



**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ»**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΛΕΤΣΙΟΥ ΣΤΥΛΙΑΝΗ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΜΕΘΟΔΩΝ ΟΜΟΓΕΝΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΠΕΡΑΣΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

ΙΩΑΝΝΙΝΑ, ΕΤΟΣ 2025

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών για την απόκτηση του Διπλώματος Μεταπτυχιακών Σπουδών που απονέμει το Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Εγκρίθηκε την 10^η Δεκεμβρίου 2025 από την εξεταστική επιτροπή:

1. Ευάγγελος Χατζηγεωργίου, Καθηγητής του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, **Επιβλέπων**
2. Ιωάννης Παναγιωτόπουλος, Καθηγητής του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
3. Κωνσταντίνος Μπέλτσιος, Καθηγητής της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

"Δηλώνω υπεύθυνα ότι η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε κάτω από τους διεθνείς ηθικούς και ακαδημαϊκούς κανόνες δεοντολογίας και προστασίας της πνευματικής ιδιοκτησίας. Σύμφωνα με τους κανόνες αυτούς, δεν έχω προβεί σε ιδιοποίηση ξένου επιστημονικού έργου και έχω πλήρως αναφέρει τις πηγές που χρησιμοποίησα στην εργασία αυτή."



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής στο εργαστήριο Μαθηματικής Μοντελοποίησης Υλικών και Επιστημονικών Υπολογισμών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Τεχνολογίες Προηγμένων Υλικών», με θέμα «Μελέτη επίδρασης της μικροδομής στις μηχανικές ιδιότητες ινοπλισμένων σύνθετων υλικών με τη χρήση μεθόδων ομογενοποίησης και πεπερασμένων στοιχείων».

Η εργασία πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Ευάγγελου Χατζηγεωργίου, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά για την πολύτιμη καθοδήγηση, υποστήριξη και τις ουσιαστικές παρατηρήσεις του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους καθηγητές Ιωάννη Παναγιωτόπουλο και Κωνσταντίνο Μπέλτσιο για τη συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένεια και τους φίλους μου για τη συμπαράσταση και την ενθάρρυνση καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών και της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Ιωάννινα, 2025

Λέτσιου Στυλιανή

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς σύνθετων υλικών μέσω προσομοιώσεων με το λογισμικό ANSYS Material Designer. Στόχος της εργασίας είναι η κατανόηση του ρόλου της μικροδομής, της γεωμετρίας και της διάταξης των ενισχυτικών στοιχείων (ινών ή σωματιδίων) στη μηχανική απόκριση των σύνθετων υλικών, καθώς και η αξιολόγηση της αξιοπιστίας των θεωρητικών μοντέλων μικρομηχανικής σε σχέση με πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν. Η εργασία καλύπτει συνολικά τη σχεδίαση, προσομοίωση και ανάλυση διαφόρων τύπων σύνθετων υλικών, εξετάζοντας τις ελαστικές τους ιδιότητες. Στο πρώτο κεφάλαιο του κυρίου μέρους, εξετάστηκαν μονοκατευθυντικά σύνθετα (UD). Υπολογίστηκαν οι βασικές ελαστικές σταθερές (E_1 , E_2 , G_{12} , G_{23} , ν_{12} , ν_{23}) και συγκρίθηκαν με προβλέψεις θεωρητικών μοντέλων, όπως Rule of Mixtures, Mori–Tanaka, Modified ROM, Chamis, Halpin–Tsai και Bridging Model, καθώς και με δεδομένα της βιβλιογραφίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν υψηλό μέτρο ελαστικότητας κατά τη διεύθυνση των ινών και σημαντική εξάρτηση των ιδιοτήτων από τη μήτρα κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Η αύξηση του ποσοστού ινών βελτίωσε τις ελαστικές ιδιότητες, ενώ οι συγκρίσεις με τα αναλυτικά μοντέλα έδειξαν πολύ καλή συμφωνία, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία των θεωρητικών προσεγγίσεων. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύθηκε η επίδραση της χρήσης διαφορετικών τρόπων ενίσχυσης στις ελαστικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών, χρησιμοποιώντας κατάλληλα αντιπροσωπευτικά στοιχεία όγκου κάθε φορά. Μελετήθηκαν διατάξεις μονοκατευθυντικών ινών (Hexagonal, Square, Random), σύνθετα με ασυνεχείς, τυχαία κατανομημένες ίνες και σύνθετα με σωματίδια κανονικά και τυχαία κατανομημένα. Διαπιστώθηκε ότι η διάταξη και η μορφολογία των ενισχυτικών στοιχείων καθορίζει τις ελαστικές ιδιότητες. Τα σύνθετα με συνεχείς ίνες εμφάνισαν μεγαλύτερη ακαμψία κατά τη διεύθυνση φόρτισης, ενώ τα σύνθετα με ασυνεχείς, τυχαία κατανομημένες ίνες ή σωματίδια είχαν χαμηλότερη ακαμψία αλλά πιο ομοιόμορφη κατανομή ιδιοτήτων. Η ανάλυση τόνισε τη σημασία της μικροδομής στην πρόβλεψη μηχανικής συμπεριφοράς. Στο τρίτο κεφάλαιο εξετάστηκαν πολυστρωματικά σύνθετα υλικά τύπου sandwich με ιδιαίτερη έμφαση στον πυρήνα, ο οποίος αποτελεί την ενδιάμεση στρώση. Στο πλαίσιο αυτό μελετήθηκε ο τρόπος με τον οποίο η διαφορετική διάταξη ινών (UD Carbon και Woven) επηρεάζει τη συνολική ελαστική συμπεριφορά του υλικού. Το

πολυστρωματικό σύνθετο υλικό με UD Carbon ως ενδιάμεσο στρώμα παρουσίασε υψηλή ακαμψία κατά μήκος των ινών, ενώ το πολυστρωματικό σύνθετο υλικό με Woven ως ενδιάμεσο στρώμα εμφάνισε βελτιωμένη διατμητική συμπεριφορά λόγω της πλέξης που κατανέμει το φορτίο σε δύο διευθύνσεις. Η σύγκριση ανέδειξε τα πλεονεκτήματα και περιορισμούς κάθε διάταξης, υπογραμμίζοντας ότι η επιλογή του τύπου ενίσχυσης πρέπει να γίνεται με βάση τις απαιτήσεις φόρτισης και λειτουργίας. Συνολικά, η εργασία αναδεικνύει τη σημασία της γεωμετρίας, της διάταξης και του ποσοστού ενίσχυσης στη μηχανική συμπεριφορά σύνθετων υλικών. Η μελέτη επιβεβαιώνει την αξιοπιστία των μοντέλων μικρομηχανικής και τη χρησιμότητα των υπολογιστικών εργαλείων προσομοίωσης στην ανάπτυξη προηγμένων σύνθετων δομών. Οι προεκτάσεις της μελέτης περιλαμβάνουν την περαιτέρω διερεύνηση μη γραμμικών συμπεριφορών, αντοχής σε κόπωση και θερμομηχανικών ιδιοτήτων, με στόχο την ανάπτυξη καινοτόμων εφαρμογών σε αεροδιαστημικούς και βιομηχανικούς τομείς.

ABSTRACT

The present thesis focuses on the study of the mechanical behavior of composite materials through simulations using the ANSYS Material Designer software. The main objective is to understand the role of microstructure, geometry, and the arrangement of reinforcement elements (fibers or particles) in the mechanical response of composite materials, as well as to evaluate the reliability of theoretical micromechanical models in comparison with experimental and numerical results. The work covers the complete process of design, simulation, and analysis of various types of composites, focusing on their elastic properties. In the first chapter of the main body, unidirectional (UD) composites were examined. The fundamental elastic constants (E_1 , E_2 , G_{12} , G_{23} , ν_{12} , ν_{23}) were calculated and compared with predictions from theoretical models such as the Rule of Mixtures, Mori–Tanaka, Modified ROM, Chamis, Halpin–Tsai, and the Bridging Model, as well as with data from the literature. The results indicated a high elastic modulus along the fiber direction and a strong dependence of the transverse properties on the matrix. Increasing the fiber volume fraction improved the elastic performance, while comparisons with analytical models showed excellent agreement, confirming the reliability of theoretical approaches. In the second chapter, the effect of using different reinforcement methods on the elastic properties of composite materials was analyzed, employing appropriate representative volume elements for each case. Various configurations were studied, including unidirectional fiber arrangements (Hexagonal, Square, Random), composites reinforced with chopped, randomly distributed fibers, and composites reinforced with regularly or randomly distributed particles. It was found that the geometry and distribution of the reinforcing elements significantly influence the elastic property distribution. Composites with continuous fibers exhibited higher stiffness along the loading direction, whereas those reinforced with chopped, randomly distributed fibers or particles showed lower stiffness but a more uniform property distribution. The analysis emphasized the crucial role of microstructure in predicting mechanical behavior. The third chapter focused on multilayer sandwich-type composites, with particular emphasis on the core, which constitutes the intermediate layer. In this context, the influence of different fiber architectures (UD Carbon and Woven) on the overall behavior of the material was investigated. The

laminated composite material with UD Carbon as the intermediate layer exhibited high stiffness along the fiber direction, while the laminated composite material with woven fabric as the intermediate layer demonstrated improved shear behavior due to the interlacing pattern that distributes the load in two directions. The comparison highlighted the advantages and limitations of each configuration, underscoring that the selection of the reinforcement type should depend on the specific loading and operational requirements. Overall, the thesis highlights the importance of geometry, reinforcement arrangement, and volume fraction in the mechanical behavior of composite materials. The study confirms the reliability of micromechanical models and the usefulness of computational simulation tools in the development of advanced composite structures. The findings open pathways for further investigation of nonlinear behavior, fatigue resistance, and thermomechanical properties, aiming to support the design of innovative applications in the aerospace and industrial sectors.

Περιεχόμενα

1.ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	3
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
1.2 ΕΙΔΗ ΜΗΤΡΑΣ.....	4
1.3 ΕΙΔΗ ΙΝΩΝ	5
2.Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	8
2.1 ΟΜΟΓΕΝΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΟΓΚΟΥ (RVE)	8
2.2 ΠΕΡΙΟΔΙΚΕΣ ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	9
2.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ANSYS	9
3.ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	11
3.1. ΚΑΝΟΝΑΣ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ ROM (RULE OF MIXTURE).....	11
3.2 ΗΜΙ-ΕΜΠΕΙΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	12
3.2.1 Τροποποιημένος Κανόνας Μειγμάτων (Modified Rule of Mixtures – MROM)....	12
3.2.2 Μοντέλο Halpin–Tsai (Halpin–Tsai model).....	13
3.2.3. Μοντέλο Chamis (Chamis model).....	14
3.3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΟΜΟΓΕΝΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	14
3.3.1. Μοντέλο Mori-Tanaka (M-T)	14
3.3.2. Bridging model.....	15
3.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ MATERIAL DESIGNER	16
3.4.1 Ομογενοποίηση στο Material Designer	16
3.4.2 Υπολογισμός γραμμικών ελαστικών ιδιοτήτων	17
4.ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ	20
4.1 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΩΝ.....	20
4.2 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ	21
4.3 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	21

4.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	22
4.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΘΟΤΡΟΠΙΚΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ	23
5.ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ.....	26
5.1 ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ – ΜΟΝΟΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟ ΣΥΝΘΕΤΟ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	26
5.1.1 Αναλυτική Παρουσίαση της Διαδικασίας Επίλυσης του μοντέλου.....	27
5.2 ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ - ΜΕΛΕΤΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΜΕΣΩ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΓΚΟΥ	35
5.2.1. Μονοκατευθυντικό RVE εξαγωνικής δομής Hexagonal UD Composite.....	36
5.2.2. Μονοκατευθυντικό RVE τετράγωνης δομής UD Composite Square.....	40
5.2.3. Σύνθετο με τυχαία διάταξη ινών Random UD Composite	43
5.2.4. Σύνθετο με σωματίδια Particle.....	47
5.2.5. Σύνθετο με τυχαία κατανεμημένα σωματίδια Random Particle.....	51
5.2.6 Σύνθετο με ασυνεχείς και τυχαία κατανεμημένες ίνες Chopped Fiber Composite.....	55
5.3 ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ - ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΟΓΚΟΥ ΓΙΑ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ: ΙΝΕΣ ΜΕ ΠΛΕΞΗ VS ΜΟΝΟΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ (WOVEN VS UD).....	60
5.3.1 Δημιουργία Woven Composite.....	61
5.3.2 Δημιουργία Epoxy-Woven-Epoxy	68
5.3.3 Δημιουργία Epoxy- Carbon UD- Epoxy	75
6.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ- ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	76
6.1 ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ	76
6.2 ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ.....	84
6.3 ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ.....	95
7.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	97
8.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	99

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1.1: Σύνθετα στην βιομηχανία σήμερα:	4
Εικόνα 1.2: Τύποι σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες.	6
Εικόνα 1.3: Διαχρονική εξέλιξη της ζήτησης ανθρακονημάτων σε δισεκατομμύρια δολάρια.	7
Εικόνα 4.1: Επιλογές RVE στο Material Designer	20
Εικόνα 4.2: Εισαγωγή Υλικών – Ιδιοτήτων στο Engineering Data	21
Εικόνα 4.3: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Mesh"	21
Εικόνα 4.4: Διαμόρφωση παραμέτρων στην ενότητα "Analysis settings"	22
Εικόνα 4.5: Πλαίσιο ονόματος υλικού στην ενότητα "Constant Material"	22
Εικόνα 5.1: Γεωμετρία προς επίλυση	27
Εικόνα 5.2: Εμφάνιση του Material Designer μέσα στο Project Schematic	27
Εικόνα 5.3: Εισαγωγή "Orthotropic Elasticity" στο υλικό "Carbon"	28
Εικόνα 5.4: Ιδιότητες Υλικού "Carbon" στο Engineering Data	29
Εικόνα 5.5: Εισαγωγή "Isotropic Elasticity" στο υλικό "Epoxy"	29
Εικόνα 5.6: Ιδιότητες Υλικού "Epoxy" στο Engineering Data	30
Εικόνα 5.7: Επιλογή Γεωμετρίας "UD Composite"	31
Εικόνα 5.8: Επιλογή Υλικών στην ενότητα "Constituent Materials" για UD Composite	31
Εικόνα 5.9: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Geometry" για UD Composite Hexagonal με $V_f = 0.6$	31
Εικόνα 5.10: Ολοκληρωμένη Γεωμετρία UD Composite Hexagonal	32
Εικόνα 5.11: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Mesh" για UD Composite	32
Εικόνα 5.12: Διακριτοποιημένη Γεωμετρία UD Composite Hexagonal	33
Εικόνα 5.13: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Analysis settings" για UD Composite	33
Εικόνα 5.14: Όνομα Υλικού στην ενότητα "Constant Material"	34

<i>Εικόνα 5.15: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Epoxy Carbon UD</i>	<i>34</i>
<i>Εικόνα 5.16: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Variable material" για UD Composite</i>	<i>35</i>
<i>Εικόνα 5.17: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Epoxy Carbon UD για διαφορετικά Vfs....</i>	<i>35</i>
<i>Εικόνα 5.18: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Geometry" για UD Composite Hexagonal με Vf =0.15</i>	<i>37</i>
<i>Εικόνα 5.19: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Mesh" για UD Composite Hexagonal.....</i>	<i>37</i>
<i>Εικόνα 5.20: Διαμόρφωση παραμέτρων στην ενότητα "Analysis settings" για UD Composite Hexagonal.....</i>	<i>38</i>
<i>Εικόνα 5.21: Όνομα Υλικού στην ενότητα " Generated Material "</i>	<i>38</i>
<i>Εικόνα 5.22: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Variable material" για UD Composite Hexagonal.....</i>	<i>39</i>
<i>Εικόνα 5.23: Διακριτοποιημένη Γεωμετρία UD Composite Hexagonal</i>	<i>39</i>
<i>Εικόνα 5.24: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Epoxy Carbon UD Hexagonal για διαφορετικά Vfs.....</i>	<i>40</i>
<i>Εικόνα 5.25: Γεωμετρία σε διαφορετικά Fiber Volume Fractions για UD Composite Hexagonal.....</i>	<i>40</i>
<i>Εικόνα 5.26: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Geometry" για UD Composite Square με Vf =0.15.....</i>	<i>41</i>
<i>Εικόνα 5.27: Όνομα Υλικού στην ενότητα " Generated Material "</i>	<i>41</i>
<i>Εικόνα 5.28: Διακριτοποιημένη Γεωμετρία UD Composite Square.....</i>	<i>41</i>
<i>Εικόνα 5.29: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Epoxy Carbon UD Square για διαφορετικά Vfs.....</i>	<i>42</i>
<i>Εικόνα 5.30: Γεωμετρία σε διαφορετικά Fiber Volume Fractions για UD Composite Square</i>	<i>42</i>
<i>Εικόνα 5.31: Επιλογή Γεωμετρίας "UD Random"</i>	<i>43</i>
<i>Εικόνα 5.32: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Geometry" για Random UD Composite με Vf =0.15.....</i>	<i>43</i>
<i>Εικόνα 5.33: Όνομα Υλικού στην ενότητα " Generated Material "</i>	<i>44</i>

<i>Εικόνα 5.34: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Variable material" για Random UD Composite</i>	<i>44</i>
<i>Εικόνα 5.35: Διακριτοποιημένη Γεωμετρία Random UD Composite.....</i>	<i>45</i>
<i>Εικόνα 5.36: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Random UD Carbon για διαφορετικά Vfs</i>	<i>46</i>
<i>Εικόνα 5.37: Γεωμετρία σε διαφορετικά Fiber Volume Fractions για Random UD Composite</i>	<i>46</i>
<i>Εικόνα 5.38: Επιλογή Γεωμετρίας "Particle"</i>	<i>47</i>
<i>Εικόνα 5.39: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Geometry" για Particle με $V_f=0.15$</i>	<i>47</i>
<i>Εικόνα 5.40: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Analysis settings" για Particle</i>	<i>48</i>
<i>Εικόνα 5.41: Όνομα Υλικού στην ενότητα "Generated Material"</i>	<i>48</i>
<i>Εικόνα 5.42: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Variable material" για Particle....</i>	<i>49</i>
<i>Εικόνα 5.43: Διακριτοποιημένη Γεωμετρία Particle</i>	<i>49</i>
<i>Εικόνα 5.44: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Particle</i>	<i>50</i>
<i>Εικόνα 5.45: Γεωμετρία σε διαφορετικά Fiber Volume Fractions για Particle</i>	<i>50</i>
<i>Εικόνα 5.46: Επιλογή Γεωμετρίας "Random Particle"</i>	<i>51</i>
<i>Εικόνα 5.47: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Geometry" για Random Particle με $V_f=0.15$</i>	<i>51</i>
<i>Εικόνα 5.48: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Analysis settings" για Random Particle.....</i>	<i>52</i>
<i>Εικόνα 5.49: Όνομα Υλικού στην ενότητα "Generated Material".....</i>	<i>52</i>
<i>Εικόνα 5.50: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Variable material" για Random Particle.....</i>	<i>53</i>
<i>Εικόνα 5.51: Διακριτοποιημένη Γεωμετρία Random Particle</i>	<i>53</i>
<i>Εικόνα 5.52: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Random Particle για διαφορετικά Vfs</i>	<i>54</i>
<i>Εικόνα 5.53: Γεωμετρία σε διαφορετικά Fiber Volume Fractions για Random Particle</i>	<i>54</i>
<i>Εικόνα 5.54: Επιλογή Γεωμετρίας "Chopped Fiber Composite"</i>	<i>55</i>

<i>Εικόνα 5.55: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Geometry" για Chopped Fiber Composite με $V_f=0.15$</i>	56
<i>Εικόνα 5.56: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Analysis settings" για Chopped Fiber Composite</i>	56
<i>Εικόνα 5.57: Όνομα Υλικού στην ενότητα "Generated Material"</i>	57
<i>Εικόνα 5.58: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Variable material" για Chopped Fiber Composite</i>	57
<i>Εικόνα 5.59: Διακριτοποιημένη Γεωμετρία "Chopped Fiber Composite"</i>	58
<i>Εικόνα 5.60: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Chopped Fiber Composite για διαφορετικά V_fs</i>	58
<i>Εικόνα 5.61: Γεωμετρία σε διαφορετικά Fiber Volume Fractions για Chopped Fiber Composite</i>	59
<i>Εικόνα 5.62: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Geometry" για UD Composite Hexagonal με $V_f=0.55$</i>	61
<i>Εικόνα 5.63: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Mesh"</i>	62
<i>Εικόνα 5.64: Διαμόρφωση παραμέτρων στην ενότητα "Analysis settings"</i>	62
<i>Εικόνα 5.65: Όνομα Υλικού στην ενότητα "Constant Material"</i>	63
<i>Εικόνα 5.66 Αποτελέσματα προσομοίωσης για Epoxy Carbon UD με $V_f= 0.55$</i>	63
<i>Εικόνα 5.67: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Epoxy Carbon UD για διαφορετικά V_fs</i>	63
<i>Εικόνα 5.68: Εισαγωγή νέου Υλικού Epoxy – Carbon UD στο Engineering Data</i>	64
<i>Εικόνα 5.69: Επιλογή Γεωμετρίας "Woven Composite"</i>	64
<i>Εικόνα 5.70: Επιλογή Υλικών για Matrix και Yarn για την δημιουργία του Woven</i>	64
<i>Εικόνα 5.71: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Geometry" για Woven</i>	65
<i>Εικόνα 5.72: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Mesh"</i>	65
<i>Εικόνα 5.73: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Analysis settings" για Woven</i>	66
<i>Εικόνα 5.74: Όνομα Υλικού στην ενότητα "Constant Material"</i>	66
<i>Εικόνα 5.75 Διακριτοποιημένη Γεωμετρία Woven</i>	67
<i>Εικόνα 5.76: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Woven</i>	67

<i>Εικόνα 5.77: Αποτελέσματα προσομοίωσης Woven για διαφορετικά Vfs</i>	<i>68</i>
<i>Εικόνα 5.78: Εισαγωγή νέου Υλικού Woven στο Engineering Data</i>	<i>69</i>
<i>Εικόνα 5.79: Προσθήκη Geometry στο Project Schematic.....</i>	<i>69</i>
<i>Εικόνα 5.80: Δημιουργία Πολυστρωματικού στο SpaceClaim Geometry</i>	<i>70</i>
<i>Εικόνα 5.81: Διαστάσεις Πολυστρωματικού Υλικού που δημιουργήθηκε</i>	<i>70</i>
<i>Εικόνα 5.82: Ιδιότητες Υλικού "Epoxy" στο Engineering Data.....</i>	<i>71</i>
<i>Εικόνα 5.83: Επιλογή Γεωμετρίας "User Defined RVE"</i>	<i>71</i>
<i>Εικόνα 5.84: Ανάθεση υλικών που θα χρησιμοποιηθούν και ανάθεση υλικού σε κάθε επιφάνεια του πολυστρωματικού υλικού</i>	<i>72</i>
<i>Εικόνα 5.85: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Mesh" για το πολυστρωματικό υλικό</i>	<i>72</i>
<i>Εικόνα 5.86: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Analysis settings" για το πολυστρωματικό υλικό</i>	<i>73</i>
<i>Εικόνα 5.87: Διακριτοποιημένη Γεωμετρία Πολυστρωματικού Υλικού.....</i>	<i>74</i>
<i>Εικόνα 5.88: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Epoxy-Woven-Epoxy.....</i>	<i>74</i>
<i>Εικόνα 5.89: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Epoxy -UD Carbon-Epoxy</i>	<i>75</i>
<i>Εικόνα 6.1: Σύγκριση τιμών του E1 για διάφορα ποσοστά όγκου ινών</i>	<i>76</i>
<i>Εικόνα 6.2: Σύγκριση τιμών του E2 για διάφορα ποσοστά όγκου ινών</i>	<i>78</i>
<i>Εικόνα 6.3: Σύγκριση τιμών του G12 για διάφορα ποσοστά όγκου ινών</i>	<i>79</i>
<i>Εικόνα 6.4: Σύγκριση τιμών του G23 για διάφορα ποσοστά όγκου ινών</i>	<i>81</i>
<i>Εικόνα 6.5: Σύγκριση τιμών του ν12 για διάφορα ποσοστά όγκου ινών.....</i>	<i>82</i>
<i>Εικόνα 6.6: Σύγκριση τιμών του ν23 για διάφορα ποσοστά όγκου ινών.....</i>	<i>83</i>
<i>Εικόνα 6.7: Σύγκριση τιμών του E1 για διάφορα ποσοστά όγκου ινών για διαφορετικά RVE</i>	<i>84</i>
<i>Εικόνα 6.8: Σύγκριση τιμών του E2 για διάφορα ποσοστά όγκου ινών για διαφορετικά RVE</i>	<i>86</i>
<i>Εικόνα 6.9: Σύγκριση τιμών του G12 για διάφορα ποσοστά όγκου ινών για διαφορετικά RVE</i>	<i>88</i>

<i>Εικόνα 6.10: Σύγκριση τιμών του G_{23} για διάφορα ποσοστά όγκου ινών για διαφορετικά RVE</i>	<i>90</i>
<i>Εικόνα 6.11: Σύγκριση τιμών του ν_{12} για διάφορα ποσοστά όγκου ινών για διαφορετικά RVE</i>	<i>91</i>
<i>Εικόνα 6.12: Σύγκριση τιμών του ν_{23} για διάφορα ποσοστά όγκου ινών για διαφορετικά RVE</i>	<i>93</i>

Κατάλογος Πινάκων

<i>Πίνακας 5.1: Ιδιότητες Υλικού "Carbon".....</i>	<i>28</i>
<i>Πίνακας 5.2: Ιδιότητες Υλικού "Epoxy"</i>	<i>30</i>
<i>Πίνακας 5.3: Τύπος ανισοτροπίας ανάλογα με την γεωμετρία του RVE</i>	<i>60</i>
<i>Πίνακας 6.1: Σύγκριση ελαστικών ιδιοτήτων πολυστρωματικού σύνθετου με Woven και με UD σύνθετο.....</i>	<i>95</i>

1.ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα σύνθετα υλικά αποτελούν μία από τις πλέον σημαντικές κατηγορίες προηγμένων υλικών, με συνεχώς αυξανόμενη χρήση σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών και τεχνολογικών εφαρμογών. Ορίζονται ως μη ομογενή υλικά που προκύπτουν από τον συνδυασμό δύο ή περισσότερων διακριτών φάσεων, οι οποίες διατηρούν την ταυτότητά τους ενώ συνεργάζονται για να προσφέρουν στο τελικό υλικό ιδιότητες ανώτερες από αυτές των αρχικών συστατικών. Η θεμελιώδης αρχή της λειτουργίας των σύνθετων υλικών έγκειται στη συνεργασία μεταξύ της μήτρας και της ενίσχυσης. Η μήτρα παρέχει συνοχή, μορφή και προστασία, ενώ η ενίσχυση, συνήθως σε μορφή ινών, προσδίδει τις κύριες μηχανικές ιδιότητες [1].

Η χρήση των σύνθετων υλικών αυξάνεται λόγω της υψηλής αναλογίας αντοχής προς βάρος, της χαμηλής πυκνότητας, της καλής αντοχής σε διάβρωση και κόπωση, καθώς και του χαμηλού συντελεστή θερμικής διαστολής. Επιπλέον, τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν δυνατότητα απορρόφησης κραδασμών και καλή θερμική μόνωση, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις συνδυάζουν εξειδικευμένα χαρακτηριστικά, όπως αντίσταση στη φλόγα, ηλεκτρομαγνητική θωράκιση και ιδιότητες αυτοϊασης [2]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα φυσικού σύνθετου υλικού αποτελεί το ξύλο, όπου οι ίνες κυτταρίνης περιβάλλονται από μήτρα λιγνίνης.



Εικόνα 1.1:Σύνθετα στην βιομηχανία σήμερα:(a) Σύνθετα πτερύγια ανεμογεννητριών, (b) Οχήματα μεταφοράς με αμάξωμα από σύνθετο υλικό (TPI Σύνθετα), (c) Σκίτσο πρωτότυπου, cockpit από σύνθετα ανθρακονήματα και χωροδικτύωμα αλουμινίου BMW Megacity[2]

1.2 ΕΙΔΗ ΜΗΤΡΑΣ

Η μήτρα αποτελεί τη συνεχή φάση του σύνθετου υλικού και είναι υπεύθυνη για την προστασία και τη στήριξη της ενίσχυσης, καθώς και για τη μεταφορά των φορτίων που ασκούνται μέσω της διεπιφάνειας, στις ίνες αλλά και σε όλο το σύνθετο. Η ταξινόμηση των σύνθετων υλικών με βάση τη μήτρα οδηγεί σε τρεις κύριες κατηγορίες: πολυμερική, κεραμική και μεταλλική.

Οι πολυμερικές μήτρες είναι οι πλέον διαδεδομένες, καθώς συνδυάζουν χαμηλό κόστος, ευκολία κατεργασίας και ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες. Διακρίνονται σε θερμοπλαστικές και θερμοσκληρυνόμενες. Οι θερμοπλαστικές, όπως το πολυαιθυλένιο και το πολυστυρένιο, χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη αντοχή αλλά προσφέρουν ευκολία στην ανακύκλωση και χρήση σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης. Οι θερμοσκληρυνόμενες μήτρες, όπως οι εποξικές και πολυεστερικές ρητίνες, εμφανίζουν υψηλότερη αντοχή και ανθεκτικότητα, αποτελώντας την κυρίαρχη επιλογή σε αεροδιαστημικές και αεροναυπηγικές εφαρμογές [3, 4].

Οι κεραμικές μήτρες παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση, στις υψηλές θερμοκρασίες και στις χημικές επιδράσεις. Ωστόσο, η ψαθυρότητά τους και η ευαισθησία σε μικρορωγμές μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία υπό φορτίο [5].

Οι μεταλλικές μήτρες προσφέρουν ολκιμότητα, υψηλή αντοχή σε θλίψη και δυνατότητα χρήσης σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών. Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, εμφανίζουν μεγαλύτερη πυκνότητα σε σχέση με τις πολυμερικές μήτρες και η κατεργασία τους είναι πιο απαιτητική [6].

1.3 ΕΙΔΗ ΙΝΩΝ

Η ενίσχυση αποτελεί το δεύτερο βασικό συστατικό των σύνθετων υλικών και είναι υπεύθυνη κυρίως για την αντοχή και την ακαμψία. Οι ίνες χρησιμοποιούνται είτε σε συνεχή είτε σε ασυνεχή μορφή, ενώ ο προσανατολισμός και η διάταξή τους επηρεάζουν καθοριστικά τις ιδιότητες του τελικού υλικού.

Οι κυριότερες μορφές ενίσχυσης είναι:

- Συνεχείς ίνες: μακριές ίνες που τοποθετούνται σε συγκεκριμένη κατεύθυνση. Οι ίνες αυτές μπορεί να έχουν:

- Μονοκατευθυντική διάταξη (Unidirectional),
- Δικατευθυντική διάταξη (Bidirectional), όπως υφασμένα ή ραμμένα πλέγματα
- Τυχαία διάταξη (Random)

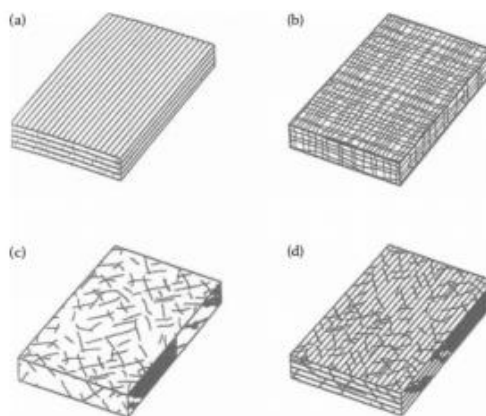
- Ασυνεχείς (κοντές) ίνες: διεσπαρμένες τυχαία στη μήτρα ή προσανατολισμένες κατά προτιμώμενο άξονα (Preferential orientation).

- Σωματιδιακές ενισχύσεις και whiskers : μικρά σωματίδια, κόκκοι ή νιφάδες που μπορούν να είναι τυχαία κατανεμημένα ή σε προκαθορισμένη κατεύθυνση.

- Δομικές μορφές ινών:

- Laminate configuration: περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα φύλλα (laminate) ενσωματωμένα σε πολυστρωματική διάταξη και σύνθετα τύπου «sandwich», όπου οι ίνες ενσωματώνονται σε πολυστρωματική ή πιο σύνθετη γεωμετρία για αυξημένη αντοχή και ακαμψία

- Υβριδική δομή (hybrid structures): περιλαμβάνει διαφορετικά υλικά ή διαφορετική ενίσχυση σε διαφορετικά φύλλα, π.χ. συνδυασμός βορίου και άνθρακα σε ένα φύλλο ή διμεταλλικά laminates. [1, 7].

