

Διερεύνηση Ευστάθειας Κυλινδρικών Κελυφών με και χωρίς Οπή



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γκουρμπάτσης Δημήτριος

Επιβλέπων: Ιωάννης Ραυτογιάννης

Αθήνα, Νοέμβριος 2016 ΕΜΚ ΔΕ 2016 31

Γκουρμπάτσης Δ. (2016). Διερεύνηση Ευστάθειας Κυλινδρικών Κελυφών με και χωρίς Οπή Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2016 31 Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Gourbatsis D. (2016). Investigation of Stability of Cylindrical Shells with and without Hole Diploma Thesis EMK ΔE 2016 31 Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη
Abstract
Ευχαριστίες
 Εισαγωγή
 2 Αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού της αντοχής κελυφών
 3 Αξιολόγηση διαφορετικών τρόπων ενίσχυσης οπών
4 Βιβλιογραφία
Παράρτημα Α. Αξιολόγηση Διακριτοποίησης Πεπερασμένων Στοιχείων

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΜΚ ΔΕ 2016 31

Διερεύνηση Ευστάθειας Κυλινδρικών Κελυφών με και χωρίς Οπή

Γκουρμπάτσης Δ. (Επιβλέπων: Ραυτογιάννης Ι.)

Περίληψη

Σκοπός αυτής της διπλωματικής είναι η μελέτη της αποδοτικότητας διαφόρων τύπων ενίσχυσης οπής ανθρωποθυρίδων χαλύβδινων πυλώνων ανεμογεννητριών. Η ύπαρξη του ανοίγματος προκαλεί συγκέντρωση τάσεων, αυξάνει τον κίνδυνο τοπικού λυγισμού και επιφέρει απομείωση της αντοχής του πυλώνα και για αυτό το λόγο θα πρέπει υποχρεωτικά να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό. Συνεπώς η ενίσχυση της οπής είναι αναγκαία και στην πράξη μπορεί να λάβει διάφορες μορφές. Γενικά δεν είναι σαφές ποια μορφή ενίσχυσης είναι η πλέον αποδοτική.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται ποια μορφή ενίσχυσης που είτε χρησιμοποιείται στην πράξη ή έχει προταθεί από την βιβλιογραφία είναι η πιο αποδοτική. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Συγκεκριμένα στα μοντέλα που δημιουργήθηκαν, έγιναν μη γραμμικές αναλύσεις στις οποίες λήφθηκαν υπόψη γεωμετρικές ατέλειες και η μη γραμμική συμπεριφορά του χάλυβα (GMNIA). Εξετάστηκαν τέσσερεις τύποι ενίσχυσης. Ο πρώτος τύπος αποτελείται από ένα περιμετρικό πλαίσιο γύρω από την πόρτα. Είναι ο πιο διαδεδομένος λόγω της ευκολίας κατασκευής του. Γενικά δεν μπορεί να μεταφέρει την αστοχία μακριά από την οπή και χρειάζεται την περισσότερη ποσότητα χάλυβα για την επαναφορά της αντοχής ενός κελύφους με οπή στην αντίστοιχη αντοχή του πλήρους κελύφους. Ο δεύτερος τύπος αποτελείται από δύο διαμήκη ελάσματα και ένα κυκλικό δακτύλιο. Αυτός ο τύπος ενίσχυσης είναι αρκετά αποδοτικός και σταθερός. Ο τρίτος τύπος είναι μία βελτίωση του προηγούμενου και αποτελείται από δύο διαμήκη ελάσματα και ημικυκλικό δακτύλιο. Είναι το ίδιο αποδοτικός και σταθερός με τον προηγούμενο τύπο αλλά απαιτεί μικρότερη ποσότητα χάλυβα. Αυτός ο τύπος ενίσχυσης προτείνεται να χρησιμοποιείται στην πράξη. Τέλος ο τέταρτος τύπος αποτελείται από διαμήκη ελάσματα και ένα μικρό οριζόντιο έλασμα. Αυτός ο τύπος είναι αρκετά ανταγωνιστικός και χρειάζεται μικρότερη ποσότητα χάλυβα από τον πρώτο αλλά μεγαλύτερη από τον δεύτερο και τρίτο τύπο ενίσχυσης.

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

DIPLOMA THESIS EMK ΔE 2016 31

Investigation of Stability of Cylindrical Shells with and without Hole

Gourbatsis D. (supervised by Raftoyiannis I.)

Abstract

Objective of this diploma thesis is the study of the efficiency of various stiffening types of the manhole cut-out in steel wind turbine tower shells. The size of this cut-out is significant and leads to stress concentration, increase the danger of local buckling and ultimately it reduce significantly the strength of the tower and for this reason it is necessary to be taken into consideration in the design. Therefore, it is considered necessary to stiffen the region of the opening and in practice can be with different types. It is not clear which type of stiffening is the most efficient.

In the present thesis is investigated which of the different alternative stiffening types which is used in practice or proposed in the literature is the most efficient. For this reason was carried out numerical analysis with the method of finite element. In the models which were created, was carried out nonlinear analysis including geometric imperfections and the nonlinear behavior of steel (GMNIA). Four stiffening types were investigated. The first type of stiffening consists of a single frame. This type is the most widely used because it is constructed easily. Generally it is not able to transfer the failure outside the cut-out region and it need the most amount of steel to restore the strength of a shell with cut-out to that of the corresponding shell without cut-out. The second type consist of two stringers and a cyclic ring stiffener. This type is efficient and stable. The third type is just an improvement of the previous type and consist of two stringers and a semicircular ring stiffener. This type of stiffening is proposed to be used in practice. The fourth type consist of two stringers and a small part of ring. The amount of steel which is required is less than the single frame but more than in the second and third type.

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την διπλωματική μου εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με βοήθησαν και με στήριξαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αλλά και στο σύνολο της ακαδημαϊκής μου πορείας.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου και τις ευχαριστίες μου στον αναπληρωτή καθηγητή και επιβλέποντα αυτής της διπλωματικής κ. Ιωάννη Ραυτογιάννη, για την πολύτιμη καθοδήγηση του και τη συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Η περίοδος της συνεργασίας μας ήταν ιδιαίτερα εποικοδομητική καθώς οι γνώσεις και οι εμπειρίες που αποκόμισα αποτελούν εφόδιο για την επαγγελματική και προσωπική μου πορεία.

Στη συνέχεια θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους συμφοιτητές και φίλους μου για την άριστη συνεργασία μας αλλά και την πολύτιμη ψυχολογική υποστήριξη τους σε κάθε στάδιο της ακαδημαϊκής μου καριέρας.

Τέλος το μεγαλύτερο ευχαριστώ ανήκει στη οικογένεια μου και στους γονείς μου για την αμέριστη συμπαράσταση τους και την στήριξη που μου παρείχαν απλόχερα σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου και αλλά και γενικότερα στη μέχρι τώρα πορεία μου.

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μία έντονη ανησυχία για την επίπτωση της ανεξέλεγκτης εκμετάλλευσης των συμβατικών μορφών ενέργειας που αποδεσμεύουν στην ατμόσφαιρα τεράστια ποσά διοξειδίου του άνθρακα ή στο έδαφος ραδιενεργά απόβλητα. Έτσι έχει ξεκινήσει μία παγκόσμια συζήτηση για την κλιματική αλλαγή έτσι ώστε να υπάρξει μία βιώσιμη ανάπτυξη, γεγονός που οδήγησε στην σταδιακή ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Μία ταχεία αναπτυσσόμενη και πολλά υποσχόμενη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας είναι και η αιολική ενέργεια. Η χρήση της αιολικής ξεκίνησε από την αρχαιότητα με σκοπό κυρίως την κίνηση των πλοίων αλλά έβρισκε εφαρμογή και για άλλες χρήσεις όπως στην άλεση των σιτηρών ή την άντληση υδάτων. Τα τελευταία χρόνια η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Οι ανεμογεννήτριες αυτές είναι εγκατεστημένες σε αιολικά πάρκα, συνήθως σε κάποια κορυφογραμμή ενός βουνού αλλά μπορεί να υπάρχουν και περιπτώσεις μεμονωμένης εγκαταστάσεις ανεμογεννήτριας συνήθως χαμηλότερης ισχύος από ιδιώτες με σκοπό είτε την αποκόμιση κέρδους είτε πιο σπάνια για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος με στόχο την κάλυψη των αναγκών σε απομακρυσμένες περιοχές εκεί όπου δεν υπάρχει κάλυψη από το δίκτυο ηλεκτροδότησης. Οι πρώτες ανεμογεννήτριες που κατασκευάστηκαν ήταν των μερικών kW σήμερα όμως έχουν κατασκευαστεί ανεμογεννήτριες με ισχύ πάνω από 5 MW. Η μεγαλύτερη σε ισχύ ανεμογεννήτρια σήμερα είναι υπεράκτια στην περιοχή της Φουκουσίμα της Ιαπωνία με μέγιστη ισχύ τα 7 MW και συνολικό ύψος 220m.

Η ισχύς του ρέοντος ανέμου που μπορεί να δεσμευτεί από την ανεμογεννήτρια δίνεται από τον τύπο:

$$P = C_{\rm p} \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3, \tag{1.1}$$

όπου C_p είναι ο συντελεστής ισχύος (με μέγιστη θεωρητική τιμή 0.539), ρ η πυκνότητα του αέρα, R η ακτίνα των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας και v η ταχύτητα του αέρα.

Από την εξίσωση βλέπουμε ότι οι σημαντικότεροι παράγοντες της παραπάνω εξίσωσης είναι η ταχύτητα του ανέμου ν που είναι υψωμένη στην τρίτη δύναμη και η ακτίνα των πτερυγίων *R* που είναι στο τετράγωνο. Στην περίπτωση των συστημάτων ξηράς η μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος *z* δίνεται από την σχέση

$$v_m(z) = c_r(z)c_o(z)v_b$$
, (1.2)

όπου cr είναι ο συντελεστής τραχύτητας του εδάφους, co ο συντελεστής οριογραφίας και vb η βασική ταχύτητα του ανέμου. Λόγω της τραχύτητας που παρουσιάζει το έδαφος η ταχύτητα αυξάνεται με μεγάλο ρυθμό σε χαμηλό ύψος (εικόνα 1.1). Δεδομένου της σημαντικότητας της ταχύτητας στην εξίσωση (1.1) υπάρχει η σύγχρονη τάση να κατασκευάζονται ανεμογεννήτριες με όλο και υψηλότερους πυλώνες.



Εικόνα 1.1: Κατανομή ταχύτητας ανέμου καθ' ύψος

Γενικά υπάρχουν δύο ειδών ανεμογεννήτριες:

- Οριζόντιου άξονα, στις οποίες ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση του ανέμου (εικόνα 1.2α).
- Κατακόρυφου άξονα, στις οποίες ο άξονας περιστροφής είναι κάθετος προς την κατεύθυνση του ανέμου (εικόνα 1.2β).





(α) (β)Εικόνα 1.2: Ανεμογεννήτριες α) οριζόντιου άξονα και β) κατακόρυφου άξονα

Διπλωματική εργασία Γκουρμπάτση Δ. - ΕΜΠ 2016

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των ανεμογεννητριών κάθετου άξονα είναι ότι μπορούν να εκμεταλλεύονται τον άνεμο από οποιαδήποτε κατεύθυνση και αν αυτός έρχεται. Το παραπάνω πλεονέκτημα απέκτησαν και αυτές του οριζόντιου άξονα μέσω ενός αυτοματισμού που αναγνωρίζει την κατεύθυνση του ανέμου και προσαρμόζει κατάλληλα τον δρομέα έτσι ώστε να είναι απόλυτα παράλληλος προς τη ροή του ανέμου και να μεγιστοποιείται η δεσμευόμενη κινητική ενέργεια του ανέμου. Έτσι σήμερα έχει επικρατήσει η κατασκευή οριζόντιου άξονα ανεμογεννητριών λόγω της σημαντικά μεγαλύτερης αποδοτικότητας που έχουν.

Οι πυλώνες των ανεμογεννητριών μπορεί να είναι κατασκευασμένοι από σκυρόδεμα ή χάλυβα. Η κατασκευή του πυλώνα από χάλυβα μπορεί να έχει τη μορφή δικτυώματος (εικόνα 1.3) ή να είναι κυλινδρικός (εικόνα 1.4) με ή χωρίς καλώδια ή πιο σπάνια μεικτού τύπου. Ο σχεδιασμός κυλινδρικού πυλώνα από χάλυβα έχει το πλεονέκτημα της ευκολίας κατασκευής λόγω της ευκολότερης μεταφοράς και της ταχύτερης ανέγερσης του. Τέτοιου είδους ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται σε κομμάτια στο εργοστάσιο, ύστερα μεταφέρονται στο εργοτάξιο και εκεί συνδέονται μεταξύ τους με κοχλίες. Όμως τα τελευταία χρόνια οι ανεμογεννήτριες των πολλών MW απαιτούν ύψος ακόμη και 100m πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η διάμετρος στη βάση μπορεί να φτάσει έως και 5m [Hau, 2006]. Σε αυτή την περίπτωση λόγω της δυσκολίας κατά την μεταφορά τους από τους οδικούς άξονες ίσως να υπερτερεί η κατασκευή δικτυώματος ή από σκυρόδεμα. Λιγότερο διαδεδομένοι είναι οι μεικτού τύπου πυλώνες οι οποίοι είναι κατασκευασμένη στη βάση μέχρι ένα ύψος του πυλώνα από σκυρόδεμα και η κορυφή του πυλώνα από χάλυβα.



Εικόνα 1.3: Ανεμογεννήτρια με δικτυωτό πυλώνα

Εικόνα 1.4: Ανεμογεννήτρια κυλινδρικού πυλώνα

Διερεύνηση Ευστάθειας Κυλινδρικών Κελυφών με και χωρίς Οπή

Ο πιο διαδεδομένος τύπος πυλώνα σήμερα, ο οποίος διερευνάται και στην παρούσα εργασία, είναι ο σωληνωτός πυλώνας από χάλυβα κυρίως λόγω της ευκολίας της κατασκευής του. Το σχήμα του πυλώνα μπορεί να είναι κυκλικό, κολουροκωνικό ή συνδυασμός των παραπάνω. Στις μεγάλης ισχύος ανεμογεννήτριες η διαδικασία της κατασκευής τους περιλαμβάνει την κατασκευή προκατασκευασμένων τμημάτων στο εργοστάσιο μήκους έως και 14m ανάλογα με την δυνατότητα μεταφοράς τους στο εργοτάξιο από το οδικό δίκτυο. Κάθε προκατασκευασμένο τμήμα αποτελείται από ελάσματα πλάτους συνήθως 2m και πάγους ανάλογα με την απαίτηση της μελέτης. Τα ελάσματα αυτά καμπυλώνονται σε ειδικά μηχανήματα (κουρμπαδώροι) που τους δίνεται το κατάλληλο κυλινδρικό ή κολουροκωνικό σχήμα (εικόνα 1.5). Τα μηχανήματα αυτά θα πρέπει να έχουν την απαραίτητη δύναμη για την καμπύλωση του ελάσματος ανάλογα με το πάχος τους. Ειδικότερα για μεγάλες ανεμογεννήτριες το πάχος του ελάσματος μπορεί να φτάσει τα 4 ή ακόμα και 5cm πράγμα το οποίο σημαίνει ότι θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί εξειδικευμένο μηχάνημα με τεράστια δύναμη το οποίο μάλιστα δεν είναι εύκολο να βρεθεί στην αγορά. Έπειτα συγκολλούνται οι δύο άκρες μεταξύ τους με μία διαμήκη ραφή και ύστερα τα επιμέρους καμπυλωμένα ελάσματα αυτά συγκολλούνται μεταξύ με περιφερειακές ραφές. Είναι προφανές ότι όλες οι συγκολλήσεις περνάνε από σχολαστικούς ελέγχους ποιότητας με μη καταστροφικές μεθόδους (υπέρηχοι, ακτίνες Χ κτλ.). Τέλος στα δύο άκρα των προκατασκευασμένων τμημάτων συγκολλάται ένας εσωτερικός δακτύλιος ώστε να γίνει η σύνδεση με κοχλίες στο εργοτάξιο (εικόνα 1.6).

Τα προκατασκευασμένα τμήματα μεταφέρονται στο εργοτάξιο και ενώνονται με τη βοήθεια γερανού με προεντεταμένους κοχλίες (εικόνα 1.7) στους δακτυλίους στα άκρα. Ειδικότερα στο κατώτερο τμήμα του πυλώνα ο δακτύλιος συνδέεται κοχλιωτά σε ειδικές υποδοχές στη θεμελίωση της κατασκευής και έπειτα διαστρώνεται με σκυρόδεμα έτσι ώστε να ενσωματώνεται στη βάση του θεμελίου (εικόνα 1.8). Στην κορυφή του πυλώνα μπαίνει το κουβούκλιο της ανεμογεννήτριας το οποίο συνδέεται με τον πυλώνα μέσω του αζιμούθιου δακτύλιου. Στο τελικό στάδιο της κατασκευής τα προκατασκευασμένα τμήματα προστατεύονται από την διάβρωση μέσω αμμοβολής, γαλβανισμού και με επίστρωση δύο ή τρεις στρώσεις βαφής της εξωτερικής επιφάνειας.



