



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών

Σπουδαστική Εργασία

Ανάλυση κύκλου ζωής επίπεδου πάνελ σύνθετου υλικού με ίνες άνθρακα και θερμοσκληρυνόμενη μήτρα και σύγκριση των μεθόδων σύνδεσης των δοκών (stringers) κατά μήκος αυτού

Μανουσάκη Ιωάννα

Επιβλέπον

Κωνσταντίνος Τσερπές, Αναπληρωτής Καθηγητής



Εργαστήριο Τεχνολογίας & Αντοχής Υλικών

ΠΑΤΡΑ 2022

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών

Μανουσάκη Ιωάννα

© 2022 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος



Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε
από τον/την

Μανουσάκη Ιωάννα

την [4, Οκτωβρίου, 2022]



Εργαστήριο Τεχνολογίας & Αντοχής Υλικών

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	III
ABSTRACT.....	IV
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	V
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	VI
1 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....	1
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	1
1.2 ΜΗΤΡΑ.....	2
1.2.1 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΗ ΜΗΤΡΑ.....	3
1.2.2 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΘΕΡΜΟΣΚΛΗΡΥΝΟΜΕΝΗ ΜΗΤΡΑ.....	3
1.3 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ.....	4
1.4 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΙΝΩΝ.....	6
1.5 ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ.....	7
1.6 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ.....	7
2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ.....	10
2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	11
2.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ.....	12
2.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ.....	14
2.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ.....	15
3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ OPENLCA.....	18
3.1 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ.....	18
3.2 ΒΑΣΕΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	21
3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ.....	21
4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	24
4.1 ΣΤΟΧΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	24
4.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ.....	25
4.3 ΟΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	25
4.4 ΚΡΙΤΗΡΙΑ CUT-OFF.....	25
4.5 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ.....	26
4.6 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ.....	27
4.7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	27
5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	34

5.1	ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	35
5.1.1	ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΙΚΡΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	35
5.1.2	ΥΠΕΡΘΕΡΜΑΝΣΗ ΤΟΥ ΠΛΑΝΗΤΗ	36
5.1.3	ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ.....	38
5.1.4	ΕΥΤΡΟΦΙΣΜΟΣ ΓΛΥΚΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	40
5.1.5	ΘΑΛΑΣΣΙΟΣ ΕΥΤΡΟΦΙΣΜΟΣ.....	41
5.1.6	ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗ ΣΤΟΙΒΑΔΑΣ ΟΖΟΝΤΟΣ.....	42
5.2	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ.....	43
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	45
7	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	46
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	47

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα σπουδαστική εργασία συντάχθηκε με σκοπό την κατανόηση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και την εφαρμογή αυτής σε μια κατηγορία προϊόντων: τα σύνθετα υλικά θερμοσκληρυνόμενης μήτρας με ενίσχυση ινών άνθρακα. Κατά τη μελέτη αυτή αναπτύχθηκε ένα εργαλείο αποτίμησης τόσο περιβαλλοντικών όσο και κοινωνικών κινδύνων που μπορούν να προκληθούν από την παραγωγή των πρώτων υλών και την κατασκευή του τελικού προϊόντος.

Αρχικά, πραγματοποιείται μια σύντομη αναφορά στον κλάδο των σύνθετων υλικών αναφέροντας τον ακριβή ορισμό τους, την ιστορική εξέλιξη τους, τη δομή και τη μέθοδο παραγωγής αυτών. Έπειτα, παρουσιάζεται ο σκοπός και οι βασικές αρχές της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής επισημαίνοντας τις μεθοδολογίες ανάλυσης αλλά και τις βασικές κατηγορίες ρύπανσης του περιβάλλοντος. Στη συνέχεια, διενεργείται μια σύντομη αναφορά στο λογισμικό openLCA με το οποίο πραγματοποιήθηκε η μελέτη της κατασκευής αναφέροντας τις διαθέσιμες βάσεις δεδομένων αλλά και τις μεθόδους εκτίμησης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Εφόσον έχει πραγματοποιηθεί η κατάλληλη αναφορά στα βασικά στοιχεία της μελέτης, σειρά έχει η ανάλυση του εξεταζόμενου μοντέλου: ενός πάνελ θερμοσκληρυνόμενης μήτρας ενισχυμένου με ίνες άνθρακα και συνδέσεις κόλλας ή κοχλιών. Η ενότητα αυτή έχει ως σκοπό τη γνωστοποίηση του στόχου της μελέτης και προσφέρει μια πλήρη εικόνα του υπό κατασκευή προϊόντος. Ακολούθως, πραγματοποιείται η συγκριτική Ανάλυση Κύκλου Ζωής των δυο κατασκευών που έχουν δημιουργηθεί και τα αποτελέσματα που συμβάλλουν στην επιβάρυνση του περιβάλλοντος σχολιάζονται. Τέλος, παρουσιάζονται τα βασικά σημεία που πρέπει να βελτιωθούν για την αύξηση της αξιοπιστίας παρόμοιων μελετών.

Ο σχεδιασμός του πάνελ βασίστηκε στις αρχές της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και με τη συμβολή της ReCiPe 2016 Midpoint (H), μιας μεθόδου που παρέχει παράγοντες χαρακτηρισμού στοιχείων και ενώσεων αντιπροσωπευτικούς σε παγκόσμιο επίπεδο, προσδιορίστηκε το αντίκτυπο της κατασκευής τόσο σε περιβαλλοντικό όσο και σε κοινωνικό επίπεδο.

Λέξεις Κλειδιά: Ανάλυση Κύκλου Ζωής, Σύνθετα Υλικά, Θερμοσκληρυνόμενη Μήτρα, Ίνες Άνθρακα, Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα, openLCA, ReCiPe 2016 Midpoint (H).

ABSTRACT

The current Thesis was written for the purpose of interpretation Life Cycle Analysis and its application to a product category called composite material with thermoset matrix and carbon fiber reinforcement. During this study, a tool was developed to assess both environmental and social risks that can be caused by the production of raw materials and the manufacture of the final product.

First of all, a reference is made to the field of composite materials stating their exact definition, their historical development, their structure and their production method. Then, the purpose and basic principles of Life Cycle Analysis are presented, highlighting the analysis methodologies as well as the main categories of environmental pollution. Subsequently, a brief reference is made to the openLCA software with which the study of the construction was carried out, mentioning the available databases and the environmental footprint estimation methods. As long as appropriate reference has been made to the key elements of the study, it is time to analyze the model under consideration: a composite material panel with thermoset matrix and carbon fiber reinforcement with bonded or mechanical joints. The purpose of this section is to communicate the objective of the study and provide a complete picture of the product under construction. Furthermore, the comparative Life Cycle Analysis of the two constructions that have been created is carried out and the results that contribute to the burden on the environment are commented on. Finally, the key points that should be improved to increase the reliability of similar studies are presented.

The design of the panel was based on the principles of Life Cycle Analysis and with the help of ReCiPe 2016 Midpoint (H), a method that provides globally representative element and compound characterization factors, the impact of construction on both environmental and social levels was determined.

Keywords: Life Cycle Analysis, Composite Materials, Thermoset Matrix, Carbon Fibers, Environmental Footprint, openLCA, ReCiPe 2016 Midpoint (H).

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Γενική ταξινόμηση των σύνθετων υλικών [1].....	5
Εικόνα 2 Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στην αντοχή σε εφελκυσμό σύνθετου υλικού [1].....	6
Εικόνα 3: Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα [1]	7
Εικόνα 4 Τυπική διαδικασία παραγωγής CFRP [4]	8
Εικόνα 5 Σχηματική διάταξη διαδικασίας σακούλας κενού [5].....	8
Εικόνα 6 Σχήμα καλουπιού για την κατασκευή των stringers [6].....	9
Εικόνα 7 Κύκλος ζωής προϊόντος [7].....	10
Εικόνα 8 Τα υποσυστήματα του συστήματος του κύκλου ζωής ενός προϊόντος [8]	14
Εικόνα 9 Το αποσυμπιεσμένο και εκτελέσιμο αρχείο για την εκκίνηση του openLCA [15].	19
Εικόνα 10 Σελίδα καλωσορίσματος λογισμικού openLCA [15].....	20
Εικόνα 11 Ισομετρική όψη κατασκευής.....	24
Εικόνα 12 Πλάγια όψη κατασκευής.....	24
Εικόνα 13 Γράφημα παραγωγής μοντέλου με σύνδεση εποξειδικής κόλλας.....	34
Εικόνα 14 Γράφημα παραγωγής μοντέλου με μηχανική σύνδεση κοχλιών	34
Εικόνα 15 Δυναμικό σχηματισμού μικρών σωματιδίων σύνθετου πάνελ με μηχανικές συνδέσεις και συνδέσεις κόλλας.....	36
Εικόνα 16 Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη σύνθετου πάνελ με μηχανικές συνδέσεις και συνδέσεις κόλλας.....	37
Εικόνα 17 Δυναμικό ανθρώπινης καρκινογόνου τοξικότητας σύνθετου πάνελ με μηχανικές συνδέσεις και συνδέσεις κόλλας.....	38
Εικόνα 18 Δυναμικό ανθρώπινης μη καρκινογόνου τοξικότητας σύνθετου πάνελ με μηχανικές συνδέσεις και συνδέσεις κόλλας.....	39
Εικόνα 19 Δυναμικό ευτροφισμού γλυκού νερού σύνθετου πάνελ με μηχανικές συνδέσεις και συνδέσεις κόλλας.....	40
Εικόνα 20 Δυναμικό θαλάσσιου ευτροφισμού σύνθετου πάνελ με μηχανικές συνδέσεις και συνδέσεις κόλλας.....	41
Εικόνα 21 Δυναμικό εξασθένησης στοιβάδας του όζοντος σύνθετου πάνελ με μηχανικές συνδέσεις και συνδέσεις κόλλας.....	42
Εικόνα 22 Συγκεντρωτικό ραβδόγραμμα ποσοστιαίων αποτελεσμάτων για κάθε κατηγορία επιπτώσεων ReCiPe 2016 Midpoint (H) σύνθετου πάνελ με μηχανικές συνδέσεις και συνδέσεις κόλλας.....	44

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Κατηγορίες ρύπανσης μοντέλου CML (baseline) [17]	22
Πίνακας 2 Κατηγορίες ρύπανσης μοντέλου ReCiPe midpoint (E, H & I) [17]	23
Πίνακας 3 Κατηγορίες ρύπανσης μοντέλου USEtox [17]	23
Πίνακας 4 Δεδομένα για την παραγωγή των ινών άνθρακα που προορίζονται για το επίπεδο πάνελ	30
Πίνακας 5 Δεδομένα για την παραγωγή των ινών άνθρακα που προορίζονται για τα stringers	30
Πίνακας 6 Δεδομένα για την παραγωγή της μήτρας εποξειδικής ρητίνης που προορίζεται για το επίπεδο πάνελ.....	31
Πίνακας 7 Δεδομένα για την παραγωγή της μήτρας εποξειδικής ρητίνης που προορίζεται για τα stringers.....	31
Πίνακας 8 Απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγή prepreg που προορίζεται για το επίπεδο πάνελ	31
Πίνακας 9 Απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγή prepreg που προορίζεται για τα stringers	31
Πίνακας 10 Δεδομένα για τη σκλήρυνση του υλικού που προορίζεται για το επίπεδο πάνελ	32
Πίνακας 11 Δεδομένα για τη σκλήρυνση του υλικού που προορίζεται για τα stringers	32
Πίνακας 12 Δεδομένα για τη μηχανική σύνδεση του πάνελ	33
Πίνακας 13 Δεδομένα για τη σύνδεση του πάνελ με τη χρήση κόλλας	33

1 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Σύνθετα ονομάζονται τα υλικά τα οποία, σε μακροσκοπική κλίμακα, αποτελούνται από δυο ή περισσότερα ευδιάκριτα συστατικά μέρη που φέρουν συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους και δημιουργούν ένα νέο υλικό με τελικές ιδιότητες διαφορετικές από τις αντίστοιχες των υλικών που το αποτελούν. Το ένα από τα συστατικά μέρη χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο υλικό βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες ενώ το δεύτερο συστατικό ονομάζεται μήτρα και εξασφαλίζει τη βέλτιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης. Για να οριστεί ένα υλικό ως σύνθετο ακολουθείται ο παρακάτω κανόνας: το υλικό πρέπει να προκύπτει ως ένας συνδυασμός συστατικών μερών όπου οι ιδιότητες ενός εκ των δυο μερών να είναι ισχυρά πιο μεγάλες από του άλλου και η κατά όγκο περιεκτικότητα του ενός να ξεπερνά το ποσοστό 10%.

1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Τα σύνθετα υλικά δεν είναι νέα υλικά παρόλο που η επιστήμη των σύνθετων υλικών αναπτύσσεται σταθερά κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται σε μεγάλο εύρος από την αρχαιότητα με τον πηλό, την ασφαλτο, τις συνθετικές ρητίνες και το ξύλο να αποτελούν τη ναυαρχίδα των υλικών που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος.

Ενδείξεις χρησιμοποίησης τέτοιων υλικών υπάρχουν στα κεραμικά του 5000 π.Χ. όπου Αιγύπτιοι χρησιμοποιούσαν την τεχνική της ενίσχυσης τούβλων πηλού με πλέγμα αχύρων ώστε να μειώσουν τις τάσεις συστολής που αναπτύσσονταν κατά τη ξήρανση του πηλού. Επιπρόσθετα, παρατήρησαν πως οι πλάκες κατασκευασμένες από πολύστρωτες βέργες ξύλου σημείωναν πολύ πιο μεγάλη αντοχή από το φυσικό ξύλο έναντι τις στρέβλωσης που προκαλούταν από την απορρόφηση υγρασίας.

Στη Μεσοποταμία και στην Αίγυπτο (3000 π.Χ.) εφαρμόστηκε η τεχνική κατασκευής σχεδίων από καλάμια παπύρου που προηγουμένως είχαν εμβαπτιστεί σε πίσσα. Αυτές οι σχεδίες θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι αποτέλεσαν τον πρόδρομο των σύγχρονων πλαστικών ενισχυμένων με ίνες γυαλιού σκαφών. Ακόμη, κατά το 1000 π.Χ. στη Μεσοποταμία εφαρμόστηκε η τεχνική του βερνικώματος των τούβλων και των πλακιδίων ώστε να περιορίζεται η επιφανειακή φθορά ενώ, κατά την εποχή της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας, η οδοποιία βασίστηκε στην ενίσχυση του οδοστρώματος με θραύσματα κεραμιδιών.

Η εξέλιξη των σύνθετων υλικών δεν παρουσιάζει παρόμοιο ρυθμό ανάπτυξης διαμέσου των αιώνων. Σημειώνεται πως μέχρι τον 19^ο αιώνα μ.Χ., η εξέλιξη αυτών ήταν πολύ μικρή με τα σύνθετα υλικά του 19^{ου} αιώνα μ.Χ. να μη διαφέρουν αρκετά από τα αντίστοιχα της αρχαιότητας τόσο σε ποιότητα όσο και σε τεχνική κατασκευής. Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών εκτινάχθηκε ραγδαία κατά τον 20^ο αιώνα και, ιδιαίτερα, κατά τα τελευταία 30 χρόνια παράλληλα με την προηγούμενη ανάπτυξη της υψηλής αντοχής ινών γυαλιού, της υψηλής δυσκαμψίας ινών βορίου και την έντονη τάση της αεροδιαστημικής βιομηχανίας για μεγαλύτερη απόδοση με ταυτόχρονη μείωση βάρους των κατασκευών.

Το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1920 και πρόκειται για μίγμα φαινολικής φορμαλδεϋδης με ινίδια ξύλου γνωστό και με την ονομασία βακελίτης. Κατά το 1950, εισήχθη και το nylon αντικαθιστώντας τα μέταλλα και το 1964 διατέθηκαν στην αγορά οι ίνες άνθρακα (carbon fibers) σε μικρή ποσότητα οι οποίες, με τα σημερινά δεδομένα, αποτελούν τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες ενισχύσεις στις αεροδιαστημικές κατασκευές. Το 1971 διατέθηκαν και οι ίνες αραμιδίου (Kevlar) στην αγορά οι οποίες πλέον χρησιμοποιούνται τόσο στα ελαστικά αυτοκινήτων όσο και σε αεροδιαστημικές και ναυπηγικές κατασκευές.

Τα τελευταία 30 χρόνια, οι ειδικές ιδιότητες (specific properties) και, συγκεκριμένα, η ειδική αντοχή και δυσκαμψία των ενισχυτικών ινών σημειώνουν όλο και μεγαλύτερη αύξηση. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεγάλη αύξηση των ειδικών ιδιοτήτων των ινών γυαλιού, άνθρακα, αραμιδίου και βορίου με τις ιδιότητες αυτές να φτάνουν στο 10πλασιο των αντίστοιχων τιμών του αλουμινίου. Το γεγονός αυτό συμβάλλει αρκετά θετικά στην εφαρμογή των υλικών σε κατασκευαστικό επίπεδο καθώς οι μεγάλες τιμές των ειδικών ιδιοτήτων συνεπάγονται με μειωμένο βάρος και ταυτόχρονα υψηλότερες τιμές των συγκεκριμένων ιδιοτήτων.

Η υψηλή αντοχή, η ακαμψία, το μικρό βάρος, η εξαιρετική αντίσταση σε διάβρωση, η αντοχή σε κρούσεις υψηλής ενέργειας, η αντίσταση σε φθορά λόγω χρήσης, η καλή συμπεριφορά σε κόπωση και σε διάδοση ρωγμών, η μεγάλη απορρόφηση ενέργειας, οι σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής και το μικρό κόστος συντήρησης αποτελούν βασικούς παράγοντες που έχουν ορίσει τα σύνθετα υλικά στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών στοιχείων.

Η μικρή αντίσταση σε μηχανική φθορά, τα υψηλά επίπεδα ερπυσμού, ευαίσθητη συμπεριφορά σε ορισμένες συνθήκες περιβάλλοντος (υψηλές θερμοκρασίες, χημικό περιβάλλον, κλπ.) και το υψηλό αρχικό τους κόστος αποτελούν μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών με αυτά να αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά μέσω της διακαούς τεχνολογικής ανάπτυξης και της εξέλιξης των μεθόδων παραγωγής.

1.2 ΜΗΤΡΑ

Η μήτρα στα σύνθετα υλικά αποτελεί τη συγκολλητική ύλη μεταξύ των ινών. Συγκεκριμένα, ο ρόλος της μήτρας βασίζεται στη συγκράτηση των ινών μεταξύ τους, στην προστασία των ινών από τυχόν περιβαλλοντικές προσβολές και φθορές, στην προώθηση των μηχανικών τάσεων που ασκούνται ολικά στο υλικό προς τις ίνες και στον περιορισμό της διάδοσης των ρωγμών που προκαλούνται από τη θραύση των ινών.

Ένα υλικό για να οριστεί ως μήτρα ενός σύνθετου υλικού πρέπει να χαρακτηρίζεται από ολκιμότητα, ανθεκτικότητα και ευκαμψία. Σημαντική αναφορά πρέπει να γίνει και στο σημείο τήξης του υλικού που πρέπει να υπερβαίνει τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του σύνθετου υλικού. Η πλειοψηφία των υλικών που επιλέγονται για τη μήτρα παρουσιάζουν μικρότερη πυκνότητα, αντοχή και δυσκαμψία συγκριτικά με τις ίνες. Καθοριστικός παράγοντας, ωστόσο, για την ορθή λειτουργία του υλικού αποτελεί η καλή πρόσφυση της διεπιφάνειας μήτρας – ίνας.

Η επιλογή της κατάλληλης μήτρας εξαρτάται από το περιβάλλον χρήσης του υλικού καθώς και από τη θερμοκρασία. Βάσει του υλικού της μήτρας διακρίνονται οι εξής κατηγορίες σύνθετων υλικών:

- PMC: Polymer Matrix Composites - Σύνθετα υλικά με Πολυμερική Μήτρα (θερμοκρασίες έως 250°C)
- MMC: Metal Matrix Composites - Σύνθετα υλικά με Μεταλλική Μήτρα (θερμοκρασίες από 250°C έως 800°C)
- CMC: Ceramic Matrix Composites – Σύνθετα υλικά με Κεραμική Μήτρα (θερμοκρασίες από 800°C έως 1600°C)

Εμείς θα ασχοληθούμε με την κατηγορία των Σύνθετων υλικών με Πολυμερική Μήτρα.

Πολυμερή ονομάζονται οι χημικές ενώσεις με τα μακρομόρια που σχηματίζονται από τη συνένωση πολλών όμοιων μικρών μορίων, τα μονομερή. Τα πολυμερή προκύπτουν από τη χημική αντίδραση των μονομερών και ετυμολογικά αναλύονται σε «πολλά μέρη» με τον όρο «μέρος» να εννοείται η δομική μονάδα του μακρομορίου. Τα πολυμερή, και άρα τα σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα διακρίνονται σε δύο κύριους τύπους: τα θερμοπλαστικά και τα θερμοσκληρυνόμενα. Παρακάτω γίνεται μια σύντομη αναφορά στις ιδιότητες των τύπων αυτών.

1.2.1 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΗ ΜΗΤΡΑ

Πρόκειται για πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες. Τα υλικά αυτά αποτελούνται από μακρομόρια συνδεδεμένα με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals που όταν το υλικό θερμανθεί οι διαμοριακές δυνάμεις χαλαρώνουν με αποτέλεσμα το υλικό να γίνεται πιο εύκαμπτο ενώ σε πιο υψηλές θερμοκρασίες να μετατρέπεται σε ιξώδες ρευστό και σε πιο χαμηλές πάλι σε στερεό. Η διαδικασία – κύκλος της ρευστοποίησης με αύξηση της θερμοκρασίας και στερεοποίηση με μείωση αυτής μπορεί να επαναλαμβάνεται θεωρητικά άπειρα. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί πως οι επαναλαμβανόμενοι κύκλοι θέρμανσης – ψύξης συνεπάγονται με υποβάθμιση των ιδιοτήτων του θερμοπλαστικού.

Τα υλικά αυτά διακρίνονται σε «κρυσταλλικά» και «άμορφα» με τη δομή των κρυσταλλικών υλικών να χαρακτηρίζεται από την τάξη των μακρομορίων τους ενώ τη δομή των άμορφων να χαρακτηρίζεται από την τυχαία διάταξη αυτών. Εξαιρέση αποτελούν μερικά πλαστικά όπως το πολυαιθυλένιο και το nylon τα οποία ορίζονται ως «ημικρυσταλλικά» ή «μερικώς κρυσταλλικά».

1.2.2 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΘΕΡΜΟΣΚΛΗΡΥΝΟΜΕΝΗ ΜΗΤΡΑ

Πρόκειται για πλαστικά που παράγονται από μια χημική αντίδραση σε δυο στάδια. Κατά το πρώτο μέρος παραγωγής τους δημιουργούνται, κατά τον ίδιο τρόπο με τα θερμοπλαστικά, μακρομοριακές αλυσίδες που τίθενται αδύνατο να αντιδράσουν περαιτέρω. Κατά το δεύτερο στάδιο, δημιουργούνται οι λεγόμενοι «σταυροειδείς δεσμοί» μεταξύ των μακρομορίων κάτω από την επίδραση της θερμότητας και της πίεσης με αποτέλεσμα το τελικό προϊόν έπειτα από τη ψύξη του να είναι στερεό και άκαμπτο. Βάσει όλων των παραπάνω, τα μακρομόρια έχουν ελάχιστους βαθμούς ελευθερίας κίνησης και, συνεπώς, τα θερμοσκληρυνόμενα υλικά δεν

ακολουθούν τον κύκλο θέρμανσης – ψύξης καθώς αυτά δε ρευστοποιούνται αλλά αποσυντίθενται.

1.3 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ

Στα προηγμένα σύνθετα υλικά, οι ίνες ενίσχυσης είναι κατασκευασμένες είτε από οργανικά είτε από ανόργανα υλικά. Συγκεκριμένα, οι ενισχυτικές ίνες διακρίνονται σε:

- Ίνες γυαλιού
- Ίνες άνθρακα
- Ίνες πολυμερούς
- Κεραμικές ίνες
- Μεταλλικές ίνες
- Τριχίτες (Whiskers)
- Ίνες φυσικών ορυκτών

Βάσει της μορφής του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα υλικά κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Ινώδη σύνθετα υλικά (fiber-reinforced composites) με ενίσχυση ινών εμποτισμένων σε υλικό μήτρας.
- Πολύστρωτα σύνθετα υλικά (laminated composites) με επάλληλες στρώσεις φύλλων ή πλακών το ένα πάνω στο άλλο.
- Κοκκώδη σύνθετα υλικά (particulate composites) με ενίσχυση διασκορπισμένων σωματιδίων στη μήτρα που δεν έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό.