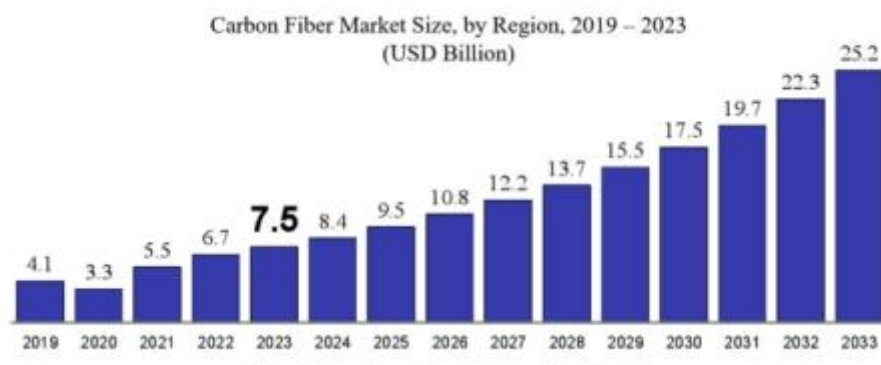


Εικόνα 1.2: Τύποι σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες (a) Σύνθετο υλικό από συνεχείς ίνες, (b) Πολυδιέυθυντο σύνθετο υλικό (Woven composite), (c) Σύνθετο υλικό από ασυνεχείς (κοντές) ίνες διεσπαρμένες τυχαία και (d) Υβριδικό σύνθετο υλικό [2].

Η ταξινόμηση των σύνθετων υλικών με βάση το υλικό της μήτρας συνδέεται άμεσα με τα είδη ινών που χρησιμοποιούνται, τα οποία καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος.

Οι ίνες υάλου αποτελούν τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες ίνες, καθώς προσφέρουν χαμηλό κόστος, ικανοποιητική αντοχή, χαμηλή πυκνότητα και υψηλή αντοχή στη διάβρωση. Χρησιμοποιούνται σε κατασκευές, σωλήνες, σκάφη και άλλες εφαρμογές όπου το κόστος αποτελεί καθοριστικό παράγοντα. Ωστόσο, υστερούν σε ακαμψία σε σχέση με τις ίνες άνθρακα, γεγονός που περιορίζει τη χρήση τους σε εφαρμογές αιχμής [8].

Οι ίνες άνθρακα διαθέτουν εξαιρετική αναλογία αντοχής και ακαμψίας προς βάρος, μεγάλη αντοχή σε κόπωση και διάβρωση και πολύ χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής. Παρουσιάζουν όμως αυξημένο κόστος και χαμηλή αντοχή σε κρούση, γεγονός που περιορίζει τη χρήση τους κυρίως στην αεροδιαστημική και αεροναυπηγική βιομηχανία [9].



Εικόνα 1.3: Διαχρονική εξέλιξη της ζήτησης ανθρακονημάτων σε δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ το διάστημα 2019–2023[10].

Οι ίνες αραμιδίου, με χαρακτηριστικό παράδειγμα το Kevlar, εμφανίζουν πολύ υψηλή αντοχή σε κρούση και χαμηλή πυκνότητα. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε αλεξίσφαιρα γιλέκα, στρατιωτικό εξοπλισμό και αθλητικές κατασκευές υψηλών απαιτήσεων, ενώ η χαμηλή αντοχή τους σε θλίψη περιορίζει τη χρήση τους σε συγκεκριμένες εφαρμογές [11].

2.Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method , FEM) αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα αριθμητικά εργαλεία για την επίλυση προβλημάτων μηχανικής. Η βασική της αρχή είναι η διακριτοποίηση της συνεχούς γεωμετρίας ενός φορέα σε πεπερασμένα στοιχεία που συνδέονται μέσω κόμβων. Με τον τρόπο αυτό, οι διαφορικές εξισώσεις που διέπουν το πρόβλημα αντικαθίστανται από ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, του οποίου η λύση παρέχει προσεγγιστικά τις επιθυμητές μηχανικές αποκρίσεις σε συγκεκριμένα σημεία της κατασκευής [12].

Η μέθοδος έχει εφαρμογές σε ευρύ φάσμα πεδίων, όπως η ανάλυση δομικών κατασκευών, η αεροναυπηγική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η μηχανική ρευστών και στερεών, αλλά και στη μελέτη σύνθετων υλικών [13]. Η μεγάλη της ευελιξία και η δυνατότητα χειρισμού πολύπλοκων γεωμετριών και ανομοιογενών υλικών την καθιστούν το κυρίαρχο εργαλείο στην αριθμητική μηχανική.

2.1 ΟΜΟΓΕΝΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΟΓΚΟΥ (RVE)

Η απευθείας προσομοίωση σύνθετων υλικών σε όλες τις μικροδομικές λεπτομέρειες είναι υπολογιστικά απαγορευτική, καθώς απαιτεί τεράστιο αριθμό στοιχείων. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος χρησιμοποιείται η μέθοδος της ομογενοποίησης (homogenization), όπου οι τοπικές μικροδομικές ιδιότητες μεταφράζονται σε ισοδύναμες μακροσκοπικές ιδιότητες [14].

Κεντρικό εργαλείο της ομογενοποίησης είναι το Representative Volume Element (RVE), δηλαδή το ελάχιστο αντιπροσωπευτικό τμήμα ενός ανομοιογενούς υλικού που περιλαμβάνει όλα τα βασικά χαρακτηριστικά της μικροδομής του. Η σωστή επιλογή του μεγέθους του RVE είναι κρίσιμη: ένα RVE πολύ μικρού μεγέθους μπορεί να μην περιλαμβάνει επαρκή αριθμό φάσεων ή χαρακτηριστικών της μικροδομής, ενώ υπερβολικά μεγάλο RVE αυξάνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος χωρίς ουσιαστικό όφελος στην ακρίβεια. Η συνδυαστική χρήση FEM και RVE επιτρέπει την πρόβλεψη των μέσων μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών, όπως το μέτρο ελαστικότητας και ο

συντελεστής Poisson, χωρίς την ανάγκη προσομοίωσης ολόκληρης της μικροδομής σε λεπτομερή κλίμακα. Λογισμικά όπως το ANSYS χρησιμοποιούνται για την επίλυση του RVE και την εξαγωγή των ισοδύναμων μακροσκοπικών ιδιοτήτων, καθιστώντας δυνατή την ανάλυση σύνθετων υλικών με υψηλή ακρίβεια και μειωμένο υπολογιστικό κόστος [13, 14].

2.2 ΠΕΡΙΟΔΙΚΕΣ ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Η ακρίβεια της ομογενοποίησης εξαρτάται άμεσα από τις οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στο RVE. Μία από τις πιο διαδεδομένες προσεγγίσεις είναι οι περιοδικές οριακές συνθήκες (Periodic Boundary Conditions, PBCs). Οι PBCs εφαρμόζονται στο RVE προκειμένου να διασφαλίσουν ότι αυτό συμπεριφέρεται ως μέρος μιας απείρως επαναλαμβανόμενης μικροδομής. Ο συνδυασμός κινηματικών και φυσικών οριακών συνθηκών επιβάλλει στις άκρες του RVE να παραμορφώνονται με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρείται η χωρική περιοδικότητα, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα τη συμβατότητα των μετατοπίσεων και την ισορροπία των τάσεων στα αντίθετα όριά του [15].

Η θεμελιώδης αρχή πίσω από τις PBCs είναι η συνθήκη Hill–Mandel, σύμφωνα με την οποία η μέση πυκνότητα ενέργειας παραμόρφωσης στη μικροδομή πρέπει να ισούται με την αντίστοιχη μακροσκοπική [16]. Έτσι, οι PBCs θεωρούνται η πλέον αξιόπιστη επιλογή για την εξαγωγή ελαστικών ιδιοτήτων σύνθετων υλικών με χρήση RVE [14], [15].

2.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ANSYS

Η ανάλυση του RVE αποτελεί θεμελιώδη μέθοδο για την αξιολόγηση των μακροσκοπικών ελαστικών ιδιοτήτων σύνθετων υλικών μέσω της ομογενοποίησης της μικροδομής τους. Στο ANSYS, η εφαρμογή αυτής της μεθόδου επιτυγχάνεται με τη χρήση περιοδικών οριακών συνθηκών οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν είτε μέσω constraint equations (CE) και pilot nodes , είτε με scripting χρησιμοποιώντας APDL ή Python για αυτοματοποίηση της διαδικασίας. Με αυτή τη διαδικασία, οι κόμβοι σε αντίθετες πλευρές του RVE συνδέονται περιοδικά, διασφαλίζοντας την ακριβή προσομοίωση της μικροδομής και την αξιόπιστη εξαγωγή του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson.

Η μελέτη των Sharma et al. (2021) παρουσίασε την κατασκευή τρισδιάστατων RVE με rod- shaped glass fillers σε εποξική μήτρα, χρησιμοποιώντας περιοδικές διατάξεις

(square και hexagonal packing) και πεπερασμένα στοιχεία υψηλής ακρίβειας. Η ανάλυση έδειξε ότι η αύξηση του ποσοστού ενισχυτικών ινών οδηγεί σε σημαντική αύξηση του μέτρου ελαστικότητας και μικρή μείωση του λόγου Poisson. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συμφωνούν καλά με πειραματικά δεδομένα, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία της μεθόδου και τη σημασία της εφαρμογής σωστών περιοδικών οριακών συνθηκών [17, 18, 19].

3.ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

3.1. ΚΑΝΟΝΑΣ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ ROM (RULE OF MIXTURE)

Στη μελέτη των συνθέτων υλικών, διάφορα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για να εκτιμήσουν τις μηχανικές ιδιότητες των μονόκατευθυντικών (UD) συνθέτων. Δύο από τα πιο γνωστά είναι τα μοντέλα του Voigt και του Reuss, που παρουσιάστηκαν στα τέλη του 19ου και στις αρχές του 20ού αιώνα αντίστοιχα [20, 21]. Το μοντέλο του Voigt αναφέρεται επίσης ως κανόνας του μείγματος (ROM) ή μοντέλο ισοπαραμόρφωσης, ενώ το μοντέλο του Reuss είναι γνωστό ως αντίστροφος κανόνας του μείγματος (IROM).

Οι ελαστικές ιδιότητες ενός συνθέτου μπορούν να εκτιμηθούν με βάση αυτά τα δύο πλαίσια. Το ROM υποθέτει ότι όλα τα συστατικά του σύνθετου υφίστανται την ίδια παραμόρφωση, ενώ το IROM θεωρεί ότι όλα τα συστατικά υφίστανται την ίδια ένταση [22, 23]. Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών, τα μοντέλα αυτά αποτελούν βασικό εργαλείο για την πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς των συνθέτων και χρησιμοποιούνται ευρέως στην επιστήμη και τη μηχανική των υλικών.

$$E_{11} = V^f \cdot E_{11}^f + V^m \cdot E^m \quad (3.1)$$

$$\nu_{12} = V^f \cdot \nu_{12}^f + V^m \cdot \nu^m \quad (3.2)$$

$$E_{22} = \frac{E_{22}^f \cdot E^m}{E^m \cdot V^f + E_{22}^f \cdot V^m} \quad (3.3)$$

$$G_{12} = \frac{G_{22}^f \cdot G^m}{G^m \cdot V^f + G_{22}^f \cdot V^m} \quad (3.4)$$

Με 3.1 και 3.2 σύμφωνα με το μοντέλο Voigt και 3.3 και 3.4 σύμφωνα με το μοντέλο Reuss.

3.2 HMI-ΕΜΠΕΙΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Τα ημιεμπειρικά μοντέλα αναπτύχθηκαν για να διορθώσουν τις εκτιμήσεις του μοντέλου ROM όπου χρειάζεται, εισάγοντας διορθωτικούς συντελεστές. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τρία σημαντικά μοντέλα: το τροποποιημένο κανόνα του μείγματος (Modified Rule of Mixture), το μοντέλο Halpin-Tsai [24] και το μοντέλο Chamis [25].

Αυτά τα μοντέλα συνδυάζουν θεωρητικές προσεγγίσεις με εμπειρικά δεδομένα, επιτρέποντας μεγαλύτερη ακρίβεια στην πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων των συνθέτων σε σχέση με το απλό ROM. Χρησιμοποιούνται εκτενώς στη μηχανική των υλικών για την εκτίμηση ελαστικών χαρακτηριστικών, ειδικά σε περιπτώσεις όπου οι ιδιότητες των συστατικών ή η μικροδομή του συνθέτου αποκλίνουν από τις ιδανικές υποθέσεις του ROM.

3.2.1 Τροποποιημένος Κανόνας Μειγμάτων (Modified Rule of Mixtures – MROM)

Η ανάγκη για το μοντέλο Modified Rule of Mixture (MROM) προκύπτει από το γεγονός ότι τα αποτελέσματα που παρέχει το βασικό ROM είναι σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα και τα δεδομένα από ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για τις παραμέτρους E_1 και ν_{12} . Ωστόσο, για τις παραμέτρους E_{22} και G_{12} , το ROM παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα και τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Το MROM εισάγει κατάλληλους διορθωτικούς συντελεστές για την ακρίβεια των E_{22} και G_{12} επιτρέποντας μια πιο αξιόπιστη πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών.

Η τροποποιημένη σχέση δίνεται από:

$$\frac{1}{E_{22}} = \frac{\eta^f \cdot V^f}{E_{22}^f} + \frac{\eta^m \cdot V^m}{E^m} \quad (3.5)$$

Όπου οι παράγοντες η^f , η^m , υπολογίζονται ως εξής:

$$\eta^f = \frac{E_{11}^f \cdot V^f + [(1 - \nu_{12}^f \cdot \nu_{21}^f) \cdot E^m + \nu^m \cdot \nu_{12}^f \cdot E_{11}^f] \cdot V^m}{E_{11}^f \cdot V^f + E^m \cdot V^m} \quad (3.6)$$

$$\eta^m = \frac{[(1 - \nu^{m^2}) \cdot E_{11}^f - (1 - \nu^m \cdot \nu_{12}^f) \cdot E^m] \cdot V^f + E^m \cdot V^m}{E_{11}^f \cdot V^f + E^m \cdot V^m} \quad (3.7)$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{\frac{V_f}{G_{12}^f} + \frac{\eta' \cdot V^m}{G_m}}{V^f + \eta' \cdot V^m} \quad (3.8)$$

Όπου για τον παράγοντα η ισχύει: $0 < \eta' < 1$ και συνήθως λαμβάνεται $\eta' = 0,6$.

3.2.2 Μοντέλο Halpin–Tsai (Halpin–Tsai model)

Το μοντέλο Halpin–Tsai [24] αποτελεί ημιεμπειρικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για τη διόρθωση του εγκάρσιου μέτρου ελαστικότητας E_{22} (transversal Young's modulus) και του διαμήκους μέτρου διάτμησης G_{12} (longitudinal shear modulus) στα σύνθετα υλικά. Για τις παραμέτρους E_{11} και ν_{12} εξακολουθεί να εφαρμόζεται ο βασικός κανόνας του μείγματος (ROM). Το μοντέλο αυτό συνδυάζει θεωρητικές και εμπειρικές προσεγγίσεις, προσφέροντας αυξημένη ακρίβεια στην πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων σε σχέση με το απλό ROM. Οι εξισώσεις του μοντέλου δίνονται ως εξής:

$$E_{22} = E^m \cdot \left(\frac{1 + \zeta \eta V^f}{1 - \eta V^f} \right) \quad (3.9)$$

$$G_{12} = G^m \cdot \left(\frac{1 + \zeta \eta V^f}{1 - \eta V^f} \right) \quad (3.10)$$

$$\eta = \frac{\frac{M^f}{M^m} - 1}{\frac{M^f}{M^m} + \zeta} \quad (3.11)$$

Με $\zeta=1$ και 2, $M=E$ ή G για E_{22} και G_{12} αντίστοιχα.

3.2.3. Μοντέλο Chamis (Chamis model)

Το μοντέλο Chamis [25] αποτελεί μικρομηχανικό μοντέλο και θεωρείται το πλέον χρησιμοποιημένο και αξιόπιστο για την εκτίμηση όλων των ελαστικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, τα E_{11} και ν_{12} υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο όπως στο ROM, ενώ για τις υπόλοιπες παραμέτρους η κλασική συνιστώσα του όγκου ίνας (V^f) αντικαθίσταται από την τετραγωνική της ρίζα. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει ακριβέστερη πρόβλεψη των μηχανικών χαρακτηριστικών των συνθέτων, ιδιαίτερα για τις εγκάρσιες και διατμητικές ιδιότητες.

$$E_{11} = V^f \cdot E_{11}^f + V^m \cdot E^m \quad (3.12)$$

$$E_{22} = \frac{E^m}{1 - \sqrt{V^f} \left(1 - \frac{E^m}{E_{22}^f}\right)} \quad (3.13)$$

$$\nu_{12} = V^f \cdot \nu_{12}^f + V^m \cdot \nu^m \quad (3.14)$$

$$G_{12} = \frac{G^m}{1 - \sqrt{V^f} \left(1 - \frac{G^m}{G_{12}^f}\right)} \quad (3.15)$$

$$G_{23} = \frac{G^m}{1 - \sqrt{V^f} \left(1 - \frac{G^m}{G_{23}^f}\right)} \quad (3.16)$$

3.3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΟΜΟΓΕΝΟΠΟΙΗΣΗΣ

3.3.1. Μοντέλο Mori-Tanaka (M-T)

Το μοντέλο Mori-Tanaka αναπτύχθηκε αρχικά από τους Mori και Tanaka [26] και αποτελεί ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο εργαλείο για τη μοντελοποίηση διαφόρων τύπων σύνθετων υλικών. Πρόκειται για ένα μοντέλο «ενθέσεων», στο οποίο οι ίνες

προσομοιώνονται ως ενθέσεις που ενσωματώνονται σε ένα ομογενές μέσο. Η διατύπωση του Benveniste [27] για το μοντέλο Mori–Tanaka δίνεται από τη σχέση:

$$C_{MT} = C_m + [V_f \langle (C_f - C_m) \cdot A_{Eshelby} \rangle] \cdot [V_m \cdot I + V_f \cdot (A_{Eshelby})]^{-1} \quad (3.17)$$

Όπου C_f και C_m είναι οι μήτρες ακαμψίας της μήτρας και της φάσης ενίσχυσης (ενθέσεις), αντίστοιχα. Τα V_f και V_m αντιπροσωπεύουν τα ποσοστά όγκου της φάσης ενίσχυσης και της μήτρας. Το A είναι ο τελεστής συγκέντρωσης παραμόρφωσης που προκύπτει από τη λύση για αραιά ενθέματα (dilute solution) και δίνεται αποτην παρακάτω σχέση:

$$A_{Eshelby} = [I + E \cdot C_m^{-1} \cdot (C_f - C_m)]^{-1} \quad (3.18)$$

Ο τελεστής A εξαρτάται από τον τελεστή Eshelby (E), ο οποίος καθορίζεται από το σχήμα της ένωσης (inclusion) και τον συντελεστή Poisson της μήτρας. Περαιτέρω λεπτομέρειες για τον τελεστή Eshelby μπορούν να βρεθούν στη μελέτη του Mura [28]. Ο τελεστής Eshelby υπολογίζεται για κάθε ένθεση μαζί με τη μήτρα ακαμψίας, προσφέροντας ακριβείς προβλέψεις των μηχανικών ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού.

3.3.2. Bridging model

Πρόσφατα, αναπτύχθηκε ένα νέο μικρομηχανικό μοντέλο από τους Huang et al. [29,30], γνωστό ως μοντέλο Bridging. Το μοντέλο αυτό έχει σχεδιαστεί για την πρόβλεψη της ακαμψίας και της αντοχής των μονοκατευθυντικών (UD) σύνθετων υλικών. Οι ελαστικές ιδιότητες σύμφωνα με το μοντέλο Bridging δίνονται από τις σχέσεις:

$$E_{11} = V^f \cdot E_{11}^f + V^m \cdot E^m \quad (3.19)$$

$$E_{22} = \frac{(V_f + V_m \cdot a_{11})(V_f + V_m \cdot a_{22})}{(V_f + V_m \cdot a_{11})(V_f \cdot S_{22}^f + V_m \cdot a_{22} \cdot S_{22}^m) + V_f \cdot V_m (S_{21}^m \cdot S_{21}^f) a_{12}} \quad (3.20)$$

$$v_{12} = V^f \cdot v_{12}^f + V^m \cdot v^m \quad (3.21)$$

$$G_{12} = \frac{(V^f + V^m \cdot a_{66}) G_{12}^f G_m}{V_f \cdot G_m + V_m \cdot a_{66} \cdot G_{12}^f} \quad (3.22)$$

Τα a_{ij} είναι τα στοιχεία της μήτρας Bridging A [29,30]. Οι Sm_{ij} και Sf_{ij} είναι τα στοιχεία των μητρών ευκαμψίας (Compliance matrices) των ινών και της μήτρας αντίστοιχα [31].

3.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ MATERIAL DESIGNER

Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζεται η μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων στο Material Designer, οι υποθέσεις που τίθενται και οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των ελαστικών ιδιοτήτων των συνθέτων υλικών.

3.4.1 Ομογενοποίηση στο Material Designer

Το Material Designer βασίζεται στην υπόθεση ότι το υλικό προς μελέτη διαθέτει μια αντιπροσωπευτική δομή μικροκλίμακας, γνωστή ως RVE, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Το RVE αποτελεί το μικρότερο τμήμα του υλικού που μπορεί να αναπαραστήσει τις μακροσκοπικές του ιδιότητες. Για περιοδικά υλικά, η αναγνώριση του RVE είναι σχετικά απλή, καθώς αντιστοιχεί σε μια μοναδιαία κυψελίδα που μπορεί να επεκταθεί και στις τρεις διαστάσεις, καλύπτοντας τη συνολική συμπεριφορά του σύνθετου.

Για μη περιοδικά υλικά, η επιλογή του RVE είναι πιο περίπλοκη. Στη βιβλιογραφία προτείνονται διάφορες μεθοδολογίες για την επιλογή του κατάλληλου RVE. Μια από αυτές είναι η μέθοδος εμπλουτισμού του περιβλήματος, η οποία περιλαμβάνει την προσομοίωση διαφορετικών RVE και την αξιολόγηση των μακροσκοπικών ιδιοτήτων τους. Εάν οι ιδιότητες δεν μεταβάλλονται σημαντικά μεταξύ διαφορετικών RVE, το επιλεγμένο RVE θεωρείται αντιπροσωπευτικό. Αν, όμως, οι ιδιότητες παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις, απαιτείται η επανεπιλογή του RVE.

Η διαδικασία ομογενοποίησης ξεκινά με τη σωστή επιλογή του RVE, η οποία περιλαμβάνει τη σχεδίαση της γεωμετρίας και την ανάθεση των υλικών στις επιμέρους φάσεις του σύνθετου. Ακολουθεί η διακριτοποίηση της γεωμετρίας μέσω πλέγματος (Meshing) και τελικά, ο υπολογισμός των επιθυμητών ιδιοτήτων του υλικού, όπως τα μέτρα ελαστικότητας και οι συντελεστές Poisson [32-36].

3.4.2 Υπολογισμός γραμμικών ελαστικών ιδιοτήτων

Παραδοχές του Material Designer για Ομογενοποίηση Σύνθετων Υλικών: για την ακριβή μοντελοποίηση σύνθετων υλικών μέσω αριθμητικών μεθόδων, είναι απαραίτητο να τεθούν συγκεκριμένες παραδοχές. Αυτές οι παραδοχές εξασφαλίζουν τη σωστή λειτουργία των αλγορίθμων και την ακριβή αναπαράσταση των φυσικών φαινομένων.

- *Σύνθετα Υλικά με Ευθύγραμμες Ίνες (Unidirectional Σύνθετα):*

- Τα UD σύνθετα αποτελούνται από μία ισοτροπική γραμμικά ελαστική μήτρα και από ισοτροπικές ή διαμήκης ορθοτροπικές (σε μία κατεύθυνση) γραμμικά ελαστικές ίνες.

- Οι ίνες είναι τέλεια ευθυγραμμισμένες με τον άξονα X του RVE.
- Οι ίνες είναι άπειρες, κυλινδρικές και έχουν όλες την ίδια διάμετρο
- Οι ίνες σχηματίζουν ένα κανονικό (περιοδικό) μοτίβο.
- Η σύνδεση μεταξύ ινών και μήτρας είναι τέλεια.

- *Υφασμένα Σύνθετα Υλικά (Woven Σύνθετα):*

- Τα υφασμένα σύνθετα αποτελούνται από μία ισοτροπική γραμμικά ελαστική μήτρα και από ισοτροπικά ή διαμήκως ορθοτροπικά (σε μία κατεύθυνση) γραμμικά ελαστικά νημάτια (yarns).

- Το κλάσμα όγκου των ινών παραμένει σταθερό.
- Το RVE είναι περιοδικό (το μοτίβο ύφανσης είναι κανονικό και τα στρώματα του υφασμένου σύνθετου τοποθετούνται ακριβώς το ένα πάνω στο άλλο)

- *Σύνθετα με Ενίσχυση Σωματιδίων (Particle Reinforced Σύνθετα):*

- Τα σύνθετα με σωματιδιακή ενίσχυση αποτελούνται από μία ισοτροπική γραμμικά ελαστική μήτρα και από ισοτροπικό γραμμικά ελαστικό υλικό σωματιδίων.

- Τα σωματίδια είναι διατεταγμένα σε κανονικό (περιοδικό) μοτίβο.
- Τα σωματίδια είναι σφαιρικά. Η διάμετρός τους είναι σταθερή.

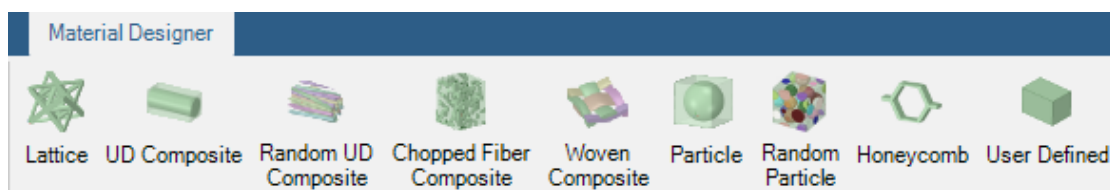
- Η σύνδεση μεταξύ σωματιδίων και μήτρας είναι τέλεια.
- *Σύνθετα με Τυχαία Σωματιδιακή Ενίσχυση (Random Particle Reinforced Σύνθετα):*
 - Τα σύνθετα με τυχαία σωματίδια αποτελούνται από μία ισοτροπική γραμμικά ελαστική μήτρα και από ισοτροπικό γραμμικά ελαστικό υλικό σωματιδίων.
 - Τα σωματίδια είναι σφαιρικά. Η διάμετρος ακολουθεί την καθορισμένη κατανομή.
 - Η θέση των σωματιδίων είναι τυχαία.
 - Στην περίπτωση κοίλων σωματιδίων, το πάχος τοιχώματος είναι ίδιο για όλα τα σωματίδια.
 - Το RVE είναι περιοδικό.
 - Η σύνδεση μεταξύ σωματιδίων και μήτρας είναι τέλεια.
- *Προσαρμοσμένα RVE (User Defined RVE):*
 - Κάθε φάση του υλικού αποτελείται από γραμμικό ελαστικό υλικό
 - Το RVE είναι ένας κύβος
 - Όλα τα υλικά βρίσκονται στο κύριο μέρος της προσομοίωσης
 - Η επιφάνεια του κάθε υλικού δεν μπορεί να μετακινηθεί.
 - Η ολική γεωμετρία είναι πακτωμένη.
- *Σύνθετα Υλικά με Τυχαίες (Μη Ευθυγραμμισμένες) UD Ίνες (Random Misaligned UD Σύνθετα):*
 - Τα τυχαία UD σύνθετα αποτελούνται από μία ισοτροπική γραμμικά ελαστική μήτρα και από ισοτροπικές ή διαμήκως ορθοτροπικές (σε μία κατεύθυνση) γραμμικά ελαστικές ίνες.
 - Οι ίνες είναι άπειρες, κυλινδρικές και έχουν όλες την ίδια διάμετρο.
 - Η σύνδεση μεταξύ ινών και μήτρας είναι τέλεια.
 - Ο μέσος προσανατολισμός των ινών είναι προς την κατεύθυνση X.
- *Σύνθετα Υλικά με κοντές Ίνες (Short Fiber Σύνθετα):*

- Τα σύνθετα με κοντές ίνες αποτελούνται από μία ισοτροπική γραμμικά ελαστική μήτρα και από ισοτροπικές ή διαμήκως ορθοτροπικές (σε μία κατεύθυνση) γραμμικά ελαστικές ίνες.
- Οι ίνες είναι κύλινδροι πεπερασμένου μήκους. Το μήκος και η διάμετρος είναι ίδια για όλες τις ίνες.
- Το RVE είναι περιοδικό.
- Η σύνδεση μεταξύ ινών και μήτρας είναι τέλεια.

Για περαιτέρω μελέτη και εφαρμογή αυτών των παραδοχών, μπορείτε να ανατρέξετε στον οδηγό χρήσης του Material Designer της ANSYS [37] για γενικές πληροφορίες σχετικά με την ομογενοποίηση σύνθετων υλικών, μπορείτε να ανατρέξετε στο άρθρο της COMSOL [38].

4.ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

Για την επίλυση προβλημάτων στο Material Designer απαιτείται η τήρηση συγκεκριμένης μεθοδολογίας. Το πρώτο στάδιο της διαδικασίας αφορά την επιλογή του RVE. Το Material Designer παρέχει στον χρήστη διάφορες προκαθορισμένες επιλογές RVE, οι οποίες απεικονίζονται στην Εικ. 4.1



Εικόνα 4.1:Επιλογές RVE στο Material Designer

4.1 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΩΝ

Όπως αναφέρθηκε, τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερες επιμέρους φάσεις. Η προσομοίωση σύνθετων δομών προϋποθέτει την ορθή εισαγωγή και ανάθεση των υλικών στο μοντέλο. Αφού δημιουργηθούν τα υλικά, απαιτείται ο ακριβής καθορισμός των ελαστικών τους ιδιοτήτων (Εικ. 4.2), ώστε να διασφαλιστεί η αξιοπιστία της προσομοίωσης. Η δημιουργία και καθορισμός των ελαστικών ιδιοτήτων τους γίνεται στο πεδίο *Engineering Data* του Material Designer.

Properties of Outline Row 4: Carbon			
	A	B	
1	Property	Value	
2	 Material Field Variables	 Table	
3	 Orthotropic Elasticity		
4	Young's Modulus X direction	2,32E+05	MPa
5	Young's Modulus Y direction	15000	MPa
6	Young's Modulus Z direction	15000	MPa
7	Poisson's Ratio XY	0,279	
8	Poisson's Ratio YZ	0,4	
9	Poisson's Ratio XZ	0,279	
10	Shear Modulus XY	24000	MPa
11	Shear Modulus YZ	5033,6	MPa
12	Shear Modulus XZ	24000	MPa

Εικόνα 4.2:Εισαγωγή Υλικών – Ιδιοτήτων στο Engineering Data

4.2 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

Το επόμενο βήμα της διαδικασίας αφορά τη διακριτοποίηση της γεωμετρίας που πρόκειται να μελετηθεί. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέσω της επιλογής *Mesh*, όπου ο χρήστης καθορίζει τις απαραίτητες παραμέτρους ανάλογα με τις απαιτήσεις της προσομοίωσης (Εικ. 4.3).

Options - Mesh

General

Maximum size: P

☐ Adapt towards edges

☒ Use Block Meshing

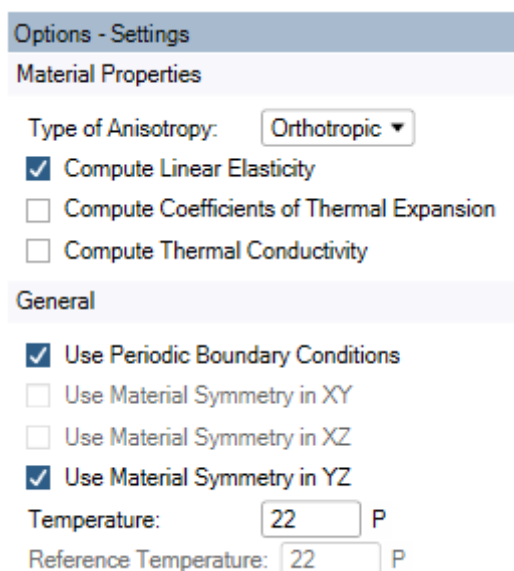
☒ Use Conformal Meshing

☐ Use Periodic Meshing

Εικόνα 4.3: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Mesh"

4.3 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Στην κατηγορία *Analysis Settings* καθορίζονται οι υπολογισμοί που θα εκτελεστούν καθώς και οι αντίστοιχες οριακές συνθήκες. Η σωστή διαμόρφωση των ρυθμίσεων αυτών είναι κρίσιμη για την ορθή εκτέλεση της προσομοίωσης (Εικ. 4.4).

