

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΚΟΠΩΣΗ ΣΕ ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΑΠΟ
ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ**



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΣΙΑΤΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΒΒΑΔΙΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΕΡΓ. ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2009

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iv
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά.....	1
1.2 Συμπεριφορά συνθέτων υλικών σε δυναμική καταπόνηση	3
1.3 Υπάρχουσες μέθοδοι πρόβλεψης της διάρκειας ζωής σε κόπωση.....	5
1.4 Εμπειρικές θεωρίες.....	7
1.5 Θεωρίες βασιζόμενες στην μείωση εναπομείνουσας αντοχής.....	8
1.6 Θεωρίες βασιζόμενες στην μείωση της δυσκαμψίας	9
1.7 Θεωρίες βασιζόμενες στους πραγματικούς μηχανισμούς αστοχίας του υλικού	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ	11
2.1 Διαθέσιμα κριτήρια	11
2.2 Κριτήρια των Z.Hashin και A.Rotem	12
2.3 Μελέτη των Awerbuch και Hahn.....	16
2.4 Κριτήριο των Z.Fawaz και F.Ellyin	17
2.5 Μελέτη των M.Owen και J.Griffiths.....	21
2.6 Μελέτη T.Fujii και F.Lin	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	24
3.1 Αστοχία ινώδων σύνθετων υλικών υπό συνθήκες κόπωσης.....	24
3.2 Κόπωση υπό φορτίο παράλληλα στις ίνες (on-axis fatigue).....	25
3.3 Κόπωση υπό φορτίο σε τυχαία διεύθυνση ως προς τις ίνες (off-axis fatigue).....	28
3.4 Μηχανισμοί αστοχίας σε τυχαία πολύστρωτη πλάκα	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	33
4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ Α/Γ	33
4.2 ΦΑΣΜΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ	37
5.1 Προτεινόμενη διαδικασία-μεθοδολογία.....	37
5.2 Υπολογισμός των φαινόμενων τεχνικών ελαστικών σταθερών.....	40
5.3 Καθορισμός του κεντροβαρικού συστήματος συντεταγμένων.....	42
5.4 Καθορισμός του τασικού πεδίου.....	44
5.4.1 Υπολογισμός ορθών τάσεων	45
5.4.2 Υπολογισμός διατμητικών τάσεων	47
5.4.3 Διατμητικές τάσεις λόγω στρέψης	48
5.4.4 Διατμητικές τάσεις λόγω κάμψης	51
5.5 Καθορισμός χρονοσειρών τάσεων	56
5.6 Αναγωγή σύνθετου ιστορικού φόρτισης σε πλήρεις κύκλους (Rainflow counting).....	58
5.7 Ποσοτική επίδραση της μέσης τάσης στο πλάτος τάσης	60
5.8 Καθορισμός συντελεστών ασφαλείας.....	64
5.9 Νόμος συσσώρευσης αστοχίας των Palmgren-Miner	66
5.10 Ισοδύναμη τάση ενός κύκλου	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Συμπεράσματα	70
<u>Βιβλιογραφία.....</u>	<u>72</u>

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί τη Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας και αναφέρεται στην μεθοδολογία υπολογισμού Κόπωσης σε Πτερύγια Ανεμογεννήτριας από Σύνθετα Υλικά. Η τάση της τεχνολογίας και της βιομηχανίας τα τελευταία χρόνια είναι προσανατολισμένα στην αντικατάσταση των συμβατικών μετάλλων και των κραμμάτων τους, από σύγχρονα σύνθετα υλικά με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και χαμηλότερο βάρος.

Αρχικά παρουσιάζεται μια εισαγωγή στα σύνθετα υλικά και η συμπεριφορά τους σε δυναμική καταπόνηση. Στην συνέχεια περιγράφονται τα διαθέσιμα κριτήρια αστοχίας και οι διάφοροι μηχανισμοί αστοχίας. Ακολουθεί μια σύντομη μεθοδολογία σχεδιασμού και λειτουργικών χαρακτηριστικών των πτερυγίων. Τέλος πραγματοποιείται λεπτομερής αναφορά της εντατικής κατάστασης σε κόπωση και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα.

Ευχαριστούμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γεώργιο Καββαδία Εργαστηριακό Συνεργάτη του Τμήματος Μηχανολογίας, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που προσέφερε για την ολοκλήρωση της παρούσας Εργασίας.

Σιάτος Γεώργιος
Σεπτέμβριος 2009

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συνεχής και όλο αυξανόμενη χρήση των υπαρχόντων συμβατικών ενεργειακών αποθεμάτων και η ταυτόχρονη εξάντλησή τους με ταχύτατους ρυθμούς έχει σαν αποτέλεσμα να παρατηρείται παγκοσμίως μια έντονη κινητικότητα στον τομέα εκμετάλλευσης και αξιοποίησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) . Στα πλαίσια της κινητικότητας επιχειρείται και στην Ελλάδα μια προσπάθεια ανάπτυξης των ΑΠΕ, σε εκμετάλλευση της ηλιακής και αιολικής ενέργειας κυρίως, σε περιοχές όπου όπου το ενεργειακό ισοζύγιο είναι ιδιαίτερα αναπτυγμένο όπως είναι π.χ. τα νησιά του Αιγαίου.

Η αξιοποίηση του υψηλού αιολικού δυναμικού που αποδεδειγμένα υπάρχει στην Ελλάδα δεν έχει επιτευχθεί ακόμα στον βαθμό που θα έπρεπε και αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο ότι η ανάπτυξη στηρίζεται στην γνώση και την εμπειρία άλλων χωρών, ιδίως της Βόρειας Ευρώπης, π.χ. Ολλανδία και Δανία. Στις χώρες αυτές οι εγκαταστάσεις των αιολικών πάρκων έχουν γίνει κατά το πλείστον σε περιοχές όπου παρουσιάζουν ήπια αιολικά δυναμικά. Αυτό αμέσως σημαίνει ότι τα αναπτυσσόμενα φορτία κόπωσης στα πτερύγια των ανεμογεννητριών (Α/Γ) είναι σχετικώς ασθενέστερα. Σε αντίθεση όμως με την Β. Ευρώπη, στην Ελλάδα οι γεωγραφικές θέσεις υψηλού αιολικού δυναμικού βρίσκονται σε περιοχές σύνθετης τοπογραφίας όπου υπάρχει παρουσία ισχυρών ανέμων. Παρ'όλα αυτά , πραγματοποιήθηκε μια προσπάθεια χρησιμοποίησης και στον Ελλαδικό χώρο ανεμογεννητριών που κατασκευάζονται σε άλλες χώρες με τις συγκεκριμένες προδιαγραφές που ισχύουν στις χώρες αυτές. Αποτέλεσμα της προσπάθειας αυτής ήταν να διαπιστωθεί αστοχία των πτερυγίων των ανεμογεννητριών σε χρονικό διάστημα πολύ πιο μικρό από αυτό που προδιαγράφεται κατά τον σχεδιασμό τους. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι πτερύγια των οποίων η διάρκεια ζωής προδιαγράφεται εξαρχής κατα τον σχεδιασμό τους σε 20

χρόνια, αστοχούν μόλις μετά από λίγους μήνες λειτουργίας. Είναι εύκολο πλέον να γίνει αντιληπτό το γιατί επιβάλλεται να αλλάξει ο τρόπος σχεδιασμού των πτερυγίων των Α/Γ οι οποίες πρόκειται να λειτουργήσουν σε περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό και έντονες εναλλαγές στην ταχύτητα του ανέμου όπου πλέον τα αναπτυσσόμενα φορτία κόπωσης είναι ασυνήθιστα μεγάλα.

Ένα πλήθος μελετών έχει δημοσιευτεί και συνεχίζει να παρουσιάζεται σχετικά με την συμπεριφορά που επιδεικνύουν τα πτερύγια ανεμογεννήτριας τα οποία υπόκεινται σε συνθήκες κόπωσης. Έχει διαπιστωθεί ύστερα από εμπειροστατομένες μελέτες ότι η τελική αστοχία των πτερυγίων τους επέρχεται λόγω των αναπτυσσομένων φορτίων κόπωσης. Από τους πρώτους κύκλους φόρτισης έχει παρατηρηθεί η παρουσία μικρορωγμών οι οποίες διαδίδονται ταχύτατα οδηγώντας το πτερύγιο σε θραύση. Έτσι μια λάθος εκτίμηση της συνολικής διάρκειας ζωής των πτερυγίων κάτω από κοπωτική καταπόνηση συνεπάγεται και ταυτόχρονα και λάθος δομικό σχεδιασμό αφού επί της ουσίας δεν επιβεβαιώνονται οι λειτουργικές προδιαγραφές για τις οποίες σχεδιάστηκε. Σε αυτό το σημείο εντοπίζεται και ένα πλέον από τα σημαντικότερα προβλήματα που καλείται να αντιμετωπίσει ο σχεδιαστής πτερυγίων Α/Γ και αφορά την ικανοποιητική πρόβλεψη της διάρκειας ζωής τους.

Σε μια προσπάθεια γενίκευσης του παραπάνω προβλήματος για δομικές κατασκευές που γίνονται από σύνθετα υλικά, ένα από τα πλέον πολύπλοκα προβλήματα που έχει να επιλύσει ο μελετητής που ασχολείται γενικότερα με τον σχεδιασμό και εφαρμογή συνθέτων υλικών είναι η ανάπτυξη και η χρησιμοποίηση ουσιώδων κριτηρίων αστοχίας με την βοήθεια των οποίων να είναι εφικτή η πρόβλεψη της διάρκειας ζωής των δομικών στοιχείων της οποίας κατασκευής η οποία κοπαίνει κάτω από εναλασσόμενα φορτία. Ξεκινώντας από τα μεταλλικά υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται από ομογενή και ισότροπη συμπεριφορά, το πρόβλημα διατύπωσης μοντέλων αστοχίας απέχει κατά πολύ από την λύση του. Είναι λοιπόν αναπόφευκτο να αναμένεται ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα γίνεται πιο πολύπλοκο και δύσκολο όταν

γίνεται αναφορά σε ινώδη σύνθετα υλικά τα οποία σε αντίθεση με τα μέταλλα είναι ανομοιογενή και ανισότροπα. Αυτή η αδυναμία πρόβλεψης της συμπεριφοράς ενός δομικού κατασκευαστικού στοιχείου που καταπονείται από χρονικά μεταβαλλόμενα φορτία έχει αποτέλεσμα τη χρησιμοποίηση από τον μελετητή μεγάλων συντελεστών ασφαλείας που αφορούν την προστασία της κατασκευής από στατική φόρτιση, από ευστάθεια και από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, οδηγεί σε υπερδιαστασιολόγηση του επιθυμητού κατασκευαστικού στοιχείου. Άμεση συνέπεια της μεθοδολογίας αυτής είναι η ανεπιθύμητη αύξηση του βάρους και του κόστους της κατασκευής.

Για τους λόγους αυτούς καθώς και για ένα πλήθος άλλων αιτιών έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση και προσοχή στο συγκεκριμένο αντικείμενο. Μια σειρά από μελέτες έχουν δημοσιευτεί σε ανά τακτά χρονικά διαστήματα προσπαθώντας να ερμηνεύσουν και να προλέψουν ταυτόχρονα τη συμπεριφορά που επιδουκνούν τα ινώδη σύνθετα υλικά υπό φορτία κόπωσης. Σε αυτό επικέντρώνεται και η παρούσα μελέτη όπου επιχειρείται να δοθεί μια μεθοδολογία υπολογισμού για τα πτερύγια Α/Γ που απαρτίζονται από ινώδη σύνθετα υλικά που υπόκεινται σε κόπωση, τόσο μονοαξονική όσο και πολυαξονική με την χρήση κάποιων κριτηρίων αστοχίας που υπάρχουν στην διεθνή βιβλιογραφία και για τα οποία γίνεται μια εκτενής καταγραφή τους με την ταυτόχρονη αναλυτική τους παρουσίαση. Επίσης πραγματοποιείται μια εισαγωγή στην φύση των συνθέτων υλικών και σε μεθόδους πρόβλεψης της διάρκειας ζωής τους, καθώς και μια ανάλυση για την εκτίμηση των φερόμενων φορτίων στα πτερύγια. Συνάμα παρατίθενται, όσο γίνεται πληρέστερα, και οι μηχανισμοί αστοχίας που οδηγούν θραύση τα ινώδη σύνθετα υλικά που αποτελούν ίσως το πιο σημαντικό τμήμα της εργασίας, αφού η ορθή κατανόησή τους βοηθά κατά πολύ στην σωστή πρόβλεψη της δομικής συμπεριφοράς των πτερυγίων Α/Γ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Στην σύγχρονη εποχή όλο και πιο επιτακτικότερη γίνεται η ανάγκη χρησιμοποίησης σύνθετων υλικών τόσο στην κατασκευή προηγμένων μηχανολογικών κατασκευών. Αυτή η ανάγκη οδηγεί στην σταδιακή αντικατάσταση των μεταλλικών υλικών από τέτοιου είδους σύνθετα υλικά. Σημειώνεται βέβαια ότι ο άνθρωπος, εν αγνοία του, χρησιμοποίησε σύνθετα υλικά τα οποία έπαιρνε έτοιμα από την φύση, όπως ήταν το άχυρο και η λάσπη για την κατασκευή σπιτιών, χωρία να είναι σε θέση να εξηγήσει την καλύτερη ποιότητα των υλικών αυτών έναντι των απλών.

Συνεπώς εύκολα διαπιστώνεται ότι ο σωστός μελετητής και μηχανικός θα πρέπει να είναι γνώστης της μηχανικής συμπεριφοράς που παρουσιάζουν τα σύνθετα υλικά τα οποία υπόκεινται σε σύνθετες καταπονήσεις, ούτως ώστε να είναι σε θέση ανά πάσα στιγμή να επιλέξει την καταλληλότερη λύση από άποψη υλικού για την οποιαδήποτε μηχανολογική εφαρμογή του ζητηθεί.

Πρώτα από όλα, κρίνεται απαραίτητο να οριστεί η ακριβής έννοια του σύνθετου υλικού. Ως πρώτη σκέψη θα μπορούσε να υποθεί ότι η λέξη σύνθετο υποδηλώνει τουλάχιστον δύο υλικά που ενώνονται τόσο σε μακροσκοπική όσο και σε μικροσκοπική κλίμακα για την δημιουργία ενός νέου και καλύτερου από άποψη ιδιοτήτων υλικού. Από τα παραπάνω είναι εύκολο να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι μεγάλο πλεονέκτημα των συνθέτων υλικών αποτελεί το γεγονός ότι επιδεικνύουν τις καλύτερες δυνατές ιδιότητες των επιμέρους συστατικών τους και συχνά και μερικές νέες που κανένα από τα συστατικά τους δεν προκατείχε. Κάποιες από τις

ιδιότητες που μπορούν να βελτιωθούν ή και τα πρωτοεμφανιστούν στα σύνθετα υλικά σε σχέση με τα μεταλλικά υλικά είναι:

- Ø Η αντοχή σε θραύση
- Ø Η δυσκαμψία
- Ø Η διάρκεια ζωής σε κόπωση
- Ø Η αντίσταση σε διάβρωση
- Ø Το βάρος
- Ø Η θερμική μόνωση
- Ø Η θερμική αγωγιμότητα
- Ø Η θερμική μόνωση

Για θέμα μεγαλύτερης ακρίβειας θα μπορούσε να ειπωθεί ότι ο κύριος λόγος δημιουργίας και ανάπτυξης των σύνθετων υλικών ήταν και η επίτευξη πολύ καλών ειδικών ιδιοτήτων που σχετίζονται με τις μηχανικές ιδιότητες και είναι: ο λόγος δυσκαμψίας ανά μονάδα βάρους, η αντοχή σε θραύση ανά μονάδα βάρους κλπ.

Η παραπάνω παρατήρηση γίνεται αμέσως κατανοητή εάν αναλογιστεί κανείς ότι αρχικά η αναγκαιότητα της έρευνας και της ανάπτυξης τέτοιων προηγμένων υλικών προήλθε από την ανάγκη της αεροναυπηγικής επιστήμης όπου οι ελαφρές κατασκευές είναι ζωτικής σημασίας στον σχεδιασμό αεροσκαφών. Γενικότερα, τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται κυρίως σε ευαίσθητες από άποψη βάρους εφαρμογές όπως αεροπλάνα, διαστημόπλοια, πτερύγια ελικοπτέρων και ανεμογεννητριών, ιστιοφόρα, ταχύπλοα σκάφης κτλ όπου το θέμα της ενεργειακής κατανάλωσης είναι πάρα πολύ σημαντικό.

Η ταξινόμηση των σύνθετων υλικών γίνεται αρχικά με βάση τον τύπο της ενίσχυσής του και σε γενικές γραμμές θα μπορούσε να ειπωθεί ότι υπάρχουν 3 τύποι τέτοιων υλικών:

- a) Ινώδη Σ.Υ. που αποτελούνται από ίνες σε μητρωικό υλικό,
- b) Κοκκώδη Σ.Υ. που αποτελούνται από κόκκους σε μητρωικό υλικό
- c) Σύνθετη δομή των δύο παραπάνω τύπων

Ο παραπάνω διαχωρισμός είναι πολύ γενικός διότι θα μπορούσαν να διακριθούν και άλλοι τύποι σύνθετων υλικών λαμβάνοντας υπόψη τόσο το υλικό της ενίσχυσης όπως είναι το ανθρακόνημα, οι ίνες γυαλιού, το κέβλαρ κ.α. όσο και το υλικό της μήτρας όπως είναι οι εποξιδικές ρητίνες, ο πολυεστέρας, ο βινυλεστέρας κ.α. καθώς και επίσης με βάση των προσανατολισμών των ινών σε κάθε στρώση σε σχέση με το βασικό σύστημα αναφοράς.

Η κάθε μια εκ των 3 παραπάνω κατηγοριών είναι δυνατόν να αποτελεί είτε μια ανεξάρτητη στρώση είτε κάποιες από αυτές να αποτελούν επιμέρους στρώσεις μιας πολύστρωτης δομής. Αυτή είναι και η κατηγορία που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην πράξη, οι πολύστρωτες διατάξεις. Γίνεται η προσπάθεια δηλαδή με τον συνδυασμό στρώσεων με διαφορετικούς προσανατολισμούς της ενίσχυσης των ινών, να επιτευχθούν όσο το δυνατόν οι καλύτερες μηχανικές ιδιότητες της πολύστρωτης διάταξης για την αντίστοιχη εφαρμογή που θα χρησιμοποιηθεί.

1.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ

Με βάση την συνοπτική άποψη που διατυπώθηκε παραπάνω για το τι είναι σύνθετο υλικό, θα πραγματοποιηθεί μια προσπάθεια για να γίνει αντιληπτή η συμπεριφορά που επιδεικνύουν οι διάφορες δομικές κατασκευές, οι οποίες υπόκεινται σε διάφορων ειδών σύνθετες καταπονήσεις.

Ως γνωστόν τα δομικά στοιχεία μιας κατασκευής υπόκεινται τόσο σε στατικές όσο και σε δυναμικές φορτίσεις. Κατά κοινή ομολογία όμως μπορούν να

υποθούν δύο πράγματα. Πρώτον, ότι το φαινόμενο της δυναμικής καταπόνησης είναι πολύ πιο συχνό στην πράξη και δεύτερον λοιπ στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές η αστοχία των διαφόρων μέσων επέρχεται λόγω κόπωσης, δηλαδή λόγω επαναλαμβανόμενης φόρτισης. Λαμβάνοντας υπόψη αυτό το γεγονός, διακρίνεται ένας επιπλέον λόγος χρησιμοποίησης σύνθετων υλικών και όχι των μεταλλικών υλικών σε ένα πλήθος μηχανολογικών κατασκευών που υπόκεινται σε φόρτιση κόπωσης. Αυτός σχετίζεται με παρατηρήσεις που δείχνουν ότι κατασκευές από σύνθετα υλικά που καταπονούνται από εναλασσόμενα φορτία παρουσιάζουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Η εμπειρία έχει δείξει ότι τα υλικά που κοπαίνουν καταστρέφονται έπειτα από σύντομο χρονικό διάστημα ακόμα και αν οι τάσεις που αναπτύσσονται σε αυτά είναι κατά πολύ μικρότερες από την αντίστοιχη στατική τάση αστοχίας. Συνεπώς υπό συνθήκες εναλασσόμενης φόρτισης οι κατασκευές είναι πού πιο ευαίσθητες από ότι σε συνθήκες στατικής φόρτισης.

