



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

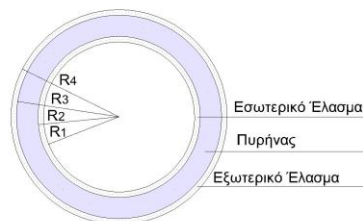
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Διπλωματική Εργασία

**«ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΤΥΠΟΥ SANDWICH
ΓΙΑ ΠΥΛΩΝΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ»**



Αικατερίνη Μουστεράκη

Επιβλέποντες:

Χάρης Γαντές, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Στυλιανός Βερνάρδος, υπ. Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2014

ΕΜΚ ΔΕ 2014/31

Αικατερίνη Γ. Μουστεράκη (2014)

Βασικές αρχές διατομών τύπου sandwich για πυλώνες ανεμογεννητριών

Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2014 31

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Aikaterini G. Mousteraki (2014)

Basic principles of sandwich sections for wind turbine towers

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2014 31

Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Copyright © Aikaterini G. Mousteraki, 2014

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

No part of these pages, either text or image may be used for any purpose other than personal use. Therefore, reproduction, modification, storage in a retrieval system or retransmission, in any forms or by any mean, electronic, mechanical or otherwise, for reasons other than personal use, is strictly prohibited without prior written permission.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Διπλωματική Εργασία
ΕΜΚ ΔΕ 2014 31

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΤΥΠΟΥ SANDWICH ΓΙΑ ΠΥΛΩΝΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ
Αικατερίνη Μουστεράκη

Επιβλέποντες:

Χάρης Γαντές, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Στυλιανός Βερνάρδος, Υπ. Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η αξιοποίηση μιας σύνθετης διατομής sandwich στην κατασκευή ενός πυλώνα ανεμογεννήτριας. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη και στην αξιοποίηση του τομέα παραγωγής αιολικής ενέργειας, ενώ παράλληλα περιγράφονται οι αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις που προβλέπονται για τις επόμενες δεκαετίες. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η δομή και η λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας, ο κύκλος ζωής της και το κανονιστικό πλαίσιο σχεδιασμού της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο τονίζεται η ανάγκη προς εύρεση νέων εναλλακτικών λύσεων όσον αφορά την κατασκευή του πυλώνα μιας ανεμογεννήτριας, δεδομένων των αυξημένων ενεργειακών απαιτήσεων και των δυσκολιών στην εφαρμογή των υπάρχουσών λύσεων. Μελετάται η χρησιμοποίηση μιας σύνθετης διατομής τύπου sandwich, ενώ περιγράφεται η δομή της, τα υλικά που ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της, οι μηχανισμοί αστοχίας της και οι τρόποι υπολογισμού της φέρουσας ικανότητάς της. Ακόμη, παρουσιάζονται βιβλιογραφικά στοιχεία που αφορούν το βέλτιστο σχεδιασμό της διατομής.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η αναλυτική προσέγγιση της συμπεριφοράς μιας κυκλικής διατομής sandwich υπό καθεστώς αξονικής καταπόνησης. Στη συνέχεια, καταστρώνονται οι εξισώσεις που αφορούν την καταπόνηση της διατομής από μονοαξονική κάμψη, που οδηγούν στην εύρεση του ουδέτερου άξονα της διατομής, αλλά και των μεγθών της ελαστικής ροπής, της ροπής πλήρους πλαστικοποίησής της και των ροπών που αναπτύσσονται στα ενδιάμεσα στάδια της διαρροής. Έπειτα, γίνεται προσπάθεια για έλεγχο της εγκυρότητας της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε, μέσω της σύγκρισης των αναλυτικών αποτελεσμάτων, όπως αυτά παρουσιάστηκαν με τη μορφή διαγράμματος ροπών-καμπυλοτήτων και των αντίστοιχων που προέκυψαν από το πρόγραμμα ανάλυσης myBiaxial.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθεται μια σειρά διαγραμμάτων που μορφώθηκαν στα πλαίσια παραμετρικών αναλύσεων της διατομής sandwich υπό καμπτική φόρτιση. Καταγράφεται, έτσι, η επίδραση του πάχους των ελασμάτων και της ποιότητας των υλικών κατασκευής μιας διατομής sandwich στα μεγέθη της ελαστικής ροπής, της ισοδύναμης δυσκαμψίας, της πλαστικής ροπής αντοχής, καθώς και της πλαστιμότητας της διατομής. Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα της εργασίας και γίνονται προτάσεις για την περαιτέρω διερεύνηση της σύνθετης διατομής sandwich και των δυνατοτήτων της.



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

Diploma Thesis
EMK ΔΕ 2014 31

BASIC PRINCIPLES OF SANDWICH SECTIONS FOR WIND TURBINE TOWERS
Aikaterini Mousteraki

Supervisors:

Charis Gantes, Professor N.T.U.A.
Stylios Vernardos, PhD Candidate N.T.U.A.

Abstract

In the present thesis, the use of a sandwich-type section on a wind turbine tower is investigated. In the first chapter a literature review of the evolution and development of wind energy converters is presented. Furthermore, the worldwide significantly increased demand in wind energy is highlighted, while the structural characteristics, the mechanical parts, the operation, the life cycle, and the structural design regulations that govern the construction of a wind turbine tower are introduced.

In the second chapter, the need for new, alternative solutions regarding the construction methods of a tower section, due to the high energy consumption levels and the constraints that the existing methods induce, is presented. The use of a composite sandwich section is, thus, investigated. Additionally, the pertinent sections' structure, the range of material combinations that can be used, along with the failure modes and the methods of stability and strength calculation of a wind turbine's sandwich-type section are presented.

In the third chapter, an analytical solution describing the behavior of a cylindrical sandwich section subjected to axial loading is formulated. Particularly, the differences between the bearing capacity of the section due to tension and compression are delineated. In addition, the equations that describe the bending resistance in the elastic and plastic range under pure bending, the bending moments that are developed between those critical values of resistance and the accordingly varying position of the neutral axis of the section are also investigated in this chapter. Moreover, a comparison is carried out between the previously-presented analytical solution governing the composite section and the results taken from the software program myBiaxial, via a moment-curvature diagram.

In the fourth chapter, the results of the analytical solution presented in chapter three are imported into the Mathematica software environment, in order to pursue an extensive parametric analysis, involving a wide range of steel and concrete qualities, as well as thicknesses of the faces and the core. The analysis investigates the effect of these parameters on the elastic bending resistance, the plastic bending resistance, the equivalent stiffness, and the ductility of the cylindrical sandwich section subjected to pure bending. Additionally, data taken from the literature about the optimization of a sandwich shell are presented. In the sixth and last chapter, conclusions of the diploma thesis are presented and proposals for further investigation of the properties and capabilities of composite sandwich sections are suggested.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με τη διπλωματική αυτή εργασία ολοκληρώνεται ο κύκλος φοίτησής μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Με την αφορμή αυτή θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους έπαιξαν σημαντικό ρόλο κατά τη διάρκεια της πενταετούς φοίτησής μου στο Ίδρυμα.

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κ. Χάρη Γαντέ που ήταν και ο επιβλέπων της διπλωματικής μου εργασίας. Η διαρκής και υποδειγματική καθοδήγηση μαζί με την άριστη επιστημονική του κατάρτιση συνέβαλαν καταλυτικά στην ολοκλήρωση της προσπάθειάς μου αυτής.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ιωάννη Ραυτογιάννη, Αναπληρωτή Καθηγητή του τομέα Δομοστατικής του Ε.Μ.Π και τον κ. Τάσο Αβραάμ, Λέκτορα του τομέα Δομοστατικής του Ε.Μ.Π. για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Για την αμέριστη συμπαράσταση, την υπομονετική στήριξη και τη βοήθεια του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π. Στυλιανό Βερνάρδο.

Για τη βοήθειά της στη μορφοποίηση του κειμένου θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Ισαβέλλα Βασιλοπούλου, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό Ε.Μ.Π.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Γρηγόρη και Γεωργία, καθώς και τα πολυαγαπημένα μου αδέρφια, Χρύσα, Μαρία και Δημήτρη, που στάθηκαν δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και συνεχίζουν να με στηρίζουν στα νέα μου βήματα.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου, οι οποίοι συνέβαλαν με τη σειρά τους στην πραγματοποίηση και ολοκλήρωση των σπουδών μου με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

Αικατερίνη Μουστεράκη

Δεκέμβριος 2014

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.2	ΑΝΑΓΚΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	1
1.2.1	Ιστορική αναδρομή στη λειτουργία ανεμογεννητριών	1
1.3	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ.....	2
1.3.1	Ενεργειακές ανάγκες.....	2
1.4	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	3
1.4.1	Γενικά στοιχεία.....	3
1.4.2	Δομή	5
1.5	ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	7
1.5.1	Γενικά στοιχεία.....	7
1.6	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	9
1.6.1	Δυναμικά χαρακτηριστικά πυλώνων και θεμελίου	9
1.6.2	Κριτήρια σχεδιασμού μεταλλικών μελών	9
1.6.3	Κριτήρια σχεδιασμού μελών από σκυρόδεμα	9
1.6.4	Σχεδιασμός θεμελίου	9
1.6.5	Φορτία	9
1.7	ΑΝΑΦΟΡΕΣ	10
2	ΔΙΑΤΟΜΕΣ SANDWICH	11
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
2.2	ΑΝΑΓΚΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΛΥΣΗΣ.....	11
2.3	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ SANDWICH.....	13

2.3.1	Δομή.....	13
2.3.2	Υλικά	14
2.3.3	Δυνατότητες διατομής.....	16
2.4	ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ.....	18
2.4.1	Υπολογισμός φέρουσας ικανότητας	18
2.4.2	Επιρροή ατελειών στη φέρουσα ικανότητα	21
2.5	ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ SANDWICH	21
2.5.1	Αναλυτική προσέγγιση.....	21
2.5.2	Αριθμητική προσέγγιση	26
2.5	ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	28

3 ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΕΙΣΩΣΕΩΝ..... 31

3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	31
3.2	ΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ	32
3.2.1	Εφελκυσμός	32
3.2.2	Θλίψη	32
3.3	ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ	33
3.3.1	Εύρεση ελαστικής ροπής αντοχής	33
3.3.2	Εύρεση ροπής για επέκταση διαρροής	37
3.3.3	Πλήρης πλαστικοποίηση	51
3.4	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ	53
3.4.1	Αναλυτική λύση	53
3.4.2	Σύγκριση αναλυτικής λύσης με myBiaxial.....	53
3.5	ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	54

4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ..... 55

4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	55
4.2	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗ.....	55
4.2.1	Ελαστική ροπή-ποιότητα χάλυβα.....	55
4.2.2	Ελαστική ροπή-ποιότητα σκυροδέματος	59
4.3	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ.....	62
4.4	ΡΟΠΗ ΠΛΗΡΟΥΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	65
4.4.1	Ροπή πλήρους πλαστικοποίησης-ποιότητα χάλυβα.....	65
4.4.2	Ροπή πλήρους πλαστικοποίησης-ποιότητα σκυροδέματος.....	67
4.5	ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ	69
4.5.1	Πλαστιμότητα-ποιότητα χάλυβα.....	69

4.5.2	Πλαστιμότητα-ποιότητα σκυροδέματος.....	71
5	ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	73
5.1	ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	73
5.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	74
5.3	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	76

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

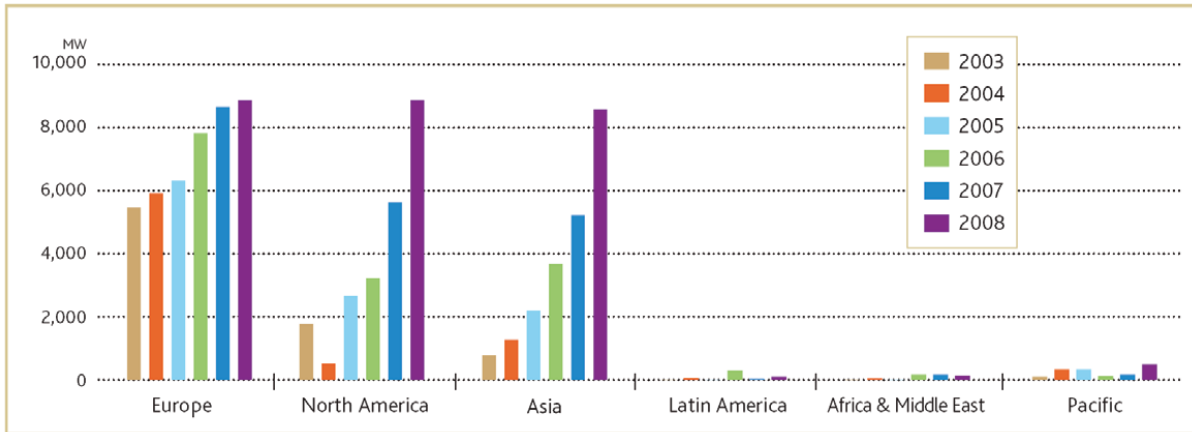
Η ραγδαία αύξηση της ζήτησης ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο έχει γίνει φανερή από ένα σύνολο μελετών. Η εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών και πιο συγκεκριμένα του κερδοφόρου κλάδου της αιολικής ενέργειας έχει κερδίσει -όχι άδικα- το ενδιαφέρον της επιστημονικής και κατασκευαστικής κοινότητας. Έτσι, η μελέτη και η ανάπτυξη των τεχνολογιών που αφορούν την αιολική ενέργεια και πιο συγκεκριμένα τις ανεμογεννήτριες, έχει βρεθεί στο επίκεντρο των ερευνητών τις τελευταίες δεκαετίες. Πληθώρα ερευνών έρχεται όλο και πιο συχνά στο προσκήνιο, αποδεικνύοντας τη συνεχή εξέλιξη του συγκεκριμένου τομέα. Η μελέτη των μηχανολογικών και δομικών τμημάτων των ανεμογεννητριών έχει προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις στην αποτελεσματικότητα και την παραγωγικότητα των αιολικών πάρκων.

1.2 ΑΝΑΓΚΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.2.1 Ιστορική αναδρομή στη λειτουργία ανεμογεννητριών

Η αιολική ενέργεια και οι εφαρμογές της έχουν απασχολήσει εδώ και πολλά χρόνια τους ερευνητές. Η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και η αξιοποίηση καινοτόμων ιδεών έχουν οδηγήσει στη ραγδαία εξέλιξη του τομέα αυτού. Μια απλή χρονική αναδρομή αποδεικνύει την ταχύτατη εξέλιξη της τεχνολογίας και της χρήσης των μέσων εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας, δηλαδή των ανεμογεννητριών. Σύμφωνα με τους Herbert et al. [1-1], στις αρχές και μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1980, μια τυπική ανεμογεννήτρια είχε ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μικρότερη από 100kW. Στα τέλη της ίδιας δεκαετίας και στις αρχές της επόμενης το μέγεθος αυτό πενταπλασιάστηκε, με τις ανεμογεννήτριες να έχουν ικανότητα παραγωγής περίπου 500kW. Στο διάστημα που ακολούθησε και μέχρι τις αρχές της καινούριας χιλιετίας το μέγεθος παραγωγής των ανεμογεννητριών έφτανε τις 2500kW.

Η βελτίωση αυτή της ικανότητας παραγωγής των ανεμογεννητριών ώθησε στην άνθηση του τομέα ανάπτυξης των αιολικών τεχνολογιών και με τη σειρά τους των αιολικών πάρκων. Πρόσφατες έρευνες έρχονται να αποδεικνύουν τη συστηματική στροφή του τομέα παραγωγής ενέργειας προς την αξιοποίηση της αιολικής, με την Ευρώπη να αποτελεί κινητήριο δύναμη σε παγκόσμιο επίπεδο. Κάτι τέτοιο επισημαίνεται και από τους Borri et al. [1-2] στο [Σχήμα 1-1](#), όπου η Ευρωπαϊκή αγορά αποδεικνύεται πρωτοπόρα στην εγκατάσταση ανεμογεννητριών ήδη από το 2003.



Σχήμα 1-1: Ετήσια δυνατότητα εγκατάστασης ανά περιοχή την περίοδο 2003-2008 [1-2].

Στην αυξημένη ζήτηση για αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας έρχεται να προστεθούν κι άλλα στοιχεία, όπως το γεγονός πως στις ΗΠΑ κατά το 2012 η ικανότητα των ανεμογεννητριών ανέρχεται κατά μέσο όρο σε 1.95 MW, ενώ την ίδια χρονιά μόνο στις ΗΠΑ κατασκευάστηκαν 6700 ανεμογεννήτριες, 20100 πτερύγια, 3.2 εκατομμύρια μπουλόνια, 36000 μίλια οπλισμού και 1.7 εκατομμύρια κυβικές γιάρδες σκυροδέματος, στοιχεία που αποδεικνύουν τα παραπάνω.

1.3 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ

1.3.1 Ενεργειακές ανάγκες

Η αιολική, η γεωθερμική, η ηλιακή, η ενέργεια της θάλασσας καθώς και της βιομάζας αποτελούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που θα πρωταγωνιστήσουν στον αγώνα της μαζικής παραγωγής ενέργειας. Σύμφωνα με τους Schaumann et al. [1-3] ευρωπαϊκά στατιστικά δείχνουν πως έως το έτος 2030 το 25% της απαιτούμενης ενέργειας προς κατανάλωση θα προέρχεται από τέτοιου είδους πηγές. Το σημαντικότερο ρόλο στη συνολική απαίτηση για παραγωγή ενέργειας πρόκειται να παίξει η αιολική, η αξιοποίηση της οποίας γίνεται με τη βοήθεια των ανεμογεννητριών που βρίσκονται συγκεντρωμένες στα αιολικά πάρκα στις διάφορες περιοχές.

Ακόμη, σύμφωνα πάλι με τους Schaumann et al. [1-3], η παραγωγή ενέργειας δια μέσου των ανεμογεννητριών προβλέπεται να φτάσει, σε ευρωπαϊκό επίπεδο, τα 300 Gigawatt (GW) έως το 2030, μια ποσότητα τριπλάσια σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη του 2010. Κάτι τέτοιο οδηγεί ακόμη μια φορά στο συμπέρασμα ότι απαιτείται ραγδαία και συστηματική ανάπτυξη της βιομηχανίας εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας.

Στην επιτακτική ανάγκη αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας έρχονται να προστεθούν οι κατευθυντήριες γραμμές της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Πιο συγκεκριμένα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέδωσε έναν χάρτη προσδοκώμενης παραγωγής αιολικής ενέργειας για τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης τον Οκτώβριο του 2009. Έκτοτε, ο χάρτης αυτός έγινε το σημαντικότερο όργανο στα πλαίσια της ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας για την περίοδο 2010-2020, ενώ παράλληλα πρόκειται να παίξει καθοριστικό ρόλο στον αγώνα κατά της κλιματικής αλλαγής. Έτσι, τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν αποκτήσει μια σαφή εικόνα των ενεργειακών στόχων που καλούνται να επιτύχουν μέχρι το έτος 2020. Με βάση τους στόχους αυτούς προβλέπονται:

- Αύξηση της παραγωγής αιολικής ενέργειας σε επίπεδα της τάξης του 20% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας στην Ευρώπη.
- Ύπαρξη και λειτουργία επίγειων ανεμογεννητριών σε ανταγωνιστικό επίπεδο προς τα άλλα μέσα παραγωγής έως το 2020.
- 250.000 νέες θέσεις εργασίας στην Ευρωπαϊκή Ένωση στον τομέα της παραγωγής αιολικής ενέργειας το διάστημα 2010-2020.

Στους στόχους και στα σχέδια της Ευρωπαϊκής Ένωσης που έχουν ήδη αναφερθεί, έρχονται να προστεθούν και οι επισημάνσεις της πλατφόρμας αιολικών τεχνολογιών (Wind Technological Platform-TPWind) το 2008, όπου τέθηκαν σημαντικά ζητήματα σχετικά με την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, τα οποία πρέπει να διευθετηθούν. Στα πλαίσια αυτά λοιπόν:

- Βραχυπρόθεσμο στόχο αποτελεί τόσο η μείωση έως το έτος 2020 των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 20%, όσο και η εξασφάλιση του 20% της παραγόμενης ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης ως προερχόμενης από ανανεώσιμες πηγές.
- Ο μακροπρόθεσμος στόχος είναι η απανθράκωση, που προϋποθέτει μείωση κατά 60-80% της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου.

Προς την υλοποίηση των στόχων του 2020, ανάμεσα σε πολλές άλλες προτάσεις και ιδέες, συγκαταλέγονται ο διπλασιασμός της παραγόμενης ενέργειας των ανεμογεννητριών και η επέκταση των θαλάσσιων ανεμογεννητριών ως κυρίαρχες λύσεις.

Η Ευρώπη του σήμερα, με βάση τους Gervásio et al. [1-4], αντλεί το 20% του ηλεκτρισμού που χρειάζεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, από τις οποίες το 5,3% προέρχεται από τα αιολικά πάρκα.

1.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

1.4.1 Γενικά στοιχεία

Μια ανεμογεννήτρια αποτελείται από διάφορα λειτουργικά τμήματα που συνδέονται μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η κατασκευή αυτή αποτελείται από έναν πυλώνα, στην κορυφή του οποίου βρίσκεται η άτρακτος (νασέλλα), η οποία περικλείει μεγάλο αριθμό εξαρτημάτων και πάνω στην οποία βρίσκεται συνδεδεμένος ο ρότορας. Ο τελευταίος αποτελείται από τα πτερύγια και την πλήμνη (hub).

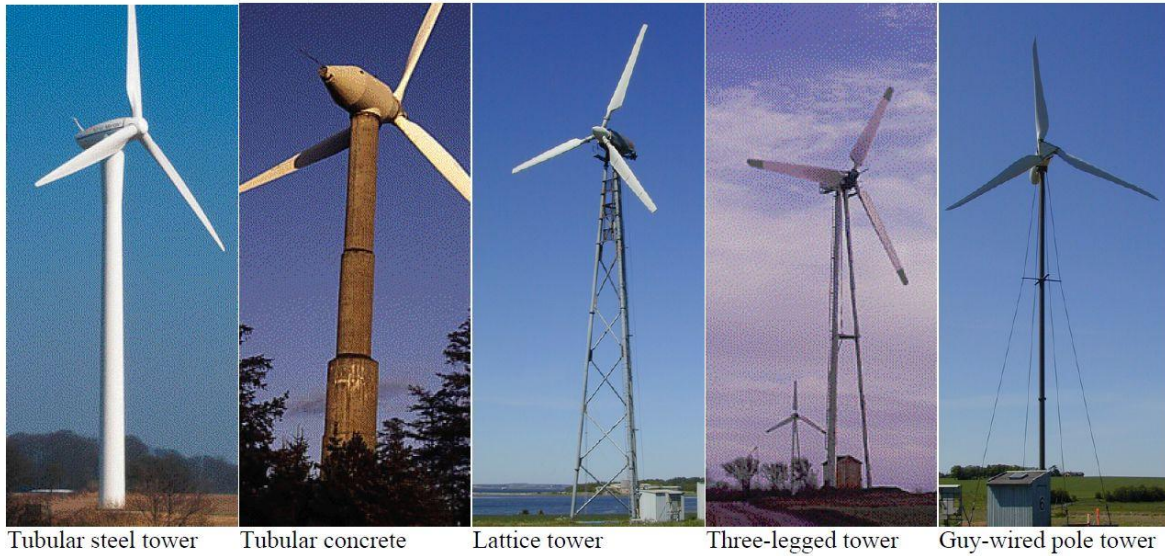
Όσον αφορά τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα μεγάλων διαστάσεων, οι πυλώνες μπορεί να έχουν τις εξής μορφές:

- Κωνικοί, χαλύβδινοι πυλώνες κυλινδρικής, κοίλης διατομής
- Πυλώνες από προεντεταμένο σκυρόδεμα
- Πυλώνες από σκυρόδεμα, σκυροδετημένοι στο σημείο εγκατάστασης
- Πυλώνες από προκατασκευασμένα επιμέρους τμήματα 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)

Μερικά από τα είδη πυλώνων που είναι δυνατό να κατασκευαστούν και που παρουσιάστηκαν παραπάνω εμφανίζονται στο Σχήμα 1-2

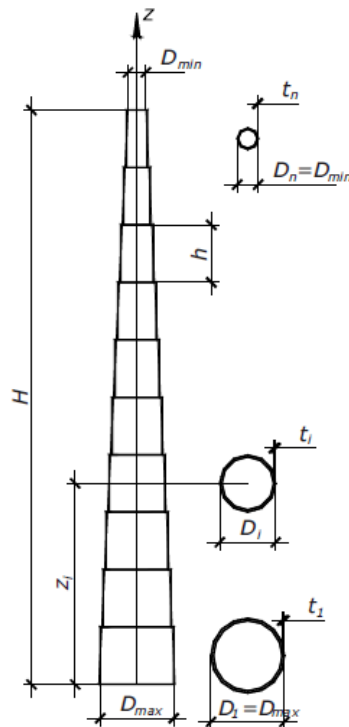
Όσον αφορά το μέγεθος της ανεμογεννήτριας, η κατασκευή πυλώνων μεγάλου ύψους, έως και 160 m, είναι εφικτή μέσω της αύξησης του πάχους του κελύφους. Η μέγιστη διάμετρος τμήματος του πυλώνα που είναι δυνατόν να μεταφερθεί οδικώς είναι τα 4.3 έως και 4.6 m, και ως εκ τούτου αυτά είναι και τα μέγιστα μεγέθη που χρησιμοποιούνται. Το πάχος της βάσης είναι συνήθως αυξημένο προκειμένου να ληφθεί υπόψη η δημιουργία οπής που θα χρησιμοποιηθεί ως είσοδος του πυλώνα. Το πάχος στην

κορυφή του πυλώνα είναι κι αυτό αυξημένο λόγω των έντονων τάσεων που αναπτύσσονται εξαιτίας της κίνησης της ατράκτου.



Σχήμα 1-2: Μορφές πυλώνα ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα [1-5].

Ο πυλώνας μιας ανεμογεννήτριας αποτελείται από επιμέρους τμήματα κυκλικής διατομής τα οποία ενώνονται μεταξύ τους. Η διάμετρος των διατομών μεταβάλλεται καθ' ύψος του πυλώνα, παραμένοντας όμως την ίδια στιγμή σταθερή σε επιμέρους τμήματα συγκεκριμένου μήκους, όπως αυτά έχουν καθοριστεί από τη μελέτη του έργου, προκειμένου να υπάρχει ομαλή μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, όπως αυτό φαίνεται και στο Σχήμα 1-3 των Perelmuter και Yurchenko [1-6].



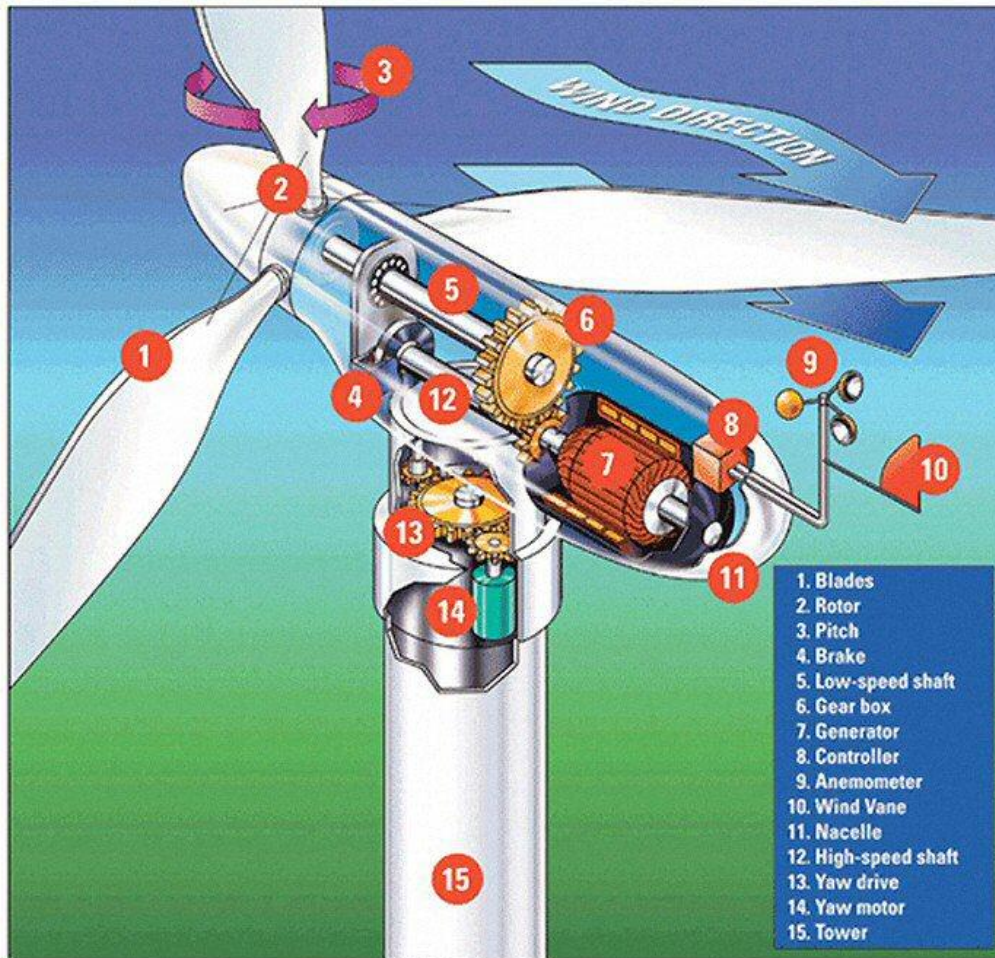
Σχήμα 1-3: Επιμέρους τμήματα σταθερής διαμέτρου καθ ύψος του πυλώνα [1-6].

Τα επιμέρους τμήματα μιας ανεμογεννήτριας είναι δυνατόν να έχουν σημαντικό βάρος. Για μια ανεμογεννήτρια, για παράδειγμα Vestas V90, η νασέλλα από μόνη της ζυγίζει περίπου 75 τόνους, το πτερύγιο 40 τόνους και ο πυλώνας 152 τόνους, ένα σύνολο της τάξης των 267 τόνων. Αντίστοιχα μεγέθη ισχύουν και για μια ανεμογεννήτρια Gamesa G87, όπου κάθε μέλος ζυγίζει 72, 42, 220 τόνους και συνολικό βάρος 334 τόνους.

1.4.2 Δομή

Ο ρότορας είναι το μέλος εκείνο που μετατρέπει την αιολική ενέργεια που δεσμεύεται από τα πτερύγια σε μηχανική. Η λειτουργία των πτερυγίων είναι παρόμοια με εκείνη των φτερών του αεροπλάνου, καθώς πάνω από το πτερύγιο ο αέρας δημιουργεί υπερπίεση, ενώ κάτω από αυτό υποπίεση, με αποτέλεσμα το μέλος αυτό να κινείται. Συνηθίζεται να κατασκευάζονται ρότορες με τρία πτερύγια τοποθετημένα σε οριζόντιο άξονα, με διάμετρο 40-90 m. Μεγάλου μήκους πτερύγια έχουν κατασκευαστεί προκειμένου να βελτιώσουν την αξιοποίηση ενέργειας, ενώ τα καμπτικά φορτία που ασκούνται πάνω σε αυτά έχουν καταστήσει την ανάπτυξη της τεχνολογίας τους εξαιρετικά πολύπλοκη. Όσον αφορά το υλικό τους, πρόκειται συνήθως για συνθετικό, με οπλισμό από fiberglass και ίνες άνθρακα. Τα πτερύγια κινούνται με αργό ρυθμό, που αντιστοιχεί σε 20 περίπου στροφές ανά λεπτό, μέχρι γρήγορο ρυθμό, πάνω από 150 στροφές το λεπτό. Επιπλέον, δεν πρέπει να έχουν πολύ μεγάλο βάρος, καθώς η αυξημένη μάζα τους αυξάνει με τη σειρά της τα φορτία κόπωσης, γεγονός που μειώνει το προσδόκιμο ζωής αυτών των μελών. Ακόμη, τα μεγάλου βάρους μέλη αυξάνουν, όπως είναι φυσικό, το κόστος κατασκευής και μεταφοράς τους, πράγμα που περιορίζει τα πλεονεκτήματα που πρόκειται να έχει μια μεγάλων διαστάσεων ανεμογεννήτρια. Γι' αυτό το λόγο, μια κατασκευή μεγάλης κλίμακας χρήζει ενδελεχούς μελέτης. Η πλήμνη, που μαζί με τα πτερύγια αποτελούν το ρότορα, κατασκευάζεται συνήθως από όλκιμο χυτοσίδηρο, ενώ αποτελεί ένα από τα πιο βαριά μέλη της ανεμογεννήτριας, με βάρος περί τους 8-10 τόνους, για ανεμογεννήτρια 2 MW. Προσαρμοσμένο πάνω στο ρότορα βρίσκεται και το σύστημα pitch drive, που επιτρέπει στα πτερύγια να περιστρέφονται και να προσαρμόζονται στις περιπτώσεις πολύ υψηλών ανέμων, αποτρέποντας πιθανή βλάβη.

Η άτρακτος (νασέλλα) βρίσκεται στην κορυφή της ανεμογεννήτριας και περιέχει τα κύρια μηχανικά μέρη της γεννήτριας. Είναι συνήθως κατασκευασμένη από fiberglass, και περιέχει το φρένο, τους άξονες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας, το κιβώτιο ταχυτήτων (gearbox), τη γεννήτρια, το θερμοστάτη, το σύστημα ελέγχου (controller), το σύστημα εκτροπής (yaw drive), ενώ είναι προσαρμοσμένα πάνω της το ανεμόμετρο και ο ανεμοδείκτης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα [1-4](#) που ακολουθεί.



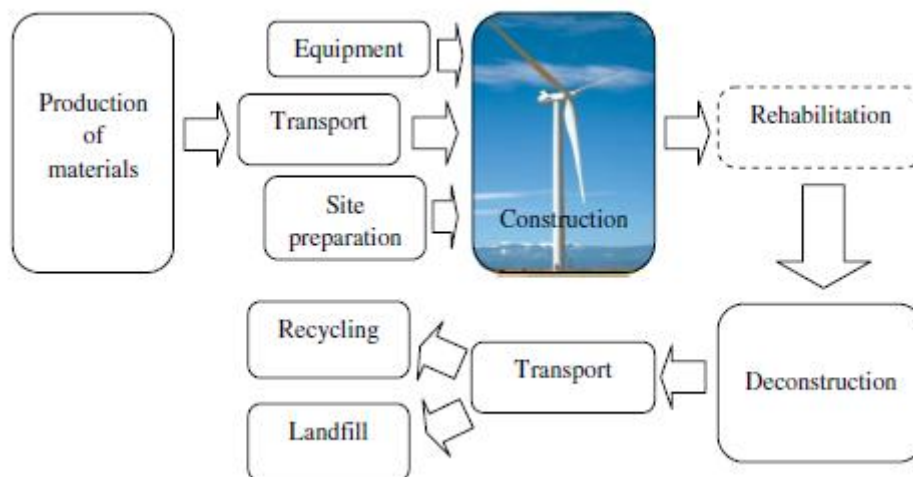
Σχήμα 1-4: Εξαρτήματα ανεμογεννήτριας [1-7].

Το κιβώτιο ταχυτήτων μετατρέπει την κίνηση του ρότορα, από 20 έως και 400 κύκλους το λεπτό, σε περίπου 1.500 κύκλους το λεπτό, όσους δηλαδή χρειάζεται η γεννήτρια για τη λειτουργία της. Το κιβώτιο αναλαμβάνει δηλαδή να μετατρέψει την αργή κίνηση του ρότορα στην ταχεία κίνηση της γεννήτριας. Η γεννήτρια με τη σειρά της μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια που παράγεται από το ρότορα σε ηλεκτρισμό, ενώ υπάρχουν διάφορα συστήματα που παράγουν είτε εναλλασσόμενη είτε σταθερή ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε από διπλανάς προς την ανεμογεννήτρια υποδομές, να αποθηκευθεί στην μπαταρία ή ακόμα να παροχετευθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο. Το σύστημα ελέγχου, που αποτελεί ένα σύστημα υπολογιστή που πραγματοποιεί δοκιμές ανάλογα με τα δεδομένα που λαμβάνει, ξεκινά ή διακόπτει τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας και κάνει προσαρμογές με βάση τις εναλλαγές του ανέμου. Παράλληλα, ένας παρατηρητής έχει τη δυνατότητα να κάνει ελέγχους στο σύστημα και να εισάγει νέες παραμέτρους μέσω ενός modem. Το μηχανικό φρένο λειτουργεί ως υποβοήθεια στην πέδηση κατά την περιστροφή των πτερυγίων ή ως φρένο διακοπής της λειτουργίας. Ακόμα, ο θερμοστάτης διατηρεί σταθερή και χαμηλή θερμοκρασία τη γεννήτρια, το ανεμόμετρο μετράει την ταχύτητα του ανέμου και μεταφέρει τις πληροφορίες αυτές στο σύστημα ελέγχου (controller) και ο ανεμοδείκτης αναγνωρίζει τη διεύθυνση του ανέμου και μεταβιβάζει τις σχετικές πληροφορίες στο σύστημα ελέγχου, που προσαρμόζει την εκτροπή του ρότορα και της νασέλλας. Τέλος, το σύστημα εκτροπής κρατάει τον ρότορα σε τέτοια θέση ώστε να είναι προσανατολισμένος στη διεύθυνση του ανέμου, ενώ υπάρχει ακόμα και σύστημα προστασίας από πυρκαγιά.

1.5 ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

1.5.1 Γενικά στοιχεία

Στην έρευνα των Gervásio et al. [1-4] αναπτύχθηκε το μοντέλο κύκλου ζωής ενός πυλώνα ανεμογεννήτριας, όπως φαίνεται και σχηματικά στο Σχήμα 1-5.



Σχήμα 1-5: Κύκλος ζωής ανεμογεννήτριας [1-4].

Το μοντέλο κύκλου ζωής του πυλώνα περιλαμβάνει την παραγωγή των υλικών που χρειάζονται για την ανέγερσή του, τη μεταφορά τους στο σημείο κατασκευής, την εκσκαφή για την ανεύρεση υλικού για τα θεμέλια, την ανέγερση του πυλώνα, συμπεριλαμβανομένων των καυσίμων που χρησιμοποιούνται για την κίνηση των γερανών, τη συντήρησή του, ακόμη και τα στάδια της αποσύνθεσης και της ανακύκλωσής του.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τη μεταφορά, τα κυλινδρικά μεταλλικά μέλη που συνθέτουν τον πυλώνα μιας ανεμογεννήτριας, με μέγιστη διάμετρο τα 4.5 μέτρα μπορούν να μεταφερθούν οδικώς. Γι αυτό το λόγο κατασκευάζονται σε τμήματα των 30 μέτρων, Σχήμα 1-6, και τοποθετούνται στο χώρο της κατασκευής του πυλώνα. Έτσι, στην περίπτωση του μεταλλικού πυλώνα των 80 μέτρων, για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται τρία μέλη, για το μεταλλικό μέρος ενός υβριδικού πυλώνα 80 μέτρων χρησιμοποιούνται 2 μέλη, ενώ τέλος για το πάνω μέρος ενός υβριδικού ή μεταλλικού πυλώνα 100 μέτρων χρησιμοποιείται ένα μέλος. Τα κυλινδρικά στελέχη κατασκευάζονται στο εργοστάσιο και μεταφέρονται στον τόπο συναρμολόγησης των επιμέρους τμημάτων, όπου συνδέονται μεταξύ τους με φλάντζες. Ο τρόπος αυτός σύνδεσης καλείται welded flange connection (WTC). Στις περιπτώσεις όπου η μεταφορά των επιμέρους τμημάτων του πυλώνα μια ανεμογεννήτριας δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί οδικώς, εξαιτίας αυξημένης διαμέτρου, ακολουθείται μια εναλλακτική διαδικασία τοποθετώντας στο πλάι της περιοχής κατασκευής προκατασκευασμένα πάνελα του πυλώνα που πρόκειται να συναρμολογηθούν προς τη δημιουργία των κυλινδρικών τμημάτων. Όσον αφορά τους μεταλλικούς πυλώνες, αξίζει να σημειωθεί πως οι συνδέσεις folded friction είναι πιο ευεργετικές σε σχέση με τις welded flange connection (WTC). Η εξοικονόμηση υλικού στην πρώτη από τις δύο περιπτώσεις δίνει τη δυνατότητα ακόμη και σε μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά 16%. Η μείωση αυτή υλικού οδηγεί στην αύξηση του ύψους των ανεμογεννητριών, ενώ καθίσταται δυνατή η επαναχρησιμοποίηση των τμημάτων του πυλώνα σε άλλο έργο.



