



## ΔΡΑΣΗ: «ΑΡΙΣΤΕΙΑ ΙΙ»

### ΤΙΤΛΟΣ:

«Πρωτότυπες έννοιες σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών  
για τον ενεργειακό τομέα με χρήση σύγχρονων υλικών»

4916-ENSSTRAM

Επιστημονικός Υπεύθυνος: **Καθ. Χ. ΓΑΝΤΕΣ**

### ΕΝΟΤΗΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ (Ε.Ε.) 1

*Βιβλιογραφική επισκόπηση ανεμογεννητριών*

### ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 1.1:

*Τεχνική έκθεση βιβλιογραφικής επισκόπησης ανεμογεννητριών*

2014



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ





NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING

9 Iroon Polytechniou Str., GR-15780, Zografou, Greece

## PROJECT: «ARISTEIA II»

TITLE:

«Novel design concepts for ENERGY related Steel  
STRUCTURES using Advanced Materials»

4916-ENSSTRAM

Research Coordinator: Prof. C. GANTES

WORK PACKAGE (W.P.) 1

*Literature survey for wind turbines*

DELIVERABLE 1.1:

*Technical report of the literature survey for wind turbines*

2014



European Union  
European Social Fund



MINISTRY OF EDUCATION & RELIGIOUS AFFAIRS, CULTURE & SPORTS  
MANAGING AUTHORITY

Co-financed by Greece and the European Union



EUROPEAN SOCIAL FUND



## Summary

---

The scope of this report is to summarize the results of the research endeavors found in the - very limited - literature, related to the concept of sandwich-type wind turbine towers. For the sake of completeness, an overview of the fast-growing sandwich-structures' trend is provided, as well as a literature review regarding the challenges accompanying the evolution of wind energy converters and thus constituting the motive for the development of the sandwich solution. More specifically:

In **Chapter 2**, facts proving the demand for uttermost utilization of wind energy through the wind-turbine technology are firstly presented. Secondly, the main structural components of a modern horizontal-axis wind turbine are described, followed by an overview of the principles which govern the design of such a construction. The reasons dictating the further increase in size, both in terms of tower height and blade length, up to prodigious levels are then addressed, consequently introducing major - and in some cases insurmountable - difficulties, mainly related to large segments' transportation, which are analyzed as well. The chapter ends with the brief description of the most common alternatives to the conventional steel towers, along with the main disadvantages which hinder their extensive implementation.

**Chapter 3** serves as an introduction to the sandwich-structure concept, consisting of two steel faces and a binding core made of some lightweight material, thus offering both high stiffness and low weight. A description of its main characteristics including its geometry and mechanical properties is provided, followed by a presentation of the wide range of materials used either as cores or faces, allowing for a variety of possible combinations, able to fulfill different design criteria, such as strength, stiffness, cost, or weight. Additionally, the main failure mechanisms of a sandwich structure are summarized, according to the results of published experimental data.

As far as the incorporation of sandwich sections in wind turbine tower construction is concerned, the few research attempts referenced in international literature are presented in **Chapter 4**. Despite the lack of studies in this specific field, abundant material exists regarding the behavior of concrete-filled double-skin steel tubular

members exposed to axial and bending loads. The results extracted from it provide useful conclusions on the influence of essential parameters such as the quality of materials and the ratio of core to faces width to the overall performance of sandwich cylindrical shells as well as to their failure mechanisms, and can thus be likewise utilized in the wind turbine tower case, the appropriate adjustments being made. In this frame, the abstract of these investigations is also present in this chapter.

Finally, in **Chapter 5** a summary of the aforementioned topics concludes this report, and issues worth considering in further investigations are addressed.

## Περιεχόμενα

---

Περιεχόμενα .....	1
<b>1. Εισαγωγή.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Εξέλιξη ανεμογεννητριών και κατασκευαστικά ζητήματα.....</b>	<b>5</b>
2.1 Ρόλος των ανεμογεννητριών στις τρέχουσες ενεργειακές εξελίξεις .....	5
2.2 Σύντομη περιγραφή τοπικής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα .....	7
2.3 Βασικά στοιχεία σχεδιασμού συμβατικών πυλώνων από χάλυβα .....	10
2.4 Σημασία του μεγέθους μιας ανεμογεννήτριας.....	11
2.5 Δυσχέρειες στη μεταφορά και εγκατάσταση ογκωδών τμημάτων ανεμογεννητριών μεγάλου μεγέθους.....	13
2.6 Εναλλακτικές λύσεις για την κατασκευή πυλώνων .....	16
<b>3. Διατομές τύπου sandwich.....</b>	<b>18</b>
3.1 Γενική περιγραφή.....	18
3.2 Υλικά .....	20
3.3 Μηχανισμοί αστοχίας .....	22
<b>4. Χρήση διατομής sandwich σε πυλώνες ανεμογεννητριών .....</b>	<b>24</b>
4.1 Εισαγωγή.....	24

4.2 Συμπεριφορά κυλινδρικών φορέων διατομής sandwich υπό αξονική καταπόνηση .....	25
4.3 Συμπεριφορά κυλινδρικών φορέων διατομής sandwich υπό καμπτική καταπόνηση .....	34
<b>5. Συμπεράσματα και θέματα προς διερεύνηση .....</b>	<b>38</b>
<b>Βιβλιογραφικές Αναφορές .....</b>	<b>41</b>



## Εισαγωγή

---

Η παρούσα Τεχνική Έκθεση αποτελεί παραδοτέο του Ερευνητικού Προγράμματος με τίτλο:

### ΔΡΑΣΗ «ΑΡΙΣΤΕΙΑ II»

#### Πρωτότυπες έννοιες σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών για τον ενεργειακό τομέα με χρήση σύγχρονων υλικών (ENSSTRAM)

που πραγματοποιείται κάτω από το γενικό συντονισμό του Καθηγητή Χαράλαμπου Γαντέ (Κύριος Ερευνητής).

Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζει τις δράσεις που προδιαγράφονται στην **Ενότητα Εργασίας Ε.Ε 1**, με τίτλο:

#### «Βιβλιογραφική επισκόπηση ανεμογεννητριών»

Το αντικείμενο της **Ενότητας Εργασίας Ε.Ε. 1**, έχει περιγραφεί στην εγκεκριμένη Ερευνητική Πρόταση ως:

*«Θα γίνει εκτεταμένη βιβλιογραφική επισκόπηση θεμάτων σχετικών με τη λειτουργία ανεμογεννητριών, τους πλώνες ανεμογεννητριών, τις δράσεις ανέμου και σεισμού σε ανεμογεννήτριες, τις ιδιότητες των ελαφροβαρών (π.χ. κυψελωτών) υλικών, καθώς και την κατασκευή και λειτουργία των πετασμάτων τύπου sandwich. Επιπροσθέτως, θα αναζητηθούν οι τελευταίες εξελίξεις σε αριθμητικές και πειραματικές μεθόδους που θα χρησιμοποιηθούν».*

Το εν λόγω αντικείμενο έχει καλυφθεί πλήρως, όπως περιγράφεται στα κεφάλαια που ακολουθούν. Πιο συγκεκριμένα:

Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφεται διεξοδικά το υπό εξέταση πρόβλημα, ξεκινώντας από την αναγκαιότητα κατασκευής ανεμογεννητριών συνεχώς αυξανόμενου μεγέθους και καταλήγοντας στο ανέφικτο του εγχειρήματος αυτού με τη σημερινές μεθόδους κατασκευής.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται αναλυτικά η έννοια της διατομής sandwich ως πιθανή λύση στο παραπάνω ζήτημα και παραθέτονται τα δημοφιλέστερα συμβατικά και σύγχρονα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της, καθώς

και οι μηχανισμοί αστοχίας που έχουν καταγραφεί στα πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των δημοσιευμένων έως τώρα ερευνών που αφορούν την πιθανή χρήση της διατομής sandwich στην κατασκευή πυλώνων ανεμογεννητριών μεγάλου μεγέθους, ως προς την επιρροή των βασικότερων παραμέτρων σχεδιασμού στη συμπεριφορά και τους μηχανισμούς αστοχίας μιας τέτοιας κατασκευής.

Στο **Κεφάλαιο 5** συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τα θέματα που εξετάστηκαν και βάσει αυτών υπογραμμίζονται τα ζητήματα που ανακύπτουν και πρέπει να ληφθούν υπόψη στις περαιτέρω έρευνες.

Οι εργασίες που περιγράφονται έχουν πραγματοποιηθεί με τη συνεισφορά των παρακάτω μελών της **Ερευνητικής Ομάδας**:

- Χαράλαμπος Γαντές, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Γεώργιος Μπουκοβάλας, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Αθανάσιος Τριανταφύλλου, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών
- Αλέξανδρος Βαλοσαμής, Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Στυλιανός Βερνάρδος, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Αριστομένης Τσαντίλης, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών
- Γρηγορία-Πολυξένη Ζαράκη, Πολιτικός Μηχανικός Δομικών Έργων
- Κυριάκος Κάρλος, Μηχανολόγος Μηχανικός

## Εξέλιξη ανεμογεννητριών και κατασκευαστικά ζητήματα

---

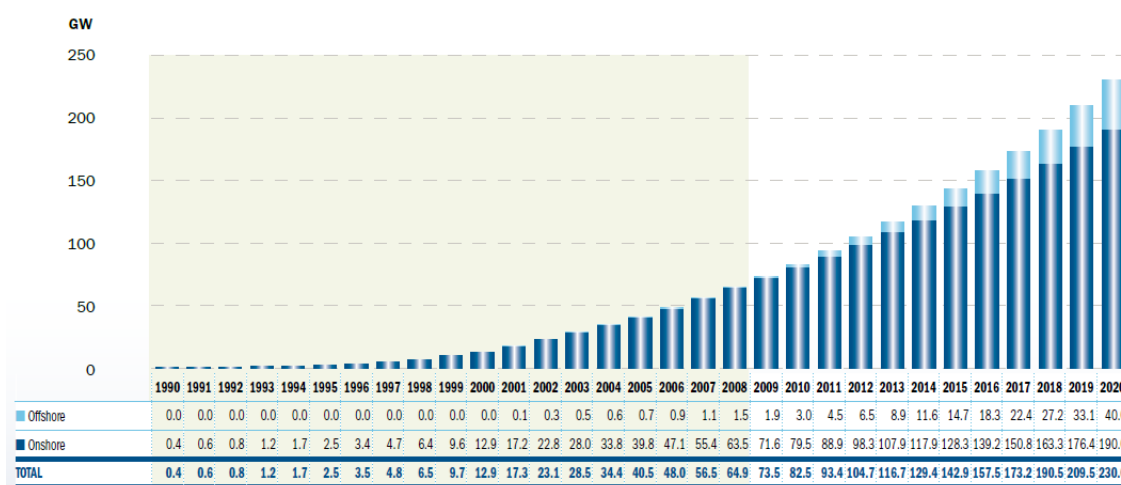
### 2.1 Ρόλος των ανεμογεννητριών στις τρέχουσες ενεργειακές εξελίξεις

Οι αυξημένες ενεργειακές ανάγκες που χαρακτηρίζουν τη σύγχρονη εποχή επιτάσσουν την εκ βαθέων αναθεώρηση της ενεργειακής πολιτικής των ανεπτυγμένων κρατών, τα οποία, όντας κυρίως υπεύθυνα για τη ραγδαίως αυξανόμενη ζήτηση, εύλογα επωμίζονται την υποχρέωση της παραγωγής αντίστοιχων ποσοτήτων ενέργειας για την κάλυψή της. Με δεδομένη, ωστόσο, τη σταδιακή εξάντληση των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων αφενός και αφετέρου την επιτακτική - στα πλαίσια της προσπάθειας προς την εξυγίανση του πολλαπλώς επιβαρυσμένου φυσικού περιβάλλοντος - ανάγκη περιορισμού και μακροπρόθεσμης εξάλειψης των ρύπων στην ατμόσφαιρα, η μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας από εναλλακτικές πηγές αποτελεί μονόδρομο.

Σε αυτό το πνεύμα, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει ως στόχο την άνοδο του ποσοστού παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στο 20% επί του συνόλου έως το έτος 2020, με το αντίστοιχο ποσοστό που αφορά την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών να ανέρχεται στο 34%. Εξέχοντα ρόλο στην επίτευξη των στόχων αυτών καλούνται να διαδραματίσουν οι ανεμογεννήτριες, επίγειες και υπεράκτιες, καθώς η αιολική ενέργεια αναμένεται να συμβάλει στην κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρισμού κατά 14% έως 17%, μέσω της απόδοσης της δυναμικότητας των ανεμογεννητριών στα 230 GW έως 265 GW, αντιστοίχως. Όσον αφορά συγκεκριμένα την Ελλάδα, οι στόχοι που έχουν τεθεί, με ορίζοντα το έτος 2020, περιλαμβάνουν τη δημιουργία αιολικών πάρκων συνολικής δυναμικότητας 6.5 GW έως 8.5 GW, η οποία θα αρκεί για την κάλυψη του 22% έως 29% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας. Η σημαντική αύξηση των κεφαλαίων που διατίθενται, τόσο στην έρευνα και ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που ενισχύουν την απόδοση των ανεμογεννητριών, όσο και στην κατασκευή και εγκατάστασή τους, καθιστά τους παραπάνω στόχους εφικτούς και, ενδεχομένως, συντηρητικούς, αν λάβει κανείς υπόψη την εκθετικά ανοδική εξέλιξη της ικανότητας παραγωγής ενέργειας του συνόλου των αιολικών πάρκων στην Ευρώπη, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1. Ωστόσο, λόγω της οικονομικής αστάθειας που έχει

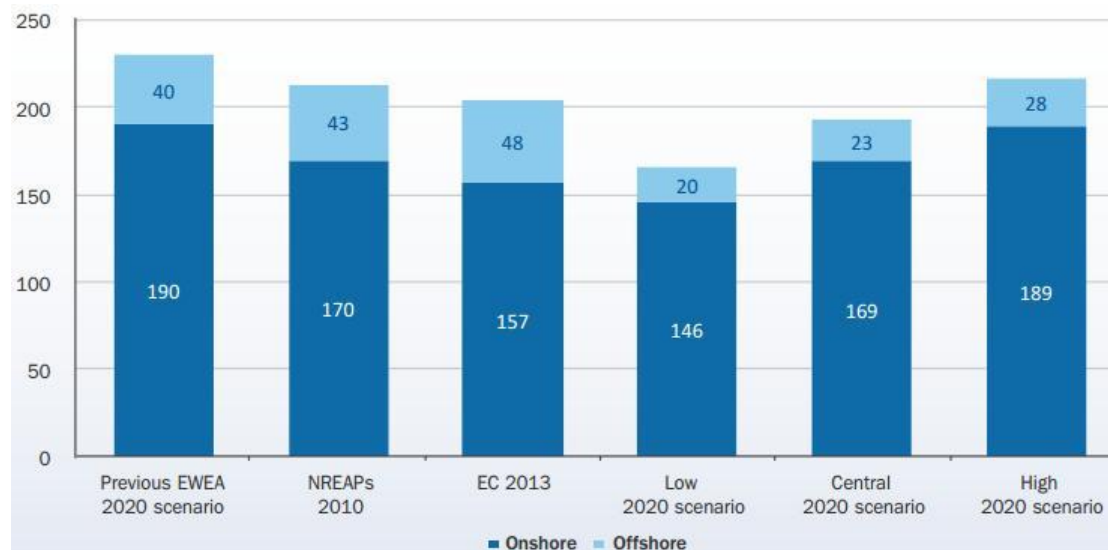
παρουσιαστεί κατά την τελευταία περίοδο σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες και των δυσμενών μεταβολών που αυτή επέφερε όσον αφορά τις επενδύσεις στο πεδίο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αλλά και γενικότερα, διατυπώνονται σταδιακά νέα, πιο απαισιόδοξα σενάρια για τα επόμενα χρόνια, καθώς αρκετοί ειδικοί αναθεωρούν τις πρότερες προβλέψεις τους, όπως προκύπτει από την πρόσφατη τεχνική έκθεση της Ευρωπαϊκής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας (EWEA) και παρουσιάζεται ενδεικτικά στο Σχήμα 2.2.

Οι μη ευνοϊκές αυτές συνθήκες δεν είναι ωστόσο ικανές να αναστείλουν, αλλά μονάχα να επιβραδύνουν τους ανοδικούς ρυθμούς ανάπτυξης του τομέα αξιοποίησης του αιολικού δυναμικού, καθώς ο αριθμός των αιολικών πάρκων συστηματικά αυξάνεται, η έκταση που το καθένα καλύπτει διευρύνεται και το μέγεθος των ανεμογεννητριών που τα αποτελούν γίνεται ολοένα μεγαλύτερο, σε όρους ύψους πυλώνα, μήκους πτερυγίων και ικανότητας παραγωγής ενέργειας. Ενδεικτικό της τάσης αυτής είναι το Σχήμα 2.3, το οποίο παρουσιάζει την εξέλιξη των ανεμογεννητριών εντός της τελευταίας εικοσαετίας, όσον αφορά τις παραπάνω παραμέτρους αλλά και το κόστος ανά MWh ενέργειας, το οποίο βαίνει ως επί το πλείστον μειούμενο λόγω των (θετικών) οικονομιών κλίμακας που επιτυγχάνονται λόγω της αύξησης του μεγέθους. Πέραν του μέσου μεγέθους των ανεμογεννητριών που απεικονίζεται στο προαναφερθέν σχήμα, αξίζει να συμπληρωθεί ότι η σημερινή τεχνολογία ήδη επιτρέπει την εγκατάσταση τέτοιων κατασκευών με ύψος πυλώνα που αγγίζει τα 160 m και απόδοση μεγέθους έως και 10MW.



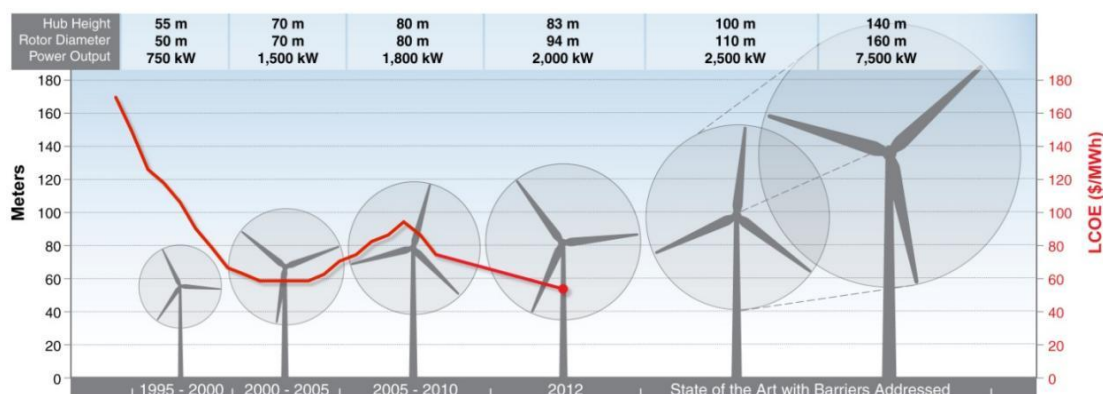
**Σχήμα 2.1:** Συνολική ικανότητα παραγωγής αιολικής ενέργειας στην Ε.Ε., από το έτος 1990 έως το έτος 2020, βάσει του συντηρητικότερου προβλεπόμενου σεναρίου (EWEA, 2011).

**Figure 2.1:** Total capacity of wind energy production in the European Union between years 1990 and 2020, based on the most conservative scenario (EWEA, 2011).



