Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



National Technical University of Athens School of Civil Engineering Institute of Steel Structures



Χριστόφορος Α. Δημόπουλος

**Christoforos A. Dimopoulos** 

Ενίσχυση οπών ανθρωποθυρίδων σε χαλύβδινα κελύφη πυλώνων ανεμογεννητριών - Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση Stiffening of manhole opening of steel wind turbine tower shells -**Experimental and numerical investigation** 

Διδακτορική διατριβή, 2012 Επιβλέπων : Χάρης Ι. Γαντές, Αναπληρωτής Καθηγητής

Doctoral Thesis, 2012 Supervisor: Charis J. Gantes, Associate Professor

## Περίληψη

Στη διατριβή αυτή εξετάστηκε η αποδοτικότητα διάφορων τύπων ενίσχυσης της οπής ανθρωποθυρίδας χαλύβδινων κυλινδρικών πυλώνων ανεμογεννητριών. Η παρουσία αυτής της οπής προκαλεί συγκέντρωση τάσεων και μειώνει σημαντικά την αντοχή του πυλώνα. Στην πράξη χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι ενισχύσεων του κελύφους στην περιοχή της οπής, με στόχο την αύξηση της αντοχής του πυλώνα.

Στα πλαίσια αυτής της διατριβής επιχειρήθηκε να διαλευκανθεί: (α) ποια μορφή ενίσχυσης από αυτές που χρησιμοποιούνται στην πράξη ή προτείνονται στη βιβλιογραφία είναι η πιο αποδοτική, (β) ποιες είναι οι απαιτούμενες διαστάσεις των ενισχύσεων, ώστε να επιτυγχάνεται αποδεκτή αντοχή του πυλώνα. Η διερεύνηση του προβλήματος πραγματοποιήθηκε με πειραματικές και αριθμητικές μεθόδους, ενώ ακολουθήθηκε αξιολόγηση όλων των προτεινόμενων από το ΕΝ1993-1.6 μεθοδολογιών αριθμητικής ανάλυσης και προτάθηκαν πρωτότυπες διαδικασίες εκεί όπου οι υπάρχουσες υστερούν.

## Abstract

Objective of this thesis was to study the efficiency of various practical stiffening schemes for the manhole cutout of cylindrical wind turbine steel towers. The presence of this cutout induces stress concentrations in the steel shell and reduces significantly the strength of the tower. In practice, several stiffening types are used in the cutout area, in order to recover the tower strength loss.

In the present thesis, solutions to the following issues were sought: (i) which stiffening type, among those that are used in practice or proposed in the literature, is the most efficient, (ii) which are the necessary dimensions of the stiffeners in order to achieve acceptable levels of strength for the tower. The investigation of this problem was carried out using a combined experimental and numerical approach. An evaluation of the existing numerical methodologies recommended in EN1993-1.6 was performed and new procedures were recommended, where the available ones were proved to be insufficient.



Η παρουσία της ανθρωποθυρίδας προκαλεί συγκέντρωση τάσεων, αυξάνει την ευαισθησία του κελύφους έναντι τοπικού λυγισμού και μειώνει την αντοχή του πυλώνα. Η τοπική ενίσχυση του

Για τις πειραματικές δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν συνολικά έξι δοκίμια που αντιστοιχούν σε πραγματικούς πυλώνες ανεμογεννητριών ως προς τη λυγηρότητα του κελύφους και τις διαστάσεις της οπής και της ενίσχυσης, σε κλίμακα 1:10. Επιπλέον, επιλύθηκαν προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων, στα οποία ελαμβάνετο υπόψη η γεωμετρική μη γραμμικότητα, την ανελαστικότητα του υλικού, τις αρχικές ατέλειες και τα φαινόμενα επαφής μεταξύ κοχλιών και δακτυλίων στις συνδέσεις (αναλύσεις GMNA και GMNIA), και πιστοποιήθηκαν μέσω σύγκρισης με τα πειραματικά αποτελέσματα. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες αριθμητικές διερευνήσεις, με σκοπό την αξιολόγηση της αποδοτικότητας διαφόρων μορφών ενίσχυσης της οπής και τη διατύπωση συστάσεων σχεδιασμού.

For the experimental tests, six specimens were manufactured in scale 1:10 and tested. These corresponded to modern wind turbine towers in terms of shell slenderness as well as opening and stiffening dimensions. Moreover, finite element models were analyzed, taking into account geometric nonlinearity, material inelasticity, initial imperfections (GMNA and GMNIA). Contact interactions between bolts and ring flanges at the connections among tower parts were also simulated. The numerical results were calibrated by means of comparison with experimental ones. Finally, extensive numerical parametric investigations were carried out, in order to evaluate the efficiency of alternative stiffening schemes of the manhole area and to formulate design recommendations.