Στην παρούσα εργασία, η ανάλυση βασίζεται στα πολύστρωτα σύνθετα υλικά. Μια ίνα χαρακτηρίζεται από το μεγάλο λόγο μήκους/διάμετρο που έχει. Σημειώνεται στο σημείο αυτό πως οι ίνες διαφόρων υλικών θεωρούνται αρκετά πιο ανθεκτικές και άκαμπτες από τα αντίστοιχα υλικά στη συνήθη μορφή τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα φύλλα γυαλιού που παρουσιάζουν τάση θραύσεως χαμηλών MPa σε αντίθεση με τις ίνες γυαλιού που η τάση θραύσεως ανέρχεται στα 2.8-4.8 GPa για ίνες εμπορίου και στα 7 GPa για αντίστοιχες κατασκευασμένες στο εργαστήριο. Το παραπάνω παράδειγμα, λοιπόν, υποδεικνύει πως η γεωμετρία της ίνας πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν καθώς οι διαφορετικές ιδιότητες οφείλονται στην τελειότητα της δομής της ίνας. Συγκεκριμένα, εντός της ίνας οι κρύσταλλοι του υλικού είναι ευθυγραμμισμένοι κατά τον διαμήκη άξονα της και σημειώνονται λιγότερες εσωτερικές ατέλειες συγκριτικά με αυτές που υπάρχουν στο καθ' αυτό υλικό.

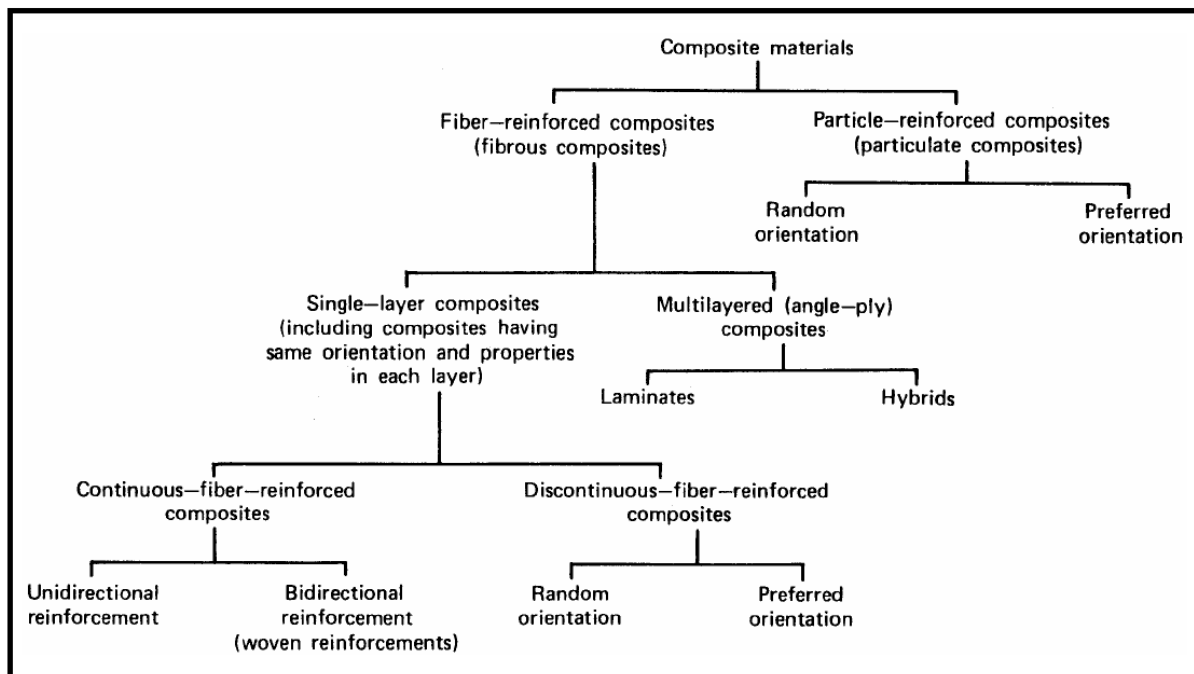
Τα σύνθετα υλικά, επίσης, ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διεύθυνση των ινών διακρίνονται ως εξής:

- Μονοδιευθυντικά σύνθετα όπου όλες οι ίνες έχουν την ίδια διεύθυνση.
- Πολυδιευθυντικά σύνθετα όπου οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις.
 - Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης.
 - Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης.
 - Σύνθετα με ίνες σε τρισορθογώνια ύφανση.

Ακόμη, βάσει του λόγου μήκους/διάμετρο οι ίνες διακρίνονται σε:

- Μακρές ίνες
- Κοντές ίνες
- Νηματίδια ή τριχίτες

Με βάση όσα προαναφέρθηκαν για τις κατηγορίες των σύνθετων υλικών, έχει οριστεί η ταξινόμηση τους όπως παρατίθεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 1: Γενική ταξινόμηση των σύνθετων υλικών [1]

Προκειμένου οι ίνες να παρέχουν ικανοποιητική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας, επιλέγεται υλικό κατασκευής τέτοιο ώστε το μέτρο ελαστικότητας (E) να είναι υψηλό, η τάση θραύσης σε εφελκυσμό να είναι εξίσου υψηλή, να σημειώνεται μεγάλη ακαμψία και χαμηλή δυσθραυστότητα και η πυκνότητα (ρ) να είναι χαμηλή.

Οι ίνες γραφίτη – άνθρακα, με τις οποίες θα ασχοληθούμε στην παρούσα εργασία, αποτελούν την επικρατέστερη ενίσχυση υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή υψηλών επιδόσεων σύνθετων υλικών. Η διάκριση αυτή οφείλεται στη φύση του άνθρακα και στους ενδοατομικούς δεσμούς που σχηματίζονται με

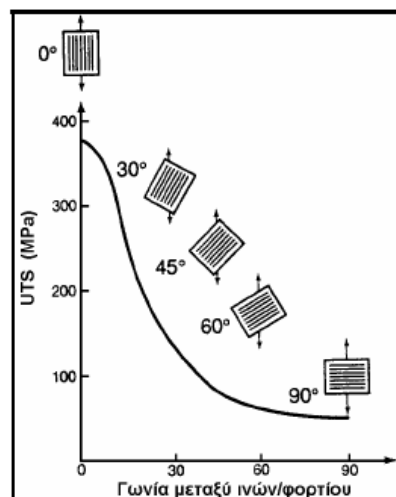
άλλα άτομα άνθρακα. Η διάμετρος τους υπολογίζεται μεταξύ 7-8 μm και αποτελούνται από κρυσταλλίτες γραφίτη τύπου «turbo static». Ο μονοκρυσταλλος άνθρακας αποτελείται από άτομα άνθρακα διατεταγμένα εξαγωνικά σε επίπεδα το ένα πάνω στο άλλο. Οι συνδέσεις των ατόμων σε κάθε επίπεδο στρώση πραγματοποιούνται με ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς και οι επίπεδες στρώσεις συγκρατούνται μεταξύ τους με μη ισχυρές δυνάμεις Van der Waals. Ο άνθρακας, λοιπόν, αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες με την ανισοτροπία αυτών να εξαρτάται από τις συνθήκες κατασκευής τους. Επακόλουθο του ισχυρού προσανατολισμού των κρυσταλλινών παράλληλα στο διαμήκη άξονα αποτελεί η υψηλή αντοχή σε θραύση, η υψηλή στιβαρότητα και ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής κατά μήκος της διεύθυνσης αυτής με το υψηλό μέτρο ελαστικότητας να οφείλεται στους ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των ατόμων άνθρακα.

Ιδιαίτερη βάση πρέπει να δοθεί στις ατέλειες δομής οι οποίες οδηγούν στη δημιουργία κενών αέρα (voids) σύνθετου σχήματος που διατάσσονται κατά μήκος της ίνας. Οι ατέλειες αυτές, χαρακτηρίζονται ως αδύναμα σημεία της δομής καθώς παρουσιάζουν συγκεντρώσεις τάσεων και, συνεπώς, μείωση της αντοχής της ίνας. Επιπρόσθετες ατέλειες δομής που συνδέονται άρρηκτα με τον τρόπο παραγωγής των ινών αποτελούν οι μακροκρύσταλλοι και οι επιφανειακές ατέλειες.

Σαν πρώτες ύλες είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν ποικίλα υλικά όπως είναι τα διάφορα πολυμερή, οι υδρογονάνθρακες, το συνθετικό μετάξι και η ρητίνη φανικού οξέος. Τα τελευταία χρόνια, βέβαια, ως κύριες πρώτες ύλες θεωρούνται το PAN (πολυ-ακρυλο-νιτρίλιο) και η πίσσα είτε από πετρέλαιο είτε από κάρβουνο.

1.4 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΙΝΩΝ

Οι συνεχείς και μονοδιευθυντικές ίνες παρουσιάζουν ισχυρή ανισοτροπία με την αντοχή τους να εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη διεύθυνση της επιβολής του φορτίου. Η χρήση ινών διαφορετικού προσανατολισμού συμβάλλει στην ισότροπη ενίσχυση του σύνθετου υλικού. Σημειώνεται, ακόμη, πως για ένα σύνθετο με μονοδιευθυντικές ίνες, το βέλτιστο μέτρο ελαστικότητας E και η βέλτιστη αντοχή UTS επιτυγχάνονται όταν η εφαρμοζόμενη τάση εφαρμόζεται παράλληλα προς τον προσανατολισμό των ινών. Αυτό επαληθεύεται και από το παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 2 Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στην αντοχή σε εφελκυσμό σύνθετου υλικού [1]

Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, όπου το σύνθετο υλικό δεν είναι μονοστρωματικό αλλά πολυστρωματικό, το υλικό συμπεριφέρεται ισότροπα.

1.5 ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ

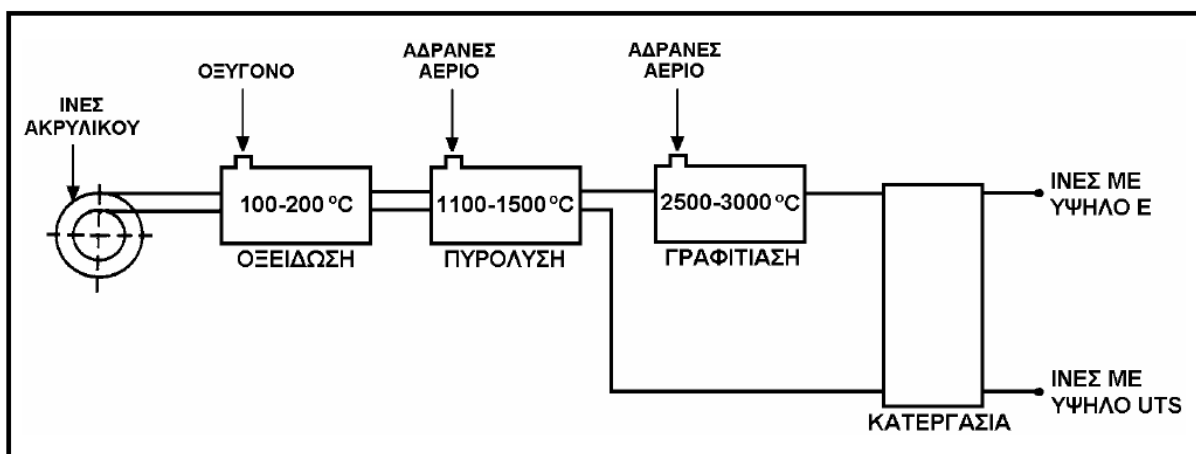
Για την κατασκευή του πάνελ, επιλέχθηκε το υλικό HexPly 8552/IM7 UD Carbon Prepreg. Το HexPly 8552 είναι μια σκληρή εποξειδική μήτρα υψηλής απόδοσης που χρησιμοποιείται κυρίως στην αεροδιαστημική. Παρουσιάζει εξαιρετικά καλή αντοχή σε κρούση και αντοχή σε φθορές για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Οι ίνες ενίσχυσης που φέρει το υλικό είναι ίνες άνθρακα με βάση το κανονικό πολυ-ακρυλο-νιτρίλιο (PAN). Ομοίως, και για την παραγωγή των stringers, επιλέχθηκαν τα ίδια υλικά.

Για τη σύνδεση των stringers στο πάνελ έγινε χρήση τόσο βιδών όσο και κόλλας αεροναυτικής χρήσης. Οι βίδες που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από τιτάνιο και τοποθετήθηκαν στα πέλματα των stringers ανά 10 cm με διάμετρο οπής 4-6 mm. Η κόλλα που χρησιμοποιήθηκε είναι μια κόλλα εποξειδικής ρητίνης που εμφανίζει παρόμοιες ιδιότητες με την Loctite EA9695 και είναι κατάλληλη για συγκόλληση τόσο co-cured όσο και pre-cured σύνθετων υλικών. Η ικανότητα της να σκληραίνει σε χαμηλότερες θερμοκρασίες την καθιστά κατάλληλη για την επισκευή σύνθετων υλικών.

Περαιτέρω ανάλυση για την παραγωγή των ινών άνθρακα, της εποξειδικής ρητίνης, του σύνθετου υλικού, των stringers, των βιδών και της κόλλας πραγματοποιείται στην παρακάτω ενότητα.

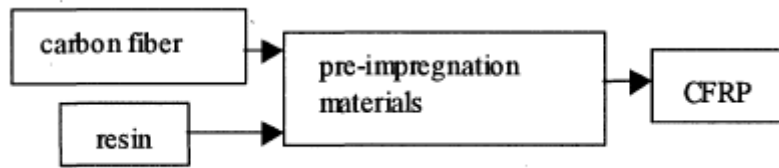
1.6 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Οι ίνες άνθρακα χαρακτηρίζονται ως Ίνες Τύπου Ι (Type I-carbon fibers) και η μεθοδολογία παραγωγής τους παρατίθεται στο παρακάτω σχήμα.



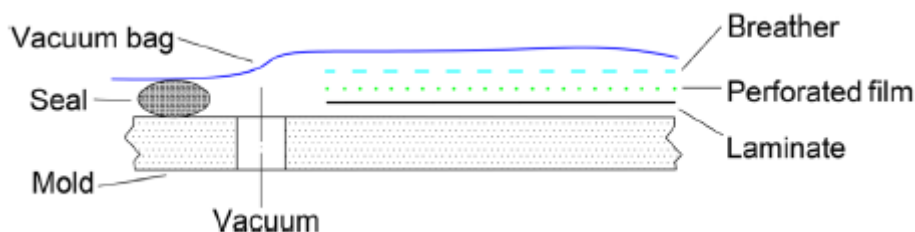
Εικόνα 3: Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα [1]

Εφόσον οι ίνες άνθρακα έχουν παραχθεί, επόμενο βήμα αποτελεί η δημιουργία του prepreg με τις ίνες άνθρακα και την εποξειδική ρητίνη να είναι οι πρώτες ύλες του.



Εικόνα 4 Τυπική διαδικασία παραγωγής CFRP [4]

Εν συνεχεία, χειρωνακτικά δημιουργείται το πάνελ αποτελούμενο από 16 στρώσεις prepreg με lay-up $[0/45/90/-45]_{25}$ και πλάτος κάθε φύλλου ίσο με 0.131 mm. Η τοποθέτηση των φύλλων prepreg σε κάθε στρώση πραγματοποιείται με ιδιαίτερη προσοχή καθώς τα φύλλα πρέπει να τοποθετηθούν κατά $[0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -45^\circ, 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -45^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 0^\circ, -45^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 0^\circ]$ ώστε οι ίνες άνθρακα να έχουν την επιθυμητή διεύθυνση. Καθώς ολοκληρωθεί η στοίβαξη των στρώσεων prepreg σειρά έχει η διαδικασία autoclave που μπορεί να διακριθεί σε τέσσερις κύριες φάσεις: κοπή, τοποθέτηση, χύτευση και εξαγωγή από το καλούπι. Αναλυτικότερα, κατά τη φάση της κοπής, το prepreg εξάγεται από το ψυγείο και διατηρείται σε θερμοκρασία δωματίου ώστε να αποψυχθεί. Στη συνέχεια, τοποθετείται στο τραπέζι κοπής και κόβεται σε διαστάσεις 800x1200 mm με ένα απλό κοπτικό εργαλείο. Το χαρτί υποστήριξης που προστατεύει το prepreg αφαιρείται και το υλικό απλώνεται στην επιφάνεια του επίπεδου καλουπιού. Μετά την τοποθέτηση όλων των στρωμάτων, ο εγκλωβισμένος αέρας μεταξύ αυτών απομακρύνεται μέσω μιας λειτουργίας αφαίρεσης αέρα. Μόλις ολοκληρωθεί αυτή η λειτουργία, τοποθετούνται σε συγκεκριμένα σημεία το αντικολλητικό υλικό (release agent), η μεμβράνη απελευθέρωσης (release film), ο εξαερωτής (bleeder) και η σακούλα κενού (vacuum bag). Η παρακάτω εικόνα δείχνει ακριβώς τη διάταξη αυτή:



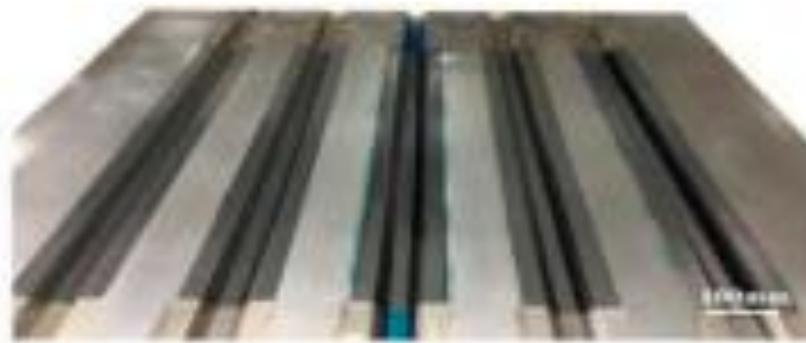
Εικόνα 5 Σχηματική διάταξη διαδικασίας σακούλας κενού [5]

Το αντικολλητικό υλικό χρησιμοποιείται για να αποφευχθεί η προσκόλληση ρητίνης στην επιφάνεια του καλουπιού. Το φιλμ απελευθέρωσης εφαρμόζεται πάνω από όλες τις πτυχές ώστε να αποβληθεί ο παγιδευμένος αέρας και η περίσσεια ρητίνης ενώ το πορώδες ύφασμα (εξαερωτής) εφαρμόζεται πάνω από αυτό. Σκοπός του εξαερωτή αποτελεί η απορρόφηση της περίσσειας ρητίνης που ρέει έξω από το υλικό κατά τη διαδικασία της χύτευσης και η διαφυγή του αέρα και των πτητικών από το υλικό. Τοποθετώντας, στο τέλος, και τη σακούλα κενού ξεκινά η εισαγωγή του υλικού στον κλίβανο για σκλήρυνση και στερεοποίηση. Η διαδικασία

σκλήρυνσης του υλικού επιτυγχάνεται με συνδυασμό εξωτερικής πίεσης, κενού και θερμότητας. Το κενό συμβάλλει στην εξάλειψη του αέρα ενώ η εξωτερική πίεση στη στερεοποίηση της λάμινας. Η θερμότητα του κλιβάνου επιταχύνει τον πολυμερισμό μέχρι την πλήρη σκλήρυνση της εποξειδικής ρητίνης. Η θερμοκρασία σκλήρυνσης και η πίεση διατηρούνται σταθερές για πάνω από 2 ώρες μέχρι να επιτευχθεί πλήρης σκλήρυνση. Μόλις η διαδικασία σκλήρυνσης ολοκληρωθεί, σειρά έχει η φάση ψύξης με στόχο την εξαγωγή του υλικού από το καλούπι. Εφόσον πραγματοποιηθεί και η τελευταία διαδικασία, το πάνελ διατηρείται εκτός του κλιβάνου μέχρι να φτάσει τη θερμοκρασία δωματίου.

Η επεξεργασία σε κλίβανο επιτρέπει να έχουμε σταθερές ιδιότητες υλικού, υψηλό όγκο ινών, ευελιξία στον προσανατολισμό των ινών και εξαιρετικές μηχανικές επιδόσεις με τη δυνατότητα παραγωγής πολύπλοκων σχημάτων χωρίς κενά ή περίσσεια ρητίνης. Βέβαια, η σακούλα κενού παρουσιάζει αρκετούς περιορισμούς καθώς, ειδικά για μεγάλα εξαρτήματα, αποτελεί μια χρονοβόρα διαδικασία και απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή για την αποτελεσματική σφράγιση της. Αξίζει να σημειωθεί, ωστόσο, πως μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικά εργαλεία για την ανίχνευση διαρροών αέρα όπως, για παράδειγμα, μια συσκευή υπερήχων.

Σημειώνεται πως η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για την κατασκευή των stringers με τη διαφορά να έγκειται στη χρήση διαφορετικού καλουπιού. Το καλούπι που χρησιμοποιήθηκε έχει παρόμοιο σχήμα και διαστάσεις με το παρακάτω:



Εικόνα 6 Σχήμα καλουπιού για την κατασκευή των stringers [6]

Έχοντας ολοκληρώσει την κατασκευή του επίπεδου πάνελ και των stringers απομένει μόνο η σύνδεση τους. Η σύνδεση πραγματοποιείται είτε με κοχλίες τιτανίου είτε με εποξειδική κόλλα σε μορφή φιλμ και η εφαρμογή τους γίνεται κατά μήκος των πελμάτων των stringers. Επισημαίνεται στο σημείο αυτό, πως οι κοχλίες τοποθετούνται ανά 10 cm σε κάθε πέλμα ενώ η κόλλα εφαρμόζεται σε όλο το πλάτος και μήκος των πελμάτων.

2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

Η βιομηχανική παραγωγή αγαθών περιλαμβάνει την κατεργασία και την μεταποίηση υλικών. Για την παραγωγή των αγαθών αυτών η κατανάλωση ενέργειας τίθεται απαραίτητη και παράλληλα με αυτήν παράγονται και απόβλητα σε διάφορες μορφές. Η αντίληψη ότι η πραγματοποίηση μιας παραγωγικής διαδικασίας η οποία δε θα καταναλώνει ενέργεια και δε θα επιβαρύνει το περιβάλλον με απόβλητα είναι μύθος. Έτσι, η πιο ρεαλιστική προσδοκία είναι η ελαχιστοποίηση τόσο της κατανάλωσης ενέργειας όσο και της αποδέσμευσης των αποβλήτων. Απαραίτητο όργανο για την προσέγγιση του ζητήματος αυτού αποτελεί η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ).

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής – ΑΚΖ (Life Cycle Assessment) αποτελεί μια σχετικά νέα επιστημονική μέθοδος η οποία αναπτύχθηκε με σκοπό να βοηθήσει στην αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προβλημάτων. Αντικειμενικός σκοπός της ανάλυσης κύκλου ζωής είναι η αναζήτηση και η ποσοτικοποίηση του περιβαλλοντικού αντικτύπου οποιουδήποτε προϊόντος κατά τη διάρκεια της ζωής του, από την εξόρυξη των πρώτων υλών, την παραγωγή, τη χρήση και την τελική του διάθεση. Μέσα από αυτή τη διαδικασία, ο εντοπισμός των δραστηριοτήτων που προκαλούν τις σοβαρότερες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις καθίσταται πιο εύκολος και οι κατασκευαστές μπορούν να προσανατολιστούν σε συγκεκριμένους τομείς ώστε να μειώσουν το περιβαλλοντικό αντίκτυπο από την παραγωγική τους διαδικασία. Συγκεκριμένα και βάσει των ορισμών:

Η ανάλυση κύκλου ζωής είναι η διαδικασία καταγραφής και ανάλυσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος (χρήσης ενέργειας και πρώτων υλών, ρύπανση ατμόσφαιρας, νερού, εδάφους κ.ο.κ.) καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του, από τη σύλληψη μέχρι την απόρριψή του.

