥ CAD.

5.1 Εισαγωγή	65
5.2 Βασικές αρχές αποτύπωσης αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης	66
5.3 Ερμηνεία προσομοιώματος Model_C	69
5.4 Αποτύπωση αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης σε σχεδιαστικό περιβάλλον AutoCad.	70

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΜΕΣΩ ΟΛΟΣΩΜΩΝ ΦΟΡΕΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΡΑΒΔΩΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΦΟΡΕΩΝ ΧΡΗΣΕΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ Scada Pro v15

6.1 Εισαγωγή	73
6.2 Ολόσωμοι φορείς από οπλισμένο σκυρόδεμα	74
6.2.1 Μοντελοποίηση	74
6.2.2 Εισαγωγή Στηρίξεων - Φορτίσεων	78
6.2.3 Ανάλυση - Συνδυασμοί φορτίσεων	81
6.3 Μεταλλικοί ραβδωτοί φορείς	83
6.3.1 Μοντελοποίηση	83
6.3.2 Εισαγωγή Στηρίξεων - Φορτίσεων	85
6.3.3 Ανάλυση - Συνδυασμοί φορτίσεων	86
6.4 Αποτελέσματα	87
6.4.1 Αποτελέσματα Model_A - ερμηνεία με ολόσωμη κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα	87
6.4.2 Αποτελέσματα Model_B - ερμηνεία με ραβδωτούς μεταλλικούς φορείς.	91
6.5 Έλεγχος διατομών και Συνδέσεων - Τοποθέτηση Οπλισμών	96
6.5.1 Έλεγχος διατομών και Συνδέσεων	96
6.5.2 Τοποθέτηση οπλισμών	100
6.6 Ενδεικτική εκτίμηση κόστους	100

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΤΕΛΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 Συμπεράσματα	103
7.2 Τελικές προτάσεις	105

<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	107
----------------------------------	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σύντομη περιγραφή διπλωματικής εργασίας - Ανάλυση στόχου

Η βασική ιδέα που διέπει την παρούσα διπλωματική εργασία είναι να ασχοληθεί από τη σκοπιά του μηχανικού με την έννοια της βελτιστοποίησης που βρίσκει εφαρμογές στο δομοστατικό σχεδιασμό[3]. Πιο συγκεκριμένα, η παρούσα διπλωματική στοχεύει να διερευνήσει το θεωρητικό υπόβαθρο ενός τομέα της βελτιστοποίησης που ακούει στο όνομα βελτιστοποίηση τοπολογίας (topology optimization)

Ως βελτιστοποίηση τοπολογίας σε προβλήματα κατασκευών ορίζεται μια μαθηματική προσέγγιση που βελτιστοποιεί τη συνολική διάταξη του υλικού σε συγκεκριμένο χώρο σχεδίασης, για δεδομένα φορτία και συνοριακές συνθήκες, ώστε να ελαχιστοποιείται ένα κριτήριο ενώ ταυτόχρονα να ικανοποιούνται τα κριτήρια σχεδιασμού.

Ο συγκεκριμένος τομέας βελτιστοποίησης αν και βρίσκει ευρύ πεδίο εφαρμογών στη ναυπηγική και στην αεροναυπηγική ή ακόμα και στη βιομηχανία παραγωγής αυτοκινήτων, σε προβλήματα πολιτικού μηχανικού οι πρώτες εφαρμογές εμφανίστηκαν μόλις μερικά χρόνια πριν. Με αφορμή κάποιες ερευνητικές μελέτες και εργασίες, αλλά και κάποιες συγκεκριμένες προσπάθειες ερμηνείας αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης, όπως μια σύγχρονη κατασκευή στο Κατάρ [5] προσπαθούμε να εμβαθύνουμε στη βελτιστοποίηση τοπολογίας και ειδικότερα στις εφαρμογές της στην επιστήμη του πολιτικού μηχανικού.

Η πορεία που ακολουθήθηκε είναι αρχικά μια ιστορική αναδρομή στη βελτιστοποίηση τοπολογίας σε προβλήματα μηχανικού και η παρουσίαση της μαθηματικής λογικής που βρίσκεται πίσω από αυτήν, ώστε να αναλυθεί το θεωρητικό υπόβαθρο της έννοιας που απαιτείται για την κατανόηση της μεθοδολογίας που προτείνεται στην παρούσα διπλωματική. Εν συνεχεία, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος με το όνομα “SIMP”, (**S**olid **I**sotropic **M**icrostructure/**M**aterial with **P**enalization for intermediate densities), με πρώτο στόχο να διερευνηθούν τα αποτελέσματα της μεθόδου αυτής σε αριθμητικά μοντέλα με κώδικα γραμμένο σε **MATLAB**.

Δεύτερο στόχο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η αναζήτηση αμεσότερων σχέσεων της βελτιστοποίησης τοπολογίας με εφαρμογές πολιτικού μηχανικού και δομοστατικού σχεδιασμού, τόσο σε επίπεδο θεωρητικής μελέτης όσο και σε επίπεδο

ελέγχων και κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, τα βελτιστοποιημένα μοντέλα μεμονωμένων δομικών στοιχείων, όπως προέκυψαν από την υπολογιστική διαδικασία, υφίστανται περαιτέρω επεξεργασία βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων στο σχεδιαστικό πρόγραμμα **AUTOCAD**, ώστε να χρησιμοποιηθούν ως πλαίσια στήριξης στεγάστρου. Τελικό αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η ανάλυση, η διαστασιολόγηση και η χρήση συγκεκριμένων δομικών υλικών, χρήσι του λογισμικού διαστασιολόγησης κατασκευών **Scada Pro v15** ώστε το υψηλό αισθητικό αποτέλεσμα που προκύπτει ως αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης τοπολογίας να συμβαδίζει πλήρως με τις απαιτήσεις των κανονισμών, καθώς και η τρισδιάστατη απεικόνιση των διαστασιολογημένων πλέον μοντέλων ως πλαίσια στήριξης στεγάστρου υπαίθριου εκθεσιακού χώρου στο πρόγραμμα **SketchUp2015**.

1.2 Μεθοδολογία

Στη συγκεκριμένη παράγραφο γίνεται μία σύντομη ανάπτυξη της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε κατά τη διάρκεια περάτωσης και συγγραφής της διπλωματικής εργασίας. Η πρώτη συνάντηση με τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Λαγαρό πραγματοποιήθηκε στις αρχές Σεπτεμβρίου του περασμένου έτους. Το γενικότερο αντικείμενο της διπλωματικής ήταν η βελτιστοποίηση αλλά ο ακριβής προσδιορισμός του θέματος ήταν αντικείμενο συζητήσεων και ολοκληρώθηκε μόνο όταν πραγματοποιήθηκε μία πρώτη επισκόπηση στις δημοσιευμένες εργασίες και άρθρα μέσω της μηχανής αναζήτησης scopus, ώστε να επιλεγεί η βελτιστοποίηση τοπολογίας σαν αντικείμενο. Εν συνεχεία και παράλληλα με την ευρεία βιβλιογραφική επισκόπηση, ακολούθησε ένας αρχικός προγραμματισμός σχετικά με τους στόχους που τέθηκαν για την παρούσα διπλωματική εργασία, και επιλέχθηκε η μέθοδος SIMP ως εργαλείο εφαρμογής της βελτιστοποίησης τοπολογίας. Ακολούθησε η πιο συγκεκριμένη βιβλιογραφική έρευνα εφαρμογών της βελτιστοποίησης στο αντικείμενο του πολιτικού μηχανικού, καθώς και έναρξη της ενασχόλησης με κώδικες γραμμένους σε MATLAB, διαθέσιμους στο διαδίκτυο [19, 20, 21].

Όταν πλέον αποκτήθηκαν τα πρώτα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, ακολούθησε επεξεργασία των αποτελεσμάτων και επανακαθορισμός των στόχων της διπλωματικής. Εκεί προέκυψε ως ζητούμενο η έρευνα ενός άμεσου και εύκολου τρόπου μεταφοράς των αποτελεσμάτων της MATLAB σε σχεδιαστικό πρόγραμμα ώστε να γίνει μία πρώτη ερμηνεία των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης σε πιο προχωρημένες μορφές. Η συμπλήρωση ενός επιπλέον κώδικα στον ήδη υπάρχοντα βοήθησε στη δημιουργία αρχείων που είναι επεξεργάσιμα από το AUTOCAD και διατηρούν ακέραια τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης όπως αυτά παράγονται χρήσι του κώδικα.

Εν συνεχεία, προκρίθηκαν ως καταλληλότερα ορισμένα από τα προκύπτοντα μοντέλα και σε συνεργασία με αρχιτεκτονικό γραφείο έγινε επεξεργασία τους ώστε να αποδίδεται όσο το δυνατόν καλύτερα το υψηλό αισθητικό αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης τοπολογίας.

Το ζητούμενο πλέον ήταν η μοντελοποίηση, ανάλυση και διαστασιολόγηση των φορέων που θα αποτελούσαν πλαίσια στήριξης στεγάστρου υπαίθριου εκθεσιακού χώρου από πρόγραμμα πολιτικού μηχανικού, ώστε να επιτευχθεί και ο τελικός στόχος της διπλωματικής. Η συμβολή της ACE HELLAS, με τη χορηγία του προγράμματος Scada Pro v15 και τη διαρκή καθοδήγηση τους ώστε να προσπερνούνται οι όποιες δυσκολίες προέκυπταν στη στατική ανάλυση του φορέα ήταν καθοριστική. Τελικά έχοντας ελέγξει με τις απαιτήσεις του EC2 και ερμηνεύσει το φορέα τόσο ως ολόσωμη κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα αλλά και ως ραβδωτή μεταλλική κατασκευή, ακολούθησε η τελική τρισδιάστατη παρουσίαση του φορέα στο πρόγραμμα SketchUp2015, ώστε να είναι άμεσα κατανοητό πως η βελτιστοποίηση τοπολογίας μπορεί έν τέλει να έχει άμεση εφαρμογή και σχέση με τις κατασκευές πολιτικού μηχανικού.

Η συγγραφή της διπλωματικής ήταν μια διαρκής διαδικασία που η έναρξη της σηματοδοτείται από τον τελικό καθορισμό των στόχων της διπλωματικής μέχρι και την τελική τρισδιάστατη επεξεργασία των φορέων.

1.3 Δομή

- ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Στο κεφάλαιο αυτό καταγράφονται τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής επισκόπησης που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, σε επιστημονικά άρθρα, δημοσιεύσεις και συγγράμματα τα οποία έγιναν αντικείμενο μελέτης τόσο για την τελική επιλογή του θέματος, όσο και κατά την πορεία της συγγραφής ώστε κάθε φορά να υπερκεράζονται οι σκόπελοι που προέκυπταν, είτε σε θεωρητικό είτε σε υπολογιστικό και προγραμματιστικό επίπεδο, και να συγκλίνει διαρκώς στους στόχους που είχαν τεθεί.

- ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Στο κομμάτι αυτό της διπλωματικής εργασίας, και ενώ έχει παρουσιαστεί επαρκώς το αντικείμενο της, γίνεται μια εκτενέστερη ανάλυση στο θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτήθηκε για την συγγραφή της και απαιτείται για την κατανόηση της. Γίνεται μια ιστορική αναδρομή στις αρχές της βελτιστοποίησης και παρουσιάζεται η μαθηματική της διατύπωση καθώς επίσης καταγράφονται στοιχεία για όλα τα είδη των αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι κατηγορίες της βελτιστοποίησης κατασκευών και ειδικότερα η βελτιστοποίηση τοπολογίας..

- ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται μια βασική επεξήγηση της μεθόδου ανάλυσης που επιλέχτηκε (**SIMP**). Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι κώδικες της μεθόδου SIMP διαθέσιμοι σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB που χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτιστοποίηση, οι κώδικες SIMP88 και SIMP99. Γίνεται πλήρης καταγραφή του κώδικα SIMP88 και επεξηγείται πρωτότυπο τμήμα κώδικα που απαιτήθηκε να συγγραφεί για τη μεταφορά των αποτελεσμάτων σε σχεδιαστικό περιβάλλον. Στο τελευταίο μέρος του

κεφαλαίου, παρατίθενται τα προσομοιώματα που προέκυψαν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης και αυτά που επιλέχθηκαν ως καταλληλότερα για ανάλυση.

- ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η πορεία αποτύπωσης των προσομοιωμάτων σε σχεδιαστικό περιβάλλον CAD για μεταφορά σε στατικό πρόγραμμα και καταγράφονται οι βασικές αρχές που ακολουθήθηκαν για την αποτύπωση αυτή.

- ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Στο τμήμα αυτό της διπλωματικής, παρουσιάζεται μια πλήρης πορεία στατικού ελέγχου, διαστασιολόγησης και οπλισμού των προσομοιωμάτων που μελετήθηκαν. Στο κεφάλαιο περιλαμβάνονται η εισαγωγή, η μοντελοποίηση, η ανάλυση, τα αποτελέσματα των εντατικών μεγεθών, ο έλεγχος των μεταλλικών διατομών, προτάσεις για οπλισμό των μελών από σκυρόδεμα και ενδεικτικός υπολογισμός κόστους της κάθε κατασκευής.

- ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Στο τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής καταγράφονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από ολόκληρη τη διαδικασία της βελτιστοποίησης όπως αυτή ξεκίνησε από τα αποτελέσματα των κωδίκων της μεθόδου SIMP και κατέληξε σε στατικό έλεγχο και διαστασιολόγηση των φορέων. Παρατίθενται προτάσεις του μελετητή για τα υλικά και την τελική μορφή κατασκευής όπως αυτή προτείνεται να χρησιμοποιηθεί στην πραγματικότητα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Στόχος βιβλιογραφικής επισκόπησης

Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να αναλυθεί η βιβλιογραφική έρευνα που συντελέστηκε τόσο κατά το πρώτο στάδιο της διπλωματικής εργασίας, όσο και καθόλη τη διάρκεια της συγγραφής της. Παρουσιάζονται τίτλοι και περιεχόμενα επιστημονικών άρθρων και συγραμμάτων, τα οποία πραγματεύονται έννοιες συναφείς με το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας, μαζί με έναν σύντομο σχολιασμό τους.

Η βιβλιογραφική επισκόπηση είχε δύο στόχους. Ο πρώτος ήταν να αναζητηθούν εργασίες συναφείς με το αντικείμενο της βελτιστοποίησης τοπολογίας, ώστε να γίνει σε πρώτη φάση ο προσδιορισμός ενός πρωτότυπου θέματος για τη διπλωματική εργασία με προοπτικές αξιοποίησης των αποτελεσμάτων στην επιστήμη του πολιτικού μηχανικού. Ο δεύτερος ήταν η επίλυση αποριών είτε σε θεωρητικό είτε σε υπολογιστικό επίπεδο, ώστε η πορεία εργασιών της διπλωματικής εργασίας να συγκλίνει όσο το δυνατόν περισσότερο στους στόχους που είχαν τεθεί εξαρχής.

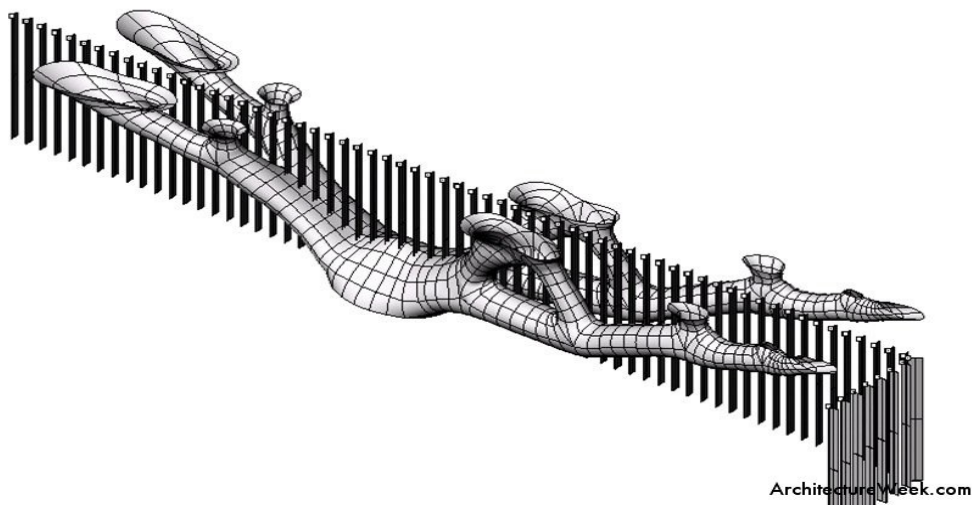
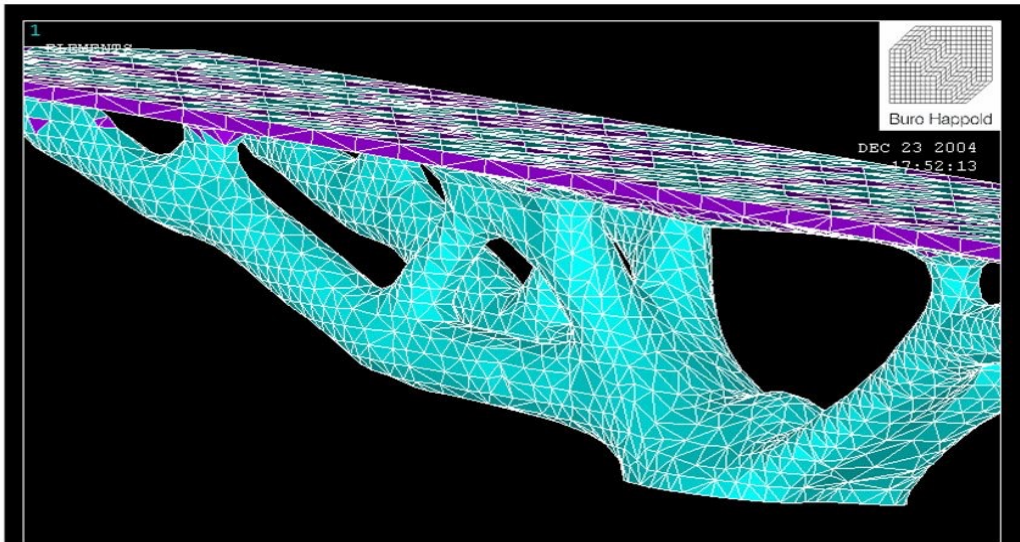
2.2 Κεντρική Ιδέα

Η κεντρική ιδέα που αποτέλεσε και το εφαλτήριο για την ενασχόληση με τη βελτιστοποίηση τοπολογίας σε εφαρμογές πολιτικού μηχανικού αποτέλεσε η δημοσίευση στο περιοδικό ArchitectureWeek με τίτλο Engineering Sidra Trees, [5].

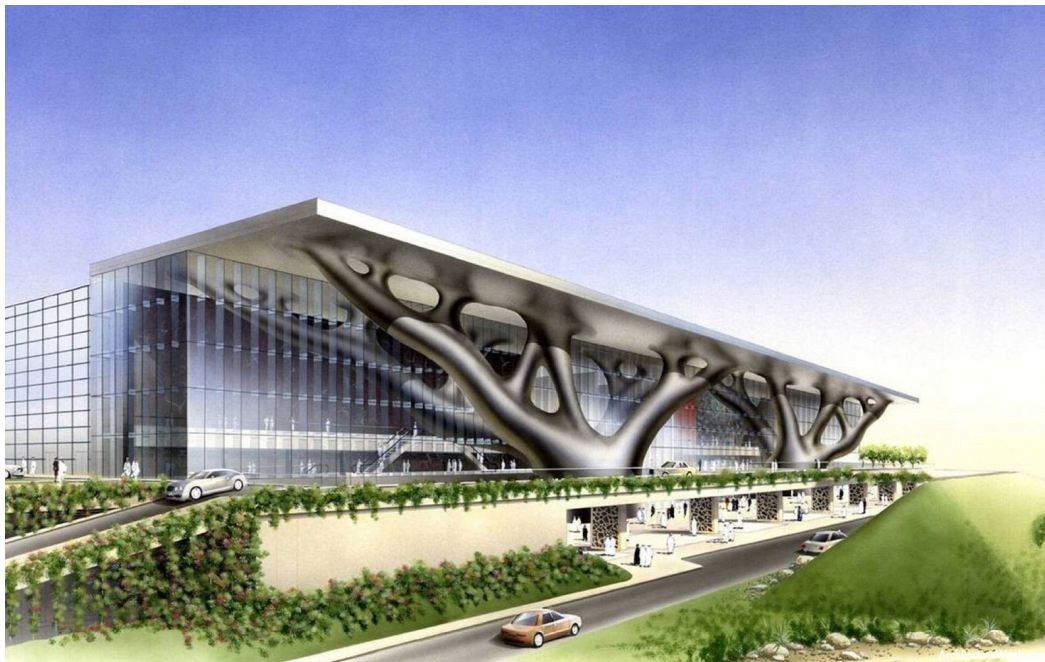
Η δημοσίευση αυτή αφορούσε μία κατασκευή στα προάστια της πρωτεύουσας Ντόχα του Κατάρ με ονομασία “Education City Convention Center”, σχεδιασμένη από τον Ιάπωνα αρχιτέκτονα **Arata Isozaki**. Κεντρικός άξονας του σχεδιασμού της κατασκευής ήταν η χρήση δύο παρόμοιων δενδροειδών κατασκευών μήκους διακοσίων πενήντα (250) μέτρων που θα στηρίζαν το στέγαστρο του περιβάλλοντα χώρου του κτηρίου, ώστε να δημιουργηθεί μία πρωτοποριακή κατασκευή που θα αποτελεί το σήμα κατατεθέν του κτηρίου. Ο **Isozaki** εμπνεύστηκε το σχήμα της κατασκευής από το αποτέλεσμα ενός

προβλήματος βελτιστοποίησης τοπολογίας, στο οποίο αναζητείται η πιο δύσκαμπτη μορφή για δεδομένο όγκο κατασκευής, υπό δεδομένα φορτία και συνθήκες στήριξης.

Με τον τελικό σχεδιασμό και τις κατασκευαστικές δυσκολίες που προκύπτουν για την πραγμάτωση ενός τέτοιας κλίμακας έργου ασχολήθηκε η ομάδα SMART (Smart Modeling Analysis Research Technologies) με επικεφαλής τον **Buro Happold**, πολιτικό μηχανικό.



Σχ. 2.1 : Η απεικόνιση τις ιδέας του αρχιτέκτονα Arata Isozaki και η μοντελοποίηση τους από τον μηχανικό Buro Happold

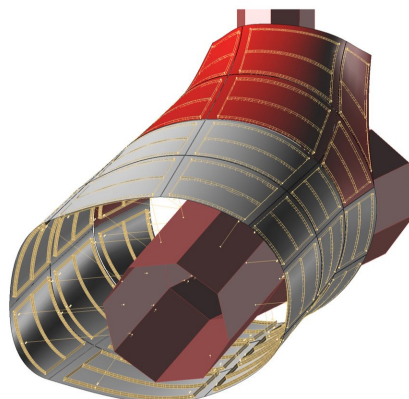


Σχ. 2.2 : Σκαρίφημα του Education City Convention Center, Arata Isozaki, Doha Qatar.

Η ομάδα αυτή ανέλαβε την μοντελοποίηση, την ανάλυση και τον έλεγχο της κατασκευής χρησιμοποιώντας το λογισμικό *SmartForm* ώστε να μπορέσουν να επεξεργαστούν τα τρισδιάστατα σχέδια που χρειάστηκαν για την απεικόνιση με λογισμικό μηχανικής ανάλυσης, και πιο συγκεκριμένα με το *ANSYS*.

Η τελική πρόταση ήταν τα καμπύλα μεταλλικά στοιχεία που θα αποτυπώνουν πλήρως την ιδέα του αρχιτέκτονα να εσωκλείουν φέροντα μεταλλικά στοιχεία τα οποία θα διαστασιολογηθούν ώστε η κατασκευή να πληροί τις κατασκευαστικές προδιαγραφές.

Το έργο ξεκίνησε να σχεδιάζεται το 2004 και ήταν έτοιμο τον Οκτώβριο του 2008.



ArchitectureWeek.com

Σχ. 2.3 : Τα φέροντα μεταλλικά στοιχεία εντός των εξωτερικών διακοσμητικών κοίλων διατομών.



Σχ. 2.4 : Τελική φάση κατασκευής

2.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση στη βελτιστοποίηση τοπολογίας

Αρχικά, προτεραιότητα αποτέλεσε η μελέτη των βασικών εννοιών που θα μας απασχολούσαν κατά τη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας. Η κατανόηση των εννοιών βελτιστοποίηση, βελτιστοποίηση κατασκευών και βελτιστοποίηση τοπολογίας επιχειρήθηκε σε πρώτη φάση με τη μελέτη της διδακτορικής διατριβής του επιβλέποντα καθηγητή κ. **Λαγαρού** [1] καθώς και του κ.**Μιχαηλίδη** [2]. Παράλληλη ήταν η μελέτη των συγγραμμάτων από τους **Καρλάυτης - Λαγαρός** [3] περί βελτιστοποίησης για μηχανικούς αλλά και από τους **Bendsoe - Sigmund** [4] συγκεκριμένα για τη βελτιστοποίηση τοπολογίας και τις εφαρμογές της. Για να καταστεί δυνατή η βιβλιογραφική επισκόπηση σε πιο συγκεκριμένους τομείς, ήταν απαραίτητος ο αποσαφηνισμός μιας σειράς εννοιών που άπτονται άμεσα της βελτιστοποίησης, όπως

- μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης, μεταβλητές σχεδιασμού (design variables), αντικειμενική συνάρτηση και συνάρτηση περιορισμού
- μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων όπως ο τετραγωνικός προγραμματισμός (quadratic programming), μέθοδοι ανάλυσης ευαισθησίας-περιορισμών (sensitivity analysis method)
- βελτιστοποίηση κατασκευών, βελτιστοποίηση σχήματος, βελτιστοποίηση τοπολογίας.

Μια περιγραφή των παραπάνω εννοιών θα ακολουθήσει σε επόμενο κεφάλαιο και θα πλαισιώνεται από το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για την όσο το δυνατόν πληρέστερη κατανόηση της εργασίας.

Με αφορμή την πορεία έμπνευσης, μελέτης και κατασκευής του παραπάνω έργου, και ύστερα από την παραπάνω διαδικασία διερεύνησης των βασικών εννοιών, ξεκίνησε μία διαδικασία αναζήτησης δημοσιεύσεων μέσω των συμβατικών μηχανών αναζήτησης του διαδικτύου αλλά και της εξειδικευμένης μηχανής αναζήτησης *scopus* με λέξεις κλειδιά :

- Βελτιστοποίηση / Optimization
- Βελτιστοποίηση Τοπολογίας / Topology optimization
- Δομοστατική βελτιστοποίηση / Structural optimization

Η αναζήτηση αυτή περιορίστηκε σε δημοσιεύσεις που είχαν γίνει κατά κύριο λόγο την τελευταία πενταετία και είχαν ως ένα βαθμό σχέση με την επιστήμη του πολιτικού μηχανικού, χωρίς όμως να αγνοούνται και θεωρητικές προσεγγίσεις με άλλο ακαδημαϊκό αντικείμενο. Στόχος ήταν η εύρεση όσο το δυνατόν περισσότερων δημοσιεύσεων, προς τη διευκόλυνση της ολοκληρωμένης προσέγγισης του θέματος.

2.4 Αποτελέσματα βιβλιογραφικής επισκόπησης

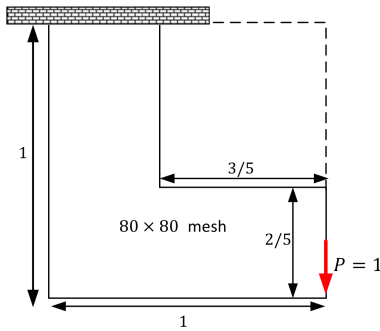
Οι **Sigmund και Bendsoe** [6], ερευνητές οι εργασίες των οποίων μνημονεύονται στις περισσότερες εργασίες περι βελτιστοποίησης τοπολογίας, ένα χρόνο μετά την έκδοση του συγγράμματος που αναφέρθηκε προηγουμένως δημοσίευσαν σε περιοδικό του DTU (Denmark Institute of Technology), το οποίο γένικα είναι πρωτοπόρο στην έρευνα της βελτιστοποίησης τοπολογίας, ένα άρθρο προσπαθώντας να μεταδώσουν στο ευρύ κοινό μια απλουστευμένη ερμηνεία της . Σε αυτή τη δημοσίευση, γίνεται αρχικά ένας απλός αλλά συνάμα σαφής διαχωρισμός βελτιστοποίησης σχήματος και τοπολογίας ως υποκατηγορίες της βελτιστοποίησης κατασκευών. Εν συνεχεία, αναφέρεται πως η βελτιστοποίηση τοπολογίας έχει ευρύ πεδίο εφαρμογών που εκτείνονται από την επίλυση καθημερινών προβλημάτων μέχρι την επεξεργασία σχημάτων και μορφών σε πλήθος επιστημονικών αντικειμένων, από τη ναυοφυσική και την μικρομηχανολογία μέχρι την αεροναυπηγική και την αρχιτεκτονική. Προτείνεται η εφαρμογή τεχνικών βελτιστοποίησης ώστε να προστεθεί μια νέα οπτική στα βασικά εργαλεία σχεδίασης ώστε να υπάρχει μια αυτοματοποιημένη διαδικασία, χωρίς ωστόσο να απεμπλέκεται εντελώς ο χρήστης. Θεωρούν πως η βελτιστοποίηση τοπολογίας και η υπολογιστική της εφαρμογή μπορεί να προσφέρει μαθηματικά μοντέλα που θα παρέχουν τη δυνατότητα αυτοματοποιημένου ελέγχου των εργαλείων ανάλυσης του σχήματος των κατασκευών, που θα ανταποκρίνονται στα κριτήρια που θα θέτει κάθε φορά ο μελετητής συνδυασμένα με υψηλό αισθητικό αποτέλεσμα.

Οι **Lewinski** et al. [7] προσπάθησαν να δώσουν μια πλήρη περιγραφή της βελτιστοποίησης τοπολογίας, ως μέσο για τη δημιουργία βέλτιστων κατασκευών μέσα σε ένα προκαθορισμένο χώρο σχεδίασης μέσω της παρουσίασης τεσσάρων θεμελιωδών προβλημάτων της βελτιστοποίησης (*Michell's structures, two-material layout problem in light of the relaxation by homogenization theory, optimal shape design and the free material design*) και της μαθηματικής ερμηνείας τους. Θεωρεί πως η βελτιστοποίηση τοπολογίας αποτελεί έναν αποδοτικό τρόπο προσαρμογής του σχήματος και της γεωμετρίας των κατασκευών υπό δεδομένες φορτίσεις, αλλά προτείνει περαιτέρω εξέλιξη των υπάρχουσων μεθόδων ώστε να λαμβάνουν υπ'όψιν τους όσο το δυνατόν περισσότερες παραμέτρους, όπως οι τάσεις που αναπτύσσονται.

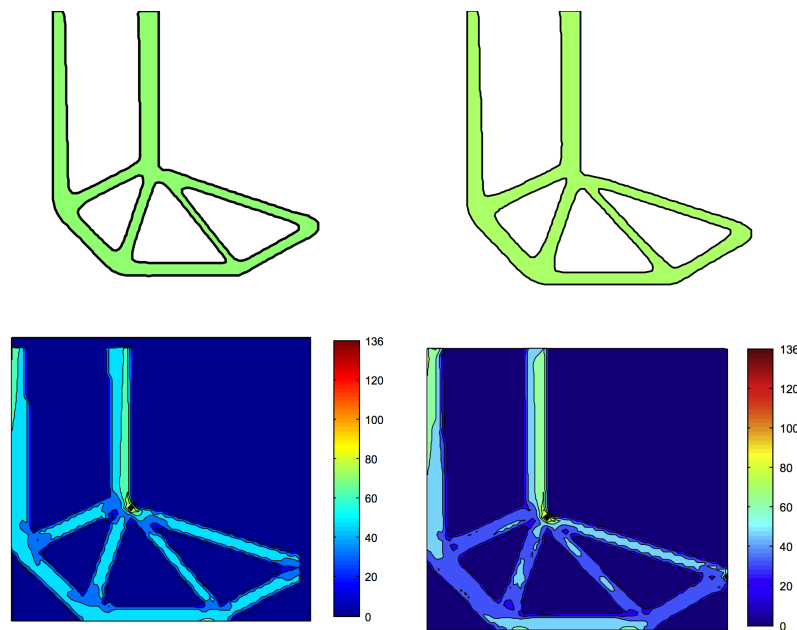
Ο **Rozvany** [8] έγραψε μια επισκόπηση των συνηθέστερων μεθόδων της βελτιστοποίησης τοπολογίας κατασκευών (*structural topology optimization*). Ύστερα από μια ιστορική αναδρομή στη βελτιστοποίηση τοπολογίας αναφέρεται σε ημερομηνίες σταθμούς για τις καθιερωμένες αριθμητικές μεθόδους βελτιστοποίησης τοπολογίας, της SIMP (**S**olid **I**sotropic **M**icrostructure/**M**aterial with **P**enalization for intermediate densities) και την ESO (**E**volutionary **S**tructural **O**ptimization) ή πιο σωστά SERA (**S**equential **E**lement **R**ejection and **A**dmission) αναλύοντας το θεωρητικό τους υπόβαθρο, τον τρόπο λειτουργίας τους, τις διαφορές μεταξύ τους αλλά και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε μιας από αυτές καθώς και κάποιες από τις εφαρμογές τους.

2.5 Βελτιστοποίηση τοπολογίας - εφαρμογές πολιτικού μηχανικού

Οι **Guo και Zhang** [9]θεώρησαν πως η βελτιστοποίηση τοπολογίας ως αναπτυσσόμενος κλάδος θα μπορούσε να συμβάλει στην αντιμετώπιση λεπτών ζητημάτων που αφορούσαν τις κατασκευές πολιτικού μηχανικού. Εφαρμόζοντας μια μέθοδο level-set προσπάθησαν να εισάγουν τον έλεγχο των τάσεων των υλικών ως βασικό κριτήριο βελτιστοποίησης. Αυτή τους η προσέγγιση οφείλεται στη διαπίστωση πως αφενός μεν η υπέρβαση των τάσεων των υλικών ευθύνεται συχνά για διάφορες αστοχίες των δομικών στοιχείων και αφετέρου γιατί χωρίς τον έλεγχο των τάσεων σε μια διαδικασία βελτιστοποίησης δομικών στοιχείων ο χρόνος ζωής μιας κατασκευής δεν μπορεί να είναι εγγυημένος. Επιπρόσθετα, βασιζόμενοι στη θεωρητική ανάλυση υποστηρίζουν πως επειδή η πλέον στιβαρή κατασκευή με την πλέον δύσκαμπτη κατασκευή μπορεί να διαφέρει αρκετά, το κριτήριο των τάσεων θα πρέπει να αποτελέσει βασικό στόχο μελέτης των ερευνητών. Η εργασία τους ολοκληρώνεται με την παρουσίαση αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης συγκεκριμένων δομικών στοιχείων μορφής L βάσει της ανάλυσης ευαισθησίας σχήματος και συγκρίνει τα αποτελέσματα με αυτά που προκύπτουν από την παραδοσιακή προσέγγιση μέσω SIMP.



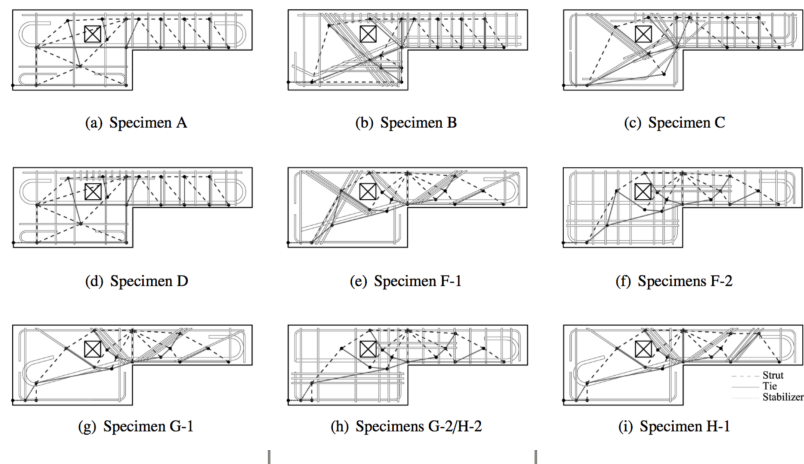
Σχ. 2.5 : Μοντέλο βελτιστοποίησης δομικό στοιχείο μορφής L



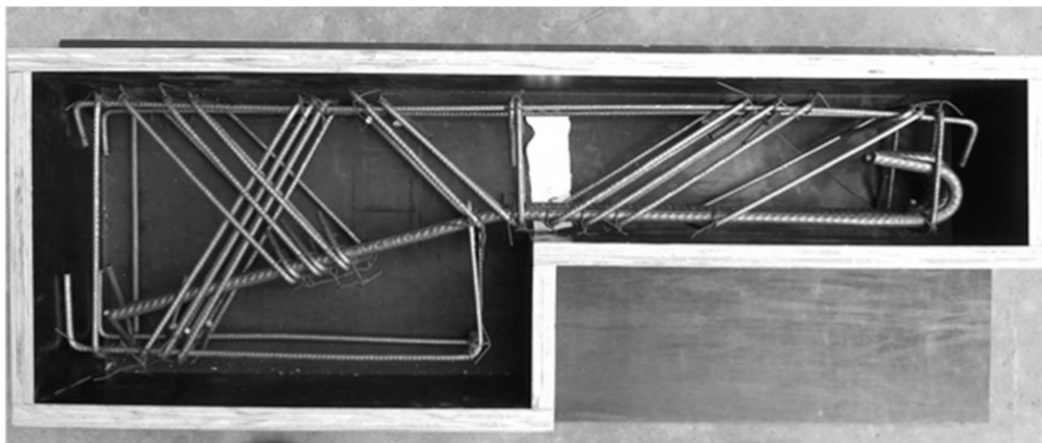
Σχ. 2.6 : Βελτιστοποιημένο μοντέλο βάσει παραμορφώσεων και οι τελικά αναπτυσσόμενες τάσεις(αριστερά). Βελτιστοποιημένο μοντέλων βάσει αρχικών τάσεων και οι τελικά αναπτυσσόμενες τάσεις(δεξιά).

Οι **Oviedo** και **Gutierrez** [10] ασχολήθηκαν σε πειραματικό επίπεδο με τη βελτιστοποίηση τοπολογίας οπλισμού δομικών μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα (Strut-and-Tie methods). Μοντελοποίησαν μια τυπική κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα χρήσει πεπερασμένων στοιχείων και αφού έκαναν χρήση της μεθόδου ομογενοποίησης (homogenization method), κατέλειξαν σε 9 διαφορετικά μεταξύ τους αποτελέσματα. Αυτό που αποδείχθηκε ήταν πως η προκύπτουσα τοπολογία του χρησιμοποιούμενου οπλισμού (η διάταξη δηλαδή των διαμήκων ράβδων και των συνδετήρων που χρησιμοποιούνται για την όπλιση) όχι μόνο κατέληγε σε ίδιες ή καλύτερες στατικές επιδόσεις συγκρινόμενες με τις παραδοσιακές διατάξεις οπλισμών, ήταν δηλαδή εξίσου ασφαλείς με αυτές, αλλά ήταν εξαιρετικά απλό οι προτεινόμενες διατάξεις να υλοποιηθούν κατασκευαστικά. Η πειραματική διαπίστωση των θέσεων του έγινε με την παρασκευή 9 διαφορετικών

δοκιμίων από οπλισμένο σκυρόδεμα με διάταξη οπλισμών όπως αυτή πρόκειψε από τη διαδικασία βελτιστοποίησης τοπολογίας και ο έλεγχος αυτών στο εργαστήριο σε ελέγχους κάμψης, στρέψης και διάτμησης.



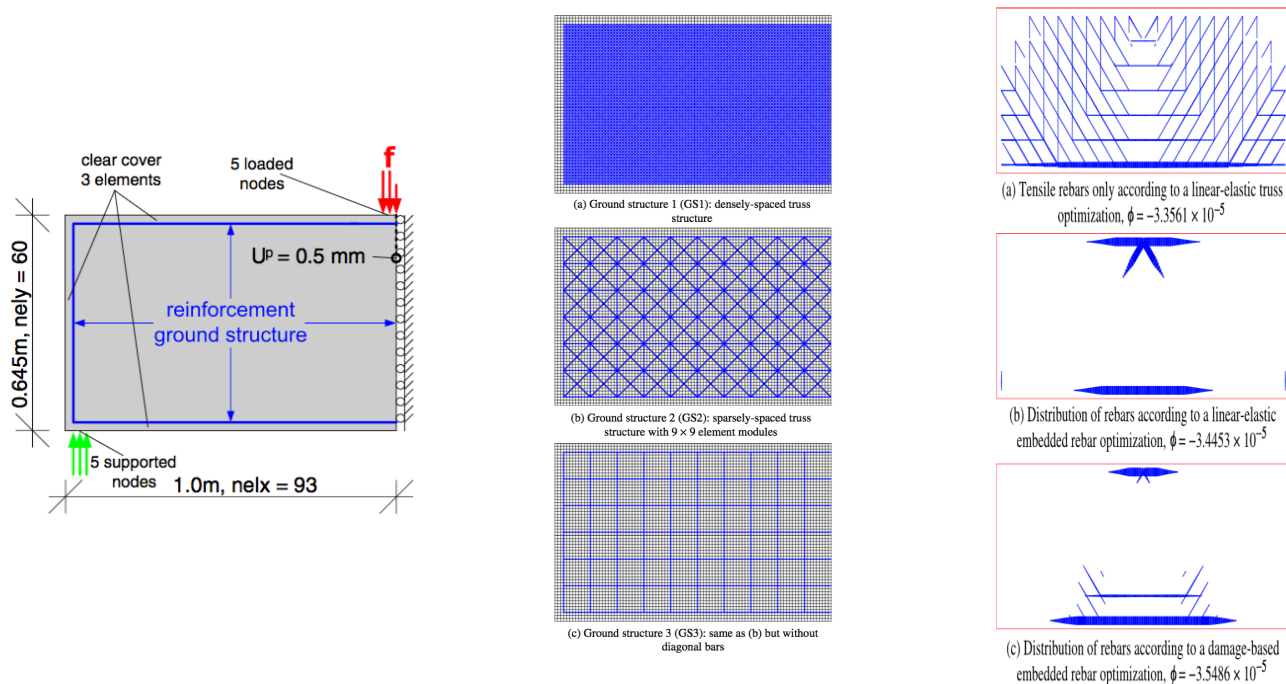
Σχ. 2.7 : Διατάξεις οπλισμών



Σχ. 2.8 : Ενδεικτική όπλιση της περίπτωσης F-1

Ο **Amir** μαζί με τον **Sigmund** [11], πρότειναν και αυτοί μια εναλλακτική διάταξη της ενίσχυσης από χάλυβα σε κατασκευές απο σκυρόδεμα. Πιο συγκεκριμένα, η εργασία τους προσπαθεί να βελτιστοποιήσει βάσει τριών διαφορετικών παραλλαγών της μεθόδου που επιλέχθηκε και στην παρούσα διπλωματική εργασία, της SIMP, καθεμία από τις οποίες έχει διαφορετικές συναρτήσεις περιορισμού (βελτιστοποιεί δηλαδή κάθε φορά με διαφορετικό κριτήριο το μοντέλο) την όπλιση κατασκευών από σκυρόδεμα στις περιοχές όπου η κατανομή των τάσεων είναι μη γραμμική, για να καταλήξει στην εκ νέου τοποθέτηση και διαστασιολόγηση του οπλισμού από χάλυβα στις περιοχές αυτές. Η μοντελοποίηση του φορέα γίνεται χρήση τετρακομβικών ισόπλευρων πεπερασμένων

στοιχείων για το σκυρόδεμα και ραβδωτών μελών με κόμβο αρχής και τέλους για τα χαλύβδινα μέλη. Ιδιαίτερη σημασία έχει για τους μελετητές η υπολογιστική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Με τη χρήση λογισμικού CAD, έγινε η μεταφορά του αρχικού μοντέλου σε λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων στο οποίο ολοκληρώθηκε η βελτιστοποίηση, ενώ τα βελτιστοποιημένα πλέον μοντέλα ήταν πολύ εύκολα επανεπεξεργάσιμα ξανά σε λογισμικό CAD.

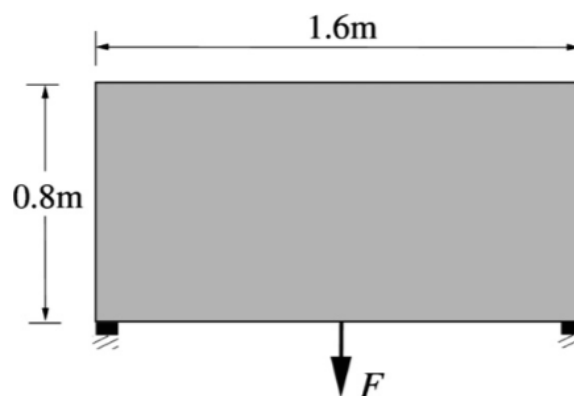


Σχ. 2.9 : Δομικό στοιχείο προβόλου (αριστερά), μοντελοποίηση(κέντρο) και βελτιστοποιημένες διάταξεις οπλισμών μπλε χρώμα(δεξιά).

Ο **Amir** [12] σε παρεμφερή εργασία προτείνει μία αντίστοιχη βελτιστοποίηση της διάταξης οπλισμών σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα με αντίστοιχη μαθηματική και υπολογιστική διαδικασία. Το αξιοσημείωτο όμως είναι, πως συμπερασματολογώντας, υποστηρίζει πως από τη στιγμή που είναι αποδεδειγμένα εφικτή η βελτιστοποίηση τοπολογίας του οπλισμού ενός δομικού στοιχείου, το επόμενο πρόβλημα που απομένει να αντιμετωπιστεί στα πλαίσια της ακαδημαϊκής έρευνας είναι η βελτιστοποίηση τοπολογίας των διατομών από σκυρόδεμα. Μακροσκοπικά και μελλοντικά, η εύρεση ενός καθολικού, αποτελεσματικού και εύχρηστου τρόπου βελτιστοποίησης των διατομών σκυροδεμάτος θα οδηγούσε σε συνολική μείωση του συνολικού όγκου χρησιμοποιούμενου σκυροδέματος. Αυτό θα σήμαινε όχι μόνο οικονομικότερες κατασκευές, αλλά θα ήταν και μια πρώτης τάξεως εφαρμογή της βιώσιμου ανάπτυξης στον κατασκευαστικό τομέα, καθώς θα μπορούσε μακροπρόθεσμα να οδηγήσει σε μια συνολική μείωση της ρυπογονού βιομηχανίας παραγωγής τσιμέντου, που κατατάσσεται μεταξύ των πρώτων ρυπαντών του περιβάλλοντος σε διοξείδιο του άνθρακα.

Οι **Yang et al.** [13], δημοσίευσαν ένα άρθρο το οποίο πραγματεύεται τη βελτιστοποίηση της διάταξης υλικών σε σημεία που ενδεχόμενως η προσέγγισή τους με τέτοιο τρόπο μπορεί να αποδειχθεί ευεργετική για τη συνολική συμπεριφορά της κατασκευής. Τέτοια είναι τα σημεία μεγάλης συγκέντρωσης τάσεων, όπως οι κόμβοι που συντρέχουν υποστυλώματα και δοκοί, και είναι πιθανότερο να εμφανιστούν βλάβες στην κατασκευή. Αντιπροτείνουν στην συμβατική διαστασιολόγηση και όπλιση των σημείων αυτών μια εναλλακτική αντιμετώπιση που θα βασίζεται στη βέλτιστη κατα SIMP διάσταση υλικού σε ένα πεπερασμένο όγκο δεδομένου σχήματος που θα μεγιστοποιεί την ακαμψία της κατασκευής για δεδομένα φορτία και στηρίξεις. Χρησιμοποιεί κώδικα γραμμένο σε MATLAB και βελτιστοποιεί 5 διαφορετικά μοντέλα ώστε να καταλήξει στις μορφές τους που είναι τόσο από δυναμική όσο και από στατική ανάλυση στιβαρότερα, παρά την παράδοση μορφή στην οποία καταλήξαν. Το πρωτοποριακό στην συγκεκριμένη εργασία είναι πως η ανάλυση των μοντέλων γίνεται τρισδιάστατα και όχι διδιάστατα όπως είχε γίνει στις υπόλοιπες εργασίες που μελετήθηκαν.

Οι **Luo et al.** [14] παρουσίασαν ένα μοντέλο βελτιστοποίησης τοπολογίας χρησιμοποιώντας πολλαπλά υλικά από την οποία προκύπτουν τα βέλτιστα μοντέλα κατανομής υλικού για κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Όχι όμως μια βέλτιστη τοπολογία για το χάλυβα όπως ο Amir και ο Sigmund, αλλά για το σύνολο του στοιχείου. Το ζήτημα αυτό προσεγγίζεται όχι μόνο ως προς τη συνολική ακαμψία του στοιχείου, αλλά και ως προς την αποφυγή αστοχίας του σκυροδέματος. Με τη λύση που προτείνεται, δημιουργείται πλέον η ιδέα της βελτιστοποίησης του συνόλου της κατασκευής και η εύρεση διαφορετικών ερμηνείων κατασκευαστικά στο ίδιο το αποτέλεσμα της κατασκευής, με παράλληλη ελαχιστοποίηση του συνολικού όγκου των χρησιμοποιούμενων υλικών άρα και του κόστους κατασκευής.



Σχ. 2.10 : Αμφιέρειστη δόκος με κρεμάμενο φορτίο στο μέσον της

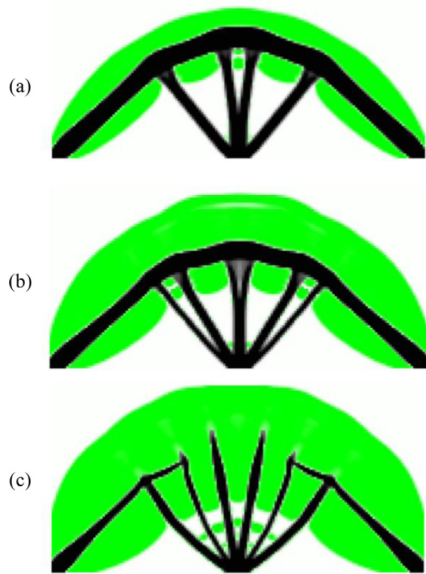


Fig. 9. Optimal composite topologies with different concrete compressive strengths. (a) $f_c' = 40\text{MPa}$; (b) $f_c' = 60\text{MPa}$; (c) $f_c' = 80\text{MPa}$.

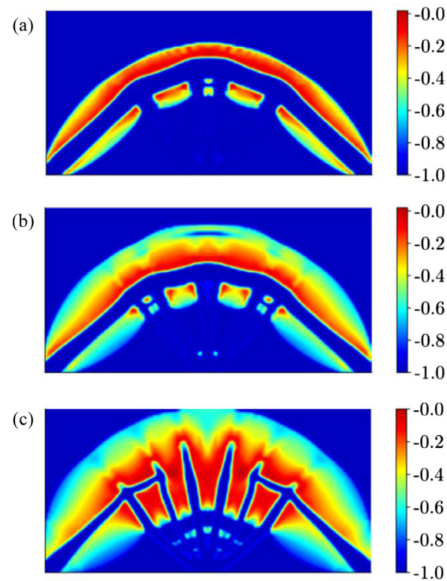


Fig. 10. Contours of concrete strength constraint functions for different designs. (a) $f_c' = 40\text{MPa}$; (b) $f_c' = 60\text{MPa}$; (c) $f_c' = 80\text{MPa}$.

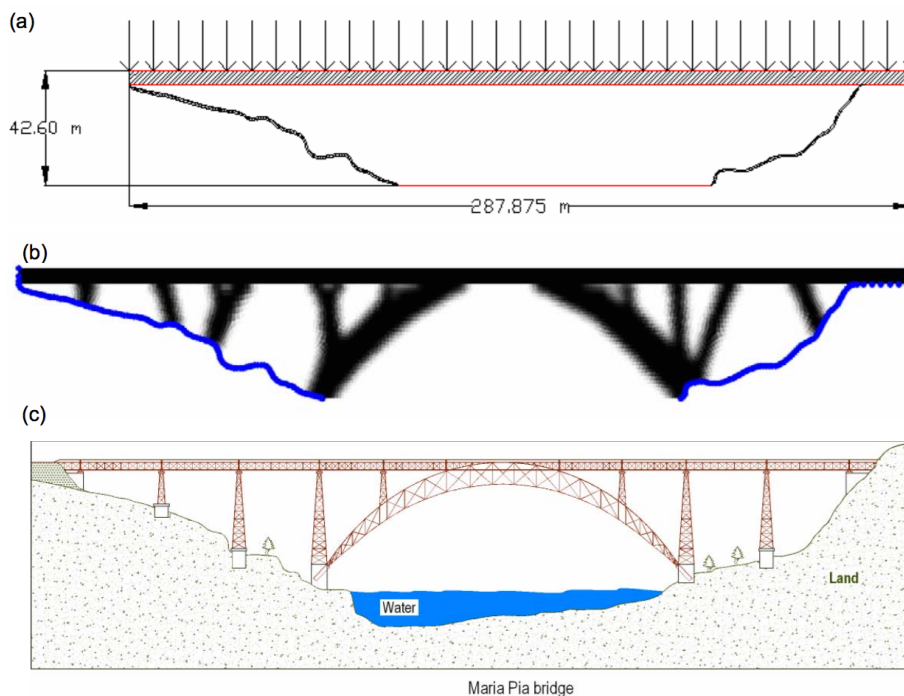
Σχ. 2.11 : Τρεις διαφορετικές εκδοχές βελτιστοποίησης με κριτήριο την ποιότητα του χρησιμοποιούμενου σκυροδέματος

Οι **Τσαβδαρίδης et al.** [15] δημοσίευσαν μια ερευνητική εργασία που αφορούσε το βέλτιστο σχεδιασμό χαλύβδινων διατομών μορφής **I**. Προτείνεται μια γενικευμένη τροποποίηση των χαλύβδινων διατομών μέσω της δημιουργίας οπών επί του κορμού τους. Η διαδικασία αυτή στοχεύει στη βελτίωση των αδρανειακών χαρακτηριστικών της διατομής με παράλληλη μείωση της συνολικά χρησιμοποιούμενης ποσότητας χάλυβα (άρα και του συνολικού κόστους) καθώς και στην περαιτέρω μελέτη της συμπεριφοράς των νέων διατομών, χρησιμοποιώντας αυτές τις διατομές για την προσομοίωση διαφόρων στατικών μοντέλων ώστε να ελεγχθούν οι αντοχές τους. Αξίζει να αναφερθεί πως οι μελετητές κατά την πορεία των εργασιών τους χρειάστηκε να επέμβουν και να τροποποιήσουν χειροκίνητα χρήση λογισμικού CAD τις βελτιστοποιημένες μορφές, ακολουθώντας όμως το προκύπτον από τη βελτιστοποίηση αποτέλεσμα. Η δημοσίευση ολοκληρώνεται προτείνοντας πως η συγκεκριμένη διεργασία μπορεί να γενικευτεί και να μελετηθούν με το αντίστοιχο πρίσμα και διάφορες άλλες τυποποιημένες μεταλλικές διατομές.

Η εφαρμογή μεθόδων βελτιστοποίησης τοπολογίας σε ολοκληρωμένες κατασκευές και μια φυσική ερμηνεία τους απασχόλησε τους **Stromberg et al.** [16]. Προτείνεται μια τεχνική εφαρμογής της βελτιστοποίησης τοπολογίας σε υψηλά κτήρια με τη χρήση βέλτιστων ενισχυμένων μεταλλικών πλαισίων, μοντελοποιημένων με επιφανειακά ισόπλευρα

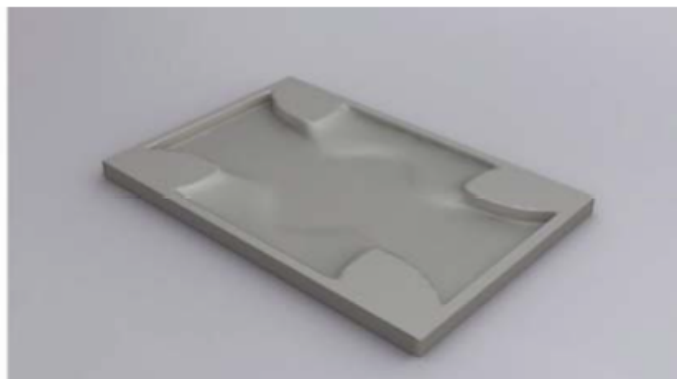
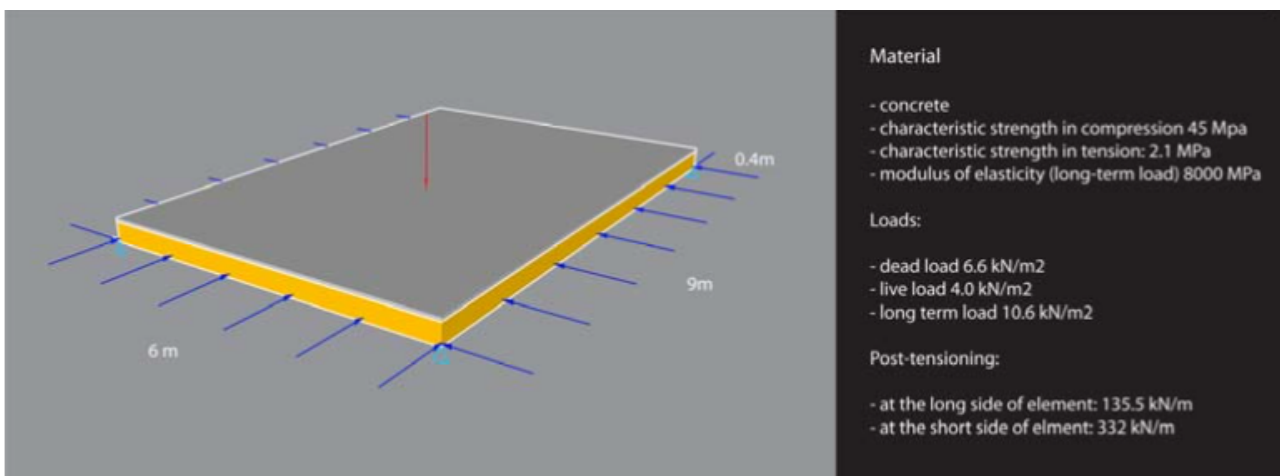
τετρακομβικά πεπερασμένα στοιχεία και ραβδωτά στοιχεία δύο κόμβων. Βασιζόμενοι στη συμμετρία των σχηματιζόμενων φορέων προτείνουν μια μαθηματική ερμηνεία του προβλήματος παράλληλα με μια προσέγγιση του με απλές έννοιες μηχανικής, ώστε να εξαχθεί ως αποτέλεσμα η βέλτιστη τοπολογία ενός ενισχυμένου μεταλλικού πλαισίου.

Αξίζει να αναφερθεί στο πλαίσιο αυτό, της μελέτης μεγάλων κατασκευών υπό το γενικότερο πρίσμα της βελτιστοποίησης τοπολογίας, μια εργασία των **Sundaram** και **Ananthasuresh** [17]. Κάνοντας μια ιστορική αναδρομή στα έργα του διάσημου Γάλλου αρχιτέκτονα και μηχανικού Gustave Eiffel, συμπεραίνεται πως ο Eiffel με τον καινοτόμο τρόπο που συνδύαζε και τοποθετούσε τα υλικά των κατασκευών του πραγματοποιούσε ουσιαστικά μια βελτιστοποίηση τοπολογίας άνευ προγραμματιστικής διαδικασίας και αυστηρά μαθηματικής περιγραφής. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται το έργο του “Maria Pia”, που είναι μια γέφυρα πάνω από τον ποταμό Ντούρο στην Πορτογαλία. Παρά το γεγονός πως οι κατασκευαστικές λύσεις ήταν πολλές ο Eiffel πρότεινε όχι μόνο την οικονομικότερη, αλλά ταυτόχρονα και την καλύτερη αισθητικού επιπέδου λύση. Το αξιοσημείωτο είναι, πως αν το πρόβλημα περιγραφεί με αυστηρά μαθηματικούς όρους και τεθούν ως περιορισμοί το άνοιγμα της γέφυρας, το πλάτος του καταστρώματος, οι δυσκολίες θεμελίωσης και τα φορτία σχεδιασμού της, πάντα σύμφωνα με τα δεδομένα της εποχής, το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης με την λύση που πρότεινε και εν τέλει κατάσκευασε ο Eiffel έχουν εξαιρετικές ομοιότητες.



Σχ. 2.12 : Προσομοίωση γέφυρας - βελτιστοποιημένο μοντέλο- σκαρίφημα κατασκευής

Μια πιο επικαιροποιημένη προσέγγιση στη σχέση της βελτιστοποίησης τοπολογίας με τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό έγινε στη δημοσίευση από τους **Dombernowsky** και **Sondergaard (2009)**. Οι μελετητές ασχολήθηκαν με το αν η βελτιστοποίηση τοπολογίας που μπορεί να πραγματοποιηθεί με υπάρχουσες λύσεις λογισμικού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αρχιτεκτονικό εργαλείο σχεδιασμού για κατασκευές από σκυρόδεμα καθώς και το πως τα σχήματα που παράγονται μπορούν να κατασκευαστούν με μια ρεαλιστικά εφαρμόσιμη μέθοδο. Η βελτιστοποίηση τοπολογίας στα πλαίσια του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα πρώτα στάδια της μελέτης σαν ένα εργαλείο που μπορεί να συνδυάσει καινοτομία στο σχεδιαστικό κομμάτι ικανοποιώντας παράλληλα τις απαιτήσεις του δομοστατικού σχεδιασμού. Η μελέτη εστίασε στο να βελτιστοποιήσει τρία συνήθη μεμονωμένα δομικά στοιχεία υπό συνήθη φορτία και δεδομένες διαστάσεις, με στόχο να περιοριστεί ο όγκος του σκυροδέματος στο 40% της αρχικής κατασκευής ενώ ικανοποιούνται βασικοί έλεγχοι. Οι μορφές που προέκυψαν επεξεργάστηκαν περαιτέρω με κάποια επιπλέον κριτήρια όπως το ελάχιστο μέγεθος των επιμέρους στοιχείων των μελών. Καταλήγουν στην πρόταση υλοποίησης των βελτιστοποιημένων μοντέλων χρήσιμη μηχανικών μελών με 6 βαθμούς ελευθερίας κινήσεων (ρομπότ) που είχαν τη δυνατότητα να “εκτυπώνουν” ουσιαστικά τους ξυλότυπους των κατασκευών σε μεγάλα κομμάτια από πολυστερίνη ώστε να χρησιμοποιηθούν στην πραγματικότητα σαν καλούπια στα οποία μπορεί να εκχυθεί το σκυρόδεμα.



2.13 : Στατικό μοντέλο (πάνω) - βέλιστα σχήματα για δύο διαφορετικά προβλήματα τοπολογίας



Σχ. 2.14 : Ρομποτικοί βραχίονες παρασκευής ξυλοτύπου

2.6 Κώδικες Βελτιστοποίησης γραμμένοι σε MATLAB

Σημαντικός κώδικας που εφαρμόζει την μέθοδο SIMP με έναν πολύ αποτελεσματικό τρόπο είναι αυτός που έγραψε ο **Sigmund (2001)**. Στην εργασία που συνόδεψε την παρουσίαση του κώδικα 99 γραμμών συμπεριλαμβάνεται μια μαθηματική περιγραφή της βελτιστοποίησης που πραγματοποιεί ο κώδικας, τον αναλυτικό τρόπο λειτουργίας του καθώς επίσης και κάποιες πολύ απλές εφαρμογές. Ο συγκεκριμένος κώδικας αποτέλεσε βασικό εργαλείο δουλειάς για πολλούς μελετητές του αντικείμενου, αλλά και για την παρούσα διπλωματική εργασία.

Οι **Sigmund et al. (2010)**, εισήγαγαν μία αρκετά βελτιωμένη σε υπολογιστική ισχύ και ταχύτητα έκδοση του κώδικα 99 γραμμών εννέα χρόνια μετά, μειωμένο μάλιστα σε 88 γραμμές, όπου παρουσίασαν εκ νέου τις δυνατότητες, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του μαζί με ορισμένες απλές εφαρμογές.

Αξίζει να αναφερθεί πως οι δύο αυτοί κώδικες παρέχουν τη δυνατότητα για διδιάστατη μόνο ανάλυση. Οι **Liu και Tovar (2014)** παρουσίασαν με αντίστοιχο τρόπο έναν κώδικα 169 γραμμών ο οποίος είναι σχεδιασμένος για την μοντελοποίηση στοιχείων, βελτιστοποίηση και εν τέλει εξαγωγής αποτελεσμάτων σε τρεις διαστάσεις.

Οι πρώτοι δύο κώδικες που αναφέρθηκαν στην συγκεκριμένη παράγραφο έχουν κοινό στόχο τη δημιουργία ενός απλού υπολογιστικού κώδικα γραμμένου σε MATLAB, που να ανταποκρίνεται αφενός μεν στις απαιτήσεις μια πρώτης γνωριμίας με τη βελτιστοποίηση τοπολογίας και αφετέρου να μπορεί να αποτελέσει τη βάση για περαιτέρω ενασχόληση με το αντικείμενο στα πλαίσια ακαδημαϊκών ερευνών. Εμπειριστατωμένη αναφορά στους κώδικες, στο θεωρητικό τους υπόβαθρο και στον τρόπο λειτουργίας τους θα ακολουθήσει στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

3.1 Εισαγωγή

Βελτιστοποίηση είναι το σύνολο εκείνων των ενεργειών που στοχεύουν στο να μετατραπεί ένα σύστημα, ένα σχέδιο ή ένα σύνολο αποφάσεων όσο το δυνατόν περισσότερο λειτουργικό, εύχρηστο ή αποτελεσματικό βάσει κριτηρίων και περιορισμών.

Η εξέλιξη της έννοιας της βελτιστοποίησης συμβαδίζει με την εξέλιξη της επιστήμης. Από τα πρώτα κίβλας στάδια της ενασχόλησης με το ευρύτερο επιστημονικό αντικείμενο, ο άνθρωπος αναζητούσε τρόπους να πετυχαίνει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Πάντοτε αναζητούσε την καλύτερη λύση, δηλαδή τον πιο σύντομο δρόμο, τον πιο γρήγορο χρόνο και τον πιο οικονομικό τρόπο. Έτσι έκανε και ο Ευκλείδης (300 π.Χ) αναζητώντας τη συντομότερη διαδρομή από ένα σημείο προς μία ευθεία και ο Ήρων ο Αλεξανδρεύς που παρατήρησε κατοπτρικά ότι το συντομότερο γεωγραφικά μονοπάτι ανάμεσα σε δύο σημεία είναι αυτό που ακολουθεί μία δέσμη φωτός.

Σημαντικά ιστορικά βήματα για την ύπαρξη διαφόρων μεθόδων βελτιστοποίησης μπορούν να ανιχνευθούν μέχρι και αιώνες νωρίτερα. Οι Newton και Leibnitz κατέστησαν εφικτή την ανάπτυξη μεθόδων διαφορικής ανάλυσης για βελτιστοποίηση μέσω της συνεισφοράς τους στη μαθηματική ανάλυση. Οι Bernoulli, Euler, Lagrange και Weirstrass θεμελίωσαν τον λογισμό των μεταβολών που ασχολείται με την ελαχιστοποίηση των ολοκληρωμάτων. Ο ίδιος ο Lagrange έδωσε το όνομά του στη μέθοδο βελτιστοποίησης για προβλήματα με περιορισμούς, η οποία περιλαμβάνει την πρόσθεση αγνώστων πολλαπλασιαστών. Ο Cauchy εφήρμοσε πρώτος τη μέθοδο Steepest Descent για την επίλυση προβλημάτων ελαχιστοποίησης χωρίς περιορισμούς.

Ουσιαστικά, πάντως, πολύ μικρή πρόοδος είχε γίνει μέχρι τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, όταν ηλεκτρονικοί υπολογιστές με πολύ υψηλές υπολογιστικές δυνατότητες έκαναν την εμφάνισή τους και έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματική υλοποίηση των μεθόδων βελτιστοποίησης δίνοντας το έναυσμα για περαιτέρω έρευνα πάνω στη δημιουργία νέων μεθόδων και οδηγώντας στην εμφάνιση νέων καλά ορισμένων κλάδων της θεωρίας βελτιστοποίησης.

3.2 Βέλτιστος σχεδιασμός κατασκευών

Στις μέρες μας, ο όρος βελτιστοποίηση κατασκευών ερμηνεύεται με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Από τη σκοπιά της μηχανικής των κατασκευών, ως κατασκευή ορίζεται εκείνη η διευθέτηση των μελών της ή των υλικών της ώστε να εξυπηρετεί στην ανάλυση μηχανικών φορτίων, δηλαδή να είναι λειτουργική.

Η επιστήμη του μηχανικού είχε και έχει ως κύριο σκοπό τον σχεδιασμό και την κατασκευή δομικών συστημάτων όπως είναι οι γέφυρες, τα αεροσκάφη και τα κτίρια. Σήμερα η πρόοδος της τεχνολογίας των υπολογιστών επέτρεψε την αύξηση των απαιτήσεων. Ο σχεδιασμός ενός δομικού συστήματος που θα ικανοποιεί τις κατασκευαστικές απαιτήσεις ασφαλείας δεν αποτελεί πια μία αποδεκτή λύση. Είναι απαραίτητο το δομικό σύστημα να σχεδιαστεί με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο, ακολουθώντας μία επαναληπτική διαδικασία για την εύρεση του άριστου ή βέλτιστου σχεδιασμού. Βέλτιστος ονομάζεται ένας σχεδιασμός που ικανοποιεί τις λειτουργικές προδιαγραφές, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα συγκεκριμένα κριτήρια όπως είναι το κόστος και το βάρος κατασκευής.

Στόχος του μηχανικού είναι να εξευρεθεί ένας συνδυασμός ανεξάρτητων μεταβλητών που λαμβάνουν πραγματικές ή ακέραιες τιμές και ονομάζονται παράμετροι ή μεταβλητές σχεδιασμού (design variables), έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η αντικειμενική συνάρτηση (objective function) του προβλήματος. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης, στην επιστημονική περιοχή της υπολογιστικής μηχανής, συνήθως υπόκεινται σε περιορισμούς, όπως είναι το εύρος μέσα στο οποίο κινούνται οι παράμετροι σχεδιασμού το οποίο καθορίζει τον χώρο αναζήτησης, αλλά και άλλες συναρτήσεις περιορισμού (constraint functions), όπως εκείνες των τάσεων και παραμορφώσεων, οι οποίες καθορίζουν τον χώρο των αποδεκτών λύσεων του προβλήματος.

Για τον υπολογισμό του βέλτιστου σχεδιασμού είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν δύο βήματα: η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης και ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει τον ορισμό των παραμέτρων σχεδιασμού, τη σχέση μεταξύ των παραμέτρων αυτών, τον καθορισμό της προς βελτιστοποίηση συνάρτησης, καθώς επίσης και τον ορισμό των περιορισμών του προβλήματος. Η διαδικασία βελτιστοποίησης ολοκληρώνεται με την επιλογή ενός κατάλληλου αλγορίθμου βελτιστοποίησης και τον συνδυασμό του με το δομοστατικό μοντέλο και το μοντέλο βελτιστοποίησης. Μια βασική προϋπόθεση του βέλτιστου σχεδιασμού κατασκευών είναι η διατύπωση με μαθηματικούς όρους της συμπεριφοράς των κατασκευών (δομοστατικό μοντέλο).

Ο σχεδιασμός πολύπλοκων δομικών συστημάτων απαιτεί πολλούς και χρονοβόρους υπολογισμούς. Η ταχύτερη πρόοδος της τεχνολογίας των υπολογιστών και παράλληλα η ανάπτυξη αποδοτικών αλγορίθμων, κατέστησαν εφικτό το βέλτιστο σχεδιασμό δομικών στοιχείων ή και πολύπλοκων κατασκευαστικών συστημάτων, δίνοντας τη δυνατότητα στο μηχανικό να σχεδιάζει καλύτερα δομικά συστήματα με μειωμένο κόστος παραγωγής και σχεδιασμού σε εύλογο υπολογιστικό χρόνο.

Η συμβατική διαδικασία που ακολουθούν οι μηχανικοί είναι εκείνης της δοκιμής και διόρθωσης, ανάμεσα στους πολλούς υποψήφιους βέλτιστους σχεδιασμούς. Βέβαια, με την αύξηση της πολυπλοκότητας και του μεγέθους των προβλημάτων, η χρήση τέτοιων εμπειρικών τεχνικών δεν οδηγεί στη βέλτιστη λύση. Έτσι, κατέστη απαραίτητη η αυτοματοποίηση του σχεδιασμού αξιοποιώντας τις εξελίξεις στην τεχνολογία των υπολογιστών και την ανάπτυξη αποτελεσματικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Σήμερα, οι δοκιμές αυτές είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν με αυτόματο τρόπο και με μεγαλύτερη ταχύτητα και ακρίβεια. Η ύπαρξη έξυπνων και αποδοτικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης δεν συνεπάγεται την επιτυχή αντιμετώπιση όλων των προβλημάτων βέλτιστου σχεδιασμού. Η εμπειρία και ευφυΐα του μηχανικού παραμένουν σημαντικές προϋποθέσεις για την ορθή χρήση των αλγορίθμων αυτών.

