

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΥΠΟ ΣΤΑΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ελένη Ι. Κοσμίδου

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής Ε.Μ.Π. Συνεπιβλέπουσα: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υποψήφια Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

> Αθήνα, Οκτώβριος 2017 ΕΜΚ ΜΕ 2017/12



ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΥΠΟ ΣΤΑΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ελένη Ι. Κοσμίδου

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής Ε.Μ.Π. Συνεπιβλέπουσα: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υποψήφια Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

> Αθήνα, Οκτώβριος 2017 ΕΜΚ ΜΕ 2017/12

Copyright © Ελένη Κοσμίδου, 2017 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 Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

> Copyright © Eleni Kosmidou, 2017 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 organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Ελένη Ι. Κοσμίδου (2017) Πειραματική αξιολόγηση της συμπεριφοράς συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών υπό στατική φόρτιση Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2017/12 Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Eleni I. Kosmidou (2017) Postgraduate Thesis EMK ME 2017/12 Experimental evalutation of the behavior of wind turbine tower connections under static loading Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Χάρη Γαντέ, Καθηγητή του Ε.Μ.Π., που ήταν ο επιβλέπων της μεταπτυχιακής μου εργασίας. Η διαρκής και υποδειγματική του καθοδήγηση μαζί με την άριστη επιστημονική του κατάρτιση συνέβαλαν καταλυτικά στην ολοκλήρωση της προσπάθειάς μου αυτής. Η προθυμία, το ήθος και η εμπιστοσύνη που μου έδειξε τον καθιστούν πρότυπο δασκάλου.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υποψήφια Διδάκτωρ του Ε.Μ.Π. για την ουσιαστικότατη συνεργασία που είχαμε όλο το διάστημα εκπόνησης της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας.

Σε αυτό το σημείο οφείλω να ευχαριστήσω τον κ. Ξενοφώντα Λιγνό, μέλος Ε.Ε.ΔΙ.Π. του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών του Ε.Μ.Π., για την εκτέλεση των πειραμάτων, καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές του κατά την ενασχόλησή μου με τις πειραματικές δοκιμές. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Στέλιο Κατσατσίδη για την βοήθειά του κατά την προετοιμασία και εκτέλεση των πειραμάτων.

Για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της μεταπτυχιακής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δημήτρη Βαμβάτσικο, Επίκουρο Καθηγητή του τομέα Δομοστατικής του Ε.Μ.Π. και τον κ. Παύλο Θανόπουλο, Λέκτορα του τομέα Δομοστατικής του Ε.Μ.Π.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην Αικατερίνη Νταϊφώτη, Διπλωματούχο Πολιτικό Μηχανικό και Διδάκτωρ του Ε.Μ.Π, καθώς και στον Ηλία Θανάσουλα, Υποψήφιο Διδάκτωρ του Ε.Μ.Π. για την βοήθεια και τον χρόνο που πρόθυμα μου αφιέρωσαν για την διεκπεραίωση της εργασίας μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την συμπαράστασή της σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου και ιδιαίτερα τον πατέρα μου, δίπλα στον οποίο εξασκώ το επάγγελμα του Πολιτικού Μηχανικού, ο οποίος μου έχει δώσει σημαντικές πρακτικές συμβουλές, γνώσεις και με έχει βοηθήσει να αποκτήσω ορθότερη σκέψη μηχανικού... και ακόμη έχει να μου διδάξει πολλά.

Ελένη Κοσμίδου

Οκτώβριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΜΚ ΜΕ 2017/12

Πειραματική αξιολόγηση της συμπεριφοράς συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών υπό στατική φόρτιση

Ελένη Κοσμίδου

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής Ε.Μ.Π. Συνεπιβλέπουσα: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υποψήφια Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με την πάροδο του χρόνου, η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας οδηγεί στην ανάγκη καλύτερης εκμετάλλευσης του αιολικού δυναμικού. Για αυτό τον λόγο, το ύψος των σύγχρονων ανεμογεννητριών διαρκώς αυξάνεται, με αποτέλεσμα να εντείνονται οι επιβαλλόμενες φορτίσεις. Ο άνεμος αποτελεί την κυρίαρχη φόρτιση μιας ανεμογεννήτριας, που λόγω της δυναμικής φύσης των ανεμοπιέσεων και της ανακυκλιζόμενης φόρτισης, οδηγεί σε ενδεχόμενη αστοχία μίας τέτοιας κατασκευής εξαιτίας της κόπωσης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των συνδέσεων μεταξύ διαδοχικών τμημάτων, οι οποίες καταπονούνται ιδιαίτερα από τις φορτίσεις του ανέμου και εμφανίζουν φαινόμενα αστοχίας. Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η πειραματική αξιολόγηση της συμπεριφοράς των συνδέσεων αποκατάστασης της συνέχειας μεταξύ τμημάτων του πυλώνα μιας ανεμογεννήτριας υπό στατική φόρτιση.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η αιολική ενέργεια και περιγράφονται συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά μιας ανεμογεννήτριας. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι τεχνικές παραγωγής και κατασκευής χαλύβδινων σωληνωτών πυλώνων. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέθοδοι σύνδεσης διαδοχικών τμημάτων ενός χαλύβδινου σωληνωτού πυλώνα, που υλοποιούνται μέσω δακτυλιοειδών ελασμάτων συγκολλημένων σε κάθε τμήμα του πυλώνα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με προεντεταμένους κοχλίες.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται σχηματικά η πειραματική διάταξη του πλαισίου που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας, καθώς και τα σχέδια των εξεταζόμενων δοκιμίων. Οι κατηγορίες των υπό εξέταση δοκιμίων είναι: δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα, δοκίμιο εσωραφής στην τομή φλάντζας – πυλώνα, δοκίμιο εσωραφής στην τομή φλάντζας – πυλώνα με σχισμή, δοκίμιο με εξωραφή και δοκίμιο εξωραφής με προεξοχή φλάντζας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται φωτογραφικό υλικό των δοκιμίων από την πειραματική διαδικασία, καθώς και τα πειραματικά αποτελέσματα σε μορφή διαγραμμάτων. Συνολικά, χρησιμοποιήθηκαν 13 πειραματικά δοκίμια, τα οποία τοποθετήθηκαν και εξετάστηκαν σε πειραματική διάταξη στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών στο Ε.Μ.Π. Επιπλέον, στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν 2 ομάδες κοχλιών διαφορετικής προέλευσης. Στόχος της πειραματικής διαδικασίας

είναι ο προσδιορισμός της αντοχής κάθε δοκιμίου και η διερεύνηση του μηχανισμού αστοχίας ελάσματος, κοχλία ή συγκόλλησης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια σύγκρισης και αξιολόγησης των πειραματικών αποτελεσμάτων, ενώ στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο γίνονται προτάσεις για την περαιτέρω μελέτη της συμπεριφοράς των συνδέσεων σε πυλώνες ανεμογεννητριών.



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

POSTGRADUATE THESIS EMK ME 2017/12

Experimental evaluation of the behavior of wind turbine tower connections under static loading

Eleni Kosmidou

Supervisor: Charis Gantes, Professor N.T.U.A. Co-Supervisor: Konstantina Koulatsou, PhD Candidate

ABSTRACT

Nowadays, growing energy consumption results in an effort for better exploitation of the available wind resources. For this purpose, the height of modern wind turbines continuously increases and so do the applied loads. Wind is the prevailing load of a wind turbine. Due to the dynamic and cyclic nature of wind loads, fatigue is one of the most common cause of failure. Investigation of the connections between adjacent parts, which are being stressed by wind loads, is of particular interest. The present postgraduate thesis deals with the experimental evaluation of the behavior of wind turbine tower connections under static loading.

In the first chapter, a brief introduction to wind power and manufacturing process of steel wind turbine tower are presented. In the second chapter, typical connections between adjacent parts of tubular wind turbine towers are described. Such connections are realized by means of ring flanges that are pre-welded at each part of the tower and are bolted together with fully preloaded bolts.

The third chapter is about the design of the experimental set – up. The geometry of the specimens and the testing frame used to evaluate the specimens' behavior are described in detail. The types of specimens tested are: specimen with butt weld in tower's shell, specimen with butt weld in flange – tower's shell section, specimen with butt weld and defined contact area, specimen with fillet weld and specimen with fillet weld and projection.

In the fourth chapter, photos as well as experimental results of each specimen are presented. The 13 specimens were tested in a testing frame in the Institute of Steel Structure in National Technical University of Athens. Furthermore, 2 types of bolts were used in the experiments. The experiments aim at defining the ultimate strength of each specimen and evaluating the failure of plate, bolt or weld.

In the fifth chapter, the experimental results are compared and conclusions are extracted. In the sixth and last chapter, proposals for the further investigation of the behavior of wind turbine tower connections are suggested.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΣΥΣΤΗΜΑ	ATA E	ΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	1									
	1.1 AIO/II	KH EN	ΕΡΓΕΙΑ	1									
	1.2 ΒΑΣΙΚ	a xap/	ΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	4									
	1.3 О ПҮЛ	ΩΝΑΣ	ΜΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	10									
	1.3.1	Εισαγ	γωγικά στοιχεία	10									
	1.3.2	Τύπο	νι πυλώνα	11									
	1.3.3	Αυτό	νομοι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες	14									
	1.3.4	Τεχν	ικές παραγωγής και κατασκευής χαλύβδινων σωληνωτών πυλώνων	15									
	1.3.5	Θεμε	λίωση ανεμογεννητριών	21									
	1.4 BIBAIC	ΟΓΡΑΦ	ΙΑ – ΑΝΑΦΟΡΕΣ	25									
2	ΣΥΝΔΕΣΙ	Н АПС	ΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΣΩΛΗΝΩΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ	27									
	2.1 ΠAPO	ʹΣΙΑΣͰ	Η ΤΗΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ	27									
	2.1.1	Εισαγ	γωγικά στοιχεία	27									
	2.1.2	Παρα	ουσίαση των μεθόδων αποκατάστασης της συνέχειας	30									
	2.2 ТРОПС	ος Σλι	ΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΚΚΕΝΤΡΩΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΒΡΑΧΕΩΣ L	32									
	2.3 BIBAIO	ΟΓΡΑΦ	ΙΑ – ΑΝΑΦΟΡΕΣ	34									
3	ΣΧΕΔΙΑΣ	ΜΟΣ	ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	35									
	3.1 ΠAPO	ΣIAΣΗ	Η ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	35									
	3.2 ∆OKIM	.2 ΔΟΚΙΜΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ											
	3.2.1	Δοκίμ	μο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα	39									
	3.2.	.1.1	Δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 45mm	39									
	3.2.	.1.2	Δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 40mm	40									
	3.2.	.1.3	Δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 35mm	41									
	3.2.	.1.4	Δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 30mm	42									
	3.2.	.1.5	Δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 25mm	43									
	3.2.	.1.6	Δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 45mm αλλαγή διαμέτρου κοχλία	каі 44									
	3.2.	.1.7	Δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 45mm αλλαγή θέσης κοχλία	каі 45									
	3.2.2	Δокіμ	μο εξωραφής με προεξοχή φλάντζας	46									

	3.2	2.3	Δοκ	Δοκίμιο με εξωραφή4										47
	3.2	2.4	Δοκίμιο εσωραφής στην τομή φλάντζας – πυλώνα									48		
	3.2	2.5	Δок	ίμιο εσω	υραφή	ς στην [.]	τομή φλ	ἀντζας	– πυλά	ονα με σχι	σμή			49
4	EKTE	ΕΛΕΣ	нп	EIPAM	ΑΤΩΝ		ΠΟΤΕΛΕ	ΕΣΜΑΤ	A					51
	4.1 ∆0 45	OKIM 5mm.	10	ΕΣΩΡΑ	ΦΗΣ	ΣΤΟ	ΚΕΛΥα	ΦΟΣ	TOY	ΠΥΛΩΝΑ	ΓIA	ΦΛΑΝ	TZA	ΠΑΧΟΥΣ 53
	4.1	1.1	Δок	ίμιο με ι	κοχλία	ομάδα	ς Α							53
	4.:	1.2	Δок	ίμιο με ι	κοχλία	ομάδα	ς Α							57
	4.2 ∆0 4(OKIM)mm.	10	ΕΣΩΡΑ	ΦΗΣ	ΣΤΟ	ΚΕΛΥΦ	ΦΟΣ	тоү	ΠΥΛΩΝΑ	ΓIA	ΦΛΑΝ	ΓΖΑ	ΠΑΧΟΥΣ 61
	4.2	2.1	Δοκ	ίμιο με Ι	κοχλία	ομάδα	ς Α							61
	4.2	2.2	Δок	ίμιο με ι	κοχλία	ομάδα	ς Α							64
	4.3 ∆0 35	OKIM 5mm.	IO	ΕΣΩΡΑ	ΦΗΣ	ΣΤΟ	ΚΕΛΥΦ	ΦΟΣ	TOY	ΠΥΛΩΝΑ	ΓIA	ΦΛΑΝ	TZA	ΠΑΧΟΥΣ 69
	4.4 ∆0 30	OKIM Omm.	IO	ΕΣΩΡΑ	ΦΗΣ	ΣΤΟ	ΚΕΛΥα	ΦΟΣ	TOY	ΠΥΛΩΝΑ	ΓIA	ΦΛΑΝ	TZA	ΠΑΧΟΥΣ 73
	4.5 ∆0 25	OKIM 5mm.	IO 	ΕΣΩΡΑ	ΦΗΣ	ΣΤΟ	ΚΕΛΥΦ	ΦΟΣ	TOY	ΠΥΛΩΝΑ	ΓIA	ΦΛΑΝ ⁻	TZA	ΠΑΧΟΥΣ 77
	4.6 Δ0 Δ1	okim: [ame]	io e: Tpoy	ΣΩΡΑΦΙ (κοχλι	ΗΣ ΣΤ(Ά	Э КЕЛҮ	ΦΟΣ ΤΟ	א חצאט	ΩΝΑ ΓΙ	Α ΦΛΑΝΤΖ	ZA ПАХС)YΣ 45m	m KA	I АЛЛАГН 81
	4.7 ∆0 Θ	ΟΚΙΜ: ΕΣΗΣ	io e Kox	ΣΩΡΑΦΙ (ΛΙΑ	ΗΣ ΣΤ(Э КЕЛҮ	ΦΟΣ ΤΟ	Υ ΠΥΛΩ	ΩΝΑ ΓΙ	Α ΦΛΑΝΤΖ	ΖΑ ΠΑΧΟ)YΣ 45m	m KA	I аллагн 85
	4.8 ∆0	OKIM	IO E	ΞΩΡΑΦΙ	ΗΣ ΜΕ	ΠΡΟΕΞ	OXH LIY	ላ ወለልቦ	ITZA П	ΑΧΟΥΣ 45	mm		·····	
	4.9 ΔΟΚΙΜΙΟ ΕΞΩΡΑΦΗΣ ΓΙΑ ΦΛΑΝΤΖΑ ΠΑΧΟΥΣ 45mm									91				
	4.10 ∆ 4	OKIM 5mm	110	εΣΩΡΑ	ΦΗΣ	ΣΤΗΝ	томн	ΦΛΑΝ	ΙΤΖΑΣ	- ΠΥΛΩ	2NA FI/	α ΦΛΑΝ	NTZA	ΠΑΧΟΥΣ 95
	4.11 ∆ ⊓	OKIM IAXON	1IO γΣ 45	EΣΩPA¢ 5mm	ΦΗΣ Σ	THN T	ОМН Ф/	∧ANTZ/	ΑΣ - Γ	ιγλΩΝΑ Ν	ME S	ΣΧΙΣΜΗ	ΓΙΑ	ФЛАNTZA 99
5	ΣΥΓκ	(ΡΙΣΙ	н пе		ΑΤΙΚΩ	Ν ΑΠΟ	ΤΕΛΕΣΙ	ΜΑΤΩΙ	NN					103
	5.1 Σ\ 	ΥΓΚΡΙ	ΣΗ Δ	\OKIMI	ΩΝ ΕΣ	ΩΡΑΦΗ	ς στο κ	(ΕΛΥΦ(ος τογ	΄ ΠΥΛΩΝΑ	ΓΙΑ ΦΛ	ANTZA	ΠΑΧΟ	YΣ 45mm 103
	5.2 Σ\ 	ΥΓΚΡΙ	ΣΗ Δ	\OKIMI	ΩΝ ΕΣ	ΩΡΑΦΗ	ς στο κ	(ΕΛΥΦ(ος τογ	΄ ΠΥΛΩΝΑ	ΓΙΑ ΦΛ	ANTZA	ΠΑΧΟ	YΣ 40mm 108
	5.3 Σ\	үгкрі	ΣΗ Δ	OKIMI	ΩΝ ΕΣΩ	ΩΡΑΦΗ	ς στο κ	ΕΛΥΦΟ	Σ ΤΟΥ	ΠΥΛΩΝΑ	МЕ КОХ	ΛΙΑ ΟΜΑ	ΔΑΣ	A114
	5.4 Σ\	γΓΚΡΙ	ΣΗ Δ	OKIMI	ΩΝ ΕΣΩ	ΩΡΑΦΗ	ς στο κ	ΕΛΥΦΟ	Σ ΤΟΥ	ΠΥΛΩΝΑ	МЕ КОХ	ΛΙΑ ΟΜΑ	ΔΑΣ	B118
	5.5 Σ\	γΓΚΡΙ	ΣΗ Δ	OKIMI	2N LIV	ΦΛΑΝ	τζα παχ	(ΟΥΣ 4	5mm					121
	5.5	5.1	Σύγι F1	κριση	βασι	κών	ομάδων	ν δοι	κιμίων	A1,	A2,	B1, C	1,	E1 каі

	5.5.2	Σύγκριση παραμετρικών δοκιμίων Α1, Α2, J1 και G1	128	
6	ΣΥΝΟΨΗ	Ι ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	133	
	6.1 ΠΕΡΙΛ	НΨН	133	
	6.2 ПРОТ	ΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	134	

1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Αιολική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια η οποία παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου και η οποία δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, καθώς η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από μια περιοχή σε άλλη. Με το τρόπο αυτό δημιουργούνται οι άνεμοι. Η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζεται ήπια μορφή ενέργειας και αποτελεί μία καθαρή και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, αφού δεν εκπέμπει ούτε προκαλεί ρύπους. Από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιήθηκε σε διάφορους τομείς. Ο πρώτος ανεμόμυλος σχεδιάστηκε από τον Ήρωνα τον 1° αιώνα μ.Χ. Ήταν οριζοντίου άξονα περιστροφής και είχε τέσσερα πτερύγια. Η αρχαιότερη μορφή εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας ήταν τα ιστία (πανιά) των πρώτων ιστιοφόρων πλοίων, στα οποία ο άνθρωπος εκμεταλλεύτηκε την δύναμη του αέρα για να ταξιδέψει με αυτά. Αρκετά αργότερα από την εμφάνιση των ιστιοφόρων πλοίων παρουσιάστηκαν και οι ανεμόμυλοι στην ξηρά, οι οποίοι χρησιμοποιούσαν την ενέργεια του ανέμου για το άλεσμα των σιτηρών και την άντληση νερού. Έτσι, οι ανεμόμυλοι οριζοντίου άξονα ήταν αναπόσπαστο τμήμα της αγροτικής οικονομίας, οι οποίοι διαδόθηκαν πλατιά στην Ευρώπη από τον 12° αιώνα μέχρι τις αρχές του 19° αιώνα, όπου άρχισε να περιορίζεται η χρήση τους, λόγω κυρίως της ατμομηχανής. Η οριστική εγκατάλειψη της χρήσης τους ξεκίνησε μετά τον Α' Παγκόσμιο πόλεμο, παράλληλα με την ανάπτυξη του κινητήρα εσωτερικής καύσεως και την διάδοση του ηλεκτρισμού. Ωστόσο, κατά την δεκαετία του 1970, το ενδιαφέρον για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας με ανεμόμυλους και ανεμογεννήτριες ανανεώθηκε λόγω της ενεργειακής κρίσης και των προβλημάτων που δημιουργεί η περιβαλλοντική ρύπανση. Οι σύγχρονοι ανεμόμυλοι ονομάζονται ανεμογεννήτριες, εξαιτίας της ιδιότητάς τους να μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική.

Αν και αρκετά χρόνια πριν, στα πλαίσια ερευνών δημιουργήθηκαν διάφορα μοντέλα ανεμογεννητριών, στην Αμερική κυρίως, η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας χρονολογείται περί το 1973, ενώ η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας με συστηματικό τρόπο άρχισε την δεκαετία του 80. Η πετρελαϊκή κρίση της δεκαετίας του '70, η ανησυχία για περιορισμένους πόρους ορυκτών καυσίμων και η σημαντική αύξηση της τιμής του πετρελαίου που επέφερε, σε συνδυασμό με την την επαλήθευση της συσχέτισης της μόλυνσης του πλανήτη λόγω χρήσεως συμβατικών καυσίμων, συνετέλεσαν στην παρακίνηση του παγκόσμιου ενδιαφέροντος για την αξιοποίηση του ανεξάντλητου, οικονομικότερου και φιλικού προς το περιβάλλον αιολικού δυναμικού. Επομένως, μόλις εντοπισθεί μία ανεμώδης περιοχή και αφού εκτελεσθούν οι απαιτούμενες μετρήσεις και μελέτες για την αξιοποίηση του αιολικού της δυναμικού, δημιουργούνται αιολικά πάρκα τα οποία απαρτίζονται από μερικές δεκάδες ανεμογεννήτριες.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η αιολική ενέργεια προέρχεται από την μετακίνηση αέριων μαζών της ατμόσφαιρας. Οι μετακινήσεις του αέρα, οι άνεμοι, προέρχονται από τις μεταβολές και τις διαφορετικές από τόπο σε τόπο τιμές της ατμοσφαιρικής πίεσης. Οι διαφορετικές αυτές τιμές της πίεσης οφείλονται στη διαφορετική θέρμανση (απορρόφηση ενέργειας) της ατμόσφαιρας κάθε τόπου από τον Ήλιο. Η θέρμανση είναι πιο έντονη σε μάζες γης κοντά στον ισημερινό και προφανώς η μεγαλύτερη θέρμανση συμβαίνει κατά την διάρκεια της μέρας. Ο θερμός αέρας διαστέλλεται, με συνέπεια να μειώνεται η πυκνότητα και το βάρος του, με αποτέλεσμα οι θερμές μάζες αέρα να παρουσιάζουν ανοδική κίνηση. Έτσι, ψυχρότερες μάζες μετακινούνται προς τα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας, τα οποία έχουν κενωθεί. Με αυτό τον τρόπο, ο ατμοσφαιρικός αέρας βρίσκεται σε διαρκή κίνηση, εξ΄αιτίας μια σειράς παραμέτρων, των οποίων οι πιο σημαντικές είναι:

- Οι δυνάμεις coriolis λόγω περιστροφής της Γης
- Η ανομοιομορφία του ανάγλυφου της Γης (βουνά, κοιλάδες, υψομετρικές διαφορές, θάλασσα)
- Η ηλιακή ακτινοβολία και ο τρόπος που αυτή φτάνει στη Γη

Μία βασική παράμετρος για την πρόβλεψη των ανέμων που αναπτύσσονται σε μία περιοχή αποτελεί η τοπογραφία. Άλλωστε, αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό από το γεγονός ότι περισσότερο άνεμο έχουν οι λοφώδεις περιοχές και τα βουνά σε σχέση με τις περιοχές που βρίσκονται σε προστατευμένες κοιλάδες, ενώ το μέγεθος των ανέμων μειώνεται σημαντικά λόγω ύπαρξης εμποδίων, όπως κτίρια και δέντρα. Επιπλέον, σημαντικός παράγοντας για το μέγεθος των ανέμων που ενδέχεται να αναπτυχθούν είναι ο χρόνος.

