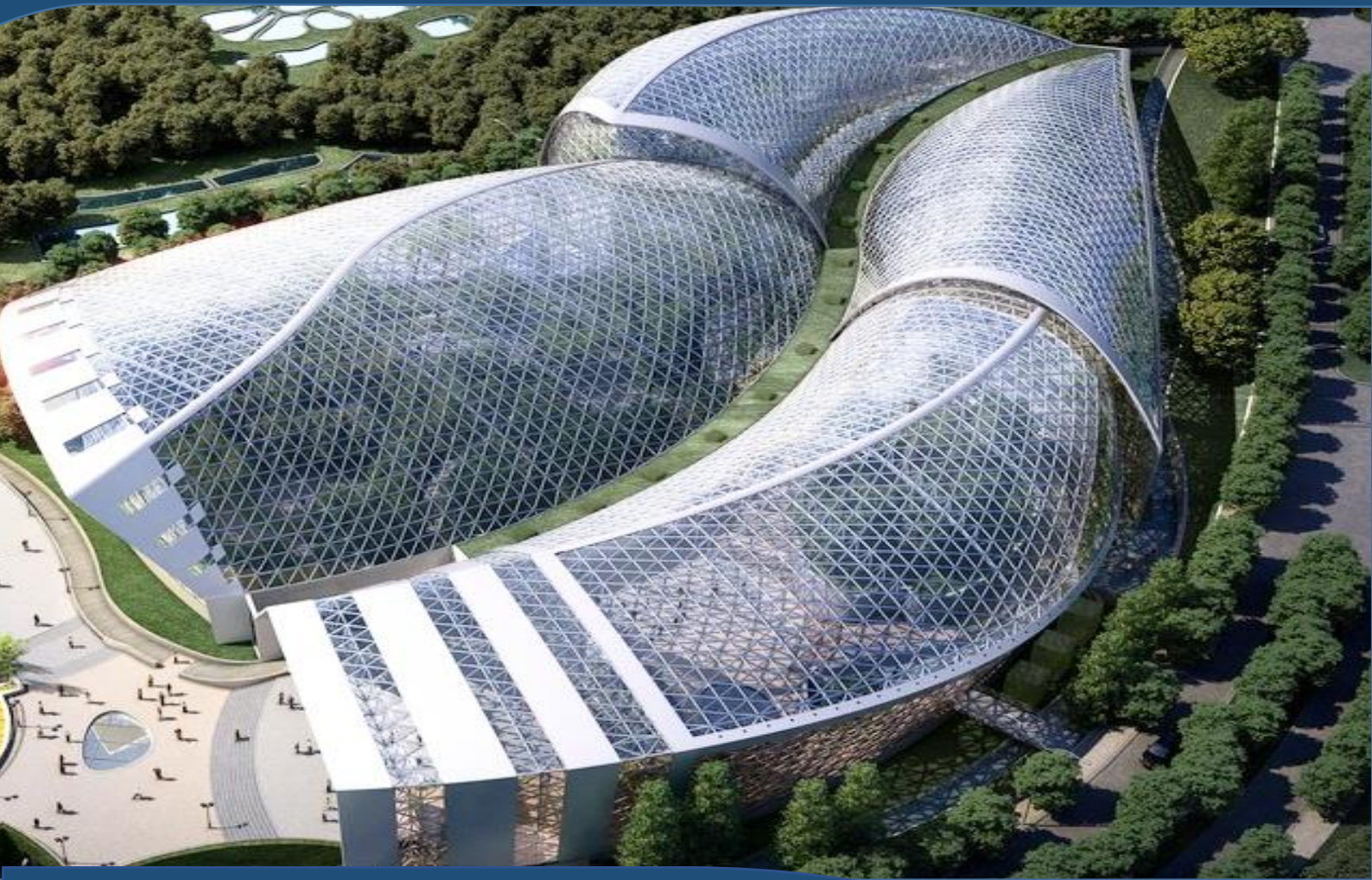




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΟΝΟΣΤΡΩΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΤΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ



Διπλωματική Εργασία
Άντζελο Μπαλή
ΕΜΚ ΔΕ 2018 15

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ
Συνεπιβλέπουσα: Μαρία Λιβανού, ΥΔ ΕΜΠ, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2018

Copyright © Αντζελο Μπαλή, 2018
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, 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 στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Antzelo Balli, 2018
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organization (L. 5343/1932, art. 202).