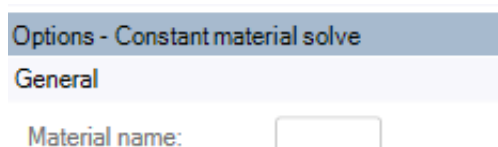


The screenshot shows the 'Options - Settings' dialog box. The 'Material Properties' section is active, showing 'Type of Anisotropy' set to 'Orthotropic'. Below it are three checkboxes: 'Compute Linear Elasticity' (checked), 'Compute Coefficients of Thermal Expansion' (unchecked), and 'Compute Thermal Conductivity' (unchecked). The 'General' section is also visible, showing 'Use Periodic Boundary Conditions' (checked), 'Use Material Symmetry in XY' (unchecked), 'Use Material Symmetry in XZ' (unchecked), and 'Use Material Symmetry in YZ' (checked). At the bottom, 'Temperature' is set to 22 P and 'Reference Temperature' is also set to 22 P.

Εικόνα 4.4: Διαμόρφωση παραμέτρων στην ενότητα "Analysis settings"

4.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η διαδικασία επίλυσης ξεκινά με την είσοδο του ονόματος του υλικού (Εικ. 4.5) και στην συνέχεια την επιλογή *Complete*, μέσω της οποίας εκτελείται η προσομοίωση. Με την ολοκλήρωση της ανάλυσης, παρέχεται η δυνατότητα αποθήκευσης των ιδιοτήτων του νέου υλικού, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί σε μελλοντικές αναλύσεις ή σε διαφορετικά υπολογιστικά μοντέλα.



The screenshot shows the 'Options - Constant material solve' dialog box. The 'General' section is active, showing a 'Material name' field with an empty text box next to it.

Εικόνα 4.5: Πλαίσιο ονόματος υλικού στην ενότητα "Constant Material"

4.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΘΟΤΡΟΠΙΚΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ

Οι παρακάτω εξισώσεις περιγράφουν τον υπολογισμό των ορθοτροπικών ελαστικών σταθερών για μία περιοδική μοναδιαία κυψελίδα. Για την εκτέλεση του υπολογισμού εξετάζονται έξι περιπτώσεις φόρτισης: τρεις δοκιμές εφελκυσμού (κατά τις διευθύνσεις X, Y και Z) και τρεις δοκιμές διάτμησης (στα επίπεδα XY, YZ και XZ). Σε κάθε περίπτωση εφαρμόζεται η αντίστοιχη μακροσκοπική τάση, ενώ οι αντιδράσεις που εμφανίζονται στις οριακές επιφάνειες του RVE χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία του πίνακα ακαμψίας.

Για την περίπτωση εφελκυσμού κατά τον άξονα X, σε ένα ορθότροπο υλικό ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & & & \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & & & \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & & & \\ & & & D_{44} & D_{55} & \\ & & & & & D_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Εάν η παραμόρφωση στη διεύθυνση X καθοριστεί σε $\varepsilon_x = 0.001$ και όλες οι υπόλοιπες παραμορφώσεις τεθούν ίσες με μηδέν, τότε προκύπτει η πρώτη στήλη του πίνακα ακαμψίας.

$$\begin{pmatrix} D_{11} \\ D_{21} \\ D_{31} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{0.001} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Χρησιμοποιώντας την περιοδική δομή, το αποτέλεσμα αυτό επιτυγχάνεται με τον ακόλουθο τρόπο (βλ. επίσης [40,43,44] για πιο αναλυτική συζήτηση σχετικά με τις συνοριακές συνθήκες των μοναδιαίων κυψελίδων). Έστω ότι το RVE καταλαμβάνει τον όγκο $[0, L_x] \times [0, L_y] \times [0, L_z]$. Για τον x άξονα εφαρμόζουμε:

$$u_x(L_x, y, z) = u_x(0, y, z) + \varepsilon L_x \quad (4.3)$$

$$u_y(L_x, y, z) = u_y(0, y, z) \quad (4.4)$$

$$u_z(L_x, y, z) = u_z(0, y, z) \quad (4.5)$$

Για τον y άξονα εφαρμόζουμε:

$$u_x(x, L_y, y) = u_x(x, 0, y) \quad (4.6)$$

$$u_y(x, L_y, y) = u_y(x, 0, y) \quad (4.7)$$

$$u_z(x, L_y, y) = u_z(x, 0, y) \quad (4.8)$$

Για τον z άξονα εφαρμόζουμε:

$$u_x(x, y, L_z) = u_x(x, y, 0) \quad (4.9)$$

$$u_y(x, y, L_z) = u_y(x, y, 0) \quad (4.10)$$

$$u_z(x, y, L_z) = u_z(x, y, 0) \quad (4.11)$$

Εκτός από αυτές τις παραπάνω συνθήκες περιοδικότητας, πρέπει επίσης να αποτραπούν οι άκαμπτες κινήσεις του σώματος. Αυτό επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας:

$$u_x(a \text{ point with } x=0) = 0 \quad (4.12)$$

$$u_y(a \text{ point with } y=0) = 0 \quad (4.13)$$

$$u_z(a \text{ point with } z=0) = 0 \quad (4.14)$$

Επαναλαμβάνοντας τα παραπάνω βήματα για κάθε περίπτωση φόρτισης, προκύπτουν όλες οι στήλες του πίνακα ακαμψίας. Αν στη συνέχεια αντιστρέψουμε τον πίνακα αυτόν, λαμβάνουμε τον compliance matrix.

$$[C]=[D]^{-1} \quad (4.15)$$

Στη συνέχεια, οι ελαστικές ιδιότητες του υλικού μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$[C]=\begin{pmatrix} 1/E_X & -\nu_{yx}/E_Y & -\nu_{zx}/E_Z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{xy}/E_X & 1/E_Y & -\nu_{zy}/E_Z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{xz}/E_X & -\nu_{yz}/E_Y & 1/E_Z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{XY} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{YZ} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{XZ} \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

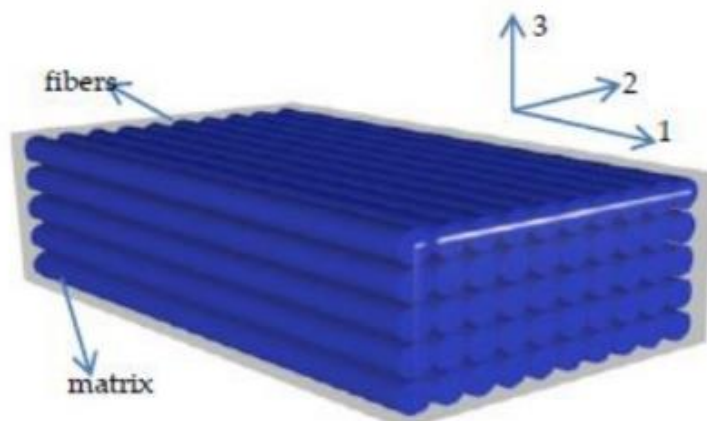
5.ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

5.1 ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ – ΜΟΝΟΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟ ΣΥΝΘΕΤΟ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Στο πρώτο μέρος πραγματοποιήθηκε υπολογιστική ομογενοποίηση ενός ινοπλισμένου σύνθετου υλικού από εποξική ρητίνη με παράλληλες, ευθυγραμμισμένες ίνες άνθρακα με χρήση του λογισμικού ANSYS Material Designer. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν συγκρίνονται με αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα (Younes et al.[31]) και με αποτελέσματα που προκύπτουν με την βοήθεια αναλυτικών μοντέλων, όπως ο Κανόνας Μειγμάτων (Rule of Mixtures – ROM), το μοντέλο Mori–Tanaka, το Modified ROM, το μοντέλο Chamis, το μοντέλο Halpin–Tsai και το Bridging Model.

Στο πλαίσιο της προσομοίωσης, υπολογίστηκαν οι βασικές ελαστικές σταθερές ενός μονοκατευθυντικού σύνθετου υλικού: Μέτρο Ελαστικότητας Young κατά τη διεύθυνση των ινών (E_1) και κάθετα στις ίνες (E_2), οι διατμητικές ακαμψίες G_{12} και G_{23} , καθώς και ο λόγος Poisson ν_{12} . Οι πέντε αυτές ανεξάρτητες σταθερές επαρκούν για την πλήρη περιγραφή της γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς ενός εγκαρσώς ισότροπο υλικού. Στη συνέχεια, οι πέντε αυτές βασικές ελαστικές σταθερές υπολογίζονται για κάθε αναλυτικό μοντέλο που αναφέρθηκε πιο πάνω και συγκρίνονται με τις τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση καθώς και με πειραματικά δεδομένα. Η γεωμετρία προς μελέτη του ινοπλισμένου σύνθετου υλικού από εποξική ρητίνη με παράλληλες, ευθυγραμμισμένες ίνες άνθρακα εμφανίζεται στην Εικ. 5.1. και από αυτή επιλέχθηκε η μελέτη ενός αντιπροσωπευτικού τμήματος της συνολικής γεωμετρίας.

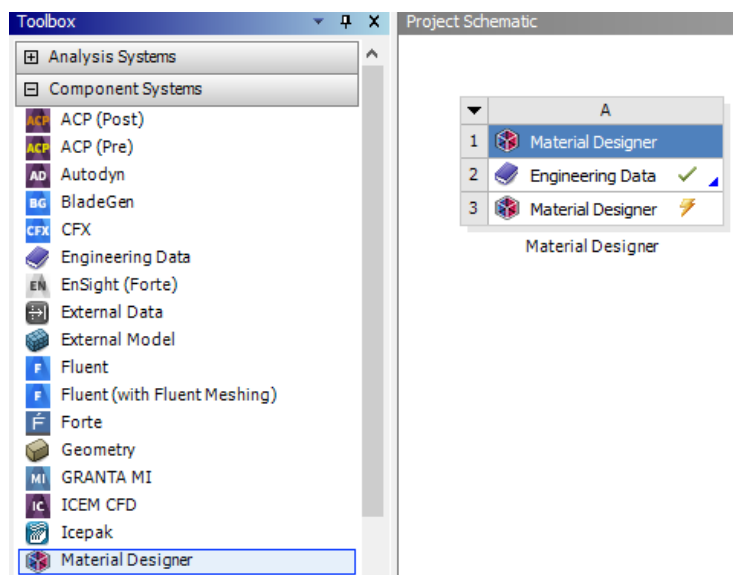
Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος θα παρουσιαστεί στη συνέχεια, με αναφορά σε όλα τα βασικά βήματα.



Εικόνα 5.1:Γεωμετρία προς επίλυση

5.1.1 Αναλυτική Παρουσίαση της Διαδικασίας Επίλυσης του μοντέλου

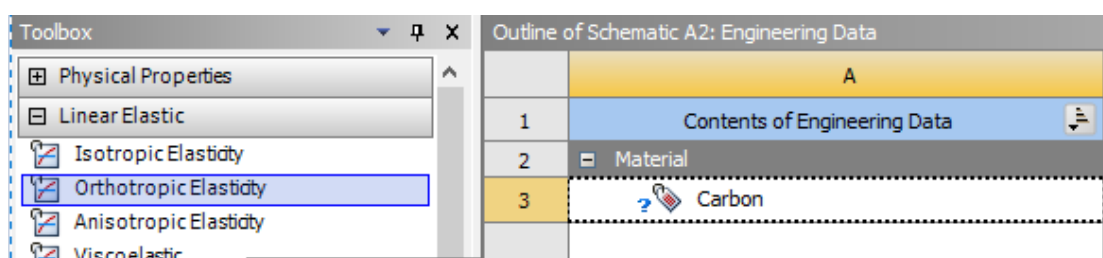
Εισαγωγή στο ANSYS: Η διαδικασία ξεκινά με την είσοδο στο περιβάλλον του ANSYS Workbench R1 2020, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας του συνολικού μοντέλου προσομοίωσης. Στη συνέχεια, από το Toolbox που περιλαμβάνεται στο Project Schematic, επιλέγεται η ενότητα Material Designer, όπως φαίνεται στην Εικ. 5.2.



Εικόνα 5.2:Εμφάνιση του Material Designer μέσα στο Project Schematic

Ορισμός Υλικών: Από το παράθυρο Project Schematic επιλέγεται η ενότητα Engineering Data. Στο περιβάλλον του Engineering Data ορίζεται το υλικό της ίνας:

- Επιλέγεται η εντολή Add a new material, μέσω της οποίας προστίθεται νέο υλικό στο μοντέλο προσομοίωσης.
- Το νέο υλικό ονομάζεται Carbon, όπως φαίνεται στην αντίστοιχη Εικόνα.
- Από το Toolbox επιλέγεται η επιλογή *Orthotropic Elasticity*, όπως παρουσιάζεται στην Εικ. 5.3.
- Συμπληρώνονται οι ιδιότητες στις μονάδες που έχουμε επιλέξει.



Εικόνα 5.3:Εισαγωγή "*Orthotropic Elasticity*"στο υλικό "*Carbon*"

Προσθέτουμε τις παρακάτω ιδιότητες από τον Πίνακα 1 [40,39] στο πεδίο του Orthotropic Elasticity. Οι ιδιότητες θα προστεθούν στο Υλικό Carbon Εικ. 5.4.

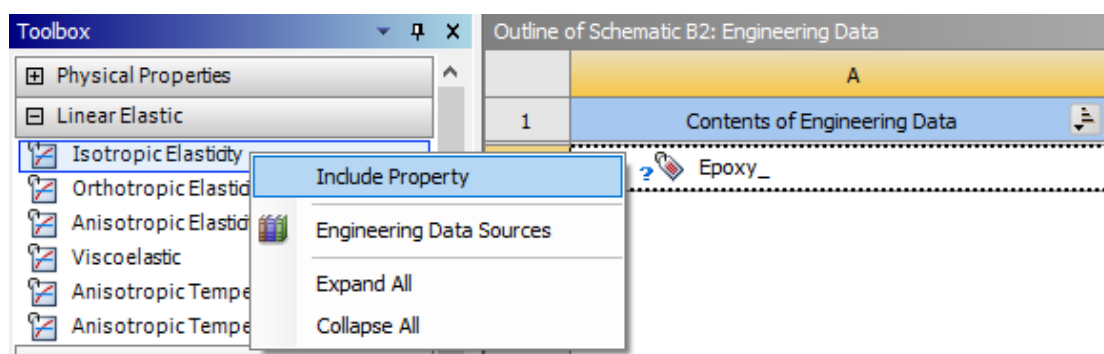
Πίνακας 5.1: Ιδιότητες Υλικού "*Carbon*"

<i>Fiber Material</i>	<i>E11 (GPa)</i>	<i>E22 (GPa)</i>	<i>ν12</i>	<i>ν23</i>	<i>G12 (GPa)</i>	<i>G23 (GPa)</i>
<i>Carbon</i>	232	15	0.279	0.49	24	5.034

Properties of Outline Row 3: Carbon			
	A	B	
1	Property	Value	
2	Material Field Variables	Table	
3	Orthotropic Elasticity		
4	Young's Modulus X direction	2,32E+05	MPa
5	Young's Modulus Y direction	15000	MPa
6	Young's Modulus Z direction	15000	MPa
7	Poisson's Ratio XY	0,279	
8	Poisson's Ratio YZ	0,49	
9	Poisson's Ratio XZ	0,279	
10	Shear Modulus XY	24000	MPa
11	Shear Modulus YZ	5034	MPa
12	Shear Modulus XZ	24000	MPa

Εικόνα 5.4:Ιδιότητες Υλικού "Carbon" στο Engineering Data

Με την ίδια μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω, δημιουργούμε νέο υλικό, το οποίο ονομάζεται Epoxy (Εικ. 5.5). Στη συνέχεια, από τον Πίνακα 2 [39,40] εισάγονται οι αντίστοιχες ιδιότητες στο πεδίο *Isotropic Elasticity*. Οι ιδιότητες αυτές προστίθενται στο υλικό Epoxy, όπως φαίνεται στην Εικ. 5.6.



Εικόνα 5.5: Εισαγωγή "Isotropic Elasticity" στο υλικό "Epoxy"

Πίνακας 5.2: Ιδιότητες Υλικού "Epoxy"

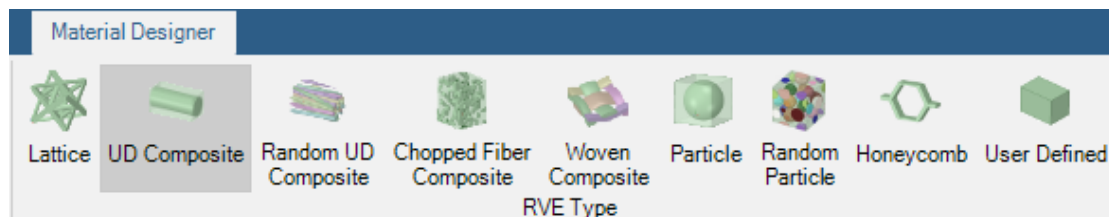
<i>Matrix Material</i>	<i>E</i> (GPa)	<i>v</i>
<i>Epoxy</i>	5.35	0.354

Properties of Outline Row 5: Epoxy			
	A	B	
1	Property	Value	
2	 Material Field Variables	 Table	
3	 Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's M... 	
5	Young's Modulus	5350	MPa
6	Poisson's Ratio	0,354	
7	Bulk Modulus	6,1073E+09	Pa
8	Shear Modulus	1,9756E+09	Pa

Εικόνα 5.6: Ιδιότητες Υλικού "Epoxy" στο *Engineering Data*

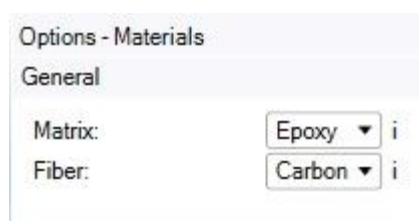
Μετά τον ορισμό των ιδιοτήτων των υλικών, πραγματοποιείται επιστροφή στο Project Schematic για τη δημιουργία της γεωμετρίας του μοντέλου. Η προετοιμασία της προσομοίωσης συνεχίζεται με τον σχεδιασμό της γεωμετρίας. Ακολουθούν τα βήματα με αναλυτικό και με λεπτομερή τρόπο.

- Επιλέγουμε την επιλογή Material Designer από το *Project schematic*
- Από το παράθυρο που ανοίγει από το Material Designer επιλέγουμε το UD Composite όπως φαίνεται και στην Εικ. 5.7.



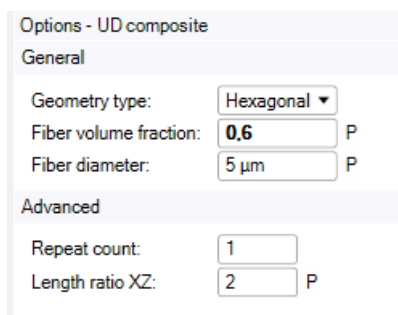
Εικόνα 5.7: Επιλογή Γεωμετρίας "UD Composite"

- Αφού επιλέξουμε το *Constituent Materials* από τις επιλογές που δίνονται:
- Επιλέγουμε το υλικό Epoxy για το Matrix (υλικό μήτρας)
- Επιλέγουμε το υλικό Carbon για το Fiber (υλικό ίνας) Εικ. 5.8



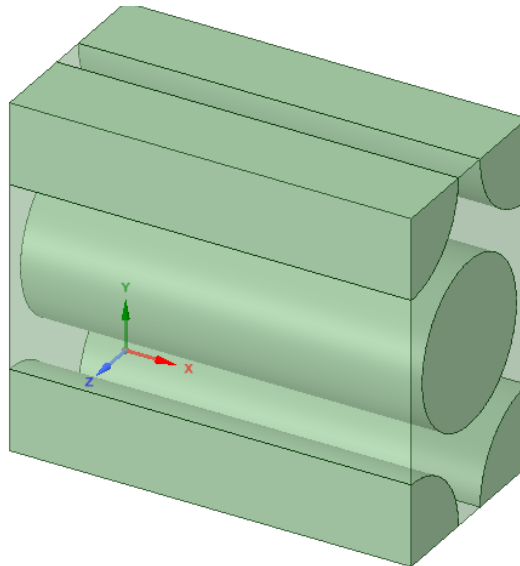
Εικόνα 5.8: Επιλογή Υλικών στην ενότητα "Constituent Materials" για UD Composite

- Στη συνέχεια στο menu διαλέγουμε την γεωμετρία (*Geometry*) και δηλώνουμε τις παρακάτω παραμέτρους (Εικ. 5.9)
- Τον τύπο της γεωμετρίας Geometry Type : Hexagonal
- Το κλάσμα όγκου της ίνας, Fiber Volume Fraction : 0.6
- Την διάμετρο της ίνας, Fiber Diameter : 5 μm



Εικόνα 5.9: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Geometry" για UD Composite Hexagonal με $V_f = 0.6$

Η γεωμετρία που δημιουργείται στο ANSYS SpaceClaim μετά την προαναφερθείσα μεθοδολογία, παρουσιάζεται στην Εικ. 5.10:

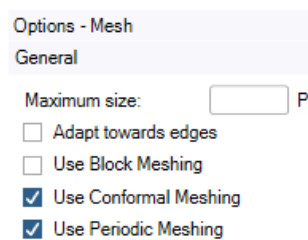


Εικόνα 5.10: Ολοκληρωμένη Γεωμετρία UD Composite Hexagonal

Ακολουθεί η δημιουργία του πλέγματος για την γεωμετρία που σχεδιάστηκε:

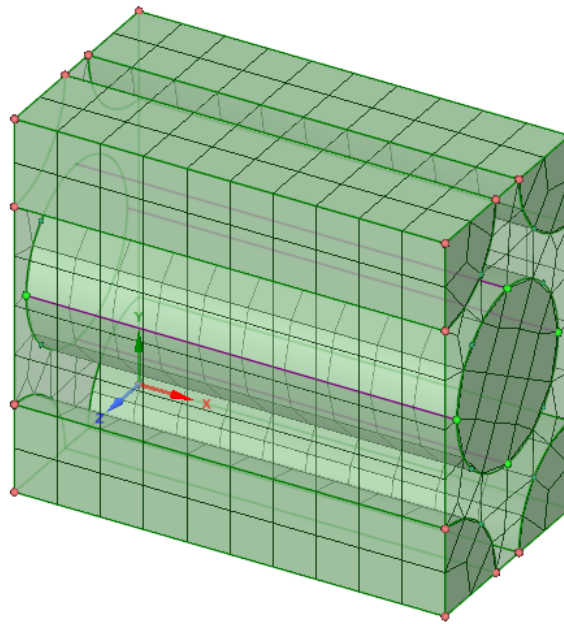
- Επιλέγουμε το *Mesh* από το menu επιλογών. Από τις παραμέτρους που μας εμφανίζονται θα γίνει επιλογή των παρακάτω:

- Use Periodic Meshing.
- Use Conformal Meshing (Εικ. 5.11)



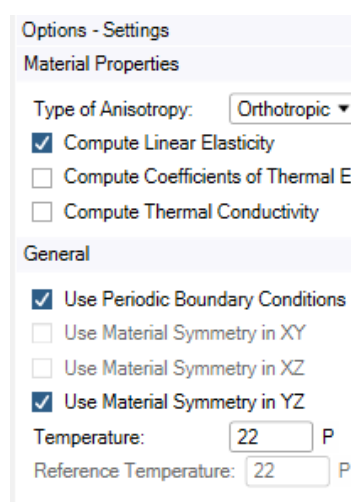
Εικόνα 5.11: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Mesh" για UD Composite

Τέλος επιλέγουμε *Complete* για να δημιουργήσουμε το πλέγμα (Εικ. 5.12).



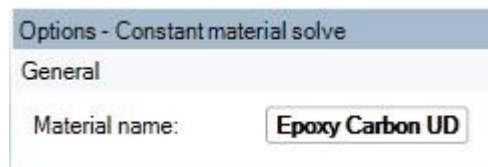
Εικόνα 5.12: Διακριτοποιημένη Γεωμετρία UD Composite Hexagonal

- Στη συνέχεια, αφού επιλέξουμε το *Analysis Settings* από το menu επιλογών:
Διαλέγουμε από τις επιλογές που είναι διαθέσιμες (Εικ. 5.13)
- Compute linear elasticity
- Use material symmetry in YZ



Εικόνα 5.13: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Analysis settings" για UD Composite

- Ακολουθεί η επιλογή *Constant Material* από το menu επιλογών
- Στο Material name ονομάζουμε το καινούριο υλικό Epoxy Carbon UD (Εικ. 5.14)



Εικόνα 5.14: Όνομα Υλικού στην ενότητα "Constant Material"

- Πατώντας Complete ξεκινάμε την προσομοίωση και περιμένουμε να γίνουν οι υπολογισμοί από το πρόγραμμα και να ετοιμαστούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.
- Επιλέγουμε το Results από το menu επιλογών.

Στο παράθυρο του Results, έχουν υπολογιστεί οι βασικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού όπως τα μέτρα ελαστικότητας κατά τις κύριες διευθύνσεις (E1,E2,E3), τα μέτρα διάτμησης (G12,G13,G23) και ο λόγος Poisson($\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$) (Εικ. 5.15):

Name	Value	Unit
Engineering Constants		
E1	1,4134E+05	MPa
E2	10028	MPa
E3	10028	MPa
G12	6095,4	MPa
G23	3338	MPa
G31	6095,4	MPa
ν_{12}	0,30662	
ν_{13}	0,30665	
ν_{23}	0,50253	

Εικόνα 5.15: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Epoxy Carbon UD

Η παραπάνω διαδικασία οδηγεί στον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των ομογενοποιημένων υλικών για το κλάσμα όγκου ινών 0.6 που ορίσαμε στην αρχή. Συνεχίζουμε θέτοντας μεταβαλλόμενο κλάσμα όγκου με τον εξής τρόπο:

- Διαλέγουμε την επιλογή Variable Material από το menu επιλογών (Εικ. 5.16)
- Επιλέγουμε το Fiber Volume Fraction σαν παράμετρο

- Συμπληρώνουμε σαν τιμές 0.2-0.7:7. Αυτό σημαίνει πως θα γίνει υπολογισμός ιδιοτήτων από το 0.2 ως το 0.7 με 7 συνολικά σημεία
- Αφήνουμε κενά τα υπόλοιπα σημεία.

Εικόνα 5.16: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Variable material" για UD Composite

- Πατάμε *Complete* για να ολοκληρώσουμε την προσομοίωση. Πλέον μπορούμε να δούμε τα αποτελέσματα στο γραφικό περιβάλλον του ANSYS επιλέγοντας *Results* (Εικ. 5.17)
- Συλλέγουμε τα αποτελέσματα για την δημιουργία γραφημάτων.

Parameters								
Fiber Volume Fraction	0,2	0,28333	0,36667	0,45	0,53333	0,61667	0,7	
Engineering Constants								
E1	50682	69570	88456	1,0735E+05	1,2623E+05	1,4512E+05	1,64E+05	MPa
E2	7030,3	7550	8112,7	8734,3	9421,1	10188	11034	MPa
E3	7030,3	7550	8112,7	8734,3	9421,1	10188	11034	MPa
G12	2783,5	3226,3	3760,4	4418,3	5248,7	6340,3	7846,6	MPa
G23	2324,5	2494,2	2682,6	2893,4	3128,6	3393,2	3682,8	MPa
G31	2783,5	3226,3	3760,4	4418,3	5248,7	6340,3	7846,6	MPa
nu12	0,33734	0,33067	0,32415	0,31777	0,31153	0,30541	0,29942	
nu13	0,33735	0,33068	0,32416	0,31777	0,31154	0,30544	0,29942	
nu23	0,51223	0,51358	0,51218	0,50927	0,50572	0,50176	0,49833	

Εικόνα 5.17: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Epoxy Carbon UD για διαφορετικά Vfs

5.2 ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ - ΜΕΛΕΤΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΜΕΣΩ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΓΚΟΥ

Στο δεύτερο μέρος της παρούσας εργασίας εξετάζεται η διαδικασία ομογενοποίησης σύνθετου υλικού με τη χρήση του ANSYS Material Designer, με στόχο την διερεύνηση των ελαστικών ιδιοτήτων διαφορετικών γεωμετριών RVE, καθώς και την αξιολόγηση της επίδρασης διαφορετικών κλασμάτων όγκου ινών στη μηχανική απόκριση του υλικού.

Στο πλαίσιο αυτό, μελετώνται διαφορετικοί τύποι RVE, προκειμένου να αναδειχθεί η σημασία της μικροδομής στη διαμόρφωση των ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού. Συγκεκριμένα, εξετάζονται οι περιπτώσεις δομών: μονοκατευθυντικό RVE εξαγωνικής δομής (Hexagonal), μονοκατευθυντικό RVE τετράγωνης δομής (Square), μονοκατευθυντικό RVE με τυχαία διάταξη ινών (Random UD Composite), σύνθετο με σωματίδια (Particles), σύνθετο με τυχαία κατανεμημένα σωματίδια (Random Particles) και σύνθετο με ασυνεχείς και τυχαία κατανεμημένες ίνες (Chopped Fibers). Η συγκριτική αξιολόγηση των παραπάνω διαμορφώσεων προσφέρει ουσιαστικές πληροφορίες για τον ρόλο της γεωμετρίας και της κατανομής της ενίσχυσης στη συνολική συμπεριφορά του σύνθετου.

5.2.1. Μονοκατευθυντικό RVE εξαγωνικής δομής Hexagonal UD Composite

Σε αυτή την περίπτωση ακολουθείται η διαδικασία που παρουσιάστηκε πιο πάνω με τις εξής αλλαγές: Στην κατηγορία Geometry αρχικά επιλέχθηκε Fiber Volume fraction (Vf) ίσο με 0,15, το οποίο χρησιμοποιείται σε όλες τις διαφορετικές RVE προσομοιώσεις. Η τιμή $V_f = 0,15$ χρησιμοποιήθηκε μόνο για την αρχική δημιουργία του γεωμετρικού μοντέλου του RVE, ενώ τα αποτελέσματα της ανάλυσης προκύπτουν αποκλειστικά από τα διαφορετικά κλάσματα όγκου που ορίζονται στο Variable Material Evaluation.

Οι επιλογές που δόθηκαν στην κατηγορία Geometry παρουσιάζονται στην Εικ. 5.18.

Options - UD composite

General

Geometry type:

Fiber volume fraction: P

Fiber diameter: P

Advanced

Repeat count:

Length ratio XZ: P

Εικόνα 5.18: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Geometry" για UD Composite Hexagonal με $V_f = 0.15$

Στην κατηγορία *Mesh* επιλέγονται τα εξής (Εικ. 5.19):

- Η επιλογή *Adapt Toward Edges* ενεργοποιήθηκε ώστε το πλέγμα να γίνεται πιο πυκνό κοντά στα όρια fiber/matrix, βελτιώνοντας την ακρίβεια των τάσεων και της συνολικής μηχανικής απόκρισης του σύνθετου, παρά την αύξηση του αριθμού στοιχείων και του χρόνου υπολογισμού.
- Η επιλογή *Use Periodic Meshing* διασφαλίζει ότι το πλέγμα είναι συνεπές στα όρια του RVE, δηλαδή οι κόμβοι και τα στοιχεία στις άκρες ταιριάζουν με τα αντίστοιχα όρια των γειτονικών RVE. Αυτό επιτρέπει την επαναλαμβανόμενη «συναρμολόγηση» του RVE στον χώρο, εξασφαλίζοντας σωστή μεταφορά τάσεων και παραμορφώσεων και αξιόπιστη εκτίμηση των μακροσκοπικών ιδιοτήτων του σύνθετου.

Options - Mesh

General

Maximum size: P

☒ Adapt towards edges

☐ Use Block Meshing

☒ Use Conformal Meshing

☒ Use Periodic Meshing

Εικόνα 5.19: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Mesh" για UD Composite Hexagonal

Στην κατηγορία *Analysis settings* θέτουμε τα εξής (Εικ. 5.20):

Options - Settings

Material Properties

Type of Anisotropy: Orthotropic ▼

☒ Compute Linear Elasticity

☐ Compute Coefficients of Thermal Expansion

☐ Compute Thermal Conductivity

General

☒ Use Periodic Boundary Conditions

☐ Use Material Symmetry in XY

☐ Use Material Symmetry in XZ

☒ Use Material Symmetry in YZ

Temperature: 22 P

Reference Temperature: 22 P

Εικόνα 5.20: Διαμόρφωση παραμέτρων στην ενότητα "Analysis settings" για UD Composite Hexagonal

Στην επιλογή *Variable Material Generated Material* δίνουμε το όνομα του υλικού που θα ομογενοποιηθεί όπως φαίνεται στην Εικ. 5.21.