Στην παρακάτω εικόνα παρατίθεται ο κύκλος ζωής ενός προϊόντος από τη γέννηση έως την απόρριψη του:



Εικόνα 7 Κύκλος ζωής προϊόντος [7]

2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η ιστορία της περιβαλλοντικής εκτίμησης διεργασιών ξεκινά από τις αρχές της δεκαετίας του 1960 και αναφέρεται κυρίως στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις μεγάλων κατασκευαστικών έργων. Η ανάλυση κύκλου ζωής έκανε για πρώτη φορά την εμφάνιση της τις τελευταίες δεκαετίες όπου αν και χρησιμοποιήθηκε από βιομηχανίες και κρατικούς φορείς στην Ευρώπη και στις Ηνωμένες Πολιτείες, το ενδιαφέρον για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής ως εργαλείο διαχείρισης του περιβάλλοντος άρχισε να αυξάνεται τα τελευταία χρόνια. Σημειώνεται πως η ανάλυση άρχισε να εφαρμόζεται στη δεκαετία του 1960 διότι εκείνη την περίοδο ξεκίνησε να είναι πιο έντονο το πρόβλημα της έλλειψης πρώτων υλών και της διαθέσιμης ενέργειας οπότε τέθηκε το ζήτημα να βρεθούν τρόποι για τη βέλτιστη και αντικειμενικότερη καταγραφή των αναγκών πρώτων υλών και της απαιτούμενης ενέργειας που θα χρειαζόνταν.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες κατά το χρονικό διάστημα 1960-1970, πραγματοποιήθηκε μια σειρά από μελέτες που σύγκριναν μεταξύ τους διάφορες εναλλακτικές πηγές. Αν και η ανάλυση βασίστηκε κυρίως στον ενεργειακό τομέα, έγινε αναφορά και στους ρυπαντές του αέρα και των υδάτων. Ερευνητές του Midwest Research Institute, το 1969, ξεκίνησαν μια έρευνα σε συνεργασία με τη Coca Cola Company για την εδραίωση των μεθοδολογιών ανάλυσης κύκλου ζωής στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Παράλληλα, το ενδιαφέρον της κοινής γνώμης άρχισε να πιέζει τη βιομηχανία να επιβεβαιώσει τις σχετικές πληροφορίες που ανακοινώνονταν για τη στενότητα του πετρελαίου και την αξιοπιστία των στοιχείων που δίνονταν στη δημοσιότητα για τις επιπτώσεις της παραγωγής στο περιβάλλον. Η πίεση της κοινωνίας είχε ως απόρροια την εκπόνηση περίπου δεκαπέντε μελετών ανάλυσης της χρήσης φυσικών πόρων και της επίδρασης στο περιβάλλον (Resource and Environmental Profile Analysis – REPA) τις χρονιές 1970 έως 1975. Εκτός από τις μελέτες αυτές, η πίεση συντέλεσε και στο να παραμεριστεί ο σκεπτικισμός που υπήρχε τότε σχετικά με την αναγκαιότητα και τη χρησιμότητα των μελετών. Την ίδια περίοδο, παρατηρήθηκαν και άλλες σχετικές μελέτες όπως αυτής του Stanford Research Institute σε συνεργασία με την εταιρεία Mc Donald's με τις περισσότερες από αυτές να είναι απόρρητες.

Ανάλογες προσπάθειες με της Αμερικής παρατηρήθηκαν και στην Ευρώπη με τις πιο σημαντικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν να είναι η «Περιβαλλοντική Λογιστική» (Environmental Accounting), το «Οικολογικό Ισοζύγιο» (Eco-Balance) και η «Ανάλυση Γραμμής Προϊόντος» (Product Line Analysis). Στη Βρετανία, η πρώτη μελέτη τέτοιου τύπου πραγματοποιήθηκε το 1972 με θέμα τη βιομηχανία γυαλιού. Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό πως κατά την περίοδο μεταξύ 1975-1980 παρατηρήθηκε μια μείωση του ενδιαφέροντος για αυτού του είδους τις μελέτες καθώς υπήρξε μια σχετική ύφεση της κρίσης πετρελαίου. Ωστόσο, οι μελέτες συνεχίστηκαν να εκπονούνται μέχρι το 1980 όπου παρατηρήθηκε μια αναθέρμανση του ενδιαφέροντος. Η αύξηση του ενδιαφέροντος προκλήθηκε και από την αύξηση των πιέσεων από τις οικολογικές κινήσεις καθώς, επίσης, και η δημιουργία της Γενικής Διεύθυνσης για το Περιβάλλον από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Αν και στην αρχή το έργο της διεύθυνσης ήταν κατά βάση η τυποποίηση των περιβαλλοντικών κανονισμών σε όλη την ΕΕ, το 1985 εισήχθη η οδηγία 85/339 σχετικά με τους περιέκτες τροφίμων και ποτών η οποία αναφερόταν στην κατανάλωση ενέργειας και πρώτων υλών και στην αύξηση της ρύπανσης. Βασική λόγος, ακόμη, που οι τεχνικές ανάλυσης κύκλου ζωής επανήλθαν στο προσκήνιο ήταν το πρόβλημα των στερεών αποβλήτων που ξεκίνησε να λαμβάνει μεγάλες διαστάσεις σε όλον τον κόσμο το 1988. Έτσι, μια μεγάλη σειρά από μελέτες σχετικά με τις διάφορες μορφές της ανάλυσης κύκλου ζωής ξεκίνησαν να εμφανίζονται ραγδαία.

2.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής αποτελεί ένα εργαλείο για την εκτίμηση της επιβάρυνσης στο περιβάλλον που προκαλεί ένα προϊόν, μια διεργασία ή δραστηριότητα σε όλη τη διάρκεια του κύκλου της ζωής του. Σύμφωνα με τον διεθνή οργανισμό που εισήγαγε την ανάλυση κύκλου ζωής SETAC (Society for Environmental Toxicology and Chemistry), η ανάλυση γνωστοποιεί την επιβάρυνση που προκαλεί το προϊόν στο περιβάλλον από τη γέννησή του ως την απόρριψη του (cradle to grave) αλλά δε διερευνά τρόπους για την πρόληψη ή την ελαχιστοποίηση της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος.

Η SETAC αναφέρει ότι μια πλήρης ανάλυση κύκλου ζωής πρέπει να περιλαμβάνει τα ακόλουθα 4 στάδια:

1. Προσδιορισμός του σκοπού και του αντικειμένου της μελέτης.
2. Απογραφή δεδομένων (Life Cycle Inventory Analysis) της κατανάλωσης των πρώτων υλών, της ενέργειας και των εκπομπών ρύπων στο περιβάλλον.
3. Ανάλυση των επιπτώσεων στο περιβάλλον από τη χρήση των πρώτων υλών, της ενέργειας και της εκπομπής των ρύπων (Life Cycle Impact Analysis).
4. Εκτίμηση βελτιώσεων και εναλλακτικών δυνατοτήτων που μπορούν να μειώσουν την επιβάρυνση προς το περιβάλλον (Life Cycle Improvement Analysis).

Τυπικά, το σύστημα αποτελεί ένα στατικό μοντέλο προσομοίωσης καθώς αποτελείται από ξεχωριστές και αντιπροσωπευτικές διαδικασίες όπως την παραγωγή, την μεταφορά κ.λπ. Για κάθε μια διαδικασία έχουμε:

- Εισροές – πόροι, εκπομπές και περιβαλλοντικές αλληλεπιδράσεις.
- Ενδιάμεσες ροές προϊόντος – σύζευξη των διαδικασιών. Αυτές ονομάζονται ροές αναφοράς και αποτελούν τις ποσότητες των ροών συγκεκριμένου προϊόντος για κάθε ένα από τα υπό σύγκριση συστήματα που απαιτούνται για την παραγωγή μιας λειτουργικής μονάδας.

Αναλυτικότερα, το πρώτο βήμα σε μια μελέτη είναι η διατύπωση του σκοπού για τον οποίο διεξάγεται. Το αντικείμενο της μελέτης πρέπει να είναι καθαρό και κατανοητό. Ακόμη, θεωρείται απαραίτητο να αναφέρονται τα απαιτούμενα δεδομένα, οι αναγκαίες υποθέσεις, οι περιορισμοί και η εκτίμηση της ποιότητας των υφιστάμενων δεδομένων. Στο στάδιο αυτό, δηλαδή, θα περιγράφονται οι λόγοι για τους οποίους έγιναν οι συγκεκριμένες υποθέσεις και παραδοχές και θα εξηγούνται τα σημαντικά σημεία περί της μεθοδολογίας και του τρόπου εφαρμογής της.

Η απογραφή δεδομένων (Life Cycle Inventory Analysis) είναι το δεύτερο στάδιο σε μια μελέτη. Στο μέρος αυτό, καταγράφεται κάθε τι το οποίο εισέρχεται από το περιβάλλον είτε εξέρχεται σε αυτό. Η απογραφή των δεδομένων υποβοηθείται από τη χρήση πινάκων οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη λεπτομερέστερη καταγραφή των επιβαρύνσεων προς το περιβάλλον. Οι επιβαρύνσεις εισάγονται ανά λειτουργική μονάδα και μπορούν να οριστούν ειδικά από τον κάθε ενδιαφερόμενο. Σημειώνεται πως η απογραφή των δεδομένων πρέπει να περιλαμβάνει όλα τα στάδια της ζωής ενός προϊόντος από την εξαγωγή των πρώτων υλών, τη βιομηχανική κατεργασία, τη μεταφορά, τη διανομή, τη χρήση, την ανακύκλωση και την τελική απόθεση.

Το τρίτο στάδιο της μελέτης είναι η ανάλυση των επιπτώσεων η οποία πραγματοποιείται με τη χρήση περιβαλλοντικών δεικτών σε κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων όπως είναι η αλλαγή του κλίματος, ο ευτροφισμός των υδάτινων πόρων, η ερημοποίηση, η διάβρωση του εδάφους και η καταστροφή του στρώματος του όζοντος.

Το τελευταίο στάδιο της ανάλυσης είναι η εκτίμηση των βελτιώσεων (Life Cycle Improvement Analysis) το οποίο περιλαμβάνει την αναγνώριση, την αξιολόγηση και την επιλογή των εναλλακτικών επιλογών για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του εξεταζόμενου προϊόντος.

Όσον αφορά την ανάλυση των επιπτώσεων αξίζει να σημειωθεί πως ο αντικειμενικός σχολιασμός των αποτελεσμάτων της καταγραφής είναι απαραίτητος έτσι ώστε να αξιοποιηθεί η ανάλυση κύκλου ζωής. Βέβαια, αυτό το στάδιο της ανάλυσης δεν έχει αναπτυχθεί ακόμη ολοκληρωτικά και οι κρίσεις για το πώς πρέπει να ερμηνεύονται τα αποτελέσματα ποικίλουν. Έτσι, ερωτήματα του τύπου εάν τη μεγαλύτερη επίδραση στο περιβάλλον την προκαλεί η όξινη βροχή ή τα αέρια που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι πολύ δύσκολο να απαντηθούν.

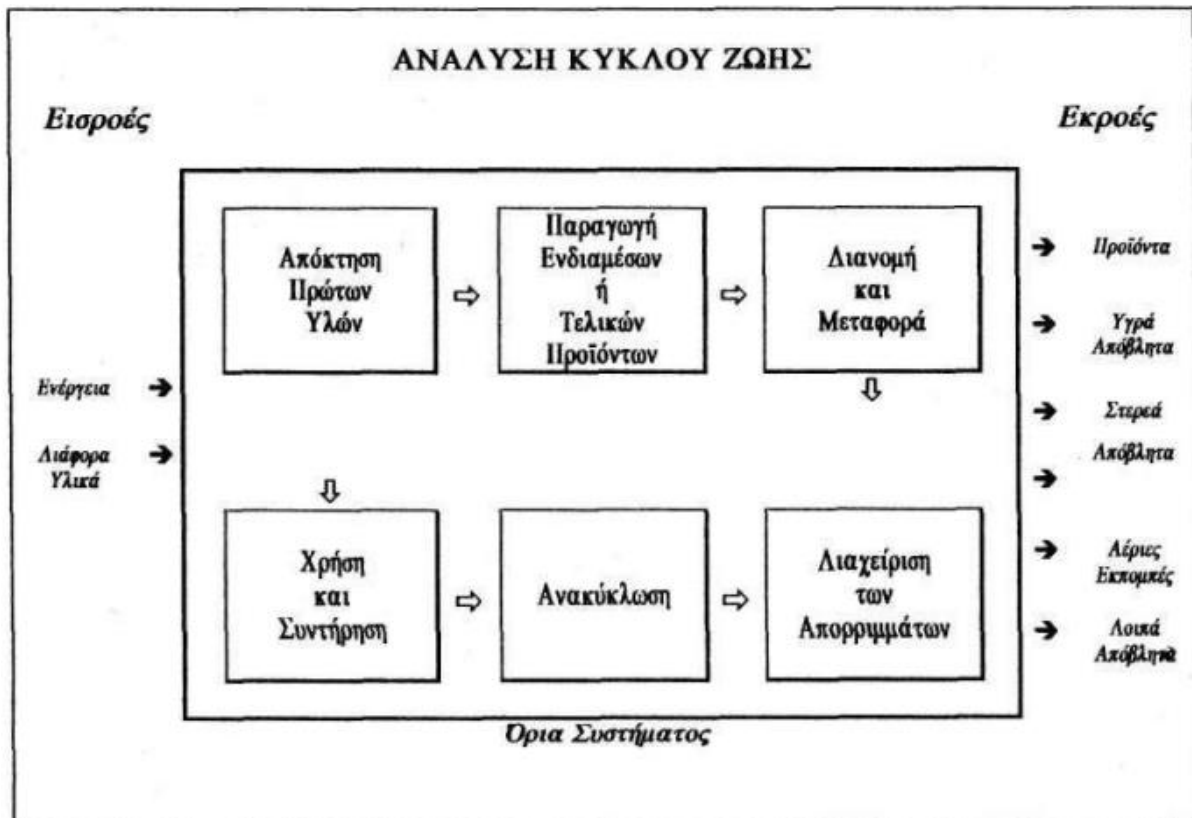
Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί και στα βήματα που πραγματοποιούνται κατά την ανάλυση των επιπτώσεων κύκλου ζωής. Η ανάλυση πραγματοποιείται σε τρία διαδοχικά βήματα:

1. Ταξινόμηση των αποτελεσμάτων της καταγραφής σε καλά καθορισμένες κατηγορίες βάσει της επίδρασης τους (αύξηση θερμοκρασίας πλανήτη, εξάντληση φυσικών πόρων, όξινη βροχή κ.ο.κ.).
2. Χαρακτηρισμός της συμβολής σε κάθε κατηγορία επίδρασης στο περιβάλλον.
3. Αξιολόγηση των κατηγοριών αυτών.

Συμπερασματικά, τα πρακτικά οφέλη που προκύπτουν από την ανάλυση κύκλου ζωής είναι τα εξής:

- Η κοινή βάση αναφοράς για τη σύγκριση διάφορων εναλλακτικών προϊόντων και δραστηριοτήτων ως προς το περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο.
- Ο προσδιορισμός των σημείων του κύκλου ζωής που έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν το βέλτιστο περιβαλλοντικό όφελος.

- Η ανάπτυξη νέων υλικών και προϊόντων με μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
- Η επιστημονική υποστήριξη για τον ορισμό προϊόντων ως φιλικά προς το περιβάλλον βάσει του κανονισμού ΕΟΚ 880/1992.
- Η εκπαίδευση σε θέματα πρόληψης ή μείωσης της ρύπανσης.



Εικόνα 8 Τα υποσυστήματα του συστήματος του κύκλου ζωής ενός προϊόντος [8]

2.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

Για την ανάλυση του κύκλου ζωής μιας μονάδας και τον υπολογισμό του περιβαλλοντικού αποτυπώματος απαιτείται η εφαρμογή ενός υπολογιστικού μοντέλου. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει ένα σύνολο από ουσίες και ροές οι οποίες συνδέονται με ένα συντελεστή για κάθε κατηγορία ρύπανσης. Έτσι, με τη χρήση του μοντέλου, ο προσδιορισμός του περιβαλλοντικού αποτυπώματος μιας διεργασίας είναι εφικτός. Αξίζει να σημειωθεί πως λόγω της πληθώρας των ουσιών αλλά και των ποικίλων κατηγοριών ρύπανσης έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα τα οποία επιχειρούν να περιγράψουν τις επιπτώσεις του κάθε ρύπου όσο το δυνατόν καλύτερα. Ωστόσο, ακόμη δεν υπάρχει μοντέλο που να περιγράφει σε βέλτιστο βαθμό το αποτύπωμα των ουσιών σε όλες τις κατηγορίες ρύπανσης. Επομένως, η αξιολόγηση και η εκτίμηση του εκάστοτε πακέτου ανάλυσης τίθεται απαραίτητη. Βέβαια, με την πρόοδο της τεχνολογίας και τις συνεχείς έρευνες, παρατηρείται μια πιο σύμφωνη προσέγγιση και εκτίμηση

των περιβαλλοντικών επιπτώσεων παρά τη χρήση διαφορετικών μοντέλων αφού όσο μελετάται μια κατηγορία ρύπανσης τόσο πιο πολύ συγκλίνουν τα μοντέλα. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελεί το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής που θεωρείται μια από τις πιο διαδεδομένες και μελετημένες κατηγορίες ρύπανσης. Η πλειοψηφία των μοντέλων για αυτό το πρόβλημα δίνει παρόμοια αποτελέσματα σημειώνοντας πολύ μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους καθώς οι συντελεστές που συνδέουν τις ουσίες με τα αποτυπώματα έχουν οριστικοποιηθεί και είναι αποδεκτοί από όλα τα μοντέλα. Παρόλα αυτά, για μερικές κατηγορίες ρύπανσης όπως είναι ο ευτροφισμός του νερού και της θαλάσσιας ζωής, τα διάφορα μοντέλα εξάγουν αποτελέσματα με έντονες διαφορές μεταξύ τους. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε διάφορους λόγους όπως είναι η γενικότητα των κατηγοριών και το εύρος εφαρμογής τους, η επίδραση πολλών εξωτερικών παραγόντων όπως κοινωνικές, πολιτικές και καιρικές συνθήκες και η διαρκής ανάπτυξη της τεχνολογίας που δίνει τη δυνατότητα εκτενέστερων υπολογισμών και υπολογισμών με αυξημένο αριθμό σεναρίων για την εκτίμηση ρεαλιστικών αποτελεσμάτων. Σήμερα, εξειδικευμένα μοντέλα κατάλληλα για συγκεκριμένες κατηγορίες ρύπανσης έχουν δημιουργηθεί και με κάθε νέα έκδοση προσπαθούν να βελτιώνουν τις προσεγγίσεις τους έτσι ώστε τα αποτελέσματα που εξάγονται να θεωρούνται ρεαλιστικά.

Η ανάλυση κύκλου ζωής βασίζεται σε συγκεκριμένα πρότυπα ISO (International Organization for Standards). Τα πρότυπα ISO 14040 [ISO 14040, 2006] και ISO 14044 [ISO 14044, 2006] παρέχουν τις αρχές και τις απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται για την εκτέλεση των μελετών αξιολόγησης του κύκλου ζωής. Κάθε ανάλυση κύκλου ζωής που είναι συμβατή με το ISO πρέπει να περιλαμβάνει τέσσερις διαφορετικές αλλά άρρηκτα συνδεδεμένες φάσεις. Αρχικά, πρέπει να καθοριστούν οι στόχοι της ανάλυσης, τα όρια του συστήματος και η λειτουργική μονάδα. Έπειτα, σύμφωνα με τον ορισμένο στόχο, πρέπει να συλλεχθούν όλα τα σχετικά δεδομένα και να υποδιαιρεθεί το σύστημα σε ξεχωριστές διεργασίες περιλαμβάνοντας τις εισροές και εκροές όλων των ροών. Εφόσον έχουν οριστεί οι εισροές και εκροές, αυτές στη συνέχεια μεταφράζονται σε κατηγορίες επιπτώσεων και, τέλος, ερμηνεύονται με βάση τους στόχους που τέθηκαν στην αρχή της μελέτης. Το στάδιο των επιπτώσεων, λοιπόν, περιλαμβάνει αποτελέσματα που διακρίνονται σε Midpoint και Endpoint δείκτες. Οι δείκτες Midpoint περιλαμβάνουν την οξίνιση (acidification), την ακτινοβολία (radiation), το κλίμα (climate), τα ορυκτά καύσιμα (fossil fuel), την οικοτοξικότητα (ecotoxicity) κ.λπ.. Αντίστοιχα, οι δείκτες Endpoint περιλαμβάνουν τις αναπνευστικές ασθένειες (respiratory diseases), το επίπεδο του θαλασσινού νερού (seawater level), την εξάντληση των πόρων κ.ο.κ..

2.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

Κλιματική Αλλαγή – Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Η κλιματική αλλαγή ορίζεται ως η αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας που προέρχεται από το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η ανθρώπινη δραστηριότητα αυξάνει σταδιακά το κλίμα της γης προσθέτοντας σημαντικές ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου σε εκείνες που προϋπάρχουν στην ατμόσφαιρα από φυσικά αίτια. Τα επιπλέον αέρια του θερμοκηπίου προέρχονται κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων με σκοπό την παραγωγή ενέργειας αλλά και από άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες όπως παραγωγή χημικών ουσιών, αποψύλωση τροπικών δασών κ.λπ. Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) είναι το κυριότερο αέριο του θερμοκηπίου που παράγεται από ανθρώπινες διαδικασίες. Αυτά τα επιπλέον αέρια ενισχύουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου αυξάνοντας τη θερμοκρασία της γης και προκαλώντας σημαντικές αλλαγές στο κλίμα. Η αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας

οδηγεί σε κλιματικές διαταραχές, ξηρασίες, αύξηση της στάθμης της θάλασσας και επιδείνωση ασθενειών. Θεωρείται από τις σημαντικότερες κατηγορίες ρύπανσης εξαιτίας του οικονομικού αντικτύπου της ενώ, ταυτόχρονα, αποτελεί μια από τις πιο δύσκολες για μελέτη ρύπανση λόγω της μεγάλης κλίμακάς της. Σημειώνεται πως το αποτύπωμα της μετριέται σε χιλιόγραμμα (kg) διοξειδίου του άνθρακα σε διάρκεια 100 χρόνων.

Εξάντληση φυσικών πόρων

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές κατηγορίες που υπάγονται στην εξάντληση πόρων με την κυριότερη να είναι η εξάντληση ορυκτών καυσίμων, ορυκτών, μετάλλων, νερού κ.λπ. Ανάλογα με το είδος του πόρου, η εξάντληση μετριέται σε κυβικά μέτρα (m^3) για το νερό, σε χιλιόγραμμα (kg) για τα ορυκτά και σε MJ για τα ορυκτά καύσιμα.

Οξίνιση

Όξινα αέρια όπως το διοξείδιο του θείου (SO_2) αντιδρούν με το νερό στην ατμόσφαιρα σχηματίζοντας τη γνωστή όξινη βροχή. Όταν η βροχή καταλήγει στο έδαφος, πολλές φορές μακριά από την πηγή του αερίου, δημιουργεί καταστροφές στο οικοσύστημα. Αέρια που συμβάλλουν στην αύξηση της όξινης βροχής είναι η αμμωνία (NH_3), τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και τα οξείδια του θείου (SO_x). Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα μετριέται σε χιλιόγραμμα (kg) διοξειδίου του θείου χωρίς να λαμβάνονται υπόψη παράμετροι όπως το πόσο ευάλωτο είναι το δεδομένο περιβάλλον.

Οικοτοξικότητα

Η οικοτοξικότητα μετριέται σε τρεις ξεχωριστές κατηγορίες επιπτώσεων που εξετάζουν το θαλάσσιο οικοσύστημα, το υδατικό οικοσύστημα γλυκού νερού και το χερσαίο οικοσύστημα. Η εκπομπή ρύπων όπως τα βαρέα μέταλλα έχουν σημαντική επίδραση στο οικοσύστημα και οι δείκτες που περιγράφουν τις κατηγορίες αυτές βασίζονται στις μέγιστες ανεκτές συγκεντρώσεις τους. Η μονάδα αναφοράς είναι τα χιλιόγραμμα (kg) 1,4-διχλωροβενζολίου.