Σε μία δεδομένη περιοχή, ο άνεμος διαφέρει από χρόνο με χρόνο. Αισθητή είναι η διαφορά αυτή σε μεγαλύτερη κλίμακα χρόνου, όπως σε δεκάδες χρόνια. Τα αίτια αυτού του φαινομένου φαίνεται να μην έχουν πλήρως τεκμηριωθεί, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται δυσκολία κατά την πρόβλεψη και τον σχεδιασμό αιολικών πάρκων σε βάθος χρόνου.

Για την μελέτη και τον σχεδιασμό ενός αιολικού πάρκου θα πρέπει να προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια η απόδοση των ανεμογεννητριών, η οποία επηρρεάζεται τόσο από την μέση ταχύτητα του ανέμου που επικρατεί σε μία συγκεκριμένη θέση όσο και από τον τρόπο που μεταβάλλεται η ταχύτητα του ανέμου με τον χρόνο. Μετασχηματίζοντας μια μεγάλη χρονική σειρά ταχυτήτων του ανέμου στο πεδίο συχνότητας ως φάσμα ισχύος προσδιορίζεται η χρονική κλίμακα ενέργειας του ανέμου. Η διάκριση των μεταβολών πραγματοποιείται σε τρεις χρονικές κλίμακες: στη μακρά (εβδομάδες έως έτη), τη μέση (ώρες έως ημέρες) και τη βραχεία (δευτερόλεπτα έως λεπτά). Σε κλίμακα χρόνου μικρότερη του ενός έτους, η διακύμανση του ανέμου από εποχή σε εποχή οφείλεται στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις λόγω αλλαγής κλίσεως του άξονα περιστροφής της Γης. Αύξηση των ανέμων σε κλίμακα μερικών ημερών παρατηρείται ανά 4 ημέρες περίπου, καθώς μεγάλες αέριες μάζες μεταφέρονται από περιοχές υψηλών βαρομετρικών πιέσεων σε χαμηλότερων. Αλλά και διακύμανση του ανέμου εντός της ίδιας ημέρας μπορεί να παρατηρηθεί σε κάποιες περιοχές, λόγω πτώσης της θερμοκρασίας κατά τις νυχτερινές ώρες, με αποτέλεσμα την μεταφορά αέριων μαζών από βουνά σε κοιλάδες και από στεριά σε θάλασσα, οδηγώντας σε μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου ανά 12 ώρες. Τέλος, η διακύμανση του ανέμου σε χρόνο μικρότερο των 10 λεπτών που οφείλεται σε ακανόνιστη ροή του αέρα λόγω της τριβής του με την επιφάνεια της Γης χαρακτηρίζεται ως τύρβη. Η τύρβη αποτελεί έναν καθοριστικό παράγοντα για τον σχεδιασμό και την αντοχή μιας ανεμογεννήτριας σε κόπωση, καθώς και την ποιότητα της ενέργειας η οποία μεταφέρεται στο δίκτυο, προκαλώντας σημαντικές επιπτώσεις στους καταναλωτές.

Συνήθως, οι διακυμάνσεις του ανέμου που υφίστανται στη βραχεία κλίμακα δεν είναι σημαντικές για την αξιολόγηση ενός αιολικού πόρου, παρά μόνο εάν ο άνεμος χαρακτηριστεί τυρβώδης ή

παρατηρηθούν αλλαγές στη διεύθυνσή του. Οι απότομες μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου προκαλούν μεγάλες διακυμάνσεις στην παραγόμενη ισχύ μεμονωμένων ανεμογεννητριών, με ταυτόχρονη ύπαρξη φθορών σε συνιστώσες τους. Ωστόσο, όταν μελετάται ένα αιολικό πάρκο, το οποίο περιέχει πολλές ανεμογεννήτριες, η επίδραση των διακυμάνσεων αυτών τείνει να εξαλειφθεί, καθώς διαφορετικές μηχανές δέχονται ριπές ανέμου σε διαφορετική χρονική στιγμή. Για το λόγο αυτό, μία θέση αξιολογείται για το αν θα είναι πιθανή θέση αιολικού πάρκου με βάση μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου που καταγράφονται σε χρονική περίοδο 10 λεπτών μέχρι μίας ώρας. Σημαντικές για την αξιολόγηση του αιολικού πόρου φαίνεται να είναι οι μεταβολές που πραγματοποιούνται στη μέση κλίμακα, καθώς τότε παρατηρούνται μεγάλες διακυμάνσεις οι οποίες διατηρούνται έως και πολλές ημέρες. Επιπλέον, αξιόλογη επίδραση στην επίδοση μίας αιολικής εγκατάστασης έχουν οι μηνιαίες και εποχιακές μεταβολές, οι οποίες διαφέρουν ως προς τον βαθμό και τον χρόνο εμφάνισής του ανά περιοχή.

Ο Van der Hoven κατασκεύασε ένα χαρακτηριστικό φάσμα διακύμανσης της ταχύτητας του ανέμου στο οποίο είναι εμφανής η χρονική μεταβλητότητα του ανέμου (Σχήμα 1-1).



Σχήμα 1-1: Φάσμα ταχυτήτων ανέμου στο Brookhaven της Ν. Υόρκης από τον Van der Hoven (1957) [1-4]

Επομένως, λόγω της μεταβλητότητας αυτής που παρουσιάζει η αιολική ενέργεια, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν πολύ προσεκτικά παράμετροι που καθορίζουν τόσο την ποιότητα όσο και ποσότητα της παραγόμενης αιολικής ενέργειας μιας αιολικής εγκατάστασης, εξετάζοντας ποιες είναι οι κατάλληλες θέσεις εγκατάστασης του αιολικού πάρκου, ελέγχοντας τυχόν προβλέψεις για την οικονομική βιωσιμότητα του αιολικού πάρκου, καθώς και μελετώντας μεμονωμένα τις ίδιες τις ανεμογεννήτριες ως προς τον σχεδιασμό τους και την επιρροή τους στα δίκτυα κατανομής του ηλεκτρισμού και τους καταναλωτές. Γι' αυτό και η μελέτη ενός τέτοιου έργου απαιτεί την πραγματοποίηση πολλών διαφορετικών μελετών.

Πειραματική αξιολόγηση της συμπεριφοράς συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών υπό στατική φόρτιση

1.2 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Τα συστήματα εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια ονομάζονται ανεμογεννήτριες. Είναι αιολικές μηχανές με περιστρεφόμενες λεπίδες, ο αριθμός των οποίων κυμαίνεται από μία λεπίδα έως και περισσότερες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-1 και 1-2. Υπάρχουν πολλών ειδών ανεμογεννητριών οι οποίες κατατάσσονται σε δύο κύριες κατηγορίες, ανάλογα με την κατεύθυνση του άξονά τους: στις μηχανές οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα, όπως παρουσιάζονται στις Εικόνες 1-3 και 1-4, αντίστοιχα.



Εικόνα 1-1: ανεμογεννήτριες πολλαπλών λεπίδων [1-6]



Εικόνα 1-2: ανεμογεννήτριες 1, 2 και 3 λεπίδων [1-6]



Εικόνα 1-3: ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα (πηγή: plainswindeis.anl.gov)



Εικόνα 1-4: ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα (πηγή: <u>www.zeroenergybuildings.org</u>)

Οι σύγχρονες αιολικές μηχανές, μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική και τα μεγέθη τους ποικίλουν από μηχανές που παράγουν μερικές δεκάδες ή εκατοντάδες Watt έως και μερικά megawatt. Στις ημέρες μας οι επικρατέστεροι τύποι ανεμοκινητήρων που εφαρμόζονται στην πράξη είναι του δρομέα οριζοντίου άξονα, οι οποίοι είτε έχουν τον άξονα περιστροφής του δρομέα παράλληλο προς την κατεύθυνση του ανέμου είτε ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της Γης αλλά κάθετος στην κατεύθυνση του ανέμου. Συνήθως, έχουν 2 ή 3 πτερύγια, των οποίων η τεχνολογία βασίζεται σε αυτή των αεροπορικών ελικών καθώς και της έλικας των ελικοπτέρων. Ένα χαρακτηριστικό των πτερυγίων αυτών που θυμίζουν "έλικα" είναι ο μεγάλος αεροδυναμικός βαθμός απόδοσης, καθώς και η βέλτιστη λειτουργία τους σε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής, με αποτέλεσμα

την μεγάλη ταχύτητα προσβολής των πτερυγίων από τον άνεμο. Η επιλογή ανάμεσα σε ανεμογεννήτριες δύο ή τριών λεπίδων είναι απλώς θέμα συντονισμού μεταξύ της αεροδυναμικής φόρτισης των πτερυγίων και του βαθμού απόδοσής τους, του κόστους κατασκευής της ανεμογεννήτριας, του θορύβου και της αισθητικής. Επιπλέον, η επιλογή του πλήθους των πτερυγίων σχετίζεται με θέματα αντοχής και συντονισμού λόγω ταλαντώσεων. Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των λεπίδων στην ανεμογεννήτρια, η αεροδυναμική απόδοση αυξάνεται με φθίνουσα πορεία. Έχει αποδειχθεί ότι ο σχεδιασμός από 2 σε 3 λεπίδες οδηγεί σε μεγαλύτερη αεροδυναμική απόδοση από ότι ο σχεδιασμός από 3 σε 4 λεπίδες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αυξάνοντας τον αριθμό των λεπίδων, αυτές θα πρέπει να κατασκευάζονται λεπτότερες, ώστε να είναι αεροδυναμικά αποτελεσματικές. Όσο πιο λεπτές, όμως, κατασκευάζονται, τόσο περισσότερο καταπονούνται σε ροπές που προκαλούνται από τα αξονικά φορτία του ανέμου. Έτσι, λοιπόν, προτιμάται η χρήση ανεμογεννητριών με 3 λεπίδες, για τις οποίες χρησιμοποιείται διατομή με ικανοποιητική δυσκαμψία και παράλληλα ικανοποιούνται οι απαιτήσεις σε απόδοση ενέργειας.

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, οι ανεμογεννήτριες με ρότορα σταθερής ταχύτητας άρχισαν να εγκαταλείπονται και να χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο ανεμογεννήτριες με μεταβαλλόμενη ταχύτητα ρότορα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η διατήρηση σταθερής ταχύτητας περιστροφής της ανεμογεννήτριας, η βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής απόδοσης των πτερυγίων, ο έλεγχος της παραγόμενης ισχύος, καθώς και ο περιορισμός των δυνάμεων που καταπονούν τα πτερύγια. Για να περιορισθεί η κυκλική μεταβολή του φορτίου των πτερυγίων, που οδηγεί σε κυκλική μεταβολή της ροπής της μηχανής λόγω της καθύψος μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου, δίνεται μια μικρή κλίση (έως και 10°) του άξονα περιστροφής ως προς το οριζόντιο επίπεδο, ενώ για να περιοριστούν οι καμπτικές τάσεις πάνω στα πτερύγια, επιβάλλεται συνήθως μια μικρή κωνικότητα αυτών που δεν ξεπερνά τις 10°, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 1-5.





<u>6</u>

Ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν σε μία περιοχή (κλιματικές, τοπογραφικές, γεωμορφολογικές), στην οποία θα τοποθετηθούν ανεμογεννήτριες, θα ληφθούν υπόψιν οι παράμετροι που καθορίζουν την αεροδυναμική απόδοση. Εάν επικρατούν μεγάλες ταχύτητες αέρα στην περιοχή αυτή, θα προτιμηθεί η τοποθέτηση ανεμογεννήτριας με σχετικά πιο κοντό μήκος λεπίδας και άρα μικρότερη μάζα, μικρότερη πιθανότητα ζημιάς στις λεπίδες και μικρότερο κόστος, από ότι σε περιοχές με μικρότερη ταχύτητα ανέμου όπου θα τοποθετηθούν λεπίδες και μικρότερο μήκος. Όσο πιο μακριές είναι οι λεπίδες, τόσο πιο λυγηρές αυτές είναι. Για το λόγω αυτό επιλέγονται να χρησιμοποιούνται υλικά ικανά να προσδίδουν ικανοποιητική δυσκαμψία στις λεπίδες και επιπλέον, να είναι μικρότερο το βάρος και άρα και το κόστος κατασκευής και συντήρησης όλου του συστήματος. Επόμένως, υπάρχουν πολλοί παράμετροι που θα πρέπει να συνεκτιμηθούν ώστε να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις σε επίπεδο αεροδυναμικής απόδοσης και μικρότερου κόστους κατασκευής και συντήρησης των μερών

Ο πιο συχνός τύπος ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιείται στις μέρες μας είναι οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα. Στην πραγματικότητα, όλες οι εμπορικές ανεμογεννήτριες που ανήκουν σε ένα δίκτυο ανεμογεννητριών σήμερα είναι σχεδιασμένες με ρότορα τύπου προπέλας τοποθετημένου σε ένα οριζόντιο άξονα στην κορυφή ενός κατακόρυφου πύργου.

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα πλεονεκτούν στην εύκολη συναρμολόγηση των μερών που τις αποτελούν, διαθέτουν υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή, μπορούν να κατασκευαστούν με μεγάλο ύψος πυλώνα, εκμεταλλεύοντας αρκετά ικανοποιητικά άνεμο μεγάλης ταχύτητας και εμφανίζουν υψηλότερη αποδοτικότητα και καλύτερη απόδοση έναντι των ανεμογεννητριών κάθετου άξονα. Ωστόσο, οι ανεμοκινητήρες οριζόντιου άξονα παράγουν αρκετό θόρυβο κατά την λειτουργία τους και απαιτείται η προσαρμογή των πτερυγίων στη διεύθυνση του ανέμου με έναν κατάλληλο μηχανισμό περιστροφής, ώστε να εκμεταλλεύονται διαρκώς την ανεξάντλητη ενέργεια του ανέμου, σε αντίθεση με του κατακορύφου άξονα, οι οποίοι παράγουν λιγότερο θόρυβο και εκμεταλλεύονται τον άνεμο από όλες τις διευθύνσεις.

Το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια των ανεμοκινητήρων κατακορύφου άξονα τοποθετώνται στο έδαφος, διευκολύνοντας την πρόσβαση και την συντήρηση των μερών αυτών, χωρίς να είναι απαραίτητος κάποιος μηχανισμός εκτροπής. Η κατασκευή αυτού του τύπου ανεμοκινητήρα είναι απλούστερη και έτσι το κόστος κατασκευής είναι αρκετά χαμηλό σε σχέση με του οριζοντίου άξονα, που λόγω του μεγέθους κοστίζει πολύ η κατασκευή και μεταφορά του. Ωστόσο, έχουν χαμηλό επίπεδο αποτελεσματικότητας, καθώς ο ρότορας τοποθετείται σχτικά κοντά στο έδαφος όπου ο άνεμος είναι ασθενής, η ροπή εκκίνησης υψηλή και επομένως η ταχύτητα περιστροφής πάρα πολύ μικρή. Επιπλέον, παρουσιάζονται αρκετά προβλήματα συντήρησης μηχανικών μερών, όπως στην αλλαγή των εδράνων κύλισης, ενώ για την αντικατάσταση του κυρίου εδράνου απαιτείται πλήρη αποσυναρμολόγηση της ανεμογεννήτριας.

Όσον αφορά τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα γίνεται διάκριση μεταξύ αυτών που έχουν προσήνεμους ρότορες και υπήνεμους. Οι προσήνεμοι ρότορες αντιμετωπίζουν τον άνεμο μπροστά από έναν κατακόρυφο πύργο και έτσι έχουν το πλεονέκτημα να αποφεύγουν κάπως την επίδραση της σκιάς του ανέμου από την παρουσία του πύργου. Ανεμογεννήτριες με προσήνεμους ρότορες χρειάζονται μηχανισμό εκτροπής ώστε να διατηρήσουν τον άξονα του ρότορα ευθυγραμμισμένο με την κατεύθυνση του ανέμου. Ωστόσο, στις ανεμογεννήτριες υπήνεμου ρότορα τα φορτία κόπωσης είναι μεγαλύτερα.

Όσον αφορά τον αριθμό των λεπίδων, στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες το πιο κοινό μοντέλο είναι αυτό των 3 λεπίδων. Τα μοντέλα με 1 ή 2 λεπίδες έχουν το πλεονέκτημα να εκπροσωπούν μία πιθανή εξοικονόμηση σε σχέση με το κόστος και το βάρος του ρότορα. Ωστόσο, η χρήση λιγότερου πλήθους λεπίδων συνεπάγεται ότι χρειάζεται υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής των λεπίδων ή μεγαλύτερη χορδή για να δώσει την ίδια ενέργεια εξόδου με μία γεννήτρια ίδιου μεγέθους αλλά 3 λεπίδων.

7

Ο σχεδιασμός των ανεμογεννητριών βασίζεται στην παραγωγή ηλεκτρισμού με το χαμηλότερο κόστος. Για τον λόγο αυτό, οι ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται ώστε να δίνεται μέγιστη ισχύ εξόδου, σε ταχύτητες ανέμου γύρω στα 15m/s. Στην περίπτωση ισχυρότερων ανέμων, οι οποίοι συνήθως είναι πολύ σπάνιοι, είναι χρήσιμο να σπαταληθεί η πλεονάζουσα ενέργεια, ώστε να αποφευχθεί πιθανή βλάβη της ανεμογεννήτριας. Επομένως, απαιτείται κάποιου είδους ελέγχου ισχύος της ανεμογεννήτριας. Ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται αυτό είναι μέσω ενός συστήματος ελέγχου κλίσης πτερυγίων (pitch control), ώστε τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας να στρίβουν κατάλληλα σε σχέση με την διεύθυνση του ανέμου.

Τα κύρια μέρη μιας τυπικής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-6 και 1-7, είναι:

- ο δρομέας, ο οποίος αποτελείται είτε από δύο είτε από τρία πτερύγια από ενισχυμένο πολυεστέρα. Πάνω σε μια πλήμνη προσδένονται τα πτερύγια είτε σταθερά, είτε με δυνατότητα περιστροφής γύρω από το διαμήκη άξονα τους με μεταβαλλόμενο βήμα.
- το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, το οποίο αποτελείται από τον κύριο άξονα, τα έδρανα του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή κατά την κανονική λειτουργία της μηχανής.
- η ηλεκτρική γεννήτρια, η οποία είναι είτε σύγχρονη είτε επαγωγική, με 4 ή 6 πόλους. Η γεννήτρια αυτή συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου, έτσι ώστε να μετατρέπεται η μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Συνήθως βρίσκεται πάνω στον πύργο της ανεμογεννήτριας. Υπάρχει και το σύστημα πέδησης, το οποίο είναι ένα συνηθισμένο δισκόφρενο, που τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας.
- το σύστημα προσανατολισμού, το οποίο εξασφαλίζει στον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις αεροδυναμικής απόδοσης.
- ο πύργος, ο οποίος στηρίζει όλη την παραπάνω ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση και έχει συνήθως σημαντικό ύψος, ώστε να εκτίθεται σε άνεμο όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ταχύτητας.
- ο ηλεκτρονικός πίνακας και ο πίνακας ελέγχου, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στη βάση του πύργου. Μέσω του συστήματος ελέγχου παρακολουθούνται, συντονίζονται και ελέγχονται όλες οι λειτουργίες της ανεμογεννήτριας, εξασφαλίζοντας με τον τρόπο αυτό την απρόσκοπτη λειτουργία της.