Options - Generated material

General

Material name: Epoxy Carbon UD Hexagona

Interpolation

Algorithm: Linear Multivariate ▼

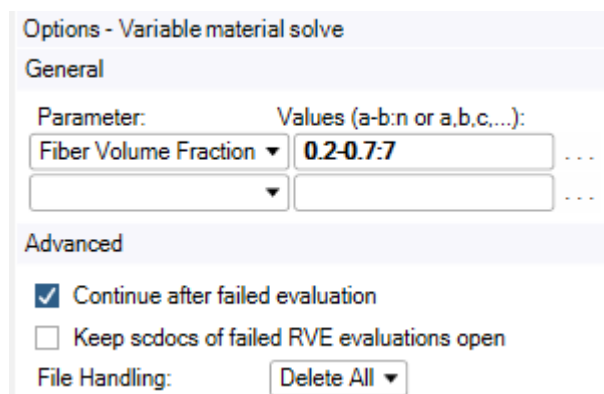
☒ Normalize

☒ Cache

Defaults:

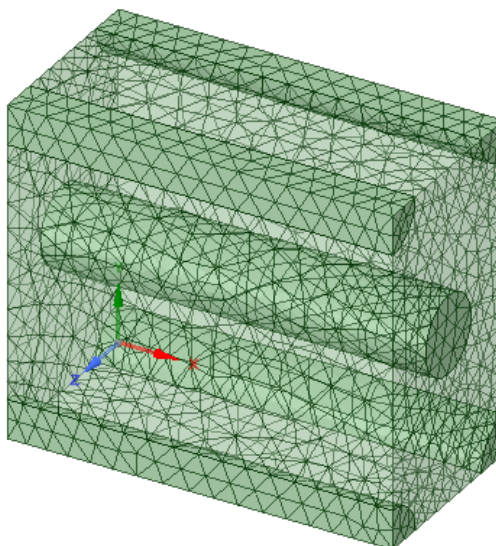
Εικόνα 5.21: Όνομα Υλικού στην ενότητα "Generated Material "

Τέλος, στο *Variable Material Evaluation* θέτουμε (Εικ. 5.22):



Εικόνα 5.22: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Variable material" για UD Composite Hexagonal

Η γεωμετρία του RVE με το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί μετά τις παραπάνω αλλαγές και είναι έτοιμη για προσομοίωση είναι η εξής (Εικ. 5.23):



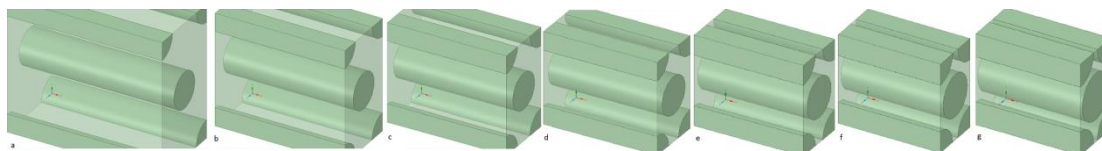
Εικόνα 5.23: Διακριτοποιημένη Γεωμετρία UD Composite Hexagonal

Αφού τρέξουμε την προσομοίωση, λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα από την επιλογή *Results* (Εικ. 5.24):

Fiber Volume Fraction	0,2	0,28333	0,36667	0,45	0,53333	0,61667	0,7	
Engineering Constants								
E1	50682	69569	88458	1,0735E+05	1,2623E+05	1,4512E+05	1,64E+05	MPa
E2	7030,2	7550,1	8112,7	8733,9	9420,8	10188	11034	MPa
E3	7030,2	7550,1	8112,7	8733,9	9420,8	10188	11034	MPa
G12	2783,4	3226,3	3760,3	4418,3	5248,1	6340,8	7847,2	MPa
G23	2324,5	2494,2	2682,6	2893,4	3128,4	3393,2	3682,9	MPa
G31	2783,4	3226,3	3760,3	4418,3	5248,1	6340,8	7847,2	MPa
nu12	0,33735	0,33067	0,32415	0,31777	0,31153	0,30541	0,29942	
nu13	0,33735	0,33068	0,32415	0,31777	0,31154	0,30544	0,29942	
nu23	0,51223	0,51358	0,51218	0,50929	0,50573	0,50176	0,49833	

Εικόνα 5.24: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Epoxy Carbon UD Hexagonal για διαφορετικά Vfs

Η Εικόνα 5.25 μας δείχνει πως αλλάζει το RVE με την αλλαγή του Fiber Volume fraction:



Εικόνα 5.25: Γεωμετρία σε διαφορετικά Fiber Volume Fractions για UD Composite Hexagonal a) 0,2 b) 0,28333 c) 0,36667 d) 0,45 e) 0,53333 f) 0,61667 g) 0,7

5.2.2. Μονοκατευθυντικό RVE τετράγωνης δομής UD Composite Square

Και σε αυτή την περίπτωση ακολουθείται η διαδικασία που παρουσιάστηκε πιο πάνω με τις κάποιες αλλαγές: Στην κατηγορία *Geometry type* διαλέγουμε την επιλογή Square (Εικ. 5.26):

Options - UD composite

General

Geometry type:

Fiber volume fraction: P

Fiber diameter: P

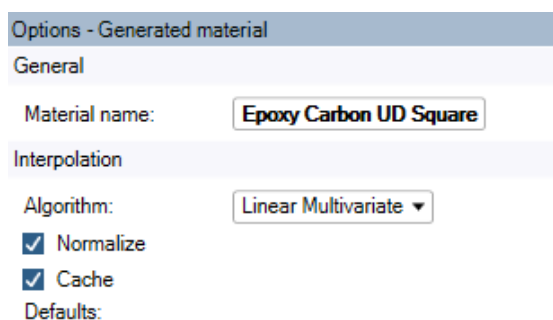
Advanced

Repeat count:

Length ratio XZ: P

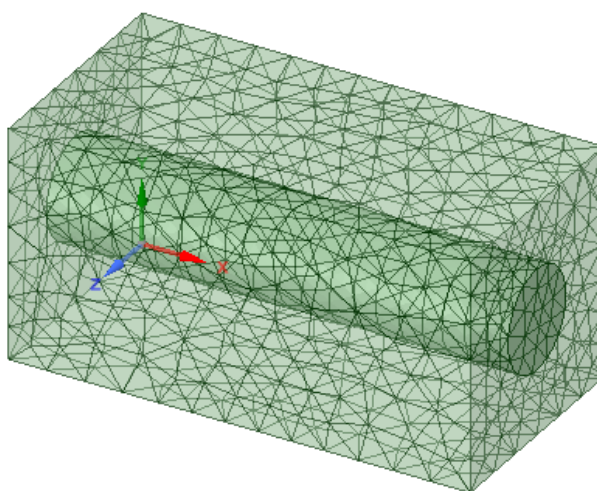
Εικόνα 5.26: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Geometry" για UD Composite Square με $V_f = 0.15$

Στην επιλογή *Variable Material Generated Material* δίνουμε το όνομα του υλικού που θα ομογενοποιηθεί (Εικ. 5.27):



Εικόνα 5.27: Όνομα Υλικού στην ενότητα "Generated Material "

Η γεωμετρία του RVE με το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί μετά τις παραπάνω αλλαγές και είναι έτοιμη για προσομοίωση είναι η εξής (Εικ. 5.28):



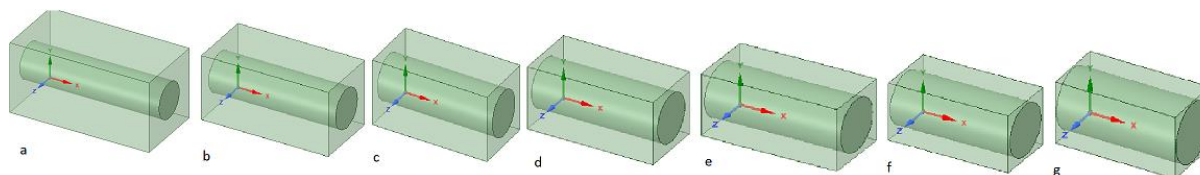
Εικόνα 5.28: Διακριτοποιημένη Γεωμετρία UD Composite Square

Αφού τρέξουμε την προσομοίωση, λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα από την επιλογή *Results* (Εικ. 5.29):

Fiber Volume Fraction	0,2	0,28333	0,36667	0,45	0,53333	0,61667	0,7	
Engineering Constants								
E1	50683	69571	88458	1,0735E+05	1,2623E+05	1,4512E+05	1,6401E+05	MPa
E2	7101,6	7687,5	8329,2	9023	9769,6	10562	11390	MPa
E3	7101,6	7687,5	8329,2	9023	9769,6	10562	11390	MPa
G12	2783,8	3228,7	3771,2	4452,3	5351,3	6630,9	8707	MPa
G23	2297,6	2443	2601,9	2779,7	2985,9	3233,2	3544,4	MPa
G31	2783,8	3228,7	3771,2	4452,3	5351,3	6630,9	8707	MPa
ν_{12}	0,33734	0,33067	0,32414	0,31773	0,31143	0,30521	0,29902	
ν_{13}	0,33735	0,33067	0,32414	0,31773	0,31143	0,30521	0,29902	
ν_{23}	0,50728	0,50475	0,49924	0,49324	0,48797	0,48469	0,48458	

Εικόνα 56.29: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Epoxy Carbon UD Square για διαφορετικά Vfs

Η Εικόνα 5.30 μας δείχνει πως αλλάζει το RVE με την αλλαγή του Fiber Volume Fraction:



Εικόνα 5.30: Γεωμετρία σε διαφορετικά Fiber Volume Fractions για UD Composite Square a) 0,2 b) 0,28333 c) 0,36667 d) 0,45 e) 0,53333 f) 0,61667 g) 0,7

Στις περιπτώσεις UD Composite RVE έως τώρα (Hexagonal και Square), οι ελαστικές σταθερές, οι διατμητικές σταθερές και οι λόγοι Poisson παρουσιάζουν ισότητα στους άξονες 2 και 3 ($E_2 = E_3 \neq E_1$, $G_{12} = G_{31} \neq G_{23}$, $\nu_{12} = \nu_{13} \neq \nu_{23}$). Αυτό φανερώνει ότι το υλικό είναι εγκάρσιως ισότροπο (transversely isotropic). Ο κύριος άξονας ανισοτροπίας είναι κατά μήκος των ινών (άξονας 1), ενώ το επίπεδο που είναι κάθετο στις ίνες (επίπεδο 2-3) συμπεριφέρεται ισότροπικά.

Για τα εγκάρσιως ισότροπα υλικά οι μηχανικές ιδιότητες καθορίζονται από πέντε ανεξάρτητες ελαστικές σταθερές, κάτι που απλοποιεί σημαντικά τον πίνακα ελαστικών σταθερών. Τα αποτελέσματα του G_{23} επιβεβαιώνουν τον τύπο $G_{23} = E_2/2(1+\nu_{23})$. Για λόγους πληρότητας, στην επόμενη ενότητα ανάλυσης των αποτελεσμάτων θα αναλυθούν και συγκριθούν έξι ελαστικές σταθερές.

5.2.3. Σύνθετο με τυχαία διάταξη ινών Random UD Composite

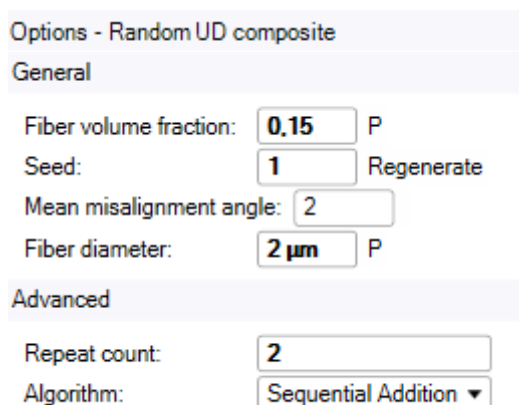
Στη συνέχεια, και σε αυτή την περίπτωση ακολουθείται η διαδικασία που παρουσιάστηκε πιο πάνω με τις κάποιες αλλαγές:

Επιλέγουμε, αυτή τη φορά, την RVE γεωμετρία RandomUD Composite (Εικ. 5.31):



Εικόνα 5.31: Επιλογή Γεωμετρίας "UD Random"

Στην κατηγορία *Geometry* επιλέγονται τα εξής (Εικ. 5.32):

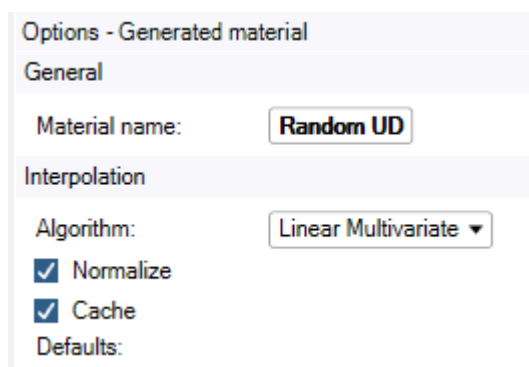


Εικόνα 7.32: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Geometry" για Random UD Composite με $V_f = 0.15$

Στην προσομοίωση του RVE Random UD Composite, ορίστηκε Seed = 1 που σημαίνει πως έχουμε μόνο μια τυχαία διάταξη ινών για το ίδιο ποσοστό όγκου. Η αλλαγή του κλάσματος όγκου ινών (V_f) οδηγεί σε διαφορετικές τυχαίες διατάξεις για κάθε V_f , καθώς το πρόγραμμα προσαρμόζει τη θέση των ινών ώστε να αντιστοιχεί στο νέο ποσοστό όγκου.

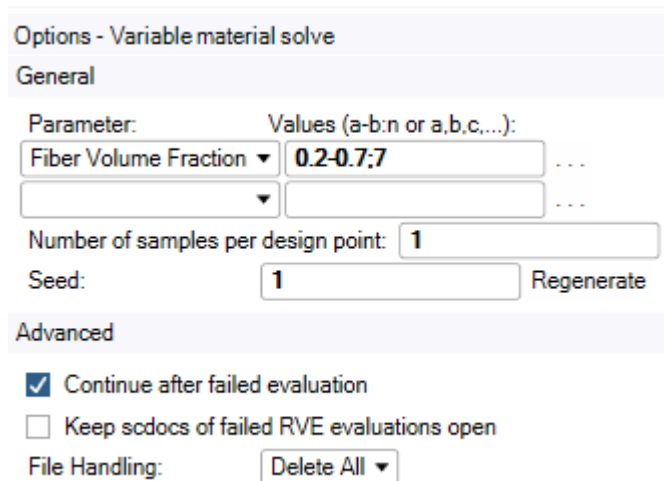
Το Repeat Count καθορίζει πόσες ίνες υπάρχουν στις διευθύνσεις Y ή Z, αν οι ίνες ήταν τοποθετημένες σε κανονικό, ομοιόμορφο μοτίβο. Η αρχική προσπάθεια με Repeat Count = 1 απέτυχε για ορισμένα υψηλά Vf λόγω γεωμετρικών προβλημάτων, γι' αυτό χρησιμοποιήθηκε Repeat Count = 2, το οποίο βελτίωσε την αντιπροσωπευτικότητα της μικροδομής και απέφυγε τα σφάλματα στη δημιουργία της γεωμετρίας και του πλέγματος.

Στην συνέχεια, στη επιλογή Variable Material Generated Material δίνουμε το όνομα του υλικού που θα ομογενοποιηθεί (Εικ. 5.33)



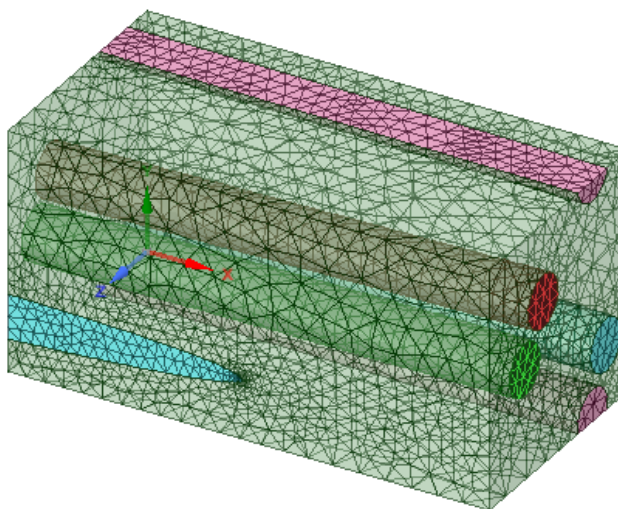
Εικόνα 5.33: Όνομα Υλικού στην ενότητα "Generated Material "

Στην επιλογή Variable Material Generated Material δίνουμε το όνομα του υλικού που θα ομογενοποιηθεί (Εικ. 5.34):



Εικόνα 5.34: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Variable material" για Random UD Composite

Η γεωμετρία του RVE με το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί μετά τις παραπάνω αλλαγές είναι έτοιμη για προσομοίωση και είναι η εξής (Εικ. 5.35):



Εικόνα 59.35: Διακριτοποιημένη Γεωμετρία Random UD Composite

Η επιλογή Number of samples per design point καθορίζει για κάθε τιμή κλάσματος ινών V_f , πόσες διαφορετικές τυχαίες μικροδομές θα δημιουργηθούν ώστε να εξαχθούν στατιστικά πιο αντιπροσωπευτικές ιδιότητες. Στην παρούσα προσομοίωση επιλέχθηκε τιμή 1, καθώς η αύξηση του αριθμού δειγμάτων οδηγεί σε σημαντική αύξηση του χρόνου προσομοίωσης. Για τους σκοπούς αυτής της μελέτης είναι επαρκές να παραχθεί μόνο ένα δείγμα ανά V_f .

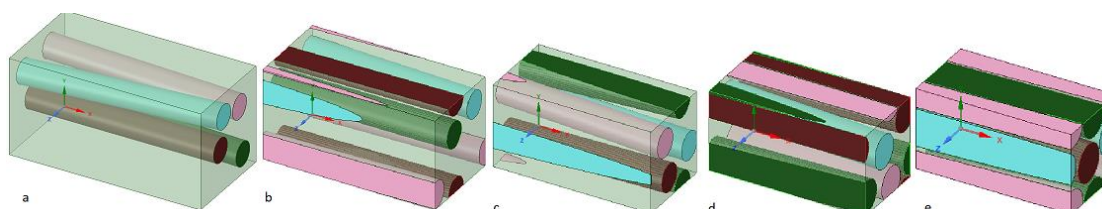
Οι υπόλοιπες επιλογές που δεν αναφέρονται στην περιγραφή της εκάστοτε προσομοίωσης θεωρούνται ίδιες με εκείνες που χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω.

Αφού τρέξουμε την προσομοίωση, λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα από την επιλογή Results (Εικ. 5.36):

Fiber Volume Fraction	0,20025	0,28363	0,36738	0,45013	0,53364	0,61681	0,70083	
Seed	534011718	237820880	1002897798	1657007234	1412011072	929393559	760389092	
Engineering Constants								
E1	50225	69035	87117	1,0709E+05	1,2565E+05	NaN	1,6238E+05	MPa
E2	7083,3	7656,7	8157,3	8699,1	9468,8	NaN	11348	MPa
E3	7062,5	7646,6	8152,8	8774,1	9539,3	NaN	11372	MPa
G12	2816,9	3266	3872,7	4518,4	5432,3	NaN	8688,9	MPa
G23	2315,2	2471,4	2689,7	2928,1	3128,5	NaN	3593,9	MPa
G31	2812,9	3322,5	3878,4	4919,9	5816,7	NaN	8793,5	MPa
nu12	0,33204	0,32489	0,3356	0,31937	0,32183	NaN	0,2975	
nu13	0,3485	0,34442	0,32928	0,31848	0,30746	NaN	0,30845	
nu23	0,5094	0,50701	0,50918	0,50809	0,50045	NaN	0,48549	

Εικόνα 5.36: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Random UD Carbon για διαφορετικά Vfs

Η Εικόνα 5.37 μας δείχνει πως αλλάζει το RVE με την αλλαγή του Fiber Volume fraction:



Εικόνα 5.10.37: Γεωμετρία σε διαφορετικά Fiber Volume Fractions για Random UD Composite a) 0,20025 b) 0,36738 c) 0,45013 d) 0,70083

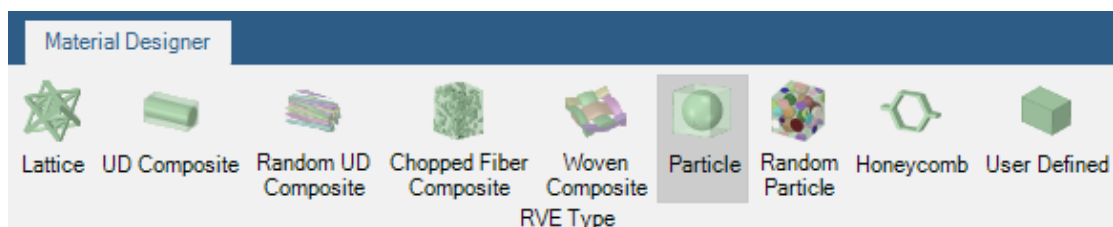
Για ορισμένες τιμές V_f δεν παρήχθησαν αποτελέσματα, ενώ για άλλες οι προσομοιώσεις ολοκληρώθηκαν κανονικά. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην τυχαία κατανομή των ινών σε κάθε RVE, η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις οδηγεί σε μη έγκυρη γεωμετρία (επικαλύψεις ή οριακά προβλήματα), με αποτέλεσμα η ανάλυση να μην μπορεί να ολοκληρωθεί.

Στα RVE με τυχαία κατανομή μονοκατευθυντικών ινών, οι ελαστικές σταθερές κατά τους άξονες 2 και 3 δηλ. E2 και E3, οι διατμητικές σταθερές G12 και G13 καθώς και οι συντελεστές Poisson (ν_{12} και ν_{13}) εμφανίζουν πολύ μικρές διαφορές, λόγω της έλλειψης απόλυτης συμμετρίας στην μικροδομή. Αυτή η μικρή διαφορά είναι φυσιολογική για το RVE και το υλικό μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν εγκαρσίως ισότροπο. Συνεπώς, στην επόμενη ενότητα των αποτελεσμάτων θα παρουσιαστούν μόνο οι κύριες 6 σταθερές καθώς οι υπόλοιπες 3 διαφέρουν πολύ λίγο και μπορούν να θεωρηθούν πρακτικά ίσες.

5.2.4. Σύνθετο με σωματίδια Particle

Ακολουθώντας, κι σε αυτή την περίπτωση, ακολουθείται η διαδικασία που παρουσιάστηκε πιο πάνω με κάποιες αλλαγές:

Επιλέγουμε την RVE γεωμετρία Particle (Εικ. 5.38):



Εικόνα 5.38: Επιλογή Γεωμετρίας "Particle"

Στην κατηγορία *Geometry* επιλέγονται τα εξής (Εικ. 5.39):

Options - Particle

General

Geometry Type: Simple cubic ▼

Particle Volume Fraction: 0.15 P

Particle Diameter: 2 μm P

☐ Hollow Particles

Particle Wall Thickness: 0.5 μm P

Advanced

Repeat count: 1

Εικόνα 5.39: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Geometry" για Particle με $V_f=0.15$

Στην κατηγορία *Analysis settings* θέτουμε τα εξής (Εικ. 5.40):

Options - Settings

Material Properties

Type of Anisotropy: Orthotropic ▼

☒ Compute Linear Elasticity

☐ Compute Coefficients of Thermal Expansion

☐ Compute Thermal Conductivity

General

☒ Use Periodic Boundary Conditions

☒ Use Material Symmetry in XY

☒ Use Material Symmetry in XZ

☒ Use Material Symmetry in YZ

Temperature: 22 P

Reference Temperature: 22 P

Εικόνα 5.40: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Analysis settings" για Particle

Στην επιλογή *Variable Material Generated Material* δίνουμε το όνομα του υλικού που θα ομογενοποιηθεί (Εικ. 5.41):

Options - Generated material

General

Material name: Particle

Interpolation

Algorithm: Linear Multivariate ▼

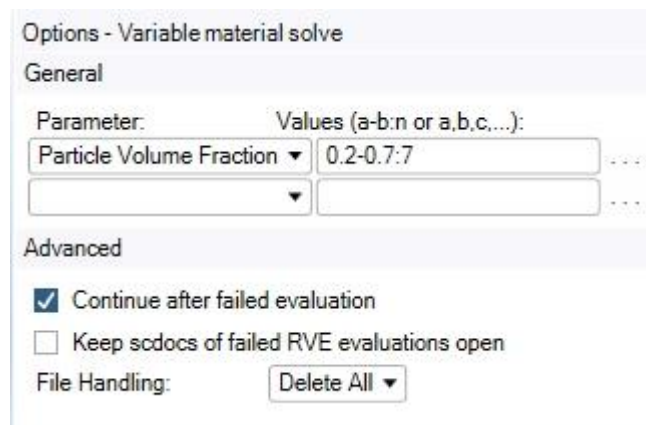
☒ Normalize

☒ Cache

Defaults:

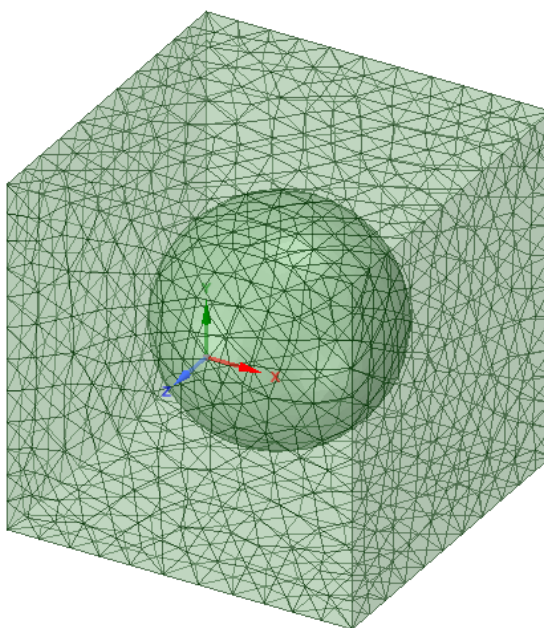
Εικόνα 5.41: Όνομα Υλικού στην ενότητα "Generated Material"

Τέλος, στο *Variable Material Evaluation* θέτουμε (Εικ. 5.42):



Εικόνα 5.42: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Variable material" για Particle

Η γεωμετρία του RVE με το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί μετά τις παραπάνω αλλαγές και είναι έτοιμη για προσομοίωση είναι η εξής (Εικ. 5.43):



Εικόνα 5.43: Διακριτοποιημένη Γεωμετρία Particle

Αφού τρέξουμε την προσομοίωση, λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα από την επιλογή *Results* (Εικ. 5.44).

κατά πολύ την μήτρα ελαστικότητας αφού πλέον 3 ελαστικές σταθερές επαρκούν για τον προσδιορισμό των μηχανικών του ιδιοτήτων. Παρόλα αυτά, στην επόμενη ενότητα για να υπάρχει σύγκριση σε όλες τις περιπτώσεις των βασικών ελαστικών ιδιοτήτων, θα παρουσιαστούν και για αυτή την περίπτωση οι 6 ελαστικές σταθερές.

5.2.5. Σύνθετο με τυχαία κατανεμημένα σωματίδια Random Particle

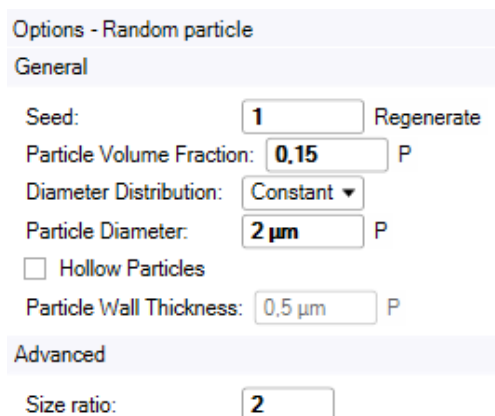
Και σε αυτή την περίπτωση ακολουθείται η ίδια διαδικασία με ορισμένες τροποποιήσεις:

Επιλέγουμε την RVE γεωμετρία Random Particle (Εικ. 5.46)



Εικόνα 5.46: Επιλογή Γεωμετρίας "Random Particle"

Στην κατηγορία *Geometry* επιλέγονται τα εξής (Εικ. 5.47):



Εικόνα 5.47: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Geometry" για Random Particle με $V_f=0.15$

Στην κατηγορία *Analysis Settings* θέτουμε τα εξής (Εικ. 5.48):

Options - Settings

Material Properties

Type of Anisotropy: Orthotropic ▼

☒ Compute Linear Elasticity

☐ Compute Coefficients of Thermal Expansion

☐ Compute Thermal Conductivity

General

☒ Use Periodic Boundary Conditions

☐ Use Material Symmetry in XY

☐ Use Material Symmetry in XZ

☐ Use Material Symmetry in YZ

Temperature: 22 P

Reference Temperature: 22 P

Εικόνα 5.48: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Analysis settings" για Random Particle

Στην επιλογή *Variable Material Generated Material* δίνουμε το όνομα του υλικού που θα ομογενοποιηθεί (Εικ. 5.49):

Options - Generated material

General

Material name: Random Particle

Interpolation

Algorithm: Linear Multivariate ▼

☒ Normalize

☒ Cache

Defaults:

Εικόνα 5.49: Όνομα Υλικού στην ενότητα "Generated Material"

Τέλος, στο *Variable Material Evaluation* θέτουμε (Εικ. 5.50):

Options - Variable material solve

General

Parameter: Values (a-b:n or a,b,c,...):

Particle Volume Fraction ▾ 0.2-0.7:7 ...

Number of samples per design point: 1

Seed: 1 Regenerate

Advanced

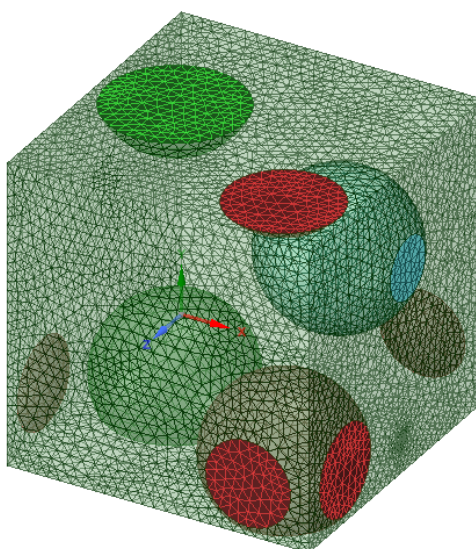
☒ Continue after failed evaluation

☐ Keep sdocs of failed RVE evaluations open

File Handling: Delete All ▾

Εικόνα 5.50: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Variable material" για Random Particle

Η γεωμετρία του RVE με το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί μετά τις παραπάνω αλλαγές είναι έτοιμη για προσομοίωση και είναι η εξής (Εικ. 5.51):



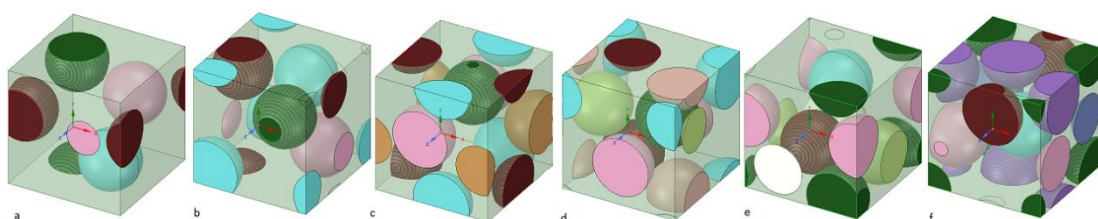
Εικόνα 5.51: Διακριτοποιημένη Γεωμετρία Random Particle

Αφού τρέξουμε την προσομοίωση, λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα από την επιλογή *Results* (Εικ. 5.52):

Particle Volume Fraction	0,26179	0,32644	0,39236	0,32726	0,39256	0,39233	0,45765	
Seed	534011718	237820880	1002897798	1657007234	1412011072	929393559	760389092	
Engineering Constants								
E1	9322.9	10748	NaN	11049	13284	13933	15955	MPa
E2	6921.7	7430.9	NaN	7473.8	7988.8	8136.5	8732.1	MPa
E3	6996.8	7624.6	NaN	7531.8	8094.4	8167.7	8715.1	MPa
G12	3329.7	3766.4	NaN	3871.3	4548.1	4150.4	4865	MPa
G23	2521.7	2673.5	NaN	2684.5	2845.5	2821.1	3027.8	MPa
G31	3391.8	3772.1	NaN	3680.3	4367.1	4549	4906.9	MPa
nu12	0,34876	0,35116	NaN	0,3465	0,34567	0,32685	0,31945	
nu13	0,3399	0,32426	NaN	0,33025	0,32896	0,33356	0,32328	
nu23	0,3923	0,39461	NaN	0,40358	0,41089	0,41748	0,4271	

Εικόνα 5.52: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Random Particle για διαφορετικά V_f s

Η Εικόνα 5.53 κάτω μας δείχνει πως αλλάζει το RVE με την αλλαγή του Fiber Volume fraction:



Εικόνα 5.53: Γεωμετρία σε διαφορετικά Fiber Volume Fractions για Random Particle a) 0,26179 b) 0,32644 c) 0,32726 d) 0,39256 e) 0,39233 f) 0,45765

Όπως παρατηρήθηκε και στην περίπτωση του Particle RVE, για τιμές V_f μεγαλύτερες από περίπου 0.45, το Material Designer δεν μπόρεσε να δημιουργήσει έγκυρο RVE, καθώς το Particle δεν χωρούσε μέσα στον όγκο χωρίς να αγγίζει ή να επικαλύπτει τα όρια του RVE.

