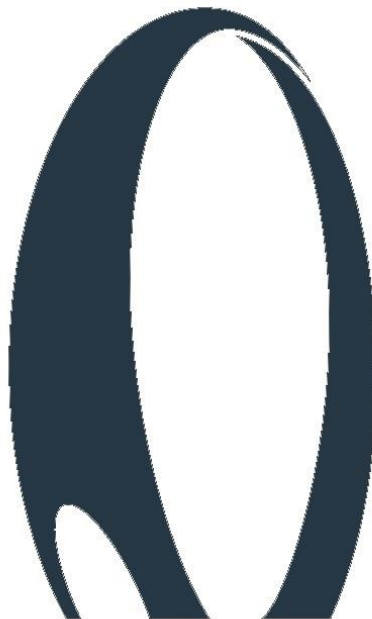




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ
ΚΑΙ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ
ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΘΟΛΟΥ
ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΜΟΡΦΗΣ**



Διπλωματική Εργασία
Σπυρίδων Καλύβας

ΕΜΚ ΔΕ 2016 37

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2016 37

Σύγκριση κανονιστικής προσέγγισης και μη γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων για το σχεδιασμό χαλύβδινου θόλου ελεύθερης μορφής

Σπυρίδων Καλύβας

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τον σχεδιασμό ενός χαλύβδινου θόλου ελεύθερης μορφής. Ο θόλος αυτός αποτελείται από δέκα τόξα διατομής διπλών ταυ, στην συμπεριφορά των οποίων δίνεται ιδιαίτερη έμφαση. Ο σχεδιασμός του πραγματοποιείται αρχικά σύμφωνα με μια κανονιστική προσέγγιση, όπως αυτή ορίζεται από τους Ευρωκώδικες, ενώ στη συνέχεια γίνονται μη γραμμικές αριθμητικές αναλύσεις με χρήση γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων δοκού, αλλά και επιφανειακών στοιχείων. Σκοπός της εργασίας είναι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των παραπάνω μεθόδων σχεδιασμού και η σύγκριση τους. Δίνεται, επίσης, βάση σε λεπτομερέστερους ελέγχους και αναλύσεις, όπως στη διερεύνηση συμπεριφοράς ενός μεμονωμένου, εκτός του θόλου, τόξου αλλά και στον ακριβέστερο έλεγχο της αντοχής των στηρίξεων των τόξων του θόλου. Η διπλωματική εργασία εκτείνεται σε οκτώ κεφάλαια, το περιεχόμενο των οποίων περιγράφεται παρακάτω.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στο υπό μελέτη πρόβλημα. Αρχικά γίνονται συνοπτικές αναφορές για το συνολικό έργο του οποίου μέρος είναι ο θόλος, ο οποίος εξετάζεται στην εργασία. Εν συντομία, επίσης, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του κανονιστικού σχεδιασμού αλλά και των βασικών εννοιών της μη γραμμικής συμπεριφοράς των κατασκευών και οι πιθανές διαφορές που συναντούνται στις δύο περιπτώσεις σχεδιασμού. Στη συνέχεια, με συγκεκριμένη αναφορά στον υπό μελέτη θόλο, γίνεται περιγραφή της δομής της διπλωματικής εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται η αναλυτική περιγραφή της γεωμετρίας του θόλου, μαζί με τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό, αλλά και τους κανονισμούς και κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένα για την κανονιστική προσέγγιση. Τέλος, παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι πιθανές φορτίσεις που μπορούν να ασκηθούν στο θόλο και εξηγείται ποιος συνδυασμός τους είναι ο πιο κρίσιμος, ώστε να χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό με τις μη γραμμικές αριθμητικές αναλύσεις.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχεδιασμού με κανονιστική προσέγγιση. Για τον σχεδιασμό αυτόν του θόλου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SAP2000, το οποίο δίνει την δυνατότητα στο χρήστη εισαγωγής όλων των πιθανών συνδυασμών φορτίσεων, οι οποίοι και παρουσιάζονται στα πλαίσια του κεφαλαίου αυτού. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε, είναι με τη μορφή βαθμών αξιοποίησης του κάθε μέλους, οι οποίοι υπολογίζονται μέσω σχέσεων αλληλεπιδράσεων σύμφωνα με τους ελέγχους που ορίζει ο Ευρωκώδικας

3 για την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας, και με τη μορφή μέγιστων μετακινήσεων που έχουν υπολογιστεί σε κρίσιμα σημεία του θόλου για την Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας.

Στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις μη γραμμικές αριθμητικές αναλύσεις για το θόλο, τα οποία προέκυψαν με βοήθεια του λογισμικού ADINA. Στο τέταρτο κεφάλαιο, η προσομοίωση των τόξων του θόλου γίνεται με τρία διαφορετικά είδη πεπερασμένων ραβδωτών στοιχείων δοκού, ενώ στο πέμπτο κεφάλαιο η προσομοίωση γίνεται με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Οι αναλύσεις για τις οποίες δίνονται τα αποτελέσματα είναι Γραμμικοποιημένες Αναλύσεις Λυγισμού (LBA), μη γραμμικές αναλύσεις με θεώρηση γεωμετρικής μη γραμμικότητας (GNA) και μη γραμμικές αναλύσεις με θεώρηση μη γραμμικότητας γεωμετρίας και υλικού (GMNA). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν σε αυτές τις αναλύσεις, για τα τρία είδη των γραμμικών στοιχείων με τα οποία έχουν προσομοιωθεί τα τόξα, συγκρίνονται μεταξύ τους, προς εξαγωγή ανάλογων συμπερασμάτων, ενώ σύγκριση γίνεται και με τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το προσομοίωμα με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων. Γίνεται, επίσης, έλεγχος της επιρροής των αρχικών ατελειών και των θερμοκρασιακών φορτίων στη συμπεριφορά των τόξων. Τέλος, στα συμπεράσματα του πέμπτου κεφαλαίου γίνεται, εν συντομία, σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τον κανονιστικό σχεδιασμό και τον σχεδιασμό με μη γραμμικές αριθμητικές αναλύσεις.