Σχήμα 1-6: Επιμέρους διατομές ανεμογεννήτριας [1-8].

Στο σημείο κατασκευής τα μεταλλικά τμήματα ή τα τμήματα από σκυρόδεμα συναρμολογούνται με τη βοήθεια γερανών κατάλληλων διαστάσεων. Από την άλλη μεριά, η αντίστοιχη διαδικασία για την ένωση τμημάτων υβριδικών πυλώνων είναι, όπως είναι φυσικό, πιο περίπλοκη και περιλαμβάνει τρία στάδια. Αρχικά ένας μικρός κινητός γερανός χρησιμοποιείται για να συναρμολογήσει προσωρινά το μισό τμήμα του μεταλλικού πύργου στο θεμέλιό του και ο ίδιος γερανός χρησιμοποιείται με τη σειρά του για να τοποθετήσει έναν σταθερό γερανό στην κορυφή του μεταλλικού πυλώνα. Στη συνέχεια τα προκατασκευασμένα τμήματα από σκυρόδεμα ενώνονται από αυτόν τον σταθερό γερανό και ο μεταλλικός πυλώνας παραμένει στο εσωτερικό του πυλώνα από σκυρόδεμα. Τέλος, το μεταλλικό τμήμα θα γλιστρήσει με τη βοήθεια υδραυλικών γρύλων και θα βγει στην επιφάνεια από το εσωτερικό όπου βρισκόταν.

Κατά την περίοδο λειτουργίας των ανεμογεννητριών η δομή συντηρείται δύο με τρεις φορές το χρόνο, με διαδικασίες που συμπεριλαμβάνουν την επίβλεψη και προσαρμογή των ενώσεων, το βάψιμο και την αντικατάσταση διάφορων ανταλλακτικών, σύμφωνα με τις διαδικασίες που περιγράφονται από τους εκάστοτε κατασκευαστές. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πλειονότητα των δράσεων συντήρησης των ανεμογεννητριών αφορά τη νασέλα και το ρότορα. Για το τέλος της προβλεπόμενης διάρκειας ζωής του έργου, όπως αυτό έχει οριστεί για κάθε μια από τις περιπτώσεις, θεωρείται πως όλα τα υλικά ανακυκλώνονται με βάση τα παρακάτω: στις μεταλλικές κατασκευές σε ποσοστό που ανέρχεται στο 90% του συνόλου του υλικού, στον μεταλλικό οπλισμό ανακυκλώνεται το 70%, και στις κατασκευές από σκυρόδεμα, μη συμπεριλαμβανομένου του θεμελίου, ποσοστό της τάξης του 70%. Τα υπόλοιπα υλικά οδηγούνται σε χώρο φύλαξης υλικών.

Όσον αφορά την αποσυναρμολόγηση του πυλώνα, σε μεταλλικούς πυλώνες γίνεται με την αντίθετη σειρά από ό,τι έγινε κατά την κατασκευή του και τα τμήματα μεταφέρονται για ανακύκλωση ή επαναχρησιμοποίηση. Όσοι πυλώνες από την άλλη μεριά είναι κατασκευασμένοι εξ ολοκλήρου από σκυρόδεμα, καθώς και το σκυροδετημένο μέρος των υβριδικών πυλώνων, καταστρέφονται και πηγαίνουν κατευθείαν για ανακύκλωση.

Αξίζει να σημειωθεί πως η απόσταση μεταξύ του σημείου παραγωγής των υλικών με το σημείο κατασκευής του επιθυμητού πυλώνα, και αντίστοιχα η απόσταση του σημείου αποσυναρμολόγησης με τον τόπο ανακύκλωσης των υλικών θεωρείται 100 km για όλα τα υλικά. Η απόσταση από το χώρο κατεδάφισης ως το χώρο υγειονομικής ταφής θεωρείται περί τα 20 km.

Σύμφωνα με τους Gervásio et al. [1-4] αναπτύχθηκαν τρία σενάρια που αφορούν τον κύκλο ζωής των πυλώνων των ανεμογεννητριών. Σύμφωνα με το πρώτο από αυτά, η κατασκευή αποσυναρμολογείται και τα υλικά ανακυκλώνονται μετά από μια περίοδο 20 χρόνων ζωής. Στο δεύτερο σενάριο θεωρείται ότι μετά το πέρας των 20 πρώτων χρόνων λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, αυτή αναδομείται και

ξαναχρησιμοποιείται για άλλα 20 χρόνια. Με βάση το τρίτο και τελευταίο σενάριο θεωρείται ότι μετά τα 20 πρώτα χρόνια η δομή αποσυντίθεται και μεταφέρεται σε άλλο σημείο όπου ανασυγκροτείται και επαναχρησιμοποιείται για άλλα 20 χρόνια. Στις δύο τελευταίες περιπτώσεις, μετά τα 40 χρόνια η κατασκευή αποσυντίθεται και πηγαίνει στον τελικό προορισμό, όποιος κι αν είναι αυτός για κάθε υλικό.

1.6 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Τα κριτήρια διαστασιολόγησης του πάχους των τοιχωμάτων του πυλώνα μιας ανεμογεννήτριας βασίζονται στις απαιτήσεις δυσκαμψίας και αντοχής της κατασκευής, καθώς επίσης και στο προσδόκιμο ζωής της, λαμβάνοντας υπόψη την την κόπωση.

1.6.1 Δυναμικά χαρακτηριστικά πυλώνα και θεμελίου

Κατά τον προσδιορισμό της ιδιοσυχνότητας της κατασκευής αποφεύγεται ο συντονισμός της κίνησης του ρότορα και της φυσικής κίνησης του πυλώνα κατά τη λειτουργία της γεννήτριας. Οι συχνότητες λειτουργίας των ανεμογεννητριών δίνονται από τους ίδιους τους κατασκευαστές τους και διατίθενται στο διαδίκτυο. Προκειμένου να κατασκευαστεί ένα δυναμικό σύστημα που πληρεί τις κατασκευαστικές απαιτήσεις, πρέπει να ληφθούν υπόψη η μάζα της νασέλας, η κατανεμημένη μάζα των πτερυγίων, και η αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής. Η κατανεμημένη μάζα των πτερυγίων δεν επηρεάζει σημαντικά την πρώτη συχνότητα, και κατά συνέπεια θεωρείται συγκεντρωμένη μαζί με την αντίστοιχη μάζα της νασέλας, συμπεριλαμβανομένου του ρότορα. Ένας απλός τρόπος προκειμένου να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής είναι η χρήση εφελκυστικών μόνο ελατηρίων κατά την προσομοίωση του εδάφους, με τη δυσκαμψία τους να υπολογίζεται ανάλογα με το είδος του εδάφους και τη γεωμετρία του θεμελίου.

1.6.2 Κριτήρια σχεδιασμού μεταλλικών μελών

Ο σχεδιασμός των μεταλλικών τμημάτων βασίζεται στις οριακές καταστάσεις ευστάθειας και αντοχής, όπως αυτές περιγράφονται από τον Ευρωκώδικα 3 (μέρος 1-6), καθώς και από την οριακή κατάσταση κόπωσης με βάση τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 (μέρος 1-9).

1.6.3 Κριτήρια σχεδιασμού μελών από σκυρόδεμα

Ο σχεδιασμός των μελών από σκυρόδεμα γίνεται με βάση τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 2. Τα σχεδιαστικά κριτήρια είναι: (i) η οριακή κατάσταση αντοχής της διατομής για τα μέγιστα φορτία από άνεμο και σεισμό, (ii) η αποφυγή της απώλειας προέντασης στη διατομή σκυροδέματος κατά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιώντας την κατάσταση φόρτισης (E_o), (iii) η κόπωση του σκυροδέματος και του οπλισμού καθώς και των τενόντων προέντασης και (iv) ο ελάχιστος οπλισμός του σκυροδέματος σύμφωνα με τους κανονισμούς.

1.6.4 Σχεδιασμός θεμελίου

Ο σχεδιασμός του θεμελίου γίνεται με βάση τον Ευρωκώδικα 7 χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του εδάφους στο οποίο γίνεται η κατασκευή μιας ανεμογεννήτριας.

1.6.5 Φορτία

Ο συνδυασμός φορτίων, σύμφωνα με τους Rebelo et al. [1-9] που αποτελείται από οριακά φορτία, εξαιρούμενης της κατάστασης λειτουργίας, περιλαμβάνει τα φορτία στην κορυφή του πυλώνα και το φορτίο του ανέμου κατανεμημένο κατά μήκος του πυλώνα. Σε αυτήν την περίπτωση η ανεμογεννήτρια βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής, και η ταχύτητα στο ύψος της πλήμνης είναι περίπου σταθερή με τιμή αναφοράς $V_{ref}=42.5$ m/s, μετρούμενη κάθε 10 λεπτά, για ανεμογεννήτρια κλάσης II.

Από την άλλη μεριά, υπάρχει και ο συνδυασμός των φορτίων στην κατάσταση λειτουργίας, που περιλαμβάνει τα φορτία στην κορυφή του πυλώνα, που μπορεί να οδηγήσουν σε προβλήματα στη λειτουργία της ανεμογεννήτριας, καθώς και το φορτίο ανέμου κατανεμημένο καθ' ύψος του πυλώνα. Η

μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας στο ύψος της πλήμνης είναι $V_{hub} = 33$ m/s, ενώ η ταχύτητα στη βάση, σε απόσταση 10m από το έδαφος, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1, είναι $V_b = 20.8$ m/s.

Ακόμη, υπάρχει η σεισμική φόρτιση, με βάση τις θεωρήσεις του Ευρωκώδικα 8. Επιπλέον, υπάρχει η κατάσταση κόπωσης, καθώς οι πυλώνες των ανεμογεννητριών καταπονούνται έντονα από τέτοια φορτία, για τα οποία πρέπει να γίνεται εκτενής έλεγχος. Η φόρτιση σε αυτήν την περίπτωση γίνεται με βάση τις καμπύλες S-N. Αυτές οι καμπύλες κατασκευάζονται σε ετήσια βάση λαμβάνοντας υπόψη όλες τις πιθανές καταστάσεις φόρτισης που μπορεί να λάβουν χώρα κατά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας, καθ' όλη τη διάρκεια του προβλεπόμενου χρόνου ζωής τους, που είναι περί τα 20 χρόνια.

1.7 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1-1] Herbert, G.M.J., Iniyar, S., Sreevalsan, E., Rajapandian, S., "A review of wind energy technologies", Renewable and sustainable energy Reviews 11, 2005.
- [1-2] Borri, C., Biagini, P. and Marino, E., "Large wind turbines in earthquake areas: structural analyses, design/construction and in-situ testing", CRIACIV c/o, Italy.
- [1-3] Schaumann, P., Böker, C., Bechtel, A. and Lochte-Holtgreven, S., "Support Structures of Wind Energy Converters", Institute for Steel Construction, Germany.
- [1-4] Gervásio, H. , Rebelo, C., Moura, A., Veljkovic, M., Simões da Silva, L., "Comparative life cycle assessment of tubular wind towers and foundations – Part 2: Life cycle analysis", Engineering Structures 74, 292–299, 2014.
- [1-5] <http://www.windfarmbop.com/tag/concrete-tower/>
- [1-6] Perelmuter, A. and Yurchenko, V., "Parametric Optimization of Steel Shell Towers of High-Power Wind Turbines", Procedia Engineering 57, 895 – 905, 2013.
- [1-7] BWE Bundesverband WindEnergie e.V., German Wind Energy Association
- [1-8] Manufacturing of Towers by Enercon - © Enercon
- [1-9] Rebelo, C., Moura, A., Gervásio, H., Veljkovic, M., Simões da Silva, L., "Comparative life cycle assessment of tubular wind towers and foundations – Part 1: Structural design", Engineering Structures 74, 283–291, 2014.

2 ΔΙΑΤΟΜΕΣ SANDWICH

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ακολουθώντας το ρου της ιστορίας, οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες συνεχίζουν να εξελίσσονται, ενώ η αγορά αιολικής ενέργειας αποτελεί μια από τις πλέον ελπιδοφόρες και κερδοφόρες αγορές ανανεώσιμων πηγών παγκοσμίως. Η ραγδαία ανάπτυξη των τεχνολογιών στον κατασκευαστικό τομέα, οι ανάγκες σε παγκόσμιο επίπεδο για παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας, καθώς και τα νέα περιβαλλοντικά δεδομένα που εμφανίζονται, δίνουν ώθηση στην εξέλιξη και επιτάσσουν την κατασκευή μεγαλύτερων και ισχυρότερων ανεμογεννητριών. Οι παράγοντες αυτοί με τη σειρά τους οδηγούν στην ανάγκη για επαναπροσδιορισμό των υπάρχουσών λύσεων για τους πυλώνες και τα θεμέλιά τους, συμπεριλαμβανομένων του σχεδιασμού και του κύκλου ζωής της κατασκευής. Η ανάγκη για μετακίνηση ογκωδών τμημάτων καθώς και η δυσκολία στην τοποθέτησή τους στην περιφέρεια του έργου, αποτελούν σημαντικά θέματα που χρήζουν μελέτης.

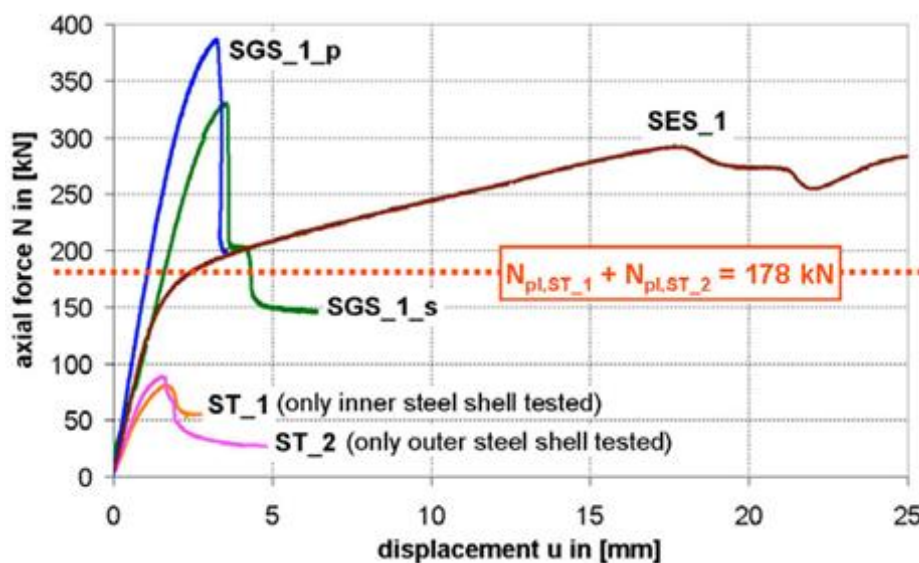
2.2 ΑΝΑΓΚΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΛΥΣΗΣ

Όλα τα στοιχεία οδηγούν προς την κατεύθυνση της άνθησης του τομέα ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας, που περιλαμβάνει τη δημιουργία περισσότερων και μεγαλύτερων αιολικών πάρκων, τα οποία θα είναι εξοπλισμένα με την πιο σύγχρονη τεχνολογία αξιοποίησης της ενέργειας. Αναζητώντας τρόπους προκειμένου να αυξηθεί όσο γίνεται περισσότερο η παραγωγή ενέργειας στα εκάστοτε αιολικά πάρκα βρέθηκαν μέθοδοι για αξιοποίηση μεγαλύτερης έντασης ανέμου. Παρατηρήθηκε από τους Rehman et al., [2-1] πως πλησιέστερα στην επιφάνεια του εδάφους ο άνεμος χάνει ένα μέρος της ταχύτητάς του εξαιτίας της τριβής που αναπτύσσεται. Συνεπώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται με το ύψος, γεγονός που οδηγεί σε περισσότερη ενέργεια προς εκμετάλλευση στην πλήμνη για μεγαλύτερα ύψη ανεμογεννητριών. Υπάρχουν δύο κυρίως παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη στον καθορισμό του ύψους του πυλώνα, προκειμένου η ανεμογεννήτρια να κριθεί ή όχι αποτελεσματική. Ο πρώτος παράγοντας είναι όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα το γεγονός πως η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται ανάλογα με το υψόμετρο. Ως εκ τούτου, μια ανεμογεννήτρια πρόκειται να παράγει περισσότερη ενέργεια από τον άνεμο αν είναι εγκατεστημένη σε μεγάλο υψόμετρο. Ο δεύτερος παράγοντας είναι ο περιορισμός, με την αύξηση του υψόμετρου, των στροβιλισμών του ανέμου οι οποίοι μειώνουν την αποδοτικότητα της γεννήτριας, ενώ προκαλούν φαινόμενα κόπωσης στην κατασκευή, μειώνοντας το προσδόκιμο λειτουργίας της. Αξίζει να σημειωθεί ότι για κάθε ένα μέτρο αύξησης του ύψους της πλήμνης ενός πάρκου ανεμογεννητριών, η ετήσια

παραγωγή ενέργειας αυξάνεται κατά 1%, γεγονός που αποδεικνύει την ανάγκη για μεγαλύτερα ύψη ανεμογεννητριών.

Η αύξηση επομένως του ύψους των πυλώνων συνεπάγεται αυξημένες ανάγκες αντοχής. Ωστόσο, σύμφωνα με τους Schaumann και Keindorf [2-2], για διάφορες κατηγορίες χάλυβα παρατηρείται πως μόνο η αύξηση της ποιότητάς του δεν είναι αρκετή ώστε να ικανοποιηθούν οι αυξημένες ανάγκες αντοχής μιας κατασκευής, τέτοιας όπως οι πυλώνες ανεμογεννητριών. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί εύκολα συγκρίνοντας τη συμπεριφορά των διάφορων διατομών.

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 2-1 ότι προκαλείται απότομη πτώση της φέρουσας ικανότητας μετά το φορτίο διαρροής, κάτι που δε συμβαίνει όταν ως υλικό πυρήνα χρησιμοποιείται το ελαστομερές (SES), οπότε και παρουσιάζεται πολύ καλή μεταλυγισμική συμπεριφορά, που κυρίως οφείλεται στα άριστα συνδυαστικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου υλικού.



Σχήμα 2-1: Σύγκριση φέρουσας ικανότητας σε θλίψη διατομών sandwich και συμβατικών χαλύβδινων διατομών [2-2].

Ακόμη, αποδεικνύεται πως η αύξηση της ποιότητας του χάλυβα και κατά συνέπεια του ορίου διαρροής του, οδηγεί σε μείωση του λόγου $\sigma_{x,cr,k}/f_{y,k}$ και κατά συνέπεια σε χαμηλότερα φορτία λυγισμού όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-2, που αποτελεί το πηλίκο της τάσης λυγισμού προς το όριο διαρροής της διατομής. Έτσι, μια διατομή S460 ή S690 δεν μπορεί να θεωρηθεί οικονομική χωρίς ενισχύσεις και ως εκ τούτου απαιτούνται κάποια επιπλέον μέτρα πέραν της χρησιμοποίησης χάλυβα μεγάλης αντοχής, προκειμένου η επιλεγθείσα διατομή να αντεπεξέλθει στις ανάγκες ενός απαιτητικού έργου, όπως η κατασκευή ενός πυλώνα ανεμογεννήτριας.

Section:
H = 30 m
D = 5.5 m
t = const.

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
λ_s [-]	0.33	0.49	0.67	0.99
κ_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 2-2: Σύγκριση διατομών διαφορετικών ποιοτήτων χάλυβα σε σχέση με το φορτίο λυγισμού [2-2].

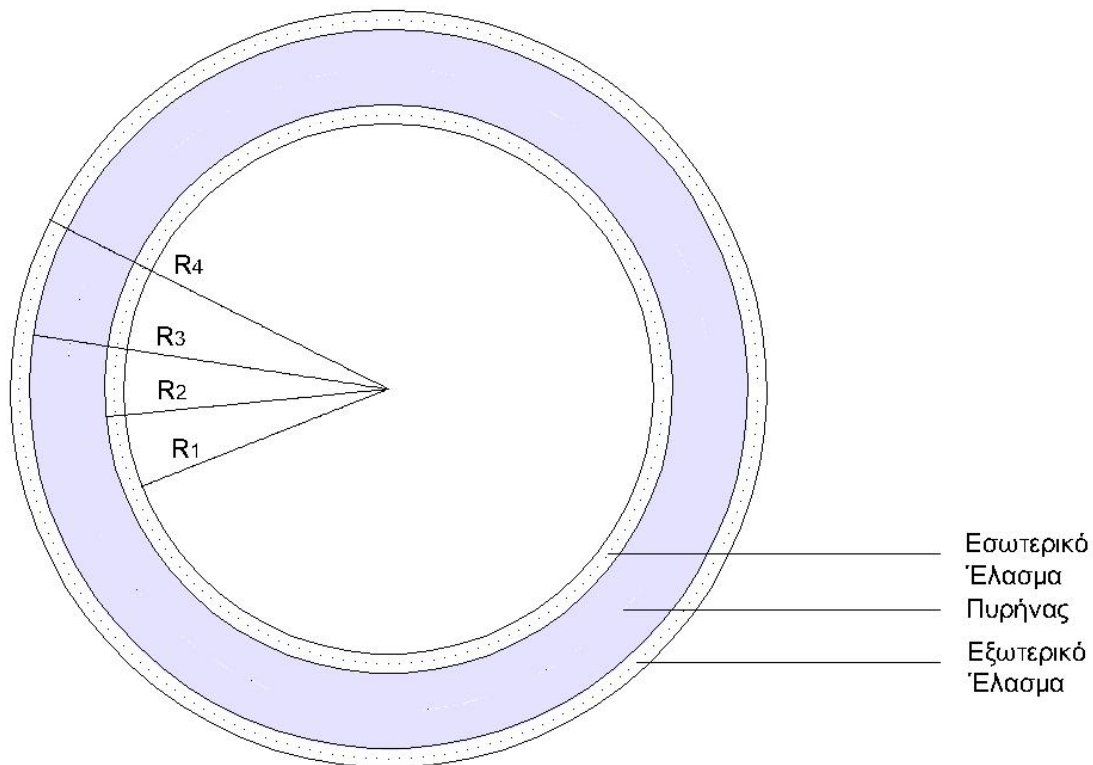
Επιπλέον, οι αυξημένες ανάγκες αντοχής οδηγούν σε μεγαλύτερες διαστάσεις διατομών των επιμέρους μελών του πυλώνα. Έτσι, τα εξαρτήματα της γεννήτριας είναι πιο ογκώδη, αυξάνοντας το συνολικό βάρος της κατασκευής, και οι διάμετροι των τμημάτων του πυλώνα μεγαλύτερες. Οι νέες αυτές διατομές, και ιδιαίτερα εκείνες που διαθέτουν διάμετρο περί τα 4m και άνω, απαιτούν για τη μεταφορά τους νέα μηχανήματα, μεγάλου κόστους και μεγέθους που είναι συχνά αδύνατο να χρησιμοποιηθούν στις, ως επί το πλείστον, δυσπρόσιτες και με ακατάλληλη οδοποιία περιοχές εγκατάστασης των ανεμογεννητριών.

Ένα αποτελεσματικό μέτρο προς την αντιμετώπιση αυτών των εμποδίων, που θα δίνει τη δυνατότητα κατασκευής μεγάλου ύψους ανεμογεννητριών, φαίνεται να αποτελεί η χρησιμοποίηση διατομών τύπου sandwich. Τα σύνθετα υλικά και οι διατομές sandwich έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στην κατασκευή των πτερυγίων των ανεμογεννητριών, η χρήση τους όμως στην κατασκευή των πυλώνων περιορίζεται έως σήμερα σε πειραματικές διερευνήσεις. Ωστόσο, όπως προκύπτει από τα επόμενα, ένας πυλώνας από σύνθετα υλικά μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας, με ταυτόχρονη μείωση του βάρους αλλά και του κόστους κατασκευής μιας ανεμογεννήτριας, μέσω της χρήσης υλικών χαμηλού κόστους, των απλών διαδικασιών κατασκευής και της εύκολης διαδικασίας μεταφοράς των τμημάτων του.

2.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ SANDWICH

2.3.1 Δομή

Η νέα σύνθετη διατομή αποτελείται από δύο ελάσματα υψηλής αντοχής κι έναν πυρήνα από ελαφρύ υλικό που τα συνδέει. Χάρη στη νέα αυτή δομή αυξάνεται σημαντικά η ευστάθεια της διατομής, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει πλήρης και αποτελεσματική συνεργασία ανάμεσα στον πυρήνα και στα δύο ελάσματα που τον περικλείουν. Η μορφολογία της διατομής sandwich παρουσιάζεται ενδεικτικά στο ακόλουθο Σχήμα 2-3.

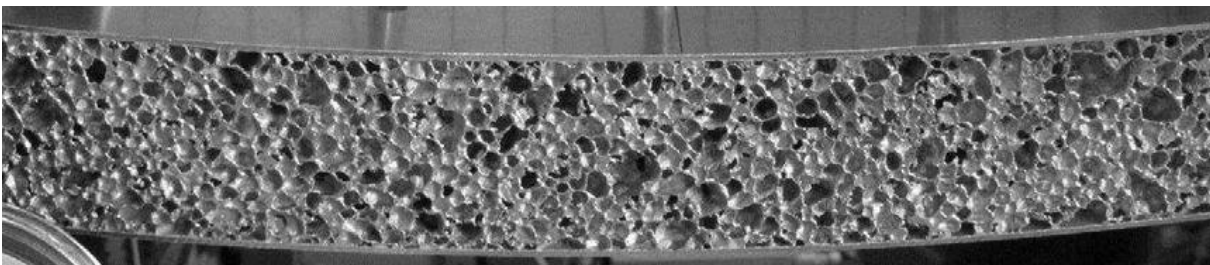


Σχήμα 2-3: Δομή sandwich

Τα ελάσματα συνδέονται με τον πυρήνα μέσω συγκολλήσεων με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται ασφαλής μεταφορά τάσεων και παραμορφώσεων μεταξύ των διαφορετικών υλικών στις στρώσεις της διατομής. Όσον αφορά την κάμψη, τα ελάσματα φέρουν το κύριο μέρος της ροπής κάμψης υπό τη μορφή εντός επιπέδου τάσεων, ενώ τις εγκάρσιες διατμητικές δυνάμεις τις παραλαμβάνει ο πυρήνας. Ακόμη, ο πυρήνας καλείται να εξασφαλίσει τα ελάσματα από τον κίνδυνο λυγισμού.

2.3.2 Υλικά

Τα ελάσματα αποτελούνται συνήθως από υλικά όπως κράματα χάλυβα ή αλουμινίου, ή σύνθετα υλικά, παραδείγματος χάριν εποξικά οπλισμένα με ίνες γυαλιού, όπως αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές δοκιμές των Langton et al. [2-3]. Ο πυρήνας είναι δυνατόν να αποτελείται από κάποιο κυψελωτό ή από κάποιο αφρώδες υλικό (foam), όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 2-4 των Jasion et al. [2-4], ή ακόμα, από κάποιο μέταλλο κυματοειδούς σχήματος.

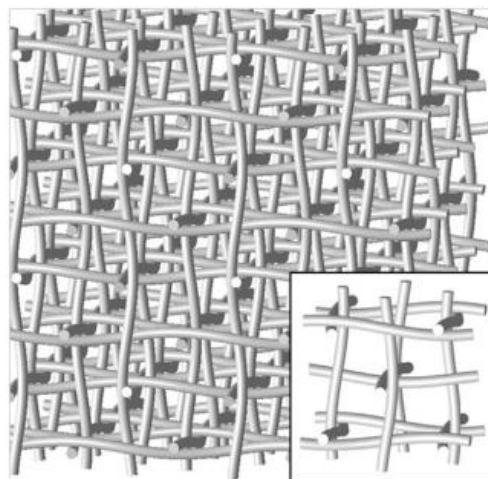


Σχήμα 2-4: Μεταλλικό αφρώδες υλικό (metal foam) ως υλικό του πυρήνα [2-3].

Άλλα συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται για τον πυρήνα μιας διατομής sandwich είναι το σκυρόδεμα και διάφορα ελαστομερή, όπως η πολυουρεθάνη και η διογκωμένη πολυστερίνη. Ακόμα, ως πυρήνας είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί και ένα μεταλλικό δικτύωμα, που να συνδέει τα δύο χαλυβδόφυλλα μεταξύ τους.

Έχουν γίνει αρκετές μελέτες για την αναζήτηση νέων υλικών πυρήνα, που ενδέχεται να αποβούν ευεργετικά για τη συνολική λειτουργία της διατομής. Με βάση τους Walker και Smith [2-5], τα σύνθετα υλικά με οπλισμό από ίνες (Fibre reinforced composites-FRCs) χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε ευρεία κλίμακα, χάρη στα εξαιρετικά χαρακτηριστικά τους ως προς τη δυσκαμψία και το βάρος, έχοντας όμως ως αντίκτυπο το αυξημένο κόστος. Πολλοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει PVC για τον πυρήνα σε συνδυασμό με ελάσματα από βινυλεστέρα οπλισμένο με ίνες γυαλιού τύπου E-glass ή από εποξικό άνθρακα, όπως οι Shivakumar και Smith [2-6]. Οι Sachse et al. [2-7] παρουσιάζουν διατομές sandwich με πυρήνα από nano-clay-filled πολυουρεθάνη και ελάσματα από πολυαμίδη, καθώς και από πολυπροπυλένιο, οπλισμένα με ίνες γυαλιού. Τα nanoclays είναι ευρέως διαδεδομένα καθώς είναι εύκολα επεξεργάσιμα, έχουν ενισχυμένες θερμομηχανικές ιδιότητες, υψηλή διαθεσιμότητα, χαμηλό κόστος και συνεπώς αποτελούν ιδανικό τρόπο ενίσχυσης της πολυουρεθάνης. Ακόμη, τα οπλισμένα με ίνες γυαλιού ελάσματα από πολυαμίδη καθώς και από πολυπροπυλένιο, συμβάλουν στη μείωση του βάρους της διατομής προσδίδοντάς της παράλληλα επιπρόσθετη δυσκαμψία. Παρόλα τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν, η μελέτη των Sachse et al. [2-7] δείχνει πως οι ενισχυμένες με nanoclay διατομές sandwich παρουσιάζουν μείωση των θλιπτικών ιδιοτήτων. Όσον αφορά τα διαφορετικά ελάσματα, όταν οι διατομές υποβλήθηκαν σε δοκιμές με μικρή επιρροή ενέργειας, η πολυαμίδη εμφάνισε ανωτερότητα όσον αφορά την απορρόφηση ενέργειας σε σχέση με το πολυπροπυλένιο.

Σε σχέση με τα κυψελωτά υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως ως πυρήνες διατομών sandwich, υπάρχει με βάση τους Lee και Kang [2-8], η δυνατότητα χρήσης υλικού WBC, που αποτελείται από σύρματα σταυρωτά πλεγμένα. Το υλικό αυτό, και πιο συγκεκριμένα με X-προσανατολισμό, έχει ικανοποιητική αντοχή και μπορεί να αποτελέσει μια καλή εναλλακτική για υλικό πυρήνα, το οποίο θα έρχεται αποτελεσματικά σε επαφή και θα λειτουργεί παράλληλα με τα ελάσματα που τον περικλείουν. Επιπλέον πλεονέκτημα της χρήσης του συγκεκριμένου υλικού αποτελεί η πιθανή αξιοποίηση του εσωτερικού κενού χώρου που δημιουργείται λόγω της δομής του, ενώ στα μειονεκτήματά του συγκαταλέγονται η αδυναμία του να σταθεί μόνο του χωρίς ελάσματα, λόγω υποστατικότητας, καθώς και η χαμηλότερη τιμή του μέτρου ελαστικότητάς του σε σύγκριση με εκείνη των κυψελωτών υλικών. Χαρακτηριστικά, η μορφή του πυρήνα φαίνεται στο Σχήμα 2-5.



Σχήμα 2-5: Δομή WBC [2-8].

Με το πέρασμα των χρόνων έχει παραχθεί μεγάλος αριθμός βιβλιογραφικών στοιχείων που περιλαμβάνει τις μεθόδους ανάλυσης και σχεδιασμού κατασκευών sandwich, εκτιθέμενων σε διάφορα μηχανικά και περιβαλλοντικά φορτία. Η ανάλυση της ευστάθειας κυλινδρικών διατομών sandwich έχει πραγματοποιηθεί από τον Vinson [2-9] μέσω της θεωρίας κελύφους, με αποτέλεσμα η επιρροή της ανισοτροπίας και της ασυμμετρίας στο μέσο επίπεδο της επικείμενης διατομής να μπορεί να ληφθεί

υπόψη, ενώ λεπτομέρειες και εφαρμογές της θεωρίας αυτής σε κελύφη τύπου sandwich έχουν ήδη παρουσιαστεί από τους Schaumann et al. [2-10].

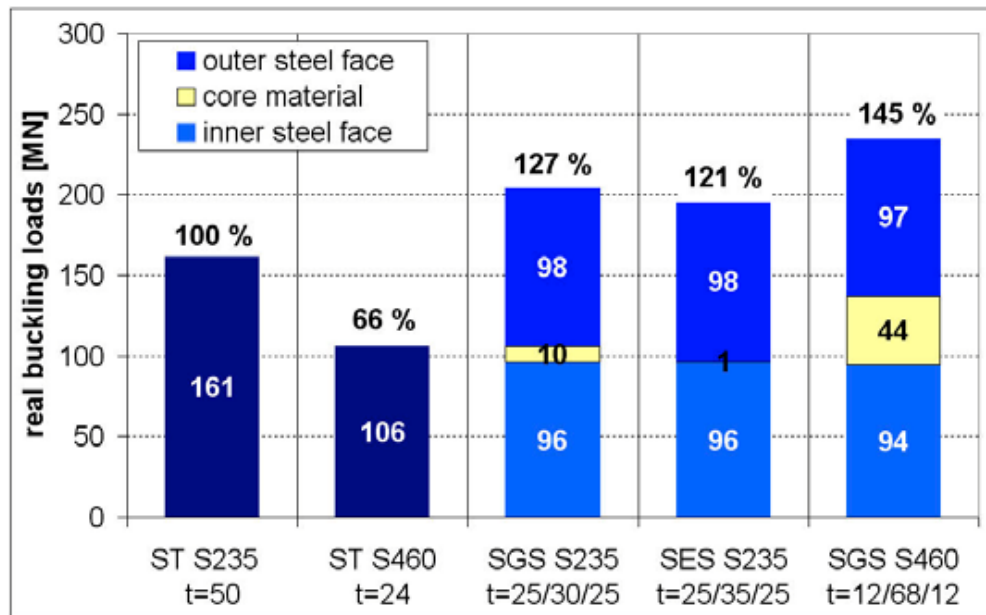
2.3.3 Δυνατότητες διατομής

Στα πλαίσια της μελέτης των δυνατοτήτων μιας διατομής τύπου sandwich, οι Schaumann και Keindorf [2-2] συνέκριναν απλές μεταλλικές κυλινδρικές διατομές μεταξύ τους, καθώς και με διατομές τύπου sandwich. Πιο αναλυτικά, έγιναν υπολογισμοί, κατά τη διάρκεια των οποίων συγκρίθηκαν δύο μεταλλικές διατομές ποιότητας S235 και S460 και δύο διατομές sandwich, μια με πυρήνα από τσιμεντένεμα και μια με πυρήνα από ελαστομερές, και πιο συγκεκριμένα πολυουρεθάνη.

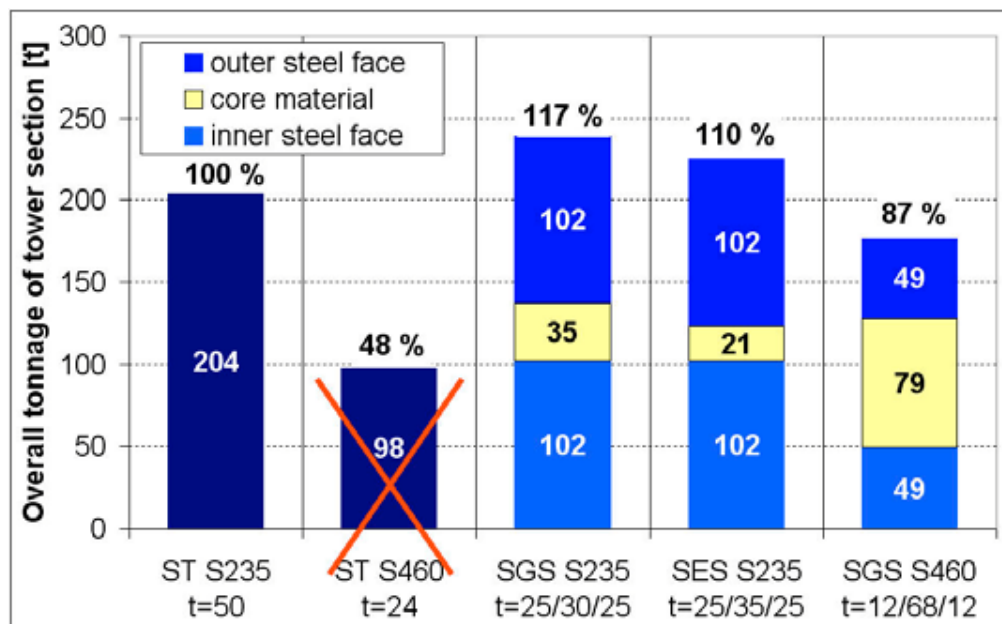
Με τη σύγκριση ανάμεσα στα κυλινδρικά κελύφη μεταλλικής διατομής και διαφόρων ποιοτήτων χάλυβα φάνηκε πως το δοκίμιο από χάλυβα μεγαλύτερης αντοχής έχει μικρότερο φορτίο λυγισμού, με την προϋπόθεση της μείωσης του πάχους του ελάσματος κατ'αναλογία με τον λόγο των τάσεων διαρροής. Με τη χρήση όμως διατομών sandwich, αποτελούμενων από υψηλής αντοχής χάλυβες, παρατηρείται η δυνατότητα για σημαντική αύξηση στα φορτία λυγισμού.

Στο Σχήμα 2-6, παρουσιάζεται η αναλογική αύξηση του φορτίου λυγισμού και της ευστάθειας της κατασκευής με τη χρήση διατομής sandwich. Στο διάγραμμα αυτό, η τιμή αναφοράς για το 100% του φορτίου λυγισμού είναι ο μεταλλικός κύλινδρος ποιότητας ST S235. Παρατηρείται από το διάγραμμα πως η διατομή ποιότητας ST S460, με την αναλογική μείωση του πάχους του ελάσματος, έχει τιμή λυγισμού πολύ μικρότερη από αυτήν με χάλυβα ποιότητας S235 και ως εκ τούτου θεωρείται ασύμφορη ως λύση. Στην αντίπερα όχθη, οι διατομές sandwich αυξάνουν σημαντικά το συνολικό φορτίο λυγισμού. Για παράδειγμα, το φορτίο λυγισμού για SES S235 είναι 21% πιο μεγάλο σε σχέση με εκείνο για ST S235. Καθώς τα φορτία λυγισμού αντιστοιχούν στη φέρουσα ικανότητα της κατασκευής στην οριακή κατάσταση αστοχίας, με την προϋπόθεση της απουσίας μειώσεων λόγω του καθολικού λυγισμού, στο διάγραμμα αυτό συγκρίνονται κατά συνέπεια και οι φέρουσες ικανότητες. Συμπεραίνεται επίσης ότι η θλιπτική αντοχή του τσιμεντενέματος είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των ελαστομερών. Η ευεργετική αυτή λειτουργία του πυρήνα, ιδίως του τσιμεντενέματος, μπορεί να αντισταθμίσει το επιπλέον κόστος λόγω περιπλοκότητας της κατασκευής μιας διατομής, όπως είναι η διατομή sandwich. Ακόμη, η επιθυμία κάθε μηχανικού να συνδυάσει την αύξηση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής με την εξοικονόμηση μάζας μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση μιας τέτοιας σύνθετης διατομής, σύμφωνα με τα επόμενα στοιχεία που παρατίθενται στο διάγραμμα του Σχήματος 2-7. Παρατηρείται ότι ο συνδυασμός υψηλής ποιότητας χάλυβα και τσιμεντενέματος, (SGS 460), εκτός από την αύξηση της φέρουσας ικανότητας κατά 45%, επιφέρει τη μείωση του συνολικού βάρους κατά 13%.