κελύφους γίνεται με διάφορους τρόπους ώστε να αποκατασταθεί η απώλεια αντοχής του.

The presence of the manhole cutout produces stress concentrations, increases the sensitivity of the shell to local buckling and reduces the strength of the tower. In order to recover the shell's strength loss, the cutout area is stiffened using various alternative stiffening schemes.



**Πειραματική διάταξη**. Τα έξι πειραματικά δοκίμια (2 χωρίς οπή, 2 με μη ενισχυμένη οπή και 2 με ενισχυμένη οπή) πακτώθηκαν στο πλαίσιο δοκιμών μέσω ενός κοχλιωτού ελάσματος μεγάλου πάχους και υποβλήθηκαν σε εγκάρσια μετατόπιση στο άκρο.

**Experimental set-up**. The six cantilever specimens (2 without cutout, 2 with unreinforced cutout and 2 with reinforced cutout) were clamped on the testing frame through a thick bolted plate and subjected to a transverse displacement at the edge.



Αριθμητικά προσομοιώματα για τα πειραματικά δοκίμια. Κατασκευάστηκαν δύο προσομοιώματα για τον υπολογισμό χαρακτηριστικών δρόμων ισορροπίας και αντίστοιχων εντάσεων και παραμορφώσεων. Το ένα αφορούσε μέρος του πλαισίου που στήριζε τα δοκίμια και το δεύτερο τα ίδια τα δοκίμια. Ελήφθησαν υπόψη όλα τα φαινόμενα επαφής μεταξύ δακτυλίων και κοχλιών καθώς και η γεωμετρική μη γραμμικότητα και η ανελαστικότητα του υλικού.

**Numerical simulation models**. Two numerical models have been built in order to evaluate characteristic load-displacement curves and corresponding stresses and deformations. The first modeled a portion of the testing frame supporting the specimens and the second the specimens themselves. All interaction phenomena were included as well as geometric nonlinearity and material inelasticity.





**Μορφές παραμόρφωσης**. (i) κέλυφος με μη ενισχυμένη οπή, (ii) κέλυφος με ενισχυμένη οπή (διαμήκη ελάσματα πλάτους 175mm και δακτύλιος, Α/Α<sub>0</sub>=1.0), (iii) κέλυφος με ενισχυμένη οπή (διαμήκη ελάσματα πλάτους 175mm και δακτύλιος, A/A<sub>0</sub>=1.8).

Α=εμβαδόν ενίσχυσης, Α<sub>0</sub>=εμβαδόν οπής

4 Block 14–1 (Πείραμα/Experiment Block 12–1 (Πείραμα/Experiment — Block 16–1 (Πείραμα/Experime Block 12-2 (Πείραμα/Experiment Block 14–2 (Πείραμα/Experiment) Block 16-2 (Πείραμα/Experi - - - ABAQUS (Επίπεδο 1/Level 1) - – ABAQUS (Επίπεδο 1/Level 1) - - ABAQUS (Επίπεδο 1/Level 1) ABAQUS (Επίπεδο 2/Level 2) ABAQUS (Επίπεδο 2/Level 2) ·· ABAQUS (Επίπεδο 2/Level 2 ABAQUS (Επίπεδο 3/Level 3) ABAQUS (Επίπεδο 3/Level 3) ABAQUS (Επίπεδο 3/Level 3) 0.04 0.06 0.08 0.04 0.06 0.08 0.1 0.12 0.1 0.04 0.06 0.08 0.1 0.12 Λετατόπιση εμβόλου (m) ιση εμβόλου (m ιση εμβόλου (m) Load cell displacement (m) Load cell displacer ent (m) Load cell displa nt (m)

Χαρακτηριστικοί δρόμοι ισορροπίας. Πειραματικοί και αριθμητικοί δρόμοι ισορροπίας για κελύφη χωρίς οπή (Block 12), κελύφη με μη ενισχυμένη οπή (Block 14) και κελύφη με ενισχυμένη οπή (Block 16). Πραγματοποιήθηκαν τρεις αριθμητικές αναλύσεις με τρία διαφορετικά επίπεδα ακρίβειας ανάλογα με το εάν ελήφθησαν υπόψη ελαστικές συνοριακές συνθήκες και φαινόμενα επαφής (επίπεδο 3), πάκτωση στο σύνορο και φαινόμενα επαφής (επίπεδο 2) ή πάκτωση και καθόλου φαινόμενα επαφής (επίπεδο 1).