Οι πρώτοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που εφαρμόστηκαν σε δομικά προβλήματα ήταν δανεισμένοι από τους τομείς των οικονομικών, των μαθηματικών και της επιχειρησιακής έρευνας και βασίζονταν στο μαθηματικό προγραμματισμό (mathematical programming). Αυτές οι τεχνικές είναι ιδιαίτερα εύχρηστες και αποδοτικές και μπορούν να οδηγήσουν στη βέλτιστη επίλυση προβλημάτων με μεγάλο εύρος πρακτικών εφαρμογών. Εκτός των μαθηματικών μεθόδων βελτιστοποίησης υπάρχουν και οι τυχηματικές μέθοδοι (μέθοδος στρατηγικών εξέλιξης, γενετικών αλγορίθμων, της προσομοίωσης απόπτωσης κ.ά.). Η εφαρμογή των μεθόδων αυτών αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματική σε ένα ευρύτερο πεδίο προβλημάτων σε σχέση με το πεδίο εφαρμογής των μεθόδων μαθηματικού προγραμματισμού.

3.3 Μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης κατασκευών ενδέχεται να είναι συνεχές ή διακριτό, ανάλογα με το είδος του πεδίου τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού. Πολλές φορές, λόγω τυποποίησης, επιβάλλεται ένα πεδίο τιμών να είναι διακριτό.

Το μαθηματικό μοντέλο [1] ενός συνεχούς προβλήματος βέλτιστου σχεδιασμού μπορεί να διατυπωθεί:

$$F(s) \rightarrow \min$$

$$s = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}^T$$

$$l_i \leq s_i \leq u_i, \quad i=1, 2, \dots, n$$

$$g_j(s) \geq 0, \quad j=1, 2, \dots, m$$

$$h_j(s) = 0, \quad j=m+1, m+2, \dots, t,$$

όπου s είναι το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδιασμού, l_i και u_i είναι το κάτω και άνω όριο της μεταβλητής σχεδιασμού s_i αντίστοιχα, $F(s)$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση (objective function) της οποίας αναζητούμε την ελάχιστη τιμή ενώ $g_j(s)$, $h_j(s)$ είναι οι συναρτήσεις περιορισμού ανισοτήτων (inequality constraints) και ισοτήτων (equality constraints), αντίστοιχα.

Σε αντιστοιχία, ένα διακριτό πρόβλημα βέλτιστου σχεδιασμού γράφεται

$$F(s) \rightarrow \min$$

$$s = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}^T$$

$$l_i \leq s_i \leq u_i, \quad i=1, 2, \dots, n$$

$$s_i \in R^d, \quad i=1, 2, \dots, n$$

$$g_j(s) \geq 0, \quad j=1, 2, \dots, m$$

$$h_j(s) = 0, \quad j=m+1, m+2, \dots, t,$$

όπου R^d είναι το πεδίο τιμών των διακριτών μεταβλητών s . Οι μεταβλητές σχεδιασμού s_i ($i=1, 2, \dots, n$) μπορούν να λάβουν τιμές μόνο από το σύνολο τιμών R^d .

Ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης μπορεί να διατυπωθεί με παρόμοιο τρόπο ως πρόβλημα ελαχιστοποίησης της συνάρτησης $-F(s)$. Επίσης, πολλά από τα προβλήματα που εμφανίζονται στην περιοχή του βέλτιστου σχεδιασμού κατασκευών ενδέχεται να εμπεριέχουν διακριτές ή και μικτού τύπου μεταβλητές σχεδιασμού. Ένα τέτοιο πρόβλημα ονομάζεται μικτό πρόβλημα βέλτιστου σχεδιασμού. Οι περισσότερες από τις μεθόδους μετατρέπουν το μικτό πρόβλημα βέλτιστου σχεδιασμού σε μια σειρά συνεχών προβλημάτων βέλτιστου σχεδιασμού τα οποία λύνονται επαναληπτικώς.

3.3.1 Μεταβλητές Σχεδιασμού

Οι παράμετροι εκείνες οι οποίες όταν λάβουν συγκεκριμένη τιμή, συνεχή ή διακριτή, καθορίζουν πλήρως έναν σχεδιασμό, ονομάζονται μεταβλητές σχεδιασμού (design variables).

Ένα πολύ σημαντικό βήμα για την κατάλληλη προσομοίωση ενός προβλήματος είναι η σωστή επιλογή των μεταβλητών σχεδιασμού. Σε περιπτώσεις που η επιλογή είναι λανθασμένη τότε η προσομοίωση είναι δυνατόν να είναι εσφαλμένη ή σε χειρότερη περίπτωση ο βέλτιστος σχεδιασμός στον οποίο καταλήγει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης να είναι μη πραγματοποιήσιμος.

Ένα επίσης σημαντικό θέμα που απαιτεί ιδιαίτερη μέριμνα κατά την επιλογή των μεταβλητών σχεδιασμού είναι η μεταξύ τους εξάρτηση ή ανεξαρτησία. Στην περίπτωση που κάποια μεταβλητή σχεδιασμού είναι εξαρτώμενη από μία άλλη παύει να αποτελεί μεταβλητή σχεδιασμού και μετατρέπεται σε παράμετρο η οποία λαμβάνει τιμές σύμφωνα με την εξάρτησή της από την μεταβλητή σχεδιασμού, οδηγώντας σε πολύπλοκα μαθηματικά μοντέλα.

Κατά την μόρφωση του μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης θα πρέπει η προς βελτιστοποίηση συνάρτηση να είναι επαρκώς εξαρτώμενη από όλες τις παραμέτρους σχεδιασμού. Ταυτόχρονα, για την αποφυγή προβλημάτων κρίνεται σκόπιμη η διασύνδεση μεταξύ των μεταβλητών σχεδιασμού, δηλαδή ομαδοποίηση κάποιων μελών της κατασκευής, ώστε να αντιστοιχούνται από μία κοινή παράμετρο σχεδιασμού. Πριν την τελική επιλογή του μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης συνιστάται η διενέργεια

μιας ανάλυσης ευαισθησίας έτσι ώστε να ελεγχθεί το μέγεθος της ευαισθησίας της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με όλες τις παραμέτρους σχεδιασμού. Μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας μπορούν να ανιχνευθούν οι παράμετροι σχεδιασμού που έχουν μηδαμινή επιρροή στην αντικειμενική συνάρτηση, ώστε στη συνέχεια να διασυνδεθούν με κάποιες άλλες παραμέτρους σχεδιασμού και να πάψουν να αποτελούν ξεχωριστές παραμέτρους σχεδιασμού.

3.3.2 Αντικειμενική Συνάρτηση

Κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης περιγράφεται από ένα μεγάλο πλήθος εφικτών σχεδιασμών εκ των οποίων κάποιοι είναι καλύτεροι κάποιων άλλων και κάποιος εξ αυτών αποτελεί τη βέλτιστη λύση του προβλήματος. Για να γίνει αυτού του είδους η διάκριση μεταξύ καλού και καλύτερου σχεδιασμού, είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός κριτηρίου για την σύγκριση και την αξιολόγηση των σχεδιασμών. Το κριτήριο αυτό είναι μία συνάρτηση η οποία λαμβάνει κάποια δεδομένη τιμή για κάποιο συγκεκριμένο σχεδιασμό. Αυτή η συνάρτηση ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση.

Η κατάλληλη επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης αποτελεί ένα πολύ σημαντικό στάδιο για την όλη διαδικασία μόρφωσης του μαθηματικού μοντέλου σχεδιασμού, εξίσου την επιλογή των μεταβλητών σχεδιασμού. Παραδείγματα αντικειμενικών συναρτήσεων είναι η ελαχιστοποίηση κόστους, η μεγιστοποίηση κέρδους, ο σχεδιασμός ελαχίστου βάρους και η ελαχιστοποίηση απωλειών ενέργειας.

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι πλήρως εξαρτώμενη από τις μεταβλητές σχεδιασμού. Ως αντικειμενική συνάρτηση τίθεται το βασικό αντικείμενο της βελτιστοποίησης το οποίο μεγιστοποιείται/ελαχιστοποιείται (αναζήτηση μέγιστης/ελάχιστης τιμής). Ανάλογα με τον αριθμό των αντικειμενικών συναρτήσεων, υπάρχουν δύο είδη βελτιστοποίησης. Βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης (Single-Objective Optimization) έχουμε στην περίπτωση ύπαρξης μονάχα μιας αντικειμενικής συνάρτησης ή πολλών βελτιστοποιούμενων ταυτόχρονα. Περίπτωση βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων (Multi-Objective Optimization) έχουμε για πρόβλημα που εκφράζεται από 2 ή περισσότερες αντικειμενικές συναρτήσεις που η βελτιστοποίηση της μίας αντιτίθεται στη βελτιστοποίηση της άλλης.

3.3.3 Συναρτήσεις Περιορισμού

Ο σχεδιασμός ενός δομικού συστήματος επιτυγχάνεται όταν οι παράμετροι σχεδιασμού λάβουν συγκεκριμένες τιμές. Σχεδιασμός, μπορεί να θεωρηθεί και ένα αυθαίρετο ορισμένο δομικό σύστημα, όπως για παράδειγμα μία κυκλική διατομή με αρνητική ακτίνα ή μία διατομή δακτυλίου με αρνητικό πάχος τοιχώματος, δηλαδή κάθε μη κατασκευάσιμο δομικό σύστημα.

Κάθε απαίτηση του μηχανικού εισάγεται στο μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης με τη μορφή ανισοτήτων και ισοτήτων οι οποίες ονομάζονται περιορισμοί και βάσει αυτών πραγματοποιείται ο έλεγχος περί του εφικτού ή μη του τρέχοντος σχεδιασμού. Για να έχει νόημα η συμμετοχή του περιορισμού στο μαθηματικό μοντέλο θα πρέπει να είναι εξαρτώμενος τουλάχιστον από μία μεταβλητή σχεδιασμού του προβλήματος. Οι περιορισμοί που συνήθως επιβάλλονται σε προβλήματα κατασκευών είναι των τάσεων και μετατοπίσεων, των οποίων οι τιμές δεν επιτρέπεται να υπερβαίνουν κάποια καθορισμένα όρια.

Πολλές φορές ο μηχανικός επιβάλλει επιπλέον συναρτήσεις περιορισμών, λόγω αβεβαιοτήτων ή απειρίας, οι οποίες ενδέχεται να είναι άχρηστες, αφού είτε είναι εξαρτημένες από άλλες, είτε παραμένουν πάντα στην ασφαλή περιοχή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη χωρίς κανένα όφελος διόγκωση των υπολογισμών κυρίως για την περίπτωση των μεθόδων μαθηματικού προγραμματισμού στις οποίες απαιτείται ανάλυση ευαισθησίας. Κρίνεται απαραίτητη η χρησιμοποίηση διαφόρων τεχνικών αποτελεσματικότερης αντιμετώπισης των συναρτήσεων περιορισμού, οι οποίες βελτιώνουν κατά πολύ την απόδοση των μεθόδων βελτιστοποίησης και μειώνουν σημαντικά τον χρόνο των υπολογισμών.

Η επιλογή μιας συνάρτησης περιορισμού πρέπει να συνεπάγεται την αναγκαιότητα αυτής για το βέλτιστο σχεδιασμό. Πολλές φορές υπάρχει κίνδυνος στο πρόβλημα να οδηγηθούμε σε κενό χώρο λύσεων, δηλαδή σε μηδενικό αριθμό βέλτιστων λύσεων του προβλήματος. Η περίπτωση αυτή προκύπτει κυρίως από την τοποθέτηση πολλών περιορισμών, λόγω κακής εποπτείας του χώρου σχεδιασμού.

Οι ανισοτικοί περιορισμοί (inequality constraint) $g_j(s) \leq 0$ μπορούν να χωριστούν σε ενεργούς (active) όταν ικανοποιείται η ισότητα $g_j(s) = 0$ και ανενεργούς (inactive), όταν ικανοποιείται αυστηρά ως ανισότητα $g_j(s) < 0$. Θεωρείται πως παραβιάζεται όταν λαμβάνει θετική τιμή $g_j(s) > 0$.

Ένας ισοτικός περιορισμός (equality constraint) $h_j(s) = 0$ θεωρείται πως παραβιάζεται όταν δεν τηρείται η ισότητα, δηλαδή $h_k(s) \neq 0$. Γενικότερα, ένας ισοτικός περιορισμός είτε θα είναι ενεργός, είτε θα παραβιάζεται.

Ένας σχεδιασμός από τον οποίο ικανοποιούνται όλες οι συναρτήσεις περιορισμών ονομάζεται εφικτός (feasible). Αντίθετα, ένας σχεδιασμός στον οποίο παραβιάζεται τουλάχιστον ένας ή περισσότεροι περιορισμοί, ονομάζεται ανέφικτος (infeasible). Καθίσταται, λοιπόν, σαφές πως στην περίπτωση του εφικτού σχεδιασμού περιλαμβάνονται ενεργές και ανενεργές ανισοτικές συναρτήσεις περιορισμών σε συνδυασμό με ενεργές ισοτικές συναρτήσεις περιορισμών. Γενικότερα, ένας εφικτός σχεδιασμός δεν είναι απαραίτητα και ο βέλτιστος, αλλά είναι πάντοτε πραγματοποιήσιμος.

3.3.4 Τοπικά & καθολικά ελάχιστα

Ένα σύνηθες πρόβλημα όλων των μαθηματικών μεθόδων βελτιστοποίησης είναι πως ενδέχεται να οδηγηθούν στον εντοπισμό ενός τοπικού ελαχίστου (local minimum), κυρίως λόγω του ντετερμινιστικού τρόπου λειτουργίας τους. Αντίθετα, οι μέθοδοι που στηρίζονται σε πιθανοτικές θεωρήσεις έχουν περισσότερες πιθανότητες να εντοπίσουν το καθολικό ελάχιστο (global minimum), λόγω του τυχαίου τρόπου έρευνάς τους.

Ένα σημείο s^* στον χώρο σχεδιασμού θεωρείται τοπικό ή σχετικό ελάχιστο όταν πληροί τις συναρτήσεις περιορισμού και ισχύει η σχέση $F(s^*) \leq F(s)$ σε κάθε σημείο εφικτού σχεδιασμού σε μικρή ακτίνα γύρω από το σημείο s^* . Εάν ισχύει μόνο η ανισότητα $F(s^*) < F(s)$, τότε το σημείο s^* καλείται αυστηρό (strict) ή μοναδικό (unique) ή δυνατό (strong) τοπικό ελάχιστο.

Ένα σημείο s^* στον χώρο σχεδιασμού θεωρείται καθολικό ή απόλυτο ελάχιστο όταν πληροί τις συναρτήσεις περιορισμού και ισχύει η σχέση $F(s^*) \leq F(s)$ σε κάθε σημείο εφικτού σχεδιασμού. Εάν ισχύει μόνο η ανισότητα, $F(s^*) < F(s)$, τότε το σημείο s^* καλείται αυστηρό (strict) ή μοναδικό (unique) ή δυνατό (strong) καθολικό ελάχιστο.

Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν συναρτήσεις περιορισμού, τότε ισχύουν οι ίδιοι ορισμοί, αλλά σε ολόκληρο τον χώρο σχεδιασμού και όχι μόνο στην περιοχή των εφικτών σχεδιασμών. Γενικά, είναι δύσκολο να προβλεφθεί από την αρχή η ύπαρξη τοπικών ή καθολικού ελαχίστων σε κάθε πρόβλημα βέλτιστου σχεδιασμού. Στην περίπτωση, πάντως, που η αντικειμενική συνάρτηση $F(s)$ είναι συνεχής και η περιοχή εφικτών σχεδιασμών δεν είναι κενή (nonempty), είναι κλειστή (closed) και καθορισμένη (bounded), τότε υπάρχει καθολικό ελάχιστο για την $F(s)$. Η περιοχή εφικτών σχεδιασμών δεν είναι κενή όταν δεν υπάρχουν αλληλοσυγκρουόμενες συναρτήσεις περιορισμού ή όταν δεν υπάρχουν υπεράριθμες συναρτήσεις περιορισμού.

3.4 Ιδιότητες αλγορίθμων βελτιστοποίησης

Κάθε αλγόριθμος βελτιστοποίησης πρέπει να έχει τις παρακάτω ιδιότητες [30]:

- Σθεναρότητα (robustness), δηλαδή ο αλγόριθμος πρέπει να μπορεί να αντιμετωπίσει μια πληθώρα προβλημάτων
- Απόδοση (efficiency), δηλαδή ο αλγόριθμος δεν θα πρέπει να απαιτεί πολύ μεγάλη υπολογιστική ισχύ και χρόνο
- Ακρίβεια (accuracy), δηλαδή ο αλγόριθμος θα πρέπει να μπορεί να αναγνωρίσει μία λύση με ακρίβεια, χωρίς να είναι υπερευαίσθητος σε αριθμητικής ακρίβειας σφάλματα.

Οι παραπάνω απαιτήσεις είναι αλληλοσυγκρουόμενες. Για παράδειγμα, ένας πολύ γρήγορος (στη σύγκλιση) αλγόριθμος μπορεί να απαιτεί υπερβολικά μεγάλο αποθηκευτικό χώρο ή μνήμη για προβλήματα με πολλές μεταβλητές σχεδιασμού. Αντίθετα, ένας αλγόριθμος με μεγάλη σθεναρότητα μπορεί να απαιτεί πολλές επαναλήψεις και μεγάλο υπολογιστικό χρόνο ώστε να βρει το βέλτιστο σχεδιασμό.

3.5 Κατηγορίες αλγορίθμων βελτιστοποίησης

Οι αλγόριθμοι και τα αντίστοιχα προβλήματα βελτιστοποίησης μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες με βάση διάφορα κριτήρια:

- ως προς την ύπαρξη περιορισμών: με περιορισμούς και χωρίς περιορισμούς
- ως προς την φύση των μεταβλητών: συνεχείς και διακριτές
- ως προς τον τρόπο αναζήτησης της πιθανής λύσης: ντετερμινιστικές, ημιστοχαστικές και στοχαστικές μέθοδοι

Στην πράξη, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης χωρίζονται γενικά σε δύο μεγάλες κατηγορίες μεθόδων:

- μαθηματικές ή αιτιοκρατικές μέθοδοι βελτιστοποίησης
- μεταευριστικές ή δαρβίνειες μέθοδοι βελτιστοποίησης

3.5.1 Μαθηματικές μέθοδοι βελτιστοποίησης

Οι μαθηματικές ή αιτιοκρατικές μέθοδοι βελτιστοποίησης είναι οι πρώτοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που εφαρμόστηκαν σε δομικά προβλήματα και ήταν δανεισμένοι από τους τομείς των οικονομικών, των μαθηματικών και της επιχειρησιακής έρευνας και βασίζονταν στο μαθηματικό προγραμματισμό (mathematical programming). Αυτές οι τεχνικές είναι ιδιαίτερα εύχρηστες και αποδοτικές και μπορούν να οδηγήσουν στη βέλτιστη επίλυση προβλημάτων με μεγάλο εύρος πρακτικών εφαρμογών.

Οι τεχνικές βελτιστοποίησης βασίζονται στις αρχές του μαθηματικού προγραμματισμού μπορούν γενικά να ταξινομηθούν σε 5 μεγάλες κατηγορίες [29]:

- Γραμμικός Προγραμματισμός (Linear Programming-LP)

Οι μέθοδοι γραμμικού προγραμματισμού αντιμετωπίζουν προβλήματα στα οποία τόσο η αντικειμενική συνάρτηση όσο και οι συναρτήσεις περιορισμών είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών σχεδιασμού. Σε αυτήν την περίπτωση η βέλτιστη λύση βρίσκεται επί του συνόρου μίας ή περισσότερων συναρτήσεων περιορισμού. Σε προβλήματα αυτού του είδους (κυρτά) ένα τοπικό ελάχιστο είναι οπωσδήποτε και καθολικό ελάχιστο του προβλήματος.

- Μη Γραμμικός Προγραμματισμός (Non Linear Programming-NLP)

Είναι οι πιο διαδεδομένες τεχνικές μαθηματικού προγραμματισμού, ιδιαίτερα σε προβλήματα βελτιστοποίησης κατασκευών. Πρόκειται για προβλήματα που έχουν μη γραμμική αντικειμενική συνάρτηση και/ή μη γραμμικούς περιορισμούς. Τα μη γραμμικά προβλήματα διατυπώνονται ουσιαστικά όπως τα γραμμικά. Η διαφορά εντοπίζεται στα μαθηματικά που χρησιμοποιούνται για την επίλυσή τους. Σκοπός είναι η απαρίθμηση των δυνατών λύσεων και η επιλογή της βέλτιστης. Σε αντίθεση με τον γραμμικό προγραμματισμό η επιτρεπτή περιοχή πιθανόν να μην είναι κυρτό σύνολο και η βέλτιστη λύση δεν είναι απαραίτητο να είναι ακραίο σημείο της επιτρεπτής περιοχής του μη γραμμικού προγραμματισμού.

- -Ακέραιος Προγραμματισμός (Integer Programming-IP)

Οι μέθοδοι αυτές αντιμετωπίζουν προβλήματα στα οποία οι παράμετροι σχεδιασμού δεν είναι συνεχείς, αλλά παίρνουν διακριτές τιμές από κάποιο συγκεκριμένο σύνολο τιμών. Ουσιαστικά αποτελεί πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού του οποίου μερικές ή όλες οι μεταβλητές δέχονται τιμές ακεραίων. Οι επιμέρους κατηγορίες του αποτελούν προβλήματα ακέραιης, μικτής και διαδικής μορφής.

- Γεωμετρικός Προγραμματισμός (Geometric Programming-GP)

Αναφέρεται σε μία ειδική κατηγορία προβλημάτων όπου οι συναρτήσεις περιορισμών αλλά και η αντικειμενική συνάρτηση είναι πολυωνυμικής μορφής συναρτήσεις των παραμέτρων σχεδιασμού. Σε προβλήματα αυτού του είδους πρέπει να ισχύει πάντα η αυστηρή προϋπόθεση ότι οι παράμετροι σχεδιασμού λαμβάνουν πάντα θετικές τιμές.

- Δυναμικός Προγραμματισμός (Dynamic Programming-DP)

Χρησιμοποιείται τόσο σε ντετερμινιστικά όσο και σε στοχαστικά προβλήματα. Κύριος στόχος αυτών των μεθόδων είναι να διασπαστεί ένα σχετικά μεγάλο πρόβλημα βελτιστοποίησης σε μικρότερα τα οποία μπορούν να αντιμετωπιστούν ως ξεχωριστά προβλήματα βέλτιστου σχεδιασμού. Κάθε υποπρόβλημα περιέχει μέρος από τα στοιχεία του καθολικού προβλήματος και μπορεί να επιλυθεί με κάποια από τις προαναφερθείσες μεθοδολογίες.

3.5.2 Μεταεβριστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης

Οι μεταεβριστικές ή δαρβίνειες μέθοδοι οφείλουν την ονομασία τους στο γεγονός ότι μιμούνται τη διαδικασία της εξέλιξης των ειδών στη φύση, όπως την παρουσίασε πρώτος ο Κάρολος Δαρβίνος. Η εφαρμογή των μεθόδων αυτών αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματική σε ένα ευρύτερο πεδίο προβλημάτων σε σχέση με το πεδίο εφαρμογής των μεθόδων μαθηματικού προγραμματισμού. Χρησιμοποιούν έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων του προβλήματος που είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και μπορούν να αντιμετωπιστούν επίσης ανεξάρτητα η μία από την άλλη, πράγμα που καθιστά ιδιαίτερα αποδοτική την εφαρμογή των μεθόδων αυτών σε παράλληλο υπολογιστικό περιβάλλον. Ο αρχικός πληθυσμός επιλέγεται με τυχαίο τρόπο και στη συνέχεια με τη χρήση κατάλληλων γενετικών μηχανισμών όπως είναι η επιλογή (selection), ο ανασυνδυασμός (recombination) και η μετάλλαξη (mutation), ο πληθυσμός εξελίσσεται κινούμενος σε όλο και καλύτερες περιοχές του χώρου αναζήτησης και μέσω της αρχής της επικράτησης του ισχυρότερου (survival of the fittest) βελτιστοποίησης επιτυγχάνεται ο εντοπισμός της βέλτιστης λύσης.

Οι μέθοδοι αυτές εφαρμόζονται σήμερα συχνά στον βέλτιστο σχεδιασμό των κατασκευών, με ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι λόγω της τυχαμικότητας στην διερεύνηση του χώρου αναζήτησης, έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες για την εύρεση του απόλυτα βέλτιστου σχεδιασμού σε σχέση με τις μαθηματικές μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούν νομοτελειακά καθορισμένες σχέσεις. Από την άλλη, το κυριότερο μειονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι ο μεγάλος αριθμός των επαναλήψεων που απαιτούνται κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, παρόλο που το υπολογιστικό κόστος της κάθε μίας από αυτές είναι σχετικά μικρό αφού δεν εμπειρεύεται ανάλυση ευαισθησίας.

Οι σημαντικότερες από τις μεθόδους αυτές είναι:

-Η μέθοδος των Γενετικών Αλγορίθμων (Genetic Algorithms-GA)

Βασίζεται στην τυχαία ανασυγκρότηση ενός πληθυσμού και την αξιολόγηση των μελών του πληθυσμού μέσω μίας συνάρτησης ποιότητας (fitness ή quality function), που σε προβλήματα βελτιστοποίησης ισούται με το άθροισμα της αντικειμενικής συνάρτησης και των παραβιάσεων των συναρτήσεων περιορισμού.

-Η μέθοδος των Στρατηγικών Εξέλιξης (Evolution Strategies-ES)

Βασίζεται στη διαδικασία της μετάλλαξης (mutation) στη φύση και επιλογής του ισχυρότερου μέσω συνάρτησης ποιότητας.

-Η μέθοδος του Εξελικτικού Προγραμματισμού (Evolutionary Programming-EP)

Βασίζεται αποκλειστικά στην αρχή της επιλογής του καλύτερου και όχι στη διαδικασία της αναπαραγωγής των ειδών. Για τον λόγο αυτό έχει μειωμένες δυνατότητες και περιορισμένη αποτελεσματικότητα.

-Η μέθοδος του Γενετικού Προγραμματισμού (Genetic Programming-GP)

Διαφέρει κατά πολύ από τις προαναφερθείσες εξελικτικές μεθοδολογίες και απλά έχει ως στόχο την αυτόματη παραγωγή προγραμμάτων Η/Υ για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων προβλημάτων (π.χ γεννήτρια τυχαίων αριθμών)

-Η μέθοδος Διαφορικής Εξέλιξης (Differential Evolution-DE)

Βασίζεται σε μία λειτουργία της γενετικής για τη δημιουργία απογόνων από χρωμοσώματα των γονέων και όχι από την κλασσική διαδικασία της διασταύρωσης. Η ευκολία στην εφαρμογή της μεθόδου αλλά και στον ορισμό των παραμέτρων συνέβαλε στην ευρεία χρήση της.

3.6 Κατηγορίες Βελτιστοποίησης Κατασκευών

Υπάρχουν τρεις μεγάλες κατηγορίες βελτιστοποίησης [29] όσον αφορά τα προβλήματα σχεδιασμού των κατασκευών:

- i. Βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης διατομής (sizing optimization)
- ii. Βελτιστοποίηση σχήματος κατασκευής (shape optimization)
- iii. Βελτιστοποίηση τοπολογίας κατασκευής (topology optimization)

3.6.1 Βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης διατομής (sizing optimization)

Η βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης αποτελεί το είδος της βελτιστοποίησης που έχει απασχολήσει κατά κόρον ερευνητές και μελετητές στο παρελθόν. Ως βασικές παράμετροι σχεδιασμού χρησιμοποιούνται οι διαστάσεις των διατομών δικτυωτών φορέων ή πλαισίων ή τα πάχη πλακών και κελυφών. Ως αντικειμενική συνάρτηση τίθεται το βάρος της κατασκευής και επιβάλλονται περιορισμοί σε μετατοπίσεις κόμβων και τάσεις μελών. Η διαδικασία βελτιστοποίησης περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

-ορισμός του δομοστατικού μοντέλου, της γεωμετρίας και των φορτίων σχεδιασμού της κατασκευής

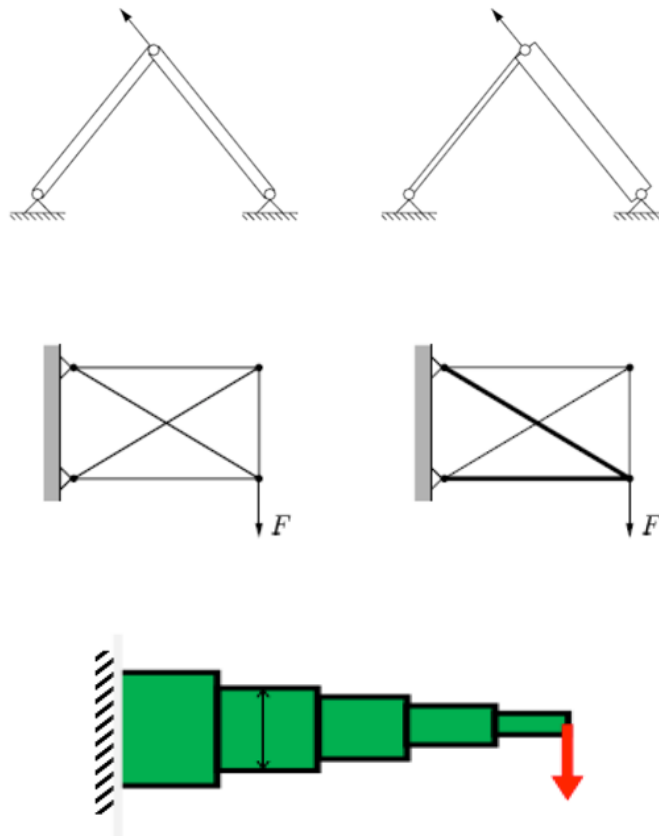
-ορισμός του μοντέλου βελτιστοποίησης, επιλογή των παραμέτρων σχεδιασμού και των συναρτήσεων περιορισμών

-υπολογισμός των τάσεων και των μετατοπίσεων των στοιχείων της κατασκευής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

-έλεγχος των περιορισμών τάσεων και μετατοπίσεων

-ανάλυση ευαισθησίας των περιορισμών και αντικειμενικής συνάρτησης (μόνο για την περίπτωση που χρησιμοποιείται μαθηματική μέθοδος βελτιστοποίησης SQP) και τροποποίηση των μεταβλητών σχεδιασμού

-επανάληψη της διαδικασίας από το τρίτο βήμα μέχρι την επίτευξη της βέλτιστης λύσης όπως ορίζεται από τα κριτήρια τερματισμού



Σχ. 3.1 : Παραδείγματα βελτιστοποίησης διαστασιολόγησης διατομής

3.6.2. Βελτιστοποίηση σχήματος κατασκευής (shape optimization)

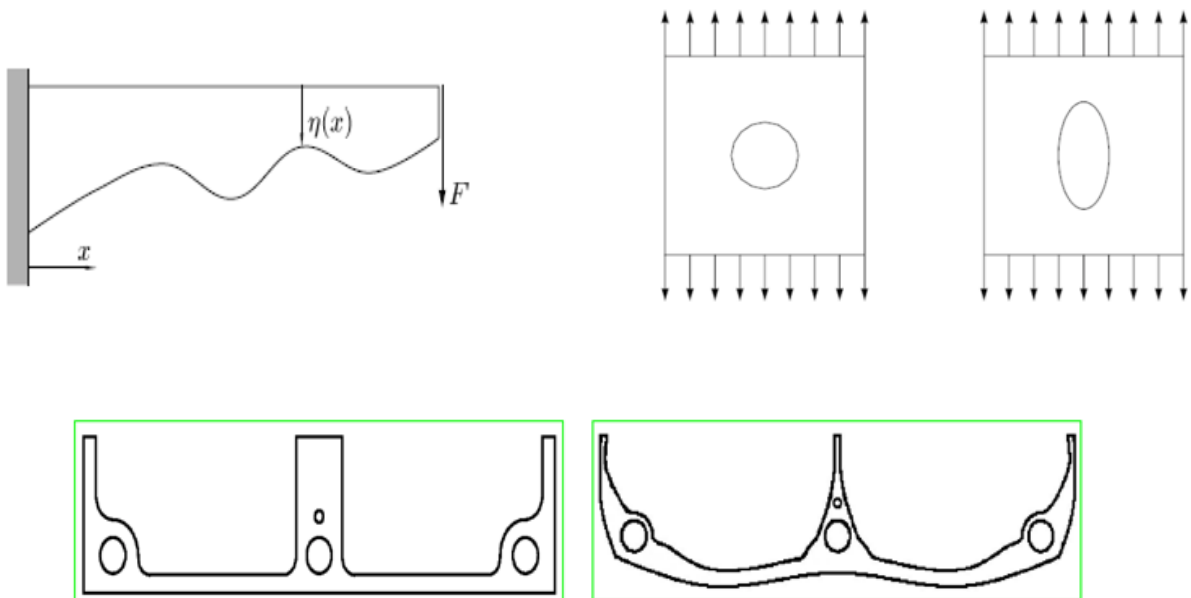
Στόχος των μεθόδων βέλτιστου σχεδιασμού σχήματος κατασκευών είναι ο βέλτιστος καθορισμός του σχήματος διατομών ράβδων ή ολόσωμων κατασκευών, δεδομένης της τοπολογίας της κατασκευής (αριθμός δομικών μελών). Η κατασκευή, με αυτόν τον τρόπο, καθίσταται πιο οικονομική και λειτουργική. Μεταβλητές σχεδιασμού αποτελούν συνήθως οι συντεταγμένες κάποιων κόμβων ή ακραίων σημείων. Η βελτιστοποίηση σχήματος κατασκευής, τις περισσότερες φορές, έπεται της βελτιστοποίησης τοπολογίας.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης σχήματος περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- περιγραφή της γεωμετρίας της κατασκευής
 - ορισμός μοντέλου μηχανικής ανάλυσης με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων
 - ανάλυση της απόκρισης της κατασκευής και υπολογισμός των τάσεων και μετατοπίσεων
 - ανάλυση ευαισθησίας των περιορισμών και της αντικειμενικής συνάρτησης (μόνο για την περίπτωση μαθηματικών μεθόδων βελτιστοποίησης SQP)
 - επανάληψη της διαδικασίας από το δεύτερο βήμα μέχρι την επίτευξη της βέλτιστης λύσης σύμφωνα με τα κριτήρια τερματισμού
- Γενικά, οι μέθοδοι βελτιστοποίησης σχήματος κατασκευής μπορούν να ταξινομηθούν στις τρεις ακόλουθες ομάδες:

- μέθοδος μεταβολής περιγράμματος (boundary segment approach)
- μέθοδος των βασικών σχημάτων (basic function/shape approach)
- μέθοδος προσομοίωσης στερεών σωμάτων (solid geometry-based approach)

Η βελτιστοποίηση σχήματος αποτελεί μια αρκετά σύνθετη διαδικασία μεγαλύτερου υπολογιστικού κόστους από τις άλλες δύο μεθόδους και αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στη συνεχή μεταβολή της γεωμετρίας του φορέα και του μοντέλου ανάλυσης. Ωστόσο, τα αποτελέσματα που προσφέρει είναι συνήθως μεγαλύτερης ακρίβειας από αυτά των μεθόδων διαστασιολόγησης και τοπολογίας, ιδιαίτερα αν έχει ευρεθεί εκ των προτέρων η βέλτιστη τοπολογία της κατασκευής.



Σχ. 3.2 : Παραδείγματα βελτιστοποίησης σχήματος κατασκευής

3.6.3 Βελτιστοποίηση τοπολογίας κατασκευής (topology optimization)

Ένας απλοποιημένος ορισμός της τοπολογίας μιας κατασκευής είναι ο αριθμός και η θέση των δομικών μελών που την αποτελούν. Ο στόχος της βέλτιστης τοπολογίας μπορεί να περιγραφεί παραστατικά από τη ρήση του Γάλλου μηχανικού *Robert le Ricolais* (1894 - 1977) :

“The art of structure is where to put the holes”.

Η τοπολογία μιας κατασκευής είναι συνήθως προκαθορισμένη από τις απαιτήσεις του προβλήματος και τους κατασκευαστικούς περιορισμούς ή προέρχεται από κάποιο αρχικό σχεδιασμό του μηχανικού. Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης της τοπολογίας είναι εργαλεία που βοηθούν το μηχανικό να επιτύχει την αποτελεσματική χρήση των υλικών για να επιτύχει τον στόχο του.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

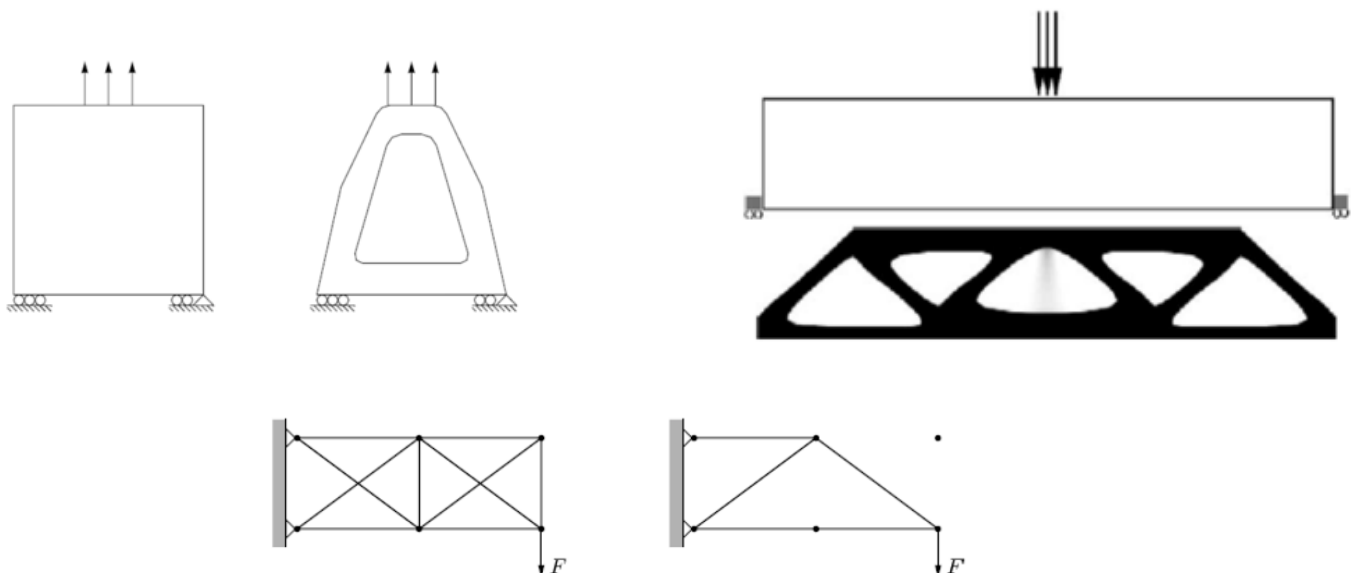
- ορισμός του χώρου σχεδιασμού
- ορισμός του τύπου του υλικού, των συνθηκών στήριξης και των φορτίων της κατασκευής

- ανάλυση του φορέα

- αφαίρεση ή πρόσθεση υλικού

- επανάληψη της διαδικασίας μέχρι τη βελτιστοποίηση της χρήσης του υλικού, δηλαδή την καλύτερη δυνατή κατανομή του υλικού στην κατασκευή

Για την ολοκλήρωση του βρόγχου επανάληψης, διάφορα κριτήρια σύγκλισης μπορούν να οριστούν, όπως ο συνολικός αριθμός επαναλήψεων, ο ρυθμός μεταβολής του σχήματος και άλλα.



Σχ. 3.3: Παραδείγματα βελτιστοποίησης τοπολογίας κατασκευής

Συνολικά, στον σχεδιασμό των κατασκευών ζητούμενο είναι ο καθορισμός μιας όσο το δυνατόν καλύτερης τοπολογίας ή δομής της κατασκευής. Στον όρο δομή περιλαμβάνεται κάθε πληροφορία που αφορά στην τοπολογία, το σχήμα και το μέγεθος της κατασκευής. Ο βέλτιστος σχεδιασμός της δομής των κατασκευών αποσκοπεί στην εύρεση των δομών εκείνων στις οποίες η αντοχή και η ακαμψία μεγιστοποιούνται με το ελάχιστο δυνατό υλικό. Η βελτιστοποίηση σχήματος μπορεί να θεωρηθεί πως έρχεται να δράσει συμπληρωματικά με τη βελτιστοποίηση της τοπολογίας ώστε να επιτευχθεί ο ζητούμενος στόχος.

3.7 Αρχιτεκτονική και βελτιστοποίηση τοπολογίας

Τα τελευταία χρόνια παρουσιάστηκαν οι πρώτες εφαρμογές της βελτιστοποίησης τοπολογίας σε προβλήματα αρχιτεκτονικού σχεδιασμού. Παρόλα αυτά, τόσο οι κύριες μέθοδοι βελτιστοποίησης τοπολογίας, όσο και το σύνολο των εμπορικών λογισμικών πάνω στο θέμα αυτό είναι προσαρμοσμένα σε προβλήματα μηχανικής του συνεχούς μέσου. Ως συνέπεια του γεγονότος αυτού μια σειρά από παραδοχές και τροποποιήσεις θα πρέπει να πραγματοποιηθούν.

Αρχικά, η μορφή ενός βελτιστοποιημένου τοπολογικά σχήματος καθορίζεται από κάποιο μηχανικό κριτήριο. Αν και το αισθητικό αποτέλεσμα ενός τέτοιου σχήματος είναι συνήθως αρκετά ικανοποιητικό, στην πραγματικότητα λείπει από το σχήμα μέχρι στιγμής η προσωπική ταυτότητα του αρχιτέκτονα. Προκειμένου ο αρχιτέκτονας να επιδράσει αισθητικά πάνω στη βελτιστοποιημένη μορφή, θα πρέπει τα μηχανικά κριτήρια του προβλήματος βελτιστοποίησης να συνδυαστούν με κάποια αισθητικά κριτήρια, γεωμετρικής φύσεως, τα οποία να χαρακτηρίζουν την προσωπική πινελιά του αρχιτέκτονα. Η μαθηματική περιγραφή των κριτηρίων αυτών καθώς και η εισαγωγή τους στο κώδικα βελτιστοποίησης απαιτεί κατά κανόνα τη στενή συνεργασία του αρχιτέκτονα με κάποιον μαθηματικό ή προγραμματιστή. Στο πλαίσιο της διπλωματικής αυτής δεν εισήχθησαν αισθητικά κριτήρια στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης αφενός μεν διότι δεν αποτελούσε κύριο μέλημα της διπλωματικής και αφετέρου γιατί η μέθοδος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε (SIMP) είναι ακατάλληλη για την μοντελοποίηση γεωμετρικών κριτηρίων, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους όπως η μέθοδος level – set, οι οποίες όμως παρουσιάζουν επιπρόσθετες υπολογιστικές δυσκολίες.

Στη συνέχεια, τα κλασσικά προβλήματα βέλτιστης τοπολογίας διατυπώνονται ως συνεχή προβλήματα βελτιστοποίησης συνεχούς μηχανικού μέσου. Τα προβλήματα αυτά βρίσκουν άμεση εφαρμογή σε άλλες ειδικότητες, για παράδειγμα σε θέματα μηχανολόγου μηχανικού, αλλά σπανίως το συνεχές μέσο χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό συμβατικών κατασκευών πολιτικού μηχανικού, όπου ο σχεδιασμός γίνεται συνήθως χρησιμοποιώντας μοντέλα κελυφών, πλακών, δοκών ή ράβδων. Επομένως προκύπτει φυσιολογικά το ερώτημα σχετικά με τα ποια μηχανικά κριτήρια θα πρέπει να συμπεριληφθούν στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Παραδείγματος χάριν, η εισαγωγή περιορισμών τάσεων σε

ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης τοπολογίας είναι γνωστό ότι εισάγει σημαντικές δυσκολίες. Παραταύτα οι τάσεις αυτές πιθανότατα δεν αντιπροσωπεύουν σε καμία περίπτωση τις τάσεις των δομικών στοιχείων που προτίθεται να κατασκευαστούν στην πραγματικότητα και επομένως είναι πρακτικά αμφίβολης χρησιμότητας. Στην παρούσα εργασία, το μόνο μηχανικό κριτήριο που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτό της συνολικής στιβαρότητας της κατασκευής, (έργο των εσωτερικών δυνάμεων).

Τέλος, δεν είναι ξεκάθαρο ποιοί συνδυασμοί φόρτισης θα έπρεπε να θεωρηθούν σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που αποσκοπεί να παραγάγει ένα αποτέλεσμα χρήσιμο σε έναν αρχιτέκτονα – πολιτικό μηχανικό. Ο λόγος είναι ότι οι σεισμικοί συνδυασμοί φόρτισης περιλαμβάνουν το ίδιο βάρος της κατασκευής το οποίο αφενός μεν αλλάζει κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης, εισάγοντας μία επιπλέον σημαντική δυσκολία στην επίλυση του, όπως και ότι το βάρος αυτό δεν αντιπροσωπεύει το πραγματικό βάρος της κατασκευής. Επίσης η θεώρηση πολύπλοκων μοντέλων ανάλυσης (ανάλυση pushover, ανάλυση ιδιομορφών) στα πλαίσια της βελτιστοποίησης τοπολογίας δεν είναι προφανής. Στη παρούσα εργασία, για το πρόβλημα βελτιστοποίησης τοπολογίας, θεωρήθηκαν μόνο κατακόρυφα φορτία και η ανάλυση περιορίστηκε στα πλαίσια της γραμμικής ελαστικότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ SIMP ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΩΔΙΚΑ MATLAB

4.1 Εισαγωγή

Με το παρόν κεφάλαιο σηματοδοτείται η έναρξη του υπολογιστικού μέρους της διπλωματικής εργασίας. Κατέστη σαφές από τη βιβλιογραφική επισκόπηση που παρουσιάστηκε στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2, πως η έννοια της βελτιστοποίησης τοπολογίας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με μαθηματικές εφαρμογές και αλγοριθμικές διαδικασίες, η εφαρμογή των οποίων είναι αδύνατη χωρίς την χρήση κωδίκων γραμμένων σε κάποια γλώσσα προγραμματισμού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έγινε επιλογή της μεθόδου SIMP με κώδικα γραμμένο σε MATLAB, ένα περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής και μια προγραμματιστική γλώσσα τέταρτης γενιάς. Στα πλαίσια της βελτιστοποίησης τοπολογίας και πιο συγκεκριμένα στην εφαρμογή κωδίκων που εφαρμόζουν τη μέθοδο SIMP, η MATLAB προσφέρει το συγκριτικό πλεονέκτημα της ευκολίας χρήσης, του καλού συντακτικού, της άμεσης εύρεσης λαθών, καθώς και της ταχύτητας υπολογισμών και του επαρκέστατου επιπέδου σχεδιαστικής αποτύπωσης αποτελεσμάτων. Το μόνο μειονέκτημα έγκειται στην περιορισμένη δυνατότητα χρήσης μνήμης (*stacksize*) το οποίο καθιστά αδύνατη την επίλυση προβλημάτων με μεγάλο συνολικό αριθμό αγνώστων.

Πιο συγκεκριμένα, θα ασχοληθούμε με την ανάλυση δύο ευρύτατα χρησιμοποιούμενων ακαδημαϊκών κωδίκων SIMP, του κώδικα SIMP99 [19] και εκ των υστέρων με τον κώδικα SIMP88[20], χρησιμοποιώντας τους για την επίλυση απλών εφαρμογών βελτιστοποίησης καθώς και με πιο συγκεκριμένα παραδείγματα, τα οποία αποτέλεσαν βασικό αντικείμενο μελέτης στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται αναλυτικά, και αναζητείται τρόπος απευθείας εκτύπωσης των αποτελεσμάτων σε σχεδιαστικό πρόγραμμα για την περαιτέρω επεξεργασία τους.

Για τα παραδείγματα της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε επεξεργαστής Intel Core i3 2,93 GHz , μνήμη RAM στα 1Gb.

4.2 Η μέθοδος SIMP

4.2.1 Μέθοδοι βελτιστοποίησης τοπολογίας

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας είναι ένα σχετικά νέο αλλά αναπτυσσόμενο ερευνητικό πεδίο, το οποίο χρησιμοποιεί εργαλεία από τα μαθηματικά τη μηχανική και την επιστήμη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, για να απαντήσει σε σημαντικά πρακτικά προβλήματα διάφορων τομέων της βιομηχανίας που εκτείνονται από την αεροναυπηγική ως τη νανοτεχνολογία.

Οι πρώτες εφαρμογές βελτιστοποίησης τοπολογίας εμφανίστηκαν στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης δικτυωμάτων (Michell [22]). Στη συνέχεια στα πλαίσια του συνεχούς μηχανικού μέσου οι πρώτες εργασίες βελτιστοποίησης τοπολογίας παρουσιάζονται από τους **Murat και Tartar** [23] και χρησιμοποιούν τη θεωρία ομογενοποίησης. Στα πλαίσια της θεωρίας αυτής θεωρείται ότι το συνεχές μέσο περιέχει κάποια μικροδομή και η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται ως προς την πυκνότητα του υλικού και πιθανόν ως προς τις ιδιότητες της μικροδομής.

Αν και η θεωρία της ομογενοποίησης έδωσε λύση στο πρόβλημα της ύπαρξης βέλτιστων λύσεων, η εφαρμογή της σε πρακτικά προβλήματα μηχανικού παρέμεινε περιορισμένη μέχρι σήμερα. Λόγω της αυξημένης δυσκολίας της μεθόδου πολλοί ερευνητές σκέφτηκαν να απλοποιήσουν το πρόβλημα θεωρώντας την ύπαρξη κάποιας πυκνότητας στο μέσο χωρίς όμως τη θεώρηση κάποιας μικροδομής. Στην περίπτωση αυτή το πρόβλημα είχε παρόμοια μορφή με το γνωστό πρόβλημα του *variable sheet thickness*, και επομένως ήταν πολύ απλούστερο να επιλυθεί παράγοντας αποτελέσματα πρακτικώς συγκρίσιμα με αυτά της θεωρίας ομογενοποίησης.

Η απλοποίηση αυτή σε συνδυασμό με την ανάγκη δημιουργίας κλασσικών σχημάτων, δηλαδή σχημάτων όπου η πυκνότητα παίρνει τιμές 0 ή 1, οδήγησε στην ιδέα χρήσης πλασματικών μηχανικών μοντέλων για την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς του υλικού τα οποία περιέχουν εγγενώς την τάση αποφυγής ενδιάμεσων πυκνοτήτων. Η πιο διάσημη μέθοδος αυτής της κατηγορίας είναι η SIMP method και η μέθοδος αυτή παρουσιάστηκε από τους **Bendsoe και Kikouchi** [28].

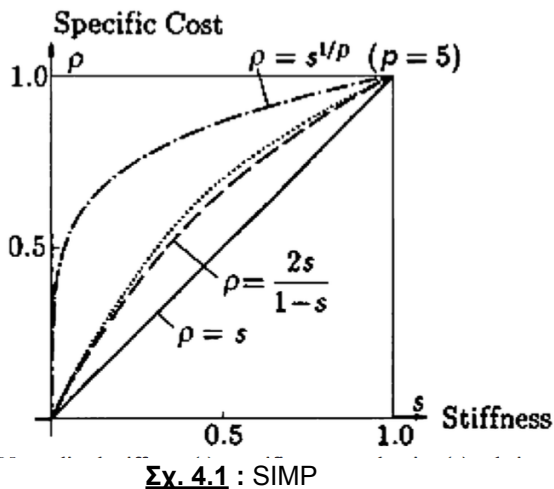
Οι παραπάνω μέθοδοι ανήκουν στις μεθόδους πυκνότητας για τη βελτιστοποίηση τοπολογίας. Το πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι η απλότητα περιγραφής τους, ενώ ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι η ανάγκη μετατροπής του μηχανικού προβλήματος με την εισαγωγή της έννοιας της πυκνότητας. Αν και η παρέμβαση αυτή, λόγω της εισαγωγής της έννοιας της πυκνότητας, δεν δημιουργεί ιδιαίτερες δυσκολίες σε απλά μηχανικά προβλήματα, το ίδιο δεν ισχύει σε πιο σύνθετα προβλήματα, όπως για παράδειγμα μη γραμμικά προβλήματα, μηχανική των ρευστών και άλλα.

Μία άλλη κατηγορία μεθόδων βελτιστοποίησης τοπολογίας η οποία δεν απαιτεί τροποποίηση του μηχανικού προβλήματος είναι αυτή των γεωμετρικών μεθόδων όπως για παράδειγμα η μέθοδος *level-set*. Παρόλα αυτά οι μέθοδοι αυτές είναι αρκετά

πολυπλοκότερες των μεθόδων πυκνότητας και για αυτό το λόγο δεν επιλέχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής.

4.2.2 Βασική ιδέα της μεθόδου SIMP

- solid isotropic microstructure
- - - rank-2 laminate
- · - · solid microstructure with penalty (SIMP)
- microstructure with square holes



Σχ. 4.1 : SIMP

Η ονομασία SIMP σημαίνει Solid Isotropic Material with Penalization και όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο πρόκειται για ένα τέτοιο τρόπο μοντελοποίησης των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, ώστε να αποφεύγεται όσο το δυνατόν η εμφάνιση ενδιάμεσων πυκνοτήτων στο βελτιστοποιημένο σχήμα, χωρίς περαιτέρω παρεμβάσεις από το χρήστη. Θα επιχειρήσουμε να παρέχουμε μία σύντομη επεξήγηση της βασικής ιδέας πίσω από τη SIMP με τη βοήθεια του σχήματος 4.1. Στο σχήμα αυτό απεικονίζεται η κανονικοποιημένη τιμή

της δυσκαμψίας ενός σημείου της κατασκευής, ως συνάρτηση της κανονικοποιημένης τιμής του κόστους, το οποίο θεωρείται ανάλογο της μάζας και άρα της τιμής της πυκνότητας ρ στο σημείο αυτό.

Υποθέτοντας πως η δυσκαμψία του υλικού εξαρτάται γραμμικά από την πυκνότητα, λαμβάνουμε τη σχέση

$$\rho = s \tag{4.1}$$

όπως αναφέραμε παραπάνω, έχει παρατηρηθεί μέσα από αριθμητικά παραδείγματα ότι η επιλογή αυτής της μοντελοποίησης οδηγεί σε βέλτιστες λύσεις με μεγάλη ποσότητα ενδιάμεσων πυκνοτήτων, κάτι που εξηγείται και θεωρητικά από το γεγονός ότι συχνότατα η βέλτιστη λύση του προβλήματος επιτυγχάνεται μέσω σύνθετων υλικών [25].

Οι δύο ενδιάμεσες καμπύλες απεικονίζουν τη σχέση πυκνότητας - δυσκαμψίας για δύο σύνθετα υλικά με περιοδική μικροδομή, πιο συγκεκριμένα για την περίπτωση ελασμάτων σε δύο διευθύνσεις (rank-2 laminates) και μικροδομή με τετραγωνικές οπές (βλ. Σχ. 4.1). Ιδιαίτερα στη δεύτερη περίπτωση, έχει παρατηρηθεί αριθμητικά η τάση για την απόκτηση βέλτιστων λύσεων της μορφής 0-1. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, για ενδιάμεσες τιμές της πυκνότητας ρ , οι τιμές της δυσκαμψίας s είναι μικρότερες από αυτές που επιτυγχάνονται χάρη της εξίσωσης (4.1) και συνεπώς η χρήση τους είναι περισσότερο αντισυμβατική.

Η βασική λοιπόν ιδέα της SIMP έγκειται στη κατασκευή ενός απλού τρόπου μοντελοποίησης των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, τέτοιου ώστε η επιλογή πυκνοτήτων με ενδιάμεσες τιμές να είναι αντισυμβατική. Οι **Bendsoe** και **Kikuchi** [28] πρότειναν τη σχέση

$$\rho = s^{1/p} (p > 1)$$

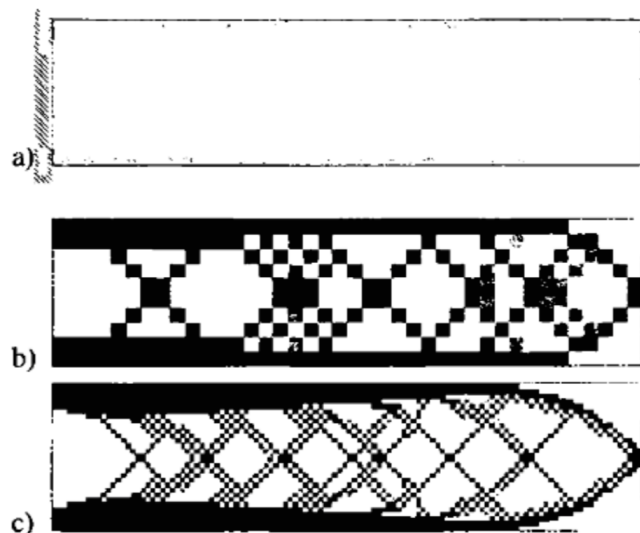
(4.2)

όπου s η δυσκαμψία ενός ισότροπου υλικού. Αργότερα οι Bendsoe και Sigmund (αναφορά) πρότειναν τη χρήση της δύναμης $p=3$, αποδεικνύοντας ότι για τη δύναμη αυτή είναι δυνατόν να κατασκευαστούν ισότροπα υλικά με τις ίδιες ελαστικές σταθερές για κάθε τιμή πυκνότητας. Για δυνάμεις $p > 3$ επιτυγχάνονται σχήματα πιο κοντά στη μορφή 0-1, όμως ο αλγόριθμος έχει τη τάση να “κολλάει” σε χειρότερα τοπικά ελάχιστα.

Τέλος αν και η μέθοδος SIMP είναι η πιο γνωστή, διάφορα άλλα σχήματα με παρόμοια λογική έχουν προταθεί, καθένα με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

4.2.3 Το πρόβλημα της σκακιέρας - checkerboard problem

Ένα από τα πρώτα προβλήματα που παρατηρήθηκαν στις μεθόδους πυκνότητας ήταν αυτό της επονομαζόμενης σκακιέρας. Το πρόβλημα της σκακιέρας οφείλεται στη μέθοδο διακριτοποίησης με γραμμικά τετραγωνικά πεπερασμένα στοιχεία και δεν έχει καμία σχέση με την ουσία της μεθόδου SIMP. Αυτό το πρόβλημα προκαλείται από μια υπερεκτίμηση της ακαμψίας για τη διάταξη του σχήματος της εικόνας 4.2. Εάν ο υπολογιστικός χρόνος δεν είναι το κύριο ζητούμενο του συνολικού προβλήματος, τότε το πρόβλημα μπορεί να ελεγχθεί και να περιοριστεί με τη χρήση διαφορετικών πεπερασμένων στοιχείων, πχ τετραγωνικών. Έχουν προταθεί επίσης άλλες μέθοδοι, όπως ο περιορισμός της περιμέτρου, ο περιορισμός της κλίσης της πυκνότητας, ή η χρήση φίλτρων η οποία είναι πολύ αποτελεσματική και απλή στην εφαρμογή της [26-27].



Σχ. 4.2 : Το πρόβλημα της σκακιέρας όπως απεικονίζεται σε μια δοκό πρόβολο. a) Το πρόβλημα σχεδίασης, b) ανάλυση με 400 πεπερασμένα στοιχεία c) ανάλυση με 6400 πεπερασμένα στοιχεία.

4.3 SIMP 99

Ο Ole Sigmund, το 2001 ολοκλήρωσε την εργασία του επάνω στον κώδικα SIMP 99 [19]. Σκοπός του ήταν η δημιουργία ενός δισδιάστατου κώδικα MATLAB για την εκπαίδευση των μηχανικών. Ο κώδικας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε απλές εφαρμογές βελτιστοποίησης τοπολογίας όπου ζητούμενο είναι τα αποτελέσματα με διαφορετικές φορτίσεις ή στηρίξεις, αλλά ακόμη και για να έρθει κάποιος σε μια πρώτη επαφή με το βέλτιστο σχεδιασμό. Πιο προχωρημένες εφαρμογές είναι η σύγκριση αποτελεσμάτων βέλτιστης τοπολογίας από τη θεωρία στην πράξη γρήγορα και αποτελεσματικά.

Ο κώδικας εφαρμόζει την επανομαζόμενη “power-law approach” ή μέθοδο SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization), η οποία αναλύθηκε στη προηγούμενη παράγραφο αναλυτικά. Εδώ οι ιδιότητες του υλικού θεωρούνται σταθερές σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο που χρησιμοποιείται για να διακριτοποιήσει τη περιοχή σχεδιασμού, ενώ μεταβλητές είναι οι σχετικές πυκνότητες των στοιχείων. Οι ιδιότητες του υλικού μοντελοποιούνται υψώνοντας τη σχετική πυκνότητα του υλικού σε κάποια δύναμη σχετική με τη πυκνότητα του στέρεου υλικού, δηλαδή σύμφωνα με τη σχέση

$$K = \rho^p K_0 \quad (4.3)$$

Επίσης, παρέχεται η δυνατότητα χρήσης ενός φίλτρου για τις υπολογιζόμενες παραγώγους, για την αποφυγή του προβλήματος της σκακιάρας. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που επιλύεται είναι αυτό της μεγιστοποίησης της στιβαρότητας για δεδομένο όγκο του υλικού.

Ο κώδικας SIMP 99

Το κυρίως πρόγραμμα καλείται από την MATLAB με την εντολή

top(nelx, nely, volfrac, penal, rmin)

όπου *nelx* και *nely* είναι ο αριθμός των στοιχείων στην οριζόντια και στην κατακόρυφη διεύθυνση, *volfrac* είναι το κλάσμα όγκου, *penal* είναι η δύναμη p της SIMP και *rmin* είναι η ακτίνα του φίλτρου (διαιρεμένο με το μέγεθος του στοιχείου). Άλλες μεταβλητές καθώς και συννοριακές συνθήκες ορίζονται από τον κώδικα και μπορούν να τροποποιηθούν . Σε κάθε επανάληψη, μέχρι τη τελική σύγκλιση, ο κώδικας παράγει μια εικόνα της τρέχουσας κατανομής πυκνότητας.

- Κυρίως πρόγραμμα (γραμμές 1-36)

Το κυρίως πρόγραμμα (γραμμές 1-36) ξεκινά με την ομοιόμορφη κατανομή υλικού στη περιοχή του σχεδίου (γραμμή 4). Μετά από κάποιες άλλες προετοιμασίες, ο κύριος βρόγχος επαναλήψεων ξεκινά καλώντας το υποπρόγραμμα FE (γραμμή 12) που επιστρέφει το διάνυσμα της μετατόπισης U. Από τη στιγμή που το μητρώο ακαμψίας, K_0 είναι ίδιο για όλα τα επιμέρους στοιχεία, αυτό καλείται μόνο μία φορά (γραμμή 14). Ακολουθώντας, μια επανάληψη για όλα τα στοιχεία (γραμμές 16-24) καθορίζει την αντικειμενική συνάρτηση και τις ευαισθησίες. Οι μεταβλητές n_1 και n_2 αριθμούν τον πάνω αριστερό και δεξιό κόμβο των στοιχείων στο γενικό σύστημα συντεταγμένων και χρησιμοποιούνται για να εξάγουν το διάνυσμα U_e από το καθολικό μητρώο U. Η ανάλυση ευαισθησίας ακολουθείται από το κάλεσμα φίλτρου (γραμμή 26) και η μεταβολή των πυκνοτήτων γίνεται βάσει της optimality criteria method, μέσω της υπορουτίνας OC (γραμμή 28). Το τρέχον αποτέλεσμα μαζί με άλλες παραμέτρους τυπώνονται με τις γραμμές 30-33 και το αποτέλεσμα της κατανομής της πυκνότητας σχεδιάζεται με τη γραμμή 35. Ο κύριος βρόγχος τερματίζεται αν η μέγιστη αλλαγή στη μεταβλητή σχεδιασμού (η οποία καθορίζεται στη γραμμή 30) είναι μικρότερη από 1%. Διαφορετικά τα παραπάνω βήματα επαναλαμβάνονται.

- Μέθοδος κριτηρίων βελτίστου (optimality criteria based optimizer) (37-48)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η μεταβολή των πυκνοτήτων γίνεται βάσει της optimality criteria method. Γνωρίζοντας ότι ο όγκος του υλικού ($sum(sum(x_{new}))$) είναι μια μονότονη φθίνουσα συνάρτηση του πολλαπλασιαστή Lagrange (lag), η τιμή του πολλαπλασιαστή Lagrange που ικανοποιεί τον περιορισμό του όγκου μπορεί να βρεθεί από έναν επιμέρους bi-sectioning αλγόριθμο (γραμμές 40-48). Ο αλγόριθμος αυτός ξεκινάει υποθέτοντας ένα κατώτατο όριο l_1 και ένα ανώτατο l_2 όριο για τον πολλαπλασιαστή Lagrange. Το διάστημα μεταξύ αυτών των ορίων μειώνεται επαναλαμβανόμενα στο μισό μέχρι το μέγεθός του να είναι μικρότερο από το κριτήριο σύγκλισης (γραμμή 40).

- Mesh - independency filtering (γραμμές 49-64)

Στις γραμμές 49-64 παρουσιάζεται το λεγόμενο φίλτρο ευαισθησίας (sensitivity filter). Αξίζει να σημειωθεί πως μόνο όσα στοιχεία βρίσκονται εντός ενός τετραγώνου με μήκος πλευράς δύο φορές την ακτίνα r_{min} γύρω από το εξεταζόμενο στοιχείο ελέγχονται. Εάν τεθεί στην τιμή της μεταβλητής r_{min} ποσότητα μικρότερη από ένα, τα φίλτρα ευαισθησίας θα ισούνται με τα αρχικά μετατρέποντας το φίλτρο σε ανενεργό. Το φίλτρο αυτό έχει παρατηρηθεί αριθμητικά ότι ενισχύει την εξασφάλιση ενός ελαχίστου πάχους των μελών της κατασκευής, ίσου με 2 φορές το r_{min} . Ως εκ τούτου, αποτρέπει την εμφάνιση όλο και

μικρότερων μελών καθώς αυξάνουμε τη διακριτοποίηση εξού και η ονομασία mesh - independency filtering.

- Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων (γραμμές 65-99)

Ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων είναι γραμμένος στις γραμμές 65-99. Να σημειωθεί πως ο λύτης χρησιμοποιεί την επιλογή αραίωσης της MATLAB. Το καθολικό μητρώο ακαμψίας σχηματίζεται με ένα βρόχο επί όλων των στοιχείων (γραμμές 70-77). Παρόμοια με ότι έγινε στο κύριο πρόγραμμα, οι μεταβλητές n1 και n2 αριθμούν την πάνω αριστερή και δεξιά γωνιά των κόμβων του στοιχείου, σε καθολικό σύστημα και χρησιμοποιούνται για να εισάγουν το μητρώο ακαμψίας του στοιχείου στις σωστές θέσεις του καθολικού μητρώου ακαμψίας.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως τόσο οι κόμβοι των στοιχείων όσο και τα στοιχεία είναι αριθμημένα ωρολογιακά. Επιπλέον κάθε κόμβος έχει δύο βαθμούς ελευθερίας (οριζόντιο και κατακόρυφο), ενώ η εντολή $F(2,1) = -1$. (γραμμή 79) εφαρμόζει μια κάθετη δύναμη στην πάνω αριστερή γωνία.

Οι στηρίξεις εισάγονται διαγράφοντας βαθμούς ελευθερίας από τις γραμμικές εξισώσεις. Η MATLAB μπορεί να το κάνει αυτό πολύ εύχρηστα με τη γραμμή 84

84 $U(\text{freedofs}, :) = K(\text{freedofs}, \text{freedofs}) \setminus F(\text{freedofs}, :)$;

όπου *freedofs* δηλώνουν τους μη δεσμευμένους βαθμούς ελευθερίας. Τις περισσότερες φορές είναι ευκολότερο να καθοριστούν οι βαθμοί ελευθερίας που είναι δεσμευμένοι (*fixeddofs*) επομένως οι μη δεσμευμένοι βρίσκονται αυτόματα χρήση της εντολής *setdiff* που βρίσκει τους μη δεσμευμένους βαθμούς ελευθερίας ως τη διαφορά μεταξύ όλων των βαθμών ελευθερίας και των δεσμευμένων.

Το μητρώο ακαμψίας του στοιχείου υπολογίζεται στις γραμμές 86-99.

- Συνθήκες στήριξης

Έίναι πολύ απλό να αλλάξουν οι συνοριακές συνθήκες και οι συνθήκες στήριξης με σκοπό να μοντελοποιηθούν και να λυθούν και άλλα προβλήματα βελτιστοποίησης, με αλλαγή των γραμμών 79,80.

- Φορτίσεις

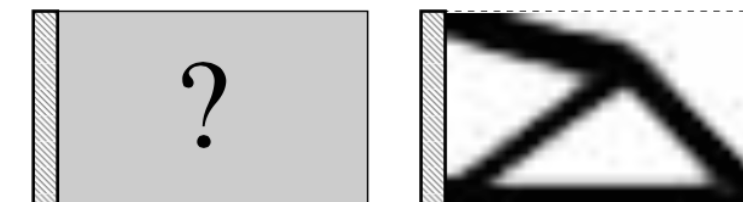
Είναι επίσης πολύ απλό να επεκταθεί ο αλγόριθμος ώστε να λαμβάνει υπόψιν περιπτώσεις πολλαπλών φορτίων. Πιο συγκεκριμένα, αυτό μπορεί να γίνει με την προσθήκη μόνο τριών γραμμών και κάνοντας μικρές παρεμβάσεις σε άλλες τέσσερις.

Στην πορεία θα παρουσιαστούν ορισμένα απλά παραδείγματα εφαρμογών του κώδικα σε απλές γεωμετρικές κατασκευές και στατικά μοντέλα με αλλαγές των συνοριακών συνθηκών και των φορτίων.

4.4 Απλά παραδείγματα εφαρμογής του κώδικα SIMP 99

Εάν οι γραμμές 79-80 του κώδικα όπως αυτός εμφανίζεται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β, τροποποιηθούν κατάλληλα ώστε να αναπαριστάται ένας κοντός πρόβολος μπορούμε να πάρουμε τα εξής αποτελέσματα, με εισαγωγή μεταβλητών *top* (32, 30, 0.4, 3.0, 1.2).

```
79 F(2*(nelx+1)*(nely+1),1) = -1 ;
80 fixeddofs = [1:2*(nely+1)] ;
```



Σχ. 4.2 : Κοντός πρόβολος και αποτέλεσμα βελτιστοποίησης

Σε περίπτωση που εφαρμόσουμε στον κοντό πρόβολο και ένα επιπλέον αντίθετο φορτίο στην άνω δεξιά ακμή του, τότε πρέπει να τροποποιήσουμε τον κώδικα ως εξής :

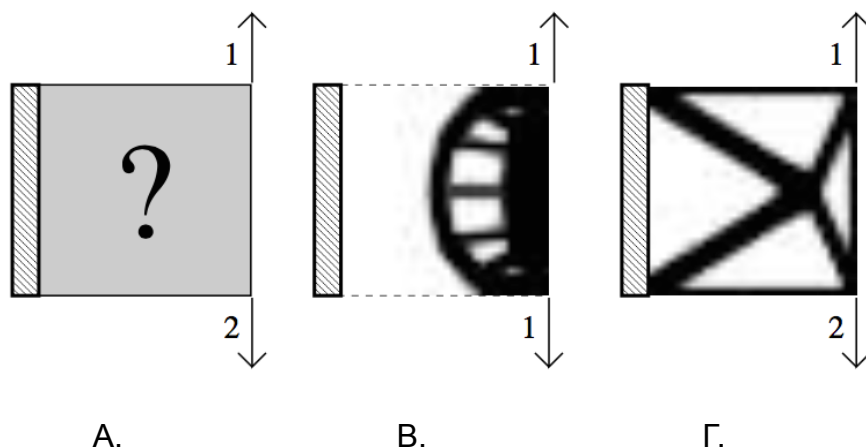
```
69 F = sparse(2*(nely+1)*(nelx+1),2);
U = sparse(2*(nely+1)*(nelx+1), 2);
```

```
79 F(2*(nelx+1)*(nely+1),1) = -1.; F(2*(nelx)*(nely+1)+2,2) = 1.
```

ενώ, καθώς το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης προκύπτει από δύο φορτίσεις , πρέπει οι γραμμές 20-22 να αντικατασταθούν με τις εξής

```
19b dc(ely, elx) = 0.;
19c for i = 1:2
20 Ue = U([2*n1-1;2*n1; 2*n2-1;2*n2; 2*n2+1;2*n2+2;2*n1+1;2*n1+2],i);
21 c = c + x(ely,elx)^penal*Ue'*KE*Ue;
22 dc(ely,elx) = dc(ely,elx) -
    penal*x(ely,elx)^(penal-1)*Ue'*KE*Ue;
22b end
```

Τρέξιμο *top*(30, 30, 0.4, 3.0, 1.2).