Ευτροφισμός

Ευτροφισμός ονομάζεται η αύξηση των συγκεντρώσεων ουσιών σε ένα σύστημα που οδηγεί σε μη φυσιολογική παραγωγικότητα. Συνήθως έχει ως απόρροια την υπερβολική ανάπτυξη των φυτών όπως τα φύκια στα ποτάμια που προκαλούν σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας του νερού. Εκπομπές αμμωνίας, νιτρικών αλάτων, οξειδίων του αζώτου και φωσφόρου στον αέρα ή στο νερό έχουν επίδραση στον ευτροφισμό. Οι επιπτώσεις του μετρούνται σε χιλιόγραμμα (kg) φωσφόρου P^3 όταν πρόκειται για ευτροφισμό νερού και σε χιλιόγραμμα (kg) αζώτου N όταν πρόκειται για ευτροφισμό θαλάσσιας ζώης.

Τοξικότητα στον άνθρωπο

Η κατηγορία αυτή αποτελεί ένα δείκτη που αντικατοπτρίζει την πιθανή βλάβη που μπορεί να προκαλέσει μια χημική ουσία στην ανθρώπινη υγεία. Βασίζεται στην τοξικότητα της ίδιας της ουσίας όπως επίσης και στο βαθμό έκθεσης του ανθρώπου σε αυτή. Υποπροϊόντα όπως το αρσενικό, το διχρωμικό νάτριο και υδροφθόριο πηγάζουν κυρίως από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα και μπορούν να βλάψουν τον άνθρωπο μέσω της εισπνοής, της κατάποσης αλλά και της επαφής. Η κατηγορία αυτή μετριέται συνήθως σε χιλιόγραμμα (kg) 1,4 – διχλωροβενζολίου.

Εξασθένηση στοιβάδας του όζοντος

Συνήθως όλες οι χλωριούχες και βρωμιούχες ενώσεις που είναι αρκετά σταθερές για να φτάσουν στη στρατόσφαιρα μπορούν να έχουν επίδραση στην εξασθένηση της στοιβάδας. Η εξασθένηση της στοιβάδας του όζοντος επιτρέπει μεγαλύτερη ποσότητα της υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) να εισέλθει στην ατμόσφαιρα αυξάνοντας έτσι τα ποσά τα καρκινογόνου φωτός (UVB) που φτάνουν στην επιφάνεια της γης. Η επίδραση των διαφόρων αερίων εκφράζεται συνήθως σε χιλιόγραμμα (kg) χλωροφθοράνθρακα-11 (CFC-11).

Δημιουργία αιωρούμενων σωματιδίων

Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούνται από εξαιρετικά μικρά σωματίδια αποτελούμενα από οξέα (θειικά και νιτρικά), οργανικές ουσίες, μέταλλα και σωματίδια χρώματος και σκόνης. Αυτά τα σωματίδια οφείλονται για την εμφάνιση πολλών προβλημάτων υγείας και, κυρίως, για αναπνευστικά προβλήματα. Μετρούνται σε χιλιόγραμμα (kg) σωματιδίων διαμέτρου 10 μm .

Σχηματισμός φωτοχημικού νέφους

Το όζον θεωρείται προστατευτικό στην στρατόσφαιρα αλλά στο επίπεδο του εδάφους είναι τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις. Το φωτοχημικό όζον, σχηματίζεται από την αντίδραση πτητικών οργανικών ενώσεων και οξειδίων του αζώτου παρουσία θερμότητας και ηλιακού φωτός. Η επίδραση του σχηματισμού εξαρτάται κυρίως από τα ποσά μονοξειδίου του άνθρακα (CO), διοξειδίου του θείου (SO₂), οξειδίου του αζώτου (NO), αμμωνίας και πτητικών οργανικών ενώσεων μη μεθανίου. Συνήθως μετριέται σε χιλιόγραμμα (kg) αιθυλενίου (C₂H₄).

3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ OPENLCA

Η ανάλυση κύκλου ζωής μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο με χειρόγραφους υπολογισμούς όσο και με τη χρήση κάποιου λογισμικού. Στην εποχή που διανύουμε, βέβαια, υπάρχουν πολλά διαφορετικά προγράμματα λογισμικού που είναι διαθέσιμα για την εκτέλεση της ανάλυσης. Οποιοδήποτε εργαλείο ανάλυσης κύκλου ζωής επιτρέπει να λαμβάνονται οι σωστές αποφάσεις σχετικά με την κατασκευή και την ανακύκλωση ενός προϊόντος λαμβάνοντας υπόψη ολόκληρο τον κύκλο ζωής του. Συγκεκριμένα, το λογισμικό επιτρέπει τη διάσπαση ολόκληρου το προϊόντος σε ροές και την ανάλυση του κύκλου ζωής αυτού, από τα συστατικά του έως την ενέργεια που απαιτείται για την κατασκευή του. Η παρούσα εργασία βασίστηκε στο λογισμικό openLCA καθώς θεωρήθηκε ως το καταλληλότερο για το πλαίσιο και τα δεδομένα της μελέτης. Αλλά λογισμικά εξίσου κατάλληλα για την ανάλυση κύκλου ζωής είναι τα εξής: SimaPro, GaBi, EcoDesign Studio, Life Cycle Assessment Software Building for Environmental & Economic Sustainability (BEES) και Umberto.

Το openLCA είναι ένα πακέτο ανοιχτού κώδικα για την αξιολόγηση του κύκλου ζωής και της βιωσιμότητας. Αναπτύχθηκε από την GreenDelta (<https://www.greendelta.com/>) το 2006 με την υποστήριξη των PE International (κατασκευαστές του GaBi), PRé Consultants (δημιουργοί του SimaPro) και του UNEP (United Nations Environment Programme) και διατίθεται ελεύθερα χωρίς κόστος άδειας χρήσης ενώ ο κώδικας του λογισμικού μπορεί να προβληθεί και να μεταποιηθεί από τον οποιονδήποτε. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του εργαλείου είναι ότι προσφέρει τη δυνατότητα στους χρήστες να εργαστούν με διαφορετικές βάσεις δεδομένων όπως αυτές που χρησιμοποιούνται στο λογισμικό GaBi. Παράλληλα, όλα τα μοντέλα που δημιουργούνται, μπορούν να κοινοποιούνται ελεύθερα εάν και εφόσον το επιτρέπει η άδεια χρήσης της βάσης δεδομένων. Ακόμη, διαθέτει μια ευρεία επιλογή βάσεων δεδομένων (LCI) με το πακέτο μεθόδων για την εκτίμηση των επιπτώσεων να παρέχεται δωρεάν αλλά όχι από προεπιλογή στο λογισμικό.

Το openLCA μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ποικίλες εφαρμογές όπως, για παράδειγμα:

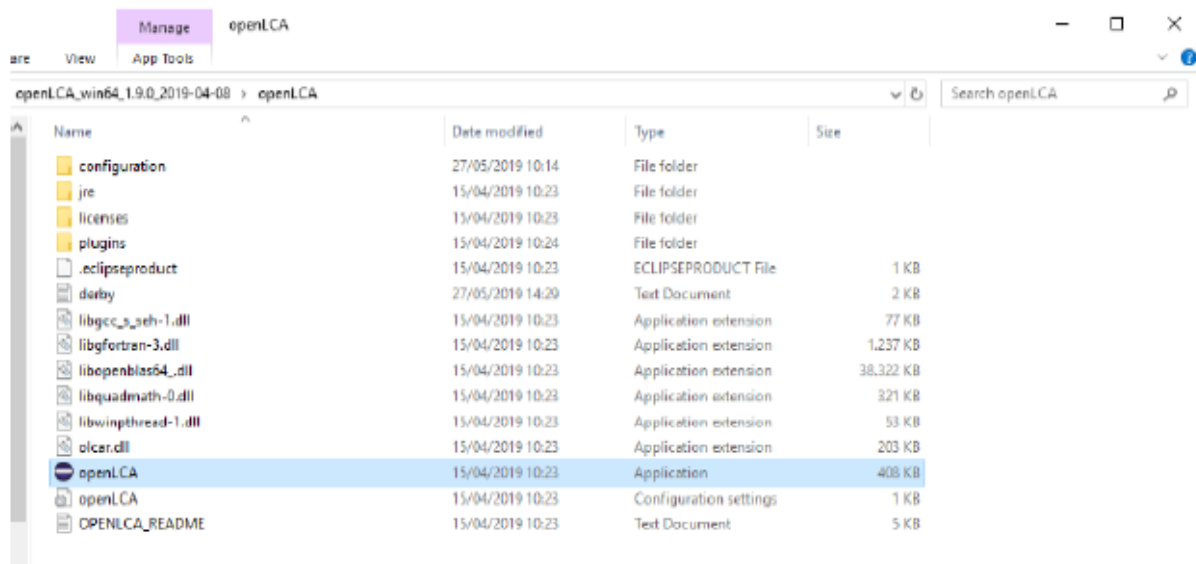
- Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA), Κόστος Κύκλου Ζωής (LCC), Ανάλυση Κύκλου Κοινωνικής Ζωής (S-LCA).
- Αποτυπώματα άνθρακα και νερού.
- Περιβαλλοντικό αποτύπωμα προϊόντος (PEF).
- Περιβαλλοντική δήλωση προϊόντος – Environmental Product Declaration (EPD).
- Σχεδιασμός του Οργανισμού Προστασίας Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών (EPA) για την περιβαλλοντική ετικέτα.
- Ολοκληρωμένη πολιτική προϊόντων (IPP).

3.1 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

Το <https://www.openlca.org/> προσφέρει πολλές διαφορετικές υπηρεσίες στους χρήστες του. Ο ιστότοπος παρέχει τους ακριβείς συνδέσμους για τη λήψη του λογισμικού, τον πηγαίο κώδικα, το πακέτο μεθόδου LCIA (Life Cycle Impact Assessment), το εγχειρίδιο χρήστη και ορισμένα παραδείγματα – tutorials μελετών. Ακόμη, ο ιστότοπος παρέχει συνδέσμους για εκπαιδευτικά βίντεο και έγγραφα στην ενότητα «Μάθηση και Υποστήριξη».

Η εγκατάσταση του λογισμικού διαφέρει για Windows, Linux και Mac. Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε σε υπολογιστή με λογισμικό Windows και η διαδικασία εγκατάστασης του προγράμματος επεξηγείται παρακάτω:

Αρχικά, αξίζει να σημειωθεί πως η διαθέσιμη έκδοση του λογισμικού υποστηρίζεται από υπολογιστές με Windows 64-bit. Ο πιο γρήγορος τρόπος για την απόκτηση του openLCA είναι η λήψη του αρχείου ZIP που παρέχεται στον ενδιαφερόμενο μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου εφόσον έχει κάνει εγγραφή και έχει δηλώσει το mail του. Μετά την αποσυμπίεση του αρχείου, αρκεί να εκκινηθεί το εκτελέσιμο αρχείο (βλ. παρακάτω εικόνα).



Εικόνα 9 Το αποσυμπιεσμένο και εκτελέσιμο αρχείο για την εκκίνηση του openLCA [15]

Εναλλακτικά, το λογισμικό μπορεί να εγκατασταθεί. Η εγκατάσταση ξεκινά κάνοντας λήψη του αρχείου εγκατάστασης από τη σελίδα λήψεων του ιστότοπου. Όπως συνηθίζεται, στην εγκατάσταση των Windows μπορεί να επιλεγθεί εάν το λογισμικό θα χρησιμοποιείται μόνο από το χρήστη που το εγκαθιστά ή από οποιονδήποτε εργάζεται στον υπολογιστή. Για την εκκίνηση του λογισμικού αρκεί να ακολουθηθούν τα βήματα εγκατάστασης ως το τέλος.

Κατά την εκκίνηση του openLCA για πρώτη φορά μπορεί να παρατηρηθεί από οποιονδήποτε πως δεν περιέχονται δεδομένα. Στην αριστερή πλευρά υπάρχει το κενό πεδίο πλοήγησης και στη δεξιά υπάρχει η σελίδα καλωσορίσματος.



Εικόνα 10 Σελίδα καλωσορίσματος λογισμικού openLCA [15]

Η σελίδα καλωσορίσματος παρέχει γρήγορους συνδέσμους προς την ιστοσελίδα openLCA Nexus, εκπαιδευτικά βίντεο, παραδείγματα μελετών, εγχειρίδιο χρήστη, τον ιστότοπο λήψης του λογισμικού και τις μεθόδους LCIA. Στο δεξί επάνω μέρος της σελίδας, υπάρχει η επιλογή της αναζήτησης η οποία δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αναζητήσει ροές, διαδικασίες, δείκτες κοινωνικής δικτύωσης, νομίσματα κ.ο.κ. είτε σε ολόκληρη είτε σε μια συγκεκριμένη ενότητα.

Σε πρώτη φάση, πραγματοποιείται η συλλογή των αναλυτικών δεδομένων των διεργασιών και των εκπομπών του εκάστοτε προϊόντος. Έπειτα, καταστρώνεται το διάγραμμα ροής της μονάδας και, παράλληλα, ελέγχονται τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας. Στη συνέχεια, συμπληρώνονται τα δεδομένα της διεργασίας τα οποία μπορεί να είναι προσεγγιστικά με βάση τη βιβλιογραφία ώστε να δημιουργηθεί η ολοκληρωμένη εικόνα της μονάδας. Όλες οι διεργασίες εισάγονται μια προς μια στο πρόγραμμα χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν περισσότερες έτοιμες ροές που παρέχονται από τις βάσεις δεδομένων. Τέτοιες ροές μπορεί να είναι το ηλεκτρικό ρεύμα, το διοξείδιο του άνθρακα, το μονοξείδιο του άνθρακα και το νερό. Σημειώνεται πως οι ροές που δημιουργούνται από τη μια διαδικασία στην άλλη είναι μοναδικές για κάθε μονάδα και, επομένως, δεν παρέχονται έτοιμες από τις βάσεις δεδομένων αφού πρέπει να τηρούνται οι κατάλληλες αναλογίες και η σωστή κλιμάκωση. Συνεπώς, μεταβάλλοντας μια ποσότητα ορισμένη στο πρόγραμμα μεταβάλλονται αναλογικά και όλες οι υπόλοιπες καθώς συνδέονται άμεσα μεταξύ τους.

Τα αποτελέσματα της μελέτης μπορούν να εξαχθούν στις ακόλουθες μορφές:

- Ecospold
- ILCD σε μορφή Zip – αρχείου
- ILCD εξαγωγή δικτύου (Network Export)
- Excel
- JSON-LD
- Αντιγραφή των πινάκων που δημιουργεί το openLCA

3.2 ΒΑΣΕΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Το openLCA Nexus είναι ένας διαδικτυακός χώρος αποθήκευσης δεδομένων που συνδυάζει δεδομένα προσφερόμενα από κορυφαίους παρόχους δεδομένων LCA όπως το ecoinvent, το PE International (βάσεις δεδομένων GaBi) και το Joint Research Centre από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (βάσεις δεδομένων ELCD). Οι βάσεις δεδομένων που παρέχονται στο Nexus μπορούν εύκολα να εισαχθούν στο λογισμικό openLCA με αυτές να παρέχονται είτε δωρεάν είτε έναντι χρηματικού ποσού. Για παραγγελία και λήψη δεδομένων αρκεί να εγγραφεί ο χρήστης χρησιμοποιώντας μια έγκυρη διεύθυνση mail. Η διαδικασία, δηλαδή, που ακολουθείται είναι αρκετά παρόμοια με ένα ηλεκτρονικό κατάστημα: προσθήκη της βάσης δεδομένων στο καλάθι αγορών και παραγγελία αυτής. Η ιστοσελίδα του Nexus περιέχει μια ισχυρή μηχανή αναζήτησης που δίνει τη δυνατότητα φιλτραρίσματος των δεδομένων ανά πάροχο, τοποθεσία, κατηγορία, τιμή και έτος.

3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ

Οι βάσεις δεδομένων στο openLCA Nexus δεν περιέχουν μεθόδους εκτίμησης των επιπτώσεων. Οι μέθοδοι αυτοί, γνωστές και ως LCIA, πρέπει να εισάγονται με μη αυτόματο τρόπο σε κάθε βάση δεδομένων στο πρόγραμμα. Ένα πακέτο μεθόδων εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων παρέχεται από τον ιστότοπο του openLCA και είναι συμβατό με όλες τις βάσεις δεδομένων που διατίθενται στο openLCA Nexus, συμπεριλαμβανομένων των ELCD, GaBi και ecoinvent. Επιπρόσθετα, παρέχεται ένα ακόμη πακέτο LCIA από την ecoinvent όπως, επίσης, και ένα πακέτο που συμπεριλαμβάνει και το κοινωνικό αντίκτυπο (s-LCA).

Εφόσον το στάδιο LCI (Life Cycle Inventory) έχει ολοκληρωθεί επόμενο βήμα αποτελεί η ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων κατά το στάδιο της αξιολόγησης των επιπτώσεων LCIA (Life Cycle Impact Assessment). Το στάδιο αυτό περιέχει κάποια κρίσιμα σημεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Το πιο σημαντικό πρόβλημα είναι να αποφασιστεί με ποιον τρόπο θα αναφερθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η απόψεις γύρω από αυτό το ζήτημα ποικίλλουν αν και την τελευταία δεκαετία έχει αναπτυχθεί μια κοινή μεθοδολογία. Το αρχικό βήμα είναι να συγκεντρωθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τις ροές προς και από τη φύση σε ένα μικρό σύνολο δεικτών. Η μεθοδολογία αυτή έχει, ουσιαστικά, διακρίνει τους δείκτες σε δείκτες μέσου (midpoint) και τελικού σημείου (endpoint). Στην προσέγγιση του μέσου σημείου (midpoint), οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις ομαδοποιούνται σε παρόμοιες κατηγορίες (π.χ. ευτροφισμός υδάτων, φαινόμενο θερμοκηπίου, καταστροφή στρώματος όζοντος). Αντίστοιχα, η προσέγγιση του τελικού σημείου (endpoint) επιδιώκει την μοντελοποίηση μιας αλυσίδας αιτίας – αποτελέσματος μέχρι και το σημείο της αξιολόγησης της ζημίας. Μια τέτοια προσέγγιση, χωρίς την ανάγκη πολλών δεικτών, θεωρείται απλούστερη αλλά και πιο ανακριβής.

Οι κατηγορίες των επιπτώσεων διαχωρίζονται κυρίως ως προς το αντίκτυπο στην ανθρώπινη υγεία και στο οικοσύστημα. Ορισμένα συστήματα, ωστόσο, συγκεντρώνουν όλες τις επιπτώσεις σε μια κατηγορία γεγονός που προκαλεί μεγάλη αβεβαιότητα στα αποτελέσματα. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας ένα φάσμα μοντέλων που επιχειρούν να προσδιορίσουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των διαδικασιών. Παραδείγματα τέτοιων μοντέλων, διαθέσιμων στο openLCA, είναι τα εξής:

- Μέσο σημείο (Midpoint): TRACI, CML, EDIP, Ecopoints.
- Τελικό σημείο (Endpoint): Eco-indicator, LIME2.
- Συνδυασμός μέσου και τελικού σημείου: ReCiPe, IMPACT 2002+.

Παρακάτω θα παρουσιαστούν συνοπτικά μερικά από τα βασικά μοντέλα εκτίμησης των επιπτώσεων που χρησιμοποιούνται σε διεθνές επίπεδο.

Μοντέλο CML

Το μοντέλο CML αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο του Λέιντεν στην Ολλανδία το 2001 και περιέχει πάνω από 170 διαφορετικές ροές οι οποίες είναι διαθέσιμες στην ιστοσελίδα τους. Το μοντέλο αυτό εστιάζει σε ένα σύνολο κατηγοριών ρύπανσης εκφρασμένο ως ρύποι στο περιβάλλον και για τους υπολογισμούς του χρησιμοποιούνται ομαδοποιήσεις και κανονικοποιήσεις. Η μέθοδος διακρίνεται σε baseline και non-baseline με τη baseline να παρέχει τις πιο κοινές κατηγορίες επιπτώσεων.

Πίνακας 1 Κατηγορίες ρύπανσης μοντέλου CML (baseline) [17]

Method: CML (baseline)	
Impact category group	Name of the impact category in the method
Acidification	Acidification potential - average Europe
Climate change	Climate change - GWP100
Depletion of abiotic resources	Depletion of abiotic resources - elements, ultimate reserves
	Depletion of abiotic resources - fossil fuels
Ecotoxicity	Freshwater aquatic ecotoxicity - FAETP inf
	Marine aquatic ecotoxicity - MAETP inf
	Terrestrial ecotoxicity - TETP inf
Eutrophication	Eutrophication - generic
Human toxicity	Human toxicity - HTP inf
Ozone layer depletion	Ozone layer depletion - ODP steady state
Photochemical oxidation	Photochemical oxidation - high Nox

Μοντέλο ReCiPe

Το μοντέλο ReCiPe παρέχει αποτελέσματα τόσο για τη μέση κατηγορία ρύπανσης (midpoint) όσο και για την τελική (endpoint) συμπεριλαμβάνοντας την ανθρωπίνη υγεία, την καταστροφή του οικοσυστήματος και τη μειωμένη παροχή πόρων. Το μοντέλο αυτό συνδυάζει δείκτες CML και Eco-Indicator 99 σε μια πιο ανανεωμένη έκδοση και παρέχει τη δυνατότητα διαφορετικών κανονικοποιήσεων (E (Egalitarian), H (Hierarchist) και I (Individualist)). Αξίζει να σημειωθεί πως λόγω της αβεβαιότητας για τις κατηγορίες τελικής ρύπανσης προτιμάται η χρήση των μέσων κατηγοριών ρύπανσης (midpoint).

Πίνακας 2 Κατηγορίες ρύπανσης μοντέλου ReCiPe midpoint (E, H & I) [17]

Method: ReCiPe midpoint (E, H & I)				
Impact category group	Name of the impact category in the method	E	H	I
Acidification	Terrestrial acidification	TAP500-E	TAP100-H	TAP20-I
Climate change	Climate Change	GWP500-E	GWP100-H	GWP20-I
Depletion of abiotic resources	Fossil depletion	FDPinf-E	FDP100-H	FDP20-I
	Metal depletion	MDPinf-E	MDP100-H	MDP20-I
	Water depletion	WDPinf-E	WDP100-H	WDP20-I
Ecotoxicity	Freshwater ecotoxicity	FETPinf-E	FETP100-H	FETP20-I
	Marine ecotoxicity	METPinf-E	METP100-H	METP20-I
	Terrestrial ecotoxicity	TETPinf-E	TETP100-H	TETP20-I
Eutrophication	Freshwater eutrophication	FEPinf-E	FEP100-H	FEP20-I
	Marine eutrophication	MEPinf-E	MEP100-H	MEP20-I
Human toxicity	Human toxicity	HTPinf-E	HTP100-H	HTP20-I
Ionising Radiation	Ionising radiation	IRPinf-E	IRP100-H	IRP20-I
Land use	Agricultural land occupation	ALOPinf-E LOP-E	ALOP100-H LOP-H	ALOP20-I LOP-I
	Natural land transformation	LTPinf-E LTP-E	LTP100-H LTP-H	LTP20-I LTP-I
	Urban land occupation	ULOPinf-E	ULOP100-H	ULOP20-I
Ozone layer depletion	Ozone depletion	ODPinf-E	ODP100-H	ODP20-I
		M2E-E	M2E-H	M2E-I
Particulate matter	Particulate matter formation	PMFPinf-E	PMFP100-H	PMFP20-I
Photochemical oxidation	Photochemical oxidant formation	POFPinf-E	POFP100-H	POFP20-I

Μοντέλο USEtox

Το μοντέλο USEtox αναλύει την επίδραση διαφόρων ουσιών και ρύπων πάνω στην τοξικότητα του περιβάλλοντος και στην ανθρώπινη υγεία. Περιλαμβάνει δείκτες που σχετίζονται με την επίδραση των ουσιών στο περιβάλλον, την έκθεση των οργανισμών σε αυτές και την επίδραση τους. Το μοντέλο αυτό πρέπει να χρησιμοποιείται με ιδιαίτερη προσοχή καθώς οι δείκτες είναι πολύ ευαίσθητοι και μεταβάλλονται εύκολα.

