



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΛΙΚΩΝ"**

**Μελέτη περιβαλλοντικών και
οικονομικών συνεπειών από την
παραγωγή σύνθετων υλικών με βάση
τον άνθρακα**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ Ι. ΜΑΥΡΟΥΔΑΚΗ

Διπλωματούχου Χημικού Μηχανικού της πολυτεχνικής σχολής του
Α.Π.Θ.

ΕΠΙΒΛΕΨΗ: Κ. Α. Χαριτίδης, Καθηγητής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ
Σ. Τσιβιλής Καθηγητής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2020



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΛΙΚΩΝ"**

**Μελέτη περιβαλλοντικών και
οικονομικών συνεπειών από την
παραγωγή σύνθετων υλικών με βάση
τον άνθρακα**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ Ι. ΜΑΥΡΟΥΔΑΚΗ

Διπλωματούχου Χημικού Μηχανικού της πολυτεχνικής σχολής του
Α.Π.Θ.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Κ. Α. Χαριτίδης, Καθηγητής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ

Σ. Τσιβιλής Καθηγητής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ

Δ. Μανωλάκος Καθηγητής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2020

Πρόλογος

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είχε ως σκοπό να κάνει χρήση σύγχρονων λογισμικών προγραμμάτων για να μελετηθούν οι περιβαλλοντικές και οι οικονομικές επιπτώσεις από τις διεργασίες παραγωγής σύνθετων υλικών με βάση τον άνθρακα. Η μελέτη επικεντρώθηκε στην ανάλυση του κύκλου ζωής των διεργασιών παραγωγής σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με νανοϋλικά όπως ίνες ή νανοσωλήνες άνθρακα. Απώτερος σκοπός της μελέτης αυτής είναι να μπορέσουν να προταθούν οι κατάλληλες βελτιώσεις των διεργασιών παραγωγής που θα μπορέσουν να τις καταστήσουν φιλικότερες προς το περιβάλλον και όπου είναι δυνατό να μειώσουν και το κόστος παραγωγής.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	i
Περιεχόμενα	iii
Λίστα Εικόνων	v
Λίστα πινάκων	vii
Περίληψη	1
Abstract	3
Εισαγωγή.....	5
1. Σύνθετα υλικά	5
2. Νανοσύνθετα Υλικά	9
3. Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ)	11
Μεθοδολογία	15
1. Γενική προσέγγιση της μεθοδολογίας της AKZ	15
2. Καθορισμός του σκοπού και του αντικειμένου της μελέτης	16
3. Απογραφή κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory) και εκτίμηση της ποιότητας των δεδομένων.	19
4. Αξιολόγηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (Life Cycle Impact Assessment)	21

5. Λειτουργική μονάδα μελέτης (Functional unit)	24
6. Απεικόνιση, εκτίμηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων	25
Κατηγοριοποίηση.....	25
Χαρακτηρισμός.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
Κανονικοποίηση.....	26
Στάθμιση	26
Ερμηνεία αποτελεσμάτων.....	27
7. Κόστος κύκλου ζωής (ΚΚΖ)	27
Αποτελέσματα και συζήτηση	29
Παρουσίαση και συσχέτιση διεργασιών	29
1. Σύστημα ψύξης CPU	29
Ανάπτυξη των υλικών.....	30
ΑΚΖ παραγωγής μέρους ψυκτικού συστήματος CPU.....	47
2. Παραγωγή μπροστινού περυγίου αγωνιστικού αυτοκινήτου	63
Ανάπτυξη των υλικών.....	63
ΑΚΖ παραγωγής μπροστινού περυγίου αγωνιστικού αυτοκινήτου.....	67
3. Ανάλυση κόστους κύκλου ζωής των προϊόντων που μελετήθηκαν	69
Συμπεράσματα	73
Βιβλιογραφία	77

Λίστα Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥΣ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΩΝ ΥΛΙΚΩΝ. ⁷	6
ΕΙΚΟΝΑ 2 ΤΜΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΕΙ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ. ¹⁹	8
ΕΙΚΟΝΑ 3 ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΑ ΙΣΧΙΟΥ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ. ²¹	8
ΕΙΚΟΝΑ 4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΓΚΛΕΙΣΜΑΤΩΝ ΒΑΣΕΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ	9
ΕΙΚΟΝΑ 5 ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΔΟΜΗ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ ΚΑΙ ΔΟΜΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΑΠΟ ΑΥΤΗ ²⁹	10
ΕΙΚΟΝΑ 6 ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΥΛΙΞΗΣ ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ CNTs A) ARMCHAIR B) ZIGZAG C) CHIRAL ³²	11
ΕΙΚΟΝΑ 7 ΣΤΑΔΙΑ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ	16
ΕΙΚΟΝΑ 8 ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΕΝΟΣ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ ⁵⁶	17
ΕΙΚΟΝΑ 9 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ⁵⁷	18
ΕΙΚΟΝΑ 10 ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	21
ΕΙΚΟΝΑ 11 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ. ΣΧΗΜΑΤΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΠΟΓΡΑΦΗ ΩΣ ΤΑ ΤΕΛΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ	23
ΕΙΚΟΝΑ 12 ΓΕΝΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ IMPACT 2002+ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ. ΤΑ ΔΙΑΚΕΚΟΜΜΕΝΑ ΒΕΛΗ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΟΥΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΕΝΑ ΕΠΙΠΕΔΟ ΣΤΟ ΑΛΛΟ. ⁶³	24
ΕΙΚΟΝΑ 13 ΌΡΙΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΨΥΞΗΣ CPU	30
ΕΙΚΟΝΑ 14 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΜΗΤΡΩΝ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΝΑΝΟΥΛΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΝΗΜΑΤΩΝ.	32
ΕΙΚΟΝΑ 15 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ PA + 3%CNTs.....	33
ΕΙΚΟΝΑ 16 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ PA + 3%CFs.....	33
ΕΙΚΟΝΑ 17 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ PA + 3%GNPs	34
ΕΙΚΟΝΑ 18 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ PLA + 3%CNTs	35
ΕΙΚΟΝΑ 19 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ PLA + 3%CFs	35
ΕΙΚΟΝΑ 20 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ PLA + 3%GNPs	36
ΕΙΚΟΝΑ 21 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ PP + 3%CNTs	37
ΕΙΚΟΝΑ 22 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ PP + 3%CFs	37
ΕΙΚΟΝΑ 23 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ PP + 3%GNPs	38
ΕΙΚΟΝΑ 24 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ PA + 3% CNTs.....	39
ΕΙΚΟΝΑ 25 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ PA + 3% CFs	39
ΕΙΚΟΝΑ 26 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ PA + 3% GNPs.....	40
ΕΙΚΟΝΑ 27 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ PLA + 3% CNTs.....	42
ΕΙΚΟΝΑ 28 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ PLA + 3% CFs.....	42
ΕΙΚΟΝΑ 29 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ PLA + 3% GNPs.....	43
ΕΙΚΟΝΑ 30 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ PP + 3% CNTs.....	43

ΕΙΚΟΝΑ 31 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ PP + 3% CFS.....	44
ΕΙΚΟΝΑ 32 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ PP + 3% GNPs.....	44
ΕΙΚΟΝΑ 33 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΗ ΜΗΤΡΑ PLA	46
ΕΙΚΟΝΑ 34 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΗ ΜΗΤΡΑ PLA	47
ΕΙΚΟΝΑ 35 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ CPU ΜΕΣΩ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ ΝΗΜΑ PA +3%CFS.....	50
ΕΙΚΟΝΑ 36 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ CPU ΜΕΣΩ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ ΝΗΜΑ PA +3%CFS.....	51
ΕΙΚΟΝΑ 37 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ CPU ΜΕΣΩ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ ΝΗΜΑ PA +3%CNTs.....	51
ΕΙΚΟΝΑ 38 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ CPU ΜΕΣΩ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ ΝΗΜΑ PA +3% CNTs.....	52
ΕΙΚΟΝΑ 39 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ CPU ΜΕΣΩ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ ΝΗΜΑ PA +3% GNPs.....	52
ΕΙΚΟΝΑ 40 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ CPU ΜΕΣΩ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ ΝΗΜΑ PA +3% GNPs.....	53
ΕΙΚΟΝΑ 41 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ CPU ΜΕΣΩ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ ΝΗΜΑ PLA +3% CFS	53
ΕΙΚΟΝΑ 42 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ CPU ΜΕΣΩ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ ΝΗΜΑ PLA +3% CFS	54
ΕΙΚΟΝΑ 43 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ CPU ΜΕΣΩ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ ΝΗΜΑ PLA +3% CNTs	54
ΕΙΚΟΝΑ 44 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ CPU ΜΕΣΩ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ ΝΗΜΑ PLA +3% CNTs	55
ΕΙΚΟΝΑ 45 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ CPU ΜΕΣΩ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ ΝΗΜΑ PLA +3% GNPs	55
ΕΙΚΟΝΑ 46 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ CPU ΜΕΣΩ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ ΝΗΜΑ PLA +3% GNPs	56
ΕΙΚΟΝΑ 47 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ CPU ΜΕΣΩ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ ΝΗΜΑ PP +3% CFS	56
ΕΙΚΟΝΑ 48 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ CPU ΜΕΣΩ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ ΝΗΜΑ PP +3% CFS	57
ΕΙΚΟΝΑ 49 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ CPU ΜΕΣΩ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ ΝΗΜΑ PP +3% CNTs	57
ΕΙΚΟΝΑ 50 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ CPU ΜΕΣΩ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ ΝΗΜΑ PP +3% CNTs	58

ΕΙΚΟΝΑ 51 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ CPU ΜΕΣΩ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ ΝΗΜΑ PP +3% GNPs	58
ΕΙΚΟΝΑ 52 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ CPU ΜΕΣΩ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ ΝΗΜΑ PP +3% GNPs	59
ΕΙΚΟΝΑ 53 ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΚΑΘΕ ΜΙΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΤΕΛΙΚΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΑ ΕΝΝΕΑ ΝΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΗΘΗΚΑΝ	59
ΕΙΚΟΝΑ 54 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ ΝΗΜΑ PA +15% GNPs +1% CNTs.....	62
ΕΙΚΟΝΑ 55 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ ΝΗΜΑ PA +15% GNPs +1% CNTs	62
ΕΙΚΟΝΑ 56 ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΠΡΟΣΤΙΝΟ ΠΤΕΡΥΓΙΟ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ	63
ΕΙΚΟΝΑ 57 ΑΛΛΗΛΟΥΧΙΑ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ PREPREG.....	64
ΕΙΚΟΝΑ 58 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ PREPREG ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ.....	65
ΕΙΚΟΝΑ 59 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ PREPREG ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ.....	66
ΕΙΚΟΝΑ 60 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΙΑΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΕ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΘΕΡΜΟΣΚΛΗΡΥΝΟΜΕΝΟΥ PREPREG	68
ΕΙΚΟΝΑ 61 ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΠΡΟΣΤΙΝΟΥ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΕ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΘΕΡΜΟΣΚΛΗΡΥΝΟΜΕΝΟΥ PREPREG.	69
ΕΙΚΟΝΑ 62 ΚΟΣΤΟΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ⁸⁴	70
ΕΙΚΟΝΑ 63 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΚΑΙΝΟΤΟΜΟΥ ΚΑΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ CPU	71
ΕΙΚΟΝΑ 64 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΚΑΙΝΟΤΟΜΟΥ ΚΑΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΜΠΡΟΣΤΙΝΟΥ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ	71

Λίστα πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ	30
ΠΙΝΑΚΑΣ 2 ΕΓΚΛΕΙΣΜΑΤΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ.....	31
ΠΙΝΑΚΑΣ 3 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΝΗΜΑΤΩΝ	32
ΠΙΝΑΚΑΣ 4 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕΡΟΥΣ ΨΥΚΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ CPU	48
ΠΙΝΑΚΑΣ 5 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΦΥΛΛΩΝ PREPREG	64
ΠΙΝΑΚΑΣ 6 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΠΡΟΣΤΙΝΟΥ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ	67

Περίληψη

Η κλιματική αλλαγή που παρατηρείται όλο και πιο έντονα τα τελευταία χρόνια σε ολόκληρο τον πλανήτη έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ευαισθητοποίησης της ανθρωπότητας σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος. Ως απόρροια αυτής της ευαισθητοποίησης προέκυψε και η ανάγκη για τη δημιουργία μεθόδων που να μπορούν να καταγράψουν τις επιπτώσεις που έχει στο περιβάλλον η παραγωγή αγαθών και η παροχή υπηρεσιών. Μια τέτοια γενική μέθοδος περιβαλλοντικής διαχείρισης είναι η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ). Η AKZ είναι μια τεχνική εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με κάποιο προϊόν, διεργασία ή δραστηριότητα προσδιορίζοντας και ποσοτικοποιώντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της ενέργειας και των υλικών που χρησιμοποιούνται, καθώς και των αποβλήτων που απελευθερώνονται στο περιβάλλον. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα να μελετηθούν οι επιπτώσεις από τη χρήση της ενέργειας και των πρώτων υλών καθώς και των αποβλήτων και να αναγνωριστούν, να εκτιμηθούν και να προταθούν οι αλλαγές που μπορούν να επιφέρουν περιβαλλοντικές βελτιώσεις.

Η AKZ (κατά ISO) ορίζεται ως η συγκέντρωση και ο υπολογισμός των εισροών, εκροών και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός παραγωγικού συστήματος κατά

τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Με τον όρο κύκλος ζωής (κατά ISO) ορίζονται τα συνεχή και αλληλοεπιδρώμενα στάδια ενός παραγωγικού συστήματος από τη συλλογή ή τη δημιουργία των πρώτων υλών έως την τελική αποσυναρμολόγηση του τελικού προϊόντος. Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία στοχεύει στην μελέτη του κύκλου ζωής προϊόντων που παράγονται με σύνθετα υλικά.

Πιο συγκεκριμένα, στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας πραγματοποιείται η αποτίμηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού (Simapro), των διεργασιών παραγωγής σύνθετων υλικών με βάση τον άνθρακα και προϊόντων που παράγονται με χρήση αυτών. Η εκτίμηση του αποτυπώματος γίνεται τόσο ως προς την επίδραση των διεργασιών σε κατηγορίες που σχετίζονται με το περιβάλλον, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας και η μείωση του στρώματος του όζοντος, αλλά και ως προς την επίδραση σε κατηγορίες που σχετίζονται με την ανθρώπινη υγεία όπως η παραγωγή καρκινογόνων ουσιών. Επιπλέον, γίνεται εκτίμηση του κόστους του κύκλου ζωής (KKZ) των τελικών προϊόντων που μελετήθηκαν και παρασκευάζονται με τα σύνθετα υλικά. Η εκτίμηση του KKZ των μελετώμενων προϊόντων συνδυάζεται με τα αποτελέσματα για τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο που προέκυψαν από την AKZ στα πλαίσια μιας ολιστικής προσέγγισης που στόχο έχει να συμβάλει στην ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας και την προώθηση της αειφόρου ανάπτυξης. Βάσει των αποτελεσμάτων πραγματοποιούνται συγκεκριμένες προτάσεις για αλλαγή, αντικατάσταση ή μείωση των κοστοβόρων ή ρυπογόνων υλικών που χρησιμοποιούνται στις διεργασίες με απώτερο σκοπό τη βελτίωση τόσο του περιβαλλοντικού όσο και του οικονομικού αντίκτυπου.

Abstract

The Climate change that has been increasingly occurring in recent years around the world led to an increment in awareness of environmental protection. As a result of this awareness arose the need to create methods that can record the impact of the production processes on the environment. One such method is the Life Cycle Assessment (LCA). LCA is a technique for assessing the environmental impact cause by a specific procedure and quantifying the environmental footprint of each part of it. In this way, it is possible to study the effect of the production procedure and propose changes that can lead to more environmental friendly procedures.

This postgraduate thesis aims to study the life cycle of carbon-based composite materials and products that are produced using these composite materials. Specifically, an evaluation of the environmental footprint of the production of carbon-based composite nanomaterials has been occurred and It has been defined in which way and how much they affect both the environment and human health, using appropriate software (Simapro).

Additionally, the life cycle costing (LCC) of these innovative products has been conducted and the economic consequences of their production are commented along with the environmental cost, in the context of a holistic approach that aims at promoting the ideas of circular economy and sustainable development. Based on the

Abstract

obtained results, specific suggestions are made with the goal of improving both the environmental and economic impact of composite material production.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

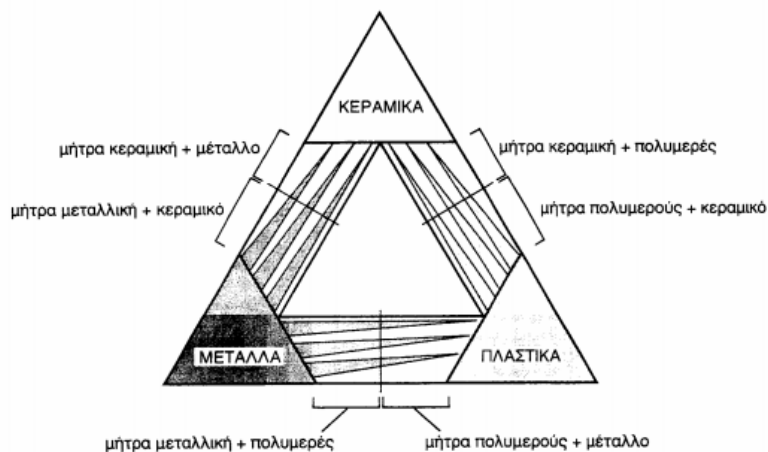
1. Σύνθετα υλικά

Ένα σύνθετο υλικό κατασκευάζεται συνδυάζοντας δύο ή περισσότερα υλικά τα οποία συχνά έχουν πολύ διαφορετικές ιδιότητες, σύνθεση και μορφή.^{1,2} Τα δύο υλικά “συνεργάζονται” για να δώσουν νέες μοναδικές ιδιότητες στο σύνθετο υλικό που δημιουργείται από την ένωσή τους. Μέσα στο σύνθετο υλικό τα δύο αρχικά υλικά μπορούν να εντοπιστούν και να ξεχωριστούν καθώς δεν διαλύονται ή δεν αναμειγνύονται μεταξύ τους.

Φυσικά σύνθετα υλικά υπάρχουν τόσο σε ζωικούς όσο και σε φυτικούς οργανισμούς.² Χαρακτηριστικά παραδείγματα φυσικών σύνθετων υλικών αποτελούν τα οστά και το ξύλο τα οποία είναι αποτέλεσμα της ένωσης υδροξιαπατίτη με κολλαγόνο και κυτταρίνης με λιγνίτη αντίστοιχα.³ Έκτος από τα φυσικά σύνθετα υλικά που μπορούν να βρεθούν στην φύση υπάρχει και μία πληθώρα τεχνικών συνθετών υλικών. Η παραγωγή σύνθετων υλικών έχει κάνει την εμφάνισή της πριν από χιλιάδες χρόνια, ένα πρώιμο παράδειγμα σύνθετου υλικού που παρασκευάστηκε από τον άνθρωπο με σκοπό την επίτευξη νέων ιδιοτήτων είναι τα τούβλα με λάσπη και άχυρα. Στις μέρες μας η συνεχόμενη και αυξανόμενη ανάγκη για οικονομικά υλικά με συγκεκριμένες ιδιότητες έχουν οδηγήσει σε αύξηση του αριθμού των

ερευνητικών ομάδων που μελετούν τα σύνθετα υλικά και σχεδιάζουν την παραγωγή νέων.

Η παρασκευή σύνθετων υλικών τις περισσότερες φορές πραγματοποιείται με την συμβολή δύο μόνο υλικών. Το ένα είναι η συνεχής μήτρα ή το συνδετικό υλικό μέσα στο οποίο υπάρχει διάσπαρτο το δεύτερο υλικό με τη μορφή σωματιδίων ή ινών, το οποίο ονομάζεται οπλισμός.⁴ Στην Εικόνα 1 παρουσιάζονται οι δυαδικοί συνδυασμοί των βασικών οικογενειών υλικών που μπορούν να δώσουν σύνθετα υλικά. Η μήτρα σε ένα σύνθετο υλικό είναι υπεύθυνη για την συγκράτηση του ενισχυτικού υλικού και για την προστασία του από το περιβάλλον που θα μπορούσε να του προκαλέσει φθορές. Επιπλέον, η μήτρα μεταβιβάζει τις μηχανικές τάσεις που δέχεται το σύνθετο υλικό προς τον οπλισμό αλλά και σταματά την διάδοσή των ρωγμών που μπορούν να προκύψουν από αστοχία του οπλισμού (π.χ. θραύση ινών). Για να μπορεί να επιτελέσει τον ρόλο της η μήτρα θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ολκιμότητα, ανθεκτικότητα, σχετική ευκαμψία και αρκούντος υψηλό σημείο τήξης που να μην περιορίζει την χρήση του σύνθετου υλικού σε εφαρμογές με χαμηλή θερμοκρασία. Τέλος, είναι εύκολο να καταλάβει κανείς πως οι ιδιότητες της μήτρας πρέπει να είναι συμβατές με τις ιδιότητες του οπλισμού για την δημιουργία ενός σύνθετου υλικού ενώ καθοριστικός παράγοντας για την σωστή λειτουργία του είναι η καλή πρόσφυση οπλισμού – μήτρας.^{5,6}

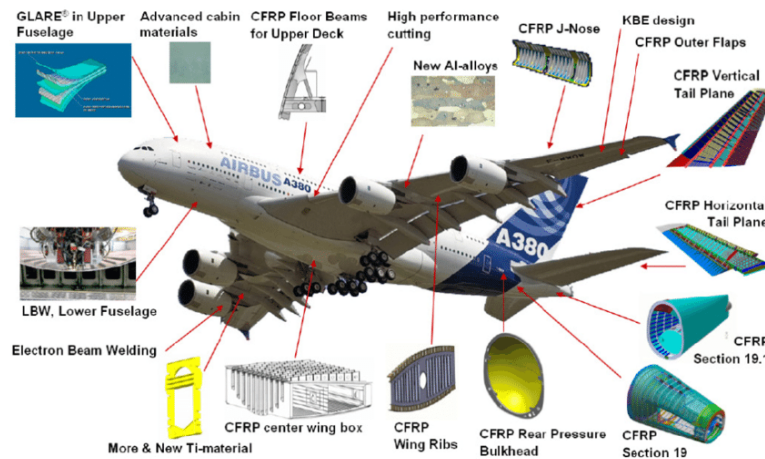


Εικόνα 1 Κατηγορίες σύνθετων υλικών που προκύπτουν από τους συνδυασμούς των βασικών οικογενειών υλικών.⁷

Ένα από τα πρώτα σύγχρονα σύνθετα υλικά ήταν το υαλόνημα (fiberglass) και είναι ακόμα και σήμερα ευρέως χρησιμοποιούμενο για την κατασκευή τμημάτων των αεροσκαφών, αθλητικού εξοπλισμού, πάνελ κτιρίων και σωμάτων αυτοκινήτων.⁸⁻¹⁰ Το συνδετικό υλικό είναι πολυμερές και το ενισχυτικό μέσο είναι λεπτά νήματα γυαλιού που συχνά είναι πλεγμένα σε ένα είδος υφάσματος. Το γυαλί παρουσιάζει αυξημένες μηχανικές αντοχές σε θλίψη, αλλά είναι εύθραυστο και σπάει αν κυρτωθεί απότομα.¹¹ Η πολυμερική μήτρα συγκρατεί μαζί τις ίνες γυαλιού και τις προστατεύει κατανέμοντας τις δυνάμεις που δρουν πάνω τους.¹² Στις μέρες μας αρκετά προηγμένα σύνθετα υλικά κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας ίνες άνθρακα αντί για ίνες γυαλιού.¹³ Αυτά τα υλικά είναι ελαφρύτερα και ισχυρότερα αλλά η παραγωγή τους κοστίζει πολύ περισσότερο. Επίσης, τα νανοϋλικά με βάση τον άνθρακα είναι ένα άλλο ενισχυτικό υλικό που έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για τη δημιουργία νέων σύνθετων υλικών.¹⁴ Αυτά τα υλικά είναι ακόμη ελαφρύτερα και ισχυρότερα από τα σύνθετα υλικά που κατασκευάζονται με συνηθισμένες ίνες άνθρακα.¹⁴

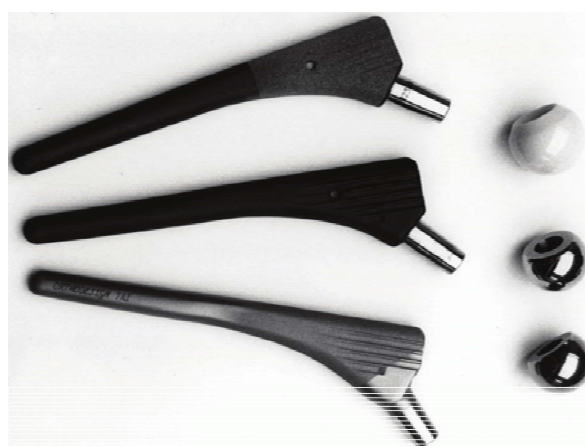
Ένας σημαντικός τομέας εφαρμογής των σύνθετων υλικών είναι η χρήση τους στην αυτοκινητοβιομηχανία¹⁵ και στη βιομηχανία κατασκευής αεροσκαφών. Η χρήση τέτοιων υλικών παρέχει τη δυνατότητα για την κατασκευή ελαφρότερων αυτοκινήτων και αεροσκαφών τα οποία μειώνουν σημαντικά την κατανάλωση καυσίμων. Το νέο Airbus A380, το μεγαλύτερο αεροπλάνο επιβατών παγκοσμίως, χρησιμοποιεί σύγχρονα σύνθετα υλικά στο σχεδιασμό του (Εικόνα 2).

Περισσότερο από το 20% του A380 είναι κατασκευασμένο από σύνθετα υλικά, κυρίως πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των σύγχρονων σύνθετων υλικών είναι ότι είναι ελαφριά και ισχυρά.¹⁶ Επιλέγοντας τον κατάλληλο συνδυασμό μήτρας και ενισχυτικού υλικού, μπορεί να κατασκευαστεί ένα νέο υλικό που να πληροί ακριβώς τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής για την οποία κατασκευάζεται.^{17,18}



Εικόνα 2 Τμήματα του αεροσκάφους που έχουν κατασκευαστεί με χρήση σύνθετων υλικών.¹⁹

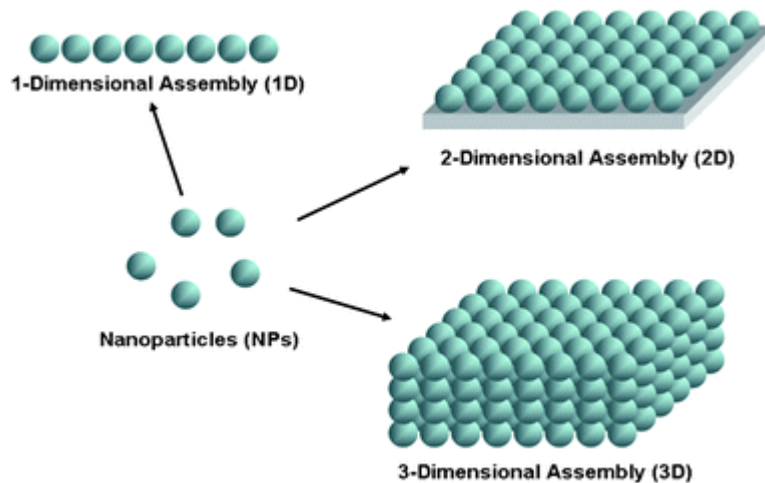
Εκτός από τις προαναφερθέντες βιομηχανίες, τα σύνθετα υλικά βρίσκουν άλλον ένα τομέα εφαρμογής στην ιατρική όπου χρησιμοποιούνται ως βιοσυμβατά υλικά για την δημιουργία προσθετικών μελών για την αντικατάσταση τμημάτων του ανθρώπινου οργανισμού (Εικόνα 3) που έχουν φθαρεί είτε από φυσικά αίτια είτε από ατυχήματα όπως οι αρθρώσεις, οι κλειδώσεις, οι τένοντες, σύνδεσμοι, δόντια κ.α..²⁰ Τα σύνθετα υλικά παρέχουν επίσης ευελιξία σχεδιασμού επειδή πολλά από αυτά μπορούν να χυτευθούν σε πολύπλοκα σχήματα. Το σημαντικότερο μειονέκτημα των σύνθετων υλικών είναι το γεγονός ότι οι πρώτες ύλες αλλά και οι αντίστοιχες διεργασίες είναι συχνά δαπανηρές και ενεργοβόρες οδηγώντας έτσι σε υψηλό κόστος και περιβαλλοντικό αποτύπωμα.