8



Εικόνα 1-6: Μέρη μιας τυπικής ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα με λεπτομέρεια (πηγή: ape1epalsyrou.weebly.com)



Εικόνα 1-7: Κύρια μέρη μιας τυπικής ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα (πηγή: www.cres.gr)

9

1.3 Ο ΠΥΛΩΝΑΣ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

1.3.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Ένα πολύ βασικό στοιχείο της ανεμογεννήτριας, του οποίου ο σχεδιασμός απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, είναι ο πυλώνας. Όταν εξετάζεται μεμονωμένα, μπορεί να θεωρηθεί μία συμβατική δομή. Ωστόσο, ο σχεδιασμός του είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς απαιτείται αρχικά η κατανόηση ενός σημαντικού ποσοστού του συνολικού συστήματος της ανεμογεννήτριας και στη συνέχεια εφαρμογής του, ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει να πληρούνται οι απαιτήσεις ασφάλειας και ανθεκτικότητας σε συνδυασμό με το μικρότερο δυνατό κόστος. Ο πυλώνας θα πρέπει να διαθέτει το απαραίτητο ύψος, ώστε να δίνεται η δυνατότητα εκμετάλλευσης ανέμου με πολύ μεγάλη ταχύτητα, ικανοποιητική δυσκαμψία και όσο το δυνατόν μικρότερη μάζα, ώστε να μην επιβαρύνεται η κατασκευή. Τέλος, η κατασκευή του πυλώνα που προβλέπεται από τον σχεδιασμό, θα πρέπει να μπορεί να υλοποιηθεί και στην πράξη.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, βασικό δεδομένο κατά τον σχεδιασμό είναι ο πυλώνας να διαθέτει μεγάλο ύψος. Ο ψηλός πυλώνας, ωστόσο, έχει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Όσο πιο ψηλός είναι ο πυλώνας τόσο πιο δύσκολη και και δαπανηρή γίνεται η μεταφορά, η συναρμολόγηση και η ανέγερσή του, ενώ δυσκολία παρουσιάζεται και κατά την συντήρηση συστατικών μερών της ανεμογεννήτριας. Το κόστος του πυλώνα, στην περίπτωση αυτή, μπορεί να ανέλθει σε έως και 20% του συνολικού κόστους της ανεμογεννήτριας, γεγονός το οποίο σίγουρα αποτελεί ένα μειονέκτημα. Από την άλλη μεριά, όμως, όσο αυξάνεται το ύψος του πυλώνα, αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου και έτσι αυξάνεται η ενεργειακή απόδοση της ανεμογεννήτριας, αφού γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση της ανεξάντλητης αιολικής ενέργειας.

Το σημείο τομής των δύο λειτουργιών, δηλ της αύξησης του κόστους κατασκευής και της αεροδυναμικής απόδοσης, θεωρητικά οδηγεί στο βέλτιστο ύψος του πυλώνα. Λόγω διαφόρων παραγόντων που υπεισέρχονται στην εύρεση αυτού του σημείου τομής, όμως και οι οποίοι συνήθως αντικρούονται μεταξύ τους, δυσχεραίνεται η εύρεση αυτού του βέλτιστου ύψους του πυλώνα. Εξετάζοντας μεγάλες ανεμογεννήτριες, παρατηρείται ότι το κόστος κατασκευής αυξάνεται με πιο γρήγορο ρυθμό καθώς αυξάνεται το ύψος του πυλώνα σε αντίθεση με τις μικρές ανεμογεννήτριες, που δεν παρατηρείται κάτι τέτοιο. Επιπλέον, βασικός παράγοντας είναι η επιλογή του τόπου εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας. Έτσι, στις νησιωτικές περιοχές, όπου η επιφανειακή τραχύτητα είναι αρκετά υψηλή, η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται πιο γρήγορα με το ύψος, απ' ότι στις χερσαίες περιοχές. Για το λόγο αυτό, στις νησιωτικές περιοχές κατασκευάζονται ανεμογεννήτριες με ύψος πυλώνα από 80m και πάνω, αποδεικνύοντας πόσο καθοριστικός παράγοντας είναι το ύψος των ανεμογεννητριών για την οικονομική χρήση του αιολικού δυναμικού.

Η δυσκαμψία του πυλώνα είναι η δεύτερη πιο σημαντική και καθοριστική παράμετρος σχεδιασμού του πυλώνα. Αυτή καθορίζει το υλικό που απαιτείται για την κατασκευή του πυλώνα και τελικά το κόστος κατασκευής. Βασικός στόχος και επιδίωξη του σχεδιασμού είναι να επιτευχθεί ένα επιθυμητό και ικανοποιητικό ύψος του πυλώνα με την απαιτούμενη δυσκαμψία και με το χαμηλότερο κόστος κατασκευής.

Όσο οι ανάγκες και οι ενεργειακές απαιτήσεις αυξάνονται τόσο μεγαλώνει η αναγκαιότητα κατασκευής ανεμογεννητριών μεγάλης ισχύος, με αποτέλεσμα να αυξάνονται τα προβλήματα μεταφοράς και ανέγερσής τους. Όταν το απαιτούμενο ύψος του πυλώνα ξεπερνά τα 100μ. και το βάρος της κεφαλής του πυλώνα τις μερικές εκατοντάδες τόνους, τότε η διάμετρος στην βάση του πυλώνα θα πρέπει να ξεπερνά τα 5m προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή αντοχή. Σ' αυτή την περίπτωση όμως, δεν θα είναι πλέον εφικτή η οδική μεταφορά των τμημάτων του πυλώνα στο χώρο του έργου. Αυτό αποτελεί ένα ισχυρό κίνητρο ώστε να βρεθούν καινοτόμες λύσεις στον σχεδιασμό πυλώνων.

1.3.2 Τύποι πυλώνα

Από τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω γίνεται φανερό ότι ο τύπος του πυλώνα που τελικά θα εφαρμοσθεί ώστε να δώσει το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα, καθορίζεται με βάσει την περιοχή και τις εκάστοτε απαιτήσεις. Οι τεχνικές απαιτήσεις που τίθενται από το συνολικό σύστημα μπορούν να ικανοποιηθούν με σχεδόν οποιαδήποτε παραλλαγή, αλλά το οικονομικό βέλτιστο επιτυγχάνεται ταιριάζοντας κατάλληλα τον επιλεγμένο σχεδιασμό πυλώνα με τις απαιτήσεις που ορίζονται. Κάθε τύπος πυλώνα παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα. Ο πυλώνας περισσότερο και από την άτρακτο, εκτός από τις λειτουργικές απαιτήσεις, καθορίζει την αισθητική εμφάνιση της ανεμογεννήτριας. Για αυτό δίνεται βάρος και στην αισθητική του τελικού έργου, ακόμη και αν αυτό οδηγεί σε πρόσθετες δαπάνες.

Παρατηρώντας τους ανεμόμυλους, οι οποίοι αποτελούν των παλαιότερο τύπο ανεμογεννητριών, διαπιστώνεται ότι ως κατασκευή ήταν ογκώδης και το ύψος τους ήταν χαμηλό σε σχέση με τη διάμετρο του ρότορα. Η επιλογή της κατασκευής τους ήταν τέτοια διότι χρησιμοποιούνταν ως χώρος εργασίας και επομένως έπρεπε να διαθέτουν την κατάλληλη δυσκαμψία. Νωρίς, όμως, αντιλήφθηκαν το πλεονέκτημα του αυξανόμενου ύψους στην αεροδυναμική απόδοση και άρχισε η κατασκευή του να μοιάζει με πύργο. Ωστόσο, πυλώνες χρησιμοποιήθηκαν στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες, οι οποίοι στηρίζουν τον ρότορα και τα μηχανικά μέρη της κεφαλής του πυλώνα, διαθέτοντας κατάλληλη δυσκαμψία. Λόγω αυτής της εξέλιξης το ξύλο, ως υλικό κατασκευής των ανεμόμυλων, άρχισε να εγκαταλείπεται και άλλα υλικά πήραν την θέση του, όπως ο χάλυβας και το σκυρόδεμα.

Δικτυωτοί πυλώνες: οι πυλώνες αυτού του τύπου είναι αρκετά ψηλοί και δύσκαμπτοι, οι οποίοι αποτελούνται από δικτυώματα τριών διαστάσεων, (Εικόνα 1-8). Χρησιμοποιήθηκαν πολύ στο παρελθόν για ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος και ιδίως κατά τον σχεδιασμό των πρώτων πειραματικών ανεμογεννητριών. Σήμερα, αυτός ο τύπος πυλώνα χρησιμοποιείται σπάνια και προτιμάται έναντι του σωληνωτού χαλύβδινου πυλώνα στις νησιωτικές περιοχές για την περίπτωση κατασκευής μεγάλων ανεμογεννητριών. Βασικό μειονέκτημα τους είναι το κακό οπτικά και αισθητικά αντίκτυπό τους. Συγκρίνοντας το κόστος παραγωγής των δικτυωτών πυλώνων με αυτό των χαλύβδινων σωληνωτών παρατηρείται ότι το κόστος των πρώτων είναι χαμηλότερο ως και 20% από των χαλύβδινων σωληνωτών. Ωστόσο, θα πρέπει να συνυπολίζεται και το κόστος συναρμολόγησης και αρκετά μεγαλύτερο.

<u>Πυλώνες από οπλισμένο σκυρόδεμα:</u> χρησιμοποιήθηκαν στην Δανία για τις πρώτες μεγάλες πειραματικές ανεμογεννήτριες (Εικόνα 1-9). Σήμερα, οι πυλώνες από σκυρόδεμα χρησιμοποιούνται όταν το απαιτούμενο ύψος ξεπερνά τα 80m. Βασικό μειονέκτημα αυτού του τύπου είναι ότι η συνολική μάζα αυξάνεται σημαντικά σε αντίθεση με τον τύπο του χαλύβδινου σωληνωτού πυλώνα. Αλλά το κόστος εδώ είναι εξαιρετικά χαμηλό, ειδικά στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται προκατασκευασμένα προεντεταμένα τμήματα από σκυρόδεμα.

<u>Αυτόνομοι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες:</u> είναι ο πιο κοινός τύπος πυλώνα που χρησιμοποιείται σήμερα (Εικόνα 1-10). Πλεονέκτημα του τύπου αυτού είναι η μείωση της μάζας της κατασκευής. Επομένως, λόγω μείωσης της μάζας το κόστος μειώνεται αρκετά. Ωστόσο, οι νέοι πύργοι που υπερβαίνουν τα 100m έχουν διάμετρο βάσης πάνω από 5m, το οποίο αποτελεί πρόβλημα σε πολλές χώρες λόγω του γεγονότος ότι το μέγιστο μεταφερόμενο οδικώς μέγεθος είναι μικρότερο από 4,9m.

<u>Χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες με αγκύρια:</u> Η καμπτική δυσκαμψία του πυλώνα ενισχύεται είτε με χρήση αγκυρωμένων με χαλύβδινων καλωδίων είτε με χρήση δύσκαμπτων δικτυώματων (Εικόνα 1-11). Η διάμετρος και η μάζα του πυλώνα μειώνονται σημαντικά με την χρήση αυτού του τύπου. Παρόλο της μικρής συνολικής μάζας τους, το κόστος των αγκυρωμένων πυλώνων είναι υψηλό, λόγω των αγκυρίων και των πρόσθετων θεμελίων αγκύρωσης που απαιτούνται για την ανέγερσή τους. Τέλος, σε αγροτικές περιοχές τα αγκύρια αυτά αποτελούν εμπόδια που περιορίζουν την πρόσβαση.



Εικόνα 1-8: δικτυωτός πυλώνας ανεμογεννήτριας Vindsyssel 130kW (πηγή: www.dansk-vindenergi.dk)



Εικόνα 1-9: πυλώνας από οπλισμένο σκυρόδεμα πειραματικής ανεμογεννήτριας 3MW (ACCIONA's Vedadillo Experimental Wind Farm, Navarra Region of Spain) (πηγή: www.windpowerengineering.com)



Εικόνα 1-10: χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες με αγκύρια (πηγή: www.windfarmbop.com)



Εικόνα 1-11: αυτόνομος χαλύβδινος σωληνωτός πυλώνας μίας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα (Courtesy of Rolando Vega) (πηγή: www.structuremag.org)

1.3.3 Αυτόνομοι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες

Ο τύπος κατασκευής εμπορικών ανεμογεννητριών που προτιμάται σήμερα είναι οι αυτόνομοι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες. Βασικός λόγος προτίμησης αυτού του τύπου είναι ο πολύ μικρός χρόνος που απαιτείται για την επιτόπου συναρμολόγηση και ανέγερση. Ένας ακόμη λόγος, βέβαια, είναι το πολύ χαμηλό κόστος, καθώς η τιμή του χάλυβα σήμερα είναι αρκετά χαμηλή.

Τα τμήματα του πυλώνα κατασκευάζονται σε κομμάτια των 20-30m που ενώνονται μεταξύ τους μέσω χαλύβδινων ελασμάτων, τα οποία κοχλιώνονται μεταξύ τους. Όταν οι πυλώνες είναι αρκετά χαμηλοί, δηλαδή είναι με ύψος μέχρι 20m, κατασκευάζεται από ένα μόνο τμήμα, το οποίο κοχλιώνεται απλά στο θεμέλιο στον χώρο του έργου. Αντίθετα, για υψηλότερους πυλώνες με ύψος μέχρι 100μ., λόγω περιορισμών που υποβάλλει το οδικό δίκτυο κατά την μεταφορά, ο πυλώνας κατασκευάζονται από περισσότερα τμήματα των 20m-30m περίπου. Τα τμήματα αυτά κοχλιώνονται μεταξύ τους, έτσι ώστε να μην απαιτούνται συγκολλήσεις στο χώρο του έργου.

Καθοριστικής σημασίας στη διαστασιολόγηση ενός πυλώνα έχουν οι απαιτήσεις αντοχής και δυσκαμψίας. Οι παράμετροι οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό είναι, ενώ στην Εικόνα 1-12 απεικονίζονται σχηματικά τα φορτία που ασκούνται στην ανεμογεννήτρια:

- Η αντοχή σε θραύση για να αντισταθεί στις ακραίες ταχύτητες του ανέμου. Το βάρος της κεφαλής του πύργου, η αεροδυναμική ώθηση του πυλώνα, καθώς και το ίδιο βάρος του πυλώνα καθορίζουν το στατικό φορτίο, ενώ σημαντικό ρόλο στην τιμή αυτού του φορτίου παίζει το σύστημα ελέγχου των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας, pitch control ή stall control. Συνήθως, το φορτίο θραύσης είναι αυτό που θα δώσει την καμπτική ροπή που δρα στην βάση του πυλώνα.
- Η αντοχή σε κόπωση για να ικανοποιείται η απαίτηση διάρκειας ζωής 20 έως 30 χρόνια λειτουργίας. Η ώθηση του ρότορα προκαλεί κατά την λειτουργία της ανεμογεννήτριας δυναμικό φορτίο που καθορίζει την αντοχή των λιγυρών πυλώνων σε κόπωση. Επιπλέον, πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν πρόσθετα φορτία πρόσθετα φορτία που προκαλούνται από τυχόν δονητική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας σε περιπτώσεις συντονισμού. Για το λόγο αυτό, δεν είναι επαρκής μία αμιγώς στατική ανάλυση τάσεων στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας.
- Η απαιτούμενη δυσκαμψία του πυλώνα, η οποία εκτός από μερικές εξαιρέσεις είναι το σημαντικότερο κριτήριο για την διαστασιολόγηση του πυλώνα. Είναι αυτή που καθορίζει το απαραίτητο πάχος τοιχώματος.
- Η αντοχή σε λυγισμό. Κυρίως στους λεπτότοιχους χαλύβδινους σωληνωτούς πυλώνες η ανίσταση σε τοπικό λυγισμό του τοιχώματος του πυλώνα είναι ένα από τα πιο σημαντικά κριτήρια. Λόγω βελτιστοποίησης του αυξανόμενου βάρους στους σύγχρονους χαλύβδινους σωληνωτούς πυλώνες, η αντοχή σε λυγισμό είναι αυτή που θα καθορίσει το απαιτούμενο πάχος του τοιχώματος του πυλώνα.

Πιο απλή και ασφαλής λύση σχεδιασμού είναι ένας δύσκαμπτος πυλώνας, με μειονέκτημα όμως την μεγάλη αύξηση της μάζας του πυλώνα. Για το λόγο αυτό, σε ανεμογεννήτριες όπου το ύψος του πυλώνα ξεπερνά τα 80m, θα πρέπει η δυσκαμψία να διατηρείται σε χαμηλή τιμή, με την προϋπόθεση ότι αυτό είναι τεχνικά εφικτό, ώστε να διατηρείται το κόστος σε χαμηλά επίπεδα. Ωστόσο, ανεμογεννήτριες με ύψος πυλώνα άνω των 80μ. για οικονομικούς λόγους η δυσκαμψία πρέπει να διατηρείται τόσο χαμηλά όσο είναι τεχνικά εφικτό.



Εικόνα 1-12: Σχηματική απεικόνιση των φορτίων που ασκούνται στην ανεμογεννήτρια (πηγή: <u>www.wind-energy-</u> <u>the-facts.org</u>)

1.3.4 Τεχνικές παραγωγής και κατασκευής χαλύβδινων σωληνωτών πυλώνων

Σχεδόν όλοι οι πυλώνες των μεγάλων ανεμογεννητριών έχουν κωνικό σχήμα. Δηλαδή η διάμετρος του πυλώνα μειώνεται σταδιακά από την βάση ως την κεφαλή του. Μπορεί ένας αυτόνομος κυλινδρικός σωλήνας με σταθερό πάχος στο τοίχωμά του να είναι πολύ απλός στην κατασκευή του, ωστόσο δεν είναι ο βέλτιστος δυνατός. Έχοντας ως δεδομένα τις απαιτήσεις δυσκαμψίας και ύψους, η μείωση της συνολικής μάζας μπορεί να πραγματοποιηθεί κατασκευάζοντας την γεωμετρία του πυλώνα κωνικά. Έτσι, διευρύνοντας κωνικά τη βάση του χαλύβδινου πυλώνα, υλοποιείται η απαιτούμενη δυσκαμψία μειώνοντας τη συνολική μάζα.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο πυλώνας αποτελείται από έναν αριθμό προκατασκευασμένων τμημάτων, το μήκος των οποίων φτάνει μέχρι 30μ. Η παραγωγή των τμημάτων αυτών προκύπτει από φύλλα χαλύβδινων ελασμάτων τα οποία έχουν πάχη 10mm-50mm. Τα φύλλα τα οποία έχουν πλάτος περίπου 2m, τοποθετούνται ευθύγραμμα πάνω σε ένα CNC υδραυλικό κύλινδρο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-13. Το χαλυβδόφυλλο θα πρέπει να διέλθει μέσα από δύο ράουλα τα οποία είναι τοποθετημένα σε κατάλληλη απόσταση, καθώς αυτή η απόσταση καθορίζει την τελική ακτίνα καμπυλότητας του τελικού προϊόντος. Από την κάτω πλευρά υπάρχουν δύο ράουλα, ενώ στην από πάνω πλευρά και στη μέση του χαλυβδόφυλλου υπάρχει ένα άλλο ράουλο το οποίο ασκεί πίεση. Ταυτόχρονα και τα τρία ράουλα περιστρέφονται συνεχώς, μέχρι να αποκτηθεί το επιθυμητό κυλινδρικό σχήμα, ενώ η πίεση που ασκείται από τα ράουλα πρέπει να είναι διαφορετική και στις δύο πλευρές, ώστε το έλασμα να καμφθεί κατάλληλα. Η διαδικασία αυτή είναι αρκετά περίπλοκη και απαιτεί μεγάλη ακρίβεια, ώστε ο χάλυβας να αποκτήσει κυλινδρικό σχήμα. Τα τμήματα αυτά των 2m συγκολλούνται τόσο κατά μήκος, ώστε να δημιουργηθεί ένας κλειστός κύλινδρος, όσο και μεταξύ τους δημιουργώντας κάθε ένα από τα τμήματα του πυλώνα μήκους από 20m μέχρι 30m. Στη συνέχεια, στα άκρα του κάθε τμήματος πυλώνα συγκολλούνται οι εσωτερικές φλάντζες, ο οποίες κατασκευάζονται από χάλυβα υψηλής αντοχής. Η διαμόρφωση και η συγκόλληση των δακτυλίων απαιτεί κάποια εξειδίκευση αφού τα συστατικά μέρη μπορούν εύκολα να παραμορφωθούν και αυτό θα `χει σαν αποτέλεσμα οι δακτύλιοι να μην ταιριάζουν κατά την συναρμολόγηση. Τα προκύπτοντα κενά ανάμεσα στα τμήματα του πυλώνα είναι ένα ποιοτικό ελάττωμα το οποίο συναντάται συχνά σε χαλύβδινους σωληνωτούς πυλώνες (Εικόνα 1-14). Στις περισσότερες περιπτώσεις για τις συγκολλήσεις αυτές χρησιμοποιούνται αυτόματοι

συγκολλητές (Εικόνα 1-15). Διότι οι συγκολλήσεις σε τέτοια έργα απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι μη καταστροφικών ελέγχων, όπως υπέρηχοι, ακτίνες Χ αλλά και οπτικοί έλεγχοι για επιφανειακές ρωγμές, οι οποίες χρησιμοποιούνται ώστε να διασφαλισθεί η ποιότητα των συγκολλήσεων (Εικόνα 1-16).



Εικόνα 1-13: κατασκευή τμημάτων πυλώνα πλάτους 2m σε CNC υδραυλικό κύλινδρο (πηγή: <u>www.steelwindtower.com</u>)



Εικόνα 1-14: συγκόλληση ελάσματος κοχλιωτής σύνδεσης στις άκρες των τμημάτων του πυλώνα ανεμογεννήτριας (πηγή: <u>www.steelwindtower.com</u>)



Εικόνα 1-15: αυτόματες μηχανές συγκόλλησης (πηγή: <u>www.steelwindtower.com</u>)



Εικόνα 1-16: πραγματοποίηση μη καταστροφικών ελέγχων στις συγκολλήσεις (πηγή: <u>www.steelwindtower.com</u>)

Ακολούθως, τα τμήματα του πυλώνα υποβάλλονται σε επεξεργασία αμμοβολής ώστε να εφαρμοσθούν θερμικά επιστρώματα ψευδαργύρου και στη συνέχεια 2 ή 3 στρώσεις βαφής (Εικόνα 1-17). Σε μερικές χώρες ή περιοχές υπάρχουν κανονισμοί που αφορούν το χρώμα του πυλώνα. Η κατεργασία των χαλύβδινων επιφανειών, ιδίως σε κατασκευές μεγάλης σπουδαιότητας, είναι πολύ σημαντική για τη διάρκεια ζωής και καλής λειτουργίας τους. Πολύ σημαντικό είναι να προστατεύονται οι χαλύβδινες επιφάνειες από την διάβρωση, ακόμη και όταν αυτή βρίσκεται σε ένα παραθαλάσσιο μέρος, πραγματοποιώντας σωστή κατεργασία των επιφανειών τόσο κατά την αρχική κατασκευή όσο και κατά την συντήρηση του έργου μέσα στις δεκαετίες.