**Σχήμα 2.2:** Παλαιότερα σενάρια ικανότητας παραγωγής ενέργειας από ανεμογεννήτριες εντός της Ε.Ε. για το έτος 2020, από τρεις διαφορετικούς φορείς, και αντίστοιχα αναθεωρημένα από την EWEA (EWEA, 2014)

**Figure 2.2:** Older scenario of wind energy production capacity in the European Union for year 2020, from three different sources, as well as corresponding ones updated from EWEA (EWEA, 2014)



**Σχήμα 2.3:** Εξέλιξη του μέσου μεγέθους επίγειων ανεμογεννητριών και του σταθμισμένου κόστους παραγόμενης ενέργειας (NREL, 2014)

**Figure 2.3:** Evolution of the average size of on-shore wind turbines and relative cost of produced energy (NREL, 2014)

## 2.2 Σύντομη περιγραφή τυπικής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

Η ιστορική εξέλιξη των ανεμογεννητριών περιλαμβάνει πολλές και σημαντικά διαφορετικές μεταξύ τους απόπειρες σχεδιασμού. Από τη δεκαετία του 1980, ωστόσο, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα με τρία πτερύγια σταδιακά επικράτησαν. Τα κυριότερα συστατικά μέρη μιας τέτοιας κατασκευής απεικονίζονται στο Σχήμα 2.4 και είναι:

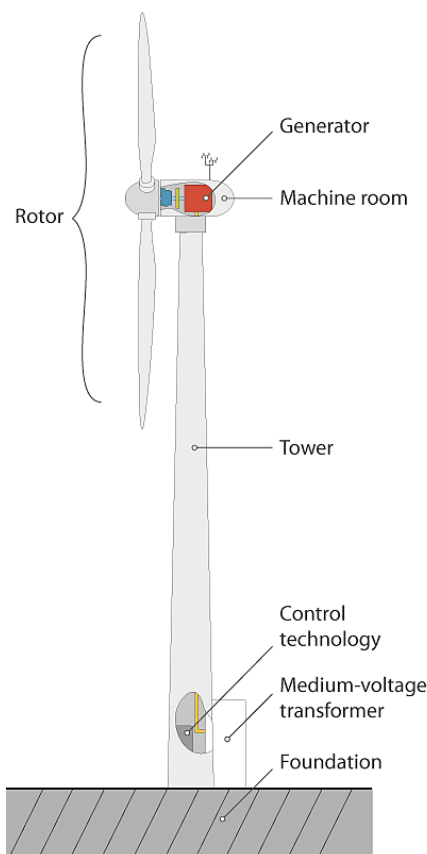
- Η άτρακτος (nacelle), η οποία περικλείει όλον τον μηχανολογικό και ηλεκτρολογικό εξοπλισμό για τη μετατροπή της κίνησης των πτερυγίων σε

ηλεκτρισμό, ενώ περιστρέφεται αυτόματα ακολουθώντας την κατεύθυνση του ανέμου για τη μέγιστη αξιοποίησή του.

- Το στροφέιο (rotor), που είναι συνδεδεμένο με την άτρακτο. Τα περύγιά του κατασκευάζονται ως επί το πλείστον από υαλοβάμβακα και άλλα σύνθετα υλικά με αποτέλεσμα να διατηρούν σχετικά χαμηλό βάρος όντας ταυτόχρονα επαρκώς δύσκαμπτα. Τα τελευταία χρόνια έχει επέλθει σημαντική πρόοδος στο σχεδιασμό και την κατασκευή των περυγίων, τα οποία είναι πλέον σαφώς βελτιωμένα από αεροδυναμικής άποψης, ενώ παράγουν χαμηλότερα επίπεδα θορύβου. Τα περύγια έχουν επιπλέον τη δυνατότητα να περιστραφούν γύρω από τον άξονά τους, καθιστώντας πλήρως ελέγξιμη τη γωνία πρόσπτωσης του ανέμου. Η ρύθμιση της τελευταίας επιτρέπει τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και αποτρέπει μία ενδεχόμενη καταστροφή της γεννήτριας στην περίπτωση μη επιτρεπών ταχυτήτων ανέμου, στρέφοντας τα περύγια εκτός επιρροής του και διακόπτοντας τη λειτουργία.
- Η γεννήτρια, στην οποία το στροφέιο μεταδίδει την κίνηση μέσω ενός πολυσύνθετου κιβωτίου ταχυτήτων και αυτή με τη σειρά της αποδίδει ηλεκτρική ενέργεια στο ηλεκτρικό δίκτυο, με το οποίο είναι συνδεδεμένη.
- Ο πυλώνας, που στηρίζει την άτρακτο με το στροφέιο στο επιθυμητό ύψος και αναλαμβάνει τη μεταφορά των όλων των φορτίων στη θεμελίωση. Όσον αφορά τις ανεμογεννήτριες μεγάλων διαστάσεων, οι πυλώνες μπορεί να έχουν τις εξής μορφές:
  - Κωνικοί, χαλύβδινοι πυλώνες κυλινδρικής, κοίλης διατομής.
  - Πυλώνες από προεντεταμένο σκυρόδεμα.
  - Πυλώνες από οπλισμένο σκυρόδεμα, σκυροδετημένοι στο σημείο εγκατάστασης.
  - Πυλώνες από προκατασκευασμένα επιμέρους τμήματα οπλισμένου σκυροδέματος.
  - Υβριδικοί πυλώνες κατασκευασμένοι μέχρι ενός ύψους από σκυρόδεμα και πέραν του ύψους αυτού από χάλυβα κυλινδρικής, κοίλης διατομής.
  - Χαλύβδινοι πυλώνες μορφής δικτυώματος.
  - Χαλύβδινοι πυλώνες μορφής καλωδιωτού ιστού.
  - Ξύλινοι πυλώνες (ο πρωτότυπος τελεί υπό κατασκευή).
- Η θεμελίωση, που στην περίπτωση των επίγειων ανεμογεννητριών αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα και φθάνει σε αρκετά μέτρα υπό του εδάφους. Μία ανεμογεννήτρια με ύψος πυλώνα 140 μέτρων απαιτεί περισσότερους από 80 τόννους χάλυβα και πάνω από 600 κυβικά μέτρα σκυροδέματος για τη θεμελίωσή

της. Σχετικά με τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, η θεμελίωση εξαρτάται από το θαλάσσιο βάθος, τα εδαφικά χαρακτηριστικά και οικονομικούς παράγοντες και μπορεί να είναι θεμελιώσεις βαρύτητας από σκυρόδεμα για ρηχά νερά (0-15 m), μονοπάσσαλοι, δικτυωτοί μεταλλικοί πύργοι ή ομάδες τριών ή τεσσάρων πασσάλων για μεσαία βάθη (15-50 m), ενώ για μεγαλύτερα βάθη οι ανεμογεννήτριες είναι πλωτές λόγω απαγορευτικού κόστους των συμβατικών μεθόδων θεμελίωσης.

- Το κέντρο ελέγχου, που βρίσκεται στη βάση του πυλώνα και πραγματοποιεί αυτοματοποιημένους ελέγχους με συνεχή παρακολούθηση της λειτουργίας των σημαντικότερων μηχανολογικών και ηλεκτρολογικών εξαρτημάτων. Είναι σε θέση να διαγνώσει αυτόματα το είδος μίας πιθανής βλάβης και να αποστείλει σχετική ειδοποίηση στη συντηρήτρια εταιρεία.
- Ο μετασχηματιστής τάσης, ο οποίος βρίσκεται επίσης στη βάση του πυλώνα και αναλαμβάνει το έργο της μετατροπής της τάσης του ρεύματος που παράγει η γεννήτρια από μεγέθη που αγγίζουν τα 690 volts στη μέση τάση των 10-30 volts, ώστε να καταστεί δυνατή η μετέπειτα τροφοδότηση του ηλεκτρικού δικτύου.



**Σχήμα 2.4:** Σχηματική απεικόνιση τυπικής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα και των βασικών τμημάτων της (Windwärts Energie GmbH)

**Figure 2.4:** Schematic presentation of a typical horizontal-axis wind turbine and its basic parts (Windwärts Energie GmbH)

### 2.3 Βασικά στοιχεία σχεδιασμού συμβατικών πυλώνων από χάλυβα

Η συντριπτική πλειοψηφία των πυλώνων ανεμογεννητριών κατασκευάζονται από χαλύβδινα φύλλα κυλινδρικού σχήματος, συγκολλημένα κατά τον διαμήκη άξονα. Εγκάρσιες συγκολλήσεις συνδέουν τα επιμέρους κυλινδρικά τμήματα μεταξύ τους ώστε να σχηματιστεί ο πυλώνας. Κάθε τμήμα καταλήγει σε μεταλλικές φλάντζες στα δύο άκρα του και η σύνδεση με τις αντίστοιχες των υπόλοιπων τμημάτων πραγματοποιείται με προεντεταμένους κοχλίες. Η φλάντζα στη βάση του πυλώνα συδέεται με τη θεμελίωση, ενώ η φλάντζα στην κορυφή με την άτρακτο.

Ο πυλώνας καταρχάς διαστασιολογείται έναντι ορθών τάσεων και λυγισμού. Επιπλέον, ο πυλώνας πρέπει να ελεγχθεί έναντι κόπωσης, κυρίως στις θέσεις συγκολλήσεων (μεταξύ διαδοχικών ελασμάτων κατά μήκος και εγκαρσίως) και και μεταξύ κελύφους και φλαντζών, καθώς και στις θέσεις κοχλιώσεων μεταξύ φλαντζών. Επομένως, η γεωμετρία και οι συνδέσεις είναι οι παράγοντες που κατά κύριο λόγο καθορίζουν την αντοχή σε λυγισμό και κόπωση, αντίστοιχα, και δευτερευόντως η ποιότητα του χάλυβα. Για τον λόγο αυτό, στους πυλώνες ανεμογεννητριών δεν απαιτείται συνήθως κάτι ισχυρότερο, από πλευράς ποιότητας υλικού, από τις συνήθεις ποιότητες χάλυβα.

Στο σενάριο φόρτισης που είναι συνήθως κρίσιμο για τη διαστασιολόγηση, ο πυλώνας δέχεται την ώση που δημιουργείται από το στροφέιο (rotor). Η ώση προκαλεί τέμνουσα δύναμη που είναι περίπου σταθερή καθ' ύψος του πυλώνα (με μικρή μεταβολή λόγω ανεμοπέσεων επί του ίδιου του πυλώνα) και καμπτική ροπή, η οποία αυξάνεται με την απόσταση από την άτρακτο, είναι δηλαδή αντιστρόφως ανάλογη με το ύψος πάνω από το έδαφος. Επίσης αναπτύσσονται ισχυρές αξονικές θλιπτικές δυνάμεις λόγω του βάρους των πτερυγίων, της άτρακτου, του στροφείου, της γεννήτριας και του ίδιου του πυλώνα. Για να είναι σε θέση η κατασκευή να παραλάβει τα αυξανόμενα προς τα κάτω εντατικά μεγέθη, και ιδίως τη ροπή, προτιμάται ο πυλώνας να έχει κολουροκωνικό σχήμα με γεωμετρικά χαρακτηριστικά και πάχη που καθορίζονται από τους ελέγχους λυγισμού.

Πέραν των αντοχών σε ορθές τάσεις λόγω κάμψης και αξονικής δύναμης, σε λυγισμό και σε κόπωση, σημαντικό ζήτημα που αφορά τον σχεδιασμό είναι και η δυσκαμψία του πυλώνα, η οποία επηρεάζει καθοριστικά την απόκρισή του σε δυναμική φόρτιση, όπως ο άνεμος, που αποτελεί και τη βασικότερη αιτία καταπόνησης της κατασκευής. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, η ιδιοσυχνότητα ενός πυλώνα ανεμογεννήτριας μεγάλου μεγέθους, που σχεδιάζεται ώστε να διαθέτει επαρκή αντοχή για να αντεπεξέλθει στις ακραίες περιπτώσεις φόρτισης, είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τη συχνότητα των περιστρεφόμενων πτερυγίων, κάτι που οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι, σε αντίθεση με τις ανεμογεννήτριες μικρού ή μεσαίου μεγέθους των οποίων ο πυλώνας διαθέτει μεγάλη δυσκαμψία, στην περίπτωση των πολύ υψηλών πυλώνων η δυσκαμψία είναι σημαντικά μειωμένη ώστε να γίνει η απαραίτητη οικονομία υλικού. Προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα συντονισμού ανάμεσα στον ρότορα και στον πυλώνα, απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός, κυρίως της διαμέτρου της βάσης του πυλώνα, ώστε να «ρυθμιστεί» η ιδιοσυχνότητά του.



Όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια, η διά ξηράς μεταφορά τμημάτων με διάμετρο μεγαλύτερη των 4.5 m ή σε αρκετές περιπτώσεις των 3.5 m είναι ανέφικτη. Προκειμένου να αντισταθμιστεί ο περιορισμός στη διάμετρο, είναι δυνατή η αύξηση του πάχους του κελύφους του πυλώνα, με σοβαρές όμως επιπτώσεις, κυρίως στο κόστος κατασκευής, αλλά και στη συγκολλησιμότητα.

## 2.4 Σημασία του μεγέθους μιας ανεμογεννήτριας

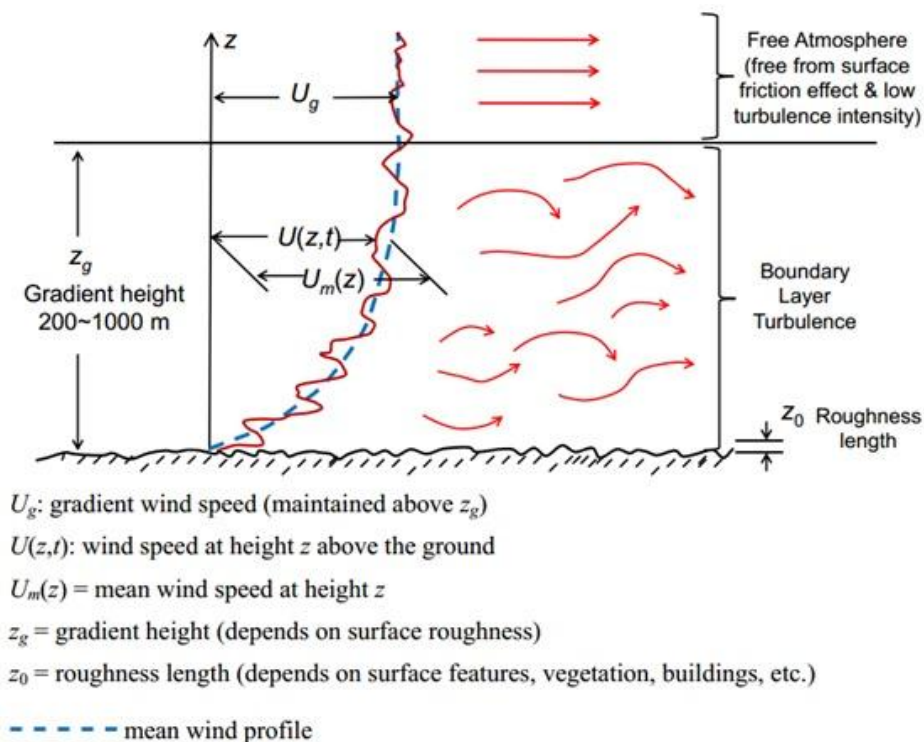
Ο τριπλασιασμός του ύψους των ανεμογεννητριών σε διάστημα μόλις δύο δεκαετιών, όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 2.3, οφείλεται στα πολλαπλά πλεονεκτήματα που προκύπτουν εξαιτίας αυτού, τα σημαντικότερα εκ των οποίων είναι τα παρακάτω:

- Αυξημένη παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα εδαφικής επιφάνειας.
- Βελτιωμένη αεροδυναμική συμπεριφορά εξαιτίας του υψηλότερου αριθμού Reynolds.
- Μειωμένη ευπάθεια των πτερυγίων σε σκόνη, βροχή και έντομα λόγω του αυξημένου πάχους τους.
- Δυνητικές οικονομίες κλίμακας όσον αφορά την κατασκευή και συντήρηση των επιμέρους τμημάτων της.

Σχετικά με το πρώτο από τα προαναφερθέντα και σημαντικότερο πλεονέκτημα που παρουσιάζουν οι ανεμογεννήτριες μεγάλων διαστάσεων, από τον θεμελιώδη νόμο που διέπει τη λειτουργία μίας ανεμογεννήτριας,  $P = 1/2 C_p \rho A V^3$ , είναι εμφανές ότι η παραγόμενη ισχύς αποτελεί συνάρτηση του συντελεστή ισχύος ( $C_p$ ), της πυκνότητας του αέρα ( $\rho$ ), του εμβαδού περιστροφής των πτερυγίων ( $A$ ) και της ταχύτητας ανέμου ( $V$ ). Ο συντελεστής ισχύος μεταβάλλεται με το λόγο ταχύτητας άκρου (tip speed ratio) και αντιπροσωπεύει το κλάσμα της ισχύος του ανέμου που μπορεί να μετατραπεί σε μηχανικό έργο. Όπως, ωστόσο, μπορεί κανείς εύκολα να συνάγει από τους φυσικούς νόμους της αεροδυναμικής, η τιμή 0.593 αποτελεί ανυπέρβλητο όριο του. Σημαντικές μεταβολές, επομένως, στο παραγόμενο έργο είναι δυνατό να επιτευχθούν με δύο τρόπους – είτε με την αύξηση του εμβαδού περιστροφής των πτερυγίων, η οποία συνεπάγεται την επιμήκυσή τους, είτε με την τοποθέτηση του μηχανισμού μετατροπής ενέργειας σε σημεία όπου παρουσιάζονται μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου. Συγκεκριμένα, ο διπλασιασμός του μήκους των πτερυγίων οδηγεί σε τετραπλασιασμό της παραγόμενης ενέργειας, ενώ ο διπλασιασμός της ταχύτητας ανέμου επιφέρει τον οκταπλασιασμό της. Όπως σχηματικά απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5, μέσω της αύξησης του υψομέτρου, αφενός τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας συναντούν εκθετικά μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου και, αφετέρου, η ροή του ανέμου χάνει τον τυρβώδη χαρακτήρα της που προκαλείται λόγω των εδαφικών ανωμαλιών, φυσικών ή τεχνητών, με αποτέλεσμα την ομαλοποίηση της ροής, η οποία με τη σειρά της ενισχύει σημαντικά την απόδοση του μηχανισμού αξιοποίησης του αιολικού δυναμικού.

Παρά το γεγονός ότι τα περισσότερα ζητήματα που αφορούν το σχεδιασμό και χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής υφίστανται σε όλες τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα ανεξαρτήτως μεγέθους, ορισμένα από αυτά καθίστανται σαφώς κρισιμότερα στην περίπτωση των ανεμογεννητριών μεγάλων διαστάσεων και υψηλής δυναμικότητας. Σε αυτά περιλαμβάνονται:

- Η δυσχερής διαχείριση, αποθήκευση και μεταφορά των επιμέρους τμημάτων της κατασκευής στην περιοχή της εγκατάστασης.
- Η περιορισμένη διαθεσιμότητα γερανών με επαρκές ύψος και ανυψωτική ικανότητα.
- Η κρίσιμη σημασία του μηχανισμού αεροδυναμικού ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής και της ισχύος.
- Η δυσκολία στην επισκευσιμότητα και στην πρόβλεψη για ασφαλή πρόσβαση του προσωπικού ελέγχου και συντήρησης σε όλα τα μηχανικά μέρη της κατασκευής.
- Η ανάγκη διατήρησης των μηχανικών μερών που βρίσκονται σε συνεχή επαφή με το περιβάλλον σε καλή κατάσταση με τη ελάχιστη δυνατή συντήρηση.
- Η απαιτούμενη προσοχή στην επιλογή της περιοχής εγκατάστασης προς αποφυγή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.
- Οι αυξημένες απαιτήσεις σχεδιασμού ώστε, λαμβάνοντας υπόψη πιθανά ακραία καιρικά φαινόμενα που μπορεί ανά διαστήματα να παρουσιαστούν, να εξασφαλίζεται μεγάλη διάρκεια ζωής της κατασκευής (περί τα 30 χρόνια).
- Οι ιδιαίτερες απαιτήσεις συμβατότητας του ηλεκτρικού δικτύου ώστε να εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη μεταφορά ρεύματος.
- Η μεγάλη απαιτούμενη αυστηρότητα στους ποιοτικούς ελέγχους κατά την παραγωγή, επεξεργασία και συγκόλληση των χαλύβδινων τμημάτων.