Άντζελο Μπαλή (2018)

Ανάλυση και σχεδιασμός μονόστρωτων δικτυωτών μεταλλικών κελυφών
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2018 15
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Antzelo Balli (2018)

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2018 15
Analysis and design of single layer reticulated shell structures
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Κατά τον προπτυχιακό κύκλο σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο είχα την τιμή να γνωρίσω και να συναναστραφώ με πολλούς αξιόλογους ανθρώπους. Ένας από αυτούς είναι και ο κ. Χάρης Γαντές. Αν και γνώριζα από πριν το όνομα του, καθώς τα ακαδημαϊκά επιτεύγματα του είναι αξιοσημείωτα, είχα την ευκαιρία να τον έχω ως καθηγητή στα μαθήματα των Σιδηρών Κατασκευών 1 και Σιδηρών Κατασκευών 2. Το πάθος, η μεταδοτικότητα, η οργάνωση και η αφοσίωση στους φοιτητές του με εξέπληξαν αφάνταστα, οπότε ήμουν βέβαιος πως θα επιλέξω και το μάθημα της Μη Γραμμικής Συμπεριφοράς Μεταλλικών Κατασκευών που διδάσκει στο 9 εξάμηνο της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών. Οπότε, θέλω να τον ευχαριστήσω θερμά τόσο για τα μαθήματα που τον είχα καθηγητή όσο και για την ευκαιρία που μου έδωσε ώστε να αναπτύξω την παρούσα διπλωματική εργασία. Κατά την φάση της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας ο κ. Χάρης Γαντές ήταν πάντα πρόθυμος να συζητήσει τις ανησυχίες μου και να με καθοδηγήσει τόσο στην ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας όσο και στα επόμενα ακαδημαϊκά μου βήματα. Πάνω από όλα όμως θα ήθελα να τον ευχαριστήσω διότι εκτός από ένας εξαιρετος επιστήμονας είναι και ένας θαυμάσιος άνθρωπος.

Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά για την υποστήριξη της την κ. Μαρία Λιβανού, Υποψήφια Διδάκτορα του Ε.Μ.Π., μια εξαιρετική επιστήμονα και λαμπρή μηχανικό. Η συμβολή της ήταν καθοριστική στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Την ευχαριστώ για τις πολυάριθμες συναντήσεις μας καθώς ήταν πάντα πρόθυμη να με συμβουλευτεί και να με καθοδηγήσει. Της εύχομαι να συνεχίσει με το ίδιο πάθος και κάθε επιτυχία στην ζωή της. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ηλία Θανασούλα, Υποψήφιο Διδάκτορα του Ε.Μ.Π., για την κατάρτιση μου στα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων.

Τέλος, οφείλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου που με στηρίζει πάντα σε όλα τα βήματα μου, καθώς και σε όλους τους φίλους μου για την αμέριστη συμπαράσταση τους στα φοιτητικά μου χρόνια.

Στους γονείς μου Ιωσήφ και Λιντίτα



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2018 15

Ανάλυση και σχεδιασμός μονόστρωτων δικτυωτών μεταλλικών κελυφών

Άντζελο Μπαλή

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ
Συνεπιβλέπουσα: Μαρία Λιβανού, ΥΔ ΕΜΠ, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Ιούλιος 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην σημερινή εποχή, η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των αριθμητικών μεθόδων έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση του σχεδιασμού και της ανάλυσης των μονόστρωτων δικτυωτών κελυφών. Ο σχεδιασμός αυτός βασίζεται σε συγκεκριμένα βήματα που πρέπει να ακολουθήσει ο μελετητής ώστε τα αποτελέσματα των αναλύσεων να είναι αξιόπιστα. Ορισμένοι σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην φάση του σχεδιασμού είναι η επιλογή της κατάλληλης γεωμετρίας, οι συνοριακές συνθήκες, η κατανομή των φορτίων, η δυσκαμψία των συνδέσεων και οι γεωμετρικές ατέλειες ώστε η μοντελοποίηση και οι αναλύσεις να είναι ορθές.