Load-Displacement Curves. Experimental and numerical load-displacement curves for shells without cutout (Block 12), shells with unreinforced cutout (Block 14) and shells with reinforced cutout (Block 16). Three numerical analyses were performed with different levels of accuracy depending on the assumptions that were considered, namely, elastic boundary conditions and contact interaction simulation (level 3), fixed boundary conditions and contact simulation (level 2) or fixed boundary conditions and no contact simulation (level 1).

Τύποι ενίσχυσης που εξετάστηκαν. (i) περιμετρικό πλαίσιο, (ii) δύο διαμήκη ελάσματα και δακτύλιος, (iii) δύο διαμήκη ελάσματα και δακτύλιος και ένα πλαίσιο, (iv) δύο διαμήκη ελάσματα και δακτύλιος, ένα πλαίσιο και νευρώσεις. Οι πιο σύνθετες ενισχύσεις (iii, iv) διαπιστώθηκε ότι δεν πλεονεκτούν έναντι των πιο απλών ενισχύσεων (i, ii).

Stiffening types examined. (i) peripheral frame, (ii) two stringers and a ring, (iii) two stringers, a frame and a ring, (iv) two stringers, a frame, a ring and comb stiffeners. More complex stiffening types (iii, iv) were not found to be more advantageous than the simpler ones (i, ii).

Τύπος ενίσχυσης Stiffening Type	Ποιότητα Α Quality A	Ποιότητα Β Quality B	Ποιότητα C Quality C
P	A/A <sub>0</sub> =0.6 (b=175mm)	A/A <sub>0</sub> =0.6 (b=175mm)	A/A <sub>0</sub> =0.8 (b=175mm)
	A/A <sub>0</sub> =0.6 (b=350mm)	A/A <sub>0</sub> =0.8 (b=350mm)	A/A <sub>0</sub> =0.8 (b=350mm)
-	A/A <sub>0</sub> =1.2 (b=175mm)	A/A <sub>0</sub> =1.2 (b=175mm)	A/A <sub>0</sub> =1.4 (b=175mm)
	A/A <sub>0</sub> =0.8 (b=350mm)	A/A <sub>0</sub> =1.0 (b=350mm)	A/A <sub>0</sub> =1.2 (b=350mm)

**νόνες Σχεδιασμού**. Προτάθηκαν άλληλα εμβαδά ενίσχυσης [3] έτσι τε να επιτυγχάνεται η αντοχή του ύφους χωρίς οπή (π.χ. η κανονιστική τοχή του ΕΝ1993-1.6 για ποιότητες Α,

sign Recommendations. Appropriate fener cross-section areas [3] were ommended in order to achieve the ength of the shell without cutout (e.g. normative strength of EN1993-1.6).

Failure patterns (modes). (i) shell with unreinforced cutout, (ii) shell with reinforced cutout (two stringers 175mm width and a ring,  $A/A_0=1.0$ ), (iii) shell with reinforced cutout (two stringers 175mm width and a ring,  $A/A_0=1.8$ ).

A=stiffeners' cross-section area, A<sub>0</sub>=cutout area

## Χαρακτηριστικές δημοσιεύσεις / Key publications

- 1. Dimopoulos, C.A. and Gantes, C.J., "Comparison of alternative algorithms for buckling analysis of slender steel structures", Structural Engineering & Mechanics, Vol. 44, Number 2, pp. 219-238, October 2012.
- 2. Dimopoulos, C.A. and Gantes, C.J., "Experimental Investigation of Buckling of Wind Turbine Tower Cylindrical Shells with Opening and Stiffening under Bending", Thin-Walled Structures, Vol. 54, pp. 140-155, May 2012.
- 3. Dimopoulos, C.A. and Gantes, C.J., "Comparison of Stiffening Types of the Cutout in Tubular Wind Turbine Towers", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 83, pp. 62-74, April 2013.
- 4. Dimopoulos, C.A. and Gantes, C.J., "Numerical methods for the design of cylindrical steel shells with unreinforced or reinforced cut-outs", Thin-Walled Structures, 2014 (under review).

Επικοινωνία / Contact info:

dchristoforos@hotmail.com

Πλήρες κείμενο διατριβής / Full Ph.D. thesis http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/6791/3/dimopoulosc\_shells.pdf http://users.ntua.gr/chgantes/files/theses/006\_dimopoulos2012.pdf

Πειραματικές και αντίστοιχες αριθμητικές μορφές παραμόρφωσης μετά την κατάρρευση Experimental and corresponding numerical post-collapse deformation patterns