**Σχήμα 2.5:** Μεταβολή της ταχύτητας ανέμου και της τύρβης με την αύξηση του υψομέτρου (UT Austin, 2012)

**Figure 2.5:** Variation of wind speed and turbulence with increased altitude (UT Austin, 2012)

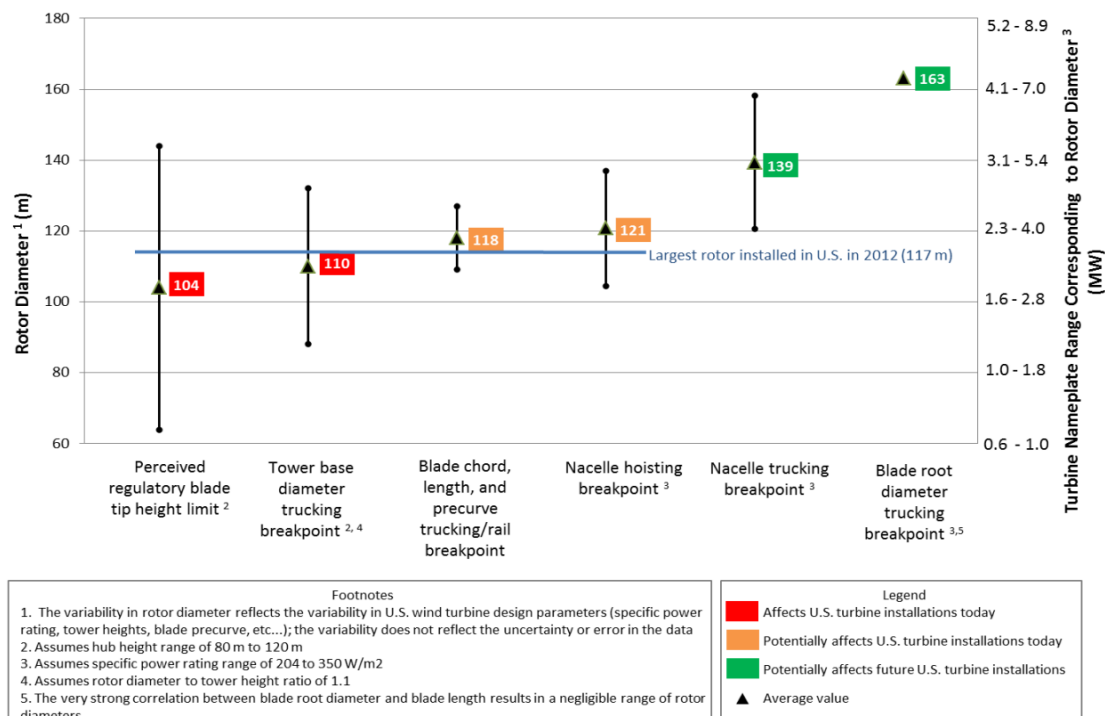
## 2.5 Δυσχέρειες στη μεταφορά και εγκατάσταση ογκωδών τμημάτων ανεμογεννητριών μεγάλου μεγέθους

Όπως προαναφέρθηκε, το μέσο μέγεθος και ιδιαίτερα το ύψος των επίγειων ανεμογεννητριών έχουν αυξηθεί σημαντικά με την πάροδο του χρόνου, ενώ παράλληλα, το σταθμισμένο κόστος της ενέργειας που παράγουν έχει ως επί το πλείστον μειωθεί, κάτι που εν μέρει οφείλεται στις αυξημένες οικονομίες κλίμακας που σχετίζονται με τις ανεμογεννήτριες μεγάλου μεγέθους. Οι τεχνολογίες που καθιστούν δυνατή την κατασκευή ακόμα μεγαλύτερων μονάδων με υψηλότερους πυλώνες, προσφέρουν την ευκαιρία για περαιτέρω μείωση του κόστους αυτού. Ωστόσο, δυσχέρειες που αφορούν τη μεταφορά ογκωδών τμημάτων αποτελούν σημαντικούς περιοριστικούς παράγοντες για το ύψος του πυλώνα και το μέγεθος γενικότερα των επίγειων ανεμογεννητριών. Η αντιμετώπιση αυτών των δυσκολιών που θα επέτρεπε την εγκατάσταση κατά πολύ παραγωγικότερων μονάδων, θα έδινε σημαντική ώθηση στην ανάπτυξη του τομέα εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας και ιδιαίτερος σε περιοχές στις οποίες επικρατούν άνεμοι χαμηλής ή μεσαίας ταχύτητας.

Σε πρόσφατη τεχνική έκθεση του αμερικανικού φορέα National Renewable Energy Laboratory (NREL), πραγματοποιήθηκε μία εκτίμηση των οριακών τιμών μεγέθους (των τιμών εκείνων πέραν των οποίων η περαιτέρω αύξηση του μεγέθους επιφέρει ραγδαία αύξηση του κόστους) που αφορούν τα πτερύγια, τον πυλώνα και την άτρακτο. Τα οριακά σημεία, γενικώς, είναι εφικτό να υπερβληθούν και αυτό ήδη

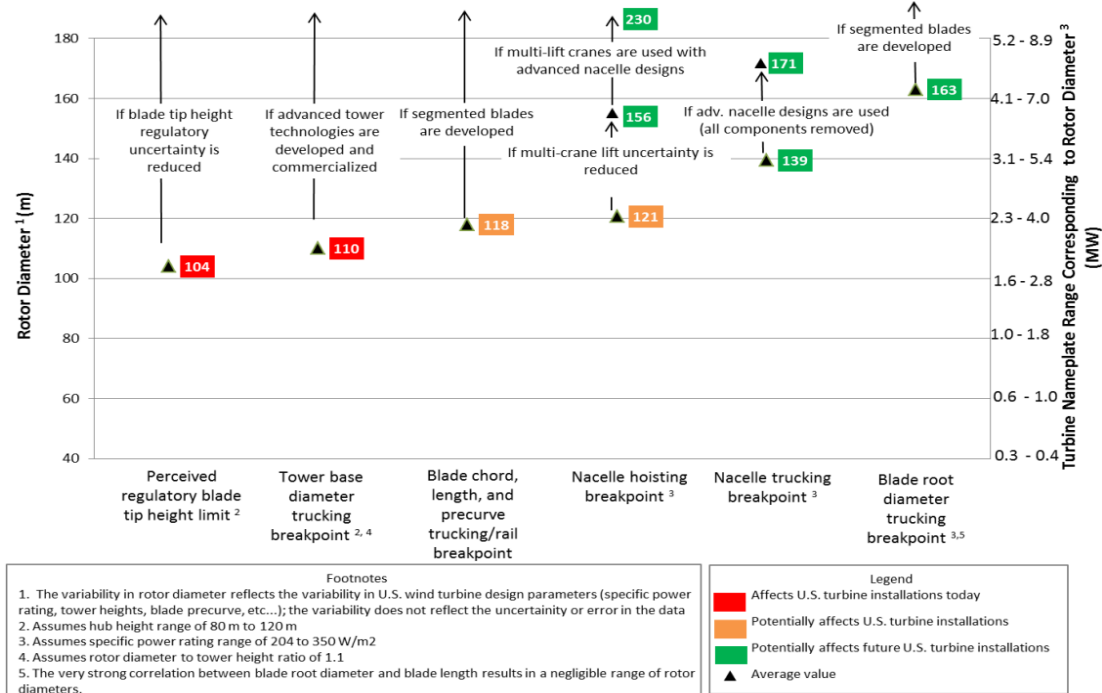
συμβαίνει σε πολλές περιπτώσεις, όχι ωστόσο χωρίς σημαντικές θυσίες στην οικονομικότητα της κατασκευής. Στη συγκεκριμένη μελέτη, τα οριακά σημεία κατατάχθηκαν με κριτήριο την επίπτωσή τους στην εγκατάσταση μονάδων αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας της τρέχουσας χρονικής περιόδου αλλά και μελλοντικών. Επιπλέον, οι συγγραφείς πραγματοποίησαν αναλύσεις, ώστε να διαπιστώσουν ποιες συγκεκριμένα είναι οι προκλήσεις εκείνες που αφορούν τη μεταφορά και επηρεάζουν την κατασκευή των σημερινών αιολικών πάρκων, αλλά και να προσδιορίσουν την αύξηση στο μέγεθος των ανεμογεννητριών που θα μπορούσε να επιτευχθεί αν οι προκλήσεις αυτές αντιμετωπιζόνταν αποτελεσματικά. Για τις αναλύσεις αυτές, η διάμετρος του δρομέα χρησιμοποιήθηκε ως αντιπροσωπευτικό μέγεθος, καθώς παρουσιάζει μεγάλη και άμεση συσχέτιση με τα επιμέρους μεγέθη των διαστάσεων των περυγίων, του πωλώνα και της ατράκτου.

Το Σχήμα 2.6 και το Σχήμα 2.7 απεικονίζουν τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 2.6 αναδεικνύονται τα προβλήματα μεταφοράς που έχουν επίπτωση στις σημερινές εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων, ενώ το Σχήμα 2.7 παρουσιάζει τη δυνητική αύξηση στις διαστάσεις των ανεμογεννητριών αν τα προβλήματα αυτά επιλύονταν. Τα μαύρα ευθύγραμμα τμήματα αντιπροσωπεύουν το εύρος των διαμέτρων των δρομέων οι οποίες θα επηρεάζονταν θετικά από την πιθανή αντιμετώπιση της εκάστοτε δυσχέρειας.



**Σχήμα 2.6:** Σύγκριση επιλεγμένων οριακών τιμών, σχετικών με τα προβλήματα μεταφοράς τμημάτων ανεμογεννητριών μεγάλου μεγέθους, στις Η.Π.Α. (NREL, 2014)

**Figure 2.6:** Comparison of selected upper values related to transportation problems of large wind turbine parts in U.S.A. (NREL, 2014)



**Σχήμα 2.7:** Μέγιστα δυνητικά μεγέθη επίγειων ανεμογεννητριών σε περίπτωση επίλυσης των προβλημάτων μεταφοράς ογκωδών τμημάτων (NREL, 2014)

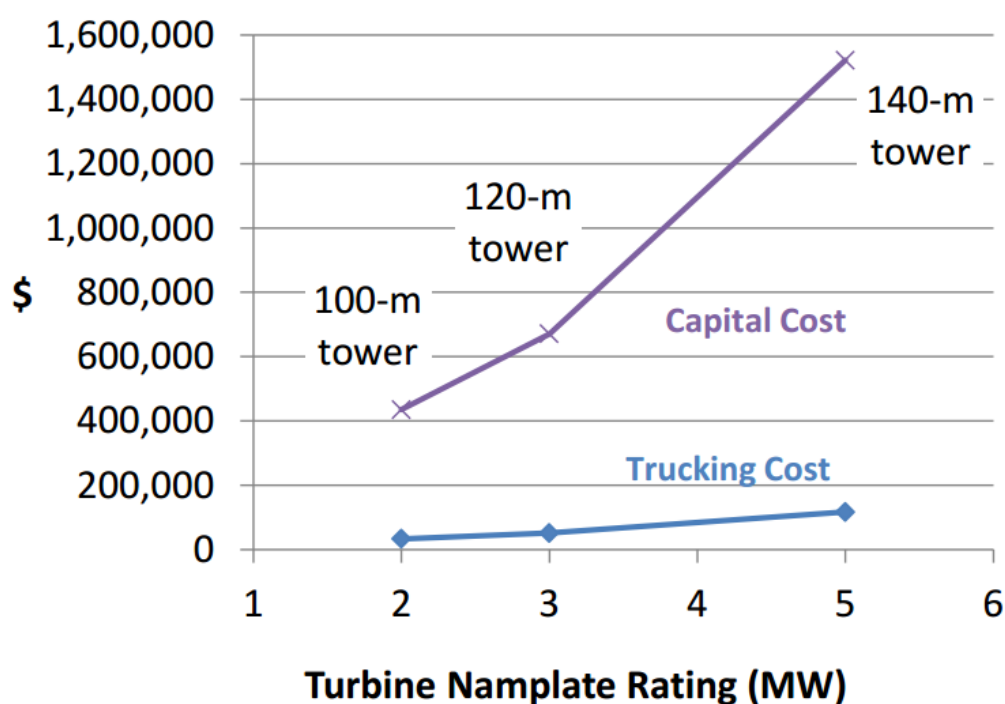
**Figure 2.7:** Largest potential size of on-shore wind turbines in case of solving issues of transportability of large parts (NREL, 2014)

Το πιο απαιτητικό εγχείρημα όσον αφορά την εγκατάσταση μίας ανεμογεννήτριας μεγάλου μεγέθους είναι η τοποθέτηση της απράκτου στην κορυφή του πυλώνα, υπό την έννοια ότι απαιτεί τη μεγαλύτερη δυνατή ισχύ και το μεγαλύτερο δυνατό ύψος γερανού, συγκριτικά με τα υπόλοιπα τμήματα της κατασκευής, λόγω της μάζας (περί τους 170 τόννους για μία γεννήτρια των 5 MW) και του ύψους τοποθέτησής της. Η διαθεσιμότητα των γερανών μειώνεται δραματικά, όταν η απαιτούμενη ανυψωτική δύναμη υπερβαίνει τους 600 τόννους, ενώ η μετακίνηση και εγκατάστασή τους στις περιοχές ανέγερσης είναι ιδιαίτερα δυσχερής και συχνά ανέφικτη. Μία λύση που έχει προταθεί αποτελεί η ταυτόχρονη χρήση δύο γερανών ίδιας δυναμικότητας με περιορισμένη προς το παρόν εφαρμογή, λόγω της ειδικής εκπαίδευσης που απαιτείται για τους χειριστές.

Σημαντικό πρόβλημα, ωστόσο, παρουσιάζεται επίσης στη μεταφορά των πτερυγίων μεγάλων διαστάσεων στο εργοτάξιο. Οι στροφές, οι στενοί δρόμοι, καθώς και το πέρασμα κάτω από γέφυρες και άλλα εμπόδια αποτελούν παράγοντες που καθιστούν τη μεταφορά απαγορευτική, ενώ στην περίπτωση που υφίστανται παράδρομοι στην περιοχή και τα παραπάνω είναι δυνατό να αποφευχθούν, συνήθως τα όρια φόρτισης βάσει των οποίων οι δρόμοι αυτοί είναι σχεδιασμένοι, δεν τους επιτρέπουν να δεχθούν το βάρος των πτερυγίων. Το πρόβλημα αυτό περιορίζει το μήκος των πτερυγίων που μπορούν να μεταφερθούν οδικώς στα 53 έως και 62 m, ανάλογα με τον τύπο τους.

Παρόμοιος περιορισμός υφίσταται και στην περίπτωση της μεταφοράς των κατώτερων τμημάτων του πυλώνα από χάλυβα, που είναι και οι πλέον διαδεδομένοι, η διάμετρος

των οποίων απαιτείται να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη, ώστε η κατασκευή να είναι σε θέση να φέρει τις επιπρόσθετες εντάσεις που προκαλεί το αυξημένο ύψος και οι διευρυμένες διαστάσεις γενικότερα. Για τους ίδιους λόγους που υφίστανται και στην περίπτωση των πτερυγίων, και υπό τις ευνοϊκότερες συνθήκες, η μέγιστη διάμετρος τμήματος του πυλώνα που είναι δυνατόν να μεταφερθεί οδικώς είναι τα 4.3 m έως και 4.6 m. Η κατασκευή πυλώνων ύψους έως και 160 m παραμένει εφικτή μέσω της αύξησης του πάχους του κελύφους, ώστε η διάμετρος των 4.3 m να επαρκεί, πρακτική που ωστόσο αυξάνει κατακόρυφα τη μάζα και το κόστος κατασκευής τους, καθιστώντας τους πλήρως αντικοινωνικούς. Η αύξηση αυτή του κόστους κατασκευής των πυλώνων αποτελεί σαφώς σημαντικότερο πρόβλημα από το κόστος μεταφοράς των τμημάτων τους στην περιοχή ανέγερσης, αφού, όπως δείχνει το Σχήμα 2.8, το ποσοστό συμμετοχής του κόστους μεταφοράς στο συνολικό είναι χαμηλότερο του 8%.



**Σχήμα 2.8:** Εκτίμηση του κόστους μεταφοράς και κατασκευής συμβατικών, χαλύβδινων πυλώνων κοίλης διατομής, υποθέτοντας απόσταση μεταφοράς 300 μιλίων (~483 km), \$0.50/τόννο/μίλι και διάμετρο βάσης περιορισμένη στα 4.3 m (NREL, 2014)

**Figure 2.8:** Estimation of cost of transportation and erection of conventional steel pylons with circular hollow sections assuming transportation distance of 300 miles (~483 km), \$0.50/ton/mile and base diameter not larger than 4.3 m (NREL, 2014)

## 2.6 Εναλλακτικές λύσεις για την κατασκευή πυλώνων

Εναλλακτικές επιλογές για την κατασκευή πυλώνων ανεμογεννητριών, ώστε να παρακαμφθούν τα εμπόδια που παρουσιάζονται στη μεταφορά τμημάτων διαμέτρου άνω των 4 m, εφαρμόζονται ήδη και είναι αρκετά διαδεδομένες, όμως σε κάθε

περίπτωση δεν απουσιάζουν τα μειονεκτήματα, τα οποία δίνουν ώθηση στην περαιτέρω έρευνα. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι:

- Πυλώνες μορφής δικτυώματος, οι οποίοι απαιτούν τη λιγότερη δυνατή ποσότητα υλικών σε σχέση με τη δυσκαμψία που διαθέτουν – είναι δυνατή η μείωση της μάζας του χάλυβα έως και κατά 50% συγκριτικά με έναν συμβατικό χαλύβδινο πυλώνα κοίλης διατομής. Επιπλέον, εξαιτίας του μεγάλου αριθμού συνδέσεων, η ικανότητα απόσβεσης της κατασκευής είναι μεγαλύτερη, ωστόσο, για τον ίδιο λόγο η δυναμική απόκρισή της καθίσταται δύσκολα ελέγξιμη. Η εφαρμογή αυτής της λύσης είναι περιορισμένη, λόγω του αρνητικού αντίκτυπου που έχει στο περιβάλλον από αισθητικής πλευράς και λόγω αυξημένου κόστους των συνδέσεων και των εργασιών ανέγερσης, σε σύγκριση με την πιο αυτοματοποιημένη διαδικασία κατασκευής των συμβατικών πυλώνων.
- Πυλώνες από σκυρόδεμα, η σκυροδέτηση των οποίων πραγματοποιείται επί τόπου, απλοποιώντας τη μεταφορά και την ανέγερση. Το σημαντικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η δυσχέρεια στη διεξαγωγή ποιοτικών ελέγχων. Οι εργασίες απαιτούν μεγάλη προσοχή, ιδιαίτερα π.χ. όταν το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται σε ύψος 100 m και υπό χαμηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια του χειμώνα.
- Πυλώνες από προκατασκευασμένα τμήματα σκυροδέματος, των οποίων, αντίθετα με τους προηγούμενους, η σκυροδέτηση γίνεται σε κατάλληλες συνθήκες στο εργαστήριο. Στην περίπτωση αυτή το κόστος εργασιών μειώνεται και ο ποιοτικός έλεγχος πραγματοποιείται με μεγαλύτερη ευχέρεια. Το κόστος μεταφοράς των τμημάτων ωστόσο είναι σημαντικό καθώς οι απαιτήσεις σε μάζα είναι κατά πολύ αυξημένες σε σύγκριση με τους χαλύβδινους πυλώνες και επιπλέον, όπως και σε κάθε άλλη περίπτωση κατασκευής από σκυρόδεμα απαιτείται οπλισμός και ενδεχομένως προένταση προκειμένου να μπορούν να παραληφθούν εφελκυστικές τάσεις.
- Υβριδικοί πυλώνες, οι οποίοι συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα τόσο του χάλυβα όσο και του σκυροδέματος. Η βάση του πυλώνα κατασκευάζεται από σκυρόδεμα, ώστε να παρακαμφθούν τα προβλήματα μεταφοράς, ενώ ο υπόλοιπος πυλώνας παραμένει χαλύβδινος. Παρά το επιπρόσθετο κόστος σύνδεσης του χαλύβδινου τμήματος με εκείνο από σκυρόδεμα, η λύση αυτή για το πρόβλημα της κατασκευής επίγειων ανεμογεννητριών μεγάλου μεγέθους είναι με τα σημερινά δεδομένα η πιο δόκιμη.