Από τα παραπάνω συνεπάγεται ότι εάν μπορούσε να προβλεφθεί η συμπεριφορά κάποιου υλικού υπό συνθήκες τόσο στατικής όσο και δυναμικής φόρτισης θα ήταν δυνατή η βελτιστοποίηση πλήθους δομικών στοιχείων. Ενώ λοιπόν τα σύνθετα υλικά όπως σημειώθει και παραπάνω υπερτερούν έναντι των μεταλλικών σε συνθήκες κόπωσης παρουσιάζουν ετο εξής βασικό μειονέκτημα: Επιδεικνύουν πολλούς τρόπους αστοχίας συμπεριλαμβανομένων των: αποκόλληση στρώσεων, θραύση μήτρας, θραύση ινών, αποκόλληση ίνας-μήτρας. Έτσι μία κατασκευή μπορεί να παρουσιάσει έναν από τους παραπάνω τρόπους αστοχίας ή και μια σύνθεση αυτών με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή εύκολα η πρόβλεψη της αστοχίας της κατασκευής. Στο σημείο αυτό πρέπει να προστεθεί ότι ακόμα και να μπορούσαν να προβλεφθούν οι μηχανισμοί αστοχίας των ενισχυμένων με ίνες πολύστρωτων διατάξεων θα υπήρχε το εξής πρόβλημα: Αν και στα ινώδη σύνθετα υλικά αναπτύσσεται ένα πλήθος μηχανισμών και τρόπων αστοχίας κατά

την διάρκεια της κόπωσης η εναπομείνουσα αντοχή τους δεν επηρεάζεται σημαντικά. Για παράδειγμα οι εγκάρσιες ρωγμές που εμφανίζονται σε στρώσεις τυχαίας διεύθυνσης που περιέχονται μέσα σε μια πολύστρωτη πλάκα, από τα πρώτα κίολας στάδια κάτω από φορτίο κόπωσης, δεν έχουν σημαντική επίδραση στην εναπομείνουσα αντοχή καθώς και στην δυσκαμψία της πλακός.

1.3 ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

Η ανάπτυξη μεθόδων της διάρκειας ζωής για ένα υλικό θα πρέπει να στηρίζεται στα εξής στάδια:

- Ø Πειραματική παρατήρηση της εξέλιξης συσσώρευσης αστοχίας και διατύπωση ενός κατάλληλου μέτρου συσσώρευσης αυτής της αστοχίας.
- Ø Διατύπωση ενός μοντέλου συσσώρευσης αστοχίας και πειραματικός χαρακτηρισμός των διαφόρων παραμέτρων του μοντέλου με εκτέλεση απλών πειραμάτων.
- Ø Ανάπτυξη μιας διαδικασίας αθροιστικής αστοχίας, βασιζόμενη στο μέτρο αστοχίας που ήδη έχει προταθεί όπου θα επιτρέπει την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής του υλικού κάτω από συνθήκες κόπωσης
- Ø Πειραματική επαλήθευση των προβλέψεων της διάρκειας ζωής.

Η παραπάνω διαδικασία έχει αποδειχτεί ότι δίνει πολύ καλά αποτελέσματα για μεταλλικές κατασκευές όπου το μήκος της αναπτυσσόμενης ρωγμής αποτελεί το καταλληλότερο μέτρο αστοχίας. Σε αντίθεση με τα μέταλλα, τα ινώδη σύνθετα υλικά δεν επιδεικνύουν ένα μοναδικό και ταυτόχρονα απλό μέτρο αστοχίας από τη στιγμή που η συσσώρευση αστοχίας συνίσταται από ένα πολυπλοκο συνδυασμό

τρόπων αστοχίας που περιλαμβάνει αποκόλληση στρώσεων, θραύση μήτρας, θραύση ινών, αποκόλληση ίνας-μήτρας. Ως αποτέλεσμα του γεγονότος αυτού, πλήθος μεθόδων έχουν αναπτυχθεί προς την κατεύθυνση της πρόβλεψης ζωής ινώδων σύνθετων υλικών.

Οι θεωρίες που έχουν αναπτυχθεί αναφέρονται, ως επί το πλείστον, σε συνθήκες κόπωσης υπό σταθερό εύρος τάσης. Ορίζοντας την ιδανική θεωρία περιγραφής της κόπωσης στα σύνθετα υλικά θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η θεωρία αυτή πρέπει να:

- § Βασίζεται σε ένα μέτρο αστοχίας που μοντελοποιεί ακριβώς την πειραματικώς παρατηρούμενη συσσώρευση αστοχίας στο υλικό,
- § Λαμβάνει υπόψη όλα τα επιμέρους υλικά, χαρακτηριστικά του πειράματος και τις περιβαλλοντικές παραμέτρους
- § Επιτρέπει σκριβή πρόβλεψη συμπεριφοράς σε κόπωση πολύστρωτης διάταξης στηριζόμενης σε πειραματικά δεδομένα κόπωσης επιμέρους στρώσεων,
- § Εφαρμόζεται με σχετική ευκολία και για φασματική ανάλυση φορτίων κόπωσης
- § Λαμβάνει υπόψη τη διασπορά των πειραματικών δεδομένων.

Όλες οι θεωρίες περιγραφής της συμπεριφοράς σε κόπωση που έχουν αναπτυχθεί πληρούν μόνο κάποιες από τις παραπάνω απαιτήσεις. Στην προσπάθεια διαχωρισμού των υπάρχοντων θεωριών, μπορούν να διακριθούν οι εξής τέσσερις κατηγορίες που αφορούν την κοπωτική συμπεριφορά:

1. εμπειρικές θεωρίες
2. θεωρίες βασιζόμενες στην μείωση της εναπομείνουσας αντοχής
3. θεωρίες βασιζόμενες στη μείωση της δυσκαμψίας

4. θεωρίες στηριζόμενες στους πραγματικούς μηχανισμούς αστοχίας του υλικού

Παρακάτω ακολουθεί μια σύντομη ανάλυση της κάθε θεωρίας ξεχωριστά.

1.4 ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΘΕΩΡΙΕΣ

Η ανάπτυξη εμπειρικών θεωριών βασίστηκε στις δυσκολίες που συναντώνται στην πράξη όσον αφορά την κατανόηση των μηχανισμών αστοχίας για πλήθος υλικών συμπεριλαμβανομένων και των σύνθετων υλικών. Με τη βοήθεια αυτών γίνεται δυνατός ο ορισμός της καμπύλης εφαρμοζόμενης τάσης-κύκλων φόρτισης (S-N curve) για κάθε υλικό κάτω από συνθήκες κόπωσης. Η επιλογή της συγκεκριμένης εμπειρικής θεωρίας εξαρτάται τόσο από την φύση των πειραματικών δεδομένων όσο και από την εμπειρία του μηχανικού που αντιμετωπίζει το πρόβλημα. Ως αποτέλεσμα αυτού πολλές εμπειρικές μαθηματικές σχέσεις έχουν αναπτυχθεί για να προσεγγίσουν τα πειραματικά δεδομένα της S-N καμπύλης. Οι εμπειρικές αυτές εξισώσεις περιορίζονται μόνο σε συνθήκες μονοαξονικής κυκλικής φόρτισης. Γενικεύσεις αυτών των θεωριών για την περίπτωση της πολυαξονικής φόρτισης προτάθηκαν από αρκετούς ερευνητές. Αυτές προεκτάσεις των θεωριών δεν είναι ίποτα άλλο από περεταίρω ανάπτυξη των στατικών κριτηρίων αστοχίας που αφορούν την πρόβλεψη της ζναπμείνουσας αντοχής έπειτα από κυκλική φόρτιση. Έτσι υπό συνθήκες κόπωσης, εφαρμόζονται τα κριτήρια αστοχίας για στατική καταπόνηση με την διαφορά ότι πλέον λαμβάνονται υπόψη παράμετροι όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η συχνότητα φόρτισης, οι κύκλοι φόρτισης, καθώς και ο λόγος ελαχίστης προς μέγιστη τάση (stress ratio, $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$)

1.5 ΘΕΩΡΙΕΣ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΕΣ ΣΤΗΝ ΜΕΙΩΣΗ ΕΝΑΠΟΜΕΙΝΟΥΣΑΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

Η πλειοψηφία των μεθόδων πρόβλεψης ζωής σε κόπωση βασίζονται στην εναπομείνουσα αντοχή θεωρώντας την ως μέτρο αστοχίας. Δηλαδή η μείωση της αντοχής συνεπάγεται και αυτόματα αύξηση της συσσώρευσης αστοχίας στο καταπονούμενο υλικό. Μια γενική θεωρία κόπωσης για σύνθετα υλικά, που βασίζεται στη μείωση εναπομείνουσας αντοχής είναι δυνατό να προκύψει από τις εξής θεωρήσεις:

- I. Η στατική αντοχή ακολουθεί κατανομή Weibull δύο παραμέτρων. Αυτή η θεώρηση βασίζεται στην παρατήρηση ότι η κατανομή Weibull δύο παραμέτρων παρέχει μια καλή προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων της στατικής αντοχής συνθέτων υλικών
- II. Η εναπομείνουσα αντοχή (σ_r) μετά από n κύκλους φόρτισης σχετίζεται με την αρχική στατική αντοχή σ_e με βάση μια ντερτιμινιστική εξίσωση. Αυτή η εξίσωση μπορεί να παραχθεί είτε από μοντελοποίηση της συσσώρευσης αστοχίας είτε να προκύψει ως απόρροια εμπειρίας
- III. Η αστοχία σε κόπωση επέρχεται όταν η εναπομείνουσα αντοχή προσεγγίζει την μέγιστη αναπτυσσόμενη κυκλική τάση

Οι θεωρίες αυτές παρουσιάζουν 3 κύριες αδυναμίες. Η πρώτη είναι ότι η εναπομείνουσα αντοχή δεν μπορεί να υπολογιστεί με μη λαταστροφική μέθοδο, από τη στιγμή που βασίζονται σε ένα μέτρο αστοχίας το οποίο δεν δύναται να καθοριστεί από τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου. Η δεύτερη αφορά τον μεγάλο αριθμό πειραματικών δεδομένων που απαιτούνται ώστε να υπάρχει αξιοπιστία στα

αποτελέσματα. Τέλος η τρίτη αδυναμία είναι το γεγονός ότι η μείωση της εναπομείνουσας αντοχής δεν είναι αρκετά ευαίσθητη ποσότητα στη συσσώρευση αστοχίας και μεταβάλλεται πολύ αργά σε σχέση με την συσσώρευση αστοχίας μέχρι ενός σημείου κοντά στην αστοχία και εν συνεχεία μειώνεται ταχύτατα.

1.6 ΘΕΩΡΙΕΣ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΕΣ ΣΤΗΝ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ

Στην προσπάθεια να ξεπεραστούν οι παραπάνω δυσκολίες αναπτύχθηκαν θεωρίες κόπωσης οι οποίες βασίζονται σε μέτρα αστοχίας που επιδέχονται υπολογισμό με μη καταστροφικές μεθόδους και επιπλέον επιδεικνύουν μεγαλύτερες μεταβολές κατά την διάρκεια ζωής κόπωσης. Ένα τέτοιο μέτρο αποτελεί και η μείωση δυσκαμψίας. Οι θεωρίες αυτές αποτελούν γενικεύσεις των θεωριών που βασίζονται στην εναπομείνουσα αντοχή. Για την ανάπτυξη αυτών των θεωριών γίνονται οι παρακάτω θεωρήσεις:

- I. Η συμπεριφορά και η ζωή σε κόπωση μιας πολύστρωτης δομής ελέγχεται με τη βοήθεια της απόκρισης ενός κρίσιμου ,φέροντος φορτίου, στοιχείου της δομής
- II. Η συμπεριφορά σε κόπωση ενός κρίσιμου στοιχείου περιγράφεται από μια θεωρία βασισμένη στη μείωση της δυσκαμψίας
- III. Η μείωση της δυσκαμψίας κατά τη διάρκεια της κόπωσης δημιουργεί εσωτερικές ανακατανομές του φορτίου, επιφέροντας συχνά αλλαγή του εύρους του φορτίου, που καλείται να φέρει το κρίσιμο στοιχείο.

Παρόλα αυτά ο μεγάλος αριθμός πειραματικών δεδομένων που απαιτούνται , η αδυναμία μοντελοποίησης τυχαίων πολύστρωτων διατάξεων και η έλλειψη ικανότητας μοντελοποίησης με μεγάλη ακρίβεια της εξέλιξης της συσσώρευσης

αστοχίας στο εσωτερικό του υλικού αποτελούν από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής.

1.7 ΘΕΩΡΙΕΣ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΕΣ ΣΤΟΥΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Ως αποτέλεσμα της προσπάθειας εξάλειψης της τελευταίας αδυναμίας της παραπάνω μεθόδου, μια νέα θεωρία αναπτύχθηκε με τις παρακάτω θεωρήσεις και παραδοχές:

- I. Οι διάφορες στρώσεις περιέχουν εσωτερικές ατέλειες στην μήτρα οι οποίες μπορούν να μοντελοποιηθούν ως μικρορωγμές στο μητρικό υλικό παράλληλα με τις ίνες. Αυτές οι εσωτερικές ρωγμές έχουν στατιστική κατανομή μεγέθους και είναι τυχαία κατανεμμημένες στις στρώσεις.
- II. Η εξέλιξη των εσωτερικών ρωγμών στη μήτρα μπορεί να προβλεφθεί με τη βοήθεια της γραμμικής θραυστομηχανικής.

Το βασικό μειονέκτημα των θεωριών αυτών είναι ότι δεν περιέχουν κάποιο κριτήριο αστοχίας. Ενώ προβλέπουν την αρχική συσσώρευση αστοχίας το υλικό ,δεν προτείνουν κριτήριο τελικής αστοχίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

2.1 ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

Μέχρι σήμερα έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για να προβλεφθεί η αστοχία κάτω από συνθήκες κόπωσης για διάφορα σύνθετα υλικά. Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στα κριτήρια τα οποία στηρίζονται σε εμπειρικές θεωρίες. Ένα από τα πρώτα κριτήρια αστοχίας παρουσιάστηκαν από τους Z. Hashin και A.Rotem και αναφερόταν σε ανάπτυξη σύνθετης εντατικής κατάστασης σε UD υλικά. Η ανάγκη όμως για πρόβλεψη της κοπωτικής συμπεριφοράς πολύστρωτων πλακών οδήγησε τους Z. Hashin και A.Rotem στη δημιουργία ενός νέου κριτηρίου, που στηρίζεται στη συμπεριφορά που επιδεικνύουν οι επιμέρους στρώσεις της πολυστρώτου πλακός υπό συνθήκες κόπωσης. Η εφαρμογή του συγκεκριμένου κριτηρίου έγινε σε ισοσταθμισμένη πλάκα διαγωνίων στρώσεων. Η όλη μελέτη συνεχίζεται και ολοκληρώνεται με την παρουσίαση μιας επέκτασης του τελευταίου κριτηρίου από τον Rotem, η οποία αφορά την πρόβλεψη αστοχίας μιας τυχαίας πολυστρωτής δομής, βασιζόμενη σε κάποιες πειραματικώς προσδιορισμένες συναρτήσεις για την κόπωση. Αμέσως μετά οι J.Awerbuch και H.Hahn παρουσιάζουν μια μελέτη τους που αφορά την συμπεριφορά σε κόπωση ινώδων συνθέτων υλικών. Στην συγκεκριμένη εργασία αν και δεν αναπτύσσεται κάποιο νέο κριτήριο πρωτοπαρουσιάζεται μια πολύ σημαντική παρατήρηση. Το ότι όλες οι

αδιαστατοποιημένες S-N καμπύλες που περιγράφουν την σε συμπεριφορά σε κόπωση ενός υλικού κυμαίνονται μεταξύ των ορίων μιας στενής ζώνης του επιπέδου αδιαστατοποιημένης τάσης-κύκλων φόρτισης (S/Xθ)-N. Πολύ αργότερα, στηριζόμενοι σε αυτή την παρατήρηση πιθανότατα, οι Z.Fawaz και F.Ellyin παρουσιάζουν ένα μοντέλο πρόβλεψης διάρκειας ζωής ινώδων συνθέτων υλικών που υπόκεινται σε συνθήκες σύνθετης εντατικής καταπόνησης. Διαπιστώνοντας όμως πρόβλημα του μοντέλου κατά την εφαρμογή του σε τυχαίες πολύστρωτες πλάκες, γίνεται μια επιπλέον προσπάθεια διόρθωσης του κριτηρίου. Τέλος από τους M.Owen και J.Griffiths παρουσιάζεται μια μελέτη όπου κριτήρια αστοχίας που αφορούν στατική καταπόνηση, τροποποιούνται κατάλληλα ώστε να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της αστοχίας σε κόπωση. Από τις πιο πρόσφατες μελέτες που έχουν παρουσιαστεί τα τελευταία δέκα χρόνια είναι αυτή των T.Fujii και F.Lin οι οποίοι αν και δεν παρουσιάζουν κάποιο συγκεκριμένο νέο κριτήριο, παραθέτουν αποτελέσματα πρόβλεψης της συμπεριφοράς σε κόπωση υλικού που υπόκεινται σε συνθήκες διαξονικής φόρτισης με τη χρήση τανυστικού πολυωνύμου αστοχίας. Παρακάτω ακολουθεί μια αναλυτική παρουσίαση των προαναφερόμενων μελετών.

2.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΤΩΝ Z.HASHIN ΚΑΙ A.ROTEM

Οι Hashin και Rotem μετά από πειράματα που διεξήγαγαν σε UD υλικά παρατήρησαν ότι αναπτύσσονται δύο βασικοί τρόποι αστοχίας, οι οποίοι συνδέονται άμεσα με την γωνία που σχηματίζει η ενίσχυση του υλικού, σε σχέση με το φυσικό σύστημα συντεταγμένων που έχει οριστεί. Έτσι για γωνία $\theta=0^\circ$ ή θ = πολύ μικρή (1° - 2°) τα δοκίμια αστοχών λόγω αστοχίας των ινών, ενώ

για μεγαλύτερες γωνίες η αστοχία εκδηλώνεται με ανάπτυξη ρωγμών κατά μήκος της μήτρας και παράλληλα στις ίνες. Σε αυτή την παρατήρηση στηρίζεται και το κριτήριο που ανέπτυξαν. Δέχονται δύο τρόπους αστοχίας, την αστοχία των ινών και την αστοχία της μήτρας. Για το καθένα από τους δύο τρόπους το κριτήριο παίρνει διαφορετική μορφή. Συνολικά ισχύει:

$$\sigma_A = \sigma_A^u \quad (2.1)$$

$$(\sigma_T / \sigma_T^u)^2 + (\tau / \tau^u)^2 = 1 \quad (2.2)$$

Η σχέση (2.1) περιγράφει την αστοχία των ινών, ενώ η σχέση (2.2) περιγράφει την αστοχία της μήτρας. Όπου σ_A^u , σ_T^u , τ^u οι καμπύλες S-N του υλικού σε μονοαξονική φόρτιση, παράλληλα στις ίνες, κάθετα στις ίνες καθώς και σε διάτμηση του κυρίου επιπέδου αντίστοιχα, ενώ οι σ_A , σ_T και τ είναι οι αναπτυσσόμενες τάσης λόγω κόπωσης στα 3 είδη φορτίσεων που ήδη περιγράψαμε.