Εικόνα 3 Προσθετικά ισχίου από σύνθετα υλικά.²¹

2. Νανοσύνθετα Υλικά

Όταν τουλάχιστον ένα από τα εγκλείσματα που αποτελούν τον οπλισμό του σύνθετου υλικού βρίσκεται στην περιοχή διαστάσεων της νανοκλίμακας τότε το υλικό χαρακτηρίζεται ως νανοσύνθετο.^{22,23} Τα νανοσύνθετα μπορούν να έχουν οποιαδήποτε από τους συνδυασμούς μήτρας οπλισμού που αναφέρθηκαν νωρίτερα. Τα νανοεγκλείσματα χαρακτηρίζονται ως μηδενικής διάστασης 0D όταν είναι σε μορφή κόκκου και όλες οι διαστάσεις τους στη νανοκλίμακα (νανοσωματίδια), μίας διάστασης 1D όταν μία διάσταση δεν είναι στη νανοκλίμακα (νανοσωλήνες), δύο διαστάσεων 2D όταν δύο διαστάσεις δεν είναι στη νανοκλίμακα (λεπτά υμένα) και τριών διαστάσεων 3D σε περιπτώσεις πολυστρωματικών δομών.^{24,25}

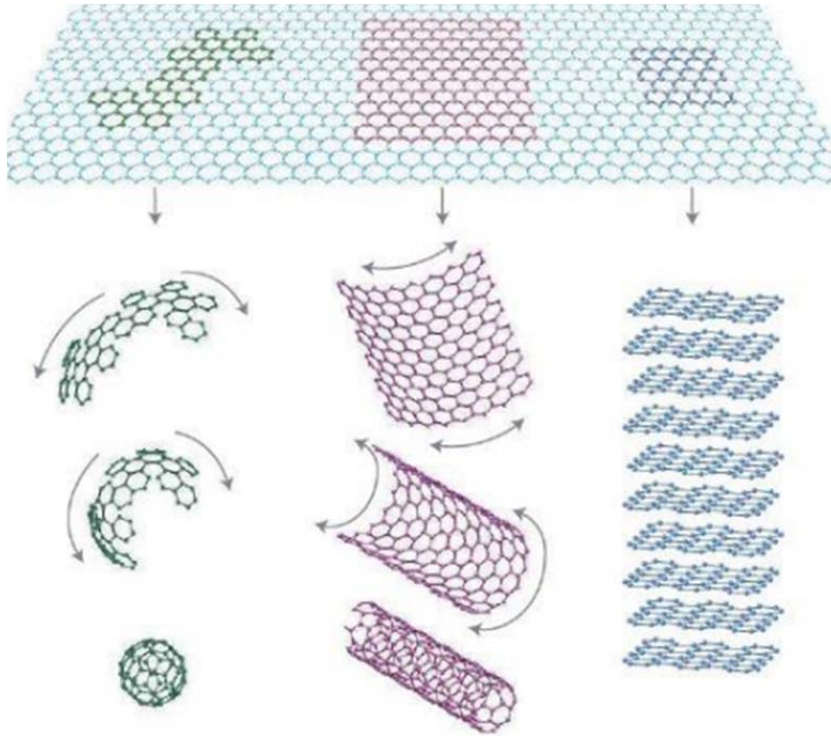


Εικόνα 4 Χαρακτηρισμός εγκλεισμάτων βάσει διαστάσεων

Στα νανοσύνθετα υλικά συχνά μικρές αλλαγές στην ποσότητα του εγκλείσματος μπορούν να επιφέρουν μεγάλες αλλαγές στις ιδιότητες.^{26,27} Αυτό οφείλεται στη μεγάλη τιμή του λόγου της διεπιφάνειας ως προς τον όγκο ή το βάρος του εγκλείσματος και είναι μία σημαντική διαφοροποίηση των νανοσύνθετων υλικών από τα συμβατικά σύνθετα, ωστόσο για την επίτευξη των ιδιοτήτων είναι κρίσιμο να εξασφαλιστεί ομοιογενής διασπορά των εγκλεισμάτων στην μήτρα.²⁸

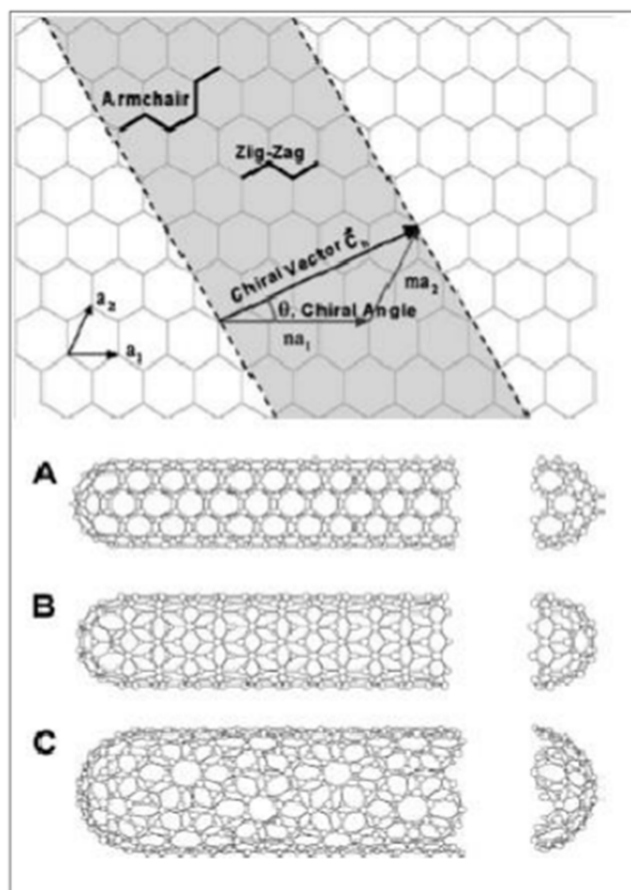
Τα νανοϋλικά αναλόγως την φύση τους μπορούν να διαχωριστούν σε αρκετές κατηγορίες όπως οργανικά, μεταλλικά ή με βάση των άνθρακα. Ειδικά για την τελευταία κατηγορία τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα νανοεγκλείσματα για την παραγωγή σύνθετων υλικών είναι οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs), το πολυστρωματικό γραφένιο και το φουλερένιο. Όλα τα νανοεγκλείσματα που αναφέρθηκαν έχουν ως δομικό υλικό το γραφένιο²⁹ το οποίο είναι μία κρυσταλλική

αλλοτροπική μορφή του άνθρακα και είναι το λεπτότερο και ισχυρότερο υλικό που υπάρχει σήμερα.



Εικόνα 5 Διδιάστατη δομή γραφενίου και δομές που προκύπτουν από αυτή²⁹

Οι νανοσωλήνες άνθρακα είναι ομόκεντροι κύλινδροι πλέγματός γραφενίου, μπορούν να είναι πολυφλοιϊκοί³⁰ (MWCNTs) ή μονοφλοιϊκοί³¹ (SWCNTs) ανάλογα με τον αριθμό των ομόκεντρων κυλίνδρων από τους οποίους αποτελούνται ενώ επιπλέον διαφοροποιούνται και σύμφωνα με τον τρόπο τύλιξης του πλέγματος γραφίτη για τον σχηματισμό του νανοσωλήνα σε τρεις κατηγορίες armchair, zigzag και chiral³² όπως φαίνεται στην Εικόνα 6. Η δομή των ομόκεντρων κυλίνδρων συνήθως κλείνει στο ένα από τα δύο άκρα τους με ημισφαίρια της δομής του φουλερένιου. Οι CNTs μπορούν να παρασκευαστούν σχετικά εύκολα μέσω μεθόδων όπως η χημική εναπόθεση ατμών³³ ή η εξάχνωση με δέσμη laser.³⁴ Ο συνδυασμός των ιδιοτήτων των CNTs τους καθιστά ιδανικό υλικό για τον οπλισμό σύνθετων υλικών που μπορεί να βελτιώσει τη μηχανική αντοχή, την θερμική και την ηλεκτρική αγωγιμότητα των τελικών σύνθετων υλικών.³⁵



Εικόνα 6 Σχηματική αναπαράσταση τύλιξης διδιάστατης δομής γραφενίου για τον σχηματισμό CNTs A) Armchair B) Zigzag C) Chiral³²

Τα πολυστρωματικά γραφένια ή graphene nanoplatelets (GNPs) προκύπτουν από την σύνδεση δύο ή περισσότερων μονοστρωματικών δομών γραφενίου. Η παρασκευή GNPs μπορεί να πραγματοποιηθεί με μηχανική αποφλοιώση,³⁶ χημική εναπόθεση ατμών³⁷ και θερμική αποσύνθεση σε υπόστρωμα καρβιδίου του πυριτίου.³⁸ Το πολυστρωματικό γραφένιο εμφανίζει υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα ενώ παρουσιάζει δυσκαμψία και αντοχή σε θραύση.^{37,39} Άλλο ένα χαρακτηριστικό των GNPs είναι η χημική ευστάθεια. Οι προαναφερθείσες ιδιότητες σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα GNPs παρασκευάζονται εύκολα και με χαμηλό κόστος τα καθιστά κατάλληλα για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών μέσω της χρήσης τους για την παρασκευή σύνθετων υλικών.

3. Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ)

Η ανάλυση του κύκλου ζωής είναι ένα εργαλείο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση όλων των περιβαλλοντικών συνεπειών που σχετίζονται με ολόκληρη τη διάρκεια της «ζωής» ενός προϊόντος.⁴⁰ Ειδικότερα η AKZ στοχεύει

αρχικά στην αναζήτηση και την πλήρη καταγραφή του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μίας διεργασίας ώστε να μπορέσει να ποσοτικοποιηθεί η περιβαλλοντική υποβάθμιση που προκαλείται από την παραγωγή του. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να μπορούν να συγκεντρωθούν πληροφορίες για όλα τα στάδια της παραγωγής του προϊόντος από τη δημιουργία του όπως για παράδειγμα οι πρώτες ύλες και η εξόρυξη αυτών ή ο τρόπος παραγωγής της ενέργειας που χρησιμοποιείται κατά την παραγωγή του προϊόντος, μέχρι και την «ταφή» του ή αλλιώς την τελική απόθεση του χρησιμοποιημένου πλέον προϊόντος.^{41,42} Αυτός ο τρόπος μελέτης του κύκλου ζωής αναφέρεται συχνά στην διεθνή βιβλιογραφία ως “cradle-to-grave”^{43,44} ενώ τα τελευταία χρόνια ή ανάγκη για τη δημιουργία προϊόντων των οποίων τα υλικά θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν μετά το τέλος της ζωής των προϊόντων για την δημιουργία διαφορετικών αλλά νέων προϊόντων έχει οδηγήσει στην δημιουργία ενός διαφορετικού τρόπου μελέτης του κύκλου ζωής που αναφέρεται ως “cradle to cradle”.^{41,42,45} Ο νέος αυτός τρόπος μελέτης προέκυψε υπό την πίεση του προβλήματος της κλιματικής αλλαγής και στο γενικότερο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας που αντιτίθεται στην απόρριψη και εστιάζει στην επαναχρησιμοποίηση των υλικών σε συνεχή βρόχο.⁴⁶ Τέλος ένας τρίτος τρόπος μελέτης που μπορεί να επιλεγεί για την AKZ είναι αυτή που αναφέρεται ως cradle-to-gate, σύμφωνα με αυτόν τον τρόπο λαμβάνονται υπόψη οι απαιτήσεις σε ενέργεια και πρώτες ύλες που απαιτούνται για την παραγωγική διεργασία μέχρι το προϊόν να είναι έτοιμο προς διανομή από την τόπο παραγωγής του.

Μέσω της συγκεντρωτικής καταγραφής της παραγωγικής διαδικασίας και της AKZ αυτής μπορεί να επιτευχθεί ο εντοπισμός επιμέρους διαδικασιών (εξαγωγή πρώτων υλών ενέργεια κ.α) που προκαλούν την σοβαρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση (hot spots). Ο εντοπισμός αυτός είναι καθοριστικής σημασίας για τον οικολογικό σχεδιασμό της διεργασίας (eco design). Συγκεκριμένα, η παραγωγική διεργασία μπορεί να επανασχεδιαστεί αντικαθιστώντας τα τμήματα της διεργασίας ή τις πρώτες ύλες που αποτελούν τα hot spots με άλλα που μειώνουν ή ελαχιστοποιούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Υπάρχουν πολλά διαθέσιμα λογισμικά στην αγορά (SimaPro, Gabi, OpenLCA) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την AKZ, στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής μελέτης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο SimaPro 8.0.4.26. Κάθε λογισμικό έχει ενσωματωμένη την βιβλιοθήκη των διαφόρων υλικών/χημικών κτλ., την οποία ο χρήστης μπορεί να εμπλουτίζει στηριζόμενος είτε σε δεδομένα της

βιβλιογραφίας είτε σε δεδομένα που προέρχονται από την παραγωγική διαδικασία του κάθε υλικού ή προϊόντος.

Η καταγραφή όλων των λεπτομερειών που απαιτούνται για τη σωστή και τεκμηριωμένη προσθήκη ενός νέου υλικού, μίας διαδικασίας ή ενός προϊόντος (inventory) και κατ' επέκταση η μελέτη της AKZ του απαιτεί ενδελεχή μελέτη και έρευνα και αρκετά πειραματικά δεδομένα τα οποία αν δεν είναι διαθέσιμα, σχετικές παραδοχές λαμβάνουν χώρα αυξάνοντας την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων.

Λογισμικά όπως το SimaPro μπορούν να αποδειχτούν χρήσιμα εργαλεία σε μελέτες σύγκρισης καινοτόμων προϊόντων και διεργασιών με αντίστοιχες συμβατικές ως προς την εκτίμηση του περιβαλλοντικού τους κόστους. Από τέτοιες μελέτες μπορούν να προκύψουν συγκριτικά αποτελέσματα για τις επιπτώσεις στο περιβάλλον αλλά και για τους κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία. Επιπλέον, με την χρήση των προαναφερθέντων λογισμικών είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί συγκριτική μελέτη του κόστους του κύκλου ζωής προϊόντων.^{47,48}

Εξαιρετικά σημαντικό ρόλο για την μελέτη της AKZ αλλά και του ΚΚΚ παίζει η σωστή επιλογή της βάσης σύγκρισης η οποία αναφέρεται ως λειτουργική μονάδα, ωστόσο κι η επιλογή της λειτουργικής μονάδας μπορεί να επηρεαστεί από την διαθεσιμότητα των δεδομένων της παραγωγικής διαδικασίας.

Υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα από την μελέτη AKZ και ΚΚΖ μίας παραγωγικής διαδικασίας. Η εξέταση ολόκληρου του κύκλου ζωής ενός προϊόντος μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στην πιο αποτελεσματική και εστιασμένη χρήση των πρώτων υλών και της ενέργειας που συνεπάγεται και ταυτόχρονη μείωση τόσο του οικονομικού όσο και του περιβαλλοντικού κόστους. Εκτός από τα οικονομικά οφέλη η AKZ προσφέρει σχεδιαστικά οφέλη καθώς μπορεί να συμβάλει στο να προσδιοριστούν τα πλεονεκτήματα από ενδεχόμενες αλλαγές της παραγωγικής διαδικασίας πριν αυτές να εφαρμοστούν συμβάλλοντας έτσι στην αειφόρο ανάπτυξη αλλά και στην κυκλική οικονομία. Η AKZ μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιπλέον ως επιστημονικό εργαλείο επιβεβαίωσης της υπεροχής ενός προϊόντος έναντι σε ένα άλλο με σκοπό την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας.

Παρόλα αυτά, είναι πολύ σημαντικό να ληφθούν υπόψη οι αβεβαιότητες της μεθοδολογίας που αφορούν κυρίως στην ποιότητα των δεδομένων, στην ορθότητα του μοντέλου, καθώς και στον τυχόν ελλιπή χαρακτήρα του.^{41,49}

Παρά το γεγονός πως οι ενσωματωμένες βιβλιοθήκες δεδομένων των λογισμικών όπως το SimaPro είναι αρκετά ενημερωμένες και καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος

υλικών και παραγωγικών διεργασιών υπάρχουν κατηγορίες νέων προηγμένων υλικών και διεργασιών που δεν καλύπτονται. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα νανοϋλικά και τα σύνθετα υλικά. Το κενό αυτό μπορεί να καλυφτεί μέσω της απογραφής του κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory, LCI) αυτών των υλικών ή διεργασιών.

Τέλος, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την AKZ βοηθούν στην μείωση εκπομπών που συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή ή ακόμα και να αποτελέσουν την βάση για την διαμόρφωση νέων περιβαλλοντικών νόμων που αφορούν νέα υλικά όπως για παράδειγμα τα σύνθετα υλικά με νανοϋλικά. Συμπερασματικά, η AKZ προσφέρει την δυνατότητα να επιλεγθούν οι διεργασίες μέσω των οποίων μπορούν να παραχθούν ποιοτικά ανώτερα προϊόντα με λιγότερους πόρους και μειωμένες εκπομπές.

Κεφάλαιο 2

Μεθοδολογία

Η ανάλυση του κύκλου ζωής και της παραγωγικής διαδικασίας ενός προϊόντος είναι μια απαιτητική διαδικασία και προϋποθέτει την οργανωμένη και στοχευόμενη χρήση υπολογιστικών μεθόδων και εργαλείων. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν οι βασικές αρχές και η μεθοδολογία στην οποία βασίζεται η AKZ.⁵⁰ Στην συνέχεια περιγράφεται το μεθοδολογικό πλαίσιο στο οποίο βασίστηκε η υπολογιστική μελέτη του κύκλου ζωής των συνθετών υλικών με βάση τον άνθρακα και των προϊόντων που προκύπτουν με την χρήση αυτών.

1. Γενική προσέγγιση της μεθοδολογίας της AKZ

Η μελέτη της AKZ είναι ένα εργαλείο που στοχεύει στην καταγραφή των αλληλεπιδράσεων μεταξύ δραστηριοτήτων και περιβάλλοντος ώστε να κατανοηθούν οι περιβαλλοντικές συνέπειες και να ληφθούν οι κατάλληλες αποφάσεις στο πλαίσιο της αειφόρου ανάπτυξης. Το εργαλείο αυτό σύμφωνα με τον Οργανισμό Περιβαλλοντικής Τοξικολογίας και Χημείας (Society of Environmental Toxicology and Chemistry - SETAC)⁵¹ ορίζεται ως: «μια τεχνική εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που συνδέονται με κάποιο προϊόν, διεργασία ή δραστηριότητα προσδιορίζοντας και ποσοτικοποιώντας την ενέργεια και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα απόβλητα που απελευθερώνονται στο περιβάλλον, εκτιμώντας τις επιπτώσεις από τη χρήση ενέργειας και υλικών καθώς και από τη χρήση των αποβλήτων, αναγνωρίζοντας και εκτιμώντας τις δυνατότητες

περιβαλλοντικών βελτιώσεων». ⁵¹ Η ανάλυση περιλαμβάνει ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος, της διεργασίας ή της δραστηριότητας (Εικόνα 7): εξαγωγή και επεξεργασία των πρώτων υλών, κατασκευή, συσκευασία, μεταφορά και διανομή, χρήση, επαναχρησιμοποίηση, συντήρηση, ανακύκλωση και τελική απόρριψη.

Κατά καιρούς έχουν υπάρξει τέσσερα πρότυπα του διεθνούς οργανισμού τυποποίησης ISO που αναφέρουν την AKZ σαν εργαλείο περιβαλλοντικής διαχείρισης και περιγράφουν τα στάδια που απαιτούνται για μία ολοκληρωμένη AKZ. ⁵² Από το 2006 και έπειτα έχουν συμπυκωθεί στο ISO 14040:2006 (Environmental management – Life cycle assessment Principles and framework). ⁵³ Συγκεκριμένα το ISO 14040:2006 περιλαμβάνει τα αποσυρμένα πρότυπα:

- ISO14041:Καθορισμός στόχου, πεδίου εφαρμογής και ανάλυση απογραφής (Goal and Scope definition and Inventory analysis).
- ISO 14042: Αξιολόγηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (Life Cycle Impact Assessment).
- ISO 14043: Ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Interpretation).

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αναλύονται τα επί μέρους τμήματα που αποτελούν το μεθοδολογικό πλαίσιο της AKZ.

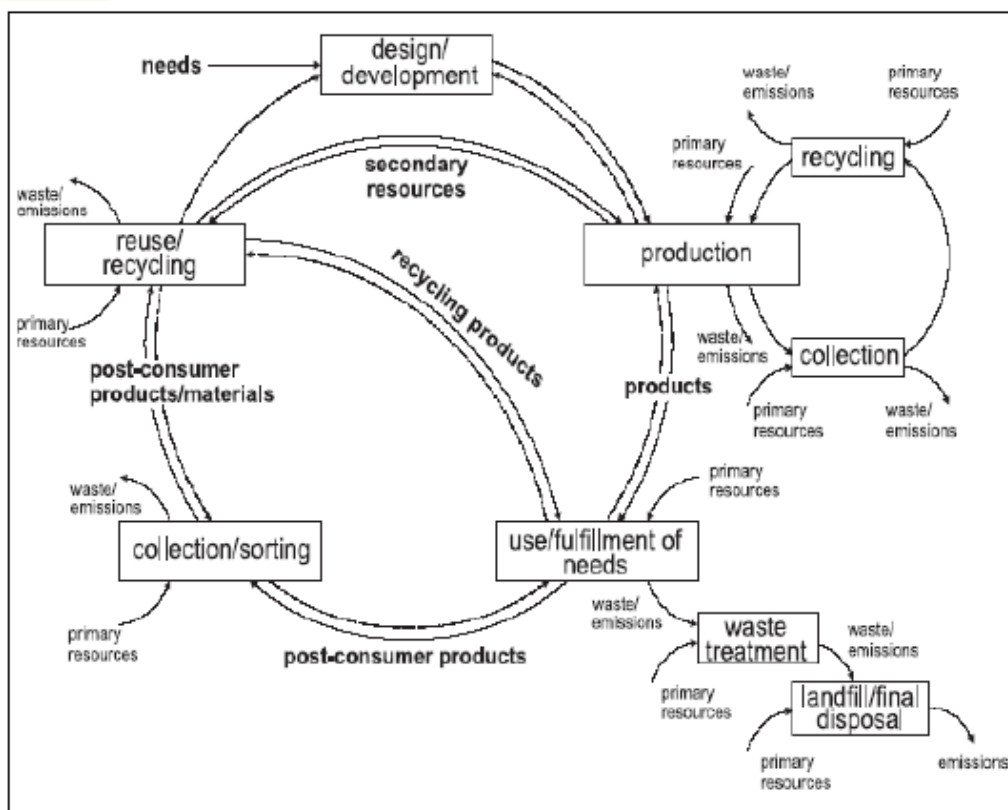


Εικόνα 7 Στάδια κύκλου ζωής

2. Καθορισμός του σκοπού και του αντικειμένου της μελέτης

Πριν από την έναρξη μίας μελέτης AKZ χρειάζεται να προσδιοριστούν με σαφήνεια ο σκοπός και το αντικείμενο της μελέτης αυτής: θα πρέπει δηλαδή να απαντηθούν τα ερωτήματα γιατί κάνουμε αυτή τη μελέτη, τι είδους πληροφορίες στοχεύουμε να αποκτήσουμε από αυτήν και που πρόκειται να χρησιμοποιήσουμε αυτές τις πληροφορίες.

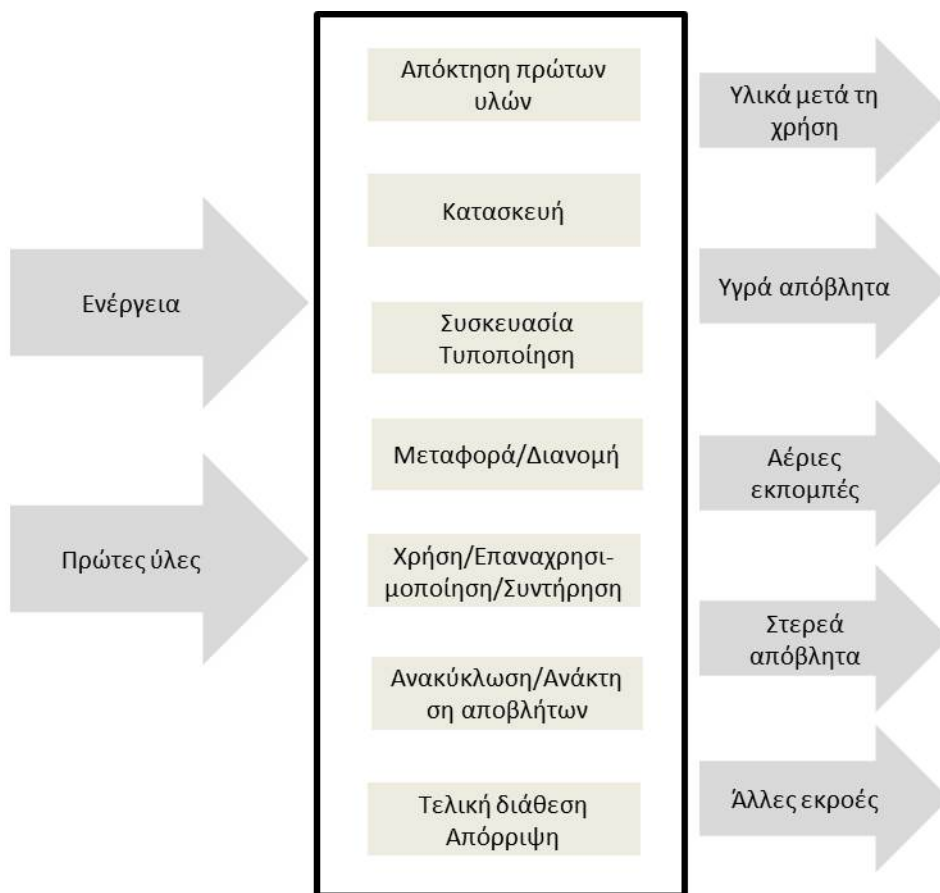
Για τον ολοκληρωμένο προσδιορισμό του αντικειμένου της μελέτης θα πρέπει να καθοριστούν με σαφήνεια τα όρια του συστήματος που θα μελετηθεί καθώς αυτά μπορούν διευρυνθούν πολύ όπως φαίνεται στην Εικόνα 8. Το σύστημα ορίζεται ως ένα σύνολο διεργασιών. Η κάθε διεργασία του συστήματος συνδέεται με τη χρήση ύλης και ενέργειας (π.χ. διεργασία κατασκευής, διεργασία μεταφοράς, διεργασία εξόρυξης καυσίμων). Το σύστημα αυτό έχει κάποια όρια που το διαχωρίζουν από άλλες διεργασίες εκτός του συστήματος. Η περιοχή έξω από τα όρια του συστήματος είναι γνωστή ως «περιβάλλον του συστήματος», ένα παράδειγμα οριοθέτησης συστήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 9. Εκτός από την οριοθέτηση του συστήματος χρειάζεται να προσδιοριστούν τα απαιτούμενα δεδομένα για την μελέτη, οι παραδοχές που πρέπει να γίνουν και οι περιορισμοί που πιθανόν να επιβάλλονται από το ίδιο το προς μελέτη σύστημα.^{54,55} Επιπλέον, χρειάζεται να υπάρχουν ξεκάθαρα γεωγραφικά και χρονικά όρια μέσα στα οποία θα περιοριστεί η μελέτη AKZ και να εκτιμάται η χωροχρονική μεταβλητότητα όλων των χρησιμοποιούμενων μεγεθών εντός αυτών των ορίων.⁴¹



Εικόνα 8 Κύκλος ζωής ενός προϊόντος⁵⁶

Ο σκοπός της μελέτης εξαρτάται από τον λόγο για τον οποίο πραγματοποιείται αυτή η μελέτη ενώ προσδιορίζεται ακόμη περισσότερο όταν καταστεί σαφές το πόσο

λεπτομερής ή αλλιώς σε πόσο βάθος επιδιώκεται να φτάσει η μελέτη ΑΚΖ. Για παράδειγμα, σε μία μελέτη μπορεί να γίνει η παραδοχή πως οι πρώτες ύλες είναι διαθέσιμες στον χώρο παραγωγής του τελικού προϊόντος ή να γίνει λεπτομερή καταγραφή των αποστάσεων και του τρόπου μεταφοράς τους στον τόπο παραγωγής ώστε να συνυπολογιστεί το αποτύπωμα της μεταφοράς. Άλλο ένα σημαντικό στοιχείο για τον καθορισμό του στόχου μίας μελέτης ΑΚΖ είναι το είδος των αποφάσεων το οποίο θα κληθεί κανείς να πάρει έχοντας γνώση των αποτελεσμάτων. Έτσι θα είναι εντελώς διαφορετικός ο σκοπός μιας μελέτης που πραγματοποιείται για εσωτερική χρήση των αποτελεσμάτων εντός μιας εταιρείας ή οργανισμού σε σχέση με μία άλλη που θα πραγματοποιηθεί για «εξωτερική» χρήση όπως λόγου χάριν μια ΑΚΖ για την δημόσια υγεία.



Εικόνα 9 Καθορισμός ορίων συστήματος⁵⁷

Στην παρούσα μεταπτυχιακή σκοπός είναι να μελετηθεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγικής διεργασίας προϊόντων με σύνθετα υλικά που έχουν ως βάση τον άνθρακα για να μπορέσουν να συγκριθούν με παρόμοια συμβατικά προϊόντα αλλά και να προταθούν οι κατάλληλες παρεμβάσεις για παραγωγή τελικών

προϊόντων με μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε αφορά μόνο την διεργασία παραγωγής των υλικών και όχι ολόκληρο τον κύκλο ζωής όπως φαίνεται στη Εικόνα 9 που παρουσιάζονται τα όρια του υπό μελέτη συστήματος.

3. Απογραφή κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory) και εκτίμηση της ποιότητας των δεδομένων.

Όταν έχουν πλέον προσδιοριστεί ο στόχος και τα όρια του υπό μελέτη συστήματος, ακολουθεί το επόμενο στάδιο της μελέτης που αφορά όλες τις διεργασίες που περιλαμβάνονται εντός των ορίων του εξεταζόμενου συστήματος και εμπεριέχουν την άμεση ή/και έμμεση χρήση ενέργειας ή/και μάζας από αυτές. Τα στάδια αυτά είναι η απογραφή του κύκλου ζωής και η εκτίμηση της ποιότητας των δεδομένων. Η απογραφή του Κύκλου ζωής είναι η μεθοδολογία που ακολουθείτε για να πραγματοποιηθεί μία αρχική εκτίμηση των πρώτων υλών, της ενέργειας καθώς και οι ποσότητες των απορριμμάτων και των εκπομπών που προκαλούνται από τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος. Μέσω αυτής της μεθοδολογίας πραγματοποιείται μια καταγραφή ενός μοντέλου του μελετώμενου συστήματος στο οποίο παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τον κύκλο ζωής συνδεδεμένες με μία συγκεκριμένη ποσότητα παραγωγής μέσω της λειτουργικής μονάδας που θα αναλυθεί αργότερα.

Για μία πλήρη μελέτη AKZ με καταγραφή όλων των αποτυπωμάτων και των συνεπειών από την εξαγωγή των πρώτων υλών μέχρι την τελική απόθεση των χρησιμοποιημένων προϊόντων (ή όποιο άλλο όριο έχει τεθεί για την μελέτη) ενός προϊόντος απαιτείται πλήθος δεδομένων η συλλογή των οποίων συχνά απαιτεί χρόνο και κόστος. Συχνά για να περιοριστεί το κόστος κατηγοριοποιούνται τα δεδομένα ή γίνονται οι ανάλογες απλοποιήσεις/παραδοχές έτσι ώστε να διευκολυνθεί η συλλογή των δεδομένων χωρίς να χαθεί η αξιοπιστία της μελέτης.^{50,58} Σε κάθε περίπτωση όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος των δεδομένων που αφορά τους πόρους, τις πρώτες ύλες και την ενέργεια που χρειάζεται να διατεθούν για την παραγωγή ενός προϊόντος, τις εκπομπές ρύπων, καθώς και τα απόβλητα που προκύπτουν από την παραγωγική διαδικασία και την πιθανή ανακύκλωση κάποιων υλικών τόσο πιο αξιόπιστη η μελέτη. Κατ ελάχιστο η απογραφή των δεδομένων θα πρέπει να πληροί τα ακόλουθα κριτήρια.⁵⁸

- τα δεδομένα θα πρέπει να είναι ποσοτικά και οι ενδεχόμενες παραδοχές για αυτά και τη μεθοδολογία συλλογής τους να προσδιορίζονται λεπτομερώς.
- Οι πηγές πληροφοριών να είναι καταγεγραμμένες και να υπάρχει επαναληψιμότητα στην καταγραφή της διαδικασίας.
- Τα δεδομένα θα πρέπει να είναι περιεκτικά. Όλες οι σημαντικές ροές μάζας και ενέργειας θα πρέπει να καταγράφονται, ενώ θα πρέπει να αναφέρονται ρητά οι περιπτώσεις έλλειψης δεδομένων και οι αιτίες τους.
- Τα δεδομένα θα πρέπει να έχουν χρησιμότητα. Οι χρήστες της μελέτης LCA θα πρέπει να μπορούν να λάβουν κατάλληλες αποφάσεις βασισμένοι στα αποτελέσματα της απογραφής.

Η διασφάλιση της ποιοτικής συλλογής των δεδομένων είναι καθοριστική για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της ΑΚΖ. Η ποιότητα των δεδομένων μπορεί να επηρεαστεί από τα παρακάτω:⁵⁸

- την πηγή των δεδομένων,
- τη μέθοδο συλλογής,
- τον τρόπο παραγωγής τους,
- το κόστος και τον χρόνο συλλογής

Οι πηγές μπορούν να είναι είτε πρωτογενείς αν τα δεδομένα συλλέγονται στον τόπο παραγωγής του προϊόντος από το προσωπικό που το παράγει μέσω απευθείας μετρήσεων, είτε δευτερογενείς αν προέρχονται από βιβλιογραφικές αναφορές. Ο τρόπος συλλογής μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το αν χρησιμοποιούνται σταθερά, κανονικοποιημένα ή μικτά δεδομένα και από το αν λαμβάνονται μέσες τιμές.⁵⁹ Επίσης σημαντικό είναι το αν τα δεδομένα λαμβάνονται με ακριβείς μετρήσεις, με εκτιμήσεις δειγμάτων ή με χρήση μοντέλων. Τέλος, η ποιότητα των δεδομένων εξαρτάται από τον χρόνο και κατ' επέκταση από την προσπάθεια που καταβάλλεται για την συλλογή τους.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την παρούσα μεταπτυχιακή μελέτη προέκυψαν τόσο από πρωτογενή όσο και δευτερογενή δεδομένα. Για την συλλογή των πρωτογενών δεδομένων έγινε χρήση του ερωτηματολογίου που παρουσιάζεται στη Εικόνα 10 και τις περισσότερες περιπτώσεις οι τιμές των δεδομένων αφορούν ακριβείς μετρήσεις. Τα ερωτηματολόγια περιλαμβάνουν ερωτήσεις αναφορικά με την προέλευση των απαραίτητων πρώτων υλών, την διεργασία παραγωγής των τελικών

προϊόντων την ενέργεια που καταναλώνεται, τις εκπομπές στο περιβάλλον που προκύπτουν από την διεργασία και την ανακύκλωση υλικών.