Εικόνα 1.5: Μηχάνημα κατασκευής καμπυλωμένων ελασμάτων



Εικόνα 1.6: Εσωτερικός δακτύλιος στα άκρα των προκατασκευασμένων ελασμάτων



Εικόνα 1.7: Προεντεταμένοι κοχλίες



Εικόνα 1.8: Θεμελίωση Ανεμογεννήτριας

Ένα σημαντικό στοιχείο του σωληνωτού πυλώνα από χάλυβα αποτελεί η παρουσία ενός ανοίγματος κοντά στη βάση του πυλώνα το οποίο εξυπηρετεί την ανάγκη για την είσοδο των συνεργείων για την συντήρηση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού της ανεμογεννήτριας. Το άνοιγμα αυτό έχει διαστάσεις τέτοιες ώστε να μπορεί να περάσει ένας άνθρωπος αλλά και να μπορούν να μεταφερθούν τυπικά εξαρτήματα που χρειάζονται για την συντήρηση της. Όμως η παρουσία του ανοίγματος προκαλεί συγκέντρωση τάσεων που οδηγούν στην αύξηση της λυγηρότητας και τελικά μπορεί να οδηγηθεί η κατασκευή σε ολική κατάρρευση. Είναι αναγκαίο λοιπόν η παρουσία του ανοίγματος να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό. Μία συνήθης πρακτική που χρησιμοποιείται συχνά σε τέτοιου είδους έργα λόγω της ευκολίας κατασκευής της για την τοπική ενίσχυση του ανοίγματος της ανθρωποθυρίδας είναι να τοποθετείται ένα έλασμα περιμετρικά από την πόρτα και να συγκολλάται στο υπόλοιπο κέλυφος.

Ένα άλλο στοιχείο στο οποίο χρειάζεται προσοχή είναι οι κοχλίες των συνδέσεων. Οι κοχλίες αυτοί θα πρέπει να είναι απαραίτητα προεντεταμένοι έτσι ώστε να έχουν αυξημένη αντοχή έναντι κόπωσης που προκύπτει από την εξαιρετικά δυναμική φόρτιση της ανεμοπίεσης. Έτσι οι κοχλίες υπόκεινται σε κυκλική φόρτιση καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του έργου.



Εικόνα 1.9: Ανθρωποθυρίδα σε πυλώνα ανεμογεννήτριας

1.2 Ιστορική Αναδρομή

Ο άνθρωπος από πολύ παλιά κατάλαβε την δύναμη του ανέμου και για αυτό προσπάθησε να την εκμεταλλευτεί προς όφελος του. Η πρώτες προσπάθειες της εκμετάλλευσης του ανέμου αφορούσε την άλεση των σιτηρών και την άντληση των υδάτων. Αν και υπάρχουν αναφορές για την ύπαρξη ανεμόμυλων από το 1000 π.Χ. η πρώτη επιβεβαιωμένη ύπαρξη ανεμόμυλου είναι το 644 π.Χ. στα σύνορα Περσίας και Αφγανιστάν στην περιοχή Siesta (εικόνα 1.10).

Μερικούς αιώνες αργότερα στην Ευρώπη ήρθε η πληροφορία ότι οι Κινέζοι χρησιμοποιούσαν τον άνεμο για την άρδευση των καλλιεργειών ρυζιού. Παρόλα αυτά σήμερα δεν μπορεί να εξακριβωθεί ποιοι ήταν οι εφευρέτες αυτών των αιολικών μηχανών. Το μόνο σίγουρο είναι ότι οι ανεμόμυλοι των Κινέζων ήταν απλές κατασκευές από καλάμια μπαμπού και πανιά και ο άξονας περιστροφής τους ήταν τοποθετημένος κάθετα στη ροή του ανέμου (εικόνα 1.11).

Ανεξάρτητα από τους ανεμόμυλους κάθετου άξονα της ανατολικής Ασίας, οι ανεμόμυλοι οριζόντιου άξονα που χρησιμοποιήθηκαν συστηματικά στην Ευρώπη πιθανόν να εφευρέθηκαν από τους Ευρωπαίους. Η πρώτη απόδειξη για αυτόν τον ισχυρισμό έρχεται από την Νορμανδία κατά το 1180 μ.Χ. όπου εγκαταστάθηκαν εκεί ανεμόμυλοι οι οποίοι ονομάζονταν 'Post-Mill'(σχήμα 1.12). Επίσης υπάρχει πληροφορία για την επαρχία του Brabant ότι είχε εγκατασταθεί εκεί ανεμόμυλος αυτού του τύπου από 1119 μ.Χ. Από την βορειοδυτική Ευρώπη η τεχνολογία των ανεμόμυλων γρήγορα και στην υπόλοιπη Ευρώπη και έφτασε μέχρι την Ρωσία. Στην Γερμανία πολλοί ανεμόμυλοι post-mill εγκαταστάθηκαν κατά τον 13° αιώνα μ.Χ.



Εικόνα 1.10: Περσικός ανεμόμυλος



Εικόνα 1.11:Κινέζικος ανεμόμυλος [Hau, 2006]



Εικόνα 1.12: Ανεμόμυλος τύπου Post-mill

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των σύγχρονων ανεμογεννητριών είναι ότι διαθέτουν σύστημα προσανατολισμού στην κατεύθυνση του ανέμου έτσι ώστε να εκμεταλλεύονται την μέγιστη ισχύ του ανέμου. Το χαρακτηριστικό έκανε την εμφάνιση του στον μεσαίωνα σε ανεμόμυλους Post-mill της Ισπανίας και της Ολλανδίας. Οι ανεμόμυλοι αυτοί είχαν στη βάση τους τετράποδες βάσεις με μεταλλικά ποδαράκια έτσι ώστε να μπορούν να περιστρέφονται γύρω από τον άξονα τους. Ο άξονας της κατασκευής εκτείνεται μέχρι λίγο πιο πάνω από την μέση της όπου συναντά τον βασικό άξονα που έχει πάνω την μυλόπετρα. Ο βασικός άξονας παίρνει ροπή από τον άξονα της πτερωτής μέσω συμπλοκής δύο γραναζιών. Η ελαφρά κλίση προς τα πάνω του άξονα της πτερωτής δίνει την δυνατότητα για εγκατάσταση γραναζιού μεγάλης διαμέτρου. Η πτερωτή είχε συνήθως τέσσερα πτερύγια και στην κεντρική Ευρώπη κατασκευαζόταν συνήθως από πανιά ενώ στην βόρεια και στην ανατολική από ξύλο



Εικόνα 1.13: Σκίτσο από το παραμύθι

1.3 Εξέλιξη της αιολικής ενέργειας

1.3.1 Εξέλιξη της αιολικής ενέργειας σε Παγκόσμιο επίπεδο

Η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από την αιολική ενέργεια ξεκίνησε το 1970 όπου λόγω της πετρελαϊκής κρίσης αυξήθηκε ραγδαία το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. Στα μέσα της δεκαετίας του 90 υπήρχε εγκατεστημένη ισχύς 6000 MW εκ των οποίων τα 2000MW στην περιοχή της Καλιφόρνια των ΗΠΑ και 3500MW ήταν εγκαταστημένα στην Ευρώπη. Το 2003 η ισχύ που εγκαταστάθηκε ήταν 8133MW δηλαδή περισσότερη από την ισχύ που ήταν εγκατεστημένη το 1997 [Καλδέλλης, 2005]. Επίσης εγκατεστημένη ισχύ παρουσιάζει εκθετική μορφή τα τελευταία χρόνια (εικόνα 1.14).



Εικόνα 1.14: Εξέλιξη παγκόσμιας αιολικής ενέργειας



Εικόνα 1.15: Παγκόσμια ετήσια προσθήκη ισχύος

Σύμφωνα με τα παρακάτω στοιχεία το 2015 η Κίνα κατείχε την πρώτη θέση στην κατάταξη των χωρών με την μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από αιολική ενέργεια με 145362MW εγκατεστημένης αιολικής ισχύος καθώς επίσης και την πρώτη θέση στην κατάταξη με την νέα εγκατάσταση ισχύος με 30753MW δηλαδή περίπου το 50% της ισχύος που εγκαταστάθηκε σε όλο τον υπόλοιπο κόσμο την ίδια χρονιά. Αυτό δικαιολογείται και από το γεγονός ότι διαθέτει πολύ μεγάλο αιολικό δυναμικό και λόγω του τεράστιου πληθυσμού της χώρας έχει άμεση ανάγκη για την παραγωγή τεράστιων ποσοτήτων ηλεκτρικού ρεύματος. Στην δεύτερη θέση έρχονται οι ΗΠΑ και στις δύο κατατάξεις με 74471MW εγκατεστημένης ισχύος και 8598MW καινούργιας εγκατάστασης αιολικής ενέργειας (εικόνες 1.16-1.17).



Εικόνα 1.16: Κατάταξη εγκατεστημένης ισχύος αιολικής ενέργειας 2015

Εικόνα 1.17: Κατάταξη νέας εγκατάστασης ισχύος αιολικής ενέργειας 2015 Λόγω της εκθετικής του ανάπτυξης ο κλάδος της αιολικής ενέργειας είναι ένας πολλά υποσχόμενος κλάδος. Ακόμα και το 2009 που υπήρξε σημαντική παγκόσμια χρηματοπιστωτική κρίση ο κλάδος παρουσίασε εντυπωσιακούς ρυθμούς ανάπτυξης. Η αύξηση των κινήτρων για εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας από τα κράτη λόγω του περιορισμού στους εκπεμπόμενους ρύπους που τους επιβάλλεται αλλά και προς όφελος του περιβάλλοντος γενικότερα θα δημιουργήσει περαιτέρω τόνωση των επενδύσεων και του ρυθμού ανάπτυξης των οικονομιών αλλά και μία πιο βιώσιμη και περιβαλλοντικά αποδεκτή ανάπτυξη. Προς αυτή την κατεύθυνση κινείται και ο υποστηρικτικός ρόλος του Διεθνούς Οργανισμού Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (IRENA-International Renewable Energy Agency) που ιδρύθηκε τον Ιανουάριο του 2009. Ο οργανισμός αυτός απαριθμεί πάνω από 140 μέλη μέσα στα οποία είναι η Ελλάδα και βασικός σκοπός του είναι στην παγκόσμια ενημέρωση για τα πολλαπλά οφέλη από την χρήση των αποφάσεων για την κλιματική αλλαγή του οργανισμού των Ηνωμένων Εθνών και θα συνεισφέρει στην διάδοση της συσσωρευμένης τεχνογνωσίας.

Ο κλάδος της αιολικής ενέργειας αναμένεται να συνεχίσει να αναπτύσσεται εκθετικά και τα επόμενα χρόνια. Επίσης πλέον όλο και περισσότερα κράτη και κυβερνήσεις του αναπτυγμένου κόσμου που εκπέμπουν το μεγαλύτερο ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα έχουν αρχίσει να συνειδητοποιούν ότι θα πρέπει να βρεθούν νέοι τρόποι παραγωγής ενέργειας και να απεξαρτηθούν από τα ορυκτά καύσιμα. Ήδη σε μερικές περιοχές του πλανήτη όπως η Ανταρκτική έχουν αρχίσει να φαίνονται τα αποτελέσματα από την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη. Επίσης αιολική ενέργεια μπορεί να δώσει λύσεις και στον αναπτυσσόμενο κόσμο σε ορεινές περιοχές όπου εξαιτίας της υπανάπτυξης του δικτύου ηλεκτροδότησης δεν καλύπτει ολόκληρο τον πληθυσμό. Εκεί μπορεί να γίνει η χρήση αυτόνομων συστημάτων για την κάλυψη τον βασικών αναγκών των κατοίκων της περιοχής για κάποιες ώρες της ημέρας (εικόνα 1.18).



Εικόνα 1.18: Αυτόνομο σύστημα αιολικής ενέργεια σε απομακρυσμένη περιοχή

1.3.2 Εξέλιξη της αιολικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση η χρηματοδότηση για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας άρχισε μετά το 1985 καθυστερημένα σε σχέση με τις ΗΠΑ όπου αυτή την περίοδο είχε ήδη ανθίσει. Όμως τα επόμενα χρόνια με την Ευρωπαϊκή Ένωση να αλλάζει την ενεργειακή στρατηγική της γρήγορα άλλαξε αυτό. Καθοριστικό ρόλο έπαιξε και το Πρωτόκολλο του Κιότο το οποίο προβλέπει μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Για να το πετύχει αυτό η Ευρωπαϊκή Ένωση ενίσχυσε τα προγράμματα έρευνας και ανάπτυξης στους τομείς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τις επιδοτήσεις για εγκατάσταση σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Ο ρυθμός ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας ξεπέρασε και τα πιο αισιόδοξα σενάρια της Ευρωπαϊκής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας (EWEA). Έτσι η αιολική ενέργεια ξεπέρασε τόσο τον αρχικό στόχο για το 2000 των 4000MW όσο και τον αναθεωρημένο στόχο των 8000MW δεδομένου ότι στο τέλος του 2000 η εγκατεστημένη ισχύ έφτασε τα 13600MW. Αντίστοιχα ξεπεράστηκε και ο στόχος που ήταν για το 2010 τα 40000MW αφού η εγκατεστημένη ισχύ έφτασε από το 2004 κιόλας τα 47000MW. (εικόνα 1.19)

Στόχος της EWEA είναι το 2020 η εγκατεστημένη αιολική ισχύ να φτάσει τα 230000MW. Εάν επιτευχθεί ο στόχος αυτός τότε το 2020 το 15% περίπου της ηλεκτρικής ενέργειας θα προέρχεται από αιολικά πάρκα και το διοξείδιο του άνθρακα προβλέπεται να μειωθεί κατά 333000 τόνους το χρόνο. Επίσης θα υπάρξει εξοικονόμηση 28 εκατομμυρίων ευρώ το χρόνο από τη μη χρησιμοποίηση συμβατικών καυσίμων. Αντίστοιχα οι στόχοι για το 2030 είναι τα 400000MW εγκατεστημένης ισχύος με το 30% περίπου της ηλεκτρικής ενέργειας να προέρχεται από την αιολική ενέργεια και μείωση του διοξειδίου του άνθρακα κατά 600000 τόνους το χρόνο. Σύμφωνα με αυτή την πρόβλεψη θα εξοικονομούνται 56 εκατομμύρια ευρώ το χρόνο από τα συμβατικά καύσιμα



Εικόνα 1.19 Χρονική εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος στην Ευρωπαϊκή Ένωση και πρόβλεψη για το μέλλον

Διερεύνηση Ευστάθειας Κυλινδρικών Κελυφών με και χωρίς Οπή

FIGURE 9: ANNUAL WIND POWER INSTALLATIONS IN EU (GW)



Εικόνα 1.20: Ετήσια εγκατάσταση αιολικής ισχύος στην Ευρωπαϊκή Ένωση



Εικόνα 1.21: Ποσοστό ισχύος κρατών της Ευρωπαϊκής Ένωσης

1.3.3 Εξέλιξη αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα οι πρώτες προσπάθειες για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας ξεκίνησαν από τη ΔΕΗ το 1980 με την εγκατάσταση αιολικού πάρκου στην Κύθνο. Μετά το 1990 ο ρυθμός ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας επιταχύνθηκε και με το N2294/94, ο οποίος επιτρέπει την κατασκευή αιολικού πάρκου από ιδιώτες και εταιρίες με σκοπό την πώληση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην ΔΕΗ. Βέβαια παρά το επενδυτικό ενδιαφέρον που έχει εκδηλωθεί κατά καιρούς, η χώρα μας δεν επιβεβαίωσε τις προβλέψεις για το 2010 όπου ο στόχος ήταν τα 3500MW αλλά η εγκατεστημένη ισχύ έφτασε μόλις τα 1350MW (εικόνα 1.22). Σημαντικό ρόλο σε αυτό έπαιξε η βαθιά οικονομική ύφεση της οικονομίας της χώρας και το συνεχώς μεταβαλλόμενη φορολογική πολιτική που οδηγεί σε επενδύσεις μεγάλου ρίσκου. Πρόβλημα υπήρχε επίσης και με την γραφειοκρατία που έκανε περίπλοκη την χορήγηση τέτοιου είδους αδειών. Ευτυχώς τα πρόβλημα αυτό επιλύθηκε πρώτα με το Ν 3468/2006 ο οποίος απλοποίησε κατά ένα μέρος τον τρόπο λήψης άδειας παραγωγής και έπειτα με τον Ν 3851/2010 ο οποίος επιταχύνει σημαντικά την αδειοδοτική διαδικασία. Τα τελευταία χρόνια έχουν δρομολογηθεί και επεκτάσεις του δικτύου ένα έργο που αναμένεται να διευκολύνει μακροπρόθεσμα την γρήγορη εισαγωγή έργων αιολικής ενέργειας στο δίκτυο. Επίσης προβλήματα κατά την εγκατάσταση αιολικών πάρκων μπορεί να εκδηλωθούν από κοινωνικές ομάδες για την οπτική όχληση πράγμα δύσκολο να αντιμετωπιστεί καθώς το αν αρέσει ή αν δεν αρέσει σε κάποιον η εικόνα μιας ανεμογεννήτριας είναι πράγμα υποκειμενικό.

