

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΡΦΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΟΠΗΣ ΣΕ ΚΑΜΠΤΟΜΕΝΑ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΑ ΚΕΛΥΦΗ

Χριστόφορος Δημόπουλος

Υποψήφιος Διδάκτορας

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: cdimop@central.ntua.gr

Χάρης Γαντές

Αναπληρωτής Καθηγητής

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail : chgantes@central.ntua.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε πυλώνες ανεμογεννητριών η παρουσία του ανοίγματος ανθρωποθυρίδας στη βάση προκαλεί μια μείωση στην αντοχή η οποία επιχειρείται να αποκατασταθεί με χρήση διάφορων τύπων ενίσχυσης. Η πλέον χρησιμοποιούμενη μορφή ενίσχυσης είναι ένα κολάρο συγκολλημένο γύρω από το άνοιγμα. Οι κανονιστικές διατάξεις σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών είτε αγνοούν το σχεδιασμό κελυφών με ενισχυμένα ή μη ανοίγματα, είτε παρέχουν διατάξεις οι οποίες είναι πιο κατάλληλες για άλλες κατασκευές αντί για πυλώνες ανεμογεννητριών, είτε τέλος, παρόλο που αφορούν πυλώνες ανεμογεννητριών δεν καλύπτουν διαστάσεις ανοιγμάτων που συναντώνται στην πράξη. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο EC3 επιτρέπει τη χρήση αριθμητικών μεθόδων για την εκτίμηση της αντοχής. Στην παρούσα εργασία η εξακρίβωση της αποτελεσματικότητας τέτοιων μεθόδων πιστοποιείται μέσω σύγκρισης με αποτελέσματα πειραματικής διερεύνησης με δοκίμια που έχουν χαρακτηριστικά γεωμετρίας και δυσκαμψίας πυλώνων ανεμογεννητριών. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αριθμητικής διερεύνησης για την συμπεριφορά και την εκτίμηση της αντοχής κυλινδρικών κελυφών από χάλυβα με άνοιγμα για διάφορους τύπους ενίσχυσης.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε κατασκευές πολιτικού μηχανικού είναι συνηθισμένο να διανοίγονται οπές για να ικανοποιούνται διάφορες πρακτικές ανάγκες. Σε πυλώνες ανεμογεννητριών η οπή

διανοίγεται ώστε να είναι προσπελάσιμο το εσωτερικό του πυλώνα αλλά και το μηχανολογικό τμήμα της ανεμογεννήτριας. Σε καπνοδόχους η οπή είναι αναγκαία για να διοχετεύονται τα παραγόμενα αέρια στην ατμόσφαιρα. Η παρουσία ενός ανοίγματος στο σώμα του κελύφους ενδέχεται να έχει σημαντική επιρροή στην αντοχή της κατασκευής. Για την ανάκτηση της χαμένης αντοχής εξαιτίας του ανοίγματος, είναι συνήθης πρακτική να χρησιμοποιούνται ενισχύσεις στην περιοχή του ανοίγματος. Μια από τις πλέον διαδεδομένες μορφές ενίσχυσης είναι ένα πλαίσιο συγκολλημένο γύρω από το άνοιγμα. Οι σύγχρονοι κανόνες σχεδιασμού είτε αγνοούν το σχεδιασμό κελυφών με ενισχυμένα ή μη ανοίγματα (EC3 [1], ECCS [2]), είτε παρέχουν διατάξεις οι οποίες είναι πιο κατάλληλες για άλλες κατασκευές πολιτικού μηχανικού αντί για πυλώνες ανεμογεννητριών (DASt [3]). Κάποιοι άλλοι κανονισμοί (DIBt [4]), παρόλο που αφορούν αποκλειστικά πυλώνες ανεμογεννητριών ενδέχεται να μην ικανοποιούν διαστάσεις ανοιγμάτων που συναντώνται στην πράξη. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο EC3 επιτρέπει τη χρήση αριθμητικών μεθόδων για την εκτίμηση της αντοχής. Οι αριθμητικές αναλύσεις είναι ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των κατασκευών. Παρόλα αυτά, η πιστοποίηση των αριθμητικών αυτών εργαλείων με πραγματικά πειραματικά αποτελέσματα είναι μια αναγκαία διαδικασία για τη διασφάλιση της εγκυρότητας αυτών των αναλύσεων.