Σχ. 4.3 : Κοντός πρόβολος με διπλό φορτίο.

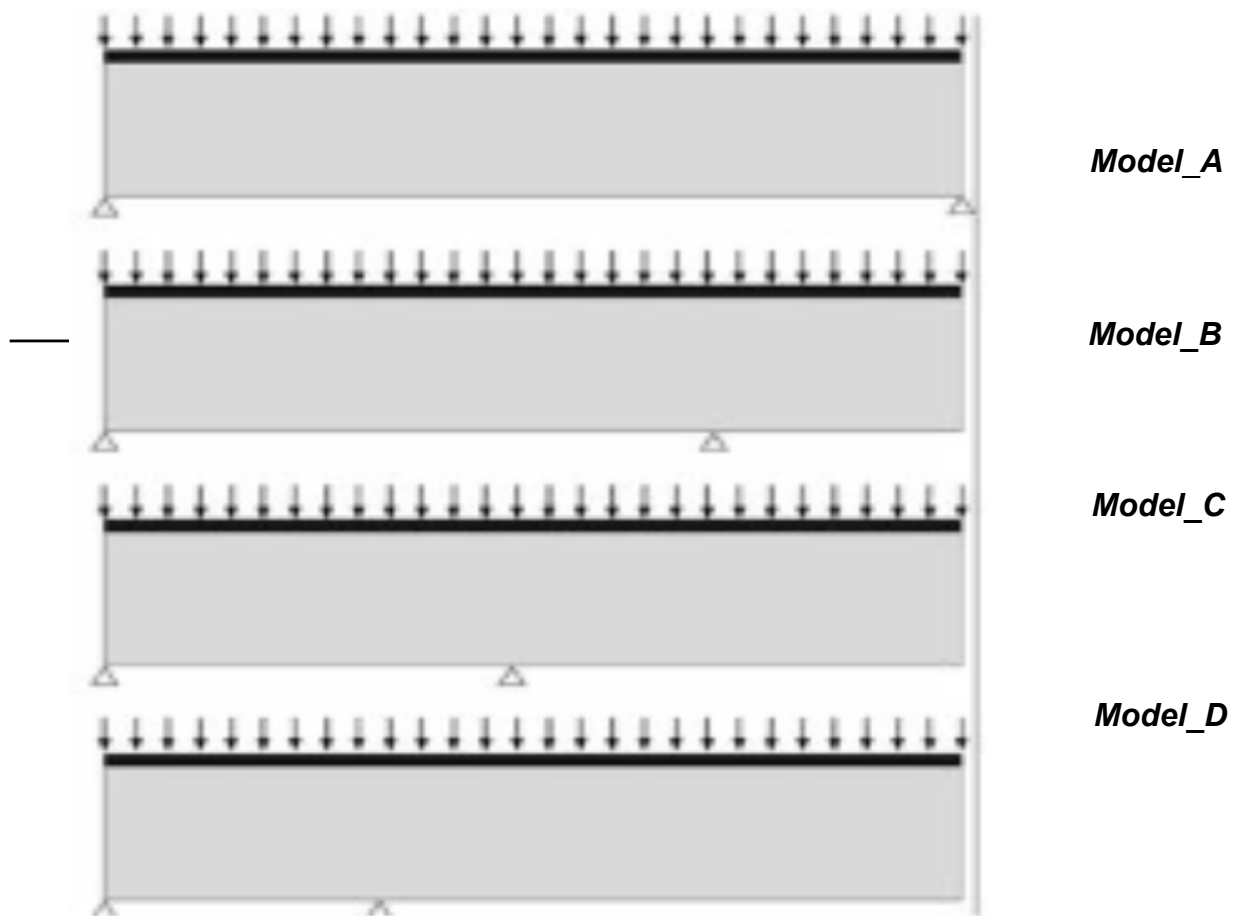
Στο Σχ. 4.3 Γ οι φορτίσεις δεν επιβάλλονται ταυτόχρονα! Βελτιστοποιείται η συνολική δυσκαμψία της κατασκευής για τις δύο ανεξάρτητες φορτίσεις. Αντιθέτως στο Σχ. 4.3 Β οι φορτίσεις επιβάλλονται ταυτόχρονα και η βέλτιστη κατασκευή ισορροπεί χωρίς να τοποθετηθεί υλικό στους δεσμευμένους βαθμούς ελευθερίας.

4.4.1 Εφαρμογή της μεθόδου SIMP σε ειδικότερες κατασκευές

Πρώτες εφαρμογές

Έχοντας πλέον μια εμπειριστατωμένη εικόνα της μεθόδου SIMP, και στα πλαίσια επαναπροσδιορισμού των στόχων της διπλωματικής εργασίας, ακολουθεί η μελέτη,

μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση τεσσάρων διαφορετικών στατικών προσομοιωμάτων βάσει της μεθόδου που αναλύθηκε στις προηγούμενες παραγράφους.



Σχ. 4.4 : Τα 4 στατικά μοντέλα που εξετάστηκαν

Τα τέσσερα διαφορετικά μοντέλα είναι τέσσερις δοκοί οι οποίες φορτίζονται με ομοίμορφα κατανεμημένο φορτίο στην άνω μεριά τους και στηρίζονται σταθερά στο αριστερό τους άκρο με άρθρωση, ενώ η δεύτερη άρθρωση τοποθετείται στο πέρα δεξιό άκρο σε μήκος L ίσο με το μήκος της δοκού από την σταθερή άρθρωση (**Model_A**) και σε μήκος $3L/4$ (**Model_B**), $L/2$ (**Model_C**) και τέλος $L/4$ (**Model_D**).

Για την παραπάνω διαδικασία απαραίτητη προϋπόθεση ήταν η κατάλληλη τροποποίηση του αρχικού κώδικα.

Σε όλες τις περιπτώσεις η γραμμή 79 τροποποιείται ώστε να αποδοθεί το ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο όπως φαίνεται στο Σχ.4.4 ως εξής :

$$79 \text{ } F(2:2*(nely+1):(2*(nely+1)*nelx+2), 1)=-1/(nelx+1);$$

Ενώ για τις συνθήκες στήριξης έχουμε διαδοχικά στη γραμμή 80 του κώδικα.

- **Model_A**

$$80 \text{ fixeddofs} = [2*(nely+1)-1, 2*(nely+1), 2*(nely+1)*(nelx+1)-1, 2*(nely+1)*(nelx+1)];$$

- **Model_B**

$$80 \text{ fixeddofs} = [2*(nely+1)-1, 2*(nely+1), 2*(nely+1)*(floor((nelx+1)*3/4)+1)-1, 2*(nely+1)*(floor((nelx+1)*3/4)+1)];$$

- **Model_C**

$$80 \text{ fixeddofs} = [2*(nely+1)-1, 2*(nely+1), 2*(nely+1)*(floor((nelx+1)*1/2)+1)-1, 2*(nely+1)*(floor((nelx+1)*1/2)+1)];$$

- **Model_D**

$$80 \text{ fixeddofs} = [2*(nely+1)-1, 2*(nely+1), 2*(nely+1)*(floor((nelx+1)*1/4)+1)-1, 2*(nely+1)*(floor((nelx+1)*1/4)+1)];$$

Μία πρώτη προσπάθεια ανάλυσης έγινε τρέχοντας τους αντίστοιχους κώδικες που κατασκευάστηκαν **top99_a (A)**, **top99_b (B)**, **top99_c(C)**, **top99_d (D)**, ώστε να πάρουμε μία πρώτη εικόνα των βελτιστοποιημένων μοντέλων, με την παρακάτω αντιστοιχία μεταβλητών:

- nelx = 50
- nely = 50
- volfrac = 0.3
- penal = 3.0
- rmin = 1.5



Model_A



Model_B



Model_C



Model_D

Σχ. 4.5 : Βελτιστοποιημένα μοντέλα με ανάλυση 50X50 και volfrac 0.3

Μετά από μία πρώτη ανάγνωση των μοντέλων και εποπτικό έλεγχο τους ώστε να διαπιστωθεί αν τα αποτελέσματα είναι τα αναμενόμενα, επόμενο βήμα αποτέλεσε η μοντελοποίηση τους με μια αλλαγή της διάστασης τους κατά τον άξονα x , θεωρώντας πως αυτή η λύση θα μπορούσε ευκολότερα να παράξει αποτελέσματα που θα προσομοιάζουν ακόμα και σε αυτό το αρχικό στάδιο μια κατασκευή πολιτικού μηχανικού. Για αυτό το λόγο προκρίθηκε η μοντελοποίηση τους με μια αναλογία 3:1, ο αριθμός δηλαδή των στοιχείων κατά τη διεύθυνση x να είναι τριπλάσιος από αυτό τον στοιχείων στη διεύθυνση y .

Με αυτό το σκεπτικό οι κώδικες **A, B, C, D** έτρεξαν με τα ακόλουθα δεδομένα :

- nelx = 150
- nely = 50
- volfrac = 0.3
- penal = 3.0
- rmin = 1.5



Model_A



Model_B



Model_C



Model_D

Σχ. 4.6 : Αποτελέσματα κώδικα SIMP99

4.4.2 Αντιμετώπιση προβλημάτων και αναζήτηση εναλλακτικών

Το βασικό μειονέκτημα του κώδικα SIMP99 είναι ότι το μητρώο δυσκαμψίας της κατασκευής ανακτασκειάζεται σε κάθε επανάληψη μέσω ενός διπλού βρόγχου *for*. Είναι γνωστό ότι η MATLAB δεν είναι κατάλληλη για βρόγχους αυτής της μορφής οι οποίοι απαιτούν πολύ χρόνο.

Στα πλαίσια της περαιτέρω ανάλυσης των μοντέλων απαιτήθηκε η μοντελοποίηση τους με $150 \times 50 = 7500$ στοιχεία, τα οποία σε σύγκριση με τα $50 \times 50 = 2500$ χιλιάδες τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά την πρώτη φάση, προκαλούσαν τρομακτικές καθυστερήσεις στην ολοκλήρωση της υπολογιστικής διαδικασίας της βελτιστοποίησης. Ενδεικτικά αναφέρεται η σύγκριση της ανάλυσης 50×50 με τις αναλύσεις 100×50 και 150×50 στο Model_A. Η πρώτη μεν ολοκληρωνόταν μετά από 74 επαναλήψεις και ύστερα από 3 λεπτά, η δεύτερη μετά από 157 επαναλήψεις και 7 λεπτά ενώ η τρίτη ολοκληρωνόταν μετά από 7 ώρες και 35 λεπτά, και 3304 επαναλήψεις. Υπήρχαν μάλιστα

περιπτώσεις που η χρονos που απαιτούνταν για την ολοκλήρωση της διαδικασίας ξεπερνούσε τις 10 ώρες, ανάλογα με την τιμή που δινόταν στη μεταβλητή `volfrac`.

Αυτή ακριβώς η καθυστέρηση στην εξαγωγή αποτελεσμάτων, και η ενδεχόμενη ανάγκη επαναλαμβανόμενων δοκιμών είτε στον ίδιο κώδικα είτε σε διαφορετικούς οδήγησε στην αναζήτηση ενός εξίσου αξιόπιστου αλλά ουσιαδώς ταχύτερου κώδικα που να εφαρμόζει την μέθοδο SIMP. Η επιλογή του κώδικα SIMP88 προκρίθηκε ως η καταλληλότερη επιλογή.

4.5 Κώδικας SIMP88

Συγκριτικά με άλλες γλώσσες προγραμματισμού υψηλών επιδόσεων όπως η C++ και η Fortran, η MATLAB θεωρείται γενικώς ότι υστερεί σε υπολογιστική ισχύ. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί με δύο λόγους.

- i. Πολλοί χρήστες χρησιμοποιούν την ίδια αλγοριθμική τεχνική που χρησιμοποιούν στη Fortran και στη C++ γράφοντας προγράμματα σε MATLAB όπως είναι η εκτεταμένη χρήση βρόγχων επανάληψης και όχι μητρικής μορφής. (Η MATLAB είναι *interpreted* και όχι *compiled* γλώσσα προγραμματισμού).
- ii. Η MATLAB γενικώς είναι αρκετά ανεκτική σε κακές προγραμματιστικές τεχνικές όπως οι δυναμικά αναπτυσσόμενες μεταβλητές.

Σε κάθε περίπτωση οι υπολογιστικές δυνατότητες που παρέχει η γλώσσα προγραμματισμού περιορίζονται αισθητά. Η αποτελεσματική χρήση της MATLAB προϋποθέτει διανυσματοποίηση των επαναλήψεων και σωστή χρήση της μνήμης.

Στην περίπτωση του κώδικα SIMP99, κάποιες επιμέρους διαδικασίες του, όπως η διαδικασία φιλτραρίσματος και κυρίως η διαδικασία μόρφωσης του καθολικού μητρώου ακαμψίας του φορέα, μπορούν να επιταχυνθούν δραματικά, χρήσει του κώδικα SIMP88, που εκδόθηκε 9 χρόνια μετά τον SIMP99. Με καλύτερη χρήση των δυνατοτήτων της MATLAB τα αποτελέσματα είναι πραγματικά εντυπωσιακά. Για παράδειγμα, στη δική μας περίπτωση των 7,500 στοιχείων ο χρόνος υπολογισμού μειώνεται στο 1/100 του χρόνου που απαιτείται για την επίλυση του ίδιου μοντέλου από τον SIMP99. Επιπλέον, ο κώδικας SIMP88 επεκτάθηκε με την ενσωμάτωση φίλτρων πυκνότητας, ενώ το συνολικό μήκος του κώδικα μειώθηκε κατά 11 γραμμές. Ο κώδικας SIMP88 κατ'ουσίας δεν είναι παρά ένας διάδοχος του προκατόχου του, του SIMP99 και πολλά κομμάτια του παραμένουν αυτούσια, παρ'όλα αυτά κρίνεται σκόπιμη η απλή περιγραφή του.

4.5.1 Ο κώδικας SIMP88

Στο σημείο αυτό θα γίνει αναφορά στον τρόπο λειτουργίας του κώδικα που εφαρμόστηκε στο μεγαλύτερο κομμάτι της διπλωματικής εργασίας, τον SIMP 88 γραμμών [20].

```

1 %%%% AN 88 LINE TOPOLOGY OPTIMIZATION CODE Nov, 2010 %%%%
2 function top88(nelx,nely,volfrac,penal,rmin,ft)
3 %%% MATERIAL PROPERTIES
4 E0 = 1;
5 Emin = 1e-9;
6 nu = 0.3;
7 %%% PREPARE FINITE ELEMENT ANALYSIS
8 A11 = [12 3 -6 -3; 3 12 3 0; -6 3 12 -3; -3 0 -3 12];
9 A12 = [-6 -3 0 3; -3 -6 -3 -6; 0 -3 -6 3; 3 -6 3 -6];
10 B11 = [-4 3 -2 9; 3 -4 -9 4; -2 -9 -4 -3; 9 4 -3 -4];
11 B12 = [2 -3 4 -9; -3 2 9 -2; 4 9 2 3; -9 -2 3 2];
12 KE = 1/(1-nu^2)/24*(A11 A12;A12' A11)+nu*[B11 B12;B12' B11];
13 nodenrs = reshape(1:(1+nelx)*(1+nely),1+nely,1+nelx);
14 edofVec = reshape(2*nodenrs(1:end-1,1:end-1)+1,nelx*nely,1);
15 edofMat = repmat(edofVec,1,8)+repmat([0 1 2*nely+[2 3 0 1] -2 -1],nelx*nely,1);
16 iK = reshape(kron(edofMat,ones(8,1)),64*nelx*nely,1);
17 jK = reshape(kron(edofMat,ones(1,8))',64*nelx*nely,1);
18 % DEFINE LOADS AND SUPPORTS (HALF MBB-BEAM)
19 F = sparse(2,1,-1,2*(nely+1)*(nelx+1),1);
20 U = zeros(2*(nely+1)*(nelx+1),1);
21 fixeddofs = union([1:2*(nely+1)],[2*(nelx+1)*(nely+1)]);
22 alldofs = [1:2*(nely+1)*(nelx+1)];
23 freedofs = setdiff(alldofs,fixeddofs);
24 %%% PREPARE FILTER
25 iH = ones(nelx*nely*(2*(ceil(rmin)-1)+1)^2,1);
26 jH = ones(size(iH));
27 sH = zeros(size(iH));
28 k = 0;
29 for i1 = 1:nelx
30   for j1 = 1:nely
31     e1 = (i1-1)*nely+j1;
32     for i2 = max(i1-(ceil(rmin)-1),1):min(i1+(ceil(rmin)-1),nelx)
33       for j2 = max(j1-(ceil(rmin)-1),1):min(j1+(ceil(rmin)-1),nely)
34         e2 = (i2-1)*nely+j2;
35         k = k+1;
36         iH(k) = e1;
37         jH(k) = e2;
38         sH(k) = max(0,rmin-sqrt((i1-i2)^2+(j1-j2)^2));
39       end
40     end
41   end
42 end
43 H = sparse(iH,jH,sH);
44 Hs = sum(H,2);
45 %%% INITIALIZE ITERATION
46 x = repmat(volfrac,nely,nelx);
47 xPhys = x;
48 loop = 0;
49 change = 1;
50 %%% START ITERATION
51 while change > 0.01
52   loop = loop + 1;
53   %%% FE-ANALYSIS
54   sK = reshape(KE(:)*(Emin+xPhys(:)'.^penal*(E0-Emin)),64*nelx*nely,1);
55   K = sparse(iK,jK,sK); K = (K+K')/2;
56   U(freedofs) = K(freedofs,freedofs)\F(freedofs);
57   %%% OBJECTIVE FUNCTION AND SENSITIVITY ANALYSIS
58   ce = reshape(sum((U(edofMat)*KE).*U(edofMat),2),nely,nelx);

```

```

59 c = sum(sum((Emin+xPhys.^penal*(E0-Emin)).*ce));
60 dc = -penal*(E0-Emin)*xPhys.^(penal-1).*ce;
61 dv = ones(nely,nelx);
62 %% FILTERING/MODIFICATION OF SENSITIVITIES
63 if ft == 1
64   dc(:) = H*(x(:).*dc(:))./Hs./max(1e-3,x(:));
65 elseif ft == 2
66   dc(:) = H*(dc(:))./Hs;
67   dv(:) = H*(dv(:))./Hs;
68 end
69 %% OPTIMALITY CRITERIA UPDATE OF DESIGN VARIABLES AND PHYSICAL DENSITIES
70 l1 = 0; l2 = 1e9; move = 0.2;
71 while (l2-l1)/(l1+l2) > 1e-3
72   lmid = 0.5*(l2+l1);
73   xnew = max(0,max(x-move,min(1,min(x+move,x.*sqrt(-dc./dv/lmid)))));
74   if ft == 1
75     xPhys = xnew;
76   elseif ft == 2
77     xPhys(:) = (H*xnew(:))./Hs;
78   end
79   if sum(xPhys(:)) > volfrac*nelx*nely, l1 = lmid; else l2 = lmid; end
80 end
81 change = max(abs(xnew(:)-x(:)));
82 x = xnew;
83 %% PRINT RESULTS
84 fprintf(' It.:%5i Obj.:%11.4f Vol.:%7.3f ch.:%7.3fn',loop,c, ...
85   mean(xPhys(:),change);
86 %% PLOT DENSITIES
87 colormap(gray); imagesc(1-xPhys); caxis([0 1]); axis equal; axis off; drawnow;
88 end

```

Ο κώδικας καλείται από τη MATLAB με την εντολή

`top88(nelx, nely, volfrac, penal, rmin, ft)`

όπου *nelx* και *nely* είναι ο αριθμός των στοιχείων κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση αντίστοιχα, *volfrac* είναι το κλάσμα όγκου *f*, *penal* είναι η δύναμη *p* της SIMP, *rmin* είναι το φίλτρο ακτίνας r_{min} (δαιρεμένο με το μέγεθος του στοιχείου), ενώ το επιπλέον στοιχείο σε σχέση με το προηγούμενο κώδικα είναι το *ft*, που προσδιορίζει αν χρησιμοποιείται το φίλτρο ευαισθησίας (*ft*=1) ή το φίλτρο πυκνότητας (*ft*=2). Στην πρώτη περίπτωση, δηλαδή του φίλτρου ευαισθησίας, ο κώδικας των 88 γραμμών πρακτικά τείνει στα ίδια αποτελέσματα με τον κώδικα. Η ελαφρά διαφοροποίηση προκύπτει από τη διαφορετική εφαρμογή της μεθόδου SIMP.

Οι πιο εμφανείς διαφορές μεταξύ των δύο κωδίκων είναι οι εξής :

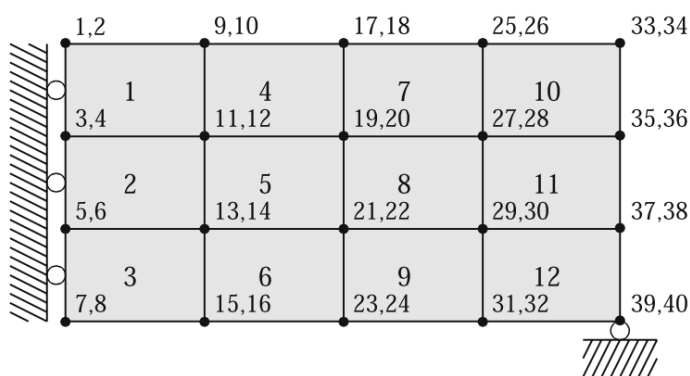
- i. Οι επαναλήψεις που ξεκινάνε με *for* και χρησιμοποιούνται για την μόρφωση του μητρώου δυσκαμψίας της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων καθώς και για να εφαρμοστεί η διαδικασία φιλτραρίσματος έχουν διανυσματοποιηθεί.
- ii. Η κατανομή μνήμης των arrays που συμπληρώνονται μέσα στον βρόγχο *for* γίνεται έξω από τους βρόγχους.
- iii. Όσο το δυνατόν περισσότερο τμήμα του κώδικα τοποθετείται έξω από τον βρόγχο βελτιστοποίησης.

- iv. Γίνεται μια διαφοροποίηση μεταξύ της μεταβλητής σχεδιασμού X και της φυσικής πυκνότητας $xPhys$ ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή ενός φίλτρου πυκνότητας, και
- v. Όλα τα υποπρογράμματα έχουν ενσωματωθεί στο κυρίως πρόγραμμα.

Ο κώδικας χωρίζεται νοηματικά σε τρία επιμέρους τμήματα: την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, τη χρήση των φίλτρων ευαισθησίας ή πυκνότητας και τέλος το βρόγχο της βελτιστοποίησης.

- Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων

Η περιοχή σχεδίασης θεωρείται ότι είναι ένα ορθογώνιο που διακριτοποιείται από τετραγωνικά στοιχεία. Ένα απλό παράδειγμα για το πως αριθμούνται τα στοιχεία, οι 4 κόμβοι ανά στοιχείο και οι δύο βαθμοί ελευθερίας ανά κόμβο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 4.3.



Σχ. 4.7 Παράδειγμα ανάλυσης στοιχείων

Η προεργασία για την μέθοδο επεξεργασίας αρχίζει με τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του υλικού (γραμμές 4-6). Στη συνέχεια υπολογίζεται το μητρώο ακαμψίας K_0 για $\rho = 1$ (γραμμές 8-12). Το μητρώο αυτό καταγράφεται ως KE . Λόγω της ομοιομορφίας του πλέγματος, το μητρώο αυτό είναι το ίδιο για όλα τα στοιχεία.

Για να διευκολυνθεί η αποτελεσματική μόνωση του μητρώου ακαμψίας στο βρόγχο επανάληψης, ένα μητρώο *edofMat* μορφώνεται (γραμμές 13-15) σε τρία βήματα, με στόχο από το επιμέρους μητρώο ακαμψίας των στοιχείων να μορφωθεί το καθολικό μητρώο ακαμψίας του φορέα.

Οι συνοριακές συνθήκες καθώς και το διάνυσμα της φόρτισης καθορίζεται στις γραμμές 18-23 που είναι πανομοιότυπες με τις αντίστοιχες του κώδικα των 99 γραμμών, αλλά στον κώδικα τον 88 γραμμών βρίσκονται εκτός του βρόγχου της επανάληψης.

Το σύστημα των εξισώσεων των πεπερασμένων στοιχείων λύνεται εν τέλει στη γραμμή 56.

- Φιλτράρισμα

Σε γενικές γραμμές, ένα φίλτρο ευαισθησίας περιλαμβάνει ένα σταθμισμένο μέσο από τις παραγώγους των γειτονικών στοιχείων. Αυτή είναι μία γραμμική διαδικασία και μπορεί να γίνει με τον πολλαπλασιασμό ενός σταθερού πίνακα και ενός διανύσματος που περιλαμβάνει της αρχικές παραγώγους. Η διαδικασία αυτή γίνεται στη γραμμή 64. Η χρήση του φίλτρου ευαισθησίας όχι μόνο επιβάλλει το φιλτράρισμα των πυκνοτήτων, αλλά και μία αλυσιδωτή τροποποίηση των παραγώγων της αντικειμενικής συνάρτησης και του όγκου. Και οι δύο διαδικασίες περιλαμβάνουν ένα σταθμισμένο μέσο των αντιστοίχων τιμών διαφόρων επιμέρους στοιχείων. Το φιλτράρισμα πυκνότητας γίνεται στη γραμμή 77, και η τροποποίηση των παραγώγων στις γραμμές 66-67.

- Βρόγχος Βελτιστοποίησης

Κάθε επανάληψη του βρόγχου ξεκινάει με την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων όπως περιγράφεται στις γραμμές 54-56. Εν συνεχεία υπολογίζονται η αντικειμενική συνάρτηση c και οι παράγωγοι dc και dn της αντικειμενικής συνάρτησης και του όγκου αντίστοιχα συναρτήσεων των φυσικών πυκνοτήτων (γραμμές 58-61). Σε σχέση με τον αρχικό κώδικα, γίνεται μία πιο αποτελεσματική χρήση του μητρώου *edofMat* για να υπολογίζεται η στιβαρότητα (compliance) της κατασκευής.

Στις γραμμές 70-82 η μέθοδος κριτηρίων βέλτιστου (optimality criteria method) χρησιμοποιείται για να ενημερώσει τις μεταβλητές σχεδιασμού. Η ενημέρωση γίνεται με παρόμοιο τρόπο με τον αρχικό κώδικα, εκτός από το γεγονός ότι η παράγωγος dn των περιορισμών του όγκου λαμβάνεται υπόψιν και η συνθήκη τέλους περιγράφεται με σχετικούς όρους. Η αλλαγή αυτή γίνεται για καθαρά λόγους ακρίβειας και υπολογιστικής ταχύτητας.

Τέλος, τα ενδιάμεσα αποτελέσματα τυπώνονται (γραμμές 84 και 85) και σχεδιάζονται (γραμμή 87) ώστε ο χρήστης να μπορεί να παρακολουθεί στην οθόνη του την πορεία της βελτιστοποίησης του στοιχείου με τον ίδιο τρόπο όπως στον κώδικα των 99 γραμμών.

Ο βρόγχος βελτιστοποίησης τερματίζεται όταν η διαφορά μεταξύ διαδοχικών σχεδίων, σε όρους μεταβλητών σχεδιασμού είναι μικρότερη από 1%.

4.5.2 Τελική επιλογή

Ανακεφαλαιώνοντας, ζητούμενο κατά την βιβλιογραφική επισκόπηση ήταν η εύρεση ενός κώδικα ο οποίος θα μπορεί να εφαρμόζει κάποια μέθοδο βελτιστοποίησης τοπολογίας ώστε μετά την μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση συγκεκριμένων στατικών

μοντέλων να εξάγεται ένα αποτέλεσμα το οποίο θα έχει ενδιαφέρον για περαιτέρω επεξεργασία από τη σκοπιά του πολιτικού μηχανικού.

Η μέθοδος που επιλέχτηκε ήταν η SIMP και ο κώδικας που θα την εφαρμόζε με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή ήταν ο SIMP88, έναντι του αντίστοιχου 99. Το συγκριτικό του πλεονέκτημα, πέρα από θεωρητικές βελτιώσεις στο κομμάτι της βελτιστοποίησης ήταν ότι ενώ διατηρούσε όλα τα θετικά της μεθόδου, παράλληλα επιτάχυνε σε ικανοποιητικό βαθμό την πορεία των υπολογισμών. Η μέθοδος επιτρέπει βάσει δεδομένων συνθηκών στήριξης και φόρτισης να προσθαφαιρεί υλικό, δηλαδή μάζα, μεταβάλλοντας κατάλληλα το μητρώο ακαμψίας του συνόλου του φορέα, μεγιστοποιώντας τη στιβαρότητα για δεδομένο όγκο υλικού.

4.6 Σύνδεση αποτελεσμάτων MATLAB με σχεδιαστικό πρόγραμμα τύπου CAD

Τελικό πλέον ζητούμενο ώστε να επιτευχθεί σύγκλιση στους στόχους της διπλωματικής εργασίας ήταν η εύρεση ενός αυτοματοποιημένου τρόπου που θα επέτρεπε την εξαγωγή ενός αρχείου ως αποτέλεσμα από τη MATLAB, το οποίο θα ήταν σε επεξεργάσιμη μορφή από σχεδιαστικό πρόγραμμα τύπου CAD, και θα μετέφερε με ακρίβεια το βελτιστοποιημένο αποτέλεσμα στο πρόγραμμα σχεδίασης.

Παρά την ύπαρξη εξειδικευμένων λογισμικών για τη συγκεκριμένη διαδικασία, επιλέχθηκε ως τρόπος αντιμετώπισης του συγκεκριμένου σκόπελου η δημιουργία μιας συνάρτησης που θα λειτουργεί συμπληρωματικά με το βασικό κώδικα και θα οδηγεί στη δημιουργία ενός αρχείου .Isr το οποίο είναι συμβατό και επεξεργάσιμο με όλα τα σχεδιαστικά προγράμματα.

Με το σκεπτικό ότι τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης επεξεργάζονταν εν συνεχεία από σχεδιαστικό πρόγραμμα και εν συνεχεία από στατικό πρόγραμμα, υπήρξε μια τροποποίηση του κώδικα των 88 γραμμών, με την προσθήκη μιας επιπλέον γραμμής 80b η οποία δημιουργούσε μια γραμμή πάχους δύο στοιχείων γεμάτη με υλικό στην άνω πλευρά του μοντέλου. Η χρησιμότητα της συγκεκριμένης προσθήκης θα αναλυθεί σε επόμενα κεφάλαια.

Εν συνεχεία ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή της συνάρτησης που συντάχθηκε και στοχεύει στη δημιουργία του αρχείου μορφής .Isr.

Στόχος της συνάρτησης είναι να δημιουργήσει ένα αρχείο τύπου .Isr, ώστε να μπορεί να εκτελεστεί από οποιοδήποτε πρόγραμμα CAD. Η συγκεκριμένη συνάρτηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποτυπώσει τα κελιά ενός πίνακα, ανάλογα με την τιμή πυκνότητας που περιέχουν. Ουσιαστικά είναι μια μεταφορά της γνωστής εντολής colormap σε περιβάλλον CAD.

- Αρχικά εισάγουμε τα στοιχεία που χρειάζονται για την εκτέλεση της συνάρτησης. Αυτά είναι ο αριθμός των στοιχείων κατά x (*nelx*), ο αριθμός των στοιχείων κατά Y (*nely*), και φυσικά ο πίνακας με βάση του οποίου τις τιμές θα γίνει η οπτικοποίηση. Η διαδικασία αυτή γίνεται στην γραμμή

```
89 function [fileID]=lsp(nelx,nely,xPhys)
```

- Έπειτα αρχικοποιούμε τον πίνακα *plot* και του δίνουμε τις επιθυμητές διαστάσεις (*nelx* γραμμές και *nely* στήλες)

```
90 plot=zeros(nelx,nely);
```

- Δίνουμε τιμές (μονάδα) στις θέσεις του πίνακα, όπου ο πίνακας *xPhys(i,j)* έχει τιμή μεγαλύτερη από 0,5 (αυτό αποτελεί κριτήριο που μπορεί να αλλαχθεί). Με άλλα λόγια όταν η πυκνότητα του κελιού της βελτιστοποιημένης κατασκευής είναι μεγαλύτερο από 0.5 τότε θεωρούμε ότι το κελί περιέχει υλικό ενώ αν είναι μικρότερο ή ίσο είναι κενό.

```
91 for i=1:nely;
92   for j=1:nelx;
93     if xPhys(i,j)>0.5;
94       plot(i,j)=1;
95     end
96   end
97 end
```

- Δημιουργούμε έναν κανόνα για την απόδοση της ονομασίας των κόμβων που απαρτίζουν ένα στοιχείο. Από την ονομασία κάθε κόμβου τα δύο πρώτα νούμερα αποτελούν τον αριθμό του κόμβου κατά x, και τα δύο τελευταία την ονομασία του κόμβου κατά y. Για παράδειγμα ο κόμβος 2432 είναι ο 24ος κατά x, και 32ος κατά Y.

```
98 for i=1:nely+1
99   for j=1:nelx+1
100    knotnumber(j,i)=j*100+i;
101    knotx(j,i)=j;
102    knoty(j,i)=i;
103   end
104 end
```

- Συμπυκνώνουμε την πληροφορία που έχουμε δημιουργήσει για τους κόμβους σε έναν πίνακα

```
112 plot1=reshape(knotnumber,1,[]);
113 plot2=reshape(knotx,1,[]);
114 plot3=reshape(knoty,1,[]);
115 multimatrix=[plot1;plot2;plot3];
116 [rowsplot,colplot]=size(multimatrix);
```

- Εδώ παρουσιάζεται το τμήμα του κώδικα στο οποίο γίνεται η επιλογή των κόμβων που συμμετέχουν σε κάθε στοιχείο που θέλουμε να απεικονίσουμε

```
117 Node=zeros(2,colplot);
118 count=1;
119 for j=1:nely
120   for i=1:nelx
121     if plot(j,i)>0.5
122       Node(1,count)=i*100+j;
123       Node(2,count)=(i+1)*100+j;
124
125       Node(1,count+1)=i*100+j;
126       Node(2,count+1)=i*100+j+1;
127
128       Node(1,count+2)=i*100+j+1;
129       Node(2,count+2)=(i+1)*100+j+1;
130
131       Node(1,count+3)=(i+1)*100+j+1;
132       Node(2,count+3)=(i+1)*100+j;
133
134       count=count+4;
135   end
136 end
137 end
```

- Εντολή που δίνει την θέση που τα αποθηκευτεί το αρχείο που εξάγουμε:

```
139 fileID = fopen('C:\Users\Documents\test_0204_A_x05.lsp','wt');
```

- Το φορμάτ που θα ακολουθηθεί στην εκτύπωση στον φάκελο για την χαρτογράφηση των κόμβων

```
140 formatSpec='(setq N%04d "%7.13f,%6.13f,0")\r\n';
141   fprintf(fileID,formatSpec,multimatrix);
```

Μερικές γραμμές απόσπασμα των αποτελεσμάτων
(setq N0101 "1.0000000000000,1.0000000000000,0")
(setq N0201 "2.0000000000000,1.0000000000000,0")
(setq N0301 "3.0000000000000,1.0000000000000,0")
(setq N0401 "4.0000000000000,1.0000000000000,0")
(setq N0501 "5.0000000000000,1.0000000000000,0")
(setq N0601 "6.0000000000000,1.0000000000000,0")
(setq N0701 "7.0000000000000,1.0000000000000,0")
(setq N0801 "8.0000000000000,1.0000000000000,0")
(setq N0901 "9.0000000000000,1.0000000000000,0")
(setq N1001 "10.0000000000000,1.0000000000000,0")
(setq N1101 "11.0000000000000,1.0000000000000,0")

- Και αντίστοιχα το φορμάτ που χρησιμοποιείται για τις εντολές προς το πρόγραμμα CAD για την ένωση των σημείων με γραμμές

```
142 formatSpecNode=(command "LINE" N%04.0f N%04.0f")\r\n';  
143   fprintf(fileID,formatSpecNode,Node);
```

- Μερικές γραμμές απόσπασμα των αποτελεσμάτων όπως αυτά εκτυπώνονται στο αρχείο .lsp :

```
(command "LINE" N0101 N0201")  
(command "LINE" N0101 N0102")  
(command "LINE" N0102 N0202")  
(command "LINE" N0202 N0201")  
(command "LINE" N0201 N0301")  
(command "LINE" N0201 N0202")  
(command "LINE" N0202 N0302")  
(command "LINE" N0302 N0301")  
(command "LINE" N0301 N0401")  
(command "LINE" N0301 N0302")  
(command "LINE" N0302 N0402")  
(command "LINE" N0402 N0401")  
(command "LINE" N0401 N0501")
```

4.7 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Μετά από πολλές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στον κώδικα, και για τα τέσσερα μοντέλα όπως αυτά παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη παράγραφο, παρατηρήθηκε πως ουσιαστικές διαφορές στα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης προέκυπταν για μεταβολή της τιμής που δινόταν στη μεταβλητή *volfrac*, κατά 0.05 έως 0.1. Προτιμήθηκε η χρήση του βήματος 0,05 για την λεπτομερέστερη ανάλυση των μοντέλων, μετά από διεξοδική συζήτηση με τους επιβλέποντες καθηγητές της διπλωματικής.

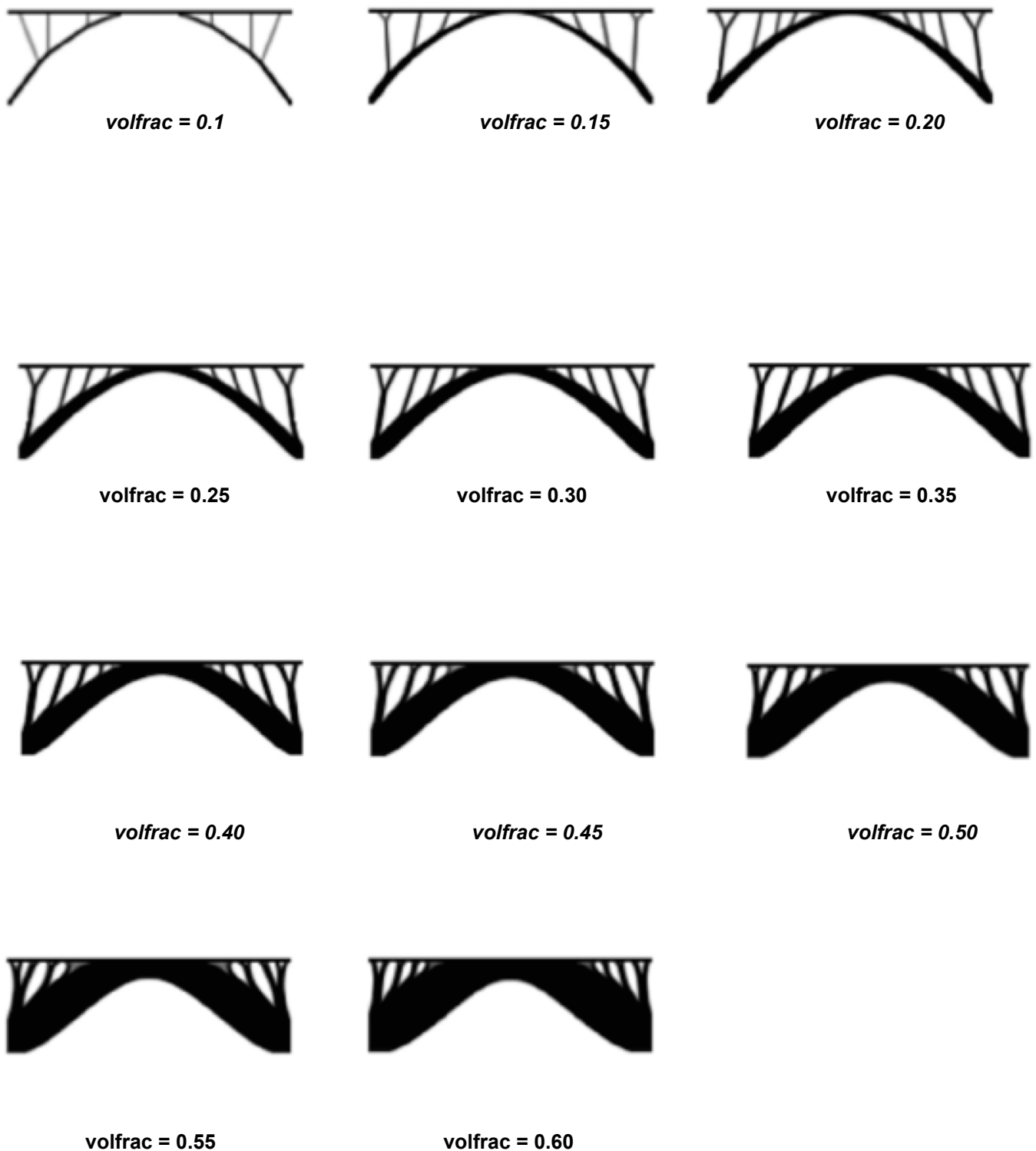
Με το σκεπτικό ότι τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης επεξεργάζονταν εν συνεχεία από σχεδιαστικό πρόγραμμα και εν συνεχεία από στατικό πρόγραμμα, υπήρξε μια τροποποίηση του κώδικα των 88 γραμμών, με την προσθήκη μιας επιπλέον γραμμής 80b η οποία δημιουργούσε μια γραμμή πάχους δύο στοιχείων γεμάτη με υλικό στην άνω μεριά του μοντέλου. Η χρησιμότητα της συγκεκριμένης προσθήκης θα αναλυθεί σε επόμενα κεφάλαια.

Ακολουθούν δύο πίνακες παρουσίασης των αποτελεσμάτων. Ο πρώτος (Πιν.1) αποδεικνύει τις ουσιαστικά μηδενικές διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων του κώδικα 99 γραμμών και του κώδικα 88 γραμμών. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης για τα τέσσερα μοντέλα με τιμή *volfrac* 0.3. Ο δεύτερος πίνακας (Πιν.2) παρουσιάζει αναλυτικά τη μορφή των αποτελεσμάτων για τα τέσσερα μοντέλα. Οι τιμές των μεταβλητών που δόθηκαν ήταν :

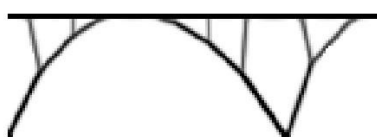
```
nelx = 150  
nely = 50  
penal = 3  
rmin = 1.5  
ft = 1  
volfrac = 0.1-0.6 με βήμα 0.05
```



Σχ. 4.8 : Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης κωδίκων SIMP 99(αριστερά) και SIMP88 (δεξιά) του Model_C για ίδιο *volfrac* = 0.3.



Σχ. 4.9 : Αποτελέσματα βελτιστοποίησης Model _A από κώδικα SIMP88 για διαφορετικά volfrac από 0.1 έως 0.6



volfrac = 0.1



volfrac = 0.15



volfrac = 0.20



volfrac = 0.25



volfrac = 0.30



volfrac = 0.35



volfrac = 0.40



volfrac = 0.45



volfrac = 0.50

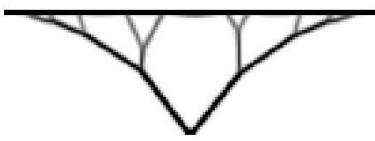


volfrac = 0.55

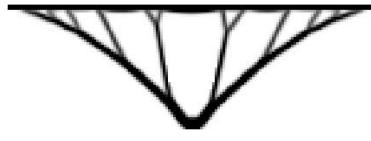


volfrac = 0.60

Σχ. 4.10 : Αποτελέσματα βελτιστοποίησης Model _B από κώδικα SIMP88 για διαφορετικά volfrac από 0.1 έως 0.6.



volfrac = 0.1



volfrac = 0.15



volfrac = 0.20



volfrac = 0.25



volfrac = 0.30



volfrac = 0.35



volfrac = 0.40



volfrac = 0.45



volfrac = 0.50

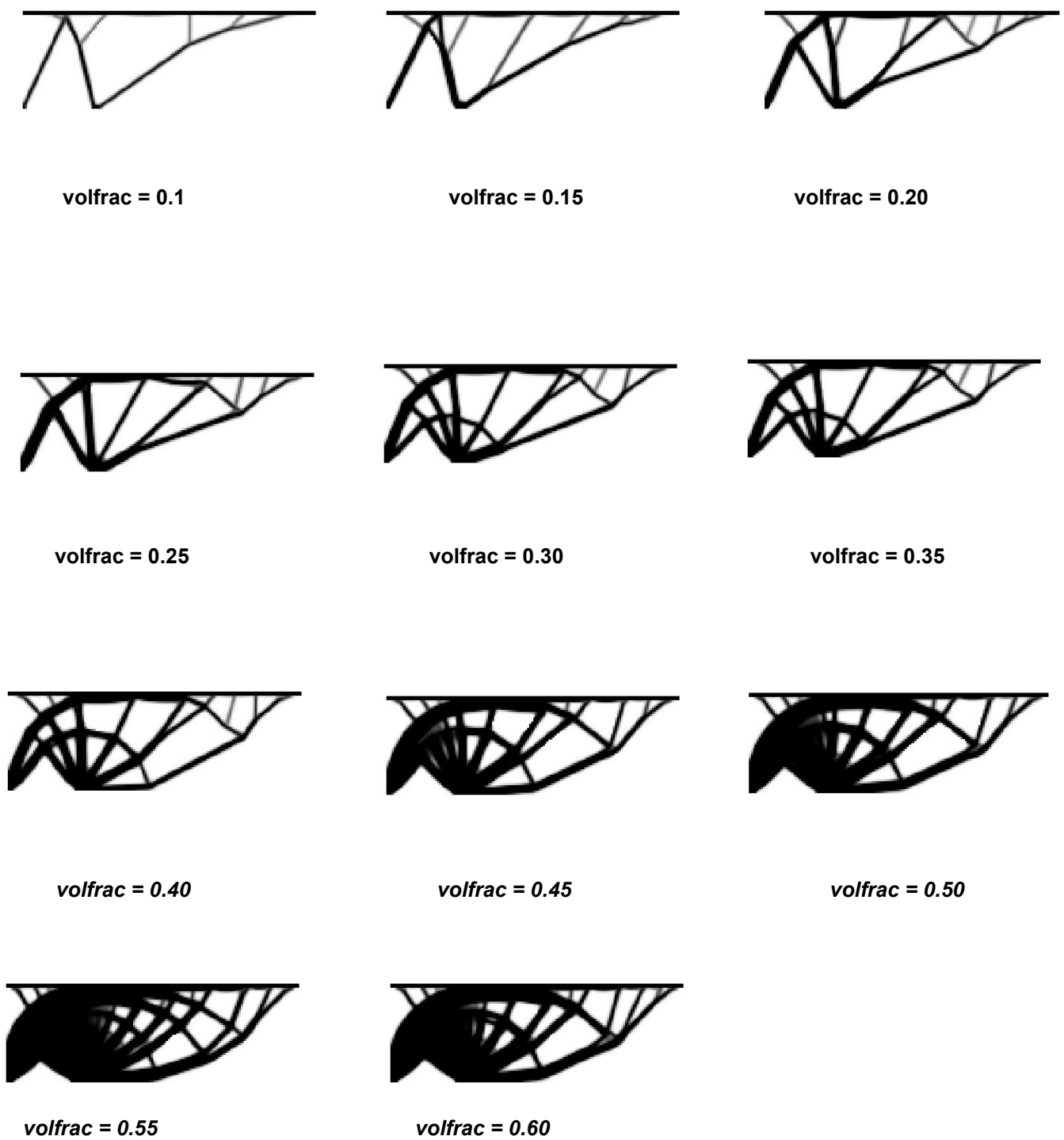


volfrac = 0.55



volfrac = 0.60

Σχ. 4.11 : Αποτελέσματα βελτιστοποίησης Model _C από κώδικα SIMP88 για διαφορετικά volfrac από 0.1 έως 0.6.



Σχ. 4.12: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης Model_D από κώδικα SIMP88 για διαφορετικά volfrac από 0.1 έως 0.6

4.8 Επιλογή προσομοιωμάτων προς μελέτη

Ως αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης από τον κώδικα SIMP88 και σύμφωνα με την επιλογή του βήματος για την τιμή του *volfrac*, προέκυψαν έντεκα (11) προσομοιώματα για κάθε τύπο διατομής. Από αυτά επιλέχθηκαν δύο για κάθε ένα από τα **Model_A**, **Model_B**, **Model_C**, **Model_D**, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στα σχήματα 2.1 έως 2.4. Επιλέχθηκαν τα εξής :

Model_A



volfrac = 0.1



volfrac = 0.25

Model_B

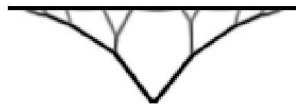


volfrac = 0.1



volfrac = 0.25

Model_C

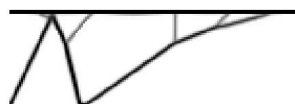


volfrac = 0.1



volfrac = 0.30

Model_D



volfrac = 0.1



volfrac = 0.20

Σχ. 4.13 : Τελικά προσομοιώματα για μελέτη

Τα κριτήρια της επιλογής ήταν τα εξής δύο :

i. Το αισθητικό κριτήριο. Σε συνεργασία με αρχιτεκτονικό γραφείο έγινε προσπάθεια να επιλεχθούν τα πιο άρτια αρχιτεκτονικά προσομοιώματα, δηλαδή αυτά τα οποία υστέρη από την κατάλληλη επεξεργασία θα είχαν το βέλτιστο συνδυασμό λειτουργικότητας (πχ όσο το δυνατόν λιγότεροι μη χρησιμοποιούμενοι χώροι) και εμφάνισης.

ii. Η δυνατότητα για διπλή ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Η παρούσα διπλωματική ερμηνεύει τα προσομοιώματα με δύο τρόπους, ως ολόσωμες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα και ως ραβδωτές μεταλλικές κατασκευές. Παράλληλη εργασία πάνω στο ίδιο αντικείμενο [31] ερμήνευσε τα προσομοιώματα ως μικτές κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Απώτερος σκοπός είναι η σύγκριση των διαφορετικών ερμηνειών των αποτελεσμάτων και η κατάληξη σε συμπεράσματα σχετικά με τη βέλτιστη κατανομή υλικών σε έργα πολιτικού μηχανικού με τη χρήση βελτιστοποίησης τοπολογίας.

Τελική απόφαση ήταν τα μοντέλα να χρησιμοποιηθούν ως πλαίσιακές στηρίξεις στεγάστρου υπαίθριου εκθεσιακού χώρου. Περαιτέρω ανάλυση σχετικά με την τελική μορφή των μοντέλων και τα στοιχεία της κατασκευής θα ακολουθήσουν στα κεφάλαια 5 και 6 αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

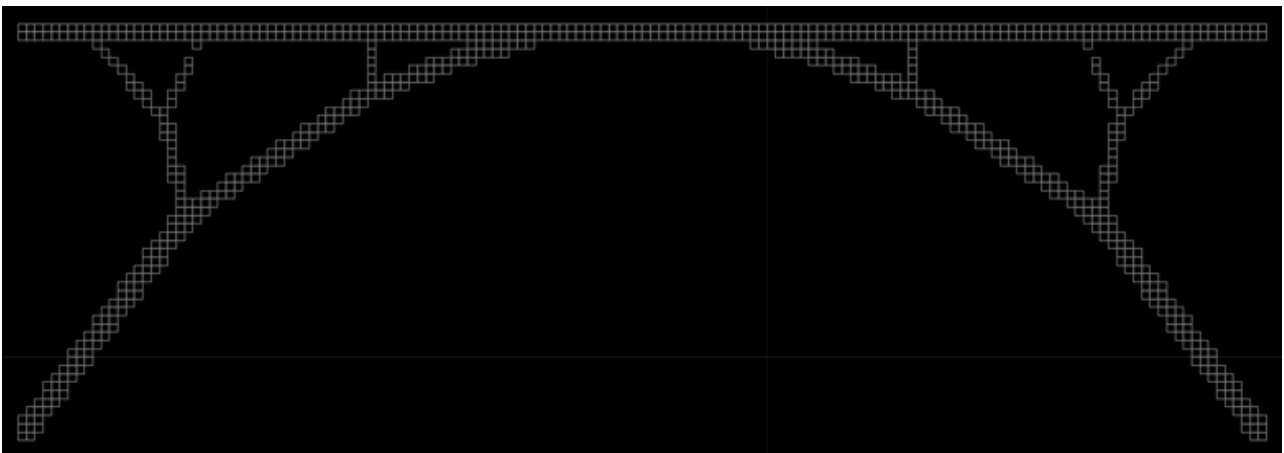
ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΕ ΣΧΕΔΙΑΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΥΠΟΥ CAD.

5.1 Εισαγωγή

Έχοντας ολοκληρώσει το στάδιο ανάλυσης των μοντέλων στον κώδικα SIMP88 της MATLAB, αντικείμενο της διπλωματικής αποτελεί η περαιτέρω επεξεργασία των 8 από τα 44 μοντέλα που επιλέχθηκαν για την εισαγωγή τους σε πρόγραμμα στατικών ελέγχων. Σε αυτό το σημείο απαιτείται η «χειροκίνητη» ερμηνεία και αποτύπωση των προσομοιωμάτων σε σχεδιαστικό περιβάλλον. Με τη χρήση των αρχείων τύπου .Isr έχει επιτευχθεί η εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε σχεδιαστικό περιβάλλον CAD και συγκεκριμένα στο AutoCad, ώστε να είναι διαθέσιμα για άμεση επεξεργασία.

Το AutoCad είναι ένα εμπορικό λογισμικό για διδιάστατη και τρισδιάστατη σχεδίαση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Στη συγκεκριμένη διπλωματική χρησιμοποιήθηκε η δωρεάν έκδοση AutoCad 2012 – Student Version, ειδικά για φοιτητές που είναι διαθέσιμη στην ιστοσελίδα της εταιρείας Autodesk, www.autodesk.com/autocad.

Το αποτέλεσμα της μεταφοράς από MATLAB σε AutoCad είναι ακριβώς το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης που προέκυψε από τον κώδικα SIMP88. Πιο συγκεκριμένα, οι μορφές Matlab figures τις οποίες είχαν τα αποτελέσματα, σχεδιάζονται με τετράγωνα πεπερασμένα στοιχεία τα οποία τοποθετημένα το ένα δίπλα στο άλλο δίνουν τη μορφή της διατομής, πλάκας, ράβδου κτλ. Με τον τρόπο που δημιουργήθηκε το αρχείο .Isr, η εξαγωγή σε AutoCad έχει την ίδια ιδιαίτερη μορφή με τα πολλά μικρά τετραγωνάκια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1.



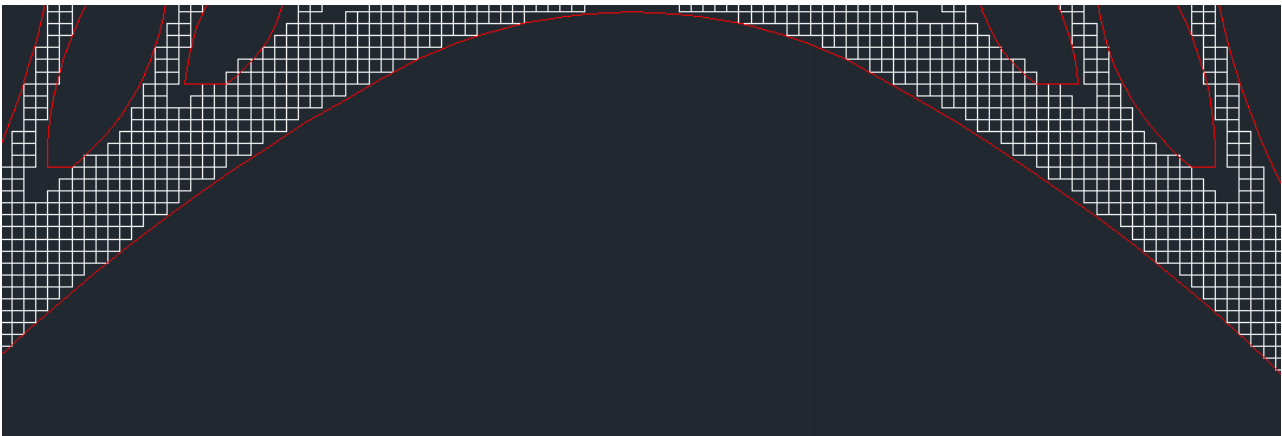
Σχήμα 5.1 : Παράδειγμα μορφής εξαγωγής από κώδικα SIMP88 σε AutoCad
Model_A volfrac = 0.10

5.2 Βασικές αρχές αποτύπωσης αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης

Οι μορφές με τον τρόπο που δίνονται, σαφέστατα δεν θα ήταν δόκιμο να σχεδιαστούν με πιστή αντιγραφή των πεπερασμένων στοιχείων. Στο συγκεκριμένο σημείο της διπλωματικής απαραίτητη δραστηριότητα αποτέλεσε η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης. Με προσεκτική μελέτη δίνονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες που απαιτούνται σχετικά με την τοπολογία της κατασκευής, με το μελετητή να αναλαμβάνει κυρίως το αισθητικό κομμάτι, σε συνδυασμό με προσθαφαίρεση υλικού σε σημεία που κρίνει πως απαιτείται για την στατική επάρκεια της κατασκευής.

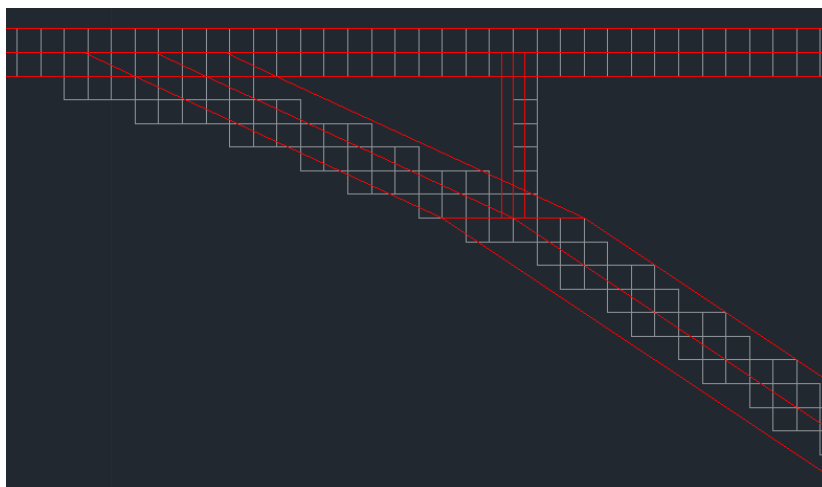
Σημαντικότερες αρχές που τηρήθηκαν κατά την αποτύπωση σημειώνονται οι εξής:

- μετατροπή δύο ή περισσότερων συνεχών ευθειών σε καμπύλα μέλη (arcs) για τμήματα κατασκευής από σκυρόδεμα.



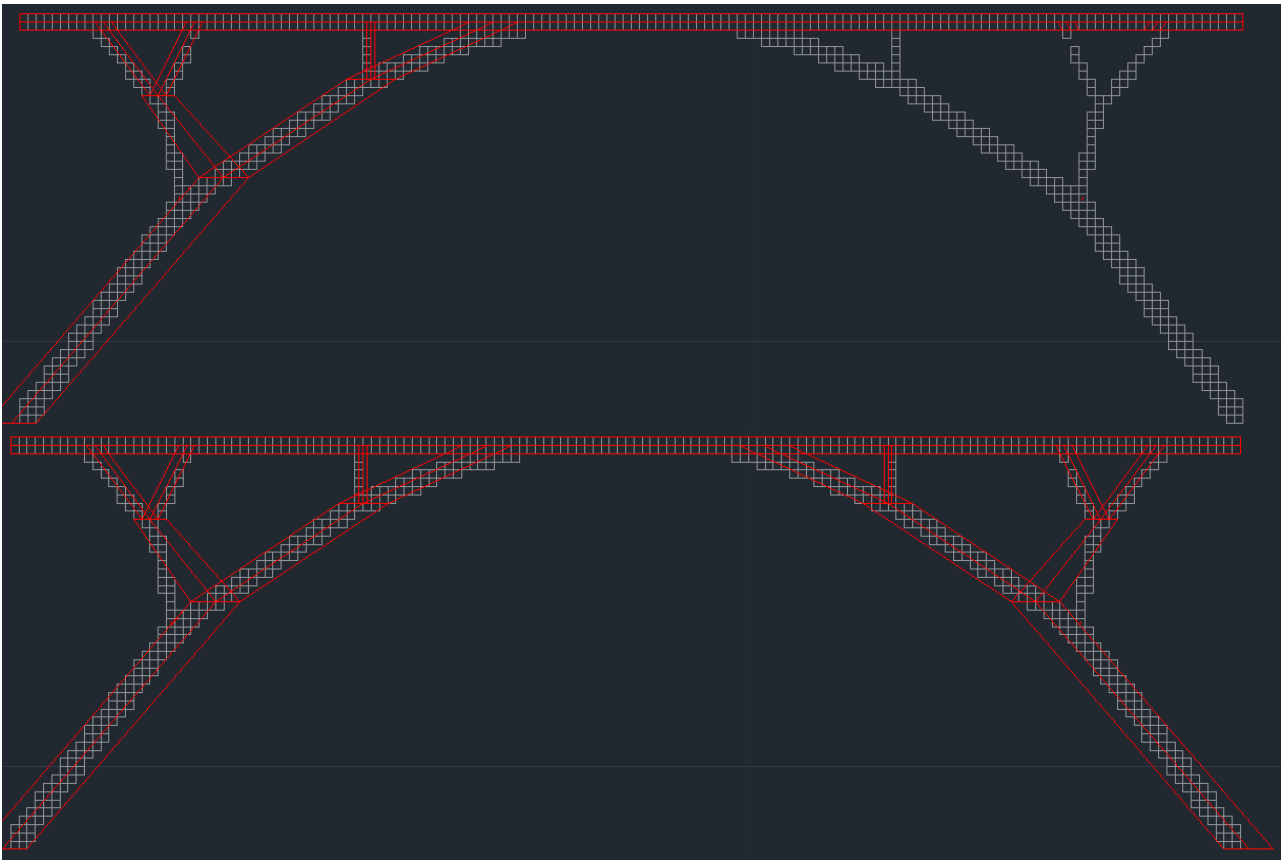
Σχ. 5.2 : Παράδειγμα αποτύπωσης καμπύλης

- μετατροπή δύο ή περισσότερων συνεχών ευθειών σε συνεχείς μεταλλικές ράβδους για μεταλλικά ραβδωτά τμήματα κατασκευής.



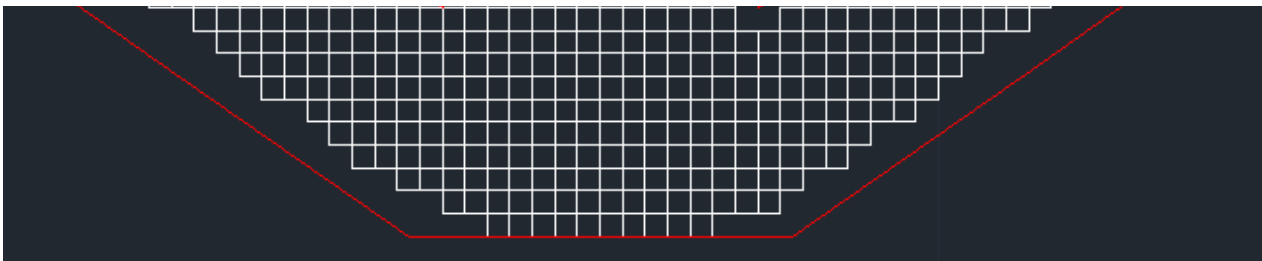
Σχ. 5.3 : Παράδειγμα αποτύπωσης μεταλλικών ράβδων

- διατήρηση συμμετρίας με τη χρήση της εντολής “MIRROR” σε προσομοιώματα συμμετρικά - αμέληση τυχόν μικροδιαφορών εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας, λόγω μεθόδου βελτιστοποίησης.



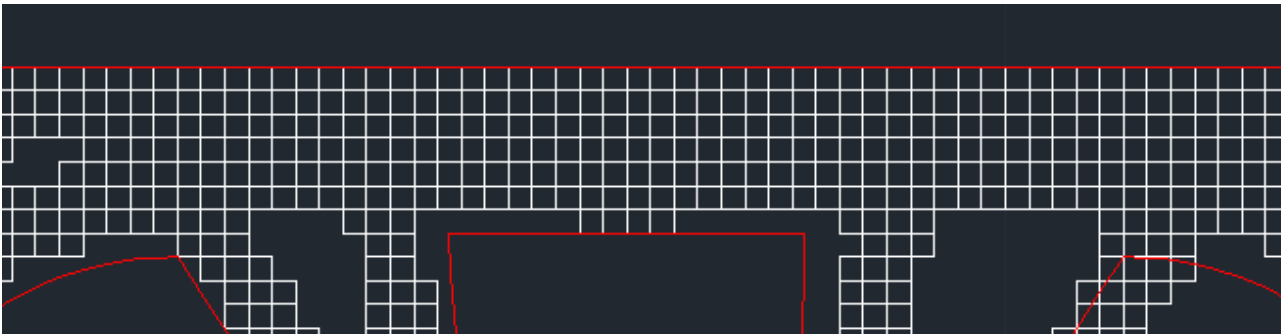
Σχ. 5.4 : Παράδειγμα συμμετρικής αποτύπωσης σε συμμετρικό φορέα

- αύξηση πλάτους περιοχής στήριξης σε προσομοιώματα που προέκυπτε μικρό πλάτος πάκτωσης.



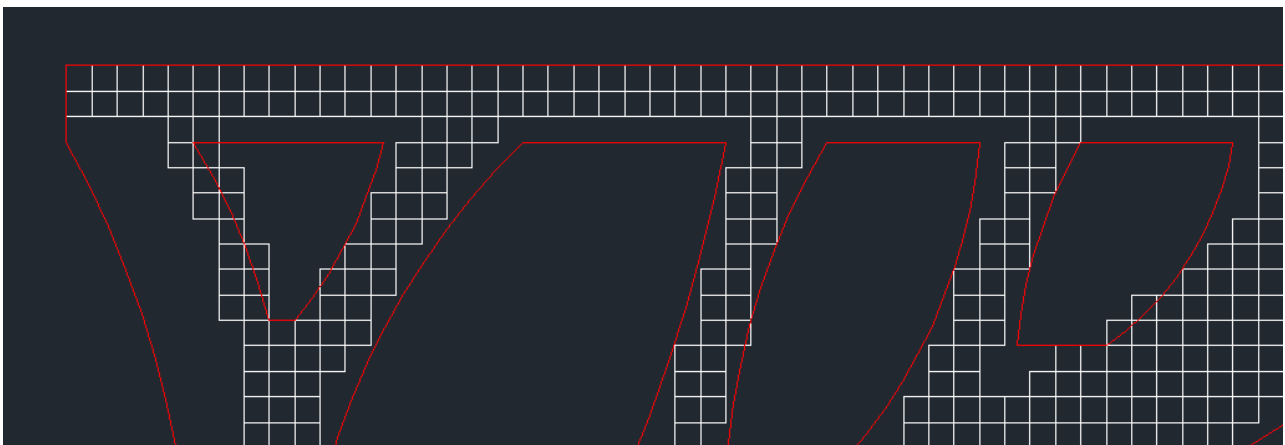
Σχ. 5.5 : Παράδειγμα αύξησης πάχους στήριξης

- αύξηση συνολικού πάχους πλακών σε προσομοιώματα με μεταβλητό πάχος πλάκας για αισθητικά ενιαίο αποτέλεσμα και μεγαλύτερη στατική επάρκεια.



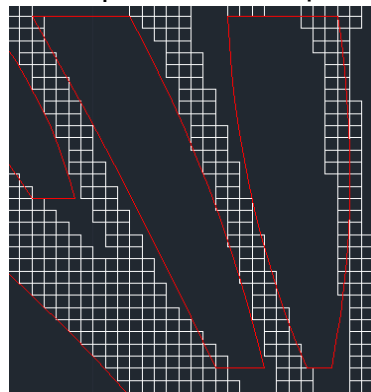
Σχ. 5.6 : Παράδειγμα αύξησης πάχους πλάκας

- αύξηση πάχους πλακών σε περιοχές κοντά σε μεγάλοι μεγέθους οπές και σε περιοχές κοντά σε ένωση με μέλη υποστυλωμάτων για αποφυγή ενδεχόμενα μεγάλης συγκέντρωσης τάσεων έναντι στατικής επάρκειας.



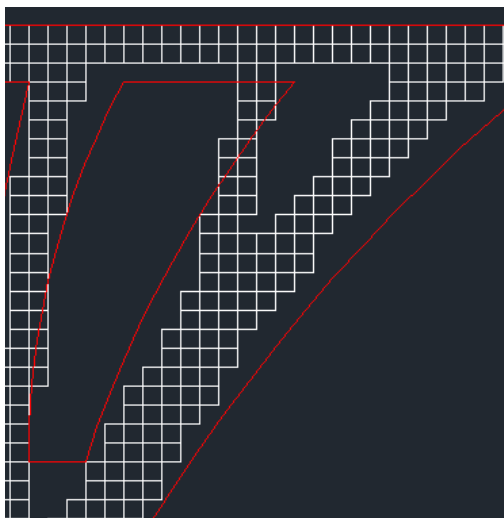
Σχ. 5.7 : Παράδειγμα Αύξηση πάχους σκυροδέματος κοντά σε οπές

- προσθαφαίρεση υλικού σε περιοχές με μεγάλες γειτονικές οπές και μικρά μέλη ανάμεσά τους για καλύτερο αισθητικό αποτέλεσμα και μεγαλύτερη στατική επάρκεια.



Σχ. 5.8 : Παράδειγμα προσθαφαίρεσης υλικού

-
- αμέλση οπών μικρού μεγέθους για καλύτερο αισθητικό αποτέλεσμα, ευκολία στην κατασκευή και αποφυγή περιοχών στατικής επικινδυνότητας.

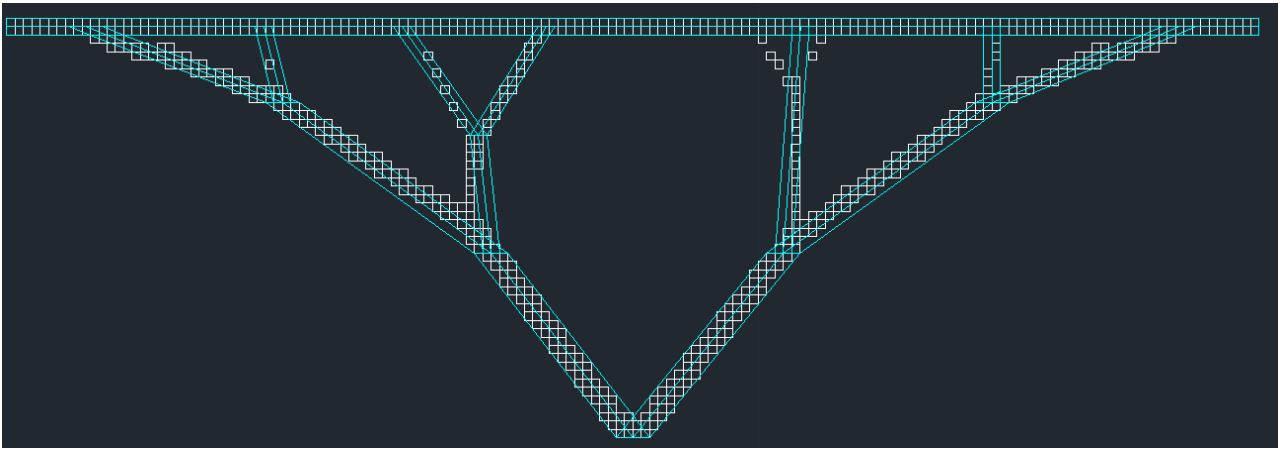


Σχ. 5.9 : Παράδειγμα αμέλσης οπών μικρού μεγέθους

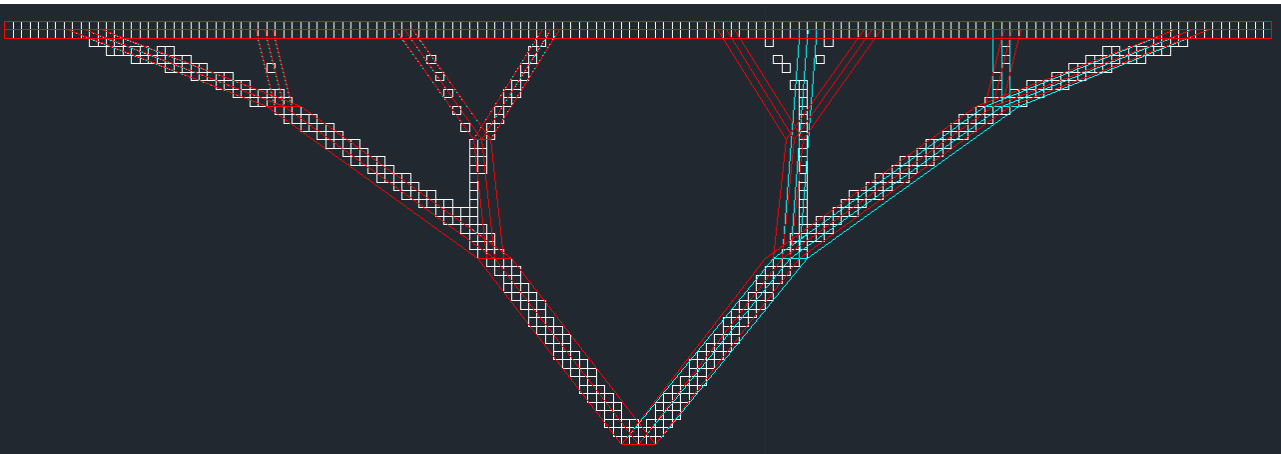
5.3 Ερμηνεία προσομοιώματος Model C

Σημαντικό κομμάτι μελέτης και ερμηνείας της διπλωματικής αποτέλεσαν τα αποτελέσματα του προσομοιώματος Model_C. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι μια μονοπροέχουσα με στήριξη αριστερά και τη δεύτερη στήριξη στο μέσον της ράβδου. Το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης περιλάμβανε μονάχα τη στήριξη στο μέσον της ράβδου. Παρόλα αυτά μέσα από τις επαναλήψεις του αλγορίθμου, ο κώδικας ουσιαστικά υπολόγισε πως η στήριξη αριστερά συνεισφέρει σε μικρό βαθμό στην στατική επάρκεια έστω και αν λόγω του τρόπου τοποθέτησης του υλικού, η στήριξη αριστερά δεν τοποθετήθηκε ποτέ.