Μεγάλο μέρος αιολικού δυναμικού της Ελλάδας βρίσκεται στα νησιά. Το πρόβλημα είναι ότι πολλά από αυτά δεν είναι διασυνδεμένα στο εθνικό δίκτυο ώστε να υπάρχει απορρόφηση παραγόμενης ενέργειας την περίοδο χαμηλής ζήτησης, δηλαδή έξω από την τουριστική περίοδο.



Εικόνα 1.22 Εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ελλάδα

Διερεύνηση Ευστάθειας Κυλινδρικών Κελυφών με και χωρίς Οπή

1.3.4 Η εξέλιξη της αιολικής ενέργειας στη Δανία

Η Δανία αποτελεί ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα της εκμετάλλευσης του αρκετά μεγάλου αιολικού δυναμικού που διαθέτει. Οι προσπάθειες εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας άρχισε από τις αρχές του 20°υ αιώνα όταν εγκαταστάθηκαν οι πρώτες ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος μέχρι 25KW σχεδιασμένες από τον καθηγητή LaCour για την παραγωγή ρεύματος. Την περίοδο 1955-1970 υπήρξε μία μικρή μείωση στην εγκατάσταση μονάδων αιολικής ενέργειας εξαιτίας της πολύ χαμηλής τιμής του πετρελαίου. Έπειτα από αυτό το γεγονός η κυβέρνηση της Δανίας κατάλαβε την τεράστια εξάρτηση της από τα ορυκτά καύσιμα και εξέλιξη την βιομηχανία κατασκευής αιολικών συστημάτων. Έτσι, το 1980 κατασκευάστηκαν 2 μεγάλες μηχανές πρώτα των 630KW και έπειτα των 2MW [Κανδέλης, 2005]. Σημαντικό στην ραγδαία ανάπτυξη αυτής της βιομηχανίας έπαιξε και η νομοθεσία που θεσπίστηκε, η οποία προβλέπει επιδότηση μέχρι 30% του κόστους εγκατάστασης και διασύνδεση με το δίκτυο, φορολογικές απαλλαγές τα πρώτα πέντε χρόνια λειτουργίας της εγκατάστασης και αγορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τις κρατικές εταιρείες διαχείρισης του δικτύου σε ευνοϊκές τιμές.

Αποτέλεσμα όλων αυτών των μέτρων είναι ότι τα τελευταία χρόνια η Δανία παράγει μεγάλο μέρος της παραγόμενη ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά συστήματα με αποκορύφωμα το 2015 όπου το 42% του ρεύματος που καταναλώθηκε στη χώρα προήλθε από ανεμογεννήτριες καθιστώντας την Δανία παγκόσμιο ηγέτη στον τομέα της αιολικής ενέργειας. Μάλιστα μόνο για τον μήνα Ιανουάριο του 2015 το ποσοστό αυτό ξεπέρασε το 60%. Το 16% του χρόνου όπου πνέουν ισχυροί άνεμοι παράγεται πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο μέσω των διασυνδέσεων πωλείται σε γειτονικές χώρες. Με βάση τα στοιχεία αυτά η Δανία βρίσκεται εντός χρονοδιαγράμματος ώστε να πετύχει το στόχο που έχει τεθεί για το 2020 που ορίζει ότι το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας πρέπει να φτάσει το 50%. Παράλληλα, η Δανία βρίσκεται σε καλή θέση προκειμένου να εκπληρώσει τους στόχους που τέθηκαν από την συμφωνία του Παρισιού για την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 40% έως το 2030 σε σχέση με τα επίπεδα του 1990.

Τέλος είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι στις ακτές της Γιουτλάνδης της Δανίας κατασκευάζεται το θαλάσσιο αιολικό πάρκο Horns Rev 3 του οποίου η τιμή της κιλοβατώρας αναμένεται να κοστίζει μόνο 10,31 λεπτά. Συγκριτικά τα φθηνότερα αιολικά πάρκα της Βρετανίας παράγουν ενέργεια έναντι 15,3 λεπτών. Σύμφωνα με το υπουργείο Ενέργειας της Δανίας η χαμηλή τιμή του εν λόγω αιολικού πάρκου αναμένεται να εξοικονομήσει στους καταναλωτές της χώρας 295 εκατομμύρια ευρώ μέσα στα επόμενα 11-12 χρόνια. Το γεγονός αυτό δείχνει πόσο ανταγωνιστικά μπορούν να γίνουν τέτοιου είδους συστήματα στην ελεύθερη αγορά παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση και με τις συμβατικές μορφές ηλεκτροπαραγωγής.



Εικόνα 1.23: Χρονική εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος στη Δανία [4]



Εικόνα 1.24:Ποσοστό ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ της Δανία

Διερεύνηση Ευστάθειας Κυλινδρικών Κελυφών με και χωρίς Οπή

2 Αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού της αντοχής κελυφών

2.1 Εισαγωγή

Είναι γνωστό ότι στις κατασκευές γενικά χρησιμοποιούνται λυγηρά μέλη εφόσον το επιτρέπουν τα υλικά κάτι το οποίο οδηγεί σε μέλη με λεπτότοιχες διατομές. Το γεγονός αυτό μεγεθύνεται στις μεταλλικές κατασκευές λόγω της υψηλής αντοχής του χάλυβα. Είναι επομένως αναγκαίο να χρησιμοποιούνται κάποιες μεθοδολογίες έτσι ώστε να μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια η ποσότητα υλικού που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί και να μην οδηγούμαστε σε υπερδιαστασιολόγηση. Πιο συγκεκριμένα στα κελύφη λόγω των λεπτότοιχων τοιχωμάτων τους είναι αναγκαίο να λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα δευτέρας τάξεως δηλαδή τον καθολικό και τον τοπικό λυγισμό. Όμως τα φαινόμενα αυτά είναι αρκετά δύσκολο να αναλυθούν με αναλυτικό τρόπο για αυτό και αναπτύχθηκαν αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού οι οποίες μπορούν να προγραμματιστούν και να εκτελεστούν από το ηλεκτρονικό υπολογιστή ο οποίος μπορεί να εκτελέσει ταχύτατα διεργασίες που επαναλαμβάνονται. Επίσης όταν κατά την εκδήλωση του λυγισμού το υλικό έχει ήδη φτάσει στο όριο διαρροής του (πλαστικός λυγισμός) τότε είναι αναγκαίο να χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι που λαμβάνουν υπόψη και την ανελαστική φύση του υλικού.

Η πιο απλή και διαδεδομένη μέθοδος ανάλυσης η οποία μπορεί να λάβει υπόψη της μη γραμμικότητες γεωμετρίας αλλά και υλικού είναι η μέθοδος Newton-Raphson. Η μέθοδος αυτή μπορεί να δώσει μόνο τον ανοδικό κλάδο του δρόμου ισορροπίας της κατασκευής. Για να ξεπεραστεί αυτό το μειονέκτημα και να μελετηθεί η συμπεριφορά της κατασκευή και μετά το οριακό σημείο, έχουν επινοηθεί οι αλγόριθμοι με περιορισμό στο μήκους τόξου (arc-length method) στους οποίους εισάγεται ένας συντελεστής φόρτισης ο οποίος μπορεί να αυξάνει ή να μειώνεται έτσι ώστε να πετυχαίνεται η υπερπήδηση του οριακού σημείου και να είναι σε θέση ο αλγόριθμος να υπολογίζει και τον καθοδικό κλάδο της κατασκευής. Όμως και αυτές οι μέθοδοι έχουν το μειονέκτημα ότι δεν μπορούν να υπολογίσουν με ακρίβεια το δρόμο ισορροπίας γύρω από σημεία διακλάδωσης τα οποία μπορεί να είναι είτε πριν είτε μετά το οριακό σημείο. Αν και έχουν προταθεί κατά καιρούς διάφοροι τρόποι άμεσου υπολογισμού των σημείων διακλάδωσης που λαμβάνουν υπόψη εκτός από τις μη γραμμικές εξισώσεις ισορροπίας και τις διάφορες συνθήκες ευστάθειας, το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί απλούστερα με την εισαγωγή μια μικρής γεωμετρικής ατέλειας στο φορέα μετατρέποντας έτσι το πρόβλημα σημείου διακλάδωσης σε πρόβλημα εύρεσης οριακού σημείο. Με αυτόν τον τρόπο υλοποιούνται και στα περισσότερα εμπορικά προγράμματα τέτοιου τύπου αλγόριθμοι και για το λόγο αυτό ζητείται στην έναρξη της εκτέλεσης της ανάλυσης να δοθεί μία μικρή γεωμετρική ατέλεια.



Μετατόπιση

Εικόνα 2.1: Δρόμος ισορροπίας με σημείο διακλάδωσης και με οριακό σημείο

2.2 Διατύπωση εξισώσεων πεπερασμένων στοιχείων

2.2.1 Γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία

Για την διατύπωση της εξίσωσης ισορροπίας του φορέα χρησιμοποιείται η αρχή των δυνατών έργων. Με την υπόθεση των μικρών μετατοπίσεων πράγμα το οποίο σημαίνει ότι οι εξισώσεις μπορούν να διατυπωθούν στον απαραμόρφωτο φορέα και ότι το υλικό είναι γραμμικώς ελαστικό η αρχή των δυνατών έργων διατυπώνεται ως εξής: Όταν ένας φορέας φορτίζεται με εξωτερικά φορτία και ισορροπεί, τότε για οποιαδήποτε «μικρή» δυνατή παραμόρφωση του φορέα, συμβιβαστή με τις συνθήκες στηρίξεως του, το δυνατό έργο των εσωτερικών δυνάμεων ισούται με το δυνατό έργο των εξωτερικών δυνάμεων.

$$\int_{V} \overline{\varepsilon} \sigma dV = \int_{V} \overline{U} f^{V} dV + \int_{V} \overline{U^{s}} f^{s} dS + \overline{D} R_{c}, \qquad (2.1)$$

Όπου \overline{e} οι δυνατές ανηγμένες παραμορφώσεις, σ οι τάσεις, \overline{U} οι δυνατές μετατοπίσεις f^V οι εξωτερικές μαζικές δυνάμεις, οι δυνατές μετατοπίσεις στην επιφάνεια επιβολής των επιφανειακών δυνάμεων f^S , οι δυνατές επικόμβιες μετατοπίσεις και R_C οι επικόμβιες δράσεις [Παπαδρακάκης, 2001]. Με την διακριτοποίηση της κατασκευής σε πεπερασμένα στοιχεία προκύπτει το εξής σύστημα γραμμικών εξισώσεων:

$$KU = R, (2.2)$$

όπου K το γραμμικό μητρώο δυσκαμψίας, U το διάνυσμα των γενικευμένων μετατοπίσεων και R το διάνυσμα των επικόμβιων δράσεων.

2.2.2 Μη γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία

Στη μη γραμμική ανάλυση η ισορροπία του σώματος εκφράζεται στην παραμορφωμένη του θέση. Είναι αναγκαίο λοιπόν να υιοθετηθεί μία χρονική μεταβλητή που να περιγράφει τη φόρτιση στη συγκεκριμένη στιγμή. Έτσι με τη μη γραμμική ανάλυση υπολογίζεται η θέση ισορροπίας του φορέας σε διακριτές χρονικές στιγμές 0, Δt, 2Δt, 3Δt, ... όπου Δt είναι το χρονικό βήμα. Με δεδομένες ότι έχουν υπολογιστεί όλες οι στατικές και κινηματικές συνθήκες στο χρόνο t τότε ζητείται να βρεθεί η νέα θέση ισορροπίας στο χρόνο t+Δt. Σύμφωνα με τη διατύπωση του προβλήματος Lagrange, ακολουθείται η κίνηση όλων των τμημάτων του σώματος από την αρχική στην τελική του θέση. Η διατύπωση Lagrange μπορεί να πάρει δύο μορφές, την Ολική Διατύπωση και την Επαυξητική Διατύπωση

Στην ολική διατύπωση κατά Lagrange η αρχή των δυνατών έργων παίρνει την μορφή:

$$\int_{V}^{t+\Delta t} S_{ij} \delta^{t+\Delta t}_{0} \varepsilon_{ij} d^0 V = {}^{t+\Delta t} R , \qquad (2.3)$$

όπου ${}^{t+\Delta t}_{0}S_{ij}$ είναι ο δεύτερος τανυστής τάσεων Piola-Kirchoff ο οποίος αφορά τη θέση ισορροπίας στη χρονική στιγμή t+ Δt και εκφράζεται ως προς την αρχική θέση ισορροπίας 0 και ισχύει

$${}^{t+\Delta t}_{0}S_{ij} = \frac{{}^{0}\rho}{{}^{t+\Delta t}\rho} {}^{0}x_{i,m} {}^{t+\Delta t}\tau_{mn} {}^{t+\Delta t}x_{j,n}, \qquad (2.4)$$

 $\delta^{t+\Delta t}_{0} \varepsilon_{ij}$ είναι η μεταβολή του τανυστή παραμορφώσεων Green-Lagrange ο οποίος αφορά τη θέση ισορροπίας στη χρονική στιγμή t+ Δt και εκφράζεται ως προς την αρχική θέση ισορροπίας 0 και ισχύει

$$\delta^{t+\Delta t}_{\ 0} \varepsilon_{ij} = \delta \frac{1}{2} \left({}^{t+\Delta t}_{\ 0} u_{i,j} + {}^{t+\Delta t}_{\ 0} u_{j,i} + {}^{t+\Delta t}_{\ 0} u_{k,i} + {}^{t+\Delta t}_{\ 0} u_{k,j} \right),$$
(2.5)

⁰V είναι ο όγκος του σώματος στο χρόνο 0 και $t^{t+\Delta t}R$ είναι το διάνυσμα των εξωτερικών δράσεων στο χρόνο t+Δt. Στην εξίσωση (2.3) $t^{t+\Delta t}\rho$ είναι η πυκνότητα του σώματος στο χρόνο t+Δt, $t^{t+\Delta t}\tau_{mn}$ είναι οι καρτεσιανές συνιστώσες του τανυστή τάσεων Cauchy στην

παραμορφωμένη γεωμετρία στο χρόνο t+Δt και ${}^{i+\Delta t}_{0}u_i$ είναι οι συνιστώσες του διανύσματος μετατοπίσεων στη θέσεων ισορροπίας κατά το χρόνο t+Δt. Σε κάθε μία από της παραπάνω μεταβλητές ο αριστερός εκθέτης δείχνει σε ποια θέση ισορροπίας εμφανίζεται η ποσότητα και ο αριστερός δείκτης δείχνει τη θέση ισορροπίας στην οποία μετρείται η ποσότητα στην ολική διατύπωση ο αριστερός δείκτης είναι ίσος με 0. Το κόμμα στο δεξιό δείκτη σημαίνει παραγώγιση ως προς αυτή την συντεταγμένη.