Η πειραματική διερεύνηση της επίδρασης διαφόρων μορφών ανοίγματος σε μεταλλικά και πλαστικά κελύφη είναι αρκετά ευρεία. Παρόλα αυτά, η πειραματική μελέτη μεταλλικών κελυφών υπό κάμψη, η οποία είναι και η κυρίαρχη δράση σε πυλώνες ανεμογεννητριών, είναι αρκετά πιο περιορισμένη, ειδικότερα μάλιστα όταν πρόκειται για την διερεύνηση και της επίδρασης της παρουσίας ενισχύσεων στην περιοχή του ανοίγματος.

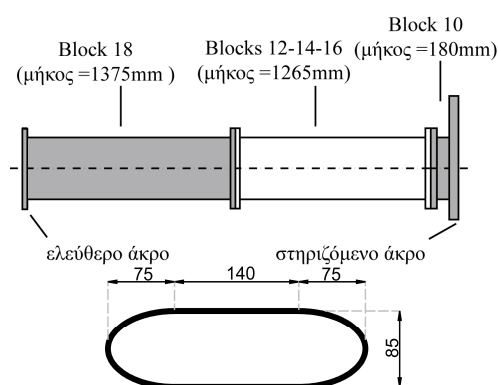
Όσον αφορά την πειραματική μελέτη κυλινδρικών κελυφών υπό κάμψη με άνοιγμα αλλά και διάφορα είδη ενισχύσεων, αναφορά πρέπει να γίνει στην εργασία των Knödel και Schulz [5]. Στην εργασία αυτή έχει εξεταστεί ένας αριθμός από πενήντα περίπου δοκίμια με ή χωρίς διαμήκεις ενισχύσεων διαφόρων διατομών υπό το καθεστώς καθαρής κάμψης. Η εργασία αυτή περιορίστηκε μόνο στην πειραματική μελέτη της επίδρασης των ανοιγμάτων και της μορφής της ενίσχυσης οι δε γεωμετρικές αναλογίες αντιστοιχούν σε κελύφη καπνοδόχων και όχι ανεμογεννητριών.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα εργασία πάνω σε καμπτόμενα κελύφη από αλουμίνιο με κυκλικά ή ορθογωνικά ανοίγματα χωρίς όμως να μελετάται η επιρροή ενισχύσεων είναι εκείνη των Meng – Kao Yeh et al. [6]. Ο λόγος διαμέτρου προς πάχος ήταν πρακτικά ίσος με 50 ενώ ο λόγος μήκους προς διάμετρο ήταν ίσος με 7,9. Πέρα από την πειραματική διερεύνηση, πραγματοποιήθηκε και μια αριθμητική ανάλυση η οποία ήταν σε ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα.

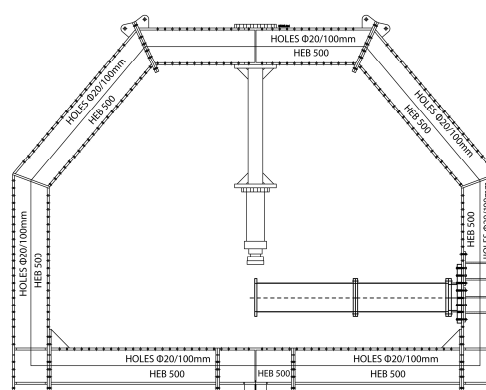
Στα πλαίσια αυτής της εργασίας παρουσιάζονται κάποια πειραματικά αποτελέσματα για κυλινδρικά κελύφη με άνοιγμα και ενίσχυση τα οποία ανταποκρίνονται σε μεγέθη γεωμετρίας και δυσκαμψίας πραγματικών πυλώνων ανεμογεννητριών. Τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίνονται με αριθμητικά αποτελέσματα όπως αυτά έχουν προκύψει με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η σύγκριση αυτή καταδεικνύει την ικανότητα των αριθμητικών μεθόδων να εκτιμούν την πραγματική συμπεριφορά τέτοιων κατασκευών μέσα σε ικανοποιητικά όρια ακρίβειας. Ακολούθως, επιχειρείται η αριθμητική διερεύνηση της επίδρασης διάφορων μορφών ενίσχυσης στην αντοχή κυλινδρικών κελυφών υπό κάμψη. Οι αριθμητικές αναλύσεις εκτελούνται σύμφωνα με τις διατάξεις του μέρους 1.6 του Ευρωκώδικα 3, που σχετίζονται με την εκτίμηση της αντοχής των κελυφών με αριθμητικές μεθόδους.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΕΛΥΦΩΝ ΥΠΟ ΚΑΜΨΗ