Επιπλέον, με βάση τους Schaumann και Keindorf [2-2], μια σειρά από δοκιμές με κυλινδρικά δοκίμια διατομής sandwich και απλών κυλινδρικών μεταλλικών διατομών που υπόκεινται σε αξονική θλίψη και έλεγχο των μετατοπίσεων, έλαβε χώρα με σκοπό να διερευνήσει την επιρροή των διαφορετικών υλικών πυρήνα στο φαινόμενο του λυγισμού. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων εξήχθη το συμπέρασμα της συμμετοχής του τσιμεντενέματος ως υλικού πυρήνα στην αύξηση της φέρουσας ικανότητας των δοκιμίων. Τα δοκίμια που είχαν ως πυρήνα το τσιμεντένεμα είχαν παρόμοια μεταλυγισμική συμπεριφορά, που περιελάμβανε απότομη πτώση στη φέρουσα ικανότητα.



Σχήμα 2-6: Αύξηση του φορτίου λυγισμού με τη χρήση διατομών sandwich στους πυλώνες των ανεμογεννητριών [2-2].



Σχήμα 2-7: Σύγκριση βάρους διατομών [2-2].

Αντίθετα, το δοκίμιο που είχε πυρήνα από ελαστομερές υλικό εμφάνισε πολύ καλή μεταλυγισμική συμπεριφορά, κάτι που αποδίδεται στην ικανότητά του ως συνδετικό υλικό να μεταφέρει δυνάμεις μέσω των διεπιφανειών στην πλαστική περιοχή, ανακατανέμοντας την ένταση. Ακόμη, παρατηρήθηκε πως το όριο της γραμμικής συμπεριφοράς του δοκιμίου με ελαστομερές υλικό πυρήνα συμπίπτει σε μεγάλο βαθμό με το όριο της ελαστικής περιοχής των μεταλλικών ελασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Αυτό εξηγείται μέσω της μικρότερης τιμής της δυσκαμψίας και της αντοχής σε θλίψη του ελαστομερούς σε σχέση με το τσιμεντένεμα. Η ευστάθεια των διατομών αυτών είναι δυνατόν να βελτιστοποιηθεί με την κατάλληλη επιλογή τιμών παραγόντων όπως το πάχος του πυρήνα, το μέτρο ελαστικότητας του υλικού που τον αποτελεί και την αντοχή του σε θλίψη.

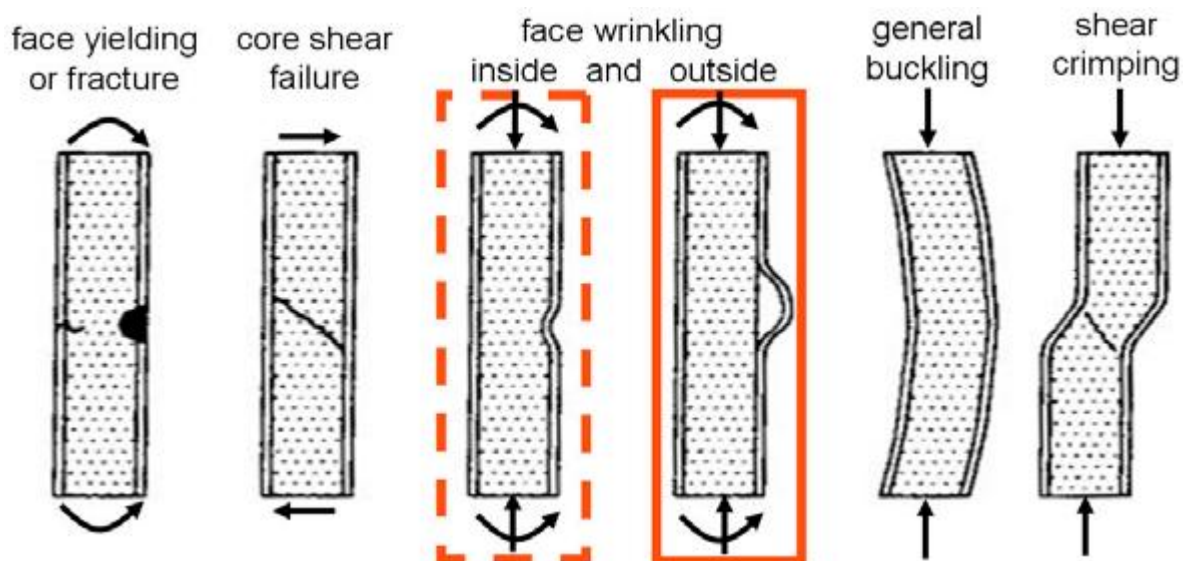
Επιπλέον, οι Lim et al. [2-11] συνέκριναν δέκα διαφορετικές περιπτώσεις διατομών sandwich, για χρήση σε πυλώνα ανεμογεννήτριας, με πυρήνα sand/epoxy και ελάσματα glass/epoxy που τον περικλείουν, για διάφορα πάχη διατομών. Από τη σύγκριση αυτή έλαβαν τις μέγιστες τιμές των τάσεων και των παραμορφώσεων και κατέληξαν σε έναν συνδυασμό, ούτως ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις της ασφάλειας, της ευστάθειας και του περιορισμού των μετακινήσεων του ανώτερου μέρους του πυλώνα. Σύμφωνα με το συνδυασμό αυτό, ο πυλώνας αποτελείται από τέσσερα κυλινδρικά τμήματα, με πάχος διατομής 84.24mm, 93.6mm, 106.8mm και 115.44mm. Ακόμη, οι ίδιοι τόνισαν ιδιαίτερα στα πλεονεκτήματα μιας διατομής sandwich το γεγονός της μείωσης του βάρους της κατασκευής, αφού ο πυλώνας 100m με υλικό πυρήνα sand/epoxy και υλικό ελασμάτων glass/epoxy είχε βάρος 270tn, κατά πολύ ελαφρύτερος από τον αντίστοιχο αμιγώς μεταλλικό πυλώνα 80m και βάρους 450-700tn. Τέλος, επισημάνθηκε η μείωση του συνολικού κόστους κατασκευής του πυλώνα από σύνθετα υλικά, σε σχέση με τον αμιγώς μεταλλικό, κατά περίπου 25%.

2.4 ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

2.4.1 Υπολογισμός φέρουσας ικανότητας

Οι Agarwal και Sobel [2-12] επεσήμαναν την ανταγωνιστικότητα των κυψελωτών δομών sandwich στη χρήση τους στα κυλινδρικά κελύφη που υπόκεινται σε αξονική θλίψη, σε σχέση με τις καθιερωμένες δομές. Πιο συγκεκριμένα, έδειξαν πως οι κυψελωτές δομές παρουσιάζουν πλεονεκτήματα όσον αφορά το βάρος τους για ένα μεγάλο εύρος φορτίων.

Σύμφωνα με τους Schaumann και Keindorf [2-2] 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 έλασμα και στον πυρήνα, όταν συμβαίνει το αντίστροφο όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-8. Ακόμη, στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται και οι υπόλοιποι μηχανισμοί αστοχίας, που περιλαμβάνουν τη διαρροή των ελασμάτων, τη διατμητική αστοχία του πυρήνα και τη διατμητική παραμόρφωση της διατομής.



Σχήμα 2-8: Μορφές αστοχίας κυλινδρικού κελύφους sandwich [2-2].

Ο λυγισμός ενός κελύφους sandwich χωρίς ατέλειες που υπόκειται σε αξονική θλιπτική δύναμη μελετήθηκε από τους Hutchinson και He [2-13]. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα σε αξονοσυμμετρικό επίπεδο, καθώς οι ιδιοτιμές αυτής της μορφής λυγισμού στις διατομές sandwich, σε αντίθεση με τις απλές κυλινδρικές διατομές, είναι μικρότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες στο μη αξονοσυμμετρικό λυγισμό, όταν η διατμητική δυσκαμψία του πυρήνα είναι μικρή. Κατά συνέπεια το κρίσιμο καταναμεμημένο αξονικό θλιπτικό φορτίο N που δίνεται από τη Σχέση (2-1):

$$\frac{N}{E_f R} = \frac{2td}{\sqrt{1 - \nu_f^2} R^2} \left[1 - \frac{\mu}{\sqrt{2}} \right] \quad (2-11)$$

Από τη Σχέση (2-2) λαμβάνουμε το συντελεστή μ , που εκφράζει τη διατμητική συμπεριφορά του πυρήνα:

$$\mu = \frac{E_f t}{\sqrt{2(1 - \nu_f^2)} G_c R} \quad (2-22)$$

Προϋπόθεση βέβαια για την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης είναι το μήκος του κελύφους να είναι πολλαπλάσιο του αξονικού μήκους λυγισμού. Επιπλέον, μελετήθηκε η διαρροή του πυρήνα και των ελασμάτων που τον περικλείουν, καθώς επίσης και η ρυτίδωση των ελασμάτων. Η προϋπόθεση για διαρροή των ελασμάτων πριν ή ταυτόχρονα με το λυγισμό δίνεται από τη Σχέση (2-3):

$$N = 2t\sigma_y \quad (2-33)$$

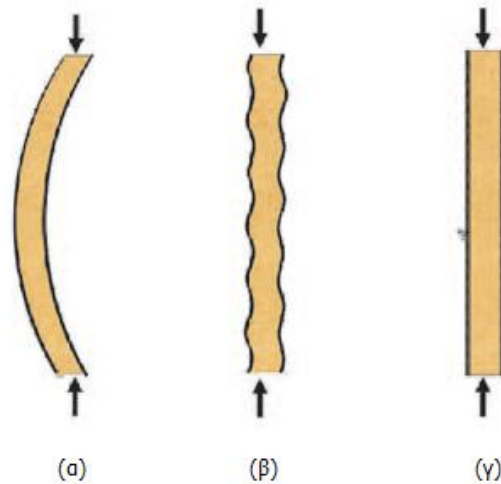
Η διαρροή του πυρήνα δεν επηρεάζει άμεσα τη φέρουσα ικανότητα της κατασκευής, καθώς ο πυρήνας θεωρείται πως δεν παραλαμβάνει φορτίο. Παρόλα αυτά, το φαινόμενο αυτό ενδέχεται να επηρεάσει την ικανότητα του πυρήνα να καταστείλει τη ρυτίδωση των ελασμάτων και να διατηρήσει τη μεταλυγισμική φέρουσα ικανότητα. Η διαρροή του πυρήνα πριν το λυγισμό του φορέα αποφεύγεται αν η παραμόρφωση διαρροής του πυρήνα σε μονοαξονική θλίψη είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή των ελασμάτων.

Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται ρυτίδωση των ελασμάτων, με την προϋπόθεση ύπαρξης επαρκώς παχέως στρώματος πυρήνα καθώς και μη αλληλεπίδρασης των δύο ελασμάτων, όταν υπάρχει φορτίο ανά μήκος περιμέτρου ίσο με την τιμή της Σχέσης (2-4):

$$N = 2tB(E_f E_c^2)^{1/3} \quad (2-44)$$

Με βάση τα αναλυτικά μοντέλα των Stapleton και Adams [2-14] περιγράφονται τρεις μορφές αστοχίας, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2-9: ο καθολικός λυγισμός, η ρυτίδωση των ελασμάτων και η αστοχία των ελασμάτων λόγω συμπίεσης. Στην περίπτωση αυτή, παρόλο που ο καθολικός λυγισμός διακρίνεται συνήθως σε διατμητικό και λυγισμό Euler, και οι δύο αστοχίες θεωρούνται ως μια, καθώς καταλήγουν στο ίδιο αποτέλεσμα. Στη μελέτη αυτή των Hutchinson και He [2-13] ο πυρήνας δε λαμβάνει αξονικό φορτίο, μιας και τα ελάσματα από είναι πολλές φορές πιο δύσκαμπτα στην αξονική διεύθυνση από τον πυρήνα, ενώ θεωρούνται ιστροπικά και τόσο αυτά όσο και ο πυρήνας γραμμικά ελαστικά. Γίνεται η θεώρηση για πακτωμένη βάση και ελεύθερη σε περιστροφή άνω άκρο του πυλώνα και ως εκ τούτου το μήκος λυγισμού θεωρήθηκε, Σχέση (2-5):

$$L_{eq} = 0.669L \quad (2-55)$$



Σχήμα 2-9: (α) Καθολικός λυγισμός (β) Ρυτίδωση ελασμάτων (γ) Αστοχία ελασμάτων λόγω συμπίεσης, [2-14].

2.4.1.1 Καθολικός λυγισμός

Υπάρχουν τρεις παράγοντες που επηρεάζουν τον καθολικό λυγισμό σύμφωνα με τον Allen [2-15]. Ο πρώτος παράγοντας είναι το φορτίο Euler P_E όπως φαίνεται και στη Σχέση (2-6):

$$P_E = \frac{\pi^2 D}{L^2} \quad (2-66)$$

όπου D είναι η καμπτική δυσκαμψία και L το ύψος του πυλώνα διατομής sandwich. Έχοντας υποθέσει πως το αξονικό φορτίο παραλαμβάνεται από τα ελάσματα και ότι αυτά είναι λεπτότοιχα, η τιμή της καμπτικής δυσκαμψίας δίνεται από την παρακάτω Σχέση (2-7):

$$D = \frac{E_f b t d^2}{2} \quad (2-77)$$

όπου E_f η δυσκαμψία των ελασμάτων, b το πλάτος του πυλώνα, d η απόσταση μεταξύ των μέσων επιφανειών των ελασμάτων και t το πάχος κάθε ελάσματος. Ο δεύτερος παράγοντας που επηρεάζει τον καθολικό λυγισμό είναι το φορτίο Euler P_{EF} των δύο ελασμάτων περί των ανεξάρτητό τους κεντροβαρικό άξονα, όπως αυτό δίνεται από τη Σχέση (2-8):

$$P_{EF} = \frac{\pi^2 E_f I_f}{L^2} \quad (2-88)$$

Όπου I_f η ροπή αδράνειας κάθε ελάσματος περί τον κεντροβαρικό του άξονα, Σχέση (2-9):

$$I_f = \frac{b t^3}{6} \quad (2-99)$$

Ο τρίτος παράγοντας P_c είναι το φορτίο διατμητικού λυγισμού που δίνεται από τη Σχέση (2-10)

$$P_c = \frac{b d^2}{c} G_c \quad (2-1010)$$

όπου c είναι τα πάχος του πυρήνα και G_c η διατμητική δυσκαμψία του πυρήνα. Για έναν μακρύ και λεπτότοιχο πυλώνα, το φορτίο P_E είναι η κύρια μορφή λυγισμού. Για πυλώνες μικρού ύψους το φορτίο λυγισμού είναι το P_{EF} . Λύνοντας τη διαφορική εξίσωση λυγισμού, προκύπτει η έκφραση των φορτίου λυγισμού P_{BCr} , Σχέση (2-11), συναρτήσει και των τριών παραγόντων που αναφέρθηκαν.

$$P_{Bcr} = P_E \left\{ \frac{1 + (P_{EF} / P_C) - (P_{EF} / P_C)(P_{EF} / P_E)}{1 + (P_E / P_C) - (P_{EF} / P_C)} \right\} \quad (2-1111)$$

2.4.1.2 Ρυτίδωση των ελασμάτων

Στην περίπτωση αυτή το μήκος λυγισμού είναι ίδιας τάξης μεγέθους με το πάχος του πυρήνα, ενώ η πιο κοντινή προσέγγιση προς τα πειραματικά αποτελέσματα είναι αυτή των Hoff και Mautner [2-16] που προσδιορίζει το φορτίο αστοχίας από τη Σχέση (2-12):

$$P_{Wcr} = 2bt(0.5\sqrt{E_f E_c G_c}) \quad (2-1212)$$

όπου E_c η δυσκαμψία του πυρήνα.

2.4.1.3 Αστοχία των ελασμάτων λόγω συμπίεσης

Για τη μελέτη των Starpleton και Adams [2-14] η αντοχή σε συμπίεση των ελασμάτων σ_{fs} θεωρήθηκε σταθερή για κάθε διατομή sandwich και ανεξάρτητη του πάχους ή της πυκνότητας του πυρήνα και υπολογίζεται έτσι από τη Σχέση (2-13):

$$P_{fs} = 2bt\sigma_{fs} \quad (2-1313)$$

2.4.2 Επирροή των ατελειών στη φέρουσα ικανότητα

Επιπλέον, με βάσει τους Hutchinson και He [2-3] δίνεται απάντηση στο ερώτημα αν οι γεωμετρικές ατέλειες αλληλεπιδρούν με την πλαστική διαρροή προς τη μείωση της αντοχής σε λυγισμό σε μεγαλύτερο βαθμό απ' ό,τι κάποιος θα περίμενε για κελύφη που είναι σχεδιασμένα να λυγίζουν ελαστικά. Από τη διερεύνησή τους προκύπτει ότι για τα κελύφη αυτά δεν υπάρχει σημαντική πιθανότητα για τέτοια φαινόμενα.

Ένα κέλυφος sandwich που είναι σχεδιασμένο με βέλτιστο τρόπο με βάση την τέλεια γεωμετρία δεν προβλέπεται να απαιτεί πολύ μεγαλύτερο μειωτικό συντελεστή από ότι τα κελύφη που λυγίζουν ελαστικά, ακόμα κι αν σε βέλτιστο σχεδιασμό ο λυγισμός και η διαρροή συμπίπτουν στο κέλυφος χωρίς ατέλειες. Με την πρώτη ματιά το γεγονός αυτό μοιάζει απρόσμενο καθώς η αλληλεπίδραση μεταξύ ατελειών και πλαστικής διαρροής είναι γνωστό πως μειώνει αρκετά τη φέρουσα ικανότητα υποστυλωμάτων και πλακών. Η συμπεριφορά αυτή του κυλινδρικού κελύφους που υπόκειται σε αξονική θλίψη μπορεί να αποδοθεί στην ιδιαίτερη γεωμετρική του ευαισθησία στην ελαστική περιοχή. Για το κέλυφος, η ατέλεια μειώνει το συνολικό φορτίο λυγισμού και ως εκ τούτου τις συνολικές μέσες αξονικές τάσεις σε τέτοιο βαθμό που αντισταθμίζει την αύξηση των τάσεων λόγω καμπτικών παραμορφώσεων.

2.5 ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ SANDWICH

2.5.1 Αναλυτική προσέγγιση

Στα πλαίσια της βελτιστοποίησης ενός κυλινδρικού κελύφους sandwich με εξωτερική ακτίνα R και μήκος L , ως προς το φορτίο ανά μονάδα μήκους περιφέρειας κυκλικής διατομής, N , υπολογίστηκε από τους Hutchinson και He [2-13] το βάρος του κελύφους από τη Σχέση (2-14):

$$W = 2\pi RL\rho(2t + \eta d) \quad (2-1414)$$

όπου η η πυκνότητα του πυρήνα, t το πάχος των ελασμάτων και d το πάχος του πυρήνα.

Η βοηθητική συνάρτηση που χρησιμοποιείται για την εύρεση των τιμών που χαρακτηρίζουν το ελάχιστο αυτό βάρος είναι, με βάση τη Σχέση (2-15):

$$F(t, d, \eta) = W - \lambda_1 \left[N - \frac{2Etd}{R} \left[1 - \frac{4\eta^{-2}t/R}{3a\sqrt{1-v^2}} \right] \right] - \lambda_2 [N - 2t\sigma_y] - \lambda_3 [N - 2BEa^{2/3}t\eta^{4/3}] \quad (2-1515)$$

όπου $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ είναι συντελεστές κατά Lagrange, ενώ ο συντελεστής a προκύπτει από τη Σχέση (2-16):

$$E_c / E_c^0 = a\eta^2 \quad (2-1616)$$

στην οποία E_c^0 είναι το μέτρο ελαστικότητας για πλήρη πυκνότητα υλικού του πυρήνα και E_c η πυκνότητα του πυρήνα.

2.5.1.1 Βελτιστοποίηση με σταθερή πυκνότητα πυρήνα

Στην περίπτωση που η πυκνότητα του πυρήνα έχει τιμή τέτοια ώστε $\eta > (\sigma_y / EBa^{2/3})^{3/4}$, τότε η ρυτίδωση των ελασμάτων θα έπεται της διαρροής τους. Υπάρχουν δύο περιπτώσεις: (i) το βέλτιστο βάρος υπολογίζεται για λυγισμό στην ελαστική περιοχή, και (ii) ο υπολογισμός του βέλτιστου βάρους γίνεται παράλληλα με τη διαρροή του μέλους.

Στην πρώτη περίπτωση, όπου η διαρροή δεν έχει ενεργοποιηθεί, οι μεταβλητές υπολογίζονται όπως φαίνεται στη συνέχεια από τη Σχέση (2-17), με τη μεταβλητή t ως ελεύθερη:

$$d/R = \frac{2[a_1 - a_2(t/R)\eta^{-2}](t/R)}{\eta[a_1 - 2a_2(t/R)\eta^{-2}]} \quad (2-1717)$$

$$\text{με } a_1 = 2/\sqrt{1-v^2}, \quad a_2 = 8/[3a(1-v^2)]$$

Οι σχέσεις αυτές έχουν ισχύ όπως είναι φυσικό μόνο όταν ικανοποιείται η συνθήκη της Σχέσης (2-18):

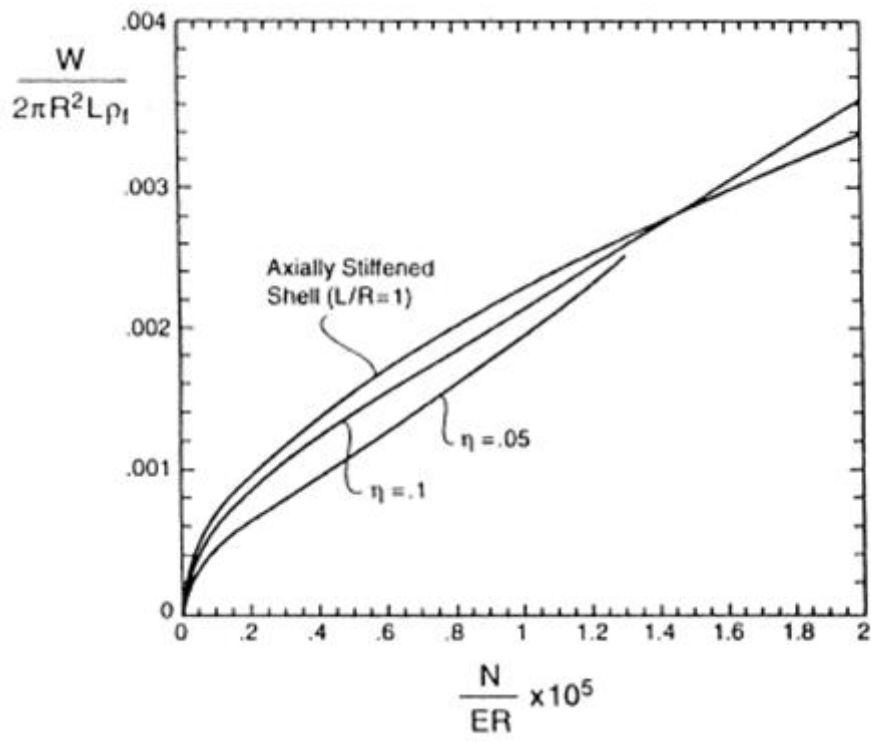
$$N < 2t\sigma_y \quad (2-1818)$$

Στην περίπτωση που υπάρχει διαρροή των ελασμάτων, ισχύουν αυτή τη φορά τα δεδομένα της Σχέσης (2-19):

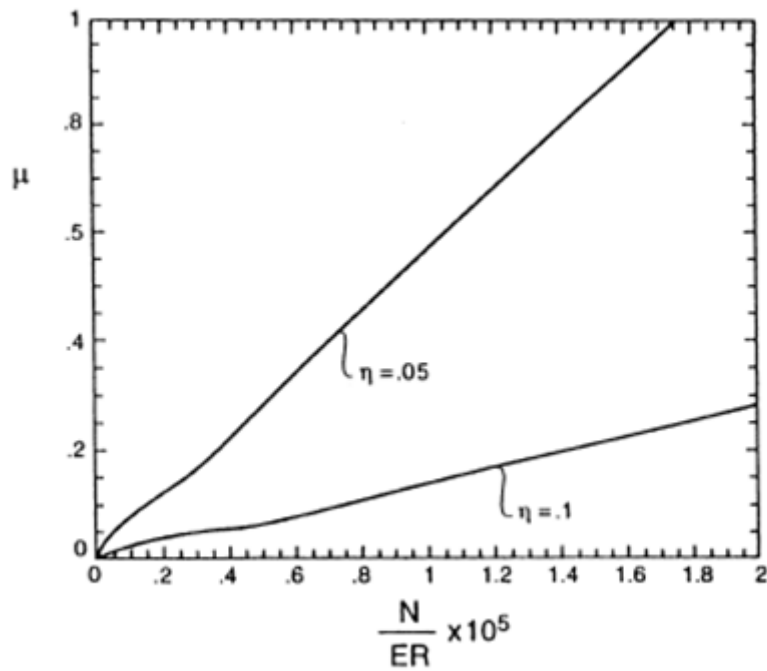
$$t = \frac{N}{2\sigma_y} \quad \text{και} \quad \frac{d}{R} = \frac{N}{ER} [a_1 t/R - a_2 (t/R)^2 \eta^{-2}]^{-1} \quad (2-1919)$$

Στα πλαίσια αυτής της βελτιστοποίησης των κελυφών με σταθερή την πυκνότητα η του πυρήνα, παρουσιάστηκε το διάγραμμα του Σχήματος 2-10(α) όπου για κυλινδρική διατομή sandwich με μεταλλικό πυρήνα υπό θλιπτική ένταση υπάρχει συσχέτιση του δείκτη βάρους $W/(2\pi R^2 L_p)$ με το δείκτη φορτίου N/ER . Από το διάγραμμα αυτό γίνεται φανερό ότι για τιμή φορτίου πάνω από 0.4×10^{-5} συμβαίνει ταυτόχρονα διαρροή των ελασμάτων και καθολικός λυγισμός. Κάτω από αυτήν την τιμή ο λυγισμός είναι ο καθοριστικός παράγοντας της αντοχής του κελύφους. Για κάθε τιμή του δείκτη φορτίου, τα πάχη των ελασμάτων και του πυρήνα έχουν επιλεγθεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να ελαχιστοποιούν το βάρος του κελύφους για δεδομένες τιμές της πυκνότητας η του πυρήνα.

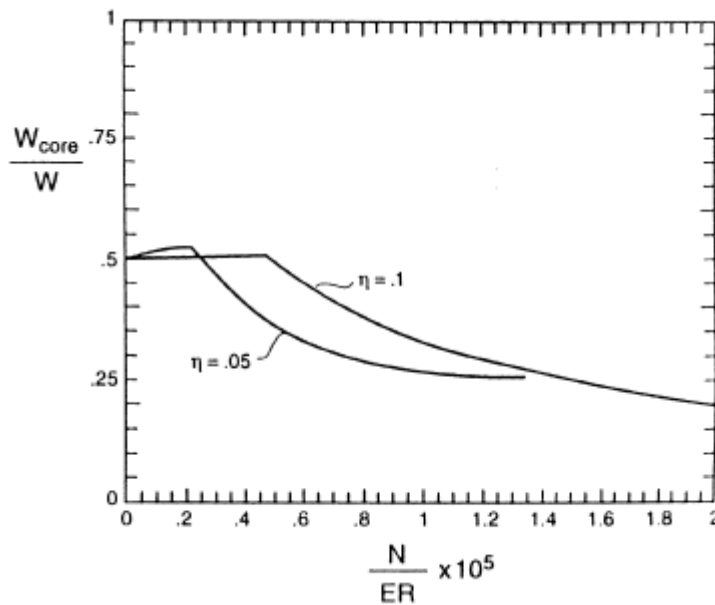
Ακόμη, από το Σχήμα 2-10(β) προκύπτει η σχέση του δείκτη φορτίου με την παράμετρο μ , απ' όπου καταλήγει κάποιος στο συμπέρασμα ότι για πολύ δύσκαμπτο πυρήνα, με σχετική πυκνότητα η κάτω από 0.1, η ποσότητα $(1/G)$ του πυρήνα δε μειώνει δραστικά το φορτίο λυγισμού. Ακόμα, από το Σχήμα 2-10(γ) προκύπτει η σχέση του λόγου του βάρους του πυρήνα προς το συνολικό βάρος της διατομής, W_{core}/W , με το αδιαστατοποιημένο φορτίο.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 2-10: (α) Δείκτης βάρους κυλινδρικού κελύφους sandwich συναρτήσει του δείκτη φορτίου. (β) Η παράμετρος μ σε σχέση με το δείκτη φορτίου. (γ) Λόγος του βάρους του πυρήνα προς το συνολικό βάρος της διατομής σε σχέση με το δείκτη φορτίου [2-13].

2.5.1.2 Βελτιστοποίηση με μεταβλητές τα πάχη των ελασμάτων, το πάχος και την πυκνότητα του πυρήνα

Προσδιορίστηκαν από τους Hutchinson και He [2-13] τέσσερις πιθανοί τρόποι βελτιστοποίησης του φορτίου N έχοντας σαν μεταβλητές τα πάχη t των ελασμάτων, το πάχος d του πυρήνα και την πυκνότητα η του πυρήνα. Οι τρόποι αυτοί παρουσιάζονται παρακάτω:

(i) Για καθολικό λυγισμό, όπου δεν υφίσταται διαρροή των ελασμάτων και ρυτίδωσή τους:

Από τις εξισώσεις (2-14) και (2-15) προκύπτουν τα ζεύγη (W, N) , ενώ οι τιμές των d , t προκύπτουν από τη Σχέση (2-20):

$$\frac{d}{R} = \frac{4a_1\eta}{3a_2} \quad \text{και} \quad \frac{t}{R} = \frac{a_1\eta^2}{3a_2} \quad (2-20)$$

Στο ελαστικό, καθολικά βελτιστοποιημένο κέλυφος τα 2/3 του βάρους του αποτελούν τον πυρήνα. Παρόλα αυτά, ο σχεδιασμός που περιλαμβάνει διαρροή και ρυτίδωση έχει σημαντικά χαμηλό σχετικό βάρος πυρήνα στο εύρος φόρτισης για το οποίο οι διατομές sandwich είναι ανταγωνιστικές.

(ii) Για καθολικό λυγισμό με διαρροή των ελασμάτων αλλά όχι ρυτίδωσή τους

Το βάρος προκύπτει από τη Σχέση (2-14) και ισχύει η Σχέση (2-21) για την τιμή του πάχους των ελασμάτων, του πάχους του πυρήνα και της πυκνότητας του πυρήνα:

$$\eta = \sqrt{\frac{3a_2N}{2a_1\sigma_Y R}}, \quad \frac{t}{R} = \frac{a_1\eta^2}{3a_2} \quad \text{και} \quad \frac{d}{R} = \frac{N}{ER} \left[a_1 t / R - a_2 (t/R)^2 \eta^{-2} \right]^{-1} \quad (2-21)$$

(iii) Για καθολικό λυγισμό με ρυτίδωση των ελασμάτων αλλά όχι διαρροή τους:

Το βάρος προκύπτει από τη Σχέση (2-14) ενώ ισχύουν τα ακόλουθα για την τιμή του φορτίου N , του πάχους ελασμάτων t και του πάχους του πυρήνα d , από τη Σχέση (2-22):

$$\frac{N}{ER} [2X^2 \eta^{-1/3} + 5a_2 Ba^{2/3}] - 7(Ba^{2/3})^2 X \eta^{10/3} = 0,$$

$$\text{όπου} \quad X = a_1 - \frac{a_2 N \eta^{-10/3}}{2Ba^{2/3} ER}, \quad \frac{t}{R} = \frac{N \eta^{-4/3}}{2Ba^{2/3} ER} \quad \text{και} \quad (2-2222)$$

$$\frac{d}{R} = \frac{N}{ER} [a_1 t / R - a_2 (t / R)^2 \eta^{-2}]$$

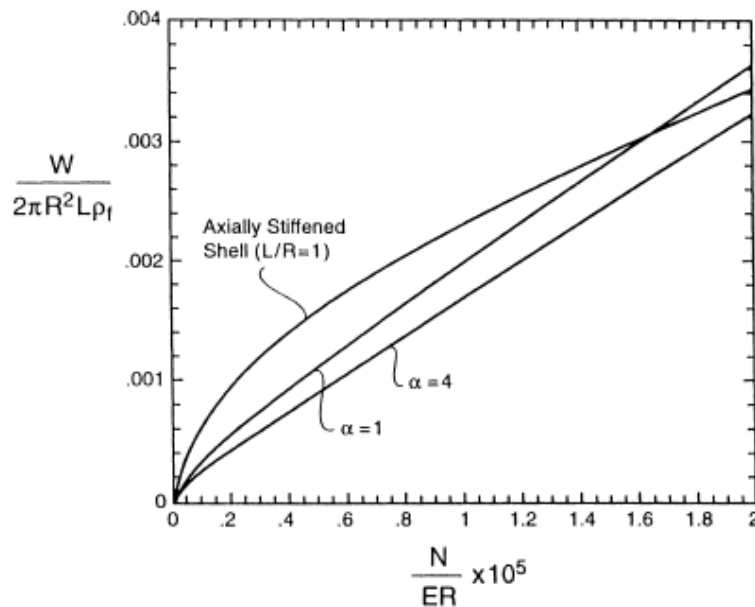
(iv) Για καθολικό λυγισμό με διαρροή των ελασμάτων και ρυτίδωσή τους:

Το βάρος προκύπτει από τη Σχέση (2-14) ενώ ισχύουν για τις τιμές η , t και d οι Σχέσεις (2-23):

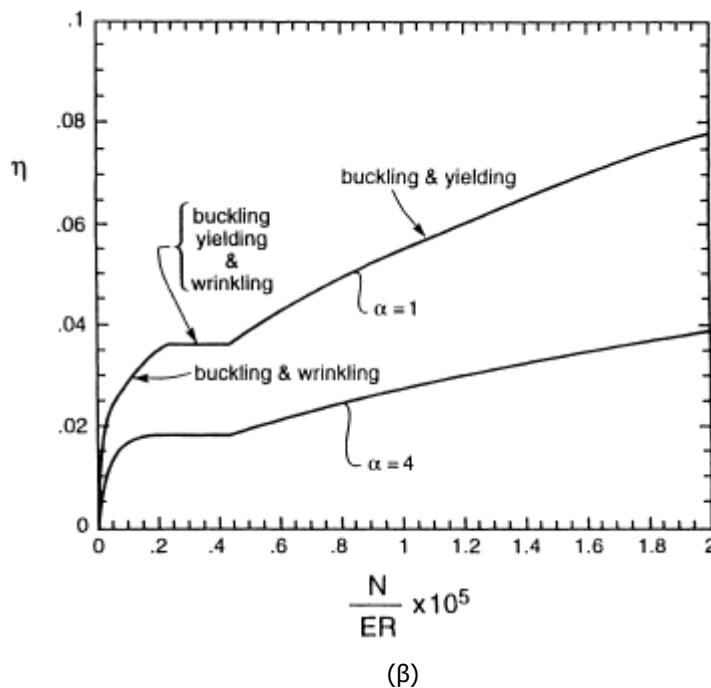
$$\eta = \left(\frac{\sigma_y}{Ba^{2/3} E} \right), \quad \frac{t}{R} = \frac{N}{2\sigma_y R}, \quad (2-2323)$$

$$\frac{d}{R} = \frac{N}{ER} [a_1 t / R - a_2 (t / R)^2 \eta^{-2}]^{-1}$$

Στο Σχήμα 2-11(α) που ακολουθεί παρουσιάζεται το αδιαστατοποιημένο βάρος σε σχέση με το αδιαστατοποιημένο φορτίο για συνολικά βελτιστοποιημένο κυλινδρικό κέλυφος με μεταλλικό πυρήνα και αξονικό θλιπτικό φορτίο. Στην περίπτωση που εξετάστηκε το πάχος των ελασμάτων και του πυρήνα καθώς και η σχετική πυκνότητα έχουν επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να ελαχιστοποιείται το βάρος του κελύφους. Στο δεύτερο διάγραμμα του Σχήματος 2-11(β), παρουσιάζονται οι τιμές της πυκνότητας του πυρήνα σε σχέση με το φορτίο και τις διάφορες μορφές αστοχίας.



(α)

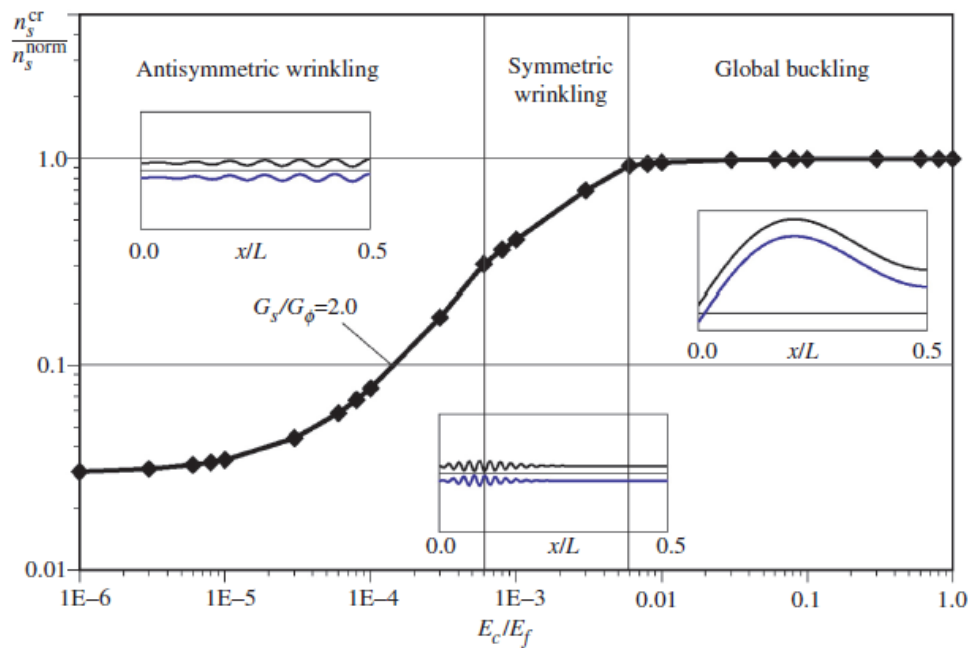


Σχήμα 2-11: (α) Δείκτης βάρους σε συνάρτηση με το δείκτη φορτίου. (β) Πυκνότητα πυρήνα σε συνάρτηση με το δείκτη φορτίου [2-13].

2.5.2 Αριθμητική προσέγγιση

Μια σειρά από αριθμητικές αναλύσεις έλαβε χώρα στα πλαίσια της μελέτης των Hutchinsson και He [2-13], με σκοπό να αποκαλύψει το ρόλο της διαρροής του πυρήνα, όπου είναι ακόμα μικρότερη η επιρροή του συντελεστή απομείωσης του κρίσιμου φορτίου σε σχέση με τη διαρροή των ελασμάτων. Οι υπολογισμοί έδειξαν πως για όσο διάστημα η παραμόρφωση διαρροής του πυρήνα, σ_y/E_c , είναι μεγαλύτερη από το περίπου 70% της αξονικής παραμόρφωσης του τέλειου φορέα στην κατάσταση λυγισμού, η διαρροή του πυρήνα δεν έχει σχεδόν καμία επιρροή στο φορτίο λυγισμού. Ακόμη, με βάση τα αναλυτικά αποτελέσματα η διαρροή του πυρήνα θα ξεκινήσει στο ατελές κέλυφος κατά το λυγισμό όταν το μέγεθος σ_y/E_c είναι περίπου ίσο με την αξονική παραμόρφωση του τέλειου φορέα κατά το λυγισμό. Κρίνεται εύλογο πως η διαρροή θα πρέπει να επεκταθεί σε μεγάλο μέρος του πυρήνα πριν αποκτήσει σημαντική επιρροή στη συνολική συμπεριφορά του κελύφους. Τόσο η αναλυτική όσο και η αριθμητική μελέτη καταλήγουν στο ότι τα κελύφη μορφής sandwich που σχεδιάζονται στα πλαίσια της τέλειας γεωμετρίας δεν απαιτούν μεγαλύτερους συντελεστές απομείωσης του κρίσιμου φορτίου από ό,τι τα ελαστικά κελύφη, ακόμη κι όταν ο βέλτιστος σχεδιασμός οδηγεί σε ταυτόχρονη διαρροή και λυγισμό.