Έτσι, δημιουργήθηκε το πρόβλημα να προκύπτει μία ράβδος εντελώς συμμετρική όσον αφορά τη στήριξη (στο μέσον) και τα φορτία της, αλλά η μορφή της να έχει λίγο περισσότερο υλικό τοποθετημένο στην αριστερή μεριά της. Η ερμηνεία και η τελική αποτύπωση που έγιναν αγνόησαν αυτό το «λάθος» του κώδικα SIMP88 της βελτιστοποίησης και θεώρησαν τα προσομοιώματα εντελώς συμμετρικά και για το ολόσωμο μοντέλο από σκυρόδεμα και για το μεταλλικό ραβδωτό. Από αυτή τη προσέγγιση γίνεται εμφανής η σημασία της μελητητικής εμπειρίας - ευφυίας του μηχανικού για τη χρήση της βελτιστοποίησης τοπολογίας σε εφαρμογές που άπτονται του αντικειμένου του.



Σχ. 5.10A : Αρχική ερμηνεία Model_C με volfrac = 0.10

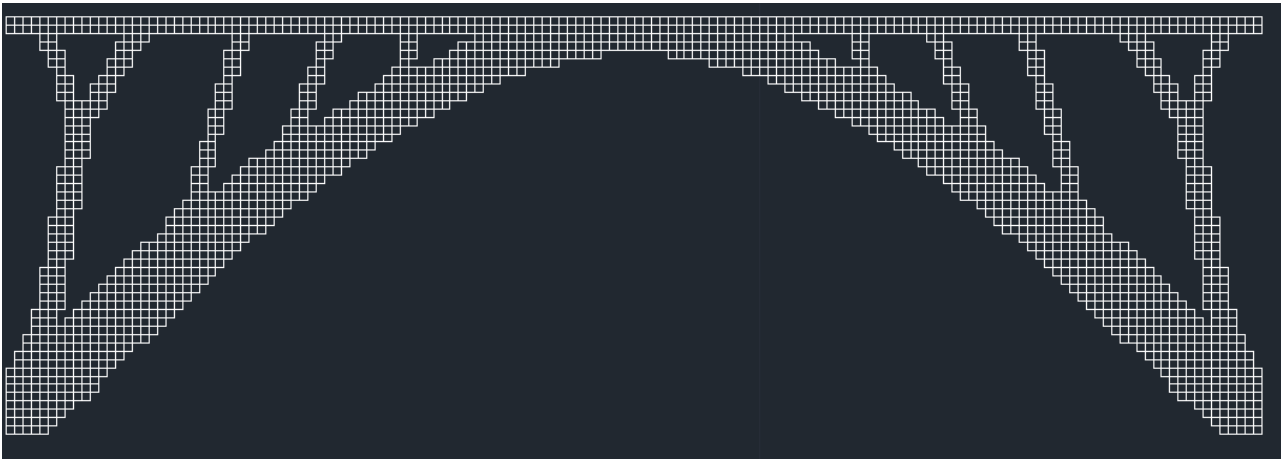


Σχ. 5.10B : Φορέας μοντέλου μετά τη συμμετρική επεξεργασία χρήση της εντολής MIRROR (με κόκκινο χρώμα οι αλλαγές),

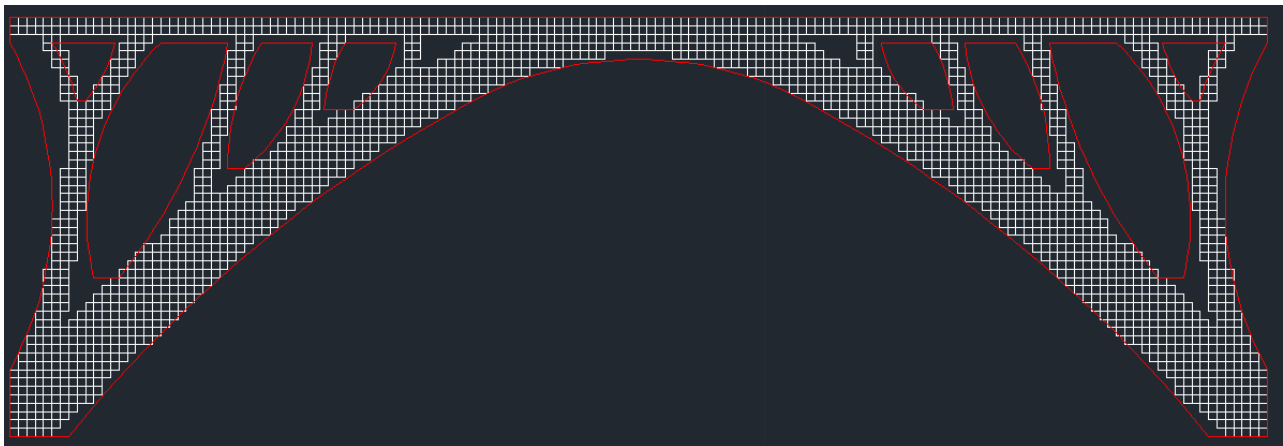
5.4 Αποτύπωση αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης σε σχεδιαστικό περιβάλλον AutoCad

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται η μορφή των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης όπως εισάχθηκαν από τη MATLAB στο AutoCad και η τελική ερμηνεία τους όπως αποτυπώθηκε για εισαγωγή σε πρόγραμμα ανάλυσης στατικών ελέγχων. Στο τεύχος θα παρουσιαστούν οι μορφές των δύο προσομοιωμάτων που θα μελετηθούν αναλυτικά, ενώ οι μορφές των υπόλοιπων 6 βρίσκονται στο παράρτημα Α.

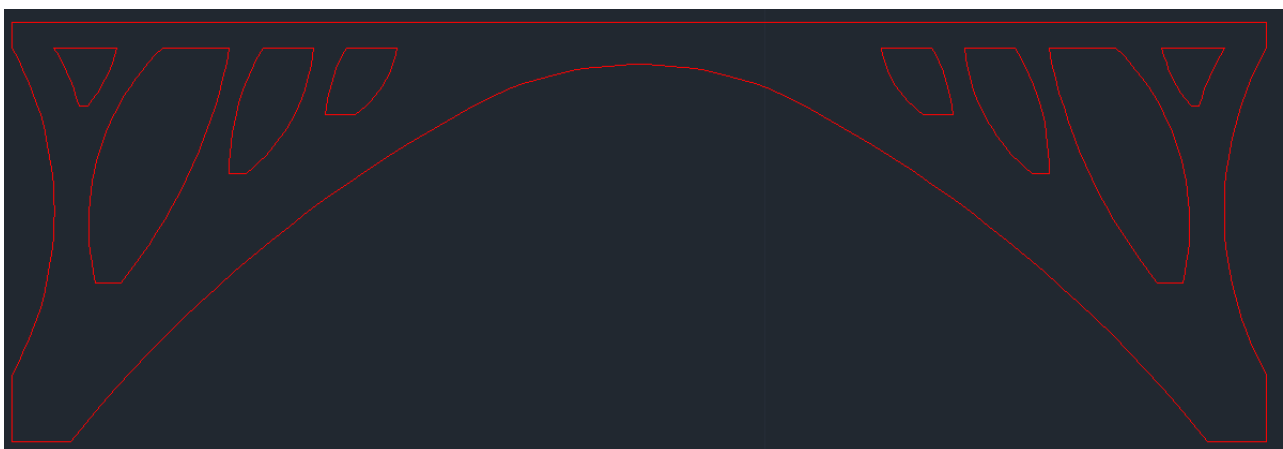
Model A με volfrac = 0,25



Σχ. 5.11A : Εισαγωγή προσομοιώματος Model_A από MATLAB σε AUTOCAD

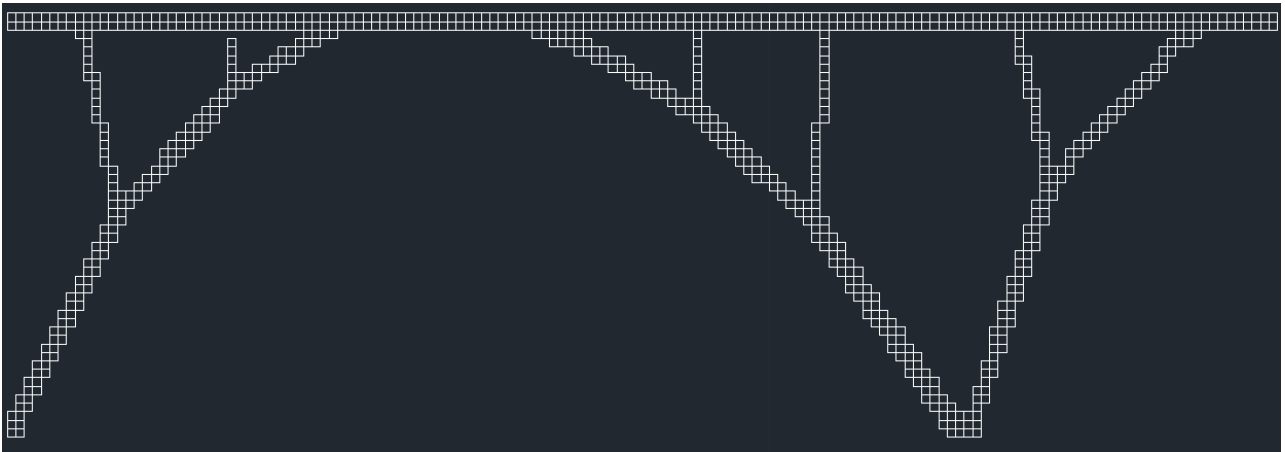


Σχ. 5.11B : Ερμηνεία αποτελέσματος Βελτιστοποίησης προσομοιώματος Model_A

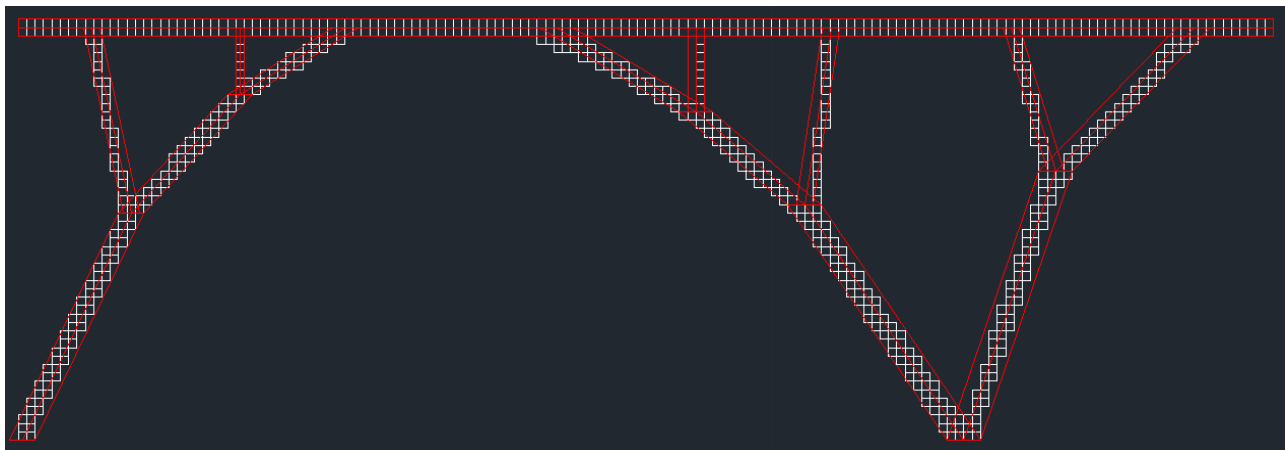


Σχ. 5.11Γ : Τελική μορφή προσομοιώματος Model_A για εισαγωγή σε στατικό πρόγραμμα

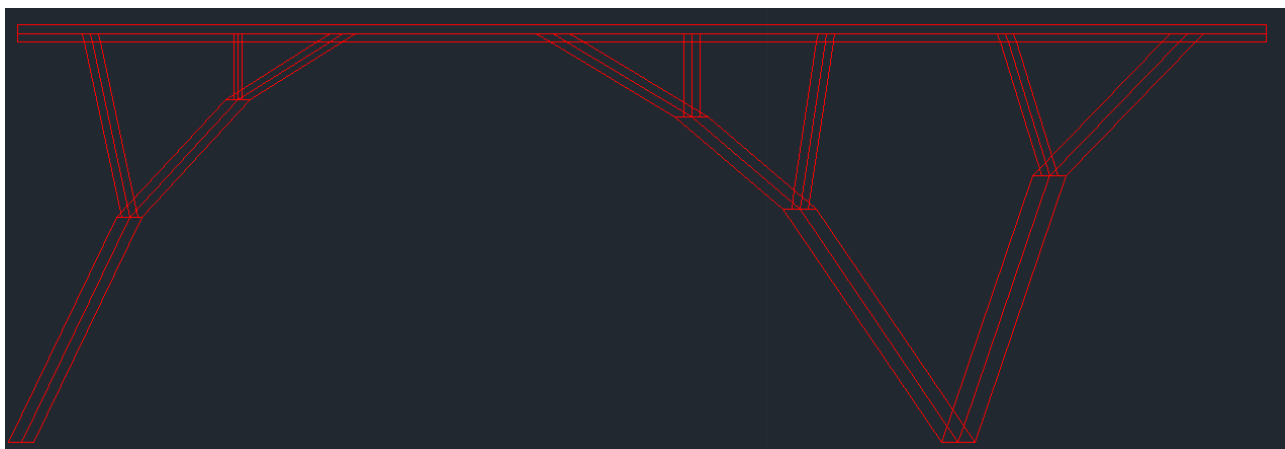
Model_B για volfrac = 0.10



Σχ. 5.12A : Εισαγωγή προσομοιώματος Model_B από MATLAB σε AUTOCAD



Σχ. 5.12B : Ερμηνεία αποτελέσματος Βελτιστοποίησης προσομοιώματος Model_B



Σχ. 5.12Γ : Τελική μορφή προσομοιώματος Model_B για εισαγωγή σε στατικό πρόγραμμα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΜΕΣΩ ΟΛΟΣΩΜΩΝ ΦΟΡΕΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΡΑΒΔΩΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΦΟΡΕΩΝ ΧΡΗΣΕΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ Scada Pro v15

6.1 Εισαγωγή

Στόχος της διπλωματικής εργασίας πέρα από τη διαδικασία της βελτιστοποίησης των τεσσάρων στατικών μοντέλων, όπως αυτή περιγράφηκε και ολοκληρώθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, αποτελεί ο έλεγχός τους με τη χρήση λογισμικού ανάλυσης κατασκευών ώστε να εξασφαλιστεί σε μία πρώτη φάση η στατική επάρκεια των αποτελεσμάτων για να μπορέσουν αυτά να αποτελέσουν, τοποθετημένα σε κατάλληλη διάταξη, στηρίξεις στεγάστρου υπαίθριου εκθεσιακού χώρου. Τον στατικό έλεγχο ακολούθησε η τοποθέτηση οπλισμών στις ολόσωμες κατασκευές από ωπλισμένο σκυρόδεμα και η διαστασιολόγηση των μελών των ραβδωτών μεταλλικών φορέων.

Για το λόγο αυτό έγινε χρήση του λογισμικού Scada Pro v15, που παρέχει τη δυνατότητα μοντελοποίησης του φορέα όπως αυτός έχει σχεδιαστεί στο AUTOCAD. Η διαδικασία που ακολουθείται σε αυτό το κεφάλαιο τοποθετείται χρονικά μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας των βελτιστοποιημένων φορέων στο πρόγραμμα σχεδίασης και σηματοδοτεί την έναρξη του τελικού σταδίου εργασιών της.

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αναφερθεί σε αυτό το σημείο, πως η πρωτότυπη και ιδιαίτερη μορφή των φορέων που προέκυψαν αποτέλεσε από μόνη της αντικείμενο εκτενούς διερεύνησης ως προς τον τρόπο με τον οποίο θα μπορούσαν να αναλυθούν από στατική σκοπιά. Καθ'όλη τη διάρκεια της ενασχόλησης με το πρόγραμμα προέκυψαν δυσκολίες που θα ήταν πολύ δύσκολο να ξεπεραστούν χωρίς τη συνδρομή και το ενδιαφέρον των επιβλέποντων καθηγητών, αλλά και του ανθρώπινου δυναμικού της εταιρείας που χορήγησε την άδεια χρήσης του λογισμικού, της ACE Hellas.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζεται η πορεία που ακολουθήθηκε κατά τη χρήση του προγράμματος.

6.2 Ολόσωμοι φορείς από οπλισμένο σκυρόδεμα

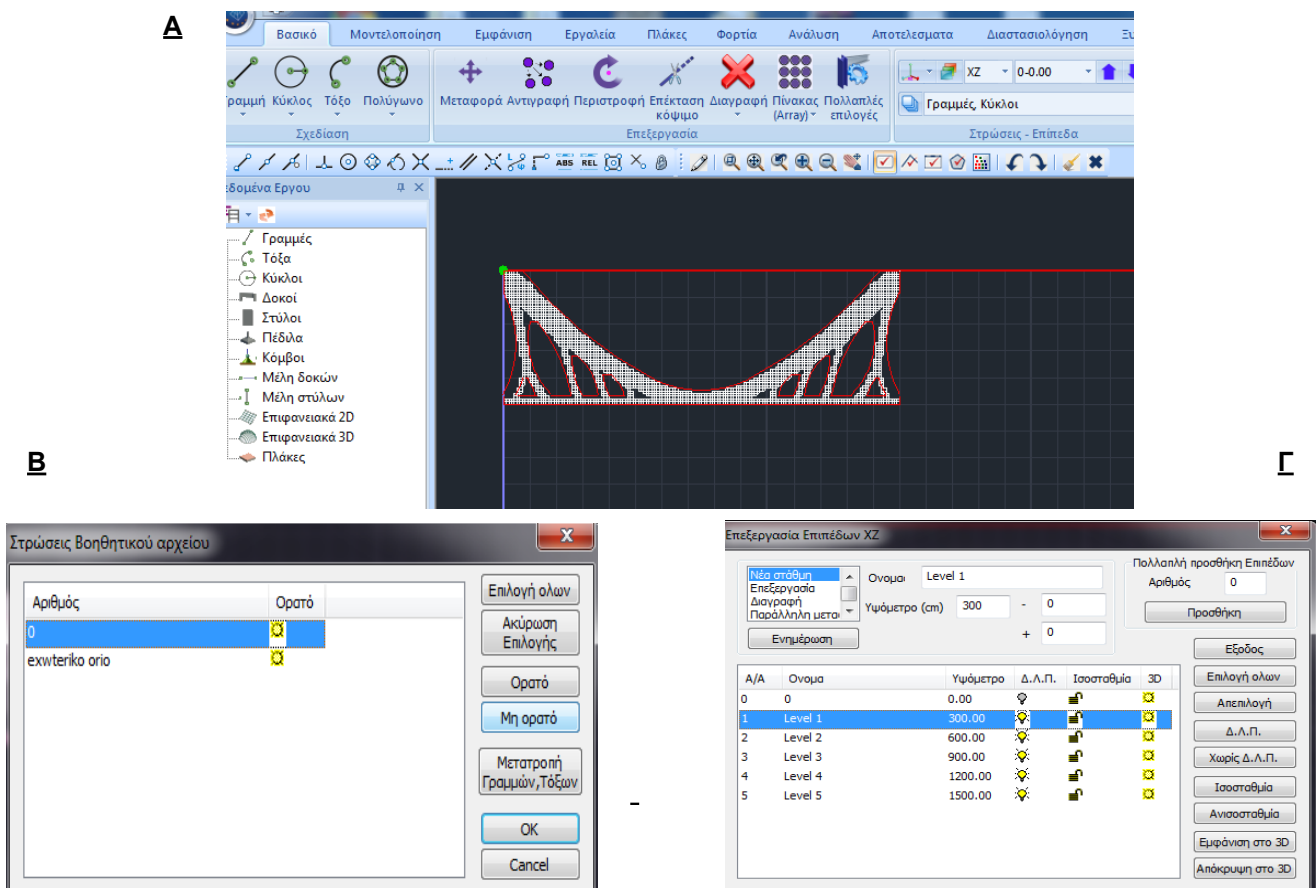
6.2.1 Μοντελοποίηση

Σε πρώτη φάση ζητούμενο ήταν τα αρχεία από το σχεδιαστικό πρόγραμμα μορφής .dwg να εισαχθούν στο περιβάλλον του προγράμματος ανάλυσης ώστε να μοντελοποιηθούν για τη στατική επεξεργασία τους. Έπειτα από συζήτηση με τους ανθρώπους της εταιρείας που γνωρίζουν τις δυνατότητες του προγράμματος, επιλέχθηκε η μοντελοποίηση των στοιχείων από σκυρόδεμα με τη χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων και των στοιχείων από χάλυβα με ραβδωτά στοιχεία.

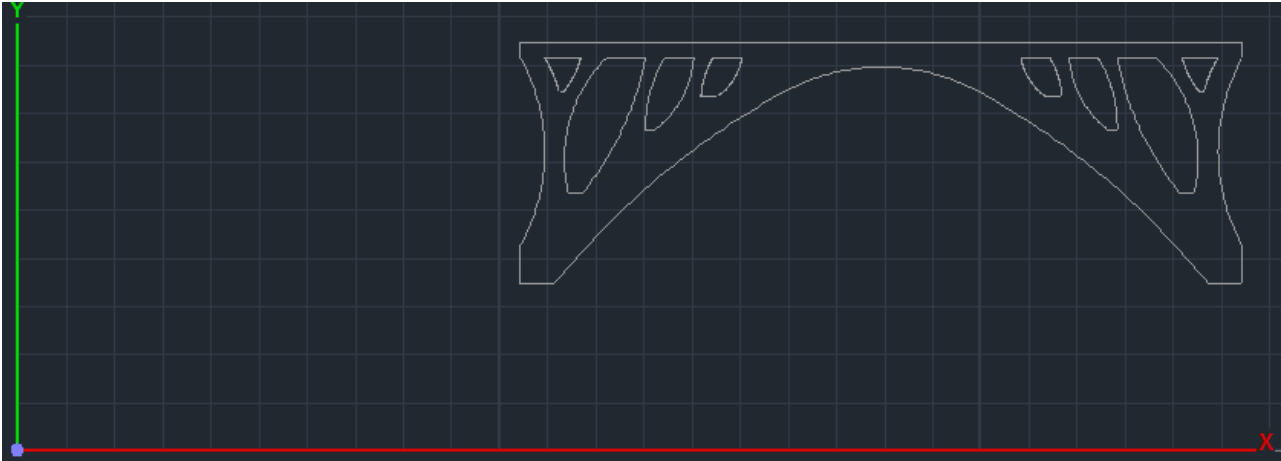
Βήμα 1. Εισαγωγή αρχείου dwg και μεταφορά του στο κατακόρυφο επίπεδο.

Κατά την εισαγωγή του αρχείου .dwg από το Autocad το σχέδιο τοποθετούνταν στο οριζόντιο επίπεδο (xz), κάτι που σε επόμενη φάση θα δημιουργούσε πρόβλημα στον συνυπολογισμό του ίδιου βάρους της κατασκευής. Για αυτό το λόγο χρειάστηκε να μας χορηγηθεί μία ειδική έκδοση του προγράμματος που θα επέτρεπε την ενιαία περιστροφή του σχεδίου κατά 90° ώστε να τοποθετηθεί στο κατακόρυφο επίπεδο (xy), αφού πρώτα είχαν προστεθεί επίπεδα στη μελέτη.

- ➔ Κεντρικό κουμπί - εισαγωγή - επιλογή αρχείου .dwg
- ➔ Υπομενού βασικό - στρώσεις - μεταφορά - πάγωμα στρώσεων - επιλογή μη ορατού πλέγματος 0 - στρώσεις - περιστροφή - γωνία 90°



Δ

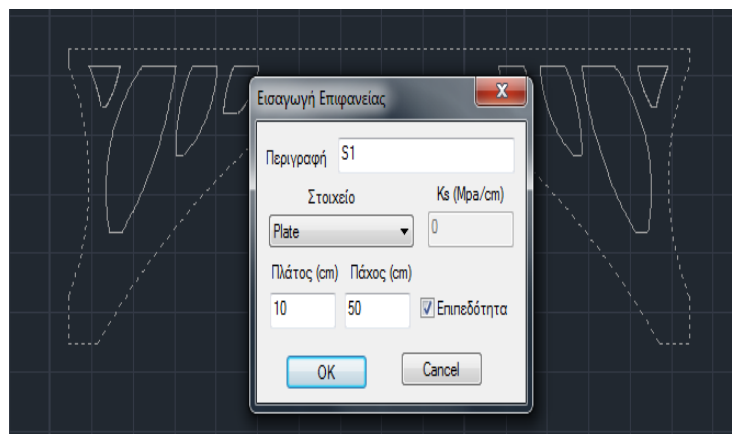
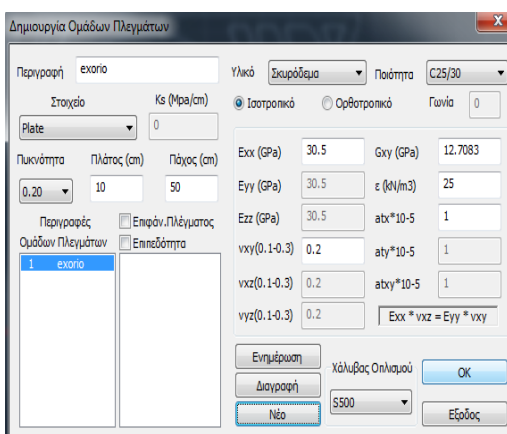


Σχ. 6.1 : Εισαγωγή αρχείου .dwg (A) και διαδικασία περιστροφής του στο κατακόρυφο επίπεδο (B-Δ).

Βήμα 2. Μοντελοποίηση με τη χρήση 3 - Δ πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων

Εν συνεχεία, για την μοντελοποίηση του φορέα από ωπλισμένο σκυρόδεμα επιλέχθηκαν 3 - Δ πλέγματα επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων πλάτους 0,10 m. Η κατασκευή είχε δεδομένο πάχος 0,50 m και δεδομένη ποιότητα σκυροδέματος C 25/30.

- ➔ Μοντελοποίηση - 3Δ επιφανειακά - εξωτερικό όριο
- ➔ Επιλογή γραμμών εξωτερικού ορίου - εισαγωγή επιφάνειας



Σχ. 6.2 : Εισαγωγή δεδομένων δημιουργίας εξωτερικού ορίου επιφανειακού πλέγματος (A)- εισαγωγή επιφάνειας (B)

Βήμα 3. Μοντελοποίηση Οπών

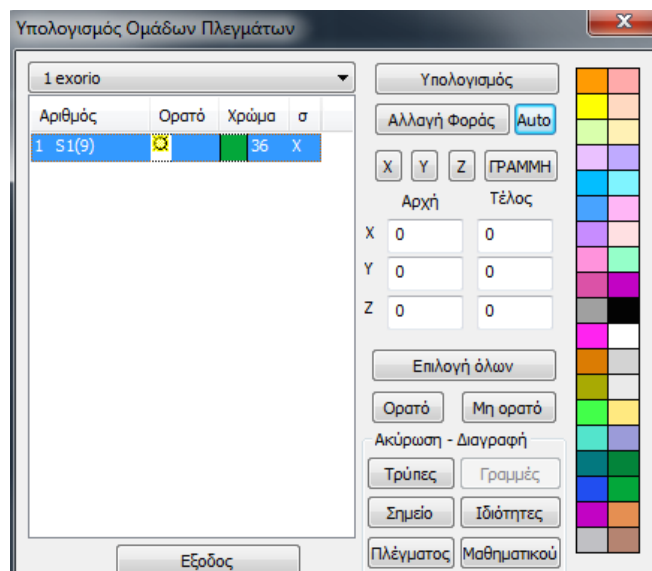
Στην περίπτωση που η εξετάζουσα διατομή σκυροδέματος έχει οπές, τότε παρέχεται από το λογισμικό η δυνατότητα αυτές να αφαιρεθούν από τα όρια του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων.

- ➔ 3D επιφανειακά - οπές - επιλογή γραμμών οπών

Βήμα 4. Υπολογισμός Επιφανειακών Στοιχείων

Δημιουργούνται με αυτό τον τρόπο τα επιφανειακά στοιχεία επί του μοντέλου. Σε αυτό το σημείο ορίζουμε τη φορά της κατεύθυνσης του κύριου σπλισμού (x) και ορίζεται η φορά των αξόνων του κάθε στοιχείου.

- ➔ 3D Επιφανειακά - Υπολογισμός

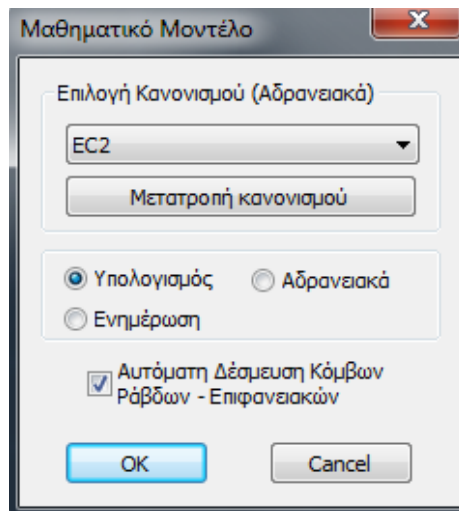
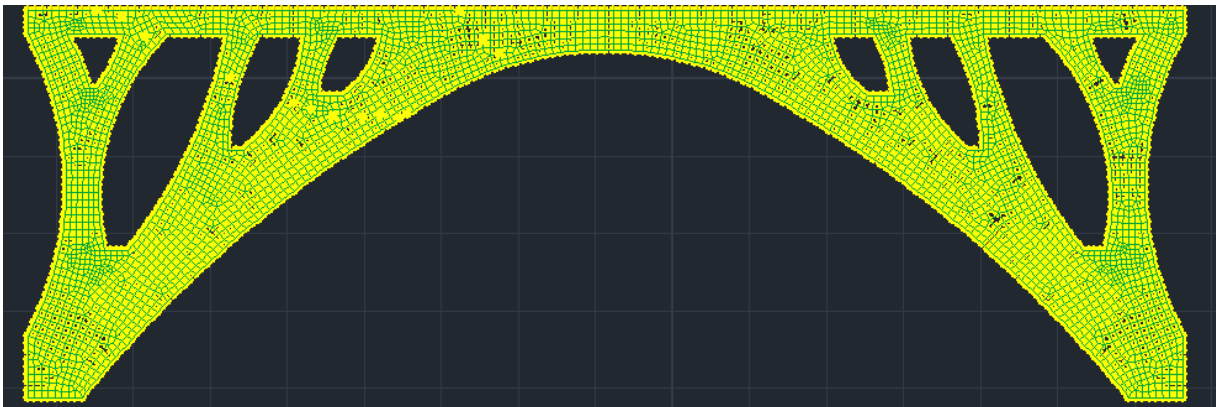


Σχ. 6.3 : Μοντελοποίηση του φορέα με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία

Βήμα 5. Υπολογισμός Μοντέλου

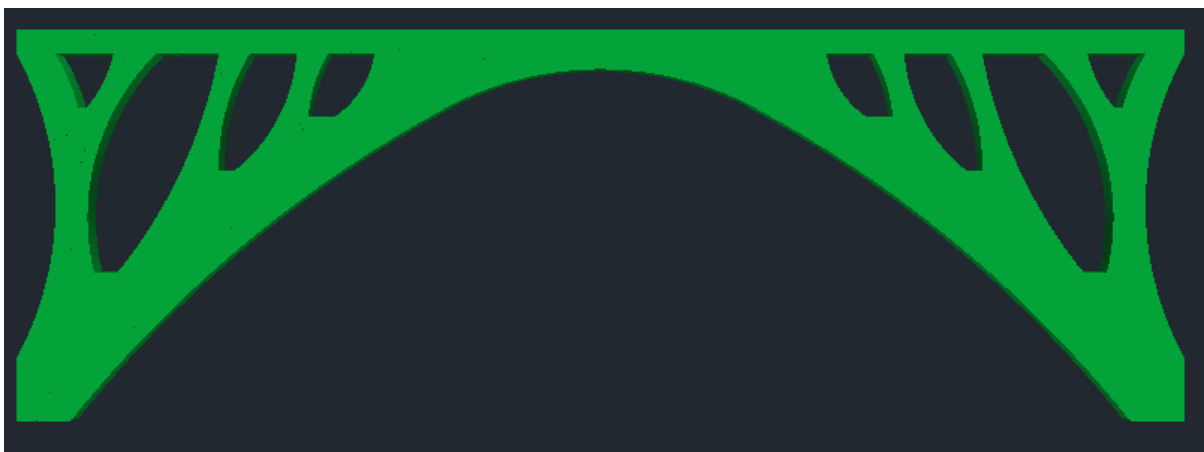
Με την εντολή “Υπολογισμός” από το μενού “ΕΡΓΑΛΕΙΑ” το πρόγραμμα υπολογίζει και παράγει το μαθηματικό μοντέλο της μελέτης, τοποθετούνται δηλαδή κόμβοι εντός του φυσικού μοντέλου.

- ➔ Υπομενού Εργαλεία - Υπολογισμός (βλ Σχ. 6.4 Α - Β)

A**B**

Σχ. 6.4: Υπολογισμός μαθηματικού μοντέλου φορέα (A) και τοποθέτηση μαθηματικών κόμβων επί του φορέα (B)

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της μοντελοποίησης παρέχεται η δυνατότητα τρισδιάστατης απεικόνισης του συνόλου του φορέα όπως έχει διαμορφωθεί. Η διπλωματική εργασία θα μπορούσε να ολοκληρωθεί με μία απλή φωτορεαλιστική απεικόνιση των διατομών και η στατική ανάλυση των φορέων να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικών διπλωματικών εργασιών. Εξετάζοντας τη βελτιστοποίηση τοπολογίας από τη σκοπιά του πολιτικού μηχανικού, κρίθηκε σκόπιμο να ακολουθήσουν η ανάλυση και η διαστασιολόγηση των φορέων καθώς και μια πρόχειρη εκτίμηση του κόστους κατασκευής τους.



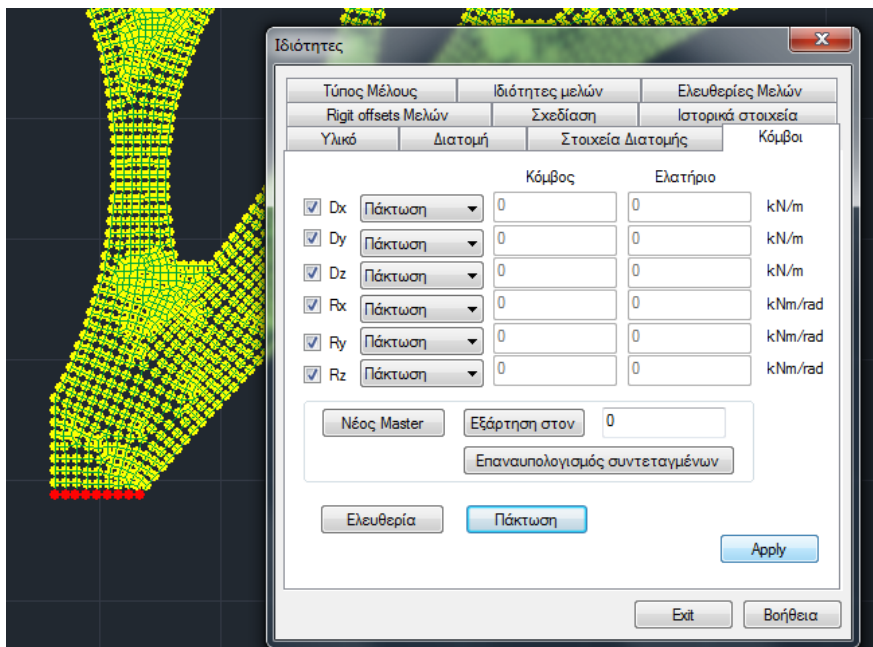
Σχ. 6.5: Φωτορεαλιστική απεικόνιση του φορέα

6.2.2 Εισαγωγή Στηρίξεων - Φορτίσεων

Βήμα 6. Εισαγωγή Στηρίξεων

Στο σημείο αυτό εισάγουμε τα τελευταία δεδομένα απαιτούμενα για την ολοκλήρωση της στατικής ανάλυσης. Η θεώρηση που έγινε για τις πλαισιακές στηρίξεις, είναι πως αυτές στηρίζονται σε πακτώσεις, είτε επί του εδάφους είτε επί υποστυλώματος χαμηλού ύψους από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η τοποθέτηση στηρίξεων γίνεται με την πολλαπλή επιλογή των κόμβων στη χαμηλότερη στάθμη ύψους της κατασκευής (αυτών δηλαδή που ακουμπούν στο έδαφος) και τη δέσμευση όλων των βαθμών ελευθερίας τους για τη μετατροπή τους σε πακτώσεις, όπως φαίνεται στο Σχ. 6.6

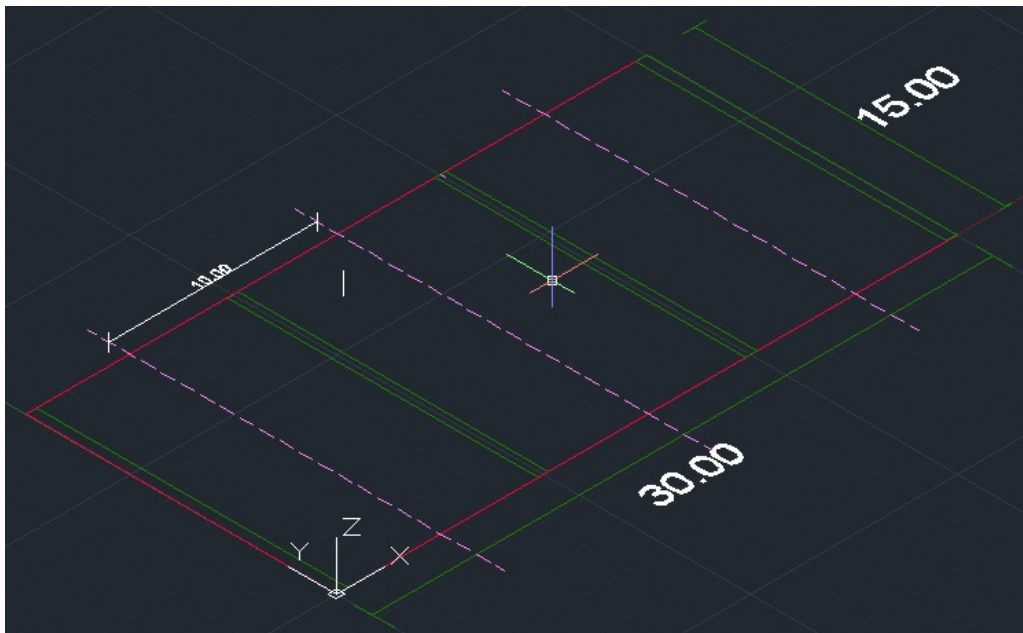
➔ Υπομενού Βασικό - πολλαπλές επιλογές - επιλογή με παράθυρο - επιλογή κόμβων χαμηλότερης στάθμης. (βλ. Σχ. ταδε



Σχ. 6.6 : Πάκτωση των κόμβων που βρίσκονται στη χαμηλότερη στάθμη

Βήμα 7. Εισαγωγή φορτίσεων

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι διατομές που εξετάστηκαν αποτελούν πλαισιακές στηρίξεις στεγάστρου υπαίθριου εκθεσιακού χώρου τοποθετημένες σε απόσταση μεταξύ τους. Η μελέτη έγινε για απόσταση μεταξύ των στηρίξεων ανά δέκα μέτρα, στέγαστρο από οπλισμένο σκυρόδεμα ποιότητας C25/30 πάχους 17 cm και η προς μελέτη πλαισιακή στήριξη ήταν εσωτερική άρα η ζώνη επιρροής της ήταν τα 10 m.



Σχ. 6.7 : Προοπτική απεικόνιση κάτοψης στεγάστρου και εμφάνιση ζώνης επιρροής φορτίων.

- Πλάκα από οπλισμένο σκυρόδεμα $h = 17 \text{ cm}$.
- Φορτία επικάλυψης $g_{\text{επικ}} = 1 \text{ KN/m}^2$
- Κινητά φορτία χιονόπτωσης $q = 1,5 \text{ KN/m}^2$
- Φορτική επιφάνεια για εσωτερική πλαισιακή στήριξη $E = 10 \times 15 = 15 \text{ m}^2$

Μόνιμα φορτία

$$g_{\text{ιβ πλάκας}} = (\gamma_b \times h_{\text{πλάκας}} \times E) / L_{\text{μήκους}} = (25 \times 0,17 \times 150) / 15 = 42,5 \text{ KN/m}$$

$$g_{\text{επικ πλάκας}} = (g_{\text{επικ}} \times E) / L_{\text{μήκους}} = (1 \times 150) / 15 = 10 \text{ KN/m}$$

Άρα συνολικό μόνιμο φορτίο

$$G = 52,5 \text{ KN/m}$$

Συνολικό Κινητό φορτίο

$$Q = (q \times E) / L_{\text{μήκους}} = (1,5 \times 150) / 15 = 15 \text{ KN/m}$$

Με τη μέθοδο μοντελοποίησης που χρησιμοποιήθηκε, δηλαδή τα πεπερασμένα στοιχεία, δεν είναι δυνατή η εφαρμογή ομοιομορφου κατανεμημένου φορτίου στο άνω μέρος της στήριξης. Για αυτό το λόγο η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η εφαρμογή συγκεντρωμένων φορτίων ίδιας τιμής σε κάθε κόμβο του άνω πέλματος. Το πλάτος της πλάκας είναι 15 μέτρα και οι κόμβοι τοποθετημένοι ανά 0,1 μετρο, όσο δηλαδή το πλάτος του κάθε πεπερασμένου στοιχείου. Είναι σαφές ότι στο άνω πέλμα υπάρχουν 151 κομβοί.

Υπολογίζουμε τα συνολικά φορτία, μόνιμα και κινητά, που εφαρμόζονται στην ανωδομή.

$$G_{ολικό} = (52,5 \text{ KN/m}) \times (15\text{m}) = 787,5 \text{ KN}$$

$$Q_{ολικό} = (15\text{KN/m}) \times (15\text{m}) = 225 \text{ KN}$$

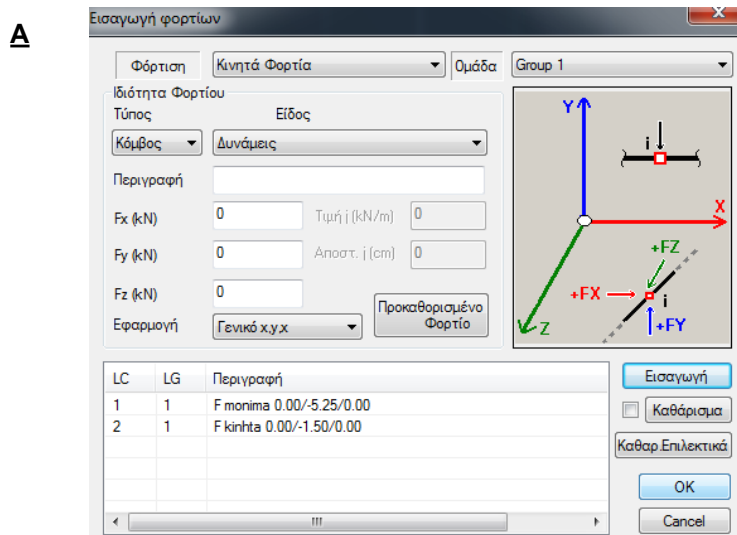
Σε κάθε κόμβο εφαρμόζονται

$$G_{κόμβου} = 787,5 / 151 = 5,22 \text{ KN ως μόνιμο φορτίο}$$

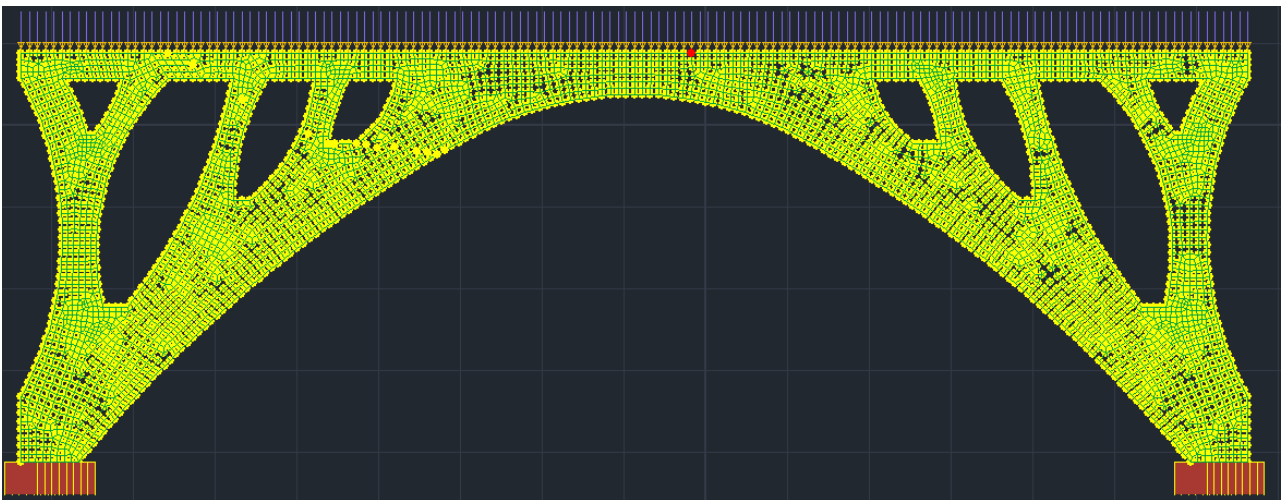
$$Q_{κόμβου} = 225 / 151 = 1,49 \text{ KN ως κινητό φορτίο.}$$

Το πρόγραμμα έχει επιλογή για διαφορετική τοποθέτηση μόνιμων και κινητών φορτίων, ενώ από την εισαγωγή των υλικών της κατασκευής που έχει γίνει προηγούμενα, υπολογίζει και συμπεριλαμβάνει στις φορτίσεις τα ίδια βάρη των πλαισιακών στηρίξεων.

➔ Υπομενού Φορτία - Εισαγωγή - Πολλαπλή επιλογή με παράθυρο κόμβων υψηλότερης στάθμης - τοποθέτηση μόνιμων και κινητών φορτίων



B



Σχ. 6.8: Εισαγωγή μόνιμων και κινητών φορτίων στους κόμβους ανωδομής του φορέα (A) και εμφάνιση συνολική εποπτεία του μοντέλου.

6.2.3 Ανάλυση - Συνδυασμοί φορτίσεων

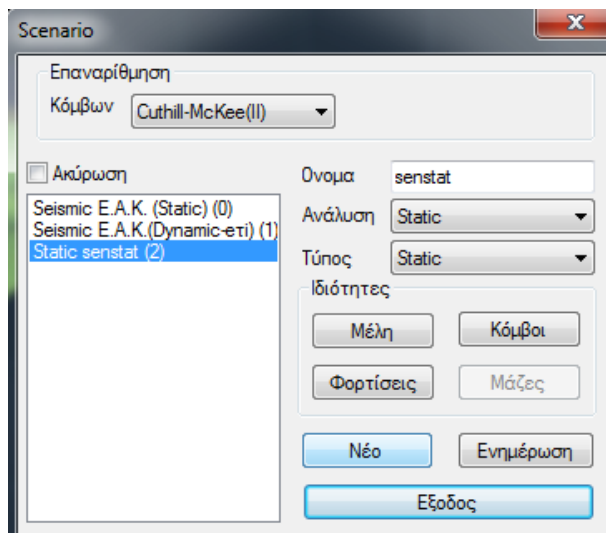
Μετά την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης του φορέα, τη δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου και την απόδοση των φορτίων στους κόμβους, ακολουθεί η δημιουργία των συνδυασμών των φορτίσεων και η ανάλυση της μελέτης.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική θα μελετηθεί η κατασκευή μόνο για απλούς ελαστικούς συνδυασμούς φορτίσεων, δηλαδή θα αγνοηθούν πλήρως οι σεισμικές δράσεις.

Βήμα 8. Δημιουργία Σεναρίων Ανάλυσης

Το πρόγραμμα για να μελετήσει την κατασκευή, ακολουθεί ένα σενάριο ανάλυσης. Αυτό προκύπτει είτε από συνηθισμένα υπάρχοντα σενάρια προεγκατεστημένα στο πρόγραμμα, είτε από σενάριο ανάλυσης που δημιουργεί ο χρήστης. Από τη στιγμή που αγνοούνται πλήρως οι σεισμικές δράσεις, απαιτείται η δημιουργία σεναρίου τύπου "Static", δηλαδή ανάλυση άνευ σεισμικών δράσεων. Στην καρτέλα δημιουργίας σεναρίων, πέρα από την επιλογή του είδους και την ονομασία του σεναρίου ανάλυσης απαιτείται επιλογή μεθόδου επαναρίθμησης των κόμβων. Έπειτα από συνεννόηση με τους προγραμματιστές της εταιρείας ACE Hellas, αποφασίστηκε για τη συγκεκριμένη κατασκευή η χρήση της μεθόδου Cuthill-McKee (II) .

➔ Υπομενού Ανάλυση - Σενάριο - Νέο

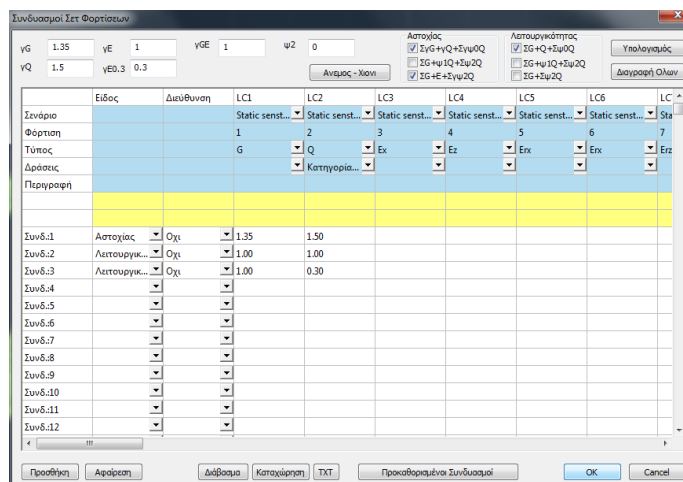


Σχ. 6.9 : Παράθυρο δημιουργίας σεναρίου

Βήμα 9. Καταχώρηση συνδυασμού φορτίσεων

Στους χειροκίνητους υπολογισμούς που έγιναν εκτός υπολογιστικού περιβάλλοντος, ήταν γνωστό πως οι συντελεστές προσάυξης των φορτίων εισάγονται μέσα στο πρόγραμμα. Οι συνδυασμοί που επελέγησαν είναι ένας συνδυασμός αστοχίας (συντελεστής μόνιμων φορτίων 1,35 και συντελεστής κινητών 1,50) και δύο συνδυασμοί λειτουργικότητας (1,00 και 1,00 οι συντελεστές μόνιμων φορτίων και 1,00 και 0,30 οι συντελεστές των κινητών αντίστοιχα). Η επιλογή των συνδυασμών αυτών έγινε ανατρέχοντας στα βιβλία διδασκαλίας [32] μαθημάτων οπλισμένου σκυροδέματος και μεταλλικών κατασκευών της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ.

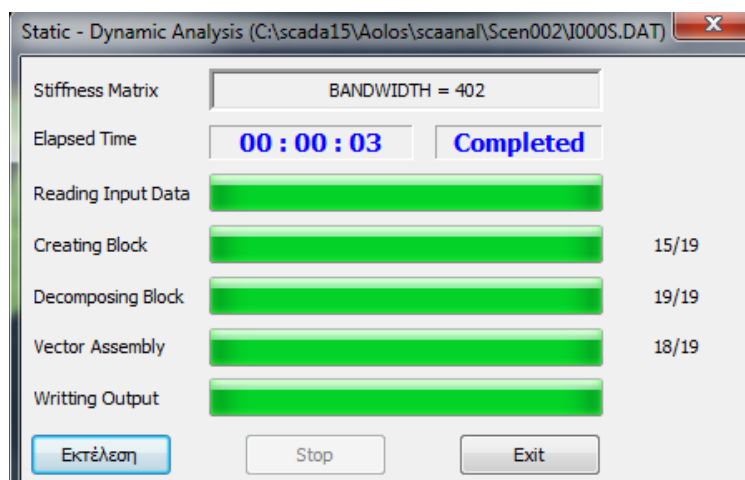
➔ Υπομενού Ανάλυση - Συνδυασμοί



Σχ. 6.10 : Καταχώρηση συνδυασμών φορτίσεων

Βήμα 10. Ανάλυση

≡ Υπομενού Ανάλυση - επιλογή σεναρίου που δημιουργήθηκε - εκτέλεσε.



Σχ. 6.11 : Εκτέλεση σεναρίου ανάλυσης

6.3 Μεταλλικοί ραβδωτοί φορείς

6.3.1 Μοντελοποίηση

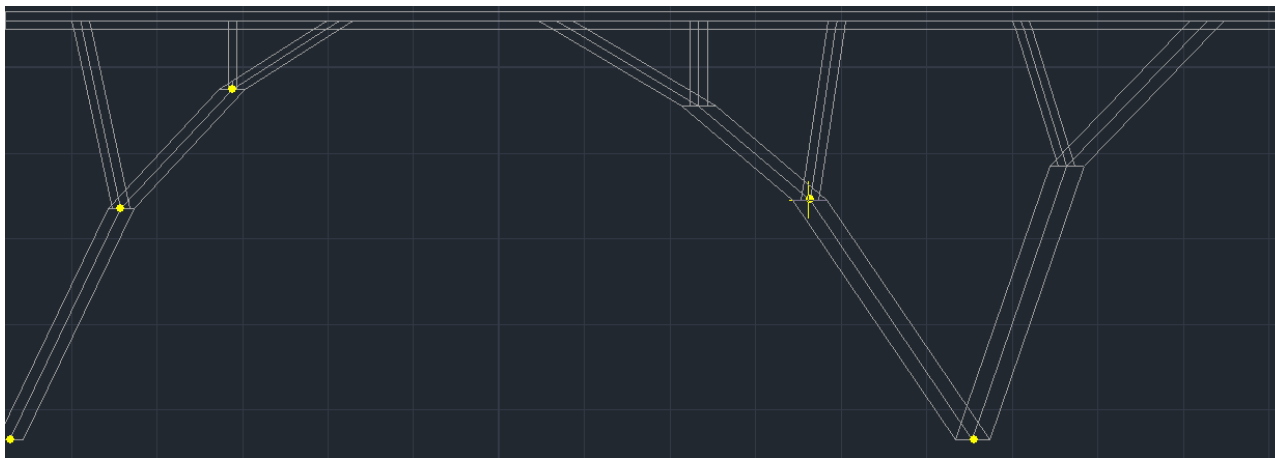
Βήμα 1. Εισαγωγή αρχείου dwg και μεταφορά του στο κατακόρυφο επίπεδο.

Το συγκεκριμένο βήμα είναι ακριβώς ίδιο με το Βήμα 1 στο Κεφάλαιο 6.2.1

Βήμα 2.Μοντελοποίηση Ραβδωτών

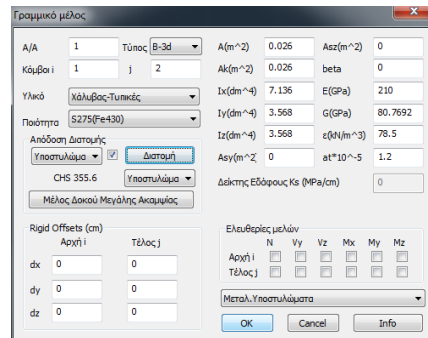
Στα πλαίσια της ερμηνείας των μεταλλικών φορέων, απαιτήθηκε η μοντελοποίηση με χαλύβδινες διατομές. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ραβδωτών στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, μετά τον αρχικό υπολογισμό του μοντέλου δημιουργήθηκαν οι κόμβοι επί των στοιχείων. Στη συνέχεια επιλέχθηκαν οι κατάλληλες χαλύβδινες διατομές οι οποίες τοποθετήθηκαν από αριθμημένο κόμβο σε αριθμημένο κόμβο. Με αυτό τον τρόπο η τοποθέτηση των ράβδων με αρχή και τέλος κόμβους στοιχείων σκυροδεμάτος ολοκλήρωσε τη διαδικασία μοντελοποίησης του φορέα. Τα ραβδωτά μέλη πρέπει να καταχωρηθούν στο layer “Μεταλλικά υποστυλώματα” ώστε να μπορούν μετά να διαστασιοποιηθούν στη συνέχεια με τους αντίστοιχους ελέγχους. Η δυνατότητα απόδοσης διατομής στο φυσικό μοντέλο ως υποστυλώματα η δόκος γίνεται από το παρακάτω υπομενού του προγράμματος.

➔ Υπομενού μοντελοποίηση - Κόμβος - χειροκίνητη εισαγωγή κόμβων



Σχ. 6.12 : Χειροκίνητη εισαγωγή κόμβων

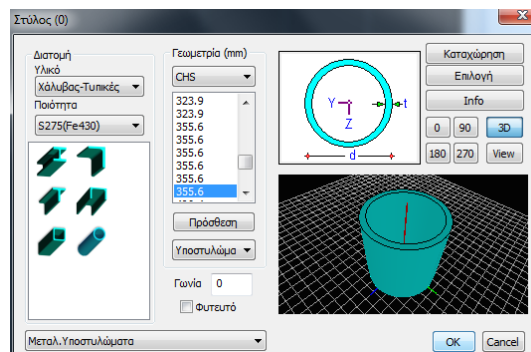
➔ Μέλος - μαθηματικό



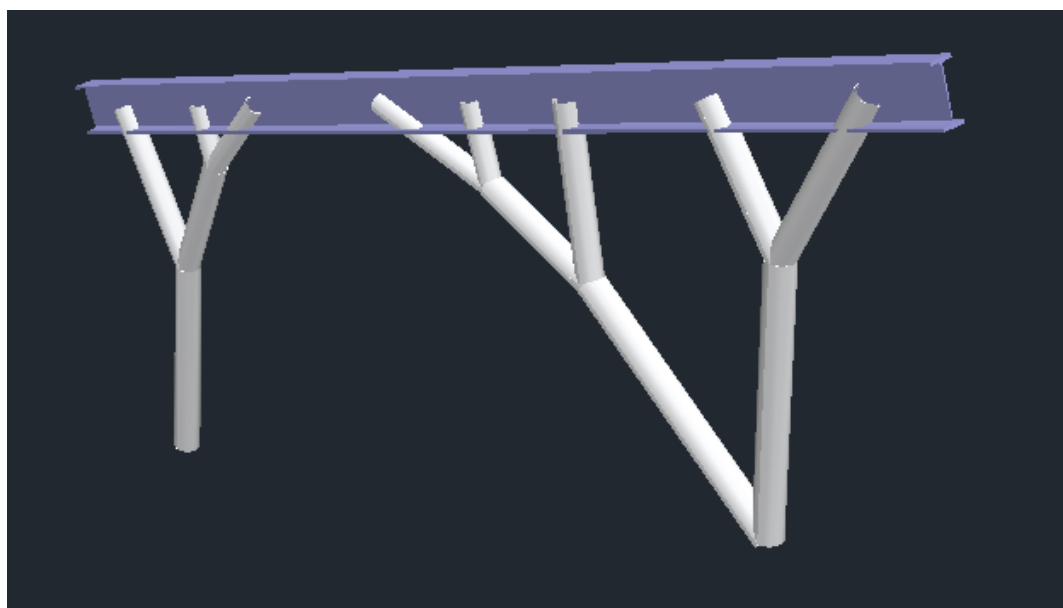
Σχ. 6.13 : Τοποθέτηση ράβδων - κόμβοι αρχής και τέλους

Βήμα 3. Επιλογή διατομών μεταλλικών ράβδων

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι οι μεταλλικές διατομές που επιλέχθηκαν κατά τη μοντελοποίηση του φορέα ήταν κοίλες κυλινδρικές, μορφής CHS για τα μέλη των υποστυλωμάτων και διατομής HEM για τα μέλη των δοκών. Η ποιότητα του χάλυβα ήταν S275. Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα τρισδιάστατης απεικόνισης των διατομών ώστε ο χρήστης να μπορεί να αποκτά καλύτερη εμποπτεία επί των προς επιλογή διατομών.



Σχ. 6.14 : Επιλογή διατομών μεταλλικών ράβδων



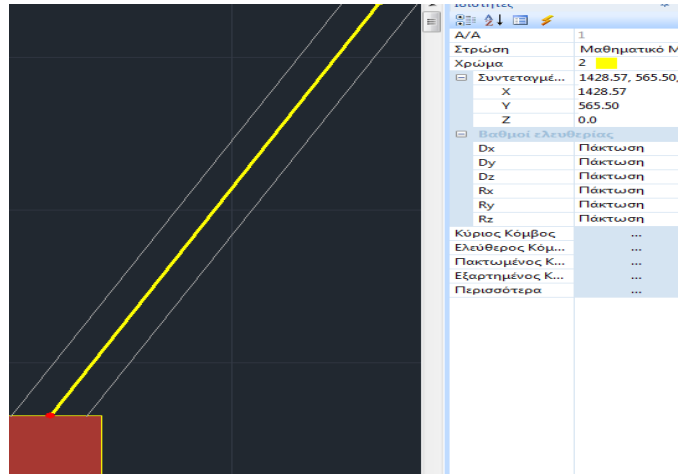
Σχ. 6.15 : Φωτορεαλιστική απεικόνιση προσωμοιώματος Model_B σε μεταλλική μορφή

6.3.2 Εισαγωγή Στηρίξεων - Φορτίσεων

Βήμα 4. Εισαγωγή στηρίξεων

Η τοποθέτηση των στηρίξεων γίνεται με την επιλογή των αντίστοιχων κόμβων και τη δέσμευση όλων των βαθμών ελευθερίας τους για τη μετατροπή τους σε πακτώσεις.

- ➔ Υπομενου μοντελοποίηση - κόμβος - χειροκίνητη επιλογή κόμβων

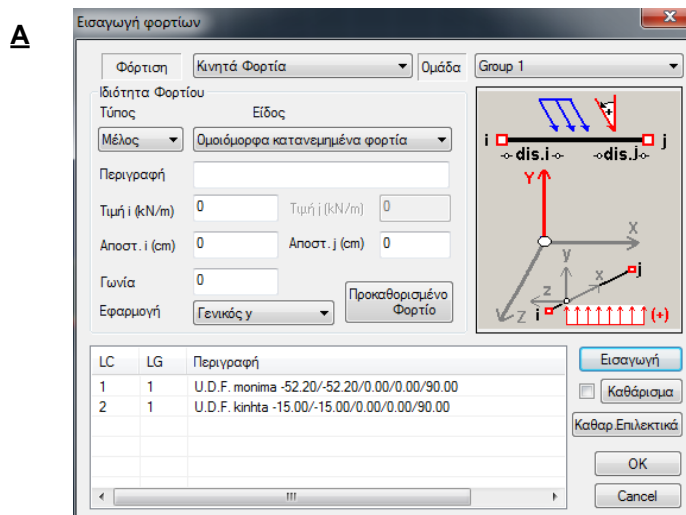


Σχ. 6.16 : Χειροκίνητη μετατροπή κόμβου σε κόμβο πάκτωσης

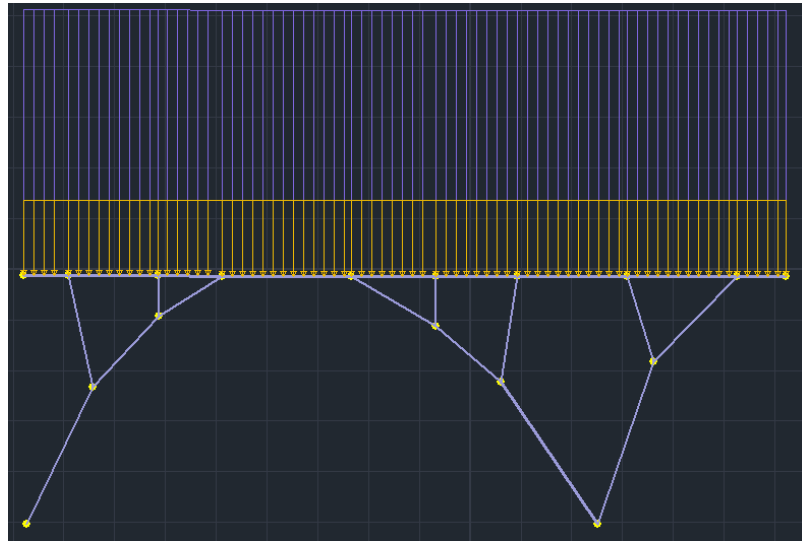
Βήμα 5. Εισαγωγή φορτίσεων

Όπως υπολογίστηκε από το βήμα 6 στο Κεφ. 6.2.2, τα μόνιμα φορτία είναι $G = 52.2 \text{ KN/m}$ και τα κινητά φορτία είναι $Q = 15 \text{ KN/m}$

- ➔ Υπομενού φορτία - εισαγωγή - πολλαπλή επιλογή με παράθυρο ράβδων υψηλότερης στάθμης - τοποθέτηση μόνιμων και κινητών φορτίων



B



Σχ. 6.17 : Εισαγωγή μόνιμων και κινητών φορτίων στους κόμβους ανωδομής του φορέα (Α) και εμφάνιση συνολική εποπτεία του μοντέλου.

6.3.3 Ανάλυση - Συνδυασμοί φορτίσεων

Βήμα 6. Δημιουργία Σεναρίων Ανάλυσης

Το συγκεκριμένο βήμα είναι ακριβώς ίδιο με το Βήμα 8 στο Κεφάλαιο 6.2.3

Βήμα 7. Καταχώρηση συνδυασμού φορτίσεων

Το συγκεκριμένο βήμα είναι ακριβώς ίδιο με το Βήμα 9 στο Κεφάλαιο 6.2.3

Βήμα 8 Ανάλυση

Το συγκεκριμένο βήμα είναι ακριβώς ίδιο με το Βήμα 10 στο Κεφάλαιο 6.2.3

6.4 Αποτελέσματα

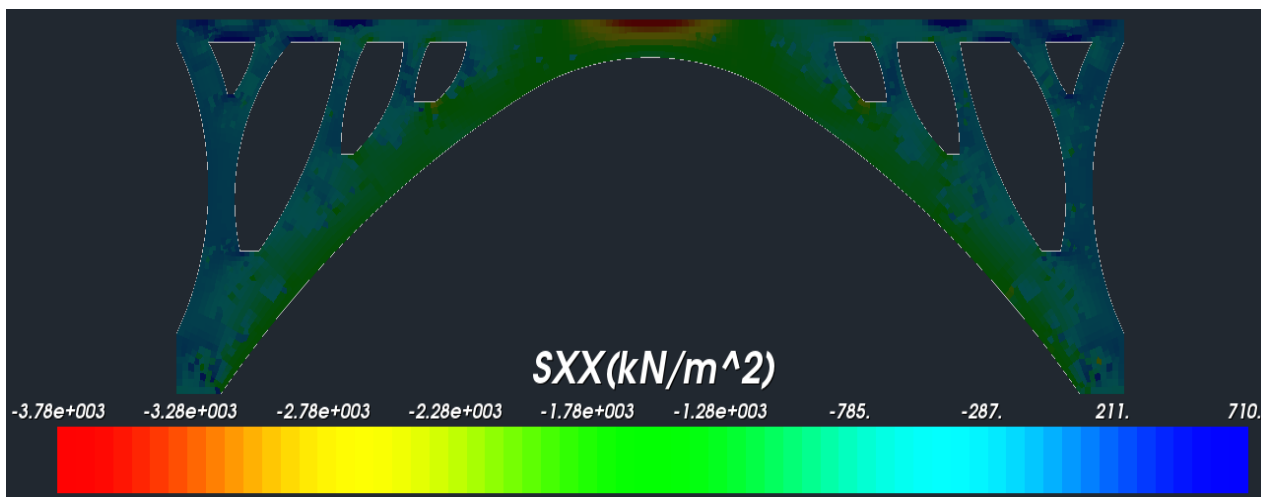
Για δεδομένη μορφή κατασκευής, δεδομένα φορτία συνθήκες στήριξης και μέθοδο ανάλυσης, στο σημείο αυτό το πρόγραμμα δύναται να υπολογίσει και να παρουσιάσει τις τιμές των εντατικών μεγεθών, των παραμορφώσεων καθώς και τα απαιτούμενα τετραγωνικά εκατοστά οπλισμού για κατασκευές από ωπλισμένο σκυρόδεμα.

Απαραίτητη διαδικασία για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων είναι το διάβασμα του αρχείου συνδυασμών, όπως αυτό δημιουργήθηκε προηγουμένως.

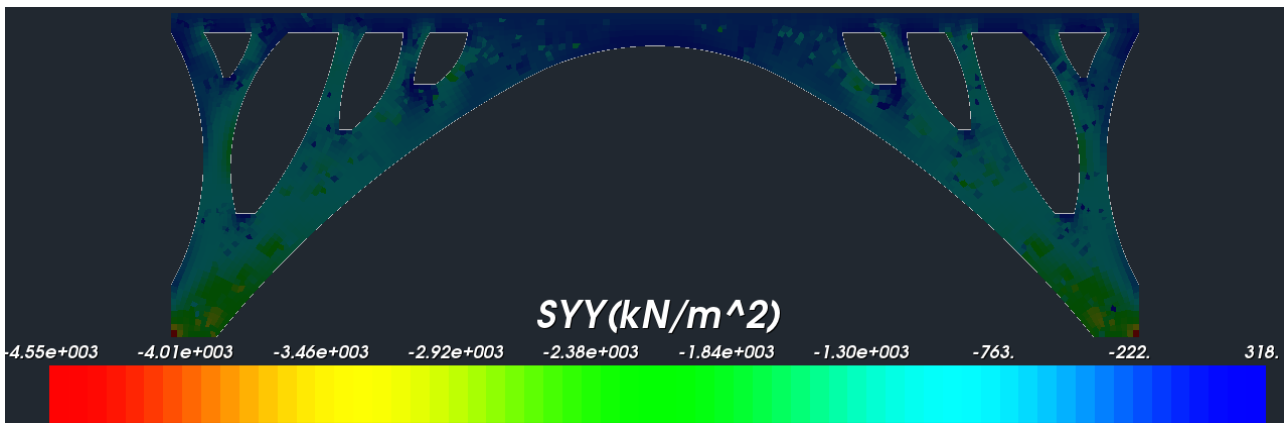
Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των εντατικών μεγεθών των δύο εκ των 8 συνολικά μοντέλων, όπως και στα προηγούμενα κεφάλαια. Τα αποτελέσματα των υπόλοιπων 6 έχουν τοποθετηθεί στο παράρτημα των αποτελεσμάτων.

- ➔ Υπομενού Αποτελέσματα - Συνδυασμοί - επιλογή συνδυασμών - υπολογισμός- διαγράμματα 2D.