Όταν ολοκληρωθούν όλοι οι απαραίτητοι έλεγχοι συγκολλήσεων και η κατεργασία της επιφάνειας με τις κατάλληλες βαφές, τα τμήματα μεταφέρονται στη θέση του έργου για να πραγματοποιηθεί η ανέγερση της ανεμογεννήτριας. Ο τρόπος με τον οποίο κοχλιώνονται δύο τμήματα του πυλώνα φαίνεται στην Εικόνα 1-18. Οι κοχλίες που χρησιμοποιούνται για την σύνδεση τμημάτων της ανεμογεννήτριας είναι πάντοτε προεντεταμένοι, καθώς μόνο έτσι μπορεί να διασφαλισθεί η απαιτούμενη αντοχή σε κόπωση. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι δακτύλιοι είναι εσωτερικοί, εφόσον οι διάμετροι του πυλώνα στις μεγάλες ανεμογεννήτριες έχουν τέτοιες διαστάσεις που επιτρέπουν την παρουσία των τεχνικών στο εσωτερικό του πυλώνα, ώστε να πραγματοποιηθεί η σύνδεση. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι οι κοχλίες τοποθετούνται στην σύνδεση ανάποδα, δηλαδή με την κεφαλή του κοχλία από κάτω και το περικόχλιο από πάνω. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό, είναι για να αποφευχθούν τυχόν αστοχίες. Επειδή λοιπόν, υπάρχει περίπτωση χαλάρωσης και πτώσης κάποιου κοχλία λόγω της εναλλασσόμενης φόρτισης από τα φορτία του ανέμου, μ' αυτή την τοποθέτηση αυτό θα γίνει αμέσως αντιληπτό κατά την συντήρηση.



Εικόνα 1-17: Χωρίς επιφανειακή κατεργασία (αριστερή εικόνα) και με επιφανειακή κατεργασία (δεξιά εικόνα) του τμήματος του πυλώνα (πηγή: <u>www.steelwindtower.com</u>)



Εικόνα 1-18: κοχλιωτή σύνδεση των τμημάτων του πυλώνα [1-5]

Επομένως, κατά την ανέγερση της ανεμογεννήτριας κατασκευάζεται πρώτα το θεμέλιο. Κατόπιν, κοχλιώνεται το κατώτερο τμήμα του πυλώνα στη θεμελίωση, το οποίο κατασκευάζεται χωριστά, καθώς ενσωματώνεται μέσα στο θεμέλιο. Στη συνέχεια, κάθε ένα τμήμα του πυλώνα σηκώνεται με τη χρήση γερανού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-19. Στο τέλος, ο πύργος ενώνεται με την άτρακτο (nacelle). Σχετικά με την τοποθέτηση των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας, υπάρχουν δύο τρόποι. Είτε τα πτερύγια κοχλιώνονται στην άτρακτο όσο είναι στο έδαφος και ακολούθως σηκώνεται όλο το σύστημα πλέον (άτρακτος-πτερύγια) με τη βοήθεια γερανού και κοχλιώνεται στον ρότορα (Εικόνα 1-20), είτε τοποθετείται η άτρακτος στον ρότορα και στη συνέχεια ένα ένα τα πτερύγια (Εικόνα 1-21).



Εικόνα 1-19: ανέγερση τμήματος πυλώνα (πηγή: www.windlab.com & diamondtowerservice.com)



Εικόνα 1-20: Κοχλίωση πτερυγίων και ατράκτου στο έδαφος και ανέγερση και κοχλίωσή τους στον ρότορα (πηγή: <u>www.bigge.com</u>)



Εικόνα 1-21: Κοχλίωση των πτερυγίων στην άτρακτο, κατόπιν ανέγερσης και κοχλίωσης της ατράκτου στον ρότορα (πηγή: <u>www.mammoet.com</u>)

Διαμέσου του πυλώνα θα πρέπει να εξασφαλίζεται η ασφαλής ανάβαση τεχνικών και επιθεωρητών στην άτρακτο της ανεμογεννήτριας, και επίσης στο εσωτερικό του πρέπει να περιλαμβάνονται κάποιες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, ιδιαίτερα τα καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην βάση του πυλώνα. Αυτό απαιτεί ορισμένες εσωτερικές εγκαταστάσεις, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-23. Ανάλογα με το ύψος του πυλώνα τοποθετείται ένας αριθμός από ενδιάμεσες πλατφόρμες. Τυπικά για κάθε τμήμα του πυλώνα αντιστοιχεί και μία πλατφόρμα. Για ανεμογεννήτριες με ύψη μέχρι 60-70μ. χρησιμοποιούνται απλές κάθετες σκάλες με αναρριχητική προστασία για την ανάβαση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-23. Για πυλώνες μεγαλύτερο των 80m, εγκαθίστανται απλοί ανελκυστήρες αναρρίχησης, αν απαιτείται από το χειριστή.

Για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας τα καλώδια κρέμονται ελεύθερα με ένα βρόγχο στο άνω τμήμα του πυλώνα, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 1-22. Επιπλέον, για τις εργασίες συντήρησης στον πυλώνα, είναι υποχρεωτικός ο εσωτερικός φωτισμός.



Εικόνα 1-22: Αναρριχητική σκάλα και καλώδια ηλεκτρικής ενέργειας στο εσωτερικό του πυλώνα (πηγή: commons.wikimedia.org)


Εικόνα 1-23: συστατικά μέρη ενός αυτόνομου χαλύβδινου σωληνωτού πυλώνα (πηγή: reichchemistry.wikispaces.com)

1.3.5 Θεμελίωση ανεμογεννητριών

Σκοπός της θεμελίωσης είναι η εξασφάλιση σταθερότητας στην ανεμογεννήτρια καθόλη τη διάρκεια λειτουργίας της. Αυτή επιτυγχάνεται μέσω της μεταφοράς και κατανομής των φορτίων που επιδρούν στη θεμελίωση στο έδαφος. Το κατακόρυφο φορτίο που επιδρά στη θεμελίωση οφείλεται στο μόνιμο βάρος του πυλώνα, του ρότορα, των πτερυγίων, καθώς και των μηχανολικών και ηλεκτρολογικών εξοπλισμών που βρίσκονται στη γεννήτρια. Η σημαντικότερη, όμως, επίδραση στη θεμελίωση προέρχεται από τα φορτία που προκαλεί ο άνεμος. Λόγω του μεγάλου ύψους του πυλώνα, η οριζόντια συνιστώσα που προέρχεται από τις δυνάμεις του ανέμου, δίνει μία σημαντική ροπή κάμψης στη θεμελίωση.

Οι παράμετροι που καθορίζουν τη θεμελίωση ενός πυλώνα είναι οι τοπικές συνθήκες του εδάφους και το μέγεθος της ανεμογεννήτριας. Κατά τη διαστασιολόγηση, λαμβάνονται υπόψιν τα φορτία με τη μεγαλύτερη τιμή τα οποία δρουν στην ανεμογεννήτρια σε συνθήκες ακινητοποίησης. Η καθοριστική παράμετρος είναι η μέγιστη θεωρητική ταχύτητα ανέμου. Όμως, και ο τεχνικός τρόπος λειτουργίας της ανεμογεννήτριας παίζει κάποιο ρόλο. Για παράδειγμα, μία ανεμογεννήτρια με σύστημα ελέγχου κλίσης πτερυγίων stall control δεν έχει η δυνατότητα απάλυνσης των πτερυγίων, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγάλων στατικών φορτίων στον σχεδιασμό, κάτι το οποίο έχει σημαντική επίδραση τόσο στη διαστασιολόγηση όσο και στη κοστολόγηση του έργου. Μια άλλη κατάσταση, η οποία πρέπει να ελεγχθεί, είναι στην περίπτωση όπου κατά τη διάρκεια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας επιδρούν και τα μέγιστα φορτία. Κατά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας, η μέγιστη ροπή ανατροπής για την θεμελίωση προσδιορίζεται με την ώθηση του ρότορα. Σε ανεμογεννήτριες με έλεγχο κλίσης πτερυγίων (pitch control) η ώθηση του ρότορα φτάνει σαν μέγιστη τιμή την ονομαστική ισχύ, ενώ στην περίπτωση ανεμογεννητριών με stall control η ώθηση του ρότορα συνεχίζεται να αυξάνεται, ακόμα κι όταν φτάσει την ονομαστική ισχύ. Έτσι, οι αρχές απαιτούν μία έγκριση σχεδιασμού και μία πιστοποίηση ασφαλείας με βάση αυτά τα στατικά φορτία. Επιπλέον, οι υπολογισμοί αντοχής σε κόπωση, οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη το δυναμικό φάσμα φορτίων, κανονικά δεν ζητούνται και γίνονται υπ' ευθύνη του κατασκευαστή.

Ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες μιας περιοχής, η θεμελίωση που πραγματοποιείται είναι είτε επιφανειακή θεμελίωση είτε θεμελίωση με πασσάλους. Το βάθος στο οποίο βρίσκονται τα στρώματα εδάφους που απορροφούν τα επιβαλλόμενα φορτία καθορίζει τον τύπο θεμελίωσης που θα επιλεχθεί.

Σχετικά με την επιφανειακή θεμελίωση (Εικόνα 1-24), τα πέδιλα είναι συνήθως κυκλικά, ορθογωνικά ή πολυγωνικά. Στην επιφανειακή θεμελίωση χρησιμοποιείται είτε ένας μεταλλικός δακτύλιος με ένα έλασμα έδρασης που ενσωματώνεται στο θεμέλιο από σκυρόδεμα είτε ένας κλωβός αγκυρίων, όπου ένας μεγάλος αριθμός αγκυρίων αγκυρώνονται μαζί με μία μεταλλική πλάκα έδρασης στη θεμελίωση. Στην Εικόνα 1-25 και 1-26 παρουσιάζεται ο τρόπος αγκύρωσης των χαλύβδινων σωληνωτών πυλώνων, εντάσσοντας ένα μεταλλικό τμήμα σε σχήμα δαχτυλιδιού στον χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος του θεμελίου, ενώ στην Εικόνα 1-27 και 1-28 φαίνεται η αγκύρωση δύο μεταλλικών πλακών έδρασης στη θεμελίωση χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο αριθμό μεγάλου μήκους αγκυρίων. Η ροπή ανατροπής της κατασκευής καθορίζει την απαιτούμενη μάζα και τις διαστάσεις της πλάκας.



Εικόνα 1-24: επιφανειακή θεμελίωση χαλύβδινου σωληνωτού πυλώνα [1-5]



Εικόνα 1-25: Χρήση ενός μεταλλικού τμήματος σε σχήμα δαχτυλιδιού στη θεμελίωση μιας ανεμογεννήτριας (πηγή: postimg.org)



Εικόνα 1-26: Θεμελίωση ανεμογεννήτριας μέσω αγκύρωσης ενός μεταλλικού τμήματος σε σχήμα δαχτυλιδιού (πηγή: <u>www.wind-watch.org</u>)



Εικόνα 1-27: Θεμελίωση ανεμογεννήτριας με χρήση κλωβού αγκυρίων και μεταλλικών πλακών έδρασης (πηγή: aerialpower.in)



Εικόνα 1-28Κλωβός αγκυρίων με μεταλλικές πλάκες θεμελίωσης (πηγή: <u>www.timars.se/nyheter.php</u> 2010-08-18)

Η θεμελίωση με πασσάλους (Εικόνα 1-29) προτιμάται ως τύπος θεμελίωσης σε αδύναμα εδάφη. Περιλαμβάνει μία πλάκα έδρασης, η οποία στηρίζεται πάνω στους πασσάλους και μεταφέρει τα φορτία σε φέροντα στρώματα του εδάφους. Η ενσωμάτωση του τμήματος θεμελίωσης στο οποίο κοχλιώνεται ο δακτύλιος της βάσης του πυλώνα απαιτεί κάποια εμπειρία. Η φλάντζα του τμήματος θεμελίωσης πρέπει να τοποθετείται σε οριζόντια και επίπεδη θέση με πολύ μικρή ανοχή από την ευθυγραμμία, ώστε να αποτραπεί τυχόν κλίση στον πυλώνα.



Εικόνα 1-29: θεμελίωση με πασσάλους [1-5]

1.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1-1] Αικατερίνη Νταϊφώτη, "Διερεύνηση της συμπεριφοράς συνδέσεων σε πυλώνες ανεμογεννητριών βάσει αριθμητικών προσομοιώσεων", Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Νοέμβριος 2014
- [1-2] Ηλίας Θανάσουλας, "Κόπωση Συνδέσεων σε Πυλώνες Ανεμογεννητριών", Μεταπτυχιακή Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2014
- [1-3] Κωνσταντίνος Θεοχάρης, "Αξιολόγηση εναλλακτικών τρόπων συγκόλλησης σε συνδέσεις βραχέος L πυλώνων ανεμογεννητριών", Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2015
- [1-4] Burton T., Sharpe D., Jenkins N., Bossanyi E. (2001). "Wind energy handbook" John Wiley & Sons, Ltd Baffins Lane, Chichester West Sussex, PO19 1UD, England
- [1-5] Erich Hau. "Wind Turbines: Fundamentals, Tecnhologies, Application, Economics" 2nd edition. Springer-Verlah Berlin Heidelberg 2006
- [1-6] "Guidelines for Design of Wind Turbines, 2nd Edition" Det Norske Veritas, Copenhagen (Wind.Turbine.Certification@dnv.com) and Wind Energy Department, Risø National Laboratory (Certification@risoe.dk) 2002.

2 ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΣΩΛΗΝΩΤΟΥ ΣΩΛΗΝΑ

2.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

2.1.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, ο αυτόνομος χαλύβδινος σωληνωτός πυλώνας της ανεμογεννήτριας αποτελείται από έναν αριθμό προκατασκευασμένων τμημάτων μήκους από 20m μέχρι 30m, τα οποία μεταφέρονται στο χώρο του έργου και συνδέονται μεταξύ τους με προεντεταμένους κοχλίες μέσω κυκλικών μεταλλικών δακτυλίων. Οι κυκλικοί αυτοί μεταλλικοί δακτύλιοι, όπως φαίνεται στην αριστερή Εικόνα 2-1, συγκολλούνται στα τμήματα του πυλώνα στο εργοστάσιο και μεταφέρονται στο εργοτάξιο με την μορφή της δεξιάς Εικόνας 2-1. Στην συνέχεια κατά την ανέγερση οι δύο φλάντζες τοποθετούνται η μία πάνω απ' την άλλη και γίνεται η σύνδεση με τους κοχλίες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-2. Αμέσως μετά την τοποθέτηση των κοχλιών ακολουθεί η προέντασή τους από ένα τεχνικό. Για πυργοειδή οικοδομήματα συστημάτων δόμησης σωληνωτού περιβλήματος, όπως είναι οι πυλώνες ανεμογεννητριών, συνήθως προτιμώνται μονόπλευρες συνδέσεις σε δακτυλιοειδείς φλάντζες (Εικόνα 2-3). Η επιλογή αυτών των συνδέσεων οφείλεται στα οικονομικά οφέλη κατά την κατασκευή και την τοποθέτηση. Οι φλάντζες συνδέονται μέσω προεντεταμένων κοχλιών υψηλής αντοχής ποιότητος (10.9).



Εικόνα 2-1: κυκλικοί μεταλλικοί δακτύλιοι τμημάτων πυλώνα (πηγή: www.iraetaforging.com & www.sustainablemfr.com)

κοχλιών

(πηγή:



και σύνδεση τμημάτων πυλώνα μέσω προεντεταμένων

Εικόνα 2-2: Ανέγερση www.builditsoftware.com & www.polarisamerica.com)



Εικόνα 2-3: εξωτερική και εσωτερική δακτυλιοειδής φλάντζα κατά Petersen [2-3]

Η φόρτιση του ανέμου είναι η κυριότερη φόρτιση μιας ανεμογεννήτριας. Εξαιτίας της δυναμικής φύσης των ανεμοπιέσεων και της ανακυκλιζόμενης φόρτισης, προεντείνοντας τους κοχλίες αυξάνεται η αντοχή τους και αποτρέπεται μία ενδεχόμενη αστοχία της σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας λόγω του φαινομένου της κόπωσης. Ο άνεμος ασκείται στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας, προκαλώντας με την σειρά του καμπτική ροπή στον πυλώνα, η οποία έχει διεύθυνση εγκάρσια στην διεύθυνση της φοράς του ανέμου. Η καμπτική αυτή ροπή, η οποία αναπτύσσεται περί τον άξονα γ όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-4, ισοδυναμεί με ορθές τάσεις στο κέλυφος του πυλώνα και χωρίζει την σύνδεση μέσω ενός ουδέτερου άξονα. Από την μία πλευρά της σύνδεσης ασκούνται εφελκυστικές ορθές τάσεις, ενώ από την άλλη πλευρά θλιπτικές ορθές τάσεις, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-5. Στην περιοχή όπου τα ελάσματα της σύνδεσης αποκατάστασης της συνέχειας απομακρύνονται οι κοχλίες καταπονούνται σε εφελκυστικά φορτία, ενώ στην περιοχή όπου τα ελάσματα έρχονται σε επαφή οι κοχλίες είναι ανενεργοί (Εικόνα 2-6).



Εικόνα 2-4: Προσομοίωση σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας τμημάτων πυλώνα (πηγή: pressurevesseltech.asmedigitalcollection.asme.org)



Εικόνα 2-5: εφελκυστική και θλιπτική περιοχή κατά Petersen [2-3]



Εικόνα 2-6: Εφελκυόμενη και θλιβόμενη ζώνη σύνδεση κατά Petersen [2-3]

2.1.2 Παρουσίαση των μεθόδων αποκατάστασης της συνέχειας

Για να μελετηθεί ο τρόπος σύνδεσης των τμημάτων του πυλώνα, απομωνώνεται ένα κομμάτι της μεταλλικής σύνδεσης που ενώνονται οι δύο μεταλλικές φλάντζες με έναν προεντεταμένο κοχλία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-7.



Εικόνα 2-7: Σχηματική απεικόνιση της σύνδεσης τμημάτων πυλώνων (πηγή: από Le Anh Tuan, Certified Journal, Volume 5, Issue 10, October 2015) [2-6]

Στην βιβλιογραφία προτείνονται τέσσερις τρόποι αποκατάστασης της συνέχειας των τμημάτων του πυλώνα, οι οποίοι παρουσιάζονται σε αυτή την παράγραφο. Οι τρεις πραγματοποιούνται με συγκόλληση εσωραφής της φλάντζας στο κέλυφος του πυλώνα, ενώ ο τέταρτος με δύο συγκολλήσεις εξωραφής. Οι τρόποι συγκόλλησης με εσωραφή διαφέρουν στη γεωμετρία των δακτυλιοειδών ελασμάτων, καθώς και στη θέση όπου πραγματοποιείται η συγκόλληση.

1. Φλάντζα εξωραφής



Εικόνα 2-8: φλάντζα εξωραφής κατά Petersen [2-3]

ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΣΩΛΗΝΩΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ

Στην Εικόνα 2-8 παρουσιάζεται ο τρόπος αποκατάστασης που επιλέγεται συνήθως για την περίπτωση έκκεντρων καταπονούμενων συνδέσεων με δακτυλιοειδής φλάντζες. Η σύνδεση δακτυλιοειδούς φλάντζας-ελάσματος κελύφους εξασφαλίζεται με δύο εξωραφές, ενώ μέσω της σύνδεσης των στεφανιών με κοχλίες διευκολύνεται η προγματοποίηση τοξοειδούς μορφής και ορθογωνίου προσανατολισμού του σωλήνα πριν την συγκόλληση. Συνήθως επιλέγεται αυτός ο τύπος σύνδεσης λόγω της απλοποιημένης γεωμετρίας του. Σύμφωνα με τον Petersen, παρόλο που σε όλες τις πραγματοποιημένες έρευνες όπου χρησιμοποιήθηκε ο τύπος της σύνδεσης με εξωραφές, δεν εμφανίστηκαν ρωγμές ή σπασίματα λόγω κόπωσης στις εξωραφές ή στις λαμαρίες σύνδεσης. Στον DIN 4133 [2-5] η σύνδεση αυτή χαρακτηρίζεται ως " λιγότερο καλή " και προτείνεται για την λαμαρίνα του κελύφους Δσ_R = 45 N/mm².

2. Φλάντζα προσυγκόλλησης



Εικόνα 2-9: φλάντζα προσυγκόλλησης κατά Petersen [2-3]

Στην Εικόνα 2-9 παρουσιάζεται ο δεύτερος τρόπος σύνδεσης της φλάντζας με το έλασμα του κελύφους. Η σύνδεση επιτυγχάνεται με μία εσωραφή πλήρους διείσδυσης. Για να είναι επιτυχής και με απόλυτη ακρίβεια η σύνδεση αυτή, θα πρέπει η κοπή της λαμαρίνας να πραγματοποιηθεί με υψηλή ακρίβεια, ενώ το κέλυφος του πυλώνα και η φλάντζα σύνδεσης θα πρέπει να έχουν αμοιβαίο προσανατολισμό.

3. Φλάντζα με ορισμένες επιφάνειες επαφής



Εικόνα 2-10: φλάντζα με ορισμένες επιφάνειες επαφής κατά Petersen [2-3]

Στην Εικόνα 2-10 παρουσιάζεται ο τρίτος τρόπος αποκατάστασης της συνέχειας. Σε αυτή την περίπτωση οι δύο φλάντζες των συνδεόμενων τμημάτων παρουσιάζουν ορισμένες επιφάνειες επαφής. Έτσι, οι αναπτυσσόμενες τάσεις ακολουθούν μία προκαθορισμένη και συγκεκριμένη διαδρομή. Η εφελκυστική δύναμη που αναλαμβάνεται σε αυτόν τον τύπο σύνδεσης είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη σύνδεση πλήρους επαφής των συνδεόμενων ελασμάτων. Για αυτόν τον λόγο στον DIN 4133 [2-5] η σύνδεση χαρακτηρίζεται "καλή" και για την λαμαρίνα του κελύφους προτείνεται Δσ_R = 90 N/mm².