Στο Σχήμα 1 δίνεται η μορφή του πειραματικού δοκιμίου ενώ στο Σχήμα 2 δίνεται η γενικότερη πειραματική διάταξη. Συνολικά εξετάζονται έξι πειραματικά δοκίμια. Τα πρώτα δυο δοκίμια δεν εμπεριέχουν άνοιγμα στην επιφάνεια τους. Τα άλλα δυο δοκίμια έχουν ένα άνοιγμα κοντά στη βάση τους, ενώ τα υπόλοιπα δυο έχουν ένα ενισχυμένο άνοιγμα με ενίσχυση μορφής κολάρου συγκολλημένου στο άνοιγμα. Το άνοιγμα βρίσκεται 55 mm από την άκρη του κελύφους ενώ η μορφή του δίνεται στο Σχήμα 1. Πιο συγκεκριμένα, το άνοιγμα αποτελείται από ένα ορθογώνιο διαστάσεων 85 mm επί 140 mm και δυο άκρα ελλειπτικής μορφής με δευτερεύοντα άξονα μήκους 85 mm και κύριο ημιάξονα μήκους 75 mm.



Σχ. 1: Βασικά μέρη δοκιμίων και γεωμετρία ανοίγματος



Σχ. 2: Πλαίσιο πειραμάτων και πειραματική διάταξη

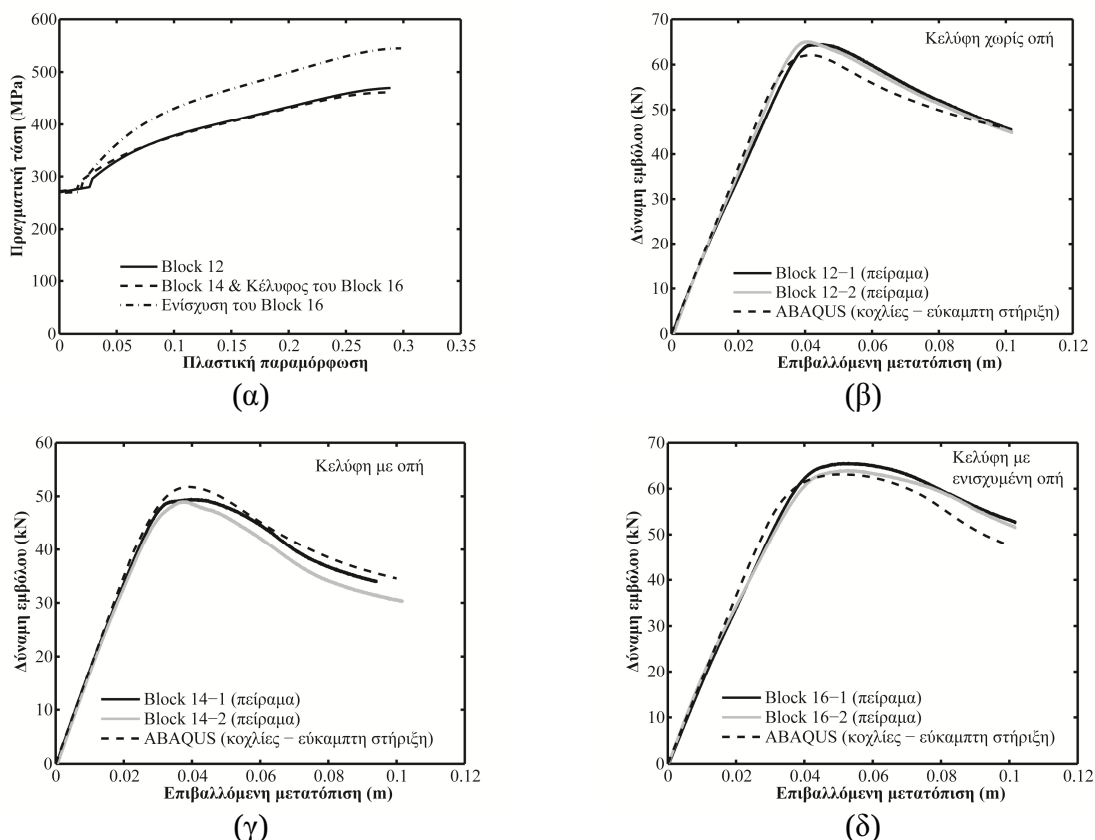
Τα πειραματικά δοκίμια αποτελούνται από τρία τμήματα. Το πρώτο τμήμα (Block 18) είναι ένα κέλυφος με εξωτερική διάμετρο 400 mm και πάχος 6 mm. Η επιβαλλόμενη μετατόπιση εφαρμόζεται μέσω του εμβόλου στην εξωτερική φλάντζα αυτού του κελύφους. Το πρώτο τμήμα συνδέεται με το δεύτερο τμήμα του δοκιμίου μέσω δυο φλατζών και 28 κοχλιών M20/10.9. Το δεύτερο τμήμα (εξωτερική διάμετρος 400 mm και πάχος 4 mm) έρχεται σε έξι κομμάτια: δυο κελύφη χωρίς άνοιγμα (Block 12), δυο