Πίνακας 3 Κατηγορίες ρύπανσης μοντέλου USEtox [17]

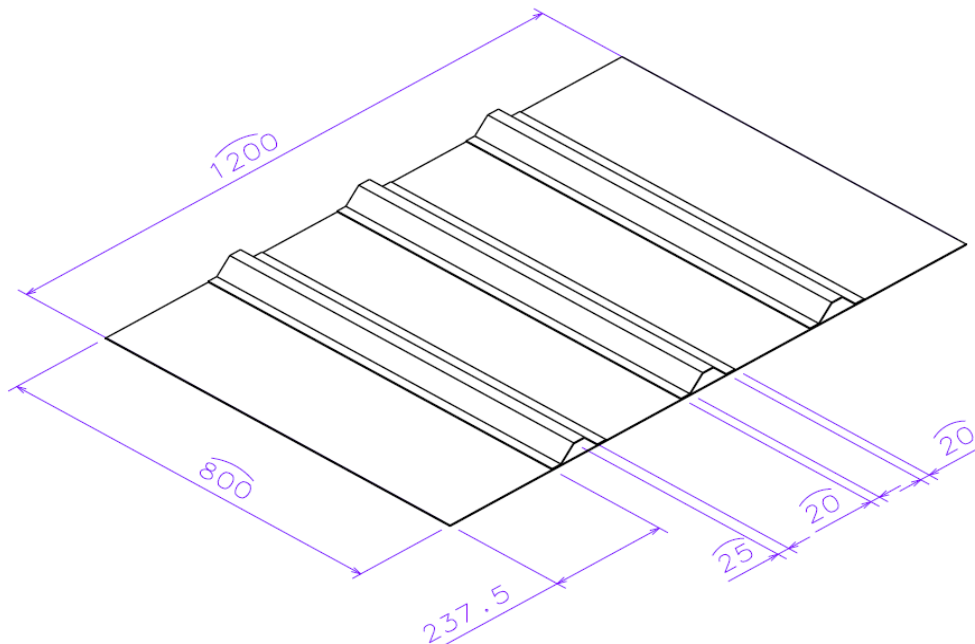
Method: USEtox	
Impact category group	Name of the impact category in the method
Ecotoxicity	Freshwater ecotoxicity
	Human health - carcinogenic
Human toxicity	Human health - non-carcinogenic
	Human health - total impact

Η επιλογή του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της μελέτης θα οριστεί και θα αιτιολογηθεί στο κεφάλαιο 4 της εργασίας.

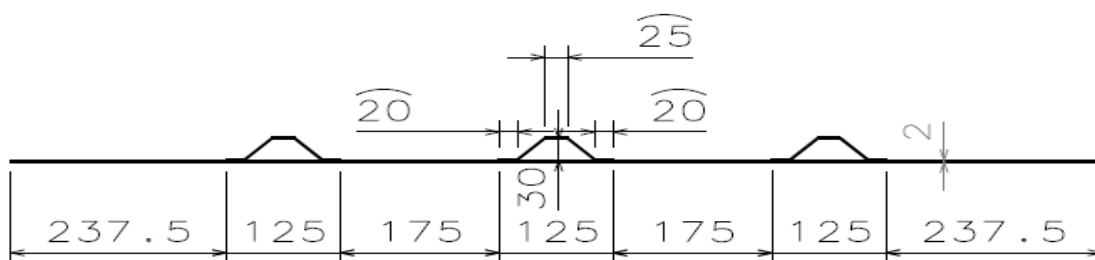
4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

4.1 ΣΤΟΧΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στόχος της παρούσας μελέτης αποτελεί η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μιας διαδικασίας κατασκευής ενός θερμοσκληρυνόμενου πολυμερούς πάνελ ενισχυμένου με ίνες άνθρακα. Το πάνελ φέρει τρία stringers κατά το πλάτος του τα οποία έχουν δυνατότητα σύνδεσης είτε με εποξειδική κόλλα σε μορφή φιλμ είτε με κοχλίες τιτανίου. Ο πρωταρχικός σκοπός αυτής της μελέτης είναι η ανάλυση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του υπό κατασκευή πάνελ με σύνδεση κόλλας σε σύγκριση με το πάνελ με σύνδεση κοχλίων. Η γεωμετρία της κατασκευής παρατίθεται παρακάτω:



Εικόνα 11 Ισομετρική όψη κατασκευής



Εικόνα 12 Πλάγια όψη κατασκευής

Διεξήχθη, λοιπόν, μια αποδοτική συγκριτική μελέτη ανάλυσης κύκλου ζωής με σκοπό τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών εστιών που σχετίζονται με την εξόρυξη των πρώτων υλών, την παραγωγή των υλικών, τη μεταφορά, τη χρήση και τη διάθεση των απορριμμάτων για τις δύο περιπτώσεις.

4.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ

Σημαντικός παράγοντας στην πραγματοποίηση της μελέτης αποτελεί ο καθορισμός της λειτουργικής μονάδας του συστήματος. Ένα συνολικό σύστημα αντιπροσωπεύει ένα πλήθος ροών διαδικασιών που συνδέεται με τις υπο-διεργασίες του. Η λειτουργική μονάδα χρησιμοποιείται ως μονάδα αναφοράς για το σύστημα όπου οι τιμές εισόδου και εξόδου προσδιορίζονται. Οι εισοδοί και οι έξοδοι του μοντέλου υπολογίζονται χρησιμοποιώντας μια ροή αναφοράς. Ακόμη, οι μελέτες σύγκρισης κύκλου ζωής μοντελοποιούνται βάσει μιας παρόμοιας συνάρτησης που αποτιμάται από παρόμοια λειτουργική μονάδα με αντίστοιχες ροές αναφοράς.

Η λειτουργική μονάδα (Functional Unit – FU) που ορίζεται σε αυτή την ανάλυση είναι 9.362971 kg θερμοσκληρυνόμενου σύνθετου υλικού ενισχυμένου με ίνες άνθρακα. Σημειώνεται πως στην ποσότητα αυτή δε συμπεριλαμβάνεται το βάρος της κόλλας αλλά και τον κοχλιών. Το συνολικό βάρος του σύνθετου υλικού, που στην περίπτωση αυτή λαμβάνεται υπόψη, αποτελείται από το βάρος του επίπεδου πάνελ και των τριών stringers. Το επίπεδο πάνελ έχει τελικό βάρος 3.051781747 kg ενώ τα stringers ζυγίζουν 2.103729829 kg το καθένα.

4.3 ΟΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η ακόλουθη ανάλυση αντιπροσωπεύει όλες τις δραστηριότητες από τη «γέννηση» ως την «πύλη» με τη μεθοδολογία αυτή να αναφέρεται ως “Cradle to Gate”. Οι δραστηριότητες στον κύκλο ζωής περιλαμβάνουν την εξόρυξη των πρώτων υλών, την παραγωγή των επιμέρους συστατικών, την κατασκευή του προϊόντος και τη διάθεση του προς κατανάλωση. Λοιπές δραστηριότητες όπως το στάδιο της χρήσης, η αξιοποίηση των υπολειμμάτων από τις διαδικασίες παραγωγής, η συσκευασία συγκεκριμένων εξαρτημάτων και η μεταφορά παραλείπονται από το σύστημα καθώς τα διαθέσιμα δεδομένα που ήταν στη διάθεση μας ήταν ελλιπή.

4.4 ΚΡΙΤΗΡΙΑ CUT-OFF

Κριτήρια αποκοπής (CUT-OFF) είναι οι τομείς που δεν εξετάζονται ή θεωρούνται λιγότερο σχετικοί με τη μελέτη. Επίσης, ορισμένες διαδικασίες ενδέχεται να εξαιρούνται καθώς η συμβολή τους στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα θεωρείται ελάχιστη. Στη μελέτη αυτή, τα βήματα που παραλήφθηκαν είναι τα εξής:

- Μεταφορά των πρώτων υλών από τον προμηθευτή στο εργαστήριο.
- Εργασίες χειρισμού και επιθεώρησης εξαρτημάτων.

- Αποθήκευση των εξαρτημάτων και των τελικών προϊόντων.
- Παραγωγή και συντήρηση των υποδομών (π.χ. κλίβανος).
- Μεταφορά του υλικού από την τοποθεσία κατασκευής στις αντίστοιχες τοποθεσίες επεξεργασίας των τελικών απορριμμάτων μετά το τέλος της ζωής τους.
- Επισκευή ηλεκτρικών καλωδίων και εγκατάσταση παροχής ρεύματος.

4.5 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Για την επιτυχή ολοκλήρωση της μελέτης χρειάστηκε να γίνουν αρκετές παραδοχές. Γενικά, ένα από τα κύρια μειονεκτήματα των βάσεων δεδομένων είναι ότι τα δεδομένα λαμβάνονται συνήθως από τους ίδιους τους κατασκευαστές των προϊόντων και σπάνια γνωστοποιούνται στο ευρύ κοινό. Επιπρόσθετα, υπάρχει και ο παράγοντας της ψευδούς πληροφόρησης καθώς οι βάσεις δεδομένων δεν ενημερώνονται τακτικά με αποτέλεσμα να παρέχονται αναξιόπιστες πληροφορίες. Έτσι, αρκετοί περιορισμοί και παραδοχές θεωρήθηκαν με σκοπό την κάλυψη των ελλিপών δεδομένων στο σύστημα. Συγκεκριμένα, αναλόγως το στάδιο ζωής ορίστηκαν τα παρακάτω:

Εξαγωγή και παραγωγή

Τα δεδομένα για την παραγωγή τόσο των ινών άνθρακα όσο και για την εποξειδική ρητίνη λήφθηκαν με γνώμονα την παραγωγή 1 kg υλικών και, στη συνέχεια, υπολογίστηκε ξεχωριστά η απαιτούμενη ποσότητα ινών και μήτρας πραγματοποιώντας τις ανάλογες μετατροπές. Ακόμη, ορίστηκε πως η τοποθέτηση των 16 συνολικών φύλλων (layers) prepreg πραγματοποιήθηκε χειρωνακτικά και, άρα, δε συνυπολογίστηκε σε αυτό το στάδιο η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπρόσθετα, θεωρήθηκε πως η κατασκευή των stringers βασίστηκε στη μεθοδολογία κατασκευής του επίπεδου κομματιού με τη μοναδική διαφορά πως τα stringers κατασκευάστηκαν σε καλούπι αντίστοιχου σχήματος. Επιπλέον, σημειώνεται πως δε συνυπολογίστηκε η κατασκευή του καλουπιού καθώς θεωρήθηκε πως ήταν διαθέσιμο και έτοιμο προς χρήση από το εργαστήριο. Τέλος, τα συνδετικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν δεν ταυτίζονται με τα αντίστοιχα της εκφώνησης καθώς οι διαθέσιμες επιλογές στο λογισμικό είναι περιορισμένες και η δυνατότητα μοντελοποίησης της παραγωγής τους εξ' αρχής καθίσταται ανέφικτη.

Μεταφορά

Στη παρούσα μελέτη, ο παράγοντας της μεταφοράς δε συνυπολογίστηκε καθώς θεωρήθηκε πως οι ουσίες, τα υλικά και τα εξαρτήματα που απαιτούνταν υπήρχαν ήδη στο εργαστήριο. Ο παράγοντας αυτός δε λήφθηκε υπόψη λόγω των περιορισμένων δεδομένων που είχαμε στη διάθεση μας.

Στάδιο χρήσης προϊόντος

Στο στάδιο αυτό δε λαμβάνεται υπόψη καμία συντήρηση της κατασκευής. Το πάνελ θεωρείται ότι εκτελεί την προβλεπόμενη λειτουργία του και οποιαδήποτε φθορά και ρωγμή δεν πρόκειται να συμβεί κατά τη φάση της χρήσης του.

Τέλος ζωής προϊόντος

Κατά το στάδιο αυτό θεωρείται πως το προϊόν οδηγείται στην απόρριψη. Ο παράγοντας ανακύκλωσης ή επαναχρησιμοποίησης δεν έχει αναλυθεί αλλά η δυνατότητα αξιοποίησης του υπάρχει. Ωστόσο, τα διαθέσιμα δεδομένα δεν συμβάλλουν θετικά στην περαιτέρω ανάλυση της κατασκευής.

4.6 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ

Η μέθοδος εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων συχνά χαρακτηρίζεται ως ένα σύνολο δεικτών επιπτώσεων LCIA. Οι ευρύτερες μέθοδοι είναι το TRACI στις Ηνωμένες Πολιτείες, οι Eco-Indicator 99, IPCC 2013, ILCD 2011 στην Ευρώπη και οι CML (baseline και non-baseline), ReCiPe 2016, IMPACT 2002+ γενικά.

Η παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο εκτίμησης ReCiPe 2016 Midpoint (H) η οποία αποτελείται από 17 δείκτες μέσου σημείου (midpoint) με τους κυριότερους να είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η σπατάλη νερού, ο ευτροφισμός, η τοξικότητα και η οξύνιση του νερού και η εξασθένηση της στοιβάδας του όζοντος. Η μέθοδος είναι διαθέσιμη σε τρία διαφορετικά χρονικά πλαίσια (I), (H) και (E). Συγκεκριμένα, (I) σημαίνει Individualist και βασίζεται σε βραχυπρόθεσμο ενδιαφέρον 20 ετών, (H) σημαίνει Hierarchist και βασίζεται σε χρονικό πλαίσιο 100 ετών ενώ (E) σημαίνει Egalitarian και βασίζεται σε χρονικό πλαίσιο 1000 ετών με αναφορά στο δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP).

4.7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Οι συνολικές ποσότητες των υλικών και της ενέργειας που απαιτούνται σε κάθε στάδιο παραγωγής παρατίθενται στην υποενότητα αυτή. Τα δεδομένα που μας παρείχαν τις απαιτούμενες ποσότητες των συστατικών λήφθηκαν από μια πληθώρα βιβλιογραφικών πηγών και τα συστατικά που προστέθηκαν στο πρόγραμμα εξάχθηκαν από τις βάσεις δεδομένων BioEnergieDat, ecoinvent LCIA methods, ELCD, IMPACT World+ LCIA Methods, openLCA LCIA methods, worldsteel, exiobase και USDA. Λόγω της μη διαθεσιμότητας τόσο των πρωτογενών όσο και των δευτερευόντων δεδομένων, η παραγωγή των ινών άνθρακα και του prepreg έχει μοντελοποιηθεί με βάση σχετικές βιβλιογραφικές μελέτες. Σημειώνεται στο σημείο αυτό πως με την πραγματοποίηση μικρών υπολογισμών βρέθηκε η απαιτούμενη ποσότητα σε κιλά κάθε συστατικού. Οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν είναι οι εξής:

Από το σχετικό φυλλάδιο της εταιρείας Hexcel για το υλικό HexPly 8552/IM7, οι πυκνότητες των ινών ενίσχυσης και της μήτρας είναι:

- $\rho_f = 1770 \text{ kg/m}^3$
- $\rho_m = 1300 \text{ kg/m}^3$

Στην παρούσα μελέτη θεωρήθηκε ότι η κατά βάρος περιεκτικότητα των ινών και της μήτρας είναι:

- $W_f = 0.538 \text{ kg}$

- $W_m = 0.462 \text{ kg}$

Βάσει των παραπάνω, η πυκνότητα του σύνθετου υλικού υπολογίζεται ίση με:

$$\rho_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{W_i}{\rho_i}} = \frac{1}{\frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_m}{\rho_m}} = \frac{1}{\frac{0.538}{1770} + \frac{0.462}{1300}} = \mathbf{1516,669523 \text{ kg/m}^3}$$

Σειρά έχει ο προσδιορισμός του όγκου του επίπεδου πάνελ. Κάθε στρώση έχει πάχος 0.131 mm οπότε το συνολικό πάχος του πάνελ θα είναι $16 * 0.131 = 2.096 \text{ mm}$. Έτσι, προκύπτει:

$$u_c = 800 * 1200 * 2.096 = 2012160 \text{ mm}^3 = \mathbf{0.00201216 \text{ m}^3}$$

Επομένως, αφού $\rho_c = \frac{w_c}{u_c}$ υπολογίζεται το βάρος του συνθέτου ως εξής:

$$w_c = \rho_c * u_c = 1516,669523 * 0.00201216 = \mathbf{3.051781747 \text{ kg}}$$

και τα επιμέρους βάρη των ινών και της μήτρας είναι:

- $w_f = w_c * W_f \Rightarrow w_f = \mathbf{1.64185858 \text{ kg}}$
- $w_m = w_c * W_m \Rightarrow w_m = \mathbf{1.409923167 \text{ kg}}$

Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες ποσότητες για τα stringers. Σημειώνεται πως οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για ένα stringer και, στο τέλος, οι τιμές που προέκυψαν τριπλασιάστηκαν. Το συνολικό πάχος των stringers είναι ίσο με του επίπεδου πάνελ και, συγκεκριμένα, έχει πάχος ίσο με $16 * 0.131 = 2.096 \text{ mm}$. Για τον προσδιορισμό του όγκου θα υπολογιστούν δυο ξεχωριστοί όγκοι, των πελμάτων και του τραπεζίου.

- Όγκος πελμάτων: $u_f = 2 * 20 * 800 * 2.096 = 67072 \text{ mm}^3 = 0.000067072 \text{ m}^3$
- Όγκος τραπεζίου: $u_t = \left(\frac{85+25}{2}\right) * 30 * 800 = 1320000 \text{ mm}^3 = 0.001320 \text{ m}^3$

Επομένως, ο συνολικός όγκος του stringer προκύπτει από την άθροιση των δυο παραπάνω όγκων και ισούται με:

$$u_{\text{ctotal}} = u_f + u_t = \mathbf{0.001387072 \text{ m}^3}$$

Αφού $\rho_c = \frac{w_{\text{cstringer}}}{u_{\text{ctotal}}}$ με $\rho_c = 1516,669523 \text{ kg/m}^3$ υπολογίζεται το βάρος του stringer ως εξής:

$$W_{\text{cstringer}} = \rho_c * u_{\text{ctotal}} = 1516,669523 * 0.001387072 = \mathbf{2.103729829 \text{ kg}}$$

και τα επιμέρους βάρη των ινών και της μήτρας είναι:

- $W_{\text{fstringer}} = W_{\text{cstringer}} * W_f \Rightarrow \mathbf{W_{fstringer} = 1.131806648 \text{ kg}}$
- $W_{\text{mstringer}} = W_{\text{cstringer}} * W_m \Rightarrow \mathbf{W_{mstringer} = 0.971923181 \text{ kg}}$

Επομένως, τα συνολικά βάρη των ινών και της μήτρας για τα τρία stringers θα είναι:

- $W_{\text{fstringers}} = 3 * 1.131806648 = \mathbf{3.395419944 \text{ kg}}$
- $W_{\text{mstringers}} = 3 * 0.971923181 = \mathbf{2.915769543 \text{ kg}}$

Όσον αφορά τους κοχλίες σύνδεσης των stringers με το επίπεδο πάνελ έχουν προκύψει επτά (7) βίδες σε κάθε πλευρά του stringer οπότε σε κάθε stringer απαιτούνται δεκατέσσερις (14) βίδες και συνολικά για τα τρία stringer χρησιμοποιήθηκαν σαράντα δυο (42) βίδες. Σημειώνεται πως οι κοχλίες τοποθετήθηκαν ανά 100 mm στα πέλματα των stringers.

Τα στάδια κατασκευής του ολοκληρωμένου πάνελ μπορούν να διακριθούν ως εξής:

- Στάδιο 1: Παραγωγή ινών άνθρακα.
- Στάδιο 2: Παραγωγή μήτρας εποξειδικής ρητίνης.
- Στάδιο 3: Παραγωγή prepreg.
- Στάδιο 4: Τοποθέτηση στρώσεων και σκλήρυνση υλικού (curing) σε κλίβανο (autoclave) για τα τέσσερα συνολικά κομμάτια (επίπεδο πάνελ και τρία stringers).
- Στάδιο 5: Παραγωγή κόλλας και κοχλιών τιτανίου.
- Στάδιο 6: Σύνδεση επίπεδου πάνελ με stringers.

Οι βιβλιογραφικές πηγές σε κάθε στάδιο κατασκευής αναφέρονται σε 1 kg προϊόντος. Παρακάτω παρατίθενται οι συνολικές ποσότητες συστατικών και ενέργειας που απαιτούνται για την πραγματοποίηση κάθε σταδίου:

Στάδιο 1: Παραγωγή ινών άνθρακα

Πίνακας 4 Δεδομένα για την παραγωγή των ινών άνθρακα που προορίζονται για το επίπεδο πάνελ

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ 1,64185858 kg ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ			
Προϊόν	Τυπολογία Υλικού	Ποσότητα	
Εισαγωγή	Polyacrylonitrile (PAN)	2,988182616	kg
	Air	11,41091713	kg
	Nitrogen (N2)	1,543347065	kg
Ενέργεια και άλλες πηγές	Thermal for PAN fibers oxidative stabilization	0,788092118	MJ
	Thermal for Carbonization of stabilized PAN fibers	12,41245086	MJ
	Electric for CF surface treatment	0,082092929	MJ
	Electric for CF sizing	0,246278787	MJ
Εξαγωγή	Water vapor	1,104970824	kg
	CO2	0,668236442	kg
	HCN	0,418838124	kg
	CO	0,061405511	kg
	NO2	0,001149301	kg
	Air	9,966081581	kg
	H2	0,000377627	kg
	NH3	0,037762747	kg
	N2	1,9423187	kg
	Ethane (C2H6)	0,012806497	kg
	Ethene (C2H4)	0,011985568	kg
	Methane (CH4)	0,06895806	kg

Πίνακας 5 Δεδομένα για την παραγωγή των ινών άνθρακα που προορίζονται για τα stringers

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ 3,395419944 kg ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ			
Προϊόν	Τυπολογία Υλικού	Ποσότητα	
Εισαγωγή	Polyacrylonitrile (PAN)	6,179664298	kg
	Air	23,59816861	kg
	Nitrogen (N2)	3,191694747	kg
Ενέργεια και άλλες πηγές	Thermal for PAN fibers oxidative stabilization	1,629801573	MJ
	Thermal for Carbonization of stabilized PAN fibers	25,66937478	MJ
	Electric for CF surface treatment	0,169770997	MJ
	Electric for CF sizing	0,509312992	MJ
Εξαγωγή	Water vapor	2,285117622	kg
	CO2	1,381935917	kg
	HCN	0,866171628	kg
	CO	0,126988706	kg
	NO2	0,002376794	kg
	Air	20,61019906	kg
	H2	0,000780947	kg
	NH3	0,078094659	kg
	N2	4,016781794	kg
	Ethane (C2H6)	0,026484276	kg
	Ethene (C2H4)	0,024786566	kg
	Methane (CH4)	0,142607638	kg

Στάδιο 2: Παραγωγή μήτρας εποξειδικής ρητίνης

Πίνακας 6 Δεδομένα για την παραγωγή της μήτρας εποξειδικής ρητίνης που προορίζεται για το επίπεδο πάνελ

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ 1,409923167 kg ΜΗΤΡΑΣ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ			
Προϊόν	Τυπολογία Υλικού	Ποσότητα	
Εισαγωγή	Epoxy	1,409923167	kg
Ενέργεια και άλλες πηγές	Electric	107,1541607	MJ
Εξαγωγή	Epoxy Resin	1,409923167	kg

Πίνακας 7 Δεδομένα για την παραγωγή της μήτρας εποξειδικής ρητίνης που προορίζεται για τα stringers

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ 2,915769543 kg ΜΗΤΡΑΣ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ			
Προϊόν	Τυπολογία Υλικού	Ποσότητα	
Εισαγωγή	Epoxy	2,915769543	kg
Ενέργεια και άλλες πηγές	Electric	221,5984853	MJ
Εξαγωγή	Epoxy Resin	2,915769543	kg

Στάδιο 3: Παραγωγή prepreg

Πίνακας 8 Απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγή prepreg που προορίζεται για το επίπεδο πάνελ

ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ 3,051781747 kg PREPREG	
Διαδικασία Παραγωγής	Απαιτούμενη Ενέργεια (MJ)
Resin blending	0,305178175
Resin coating	4,272494446
Resin impregnation	6,408741669
Prepreg winding	0,610356349
Atmosphere control	63,47706034
Raw material storage	35,09549009
Prepreg storage	10,37605794
Release coated paper production	1,525890874
TOTAL	122,0712699

Πίνακας 9 Απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγή prepreg που προορίζεται για τα stringers

ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ 6,311189487 kg PREPREG	
Διαδικασία Παραγωγής	Απαιτούμενη Ενέργεια (MJ)
Resin blending	0,631118949
Resin coating	8,835665282
Resin impregnation	13,25349792
Prepreg winding	1,262237897
Atmosphere control	131,2727413
Raw material storage	72,5786791
Prepreg storage	21,45804426
Release coated paper production	3,155594744
TOTAL	252,4475795

Στάδιο 4: Τοποθέτηση στρώσεων και σκλήρυνση υλικού (curing) σε κλίβανο (autoclave) για τα τέσσερα συνολικά κομμάτια (επίπεδο πάνελ και τρία stringers).