Οι τρεις S-N καμπύλες σ_A^u , σ_T^u , τ^u , μπορούν να ξαναγραφούν στη μορφή:

$$\sigma_A^u = \sigma_A^s f_A(R, N, n, \theta) \quad (2.3)$$

$$\sigma_T^u = \sigma_T^s f_T(R, N, n, \theta) \quad (2.4)$$

$$\tau^u = \tau^s f_\tau(R, N, n, \theta) \quad (2.5)$$

όπου σ_A^s , σ_T^s , τ^s παράμετροι που έχουν διαστάσεις τάσης και f_A , f_T , f_τ αδιάστατες συναρτήσεις οι οποίες καλούνται συναρτήσεις κόπωσης του υλικού. Και πάλι οι τρεις δείκτες αφορούν τα είδη φορτίσεων. Οι συναρτήσεις κόπωσης όπως μπορεί να διαπιστωθεί, αποτελούν ουσιαστικά συναρτήσεις εξαρτώμενες από τα εξής μεγέθη:

1. N, ο αριθμός των κύκλων φόρτισης ως την αστοχία
2. n, η συχνότητα της φόρτισης
3. θ η γωνία της ενίσχυσης ως προς το κύριο σύστημα συντεταγμένων
4. R, ο λόγος ελαχίστης προς μέγιστη τάση (stress ratio)

Ορίζοντας f' και f'' τις δύο συναρτήσεις κόπωσης που περιγράφουν την αστοχία των ινών και της μήτρας αντιστοίχως θα ισχύει:

$$f'(R, N, n, \theta) = f'(R, N, n) = f_A(R, N, n) \quad (2.6)$$

$$f''(R, N, n, \theta) = f_T \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{\tau^s}{\sigma_T^s}\right)^2 \tan^2 \theta}{1 + \left(\frac{\tau^s}{\sigma_T^s} \frac{f_T}{f_T}\right)^2 \tan^2 \theta}} \quad (2.7)$$

Ο υπολογισμός των συναρτήσεων κόπωσης f_T , f_T γίνεται με τον προσδιορισμό των συναρτήσεων κόπωσης f'' πειραματικά για δύο τυχαίες γωνίες θ έπειτα εφαρμόζεται στη σχέση (2.7). Έτσι υπάρχουν στη διάθεση του μελετητή δύο εξισώσεις με αγνώστους τους f_T , f_T . Η μετάβαση από το κριτήριο (2.1) στο κριτήριο (2.2) γίνεται για κάποια κρίσιμη γωνία της γωνίας θ για την οποία και τα δύο κριτήρια ισχύουν ταυτόχρονα. Η τιμή αυτή ορίζεται με την βοήθεια της σχέσης:

$$\tan^2(\theta_c) \equiv \frac{\tau^u}{\sigma_A^u} = \frac{\tau^l}{\sigma_A^l} \frac{f_T(R, N, n)}{f'(R, N, n)} \quad (2.8)$$

Το παραπάνω κριτήριο όπως ήδη αναφέρθηκε αφορά υλικά ενός είδους στρώσεως (UD). Επειδή όμως στην πράξη χρησιμοποιούνται πολύστρωτες δομές, οι Hashin και Rotem προέκτειναν το κριτηριό τους . Χρησιμοποιώντας την κλασική θεωρία πολυστρωτων πλακών προσπάθησαν να προβλέψουν την συμπεριφορά σε συνθήκες κόπωσης, μιας ισοσταθμισμένης πλάκας διαγωνίων στρώσεων. Με κριτήριο λοιπόν που προτείνουν είναι δυνατόν να προβλεφθεί η αστοχία της πρώτης στρώσης μιας πολύστρωτης πλακός που υπόκειται σε συνθήκες κόπωσης. Αυτός είναι και ο λόγος που επιλέχτηκε μια ισοσταθμισμένη πλάκα διαγωνίων στρώσεων για εφαρμογή του κριτηρίου. Απέδειξαν με αναλυτικές μαθηματικές σχέσεις όσο και με πειραματικά αποτελέσματα ότι σε μια πλάκα διαγωνίων στρώσεων η αστοχία της πρώτης στρώσης συμπίπτει με την συνολική αστοχία της πλακός. Η εφαρμογή του κριτηρίου απέδειξε πως για πλάκες διαγωνίων στρώσεων με γωνία άνω των 45ο επιτυγχάνεται πολύ καλή πρόβλεψη σε αντίθεση με τις πλάκες όπου οι γωνίες των στρώσεων είναι μικρότερες των 45ο. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται μια υποεκτίμηση του φορτίου αστοχίας σε κόπωση.

Παρατηρώντας και πάλι ο Rotem ότι δεν καλυπτόταν η ανάγκη για πρόβλεψη συμπεριφοράς τυχαίων διευθύνσεων του υλικού συνέχισε την προσπάθεια και παρουσίασε ένα νέο κριτήριο που ουσιαστικά αποτέλεσε προέκταση του προηγούμενου. Διατυπώνοντας την άποψη ότι κατά τη φόρτιση πολυστρωτων πλακών οι διάφορες στρώσεις υπόκεινται κατα κανόνα σε διαφορετικά επίπεδα τάσεων, μπόρεσε να διακρίνει πλήν των δύο τρόπων αστοχίας που εκφράζονται από τα κριτήρια (2.1) και (2.2) και ένα τρίτο τρόπο αστοχίας, την αποκόλληση των στρώσεων. Ο τρόπος αστοχίας εκφράζεται από το κριτήριο:

$$\left(\frac{\sigma_d}{\sigma_d^u}\right)^2 + \left(\frac{\tau_d}{\tau_d^u}\right)^2 = 1 \quad (2.9)$$

Όπου ο εκθέτης u συμβολίζει την αστοχία σε κόπωση και ο δείκτης d τις διαστρωματικές τάσεις.

Για να προσδιοριστεί το πότε επέρχεται η αστοχία σε κόπωση, είναι απαραίτητο να εφαρμοστούν και τα τρία κριτήρια 2.1, 2.2, 2.9 για τον συγκεκριμένο αριθμό κύκλων φόρτισης που εξετάζεται. Το συγκεκριμένο μοντέλο ενώ βρέθηκε ότι δίνει πολύ καλές προβλέψεις παρουσιάζει ένα σημαντικό μειονέκτημα, τον μεγάλο αριθμό πειραματικών δεδομένων που απαιτούνται ώστε να εφαρμοστεί τόσο η κλασική θεωρία πολυστρώτων πλακών κατά την ανάλυση των τάσεων όσο και τα τρία κριτήρια αστοχίας τα οποία απαιτούν με τη σειρά τους την γνώση τεσσάρων, πειραματικά προσδιορισμένων, συναρτήσεων κόπωσης.

2.3 ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ AWERBUCH ΚΑΙ HAHN

Οι J.Awerbuch και H.Hahn διεξάγοντας μια σειρά πειραμάτων με σκόπο τη μελέτη της συμπεριφοράς σε συνθήκες κόπωσης ενός graphite/epoxy υλικού σε διάφορες τυχαίες διευθύνσεις, παρατήρησαν ότι όλες οι αδιαστατοποιημένες S-N καμπύλες που περιγράφουν την συμπεριφορά σε κόπωση, κυμαίνονται μεταξύ των ορίων μιας στενής ζώνης, του επιπέδου αδιαστατοποιημένης τάσης-κύκλων φόρτισης ((S/Xθ)-N). Όπου Xθ η στατική αντοχή της κάθε τυχαίας διεύθυνσης. Με την βοήθεια της παραπάνω παρατήρησης εξήγαγαν το συμπέρασμα ότι γνωρίζοντας την αδιαστατοποιημένη S-N καμπύλη για κάποια

γωνία, αυτομάτως είναι δυνατό να βρεθεί η S-N καμπύλη για οποιαδήποτε τυχαία γωνία. Παρά το γεγονός αυτό, οι συγγραφείς τονίζουν την αδυναμία που συναντούν, στην πρόβλεψη συγκεκριμένης επίδρασης των διαφόρων τυχαίων γωνιών στη διάρκεια ζωής του υλικού.

2.4 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΩΝ Z.FAWAZ ΚΑΙ F.ELLYIN

Οι Z.Fawaz και F.Ellyin παρουσιάζουν ένα νέο κριτήριο, που πιθανότατα να αποτελεί επέκταση της παρατήρησης των J.Awerbuch και H.Hahn, το οποίο έχει τη δυνατότητα πρόβλεψης της αστοχίας ινώδων συνθέτων υλικών υπό συνθήκες σύνθετης εντατικής κατάστασης. Η σπουδαιότητα του παρόντος κριτηρίου έγκειται στον πολύ μικρό αριθμό δεδομένων που απαιτούνται για την εφαρμογή του. Με τον τρόπο αυτό διαθέτοντας μόνο μια S-N καμπύλη και μερικά εύκολα παρατηρούμενες στατικές τιμές τάσεων αστοχίας, μπορεί να προβλεφθεί η αντοχή σε κόπωση οποιουδήποτε ινώδους σύνθετου υλικού. Πιο αναλυτικά θεωρείται ότι η σχέση αναπτυσσόμενης τάσης-κύκλων φόρτισης σε κάποιο υλικό εκφράζεται από την ημιλογαριθμική γραμμική σχέση της μορφής:

$$S=m*\log (N) +b \quad (2.10)$$

Όπου S η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση, m και b είναι οι δύο περάμετροι που οι τιμές τους εξαρτώνται από τις ιδιότητες του υλικού και τις συνθήκες φόρτισης και N είναι οι κύκλοι φόρτισης ως την αστοχία του υλικού υπό την τάση S.

Υποθετίστο ότι είναι γνωστή μια S-N καμπύλη η οποία και ονομάζεται και καμπύλη αναφοράς. Αυτή θα είναι της μορφής:

$$S_r = m_r \cdot \log(N) + b_r \quad (2.11)$$

Για να είναι εφικτή η πρόβλεψη μιας S-N καμπύλης για οποιαδήποτε τυχαία διεύθυνση, γνωρίζοντας την καμπύλη αναφοράς σε κάποια διεύθυνση, οι Z.Fawaz και F.Ellyin συσχέτισαν τις εξαρτόμενες εκ του υλικού παραμέτρους των σχέσεων 6 και 7 με τις εξισώσεις;

$$M = f(a_1, a_2, \theta) \cdot g(R) \cdot m_r \quad (2.12)$$

$$b = f(a_1, a_2, \theta) \cdot b_r \quad (2.13)$$

Όπου με a_1, a_2 , ορίζονται οι λόγοι της συνθέτου εντατικής κατάστασης οι οποίοι εκφράζονται ως σ_y/σ_x και τ_{xy}/σ_x αντίστοιχα. Τα x, y παριστούν ένα φυσικό σύστημα συντεταγμένων προσανατολισμένο κατά γωνία θ , που το σύστημα συντεταγμένων δημιουργεί με τις κύριες διευθύνσεις του υλικού. Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.12) και (2.13) στην (2.11) προκύπτει η μορφή του προτεινόμενου μοντέλου:

$$S(a_1, a_2, \theta, R, N) = f(a_1, a_2, \theta) \cdot [g(R) \cdot m_r \cdot \log(N) + b_r] \quad (2.14)$$

Με τις συναρτήσεις $f(a_1, a_2, \theta)$ και $g(R)$ να ορίζονται ως εξής:

$$f(a_1, a_2, \theta) = \sigma_x(a_1, a_2, \theta) / X_r \quad (2.15)$$

Όπου σ_x η στατική αντοχή κατά την x-διεύθυνση υπό των παραμέτρων φόρτισης $(\alpha_1, \alpha_2, \theta)$, X_r η στατική αντοχή κατά την x-διεύθυνση υπό των παραμέτρων φόρτισης $(\alpha_{1r}, \alpha_{2r}, \theta)$ που αφορούν την καμπύλη αναφοράς και

$$g(R) = \sigma_{\max} \cdot (1-R) / [\sigma_{(\max)r} - \sigma_{(\min)r}] \quad (2.16)$$

Με $[\sigma_{(\max)r} - \sigma_{(\min)r}]$, το εύρος τάσης που χρησιμοποιείται για να προκύψει η καμπύλη αναφοράς. Εύκολα συμπεραίνεται ότι η $g(R)$ γίνεται ίση με την μονάδα όταν $R=R_r$ και όταν $R=1$ τότε $g(1)=0$.

Για UD υλικά έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει μια υπερεκτίμηση των κλίσεων των on-axis S-N καμπυλών όταν η καμπύλη αναφοράς προκύπτει από πειράματα κόπωσης σε τυχαίες διευθύνσεις, σε αντίθεση με τις κλίσεις των off-axis S-N καμπυλών οι οποίες υποεκτιμούνται όταν η καμπύλη αναφοράς από την οποία παρήχθη αναφορά on-axis στοιχεία αστοχίας από κόπωση. Για το λόγο αυτό, οι σχέσεις (8α), (8β) μπορούν να ξαναγραφούν στην μορφή:

$$m = x \cdot f(\alpha_1, \alpha_2, \theta) \cdot g(R) \cdot m_r \quad (2.17)$$

$$b = f(\alpha_1, \alpha_2, \theta) \cdot b_r \quad (2.18)$$

Όπου x ένας διορθωτικός συντελεστής η τιμή του οποίου εξαρτάται από τον τύπο του ινώδους σύνθετου υλικού που μελετάται. Έχει βρεθεί ότι όταν η καμπύλη αναφοράς προκύπτει από πειράματα κόπωσης σε off-axis διεύθυνση, το x προσδιορίζεται με την ακόλουθη έκφραση:

$$x = [(S_c - X) / (N_c + m_0)] \quad (2.19)$$

Όπου S_c η τάση αστοχίας για ένα on-axis πείραμα κόπωσης στους N_c κύκλους αστοχίας και m_o η προβλεπόμενη on-axis κλίση που προκύπτει με την εφαρμογή της σχέσης (2.17). Παρόμοια σχέση δύναται να παραχθεί και για την περίπτωση όπου η καμπύλη αναφοράς προκύπτει από πειράματα κόπωσης σε on-axis διεύθυνση.

Οι Z.Fawaz και F.Ellyin παρατηρώντας ότι πολύστρωτες πλάκες οι οποίες περιέχουν στη δομή τους μόνο διαφορετικούς προσανατολισμούς στρώσεων των 90° , παρουσιάζουν κάποιες συμμετρίες οι οποίες καθιστούν την ανάλυση τους απλούστερη, προσπάθησαν να προσαρμόσουν το κριτήριό τους σε τέτοιου είδους υλικά. Έτσι το κριτήριο παίρνει την μορφή:

$$S(\alpha, \theta, R, N) = f(\alpha) \cdot T(\theta) \cdot [g(R) \cdot m_r \cdot \log(N) + b_r] \quad (2.20)$$

Όπου $\alpha = \alpha_1 = \sigma_y / \sigma_x$ και f και T αδιαστατοποιημένες συναρτήσεις. Με βάση τη νέα μορφή του κριτηρίου προκύπτει το συμπέρασμα ότι η τιμή του λόγου της σύνθετης εντατικής κατάστασης α , καθώς και η τιμή της γωνίας θ , επηρεάζουν ανεξάρτητα η μία την άλλη τη συμπεριφορά που επιδεικνύουν τα υλικά που έχουν μόνο διαφορετικούς προσανατολισμούς στρώσεων των 90° σε κόπωση.

Η εφαρμογή του κριτηρίου σε μια σειρά πειραματικών δεδομένων, αποδεικνύει ότι δύναται με τη χρησιμοποίησή του να γίνουν πολύ ικανοποιητικές προβλέψεις της διάρκειας ζωής. Αυτό το γεγονός σε συνδυασμό με το ότι ,πρώτον περιορίζονται στο ελάχιστο τα πειραματικά δεδομένα τα οποία απαιτούνται για την εφαρμογή του κριτηρίου και δεύτερον το ότι το συγκεκριμένο κριτήριο λαμβάνει υπόψη του ποικίλους παράγοντες όπως το λόγο σύνθετης εντατικής κατάστασης, τον διαφορετικό προσανατολισμό των ινών και

τον λόγο ελάχιστης προς μέγιστη τάση R , καθιστούν το κριτήριο αυτό πολύ αξιόλογο για σχεδιαστική μελέτη. Βασικό του μειονέκτημα είναι το ότι είναι πολύ ευαίσθητο στην επιλογή της S-N καμπύλης αναφοράς. Επίσης το κριτήριο αδυνατεί να προβλέψει τη συμπεριφορά που επιδεικνύει μια τυχαία πολυστρωτη δομή υπό συνθήκες σύνθετης εντατικής κατάστασης.

2.5 ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ M.OWEN ΚΑΙ J.GRIFFITHS

Οι Owen και Griffiths παρουσιάζουν μια εργασία, μέσω της οποίας γίνεται μία εκτίμησης, της πρόβλεψης που παρέχουν διάφορα κριτήρια αστοχίας στατικής καταπόνησης, όταν εφαρμόζονται, τροποποιημένα βέβαια, σε συνθήκες κόπωσης.

Εξ' αρχής σημειώνεται ότι έχει γίνει μια πολύ υποκειμενική επιλογή δεδομένων, τονίζεται τελικά ότι παρατηρείται μια περιορισμένη συμφωνία των πειραματικών δεδομένων και των προβλέψεων που γίνονται με τη χρησιμοποίηση διαφόρων κριτηρίων. Παρ'όλα αυτά, αντιπαρατίθοντας τα κριτήρια που λαμβάνουν υπόψη τους την σύνθετη εντατική κατάσταση, με αυτά που δεν την λαμβάνουν, οδηγούνται στο συμπέρασμα πως πιο λογικά αποτελέσματα πρόβλεψης προκύπτουν με τη χρησιμοποίηση αυτών που περιέχουν συνδυασμό των εφαρμοζόμενων τάσεων. Η συγκεκριμένη παρατήρηση κρίνεται ιδιαιτέρως αξιόλογη.

2.6 ΜΕΛΕΤΗ T.FUJII ΚΑΙ F.LIN

Οι Fujii και Lin παρουσιάζουν μια σειρά πειραματικών αποτελεσμάτων που αφορούν δοκιμές διαξονικής κόπωσης, εφελκυσμού-στρέψης σε λεπτότοιχα κυλινδρικά δοκίμια. Στην συνέχεια με τη βοήθεια του τανυστικού πολυωνύμου αστοχίας (Tsai=Wu strength criterion) προβλέπουν τους τύπους αστοχίας σ_1 - σ_6 για στατικές τιμές και τους 10^3 , 10^4 , 10^5 και 10^6 κύκλους φόρτισης αντίστοιχα. Αναλυτικά το κριτήριο χρησιμοποιείται με τη μορφή:

$$F_1\sigma_1 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{66}\sigma_6^2 = 1 \quad (2.21)$$

με τους τανυστές F_1 , F_{11} , F_{66} να δίδονται από τις σχέσεις:

$$F_1 = \frac{1}{\sigma_{1ult}^t} - \frac{1}{\sigma_{1ult}^c} \quad (2.22)$$

$$F_{11} = \frac{1}{\sigma_{1ult}^t \sigma_{1ult}^c} \quad (2.23)$$

$$F_{66} = \frac{1}{(\sigma_{6ult})^2} \quad (2.24)$$

με σ συμβολίζονται οι μονοαξονικές εφελκυστικές, θλιπτικές και διατμητικές αντοχές αντίστοιχα. Οι Fujii και Lin εφάρμοσαν λοιπόν το συγκεκριμένο κριτήριο για διαξονική φόρτιση κόπωσης ως εξής. Χρησιμοποίησαν στη θέση των τάσεων αστοχίας σε εφελκυσμό και διάτμηση τις αντίστοιχες πειραματικές προσδιορισμένες, S-N καμπύλες του υλικού, ενώ τη τιμή θλιπτικής αντοχής την προσάρμοσαν κάθε φορά με τέτοιο τρόπο, ώστε ο προβλεπόμενος τύπος αστοχίας να προσεγγίζει κάθε φορά τα αντίστοιχα

πειραματικά αποτελέσματα. Έτσι βέβαια εξηγείται και το φαινόμενο ότι προκύπτουν αποτελέσματα τα οποία δεν μπορούν να ίνουν αποδεκτά, όπως για παράδειγμα το ότι οι προβλεπόμενες αντοχές σε κόπωση για 10^5 και 10^6 κύκλους φόρτισης είναι μεγαλύτερες των αντίστοιχων τιμών για 10^3 και 10^4 κύκλους φόρτισης. Σαν τελικό αποτέλεσμα τονίζεται από τους συγγραφείς ότι το ταυστικό πολυώνυμο αστοχίας δεν μπορεί πάντοτε να προβλέπει την συμπεριφορά σε σύνθετη κατάσταση κόπωσης και για αυτό προτείνεται και μια περαιτέρω εξέταση του κριτηρίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

3.1 ΑΣΤΟΧΙΑ ΙΝΩΔΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΩΣΗΣ

Σε αντίθεση με τα μέταλλα, τα ενισχυμένα με ίνες σύνθετα υλικά σπάνια αστοχούν με ένα πανομοιότυπο και προκαθορισμένο τρόπο λόγω της διάδοσης κάποιας ρωγμής. Αντ'αυτού η αστοχία υπό συνθήκες κόπωσης επέρχεται σε τυχαία σημεία του υλικού και παρουσιάζεται ως θραύση ινών, αποκόλληση στρώσεων, θραύση μήτρας καθώς και αποκόλληση ινών-μήτρας. Εξαρτόμενοι από το επίπεδο τάσης που αναπτύσσεται, από το μήκος των ινών, από τον προσανατολισμό των επιμέρους στρώσεων και από τις τεχνικές ελαστικές σταθερές που παρουσιάζει τόσο το μητρικό υλικό όσο και οι εκάστοτε ενίσχυση, κάποιοι από τους τρόπους αστοχίας που προαναφέρθησαν κατά την διάρκεια της κοπωτικής φόρτισης ίσως παρουσιαστούν ξεχωριστά ή και σε συνδυασμό όταν βρίσκονται αρκετά κοντά στην αστοχία του υλικού. Παρ'όλα αυτά ακόμα και η παρουσία κάποιων μορφών αστοχίας στο όποιο υλικό δεν συνεπάγεται και την ολική αστοχία αυτού. Αυτό συμβαίνει διότι η αύξηση της παρουσιαζόμενης αστοχίας τόσο σε μέγεθος όσο και σε ένταση γίνεται με ένα προοδευτικό τρόπο έως και την τελική θραύση.