Καινοτόμες λύσεις και τεχνολογίες προς την αντιμετώπιση του ζητήματος της μεταφοράς, όπως περύγια αποτελούμενα από μικρότερα τμήματα που συναρμολογούνται στο χώρο ανέγερσης και επί τόπου κατασκευή πυλώνων, διερευνώνται διεθνώς, καθώς είναι προφανές ότι οι σημερινές και μελλοντικές ενεργειακές ανάγκες απαγορεύουν το συμβιβασμό στους υπάρχοντες περιορισμούς και καθιστούν επιτακτική την ανάγκη εξεύρεσης λύσεων στα πρακτικά προβλήματα που προαναφέρθηκαν.

# 3

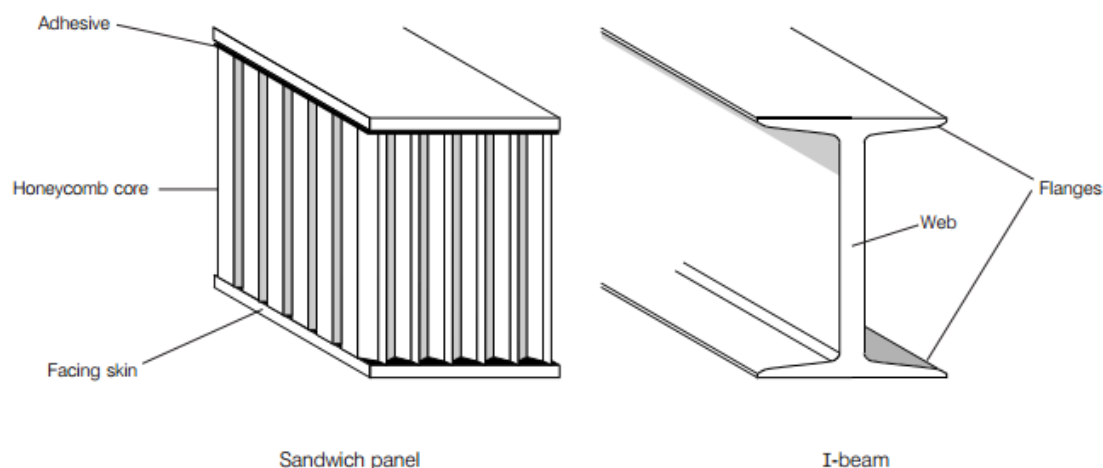
## Διατομές τύπου sandwich

---

### 3.1 Γενική περιγραφή

Η εναλλακτική λύση που διερευνάται στα πλαίσια του συγκεκριμένου ερευνητικού προγράμματος και αναμένεται να συμβάλλει στην αντιμετώπιση των προαναφερθέντων προβλημάτων, αφορά τη χρήση κελυφών τύπου sandwich σε पुलώνες άνω των 100 m. Η διατομή sandwich συνίσταται από δύο ελάσματα, συνήθως χαλύβδινα, που περικλύουν έναν πυρήνα από ελαφρύ υλικό χαμηλότερης πυκνότητας, ο οποίος τα διατηρεί στη θέση τους ως συνδετικό μέσο. Ως ιδέα έχει μακρά ιστορία με τις πρώτες μελέτες να ξεκινούν στις αρχές της δεκαετίας του 1940. Μέσα σε περίπου 70 χρόνια, η διατομή sandwich έχει αποτελέσει αντικείμενο αναρίθμητων μελετών, θεωρητικών και πειραματικών, με ποικίλες εφαρμογές σε πολλούς τομείς του ευρύτερου πεδίου της μηχανικής, χωρίς να εξαιρείται ο τομέας αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας, καθώς η χρήση των διατομών sandwich είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στην κατασκευή περυγίων των ανεμογεννητριών, όχι όμως και στην κατασκευή पुलώνων, που αποτελεί το θέμα της συγκεκριμένης έρευνας. Το βασικό πλεονέκτημα μίας τέτοιας διατομής είναι η βελτιωμένη δυσκαμψία με ανεπαίσθητη αύξηση του βάρους, σε σύγκριση με μία συμβατική κοίλη διατομή από συμπαγή χάλυβα. Σχηματική απεικόνιση μίας διατομής sandwich, σε αντιπαραβολή με μία αμιγώς χαλύβδινη διατομή, αποτελεί το Σχήμα 3.1.





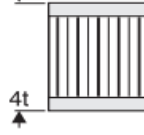


**Σχήμα 3.1:** Δομή δοκού τύπου sandwich σε σύγκριση με δοκό διατομής I (Hexcel, 2000)

**Figure 3.1:** Cross-section of sandwich-type beam compared to I-beam (Hexcel, 2000)

Τα δύο ελάσματα του sandwich μπορούν να παρομοιαστούν με τα πέλατα μίας διατομής I, τα οποία παραλαμβάνουν τις ορθές τάσεις στις οποίες υποβάλλεται η καμπτόμενη διατομή, με το ένα έλασμα υπό θλίψη και το άλλο υπό εφελκυσμό. Ομοίως, ο πυρήνας αντιστοιχεί στον κορμό της διατομής I, καθώς αντιστέκεται στα διατμητικά φορτία, αυξάνει τη δυσκαμψία διατηρώντας τα ελάσματα σε απόσταση μεταξύ τους και μάλιστα υπερέχει της διατομής I, αφού επιπλέον προσφέρει στα ελάσματα των πελμάτων πλήρη πλευρική στήριξη σε όλη τους την επιφάνεια, δημιουργώντας μία ομοιόμορφα δύσκαμπτη κατασκευή. Το συνδετικό μέσο δημιουργεί μία ισχυρή σύνδεση των τμημάτων του sandwich και τους επιτρέπει να λειτουργούν ως ενιαία κατασκευή με υψηλή αντοχή έναντι στρεπτικών και καμπτικών φορτίσεων, ενώ παράλληλα προστατεύει τα θλιβόμενα ελάσματα από τοπικό λυγισμό. Το Σχήμα 3.2 δείχνει τη σχετική μεταβολή δυσκαμψίας, ελαστικής αντοχής και βάρους μίας διατομής sandwich σε σύγκριση με μία συμπαγή διατομή.

Επισημαίνεται βέβαια ότι σε ένα κυλινδρικό κέλυφος τύπου sandwich η κάμψη προκαλεί εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις στις απέναντι περιοχές του κελύφους, με αποτέλεσμα στις αντίστοιχες περιοχές και τα δύο ελάσματα καθώς και ο πυρήνας να καταπονούνται από ομόσημες ορθές τάσεις.

	Solid Material	Core Thickness $t$	Core Thickness $3t$
			
Stiffness	1.0	7.0	37.0
Flexural Strength	1.0	3.5	9.2
Weight	1.0	1.03	1.06

**Σχήμα 3.2:** Δυσκαμψία, ελαστική αντοχή και βάρος διατομής sandwich σε σχέση με μια συμπαγή διατομή (Hexcel, 2000)

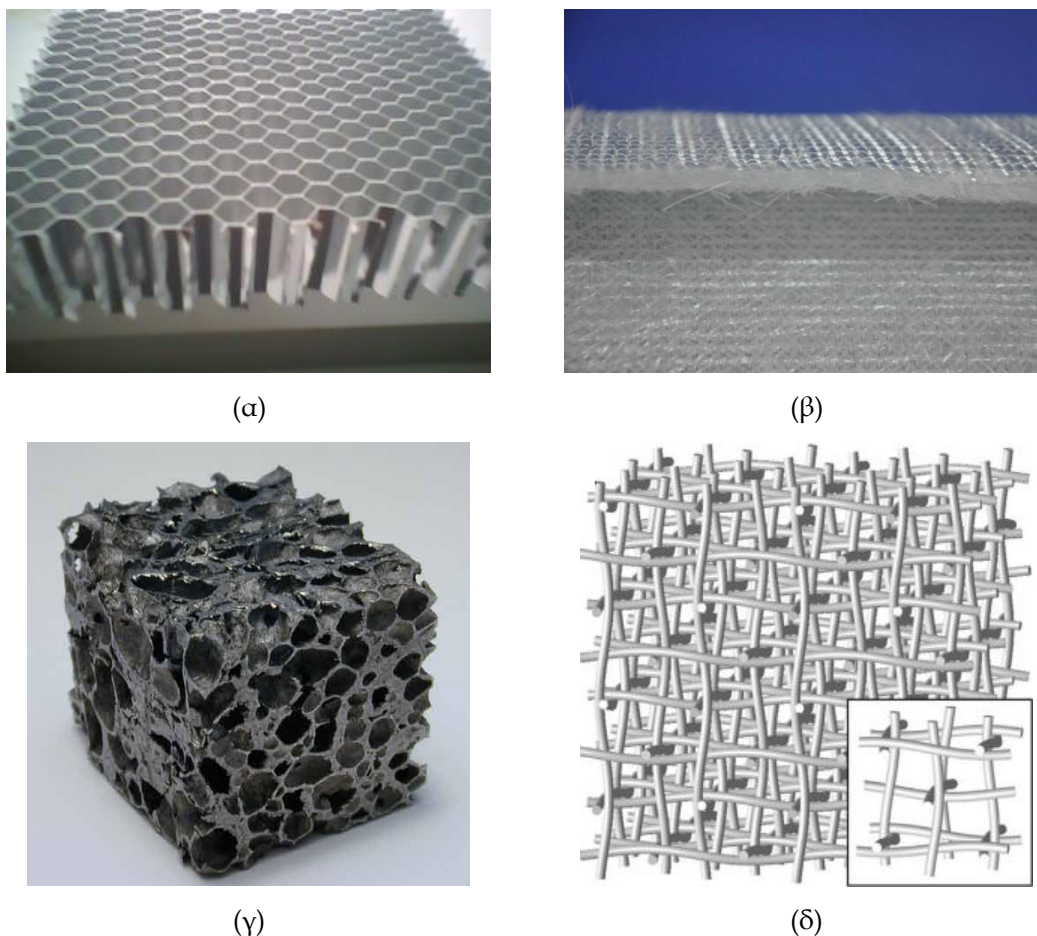
**Figure 3.2:** Relative stiffness, flexural strength and weight of sandwich panels compared to solid panels

### 3.2 Υλικά

Η παραγωγή νέων υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες και η εφαρμογή τους σε κατασκευές sandwich αποτελεί ένα διαρκώς εμπλουτιζόμενο επιστημονικό πεδίο με ήδη πολύ πλούσια βιβλιογραφία. Μία γενική επισκόπηση των μέχρι τώρα μελετών και εφαρμογών δείχνει ότι τα ελάσματα αποτελούνται συνήθως από κράματα χάλυβα ή αλουμινίου, ή από σύνθετα υλικά, όπως εποξικά, οπλισμένα με ίνες γυαλιού. Ο πυρήνας συνήθως αποτελείται από κάποιο κυψελωτό υλικό, είτε μεταλλικό (ως επί το πλείστον αλουμίνιο) (Σχήμα 3.3α), είτε πλαστικό οπλισμένο με ίνες γυαλιού (Σχήμα 3.3β) ή ανθρακονήματα. Εξίσου δημοφιλή ως υλικά πυρήνα είναι και τα αφρώδη υλικά (foams), ανοιχτής ή κλειστής δομής, συχνά μεταλλικά (Σχήμα 3.3γ), ενώ μία απλούστερη επιλογή αποτελεί και κάποιο μέταλλο (κυρίως χάλυβας ή αλουμίνιο) με κυματοειδές σχήμα. Άλλα συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται για τον πυρήνα μιας διατομής sandwich είναι το σκυρόδεμα και ελαστομερή, όπως η πολυουρεθάνη και η διογκωμένη πολυστερίνη. Τέλος, ως πυρήνας είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί και κάποιο μέταλλο σε μορφή μικροσκοπικών συρμάτων, πλεγμένων με τέτοιο τρόπο ώστε η δομή τους να μοιάζει με δικτύωμα (Σχήμα 3.3δ). Παρά την πληθώρα των υλικών που είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν, είτε ως ελάσματα, είτε ως πυρήνες, στην πράξη οι συνδυασμοί που συναντώνται στις κατασκευές sandwich είναι περιορισμένοι σε ένα μικρό εύρος. Για παράδειγμα, ένα μεταλλικό αφρώδες υλικό (metal foam) γενικώς συνδυάζεται με μεταλλικά ελάσματα, ενώ ένα πολυμερικό αφρώδες υλικό (polymeric foam) συνήθως χρησιμοποιείται με ελάσματα από σύνθετα υλικά.

Σε περιπτώσεις φορέων με σχήμα κυλινδρικό ή και ελαφρώς κωνικό, παρεμφερών με τους πυλώνες ανεμογεννητριών, στους οποίους έχει δοκιμαστεί η διατομή sandwich, έχει εφαρμοστεί η λύση του συνδυασμού χαλύβδινων ελασμάτων με πυρήνα από σκυρόδεμα, που συνδυάζει τα γενικά πλεονεκτήματα των διατομών sandwich με το χαμηλό κόστος παρασκευής του σκυροδέματος, σε σύγκριση με τα πιο σύγχρονα υλικά

που αναφέρθηκαν, που απαιτούν πιο εξελιγμένη τεχνολογία και τεχνογνωσία για την παραγωγή και διαχείρισή τους.



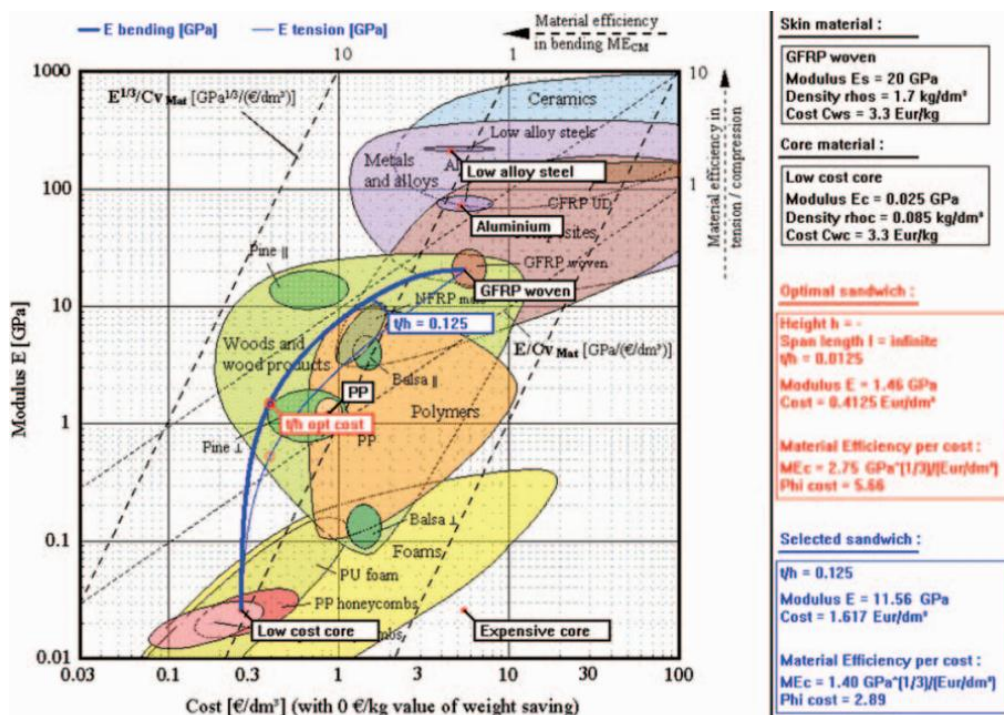
**Σχήμα 3.3:** (α) κυψελωτό υλικό (honeycomb) από αλουμίνιο (Suzhou Yida Purifying Laboratory Equipments Co.ltd, 2014), (β) κυψελωτό υλικό από υαλοβάμβακα (Changzhou Tianma Group Corp., 2014), (γ) μεταλλικό αφρώδες υλικό (metal foam) από αλουμίνιο (König et al., 2000) και (δ) χαλύβδινο συρμάτινο πλέγμα μορφής WBC (Lee and Kang, 2014)

**Figure 3.3:** (a) aluminum honeycomb (Suzhou Yida Purifying Laboratory Equipments Co.ltd, 2014), (b) fiberglass honeycomb (Changzhou Tianma Group Corp., 2014), (c) aluminum foam (König et al., 2000) and (d) Wire-woven Bulk Cross (WBC) (Lee and Kang, 2014)

Προκειμένου να αντιμετωπίσουν κάποια από τα μειονεκτήματα των ευρέως χρησιμοποιούμενων υλικών στις κατασκευές sandwich, κάποιοι ερευνητές δοκίμασαν με επιτυχία να χρησιμοποιήσουν συνδυασμούς διαφορετικών υλικών, είτε στον πυρήνα, είτε σε επιπρόσθετες στρώσεις ανάμεσα στον πυρήνα και τα ελάσματα, αλλά και να αναμειξουν τελείως διαφορετικά υλικά που παραδοσιακά δε χρησιμοποιούνταν μαζί - όπως μέταλλα με πολυμερή - με εφαρμογή στην κατασκευή κτιρίων (πανέλα για τοίχους ή οροφές) και στην αυτοκινητοβιομηχανία (λεπτά ελάσματα από χάλυβα ή αλουμίνιο, με πυρήνα από πολυμερές).