Στο αρχικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας μελετάται η απόκριση ενός μονόστρωτου δικτυωτού θόλου υπό κατακόρυφη ομοιόμορφη φόρτιση. Το μοντέλο του θόλου προσομοιώνεται με ελαστικές συνοριακές συνθήκες, ενώ οι συνδέσεις στους κόμβους του φορέα γίνονται με ελατήρια ώστε να ληφθεί υπόψη στην ανάλυση και η καμπτική δυσκαμψία των συνδέσεων. Στην συνέχεια αναπτύσσονται αλγόριθμοι τόσο για το γεωμετρικό σχεδιασμό των μονόστρωτων δικτυωτών κελυφών όσο και για την μετατροπή τους σε μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων.

Στις παραμετρικές αναλύσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετάται η επιρροή των φορτίων ανέμου σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1, η επίδραση της λυγηρότητας των μελών καθώς και ο λόγος ύψους προς άνοιγμα στην απόκριση των μονόστρωτων δικτυωτών θόλων. Επιπλέον, εξετάζεται παραμετρικά η επιρροή της καμπτικής δυσκαμψίας των συνδέσεων στο φορτίο αντοχής των σφαιρικών θόλων. Οι τιμές των στροφικών δυσκαμψιών κυμαίνονται από μικρές τιμές για αρθρώσεις έως πολύ μεγάλες όπου πρακτικά οι συνδέσεις θεωρούνται άκαμπτες.

Στην τελευταία ενότητα της διπλωματικής εργασίας σχεδιάζονται και αναλύονται δυο μοντέλα μονόστρωτων δικτυωτών κελυφών με ελεύθερη μορφή. Η φόρτιση των μοντέλων είναι ομοιόμορφη και στις αναλύσεις έχει ληφθεί υπόψη η μη γραμμικότητα γεωμετρίας, η μη γραμμικότητα υλικού καθώς και οι γεωμετρικές ατέλειες.



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

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2018 15

Analysis and design of single layer reticulated shell structures

Antzelo Balli

Supervisor: Charis Gantes, Dr. Civil Engineer, Professor N.T.U.A.
Co-supervisor: Maria Livanou, PhD Candidate N.T.U.A., Civil Engineer N.T.U.A.

July 2018

ABSTRACT

Nowadays, due to the development of computers and numerical methods the design and analysis of single layer reticulated shell structures has been progressed a lot. More specifically, the design process of a reticulated shell is based on concrete actions that must be followed by engineers so that the analysis results are reliable. For instance, during the design process many important parameters must be taken into account, such as the geometry of the structure, the boundary conditions, the load distribution, the bending stiffness of the connections and the geometrical imperfections in order to model the structure properly, and so that the analysis will properly describe the response of the shell.

The first part of this thesis examines the response of a reticulated dome under uniform load. The dome model is simulated with elastic boundary conditions while the connections between struts are designed with springs in order to study how the bending stiffness at the nodes affects the critical buckling load. Additionally, in the next part of the thesis two algorithms are presented, which have been developed to design the geometry of reticulated shell structures and to convert them into finite element models. Therefore, the combination of the above algorithms has as a result the considerable reduction of the time and effort needed for the model design of reticulated shell structures, thus many parametric investigations can be made.

Through parametric analyses, it is observed how the wind load which is based on Eurocode 1 standards affects the response of a single layer reticulated dome. Also, this part of the thesis examines how the members' slenderness and height to span ratio affect the critical buckling load of reticulated shell structures. Furthermore, it is known that the bending stiffness of connections affects the critical buckling load and the collapse mechanism of shell structures, therefore the loading resistance of a single layer reticulated spherical dome is investigated for a wide range of bending stiffness values at nodes.

In the last part of this thesis the design and analysis process of two free form reticulated shell models is presented. The loading on the models is uniform and the analyses have taken into account the material and geometric nonlinearity as well as the geometrical imperfections.