Life Cycle Assessment – LCA questionnaire

General information

Organisation name	
Simple description of your product manufacturing process	
Product / Case study	
Functional unit (*1)	
Annual capacity	
Process 1 (i.e. material production)	
Process 2 (i.e. packaging process)	
Process 3 (i.e. other)	

Part A. Raw materials						
Material name	Product Functional Unit (same value as at *1)	Quantity	Unit	Transportation mode (i.e. air, pipe, van)	Distance	Comment (if any)
Packaging materials	Product Functional Unit (same value as at *1)	Quantity	Unit	Transportation mode (i.e. air, pipe, van)	Distance	Comment (if any)

Part B. Energy				
Source	Product Functional Unit (same value as at *1)	Quantity	Unit	Comment (if any)

Part C. Emission(s)				
Name	Product Functional Unit (same value as at *1)	Quantity	Unit	Comment (if any)

Part D. Waste(s)						
Waste stream (i.e. hazardous, non-hazardous, toxic)	Product Functional Unit (same value as at *1)	Quantity	Unit	Transportation mode (i.e. air, pipe, van)	Distance	Comment (if any)

Part E. Recycling					
Material Recycled	Quantity	Unit	Transportation mode (i.e. air, pipe, van)	Distance	Comment (if any)

Please describe us your recycling route

Εικόνα 10 Ερωτηματολόγια συλλογής δεδομένων

4. Αξιολόγηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (Life Cycle Impact Assessment)

Εφόσον τεθούν τα όρια και ο σκοπός της μελέτης και ολοκληρωθεί η απογραφή των δεδομένων πρέπει να απαντηθούν τα ερωτήματα πώς μπορούν να συνδεθούν τα δεδομένα που συλλέχθηκαν με τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις και πώς

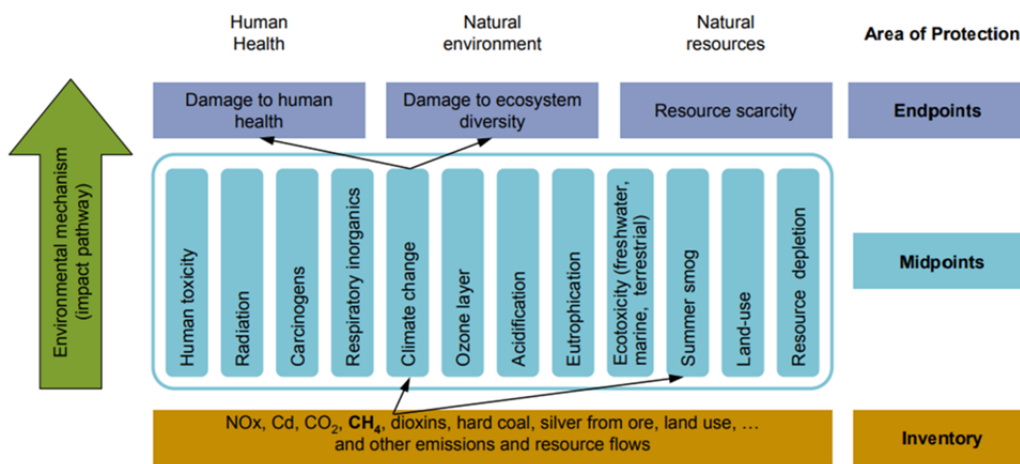
μπορούμε να συγκρίνουμε τις διαφορετικές επιπτώσεις. Το στάδιο αυτό είναι η αξιολόγηση επιπτώσεων κύκλου ζωής (Life Cycle Impact Assessment-LCIA) και αποτελεί την βάση για να αναλύσει κανείς της περιβαλλοντικές επιπτώσεις μίας διεργασίας. Για τον σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες εκτίμησης των επιπτώσεων (Impact Assessment Methods) οι οποίες χρησιμοποιούνται από τους μελετητές χωρίς αυτό να σημαίνει πως ο κάθε μελετητής δεν μπορεί να αναπτύξει την δική του μεθοδολογία αν αυτό κριθεί σκόπιμο. Η επιλογή της μεθόδου και των κατηγοριών επιπτώσεων που θα επιλεγεί για κάθε μελέτη εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τον στόχο και το πλαίσιο της μελέτης, που έχουν επιλεγεί.⁶⁰

Μέσω της LCIA προκύπτει ως αποτέλεσμα η εκτίμηση του κύκλου ζωής ενός προϊόντος με βάση μία λειτουργική μονάδα σε δείκτες διάφορων κατηγοριών επιπτώσεων ή κατηγοριών επίδρασης (Impact category). Οι κατηγορίες αυτές αντιπροσωπεύουν ένα σύνολο από ανησυχητικά περιβαλλοντικά ζητήματα στα οποία αντιστοιχίζονται τα LCI αποτελέσματα. Όλα τα τμήματα των διεργασιών παραγωγής συνδέονται με μία δεδομένη κατηγορία επιπτώσεων μέσω του καλούμενου περιβαλλοντικού μηχανισμού αυτής της κατηγορίας. Μέσα σε αυτόν τον περιβαλλοντικό μηχανισμό μπορούμε να ξεχωρίσουμε τους ακόλουθους όρους:

- Περιβαλλοντικές παρεμβάσεις, όπως εξορύξεις, χρήσεις γης ή εκπομπές στο περιβάλλον, καλούνται επίσης «βασικές ροές» ή «περιβαλλοντικές εισροές και εκροές».
- Ενδιάμεσες κατηγορίες (midpoint categories): μεταβλητές στον περιβαλλοντικό μηχανισμό ανάμεσα στις περιβαλλοντικές παρεμβάσεις και τις τελικές κατηγορίες, όπως η τοξικότητα, η καρκινογένεση ή η κλιματική αλλαγή.
- Τελικές κατηγορίες ή κατηγορίες βλαβών (endpoint/damage categories): μεταβλητές άμεσης κοινωνικής ανησυχίας, όπως η ανθρώπινη διάρκεια ζωής, ή η εξάντληση των φυσικών πόρων κ.ά. Το επίπεδο των τελικών σημείων καλείται επίσης «επίπεδο βλαβών».
- Περιοχές προστασίας (areas of protection): κατηγορίες τελικών σημείων που έχουν αναγνωρίσιμη αξία για την κοινωνία όπως η ανθρώπινη υγεία, το φυσικό περιβάλλον και οι φυσικοί πόροι.

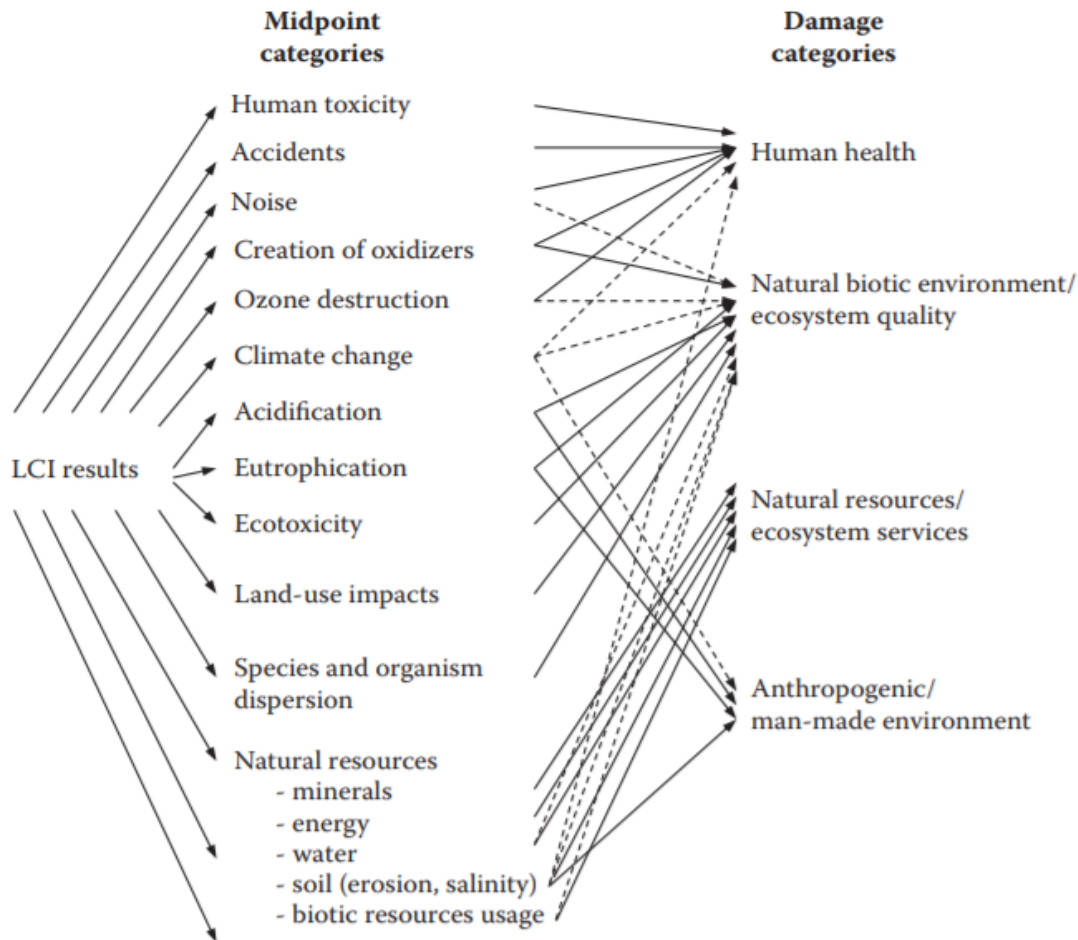
Η αξιολόγηση των επιδράσεων του κύκλου ζωής μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην αναγνώριση ευκαιριών βελτίωσης των διεργασιών, στο χαρακτηρισμό ή στη συγκριτική αξιολόγηση ενός προϊόντος ή μίας παραγωγικής διεργασίας στη διάρκεια

του χρόνου, στην πραγματοποίηση σχετικών συγκρίσεων ανάμεσα στα συστήματα προϊόντων βασισμένες σε επιλεγμένες κατηγορίες δεικτών, στην αναγνώριση περιβαλλοντικών ζητημάτων για τα οποία άλλες τεχνικές μπορούν να παρέχουν επιπλέον περιβαλλοντικά στοιχεία και πληροφορίες χρήσιμες στους αποφασίζοντες. Επομένως, οι μέθοδοι αξιολόγησης επιπτώσεων κύκλου ζωής στοχεύουν στη σύνδεση – όσο είναι δυνατό κι επιθυμητό – κάθε αποτελέσματος της καταγραφής του κύκλου ζωής (LCI) με τις αντίστοιχες περιβαλλοντικές επιδράσεις. Στην Εικόνα 11 παρουσιάζεται η διαδικασία ενός τυπικού περιβαλλοντικού μηχανισμού, για την επιλογή των κατάλληλων κατηγοριών επιπτώσεων με τη βοήθεια των αποκαλούμενων τελικών σημείων (Endpoints), που θα πρέπει να εκλαμβάνονται ως ζητήματα περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος.⁶¹



Εικόνα 11 Εκτίμηση επιπτώσεων του κύκλου ζωής. Σχηματικά βήματα από την απογραφή ως τα τελικά σημεία.

Η μεθοδολογία που επιλέχθηκε για την περιγραφή του περιβαλλοντικού μηχανισμού στην παρούσα μελέτη είναι η IMPACT 2002+⁶² η οποία επιτρέπει στον μελετητή να επιλέξει να σταματήσει στο επίπεδο του midpoint ή να φτάσει μέχρι το τελικό συγκεντρωτικό αποτύπωμα. Μία γενική απεικόνιση του μεθοδολογικού πλαισίου της μεθόδου παρουσιάζεται στην Εικόνα 12. Το στάδιο της μελέτης του κύκλου ζωής ενός προϊόντος κατά το οποίο προετοιμάζεται το μοντέλο σύμφωνα με το οποίο θα γίνει η σύνδεση των εισροών και των εκροών ονομάζεται απογραφή του κύκλου ζωής (LCI) ενώ όταν πια είναι πλέον κατανοητή η συνάφεια και η σύνδεση τους η μελέτη περνάει στο επόμενο της στάδιο το οποίο είναι γνωστό ως εκτίμηση επιπτώσεων κύκλου ζωής (LCIA).



Εικόνα 12 Γενική δομή του μεθοδολογικού πλαισίου IMPACT 2002+ για την εκτίμηση αποτυπωμάτων. Τα διακεκομμένα βέλη αντιπροσωπεύουν μετατροπές από το ένα επίπεδο στο άλλο.⁶³

5. Λειτουργική μονάδα μελέτης (Functional unit)

Η λειτουργική μονάδα είναι μία σημαντικότερη παράμετρος που πρέπει να ρυθμιστεί εξ αρχής και μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τα δεδομένα που συλλέγονται είναι η λειτουργική μονάδα στην οποία θα βασιστεί η μελέτη.

Η λειτουργική μονάδα είναι ένα από τα βασικότερα στοιχεία της ΑΚΖ και πρέπει να καθοριστεί με σαφήνεια από την αρχή. Επιπλέον, ο ορισμός της ίδια λειτουργικής μονάδας στη μελέτη της ΑΚΖ δυο διαφορετικών συστημάτων είναι αυτός που επιτρέπει τη σύγκρισή τους. Ο ορισμός μιας λειτουργικής μονάδας θα μπορούσε να είναι από απλός μέχρι αρκετά σαφής.

Για παράδειγμα, η λειτουργική μονάδα σε μία μονάδα παρασκευής προϊόντων θα μπορούσε να είναι το ένα τεμάχιο ή τα χίλια τεμάχια παραγόμενων προϊόντων αλλά

επίσης θα μπορούσε να έχει επιλεγεί ως λειτουργική μονάδα ο ένας τόνος παραγόμενων προϊόντων ή η συνολική παραγωγή σε διάστημα μίας ημέρας. Η επιλογή της λειτουργικής μονάδας εξαρτάται από το σκοπό της συνολικής. Αξίζει να σημειωθεί πως η σωστή επιλογή της λειτουργικής μονάδας επηρεάζει τη χρησιμότητα των αποτελεσμάτων κι αν επιλεγθεί σωστά, τότε τα αποτελέσματα εκτός από άμεσα συγκρίσιμα θα έχουν και πρακτική εφαρμογή.⁶⁴ Για παράδειγμα για την AKZ ενός υλικού επίστρωσης αντί για την επιλογή του ενός λίτρου υλικού ως λειτουργική μονάδα θα μπορούσε να επιλεγθεί η ποσότητα του υλικού που χρειάζεται για να καλυφθεί με μία στρώση συγκεκριμένου πάχους μία επιφάνεια συγκεκριμένου εμβαδού ή η ποσότητα του ίδιου υλικού που απαιτείται για να αποκτήσει η επιφάνεια μία ιδιότητα (π.χ. στεγανωτικά υλικά)

6. Απεικόνιση, εκτίμηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Το τελικό στάδιο μίας μελέτης AKZ αφορά στην παρουσίαση και σύγκριση των αποτελεσμάτων της μελέτης ώστε να ληφθούν οι ανάλογες αποφάσεις. Η υλοποίηση αυτού του σταδίου σύμφωνα με το ISO 14040:2006 πραγματοποιείται μέσα από την εφαρμογή των φάσεων της κατηγοριοποίησης (Classification), του χαρακτηρισμού (Characterization), της κανονικοποίησης (Normalization) και της στάθμισης (Weighting).⁵³ Σε κάθε περίπτωση η επιλογή των περιβαλλοντικών αποτυπωμάτων που θα μελετηθούν, οι μεθοδολογία, το περιβαλλοντικό πλαίσιο και το επίπεδο της εμβάθυνσης της μελέτης εξαρτώνται από τον σκοπό και το αντικείμενό της.

Κατηγοριοποίηση

Με την κατηγοριοποίηση πραγματοποιείται η αντιστοίχιση των δεδομένων των εισροών και των εκροών της απογραφής στις διάφορες κατηγορίες επιπτώσεων. Η ταξινόμηση των δεδομένων της απογραφής στις πιθανές περιβαλλοντικές επιδράσεις γίνεται μέσω των κατηγοριών επίδρασης. Είναι πιθανό κάποια δεδομένα να συμβάλλουν σε διαφορετικές κατηγορίες επίδρασης και συνεπώς αναφέρονται δύο φορές. Η διπλή καταγραφή είναι αποδεκτή αν οι επιδράσεις είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Αν υπάρχει αλληλεξάρτηση μεταξύ των επιδράσεων, τότε η διπλή αντιστοίχιση οδηγεί σε διπλό υπολογισμό.⁶⁵

Χαρακτηρισμός

Το δεύτερο στάδιο είναι ο χαρακτηρισμός των δεδομένων απογραφής. Σε αυτό το στάδιο ανάλογα με την ταξινόμηση που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο στάδιο

τα δεδομένα απογραφής ποσοτικοποιούνται και αθροίζονται ανά κατηγορία αποτυπώματος. Ο σκοπός του χαρακτηρισμού είναι να μοντελοποιηθούν οι κατηγορίες σε δείκτες και, αν είναι δυνατόν, να δοθεί μία βάση για τη σύνθεση των δεδομένων των εισροών και εκροών μέσα σε μία κατηγορία. Αυτό γίνεται με τη μορφή ενός δείκτη που αντιπροσωπεύει μια συνολική αλλαγή ή την επιβάρυνση σε αυτή την κατηγορία. Το αποτέλεσμα του χαρακτηρισμού είναι ότι ο συνδυασμός των δεικτών μιας κατηγορίας αναπαριστά την αρχική επιβάρυνση και το προφίλ της μείωσης πόρων.⁶⁶

Κανονικοποίηση

Κατά το στάδιο της κανονικοποίησης προσδιορίζεται η έκταση κατά την οποία μία συγκεκριμένη κατηγορία αποτυπώματος συμβάλει στο γενικότερο περιβαλλοντικό πρόβλημα. Σύμφωνα με το ISO 14040:2006 συμβάλει στον υπολογισμό του μεγέθους των αποτελεσμάτων των δεικτών κατηγοριών σε σχέση με κάποια βάση.⁵³ Η κανονικοποίηση εξυπηρετεί δύο σκοπούς, αφενός εντοπίζονται οι κατηγορίες που συμβάλλουν μόνο σε πολύ μικρό ποσοστό σε σύγκριση με άλλες και παραμένουν εκτός μελέτης και αφετέρου τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα δείχνουν τη σοβαρότητα των περιβαλλοντικών προβλημάτων που παράγονται από τον κύκλο ζωής των προϊόντων, σε σύγκριση με τα συνολικά περιβαλλοντικά φορτία σε μία περιοχή.

Στάθμιση

Η στάθμιση είναι το τελευταίο στάδιο της LCIA κατά το οποίο σταθμίζονται οι κατηγορίες επίδρασης μεταξύ τους καθιστώντας έτσι εφικτή μία άμεση σύγκριση μεταξύ τους. Από την σύγκριση αυτή υποδεικνύονται ποιοι είναι οι βασικότεροι παράγοντες περιβαλλοντικής υποβάθμισης που προκαλούνται από την παραγωγική διαδικασία του συστήματος και πόσο συνεισφέρει σε αυτό κάθε μία από της ροές εισόδου (πρώτες ύλες και ενέργεια).

Κατά την σύγκριση των τελικών αποτελεσμάτων του περιβαλλοντικού αντίκτυπου που έχει κάθε διεργασία στις διάφορες επιμέρους κατηγορίες σπάνια προκύπτει ως αποτέλεσμα πως μεταξύ των συγκρινόμενων διεργασιών υπάρχει μία που να υπερέχει σε όλες τις κατηγορίες έναντι των άλλων. Η συχνότερη κατάσταση είναι αυτή κατά την οποία παρατηρούνται διακυμάνσεις μεταξύ των θετικών και των αρνητικών αποτελεσμάτων για κάθε διεργασία. Οι τελικές αποφάσεις παίρνονται μετά από την μελέτη και την ερμηνεία των τελικών αποτελεσμάτων σε όλες τις κατηγορίες

λαμβάνοντας υπόψιν μία σειρά από παράγοντες που ορίζουν την ιεράρχηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.⁵⁷

Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Τα τελικά αποτελέσματα από την εκτίμηση του κύκλου ζωής θα πρέπει να βασίζονται σε μία σύνδεση όλως των δεδομένων, των υποθέσεων και των αποτελεσμάτων σε συνδυασμό με τους σκοπούς και τους στόχους της μελέτης. Στην ουσία διεξάγεται μια σειρά ελέγχων που πρέπει να γίνουν προκειμένου να διαπιστωθεί αν τα συμπεράσματα από τη μελέτη που πρόκειται να γίνει, υποστηρίζονται επαρκώς από τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται και από τις διαδικασίες που εκτελούνται. Οι αβεβαιότητες που μπορεί να προκύψουν αφορούν κυρίως στην ποιότητα των δεδομένων, στην ορθότητα του μοντέλου, καθώς και στον τυχόν ελλιπή χαρακτήρα του.^{41,49} Τα αποτελέσματα της ανάλυσης χρησιμοποιούνται ως βάση για τη λήψη αποφάσεων που θα ωφελήσουν τόσο τη βιομηχανία όσο και το περιβάλλον.

7. Κόστος κύκλου ζωής (KKZ)

Το κόστος του κύκλου ζωής (KKZ) είναι το άθροισμα όλων των δαπανών που προκύπτουν καθ' όλη τη διάρκεια ζωής ενός στοιχείου, δηλαδή το σύνολο των δαπανών προμήθειας και ιδιοκτησίας. Με άλλα λόγια, δηλώνει το άθροισμα του κόστους αγοράς, εγκατάστασης, λειτουργίας, συντήρησης και πιθανής αντικατάστασης ή απόρριψης του αντικειμένου κατά τη διάρκεια της ζωής του. Η ανάλυση κόστους κύκλου ζωής είναι μία τεχνική που επιτρέπει την πραγματοποίηση συγκριτικών αξιολογήσεων κόστους σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους σχετικούς οικονομικούς συντελεστές, τόσο από άποψης αρχικού κόστους κεφαλαίου, όσο και από το μελλοντικό κόστος λειτουργίας. Το KKZ σχετίζεται άμεσα με τη βιωσιμότητα καθώς η οικονομία είναι μία από τις τρεις διαστάσεις της μαζί με το περιβάλλον και την κοινωνική διάσταση. Το περιβαλλοντικό KKZ είναι πλήρως συμβατό με την AKZ και επιτρέπει την αξιολόγηση του κόστους των διεργασιών παραγωγής προϊόντων.⁶⁶

Μία σημαντική πρακτική πλευρά από την άποψη των χρηστών είναι ότι τα περιβαλλοντικά φιλικά προϊόντα, όπως αναγνωρίζονται και ποσοτικοποιούνται από την AKZ, έχουν συχνά υψηλότερα κόστη αγοράς, αλλά συνήθως εμφανίζονται να είναι φθηνότερα αν ληφθούν υπόψη το στάδιο της χρήσης και/ή του τέλους της ζωής

τους (end-of-life phase). Άρα, το περιβαλλοντικό ΚΚΖ μπορεί να βοηθήσει τους καταναλωτές να λαμβάνουν υπεύθυνες αποφάσεις, και τους παραγωγούς και τους εμπόρους να επισημάνουν το χρηματοοικονομικό πλεονέκτημα της αγοράς ενός περιβαλλοντικά προτιμητέου προϊόντος.⁶⁷

Κεφάλαιο 3

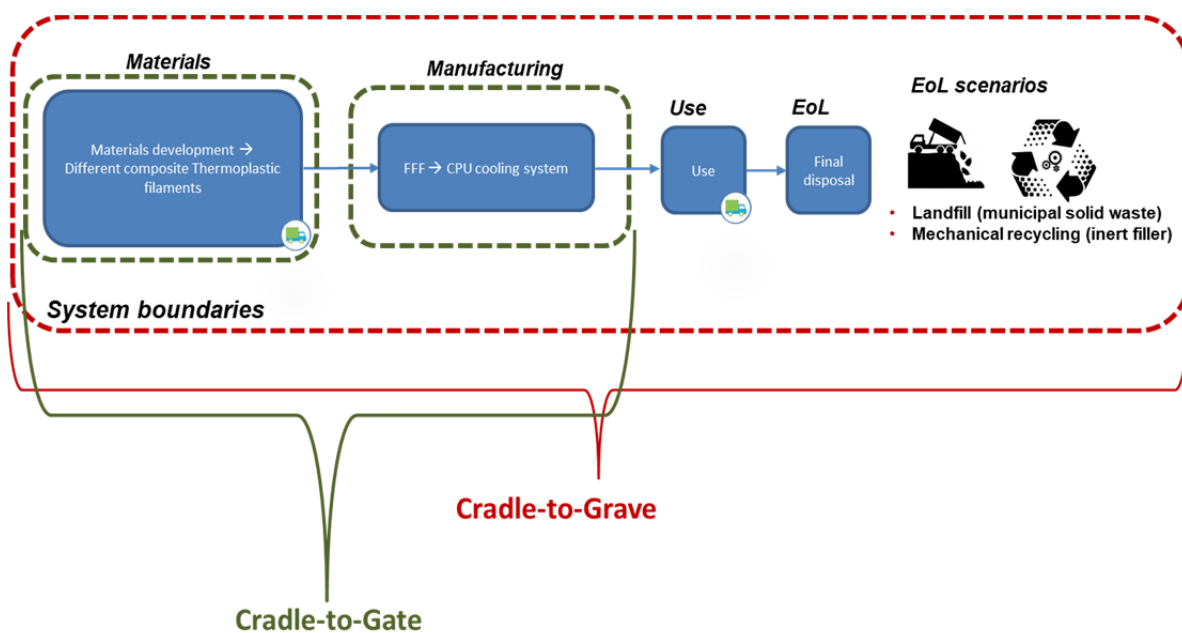
Αποτελέσματα και συζήτηση

Παρουσίαση και συσχέτιση διεργασιών

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται όλες οι διεργασίες που μελετήθηκαν σε αυτήν την μεταπτυχιακή εργασία και τα αποτελέσματα της AKZ για αυτές. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι μελέτες της AKZ για την παραγωγή μέρους συστήματος ψύξης CPU μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιεί νήμα σύνθετου υλικού θερμοπλαστικής μήτρας ενισχυμένο με νανοϋλικά και την παραγωγή ενός πτερυγίου αγωνιστικού αυτοκινήτου που προέκυψε με τεχνολογία συμπίεσης θερμοσκληρυνόμενου prepreg.

1. Σύστημα ψύξης CPU

Η AKZ, για την παραγωγή μέρους του συστήματος ψύξης CPU που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, εστίασε στο τμήμα cradle-to-gate του κύκλου ζωής και τα επιμέρους τμήματα της μελέτης παρουσιάζονται στην Εικόνα 13 αναλύονται στη συνέχεια.



Εικόνα 13 Όρια του συστήματος για την μελέτη του κύκλου ζωής για το σύστημα ψύξης CPU

Ανάπτυξη των υλικών

Όλα τα σύνθετα υλικά που μελετήθηκαν κατά τη διάρκεια της μεταπτυχιακής εργασίας αποτελούνταν από πολυμερική μήτρα. Συγκεκριμένα, τα πολυμερή που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυγαλακτικό οξύ (PLA), και το πολυαμίδιο (PA). Δεδομένου πως τα πολυμερή που χρησιμοποιήθηκαν είναι από τα πλέον χρησιμοποιούμενα, στη βιβλιοθήκη του SimaPro ήταν διαθέσιμα περισσότερα από ένα inventories για το κάθε ένα. Στον Πίνακα 1 παρατίθενται τα πολυμερή και τα αντίστοιχα inventories που επιλέχθηκαν για την μελέτη.

Πίνακας 1 Πολυμερικές μήτρες

Πολυμερή	Inventories βιβλιοθήκης SimaPro
πολυπροπυλένιο (PP)	Polypropylene granulate
πολυγαλακτικό οξύ (PLA)	Poly lactide granulate
πολυαμίδιο (PA)	Nylon 6

Τα εγκλείσματα που χρησιμοποιήθηκαν ως ενισχυτικά για την παραγωγή των σύνθετων υλικών στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία ήταν οι ίνες άνθρακα⁶⁸⁻⁷⁰ (CFs), οι νανοσωλήνες άνθρακα^{71,72} (CNTs) και τα γραφίτικα νανο-φυλλίδια⁷³ (GNPs). Σε αντίθεση με τα πολυμερή, τα νανοϋλικά δεν περιλαμβάνονται στη βιβλιοθήκη του λογισμικού SimaPro και θα πρέπει να οριστούν. Για να μπορέσουν

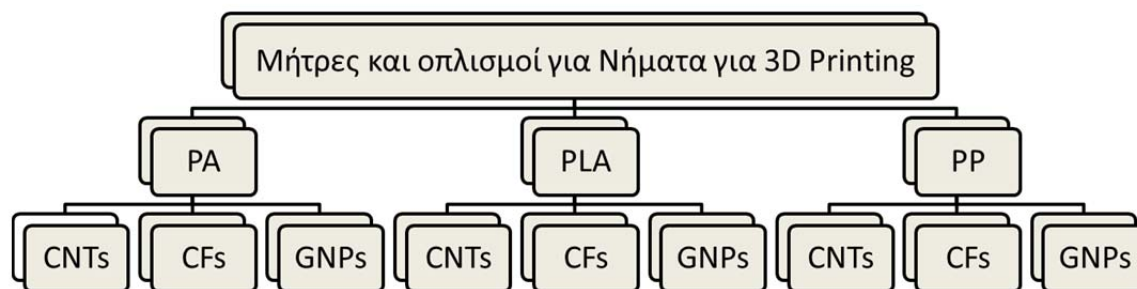
να δημιουργηθούν τα ανάλογα inventories στο λογισμικό και να εκτιμηθούν τα περιβαλλοντικά αποτυπώματα τους έγινε χρήση πρωτογενών δεδομένων για την παραγωγή των νανοϋλικών. Οι πληροφορίες που απαιτούνται για τις ίνες άνθρακα συλλέχθηκαν σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία.⁶⁸⁻⁷⁰ Με αυτά τα δεδομένα δημιουργήθηκαν τρία διαφορετικά inventories για την αλληλουχία των διεργασιών που απαιτείται για την παράγωγή των ινών άνθρακα. Δεδομένου πως οι διεργασίες που περιγράφονται στη βιβλιογραφία⁶⁸⁻⁷⁰ αφορούν παραγωγή ινών άνθρακα που πραγματοποιείται στον Καναδά για την ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή τους επιλέχθηκε το ανάλογο inventory από την βιβλιοθήκη του SimaPro. Με τη χρήση των ερωτηματολογίων δημιουργήθηκαν τα ανάλογα inventories για την παραγωγή των CNTs και GNPs στα οποία για την κατανάλωση ενέργειας χρησιμοποιήθηκε η παραγωγή ενέργειας στην Ελλάδα. Τα inventories για την παραγωγή ενέργειας στις δύο χώρες στη βιβλιοθήκη του SimaPro έχουν σημαντικές διαφορές, η παραγωγή μίας kWh Ελληνικής ενέργειας δίνει μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό την ενέργειας που παράγεται στη χώρα μας προέρχεται από καύση λιγνίτη⁷⁴ ενώ αντίθετα για την παραγωγή ενέργειας στον Καναδά μεγάλο ποσοστό παράγεται από ανανεώσιμες πηγές και από πυρηνικούς αντιδραστήρες.⁷⁵ Οι διαφορές αυτές αποτυπώνονται στα αντίστοιχα inventories για την παραγωγή ενέργειας που είναι διαθέσιμα στην βιβλιοθήκη του Simapro.