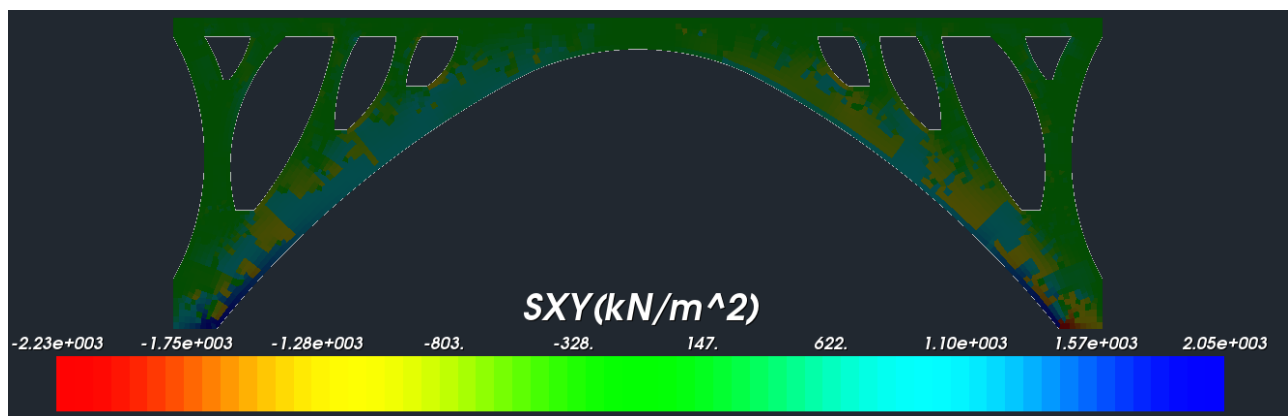
6.4.1 Αποτελέσματα Model A - ερμηνεία με ολόσωμη κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα



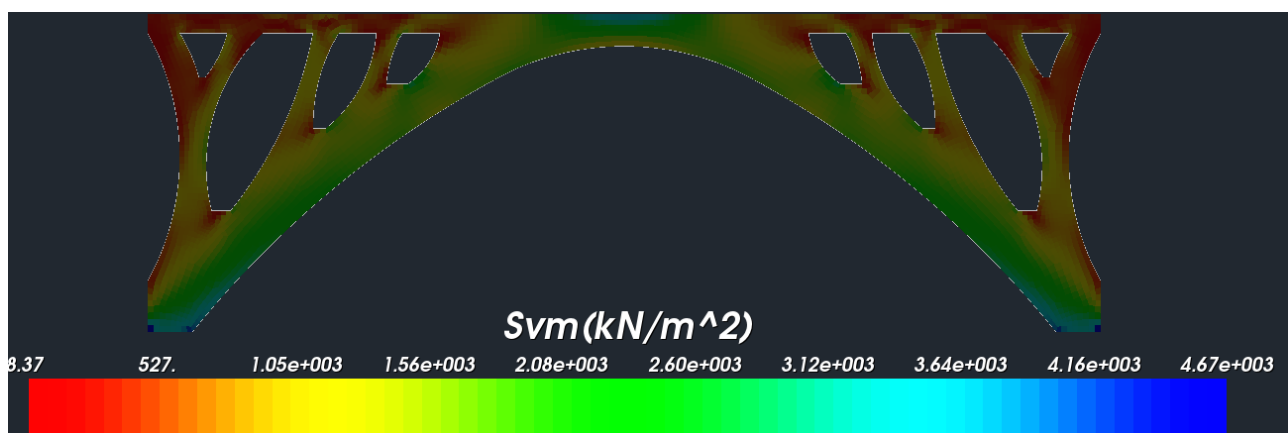
Σχ. 6.18A : Περιβάλλουσα τάση S_{xx} σε KN/m^2



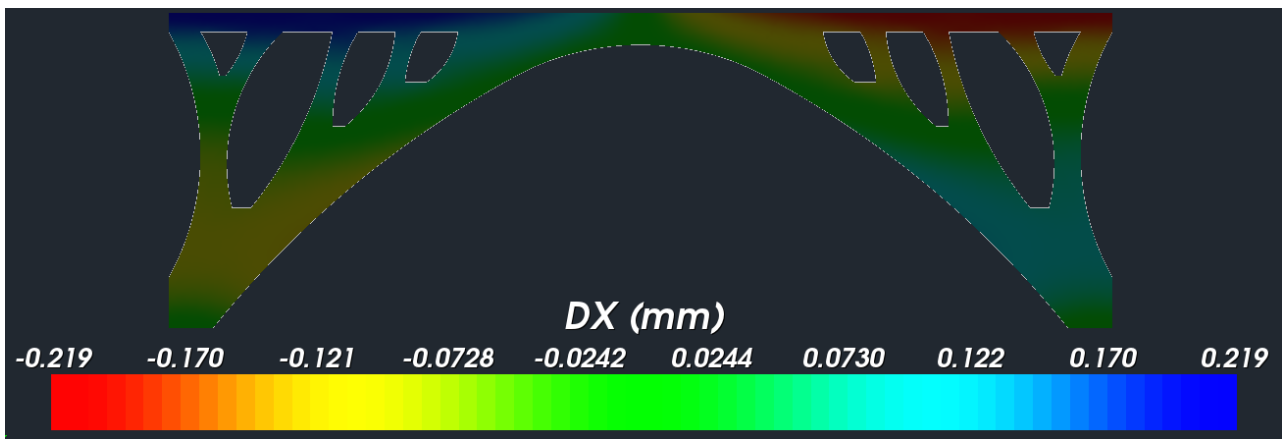
Σχ. 6.18B : Περιβάλλουσα τάση S_{yx} σε KN/m^2



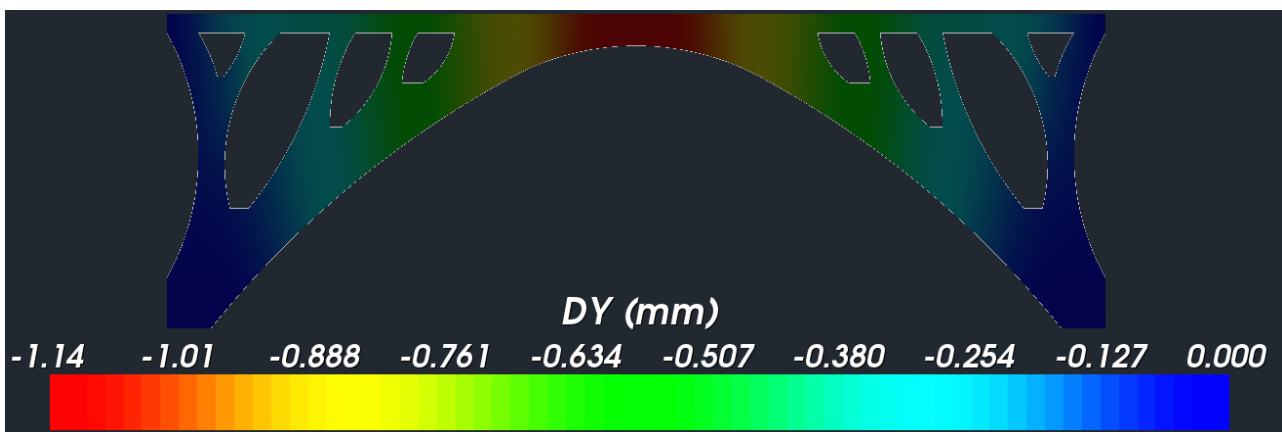
Σχ. 6.18Γ : Περιβάλλουσα τάση S_{xy} σε KN/m^2



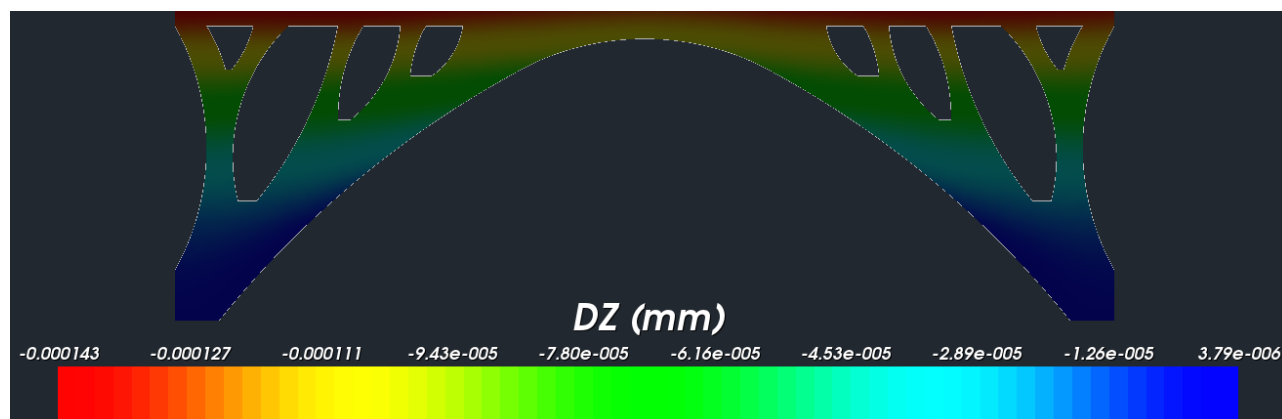
Σχ. 6.18Δ : Περιβάλλουσα Τάση S_{vm} (Von mises) σε KN/m^2



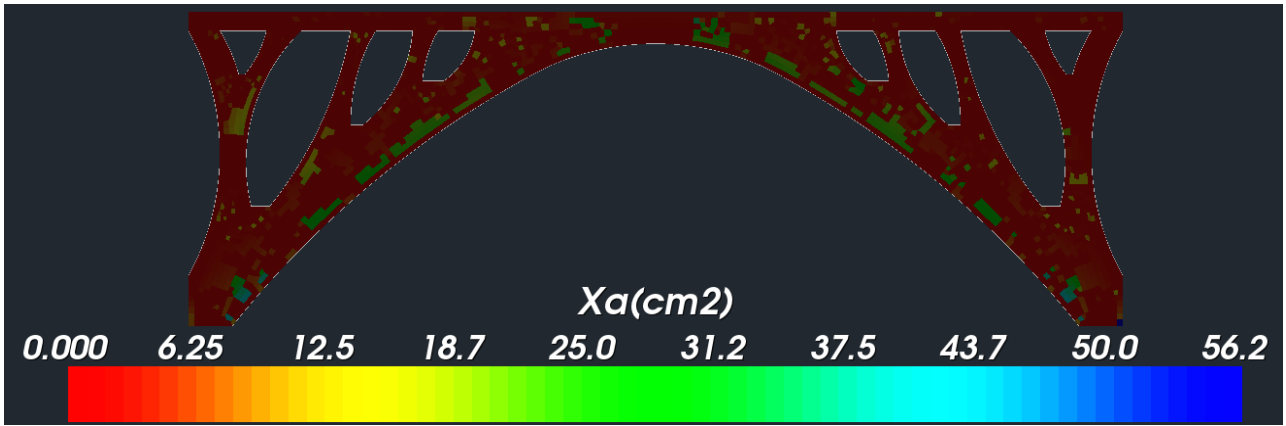
Σχ. 6.18E : Μετατόπιση φορέα κατά τον οριζόντιο άξονα x DX σε mm.



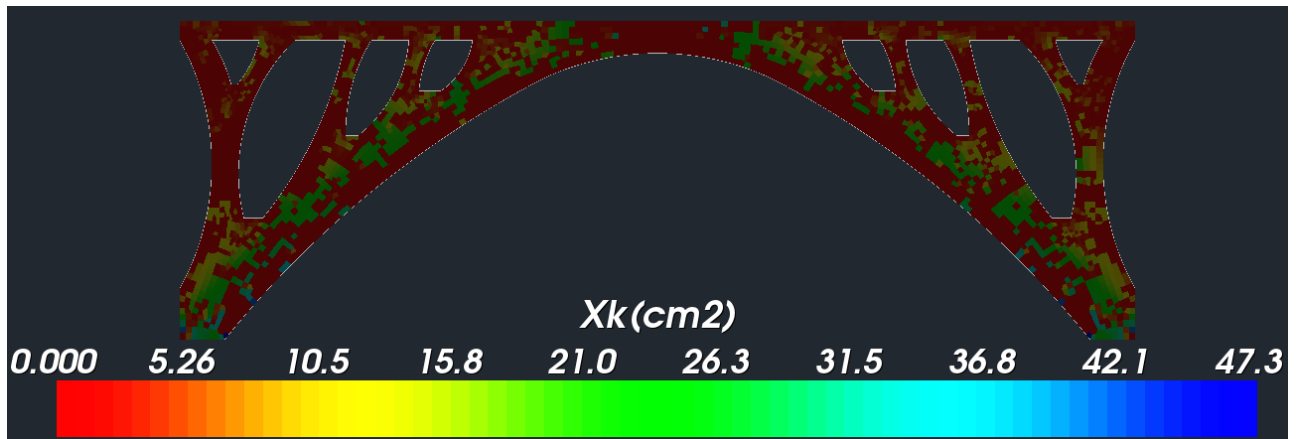
Σχ. 6.18ΣΤ : Μετατόπιση φορέα κατά τον κατακόρυφο άξονα y DY σε mm.



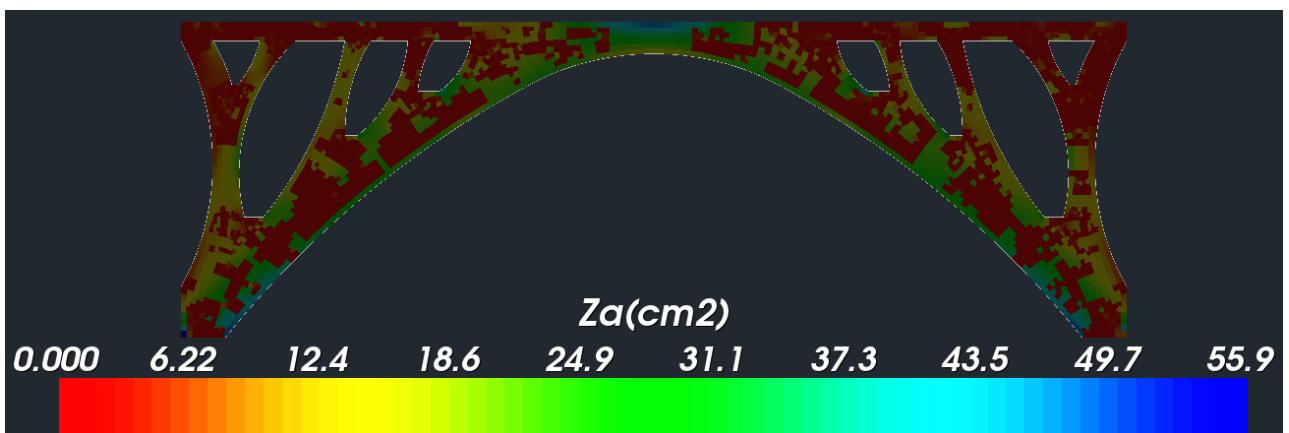
Σχ. 6.18Ζ : Μετατόπιση φορέα κατά τον άξονα z DZ σε mm.



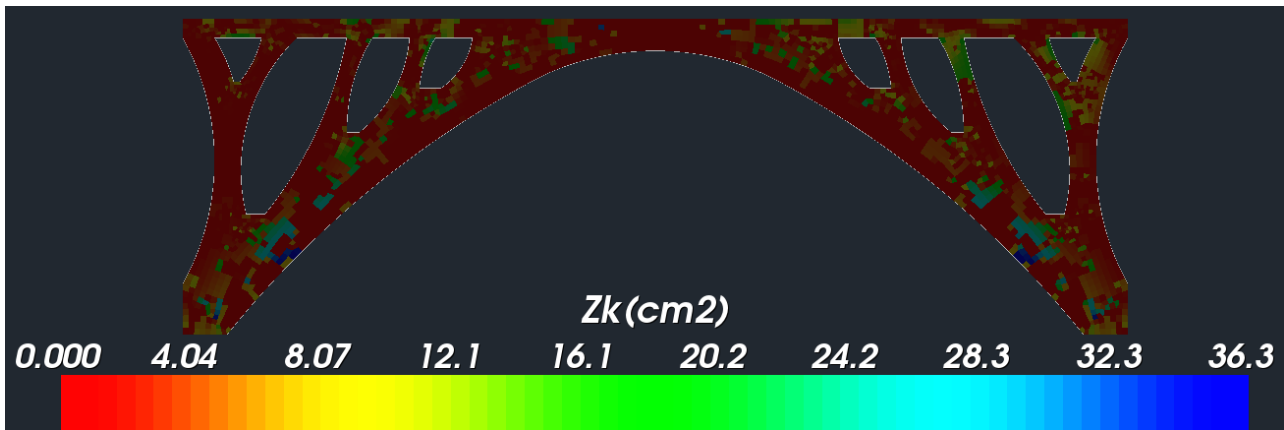
Σχ. 6.18H : Τετραγωνικά εκατοστά απαιτούμενου οπλισμού στη διεύθυνση x άνω



Σχ. 6.18Θ : Τετραγωνικά εκατοστά απαιτούμενου οπλισμού στη διεύθυνση x κάτω



Σχ. 6.18I : Τετραγωνικά εκατοστά απαιτούμενου οπλισμού στη διεύθυνση z άνω



Σχ. 6.18K : Τετραγωνικά εκατοστά απαιτούμενου οπλισμού στη διεύθυνση z κάτω

6.4.2 Αποτελέσματα Model_B - ερμηνεία με ραβδωτούς μεταλλικούς φορείς.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΣΙΔΗΡΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

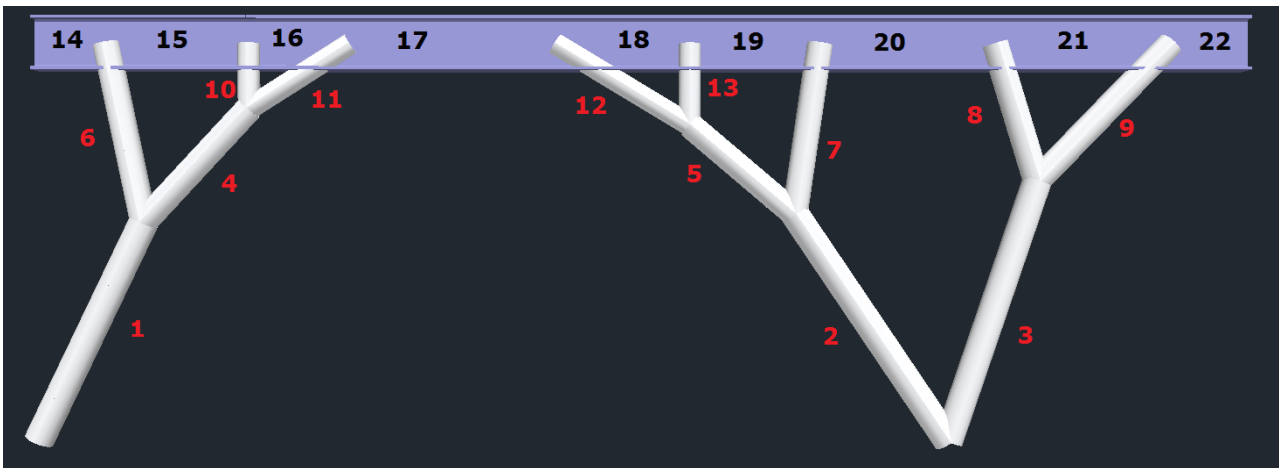
Μέλος	Διατομή	Μήκος (m)	Βάρος/m (Kg/m)	Βάρος (Kg)
K0 / 1	CHS 355.6	2.99	204.00	609.38
K0 / 2	CHS 355.6	3.38	204.00	689.85
K0 / 3	CHS 355.6	3.38	204.00	689.77
K0 / 4	CHS 323.9	1.91	184.00	352.10
K0 / 5	CHS 323.9	1.70	184.00	313.58
K0 / 6	CHS 323.9	2.25	184.00	414.04
K0 / 7	CHS 323.9	2.12	184.00	390.46
K0 / 8	CHS 323.9	1.78	184.00	327.00
K0 / 9	CHS 323.9	2.37	184.00	436.31
K0 / 10	CHS 273	0.80	153.00	122.49
K0 / 11	CHS 273	1.49	153.00	227.83
K0 / 12	CHS 273	1.94	153.00	296.77
K0 / 13	CHS 273	1.00	153.00	152.87

Δ0 / 14	HEM 300	0.89	237.92	211.75
Δ0 / 15	HEM 300	1.77	237.92	421.12
Δ0 / 16	HEM 300	1.26	237.92	299.78
Δ0 / 17	HEM 300	2.53	237.92	601.94
Δ0 / 18	HEM 300	1.66	237.92	394.95
Δ0 / 19	HEM 300	1.61	237.92	383.05
Δ0 / 20	HEM 300	2.16	237.92	513.91
Δ0 / 21	HEM 300	2.17	237.92	516.29
Δ0 / 22	HEM 300	0.95	237.92	226.02
T O T A L			8591.24	

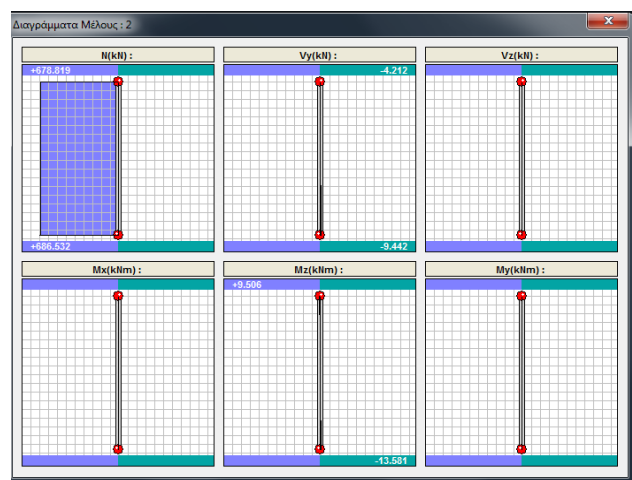
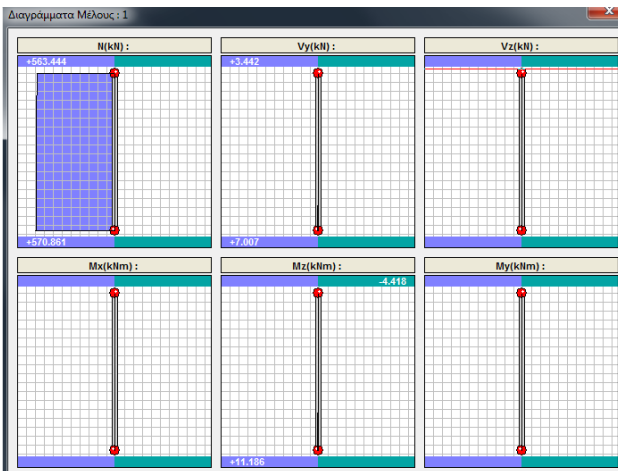
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ΠΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΣΙΔΗΡΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

Διατομή	Μήκος (m)	Βάρος/m (Kg/m)	Βάρος (Kg)
CHS 355.6	9.75	204.00	1989.00
CHS 323.9	12.14	184.00	2233.49
CHS 273	5.23	153.00	799.95
HEM 300	15.00	237.92	3568.8
T O T A L			8591.24

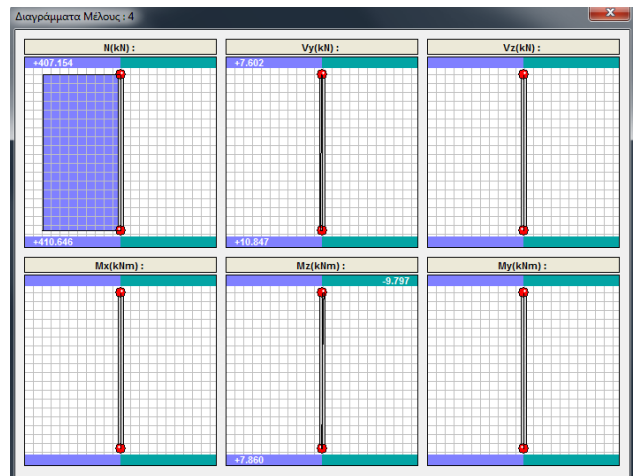
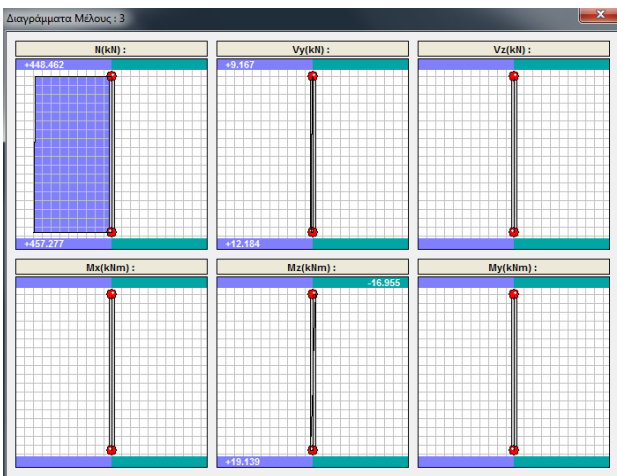
Σχ. 6.19 : Αναλυτική και συγκεντρωτική προμέτρηση σιδηρών διατομών Model_C



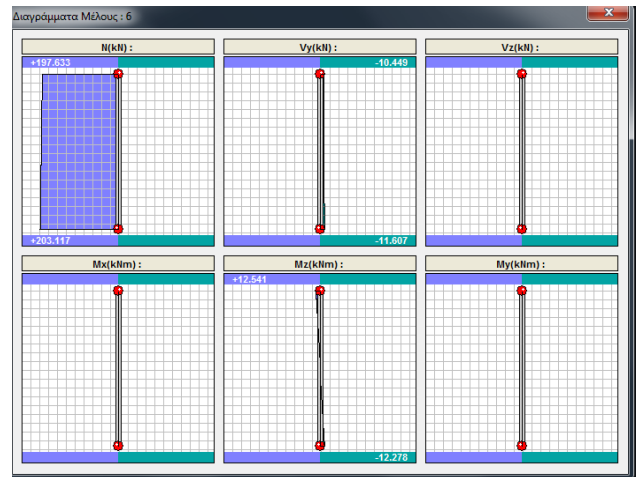
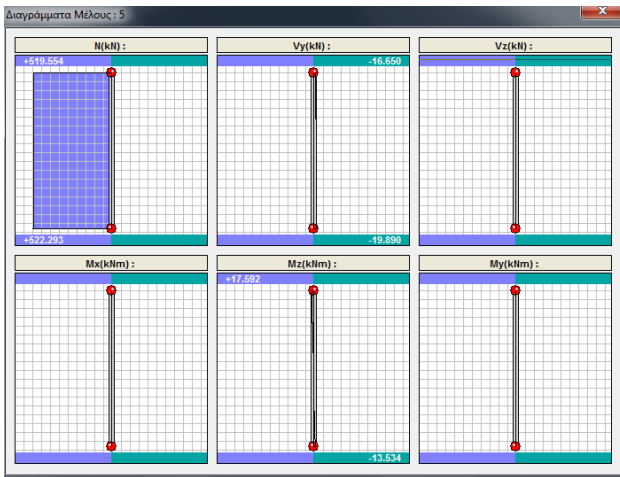
Σχ. 6.20 : Αρίθμηση ραβδωτών μελών φορέα



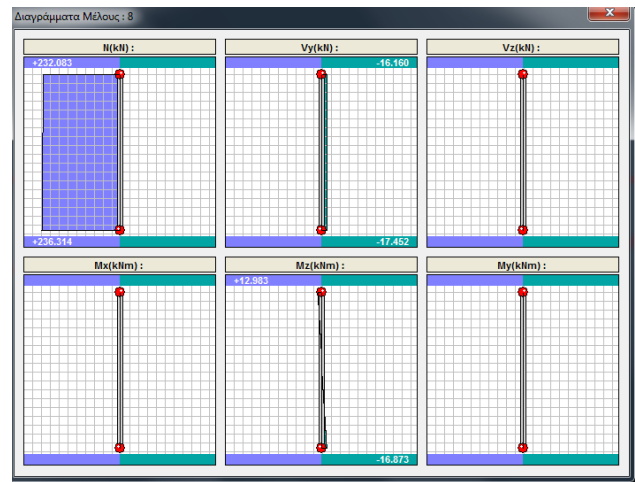
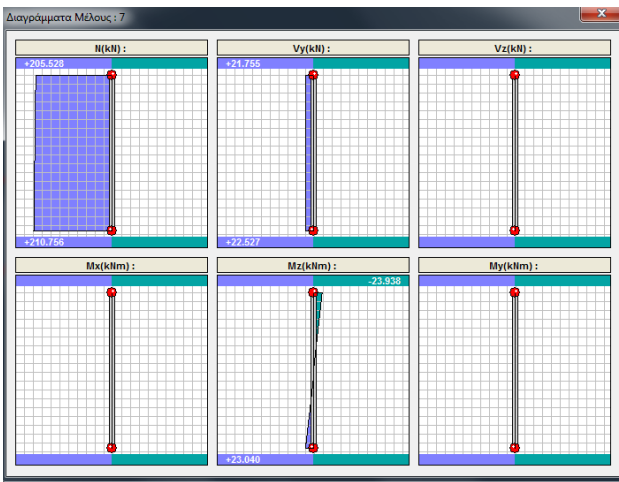
Σχ. 6.21 : Εντατικά μεγέθη μέλους 1 και μέλους 2



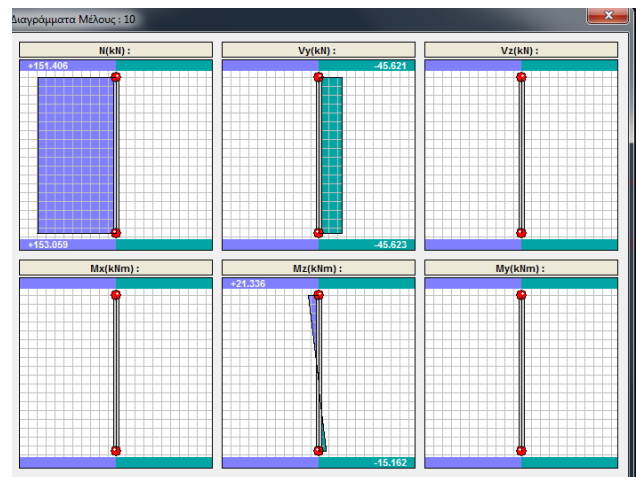
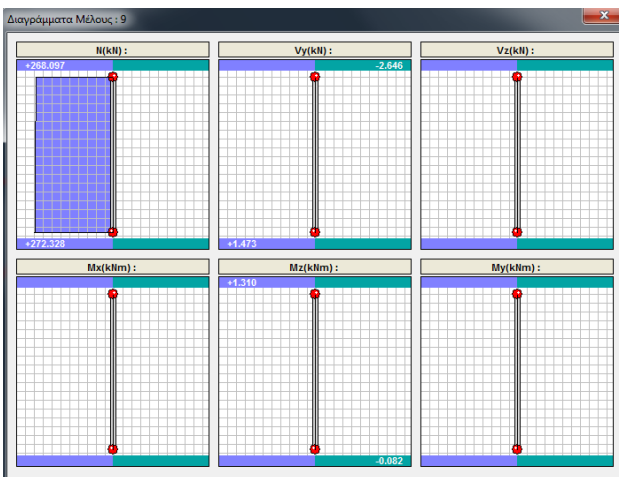
Σχ. 6.22 : Εντατικά μεγέθη μέλους 3 και μέλους 4



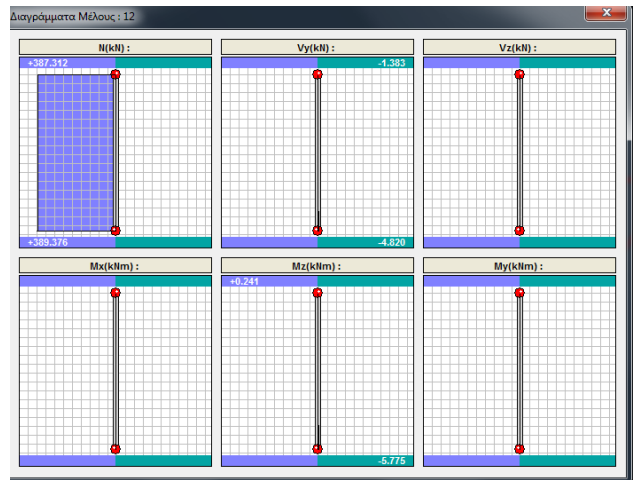
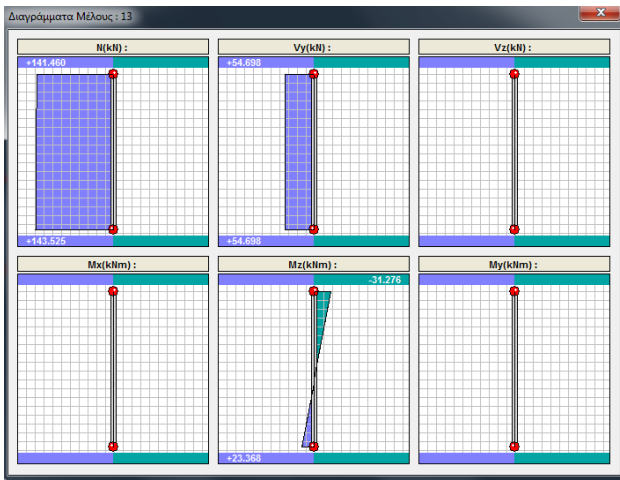
Σχ. 6.23 : Εντατικά μεγέθη μέλους 5 και μέλους 6



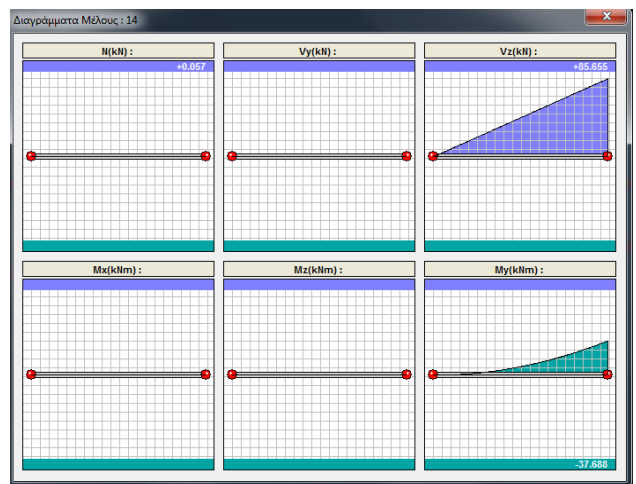
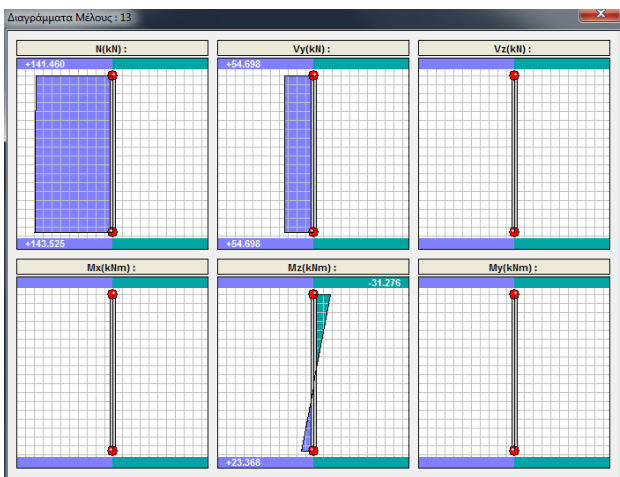
Σχ. 6.24 : Εντατικά μεγέθη μέλους 7 και μέλους 8



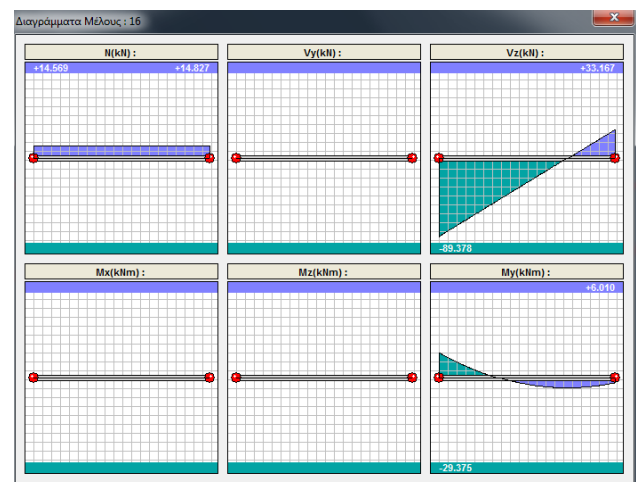
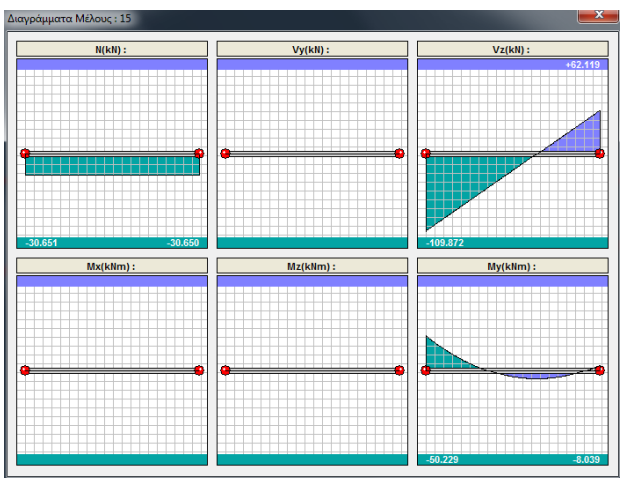
Σχ. 6.25 : Εντατικά μεγέθη μέλους 9 και μέλους 10



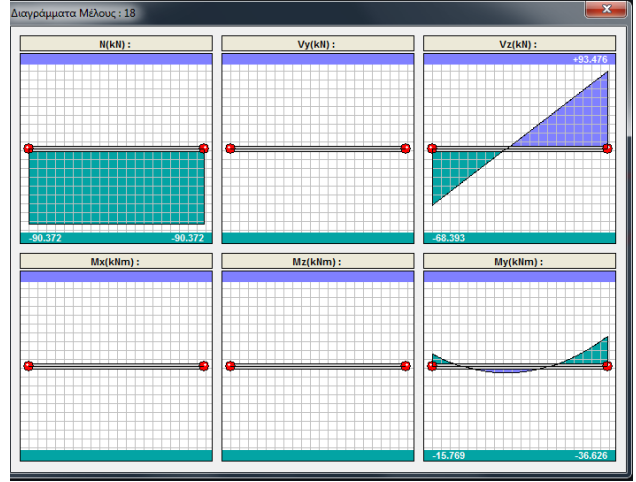
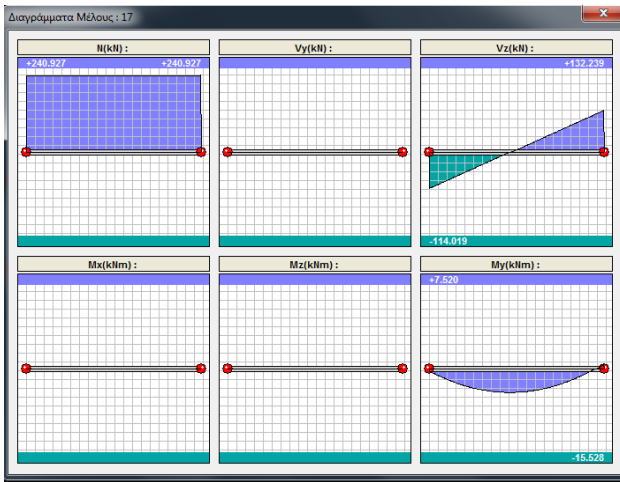
Σχ. 6.26 : Εντατικά μεγέθη μέλους 11 και μέλους 12



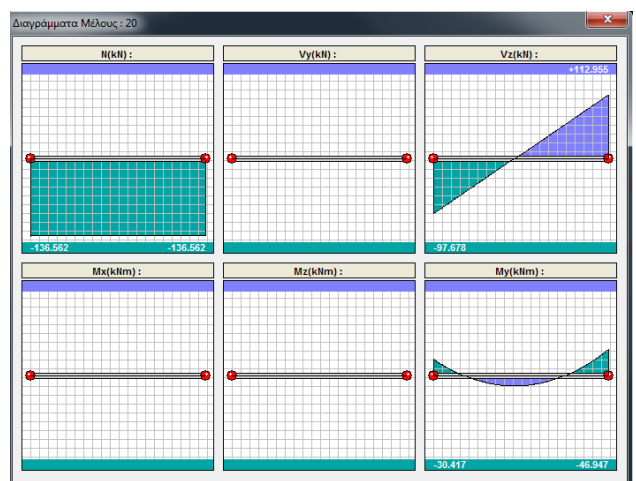
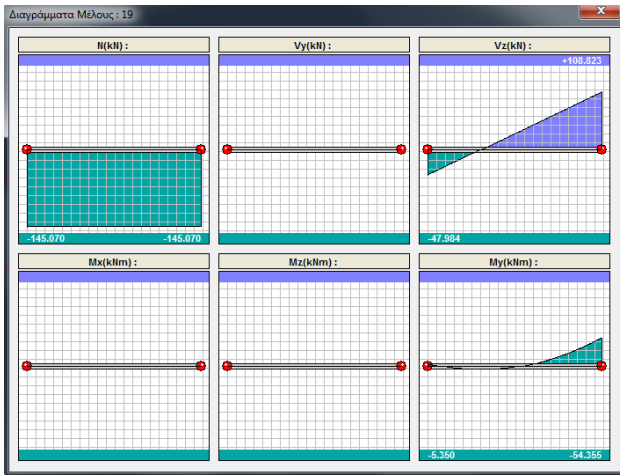
Σχ. 6.27 : Εντατικά μεγέθη μέλους 13 και μέλους 14



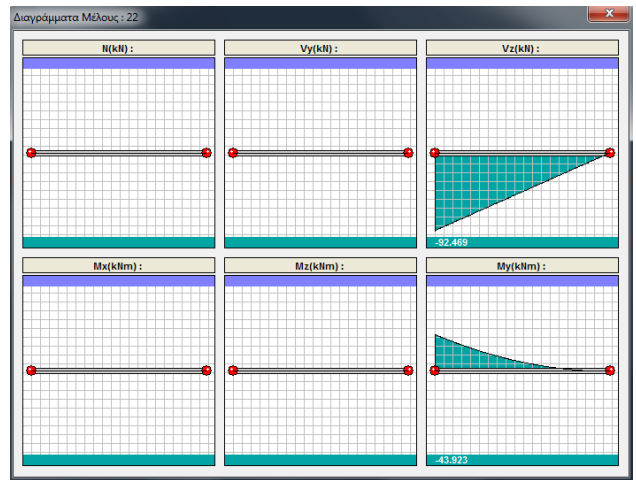
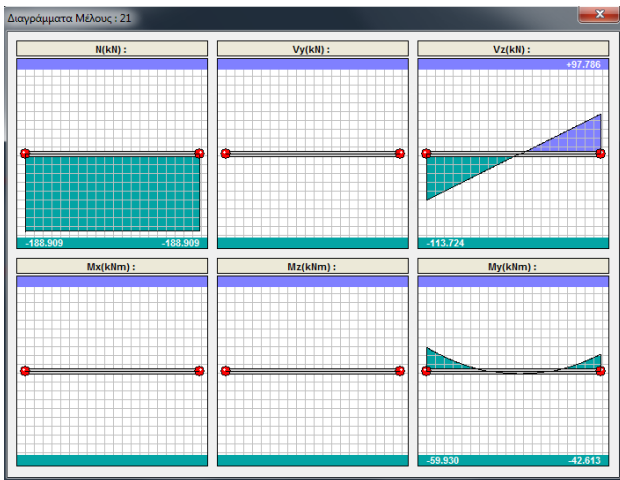
Σχ. 6.28 : Εντατικά μεγέθη μέλους 15 και μέλους 16



Σχ. 6.29 : Εντατικά μεγέθη μέλους 17 και μέλους 18



Σχ. 6.30 : Εντατικά μεγέθη μέλους 19 και μέλους 20



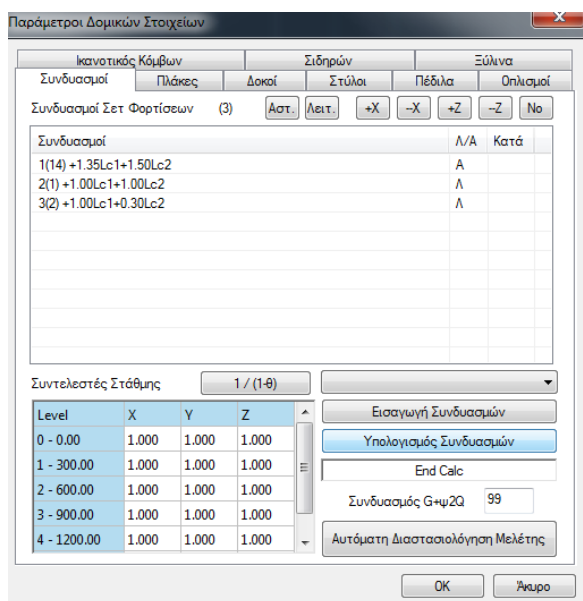
Σχ. 6.31 : Εντατικά μεγέθη μέλους 21 και μέλους 22

6.5 Έλεγχος διατομών και Συνδέσεων - Τοποθέτηση Οπλισμών

6.5.1 Έλεγχος διατομών και Συνδέσεων

Απαραίτητη προϋπόθεση για τον έλεγχο των μεταλλικών διατομών, την τοποθέτηση οπλισμού στα μέλη από οπλισμένο σκυρόδεμα και την ενδεικτική αποτύπωση των συνδέσεων είναι η εισαγωγή των συνδυασμών μέσα από αρχείο στο φακέλο της μελέτης.

➔ Υπομενού Διαστασιολόγηση - παράμετροι - εισαγωγή συνδυασμών

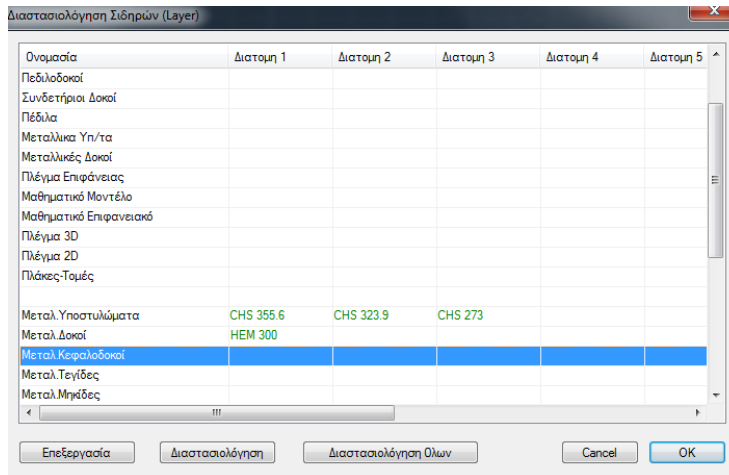


Σχ. 6.32 : Υπολογισμός παραμέτρων δομικών στοιχείων - εισαγωγή συνδυασμών φορτίσεων

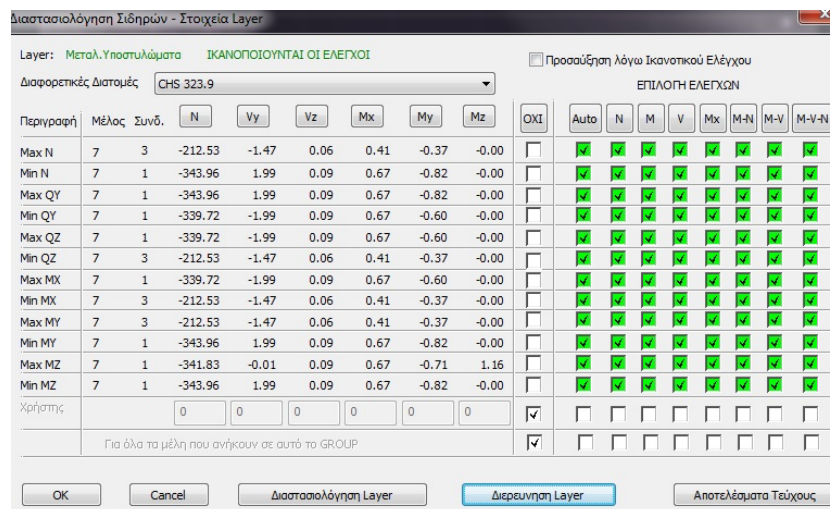
Έλεγχος διατομών μεταλλικών ράβδων

Ο έλεγχος επάρκειας μεταλλικών διατομών αποτελεί ένα από τα τελευταία στάδια της μελέτης. Για τους δεδομένους συνδυασμούς φορτίσεων το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα να ελέγξει κάθε μεταλλικό μέλος ξεχωριστά ως προς την επάρκειά του έναντι όλων των ελέγχων. Ταυτόχρονα, δημιουργεί πίνακα με τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές κάθε εντατικού μεγέθους και σε ποιο μέλος αυτές εμφανίζονται. Στα παραδείγματα που παρουσιάζονται τα επιμέρους μέλη επαρκούν πλήρως.

➔ Υπομενού Διαστασιολόγηση - διαστασιολόγηση σιδηρών - έλεγχος επάρκειας

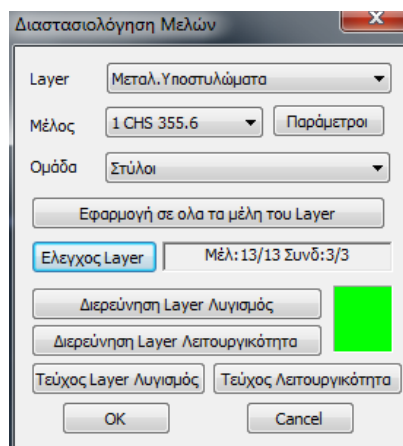


Σχ. 6.33 : Έλεγχος επαρκούς διαστασιολόγησης layer μεταλλικών κατασκευών



Σχ. 6.34 : Αναλυτική επάρκεια διατομών - εμφάνιση μέγιστων και ελάχιστων τιμών μεγεθών ανά τύπο διατομής

➔ Υπομενού Διαστασιολόγηση - διαστασιολόγηση σιδηρών - έλεγχος λυγισμού



Σχ. 6.35 : Διαστασιολόγηση έναντι λυγισμού

Μέλος	Διατομή	Καμπτικός	Πλευρικός	Στρεπτοκ.	Λεπ.Παραμ	Λεπ.Μετακ
1	CHS 355.6	1/0.00	Δεν Απατ.	1/0.09		
2	CHS 355.6	1/0.00	Δεν Απατ.	1/0.11		
3	CHS 355.6	1/0.00	Δεν Απατ.	1/0.08		
4	CHS 323.9	1/0.00	Δεν Απατ.	1/0.08		
5	CHS 323.9	1/0.00	Δεν Απατ.	1/0.10		
6	CHS 323.9	1/0.00	Δεν Απατ.	1/0.05		
7	CHS 323.9	1/0.00	Δεν Απατ.	1/0.06		
8	CHS 323.9	1/0.00	Δεν Απατ.	1/0.06		
9	CHS 323.9	1/0.00	Δεν Απατ.	1/0.04		
10	CHS 273	1/0.00	Δεν Απατ.	1/0.07		
11	CHS 273	1/0.00	Δεν Απατ.	1/0.06		
12	CHS 273	1/0.00	Δεν Απατ.	1/0.08		
13	CHS 273	1/0.00	Δεν Απατ.	1/0.08		

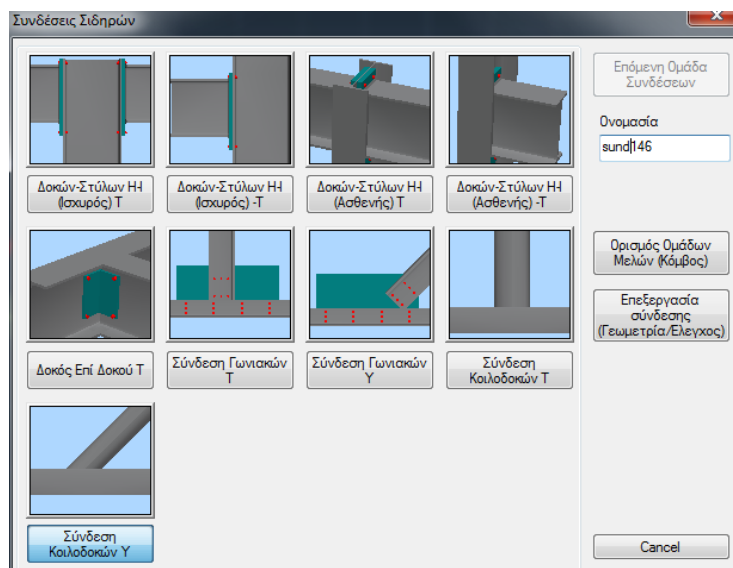
Σχ. 6.36 : Έλεγχος διατομών έναντι καμπτικού, πλευρικού και στρεπτοκαμπτικού λυγισμού

Συνδέσεις

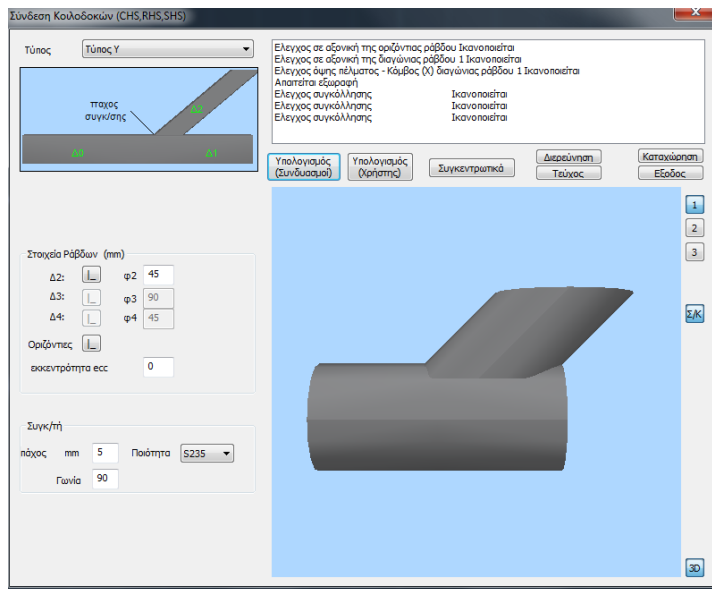
Το τελευταίο κομμάτι ελέγχων που πραγματοποιείται είναι αυτό των συνδέσεων των μελών του φορέα. Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα αυτόματου υπολογισμού των εντατικών μεγεθών ενός ζεύγους ράβδων που συνδέονται και της αυτόματης διαστασιολόγησης της σύνδεσης με βάση το δυσμενέστερο συνδυασμό.

Επίσης παρέχεται η δυνατότητα της ταυτόχρονης επεξεργασίας του συνόλου των συνδέσεων της κατασκευής, εντοπισμού της δυσμενέστερης αυτών, της διαστασιολόγησής της και ως εκ τούτου την επάρκεια όλων των υπολοίπων.

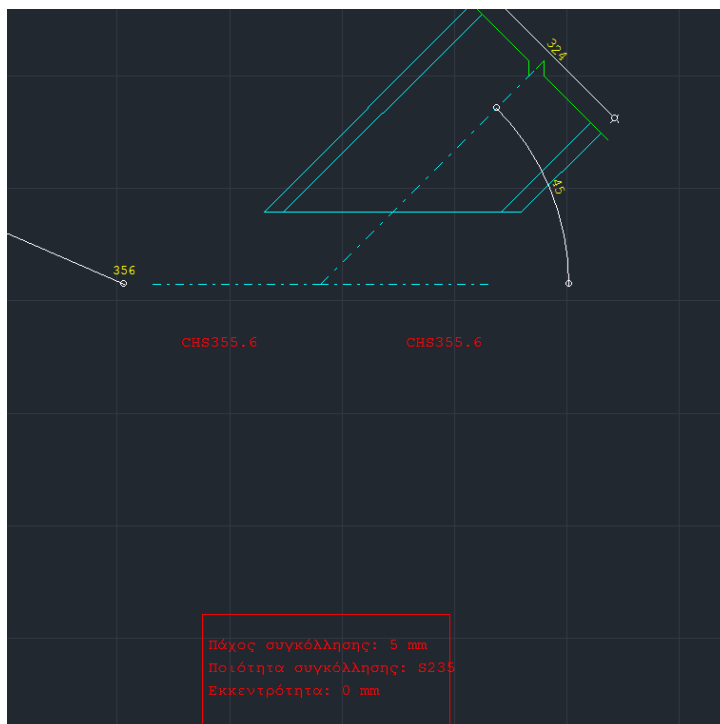
- ➔ Υπομενού Διαστασιολόγηση - διαστασιολόγηση σιδηρών - συνδέσεις (βλ. σχ. 33Α - σχ. 33Γ)



Σχ. 6.37Α : Επιλογή τύπου σύνδεσης



Σχ. 6.37B : Διαστασιολόγηση συγκολλητής σύνδεσης κοιλοδοκίων



Σχ. 6.37Γ : Παράδειγμα συγκολλητής σύνδεσης ράβδων 5-6

6.5.2 Τοποθέτηση οπλισμών

Ενδεικτικός οπλισμός κατασκευής από ωπλισμένο σκυρόδεμα

Ο ακριβής υπολογισμός απαιτούμενου οπλισμού ανά δομικό στοιχείο είναι συνάρτηση του είδους και του μεγέθους των εντατικών μεγεθών που το καταπονούν. Ενδεικτικά, προτείνεται οπλισμός ο οποίος να υπερκαλύπτει τα ελάχιστα του κανονισμού.

Με βάση την παραπάνω εκτίμηση θέτουμε $\Phi 14/15$ ανά παρειά του φορέα (και κατά τις δύο διευθύνσεις του φορέα), δηλαδή $10.27 \text{ cm}^2/\text{m}$. Άρα, για όγκο σκυροδέματος $15 \times 5 \times 0.5 = 37.5 \text{ m}^3$, έχουμε

-στα 15 m, για πλέγμα συνδετήρα ανά 0.15 m, απαίτηση για 100 πλέγματα κατά τη διεύθυνση y,

-στα 5 m, για πλέγμα συνδετήρα ανά 0.15 m, απαίτηση για 33 πλέγματα κατά τη διεύθυνση x.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα έχουμε συνολικό όγκο σκυροδέματος 12.23 m^3 , αρκετά λιγότερο από τον μισό όγκο του αρχικού φορέα που βελτιστοποιήθηκε. Θεωρούμε τελική απαίτηση το μισό οπλισμό του παραπάνω υπολογισμού, λόγω καμπύλων τμημάτων και οπών, άρα απαιτούνται 50 πλέγματα συνδετήρων $\Phi 14$ κατά τη διεύθυνση y και 18 πλέγματα συνδετήρων $\Phi 14$ κατά τη διεύθυνση x.

Για τα πλέγματα κατά τη διεύθυνση y απαιτούνται $2 \times 50 \times 5 + 2 \times 50 \times 0.5 = 550 \text{ m}$ ράβδων $\Phi 14$ και για τα πλέγματα της διεύθυνση x απαιτούνται $2 \times 18 \times 15 + 2 \times 18 \times 0.5 = 558 \text{ m}$, άρα συνολικά απαιτούνται 1108 m ράβδων $\Phi 14$.

Η μορφή της κατασκευής δεν είναι συμβατική, γεγονός που καθιστά τον ακριβή υπολογισμό του οπλισμού πολύ απαιτητική διαδικασία. Παραπάνω παρουσιάζεται μια πολύ σύντομη εκτίμηση του οπλισμού που απαιτείται και κυρίως σε επίπεδο μέτρων ράβδων $\Phi 14$. Αναλυτικότερη μελέτη των απαιτήσεων θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής διερεύνησης για τη βελτιστοποίηση τοπολογίας.

6.6 Ενδεικτική εκτίμηση κόστους

Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα προμέτρησης των υλικών της κάθε κατασκευής. Το σύνολο του σκυροδέματος δίνεται σε όγκο (m^3) και το σύνολο του χάλυβα σε κιλά (kg). Ενδεικτικά παρουσιάζονται από μία αρχική εκτίμηση κόστους για κάθε κατασκευή. Οι τιμές χάλυβα, σκυροδέματος και εργατικών είναι σύγχρονες για τον Ιούνιο 2015.

Ολόσωμη κατασκευή από ωπλισμένο σκυρόδεμα

- Κόστος αγοράς και άντλησης σκυροδέματος C25/30 : 65€/m³
- Κατασκευή ξυλοτύπου σκυροδέματος : 45 €/m³
- Απαιτούμενη ποσότητα σκυροδέματος : 12.23 m³
- ΙΚΑ για εργασία σκυροδέματος : 10 €/m³
- Απαιτούμενο μήκος ράβδων οπλισμού Φ14 B500C : 1108 m
- Βάρος οπλισμού χάλυβα : 1.208 kg/m
- Κόστος αγοράς οπλισμού χάλυβα : 0.75 €/kg
- Κόστος εργασίας οπλισμού χάλυβα : 0.08 €/kg
- ΙΚΑ για εργασία οπλισμού χάλυβα : 0.11 €/kg
- Φ.Π.Α. σκυροδέματος & οπλισμού χάλυβα : 23%

Κόστος αγοράς και άντλησης σκυροδέματος K₁:

$$K_1 = 65 \times 12.23 = 794.95 \text{ €}, \text{ μετά το Φ.Π.Α. έχουμε } K_1 = 1.23 \times 794.95 = 978 \text{ €}$$

Κόστος ξυλοτύπου σκυροδέματος K₂:

$$K_2 = 45 \times 12.23 = 550.35 \text{ €}, \text{ μετά το Φ.Π.Α. έχουμε } K_2 = 1.23 \times 550.35 = 677 \text{ €}$$

Κόστος ΙΚΑ για εργασία σκυροδέματος K₃:

$$K_3 = 10 \times 12.23 = 123 \text{ €},$$

Συνολικό κόστος σκυροδέματος K_{σκυρ}:

$$K_{\text{σκυρ}} = 978 + 677 + 123 = 1778 \text{ €}$$

Συνολικό βάρος χάλυβα B_{χαλ}:

$$B_{\text{χαλ}} = 1.208 \times 1108 = 1339 \text{ kg}$$

Κόστος αγοράς οπλισμού χάλυβα K₄:

$$K_4 = 0.75 \times 1339 = 1004.25 \text{ €}, \text{ μετά το Φ.Π.Α. έχουμε } K_4 = 1.23 \times 1004.25 = 1236 \text{ €}$$

Κόστος εργασίας οπλισμού χάλυβα K₅:

$$K_5 = 0.08 \times 1339 = 108 \text{ €}$$

Κόστος ΙΚΑ για εργασία οπλισμού χάλυβα:

$$K_6 = 0.11 \times 1339 = 148 \text{ €}$$

Συνολικό κόστος οπλισμού χάλυβα K_{χαλ}:

$$K_{\text{χαλ}} = 1236 + 108 + 148 = 1492 \text{ €}$$

Συνολικό κόστος κατασκευής K_{κατασκ}:

$$K_{\text{κατασκ}} = K_{\text{σκυρ}} + K_{\text{χαλ}} = 1778 + 1492 = 3270 \text{ €}, \text{ ή αλλιώς } 3270 / 12.23 = 268 \text{ €/m}^3$$

Ραβδωτή μεταλλική κατασκευή

- Κόστος αγοράς ράβδων χάλυβα S275: 0.75 €/kg
- ΦΠΑ αγοράς ράβδων χάλυβα : 23 %
- Βάρος ράβδου διατομής CHS 355.6 πάχους 25 mm : 204 kg/m
- Βάρος ράβδου διατομής CHS 323.9 πάχους 25 mm : 284 kg/m
- Βάρος ράβδου διατομής CHS 273 πάχους 25 mm : 153 kg/m

-
- Βάρος ράβδου διατομής HEM 300 : 237.92 kg/m
 - Ολικό μήκος ράβδων διατομής CHS 355 : 9.75 m
 - Ολικό μήκος ράβδων διατομής CHS 323.9 : 12.14 m
 - Ολικό μήκος ράβδων διατομής CHS 273 : 5.23 m
 - Ολικό μήκος ράβδων διατομής HEM 300 : 15 m
 - Κόστος εργασίας τοποθέτησης ράβδων χάλυβα : 0.5 €/kg
 - ΙΚΑ για εργασία ράβδων χάλυβα : 0.2 €/kg

Συνολικό βάρος χάλυβα $B_{ολ}$:

$$B_{ολ}=(204 \times 9.75)+(284 \times 12.14)+(153 \times 5.23)+(237.92 \times 15)=8591.24 \text{ kg}$$

Κόστος αγοράς χάλυβα K_1 :

$$K_1=0.75 \times 8591.24=6443.43 \text{ €}, \text{ μετά το Φ.Π.Α. έχουμε}$$

$$K_1=1.23 \times 6443.43=7926 \text{ €}$$

Κόστος εργασίας ράβδων χάλυβα K_2 :

$$K_2=0.5 \times 8591.24=4296 \text{ €}$$

Κόστος ΙΚΑ για εργασία ράβδων χάλυβα K_3 :

$$K_3=0.2 \times 8591.24=1719 \text{ €}$$

Συνολικό κόστος κατασκευής $K_{κατασκ}$:

$$K_{κατασκ}=K_1+K_2+K_3=7926+4296+1719=\mathbf{13941 \text{ €}}.$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΤΕΛΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προτάθηκε μια απλοποιημένη, αλλά ολοκληρωμένη μεθοδολογία για την εφαρμογή βελτιστοποίησης τοπολογίας σε κατασκευές πολιτικού μηχανικού. Η αρχή έγινε με την βελτιστοποίηση 4 απλών φορέων με τη μέθοδο SIMP της βελτιστοποίησης τοπολογίας. Για τη διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκε ο διαθέσιμος στο διαδίκτυο κώδικας SIMP88, γραμμένος σε MATLAB. Πραγματοποιήθηκαν πολλές επαναλήψεις για διάφορες αναλογίες όγκου των κατασκευών και επιλέχθηκαν τελικά 8 προσομοιώματα για τη χρησιμοποίησή τους ως πλαισιακές στηρίξεις στεγάστρου. Αποφασίστηκε τα τέσσερα προσομοιώματα με την μεγαλύτερη αναλογία όγκου να ερμηνευτούν ως ολόσωμες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα και τα υπόλοιπα τέσσερα ως ραβδωτές μεταλλικές κατασκευές. Τα προσομοιώματα, στη συνέχεια, εισάχθηκαν σε σχεδιαστικό περιβάλλον AutoCAD και ερμηνεύτηκαν περαιτέρω ως προς την αποτύπωσή τους. Στο τελικό στάδιο, έγινε εισαγωγή των μοντέλων στο πρόγραμμα στατικής ανάλυσης και ελέγχου SCADA V15 PRO, όπου για απλά κατακόρυφα φορτία, αναλύθηκαν και έγινε διαστασιολόγησή τους.

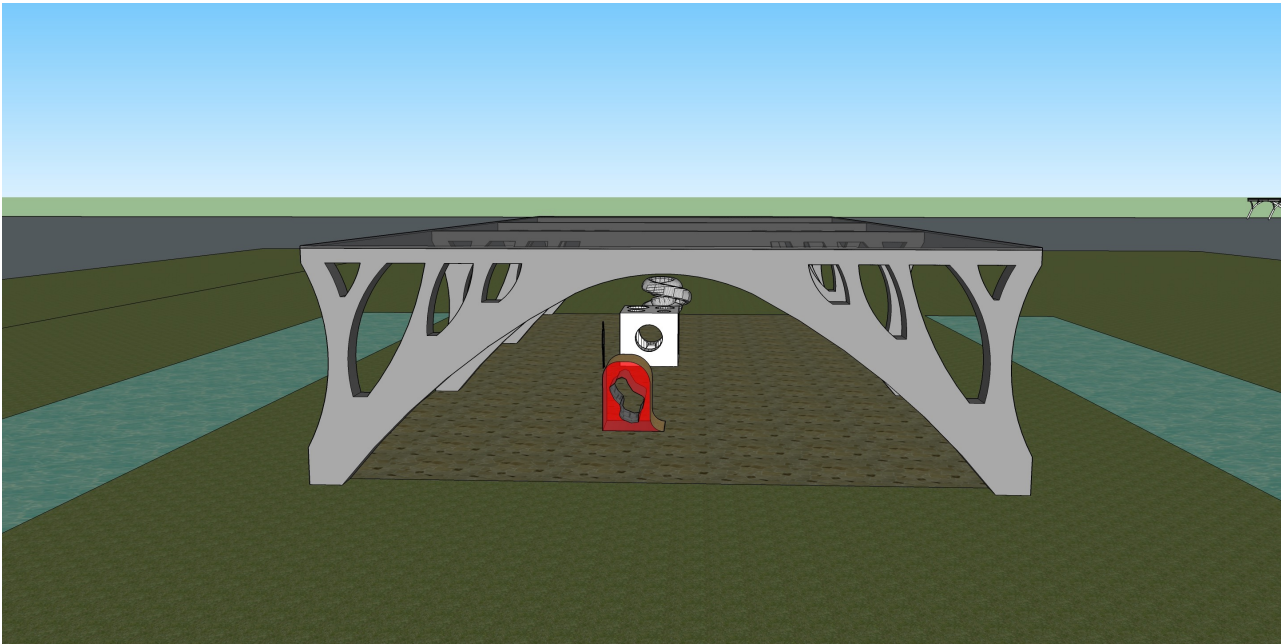
Κύριος στόχος και τελικό συμπέρασμα της διπλωματικής εργασίας είναι η απόδειξη για τη δυνατότητα της εφαρμογής της βελτιστοποίησης τοπολογίας σε απλές κατασκευές πολιτικού μηχανικού. Σε συνεργασία με παράλληλη διπλωματική εργασία [31], η διερεύνηση καταλήγει σε ολοκληρωμένη πρόταση για την υλοποίηση τεσσάρων πλαισιακών στηρίξεων ως ολόσωμων κατασκευών από σκυρόδεμα, ως μεταλλικών ραβδωτών και ως μεικτών από σκυρόδεμα και μεταλλικές ράβδους. Όλες οι μέθοδοι και τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν χρησιμοποιούνται από το μέσο πολιτικό μηχανικό και βρίσκονται οικονομικά στο εμπόριο. Ακόμα και χωρίς τη δυνατότητα χρήσης ακριβού λογισμικού βελτιστοποίησης τοπολογίας, αποδείχτηκε πως είναι εφικτή τελικά η εφαρμογή της σε μικρής κλίμακας κατασκευές. Η μεθοδολογία παρουσιάζει και προτείνει, με πολλές απλοποιητικές παραδοχές, μια πλήρη πορεία για την εφαρμογή αυτή και ταυτόχρονα ανοίγει το δρόμο για μελλοντική διερεύνηση στις επιμέρους διαδικασίες που ακολουθήθηκαν. Δεν αποτελεί ένα πλήρες εγχειρίδιο βελτιστοποίησης τοπολογίας, παρόλα αυτά, περιλαμβάνει όλα τα βήματα που απαιτούνται να πραγματοποιηθούν και αποτελεί ένα πολύ καλό αρχικό βήμα για την περαιτέρω αναζήτηση πάνω στο αντικείμενο. Σαφέστατα, υπάρχουν πολλές επιπλέον κατασκευαστικές λεπτομέρειες που πρέπει να ληφθούν υπόψιν και αρκετά ακόμα κριτήρια που θα μπορούσαν να τεθούν κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Ενδεικτικά, απαιτείται διερεύνηση όσον αφορά τον τρόπο κατασκευής των συγκεκριμένων κατασκευών, καθώς και του οπλισμού τους, αφού δεν αποτελούν συμβατικές κατασκευές. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης τοπολογίας παρουσιάζουν πολλές φορές επαναλαμβανόμενα μοτίβα οπών και οπές με πολύ ιδιαίτερο σχήμα. Ο οπλισμός αυτών των κατασκευών απαιτείται να αντιμετωπιστεί με ιδιαίτερη μελέτη για την στατική επάρκεια και συμπεριφορά τους. Επίσης, χρειάζεται να εξεταστεί η ανάγκη για χρήση γεωμετρικών κριτηρίων από αρχιτέκτονα για το καλύτερο αισθητικό αποτέλεσμα, εφόσον τα προσομοιώματα που μελετώνται προορίζονται για κατασκευή στην πραγματικότητα. Η μέθοδος SIMP που χρησιμοποιήθηκε, βελτιστοποιεί το φορέα μέσα από την πυκνότητα της κατασκευής και επιλέχθηκε για την ευκολία στη χρήση της. Η δυνατότητα παρέμβασης πάνω στο αισθητικό μέρος της μελέτης είναι συγκεκριμένη και περιορίζεται στο κομμάτι της ερμηνείας των εξαγόμενων αποτελεσμάτων. Υπάρχουν άλλες μέθοδοι διαθέσιμες, για παράδειγμα η μέθοδος level-set, στις οποίες είναι δυνατή η εισαγωγή αισθητικών-γεωμετρικών κριτηρίων από αρχιτέκτονα. Αυτές οι μέθοδοι βελτιστοποίησης εμπεριέχουν πιο σύνθετες διαδικασίες, ενώ και ο υπολογιστικός φόρτος είναι σαφέστερα μεγαλύτερος. Η έννοια του βέλτιστου σχεδιασμού μιας κατασκευής και πιο συγκεκριμένα της τοπολογίας αυτής δεν θα μπορούσε να μην περιέχει και την έννοια της αισθητικής βελτιστοποίησης. Για αυτό το λόγο, ιδιαίτερο ενδιαφέρον για μελλοντική διερεύνηση θα είχε η μελέτη των ίδιων ή παρόμοιων προσομοιωμάτων με κάποια μέθοδο διαφορετική της SIMP και η σύγκριση των τελικών αποτελεσμάτων. Τέλος, ιδιαίτερος ενδιαφέρον αντικείμενο μελλοντικής διερεύνησης αποτελεί η τρισδιάστατη αποτύπωση και εκτύπωση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης, διαδικασία που εκτιμάται πως θα κατακτήσει μεγάλο ποσοστό της αγοράς στις μεθόδους κατασκευής στο μέλλον. Στο εμπόριο διατίθενται κώδικες για τρισδιάστατη βελτιστοποίηση, αλλά με περιορισμένες υπολογιστικές δυνατότητες. Το υψηλό κόστος και η τεχνολογική καινοτομία της τρισδιάστατης εκτύπωσης δεν έχουν επιτρέψει τη μαζική χρησιμοποίησή τους στην πραγματικότητα, παρά μόνο σε ερευνητικό επίπεδο. Στο μέλλον αναμένονται αύξηση στην χρησιμοποίηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στις κατασκευές και περαιτέρω διερεύνηση της σύνδεσης βελτιστοποίησης τοπολογίας και καινοτόμων μεθόδων κατασκευής.