με άνοιγμα (Block 14) και τα τελευταία δυο με ενισχυμένα ανοίγματα (Block 16). Στο Block 16 η ενίσχυση έχει πλάτος 35 mm και πάχος 6 mm. Το δεύτερο τμήμα συνδέεται με το τρίτο τμήμα μέσω δυο φλαντζών και 28 κοχλιών M20/10.9. Το τρίτο τμήμα (Block 10) είναι ένας συνδυασμός ενός κοντού κυλίνδρου συγκολλημένου σε ένα παχύ έλασμα. Ο κοντός κύλινδρος έχει εξωτερική διάμετρο 400 mm, πάχος 20 mm και μήκος 80 mm. Το παχύ έλασμα έχει πάχος 60 mm. Το δοκίμιο συνδέεται κοχλιωτά μέσω του ελάσματος στο υποστύλωμα του πειραματικού πλαισίου του εργαστηρίου (Σχήμα 2). Το αριθμητικό προσομοίωμα που κατασκευάστηκε περιέχει όλα τα προαναφερθέντα τμήματα αγνοώντας όμως το παχύ έλασμα του Block 10 (βλ. Σχήμα 1).

Για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού πραγματοποιήθηκαν πειράματα μονοαξονικού εφελκυσμού. Τα πειράματα αυτά αφορούσαν μόνο τα Block 12, 14 και 16 μιας και τα υπόλοιπα τμήματα έχουν σχεδιαστεί με επαρκή υπεραντοχή, ώστε να παραμένουν στην ελαστική περιοχή κατά τη διάρκεια του πειράματος. Οι βασικές ιδιότητες του χάλυβα δίνονται στον Πίνακα 1. Το πλαστικό μέρος του νόμου του υλικού σε όρους πλαστικής παραμόρφωσης και πραγματικής τάσης δίνονται στο Σχήμα 3. Στο ίδιο σχήμα δίνονται οι πειραματικοί δρόμοι ισορροπίας και ο αντίστοιχος αριθμητικός για