Πίνακας 2 Εγκλείσματα που χρησιμοποιήθηκαν

Νανοϋλικά	Πηγή δεδομένων
Ίνες άνθρακα (CFs),	68-70
Νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs)	Εργαστηριακή διεργασία ΕΜΠ
Γραφίτικα νανο-φυλλίδια (GNPs)	Εργαστηριακή διεργασία ΕΜΠ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία η μελέτη βασίστηκε στα δεδομένα για τη διεργασία παρασκευής ενισχυμένων θερμοπλαστικών νημάτων για χρήση σε τριδιάστατη εκτύπωση σύμφωνα με βιομηχανική διεργασία. Η διεργασία αυτή αφορά την ανάπτυξη σύνθετων υλικών θερμοπλαστικής μήτρας ενισχυμένα με νανοσωματίδια, με χρήση εκβολέα διπλού κοχλία. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα σημαντικότερα δεδομένα για τη διεργασία βάσει των οποίων δημιουργήθηκαν τα

inventories για όλους τους συνδυασμούς μήτρας και οπλισμού που παρουσιάζονται στην Εικόνα 14 και θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια.



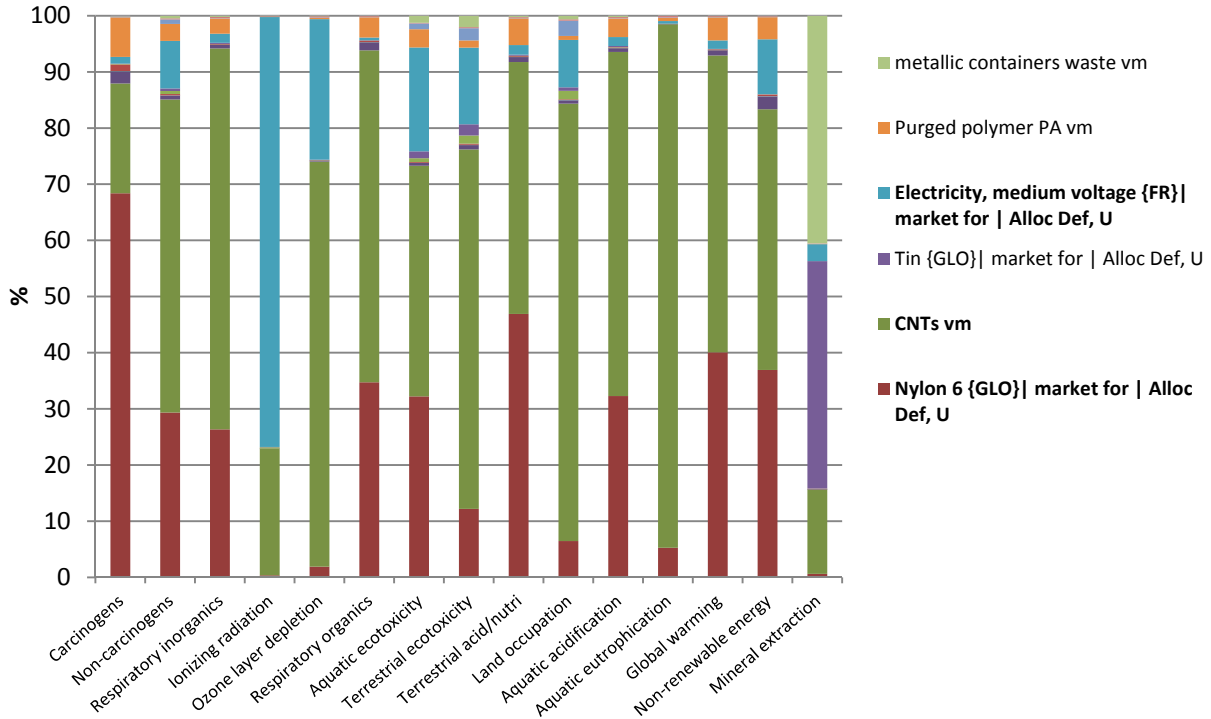
Εικόνα 14 Συνδυασμοί πολυμερικών μητρών και ενισχυτικών νανοϋλικών για την παραγωγή νημάτων.

Πίνακας 3 Δεδομένα διεργασίας παρασκευής ενισχυμένων θερμοπλαστικών νημάτων

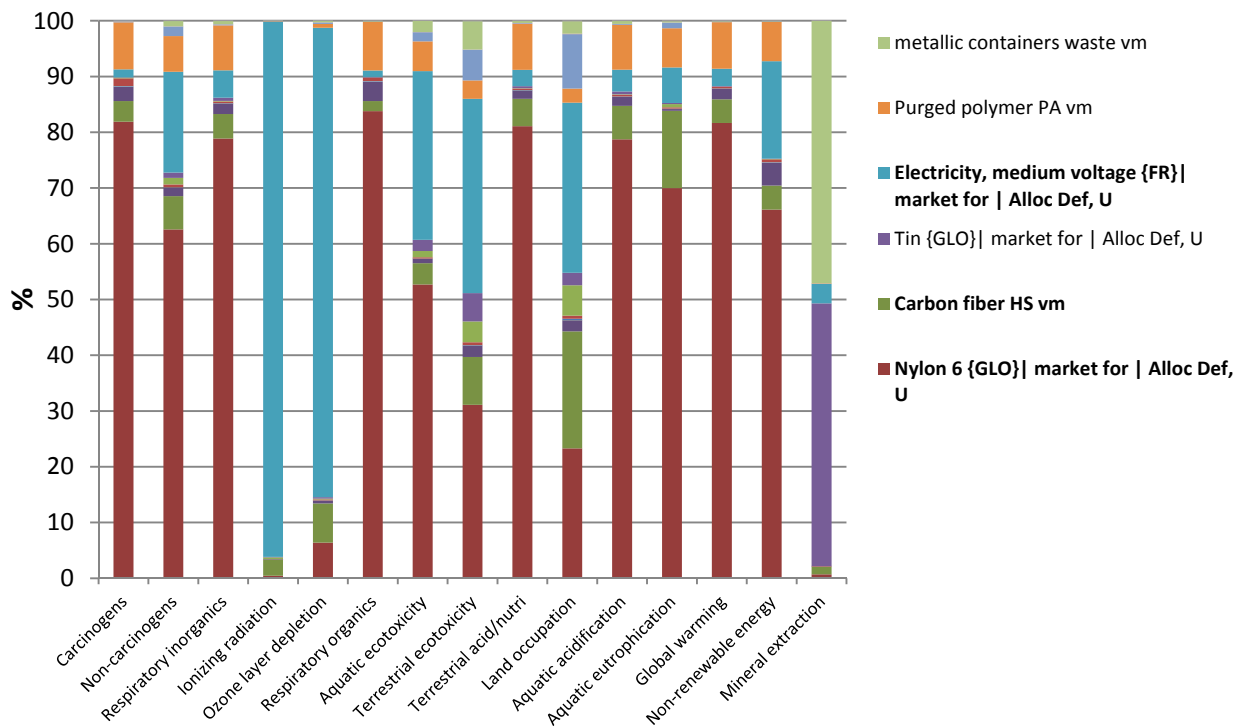
Παρασκευή 1000 kg ενισχυμένου θερμοπλαστικού νήματος	Ποσότητες
Δεδομένα εισόδου	
Πολυμερές	970 kg
Νανοσωματίδια	30 kg
Ενέργεια	2660 kWh
Καθαριστικό υλικό εκβολέα	100 kg
Αναλώσιμα εργαστηρίου	200 γάντια νιτριλίου 2 kg χαρτί εργαστηρίου 20 μάσκες
Μεταλλικά δοχεία	6 δοχεία
Εκπομπές/Απόβλητα	
VOC	<50 g
CO ₂	<3 kg
UFP	<20 g
Νανοσωματίδια	0,1 kg

Η AKZ για κάθε ένα από τα σύνθετα υλικά που προκύπτουν από τους συνδυασμούς της Εικόνας 14 μελετήθηκαν ξεχωριστά και τα αποτελέσματά του χαρακτηρισμού τους παρουσιάζονται στην συνέχεια. Η λειτουργική μονάδα που επιλέχτηκε για την μελέτη ήταν το ένα κιλό παραγόμενου προϊόντος ενώ για όλους τους συνδυασμούς η

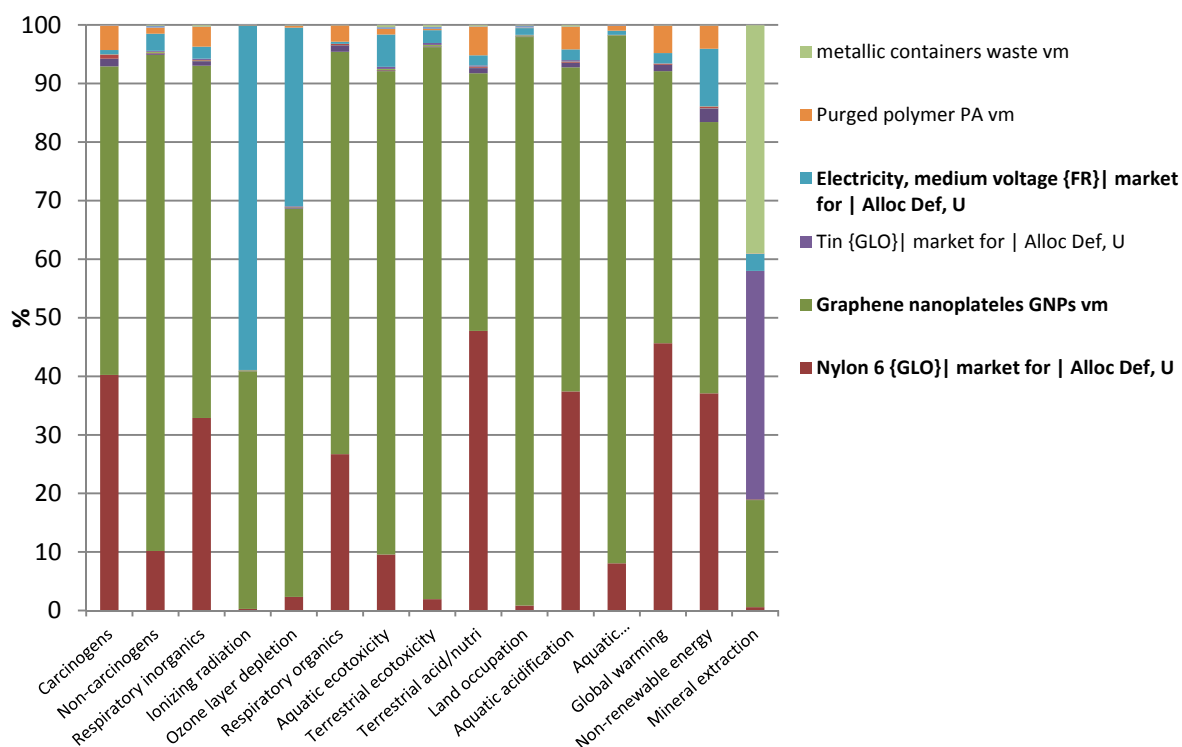
συγκέντρωση του εγκλείσματος στο τελικό υλικό είναι σταθερή και ίση με 3% κατά βάρος.



Εικόνα 15 Ραβδογράμματα χαρακτηρισμού παραγωγής PA + 3%CNTs



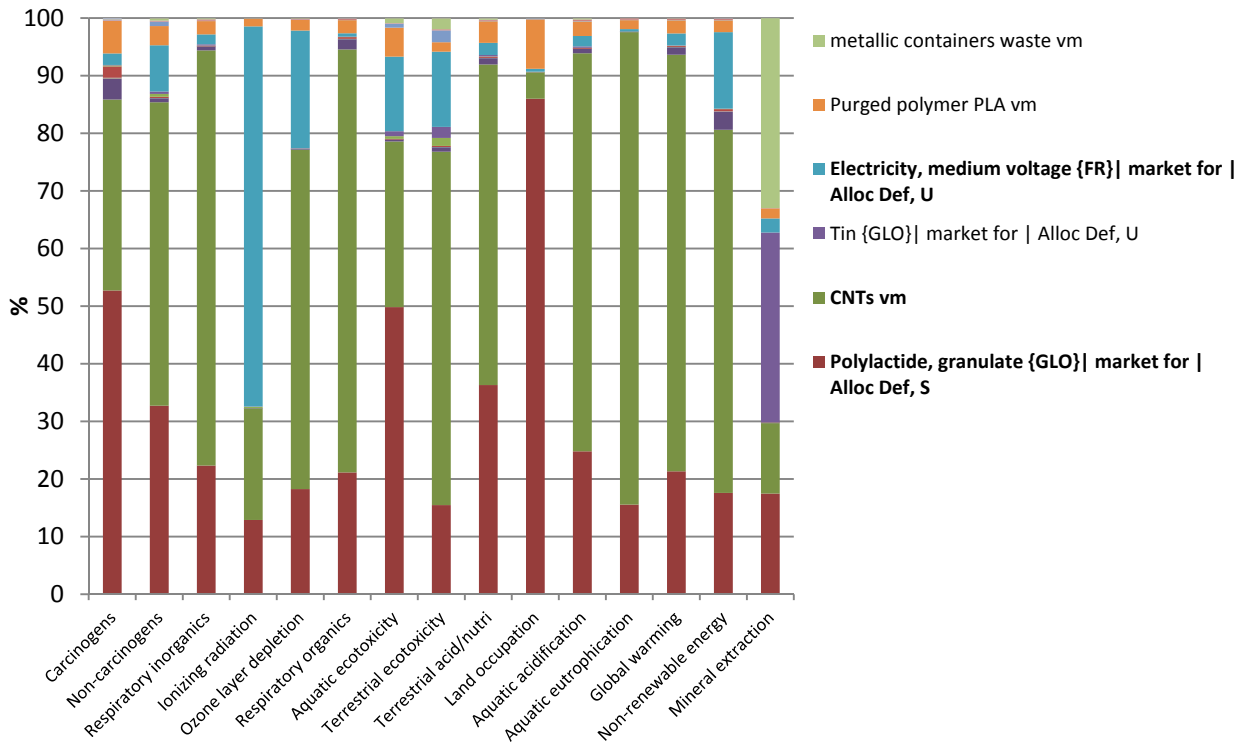
Εικόνα 16 Ραβδογράμματα χαρακτηρισμού παραγωγής PA + 3%CFs



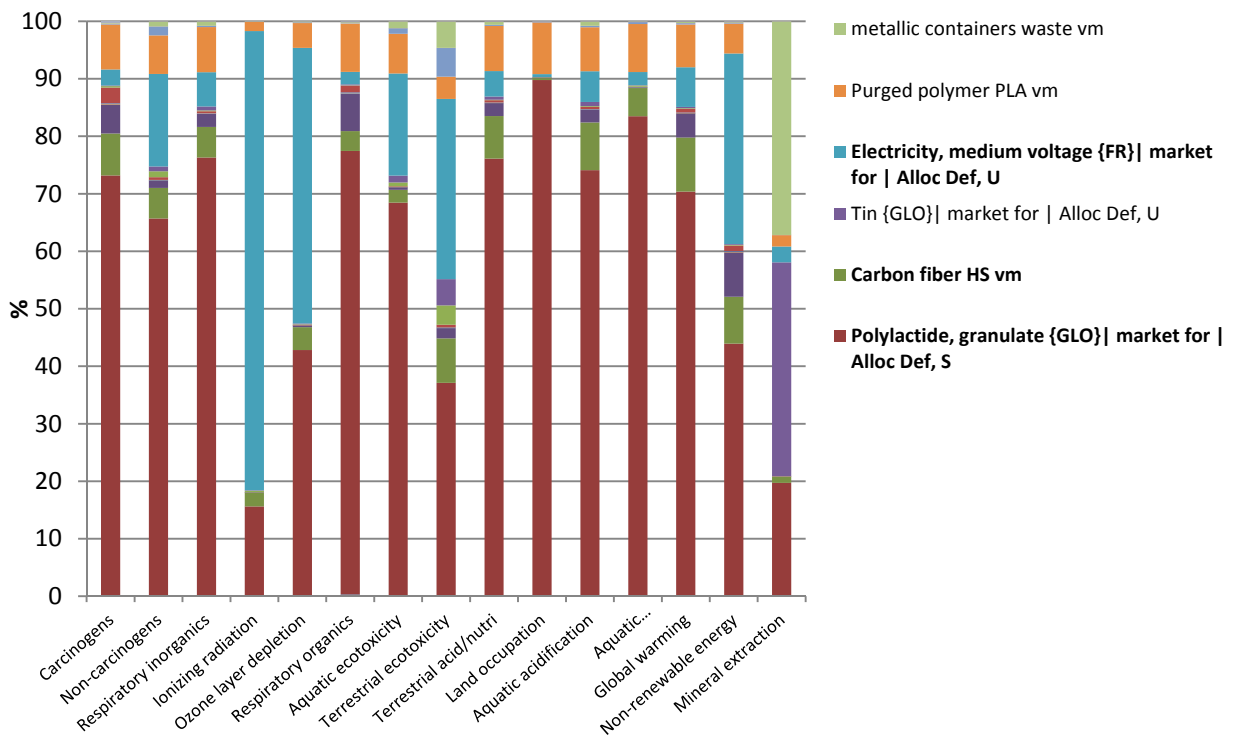
Εικόνα 17 Ραβδογράμματα χαρακτηρισμού παραγωγής PA + 3%GNPs

Στις Εικόνες 15 – 17 παρουσιάζονται τα ποσοστά της συνεισφοράς του κάθε τμήματος της παραγωγικής διεργασίας των νημάτων με μήτρα πολυαμιδίου σε κάθε μία από της κατηγορίες midpoint σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση της μεθόδου impact 2002+⁶² η οποία χρησιμοποιείται σε ολόκληρη την μελέτη. Τα μεγαλύτερα ποσοστά συμμετοχής σχεδόν σε όλες τις κατηγορίες τα έχουν η πολυαμιδική μήτρα, τα εγκλείσματα και η ενέργεια και για αυτόν ακριβώς τον λόγο αποτελούν τα hot spot για αυτές τις διεργασίες. Στα υπομνήματα όλων των ραβδογραμμάτων που παρουσιάζονται σε αυτήν την μεταπτυχιακή εργασία, χάριν ευκολίας του αναγνώστη, παρουσιάζονται μόνο τα τμήματα τις διεργασίας που έχουν σημαντική συνεισφορά στις ενδιάμεσες και τελικές κατηγορίες. Μεταξύ αυτών υπάρχουν τα hot spots τα οποία επισημαίνονται με έντονη γραφή και είναι αυτά για τα οποία πρέπει να επανεξεταστεί η δυνατότητα μείωσης του αντίκτυπού τους. Στις Εικόνες 15 – 17 φαίνονται οι μεγάλες διαφορές που υπάρχουν στο ποσοστό του αποτυπώματος κάθε κατηγορίας που οφείλεται στη συνεισφορά του νανοϋλικού το οποίο και στις τρεις περιπτώσεις παρουσιάζεται με πράσινο χρώμα.

Αποτελέσματα και συζήτηση

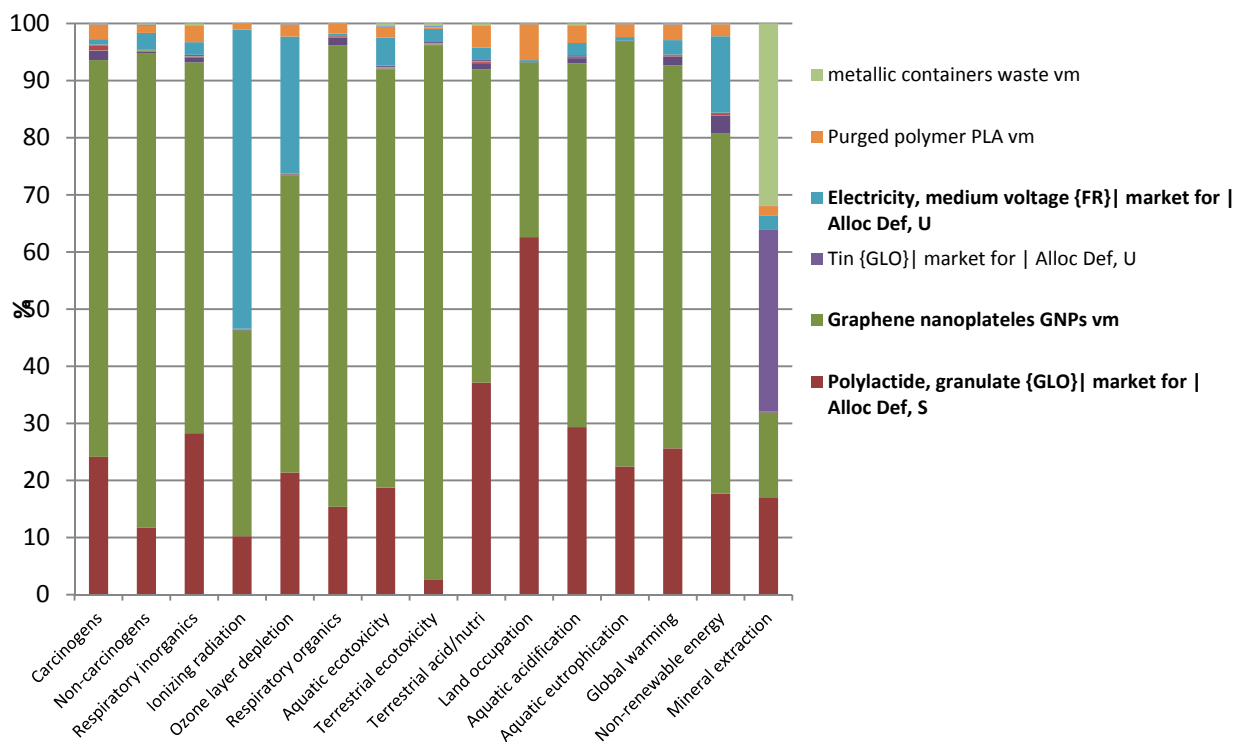


Εικόνα 18 Ραβδογράμματα χαρακτηρισμού παραγωγής PLA + 3%CNTs



Εικόνα 19 Ραβδογράμματα χαρακτηρισμού παραγωγής PLA + 3%CFs

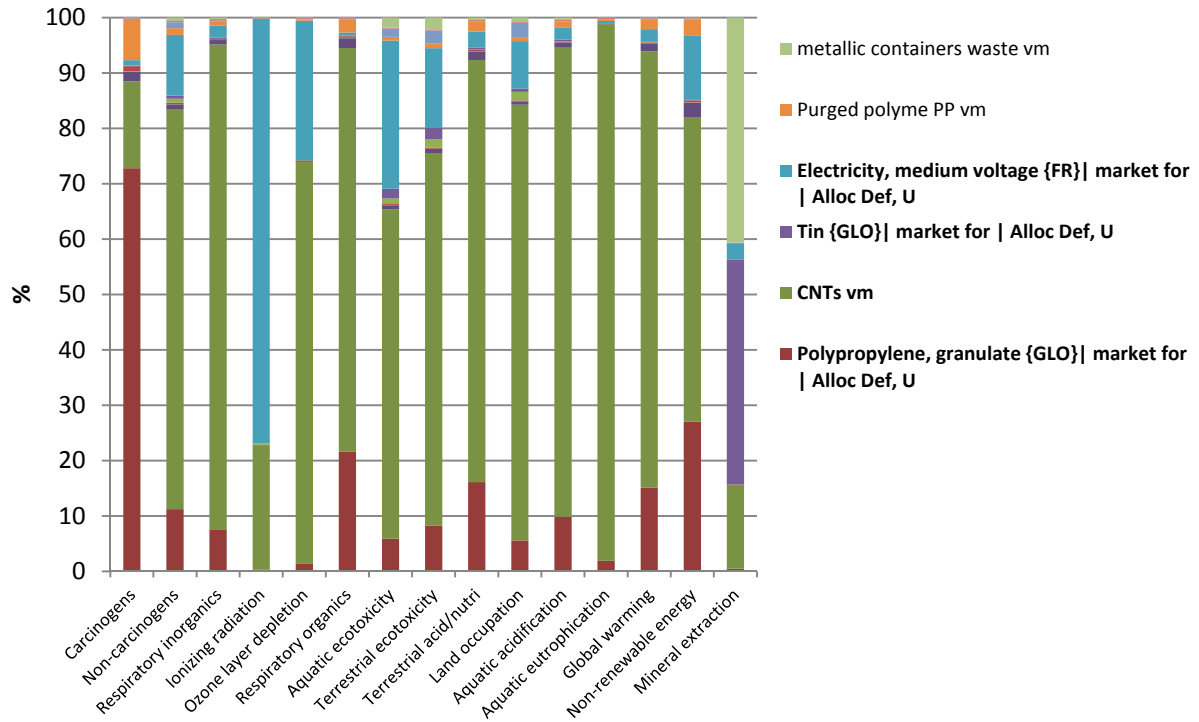
Αποτελέσματα και συζήτηση



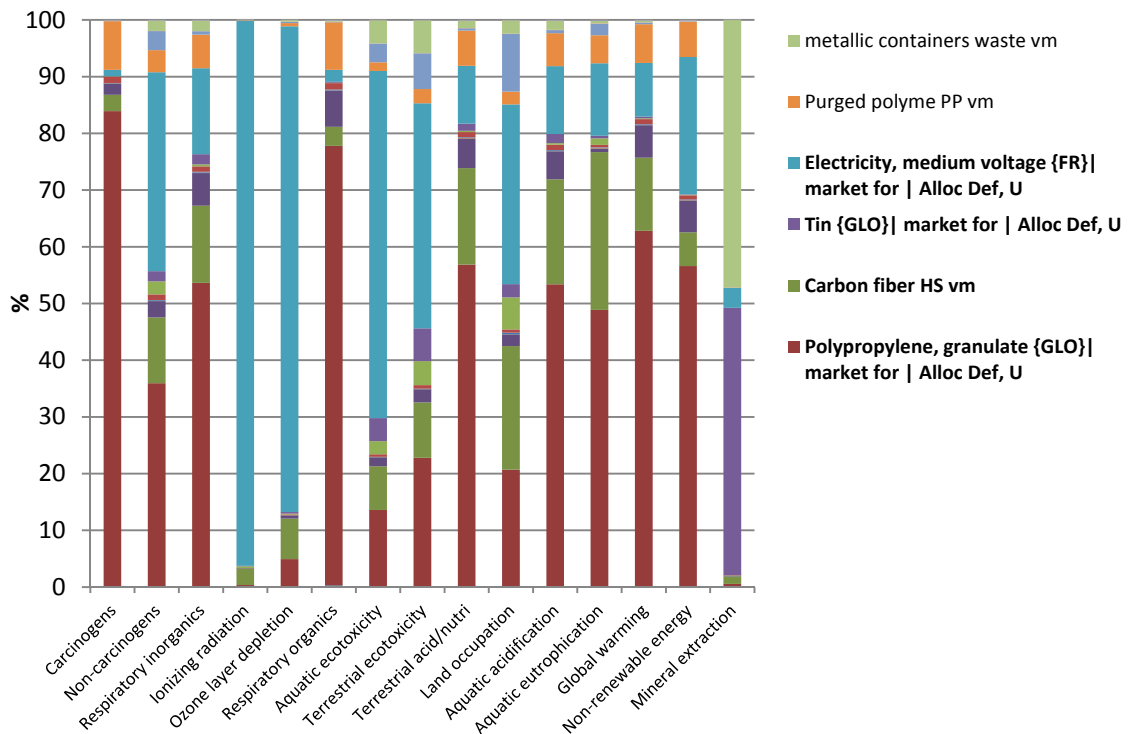
Εικόνα 20 Ραβδογράμματα χαρακτηρισμού παραγωγής PLA + 3%GNPs

Στις Εικόνες 18-20 παρουσιάζονται τα ποσοστά συνεισφοράς των τμημάτων της διαδικασίας παραγωγής των νημάτων με μήτρα πολυγαλακτικού οξέος. Τα hot spot και σε αυτή την περίπτωση παραμένουν η πολυμερική μήτρα, τα εγκλείσματα και η ενέργεια.