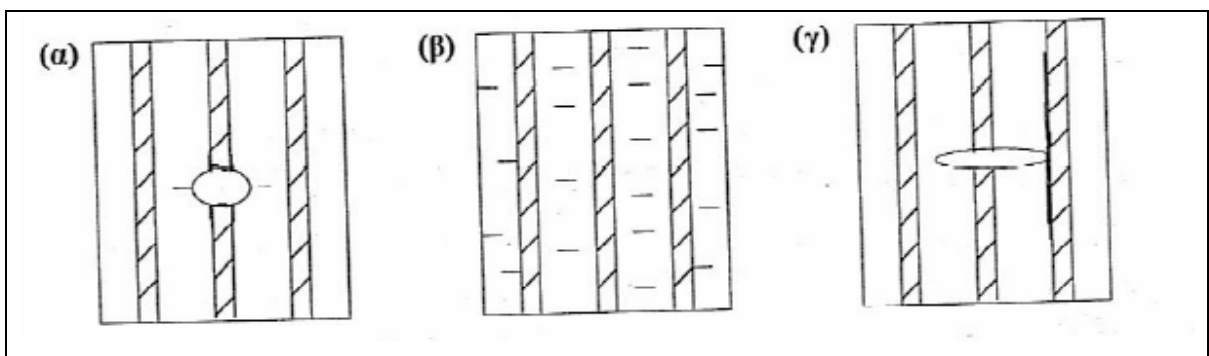
Στη συνέχεια ακολουθεί μια αναλυτική παρουσίαση των διαφόρων τρόπων αστοχίας που παρουσιάζουν οι τυχαίας διάταξης πολύστρωτες δομές. Πριν από αυτό όμως παρατείθονται εκτενώς οι μηχανισμοί αστοχίας που

αναπτύσσονται σε UD υλικά τόσο σε on-axis όσο και σε off-axis διευθύνσεις. Με τον τρόπο αυτό θα γίνει πιο εύκολη η κατανόηση της συμπεριφοράς που επιδεικνύουν οι πολύστρωτες πλάκες κατά την διάρκεια της φόρτισης σε κόπωση αφού αυτές αποτελούν σύνθεση on-axis και off-axis στρώσεων.

3.2 ΚΟΠΩΣΗ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΣΤΙΣ ΙΝΕΣ (ON-AXIS FATIGUE)

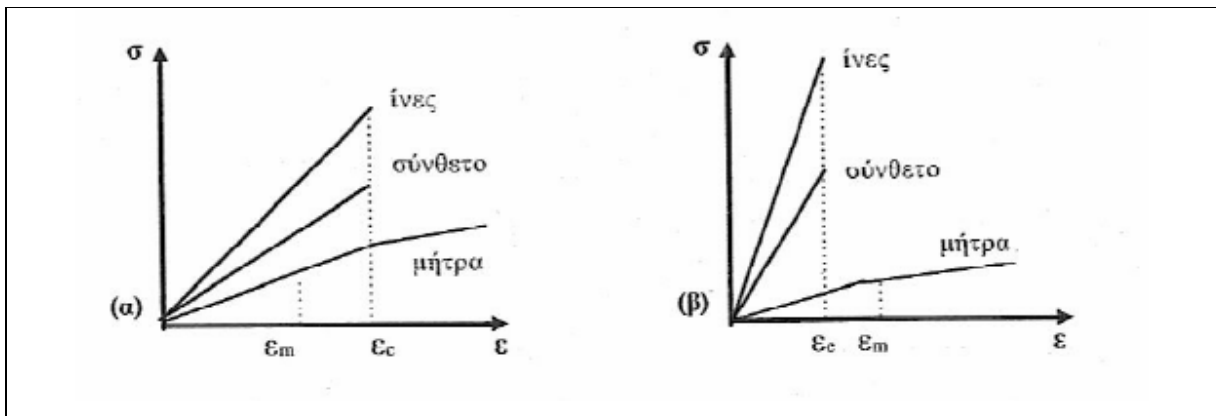
Η αστοχία για UD πλακών λόγω φορτίων κόπωσης που ασκούνται παράλληλα στις ίνες μπορεί να εκδηλώνεται είτε με θράυση ινών είτε με την παρουσία μικρορωγμών στη μήτρα. Σε πολύ υψηλά επίπεδα τάσης υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η αναπτυσσόμενη τάση στις ίνες να υπερβαίνει το όριο αντοχής τους. Αυτό οδηγεί αυτόματα στην θραύση των αδυνάτων σημείων. Οι ίνες που αστοχούν είναι τυχαία κατανεμημένες σε όλο τον όγκο της πλακός. Η θραύση μίας ίνας έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία δύο ελευθέρων επιφανειών. Το μήκος αυτής της αποκόλλησης εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από το μέγεθος των αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων σε σχέση με την διατμητική αντοχή της επιφάνειας και συνήθως είναι μικρό. Η υψηλή συγκέντρωση τάσεων στις χωριζόμενες επιφάνειες μπορεί να οδηγήσει, πλην της αστοχίας της διεπιφάνειας που μόλις περιγράφηκε και στην δημιουργία μικρορωγμών στην μήτρα. Αυτό συμβαίνει γιατί σε αυτές τις επιφάνειες η αναπτυσσόμενη τάση είναι πολύ μεγαλύτερη από την εξωτερικώς ασκούμενη, με αποτέλεσμα να υπερβαίνει την τάση αστοχίας της μήτρας. Όλα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα την γρήγορη εξασθένιση του υλικού και εν τέλει την βίαιη αστοχία του σε μόλις ελάχιστους εκατοντάδες κύκλους.

Σε χαμηλότερα φορτία κόπωσης, η αναπτυσσόμενη τάση στις ίνες ίσως είναι μικρότερη σε σχέση με το όριο αντοχής τους, όμως η επιφερόμενη παραμόρφωση στο υλικό ίσως υπερβαίνει το όριο παραμόρφωσης της μήτρας. Έτσι εδώ πλέον η έναρξη της αστοχίας παρουσιάζεται με μικρορωγμές στο μητρικό υλικό αντί θραύσης ινών. Λόγω και πάλι παρουσίας συγκέντρωσης τάσεων στα άκρα των μικρορωγμών αυτές διαδίδονται εγκάρσια στο υλικό. Η πορεία τους αυτή ανακόπτεται από τις διεπιφάνειες που συναντούν. Και πάλι στα σημεία αυτά παρουσιάζονται διατμητικές τάσεις που οδηγούν σε μια προοδευτική αποκόλληση της διεπιφάνειας. Υπάρχει όμως περίπτωση αν η συγκέντρωση των τάσεων γίνει πολύ μεγάλη κάποια μικρορωγή στη μήτρα να οδηγήσει σε αστοχία κάποιες ίνες. Από την στιγμή λοιπόν που η διάδοση των μικρορωγμών στη μήτρα συχνά διακόπτεται στα σύνορα των διεπιφανειών, συμπεραίνεται ότι υπάρχει μια ομαλή και προοδευτική διαδικασία στοχίας που πολλές φορές οδηγεί σε συνολική διάρκεια ζωής που υπερβαίνει τους 10⁷ κύκλους φόρτισης. Εδώ πρέπει να τονιστεί σε πολυμερή υλικά οι μηχανισμοί αστοχίας που αναπτύσσονται είναι παρεμφερείς με αυτών των μεταλλικών υλικών, υπό την έννοια ότι εμπεριέχουν τόσο την έναρξη της αστοχίας όσο και την προοδευτική εξέλιξη αυτής κάθετα στο αναπτυσσόμενο εξωτερικό φορτίο.



Σχήμα 1: Μηχανισμοί αστοχίας σε κόπωση UD υλικών σε on-axis διεύθυνση. (α) θραύση ίνας, διεπιφανειακή αποκόλληση, (β) θραύση μήτρας, (γ) διεπιφανειακή διατμητική αστοχία.

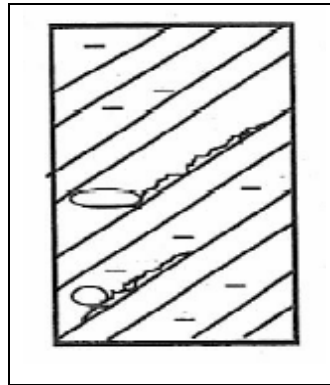
Ένας άλλος παράγοντας που καθορίζει τους μηχανισμούς αστοχίας που αναπτύσσονται σε UD υλικά όταν αυτά φορτίζονται σε διεύθυνση παράλληλα στις ίνες είναι η δυσκαμψία των ινών. Έστω τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για δύο σύνθετα υλικά, τα οποία περιέχουν ίνες με μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και με μικρό μέτρο ελαστικότητας αντίστοιχα καθώς και το ίδιο μητρικό υλικό που φαίνονται στο σχήμα 54. για σύνθετα υλικά χαμηλής δυσκαμψίας ινών όπως για παράδειγμα τα Glass/ Epoxy παρατηρείται πως η παραμόρφωση αστοχίας τους ϵ_c , είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την παραμόρφωση αστοχία της μήτρας ϵ_m , ενώ αντίθετως για υλικά υψηλής δυσκαμψίας όπως είναι τα Carbon/ Epoxy αυτή η διαφορά δεν είναι πολύ μεγάλη και μάλιστα αρκετές φορές η ϵ_m ξεπερνά σε τιμή την ϵ_c . Σε αυτήν την περίπτωση όπως είναι αντιληπτό αν η μέγιστη αναπτυσσόμενη παραμόρφωση στο υλικό είναι μικρότερη από την οριακή παραμόρφωση αστοχίας του, είναι αδύνατον η έναρξη της αστοχίας να εμφανιστεί με την μορφή μικρορωγμών στην μήτρα. Όμοια αν η αναπτυσσόμενη παραμόρφωση είναι μεταξύ της περιοχής ϵ_c - ϵ_m υπάρχει πιθανότητα οι μικρορωγμές στη μήτρα να εμφανιστούν πρώτες.



Σχήμα 2: Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης, (α) χαμηλής δυσκαμψίας ίνες, (β) υψηλής δυσκαμψίας ίνες.

3.3 ΚΟΠΩΣΗ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ ΣΕ ΤΥΧΑΙΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΙΝΕΣ (OFF-AXIS FATIGUE)

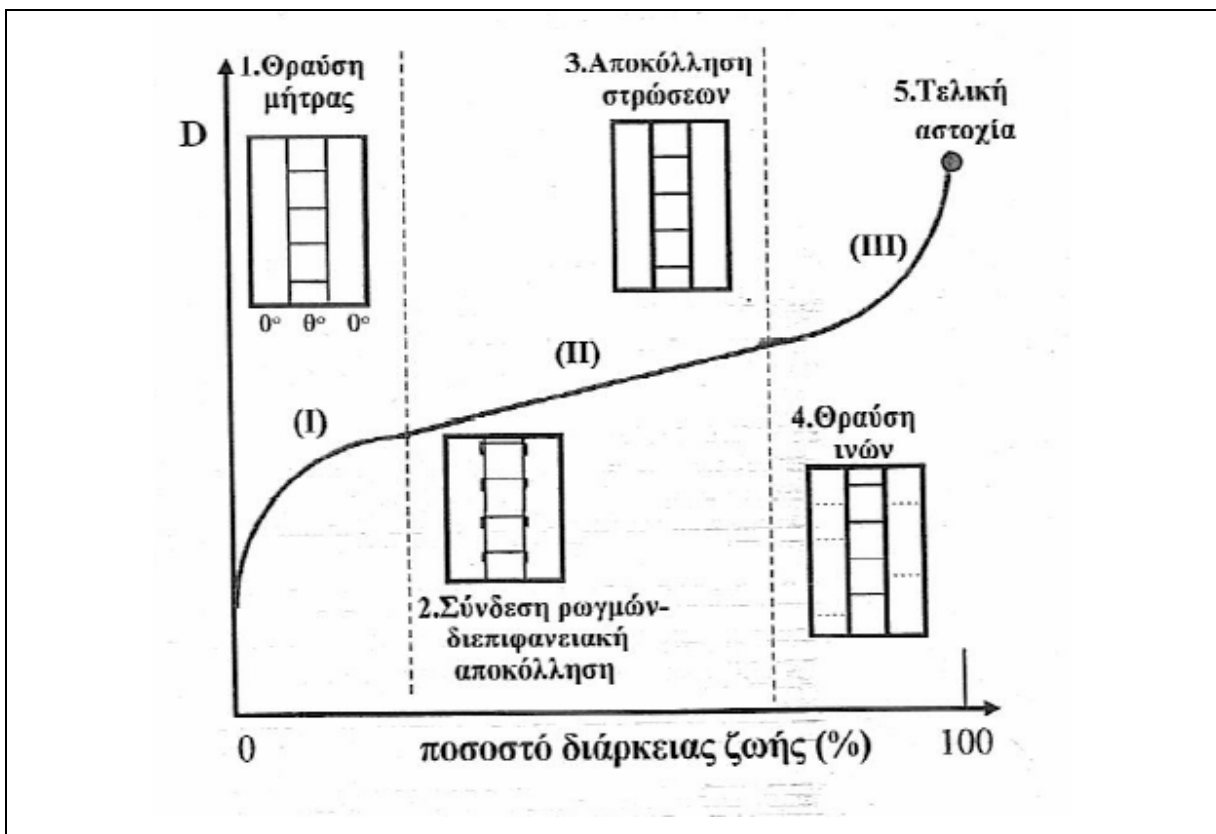
Η αστοχία σε ένα UD υλικό που υπόκειται σε κόπωση υπό κάποια off-axis διεύθυνση συνίσταται από ένα πολύπλοκο τρόπο. Παρατηρείται αρχικά η παρουσία μικρορωγμών στη μήτρα κάθετα στις ίνες. Αυτές οι μικρορωγμές έχουν την τάση να εξελιχθούν στη συνέχεια με ένα σύνθετο τρόπο: αρχικά παρατηρείται μια συνεχής αύξηση του μήκους τους κάθετα στις ίνες. Την στιγμή που αυτές οι ρωγμές της μήτρας συναντήσουν κάποια διεπιφάνεια αυτόματα αλλάζουν κατεύθυνση και πλέον μετακινούνται παράλληλα στις ίνες (Σχ.3) . αυτό έχει ως αποτέλεσμα η τελική αστοχία να επέρχεται με έναν πολυπλοκότερο τρόπο ο οποίος περιλαμβάνει πλην της θραύσης της μήτρας και μια αποκόλληση των διεπιφανειών ινών-μήτρας. Για δεδομένη αναπτυσσόμενη τάση το πόσο δίνεται να αυξηθεί το μήκος μιας ρωγμής στη μήτρα καθώς και η διάρκεια ζωής ενός σύνθετου υλικού εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από την off-axis γωνία θ . Έχει διαπιστωθεί λοιπόν πειραματικά ότι η διάρκεια ζωής σε κόπωση μειώνεται με την αύξηση της off-axis γωνίας.



Σχήμα 3: Θραύση μήτρας και διεπιφάνειας σε κόπωση UD πλάκας, σε off-axis διεύθυνση.

3.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΤΥΧΑΙΑ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΗ ΠΛΑΚΑ

Αρχικά πρέπει να τονιστεί ότι σε μια πολύστρωτη δομή οι διάφορες μορφές αστοχίας όπως για παράδειγμα η θραύση των ινών, η θραύση της μήτρας, η αποκόλληση των επιμέρους στρώσεων, εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από την διάταξη που παρουσιάζουν οι διάφορες στρώσεις που περιέχονται σε αυτή. Στο σχήμα 56 που ακολουθεί φαίνεται πολύ αναλυτικά η ανάπτυξη των διαφόρων μηχανισμών αστοχίας που παρουσιάζονται σε μια τυχαία πολυστρωτη πλάκα κατά την διάρκεια της ζωής της.



Σχήμα 4: Εξέλιξη αστοχίας σε πολύστρωτες πλάκες που καταπονούνται σε συνθήκες κόπωσης.

Όπως διαπιστώνεται από το παραπάνω σχήμα η ανάπτυξη των διαφόρων μηχανισμών αστοχίας μπορεί να χωριστεί σε 3 περιοχές. Η περιοχή I συνήθως περιλαμβάνει μικρορωγμές στη μήτρα οι οποίες εκτείνονται κατά το πάχος των off-axis στρώσεων. Αυτές οι μικρορωγμές σχεδόν πάντα αναπτύσσονται κατά την έναρξη της κοπωτικής φόρτισης, παράλληλα στην διεύθυνση των ινών. Το μοντέλο ανάπτυξης ρωγμών που παρουσιάζεται στην περιοχή I καλείται χαρακτηριστική κατάσταση αστοχίας (Characteristic Damage State, CDS). Αυτή η χαρακτηριστική κατάσταση αστοχίας (CDS) θεωρείται ιδιότητα της πολύστρωτης πλακός υπό την έννοια ότι εξαρτάται από τις ιδιότητες των

επιμέρους στρώσεων από τα πάχη αυτών καθώς και από την διάταξη την οποία αυτές έχουν πολύστρωτη δομή.

Η δεύτερη περιοχή II περιλαμβάνει σύνδεση και ταυτ'οχρονη ανάπτυξη των μικρορωγμών της μήτρας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την διεπιφανειακή αποκόλληση ινών/ μήτρας (interfacial debonding) καθώς επίσης και την αποκόλληση των επιμέρους στρώσεων μεταξύ τους (delamination). Και οι δύο τρόποι αστοχίας οφείλονται στις πολύ υψηλές ορθές και διατμητικές τάσεις που συγκεντρώνονται στα άκρα των μικρορωγμών. Επιπλέον η αποκόλληση στρώσεων οφείλεται συχνά και στις μεγάλες διαστρωματικές τάσεις που αναπτύσσονται μεταξύ τους. Τέλος κατά την ανάπτυξη θλιπτικών φορτίων οι εκτός επιπέδου μετατοπίσεις που υφίστανται οι διάφορες στρώσεις επηρεάζουν την άυξηση της διαστρωματικής αποκόλλησης. Σαν αποτέλεσμα αυτής της αποκόλλησης επέρχεται η έναρξη της θραύσης των ινών στις on-axis στρώσεις. Αυτό συμβαίνει γιατί με το που διαχωρίζονται οι στρώσεις μεταξύ τους καλούνται να φέρουν όλο το εξωτερικώς ασκούμενο φορτίο αυτές με προσανοτολισμό ινών παράλληλα με τη φόρτιση.

Η τρίτη και η τελευταία περιοχή III χαρακτηρίζεται από την θραύση των ινών ως κύριο αναπτυσσόμενο μηχανισμό αστοχίας, η οποία ακολουθείται και από διεπιφανειακή αστοχία μεταξύ των ινών και της μήτρας που βρίσκονται σε αυτές τις στρώσεις. Οι θραύσεις ινών που παρουσιάζονται σε αυτό το στάδιο αναπτύσσονται σε γειτονικές περιοχές των σημείων των off-axis στρώσεων που παρουσίασαν μικρορωγμές στη μήτρα. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι η θραύση ινών όπως παρατηρείται επιτυγχάνεται τόσο στην II όσο και στην III περιοχή. Παρά το γεγονός αυτό όμως ο ρυθμός αστοχίας των ινών στο τρίτο στάδιο είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από αυτόν στο δεύτερο στάδιο, ενώ ταυτόχρονα το 3ο στάδιο αδηγεί με μεγάλη ταχύτητα στην ολική αστοχία της πολύστρωτου πλακός.

Ολοκληρώνοντας τους μηχανισμούς αστοχίας θα πρέπει να δοθεί έμφαση στο γεγονός ότι οι διάφοροι μηχανισμοί που παρουσιάστηκαν αναλυτικά παραπάνω δεν αφορούν ανεξάρτητες περιόδους της συνολικής διάρκειας ζωής ενός σύνθετου υλικού. Αντιθέτως μάλιστα πολύ συχνά συμβαίνουν ταυτόχρονα. Παρόλα αυτά όμως για κάθε μηχανισμό αστοχίας δύναται να βρεθεί μια περίοδος της ζωής του υλικού όπου αυτός είναι κυρίαρχος. Για παράδειγμα, η αρχική αστοχία της μήτρας μπορεί να είναι κυρίαρχη στο αρχικό στάδιο της ζωής του υλικού ενώ η αποκόλληση των στρώσεων να είναι κυρίαρχη στο ενδιάμεσο στάδιο της ζωής του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ Α/Γ

Από την στιγμή που η πιστοποίηση των μηχανών έγινε νόμος της Ενωμένης Ευρώπης την 1 Ιανουαρίου 1995, επιβάλλεται πλέον σε όλες τις κατασκευάστριες εταιρίες μηχανών η υποχρέωση να αποσεικνύουν την ασφάλεια των παραγόμενων προϊόντων τους πριν τα διοχετεύσουν στην Ευρωπαϊκή αγορά. Μέσα στο πλαίσιο αυτό εντάσσονται και οι κατασκευάστριες εταιρίες Α/Γ συμπεριλαμβανομένων και αυτών που παράγουν αποκλειστικά πτερύγια. Με τον τρόπο αυτό ο σχεδιαστής μηχανικός πτερυγίων Α/Γ καλείται εξ αρχής να επιλέξει την φιλοσοφία σχεδιασμού που πρόκειται να υιοθετήσει, λαμβάνοντας υπόψη ότι κατά την παράδοση του τελικού προϊόντος στην αγορά, να μπορεί να πιστοποιήσει την ασφάλειά του. Οι δύο φιλοσοφίες σχεδιασμού μεταξύ των οποίων καλείται να επιλέξει ο σχεδιαστής είναι οι SAFE LIFE και η FAIL SAFE φιλοσοφία. Σίγουρα η FAIL SAFE φιλοσοφία η οποία στηρίζεται στις αρχές της γραμμικής θραυστομηχανικής και της ανοχής έναντι της βλάβης, εν αντιθέσει με την παλαιότερη SAFE LIFE, είναι λιγότερο συντηρητική, αφού ο όλος σχεδιασμός του όποιου κατασκευαστικού δομικού στοιχείου γίνεται έτσι ώστε να μην επιρρεάζεται η ασφαλής λειτουργία του ακόμα και στην περίπτωση της συσσώρευσης αστοχίας σε αυτό λόγω κάποιας απρόσμενης καταπόνησης. Παρά το γεγονός αυτό όμως και λόγω της αδυναμίας του καθορισμού του

τρόπου διαδόσεως των ρωγμών στα σύνθετα υλικά, μέχρι σήμερα από τους κατασκευαστές πτερυγίων υιοθετείται η SAFE LIFE φιλοσοφία σχεδιασμού, που αν και πιο συντηρητική από την FAIL SAFE μπορεί και επιτρέπει την πιο εύκολη πιστοποίηση των Α/Γ .

Η προδεδειγμένη διάρκεια ζωής των πτερυγίων Α/Γ έχει οριοθετηθεί στα 20 χρόνια. Στο διάστημα αυτό υπολοίζεται ότι το πτερύγιο υποβάλλεται σε σύνθετη κοπωτική καταπόνηση που αντιστοιχεί σε έναν αριθμό 10^8 - 10^9 κύκλων φόρτισης με ποικίλα εύρη και μέσες τιμές αναπτυσσόμενης τάσης.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πτερυγίων Α/Γ είναι ινώδη σύνθετα (FRP). Αυτός αποτελεί και τον κύριο λόγο αδυναμίας σχεδιασμού πτερυγίων υπό συνθήκες κοπωτικής καταπόνησης. Ειδικότερα, το γεγονός ότι στα σύνθετα υλικά δεν είναι πλήρως ξεκαθαρισμένοι οι μηχανισμοί αστοχίας που λαμβάνουν χώρα σε μικροσκοπική κλίμακα καθώς και η έλλειψη ενός αποδεδειγμένα αξιόπιστου μη γραμμικού νόμου συσσώρευσης αστοχίας, συνηγορούν στην διαπίστωση αυτή. Όσον αφορά την μέθοδο παραγωγής, μιλώντας πάντα για μεγάλων διαστάσεων πτερύγια, είναι αυτή της επίστρωσης με το χέρι (hand lay-up).

Τέλος οι διατομές ενός πτερυγίου αποτελούν συνήθως λεπτότοιχες πολυκυβελικές κατασκευές οι οποίες σχεδιάζονται από σύνθετες πολύστρωτες πλάκες. Τα διάφορα στοιχεία της εκάστοτε διατομής αποτελούνται, κατά πλειοψηφία, από διαφορετικές πολύστρωτες διατάξεις ως αποτέλεσμα της προσπάθειας βελτιστοποίησης του συνολικού βάρους του πτερυγίου.

4.2 ΦΑΣΜΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

Το σύνολο των φορτίων που αναπτύσσονται στα πτερύγια μιας Α/Γ αποτελείται τόσο από στοχαστικές όσο και από ντερτιμινιστικές περιπτώσεις φόρτισης. Κατά την διάρκεια λειτουργίας της Α/Γ παρατηρούνται μεγάλες διακυμάνσεις στα αναπτυσσόμενα φορτία οι οποίες οφείλονται στην αλλαγή της ταχύτητας του ανέμου η οποία αυξομειώνεται συνεχώς λόγω της σύνθετης τοπογραφίας του εδάφους, στην αλλαγή των περιβαλλοντικών συνθηκών καθώς και στον τυρβώδη χαρακτήρα της επερχόμενης ροής του αέρα. Έτσι στην πράξη συναντάται πολύ συχνά η περίπτωση λειτουργίας Α/Γ σε εισερχόμενη ροή αέρα με κλίση, είτε γιατί δεν ενεργοποιήθηκε έγκαιρα ο μηχανισμός ευθυγράμμισης της μηχανής, είτε γιατί η κατεύθυνση του ανέμου λόγω ανώμαλης τοπογραφίας μεταβάλλεται πολύ γρήγορα. Ως αποτέλεσμα του συγκεκριμένου γεγονότος παρατηρείται μιας συνεχής διαφοροποίηση των αναπτυσσόμενων φορτίων. Εδώ σημειώνεται και η συχνή εμφάνιση απώλειας της δυναμικής στηρίξεως των πτερυγίων, ειδικά σε υψηλές μέσες ταχύτητες ροής του ανέμου. Σε όλα τα παραπάνω προστίθενται και ένα πλήθος ιδιαιτεροτήτων που παρουσιάζει μια Α/Γ κατά την λειτουργία της όπως τα συνεχόμενα φρεναρίσματα και ξεκινήματα της μηχανής λόγω των στοχαστικών χαρακτηριστικών του ανέμου, τα απότομα φρεναρίσματα αυτής όταν πέφτει η ισχύς του δικτύου ή διακόπτεται η τροφοδοσία της ηλεκτρικής ενέργειας, η καταστροφή του συστήματος ελέγχου της Α/Γ, καθώς και οι διακοπές της λειτουργίας της μηχανής για λόγους ασφαλείας όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή (περί 25 m/sec), με αποτέλεσμα την ακόμα πιο έντονη καταπόνηση των πτερυγίων.

Ένεκα των παραπάνω χαρακτηριστικών που παρουσιάζει μια Α/Γ κατά την λειτουργία της όσο και το περιβάλλον λειτουργίας αυτής, συμπεραίνεται ότι η συνολική φόρτιση των πτερυγίων συντίθεται από δυνάμεις :1) αεροδυναμικές

(η αεροδυναμική αντίσταση που είναι παράλληλη στην διεύθυνση κίνησης του ανέμου και η αεροδυναμική άνωση που είναι κάθετη στην διεύθυνση κίνησης του ανέμου), 2) βαρυτικές λόγω της μάζας του κάθε τμήματος της Α/Γ και 3) αδρανειακές λόγω της περιστροφής των πτερυγίων και της μεταβαλλόμενης ταχύτητας του ανέμου που δημιουργεί επιτάχυνση ή επιβράδυνση των πτερυγίων της Α/Γ. Όλες αυτές οι περιπτώσεις φόρτισης εκφράζονται πάνω στο πτερύγιο με την μορφή καμπτικών ροπών, με την μορφή στρεπτικής ροπής καθώς και με την μορφή τεμνουσών και αξονικών δυνάμεων. Το σύνολο των προαναφερθεισών φορτίσεων αφορά τόσο την στατική όσο και την κοπωτική φόρτιση της κάθε υπό μελέτης διατομής του πτερυγίου. Αποτέλεσμα της σύνθετης καταπόνησης είναι η ανάπτυξη στο κάθε σημείο, της κάθε διατομής του πτερυγίου, ενός σύνθετου τασικού πεδίου που αποτελείται τόσο από ορθές όσο και από διατμητικές τάσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

5.1 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ-ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Αρχικά κρίνεται απαραίτητο να τονιστεί ότι η προσομοίωση της ελαστικής συμπεριφοράς των πτερυγίων στηρίζεται στην θεωρία δοκού. Το σύνολο των υπολογισμών θα στηριχτούν σε θεωρίες που έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς για την μελέτη λεπτότοιχων πολυκυψελιδικών δοκών που υπόκεινται σε συνθήκες σύνθετης καταπόνησης και ειδικότερα κάμψης, διάτμησης και στρέψης.

Περνώντας τώρα στην διαδικασία-μεθοδολογία της αναλύσεως του πτερυγίου υπό κοπωτική φόρτιση, μπορούν να διακριθούν τα εξής βήματα:

1. Αρχικώς προηγείται ο δομικός σχεδιασμός του πτερυγίου που αφορά την στατική του φόρτισή του. Καθορίζονται έτσι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όσο και οι πολύστρωτες διατάξεις που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του. Σε αυτό το στάδιο επίσης γίνεται και η διακριτοποίηση της κάθε εξεταζόμενης διατομής σε ν-στοιχεία. Το κάθε στοιχείο περιγράφεται πλήρως με το πάχος του καθώς και με τις συντεταγμένες των δύο ακραίων κόμβων του.
2. Γνωρίζοντας τώρα τις πολύστρωτες διατάξεις που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του πτερυγίου υπολογίζονται οι φαινόμενες τεχνικές ελαστικές σταθερές. Με τον τρόπο αυτό δύναται να ομογενοποιηθούν οι

διάφορες πολύστρωτες διατάξεις, αντικαθιστώντας τις με ισοδύναμο υλικό το οποίο χαρακτηρίζεται από τις φαινόμενες τεχνικές ελαστικές σταθερές που ήδη υπολογίστηκαν. Για τον συγκεκριμένο υπολογισμό αναπτύσσεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή κατάλληλο πρόγραμμα σε γλώσσα προγραμματισμού που να προσδιορίζει τις παραμέτρους αυτές.

3. Εν συνεχεία καθορίζεται το κεντροβαρικό σύστημα συντεταγμένων βάση του οποίου θα γίνουν όλοι οι εν συνεχεία υπολογισμοί.
4. έχοντας ορίσει το ελαστικό κέντρο πραγματοποιείται ο υπολογισμός του τασικού πεδίου σε κάθε κόμβο (y_i, z_i) της εκάστοτε διατομής του πτερυγίου που μελετάται. Σε αυτό περιλαμβάνονται τόσο ορθές όσο και διατμητικές τάσεις ως απόρρεια των αξονικών και τεμνουσών δυνάμεων καθώς και των στρεπτικών και καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται στο πτερύγιο. Τα παραπάνω είδη φορτίσεων προσομοιώνονται από οκτάλεπτες περίπου χρονοσειρές στις οποίες αναγράφονται τα ιστορικά φόρτισης σε συγκεκριμένο αριθμό ,εξ' αρχής προδεδεγγραμένο, διατομών. Από τις χρονοσειρές αυτές φόρτισης μπορεί να προσδιοριστούν οι χρονοσειρές ορθές τάσεων σε κάθε στοιχείο της κάθε διατομής. Για τον συγκεκριμένο υπολογισμό απαιτείται και πάλι ανάπτυξη παρακφερούς υπολογιστικού κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού.
5. Το επόμενο βήμα χαρακτηρίζεται από τον προσδιορισμό των τάσεων αστοχίας σε UTS (Ultimate Tensile Stress) και UCS(Ultimate Compressive Stress) που παρουσιάζουν οι διάφορες χρησιμοποιούμενες πολύστρωτες διατάξεις σε συνθήκες τόσο μονοαξονικού εφελκυσμού όσο και μονοαξονικής θλίψης αντίστοιχα. Έτσι μπορούν να οριστούν οι χαρακτηριστικές καμπύλες S-N του κάθε υλικού έτσι όπως προδιαγράφονται από τις αντίστοιχες προδιαγραφές προτύπων. Ένας από

τους συνηθέστερους εμπειρικούς νόμους εξομοίωσης που χρησιμοποιείται συχνά από πολλούς ερευνητές είναι:

$$\sigma_{\alpha N} = (UTS + UCS/2)N^{-1/k}$$

(5.1)

όπου, το όριο κόπωσης για N κύκλους και μέση τάση $\sigma_m=0$, UTS, UCS: το όριο θραύσης σε εφεκυσμό και θλίψη αντίστοιχα. Οι τιμές UTS και UCS αφορούν πάντα την αστοχία της πρώτης στρώσης της όποιας πολύστρωτης διατάξεως (FPF- First Ply Failure). Για τον υπολογισμό των παραμέτρων αυτών απαιτείται η κατάστρωση υπολογιστικού προγράμματος με την βοήθεια του οποίου αναλύεται η κάθε χρησιμοποιούμενη πολύστρωτη διάταξη εφαρμόζοντας την κλασική θεωρία πολυστρώτων πλακών (Classical Lamination Theory, CLT).

6. Στο επόμενο βήμα ακολουθεί η μετατροπή των προκύπτουσων χρονοσειρών τάσεων σε μητρώα με την διαδικασία Rain flow Counting. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται η επίπτωση των χρονοσειρών των τάσεων στην κοπωτική συμπεριφορά του υπο μελέτη περυγίου. Η διαδικασία αυτή γίνεται με ανάπτυξη υπολογιστικού κώδικα του οποίου ο αλγόριθμος και η αναλυτική διαδικασία του παρουσιάζεται από τους ερευνητές S.D.Dowing, και D.F.Socie που αναφέρονται στην βιβλιογραφία.
7. Εν συνεχεία με παρουσίαση του νόμου του Goodman, κατάλληλα τροποποιημένου ώστε να λαμβάνει υπόψη την ανομοιογένεια των UTS και UCS, υπολογίζεται ο επιτρεπόμενος αριθμός κύκλων φόρτισης.
8. Τέλος λόγω ελλείψεως ενός αποδεδειγμένου αξιόπιστου μη γραμμικού νόμου συσώρευσης αστοχίας χρησιμοποιείται ο νόμος των Palmgren-

Μίνερ ο οποίος βασίζεται στον νόμο της γραμμικής συσσώρευσης στο υλικό για τον προσδιορισμό του συντελεστού συνολικής αστοχίας D για κάθε θέση της διατομής του πτερυγίου και για όλες τις χρονοσειρές ταχυτήτων οι οποίες αναπτύσσονται σε αυτή κατά την εικοσαετή διάρκεια λειτουργία της Α/Γ. Σε περίπτωση που ο συντελεστής D ξεπεράσει την τιμή της μονάδας σε κάποια θέση αυτομάτως το γεγονός συνεπάγεται αστοχία της πολύστρωτης διάταξης και επιβάλλεται επανσχεδιασμός.

Μετά την συνοπτική παρουσίαση της μεθοδολογίας ελέγχου ενός πτερυγίου Α/Γ υπο συνθήκες κόπωσης ακολουθεί η αναλυτική παρουσίαση των παραπάνω βημάτων.

5.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ

Η ανάπτυξη των φαινόμενων ελαστικών σταθερών βασίζεται στις ελαστικές ιδιότητες του υλικού : μέτρο Ελαστικότητας (E), μέτρο Διάτμησης (G), και λόγος Poisson (ν) οι οποίες λόγω της φύσης του σύνθετου υλικού μεταβάλλονται κατά τις κύριες διεύθυνσεις του υλικού καθώς και ανάλογα με την γωνία που τοποθετούνται κατά το πάχος της πολύστρωτης πλάκας.

Ο υπολογισμός ξεκινά από τις καταστατικές εξισώσεις της πολύστρωτου πλακός στην γενική τους μορφή δίνονται ως:

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e \\ k \end{Bmatrix}$$

(5.2)

Όπου A: μητρώο εκτατικής δυσκαμψίας

B: μητρώο συζεύξεως

D: μητρώο καμπτικής δυσκαμψίας

Γνωρίζοντας τα μητρώα A, B, D είναι πλέον εφικτό να υπολογιστούν οι φαινόμενες τεχνικές ελαστικές σταθères της οποιαδήποτε πολύστρωτης μη-συμμετρικής διατάξεως. Σε γενικές γραμμές για την περίπτωση μη συμμετρικής πολύστρωτης πλακός, θεωρούμενης μακροσκοπικά ως ομογενές υλικό τα φαινόμενα τεχνικά μέτρα ελαστικότητας όπως και οι λόγοι Poisson δίδονται από τις σχέσεις που ακολουθούν:

$$E_{xx} = (hA_{xx})^{-1}, E_{yy} = (hA_{yy})^{-1}, E_{ss} = (hA_{ss})^{-1}, \nu_{xy} = -A_{xy}/A_{xx}, \nu_{yx} = -A_{xy}/A_{yy} \quad (5.3)$$

Όπου A_{ij} : συνιστώσες του μητρώου εκτατικής ενδόσεως

Το μητρώο εκτατικής ενδόσεως προκύπτει από την αντιστροφή του 6Χ6 μητρώου της σχέσεως (5.2). Συνεπώς διαπιστώνεται ότι οι τιμές του μητρώου εκτατικής ενδόσεως εξαρτώνται πλην των συνιστωσών του μητρώου εκτατικής δυσκαμψίας και από τις συνιστώσες του μητρώου συζεύξεως B.

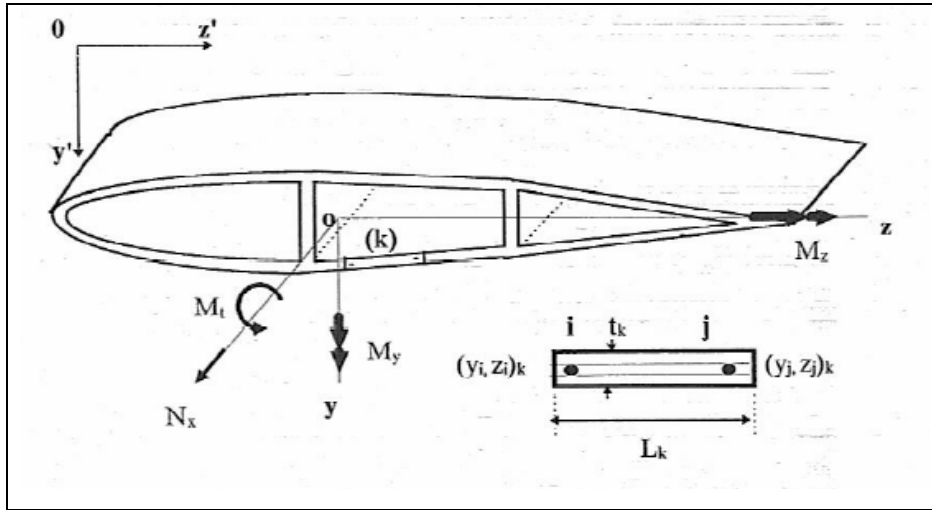
Η ανάπτυξη υπολογιστικού κώδικα με τα στοιχεία αυτά βοηθά έτσι ώστε δίνοντας ως δεδομένα εισόδου κάθε φορά τα είδη των υλικών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν καθώς και τα χαρακτηριστικά τους μεγέθη: ελαστικές σταθερές, το πάχος τους, την πυκνότητα της μάζας τους, καθώς και τις αντοχές τους σε συνθήκες εφελκυσμού, θλίψης, και διάτμησης τόσο κατά μήκος της

διεύθυνσης των ινών τους όσο και τα εγκάρσια σε αυτές και επιπροσθέτως καθορίζοντας και τις πολύστρωτες διατάξεις που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στην κάθε λεπτότοιχη κυψελοειδής διατομή του πτερυγίου, υπολογίζονται κάθε φορά τα φαινόμενα μέτρα ελαστικότητας και μέτρα διάτμησης E_x , G_{xy} , αντίστοιχα, οι ισοδύναμοι συντελεστές θερμικής και υγροσκοπικής διαστολής α_x και β_x , ο ισοδύναμος λόγος Poisson ν_{xy} καθώς και το συνολικό πάχος για την κάθε χρησιμοποιούμενη πολύστρωτη διάταξη.

Το αποτέλεσμα της έκφρασης των συντελεστών των μητρώων A , B , D είναι, όπως δίνεται και από την βιβλιογραφία, αριθμοί οι οποίοι προκύπτουν από τον συνυπολογισμό των ελαστικών σταθερών του εκάστοτε υλικού (E, G, ν) με τα γεωμετρικά στοιχεία της πολύστρωτης πλάκας (πάχος, απόσταση από τον κεντροβαρικό άξονα) συντίθοντας με τον τρόπο αυτό την συνολική δυσκαμψία της πλακός.

5.3 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΚΕΝΤΡΟΒΑΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί όλοι οι υπολογισμοί που πρόκειται να διεξαχθούν κατά τον έλεγχο του πτερυγίου θα αναφέρονται στο κέντρο της κάθε εξαταζόμενης διατομής, οι συντεταγμένες του οποίου ορίζονται ως προς κάποιο αρχικώς καθοριζόμενο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά λεπτότοιχης πολυκυβελικής διατομής.

$$\dot{y}_E = \frac{1}{S} \int_A y' dS = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^n \frac{(y_{ki} + y_{kj})}{2} S_k \quad (5.4)$$

$$\dot{z}_E = \frac{1}{S} \int_A z' dS = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^n \frac{(z_{ki} + z_{kj})}{2} S_k \quad (5.5)$$

$$S = \int_A dS = \sum_{k=1}^n S_k, \quad \mu \epsilon \quad S_k = \frac{E_k}{E_m} t_k L_k \quad (5.6)$$

Όπου E_m το ελάχιστο μέτρο ελαστικότητας, όλων των στοιχείων της εκάστοτε διατομής.

Όσον αφορά τα μεγέθη t_k , L_k καθώς και τις συντεταγμένες των δύο κόμβων (i) και (j) του κάθε στοιχείου k, (y_i, z_i) και (y_j, z_j) αντίστοιχα όπως παροθσιάστηκε και στο προηγούμενο σχήμα. Εδώ σημειώνεται ότι οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τον καθορισμό του κέντρου μάζας της μάζας κάθε διατομής του πτερυγίου, αν αντικατασταθούν τα φαινόμενα

τεχνικά μέτρα ελαστικότητας E_k και E_m , με τις πυκνότητες μάζας ρ_k και ρ_m αντίστοιχα.

5.4 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΤΑΣΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή τα πτερύγια ανεμογεννητριών αποτελούν λεπτότοιχες κυψελοειδής κατασκευές οι οποίες δημιουργούνται από πολύστρωτες δομές ινώδων σύνθετων υλικών. Προς εξέταση των συγκεκριμένων κατασκευών αρχικώς χρησιμοποιείται η θεωρία της ομογενοποίησης των συνθέτων υλικών. Αφού γίνει η ομογενοποίηση των πολύστρωτων διατάξεων πραγματοποιείται η τασική ανάλυση της οποίας η προσομοίωση της ελαστικής συμπεριφοράς στηρίζεται στην θεωρία λεπτότοιχης κυψελοειδούς δοκού.

Αρκετές είναι οι μελέτες που έχουν γίνει μέχρι σήμερα πάνω στον τομέα του υπολογισμού των τάσεων λεπτότοιχων κυψελικών δοκών, οι οποίες όμως αφορούν ομογενή και ισότροπα υλικά. Από αυτό προκύπτει άλλωστε και η ανάγκη της ομογενοποίησης των πολύστρωτων πλακών όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Με βάση της θεωρίες αυτές είναι εφικτός ο υπολογισμός του αναπτυσσόμενου τασικό πεδίο σε καθε κόμβο (θέση) της εξεταζόμενης διατομής κατά μήκος του πτερυγίου.

Το πτερύγιο υποβάλλεται σε σύνθετη καταπόνηση η οποία συντίθεται τόσο από αξονικές και τέμνουσες δυνάμεις όσο και από καμπτικές και στρεπτικές ροπές. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι αξονικές δυνάμεις καθώς και οι καμπτικές ροπές αποτελούν επαλληλία των αναπτυσσόμενων μηχανικών και υγροθερμικών φορτίων. Αποτέλεσμα αυτής της σύνθετης φορτίσεως είναι η

δημιουργία ενός σύνθετου τασικού πεδίου το οποίο με την σειρά του αποτελείται τόσο από ορθές τάσεις, ως αποτέλεσμα των αξονικών δυνάμεων και των καμπτικών ροπών, όσο και από διατμητικές τάσεις ως αποτέλεσμα τεμνουσών δυνάμεων και στρεπτικών ροπών.

Παρακατώ ακολουθεί μια αναλυτική παρουσίαση των αναπτυσσόμενων τάσεων που μόλις περιγράψαμε.

5.4.1 Υπολογισμός ορθών τάσεων

Οι αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις στο κάθε στοιχείο (k), της όποιας διατομής του περυγίου, λόγω των καμπτικών και αξονικών φορτίων (M_z , M_y , N_x) δίνονται από την σχέση:

$$\sigma_x^{(k)} = \frac{E_k}{E_{\min}} \left[\frac{\bar{N}_x}{S} + \frac{\bar{M}_z \bar{I}_y - \bar{M}_y \bar{I}_{yz}}{\bar{I}_y \bar{I}_z - \bar{I}_{yz}^2} y + \frac{\bar{M}_y \bar{I}_z - \bar{M}_z \bar{I}_{yz}}{\bar{I}_y \bar{I}_z - \bar{I}_{yz}^2} z \right] - E_k e_k \quad (5.7)$$

Λόγω ότι η συνολική φόρτιση των περυγίων που είναι κατασκευασμένα από ινώδη σύνθετα υλικά συνίσταται πλήν των μηχανικών και από υγροθερμικά φορτία, επιβάλλεται να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς και η ελευθέρα υγροθερμική παραμόρφωση e_k (free hygrothermal strain), στον κάθε κόμβο της εξεταζόμενης διατομής, η οποία δίνεται από την σχέση:

$$e_k = a_k \Delta T(y, z) + \beta_k c(y, z) \quad (5.8)$$

Με α_k και β_k συμβολίζονται οι συντελεστές θερμικής διαστολής και υγροσκοπικής διογκώσεως αντίστοιχα, του k στοιχείου στην x -διεύθυνση και με $\Delta T(y,z)$, $c(y,z)$ την θερμοκρασιακή διαφορά καθώς και την ειδική συγκέντρωση υγρασίας που παρουσιάζει ο κάθε κόμβος της κάθε διατομής, αντίστοιχα.

Με τις παρακάτω εξισώσεις (5.9), παριστάνονται οι συνολικά ασκούμενες αξονικές και καμπτικές φορτίσεις, δηλαδή τόσο τις μηχανικές όσο και τις αντίστοιχες υgroθερμικές.

$$\begin{aligned}\bar{N}_x &= N_x + N_x^N \\ \bar{M}_y &= M_y + M_y^N \\ \bar{M}_z &= M_z + M_z^N\end{aligned}\tag{5.9}$$

Με τον εκθέτη (N) συμβολίζονται τα αντίστοιχα υgroθερμικά μεγέθη των χωρίς εκθέτη μεγεθών N_x , M_y και M_z . Ειδικότερα τώρα και θεωρώντας τα μεγέθη ΔT και c σταθερά σε όλη τη διατομή, τα υgroθερμικά φορτία εκφράζονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned}N_x^N &= \int_A E_k e_k dA = \sum_{k=1}^n E_k e_k t_k L_k \\ M_y^N &= \int_A z E_k e_k dA = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n E_k e_k t_k L_k (z_i + z_j) \\ M_z^N &= \int_A y E_k e_k dA = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n E_k e_k t_k L_k (y_i + y_j)\end{aligned}\tag{5.10}$$

Όσον αφορά τα παρακάτω μεγέθη που συμβολίζονται με I , παριστάνουν τις δευτεροβάθμιες ροπές αδράνειας ορισμένες πάντα ως προς το ελαστικό κέντρο. Οι τρεις αυτές σχέσεις εκφράζονται παρακάτω:

$$\begin{aligned}
 \bar{I}_y &= \int_A z^2 dS = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (z_i^2 + z_i z_j + z_j^2)_k S_k \\
 \bar{I}_z &= \int_A y^2 dS = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (y_i^2 + y_i y_j + y_j^2)_k S_k \\
 \bar{I}_{yz} &= \int_A yz dS = \sum_{k=1}^n \left[\frac{1}{3} (y_i z_i + y_j z_j) + \frac{1}{6} (y_i z_j + y_j z_i) \right] S_k
 \end{aligned}
 \tag{5.11}$$

5.4.2 Υπολογισμός διατμητικών τάσεων

Εκτός των ορθών τάσεων υπάρχει και η ανάπτυξη και των διατμητικών τάσεων οι οποίες μπορούν να μην οφείλονται τόσο στις τέμνουσες δυνάμεις (λόγω του μεγάλου μήκους του πτερυγίου υπερσχύουν τα καμπτικά φαινόμενα που εισάγουν μεγαλύτερες ορθές παρά διατμητικές τάσεις), όσο στις στρεπτικές ροπές που ασκούνται στο πτερύγιο. Λόγω της σύνθετης καταπόνησης, η συνολική αναπτυσσόμενη διατμητική τάση που πρέπει να υπολογιστεί σε κάθε κόμβο της κάθε διατομής, θα προκύπτει σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας από την παρακάτω σχέση:

$$\tau^{\text{tot}} = \tau^{\text{bend}} + \tau^{\text{tors}}
 \tag{5.12}$$

όπου η τ^{bend} η αναπτυσσόμενη διατμητική τάση λόγω κάμψης και η τ^{tors} η αντίστοιχη λόγω στρέψης .

Παρακάτω ακολουθεί αναλυτικά η διαδικασία υπολογισμού των δύο επιμέρους τάσεων καθώς και ο τρόπος καθορισμού του κέντρου διατμήσεως της όποιας εξεταζόμενης διατομής.

5.4.3 Διατμητικές τάσεις λόγω στρέψης

Η στρέψη μιας μονοκυψελικής διατομής αποτελεί ένα στατικώς ορισμένο πρόβλημα, με συνέπεια η διατμητική ροή και άρα και η αναπτυσσόμενη διατμητική τάση να μην εξαρτώνται από τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού. Στην περίπτωση όμως στρέψης λεπτότοιχης πολυκυψελικής διατομής το πρόβλημα είναι στατικά απροσδιόριστο αφού πλέον στην κάθε κυψέλη υπάρχει η εμφάνιση επιπλέον διατμητικών ροών. Ο βαθμός απροσδιοριστίας μιας τέτοιας διατομής η οποία περιέχει n κυψέλες είναι $n-1$.

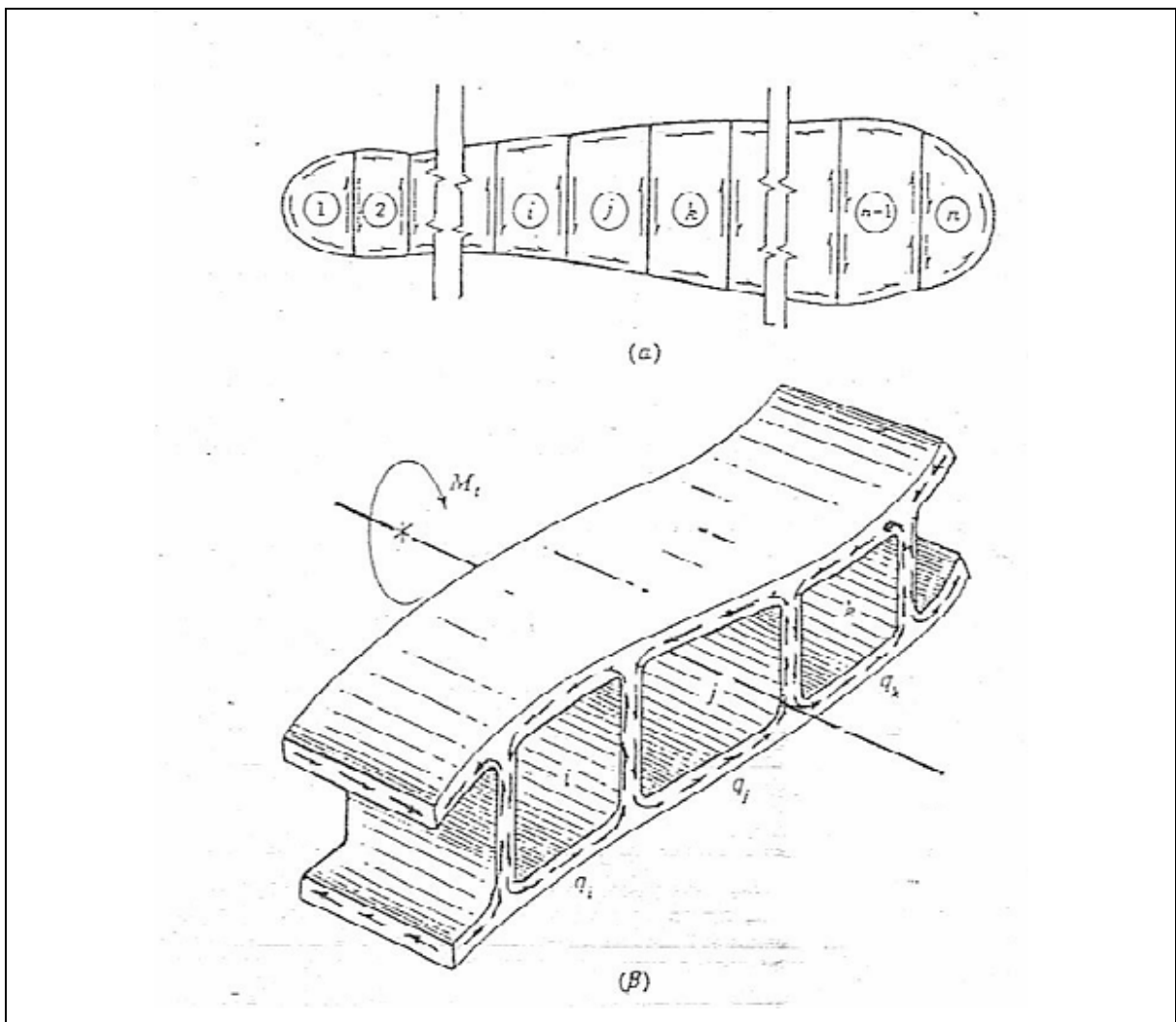
Για την διατομή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα η εξίσωση ισορροπίας εκφράζεται από την σχέση:

$$M_{\text{τοξ}} = 2 \sum_{j=1}^n q_j \Omega_j \quad (5.13)$$

Όπου q_j η διατμητική ροή στην κυψέλη j και Ω_j το εμβαδόν που περικλείεται από την μέση γραμμή της αντίστοιχης κυψέλης. Ειδικότερα η ποσότητα Ω_j στην περίπτωση συγκεκριμένης κυψέλης (j) η οποία έχει διακριτοποιηθεί με n_j στοιχεία ορίζεται με την βοήθεια της σχέσεως

$$\Omega_j = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n_j} |y_i z_j - y_j z_i|_k \quad (5.14)$$

Οι άγνωστοι παράγοντες οι οποίοι πρέπει να υπολογιστούν στο παρόν πρόβλημα είναι εκτός των διατμητικών ροών q_i με $i=1, \dots, n$ και η γωνία στρέψης θ . Από το σχήμα ββ, και θεωρώντας αρχικά αρχικά ότι υπάρχει μόνο η κυψέλη j , είναι δηλαδή μονοκυψελική διατομή, προσδιορίζεται η γωνία στρέψης θ_j η οποία ισούται με:



Σχήμα 6: Πολυκυψελική διατομή σε στρέψη.

$$\theta_j = \frac{q_j}{2G\Omega_j} \oint_{s_j} \frac{ds}{t} \quad (5.15)$$

Με s_j δηλώνεται η περιοχή γύρω από την κυψέλη (j).

Εν συνεχεία εισάγονται στην μελέτη και άλλες δύο κυψέλες (i) και (k) όπως φαίνονται και στο σχήμα 6β και συμβολίζονται οι διατμητικές ροές σε αυτές τις κυψέλες ως q_i και q_k αντίστοιχα, οι ροές στα νεύρα (webs) s_{ji} και s_{jk} μειώνονται τελικά σε $q_j - q_i$ και $q_j - q_k$ αντίστοιχα όπως φαίνεται στο σχήμα 6β. Σε αυτή την περίπτωση σχέση 54 θα πάρει την μορφή

$$\theta_j = \frac{1}{2G\Omega_j} \left(q_j \oint_{s_j} \frac{ds}{t} - q_i \int_{s_{ji}} \frac{ds}{t} - q_k \int_{s_{jk}} \frac{ds}{t} \right) \quad (5.16)$$

Οι εξισώσεις συμβιβαστού των παραμορφώσεων για το συγκεκριμένο πρόβλημα εκφράζουν το ότι αν και η διατομή παραμορφώνεται λόγω της στρεπτικής ροπής δεν παρατηρείται στρέβλωση στο επίπεδό της. Η φυσική σημασία της συγκεκριμένης παρατήρησης είναι ότι όλη η πολυκυψελική διατομή και άρα και η κάθε κυψέλη χωριστά, στρέφονται με τον ίδι ρυθμό στρέψης θ . Δηλαδή η εξίσωση συμβιβαστού των παραμορφώσεων εκφράζεται από την σχέση:

$$\theta_1 = \theta_2 = \dots = \theta_j = \dots \theta_n = \theta \quad (5.17)$$

με συνέπεια, στην γενικότερη περίπτωση όπου η κυψέλη j συνορεύει με περισσότερες των δύο κυψελών, η σχέση γράφεται:

$$\theta = \frac{1}{2G\Omega_j} \left[q_j \int_{s_j} \frac{ds}{t} - \sum_{r=1}^m \left(q_r \int_{s_r} \frac{ds}{t} \right) \right] \quad (5.18)$$

Οι εξισώσεις (5.17) και (5.18) καλούνται εξισώσεις επιφερόμενης αλλαγής σχήματος. Έτσι πλέον είναι εφικτό να παραχθεί για την κάθε μία από τις n κυψέλες μια εξίσωση της μορφής (5.18). Με την προσθήκη σε αυτές και της εξίσωσης (5.13) προκύπτουν $n+1$ εξισώσεις προς τον προσδιορισμό των $n+1$ αγνώστων q_i και θ .

Γνωρίζοντας πλέον τις διατμητικές ροές στο κάθε σημείο της εξεταζόμενης διατομής καθώς και την διαφορική γωνία στρέψης θ είναι δυνατόν να υπολογιστεί τόσο οι αντίστοιχες διατμητικές τάσεις όσο και η ισοδύναμη στρεπτική δυσκαμψία $(GJ)_{eq}$. Αναλυτικότερα η προκύπτουσα διατμητική τάση θα ισούται σε κάθε στοιχείο της διατομής με τον λόγο της διατμητικής ροής προς το πάχος αυτού.

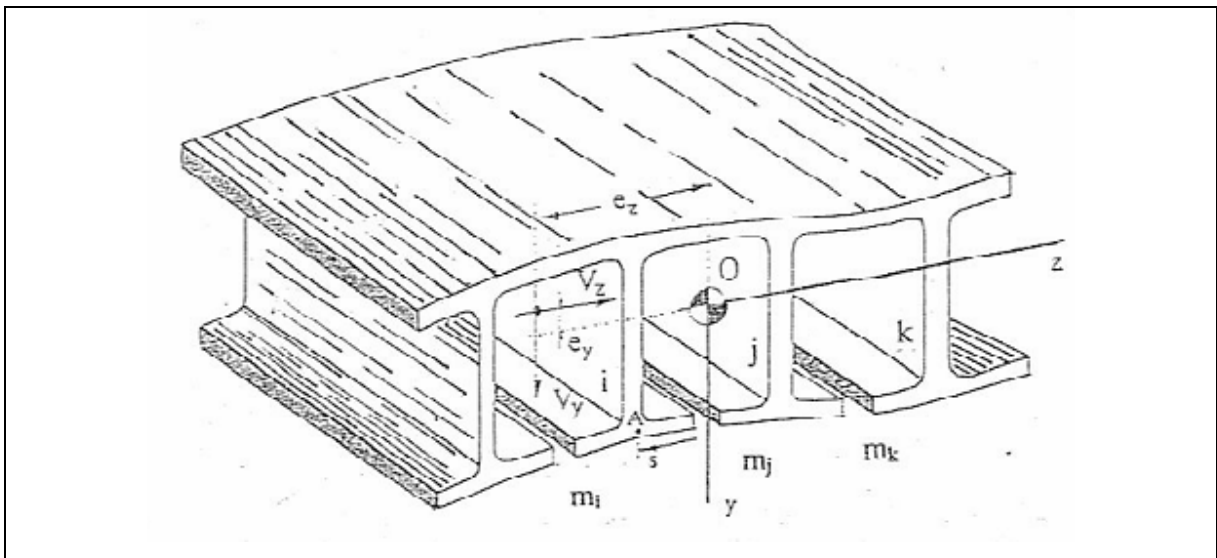
Όσον αφορά την στρεπτική δυσκαμψία αυτή προκύπτει εύκολα από την παρακάτω σχέση:

$$\begin{aligned} M_{tors} &= 2 \sum_{j=1}^n q_j \Omega_j = (GJ)_{eq} \theta \Rightarrow \\ \Rightarrow (GJ)_{eq} &= \frac{2}{\theta} \sum_{j=1}^n q_j \Omega_j \end{aligned} \quad (5.19)$$

5.4.4 Διατμητικές τάσεις λόγω κάμψης

Για την περίπτωση της κάμψης πολυκυψελωτής διατομής το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι με την προσθήκη κάθε επιπλέον κυψέλης, πλην της μιας της αρχικής, εισάγεται στους υπολογισμούς μια επιπλέον άγνωστη διατμητική ροή. Αυτό έχει ως συνέπεια μια n-κυψελωτή διατομή σε συνθήκες κάμψης, όπως και στην περίπτωση της στρέψης να αποτελεί ένα στατικά απροσδιόριστο πρόβλημα με n-1 βαθμούς απροσδιοριστίας. Σε αυτούς τους βαθμούς απροσδιοριστίας προστίθονται και η διατμητική ροή της αρχικής κυψέλης καθώς και ο καθορισμός του κέντρου διατμήσεως έτσι ώστε να απαιτείται ο προσδιορισμός n+1 αγνώστων. Ειδικότερα πρέπει να υπολογιστούν n διατμητικές ροές καθώς και η απόσταση e που απέχει το κέντρο διάτμησης από ένα εξαρχής προεπιλεγμένο σημείο που είναι το κεντροβαρικό σύστημα συντεταγμένων.