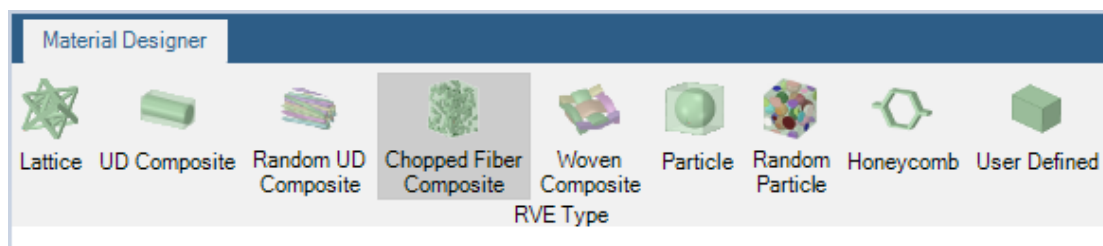
Στα RVE με Random Particle, οι ελαστικές σταθερές E_2 και E_3 , οι διατμητικές σταθερές G_{12} και G_{31} και οι συντελεστές Poisson ν_{12} και ν_{13} εμφανίζουν πολύ μικρές διαφορές, λόγω της τυχαίας κατανομής των σωματιδίων. Παρά το γεγονός ότι στο συγκεκριμένο RVE παρατηρείται ελαφρώς υψηλότερη δυσκαμψία στον άξονα E_1 , αυτό

δεν οφείλεται σε φυσική ανισοτροπία του υλικού, αλλά πιθανών σε μικρή αριθμητική προτίμηση. Στον άξονα E_1 , που είναι ο άξονας αναφοράς στο Material Designer, η φόρτιση εφαρμόζεται άμεσα στην επιφάνεια του RVE και οι περιοδικές συνοριακές συνθήκες (PBC) απλώς εξασφαλίζουν τη συνεπή κίνηση των αντίθετων πλευρών, χωρίς επιπλέον coupling nodes ή μετασχηματισμούς. Στους άξονες E_2 και E_3 , αντίθετα, η μέτρηση της μέσης παραμόρφωσης απαιτεί επιπλέον υπολογισμούς για να ικανοποιηθούν οι PBC, με αποτέλεσμα οι αντίστοιχες δυσκαμψίες να εμφανίζονται ελαφρώς χαμηλότερες. Επιπλέον, καθώς για κάθε ποσοστό όγκου σωματιδίων χρησιμοποιήθηκε μία μόνο τυχαία κατανομή σωματιδίων μέσα στο RVE (Seed=1) και η ακριβέστερη εκτίμηση της πραγματικής ιστροπικής συμπεριφοράς που αναμενόταν, θα προέκυπτε με πολλαπλά RVE και μέσο όρο των αποτελεσμάτων.

Στην επόμενη ενότητα των αποτελεσμάτων θα παρουσιαστούν οι κύριες 9 σταθερές του υλικού καθώς, βάσει των αποτελεσμάτων, θεωρείται ορθότροπο σύνθετο.

5.2.6 Σύνθετο με ασυνεχείς και τυχαία κατανεμημένες ίνες Chopped Fiber Composite

Επιλέγουμε την RVE γεωμετρία Random Particle (Εικ. 5.54):



Εικόνα 5.54: Επιλογή Γεωμετρίας "Chopped Fiber Composite"

Στην κατηγορία *Geometry* επιλέγονται τα εξής (Εικ. 5.55):

Options - Chopped fiber

General

Fiber volume fraction: P

Seed: Regenerate

Orientation Tensor:

a11: P

a22: P

a33:

Aspect ratio: P

Fiber diameter: P

Advanced

Repeat count:

Εικόνα 5.55: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Geometry" για Chopped Fiber Composite με $V_f = 0.15$

Στο Chopped Fiber RVE, οι παράμετροι a11, a22 και a33 καθορίζουν το ποσοστό των ινών που ευθυγραμμίζονται κατά τους άξονες x, y και z αντίστοιχα. Όταν θέτουμε $a_{11} = a_{22} = a_{33} = 0,33333$, αυτό σημαίνει ότι οι ίνες κατανέμονται ισομερώς σε όλες τις τρεις διαστάσεις, χωρίς καμία προτίμηση σε συγκεκριμένη διεύθυνση.

Στην κατηγορία Analysis Settings θέτουμε τα εξής (Εικ. 5.56):

Options - Settings

Material Properties

Type of Anisotropy:

☒ Compute Linear Elasticity

☐ Compute Coefficients of Thermal Expansion

☐ Compute Thermal Conductivity

General

☒ Use Periodic Boundary Conditions

☐ Use Material Symmetry in XY

☐ Use Material Symmetry in XZ

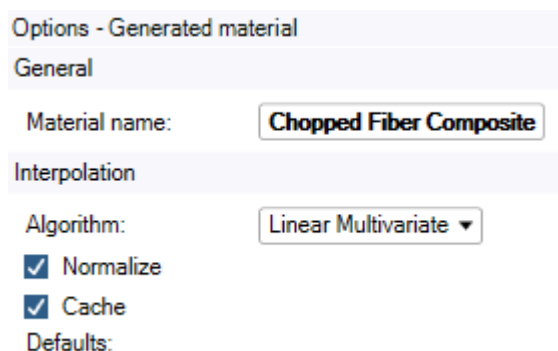
☐ Use Material Symmetry in YZ

Temperature: P

Reference Temperature: P

Εικόνα 5.56: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Analysis settings" για Chopped Fiber Composite

Στην επιλογή *Variable Material Generated Material* δίνουμε το όνομα του υλικού που θα ομογενοποιηθεί (Εικ. 5.57):



Options - Generated material

General

Material name: **Chopped Fiber Composite**

Interpolation

Algorithm: **Linear Multivariate**

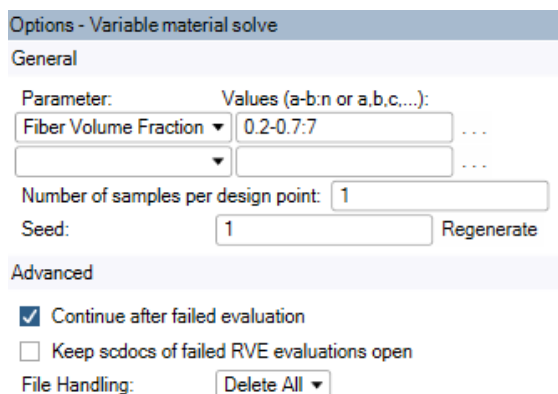
☒ Normalize

☒ Cache

Defaults:

Εικόνα 5.57: Όνομα Υλικού στην ενότητα "Generated Material"

Τέλος, στο *Variable Material Evaluation* θέτουμε (Εικ. 5.58):



Options - Variable material solve

General

Parameter: **Fiber Volume Fraction** Values (a-b:n or a,b,c,...): **0.2-0.7:7**

Number of samples per design point: **1**

Seed: **1** Regenerate

Advanced

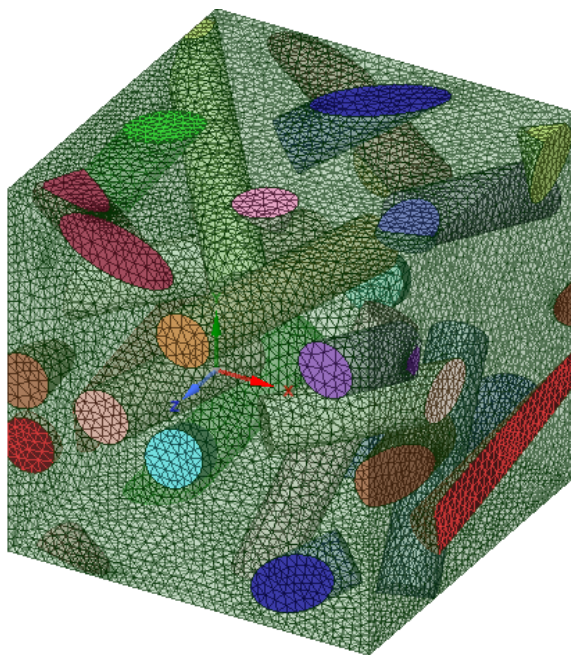
☒ Continue after failed evaluation

☐ Keep sodocs of failed RVE evaluations open

File Handling: **Delete All**

Εικόνα 5.58: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Variable material" για Chopped Fiber Composite

Η γεωμετρία του RVE με το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί μετά τις παραπάνω αλλαγές και είναι έτοιμη για προσομοίωση είναι η εξής (Εικ. 5.59):



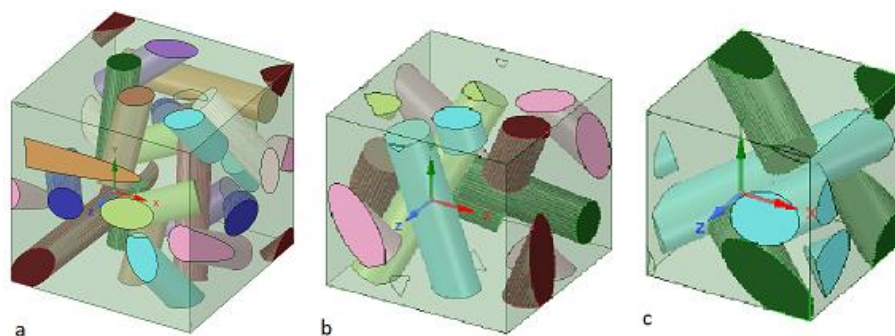
Εικόνα 5.59: Διακριτοποιημένη Γεωμετρία "Chopped Fiber Composite"

Αφού τρέξουμε την προσομοίωση, λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα από την επιλογή *Results* (Εικ. 5.60):

Fiber Volume Fraction	0,20541	0,28333	0,23169	0,45	0,53333	0,61667	0,24453	
Seed	534011718	237820880	1002897798	1657007234	1412011072	929393559	760389092	
Engineering Constants								
E1	8750,3	NaN	8625,7	NaN	NaN	NaN	9083,8	MPa
E2	9359,1	NaN	13413	NaN	NaN	NaN	7598,5	MPa
E3	7902,9	NaN	7338,4	NaN	NaN	NaN	8482,6	MPa
G12	3295,9	NaN	4030,6	NaN	NaN	NaN	3724,6	MPa
G23	3505,2	NaN	3447,1	NaN	NaN	NaN	3264,3	MPa
G31	3021,8	NaN	2864,8	NaN	NaN	NaN	5265,4	MPa
nu12	0,27699	NaN	0,21146	NaN	NaN	NaN	0,33858	
nu13	0,34835	NaN	0,42283	NaN	NaN	NaN	0,42188	
nu23	0,37891	NaN	0,38351	NaN	NaN	NaN	0,282	

Εικόνα 5.60: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Chopped Fiber Composite για διαφορετικά Vfs

Η Εικόνα 5.61 κάτω μας δείχνει πως αλλάζει το RVE με την αλλαγή του Fiber Volume fraction:



Εικόνα 5.61: Γεωμετρία σε διαφορετικά Fiber Volume Fractions για Chopped Fiber Composite a) 0,20541 b) 0,23169 c) 0,24453

Κατά τις προσομοιώσεις του Chopped Fiber RVE με Aspect Ratio = 5 και Repeat Count = 3, παρατηρήθηκε ότι το Material designer έδωσε αποτελέσματα μόνο για χαμηλά κλάσματα όγκου ινών ($V_f \approx 0.2$). Για υψηλότερα V_f , η δημιουργία RVE δεν ήταν δυνατή, καθώς οι ίνες επικαλύπτονταν ή άγγιζαν τα όρια του RVE, με αποτέλεσμα η διαδικασία πλεγματοποίησης να αποτύχει. Ως εκ τούτου, τα διαθέσιμα αποτελέσματα αφορούν μόνο τιμές V_f κοντά στο 0.2, κάτι που είναι αποδεκτό για τα τυπικά Chopped Fiber σύνθετα, καθώς οι ασυνεχείς ίνες είναι τυχαία κατανομημένες και δεν μπορούν να τοποθετηθούν πολύ πυκνά χωρίς να επικαλύπτονται ή να αγγίζουν τα όρια του RVE.

Στο Chopped Fiber Composite RVE, όλες οι κύριες ελαστικές σταθερές, οι διατμητικές σταθερές και οι συντελεστές Poisson είναι διαφορετικές, ωστόσο η διαφορά μεταξύ των ιδιοτήτων στις τρεις κύριες διευθύνσεις είναι σχετικά μικρή. Αυτό οφείλεται στην τυχαία αλλά και περιορισμένη κατεύθυνση των τεμαχισμένων ινών, που δεν δημιουργεί συμμετρία ούτε κύριο άξονα. Ως αποτέλεσμα, το υλικό εμφανίζει ορθοτροπική συμπεριφορά με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες κατά μήκος των τριών κύριων αξόνων. Στο επόμενο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων θα παρουσιαστούν και οι 9 σταθερές ώστε να απεικονίζεται πλήρως η συμπεριφορά του.

Πίνακας 5.3: Τύπος ανισοτροπίας ανάλογα με την γεωμετρία του RVE

ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ RVE	ΕΙΔΟΣ ΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
UD Composite Hexagonal	Εγκαρσίως ισότροπο
UD Composite Square	Εγκαρσίως ισότροπο
Random UD Composite	"Σχεδόν" εγκαρσίως ισότροπο
Particle	Ισότροπο
Random Particle	Ορθοτροπική συμπεριφορά
Chopped Fiber Composite	Ορθοτροπική συμπεριφορά

5.3 ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ - ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΟΓΚΟΥ ΓΙΑ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ: ΙΝΕΣ ΜΕ ΠΛΕΞΗ VS ΜΟΝΟΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ (WOVEN VS UD)

Στο τρίτο μέρος της εργασίας πραγματοποιήθηκε η δημιουργία και ανάλυση πολυστρωματικών σύνθετων υλικών τύπου sandwich, με στόχο τη σύγκριση των ελαστικών ιδιοτήτων διαφορετικών ενισχυτικών φάσεων. Αρχικά στο περιβάλλον Geometry στο ANSYS δημιουργήθηκε η γεωμετρία ενός πολυστρωματικού υλικού αποτελούμενο από τρεις διαφορετικές φάσεις.

Στη συνέχεια η γεωμετρία μεταφέρθηκε στο Material Designer όπου ορίστηκαν τα υλικά: Για την πρώτη περίπτωση οι στρώσεις του συνθέτου δόθηκαν ως εποξική ρητίνη τα δύο εξωτερικά στρώματα και σύνθετο με πλεγμένες ίνες (Woven) η ενδιάμεση στρώση (Epoxy-Woven-Epoxy). Για την δεύτερη περίπτωση οι στρώσεις ορίστηκαν ως ρητίνη τα δύο εξωτερικά στρώματα και σε αυτή την περίπτωση και η μεσαία στρώση σύνθετο με μονοκατευθυντικές ίνες άνθρακα (Epoxy- UD Carbon –Epoxy). Ακολούθησε ομογενοποίηση του αντιπροσωπευτικού όγκου ινών και σύγκριση των ελαστικών σταθερών των δύο πολυστρωματικών υλικών.

Για τη δημιουργία της γεωμετρίας χρησιμοποιήθηκαν ίδιες διαστάσεις για όλα τα RVE: πάχος 0.5 mm για τα στρώματα Epoxy και 1 mm για το Woven σύνθετο, με μήκος

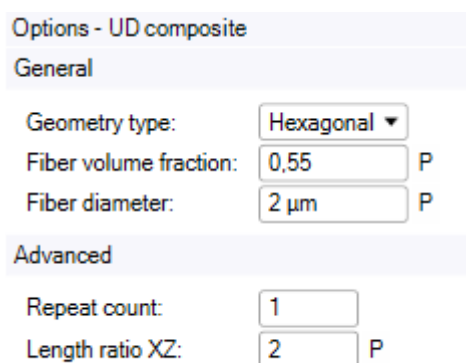
και πλάτος $10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$. Ακολουθεί αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε στο Material Designer.

Τα δύο εξωτερικά στρώματα του sandwich επιλέχθηκε να είναι εποξική ρητίνη, χωρίς ίνες ώστε να συγκριθεί μόνο η συνεισφορά του μεσαίου στρώματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα όλες οι τιμές ακαμψίας να αναμένονται μειωμένες σε σχέση με τις τιμές των RVE επειδή τα εξωτερικά στρώματα δεν φέρουν σημαντική φόρτιση. Παρόλα αυτά η διάταξη επιτρέπει να συγκρίνουμε την επίδραση της πλέξης ή μη των ινών στο μεσαίο στρώμα.

5.3.1 Δημιουργία Woven Composite

Για τη δημιουργία του Woven σύνθετου υλικού, ακολουθήθηκε αρχικά η ίδια διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε για το UD Hexagonal, με τις προσαρμογές που εμφανίζονται παρακάτω (Εικόνα 5.62 και Εικόνα 5.63) με σκοπό την δημιουργία του Epoxy Carbon UD υλικό που θα έχει το ίδιο ποσοστό όγκου ινών με το Woven και θα χρησιμοποιηθεί και για την δημιουργία του Woven αλλά και για την σύγκριση των πολυστρωματικών.

Στην κατηγορία Geometry επιλέγονται τα παρακάτω, φροντίζοντας εδώ να δώσουμε ποσοστό όγκου ινών 0.55.



Options - UD composite

General

Geometry type: Hexagonal ▼

Fiber volume fraction: 0.55 P

Fiber diameter: 2 μm P

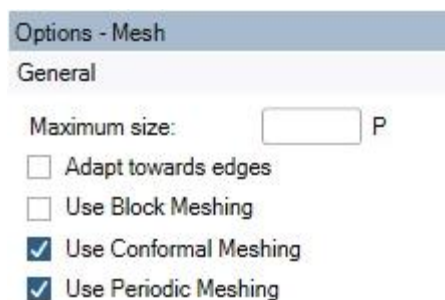
Advanced

Repeat count: 1

Length ratio XZ: 2 P

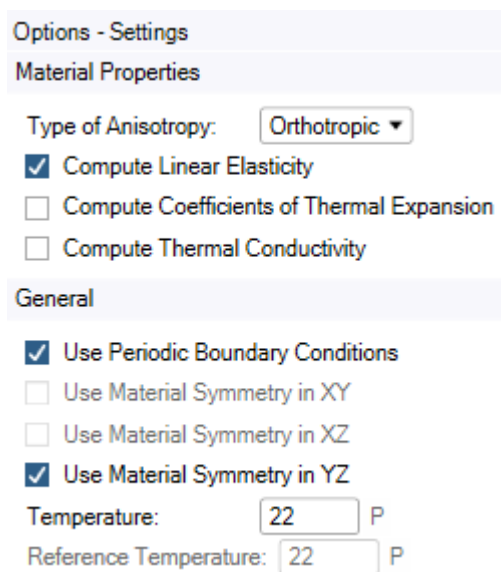
Εικόνα 5.62: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Geometry" για UD Composite Hexagonal με $V_f = 0.55$

Στη επιλογή *Mesh* επιλέγουμε τα εξής (Εικ. 5.63):



Εικόνα 5.63: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Mesh"

Στην κατηγορία *Analysis settings* θέτουμε τα εξής (Εικ. 5.64):



Εικόνα 5.64: Διαμόρφωση παραμέτρων στην ενότητα "Analysis settings"

Στην επιλογή *Constant Material* δίνουμε το όνομα του υλικού που θα ομογενοποιηθεί (Εικ. 5.65):

Options - Generated material

General

Material name: **Epoxy Carbon UD Vf 0.55**

Εικόνα 5.65: Όνομα Υλικού στην ενότητα "Constant Material"

Αφού πάρουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ομογενοποίηση του πολυστρωματικού υλικού Epoxy – Carbon UD (Εικ. 5.66), μπορούμε να τα εισάγουμε στο Engineering Data ως νέο υλικό (Εικόνα 5.68).

Engineering Constants		
E1	1,3001E+05	MPa
E2	9567,2	MPa
E3	9567,1	MPa
G12	5441,9	MPa
G23	3179	MPa
G31	5441,9	MPa
nu12	0,3103	
nu13	0,31031	
nu23	0,50497	

Εικόνα 5.66 Αποτελέσματα προσομοίωσης για Epoxy Carbon UD με Vf= 0.55

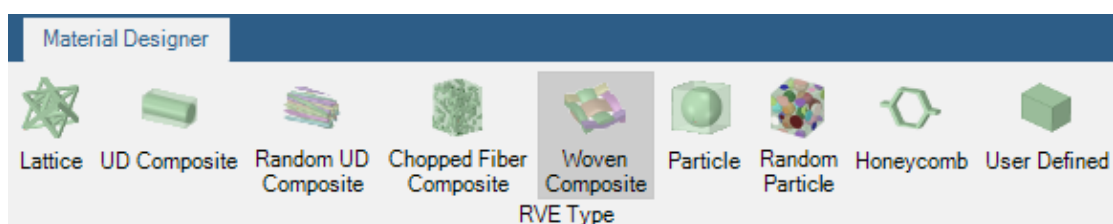
Fiber Volume Fraction	0,2	0,28333	0,36667	0,45	0,53333	0,61667	0,7	
Engineering Constants								
E1	50682	69569	88457	1,0735E+05	1,2623E+05	1,4512E+05	1,6401E+05	MPa
E2	7030,3	7550,1	8112,9	8733,7	9420,9	10188	11033	MPa
E3	7030,3	7550,1	8112,9	8733,7	9420,9	10188	11033	MPa
G12	2783,5	3226,2	3760,4	4418,1	5248,2	6342,7	7846,1	MPa
G23	2324,5	2494,2	2682,6	2893,4	3128,6	3393,3	3682,7	MPa
G31	2783,5	3226,2	3760,4	4418,1	5248,2	6342,7	7846,1	MPa
nu12	0,33735	0,33067	0,32415	0,31777	0,31153	0,30541	0,29942	
nu13	0,33735	0,33068	0,32416	0,31778	0,31154	0,30544	0,29942	
nu23	0,51223	0,51358	0,51217	0,5093	0,50573	0,50174	0,49834	

Εικόνα 5.67: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Epoxy Carbon UD για διαφορετικά Vfs

Properties of Outline Row 5: Epoxy UD Carbon			
	A	B	
1	Property	Value	
2	 Material Field Variables	 Table	
3	 Orthotropic Elasticity		
4	Young's Modulus X direction	1,3001E+05	MPa
5	Young's Modulus Y direction	9567,2	MPa
6	Young's Modulus Z direction	9567,2	MPa
7	Poisson's Ratio XY	0,3103	
8	Poisson's Ratio YZ	0,50497	
9	Poisson's Ratio XZ	0,3103	
10	Shear Modulus XY	5441,9	MPa
11	Shear Modulus YZ	3179	MPa
12	Shear Modulus XZ	5441,9	MPa

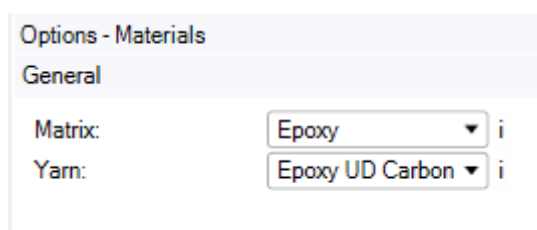
Εικόνα 5.68: Εισαγωγή νέου Υλικού Epoxy – Carbon UD στο Engineering Data

Ανοίγουμε το Material Designer και επιλέγουμε ως RVE το Woven Composite



Εικόνα 5.69: Επιλογή Γεωμετρίας "Woven Composite"

Ορίζουμε τα υλικά ως Matrix το Epoxy και ως Yarn το Epoxy Carbon UD (Εικ. 5.70):



Εικόνα 5.70: Επιλογή Υλικών για Matrix και Yarn για την δημιουργία του Woven

Στην κατηγορία *Geometry* επιλέγονται τα εξής (Εικ. 5.71):

Options - Woven composite

General

Weaving type: Plain ▼

Fiber volume fraction: 0,55 P

Yarn Fiber Volume fraction: 0,65 P

Shear angle: 0 P

Yarn spacing: 1 mm P

Fabric thickness: 0,2 mm P

Advanced

Repeat count: 1

☐ Align yarn with x direction.

Algorithm: Flattened Lenticular (high fiber volume fracti

Εικόνα 5.71: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Geometry" για Woven

Στην κατηγορία *Mesh* επιλέγονται τα εξής (Εικ. 5.72):

Options - Mesh

General

Maximum size: P

☐ Adapt towards edges

☐ Use Block Meshing

☒ Use Conformal Meshing

☒ Use Periodic Meshing

Εικόνα 5.72: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Mesh"

Στην κατηγορία *Analysis settings* θέτουμε τα εξής (Εικ. 5.73):

Options - Settings

Material Properties

Type of Anisotropy: Orthotropic ▼

☒ Compute Linear Elasticity

☐ Compute Coefficients of Thermal Expansion

☐ Compute Thermal Conductivity

General

☒ Use Periodic Boundary Conditions

☒ Use Material Symmetry in XY

☐ Use Material Symmetry in XZ

☐ Use Material Symmetry in YZ

Temperature: 22 P

Reference Temperature: 22 P

Εικόνα 5.73: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Analysis settings" για Woven

Επιλέγουμε *Constant Material* και δίνουμε το όνομα του νέου υλικού (Εικ. 5.74).

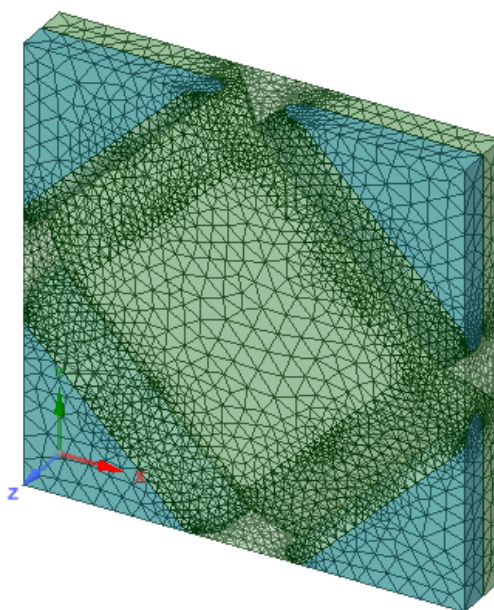
Options - Constant material solve

General

Material name: Woven Composite

Εικόνα 5.74: Όνομα Υλικού στην ενότητα "Constant Material"

Η γεωμετρία του RVE με το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί μετά τις παραπάνω αλλαγές και είναι έτοιμη για προσομοίωση είναι η εξής (Εικ. 5.75):



Εικόνα 5.75 Διακριτοποιημένη Γεωμετρία Woven

Αφού τρέξουμε την προσομοίωση, λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα από την επιλογή *Results* (Εικ. 5.76, 5.77)

E1	1,5242E+10	Pa
E2	1,5242E+10	Pa
E3	1,0815E+10	Pa
G12	1,8689E+10	Pa
G23	3,9486E+09	Pa
G31	3,9486E+09	Pa
nu12	0,68135	
nu13	0,18061	
nu23	0,18061	
Fabric Fiber Angle		
phi	45	degree

Εικόνα 5.76: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Woven

Fiber Volume Fraction	0.19413	0.27766	0.36162	0.44641	0.53307	0.61667	0.7	
Engineering Constants								
E1	8.747E+09	1.0148E+10	1.164E+10	1.3232E+10	1.4893E+10	NaN	NaN	Pa
E2	8.747E+09	1.0148E+10	1.164E+10	1.3232E+10	1.4893E+10	NaN	NaN	Pa
E3	8.0313E+09	8.7388E+09	9.3859E+09	1.0016E+10	1.067E+10	NaN	NaN	Pa
G12	9.7755E+09	1.2489E+10	1.4788E+10	1.6712E+10	1.8336E+10	NaN	NaN	Pa
G23	2.489E+09	2.7541E+09	3.0659E+09	3.4358E+09	3.8612E+09	NaN	NaN	Pa
G31	2.489E+09	2.7541E+09	3.0659E+09	3.4358E+09	3.8612E+09	NaN	NaN	Pa
nu12	0.66459	0.6934	0.70366	0.70149	0.68575	NaN	NaN	
nu13	0.18451	0.16974	0.16557	0.16847	0.17817	NaN	NaN	
nu23	0.18451	0.16974	0.16557	0.16847	0.17817	NaN	NaN	
Fabric Fiber Angle								
phi	45	45	45	45	45	NaN	NaN	degree

Εικόνα 5.77: Αποτελέσματα προσομοίωσης Woven για διαφορετικά Vfs

Στο RVE Woven παρατηρείται συμμετρία κατά μήκος των αξόνων 1 και 2, ενώ κατά μήκος του άξονα 3 παρουσιάζεται διαφορετική συμπεριφορά: Κύριες ελαστικές σταθερές $E1 = E2 \neq E3$, διατμητικές σταθερές $G23 = G13 \neq G12$ και συντελεστές Poisson με $\nu23 = \nu13 \neq \nu12$. Αυτή η συμμετρία μεταξύ των δυο κύριων αξόνων και η διαφορετική συμπεριφορά κατά μήκος του κάθετου άξονα κάνουν το υλικό μας ορθοτρόπο με απλοποιημένη μήτρα ελαστικότητας από τα εξ ορισμού ορθότροπα, λόγω της συμμετρίας στον άξονα 1,2.

5.3.2 Δημιουργία Epoxy-Woven-Epoxy

Στην επόμενη φάση της προσομοίωσης θα υπολογιστούν οι μηχανικές ιδιότητες του πολυστρωματικού υλικού, στο οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως ενδιάμεση στρώση το Woven που δημιουργήθηκε. Το πολυστρωματικό σύστημα που θα προσομοιωθεί έχει τη μορφή Epoxy – Woven – Epoxy.

Αφού πάρουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προηγούμενη προσομοίωση για το Woven με $V_f = 0.55$ μπορούμε να τα εισάγουμε στο Engineering Data ως νέο υλικό (Εικ. 5.78).