Στην Επαυξητική διατύπωση κατά Lagrange η αρχή των δυνατών έργων παίρνει την μορφή:

$$\int_{V}^{t+\Delta t} S_{ij} \delta^{t+\Delta t} \varepsilon_{ij} d^{t} V = {}^{t+\Delta t} R , \qquad (2.6)$$

Για την γραμμικοποίηση της παραπάνω εξίσωσης θα πρέπει να γίνει επαυξητική ανάλυση των τάσεων και των παραμορφώσεων. Ο τάσεις Piola-Kirchhoff δεύτερης τάξης αναλύονται σε:

$${}^{t+\Delta t}_{0}S_{ij} = {}^{t}_{0}S_{ij} + {}_{0}S_{ij}, \qquad (2.7)$$

όπου ${}_{0}^{t}S_{ij}$ είναι οι συνιστώσες των επαυξητικών τάσεων Piola-Kirchhoff δεύτερης τάξης. Αντίστοιχα και οι παραμορφώσεις Green-Lagrange μπορούν να αναλυθούν σε:

$${}^{t+\Delta t}_{0}\mathcal{E}_{ij} = {}^{t}_{0}\mathcal{E}_{ij} + {}_{0}\mathcal{E}_{ij}, \qquad (2.8)$$

$$\mu \varepsilon_{0} \varepsilon_{ij} = {}_{0} e_{ij} + {}_{0} n_{ij}, \qquad (2.9)$$

όπου
$$_{0}e_{ij} = \frac{1}{2} (_{0}u_{i,j} + _{0}u_{j,i} + _{0}^{t}u_{k,i} _{0}u_{k,j} + _{0}u_{k,i} _{0}^{t}u_{k,j}),$$
 (2.10)

και ₀
$$n_{ij} = \frac{1}{2} u_{k,i\,0} u_{k,j},$$
 (2.11)

όπου ${}_{0}^{t} \varepsilon_{ij}$ είναι οι συνιστώσες των επαυξητικών παραμορφώσεων Green-Lagrange. Λαμβάνοντας υπόψη την επαυξητική ανάλυση των τάσεων και των παραμορφώσεων και την σχέση $\delta^{t+\Delta t}_{0} \varepsilon_{ij} = \delta_{0} \varepsilon_{ij}$ οι εξισώσεις ισορροπίας μπορούν να γραφούν:

$$\int_{{}^{0}V} S_{ij} \delta_{0} \varepsilon_{ij} d^{0}V + \int_{{}^{0}V} S_{ij} \delta_{0} n_{ij} d^{0}V = {}^{t+\Delta t}R - \int_{{}^{0}V} S_{ij} \delta_{0} e_{ij} d^{0}V, \qquad (2.12)$$

Χρησιμοποιώντας τις προσεγγιστικές σχέσεις ${}_{0}S_{ij} = {}_{0}C_{ijrs\ 0}e_{rs}$ και $\delta_{0}\varepsilon_{ij} = \delta_{0}e_{ij}$ προκύπτει η ακόλουθη προσεγγιστική εξίσωση ισορροπίας:

$$\int_{{}^{0}V} C_{ijrs\ 0} e_{rs} \delta_{0} e_{ij} d^{0}V + \int_{{}^{0}V} S_{ij} \delta_{0} n_{ij} d^{0}V = {}^{t+\Delta t}R - \int_{{}^{0}V} S_{ij} \delta_{0} e_{ij} d^{0}V, \qquad (2.13)$$

όπου ₀C_{ijrs} είναι ο επαυξητικός τανυστής τάσεων παραμορφώσεων στο χρόνο t ως προς τη θέση ισορροπίας 0. Και σε μητρωϊκή μορφή η παραπάνω εξίσωση γράφεται:

$$\binom{t}{0}K_{0} + \binom{t}{0}K_{u} + \binom{t}{0}K_{g}U = {}^{t+\Delta t}R - \binom{t}{0}F, \qquad (2.14)$$

όπου ${}_{0}^{t}K_{0}$ το γραμμικό ελαστικό μητρώο, ${}_{0}^{t}K_{u}$ το μητρώο αρχικών μετατοπίσεων, ${}_{0}^{t}K_{g}$ το αρχικών τάσεων και ${}_{0}^{t}F$ το διάνυσμα των εσωτερικών δράσεων της θέσης ισορροπίας t.

2.3 Επίλυση μη γραμμικών εξισώσεων ισορροπίας

Στην μη γραμμική ανάλυση όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, τα εξωτερικά φορτία είναι συναρτήση του χρόνου. Η εξίσωση ισορροπίας μπορεί είναι

$${}^{t}R - {}^{t}F = 0, (2.15)$$

Όπου ${}^{t}R$ είναι το διάνυσμα με τις εξωτερικές επικόμβιες δράσεις στο χρόνο t και ${}^{t}F$ το διάνυσμα με των εσωτερικών δυνάμεων που αντιστοιχούν στις τάσεις στην παραμορφωμένη κατάσταση.

Επειδή στην μη γραμμική ανάλυση τα φορτία επιβάλλονται σταδιακά στο φορέα για αυτό και η επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας θα πρέπει να επιλύονται σε κάθε χρονική στιγμή t και έπειτα να επιδιώκεται η λύση στο χρόνο t + Δt. Επομένως η εξίσωση (2.15) για την χρονική στιγμή t+Δt γράφεται

$$^{t+\Delta t}R^{-t+\Delta t}F = 0 \tag{2.16}$$

Έστω ότι το διάνυσμα ${}^{t+\Delta t}\!R$ είναι ανεξάρτητο από τις παραμορφώσεις. Με γνωστό το διάνυσμα ${}^{t}\!F$ τότε

$$^{t+\Delta t}F = {}^{t}F + F, \qquad (2.17)$$

όπου F είναι η επαύξηση του διανύσματος των εσωτερικών δυνάμεων που αντιστοιχούν στην επαύξηση των μετατοπίσεων και των τάσεων από το χρόνο t στο χρόνο $t+\Delta t$. Τ ο διάνυσμα αυτό μπορεί να υπολογιστεί από το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας ^tK το οποίο αντιστοιχεί στις γεωμετρικές συνθήκες και στις συνθήκες του υλικού στο χρόνο t

$$F = {}^{t}KU , \qquad (2.18)$$

όπου U είναι ένα διάνυσμα επαυξητικών επικόμβιων μετατοπίσεων και

$${}^{t}K = \frac{\partial^{t}F}{\partial^{t}U}, \qquad (2.19)$$

δηλαδή το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας είναι η παράγωγος των εσωτερικών επικόμβιων δυνάμεων ^tF προς τις επικόμβιες μετατοπίσεις ^tU. Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (2.17) και (2.18) στην εξίσωση (2.16)

$$^{t}KU = ^{t+\Delta t}R - ^{t}F, \qquad (2.20)$$

και επιλύοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς U, μπορεί να υπολογιστούν προσεγγιστικά οι μετατοπίσεις στο χρόνο t+ Δt

$$^{t+\Delta t}U = {}^{t}U + U , \qquad (2.21)$$

Η παραπάνω εξίσωση υπολογίζει προσεγγιστικά τις μετατοπίσεις με τη χρήση της εξίσωσης (2.18). Οι ακριβείς μετατοπίσεις στο χρόνο t+Δt είναι εκείνες που αντιστοιχούν στα εφαρμοζόμενα εξωτερικά φορτία ^tR.

Έτσι έχοντας υπολογίσει μία προσέγγιση των μετατοπίσεων του χρόνου t+Δt μπορούν να βρεθούν προσεγγιστικά οι τάσεις και οι αντίστοιχες εσωτερικές επικόμβιες δράσεις στο χρόνο t+Δt και συνεχίζοντας αυτή την επαναληπτική διαδικασία για κάθε χρονικό βήμα Δt βρίσκονται τα αντίστοιχα μεγέθη στον αντίστοιχο χρόνο. Όμως με την παραδοχή της εξίσωσης (2.18) μπορούν να προκύψουν σημαντικά σφάλματα και το αποτέλεσμα να είναι εντελώς λάθος. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα γίνεται μία επαναληπτική διαδικασία για κάθε χρονικό βήμα Δt μέχρι η εξίσωση (2.16) να λύνεται με ένα αποδεκτό μέγεθος σφάλματος

$$\left\|^{t+\Delta t} R^{-t+\Delta t} F\right\| \le \left\|e\right\| \tag{2.22}$$

Όπου το *e* είναι η ανοχή του σφάλματος της εξίσωσης και συνήθως είναι ένας αρκετά μικρός αριθμός

2.3.1 Ο αλγόριθμος Newton-Raphson

Η γνωστή και διαδεδομένη μέθοδος επίλυσης των μη γραμμικών εξισώσεων ισορροπίας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι η πλήρης Newton-Raphson (σχήμα 2.2).



Εικόνα 2.2: Η πλήρης Newton-Raphson και μεγέθυνση στο βήμα Δt

Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή σε κάθε επανάληψη υπολογίζεται το ΔU από την σχέση

$${}^{t+\Delta t}K^{(i-1)}\Delta U^{(i)} = {}^{t+\Delta t}R - {}^{t+\Delta t}F^{(i-1)}$$
(2.23)

όπου ${}^{t+\Delta t}K^{(i-1)}$ είναι το τρέχον εφαπτομενικό μητρώο της κατασκευής και υπολογίζεται από την σχέση

$$^{t+\Delta t}K^{(i-1)} = \left[\frac{\partial F}{\partial U}\right]_{t+\Delta t}$$
(2.24)

Ενώ το νέο μητρώο των μετατοπίσεων ισούται με

$${}^{t+\Delta t}U^{(i)} = {}^{t+\Delta t}U^{(i-1)} + \Delta U^{(i)}$$
(2.25)

και χρησιμοποιείται για την επόμενη επανάληψη

Οι εξισώσεις (2.23) και (2.25) αποτελούν τα βασικά βήματα της επίλυσης της μεθόδου full Newton-Raphson. Η επίλυση γίνεται επαναληπτικά με βήμα Δt, και οι αρχικές συνθήκες είναι ^{t+Δt}K⁽⁰⁾ = ^tK, ^{t+Δt}U⁽⁰⁾ = ^tU, ^{t+Δt}F⁽⁰⁾ = ^tF. Σε κάθε βήμα Δt γίνεται η ίδια επαναληπτική διαδικασία μέχρι να ικανοποιηθούν τα κατάλληλα κριτήρια σύγκλισης. Τα βασικότερα κριτήρια σύγκλισης είναι

1. Κριτήριο ενέργειας

$$\Delta U^{(i)^{\mathrm{T}}}({}^{t+\Delta t}R - {}^{t+\Delta t}F^{(i-1)}) \le \varepsilon_{E}(\Delta U^{(1)^{\mathrm{T}}}({}^{t+\Delta t}R - {}^{t}F))$$
(2.26)

2. Κριτήριο δυνάμεων

$$\left\|^{t+\Delta t} R^{-t+\Delta t} F^{(i)}\right\| \le \varepsilon_F \left\|^{t+\Delta t} R^{-t} F\right\|$$
(2.27)

3. Κριτήριο μετατοπίσεων

$$\frac{\left\|\Delta U^{(i)}\right\|}{\left\|^{t+\Delta t}U\right\|} \le \varepsilon_D \tag{2.28}$$

Οι σταθερές $\varepsilon_D \varepsilon_F$ και ε_E στα παραπάνω κριτήρια είναι οι ανοχές σύγκλισης και επιλέγονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να πετυχαίνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα ακρίβειας σε σχέση με την τέλεια λύση αλλά και να πραγματοποιείται η μεγαλύτερη δυνατή οικονομία χρόνου εύρεσης της λύσης. Είναι γνωστό ότι εύρεση της ακριβούς λύσης στο πρόβλημα είναι αδύνατο να βρεθεί με τις αριθμητικές μεθόδους (πρέπει να γίνει άπειρος αριθμός επαναλήψεων). Συνήθως τα εμπορικά προγράμματα χρησιμοποιούν το κριτήριο σύγκλησης της ενέργειας.

Το πιο χρονοβόρο μέρος σε κάθε επανάληψη της μεθόδου Newton-Raphson αποτελεί ο υπολογισμός και η παραγοντοποίηση του εφαπτομενικού μητρώου δυσκαμψίας. Ειδικότερα στα συστήματα μεγάλης τάξης οι υπολογισμοί αυτοί μπορεί να γίνουν πολύ χρονοβόροι ακόμα για τους σύγχρονους υπολογιστή οι οποίοι πραγματοποιούν πράξεις με τρομερά μεγάλη ταχύτητα. Για τον λόγο αυτό επινοήθηκε μία τροποποιημένη μορφή της πλήρους Newton-Raphson η οποία ονομάζεται απλά «τροποποιημένη» Newton-Raphson (modified Newton-Raphson) [Bathe, 1996]. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή το σύστημα που πρέπει να λυθεί είναι

$$^{\tau}K\Delta U^{(i)} = {}^{t+\Delta t}R - {}^{t+\Delta t}F^{(i-1)}$$

$$(2.29)$$

Όπου τ αντιστοιχεί σε μία από τις αποδεκτές θέσεις ισορροπίας στους χρόνους 0, Δt, 2Δt... Οι αρχικές συνθήκες είναι $t+\Delta t F^{(0)}=tF$, $t+\Delta t U^{(0)}=tU$. Η «τροποποιημένη» μέθοδος Newton-Raphson απαιτεί λιγότερους υπολογισμούς του εφαπτομενικού μητρώου δυσκαμψίας από ότι η πλήρης Newton-Raphson.

Γενικότερα η τροποποιημένη μέθοδος Newton-Raphson μπορεί να δώσει πολύ γρήγορα και αποτελεσματικά το οριακό φορτίο ειδικά όταν ο δρόμος ισορροπία έχει μεγάλο τμημα στο οποίο είναι γραμμικός. Αποτελεί μία βελτίωση της παλαιότερης μεθόδου Full Newton-Raphson.


Εικόνα 2.3:Η «τροποποιημένη» Newton-Raphson και μεγέθυνση στο τρέχον βήμα.

2.3.2 Ο αλγόριθμος Collapse του ADINA

Η μέθοδος του μήκους τόξου (arc-length method) στο ADINA υλοποιείται με τον αλγόριθμο Collapse. Οι αλγόριθμοι μήκους τόξου έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να υπερπηδήσουν το οριακό σημείο και να υπολογίσουν και το καθοδικό μέρος του δρόμου ισορροπίας της κατασκευής. Η εκτέλεση τέτοιου είδους αναλύσεων έχει μεγάλη σημασία για την κατανόηση της συμπεριφοράς της κατασκευής, ιδιαίτερα στα κελύφη αλλά και γενικά στις λεπτότοιχες διατομές όπου τα φαινόμενα τοπικού λυγισμού είναι πολύ συχνά. Η κλίση του μεταλυγισμικού κλάδου μπορεί να δώσει σημαντικά στοιχεία για τον τρόπο αστοχίας αλλά για την συμπεριφορά της κατασκευής σε προχωρημένες θέσεις του μεταλυγισμικού κλάδου όπου θα έχουν αναπτυχθεί σημαντικές μετακινήσεις στην κατασκευή.



Εικόνα 2.4: Μη γραμμικός δρόμος ισορροπίας με ασταθές οριακό σημείο (Snap-Back)

Διερεύνηση Ευστάθειας Κυλινδρικών Κελυφών με και χωρίς Οπή

36

Έστω ότι η κατασκευή υποβάλλεται σε ένα φορτίο αναφοράς R το οποίο αυξάνεται στο βήμα t+Δt σε φορτίο ^{t+Δt}λR όπου ^{t+Δt}λ είναι ένας συντελεστής φορτίου που ρυθμίζει το μέγεθος του φορτίου. Τότε η εξίσωση (2.23) παίρνει την μορφή

$${}^{\tau}K^{(i-1)}\Delta U^{(i)} = {}^{t+\Delta t}\lambda R - {}^{t+\Delta t}F^{(i-1)}$$
(2.30)

Ένα βασικό στοιχείο της μεθόδου αποτελεί η αυτόματη επιλογή του συντελεστή λ. Επειδή ο συγκεκριμένος συντελεστής πρέπει να διορθώνεται σε κάθε επανάληψη, η παραπάνω εξίσωση παίρνει την μορφή

$${}^{\tau}K^{(i-1)}\Delta U^{(i)} = ({}^{t+\Delta t}\lambda^{(i-1)} + \Delta\lambda^{(i)})R - {}^{t+\Delta t}F^{(i-1)}$$
(2.31)

Όμως για την εύρεση της μεταβολής του συντελεστή Δλ⁽ⁱ⁾ χρησιμοποιείται μία εξίσωση της μορφής

$$f(\Delta \lambda^{(i)}, \Delta U^{(i)}) = 0 \tag{2.32}$$

η οποία μπορεί να πάρει πολλές μορφές. Για τις περιοχές μακριά από το οριακό σημείο χρησιμοποιείται η τεχνική του σταθερού σφαιρικού τόξου. Η εξίσωση αυτή είναι

$$\left[\left(t+\Delta t \lambda^{(i-1)}-t \lambda\right)+\Delta \lambda^{(i)}\right]^2+U^{(i)\mathsf{T}}U^{(i)}=\Delta l^2, \qquad (2.33)$$

$$U^{(i)} = {}^{t+\Delta t} U^{(i)} - {}^{t} U , \qquad (2.34)$$

όπου Δl είναι το μήκος σφαιρικού τόξου. Κοντά στα οριακά σημεία χρησιμοποιείται η μέθοδος της επαύξησης του εξωτερικού έργου. Σε αυτή την περίπτωση η εξίσωση (2.32) για την πρώτη επανάληψη παίρνει την μορφή

$$\left({}^{t}\lambda^{(i-1)} + \frac{1}{2}\Delta\lambda^{(i)}\right)R^{\mathrm{T}}\Delta U^{(i)} = W, \qquad (2.35)$$

και για τις επόμενες

$$\left({}^{t+\Delta t}\lambda^{(i-1)} + \frac{1}{2}\Delta\lambda^{(i)}\right) R^{\mathrm{T}}\Delta U^{(i)} = 0, \qquad (2.36)$$

όπου W είναι το εξωτερικό έργο για το συγκεκριμένο βήμα (θετικό ή αρνητικό). Πριν την έναρξη της ανάλυση θα πρέπει να δοθούν από το χρήστη τρία δεδομένα:

- 1. το φορτίο αναφοράς R
- μία μετακίνηση σε ένα κόμβο ^{Δt}U_k η οποία αντιστοιχεί στο πρώτο βήμα της επανάληψης. Η μετακίνηση αυτή θα πρέπει να συμφωνεί με την αναμενόμενη παραμόρφωση και τις δοθείσες αρχικές ατέλειες και συνήθως παίρνει πολύ μικρές τιμές
- Μία σταθερά α με την οποία επιβάλλεται ο περιορισμός στο μέγεθος της μεταβολής του φορτίου ανά βήμα και ισχύει η σχέση

$$\|U\| \le \alpha \|^{\Delta t} U\| \tag{2.37}$$

όπου U είναι οι μετατοπίσεις σε κάθε βήμα και ^{Δt}U οι μετατοπίσεις στο χρόνο Δt. Όσο πιο μικρή είναι η σταθερά α τόσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα των σημείων πάνω στο δρόμο ισορροπίας που υπολογίζονται από το πρόγραμμα. Συνήθως παίρνει τιμές από 1,5 έως 15.