4. Φλάντζα με προέκταση



Εικόνα 2-11: φλάντζα με προέκταση κατά Petersen [2-3]

Στην Εικόνα 2-11 παρουσιάζεται η περίπτωση της φλάντζας με προέκταση, όπου επεκτείνεται η δακτυλιοειδής φλάντζα με ένα πρόσθετο κομμάτι χάλυβα, έτσι ώστε η διαμόρφωση της γεωμετρίας από την φλάντζα στο κέλυφος του πυλώνα να γίνεται με πιο ομαλό τρόπο. Για την διαμόρφωση αυτή πραγματοποιείται συγκόλληση εσωραφής στην προέκταση της φλάντζας και σε απόσταση από την επιθυμητή αλλαγή γεωμετρίας, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η συγκέντρωση τάσεων.

Το πιο ευνοικό θα ήταν ένας συνδυασμός του τρίτου και τέταρτου τρόπου σύνδεσης φλάντζας, κάτι το οποίο όμως θα οδηγούσε σε δυσανάλογα υψηλό κόστος, καθώς σε όλες τις προαναφερόμενες περιπτώσεις συνδέσεων, το πιο αδύναμο τμήμα είναι οι κοχλίες. Ωστόσο, η σύνδεση με φλάντζα εξωραφής (Εικόνα 2-8) αποτελεί ιδανική λύση σε συνήθεις κατασκευές σχετικά με την αντοχή έναντι κόπωσης συνολικά της κατασκεύης.

2.2 ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΚΚΕΝΤΡΩΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΒΡΑΧΕΩΣ L

Στο Σχήμα 2-1 παρουσιάζεται από πείραμα κατά Petersen ο τρόπος που συμπεριφέρεται μια σύνδεση βραχέως L, και συγκεκριμένα συσχετίζεται ο τρόπος αύξησης της δύναμης του κοχλία Fs με την δύναμη εφελκυσμού της δύναμης Z. Στην αρχή παρατηρείται ότι η δύναμη του κοχλία Fs δεν παρουσιάζει σημαντική αύξηση. Ωστόσο, η δύναμη Fs αρχίζει να αυξάνεται προοδευτικά και αρχίζουν οι δύο συνδεόμενες φλάντζες να απομακρύνονται. Στο σπείρωμα του κοχλία πραγματοποιούνται οι πρώτες πλαστικές παραμορφώσεις, ενώ ο κορμός του κοχλία θα υπερτεντωθεί όλκιμα με ταυτόχρονη μείωση της προέντασης. Τελικά, επέρχεται αστοχία του κοχλία, η οποία μπορεί να είναι είτε θραύση του ίδιου του κοχλία είτε αστοχία του σπειρώματος. Για την μελέτης της σύνδεσης έναντι κοπώσεως, η αρχική περιοχή του διαγράμματος έχει καθοριστική σημασία.



Σχήμα 2-1: Διάγραμμα συσχέτισης δύναμης κοχλία Fs με εφελκυστικής δύναμης σύνδεσης Z κατά Petersen [2-3]

Η μη γραμμική σχέση δύναμης του κοχλία Fs και επιβαλλόμενης δύναμης Z στο κέλυφος του πυλώνα επιβεβαιώνεται και από Σχήμα 2-2. Σύμφωνα με τον Seidel, υπάρχουν 4 περιοχές:

- i) <u>Περιοχή 1</u>: Η καμπύλη είναι σχετικά γραμμική, ενώ όσο οι φλάντζες πλησιάζουν μεταξύ τους στο σημείο επαφής οι τάσεις ανάμεσα στις φλάντζες μειώνονται.
- ii) <u>Περιοχή 2</u>: Οι φλάντζες απομακρύνονται η μία από την άλλη.
- iii)<u>Περιοχή 3</u>: Άνοιγμα σύνδεσης με χάσμα ανάλογα με τα φορτία και την γεωμετρία.
- iv)<u>Περιοχή 4</u>: Πλαστικοποίηση του κοχλία και/ή της φλάντζας μέχρι να επέλθει αστοχία της σύνδεσης.



κέλυφος του πυλώνα κατά Seidel 2001b [2-4]

2.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [2-1] Αικατερίνη Νταϊφώτη, "Διερεύνηση της συμπεριφοράς συνδέσεων σε πυλώνες ανεμογεννητριών βάσει αριθμητικών προσομοιώσεων", Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Νοἑμβριος 2014
- [2-1] Κωνσταντίνος Θεοχάρης, "Αξιολόγηση εναλλακτικών τρόπων συγκόλλησης σε συνδέσεις βραχέος L πυλώνων ανεμογεννητριών", Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2015
- [2-2] C. Petersen, Stahlbau: Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten, Vieweg, 1993
- [2-3] C. Heistermann & W. Husson & M. Veljkovic, "Flange connection vs. friction connection in towers for wind turbines", Division of structural engineering-steel structures, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, NSCC2009
- [2-4] DIN 6914, High Strength hexagon head bolts, Deutsche Norm, 1989
- [2-5] Le Anh Tuan, "Simple Formula for Evaluating Variable Stiffness of Wind-Turbine Tower with Consideration of Flange – Joint Separation", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Website: www.ijetae.com (ISSN 2250-2459, ISO 9001:2008 Certified Journal, Volume 5, Issue 10, October 2015)

3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

3.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Για την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε ένα μεταλλικό πλαίσιο, το σχέδιο του οποίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-1. Το μεταλλικό πλαίσιο αποτελείται από 5 μεταλλικές πλάκες 50mm, τα σχέδια κοπής των οποίων φαίνονται στην Εικόνα 3-2. Οι 2 ακραίες πλάκες του πλαισίου είναι κατασκευασμένες με βάση την τομή Α-Α, ενώ οι 3 ενδιάμεσες βάσει της τομής Β-Β. Τις μεταλλικές αυτές πλάκες διαπερνούν 4 ντίζες M33 ποιότητας (8.8), όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-1, ενώ για τον περιορισμό λυγισμού των ντιζών τοποθετήθηκαν περιμετρικά του πλαισίου και καθ΄ ύψος όλων των φατνωμάτων ελάσματα διατομής L40x40 με πάχος 3mm.

Τα δοκίμια τοποθετούνται μέσα στο μεταλλικό αυτό πλαίσιο, σύμφωνα με την διάταξη της Εικόνα 3-3. Στο πλαίσιο τοποθετούνται κάθε φορά δύο δοκίμια, όπου το κάτω δοκίμιο συγκρατείται από μία βάση στήριξης πάνω στο έμβολο (λεπτομέρεια Λ1 Εικόνας 3-3), ενώ το πάνω δοκίμιο στηρίζεται σε μία ίδια μεταλλική βάση που είναι συγκολλημένη στην άνω ακραία μεταλλική πλάκα 50mm. Το έμβολο κινείται προς τα κάτω, με αποτέλεσμα το εφελκυστικό φορτίο να ασκείται μέσω του εμβόλου στο κάτω δοκίμιο. Τα σχέδια κοπής των βάσεων στήριξης των δοκιμίων παρουσιάζονται στην Εικόνα 3-4, ενώ στην Εικόνα 3-5 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που εφαρμόστηκε, βάσει των σχεδίων εφαρμογής.



Εικόνα 3-1: Όψη μεταλλικού πλαισίου για την πειραματική διαδικασία



Εικόνα 3-2: Τομή Α-Α' και Β-Β' μεταλλικών ελασμάτων 50mm



Εικόνα 3-4: Σχέδια κοπής βάσεων στήριξης δοκιμίων (Λ1)



Εικόνα 3-5: Πειραματική διάταξη στο εργαστήριο

3.2 ΔΟΚΙΜΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 5 βασικές ομάδες δοκιμίων και επιπλέον πραγματοποιήθηκαν κάποιες παραμετρικές δοκιμές αντοχής. Συγκεκριμένα, οι βασικές ομάδες δοκιμίων είναι:

- Δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα
- Δοκίμιο εξωραφής με προεξοχή φλάντζας
- Δοκίμιο με εξωραφή
- Δοκίμιο εσωραφής στην τομή φλάντζας πυλώνα
- > Δοκίμιο εσωραφής στην τομή φλάντζας πυλώνα με σχισμή

Παραμετρικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για την περίπτωση των δοκιμίων εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα, αλλάζοντας κάθε φορά τα πάχη της φλάντζας, καθώς και τη διάμετρο και την θέση του κοχλία. Πιο αναλυτικά, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές αντοχής σε δοκίμια εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 25mm, 30mm, 35mm, 40mm και 45mm, ενώ για την περίπτωση της φλάντζας 45mm πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές, όπου στη μία περίπτωση έγινε αλλαγή θέσης του κοχλία και στην άλλη αλλαγή διαμέτρου του κοχλία.

3.2.1 Δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα σχέδια κοπής των μελών των δοκιμίων εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα. Το έλασμα που προσομοιώνει το κέλυφος του πυλώνα σχεδιάστηκε να έχει ίδιο πάχος και διαστάσεις σε όλα τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν, ενώ η φλάντζα που χρησιμοποιήθηκε για την σύνδεση αποκατάστασης της συνέχειας των τμημάτων ήταν ίδια σε όλα τα δοκίμια ως προς τις διαστάσεις και την οπή για τον προεντεταμένο κοχλία, αλλά άλλαζε κάθε φορά ως προς το πάχος της, ανάλογα με τις εξεταζόμενες περιπτώσεις και σύμφωνα με τα σχέδια που παρουσιάζονται παρακάτω.

3.2.1.1 Δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 45mm

Στην Εικόνα 3-6 παρουσιάζεται το δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 45mm, ενώ στην Εικόνα 3-7 παρουσιάζονται τα σχέδια κοπής των μελών του συγκεκριμένου δοκιμίου.



Εικόνα 3-6: Δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 45mm



MEΛΟΣ A7: PL160/355/7, #2

Εικόνα 3-7: Σχέδια κοπής μελών με φλάντζα πάχους 45mm



Στην Εικόνα 3-8 παρουσιάζεται το δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 40mm, ενώ στην Εικόνα 3-9 παρουσιάζονται τα σχέδια κοπής των μελών του.





40



MEΛΟΣ A7: PL160/355/7, #2

Εικόνα 3-9: Σχέδια κοπής μελών με φλάντζα πάχους 40mm

3.2.1.3 Δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 35mm

Στην Εικόνα 3-10 παρουσιάζεται το δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 35mm, ενώ στην Εικόνα 3-11 παρουσιάζονται τα σχέδια κοπής των μελών του.



Εικόνα 3-10: Δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 35mm



ΜΕΛΟΣ Α7: PL160/355/7, #2

Εικόνα 3-11: Σχέδια κοπής μελών με φλάντζα πάχους 35mm



Στην Εικόνα 3-12 παρουσιάζεται το δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 30mm, ενώ στην Εικόνα 3-13 παρουσιάζονται τα σχέδια κοπής των μελών του.







MEΛΟΣ Α7: PL160/355/7, #2

Εικόνα 3-13: Σχέδια κοπής μελών με φλάντζα πάχους 30mm



Στην Εικόνα 3-14 παρουσιάζεται το δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 25mm, ενώ στην Εικόνα 3-15 παρουσιάζονται τα σχέδια κοπής των μελών του.





MEΛΟΣ A7: PL160/355/7, #2

Εικόνα 3-15: Σχέδια κοπής μελών με φλάντζα πάχους 25mm

3.2.1.6 Δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 45mm και αλλαγή διαμέτρου κοχλία

Στην Εικόνα 3-16 παρουσιάζεται το δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 45mm, αλλάζοντας τη διάμετρο του προεντεταμένου κοχλία M20 και βάζοντας στη θέση του κοχλία M16 ποιότητος (10.9), ενώ στην Εικόνα 3-17 παρουσιάζονται τα σχέδια κοπής των μελών του.







MEΛΟΣ A7: PL160/355/7, #2

Εικόνα 3-17: Σχέδια κοπής μελών με φλάντζα πάχους 45mm και οπής Φ18 για προεντεταμένο κοχλία Μ16

3.2.1.7 Δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 45mm και αλλαγή θέσης κοχλία

Στην Εικόνα 3-18 παρουσιάζεται το δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 45mm, αλλάζοντας τη θέση του προεντεταμένου κοχλία M20 ποιότητος (10.9), ενώ στην Εικόνα 3-19 παρουσιάζονται τα σχέδια κοπής των μελών του.



προεντεταμένου κοχλία Μ20



ΜΕΛΟΣ Α7: PL160/355/7, #2

Εικόνα 3-19: Σχέδια κοπής μελών με φλάντζα πάχους 45mm και αλλαγή θέσης προεντεταμένου κοχλία M20

3.2.2 Δοκίμιο εξωραφής με προεξοχή φλάντζας

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται στην Εικόνα 3-20 το δοκίμιο εξωραφής στο οποίο προεξέχει η φλάντζα 45mm και χρησιμοποιείται προεντεταμένος κοχλίας M20 ποιότητος (10.9), ενώ στην Εικόνα 3-21 παρουσιάζονται τα σχέδια κοπής των μελών του συγκεκριμένου δοκιμίου.



Εικόνα 3-20: Δοκίμιο εξωραφής με προεξοχή φλάντζας



MEΛΟΣ A2: PL160/390/7, #2

Εικόνα 3-21: Σχέδια κοπής μελών δοκιμίου εξωραφής με προεξοχή φλάντζας

3.2.3 Δοκίμιο με εξωραφή

Στην Εικόνα 3-22 παρουσιάζεται το δοκίμιο εξωραφής χωρίς να προεξέχει η φλάντζα 45mm, ενώ στην Εικόνα 3-23 παρουσιάζονται τα σχέδια κοπής των μελών για αυτή την περίπτωση.





MEΛΟΣ A8: PL160/420/7, #2

Εικόνα 3-23: Σχέδια κοπής μελών δοκιμίου εξωραφής χωρίς προεξοχή φλάντζας

3.2.4 Δοκίμιο εσωραφής στην τομή φλάντζας – πυλώνα

Στην Εικόνα 3-24 παρουσιάζεται το δοκίμιο που σχεδιάστηκε για να χρησιμοποιηθεί στη πειραματική διαδικασία με εσωραφή στην τομή φλάντζας 45mm και πυλώνα, ενώ στην εικόνα 3-25 φαίνονται τα σχέδια κοπής των μελών του δοκιμίου.







ΜΕΛΟΣ Α2: PL160/390/7, #2 Εικόνα 3-25: Σχέδια κοπής μελών δοκιμίου εσωραφής στην τομή φλάντζας – πυλώνα

3.2.5 Δοκίμιο εσωραφής στην τομή φλάντζας – πυλώνα με σχισμή

Στην Εικόνα 3-26 παρουσιάζεται το δοκίμιο που κατασκευάστηκε με εσωραφή στην τομή φλάντζας με πυλώνα και τα δύο δοκίμια ακουμπούν μεταξύ τους σε φλάντζες πάχους 45mm σε συγκεκριμένα σημεία επαφής, λόγω ύπαρξης σχισμής, επιβάλλοντας με τον τρόπο αυτόν στις αναπτυσσόμενες τάσεις να ακολουθήσουν συγκεκριμένη διαδρομή. Τέλος, στην Εικόνα 3-27 παρουσιάζονται τα σχέδια κοπής των μελών του συγκεκριμένου δοκιμίου.



Εικόνα 3-26: Δοκίμιο εσωραφής στην τομή φλάντζας – πυλώνα με σχισμή



ΜΕΛΟΣ Α2: PL160/390/7, #2 Εικόνα 3-27: Σχέδια κοπής μελών δοκιμίου εσωραφής στην τομή φλάντζας – πυλώνα με σχισμή

4 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα δοκίμια που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό, υποβλήθηκαν σε δοκιμή αντοχής υπό εφελκυστική καταπόνηση. Κάθε δοκίμιο, συνοδεύεται από ένα διάγραμμα φορτίου και μετακίνησης, όπου η μετακίνηση αυτή χαρακτηρίζει όλο το πλαίσιο στο οποίο πραγματοποιούνται οι δοκιμές και επιπλέον περιλαμβάνονται οι μετακινήσεις του εξεταζόμενου δοκιμίου, καθώς και των 8 συνολικά κοχλιών M20 ποιότητος (8.8), που βρίσκονται στην πάνω και κάτω στήριξη των δοκιμίων και παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-1. Το πλαίσιο στο οποίο πραγματοποιούνται οι δοκιμές αντοχής παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-1.



Εικόνα 4-1: Πειραματική διάταξη δοκιμίων και πλαίσιο πειραματικών δοκιμών αντοχής



Σε κάθε πειραματική δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν δύο βελόμετρα, τα DT 01 και DT 02, καθώς και δύο μετρητές παραμορφώσεων (strain gauges), SG 08 και SG 09, όπως φάινεται στην Εικόνα 4-2.

Εικόνα 4-2: Χρήση βελομέτρων (DT 01 και DT 02) και μετρητών παραμορφώσεων (SG 08 και SG 09) στις πειραματικές δοκιμές

Από το βελόμετρο DT 02 καταγράφονται οι μετακινήσεις του δοκιμίου στην περιοχή μετρήσεως, στις οποίες περιλαμβάνεται και η παραμόρφωση (στροφή) του προεντεταμένου κοχλία M20 ποιότητος (10.9), χωρίς να περιλαμβάνονται οι μετακινήσεις των συνολικά 8 κοχλιών M20 ποιότητος (8.8), που βρίσκονται στην άνω και κάτω στήριξη των δοκιμίων.

Από το βελόμετρο DT 01 καταγράφεται η επιμήκυνση του προεντεταμένου κοχλία M20 ποιότητος (10.9), καθώς και η ενδοτικότητα (παραμορφωσιμότητα) των δύο φλαντζών αποκατάστασης της συνέχειας.

Στις παρακάτω πειραματικές δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές ομάδες κοχλιών, η ομάδα Α και η ομάδα Β. Οι κοχλίες της ομάδας Α που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αγνώστων προδιαγραφών και τεχνικών χαρακτηριστικών, ενώ οι κοχλίες της ομάδας Β συνοδεύονται από κατάλληλο πιστοποιητικό δοκιμών, το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-3. Στο συγκεκριμένο πιστοποιητικό παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα δοκιμών των κοχλιών M20 και έχουν διαγραφεί τα στοιχεία τόσο του εργοστασίου παραγωγής όσο και του πελάτη.

		ΠΙΣ	ΤΟΠΟΙΗΤΙΚ Ε	Ο ΔΟΚΙΜΩΝ / ΤΕ ΛΟΤ / ΕΝ 10204 / 3	ST CERTII 3.1	FICAT	TE		H	N MEP	O 17 /DA	/034 TE 10	7 0/04/1	7	
		ПЕЛА CUSTO	THΣ DMER	AP. ΠΑΡΑΓ ORDE	ΑΡ. ΠΑΡΑΓΓΕΛΙΑΣ ORDER No			AP. A. ANOSTOARS \ HMEPOMHNIA DELIVERY NOTE DATE							
								Τ.4	A.A:	00049	92 / 1	0-04-	2017	_	
•/•	FILOS	ΑΡ ΠΑΡΤΙΛΟΣ	ΠΡΟΑΙΑΓ	ΠΟΙΟΤΗΤΑ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ		хнмп	κΗ ΣΥ	ΣΤΑΣ	H/CH	EMIC	AL AN	ALYS	S	
No	PRODUCT DESCRIPTION	BATCH No	PROD. SPECIFICAT.	PROD. GRADE	QUANTITY	% C	%S	%P	%Mn	%Si	%Cu	%Cr	%Ni	%B	
1	M 20 X 120	15310	EN 14399-4	10.9	10	0,295	0,005	0.009	0,900	0,040	0,100	0.190	0,100	0,0022	
2	NUTS M20	33130 8867	EN 14399-4	.10	10	0,460	0.005	0.012	0,740		-				
3	WASHERS M20	914074	EN 14399-6	HV	20	0,470	0.005	0,011	0.630	0,207	0.017	0.237	0.019		
4							+	-		-					
5	<u> </u>		-				-	-				-			
6										-		-			
7								-	-		-				
8							<u> </u>	-		-					
9						_	<u> </u>	-		<u> </u>	-		-		
10				L									<u> </u>		
_	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ/ΜΕCH	IANICAL PROPER	TIES	УКАПР/ТРИУН				ПАР	ATHP	ΗΣΕΊΣ	:			
A/A	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ	ΦΟΡΤΙΟ ΔΟΚΙΜΗΣ	ε επιμηκγνση	ΠΡΟΣΦΥΣΗ ΓΑΛΒΑΝ.	HARDN, TEST					REM.4R	KS .				
No	TENSILE STRENGTH (N/mm ²)	PROOF LOAD	ELONGATION %	STRIPPING TEST	HB HI' HBC										
	2	020 11/ 2			240 27 6 HDC	Uardon	e Ane to	100 808	2.1 Min 1	DHRC	May 20	HRC			

	ANTOXED F FORAKYZVIUN					
No	TENSILE STRENGTH (N/mm ²)	PROOF LOAD	ELONGATION %	STRIPPING TEST	HB HI' HBÇ	
1	1081 - 1117 N/mm ²	830 N/mm ²			34,9 - 37,5 HRC	Hardness Acc to ISO 898-1 Min 32 HRC - Max 39 HRC
2					30 - 33 HRC	Hardness Acc to ISO 898-2 Min 26 HRC - Max 36 HRC
3					331 - 348 HV	Hardness Min 300 HV - Max 370 HV
4						
5						
6				1990-100-100-100-100-100-100-100-100-100		
7						
8						
9						
10						

WE REREBY CERTIFY THAT THE PRODUCTS DESCRIBED ABOVE HAVE BEEN TESTED AND COMPLY WITH THE FERMS OF THE ORDE

ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ OUALITY CHECK

1 ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΔΙΑΣΦΑΛΙΣΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ OUALITY ASSURANCE



4.1 ΔΟΚΙΜΙΟ ΕΣΩΡΑΦΗΣ ΣΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ ΓΙΑ ΦΛΑΝΤΖΑ ΠΑΧΟΥΣ 45mm

4.1.1 Δοκίμιο με κοχλία ομάδας Α

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε δοκιμή αντοχής σε δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 45mm και κοχλία M20 της ομάδας Α, τα σχέδια κοπής του οποίου παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-4. Τα δοκίμια που τελικά κατασκευάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία διαφέρουν από εκείνα που είχαν σχεδιαστεί και των οποίων τα σχέδια παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3. Οι διαφορές οφείλονται σε αλλαγές λόγω της βιομηχανοποίησης των δοκιμίων. Μάλιστα, χρησιμοποιήθηκε χάλυβας ποιότητος S235 αντί του S355 που είχε αρχικά προβλεφθεί, ενώ το πλάτος της φλάντζας κατασκευάστηκε 80mm αντί 85mm που είχε αρχικώς σχεδιαστεί. Πριν την έναρξη του πειράματος μετρήθηκαν τα μέλη των δοκιμίων και οι διαφορές που εντοπίστηκαν σε σχέση με τα αρχικά σχέδια που είχαν κατασκευαστεί, παρουσιάζονται με κόκκινη σημείωση στην Εικόνα 4-4.