τα τρία είδη κελυφών. Στις αριθμητικές αναλύσεις, που έχουν διεξαχθεί με το πρόγραμμα ABAQUS [7], λαμβάνεται υπόψη η γεωμετρική μη γραμμικότητα και η μη γραμμικότητα του υλικού καθώς επίσης ο τέλειος γεωμετρικά φορέας (ανάλυση GMNA και πεπερασμένα στοιχεία S4R). Στις αναλύσεις λαμβάνεται υπόψη η παρουσία κοχλίων μέσω κατάλληλης εξομοίωσης της επαφής μεταξύ των διαφόρων τμημάτων του δοκιμίου. Επιπλέον, μέσω κατάλληλων ελατηρίων στη βάση του αριθμητικού προσομοιώματος, λαμβάνεται υπόψη η ευκαμψία του συστήματος στήριξης του δοκιμίου. Οι σταθερές των ελατηρίων έχουν προκύψει από ανεξάρτητες αριθμητικές αναλύσεις. Παρατηρείται ότι η αριθμητική ανάλυση δίνει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα. Μόνο στην περίπτωση των κελυφών με άνοιγμα η αριθμητική ανάλυση υπερεκτιμά την αντοχή του δοκιμίου χωρίς όμως αυτή η απόκλιση να είναι σημαντική.

	Κέλυφος του Block 12	Κέλυφος των Block 14 και 16	Ενίσχυση του Block 16
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	208	206	208
Όριο διαρροής ⁽¹⁾ (MPa)	270	272	269
(1) το όριο διαρροής λαμβάνεται σαν η τάση που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση 0,2%			

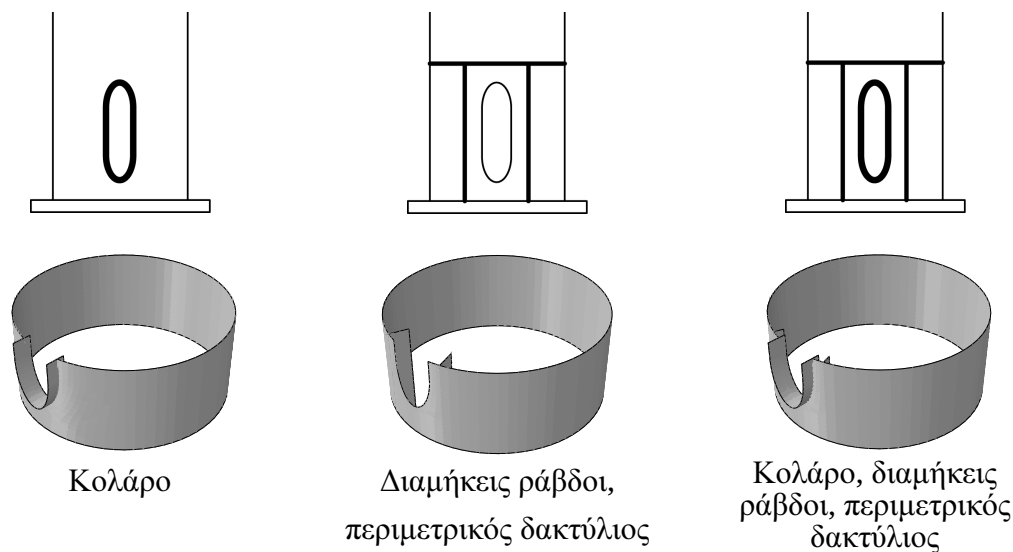
Πιν. 1: Ιδιότητες υλικού



Σχ. 3: (α) Καμπύλες πλαστικής παραμόρφωσης – πραγματικής τάσης, και δρόμοι ισορροπίας για (β) κελύφη χωρίς οπή, (γ) κελύφη με οπή και (δ) κελύφη με ενισχυμένη οπή

4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΕΛΥΦΩΝ ΥΠΟ ΚΑΜΨΗ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

Για την αριθμητική διερεύνηση της αποδοτικότητας διάφορων μορφών ενισχύσεων, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS [7]. Στο Σχήμα 4 δίνονται οι τρεις τύποι ενίσχυσης οι οποίοι εξετάζονται στην παρούσα εργασία. Ο πρώτος τύπος ενίσχυσης αφορά ένα περιμετρικό πλαίσιο (κολάρο) το οποίο εφαρμόζεται περιμετρικά του ανοίγματος. Ο δεύτερος τύπος ενίσχυσης αφορά ένα ζεύγος διαμηκών ράβδων οι οποίες στερεώνονται σε ένα περιμετρικό δακτύλιο πάνω από το άνοιγμα. Ο τρίτος τύπος ενίσχυσης αφορά το συνδυασμό των δυο προηγούμενων μορφών ενίσχυσης.