Πίνακας 10 Δεδομένα για τη σκλήρυνση του υλικού που προορίζεται για το επίπεδο πάνελ

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΗ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ (3,051781747 kg PREPREG)			
Προϊόν	Τυπολογία Υλικού	Ποσότητα	
Εισαγωγή	Vacuum Bag (PA66)	0,5	kg
	Breather (PET)	0,375	kg
	Release Film (PTFE)	0,055	kg
	Release Agent (Organic solvent - acetone)	0,03	kg
Ενέργεια και άλλες πηγές	Autoclave Molding	66,83402026	MJ
	Cutting	0,090088597	MJ
Εξαγωγή	Επίπεδο πάνελ	3,051781747	kg

Πίνακας 11 Δεδομένα για τη σκλήρυνση του υλικού που προορίζεται για τα stringers

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΗ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ (6,311189487 kg PREPREG)			
Προϊόν	Τυπολογία Υλικού	Ποσότητα	
Εισαγωγή	Vacuum Bag (PA66)	0,5	kg
	Breather (PET)	0,375	kg
	Release Film (PTFE)	0,055	kg
	Release Agent (Organic solvent - acetone)	0,03	kg
Ενέργεια και άλλες πηγές	Autoclave Molding	138,2150498	MJ
Εξαγωγή	Stringers	6,311189487	kg

Στάδιο 5: Σύνδεση επίπεδου πάνελ με stringers με χρήση κοχλιών ή κόλλας

Έπειτα από εκτενή διερεύνηση των διαθέσιμων δεδομένων παρατηρήθηκε πως δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα στο λογισμικό και στη βιβλιογραφία για την παραγωγή κοχλιών τιτανίου. Για την ολοκλήρωση της εργασίας και για την εξαγωγή αποτελεσμάτων οριστήκαν εναλλακτικοί κοχλίες από γαλβανισμένο χάλυβα με θεωρήθηκαν ορισμένες παραδοχές όσον αφορά το συνολικό βάρος των 42 κοχλιών και την απαιτούμενη ενέργεια για τη διάνοιξη των αντίστοιχων οπών. Το συνολικό βάρος των κοχλιών υπολογίστηκε για κοχλίες M5 μήκους 6 mm και η απαιτούμενη ενέργεια για τη διάνοιξη οπών ορίστηκε για δεδομένο χρόνο κοπής κάθε οπής 1 sec και ισχύος 108 W.

Πίνακας 12 Δεδομένα για τη μηχανική σύνδεση του πάνελ

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΝΔΕΣΗ				
Προϊόν	Τυπολογία Υλικού	Τεμάχια	Ποσότητα	
Εισαγωγή	Taiwanese Galvanised Steel Coachscrew or Bolt	42	0,13818	kg
	Επίπεδο πάνελ	1	3,05178175	kg
	Stringers	1	6,31118949	kg
Ενέργεια και άλλες πηγές	Ηλεκτρική ενέργεια		0,004536	MJ
Εξαγωγή	Τελικό πάνελ	1	9,501151	kg

Ο μεγαλύτερος και σημαντικότερος περιορισμός σημειώθηκε για τη σύνδεση των επιμέρους κομματιών με κόλλα εποξειδικής ρητίνης σε μορφή φιλμ. Λόγω των αρκετά περιορισμένων διαθέσιμων δεδομένων η κόλλα που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη λήφθηκε από το λογισμικό και αναφέρεται ως Epoxy Sealer Glue. Η δοθείσα κόλλα θεωρήθηκε πως εφαρμόστηκε χειρωνακτικά και χωρίς τη χρήση απαιτούμενης ενέργειας. Συγκεκριμένα, οι επιφάνειες των προϊόντων τραχύνθηκαν με γυαλόχαρτο, καθαρίστηκαν από τυχόν σκόνη και βρωμιές και συνδέθηκαν με τη χρήση μικρής ποσότητας κόλλας ασκώντας σταθερή πίεση μεταξύ τους. Η σκλήρυνση του συγκεκριμένου υλικού θεωρήθηκε πως δεν απαιτεί ηλεκτρική ενέργεια καθώς πραγματοποιείται σε θερμοκρασία δωματίου και ολοκληρώνεται σε 24 ώρες. Βάσει όλων των παραπάνω παραδοχών και περιορισμών, τα δεδομένα που απαιτούνται για την παραγωγή του τελικού πάνελ με σύνδεση κόλλας παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

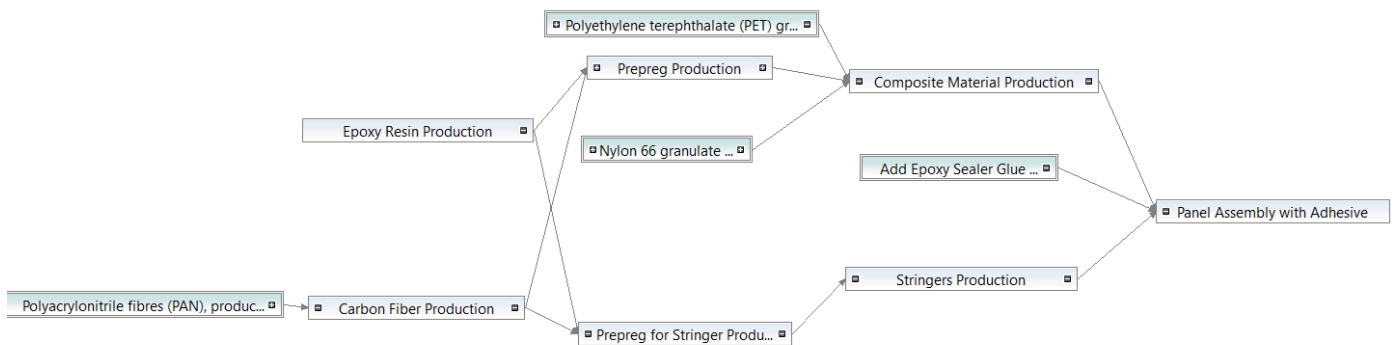
Πίνακας 13 Δεδομένα για τη σύνδεση του πάνελ με τη χρήση κόλλας

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΚΟΛΛΑ				
Προϊόν	Τυπολογία Υλικού	Τεμάχια	Ποσότητα	
Εισαγωγή	Epoxy Sealer Glue	1	0,2834952	kg
	Επίπεδο πάνελ	1	3,051781747	kg
	Stringers	1	6,311189487	kg
Εξαγωγή	Τελικό πάνελ	1	9,646466	kg

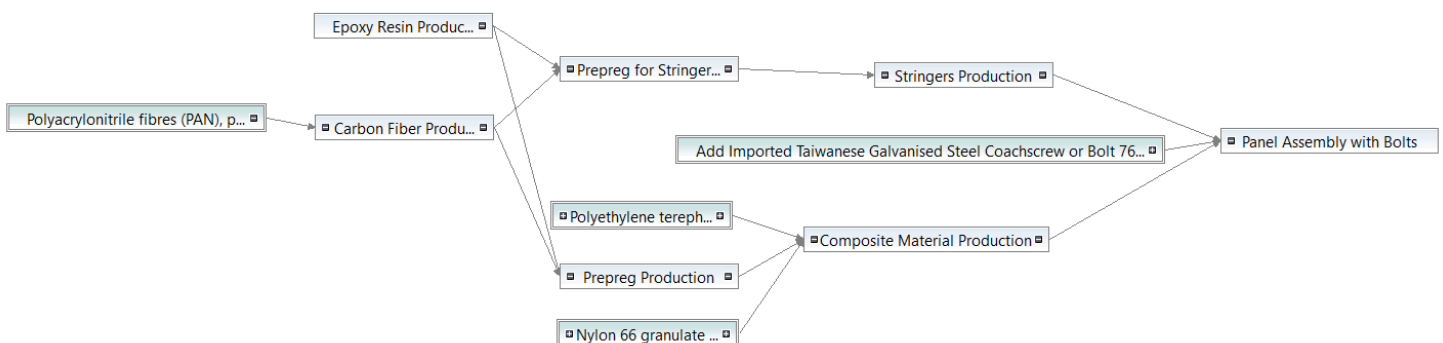
5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Εφόσον όλα τα παραπάνω δεδομένα καταγράφηκαν στο πρόγραμμα δημιουργώντας τα αντίστοιχα Flows, Processes και Product Systems η μελέτη πραγματοποιήθηκε με επιτυχία. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη συνοχή όλων των διεργασιών μεταξύ τους καθώς κάθε διαδικασία, από το αρχικό ως το τελικό βήμα, έπρεπε να συνδέεται άρρηκτα με τη διαδοχικά επόμενη. Στο λογισμικό δημιουργήθηκε ένα Project με δυο Product Systems τα οποία διακρίνονται ως προς τη μέθοδο σύνδεσης των stringers με το επίπεδο πάνελ. Το τελικό Project που προέκυψε συγκρίνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των δύο υπό μελέτη προϊόντων απεικονίζοντας σε κατάλληλα γραφήματα το ποσοστό επιβάρυνσης στις διάφορες κατηγορίες επιπτώσεων.

Παρακάτω παρατίθενται τα αντίστοιχα γραφήματα των δυο μοντέλων τα οποία απεικονίζουν τη διαδικασία παραγωγής τόσο τον επιμέρους προϊόντων όσο και της τελικής κατασκευής. Η διαφοροποίηση των δυο μοντέλων σημειώνεται στη διαφορετική μέθοδο σύνδεσης και, επομένως, η διαδικασία παραγωγής τους είναι σχεδόν πανομοιότυπη.



Εικόνα 13 Γράφημα παραγωγής μοντέλου με σύνδεση εποξειδικής κόλλας



Εικόνα 14 Γράφημα παραγωγής μοντέλου με μηχανική σύνδεση κοχλίων

5.1 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

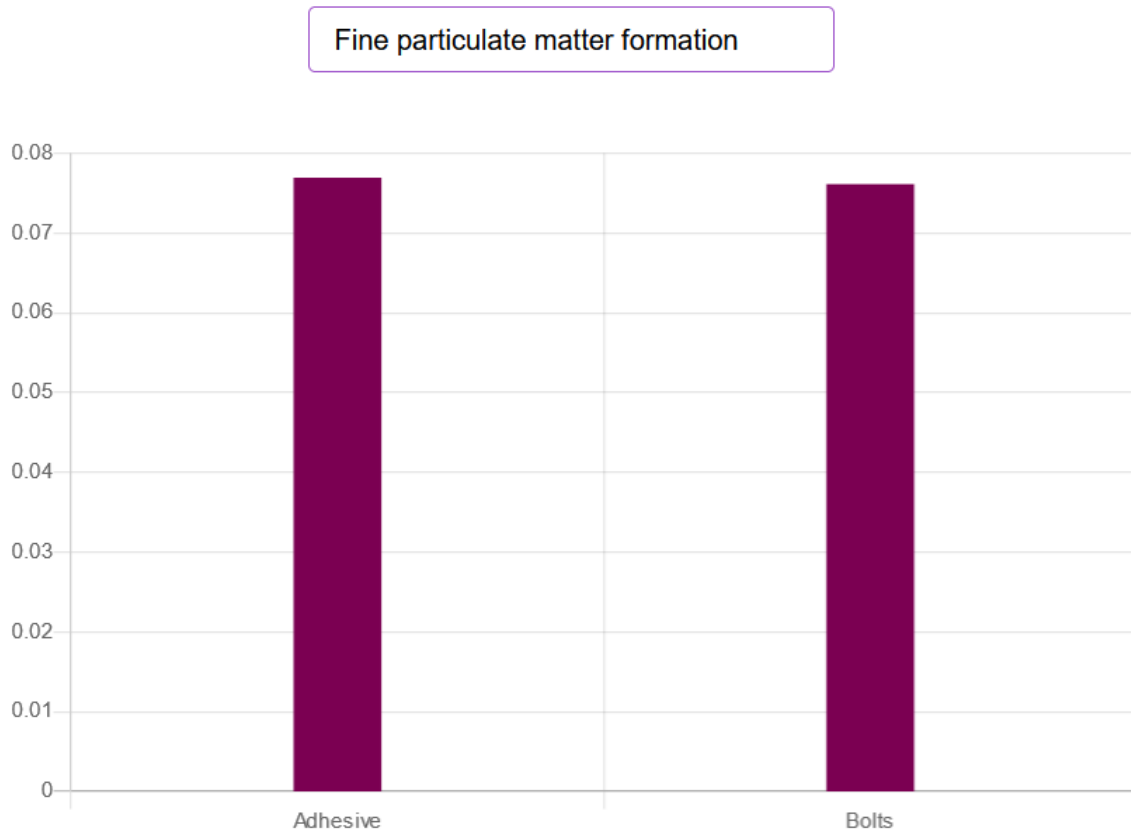
Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του πάνελ με σύνδεση κόλλας και του πάνελ με σύνδεση κοχλιών συγκρίνονται σύμφωνα με τις επιλεγμένες κατηγορίες επιπτώσεων οι οποίες είναι ο σχηματισμός μικρών σωματιδίων, η έλλειψη ορυκτών πόρων, η οικοτοξικότητα του γλυκού νερού και ο ευτροφισμός του, η υπερθέρμανση του πλανήτη, η ανθρώπινη καρκινογένεση ή μη τοξικότητα, η ιονίζουσα ακτινοβολία, η χρήση της γης, η θαλάσσια οικοτοξικότητα και ο ευτροφισμός της, η εξασθένηση της στοιβάδας του όζοντος, η χερσαία οξίνιση και οικοτοξικότητα και η κατανάλωση νερού. Η συγκεκριμένη μελέτη εμβάθυνε κυρίως στο σχηματισμό μικρών σωματιδίων, στην υπερθέρμανση του πλανήτη, στην ανθρώπινη τοξικότητα, στον ευτροφισμό τόσο του γλυκού νερού όσο και του θαλασσινού και στην εξασθένηση της στοιβάδας του όζοντος.

Όλα τα αποτελέσματα λήφθηκαν από το λογισμικό openLCA αναλύοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλεί η συνολική ποσότητα σε χιλιόγραμμα (kg) του υλικού. Τα αποτελέσματα των δυο επιμέρους πάνελ που μελετήθηκαν συγκρίνονται και παρουσιάζονται σε ειδικά ποσοστιαία ραβδογράμματα που απεικονίζουν το περιβαλλοντικό αντίκτυπο των διαφόρων διεργασιών.

5.1.1 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΙΚΡΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Τα μικρά σωματίδια αναφέρονται ως τα εξαιρετικά μικρά στερεά και υγρά σωματίδια που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα τα οποία προκαλούν τη γνωστή σωματιδιακή ρύπανση ή αλλιώς PM. Τα σωματίδια αυτά είναι γνωστά ως PM_{2.5} και οι διαστάσεις του είναι ίσες ή μικρότερες από 2.5 μm με αποτέλεσμα να μην είναι διακριτά με γυμνό μάτι καθώς είναι τουλάχιστον 30 φορές λεπτότερα από τις ανθρώπινες τρίχες. Ωστόσο, αν και μικρά, προκαλούν ιδιαίτερη ανησυχία όσον αφορά την ανθρώπινη υγεία καθώς το αναπνευστικό σύστημα επιτρέπει σε αυτό το εύρος μεγεθών να ταξιδεύει στην αναπνευστική οδό και στους πνεύμονες επηρεάζοντας, έτσι, τη σωστή λειτουργία των πνευμόνων και προκαλώντας καρδιακές και αναπνευστικές παθήσεις. Επιπλέον, έχουν την τάση να προκαλούν ερεθισμό στα μάτια, στη μύτη και στο λαιμό που μπορεί να οδηγήσει σε βήχα, φτέρνισμα, καταρροή αλλά και δύσπνοια. Σημειώνεται, ακόμη, πως όταν η συγκέντρωση των σωματιδίων σε εξωτερικούς χώρους είναι αυξημένη, η μείωση της ορατότητας μπορεί να προκαλέσει τροχαίο ατύχημα.

Σε αυτή τη μελέτη, το δυναμικό σχηματισμού μικρών σωματιδίων μετριέται ανά kg PM_{2.5} που παράγεται από τη χρήση κάθε χιλιόγραμμου σύνθετου πάνελ. Η παραγωγή PM_{2.5} των δυο υπό μελέτη πάνελ απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



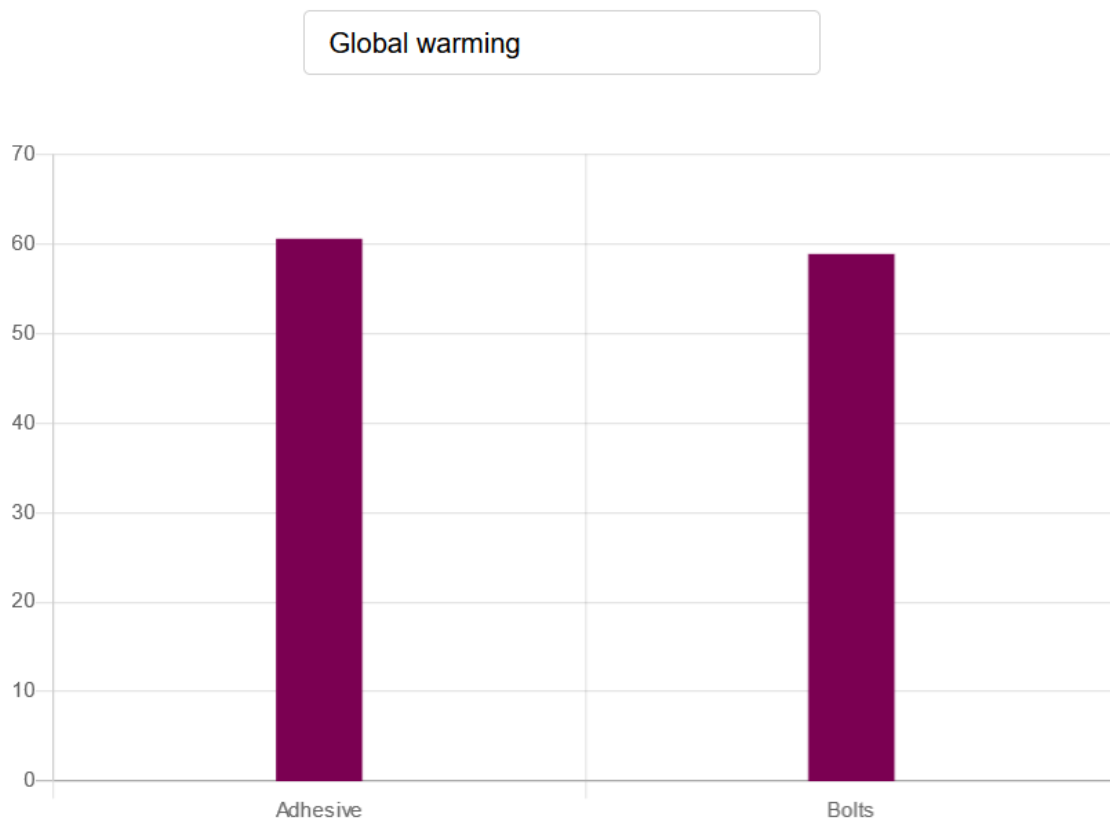
Εικόνα 15 Δυναμικό σχηματισμού μικρών σωματιδίων σύνθετου πάνελ με μηχανικές συνδέσεις και συνδέσεις κόλλας

Όπως αποδεικνύεται στο παραπάνω ραβδόγραμμα⁴, το πάνελ με σύνδεση κόλλας παρήγαγε 0.0769151 kg PM2.5 σε αντίθεση με το αντίστοιχο πάνελ με σύνδεση κοχλίων που παρήγαγε 0.076109 kg PM2.5. Συγκεκριμένα, το πάνελ με σύνδεση κόλλας παρήγαγε περίπου 1.06% περισσότερα σωματίδια με την παραγωγή των ινών πολυακρυλονιτριλίου (PAN) να σημειώνει τη μεγαλύτερη παραγωγή και στις δυο κατηγορίες πάνελ. Η παραγωγή ινών πολυακρυλονιτριλίου παρήγαγε και στις δυο περιπτώσεις 0.045 kg PM2.5, η παραγωγή ινών άνθρακα 0.028 kg PM2.5, η χρήση PA 66 προκάλεσε παραγωγή 3.410E-3 kg PM2.5 και η χρήση PET -1.278 E-3 kg PM2.5. Η διαφορά στην ποσότητα παραγωγής των σωματιδίων έγκειται στις διαφορετικές μεθόδους σύνδεσης αφού η εποξειδική κόλλα παρήγαγε 1.165 E-3 kg PM2.5 ενώ οι κοχλίες παρήγαγαν 3.586 E-4 kg PM2.5.

5.1.2 ΥΠΕΡΘΕΡΜΑΝΣΗ ΤΟΥ ΠΛΑΝΗΤΗ

Η υπερθέρμανση του πλανήτη είναι ένα φαινόμενο που περιγράφει την άνοδο της μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας στη Γη που προκαλείται κυρίως λόγω του αυξημένου επιπέδου εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG). Η πιο άμεση και πιθανή επίδραση της κλιματικής αλλαγής είναι οι ακραίες καιρικές συνθήκες και η τήξη των πολικών πάγων. Το λιώσιμο των πολικών πάγων έχει ως αποτέλεσμα την άνοδο της στάθμης της θάλασσας επηρεάζοντας, έτσι, την ακτογραμμή αλλά και το χερσαίο και υδάτινο οικοσύστημα.

Η παράμετρος της κλιματικής αλλαγής στην ανάλυση κύκλου ζωής που υιοθετεί η μέθοδος ReCiPe μετρίεται με την αύξηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας η οποία αποτελεί έναν παράγοντα που μεταβάλλει την ισορροπία μεταξύ της εισερχόμενης και εξερχόμενης ακτινοβολίας IR στο εσωτερικό της επιφάνειας της Γης. Τα κύρια αέρια του θερμοκηπίου είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), οι υδρατμοί (H_2O), το μεθάνιο (CH_4), το όζον (O_3) και το υποξείδιο του αζώτου (N_2O). Στην παρούσα μελέτη, το δυναμικό της υπερθέρμανσης του πλανήτη υπολογίζεται ανά kg CO_2 που παράγεται από κάθε υπό μελέτη πάνελ. Το δυναμικό της υπερθέρμανσης του πλανήτη για τα δυο πάνελ που μελετήθηκαν απεικονίζεται στο παρακάτω ραβδόγραμμα.