Εικόνα 4-4: Εντοπισμός διαφορών σχεδιασμού και κατασκευής δοκιμίου Α1



Εικόνα 4-5: Δοκίμιο αντοχής Α1

Για το δοκίμιο A1 της Εικόνας 4-5, σχεδιάζεται το διάγραμμα εφελκυστικού φορτίου – συνολικής μετακίνησης του πλαισίου, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-1.



Σχήμα 4-1: Διάγραμμα εφελκυστικού φορτίου (kN) – συνολικής πλαισιακής μετακίνησης (mm) δοκιμίου A1.

Μεταξύ των δύο δοκιμίων, τοποθετούνται μετρητές για να καταγράφονται τόσο οι μετακινήσεις στις δύο φλάντζες 45mm μεταξύ τους, όσο και σε μία απόσταση 100mm από την ακραία επιφάνεια της φλάντζας 45mm πάνω στα δύο ελάσματα 6mm. Το βελόμετρο που είναι τοποθετημένο πάνω στις δύο φλάντζες πάχους 45mm, παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-6 (DT 01), ενώ το βελόμετρο που είναι πάνω στα ελάσματα 6mm και σε απόσταση 100mm από την άνω και κάτω φλάντζα των δύο δοκιμίων αντίστοιχα, φαίνεται στην Εικόνα 4-7 (DT 02). Επιπλέον, στην Εικόνα 4-7 φαίνεται και η τοποθέτηση μετρητή παραμόρφωσης SG 08 στο έλασμα 6mm.



Εικόνα 4-6: Σχηματική παρουσίαση βελόμετρου DT 01



Εικόνα 4-7: Σχηματική παρουσίαση βελόμετρου DT 02 και μετρητή παραμορφώσεων SG 08

Στο Σχήμα 4-2 παρουσιάζεται η σχέση του εφελκυστικού φορτίου με τις μετακινήσεις που καταγράφηκαν από τα βελόμετρα DT 01 και DT 02, ενώ στο Σχήμα 4-3 παρουσιάζεται η σχέση εφελκυστικού φορτίου με τις παραμορφώσεις που καταγράφηκαν από τους μετρητές SG 08 και SG 09, τα οποία έχουν τοποθετηθεί βάσει των Εικόνων 4-2, 4-6 και 4-7.




4.1.2 Δοκίμιο με κοχλία ομάδας Β

Για το δοκίμιο A2 της Εικόνας 4-8, με τελικές διαστάσεις που εμφανίζεται στο σχέδιο της Εικόνας 4-9, πάχος φλάντζας 45,23mm και κοχλία M20 ομάδας B, σχεδιάζεται το διάγραμμα εφελκυστικού φορτίου–συνολικής μετακίνησης του πλαισίου, καθώς και τα διαγράμματα εφελκυστικού φορτίου με τις μετακινήσεις που καταγράφηκαν από τα βελόμετρα DT 01 και DT 02, τα οποία παρουσιάζονται στα Σχήματα 4-4, 4-5 και 4-6.



Εικόνα 4-8: Δοκίμιο αντοχής Test A2



Εικόνα 4-9: Εντοπισμός διαφορών σχεδιασμού και κατασκευής δοκιμίου Α2







Σχήμα 4-5: Σχέση εφελκυστικού φορτίου (kN) – μετακίνηση DT 01 (mm) δοκιμίου A2

Στο διάγραμμα του Σχήματος 4-5 σημαντικός είναι μόνο ο 1°ς κλάδος, καθώς το δοκίμιο Α2 αστόχησε στη συγκόλληση, λόγω ατελούς διείσδυσης της συγκόλλησης, όπως φαίνεται στις Εικόνες 4-10 και 4-11. Για αυτό το λόγο, στο Σχήμα 4-6 σχεδιάζεται για το βελόμετρο DT 01 μόνο ο 1°ς κλάδος και παράλληλα παρουσιάζεται η σχέση εφελκυστικού φορτίου με τη μετακίνηση που καταγράφηκε από το βελόμετρο DT 02.



Σχήμα 4-6: Σχέση εφελκυστικού φορτίου (kN) – μετακίνηση DT 01 και DT 02 (mm) δοκιμίου A2

Πειραματική αξιολόγηση της συμπεριφοράς συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών υπό στατική φόρτιση



Εικόνα 4-10: Αστοχία συγκόλλησης στο δεξί άκρο του δοκιμίου



Εικόνα 4-11: Ατελής διείσδυση συγκόλλησης

Τέλος, στο Σχήμα 4-7 παρουσιάζεται η σχέση εφελκυστικού φορτίου με τις παραμορφώσεις που καταγράφηκαν από τους μετρητές SG 08 και SG 09, τα οποία είναι τοποθετημένα στις θέσεις που έχουν υποδειχθεί στην Εικόνα 4-2.



Σχήμα 4-7: Σχέση εφελκυστικού φορτίου (kN) – παραμορφώσεων SG 08 και SG 09 (μstrain) δοκιμίου A2

4.2 ΔΟΚΙΜΙΟ ΕΣΩΡΑΦΗΣ ΣΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ ΓΙΑ ΦΛΑΝΤΖΑ ΠΑΧΟΥΣ 40mm

4.2.1 Δοκίμιο με κοχλία ομάδας Α

Για το δοκίμιο K2 της Εικόνας 4-12, του οποίου τα κατασκευαστικά σχέδια παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-13, με πάχος φλάντζας 40,69mm και κοχλία M20 ομάδας Α, σχεδιάζεται το διάγραμμα εφελκυστικού φορτίου – συνολικής μετακίνησης του πλαισίου, καθώς και τα διαγράμματα εφελκυστικού φορτίου με τις μετακινήσεις που καταγράφηκαν από τα βελόμετρα DT 01 και DT 02 και παραμορφώσεων SG 08 και SG 09, τα οποία παρουσιάζονται στα Σχήματα 4-8, 4-9 και 4-10, αντίστοιχα.



Εικόνα 4-12: Δοκίμιο Κ2



Εικόνα 4-13: Εντοπισμός διαφορών σχεδιασμού και κατασκευής δοκιμίου Κ2



Σχήμα 4-8: Διάγραμμα εφελκυστικού φορτίου (kN) – συνολικής πλαισιακής μετακίνησης (mm) δοκιμίου K2



Σχήμα 4-9: Σχέση εφελκυστικού φορτίου (kN) – μετακίνηση DT 01 και DT 02 (mm) δοκιμίου K2



Σχήμα 4-10: Σχέση εφελκυστικού φορτίου (kN) – παραμορφώσεων SG 08 και SG 09 (μstrain) δοκιμίου K2

Ο κοχίας Μ20 της ομάδας Α που χρησιμοποιήθηκε στο δοκίμιο Κ2 αστόχησε και μάλιστα παρουσίασε αστοχία στο σπείρωμά του, με αποτέλεσμα να διακοπεί η πειραματική διαδικασία αντοχής του

συγκεκριμένου δοκιμίου. Στην Εικόνα 4-14 φαίνεται το άνοιγμα που έχει παρουσιαστεί μεταξύ των δύο φλαντζών 40mm.



Εικόνα 4-14: Απομάκρυνση των δύο φλαντζών 40mm του δοκιμίου K2

4.2.2 Δοκίμιο με κοχλία ομάδας Β

Πραγματοποιήθηκε δοκιμή αντοχής σε δοκίμιο εσωραφής K1 στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 39,18mm και κοχλία M20 της ομάδας B, το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-15 και 4-16 και του οποίου τα κατασκευαστικά σχέδια φαίνονται στην Εικόνα 4-17.



Εικόνα 4-15: Δοκίμιο Κ1 (μπροστινή όψη)



Εικόνα 4-16: Δοκίμιο Κ1



Εικόνα 4-17: Εντοπισμός διαφορών σχεδιασμού και κατασκευής δοκιμίου Κ1

Για το δοκίμιο K1, σχεδιάζεται το διάγραμμα εφελκυστικού φορτίου – συνολικής μετακίνησης του πλαισίου, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-11.



Τοποθετώντας στις ίδιες θέσεις με αυτές των προηγούμενων δοκιμίων τα βελόμετρα DT 01 και DT 02 και τους μετρητές παραμορφώσεων SG 08 και SG 09, σχεδιάζεται στο Σχήμα 4-12 το εφελκυστικό φορτίο συναρτήσει των μετακινήσεων που καταγράφηκαν από τα βελόμετρα DT 01 και DT 02, ενώ στο Σχήμα 4-13 παρουσιάζεται η σχέση εφελκυστικού φορτίου συναρτήσει των παραμορφώσεων SG 08 και SG 09, αντίστοιχα.







Παρατηρήθηκε ότι σε τιμή εφελκυστικού φορτίου 156kN, όπου η μετακίνηση όλου του πλαισίου ήταν 20,66mm, η μετακίνηση που καταγράφηκε από το βελόμετρο ήταν DT 01 7,21mm και του βελόμετρου DT 02 ήταν 15,36mm, η συγκόλληση του δεξιού άκρου άρχισε να ανοίγει προς τα πάνω, με αποτέλεσμα να πέφτει συνεχώς η αντοχή του δοκιμίου. Στην Εικόνα 4-18, όπου το δοκίμιο δεν έχει ακόμη υποβληθεί σε δοκιμή αντοχής, δεν εμφανίζει το δεξί άκρο της συγκόλλησης κάποια αρχική

αποτέλεσμα να πέφτει συνεχώς η αντοχή του δοκιμίου. Στην Εικόνα 4-18, όπου το δοκίμιο δεν έχει ακόμη υποβληθεί σε δοκιμή αντοχής, δεν εμφανίζει το δεξί άκρο της συγκόλλησης κάποια αρχική ατέλεια. Όσο το φορτίο αυξανόταν, οι φλάτζες 40mm άρχισαν να απομακρύνονται, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-19, το οποίο οδήγησε σε άνοιγμα της συγκόλλησης του δεξιού άκρου του ελάσματος, όπως δείχνουν οι Εικόνες 4-20 και 4-21.



Εικόνα 4-18: Αρχική κατάσταση του δοκιμίου Κ1



Εικόνα 4-19: Απομάκρυνση των δύο φλαντζών ~40mm



Εικόνα 4-20: Εμφάνιση ρωγμής στο δεξί άνω άκρο της συγκόλλησης



Εικόνα 4-21: Εμφάνιση ρωγμής στο δεξί άνω άκρο της συγκόλλησης

4.3 ΔΟΚΙΜΙΟ ΕΣΩΡΑΦΗΣ ΣΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ ΓΙΑ ΦΛΑΝΤΖΑ ΠΑΧΟΥΣ 35mm

Πραγματοποιήθηκε δοκιμή αντοχής σε δοκίμιο εσωραφής L1 στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 35,87mm και κοχλία M20 της ομάδας A, το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-22 και του οποίου τα κατασκευαστικά σχέδια φαίνονται στην Εικόνα 4-23.



Εικόνα 4-22: Δοκίμιο L1



Εικόνα 4-23: Εντοπισμός διαφορών σχεδιασμού και κατασκευής δοκιμίου L1

Για το δοκίμιο L1, σχεδιάζεται το διάγραμμα εφελκυστικού φορτίου – συνολικής μετακίνησης του πλαισίου, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-14, ενώ στο Σχήμα 4-15 και 4-16 σχεδιάζεται το εφελκυστικό φορτίο συναρτήσει των μετακινήσεων που καταγράφηκαν από τα βελόμετρα DT 01 και DT 02 και συναρτήσει των παραμορφώσεων που καταγράφηκαν από τους μετρητές παραμορφώσεως SG 08 και SG 09, αντίστοιχα.







Σχήμα 4-15: Σχέση εφελκυστικού φορτίου (kN) – μετακίνηση DT 01 και DT 02 (mm) δοκιμίου L1



Σχήμα 4-16: Σχέση εφελκυστικού φορτίου (kN) – παραμορφώσεως SG 08 και SG 09 (μstrain) δοκιμίου L1

Όταν το φορτίο έφτασε τα 136,36kN όπου η συνολική πλαισιακή μετακίνηση ήταν 12,37mm, η μετακίνηση που καταγράφηκε από το βελόμετρο DT 01 ήταν 5,78mm και η μετακίνηση που καταγράφηκε από το βελόμετρο DT 02 ήταν 10,45mm, παρατηρήθηκε μείωση της αντοχής του δοκιμίου. Παρατηρώντας την Εικόνα 4-24, ο κοχλίας M20 έχει σπείρωμα περίπου 7mm και δεν παρατηρείται κάποια ατέλεια (ρωγμή) στη συγκόλληση. Στην Εικόνα 4-25, όμως, επειδή οι φλάντζες πάχους 35,87mm απομακρύνονται μεταξύ τους, ο κοχλίας καταπονείται σε εφελκυσμό και κάμψη, με αποτέλεσμα να παρατηρείται αστοχία στο σπείρωμα του κοχλία. Όταν σταμάτησε η δοκιμή αντοχής, είχε απομείνει σπείρωμα περίπου 3,5mm. Κατά την πειραματική διαδικασία, ακούστηκαν δύο δυνατοί ήχοι και ταυτόχρονα παρατηρήθηκε πτώση στο διάγραμμα του Σχήματος 4-14. Συγκεκριμένα, υπάρχουν δύο μεγάλες πτώσεις της αντοχής του δοκιμίου, οι οποίες πιθανόν οφείλονται στην αστοχία του σπειρώματος. Δηλαδή, κάθε ήχος συνδέεται με αστοχία τουλάχιστον ενός σπειρώματος του κορμού M20.



Εικόνα 4-24: Αρχική κατάσταση του δοκιμίου L1



Εικόνα 4-25: Τελική κατάσταση του δοκιμίου L1

4.4 ΔΟΚΙΜΙΟ ΕΣΩΡΑΦΗΣ ΣΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ ΓΙΑ ΦΛΑΝΤΖΑ ΠΑΧΟΥΣ 30mm

Για το δοκίμιο H1 της Εικόνας 4-26, πραγματοποιήθηκε δοκιμή αντοχής σε δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 30mm και κοχλία M20 της ομάδας A, τα κατασκευαστικά σχέδια του οποίου φαίνονται στην Εικόνα 4-27.



Εικόνα 4-26: Δοκίμιο Η1



Εικόνα 4-27: Εντοπισμός διαφορών σχεδιασμού και κατασκευής δοκιμίου Η1



Για το δοκίμιο H1, σχεδιάζεται το διάγραμμα εφελκυστικού φορτίου – συνολικής μετακίνησης του πλαισίου, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-17.

Σχήμα 4-17: Διάγραμμα εφελκυστικού φορτίου (kN) – συνολικής πλαισιακής μετακίνησης (mm) δοκιμίου H1

Το βελόμετρο DT 01 τοποθετήθηκε στην κάτω φλάντζα του δοκιμίου, στην ίδια θέση με εκείνη των προηγούμενων δοκιμίων, ενώ το βελόμετρο DT 02 τοποθετήθηκε στη φλάντζα 6mm σε απόσταση 100mm από την άκρη της κάτω φλάντζας 30mm, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-28. Επιπλέον, στο Σχήμα 4-18 και 4-19 παρουσιάζεται η σχέση εφελκυστικού φορτίου με τις μετακινήσεις που καταγράφηκαν από τα βελόμετρα DT 01 και DT 02 και με τις παραμορφώσεις που καταγράφηκαν από τους μετρητές παραμόρφωσης SG 08 και SG 09, αντίστοιχα.



Εικόνα 4-28: Σχηματική παρουσίαση βελόμετρου DT 01 και DT 02 στο δοκίμιο H1



Σχήμα 4-18: Σχέση εφελκυστιού φορτίου (kN) – μετακίνηση DT 01 και DT 02 (mm) δοκιμίου H1



Σχήμα 4-19: Σχέση εφελκυστικού φορτίου (kN) – παραμορφώσεων SG 08 και SG 09 (μstrain) δοκιμίου H1

Στη συνέχεια, στην Εικόνα 4-29 και 4-30 παρατηρείται φούσκωμα τοπικά στο σημείο της εσωραφής, ενώ όσο αυξανόταν η εφελκυστική αντοχή άρχισαν να εμφανίζονται λοξές ρωγμές, οι οποίες φαίνονται στην Εικόνα 4-31.

75



Εικόνα 4-29: Δοκίμιο Η1 κατά την πειραματική δοκιμή αντοχής



Εικόνα 4-30: Πλαϊνή όψη κορμού δοκιμίου Η1 κατά την πειραματική δοκιμή αντοχής



Εικόνα 4-31: Εμφάνιση λοξών εφελκυστικών ρωγμών κατά την αύξηση του εφελκυστικού φορτίου

4.5 ΔΟΚΙΜΙΟ ΕΣΩΡΑΦΗΣ ΣΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ ΓΙΑ ΦΛΑΝΤΖΑ ΠΑΧΟΥΣ 25mm

Πραγματοποιήθηκε δοκιμή αντοχής σε δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα D1, αλλάζοντας το πάχος της κάτω φλάντζας από 45 mm σε 25mm και χρησιμοποιώντας κοχλία M20 της ομάδας A, τα κατασκευαστικά σχέδια του οποίου φαίνονται στην Εικόνα 4-32.



Εικόνα 4-32: Εντοπισμός διαφορών σχεδιασμού και κατασκευής δοκιμίου D1

Στις Εικόνες 4-33, 4-34 και 4-35 παρουσιάζονται ορισμένες καταστάσεις του δοκιμίου D1 κατά την πειραματική διαδικασία.



Εικόνα 4-33: Δοκίμιο αντοχής D1 στην αρχή της πειραματικής δοαδοκασίας



Εικόνα 4-34: Δοκίμιο D1 σε παραμορφωμένη κατάσταση



Εικόνα 4-35: Δοκίμιο αντοχής D1 σε παραμορφωμένη κατάσταση με απομάκρυνση των φλαντζών 25mm και ταυτόχρονη κάμψη και εφελκυσμό προεντεταμένου κοχλία M20 (10.9)

Στο Σχήμα 4-20 παρουσιάζεται η σχέση εφελκυστικού φορτίου με την συνολική μετακίνηση όλου του πλαισίου, στο οποίο τοποθετούνται τα εξεταζόμενα δοκίμια.



Σχήμα 4-20: Διάγραμμα εφελκυστικού φορτίου (kN) – συνολικής πλαισιακής μετακίνησης (mm) δοκιμίου D1

Στις ίδιες θέσεις με αυτές του υποδείχθηκαν στην Εικόνα 4-2, τοποθετήθηκαν τα βελόμετρα DT 01 και DT 02, καθώς και οι μετρητές παραμορφώσεως SG 08 και SG 09. Έτσι, στα Σχήματα 4-21 και 4-22 παρουσιάζεται η σχέση του εφελκυστικού φορτίου με τις μετακινήσεις που καταγράφηκαν από τα



βελόμετρα DT 01 και DT 02 και με τις παραμορφώσεις που καταγράφηκαν από τους μετρητές παραμορφώσεων SG 08 και SG 09, αντίστοιχα.

Σχήμα 4-21: Σχέση εφελκυστικού φορτίου (kN) – μετακίνηση DT 01 και DT 02 (mm) δοκιμίου D1



4.6 ΔΟΚΙΜΙΟ ΕΣΩΡΑΦΗΣ ΣΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ ΓΙΑ ΦΛΑΝΤΖΑ ΠΑΧΟΥΣ 45mm ΚΑΙ ΑΛΛΑΓΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΚΟΧΛΙΑ

Για το δοκίμιο J1 της Εικόνας 4-36, πραγματοποιήθηκε δοκιμή αντοχής σε δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 45mm και με κοχλία M16 της ομάδας A, τα κατασκευαστικά σχέδια του οποίου φαίνονται στην Εικόνα 4-37. Επειδή η οπή της κάτω φλάντζας είναι Φ16, ο κοχλίας συμπεριφέρεται διατμητικά.



Εικόνα 4-36: Δοκίμιο J1



Εικόνα 4-37: Εντοπισμός διαφορών σχεδιασμού και κατασκευής δοκιμίου J1

Για το δοκίμιο J1, σχεδιάζεται το διάγραμμα εφελκυστικού φορτίου – συνολικής μετακίνησης του πλαισίου, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-23.





Το βελόμετρο DT 01 τοποθετήθηκε στην κάτω φλάντζα του δοκιμίου, όπως και στα προηγούμενα δοκίμια, ενώ το βελόμετρο DT 02 τοποθετήθηκε στη φλάντζα 6mm σε απόσταση 100mm από την άκρη της κάτω φλάντζας 30mm. Έτσι, στο Σχήμα 4-24 και 4-25 παρουσιάζεται η σχέση εφελκυστικού φορτίου με τις μετακινήσεις που καταγράφηκαν από τα βελόμετρα DT 01 και DT 02 και με τις παραμορφώσεις που καταγράφηκαν από τους μετρητές παραμορφώσεων SG 08 και SG 09, αντίστοιχα.



Σχήμα 4-24: Σχέση εφελκυστικού φορτίου (kN) – μετακίνηση DT 01 και DT 02 (mm) δοκιμίου J1





Πειραματική αξιολόγηση της συμπεριφοράς συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών υπό στατική φόρτιση

Το δοκίμιο αστόχησε λόγω θραύσης του κοχλία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-38. Οι δύο κάτω φλάντζες πάχους 45mm απομακρύνθηκαν αρκετά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-39 και ο κοχλίας M16 που βρισκόταν σε οπή Φ16, καταπονούμενος περισσότερο έναντι διάτμησης, οδηγήθηκε σε θραύση.