Προς διευκόλυνση της επιλογής των υλικών μίας διατομής sandwich, μέσα από την πληθώρα των πιθανών συνδυασμών, έχουν δημιουργηθεί βοηθητικά διαγράμματα τα

οποία προσφέρουν μία καλή εμποικία των επιλογών, με κριτήριο τη σχέση της αντοχής του υλικού με την εκάστοτε περιοριστική παράμετρο, όπως το βάρος ή το κόστος παραγωγής του (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4: Διάγραμμα επιλογής συνδυασμού υλικών για διατομή sandwich, βάσει σχέσης της συμπεριφοράς σε κάμψη με το κόστος του υλικού. (Pflug & Verpoest, 2006)

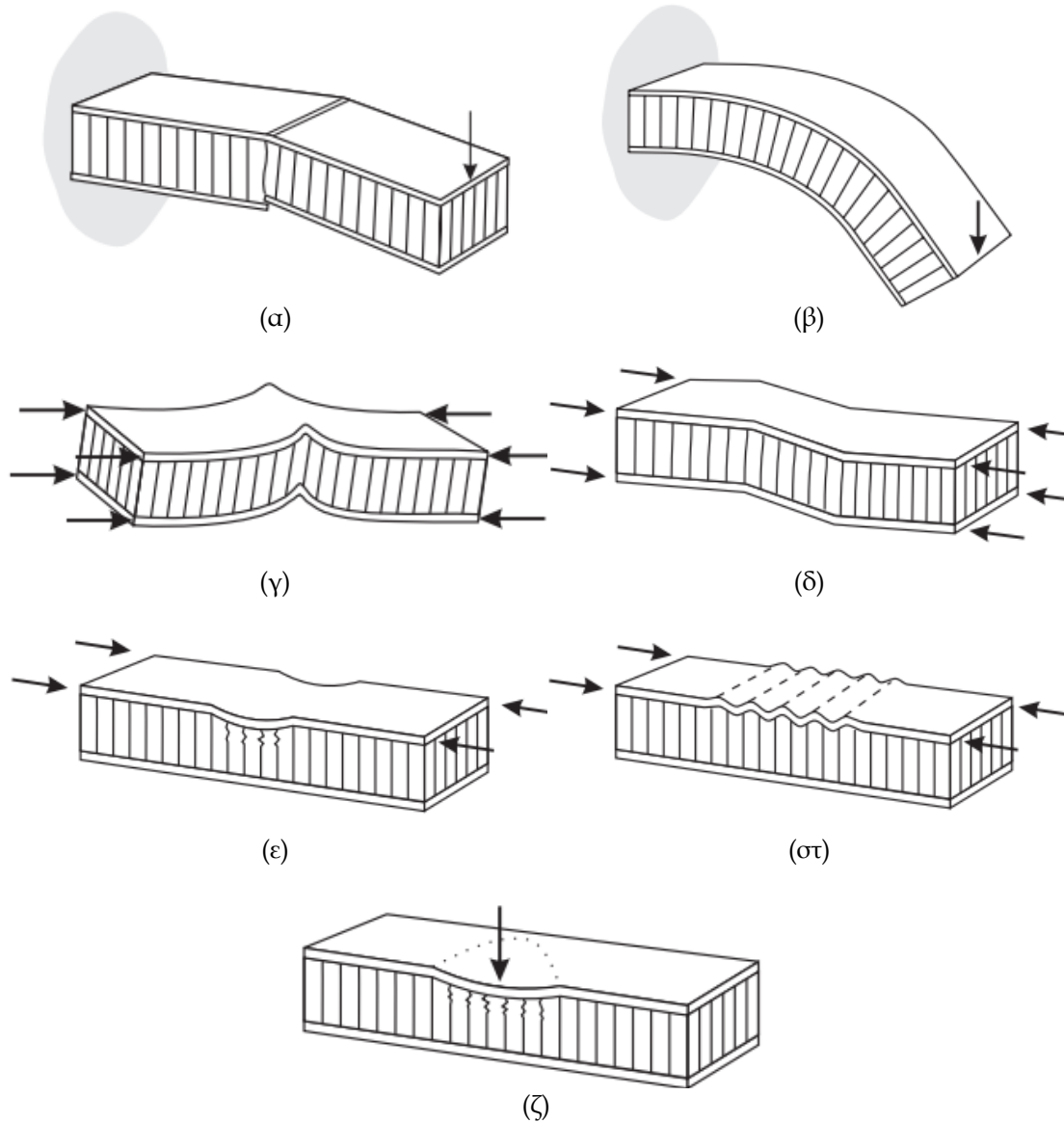
Figure 3.4: Sandwich selection chart for material efficiency in bending per material cost (Pflug & Verpoest, 2006)

### 3.3 Μηχανισμοί αστοχίας

Οι κύριοι μηχανισμοί αστοχίας μίας κατασκευής sandwich είναι:

- Αστοχία ελάσματος σε θλίψη (Σχήμα 3.5α), λόγω ανεπαρκούς αντοχής του ελάσματος ή ανικανότητας του συνδετικού μέσου να μεταφέρει με ασφάλεια τα διατμητικά φορτία μεταξύ του ελάσματος και του πυρήνα.
- Υπεβολική παραμόρφωση (Σχήμα 3.5β), λόγω ανεπαρκούς δυσκαμψίας σε κάμψη ή/και διάτμηση.
- Καθολικός λυγισμός (Σχήμα 3.5γ), εξαιτίας ανεπαρκούς πάχους και μέτρου διάτμησης του πυρήνα σε σχέση με τις εφαρμοζόμενες θλιπτικές τάσεις.
- Αστοχία πυρήνα σε διάτμηση (Σχήμα 3.5δ), λόγω ανεπαρκούς πάχους και μέτρου διάτμησης.
- Ρυτίδωση ελάσματος (Σχήμα 3.5ε), που αποτελεί ένα είδος τοπικού λυγισμού λόγω χαμηλής αξονικής δυσκαμψίας του ελάσματος ή ανεπαρκούς θλιπτικής αντοχής του πυρήνα.

- Λυγισμός ελάσματος εντός «κυψέλης» (Σχήμα 3.5στ), που αποτελεί ένα ακόμα είδος τοπικού λυγισμού και συμβαίνει όταν ο πυρήνας αποτελείται από κυψελωτό υλικό, οι «κυψέλες» του οποίου δεν είναι επαρκώς μικρές για το συγκεκριμένο είδος ελάσματος.
- Τοπική αστοχία πυρήνα σε θλίψη (Σχήμα 3.5ζ), υπό συγκεντρωμένη φόρτιση, λόγω ανεπαρκούς θλιπτικής αντοχής του.



**Σχήμα 3.5:** Μηχανισμοί αστοχίας δοκού sandwich: (α) αστοχία ελάσματος σε θλίψη, (β) υπερβολική παραμόρφωση, (γ) καθολικός λυγισμός, (δ) αστοχία πυρήνα σε διάτμηση, (ε) ρυτίδωση ελάσματος, (στ) λυγισμός ελάσματος εντός «κυψέλης», (ζ) τοπική αστοχία πυρήνα σε θλίψη (Hexcel, 2000)

**Figure 3.5:** Failure mechanisms of a sandwich beam: (a) skin compression failure, (b) excessive deflection, (c) panel buckling, (d) shear crimping, (e) skin wrinkling, (f) intra cell buckling, (g) core local compression failure (Hexcel, 2000)



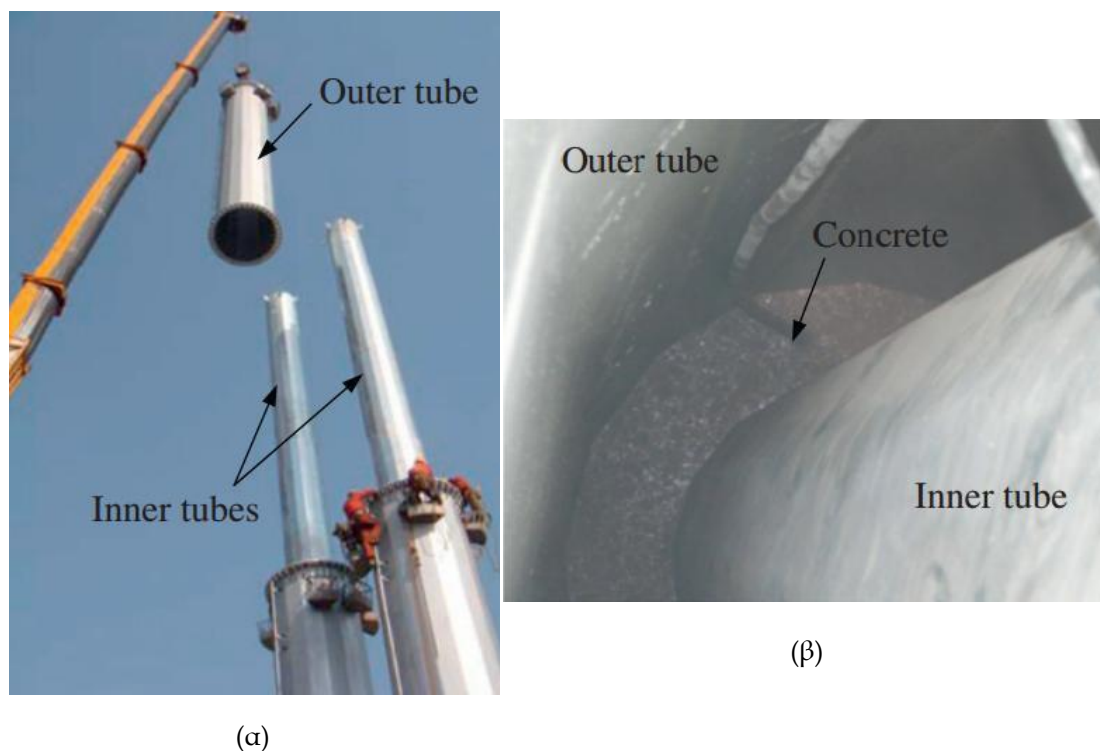
# 4

## Χρήση διατομής sandwich σε πυλώνες ανεμογεννητριών

---

### 4.1 Εισαγωγή

Παρά την ευρεία χρήση των διατομών sandwich, οι οποίες έχουν αντικαταστήσει τις συμβατικές διατομές των κατασκευών σε πολλά πεδία ενδιαφέροντος της σύγχρονης μηχανικής, η εφαρμογή τους σε πυλώνες ανεμογεννητριών δεν έχει έως τώρα πραγματοποιηθεί σε επίπεδο κατασκευής, ενώ και ως ερευνητικό αντικείμενο αναφέρεται σε εξαιρετικά περιορισμένη βιβλιογραφία. Συναφής έρευνα έχει ωστόσο παρουσιαστεί όσον αφορά τα μέλη CFDST (Concrete-Filled Double-skin Steel Tubular members), όπως αναφέρονται εν συντομία στη διεθνή βιβλιογραφία, τα οποία αποτελούν σύνθετους φορείς που αποτελούνται από έναν εσωτερικό και έναν εξωτερικό χαλύβδινο κυλινδρικό σωλήνα με πλήρωση του ενδιάμεσου χώρου με σκυρόδεμα (Σχήμα 4.1). Η συμπεριφορά τους υπό αξονική ή καμπτική καταπόνηση έχει σε σημαντικό βαθμό μελετηθεί και, ενώ οι σχετικές έρευνες δεν είναι προσαρμοσμένες στις ιδιαίτερες απαιτήσεις ενός πυλώνα σύγχρονης ανεμογεννήτριας μεγάλου μεγέθους, προσφέρουν πάντως σημαντική πληροφόρηση, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για τη διερεύνηση της πιθανής εφαρμογής της έννοιας sandwich και στην εξειδικευμένη αυτή περίπτωση.



**Σχήμα 4.1:** Ανέγερση पुलώνα τηλεπικοινωνιών τύπου CFDSST - (α) εγκατάσταση εσωτερικού και εξωτερικού χαλύβδινου σωλήνα, (β) πλήρωση πυρήνα με σκυρόδεμα (Li et al., 2012)

**Figure 4.1:** Application of CFDSST columns in transmission tower. (a) CFDSST columns during construction, (b) concrete placement

#### 4.2 Συμπεριφορά κυλινδρικών φορέων διατομής sandwich υπό αξονική καταπόνηση

Στις προαναφερθείσες διερευνήσεις, έχει βρεθεί ότι, υπό αξονική καταπόνηση, ο εσωτερικός χαλύβδινος σωλήνας ενός φορέα CFDSST προσφέρει σημαντική στήριξη στο σκυρόδεμα, πριν οι επιβαλλόμενες τάσεις φθάσουν την τελική αντοχή του. Όσον αφορά τη λυγηρότητα, για τον εκάστοτε λόγο της συνολικής διαμέτρου της διατομής προς το συνολικό πάχος του τοιχώματος, στην περίπτωση του εξωτερικού σωλήνα μπορεί να εφαρμοστεί ο αντίστοιχος περιορισμός που ισχύει για κυλινδρικό φορέα με ένα εξωτερικό χαλύβδινο έλασμα και ολόκληρο τον εσωτερικό χώρο πληρωθέντα με σκυρόδεμα (CFST), ενώ στην περίπτωση του εσωτερικού σωλήνα είναι καταλληλότερη η εφαρμογή του περιορισμού λυγηρότητας που αφορά έναν συμβατικό χαλύβδινο φορέα κοίλης κυκλικής διατομής. Από τις ίδιες έρευνες έχει αποδειχθεί ότι η διατομή φορέα CFDSST είναι, όσον αφορά τα θλιπτικά φορτία, πλήρως ενεργή στο σύνολό της, ενώ η συμπεριφορά της είναι παρόμοια με αυτήν της διατομής ενός φορέα CFST. Ωστόσο, η πρώτη παρουσιάζει κάποια επιπλέον πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τη δεύτερη, όπως μικρότερο βάρος, μεγαλύτερη ικανότητα απόσβεσης και βελτιωμένη αντοχή σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, μια ιδιότητα που, για την εφαρμογή σε पुलώνες ανεμογεννητριών, καθιστά τη συγκεκριμένη διατομή σαφώς καταλληλότερη. Επιπλέον, διαθέτει σημαντικό χρονικό περιθώριο αστοχίας από πυρκαγιά, καθώς ο

πυρήνας σκυροδέματος προστατεύει τον εσωτερικό χαλύβδινο σωλήνα, καθυστερώντας την έκθεση στις καταστροφικά υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην περίπτωση αυτή.

Ένα πρακτικό ζήτημα, που επηρεάζει ωστόσο το σχεδιασμό και αξίζει να σημειωθεί, είναι ότι κατά την κατασκευή ενός φορέα CFDST, ο εσωτερικός και ο εξωτερικός χαλύβδινος σωλήνας εγκαθίστανται, προς διευκόλυνση της κατασκευής, συνήθως πριν τη σκυροδέτηση (Σχήμα 4.1), με αποτέλεσμα να επιβαρύνονται αξονικά, πρώιμα, με το ίδιο βάρος τους, το βάρος του υγρού σκυροδέματος και άλλα κατασκευαστικά φορτία, πριν ο φορέας λάβει την τελική του μορφή, με συνέπεια, οι μόνιμες τάσεις και παραμορφώσεις που δημιουργούνται να υπονομεύουν την αντοχή της τελικής κατασκευής σε θλίψη. Συμπερασματικά, κατά το σχεδιασμό ενός φορέα CFDST, κρίνεται σκόπιμη η απομείωση της αναμένουσας αντοχής σε θλίψη, ενώ απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση του ποσοστού της απομείωσης αυτής.

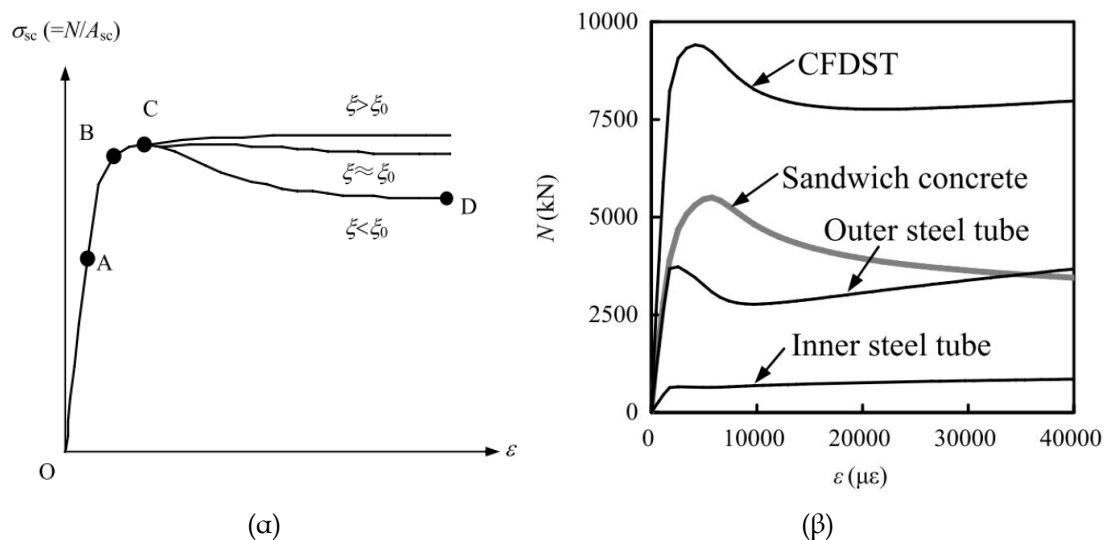
Από την προσομοίωση του φορέα CFDST με πεπερασμένα στοιχεία και τις σχετικές αναλύσεις υπό θλιπτικά φορτία, προκύπτει το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2. Στο σημείο A του διαγράμματος, ο εξωτερικός χάλυβας εισέρχεται στην ελαστοπλαστική περιοχή, ενώ στο σημείο B έχει διαρρέυσει πλήρως. Το σημείο C αντιστοιχεί στο φορτίο αστοχίας του φορέα και, τέλος, στο σημείο D, η παραμόρφωση έχει φτάσει τη μέγιστη τιμή 0.02. Το Σχήμα 4.3 απεικονίζει την κατανομή των αξονικών τάσεων ( $S_{33}$  στο γράφημα) που αναπτύσσονται στον πυρήνα σκυροδέματος στα χαρακτηριστικά αυτά σημεία, για τη διατομή που βρίσκεται στο μέσον του ύψους του φορέα. Οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς είναι  $D = 400$  mm,  $t_{so} = 9.3$  mm,  $d = 191$  mm,  $t_{si} = 3.18$  mm,  $L = 1200$  mm,  $f_{syo} = f_{syi} = 345$  MPa,  $f_{cu} = 60$  MPa,  $\chi = 0.5$ , όπου  $D$  η εξωτερική διάμετρος του εξωτερικού σωλήνα,  $t_{so}$  το πάχος του εξωτερικού σωλήνα,  $d$  η εξωτερική διάμετρος του εσωτερικού σωλήνα,  $t_{si}$  το πάχος του εσωτερικού σωλήνα,  $L$  το ύψος του φορέα,  $f_{syo}$  η τάση διαρροής του εξωτερικού σωλήνα,  $f_{syi}$  η τάση διαρροής του εσωτερικού σωλήνα,  $f_{cu}$  η χαρακτηριστική αντοχή του σκυροδέματος του πυρήνα και  $\chi$  ο λόγος  $d/(D - 2t_{so})$ . Σημαντικό στοιχείο του διαγράμματος αποτελεί η παράμετρος  $\xi = a_n f_{syo} / f_{ck}$  που εκφράζει το βαθμό συμμετοχής του χάλυβα στη διατομή, όπου  $a_n$  ο λόγος εμβαδού του εξωτερικού χαλύβδινου σωλήνα προς το εμβαδό του σκυροδέματος της διατομής ( $A_{sq}/A_{ce}$ ). Είναι εμφανές από το Σχήμα 4.2α ότι επί της καμπύλης μπορούν να διακριθούν τέσσερις περιοχές:

- Η ελαστική περιοχή (από το σημείο O έως το σημείο A), όπου ο χάλυβας και το σκυρόδεμα φέρουν τα αξονικά φορτία χωρίς να επηρεάζονται από τον σύνθετο χαρακτήρα της διατομής. Οι αξονικές τάσεις του σκυροδέματος είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στον πυρήνα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3α.
- Η ελαστοπλαστική περιοχή (από το σημείο A έως το σημείο B), κατά την οποία, καθώς το θλιπτικό φορτίο αυξάνεται, το σκυρόδεμα ρηγματώνεται και διογκώνεται, με αποτέλεσμα η πίεση από τον εξωτερικό χαλύβδινο σωλήνα να γίνεται σταδιακά εντονότερη. Οι αξονικές τάσεις του σκυροδέματος κατανέμονται και πάλι σχεδόν ομοιόμορφα στον πυρήνα (Σχήμα 4.3β)



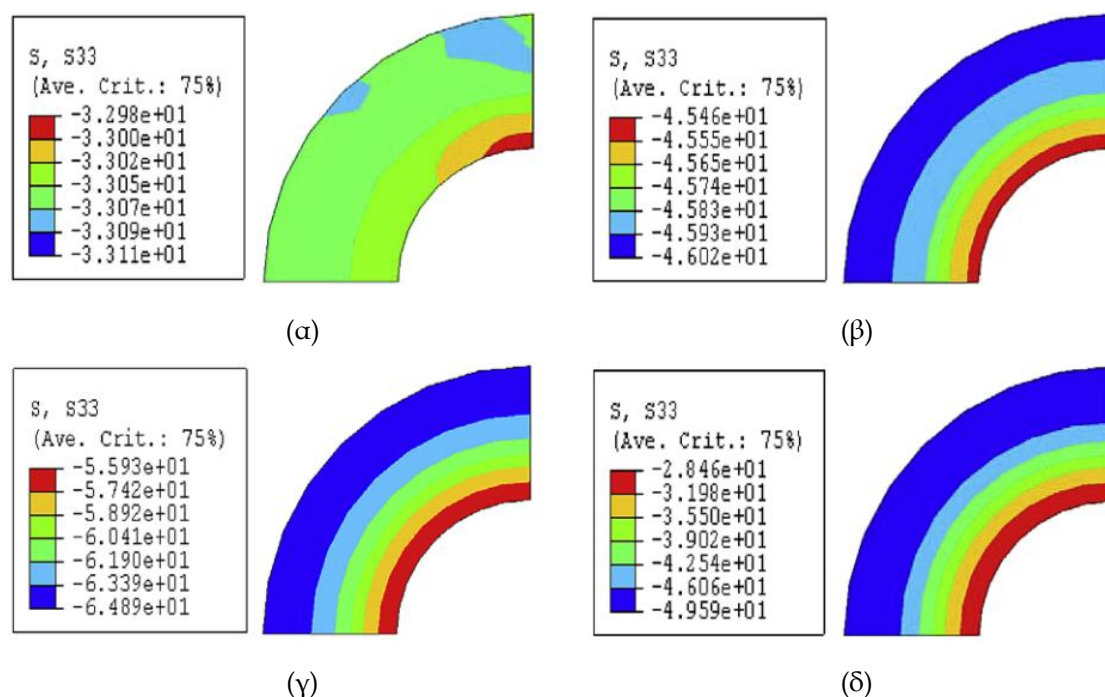
- Η πλαστική περιοχή (από το σημείο B έως το σημείο C), όπου, εξαιτίας της αύξησης της πίεσης από τον εξωτερικό σωλήνα, η μέση αξονική τάση του σκυροδέματος στη διατομή έχει υπερβεί την αντοχή του (ως αντοχή εδώ εννοείται η αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου σκυροδέματος). Από το Σχήμα 4.3γ φαίνεται ότι η αξονική τάση παύει να κατανέμεται ομοιόμορφα και παρουσιάζει σημαντική αύξηση όσο μειώνεται η απόσταση από τον εξωτερικό σωλήνα, κάτι που αποδίδεται στο γεγονός ότι η πίεση στο σκυρόδεμα λόγω εγκλεισμού του προέρχεται κυρίως από τον εξωτερικό σωλήνα.
- Η περιοχή χαλάρωσης (από το σημείο C έως το σημείο D), αν  $\xi < \xi_0$ , ή κράτωσης, αν  $\xi > \xi_0$ , λόγω κράτωσης του χάλυβα και ισχυρότερης πίεσης προς το σκυρόδεμα. Η τιμή του  $\xi_0$  βρέθηκε περίπου ίση με 1 βάσει παραμετρικών αναλύσεων. Η κατανομή των τάσεων όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3δ έχει τη μορφή της κατανομής στην πλαστική περιοχή, με σημαντικά μειωμένες ωστόσο τιμές τάσεων.