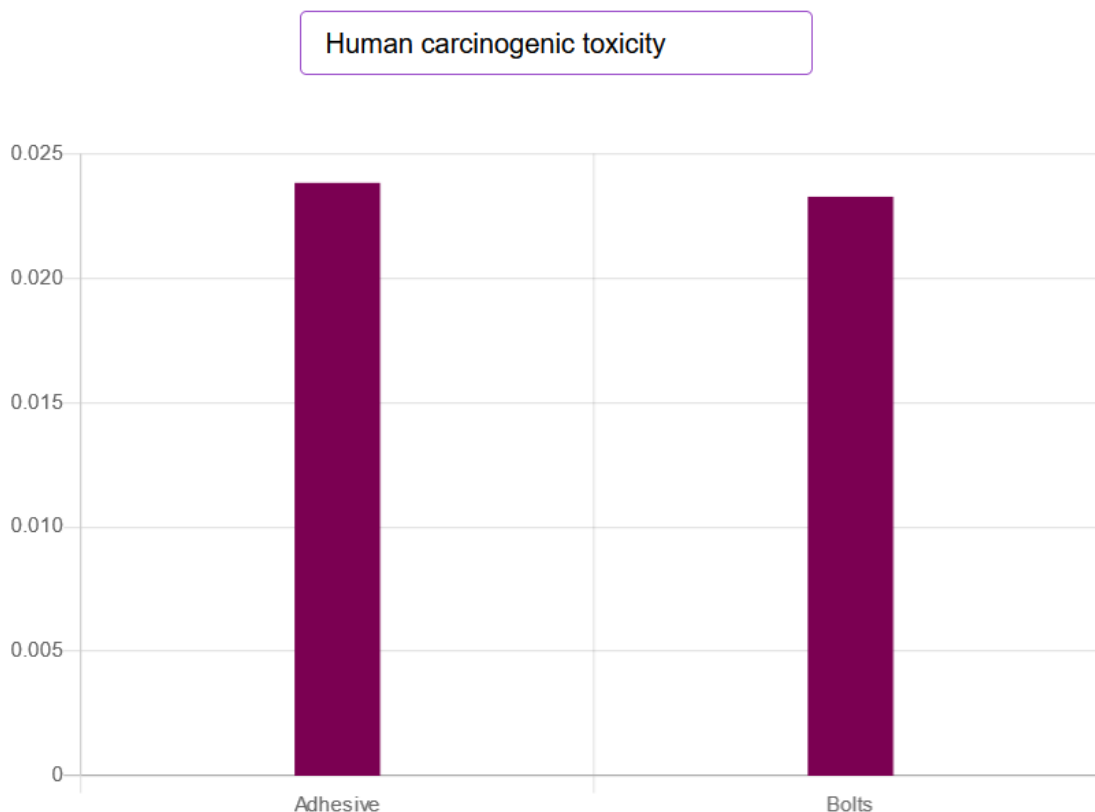


Εικόνα 16 Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη σύνθετου πάνελ με μηχανικές συνδέσεις και συνδέσεις κόλλας

Βάσει του παραπάνω ραβδογράμματος, το πάνελ με σύνδεση κόλλας παρήγαγε 60.5678 kg CO_2 σε αντίθεση με το αντίστοιχο πάνελ με σύνδεση κοχλίων που παρήγαγε 58.8687 kg CO_2 . Η διαφορά του δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη για τα δυο υπό μελέτη πάνελ είναι ίση με περίπου 2.89%. Όπως και στην προηγούμενη κατηγορία επιπτώσεων, η παραγωγή των ινών πολυακρυλονιτριλίου (PAN) προκαλεί τη μεγαλύτερη επιβάρυνση αφού, και στις δυο περιπτώσεις, παρήγαγε 53.378 kg CO_2 . Σημειώνεται πως η διαδικασία παραγωγής ινών άνθρακα παρήγαγε 2.050 kg CO_2 , η χρήση PA 66 προκάλεσε παραγωγή 4.218 kg CO_2 και η χρήση PET -1.177 kg CO_2 . Η διαφορά του δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη στις δυο κατηγορίες κατασκευής δικαιολογείται λόγω των διαφορετικών μεθόδων σύνδεσης με την εποξειδική κόλλα να παρήγαγε 2.099 kg CO_2 και τους κοχλίες 0.400 kg CO_2 .

5.1.3 ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ

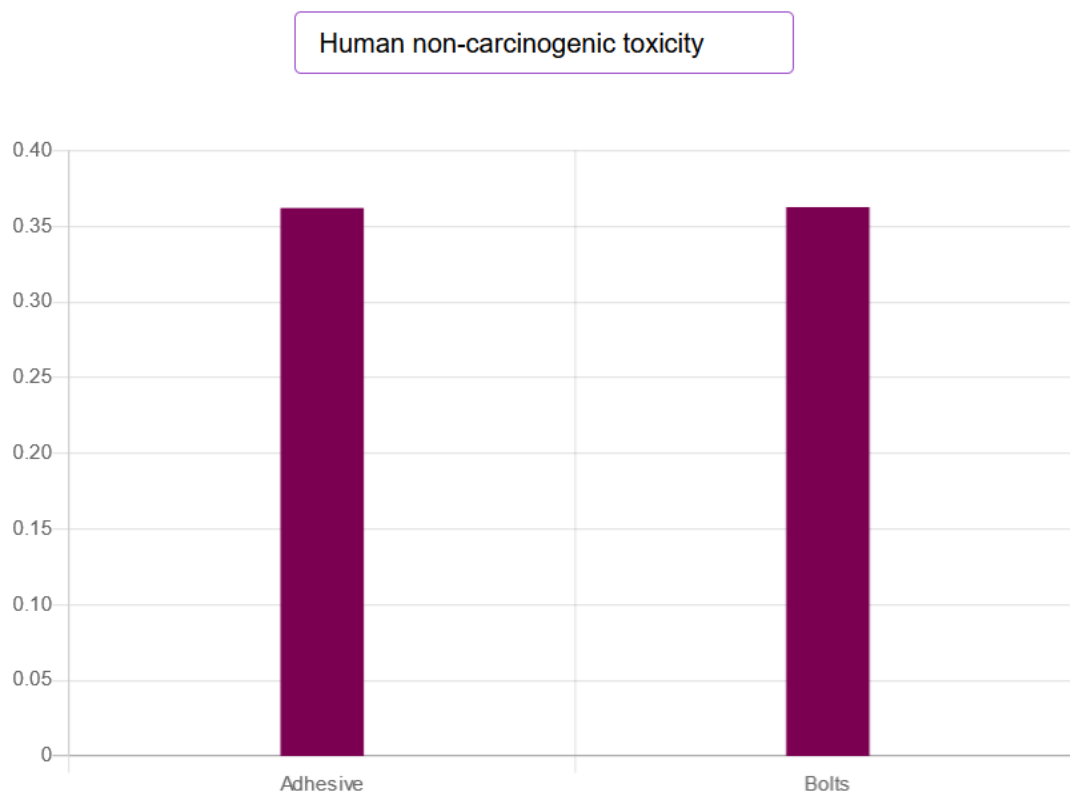
Η θαλάσσια και χερσαία οικοτοξικότητα, η οικοτοξικότητα του γλυκού νερού, ο καρκίνος και η μη καρκινογόνος τοξικότητα εμπίπτουν στην κατηγορία επιπτώσεων της τοξικότητας. Σύμφωνα με μελέτες του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας το 2018, ο καρκίνος αποτελεί τη δεύτερη πιο θανατηφόρα ασθένεια παγκοσμίως με περίπου 9.6 εκατομμύρια θανάτους το 2018 μόνο. Η ασθένεια του καρκίνου είναι μια ομάδα ασθενειών που περιλαμβάνει τη μη φυσιολογική κυτταρική ανάπτυξη με τη δυνατότητα εισβολής και εξάπλωσης σε άλλα μέρη του σώματος. Στην παρούσα μελέτη, αναλύονται και μετρούνται τα δυναμικά της ανθρώπινης καρκινογόνου και μη τοξικότητας ανά κιλό παραγόμενου ισοδύναμου 1,4-DCB. Το παραγόμενο 1,4-DCB αποτελεί μια οργανική ένωση με χημικό τύπο $C_6H_4Cl_2$ που ονομάζεται παρα-διχλωροβενζόλιο και χρησιμοποιείται ως μονάδα αναφοράς της ανθρώπινης τοξικότητας. Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν για τη συγκεκριμένη κατηγορία επιπτώσεων παρατίθενται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 17 Δυναμικό ανθρώπινης καρκινογόνου τοξικότητας σύνθετου πάνελ με μηχανικές συνδέσεις και συνδέσεις κόλλας

Ομοίως, το πάνελ με σύνδεση κόλλας έχει μεγαλύτερη επιρροή στην ανθρώπινη καρκινογόνο τοξικότητα με το δυναμικό του να ανέρχεται στα 0.0238297 kg 1,4-DCB. Το δυναμικό των δυο προϊόντων για τη συγκεκριμένη κατηγορία επιπτώσεων διαφέρει κατά 2.4 % με το πάνελ με σύνδεση κοχλιών να παράγει 0.0232708 kg 1,4-DCB. Όπως αναμένεται, πλέον, η παραγωγή των ινών πολυακρυλονιτριλίου (PAN) προκαλεί τη μεγαλύτερη τοξικότητα καθώς, και στις δυο περιπτώσεις, παρήγαγε 0.024 kg 1,4-DCB. Σημειώνεται πως η διαδικασία παραγωγής ινών άνθρακα δεν παρήγαγε ποσότητα 1,4-DCB ενώ η χρήση PA 66 παρήγαγε $5.954E-4$ kg 1,4-DCB και η χρήση PET $-9.186E-4$ kg 1,4-DCB. Η μοναδική διαφορά στη συνολική παραγωγή

παρα-διχλωροβενζολίου παρατηρείται στις μεθόδους σύνδεσης του επίπεδου πάνελ με τα stringers. Συγκεκριμένα, η σύνδεση με εποξειδική κόλλα παρήγαγε $5.702 \text{E-4 kg 1,4-DCB}$ ενώ η μηχανική σύνδεση $1.127 \text{E-5 kg 1,4-DCB}$.

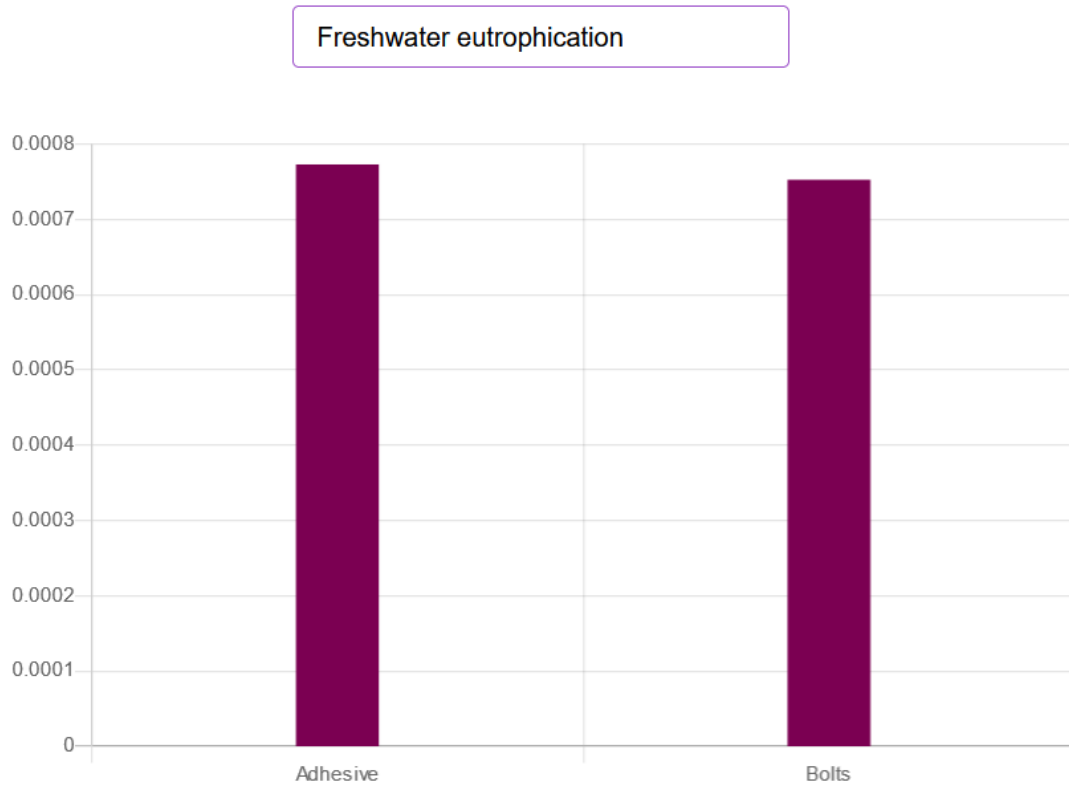


Εικόνα 18 Δυναμικό ανθρώπινης μη καρκινογόνου τοξικότητας σύνθετου πάνελ με μηχανικές συνδέσεις και συνδέσεις κόλλας

Σε αντίθεση με το δυναμικό ανθρώπινης καρκινογόνου τοξικότητας, το πάνελ με σύνδεση κόλλας έχει μικρότερη επιρροή στην ανθρώπινη μη καρκινογόνο τοξικότητα παράγοντας $0.362622 \text{ kg 1,4-DCB}$. Στη συγκεκριμένη κατηγορία επιπτώσεων, το πάνελ με σύνδεση κοχλιών έχει μεγαλύτερη επιβάρυνση αφού παράγει $0.362033 \text{ kg 1,4-DCB}$. Η ποσοστιαία διαφορά παραγωγής παρα-διχλωροβενζολίου ανέρχεται στα 0.16% με την παραγωγή ινών πολυακρυλονιτριλίου (PAN) να προσδίδει 0.352 kg 1,4-DCB καθιστώντας τη την πιο κομβική ως προς την ανθρώπινη μη καρκινογόνο τοξικότητα. Εν συνεχεία, η διαδικασία σκλήρυνσης του επίπεδου πάνελ παρήγαγε $2.634 \text{E-3 kg 1,4-DCB}$, η χρήση PA 66 $5.954 \text{E-4 kg 1,4-DCB}$ και η χρήση PET $-9.186 \text{E-4 kg 1,4-DCB}$.

5.1.4 ΕΥΤΡΟΦΙΣΜΟΣ ΓΛΥΚΟΥ ΝΕΡΟΥ

Ο ευτροφισμός του γλυκού νερού προκαλείται όταν τα θρεπτικά συστατικά και τα μεταλλικά στοιχεία εμπλουτίζονται υπερβολικά με αποτέλεσμα την υπερανάπτυξη των υδρόβιων φυτών και των φυκιών. Όμοια με κάθε άλλο φυτό, τα φύκια κάτω από το νερό εκπέμπουν οξυγόνο μέσω της φωτοσύνθεσης αλλά, παράλληλα, καταναλώνουν και υψηλή ποσότητα οξυγόνου κατά τη νύχτα. Ιδιαίτερα στην περίπτωση της άνθισης των φυκιών, όπου ο αριθμός των φυκιών συσσωρεύεται αρκετά γρήγορα κάτω από το νερό, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα το οξυγόνο του υδατικού σώματος να εξαντληθεί. Βάσει των παραπάνω, το υδατικό οικοσύστημα μπορεί να επηρεαστεί σοβαρά με την επιρροή στην αλιεία και τη μείωση της διαύγειας του νερού να αποτελούν τα πιο συχνά παραδείγματα. Ο ευτροφισμός, συνήθως, συμβαίνει λόγω της υπέρμετρης χρήσης και απόρριψης απορρυπαντικών ή λιπασμάτων που περιέχουν νιτρικά ή φωσφορικά άλατα στο υδατικό σύστημα. Στη μελέτη αυτή, το δυναμικό ευτροφισμού του γλυκού νερού μετριέται σε ανά κιλό παραγόμενο P (φώσφορο) και τα αποτελέσματα απεικονίζονται παρακάτω.



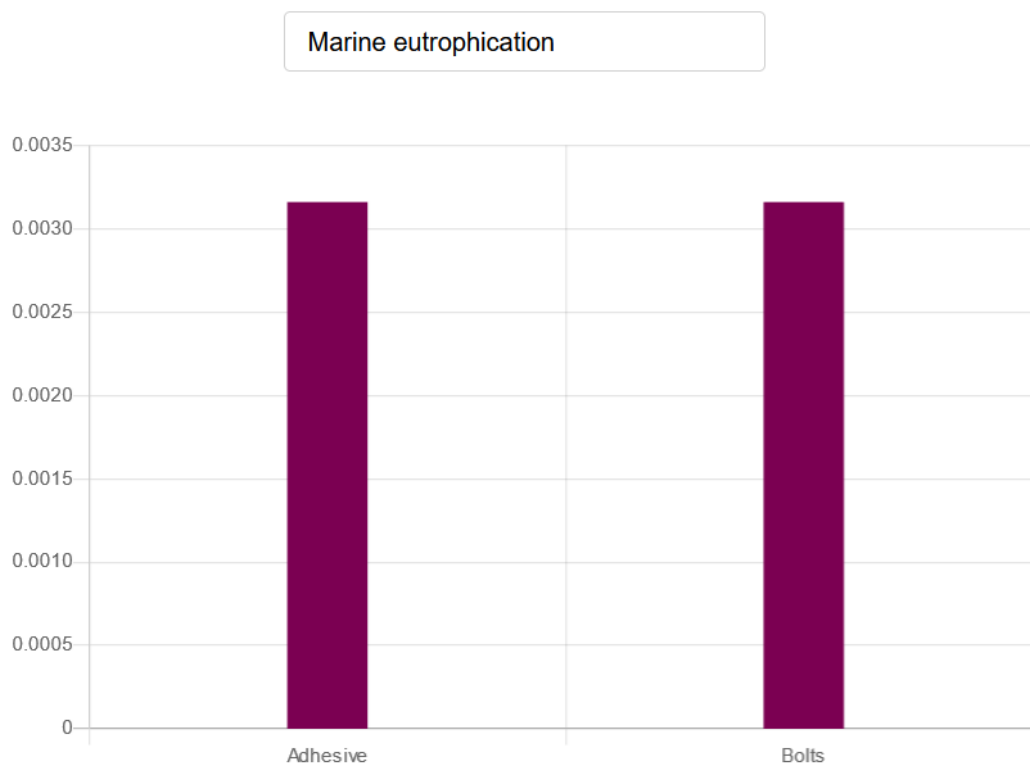
Εικόνα 19 Δυναμικό ευτροφισμού γλυκού νερού σύνθετου πάνελ με μηχανικές συνδέσεις και συνδέσεις κόλλας

Το δοθέν ραβδόγραμμα απεικονίζει το δυναμικό ευτροφισμού του γλυκού νερού για τα δυο υπό μελέτη προϊόντα κατασκευής. Όπως παρατηρείται, το πάνελ με σύνδεση κόλλας συνεισφέρει σε μεγαλύτερο βαθμό στην αύξηση του δυναμικού καθώς παράγει 7.72757E-4 kg P. Αντίστοιχα, το πάνελ με σύνδεση κοχλιών παράγει 7.52460E-4 kg P δημιουργώντας, έτσι, μια ποσοστιαία διαφορά ίση με 2.7%. Σημειώνεται πως τη μεγαλύτερη επιρροή στα παραπάνω αποτελέσματα έχει η χρήση του PA 66 η οποία παράγει, και στις δυο κατηγορίες πάνελ,

$7.089\text{E-}4$ kg P. Αμέσως μετά ακολουθεί η παραγωγή ινών πολυακρυλονιτριλίου (PAN) που προσδίδει $4.359\text{E-}5$ kg P και η χρήση PET που επιβαρύνει το περιβάλλον με $-7.140\text{E-}8$ kg P. Η επιβάρυνση της εφαρμογής εποξειδικής κόλλας ανέρχεται στα $2.031\text{E-}5$ kg P ενώ η σύνδεση με κοχλίες στα $1.806\text{E-}8$ kg P.

5.1.5 ΘΑΛΑΣΣΙΟΣ ΕΥΤΡΟΦΙΣΜΟΣ

Ο θαλάσσιος ευτροφισμός προκαλείται, ομοίως, όταν τα θρεπτικά συστατικά και τα μεταλλικά στοιχεία εμπλουτίζονται σημαντικά. Οι παράγοντες που συμβάλλουν στην εμφάνιση του θαλάσσιου ευτροφισμού είναι μια πηγή μαζικής εισροής θρεπτικών συστατικών και μια σχετικά ρηχή και προφυλαγμένη λεκάνη που υφίσταται στρωμάτωση είτε θερμοκρασίας είτε πυκνότητας. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης κατηγορίας επιπτώσεων μετρούνται σε ανά κιλό παραγόμενο N (άζωτο) και απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 20 Δυναμικό θαλάσσιου ευτροφισμού σύνθετου πάνελ με μηχανικές συνδέσεις και συνδέσεις κόλλας

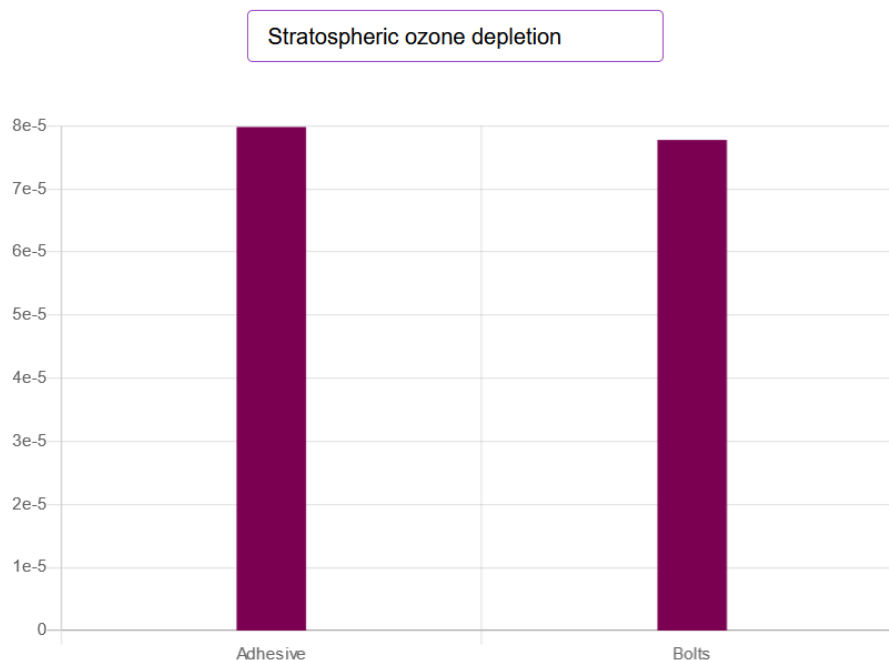
Παρατηρώντας την παραπάνω εικόνα συμπεραίνουμε πως τα δυο τελικά προϊόντα έχουν το ίδιο δυναμικό θαλάσσιου ευτροφισμού προσδίδοντας $3.16002\text{E-}3$ kg N. Ωστόσο, στη ξεχωριστή ανάλυση των δυο κατασκευών παρατηρούνται ορισμένες διαφορές στις παραγόμενες τιμές N (άζωτου). Συγκεκριμένα, η παραγωγή ινών πολυακρυλονιτριλίου (PAN) προσδίδει και στις δυο περιπτώσεις $1.900\text{E-}3$ kg N, η χρήση PA 66 $1.260\text{E-}3$ kg N και η χρήση PET $-4.883\text{E-}7$ kg N. Η διαφορές στις τιμές του παραγόμενου αζώτου οφείλονται στις επιμέρους ποσότητες που παράγονται λόγω της χρήσης εποξειδικής κόλλας και κοχλίων.

Συγκεκριμένα, η εποξειδική κόλλα παράγαγε $7.526\text{E-}7$ kg N και οι κοχλίες $7.487\text{E-}7$ kg N σημειώνοντας μια σχετικά αμελητέα ποσοστιαία διαφορά ίση με 0.52%.

5.1.6 ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗ ΣΤΟΙΒΑΔΑΣ ΟΖΟΝΤΟΣ

Το όζον είναι ταυτόχρονα ωφέλιμο αλλά και επιβλαβές. Κοντά στο έδαφος, το όζον που σχηματίζεται ως αποτελέσματα χημικών αντιδράσεων έχει την ικανότητα να προκαλέσει μια σειρά αναπνευστικών προβλημάτων που βλάπτει κυρίως τα μικρά παιδιά. Ωστόσο, ψηλά στην ατμόσφαιρα, στην περιοχή της στρατόσφαιρας, το όζον φιλτράρει την εισερχόμενη ακτινοβολία από τον Ήλιο στο υπεριώδες τμήμα του φάσματος (UV) που καταστρέφει τα κύτταρα. Η στρατόσφαιρα αποτελεί το δεύτερο πιο μεγάλο στρώμα της ατμόσφαιρας και καταλαμβάνει την περιοχή της ατμόσφαιρας από περίπου 12 km έως και 50 km πάνω από την επιφάνεια της Γης.