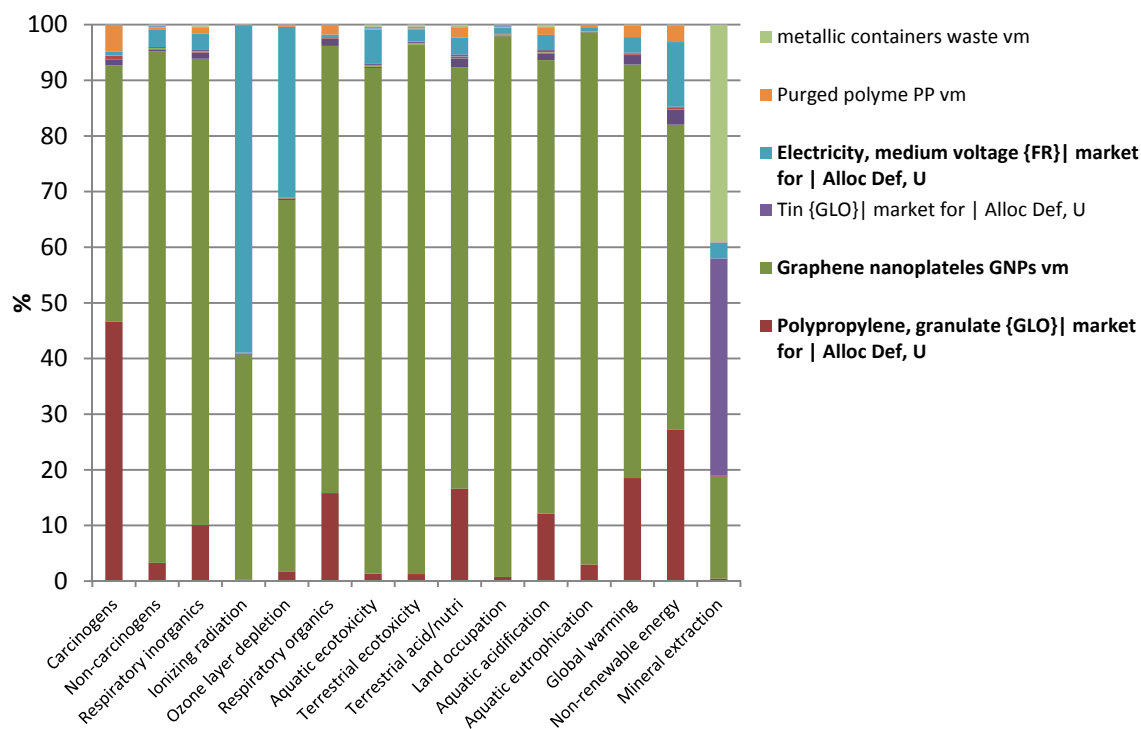
Αποτελέσματα και συζήτηση



Εικόνα 21 Ραβδογράμματα χαρακτηρισμού παραγωγής PP + 3%CNTs



Εικόνα 22 Ραβδογράμματα χαρακτηρισμού παραγωγής PP + 3%CFs

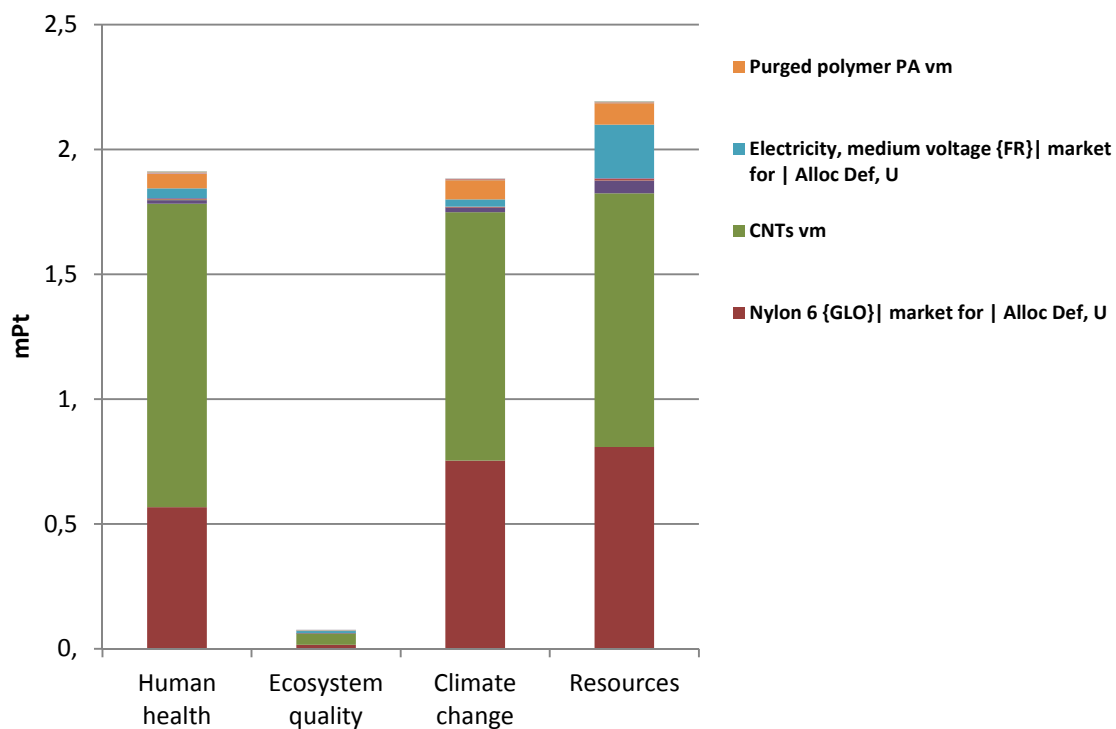


Εικόνα 23 Ραβδογράμματα χαρακτηρισμού παραγωγής PP + 3%GNPs

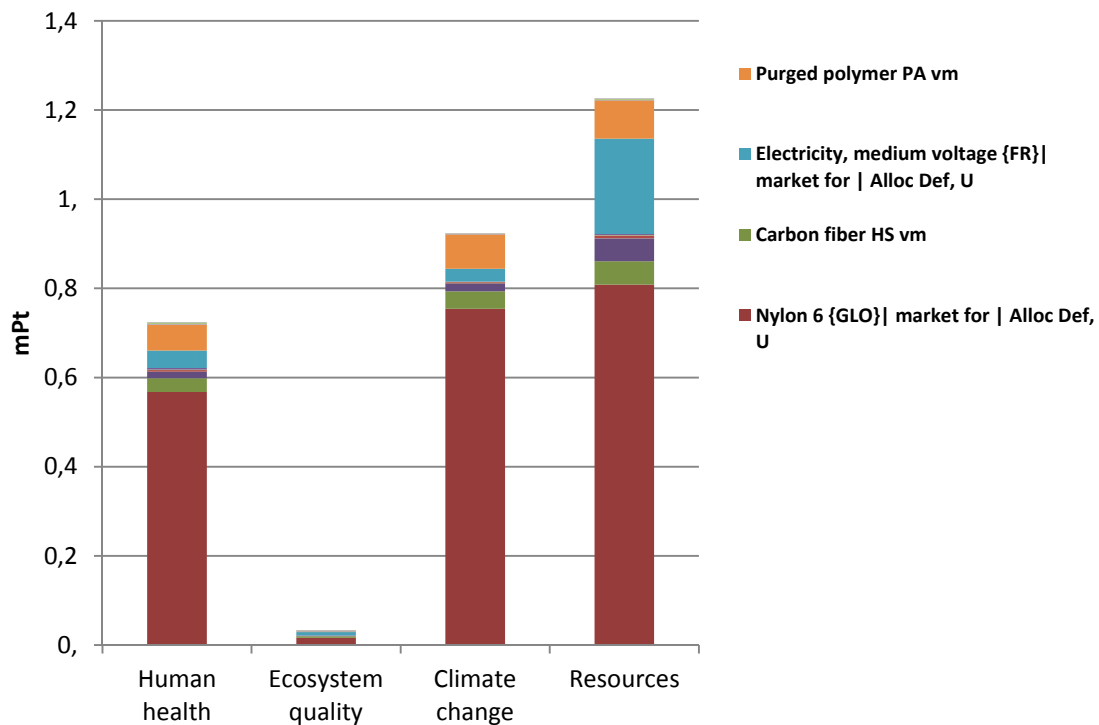
Στις Εικόνες 21-23 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα ποσοστά συνεισφοράς των τμημάτων της παραγωγικής διεργασίας για τα νήματα με μήτρα πολυπροπυλενίου. Και σε αυτή την περίπτωση τα hot spot είναι τα ίδια με τις δύο προηγούμενες δηλαδή η πολυμερική μήτρα, τα εγκλείσματα και η ενέργεια.

Αξίζει να σημειωθεί πως τα ραβδογράμματα του χαρακτηρισμού μπορούν εύκολα να παραπλανήσουν τον αναγνώστη και να τον οδηγήσουν στο συμπέρασμα πως η κάθε διεργασία επιφέρει σημαντικό αποτύπωμα σε κάθε μία από τις midpoint κατηγορίες γεγονός το οποίο δεν είναι αληθές. Σε κάθε μία από τις ράβδους του ραβδογράμματος παρουσιάζονται τα τμήματα εκείνα της διεργασίας που συμμετέχουν στην διαμόρφωση του αποτυπώματος της συγκεκριμένης midpoint κατηγορίας έστω και αν αυτή η κατηγορία έχει μικρή συνεισφορά στη συνολική περιβαλλοντική επίπτωση που προκαλεί η διεργασία. Για να έχει κανείς μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα θα πρέπει να μελετήσει τα ραβδογράμματα του χαρακτηρισμού σε συνδυασμό με αυτά της στάθμισης για τις ίδιες διεργασίες. Τα ραβδογράμματα στάθμισης για τις διεργασίες παρασκευής που μελετώνται παρουσιάζονται στις Εικόνες 24 – 32.

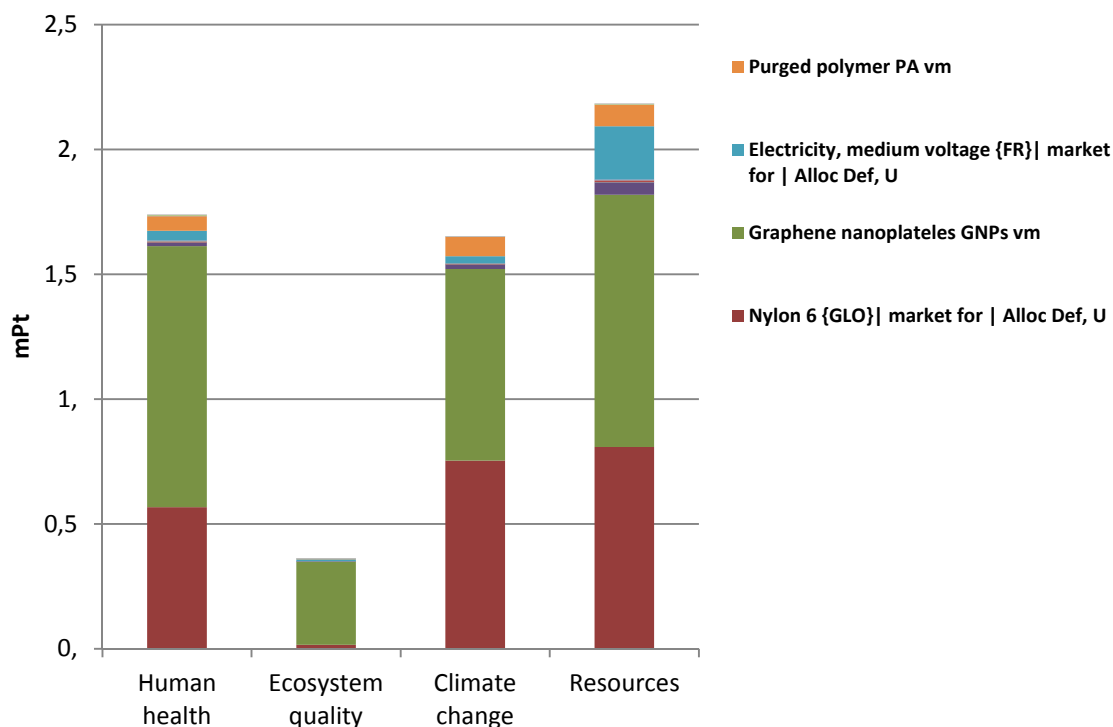
Αποτελέσματα και συζήτηση



Εικόνα 24 Ραβδογράμματα στάθμισης παραγωγής PA + 3% CNTs



Εικόνα 25 Ραβδογράμματα στάθμισης παραγωγής PA + 3% CFs



Εικόνα 26 Ραβδογράμματα στάθμισης παραγωγής PA + 3% GNPs

Στις Εικόνες 24-26 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στάθμισης σχετικά με την παραγωγή του σύνθετου PA + 3% εγκλεισμάτων. Τα αποτελέσματα για τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο όλων των τμημάτων της παραγωγικής διεργασίας σε όλες τις κατηγορίες είναι σταθερά και στις 3 εικόνες και τα μόνα που αλλάζουν είναι αυτά που αφορούν τα εγκλείσματα. Από την σύγκριση των συνολικών μονάδων συνεισφοράς των τριών εγκλεισμάτων στις Εικόνες 24-26 προκύπτει πως το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο σε όλες τις κατηγορίες εμφανίζουν τα εγκλείσματα CNTs, ενώ ακολουθούν τα GNPs και τέλος οι CFs. Οι μεγάλες διαφορές στον αντίκτυπο των εγκλεισμάτων των CNTs και των GNPs σε σύγκριση με αυτόν των CFs όπως έχει ήδη σχολιαστεί και παραπάνω οφείλονται στις διαφορές που υπάρχουν στα inventories των εγκλεισμάτων που δημιουργήθηκαν για την μελέτη. Συγκεκριμένα η προέλευση των δεδομένων είναι καθοριστικής σημασίας καθώς για τα CNTs και τα GNPs (συλλογή δεδομένων με ερωτηματολόγιο) υπήρχαν πολύ πιο λεπτομερή δεδομένα για τις πρώτες ύλες αλλά και τα επικουρικά υλικά της διεργασίας ενώ αντίθετα για τις CFs (δεδομένα από βιβλιογραφία) τα δεδομένα ήταν λιγότερο λεπτομερή. Επιπλέον, δεδομένου πως και τα τρία εγκλείσματα παράγονται μέσω ενεργοβόρων διεργασιών η διαφορά στην ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή τους (ενέργεια που έχει παραχθεί στην Ελλάδα για τα CNTs και τα

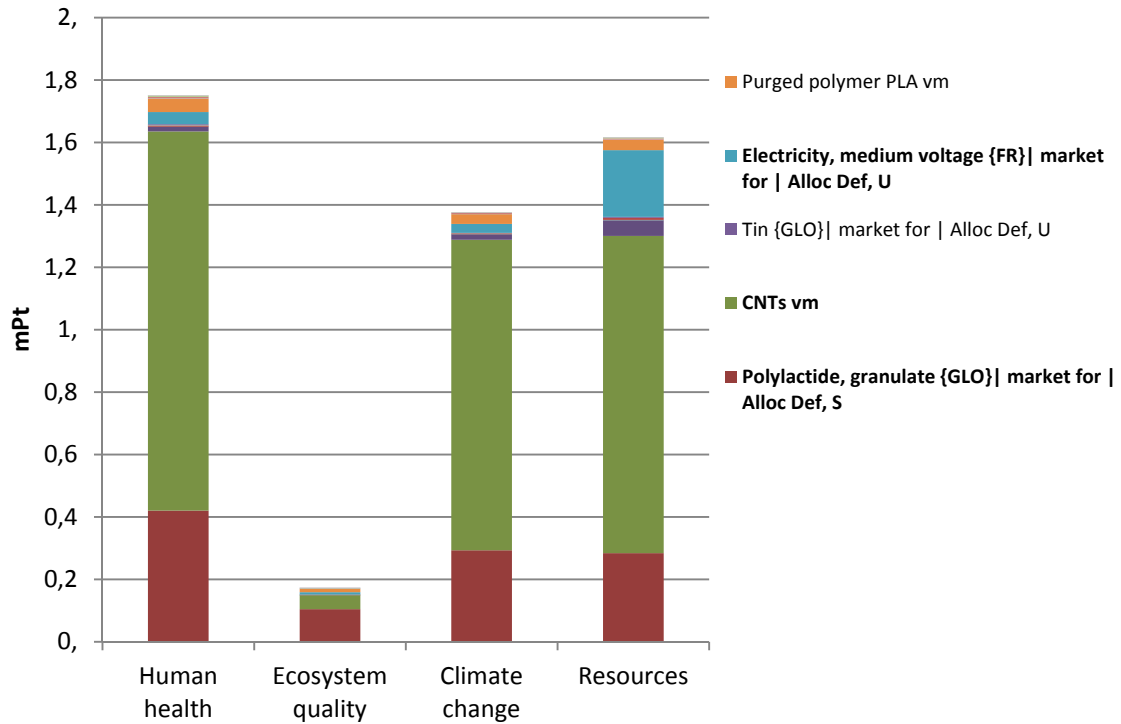
GNPs και ενέργεια που έχει παραχθεί στον Καναδά για τα CFs) συμβάλει σημαντικά στις τελικές διακυμάνσεις των αποτελεσμάτων.

Οι συνολικές μονάδες αποτυπώματος στις τελικές κατηγορίες που συνδέονται με κάθε είδος εγκλείσματος παραμένουν σταθερές όπως φαίνεται στα ραβδογράμματα στάθμισης για την παραγωγή νημάτων με τις άλλες δύο πολυμερικές μήτρες (PLA Εικόνες 27-29 και PP Εικόνες 30-32) γεγονός το οποίο οφείλεται στις σταθερές ποσότητες των εγκλεισμάτων.

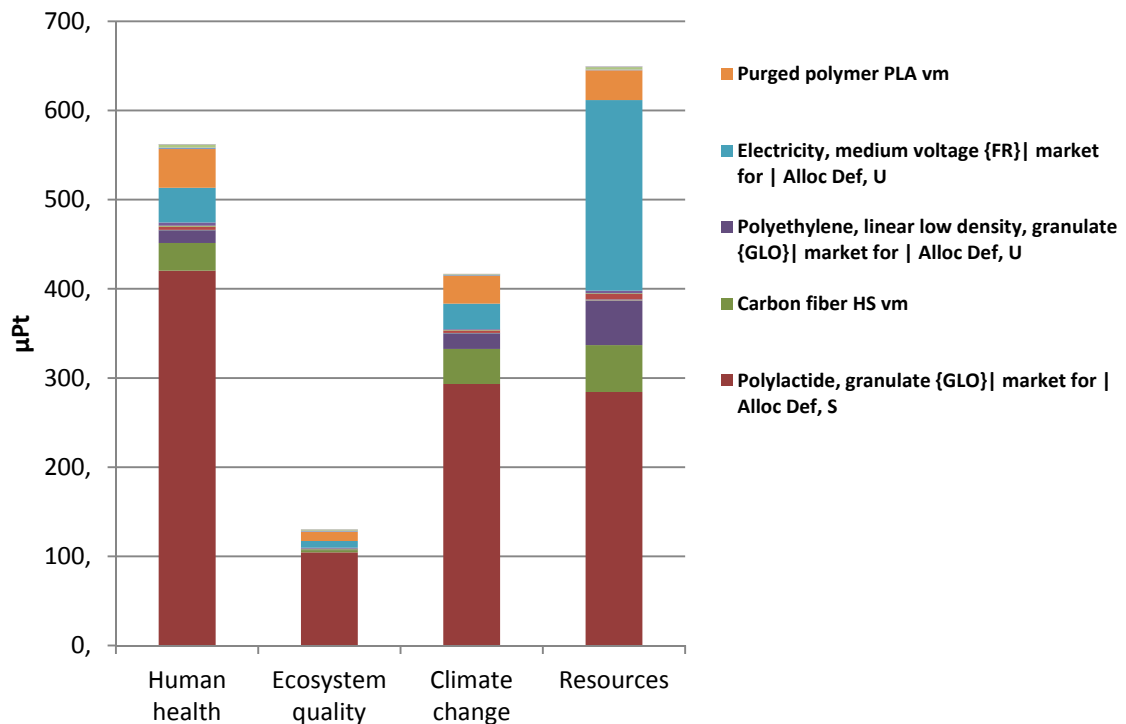
Τον δεύτερο σημαντικότερο αντίκτυπο σύμφωνα με τα αποτελέσματα της AKZ για την παραγωγή νημάτων σύνθετου υλικού (εκτός από την περίπτωση εγκλεισμάτων CFs όπου είναι ο πρώτος) συνδέεται με την πολυμερική μήτρα (και για τις τρεις διαφορετικές μήτρες). Το γεγονός αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από τις πρώτες ύλες που απαιτούνται για την παραγωγή των πολυμερών καθώς και την ενέργεια.⁷⁶⁻⁷⁸

Η κατηγορία που επηρεάζεται περισσότερο από την παραγωγή νημάτων με πολυμερικές μήτρες (PA, PLA, PP) και με εγκλείσματα (CFs, GNPs, CNTs) σύμφωνα με τα αποτελέσματα στις Εικόνες 24-32 είναι αυτή των φυσικών πηγών ενώ ακολουθεί η ανθρώπινη υγεία και η κλιματική αλλαγή. Μόνη εξαίρεση αποτελεί η παραγωγή νήματος με μήτρα PLA + 3% CNTs για την οποία η κατηγορία που επηρεάζεται περισσότερο είναι η ανθρώπινη υγεία και μετά ακολουθούν οι φυσικές πόροι και η κλιματική αλλαγή. Η ποιότητα του οικοσυστήματος είναι η κατηγορία που επηρεάζεται λιγότερο από όλες.

Αποτελέσματα και συζήτηση

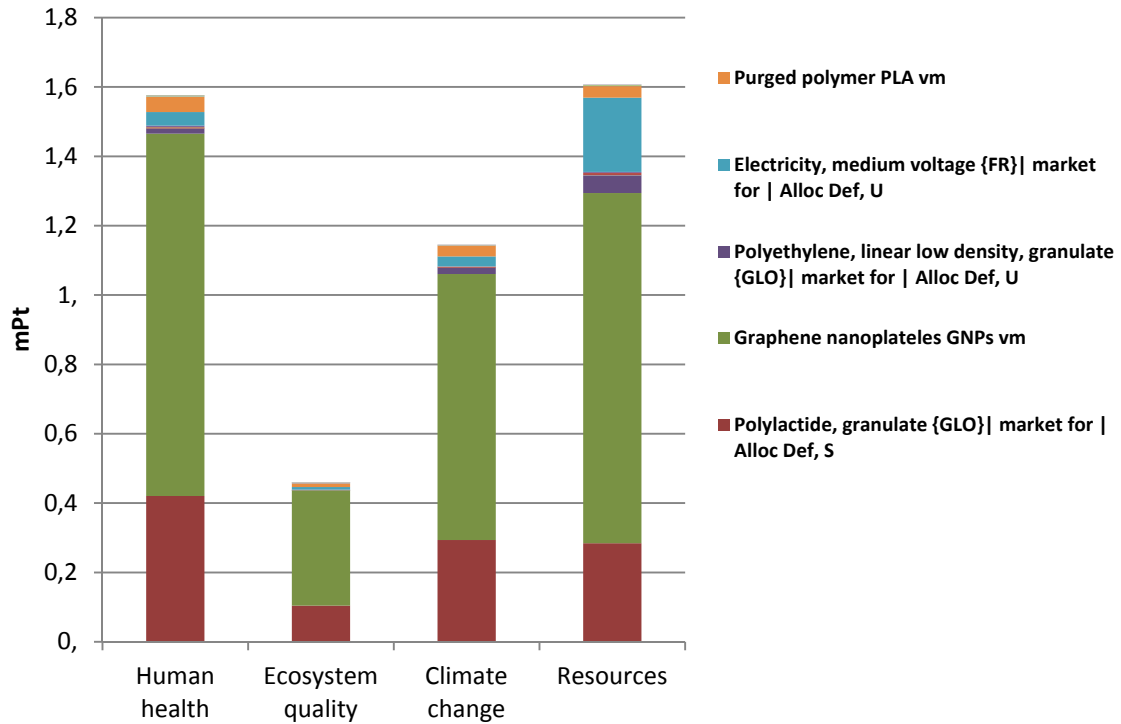


Εικόνα 27 Ραβδογράμματα στάθμισης παραγωγής PLA + 3% CNTs

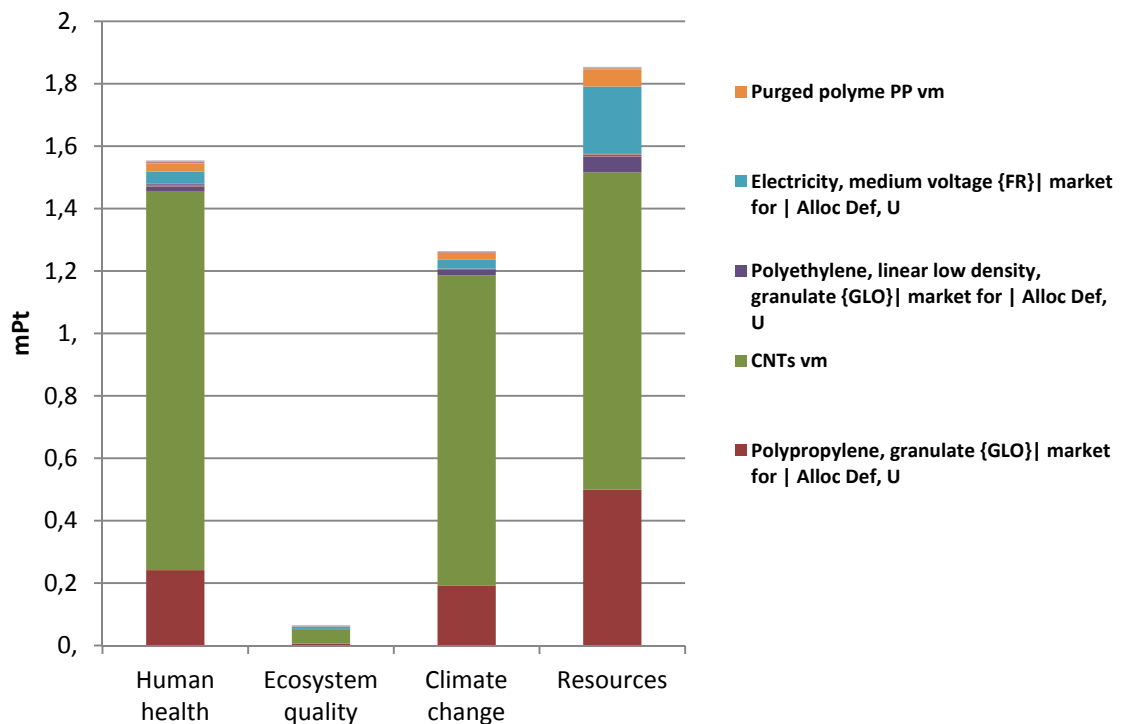


Εικόνα 28 Ραβδογράμματα στάθμισης παραγωγής PLA + 3% CFs

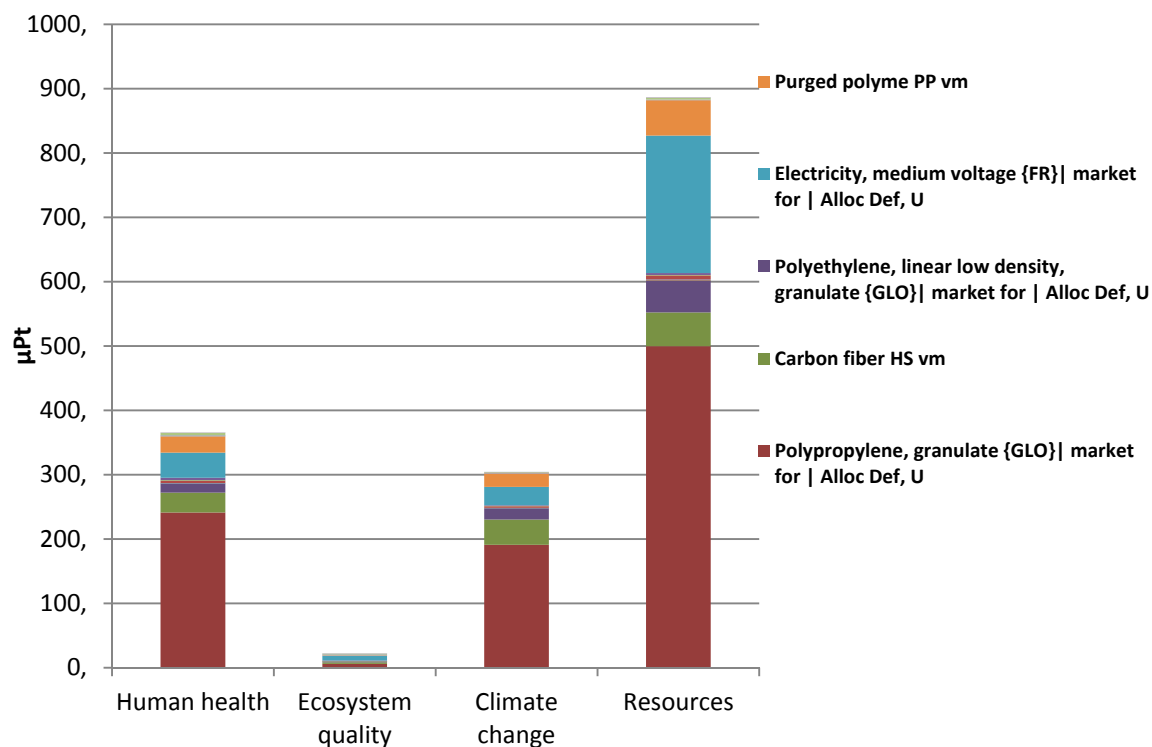
Αποτελέσματα και συζήτηση



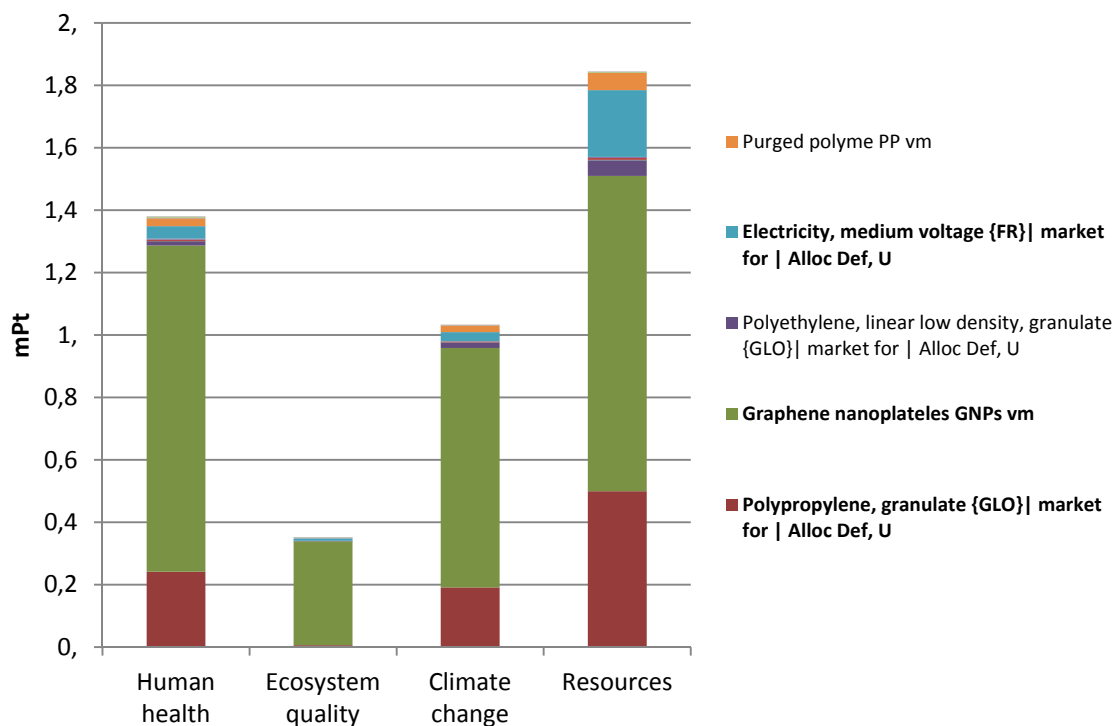
Εικόνα 29 Ραβδογράμματα στάθμισης παραγωγής PLA + 3% GNPs



Εικόνα 30 Ραβδογράμματα στάθμισης παραγωγής PP + 3% CNTs



Εικόνα 31 Ραβδογράμματα στάθμισης παραγωγής PP + 3% CFs



Εικόνα 32 Ραβδογράμματα στάθμισης παραγωγής PP + 3% GNPs

Από την παρατήρηση των ραβδογραμμάτων στάθμισης, μπορεί να διαπιστώσει κανείς πως η προσθήκη των CNTs και των GNPs ως εγκλείσματα στα σύνθετα υλικά έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη περιβαλλοντική επίπτωση ενώ η πολυμερική μήτρα

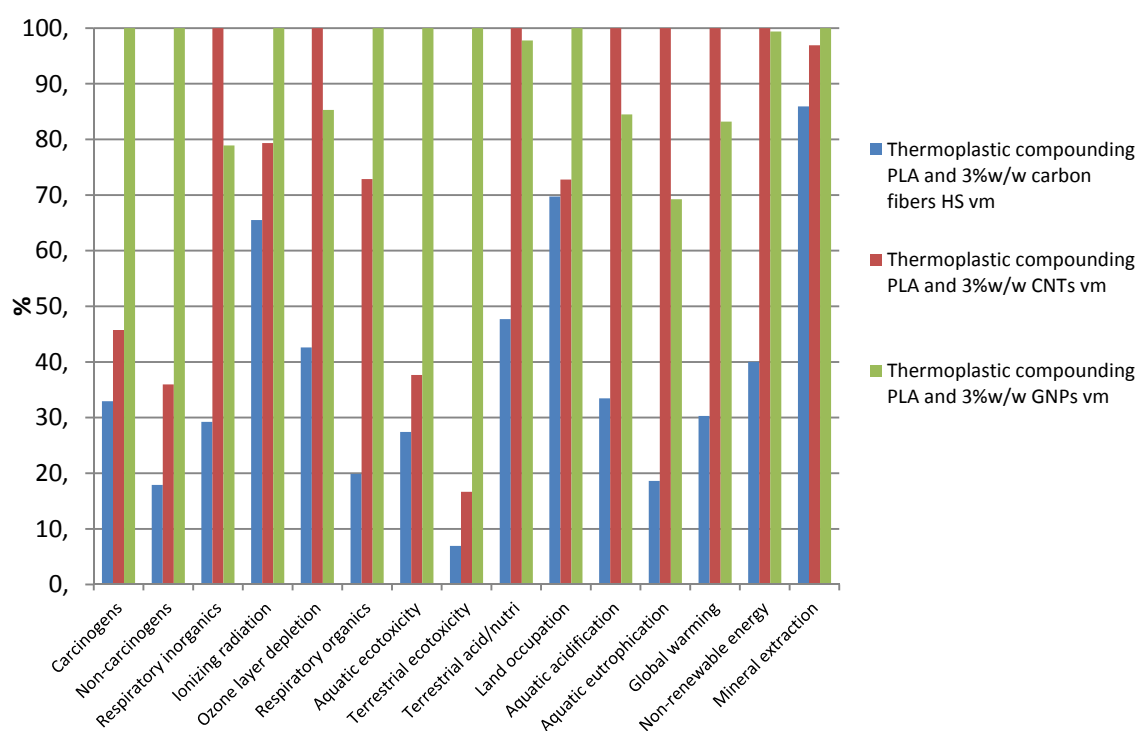
που συνδέεται με την μικρότερη περιβαλλοντική επίπτωση στις τρεις από τις τέσσερις τελικές κατηγορίες (ανθρώπινη υγεία, Ποιότητα οικοσυστήματος, κλιματική αλλαγή) είναι το πολυπροπυλένιο (PP). Στην κατηγορία των φυσικών πόρων τον μικρότερο αντίκτυπο τον έχει το PLA, τα αυξημένα αποτυπώματα που έχει η παραγωγή PLA στις άλλες τρεις τελικές κατηγορίες είναι σύμφωνα με σχετικές μελέτες στη βιβλιογραφία.^{78,79}

Έχοντας τις παραδοχές και τις ιδιαιτερότητες της μελέτης στο μυαλό τα συνδυαστικά ραβδογράμματα των Εικόνων 33 και 34 στα οποία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ των τριών σύνθετων υλικών με πολυμερική μήτρα PLA για τις ενδιάμεσες και τις τελικές κατηγορίες αντίστοιχα. Μπορούν να βοηθήσουν για την επιλογή του κατάλληλου σύνθετου υλικού. Αξίζει να σημειωθεί πως οι διαφορές που προκύπτουν οφείλονται στα διαφορετικά εγκλείσματα καθώς όλα τα άλλα δεδομένα που έχουν εισαχθεί στα τρία inventories των οποίων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παραμένουν ίδια.