Στο Σχήμα 4.2β παρουσιάζεται το διάγραμμα θλιπτικού φορτίου - παραμόρφωσης για τον εξωτερικό και τον εσωτερικό χάλυβδινο σωλήνα, για τον πυρήνα σκυροδέματος αλλά και για τον συνολικό φορέα CFDST. Είναι εμφανές ότι ο πυρήνας σκυροδέματος φέρει το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου, ενώ η μικρότερη συνεισφορά στην παραλαβή των φορτίων είναι αυτή του εσωτερικού χάλυβδινου σωλήνα.



**Σχήμα 4.2:** Συμπεριφορά φορέα CFDST υπό θλίψη: (α) Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων βάσει συντελεστή  $\xi$  (β) διάγραμμα δύναμης - παραμόρφωσης για τα ελάσματα, τον πυρήνα και τη συνολική διατομή (Huang et al., 2009)

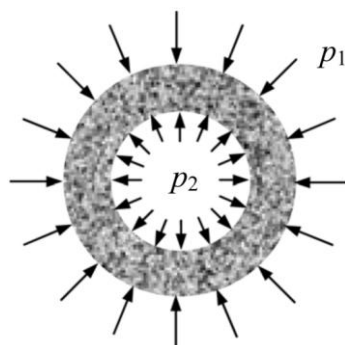
**Figure 4.2:** Behavior of concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) stub columns under compression: (a) typical calculated curves of average stress versus longitudinal strain (b) the loads carried by outer steel tube, inner steel tube, sandwich concrete, and CFDST respectively versus longitudinal strain (Huang et al., 2009)



**Σχήμα 4.3:** Κατανομή αξονικών τάσεων στον πυρήνα σκυροδέματος στα σημεία (α) A, (β) B, (γ) C και (δ) D (Huang et al., 2009)

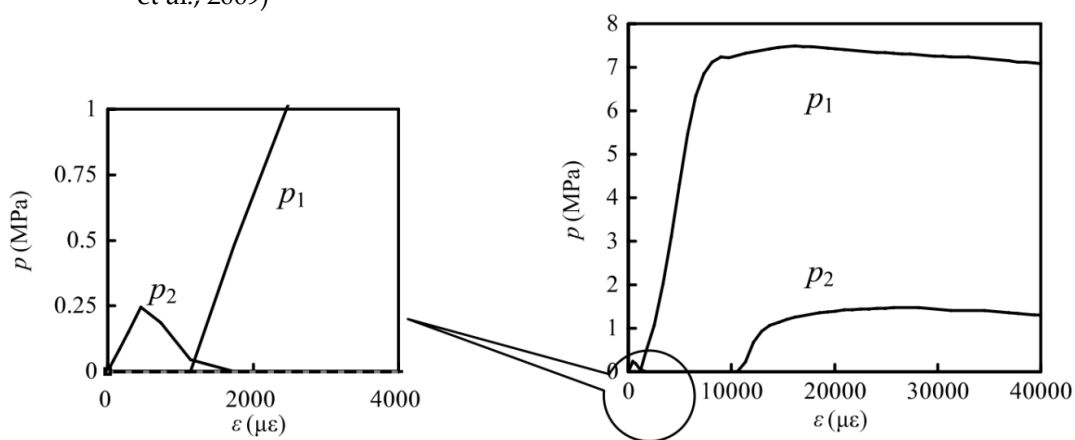
**Figure 4.3:** Distributions of longitudinal stress at characteristic points A, B, C and D for the sandwich concrete (Huang et al., 2009)

Το **Σχήμα 4.4** απεικονίζει τις τάσεις  $p_1$ ,  $p_2$  που αναπτύσσονται στις διεπιφάνειες του σκυροδέματος με τον εξωτερικό και τον εσωτερικό χάλυβα, αντίστοιχα. Έχει παρατηρηθεί ότι, στην περίπτωση φορέα CFDST υπό θλίψη, οι τάσεις αυτές είναι σχεδόν σταθερές εντός μίας διατομής. Το διάγραμμα μεταβολής των τάσεων  $p_1$ ,  $p_2$  με την παραμόρφωση που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5 δείχνει ότι κατά το αρχικό στάδιο φόρτισης η τάση  $p_1$  είναι μηδενική. Αυτό οφείλεται στη διαφορά του λόγου Poisson μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα, η οποία οδηγεί τον εξωτερικό σωλήνα σε μεγαλύτερες πλευρικές παραμορφώσεις συγκριτικά με τον πυρήνα, με αποτέλεσμα την απουσία τάσεων αλληλεπίδρασης στη διεπιφάνεια, στο στάδιο αυτό. Στη συνέχεια, ωστόσο, με την αύξηση της διαμήκου παραμόρφωσης και το σχηματισμό ρωγμών στο σκυρόδεμα, οι πλευρικές παραμορφώσεις του πυρήνα σταδιακά υπερβαίνουν αυτές του εξωτερικού χαλύβδινου σωλήνα, με συνέπεια την απότομη αύξηση της τάσης  $p_1$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5. Όσον αφορά την τάση  $p_2$ , παρατηρείται μία μικρή ανάπτυξη της κατά το αρχικό στάδιο φόρτισης, καθώς ο εσωτερικός χαλύβδινος σωλήνας τείνει να παραμορφωθεί προς το εξωτερικό της διατομής, πιέζοντας το σκυρόδεμα. Το φαινόμενο αυτό είναι ωστόσο αμελητέο, καθώς το σκυρόδεμα εισέρχεται πολύ σύντομα στην ελαστοπλαστική περιοχή, κάτι που συνεπάγεται απώλεια της αλληλεπίδρασης εσωτερικού σωλήνα και πυρήνα. Θλιπτικές τάσεις στη διεπιφάνεια εμφανίζονται ξανά αργότερα, αφού το επιβαλλόμενο φορτίο φτάσει τη μέγιστη τιμή του.



**Σχήμα 4.4:** Θλιπτικές τάσεις πυρήνα σκυροδέματος στις διεπιφάνειες με τους χαλύβδινους σωλήνες (Huang et al., 2009)

**Figure 4.4:** Interaction stresses between the concrete and outer and inner steel tubes (Huang et al., 2009)

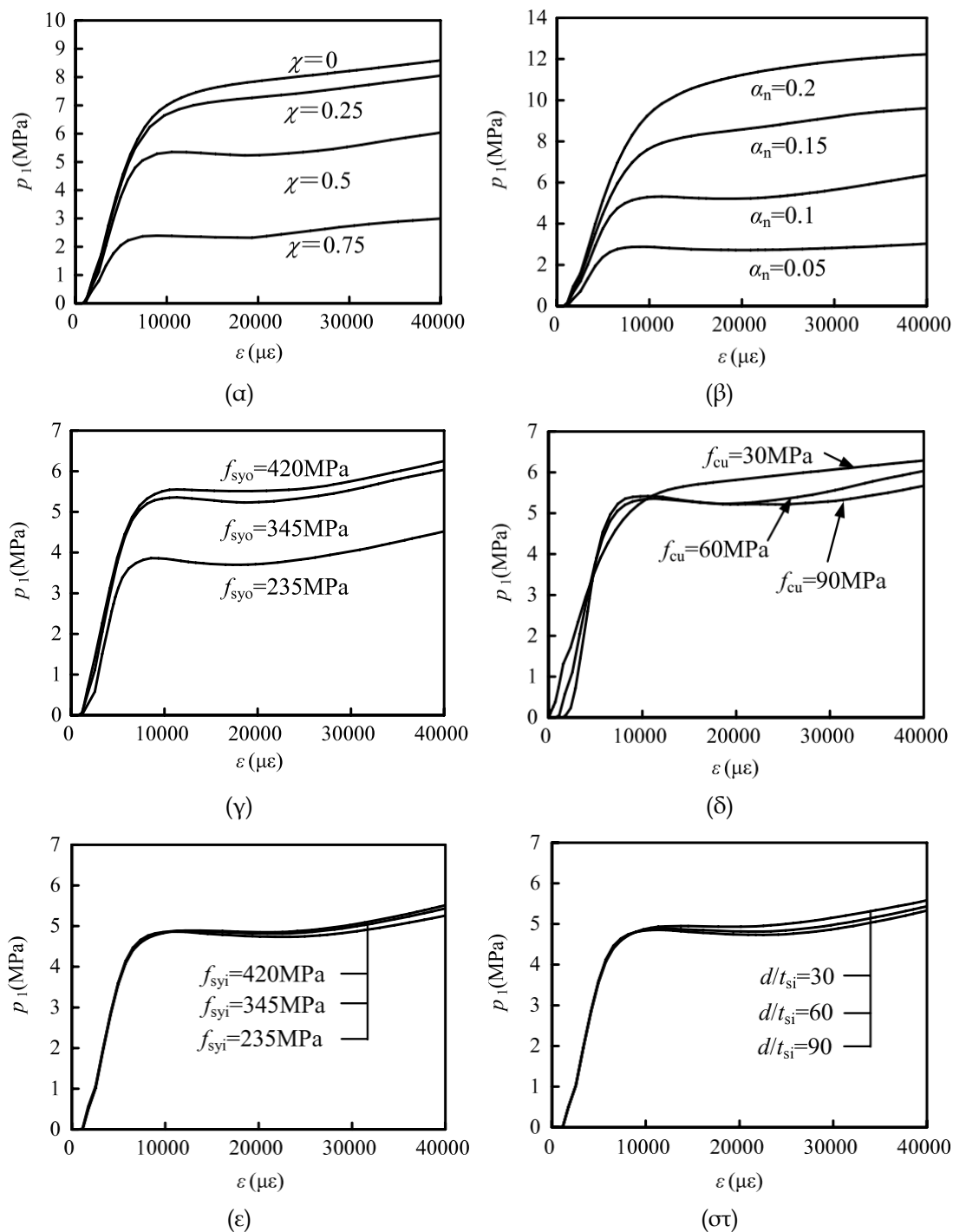


**Σχήμα 4.5:** Διάγραμμα μεταβολής τάσεων διεπιφανειών σε σχέση με τη διαμήκη παραμόρφωση (Huang et al., 2009)

**Figure 4.5:** Interaction stresses versus longitudinal strain relations (Huang et al., 2009)

Στο Σχήμα 4.6 εξετάζεται η πιθανή επιρροή στη σχέση τάσεων αλληλεπίδρασης - διαμήκους παραμόρφωσης του λόγου  $\chi$ , του λόγου  $a_n$ , της αντοχής του εξωτερικού χαλύβδινου σωλήνα ( $f_{syo}$ ), της αντοχής του σκυροδέματος ( $f_{cu}$ ), της αντοχής του εσωτερικού χαλύβδινου σωλήνα ( $f_{syi}$ ) και του λόγου εξωτερικής διαμέτρου του εσωτερικού χαλύβδινου σωλήνα προς το πάχος του ( $d/t_{si}$ ). Καθώς οι παράμετροι αυτές δεν έχουν ουσιαστική επίδραση στην τάση  $p_2$ , παρουσιάζεται στα διαγράμματα του σχήματος η επιρροή τους στη μεταβολή της τάσης  $p_1$  σε σχέση με τη διαμήκη παραμόρφωση. Παρατηρείται από τα διαγράμματα αυτά ότι:

- Με την αύξηση του λόγου  $\chi$  και της αντοχής του σκυροδέματος, η τάση  $p_1$  μειώνεται καθώς η επίδραση του εξωτερικού χαλύβδινου σωλήνα είναι ασθενέστερη.
- Η αύξηση του λόγου  $a_n$  και της αντοχής του εξωτερικού χαλύβδινου σωλήνα, οδηγεί σε αύξηση της τάσης  $p_1$ .
- Η αντοχή και ο λόγος της εξωτερικής διαμέτρου του εσωτερικού χαλύβδινου σωλήνα προς το πάχος του δεν έχουν ουσιαστική επιρροή στην τάση  $p_1$ .



**Σχήμα 4.6:** Επιρροή στη σχέση τάσης  $p_1$  - διαμήκους παραμόρφωσης των παραμέτρων: (α) λόγος  $\chi$ , (β) λόγος  $\alpha_n$ , (γ) αντοχή εξωτερικού χαλύβδινου σωλήνα ( $f_{syo}$ ), (δ) αντοχή σκυροδέματος ( $f_{cu}$ ), (ε) αντοχή εσωτερικού χαλύβδινου σωλήνα ( $f_{syi}$ ) και (στ) λόγος εξωτερικής διαμέτρου προς πάχος εσωτερικού χαλύβδινου σωλήνα ( $d/t_{si}$ ) (Huang et al., 2009)

**Figure 4.6:** Effects of different parameters on  $p_1$  versus longitudinal strain relations.: (a) hollow ratio, (b) nominal steel ratio, (c) strength of outer steel tube, (d) concrete strength, (e) strength of inner steel tube and (f) Width to thickness ratio of inner steel tube (Huang et al., 2009)

Για συνθήκες αξονικής φόρτισης, οι Schaumann και Keindorf έδειξαν μέσω πειραματικών διερευνήσεων, αριθμητικών προσομοιώσεων και αναλυτικών λύσεων

ότι σε κυλινδρικούς, κοίλους φορείς από συμπαγή χάλυβα, η χρήση υψηλότερης ποιότητας υλικού, με την αναλογική μείωση στο πάχος της διατομής, οδηγεί σε χαμηλότερα κρίσιμα φορτία λυγισμού (Σχήμα 4.7) και, απορρίπτοντας αυτή τη λύση, για φορείς με μεγάλο ύψος, αντιπροτείνουν τη χρήση διατομών sandwich. Όπως αποδεικνύεται από την έρευνά τους, όπου εξετάστηκαν ως υλικά πυρήνα δύο τύποι κονιάματος και ένα ελαστομερές, σε τέτοιες διατομές γίνεται σαφώς καλύτερη αξιοποίηση μίας πιθανής αναβάθμισης της ποιότητας του χάλυβα. Με δεδομένο ότι ο σχεδιασμός των πολώνων ανεμογεννητριών τοπικά πραγματοποιείται στην ελαστική περιοχή, οι μελετητές εντόπισαν τις βέλτιστες τιμές παχών χαλύβδινων ελασμάτων και πυρήνα για τις οποίες υπάρχει ταυτόχρονη αύξηση της φέρουσας ικανότητας και μείωση της μάζας των υλικών. Στην έρευνα αυτή δε λήφθηκε ωστόσο υπόψη ως κριτήριο το κόστος, που από τη μία πλευρά πιθανώς να είναι αυξημένο λόγω της ανάγκης για κατασκευή δύο χαλύβδινων σωλήνων αντί για έναν ενιαίο, καθώς και της διαδικασίας έγχυσης του υλικού του πυρήνα μεταξύ των δύο σωλήνων, ενώ από την άλλη πλευρά ενδεχομένως να παρουσιάζεται συνολικά μειωμένο εξαιτίας της οικονομίας στη συγκόλληση των τμημάτων καθ' ύψος, αφού το πάχος του κελύφους της διατομής sandwich είναι σημαντικά μικρότερο.



Steel grade	S 235	S 355	S 460	S 690
$f_{y,k,red}$ [MPa]	215 for t=50	345 for t=35	460 for t=24	690 for t=16
$\sigma_{x,cr}$ [MPa]	2011	1459	1032	706
$\lambda_S$ [-]	0.33	0.49	0.67	0.99
$\kappa_2$ [-]	0.93	0.78	0.61	0.31
$\sigma_{x,cr,k}$ [MPa]	199	269	280 ⚡	215 ⚡
$\sigma_{x,cr,k} / f_{y,k}$ [%]	85 %	76 %	61 % ⚡	31 % ⚡

**Σχήμα 4.7:** Σύγκριση κοίλων, κυκλικών διατομών, διαφορετικών ποιοτήτων χάλυβα, ως προς την αντοχή σε λυγισμό (Schaumann & Keindorf, 2008)

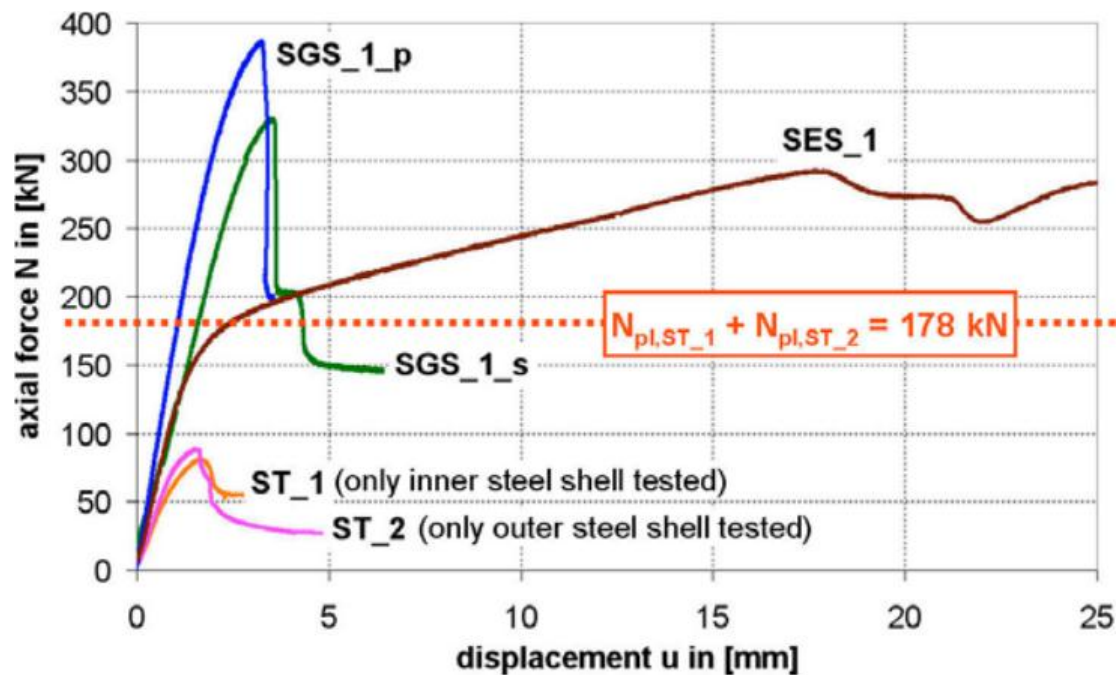
**Figure 4.7:** Comparison of hollow cylindrical sections with various steel grades with regard to shell buckling (Schaumann & Keindorf, 2008)

Επιπλέον, στην προαναφερθείσα μελέτη εξετάστηκε πειραματικά η ισχύς της αρχικής παραδοχής που έγινε στη θεωρητική ανάλυση ότι υπάρχει άρρηκτη συνεργασία μεταξύ χάλυβα και υλικών πυρήνα. Όσον αφορά την κατασκευή του φορέα, στην περίπτωση του ελαστομερούς, λόγω της ιδιότητάς του να διογκώνεται ελαφρώς μετά τη σύνθεσή του εντός του πυρήνα, η πλήρης επαφή με τα χαλύβδινα ελάσματα είναι

πρακτικώς εξασφαλισμένη. Το κονίαμα δε διαθέτει αυτήν την ιδιότητα, αντιθέτως ελαφρώς συρρικνώνεται κατά τη σκλήρυνση μετά την έγχυσή του, αλλά το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξαιρεθεί με την προσθήκη κατάλληλων προσμίξεων.