Properties of Outline Row 6: Woven			
	A	B	
1	Property	Value	
2	Material Field Variables	Table	
3	Orthotropic Elasticity		
4	Young's Modulus X direction	1,5242E+10	Pa
5	Young's Modulus Y direction	1,5242E+10	Pa
6	Young's Modulus Z direction	1,0815E+10	Pa
7	Poisson's Ratio XY	0,68135	
8	Poisson's Ratio YZ	0,18061	
9	Poisson's Ratio XZ	0,18061	
10	Shear Modulus XY	1,8689E+10	Pa
11	Shear Modulus YZ	3,9486E+09	Pa
12	Shear Modulus XZ	3,9486E+09	Pa

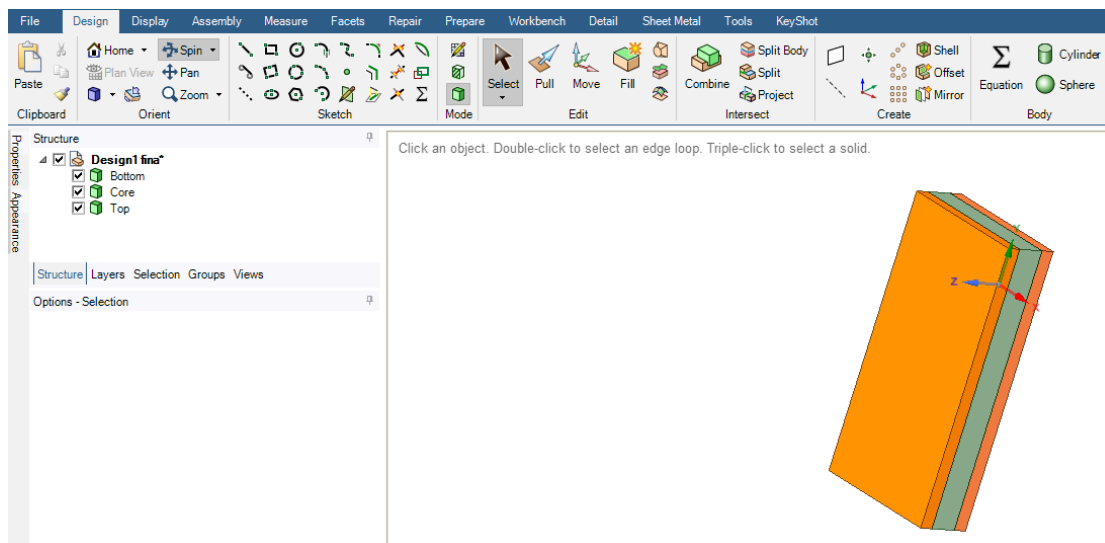
Εικόνα 5.78: Εισαγωγή νέου Υλικού Woven στο Engineering Data

Ανοίγουμε το ANSYS Workbench και προσθέτουμε Geometry Component στο Project Schematic (Εικ. 5.79)

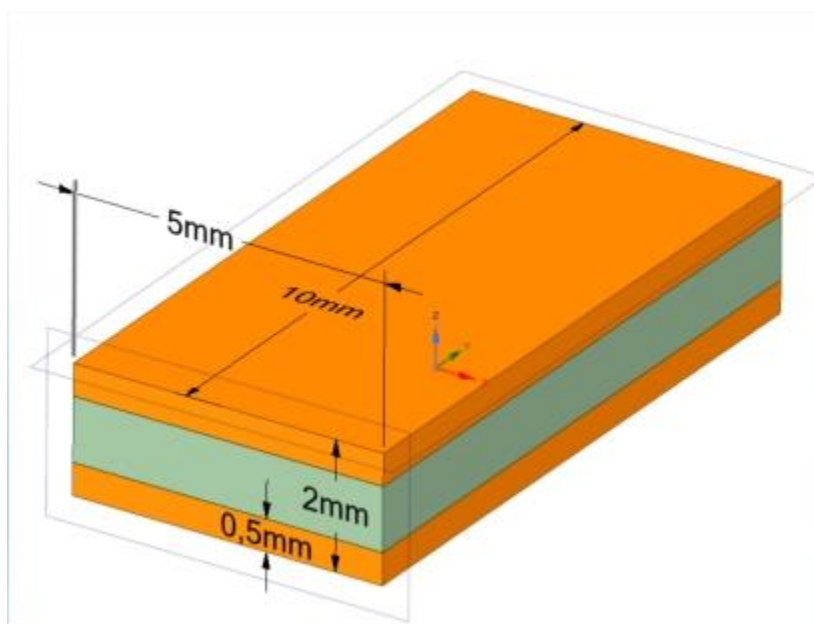


Εικόνα 5.79: Προσθήκη Geometry στο Project Schematic

Επιλέγουμε με δεξί κλικ την γεωμετρία από το Geometry και επιλέγουμε New SpaceClaim Geometry, και δημιουργούμε εκεί την γεωμετρία που θέλουμε (Εικ. 5.80, 5.81):



Εικόνα 5.80: Δημιουργία Πολυστρωματικού στο SpaceClaim Geometry



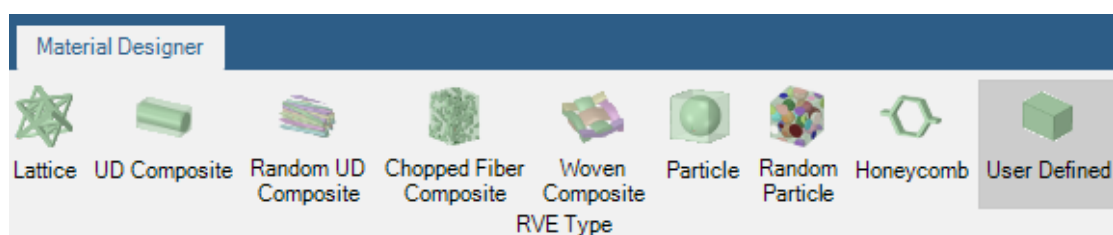
Εικόνα 5.81: Διαστάσεις Πολυστρωματικού Υλικού που δημιουργήθηκε

Στο Engineering data προσθέτουμε το υλικό Epoxy και επιλέγουμε από το Linear Elasticity την επιλογή Isotropic Elasticity και δίνουμε στο υλικό τις παρακάτω ελαστικές ιδιότητες (Εικ. 5.82).

Properties of Outline Row 4: Epoxy2			
	A	B	
1	Property	Value	
2	 Material Field Variables	 Table	
3	 Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's M... 	
5	Young's Modulus	3000	MPa
6	Poisson's Ratio	0,37	
7	Bulk Modulus	3,8462E+09	Pa
8	Shear Modulus	1,0949E+09	Pa

Εικόνα 5.82: Ιδιότητες Υλικού "Epoxy" στο Engineering Data

Στη συνέχεια, επιλέγουμε από το Project Schematic το Material Designer και από το μενού επιλογών της γεωμετρίας επιλέγουμε το User Defined (Εικ. 5.83):



Εικόνα 5.83: Επιλογή Γεωμετρίας "User Defined RVE"

- Εισάγουμε την γεωμετρία που φτιάξαμε στο Geometry
- Εισάγουμε τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν
- Θέτουμε τα υλικά στις επιφάνειες του υλικού (Εικ. 5.84)

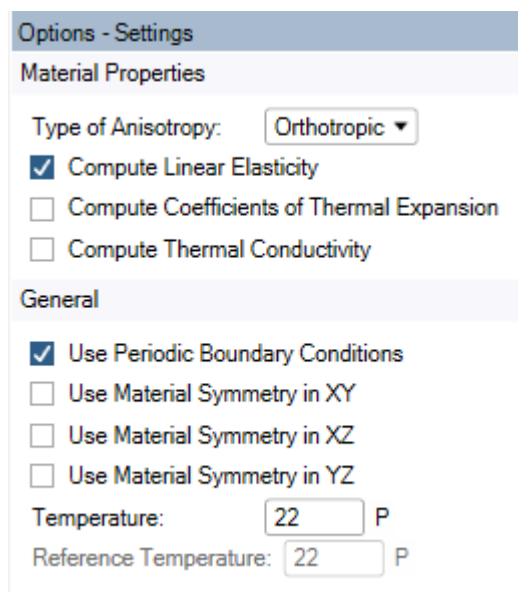
Phase names:	
Phase 1:	Epoxy Layer
Phase 2:	Woven Layer
Options - Materials	
General	
Epoxy Layer :	Epoxy2 ▾ i
Woven Layer:	Woven ▾ i
Options - User defined RVE	
General	
Name:	
Phase assignment:	
Epoxy Layer (2 bodies)	
Woven Layer (1 body)	

Εικόνα 5.84: Ανάθεση υλικών που θα χρησιμοποιηθούν και ανάθεση υλικού σε κάθε επιφάνεια του πολυστρωματικού υλικού

Δίνουμε τις κατηγορίες *Mesh*, *Analysis Settings* όπως δίνονται στις Εικ. 5.85, 5.86.

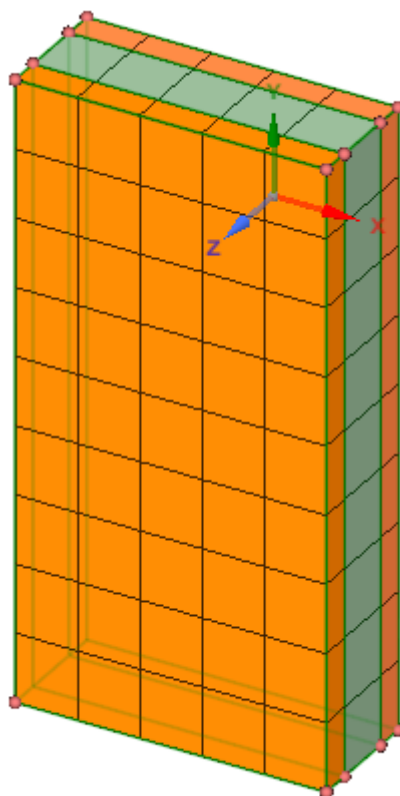
Options - Mesh	
General	
Maximum size:	P
☐ Adapt towards edges	
☒ Use Block Meshing	
☒ Use Conformal Meshing	
☐ Use Periodic Meshing	

Εικόνα 5.85: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Mesh" για το πολυστρωματικό υλικό



Εικόνα 5.86: Διαμόρφωση Παραμέτρων στην ενότητα "Analysis settings" για το πολυστρωματικό υλικό

Η γεωμετρία του RVE με το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί μετά τις παραπάνω αλλαγές και είναι έτοιμη για προσομοίωση είναι η εξής (Εικ. 5.87):



Εικόνα 5.87: Διακριτοποιημένη Γεωμετρία Πολυστρωματικού Υλικού

Αφού τρέξουμε την προσομοίωση, λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα από την επιλογή *Results* (Εικ. 5.88):

E1	9,2711E+09	Pa
E2	9,2711E+09	Pa
E3	6,2864E+09	Pa
G12	9,8919E+09	Pa
G23	1,7144E+09	Pa
G31	1,7144E+09	Pa
ν ₁₂	0,64745	
ν ₁₃	0,20344	
ν ₂₃	0,20344	

Εικόνα 5.88: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Epoxy-Woven-Epoxy

5.3.3 Δημιουργία Epoxy - Carbon UD - Epoxy

Επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία χρησιμοποιώντας αντί για Woven ως ενδιάμεσο υλικό στο πολυστρωματικό, το Carbon UD, και λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα (Εικ. 5.89):

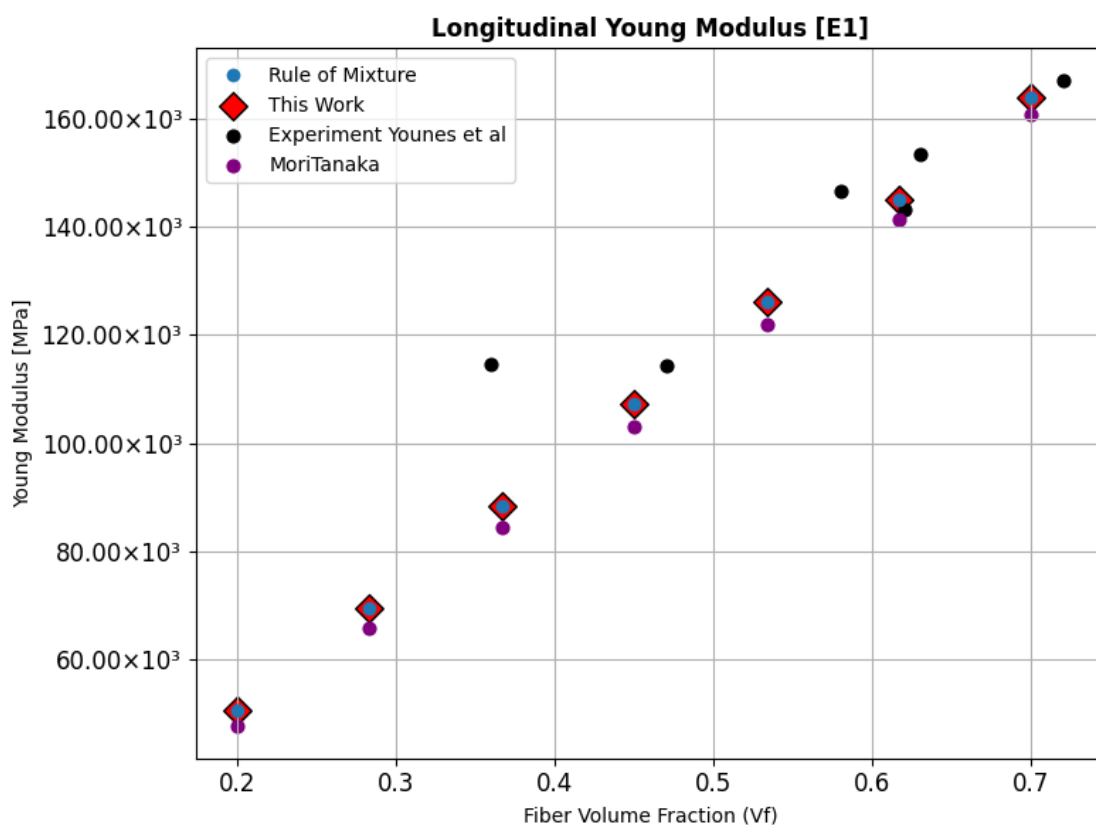
E1	6,651E+10	Pa
E2	6,4876E+09	Pa
E3	5,5386E+09	Pa
G12	3,2684E+09	Pa
G23	1,6288E+09	Pa
G31	1,823E+09	Pa
nu12	0,32613	
nu13	0,34895	
nu23	0,53468	

Εικόνα 5.89: Αποτελέσματα προσομοίωσης για Epoxy -UD Carbon-Epoxy

6.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ- ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται όλα τα διαγράμματα που προέκυψαν από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που περιγράφηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Κάθε διάγραμμα συνοδεύεται από σχολιασμό των δεδομένων που συλλέχθηκαν, με στόχο την κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες και την αξιολόγηση τους σε συνάρτηση με την θεωρία. Παράλληλα, η ανάλυση θα αναδείξει την ακρίβεια των προσομοιώσεων ή πιθανούς περιορισμούς που ενδέχεται να επηρεάσουν τα δεδομένα.

6.1 ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ



Εικόνα 6.1: Σύγκριση τιμών του E1 για διάφορα ποσοστά όγκου ινών

Η παραπάνω ανάλυση παρουσιάζει την επίδραση της φάσης ενίσχυσης στο μέτρο ελαστικότητας E_1 ενός σύνθετου υλικού. Συγκρίνονται τέσσερις προσεγγίσεις: τα δεδομένα της παρούσας διπλωματικής εργασίας «this work», δύο αναλυτικά μοντέλα Rule of Mixtures (ROM) και Mori-Tanaka, καθώς και πειραματικά δεδομένα από την βιβλιογραφία.

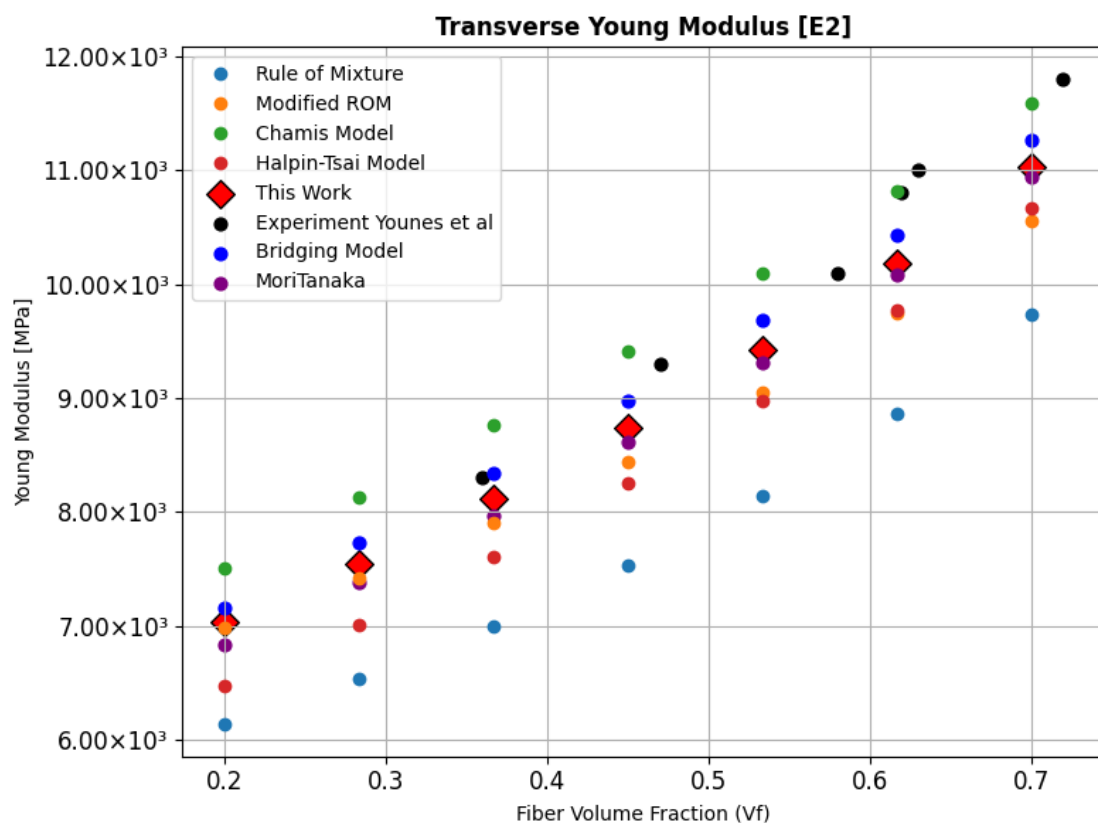
Όλα τα αποτελέσματα για μονοκατευθυντικά σύνθετα υλικά δείχνουν αύξηση του συντελεστή E_1 με την αύξηση του ποσοστού όγκου ίνας (V_f), όπως αναμένεται από τη μικρομηχανική των σύνθετων: καθώς το V_f αυξάνεται, οι ίνες, που είναι προσανατολισμένες κατά την κύρια διεύθυνση και έχουν υψηλότερη ελαστική σταθερά από τη μήτρα, φέρουν μεγαλύτερο μέρος του φορτίου, ενισχύοντας τη συνολική ακαμψία του υλικού.

Οι τιμές που προκύπτουν από τα δύο αναλυτικά μοντέλα είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, με την προσέγγιση ROM να δίνει ελαφρώς υψηλότερες τιμές σε σχέση με το μοντέλο Mori-Tanaka. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς το ROM υποθέτει τέλεια ευθυγράμμιση και πλήρη μεταφορά φορτίου από τη μήτρα στις ίνες [23] χωρίς να λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση γειτονικών μεταξύ ινών, ενώ το μοντέλο Mori-Tanaka λαμβάνει υπόψη ότι οι ίνες δεν φέρουν πλήρως όλο ο φορτίο, αλλά ένα μέρος μεταφέρεται στην μήτρα λόγω ανομοιομορφίας. Αυτό οδηγεί σε ελαφρώς χαμηλότερη τιμή του E_1 [41]. Η μέγιστη διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων είναι σχετικά μικρή, γεγονός που δείχνει ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ των ινών δεν έχει μεγάλη επίδραση στις αναλογίες όγκου που μελετάμε.

Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής «this work», έρχονται σε συμφωνία με τα αναλυτικά μοντέλα, με μικρές αποκλίσεις. Αυτό δείχνει ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συμφωνούν πολύ καλά με τους θεωρητικούς υπολογισμούς επιβεβαιώνοντας το γεγονός ότι η γεωμετρία και οι ιδιότητες του υλικού στην προσομοίωση έχουν οριστεί σωστά.

Σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα, παρατηρείται ότι οι θεωρητικές τιμές και τα δεδομένα της παρούσας διπλωματικής υποεκτιμούν ή υπερεκτιμούν ελαφρά το πραγματικό E_1 . Βλέπουμε ότι οι πειραματικές τιμές τείνουν κυρίως να είναι υψηλότερες από τις θεωρητικές προβλέψεις. Αυτό πιθανώς οφείλεται σε παράγοντες όπως η καλύτερη

διάταξη των ινών και στην συνολικά πιο βελτιωμένη κατασκευή που οδηγούν σε πιο αποτελεσματική μεταφορά φορτίου.



Εικόνα 6.2: Σύγκριση τιμών του E2 για διάφορα ποσοστά όγκου ινών

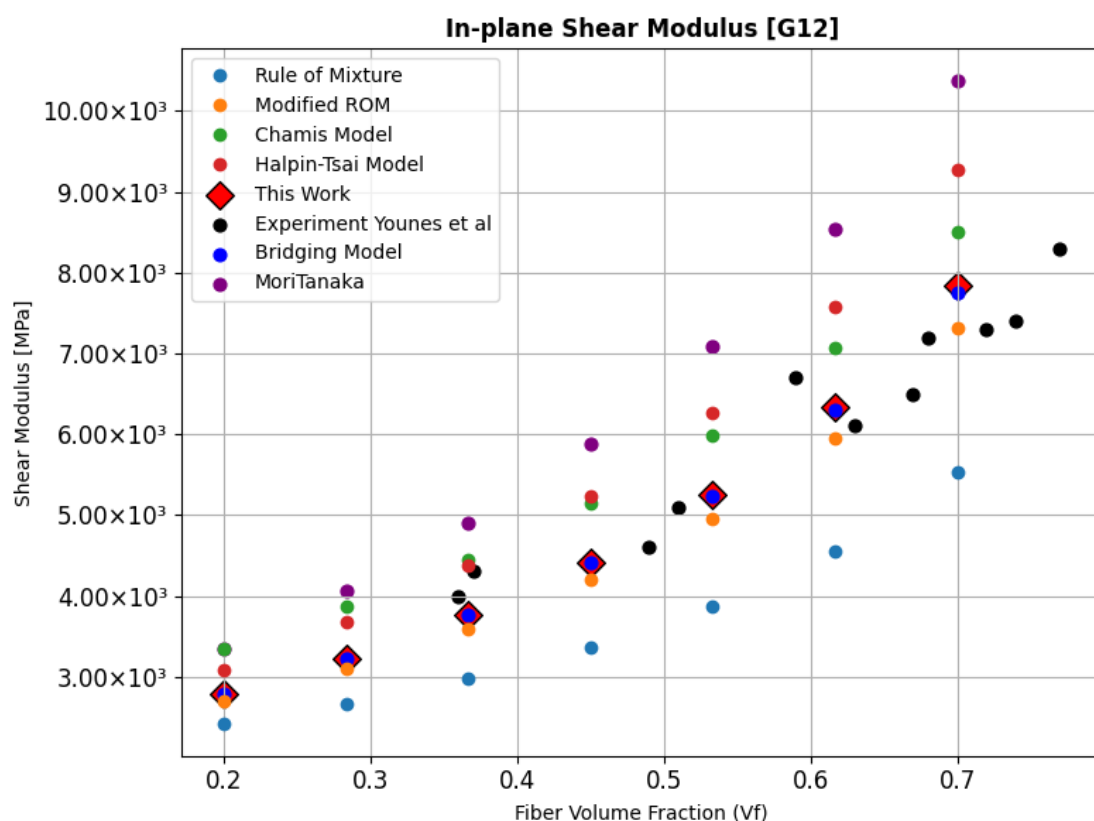
Η παραπάνω ανάλυση παρουσιάζει την επίδραση της φάσης ενίσχυσης στο μέτρο ελαστικότητας E2 ενός σύνθετου υλικού. Η σύγκριση περιλαμβάνει τα αναλυτικά μοντέλα: ROM, Modified ROM, Chamis, Halpin-Tsai, Mori-Tanaka, Bridging model, τα δεδομένα της παρούσας διπλωματικής εργασίας «this work» και πειραματικά δεδομένα.

Όλα τα αποτελέσματα για μονοκατευθυντικά σύνθετα υλικά δείχνουν αύξηση του συντελεστή E2 με την αύξηση του ποσοστού όγκου ίνας.

Όλα τα αναλυτικά μοντέλα παρουσιάζουν λογική αύξηση του E2 με το Vf, και τα περισσότερα από αυτά υποεκτιμούν ελαφρά τις πειραματικές τιμές. Οι προσομοιώσεις της

παρούσας εργασίας ακολουθούν τα αναλυτικά μοντέλα με μικρές αποκλίσεις, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία της προσομοίωσης.

Παρατηρήθηκε ότι το Bridging model έτεινε να υπερεκτιμά τις τιμές το εγκάρσιου μέτρου ελαστικότητας E_2 , ιδιαίτερα για υψηλά V_f . Το E_2 παρουσιάζει αυξημένη ευαισθησία στην αλληλεπίδραση μεταξύ ίνας και μήτρας [29] και για αυτό το λόγο για τον υπολογισμό του E_2 χρησιμοποιήθηκε η παράμετρος $b=0.6$, ενώ για τις υπόλοιπες ελαστικές σταθερές επιλέχθηκε η χρήση της παραμέτρου $b=0.5$. Με αυτή τη ρύθμιση επιτεύχθηκαν πιο ρεαλιστικές τιμές του E_2 και καλύτερη προσαρμογή στα θεωρητικά αποτελέσματα.

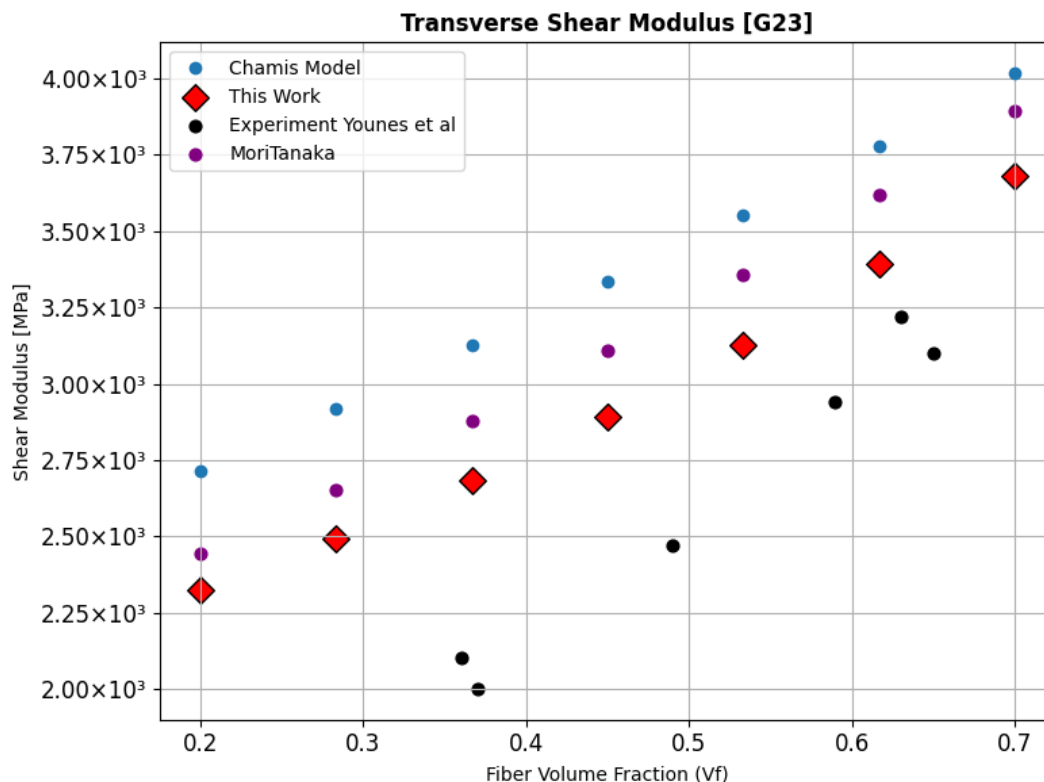


Εικόνα 6.3: Σύγκριση τιμών του G_{12} για διάφορα ποσοστά όγκου ινών

Η παραπάνω ανάλυση παρουσιάζει την επίδραση της φάσης ενίσχυσης στο μέτρο διάτμησης G_{12} ενός σύνθετου υλικού. Η σύγκριση περιλαμβάνει τα αναλυτικά μοντέλα: ROM, Modified ROM, Chamis, Halpin-Tsai, Mori-Tanaka, το Bridging model, τα δεδομένα της παρούσας διπλωματικής εργασίας «this work» και πειραματικά δεδομένα.

Τα δεδομένα του G12 για μονοκατευθυντικά σύνθετα υλικά δείχνουν αύξηση του μέτρου διάτμησης με την αύξηση του ποσοστού όγκου ίνας.

Τα αναλυτικά μοντέλα ROM, Modified ROM, Chamis, Halpin-Tsai, Mori-Tanaka, παρουσιάζουν μια γενική τάση αύξησης του G12 με την αύξηση του ποσοστού όγκου ίνας, γεγονός που είναι φυσικό αφού η προσθήκη περισσότερων ινών, οι οποίες έχουν υψηλότερη ακαμψία από τη μήτρα, περιορίζει την παραμόρφωση υπό διάτμηση και συνεπώς αυξάνει τη συνολική διατμητική ακαμψία του σύνθετου. Τα μοντέλα Chamis, Mori-Tanaka και το Halpin-Tsai δίνουν τις υψηλότερες τιμές και αυτό οφείλεται στο ότι αυτά τα μοντέλα λαμβάνουν υπόψη με διαφορετικούς τρόπους το πώς οι ίνες περιορίζουν την παραμόρφωση της μήτρας υπό διάτμηση, δηλαδή την αλληλεπίδραση ίνας-μήτρας, ενισχύοντας έτσι τη συνολική διατμητική ακαμψία του σύνθετου. Αντίθετα, το ROM που βασίζεται σε απλοποιημένες προσεγγίσεις, υποεκτιμά το G12. Το Modified ROM δίνει προβλέψεις σημαντικά πιο κοντά στα πειραματικά δεδομένα και στα αποτελέσματα αυτής της εργασίας ενώ το Bridging model παρουσιάζει τιμές υψηλότερες από ROM και Modified ROM αλλά χαμηλότερες από Chamis, Halpin-Tsai και Mori-Tanaka σε όλα τα ποσοστά όγκου ίνας. Οι προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας «this work», ακολουθούν στενά την τάση των θεωρητικών μοντέλων Modified ROM και Bridging model καθώς και των πειραματικών δεδομένων, γεγονός που επιβεβαιώνει την αξιοπιστία της μεθοδολογίας της προσομοίωσης.



Εικόνα 6.4: Σύγκριση τιμών του G23 για διάφορα ποσοστά όγκου ινών

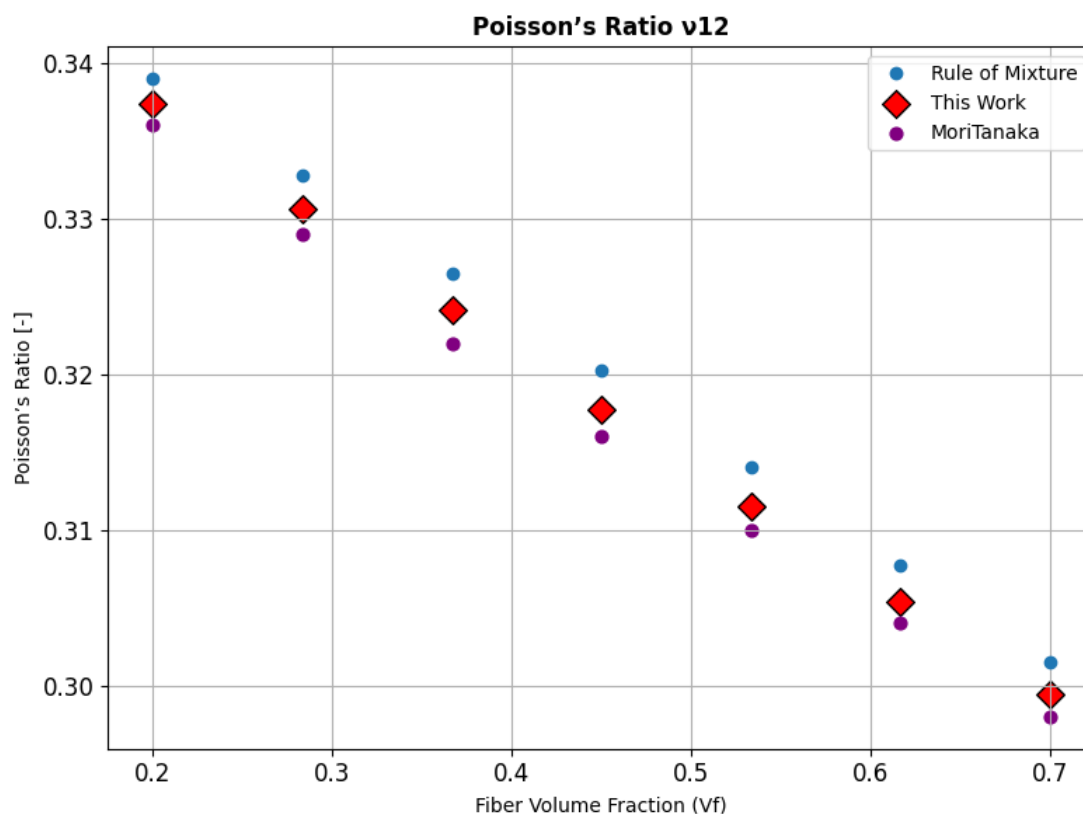
Η παραπάνω ανάλυση παρουσιάζει την επίδραση της φάσης ενίσχυσης στο μέτρο διάτμησης G23 ενός σύνθετου υλικού. Η σύγκριση περιλαμβάνει τα αναλυτικά μοντέλα: Chamis, Mori-Tanaka, τα δεδομένα της παρούσας διπλωματικής εργασίας «this work» και πειραματικά δεδομένα από την βιβλιογραφία.

Τα δεδομένα του G23 για μονοκατευθυντικά σύνθετα υλικά δείχνουν αύξηση του μέτρου διάτμησης με την αύξηση του ποσοστού όγκου ίνας.

Το θεωρητικό μοντέλο Chamis δίνει σταθερά υψηλότερες τιμές, ενώ η μέθοδος Mori-Tanaka χαμηλότερες τιμές από το Chamis, ενώ και τα δύο μοντέλα υπερεκτιμούν ελαφρώς τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτής της εργασίας. Οι διαφορές είναι μικρές και μπορούμε να πούμε ότι υπάρχει σχετικά καλή συμφωνία με τις θεωρητικές προβλέψεις και κυρίως με το μοντέλο Mori-Tanaka, γεγονός που επιβεβαιώνει την αξιοπιστία της μεθοδολογίας της προσομοίωσης.

Σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα, παρατηρείται ότι τα αναλυτικά μοντέλα τείνουν να υπερεκτιμούν το G23 για χαμηλές τιμές Vf και να προσεγγίζουν καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα σε υψηλές τιμές Vf. Οι αποκλίσεις από τα πειραματικά δεδομένα

μπορούν να αποδοθούν σε ατέλειες στη διεπιφάνεια, μικροδομικές ανωμαλίες και διαφορές στην παραγωγή των δειγμάτων.



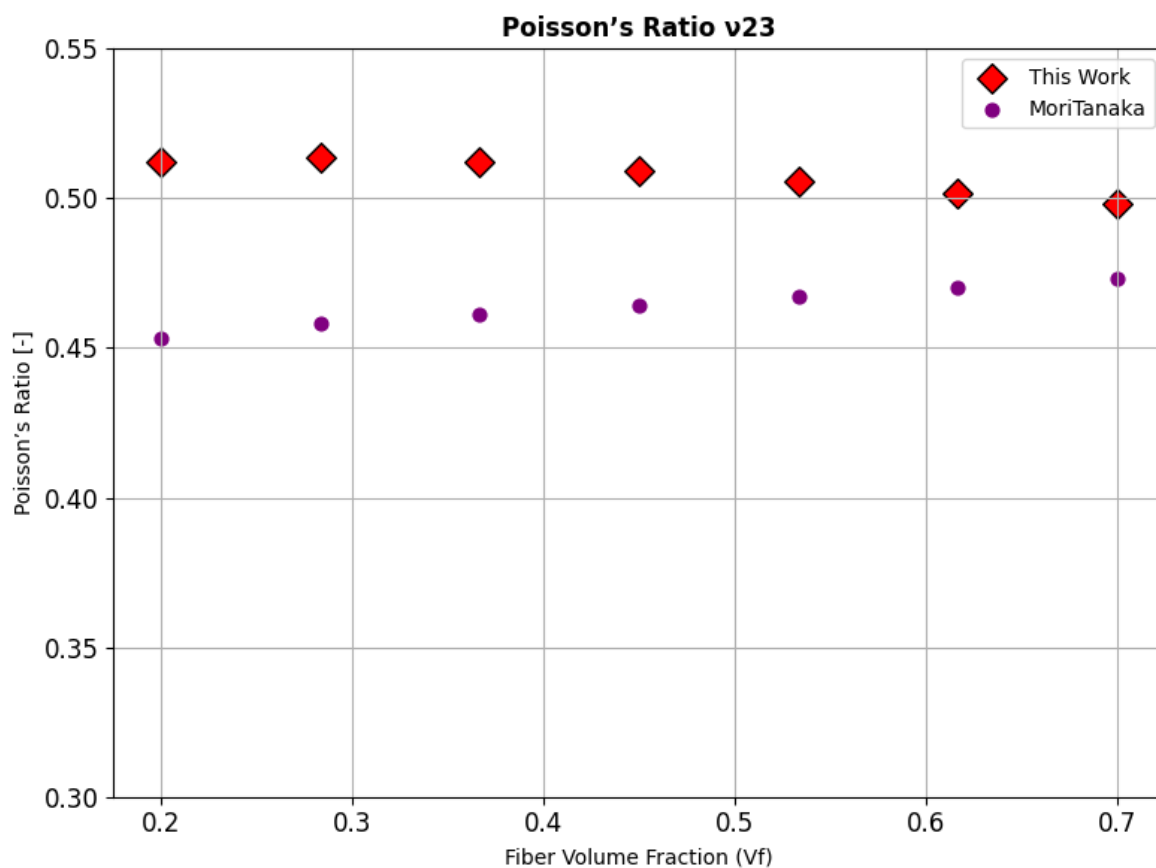
Εικόνα 6.5: Σύγκριση τιμών του ν12 για διάφορα ποσοστά όγκου ινών

Η παραπάνω ανάλυση παρουσιάζει την επίδραση της φάσης ενίσχυσης (Vf) στον λόγο Poisson ν12 ενός σύνθετου υλικού. Η σύγκριση περιλαμβάνει τα αναλυτικά μοντέλα: ROM, Modified ROM, Mori-Tanaka, και τα δεδομένα της παρούσας διπλωματικής εργασίας «this work».

Τα δεδομένα του συντελεστή Poisson ν12 για μονοκατευθυντικά σύνθετα υλικά δείχνουν σταδιακή μείωση με την αύξηση του ποσοστού όγκου ίνας (Vf), όπως αναμένεται από τη μικρομηχανική των σύνθετων: καθώς αυξάνει η περιεκτικότητα σε ίνα (πιο σκληρή και λιγότερο παραμορφώσιμη από τη μήτρα), η εγκάρσια παραμόρφωση μειώνεται, οδηγώντας σε μικρότερη τιμή ν12.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας «this work», βρίσκονται ανάμεσα στις προβλέψεις του ROM και του Mori-Tanaka, με πολύ μικρές αποκλίσεις, γεγονός που

επιβεβαιώνει την αξιοπιστία της μεθοδολογίας της προσομοίωσης. Το ROM δίνει ελαφρώς υψηλότερες τιμές, ενώ το Mori-Tanaka πιο χαμηλές, επειδή λαμβάνει καλύτερα υπόψη την αλληλεπίδραση ανάμεσα στις ίνες και την μήτρα.



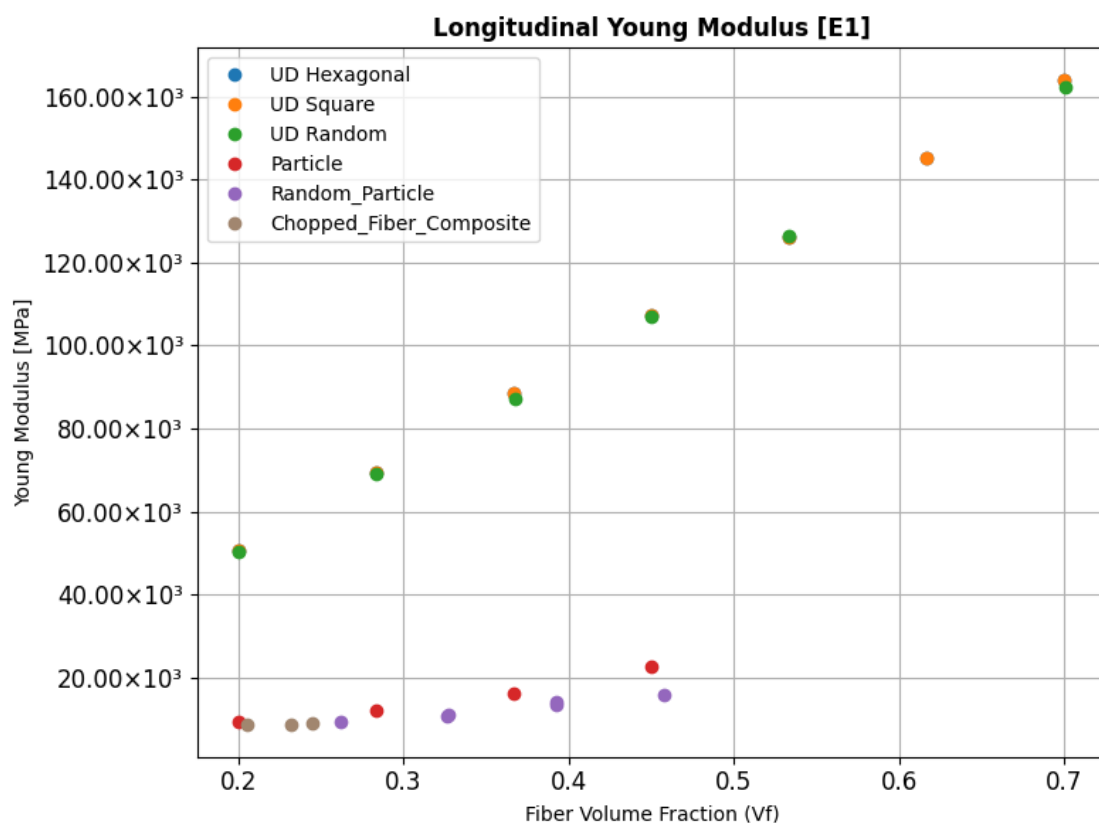
Εικόνα 6.6: Σύγκριση τιμών του ν_{23} για διάφορα ποσοστά όγκου ινών

Η παραπάνω ανάλυση παρουσιάζει την επίδραση της φάσης ενίσχυσης στον λόγο Poisson ν_{23} ενός σύνθετου υλικού. Η σύγκριση περιλαμβάνει το αναλυτικό μοντέλο Mori-Tanaka, τα δεδομένα της παρούσας διπλωματικής εργασίας «this work» και πειραματικά δεδομένα.

Τα δεδομένα παρουσιάζουν μια σαφή τάση: στο αναλυτικό μοντέλο Mori-Tanaka, η τιμή του ν_{23} αυξάνει ελαφρά με την αύξηση του ποσοστού όγκου ίνας (V_f). Αντίθετα, τα δεδομένα από τις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας «this work», δείχνουν μικρή μείωση του ν_{23} με την αύξηση του V_f . Οι τιμές συγκλίνουν περισσότερο σε μεγαλύτερα V_f .

6.2 ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το RVE του Random Particle και Chopped Fiber Composite παρουσιάζει ορθοτροπική συμπεριφορά με τις τιμές των σταθερών να διαφέρουν μεταξύ των αξόνων. Αντίθετα, οι υπόλοιπες περιπτώσεις RVE είναι είτε εγγκαρσίως ισοτροπικές, είτε στην περίπτωση του Particle, πλήρως ισοτροπική, γεγονός που συνεπάγεται ότι $E_2=E_3$. Για αυτό το λόγο, κρίθηκε σκόπιμο στο διάγραμμα σύγκρισης E_2 να συμπεριληφθεί και η τιμή E_3 του Random Particle και Chopped Fiber RVE, καθώς εφόσον για τα υπόλοιπα RVE το E_3 είναι ίσο με το E_2 , επιτρέπεται η άμεση σύγκριση. Το ίδιο θα ακολουθήσει και στα διαγράμματα G_{12} και ν_{12} , όπου θα προστεθεί το G_{31} και ν_{13} αντίστοιχα, για την περίπτωση του Chopped fiber RVE.



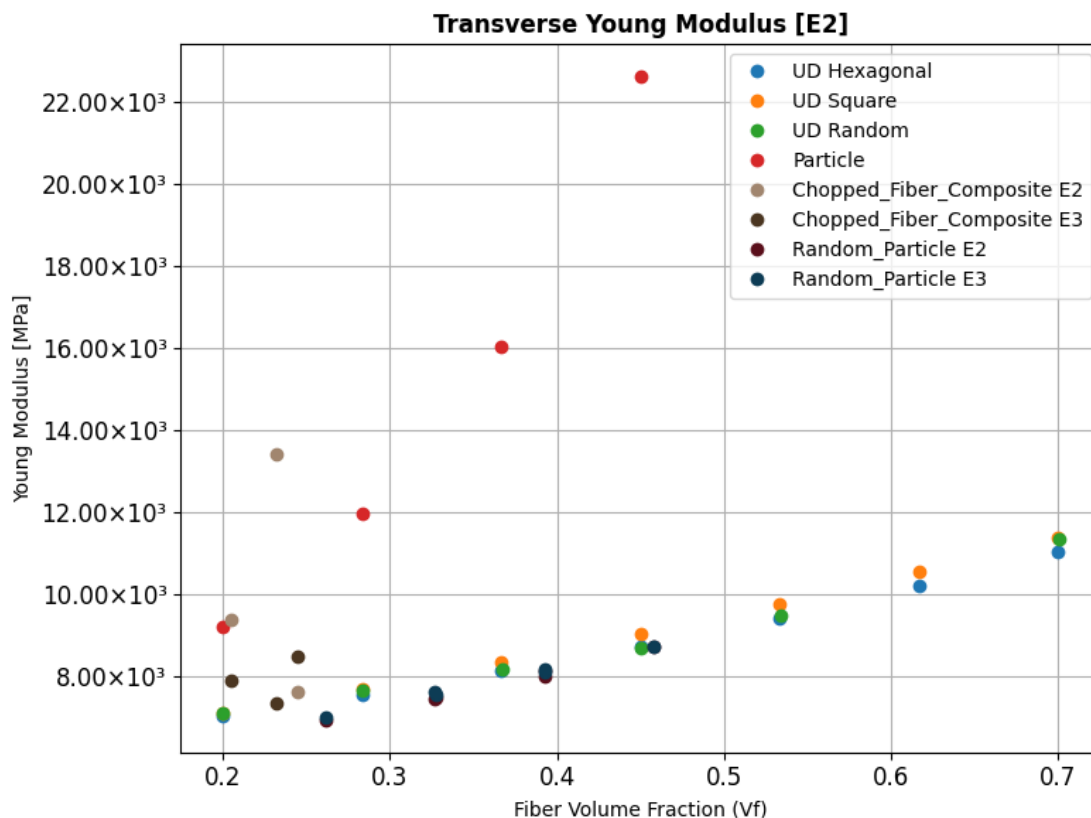
Εικόνα 6.7: Σύγκριση τιμών του E_1 για διάφορα ποσοστά όγκου ινών για διαφορετικά RVE

Βάσει των αποτελεσμάτων για το ελαστικό μέτρο E_1 , παρατηρείται ότι τα διαφορετικά RVE επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά του υλικού κατά μήκος του

άξονα των ινών. Στις περιπτώσεις με συνεχείς ίνες (UD Hexagonal, UD Square, UD Random), το E_1 αυξάνεται σημαντικά και σχεδόν γραμμικά με την αύξηση του ποσοστού όγκου ινών, φθάνοντας τιμές έως και ~ 160 GPa για $V_f=0.7$. Σε αυτά τα UD σύνθετα, το E_1 αντιστοιχεί στο ελαστικό μέτρο κατά μήκος του άξονα των ινών, δηλαδή στον άξονα φόρτισης όπου η ίνα κυριαρχεί. Η μικρή διαφοροποίηση μεταξύ των κανονικών και τυχαίων διατάξεων οφείλεται στη γεωμετρία της μικροδομής, ενώ συνολικά όλες οι διατάξεις UD συγκλίνουν σε παρόμοια συμπεριφορά, όπως αναμένεται λόγω της κυριαρχίας της ίνας κατά τον άξονα φόρτισης.

Αντίθετα, στα σύνθετα με σωματίδια (Particle και Random Particle), το E_1 παραμένει σημαντικά χαμηλότερο, με τιμές 9–23 GPa. Παρουσιάζει ανοδική τάση με την αύξηση του V_f , αλλά η ενίσχυση είναι περιορισμένη σε σχέση με τα UD υλικά. Στα υλικά με τα σωματίδια, δεν υπάρχει κυρίαρχος προσανατολισμός, συνεπώς το E_1 μπορεί να θεωρηθεί ότι θα είναι ίδιο σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. Στα σύνθετα με τυχαία κατανομή σωματιδίων (Random Particle), οι τιμές του E_1 είναι επίσης χαμηλές. Τέλος, στα σύνθετα με ασυνεχείς, τυχαία κατανεμημένες ίνες (Chopped Fiber), το E_1 παραμένει χαμηλό και σχεδόν σταθερό γύρω στα 8–9 GPa για V_f κοντά στο 0.2. Οι ίνες δεν είναι μακριές και δεν έχουν κυρίαρχη κατεύθυνση, επομένως η υψηλή ακαμψία των ανθρακονημάτων δεν αξιοποιείται πλήρως. Αυξάνοντας το κλάσμα όγκου των ινών με κόστος υπολογιστικής δύναμης και υπολογιστικού χρόνου αναμένεται ότι σε μακροσκοπικό επίπεδο και λόγω της ισομερούς κατανομής τους και στις τρεις διαστάσεις, το υλικό θα εμφανίζει σχεδόν ισοτροπική συμπεριφορά, με τις μηχανικές ιδιότητες να είναι παρόμοιες σε διαφορετικές διευθύνσεις φόρτισης. Η παρατήρηση αυτή συμφωνεί με τη βιβλιογραφία για σύνθετα με κοντές ίνες [42].

Συνολικά, από τη σύγκριση φαίνεται να επιβεβαιώνεται η αναμενόμενη κατάταξη: τα σύνθετα με συνεχείς ίνες παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ενίσχυση, ακολουθούν τα σύνθετα με σωματίδια με πιο μέτρια βελτίωση, ενώ τα σύνθετα με τυχαία κατανεμημένα σωματίδια και τα σύνθετα με ασυνεχείς, τυχαία κατανεμημένες ίνες εμφανίζουν μικρότερες τιμές. Η κατάταξη αυτή συμφωνεί με τις βασικές αρχές της μηχανικής των σύνθετων υλικών και επιβεβαιώνει την αξιοπιστία των αριθμητικών προσομοιώσεων.



Εικόνα 6.8: Σύγκριση τιμών του E2 για διάφορα ποσοστά όγκου ινών για διαφορετικά RVE

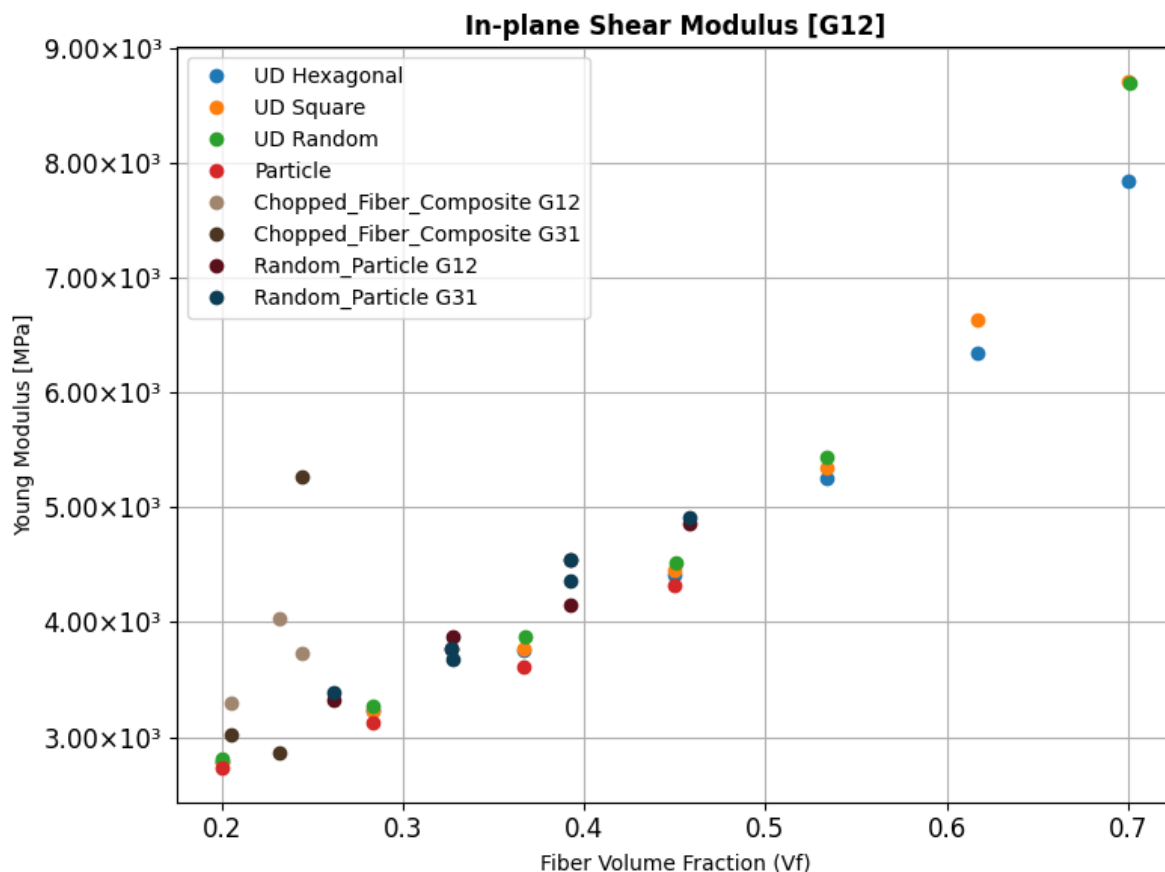
Βάσει των αποτελεσμάτων για το μέτρο ελαστικότητας E2 και E3, παρατηρείται ότι η διαφοροποίηση των RVE επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά του υλικού κατά τον άξονα 2, δηλαδή κάθετα στις ίνες και κατά τον άξονα 3 δηλαδή κάθετα στο πάχος του σύνθετου. Στις περιπτώσεις με συνεχείς ίνες (UD Hexagonal, UD Square, UD Random), το E2 κυμαίνεται περίπου μεταξύ 7-11 GPa και αυξάνεται με το ποσοστό όγκου ινών, ωστόσο η αύξηση αυτή είναι σχετικά μικρότερη σε σχέση με το E1, κάτι που δείχνει ότι στον άξονα κάθετα στις ίνες η συμπεριφορά επηρεάζεται κυρίως από την μήτρα.

Οι μικρές διαφορές μεταξύ των διαφορετικών διατάξεων UD δείχνουν ότι η γεωμετρία της διάταξης επηρεάζει ελάχιστα τη ακαμψία κάθετα στις ίνες, όπως προβλέπεται και θεωρητικά. Στα σύνθετα με σωματίδια (Particle), το E2 παρουσιάζει υψηλότερες τιμές, περίπου 9–23 GPa, λόγω της ισοτροπικής κατανομής των σωματιδίων που επιτρέπει την αποτελεσματική ενίσχυση της μήτρας σε όλες τις διευθύνσεις. Όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση του E1, αφού η ισοτροπική κατανομή των σωματιδίων δεν δημιουργεί κάποιον κυρίαρχο άξονα ενίσχυσης η τιμή του μέτρου ελαστικότητας είναι

σχεδόν ίδιο σε όλες τις κατευθύνσεις. Τα Random Particle υλικά τα E2 και E3 εμφανίζουν μικρότερες τιμές ($\sim 7\text{--}8.8$ GPa), καθώς ο τυχαίος προσανατολισμός των σωματιδίων περιορίζει την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης και μειώνει την συνολική ακαμψία.

Στα σύνθετα με ασυνεχείς, τυχαία κατανεμημένες ίνες (Chopped Fiber), οι τιμές του E2 κυμαίνονται μεταξύ 7.5 και 13.4 GPa σε V_f κοντά στο 0.2, με σημαντικές διακυμάνσεις, που οφείλονται στο γεγονός ότι οι ίνες είναι μικρές και κατανέμονται τυχαία μέσα στο υλικό με διαφορετικό προσανατολισμό σε κάθε σημείο. Μικρότερες διακυμάνσεις παρατηρούνται και για την περίπτωση του E3 για V_f κοντά στο 0.2, με τις τιμές να κυμαίνονται εδώ από 7.3–8.4 GPa.

Συνολικά, η σύγκριση των διαφορετικών RVE δείχνει ότι τα UD σύνθετα παρουσιάζουν έντονη ανισοτροπία, τα σύνθετα με σωματίδια προσφέρουν πιο ισοτροπική ενίσχυση, ενώ τα σύνθετα με τυχαία διασκορπισμένες και κομμένες ίνες παρουσιάζουν μέτρια αύξηση της ακαμψίας κάθετα στις ίνες, αλλά με αρκετές διακυμάνσεις λόγω του τυχαίου προσανατολισμού των κοντών ινών.



Εικόνα 6.9: Σύγκριση τιμών του G12 για διάφορα ποσοστά όγκου ινών για διαφορετικά RVE

Βάσει των αποτελεσμάτων για το μέτρο διάτμησης G12 και G31, παρατηρείται ότι τα διαφορετικά RVE επηρεάζουν και εδώ σημαντικά τη συμπεριφορά του υλικού στο επίπεδο 1–2, δηλαδή στο επίπεδο που περιλαμβάνει τον άξονα των ινών και τον άξονα κάθετο σε αυτές καθώς και στο επίπεδο 1-3 δηλ το επίπεδο που περιλαμβάνει τον άξονα των ινών και τον εγκάρσιο άξονα 3.

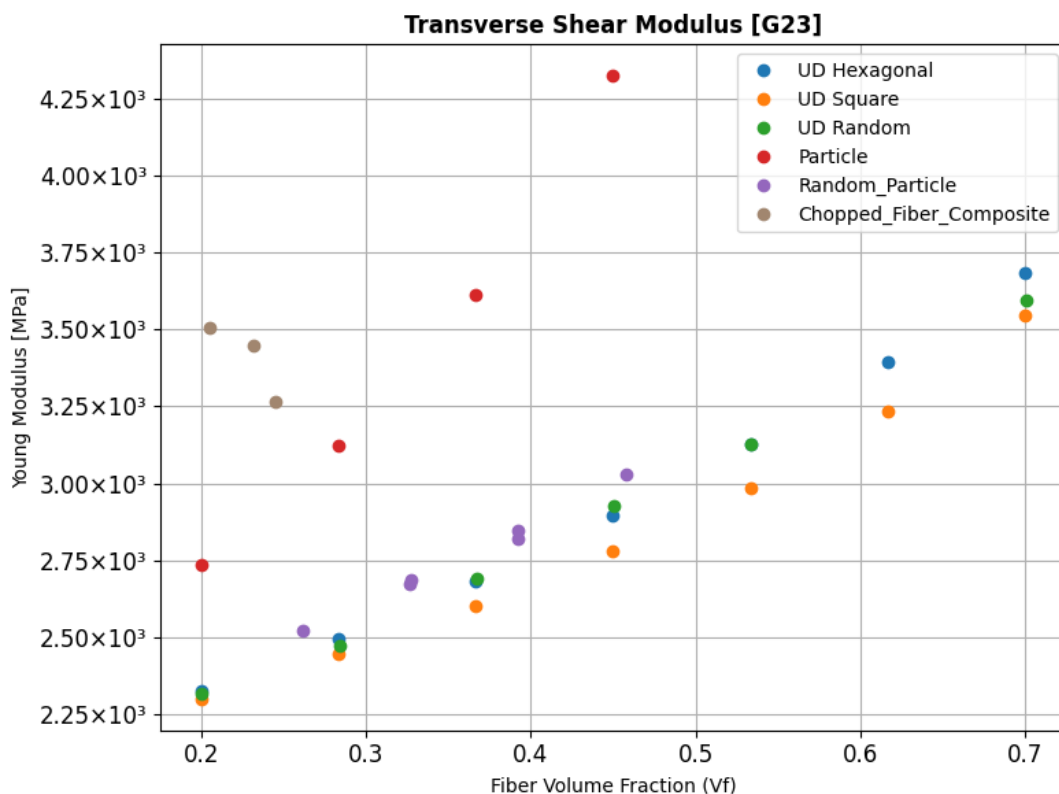
Στις περιπτώσεις με συνεχείς ίνες (UD Hexagonal, UD Square, UD Random), το G12 κυμαίνεται περίπου μεταξύ 2.8 και 8.5 GPa και αυξάνεται με το ποσοστό όγκου ινών, αυτό δείχνει ότι όσο περισσότερες ίνες υπάρχουν, τόσο περισσότερο βοηθούν το υλικό να αντιστέκεται στις διατμητικές τάσεις.

Οι μικρές διαφορές μεταξύ Hexagonal, Square και Random δείχνουν ότι η διάταξη των ινών επηρεάζει ελάχιστα τη διατμητική ακαμψία. Στα σύνθετα με σωματίδια (Particle) και τυχαία κατανομημένα σωματίδια (Random Particle), το G12 κυμαίνεται περίπου 2.7–4.9 GPa με τις τιμές των τυχαία κατανομημένων σωματιδίων να είναι ελαφρώς υψηλότερες

από αυτές των σωματιδίων με περιοδική διάταξη. Η τιμή του G12 για τα σύνθετα με περιοδική διάταξη σωματιδίων μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει σε όλες τις κατευθύνσεις, αφού η ισοτροπική κατανομή των σωματιδίων δεν δημιουργεί κάποιον κυρίαρχο άξονα ενίσχυσης. Για το σύνθετο με τυχαία κατανεμημένα σωματίδια (Random Particle) οι τιμές G12 και G31 είναι περίπου ίδιες.

Στα σύνθετα με ασυνεχείς τυχαία κατανεμημένες ίνες (Chopped Fiber), οι τιμές του G12 είναι περίπου 3.3–4.0 GPa σε Vf κοντά στο 0.2, με σημαντικές διακυμάνσεις, που και σε αυτή την περίπτωση οφείλονται στο γεγονός ότι οι ίνες είναι μικρές και κατανέμονται τυχαία μέσα στο υλικό με διαφορετικό προσανατολισμό σε κάθε σημείο. Μεγάλες διακυμάνσεις παρατηρούνται και για την περίπτωση του Chopped fiber G31 για Vf κοντά στο 0.2, με τις τιμές να κυμαίνονται εδώ από 2.9–5.2 GPa.

Συνολικά, η σύγκριση των διαφορετικών RVE δείχνει ότι τα UD σύνθετα με συνεχείς ίνες παρουσιάζουν υψηλές τιμές G12 που αυξάνονται με την ποσότητα των ινών, ενώ οι διαφορές λόγω της διάταξης των ινών (Hexagonal, Square, Random) είναι μικρές. Τα σύνθετα με σωματίδια προσφέρουν μέτρια και πιο ισοτροπική διατμητική ενίσχυση, ενώ τα σύνθετα με τυχαία διασκορπισμένες και κομμένες ίνες προσφέρουν μεγάλη ενίσχυση σε σχέση με τα υπόλοιπα σύνθετα για Vf κοντά στο 0.2. και παρουσιάζουν διακυμάνσεις λόγω του τυχαίου προσανατολισμού και της περιορισμένης αποτελεσματικότητας των κοντών ινών στη μεταφορά φορτίων.



Εικόνα 6.10: Σύγκριση τιμών του G23 για διάφορα ποσοστά όγκου ινών για διαφορετικά RVE

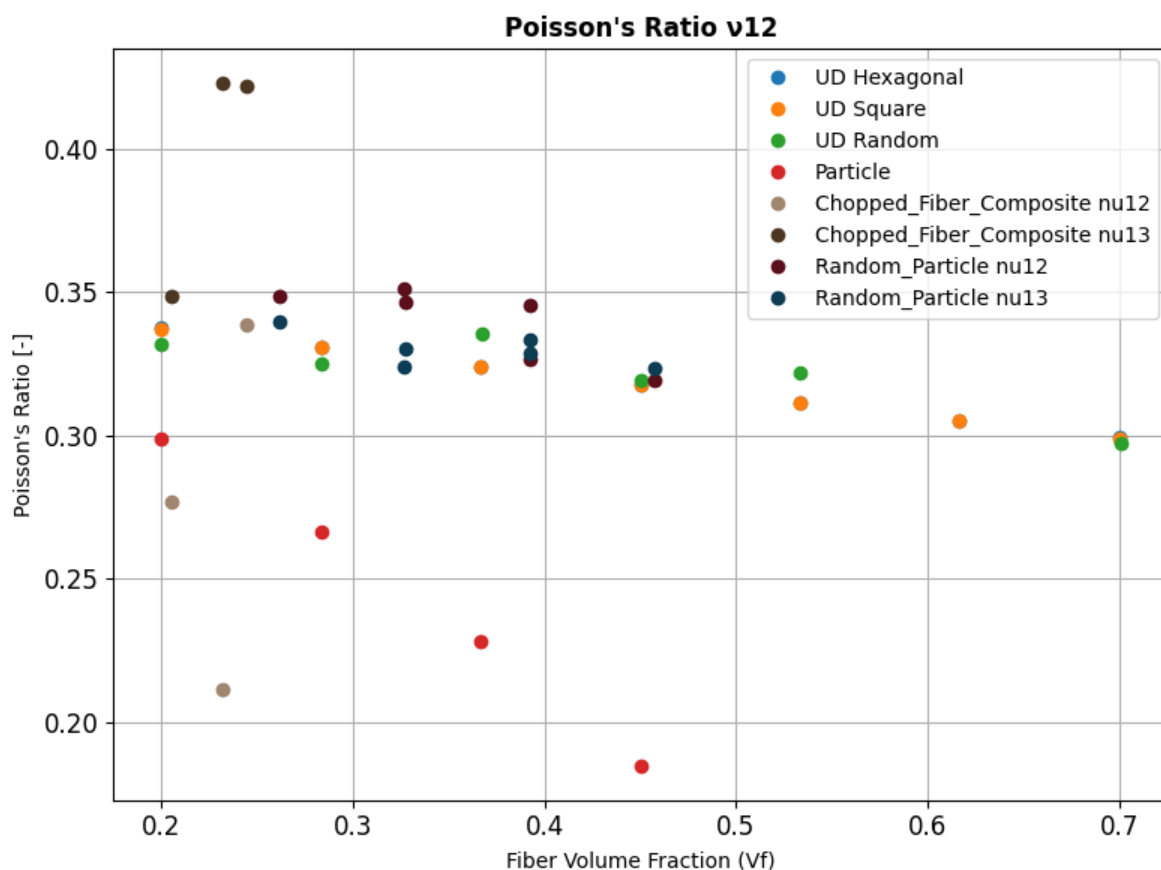
Βάσει των αποτελεσμάτων για το μέτρο διάτμησης G23, παρατηρείται ότι οι η επιλογή των RVE επηρεάζει και σε αυτή την περίπτωση σημαντικά τη συμπεριφορά του υλικού στο εγκάρσιο επίπεδο 2–3, δηλαδή στο επίπεδο που είναι κάθετο στις ίνες για τα UD σύνθετα.