Εικόνα 4-38: Θραύση κοχλία Μ16 δοκιμίου J1



Εικόνα 4-39: Απομάκρυνση των δύο κάτω φλαντζών πάχους 45mm δοκιμίου J1 και θραύση προεντεταμένου κοχλία M16 (10.9)

4.7 ΔΟΚΙΜΙΟ ΕΣΩΡΑΦΗΣ ΣΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ ΓΙΑ ΦΛΑΝΤΖΑ ΠΑΧΟΥΣ 45mm ΚΑΙ ΑΛΛΑΓΗ ΘΕΣΗΣ ΚΟΧΛΙΑ

Πραγματοποιήθηκε δοκιμή αντοχής σε δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα και αλλαγή θέσης του κοχλία M20 της ομάδας B (δοκίμιο G1 της Εικόνας 4-40), του οποίου τα κατασκευαστικά σχέδια φαίνονται στην Εικόνα 4-41.



Εικόνα 4-40: Δοκίμιο G1



Εικόνα 4-41: Εντοπισμός διαφορών σχεδιασμού και κατασκευής δοκιμίου TEST G1

Για το δοκίμιο G1, σχεδιάζεται το διάγραμμα εφελκυστικού φορτίου – συνολικής μετακίνησης του πλαισίου, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-26.



Σχήμα 4-26: Διάγραμμα εφελκυστικού φορτίου (kN) – συνολικής πλαισιακής μετακίνησης (mm) δοκιμίου G1

Τοποθετώντας τα βελόμετρα DT 01 και DT 02 και μετρητές παραμορφώσεως SG 08 και SG 09 στις ίδιες θέσεις με τα προηγούμενα δοκίμια, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στα Σχήματα 4-27 και 4-28. Στο συγκεκριμένο δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε προεντεταμένος κοχλίας M20x120 (10.9) της ομάδας B.



Σχήμα 4-27: Σχέση εφελκυστικού φορτίου (kN) – μετακίνηση DT 01 και DT 02 (mm) δοκιμίου G1



Σχήμα 4-28: Σχέση εφελκυστικού φορτίου (kN) – παραμορφώσεων SG 08 και SG 09 (μstrain) δοκιμίου G1

Όπως και το δοκίμιο F1, το δοκίμιο G1 αστόχησε στην συγκόλληση του κάτω δοκιμίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-42.



Εικόνα 4-42: Αστοχία δοκιμίου G1 στη συγκόλληση του κάτω δοκιμίου

4.8 ΔΟΚΙΜΙΟ ΕΞΩΡΑΦΗΣ ΜΕ ΠΡΟΕΞΟΧΗ ΓΙΑ ΦΛΑΝΤΖΑ ΠΑΧΟΥΣ 45mm

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε δοκιμή αντοχής σε δοκίμιο εξωραφής με προεξοχή της φλάντζας, όπου το πάχος της φλάντζας που μετρήθηκε πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας δεν ήταν 45mm, αλλά 40mm και χρησιμοποιήθηκε κοχλίας M20 της ομάδας A (δοκίμιο B1). Τα κατασκευαστικά σχέδια του δοκιμίου B1 παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-43.



Εικόνα 4-43: Εντοπισμός διαφορών σχεδιασμού και κατασκευής δοκιμίου Β1



Εικόνα 4-44: Δοκίμιο αντοχής Β1



Εικόνα 4-45: Πλαϊνή όψη δοκιμίου αντοχής Β1

Για το δοκίμιο B1 της Εικόνας 4-44 και 4-45 σχεδιάζεται το διάγραμμα εφελκυστικού φορτίου – συνολικής μετακίνησης του πλαισίου, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-29.



Σχήμα 4-29: Διάγραμμα εφελκυστικού φορτίου (kN) – συνολικής πλαισιακής μετακίνησης (mm) δοκιμίου B1.

Πειραματική αξιολόγηση της συμπεριφοράς συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών υπό στατική φόρτιση

Δοκίμιο Β1 160.00 140.00 120.00 100.00 Φορτίο (kN) 80.00 ___DT 01 ___DT 02 60.00 40.00 20.00 0.00 -10 0 10 20 30 40 50 60 70 Μετακίνηση (mm)

Τέλος, τοποθετήθηκαν στα ίδια σημεία με εκείνα της Εικόνας 4-2, τα βελόμετρα DT 01 και DT 02 και οι μετρητές παραμορφώσεων SG 08 και SG 09 και στα Σχήματα 4-30 και 4-31 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

Σχήμα 4-30: Σχέση εφελκυστικού φορτίου (kN) – μετακίνηση DT 01 και DT 02 (mm) δοκιμίου B1



Σχήμα 4-31: Σχέση εφελκυστικού φορτίου (kN) – παραμορφώσεων SG 08 και SG 09 (μstrain) δοκιμίου B1



Εικόνα 4-46: Απομάκρυνση των δύο φλαντζών πάχους~40mm κατά την δοκιμή αντοχής

4.9 ΔΟΚΙΜΙΟ ΕΞΩΡΑΦΗΣ ΓΙΑ ΦΛΑΝΤΖΑ ΠΑΧΟΥΣ 45mm

Ακολούθως, για το δοκίμιο εξωραφής C1 της Εικόνας 4-47 πραγματοποιήθηκε δοκιμή αντοχής με κοχλία M20 της ομάδας A, τα κατασκευαστικά σχέδια του οποίου φαίνονται στην Εικόνα 4-48.



Εικόνα 4-47: Δοκίμιο αντοχής C1



Εικόνα 4-48: Εντοπισμός διαφορών σχεδιασμού και κατασκευής δοκιμίου C1

Για το δοκίμιο C1 σχεδιάζεται το διάγραμμα εφελκυστικού φορτίου – συνολικής μετακίνησης του πλαισίου, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-32.



Σχήμα 4-32: Διάγραμμα εφελκυστικού φορτίου (kN) – συνολικής πλαισιακής μετακίνησης (mm) δοκιμίου C1.

Στο δοκίμιο C1 τοποθετήθηκε το βελόμετρο DT 01 σε απόσταση 112mm από τη φλάντζα 45mm, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-49, ενώ το βελόμετρο DT 02 τοποθετήθηκε σε απόσταση 100mm από τη
φλάντζα 45mm, το οποίο φαίνεται σχηματικά στην Εικόνα 4-50. Έτσι, στα Σχήματα 4-33 και 4-34 παρουσιάζεται η σχέση του εφελκυστικού φορτίου με τις μετακινήσεις που καταγράφηκαν από τα βελόμετρα DT 01 και DT 02, καθώς και η σχέση του εφελκυστικού φορτίου με τις παραμορφώσεις που καταγράφηκαν από τους μετρητές παραμορφώσεων SG 08 και SG 09, αντίστοιχα.



Εικόνα 4-49: Σχηματική παρουσίαση βελόμετρου DT 01 στο δοκίμιο C1



Πειραματική αξιολόγηση της συμπεριφοράς συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών υπό στατική φόρτιση



Εικόνα 4-50: Σχηματική παρουσίαση βελόμετρου DT 01 και DT 02 στο δοκίμιο C1



Σχήμα 4-34: Σχέση εφελκυστικού φορτίου (kN) – παραμορφώσεων SG 08 και SG 09 (μstrain) δοκιμίου C1

4.10 ΔΟΚΙΜΙΟ ΕΣΩΡΑΦΗΣ ΣΤΗΝ ΤΟΜΗ ΦΛΑΝΤΖΑΣ – ΠΥΛΩΝΑ ΓΙΑ ΦΛΑΝΤΖΑ ΠΑΧΟΥΣ 45mm

Πραγματοποιήθηκε δοκιμή αντοχής σε δοκίμιο εσωραφής στην τομή φλάντζας – πυλώνα (δοκίμιο Ε1 της Εικόνας 4-51) με κοχλία M20 της ομάδας B, τα κατασκευαστικά σχέδια του οποίου φαίνονται στην Εικόνα 4-52.



Εικόνα 4-51: Δοκίμιο αντοχής Ε1



Εικόνα 4-52: Εντοπισμός διαφορών σχεδιασμού και κατασκευής δοκιμίου Ε1



Εικόνα 4-53: Δοκίμιο εσωραφής στην τομή φλάντζας – πυλώνα TEST Ε1



Εικόνα 4-54: Άνω και κάτω δοκίμιο Ε1

Για τα δοκίμιο Ε1 της Εικόνας 4-53 και 4-54, σχεδιάζεται το διάγραμμα εφελκυστικού φορτίου – συνολικής μετακίνησης του πλαισίου, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-35.



Σχήμα 4-35: Διάγραμμα εφελκυστικού φορτίου (kN) – συνολικής πλαισιακής μετακίνησης (mm) δοκιμίου E1.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-55, τοποθετήθηκε το βελόμετρο DT 01 στην κάτω φλάντζα 45mm, ώστε να μετρώνται οι μετακινήσεις της και το βελόμετρο DT 02 τοποθετήθηκε στην φλάντζα που προσομοιώνει τον πυλώνα σε απόσταση 100mm από την κάτω φλάντζα πάχους 45mm. Στη συνέχεια, στο Σχήμα 4-36 και 4-37 παρουσιάζεται η σχέση εφελκυστικού φορτίου με τις μετακινήσεις που καταγράφηκαν από τα βελόμετρα DT 01 και DT 02, καθώς και με τις παραμορφώσεις που καταγράφηκαν από τους μετρητές παραμορφώσεως SG 08 και SG 09, αντίστοιχα. Στο συγκεκριμένο δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε κοχλίας M20x120 (10.9) της ομάδας B.



Εικόνα 4-55: Σχηματική παρουσίαση βελόμετρου DT 01 και DT 02 στο δοκίμιο E1



Σχήμα 4-36: Σχέση εφελκυστικού φορτίου (kN) – μετακίνηση DT 01 και DT 02 (mm) δοκιμίου E1





4.11 ΔΟΚΙΜΙΟ ΕΣΩΡΑΦΗΣ ΣΤΗΝ ΤΟΜΗ ΦΛΑΝΤΖΑΣ – ΠΥΛΩΝΑ ΜΕ ΣΧΙΣΜΗ ΓΙΑ ΦΛΑΝΤΖΑ ΠΑΧΟΥΣ 45mm

Πραγματοποιήθηκε δοκιμή αντοχής σε δοκίμιο εσωραφής στην τομή φλάντζας – πυλώνα με σχισμή και κοχλία M20 της ομάδας A (δοκίμιο F1 της Εικόνας 4-56), τα κατασκευαστικά σχέδια του οποίου φαίνονται στην Εικόνα 4-57.



Εικόνα 4-56: Δοκίμιο αντοχής F1



Εικόνα 4-57: Εντοπισμός διαφορών σχεδιασμού και κατασκευής δοκιμίου F1



Για το δοκίμιο F1, σχεδιάζεται το διάγραμμα εφελκυστικού φορτίου – συνολικής μετακίνησης του πλαισίου, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-38.

Σχήμα 4-38: Διάγραμμα εφελκυστικού φορτίου (kN) – συνολικής πλαισιακής μετακίνησης (mm) δοκιμίου F1.

Με τα βελόμετρα και τους μετρητές παραμορφώσεως τοποθετημένα στις ίδιες θέσεις με εκέινες των προηγούμενων δοκιμίων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-58, σχεδιάζονται στο Σχήμα 4-39 και 4-40 η σχέση εφελκυστικού φορτίου με τις μετακινήσεις που καταγράφηκαν από τα βελόμετρα DT 01 και DT 02, καθώς και η σχέση εφελκυστικού φορτίου με τις παραμορφώσεις που κατάγραφηκαν από τους μετρητές παραμορφώσεως SG 08 και SG 09, αντίστοιχα. Στο συγκεκριμένο δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε κοχλίας M20x120 (10.9) της ομάδας Α.



Εικόνα 4-58: Σχηματική παρουσίαση βελόμετρων DT 01 και DT 02 και μετρητή παραμόρφωσης SG 08 στο δοκίμιο F1



Σχήμα 4-39: Σχέση εφελκυστικού φορτίου (kN) – μετακίνηση DT 01 και DT 02 (mm) δοκιμίου F1



Σχήμα 4-40: Σχέση εφελκυστικού φορτίου (kN) – παραμορφώσεων SG 08 και SG 09 (μstrain) δοκιμίου F1

Το δοκίμιο TEST F1 αστόχησε στη συγκόλληση του κάτω δοκιμίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-41 και 4-42.



Σχήμα 4-41: Αστοχία δοκιμίου F1 στη συγκόλληση του κάτω δοκιμίου (πίσω όψη)



Σχήμα 4-42: Αστοχία δοκιμίου F1 στη συγκόλληση του κάτω δοκιμίου (πλαϊνή όψη)

5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΕΣΩΡΑΦΗΣ ΣΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ ΓΙΑ ΦΛΑΝΤΖΑ ΠΑΧΟΥΣ 45mm

Στα Σχήματα 5-1, 5-2, 5-3, 5-4 και 5-5 συγκρίνονται τα δοκίμια εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 45mm, τα A1 και A2. Για το δοκίμιο A1 χρησιμοποιήθηκε προεντεταμένος κοχλίας M20x120 ποιότητος (10.9) της ομάδας A, ενώ για το δοκίμιο A2 χρησιμοποιήθηκε προεντεταμένος κοχλίας M20x120 ποιότητος (10.9) της ομάδας B.



Σχήμα 5-1: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – συνολικής πλαισιακής μετακίνησης (mm) δοκιμίων A1 και A2

Πειραματική αξιολόγηση της συμπεριφοράς συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών υπό στατική φόρτιση



Σχήμα 5-2: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – μετακίνησης βελόμετρου DT 01 (mm) δοκιμίων A1 και A2



Σχήμα 5-3: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – μετακίνησης βελόμετρου DT 01 (mm) δοκιμίων A1 και A2, παρουσίαση όλου του διαγράμματος δοκιμίου A2



Σχήμα 5-4: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – μετακίνησης βελόμετρου DT 02 (mm) δοκιμίων A1 και A2



Σχήμα 5-5: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – παραμορφώσεως SG 09 (μstrain) δοκιμίων A1 και A2

A1	LOAD (kN)	DISPLACEMENT (mm)	DT 01 (mm)	DT 02 (mm)	SG 09 (µstrain)
1	120.08	4.15	4.05	2.68	2349.38
2	137.25	12.49	8.144012	8.14	34410.31
3	50.90	26.67	87.82	23.35	34519.07
A2	LOAD (kN)	DISPLACEMENT (mm)	DT 01 (mm)	DT 02 (mm)	SG 09 (µstrain)
1'	98.10	1.70	1.41	0.54	1288.97
2′	21.45	1.86	-1.85	0.89	379.15
3′	133.22	9.78	2.23	5.24	2846.80
4′	119.65	10.53	2.01	6.44	5240.23

Πίνακας 5-1: Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμίων Α1 και Α2

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα και παρατηρώντας τις Εικόνες 5-1, 5-2, 5-3 και 5-4 στο δοκίμιο A1 πραγματοποιείται αστοχία του σπειρώματος του προεντεταμένου κοχλία M20x120 ποιότητος (10.9), ενώ στο δοκίμιο A2 πραγματοποιείται αστοχία λόγω ατελούς διείσδυσης της συγκόλλησης. Συγκεκριμένα, το δοκίμιο A1 μέχρι το σημείο 1 είναι αρκετά δύσκαμπτο και δεν έχει παραμορφωθεί έντονα. Μετά το σημείο 1, όμως, μέχρι το σημείο 2 παρατηρείται έντονη παραμόρφωση, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-1. Οι δύο φλάντζες πάχους 45mm απομακρύνονται η μία από την άλλη, ο κοχλίας της ομάδας Α καταπονείται σε εφελκυσμό και κάμψη ταυτόχρονα, ο κορμός του κοχλία επιμηκύνεται, γίνεται λεπτότερος και παραμορφώνεται καμπτικά, ενώ στο σπείρωμα παρατηρούνται πλαστικές παραμορφώσεις, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-2.

Στο δοκίμιο A2, ωστόσο, χρησιμοποιείται προεντεταμένος κοχλίας M20x120 ποιότητος (10.9) της ομάδας B. Αρχικά, το δοκίμιο φτάνει μέχρι το σημείο 1' και στη συνέχεια παρατηρείται πτώση της αντοχής μέχρι το σημείο 2', με ταυτόχρονη μείωση των παραμορφώσεων. Στη συνέχεια, θα αρχίσει η αντοχή και οι παραμορφώσεις – μετακίνήσεις του δοκιμίου να αυξάνονται μέχρι το σημείο 3', ώσπου θα επέλθει αστοχία. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-3, οι δύο φλάντζες πάχους 45mm δεν απομακρύνονται αρκετά η μία από την άλλη, ο προεντεταμένος κοχλίας της ομάδας B δεν παραμορφώνεται έντονα, ενώ το δοκίμιο αστοχεί στο σημείο της συγκόλλησης. Στην Εικόνα 5-4 φαίνεται η ατελής διείσδυση της συγκόλλησης, που τελικά οδήγησε στην αστοχία του δοκιμίου A2.



Εικόνα 5-1: Απομάκρυνση φλαντζών πάχους 45mm δοκιμίου Α1



Εικόνα 5-2: Αστοχία κορμού και σπειρώματος προεντεταμένου κοχλία M20x120 ομάδας Α ποιότητος (10.9) δοκιμίου Α1



Εικόνα 5-3: Αστοχία συγκόλλησης δοκιμίου Α2



Εικόνα 5-4: Αστοχία συγκόλλησης δοκιμίου Α2 – ατελής διείσδυση συγκόλλησης

5.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΕΣΩΡΑΦΗΣ ΣΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ ΓΙΑ ΦΛΑΝΤΖΑ ΠΑΧΟΥΣ 40mm

Στα Σχήματα 5-6, 5-7, 5-8, 5-9, 5-10, 5-11 και 5-12 συγκρίνονται τα δοκίμια εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 40mm, τα K2 και K1. Για το δοκίμιο K2 χρησιμοποιήθηκε προεντεταμένος κοχλίας M20x120 ποιότητος (10.9) της ομάδας A, ενώ για το δοκίμιο K1 χρησιμοποιήθηκε προεντεταμένος κοχλίας M20x120 ποιότητος (10.9) της ομάδας B.







Σχήμα 5-7: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – μετακίνησης βελόμετρου DT 01 (mm) δοκιμίων K1 και K2





109



Σχήμα 5-9: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – παραμορφώσεως SG 08 (μstrain) δοκιμίων K1 και K2







Σχήμα 5-11: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – παραμορφώσεως SG 09 (μstrain) δοκιμίων K1 και K2





K2	LOAD (kN)	DISPLACEMENT (mm)	DT 01 (mm)	DT 02 (mm)	SG 08 (µstrain)	SG 09 (µstrain)
1	122.09	4.57	3.02	2.36	1274.45	1253.88
2	135.41	6.36	5.26	4.35	2437.22	2411.51
K1	LOAD (kN)	DISPLACEMENT (mm)	DT 01 (mm)	DT 02 (mm)	SG 08 (µstrain)	SG 09 (µstrain)
1′	136.61	8.50	3.44	6.67	1203.39	2607.11
2′	156.03	20.65	7.21	15.35	47407.29	45816.82

Πίνακας 5-2: Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμίων Κ1 και Κ2

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω σχήματα, καθώς και από τις Εικόνες 5-5 και 5-6, το δοκίμιο K1 με τον προεντεταμένο κοχλία M20x120 ποιότητος (10.9) της ομάδας B συμπεριφέρθηκε πολύ καλύτερα σε σχέση με το δοκίμιο K2 που είχε προεντεταμένο κοχλία M20x120 της ομάδας A. Συγκεκριμένα, το δοκίμιο K1 παρουσίασε μεγαλύτερη οριακή αντοχή συγκρινόμενη με αυτήν του δοκιμίου K2, ενώ το σημείο οριακής αντοχής (1) του δοκιμίου K2 είναι πολύ κοντά με το σημείο (1') του δοκιμίου K1, το οποίο όπως φαίνεται από τα διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων (Σχήματα 5-9 και 5-11), το (1') είναι το σημείο όπου το δοκίμιο K1 μπαίνει στην περιοχή πλαστικών παραμορφώσεων. Τέλος, η περιοχή πλαστικών παραμορφώσεων του δοκιμίου K2 (περιοχή μεταξύ των σημείων 1 και 2) είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη περιοχή του δοκιμίου K1 (περιοχή μεταξύ των σημείων 1' και 2) είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη περιοχή του δοκιμίου K1 (περιοχή μεταξύ των σημείων 1' και 2'). Και τα δύο δοκίμια συμπεριφέρθηκαν κατά τον ίδιο τρόποι: όσο αυξανόταν το εφελκυστικό φορτίο, οι δύο φλάντζες πάχους 40mm απομακρύνονταν μεταξύ τους, ενώ στο προεντεταμενο κοχλία επιβαλλόταν καμπτική και εφελκυστική ένταση. Στις Εικόνας 5-5 και 5-6 παρουσιάζεται η παραμόρφωση των δοκιμίων K1 και K2, λίγο πριν την ολοκλήρωση της περιαματικής διαδικασίας.



Εικόνα 5-5: Δοκίμιο Κ1 λίγο πριν το πέρας της πειραματικής διαδικασίας



Εικόνα 5-6: Δοκίμιο Κ2 λίγο πριν το πέρας της πειραματικής διαδικασίας

5.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΕΣΩΡΑΦΗΣ ΣΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ ΜΕ ΚΟΧΛΙΑ ΟΜΑΔΑΣ Α

Στη συγκεκριμένη παράγραφο εξετάζονται τα δοκίμια εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα με πάχη φλαντζών 45mm, 40mm, 35mm, 30mm και 25mm, στα οποία χρησιμοποιήθηκε προεντεταμένος κοχλίας M20 της ομάδας Α. Στόχος είναι η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των δοκιμίων A1 (45mm), K2 (40mm), L1 (35mm), H1 (30mm) και D1 (25mm). Σε όλα τα δοκίμια παρουσιάστηκε απομάκρυνση των φλαντζών, καθώς και καταπόνηση του κοχλία σε εφελκυσμό και κάμψη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-7. Στα Σχήματα 5-13, 5-14, 5-15, 5-16 και 5-17 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των 5 εξεταζόμενων δοκιμίων, ενώ στον Πίνακα 5-3 παρουσιάζεται η οριακή αντοχή κάθε δοκιμίου σε σχέση με τις μετακινήσεις που καταγράφηκαν από τα βελόμετρα DT 01 και DT 02, καθώς και η οριακή αντοχή σε σχέση με τις παραμορφώσεις που καταγράφηκαν από τους μετρητές παραμορφώσεων SG 08 και SG 09.