Για την εύρεση της θέσης ισορροπίας στο χρόνο Δt πρέπει να ισχύουν οι εξισώσεις

$${}^{0}K\Delta U^{(i)} = ({}^{\Delta t}\lambda^{(i-1)} + \Delta\lambda^{(i)})R - {}^{\Delta t}F^{(i-1)}$$
(2.38)

όπου για την πρώτη επανάληψη ισχύει

$${}^{\Delta t}\lambda^{(0)} = 0$$
(2.39)
 ${}^{\Delta t}F^{(0)} = 0$

Για i=1 από την εξίσωση (2.38) για τις παραπάνω αρχικές συνθήκες

$${}^{0}K\Delta U^{(1)} = R$$

$${}^{\Delta t}\lambda^{(1)} = \frac{{}^{\Delta t}U_{k}}{\Delta U_{k}^{(1)}}$$

$${}^{\Delta t}U^{(1)} = {}^{\Delta t}\lambda^{(1)}\Delta U^{(1)}$$
(2.40)

Για i=2,3,... αντί της εξίσωσης (2.38) χρησιμοποιούμε

$${}^{0}K\Delta\overline{U}^{(i)} = {}^{\Delta t}\lambda^{(i-1)}R - {}^{\Delta t}F^{(i-1)}$$
(2.41)

$${}^{0}K\Delta \overline{U}^{(i)} = \Delta \lambda^{(i)}R \tag{2.42}$$

Όπου $\overline{\overline{U}}^{(i)} = \Delta \lambda^{(i)} \Delta U^{(1)}$. Επειδή η μετατόπιση επιβάλλεται στο βαθμό ελευθερία k

$$\Delta \lambda^{(i)} = \frac{\Delta \overline{U}_{k}^{(i)}}{\Delta U_{k}^{(1)}}$$
(2.43)

Και επομένως

$${}^{\Delta t}\lambda^{(i)} = {}^{\Delta t}\lambda^{(i-1)} + \Delta\lambda^{(i)}$$
(2.44)

$${}^{\Delta t}U^{(i)} = {}^{\Delta t}U^{(i-1)} + \Delta\lambda^{(i)}$$
(2.45)

$$\Delta U^{(i)} = \Delta \overline{U}^{(i)} + \Delta \overline{\overline{U}}^{(i)} = \Delta \overline{U}^{(i)} + \Delta \lambda^{(i)} \Delta U^{(1)}$$
(2.46)

Ο αλγόριθμος θεωρείται ότι συγκλίνει όταν ικανοποιείται η σχέση

$$\frac{\Delta U^{(i)\mathrm{T}}(\Delta \lambda^{(i-1)}R - \Delta F^{(i-1)})}{\Delta U^{(1)\mathrm{T}}(\Delta \lambda^{(1)}R)} \le e$$
(2.47)

Για την εύρεση της θέσης ισορροπίας του φορέα στους χρόνους 2Δ, 3Δt, 4Δt,... πρέπει να ισχύουν τα εξής:

Στην αρχή κάθε επανάληψης πρέπει να υπολογίζεται το μήκος τόξου Δ1 σύμφωνα με την σχέση

$$\Delta l = \beta \sqrt{U^{\mathrm{T}} U + \lambda^2} \tag{2.48}$$

όπου $U = U^{t+\Delta t}U$, $\lambda = \lambda^{t+\Delta t}\lambda$ και β είναι μία σταθερά η οποία προσαρμόζει το μήκος τόξου σε σχέση με το προηγούμενο και ανάλογα με τη μη γραμμικότητα του δρόμου ισορροπίας. Από την εξίσωση (2.31) για i=1

$${}^{\tau}K\Delta\overline{U}^{(1)} = {}^{t}\lambda R - {}^{t}F$$
(2.49)

$${}^{\tau}K\Delta\overline{U}^{(1)} = R \tag{2.50}$$

Και

$$\Delta U^{(1)} = \Delta \overline{U}^{(1)} + \Delta \lambda^{(1)} \Delta \overline{U}^{(1)}$$
(2.51)

$${}^{t+\Delta t}U^{(1)} = {}^{t}U + \Delta U^{(1)}$$

$$(2.52)$$

$${}^{t+\Delta t}a^{(1)} = {}^{t}a^{-t} + a^{(1)}$$

$$(2.52)$$

$$(2.53)$$

Όπου το $\Delta \lambda^{(1)}$ υπολογίζεται από το τρέχον μήκος τόξου σύμφωνα με την εξίσωση (2.33)

$$\Delta U^{(1)T} \Delta U^{(1)} + (\Delta \lambda^{(1)})^2 = \Delta l^2, \qquad (2.54)$$

Για τις επαναλήψεις i=2,3, ... χρησιμοποιούμε την (2.50) και επιπρόσθετα επιλύουμε την εξίσωση

$$^{\tau}K\Delta\overline{U}^{(i)} = {}^{t+\Delta t}\lambda^{(i-1)}R - {}^{t+\Delta t}F^{(i-1)}$$

$$(2.55)$$

Έτσι ώστε

$$^{t+\Delta t}U^{(i)} = {}^{t+\Delta t}U^{(i-1)} + \Delta \overline{U}^{(i)} + \Delta \lambda^{(i)} \Delta \overline{U}^{(1)}, \qquad (2.56)$$

και από την εξίσωση (2.33) δίνεται το $\Delta \lambda^{(i)}$ όποτε έχουμε

$$^{t+\Delta t}\lambda^{(i)} = {}^{t+\Delta t}\lambda^{(i-1)} + \Delta\lambda^{(i)}$$
(2.57)

Η κάθε επανάληψη συγκλίνει όταν ικανοποιείται η σχέση

$$\frac{\Delta U^{(i)\mathrm{T}}({}^{t+\Delta t}\lambda^{(i-1)}R - {}^{t+\Delta t}F^{(i-1)})}{\Delta U^{(i)\mathrm{T}}(\Delta\lambda^{(1)}R)} \le e$$
(2.58)

Σημειώνεται ότι το Δλ⁽ⁱ⁾ προκύπτει από την επίλυση μιας αλγεβρικής εξίσωσης δευτέρας τάξης, οπότε υπάρχουν δύο δυνατές λύσεις. Η πρώτη είναι να μην προκύπτουν πραγματικές λύσεις. Σε αυτή την περίπτωση η ανάλυση ξεκινά ξανά από την τελευταία θέση ισορροπίας χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο της σταθερής επαύξησης του εξωτερικού έργου. Η δεύτερη περίπτωση είναι να προκύπτουν δύο πραγματικές λύσεις. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούμε την λύση για την οποία το γ είναι μεγαλύτερο

$$\gamma = U^{(i-1)T} U^{(i)} \tag{2.59}$$

Μόλις καθοριστεί μία νέα θέση ισορροπίας, γίνεται ο έλεγχος της συνθήκης (2.37). Εάν δεν ικανοποιείται η συγκεκριμένη συνθήκη τότε γίνεται επανεκκίνηση από την προηγούμενη θέση ισορροπίας με

$$\Delta l_{new} = \Delta l_{old} \frac{\left\| U \right\|_{allowable}}{\left\| U \right\|_{actual}}$$
(2.60)

 $\overline{O\piou} \|U\|_{allowable} = \alpha \|^{\Delta t} U \|$ σύμφωνα με την εξίσωση (2.37) και $\|U\|_{actual}$ είναι η νόρμα της πραγματικής επαύξησης των μετατοπίσεων που υπολογίζεται από την επαναληπτική διαδικασία.

Εάν η συνθήκη (2.37) ικανοποιείται, τότε προχωράμε στην επόμενη επανάληψη με

$$\Delta l_{new} = \Delta l_{old} \sqrt{\frac{N_1}{N_2}} \frac{\left\| U \right\|_{allowable}}{\left\| U \right\|_{actual}},$$
(2.61)

Όπου N₁ είναι ο βέλτιστος αριθμός επαναλήψεων και N₂ είναι ο αριθμός των επαναλήψεων που έχει χρησιμοποιηθεί στο προηγούμενο βήμα.

Η παραπάνω διαδικασία ακολουθείται όταν ο αλγόριθμος δεν είναι κοντά σε οριακό σημείο. Σε αντίθετη περίπτωση χρησιμοποιείται η διαδικασία της σταθερής επαύξησης του εξωτερικού έργου. Το κριτήριο το οποίο καθορίζει εάν θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος του σταθερού μήκους ή η μέθοδος της σταθερής επαύξησης του έργου είναι η τιμή του λόγου

 $\frac{^{t}W}{^{t-\Delta t}W}$ όπου το εξωτερικό έργο W δίνεται από την εξίσωση (2.35). Έτσι αν ισχύει η συνθήκη

$$1 - \delta \le \frac{{}^{t}W}{{}^{t - \Delta t}W} \le 1 + \delta , \qquad (2.62)$$

Όπου δ ένας μικρό αριθμός τότε ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί την μέθοδο της σταθερής επαύξησης του εξωτερικού έργου. Για την εύρεση των θέσεων ισορροπίας στο χρόνο 2Δt, 3Δt, ... με την μέθοδο της σταθερής επαύξησης έργου πρώτα υπολογίζουμε στην αρχή κάθε βήματος το έργο

$$^{t+\Delta t}W = \beta''W, \qquad (2.63)$$

Όπου το ^tW βρίσκεται από την εξίσωση (2.35) και $\beta' = \frac{t^2}{t^{-\Delta t}\lambda}$. Τα υπόλοιπα στοιχεία

υπολογίζονται όπως και στην μέθοδο του σταθερού μήκους τόξου με τη διαφορά ότι το $\Delta \lambda^{(i)}$ υπολογίζονται από την εξίσωση (2.35) και (2.36) αλλά και σε αυτή την μέθοδο το $\Delta \lambda^{(i)}$ λαμβάνει δύο τιμές. Το ίδιο ισχύει και για το $\Delta \lambda^{(1)}$ με την προϋπόθεση ότι το $^{t+\Delta t}W$ είναι αρκετά μικρό και η ισορροπία του προηγούμενου βήματος έχει ικανοποιηθεί επαρκώς. Για την πρώτη επανάληψη εφαρμόζονται η εξίσωση (2.35) και οι (2.49)-(2.53). Αντίστοιχα για τις επαναλήψεις i=2,3,... εφαρμόζονται οι εξισώσεις (2.36), (2.50) και (2.55)-(2.57) και για την σύγκληση της μεθόδου την εξίσωση (2.58). Τέλος για την έναρξη του αλγορίθμου πρέπει εκτός από το α να υπάρχουν λογικές τιμές για τα δ και N₁.

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τον αλγόριθμο Collapse παρέχονται στο άρθρο των [Bathe and Dvorkin, 1983].

2.4 Ανάλυση γραμμικού λυγισμού

Η γραμμική ανάλυση λυγισμού που υλοποιείται με αριθμητικές μεθόδους είναι μία σχετικά απλή διαδικασία από πλευράς υπολογιστικού φόρτου. Τα κρίσιμα φορτία που λαμβάνονται από μία τέτοια ανάλυση αποτελούν μία πρώτη ένδειξη και είναι συνήθως

μεγαλύτερα από τα πραγματικά κρίσιμα φορτία της κατασκευής. Βέβαια το γεγονός ότι τέτοιου είδους αναλύσεις γίνονται πάρα πολύ γρήγορα μπορεί να αποτελέσουν ένα εργαλείο για την αξιολόγηση των διαφορετικών εναλλακτικών σε προκαταρκτικό στάδιο, πριν από τις χρονοβόρες μη γραμμικές αναλύσεις. Οι ιδιομορφές που προκύπτουν από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού συνήθως χρησιμοποιούνται σαν αρχικές ατέλειες σε μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας ή και υλικού με στόχο να εξασφαλίσουν ότι διεγείρονται όλοι οι πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας της κατασκευής και το αποτέλεσμα να είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στο πραγματικό φορτίο κατάρρευσης. Επίσης τα κρίσιμα φορτία λυγισμού χρειάζονται για τον υπολογισμό των αδιάστατων λυγηροτήτων οι οποίες απαιτούνται από διάφορους κανονισμούς.

Στο σημείο κατάρρευσης της κατασκευής η μετακινήσεις απειρίζονται και το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας είναι αόριστο. Τότε η συνθήκη ευστάθειας της κατασκευής είναι

$$\det({}_{0}^{t}K_{T}) = \det({}_{0}^{t}K_{0} + {}_{0}^{t}K_{u} + {}_{0}^{t}K_{g}) = 0$$
(2.64)

Έτσι μπορούν να οριστούν τα ακόλουθα προβλήματα

$$\binom{t}{0}K_{0} + \binom{t}{0}K_{u} + \binom{t}{\lambda}\binom{t}{0}K_{g}\phi_{i} = 0$$
(2.65)

$$\binom{t}{0}K_{0} + \binom{t}{0}\binom{t}{0}K_{u} + \binom{t}{0}K_{g})\phi_{i} = 0$$
(2.66)

Όπου φ_i είναι η *i* ιδιομορφή λυγισμού. Οι δύο παραπάνω σχέσεις διαφέρουν στον τρόπο που η παράμετρο ^tλ συσχετίζεται με τα στοιχεία του εφαπτομενικού μητρώου δυσκαμψίας. Παραλείποντας το μητρώο μετατοπίσεων ${}_0^t K_u$ από τις παραπάνω μη γραμμικές σχέσεις τότε προκύπτει το κλασικό πρόβλημα λυγισμού

$$\binom{t}{0}K_{0} + \binom{t}{\lambda}\binom{t}{0}K_{g}\phi_{i} = 0$$
(2.67)

2.4.1 Ο γραμμικός λυγισμός στο ADINA (LBA)

Ο γραμμικός λυγισμός στο ADINA μπορεί να υλοποιηθεί με δύο διαφορετικούς αλγορίθμους [ADINA, 2006]. Ο πρώτος ονομάζεται 'Classical' που είναι και ο προεπιλεγμένος αλγόριθμος για τη 'γραμμικοποιημένη' ανάλυση λυγισμού και ο δεύτερος που ονομάζεται 'Secant'

2.4.1.1 Ο αλγόριθμος Classical

Η βασική σχέση του αλγόριθμου Classical είναι η ακόλουθη:

$$\binom{t_1}{0}K_0 + \binom{t_1}{0}K_u + \lambda_i \binom{t_1}{0}K_g)\phi_i = 0$$
(2.68)

Η παραπάνω εξίσωση δεν αντιστοιχεί στην εξίσωση του κλασικού προβλήματος λυγισμού της εξίσωσης (2.67) αλλά στο μη γραμμικό πρόβλημα της εξίσωσης (2.65). Όταν τα φορτία είναι μικρά τότε το φορτίο που προκύπτει από την εξίσωση είναι (2.68) τείνει προς το φορτίο που προκύπτει από το κλασικό πρόβλημα λυγισμού της εξίσωσης (2.67).

Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού υπολογίζεται με την βοήθεια του κρίσιμου συντελεστή λυγισμού σύμφωνα με την σχέση

$$R_{cr,i} = \lambda_i^{t_1} R \tag{2.69}$$

όπου το ${}^{t_1}R$ είναι το φορτίο αναφοράς που εφαρμόζεται στην κατασκευή

2.4.1.2 Ο αλγόριθμος Secant

Η βασική σχέση του αλγόριθμου 'Secant' είναι η ακόλουθη:

$${}^{t_1}_{0}K\phi_i = \gamma_i {}^{t_0}_{0}K\phi_i \tag{2.70}$$

όπου ${}_{0}^{t_{1}}K$ και ${}_{0}^{t_{0}}K$ είναι τα μητρώα δυσκαμψίας στους χρόνους t_{0} και t_{1} αντίστοιχα και t_{0} είναι ο χρόνος στην αρχή της ανάλυσης, t_{1} είναι ο χρόνος για $t_{0}+\Delta t$ και γ_{i} είναι μία συνάρτηση της ιδιοτιμής λ_{i} . Το λ_{i} ισούται με

$$\gamma_i = 1 - \frac{1}{\lambda_i} \tag{2.71}$$

Και με αντικατάσταση της (2.71) στην εξίσωση (2.70) προκύπτει

$${}^{t_0}_0 K + \lambda_i ({}^{t_1}_0 K - {}^{t_0}_0 K) \phi_i = 0, \qquad (2.72)$$

Εξετάζοντας την παραπάνω σχέση διαπιστώνουμε ότι ο συγκεκριμένος αλγόριθμος δεν λύνει το κλασικό πρόβλημα λυγισμού, αφού το ${}^{t_0}_0 K$ δεν αντιστοιχεί στο γραμμικό μητρώο δυσκαμψίας και το ${}^{t_1}_0 K - {}^{t_0}_0 K$ δεν αντιστοιχεί στο μητρώο αρχικών τάσεων ${}^{t}_0 K_g$. Τα κρίσιμα φορτία λυγισμού $R_{cr,i}$ καθορίζονται από τους κρίσιμους συντελεστές λυγισμού από την σχέση

$$R_{cr,i} = {}^{t_0}R + \lambda_i ({}^{t_1}R - {}^{t_0}R)$$
(2.73)

όπου $t_0 R$ και $t_1 R$ είναι τα εφαρμοζόμενα φορτία στους χρόνους t_0 και t_1 αντίστοιχα. Αν το t_0 αντιστοιχεί στην αρχική κατάσταση χωρίς προφόρτιση τότε η παραπάνω σχέση γίνεται

$$R_{cr,i} = \lambda_i^{t_1} R \tag{2.74}$$

Το φορτίο ^{t_1}R είναι το φορτίο αναφοράς και έχει μεγάλο αντίκτυπο στα αποτελέσματα των αριθμητικών μεθόδων για τον υπολογισμό τόσο των κρίσιμων φορτίων όσο και των ιδιομορφών λυγισμού.