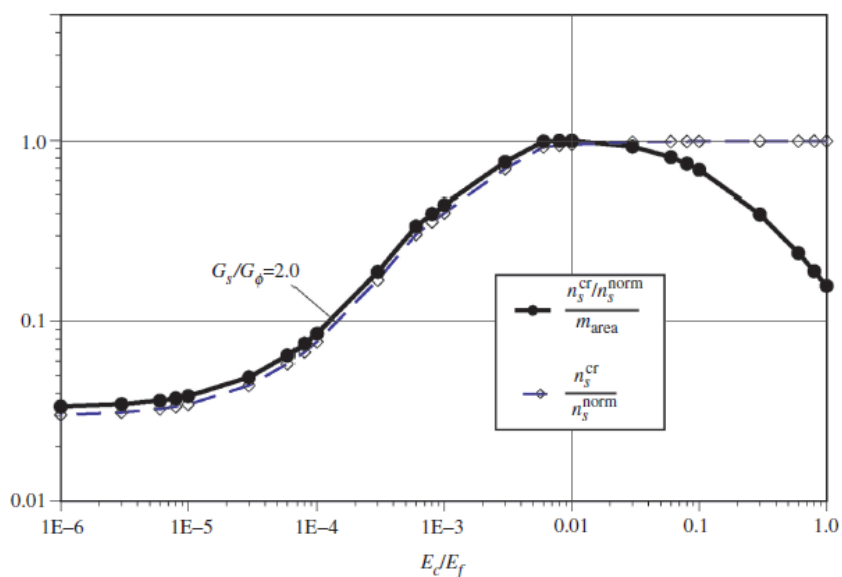
Επιπλέον, σύμφωνα με τους Zhong και Reimerdes [2-17], πραγματοποιήθηκε έρευνα, όσον αφορά την επιρροή της δυσκαμψίας του πυρήνα στην ευστάθεια της διατομής sandwich που φορτίζεται από αξονική θλίψη. Έχοντας ελάσματα με δεδομένα χαρακτηριστικά και πυρήνα με δυσκαμψία που είναι δυνατόν να μεταβληθεί, παρουσιάστηκαν στο ακόλουθο διάγραμμα του Σχήματος 2-12 κανονικοποιημένα τα αξονικά κρίσιμα φορτία ως συνάρτηση της δυσκαμψίας του πυρήνα.



Σχήμα 2-12: Κανονικοποιημένο αξονικό φορτίο ως συνάρτηση της δυσκαμψίας του πυρήνα στη διαμήκη διεύθυνση L [2-17].

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει ότι η μορφή λυγισμού ποικίλει ανάλογα με τη δυσκαμψία του πυρήνα. Παρατηρείται πως για λόγο δυσκαμψίας πυρήνα προς την αντίστοιχη τιμή του ελάσματος μικρότερη από 1% εμφανίζονται τοπικά φαινόμενα λυγισμού. Σε κάθε άλλη περίπτωση, όσο δηλαδή η δυσκαμψία του πυρήνα έχει τιμή μεγαλύτερη από το 1% της δυσκαμψίας του ελάσματος, εμφανίζονται φαινόμενα καθολικού λυγισμού. Την ίδια στιγμή, το φορτίο λυγισμού μειώνεται ραγδαία καθώς μειώνεται η δυσκαμψία του πυρήνα της διατομής sandwich.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα και με το Σχήμα 2-13 η μέγιστη τιμή του κρίσιμου φορτίου, κανονικοποιημένου ως προς την επιφανειακή μάζα της διατομής, συμπίπτει με τη μετάβαση από τα τοπικά στα καθολικά φαινόμενα.



Σχήμα 2-13: Κανονικοποιημένο φορτίο ως προς μάζα ως συνάρτηση της δυσκαμψίας του πυρήνα [2-17].

Κατά συνέπεια η βέλτιστη διατομή που μπορεί να επιτευχθεί ως προς το κρίσιμο φορτίο και τη μάζα είναι εκείνη που αποτελείται από πυρήνα με δυσκαμψία περί το 1% της δυσκαμψίας των ελασμάτων.

2.6 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

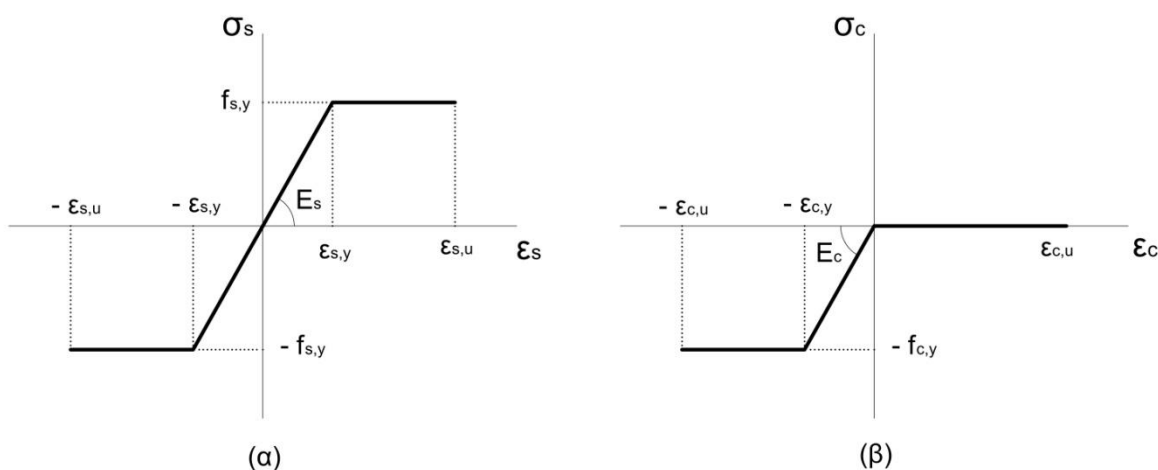
- [2-1] Rehman, S., Al-Hadhrami, L.M., Mahbub Alam, Md., and Meyer, J.P., "Empirical correlation between hub height and local wind shear exponent for different sizes of wind turbines", *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 4, 45–51, 2013.
- [2-2] Schaumann, P., Keindorf, C., "Sandwich-Towers for Wind Energy Converters", Institute for steel construction.
- [2-3] Langdon, G.S., Nurick, G.N., Yazid Yahya, M., and Cantwell, W.J., "The Response of Honeycomb Core Sandwich Panels, with Aluminum and Composite Face Sheets, to Blast Loading", *Journal of Sandwich Structures and Materials* 12: 733, 2010.
- [2-4] Jasion, P., Magnucka-Blandzi, E., Szyk, W., and Magnucki, K., "Global and local buckling of sandwich circular and beam-rectangular plates with metal foam core", *Thin-Walled Structures* 61, 154–161, 2012.
- [2-5] Walker, M., Ryan Smith, R., "A computational methodology to select the best material combinations and optimally design composite sandwich panels for minimum cost", *Computers and Structures* 80, 1457–1460, 2002.
- [2-6] Shivakumar, K.N., Smith, S.A., "In Situ Fracture Toughness Testing of Core Materials in Sandwich Panels", *Journal of Composite Materials* 38: 655, 2004.
- [2-7] Sachse, S., Poruri, M., Silva, F., Michalowski, S., Pielichowski, K., and Njuguna, J., "Effect of nanofillers on low energy impact performance of sandwich structures with nanoreinforced polyurethane foam cores", *Journal of Sandwich Structures and Materials* 16: 173, 2014.
- [2-8] Lee, M.G., Kang, K.J., "Feasibility of wire-woven metal for application as a sandwich core", *International Journal of Mechanical Sciences* 80, 81–92, 2014.
- [2-9] Vinson, J.R., "The behaviour of shells composed of isotropic and composite materials", University of Delaware, USA, Kluwer Academic Publisher, 1993.
- [2-10] Schaumann, P., Keindorf, C., Matuschek, J., and Stihl, T., "Schalenbeulen von Sandwichzylindern mit einem neuen Elastomer als Verbundwerkstoff", *Stahlbau*, Vol. 75, No 9, pp 748-753, 2006.
- [2-11] Lim, S., Kong, C., and 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*, 3(1): 15-23, 2013.
- [2-12] Agarwal, B.L., Sobel, L.H., "Weight comparisons of optimized stiffened, unstiffened, and sandwich cylindrical shells", *Journal of Aircraft*, Vol. 14, No. 10, pp. 1000-1008, 1977.
- [2-13] Hutchinson, J.W., He, M.Y., "Buckling of cylindrical sandwich shells with metal foam cores", *International Journal of Solids and Structures* 37 6777±6794, 2000.
- [2-14] Stapleton, S.E., Adams, D.O., "Core Design for Energy Absorption in Sandwich Composites", *Journal of Composite Materials* 43: 175, 2009.
- [2-15] Allen, H.G., "Analysis and Design of Structural Sandwich Panels", Pergamon Press, Oxford, 1969.
- [2-16] Hoff, N.J., Mautner, S.E., "The Buckling of Sandwich-Type Panels", *Journal of Aeronautical Sciences*, 12(3): 285–297, 1945.

- [2-17] Zhong, C., Reimerdes, H.-G, "Stability Behavior of Cylindrical and Conical Sandwich Shells with Flexible Core", Journal of Sandwich Structures and Materials, Vol. 9: 143, 2007.

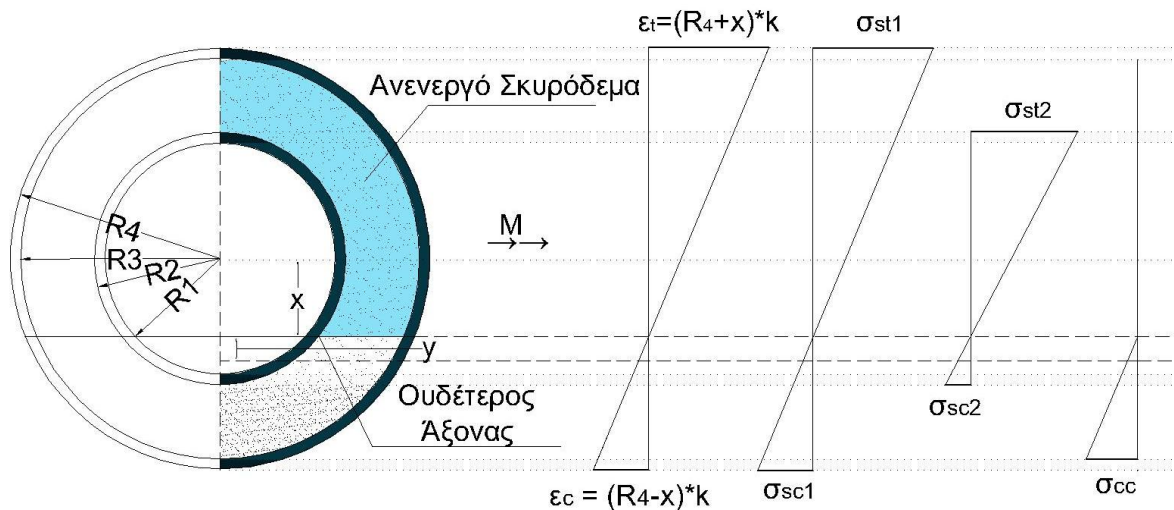
3 ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αναλυτική προσέγγιση της συμπεριφοράς ενός κυλίνδρου διατομής sandwich, που χρησιμοποιείται ως πυλώνας μιας ανεμογεννήτριας, περιλαμβάνει την διερεύνησή της υπό καθεστώς αξονικής καταπόνησης αλλά και υπό καθαρή κάμψη. Οι δύο αυτές εντατικές καταστάσεις περιγράφονται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους. Στα πλαίσια της μελέτης της συμπεριφοράς του κυλινδρικού αυτού φορέα, χρησιμοποιήθηκε ως υλικό πυρήνα το σκυρόδεμα, με νόμο υλικού που περιγράφεται στο Σχήμα 3-1(b), και ως υλικό των δύο ελασμάτων χάλυβας, του οποίου η συμπεριφορά φαίνεται στο Σχήμα 3-1(a). Για τη διευκόλυνση της πραγματοποίησης των υπολογισμών, η διατομή χωρίστηκε σε τομείς, όπου οι δυνάμεις που αναπτύσσονται σε κάθε έναν από αυτούς υπολογίζονται με παρεμφερή τρόπο. Ακόμη, οι παραμορφώσεις και οι τάσεις που καταπονούν κάθε υλικό και μέλος της διατομής παρουσιάζονται κι αυτές στο Σχήμα 3-2.



Σχήμα 3-1: Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων (α) χάλυβα και (β) σκυροδέματος



Σχήμα 3-2: Διατομή τύπου sandwich υπό καθαρή κάμψη

3.2 ΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ

Μια από τις κρίσιμες μορφές φορτίσεων από την οποία καταπονούνται οι ανεμογεννήτριες είναι αυτή της αξονικής καταπόνησης. Το ίδιο βάρος του πυλώνα καθώς και το μεγάλο βάρος της νασέλλας συνδυάζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να αποτελούν το αξονικό θλιπτικό φορτίο της διατομής του πυλώνα. Για έναν κύλινδρο διατομής sandwich, μήκους L , με γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως αυτά φαίνονται στο Σχήμα 3-2 και νόμους υλικού κατά το Σχήμα 3-1, η αξονική καταπόνηση διαφοροποιείται στην περίπτωση του εφελκυσμού και της θλίψης.

3.2.1 Εφελκυσμός

Στην περίπτωση του εφελκυστικού αξονικού φορτίου τα χαλύβδινα μέλη της διατομής, στην προκειμένη περίπτωση τα ελάσματα, είναι αυτά που καλούνται να παραλάβουν τη φόρτιση αυτή. Ο πυρήνας της διατομής sandwich αποτελείται από σκυρόδεμα και ως εκ τούτου αδυνατεί να παραλάβει εφελκυστικές τάσεις, σύμφωνα με το νόμο υλικού που έχει θεωρηθεί πως διέπει το υλικό και ο οποίος περιγράφεται στο Σχήμα 3-1(β). Η συμπεριφορά του κυλίνδρου σε εφελκυσμό παρουσιάζεται με στη Σχέση (3-1).

$$N = \sigma_s A_s = \varepsilon_s E_s A_s = \frac{\delta}{L} E_s \pi [(R_4^2 - R_3^2) + (R_2^2 - R_1^2)] \quad (3-1)$$

Το ελαστικό εφελκυστικό φορτίο, που αντιστοιχεί σε τάση ίση με την τάση διαρροής του χάλυβα παρουσιάζεται από τη Σχέση (3-2) που ακολουθεί.

$$N = f_{ys} A_s = f_{ys} \pi [(R_4^2 - R_3^2) + (R_2^2 - R_1^2)] \quad (3-2)$$

Στις παραπάνω σχέσεις N είναι η τιμή του αξονικού -εφελκυστικού εν προκειμένω- φορτίου, δ η αξονική μετακίνηση, L το μήκος του φορέα, E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα και R_4, R_3, R_2 και R_1 οι ακτίνες των ομόκεντρων κύκλων που συνθέτουν τη διατομή sandwich με φθίνουσα σειρά.

3.2.2 Θλίψη

Η περίπτωση του θλιπτικού αξονικού φορτίου διαφοροποιείται από την αντίστοιχη περίπτωση όπου το φορτίο είναι εφελκυστικό καθώς σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει παραλαβή τάσεων τόσο από τον χάλυβα όσο και από το σκυρόδεμα. Παρατηρώντας τα διαγράμματα του Σχήματος 3-1 γίνεται αντιληπτό πως και τα δύο υλικά έχουν τη δυνατότητα να παραλάβουν θλιπτικές τάσεις. Η αξονική

θλιπτική δύναμη που αναπτύσσεται στη διατομή εκφράζεται συναρτήσει των τάσεων και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της, όπως περιγράφεται από τη Σχέση (3-3).

$$N = \sigma_s A_s + \sigma_c A_c = \frac{\delta}{L} \pi [E_s (R_4^2 - R_3^2) + E_s (R_2^2 - R_1^2) + E_c (R_3^2 - R_2^2)] \quad (3-3)$$

όπου N η εκάστοτε ασκούμενη αξονική δύναμη, δ η αντίστοιχη αξονική μετακίνηση, L το μήκος του φορέα, R_i , με $i=1,2,3,4$, η ακτίνα της κάθε στρώσης στις οποίες είναι χωρισμένος ο φορέας, E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα και E_c το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος.

Για την εύρεση του θλιπτικού ελαστικού φορτίου τροποποιείται η Σχέση (3-3) με τη θέση των ελαστικών τάσεων να καταλαμβάνουν οι τάσεις διαρροής για κάθε υλικό, για το χάλυβα η τάση διαρροής συμβολίζεται με f_{ys} και για το σκυροδέμα με f_{yc} . Η Σχέση (3-4) δίνει το ελαστικό θλιπτικό φορτίο που μόλις περιγράφηκε.

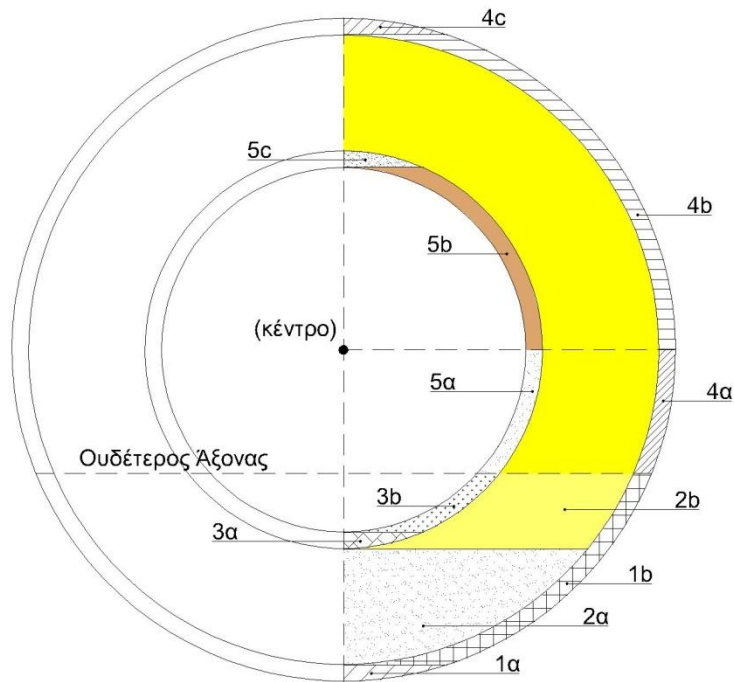
$$N = f_{ys} A_s + f_{yc} A_c = \pi [f_{ys} [(R_4^2 - R_3^2) + (R_2^2 - R_1^2)] + f_{yc} (R_3^2 - R_2^2)] \quad (3-4)$$

3.3 ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ

Ο πυλώνας της ανεμογεννήτριας δέχεται σημαντικά φορτία ανέμου, τα οποία καταπονούν τη διατομή καμπτικά. Για τον προσδιορισμό τη συμπεριφοράς της διατομής υπό μονοαξονική καμπτική καταπόνηση, θεωρείται απλοποιητικά μια συγκεντρωμένη ροπή η οποία ασκείται στο κέντρο βάρους της διατομής και στη συνέχεια προσδιορίζονται οι αναλυτικές εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά της διατομής sandwich, η οποία φέρει τέτοιας μορφής φορτίο. Διαφορετική μεθοδολογία αλλά και εξισώσεις χρησιμοποιούνται για την εύρεση της ελαστικής ροπής αντοχής μιας διατομής τύπου sandwich, της ροπής πλήρους πλαστικοποίησης αλλά και όλων των ενδιάμεσων τιμών μεταξύ των δύο αυτών ακραίων τιμών που αναπτύσσονται στη διατομή.

3.3.1 Εύρεση ελαστικής ροπής αντοχής

Για τον υπολογισμό της ελαστικής ροπής μιας διατομής τύπου sandwich που υπόκειται σε καθαρή κάμψη είναι αρχικά απαραίτητος ο προσδιορισμός της θέσης του ουδέτερου άξονα, μέσω της εξίσωσης των εφελκυστικών και θλιπτικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στη διατομή κατά την εφαρμογή μιας συγκεντρωμένης ροπής στο κέντρο της. Οι δυνάμεις αυτές υπολογίστηκαν με τον κατακερματισμό της διατομής σε πέντε τομείς, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-3. Η επιλογή των τομών έγινε με γνώμονα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μελών και τη δυνατότητα τυποποίησης των σχέσεων. Ο υπολογισμός των δυνάμεων έγινε με τη χρήση των ακόλουθων ολοκληρωμάτων των εξισώσεων 3-5 έως 3-16.



Σχήμα 3-3: Τομείς διατομής sandwich

Τομέας 1:

$$F_{1a} = E_s k \int_{R_3-x}^{R_4-x} y \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy \quad (3-5)$$

$$F_{1b} = E_s k \int_0^{R_3-x} y [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-6)$$

Τομέας 2:

$$F_{2a} = E_c k \int_{R_2-x}^{R_3-x} y \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} dy \quad (3-7)$$

$$F_{2b} = E_c k \int_0^{R_2-x} y [\sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} dy - \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-8)$$

Τομέας 3:

$$F_{3a} = E_s k \int_{R_1-x}^{R_2-x} y \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy \quad (3-9)$$

$$F_{3b} = E_s k \int_0^{R_1-x} y [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-10)$$

Τομέας 4:

$$F_{4a} = E_s k \int_0^{-x} y [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-11)$$

$$F_{4b} = E_s k \int_{-x}^{-(R_3+x)} y [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-12)$$

$$F_{4c} = E_s k \int_{-(R_3+x)}^{-(R_4+x)} y \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy \quad (3-13)$$

Τομέας 5:

$$F_{5a} = E_s k \int_0^{-x} y [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-14)$$

$$F_{5b} = E_s k \int_{-x}^{-(R_1+x)} y [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-15)$$

$$F_{5c} = E_s k \int_{-(R_1+x)}^{-(R_2+x)} y \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy \quad (3-16)$$

Στις συμμετρικές διατομές, όπως αυτή που εξετάζεται, ισχύει η επιπεδότητα των διατομών άσχετα από τις ιδιότητες των υλικών από τα οποία αποτελούνται. Καθώς διατηρείται η επιπεδότητα, οι παραμορφώσεις της διατομής θα μεταβάλλονται γραμμικά συναρτήσει του y , που αποτελεί την απόσταση κάθε διατομής από τον ουδέτερο άξονα. Η βασική εξίσωση (3-17) που εκφράζει την ισορροπία των θλιπτικών και εφελκυστικών δυνάμεων, μέσω του μηδενισμού της συνολικής τάσης στη συνολική επιφάνεια A της διατομής, αναλύεται στην περίπτωση της σύνθετης διατομής στην εξίσωση (3-18), όπου x είναι η απόσταση του ουδέτερου άξονα από το κέντρο της διατομής και y η θέση της εκάστοτε εξεταζόμενης χορδής ως προς αυτόν, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-2. Οι δυνάμεις στους τομείς 1, 2, 3 είναι θλιπτικές, σύμφωνα και με τα διαγράμματα τάσεων που παρουσιάζονται λόγω της καμπτικής καταπόνησης, γι αυτό προσημαίνονται θετικά, ενώ οι αντίστοιχες στους τομείς 4 και 5 είναι εφελκυστικές και έχουν αρνητικό πρόσημο.

$$\int_A \sigma_x dA = 0 \quad (3-17)$$

$$F_{1a} + F_{1b} + F_{2a} + F_{2b} + F_{3a} + F_{3b} - F_{4a} - F_{4b} - F_{4c} - F_{5a} - F_{5b} - F_{5c} = 0 \quad (3-18)$$

Καθώς η εξίσωση 3-18 δεν είναι δυνατόν να επιλυθεί ως προς x με συμβολικό τρόπο, επιλέγονται σε αυτήν τη φάση της διαδικασίας συγκεκριμένες τιμές για τα πάχη και τα μέτρα ελαστικότητας των υλικών, καθώς και μία τυχαία τιμή καμπυλότητας για τη διατομή. Μέσω του κώδικα του προγράμματος Mathematica και της επαναληπτικής διαδικασίας μιας αριθμητικής μεθόδου, όπως η μέθοδος Newton-Raphson υπολογίζεται έπειτα η τιμή του x , η οποία εκφράζει τη θέση του ουδέτερου άξονα ως προς το κέντρο της διατομής.

Στη συνέχεια έχοντας την ακριβή θέση του ουδέτερου άξονα υπάρχει η δυνατότητα προσδιορισμού της ελαστικής ροπής που προκάλεσε την καμπυλότητα που υποτέθηκε προηγουμένως. Πιο συγκεκριμένα, το σύνολο των εφελκυστικών και θλιπτικών δυνάμεων που ασκούνται στη διατομή

δημιουργούν μια ροπή ως προς το κέντρο της, ίση με το γινόμενο του μοχλοβραχίονα κάθε δύναμης σε σχέση με τον ουδέτερο άξονα, επί τη δύναμη αυτή. Η ροπή αυτή υπολογίζεται από τη Σχέση (3-19), που μπορεί να περιγραφεί πιο αναλυτικά από τη Σχέση (3-20).

$$M = \sum_{i=1, j=a,b,c}^5 2F_{ij}y \quad (3-19)$$

$$\begin{aligned} M &= 2E_s k \int_{R_3-x}^{R_4-x} y^2 \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy \\ &+ 2E_s k \int_0^{R_3-x} y^2 [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy \\ &+ 2E_c k \int_{R_2-x}^{R_3-x} y^2 \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} dy \\ &+ 2E_c k \int_0^{R_2-x} y^2 [\sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} dy - \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2}] dy \\ &+ 2E_s k \int_{R_1-x}^{R_2-x} y^2 \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy \\ &+ 2E_s k \int_0^{R_1-x} y^2 [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy \\ &+ 2E_s k \int_0^{-x} y^2 [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy \\ &+ 2E_s k \int_{-x}^{-(R_3+x)} y^2 [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy \\ &+ 2E_s k \int_{-(R_3+x)}^{-(R_4+x)} y^2 \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy \\ &+ 2E_s k \int_0^{-x} y^2 [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy \\ &+ 2E_s k \int_{-x}^{-(R_1+x)} y^2 [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy \\ &+ 2E_s k \int_{-(R_1+x)}^{-(R_2+x)} y^2 \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy \end{aligned} \quad (3-20)$$

Από την παραπάνω σχέση και με τη βοήθεια του προγράμματος Mathematica [3-1] καθίσταται εφικτός ο υπολογισμός της ροπής που έχει προκαλέσει τη δεδομένη καμπυλότητα. Στη συνέχεια, η ροπή αυτή σε συνδυασμό με την καμπυλότητα που έχει υποθεθεί δίνουν την τιμή μιας ισοδύναμης δυσκαμψίας για τη διατομή, \bar{EI} , σύμφωνα με τη Σχέση (3-21) ροπών-καμπυλοτήτων:

$$M = k\bar{E}I \quad (3-21)$$

Η ισοδύναμη αυτή δυσκαμψία θα οδηγήσει στην εύρεση της ελαστικής ροπής αντοχής. Για τον υπολογισμό της τελευταίας, αρκεί να είναι γνωστή η μικρότερη τιμή για την οποία κάποιο σημείο της διατομής εισέρχεται στη διαρροή. Το πρώτο πιθανό κρίσιμο σημείο, που φαίνεται να καταπονείται περισσότερο είναι η εξωτερική ίνα του χαλύβδινου ελάσματος της διατομής στην εφελκυσμένη περιοχή, όπου το σκυρόδεμα είναι ανενεργό και ο χάλυβας καλείται να αναλάβει όλο το εξωτερικό φορτίο. Στην προκειμένη περίπτωση η εξωτερική ίνα θεωρείται κρισιμότερη από την εσωτερική, καθώς όπως θα φανεί και από τη Σχέση (3-23), η ακτίνα του κυκλικού ελάσματος παίζει καθοριστικό ρόλο στον υπολογισμό της ροπής, καθώς είναι αντιστρόφως ανάλογή της. Επιπλέον, το δεύτερο σημείο που ενδέχεται να αποβεί κρίσιμο είναι η ακραία ίνα του σκυροδέματος στη θλιβόμενη περιοχή της διατομής. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί καθώς στη θέση αυτή η καταπόνηση είναι έντονη και το σκυρόδεμα σε σχέση με το χάλυβα ασθενέστερο.

Η ροπή στην πρώτη περίπτωση από τις προαναφερθείσες υπολογίζεται με βάση τα παρακάτω:

$$\sigma_{\max s} = f_{ys} = E_s \varepsilon_{\max s} = E_s k_{\max} y = E_s k_{\max} (R_4 + x) = E_s \frac{M_{\max s}}{EI} (R_4 + x) \quad (3-22)$$

Σύμφωνα με τη Σχέση (3-21) προκύπτει τελικά:

$$M_{\max s} = \frac{f_{ys} \bar{E}I}{(R_4 + x)E_s} \quad (3-23)$$

Αντίστοιχα, η ροπή στην ακραία ίνα του σκυροδέματος στη θλιπτική περιοχή έχει ως εξής με τη βοήθεια αρχικά της Σχέσης (3-24) και στη συνέχεια της Σχέσης (3-25):

$$\sigma_{\max c} = f_{yc} = E_c \varepsilon_{\max c} = E_c k_{\max} (R_3 - x) = E_s \frac{M_{\max c}}{EI} (R_3 - x) \quad (3-24)$$

$$M_{\max c} = \frac{f_{yc} \bar{E}I}{(R_3 - x)E_c} \quad (3-25)$$

Η ελαστική ροπή θα είναι η μικρότερη από τις δύο ροπές που μόλις υπολογίστηκαν με βάση τη Σχέση (3-26).

$$M_{el} = \min\{M_{\max s}, M_{\max c}\} \quad (3-26)$$

Με γνωστή την ελαστική ροπή και την ισοδύναμη δυσκαμψία της διατομής υπολογίζεται και η καμπυλότητά της σύμφωνα με τη Σχέση (3-21).

3.3.2 Εύρεση ροπής για επέκταση της διαρροής

Η διατομή πλέον χωρίζεται σε τμήματα που έχουν διαρρεύσει και σε τμήματα που συμπεριφέρονται ακόμη ελαστικά. Το κάθε τμήμα της διατομής sandwich αναπτύσσει διαφορετικές τάσεις. Κάθε τμήμα ανάλογα με το αν έχει διαρρεύσει ολόκληρο, μέρος αυτού ή αν βρίσκεται ακόμη στην ελαστική περιοχή, αντιμετωπίζεται διαφορετικά, καθώς τα ολοκληρώματα που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τις δυνάμεις που αναπτύσσουν αλλάζουν με τη σειρά τους σε σχέση με την εξέλιξη της διαρροής και της θέσης του ουδέτερου άξονα. Παρακάτω παρουσιάζονται για όλους τους τομείς και ανάλογα με την εξέλιξη της διαρροής οι δυνάμεις που αναπτύσσονται. Για την περιγραφή της διαρροής χρησιμοποιήθηκε το σύμβολο a που εκφράζει τη στάθμη της διαρροής, αφορά τον εφελκυσμένο χάλυβα, έχει θετικό πρόσημο, ξεκινάει από την κορυφή της διατομής και έχει εύρος τιμών από 0 έως

R_4+x , έως δηλαδή τη στάθμη του ουδέτερου άξονα. Με την ίδια λογική, το σύμβολο b αναφέρεται στη διαρροή του θλιβόμενου χάλυβα, παίρνει θετικές μόνο τιμές, ξεκινάει από την κάτω ίνα της διατομής, όπου υπάρχει θλίψη, ενώ η τιμή του κυμαίνεται από 0 έως R_4-x , καταλαμβάνει με λίγα λόγια όλο το εύρος της θλιβόμενης περιοχής. Τέλος χρησιμοποιείται το σύμβολο c , που αφορά τη διαρροή του θλιβόμενου σκυροδέματος, έχει θετικό πρόσημο και έχει τη δυνατότητα να λάβει τιμές από 0 έως R_4-x . Τα εύρη τιμών των εν λόγω μεταβλητών έχουν επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να καλύπτουν όλες τις περιπτώσεις φορτίσεων, όπως φαίνεται από τις ακόλουθες Σχέσεις (3-27) έως (3-74).

Τομέας 1a

$b=0$

$$A_{11} = \int_{R_3-x}^{R_4-x} f_{sy} \frac{y}{R_4+x-a} \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy \quad (3-27)$$

$0 < b < R_4 - R_3$

$$A_{21} = \int_{R_4-x-b}^{R_4-x} f_{sy} \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy \quad (3-28)$$

$$A_{22} = \int_{R_3-x}^{R_4-x-b} f_{sy} \frac{y}{R_4-x-b} \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy \quad (3-29)$$

$R_4 - R_3 < b$

$$A_{31} = \int_{R_3-x}^{R_4-x} f_{sy} \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy \quad (3-30)$$

Τομέας 1b

$0 < b < R_4 - R_3$

$$B_{11} = \int_0^{R_3-x} f_{sy} \frac{y}{R_4-x-b} [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-31)$$

$R_4 - R_3 < b < R_4 - x$

$$B_{21} = \int_{R_4-x-b}^{R_3-x} f_{sy} [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-32)$$

$$B_{22} = \int_0^{R_4-x-b} f_{sy} \frac{y}{R_4-x-b} [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-33)$$

$b = R_4 - x$

$$B_{31} = \int_0^{R_3-x} f_{sy} [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-34)$$

Τομέας 2a

$$0 < c < R_4 - R_3$$

$$C_{11} = \int_{R_2-x}^{R_3-x} \sigma_c \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} dy \quad (3-35)$$

$$R_4 - R_3 < c < R_4 - R_2$$

$$C_{21} = \int_{R_4-x-c}^{R_3-x} f_{cy} \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} dy \quad (3-36)$$

$$C_{22} = \int_{R_2-x}^{R_4-x-c} \sigma_c \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} dy \quad (3-37)$$

$$R_4 - R_2 < c$$

$$C_{31} = \int_{R_2-x}^{R_3-x} f_{cy} \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} dy \quad (3-38)$$

Τομέας 2b

$$c < R_4 - R_2$$

$$D_{11} \int_0^{R_2-x} \sigma_c [\sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-39)$$

$$R_4 - R_2 < c < R_4 - x$$

$$D_{21} = \int_{R_4-x-c}^{R_2-x} f_{cy} [\sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-40)$$

$$D_{22} = \int_0^{R_4-x-c} \sigma_c [\sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-41)$$

$$c = R_4 - x$$

$$D_{31} = \int_0^{R_2-x} f_{cy} [\sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-42)$$

Όπου

$$\sigma_c = f_{sy} \frac{y}{R_4 + x - a} \frac{E_c}{E_s} \quad (3-43)$$

Τομέας 3a

$$b < R_4 - R_2$$

$$F_{11} = \int_{R_1-x}^{R_2-x} f_{sy} \frac{y}{R_4 - x - b} \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy \quad (3-44)$$

$$R_4 - R_2 < b < R_4 - R_1$$

$$F_{21} = \int_{R_4 - x - b}^{R_2 - x} f_{sy} \sqrt{R_2^2 - (x + y)^2} dy \sqrt{2} \quad (3-45)$$

$$F_{22} = \int_{R_1 - x}^{R_4 - x - b} f_{sy} \frac{y}{R_4 - x - b} \sqrt{R_2^2 - (x + y)^2} dy \quad (3-46)$$

$$R_4 - R_1 < b$$

$$F_{31} = \int_{R_1 - x}^{R_2 - x} f_{sy} \sqrt{R_2^2 - (x + y)^2} dy \quad (3-47)$$

Τομέας 3b

$$b < R_4 - R_1$$

$$H_{11} = \int_0^{R_1 - x} f_{sy} \frac{y}{R_4 - x - b} [\sqrt{R_2^2 - (x + y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x + y)^2}] dy \quad (3-48)$$

$$R_4 - R_1 < b < R_4 - x$$

$$H_{21} = \int_{R_4 - x - b}^{R_1 - x} f_{sy} [\sqrt{R_2^2 - (x + y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x + y)^2}] dy \quad (3-49)$$

$$H_{22} = \int_0^{R_4 - x - b} f_{sy} \frac{y}{R_4 - x - b} [\sqrt{R_2^2 - (x + y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x + y)^2}] dy \quad (3-50)$$

$$b = R_4 - x$$

$$H_{31} = \int_0^{R_1 - x} f_{sy} [\sqrt{R_2^2 - (x + y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x + y)^2}] dy \quad (3-51)$$

Τομέας 4a

$$J_{11} = \int_0^{-x} f_{sy} \frac{y}{R_4 + x - a} [\sqrt{R_4^2 - (x + y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x + y)^2}] dy \quad (3-52)$$

$$a < R_4$$

$$R_4 < a < R_4 + x$$

$$J_{21} = \int_{-(R_4 + x - a)}^{-x} f_{sy} [\sqrt{R_4^2 - (x + y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x + y)^2}] dy \quad (3-53)$$

$$J_{22} = \int_0^{-(R_4 + x - a)} f_{sy} \frac{y}{R_4 + x - a} [\sqrt{R_4^2 - (x + y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x + y)^2}] dy \quad (3-54)$$

$$a=R_4-x$$

$$J_{31} = \int_0^{-x} f_{sy} [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-55)$$

Τομέας 4b

$$0 < a < R_4 - R_3$$

$$K_{11} = \int_{-x}^{-(R_3+x)} f_{sy} \frac{y}{R_4 + x - a} [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-56)$$

$$R_4 - R_3 < a < R_4$$

$$K_{21} = \int_{-(R_4+x-a)}^{-(R_3+x)} f_{sy} [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-57)$$

$$K_{22} = \int_{-x}^{-(R_4+x-a)} f_{sy} \frac{y}{R_4 + x - a} [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-58)$$

$$R_4 < a$$

$$K_{31} = \int_{-x}^{-(R_3+x)} f_{sy} [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-59)$$

Τομέας 4c

$$0 < a < R_4 - R_3$$

$$L_{11} = \int_{-(R_4+x-a)}^{-(R_4+x)} f_{sy} \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy \quad (3-60)$$

$$L_{12} = \int_{-(R_3+x)}^{-(R_4+x-a)} f_{sy} \frac{y}{R_4 + x - a} \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy \quad (3-61)$$

$$R_4 - R_3 < a$$

$$L_{21} = \int_{-(R_3+x)}^{-(R_4+x)} f_{sy} \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy \quad (3-62)$$

Τομέας 5a

$$a < R_4$$

$$M_{11} = \int_0^{-x} f_{sy} \frac{y}{R_4 + x - a} [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-63)$$

$$R_4 < a < R_4 + x$$

$$M_{21} = \int_{-(R_4+x-a)}^{-x} f_{sy} [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-64)$$

$$M_{22} = \int_0^{-(R_4+x-a)} f_{sy} \frac{y}{R_4+x-a} [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-65)$$

$$a=R_4+x$$

$$M_{31} = \int_0^{-x} f_{sy} [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-66)$$

Τομέας 5b

$$a < R_4 - R_1$$

$$N_{11} = \int_{-x}^{-(R_1+x)} f_{sy} \frac{y}{R_4+x-a} [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-67)$$

$$R_4 - R_1 < a < R_4$$

$$N_{21} = \int_{-(R_4+x-a)}^{-(R_1+x)} f_{sy} [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-68)$$

$$N_{22} = \int_{-x}^{-(R_4+x-a)} f_{sy} \frac{y}{R_4+x-a} [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-69)$$

$$R_4 < a$$

$$N_{31} = \int_{-x}^{-(R_1+x)} f_{sy} [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy \quad (3-70)$$

Τομέας 5c

$$a < R_4 - R_2$$

$$P_{11} = \int_{-(R_1+x)}^{-(R_2+x)} f_{sy} \frac{y}{R_4+x-a} \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy \quad (3-71)$$

$$R_4 - R_2 < a < R_4 - R_1$$

$$P_{21} = \int_{-(R_4+x-a)}^{-(R_2+x)} f_{sy} \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy \quad (3-72)$$

$$P_{22} = \int_{-(R_1+x)}^{-(R_4+x-a)} f_{sy} \frac{y}{R_4+x-a} \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy \quad (3-73)$$

$$R_4 - R_1 < a$$

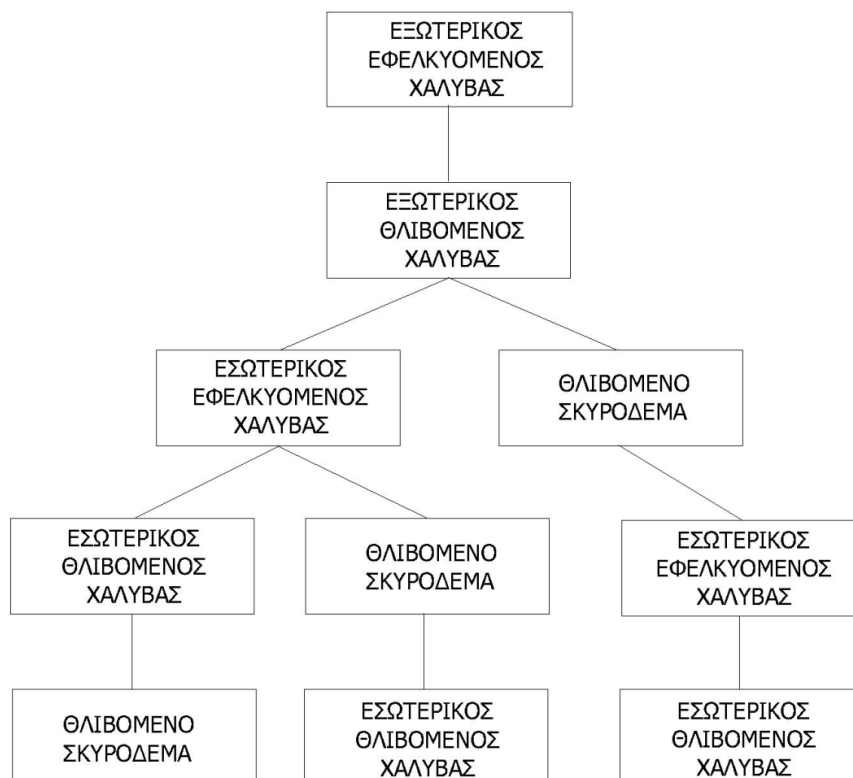
$$P_{31} = \int_{-(R_1+x)}^{-(R_2+x)} f_{sy} \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy \quad (3-74)$$

Οι εξισώσεις που προηγήθηκαν συνδυάζονται κάθε φορά με κατάλληλο τρόπο ανάλογα με τη στάθμη της διαρροής στη διατομή. Όπως είναι φυσικό, η φύση της διατομής οδηγεί σε πολλούς πιθανούς συνδυασμούς παραμορφώσεων και τάσεων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι κάθε στάθμη της

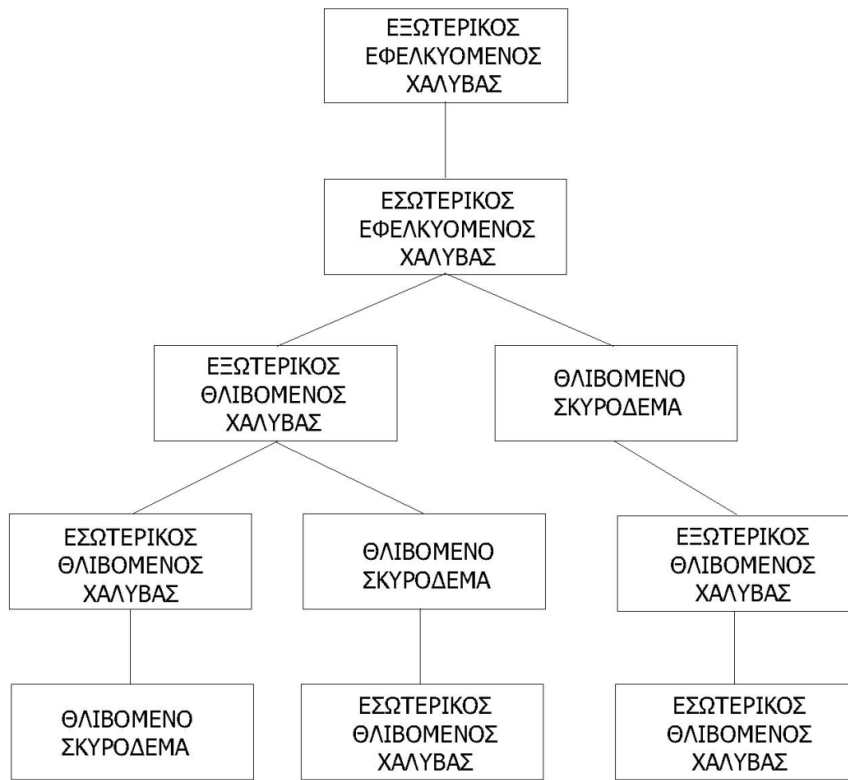
διατομής sandwich είναι δυνατό να αποτελείται, από ένα υλικό, αν για παράδειγμα η εξετασθείσα διατομή περιλαμβάνει μόνο τον τομέα 4c, ή ακόμη από δύο υλικά, αν η διατομή περιλαμβάνει τους τομείς 1a και 2b, που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και τα οποία αναπτύσσουν τάσεις ανάλογα με το στάδιο της φόρτισης στην οποία υπόκειται η διατομή. Πιο αναλυτικά καθώς η διατομή έχει χωριστεί ήδη σε τομείς στα πλαίσια της ελαστικής ανάλυσης, υπάρχουν τα τμήματα από τα οποία, ανάλογα με τη φόρτιση, προκύπτουν οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις. Η διαρροή ξεκινάει είτε από τον ακραίο εφελκόμενο χάλυβα είτε από την ακραία ίνα του θλιβόμενου σκυροδέματος.