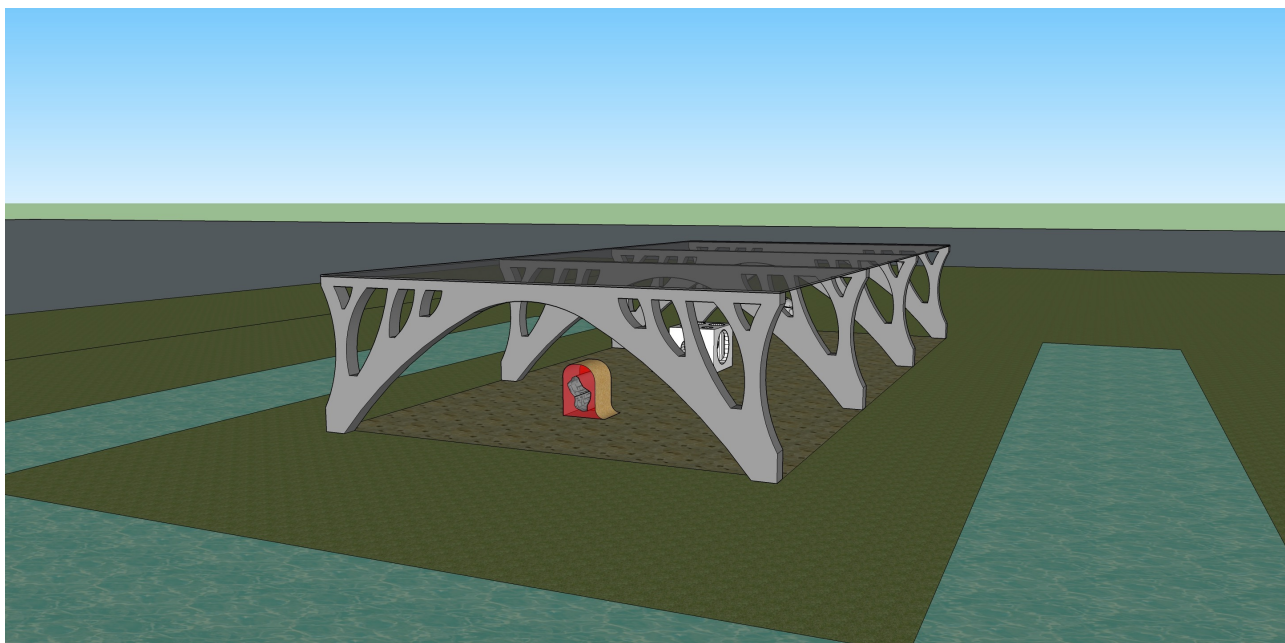
Κλείνοντας, παρακάτω παρατίθενται δύο ολοκληρωμένες προτάσεις υλοποίησης για τα προσομοιώματα που παρουσιάζονται αναλυτικά στο τεύχος της διπλωματικής εργασίας. Για να αποτυπωθεί η χρησιμοποίηση των φορέων ως στηρίξεις στεγάστρου υπαίθριου εκθεσιακού χώρου, χρησιμοποιήθηκε το δωρεάν λογισμικό SketchUp που διατίθεται από την Google. Με τη χρήση του προγράμματος αυτού, ήταν δυνατή η εισαγωγή των σχεδίων που δημιουργήθηκαν και η επεξεργασία τους με απλές εντολές που ακολουθούν τη λογική του AUTOCAD. Παρουσιάζονται οι πλαισιακές στηρίξεις όπως αυτές μελετήθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια με απλή επεξεργασία του περιβάλλοντος χώρου και του υλικού του στεγάστρου που χρησιμοποιήθηκε. Το αποτέλεσμα είναι μια ολοκληρωμένη τρισδιάστατη απεικόνιση του φορέα που μελετήθηκε, ξεκινώντας από έναν απλό κώδικα βελτιστοποίησης.

7.2 Τελικές προτάσεις

Model_A

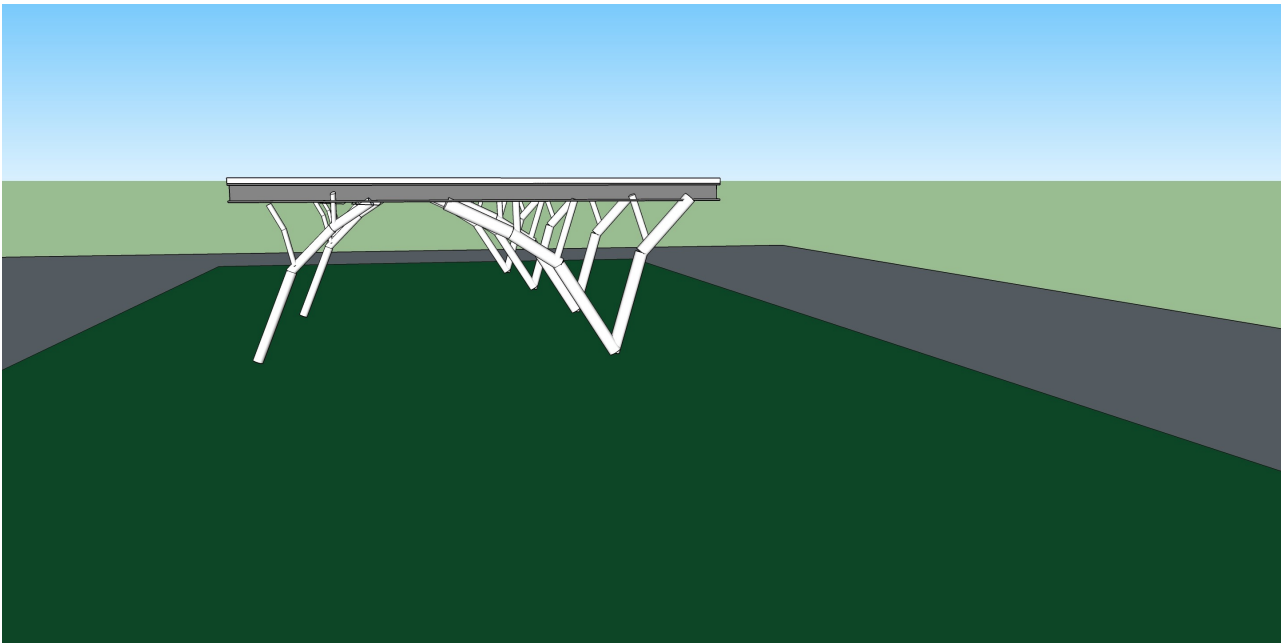


Σχ. 7.1 : Πρόσση τελικής πρότασης Model_A

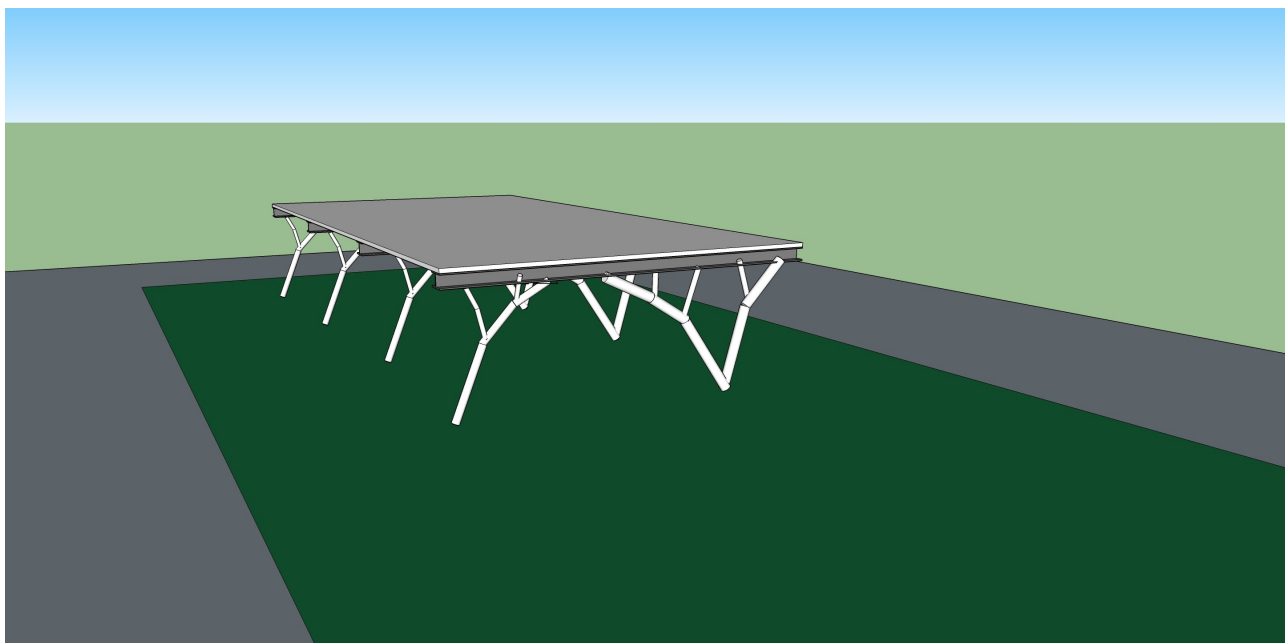


Σχ. 7.2 : Προοπτική απεικόνιση τελικής πρότασης Model_A

Model_B



Σχ. 7.1 : Πρόσοψη τελικής πρότασης Model_B



Σχ. 7.2 : Προοπτική απεικόνιση τελικής πρότασης Model_B

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. N. Λαγαρός (2000) - Βελτιστοποίηση κατασκευών με χρήση εξελικτικών αλγορίθμων και νευρωνικών δικτύων, ΕΜΠ
2. Γ. Μιχαηλίδης (2014) - Manufacturing constraints and multi-phase shape and topology optimization via a level-set method.
3. Μ. Καρλαύτης, Ν. Λαγαρός (2010) - Επιχειρησιακή έρευνα και βελτιστοποίηση για μηχανικούς.
4. M. Bendsoe, O. Sigmund (2004) - Topology optimization - Theory, methods and applications.
5. S. Smith (2008) - Engineering sidra trees.
6. O. Sigmund, M. Bendsoe - Topology optimization : from airplanes to nano-optics.
7. T. Lewinski, S. Czarnecki, G. Dzierzanowski, and T. Sokol (2013) - Topology optimization in structural mechanics
8. G. Rozvany (2008) - A critical review of established methods of structural topology optimization.
9. X. Guo, W. Zhang, M. Wang, P. Wei (2011) - Stress-related topology optimization via level set approach.
10. R. Oviedo, S. Gutierrez, H. Santa-Maria (2011) - Experimental evaluation of optimized strut-and-tie models for a dapped beam.
11. O. Amir, O. Sigmund (2012) - Reinforcement layout design for concrete structures based on continuum damage and truss topology optimization.
12. O. Amir (2012) - A topology optimization procedure for reinforced concrete structures.
13. D. Lee, C. Yang, U. Starossek (2012) - Topology design of optimizing material arrangements of beam-to-column connection frames.
14. Y. Luo, M. Wang, M. Zhou, Z. Deng (2012) - Optimal topology design of steel-concrete composite structures under stiffness and strength constraints.
15. K. Tsavdaridis, J. Kingman, V. Toropov (2013) - Structural topology optimization study and novel perforated beams.
16. L. Stromberg, A. Beghini, W. Baker, G. Paulino (2011) - Topology optimization for braced frames : combining continuum and beam/column elements.
17. M. Sundaram, G. Ananthasuresh (2009) - Gustave Eiffel and his Optimal Structures.
18. P. Dombernowsky, A. Sondergaard (2009) - Three- dimensional topology optimization in architectural and structural design of concrete structures.
19. O. Sigmund (2001) - A 99 line topology optimization code written in MATLAB.
20. E. Andreassen, A. Clausen, M. Schevenels, B. Lazarov, O. Sigmund (2010) - Efficient topology optimization in MATLAB using 88 lines of code.
21. K. Liu, A. Tovar (2014) - An efficient 3-D topology optimization code written in MATLAB.
22. F. Murat and L. Tartar. (1985) - Calcul des variations et homogénéisation. Les méthodes de l'homogénéisation: théorie et applications en physique, (57):319-369,

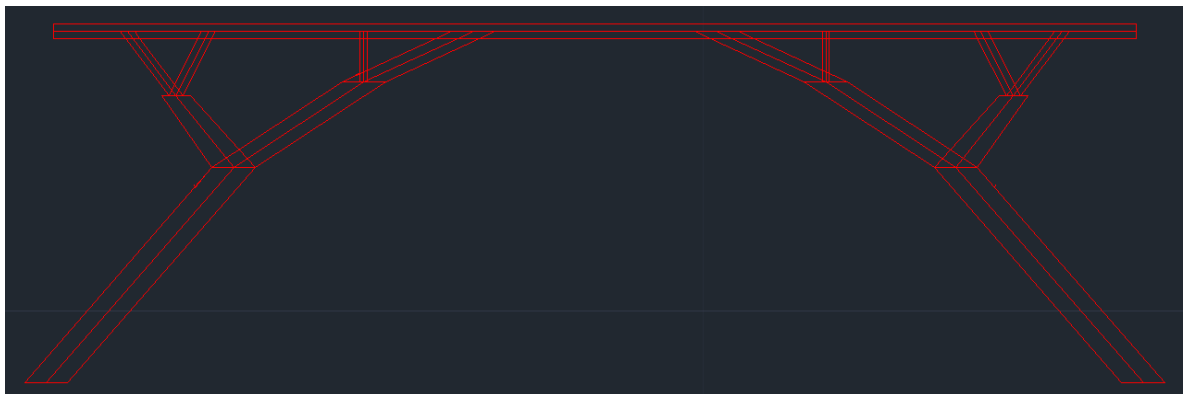
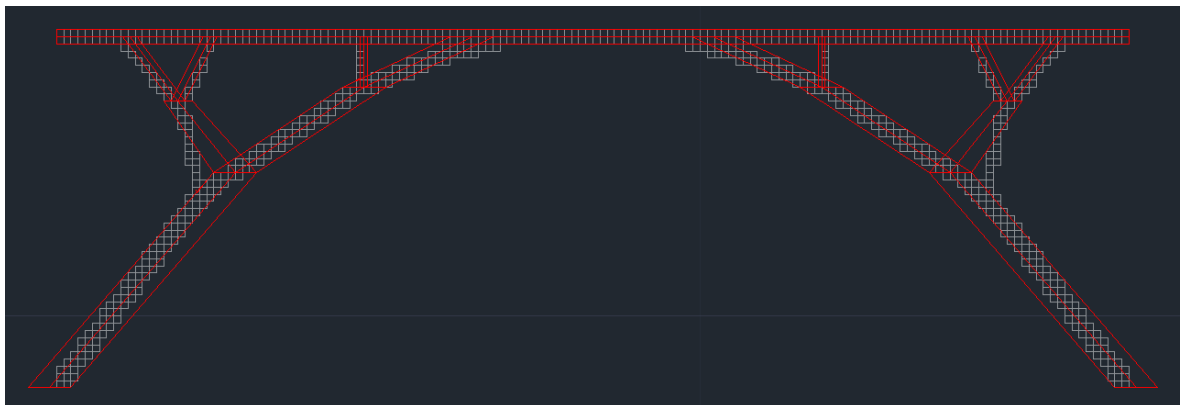
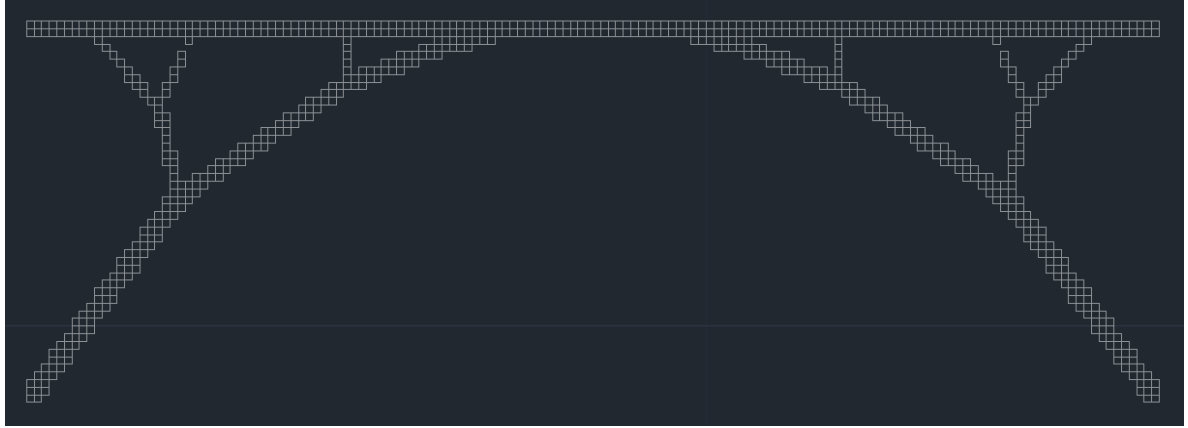
-
23. G. Allaire, F. Jouve, and A.M. Toader. (2004) - Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method. *Journal of computational physics*, 194(1): 363-393.
 24. M.Y. Wang, X. Wang, and D. Guo. (2003) - A level set method for structural topology optimization. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 192(1): 227-246.
 25. G. Allaire. (2002) - Shape optimization by the homogenization method, volume 146. Springer.
 26. Blaise Bourdin. (2001) - Filters in topology optimization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 50(9):2143-2158,
 27. Sigmund, O. & Petersson, J. (1998). - Numerical instabilities in topology optimization: A survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima, *Structural Optimization* 16(1): 68-75.
 28. M.P. Bendsoe and N. Kikuchi. (1988) - Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 71(2):197-224.
 29. Πλεύρης Ε. (2001) - Βέλτιστος σχεδιασμός κατασκευών με πολλαπλά κριτήρια με χρήση στρατηγικών εξέλιξης, ΕΜΠ, Αθήνα
 30. Bakas A. (2011) – Optimum design of reinforced concrete buildings, NTUA, Athens
 31. Μαργαρίτης Στέφανος (2015) – Βελτιστοποίηση τοπολογίας σε κατασκευές πολιτικού μηχανικού: ερμηνεία με μικτούς φορείς, ΕΜΠ
 32. Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης - Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζεται η τελική αποτύπωση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης για Model_A $\text{volfrac}=0.1$, Model_B $\text{volfrac}=0.25$, Model_C $\text{volfrac}=0.10$ & $\text{volfrac}=0.30$, Model_D $\text{volfrac}=0.10$ & $\text{volfrac}=0.20$

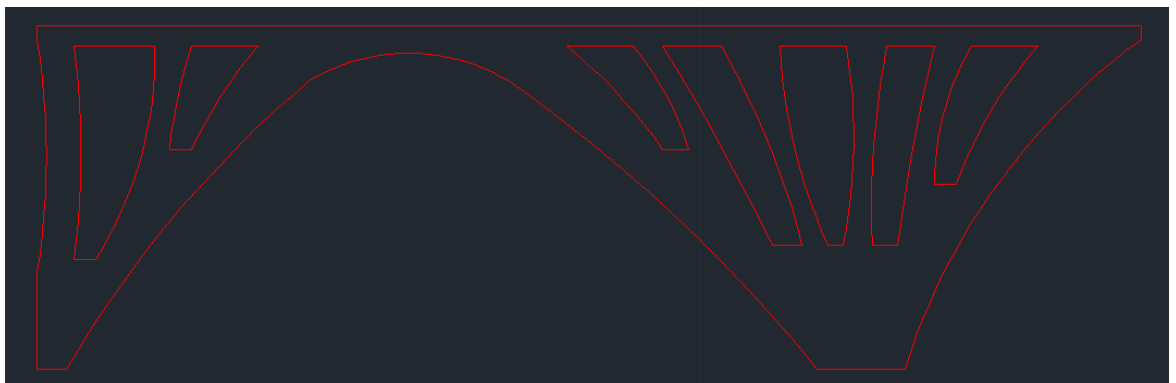
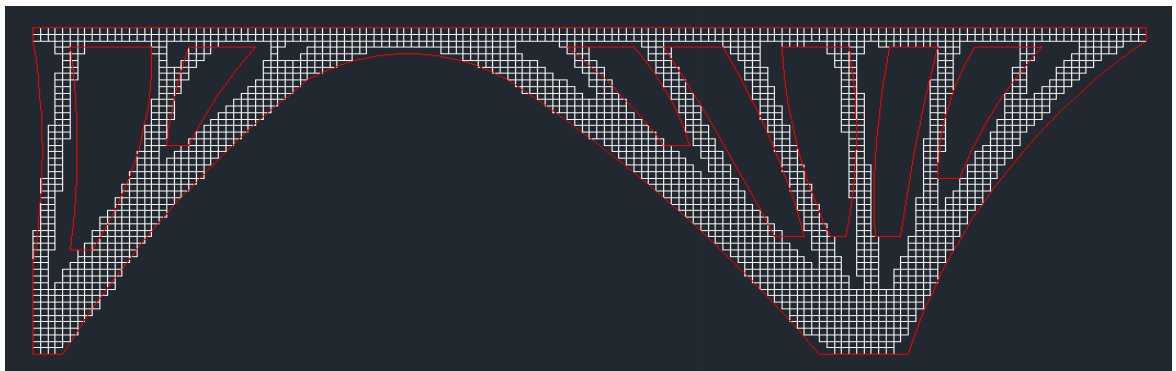
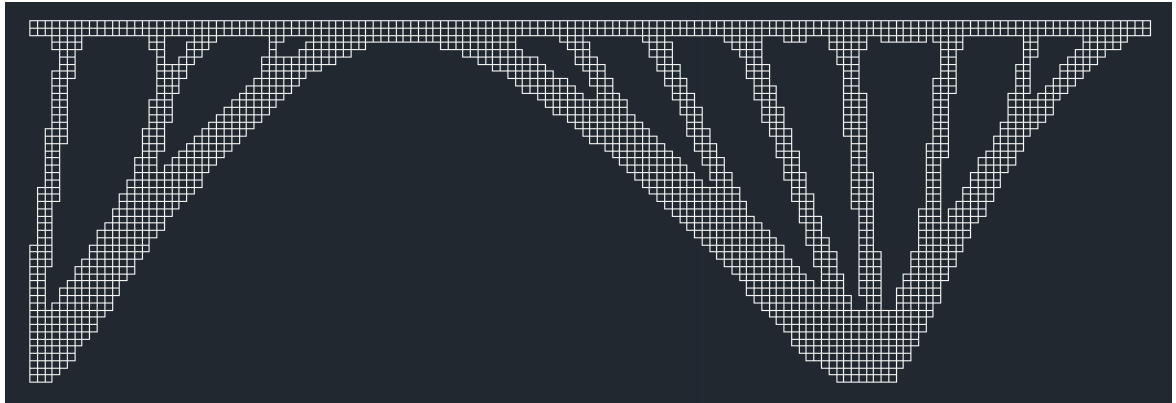
Model_A volfrac=0.10

(Εισαγωγή προσομοιώματος από MATLAB σε AutoCAD – ερμηνεία αποτελέσματος βελτιστοποίησης – τελική μορφή αποτύπωσης)



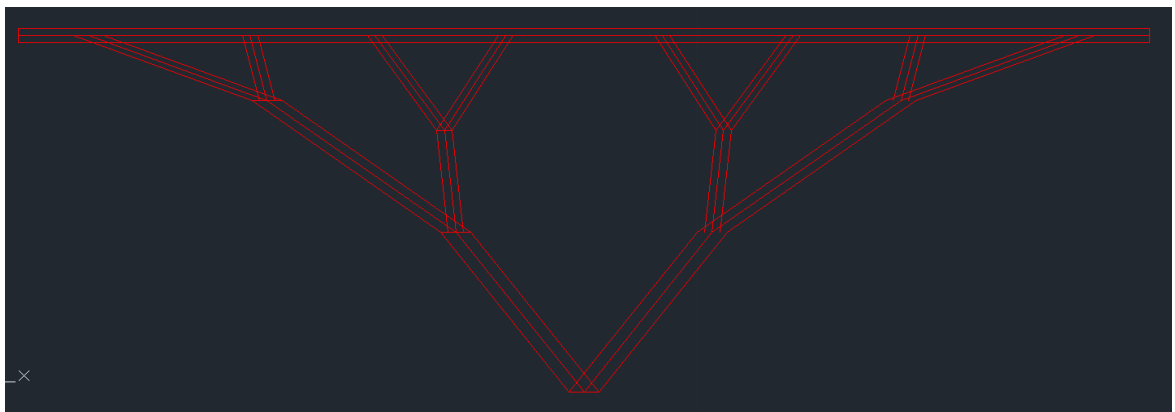
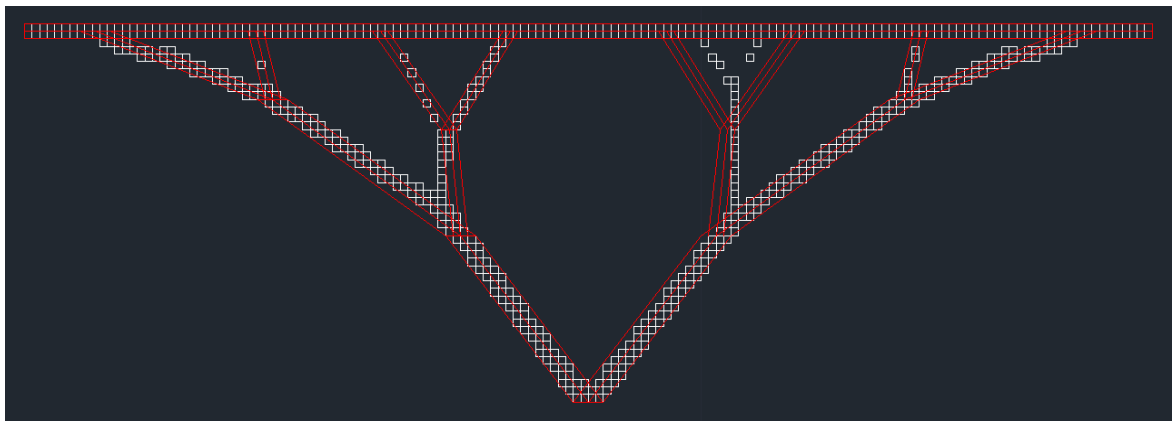
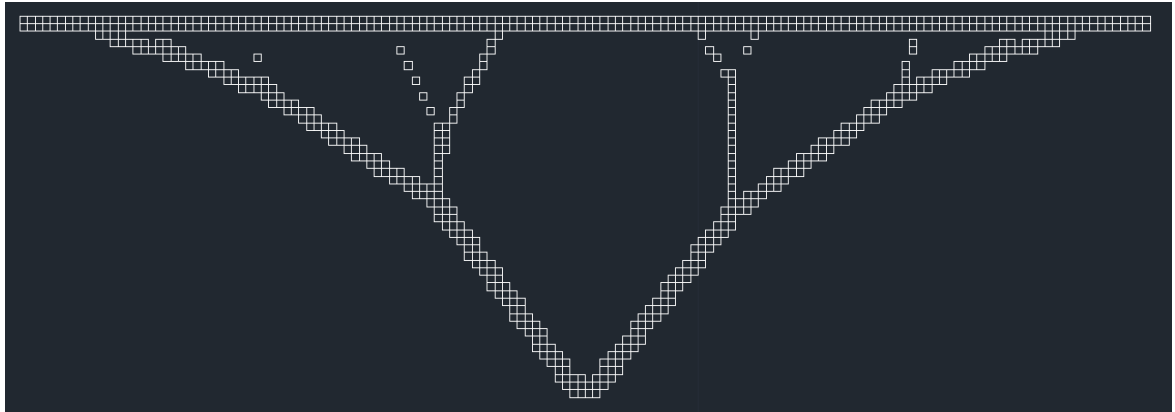
Model_B volfrac=0.25

(Εισαγωγή προσομοιώματος από MATLAB σε AutoCAD – ερμηνεία αποτελέσματος βελτιστοποίησης – τελική μορφή αποτύπωσης)



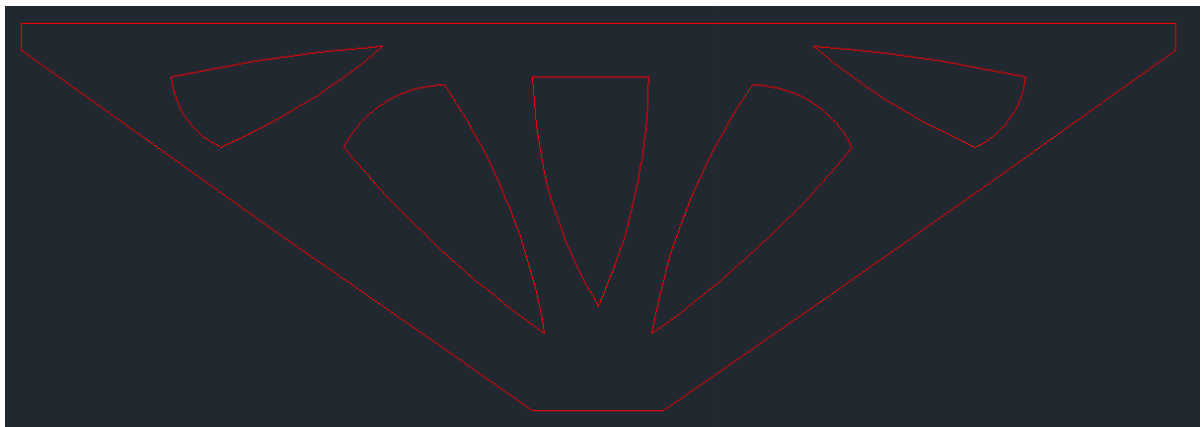
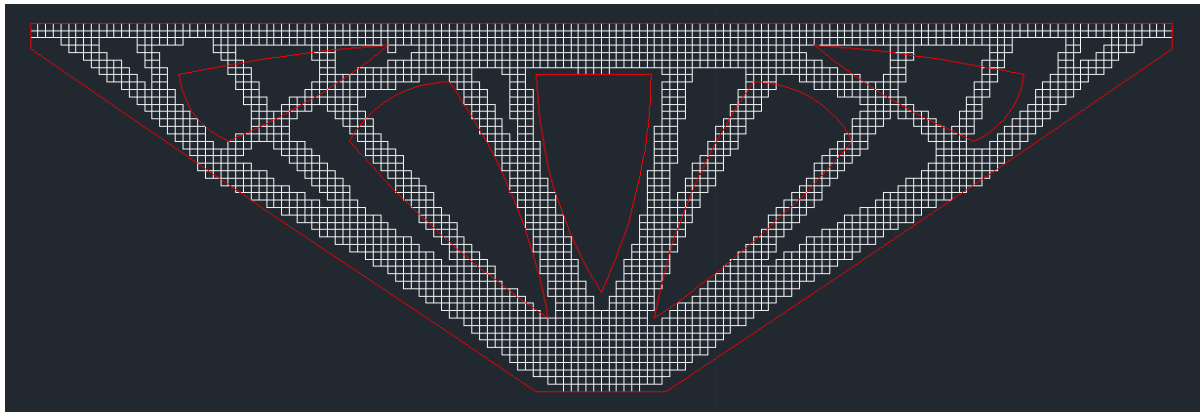
Model_C volfrac=0.10

(Εισαγωγή προσομοιώματος από MATLAB σε AutoCAD – ερμηνεία αποτελέσματος βελτιστοποίησης – τελική μορφή αποτύπωσης)



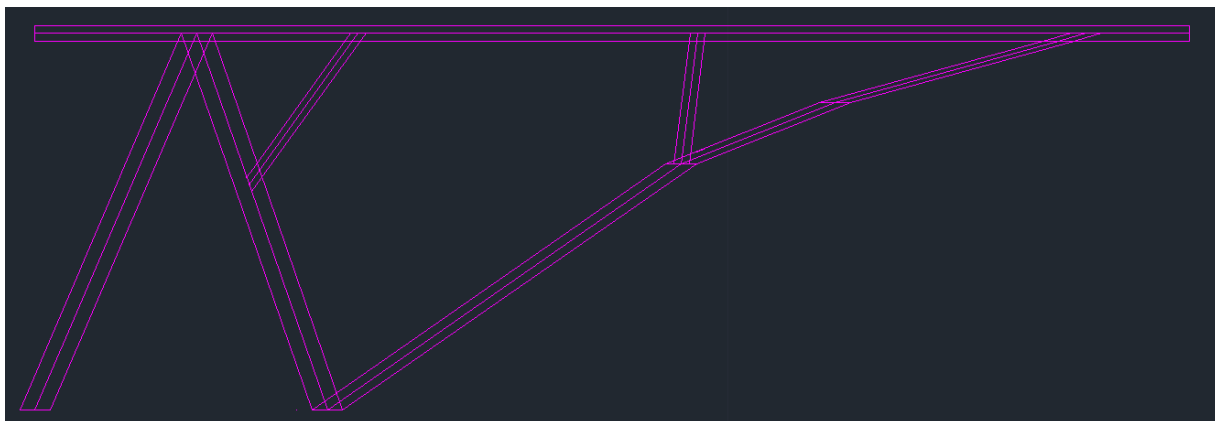
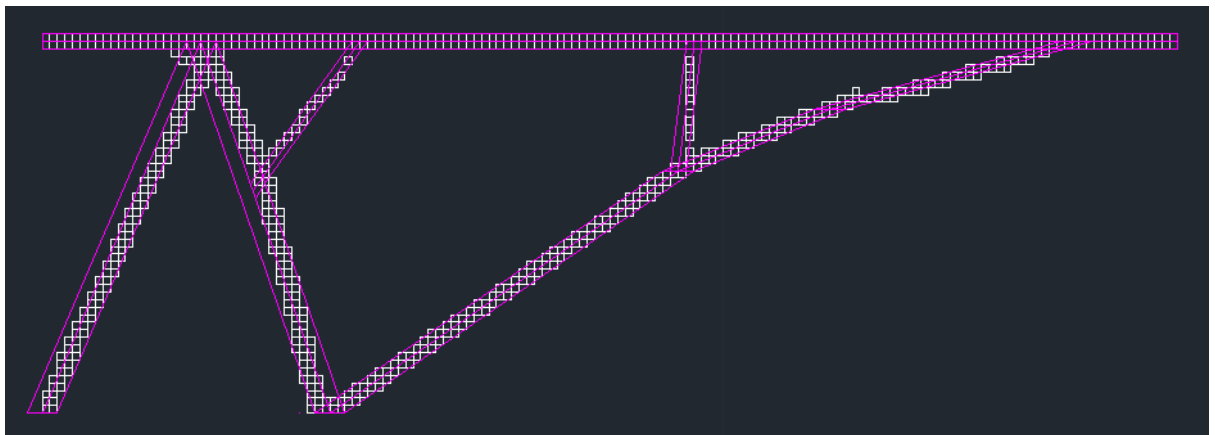
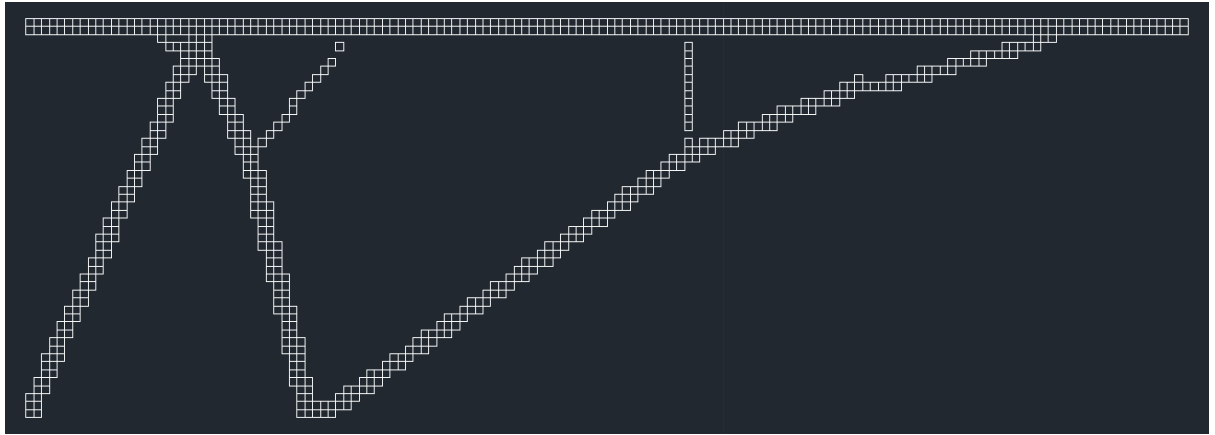
Model_C volfrac=0.30

(Εισαγωγή προσομοιώματος από MATLAB σε AutoCAD – ερμηνεία αποτελέσματος βελτιστοποίησης – τελική μορφή αποτύπωσης)



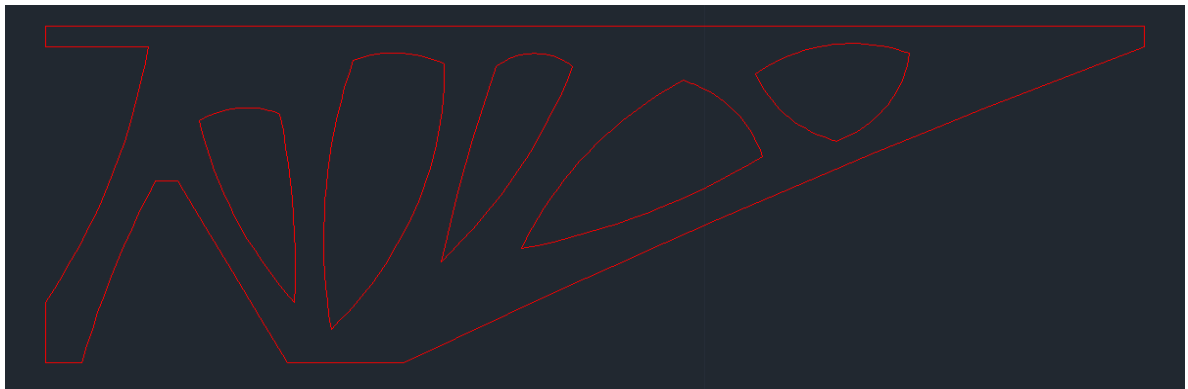
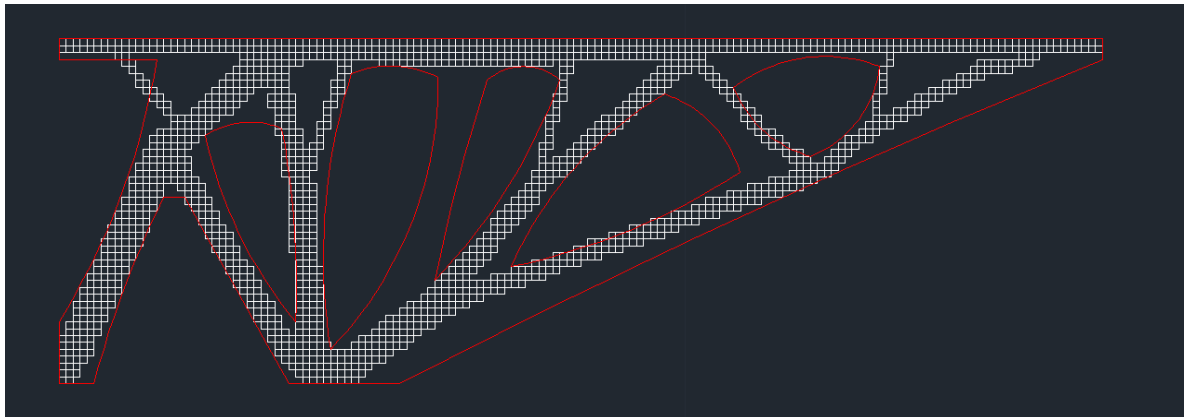
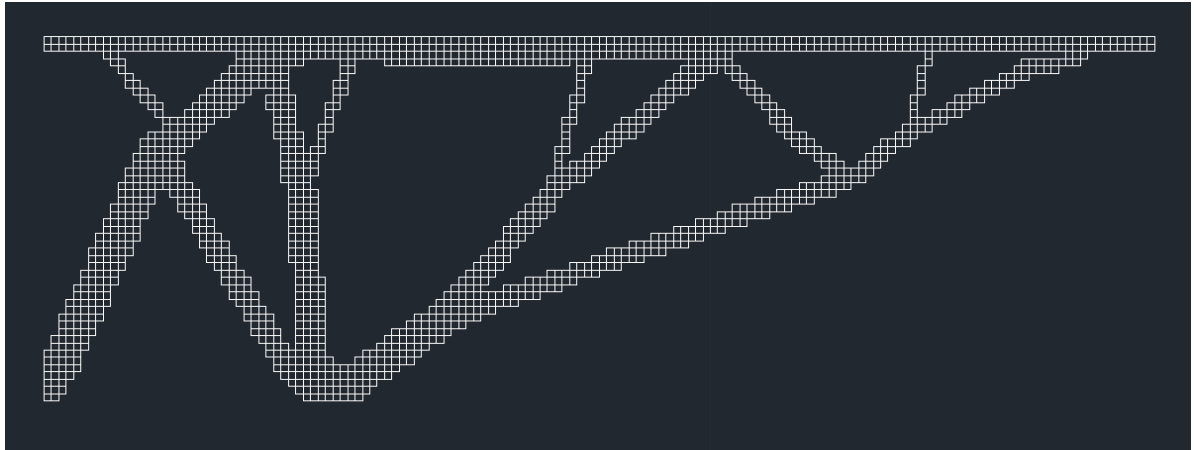
Model_D volfrac=0.10

(Εισαγωγή προσομιώματος από MATLAB σε AutoCAD – ερμηνεία αποτελέσματος βελτιστοποίησης – τελική μορφή αποτύπωσης)



Model_D volfrac=0.20

(Εισαγωγή προσομοιώματος από MATLAB σε AutoCAD – ερμηνεία αποτελέσματος βελτιστοποίησης – τελική μορφή αποτύπωσης)

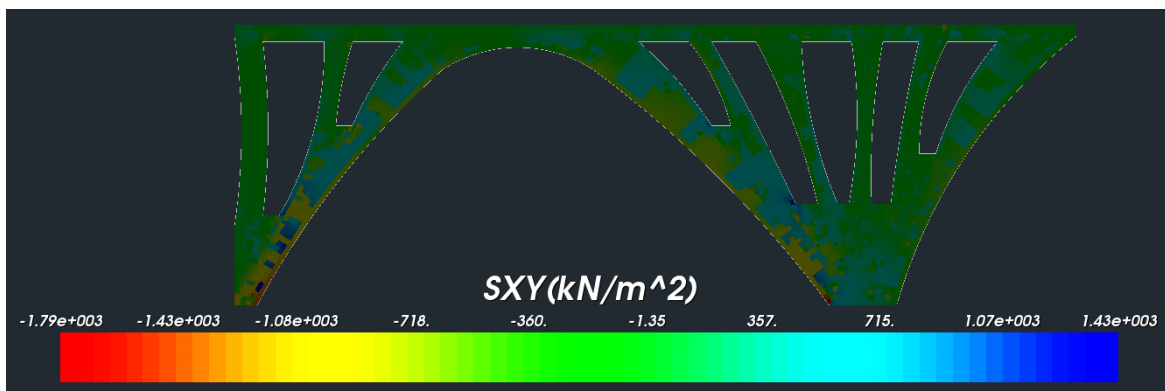
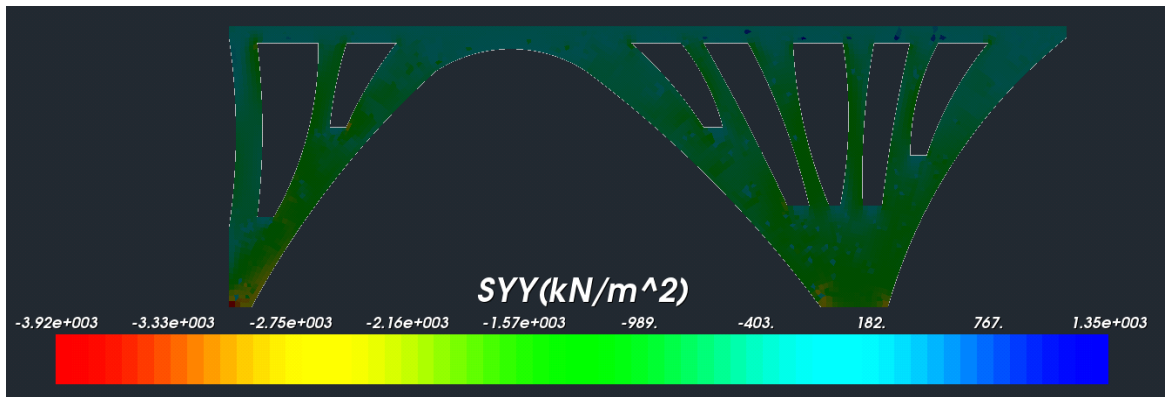
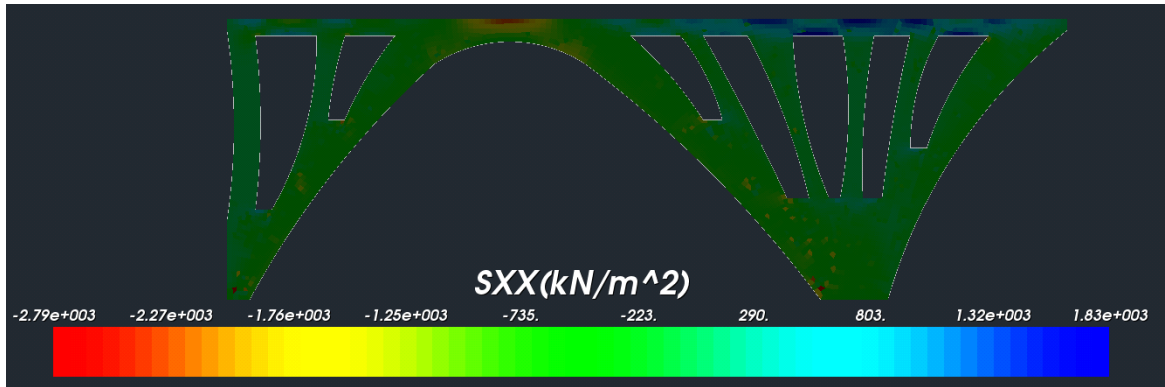


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

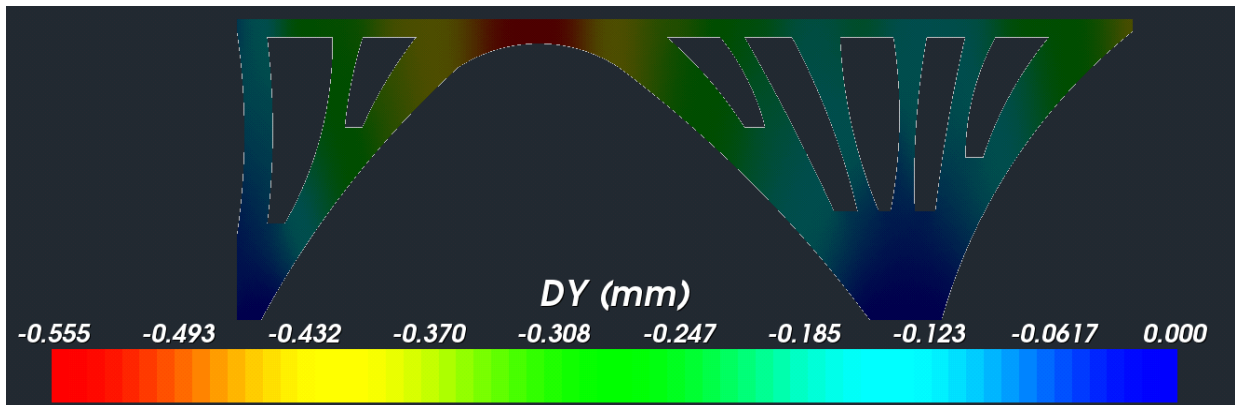
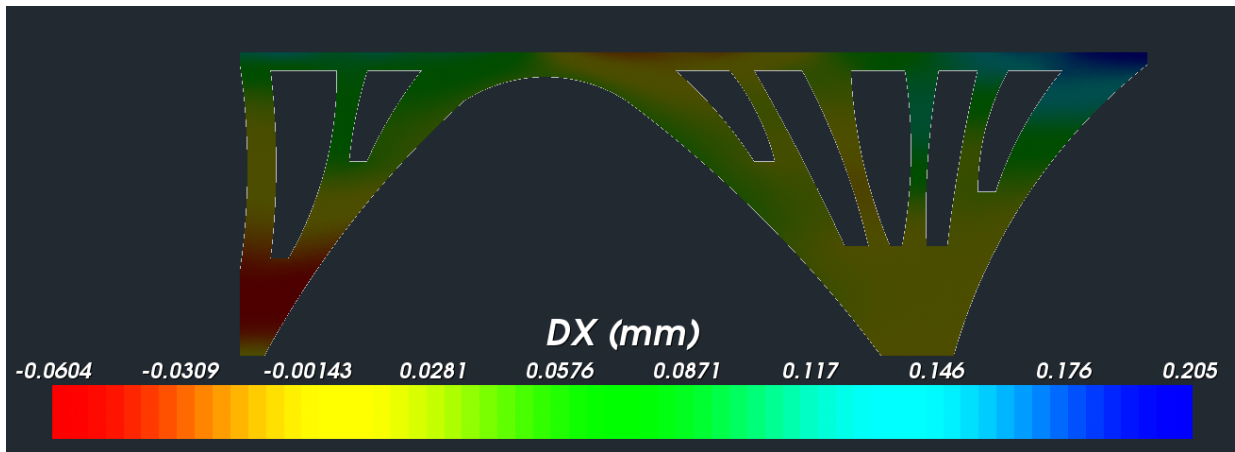
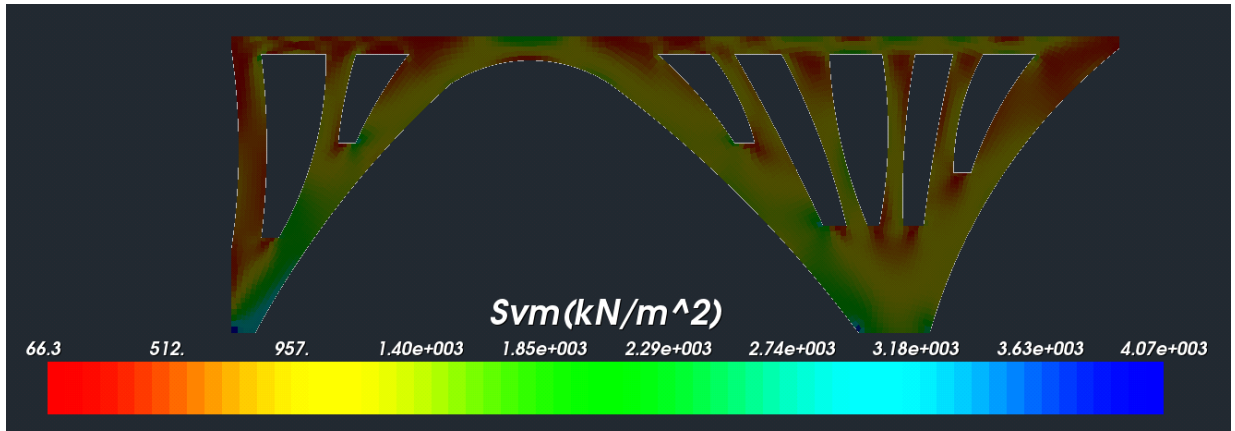
Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα περιβάλλουσας στατικής ανάλυσης για ολόσωμες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα Model_B $\text{volfrac}=0.25$, Model_C $\text{volfrac}=0.30$ και Model_D $\text{volfrac}=0.20$

Model_B volfrac=0.10

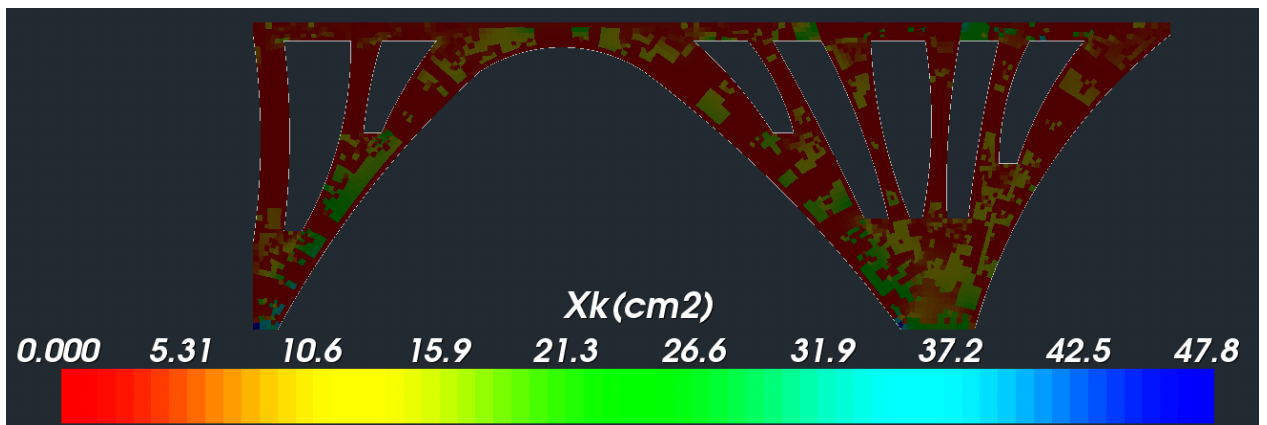
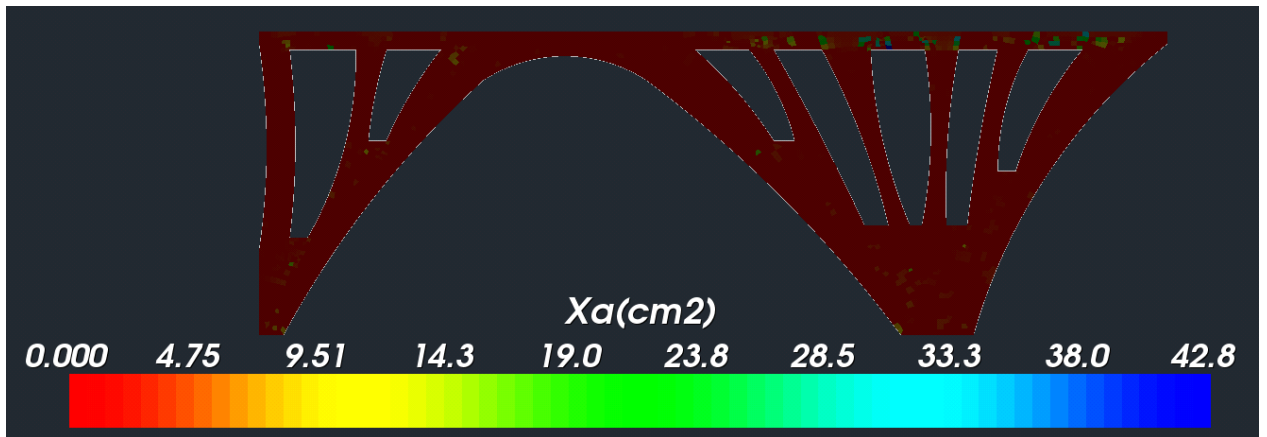
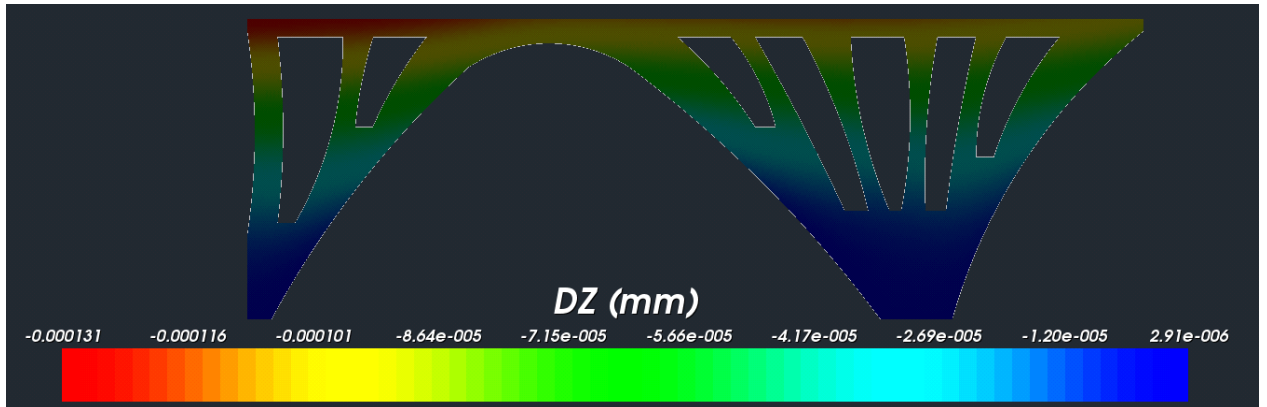
(περιβάλλουσα αποτελεσμάτων των
συνδυασμών όλων των φορτίσεων που επιλέχθηκαν)



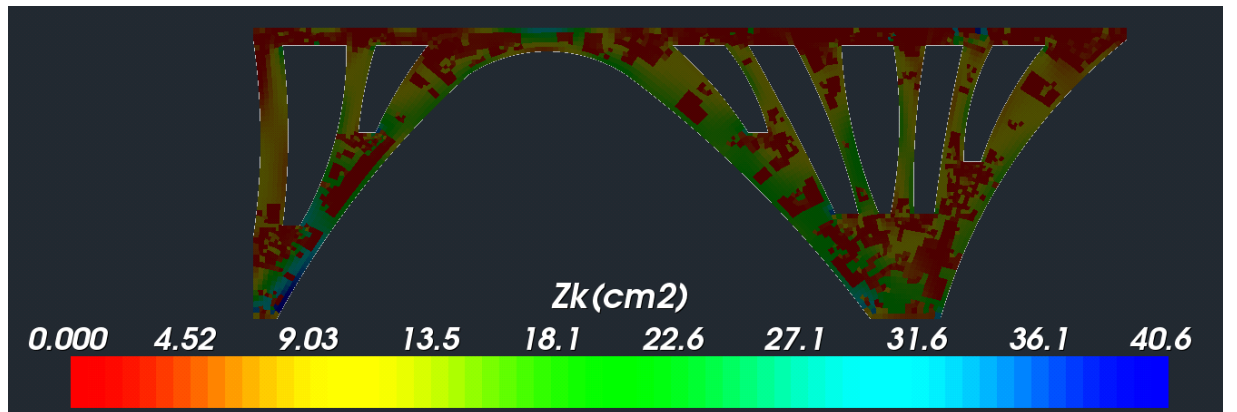
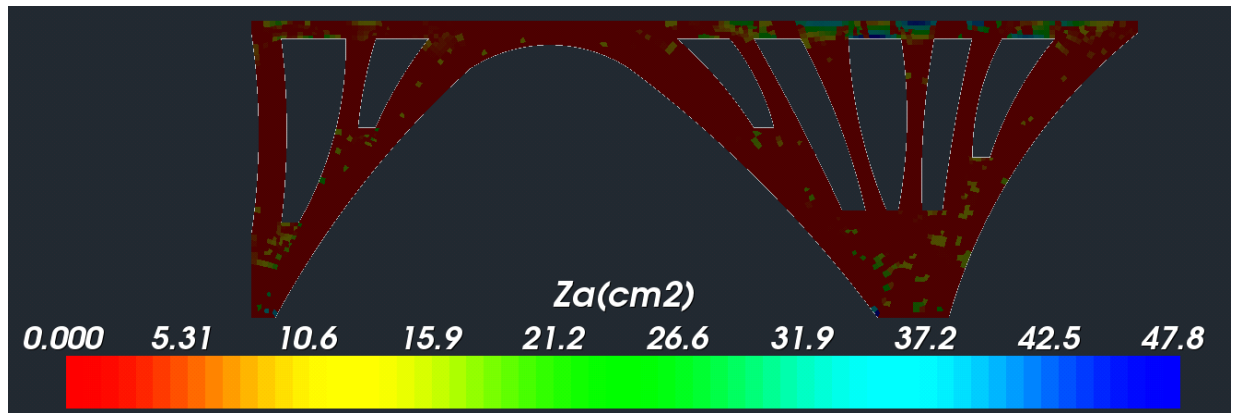
Model_B volfrac=0.25



Model_B volfrac=0.25

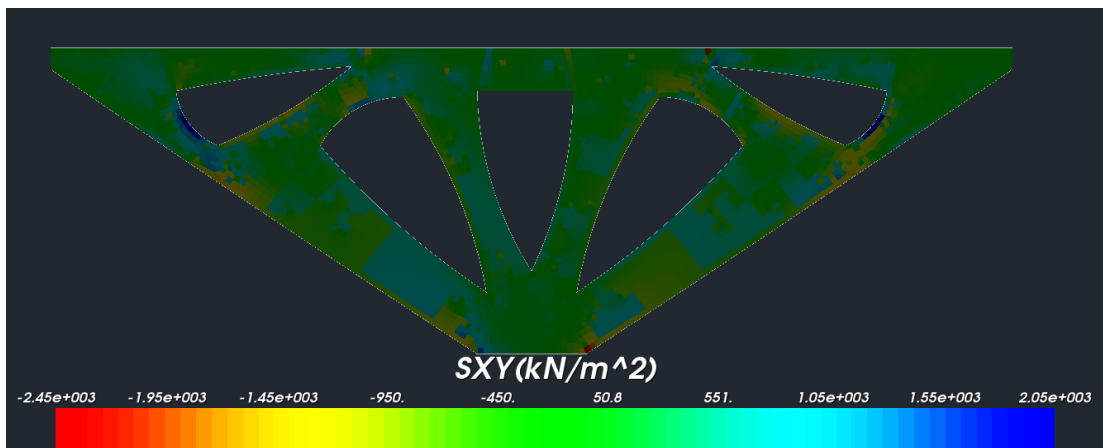
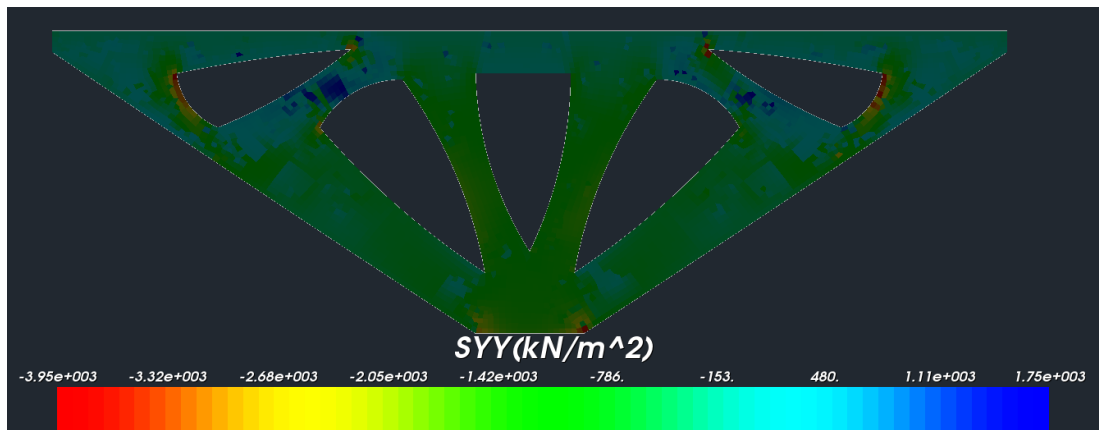
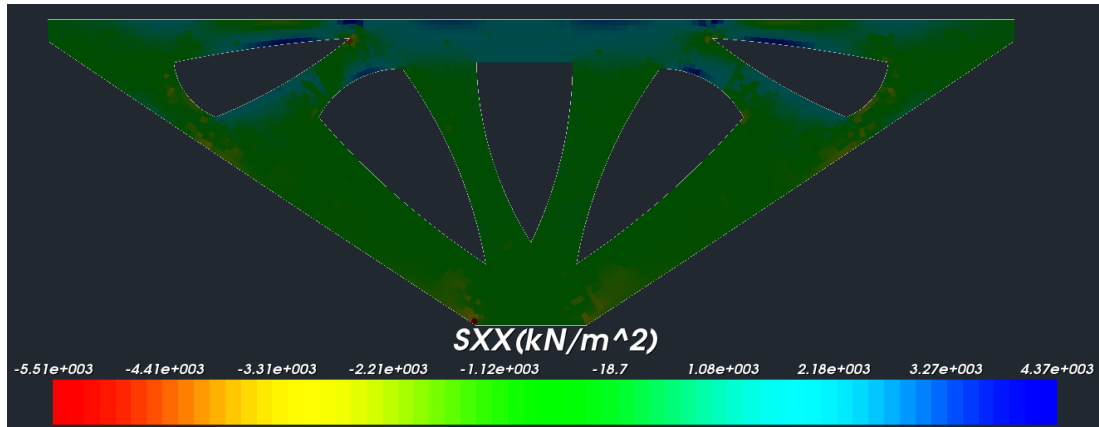


Model_B volfrac=0.25

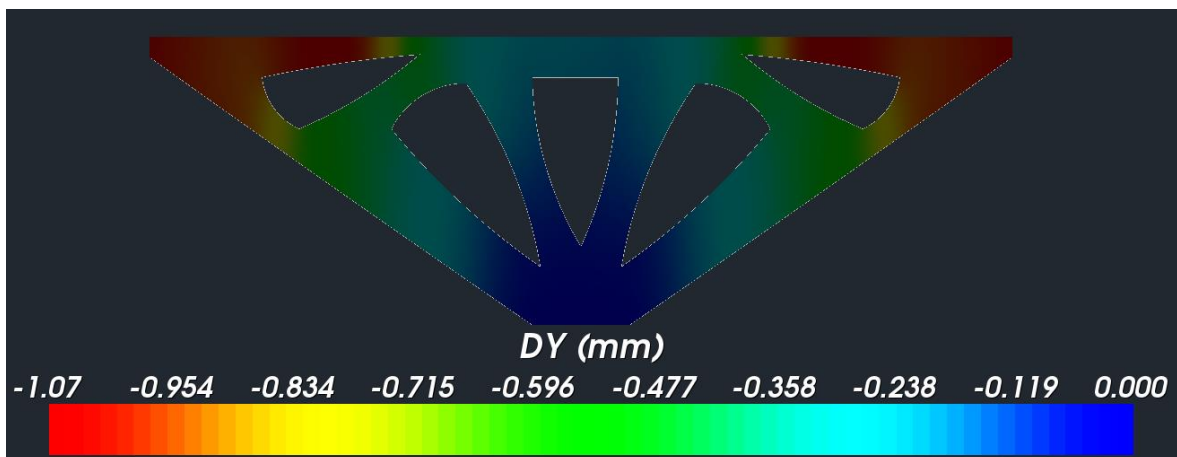
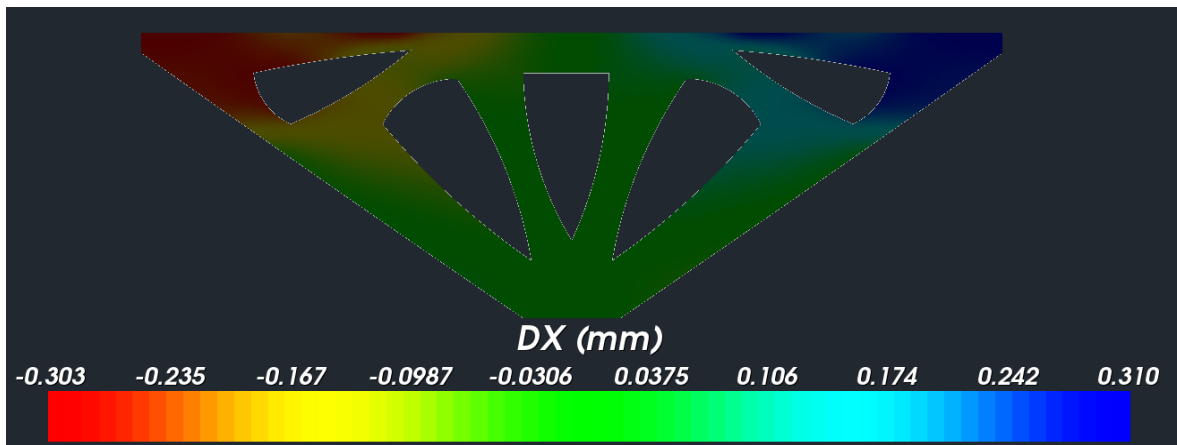
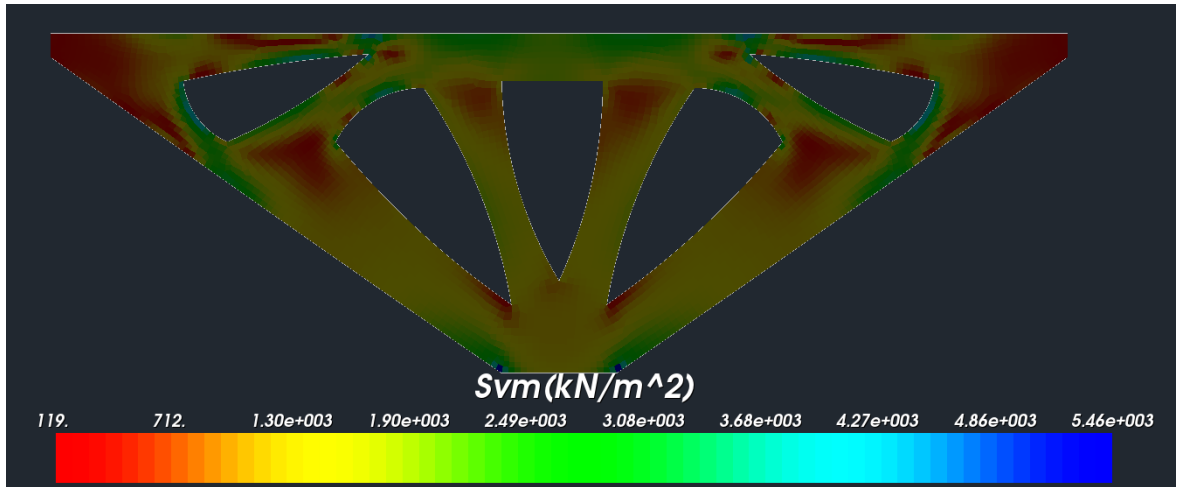


Model_C volfrac=0.30

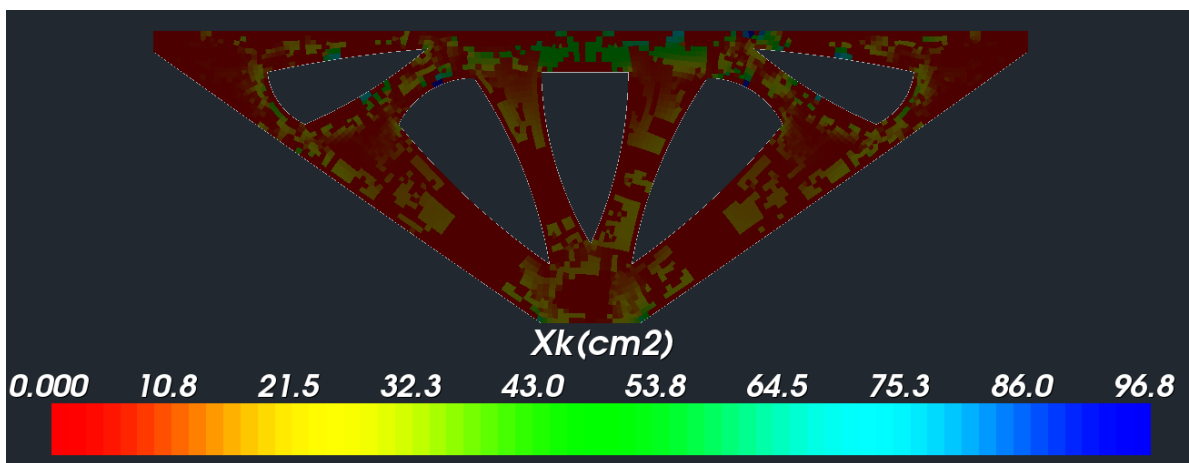
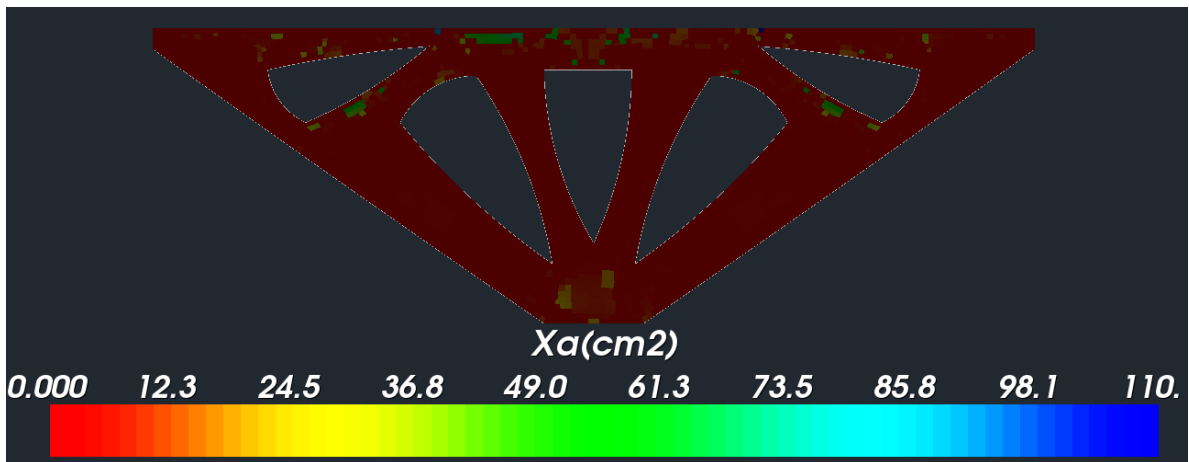
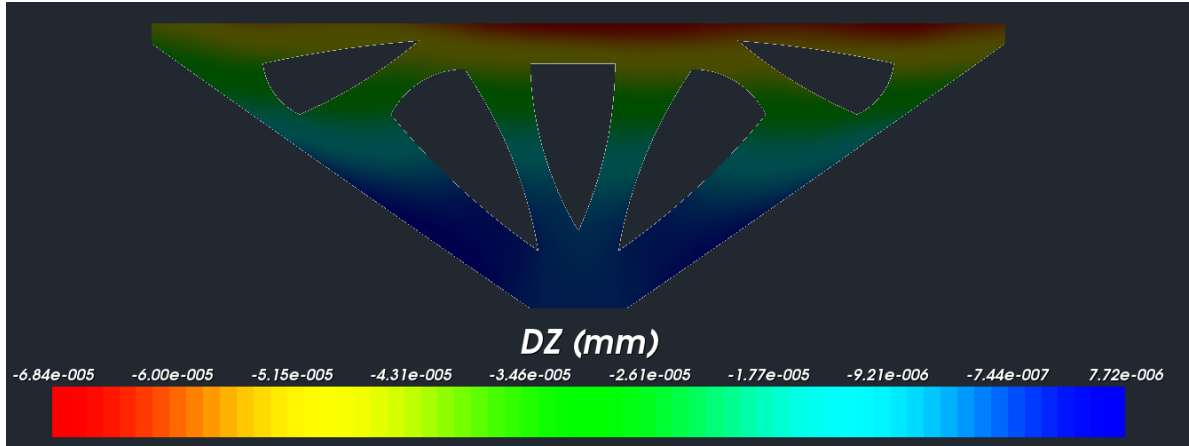
(περιβάλλουσα αποτελεσμάτων των
συνδυασμών όλων των φορτίσεων που επιλέχθηκαν)