Στην Εικόνα 33 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των επιπτώσεων στις ενδιάμεσες κατηγορίες μεταξύ των διεργασιών παραγωγής τριών διαφορετικών σύνθετων υλικών με πολυμερική μήτρα PLA (PLA με 3%w/w CNTs, PLA με 3%w/w GNPs και PLA με 3%w/w CF). Συγκεκριμένα παρουσιάζεται ποια από τις τρεις διεργασίες έχει την μεγαλύτερη επίδραση σε κάθε ενδιάμεση κατηγορία και τα ποσοστά επί αυτής που αντιστοιχούν στην επίδραση των άλλων δύο διεργασιών. Στην Εικόνα 33 φαίνεται πως η παραγωγή σύνθετου υλικού με εγκλείσματα GNPs έχει την μεγαλύτερη επίδραση στις μισές από τις ενδιάμεσες κατηγορίες (καρκινογόνες ουσίες, μη καρκινογόνες ουσίες, υδάτινη και εδαφική οικοτοξικότητα, κατάληψη/χρήση γης, εξόρυξη ορυκτών, ιοντίζουσα ακτινοβολία και εισπνεόμενα οργανικά) αλλά και σε όλες τις υπόλοιπες έχει την δεύτερη επίδραση μετά την διεργασία παραγωγής σύνθετου υλικού με εγκλείσματα CNTs (με ποσοστό πάντα μεγαλύτερο του 70%)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι δύσκολο να προκύψει ένα ξεκάθαρο αποτέλεσμα και ένα υλικό να υπερέχει σε όλες τις midpoint κατηγορίες έτσι έχοντας ως γνώμονα είτε το συγκεντρωτικό αποτύπωμα της διεργασίας ή την περιβαλλοντική υποβάθμιση σε συγκεκριμένη midpoint κατηγορία μπορεί να γίνει η ορθότερη επιλογή υλικού σύμφωνα με τα εκάστοτε κριτήρια. Για παράδειγμα, αν το βασικότερο κριτήριο επιλογής ήταν η καρκινογένεση σίγουρα τα GNPs δε θα ήταν σωστή επιλογή καθώς

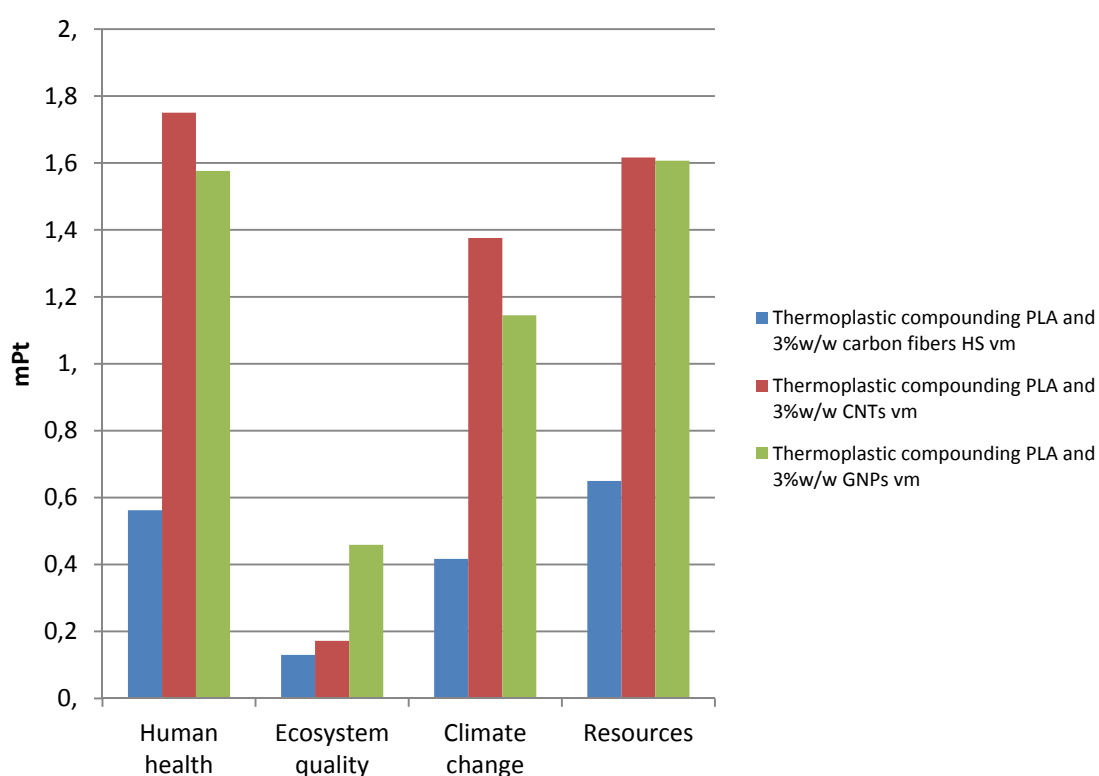
η επίπτωση της παραγωγής τους στην συγκεκριμένη κατηγορία όπως φαίνεται στην Εικόνα 33 είναι διπλάσια ως τριπλάσια συγκριτικά με τα δύο άλλα νανοϋλικά. Από την άλλη, η διαφορά ανάμεσα στις CFs και τα CNTs (ειδικά αν ληφθεί υπόψη πως τα CNTs σε αυτήν την κατηγορία έχουν επιβαρυνθεί από την καύση λιγνίτη για την παραγωγή ενέργειας όπως αναλύθηκε νωρίτερα) δεν είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μπορούμε να πούμε πως κάποιο από τα δύο υπερέχει έτσι μάλλον θα επιλέγαμε τις CFs λόγω του συνολικά μικρότερου αποτυπώματος στην ΑΚΖ.



Εικόνα 33 Συγκριτικά ραβδογράμματα χαρακτηρισμού διεργασιών παραγωγής συνθετών υλικών με πολυμερική μήτρα PLA

Στην Εικόνα 34 παρατίθενται τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ των διεργασιών παραγωγής των ίδιων τριών συνθέτων (PLA με 3%w/w CNTs, PLA με 3%w/w GNPs και PLA με 3%w/w CF) ως προς την επίδρασή τους στις τέσσερις τελικές κατηγορίες (ανθρώπινη υγεία, ποιότητα οικοσυστήματος, κλιματική αλλαγή και φυσικών πόρων). Η παραγωγική διαδικασία και των τριών συνθέτων στο σύνολό της επηρεάζει κυρίως την ανθρώπινη υγεία και τους φυσικούς πόρους ενώ μεταξύ των τριών το σύνθετο που έχει το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα είναι αυτό με τα εγκλείσματα CNTs, ακολουθούν αυτό με τα εγκλείσματα GNPs και τα

εγκλείσματα CFs. Διαφορετική τάση εμφανίζεται σύμφωνα με τα αποτελέσματα στην περίπτωση της κατηγορίας που αφορά την ποιότητα του οικοσυστήματος όπου η διεργασία παραγωγής σύνθετου υλικού με πολυμερική μήτρα PLA και εγκλείσματα GNPs φαίνεται να έχει τη μεγαλύτερη περιβαλλοντική επίπτωση. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 34 δείχνουν πως η διεργασία παραγωγής των σύνθετων υλικών με CFs συνδέεται με τις μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε όλες τις endpoint κατηγορίες. Το γεγονός αυτό καθιστά την επιλογή των συγκεκριμένων σύνθετων υλικών ως την πιο φιλική προς το περιβάλλον επιλογή σύμφωνα με τα αποτελέσματα της AKZ.



Εικόνα 34 Συγκριτικά ραβδογράμματα στάθμισης διεργασιών παραγωγής σύνθετων υλικών με πολυμερική μήτρα PLA

AKZ παραγωγής μέρους ψυκτικού συστήματος CPU

Μετά την ολοκλήρωση της μελέτης της παραγωγής των νημάτων σύνθετου υλικού ακολουθεί η μελέτη της παραγωγής μέρους του ψυκτικού συστήματος CPU. Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τα inventories για τα νήματα σύνθετου υλικού τα οποία είχαν προστεθεί στη βιβλιοθήκη του SimaPro και παρουσιάστηκαν παραπάνω. Τα σημαντικότερα από τα δεδομένα της διεργασίας τριδιάστατης εκτύπωσης στα οποία

βασίστηκε η μελέτη παρουσιάζονται στον Πίνακα 4, ως λειτουργική μονάδα για την μελέτη ορίστηκε η παραγωγή ενός τεμαχίου.

Πίνακας 4 Δεδομένα διεργασίας τριδιάστατης εκτύπωσης μέρους ψυκτικού συστήματος CPU

Παρασκευή 200 τεμαχίων τμήματος ψυκτικού συστήματος CPU	Ποσότητες
Δεδομένα εισόδου	
Νήμα σύνθετου υλικού	120 kg
Αιθανόλη	2 L
Ενέργεια	7800kWh
Μεταλλικά ακροφύσια	12 τεμάχια
Αναλώσιμα εργαστηρίου	200 γάντια νιτριλίου 0,65 kg χαρτί εργαστηρίου 20 μάσκες
Μεταλλικά δοχεία	10 δοχεία
Πλαστικά δοχεία	2 δοχεία
Απόβλητα	
Νήμα σύνθετου υλικού	40 kg

Τα ραβδογράμματα χαρακτηρισμού και στάθμισης που προέκυψαν από τη μελέτη της παραγωγικής διαδικασίας μέρους του συστήματος ψύξης παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες. Συγκεκριμένα, στις Εικόνες 35-52 παρουσιάζονται τα ραβδογράμματα χαρακτηρισμού και στάθμισης για την τριδιάστατη εκτύπωση μέρους του συστήματος ψύξης CPU με εννέα διαφορετικά νήματα σύνθετων υλικών (PA 3%/w/w CNTs, PA 3%/w/w GNPs και PA 3%/w/w CFs, PLA 3%/w/w CNTs, PLA 3%/w/w GNPs και PLA 3%/w/w CFs, PP με 3%/w/w CNTs, PP με 3%/w/w GNPs και PP 3%/w/w CFs). Η μοναδική διαφορά στα δεδομένα που εισήχθησαν για αυτές τις εννέα διαφορετικές παραγωγές είναι τα νήματα και για αυτό οι όποιες διαφορές προκύπτουν στα ραβδογράμματα των Εικόνων 35-53 οφείλονται αποκλειστικά σε αυτά. Για τον λόγο αυτό τα αποτελέσματα αξίζει να σχολιαστούν συγκριτικά και όχι το κάθε ένα ξεχωριστά.

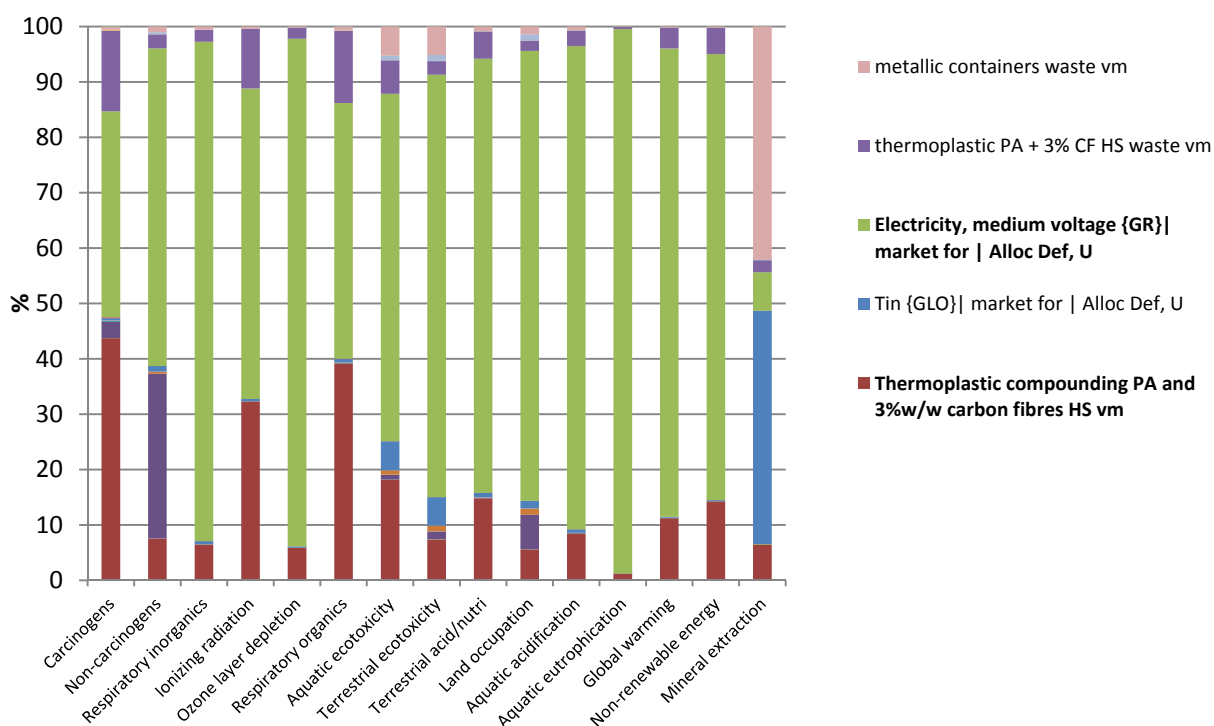
Όπως φαίνεται στα ραβδογράμματα των Εικόνων 35 – 53 υπάρχει μια σημαντική διακύμανση στα ποσοστά του αποτυπώματος των ενδιάμεσων κατηγοριών που

οφείλονται στην επιλογή του νήματος που φαίνεται στα ραβδογράμματα χαρακτηρισμού ενώ αντίθετα στα διαγράμματα στάθμισης παρατηρείται μια σταθερότητα στο καταμερισμό του αποτυπώματος των τελικών κατηγοριών. Στα αποτελέσματα για την παραγωγή τμήματος του συστήματος ψύξης CPU που παρουσιάζονται στα ραβδογράμματα χαρακτηρισμού των Εικόνων 35, 37, 39, 41, 43, 45, 47, 49, 51 φαίνεται πως για τις διεργασίες τριδιάστατης εκτύπωσης με κάθε ένα από τα χρησιμοποιούμενα νήματα τα hot spot, για όλες τις ενδιάμεσες κατηγορίες εκτός της κατηγορίας της εξόρυξης ορυκτών, είναι η ενέργεια και τα νήματα σύνθετου υλικού (συμπεριλαμβανομένης της φύρας του σύνθετου υλικού που προκύπτει). Τα hot spot για την ενδιάμεση κατηγορία της εξόρυξης ορυκτών στο σύνολο των εννέα παραγωγών είναι οι μεταλλικές συσκευασίες των επικουρικών υλικών της διεργασίας και τα μεταλλικά αναλώσιμα τμήματα των συσκευών που χρησιμοποιούνται.

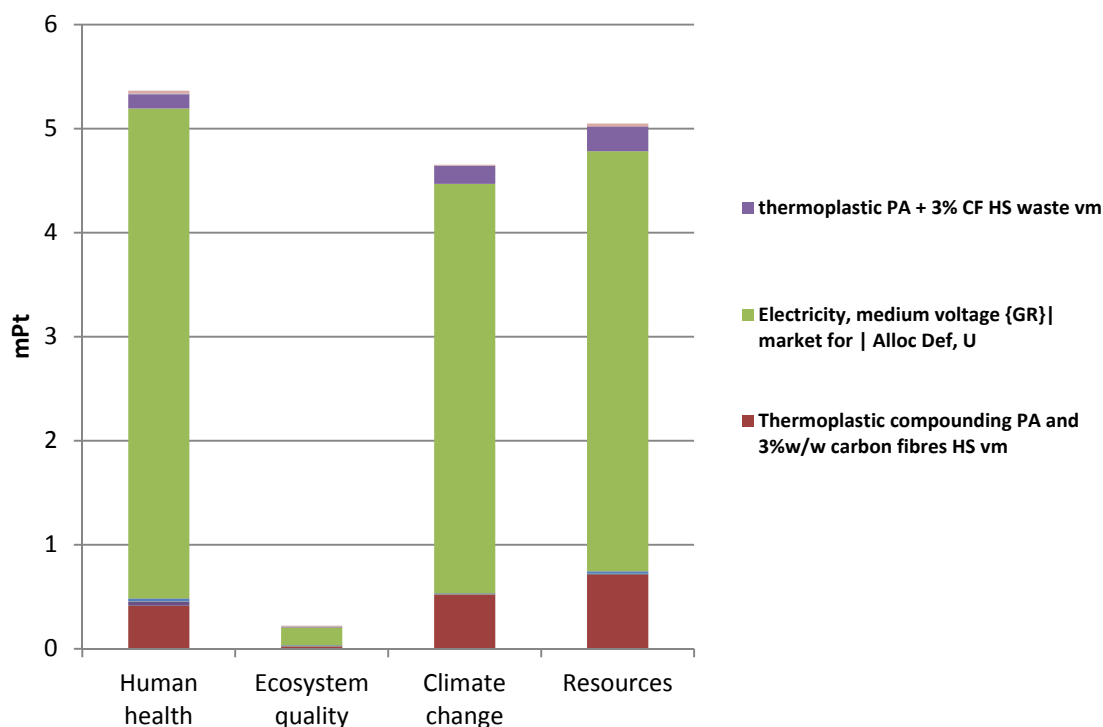
Στις Εικόνες 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50, 52 παρουσιάζονται τα ραβδογράμματα στάθμισης για τις παραγωγές τμήματος συστήματος ψύξης CPU με τα εννέα διαφορετικά νήματα σύνθετου υλικού. Από τα αποτελέσματα φαίνεται πως οι παραγωγικές διαδικασίες και με τα εννέα νήματα έχουν μεγαλύτερο αντίκτυπο στην τελική κατηγορία της ανθρώπινης υγείας και ακολουθούν οι τελικές κατηγορίες των φυσικών πόρων και της κλιματικής αλλαγής. Ο αντίκτυπος των παραγωγικών διεργασιών στην ποιότητα του οικοσυστήματος είναι αρκετά περιορισμένος σε όλες τις περιπτώσεις. Στα ραβδογράμματα στάθμισης φαίνεται πως τα hot spot για τις τελικές κατηγορίες είναι η ενέργεια και τα νήματα σύνθετου υλικού. Επιπλέον, παρατηρείται πως η συνεισφορά της ενέργειας για όλες τις διεργασίες παραμένει σταθερή και οι αλλαγές στις συνολικές μονάδες των τελικών κατηγοριών οφείλονται αποκλειστικά στα διάφορα νήματα σύνθετου υλικού.

Για να καταστεί πιο εύκολη η σύγκριση μεταξύ των εννέα διεργασιών που διαφέρουν μόνο ως προς τα χρησιμοποιούμενα νήματα στην Εικόνα 53 παρουσιάζονται οι συνολικές μονάδες συνεισφοράς που έχει το κάθε νήμα στις τελικές κατηγορίες. Στην Εικόνα 53 φαίνεται πως οι διεργασίες που συνδέονται με το χαμηλότερο αποτύπωμα σε όλες τις τελικές κατηγορίες είναι οι διεργασίες παραγωγής με νήματα που περιέχουν εγκλείσματα CFs. Από τη σύγκριση των συνολικών μονάδων στις τελικές κατηγορίες (Εικόνα 53) για τα νήματα PA +3%CFs, PLA +3%CFs και PP +3%CFs προκύπτει πως το χαμηλότερο αποτύπωμα στις τελικές κατηγορίες της ανθρώπινης

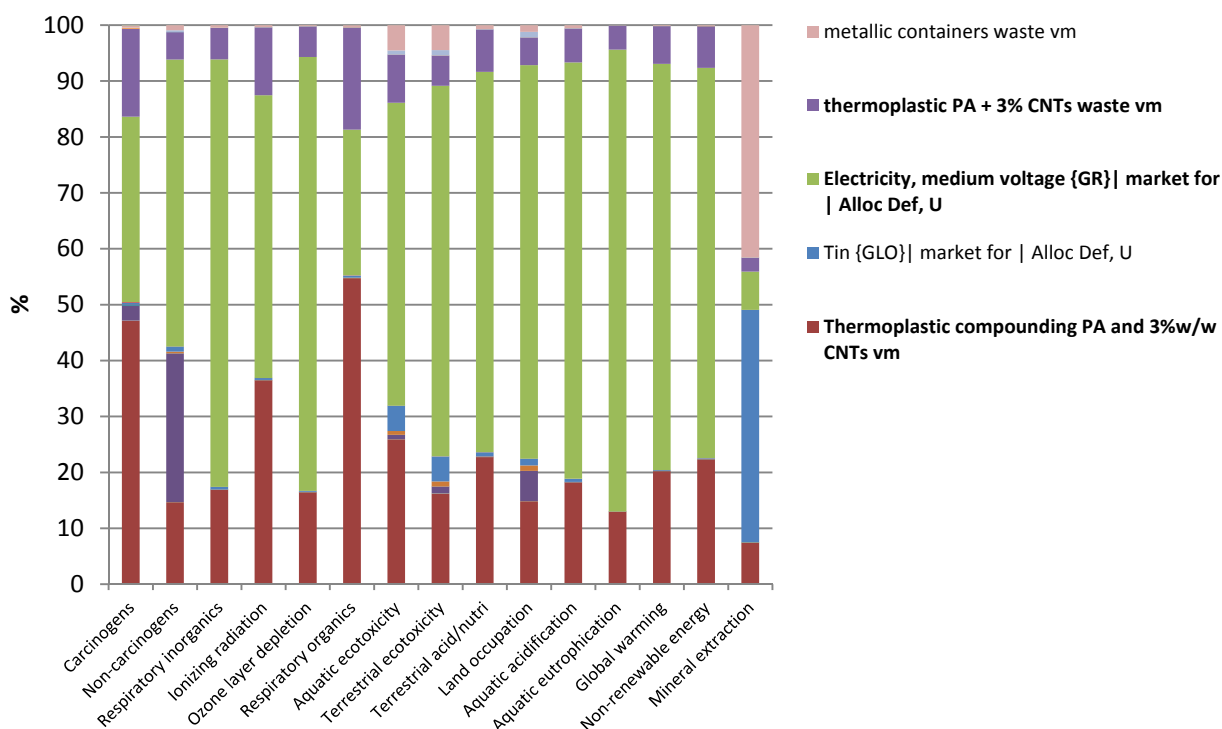
υγείας, της κλιματικής αλλαγής και της ποιότητας του οικοσυστήματος συνδέεται με την παραγωγή νήματος PP +3%CFs. Στην τελική κατηγορία των φυσικών πόρων το νήμα με την χαμηλότερη συνεισφορά είναι το PLA +3%CFs. Στις Εικόνες 36, 42 και 48 όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την παραγωγή με νήματα που έχουν εγκλείσματα CFs και πολυμερική μήτρα PA, PLA και PP αντίστοιχα φαίνεται πως οι συνολικές μονάδες στις τελικές κατηγορίες έχουν ανάλογη τάση, οι χαμηλότερες συνολικές μονάδες σε όλες τις τελικές κατηγορίες εκτός από την ποιότητα του οικοσυστήματος συνδέονται με την παραγωγή τμήματος του συστήματος ψύξης CPU με σύνθετο υλικό PP με 3%/w CFs. Η παραγωγή με σύνθετο υλικό PLA με 3%/w CFs συνδέεται με το μικρότερο αποτύπωμα την τελική κατηγορία της ποιότητας του οικοσυστήματος.



Εικόνα 35 Ραβδογράμματα χαρακτηρισμού παραγωγής συστήματος ψύξης CPU μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης με νήμα PA +3%CFs

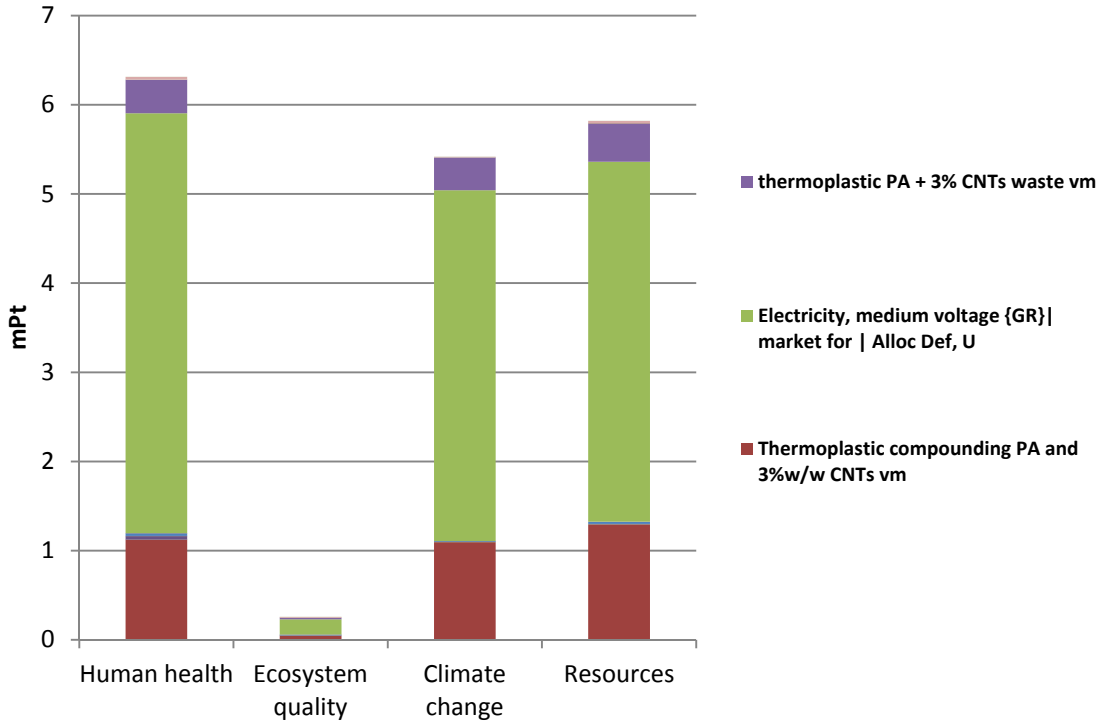


Εικόνα 36 Ραβδογράμματα στάθμισης παραγωγής συστήματος ψύξης CPU μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης με νήμα PA +3%CFs

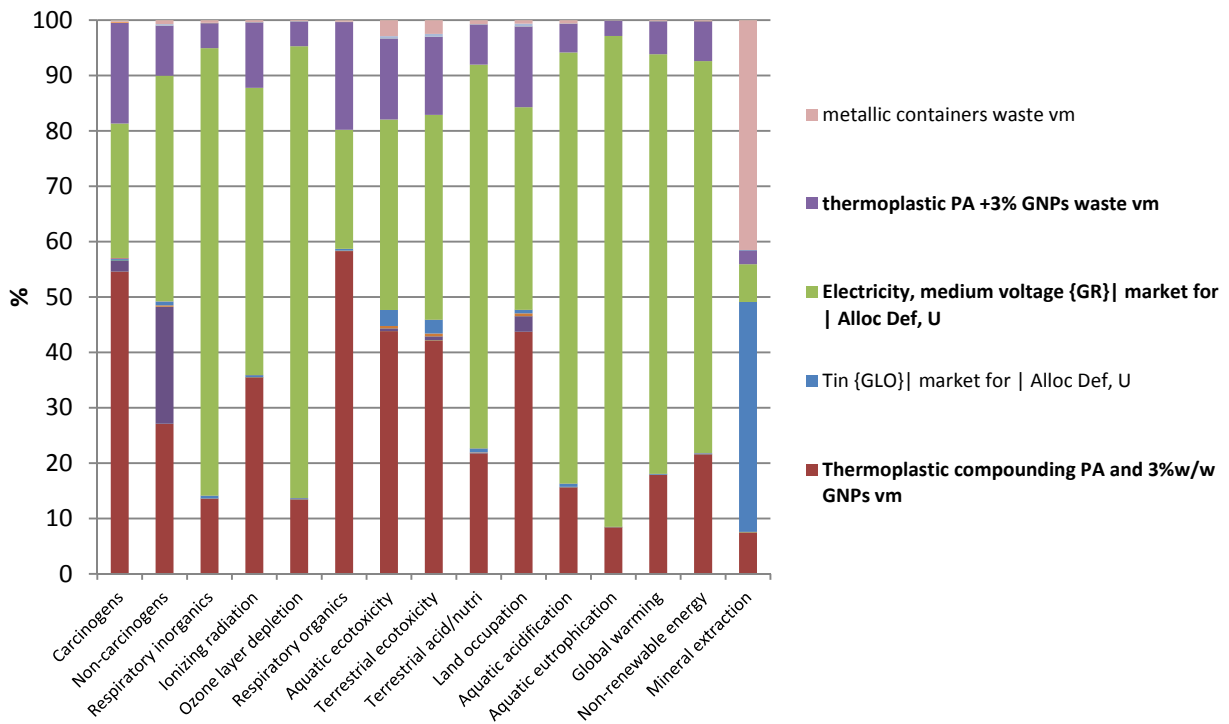


Εικόνα 37 Ραβδογράμματα χαρακτηρισμού παραγωγής συστήματος ψύξης CPU μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης με νήμα PA +3%CNTs