3.3.2.1 Η διαρροή ξεκινά από τον εφελκόμενο χάλυβα - Εύρεση ουδέτερου άξονα και ροπής

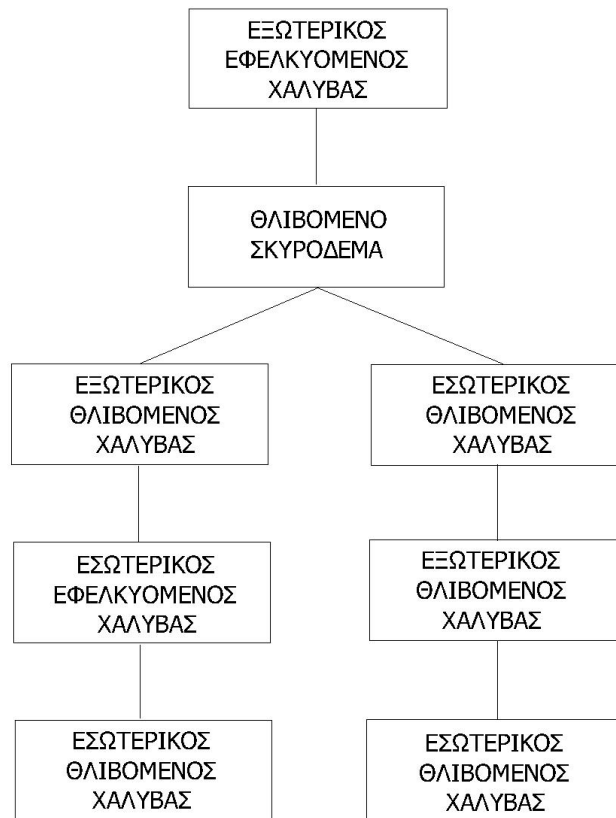
Στην περίπτωση αυτή ο εφελκόμενος χάλυβας μεταπίπτει πρώτος στην πλαστική περιοχή και η διαρροή ακολουθεί και στα υπόλοιπα μέρη με τρόπο τέτοιο όπως παρουσιάζεται παρακάτω στο Σχήμα 3-4. Όπως είναι φυσικό η φύση της διατομής οδηγεί σε μια σειρά από πιθανές περιπτώσεις οι οποίες, χάρη σε διάφορους γεωμετρικούς κανόνες είναι δυνατό να περιοριστούν. Με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής, εύκολα συμπεραίνεται πως η διαρροή του εσωτερικού εφελκόμενου χάλυβα θα προηγηθεί της διαρροής του εσωτερικού θλιβόμενου. Αυτό καθώς, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3-2, η θέση του ουδέτερου άξονα που βρίσκεται στο κάτω μισό της διατομής και χωρίζει τα διαγράμματα τάσεων σε όμοια τρίγωνα, δημιουργεί αναλογικά μεγαλύτερη παραμόρφωση στη στάθμη του εσωτερικού θλιβόμενου χάλυβα από ό,τι στην αντίστοιχη στάθμη του εφελκόμενου. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την παραδοχή πως το υλικό του εξωτερικού και του εσωτερικού χάλυβα είναι το ίδιο, έχουν επομένως το ίδιο μέτρο ελαστικότητας, οδηγεί στο συμπέρασμα πως στην ελαστική περιοχή η τάση της ακραίας εσωτερικής θλιβόμενης ίνας είναι μικρότερη από την τάση της εσωτερικής ακραίας εφελκόμενης ίνας. Ως εκ τούτου, η διαρροή θα προηγηθεί στη δεύτερη στάθμη σε σχέση με την πρώτη, με τη σειρά που αναφέρθηκαν. Όσο αυξάνεται η παραμόρφωση της διαρροής τόσο αυξάνονται οι τάσεις που αναπτύσσονται σε αυτήν και κατ' επέκταση και η διαρροή των υλικών που την αποτελούν.



(a)



(β)



(γ)

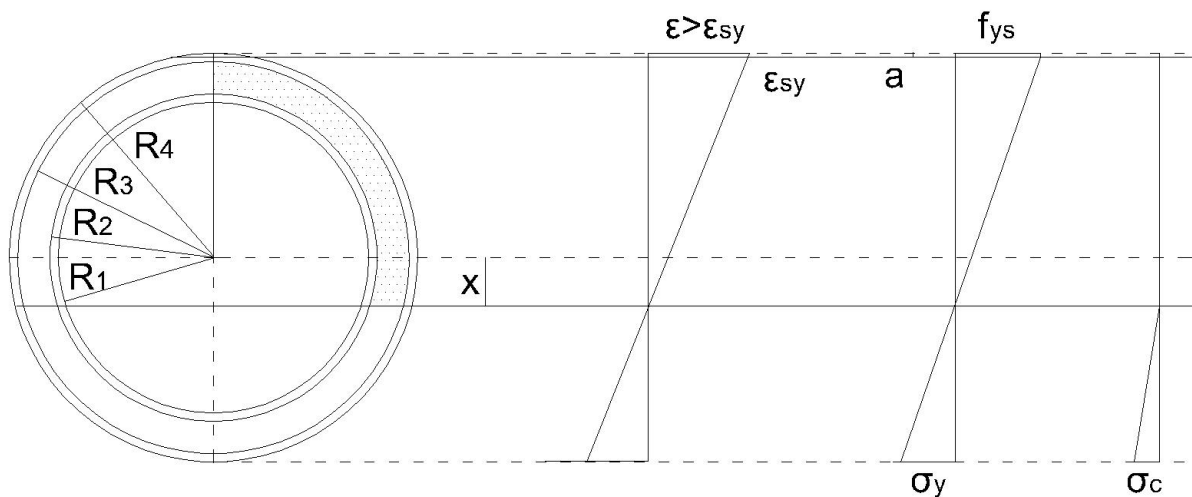
Σχήμα 3-4: Διαγράμματα ροής διαρροής.

Για κάθε μια από τις ενδιάμεσες παραμορφωσιακές καταστάσεις όπου η διαρροή αφορά διαφορετική στάθμη τις διατομής προκύπτει νέος συνδυασμός εξισώσεων που τις περιγράφουν. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που η διαρροή έχει επεκταθεί μόνο εντός του εφελκυόμενου εξωτερικού χάλυβα και πιο συγκεκριμένα όταν βρίσκεται μέσα στον τομέα 4c όπου $0 < a < R_4 - R_3$. Στην περίπτωση αυτή τα ολοκληρώματα που χρησιμοποιούνται για την εύρεση της τιμής της μεταβλητής x , της ροπής κάμψης και της καμπυλότητας της διατομής, διαφοροποιούνται όπως αυτό γίνεται κατανοητό από τα παρακάτω.

Η θέση του ουδέτερου άξονα x προκύπτει από την επίλυση της εξίσωσης (3-75) με τη βοήθεια του προγράμματος Mathematica [3-1]:

$$A_{11} + B_{11} + C_{11} + D_{11} + F_{11} + H_{11} = J_{11} + K_{11} + L_{11} + L_{12} + M_{11} + N_{11} + P_{11} \quad (3-75)$$

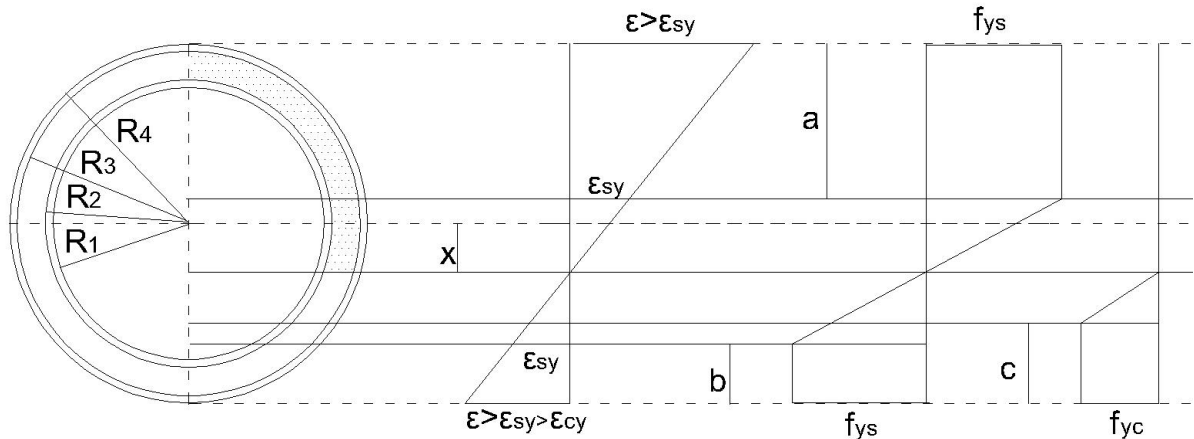
Η ροπή που αντιστοιχεί στην τιμή αυτή του ουδέτερου άξονα υπολογίζεται από τη Σχέση (3-76) ενώ στο Σχήμα 3-5 παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις και οι τάσεις που αναπτύσσονται στη διατομή.



Σχήμα 3-5: Διαρροή εφελκυόμενου χάλυβα - τμήμα 4c.

$$\begin{aligned}
M &= 2 \times \left[\int_{R_3-x}^{R_4-x} \frac{f_{sy} y^2}{R_4 + x - a} \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy + \right. \\
&\int_0^{R_3-x} \frac{f_{sy} y^2}{R_4 + x - a} [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy + \\
&\int_{R_2-x}^{R_3-x} \frac{f_{sy} y^2}{R_4 + x - a} \frac{E_c}{E_s} \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} dy + \\
&\int_0^{R_2-x} \frac{f_{sy} y^2}{R_4 + x - a} \frac{E_c}{E_s} [\sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2}] dy + \\
&\int_{R_1-x}^{R_2-x} \frac{f_{sy} y^2}{R_4 + x - a} \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy + \\
&\int_0^{R_1-x} \frac{f_{sy} y^2}{R_4 + x - a} \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2} dy \\
&\int_0^{-x} \frac{f_{sy} y^2}{R_4 + x - a} \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} dy + \\
&\int_{-x}^{-(R_3+x)} \frac{f_{sy} y^2}{R_4 + x - a} [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy + \\
&\int_{-(R_3+x)}^{-(R_4+x-a)} \frac{f_{sy} y^2}{R_4 + x - a} \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy + \int_{-(R_4+x-a)}^{-(R_4+x)} f_{sy} y \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy + \\
&\int_0^{-x} y f_{sy} [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy + \\
&\left. \int_{-x}^{-(R_1+x)} y f_{sy} [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy + \int_{-(R_1+x)}^{-(R_2+x)} y f_{sy} \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy \right] \quad (3-76)
\end{aligned}$$

Ακόμη, οι διαφοροποιήσεις στις διάφορες καταστάσεις παραμόρφωσης είναι δυνατόν να παρουσιαστούν, συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση, με μια νέα, όπου η διαρροή αφορά πλέον τμήμα του εφελκυσμένου χάλυβα, τμήμα του θλιβόμενου καθώς και μέρος του θλιβόμενου σκυροδέματος. Η περίπτωση αυτή περιγράφεται από το Σχήμα 3-6 όπου παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσεων και παραμορφώσεων της.



Σχήμα 3-6: Διαρροή τμήματος του εφελκόμενου χάλυβα, τμήματος του θλιβόμενου και τμήματος του σκυροδέματος - 1a, 1b, 2a, 2b, 3a, 3b, 4b, 4c, 5b και 5c.

Ο συνδυασμός των δυνάμεων που αναπτύσσονται στα εκάστοτε τμήματα οδηγεί στον προσδιορισμό της θέσης του ουδέτερου άξονα με τη βοήθεια της Σχέσης (3-77), που εκφράζει την ισορροπία των δυνάμεων και των Σχέσεων (3-78) και (3-79) που προκύπτουν από τη γεωμετρική σχέση των παραμορφώσεων σύμφωνα με τη μορφή της διατομής.

$$A_{31} + B_{21} + B_{22} + C_{31} + D_{21} + D_{22} + F_{31} + H_{21} + H_{22} = J_{11} + K_{21} + K_{22} + L_{21} + M_{11} + N_{21} + N_{22} + P_{31} \quad (3-77)$$

$$\frac{\epsilon_{sy}}{R_4 - x - b} = \frac{\epsilon_{cy}}{R_4 - x - c} \Rightarrow b = \frac{(\epsilon_{sy} - \epsilon_{cy})x - (\epsilon_{sy} - \epsilon_{cy})R_4 + \epsilon_{sy}c}{\epsilon_{cy}} \quad (3-78)$$

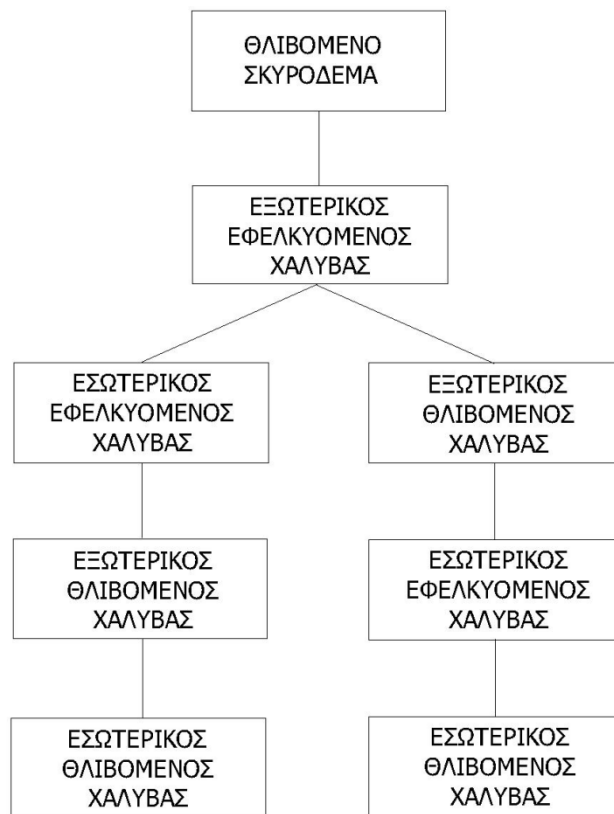
$$\frac{\epsilon_{sy}}{R_4 + x - a} = \frac{\epsilon_{cy}}{R_4 - x - c} \Rightarrow a = \frac{(\epsilon_{sy} + \epsilon_{cy})x - (\epsilon_{sy} - \epsilon_{cy})R_4 + \epsilon_{sy}c}{\epsilon_{cy}} \quad (3-79)$$

Για τον υπολογισμό της ροπής που αναπτύσσεται στη διατομή sandwich που εξετάζεται, χρησιμοποιείται η εξίσωση (3-80) που ακολουθεί, με τις παραδοχές ότι $(R_4 - R_1) < a < R_4$, $(R_4 - R_1) < b < (R_4 - x)$ και $(R_4 - R_2) < c < (R_4 - x)$. Με άλλα λόγια, έχει θεωρηθεί στην προκειμένη περίπτωση διαρροή στους τομείς 1a, 1b, 2a, 2b, 3a, 3b, 4b, 4c, 5b και 5c.

$$\begin{aligned}
M = & 2 \left[\int_{R_3-x}^{R_4-x} f_{sy} y \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy + \int_{R_4-x-b}^{R_3-x} f_{sy} y [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy + \right. \\
& \int_0^{R_4-x-b} f_{sy} \frac{y^2}{R_4-x-b} [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy + \\
& \int_{R_2-x}^{R_3-x} f_{cy} y \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} dy + \int_{R_4-x-c}^{R_2-x} f_{cy} y [\sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2}] dy + \\
& \int_0^{R_4-x-c} f_{cy} \frac{y^2}{R_4-x-c} [\sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2}] dy + \\
& \int_{R_1-x}^{R_2-x} f_{sy} y \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy + \int_{R_4-x-b}^{R_1-x} f_{sy} y [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy + \\
& \int_0^{R_4-x-b} f_{sy} \frac{y^2}{R_4-x-b} [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy + \\
& \int_0^{-x} f_{sy} \frac{y^2}{R_4+x-a} [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy + \\
& \int_{-(R_4+x-a)}^{-(R_3-x)} f_{sy} y [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy + \\
& \int_{-x}^{-(R_4+x-a)} f_{sy} \frac{y^2}{R_4+x-a} [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy + \\
& \int_{-(R_3+x)}^{-(R_4+x)} f_{sy} y \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy + \int_0^{-x} f_{sy} \frac{y^2}{R_4+x-a} [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy + \\
& \int_{-(R_4+x-a)}^{-(R_1+x)} f_{sy} y [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy + \\
& \int_{-x}^{-(R_4+x-a)} f_{sy} \frac{y^2}{R_4+x-a} [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy + \\
& \left. \int_{-(R_1+x)}^{-(R_2+x)} f_{sy} y \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy \right] \tag{3-80}
\end{aligned}$$

3.3.2.2 Η διαρροή ξεκινά από το θλιβόμενο σκυρόδεμα - Εύρεση ουδέτερου άξονα και ροπής

Καθώς η διαρροή του σκυροδέματος προηγείται της διαρροής του χάλυβα η πορεία της επέκτασής της παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα του Σχήματος [3-7](#).



Σχήμα 3-7: Διάγραμμα ροής διαρροής.

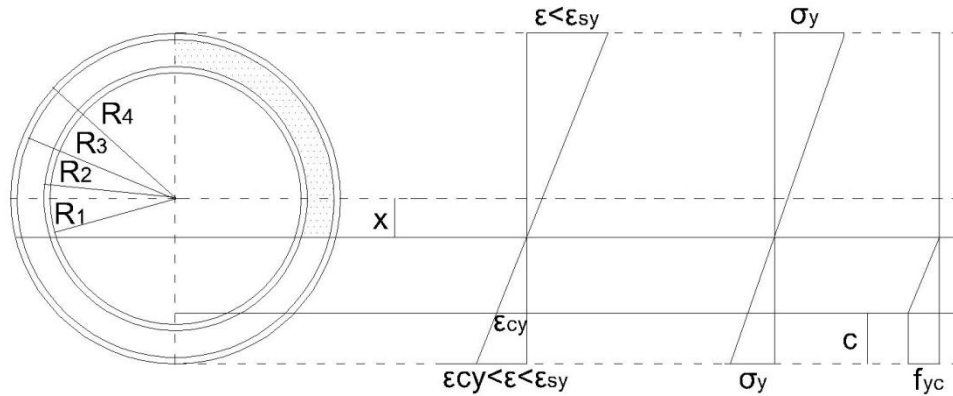
Καθίσταται δυνατή η παρατήρηση της συμπεριφοράς της διατομής για διάφορες στάθμες της διαρροής, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση του διαγράμματος του Σχήματος 3-8, όπου υπάρχει διαρροή μόνο στο θλιβόμενο σκυρόδεμα. Ακόμη, ομοίως με τις προηγούμενες περιπτώσεις, υπολογίζεται ο ουδέτερος άξονας από τη Σχέση (3-81) για στάθμες διαρροής $a=0$, $b=0$ και $(R_4 - R_2) < c < (R_4 - x)$.

$$A_{11} + B_{11} + C_{31} + D_{21} + D_{22} + F_{11} + H_{11} = J_{11} + K_{11} + L_{11} + M_{11} + N_{11} + P_{11} \quad (3-81)$$

Η εύρεση της ροπής πραγματοποιείται με την εξίσωση (3-82) που ακολουθεί. Καθώς η διαρροή επεκτείνεται πλησιάζει παράλληλα και η επέκταση των τάσεων διαρροής κάθε υλικού στο σύνολο της διατομής, οδηγώντας τελικά στην πλήρη διαρροή της.

$$\begin{aligned}
M &= 2 \left[\int_{R_3-x}^{R_4-x} f_{cy} \frac{E_s}{E_c} \frac{y^2}{R_4-x-c} \sqrt{R_4^2-(x+y)^2} dy + \right. \\
&\int_0^{R_3-x} f_{cy} \frac{E_s}{E_c} \frac{y^2}{R_4-x-c} [\sqrt{R_4^2-(x+y)^2} - \sqrt{R_3^2-(x+y)^2}] dy + \\
&\int_{R_2-x}^{R_3-x} f_{cy} y \sqrt{R_3^2-(x+y)^2} dy + \int_{R_4-x-c}^{R_2-x} f_{cy} y [\sqrt{R_3^2-(x+y)^2} - \sqrt{R_2^2-(x+y)^2}] dy + \\
&\int_0^{R_4-x-c} f_{cy} \frac{y^2}{R_4-x-c} [\sqrt{R_3^2-(x+y)^2} - \sqrt{R_2^2-(x+y)^2}] dy + \\
&\int_{R_1-x}^{R_2-x} f_{cy} \frac{E_s}{E_c} \frac{y^2}{R_4-x-c} \sqrt{R_2^2-(x+y)^2} dy + \\
&\int_0^{R_1-x} f_{cy} \frac{E_s}{E_c} \frac{y^2}{R_4-x-c} [\sqrt{R_2^2-(x+y)^2} - \sqrt{R_1^2-(x+y)^2}] dy + \\
&\int_0^{-x} f_{cy} \frac{E_s}{E_c} \frac{y^2}{R_4-x-c} [\sqrt{R_4^2-(x+y)^2} - \sqrt{R_3^2-(x+y)^2}] dy + \\
&\int_{-x}^{-(R_3-x)} f_{cy} \frac{E_s}{E_c} \frac{y^2}{R_4-x-c} [\sqrt{R_4^2-(x+y)^2} - \sqrt{R_3^2-(x+y)^2}] dy + \\
&\int_{-(R_3+x)}^{-(R_4+x)} f_{cy} \frac{E_s}{E_c} \frac{y^2}{R_4-x-c} \sqrt{R_4^2-(x+y)^2} dy + \\
&\int_0^{-x} f_{cy} \frac{E_s}{E_c} \frac{y^2}{R_4-x-c} [\sqrt{R_2^2-(x+y)^2} - \sqrt{R_1^2-(x+y)^2}] dy + \\
&\int_{-x}^{-(R_1+x)} f_{cy} \frac{E_s}{E_c} \frac{y^2}{R_4-x-c} [\sqrt{R_2^2-(x+y)^2} - \sqrt{R_1^2-(x+y)^2}] dy + \\
&\left. \int_{-(R_1+x)}^{-(R_2+x)} f_{cy} \frac{E_s}{E_c} \frac{y^2}{R_4-x-c} \sqrt{R_2^2-(x+y)^2} dy \right] \tag{3-82}
\end{aligned}$$

Στο Σχήμα 3-8 εμφανίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στη διατομή για το σημείο της εξέλιξης της διαρροής που έχει υποθεθεί.



Σχήμα 3-8: Διαρροή τμήματος σκυροδέματος 2b.

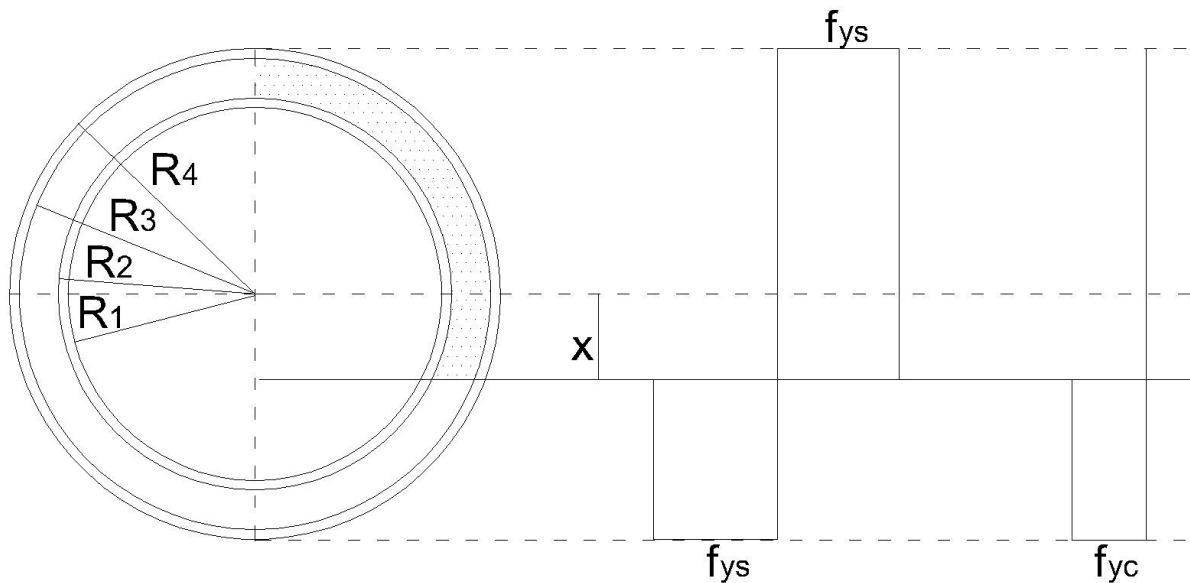
3.3.3 Πλήρης πλαστικοποίηση

Κατά την επέκταση της διαρροής στο σύνολο της διατομής πραγματοποιείται η πλήρης πλαστικοποίησή της. Στην περίπτωση αυτή όλες οι ίνες του χάλυβα έχουν παραμόρφωση μεγαλύτερη ή ίση της παραμόρφωσης διαρροής ϵ_{sy} και όλες οι ίνες του σκυροδέματος έχουν παραμόρφωση μεγαλύτερη ή ίση της παραμόρφωσης διαρροής ϵ_{cy} . Η παραμορφωσιακή κατάσταση της πλήρους πλαστικοποίησης και τα διαγράμματα τάσεων που αναπτύσσονται παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-9.

Η εύρεση του ουδέτερου άξονα στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται με την εξίσωση των δυνάμεων όπως αυτή παρουσιάζεται στην εξίσωση (3-83)

$$A_{31} + B_{31} + C_{31} + D_{31} + F_{31} + H_{31} = J_{31} + K_{31} + L_{31} + M_{31} + N_{31} + P_{31} \tag{3-83}$$

Αφού η θέση του ουδέτερου άξονα έχει ήδη προσδιορισθεί, είναι πλέον εύκολος ο υπολογισμός της ροπής πλήρους πλαστικοποίησης της διατομής sandwich που εξετάζεται, με τη βοήθεια της εξίσωσης (3-84) και για δεδομένες πλέον τις ακριβείς στάθμες διαρροής, δηλαδή $a=R_4+x$, $b=R_4-x$ και $c=R_4-x$.



Σχήμα 3-9: Πλήρης διαρροή διατομής.

$$\begin{aligned}
M &= 2 \left[\int_{R_3-x}^{R_4-x} f_{sy} y \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy + \right. \\
&\int_0^{R_3-x} f_{sy} y [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy + \\
&\int_{R_2-x}^{R_3-x} f_{cy} y \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} dy + \int_0^{R_2-x} f_{cy} y [\sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2}] dy + \\
&\int_{R_1-x}^{R_2-x} f_{sy} y \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy + \\
&\int_0^{R_1-x} f_{sy} y [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy + \\
&\int_0^{-x} f_{sy} y [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy + \\
&\int_{-x}^{-(R_3-x)} f_{sy} y [\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2}] dy + \\
&\int_{-(R_3+x)}^{-(R_4+x)} f_{sy} y \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy + \int_0^{-x} f_{sy} y [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy + \\
&\int_{-x}^{-(R_1+x)} f_{sy} y [\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2}] dy + \\
&\left. \int_{-(R_1+x)}^{-(R_2+x)} f_{sy} y \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy \right]
\end{aligned} \tag{3-84}$$

3.3.3.1 Εύρεση καμπυλότητας

Για όλες τις περιπτώσεις που προηγήθηκαν, αφού έχουν βρεθεί για κάθε σημείο οι ροπές που αναπτύσσονται και η θέση του ουδέτερου άξονα, που όπως είναι φυσικό αλλάζει για κάθε φόρτιση, είναι δυνατός πλέον ο υπολογισμός της καμπυλότητας της διατομής. Οι ροπές έχουν υπολογιστεί εκφράζοντας τις τάσεις σε κάθε σημείο με βάση τη γεωμετρική τους εξάρτηση από τα σημεία που έχουν διαρρέυσει εκείνη τη στιγμή. Είναι δυνατόν όμως η ροπή να γραφεί ως συνάρτηση της καμπυλότητας με τον τρόπο που περιγράφεται από τη Σχέση (3-85) που ακολουθεί.

$$M = \sum \int y \sigma A = \sum \int y \varepsilon EA = \sum \int y (ky) EA \tag{3-85}$$

Έτσι, έχοντας ήδη υπολογίσει τη ροπή με τη βοήθεια του προγράμματος Mathematica [3-1], υπολογίζεται ο μόνος άγνωστος, δηλαδή η καμπυλότητα k .

3.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

3.4.1 Αναλυτική λύση

3.4.1.1 Προσδιορισμός ελαστικής ροπής

Προς την επαλήθευση των αναλυτικών αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα είναι δυνατόν να συμβάλει ένα αριθμητικό παράδειγμα με δεδομένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και υλικά, που επιλύεται με τη βοήθεια του προγράμματος Mathematica [3-1]. Για παράδειγμα, ας υποθεθεί μια διατομή τύπου sandwich εξωτερικής ακτίνας $R_4=2\text{m}$, πάχους χάλυβα $t_f=10\text{mm}$, πάχους σκυροδέματος $t_c=100\text{mm}$, ποιότητας χάλυβα S355 με όριο διαρροής $f_{sy}=355\text{MPa}$ και μέτρο ελαστικότητας $E_s=210\text{GPa}$, ποιότητας σκυροδέματος C30/37 με όριο διαρροής $f_{cy}=30\text{MPa}$ και μέτρο ελαστικότητας $E_c=32\text{GPa}$. Για τη συγκεκριμένη διατομή που επιλέχθηκε υπολογίζονται αρχικά τα χαρακτηριστικά της πρώτης διαρροής, που στην περίπτωση αυτή λαμβάνει χώρα στην ακραία ίνα του θλιβόμενου σκυροδέματος. Προσδιορίζεται η θέση του ουδέτερου άξονα από τη Σχέση (3-18), ο οποίος βρίσκεται $x=0.346\text{m}$ κάτω από το κέντρο βάρους της διατομής και στη συνέχεια υπολογίζεται η ελαστική ροπή από τη Σχέση (3-20), η οποία παίρνει τιμή $M_{el}=71291.83\text{kNm}$.

3.4.1.2 Προσδιορισμός ροπής πλήρους πλαστικοποίησης

Στην πλήρη πλαστικοποίηση, που περιγράφηκε στην Ενότητα 3-3-3, υπολογίζεται η τιμή της θέσης του ουδέτερου άξονα από τη Σχέση (3-83). Η απόσταση του ουδέτερου άξονα από το κέντρο βάρους της διατομής είναι $x=0.525\text{m}$, ενώ η τιμή της ροπής πλήρους πλαστικοποίησης υπολογίζεται από τη Σχέση (3-84) και είναι ίση με $M_{pl}=124730\text{kNm}$.

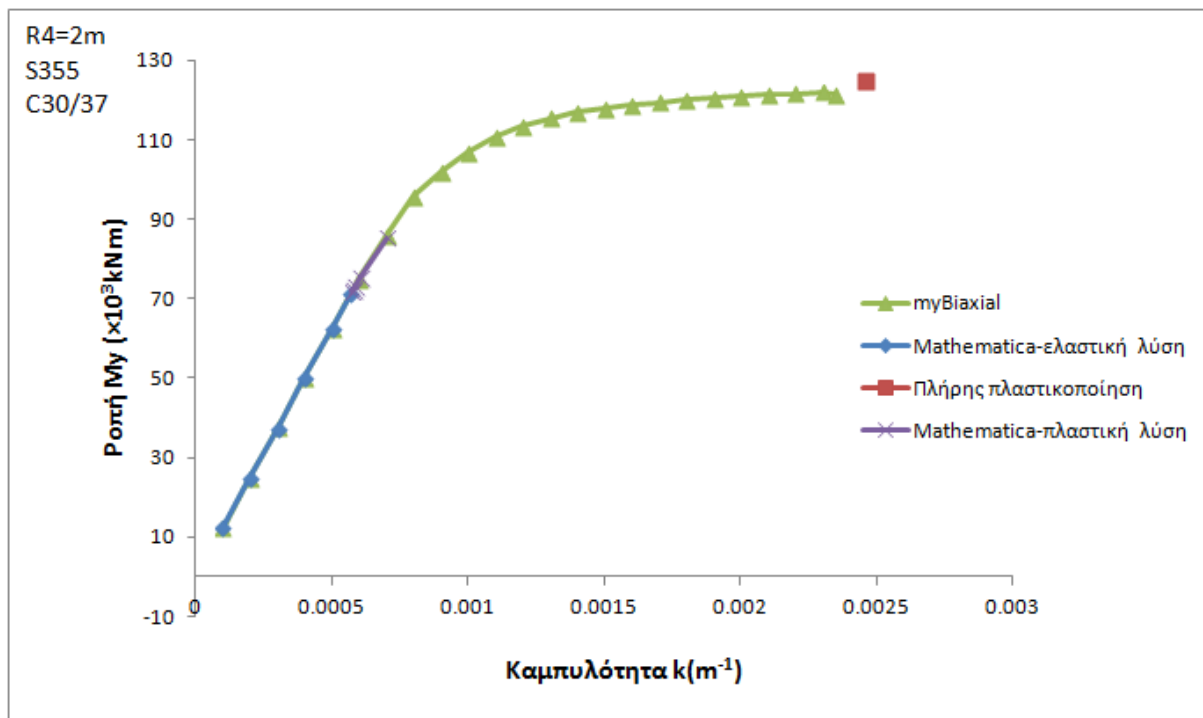
3.4.1.3 Προσδιορισμός ροπής ενδιάμεσων σημείων

Για όλα τα ενδιάμεσα σημεία ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε στην Παράγραφο 3-3-2. Για κάθε ένα από αυτά υπολογίζεται η θέση του ουδέτερου άξονα και τη ροπή που αναπτύσσεται, ανάλογα με τους τομείς της διατομής που έχουν διαρρεύσει κάθε φορά. Ενδεικτικά για την περίπτωση όπου η διαρροή έχει επεκταθεί στο σκυρόδεμα σε απόσταση $c=0.20\text{m}$ από την ακραία ίνα της διατομής, ενώ την ίδια στιγμή κανένα σημείο του χάλυβα δεν έχει διαρρεύσει, ο ουδέτερος άξονας βρίσκεται με τη βοήθεια της Σχέσης (3-81) σε απόσταση $x=0.340\text{m}$ από το κέντρο της διατομής και η διατομή αναπτύσει ροπή ίση με $M=85306.40\text{kNm}$ από τη Σχέση (3-82).

3.4.2 Σύγκριση αναλυτικής λύσης με το myBiaxial

Στα πλαίσια της επαλήθευσης της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσέγγισης της συμπεριφοράς μιας καμπτόμενης διατομής τύπου sandwich, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων το λογισμικό myBiaxial [3-2]. Μια διατομή τύπου sandwich με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν προηγουμένως στο αριθμητικό παράδειγμα της Ενότητας 2-4-1, αφού σχεδιάστηκε στο λογισμικό AutoCad [3-3], εισήχθη στην συνέχεια στο πρόγραμμα myBiaxial [3-2]. Ακολούθως, το πρόγραμμα αυτό υπολόγισε για μονοαξονική κάμψη το διάγραμμα ροπών-καμπυλοτήτων που χαρακτηρίζει τη διατομή.