Οι ενώσεις που προκαλούν σημαντική καταστροφή του όζοντος περιλαμβάνουν χλωροφθοράνθρακες (CFCs), τετραχλωράνθρακα, μεθυλοχλωροφόρμιο, υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFCs), υδροβρωμοφθοράνθρακες (HBFCs) και μεθυλοβρωμίδιο. Οι ενώσεις αυτές χρησιμοποιούνται ως διαλύτες, ψυκτικά μέσα, προωθητικά αερολύματος, πυροσβεστήρες, γεωργικά φάρμακα και απολιπαντικά. Ο βαθμός κατά τον οποίο μια ουσία που καταστρέφει το όζον επηρεάζει το στρώμα του όζοντος εξαρτάται από τα χημικά χαρακτηριστικά της κάθε ένωσης. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970, γνωστοποιήθηκε ότι οι εκπομπές των ενώσεων αυτών μπορεί να προκαλέσουν σημαντική καταστροφή του όζοντος στην ατμόσφαιρα αφήνοντας, συνεπώς, περισσότερη επιβλαβή υπεριώδη ακτινοβολία να περάσει. Το 1985, μια μεγάλη «τρύπα του όζοντος» ανακαλύφθηκε πάνω από την Ανταρκτική κατά την εποχή της Άνοιξης και διαπιστώθηκε ότι αυτή εμφανίζεται κάθε χρόνο μεγαλώνοντας και βαθαινόντας. Το δυναμικό καταστροφής του όζοντος, στην παρούσα μελέτη, μετριέται σε ανά κιλό παραγόμενο CFC11 και τα αποτελέσματα για τα δυο πάνελ εμφανίζονται παρακάτω.



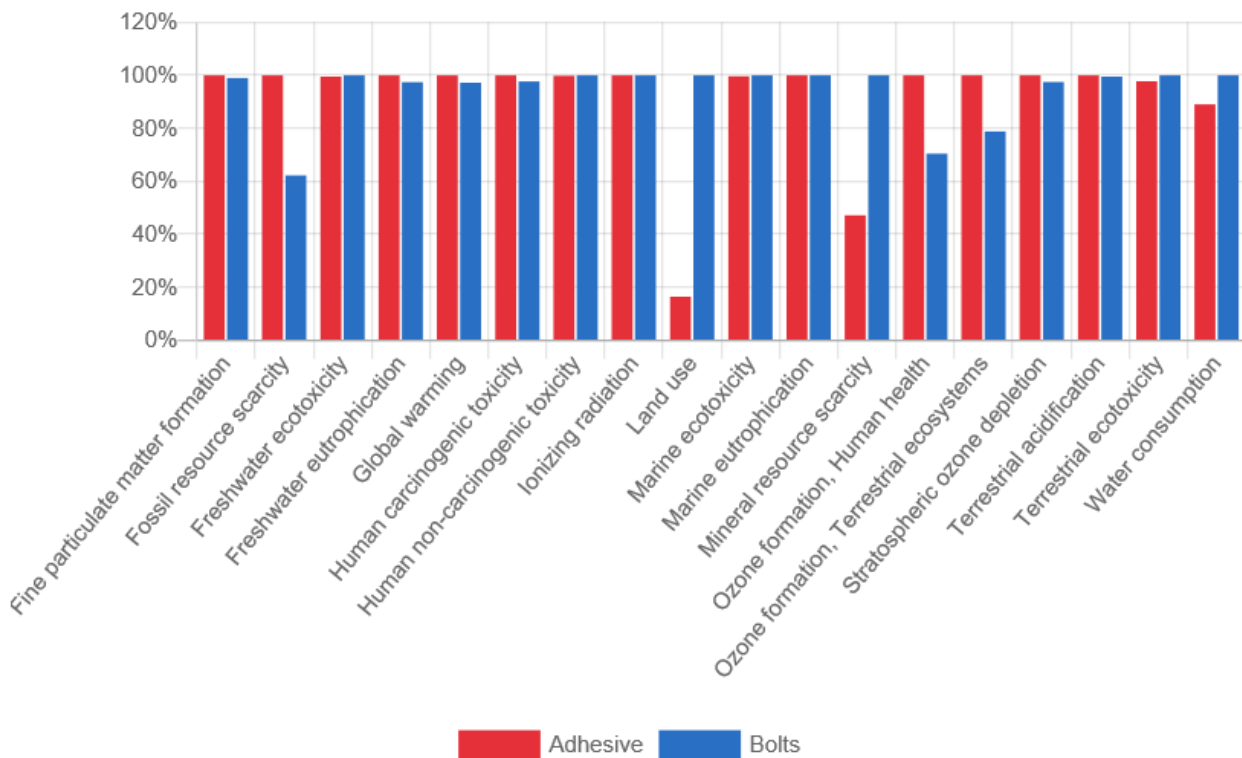
Εικόνα 21 Δυναμικό εξασθένησης στοιβάδας του όζοντος σύνθετου πάνελ με μηχανικές συνδέσεις και συνδέσεις κόλλας

Και σε αυτή την κατηγορία επιπτώσεων, το πάνελ με σύνδεση κόλλας επιβαρύνει σε μεγαλύτερο βαθμό το περιβάλλον καθώς παράγει 2.64% περισσότερους χλωροφθοράνθρακες. Το πάνελ με σύνδεση κόλλας παράγει 7.98266×10^{-5} kg CFC11 ενώ το πάνελ με μηχανική σύνδεση παράγει 7.77747×10^{-5} kg CFC11. Οι ίνες πολυακρυλονιτριλίου (PAN) εξακολουθούν να παρέχουν τη μεγαλύτερη ποσότητα χλωροφθοράνθρακα με την παραγωγή τους να είναι ίδια στα δυο πάνελ και ίση με 7.351×10^{-5} kg CFC11. Στη συνέχεια, ακολουθεί η χρήση PA 66 με ποσότητα ίση με 4.050×10^{-6} kg CFC11 και η χρήση PET με -1.696×10^{-13} kg CFC11. Στην κατηγορία της εξασθένησης της στοιβάδας του όζοντος, η εφαρμογή της εποξειδικής κόλλας προσφέρει 2.266×10^{-6} kg CFC11 και η εφαρμογή των κοχλιών 2.137×10^{-7} kg CFC11.

5.2 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Στην παρούσα μελέτη, επιλέχθηκαν έξι κατηγορίες επιπτώσεων με σκοπό την αξιολόγηση και τη σύγκριση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος που προκύπτει από τον κύκλο ζωής των υπό μελέτη πάνελ. Είναι εμφανές πως το πάνελ με σύνδεση κόλλας επιφέρει μεγαλύτερο αντίκτυπο στο περιβάλλον καθώς, στη πλειοψηφία των κατηγοριών, οι ποσότητες των ουσιών που παράγει υπερέχουν. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούνται από την κατασκευή των πάνελ βασίζονται κυρίως στην ποσότητα των ινών, του νάιλον PA 66, του PET, της εποξειδικής κόλλας και των βιδών. Η παραγωγή ενός πάνελ με συνδέσεις κόλλας φαίνεται να έχει αρκετές αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και, ιδίως, όσον αφορά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, τις εκπομπές παρα-διχλωροβενζολίου και το σχηματισμό μικρών σωματιδίων. Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί στο γεγονός πως η παραγωγή ινών πολυακρυλονιτριλίου (PAN) προκάλεσε τις περισσότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθώς σχεδόν σε κάθε υπό ανάλυση κατηγορία επιπτώσεων παρήγαγε τη μεγαλύτερη ποσότητα επιβλαβών ουσιών.

Οι συνδέσεις με κόλλα (bonded joints) παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές μηχανικές συνδέσεις (mechanical joints) όπως μειωμένο βάρος, πιο ομοιόμορφη κατανομή τάσεων, μειωμένη πιθανότητα αστοχίας στα συγκολλημένα μέρη, ευκολία κατασκευής και δυνατότητα σύνδεσης ανόμοιων υλικών. Ωστόσο, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των συνδέσεων κόλλας υπερέχει από το αντίστοιχο των συνδέσεων κοχλιών. Για την πλήρη κατανόηση των αποτελεσμάτων της μελέτης και για την επιβεβαίωση της πρότασης πως οι συνδέσεις με κόλλα παρουσιάζουν μεγαλύτερη περιβαλλοντική επιρροή παρατίθεται το παρακάτω ραβδόγραμμα που συγκεντρώνει τα ποσοστά επί τοις εκατό % όλων των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συμπεριλαμβάνονται στη μέθοδο ReCiPe 2016 Midpoint (H).



Εικόνα 22 Συγκεντρικό ραβδόγραμμα ποσοστιαίων αποτελεσμάτων για κάθε κατηγορία επιπτώσεων ReCiPe 2016 Midpoint (H) σύνθετου πάνελ με μηχανικές συνδέσεις και συνδέσεις κόλλας

Το παραπάνω ραβδόγραμμα επαληθεύει την πρόταση πως το πάνελ με σύνδεση κόλλας προκαλεί το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Το πάνελ με μηχανικές συνδέσεις επιβαρύνει περισσότερο το περιβάλλον μόνο σε τρεις κατηγορίες επιπτώσεων: στη χρήση γης, στην ανεπάρκεια των ορυκτών πόρων και στην κατανάλωση νερού. Κατά πλειοψηφία, λοιπόν, συμπεραίνουμε πως το πάνελ κατασκευασμένο από εποξειδική ρητίνη ενισχυμένο με ίνες άνθρακα και συνδέσεις εποξειδικής κόλλας μειονεκτεί στον τομέα της βιωσιμότητας. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως τα αποτελέσματα για τις δυο κατηγορίες κατασκευής δεν εμφάνισαν σημαντικές διαφορές. Οι μικρές διαφορές των τιμών βασίζονται, κατά μεγάλο βαθμό, στις παραδοχές που πραγματοποιήθηκαν λόγω περιορισμένων δεδομένων αλλά και στην επιλογή πανομοιότυπων υλικών με τα αντίστοιχα που είχαν ανατεθεί. Συνεπώς, οι παραδοχές που πραγματοποιήθηκαν οδήγησαν σε μια ανάλυση που παρουσιάζει μικρές διαφορές αποτελεσμάτων ως προς το περιβαλλοντικό αντίκτυπο της κατασκευής των δυο πάνελ. Σε καμία περίπτωση, όμως, δε μπορεί να θεωρηθεί η ανάλυση μη ρεαλιστική καθώς τα υπάρχοντα δεδομένα συλλέχθηκαν με ιδιαίτερη προσοχή.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η συλλογή των δεδομένων για τον κύκλο ζωής της κατασκευής πάνελ με μήτρα εποξειδικής ρητίνης και ίνες άνθρακα ήταν αρκετά δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία. Στόχος της εργασίας ήταν η συγκριτική Ανάλυση Κύκλου Ζωής των δύο κατασκευών που διαφοροποιούνταν ως προς τη σύνδεση των stringers με το επίπεδο κομμάτι του πάνελ. Αξίζει να αναφερθεί στο σημείο αυτό πως η άμεση λήψη πληροφοριών από τις αντιπροσωπείες των υλικών και τις εγκαταστάσεις παραγωγής τους δεν ήταν εφικτή. Αποτέλεσμα αυτού ήταν η αναγκαία λήψη ορισμένων παραδοχών οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με ιδιαίτερη προσοχή και συνοχή ώστε να μην υπάρχουν σημαντικές στρεβλώσεις στα τελικά αποτελέσματα. Η μικρή διαθεσιμότητα στα δεδομένα εμφανίζεται κυρίως στη φάση της εφαρμογής κόλλας και των κοχλιών αφού δεν βρέθηκαν διαθέσιμες πληροφορίες ούτε για τα συγκεκριμένα υλικά που είχαν ανατεθεί στην εργασία ούτε για την απαιτούμενη ενέργεια και ποσότητα των υλικών αυτών. Σημειώνεται, ακόμη, πως δεν συνυπολογίστηκε ούτε ο παράγοντας της μεταφοράς των προϊόντων καθώς τα διαθέσιμα δεδομένα ήταν αρκετά ελλιπή και υπήρχε μεγάλη πιθανότητα να επηρεάσουν σημαντικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης οδηγώντας τα σε μη ρεαλιστικά.

Οι υπεύθυνοι χάραξης περιβαλλοντικής πολιτικής έχουν γνωστοποιήσει ξεκάθαρα την ανάγκη μιας νέας σειράς δράσεων τόσο ατομικά όσο και συνολικά για την επίτευξη ενός βιωσιμότερου πλανήτη. Πρωταρχικό ρόλο, στο πλαίσιο αυτό, παίζουν οι βιομηχανίες οι οποίες μέσω των ενεργειών τους δυσχεραίνουν ανεπανόρθωτα το περιβάλλον. Απαιτείται, λοιπόν, η μεμονωμένη διερεύνηση της επιβάρυνσης των διαδικασιών ή των προϊόντων τους με στόχο τη βελτίωση τους έτσι ώστε τα προϊόντα αυτά να θεωρούνται αποδεκτά από το κοινό και τη νομοθεσία ως βιώσιμα.

Εξέχοντα ρόλο για την επίτευξη των παραπάνω έχει η μέθοδος της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής αλλά και η επιλογή του ιδανικού προγράμματος για την πραγματοποίηση της μελέτης. Το λογισμικό openLCA επιλέχθηκε διότι παρείχε δωρεάν τις βάσεις δεδομένων και ήταν, παράλληλα, εύκολο και ευέλικτο στη χρήση.

Στο σημείο αυτό, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η κύρια αιτία που φαίνεται να υπερτερεί το πάνελ με μηχανική σύνδεση έναντι του πάνελ με σύνδεση κόλλας είναι η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης και η εύκολη αποσυναρμολόγηση του συνδυαστικά με τις μικρότερες παραγόμενες ποσότητες επιβλαβών ουσιών. Οι κόλλες έχουν μεγάλη επιρροή στην περιβαλλοντική υποβάθμιση καθώς οι περισσότερες απορροφούν υγρασία και παρουσιάζουν μειωμένη αντοχή και ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες. Ακόμη, μερικές από αυτές αλλοιώνονται από χημικές ουσίες όπως είναι τα διαβρωτικά χρώματα και άλλοι διαλύτες. Ωστόσο, οι συνδέσεις με κόλλα δύναται να είναι δομικά πιο αποτελεσματικές σε σχέση με τις μηχανικές συνδέσεις διότι έχουν τη δυνατότητα να εξαλείφουν τις συγκεντρώσεις τάσεων. Όσον αφορά το δεδομένο πλαίσιο της ανάλυσης, το πάνελ με μηχανικές συνδέσεις θεωρείται η βέλτιστη επιλογή καθώς το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα είναι πιο ήπιο σε σχέση με το πάνελ με σύνδεση κόλλας.

7 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Δεδομένου ότι το βασικότερο πρόβλημα για την πραγματοποίηση της μελέτης ήταν η συλλογή στοιχείων, ιδιαίτερα χρήσιμη για μελλοντικές μελέτες καθίσταται η ανάπτυξη βάσεων δεδομένων και μεθοδολογιών αποκλειστικά για τον κύκλο ζωής σύνθετων υλικών που να είναι, ταυτόχρονα, και ποιοτικές. Ειδικά για τις απαιτούμενες ποσότητες πρώτων υλών και ενέργειας, απαραίτητη κρίνεται οποιαδήποτε σαφέστερη πληροφορία καθώς τα διαθέσιμα δεδομένα δεν συνέπιπταν επακριβώς μεταξύ τους με αποτέλεσμα τη δημιουργία παραδοχών για ένα ευρύ μέρος της κατασκευής. Ιδιαίτερα χρήσιμη θα ήταν και οποιαδήποτε πληροφορία σχετικά με τις συγκεκριμένες πρώτες ύλες που είχαν ανατεθεί στην εργασία αφού καμία από αυτές δεν ήταν διαθέσιμη στο λογισμικό. Συγκεκριμένα, το δοθέν prepreg ονομαζόμενο ως HexPly 8552 UD Prepreg/IM7, η δοθείσα εποξειδική κόλλα σε μορφή φιλμ ονομαζόμενη ως Loctite EA9695 και οι κοχλίες τιτανίου δεν εισήχθησαν στο λογισμικό αλλά αντικαταστάθηκαν από υλικά με αντίστοιχες και όμοιες ιδιότητες έτσι ώστε τα αποτελέσματα της ανάλυσης να θεωρηθούν ορθά. Τέλος, σε μελλοντικές μελέτες προτείνεται, κατά την ανάλυση του κύκλου ζωής, να λαμβάνονται υπόψη δεδομένα της μεταφοράς των υλικών από το εργοστάσιο παραγωγής στο εργαστήριο καθώς και από την ανακύκλωση τόσο τον παραπροϊόντων όσο και της τελικής κατασκευής.

Πρέπει, λοιπόν, να λάβουν χώρα ολοκληρωμένες μελέτες που θα καλύπτουν διάφορες κατασκευές σύνθετων υλικών ώστε να δημιουργηθεί μια βάση δεδομένων για τις διάφορες διεργασίες και την αποτίμηση των διαφόρων κατηγοριών επιπτώσεων. Η επίτευξη όλων των παραπάνω έχει ως σκοπό την ορθότερη ανάλυση του κύκλου ζωής της κατασκευής και την κατανόηση των περιβαλλοντικών ζητημάτων που προκύπτουν κατά τη κατασκευή και τη χρήση κατασκευών από σύνθετα υλικά.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. National Technical University of Athens, “ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (COMPOSITES)”, http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf, [πρόσβαση 7/4/2022].
- [2]. Henkel, “LOCTITE EA 9695”, https://www.henkel-adhesives.com/us/en/product/industrial-adhesives/loctite_ea_9695.html, [πρόσβαση 7/4/2022].
- [3]. Hexcel Composites, “HexPly 8552 Epoxy matrix (180°C/356°F curing matrix) Product Data”, February 2013.
- [4]. Nagai, H., Takahashi, J., Kemmochi, K., Matsui, J. (2001), “Inventory analysis in production and recycling process of advanced composite materials”, 5th International Conference on ECOMATERIALS, Oct 2-4 2001, Society of Advanced Science, Honolulu, Hawaii.
- [5]. Vita, A., Castorani, V., Germani, M., Marconi, M. (2019), “Comparative life cycle assessment and cost analysis of autoclave and pressure bag molding for producing CFRP components”, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04384-9>, [πρόσβαση 7/4/2022].
- [6]. Ju, X.; Xiao, J.; Wang, D.; Zhao, C.; Wang, X. (2021), “Research on the Forming Quality of Hat-Stiffened Composite Structure Manufactured by Co-curing Process”, *MDPI Materials*, **14** (2747), pp. 1-17.
- [7]. Enve-Lab – Aristotle University of Thessaloniki (2015), «Ανάλυση κύκλου ζωής», <https://www.enve-lab.eu/wp-content/uploads/2015/03/Environmental-Engineering-lecture-14-LCA.pdf>, [πρόσβαση 6/7/2022].
- [8]. Γεωργακέλλος, Δ. (1999), «ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ: ΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΟ ΟΡΓΑΝΟ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ», *ΣΠΟΥΔΑΙ*, **49** (1^ο – 4^ο), σελ. 127-158.
- [9]. Πανεπιστήμιο Πατρών, «Η εφαρμογή της ανάλυσης κύκλου ζωής στη διαχείριση των συσκευασιών», <https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/ENV204/LCA.pdf>, [πρόσβαση 30/8/2022].
- [10]. Forcellese, A., Marconi, M., Simoncini, M., Vita, A. (2020), “Life cycle impact assessment of different manufacturing technologies for automotive CFRP components”, *Journal of Cleaner Production*, **1** (271), pp. 1-16.
- [11]. La Rosa, A., Banatao, D., Pastine, S., Latteri, A., Cicala, G. (2016), “Recycling treatment of carbon fibre/epoxy composites: Materials recovery and characterization and environmental impacts through life cycle assessment”, *Composites*, **Part B** (104), pp. 17-25.
- [12]. Zi Jun, L. (2021), “*Life Cycle Assessment of Reuse/Remanufacture End-of-Life Fibre Reinforced Polymer in Composite Industry*”, Bachelor’s Thesis, Merseburg University of Applied Sciences.

- [13]. International Organization for Standardization ISO 14040 (2006). Environmental management - life cycle assessment - principles and framework. Switzerland: ISO 14000 International Standards Compendium; 2006.
- [14]. International Organization for Standardization ISO 14044 (2006). Environmental management - life cycle assessment - requirements and guidelines. Switzerland: ISO14000 International Standards Compendium; 2006.
- [15]. Ciroth, A., Di Noi, C., Lohse, T., Srocka, M. (2020), “Comprehensive User Manual for openLCA 1.10”, https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2020/02/openLCA_1.10_User-Manual.pdf, [πρόσβαση 7/4/2022].
- [16]. Hill, C., Norton, A. (2018), “LCA database of environmental impacts to inform material selection process”, *DACOMAT – Damage Controlled Composite Materials*, **6.1**, pp. 1-32.
- [17]. Acero, A., Rodriguez, C., Ciroth, A. (2016), “Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories”, *GREENDELTA*, **1.5.5**, pp. 1-23.
- [18]. Iswara, A., Farahdiba, A., Nadhifatin, E., Pirade, F., Andhikaputra, G., Muflihah, I., Boedisantoso, R. (2022), “A Comparative Study of Life Cycle Impact Assessment using Different Software Programs”, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/506/1/012002/pdf>, [πρόσβαση 5/9/2022].
- [19]. Remy Prame, J. (2020), *A Comparative LCA study on the refurbishment of quays with induced mineral deposition technology*, Degree Project, KTH Royal Institute of Technology.
- [20]. La Rosa, A., Cozzo, G., Latteri, A., Mancini, G., Recca, A., Cicala, G. (2013), “A Comparative Life Cycle Assessment of a Composite Component for Automotive”, *Chemical Engineering Transactions*, **32** (1), pp. 1723-1728.
- [21]. Huijbregts, M., Steinmann, Z., Elshout, P., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., Zelm, R. (2016), “ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*.
- [22]. Khalil, Y. (2017), “Eco-efficient lightweight carbon-fiber reinforced polymer for environmentally greener commercial aviation industry”, *Sustainable Production and Consumption*, **12** (1), pp. 16-26.
- [23]. Suzuki, T., Takahashi, J. (2005), “Prediction of energy intensity of carbon fiber reinforced plastics for mass-produced passenger cars”, *The Ninth Japan International SAMPE symposium*, pp. 14-19.
- [24]. Song, Y., Youn, J., Gutowski, T. (2009), “Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites”, *Composites: Part A*, **40** (1), pp. 1257-1265.
- [25]. UK AIR Air Information Resource, “Stratospheric Ozone Depletion”, <https://uk-air.defra.gov.uk/research/ozone-uv/ozone-depletion>, [πρόσβαση 21/9/2022].

- [26]. European Environment Agency (2016), “Stratospheric ozone depletion”, <https://www.eea.europa.eu/publications/92-9167-205-X/page010.html>, [πρόσβαση 21/9/2022].
- [27]. Yuan, A. (2020), *Evaluate Environmental Sustainability of Concrete Composite Floor-Plates*, Bachelor’s Thesis, Lee Kong Chian Faculty of Engineering and Science University Tunku Abdul Rahman.
- [28]. Industrial Tools Agency (2019), “Weight & Count Chart of Popular Fasteners”, <https://itafasteners.com/weight-chart.php>, [πρόσβαση 21/9/2022].
- [29]. Loctite (2022), “LOCTITE PL HEAVY DUTY SEALANT – 10 OZ”, https://www.loctiteproducts.com/en/products/build/sealants/loctite_pl_heavydutysealant.2141743.html#variants, [πρόσβαση 21/9/2022].
- [30]. Barbosa, N., Campilho, R., Silva, F., Moreira, R. (2018), “Comparison of different adhesively-bonded joint types for mechanical structures”, *Springer*, **6** (15), pp.1-19.
- [31]. Domínguez-Monferrera, C., Fernández-Pérez, J., De Santosa, R., Miguéleza, M., Cantero, J. (2022), “CFRP drilling process control based on spindle power consumption from real production data in the aircraft industry”, *Procedia CIRP*, **1** (107), pp. 1533-1538.
- [32]. Zampori L., Saouter E., Castellani V., Schau E., Cristobal J., Sala S.; *Guide for interpreting life cycle assessment result*; EUR 28266 EN; doi:10.2788/171315
- [33]. Oplinger, D. (1998), “MECHANICAL FASTENING AND ADHESIVE BONDING”, Peters, S., *Handbook of Composites*, London: Chapman & Hall, pp. 610-666.
- [34]. Sietou, F. (2022), *Life Cycle Analysis for Bioplastics*, Master Thesis, University of Piraeus.