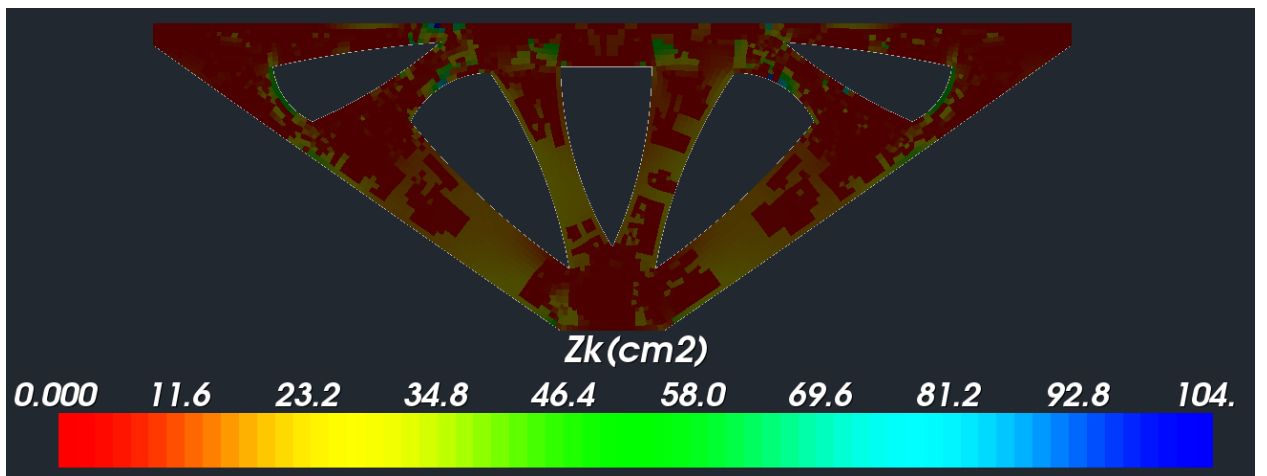
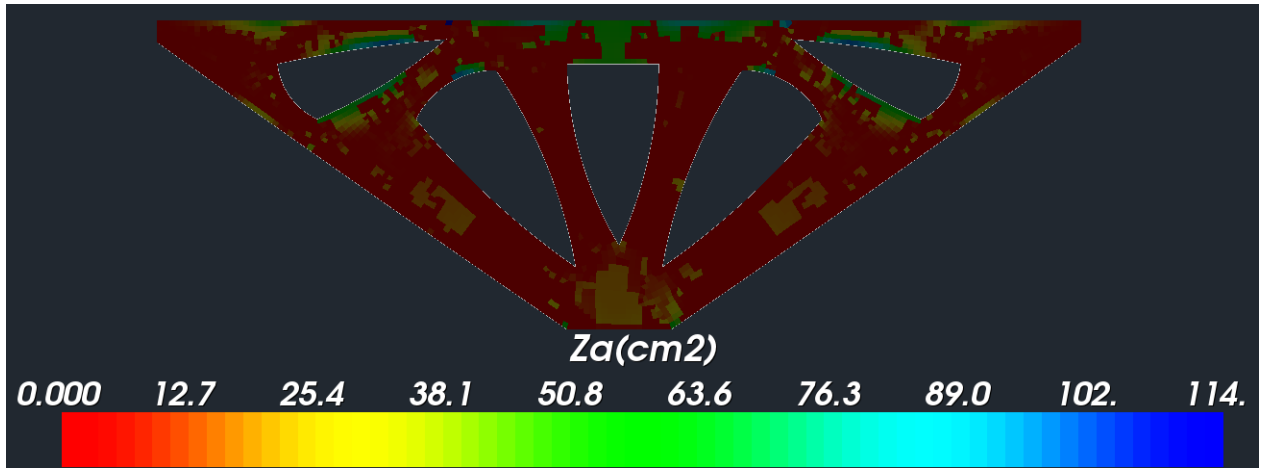
Model_C volfrac=0.30



Model_C volfrac=0.30

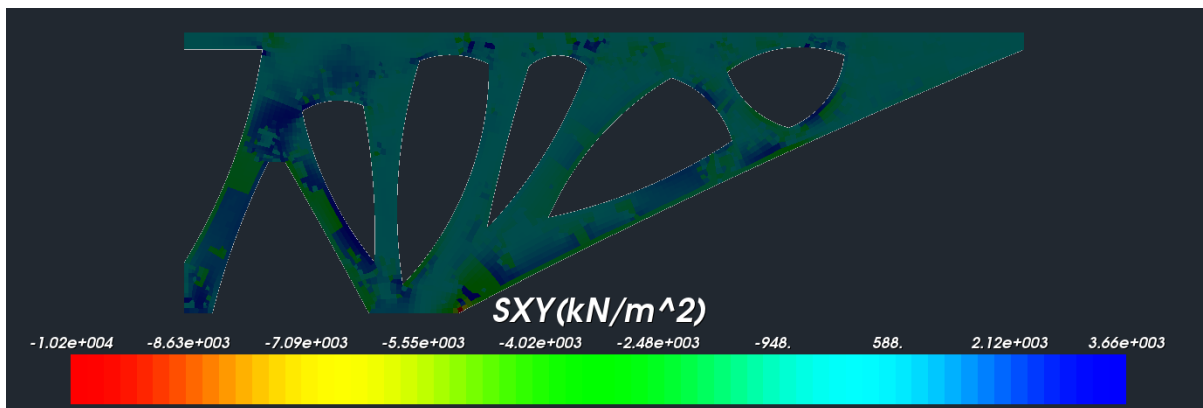
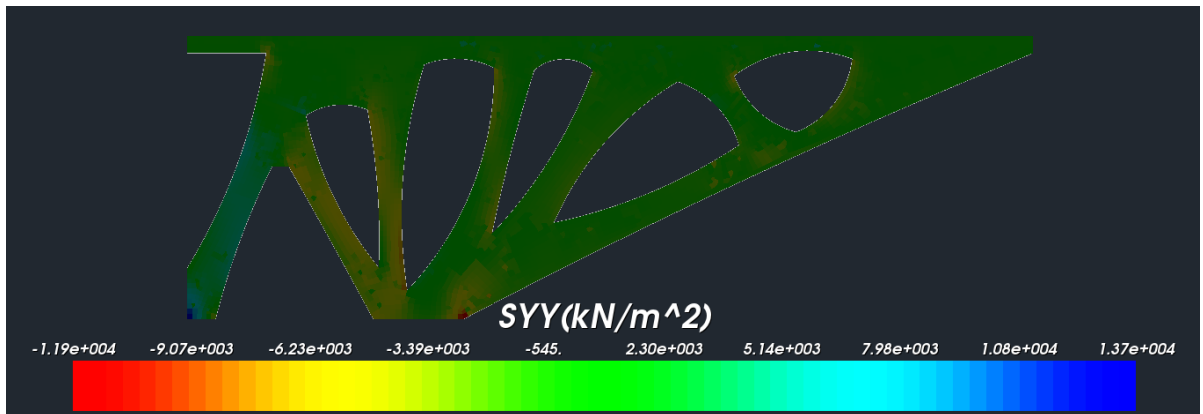
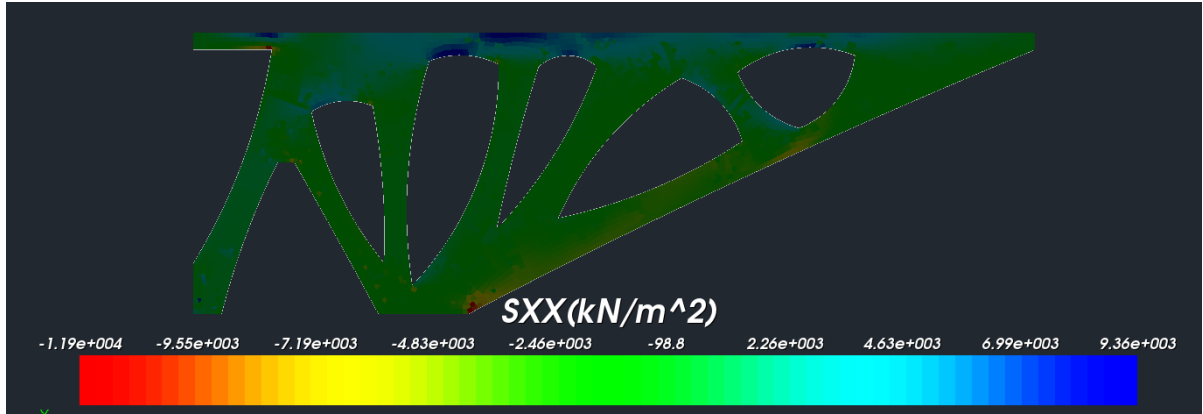


Model_C volfrac=0.30

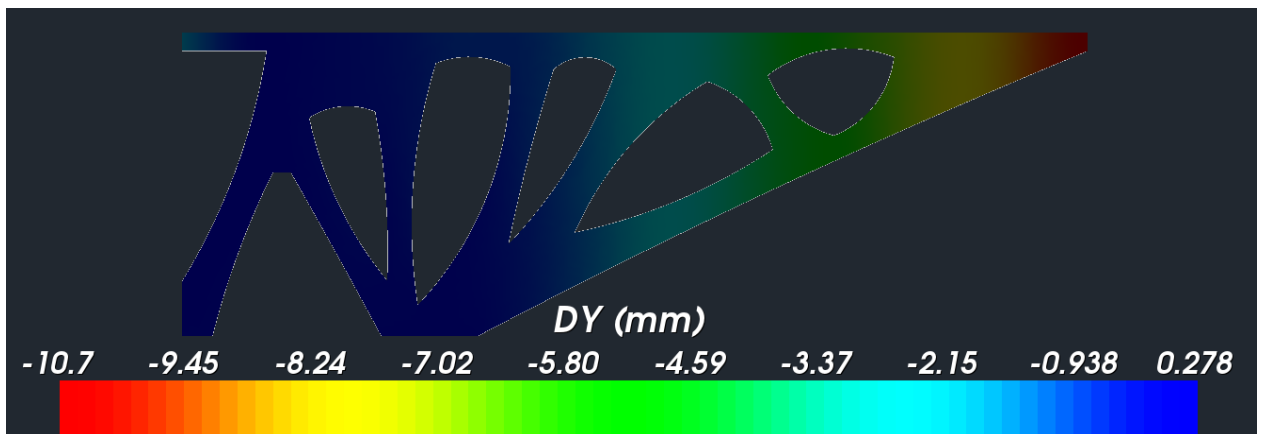
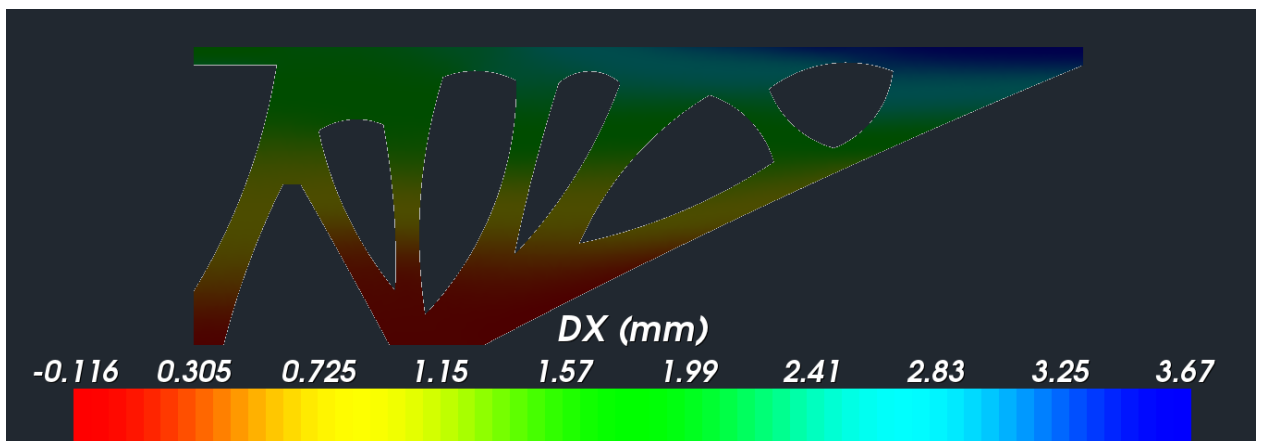
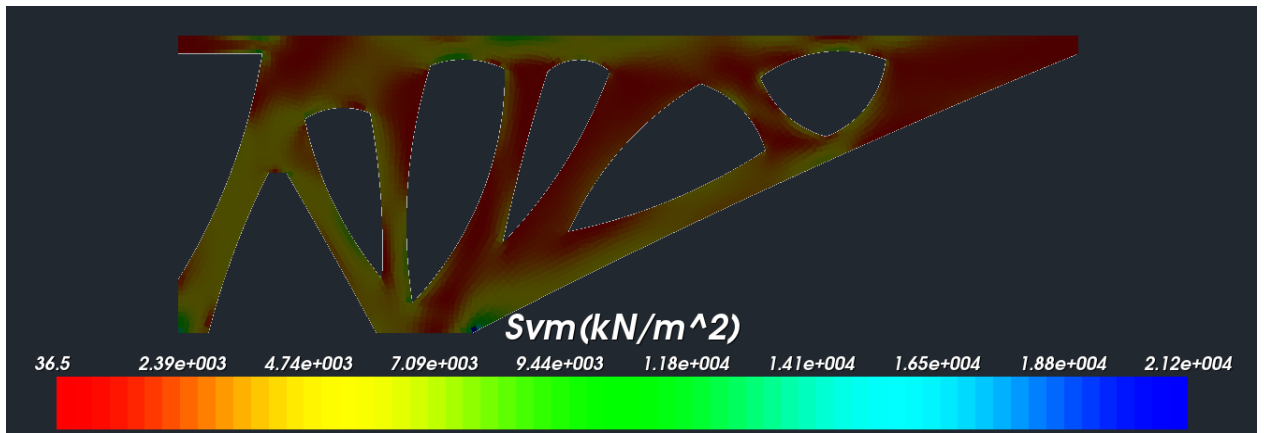


Model_D volfrac=0.20

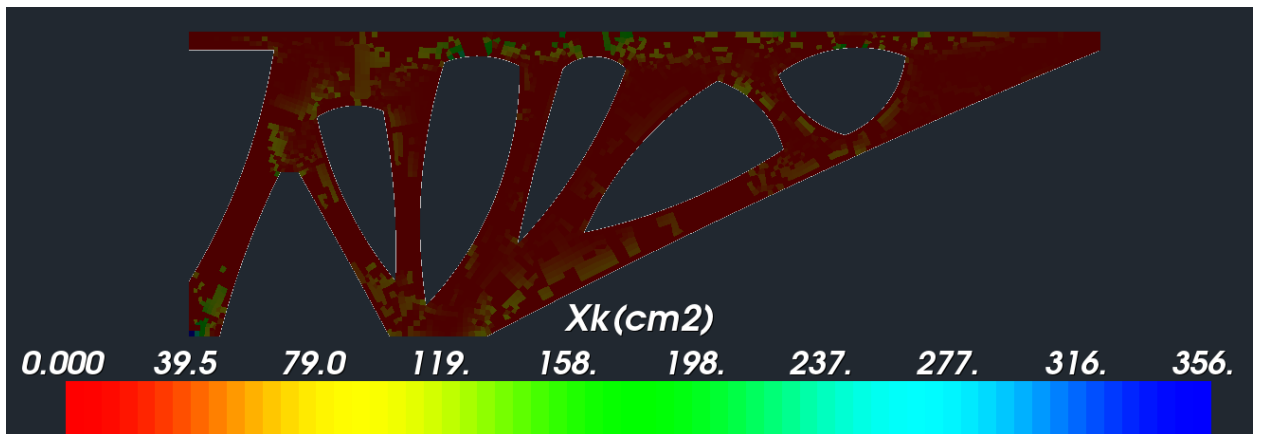
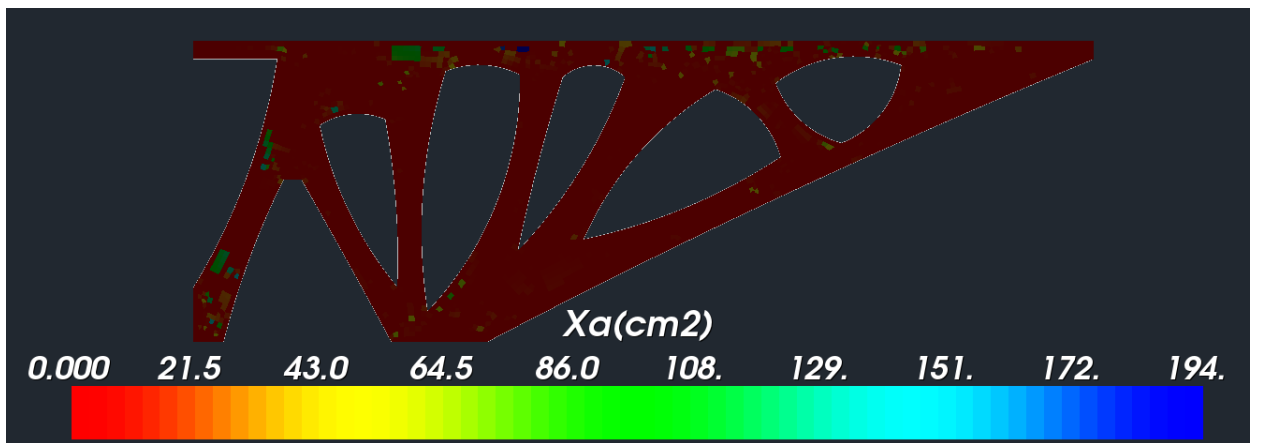
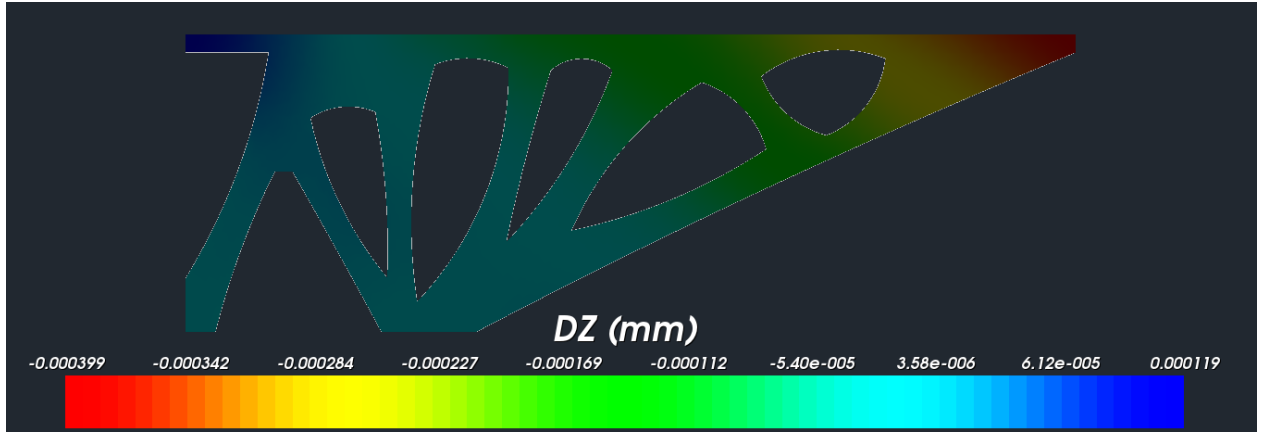
(περιβάλλουσα αποτελεσμάτων των
συνδυασμών όλων των φορτίσεων που επιλέχθηκαν)



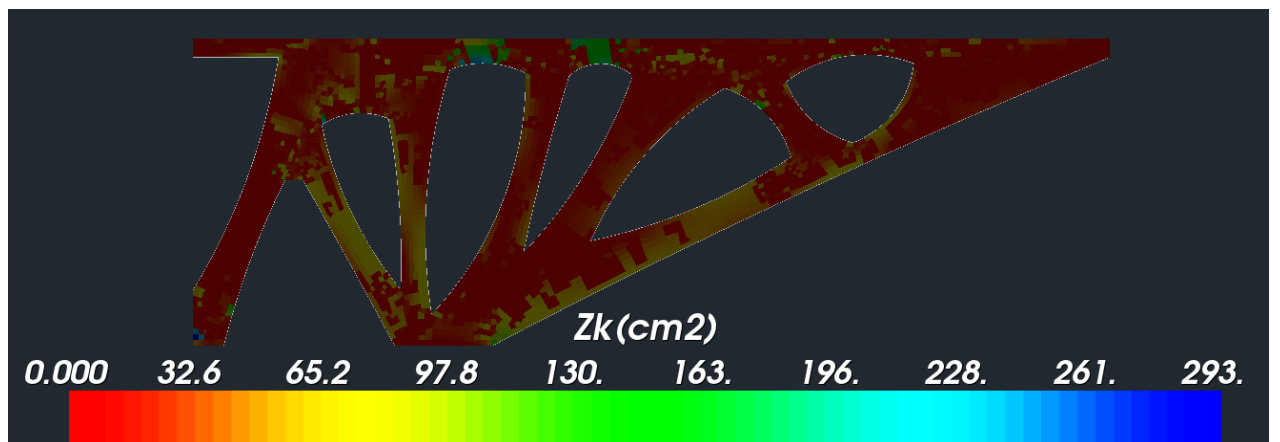
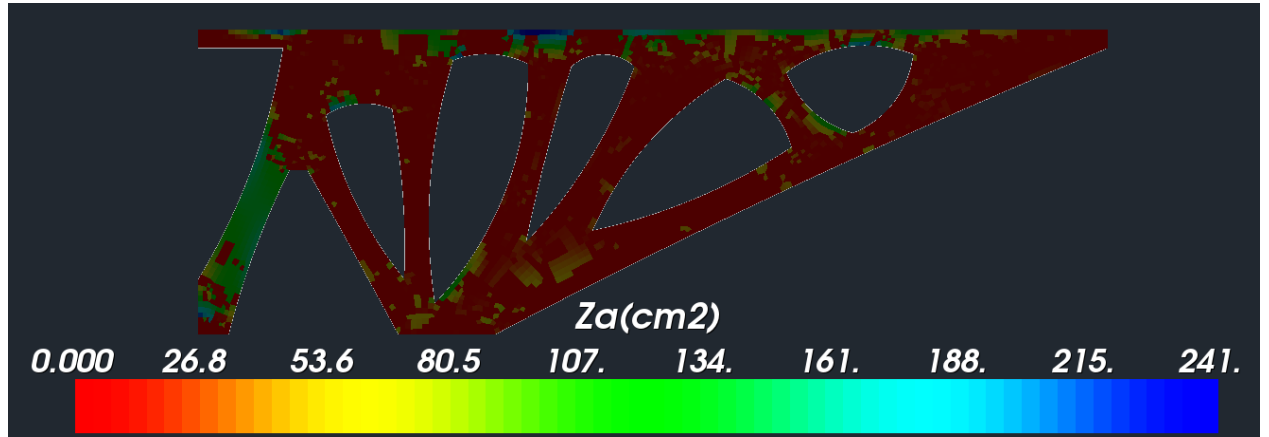
Model_D volfrac=0.20



Model_D volfrac=0.20



Model_D volfrac=0.20

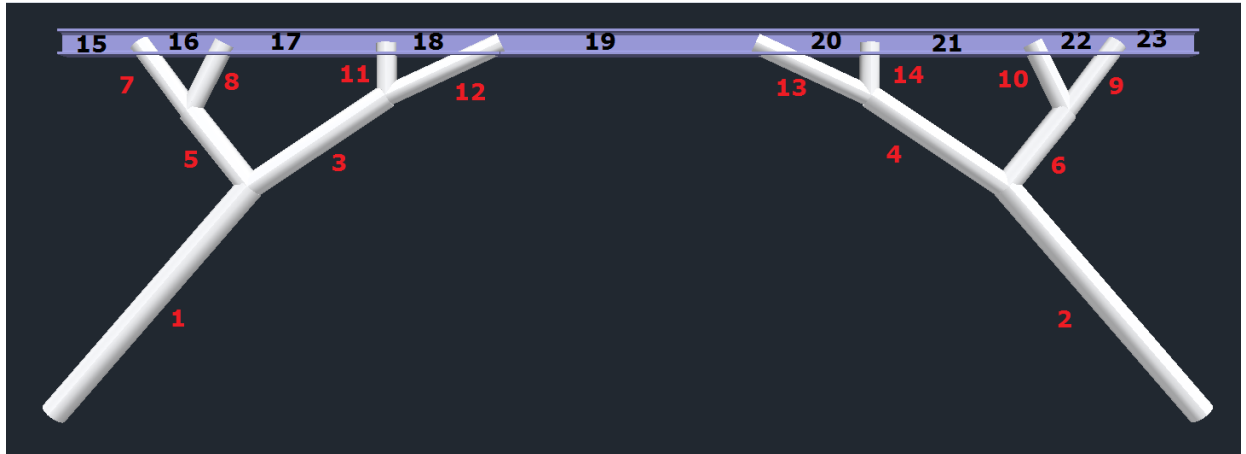


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται αποτελέσματα περιβάλλουσας εντατικών μεγεθών για ραβδωτές μεταλλικές κατασκευές Model_A $\text{volfrac}=0.10$, Model_C $\text{volfrac}=0.10$ και Model_D $\text{volfrac}=0.10$

Model_A volfrac=0.10

(περιβάλλουσα εντατικών μεγεθών των
συνδυασμών όλων των φορτίσεων που επιλέχθηκαν)



ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΣΙΔΗΡΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

Μέλος	Διατομή	Μήκος (m)	Βάρος/m (Kg/m)	Βάρος (Kg)
K0 / 1	CHS 355.6	3.97	204.00	809.31
K0 / 2	CHS 355.6	3.97	204.00	809.94
K0 / 3	CHS 323.9	2.17	184.00	398.79
K0 / 4	CHS 323.9	2.17	184.00	398.79
K0 / 5	CHS 323.9	1.28	184.00	235.43
K0 / 6	CHS 323.9	1.28	184.00	235.57
K0 / 7	CHS 273	1.13	153.00	172.32
K0 / 8	CHS 273	1.01	153.00	154.65
K0 / 9	CHS 273	0.70	153.00	107.10
K0 / 10	CHS 273	1.67	153.00	255.17
K0 / 11	CHS 273	1.67	153.00	255.60
K0 / 12	CHS 273	0.70	153.00	107.29
K0 / 13	CHS 273	1.01	153.00	154.04
K0 / 14	CHS 273	1.13	153.00	172.32

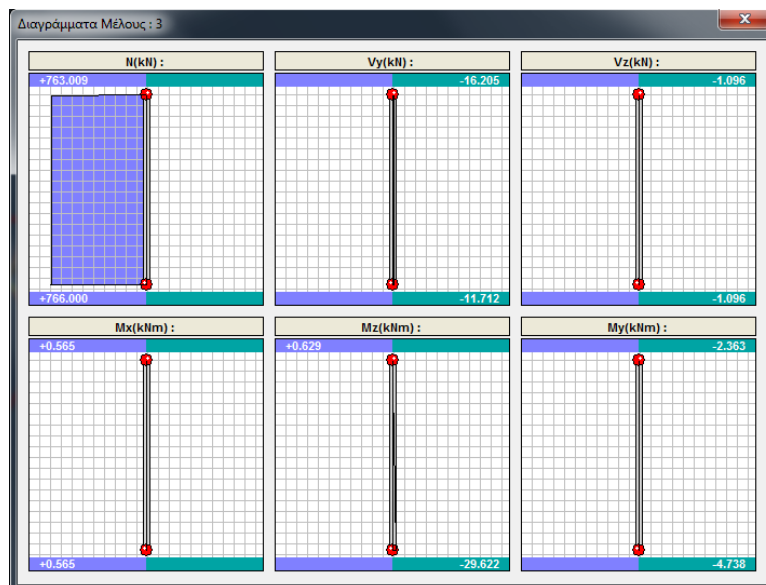
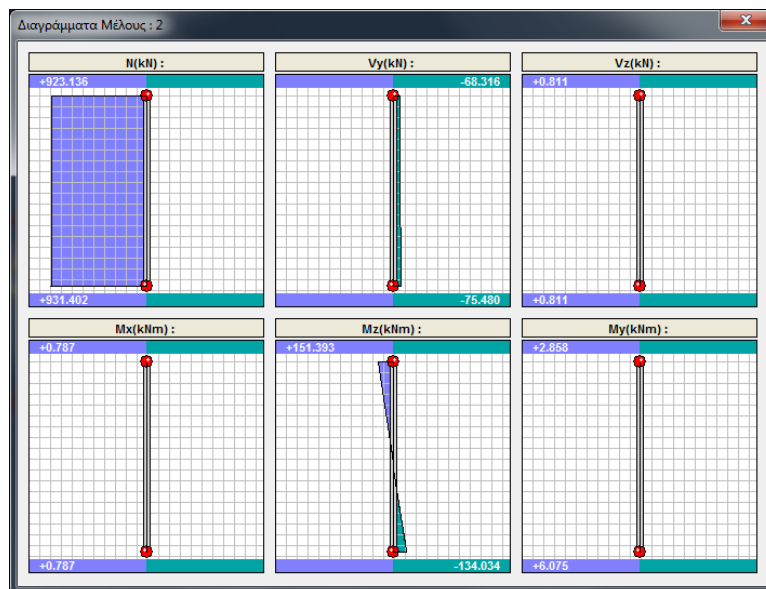
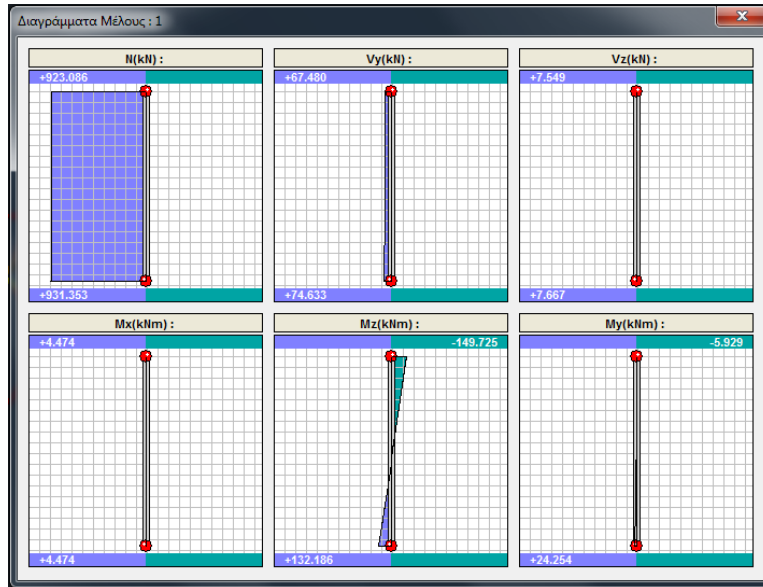
Δ0 / 15	HEM 300	1.02	237.92	243.63
Δ0 / 16	HEM 300	1.13	237.92	267.87
Δ0 / 17	HEM 300	2.15	237.92	510.93
Δ0 / 18	HEM 300	1.52	237.92	360.57
Δ0 / 19	HEM 300	3.36	237.92	799.41
Δ0 / 20	HEM 300	1.52	237.92	360.93
Δ0 / 21	HEM 300	2.15	237.92	512.08
Δ0 / 22	HEM 300	1.13	237.92	267.87
Δ0 / 23	HEM 300	1.02	237.92	243.63

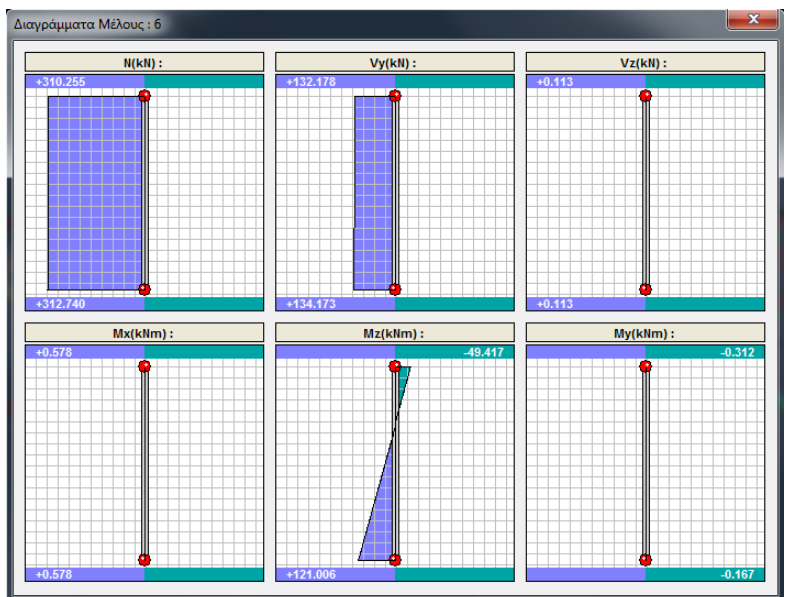
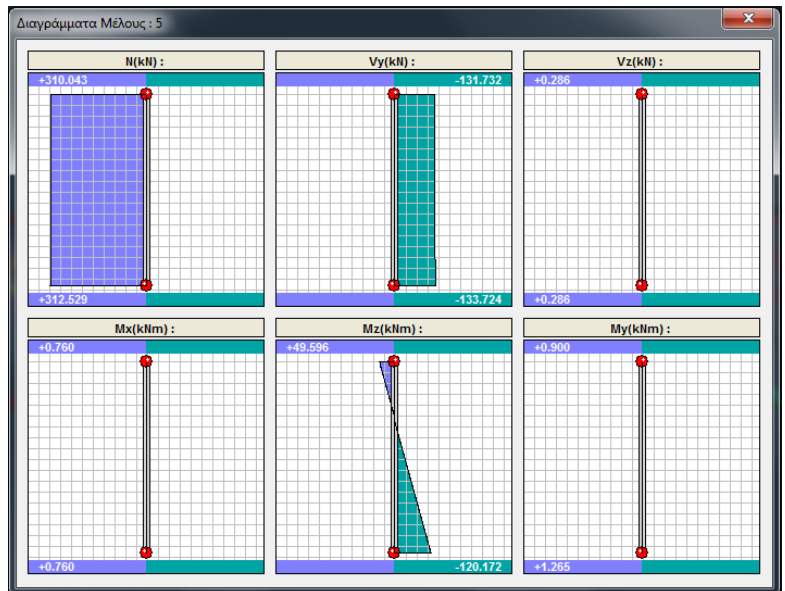
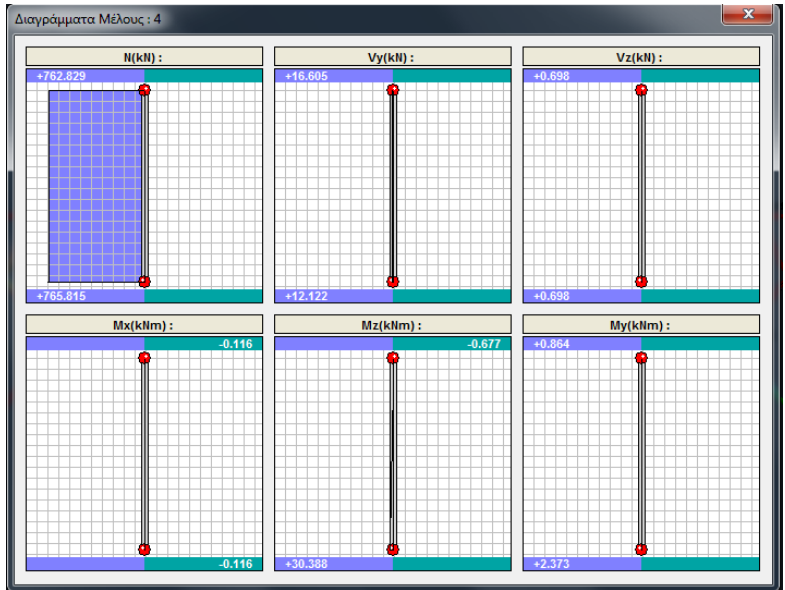
T O T A L			7833.68	

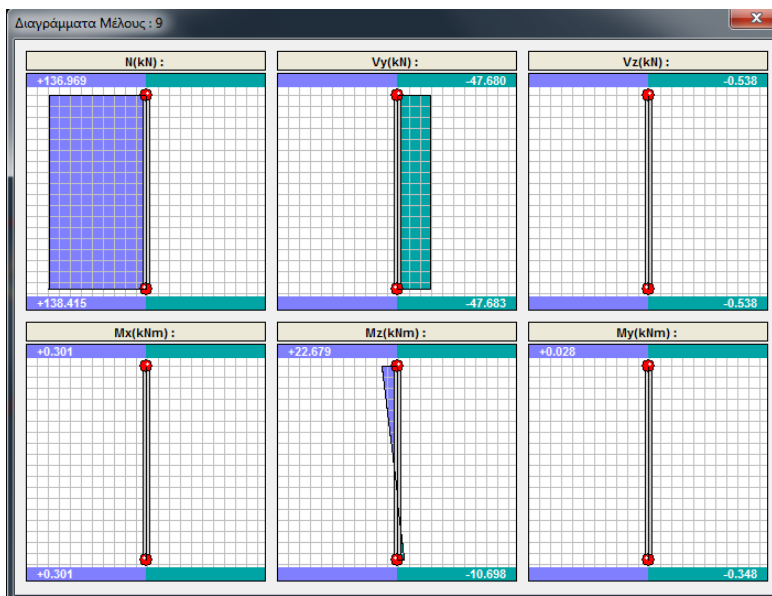
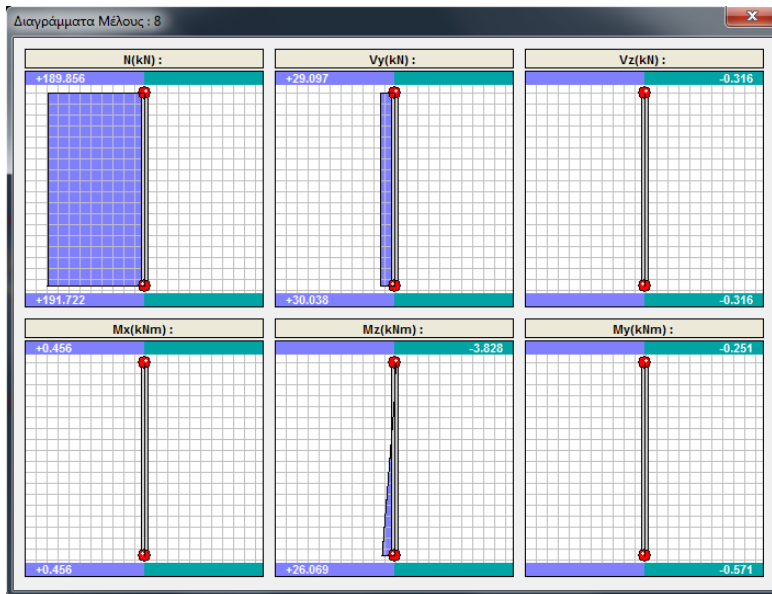
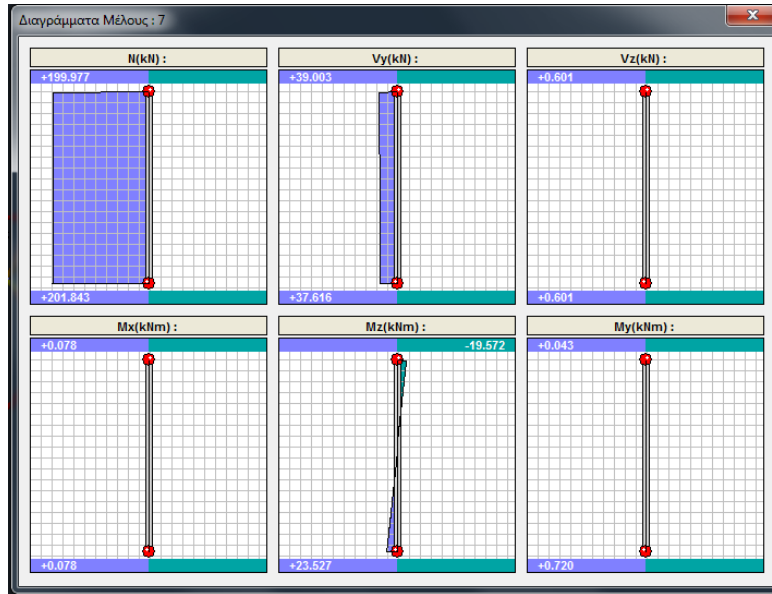
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ΠΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΣΙΔΗΡΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

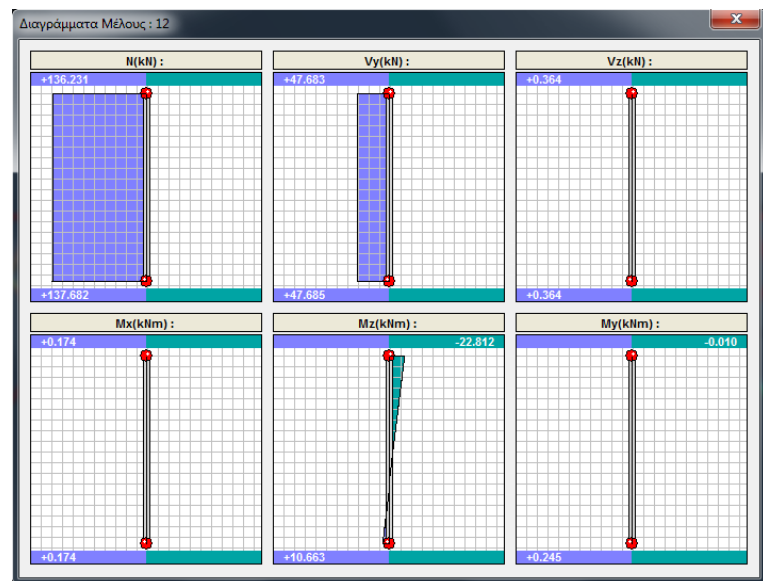
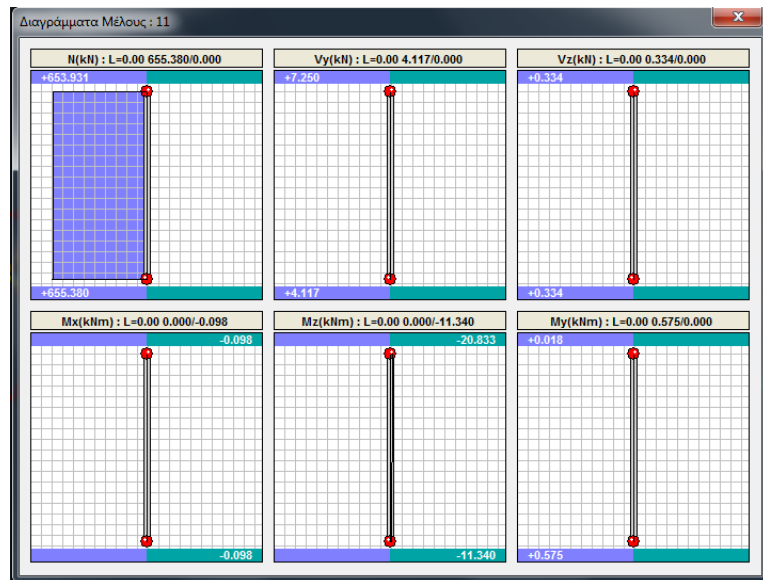
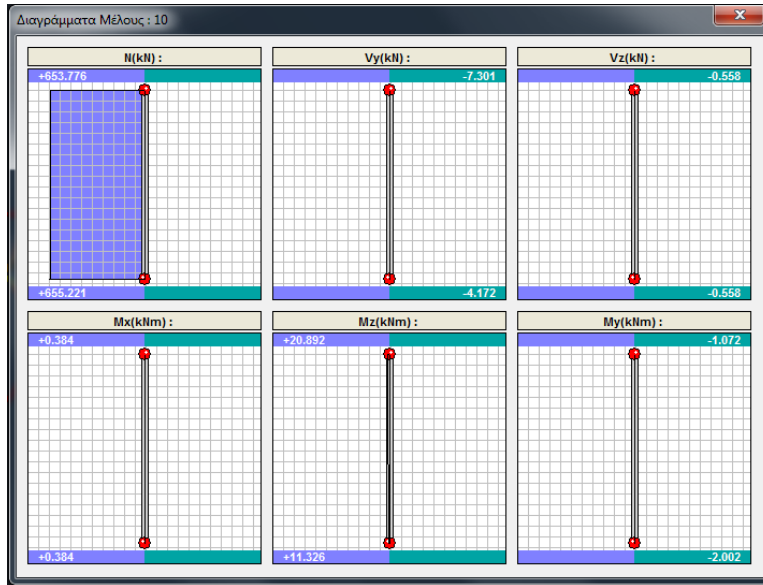
Διατομή	Μήκος (m)	Βάρος/m (Kg/m)	Βάρος (Kg)
CHS 355.6	7.94	204.00	1619.24
CHS 323.9	6.89	184.00	1267.66
CHS 273	9.01	153.00	1378.15
HEM 300	15.00	237.92	3568.62

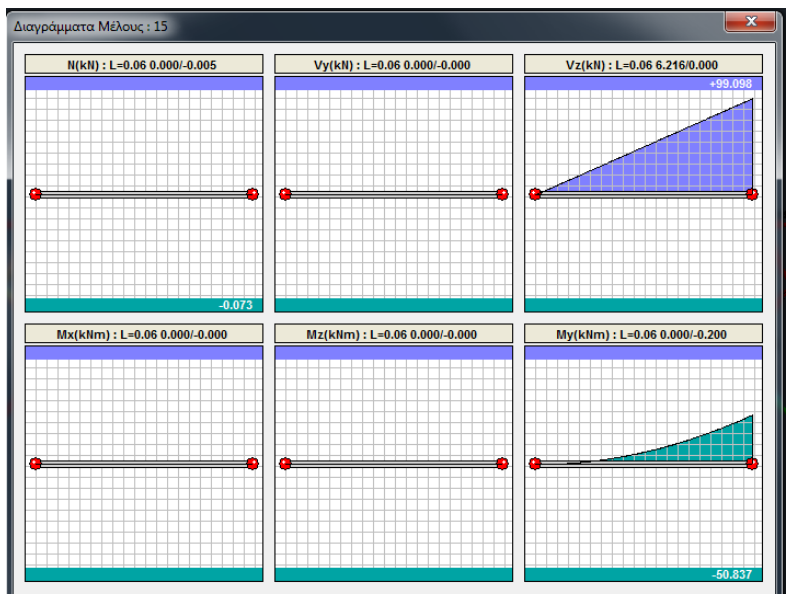
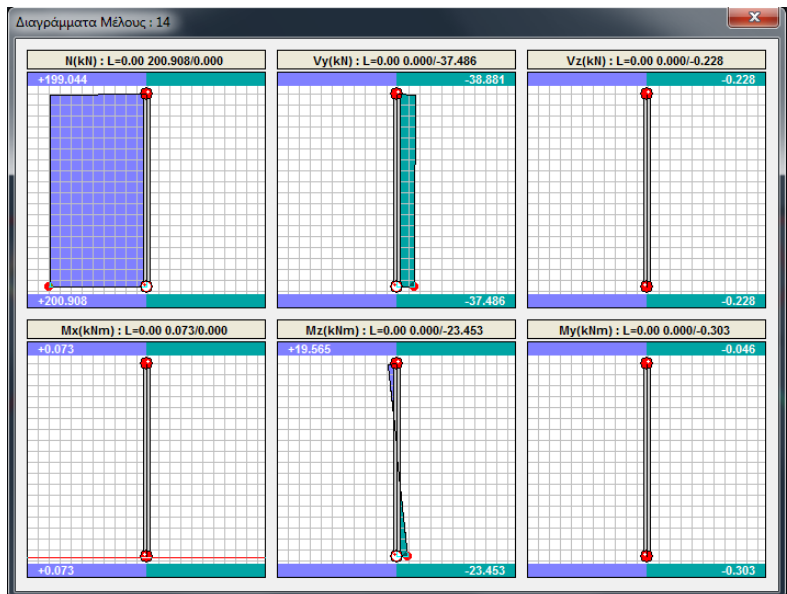
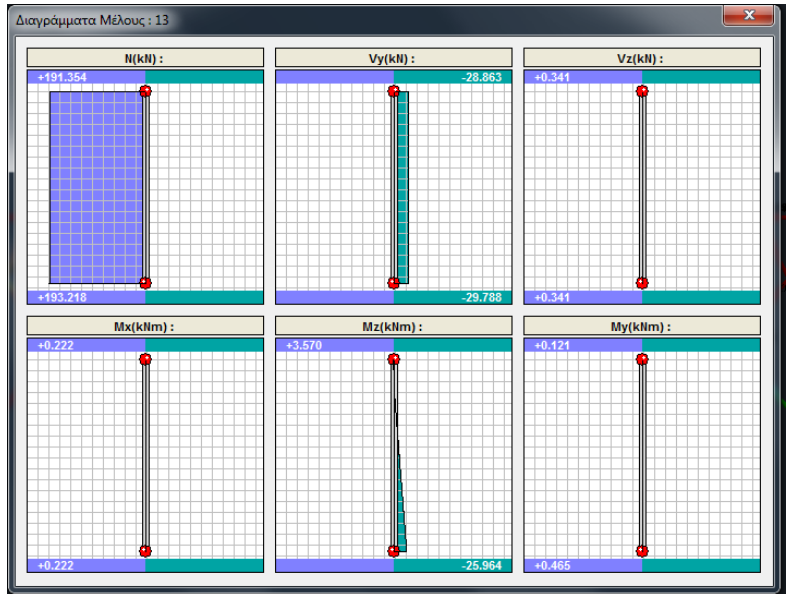
T O T A L			7833.68

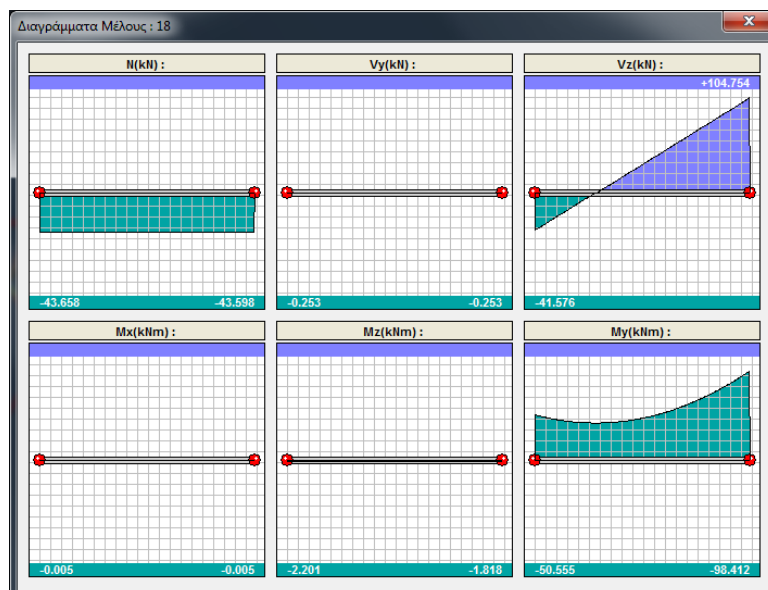
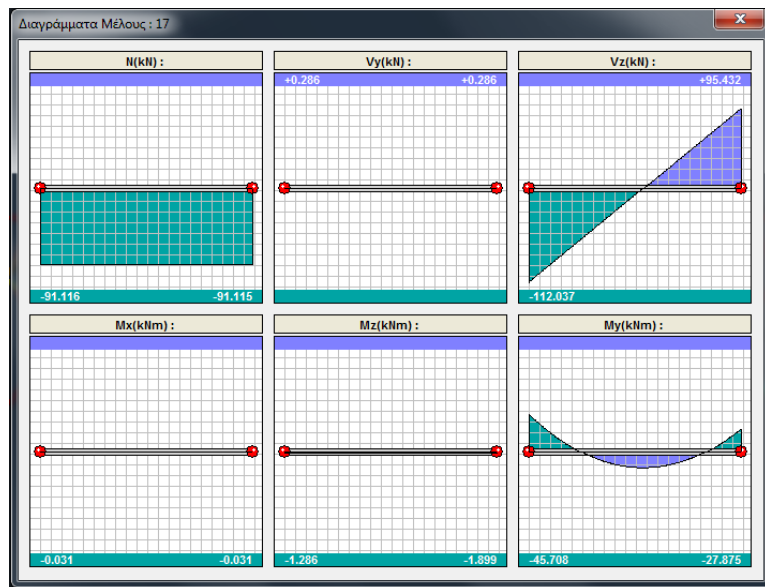
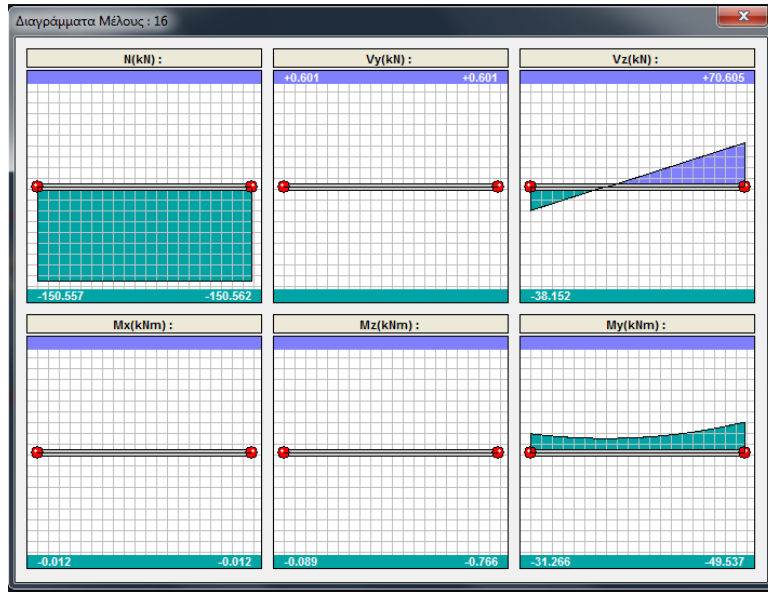


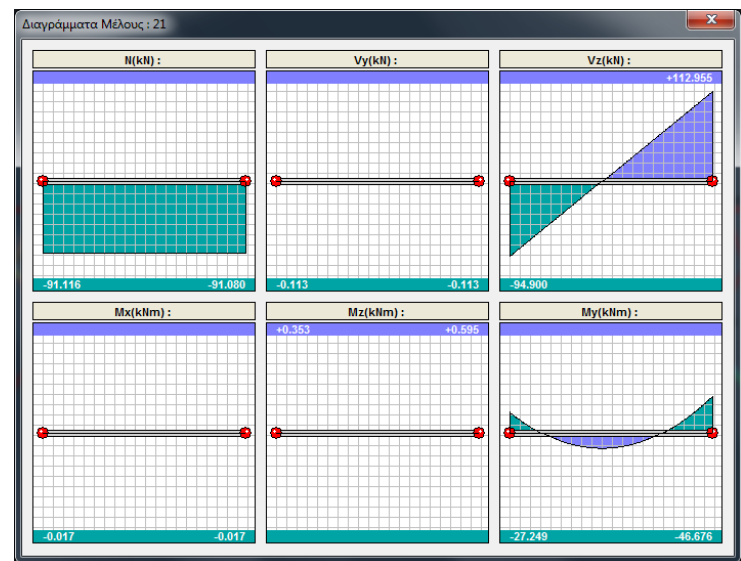
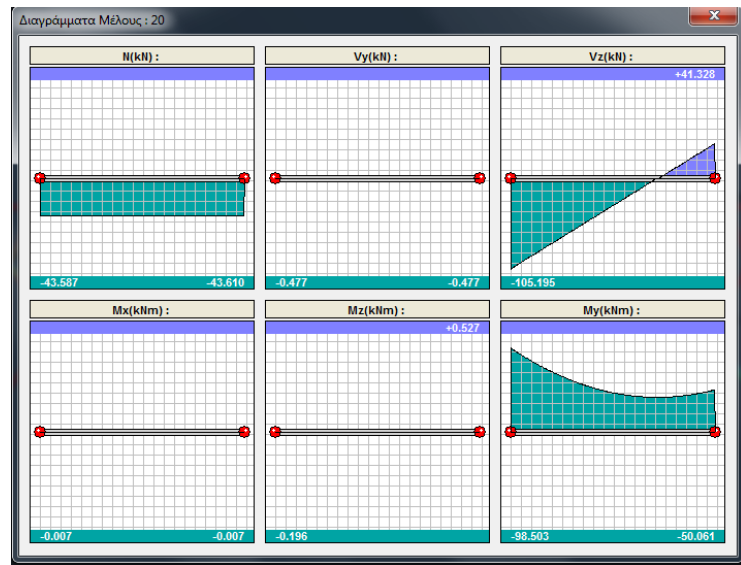
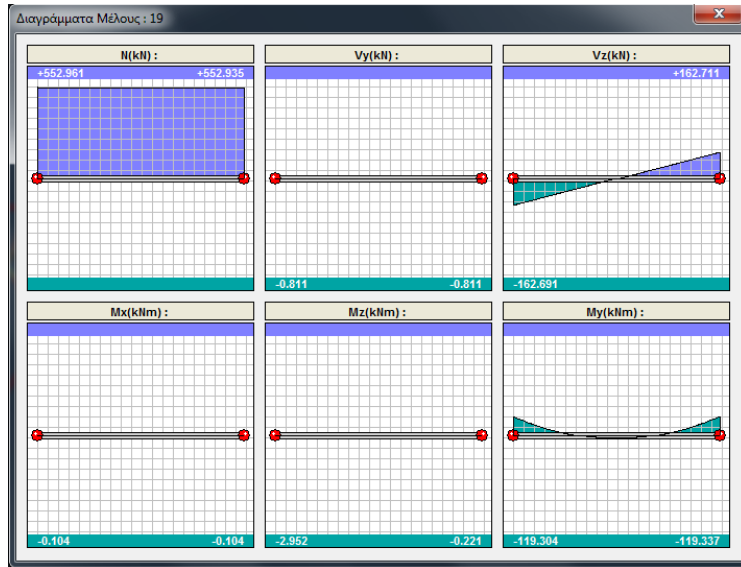


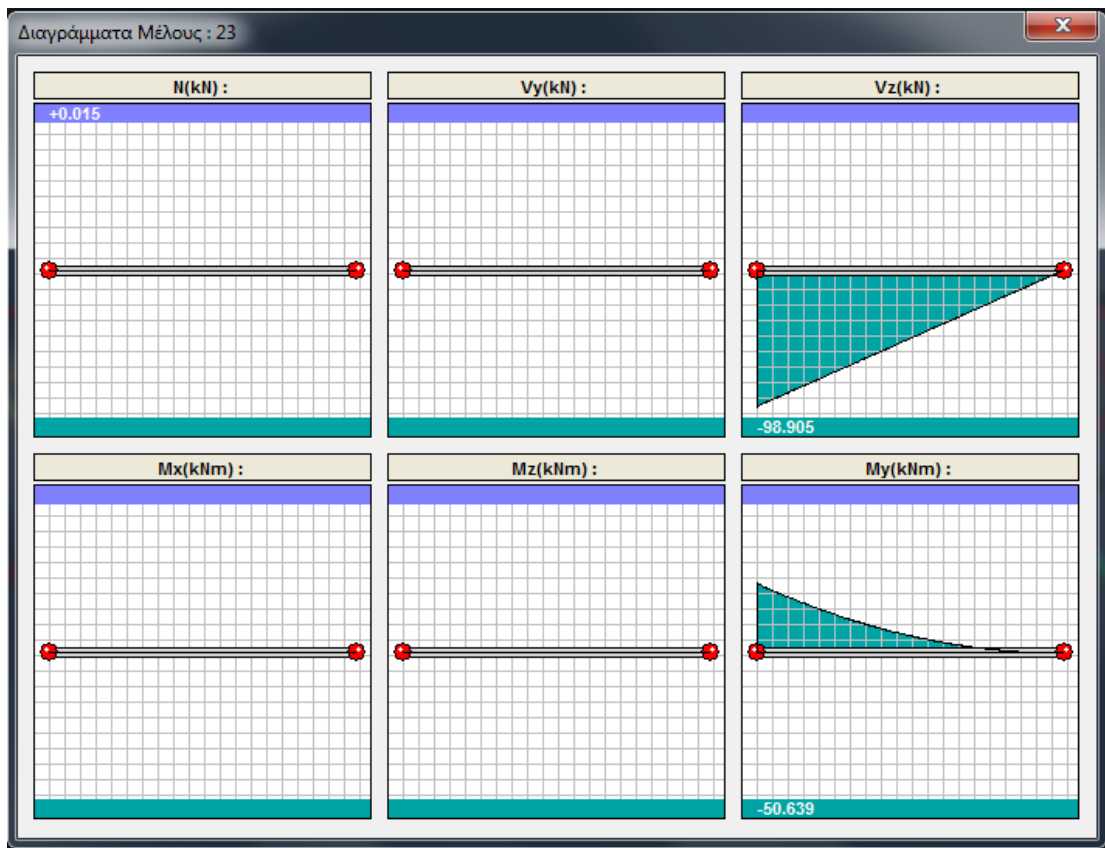
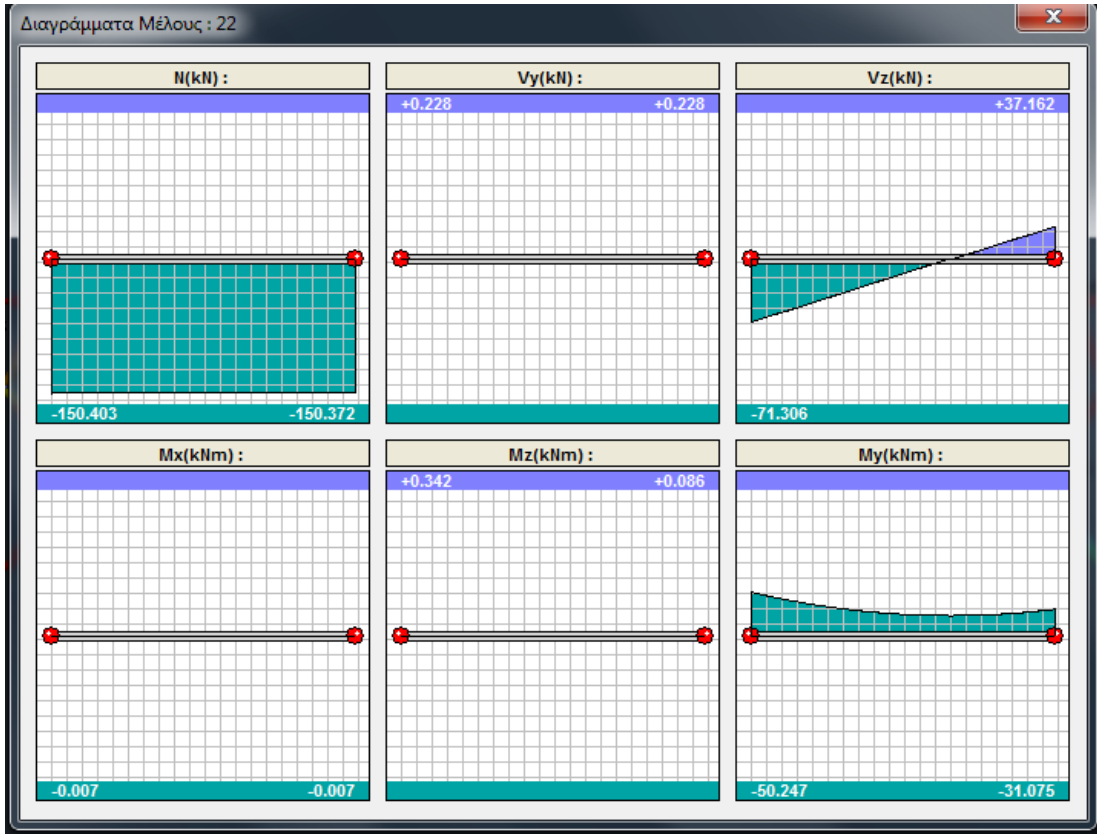






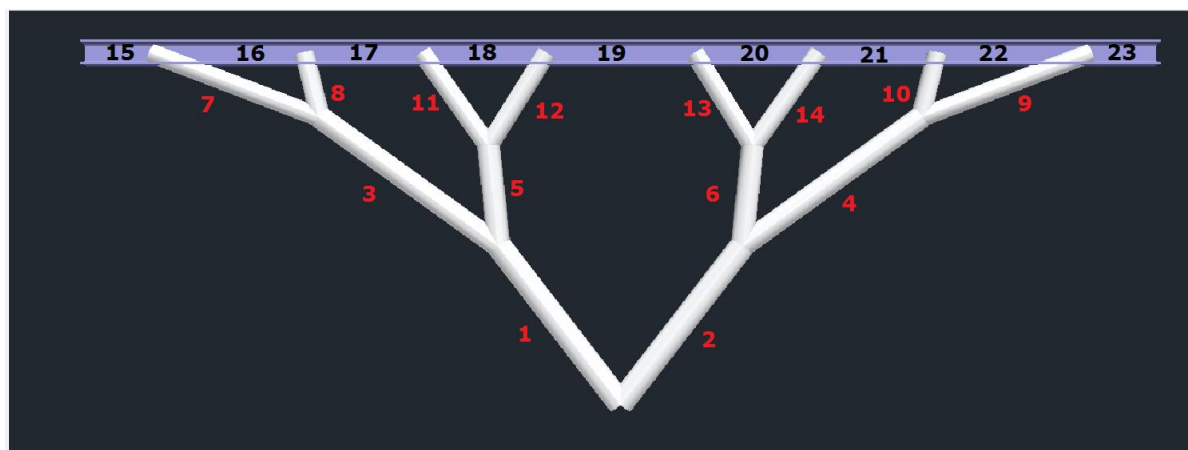






Model_C volfrac=0.10

(περιβάλλουσα εντατικών μεγεθών των
συνδυασμών όλων των φορτίσεων που επιλέχθηκαν)

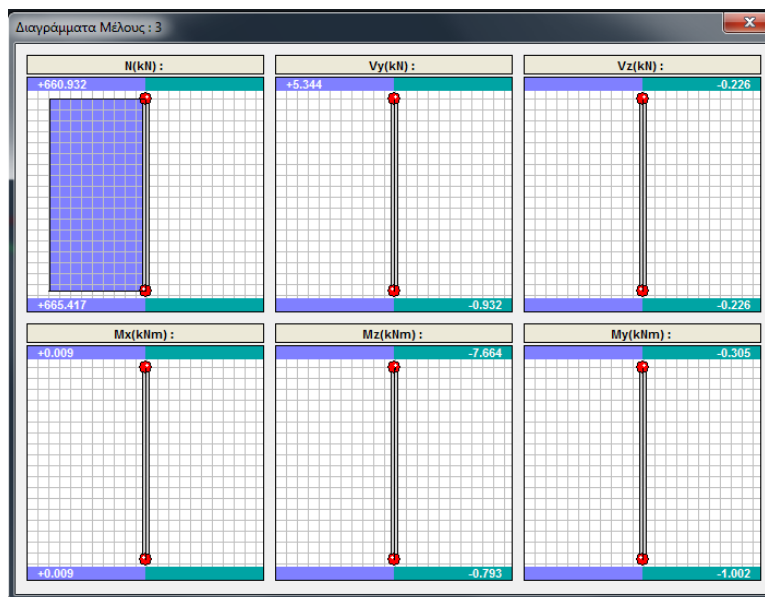
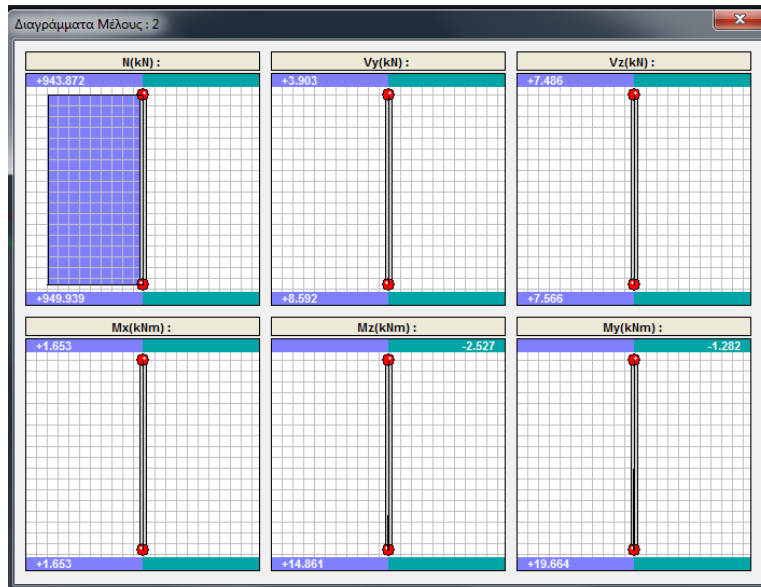
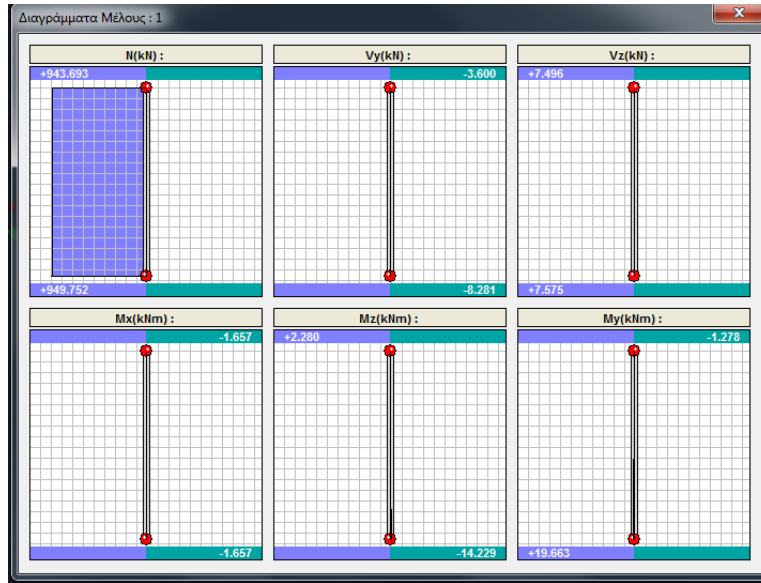