Το διάγραμμα αυτό βρίσκεται σε απόλυτη ταύτιση με τον ελαστικό κλάδο της καμπύλης που προέκυψε από την επίλυση της αναλυτικής λύσης για κάμψη της διατομής, μέσω του προγράμματος Mathematica, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-10. Το τμήμα που αντιστοιχεί σε επέκταση της πλαστικοποίησης και επιλύθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος Mathematica [3-1] ταυτίζεται και αυτό με τις ροπές και τις καμπυλότητες που προέκυψαν από την επίλυση του myBiaxial [3-2], όπως γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 3-10. Τέλος, η ροπή πλήρους πλαστικοποίησης παρουσιάζει ικανοποιητική σύγκλιση και με τους δύο τρόπους υπολογισμού της, με τη ροπή πλήρους πλαστικοποίησης με βάση το πρόγραμμα myBiaxial [3-2] να έχει τιμή $M_{pl}=121561\text{kNm}$ και καμπυλότητα διατομής $k=0.00235\text{m}^{-1}$, ενώ τα μεγέθη αυτά από το Mathematica [3-1] λαμβάνουν τιμές $M_{pl}=12473\text{kNm}$ και $k=0.00246\text{m}^{-1}$, αντίστοιχα.



Σχήμα 3-10: Σύγκριση διαγραμμάτων ροπών-καμπυλότητων των λογισμικών myBiaxial, Mathematica.

3.5 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [3-1] Wolfram research Inc. "Mathematica, Version 9.0", 2012.
- [3-2] Charalampakis, A.E., Koumoussis, V.K., "Ultimate strength analysis of composite sections under biaxial bending and axial load", Advances in Engineering Software, Vol. 39, 2008, pp. 923-936.
- [3-2] AutoCad software, 2012.

4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διερεύνηση της συμπεριφοράς μιας σύνθετης διατομής, όπως της διατομής τύπου sandwich, προϋποθέτει πρωτίστως την κατανόηση και την ενδεδειγμένη μελέτη των παραγόντων και των στοιχείων που την επηρεάζουν. Ως εκ τούτου, τα γεωμετρικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά μιας τέτοιας διατομής αποτελούν το γνώμονα με βάση τον οποίο πρόκειται να εξεταστεί η μεταβολή στη συμπεριφορά της διατομής sandwich. Η ελαστική ροπή αντοχής της διατομής, δηλαδή η ροπή κατά την πρώτη διαρροή οποιουδήποτε σημείου της, η δυσκαμψία της διατομής, καθώς επίσης και η ροπή πλήρους πλαστικοποίησης αποτελούν μεγέθη που χρήζουν εκτεταμένης παραμετρικής ανάλυσης, αφού πρόκειται για κρίσιμους παράγοντες που επηρεάζουν τη διατομή. Στα πλαίσια της παραμετρικής ανάλυσης, παρατίθενται στοιχεία ερευνητών με σκοπό το βέλτιστο σχεδιασμό, ενώ τέλος παρουσιάζεται η προσπάθεια προσομοίωσης μιας διατομής sandwich με πεπερασμένα στοιχεία.

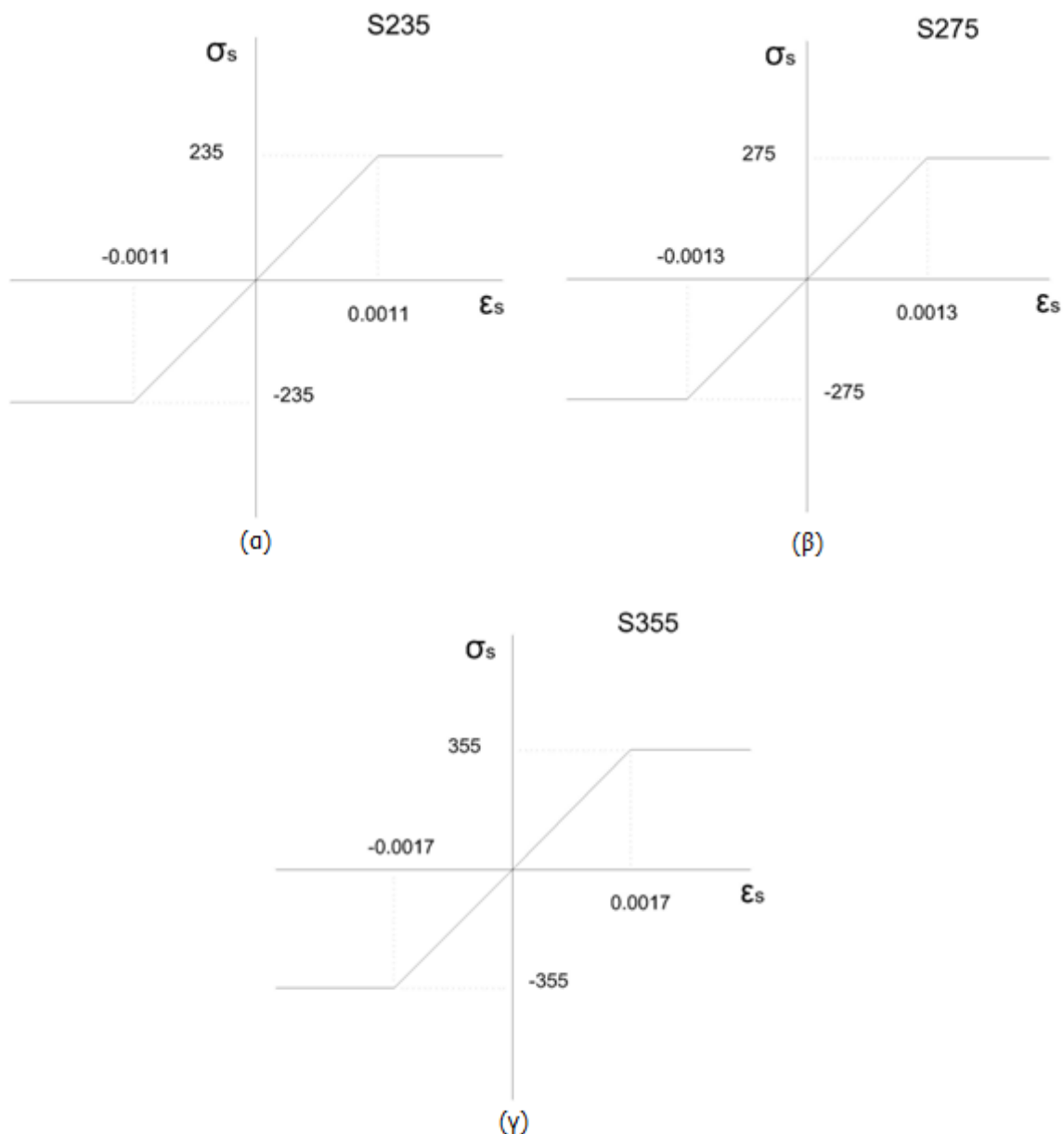
4.2 ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗ

Η εύρεση της ροπής διαρροής μιας κυλινδρικής διατομής τύπου sandwich που υπόκειται σε καθαρή κάμψη, όπως φάνηκε και από τα προηγούμενα κεφάλαια, περιλαμβάνει μια περίπλοκη διαδικασία και μια πληθώρα διαφορετικών παραγόντων που είναι δυνατό να επηρεάσουν την τιμή της. Έτσι, μπορεί να ειπωθεί ότι η ελαστική ροπή αντοχής μιας διατομής ανεμογεννήτριας τύπου sandwich εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες: (i) τις ακτίνες των κύκλων που συνθέτουν τη διατομή (ii) τα πάχη και (iii) τις ποιότητες των εκάστοτε υλικών που αποτελούν τη διατομή. Γνωρίζοντας επομένως τους παράγοντες αυτούς που καθορίζουν το μέγεθος της ροπής, που η διατομή είναι σε θέση να αναλάβει προτού κάποιο από τα μέλη της διαρρεύσει, υπάρχει η δυνατότητα διερεύνησης του τρόπου που κάθε ένα από τα παραπάνω μεγέθη επηρεάζει τη συμπεριφορά της διατομής.

4.2.1 Ελαστική ροπή - ποιότητα χάλυβα

Καθώς η εξεταζόμενη διατομή αποτελείται από χαλύβδινα μέλη, οι διάφορες ποιότητες αυτού του υλικού είναι εμφανές πως επηρεάζουν τη συμπεριφορά της διατομής που έχει επιλεγεί. Παρακάτω θα εξεταστεί με ποιόν τρόπο γίνεται κάτι τέτοιο και σε τι βαθμό. Η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο ο χάλυβας επηρεάζει μια διατομή sandwich γίνεται εν προκειμένω με την επιλογή και χρήση χαλύβδινων ελασμάτων που αποτελούνται από τρεις διαφορετικούς σε ποιότητα χάλυβες. Πιο συγκεκριμένα, οι χάλυβες που εξετάστηκαν ήταν οι S355, S275 και S235, με τάσεις διαρροής $f_{sy}=355\text{MPa}$, $f_{sy}=275\text{MPa}$

και $f_{sy}=235\text{MPa}$, αντίστοιχα. Οι χάλυβες αυτοί θεωρείται ότι δεν έχουν κρατυνόμενο κλάδο, όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σχήμα 4-1.

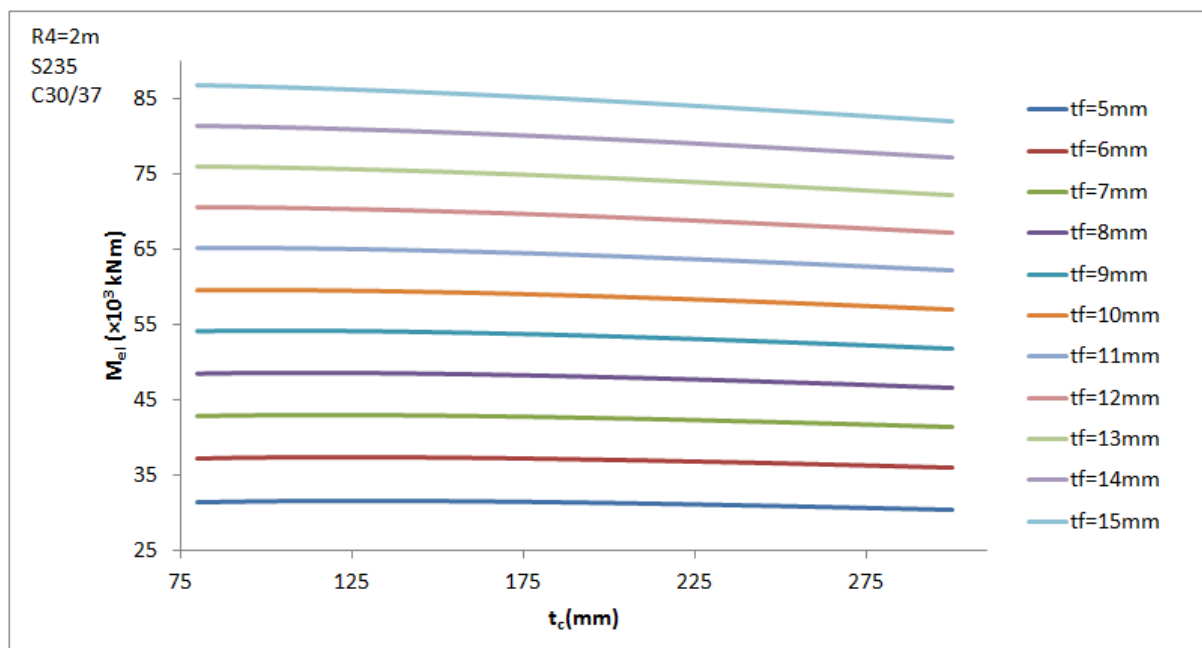


Σχήμα 4-1: Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων για: (α) χάλυβα S235, (β) χάλυβα S275 και (γ) χάλυβα S355.

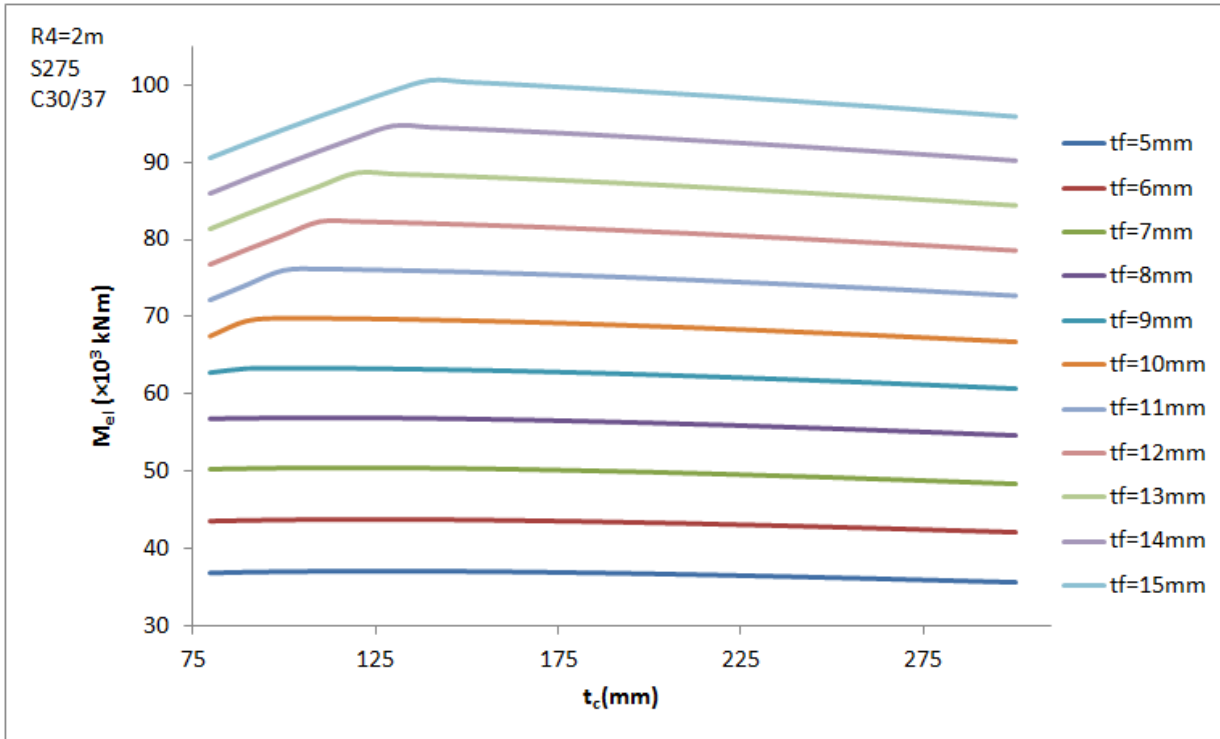
Η παραμετρική ανάλυση στη συγκεκριμένη περίπτωση περιλαμβάνει την επίλυση των αναλυτικών εξισώσεων που περιγράφουν τη συμπεριφορά της διατομής στην ελαστική περιοχή, κάθε φορά με διαφορετικά χαρακτηριστικά χάλυβα. Για κάθε μια από τις περιπτώσεις θεωρήθηκε διατομή σταθερής εξωτερικής ακτίνας ίσης με $R_4=4\text{m}$, ποιότητας σκυροδέματος C30/37, ενώ μεταβλήθηκαν τα μεγέθη του πάχους των μεταλλικών ελασμάτων t_f και του πάχους του σκυροδέματος t_c . Έτσι, στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται η μεταβολή της τιμής της ελαστικής ροπής αντοχής μιας διατομής sandwich με τις παραπάνω μεταβλητές, ενώ επιλέχθηκαν πάχη σκυροδέματος με εύρος τιμών από 80mm έως 300mm. Τα χάλυβδινα ελάσματα θεωρήθηκε πως μπορούν να λάβουν τιμές μεταξύ 5 και 15mm. Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν με γνώμονα τη φύση της διατομής.

Στο Σχήμα 4-2, όπου έχει χρησιμοποιηθεί χάλυβας S235, παρατηρείται μια συνεχής μείωση της ελαστικής ροπής καθώς το πάχος του σκυροδέματος αυξάνεται. Από την άλλη μεριά, στα Σχήματα 4-3

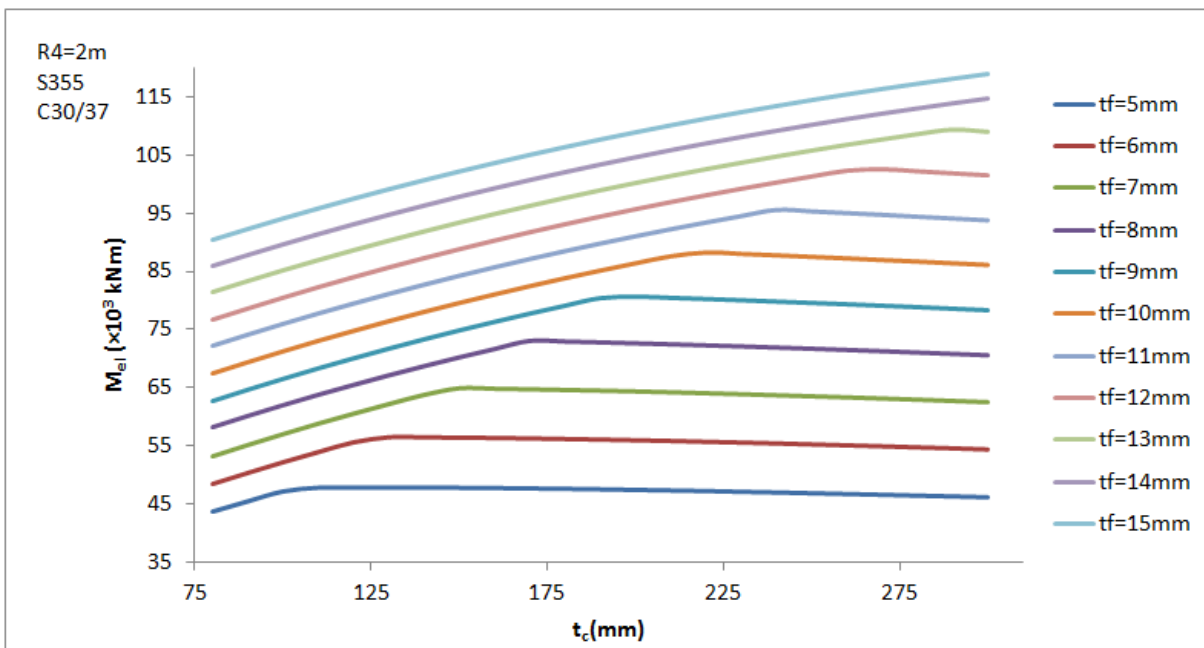
και 4-4 παρατηρείται πως η ελαστική ροπή αντοχής της διατομής ξεκινά να αυξάνεται παράλληλα με την αύξηση του πάχους του σκυροδέματος μέχρι ενός σημείου καμπής, από το οποίο και μετά υφίσταται σταδιακή μείωση της τιμής της. Το φαινόμενο αυτό όσο αυξάνεται η ποιότητα του χάλυβα γίνεται όλο και πιο έντονο, ενώ παρατηρείται πως το σημείο καμπής της τιμής της ελαστικής ροπής για μια συγκεκριμένη τιμή πάχους χάλυβα, λαμβάνει χώρα για μεγαλύτερες τιμές πάχους σκυροδέματος όσο αυξάνεται και η ποιότητα του χάλυβα. Αυτό σημαίνει με άλλα λόγια, πως, για δεδομένο πάχος χάλυβα, αν αυξηθεί η τιμή της τάσης διαρροής του χάλυβα, τότε η ροπή που αντέχει η διατομή ως την πρώτη διαρροή της συνεχίζει να αυξάνεται για μεγαλύτερο εύρος τιμών σκυροδέματος. Πρόκειται δηλαδή για μια οικονομική και αποτελεσματική λύση, καθώς αυξάνοντας τα πάχη των υλικών επιτυγχάνεται και η επιθυμητή αύξηση της αντοχής της διατομής.



Σχήμα 4-2: Διάγραμμα ελαστικής ροπής M_{el} -πάχους σκυροδέματος t_c για διάφορες τιμές του πάχους ελασμάτων t_f . Εξωτερική ακτίνα $R_4=2m$, χάλυβας S235, σκυρόδεμα C30/37.



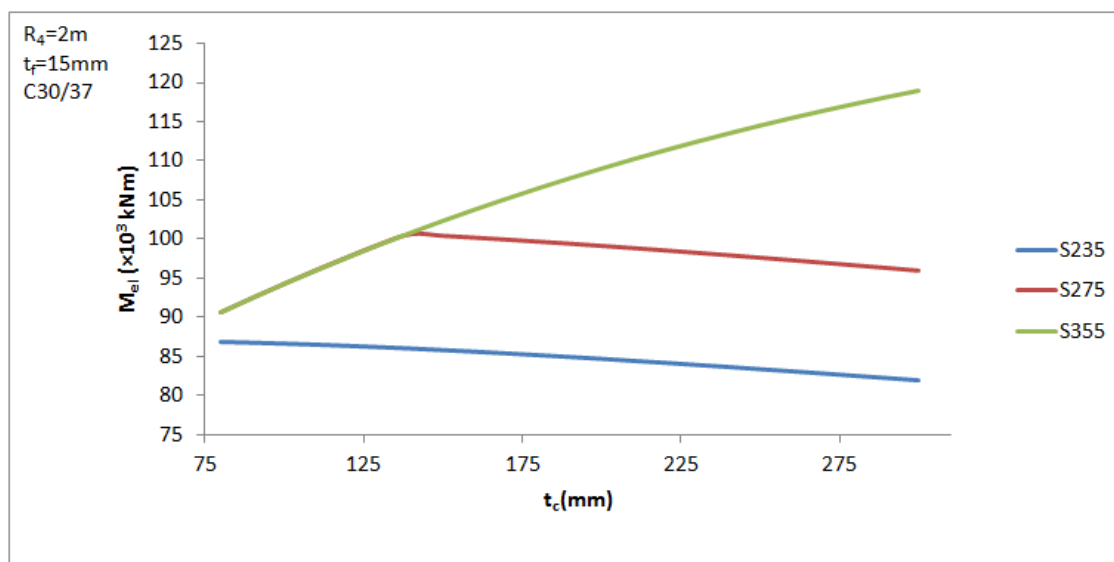
Σχήμα 4-3: Διάγραμμα ελαστικής ροπής M_{el} -πάχους σκυροδέματος t_c για διάφορες τιμές του πάχους ελασμάτων t_f . Εξωτερική ακτίνα $R_4=2m$, χάλυβας S275, σκυρόδεμα C30/37.



Σχήμα 4-4: Διάγραμμα ελαστικής ροπής M_{el} -πάχους σκυροδέματος t_c για διάφορες τιμές του πάχους ελασμάτων t_f . Εξωτερική ακτίνα $R_4=2m$, χάλυβας S355, σκυρόδεμα C30/37.

Παράλληλα, εύκολα γίνεται αντιληπτό πως για δεδομένο πάχος και ποιότητα σκυροδέματος, αλλά και για σταθερή ποιότητα χάλυβα, υπάρχει αύξηση της τιμής της ελαστικής ροπής αντοχής της διατομής που υπόκειται σε καθαρή κάμψη, αυξάνοντας το πάχος των μεταλλικών ελασμάτων που χρησιμοποιούνται.

Επιπλέον, στο Σχήμα 4-5 που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή της ελαστικής ροπής αντοχής της διατομής sandwich για σταθερό πάχος χάλυβα, $t_f=15\text{mm}$, ποιότητα σκυροδέματος C30/37, σε σχέση με τις διάφορες ποιότητες χάλυβα και τα πάχη του σκυροδέματος.

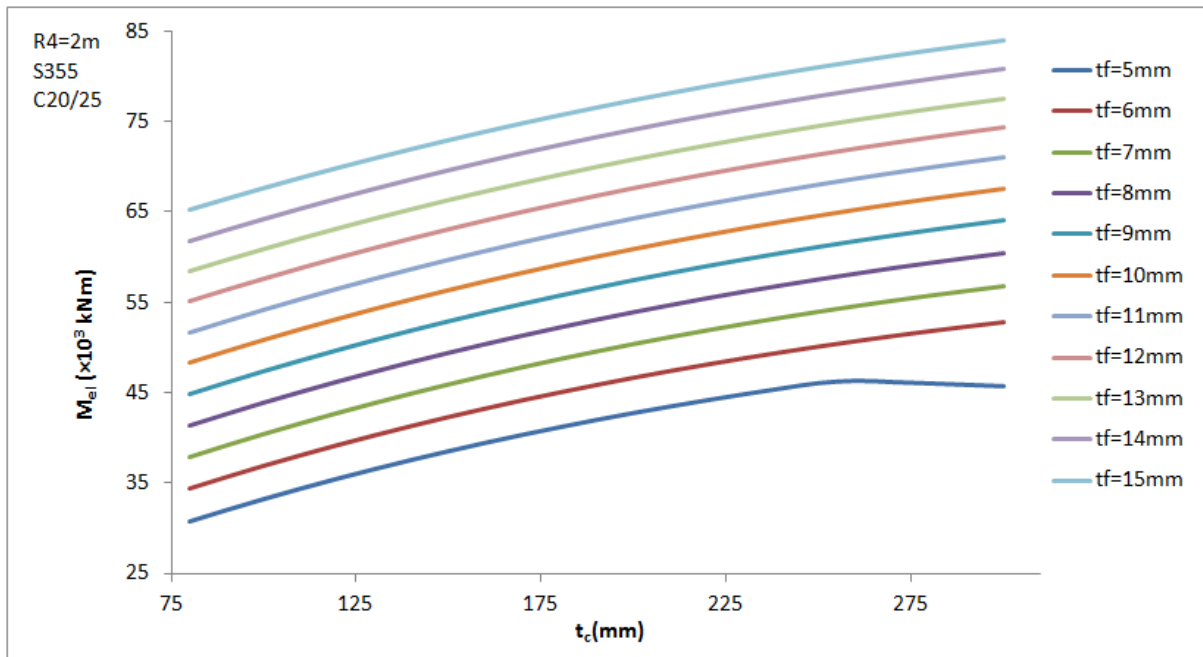


Σχήμα 4-5: Διάγραμμα ελαστικής ροπής M_{el} -πάχους σκυροδέματος t_c για διάφορες ποιότητες χάλυβα. Εξωτερική ακτίνα $R_4=2\text{m}$, σκυρόδεμα C30/37 και πάχος χαλύβδινου ελάσματος $t_f=15\text{mm}$.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται, πως όσον αφορά την ελαστική ροπή διαγράφεται μια κοινή πορεία μέχρι ενός σημείου για τους χάλυβες S355 και S275 κατά την αύξηση του πάχους του σκυροδέματος. Για τη συγκεκριμένη διατομή, συμπεραίνεται πως για χάλυβα S355 δεν υπάρχει σημείο καμπής της καμπύλης και η ελαστική ροπή αυξάνεται όσο αυξάνεται η τιμή του πάχους του σκυροδέματος. Αντίθετα, για την καμπύλη που αντιστοιχεί σε χάλυβα S275 δημιουργείται σημείο καμπής εντός του εύρους των τιμών του πάχους του σκυροδέματος όπου η ροπή αυξάνεται μέχρι ενός σημείου, από το οποίο και έπειτα ξεκινά να μειώνεται. Τέλος, για την περίπτωση χάλυβα S235 εμφανίζεται μείωση της τιμής της ελαστικής ροπής καθώς αυξάνεται το πάχος του σκυροδέματος.

4.2.2 Ελαστική ροπή - ποιότητα σκυροδέματος

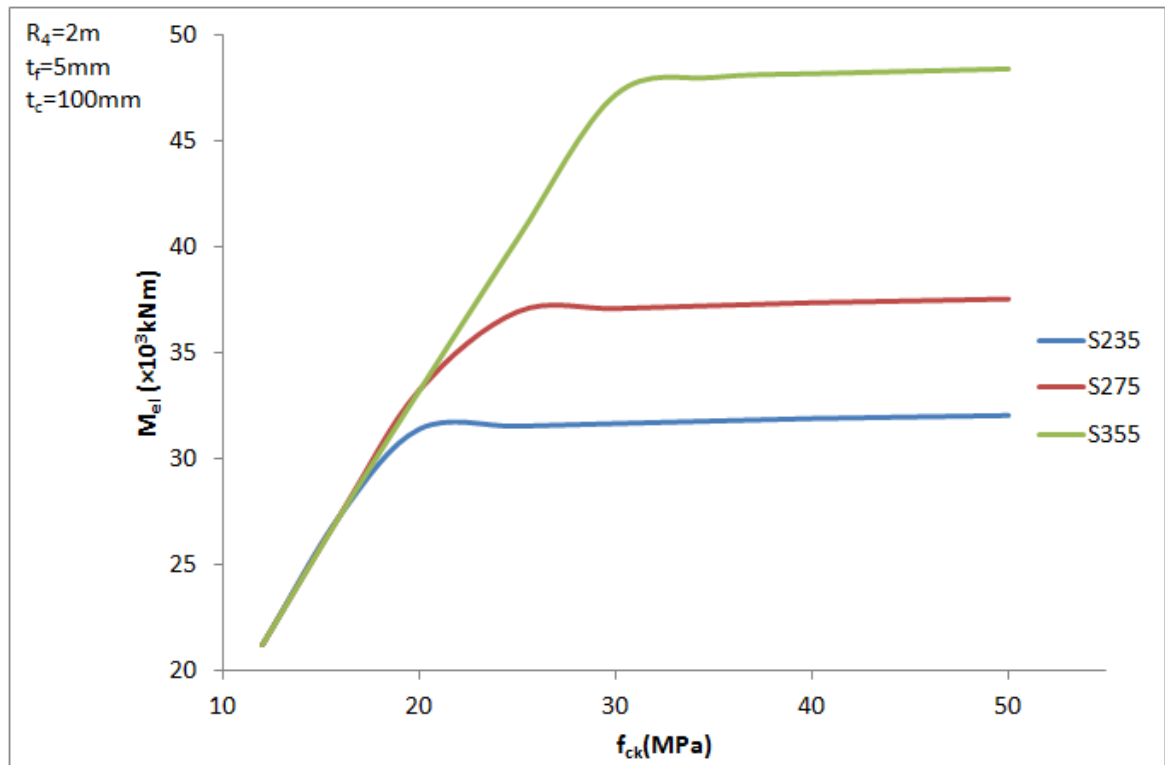
Η ελαστική ροπή αντοχής εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος και κατ' επέκταση από την ποιότητά του, καθώς αυτό έχει διαφορετική τιμή για τις διάφορες ποιότητες του υλικού. Εξετάστηκε αναλυτικά η μεταβολή στην τιμή της ελαστικής ροπής αντοχής μιας διατομής sandwich ποιότητας χάλυβα S355, εξωτερικής ακτίνας $R_4=2\text{m}$ και ποιότητας σκυροδέματος C30/37 και C20/25, όπου για κάθε μια από τις περιπτώσεις καταγράφηκε το διάγραμμα που περιγράφει τη μεταβολή αυτή σε σχέση με τα διάφορα πάχη των υλικών. Το διάγραμμα που αντιστοιχεί στην πρώτη περίπτωση, για σκυρόδεμα C30/37 παρουσιάστηκε στα προηγούμενα, Σχήμα 4-4, ενώ παρακάτω παρατίθεται το αντίστοιχο για σκυρόδεμα C20/25 στο Σχήμα 4-6.



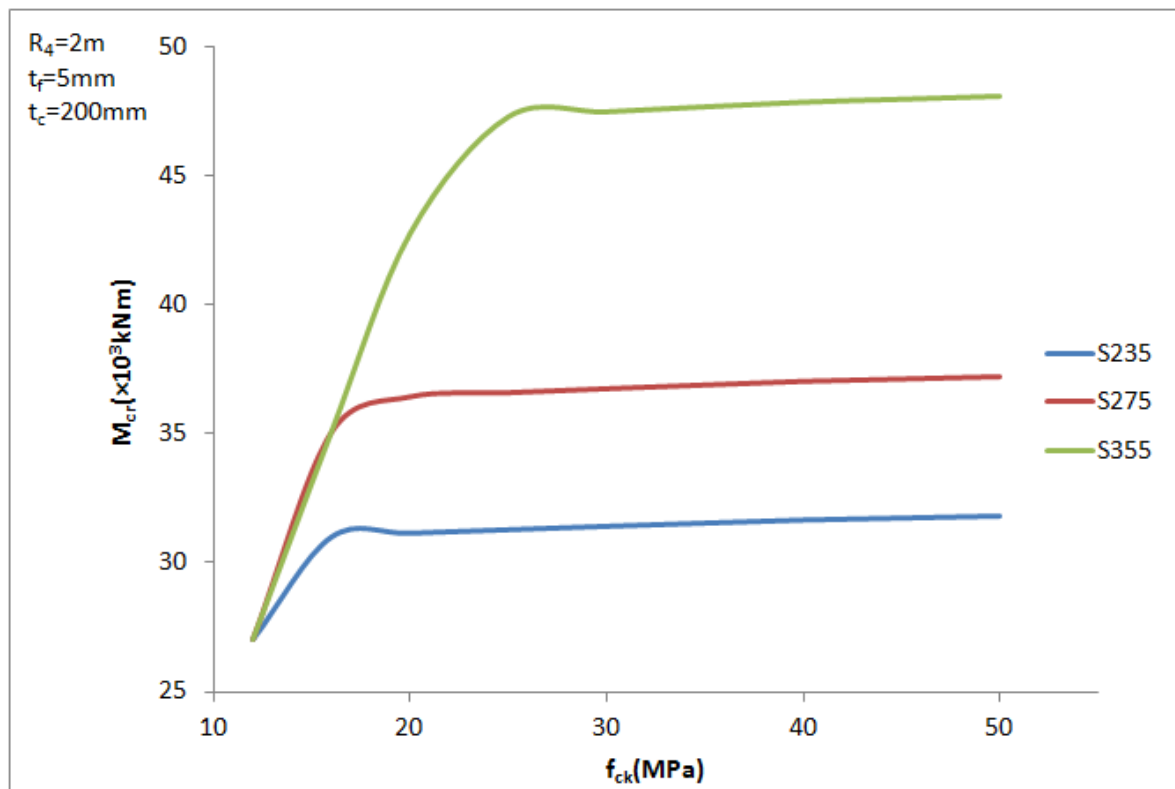
Σχήμα 4-6: Διάγραμμα ελαστικής ροπής M_{el} -πάχους σκυροδέματος t_c για διάφορες τιμές του πάχους ελασμάτων t_f . Εξωτερική ακτίνα $R_4=2m$, χάλυβας S355, σκυρόδεμα C20/25.

Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με αυτήν για μεγαλύτερη ποιότητα σκυροδέματος, με τη διαφορά να έγκειται στο γεγονός ότι για το εύρος τιμών του πάχους σκυροδέματος t_c που έχει επιλεγεί, υπάρχει σημείο καμψής μόνο για πάχος ελάσματος χάλυβα $t_f=5mm$, ενώ για όλες τις άλλες περιπτώσεις εμφανίζεται συνεχής αύξηση στην τιμή της ελαστικής ροπής παράλληλα με την αύξηση του πάχους του σκυροδέματος. Ακόμα, συμπεραίνεται πως στην περίπτωση του σκυροδέματος χαμηλότερης ποιότητας οι τιμές της ροπής πρώτης διαρροής είναι επίσης χαμηλότερες.

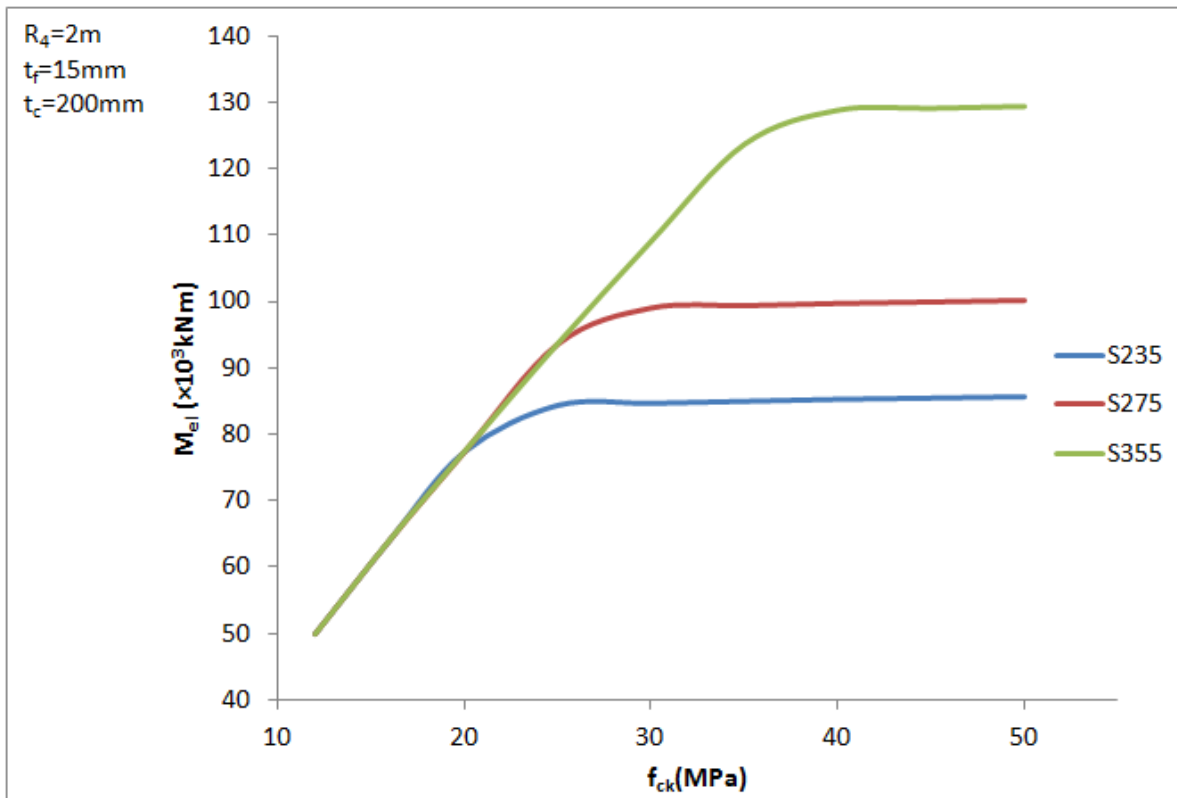
Επιπλέον, εξετάστηκε η συμπεριφορά της διατομής για σταθερή γεωμετρία και μεταβαλλόμενη ποιότητα, τόσο χάλυβα όσο και σκυροδέματος, όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα που ακολουθούν. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάστηκαν τρεις περιπτώσεις με την πρώτη να έχει εξωτερική ακτίνα $R_4=2m$, πάχος σκυροδέματος $t_c=100mm$ και πάχος χάλυβα $t_f=5mm$, τη δεύτερη περίπτωση να έχει ακτίνα $R_4=2m$, πάχος σκυροδέματος $t_c=200mm$ και πάχος χάλυβα $t_f=5mm$ και την τρίτη ακτίνα $R_4=2m$, πάχος σκυροδέματος $t_c=200mm$ και πάχος χάλυβα $t_f=15mm$. Οι παραπάνω περιπτώσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα [4-7](#), στο Σχήμα [4-8](#) και στο Σχήμα [4-9](#), αντίστοιχα.



Σχήμα 4-7: Διάγραμμα ελαστικής ροπής M_{eI} -ποιότητας σκυροδέματος για διάφορες της ποιότητας χάλυβα. Εξωτερική ακτίνα $R_4=2m$, πάχος χάλυβα $t_f=5mm$ και πάχος σκυροδέματος $t_c=100mm$.



Σχήμα 4-8: Διάγραμμα ελαστικής ροπής M_{eI} -ποιότητας σκυροδέματος για διάφορες της ποιότητας χάλυβα. Εξωτερική ακτίνα $R_4=2m$, πάχος χάλυβα $t_f=5mm$ και πάχος σκυροδέματος $t_c=200mm$.