Στις περιπτώσεις με συνεχείς ίνες (UD Hexagonal, UD Square, UD Random), το G23 αυξάνεται με το ποσοστό όγκου ινών και κυμαίνεται περίπου μεταξύ 2.3–3.7 GPa. Η μικρή τιμή του μέτρου διάτμησης σε σχέση με τις ίνες δείχνει ότι και σε αυτό το επίπεδο η ενίσχυση από τις ίνες είναι περιορισμένη και μήτρα παίζει σημαντικό ρόλο στην διάτμηση στο εγκάρσιο επίπεδο. Στα σύνθετα με σωματίδια (Particle) και τυχαία κατανομημένα σωματίδια (Random Particle), το G23 κυμαίνεται περίπου 2.5–4.3 GPa. Για το σύνθετο με σωματίδια, όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση του G12, η ισοτροπική κατανομή των σωματιδίων δεν δημιουργεί κάποιον κυρίαρχο άξονα ενίσχυσης, με αποτέλεσμα το μέτρο ελαστικότητας να είναι σχεδόν ίδιο σε όλες τις κατευθύνσεις. Επιπλέον, το σύνθετο με

σωματίδια (Particle) παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές ανάμεσα στα εξεταζόμενα σύνθετα, καθώς τα σωματίδια ενισχύουν αποτελεσματικά τη μήτρα παντού.

Στα σύνθετα με ασυνεχείς τυχαία κατανεμημένες ίνες (Chopped Fiber), οι τιμές του G23 κυμαίνονται περίπου μεταξύ 3.3 και 3.5 GPa σε Vf κοντά στο 0.2, με μικρές διαφορές ανάλογα με το τοπικό προσανατολισμό και την πυκνότητα των ινών στο κάθε RVE.

Συνολικά, η σύγκριση των διαφορετικών RVE δείχνει ότι τα UD σύνθετα έχουν χαμηλότερο μέτρο διάτμησης στο εγκάρσιο επίπεδο 2–3 σε σχέση με τα σύνθετα με σωματίδια, τα οποία προσφέρουν μεγαλύτερη ακαμψία G23, η οποία αυξάνεται με το ποσοστό όγκου σωματιδίων λόγω της ιστροπικής ενίσχυσης από τα άκαμπτα σωματίδια. Σύνθετα με τυχαία διασκορπισμένες και κομμένες ίνες εμφανίζουν μεγάλη ενίσχυση σε σχέση με τα υπόλοιπα σύνθετα για Vf κοντά στο 0.2. με μικρές διακυμάνσεις στο G23 ανάλογα με τον τοπικό προσανατολισμό και την πυκνότητα των κοντών ινών, καθώς η ενίσχυση εξαρτάται έντονα από την κατανομή και την αλληλεπίδραση των ινών.



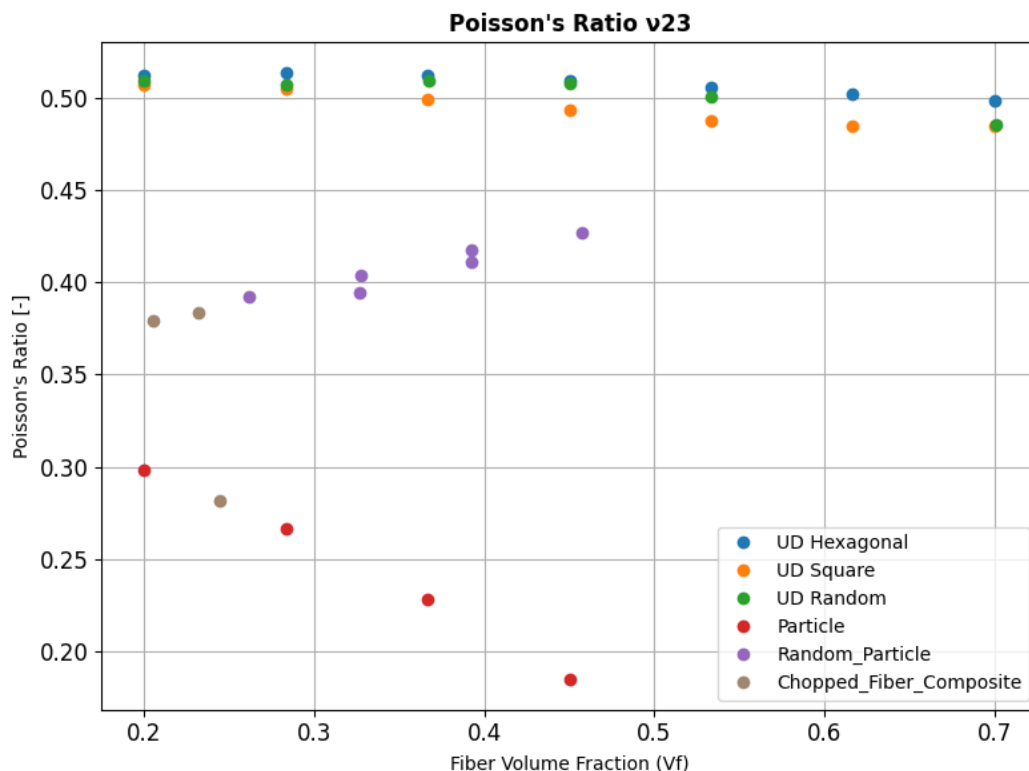
Εικόνα 6.11: Σύγκριση τιμών του ν_{12} για διάφορα ποσοστά όγκου ινών για διαφορετικά RVE

Βάσει των αποτελεσμάτων για το λόγο Poisson ν_{12} και ν_{13} , παρατηρείται ότι οι διαφορετικές RVE μικροδομές, επηρεάζουν την εγκάρσια παραμόρφωση όταν το σύνθετο φορτίζεται κατά μήκος των ινών, δηλαδή κατά μήκος του άξονα 1.

Στις περιπτώσεις με συνεχείς ίνες (UD Hexagonal, UD Square, UD Random), το ν_{12} κυμαίνεται περίπου μεταξύ 0.30-0.34 και μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού όγκου ινών, καθώς οι άκαμπτες ίνες περιορίζουν την παραμόρφωση κατά μήκος του άξονα φόρτισης και μειώνουν την επίδραση της πιο εύκαμπτης μήτρας στην παραμόρφωση του συνθετού.

Στα σύνθετα με σωματίδια (Particle) το ν_{12} κυμαίνεται περίπου 0.18-0.29 ενώ στο σύνθετο με τυχαία κατανομημένα σωματίδια (Random Particle) στο 0.31-0.34 και στο ν_{13} έχουμε μικρότερη διακύμανση: 0.32-0.33. Στα σύνθετα με ασυνεχείς τυχαία κατανομημένες ίνες (Chopped fiber), οι τιμές του ν_{12} εμφανίζουν διακυμάνσεις μεταξύ 0.21 και 0.34 σε V_f κοντά στο 0.2, λόγω του τυχαίου προσανατολισμού και της τοπικής συγκέντρωσης των κοντών ινών, που επηρεάζουν την κατανομή της παραμόρφωσης στον όγκο του υλικού. Στο ν_{13} έχουμε τιμές από 0.34-0.42. Διακυμάνσεις παρατηρούνται και για την περίπτωση του Chopped Fiber ν_{13} για V_f κοντά στο 0.2, με τις τιμές να κυμαίνονται εδώ από 0.34–0.42 GPa.

Συνολικά, η σύγκριση των διαφορετικών RVE δείχνει ότι στα UD σύνθετα, οι τιμές είναι υψηλές, υποδηλώνοντας ότι οι ίνες περιορίζουν την εγκάρσια παραμόρφωση. Στα Particle σύνθετα, οι τιμές είναι χαμηλότερες, καθώς η ομοιογενής κατανομή των σωματιδίων περιορίζει την παραμόρφωση ισотροπικά. Στα Random Particle εμφανίζονται ελαφρώς υψηλότερες τιμές σε σχέση με τα Particle, λόγω τυχαίας διάταξης των σωματιδίων, ενώ στα Chopped Fiber, οι τιμές είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις και παρουσιάζουν διακυμάνσεις, εξαιτίας του τυχαίου προσανατολισμού και της διαφορετικής πυκνότητας των κοντών ινών. Η σύγκριση δείχνει ότι η ακαμψία και η εγκάρσια παραμόρφωση εξαρτώνται έντονα από τον τύπο και τον προσανατολισμό της ενίσχυσης.



Εικόνα 6.12: Σύγκριση τιμών του ν_{23} για διάφορα ποσοστά όγκου ινών για διαφορετικά RVE

Βάσει των αποτελεσμάτων για τον λόγο Poisson ν_{23} , παρατηρείται ότι τα διαφορετικά RVE επηρεάζουν τη συμπεριφορά του υλικού στα εγκάρσια επίπεδα 2–3 των UD σύνθετων υλικών και συγκεκριμένα, όταν το υλικό φορτίζεται κατά μήκος του άξονα 2, εμφανίζεται παραμόρφωση κατά μήκος του άξονα 3.

Στις περιπτώσεις με συνεχείς ίνες (UD Hexagonal, UD Square, UD Random), το ν_{23} κυμαίνεται περίπου μεταξύ 0.43 και 0.50 και μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού όγκου ινών. Αυτό οφείλεται στο ότι οι ίνες είναι σκληρές και η μήτρα παραμορφώνεται λιγότερο στα επίπεδα κάθετα προς τις ίνες, με αποτέλεσμα το υλικό να παρουσιάζει μικρότερη εγκάρσια παραμόρφωση όσο αυξάνει το ποσοστό των ινών. Στο σύνθετο με σωματίδια (Particle) το ν_{23} κυμαίνεται περίπου 0.18–0.29 και στο σύνθετο με τυχαία κατανεμημένα σωματίδια (Random Particle) μεταξύ 0.39–0.42, συγκριτικά χαμηλότερα από τα UD σύνθετα με συνεχείς ίνες. Αυτό συμβαίνει επειδή η τυχαία κατανομή των σωματιδίων δεν δημιουργεί κυρίαρχο άξονα ενίσχυσης, με αποτέλεσμα η παραμόρφωση της μήτρας να ελέγχει κυρίως την εγκάρσια συμπεριφορά.

Στο σύνθετο με ασυνεχείς ίνες τυχαία κατανεμημένες (Chopped Fiber), οι τιμές του v_{23} εμφανίζουν διακυμάνσεις μεταξύ 0.28 και 0.38 στα Vf κοντά στο 0.2, επειδή οι κοντές ίνες είναι τυχαία διασκορπισμένες και διαφορετικά RVE μπορεί να έχουν διαφορετικό τοπικό προσανατολισμό και συγκέντρωση ινών, επηρεάζοντας την κατανομή παραμόρφωσης στα εγκάρσια επίπεδα.

Συνολικά, η σύγκριση των διαφορετικών RVE δείχνει ότι στα UD σύνθετα, οι τιμές είναι υψηλές, καθώς οι συνεχείς ίνες περιορίζουν την παραμόρφωση της μήτρας στα εγκάρσια επίπεδα 2–3. Στα Particle σύνθετα, οι τιμές είναι χαμηλότερες λόγω της ομοιογενούς κατανομής των σωματιδίων, που περιορίζει ιστροπικά την εγκάρσια παραμόρφωση. Στα Random Particle οι τιμές είναι υψηλότερες από τα Particle, καθώς η τυχαία διάταξη των σωματιδίων επιτρέπει μεγαλύτερη παραμόρφωση, ενώ στα Chopped Fiber οι τιμές είναι μέτριες και παρουσιάζουν διακυμάνσεις λόγω του τυχαίου προσανατολισμού και της διαφορετικής πυκνότητας των κοντών ινών. Η σύγκριση δείχνει ότι η εγκάρσια παραμόρφωση κατά το επίπεδο 2–3 εξαρτάται έντονα από τον τύπο, τη μορφολογία και την κατανομή των ενισχυτικών στοιχείων.

6.3 ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ

Πίνακας 6.1: Σύγκριση ελαστικών ιδιοτήτων πολυστρωματικού σύνθετου με Woven και με UD σύνθετο

Ελαστικές σταθερές	Epoxy–Woven–Epoxy (GPa/-)	Epoxy–UD Carbon– Epoxy (GPa/-)
E1	9.27	66.6
E2	9.27	6.48
E3	6.28	5.53
G12	9.89	3.26
G23	1.71	1.62
G31	1.71	1.82
ν_{12}	0.647	0.326
ν_{13}	0.203	0.348
ν_{23}	0.203	0.534

Η σύγκριση των πολυστρωματικών συνθέτων Epoxy-Woven-Epoxy και του Epoxy-UD Carbon-Epoxy παρουσιάζει σαφείς διαφορές που σχετίζονται με την διάταξη και τον προσανατολισμό των ινών. Το σημαντικότερο στοιχείο που θα εξεταστεί και που καθορίζει τις μηχανικές ιδιότητες είναι η ενδιάμεση στρώση, καθώς επηρεάζει καθοριστικά την ακαμψία κατά μήκος των ινών, την αντίσταση σε διάτμηση και την κατανομή φορτίου μέσα στο σύνθετο.

Το μέτρο ελαστικότητας E1 του σύνθετου με την ενδιάμεση στρώση UD Carbon είναι πολύ μεγαλύτερο (66.6 GPa) σε σχέση με το ενδιάμεσο Woven (9.2 GPa), γεγονός που οφείλεται στην μονοκατευθυντική διάταξη των ανθρακονημάτων, τα οποία εκμεταλλεύονται πλήρως την υψηλή ακαμψία τους κατά μήκος της κύριας διεύθυνσης. Αντίθετα, στο υλικό με Woven ως ενδιάμεση στρώση οι ίνες είναι πλεγμένες και το φορτίο μοιράζεται στις δύο διευθύνσεις περιορίζοντας την ακαμψία.

Το μέτρο ελαστικότητας E_2 στο Woven είναι ίσο με το μέτρο ελαστικότητας E_1 (9.2 GPa), εμφανίζοντας ισοτροπική συμπεριφορά στο επίπεδο 1 και 2 λόγω της συμμετρίας της πλέξης. Για το UD Carbon είναι πιο χαμηλά (6.48 GPa) γιατί οι ίνες προσφέρουν ακαμψία κατά την κύρια διεύθυνση, ενώ η εγκάρσια καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη μήτρα.

Για την τιμή του μέτρου διάτμησης G_{12} βλέπουμε ότι το Woven εμφανίζει μεγαλύτερη τιμή (9.8 GPa) από το UD Carbon (3.2 GPa), καθώς η διάτμηση στο επίπεδο του υφαντού ενισχύεται από την πλέξη των ινών ενώ στο UD Carbon η αντίσταση στην διάτμηση βασίζεται στην χαμηλή σε ακαμψία μήτρα.

Οι τιμές των μέτρων διάτμησης G_{23} και G_{31} είναι σχετικά χαμηλές και στα δύο υλικά (1.6-1.8 GPa), κάτι που δείχνει ότι οι ίνες δεν προσφέρουν σημαντική ενίσχυση σε αυτές τις διευθύνσεις.

Η τιμή του λόγου Poisson ν_{12} στο Woven είναι υψηλή (0.6) επειδή οι ίνες είναι διατεταγμένες συμμετρικά και επιτρέπουν μεγάλη εγκάρσια παραμόρφωση όταν το υλικό τεντωθεί κατά μήκος της κύριας διεύθυνσης. Αντίθετα, στο UD Carbon, ο λόγος Poisson ν_{12} είναι χαμηλότερος (0.3) καθώς οι άκαμπτες, μονοκατευθυντικές ίνες περιορίζουν την εγκάρσια παραμόρφωση.

Τέλος οι λόγοι Poisson ν_{13} και ν_{23} είναι ίσοι στο Woven λόγω συμμετρίας της πλέξης αλλά διαφέρουν στο UD Carbon κάτι που δείχνει ότι οι ίνες είναι προσανατολισμένες προς μία διεύθυνση.

Η ανάλυση δείχνει ότι το Epoxy-UD Carbon-Epoxy σύνθετο παρουσιάζει υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας κατά την διαμήκη διεύθυνση (E_1) λόγω της παράλληλης διάταξης των άκαμπτων ινών, ενώ το Epoxy-Woven-Epoxy εμφανίζει υψηλότερη διατμητική ακαμψία (G_{12}) για το ίδιο ποσοστό ινών ($V_f = 0.55$). Αυτό μας δείχνει ότι το υλικό Epoxy-UD Carbon-Epoxy απαιτεί μεγαλύτερο ποσοστό ινών για να φτάσει την ίδια διατμητική ακαμψία με το Epoxy-Woven-Epoxy, γεγονός που καθιστά το Woven πιο αποδοτικό από πλευράς κατανάλωσης ινών σε εφαρμογές όπου η διάτμηση είναι κρίσιμη. Συνολικά η επιλογή μεταξύ δύο υλικών εξαρτάται από το είδος της φόρτισης: για υψηλή ακαμψία κατά μήκος των ινών το Epoxy-UD Carbon-Epoxy με τις παράλληλες ίνες είναι πιο αποτελεσματικό, ενώ για βελτιωμένη συμπεριφορά στην διάτμηση το Epoxy-Woven-Epoxy ως ενδιάμεση στρώση προσφέρει πλεονέκτημα στον ίδιο όγκο ινών.

7.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πρώτο μέρος της διπλωματικής μελετήθηκαν τα μονοκατευθυντικά σύνθετα υλικά (UD) με υπολογιστικό και θεωρητικό τρόπο. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι τα υλικά αυτά παρουσιάζουν πολύ υψηλή ακαμψία κατά τη διεύθυνση των ινών, ενώ στις εγκάρσιες διευθύνσεις οι ιδιότητες επηρεάζονται κυρίως από τη μήτρα. Από τους υπολογισμούς προκύπτει ότι, όσο αυξάνεται το κλάσμα όγκου των ινών, οι ιδιότητες βελτιώνονται σημαντικά, επιβεβαιώνοντας τις προβλέψεις της θεωρίας. Επίσης παρατηρήθηκε μείωση των λόγων Poisson, καθώς οι ίνες περιορίζουν την εγκάρσια παραμόρφωση. Οι συγκρίσεις με τα αναλυτικά μοντέλα έδειξαν γενικά καλή συμφωνία, με μικρές αποκλίσεις που οφείλονται σε απλοποιήσεις και υποθέσεις των μοντέλων.

Στο δεύτερο μέρος της διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε η επίδραση της χρήσης διαφορετικών τρόπων ενίσχυσης στις ελαστικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών, χρησιμοποιώντας κατάλληλα αντιπροσωπευτικά στοιχεία όγκου κάθε φορά. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η διάταξη και το είδος των ινών ή σωματιδίων επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά του υλικού. Στα σύνθετα με συνεχείς ίνες το μέτρο ελαστικότητας κατά την κατεύθυνση των ινών ήταν υψηλό και αυξανόταν σχεδόν γραμμικά με το κλάσμα όγκου των ινών, ενώ στις εγκάρσιες διευθύνσεις οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας ήταν χαμηλότερες, επηρεαζόμενες κυρίως από τη μήτρα. Στα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με σφαιρικά σωματίδια (Particle), το μέτρο ελαστικότητας E_1 κυμαίνεται σε χαμηλότερες τιμές σε σύγκριση με τα σύνθετα με συνεχείς ίνες, καθώς δεν υπάρχει κυρίαρχος προσανατολισμός ενίσχυσης. Η ισοτροπική κατανομή των σωματιδίων οδηγεί σε παρόμοιες τιμές των μέτρων ελαστικότητας σε όλες τις διευθύνσεις ($E_1 = E_2 = E_3$). Στα σύνθετα με τυχαία κατανομή σωματιδίων (Random Particle), οι τιμές του E_1 είναι επίσης χαμηλές, ενώ παρατηρείται ελαφρώς μειωμένη ακαμψία στις εγκάρσιες διευθύνσεις. Η μικρή προτίμηση που εμφανίζεται στον άξονα E_1 δεν αποδίδεται σε φυσική ανισοτροπία του υλικού, αλλά σε αριθμητικά φαινόμενα του RVE και στην τυχαιότητα της κατανομής των σωματιδίων. Στα σύνθετα με τυχαία κατανεμημένες ασυνεχείς ίνες το E_1 ήταν επίσης χαμηλότερο από εκείνο των συνθέτων με συνεχείς ίνες ενίσχυσης, καθώς η ασυνέχεια και η τυχαιότητα στον προσανατολισμό των ινών μείωσαν την αποτελεσματική ενίσχυση κατά μήκος της φόρτισης. Αντίστοιχα, τα μέτρα διάτμησης έδειξαν ότι τα

μονοκατευθυντικά σύνθετα υλικά (UD) παρουσιάζουν υψηλές τιμές κατά την κατεύθυνση των ινών. Τα σύνθετα με σωματίδια (Particle) εμφανίζουν χαμηλότερη διατμητική ακαμψία, με την ενίσχυση να δρα ισотροπικά λόγω της ομοιομορφίας της κατανομής των σωματιδίων. Στα σύνθετα με τυχαία κατανεμημένα σωματίδια (Random Particle), οι τιμές για G_{12} και G_{31} είναι ελαφρώς υψηλότερες, λόγω της τυχαίας διάταξης των σωματιδίων στο RVE. Τέλος, στα σύνθετα με ασυνεχείς, τυχαία κατανεμημένες ίνες (Chopped Fiber), τα διατμητικά μέτρα παρουσιάζουν μέτρια τιμή με εμφανείς διακυμάνσεις, λόγω του τυχαίου προσανατολισμού και της διαφορετικής πυκνότητας των ινών.

Στο τρίτο μέρος μελετήθηκαν πολυστρωματικά σύνθετα υλικά με ενδιάμεσα στρώματα ενισχυμένα με μονοκατευθυντικές ίνες (UD Carbon) και ενδιάμεσα στρώματα ενισχυμένα με πλέγμα ινών (Woven). Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η διάταξη των ινών επηρεάζει καθοριστικά τις μηχανικές ιδιότητες του πολυστρωματικού υλικού. Το πολυστρωματικό σύνθετο υλικό με UD Carbon ως ενδιάμεσο στρώμα εμφανίζει υψηλή ακαμψία κατά μήκος της κύριας διεύθυνσης, ενώ το πολυστρωματικό σύνθετο υλικό με Woven ως ενδιάμεσο στρώμα, έχει χαμηλότερο E_1 λόγω του πλέγματος των ινών που μοιράζει το φορτίο σε δύο διευθύνσεις. Το πολυστρωματικό υλικό με Woven ως ενδιάμεσο στρώμα έδειξε μεγαλύτερη διατμητική ακαμψία στο επίπεδο 1-2 (G_{12}) συγκριτικά με το αντίστοιχο σύνθετο με UD Carbon ως ενδιάμεσο στρώμα. Τα μέτρα διάτμησης G_{23} και G_{31} ήταν χαμηλά και στους δύο τύπους πολυστρωματικών υλικών. Από τις τιμές των λόγων Poisson προκύπτει μεγαλύτερη δυνατότητα εγκάρσιας παραμόρφωσης στο πολυστρωματικό σύνθετο υλικό με Woven ως ενδιάμεσο στρώμα, σε σχέση με το πολυστρωματικό σύνθετο υλικό με UD Carbon ως ενδιάμεσο στρώμα. Συνολικά το ένα πολυστρωματικό σύνθετο υλικό με UD Carbon ως ενδιάμεσο στρώμα, είναι πιο αποτελεσματικό σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ακαμψία στην κατεύθυνση των ινών, ενώ ένα πολυστρωματικό σύνθετο υλικό με Woven ως ενδιάμεσο στρώμα πλεονεκτεί σε εφαρμογές όπου η διάτμηση είναι κρίσιμη, καθώς η πλέξη των ινών ενισχύει αποτελεσματικά το υλικό σε εγκάρσιες διευθύνσεις με μικρότερο ποσοστό ινών.

Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προκύπτουν ορισμένες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα που παρουσιάζουν ιδιαίτερο επιστημονικό και τεχνολογικό ενδιαφέρον. Αρχικά, κρίνεται σκόπιμη περαιτέρω βελτίωση της περιγραφής της τυχαίας κατανομής των ινών ή των σωματιδίων στα αντιπροσωπευτικά

στοιχεία όγκου, με στόχο την ακριβέστερη αναπαράσταση της πραγματικής μικροδομής των σύνθετων υλικών. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στους περιορισμούς του υπολογιστικού χρόνου και της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος. Επιπλέον, μελλοντικές μελέτες θα μπορούσαν να εστιάσουν στην επίτευξη υψηλότερων κλασμάτων όγκου ενίσχυσης, μέσω ελέγχου των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών ή των σωματιδίων, όπως το μήκος, η διάμετρος και η κατανομή τους στον χώρο. Η παράμετρος αυτή αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες και τη συνολική απόδοση των σύνθετων υλικών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η μελέτη της επίδρασης ανισότροπων ινών ενίσχυσης στη μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων ινοπλισμένων υλικών, καθώς η ανισοτροπία της φάσης ενίσχυσης μπορεί να οδηγήσει σε διαφοροποιημένη απόκριση υπό πολύπλοκες καταστάσεις φόρτισης. Τέλος, μία ακόμη σημαντική κατεύθυνση μελλοντικής έρευνας αφορά τη διερεύνηση της επίδρασης της φάσης ενίσχυσης (ίνες, σωματίδια ή συνδυασμοί αυτών) στα όρια ασφαλούς λειτουργίας και στα κριτήρια αστοχίας των σύνθετων υλικών. Η επέκταση της ανάλυσης πέρα από τις ελαστικές ιδιότητες, προς τη μελέτη μηχανισμών αστοχίας και αντοχής, θα συνέβαλε ουσιαστικά στην πληρέστερη αξιολόγηση της καταλληλότητας των σύνθετων υλικών για εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων.

8.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Barbero, E. J. (2017). Introduction to composite materials design. (Third Edition) CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315296494>
- [2] Gibson, R. F. (2016). *Principles of Composite Material Mechanics*. CRC Press.
- [3] Chawla, K. K. (2012). *Composite Materials: Science and Engineering*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-74365-3>
- [4] Strong, A. B. (2008). *Fundamentals of composite manufacturing: Materials, methods, and applications*. SME.
- [5] Naslain, R. (1998). Design, preparation and properties of non-oxide CMCs. *Composite Science and Technology*, 58(5), 703–711.
- [6] Miracle, D. B. (2005). Metal matrix composites – From science to technological significance. *Composite Science and Technology*, 65(15–16), 2526–2540. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.027>
- [7] Substech. (n.d.). Classification of composites. https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=classification_of_composites
- [8] Sathishkumar et al., (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites – A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(13), 1258–1275. <https://doi.org/10.1177/0731684414530790>
- [9] Chung, D. D. L. (2002). *Carbon Fiber composites*. <https://doi.org/10.1016/B978-075067269-3/50004-0>
- [10] Kim et al., (2025). Advancing carbon fiber and its σύνθετα technology: Korea's strategic growth and innovation. *Composites Part B: Engineering* <https://doi.org/10.1016/j.σύνθεταb.2025.112266>
- [11] Bhatnagar, A. (2006). *Lightweight Ballistic composites: Military and Law-Enforcement Applications*. Woodhead Publishing.
- [12] Zienkiewicz et al., (2013). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, Chapter 2 (pp 12–18)
- [13] Müzel, S. D. (2020). Application of the Finite Element Method in the Analysis of Composite Materials: A Review. *Polymers*, 12(4), 818. <https://doi.org/10.3390/polym12040818>

- [14] Geers et al., (2010). "Multi-scale computational homogenization: Trends and challenges. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 234(7), 2175–2182. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2009.08.077>
- [15] Smit et al., (1998). Prediction of the mechanical behavior of nonlinear heterogeneous systems by multi-level finite element modeling. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 155(1–2), 181–192. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(97\)00139-4](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(97)00139-4)
- [16] Hill, R. (1963). Elastic properties of reinforced solids: Some theoretical principles. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 11(5), 357–372.
- [17] Sharma et al., (2021). Representative volume element based micromechanical modelling of rod shaped glass filled epoxy composites. *SN Applied Sciences*, 3(2), 258.
- [18] ANSYS. (2021). *Leveraging Materials Homogenization in Ansys*. <https://www.ansys.com/resource-center/white-paper/leveraging-materials-homogenization-in-ansys>
- [19] PyAnsys. (2025). *PyAnsys documentation* <https://mechanical.docs.pyansys.com/>
- [20] Voigt, W. (1889). Ueber die Beziehung zwischen den beiden Elasticitätsconstanten isotroper Körper. *Annalen der Physik*, 274(12), 573–587.
- [21] Reuss, A. (1929). Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 9(1), 49–58.
- [22] Hull, D., & Clyne, T. W. (1996). *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge University Press.
- [23] Daniel, I. M., & Ishai, O. (2006). *Engineering Mechanics of Composite Materials*. (2nd edition), Oxford University Press.
- [24] Halpin, J. C., Kardos, J. L. (1976). The Halpin-Tsai equations: A review. *Polymer Engineering and Science*, 16(5), May 1976.
- [25] Chamis, C. C. (1989). Mechanics of composite materials: past, present, and future. *Journal of Composite Technology & Research*, 11(1), 3–14
- [26] Mori, T., & Tanaka, K. (1973). Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metallurgica*, 21(5), 571–574. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(73\)90064-3](https://doi.org/10.1016/0001-6160(73)90064-3)

- [27] Benveniste, Y. (1987). A new approach to the application of Mori–Tanaka’s theory in composite materials. *Mechanics of Materials*, 6(2), 147–157. [https://doi.org/10.1016/0167-6636\(87\)90005-6](https://doi.org/10.1016/0167-6636(87)90005-6)
- [28] Mura T .(1987) *Micromechanics of Defects in Solids*, 2nd edn. Martinus Nijhof Publishers
- [29] Huang, Z. M. (2001). Simulation of the mechanical properties of fibrous σύνθετα by the bridging micromechanics model. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(2), 143–172.
- [30] Huang, Z. M. (2001). Micromechanical prediction of ultimate strength of transversely isotropic fibrous σύνθετα. *International Journal of Solids and Structures*, 38(25–26), 4147–4172.
- [31] Younes et al. (2012). Comparative review study on elastic properties modeling for unidirectional composite materials, composites and their properties (Chapter 17).
- [32] Vazeille, F., & Lemoine, X. (2024). Envelope enrichment method for homogenization of non-periodic composite materials. *Composite Science and Technology*, 235, 109797.
- [33] Dutra, T. A., & Miehe, C. (2020). A complete implementation methodology for Asymptotic Homogenization. *Computational Materials Science*, 173, 109408.
- [34] Xia, W., Galadima, Y. K., Oterkus, E., & Oterkus, S. (2019). Representative volume element homogenization of a composite material by using bond-based peridynamics. *Journal of Composite Materials*, 53(1), 3–21.
- [35] El Moumen, A., & Benallal, A. (2021). Numerical evaluation of the representative volume element size for random composites. *Computational Materials Science*, 187, 110099.
- [36] Cheng, L., & Zhang, L. (2022). A representative volume element network (RVE-net) for homogenization of composite materials. *Computational Materials Science*, 206, 111212. DOI: 10.1016/j.cma.2021.114507
- [37] ANSYS. *ANSYS Material Designer User's Guide*, <https://ansyshelp.ansys.com/>
- [38] COMSOL. *Homogenization of Material Properties* <https://www.comsol.com/>
- [39] Rayhan, S. B., & Rahman, M. M. (2020). Modeling elastic properties of unidirectional composite materials using Ansys Material Designer. *Procedia Structural Integrity*, 28, 1892–1900. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.012>

- [40] Ασλανίδου Αικ. (2025), Μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς σύνθετων μονοδιάστατων και διδιάστατων ελαστικών δομών ενισχυμένων με καμπυλόγραμμες ίνες, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιωάννινα.
- [41] Fedotov, A. F. (2022). Mori–Tanaka experimental-analytical model for predicting engineering elastic moduli of composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 232, 109635.
- [42] Tian, W., et al. (2021). Representative volume element for composites reinforced by spatially randomly distributed discontinuous fibers and its applications. *Computational Materials Science*, 190, 110306. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2021.110306>
- [43] Li, S. (2008) Boundary conditions for unit cells from periodic microstructures and their implications. *Composites Science and Technology*. 68 (9), 1962-1974.
- [44] Li, S., Jeanmeure, L.F.C., & Pan, Q. J. (2015). A composite material characterisation tool: UnitCells. *J Eng Math*. (95) 279.