3 Αξιολόγηση διαφορετικών τρόπων ενίσχυσης οπών

3.1 Εισαγωγή

Σήμερα υπάρχει η απαίτηση για όλο και μεγαλύτερου ύψους πυλώνες γεγονός το οποίο προκαλεί ολοένα και μεγαλύτερες ροπές στην βάση του πυλώνα. Βέβαια στη βάση του πυλώνα η παρουσία της ανθρωποθυρίδας προκαλεί σημαντικά προβλήματα στην ευστάθεια του φορέα. Η πόρτα προκαλεί τοπική αποδυνάμωση στο κέλυφος του πυλώνα πράγμα που οδηγεί στην ευαισθησία σε τοπικό λυγισμό. Επίσης λόγω της ανθρωποθυρίδας δημιουργείται στην περιοχή συγκέντρωση τάσεων. Έτσι είναι σημαντικό να γίνεται η ενίσχυση της περιοχής έτσι ώστε να επαναφέρεται η χαμένη αντοχή λόγω του ανοίγματος. Αυτό μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους, αλλά στην πράζη η πιο διαδεδομένη κυρίως λόγω της ευκολίας κατασκευής της είναι το άνοιγμα να ενισχύεται με περιμετρικό πλαίσιο από έλασμα το οποίο συγκολλάται πάνω στο κέλυφος. Βέβαια μπορεί να υπάρζουν και πιο σύνθετοι τρόποι ενίσχυσης όπως παράδειγμα με πλαίσιο, διαμήκη ελάσματα, δακτύλιο και επιπλέον ενισχύσεις που συνδέουν το πλαίσιο με τα διαμήκη ελάσματα [Lavassas, 2003] (εικόνα 3.1). Βέβαια μία τέτοια μορφή ενίσχυσης απαιτεί επιπλέον κόστος συγκόλλησης το οποίο δεν είναι αμελητέο και γενικά είναι κατασκευαστικά πιο δύσκολο να υλοποιηθεί.



Εικόνα 3.1: Σύνθετη μορφή ενίσχυσης

Για να είναι μία ενίσχυση αποδοτική θα πρέπει να αποκαθιστά την στιβαρότητα του κελύφους σε όλο το ύψος του ανοίγματος με την μεγαλύτερη δυνατή οικονομία υλικού αλλά και με το μικρότερο κόστος κατασκευής (π.χ. μικρό μήκος συγκολλήσεων). Επίσης οι ενισχύσεις θα πρέπει να κάνουν την κατασκευή να αστοχεί με όσο πιο πολύ πλάστιμο τρόπο γίνεται. Με αυτό το σκεπτικό μελετήθηκαν οι εναλλακτικοί τύποι ενίσχυσης του ανοίγματος (εικόνα 3.2) έτσι ώστε να βρεθεί το πάχος των διατομών το οποίο επαναφέρει την αντοχή του πυλώνα στο σημείο που ήταν χωρίς το άνοιγμα. Επειδή στις αριθμητικές αναλύσεις είναι αδύνατο τα δύο φορτία να ταυτίζονται, υιοθετήθηκε σαν κριτήριο το

φορτίο με την ενίσχυση να διαφέρει σε ποσοστό μικρότερο του 1% από το φορτίο που υπολογίστηκε για το κέλυφος χωρίς άνοιγμα.



Ο τύπος (α) ο οποίος είναι και ο πιο διαδεδομένος στην πράξη λόγω της ευκολίας του στην κατασκευή και αποτελείται από ένα μεμονωμένο περιμετρικό πλαίσιο, ο τύπος (β) αποτελείται από δύο μεμονωμένα διαμήκη ελάσματα σε συνεργασία με κυκλικό δακτύλιο, ο τύπος (γ) ο οποίος είναι μία βελτιστοποίηση του προηγούμενου τύπου στον οποίο όμως ο δακτύλιος είναι ημικυκλικός και όχι κυκλικός και ο τύπος (δ) που αποτελείται από διαμήκη ελάσματα και δακτύλιο με μηκός που αντιστοιχεί σε γωνία κυκλικού τόξου 90 μοίρες.

Για να αξιολογηθούν οι παραπάνω τύποι ενίσχυσης έγινε σειρά παραμετρικών αναλύσεων στο εμπορικό πρόγραμμα ADINA. Για το σκοπό αυτό σε κάθε ένα από τα μοντέλα που δημιουργήθηκε πραγματοποιήθηκε αρχικά μία γραμμικώς ελαστική ανάλυση έτσι ώστε να διαπιστωθεί ότι το μοντέλο έχει τις σωστές παραμέτρους και συνοριακές συνθήκες. Έπειτα πραγματοποιούνταν μία γραμμική ανάλυση λυγισμού (Linearized Buckling) ώστε να προσδιοριστούν τα φορτία και οι ιδιομορφές λυγισμού. Ύστερα γινόταν οι μη γραμμικές αναλύσεις με μη γραμμικό υλικό χρησιμοποιώντας με τη σειρά τους αλγορίθμους: πρώτα πραγματοποιούνταν ο αλγόριθμος της τροποποιημένης Newton-Raphson (modidied Newton-Raphson) που είναι ο πιο γρήγορος για να προσδιοριστούν οι διατομές στις ενισχύσεις και έπειτα για επαλήθευση των αποτελεσμάτων εκτελούνταν η κανονική μορφή της Newton-Raphson (full Newton-Raphson). Τέλος για τον υπολογισμό του πλήρη δρόμου ισορροπίας εκτελούνταν ο αλγόριθμος Collapse.

Ο δρόμος ισορροπίας υπολογίστηκε σε όλα τα μοντέλα για λόγους σύγκρισης για τον ίδιο κόμβο ο οποίος βρίσκεται στο μέσο του ύψους του πυλώνα στη γενέτειρα που είναι ακριβώς πάνω από τον άξονα του ανοίγματος (εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3 Κόμβος στον οποίο δημιουργείται ο δρόμος ισορροπίας

Στην εικόνα δίνονται οι κατανομές της αξονικής τάσης για το κέλυφος χωρίς άνοιγμα και με άνοιγμα για το ίδιο φορτίο. Η κατανομή της αξονικής τάσης του κελύφους χωρίς άνοιγμα είναι η αναμενόμενη κατανομή όπως προβλέπει η θεωρία δοκού. Όσο αναφορά στο κέλυφος με άνοιγμα υπάρχει σημαντική αύξηση της αξονικής τάσης στην παρειά του ανοίγματος που φτάνει παραπάνω από την διπλάσια τιμή σε σχέση με το κέλυφος χωρίς άνοιγμα.



Εικόνα 3.4: Κατανομή αξονικής τάσης σε ένα κέλυφος χωρίς άνοιγμα (αριστερά) και με άνοιγμα (δεξιά)

Διερεύνηση Ευστάθειας Κυλινδρικών Κελυφών με και χωρίς Οπή

3.2 Γεωμετρικά στοιχεία αριθμητικού προσομοιώματος

Για τον υπολογισμό του φορτίου κατάρρευσης της ανεμογεννήτρια χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο αριθμητικό προσομοίωμα. Για την εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων το μοντέλο που δημιουργήθηκε αφορούσε μόνο το κάτω μέρος του πυλώνα. Το ύψος του μοντέλου είναι 10m και η ακτίνα του κελύφους 1,5m (εικόνα 3.5α). Το υλικό θεωρήθηκε γραμμικώς ελαστικό-απολύτως πλαστικό (διγραμμικό διάγραμμα τάσεωνπαραμορφώσεων) με μέτρο ελαστικότητας 210 GPa και όριο διαρροής 275 MPa (S275). Για την περίπτωση των κελυφών με άνοιγμα το συνολικό ύψος του ανοίγματος είναι 2,3m και το πλάτος του ανοίγματος 0,7m. Το άνοιγμα αποτελείται από ένα κεντρικό τμήμα ύψους 1,6 και δύο ημικυκλικά τμήματα πάνω και κάτω με ακτίνα 0,35m (εικόνα 3.5β). Η κάτω παρειά του ανοίγματος απέγει 0,5m από τη βάση του κελύφους. Η βάση του κελύφους θεωρείται πακτωμένη. Με βάση αυτά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά υπολογίστηκε ότι ο πυλώνας θα μπορούσε να έχει συνολικό ύψος 50m. Έτσι για φόρτιση επιβάλλεται ένα συγκεντρωμένο οριζόντιο φορτίο στο κέντρο της διατομής σε ύψος 50m συνδεδεμένο με άκαμπτα στοιχεία (rigid links) με την επάνω παρειά του κελύφους και με φορά προς τον άξονα του ανοίγματος που είναι και ο δυσμενέστερος συνδυασμός για την οριακή κατάσταση λυγισμού. Για την διακριτοποίηση χρησιμοποιήθηκε το τετρακομβικό στοιχείο κελύφους με κατάλληλη πύκνωση στο κάτω μέρος του μοντέλου (βλ. Παράρτημα A)



Εικόνα 3.5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσομοιώματος και ανοίγματος

3.3 Αρχικές ατέλειες με βάση των κανονισμό ΕC3

Με βάση τον Ευρωκώδικα [ΕΝ1993-1.6, 2006] τα κελύφη μπορούν να καταταχτούν σε τρεις κατηγορίες ποιότητας κατασκευής, την Α (εξαιρετικής ποιότητας), την Β και την C (χαμηλότερη ποιότητα). Για κάθε μία από τις παραπάνω ποιότητες ο Ευρωκώδικας προτείνει κάποιες κατασκευαστικές ανοχές για την απόκλιση της πραγματικής γεωμετρίας από την ιδεατά τέλεια επιφάνεια του κελύφους όπως για παράδειγμα την ανοχή για κάποιο κοίλωμα που μπορεί να υπάρχει. Όταν στο κέλυφος υπάρχουν αξονικές θλιπτικές τάσεις όπως συμβαίνει και στα καμπτόμενα κελύφη των ανεμογεννητριών, τότε θα πρέπει να γίνουν μετρήσεις για να προσδιοριστεί το βάθος των κοιλωμάτων τόσο στην αξονική όσο και στην περιφερειακή διεύθυνση για να προσδιοριστεί η ποιότητα κατασκευής του. Για να γίνουν αυτές οι μετρήσεις θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας μετρητής μήκους (εικόνα 3.6α):

$$l_{gx} = 4\sqrt{rt} , \qquad (3.1)$$

Στις θέσεις των συγκολλήσεων θα πρέπει το βάθος των κοιλωμάτων να εκτιμάται με τη βοήθεια ενός ειδικού μετρητή μήκους (εικόνα 3.6β):

$$l_{ew} = 20t \, \acute{\eta} \, l_{ew} = 25t_{\min} \, \alpha \lambda \lambda \acute{\alpha} \, \mu \varepsilon \, l_{ew} \le 500 \, mm \tag{3.2}$$

όπου tmin είναι το πάχος του λεπτότερου ελάσματος στη συγκόλληση.



Εικόνα 3.6: Μέτρηση βάθους στην αξονική διεύθυνση και στη συγκόλληση

Το βάθος των κοιλωμάτων στην αξονική διεύθυνση χαρακτηρίζεται από τις παραμέτρους κοιλώματος και :

$$U_{0x} = \frac{\Delta w_{0x}}{l_{gx}}, \quad \mu \epsilon \quad U_{0x} \le U_{0,\max}$$
 (3.3)

$$U_{0w} = \frac{\Delta w_{0w}}{l_{gw}}, \quad \mu \epsilon \quad U_{0w} \le U_{0,\max}$$
(3.4)

Όπου U_{0,max} είναι η ανοχή της παραμέτρου κοιλώματος για της διάφορες ποιότητες κατασκευής κελυφών. Στον πίνακα 3-1 δίνονται οι μέγιστες προτεινόμενες τιμές για την ανοχή του βάθους του κοιλώματος

Επίπεδο ποιότητας κατασκευής	Περιγραφή	Προτεινόμενη τιμή του U _{0,max}
А	Εξαιρετική	0.006
B C	Υψηλή Κανονική	0.01
		0.016

Πίνακας 3-1: Προτεινόμενες τιμές του Ευρωκώδικα για την κατασκευαστική ανοχή του βάθους του κοιλώματος

Σε κάθε ανάλυση GMNIA θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι κατάλληλες ατέλειες στο αριθμητικό προσομοίωμα. Οι ατέλειες που δίνονται στους διάφορους κανονισμούς εισάγονται ως ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες με την μορφή αρχικών αποκλίσεων κάθετα στην γεωμετρικά τέλεια επιφάνεια του φορέα. Η μορφή αυτής της ισοδύναμης ατέλειας θα πρέπει να επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει την δυσμενέστερη επίπτωση στην εύρεση του φορτίου κατάρρευσης της κατασκευής. Συνήθως για την μορφή της ατέλειας χρησιμοποιείται η πρώτη ιδιομορφή ή κάποιος συνδυασμός των πρώτων ιδιομορφών. Ο γραμμικός συνδυασμός των πρώτων ιδιομορφών χρειάζεται προσοχή στα κελύφη μην τυχόν και η μία ιδιομορφή αναιρεί κάποια άλλη. Η ατέλειες θα πρέπει να αντανακλούν τον τρόπο ανέγερσης, τις λεπτομέρειες κατασκευής και τις συνοριακές συνθήκες και κάποιες ατέλειες μπορούν να αγνοηθούν αν κρίνονται μη ρεαλιστικές λόγω της μεθόδου κατασκευής. Το πρόσημο της ατέλειας από την τέλεια γεωμετρία να κατευθύνεται προς το κέντρο καμπυλότητας του κελύφους που είναι γενικά δυσμενέστερο από το να είναι προς τα έξω. Το πλάτος της ισοδύναμης γεωμετρικής ατέλειας είναι συνάρτηση του επιπέδου ποιότητα του κελύφους σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα. Η μέγιστη απόκλιση της ισοδύναμης γεωμετρικής ατέλειας από τον γεωμετρικά τέλειο φορέα θα πρέπει να είναι η μεγαλύτερη από τις δύο τιμές $\Delta w_{0,eq1}$ και $\Delta w_{0,eq2}$ όπου:

$$\Delta w_{0,eq1} = l_g U_{n1}, (3.5)$$

$$\Delta w_{0,eq2} = n_i t U_{n2}, \qquad (3.6)$$

όπου l_g είναι το χαρακτηριστικό μήκος μέτρησης της ατέλειας σύμφωνα με τη σχέση (3.1), t το πάχος του κελύφους, n_i είναι ένας συντελεστής που διαμορφώνει το επιθυμητό επίπεδο ποιότητας και U_{n1} και U_{n2} είναι οι συντελεστές πλάτους ατέλειας οι οποίοι εξαρτώνται από το επίπεδο ποιότητας. Σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα δίνονται για τα U_{n1} και U_{n2} στον πίνακα 3-2. Για την τιμή του n_i ο κανονισμός προτείνει την τιμή 25.

Επίπεδο ποιότητας κατασκευής	Περιγραφή	U _{n1}	U _{n2}
Επίπεδο Α	Εξαιρετική	0.010	0.010
Επίπεδο Β	Υψηλή	0.016	0.016
Επίπεδο C	Κανονική	0.025	0.025

Πίνακας 3-2: Προτεινόμενες τιμές από τον Ευρωκώδικα για τους συντελεστές πλάτους ατέλειας

Τέλος σύμφωνα με τον κανονισμό θα πρέπει να διαπιστωθεί ότι σε μία ανάλυση με ατέλεια μικρότερη κατά 10% από την προτεινόμενη, το φορτίο κατάρρευσης της κατασκευής δεν είναι μικρότερο. Εάν προκύψει μικρότερο φορτίο τότε θα πρέπει να γίνουν σειρά από αναλύσεις με μεταβαλλόμενο πλάτος έτσι ώστε να βρεθεί η μικρότερη τιμή του φορτίου.