Εικόνα 5-7: Δοκίμια εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα με κοχλία M20 της ομάδας Α λίγο πριν το πέρας της πειραματικής διαδικασίας



Σχήμα 5-13: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – συνολικής πλαισιακής μετακίνησης (mm) δοκιμίων εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα με προεντεταμένο κοχλία M20 της ομάδας Α



Σχήμα 5-14: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – μετακίνησης βελόμετρου DT 01 (mm) δοκιμίων εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα με προεντεταμένο κοχλία M20 της ομάδας A



Σχήμα 5-15: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – μετακίνησης βελόμετρου DT 02 (mm) δοκιμίων εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα με προεντεταμένο κοχλία M20 της ομάδας A



Σχήμα 5-16: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – παραμορφώσεως SG 08 (μstrain) δοκιμίων εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα με προεντεταμένο κοχλία M20 της ομάδας A



Σχήμα 5-17: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – παραμορφώσεως SG 09 (μstrain) δοκιμίων εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα με προεντεταμένο κοχλία M20 της ομάδας Α

	LOAD (kN)	DISPLACEMENT (mm)	DT 01 (mm)	DT 02 (mm)	SG 08 (µstrain)	SG 09 (µstrain)
A1	137.25	12.49	8.14	8.14		34410.31
K2	135.41	6.36	5.26	4.35	2437.22	2411.51
L1	136.426	12.60665	5.98	10.6812	15072.01	18192.43
H1	139.11	19.03	14.73	12.95	34080.95	38653.18
D1	127.99	16.98	13.88	12.89	13865.11	12315.67

Πίνακας 5-3: Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμίων εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα με προεντεταμένο κοχλία Μ20 της ομάδας Α

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω σχήματα, μεγαλύτερη οριακή αντοχή με την μεγαλύτερη μετακίνηση DT 01 (απομάκρυνση φλαντζών και παραμόρφωση προεντεταμένου κοχλία M20) παρουσιάζει το δοκίμιο H1 με πάχος φλάντζας 30mm, ενώ το δοκίμιο A1 με πάχος φλάντζας 45mm, πλησιάζει την οριακή αντοχή του H1, αλλά με πολύ μικρότερη μετακίνηση DT 01, καθώς το A1 είναι πιο δύσκαμπτο σε σχέση με το H1 λόγω του μεγαλύτερου πάχους φλάντζας. Επιπλέον, το A1 παρουσιάζει συγκριτικά παρόμοια παραμόρφωση του ελάσματος 6mm με εκείνη του H1 (SG 09_{A1}: 34410,31 ; SG 09_{H1}: 38653,18). Την μικρότερη οριακή αντοχή παρουσιάζει το δοκίμιο D1 με πάχος φλάντζας 25mm. Λόγω της μεγαλύτερης ενδοτικότητας που έχει το μικρότερο πάχος, ο κοχλίας οδηγείται σε αστοχία με μικρότερο εφελκυστικό φορτίο.

5.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΕΣΩΡΑΦΗΣ ΣΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ ΜΕ ΚΟΧΛΙΑ ΟΜΑΔΑΣ Β

Στη συγκεκριμένη παράγραφο εξετάζονται τα δοκίμια εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα με πάχη φλαντζών 45mm και 40mm, στα οποία χρησιμοποιήθηκε προεντεταμένος κοχλίας M20x120 της ομάδας B. Τα εξεταζόμενα δοκίμια είναι το A2 με πάχος φλάντζας 45mm, στο οποίο παρουσιάστηκε αστοχία στο σημείο της συγκόλλησης και το K1 με πάχος φλάντζας 40mm. Στην Εικόνα 5-8 υπενθυμίζονται τα δύο δοκίμια, τα οποία έχουν παρουσιαστεί στις παραγράφους 5.1 και 5.2.



Εικόνα 5-8: Δοκίμιο Κ1 (αριστερά) – δοκίμιο Α2 (δεξιά)



Σχήμα 5-18: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – συνολικής πλαισιακής μετακίνησης (mm) δοκιμίων εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα με προεντεταμένο κοχλία M20 της ομάδας B



Σχήμα 5-19: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – μετακίνησης βελόμετρου DT 01 (mm) δοκιμίων εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα με προεντεταμένο κοχλία M20 της ομάδας B







Σχήμα 5-21: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – παραμορφώσεως SG 08 (μstrain) δοκιμίων εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα με προεντεταμένο κοχλία M20 της ομάδας B





Τα δύο δοκίμια έχουν περίπου την ίδια συμπεριφορά και ακολουθούν τον ίδιο ανοδικό κλάδο, μέχρις ότου το δοκίμιο Α2 οδηγηθεί σε αστοχία στο σημείο της εσωραφής, όπως υποδεικνύεται στα Σχήματα 5-18, 5-19, 5-20, 5-21 και 5-22.

A2	LOAD	DISPLACEMENT	DT 01	DT 02	SG 08	SG 09
	(kN)	(mm)	(mm)	(mm)	(µstrain)	(µstrain)
ΑΣΤΟΧΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ	98.10	1.70	1.41	0.54	567.98	1288.97

Πίνακας 5-4: Πειραματικό αποτέλεσμα αστοχίας δοκιμίου Α2

Στο σημείο αυτό χρειάζεται διερεύνηση της ποιότητος της συγκόλλησης του δοκιμίου A2, για να αξιολογηθούν ποιοτικότερα τα αποτελέσματα.

5.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΓΙΑ ΦΛΑΝΤΖΑ ΠΑΧΟΥΣ 45mm

Στη συγκεκριμένη παράγραφο εξετάζονται τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία, τα οποία έιχαν φλάντζα πάχους 45mm. Συγκεκριμένα, εξετάζονται:

- τα δοκίμια της κατηγορίας εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα με κοχλία της ομάδας Α (δοκίμιο A1) και της ομάδας Β (δοκίμιο A2)
- το δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα και χρήση προεντεταμένου κοχλία M16 της ομάδας A (δοκίμιο J1)
- το δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα και αλλαγή της θέσης του κοχλία M20 της ομάδας B (δοκίμιο G1)
- το δοκίμιο εξωραφής με προεξοχή και κοχλία M20 της ομάδας A (δοκίμιο B1)
- το δοκίμιο εξωραφής και κοχλία M20 της ομάδας A (δοκίμιο C1)
- το δοκίμιο εσωραφής στην τομή φλάντζας πυλώνα με κοχλία M20 της ομάδας B (δοκίμιο E1)
- το δοκίμιο εσωραφής στην τομή φλάντζας πυλώνα με σχισμή και κοχλία M20 της ομάδας A (δοκίμιο F1)

Αρχικά, αξιολογείται η συμπεριφορά των βασικών ομάδων δοκιμίων συγκρίνοντας τα A1, A2, B1, C1, E1 και F1, ενώ στη συνέχεια συγκρίνονται τα δοκίμια εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα A1 και A2 με τις παραμετρικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, χρησιμοποιώντας τα δοκίμια J1 και G1.

5.5.1 Σύγκριση βασικών ομάδων δοκιμίων Α1, Α2, Β1, C1, Ε1 ΚΑΙ F1

Στα Σχήματα 5-23, 5-25, 5-28, 5-30 και 5-32 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των εξεταζόμενων δοκιμίων, ενώ για λόγους απλοποίησης στα Σχήματα 5-24, 5-26, 5-27, 5-29, 5-31 και 5-33 παρουσιάζεται μέρος του αρχικού συνολικού διαγράμματος. Υπενθυμίζεται πως στα δοκίμια A1, B1, C1 και E1 αστόχησε ο κοχλίας, για το δοκίμιο A2 αστόχησε η συγκόλληση του άνω δοκιμίου, ενώ για την περίπτωση του δοκιμίου F1 αστόχησε η συγκόλληση του κάτω δοκιμίου, το οποίο εφελκυόταν από το έμβολο.

Σχήμα 5-23: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – συνολικής πλαισιακής μετακίνησης (mm) δοκιμίων με φλάντζα πάχους 45mm

Σχήμα 5-25: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – μετακίνησης βελόμετρου DT 01 (mm) δοκιμίων με φλάντζα πάχους 45mm

Σχήμα 5-27: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – μετακίνησης βελόμετρου DT 01 (mm) δοκιμίων με φλάντζα πάχους 45mm – απλοποίηση διαγραμμάτων Σχημάτων 5-25 και 5-26

πάχους 45mm

Σχήμα 5-29: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – μετακίνησης βελόμετρου DT 02 (mm) δοκιμίων με φλάντζα πάχους 45mm – περιορισμός συνολικού διαγράμματος Σχήματος 5-28

Την μεγαλύτερη οριακή αντοχή παρουσίασε το δοκίμιο με εσωραφή στην τομή φλάντζας – πυλώνα με κοχλία M20 της ομάδας B (δοκίμιο E1). Μάλιστα, παρουσίασε την μεγαλύτερη οριακή αντοχή για μεγαλύτερη παραμόρφωση του ελάσματος 6mm και μικρότερη παραμόρφωση κοχλία και ενδοτικότητα φλαντζών 45mm.

Στη συνέχεια, συγκρίνοντας τα δοκίμια A1 και B1, στα οποία χρησιμοποιήθηκε κοχλίας M20 της ομάδας A, παρατηρείται ότι έχουν περίπου ίδια οριακή αντοχή. Ωστόσο, το δοκίμιο A1 φαίνεται να παρουσιάζει μεγαλύτερη μετακίνηση DT 01 σε σχέση με του δοκιμίου B1, δηλαδή ο κοχλίας M20 του δοκιμίου A1 επιμηκύνθηκε περισσότερο από του B1 και η φλάντζα πάχους 45mm του δοκιμίου A1 απομακρύνθηκε περισσότερο από την φλάντζατου άλλου δοκιμίου. Όλα αυτά όμως θα πρέπει να διευρευνηθούν ταυτόχρονα με αναλυτικά αποτελέσματα, προσομοιώνοντας τα δοκίμια σε κατάλληλα λογισμικά και επιπλέον θα πρέπει να γίνει έλεγχος της ποιότητας των συγκολλήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί.

Παρατηρώντας στα Σχήματα 5-26 και 5-28 το δοκίμιο C1 (δοκίμιο με εξωραφή και κοχλία M20 ομάδας A) και το E1 (δοκίμιο με εσωραφή στην τομή φλάντζας – πυλώνα με κοχλία M20 της ομάδας B), φαίνεται ότι το δοκίμιο E1 είναι πιο δύσκαμπτο από ότι το C1. Από τις μετρήσεις του βελομέτρου DT 09 και του μετρητή παραμορφώσεως SG 09 φαίνεται πως τα δύο δοκίμια συμπεριφέρονται με περίπου ίδιο τρόπο μέχρι το φορτίο 120kN περίπου, ενώ στη συνέχεια το δοκίμιο E1 φαίνεται να εμφανίζει κράτυνση υλικού με παραμόρφωση (επιμήκυνση) του ελάσματος 6mm.

Σχετικά με το δοκίμιο με εσωραφή στην τομή φλάντζας – πυλώνα με σχισμή και κοχλία M20 της ομάδας A φαίνεται να ακολουθεί την ίδια διαδρομή με εκείνη των δοκιμίων E1 (E1: εσωραφή στην τομή φλάντζας – πυλώνα με κοχλία M20 της ομάδας B) και A2 (A2: εσωραφή στο κέλυφος με κοχλία M20 της ομάδας B), ωστόσο χρειάζεται έλεγχος στο σημείο της συγκόλλησης για να αξιολογηθούν ποιοτικότερα τα αποτελέσματα.

5.5.2 Σύγκριση παραμετρικών δοκιμίων Α1, Α2, J1 ΚΑΙ G1

Τέλος, τα δοκιίμια εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα με προεντεταμένο κοχλία M20 της ομάδας A (δοκίμιο A1) και της ομάδας B (δοκίμιο A2) συγκρίνονται με τα δοκίμια εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα με προεντεταμένο κοχλία M16 της ομάδας A (δοκίμιο J1) και με αλλαγή της θέσης του προεντεταμένου κοχλία M20 της ομάδας B (δοκίμιο G1). Οι συγκρίσεις φαίνονται στα Σχήματα 5-34, 5-35, 5-36, 5-37, 5-38, 5-39, 5-40 και 5-41.

Σχήμα 5-34: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – συνολικής πλαισιακής μετακίνησης (mm) δοκιμίων εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 45mm



Σχήμα 5-36: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – μετακίνησης βελόμετρου DT 01 (mm) δοκιμίων εσωραφής στο κέλυφος για φλάντζα πάχους 45mm – περιορισμός διαγράμματος Σχήματος 5-35 σε μετακίνηση βελόμετρου DT 01 στα 20mm







Σχήμα 5-38: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – μετακίνησης βελόμετρου DT 02 (mm) δοκιμίων εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 45mm







Σχήμα 5-40: Σύγκριση εφελκυστικού φορτίου (kN) – παραμορφώσεως SG 09 (μstrain) δοκιμίων εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα για φλάντζα πάχους 45mm





Από τις μετρήσεις του βελομέτρου DT 01 (Σχήμα 5-36) φαίνεται ότι το δοκίμιο G1 είναι αρκετά δύσκαμπτο και παρουσιάζει τη μεγαλύτερη οριακή αντοχή από τα δοκίμια A1, A2 και J1, κάτι που φαίνεται λογικό, καθώς ο κοχλίας M20 του δοκιμίου G1 είναι τοποθετημένο πιο κοντά προς το κέλυφος του πυλώνα και επομένως καταπονείται λιγότερο έναντι κάμψης. Τη μικτότερη οριακή αντοχή φέρει το δοκίμιο J1 με κοχλία M16 της ομάδας A. Υπενθυμίζεται πως ο κοχλίας M16 του δοκιμίου J1 βρισκόταν σε οπή 16mm, με αποτελέσμα να καταπονείται ιδιαίτερα σε διάτμηση και εν συνεχεία να αστοχήσει το δοκίμιο σε θραύση του κοχλία.

Μάλιστα στο Σχήμα 5-37 φαίνεται ότι τα δοκίμια A2 και G1 στα οποία χρησιμοποιείται κοχλίας M20 της ομάδας B ακολουθούν την ίδια διαδρομή μέχρι που το δοκίμιο A2 εμφανίζει παραμόρφωση γρηγορότερα σε σχέση με το δοκίμιο G1, καθώς ο κοχλίας M20 του δοκιμίου G1 καταπονείται λιγότερο σε κάμψη. Αντιθέτως, το δοκίμιο A1 εμφανίζει έντονα παραμορφώσεις και για μικρότερο φορτίο σε σχέση με το δοκίμιο A2. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να διερευνηθεί τόσο η ποιότητα της εσωραφής του δοκιμίου A1, όσο και η ποιότητα του κοχλία M20 της ομάδας A.

6 ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

6.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των συνδέσεων σε χαλύβδινους πυλώνες ανεμογεννητριών υπό στατική φόρτιση, προσομοιώνοντας σε κλίμακα 1:10 συνδέσεις βραχέως L, οι οποίες διερευνήθηκαν σε μία πειραματική διάταξη που κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών στο Ε.Μ.Π.

Αρχικά, περιγράφηκε συνοπτικά η αιολική ενέργεια και παρουσιάστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά μιας ανεμογεννήτριας, η οποία χρησιμοποιείται για την εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού. Ένα βασικό στοιχείο της ανεμογεννήτριας, του οποίου ο σχεδιασμός απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή είναι ο πυλώνας. Ο πυλώνας θα πρέπει να διαθέτει το απαραίτητο ύψος, ώστε να δίνεται η δυνατότητα εκμετάλλευσης ανέμου με πολύ μεγάλη ταχύτητα, ικανοποιητική δυσκαμψία και όσο το δυνατόν μικρότερη μάζα, ώστε να μην επιβαρύνεται η κατασκευή. Οι βασικοί τύποι πυλώνα που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας είναι: οι δικτυωτοί πυλώνες, οι πυλώνες από οπλισμένο σκυρόδεμα, οι αυτόνομοι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες και οι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες με αγκύρια.

Ο τύπος κατασκευής εμπορικών ανεμογεννητριών που προτιμάται σήμερα είναι οι αυτόνομοι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες, λόγω του μικρού χρόνου συναρμολόγησης και ανέγερσης που απαιτείται, καθώς και λόγω του πολύ χαμηλού κόστους. Ο πυλώνας κατασκευάζεται τμηματικά σε κομμάτια των 20-30m. Η σύνδεση των διαδοχικών τμημάτων ενός χαλύβδινου σωληνωτού πυλώνα υλοποιείται μέσω δακτυλιοειδών ελασμάτων συγκολλημένων σε κάθε τμήμα του πυλώνα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με προεντεταμένους κοχλίες. Οι συνδέσεις αυτές καταπονούνται ιδιαίτερα από τις φορτίσεις του ανέμου και εμφανίζουν φαινόμενα αστοχίας. Ο άνεμος αποτελεί την κυρίαρχη φόρτιση μιας ανεμογεννήτριας, που λόγω της δυναμικής φύσης των ανεμοπιέσεων και της ανακυκλιζόμενης φόρτισης, οδηγεί σε ενδεχόμενη αστοχία μίας τέτοιας κατασκευής εξαιτίας της κόπωσης. Για αυτό τον λόγο έχει ενδιαφέρον η μελέτη και αξιολόγηση της συμπεριφοράς αυτών των συνδέσεων.

Σε ένα μεταλλικό πλαίσιο τοποθετήθηκαν και δοκιμάστηκαν συνολικά 13 πειραματικά δοκίμια, τα οποία ήταν προσομοίωση συνδέσεων μεταξύ διαδοχικών τμημάτων πυλώνα βραχέως L υπό κλίμακα 1:10. Το μεταλλικό πλαίσιο αποτελείται από 5 μεταλλικές πλάκες πάχους 50mm, οι οποίες διαπερνώνται από 4

ντίζες M33 ποιότητας (8.8). Για τον περιορισμό λυγισμού των ντιζών τοποθετήθηκαν περιμετρικά του πλαισίου και καθ'ύψος όλων των φατνωμάτων ελάσματα διατομής L40x40 με πάχος 3mm. Συνολικά, το πειραματικό πλαίσιο αποτελείται από 4 φατνώματα. Στο πλαίσιο τοποθετούνται κάθε φορά δύο δοκίμια, όπου το κάτω δοκίμιο συγκρατείται από μία βάση στήριξης πάνω στο έμβολο, ενώ το πάνω δοκίμιο στηρίζεται σε μία ίδια μεταλλική βάση που είναι συγκολλημένη στην άνω ακραία μεταλλική πλάκα 50mm. Το έμβολο κινείται προς τα κάτω, με αποτέλεσμα το εφελκυστικό φορτίο να ασκείται μέσω του εμβόλου στο κάτω δοκίμιο Οι κατηγορίες των υπό εξέταση δοκιμίων είναι: δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα, δοκίμιο εσωραφής στην τομή φλάντζας – πυλώνα, δοκίμιο εσωραφής στην τομή φλάντζας – πυλώνα με σχισμή, δοκίμιο με εξωραφή και δοκίμιο εξωραφής με προεξοχή φλάντζας. Επιπλέον, στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν 2 ομάδες προεντεταμένων κοχλιών M20 ποιότητος (10.9) διαφορετικής προέλευσης. Στόχος της πειραματικής διαδικασίας είναι ο προσδιορισμός της αντοχής κάθε δοκιμίου και η διερεύνηση του μηχανισμού αστοχίας ελάσματος, κοχλία ή συγκόλλησης.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι διαφορές των σχεδίων μελέτης με τα κατασκευαστικά σχέδια που τελικά εφαρμόστηκαν. Οι διαφορές αυτές εντοπίστηκαν εργαστηριακά και σχετίζονται με αλλαγή παχών ελασμάτων στα πειραματικά δοκίμια, αλλαγή ποιότητος χάλυβα, καθώς και με ατέλειες στην ποιότητα των συγκολλήσεων. Τα πειραματικά αποτελέσματα συνοδεύονται και τεκμηριώνονται με φωτογραφικό υλικό που εξασφαλίστηκε κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Τέλος, γίνεται προσπάθεια σύγκρισης και αξιολόγησης των πειραματικών αποτελεσμάτων.

6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο για την καλύτερη αποτίμηση της συμπεριφοράς συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών υπό στατική φόρτιση, η προσομοίωση των δοκιμίων σε κατάλληλο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, ώστε να εκτιμηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η πραγματική αντοχή υπό στατική φόρτιση κάθε δοκιμίου.

Στα αριθμητικά αυτά μοντέλα κρίνεται σκόπιμη η ακόμα πιο ρεαλιστική απεικόνιση των συγκολλήσεων και η εισαγωγή ατελειών, ώστε να αξιολογείται η πραγματική αντοχή κάθε είδους συγκόλλησης στα δοκιίμια που χρησιμοποιήθηκαν.

Πέρα από σύγκριση πειραματικών με κατάλληλα σχεδιασμένων αριθμητικών προσομοιωμάτων, καλό θα ήταν ο ποιοτικός έλεγχος των συγκολλήσεων που πραγματοποιήθηκε στα εξεταζόμενα δοκίμια με μη καταστροφικές μεθόδους. Με το τρόπο αυτό, θα γίνει καλύτερη αξιολόγηση της σύγκρισης των πειραματικών αποτελεσμάτων και θα διερευνηθεί ο μηχανισμός αστοχίας κάθε δοκιμίου.