Στο έκτο κεφάλαιο, κρίθηκε ενδιαφέρον να γίνει μια διερεύνηση της συμπεριφοράς του κρίσιμου για την αστοχία τόξου του θόλου, όταν αυτό λειτουργεί μεμονωμένα. Περιγράφεται, η προσπάθεια, από το συγγραφέα, προσομοίωσης της γεωμετρίας του μεμονωμένου τόξου, αλλά και των συνθηκών στήριξης και των φορτίσεών του. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων που έγιναν για το μεμονωμένο τόξο και συγκρίνονται με αυτά για την περίπτωση που το τόξο λειτουργεί εντός του θόλου, με εξαγωγή ανάλογων συμπερασμάτων.

Στο έβδομο κεφάλαιο εξετάζεται το μοντέλο της στήριξης ενός τόξου του θόλου. Η προσομοίωση του μοντέλου έχει γίνει με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων. Εξετάζεται και εντοπίζεται η συνολική αντοχή του μοντέλου αυτού, καθώς και ο λόγος για τον οποίο αστοχεί, ενώ εξάγονται και τα ανάλογα συμπεράσματα. Τέλος, στο όγδοο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2016 37

Comparison of code-based approach and nonlinear numerical analyses for the design of free form steel dome

Spyridon Kalyvas

Supervisor: Professor Charis Gantes

ABSTRACT

The present diploma thesis is concerned with the design of a free form steel dome. This dome is comprised of ten I-section arches, on the behaviour of which particular attention is paid. Initially, its design is performed via a code-based approach, as the latter is defined by the relevant Eurocodes, while, subsequently, nonlinear numerical analyses with the utilisation of beam, as well as shell finite elements, is undertaken. The ultimate objective of this study is the presentation of the results arrived at through the aforementioned design methods, as well as a comprehensive comparison between them. In addition, particular attention to more detailed investigations and analyses is devoted, such as vis-à-vis the behaviour of an arch in isolation (that is, abstracted from the dome), as well as with regards to the more precise calculation of the resistance of the base connections of the arches of the dome. This study is organised in eight Chapters, the content of which will be referred to in detail below.

Chapter One introduces the reader to the investigation and its rationale. It starts by providing a brief reference to the building, the dome of which is the primary focus of this study. The key characteristics of the code-based design approach, the basic principles particular to the nonlinear behaviour of structures, and the potential divergences one could face via the utilisation of the two distinct design approaches are also presented. In turn, this Chapter proceeds by outlining the organisation of the present diploma thesis, referring, as deemed relevant, to the dome under examination. Chapter Two is concerned with carefully describing the dome's geometry, the materials used in the design, and the codes, regulations and standards summoned specifically for the code-based approach. Finally, the entirety of possible loads that can be applied to the dome is presented in detail, proceeded by the explanation of which of these combinations is the most critical, to motivate the reasons why the latter is used for the design that pertains the nonlinear numerical analyses.

Chapter Three presents the results of the code-based design approach. To carry out the design of the dome, the SAP2000 software was used, which allows the user to incorporate all possible load combinations, all of which are presented in this Chapter. The results that were subsequently drawn from the software are in the form of interaction ratios of each member, which were calculated according to the relevant guidelines, as outlined by Eurocode 3, pertaining to the Ultimate Limit State,

and in the form of maximum displacement calculated at critical points of the dome, vis-à-vis the Serviceability Limit State.

Chapters Four and Five present the results of the nonlinear numerical analyses of the dome, which were arrived at through the usage of the ADINA software. In the former Chapter, the simulation of the dome's arches is performed via three distinct types of finite beam elements, while in the latter, the simulation is undertaken through finite shell elements. The analyses for which results are presented are Linearised Buckling Analysis (LBA), Geometric Nonlinear Analysis (GNA), and Geometric and Material Nonlinear Analysis (GMNA). The results that are drawn from the three different types of analyses regarding the arches' simulation are compared and contrasted among one another, the relevant conclusions are noted, and the study proceeds by comparing them, in turn, to the results arrived at through the finite shell elements' simulation. In addition, the influence of initial imperfections and temperature loads to the behaviour of the arches is examined. Finally, Chapter Five concludes by briefly comparing the results of the code-based and nonlinear numerical analyses' design approaches.

In Chapter Six, it was deemed interesting to investigate the behaviour of one of the dome's arches in isolation, as it can prove critical to its potential failure. The attempt of simulating the geometry of the isolated arch is described, as well as those of the boundary conditions and loads. In turn, the results of the nonlinear analyses that were carried out with regards to the isolated arch are presented, and compared to those that were arrived at when the arch was not in isolation (i.e. was part of the dome), drawing the relevant conclusions.

Chapter Seven examines the base connection for one of the dome's arches. The model's simulation has been performed via finite shell elements. The resistance of the base connections model is investigated and pinpointed, as well as the reasons for which it can fail, drawing the relevant conclusions. Finally, Chapter Eight summarises the key conclusions of this diploma thesis.