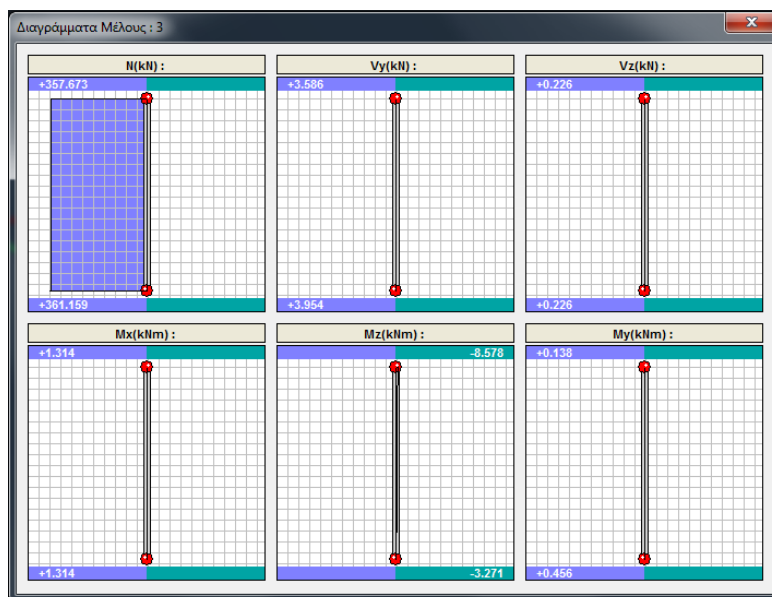
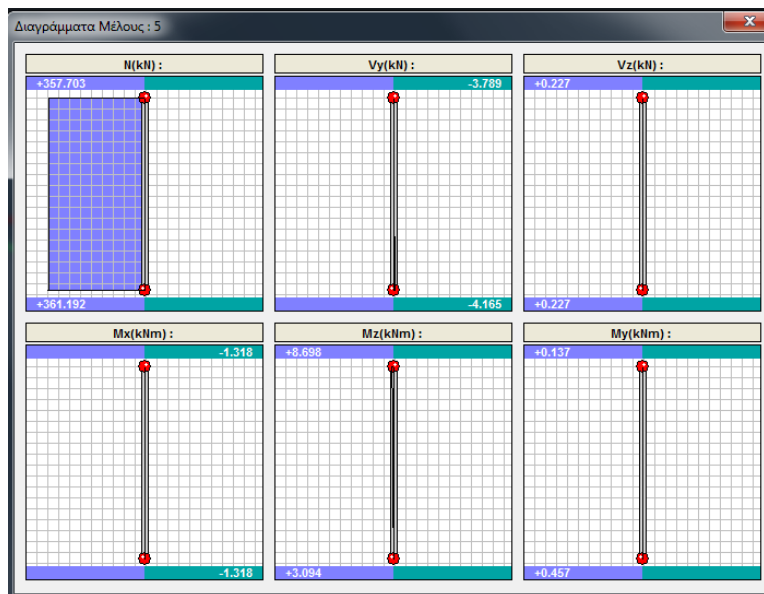
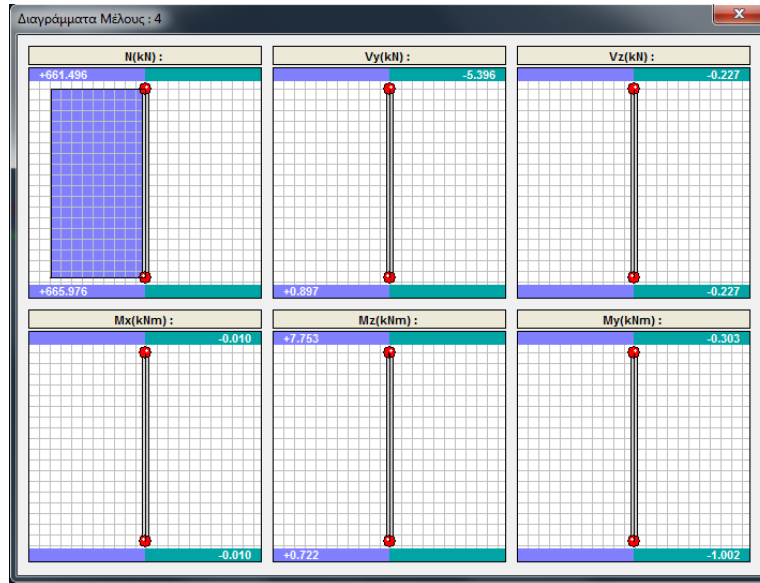
ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΣΙΑΦΡΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

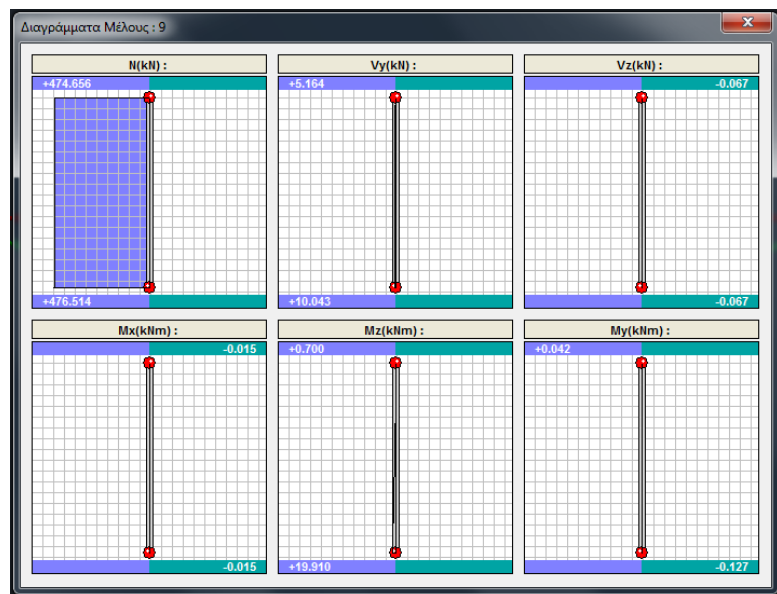
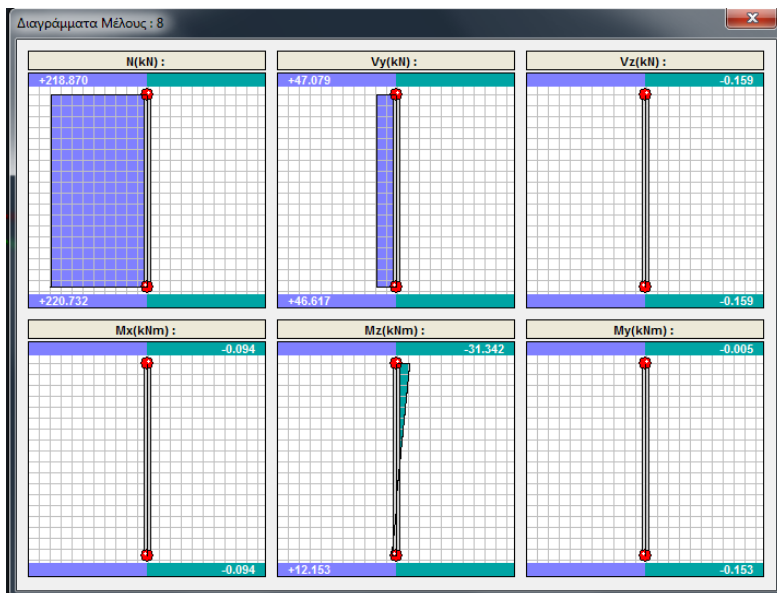
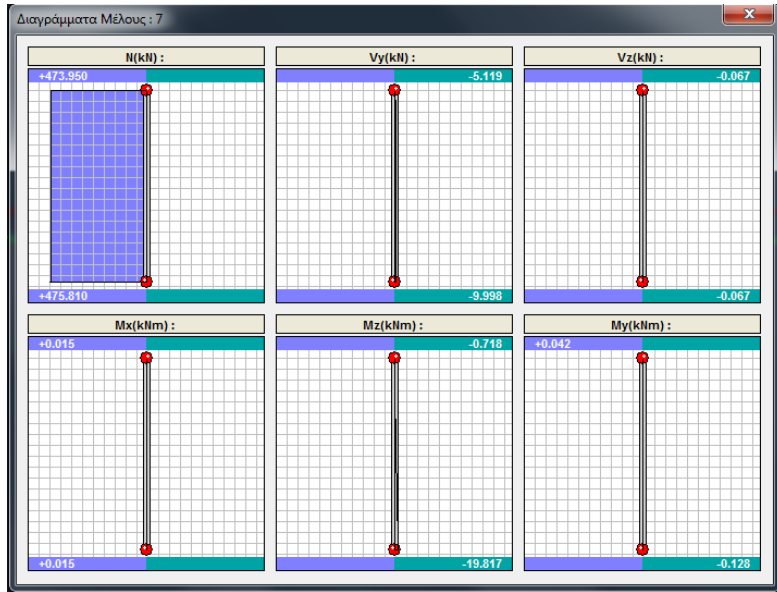
Μέλος	Διατομή	Μήκος (m)	Βάρος/m (Kg/m)	Βάρος (Kg)
KO / 1	CHS 355.6	2.78	204.00	566.92
KO / 2	CHS 355.6	2.78	204.00	567.66
KO / 3	CHS 323.9	3.08	184.00	567.20
KO / 4	CHS 323.9	3.08	184.00	566.73
KO / 5	CHS 323.9	1.41	184.00	259.28
KO / 6	CHS 323.9	1.41	184.00	259.02
KO / 7	CHS 273	2.53	153.00	386.62
KO / 8	CHS 273	0.93	153.00	142.13
KO / 9	CHS 273	2.53	153.00	386.53
KO / 10	CHS 273	0.93	153.00	141.67
KO / 11	CHS 273	1.59	153.00	243.81
KO / 12	CHS 273	1.53	153.00	234.51
KO / 13	CHS 273	1.53	153.00	234.28
KO / 14	CHS 273	1.59	153.00	243.53
ΔO / 15	HEM 300	0.94	237.92	222.95
ΔO / 16	HEM 300	2.14	237.92	508.48
ΔO / 17	HEM 300	1.65	237.92	393.46
ΔO / 18	HEM 300	1.73	237.92	412.35
ΔO / 19	HEM 300	2.08	237.92	493.87
ΔO / 20	HEM 300	1.73	237.92	412.26
ΔO / 21	HEM 300	1.65	237.92	393.40
ΔO / 22	HEM 300	2.14	237.92	508.78
ΔO / 23	HEM 300	0.94	237.92	223.09
T O T A L				8368.55

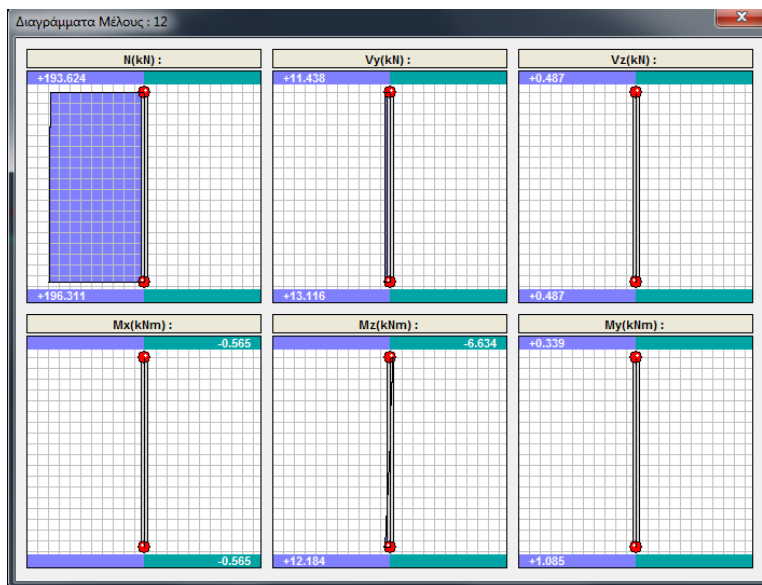
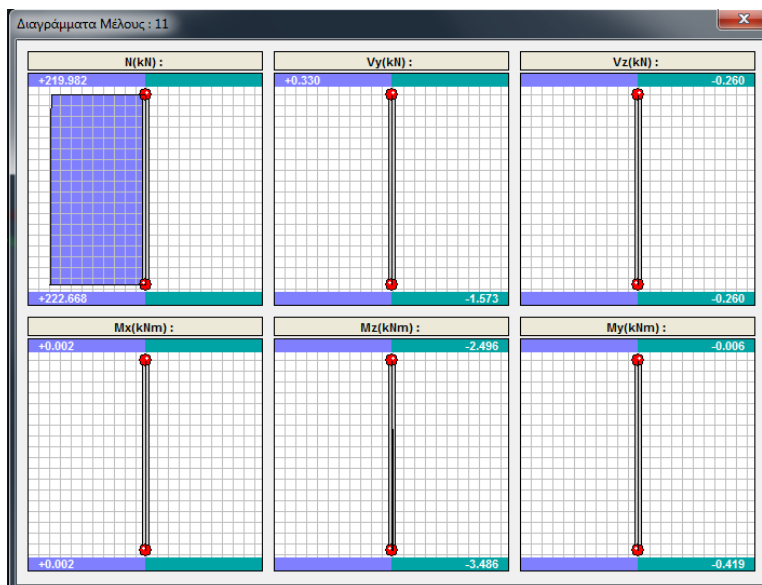
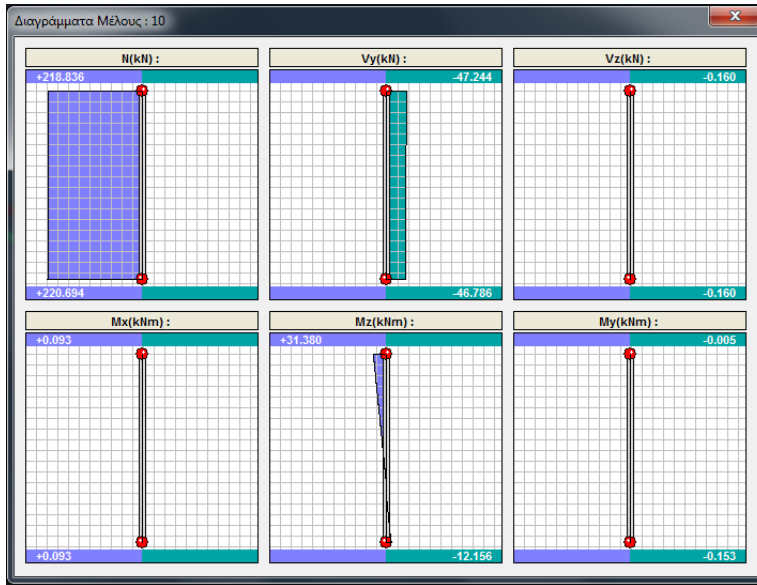
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ΠΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΣΙΑΦΡΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

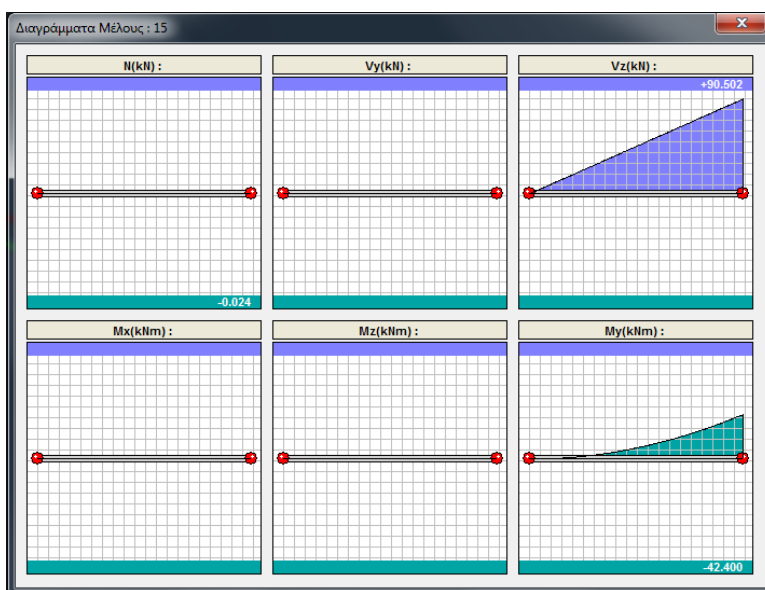
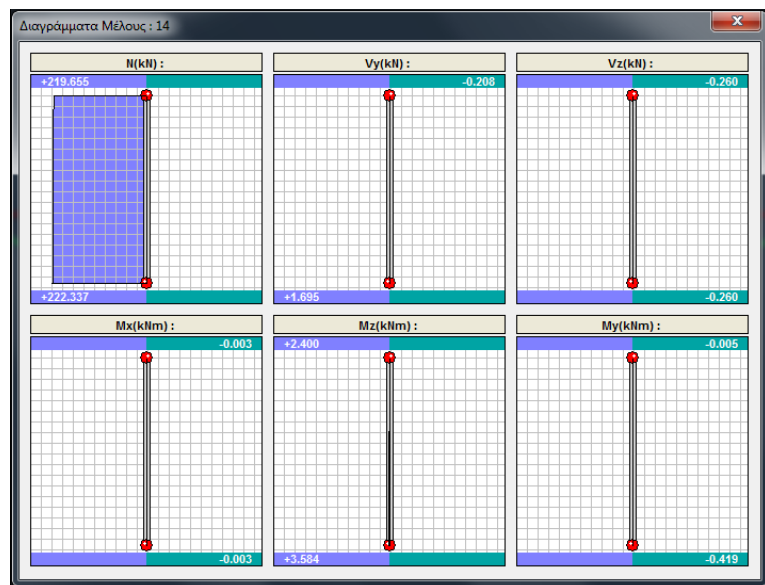
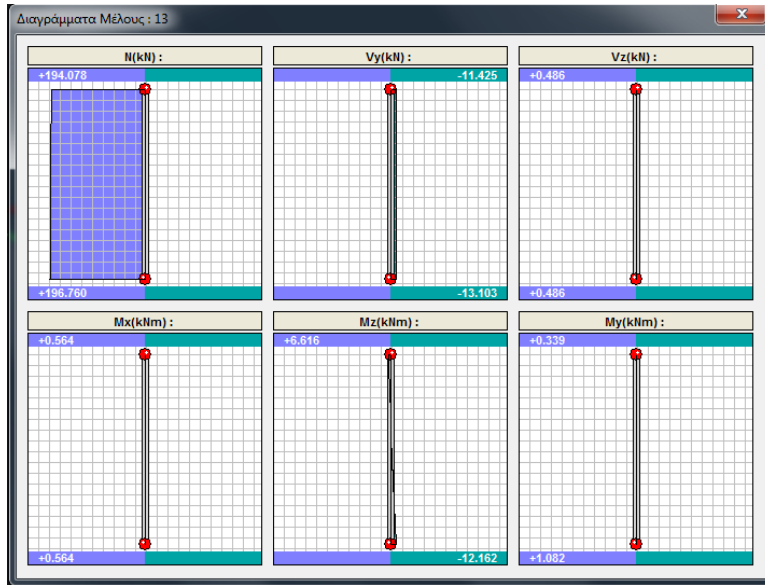
Διατομή	Μήκος (m)	Βάρος/m (Kg/m)	Βάρος (Kg)
CHS 355.6	5.56	204.00	1134.58
CHS 323.9	8.98	184.00	1652.23
CHS 273	13.16	153.00	2013.10
HEM 300	15.00	237.92	3568.64
T O T A L			8368.55

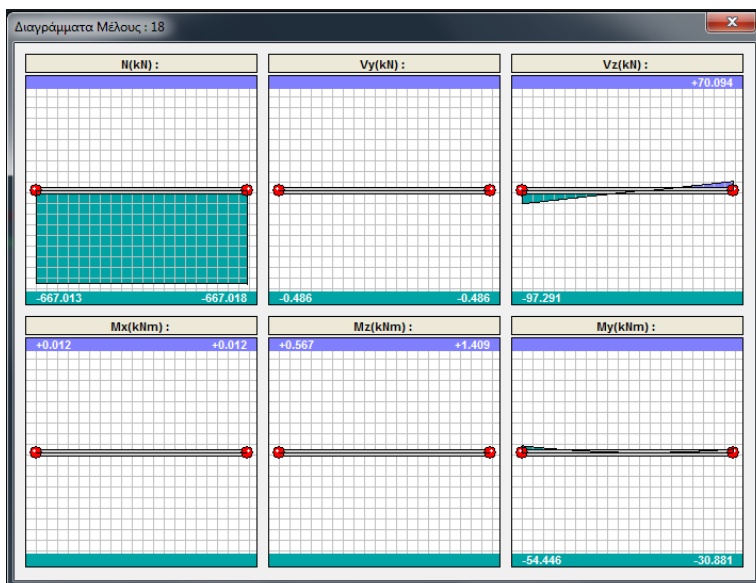
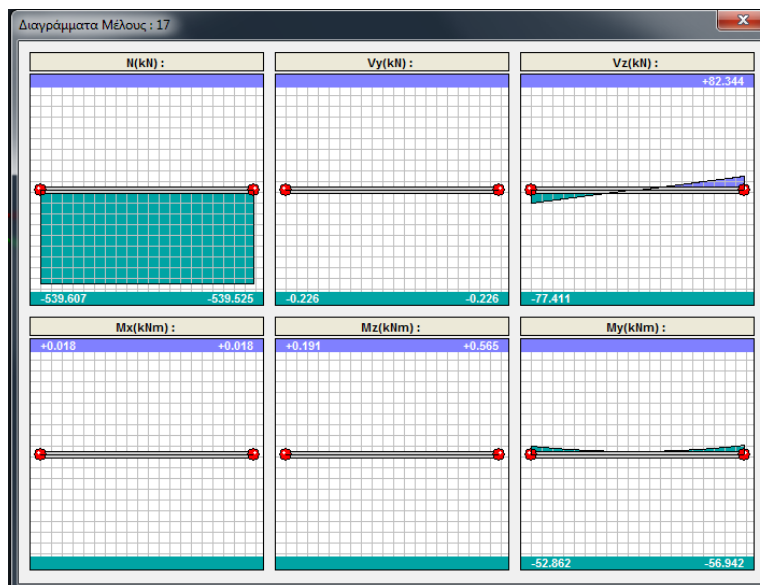
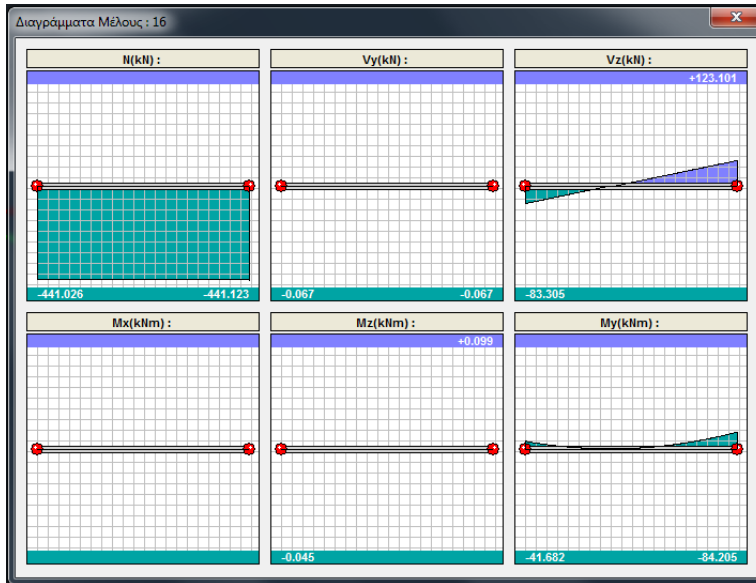


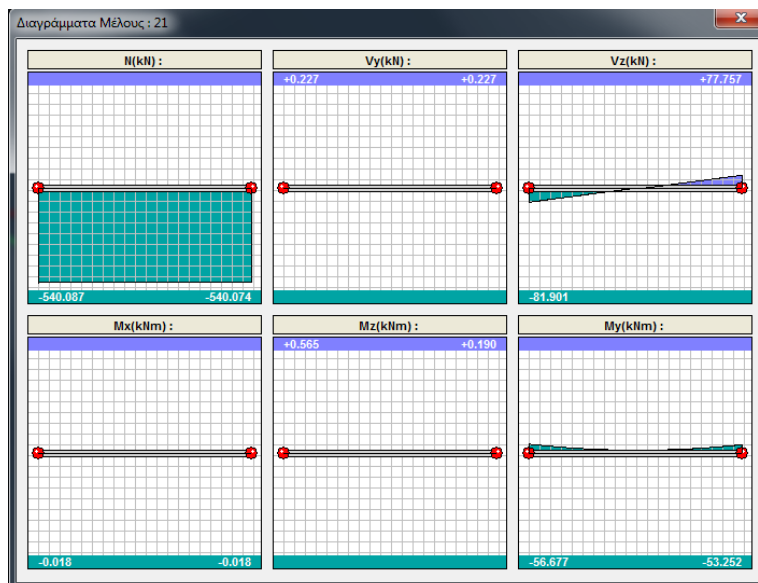
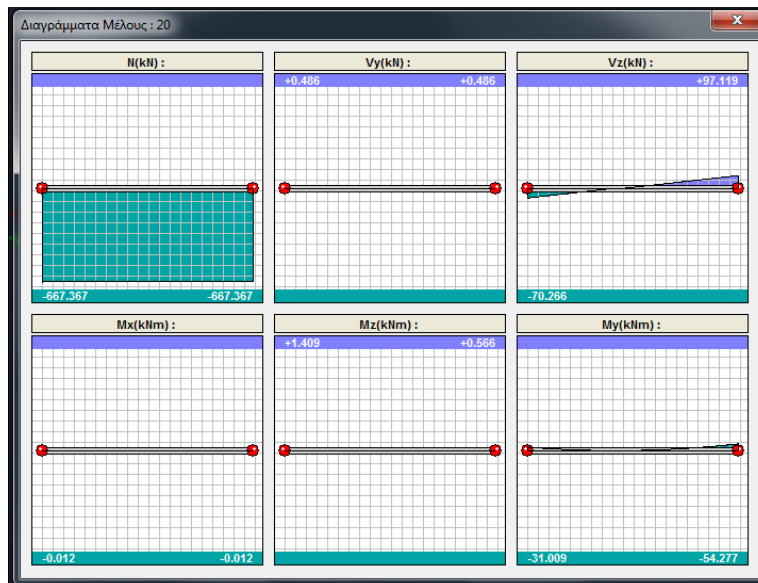
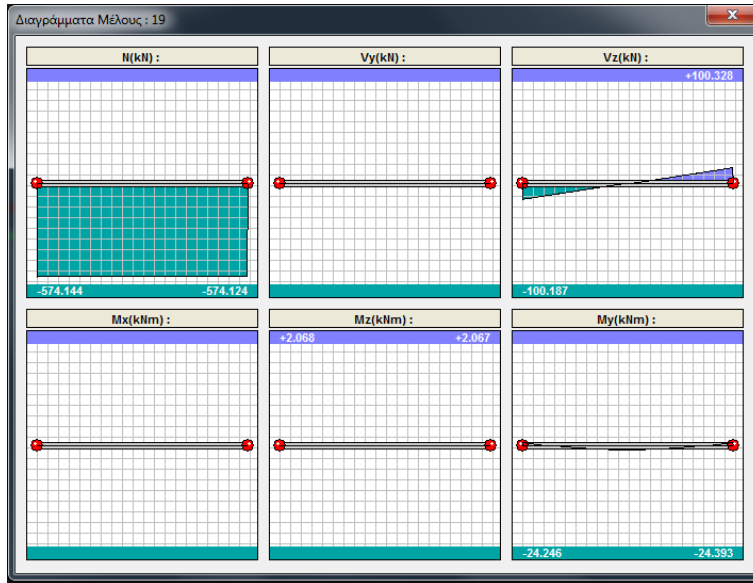


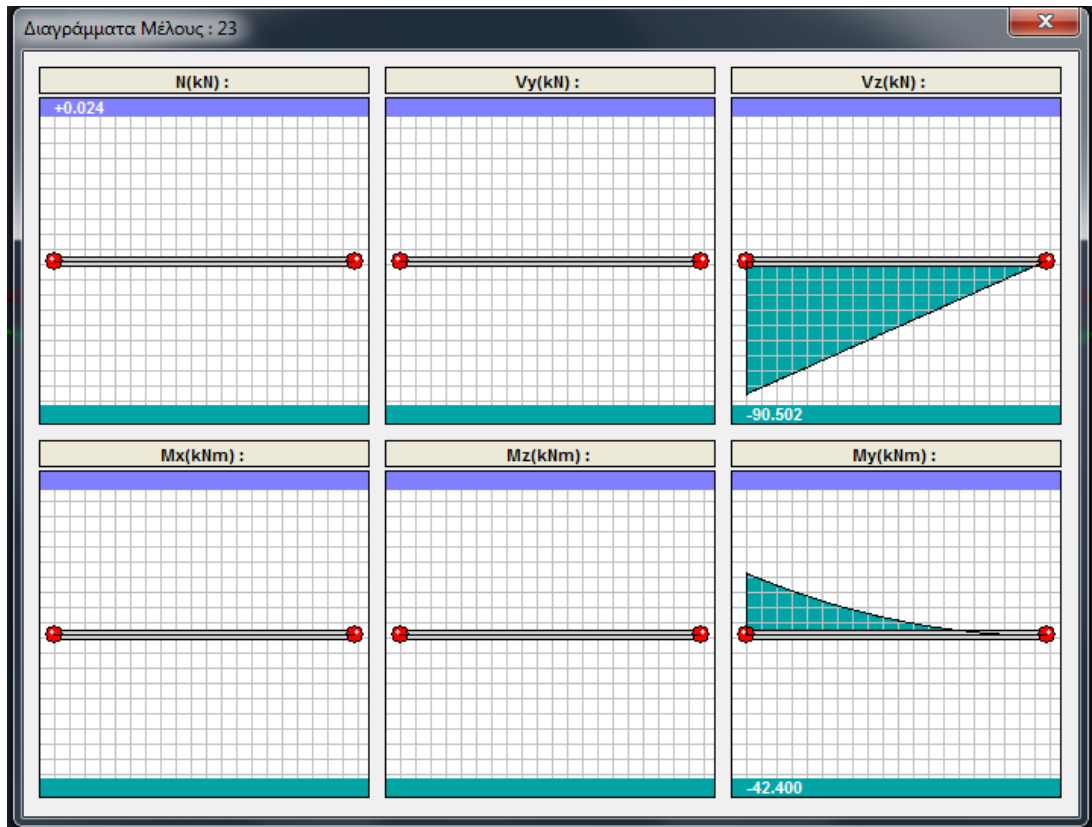
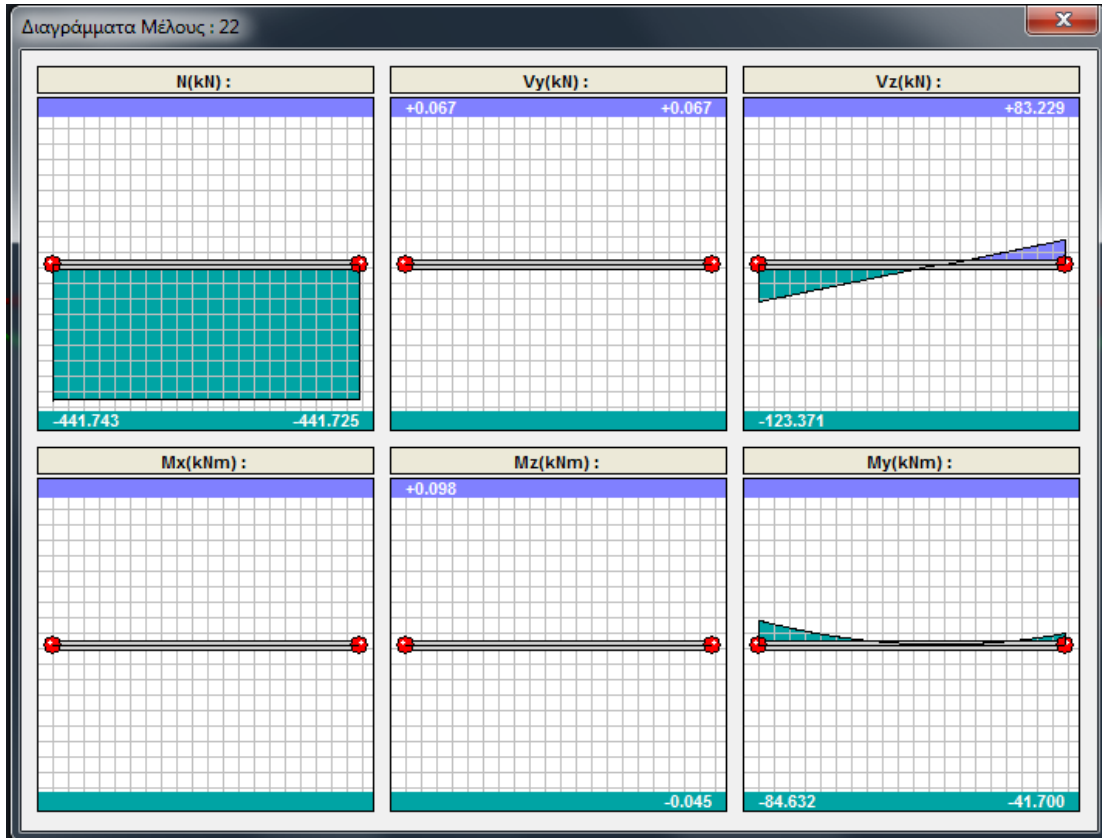






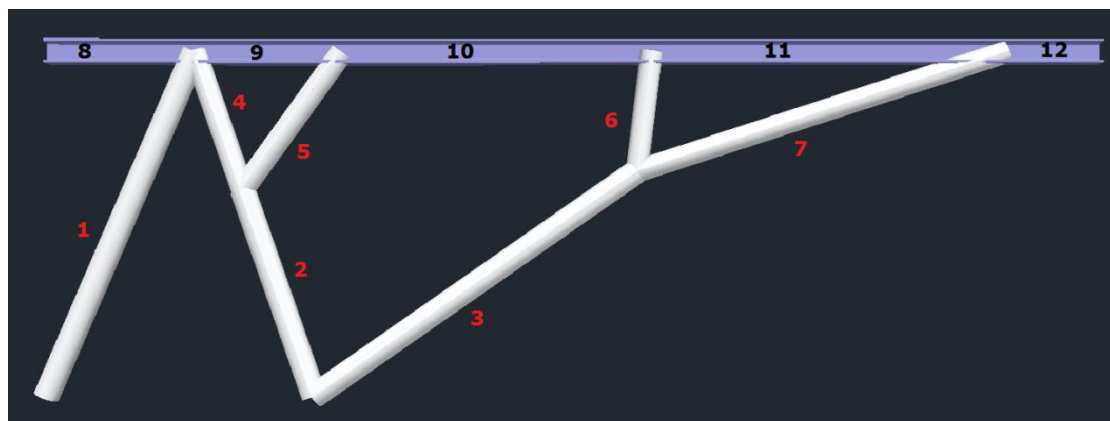






Model_D volfrac=0.10

(περιβάλλουσα εντατικών μεγεθών των
συνδυασμών όλων των φορτίσεων που επιλέχθηκαν)

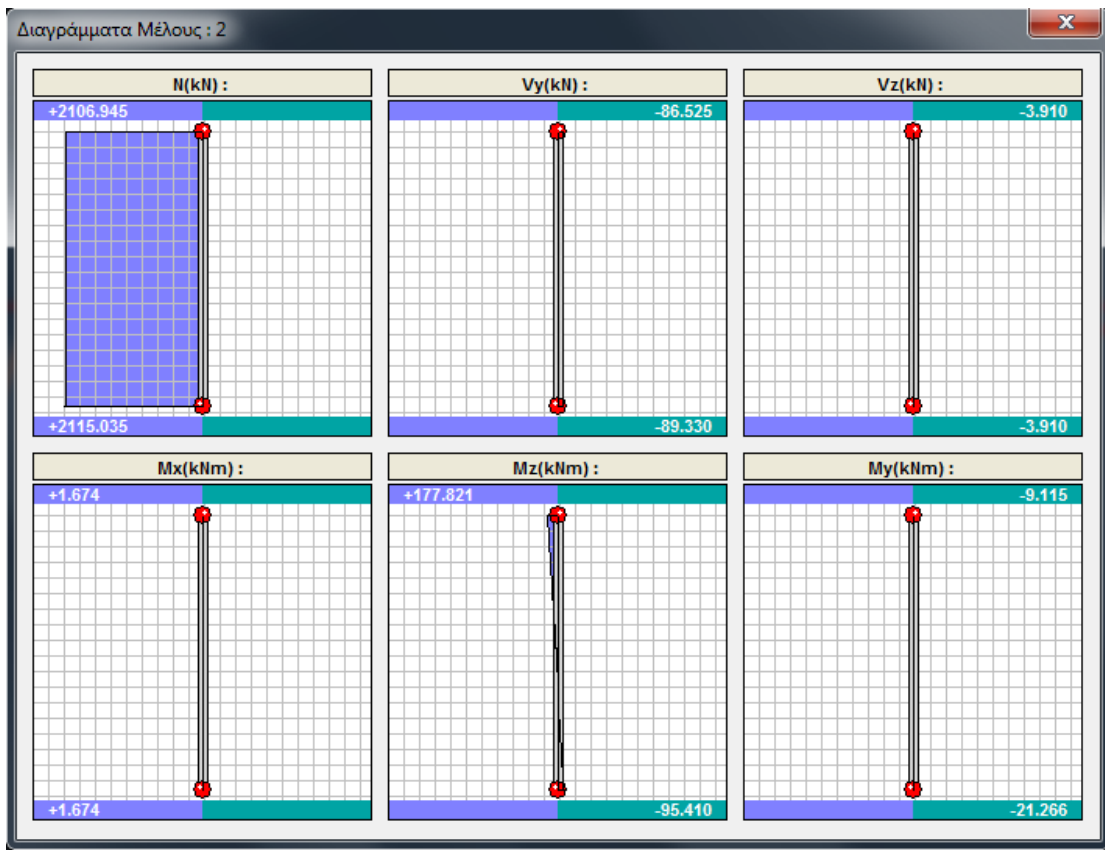
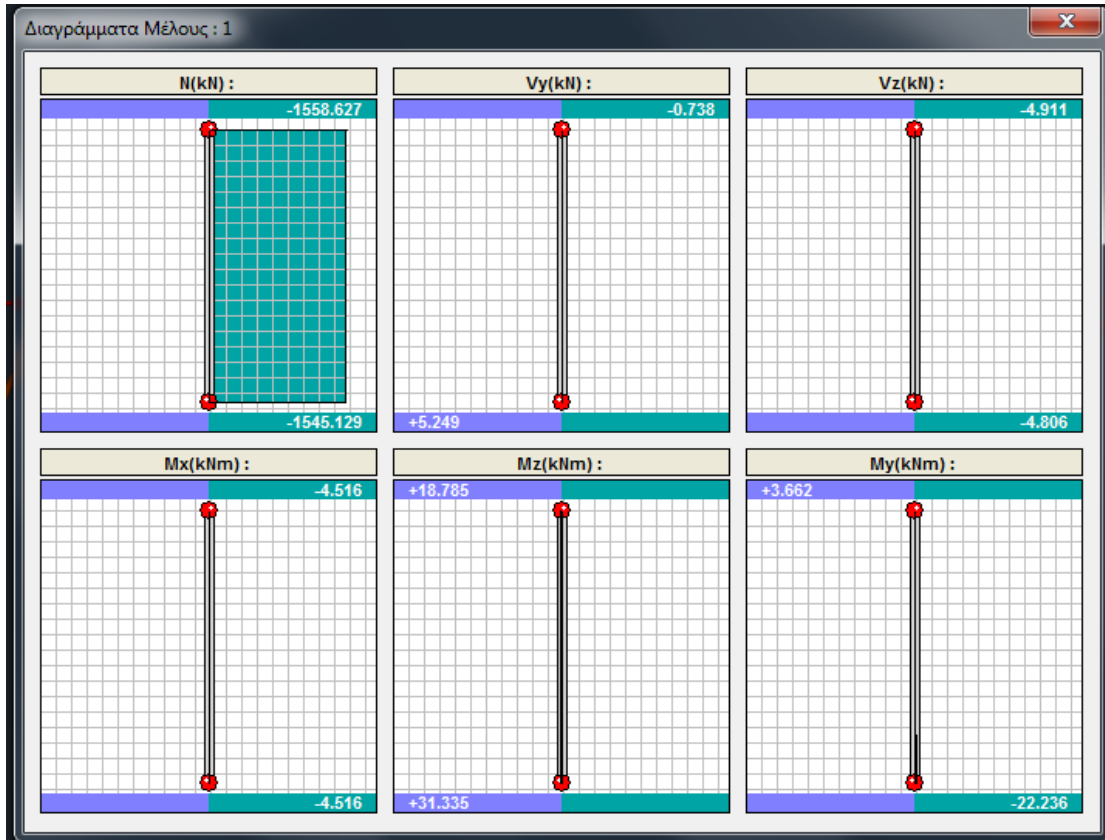


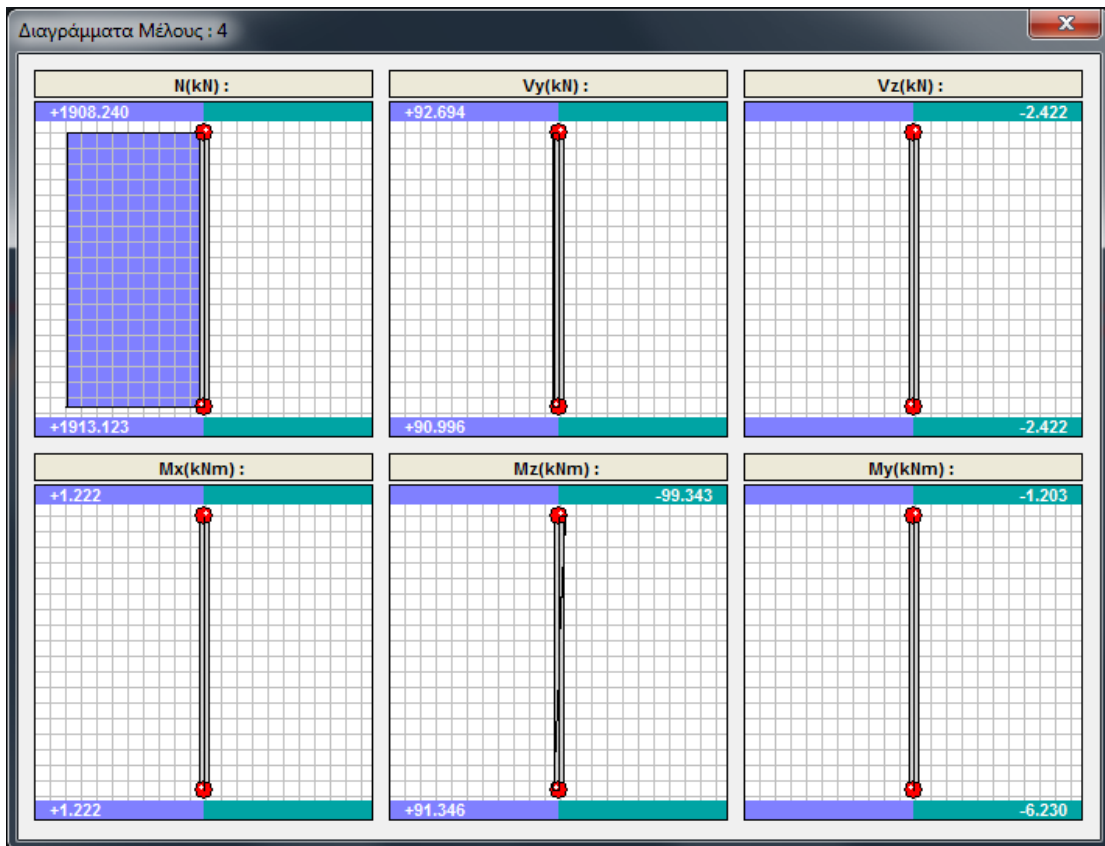
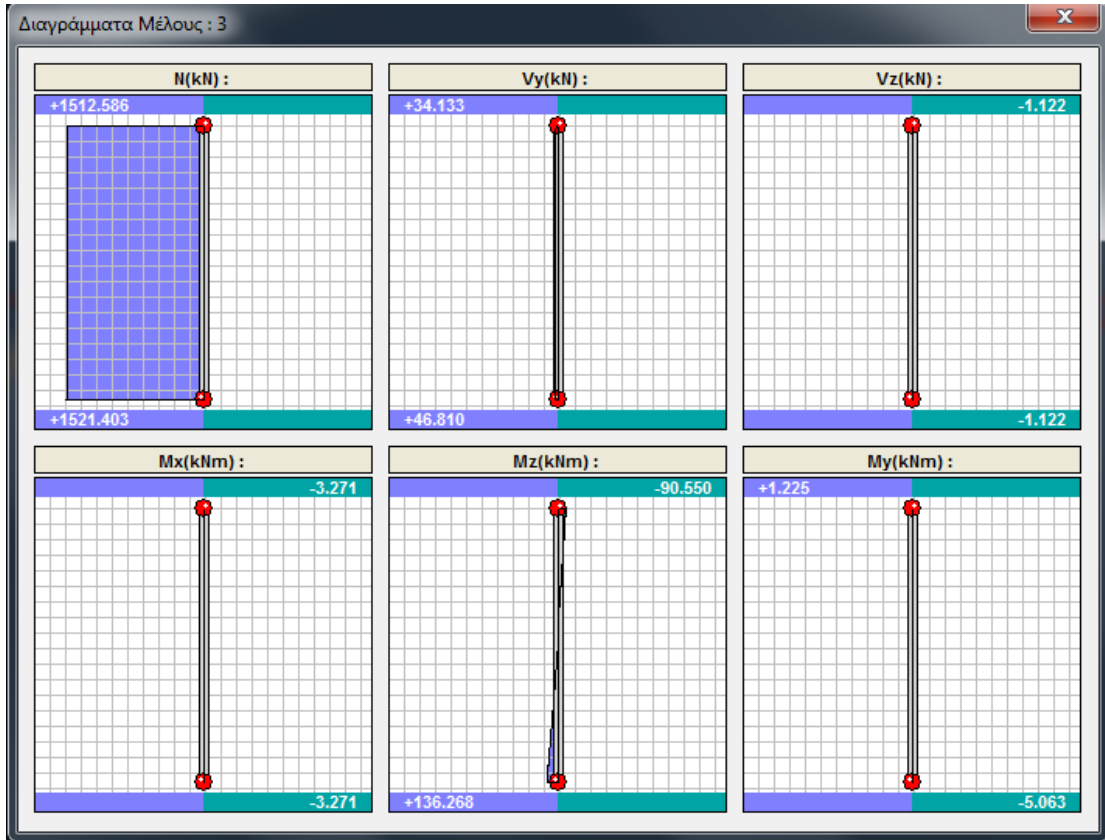
ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΣΙΔΗΡΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

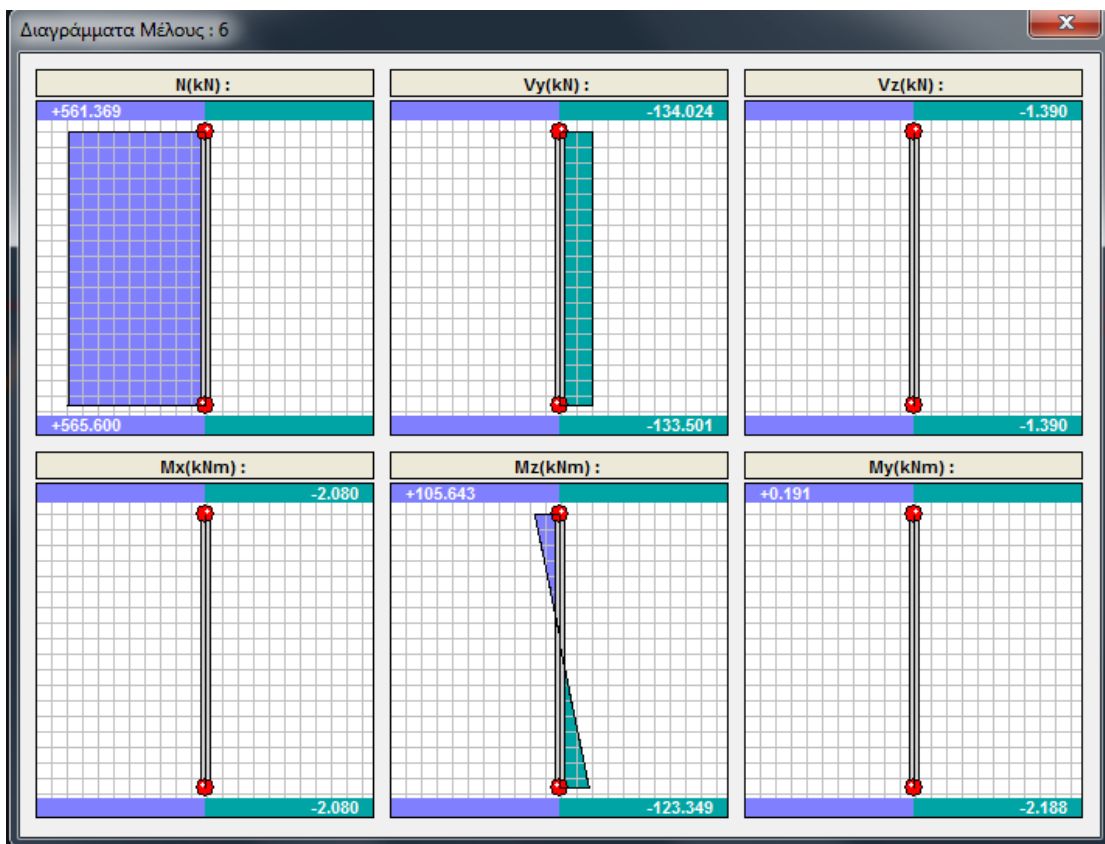
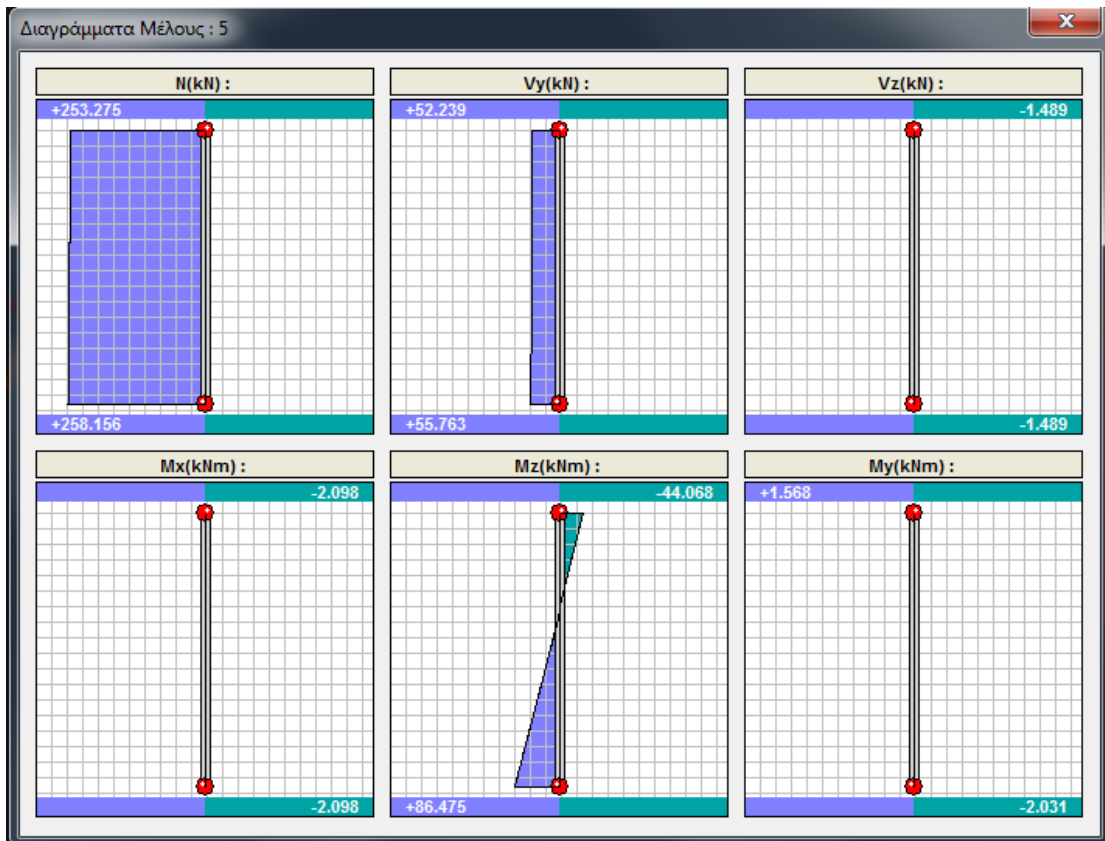
Μέλος	Διατομή	Μήκος (m)	Βάρος/m (Kg/m)	Βάρος (Kg)
K0 / 1	CHS 355.6	5.33	204.00	1087.55
K0 / 2	CHS 355.6	3.11	204.00	633.94
K0 / 3	CHS 355.6	5.61	204.00	1143.43
K0 / 4	CHS 323.9	2.08	184.00	382.12
K0 / 5	CHS 323.9	2.42	184.00	444.86
K0 / 6	CHS 323.9	1.71	184.00	314.93
K0 / 7	CHS 323.9	5.53	184.00	1017.39
Δ0 / 8	HEM 450	2.10	263.32	552.97
Δ0 / 9	HEM 450	2.10	263.32	552.45
Δ0 / 10	HEM 450	4.41	263.32	1161.24
Δ0 / 11	HEM 450	5.05	263.32	1329.78
Δ0 / 12	HEM 450	1.34	263.32	352.85
T O T A L				8974.00

ΕΥΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ΠΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΣΙΔΗΡΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

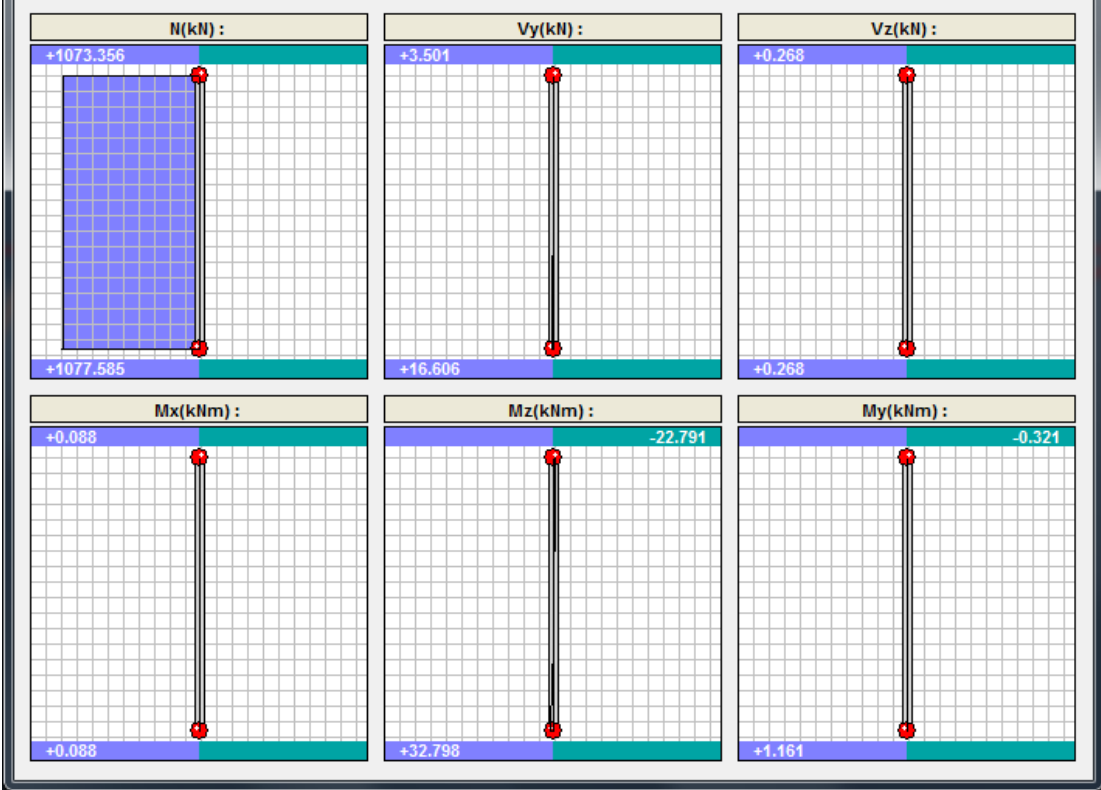
Διατομή	Μήκος (m)	Βάρος/m (Kg/m)	Βάρος (Kg)
CHS 355.6	14.04	204.00	2864.92
CHS 323.9	11.74	184.00	2159.30
HEM 450	15.00	263.32	3949.78
T O T A L			8974.00



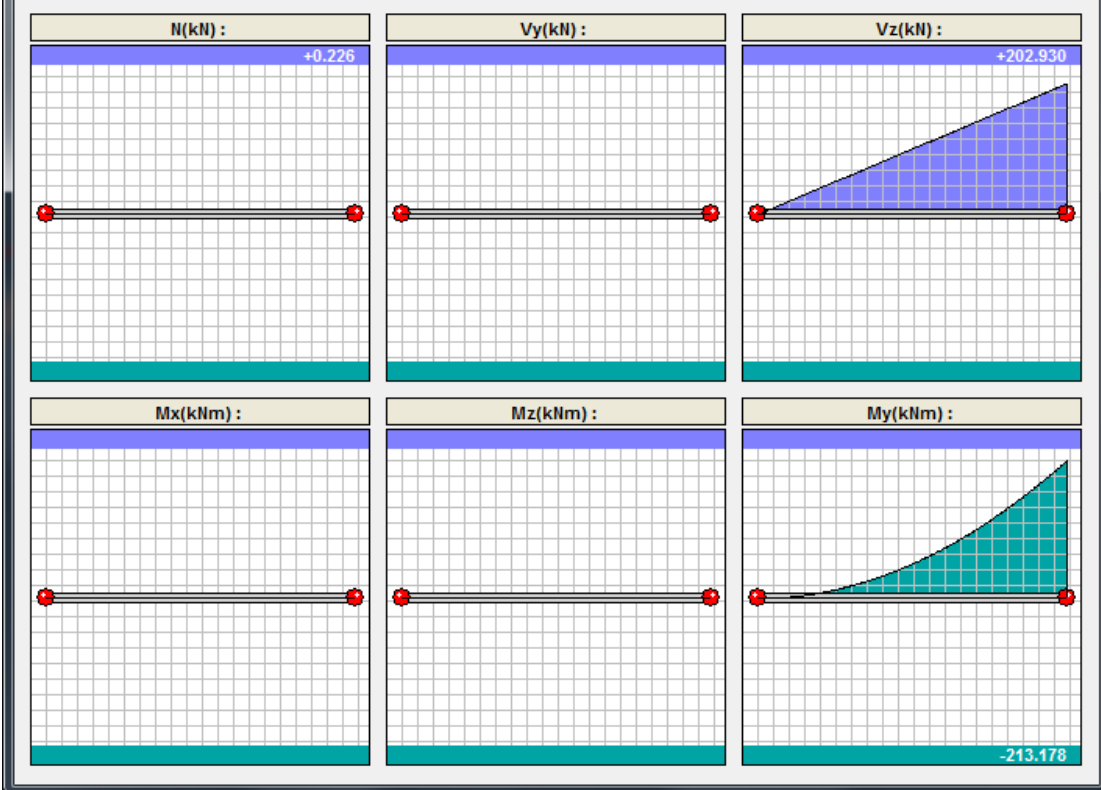


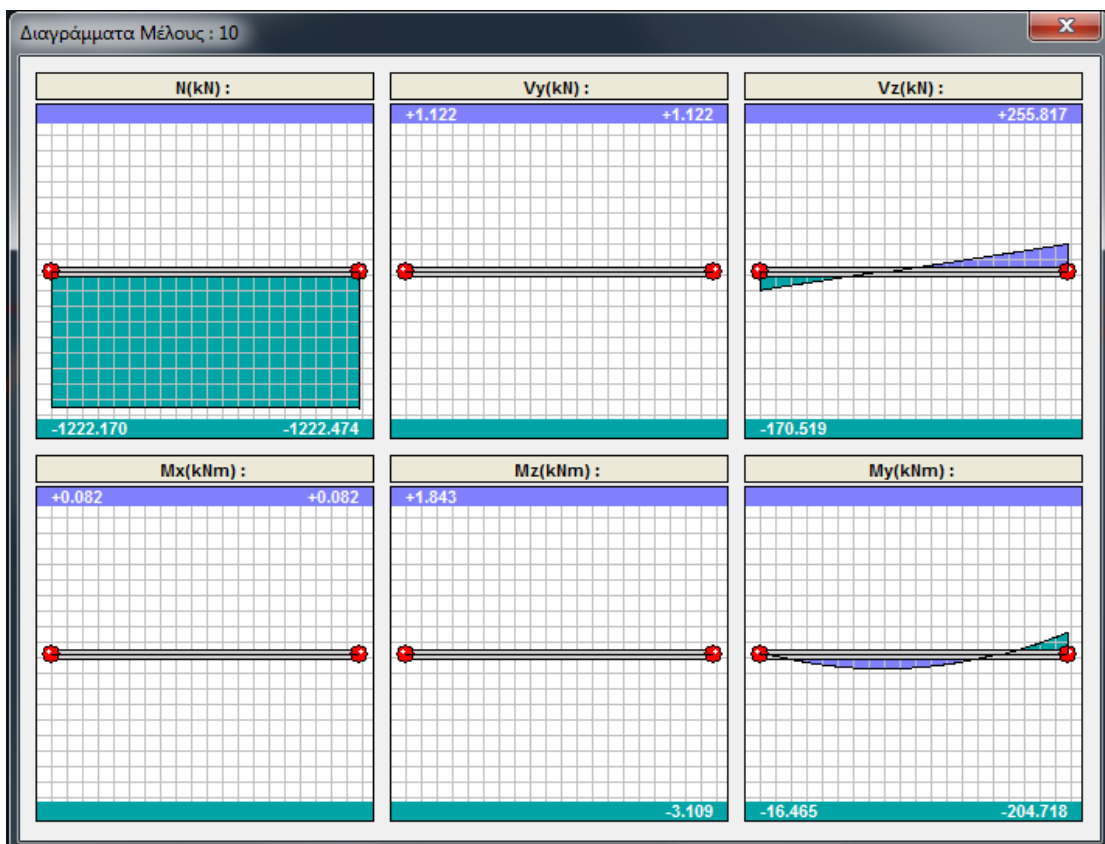
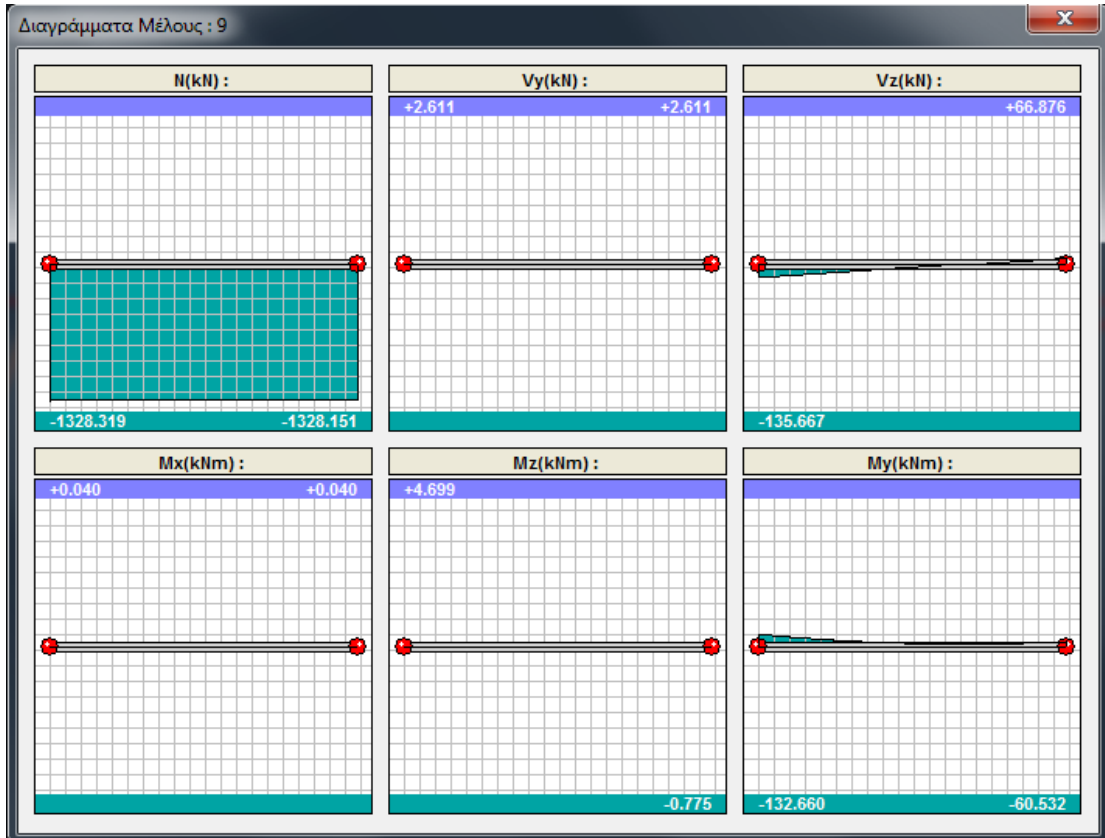


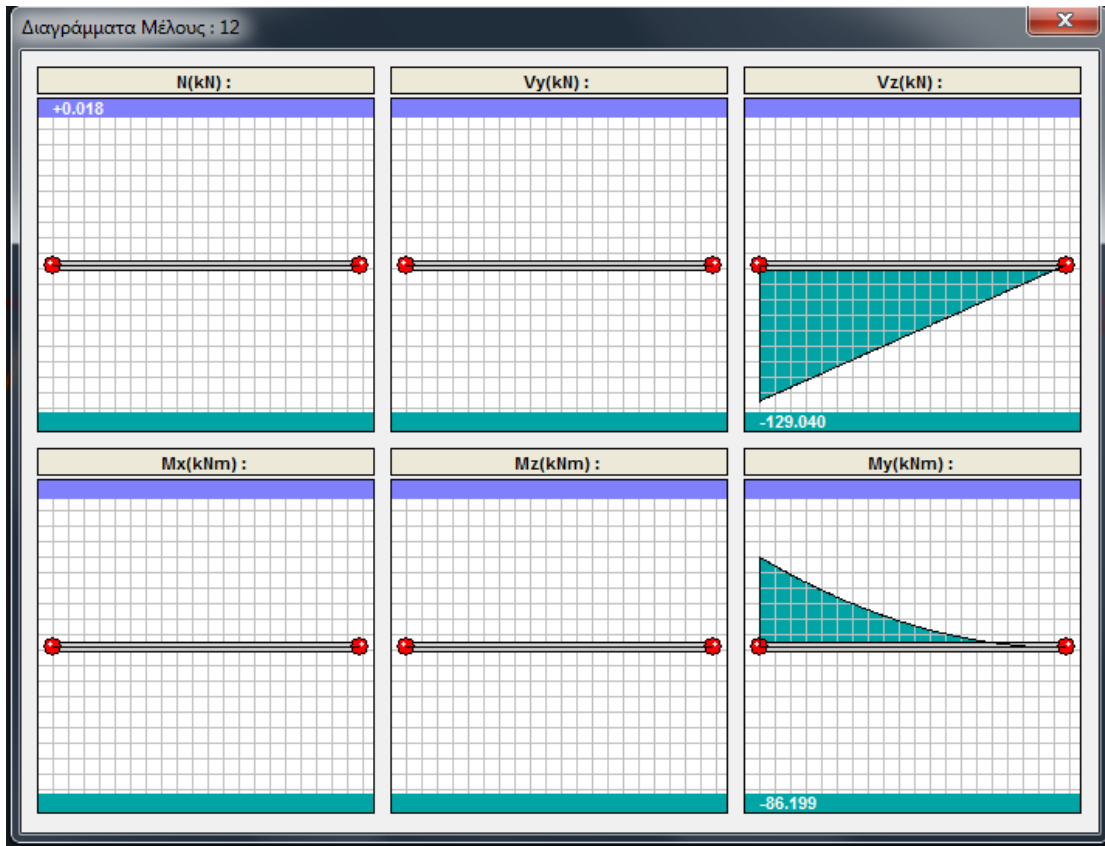
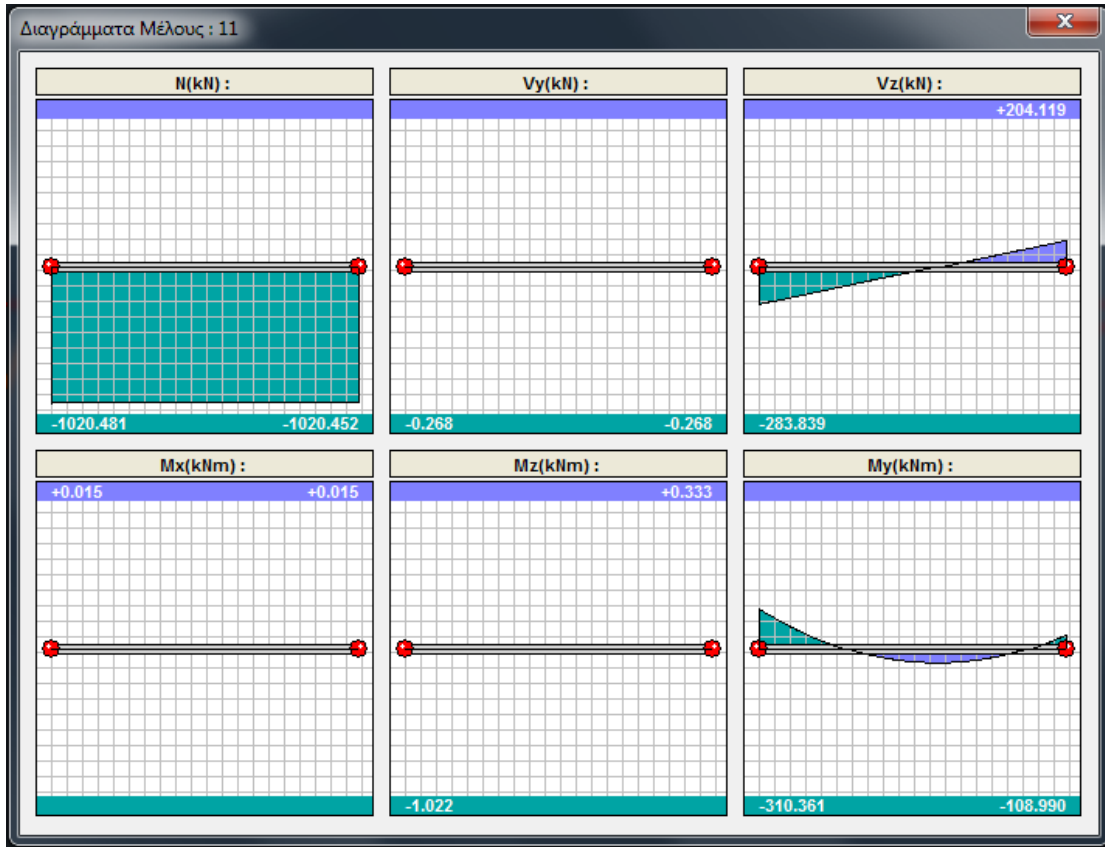
Διαγράμματα Μέλους : 7



Διαγράμματα Μέλους : 8





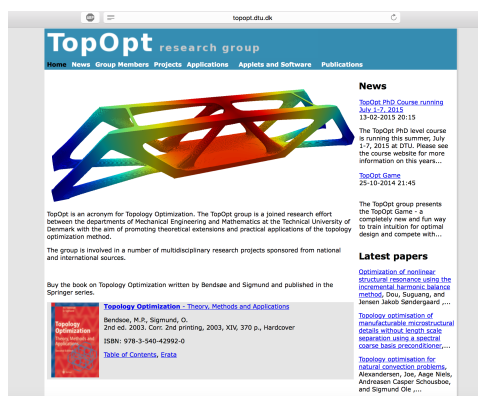


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

TopOpt Research Group

Στα πλαίσια ενασχόλησης με τη διπλωματική εργασία, η βιβλιογραφική επισκόπηση διαρκώς παρέπεμπε σε δανούς επιστήμονες που ανήκουν στη λεγόμενη “TopOpt research Group”. Πρόκειται για μια διατμηματική επιστημονική ομάδα του DTU (Technical University of Denmark), και πιο συγκεκριμένα του τμήματος μηχανολογών μαθηματικών και του τμήματος εφαρμοσμένων μαθηματικών, με σκοπό την προώθηση των θεωρητικών επεκτάσεων και των πρακτικών εφαρμογών των μεθόδων βελτιστοποίησης τοπολογίας. Της συγκεκριμένης προσπάθειας ηγείται ο Ole Sigmund, ερευνητικές εργασίες του οποίου αποτέλεσαν αντικείμενο μελέτης στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Τα ερευνητικά προτζεκτ που αναλαμβάνει η ομάδα χρηματοδοτούνται από εθνικούς και διεθνείς πόρους.

Στην ηλεκτρονική διεύθυνση της ομάδας, www.topopt.dtu.dk, μπορεί κανείς να βρει βιογραφικά των μελών που την αποτελούν, ερευνητικές δημοσιεύσεις, εφαρμογές, καθώς και δωρεάν λογισμικό το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην βελτιστοποίηση τοπολογίας. Η προσπάθεια αυτή χρονολογείται από το 2009.



Αξίζει να σημειωθεί πως η ίδια ομάδα δημιούργησε το 2014 την εφαρμογή “TopOpt” , καθώς και την “TopOpt3D” για κινητά τηλέφωνα που μπορεί με μερικές απλές κινήσεις να εμφανιστούν στην οθόνη του κινητού τηλεφώνου του χρήστη τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης.