



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ

ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

ΡΟΥΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΑΜ:4742

ΤΟΜΕΑΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ
ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Θ.Π. ΦΙΛΙΠΠΙΔΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2012

Ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου, καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών Θ.Π Φιλιππίδη, για τις πολύτιμες συμβουλές του αλλά και την καθοδήγηση του κατά την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Η συνεργασία μου μαζί του υπήρξε καθοριστική στην εκπαίδευση μου ως μηχανικός και άλλαξε τον τρόπο με τον οποίο εργάζομαι και σκέπτομαι. Επίσης ευχαριστώ τον Κ. Μπαχαρούδη, μεταπτυχιακό φοιτητή της ερευνητικής ομάδας του κ. Φιλιππίδη, για τις συμβουλές του οι οποίες υπήρξαν καθοριστικές για την ολοκλήρωση της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Θανάση και Κούλα για την στήριξη και την υπομονή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Ευχαριστώ,

Γιώργος Ρούκης

Πίνακας περιεχομένων

ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	5
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ	5
1.3 ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	11
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕ CARLO	14
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
2.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΟΝΤΕ CARLO	14
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ	17
3.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΤΟΠΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	17
3.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	20
3.2.1 ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΟΙ ΤΟΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	21
3.2.2 ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΩΣ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	22
3.2.3 ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΩΣ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	27
3.2.4 ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ ΩΣ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	32
3.2.5 ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΩΣ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	36
3.2.6 ΕΠΙΠΛΕΩΝ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΙΝΩΝ ΚΑΘΕ ΣΤΡΩΣΗΣ ΩΣ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	42
3.2.7 ΘΕΩΡΗΣΗ ΣΕ ΚΑΘΕ ΣΤΡΩΣΗ ΞΕΧΩΡΙΣΤΩΝ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ	48
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ IEC 61400-1 ed. 3 standards ΜΕ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΟ ΤΟΠΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	56
4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΟΥ ΤΟΠΟΥ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEC 61400 ed. 3	56
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΓΙΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ 10^{-4}	61
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΣΕ ΔΙΑΤΟΜΗ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	63
6.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ	63
6.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ MATLAB ΜΕ ΤΟ ROBUST	64
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΣΕ ΑΞΟΝΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	66
7.1 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΗΘΗΚΑΝ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ	66
7.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	68
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	72
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	73

8.1 ΟΔΗΓΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ MATLAB	73
8.1.1 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΙΜΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΚΛΑΣΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΡΩΝ ΠΛΑΚΩΝ.....	73
8.1.2 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΚΑΘΕ ΣΤΡΩΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΟΝΤΕ CARLO.	74
8.1.3 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΟΥ ΤΟΠΟΥ ΑΣΤΟΧΙΑΣ.	75
8.1.4 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΟΥ ΤΟΠΟΥ ΑΣΤΟΧΙΑΣ.....	76
8.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΩΝ ΠΛΑΚΩΝ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΤΕΡΥΓΙΟ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	77
8.3 ΟΔΗΓΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥΣ ΣΕ ΑΞΟΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟΥΣ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	81

ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μία από τις μεγαλύτερες ευθύνες ενός μηχανικού, αν όχι η μεγαλύτερη, κατά την διάρκεια του σχεδιασμού μιας κατασκευής, είναι να εξασφαλίσει ότι η κατασκευή αυτή θα αποδώσει στα επιθυμητά επίπεδα για μια συγκεκριμένη διάρκεια ζωής εξυπηρετώντας συγκεκριμένους οικονομικούς όρους.

Ο σχεδιασμός κατασκευών παλαιότερα γινόταν με μη πιθανοτικούς υπολογισμούς και η αξιοπιστία προδιοριζόταν με τη χρήση συντελεστών ασφαλείας οι οποίοι ήταν απόρροια στατιστικών υπολογισμών ή βασισμένοι στην εμπειρία του σχεδιαστή μηχανικού από παραπλήσιες κατασκευές. Αυτή η προσέγγιση όμως δεν είναι η ενδεδειγμένη στον σχεδιασμό κατασκευών από σύνθετα υλικά. Οι κατασκευές είναι καινούργιες και η αβεβαιότητα στις ιδιότητες των συνθέτων υλικών (διαφορετικός συνδιασμός συνιστωσών ίνας-μήτρας, διαφορετική μέθοδος κατασκευής κ.τ.λ.) είναι πολύ μεγαλύτερη σε αντιστοιχία με τις ιδιότητες άλλων συμβατικών υλικών. Επίσης οι ιδιότητες αντοχής των συνθέτων υλικών λόγω της ανισοτροπίας τους, της ποικιλίας τους και της αλληλεπίδρασης των μορφών αστοχίας παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά.

Γι' αυτό επιβάλλεται η χρησιμοποίηση πιθανοτικών όρων στην έκφραση της ασφάλειας της κατασκευής. Αυτό προϋποθέτει την χρησιμοποίηση τεχνικών που θα λαμβάνουν υπ' όψιν την αβεβαιότητα που υπάρχει στις ιδιότητες των υλικών, στα φορτία που υπόκειται η κατασκευή καθώς και στις συνθήκες που καλείται αυτή να ανταπεξέλθει.

Με την χρησιμοποίηση τέτοιων τεχνικών είναι δυνατόν να προσδιορίσουμε την πιθανότητα που υπάρχει ώστε η σχεδιαζόμενη κατασκευή να μην αστοχήσει. Αυτή η πιθανότητα που έχει η κατασκευή ώστε να αποδώσει εντός κάποιων επιθυμητών πλαισίων για μία προσδοκώμενη διάρκεια ζωής ορίζεται και ως αξιοπιστία της κατασκευής.

1.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ

Το πρόβλημα της αξιοπιστίας μπορεί στη βάση του να θεωρηθεί και ως ένα πρόβλημα αντοχής και φορτίων. Θα πρέπει η κατασκευή για μία συγκεκριμένη διάρκεια ζωής να μην αστοχήσει υπό την δράση των φορτίων.

Στην πραγματικότητα ο καθορισμός της αντοχής ενός συστήματος αλλά και των φορτίων που θα κληθεί να αντέξει είναι πολύπλοκο πρόβλημα. Η αβεβαιότητα είναι δύσκολο να αποφευχθεί γι αυτό και δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν μη στοχαστικές τιμές για τις παραμέτρους. Θα πρέπει να ληφθούν υπ'όψιν όλο το εύρος τιμών και στην αντοχή και στα φορτία. Για να ληφθεί υπ'όψιν η αβεβαιότητα σε ικανοποιητικό και ρεαλιστικό βαθμό θα πρέπει η μοντελοποίηση του προβλήματος να γίνει λαμβάνοντας υπ'όψιν την στοχαστικότητα κάθε μεταβλητής.

Εάν ορίσουμε σε πιθανοτικούς όρους την αντοχή και τις φορτίσεις θα έχουμε:

R=αντοχή

S=φόρτιση

Τότε το γεγονός (R>S) για μία συγκεκριμένη διάρκεια ζωής είναι και ο στόχος της αξιοπιστίας του συστήματος. Η πιθανότητα P(R>S) είναι μια ρεαλιστική αποτύπωση της αξιοπιστίας του συστήματος. Ομοίως η πιθανότητα P(R<S) είναι η αποτύπωση της αστοχίας της κατασκευής.

Εάν υποθέσουμε ότι οι κατανομές είναι γνωστές ως F_R ή f_R και F_S ή f_S τότε η πιθανότητα αστοχίας είναι:

$$P(\text{failure}) = P_F = P(R \leq S)$$

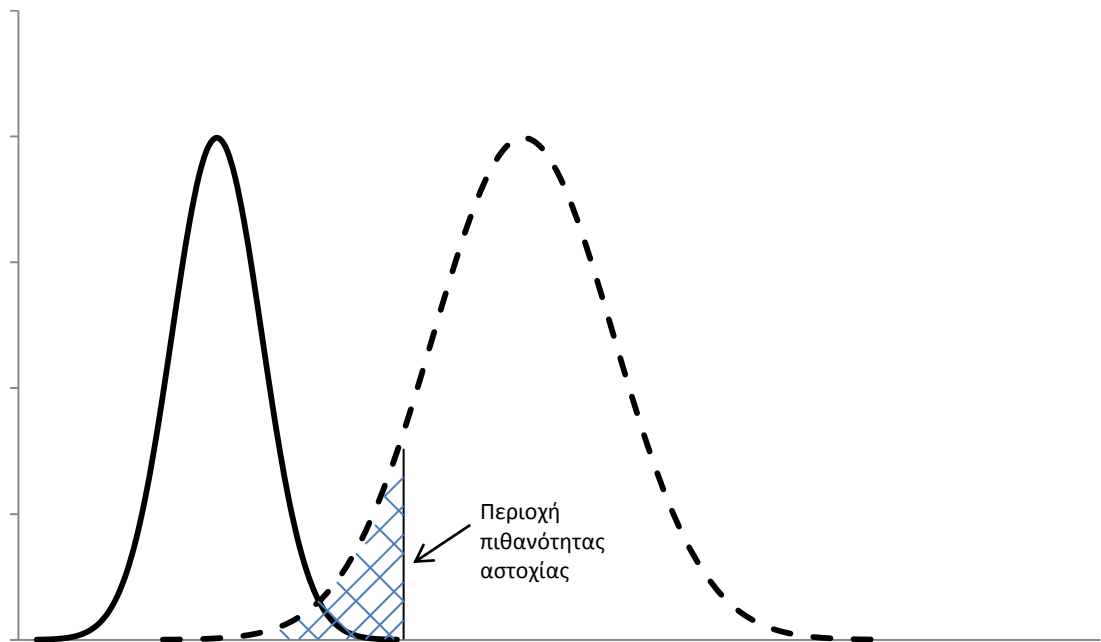
Η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$\int_{-\infty}^{\infty} P(R \leq x)P(x \leq S \leq x + dx) = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(x)f_S(x) dx$$

Επίσης η πιθανότητα αστοχίας μπορεί να υπολογιστεί και ως εξής :

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} P(x \leq R \leq x + dx)P(S \geq x) dx &= \int_{-\infty}^{\infty} f_R(x)(1 - F_S(x)) dx \\ &= 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f_R(x)F_S(x) dx \end{aligned}$$

Στο Σχ. 1.1 φαίνεται η γραφική απεικόνιση των κατανομών της αντοχής και της φόρτισης f_R και f_S :



Σχήμα 1.1 Probability density functions (PDF) αντοχής και φόρτισης της κατασκευής
(α)Αντοχή (f_R) (--) (β)Φόρτιση (f_S) (-)

Η αξιοπιστία είναι μια συνάρτηση της σχέσης των τοθετήσεων των f_S και f_R καθώς και του βαθμού διασποράς των κατανομών.

Όσο πιο κοντά βρίσκονται οι κατανομές τόσο μεγαλύτερη είναι και η πιθανότητα αστοχίας της κατασκευής και κατά συνέπεια τόσο μικρότερη η αξιοπιστία. Εάν υποθέσουμε μ_S και μ_R τις μέσες τιμές των κατανομών τότε η σχετική τους θέση μπορεί να καθοριστεί είτε από το πηλίκιο μ_R/μ_S που ορίζεται ως ο κεντρικός συντελεστής ασφαλείας είτε από την διαφορά $\mu_R - \mu_S$ η οποία ορίζεται ως το περιθώριο ασφαλείας της κατασκευής.

Στην περίπτωση όπου οι μεταβλητές S και R είναι στατιστικά ανεξάρτητες, δηλαδή έχουμε $f_S(x)$ και $f_R(y)$, η πιθανότητα αστοχίας υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα:

$$P_F = \int_0^{\infty} \left[\int_0^y f_{S,R}(x, y) dx \right] dy$$

Και η αξιοπιστία του συστήματος από το ολοκλήρωμα:

$$P_S = \int_0^{\infty} \left[\int_0^x f_{S,R}(x, y) dy \right] dx$$

Το πρόβλημα της αξιοπιστίας μπορεί να μοντελοποιηθεί και ως ένα πρόβλημα του περιθωρίου ασφάλειας. Εάν θεωρήσουμε τον συντελεστή αυτό ως $M=S-R$, όπου R και S είναι μεταβλητές οι οποίες είναι σε μορφή κατανομών, το M είναι και αυτό μια τέτοια μεταβλητή και με μια κατανομή $f_m(m)$. Σε αυτή την περίπτωση η αστοχία ορίζεται από το γεγονός $M < 0$ και η πιθανότητα αυτού του γεγονότος είναι:

$$P_F = \int_{-\infty}^0 f_M(m) dm = F_M(0)$$

Γραφικά αυτό αποτυπώνεται από την περιοχή της κατανομής $f_M(m)$ η οποία βρίσκεται αριστερά του μηδενός όπως φαίνεται και στο Σχ. 1.2.

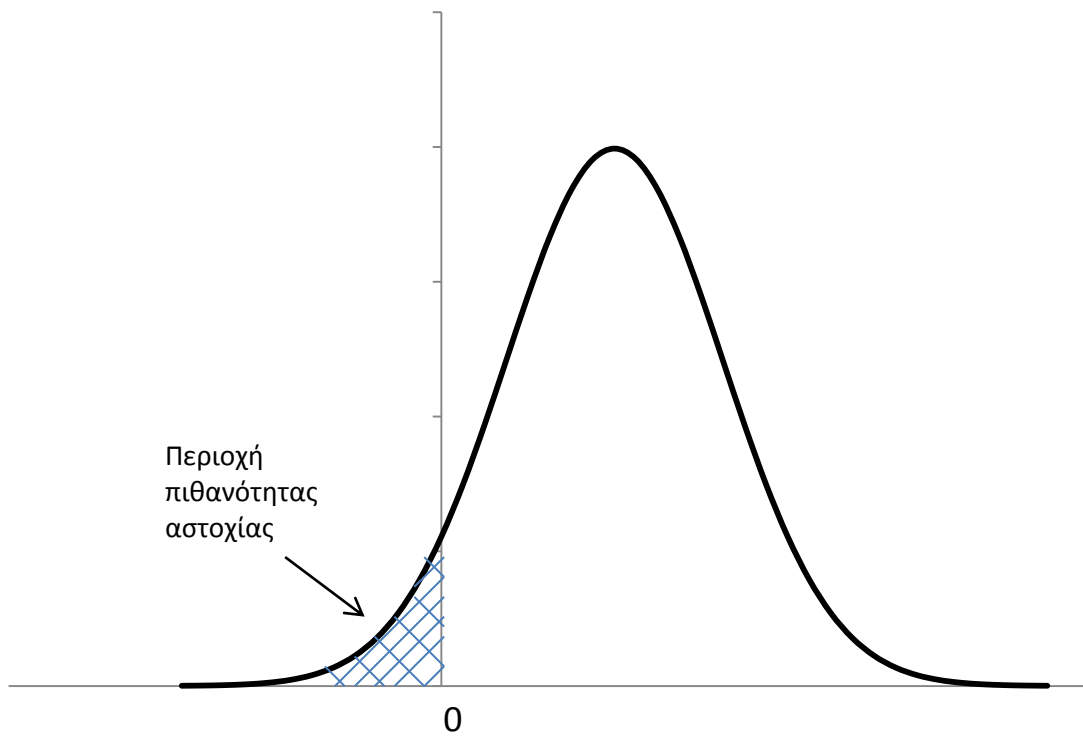
Το πρόβλημα της εύρεσης της αξιοπιστίας μπορεί να μοντελοποιηθεί και με διαφορετικό τρόπο, χρησιμοποιώντας τον ορισμό του συντελεστή ασφάλειας ο οποίος είναι:

$$\theta = \frac{R}{S}$$

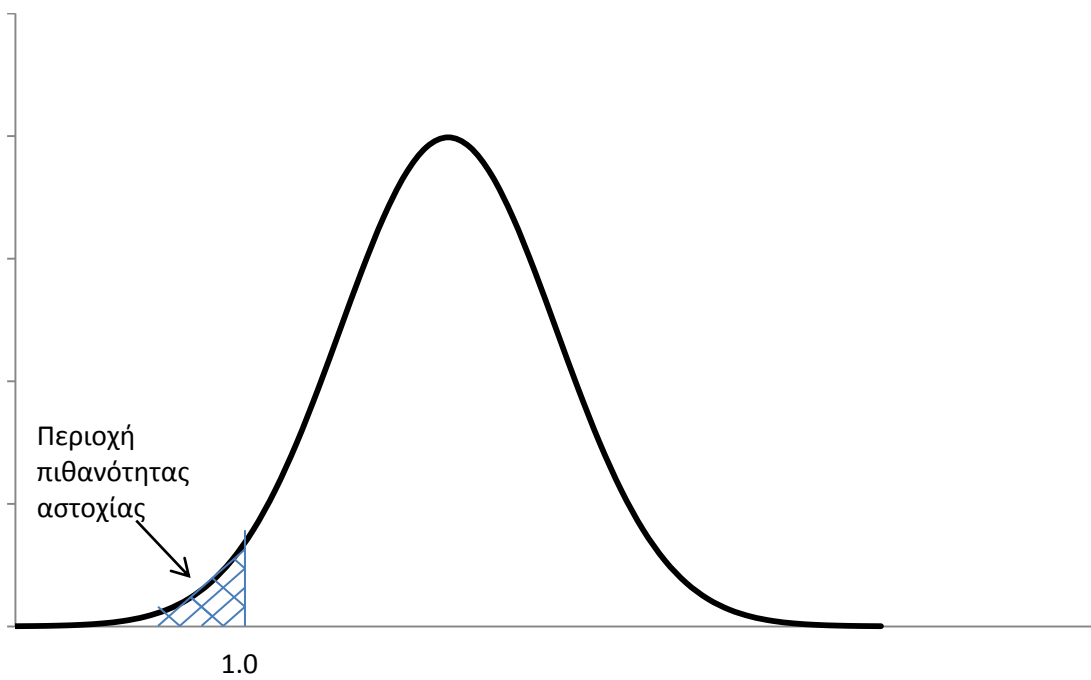
Από τη στιγμή που οι μεταβλητές R και S είναι σε μορφή κατανομών ο συντελεστής ασφάλειας θα είναι και αυτός σε τέτοια μορφή και η πιθανότητα αστοχίας υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα:

$$P_F = \int_0^1 f_{\theta}(\theta) d\theta = F_{\theta}(1.0)$$

Κάτι που αποτυπώνεται γραφικά ως την περιοχή που βρίσκεται αριστερά της μονάδας στο Σχ. 1.3.



Σχήμα 1.2 Probability density function του περιθωρίου ασφάλειας M



Σχήμα 1.3 Probability density function του συντελεστή ασφάλειας Θ

Από τη στιγμή που έχουμε ορίσει ότι για $M > 0$ έχουμε ασφαλή λειτουργία και για $M < 0$ το σύστημα αστοχεί, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι για $M = 0$ έχουμε μια οριακή κατάσταση. Στην περίπτωση όπου ένα σύστημα έχει πολλές μεταβλητές ορίζουμε ως συνάρτηση απόδοσης ή συνάρτηση κατάστασης της συνάρτησης:

$$g(x) = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Η απόδοση ενός μηχανικού συστήματος έχει άμεση εξάρτηση από τις μεταβλητές x_i , γι αυτό και εκφράζεται μέσω της $g(x)$. Η ελάχιστη απαιτούμενη απόδοση του μηχανικού συστήματος ορίζεται ως $g(x) = 0$, η οποία ονομάζεται και συνάρτηση οριακής κατάστασης.

Οπότε ισχύει:

$$[g(X) > 0] = \text{η ασφαλής περιοχή}$$

$$[g(X) < 0] = \text{η περιοχή αστοχίας}$$

Γεωμετρικά η εξίσωση $g(x) = 0$ είναι μία επιφάνεια η οποία ονομάζεται και τόπος αστοχίας. Η μία πλευρά της είναι και η ασφαλής περιοχή για $g(x) > 0$ ενώ η περιοχή για $g(x) < 0$ είναι η περιοχή αστοχίας. Εάν υποθέσουμε τις κατανομές των παραμέτρων X_1, X_2, \dots γνωστές και ίσες με $f_{X_1} \dots f_{X_n}(x_1 \dots x_n)$ η πιθανότητα ασφάλειας είναι:

$$P_S = \int_{(g(x) > 0)} \dots \int f_{X_1} \dots f_{X_n}(x_1 \dots x_n) dx_1 \dots dx_n$$

Εν συντομία:

$$P_S = \int_{g(x) > 0} f_x(x) dx$$

Ενώ η πιθανότητα αστοχίας θα είναι:

$$P_F = \int_{g(x) < 0} f_x(x) dx$$

Ο υπολογισμός αυτών των πιθανότητων με αναλυτικές μεθόδους όμως είναι μια διαδικασία επίπονη και μερικές φορές αδύνατη για αυτό και συνήθως χρησιμοποιούνται εναλλακτικές μέθοδοι. Στο παρών σύγγραμμα θα αναλυθεί και θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Μόντε Κάρλο.

1.3 ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Στο σχεδιασμό κατασκευών οι οποίες αποτελούνται από σύνθετα υλικά ο υπολογισμός της αξιοπιστίας της κατασκευής μετατρέπεται σε ένα πρόβλημα υπολογισμού της πιθανότητας αστοχίας της πολύστρωτης πλακάς.

Η συνάρτηση οριακής κατάστασης $g(x)$ σε αυτή την περίπτωση αποτελείται από το επιλεγμένο κριτήριο αστοχίας. Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι τα κριτήρια Tsai-Hill, Tsai-Hahn και το παραβολοειδές κριτήριο αστοχίας (EPFS) όπου για επίπεδη εντατική κατάσταση έχουν την εξής μορφή:

Tsai Hill:

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\sigma_6^2}{S^2} - 1 = 0$$

Tsai Hahn:

$$\frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} - \left(\sqrt{\frac{1}{X_t X_c Y_t Y_c}} \right) \sigma_1 \sigma_2 + \frac{\sigma_6^2}{S^2} - 1 = 0$$

EPFS:

$$\frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} - \left(\frac{\sigma_1 \sigma_2}{X_t X_c} \right) + \frac{\sigma_6^2}{S^2} + \left(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \right) \sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \right) \sigma_2 - 1 = 0$$

Όπου $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_6$ είναι οι τάσεις στο κύριο σύστημα. Η τιμή X αντιπροσωπεύει την τάση αστοχίας στην διεύθυνση της ίνας, η τιμή Y την τάση αστοχίας στην εγκάρσια διεύθυνση και η S την τάση αστοχίας λόγω διάτμησης. Λόγω του γεγονότος ότι οι τάσεις αστοχίας X και Y έχουν διαφορετικές τιμές για θλιπτικά και διαφορετικές για εφελκυστικά φορτία οι μεταβλητές X και Y στον τύπο του κριτηρίου Tsai Hill έχουν άμεση εξάρτηση από την τιμή των τάσεων στο κύριο σύστημα του υλικού. Για θετικές τιμές των κυρίων τάσεων σ_1, σ_2 επιλέγονται οι X_t

και Y_t (τάσεις αστοχίας για εφελκυστικά φορτία) αντίστοιχα, ενώ για αρνητικές τιμές οι X_c και Y_c (τάσεις αστοχίας για θλιπτικά φορτία).

Ενώ οι τάσεις αστοχίας αποτελούν ιδιότητες του υλικού και είναι γνωστές, οι τάσεις στο κύριο σύστημα υπολογίζονται σύμφωνα με την Κλασική Θεωρία Πολύστρωτων Πλακών. Για τον υπολογισμό αυτών των τάσεων απαιτείται να είναι γνωστές οι ελαστικές και υδροθερμικές ιδιότητες των υλικών που απαρτίζουν την πολύστρωτη πλάκα, το πάχος και ο προσανατολισμός της κάθε στρώσης, οι φορτίσεις στις οποίες υπόκειται η πλάκα και τέλος οι συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας. Όλες αυτές οι παράμετροι, είναι ουσιαστικά και οι μεταβλητές που απαρτίζουν την συνάρτηση οριακής κατάστασης της πολύστρωτης πλάκας.

Αναλυτικά :

E1: Μέτρο ελαστικότητας Young στη διεύθυνση της ίνας.

E2: Εγκάρσιο μέτρο ελαστικότητας.

ν_{12} : Αριθμός Poisson.

G12: Μέτρο διάτμησης στο επίπεδο 1-2.

α_1, α_2 : Συντελεστές θερμικής διαστολής.

β_1, β_2 : Συντελεστές υγροσκοπικής διογκώσεως.

h_{ply} : Πάχος της κάθε στρώσης.

θ : Γωνία προσανατολισμού της κάθε στρώσης.

N_x, N_y, N_s : Συνισταμένες συνεπίπεδες δυνάμεις N_i .

M_x, M_y, M_s : Ροπές ανηγμένες σε μονάδες μήκους.

ΔT : Διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T = T - T_0$. Όπου η θερμοκρασία αναφοράς T_0 είναι συνήθως η θερμοκρασία στερεοποίησης (max curing temperature) του συνθέτου.

c : Ειδική συγκέντρωση υγρασίας c , η οποία ορίζεται ως ο λόγος της ποσότητας μάζης υγρασίας που εμπεριέχεται σε απειροστό στοιχείο όγκου ΔV του συνθέτου υλικού διά της "ξηρής" μάζης του όγκου αυτού.

X_t : Τάση αστοχίας του συνθέτου ύπο εφελκυστικά φορτία στη διεύθυνση της ίνας.

Xc: Τάση αστοχίας του συνθέτου υπό θλιπτικά φορτία στη διεύθυνση της ίνας.

Yt: Τάση αστοχίας του συνθέτου υπό εφελκυστικά φορτία στην εγκάρσια διεύθυνση της ίνας.

Yc: Τάση αστοχίας του συνθέτου υπό θλιπτικά φορτία στην εγκάρσια διεύθυνση της ίνας.

S: Τάση αστοχίας του συνθέτου λόγω διάτμησης.

Για τις ανάγκες της εργασίας δημιουργήθηκε πρόγραμμα στο Matlab, το οποίο υπολογίζει την τιμή των κριτηρίων αστοχίας Tsai-Hill, Tsai-Hahn και παραβολοειδούς κριτηρίου αστοχίας (EFPS). Το πρόγραμμα δέχεται εώς δεδομένα τις τάσεις αστοχίας, τις ελαστικές και υgroθερμικές ιδιότητες των υλικών από τα οποία αποτελείται η πολύστρωτη πλάκα, τον προσανατολισμό και το υλικό της κάθε στρώσης, τις μηχανικές φορτίσεις και τις συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας. Στη συνέχεια το πρόγραμμα βασιζόμενο στην Κλασική Θεωρία Πολύστρωτων Πλακών υπολογίζει τις παραμορφώσεις στις δύο επιφάνειες κάθε στρώσης και τις τάσεις που αναπτύσσονται στο φυσικό και κύριο σύστημα συντεταγμένων. Τέλος υπολογίζει την τιμή του επιλεχθέντος κριτηρίου αστοχίας στις επιφάνειες κάθε στρώσης.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ MONTE CARLO

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο υπολογισμός της πιθανότητας αστοχίας μιας πολύστρωτης πλάκας μέσω των αναλυτικών μεθόδων είναι μια διαδικασία απαιτητική και πολλές φορές αδύνατη, λόγω των πολλών μεταβλητών του μηχανικού συστήματος. Έτσι ο μηχανικός καταφεύγει σε τεχνικές μεθόδους που απλοποιούν αυτήν την διαδικασία. Μια τέτοια μέθοδος είναι και η μέθοδος Monte Carlo. Πρόκειται για μία μέθοδο προσομοίωσης η οποία βρίσκει μεγάλη εφαρμογή σε τέτοιου είδους προβλήματα.

Γενικότερα η προσομοίωση Monte Carlo χρησιμοποιείται σε μηχανικά συστήματα, με στόχο την πρόβλεψη και μελέτη της απόκρισης ή της απόδοσης του συστήματος. Χρησιμοποιώντας ένα σετ τιμών των παραμέτρων του μηχανικού συστήματος, η διαδικασία προσομοίωσης μπορεί να πάρει μία μέτρηση για την απόδοση του συστήματος. Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία της προσομοίωσης για ένα συγκεκριμένο μέγεθος δείγματος, μπορεί να υπολογιστεί η απόκριση του συστήματος. Σε προβλήματα όπου οι παράμετροι του συστήματος είναι σε στοχαστική μορφή η προσομοίωση Monte Carlo ενδείκνυται λόγω του ρεαλισμού και της ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Βέβαια πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ότι η προσομοίωση Monte Carlo είναι μία διεργασία ιδιαίτερα χρονοβόρα και απαιτητική σε υπολογιστική ισχύ. Για αυτό και αποτελεί την τελευταία επιλογή του μηχανικού, ο οποίος καλείται να την χρησιμοποιήσει σε περιπτώσεις όπου η χρησιμοποίηση αναλυτικών μεθόδων είναι είτε αδύνατη είτε αναποτελεσματική.

2.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MONTE CARLO

Η προσομοίωση Monte Carlo αρχικά απαιτεί την παραγωγή ενός σετ τυχαίων τιμών για κάθε στοχαστική παράμετρο του μηχανικού συστήματος. Στη συνέχεια για κάθε σετ τιμών των παραμέτρων η διαδικασία προσομοίωσης είναι μη πιθανοτική. Με βάση το σύνολο των μετρήσεων της απόκρισης του συστήματος που γίνονται ντετερμινιστικά, υπολογίζεται και η αξιοπιστία του.

Η διαδικασία παραγωγής των τυχαίων τιμών με βάση τις κατανομές των στοχαστικών παραμέτρων, είναι πολύ σημαντική για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της Μόντε Κάρλο. Λόγω του γεγονότος ότι ένα δείγμα της

εξομοίωσης Monte Carlo θεωρητικά αντιπροσωπεύει πειραματικές μετρήσεις, θα πρέπει οι τυχαίοι αριθμοί να καλύπτουν ολόκληρο το φάσμα των τιμών της εκάστοτε κατανομής. Το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε για τις ανάγκες των μετρήσεων της εργασίας χρησιμοποιεί τις μηχανές παραγωγής τυχαίων αριθμών του Matlab.

Σημαντικό ρόλο στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων επίσης παίζει και το μέγεθος του δείγματος στο οποίο θα γίνει η προσομοίωση ώστε να έχουμε ένα ελεγχόμενο σφάλμα. Το δείγμα της προσομοίωσης Monte Carlo, ορίζεται ως ο αριθμός των επαναλήψεων του ντετερμινιστικού υπολογισμού της απόκρισης του συστήματος. Ο Shooman [1] έχει αναπτύξει μία σχέση ανάμεσα στο σφάλμα, το μέγεθος του δείγματος και την ζητούμενη πιθανότητα υπολογισμού. Αν ορίσουμε ως E το σφάλμα και $e=E\%$, ισχύει:

$$e = 200 \cdot \sqrt{\frac{1 - P_F}{nP_F}}$$

Όπου n είναι το δείγμα της προσομοίωσης Monte Carlo και P_F η πιθανότητα αστοχίας της κατασκευής. Θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν το γεγονός, ότι υπάρχει μια πιθανότητα της τάξης του 95%, το σφάλμα που υπολογίζεται από την παραπάνω σχέση να είναι μικρότερο από το πραγματικό.

Για τις ανάγκες της εργασίας δημιουργήθηκε στο Matlab πρόγραμμα το οποίο υπολογίζει την πιθανότητα αστοχίας πολύστρωτης πλακός συνθέτου υλικού χρησιμοποιώντας την μέθοδο Monte Carlo. Το πρόγραμμα δέχεται ως δεδομένα τις κατανομές των παραμέτρων της πολύστρωτης πλάκας (προσανατολισμός, πάχος και υλικό κάθε στρώσης, ιδιότητες των υλικών, μηχανικές φορτίσεις και συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας) καθώς και το επιθυμητό δείγμα της εξομοίωσης. Στη συνέχεια για κάθε σει ντετερμινιστικών τιμών το πρόγραμμα υπολογίζει την τιμή του επιλεχθέντος κριτηρίου αστοχίας στις δύο επιφάνειες κάθε στρώσης, βασιζόμενο στην Κλασική Θεωρία Πολύστρωτων Πλακών. Η πιθανότητα αστοχίας σε κάθε στρώση υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P_F = \frac{m}{n}$$

Όπου P_F είναι η πιθανότητα αστοχίας, n είναι το δείγμα της προσομοίωσης Monte Carlo που χρησιμοποιήθηκε και m είναι το πλήθος των ντετερμινιστικών προσομοιώσεων όπου η στρώση αστόχησε, σύμφωνα με την τιμή του επιλεχθέντος κριτηρίου αστοχίας.

Το πρόγραμμα υποστηρίζει τρία κριτήρια αστοχίας, τα κριτήρια Tsai-Hill, Tsai-Hahn και το παραβολοειδές κριτήριο αστοχίας. Επίσης όσον αφορά τα δεδομένα που εισάγονται, το πρόγραμμα υποστηρίζει τις κατανομές Gauss, Weibull, Gumbel και Lognormal ως κατανομές των παραμέτρων του μηχανικού συστήματος.

Τέλος, σημειώνεται ότι όσον αφορά την παραγωγή τυχαίων αριθμών, το πρόγραμμα έχει δύο επιλογές. Στην πρώτη, το πρόγραμμα παράγει τυχαίους αριθμούς για κάθε υλικό που εισάγεται στα δεδομένα. Σε αυτή την μορφή δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει διαφορετικό υλικό στην κάθε στρώση ώστε να παραχθούν διαφορετικοί τυχαίοι αριθμοί για κάθε μία. Στη δεύτερη, το πρόγραμμα ελέγχει τα υλικά μεταξύ τους και εάν είναι ίδια παράγει τους ίδιους τυχαίους αριθμούς για αυτά. Αυτός ο έλεγχος εισήχθη στο πρόγραμμα ώστε να έχει την δυνατότητα ο χρήστης να βάλει το ίδιο υλικό σε διαφορετικά πάχη, αλλά να δοθούν οι ίδιες τυχαίες τιμές -πλην πάχους- σε αυτό.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ

3.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΤΟΠΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Στο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών που έγιναν σε δύο πολύστρωτες πλάκες που αποτελούνται από το ίδιο glass/polyester σύνθετο υλικό. Την [45/-45/0₃/45/-45] και την [45/-45/0]. Ο σκοπός της μελέτης είναι να γίνει μία αποτύπωση της επίδρασης των στοχαστικών μεταβλητών στον υπολογισμό του First Ply Failure (FPF) τύπου αστοχίας της πολύστρωτης πλάκας.

Με τον όρο First Ply Failure (FPF) ή αστοχία πρώτης στρώσης ορίζουμε την κατάσταση κατά την οποία η ένταση της εξωτερικής φορτίσεως είναι τέτοια ώστε να αστοχήσει μία τουλάχιστον στρώση της πολύστρωτης. Επίσης υπάρχει και η περίπτωση να αστοχήσουν και περισσότερες από μία στρώσεις αλλά την ίδια χρονική στιγμή.

Για την μελέτη της επίδρασης διαφόρων στοχαστικών μεταβλητών στον υπολογισμό του FPF γεωμετρικού τύπου αστοχίας ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: Αρχικά υπολογίστηκε ο μη πιθανοτικός τύπος αστοχίας για τις δύο πολύστρωτες πλάκες και στη συνέχεια οι πιθανοτικοί, θεωρώντας κάθε φορά όλο και περισσότερες μεταβλητές ως στοχαστικές. Συγκεκριμένα, αρχικά θεωρήθηκαν ως στοχαστικές οι τάσεις αστοχίας του υλικού και στη συνέχεια κατά σειρά οι ελαστικές ιδιότητες, οι θερμικές ιδιότητες, το πάχος των στρώσεων, οι γωνία προσανατολισμού των ινών και τέλος η περίπτωση όπου όλα τα παραπάνω εφαρμόστηκαν για κάθε στρώση ξεχωριστά.

Για τον υπολογισμό των μη πιθανοτικών τύπων αστοχίας δημιουργήθηκε πρόγραμμα στο Matlab. Ο κώδικας χρησιμοποιεί το διάνυσμα θέσης R και την γωνία θ που σχηματίζει το διάνυσμα θέσης με τον οριζόντιο άξονα, για τον υπολογισμό των συντεταγμένων κάθε σημείου. Ξεκινώντας από ένα μηδενικό R και αυξάνοντάς το μέχρι να έχουμε FPF. Για κάθε τιμή του R το πρόγραμμα υπολογίζει τις φορτίσεις που έχουν επιλεγεί ως άξονες του γεωμετρικού τύπου και στη συνέχεια βασιζόμενο στην Κλασική Θεωρία Πολύστρωτων Πλακών υπολογίζει την τιμή του επιλεχθέντος κριτηρίου αστοχίας. Όταν η πολύστρωτη πλάκα αστοχήσει σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας που έχει επιλεχθεί το πρόγραμμα αποθηκεύει τις φορτίσεις υπο την

δράση των οποίων επήλθε αστοχία, την στρώση και την επιφάνεια αυτής στην οποία επήλθε αρχικά αστοχία και τέλος την τιμή του κριτηρίου αστοχίας. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται εως ότου υπολογιστούν όλα τα σημεία του γεωμετρικού τόπου.

Ο υπολογισμός των γεωμετρικών τόπων για πιθανότητα αστοχίας 10^{-2} και 10^{-4} έγινε με τη χρήση κώδικα στο Matlab ο οποίος δημιουργήθηκε για τις ανάγκες της εργασίας. Το πρόγραμμα δέχεται ως δεδομένα τα υλικά από τα οποία αποτελείται η πολύστρωτη πλάκα και τις ιδιότητες αυτών, το πάχος και τον προσανατολισμό της κάθε στρώσης, τις φορτίσεις στις οποίες υπόκειται η πολύστρωτη πλάκα καθώς και την διαφορά θερμοκρασίας και την υγρασία. Όλα τα δεδομένα εισάγονται στην μορφή κατανομών, με τις υποστηριζόμενες επιλογές να είναι οι κατανομές: Normal, Lognormal, Gumbel και Weibull.

Ο κώδικας, όπως και ο κώδικας υπολογισμού του μη πιθανοτικού τόπου αστοχίας, χρησιμοποιεί το διάνυσμα θέσης R και την γωνία θ του σημείου για τον υπολογισμό των συντεταγμένων του κάθε σημείου του τόπου. Για κάθε R που “προβλέπει” το πρόγραμμα μέσω της θ και του R υπολογίζει τις φορτίσεις που έχουν επιλεγεί ως άξονες του γεωμετρικού τόπου και καλεί μια συνάρτηση η οποία μέσω της προσομοίωσης Μοντε Κάρλο υπολογίζει την πιθανότητα αστοχίας. Αυτή η πιθανότητα αστοχίας συγκρίνεται με τη επιθυμητή και σε περίπτωση που δεν συμπίπτουν το πρόγραμμα “προβλέπει” κάποιο άλλο διάνυσμα θέσης. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται εως ότου βρεθεί το σημείο εκείνο με την επιθυμητή πιθανότητα αστοχίας.

Η διαδικασία όπου το πρόγραμμα “προβλέπει” μία τιμή του διανύσματος R προσεγγίστηκε ως ένα πρόβλημα εύρεσης ριζών. Εάν υποθέσουμε μία συνάρτηση $h(R_x)=P_x$ η οποία εκφράζει τη συνάρτηση των πιθανοτήτων αστοχίας συναρτήσει του διανύσματος θέσης R, και P_F την επιθυμητή πιθανότητα αστοχίας στο κάθε σημείο του γεωμετρικού τόπου αστοχίας θα ισχύει:

$$h(R)=P_F$$

το οποίο γίνεται:

$$h(R)-P_F=0$$

Η μεγάλη δυσκολία σε αυτό το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι λόγω της μεθόδου Μόντε Κάρλο η οποία είναι εξαιρετικά χρονοβόρα ο υπολογισμός της συνάρτησης $h(R)$ είναι πρακτικά αδύνατος. Αυτό που μπορούμε να κάνουμε είναι να υπολογίζουμε την πιθανότητα αστοχίας για συγκεκριμένες τιμές του R. Η

μέθοδος εύρεσης ριζών που εδειξε τα καλύτερα αποτελέσματα και εφαρμόστηκε είναι η μέθοδος της διχοτόμησης.

Η μέθοδος αυτή χρειάζεται ένα ανώτερο (R_{up}) και ένα κατώτερο όριο (R_{down}) που να περιλαμβάνει την ρίζα και κάνει την πρώτη πρόβλεψη επιλέγοντας το R που βρίσκεται στο μέσο (R_{mid}). Για την τιμή R_{mid} υπολογίζεται η πιθανότητα αστοχίας η οποία συγκρίνεται με την επιθυμητή. Εάν η πιθανότητα αστοχίας δεν είναι η επιθυμητή τότε εάν είναι μεγαλύτερη ως όρια ορίζονται τα R_{up} , R_{mid} ενώ εάν είναι μικρότερη ως όρια καθορίζονται τα R_{mid} , R_{down} . Αυτό καθορίζεται ως εξής:

Εάν

$$P_F(R_{down}) * P_F(R_{mid}) < 0$$

Τότε όρια ορίζονται τα R_{mid} και R_{down} . Αντικαθιστούμε δηλαδή το R_{up} με το R_{mid} . Εάν όμως:

$$P_F(R_{down}) * P_F(R_{mid}) > 0$$

Τότε αντικαθιστούμε το R_{down} με το R_{mid} .

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου βρεθεί μια P_F η οποία να έχει ένα ανεκτό σφάλμα, το οποίο καθορίζεται από τον χρήστη του προγράμματος. Το πρόγραμμα έχει την δυνατότητα υπολογισμού του γεωμετρικού τύπου με βάση τα κριτήρια αστοχίας Tsai-Hill, Tsai-Hahn και του EPFS.

Τέλος, το πρόγραμμα περιέχει έναν έλεγχο ώστε να διαπιστώσει ότι οι τυχαίες τιμές που παράγονται για τις παραμέτρους $E1, E2, \nu12$ και $G12$ είναι θετικές. Στην περίπτωση που δεν είναι το πρόγραμμα καλεί μία συνάρτηση η οποία διορθώνει το πρόβλημα, παράγοντας μόνο θετικούς αριθμούς.

Σημειώνεται επίσης ότι όπως και το πρόγραμμα υπολογισμού της πιθανότητας αστοχίας μέσω της μεθόδου Monte Carlo, έτσι και το πρόγραμμα υπολογισμού πιθανοτικών γεωμετρικών τύπων αστοχία έχει κατασκευαστεί σε δύο μορφές. Μία στην οποία το πρόγραμμα ελέγχει τα υλικά που έχουν εισαχθεί στα δεδομένα εάν είναι ίδια και παράγει τους ίδιους τυχαίους αριθμούς και μία στην οποία δεν υπάρχει τέτοιος έλεγχος.

Με την χρήση των δύο αυτών προγραμμάτων υπολογίστηκαν οι γεωμετρικοί τύποι για πιθανότητες αστοχίας 10^{-2} και 10^{-4} καθώς και οι μη πιθανοτικοί γεωμετρικοί τύποι για τις δύο πολύστρωτες πλάκες που προαναφέρθηκαν.

3.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Κάποιες αρχικές παρατηρήσεις:

1. Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε στην μέθοδο Monte Carlo με σκοπό τον υπολογισμό της πιθανότητας αστοχίας και μετέπειτα της αξιοπιστίας, είναι της τάξης του ενός εκατομμυρίου.
2. Ο υπολογισμός των γεωμετρικών τόπων έγινε σε άξονες Nx-Ns.
3. Οι συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας ληφθήκαν υπ' όψιν ως $\Delta T = -60$ και $c = 0$.

Τα αρχικά δεδομένα που αποτελούν τις μέσες τιμές των παραμέτρων οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των ντετερμινιστικών τόπων αστοχίας είναι:

Οι ελαστικές ιδιότητες :

- $E_1 = 22.884 \cdot 10^9 \text{ Pa}$
- $E_2 = 7.8823 \cdot 10^9 \text{ Pa}$
- $\nu_{12} = 0.3008$
- $G_{12} = 1.6663 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$

Οι υγροθερμικές:

- $\alpha_1 = 9.132 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- $\alpha_2 = 46.044 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- $\beta_1 = 0$
- $\beta_2 = 0$

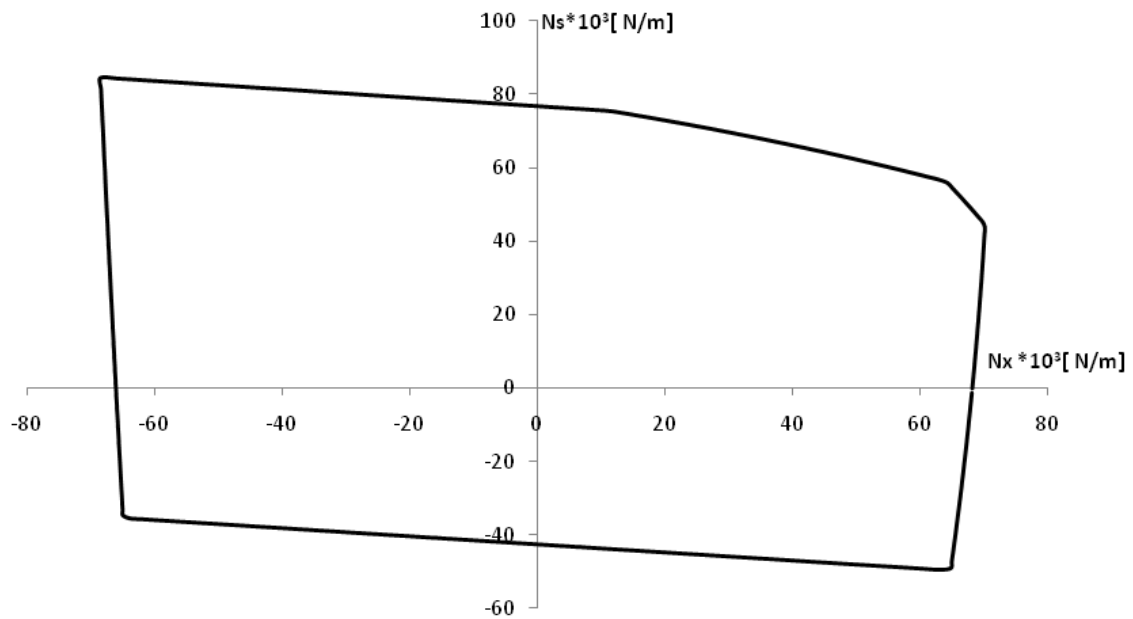
Οι τάσεις αστοχίας:

- $X_t = 397.94 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
- $X_c = 329.11 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
- $Y_t = 36.218 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
- $Y_c = 147.34 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
- $S = 16.025 \cdot 10^6 \text{ Pa}$

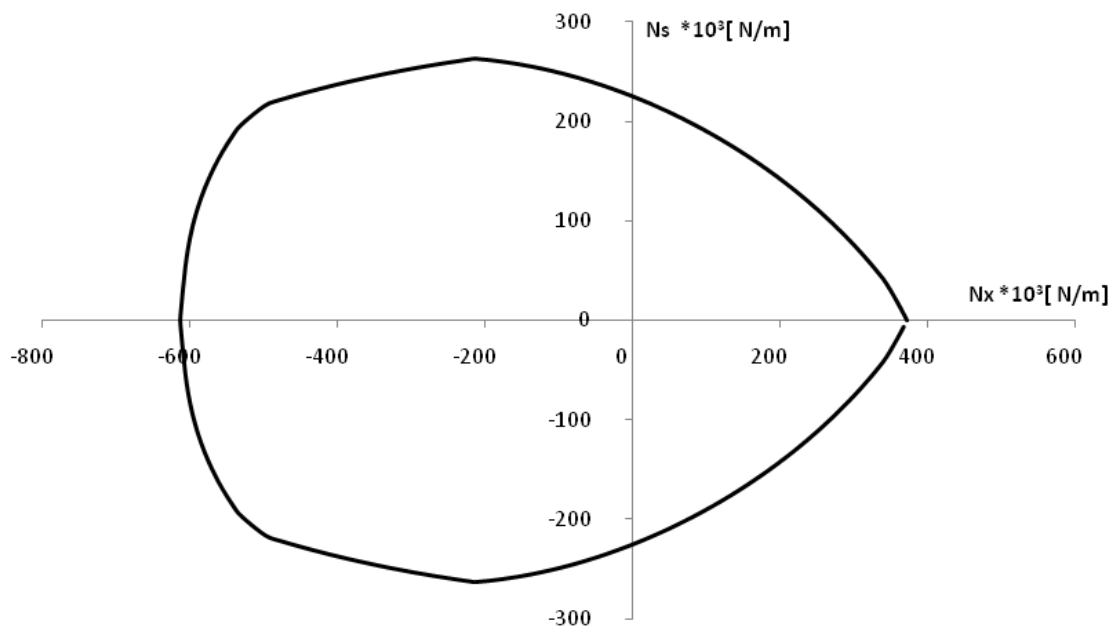
Τέλος, το πάχος της κάθε στρώσης h_{ply} ορίστηκε ως $0.938 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

3.2.1 ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΟΙ ΤΟΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα ανωτέρω υπολογιστήκαν οι ντετερμινιστικοί τόποι αστοχίας και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχ. 3.1 και Σχ. 3.2:



Σχήμα 3.1: Ντετερμινιστικός τόπος αστοχίας για την πολύστρωτη πλάκα [45/-45/0]



Σχήμα 3.2: Ντετερμινιστικός τόπος αστοχίας για την πολύστρωτη πλάκα [45/-45/0₃/45/-45]

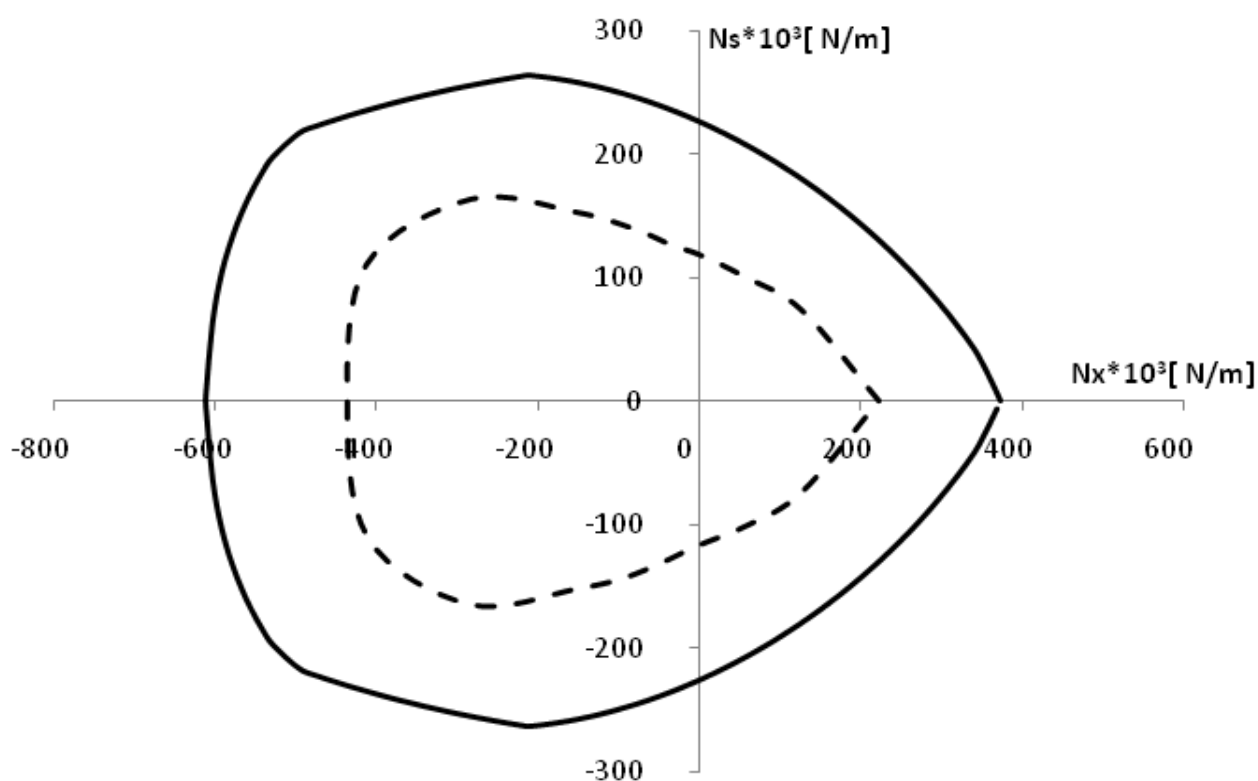
3.2.2 ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΩΣ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ

Θεωρώντας τις τάσεις αστοχίας ως στοχαστικές μεταβλητές και συγκεκριμένα έως κανονικές κατανομές με μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις με τιμές όπως φαίνονται στον Πίνακα 3.2.1:

Πίνακας 3.2.1: Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των τάσεων αστοχίας

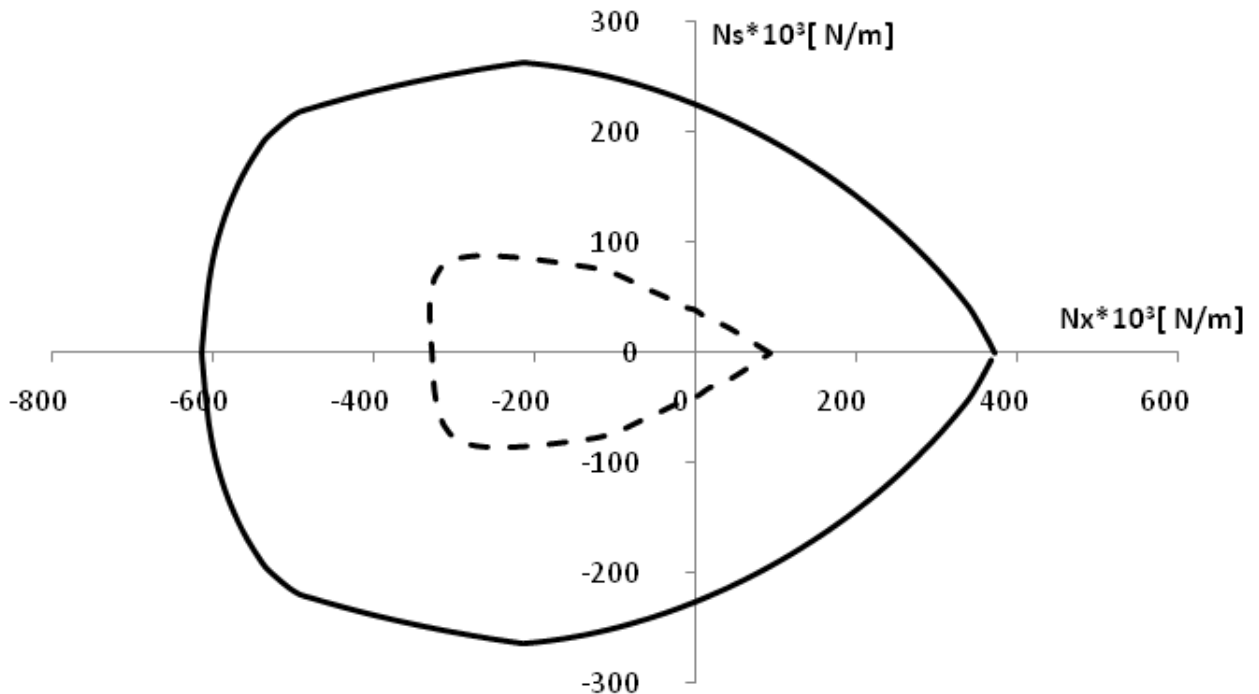
ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
χ_t	$397.94 \cdot 10^6 \text{ Pa}$	$55.932 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
χ_c	$329.11 \cdot 10^6 \text{ Pa}$	$32.345 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
γ_t	$36.218 \cdot 10^6 \text{ Pa}$	$5.8765 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
γ_c	$147.34 \cdot 10^6 \text{ Pa}$	$14.702 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
S	$16.025 \cdot 10^6 \text{ Pa}$	$2.303 \cdot 10^6 \text{ Pa}$

Υπολογίσθηκαν οι γεωμετρικοί τόποι αστοχίας για πιθανότητα αστοχίας 10^{-2} και 10^{-4} οι οποίοι παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές από τον ντετερμινιστικό. Οι διαφορές αυτές αποτυπώνονται στα Σχ. 3.3-3.4:



Σχήμα 3.3: Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη [45/-45/0₃/45/-45]
 (α) Ντετερμινιστικός τόπος αστοχίας (-) (β) Τόπος αστοχίας για πιθανότητα αστοχίας 10^{-2} θεωρώντας τις τάσεις αστοχίας ως στοχαστικές μεταβλητές(- -)

Ενώ οι διαφορές στα φορτία αστοχίας μεταξύ του ντετερμινιστικού τύπου αστοχίας και του πιθανοτικού είναι εμφανείς, οι στρώσεις που αστοχούν παραμένουν οι ίδιες και στους δύο τύπους.



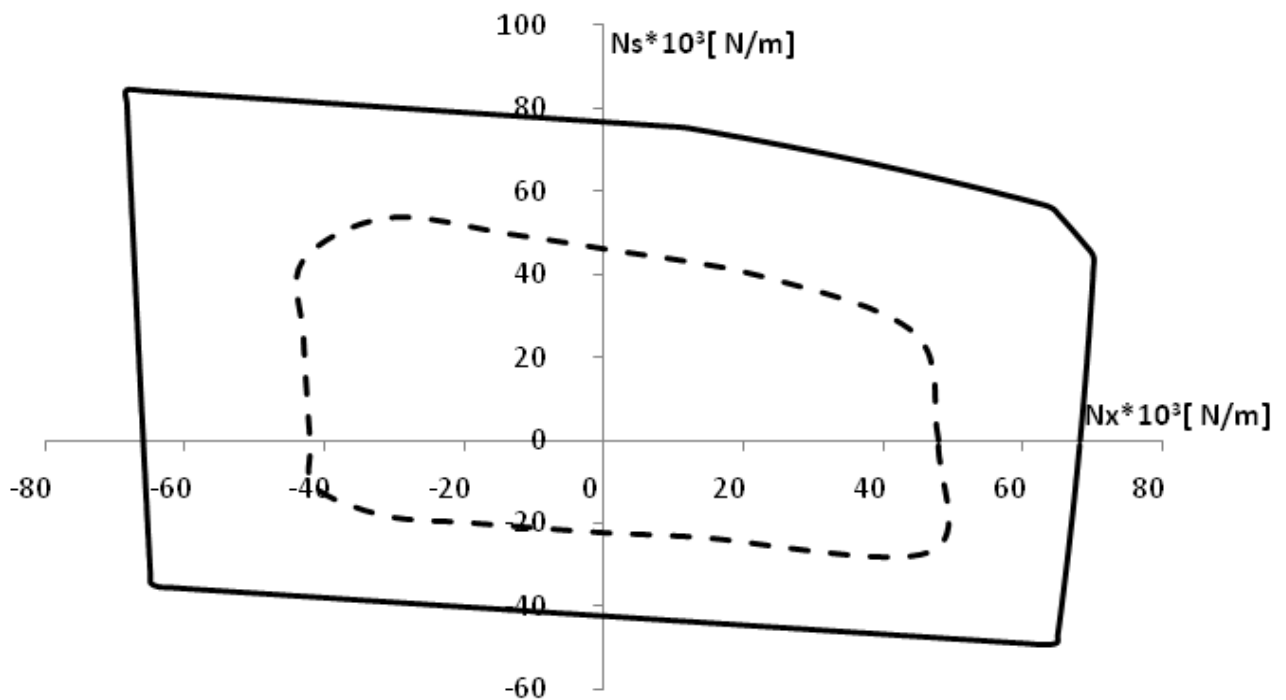
Σχήμα 3.4: Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη [45/-45/0₃/45/-45]
 (α) Ντετερμινιστικός τύπος αστοχίας (-) (β) Τόπος αστοχίας για πιθανότητα αστοχίας 10^{-4}
 θεωρώντας τις τάσεις αστοχίας ως στοχαστικές μεταβλητές (- -)

Για πιθανότητα αστοχίας 10^{-4} εκτός από τις εμφανείς διαφορές στα φορτία αστοχίας ανάμεσα στον μη πιθανοτικό τύπο αστοχίας και στον τύπο αστοχίας όπου οι τάσεις αστοχίας έχουν εκληφθεί ως στοχαστικές μεταβλητές, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.2 και κάποιες διαφορές στις στρώσεις που αστοχούν πρώτες ως εξής:

Πίνακας 3.2.2: Διαφορές στις FPF μεταξύ του ντετερμινιστικού τύπου αστοχίας και του τύπου αστοχίας με θεωρημένες τις τάσεις αστοχίας ως στοχαστικές μεταβλητές για $P_F=10^{-4}$

$P_F=10^{-4}$	ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΟΣ [45/-45/0 ₃ /45/-45]			ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΟΣ [45/-45/0 ₃ /45/-45]		
	ΣΤΡΩΣΗ	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	ΣΤΡΩΣΗ	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ
30	7	-45	ΠΑΝΩ	2	-45	ΚΑΤΩ
60	7	-45	ΠΑΝΩ	2	-45	ΚΑΤΩ
90	7	-45	ΠΑΝΩ	2	-45	ΚΑΤΩ
105	7	-45	ΠΑΝΩ	2	-45	ΚΑΤΩ
120	7	-45	ΠΑΝΩ	2	-45	ΚΑΤΩ
135	7	-45	ΠΑΝΩ	2	-45	ΚΑΤΩ
150	3	0	ΚΑΤΩ	2	-45	ΚΑΤΩ
165	2	-45	ΠΑΝΩ-ΚΑΤΩ	3	0	ΚΑΤΩ
	6	45	ΠΑΝΩ-ΚΑΤΩ	4	0	ΠΑΝΩ-ΚΑΤΩ
				5	0	ΠΑΝΩ-ΚΑΤΩ
195	6	45	ΠΑΝΩ	3	0	ΚΑΤΩ
210	5	0	ΠΑΝΩ	6	45	ΠΑΝΩ
225	1	45	ΚΑΤΩ	6	45	ΠΑΝΩ
240	1	45	ΚΑΤΩ	6	45	ΠΑΝΩ
270	1	45	ΚΑΤΩ	6	45	ΠΑΝΩ
300	1	45	ΚΑΤΩ	6	45	ΠΑΝΩ
330	1	45	ΚΑΤΩ	6	45	ΠΑΝΩ

Για την πολύστρωτη [45/-45/0] οι τύποι που υπολογίστηκαν αποτυπώνονται στα Σχ. 3.5-3.6:

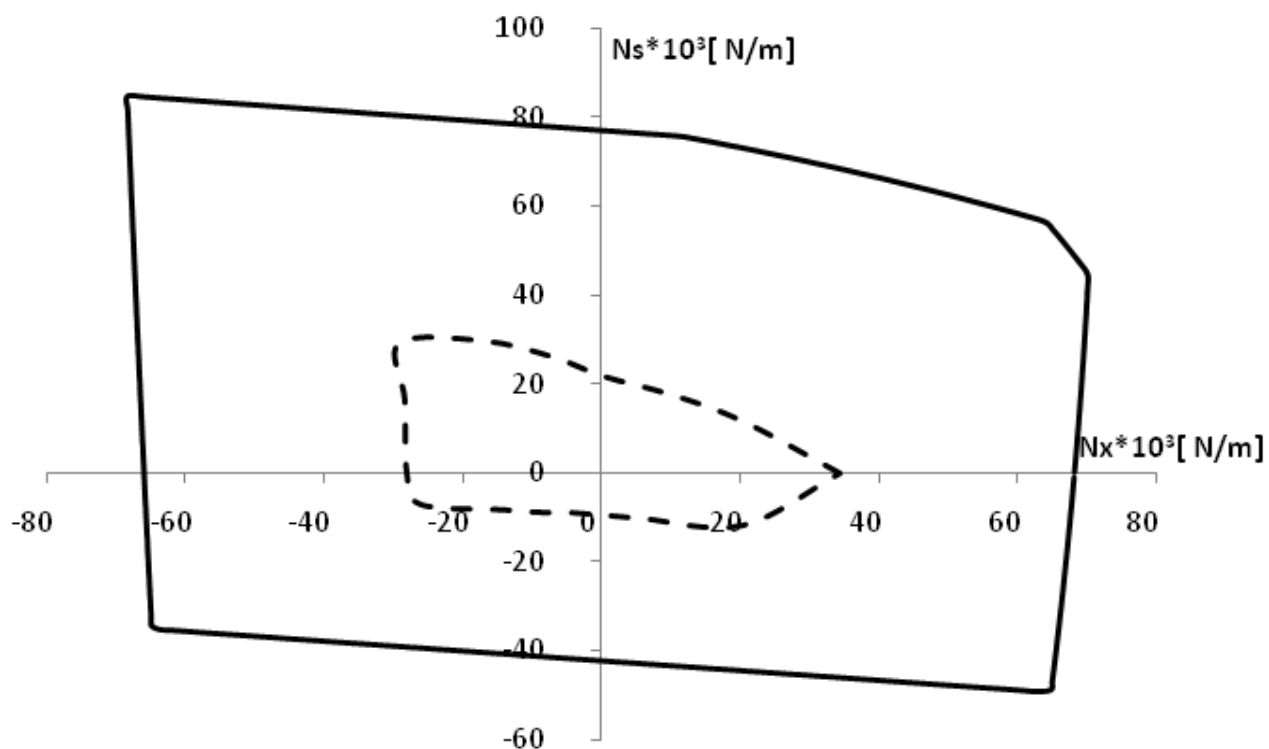


Σχήμα 3.5 Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη [45/-45/0]
 (α) Ντετερμινιστικός τόπος αστοχίας (-) (β) Τόπος αστοχίας για πιθανότητα αστοχίας 10^{-2}
 θεωρώντας τις τάσεις αστοχίας ως στοχαστικές μεταβλητές (- -)

Και στον Πίνακα 3.2.3 παρουσιάζονται διαφορές στις στρώσεις αστοχίας.

Πίνακας 3.2.3: Διαφορές στις FPF μεταξύ του ντετερμινιστικού τύπου αστοχίας και του τύπου αστοχίας με θεωρημένες τις τάσεις αστοχίας ως στοχαστικές μεταβλητές για $P_F=10^{-2}$

$P_F=10^{-2}$	ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΟΣ [45/-45/0]			ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΟΣ [45/-45/0]		
	ΣΤΡΩΣΗ	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	ΣΤΡΩΣΗ	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ
30	1	45	ΚΑΤΩ	2	-45	ΚΑΤΩ
90	3	0	ΠΑΝΩ	2	-45	ΠΑΝΩ
105	3	0	ΠΑΝΩ	2	-45	ΠΑΝΩ
120	3	0	ΠΑΝΩ	2	-45	ΠΑΝΩ



Σχήμα 3.6: Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη [45/-45/0]
 (α) Ντετερμινιστικός τόπος αστοχίας (-) (β) Τόπος αστοχίας για πιθανότητα αστοχίας 10^{-4}
 θεωρώντας τις τάσεις αστοχίας ως στοχαστικές μεταβλητές (- -)

Οι διαφορές στις στρώσεις αστοχίας αποτυπώνονται στον Πίνακα 3.2.4:

Πίνακας 3.2.4: Διαφορές στις FPF μεταξύ του ντετερμινιστικού τόπου αστοχίας και του τόπου αστοχίας με θεωρημένες τις τάσεις αστοχίας ως στοχαστικές μεταβλητές για $P_F=10^{-4}$

$P_F=10^{-4}$	ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΟΣ [45/-45/0]			ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΟΣ [45/-45/0]		
	ΣΤΡΩΣΗ	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	ΣΤΡΩΣΗ	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ
0	1	45	ΚΑΤΩ	2	-45	ΚΑΤΩ
30	1	45	ΚΑΤΩ	2	-45	ΚΑΤΩ
60	2	-45	ΠΑΝΩ	2	-45	ΚΑΤΩ
90	3	0	ΠΑΝΩ	2	-45	ΚΑΤΩ
105	3	0	ΠΑΝΩ	2	-45	ΚΑΤΩ
120	3	0	ΠΑΝΩ	2	-45	ΚΑΤΩ
195	1	45	ΚΑΤΩ	3	0	ΠΑΝΩ
330	1	45	ΚΑΤΩ	3	0	ΠΑΝΩ

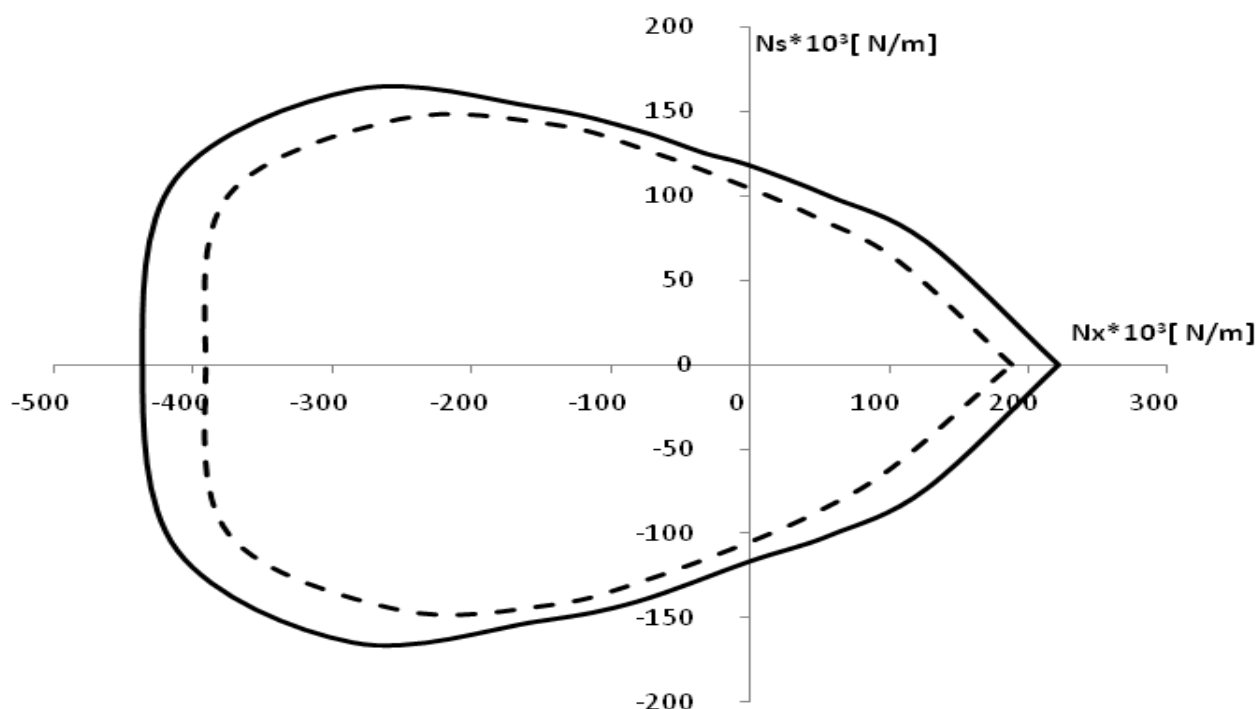
3.2.3 ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΩΣ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ

Στη συνέχεια θεωρήσαμε ως στοχαστικές μεταβλητές εκτός από την αντοχή του υλικού (τάσεις αστοχίας) και τις ελαστικές σταθερές. Οι κατανομές των στοχαστικών μεταβλητών είναι και πάλι κανονικές.

Πίνακας 3.2.5: Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των ελαστικών σταθερών του υλικού

ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
E1	$22.884 \cdot 10^9$ Pa	$2.0737 \cdot 10^9$ Pa
E2	$7.8823 \cdot 10^9$ Pa	$1.576 \cdot 10^9$ Pa
ν_{12}	0.3008	0.051763
G12	$1.6663 \cdot 10^9$ Pa	$0.36901 \cdot 10^9$ Pa

Τα αποτελέσματα για την $[45/-45/0_3/45/-45]$ αποτυπώνονται στα Σχ. 3.7-3.8:



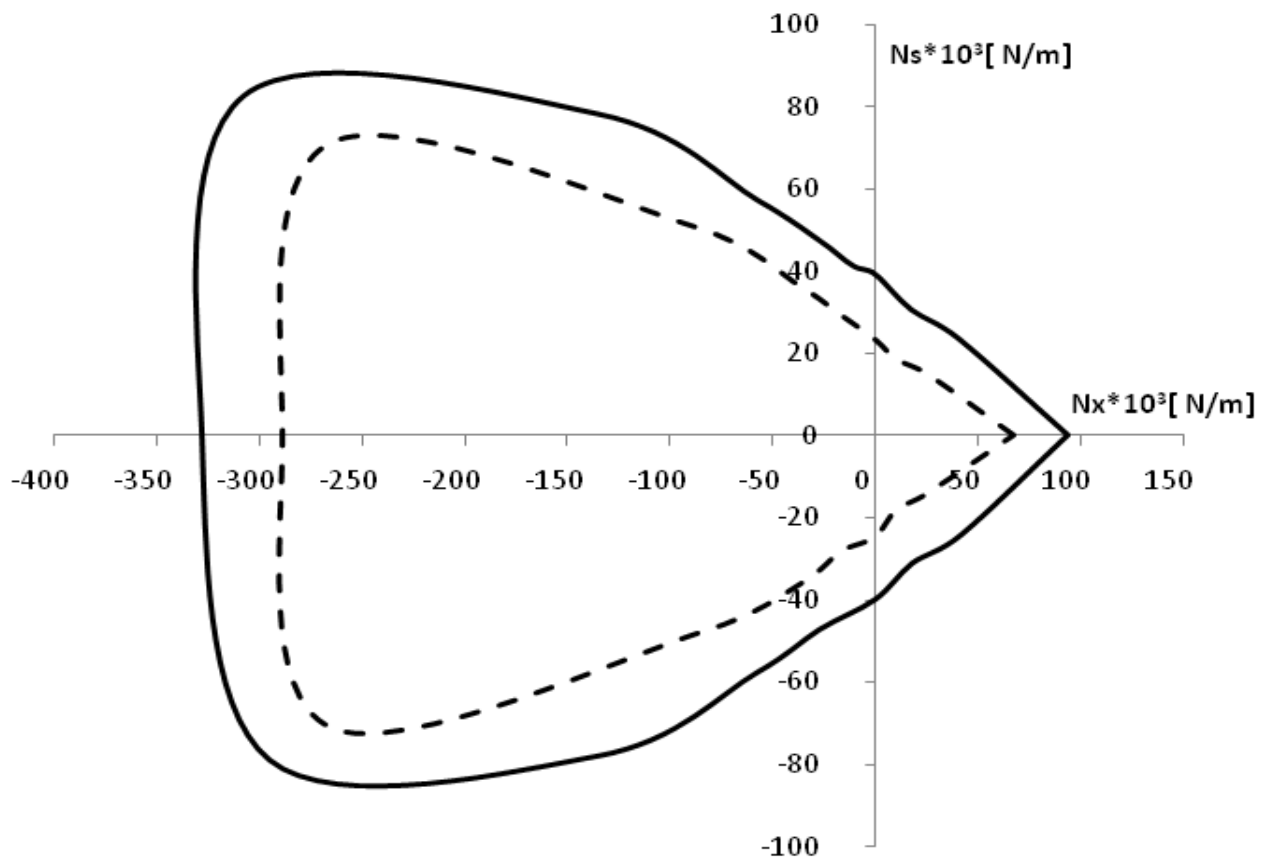
Σχήμα 3.7: Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη $[45/-45/0_3/45/-45]$ για πιθανότητα αστοχίας 10^{-2}

(α) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας(-) (β) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές(- -)

Οι στρώσεις αστοχίας που διαφέρουν στους δύο τύπους αποτυπώνονται στον Πίνακα 3.2.6:

Πίνακας 3.2.6: Διαφορές στις FPF μεταξύ πιθανοτικών τύπων με την αντοχή θεωρημένη ως στοχαστική μεταβλητή ο πρώτος και την αντοχή και τις ελαστικές σταθερές ο δεύτερος για $P_F=10^{-2}$

$P_F=10^{-2}$	ΑΝΤΟΧΗ [45/-45/0₃/45/-45]			ΑΝΤΟΧΗ+ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ [45/-45/0₃/45/-45]		
	ΘΕΣΗ ΣΗΜΕΙΟΥ (ΓΩΝΙΑ)	ΣΤΡΩΣΗ	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	ΣΤΡΩΣΗ	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ
30	7	-45	ΠΑΝΩ	2	-45	ΚΑΤΩ
60	7	-45	ΠΑΝΩ	2	-45	ΚΑΤΩ
90	7	-45	ΠΑΝΩ	2	-45	ΚΑΤΩ
165	2	-45	ΠΑΝΩ	2	-45	ΚΑΤΩ
	6	45	ΠΑΝΩ			
270	1	45	ΚΑΤΩ	6	45	ΠΑΝΩ
300	1	45	ΚΑΤΩ	6	45	ΠΑΝΩ
330	1	45	ΚΑΤΩ	6	45	ΠΑΝΩ



Σχήμα 3.8 Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη [45/-45/0₃/45/-45] για πιθανότητα αστοχίας 10^{-4}

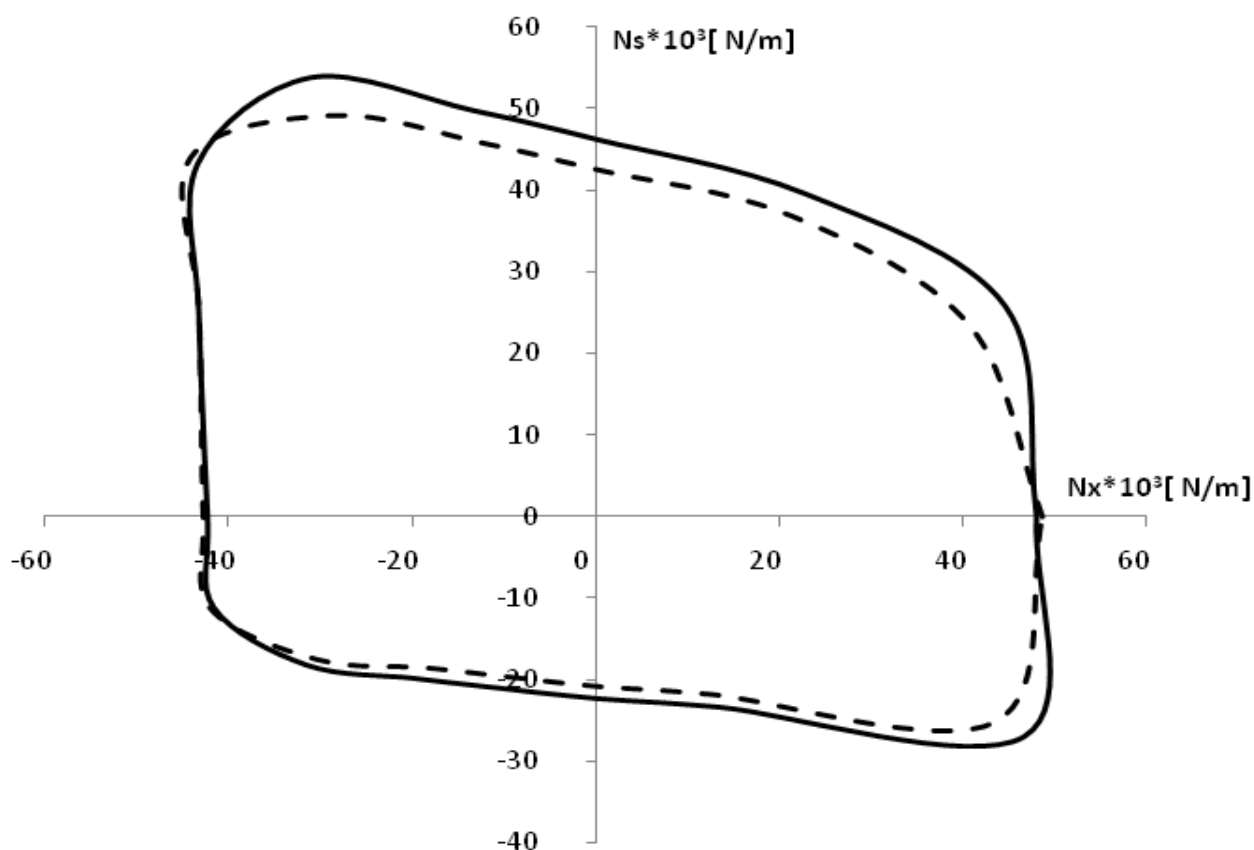
(α) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας (-) (β) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές (- -)

Όσον αφορά τις στρώσεις αστοχίας που διαφέρουν στους δύο τύπους τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 3.2.7:

Πίνακας 3.2.7: Διαφορές στις FPF μεταξύ πιθανοτικών τόπων με την αντοχή θεωρημένη ως στοχαστική μεταβλητή ο πρώτος και την αντοχή και τις ελαστικές σταθερές ο δεύτερος για $P_F=10^{-4}$

$P_F=10^{-4}$	ΑΝΤΟΧΗ [45/-45/0 ₃ /45/-45]			ΑΝΤΟΧΗ+ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ [45/-45/0 ₃ /45/-45]		
	ΣΤΡΩΣΗ	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	ΣΤΡΩΣΗ	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ
165	4	0	ΠΑΝΩ	5	0	ΠΑΝΩ
	5	0	ΠΑΝΩ-ΚΑΤΩ			

Για την πολύστρωτη [45/-45/0] τα αποτελέσματα αποτυπώνονται στα σχήματα 3.9-3.10:

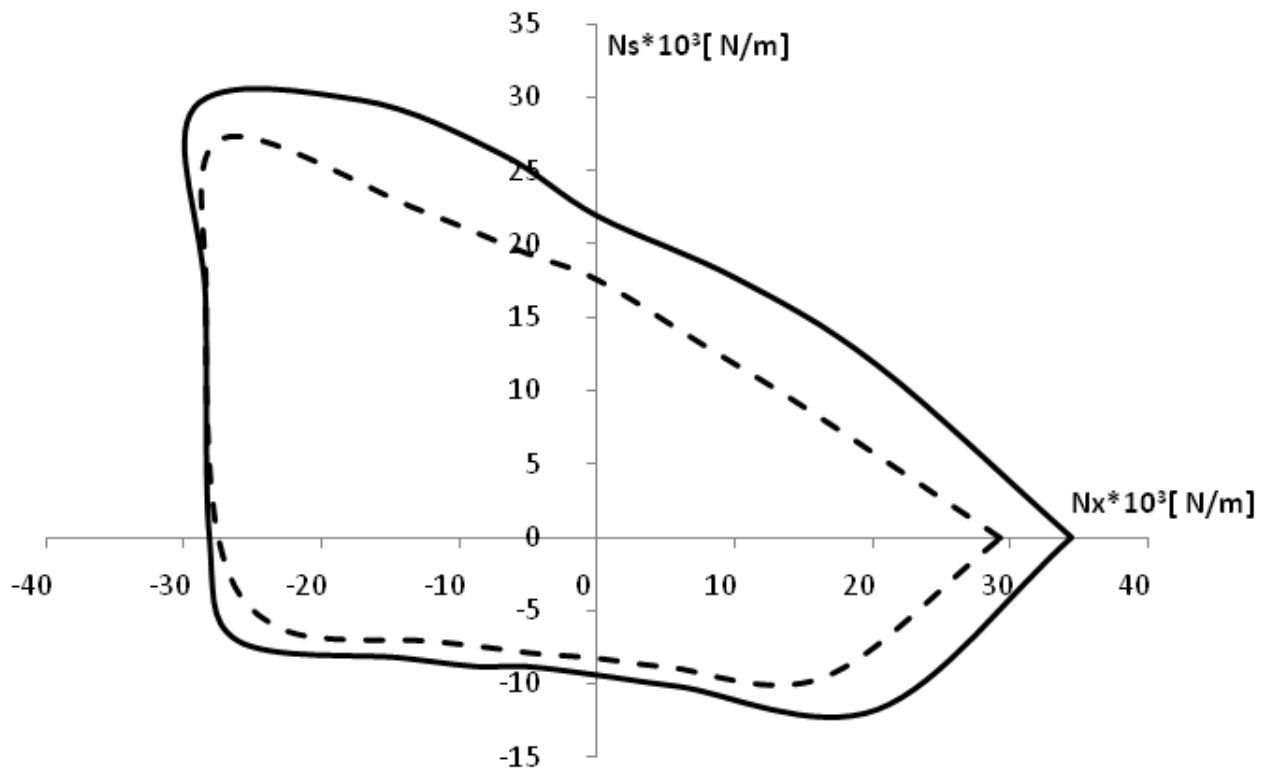


Σχήμα 3.9: Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη [45/-45/0] για πιθανότητα αστοχίας 10^{-2}
(α) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας (-) (β) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές(- -)

Πίνακας 3.2.8: Διαφορές στις FPF μεταξύ πιθανοτικών τύπων με την αντοχή θεωρημένη ως στοχαστική μεταβλητή ο πρώτος και την αντοχή και τις ελαστικές σταθερές ο δεύτερος για $P_F=10^{-2}$

$P_F=10^{-2}$	ΑΝΤΟΧΗ [45/-45/0]			ΑΝΤΟΧΗ+ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ [45/-45/0]		
	ΘΕΣΗ ΣΗΜΕΙΟΥ (ΓΩΝΙΑ)	ΣΤΡΩΣΗ	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	ΣΤΡΩΣΗ	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ
330	1	45	ΚΑΤΩ	3	0	ΠΑΝΩ

Και:



Σχήμα 3.10: Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη [45/-45/0] για πιθανότητα αστοχίας 10^{-4}
(α) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας (-) (β) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές (- -)

Οι διαφορές στις στρώσεις αστοχίας:

Πίνακας 3.2.9: Διαφορές στις FPF μεταξύ πιθανοτικών τόπων με την αντοχή θεωρημένη ως στοχαστική μεταβλητή ο πρώτος και την αντοχή και τις ελαστικές σταθερές ο δεύτερος για $P_F=10^{-4}$

$P_F=10^{-4}$	ΑΝΤΟΧΗ [45/-45/0]			ΑΝΤΟΧΗ+ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ [45/-45/0]		
	ΘΕΣΗ ΣΗΜΕΙ ΟΥ (ΓΩΝΙΑ)	ΣΤΡΩΣ Η	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣ ΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕ ΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑ Σ	ΣΤΡΩΣ Η	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣ ΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ
135	1	45	ΚΑΤΩ	2	-45	ΚΑΤΩ

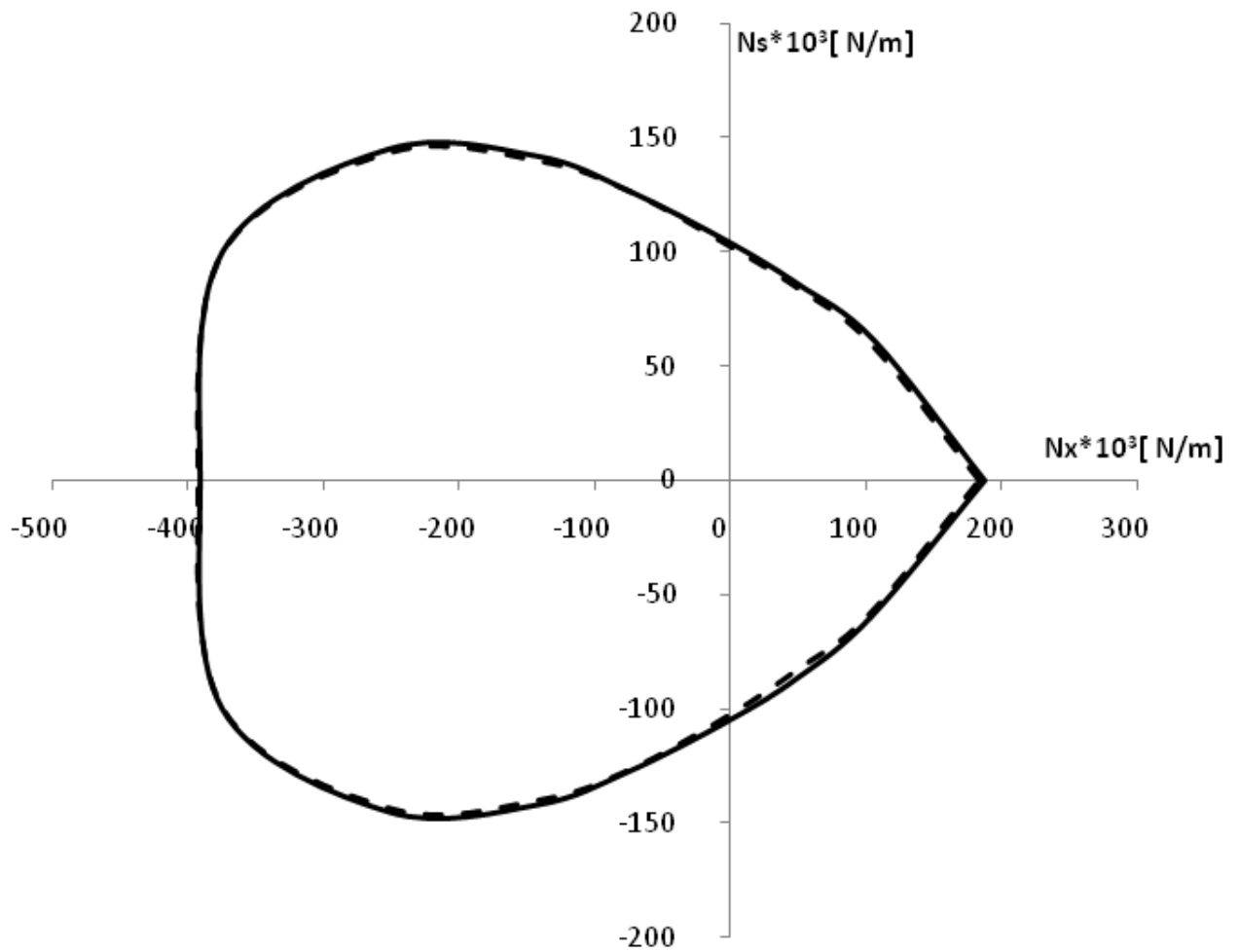
3.2.4 ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ ΩΣ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ

Θεωρώντας και τους συντελεστές θερμικής διαστολής a_1, a_2 ως στοχαστικές μεταβλητές κανονικής κατανομής:

Πίνακας 3.2.10: Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των συντελεστών θερμικής διαστολής

ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
a_1	$9.132 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$0.987 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
a_2	$46.044 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$3.021 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

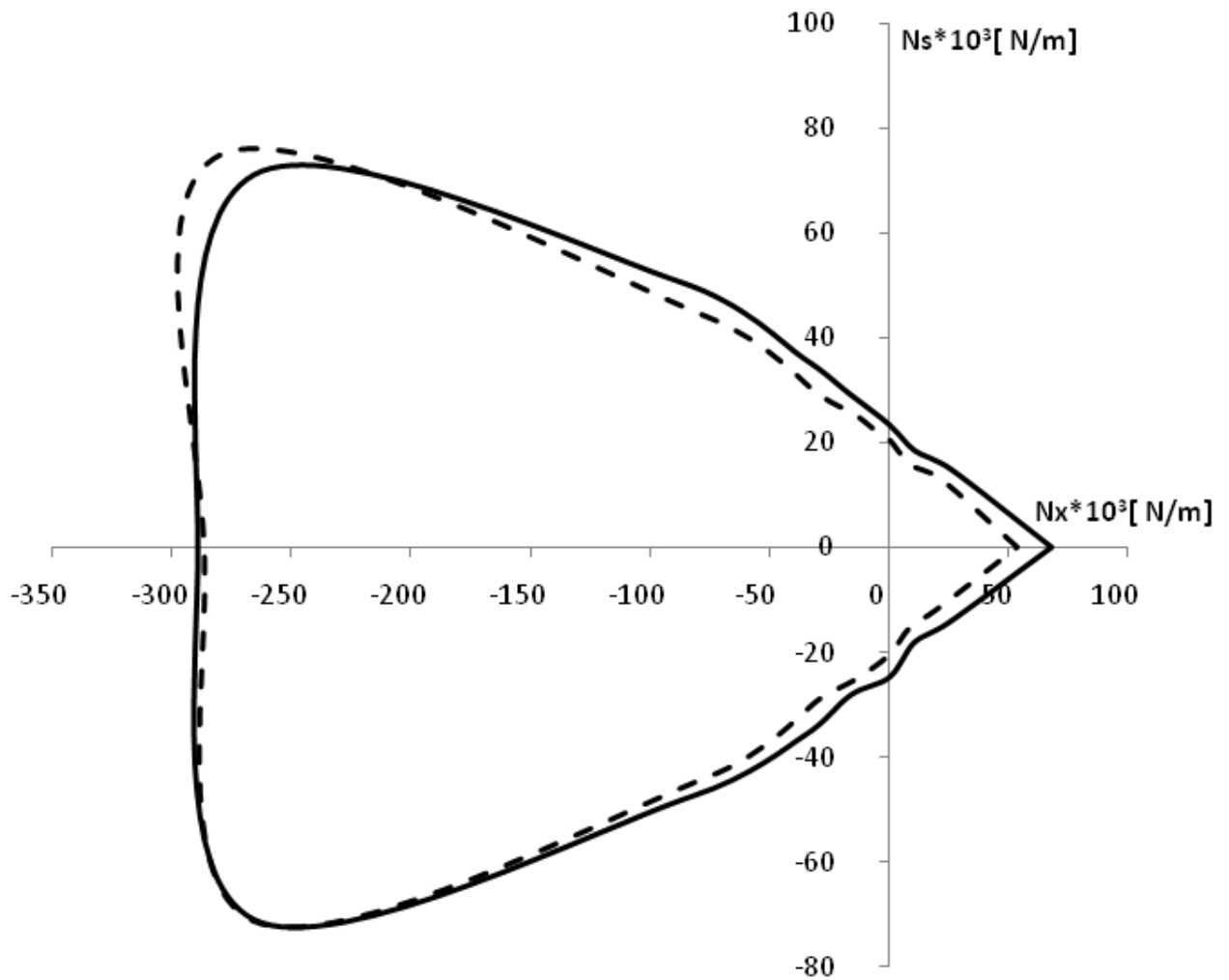
Οι υπολογισμοί για την SPAR CAP [45/-45/0₃/45/-45] αποτυπώνονται στα Σχ 3.11-3.12:



Σχήμα 3.11 Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη [45/-45/0₃/45/-45] για πιθανότητα αστοχίας 10^{-2}

- (α) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές(-)
 (β) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας, τις ελαστικές σταθερές και τους συντελεστές θερμικής διαστολής(--)

Σημειώνεται εδώ πως στους δύο τόπους αστοχίας του Σχ. 3.11 δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στις στρώσεις οι οποίες αστοχούν.



Σχήμα 3.12: Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη [45/-45/0₃/45/-45] για πιθανότητα αστοχίας 10^{-4}

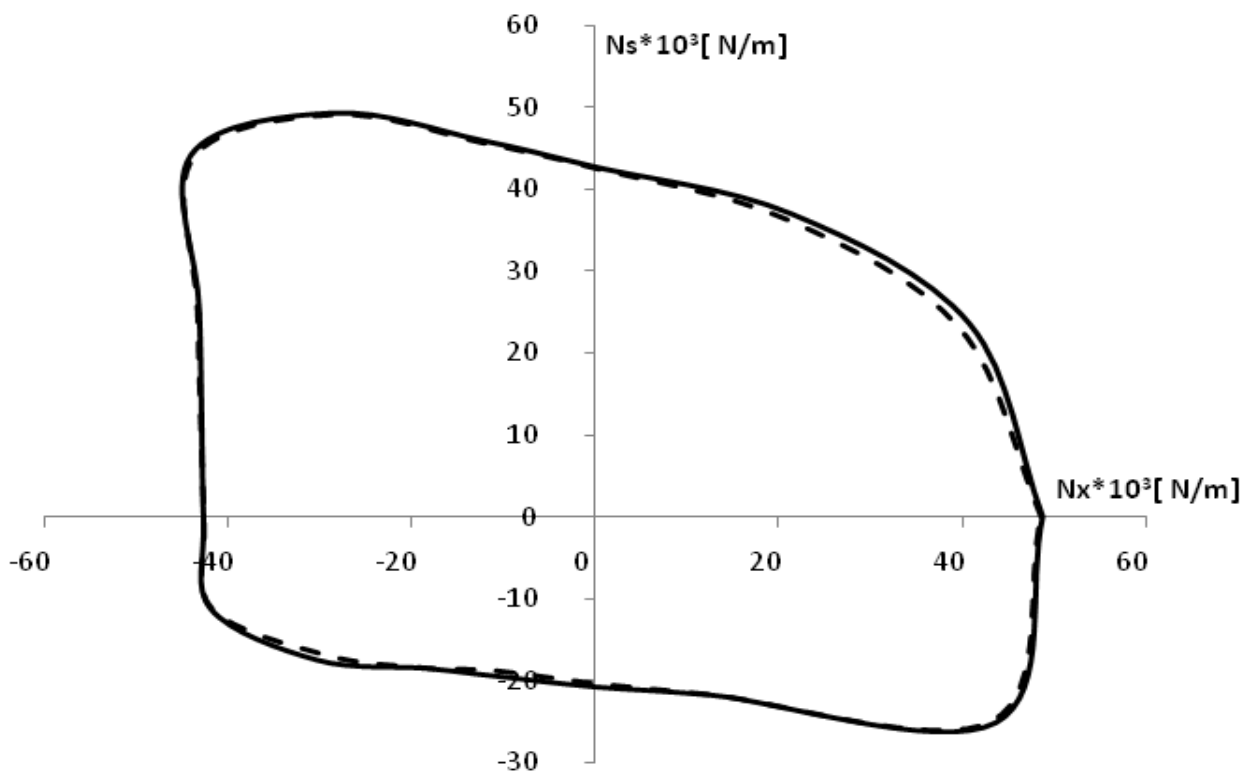
- (α) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές (-)
 (β) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας, τις ελαστικές σταθερές και τους συντελεστές θερμικής διαστολής(--)

Εδώ παρατηρείται πάλι το φαινόμενο όπου αλλάζουν οι στρώσεις αστοχίας με την αύξηση των στοχαστικών μεταβλητών όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.2.11:

Πίνακας 3.2.11: Διαφορές στις FPF μεταξύ πιθανοτικών τόπων θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές την αντοχή και τις ελαστικές σταθερές του υλικού αρχικά και στη συνέχεια και τους συντελεστές θερμικής διαστολής για $P_F=10^{-4}$

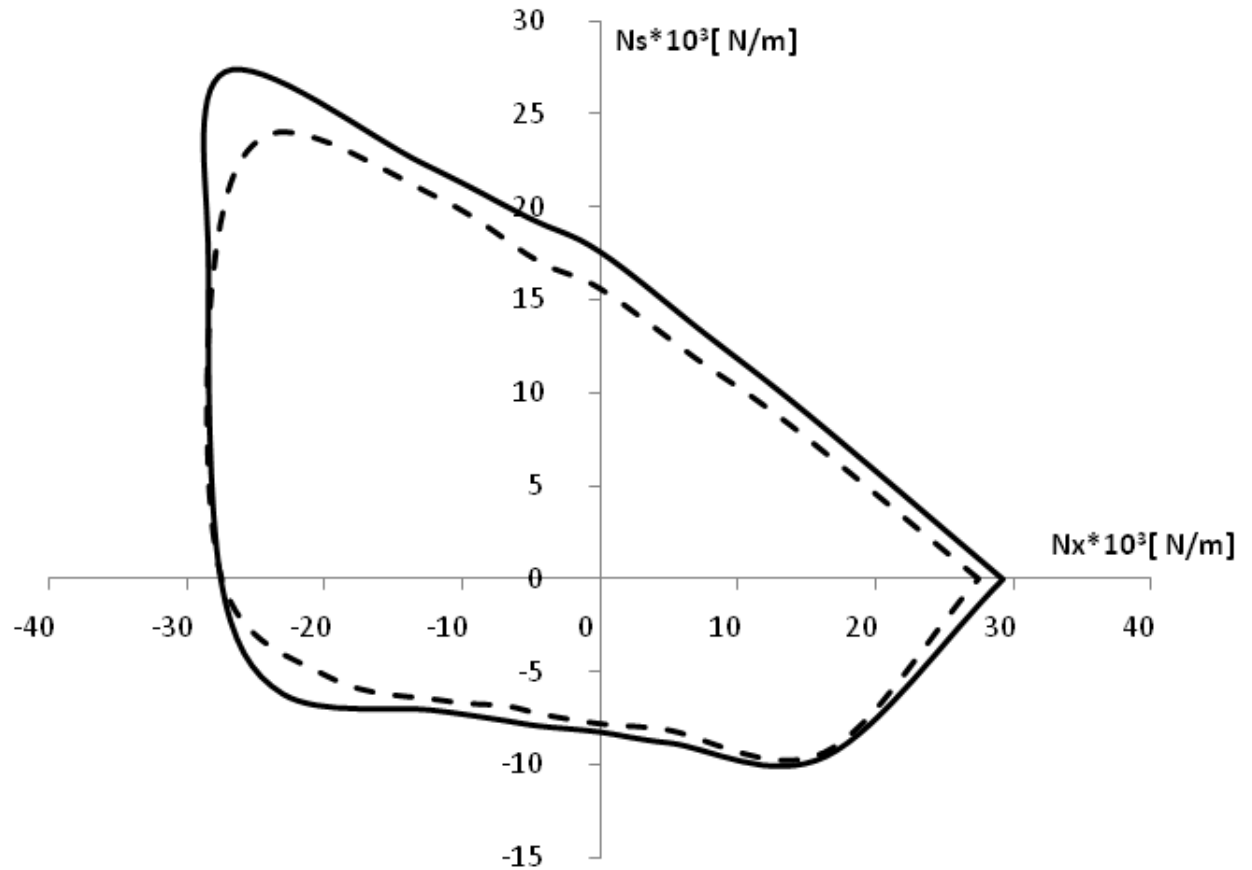
ΘΕΣΗ ΣΗΜΕΙΟΥ (ΓΩΝΙΑ)	ΑΝΤΟΧΗ+ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ [45/-45/0 ₃ /45/-45]			ΑΝΤΟΧΗ+ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ+ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ [45/-45/0 ₃ /45/-45]		
	ΣΤΡΩΣΗ	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	ΣΤΡΩΣΗ	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ
165	5	0	ΠΑΝΩ	6	45	ΠΑΝΩ-ΚΑΤΩ
				2	-45	ΚΑΤΩ

Για την πολύστρωτη [45/-45/0] οι τόποι αποτυπώνονται στα Σχ. 3.13-3.14:



Σχήμα 3.13: Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη [45/-45/0] για πιθανότητα αστοχίας 10^{-2}
 (α) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές(-)
 (β) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας, τις ελαστικές σταθερές και τους συντελεστές θερμικής διαστολής(--)

Με την προσθήκη των συντελεστών θερμικής διαστολής έως στοχαστικές μεταβλητές δεν παρατηρήθηκαν αλλαγές στις στρώσεις αστοχίας.



Σχήμα 3.14: Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη [45/-45/0] για πιθανότητα αστοχίας 10^{-4}
 (α) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές(-)
 (β) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας, τις ελαστικές σταθερές και τους συντελεστές θερμικής διαστολής(--)

Ομοίως και για πιθανότητα αστοχίας 10^{-4} , πάλι δεν παρατηρήθηκαν αλλαγές στις στρώσεις αστοχίας.

3.2.5 ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΩΣ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ

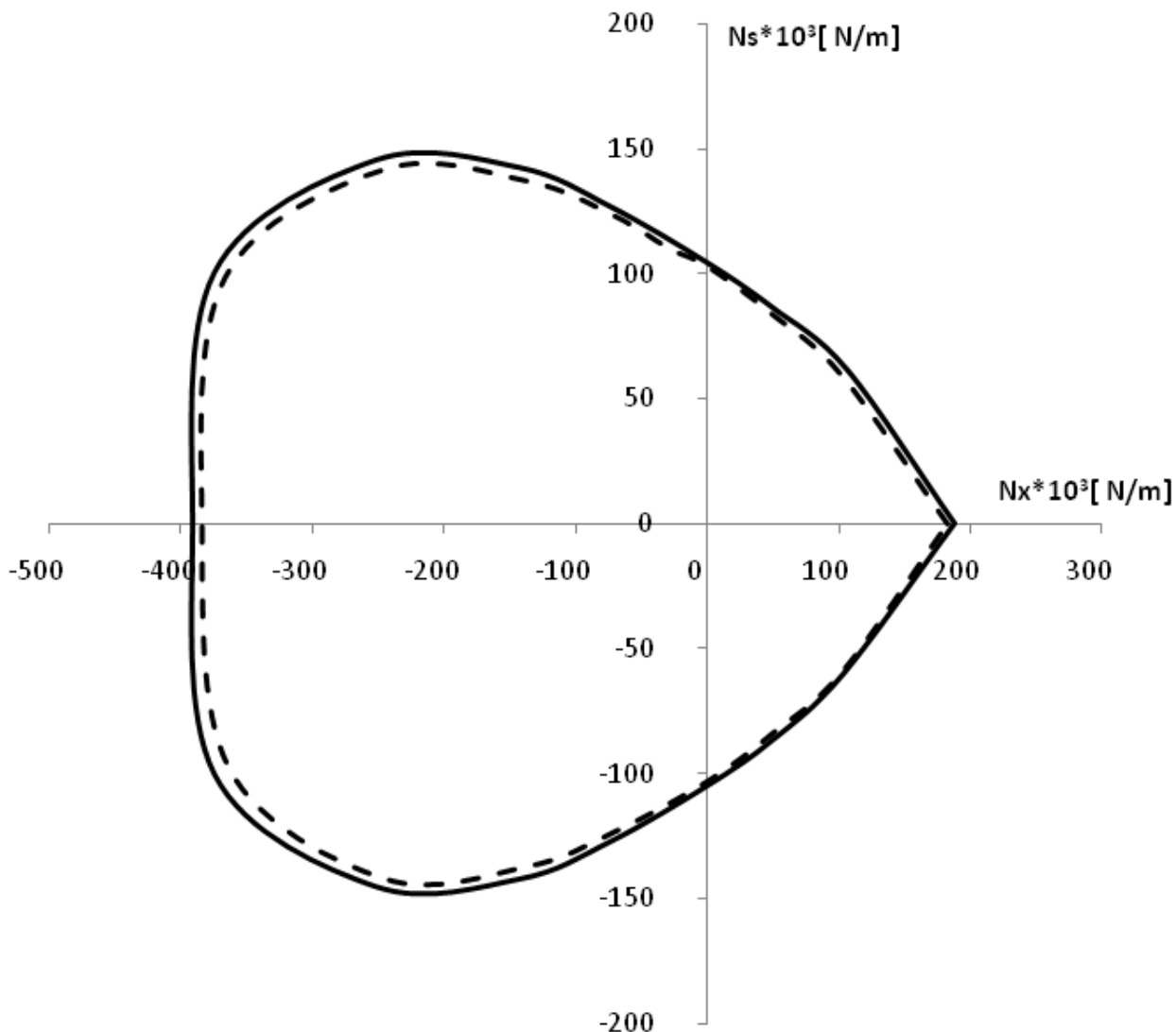
Στη συνέχεια το πάχος θεωρήθηκε ως στοχαστική μεταβλητή και συγκεκριμένα ως

μια κατανομή Weibull της μορφής: $y = f(x|a, b) = ba^{-b} x^{b-1} e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b} I_{(0, \infty)}(x)$

Όπου οι τιμές των παραμέτρων της κατανομής είναι ως εξής:

ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	Shape parameter a	Scale parameter b
hply	0.00095812	23.238

Τα αποτελέσματα για την [45/-45/0₃/45/-45] αποτυπώνονται στα Σχ. 3.15-3.16:



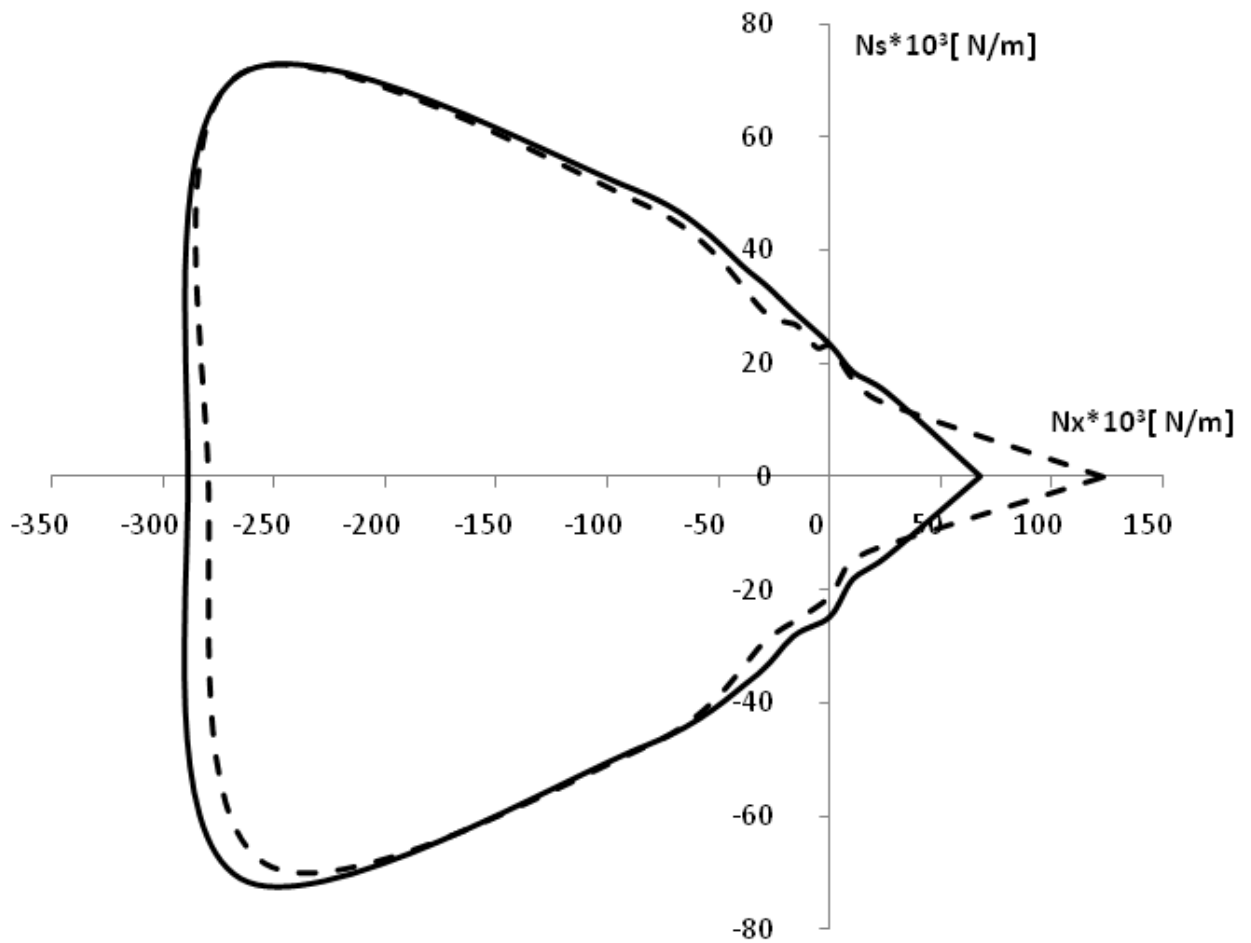
Σχήμα 3.15: Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη [45/-45/0₃/45/-45] για πιθανότητα αστοχίας 10^{-2}

- (α) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές (-)
 (β) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας, τις ελαστικές σταθερές, τους συντελεστές θερμικής διαστολής και το πάχος των στρώσεων(--)

Οι διαφορές στις στρώσεις αστοχίας μεταξύ των δύο τρόπων αστοχίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.12

Πίνακας 3.2.12 Διαφορές στις FPF μεταξύ πιθανοτικών τόπων θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές την αντοχή και τις ελαστικές σταθερές του υλικού αρχικά και στη συνέχεια θεωρώντας επίσης ως στοχαστικές μεταβλητές τους συντελεστές θερμικής διαστολής και το πάχος των στρώσεων για $P_F=10^{-2}$

$P_F=10^{-2}$	ΑΝΤΟΧΗ+ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ [45/-45/0 ₃ /45/-45]			ΑΝΤΟΧΗ+ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ+ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ+ΠΑΧΟΣ [45/-45/0 ₃ /45/-45]		
ΘΕΣΗ ΣΗΜΕΙ ΟΥ (ΓΩΝΙΑ)	ΣΤΡΩΣ Η	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣ ΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕ ΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑ Σ	ΣΤΡΩΣ Η	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣ ΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕ ΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑ Σ
165	2	-45	ΚΑΤΩ	6	45	ΠΑΝΩ- ΚΑΤΩ
				2	-45	ΠΑΝΩ- ΚΑΤΩ



Σχήμα 3.16: Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη [45/-45/0₃/45/-45] για πιθανότητα αστοχίας 10^{-4}

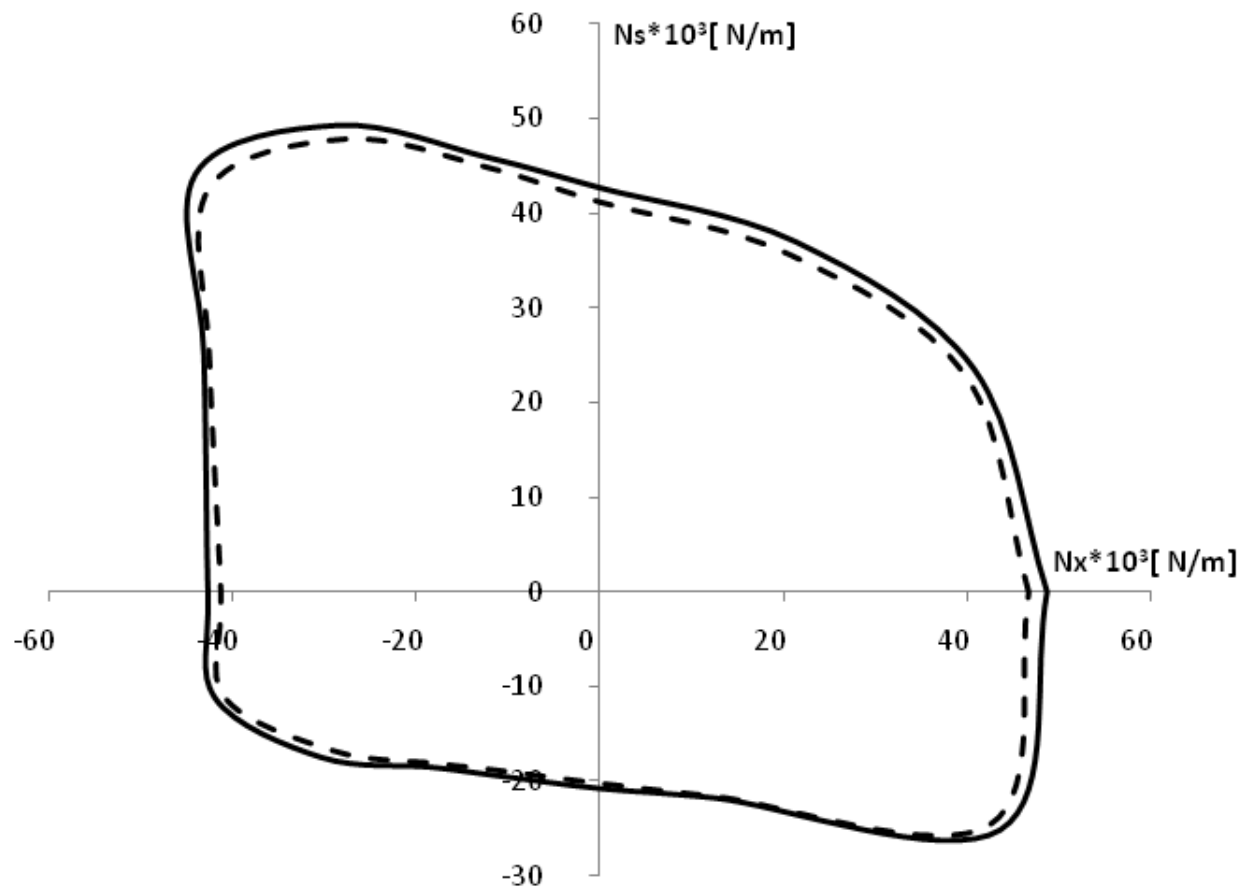
(α) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές (-) (β) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας, τις ελαστικές σταθερές, τους συντελεστές θερμικής διαστολής και το πάχος των στρώσεων(--)

Οι διαφορές στις στρώσεις αστοχίας μεταξύ των δύο τύπων αστοχίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.13

Πίνακας 3.2.13 Διαφορές στις FPF μεταξύ πιθανοτικών τόπων θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές την αντοχή και τις ελαστικές σταθερές του υλικού αρχικά και στη συνέχεια θεωρώντας επίσης ως στοχαστικές μεταβλητές τους συντελεστές θερμικής διαστολής και το πάχος των στρώσεων για $P_F=10^{-4}$

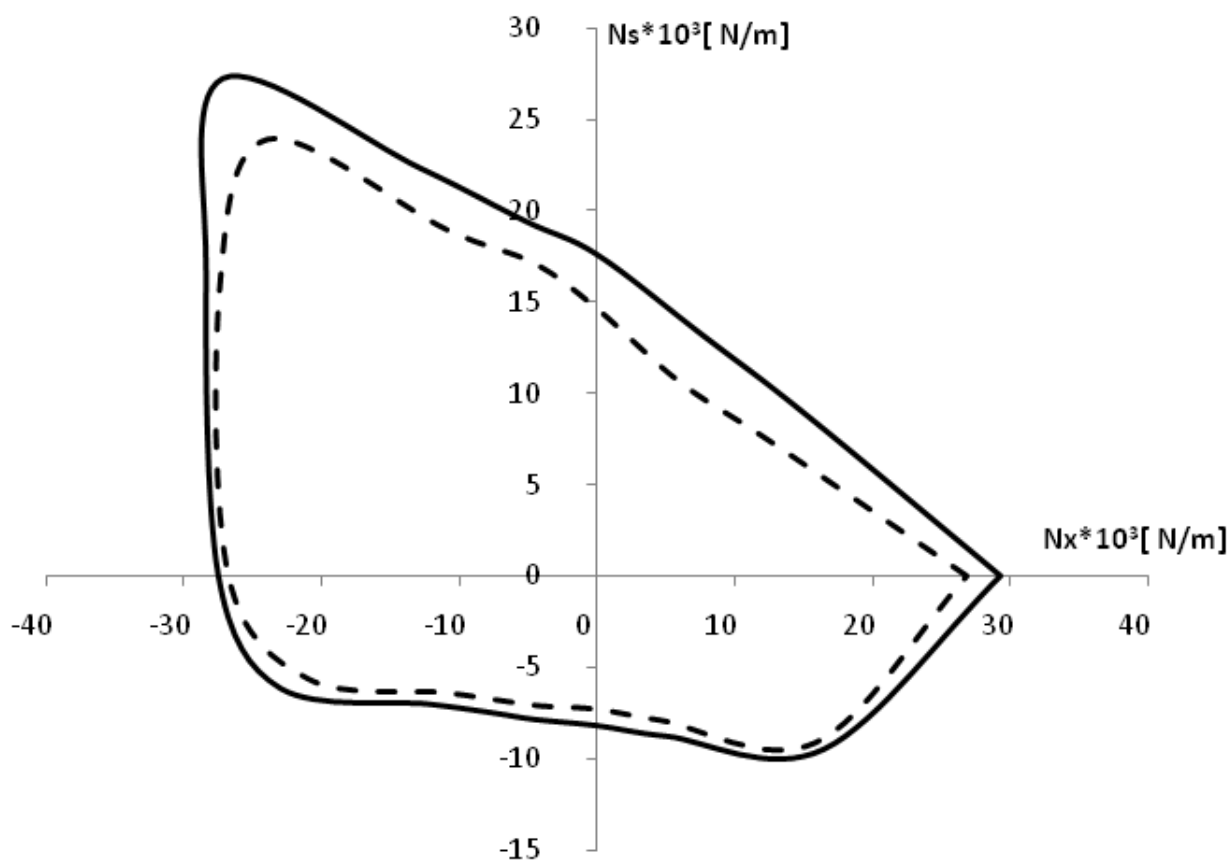
$P_F=10^{-4}$		ΑΝΤΟΧΗ+ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ [45/-45/0₃/45/-45]			ΑΝΤΟΧΗ+ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ+ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ+ΠΑΧΟΣ [45/-45/0₃/45/-45]		
ΘΕΣΗ ΣΗΜΕΙ ΟΥ (ΓΩΝΙΑ)	ΣΤΡΩΣ Η	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣ ΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕ ΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑ Σ	ΣΤΡΩΣ Η	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣ ΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕ ΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑ Σ	
165	5	0	ΠΑΝΩ	3	0	ΠΑΝΩ- ΚΑΤΩ	
				4	0	ΠΑΝΩ- ΚΑΤΩ	
				5	0	ΠΑΝΩ- ΚΑΤΩ	

Για την [45/-45/0] οι υπολογισμοί παρουσιάζονται στα Σχ. 3.17-3.18:



Σχήμα 3.17: Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη [45/-45/0] για πιθανότητα αστοχίας 10^{-2}
 (α) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές (-)
 (β) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας, τις ελαστικές σταθερές, τους συντελεστές θερμικής διαστολής και το πάχος των στρώσεων (-)

Με την προσθήκη του πάχους ως στοχαστική μεταβλητή δεν παρατηρούνται διαφορές στις στρώσεις αστοχίας για την πολύστρωτη WEB.



Σχήμα 3.18: Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη [45/-45/0] για πιθανότητα αστοχίας 10^{-4}
 α) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές(-)
 β) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας, τις ελαστικές σταθερές, τους συντελεστές θερμικής διαστολής και το πάχος των στρώσεων(--)

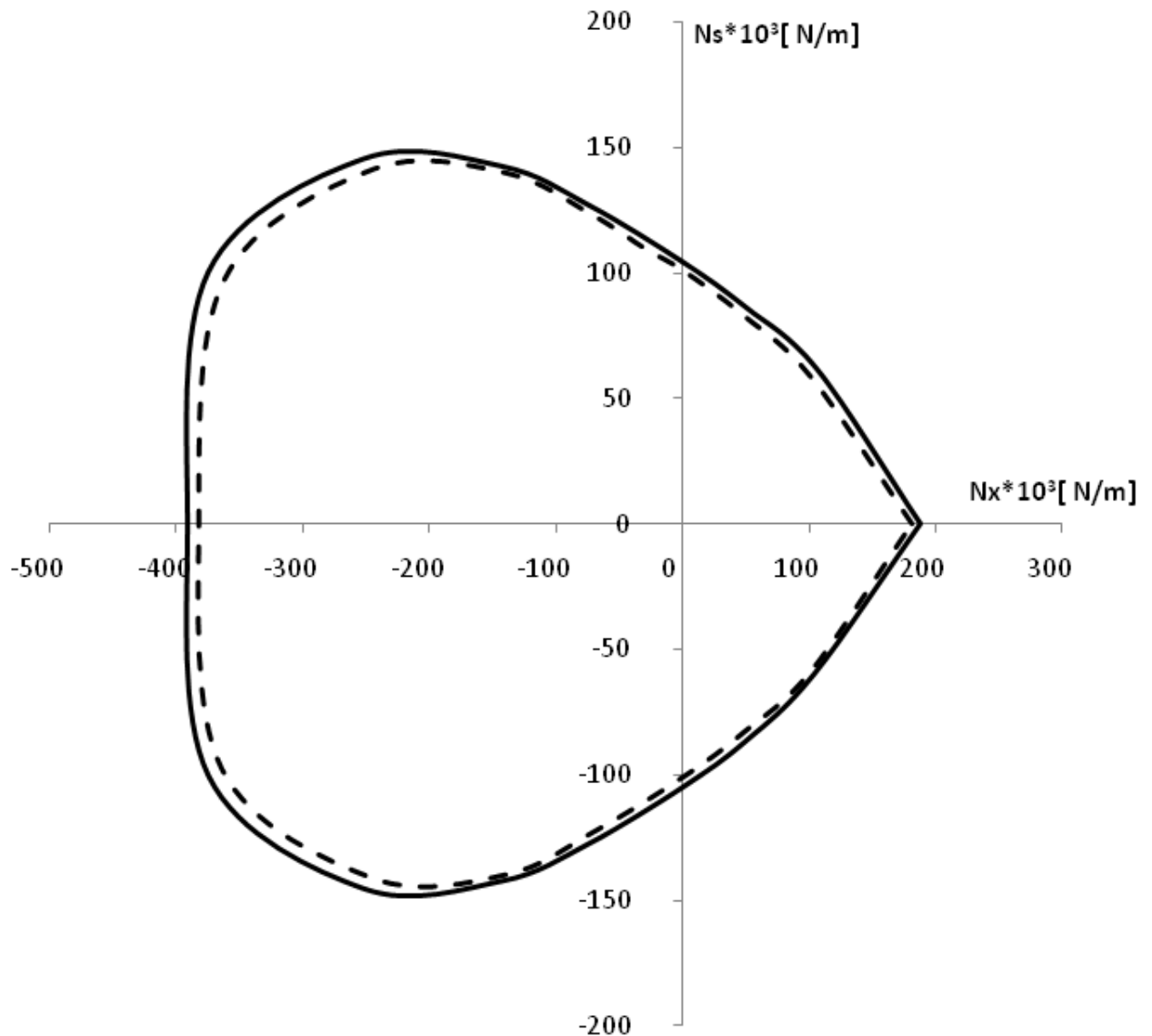
Ομοίως και για πιθανότητα αστοχίας 10^{-4} δεν παρατηρήθηκαν αλλαγές στις στρώσεις αστοχίας.

3.2.6 ΕΠΙΠΛΕΩΝ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΙΝΩΝ ΚΑΘΕ ΣΤΡΩΣΗΣ ΩΣ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ

Στη συνέχεια θεωρήσαμε τον προσανατολισμό της κάθε στρώσης ως στοχαστική μεταβλητή. Συγκεκριμένα για κάθε στρώση θεωρήσαμε κανονική κατανομή με:

ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
Προσανατολισμός	Προσανατολισμός κάθε στρώσης	1

Για την SPAR CAP [45/-45/0₃/45/-45] οι υπολογισμοί παρουσιάζονται στα Σχ. 3.19-3.20:



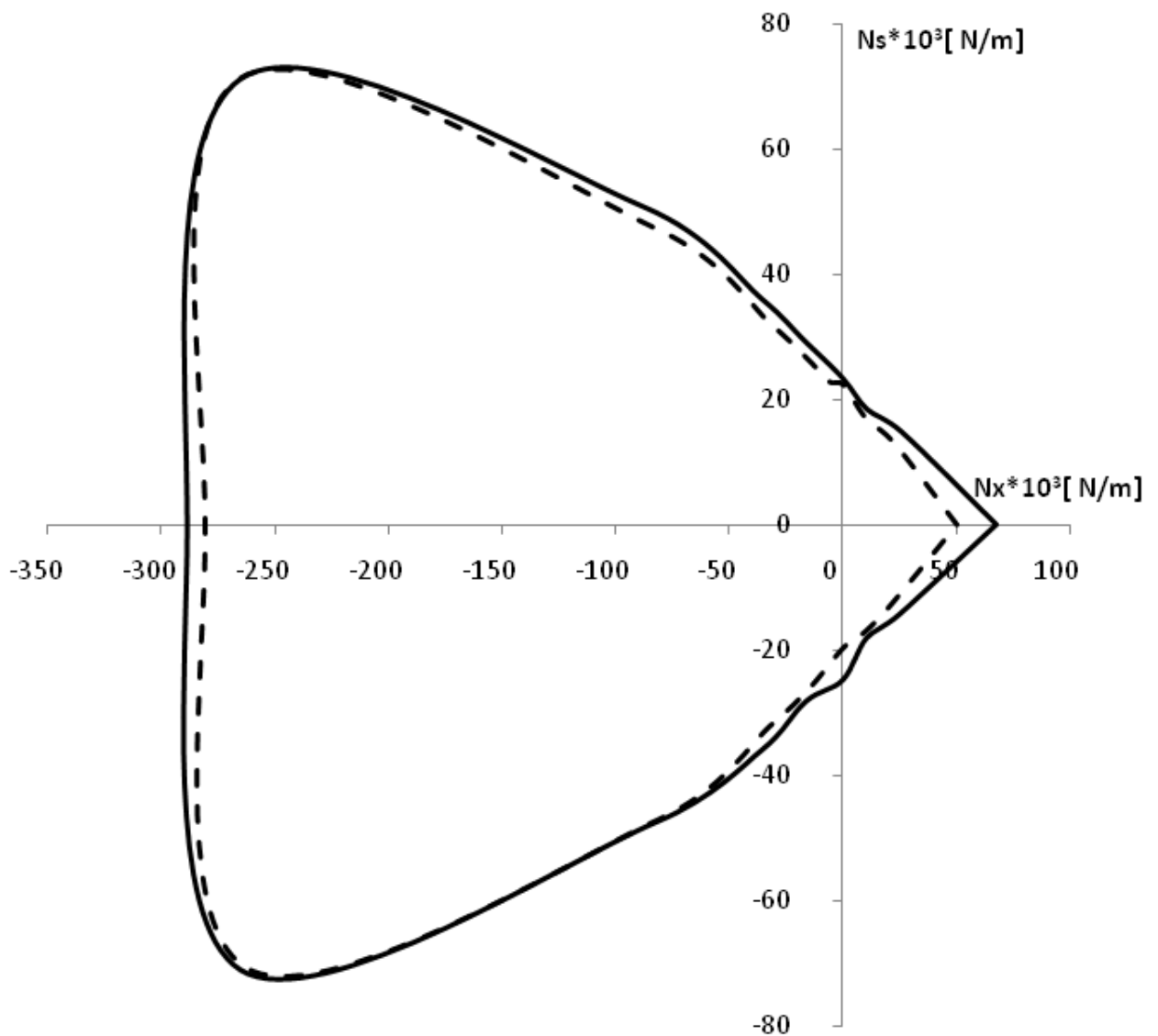
Σχήμα 3.19: Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη [45/-45/0₃/45/-45] για πιθανότητα αστοχίας 10^{-2}

- (α) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές (-)
 (β) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας, τις ελαστικές σταθερές, τους συντελεστές θερμικής διαστολής, το πάχος και των προσανατολισμό των στρώσεων(--)

Παρατηρούμε πάλι κάποιες διαφορές στις στρώσεις αστοχίας όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.2.14:

Πίνακας 3.2.14: Διαφορές στις FPF μεταξύ πιθανοτικών τόπων θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές την αντοχή και τις ελαστικές σταθερές του υλικού αρχικά και στη συνέχεια θεωρώντας επίσης ως στοχαστικές μεταβλητές τους συντελεστές θερμικής διαστολής, το πάχος και τον προσανατολισμό των στρώσεων για $P_F=10^{-2}$

$P_F=10^{-2}$	ΑΝΤΟΧΗ+ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ [45/-45/0 ₃ /45/-45]			ΑΝΤΟΧΗ+ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ+ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ+ΠΑΧΟΣ+ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ [45/-45/0 ₃ /45/-45]		
	ΘΕΣΗ ΣΗΜΕΙ ΟΥ (ΓΩΝΙΑ)	ΣΤΡΩΣ Η	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣ ΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕ ΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑ Σ	ΣΤΡΩΣ Η	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣ ΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ
0	6	45	ΠΑΝΩ	6	45	ΠΑΝΩ
	2	-45	ΚΑΤΩ			
165	2	-45	ΚΑΤΩ	6	45	ΠΑΝΩ
180	6	45	ΠΑΝΩ	2	-45	ΚΑΤΩ
	2	-45	ΚΑΤΩ			



Σχήμα 3.20: Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη [45/-45/0₃/45/-45] για πιθανότητα αστοχίας 10^{-4}

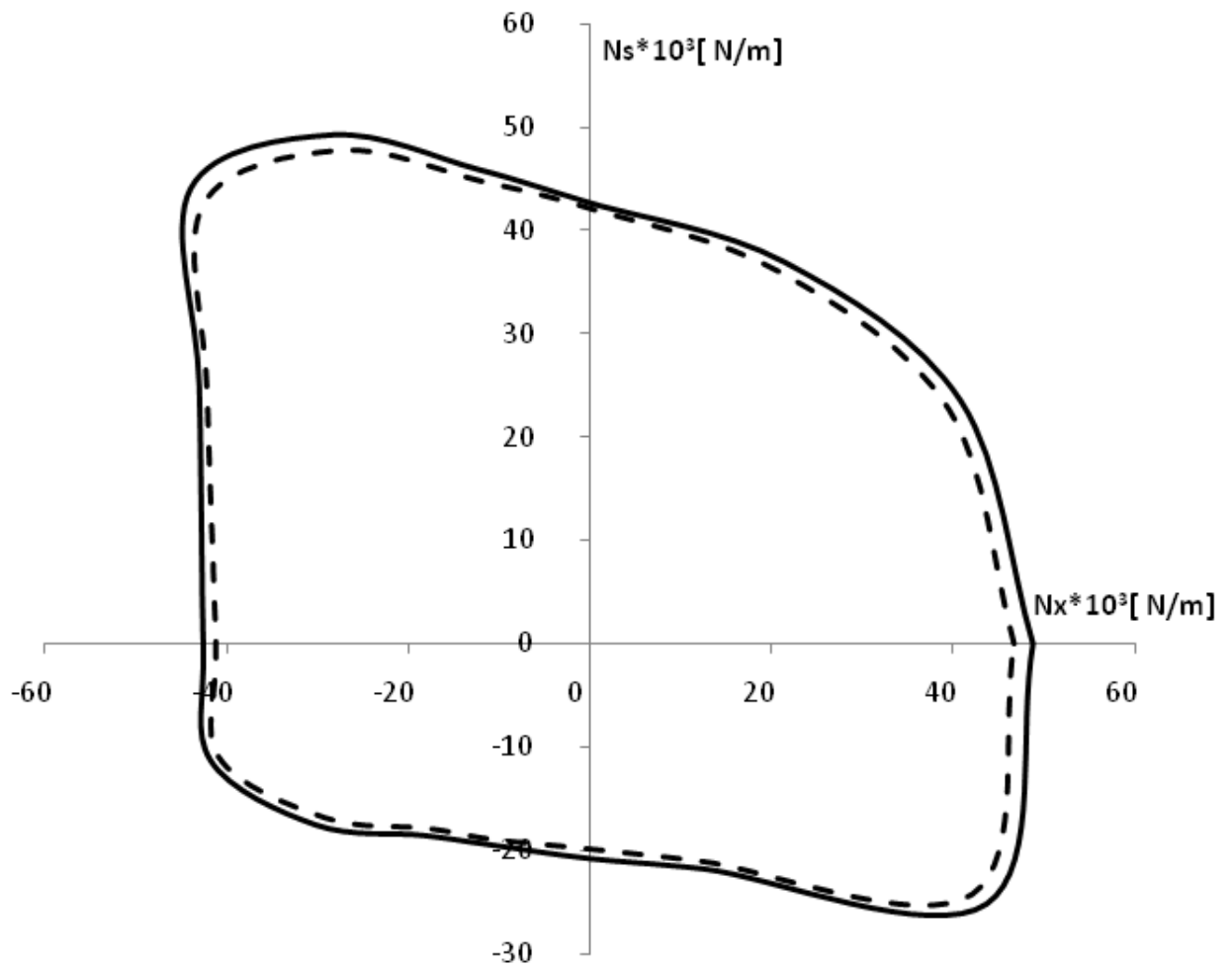
- (α) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές (-)
 (β) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας, τις ελαστικές σταθερές, τους συντελεστές θερμικής διαστολής, το πάχος και των προσανατολισμό των στρώσεων (--)

Οι διαφορές στις στρώσεις αστοχίας αποτυπώνονται στον Πίνακα 3.2.15:

Πίνακας 3.2.15: Διαφορές στις FPF μεταξύ πιθανοτικών τόπων θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές την αντοχή και τις ελαστικές σταθερές του υλικού αρχικά και στη συνέχεια θεωρώντας επίσης ως στοχαστικές μεταβλητές τους συντελεστές θερμικής διαστολής, το πάχος και τον προσανατολισμό των στρώσεων για $P_F=10^{-4}$

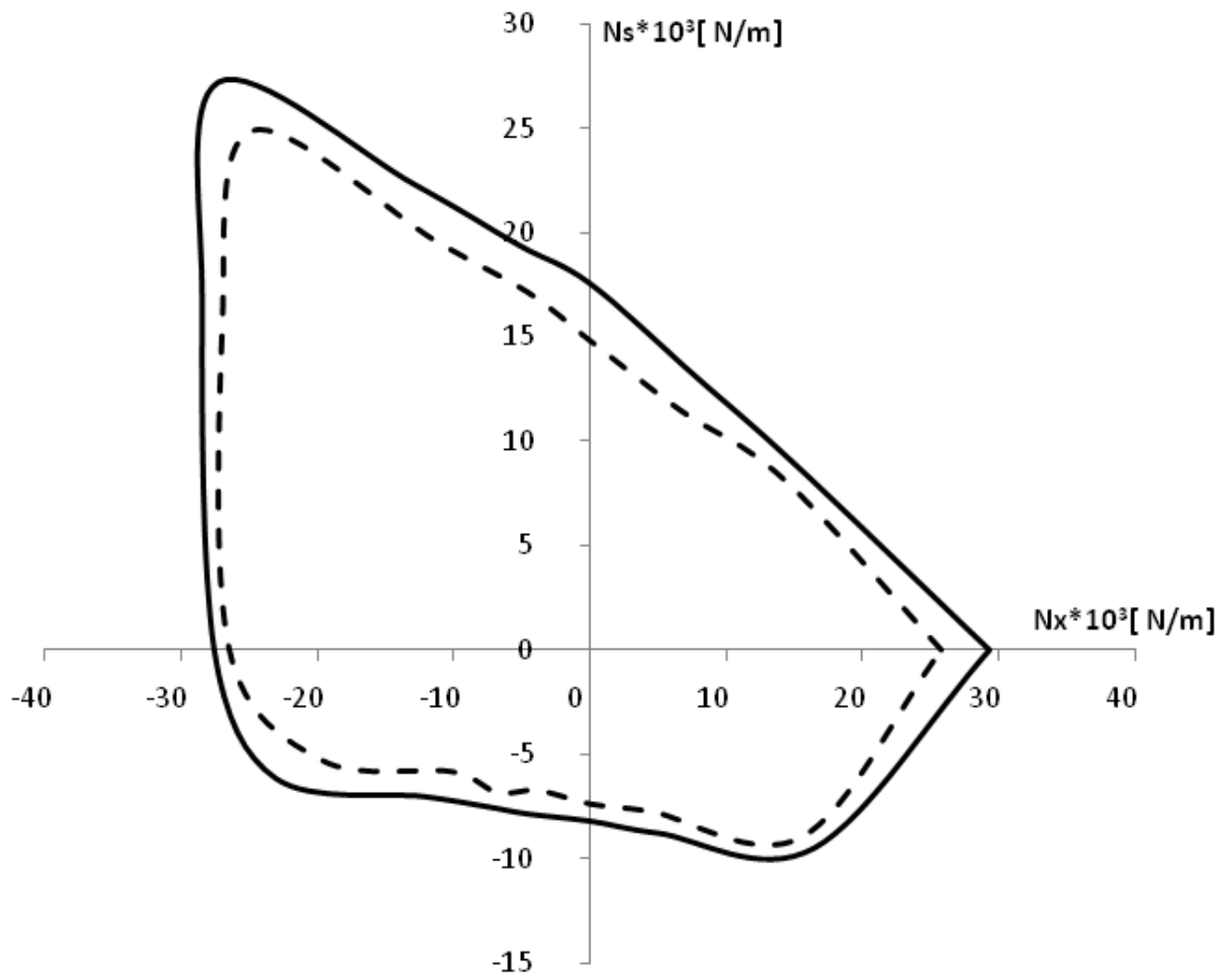
$P_F=10^{-4}$	ΑΝΤΟΧΗ+ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ [45/-45/0 ₃ /45/-45]			ΑΝΤΟΧΗ+ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ+ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ+ΠΑΧΟΣ+ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ [45/-45/0 ₃ /45/-45]		
	ΘΕΣΗ ΣΗΜΕΙ ΟΥ (ΓΩΝΙΑ)	ΣΤΡΩΣ Η	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣ ΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕ ΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑ Σ	ΣΤΡΩΣ Η	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣ ΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ
0	6	45	ΠΑΝΩ	6	45	ΠΑΝΩ
	2	-45	ΚΑΤΩ			
165	2	-45	ΚΑΤΩ	6	45	ΠΑΝΩ
180	6	45	ΠΑΝΩ	2	-45	ΚΑΤΩ
	2	-45	ΚΑΤΩ			

Για την πολύστρωτη [45/-45/0] οι υπολογισμοί παρουσιάζονται στα Σχ. 3.21-3.22:



(Σχήμα 3.21) Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη [45/-45/0] για πιθανότητα αστοχίας 10^{-2}
 (α) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές(-)
 (β) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας, τις ελαστικές σταθερές, τους συντελεστές θερμικής διαστολής, το πάχος και των προσανατολισμό των στρώσεων(--)

Με την προσθήκη του προσανατολισμού ως στοχαστική μεταβλητή δεν παρατηρούνται αλλαγές στις στρώσεις αστοχίας.



Σχήμα 3.22: Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη [45/-45/0] για πιθανότητα αστοχίας 10^{-4}
 (α) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές(-)
 (β) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας, τις ελαστικές σταθερές, τους συντελεστές θερμικής διαστολής, το πάχος και των προσανατολισμό των στρώσεων(--)

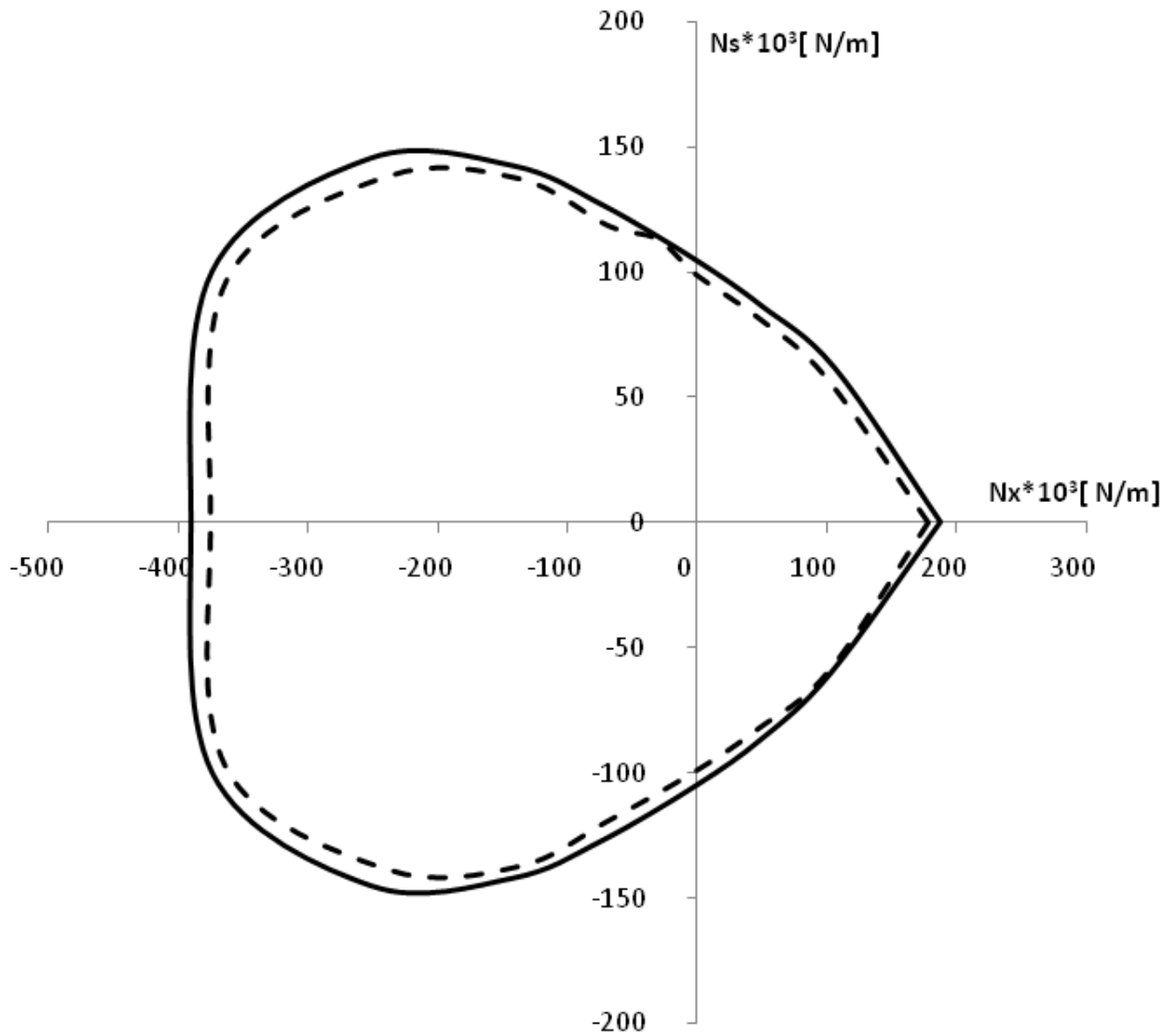
Ομοίως και για πιθανότητα αστοχίας 10^{-4} δεν παρατηρούνται αλλαγές στις στρώσεις αστοχίας.

3.2.7 ΘΕΩΡΗΣΗ ΣΕ ΚΑΘΕ ΣΤΡΩΣΗ ΞΕΧΩΡΙΣΤΩΝ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

Τέλος πραγματοποιήθηκε ένα σετ υπολογισμών, όπου θεωρηθήκαν όλες οι μεταβλητές στοχαστικές όπως και στο προηγούμενο, αλλά επιπλέον παράχθηκαν ξεχωριστοί τυχαίοι αριθμοί για κάθε στρώση των πλακών. Αυτό έγινε με σκοπό τον

υπολογισμό της αξιοπιστίας των πλακών λαμβάνοντας υπ' όψιν και την αβεβαιότητα που δημιουργείται κατά την κατασκευή των πολύστρωτων πλακών.

Για την $[45/-45/0_3/45/-45]$ οι υπολογισμοί παρουσιάζονται στα Σχ. 3.23-3.24 και οι διαφορές ανάμεσα στις στρώσεις που αστοχούν πρώτες σε κάθε σημείο των τόπων αστοχίας στους Πίνακες 3.216-3.2.17:

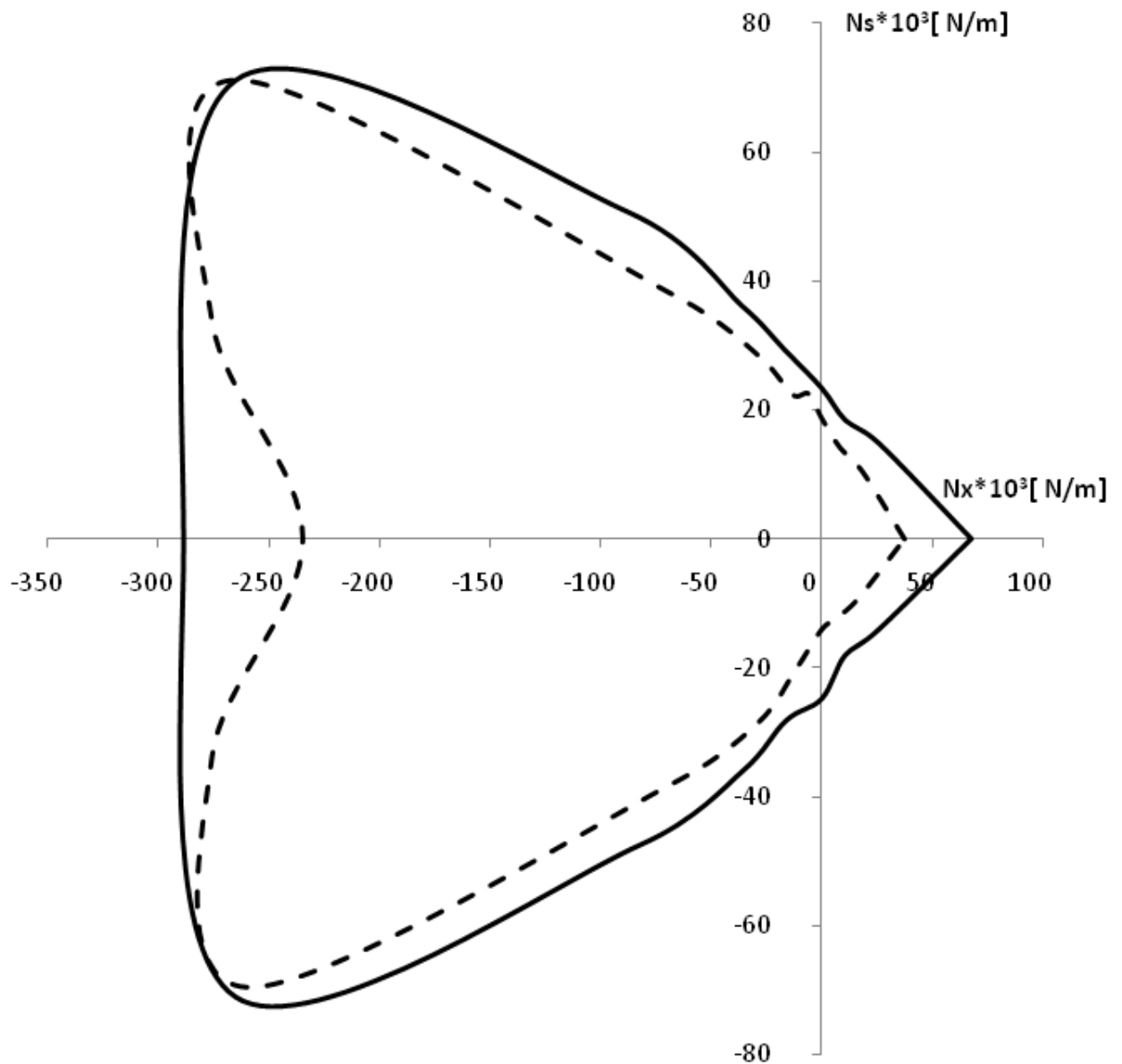


Σχήμα 3.23 Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη $[45/-45/0_3/45/-45]$ για πιθανότητα αστοχίας 10^{-2}

- (α) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές(-)
 (β) Θεωρώντας όλες τις μεταβλητές ως στοχαστικές και επιπλέον παράγοντας τυχαίους αριθμούς σε κάθε στρώση της πολύστρωτης(--)

Πίνακας 3.2.16: Διαφορές στις FPF μεταξύ πιθανοτικών τόπων θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές την αντοχή και τις ελαστικές σταθερές του υλικού αρχικά και στη συνέχεια θεωρώντας επίσης ως στοχαστικές μεταβλητές τους συντελεστές θερμικής διαστολής, το πάχος και τον προσανατολισμό των στρώσεων για κάθε στρώση ξεχωριστά για $P_f=10^{-2}$

$P_f=10^{-2}$	ΑΝΤΟΧΗ+ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ [45/-45/0 ₃ /45/-45]			ΑΝΤΟΧΗ+ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ+ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ+ΠΑΧΟΣ+ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΕ ΚΑΘΕ ΣΤΡΩΣΗ [45/-45/0 ₃ /45/-45]		
	ΘΕΣΗ ΣΗΜΕΙ ΟΥ (ΓΩΝΙΑ)	ΣΤΡΩΣ Η	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣ ΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕ ΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑ Σ	ΣΤΡΩΣ Η	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣ ΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ
0	6	45	ΠΑΝΩ	2	-45	ΚΑΤΩ
	2	-45	ΚΑΤΩ			
120	7	-45	ΠΑΝΩ	2	-45	ΠΑΝΩ
180	6	45	ΠΑΝΩ	2	-45	ΚΑΤΩ
	2	-45	ΚΑΤΩ			
270	6	45	ΠΑΝΩ	6	45	ΚΑΤΩ
	6	45	ΠΑΝΩ	6	45	ΚΑΤΩ



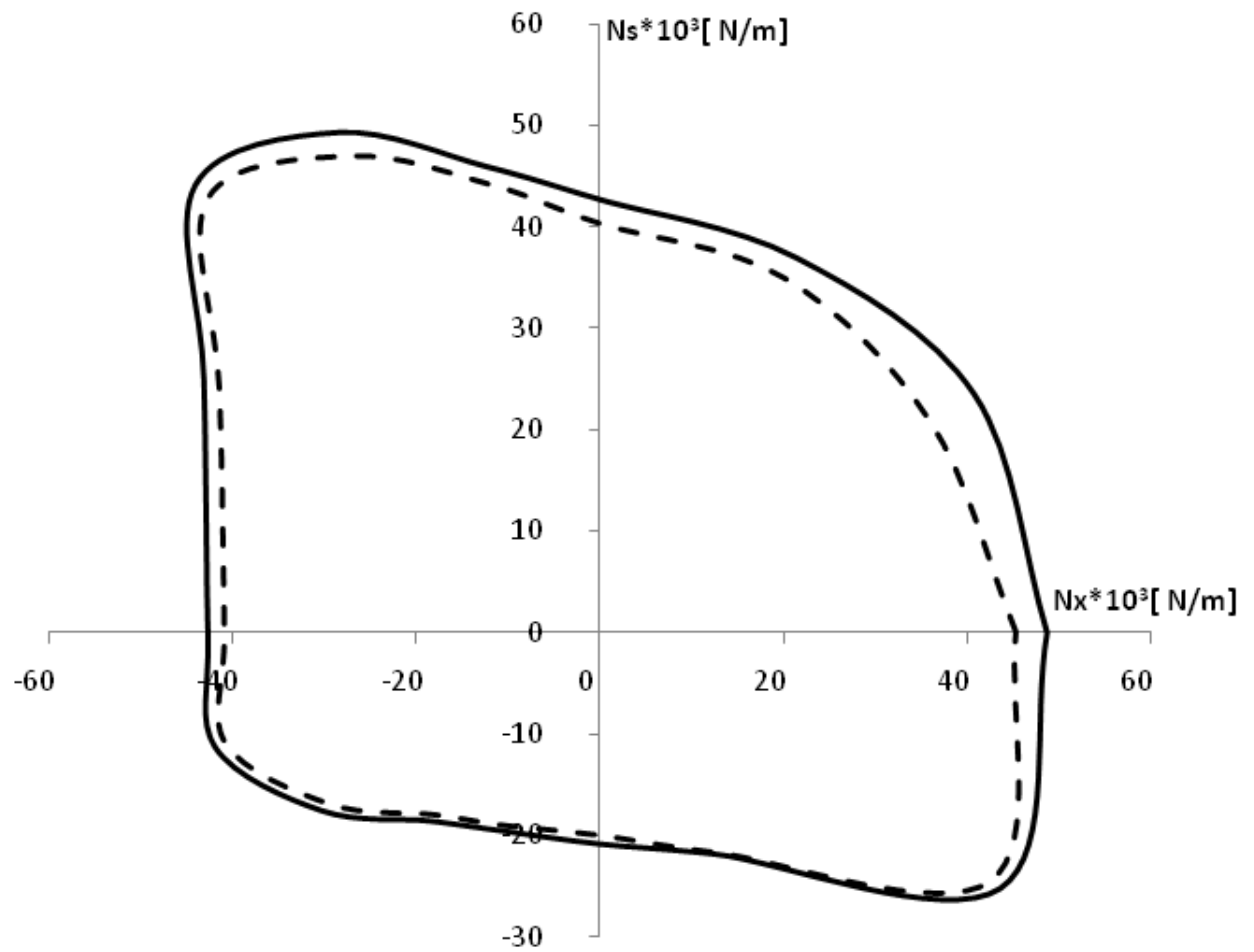
Σχήμα 3.24: Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη [45/-45/0₃/45/-45] για πιθανότητα αστοχίας 10^{-4}

- (α) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές(-)
 (β) Θεωρώντας όλες τις μεταβλητές ως στοχαστικές και επιπλέον παράγοντας τυχαίους αριθμούς σε κάθε στρώση της πολύστρωτης(--)

Πίνακας 3.2.17: Διαφορές στις FPF μεταξύ πιθανοτικών τόπων θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές την αντοχή και τις ελαστικές σταθερές του υλικού αρχικά και στη συνέχεια θεωρώντας επίσης ως στοχαστικές μεταβλητές τους συντελεστές θερμικής διαστολής, το πάχος και τον προσανατολισμό των στρώσεων για κάθε στρώση ξεχωριστά για $P_f=10^{-4}$

$P_f=10^{-4}$	ΑΝΤΟΧΗ+ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ [45/-45/0₃/45/-45]			ΑΝΤΟΧΗ+ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ+ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ+ΠΑΧΟΣ+ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΕ ΚΑΘΕ ΣΤΡΩΣΗ [45/-45/0₃/45/-45]		
	ΘΕΣΗ ΣΗΜΕΙ ΟΥ (ΓΩΝΙΑ)	ΣΤΡΩΣ Η	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣ ΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕ ΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑ Σ	ΣΤΡΩΣ Η	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣ ΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ
0	6	45	ΠΑΝΩ	6	45	ΠΑΝΩ
	2	-45	ΚΑΤΩ			
165	5	0	ΠΑΝΩ	6	45	ΠΑΝΩ
180	6	45	ΠΑΝΩ	3	0	ΠΑΝΩ
	2	-45	ΚΑΤΩ			

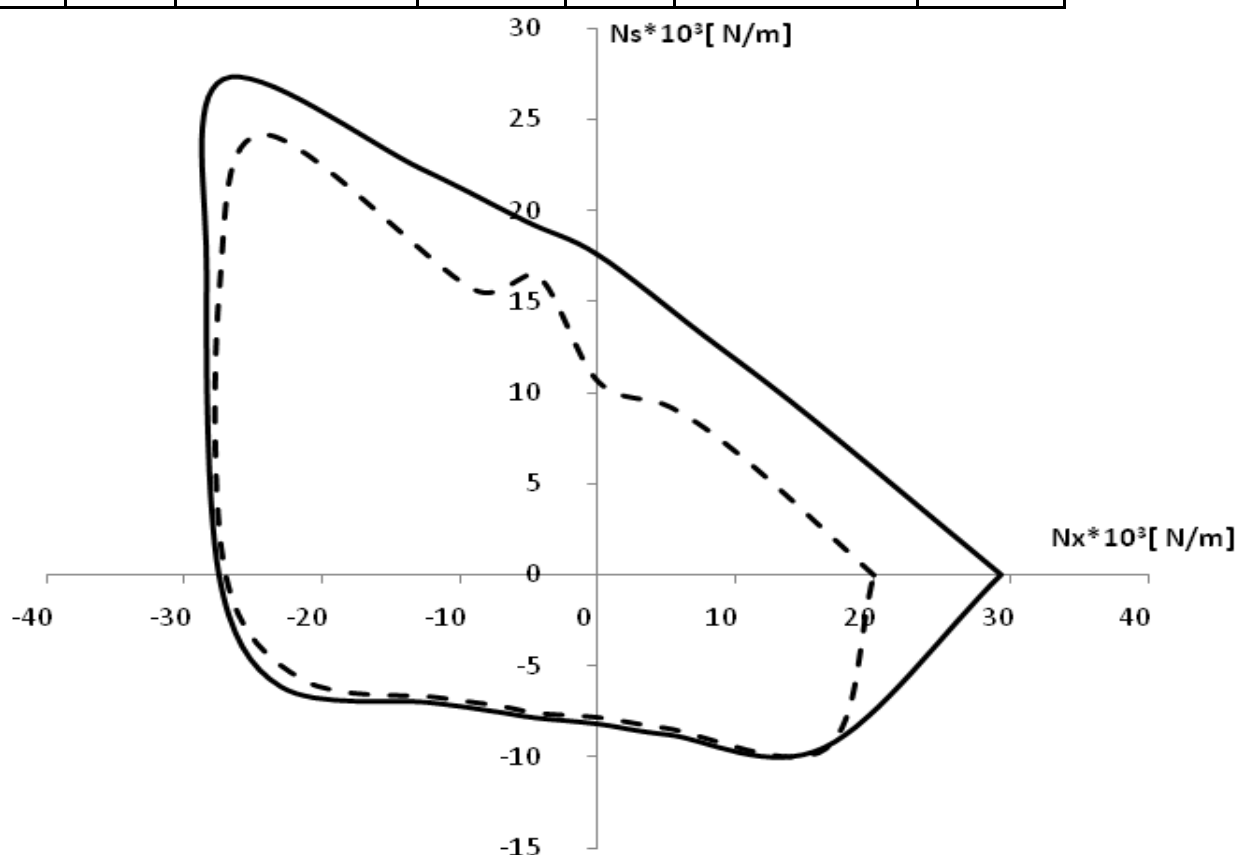
Για την πολύστρωτη [45/-45/0] οι υπολογισμοί παρουσιάζονται στα Σχ. 3.25-3.26 και οι διαφορές ανάμεσα στις στρώσεις που αστοχούν πρώτες σε κάθε σημείο των τόπων αστοχίας στον Πίνακα 3.218:



Σχήμα 3.25: Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη [45/-45/0] για πιθανότητα αστοχίας 10^{-2}
 (α) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές(-)
 (β) Θεωρώντας όλες τις μεταβλητές ως στοχαστικές και επιπλέον παράγοντας τυχαίους αριθμούς σε κάθε στρώση της πολύστρωτης(--)

Πίνακας 3.2.18: Διαφορές στις FPF μεταξύ πιθανοτικών τρόπων θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές την αντοχή και τις ελαστικές σταθερές του υλικού αρχικά και στη συνέχεια θεωρώντας επίσης ως στοχαστικές μεταβλητές τους συντελεστές θερμικής διαστολής, το πάχος και τον προσανατολισμό των στρώσεων για κάθε στρώση ξεχωριστά για $P_F=10^{-2}$

$P_F=10^{-2}$	ΑΝΤΟΧΗ+ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ [45/-45/0]			ΑΝΤΟΧΗ+ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ+ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ+ΠΑΧΟΣ+ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΕ ΚΑΘΕ ΣΤΡΩΣΗ [45/-45/0]		
	ΘΕΣΗ ΣΗΜΕΙ ΟΥ (ΓΩΝΙΑ)	ΣΤΡΩΣ Η	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣ ΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕ ΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑ Σ	ΣΤΡΩΣ Η	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣ ΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ
0	1	45	ΚΑΤΩ	2	-45	ΚΑΤΩ



Σχήμα 3.26: Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη [45/-45/0] για πιθανότητα αστοχίας 10^{-4}
 (α) Θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές(-)
 (β) Θεωρώντας όλες τις μεταβλητές ως στοχαστικές και επιπλέον παράγοντας τυχαίους αριθμούς σε κάθε στρώση της πολύστρωτης(--)

Για πιθανότητα αστοχίας 10^{-4} δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στις στρώσεις αστοχίας.

Από αυτήν την μελέτη παρατηρούμε ότι για μικρή πιθανότητα αστοχίας και κατά συνέπεια μεγάλη αξιοπιστία θα πρέπει να λαμβάνεται υπ'όψιν ο στοχαστικός χαρακτήρας όλων των μεταβλητών και μάλιστα ξεχωριστά σε κάθε στρώση της πολύστρωτης πλάκας καθώς η επίδραση της στοχαστικότητας των μεταβλητών δεν κρίνεται ως αμελητέα. Επίσης όσον αφορά τους FPF γεωμετρικούς τόπους παρατηρήσαμε ότι ο υπολογισμός της στρώσης που θα αστοχήσει πρώτη πρακτικά είναι ανέφικτος καθώς αυτή καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την διασπορά που εμφανίζουν οι ιδιότητες του συνθέτου υλικού.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ IEC 61400-1 ed. 3 standards ΜΕ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΟ ΤΟΠΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΟΥ ΤΟΠΟΥ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEC 61400 ed. 3.

Στο παρόν εδάφιο εφαρμόσαμε τα προγράμματα που δημιουργήθηκαν στο Matlab για τον υπολογισμό των τόπων αστοχίας σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο IEC 61400-1 ed. 3 και τη σύγκρισή τους με τους αντίστοιχους πιθανοτικούς, με σκοπό την εύρεση της πιθανότητας αστοχίας για κατασκευές εναρμονισμένες με το πρότυπο.

Το IEC 61400-1 ed. 3 είναι ένα διεθνές πρότυπο το οποίο αφορά τον σχεδιασμό και την κατασκευή ανεμογεννητριών και των επιμέρους μερών τους. Όσον αφορά τον σχεδιασμό των πτερυγίων ανεμογεννητριών το πρότυπο προτείνει την εφαρμογή ενός συντελεστή ασφάλειας στις τάσεις αστοχίας της κατασκευής. Ο γενικός συντελεστής ασφάλειας που προτείνει το πρότυπο είναι της τάξης του 2.145. Αυτός προκύπτει από τρεις επιμέρους συντελεστές ασφαλείας. Έναν βασικό συντελεστή της τάξης του 1.3, έναν συντελεστή ασφαλείας της τάξης του 1.1 ο οποίος αφορά την επίδραση της θερμοκρασίας στην κατασκευή και τέλος ένας συντελεστής ασφαλείας ο οποίος αφορά την γήρανση του υλικού και είναι της τάξης του 1.5.

Για τον υπολογισμό των design values (R_d) ή της οριακής αντοχής σχεδιασμού (design limit strength) του υλικού αρκεί να διαιρέσουμε τις χαρακτηριστικές τιμές (R_k) με τον συντελεστή ασφαλείας που έχουμε επιλέξει. Οι R_k καθορίζονται ως το ποσοστιαίο 5% των τάσεων αστοχίας και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικές τιμές R_k

X_t	287,94 MPa
X_c	265,09 MPa
Y_t	24,59 MPa
Y_c	118,25 Mpa
S	11.5 MPa

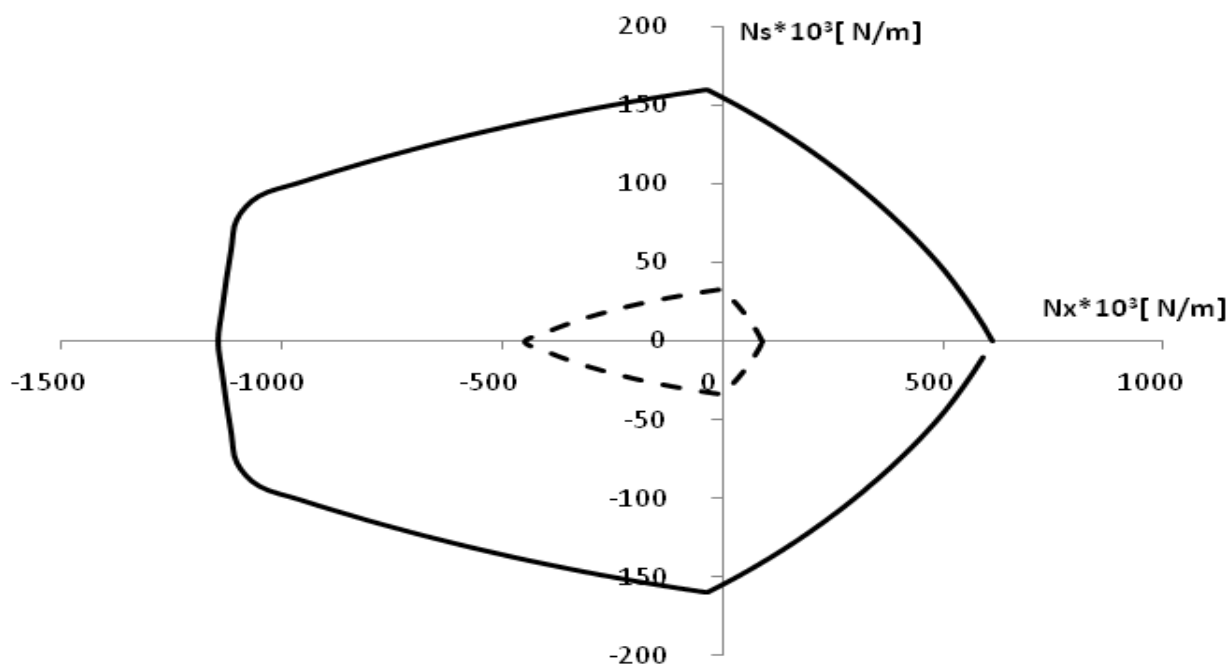
Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν σε μία πολύστρωτη πλάκα [45/0₆/-45] αποτελούμενη από ένα glass/polyester σύνθετο υλικό. Το ίδιο υλικό που χρησιμοποιήθηκε και στο προηγούμενο εδάφιο.

Αρχικά υπολογίστηκε ο ντετερμινιστικός τύπος αστοχίας σύμφωνα με τις υποδείξεις του προτύπου, χρησιμοποιώντας τον ολικό συντελεστή ασφαλείας. Ο τύπος αυτός εν συγκρίσει με τον ντετερμινιστικό τύπο αστοχίας με μέσες τιμές αποτυπώνεται στο Σχ. 4.1.

Οι R_d που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του τύπου αστοχίας κατά τον πρότυπο IEC 61400 παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2 και έχουν προκύψει από τη διαίρεση των χαρακτηριστικών τιμών R_k με τον συντελεστή ασφάλειας και είναι:

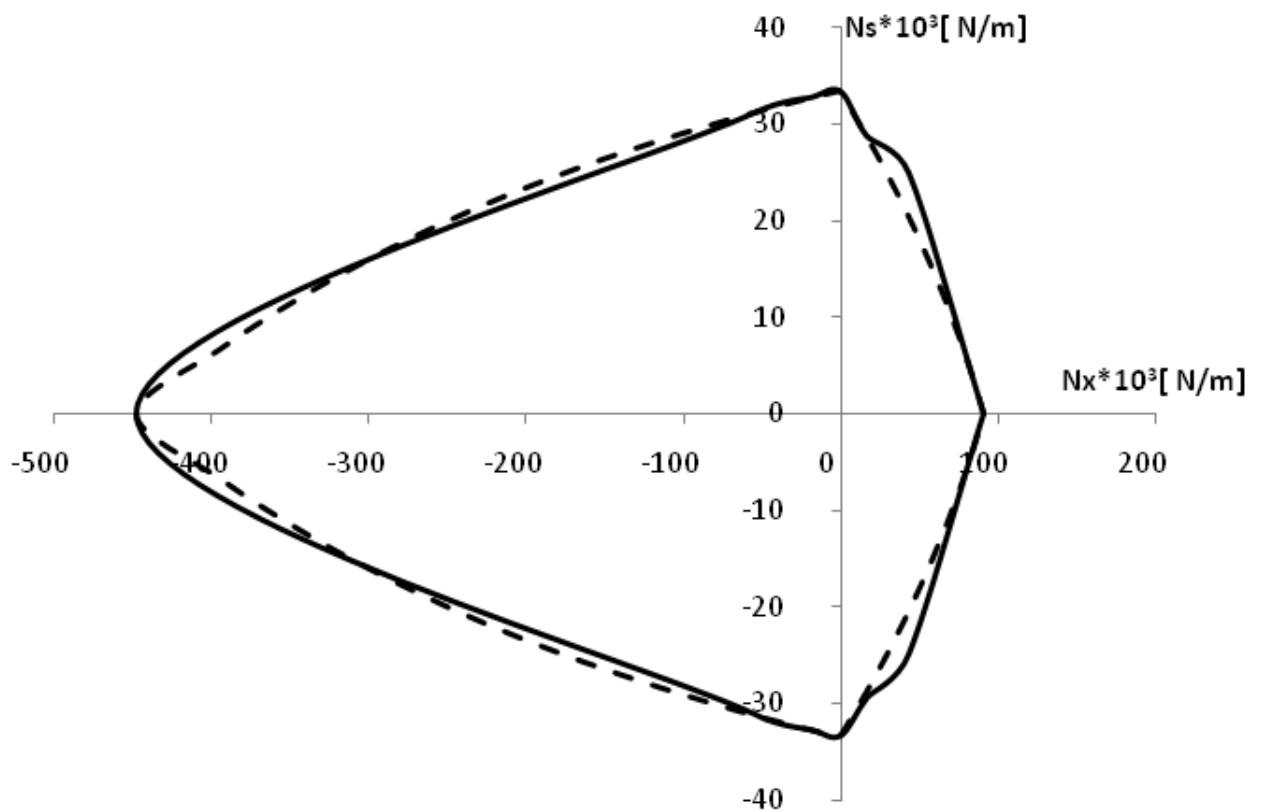
Πίνακας 4.2: Τιμές των τάσεων αστοχίας του υλικού που προκύπτουν από την διαίρεση των R_k με τον συντελεστή ασφαλείας 2.145

X_t	134,236 MPa
X_c	123,584 MPa
Y_t	11,466 MPa
Y_c	55,127 MPa
S	5,364 MPa



Σχήμα 4.1: Ντετερμινιστικοί τύποι αστοχίας για την πολύστρωτη πλάκα [45/0₆/-45]
(α) Με μέσες τιμές(-) (β)Με εφαρμογή ολικού συντελεστή ασφάλειας κατά IEC(--)

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο πιθανοτικός τόπος αστοχίας που να προσεγγίζει τον ντετερμινιστικό κατά IEC (Σχ 4.2). Η πιθανότητα αστοχίας υπολογίστηκε με δοκιμές και είναι της τάξης του $4 \cdot 10^{-6}$. Ο πιθανοτικός τόπος αστοχίας υπολογίστηκε με ένα δείγμα **δέκα εκατομμυρίων** λόγω της πολύ μικρής πιθανότητας αστοχίας. Στοχαστικές μεταβλητές θεωρήθηκαν οι τάσεις αστοχίας του υλικού και οι ελαστικές σταθερές.



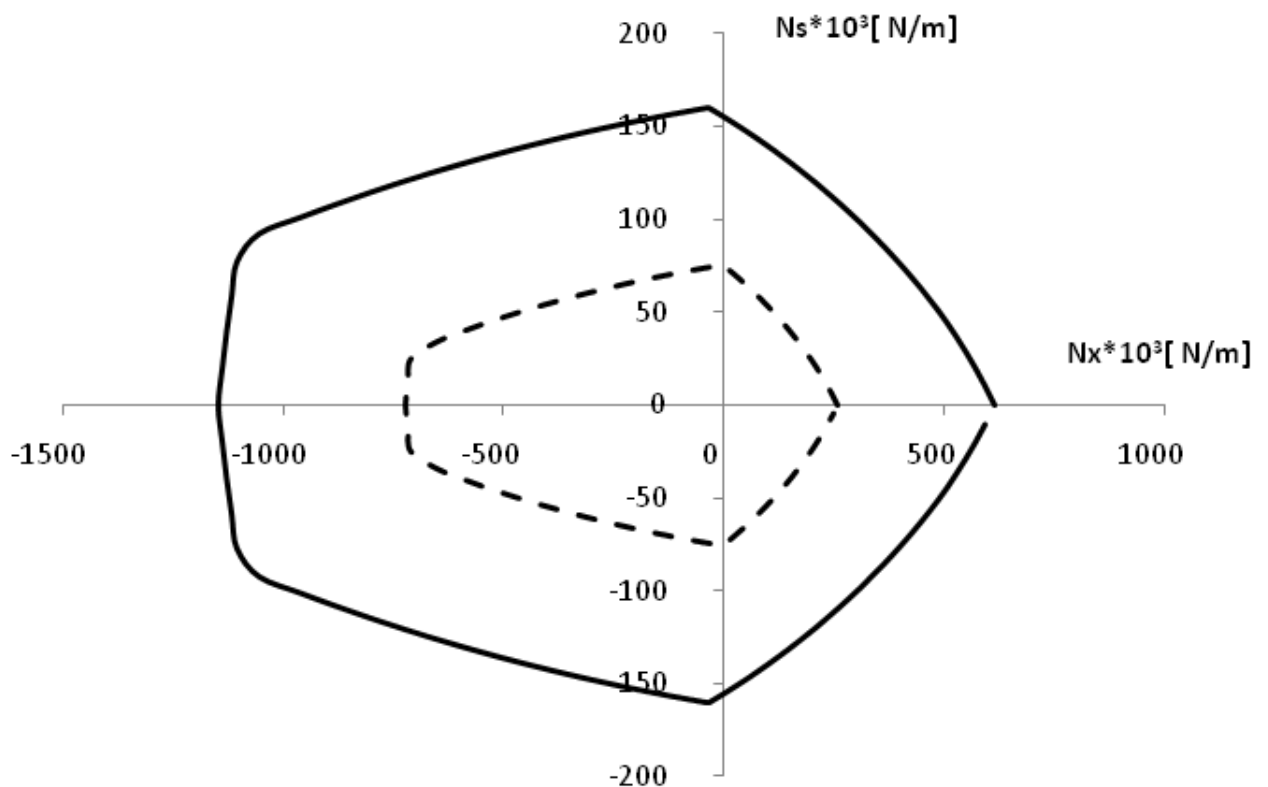
Σχήμα 4.2 Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη πλάκα [45/0₆/-45]
 (α) Ντετερμινιστικός με εφαρμογή του ολικού συντελεστή ασφαλείας κατά IEC (-)
 (β) Πιθανοτικός τόπος αστοχίας για $P_f = 4 \cdot 10^{-6}$ θεωρώντας τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές ως στοχαστικές μεταβλητές (--)

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία υπολογίσαμε την πιθανότητα αστοχίας της πολύστρωτης η οποία σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας τον βασικό συντελεστή ασφαλείας του προτύπου IEC 61400 ο οποίος ισούται με 1.3. Η πιθανότητα αυτή βρέθηκε ίση με $2.5 \cdot 10^{-3}$. Στο Σχ. 4.3 φαίνονται οι ντετερμινιστικοί τόποι αστοχίας ενώ στο Σχ. 4.4 ο πιθανοτικός.

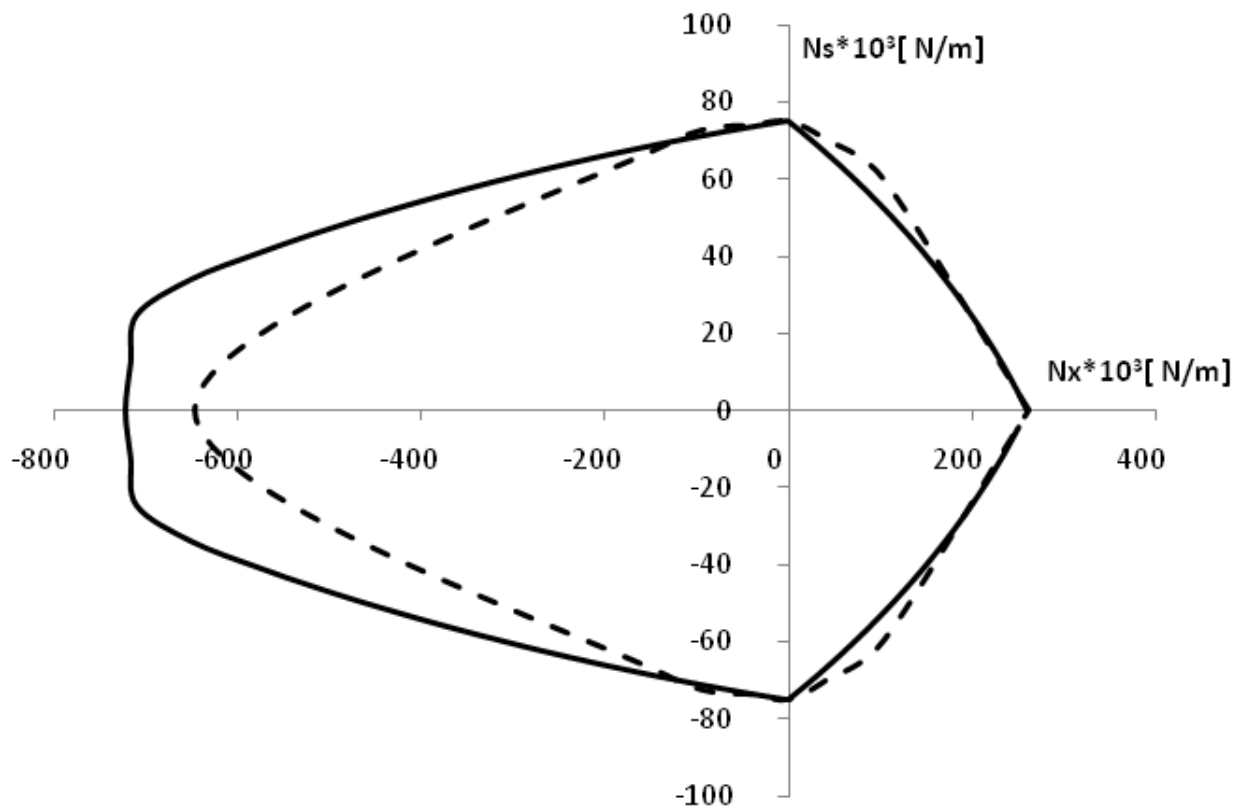
Ο πιθανοτικός τύπος αστοχίας υπολογίστηκε θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές και με ένα δείγμα της τάξης των δύο εκατομμυρίων, ενώ ο ντετερμινιστικός υπολογίστηκε με τις R_d οι οποίες έχουν προκύψει με την διαίρεση των χαρακτηριστικών τιμών R_k με τον συντελεστή ασφαλείας 1.3 και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3:

Πίνακας 4.3: Τιμές των τάσεων αστοχίας του υλικού που προκύπτουν από την διαίρεση των R_k με τον συντελεστή ασφαλείας 1.3

X_t	221,49 MPa
X_c	203,913 MPa
Y_t	18,919 MPa
Y_c	90,959 MPa
S	8,851 MPa



Σχήμα 4.3: Ντετερμινιστικοί τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη πλάκα [45/0₆/-45]
(α) με μέσες τιμές(-) (β)Με εφαρμογή του βασικού συντελεστή ασφαλείας 1.3 κατά IEC(--)



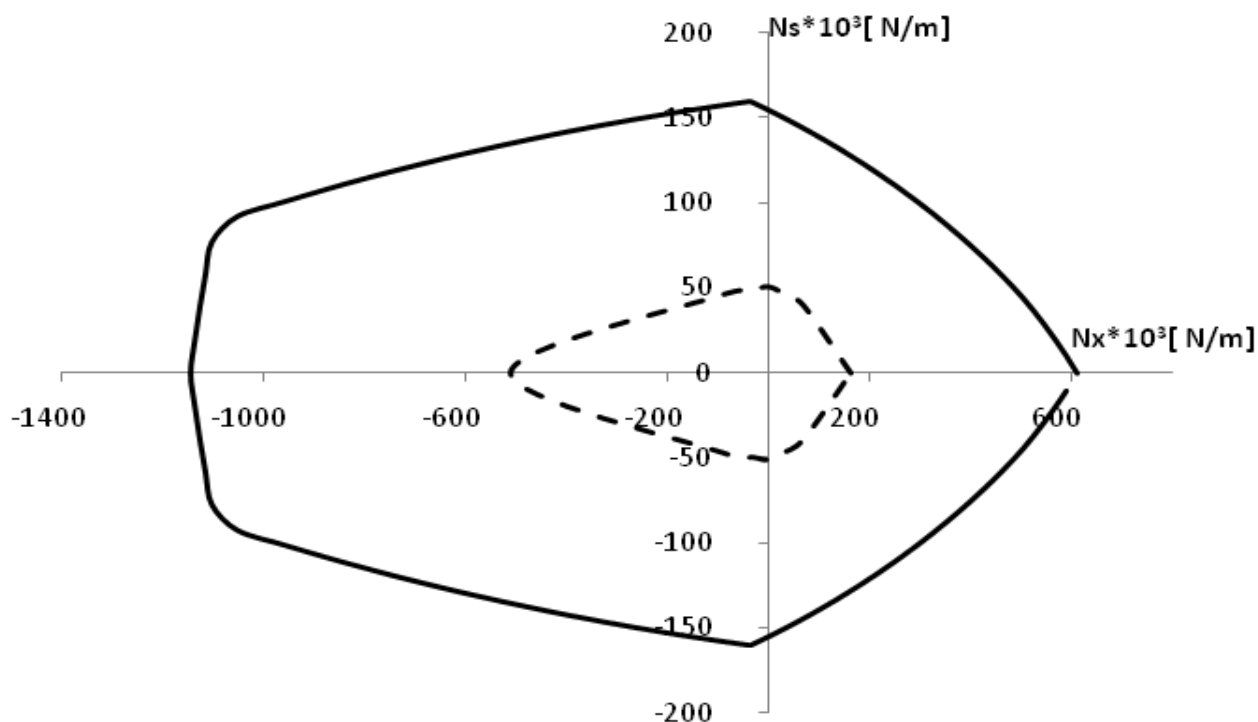
Σχήμα 4.4: Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη πλάκα [45/0₆/-45]
 (α) Ντετερμινιστικός με εφαρμογή του βασικού συντελεστή ασφαλείας κατά IEC(-)
 (β) Πιθανοτικός τόπος αστοχίας για $P_f = 2.5 \cdot 10^{-3}$ θεωρώντας τις τάσεις αστοχίας και τις ελαστικές σταθερές ως στοχαστικές μεταβλητές(--)

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΓΙΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ 10^{-4}

Στον παρόν εδάφιο υπολογίσαμε τον συντελεστή ασφάλειας που θα πρέπει να χρησιμοποιήσει ο μηχανικός, ώστε να λάβει υπόψιν του την στοχαστικότητα όλων των παραμέτρων του μηχανικού συστήματος και να προσδώσει μια πιθανότητα αστοχίας της τάξης του 10^{-4} στην κατασκευή του.

Αρχικά υπολογίσαμε τον πιθανοτικό τόπο για πιθανότητα αστοχίας 10^{-4} θεωρώντας ως στοχαστικές τις τάσεις αστοχίας του υλικού, τις ελαστικές σταθερές του υλικού, τους συντελεστές θερμικής διαστολής και τέλος το πάχος και τον προσανατολισμό της κάθε στρώσης.

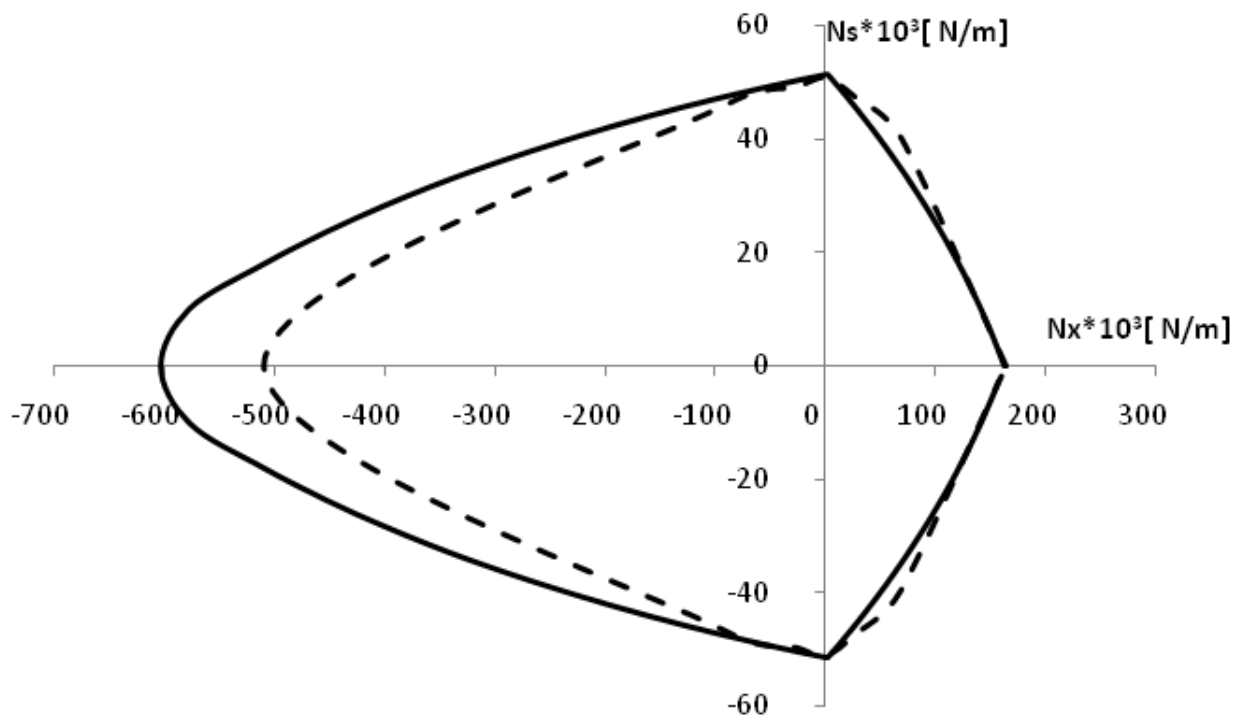
Χρησιμοποιώντας την ίδια πολύστρωτη πλάκα με τις προηγούμενες μετρήσεις ο πιθανοτικός τόπος αστοχίας για πιθανότητα αστοχίας 10^{-4} εν συγκρίσει με τον ντετερμινιστικό που έχει υπολογιστεί με τις χαρακτηριστικές τιμές, υπολογίστηκε και παρουσιάζεται στο Σχ.5.1:



Σχήμα 5.1: Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη πλάκα [45/0₆/-45]
(α) Ντετερμινιστικός με μέσες τιμές(-) (β) Τόπος αστοχίας για $P_f=10^{-4}$ (--)

Η διαδικασία που ακολουθήσαμε για την εύρεση του συντελεστή ασφάλειας, ήταν να επιλέγουμε κάποιον συντελεστή ασφάλειας και να υπολογίζουμε τον ντετερμινιστικό τόπο αστοχίας ώστε να βρούμε κάποιον ο οποίος να προσεγγίζει ικανοποιητικά τον πιθανοτικό τόπο αστοχίας. Για κάθε συντελεστή ασφάλειας υπολογίσαμε τις τάσεις αστοχίας διαιρώντας με αυτόν τις χαρακτηριστικές τιμές R_k του υλικού.

Ο επιθυμητός ντετερμινιστικός τόπος αστοχίας βρέθηκε με ένα συντελεστή ασφαλείας της τάξης του 1.68, ο οποίος όπως φαίνεται στο Σχ. 5.2 εφαρμόζει με ικανοποιητική ακρίβεια πάνω στον πιθανοτικό.

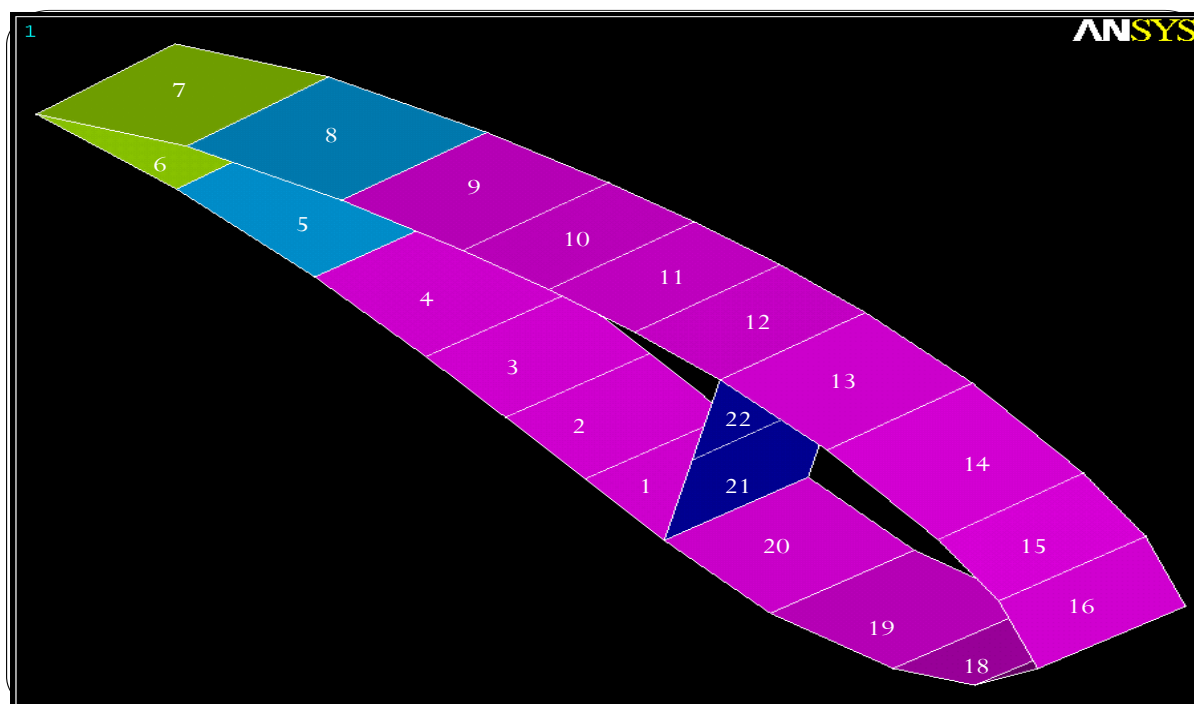


Σχήμα 5.2: Τόποι αστοχίας για την πολύστρωτη πλάκα [45/0₆/-45]
 (α) Ντετερμινιστικός με συντελεστή ασφάλειας 1.68 (-) (β) Τόπος αστοχίας για $P_f=10^{-4}$ (--)

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΣΕ ΔΙΑΤΟΜΗ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

6.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ

Το τρίτο μέρος των υπολογισμών της εργασίας έγινε σε μία διατομή πτερυγίου Ανεμογεννήτριας η οποία αποτελείται από 22 στοιχεία. Η διατομή και τα στοιχεία αυτής παρουσιάζονται στο σχήμα 6.1.



6.1 Διατομή πτερυγίου ανεμογεννήτριας διαχωρισμένο σε 22 στοιχεία.

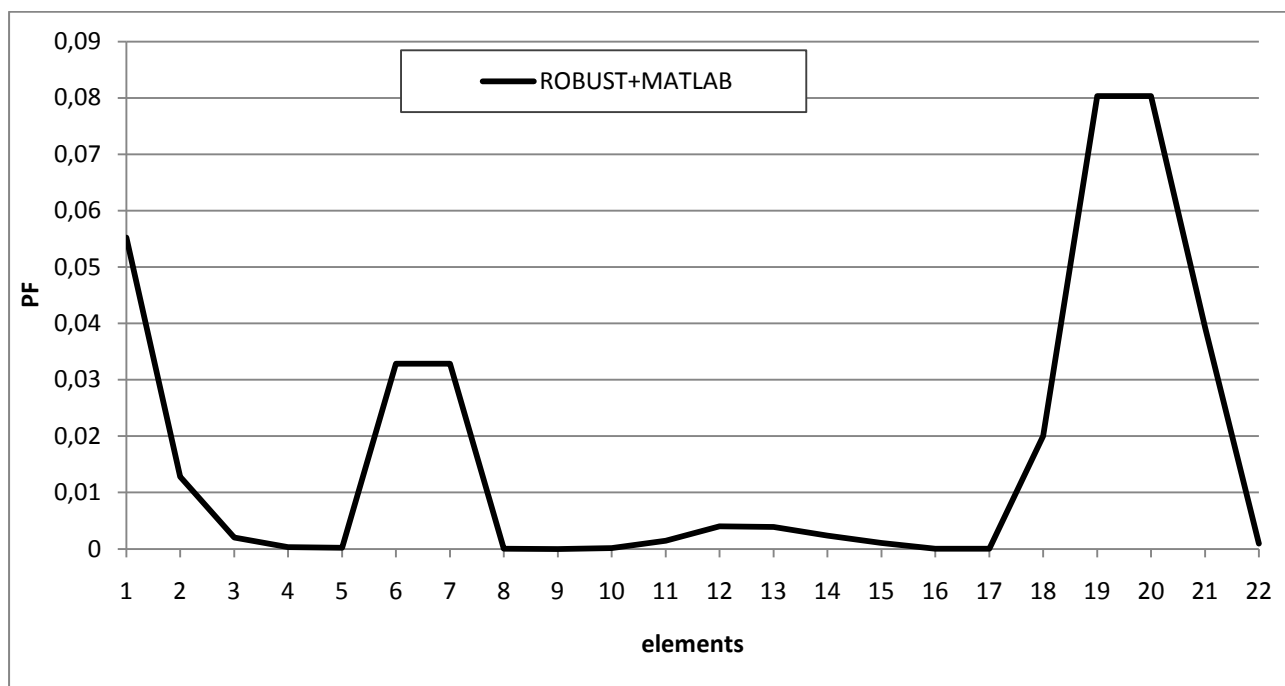
Η διατομή στο σύνολο της αποτελείται από 5 διαφορετικές πολύστρωτες πλάκες. Οι αναλυτικές δομές των πολύστρωτων πλακών αναφέρονται στο παράρτημα. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται από ποια πολύστρωτη πλάκα αποτελείται το κάθε στοιχείο ξεχωριστά.

ΠΛΑΚΕΣ	ΣΤΟΙΧΕΙΑ
mat_9	1,2,3,4,9,10,11,12,13,14,19,20
mat_19	15,18
mat_26	5,8
mat_32	21,22
mat_86	6,7

6.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ MATLAB ΜΕ ΤΟ ROBUST

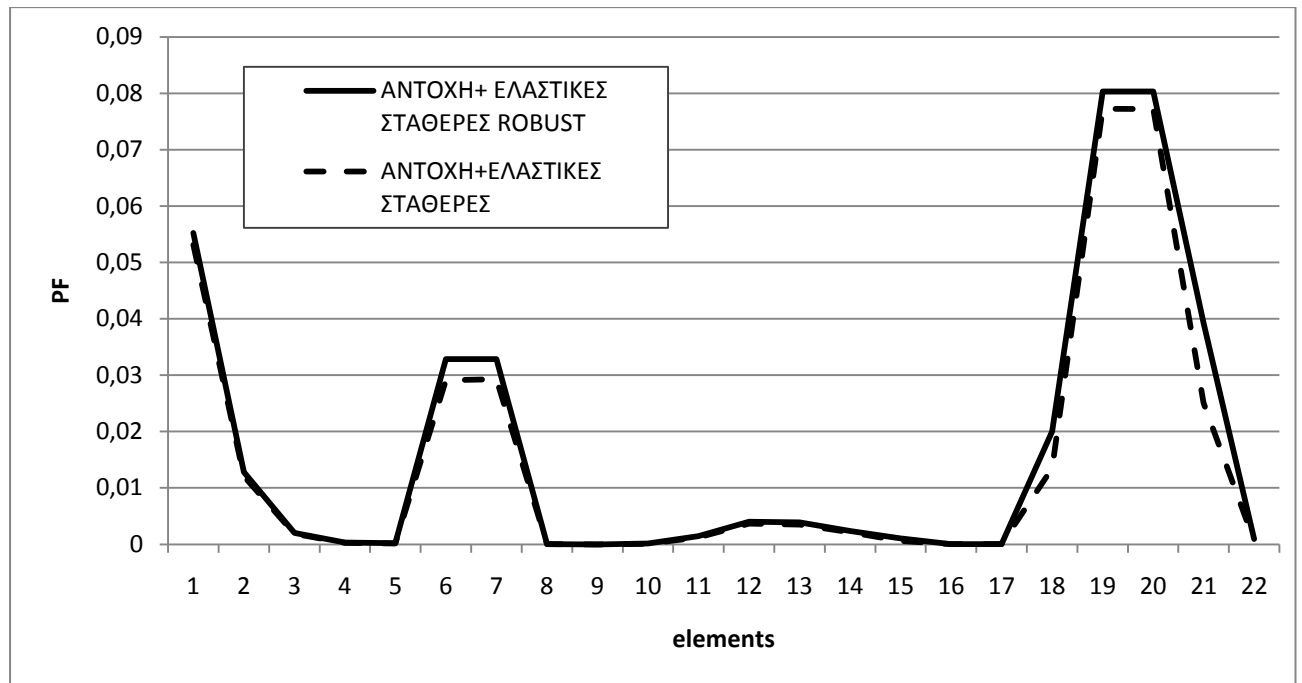
Το Rotor Blade analysis Under Static loading (ROBUST)[9][12] είναι ένα εργαλείο το οποίο έχει αναπτυχθεί από την ερευνητική ομάδα του καθηγητή κ. Φιλίππιδη και παρέχει την δυνατότητα υπολογισμού πιθανοτήτων αστοχίας. Το εργαλείο αυτό μπορεί να υπολογίσει την πιθανότητα αστοχίας θεωρώντας ως στοχαστικές μεταβλητές τις ελαστικές σταθερές του υλικού καθώς και τις τάσεις αστοχίας.

Αρχικά έγινε μια σύγκριση του ROBUST με τα προγράμματα που δημιουργήθηκαν για τις ανάγκες αυτής της εργασίας. Χρησιμοποιώντας τις τυχαίες τιμές που παράγει το ROBUST υπολογίστηκαν οι πιθανότητες αστοχίας κάθε κόμβου για κάθε στοιχείο της διατομής, με το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε στο Matlab, σε ένα περιβάλλον μηδενικής θερμοκρασιακής διαφοράς. Τα αποτελέσματα ήταν άκρως ικανοποιητικά καθώς είχαμε απόλυτη ταυτοποίηση τους. Στο Σχ. 6.2.1 παρουσιάζονται οι πιθανότητες αστοχίας για το σύνολο της διατομής.



Σχήμα 6.2.1 Πιθανότητα αστοχίας ανα κόμβο στοιχείου για την διατομή του πτερυγίου του σχήματος 6.1

Στη συνέχεια υπολογίσαμε την πιθανότητα αστοχίας σε κάθε κόμβο, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε στο Matlab. Η σύγκριση με το ROBUST αποτυπώνεται στο Σχ. 6.2.2.



Σχήμα 6.2.2 Σύγκριση P_f υπολογισμένων με ROBUST και MATLAB ξεχωριστά.

Στο σχήμα 6.2.2 αποτυπώνεται ο σημαντικός ρόλος που έχει η μηχανή παραγωγής τυχαίων αριθμών. Το ROBUST είναι ανεπτυγμένο πάνω σε παλαιότερη πλατφόρμα του Matlab από ότι τα προγράμματα που δημιουργήθηκαν για της ανάγκες αυτής της εργασίας. Το αποτέλεσμα είναι κάποιες μικρές διαφορές στον υπολογισμό της πιθανότητας αξιοπιστίας σε κάποια στοιχεία της διατομής.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΣΕ ΑΞΟΝΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

7.1 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΗΘΗΚΑΝ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

Στο τελευταίο μέρος της εργασίας πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί σε άξονες κατασκευασμένους από σύνθετα υλικά με την τεχνική Filament Winding. Πρόκειται για μία μεθοδολογία για την περίπτωση κατασκευών λεπτότοιχων κυλίνδρων με περιέλιξη ινών. Με αυτή την μεθοδολογία κατασκευάζονται σωλήνες όπου μεταφέρουν ρευστά υπό πίεση καθώς και άξονες μεταφοράς ισχύος οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε εργοστάσια παραγωγής ενέργειας ή οχημάτων. Λόγω του τρόπου κατασκευής των αξόνων και τις δυσκολίας επίτευξης μεγάλης ακρίβειας στον προσανατολισμό των στρώσεων κατά την περιέλιξη των ινών παρουσιάζεται μεγάλη αβεβαιότητα και στον προσανατολισμό των ινών αλλά και στο πάχος του άξονα.

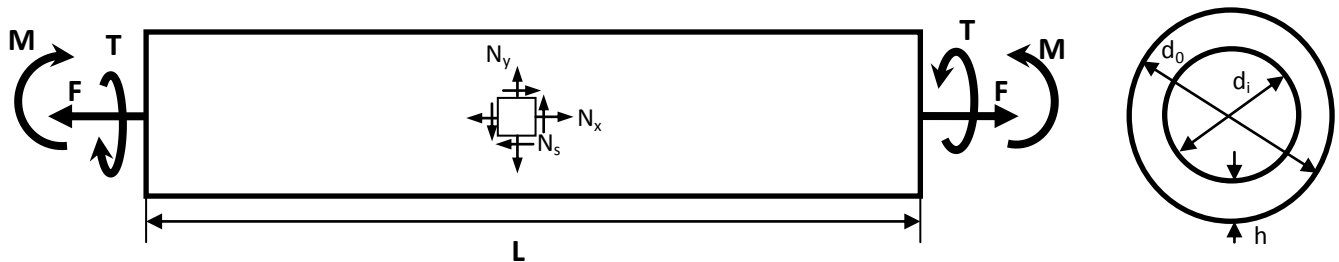
Για τις ανάγκες της εργασίας δημιουργήθηκαν τέσσερα προγράμματα στο MATLAB τα οποία αφορούν άξονες κατασκευασμένους από σύνθετα υλικά. Το πρώτο πρόγραμμα χρησιμοποιώντας αναλυτικές σχέσεις όπως παρουσιάζονται στα συγγράμματα των Rastogi Naveen[10] και Jack R. Vinson[11] και βασιζόμενο στην Κλασική Θεωρία Πολύστρωτων Πλακών και Κελυφών πραγματοποιεί μία πλήρη ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων στον άξονα και υπολογίζει τα κρίσιμα φορτία λυγισμού σε στρέψη, θλιπτική δύναμη, κάμψη, συνδυασμό κάμψης και θλιπτικής δύναμης και διαφοράς πίεσης. Επίσης υπολογίζει την κρίσιμη ταχύτητα του άξονα καθώς και την μάζα του άξονα και την στρεπτική του δυσκαμψία.

Το δεύτερο πρόγραμμα χρησιμοποιεί τις ίδιες αναλυτικές σχέσεις με το πρώτο και μέσω της μεθόδου Μοντε Κάρλο υπολογίζει την πιθανότητα αστοχίας για τον άξονα λόγω αξονικής φόρτισης, κάμψης, στρέψης και εσωτερικής πίεσης ή συνδυασμό αυτών. Επίσης υπολογίζει την πιθανότητα αστοχίας για λυγισμό λόγω αξονικής θλιπτικής δύναμης, κάμψης, στρέψης, εσωτερικής πίεσης και συνδυασμό θλιπτικής αξονικής δύναμης και κάμψης. Τέλος μέσω του προγράμματος μπορεί να αποτυπωθεί η διασπορά τιμών της κρίσιμης ταχύτητας, της μάζας και της στρεπτικής δυσκαμψίας του άξονα λόγω της αβεβαιότητας των ιδιοτήτων, των φορτίσεων και των συνθηκών λειτουργίας του άξονα.

Το τρίτο πρόγραμμα προσφέρει την δυνατότητα υπολογισμού της τιμής όπου ο άξονας θα αστοχήσει λόγω αξονικής δύναμης, στρέψης, κάμψης ή

εσωτερικής πίεσης και στο τέταρτο ο χρήστης έχει την δυνατότητα να εισάγει τον λόγο δύο φορτίσεων και το πρόγραμμα υπολογίζει τις τιμές των φορτίσεων που επιλεχθήκαν για τις οποίες ο άξονας αστοχεί.

Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν σε άξονα που αποτελείται από την πολύστρωτη πλάκα glass/epoxy [$\pm 12/\pm 45/86$]. Στο Σχ. 7.1.1 παρουσιάζονται οι φορτίσεις που θεωρήθηκαν ως θετικές, καθώς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του άξονα.



Σχήμα 7.1.1 Σύμβαση φορτίσεων και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του άξονα

Τα δεδομένα των υπολογισμών :

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά άξονα:

- $d_i = 0,3 \text{ m}$.
- $L = 2 \text{ m}$.

Πάχος στρώσεων:

- Για τις στρώσεις με προσανατολισμό $\pm 12^\circ$ το πάχος είναι $3,65 \cdot 10^{-4} \text{ m}$.
- Για τις στρώσεις με προσανατολισμό $\pm 45^\circ$ το πάχος είναι $2,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}$.
- Για τις στρώσεις με προσανατολισμό 86° το πάχος είναι $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}$.

Φορτίσεις:

- POWER = 60 kW.
- N = 200 rpm.
- Θλιπτική αξονική δύναμη: $F = 2,2 \text{ kN}$.
- Καμπτική Ροπή: $M = 1,2 \text{ kN} \cdot \text{m}$.

Οι ιδιότητες του υλικού E_{glass}/E_{epoxy} παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1:

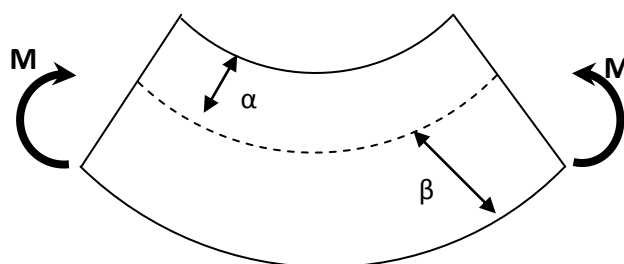
Πίνακας 7.1 Ιδιότητες υλικού Eglass/Epoxy

	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
E_1	37.04 GPa	$3.36 \cdot 10^9$ [Pa]
E_2	15.04 GPa	$3.01 \cdot 10^9$ [Pa]
ν_{12}	0.28	$4,82 \cdot 10^{-2}$
G_{12}	5.5 GPa	$1,22 \cdot 10^9$ [Pa]
X_t	547.86 MPa	$77 \cdot 10^6$ [Pa]
X_c	484.32 MPa	$47.6 \cdot 10^6$ [Pa]
Y_t	38.12 MPa	$6.19 \cdot 10^6$ [Pa]
Y_c	117.90 MPa	$11.8 \cdot 10^6$ [Pa]
S	39.54 MPa	$5.68 \cdot 10^6$ [Pa]

7.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Με την χρήση του προγράμματος για τους μη πιθανοτικούς υπολογισμούς σε άξονα κατασκευασμένο από σύνθετα υλικά και χρησιμοποιώντας τις μέσες τιμές από τις ελαστικές σταθερές και τις τάσεις αστοχίας του υλικού υπολογίσαμε τις τιμές των κριτηρίων αστοχίας Tsai-Hill, Tsai-Hahn, EPFS και maximum stress, τα κρίσιμα φορτία λυγισμού σε κάθε φόρτιση και διάφορα χαρακτηριστικά του άξονα.

Σημειώνεται εδώ πως επειδή ο άξονας καταπονείται σε κάμψη διαχωρίζεται σε δύο τμήματα (Σχ. 7.2.1) όπου στο ένα καταπονείται με εφελκυστικά φορτία ενώ στο άλλο με θλιπτικά.



Σχήμα 7.2.1 Άξονας που υπόκειται σε κάμψη
(α)Τμήμα που υπόκειται σε θλίψη (β)Τμήμα που υπόκειται σε εφελκυσμό

Οι μέγιστες τιμές των κριτηρίων αστοχίας παρουσιάζονται στον πίνακα 7.2.1. Σημειώνεται πως το πάνω μέρος του άξονα είναι εκείνο που καταπονείται σε θλίψη λόγω κάμψης και το κάτω εκείνο που καταπονείται σε εφελκυσμό λόγω κάμψης.

Πίνακας 7.2.1 Μέγιστες τιμές κριτηρίων αστοχίας

ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	ΜΕΡΟΣ ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ ΠΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΤΗΚΕ Η ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ ΤΟΥ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ	ΣΤΡΩΣΗ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΤΩΣΗΣ	ΤΙΜΗ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΑΣΤΟΧΙΑΣ
Tsai Hill	ΚΑΤΩ	4	ΠΑΝΩ	-45	0.1626
Tsai Hahn	ΚΑΤΩ	4	ΠΑΝΩ	-45	0.3299
EPFS					0.3248
Maximum stress (x axis)	ΚΑΤΩ	3	ΠΑΝΩ	45	0.0677
Maximum stress (y axis)	ΚΑΤΩ	4	ΠΑΝΩ	-45	0.3778
Maximum stress (shear)	ΠΑΝΩ	1	ΚΑΤΩ	12	0.2852

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν τα κρίσιμα φορτία λυγισμού. Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται στον Πίνακα 7.2.2.

Πίνακας 7.2.2 Κρίσιμα φορτία λυγισμού

ΦΟΡΤΙΣΗ	ΚΡΙΣΙΜΟ ΦΟΡΤΙΟ
ΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ	$8.3 \cdot 10^4$ [N]
ΣΤΡΕΨΗ	$3.26 \cdot 10^3$ [N*m]
ΚΑΜΨΗ	$7.1 \cdot 10^3$ [N*m]
ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ	$5 \cdot 10^3$ [Pa]
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΚΑΙ ΚΑΜΨΗΣ	Ο άξονας ΔΕΝ θα αστοχήσει λόγω λυγισμού στη συνδυασμένη φόρτιση κάμψης και θλιπτικής αξονικής δύναμης

Τέλος υπολογίστηκαν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του άξονα τα οποία εμφανίζονται στον Πίνακα 7.2.3.

Πίνακας 7.2.3. Τιμές διάφορων χαρακτηριστικών του άξονα

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ	ΤΙΜΗ
ΚΡΙΣΙΜΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ	$9.09 \cdot 10^3$ [rpm]
ΣΤΡΕΠΤΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ	$1.28 \cdot 10^5$
ΓΩΝΙΑ ΣΤΡΕΨΗΣ	0.0223

Στη συνέχεια με τη χρήση του δευτέρου προγράμματος υπολογίστηκε η πιθανότητα αστοχίας του άξονα σύμφωνα με το κριτήριο Tsai-Hill καθώς και η

πιθανότητα αστοχίας του άξονα σε λυγισμό. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 7.2.4-7.2.5.

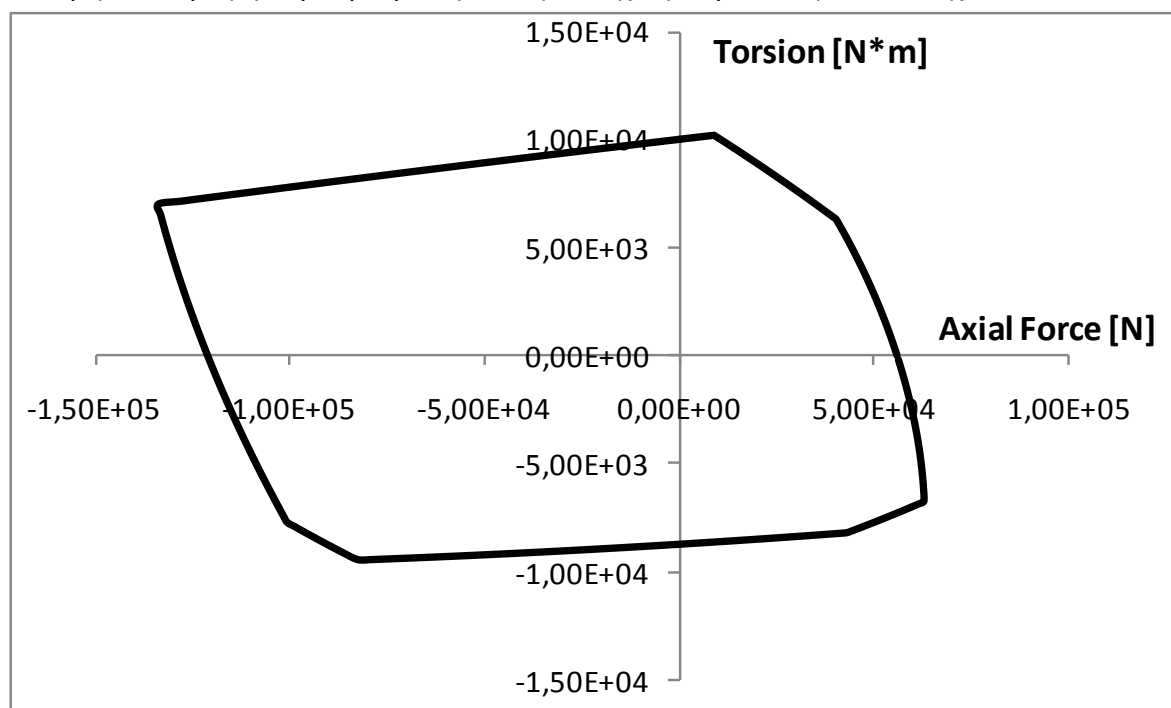
Πίνακας 7.2.4 Πιθανότητα αστοχίας άξονα κατασκευασμένου από σύνθετα υλικά

ΑΣΤΟΧΙΑ ΣΤΟ ΜΕΡΟΣ ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ ΠΟΥ ΚΑΤΑΠΟΝΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΛΟΓΩ ΚΑΜΨΗΣ	ΣΤΡΩΣΗ: 4η	ΠΑΝΩ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ: -45	ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ: $3.89 \cdot 10^{-4}$
--	-------------------	-------------------------------------	---	---

Πίνακας 7.2.5 Πιθανότητα αστοχίας άξονα κατασκευασμένου από σύνθετα υλικά σε λυγισμό λόγω στρεπτικής ροπής.

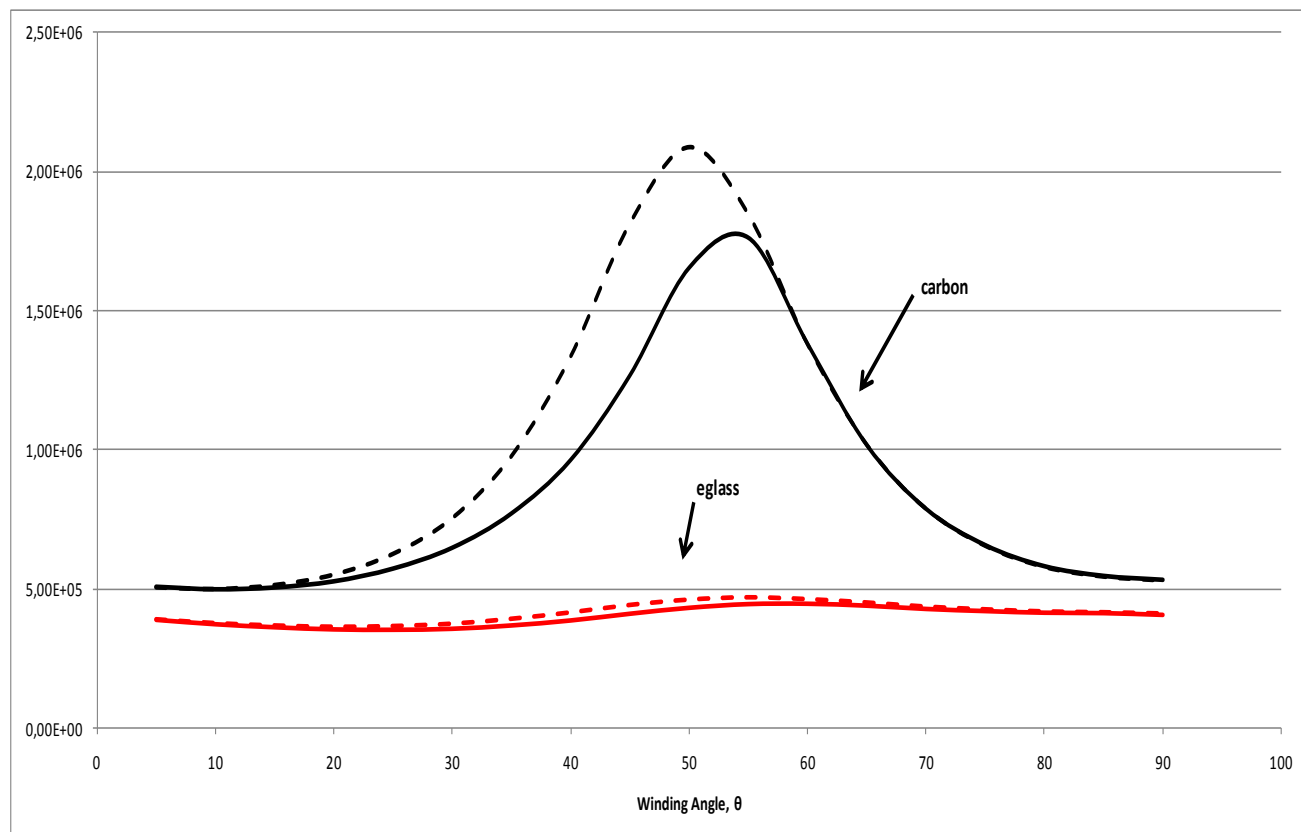
ΑΙΤΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ
ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΛΟΓΩ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ	$1.68 \cdot 10^{-4}$

Ο επόμενος υπολογισμός που πραγματοποιήθηκε ήταν ο υπολογισμός του γεωμετρικού τόπου αστοχίας ενός άξονα ο οποίος αποτελείται από το σύνθετο υλικό eglass/eroxy που χρησιμοποιήθηκε στο προηγούμενο εδάφιο της μορφής $[\pm 12/\pm 45/86]$ αυτή τη φορά. Στον άξονα επιβλήθη συνδιασμένη φόρτιση σε αξονική δύναμη και στρέψη. Ο γεωμετρικός τόπος αστοχίας παρουσιάζεται στο Σχ.7.2.2.



Σχήμα 7.2.2 Γεωμετρικός τόπος αστοχίας (Αξονικής Δύναμης/Στρέψης) για άξονα $[\pm 12/\pm 45/86]$

Τέλος πραγματοποιήθηκε ένα σετ υπολογισμών για την αντοχή που παρουσιάζουν οι ίνες άνθρακα και eglass όταν αποτελούν μέρος πιεστικού δοχείου στην εσωτερική πίεση ανάλογα με τον προσανατολισμό τους. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχ. 7.2.3 και οι ιδιότητες του συνθέτου υλικού ινών άνθρακα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2.6.



Σχήμα 7.2.3 Τάσεις αστοχίας σε πολύστρωτη $[\pm\theta/\pm\theta]$
 (α)Ίνες άνθρακα-Κριτήριο Tsai-hill(-) (β)Ίνες άνθρακα-Κριτήριο maximum stress,y axis(--)
 (γ)Ίνες eglass-Κριτήριο Tsai-hill(-) (δ)Ίνες eglass-Κριτήριο maximum stress(--)

Πίνακας 7.2.6. Ιδιότητες υλικού Carbon/Epoxy

E_1	122 GPa
E_2	8.2 GPa
ν_{12}	0.33
G_{12}	5.6 GPa
X_t	1730 MPa
X_c	1110 MPa
Y_t	49.4 MPa
Y_c	177 MPa
S	63.5 MPa

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. A.H-S Ang and W.H Tang, Probability concepts in engineering, Planning and design, John Wiley & Sons, 1984.
2. John Dalsgaard Sørensen, Notes in structural reliability theory, Aalborg University, 2004.
3. Joint Committee on Structural Safety, Probabilistic model code, part I, 2001.
4. Θ.Π. Φιλιππίδης, Σημειώσεις για την μηχανική συνθέτων, 2004.
5. Θ.Π. Φιλιππίδης, Σημειώσεις για το σχεδιασμό με σύνθετα υλικά, 2003.
6. Δ.Ι.Λεκού, Προσδιορισμός της αξιοπιστίας στο σχεδιασμό από σύνθετα υλικά, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2009.
7. K.C. Bacharoudis and D.J. Lekou and T.P. Philippidis, Structural reliability analysis of rotor blades in ultimate loading, Scientific Proceedings, European Wind Energy Conference & Exhibition (EWEA 2011) pp 129-131.
8. P.S. Theocaris and T.P. Philippidis, The Paraboloidal Failure Surface of Initially Anisotropic Elastic Solids, Journal of Reinforced Plastics And Composites, volume 6(4) pp 378-395, October 1987
9. K.C. Bacharoudis, T.P. Philippidis, Probabilistic stress analysis of composite rotor blades under ultimate loading, 2012 (submitted for publication).
10. Rastogi Naveen, "Design of Composite Driveshafts for Automotive Applications", SAE World Congress, Detroit, Michigan, March 8-11, 2004, SAE Paper No. 2004-1-0485
11. Jack R. Vinson, "The Behavior of Structures Composed of Composite Materials", Second Edition, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002.
12. Ηλίας Μίνγκο, Ανάλυση τάσεων και μελέτη αστοχίας σε πτερύγια Ανεμογεννήτριας από σύνθετα υλικά υπό ακραία φορτία-Πρόβλεψη ιδιοτιμών και ιδιομορφών ελαστικής αστάθειας με την μέθοδο πεπερασμένων λωρίδων, Διπλωματική, Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

8.1 ΟΔΗΓΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ MATLAB

8.1.1 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΙΜΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΚΛΑΣΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΡΩΝ ΠΛΑΚΩΝ

Το πρόγραμμα αυτό που αποτελείται από ένα mfile, υπολογίζει με βάση την Κλασική Θεωρία Πολύστρωτων Πλακών την τιμή κριτηρίων αστοχίας για κάθε στρώση οποιασδήποτε πολύστρωτης πλάκας. Το πρόγραμμα υποστηρίζει τα κριτήρια αστοχίας Tsai-Hill, Tsai-Hahn και το τετραγωνικό κριτήριο αστοχίας.

Το πρόγραμμα αυτό αρχικά δέχεται ως δεδομένα ένα αρχείο **plate_CLT.inp** στο οποίο ο χρήστης τοποθετεί την γεωμετρία της πολύστρωτης πλάκας και τα υλικά από τα οποία αποτελείται αυτή.

Η δομή του αρχείου είναι ως εξής:

plate_CLT.inp

Αριθμός υλικών

Υλικό 1

Υλικό 2

(κ.ο.κ)

Αριθμός στρώσεων πολύστρωτης

Προσανατολισμός στρώσης 1

αριθμος υλικού από το οποίο αποτελείται η στρώση

Προσανατολισμός στρώσης 2

αριθμός υλικού από το οποίο αποτελείται η στρώση

(κ.ο.κ.)

Στη συνέχεια το πρόγραμμα δέχεται ένα αρχείο txt για κάθε υλικό που χρησιμοποιείται. Η δομή αυτών των αρχείων είναι η εξής:

Πάχος

E_1 E_2 ν_{12} G_{12} α_1 α_2 b_1 b_2

Xt

Xc

Yt

Yc

S

Τέλος το πρόγραμμα δέχεται ένα αρχείο `stress_resultants_clt.txt` στο οποίο αναφέρονται οι φορτίσεις. Η δομή αυτού του αρχείου είναι η εξής:

Nx
Ny
Ns
Mx
My
Ms
ΔT
c

8.1.2 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΚΑΘΕ ΣΤΡΩΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ MONTE CARLO.

Το πρόγραμμα αυτό υπολογίζει την πιθανότητα αστοχίας σε κάθε στρώση της πολύστρωτης πλάκας. Το πρόγραμμα αυτό έχει δημιουργηθεί σε δύο μορφές τις `NOT_CONTROL_MONTE_CARLO.m` και την `MONTE_CARLO.m`. Το πρόγραμμα **NOT_CONTROL_MONTE_CARLO.m** παράγει τυχαίους αριθμούς για κάθε αρχείο υλικού που εισάγεται ως δεδομένο. Για παράδειγμα στην περίπτωση που δοθεί το ίδιο υλικό δυο φορές ως δεδομένο το πρόγραμμα θα παράγει ξεχωριστές τυχαίες τιμές. Το πρόγραμμα **MONTE_CARLO.m** περιέχει έναν έλεγχο όπου πριν ο κώδικας ξεκινήσει την παραγωγή τυχαίων τιμών για κάποιο υλικό, συγκρίνει τις ιδιότητες του με όλα τα προηγούμενα. Έτσι το πρόγραμμα εξασφαλίζει πως οι τυχαίες τιμές θα είναι οι ίδιες για κάθε ξεχωριστό υλικό (και όχι αρχείο υλικού). Ο έλεγχος αυτός τοποθετήθηκε με σκοπό να έχει την δυνατότητα ο χρήστης να μπορεί να εισάγει στο πρόγραμμα διαφορετικά πάχη στρώσεων από το ίδιο υλικό και να λάβει τις ίδιες τυχαίες τιμές για τις υπόλοιπες ιδιότητες του υλικού.

Τα δύο αυτά προγράμματα συνοδεύονται από ακόμα δύο mfiles τα **RN_function.m** και **TruncatedGaussian.m**. Κατά την παραγωγή των τυχαίων αριθμών, στην περίπτωση που σε κάποια από τις μεταβλητές E_1 , E_2 , ν_{12} ή G_{12} δοθεί αρνητική τιμή και η δινόμενη κατανομή είναι η normal, χρησιμοποιώντας αυτές τις δύο συναρτήσεις το πρόγραμμα διορθώνει το πρόβλημα.

Η εισαγωγή δεδομένων σε αυτό το πρόγραμμα είναι όμοια με το προηγούμενο με την διαφορά ότι κάθε μεταβλητή εισάγεται ως κατανομή. Συγκεκριμένα το πρόγραμμα υποστηρίζει τεσσερα είδη κατανομών. Η εισαγωγή μιας μεταβλητής με βάση την κατανομή αποτελείται από τρεις τιμές. Η πρώτη δίνει την μέση τιμή, η δεύτερη την τυπική απόκλιση και η τρίτη τον αριθμό που καθορίζει την κατανομή.

Συγκεκριμένα:

1 για normal

2 για lognormal

3 για Gumbel

4 για Weibull

Για παράδειγμα εάν θέλουμε να εισαγουμε μία μεταβλητή με μέση τιμή 2 και τυπική απόκλιση 0.2 normal κατανομής, γράφουμε **2 0.2 1**.

Για να δοθούν ντετερμινιστικές τιμές επιλέγεται η normal κατανομή και μηδενική τυπική απόκλιση.

Για την εισαγωγή των δεδομένων το πρόγραμμα δέχεται τα αρχεία **plate_MC.inp** και **stress_resultants_MC.txt**. Επίσης δέχεται και ένα αρχείο για κάθε υλικό.

Κατά την έναρξη του προγράμματος ζητείται το **μέγεθος του δείγματος**. Πρόκειται για το δείγμα που θα χρησιμοποιηθεί στην εξομοίωση, δηλαδή η ποσότητα των τυχαίων τιμών που θα παραχθεί για κάθε μεταβλητή.

8.1.3 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΟΥ ΤΟΠΟΥ ΑΣΤΟΧΙΑΣ.

Το πρόγραμμα αυτό υπολογίζει τον ντετερμινιστικό τόπο αστοχίας για την δινόμενη πολύστρωτη πλάκα. Το πρόγραμμα έχει την δυνατότητα επιλογής για τον υπολογισμό ολόκληρου γεωμετρικού τόπου, ενός τόξου ή απλά συγκεκριμένων σημείων.

Το πρόγραμμα δέχεται τα δεδομένα με τον τρόπο που περιγράφηκε στην ενότητα 8.1.2. η μοναδική διαφορά είναι πως το πρόγραμμα διαβάζει μόνο την τιμή που δίνεται σαν μέση τιμή και αδιαφορεί για τιμές που δόθηκαν ως τυπική απόκλιση και αριθμός κατανομής.

Κατά την έναρξή του το πρόγραμμα απαιτεί την εισαγωγή κάποιων επιπλέον δεδομένων. Αυτά είναι:

Όνομα αρχείου που θα αποθηκεύονται τα δεδομένα: Εδώ ο χρήστης θα πρέπει να προσθέσει και την κατάληξη του αρχείου στο όνομα που θα εισάγει. Για παράδειγμα *apotelesmata.txt* .

Επιλογή αξόνων: Ο χρήστης θα πρέπει να εισάγει διαδοχικά τους άξονες στους οποίους επιθυμεί να υπολογιστεί ο γεωμετρικός τόπος.

Επιλογή κριτηρίου αστοχίας: Ο χρήστης θα πρέπει να επιλέξει το κριτήριο αστοχίας.

Τέλος στο πρόγραμμα ο χρήστης εισάγει το μέγεθος του γεωμετρικού τόπου.

8.1.4 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΟΥ ΤΟΠΟΥ ΑΣΤΟΧΙΑΣ.

Το πρόγραμμα αυτό το οποίο υπολογίζει έναν πιθανοτικό τόπο αστοχίας δημιουργήθηκε σε δύο μορφές όπως και το πρόγραμμα που περιγράφηκε στην ενότητα 8.1.2. Μία με έλεγχο των αρχείων των υλικών και μία χωρίς.

Τα δεδομένα εισάγονται ακριβώς όπως και στο πρόγραμμα υπολογισμού της πιθανότητας αστοχίας μέσω της μεθόδου Monte Carlo.

Κατά την έναρξή του το πρόγραμμα απαιτεί την εισαγωγή κάποιων επιπλέον δεδομένων. Αυτά είναι:

Όνομα αρχείου που θα αποθηκεύονται τα δεδομένα: Εδώ ο χρήστης θα πρέπει να προσθέσει και την κατάληξη του αρχείου στο όνομα που θα εισάγει. Για παράδειγμα *apotelesmata.txt* .

Επιλογή αξόνων: Ο χρήστης θα πρέπει να εισάγει διαδοχικά τους άξονες στους οποίους επιθυμεί να υπολογιστεί ο γεωμετρικός τόπος.

Επιλογή κριτηρίου αστοχίας: Ο χρήστης θα πρέπει να επιλέξει το κριτήριο αστοχίας.

Μέγεθος δείγματος MC: Εδώ επιλέγεται το μέγεθος του δείγματος βάσει του οποίου θα γίνεται ο υπολογισμός της πιθανότητας αστοχίας.

Πιθανότητα αστοχίας: Εδώ εισάγεται η πιθανότητα αστοχίας για την οποία υπολογίζεται ο γεωμετρικός τόπος.

Σφάλμα: Εισάγεται σφάλμα το οποίο θεωρείται ανεκτό από το χρήστη. Σημειώνεται εδώ πως δε πρέπει η τιμή του σφάλματος να είναι ίδια με την τιμή της πιθανότητας αστοχίας.

Μέγιστη και ελάχιστη τιμή του R: Η μέθοδος της διχοτόμησης απαιτεί ένα πάνω και ένα κάτω όριο ώστε να υπολογίσει τη ρίζα. Σε περίπτωση που ο χρήστης τοποθετήσει λάθος όρια το πρόγραμμα με δοκιμές τα διορθώνει.

Στην τελική επιλογή ο χρήστης εισάγει το μέγεθος του γεωμετρικού τόπου.

8.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΩΝ ΠΛΑΚΩΝ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΤΕΡΥΓΙΟ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Οι πολύστρωτες πλάκες από τις οποίες αποτελείται η διατομή του πτερυγίου αποτελούνται από σύνθετο υλικό glass/polyester και δομικό αφρό.

Οι ιδιότητες του glass/polyester συνθέτου υλικού:

ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
E_1	$22.884 \cdot 10^9$ Pa	$2.07 \cdot 10^9$ Pa
E_2	$7.8823 \cdot 10^9$ Pa	$1.58 \cdot 10^9$ Pa
ν_{12}	0.3008	0.3008
G_{12}	$1.666 \cdot 10^9$ Pa	$0.369 \cdot 10^9$ Pa
a_1	$9.132 \cdot 10^{-6}$ K ⁻¹	$0.987 \cdot 10^{-6}$ K ⁻¹
a_2	$46.044 \cdot 10^{-6}$ K ⁻¹	$3.021 \cdot 10^{-6}$ K ⁻¹
b_1	0	0
b_2	0	0
X_t	$397.94 \cdot 10^6$ Pa	$55.932 \cdot 10^6$ Pa
X_c	$329.11 \cdot 10^6$ Pa	$32.35 \cdot 10^6$ Pa
Y_t	$36.218 \cdot 10^6$ Pa	$5.877 \cdot 10^6$ Pa
Y_c	$147.34 \cdot 10^6$ Pa	$14.702 \cdot 10^6$ Pa
S	$16.025 \cdot 10^6$ Pa	$2.303 \cdot 10^6$ Pa

Στη συνέχεια περιγράφεται η γεωμετρία των πλακών.

mat_9:

ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ(m)	ΥΛΙΚΟ ΣΤΡΩΣΗΣ
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester
-45	0.0003	glass/polyester

45	0.0003	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.001694	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.001694	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
0	0.001694	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester

mat_19:

ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ(m)	ΥΛΙΚΟ ΣΤΡΩΣΗΣ
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester
0	0.02	ΔΟΜΙΚΟΣ ΑΦΡΟΣ
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester

0	0.0004	glass/polyester
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester

mat_26:

ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ(m)	ΥΛΙΚΟ ΣΤΡΩΣΗΣ
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester
0	0.02	ΔΟΜΙΚΟΣ ΑΦΡΟΣ
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester

mat_32:

ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ(m)	ΥΛΙΚΟ ΣΤΡΩΣΗΣ
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester

90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
0	0.03	ΔΟΜΙΚΟΣ ΑΦΡΟΣ
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester

mat_86:

ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ(m)	ΥΛΙΚΟ ΣΤΡΩΣΗΣ
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester
0	0.02	ΔΟΜΙΚΟΣ ΑΦΡΟΣ
-45	0.0003	glass/polyester

45	0.0003	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
0	0.000847	glass/polyester
90	0.0004	glass/polyester
0	0.0004	glass/polyester
-45	0.0003	glass/polyester
45	0.0003	glass/polyester

Στις μετρήσεις όπου το πάχος θεωρήθηκε ως στοχαστική μεταβλητή, θεωρήθηκε ως μία κανονική κατανομή με μέση τιμή όπως φαίνεται στην γεωμετρία της κάθε πλάκας και τυπική απόκλιση ως εξής:

ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΠΑΧΟΥΣ (m)	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ (m)
$3 \cdot 10^{-4}$	$1.41 \cdot 10^{-5}$
$4 \cdot 10^{-4}$	$1.88 \cdot 10^{-5}$
$8.47 \cdot 10^{-4}$	$3.984 \cdot 10^{-5}$
$16.94 \cdot 10^{-4}$	$7.97 \cdot 10^{-5}$
$25.41 \cdot 10^{-4}$	$12 \cdot 10^{-5}$
$33.88 \cdot 10^{-4}$	$15.9 \cdot 10^{-5}$

Οι τιμές αυτές έχουν προκύψει από τον πολλαπλασιασμό της μέσης τιμής με την CoV η οποία προσδιορίστηκε πειραματικά και έχει την τιμή 0.047035326.

8.3 ΟΔΗΓΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥΣ ΣΕ ΑΞΟΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟΥΣ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Το πρώτο πρόγραμμα που δημιουργήθηκε για ντετερμινιστικούς υπολογισμούς σε άξονα ο οποίος είναι κατασκευασμένος από σύνθετα υλικά δέχεται τρία βασικά αρχεία εισόδου. Το αρχείο **plate.inp** είναι της μορφής των προηγούμενων προγραμμάτων (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 8.2.1).

Οι διαφορές παρατηρούνται στα αρχεία των υλικών όπου τώρα προστίθεται και η πυκνότητα του υλικού. Έτσι τα αρχεία των υλικών τώρα είναι της μορφής:

Πάχος Πυκνότητα

E_1 E_2 ν_{12} G_{12} a_1 a_2 b_1 b_2
 χt

X_c
 Y_t
 Y_c
 S

Επίσης το πρόγραμμα δέχεται ένα αρχείο SHAFT_INFORMATION.txt το οποίο είναι της μορφής:

Εσωτερική διάμετρος (d_i)
Εσωτερική Πίεση (p)
Ισχύς (POWER)(KW)
Στροφές (N [rpm])
Αξονική Δύναμη (F)
Καμπτική Ροπή (M)
 ΔT
Υγρασία (c)
Μήκος Άξονα (L)

Το πρόγραμμα που πραγματοποιεί πιθανοτικούς υπολογισμούς δέχεται ακριβώς τα ίδια αρχεία εισόδου με την μοναδική διαφορά ότι κάθε μεταβλητή αντιπροσωπεύεται από τρεις τιμές. Μία για την μέση τιμή, μία για την τυπική απόκλιση και μία για τον προσδιορισμό της κατανομής. Πιο αναλυτικά η διαδικασία περιγράφεται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 8.1.2.