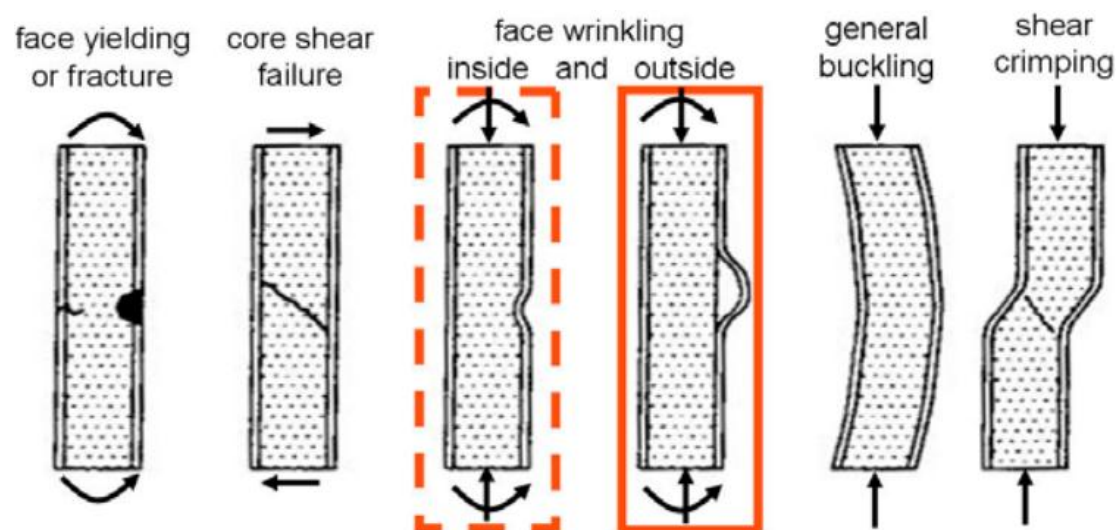
Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν σημαντική αύξηση της φέρουσας ικανότητας σε θλίψη της διατομής sandwich σε σύγκριση με τις συμβατικές χαλύβδινες διατομές, πολύ περισσότερο στην περίπτωση του πυρήνα από κονίαμα. Φαίνεται όμως στο Σχήμα 4.8 ότι προκαλείται απότομη πτώση της φέρουσας ικανότητας μετά το φορτίο διαρροής (που λόγω του σχεδιασμού των φορέων συμπίπτει με το φορτίο λυγισμού), κάτι που δε συμβαίνει όταν ως υλικό πυρήνα χρησιμοποιείται το ελαστομερές, οπότε και παρουσιάζεται πολύ καλή μεταλυγισμική συμπεριφορά, που κυρίως οφείλεται στα άριστα συνδεδετικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου υλικού. Καθώς η αστοχία λόγω καθολικού λυγισμού μπορεί στην περίπτωση της διατομής sandwich, με χρήση κατάλληλων υλικών και πάχους πυρήνα να αποτραπεί, ο κρίσιμος μηχανισμός αστοχίας είναι πλέον ο τοπικός λυγισμός με τη μορφή «ρυτίδωσης» του χαλύβδινου ελάσματος, ο οποίος είναι δυνατό να παρουσιαστεί είτε προς το εσωτερικό της διατομής, προκαλώντας διείσδυση του ελάσματος στον πυρήνα, όταν το υλικό του τελευταίου διαθέτει χαμηλότερη θλιπτική αντοχή συγκριτικά με την εφελκυστική, είτε προς το εξωτερικό της διατομής, με τον σχηματισμό κενού ανάμεσα στο χαλύβδινο έλαμα και στον πυρήνα, όταν συμβαίνει το αντίστροφο Σχήμα 4.9). Το φαινόμενο της «ρυτίδωσης», το οποίο είναι εξίσου συχνό και στην περίπτωση καμπτικής καταπόνησης στο θλιβόμενο τμήμα του φορέα, παρουσιάστηκε με τη δεύτερη μορφή του ως κυρίαρχος μηχανισμός αστοχίας στις πειραματικές δοκιμές (Σχήμα 4.10), ωστόσο, εκτός της περιοχής όπου εμφανίστηκε ο τοπικός αυτός λυγισμός, η σύνδεση μεταξύ των στρώσεων διατηρήθηκε ανέπαφη.

Αποδεικνύεται βάσει της συγκεκριμένης έρευνας ότι υπό την προϋπόθεση της προσεκτικής πλήρωσης του πυρήνα, είτε με κάποιο κονίαμα, είτε με ελαστομερές, ο φορέας διατομής sandwich σε σύγκριση με έναν συμβατικής, κοίλης διατομής από συμπαγή χάλυβα, παρουσιάζει πολύ υψηλότερα φορτία λυγισμού, με αποτέλεσμα να εξασφαλίζεται η ικανότητα παραλαβής θλιπτικών φορτίων τουλάχιστον μέχρι τη διαρροή του χάλυβα, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις και εντός της πλαστικής περιοχής.



**Σχήμα 4.8:** Αποτελέσματα πειραμάτων σε κοίλους κυλινδρικούς φορείς συμβατικής χαλύβδινης διατομής (ST) και διατομής sandwich με πυρήνες κονιάματος (SGS) και ελαστομερούς (SES) (Schaumann & Keindorf, 2008)

**Figure 4.8:** Buckling tests' results with steel and sandwich cylinders of grout and elastomer cores (ST, SGS and SES on the diagram, respectively)



**Σχήμα 4.9:** Μηχανισμοί αστοχίας κυλινδρικών φορέων διατομής sandwich, με έμφαση στη «ρυτίδωση» του εξωτερικού ελάσματος (Zenkert, 1997)

**Figure 4.9:** Failure modes for sandwich constructions, face wrinkling being highlighted (Zenkert, 1997)





**Σχήμα 4.10:** Τοπικός λυγισμός με μορφή «ρυτίδωσης» εξωτερικού χαλύβδινου ελάσματος σε πειραματική δοκιμή κυλινδρικού φορέα διατομής sandwich με πυρήνα κονιάματος υπό θλίψη (Schaumann & Keindorf, 2008)

**Figure 4.10:** Outer face wrinkling of a sandwich cylinder with grout core, as a result of compression testing (Schaumann & Keindorf, 2008)

### 4.3 Συμπεριφορά κυλινδρικών φορέων διατομής sandwich υπό καμπτική καταπόνηση

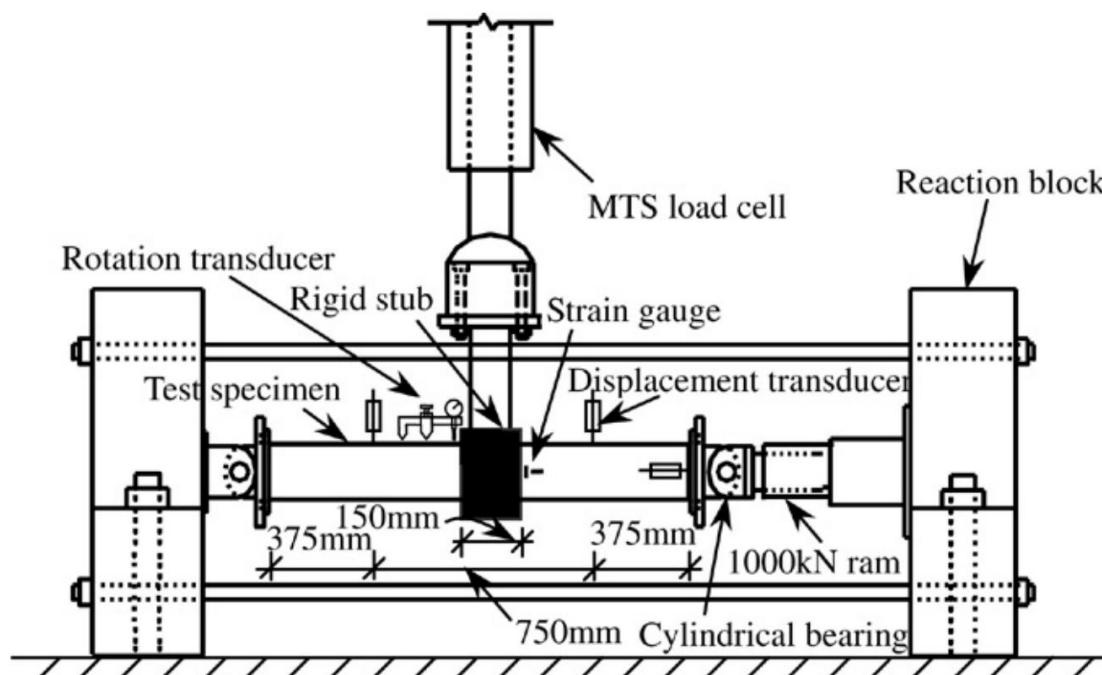
Οι Han et al. πραγματοποίησαν πειραματικές διερευνήσεις σε φορείς CFDST υπό σταθερή αξονική δύναμη και ταυτόχρονη αυξανόμενη ανακυκλιζόμενη καμπτική φόρτιση, συνθήκες οι οποίες προσεγγίζουν σε σημαντικό βαθμό αυτές στις οποίες καλείται να αντεπεξέλθει ένας πλώνας ανεμογεννήτριας. Παραμέτρους σχεδιασμού, πέραν του είδους των διατομών, αποτέλεσαν το επίπεδο αξονικής φόρτισης ( $n$ ) και ο λόγος  $\chi$ , όπως ορίστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Το επίπεδο αξονικής φόρτισης ορίζεται ως  $n=N_0/N_u$ , όπου  $N_0$  είναι το επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο και  $N_u$  το θλιπτικό φορτίο αστοχίας του φορέα. Τα δοκίμια ήταν στα άκρα τους στηριγμένα με τρόπο που να επιτρέπει τη στροφή στο επίπεδο φόρτισης, ενώ δύο υδραυλικά έμβολα επέβαλαν σταθερό αξονικό φορτίο στο άκρο και ανακυκλιζόμενο εγκάρσιο φορτίο στο μέσον του δοκιμίου αντίστοιχα. Η καμπυλότητα του φορέα μετρήθηκε με συνδυασμό μηκυσιομέτρων και ποτενσιομέτρων. Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται αδρά στο Σχήμα 4.11.

Κατά τις πειραματικές δοκιμές τα σύνθετα δοκίμια επέδειξαν σημαντική πλαστιμότητα στη συμπεριφορά τους. Παρατηρήθηκε ότι αφού ο χάλυβας έφτασε την παραμόρφωση διαρροής του, προκλήθηκε τοπικός λυγισμός με τη μορφή εξογκωμάτων στη θλιβόμενη πλευρά του φορέα, εκατέρωθεν της περιοχής επιβολής



της εγκάρσιας φόρτισης. Το ίδιο φαινόμενο παρουσιάστηκε και στην άλλη πλευρά του φορέα όταν το εγκάρσιο φορτίο αντιστράφηκε. Τα εξογκώματα σταδιακά μεγεθύνθηκαν με την αύξηση της πλευρικής παραμόρφωσης, σχηματίζοντας τελικά δύο πλήρεις δακτυλίους στις δύο διατομές στις οποίες αρχικά εμφανίστηκαν. Όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια αστόχησαν λόγω ρηγματώσεων από εφελκυσμό στα σημεία όπου παρατηρήθηκε ο τοπικός λυγισμός, με απότομη απώλεια της ικανότητας παραλαβής εγκάρσιων φορτίων (Σχήμα 4.12).

Στο Σχήμα 4.13 απεικονίζεται ένα ενδεικτικό διάγραμμα ροπών - καμπυλοτήτων από τα πειραματικά αποτελέσματα. Όπως ήταν αναμενόμενο, ο φορέας αποκρίνεται αρχικώς ελαστικά, έπειτα παρουσιάζει ανελαστική συμπεριφορά με σταδιακή μείωση της δυσκαμψίας, έως ότου η επιβαλλόμενη ροπή προσεγγίσει ασυμπτωτικά τη ροπή αστοχίας. Από μια προσεκτικότερη εξέταση των πειραματικών αποτελεσμάτων προέκυψε ότι η σχέση ροπής - καμπυλότητας εισέρχεται στην ανελαστική περιοχή όταν η ροπή φτάσει το 20% της ροπής αστοχίας ( $M_u$ ), επομένως η αρχική καμπτική δυσκαμψία μπορεί να ταυτιστεί με την τέμνουσα δυσκαμψία που αντιστοιχεί σε ροπή  $0.2M_u$ . Από το διάγραμμα μπορεί να προσδιοριστεί ακόμα η καμπτική δυσκαμψία στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας ως η τέμνουσα δυσκαμψία που αντιστοιχεί σε ροπή  $0.6M_u$ .



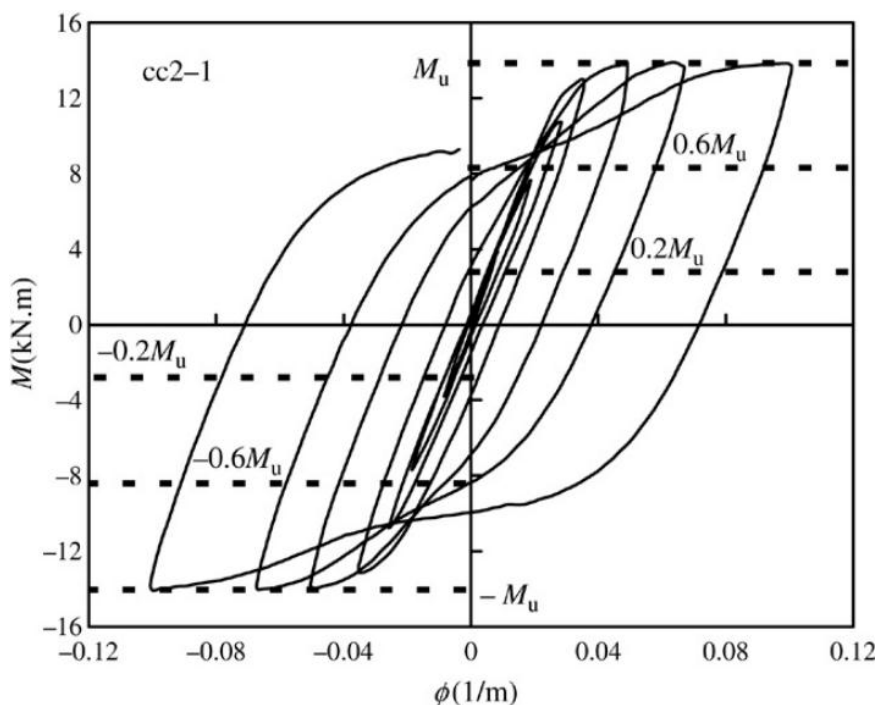
**Σχήμα 4.11:** Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής διάταξης για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς φορέα CFDST υπό ταυτόχρονη επιβολή σταθερής αξονικής και αυξανόμενης, ανακυκλιζόμενης καμπτικής φόρτισης (Han et al., 2006)

**Figure 4.11:** Schematic view of the test setup and the arrangement of measuring devices for the investigation of the behavior of a CFDST column under combined axial force and cyclic bending (Han et al., 2006)



**Σχήμα 4.12:** Κυρίαρχη μορφή αστοχίας των υπο εξέταση δοκιμίων από τοπικό λυγισμό (Han et al., 2006)

**Figure 4.12:** Typical failure mode of the tested specimens (Han et al., 2006)



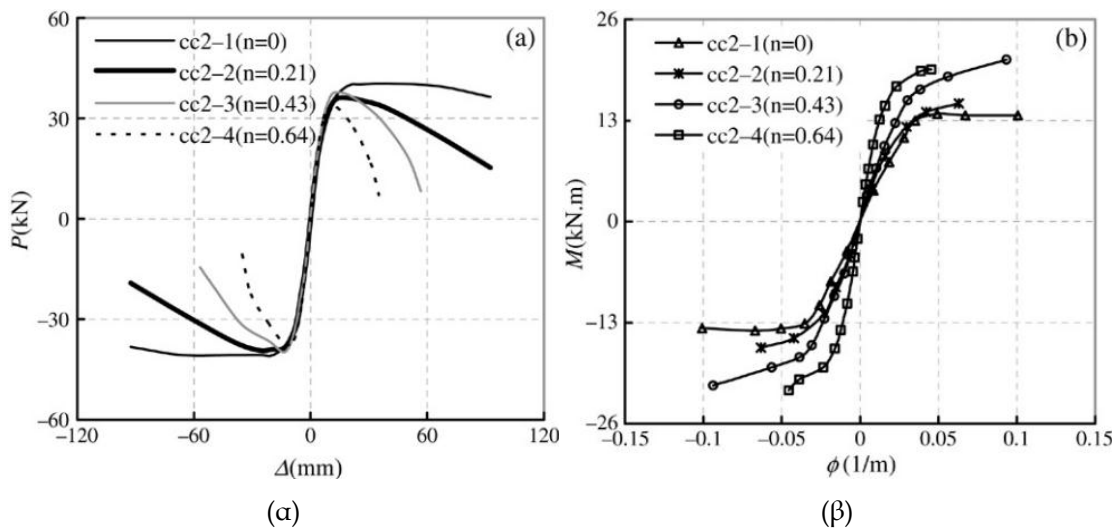
**Σχήμα 4.13:** Ενδεικτικό διάγραμμα ροπών - καμπυλοτήτων των πειραματικών αποτελεσμάτων (Han et al., 2006)

**Figure 4.13:** Typical moment versus curvature relations derived by test results (Han et al., 2006)

Τα διαγράμματα του Σχήμα 4.14 παρουσιάζουν την επιρροή του επιπέδου αξονικής φόρτισης στη σχέση εγκάρσιου φορτίου - μετατόπισης, καθώς και στη σχέση ροπής - καμπυλότητας. Το συμπέρασμα που εξάγεται από τα διαγράμματα αυτά είναι ότι το επίπεδο αξονικής φόρτισης όχι μόνο επηρεάζει το εγκάρσιο φορτίο αστοχίας αλλά ασκεί σημαντική επίδραση και στην πλαστιμότητα του φορέα. Συγκεκριμένα, το εγκάρσιο φορτίο αστοχίας φαίνεται να αυξάνεται με την αύξηση του αξονικού φορτίου για  $n < 0.3$ , ενώ για  $n > 0.3$  η αύξηση του αξονικού φορτίου υποβιβάζει τη μέγιστη τιμή του εγκάρσιου. Αντίστοιχα, τα διαγράμματα του Σχήμα 4.15

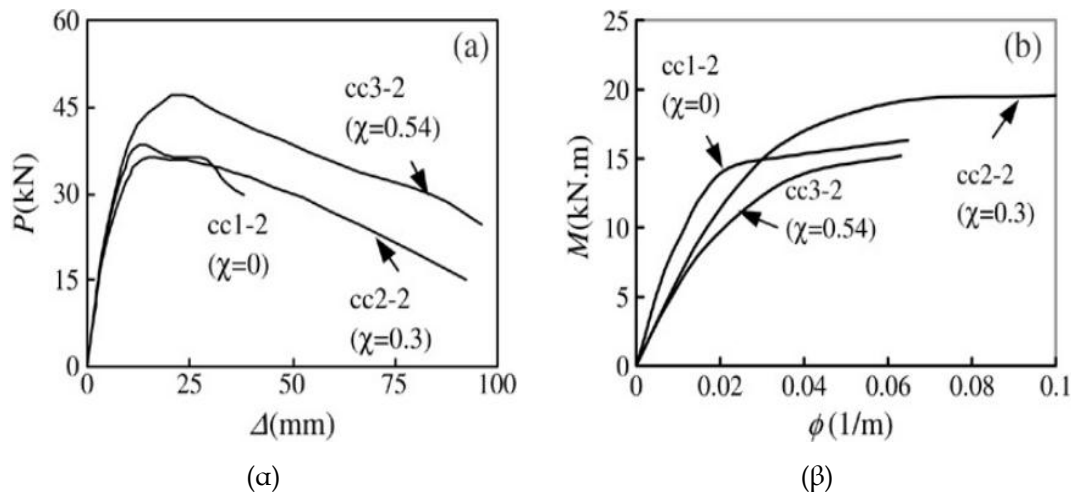
απεικονίζουν την επίδραση του λόγου  $\chi$  στις παραπάνω σχέσεις. Φαίνεται σε αυτά ότι ο λόγος  $\chi$  δεν επηρεάζει σημαντικά την καμπύλη εγκάρσιου φορτίου - μετατόπισης σε φορείς CFDST. Όσον αφορά την πλαστιμότητα, γενικώς τείνει να μειώνεται με την αύξηση του αξονικού φορτίου, ενώ το ίδιο συμβαίνει όταν αυξάνεται η τιμή του λόγου  $\chi$ .