Με βάση τα παραπάνω ο δρόμος ισορροπίας για τους εναλλακτικούς τρόπούς ενίσχυσης υπολογίστηκε για βάθος ατέλειας που προκύπτει από επίπεδο ποιότητας κατασκευής Β και χρησιμοποιώντας την πρώτη ιδιομορφή ως μορφή ατέλειας. Χρησιμοποιώντας ανώτερες ιδιομορφές σαν ατέλεια (προσέχοντας πάντα να μην είναι συμμετρική ως προς την πρώτη γιατί σε αυτή την περίπτωση η μία θα ακύρωνε την άλλη) σε συνδυασμό με την πρώτη το κρίσιμο παραμένει πρακτικά το ίδιο σε όλα τα μοντέλα.



Εικόνα 3.7: Δρόμος ισορροπίας για κέλυφος χωρίς οπή με και χωρίς ατέλειες

3.4 Αντοχή του κελύφους χωρίς άνοιγμα και με άνοιγμα

3.4.1 Αντοχή κελύφους χωρίς άνοιγμα

Με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά υπολογίστηκε η αντοχή του κελύφους χωρίς άνοιγμα η οποία αποτελεί σημείο αναφοράς για τις υπόλοιπες αναλύσεις καθώς αυτή είναι η αντοχή που θα πρέπει να επιτευχθεί. Για τον υπολογισμό της αντοχής αυτής χρησιμοποιήθηκε η αριθμητική μέθοδος GMNIA που λαμβάνει υπόψη της όλες εκείνες τις παραμέτρους που συμβάλουν στην μείωση του φορτίου κατάρρευσης της κατασκευής και είναι γενικά όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πραγματικότητα. Για ατέλεια έχει ληφθεί υπόψη μόνο η πρώτη ιδιομορφή καθώς οι ανώτερες βρέθηκε ότι δεν συμβάλλουν ουσιαστικά στη μείωση του φορτίου και με μέγεθος όσο προβλέπεται από το Ευρωκώδικα για αυτού του είδους τις αναλύσεις για ποιότητα Β. Τα μεγέθη τα οποία υπολογίζονται με βάση τον Ευρωκώδικα είναι αρκετά συντηρητικά γενικά. Έτσι το μέγεθος που προτείνεται για ατέλεια με βάση τη γενικότερη λογική του Ευρωκώδικα είναι αρκετά μεγάλο, πάντα υπέρ της ασφαλείας.

Η πρώτη ιδιομορφή λυγισμού φαίνεται στην εικόνα 3.8 και το κρίσιμο φορτίο είναι P=11810 KN. Ο δρόμος ισορροπίας που προέκυψε από το αλγόριθμο Collapse του ADINA με μη γραμμικότητα γεωμετρίας και με μη γραμμικό υλικό παρουσιάζεται στο διάγραμμα της εικόνας 3.9. Το οριακό φορτίο υπολογίστηκε P=1340 KN. Αυτό το φορτίο συμφωνεί με το αποτέλεσμα που υπολογίζεται από τον αναλυτικό τύπο για την ροπή κάμψης από την θεωρία δοκού. Βέβαια εδώ παρουσιάζεται μόνο το αποτέλεσμα από την αριθμητική μέθοδο υπολογισμού του φορτίου για λόγους συσχέτισης με τα παρακάτω αποτελέσματα των εναλλακτικών τρόπων ενίσχυσης για τα οποία δεν υπάρχει ακριβής τρόπος υπολογισμού του οριακού φορτίου με αναλυτική μορφή παρά μόνο με αριθμητικές μεθόδους.



Εικόνα 3.8: Πρώτη ιδιομορφή λυγισμού κελύφους χωρίς άνοιγμα (P=11810KN)



Εικόνα 3.9: Δρόμος ισορροπίας για κέλυφος χωρίς οπή

Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η παραμόρφωση του φορέα και οι τάσεις την ίδια στιγμή για τα σημεία που φαίνονται στο παραπάνω δρόμο ισορροπίας (εικόνες 3.10-3.12)



Εικόνα 3.10: Παραμόρφωση και τάσεις στο σημείο Α



Εικόνα 3.11: Παραμόρφωση και τάσεις στο σημείο Β



Εικόνα 3.12: Παραμόρφωση και τάσεις στο σημείο Γ

Το σημείο Α αντιστοιχεί στο ελαστικό μέρος του δρόμου ισορροπίας λίγο πριν ξεκινήσει να διαρρέει η κατασκευή. Το φορτίο σε Το σημείο Β αντιστοιχεί στο οριακό σημείο όπου η κατασκευή έχει διαρρεύση και αρχίζει να φαίνεται το σημείο που θα αστοχήσει η κατασκευή. Στο σημείο Γ η κατασκευή έχει αστοχήσει και έχει πάρει μεγάλες παραμορφώσεις. Φαίνεται ξεκάθαρα το σημείο στο οποίο το κέλυφος έχει τσακίσει εκεί όπου δηλαδή υπήρχε η ατέλεια. Το φορτίο σε αυτό το σημείο είναι μειωμένο κατά 40% περίπου σε σχέση με το οριακό φορτίο.

3.4.2 Αντοχή κελύφους με οπή

Το άνοιγμα στο κέλυφος προκαλεί σημαντική μείωση στο οριακό φορτίο του πυλώνα. Αρχικά έγινε μία γραμμική ανάλυση λυγισμού για να βρεθεί η πρώτη ιδιομορφή και να προσδιοριστούν τα κρίσιμα φορτία. Από αυτή την ανάλυση βρέθηκε το κρίσιμο φορτίο της πρώτης ιδιομορφής που έχει τιμή P=1994 kN και το σχήμα της φαίνεται στην εικόνα 3.13. Είναι γεγονός ότι η παρουσία της οπής στο κέλυφος προκαλεί σημαντική μείωση ακόμα και στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού.

Ο δρόμος ισορροπίας βρέθηκε με την εκτέλεση ανάλυσης GMNIA (εικόνα 3.14) και η τιμή του οριακού φορτίου υπολογίστηκε P=1116KN δηλαδή μειώθηκε κατά 20% περίπου σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή του κελύφους χωρίς οπή.



Εικόνα 3.13: Πρώτη ιδιομορφή κελύφους με ο
πή (P=1994 kN)



Εικόνα 3.14: Δρόμος ισορροπίας για κέλυφος με άνοιγμα

Στις εικόνες 3.15-3.17 παρουσιάζεται η παραμόρφωση και οι τάσεις von Mises του φορέα για τα τρία σημεία που φαίνονται στο δρόμο ισορροπίας. Στο σημείο Α του δρόμου ισορροπίας έχει ήδη αρχίσει να διαρρέει τμήμα που βρίσκεται στις παρειές του ανοίγματος λόγω του ότι εκεί υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση τάσεων. Στο σημείο Β η κατασκευή έχει

φτάσει στο οριακό σημείο και έχει διαρρεύσει μεγάλο τμήμα της κατασκευής. Στο σημείο Γ η γεωμετρία του φορέα έχει παραμορφωθεί σημαντικά και ο πυλώνας έχει πάρει έντονες κλίσεις.



Εικόνα 3.15: Παραμόρφωση και Τάσεις στο σημείο Α



Εικόνα 3.16: Παραμόρφωση και τάσεις στο σημείο Β



Εικόνα 3.17: Παραμόρφωση και τάσεις στο σημείο Γ

3.5 Τρόποι ενίσχυσης του ανοίγματος

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται διάφοροι τρόποι ενίσχυσης της ανθρωποθυρίδας του πυλώνα. Έτσι συγκρίνονται οι διάφοροι τρόποι ενίσχυσης: το απλό περιμετρικό πλαίσιο που χρησιμοποιείται ευρέως στην πράξη, ενίσχυση με διαμήκη ελάσματα και δακτύλιο ο οποίος έχει προταθεί από την βιβλιογραφία, μία βελτίωση του προηγούμενου τρόπου που αντί για ολόκληρο τον δακτύλιο χρησιμοποιείται ημικυκλικός δακτύλιος και τέλος μία άλλη πιθανή μορφή ενίσχυσης. Ο σκοπός είναι να βρεθεί το πιο αποτελεσματικό σχήμα ενίσχυσης το οποίο θα προταθεί για να εφαρμόζεται στην πράξη προσαρμοζόμενο κάθε φορά στα γεωμετρικά στοιχεία του πυλώνα.

3.5.1 Ενίσχυση με περιμετρικό πλαίσιο

Η ενίσχυση της ανθρωποθυρίδας με περιμετρικό πλαίσιο το οποίο συγκολλάται πάνω στο κέλυφος περιμετρικά γύρω από την οπή είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος ενίσχυσης της οπής. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες στις οποίες ο πυλώνας είναι κατασκευασμένες από χαλύβδινο κέλυφος ενισχύονται με αυτόν τον τύπο ενίσχυσης. Μάλιστα υπάρχει και μία κατασκευαστική πρακτική που προτείνει όσο υλικό αφαιρέθηκε από το κέλυφος θα πρέπει να τοποθετηθεί με την μορφή ελάσματος γύρω από την οπή.

Μετά από δοκιμές βρέθηκε ότι το περιμετρικό έλασμα για να επαναφέρει την αντοχή του πυλώνα στην στάθμη που ήταν όταν δεν υπήρχε το άνοιγμα θα πρέπει να έχει διαστάσεις 30 x 6 cm. Το έλασμα συγκολλήθηκε έτσι ώστε το κάθετο ευθύγραμμο τμήμα της παρειάς του ανοίγματος να βρίσκεται ακριβώς στο μέσο του πλάτους του ελάσματος.

Για καταπόνηση σε καθαρή θλίψη η διατομή του ελάσματος είναι κατηγορίας 1 [Βαγιας, 2005]. Από την γραμμική ανάλυση λυγισμού βρέθηκε ότι το κρίσιμο φορτίο για την πρώτη ιδιομορφή είναι P=9011 kN και η μορφή της φαίνεται στην εικόνα 3.18. Ο δρόμος ισορροπίας για αυτή την περίπτωση ενίσχυσης φαίνεται στην εικόνα 3.19.



Εικόνα 3.18: Πρώτη ιδιομορφή κελύφους με περιμετρικό πλαίσιο (P=9011 kN)



Εικόνα 3.19: Δρόμος ισορροπίας για κέλυφος με περιμετρικό πλαίσιο

Διερεύνηση Ευστάθειας Κυλινδρικών Κελυφών με και χωρίς Οπή

Στο παραπάνω διάγραμμα στον άξονα των x είναι η μετακίνηση του κόμβου που βρίσκεται στο μέσο του ύψους του πυλώνα και στον άξονα y ο λόγος P/P_{cr} όπου P το φορτίο εκείνη την στιγμή και P_{cr} το οριακό φορτίο του κελύφους χωρίς κανένα άνοιγμα.

Στις εικόνες 3.20-3.22 φαίνονται για τρία σημεία του δρόμου ισορροπίας οι αντίστοιχες παραμορφώσεις και τάσεις. Το σημείο Α είναι το σημείο που αρχίζει να διαρρέει η κατασκευή και έχει φτάσει το 0,8 του οριακού φορτίου. Λόγω της ύπαρξης του πλαισίου το οποίο παραλαμβάνει κατά κύριο λόγο την αξονική θλίψη δεν υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση τάσεων στα κάθετα ευθύγραμμα τμήματα του ανοίγματος αλλά μόνο στο κυκλικό μέρος του. Αυτό συμβαίνει γιατί το κυκλικό τμήμα είναι εκεί που αλλάζει η γεωμετρία και υπάρχει αυτή η συγκέντρωση τάσεων. Στο κάθετο ευθύγραμμο τμήμα όλη την αξονική δύναμη την παίρνει το έλασμα. Στο σημείο Β η κατασκευή έχει φτάσει στο οριακό σημείο και έχει αρχίσει να φαίνεται ότι παραμορφώνεται περίπου με το σχήμα της πρώτης ιδιομορφής η οποία μπήκε σαν αρχική ατέλεια. Στο σημείο Γ ο φορέας έχει χάσει το 40% της αντοχής του περίπου και έχει χαλάσει η γεωμετρία του κελύφους λόγω των μεγάλων παραμορφώσεων.



Εικόνα 3.20: Παραμόρφωση και τάσεις στο σημείο Α



Εικόνα 3.21: Παραμόρφωση και τάσεις στο σημείο Β



Εικόνα 3.22: Παραμόρφωση και τάσεις στο σημείο Α

3.5.2 Ενίσχυση με διαμήκη ελάσματα και κυκλικό δακτύλιο

Η ενίσχυση με διαμήκη ελάσματα και δακτύλιο αποτελεί πρόταση που βρέθηκε στην βιβλιογραφία και συγκεκριμένα στην διδακτορική διατριβή του κ. Δημόπουλου

[Δημόπουλος, 2012]. Αποτελείται από δύο διαμήκη ελάσματα τοποθετημένα συμμετρικά δεξιά και αριστερά από τον άξονα του ανοίγματος και ένα κυκλικό δακτύλιο (εικόνα 3.2). Πρόκειται για μία αρκετά αποδοτική μέθοδο ενίσχυσης γιατί ενώνει το επάνω μέρος των ελασμάτων με την απέναντι πλευρά του κελύφους που είναι σε εφελκυσμό και συνεπώς είναι εντελώς σταθερή.

Το πλάτος των δύο διαμήκων ελασμάτων και του δακτυλίου θεωρήθηκε κοινό 20cm έτσι ώστε το ένα να συγκολλάται στο άλλο σε όλο το πλάτος του. Μετά από δοκιμές βρέθηκε ότι για να αποκαθίσταται η αντοχή του πυλώνα στα επίπεδα πριν το άνοιγμα θα πρέπει το πάχος από τα διαμήκη ελάσματα να είναι 3,5 cm και του δακτυλίου 1 cm. Θεωρούμενα ότι τα διαμήκη ελάσματα καταπονούνται σε καθαρή θλίψη η διατομή τους είναι κατηγορίας 1.

Από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού το κρίσιμο φορτίο της πρώτης ιδιομορφής βρέθηκε P=8022 kN και το σχήμα της φαίνεται στη εικόνα 3.23. Με βάση την πρώτη ιδιομορφή σαν ατέλεια και μέγεθος όσο προτείνεται από τον Ευρωκώδικα έγινε μη γραμμική ανάλυση με μη γραμμικό υλικό (GMNIA) και υπολογίστηκε ο δρόμος ισορροπίας για αυτό τον τύπο ενίσχυσης (εικόνα 3.24). Όπως και στους προηγούμενους τύπους ενίσχυσης έτσι και εδώ στον άξονα των x είναι η μετακίνηση και στον άξονα των y το αδιαστατοποιημένο φορτίο.



Εικόνα 3.23: Πρώτη ιδιομορφή λυγισμού κελύφους με διαμήκη ελάσματα και κυκλικό δακτύλιο



Εικόνα 3.24: Δρόμος ισορροπίας για κέλυφος με διαμήκη ελάσματα και δακτύλιο

Στο σημείο A (εικόνα 3.25) είναι το σημείο στο οποίο μπαίνει στο πλαστικό μέρος του δρόμου ισορροπίας η κατασκευή. Το φορτίο στο σημείο αυτό είναι κατά 30% μικρότερο από το οριακό φορτίο. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι οι στις παρειές του ανοίγματος το υλικό έχει διαρρεύσει και επομένως εάν θέλαμε να αυξήσουμε το οριακό φορτίο θα έπρεπε να αυξήσουμε το πάχος μόνο των διαμήκων ελασμάτων. Στο σημείο B όπου η κατασκευή έχει φτάσει το οριακό φορτίο έχει αρχίσει να φαίνεται το σημείο που θα αστοχήσει η κατασκευή. Στο σημείο Γ η κατασκευή έχει αστοχήσει και το κέλυφος έχει πάρει μεγάλες παραμορφώσεις. Από τον τρόπο αστοχία γίνεται αντιληπτό ότι αν αυξήσουμε τη διατομή από τα διαμήκη ελάσματα τότε η αστοχία είναι δυνατόν να μεταφερθεί πάνω από τον δακτύλιο.



Εικόνα 3.25: Παραμόρφωση και τάσεις στο σημείο Α



Εικόνα 3.26: Παραμόρφωση και τάσεις στο σημείο Α



Εικόνα 3.27: Παραμόρφωση και τάσεις στο σημείο Α

3.5.3 Ενίσχυση με διαμήκη ελάσματα και ημικυκλικό δακτύλιο

Αυτός ο τύπος ενίσχυσης είναι στην ουσία απλά μία βελτίωση του προηγούμενου τρόπου ενίσχυσης. Αποτελείται όπως και ο προηγούμενος από δύο διαμήκη ελάσματα τοποθετημένα συμμετρικά ως προς τον άξονα του ανοίγματος αλλά αντί ο δακτύλιος να είναι κυκλικός, αυτός είναι ημικύκλιο (εικόνα 3.2). Ο ημικυκλικός δακτύλιος φτάνει μέχρι το μέσο του κελύφους το οποίο είναι γενικά αφόρτιστο για το πάχος που διαθέτει. Συνδέοντας το μέσο του κελύφους μέσω του δακτυλίου με τα διαμήκη ελάσματα προσφέρεται στήριξη σε αυτά και από τα αποτελέσματα φαίνεται να είναι το ίδιο αποδοτική όπως και στην περίπτωση του κυκλικού δακτυλίου ο οποίος συνδέει τα διαμήκη ελάσματα με την εφελκυόμενη πλευρά του κελύφους.