Στο σχήμα 59 που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα τρικυψελικό μέρος μιας n-κυψελικής διατομής, με τις τρεις κυψέλες i,j,k . Στο συγκεκριμένο σχήμα διακρίνονται τόσο το κεντροβαρικό σύστημα όσο και το κέντρο διάτμησης e με συντεταγμένες ως προς το O, e_y , e_z .



Σχήμα 7: Τρεις κυψέλες μιας n-κυψελικής διατομής σε συνθήκες κάμψης.

Και εδώ η διαδικασία υπολογισμού των παραπάνω ποσοτήτων είναι παραπλήσια αυτής που χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση της στρέψης και ουσιαστικά αποτελεί επέκταση της μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται στις μονοκυψελικές διατομές. Έτσι όπως και στις μονοκυψελικές διατομές, θεωρούνται υποθετικές τομές σε κάθε μια από τις κυψέλες i, j, k στα σημεία m_i, m_j, m_k όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.

Έτσι πλέον το πρόβλημα αντιμετωπίζεται ως μια ανοικτή διατομή. Αν σε αυτό το σημείο αποκαταστηθεί το m_j κλείνοντας ουσιαστικά την κυψέλη j ενώ οι δύο υπόλοιπες διατηρούνται ανοικτές, η συνολική διατμητική ροή που αναπτύσσεται στην κυψέλη j θα δίνεται από την σχέση:

$$q_j = q_{j0} + q_j \quad (5.20)$$

Όπου το q_{j0} η διατμητική ροή σε κάθε σημείο της κυψέλης j θεωρώντας τομές σε όλα τα σημεία m_n για n-κυψελωτή διατομή. Για την περίπτωση της ανοικτής διατομής η διατμητική ροή θα δίνεται:

$$q_{j0} = \frac{\bar{Q}_z \bar{I}_y - \bar{Q}_y \bar{I}_{yz}}{\bar{I}_y \bar{I}_z - \bar{I}_{yz}^2} V_y + \frac{\bar{Q}_y \bar{I}_z - \bar{Q}_z \bar{I}_{yz}}{\bar{I}_y \bar{I}_z - \bar{I}_{yz}^2} V_z \quad (5.21)$$

Όπου V οι εφαρμοζόμενες στην κάθε διατομή τέμνουσες δυνάμεις στην διεύθυνση y και z , I οι αντίστοιχες δευτεροβαθμές ροπές αδράνειας και με Q οι αντίστοιχες πρωτοβάθμιες ροπές αδράνειας που δίνονται από τις σχέσεις

$$\bar{Q}_y = \int_A z dA = \sum_{k=1}^n S_k \frac{(z_i + z_j)_k}{2} \quad (5.22)$$

$$\bar{Q}_z = \int_A y dA = \sum_{k=1}^n S_k \frac{(y_i + y_j)_k}{2} \quad (5.23)$$

Επιστρέφοντας πάλι στην σχέση (5.20) η διατμητική ροή q_j παριστά την σταθερή διορθωτική ροή που αναπτύσσεται ανεξάρτητα στην κυψέλη j . Με την προσθήκη αυτής της ροής στην q_{jo} κλείνει η τομή στο σημείο m_j . εύκολα γίνεται κατανοητό αν όλες οι κυψέλες κλείσουν τότε οι σχετικές μετατοπίσεις στα σημεία m_1, \dots, m_n θα μηδενιστούν. Κατά τα γνωστά η σχετική μετατόπιση u του οποίου σημείου τόσο κλειστής όσο και ανοικτής διατομής σε συνθήκες στρέψης δίνεται από την σχέση:

$$\bar{u} = \frac{1}{G} \int \tau ds - 2\theta\omega \quad (5.24)$$

Για την περίπτωση όπου $\theta=0$ και ειδικότερα για την κυψέλη j , η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$\bar{u}_j - \frac{1}{G} \oint_{\gamma_j} q_j \frac{ds}{t} = \frac{1}{G} \left(- \int_{\gamma_i} \bar{q}_i \frac{ds}{t} + \oint_{\gamma_j} \bar{q}_j \frac{ds}{t} - \int_{\gamma_k} \bar{q}_k \frac{ds}{t} + \oint_{\gamma_{jo}} q_{jo} \frac{ds}{t} \right) = 0 \quad (5.25)$$

Συμβολίζοντας τώρα με:

$$\begin{aligned} \delta_{j\sigma} &= \frac{1}{G} \oint_{s_j} q_{j\sigma} \frac{ds}{t} & , & & \delta_{jj} &= \frac{1}{G} \oint_{s_j} \frac{ds}{t} \\ \delta_{ji} &= -\frac{1}{G} \int_{s_i} \frac{ds}{t} & , & & \delta_{jk} &= -\frac{1}{G} \int_{s_k} \frac{ds}{t} \end{aligned} \quad (5.26)$$

η σχέση 65 παίρνει τελικά την μορφή:

$$\delta_{ji} \bar{q}_i + \delta_{jj} \bar{q}_j + \delta_{jk} \bar{q}_k + \delta_{j\sigma} = 0 \quad (5.27)$$

Με εφαρμογή της σχέσεως (5.27) σε όλες τις κυψέλες της n-κυψελωτής διατομής προκύπτουν οι n άγνωστες διατμητικές ροές $q_i=1..n$, από την στιγμή που με την βοήθεια της (5.21) έχει ήδη υπολογιστεί η $q_{j\sigma}$ για την κάθε κυψέλη. Έτσι με την χρησιμοποίηση της (5.20) είναι δυνατός ο υπολογισμός της συνολικής διατμητικής ροής q_i και άρα και την αντίστοιχη διατμητική τάση που αναπτύσσεται σε κάθε στοιχείο της οποιας κυψέλης, της εξεταζόμενης διατομής.

Πριν υπολογιστεί το κέντρο διάτμησης κρίνεται απαραίτητο να δοθεί ο ορισμός του. Έτσι:

«Ως κέντρο διάτμησης ορίζεται το σημείο εκείνο στο επίπεδο της διατομής από το οποίο θα πρέπει να διέρχεται ο φορέας κάθε εγκάρσιας δύναμης έτσι ώστε η διατομή να μην υπόκειται σε συνθήκες στρεπτικής καταπόνησης».

Όσον αφορά τον προσδιορισμό του τώρα, χρειάζεται να υπολογιστούν οι συντεταγμένες του e_y και e_z ως προς το κεντροβαρικό σύστημα συντεταγμένων. Αυτό γίνεται θεωρώντας στους υπολογισμούς $V_y=0$ και $V_z=1$ και αμέσως μετά $V_y=1$ και $V_z=0$. με εφαρμογή λοιπόν της σχέσης ισορροπίας ροπών στρέψεως ως προς το κεντροβαρικό σύστημα θα ισχύει:

$$V_y e_z - V_z e_y + \sum_{i=1}^n \oint_{\omega_i} q_{io} r ds + 2 \sum_{i=1}^n \bar{q}_i \Omega_i = 0 \quad (5.28)$$

Και με την διαδικασία που αναφέρθηκε πιο πάνω προκύπτουν οι αντίστοιχες συντεταγμένες του κέντρου διάτμησης με χρήση των ακολούθων σχέσεων:

$$e_z = \sum_{i=1}^n \oint_{\omega_i} q_{io} r ds + 2 \sum_{i=1}^n \bar{q}_i \Omega_i \quad \mu \epsilon \quad V_y = 1 \quad \kappa \alpha \iota \quad V_z = 0 \quad (5.29)$$

$$e_y = - \sum_{i=1}^n \oint_{\omega_i} q_{io} r ds - 2 \sum_{i=1}^n \bar{q}_i \Omega_i \quad \mu \epsilon \quad V_z = 1 \quad \kappa \alpha \iota \quad V_y = 0 \quad (5.30)$$

$$\oint_{\omega_j} q_{io} r ds = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N |y_i z_j - y_j z_i|_k (q_{oi}(i) + q_{oi}(j))_k \quad (5.31)$$

5.5 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Όπως έχει ειπωθεί από την ανάλυση των φορτίων και από την ανάλυση της αντοχής προκύπτουν οι χρονοσειρές φόρτισης των τριών δυνάμεων $N_x(t)$, $V_y(t)$, $V_z(t)$ και των τριών ροπών $M_y(t)$, $M_z(t)$, $M_{tors}(t)$ που προέρχονται από το ιστορικό της μεταβολής της ταχύτητας με το χρόνο. Έχοντας λοιπόν αυτά τα ιστορικά φόρτισης για κάποιες προεπιλεγμένες διατομές του πτερυγίου, ο αριθμός των οποίων δεν πρέπει να είναι μικρότερος των πέντε (5), είναι δυνατό να υπολογιστούν οι αναπτυσσόμενες χρονοσειρές τάσεων σε τουλάχιστον κόμβους (θέσεις) της διατομής.

Η όλη διαδικασία βασίζεται στην χρησιμοποίηση υπολογιστικού κώδικα, προσδιορίζεται ένας συντελεστής τάσεως ο οποίος εκφράζει την αναπτυσσόμενη τάση στον κάθε κόμβο, για μοναδιαία φόρτιση. Έτσι αφού η πλέον σύνθετη καταπόνηση του πτερυγίου συνιστάται από τα 6 είδη φορτίσεων, εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι από τον υπολογιστικό κώδικα και για τον προεπιλεγμένο αριθμό κρίσιμων προς αστοχία κόμβων καθίσταται δυνατή η εξαγωγή 6 συντελεστών τάσεων. Τότε οι χρονοσειρές τόσο των ορθών και των διατμητικών τάσεων θα δίδονται από την σχέση:

$$\sigma(\text{" case B"}) = \sum \sigma_{,Li} Li(\text{" case B"}) \quad (5.32)$$

Γενικά όμως μέχρι και σήμερα οι μεγάλες κατασκευάστριες εταιρίες πτερυγίων Α/Γ κατά τους υπολογισμούς τους λαμβάνουν υπόψη μόνο τις ορθές τάσεις και αμελούν τις διατμηματικές. Το ποιές είναι οι επιπτώσεις στην πράξη μιας τέτοιας θεώρησης αποτελεί για την ώρα ένα μεγάλο ερωτηματικό χωρίς αξιόπιστη απάντηση. Όπως είναι κατανοητό αν και στην ανάλυση της αντοχής ορίστηκαν και οι διατμητικές τάσεις στην τελική ανάλυση της αστοχίας θα χρησιμοποιηθούν μόνο οι ορθές τάσεις για την εξαγωγή των οποίων θα χρησιμοποιηθούν μόνο οι χρονοσειρές των αξονικών φορτίων $N_x(t)$ καθώς και των καμπτικών ροπών $M_y(t)$ και $M_z(t)$. Συνεπώς και η σχέση παίρνει τελικά την μορφή:

$$\sigma(t) = \sigma_{,N_x} N_x(t) + \sigma_{,M_y} M_y(t) + \sigma_{,M_z} M_z(t) \quad (5.33)$$

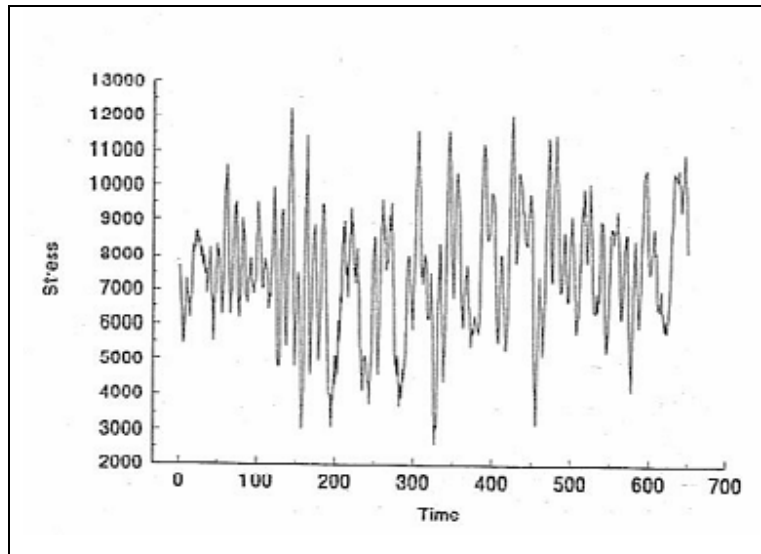
με σ συμβολίζονται οι συντελεστές τάσεων για μοναδιαίες φορτίσεις N_x , M_y και M_z αντίστοιχα.

Με τον τρόπο αυτό καθορίζονται η αναπτυσσόμενες χρονοσειρές ορθών τάσεων σε κάθε ένα από τους 12 τουλάχιστον κρίσιμους προς αστοχία κόμβους (θέσεις), σε κάθε μία εκ των 5 τουλάχιστον διατομών που θα πρέπει να ελεγχθούν.

5.6 ΑΝΑΓΩΓΗ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΙΣΤΟΡΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΕ ΠΛΗΡΕΙΣ ΚΥΚΛΟΥΣ (RAINFLOW COUNTING)

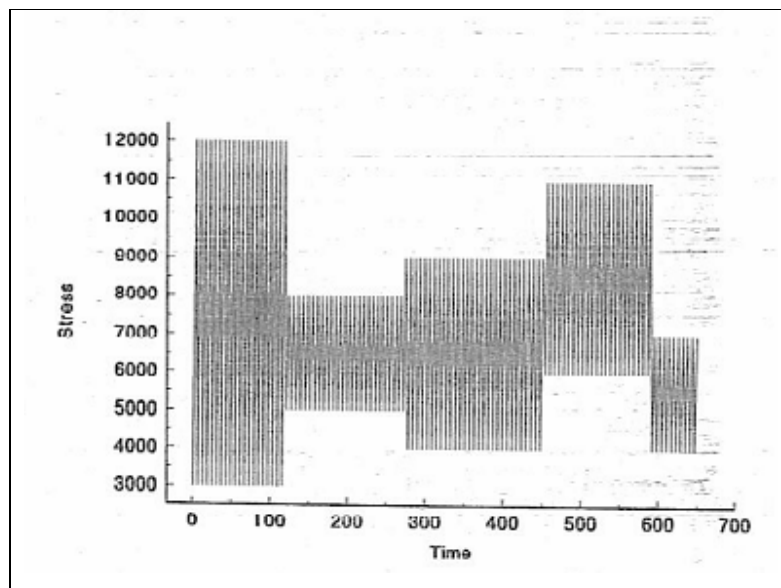
Με βάση τις αναπτυσσόμενες χρονοσειρές τάσεων, εξάγονται τα συμπεράσματα για την κοπωτική καταπόνηση του πτερυγίου. Σημειώνεται ότι οι προκύπτουσες χρονοσειρές τάσεων είναι σύνθετες. Με τον τρόπο αυτό εννοείται ότι δεν υφίσταται η έννοια του κύκλου φόρτισης αφού οι τάσεις μεταβάλλονται ακανόνιστο τρόπο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα του σύνθετου αυτού ιστορικού φόρτισης παρουσιάζεται στο Σχ.59 που ακολουθεί.

Αυτό που πρέπει να γίνει για την αντιμετώπιση τέτοιων χρονοσειρών φόρτισης είναι η αναγωγή τους σε ένα σύνολο διακεκριμένων κύκλων, όπως φαίνεται στο σχήμα 9, στο οποίο παρουσιάζεται η αναγωγή του ιστορικού του σχήματος 8 σε πλήρεις κύκλους στο σχήμα 9.



Σχήμα 8: Σύνθετο ιστορικό φόρτισης.

Κατά συνέπεια λοιπόν ο υπολογισμός της μείωσης στη διάρκεια ζωής που προκαλεί στο υλικό ένα ιστορικό φόρτισης όπως στο Σχ.8, ανάγεται στον υπολογισμό της μείωσης στη διάρκεια ζωής για ένα ιστορικό της μορφής του Σχ.9



Σχήμα 9: Αναγωγή του σύνθετου ιστορικού φορτισης σε πλήρεις κύκλους φόρτισης.

Για την επίτευξη αυτής της αναγωγής έχουν παρουσιαστεί κατά καιρούς διάφορες μέθοδοι. Αυτές στο σύνολό τους ονομάζονται μετρικές μέθοδοι και η σημαντικότερη εξ αυτών, η οποία χρησιμοποιείται ευρύτατα και καλείται μέθοδος της ροής της βροχής (Rainflow Counting Method) . Ως αποτέλεσμα της εφαρμογής αυτής της μεθόδου στην όποια χρονοσειρά τάσεως είναι η δημιουργία ενός μητρώου, το οποίο περιέχει τον εκτελούμενο αριθμό των κύκλων φόρτισης ανά διαμέριση μέσης τάσεως-πλάτους τάσεως.

Για την όλη παραπάνω διαδικασία έχουν αναπτυχθεί από τους ερευνητές S.D.Dowing, και D.F.Socie ειδική μεθοδολογία και υπολογιστικός κώδικας ο οποίος απαιτεί ως δεδομένα εισόδου πλην της χρονοσειράς τάσεως και τον καθορισμό του αριθμού των μπλοκ φόρτισης σταθερού εύρους τάσεως που εξετάζονται. Ως αποτέλεσμα εξόδου του προγράμματος προκύπτει μπλοκ φόρτισης με συγκεκριμένο εύρος τάσεως, συγκεκριμένη μέση τιμή τάσεως καθώς και οι εκτελούμενοι κύκλοι για αυτές τις συνθήκες φόρτισης.