Σχ. 4: Τύποι ενίσχυσης

Το αριθμητικό προσομοίωμα έχει ύψος 6,35 m, ακτίνα 1,98 m και πάχος 40 mm. Ο λόγος ακτίνας προς πάχος του κελύφους ($r/t = 49,5$) επιλέχθηκε ώστε να βρίσκεται και σε συμφωνία με τον αντίστοιχο πειραματικό λόγο αλλά και να αποτελεί ρεαλιστικό μέγεθος που παρατηρείται σε πυλώνες ανεμογεννητριών. Η μορφή του ανοίγματος δίνεται στο Σχήμα 1 ενώ οι διαστάσεις του είναι δέκα φορές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του σχήματος. Η κάτω άκρη του ανοίγματος βρίσκεται σε απόσταση 550 mm από την κάτω άκρη του κελύφους. Η βάση του κελύφους θεωρήθηκε πακτωμένη ενώ σαν φόρτιση επιβλήθηκε μια συγκεντρωμένη στροφή στο κέντρο βάρους της πάνω διατομής του κελύφους, η οποία κατανέμεται στους κόμβους της κορυφής με τη χρήση “*άκαμπτων μελών*” (MPC constraint). Το κολάρο το οποίο χρησιμοποιείται στους δυο από τους τρεις τύπους ενίσχυσης έχει πλάτος 350 mm. Στον δεύτερο τύπο ενίσχυσης το πλάτος των διαμηκών ενισχύσεων είναι ίσο με 350 mm, ενώ στον τρίτο τύπο ενίσχυσης το αντίστοιχο πλάτος είναι ίσο με 175 mm. Το μήκος όλων των διαμηκών ενισχύσεων είναι ίσο με 4 m. Ο περιμετρικός δακτύλιος στους δυο τελευταίους τύπους ενίσχυσης θεωρήθηκε ότι έχει πάχος ίσο με 80 mm και πλάτος ίσο με το πλάτος των εκάστοτε διαμηκών ενισχύσεων. Αν θεωρήσουμε ότι το άνοιγμα των κελυφών έχει περιεχόμενη γωνία ίση με 2β ($=0,4327\text{rad}$), τότε οι διαμήκεις ενισχύσεις τοποθετούνται σε επιπλέον γωνία $\beta/2$ από την αντίστοιχη πλευρά του ανοίγματος (η περιεχόμενη γωνία μεταξύ των διαμηκών ενισχύσεων είναι 3β). Στην παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, βασική μεταβλητή αποτελεί το πάχος των ενισχύσεων. Στην τρίτη περίπτωση ενίσχυσης γίνεται η παραδοχή ότι το εμβαδόν της διατομής του κολάρου είναι ίσο με το εμβαδόν της διατομής των διαμηκών ενισχύσεων. Στο Σχήμα 5 δίνεται ένα προσομοίωμα με πεπερασμένα στοιχεία καθώς επίσης και η