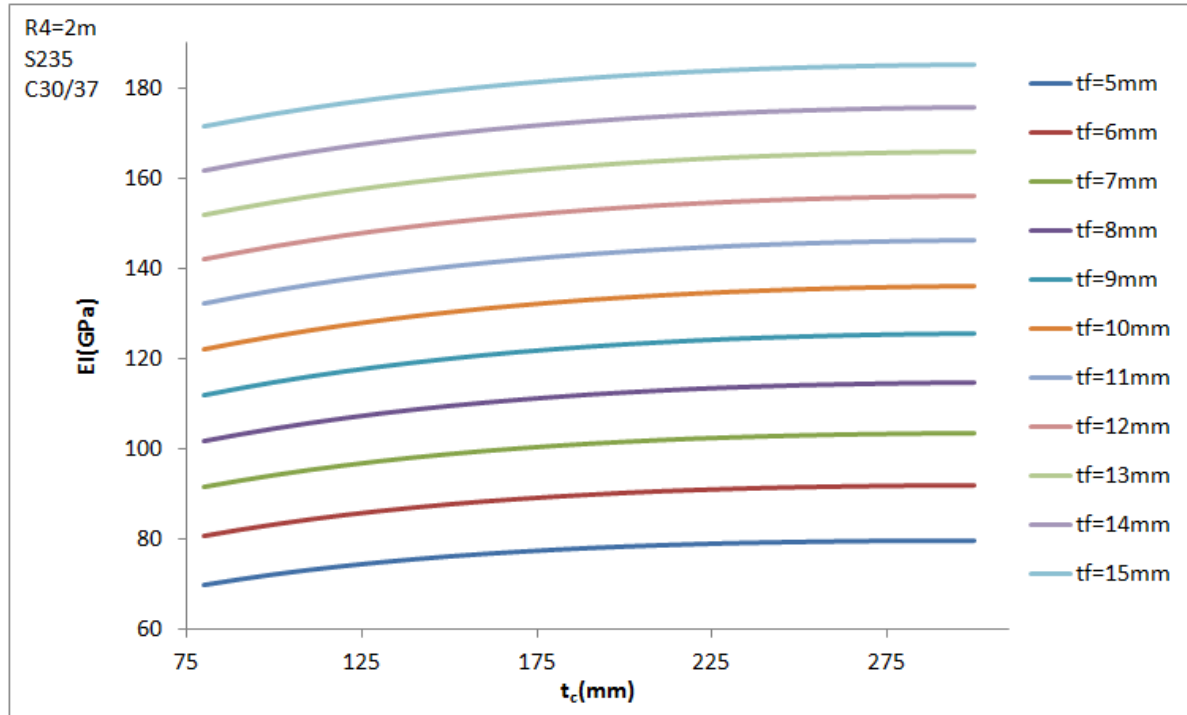


Σχήμα 4-9: Διάγραμμα ελαστικής ροπής M_{el} -ποιότητας σκυροδέματος για διάφορες της ποιότητας χάλυβα. Εξωτερική ακτίνα $R_4=2m$, πάχος χάλυβα $t_f=15mm$ και πάχος σκυροδέματος $t_c=200mm$.

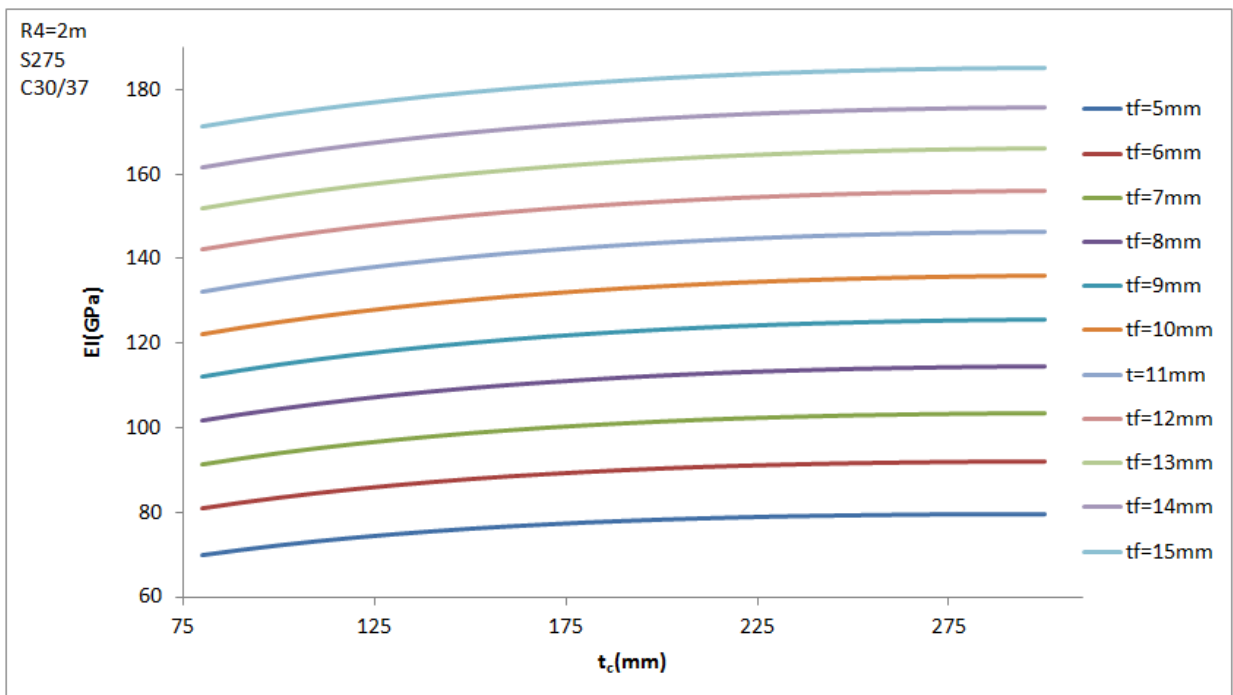
Από τα διαγράμματα που προηγήθηκαν είναι δυνατόν να παρατηρήσει κάποιος, πως για σταθερή ποιότητα χάλυβα και γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατομής, η τιμή της ελαστικής ροπής αυξάνεται με ταχύ ρυθμό καθώς αυξάνεται η τιμή της τάσης διαρροής του σκυροδέματος μέχρι ενός σημείου, πέρα από το οποίο αυξάνεται με βραδύτερο ρυθμό και στη συνέχεια παραμένει σχεδόν σταθερή. Ακόμη, για δεδομένη γεωμετρία, μαζί με την αύξηση της ποιότητας του χάλυβα αυξάνεται και η τιμή της ελαστικής ροπής. Επιπρόσθετα, στα δύο τελευταία διαγράμματα, όπου το πάχος σκυροδέματος είναι κοινό και ίσο με 200mm, παρατηρείται πως για πάχος χάλυβα $t_f=5mm$ οι τιμές της ροπής είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με την περίπτωση όπου το πάχος του ελάσματος είναι ίσο με $t_f=15mm$. Πιο συγκεκριμένα, αν παραδείγματος χάρη μελετηθεί η διατομή σκυροδέματος με τάση διαρροής $f_{ck}=30MPa$ και χάλυβα S355, προκύπτει στην περίπτωση του πάχους ελάσματος $t_f=15mm$ ελαστική ροπή αντοχής $M_{el}=109037.3kNm$, ενώ για πάχος χαλύβδινου ελάσματος $t_f=5mm$ ελαστική ροπή $M_{el}=47470.69kNm$. Η μείωση αυτή στην τιμή της ελαστικής ροπής αντοχής είναι της τάξης του 56.5%, γεγονός που δείχνει πόσο σημαντικό ρόλο παίζει ο χάλυβας και η γεωμετρία του.

4.3 ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ

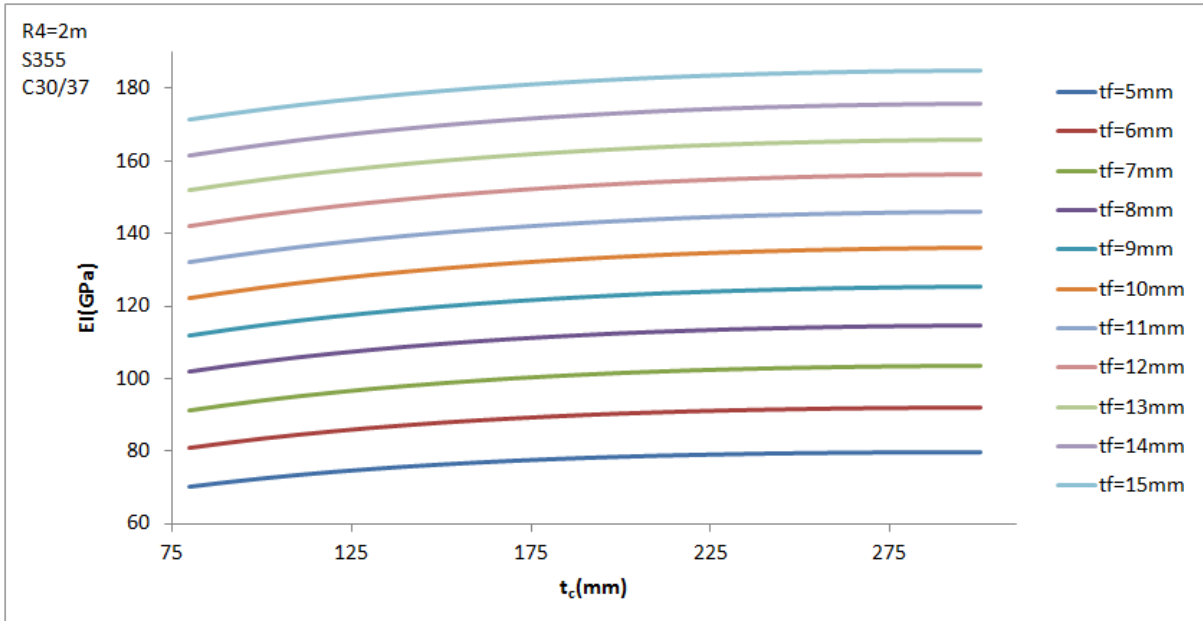
Στη διατομή τύπου sandwich που αποτελείται από διαφορετικά υλικά που βρίσκονται σε επαφή και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους υπάρχει τη δυνατότητα να υπολογιστεί μια συνολική ισοδύναμη δυσκαμψία που αφορά την ελαστική συμπεριφορά της διατομής. Λύνοντας τις εξισώσεις που περιγράφουν την ελαστική συμπεριφορά της διατομής, για μια τυχαία τιμή ροπής και καμπυλότητας, αντίστροφα, τελικά προκύπτει μια σταθερή ισοδύναμη καμπυλότητα για κάθε διατομή. Στα πλαίσια της παραμετρικής διερεύνησης μιας διατομής sandwich δημιουργήθηκε μια σειρά από διαγράμματα, που παρουσιάζονται στα Σχήματα 4-10 έως 4-13, τα οποία περιγράφουν τη σχέση της ισοδύναμης δυσκαμψίας με τα διάφορα χαρακτηριστικά της διατομής.



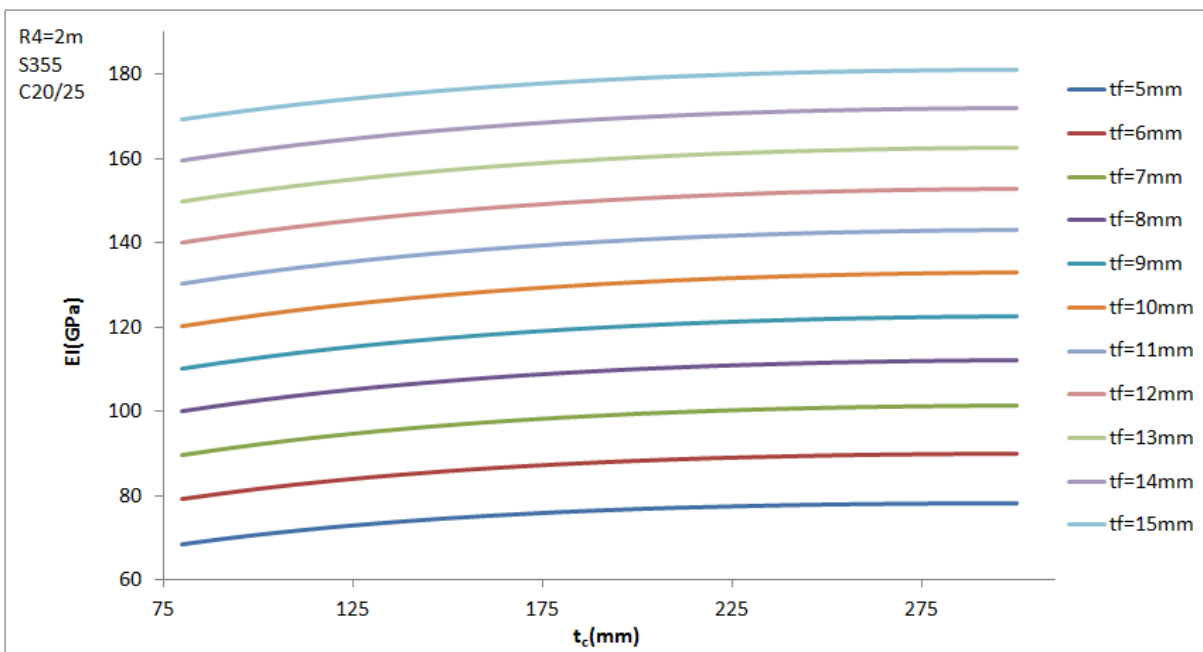
Σχήμα 4-10: Διάγραμμα ισοδύναμης δυσκαμψίας-πάχους σκυροδέματος για διάφορες τιμές του πάχους χάλυβα t_f . Εξωτερική ακτίνα $R_4=2m$, χάλυβας S235 και σκυρόδεμα C30/37.



Σχήμα 4-11: Διάγραμμα ισοδύναμης δυσκαμψίας-πάχους σκυροδέματος για διάφορες τιμές του πάχους χάλυβα t_f . Εξωτερική ακτίνα $R_4=2m$, χάλυβας S275 και σκυρόδεμα C30/37.



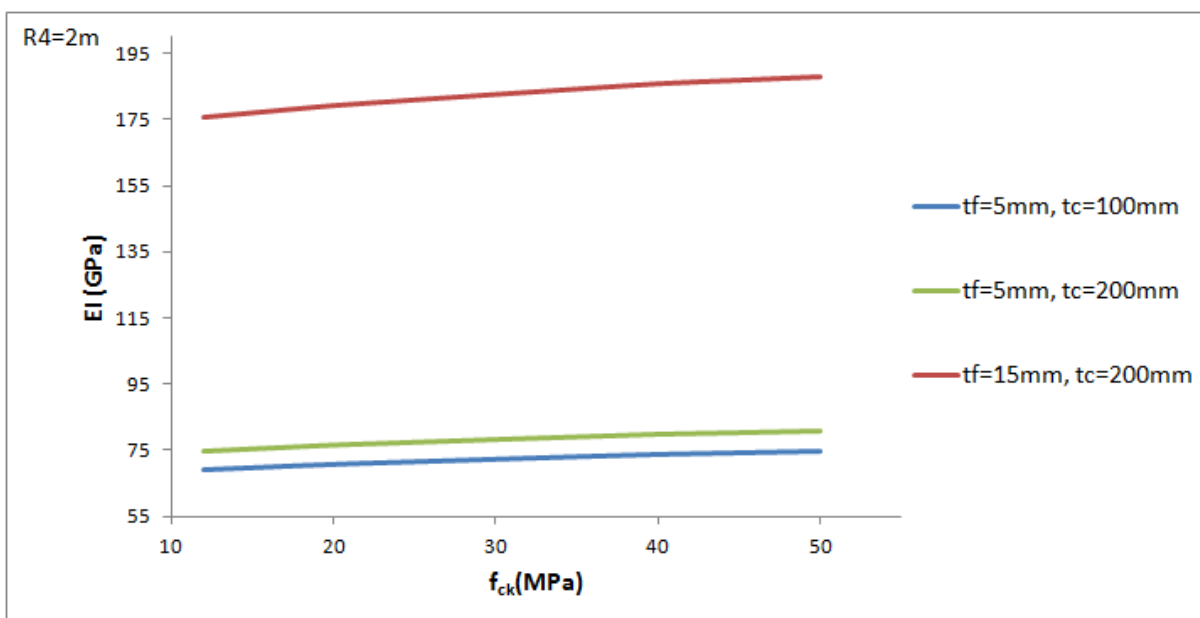
Σχήμα 4-12: Διάγραμμα ισοδύναμης δυσκαμψίας-πάχους σκυροδέματος για διάφορες τιμές του πάχους χάλυβα t_f . Εξωτερική ακτίνα $R_4=2m$, χάλυβας S355 και σκυρόδεμα C30/37.



Σχήμα 4-13: Διάγραμμα ισοδύναμης δυσκαμψίας-πάχους σκυροδέματος για διάφορες τιμές του πάχους χάλυβα t_f . Εξωτερική ακτίνα $R_4=2m$, χάλυβας S355 και σκυρόδεμα C20/25.

Στα παραπάνω διαγράμματα είναι φανερή η συμβολή του πάχους του σκυροδέματος στην αύξηση της ισοδύναμης δυσκαμψίας της διατομής για δεδομένο πάχος χάλυβα και για συγκεκριμένη ποιότητα σκυροδέματος και ποιότητα χάλυβα. Αντίστοιχα, η αύξηση της τιμής του πάχους του χαλύβδινου ελάσματος, για σταθερό αυτή τη φορά πάχος σκυροδέματος και ποιότητα υλικών, οδηγεί κι αυτή σε αύξηση της τιμής της ισοδύναμης δυσκαμψίας της διατομής. Για αλλαγή στην ποιότητα χάλυβα παρατηρείται ότι η δυσκαμψία παραμένει ίδια, ενώ για μείωση της ποιότητας του σκυροδέματος, από C30/37 σε C20/25 η ισοδύναμη δυσκαμψία υφίσταται μικρή μείωση.

Για διαφορετικά πάχη χάλυβα και σκυροδέματος, παρατίθενται τρία παραδείγματα και παρουσιάζεται η συμπεριφορά τους με τη βοήθεια του Σχήματος 4-14. Στην πρώτη περίπτωση το πάχος του χάλυβα είναι $t_f=5\text{mm}$ και το πάχος του σκυροδέματος $t_c=100\text{mm}$, στη δεύτερη περίπτωση το πάχος του χάλυβα είναι $t_f=5\text{mm}$ και το πάχος του σκυροδέματος $t_c=200\text{mm}$ και στην τρίτη περίπτωση το πάχος του χάλυβα είναι $t_f=15\text{mm}$ και το πάχος του σκυροδέματος $t_c=200\text{mm}$.



Σχήμα 4-14: Διάγραμμα ισοδύναμης δυσκαμψίας-ορίου διαρροής σκυροδέματος για διάφορες τιμές πάχους ελασμάτων. Εξωτερική ακτίνα $R_4=2\text{m}$, χάλυβας S355.

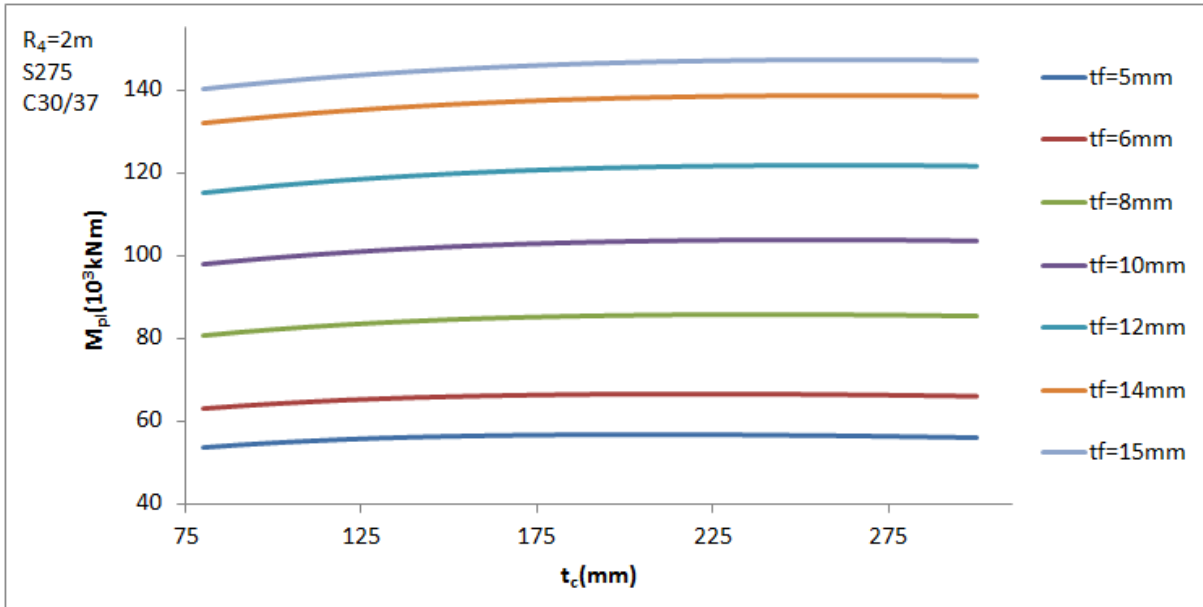
Παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα του Σχήματος 4-14 μικρή σχετικά αύξηση της τιμής της δυσκαμψίας για διπλάσιο πάχος σκυροδέματος, από 100mm σε 200mm και μεγαλύτερης κλίμακας αύξηση της ισοδύναμης δυσκαμψίας της διατομής για τριπλασιασμό του πάχους των χαλύβδινων ελασμάτων, από 5mm σε 15mm. Σε κάθε περίπτωση, το αποτέλεσμα είναι το επιθυμητό, για αύξηση δηλαδή των παχών και αντίστοιχα του κόστους της διατομής υπάρχει αντίστοιχη αύξηση της ισοδύναμης δυσκαμψίας της διατομής τύπου sandwich.

4.4 ΡΟΠΗ ΠΛΗΡΟΥΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ

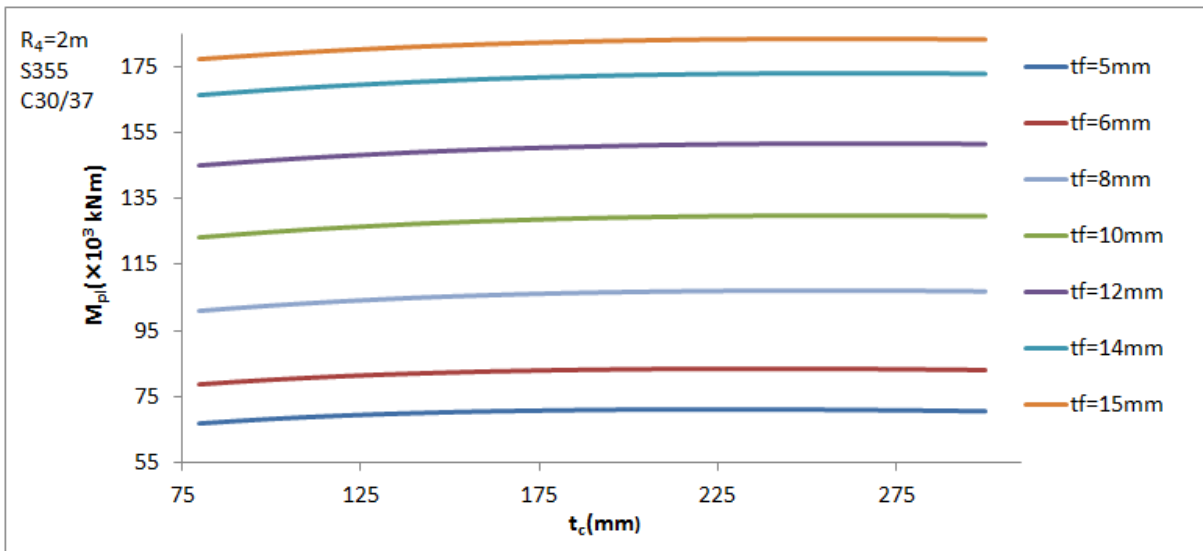
Για την εύρεση της ροπής πλήρους πλαστικοποίησης της διατομής χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις που έχουν ως μεταβλητές την ποιότητα τόσο του χάλυβα όσο και του σκυροδέματος, αλλά και τα πάχη των ελασμάτων, ως εκ τούτου και τις διαμέτρους των ομόκεντρων κύκλων που αποτελούν τη διατομή sandwich. Από τα παραπάνω κρίθηκε σκόπιμη η διερεύνηση της συμπεριφοράς μιας διατομής sandwich ως προς την τιμή της ροπής πλήρους πλαστικοποίησής της σε σχέση με τις παραπάνω μεταβλητές.

4.4.1 Ροπή πλήρους πλαστικοποίησης - ποιότητα χάλυβα

Όπως και στην περίπτωση της ροπής πρώτης πλαστικοποίησης της διατομής, έτσι και στην περίπτωση όπου όλα τα σημεία της διατομής έχουν ξεπεράσει το όριο διαρροής των υλικών τους, υπάρχει εξάρτηση της τιμής της ροπής πλήρους πλαστικοποίησης από την ποιότητα χάλυβα από την οποία είναι κατασκευασμένα τα χαλυβδόφυλλα. Στα διαγράμματα των Σχημάτων 4-15 και 4-16 εμφανίζεται, για διάφορες τιμές των παχών των μελών της διατομής και σταθερή ποιότητα σκυροδέματος, η μεταβολή της τιμής της ροπής αυτής σε σχέση με τις διαφορετικές ποιότητες χάλυβα.

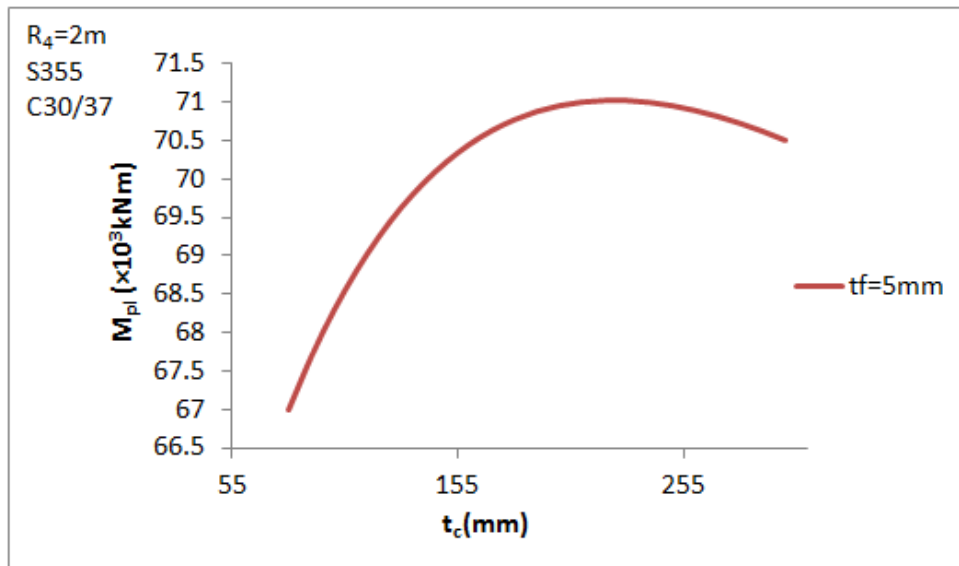


Σχήμα 4-15: Διάγραμμα ροπής πλήρους πλαστικοποίησης-πάρους σκυροδέματος t_c για διάφορες τιμές πάχους χαλύβδινου ελάσματος t_f . Εξωτερική ακτίνα $R_4=2m$, χάλυβας S275 και σκυρόδεμα C30/37.



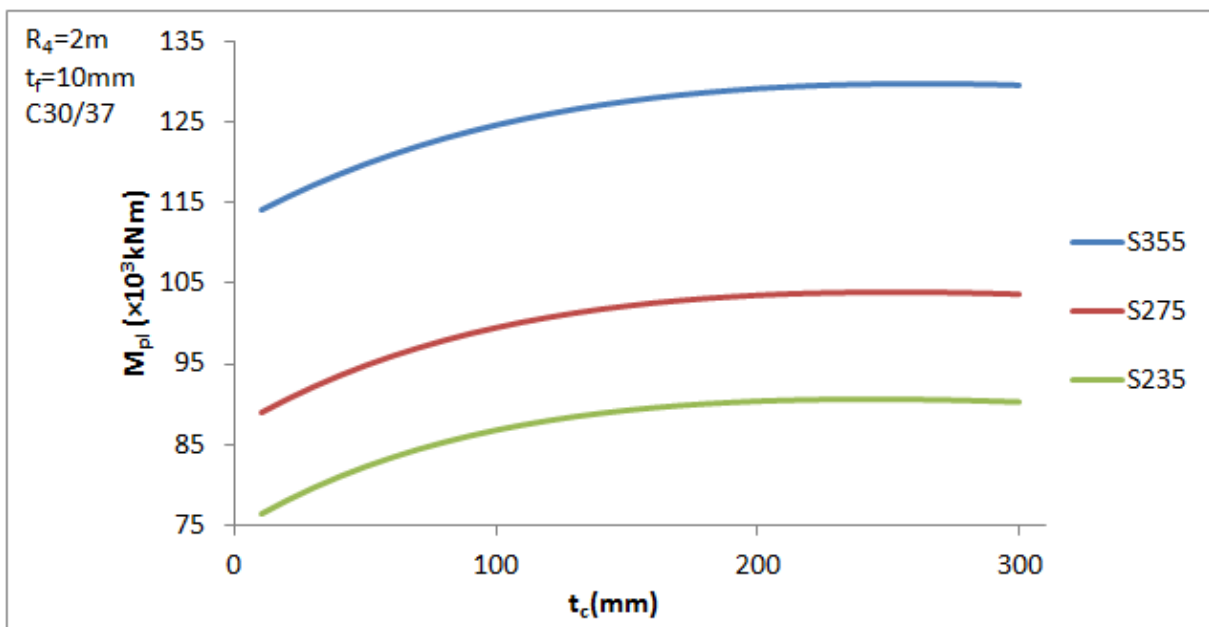
Σχήμα 4-16: Διάγραμμα ροπής πλήρους πλαστικοποίησης-πάρους σκυροδέματος t_c για διάφορες τιμές πάχους χαλύβδινου ελάσματος t_f . Εξωτερική ακτίνα $R_4=2m$, χάλυβας S355 και σκυρόδεμα C30/37.

Όπως αναμενόταν, η ροπή πλήρους πλαστικοποίησης αυξάνεται όσο αυξάνεται το πάχος των ελασμάτων, αν θεωρηθεί πως το πάχος του σκυροδέματος και οι ποιότητες των υλικών παραμένουν σταθερά. Με την αύξηση όμως του πάχους του σκυροδέματος και κρατώντας σταθερό το πάχος των χαλύβδινων ελασμάτων και τις ποιότητες των υλικών, παρατηρείται πως ενώ η ροπή πλήρους πλαστικοποίησης αρχικά αυξάνεται, υπάρχει ένα σημείο όπου η καμπύλη παρουσιάζει μέγιστη τιμή, πέρα από το οποίο υπάρχει μείωση της τιμής της ροπής. Αυτό γίνεται αντιληπτό από το παρακάτω Σχήμα 4-17, όπου παρουσιάζεται λεπτομερώς η καμπύλη που περιγράφει τη σχέση της ροπής πλήρους πλαστικοποίησης μιας διατομής sandwich, εξωτερικής ακτίνας $R_4=2m$, χάλυβα S355 σκυροδέματος C30/37 και πάχους χαλύβδινων ελασμάτων $t_f=5mm$, με τη μεταβολή του πάχους του σκυροδέματος.



Σχήμα 4-17: Διάγραμμα ροπής πλήρους πλαστικοποίησης-πάχους σκυροδέματος t_c . Εξωτερική ακτίνα $R_4=2m$, πάχος χάλυβα $t_f=5mm$, χάλυβας S355 και σκυρόδεμα C30/37.

Ακόμη, η αύξηση της ποιότητας του χάλυβα οδηγεί σε αύξηση της ροπής πλαστικοποίησης, για ίδια φυσικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατομής καθώς και ίδια ποιότητα σκυροδέματος. Το γεγονός αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-18, όπου έχουν εξετασθεί τρεις διαφορετικοί χάλυβες, ο S235, ο S275 και ο S355.

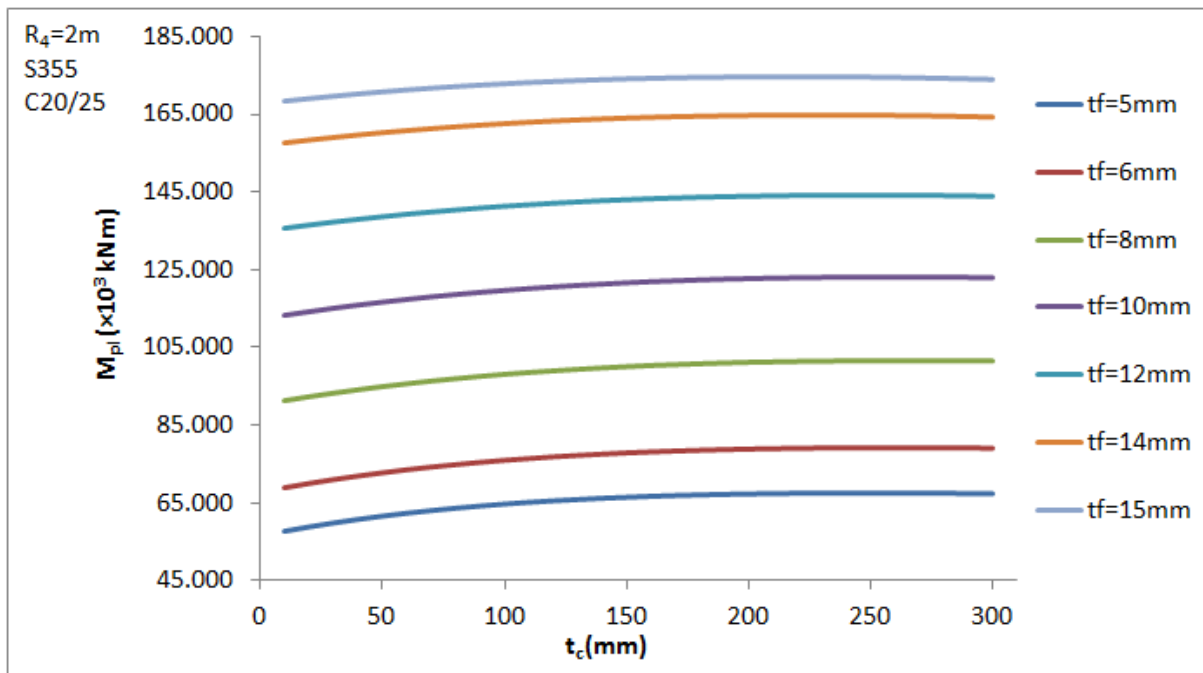


Σχήμα 4-18: Διάγραμμα ροπής πλήρους πλαστικοποίησης-πάχους σκυροδέματος t_c για διάφορες ποιότητες χάλυβα. Εξωτερική ακτίνα $R_4=2m$, πάχος χάλυβα $t_f=10mm$ και σκυρόδεμα C30/37.

4.4.2 Ροπή πλήρους πλαστικοποίησης - ποιότητα σκυροδέματος

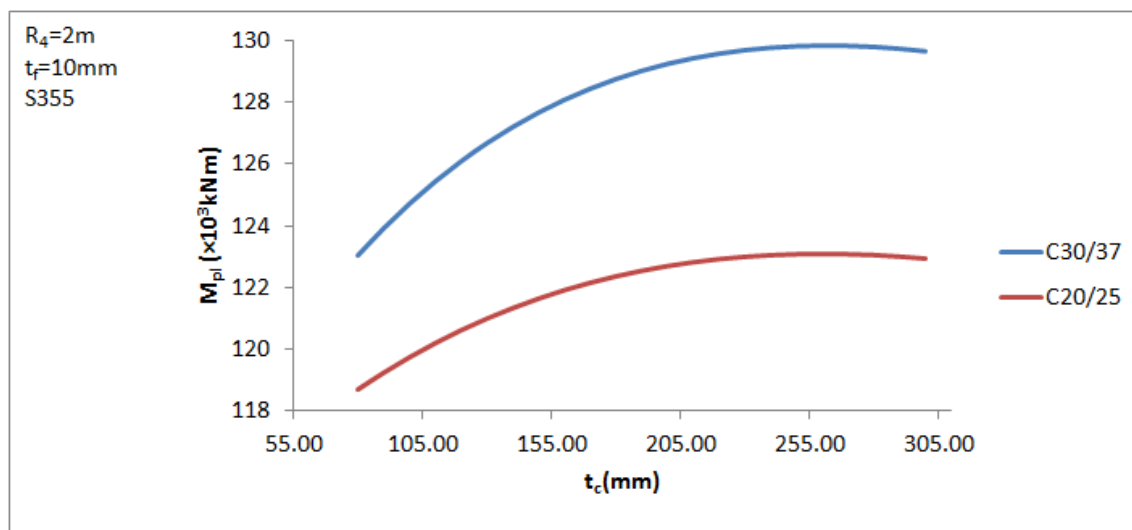
Η ποιότητα του σκυροδέματος, αντίστοιχα με την ποιότητα του χάλυβα που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, αποτελεί παράγοντα που επηρεάζει την αντοχή μιας διατομής sandwich η οποία υπόκειται σε μονοαξονική κάμψη. Για την καλύτερη εμπορεία της συμπεριφοράς της διατομής εξετάστηκαν διαφορετικές περιπτώσεις, κάθε μια από τις οποίες διέφερε ως προς την ποιότητα του

σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε για τη διατομή. Πιο αναλυτικά, εξετάστηκαν δύο διατομές, με ποιότητα σκυροδέματος C30/37 και C20/25. Με βάση τις αναλυτικές εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά τους, μορφώθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα που εκφράζουν τη σχέση της ροπής πλήρους πλαστικοποίησης με τα πάχη του σκυροδέματος και του χάλυβα για δεδομένη εξωτερική ακτίνα $R_4=2\text{m}$ και ποιότητα χάλυβα. Η περίπτωση σκυροδέματος C30/37 παρουσιάστηκε στο Σχήμα [4-16](#). Για τη διατομή που αποτελείται από σκυρόδεμα C20/25 το Σχήμα [4-19](#) περιγράφει τη σχέση αυτή.



Σχήμα 4-19: Διάγραμμα ροπής πλήρους πλαστικοποίησης-πάχους σκυροδέματος t_c για διάφορες τιμές πάχους χαλύβδινου ελάσματος t_f . Εξωτερική ακτίνα $R_4=2\text{m}$, χάλυβας S355 και σκυρόδεμα C20/25.

Η σχέση ανάμεσα στη ροπή και στο πάχος του σκυροδέματος είναι κι εδώ ανάλογη με την περίπτωση του σκυροδέματος C30/37. Για τις δύο ποιότητες σκυροδέματος που εξετάστηκαν δημιουργήθηκε το διάγραμμα του Σχήματος [4-20](#), το οποίο περιγράφει τις διαφορές ανάμεσα σε αυτές τις περιπτώσεις. Ο χάλυβας θεωρήθηκε πως έχει σταθερή ποιότητα S355, ενώ το πάχος του κάθε χαλύβδινου ελάσματος θεωρήθηκε κι αυτό σταθερό, με τιμή $t_f=10\text{mm}$. Για το σκυρόδεμα ποιότητας C30/37, όπου το όριο διαρροής είναι $f_{yc}=30\text{MPa}$, οι τιμές της ροπής πλαστικοποίησης είναι μεγαλύτερες σε σχέση με το σκυρόδεμα C20/15 $f_{yc}=20\text{MPa}$, για συγκεκριμένη τιμή πάχους σκυροδέματος. Γίνεται λοιπόν φανερό πόσο αποτελεσματικό μέτρο προς την αύξηση της ροπής πλήρους πλαστικοποίησης της διατομής είναι η αύξηση της ποιότητας του σκυροδέματος. Κι αυτό παρόλο που για την ίδια την καμπύλη που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο σκυρόδεμα υπάρχει σημείο καμψής και πιο συγκεκριμένα μέγιστο. Ακόμα και όταν η καμπύλη που αντιστοιχεί σε σκυρόδεμα C30/37 φθίνει, εξακολουθεί να έχει μεγαλύτερες τιμές ροπής για συγκεκριμένο πάχος σκυροδέματος σε σχέση με την καμπύλη που αντιστοιχεί σε σκυρόδεμα C20/25.