5.7 ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΟ ΠΛΑΤΟΣ ΤΑΣΗΣ

Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το όριο κόπωσης είναι η μέση τάση σ_m . Η ποσοτική επίδραση της σ_m στο πλάτος τάσης σ_a υπολογίζεται μεταξύ των άλλων και με τον νόμο του Goodman που φαίνεται παρακάτω:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{aN}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_o} = 1 \quad (5.34)$$

Όπου:

- σ_{a_N} το όριο κόπωσης για N κύκλους και μέση τάση $\sigma_m = 0$ και
- σ_o η στατική τάση αστοχίας του υλικού και
- σ_a, σ_m το πλάτος και η μέση τάση αντίστοιχα ως αποτέλεσμα της RFC

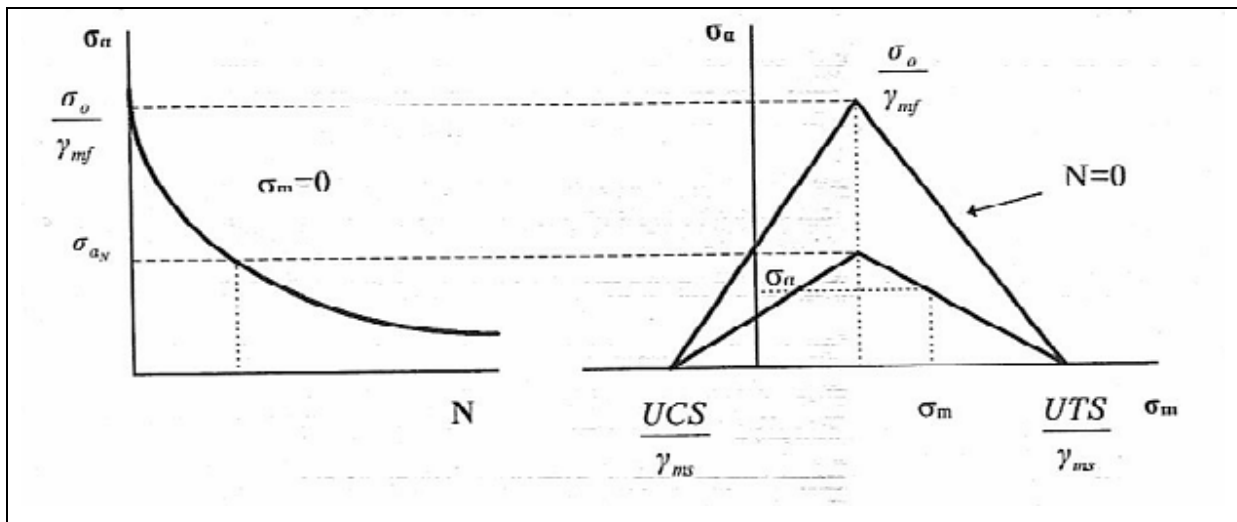
Η σχέση (5.34) πλέον γράφεται:

$$\sigma_{a_N} = \sigma_o N^{-\frac{1}{k}} \quad (5.35)$$

Επιτρέποντας την αντικατάσταση των μεγεθών (σ_a, σ_m) του κάθε μπλοκ φόρτισης (bin), που προέκυψε από την RFC, με ένα ζεύγος πλάτους τάσης-μηδενικής μέσης τάσης, ούτως ώστε να είναι εφικτή η συσχέτιση των τιμών με τις πειραματικά προσδιορισμένες καμπύλες Wohler οι οποίες συνήθως περιγράφουν την κοπωτική συμπεριφορά των πολύστρωτων πλακών και όχι μόνο. Ειδικότερα από τις προηγούμενες δύο σχέσεις προκύπτει τελικά η παρακάτω:

$$\sigma_{a_N} = \frac{\sigma_o \sigma_a}{\sigma_o - \sigma_m} \quad (5.36)$$

Αυτά ισχύουν για την περίπτωση του συμμετρικού νόμου του Goodman και για την μη χρησιμοποίηση συντελεστών ασφαλείας. Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά των UTS και UCS αντοχών των συνθέτων υλικών, όσο και τους προδιαγραφόμενους συντελεστές ασφαλείας για συνθήκες στατικής και κοπωτικής καταπόνησης γ_{ms} και γ_{mf} αντίστοιχα.



Σχήμα 10: Καμπύλη Wohler και το αντίστοιχο διάγραμμα Goodman.

Η σχέση (5.37) με την βοήθεια της οποίας εξομοιώθηκε η καμπύλη Wohler αν επιλυθεί ως προς τους κύκλους N δίνει:

$$N_{all} = \left[\frac{UTS + UCS}{2\gamma_{mf}} \cdot \frac{1}{\sigma_{aN}} \right]^k \quad (5.38)$$

Όμοια η σχέση (5.34) με προσεκτική παρατήρηση του διαγράμματος Goodman γράφεται πλέον στην τροποποιημένη μορφή ως:

$$\frac{\sigma_{\alpha}}{\sigma_{\alpha N}} + \frac{\sigma_m - \frac{UTS-UCS}{2\gamma_{ms}}}{\frac{UTS+UCS}{2\gamma_{ms}}} = 1 \Rightarrow \frac{\sigma_{\alpha}}{\sigma_{\alpha N}} = \frac{UTS+UCS}{2\gamma_{ms}} \frac{\left(\sigma_m - \frac{UTS-UCS}{2\gamma_{ms}} \right)}{UTS+UCS} \Rightarrow$$

$$\sigma_{\alpha N} = \sigma_{\alpha} \frac{UTS+UCS}{2\gamma_{ms}} - \left(\sigma_m - \frac{UTS-UCS}{2\gamma_{ms}} \right)$$
(5.39)

Με αντικατάσταση της (5.39) στην (5.40) προκύπτει τελικά

$$N_{all} = \left[\frac{\frac{\gamma_{ms}}{\gamma_{mf}} \left(\frac{UTS+UCS}{2\gamma_{ms}} - \left(\sigma_m - \frac{UTS-UCS}{2\gamma_{ms}} \right) \right)}{\sigma_{\alpha}} \right]^k \Rightarrow$$

$$N_{all} = \left[\frac{\frac{UTS+UCS}{2\gamma_{mf}} - \frac{\gamma_{ms}}{\gamma_{mf}} \left(\sigma_m - \frac{UTS-UCS}{2\gamma_{ms}} \right)}{\sigma_{\alpha}} \right]^k$$
(5.40)

Στην παραπάνω σχέση τα $(\sigma_{\alpha}, \sigma_m)$ αντικαθίστανται από τα αποτελέσματα της RFC, ενώ οι συντελεστές ασφαλείας γ_{ms} και γ_{mf} αντικαθίστανται με τις τιμές που θέτουν οι προδιαγραφές διαφόρων προτύπων π.χ. Germanischer-Lloyd (GL). Περισσότερες πληροφορίες για τον καθορισμό των συντελεστών ασφαλείας παρουσιάζονται στην παρακάτω παράγραφο.

5.8 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Αρχικά σημειώνεται ότι ο καθορισμός των συντελεστών ασφαλείας αφορά την περίπτωση ινώδων συνθέτων υλικών τα οποία αποτελούνται από ίνες γυαλιού, αφού όπως ήδη έχει τονιστεί την εισαγωγή αυτό αποτελεί το κυριότερο υλικό κατασκευής των πτερυγίων Α/Γ. Οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας που εδώ θα παρουσιαστούν προδιαγράφονται από τους κανονισμούς του Germanischer-Lloyd (GL) και συμβολίζεται με γ_{mx} σύμφωνα με το πρότυπο του GL απαιτείται ξεχωριστός καθορισμός αυτών που αφορούν συνθήκες στατικής καταπόνησης από αυτούς που αφορούν συνθήκες κόπωσης του υλικού. Χάριν συνέχειας διατηρούνται οι ίδιοι συμβολισμοί για τους δύο συντελεστές ασφαλείας, που χρησιμοποιήθηκαν δηλαδή γ_{ms} για στατική φόρτιση (s..static loading) και γ_{mf} για κοπωτική φόρτιση (f...fatigue loading). Ο κάθε ένας τώρα εκ των δύο συντελεστών ασφαλείας συντίθεται από 5 άλλους συντελεστές που συμβολίζονται από C_{ix} , $i=1,\dots,5$ και $x=s,f$ και αφορούν μεταξύ των άλλων, τις επιμέρους συνθήκες κατασκευής του υπό μελέτη υλικού, τις συνθήκες λειτουργίας του δομικού στοιχείου το οποίο θα κατασκευαστεί από το συγκεκριμένο υλικό καθώς και φαινόμενα ερπυσμού που παρουσιάζονται σε ινώδη σύνθετα υλικά. Γενικά ισχύει:

$$\gamma_{mx} = C_{1x} C_{2x} C_{3x} C_{4x} C_{5x} \quad (5.41)$$

Ειδικότερα για την περίπτωση της στατικής καταπόνησης οι διάφοροι συντελεστές C_{is} οι οποίοι χρησιμοποιούνται γράφονται:

$C_{1b} = 1.35$	..... γενικός συντελεστής ασφαλείας
$C_{2b} = 1.5$	..... αντοχή σε ερπυσμό
$C_{3b} = 1.1$	..... επιδράσεις θερμοκρασίας
$C_{4b} = 1.1$	..... πολύστρωτη δομή κατασκευασμένη από prepregs
$= 1.2$	..... πολύστρωτη δομή κατασκευασμένη με την μέθοδο επίστρωσης με το χέρι (hand lay-up)
$C_{5b} = 1.0$	..... tempered laminate
$= 1.1$	..... untempered laminate

Ομοίως για την περίπτωση της κόπωσης οι διάφοροι συντελεστές C_{if} γράφονται:

$C_{1f} = 1.35$	..... γενικός συντελεστής ασφαλείας
$C_{2f} = N^{\frac{1}{k}}$	..... αντοχή σε κόπωση μετά από N κύκλους φόρτισης με k=9 για πολυεστερική μήτρα και k=10 για εποξειδική μήτρα
$C_{3f} = 1.1$	..... επιδράσεις θερμοκρασίας
$C_{4f} = 1.0$	..... για (UD) υλικά με συνεχόμενες ίνες
$C_{4f} = 1.2$	..... για woven ή και για (UD) υλικά με μη-συνεχόμενες ίνες
$C_{5f} = 1.0$	..... tempered laminate
$= 1.1$	..... untempered laminate

Εδώ σημειώνεται ότι ο συντελεστής C_{2f} χρησιμοποιείται όπως έχει οριστεί παραπάνω χωρίς καμία επανεξέταση, μόνο όταν η συνολική μάζα της ενίσχυσης (ινών) του υπό εξέταση υλικού αποτελεί τουλάχιστον το 45% της συνολικής μάζας του. Σε διαφορετική περίπτωση απαιτείται επαναπροσδιορισμός της S-N καμπύλης με δοκιμές.

5.9 ΝΟΜΟΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΩΝ PALMGREN-MINER

Με τη χρησιμοποίηση της μεθόδου RFC πραγματοποιήθηκε η αναγωγή του σύνθετου ιστορικού φόρτισης σε ένα σύνολο διακεκριμένων κύκλων φόρτισης. Το επόμενο βήμα είναι να γίνει η αποτίμηση της προκαλούμενης αστοχίας D κάθε διακεκριμένου κύκλου με την χρησιμοποίηση ενός νόμου συσσώρευσης της.

Έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές πλήθος τέτοιων νόμων. Λόγω όμως ελλείψεως ενός αποδεδειγμένα αξιόπιστου νόμου μη γραμμικού νόμου συσσώρευσης αστοχίας χρησιμοποιείται ο νόμος των Palmgren-Miner, ο οποίος στηρίζεται στη γραμμική συσσώρευσή της στο υλικό. Αυτός ο κανόνας, οποίος παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1945, έχει γνωρίσει ευρύτατη εφαρμογή και αποτελεί τον πλέον χρησιμοποιούμενο κανόνα ακόμα και σήμερα. Η μορφή του νόμου είναι:

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad (5.42)$$

Για την περίπτωση τώρα του πτερυγίου ανεμογεννήτριας, ο νόμος θα εφαρμοδτεί για τον κάθε κρίσιμο προς αστοχία κόμβο της εκάστοτε εξεταζόμενης διατομής καθώς και για την κάθε χρονοσειρά ταχύτητας του ανέμου. Ειδικότερα επιλέγονται τουλάχιστον χρονοσειρές 11 πλήρων φόρτισης για την κάθε διατομή που αντιστοιχούν σε 11 διαφορετικές ταχύτητες ανέμου που ποικίλουν από 5 έως 25 m/sec. Εδώ σημειώνονται οι εξής σημαντικές

παρατηρήσεις. Η πρώτη εξ αυτών αφορά το γεγονός ότι η κάθε χρονοσειρά φόρτισης δεν συμμετέχει στην συνολική φόρτιση κατά την διάρκεια της ζωής του πτερυγίου, με το ίδιο ποσοστό. Έτσι στο νόμο των Palmgren-Miner της σχέσεως 81 απαιτείται η προκύπτουσα συνολική αστοχία D του κάθε κόμβου που προκύπτει ως απόρροια επιβολής της όποιιας χρονοσειράς ταχύτητας του ανέμου, να πολλαπλασιάζεται με το αντίστοιχο ποσοστό συμμετοχής αυτής επί της συνολικής διάρκειας φόρτισης του πτερυγίου. Η δεύτερη παρατήρηση που πρέπει να γίνει αφορά την αναγωγή των διαφόρων χρονοσειρών φόρτισης στην αρχικώς προδιαγραφόμενη εικασαετή διάρκεια ζωής του πτερυγίου. Ειδικότερα οι χρονοσειρές οι οποίες διατίθενται για τον έλεγχο υπό συνθήκες κόπωσης, αφορούν συνήθως οκτάλεπτα διαστήματα στα οποία διεξάγονται οι μετρήσεις. Για την ακρίβεια η κάθε χρονοσειρά περιέχει περίπου 33000 μετρήσεις οι οποίες έχουν ληφθεί με συχνότητα 0.01433 sec η κάθε μια. Συνεπώς η συνολική διάρκεια των μετρήσεων ορίζεται στα 7.88 λεπτά. Έτσι πολλαπλασιάζοντας τον συντελεστή αστοχίας D που προκύπτει από την σχέση 81 για την κάθε χρονοσειρά των 7.88 λεπτών, επιπρόσθετα με έναν συντελεστή x ο οποίος ισούται με :

$x = (\text{προδιαγραφόμενη διάρκεια ζωής σε λεπτα} / 7.88 \text{ λεπτά})$

προκύπτει ο συνολικός συντελεστής αστοχίας για την συνολική 20ετή διάρκεια ζωής του πτερυγίου, D_{tot} (Life Time Damage Coefficient). Έτσι η σχέση (5.42) γράφεται:

$$D_{tot} = x \sum_j \sum_i \Pi_j \frac{n_i}{N_t} \leq 1 \quad (5.43)$$

Έτσι με την σχέση (5.43) είναι δυνατόν να υπολογιστεί η συνολική D_{tot} του εκάστοτε μελετούμενου κόμβου. Με σύγκριση της τιμής με την μονάδα είναι εφικτό να διαπιστωθεί ο εξεταζόμενος κόμβος αστοχεί ή όχι.

Στον παρακάτω πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται ενδεικτικά τα ποσοστά Π_j συμμετοχής της κάθε χρονοσειράς στην κόπωση του πτερυγίου. Αυτές οι τιμές προσδιορίζονται για συγκεκριμένη τοποθεσία βάσει της ετήσιας κατανομής τεχνητών της επερχόμενης ροής του ανέμου, όπως αυτή προκύπτει από μετρήσεις του αιολικού δυναμικού της περιοχής.

Πίνακας 1: Ποσόστωση των χρονοσειρών ταχύτητας του ανέμου.

Χρονοσειρά (m/sec)	Ποσοστό Π (%)	Χρονοσειρά (m/sec)	Ποσοστό Π (%)
5	24.63	17	5.54
7	14.88	19	3.53
9	14.90	21	2.08
11	13.32	23	1.23
13	10.82	25	1.00
15	8.06		

5.10 ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ ΕΝΟΣ ΚΥΚΛΟΥ

Αν με τη χρησιμοποίηση του νόμου των Palmgren-Miner διαπιστώνεται αν κάποιο μέλος του πτερυγίου αστοχεί πριν την ολοκλήρωση της προδιαγραφόμενης εικασαετούς διάρκειας ζωής, το ερώτημα που προκύπτει είναι το πως μπορεί να ερμηνευτεί και πως κατα κύριο λόγο να αξιολογηθεί

άμεσα η αστοχία. Στα πλαίσια του ερωτήματος αυτοάναζητήθηκε από την βιβλιογραφία ένα άλλο μέγεθος έκφρασης της συνπεριφοράς σε κόπωση, εκτός της συνολικής αστοχίας D_{tot} , το οποίο δύναται να συσχετιστεί άμεσα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της υπό μελέτης κατασκευής.

Μια από τις ποσότητες που ανατύχθηκε για τον σκοπό αυτό είναι και η ισοδύναμη τάση ενός κύκλου (σ_{eq}) η οποία εκφράζει την τάση που αν αναπτυχθεί για ένα μόνο κύκλο φόρτισης επιφέρει την ίδια D_{tot} που επιφέρει και η ασκούμενη χρονοσειρά τάσης. Έτσι ισχύει:

$$D_{tot} = \frac{1}{N(\sigma_{eq})} \quad (5.44)$$

Από προηγούμενο κεφάλαιο αναφέρθηκε ότι ο νόμος εξομοίωσης των S-N καμπυλών κόπωσης δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_{a_N} = \left(\frac{UTS + UCS}{2} \right) N^{\frac{1}{k}}$$

Αν στην παραπάνω σχέση αντικατασταθούν οι κύκλοι φόρτισης με την ποσότητα της σχέσεως (5.44) θα προκύψει για την ισοδύναμη τάση ενός κύκλου σ_{eq} η τελική έκφραση:

$$\sigma_{eq} = \left(\frac{UTS + UCS}{2} \right) \left(\frac{1}{D_{tot}} \right)^{-\frac{1}{k}} \quad (5.45)$$

Η ισοδύναμη τάση ενός κύκλου βέβαια δεν μπορεί να συσχετιστεί άμεσα με την γεωμετρία του εξεταζόμενου δομικού στοιχείου, όμως αποτελεί ένα πιο

μηχανικό μέγεθος υπό την έννοια ότι διατείνεται στον σχεδιαστή μηχανικό μια τιμή άμεσα συγκρίσιμη με ένα χαρακτηριστικό μέγεθος του χρησιμοποιούμενου υλικού, την στατική αντοχή του.

Με την παρουσίαση και του μεγέθους της ισοδύναμης τάσης ενός κύκλου ολοκληρώνεται ο έλεγχος της αντοχής του πτερυγίου που υπόκειται σε συνθήκες κόπωσης. Σημειώνεται η σπουδαιότητα της ανάπτυξης υπολογιστικών κωδίκων για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων στις διάφορες διευθύνσεις που χρησιμοποιούνται εν τέλει ως δεδομένα εισόδου για τον προσδιορισμό των τάσεων σε κάθε διατομή για τις αντίστοιχες χρονοσειρές φόρτισης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία αποτέλεσε την συλλογή θεωρητικών και βασικών εννοιών για τα σύνθετα υλικά και ιδίως για την κατηγορία των ινώδων υλικών από γυαλί τα οποία υπόκεινται σε κόπωση. Αναπτύχθηκαν οι βασικοί τρόποι υπολογισμού της αντοχής των πτερυγίων ανεμογεννήτριας οι οποίες ανάχθηκαν σε συνθήκες κόπωσης με την χρήση των χρονοσειρών φόρτισης και την θεώρηση του συντελεστή συσσώρευσης αστοχίας. Οι συγκεκριμένοι τρόποι υπολογισμού αποτέλεσαν το βασικό τρόπο μελέτης των πτερυγίων που ξεκίνησε εδώ και πάνω από μια δεκαετία από τη στιγμή δηλαδή που οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ιδίως η αιολική ενέργεια θεωρήθηκε ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση των ενεργειακών αναγκών του πλανήτη.

Με βάση τα στοιχεία που παρουσιάστηκαν το επόμενο βήμα που θα μπορούσε να ακολουθήσει θα ήταν η ανάπτυξη των απαιτούμενων

υπολογιστικών κωδίκων σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran ή C ώστε να υπολογιστούν τα αντίστοιχα μητρώα που απαιτούνται για να προσδιοριστεί η δυσκαμψία των διατομών καθώς και η επέκταση των εξισώσεων αντοχής, πάλι με χρήση υπολογιστικών κωδίκων, ώστε να προσδιοριστεί η αντοχή στις προδεγεγραμμένες θέσεις της διατομής του πτερυγίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. A.Rotem, Z.Hashin, 1976, “ Fatigue failure of Angle Ply Laminates” AIAA Journal, Vol 14, pp.868-872
2. Z.Hashin , A.Rotem, 1976, “ Fatigue criterion for fiber reinforces materials” in Journal of Composites Materials, Vol 7, pp.448-464
3. J. Awerbuch, H.T.Hahn, 1982, “ Off-axis fatigue of Graphite/Epoxy Composite” in Fatigue of Fibrous Composites Materials”, ASTM STP 723, pp.243-273
4. M.J.Owen, J.R.Griffiths, 1978, “ Evaluation of Biaxial Stress Failure Surfaces for a glass fabric reinforced polyester resin under static and fatigue loading” in Journal of Material Science, Vol 13, pp.1521-1537
5. T.Fujii, F.Lin, 1995, “Fatigue Behavior of a Plain-Woven Glass Fabric Laminate under Tension/ Torsion biaxial Loading” in Journal of Composites Materials, Vol 29,No 5, pp.573-590
6. S.W.Tsai, H.T.Hahn, 1985, Introduction to Composite Materials, Technomic
7. S.W.Tsai, E.M.Wu, 1971, “ A General Theory of Strength for Anisotropic Materials” in Journal of Composites Materials, Vol 5, pp.58-80
8. Germanischer-Lloyd, Rules and Regulations, 1993, “Regulations for the Certification of Wind Energy Conversion Systems” IV-Non-Marine Technology, PART 1-WIND ENERGY, Chapters 1-10
9. J.T.Oden,1967, Mechanics of elastic structures, Mc Graw Hill
10. Θ.Π. Φιλίππιδης, Σημειώσεις μαθήματος “ Σχεδιασμός με Σύνθετα υλικά”, 1997
11. Σ.Γ.Παντελάκης, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις του μαθήματος “Μηχανική Συμπεριφορά Μεταλλικών Υλικών”, 1996