Αποτελέσματα και συζήτηση

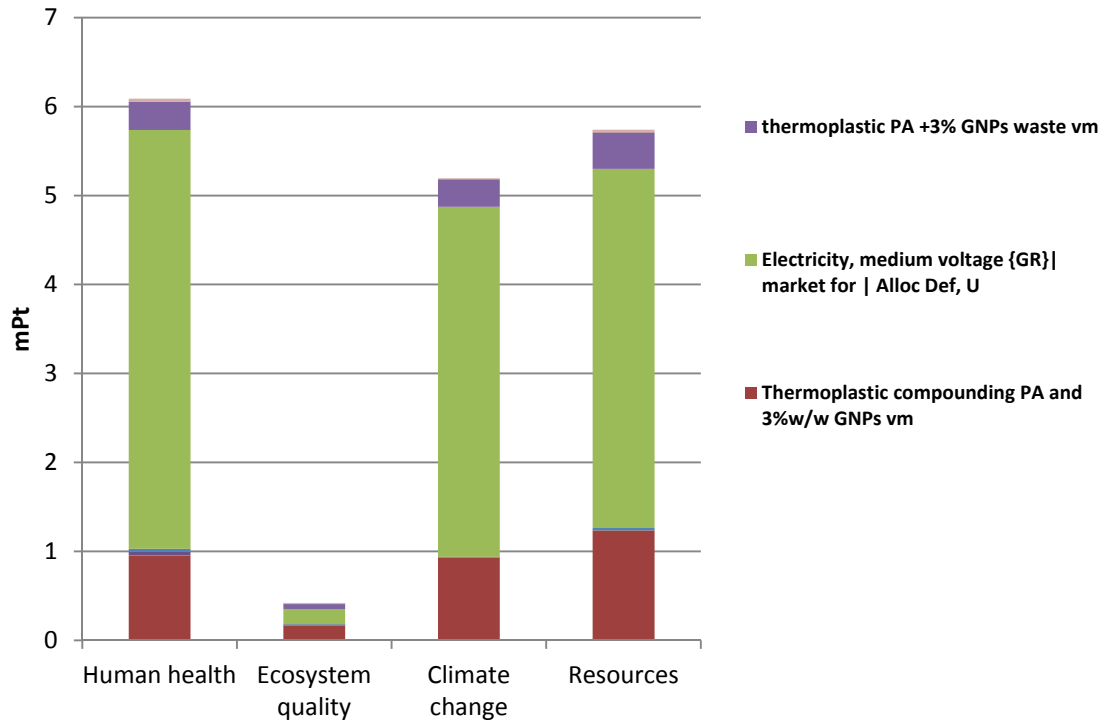


Εικόνα 38 Ραβδογράμματα στάθμισης παραγωγής συστήματος ψύξης CPU μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης με νήμα PA +3% CNTs

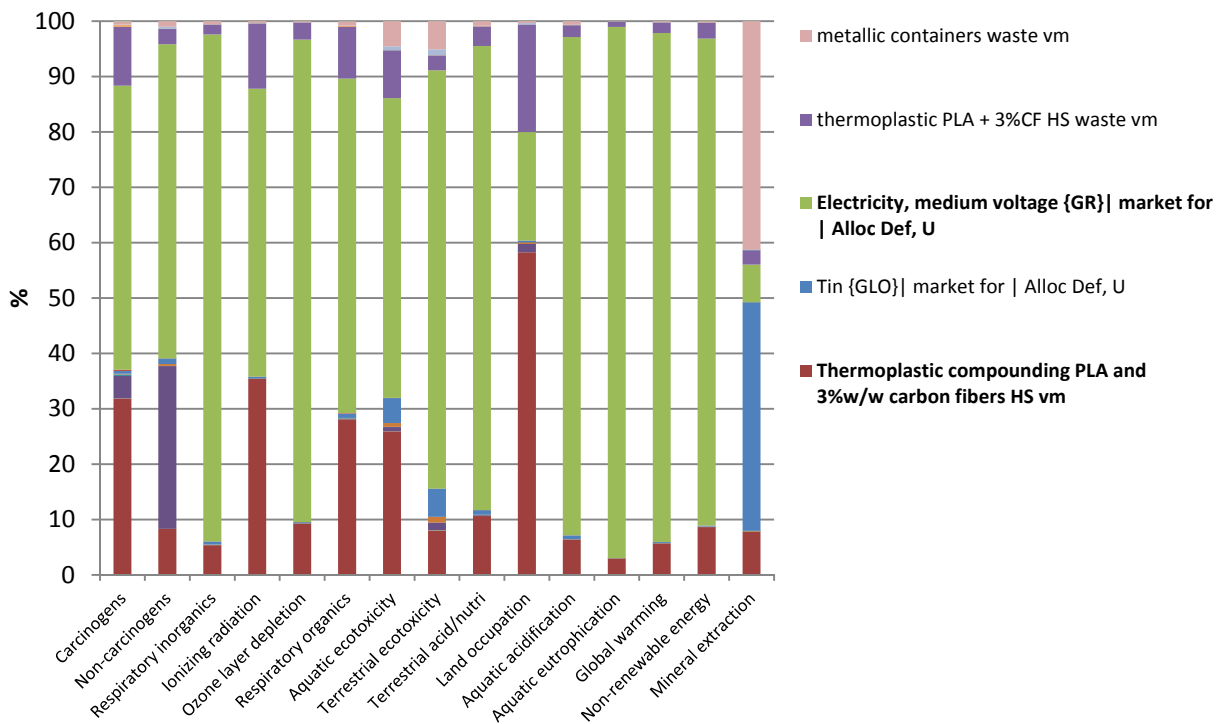


Εικόνα 39 Ραβδογράμματα χαρακτηρισμού παραγωγής συστήματος ψύξης CPU μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης με νήμα PA +3% GNPs

Αποτελέσματα και συζήτηση

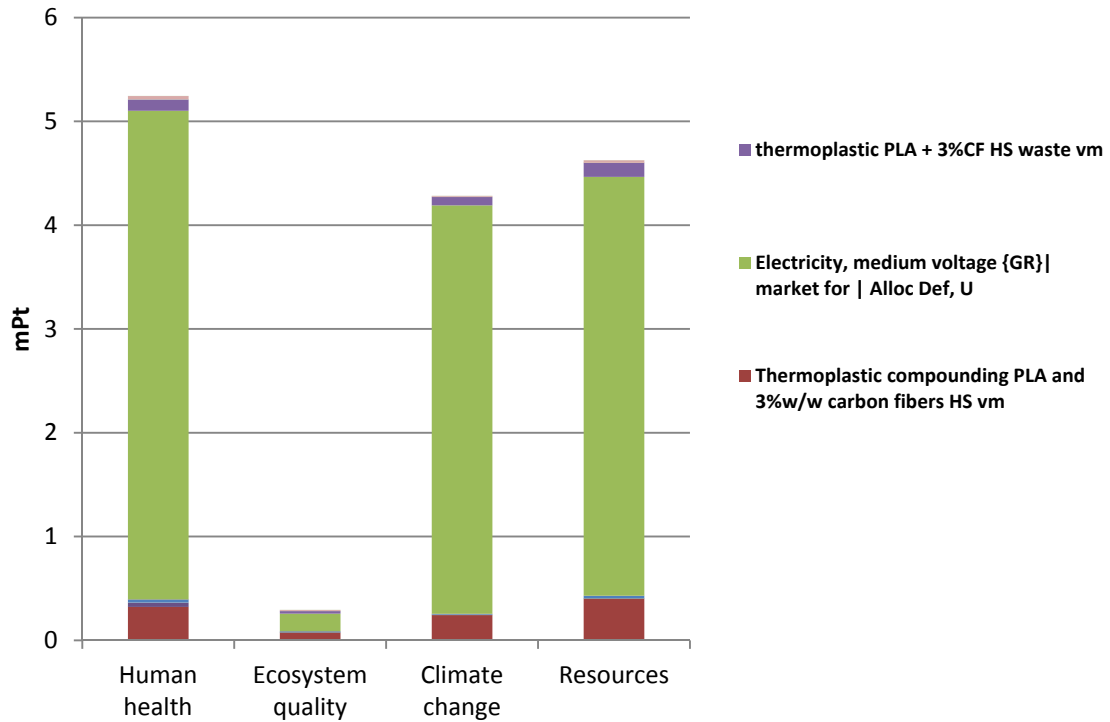


Εικόνα 40 Ραβδογράμματα στάθμισης παραγωγής συστήματος ψύξης CPU μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης με νήμα PA +3% GNPs

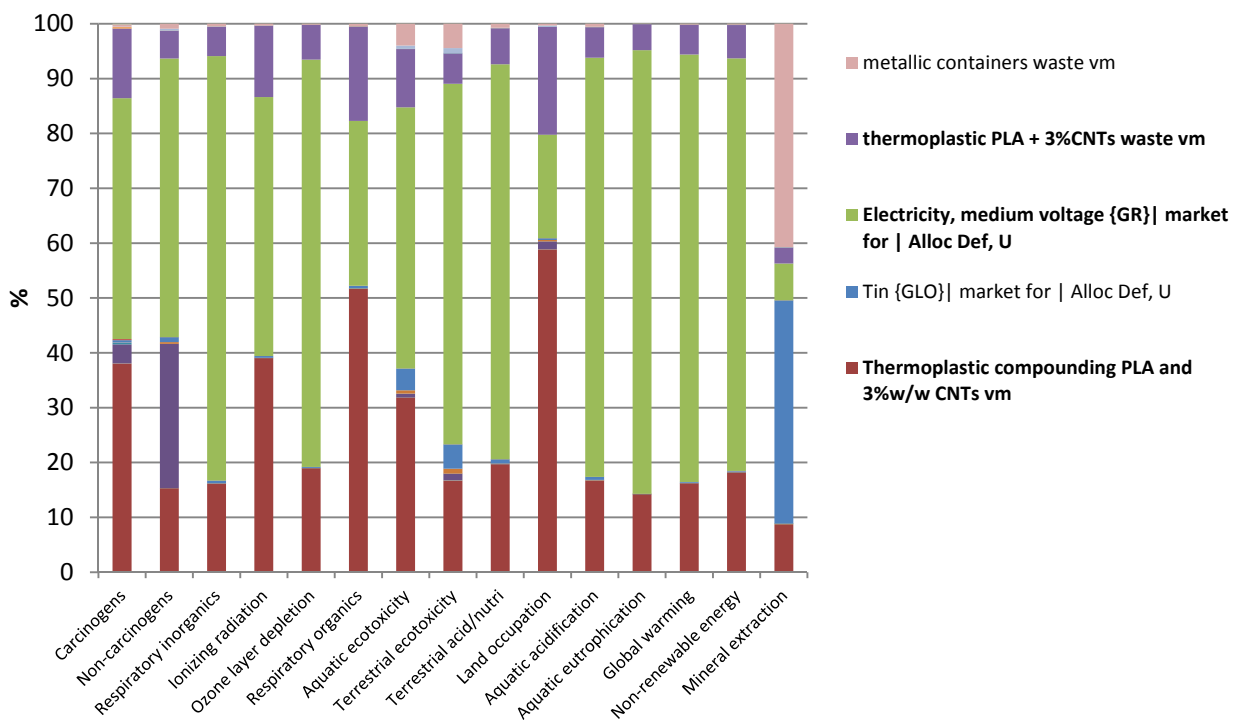


Εικόνα 41 Ραβδογράμματα χαρακτηρισμού παραγωγής συστήματος ψύξης CPU μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης με νήμα PLA +3% CFs

Αποτελέσματα και συζήτηση

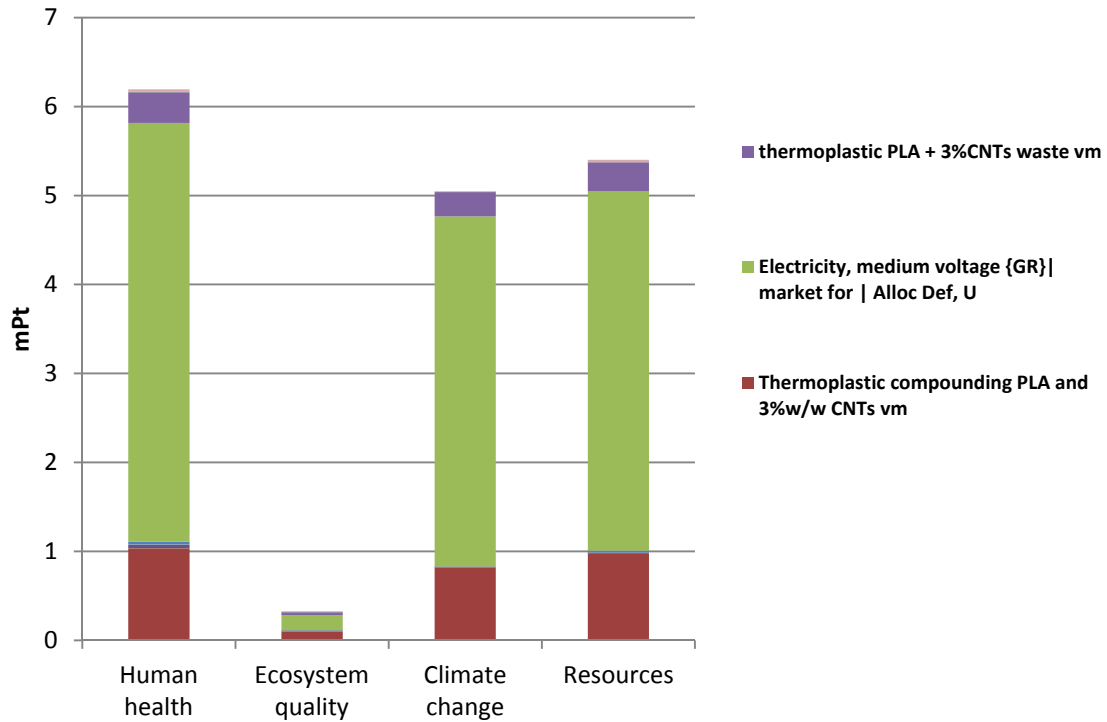


Εικόνα 42 Ραβδογράμματα στάθμιση παραγωγής συστήματος ψύξης CPU μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης με νήμα PLA +3% CFs

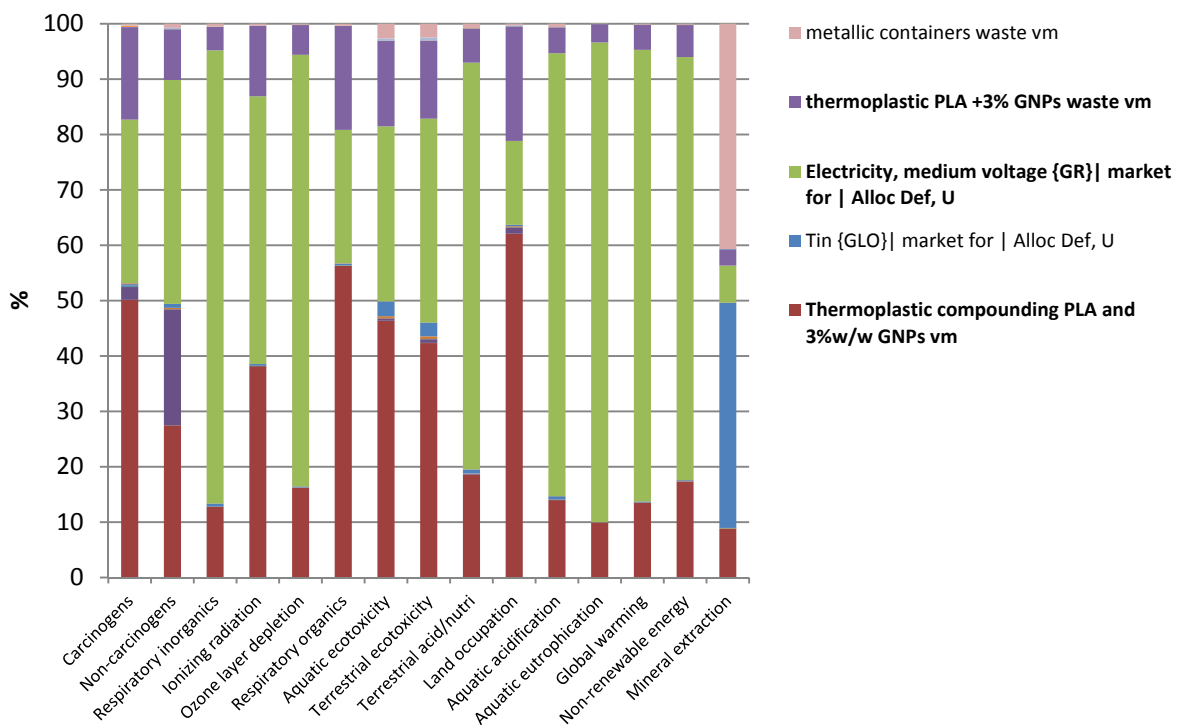


Εικόνα 43 Ραβδογράμματα χαρακτηρισμού παραγωγής συστήματος ψύξης CPU μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης με νήμα PLA +3% CNTs

Αποτελέσματα και συζήτηση

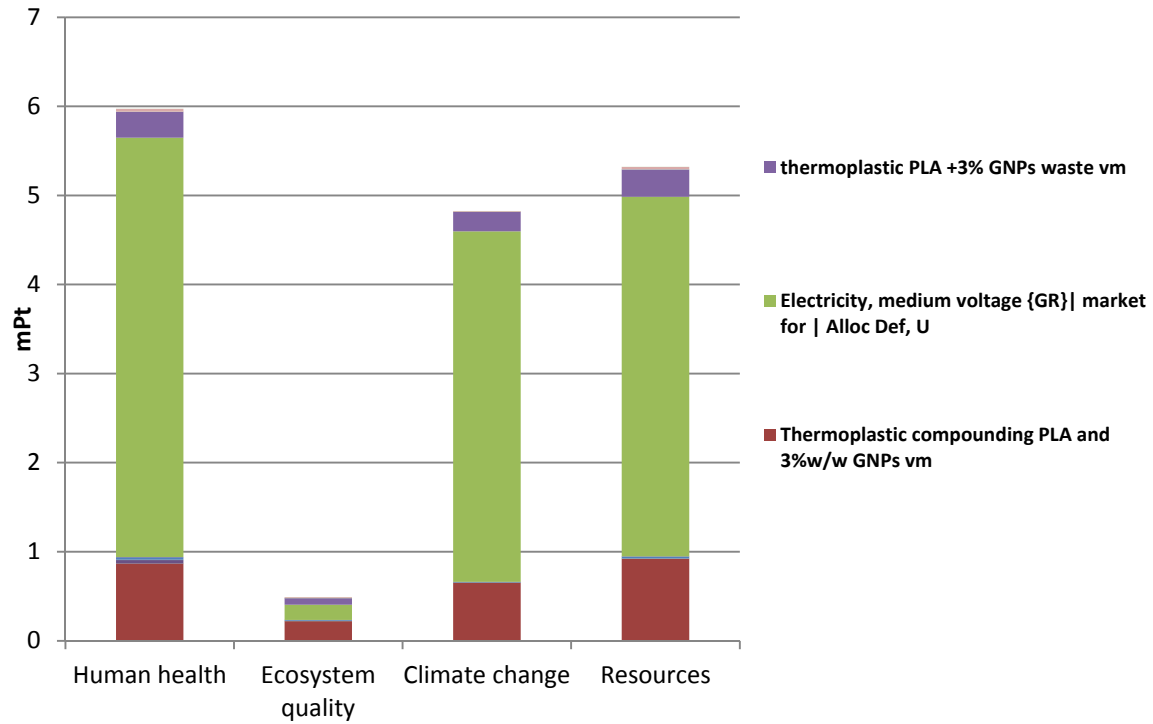


Εικόνα 44 Ραβδογράμματα στάθμισης παραγωγής συστήματος ψύξης CPU μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης με νήμα PLA +3% CNTs

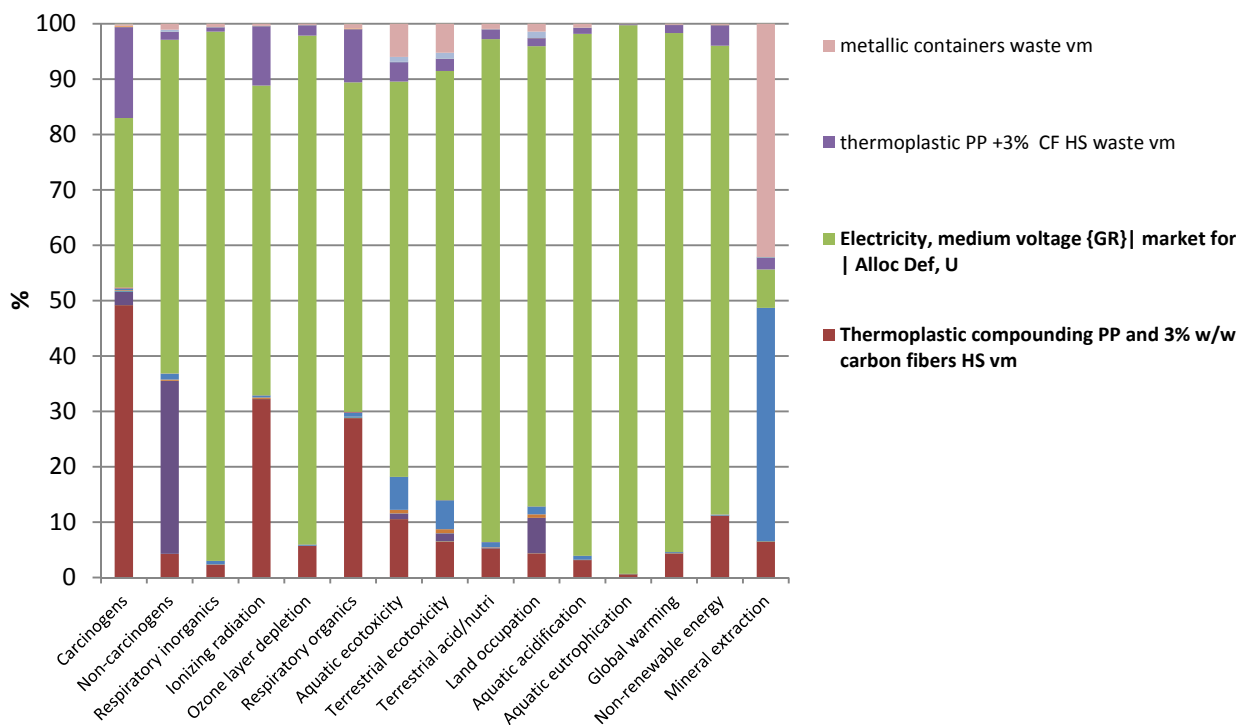


Εικόνα 45 Ραβδογράμματα χαρακτηρισμού παραγωγής συστήματος ψύξης CPU μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης με νήμα PLA +3% GNPs

Αποτελέσματα και συζήτηση

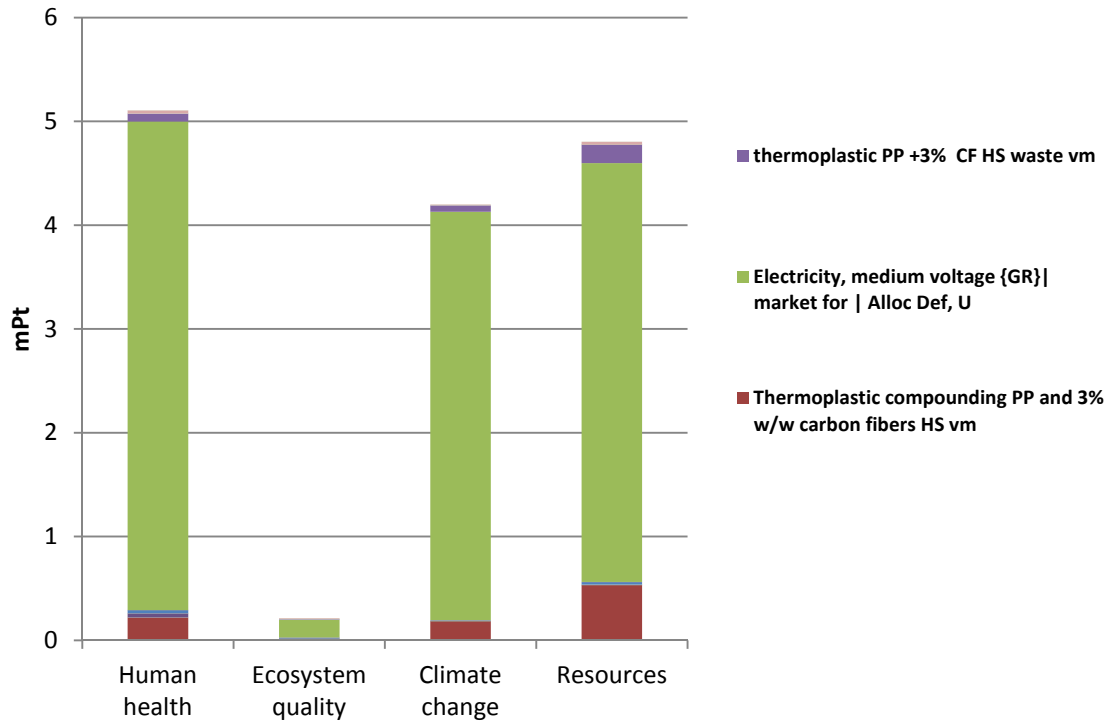


Εικόνα 46 Ραβδογράμματα στάθμισης παραγωγής συστήματος ψύξης CPU μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης με νήμα PLA +3% GNPs

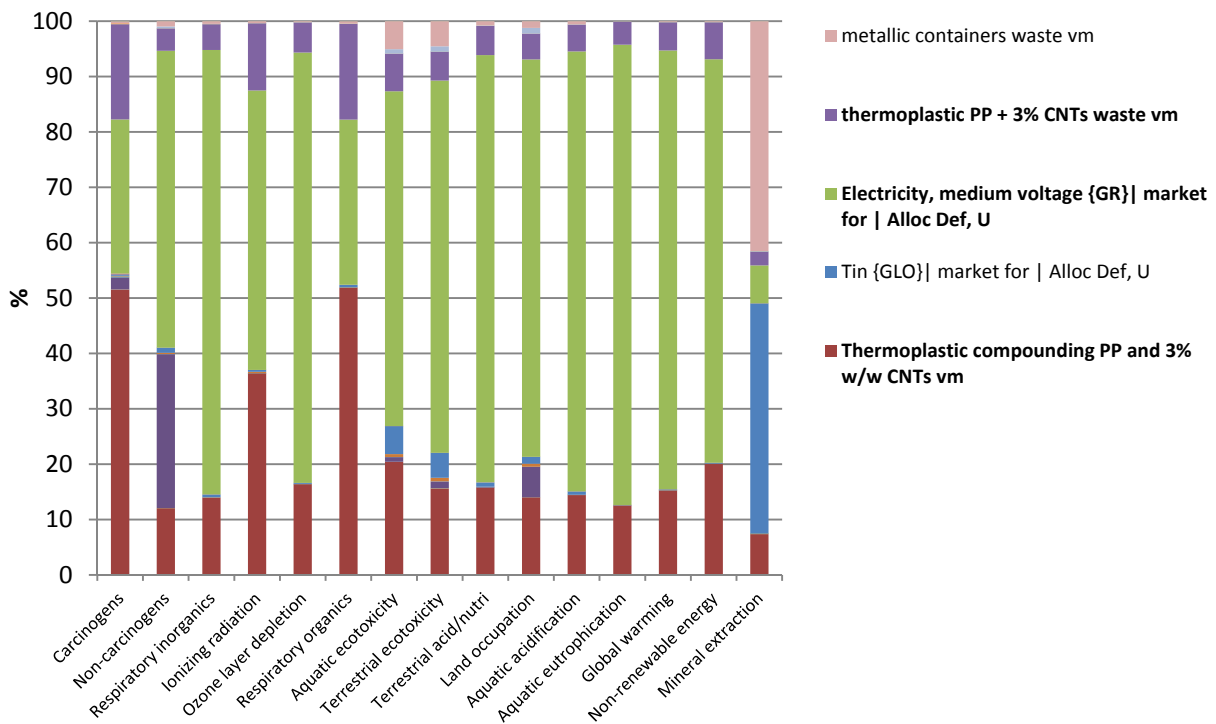


Εικόνα 47 Ραβδογράμματα χαρακτηρισμού παραγωγής συστήματος ψύξης CPU μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης με νήμα PP +3% CFs

Αποτελέσματα και συζήτηση

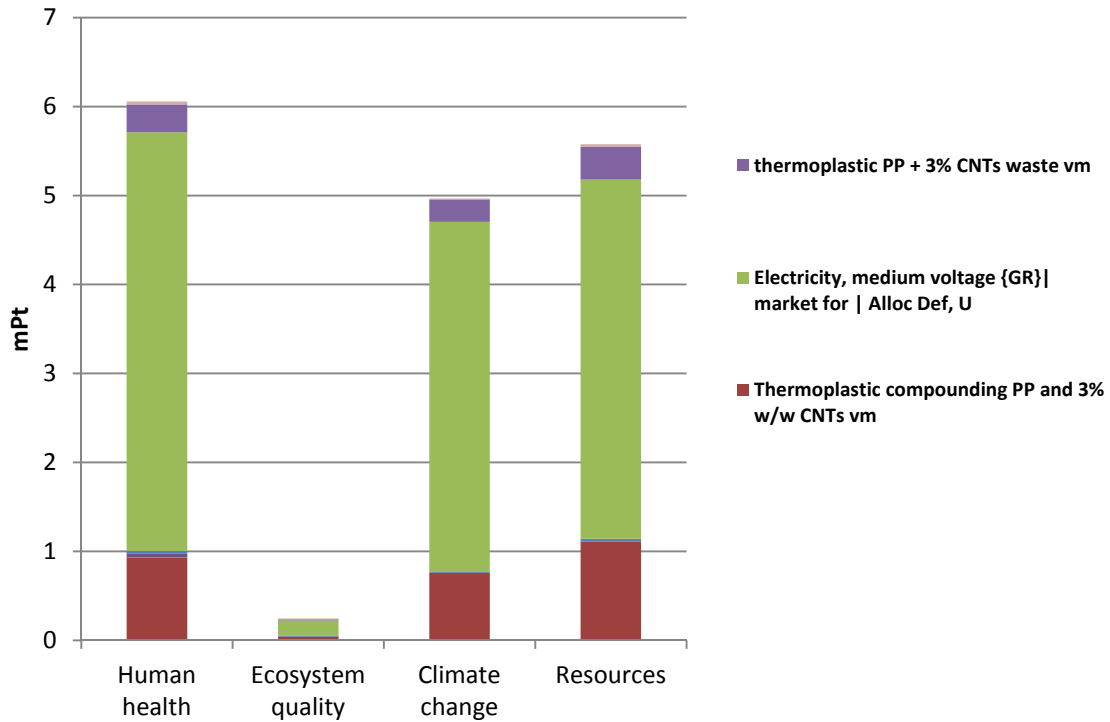


Εικόνα 48 Ραβδογράμματα στάθμισης παραγωγής συστήματος ψύξης CPU μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης με νήμα PP +3% CFs