Θεωρήθηκε τα διαμήκη ελάσματα και ο δακτύλιος έχουν ίδιο πλάτος 20 cm. Για την επαναφορά της χαμένης αντοχής λόγω του ανοίγματος το πάχος από τα διαμήκη ελάσματα θα πρέπει να είναι 3,5 cm και θεωρούμενα ότι καταπονούνται μόνο θλιπτικά προκύπτει ότι η διατομή τους είναι κατηγορίας 1. Αντίστοιχα το πάχος του δακτυλίου υπολογίστηκε στο 1 cm. Δηλαδή τα χαρακτηριστικά είναι τα ίδια με την προηγούμενη περίπτωση ενίσχυσης εκτός από το γεγονός ότι ο δακτύλιος είναι ημικυκλικός και όχι πλήρης κύκλος. Με βάση τα αποτελέσματα από τις αριθμητικές αναλύσεις η τιμή του φορτίου είναι μόλις 0,3% μειωμένη σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το

αποτέλεσμα είναι πρακτικά το ίδιο γιατί στις αριθμητικές αναλύσεις είναι αδύνατον να βρεθεί η τιμή του φορτίου λόγω των παραδοχών που κάνουν.

Από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού προσδιορίστηκε το κρίσιμο φορτίο P=8013 kN και η μορφή της πρώτης ιδιομορφής λυγισμού (εικόνα 3.28). Έπειτα με ανάλυση GMNIA προσδιορίστηκε ο δρόμος ισορροπίας που είναι σχεδόν ίδιος με αυτόν της προηγούμενη περίπτωσης (εικόνα 3.29).



Εικόνα 3.28: Πρώτη ιδιομορφή λυγισμού για κέλυφος με διαμήκη ελάσματα και ημικυκλικό δακτύλιο





Στις εικόνες 3.30-3.32 παρουσιάζονται η παραμόρφωση και οι τάσεις για τα επιλεγμένα σημεία του δρόμου ισορροπίας. Στο σημείο Α ο φορέας βρίσκεται στην κατάσταση όπου έχουν αρχίσει να διαρρέουν οι παρειές δεξιά και αριστερά του ανοίγματος. Στο σημείο Β η κατασκευή έχει φτάσει το οριακό σημείο. Σε μεγάλα τμήματα της κατασκευής το υλικό έχει φτάσει το όριο διαρροής του. Τέλος στο σημείο Γ η ήδη ο φορέας έχει χάσει περισσότερο από το 40% της αντοχής του.



Εικόνα 3.30: Παραμόρφωση και τάσεις στο σημείο Α





Διερεύνηση Ευστάθειας Κυλινδρικών Κελυφών με και χωρίς Οπή



Εικόνα 3.32: Παραμόρφωση και τάσεις στο σημείο Γ

3.5.4 Ενίσχυση με διαμήκη κάθετα ελάσματα και οριζόντιο έλασμα

Σε συνέχεια από τον προηγούμενο τύπο ενίσχυσης διερευνήθηκε η περίπτωση το οριζόντιο έλασμα αντί να είναι ημικυκλικό να αποτελεί μήκος τόξου π/2. Όμως σε αυτή την περίπτωση επειδή το έλασμα δεν δημιουργεί επαρκή στήριξη για τα κάθετα διαμήκη ελάσματα για αυτό και προστέθηκαν επιπλέον ελάσματα ώστε αυτά να φτάνουν σε μεγαλύτερο υψόμετρο στον πυλώνα (εικόνα 3.2). και να σταθεροποιείται το τμήμα πάνω από το άνοιγμα όπου δημιουργείται συγκέντρωση τάσεων.

Και σε αυτή την περίπτωση ενίσχυσης θεωρήθηκε κοινό πλάτος σε όλα τα ελάσματα 20 cm. Μετά από δοκιμές βρέθηκε ότι για την αποκατάσταση της αντοχής του πυλώνα λόγω του ανοίγματος απαιτείται το πάχος των κάθετων ελασμάτων στις παρειές του ανοίγματος να είναι 3,5 cm, του οριζόντιου ελάσματος 1 cm και των κάθετων ελασμάτων που βρίσκονται πάνω από το οριζόντιο 2 cm. Με αυτές τις διαστάσεις η διατομή των ελασμάτων που βρίσκονται δεξιά και αριστερά από το άνοιγμα θεωρούμενα ότι καταπονούνται σε θλίψη είναι κατηγορίας 1 ενώ των ελασμάτων που είναι πάνω από το οριζόντιο 2.

Σύμφωνα με τη γραμμική ανάλυση λυγισμού το κρίσιμο φορτίο λυγισμού για αυτή την περίπτωση ενίσχυσης βρέθηκε P=8345 kN και η μορφής της φαίνεται στη εικόνα 3.33. Στην εικόνα 3.34 φαίνεται ο δρόμος ισορροπίας για το ίδιο σημείο που υπολογίστηκε και στις προηγούμενες περιπτώσεις δηλαδή για ένα κόμβο που βρίσκεται στο μέσο του ύψους. Από διάγραμμα φαίνεται ότι το οριακό σημείο είναι ασταθές όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις.



Εικόνα 3.33: Πρώτη ιδιομορφή λυγισμού κελύφους με ενίσχυση με διαμήκη και οριζόντια ελάσματα





Διερεύνηση Ευστάθειας Κυλινδρικών Κελυφών με και χωρίς Οπή

Στις εικόνες 3.35-3.37 παρουσιάζονται για τα τρία σημεία του δρόμου ισορροπίας που φαίνονται στην παραπάνω εικόνα η παραμόρφωση και οι τάσεις von Mises. Στο σημείο Α φαίνεται η παραμορφωσιακή κατάσταση και οι τάσεις του φορέα όταν αρχίζει να διαρρέει το υλικό στις παρειές του ανοίγματος όπως αναμενόταν. Στο σημείο Β φαίνονται τα αντίστοιχα μεγέθη τη στιγμή που η κατασκευή έχει φτάσει στο οριακό σημείο. Στο σημείο Γ φαίνεται ο φορέα κατά την αστοχία όπου οι παραμορφώσεις είναι αρκετά μεγάλες.



Εικόνα 3.35: Παραμόρφωση και τάσεις στο σημείο Α



Εικόνα 3.36: Παραμόρφωση και τάσεις στο σημείο Β


Εικόνα 3.37: Παραμόρφωση και τάσεις στο σημείο Γ

3.6 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά στον πίνακα 3-3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από όλες τις περιπτώσεις ενίσχυσης ως προς το αδιαστατοποιημένο εμβαδό Α/Α0 και το αδιαστατοποιημένο όγκο V/V₀ που απαιτείται για κάθε περίπτωση. Το εμβαδό A₀ είναι το εμβαδό της διατομής που θλίβεται εκεί όπου δημιουργείται το άνοιγμα (εικόνα 3.38). Με αντίστοιχο τρόπο υπολογίζεται και το εμβαδό Α της διατομής του ελάσματος που υπόκειται σε καθαρή θλίψη για κάθε ενίσχυσης. Στην εικόνα 3.39 φαίνεται το εμβαδό Α για την περίπτωση της ενίσχυσης με περιμετρικό πλαίσιο. Με αντίστοιχο τρόπο ορίζονται και όγκοι υλικού V και V_0 .



Διερεύνηση Ευστάθειας Κυλινδρικών Κελυφών με και χωρίς Οπή



Πίνακας 3-3: Συγκριτικός πίνακας για όλες τις περιπτώσεις ενισχύσεις ως προς το αδιαστατοποιημένο εμβαδό και τον αδιαστατοποιημένο όγκο.

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα αλλά και από τις εκτενείς αναλύσεις που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους η ενίσχυση με απλό περιμετρικό πλαίσιο παρόλο το μεγάλο πλεονέκτημα που διαθέτει ότι κατασκευάζεται σχετικά εύκολα χρειάζεται την μεγαλύτερη ποσότητα υλικού. Επίσης στα μειονεκτήματα της συγκαταλέγεται και το γεγονός ότι δεν μπορεί να μεταφέρει την αστοχία μακριά από την περιοχή του ανοίγματος. Γενικά είναι η λιγότερο αποδοτική σε σχέση με τις υπόλοιπες. Η ενίσχυση που προτείνεται από την βιβλιογραφία η οποία αποτελείται από δύο διαμήκη ελάσματα και κυκλικό δακτύλιο είναι αρκετά αποδοτική. Αυτό οφείλεται και το γεγονός ότι συνδέει το επάνω άκρο των διαμήκων ελασμάτων με την εφελκυόμενη μεριά όπου λόγω του εφελκυσμού είναι εντελώς σταθερή. Μια βελτίωση του παραπάνω τύπου ενίσχυσης αποτελείται από δύο διαμήκη ελάσματα όπως και πριν αλλά αντί για κυκλικό δακτύλιο, αυτός είναι ημικύκλιο. Με αυτό τον τρόπο τα διαμήκη ελάσματα συνδέονται με το μέσο του κελύφους το οποίο είναι σχετικά αφόρτιστο. Έτσι πετυχαίνεται η απαιτούμενη σταθερότητα στα διαμήκη ελάσματα κάνοντας παράλληλα οικονομία υλικού. Από τις αναλύσεις φάνηκε ότι αν και τα διαμήκη ελάσματα έχουν ακριβώς το ίδιο πάχος πριν, η ενίσχυση αυτή συμπεριφέρεται το ίδιο αποδοτικά όπως και πριν. Τέλος η τελευταία περίπτωση ενίσχυσης λόγω της ελλιπούς στήριξης που παρέχεται στα διαμήκη ελάσματα, κρίθηκε σκόπιμο αυτά να επεκταθούν σε μεγαλύτερο ύψος. Όμως αυτό πρόσθεσε επιπλέον υλικό γεγονός που είναι κατά της οικονομίας. Καταλήγοντας ο τύπος ενίσχυσης που προτείνεται από την παρούσα εργασία είναι αυτός με τα δύο διαμήκη ελάσματα και τον ημικυκλικό δακτύλιο ο οποίος συνδυάζει ιδανικά την σταθερότητα με την καλύτερη εκμετάλλευση του υλικού.

Τέλος στην εικόνα 3.40 παρουσιάζονται όλοι οι δρόμοι ισορροπίας από μη γραμμική ανάλυση με μη γραμμικό υλικό και αρχικές ατέλειες (GMNIA) για όλες τις περιπτώσεις ενισχύσεων. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα για όλες τις περιπτώσεις το οριακό φορτίο είναι ασταθές Γενικά δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές στους δρόμους εκτός από μια μικρή διαφορά για την περίπτωση με περιμετρικό πλαίσιο όπου ο μεταλυγισμικός κλάδος παρουσιάζει μεγαλύτερη πτώση του φορτίου μετά το οριακό σημείο αλλά για τις μεγάλες παραμορφώσεις το φορτίο για την ίδια μετακίνηση είναι ελαφρώς μεγαλύτερο.



Εικόνα 3.40: Δρόμοι ισορροπίας για όλους τους τύπους ενίσχυσης

4 Βιβλιογραφία

- 1. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (2005). «Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα, 2η έκδοση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα
- Δημόπουλος Χ., (2012), «Ενίσχυση Οπών Ανθρωποθυρίδων σε Χαλύβδινα Κελύφη Πυλώνων Ανεμογεννητριών»,
- 3. Ηλεκτρονική διεύθυνση www.gwec.net
- 4. Ηλεκτρονική διεύθυνση https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power_in_Denmark444
- Καλδέλλης Ι., (2005), «Διαχείρηση της Αιολικής Ενέργειας 2^η Έκδοση», Εκδόσεις Σταμούλη,
- 6. Παπαδρακάκης Μ. (2001), «Ανάλυση Φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων», Εκδόσεις Παπασωτηρίου
- 7. ADINA R&D, Inc (2012) 'Theory and Modeling Guide Volume I: ADINA', Report ARD 12-8.
- 8. Bathe K-J, (1996), "Finite element procedures", Prentice Hall.
- 9. Bathe K-J and Dvorkin N. E. (1983) 'On the Automatic Solution of Nonlinear Finite Element Equation', Computers & Structures, Vol 17, pp.871-879.
- 10. European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures, 2006.
- 11. Hau E, (2006), "Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics", Springer, 2nd English Edition,
- Lavassas I., Nikolaidis G.,Efthimiou E., Doudoumis I. and Baniatopoulos C., 2003, 'Analysis and design of the prototype of steel 1-MW Wind turbine tower', Engineering Structures, Vol. 25 (8), pp 1097-1106.

Παράρτημα Α. Αξιολόγηση Διακριτοποίησης Πεπερασμένων Στοιχείων

Τα διαθέσιμα στοιχεία κελύφους που υπάρχουν στο εμπορικό πρόγραμμα ADINA μπορούν να έχουν από 4 μέχρι 32 κόμβους. Οι κόμβοι μπορούν να βρίσκονται στη μέση επιφάνεια του κελύφους οπότε μπορούμε να έχουμε από 4 έως 16 κόμβους είτε στην πάνω και κάτω επιφάνεια του κελύφους οπότε έχουμε στοιχεία με 8 έως 32 κόμβους. Υπάρχει και μία ξεχωριστή κατηγορία στοιχείων στο πρόγραμμα που ονομάζονται μεταβατικά και σκοπό έχουν να γίνεται ομαλά η μετάβαση από στοιχεία κελύφους σε στοιχεία τρισδιάστατης ελαστικότητας. Τα στοιχεία κελύφους διαμορφώνονται θεωρώντας το κέλυφος ως ένα τρισδιάστατο συνεχές σώμα με τις ακόλουθες δύο παραδοχές που χρησιμοποιούνται και στη θεωρία δικού κατά Timoshenko. Η πρώτη είναι ότι τα διάφορα στοιχειώδη υλικά βρίσκονται αρχικά σε ένα ευθύγραμμο τμήμα κατά τη διάρκεια των παραμορφώσεων. Η δεύτερη παραδοχή είναι ότι η τάση κάθετα στη διεύθυνση του κελύφους είναι μηδενική.

Για την διακριτοποίηση και την ανάλυση του φορέα της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το τετρακομβικό στοιχείο κελύφους (στοιχείο MITC4) (εικόνα A.1) με 5 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (τρεις μετακινησιακούς κατά τους καθολικούς άξονες και 2 στροφικούς ορισμένους στο τοπικό σύστημα της μέσης επιφάνειας). Το συγκεκριμένο στοιχείο είναι το πλέον αποδοτικό στοιχείο για την ανάλυση κελυφών γενικής μορφής. Δεν παρουσιάζει προβλήματα παρασιτικής δυσκαμψίας και είναι αρκετά ακριβές, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση τόσο λεπτών όσο και παχιών κελυφών. Η προεπιλεγμένη τάξη ολοκλήρωσης αυτών των στοιχείων για το επίπεδο r-s είναι 2x2 σημεία Gauss και κατά τη διεύθυνση του πάχους t είναι 2 σημεία Gauss.



Εικόνα Α.1: Τετρακομβικό στοιχείο κελύφους (ΜΙΤC4) για λεπτά και παχιά κελύφη

Για την διακριτοποίηση του φορέα τα στοιχεία κελύφους που χρησιμοποιήθηκαν είχαν μέγιστη πλευρά 10 cm για το επάνω μέρος του φορέα και έγινε κατάλληλη πύκνωση στο κάτω μέρος όπου η παρουσία του ανοίγματος δημιουργεί συγκέντρωση τάσεων γύρω από την οπή. Επίσης με την πύκνωση μπορούν να υπολογιστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι ιδιομορφές λυγισμού αφού γύρω από την οπή αναμένεται να υπάργει και τοπικός λυγισμός. Η μέγιστη πλευρά των στοιχείων στο κάτω μέρος είναι 5cm δηλαδή λίγο μεγαλύτερη από το πάγος του κελύφους (3,5cm) (εικόνα Α.2α). Αυτή η διακριτοποίηση είναι στο όριο των δυνατοτήτων των υπολογιστικών πόρων που ήταν διαθέσιμη για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας έτσι ώστε να γίνει εκτέλεση μη γραμμικών αναλύσεων με μη γραμμικό υλικό με σκοπό την εύρεση του δρόμου ισορροπίας της κάθε κατασκευής. Για να αξιολογηθεί αν αυτή η διακριτοποίηση επαρκεί, έγινε αρχικά στο φορέα με το άνοιγμα μία γραμμικώς ελαστική ανάλυση έτσι ώστε να υπολογιστούν οι τάσεις Mises και να γίνει ομαλοποίηση σε αυτές. Έπειτα υπολογίστηκε η διαφορά στις τάσεις που υπήρχαν σε κοινούς κόμβους από τα διαφορετικά στοιγεία (εικόνα Α.2β). Η μέγιστη διαφορά υπολογίστηκε στο 27% το οποίο βρίσκεται δίπλα στο άνοιγμα όπως ήταν αναμενόμενο. Η τιμή αυτή είναι αποδεκτή για τέτοιου είδους φορείς.





Διερεύνηση Ευστάθειας Κυλινδρικών Κελυφών με και χωρίς Οπή