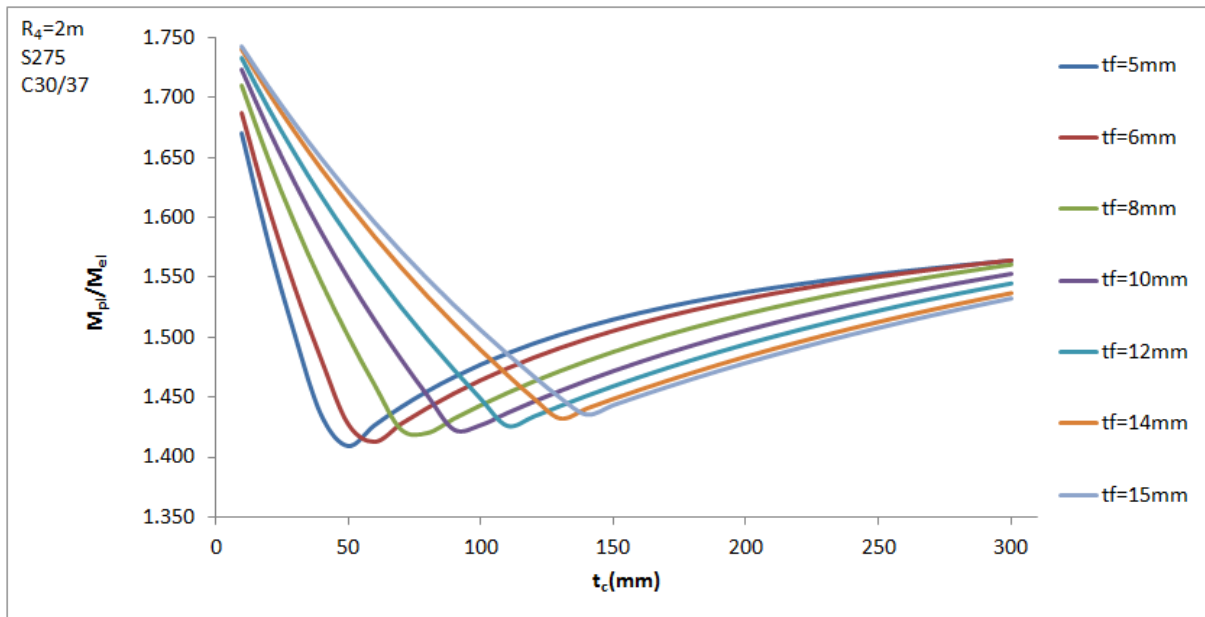
Σχήμα 4-20: Διάγραμμα ροπής πλήρους πλαστικοποίησης- πάχους σκυροδέματος t_c για διαφορετικές ποιότητες σκυροδέματος. Εξωτερική ακτίνα $R_4=2\text{m}$, χάλυβας S355 και πάχος χαλύβδινου ελάσματος $t_f=10\text{mm}$.

4.5 ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ

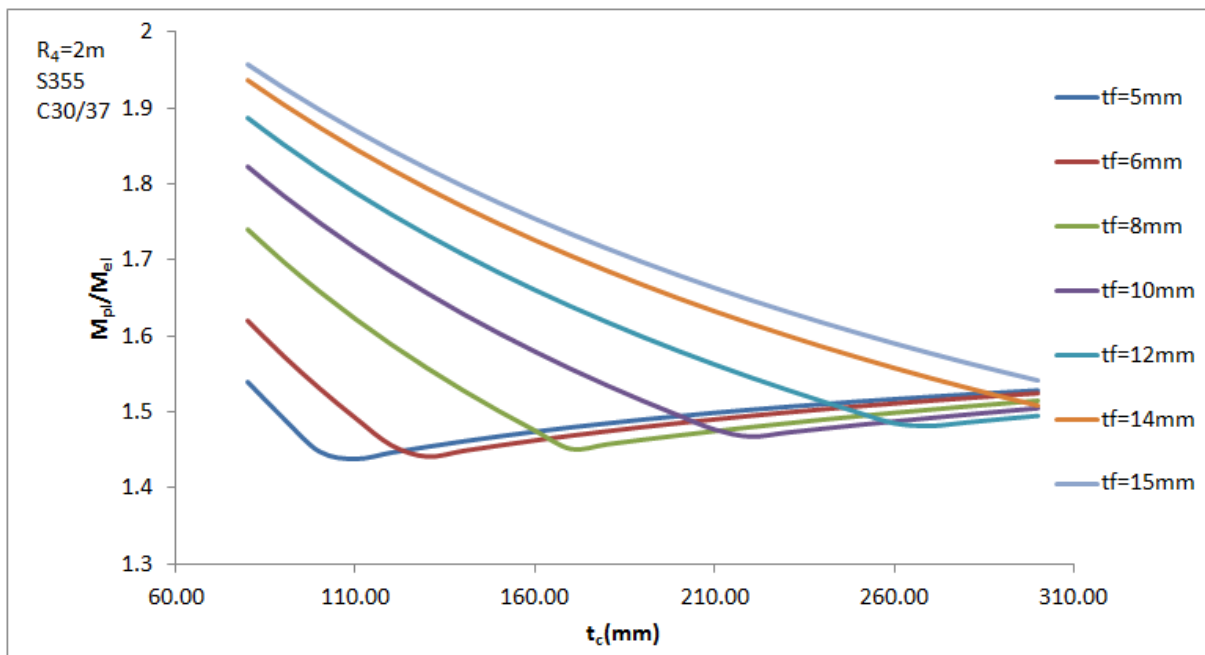
Η πλαστιμότητα μιας διατομής αποτελεί μέγα ζητούμενο στα πλαίσια της μελέτης μια κατασκευής πολιτικού μηχανικού, και ιδιαίτερα σε ένα έργο όπως οι ανεμογεννήτριες. Το μέγεθος αυτό χαρακτηρίζει την ικανότητα της διατομής να συνεχίζει να παραλαμβάνει φορτίο ακόμη και μετά την πρώτη διαρροή σε κάποια ίνα της. Η πλαστιμότητα εκφράζεται σαν το ηηλικό της ροπής πλήρους πλαστικοποίησης προς την ροπή πρώτης πλαστικοποίησης, M_{pl}/M_{el} και αναφέρεται στο πόσο μεγαλύτερη είναι η ροπή πλήρους πλαστικοποίησης σε σχέση με την ελαστική ροπή της διατομής. Καθώς και τα δύο αυτά μεγέθη εξαρτώνται από τις ποιότητες των υλικών, τα πάχη τους και τις ακτίνες των ομόκεντρων κύκλων που συνθέτουν τη διατομή sandwich, είναι ευκόλως εννοούμενο ότι και ο λόγος τους θα εξαρτάται κι αυτός από τα συγκεκριμένα μεγέθη. Στα πλαίσια επομένως της διερεύνησης του τρόπου με τον οποίο επηρεάζεται η πλαστιμότητα της διατομής από κάθε μια από τις μεταβλητές, δημιουργήθηκαν διαγράμματα που βοηθούν προς αυτό το σκοπό.

4.5.1 Πλαστιμότητα - ποιότητα χάλυβα

Αρχικά διερευνήθηκε η συμπεριφορά της διατομής ως προς την πλαστιμότητα για διαφορετικές ποιότητες χάλυβα και πιο συγκεκριμένα, για χάλυβα S355 και S275, όπου για κάθε περίπτωση μορφώθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα, όπως αυτά περιγράφονται από το Σχήμα [4-21](#) και το Σχήμα [4-22](#). Στα σχήματα αυτά παρατηρείται πως η πλαστιμότητα παρουσιάζει ελάχιστο κατά την αύξηση του πάχους του σκυροδέματος, για ένα συγκεκριμένο πάχος χάλυβα. Με άλλα λόγια, καθώς αυξάνεται το πάχος του σκυροδέματος και παράλληλα μειώνεται η πλαστιμότητα, υπάρχει μια τιμή πάχους σκυροδέματος που σηματοδοτεί το σημείο πέρα από το οποίο κάθε αύξηση του πάχους σκυροδέματος οδηγεί σε αύξηση της πλαστιμότητας. Οι μεγαλύτερες τιμές πλαστιμότητας παρατηρούνται στις χαμηλές τιμές πάχους σκυροδέματος, τόσο για το διάγραμμα όπου απεικονίζεται η συμπεριφορά μιας διατομής με χάλυβα S355 όσο και για το διάγραμμα όπου έχει χρησιμοποιηθεί χάλυβας S275. Ακόμη, η ελάχιστη τιμή της πλαστιμότητας εμφανίζεται στην περίπτωση του Σχήματος [4-21](#) με το χάλυβα S275 για μικρότερες τιμές πάχους σκυροδέματος σε σχέση με το διάγραμμα του Σχήματος [4-22](#) όπου χρησιμοποιήθηκε χάλυβας S355.

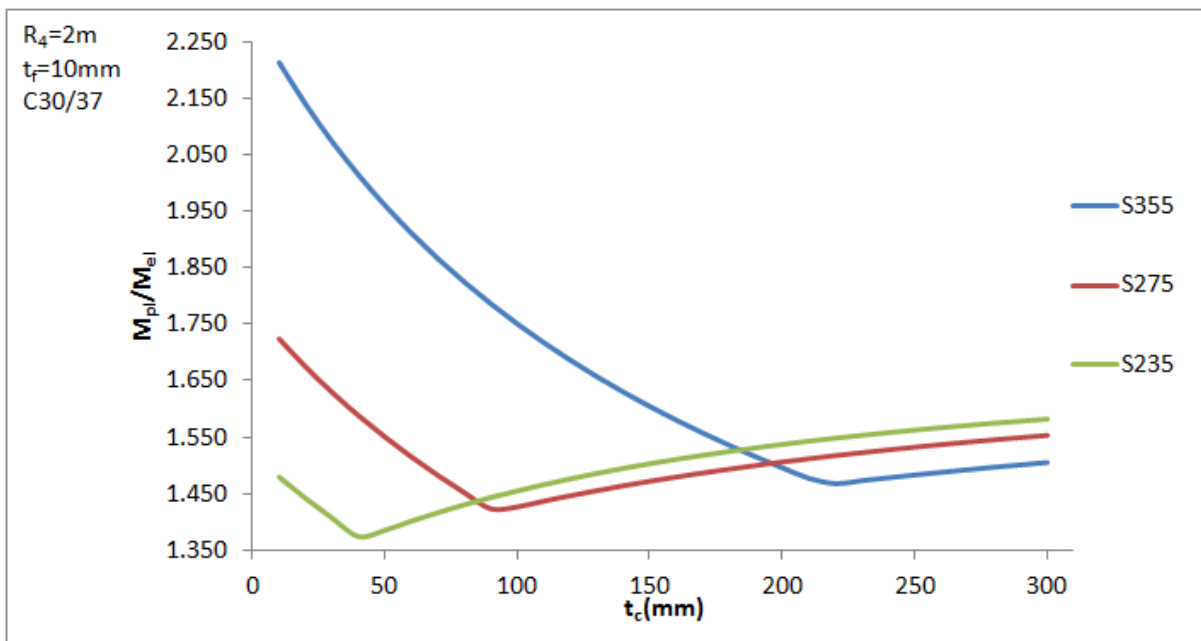


Σχήμα 4-21: Διάγραμμα πλαστιμότητας M_{pl} -πάρους σκυροδέματος t_c για διάφορες τιμές πάχους χάλυβα t_f . Εξωτερική ακτίνα $R_4=2m$, χάλυβας S275 και σκυρόδεμα C30/37.



Σχήμα 4-22: Διάγραμμα πλαστιμότητας M_{pl} -πάρους σκυροδέματος t_c για διάφορες τιμές πάχους χάλυβα t_f . Εξωτερική ακτίνα $R_4=2m$, χάλυβας S355 και σκυρόδεμα C30/37.

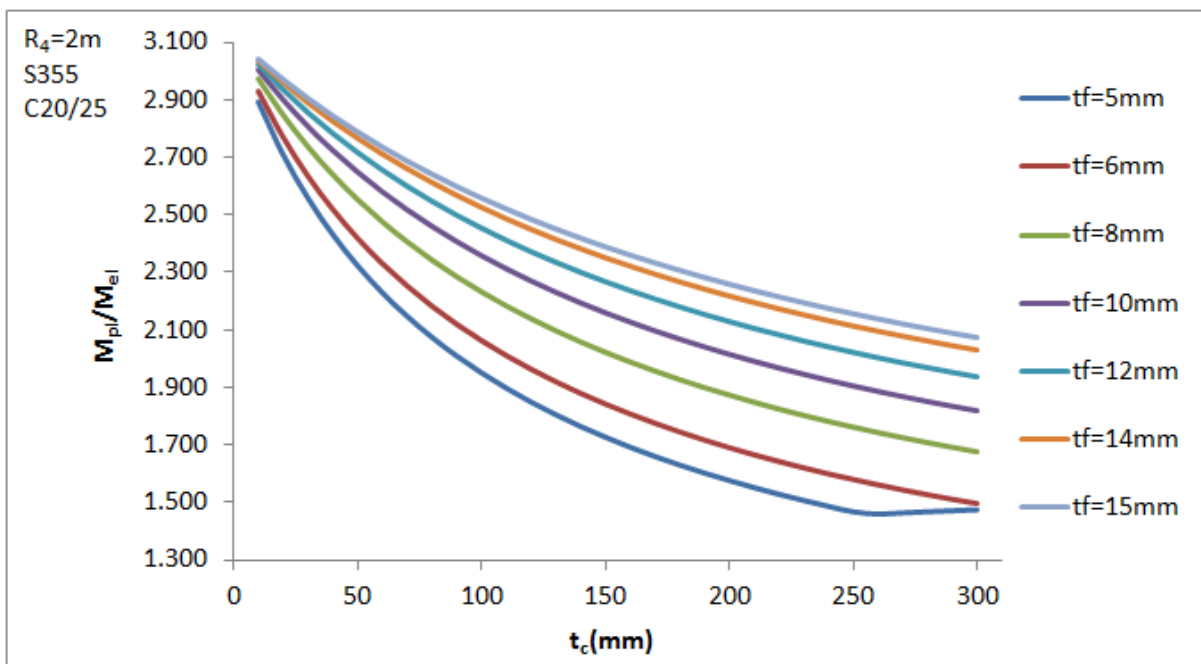
Στα πλαίσια της διερεύνησης της σχέσης της πλαστιμότητας της διατομής sandwich με την ποιότητα του χάλυβα από τον οποίο αποτελούνται τα ελάσματα του δημιουργήθηκε το διάγραμμα του Σχήματος 4-23. Σύμφωνα με αυτό, για εξωτερική ακτίνα διατομής $R_4=2m$, πάχος μεταλλικών ελασμάτων $t_f=10mm$ και σκυρόδεμα C30/37, για χάλυβες με μεγαλύτερη τάση διαρροής εμφανίζεται μεγαλύτερη πλαστιμότητα στις μικρές τιμές πάχους σκυροδέματος. Αντίθετα, όσο μεγαλώνει το πάχος του σκυροδέματος η κατάσταση αυτή αντιστρέφεται, μέχρι το σημείο όπου η πλαστιμότητα για δεδομένα πάχη σκυροδέματος έχει μεγαλύτερη τιμή για χάλυβες χαμηλότερης ποιότητας.



Σχήμα 4-23: Διάγραμμα πλασιμότητας M_{pl} - πάχους σκυροδέματος t_c για διάφορες ποιότητες χάλυβα. Εξωτερική ακτίνα $R_4=2m$, πάχος χάλυβα $t_f=10mm$ και σκυρόδεμα C30/37.

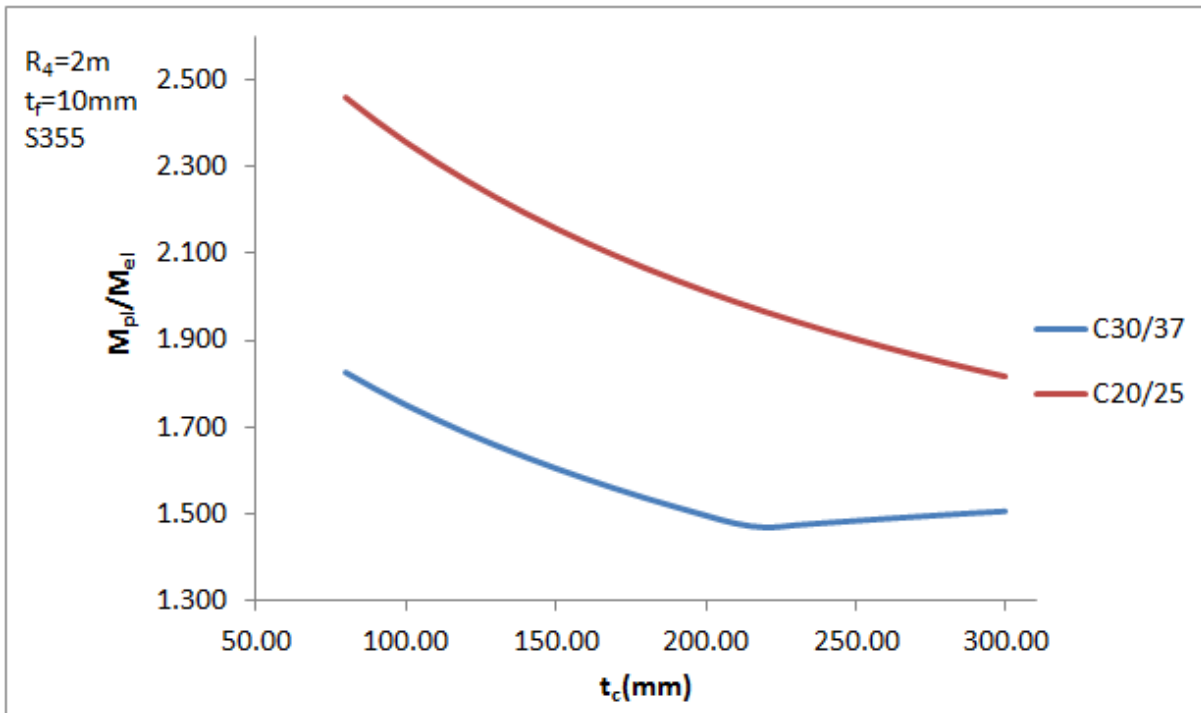
4.5.2 Πλασιμότητα-ποιότητα σκυροδέματος

Όπως και στις περιπτώσεις της ροπής πρώτης και πλήρους πλαστικοποίησης έτσι και σε αυτήν της πλασιμότητας η τελευταία επηρεάζεται από την ποιότητα του σκυροδέματος από το οποίο αποτελείται ο πυρήνας της διατομής sandwich. Εξετάστηκαν δύο ποιότητες σκυροδέματος, η ποιότητα C30/37 και η C20/25 για χάλυβα S355. Η συμπεριφορά της διατομής με σκυρόδεμα C30/37 παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα ενώ για τη διατομή σκυροδέματος C20/25 παρατίθεται το ακόλουθο Σχήμα 4-24.



Σχήμα 4-24: Διάγραμμα πλασιμότητας M_{pl} - πάχους σκυροδέματος t_c για διάφορες τιμές πάχους χάλυβα t_f . Εξωτερική ακτίνα $R_4=2m$, χάλυβας S355 και σκυρόδεμα C20/25.

Στην περίπτωση αυτή και για τις τιμές πάχους σκυροδέματος που επιλέχθηκαν, όλες οι καμπύλες, πλην εκείνης που αντιστοιχεί σε πάχος χάλυβα 5mm, βρίσκονται ακόμη στο φθίνοντα κλάδο και δεν έχουν παρουσιάσει σημείο καμπής. Εδώ, για αύξηση του πάχους του σκυροδέματος και για δεδομένο πάχος χάλυβα υπάρχει σταδιακή μείωση της πλαστιμότητας της διατομής. Η πλαστιμότητα για τα δεδομένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές στην περίπτωση του σκυροδέματος C20/25 που έχει μικρότερο όριο διαρροής, $f_{yc}=20\text{MPa}$, σε σχέση με το σκυρόδεμα C30/37 που έχει όριο διαρροής $f_{yc}=30\text{MPa}$. Το γεγονός αυτό παρουσιάζεται μέσω του Σχήματος 4-25.



Σχήμα 4-25: Διάγραμμα πλαστιμότητας M_{pl} -πάχους σκυροδέματος t_c για διάφορες ποιότητες σκυροδέματος. Εξωτερική ακτίνα $R_4=2\text{m}$, πάχος χάλυβα $t_f=10\text{mm}$ και χάλυβας S355.

5 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η περιγραφή της συμπεριφοράς μιας σύνθετης κυλινδρικής διατομής ανεμογεννήτριας, τύπου sandwich, η οποία υπόκειται σε μια σειρά φορτίσεων, καθώς επίσης και η παραμετρική διερεύνησή της.

Αρχικά έγινε βιβλιογραφική ανασκόπηση, στην οποία παρουσιάστηκε μια ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη του τομέα αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας και καταγράφησαν οι ενεργειακές απαιτήσεις των προηγούμενων δεκαετιών, οι σημερινές ανάγκες για ενέργεια και οι μελλοντικές προσδοκίες που αφορούν την αιολική ενέργεια και την παραγωγή της. Ακολούθως, περιγράφηκε η κατασκευή, η δομή και η λειτουργία των επιμέρους μελών μιας τυπικής ανεμογεννήτριας. Στη συνέχεια περιγράφηκαν τα διάφορα στάδια που αποτελούν τον κύκλο ζωής μιας κατασκευής όπως οι ανεμογεννήτριες. Τέλος, έγινε περιγραφή της μεθοδολογίας σχεδιασμού των ανεμογεννητριών και του κανονιστικού πλαισίου που περιβάλλει την κατασκευή αλλά και τη λειτουργία τους.

Στη συνέχεια, έγινε παρουσίαση των αναγκών και των προβλημάτων που αφορούν την κατασκευή των συμβατικών φορέων των ανεμογεννητριών. Στα πλαίσια αυτά τονίστηκε η ανάγκη για εύρεση εναλλακτικής λύσης όσον αφορά τον πυλώνα μιας τέτοιας κατασκευής. Αξιολογήθηκαν διαφορετικές εναλλακτικές, οι οποίες περιελάμβαναν διαφορετικούς συνδυασμούς υλικών και δομών, καταλήγοντας στην αξιολόγηση της πρότασης της χρήσης μιας σύνθετης διατομής τύπου sandwich, η οποία αποτελείται από έναν δύσκαμπτο πυρήνα και δύο ελάσματα που τον περικλείουν. Παρουσιάστηκε η δομή της διατομής αυτής, ενώ έγινε βιβλιογραφική περιγραφή των υλικών που δύνανται να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκαν οι μορφές αστοχίας μιας διατομής sandwich, οι τρόποι υπολογισμού της φέρουσας ικανότητάς της, καθώς επίσης και η επιρροή των διάφορων ατελειών σε αυτήν.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η αναλυτική προσέγγιση της συμπεριφοράς μιας κυκλικής διατομής sandwich που αποτελείται από χαλύβδινα ελάσματα και πυρήνα από σκυρόδεμα. Περιγράφηκαν οι εξισώσεις που διέπουν τη διατομή και εκφράζουν την εντατική της κατάσταση, όταν αυτή υπόκειται σε αξονική καταπόνηση. Τονίστηκαν ακόμη, οι διαφορές στην περίπτωση του εφελκυσμού και της θλίψης. Έπειτα, έγινε μια προσπάθεια περιγραφής της συμπεριφοράς της διατομής στα πλαίσια του καθεστώτος μονοαξονικής κάμψης. Για την καλύτερη εποπτεία της, η διατομή χωρίστηκε σε τομείς, ανάλογα με το υλικό τους και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εκάστοτε σταθμών της, ενώ εξετάστηκε χωριστά για τον ελαστικό και για τον πλαστικό κλάδο της παραμόρφωσης των υλικών της. Με αυτόν τον τρόπο διατυπώθηκε η μεθοδολογία υπολογισμού του ουδέτερου άξονα της διατομής

από την εξίσωση ισορροπίας των εφελκυστικών και θλιπτικών δυνάμεων ως προς αυτόν. Ακόμη, υπολογίστηκε αναλυτικά ο τρόπος εύρεσης της ροπής που αναπτύσσεται για κάθε επίπεδο φόρτισης. Προσδιορίστηκε με τη σειρά της η μεθοδολογία υπολογισμού της ελαστικής και της πλαστικής ροπής αντοχής μιας κυκλικής διατομής sandwich, η οποία υπόκειται σε καθαρή κάμψη. Τα αποτελέσματα της αναλυτικής διερεύνησης συγκρίθηκαν με τη βοήθεια αριθμητικού παραδείγματος με αυτά ενός προσομοιώματος στο πρόγραμμα *myBiaxial*, όπου με την κατασκευή διαγραμμάτων ροπών καμπυλοτήτων ελέγχθηκε η εγκυρότητά τους.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε μια σειρά παραμετρικών αναλύσεων με τη χρήση του προγράμματος *Mathematica*, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα της αναλυτικής λύσης που προτάθηκε στο τρίτο κεφάλαιο. Παρουσιάστηκε η επιρροή των υλικών και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διατομής στην τιμή της ελαστικής ροπής αντοχής της, καθώς επίσης και η επίδρασή τους στην τιμή της ισοδύναμης δυσκαμψίας της διατομής. Ακόμη έγινε περιγραφή του τρόπου που η μεταβολή των χαρακτηριστικών αυτών επηρεάζει το μέγεθος της ροπής πλήρους πλαστικοποίησης, με τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης να εμφανίζονται σε μια σειρά διαγραμμάτων. Αμέσως μετά ακολούθησε διερεύνηση της επιρροής των διάφορων χαρακτηριστικών των δομικών στοιχείων μιας διατομής sandwich στην πλαστιμότητα της διατομής, απ' όπου εξήχθη μια σειρά συμπερασμάτων, ενώ παρουσιάστηκαν βιβλιογραφικά στοιχεία που αφορούν το βέλτιστο σχεδιασμό της εξετασθείσας διατομής.

5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη μελέτη της βιβλιογραφίας προέκυψαν σημαντικά δεδομένα και συμπεράσματα, όσον αφορά τις ενεργειακές ανάγκες και τις απαιτήσεις των σύγχρονων κοινωνιών. Τονίστηκε η ανάγκη για εύρεση καινοτόμων λύσεων που θα δώσουν τη δυνατότητα κάλυψης των μεγάλων απαιτήσεων παραγωγής ενέργειας. Οι αυξημένες αντοχές και τα πλεονεκτήματα, όσον αφορά τη δυσκαμψία και την αντοχή μιας σύνθετης διατομής τύπου sandwich, την κατέστησαν αξιόλογη πρόταση προς μελέτη.

Η αναλυτική προσέγγιση της συμπεριφοράς μιας τέτοιας διατομής ανέδειξε τους τρόπους με τους οποίους την επηρεάζουν τα διάφορα χαρακτηριστικά της. Πιο συγκεκριμένα, προέκυψε το συμπέρασμα πως η τιμή της αξονικής δύναμης που αναπτύσσεται σε μια διατομή σαν αυτήν που εξετάζεται, εξαρτάται από τις διαμέτρους των ομόκεντρων κύκλων που απαρτίζουν τη διατομή και φυσικά από την τιμή της αξονικής παραμόρφωσής της. Ακόμη πιο ενδιαφέρον είναι το γεγονός πως η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στη διατομή διαφέρει στις περιπτώσεις της θλίψης και του εφελκυσμού, καθώς η διατομή sandwich αποτελείται από δύο διαφορετικής φύσεως υλικά και πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση που εξετάστηκε, από χαλύβδινα ελάσματα και πυρήνα από σκυρόδεμα. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν εντελώς διαφορετική συμπεριφορά σε θλίψη και σε εφελκυσμό, γεγονός που αντικατοπτρίζεται στις τιμές των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στο σύνολο της διατομής.

Η μελέτη της καμπτικής καταπόνησης μιας διατομής sandwich έφερε στην επιφάνεια την ανάγκη για προσεκτική προσέγγιση της συμπεριφοράς ενός σύνθετου κυκλικού κελύφους. Οι εξισώσεις που διέπουν την εκάστοτε φόρτιση του κελύφους φάνηκε πως διαφέρουν μεταξύ τους, λόγω της φύσης της διατομής. Ο ουδέτερος άξονας δεν ταυτίζεται με το κέντρο βάρους της διατομής, παρότι εκείνη είναι συμμετρική. Αυτό συμβαίνει καθώς θα πρέπει να εξισορροπείται η κατανομή των εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων εκατέρωθεν του ουδέτερου άξονα, που στην προκειμένη περίπτωση δε γίνεται στην περιοχή του κέντρου της διατομής. Εξαιτίας της μεταβολής του ουδέτερου άξονα κρίνεται απαραίτητος ο κατακερματισμός της διατομής σε τομείς προκειμένου να εξεταστεί η κατανομή των τάσεων ανάλογα με τη θέση του ουδέτερου άξονα κάθε φορά. Οι εξισώσεις που αφορούν τη ροπή που αναπτύσσεται κάθε φορά χωρίζονται σε αυτές που αφορούν την ελαστική ροπή, όπου λαμβάνει χώρα η πρώτη διαρροή στην πλέον ακραία ίνα της διατομής, σε αυτές που οδηγούν στον υπολογισμό των ενδιάμεσων καταστάσεων φόρτισης της διατομής, σε αυτές που δίνουν την πλήρη πλαστικοποίηση της

διατομής καθώς και στις εξισώσεις που προσδιορίζουν τη θέση του ουδέτερου άξονα για κάθε μια από τις περιπτώσεις φόρτισης. Επιπλέον, η σύγκριση των αποτελεσμάτων της αναλυτικής προσέγγισης, μέσω ενός διαγράμματος ροπών-καμπυλοτήτων για μια δεδομένη διατομή, με αυτά του προγράμματος myBiaxial, οδηγούν στο συμπέρασμα της εγκυρότητας της αναλυτικής λύσης στην ελαστική περιοχή καθώς και του τρόπου προσέγγισης της ροπής πλήρους πλαστικοποίησης. Η αδυναμία εύρεσης της τιμής του ουδέτερου άξονα στην οποία να συγκλίνει η μέθοδος που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα Mathematica, για μια σειρά ενδιάμεσων φορτίσεων, οδηγεί στο συμπέρασμα για ανάγκη επαναπροσδιορισμού της προγραμματιστικής περιγραφής του προβλήματος.

Η παραμετρική διερεύνηση της καμπτικής καταπόνησης της κυκλικής διατομής sandwich οδήγησε σε μια σειρά σημαντικών συμπερασμάτων, τα οποία αφορούν την ελαστική και την πλαστική ροπή αντοχής της διατομής καθώς και την πλαστιμότητά της. Σε πρώτη φάση έγινε περιγραφή του τρόπου μεταβολής της τιμής της ελαστικής ροπής αντοχής για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις χάλυβα, με σταθερά πάχη χαλύβδινων ελασμάτων και σταθερή ποιότητα σκυροδέματος, απ' όπου προέκυψε πως σε ελάσματα με χάλυβα χαμηλής ποιότητας, και πιο συγκεκριμένα για χάλυβα S235, για αύξηση του πάχους του σκυροδέματος παρατηρείται ταυτόχρονη και συνεχής μείωση της τιμής της ελαστικής ροπής. Από την άλλη μεριά, για διατομές με ελάσματα από χάλυβα ποιότητας S275 και S355, η αύξηση της τιμής του πάχους του σκυροδέματος οδηγεί σε μία αρχική αύξηση της ελαστικής ροπής, μέχρι ενός σημείου καμψής, από το οποίο και μετά κάθε αύξηση στο πάχος του σκυροδέματος συνοδεύεται με μείωση της ελαστικής ροπής. Παράλληλα, γίνεται αντιληπτό πως για δεδομένο πάχος και ποιότητα σκυροδέματος αλλά και για σταθερή ποιότητα χάλυβα, υπάρχει αύξηση της τιμής της ελαστικής ροπής αντοχής της διατομής που υπόκειται σε καθαρή κάμψη, καθώς αυξάνεται το πάχος των μεταλλικών ελασμάτων που χρησιμοποιούνται σε αυτήν. Αντίστοιχα, όταν εξετάστηκαν δύο διαφορετικές ποιότητες σκυροδέματος προκειμένου να γίνει αντιληπτή η επιρροή τους στην ελαστική ροπή της διατομής, προέκυψε πως για σκυρόδεμα χαμηλότερης ποιότητας, σημείο καμψής εμφανίζει μόνο η διατομή με τη μικρότερη από τις τιμές πάχους ελάσματος που εξετάστηκαν, η οποία είναι 5mm, ενώ για όλες τις υπόλοιπες διατομές η αύξηση της τιμής της ελαστικής ροπής αντοχής είναι παράλληλη με την αύξηση του πάχους του σκυροδέματος. Ακόμη, προέκυψε πως η τιμή της ελαστικής ροπής αυξάνεται με ταχύ ρυθμό για σταθερή ποιότητα χάλυβα και σταθερή γεωμετρία διατομής καθώς αυξάνεται η ποιότητα του σκυροδέματος μέχρι ενός σημείου, πέρα από το οποίο η αύξηση αυτή μειώνεται σε τέτοιο βαθμό ώστε να θεωρείται μηδενική. Τέλος, επισημαίνεται η συμβολή του πάχους του χαλύβδινου ελάσματος στην ελαστική ροπή της διατομής, καθώς η αύξησή του από 5mm σε 15mm οδήγησε σε αύξηση της ελαστικής ροπής κατά 56.5%.

Όσον αφορά την ισοδύναμη δυσκαμψία της διατομής στον ελαστικό κλάδο του διαγράμματος ροπών-καμπυλοτήτων, το οποίο περιγράφει την εξεταζόμενη διατομή sandwich, γίνεται εμφανής η συμβολή τόσο του πάχους του σκυροδέματος όσο και του πάχους των χαλύβδινων ελασμάτων στην αύξηση της τιμής αυτής. Η δυσκαμψία συμπεραίνεται πως παραμένει ίδια για διαφορετικές ποιότητες χάλυβα, ενώ μειώνεται με τη μείωση της αντίστοιχης ποιότητας σκυροδέματος.

Στα πλαίσια της παραμετρικής διερεύνησης της συμπεριφοράς ενός κελύφους sandwich κυκλικής διατομής, παρατηρείται πως η ροπή πλήρους πλαστικοποίησης αυξάνεται όσο αυξάνεται το πάχος των ελασμάτων, υπό την προϋπόθεση ότι παραμένει σταθερό το πάχος του σκυροδέματος και οι ποιότητες των υλικών. Από την άλλη μεριά, με την αύξηση του πάχους του σκυροδέματος και κρατώντας σταθερό το πάχος των χαλύβδινων ελασμάτων και τις ποιότητες των υλικών, παρατηρείται πως ενώ η ροπή πλήρους πλαστικοποίησης αρχικά αυξάνεται, υπάρχει ένα σημείο όπου η καμπύλη παρουσιάζει μέγιστη τιμή, πέρα από την οποία υπάρχει μείωση της τιμής της ροπής. Επιπλέον, συμπεραίνεται πως η αύξηση τόσο της ποιότητας του χάλυβα όσο και της ποιότητας του σκυροδέματος, επιφέρουν την επιθυμητή αύξηση στην ροπή πλήρους πλαστικοποίησης. Ακόμα, φαίνεται από τα διάφορα διαγράμματα που δημιουργήθηκαν πως καθώς αυξάνεται το πάχος του σκυροδέματος, παράλληλα μειώνεται η πλαστιμότητα, ενώ υπάρχει μια τιμή πάχους σκυροδέματος που σηματοδοτεί το σημείο

πέρα από το οποίο κάθε αύξηση του πάχους σκυροδέματος οδηγεί σε αύξηση της πλαστιμότητας. Οι μεγαλύτερες τιμές πλαστιμότητας παρατηρούνται για τις δύο εξεταζόμενες ποιότητες σκυροδέματος στις χαμηλές τιμές πάχους σκυροδέματος. Επιπρόσθετα, συμπεραίνεται πως η ελάχιστη τιμή της πλαστιμότητας εμφανίζεται, για τα ελάσματα με χάλυβα S275, για μικρότερες τιμές πάχους σκυροδέματος σε σχέση με την περίπτωση όπου ο χάλυβας είχε ποιότητα S355. Επιπλέον, παρατηρείται πως για μικρές τιμές πάχους σκυροδέματος εμφανίζεται μεγαλύτερη πλαστιμότητα για χάλυβες με μεγαλύτερη τάση διαρροής. Αντίθετα, όσο μεγαλώνει το πάχος του σκυροδέματος η κατάσταση αυτή αντιστρέφεται, μέχρι το σημείο όπου η πλαστιμότητα για δεδομένα πάχη σκυροδέματος έχει μεγαλύτερη τιμή για χάλυβες χαμηλότερης ποιότητας. Παράλληλα, προέκυψε πως η πλαστιμότητα παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές στην περίπτωση σκυροδέματος χαμηλότερης ποιότητας, εδώ C20/25, σε σχέση με σκυρόδεμα C30/37. Τέλος, η βιβλιογραφία οδήγησε στο συμπέρασμα της ύπαρξης μεθόδου βελτιστοποίησης της τιμής του αξονικού θλιπτικού φορτίου που ασκείται στη διατομή για διάφορες μεταβλητές.

5.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Η δημιουργία μιας διατομής ικανής να προσφέρει υψηλές αποδόσεις όσον αφορά τη δυσκαμψία και τη ροπή αντοχής της, είναι ζήτημα που απασχολεί διαρκώς τους ερευνητές, ειδικά στα πλαίσια μελέτης απαιτητικών περιπτώσεων, όπως αυτή της διατομής ενός πυλώνα ανεμογεννήτριας. Για την ακριβέστερη μελέτη της συμπεριφοράς και των δυνατοτήτων μιας τέτοιας διατομής απαιτείται λεπτομερής διερεύνηση των υλικών που τη συνθέτουν. Πιο συγκεκριμένα, για μια διατομή sandwich που αποτελείται από στρώματα διαφορετικών υλικών με διαφορετικά πάχη το καθένα, έχουν ήδη αναζητηθεί υλικά για την κατασκευή της, όπως επίσης και οι διάφοροι πιθανοί συνδυασμοί τους. Υπάρχει όμως ένα μεγάλο εύρος υλικών που βρίσκονται στη διάθεση των ερευνητών, τα οποία μπορούν να προσδώσουν στη διατομή τα επιθυμητά χαρακτηριστικά, αποτελώντας ένα πεδίο επιστημονικής μελέτης. Πέραν τούτου, οι διαστάσεις της διατομής, τα πάχη των υλικών και οι αναλογίες τους είναι ένα ζητούμενο που θα μπορούσε να ενισχύσει την προσπάθεια προς την αναζήτηση μιας όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικής διατομής.

Η επαλήθευση των αναλυτικών εξισώσεων που περιγράφουν τη συμπεριφορά της διατομής υπό θλίψη και κάμψη με τη βοήθεια αριθμητικών μοντέλων, κρίνεται επίσης απαραίτητη. Η προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία αποτελεί έναν αποτελεσματικό τρόπο μελέτης της λειτουργίας ενός φορέα που αποτελείται από μια σύνθετη διατομή τύπου sandwich. Η προσομοίωση των χαλύβδινων ελασμάτων με στοιχεία κελύφους (shell elements) και του πυρήνα με συμπαγή πεπερασμένα στοιχεία (3D-Solid elements) θα μπορούσε να δώσει μια ρεαλιστική απεικόνιση του μοντέλου. Ακόμη, σε μια προσομοίωση με την βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων, ιδιαίτερη προσοχή κρίνεται απαραίτητο να δοθεί στα υλικά που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν και στους νόμους που διέπουν τη συμπεριφορά τους. Επιπλέον, η προσομοίωση μιας κυκλικής διατομής τύπου sandwich με τη χρήση στοιχείων επαφής (contact elements) θα αποτελούσε μια αποτελεσματική μέθοδο, η οποία θα έδινε τη δυνατότητα στο σχεδιαστικό μοντέλο να αντικατοπτρίζει σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο συνεργασίας των χρησιμοποιούμενων υλικών.

Καθώς ο πυλώνας μιας ανεμογεννήτριας πλήττεται από ένα σύνολο φορτίων, όχι ανεξάρτητων μεταξύ τους, θα ήταν απαραίτητη η προσέγγιση όλων των δυνατών αυτών φορτίσεων προκειμένου να περιγραφεί με ρεαλιστικό τρόπο η λειτουργία ενός τέτοιου φορέα. Αρκετές δυνατότητες για έρευνα προσδίδει ο τομέας της διερεύνησης της συμπεριφοράς μιας κυκλικής διατομής sandwich με σκοπό την κατάρθρωση των αναλυτικών εξισώσεων που την περιγράφουν, όταν αυτή υπόκειται σε διάφορες φορτίσεις, όπως η στρέψη, η διάτμηση, η κόπωση και τα δυναμικά φορτία, καθώς και ο συνδυασμός αυτών των μεγεθών, τόσο μεταξύ τους, όσο και με αξονικό ή θλιπτικό φορτίο. Ακόμη, η μελέτη των

τρόπων αστοχίας ενός κελύφους sandwich και της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης δύναται να αποτελέσει έναν από τους κύριους στόχους στα πλαίσια της μελέτης μιας τέτοιας διατομής.

Τέλος, στα πλαίσια της διερεύνησης του τρόπου με τον οποίο κάθε παράγοντας επηρεάζει τη λειτουργία και την αποτελεσματικότητα μιας διατομής sandwich, θα ήταν χρήσιμη μελλοντικά μια περαιτέρω παραμετρική ανάλυση.