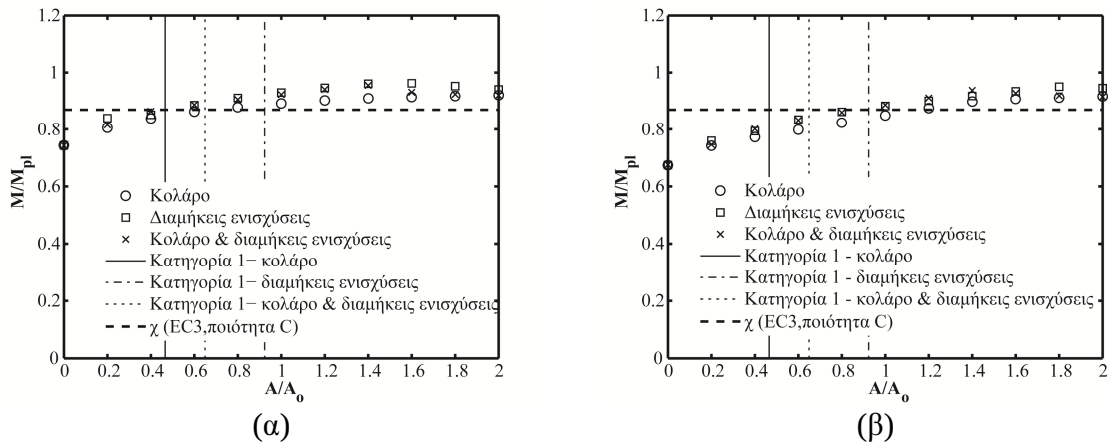
μορφή ατέλειας η οποία χρησιμοποιείται στις αριθμητικές αναλύσεις με ατέλεια (GMNIA). Η ατέλεια, μορφής κυκλικού τόξου, τοποθετήθηκε στην περιοχή του ανοίγματος, έτσι ώστε το μέγιστο πλάτος της ατέλειας w_0 να βρίσκεται στο μέσο ύψος του ανοίγματος. Το πλάτος της ατέλειας (βλ. Σχήμα 5) αντιστοιχεί στην ποιότητα κατασκευής C σύμφωνα με τον EC3 – Μέρος 1.6. Στις αριθμητικές αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε το τετρακομβικό πεπερασμένο στοιχείο S4. Όσον αφορά τις ιδιότητες του χάλυβα, θεωρήθηκε ελαστικό – τελειώς πλαστικό υλικό με μέτρο ελαστικότητας $E=210 \text{ GPa}$, λόγος Poisson $\nu=0,3$ και όριο διαρροής $f_y = 355 \text{ MPa}$.



Σχ. 5: (α) Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων και (β) μορφή ατέλειας στις αναλύσεις GMNIA ($L_{gx} = 1,1257m$, $w_0 = 0,0180m$)

Στο Σχήμα 6 δίνεται η ροπή αντοχής M αδιαστατοποιημένη ως προς την πλαστική ροπή αντοχής M_{pl} ως συνάρτηση του εμβαδού των ενισχύσεων A αδιαστατοποιημένου ως προς το εμβαδόν της διατομής του ανοίγματος A_0 , για δυο βασικούς τύπους αριθμητικής ανάλυσης (GMNA, GMNIA). Σημειώνεται ότι A_0 είναι το εμβαδόν της διατομής του κελύφους που αφαιρείται λόγω της παρουσίας του ανοίγματος και είναι ίσο με $2\beta\pi t$ ($=0,0343 \text{ m}^2$). Για την περίπτωση του απλού κολάρου, των διαμηκών ενισχύσεων και του συνδυασμού των δυο προηγούμενων περιπτώσεων, το εμβαδόν της ενίσχυσης είναι ίσο με $2x0,35t_f$, $2x0,35t_s$, και $2x(0,35t_f+0,175t_s)= 2x(0,35t_f+0,175x2t_f)= 4x0,35t_f$ αντίστοιχα, όπου t_f είναι το πάχος του κολάρου και t_s το πάχος των διαμηκών ενισχύσεων.

Στα ίδια γραφήματα δίνεται και ο αδιαστατοποιημένος λόγος εμβαδού ενίσχυσης, ο οποίος διαχωρίζει τις διατομές κατηγορίας 1 από τις άλλες κατηγορίες, για τους τρεις τύπους ενίσχυσης. Επίσης, δίνεται η αντοχή του κελύφους υπό τη μορφή του μειωτικού συντελεστή χ , η οποία αφορά ένα αντίστοιχο κέλυφος χωρίς άνοιγμα, ποιότητας C, όπως αυτή προβλέπεται από τον EC3 – Μέρος 1.6. Σε γενικές γραμμές η ανάλυση GMNA προβλέπει μεγαλύτερες αντοχές και επομένως μικρότερα απαιτούμενα εμβαδά ενίσχυσης. Παραδείγματος χάριν, εάν απαιτηθεί η διατομή των ενισχύσεων να είναι κατηγορίας 1, τότε, για την περίπτωση αναλύσεων GMNA, η αντοχή του κελύφους χωρίς άνοιγμα εξασφαλίζεται με χρήση ενίσχυση εμβαδού $0,8A_0$ για την περίπτωση κολάρου, A_0 για την περίπτωση διαμηκών ενισχύσεων και $0,8A_0$ για την περίπτωση κολάρου & διαμηκών ενισχύσεων. Όσον αφορά την ανάλυση GMNIA, η αντοχή του κελύφους χωρίς άνοιγμα εξασφαλίζεται με ενίσχυση $1,2A_0$ για την περίπτωση κολάρου και A_0 για τους δυο άλλους τύπους ενίσχυσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα πειράματα έχει χρησιμοποιηθεί ενίσχυση εμβαδού $1,226A_0$.