Από τα παραπάνω και άλλες ακόμη αναλύσεις προκύπτει ότι οι φορείς CFDST παρουσιάζουν σημαντική πλαστιμότητα ακόμα και στην περίπτωση μεγάλων αξονικών φορτίων, αλλά και πολύ υψηλά επίπεδα απαγωγής ενέργειας, υπό τις παραπάνω συνθήκες φόρτισης.



**Σχήμα 4.14:** Επιρροή μεγέθους αξονικής δύναμης στη σχέση (α) εγκάρσιου φορτίου - μετατόπισης και (β) ροπής - καμπυλότητας (Han et al., 2006)

**Figure 4.14:** Influence of axial load levels on (a) lateral load versus lateral deflection and (b) moment versus curvature envelope curves (Han et al., 2006)



**Σχήμα 4.15:** Επιρροή τιμής λόγου  $\chi$  στη σχέση (α) εγκάρσιου φορτίου - μετατόπισης και (β) ροπής - καμπυλότητας (Han et al., 2006)

**Figure 4.15:** Influence of hollow ratio ( $\chi$ ) on (a) lateral load versus lateral deflection and (b) moment versus curvature envelope curves (Han et al., 2006)

# 5

## Συμπεράσματα και θέματα προς διερεύνηση

---

Οι σύγχρονες ενεργειακές εξελίξεις προαναγγέλουν ραγδαία ανάπτυξη του τομέα αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας και κυρίως της τεχνολογίας που την καθιστά εφικτή. Ήδη οι συμβατικές λύσεις αποτελούν πλέον τροχοπέδη για την περαιτέρω αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες, καθώς η επιθυμητή αύξηση του μεγέθους των κατασκευών αυτών συναντά τους περιορισμούς που αφορούν τη μεταφορά των ογκωδών τμημάτων κυρίως του πυλώνα, στις συνήθως δυσπρόσιτες περιοχές εγκατάστασης. Για τη μελλοντική κάλυψη των απαιτήσεων σε «καθαρή» ενέργεια, το ύψος των ανεμογεννητριών είναι αναπόφευκτο να υπερβεί κατά πολύ τα 100 m, ώστε να αξιοποιηθούν οι υψηλές ταχύτητες ανέμου που επικρατούν σε μεγάλα υψόμετρα, με άμεση συνέπεια την ανάγκη διεύρυνσης της διατομής του πυλώνα, ο οποίος καλείται να παραλάβει πολύ ισχυρότερες δράσεις. Εξαιτίας αυτού, η παραδοσιακά εφαρμοζόμενη λύση της χρήσης κοίλων χαλύβδινων διατομών, εξαναγκάζει σε επιλογή διαμέτρου βάσης του πυλώνα μεγαλύτερης των 4 m, κάτι που αντίκειται στις σημερινές δυνατότητες μεταφοράς. Ενδεχόμενη αύξηση του πάχους αντί της διαμέτρου είναι πολύ λιγότερο αποτελεσματική, γιατί όχι μόνο επιβάλλει δυσμενέστερες απαιτήσεις υλικού, αλλά και εισάγει μεγαλύτερες παραμένουσες τάσεις κατά τη διάρκεια της ψυχρής καμπύλωσης των μεταλλικών ελασμάτων, μειώνοντας έτσι το εύρος της ελαστικής απόκρισης του πυλώνα υπό φορτία λειτουργίας. Επιπλέον, η πιθανή λύση που αφορά τη χρήση χάλυβα υψηλότερης ποιότητας, για αύξηση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής με μείωση του πάχους του κελύφους, έχει αποδειχθεί ότι στην πραγματικότητα υποβιβάζει το κρίσιμο φορτίο λυγισμού σημαντικά. Βάσει των παραπάνω, η αναζήτηση καινοτόμων λύσεων για την κατασκευή υψηλότερων πυλώνων αποκτά ιδιαίτερα μεγάλη σημασία.

Η εναλλακτική λύση που διερευνάται στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού προγράμματος για υψηλούς πυλώνες είναι η χρήση ενός κελύφους με διατομή τύπου sandwich, αποτελούμενη από ένα εσωτερικό και ένα εξωτερικό χαλύβδινο έλασμα με ένα ελαφρύτερο υλικό πλήρωσης της μεταξύ τους απόστασης (πυρήνας), το οποίο θα συγκρατεί τα δύο ελάσματα στη θέση τους, προσφέροντας έτσι μεγάλη δυσκαμψία με

μικρό βάρος. Μολονότι η διατομή sandwich έχει χρησιμοποιηθεί με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ποικίλα υλικά, κυρίως του πυρήνα, σε ένα ευρύ φάσμα κατασκευών που τα τελευταία χρόνια συνεχώς διευρύνεται, η πιθανή χρήση της σε πυλώνες ανεμογεννητριών σπάνια έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία. Ωστόσο, παρά την απουσία έρευνας στο συγκεκριμένο αντικείμενο, έχει σε αρκετές περιπτώσεις μελετηθεί η συμπεριφορά κυλινδρικών φορέων διατομής sandwich σε συνθήκες αξονικής και καμπτικής φόρτισης, είτε στατικής, είτε δυναμικής, τόσο μέσω αναλυτικών ή αριθμητικών προσομοιώσεων, όσο και μέσω πειραματικών δοκιμών. Η συνάφειά τους με έναν πυλώνα ανεμογεννήτριας καθιστά εφικτή την επέκταση των εξαγόμενων συμπερασμάτων και στην ειδικότερη αυτή περίπτωση κατασκευής.

Οι μελέτες αυτές επιβεβαιώνουν ότι η χρήση της εν λόγω διατομής, είτε με σύνθετα υλικά όπως ινοπλισμένα εποξικά ή ελαστομερή, είτε με συμβατικά όπως ο χάλυβας και το σκυρόδεμα, ενισχύει σημαντικά τη φέρουσα ικανότητα της κατασκευής ενώ επιπλέον βελτιώνει τη δυσκαμψία, μειώνει το βάρος, σχεδόν εξαλείφει την πιθανότητα καθολικού λυγισμού, ενώ προσδίδει μεγαλύτερη ικανότητα απόσβεσης ταλαντώσεων και βελτιωμένη αντοχή σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, μια ιδιότητα που, για την εφαρμογή σε πυλώνες ανεμογεννητριών, καθιστά τη συγκεκριμένη διατομή σαφώς καταλληλότερη της συμβατικής. Επιπλέον στην περίπτωση χρήσης σκυροδέματος ως υλικού πυρήνα, η διατομή sandwich προσφέρει σημαντικό χρονικό περιθώριο προστασίας από πυρκαγιά, καθώς ο πυρήνας σκυροδέματος προστατεύει το εσωτερικό χαλύβδινο έλασμα, καθυστερώντας την έκθεση στις καταστροφικά υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται. Τα ελαστομερή, ως υλικά πλήρωσης του πυρήνα προσδίδουν εξαιρετική μεταλυγισμική συμπεριφορά και πλαστιμότητα με μικρή σχετικά όμως συνεισφορά στη βελτίωση της φέρουσας ικανότητας, σε αντίθεση με διάφορους τύπους κονιαμάτων, τα οποία αυξάνουν κατά πολύ την αντοχή αλλά προκαλούν απότομη απώλεια της ικανότητας παραλαβής φορτίων μετά τη διαρροή των χαλύβδινων ελασμάτων.

Σημαντική παράμετρο πέραν της επιλογής υλικών και παχών των στρώσεων αποτελεί η συνάφειά τους. Με δεδομένη την εξάλειψη του κινδύνου καθολικού λυγισμού, ο τοπικός λυγισμός με τη μορφή «ρυτίδωσης» του εξωτερικού χαλύβδινου ελάσματος καθίσταται κρίσιμος μηχανισμός αστοχίας, κάτι που επιβεβαιώνεται με την έντονη παρουσία του στις πειραματικές δοκιμές. Είτε στην περίπτωση ελαστομερών που διαθέτουν άριστα συνδετικά χαρακτηριστικά, είτε κονιαμάτων ή σκυροδέματος με μετριότερες ιδιότητες όσον αφορά τη συνάφεια που αναπτύσσουν, η προσεκτική πλήρωση του πυρήνα, με εφαρμογή των κατάλληλων μέτρων για την εξάλειψη στο μέγιστο δυνατό βαθμό των κενών ή άλλων ατελειών, αποτελεί βασική προϋπόθεση ώστε να υπάρξει άρρηκτη συνεργασία των επιμέρους στρώσεων και περιορισμός των τάσεων αποκόλλησης στις διεπιφάνειες.

Στις έρευνες που έχουν έως τώρα πραγματοποιηθεί και μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για την πιο εξειδικευμένη μελέτη των επιπτώσεων της χρήσης διατομής sandwich σε πυλώνες ανεμογεννητριών, πρέπει να προστεθούν διερευνήσεις σχετικές με:

- (α) Την επίδραση της ανεμοπίεσης, η οποία, περαν του δυναμικού της χαρακτήρα, καταπονεί τόσο άμεσα όσο και έμμεσα τον πυλώνα μέσω της οπισθέλκουσας δύναμης που προκαλεί στα πτερύγια,
- (β) τα φαινόμενα κόπωσης που η φόρτιση αυτή δημιουργεί, κυρίως στις συνδέσεις,
- (γ) τις πιθανές νέες μεθόδους σύνδεσης των επιμέρους τμημάτων του πυλώνα καθ' ύψος που ενδεχομένως θα απαιτηθούν λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών της διατομής sandwich συγκριτικά με τη συμβατική και, τέλος,
- (δ) την εισαγωγή του κόστους κατασκευής ως βασικού κριτηρίου για την βέλτιστη επιλογή γεωμετρίας και υλικών.

## Βιβλιογραφικές Αναφορές

---

- Abrate S et al. Dynamic failure of composite and sandwich structures. Springer 2013.
- Allen H. Analysis and design of structural sandwich panels. Pergamon Press 1969.
- Ashby M, Bréchet Y. Designing hybrid materials. Acta Materialia 2003; 51: 5801–5821.
- Banhart J. Metal foams - From fundamental research to applications. Frontiers in the design of materials, Raj et al., Universities Press (India) 2007.
- Bart-Smith H et al. Influence of imperfections on the performance of metal foam core sandwich panels. International Journal of Solids and Structures 2002; 39: 4999–5012.
- Bradford MA, Loh HY, Uy B. Slenderness limits for filled circular steel tubes. Journal of Construction Steel Research 2002; 58(2): 243–52.
- Burton T et al. Wind energy handbook. Wiley 2001.
- Carlsson L, Kardomateas G. Structural and failure mechanics of sandwich composites. Springer 2011.
- Ceyhan O. Towards 20MW wind turbine - High Reynolds number effects on rotor design. 50th AIAA ASM Conference 2012.
- Daniel I et al. Major accomplishments in composite materials and sandwich structures. Springer 2009.
- Elchalakani M, Zhao XL, Grzebieta R. Tests on concrete filled double skin (CHS outer and SHS inner) composite short columns under axial compression. Thin-Walled Structures 2002; 40(5): 415–41.
- European Commission. Proposal for Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources. 2012.
- European Wind Energy Association (EWEA). Pure Power - Wind energy targets for 2020 and 2030. Technical Report, 2011.
- European Wind Energy Association (EWEA). Wind energy scenarios for 2020. Technical Report, 2014.

Gasch R, Twele J. Wind Power Plants - Fundamentals, Design, Construction and Operation. Springer 2012

Gervásio H et al. Comparative life cycle assessment of tubular wind towers and foundations - Part 2 - Life cycle analysis. *Engineering Structures* 2014; 74: 292-299.

Han LH, Huang H, Tao Z, Zhao XL. Concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) beam-columns subjected to cyclic bending. *Engineering Structures* 2006; 28(12): 1698-714.

Han LH, Huang H, Zhao XL. Analytical behaviour of concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) beam-columns under cyclic loading. *Thin-Walled Structures* 2009; 47(6-7): 668-80.

Han LH, Tao Z, Huang H, Zhao XL. Concrete-filled double skin (SHS outer and CHS inner) steel tubular beam-columns. *Thin-Walled Structures* 2004; 42(9): 1329-55.

Han LH, Yao GH, Tao Z. Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion. *Thin-Walled Structure* 2007; 45(1): 24-36.

Han LH, Yao GH. Behaviour of concrete-filled hollow structural steel (HSS) columns with pre-load on the steel tubes. *Journal of Construction Steel Research* 2003; 59(12): 1455-75.

Hofmann M, Sperstad IB. Will 10 MW wind turbines bring down the operation and maintenance cost of offshore wind farms?. *Energy Procedia* 2014; 53: 231-238.

Huang H, Han LH, Tao Z, Zhao XL. Analytical behaviour of concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) stub columns. *Journal of Constructional Steel Research* 2009; 66: 542-555

Lee MG, Kang KJ. Feasibility of a wire-woven metal for application as a sandwich core. *International Journal of Mechanical Sciences* 2014; 80: 81-92

Li W, Han LH, Zhao XL. Axial strength of concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) columns with preload on steel tubes. *Thin-Walled Structures* 2012; 56: 9-20

Liew JYR, Xiong DX. Effect of preload on the axial capacity of concrete-filled composite columns. *Journal of Construction Steel Research* 2009; 65(3): 709-22.

Lim S, Kong C, Park H. A study on optimal design of filament winding composite tower for 2 MW class horizontal axis wind turbine systems. *International Journal of Composite Materials* 2013; 3(1): 15-23

Lin ML, Tsai KC. Behavior of double-skinned composite steel tubular columns subjected to combined axial and flexural loads. *Proceedings of the 1st international conference on steel and composite structures* 2001; 1145-52.

Lynette R, Gipe P. Commercial wind turbines and applications. *Wind Turbine Technology*, D. A. Spera, New York: ASME Press 1994.



- National Renewable Energy Laboratory (NREL). Analysis of transportation and logistics challenges affecting the deployment of larger wind turbines: summary of results. Technical Report NREL/TP-5000-61063, 2014.
- Petras A, Sutcliffe M. Failure mode maps for honeycomb sandwich panels. *Composite Structures* 1999; 44: 237-252.
- Pflug J, Verpoest I. Sandwich materials selection charts. *Journal of Sandwich Structures and Materials* 2006; 8: 407-421.
- Qin QH, Wang T. An analytical solution for the large deflections of a slender sandwich beam with a metallic foam core under transverse loading by a flat punch. *Composite Structures* 2009; 88: 509-518.
- Rebello C et al. Comparative life cycle assessment of tubular wind towers and foundations - Part 1 - Structural design. *Engineering Structures* 2014; 74: 283-291.
- Schaumann P et al. Support structures of wind energy converters. *Environmental Wind Engineering and Design of Wind Energy Structures*, C. C. Baniotopoulos, CISM, Udine 2011.
- Schaumann P, Keindorf C. Sandwich-towers for wind energy converters. *DEWI MAGAZIN* 2008; 33: 65-76
- Tao Z, Han LH, Zhao XL. Behaviour of concrete-filled double skin (CHS inner and CHS outer) steel tubular stub columns and beam-columns. *Journal of Constructional Steel Research* 2004; 60(8): 1129-58.
- Tao Z, Han LH. Behaviour of concrete-filled double skin rectangular steel tubular beam-columns. *Journal of Construction Steel Research* 2006; 62(7): 631-46.
- Thomsen O et al. *Sandwich structures 7 - Advancing with sandwich structures and materials*. Springer 2005.
- Uenaka K, Kitoh H, Sonoda K. Concrete filled double skin circular stub columns under compression. *Thin-Walled Structures* 2010; 48(1): 19-24.
- Uy B, Das S. Wet concrete loading of thin-walled steel box columns during the construction of a tall building. *Journal of Construction Steel Research* 1997; 42(2): 95-119.
- Varma AH, Ricles JM, Sause R, Lu LW. Seismic behavior and modeling of high-strength composite concrete-filled steel tube (CFT) beam - columns. *Journal of Constructional Steel Research* 2002; 58(5-8): 725-58
- Vautrin A. *Mechanics of sandwich structures*. Springer 1998.
- Vinson J. *The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials*. Technomic 1999.
- Wei S, Mau ST, Vipulanandan C, Mantrala SK. Performance of new sandwich tube under axial loading: experiment. *Journal of Structural Engineering ASCE* 1995; 121(12): 1806-14.

Wei S, Mau ST, Vipulanandan C, Mantrala SK. Performance of new sandwich tube under axial loading: analysis. *Journal of Structural Engineering ASCE* 1995; 121(12): 1815-21.

Yagishita F, Kitoh H, Sugimoto M, Tanihira T, Sonoda K. Double-skin composite tubular columns subjected cyclic horizontal force and constant axial force. *Proceedings of 6th ASCCS conference* 2000; 497-503.

Zenkert, D. (1997): *An introduction to sandwich construction*, Warley, West Midlands, Engineering Materials Advisory Services, Ltd.

Zhao XL, Grzebieta R, Ukur A, Elchalakani M. Tests of concrete-filled double skin (SHS outer and CHS inner) composite stub columns. *Advances in Steel Structures* 2002; 567-74.

Zhao XL, Grzebieta R. Strength and ductility of concrete filled double skin (SHS inner and SHS outer) tubes. *Thin-Walled Structures* 2002; 40(2):199-213.

Zhao XL, Grzebieta RH, Elchalakani M. Tests of concrete-filled double skin CHS composite stub columns. *Steel and Composite Structures - An International Journal* 2002; 2(2): 129-42.

Zhao XL, Han B, Grzebieta RH. Plastic mechanism analysis of concrete filled double-skin (SHS inner and SHS outer) stub columns. *Thin-Walled Structures* 2002; 40(10): 815-33.

Zhao XL, Han LH. Double skin composite construction. *Progress in Structural Engineering and Materials* 2006; 8(3): 93-102.

Zhao XL, Tong LW, Wang XY. CFDST stub columns subjected to large deformation axial loading. *Engineering Structures* 2010; 32(3): 692-703.