Σχ. 6: Αδιαστατοποιημένη ροπή αντοχής ως προς το αδιαστατοποιημένο εμβαδόν των ενισχύσεων για δυο τύπους αριθμητικής ανάλυσης (α) ανάλυση GMNA και (β) ανάλυση GMNIA

5. ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από το πειραματικό σκέλος της εργασίας παρατηρείται ότι σε κελύφη πυλώνων ανεμογεννητριών ένα άνοιγμα με ρεαλιστικές διαστάσεις προκαλεί μείωση της αντοχής κατά 24% περίπου. Επιπλέον, η επιλεγόμενη ενίσχυση, η οποία επίσης έχει ρεαλιστικές διαστάσεις δύναται να επαναφέρει την χαμένη αντοχή λόγω του ανοίγματος. Οι αριθμητικές αναλύσεις που αφορούν την πειραματική ανάλυση έρχονται σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα. Όσον αφορά την παραμετρική ανάλυση, η πλέον προχωρημένη αριθμητική ανάλυση (GMNIA) έχει δείξει ότι για ρεαλιστικά μεγέθη ενισχύσεων όπως παραδείγματος χάριν $1,2A_0$ για την περίπτωση κολάρου και A_0 για τους δυο άλλους τύπους ενίσχυσης είναι δυνατή η επαναφορά της αντοχής στα επίπεδα ενός αντίστοιχου κελύφους χωρίς άνοιγμα.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures, 2006.
- [2] ECCS Technical Committee 8, Structural Stability, TWG 8.4 – Shells, Buckling of Steel Shells, European Design Recommendations, 5th Edition, Editors: John Michael Rotter and Herbert Schmidt, 2008.
- [3] Deutscher Ausschluß für Stahlbau: DAST – Richtlinie 017 Entwurf. Beulsicherheitsnachweise für Schalen – Spezielle Fälle. Köln: Stahlbau Verlagsgesellschaft 1992.
- [4] Deutsches Institut für Bautechnik - DIBt, Richtlinie für Windenergieanlagen, Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung, 2004.
- [5] Knödel P. και Schulz U., “Zur Stabilität von Schornsteinen mit Fuchsöffnungen“, *Stahlbau*, Vol. 57, H. 1, 1988, pp. 13 – 21.
- [6] Yeh M.K., Lin M.C. και Wu W.T., “Bending buckling of an elastoplastic cylindrical shell with a cutout”, *Engineering Structures*, Vol. 21, 1999, pp. 996 – 1005.
- [7] ABAQUS/Standard και ABAQUS/Explicit - Version 6.8-1, “Abaqus Theory Manual”, Dassault Systems, 2008.

COMPARISON OF CUTOUT STIFFENING SCHEMES IN CYLINDRICAL SHELLS UNDER BENDING

Christoforos Dimopoulos

PhD Candidate

School of Civil Engineering, National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: cdimop@central.ntua.gr

Charis Gantes

Associate Professor

School of Civil Engineering, National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: chgantes@central.ntua.gr

SUMMARY

Wind turbine towers have a man-hole opening near their base which reduces their bending strength. Different stiffening schemes may be provided in order to compensate for the strength loss due to the presence of the opening. The most common stiffening type is a frame welded around the opening. Modern design norms either ignore the design of shells with unreinforced or reinforced openings (EC3, ECCS) or they provide rules that refer to other types of structures rather than wind turbine towers (DASt). Some other norms (DIBt), although aiming specifically towards design of wind turbine towers, may not apply to all geometrical properties of the openings encountered in practice. In such cases, EC3 allows the use of numerical methods for the determination of strength. In the present work, a comparison is first made between such numerical methods and experimental results. Then, the results of a numerical investigation for the behaviour and strength evaluation of cylindrical shells under bending with opening and different types of stiffening are presented.