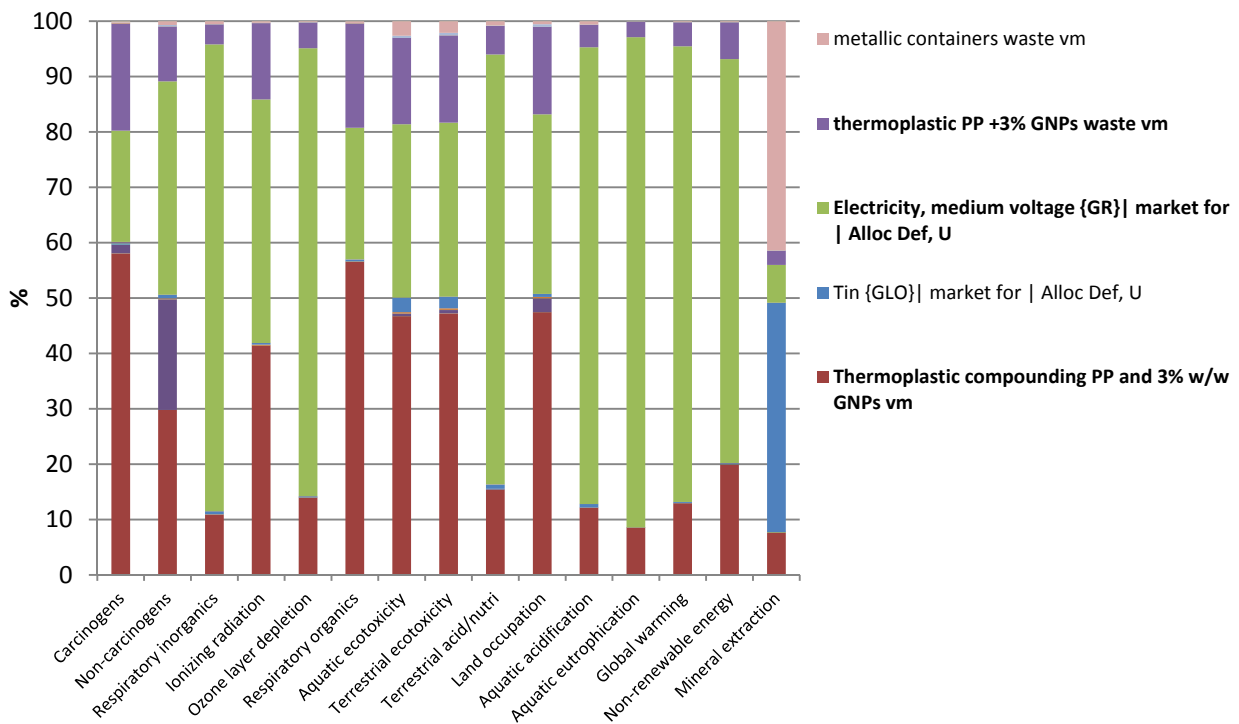


Εικόνα 49 Ραβδογράμματα χαρακτηρισμού παραγωγής συστήματος ψύξης CPU μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης με νήμα PP +3% CNTs

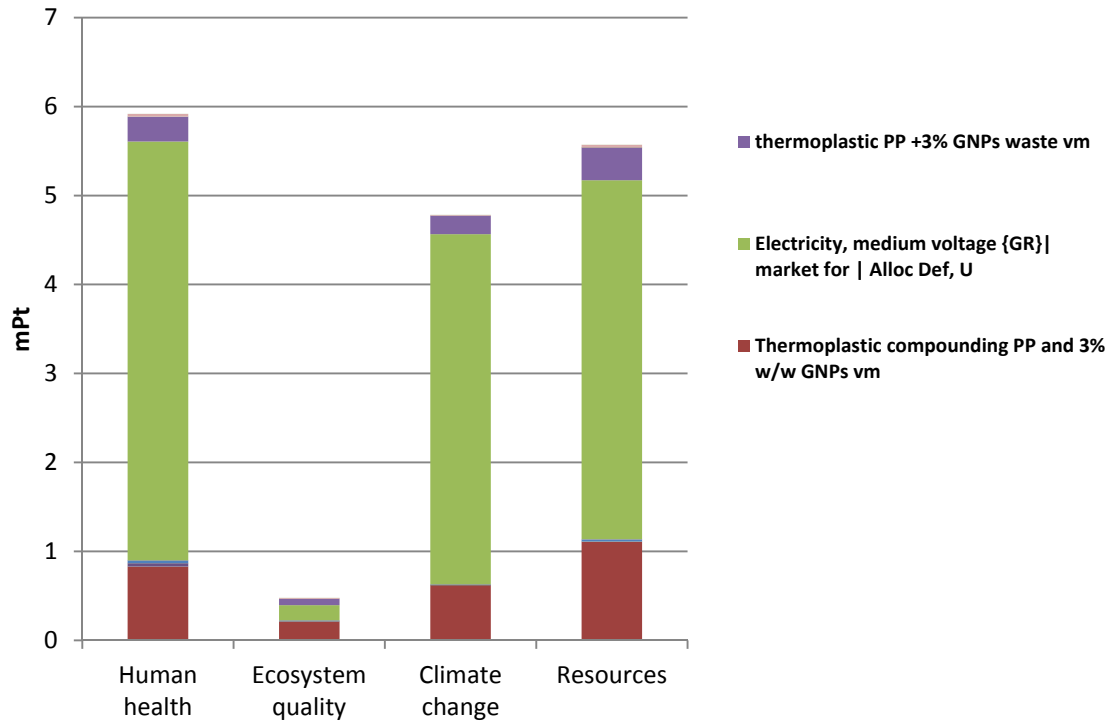
Αποτελέσματα και συζήτηση



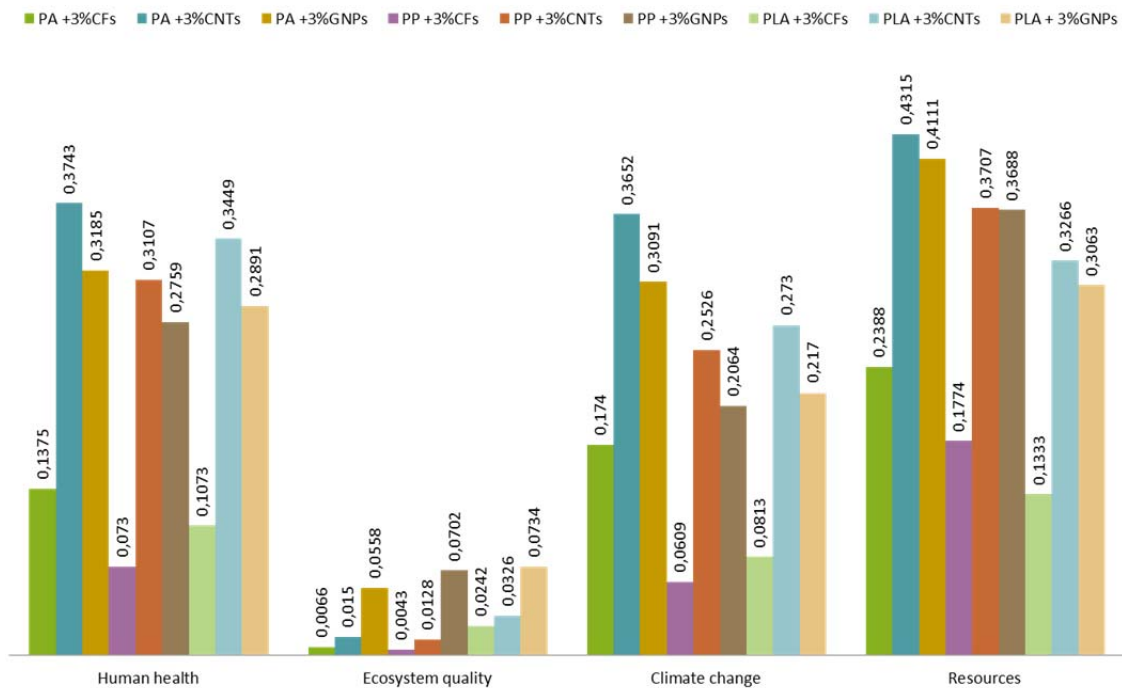
Εικόνα 50 Ραβδογράμματα στάθμισης παραγωγής συστήματος ψύξης CPU μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης με νήμα PP +3% CNTs



Εικόνα 51 Ραβδογράμματα χαρακτηρισμού παραγωγής συστήματος ψύξης CPU μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης με νήμα PP +3% GNPs



Εικόνα 52 Ραβδογράμματα στάθμισης παραγωγής συστήματος ψύξης CPU μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης με νήμα PP +3% GNPs



Εικόνα 53 Συνολικές μονάδες αποτυπώματος σε κάθε μία από τις τελικές κατηγορίες για τα εννέα νήματα που μελετήθηκαν

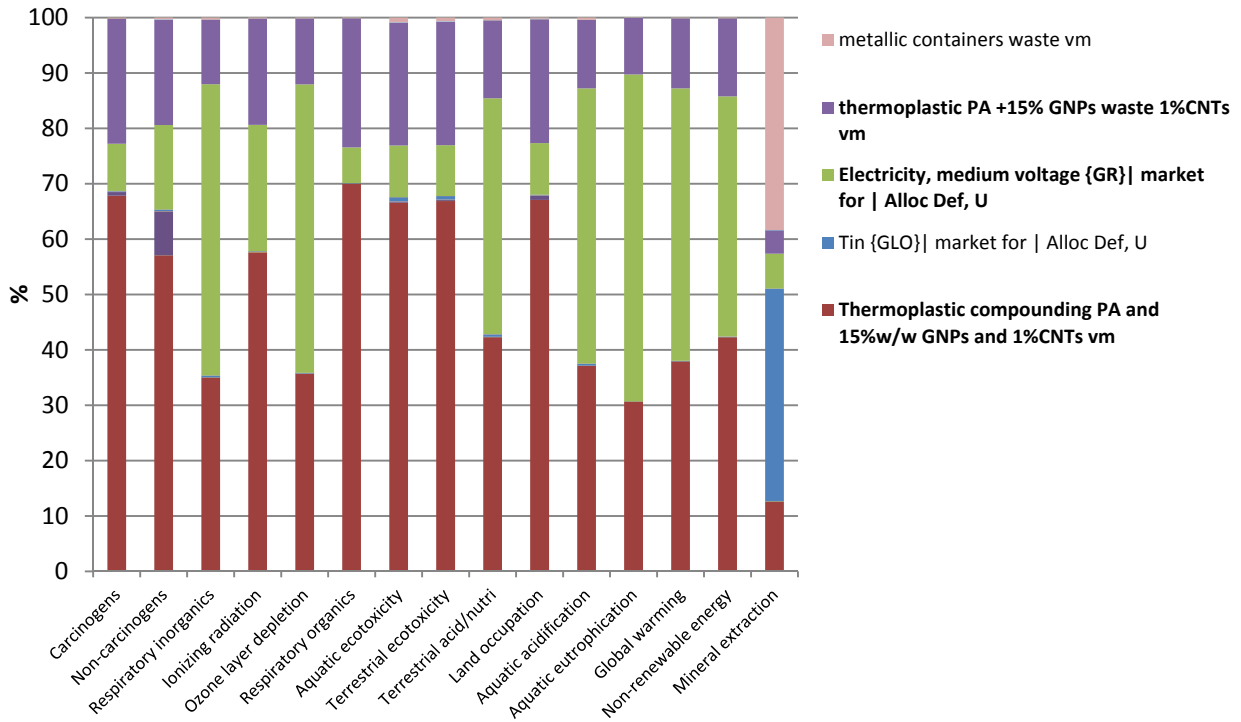
Από την παρατήρηση των ραβδογραμμάτων στις εικόνες 35-52 αλλά και την συγκριτική παρουσίαση των αποτυπωμάτων των εννέα νημάτων στην Εικόνα 53 προκύπτει το συμπέρασμα πως τα νήματα σύνθετων υλικών με εγκλείσματα CFs σε κάθε μία από τις τρεις πολυμερικές μήτρες που μελετήθηκαν παρουσιάζει το χαμηλότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Σύμφωνα με την ανάλυση της συνεισφοράς που έχει το κάθε τμήμα της διεργασίας στις συνολικές μονάδες των τελικών κατηγοριών (Εικόνες 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50, 52) προκύπτει πως μεγάλο τμήμα της περιβαλλοντικής επίπτωσης σε όλες τις μελετώμενες διεργασίες οφείλεται στην ενέργεια που καταναλώνεται κατά την παραγωγική διεργασία. Τμήμα αυτού του αποτυπώματος θα μπορούσε να μειωθεί αν μειωθεί η ενέργεια που καταναλώνεται ή αντικατασταθεί από μορφές φιλικότερες προς το περιβάλλον. Επιπλέον, από την σύγκριση των μονάδων για κάθε ένα από τα τρία σύνθετα υλικά με εγκλείσματα CFs στην Εικόνα 53 φαίνεται πως εκείνο με τη μήτρα πολυπροπυλενίου προκαλεί μικρότερη επίπτωση στο περιβάλλον σε σχέση με τις άλλες δύο (πολυαμιδίου και πολυγαλακτικού οξέος) που μελετήθηκαν.

Τα νήματα που μελετήθηκαν αποτελούνται από πολυμερική μήτρα ενός μόνο πολυμερούς και περιέχουν σταθερή συγκέντρωση ενός μόνο νανοϋλικού ως οπλισμό. Η πραγματικότητα μπορεί να διαφέρει πολύ από την παραπάνω παραδοχή καθώς για την επίτευξη των ίδιων επιθυμητών ιδιοτήτων από διαφορετικά σύνθετα υλικά οι συνδυασμοί και οι συγκεντρώσεις μήτρας – οπλισμού διαφοροποιούνται.⁸⁰ Η μελέτη πολλαπλών νημάτων σύνθετου υλικού που πληρούν τις ίδιες συγκεκριμένες ιδιότητες απαιτεί την παράλληλη πειραματική και υπολογιστική μελέτη και υπερβαίνει τα όρια της παρούσας μεταπτυχιακής μελέτης. Παρόλα αυτά για να γίνει κατανοητό το πόσο μπορούν να διαφοροποιηθούν τα αποτυπώματα στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της AKZ για την παραγωγή συστήματος ψύξης CPU μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης με εκτυπώσιμο νήμα σύνθετου υλικού με πολυμερική μήτρα PA και 15% κατά βάρος GNPs και 1% κατά βάρος CNTs.

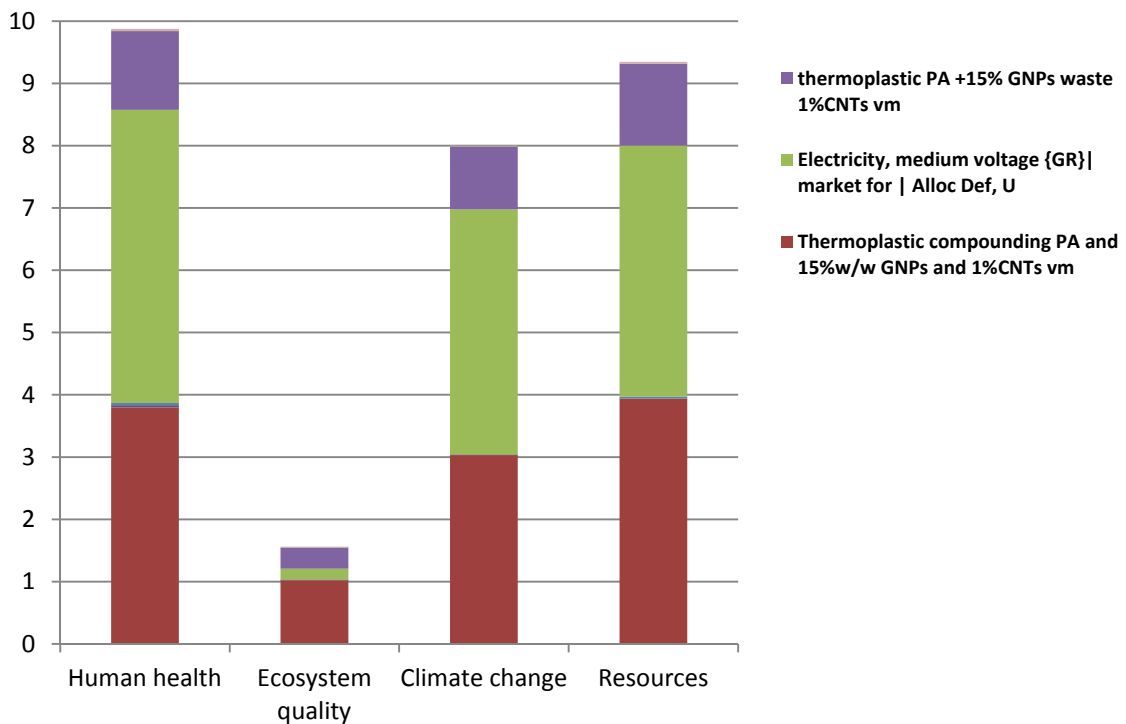
Στα ραβδογράμματα των Εικόνων 54 και 55 μπορεί κανείς να παρατηρήσει πως τα hot spot παραμένουν τα ίδια με αυτά που παρουσιάστηκα στις Εικόνες 35-52, συγκεκριμένα είναι η ενέργεια και τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται. Η σημαντική διαφορά που φαίνεται στα ραβδογράμματα είναι η αύξηση της συμμετοχής του σύνθετου υλικού στις ενδιάμεσες και τελικές κατηγορίες η οποία οφείλεται στην αύξηση της ποσότητας εγκλεισμάτων που περιέχονται στο

παραγόμενο σύνθετο υλικό. Επιπλέον, για τον ίδιο λόγο, στα ραβδογράμματα της Εικόνας 55 φαίνεται πως έχουν αυξηθεί σημαντικά οι συνολικές μονάδες όλων των τελικών κατηγοριών. Ο μεγαλύτερος αντίκτυπος παρουσιάζεται στην τελική κατηγορία της ανθρώπινης υγείας, ακολουθεί η τελική κατηγορία των φυσικών πόρων και έπειτα της κλιματικής αλλαγής ενώ τέλος, ο μικρότερος αντίκτυπος αφορά την τελική κατηγορία της ποιότητας του οικοσυστήματος. Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα της παρούσας μεταπτυχιακής που παρουσιάστηκαν νωρίτερα σχετικά με την επίδραση των εγκλεισμάτων και των πολυμερικών μητρών στις ενδιάμεσες και στις τελικές κατηγορίες μπορούμε να κατανοήσουμε πως η αύξηση της συγκέντρωσης των εγκλεισμάτων οδηγεί σε αύξηση των συνολικών μονάδων των τελικών κατηγοριών. Επιπλέον, θα μπορούσαμε να προτείνουμε δράσεις για την μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της διεργασίας. Μία πρώτη αλλαγή που μπορεί να επιφέρει μείωση των αποτυπώματων είναι η μείωση της ποσότητας των GNPs ως εγκλείσματα και η αντικατάστασή τους από CFs. Μία δεύτερη αλλαγή που μπορεί να προταθεί είναι η αντικατάσταση του πολυαμιδίου με πολυπροπυλένιο, η αντικατάσταση αυτή μπορεί να ενισχύσει την μείωση της περιβαλλοντικής επίπτωσης. Τέλος, η μείωση της ενέργειας που απαιτείται για την διεργασία στο βαθμό του εφικτού ή η επιλογή ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές θα μπορούσε να επιφέρει επιπλέον θετικά αποτελέσματα στα αποτυπώματα των ενδιάμεσων και των τελικών κατηγοριών.⁸¹ Ο συμβουλευτικός ρόλος που έχει η μελέτη της AKZ θα πρέπει πάντα να συνδυάζεται με παράλληλες πειραματικές μελέτες που θα διασφαλίζουν πως οι προτεινόμενες αλλαγές δεν υποβαθμίζουν τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος και δεν προκαλούν προβλήματα στην παραγωγική διαδικασία

Αποτελέσματα και συζήτηση



Εικόνα 54 Ραβδογράμματα χαρακτηρισμού τριδιάστατης εκτόπωσης με νήμα PA +15% GNPs +1% CNTs



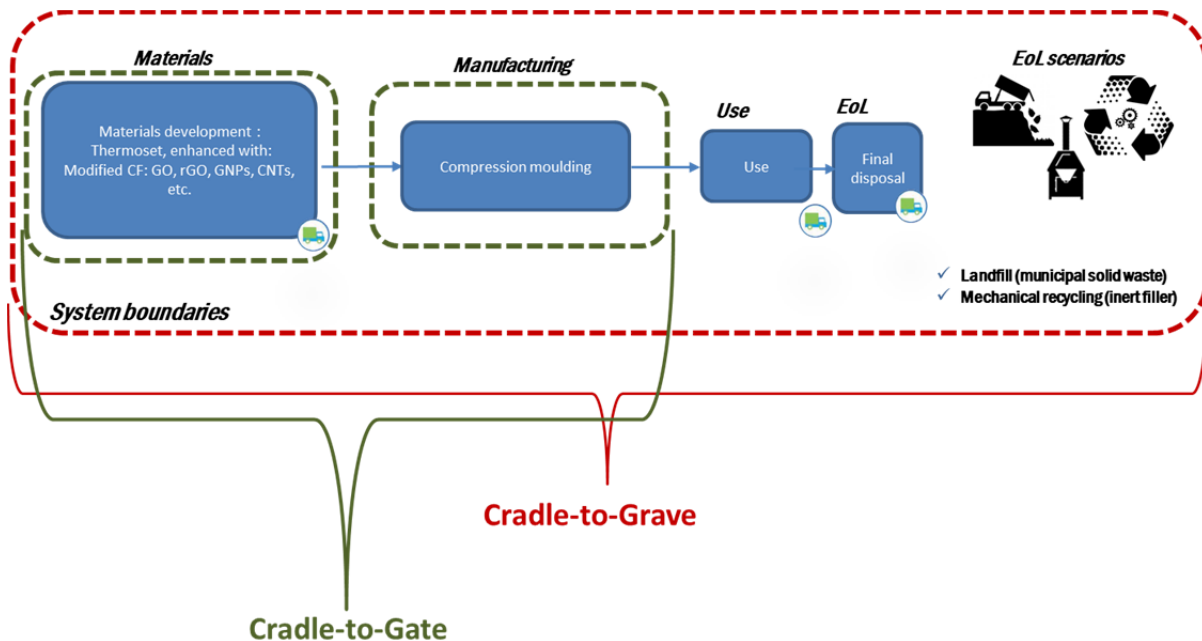
Εικόνα 55 Ραβδογράμματα στάθμισης τριδιάστατης εκτόπωσης με νήμα PA +15% GNPs +1% CNTs

2. Παραγωγή μπροστινού πτερυγίου αγωνιστικού αυτοκινήτου

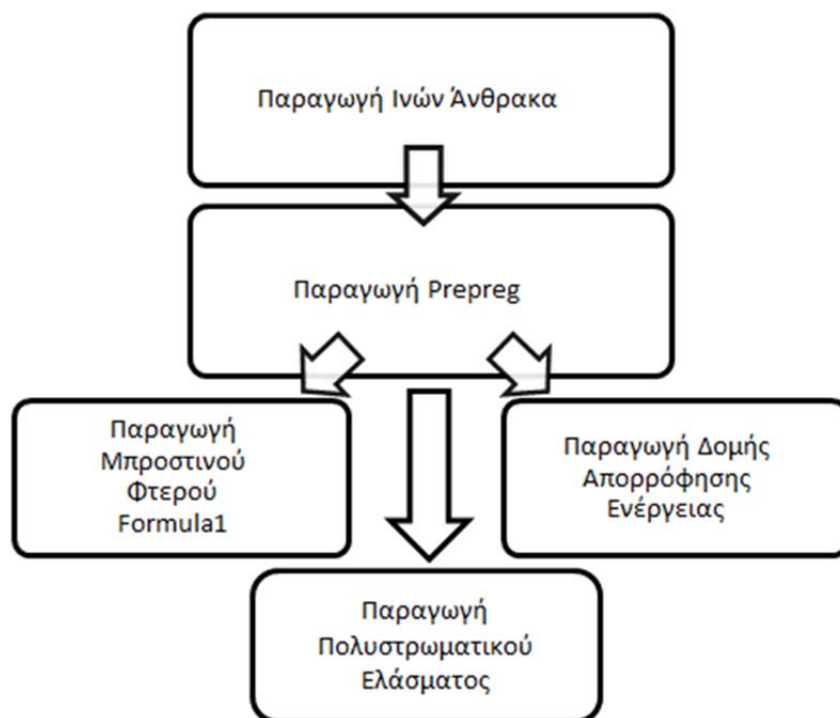
Το δεύτερο σύστημα το οποίο μελετήθηκε ήταν η παραγωγή με τεχνολογία συμπίεσης θερμοσκληρυνόμενου prepreg του μπροστινού πτερυγίου αγωνιστικού αυτοκινήτου. Η μελέτη και για αυτό το σύστημα έλαβε υπόψη τα υλικά και την παραγωγική διαδικασία cradle-to-gate και όχι όλο τον κύκλο ζωής του προϊόντος όπως φαίνεται στην Εικόνα 56. Για την παραγωγή προϊόντων με χρήση της τεχνολογίας συμπίεσης φύλλων prepreg απαιτείται η αλληλουχία διεργασιών που παρουσιάζεται στην Εικόνα 56 και αναλύεται στη συνέχεια.

Ανάπτυξη των υλικών

Το inventory που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγής ινών άνθρακα είναι ίδιο με αυτό που περιγράφηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο. Για την παραγωγή των έτοιμων φύλλων Prepreg τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για το inventory της διεργασίας βασίστηκαν σε βιομηχανική διεργασία παραγωγής τα σημαντικότερα δεδομένα της οποίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Η λειτουργική μονάδα που επιλέχθηκε για την μελέτη είναι η παραγωγή ενός τετραγωνικού μέτρου φύλλων prepreg.



Εικόνα 56 Κύκλος ζωής για το μπροστινό πτερόγιο αγωνιστικού αυτοκινήτου



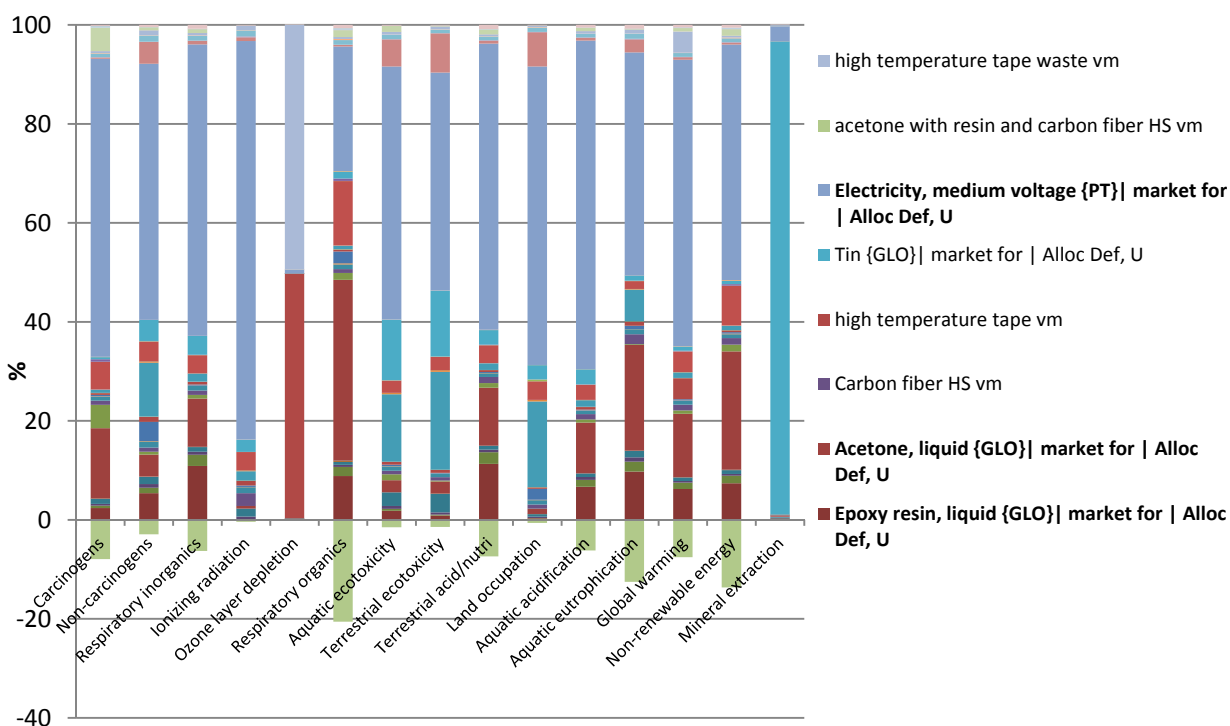
Εικόνα 57 Αλληλουχία διεργασιών για την παραγωγή προϊόντων με χρήση prepreg

Πίνακας 5 Δεδομένα διεργασίας παραγωγής φύλλων prepreg

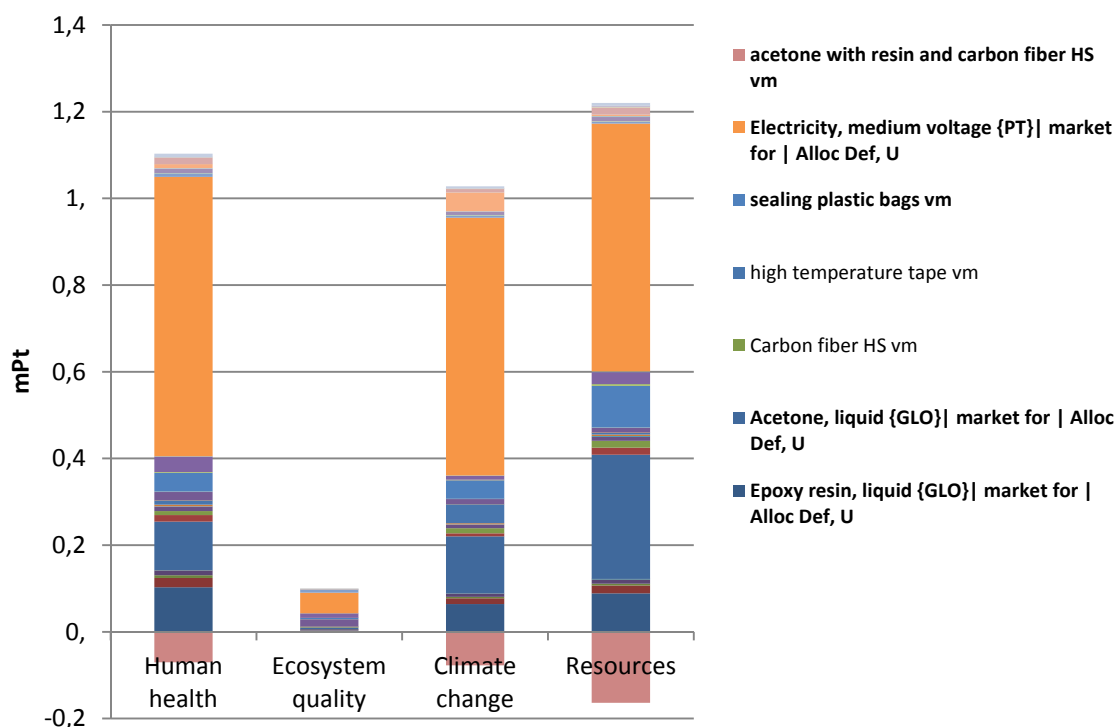
Παρασκευή 550 m ² CFRP	Ποσότητες
Δεδομένα εισόδου	
Εποξειδική Ρητίνη	55 kg
Ακετόνη	450 L
Ενέργεια	5900kWh
CFs	5 kg
Μεμβράνη σφράγισης	20 m ²
Αναλώσιμα εργαστηρίου	2500 γάντια νιτριλίου και latex 15 kg χαρτί εργαστηρίου 30 μάσκες
Μεταλλικά δοχεία	23 δοχεία
Πλαστικά δοχεία	250 δοχεία
Εκπομπές/Απόβλητα	
VOC	250 ng
CO ₂	<1 kg
Φορμαλδεΰδη	<1,2 μg
CFs	0,385 kg

Ακετόνη (με ρητίνη και CFs)	350L
Ανακύκλωση	
Ακετόνη (με ρητίνη και CFs)	250L

Τα αποτελέσματα για την ΑΚΖ της διεργασίας παραγωγής των φύλλων prepreg που παρουσιάζονται στις Εικόνες 58-59 μπορούν να βοηθήσουν στο να εντοπιστούν τα hotspots για αυτήν. Συγκεκριμένα, η ενέργεια που καταναλώνεται για την διεργασία, η εποξειδική ρητίνη και η ακετόνη, είναι τα τρία στοιχεία του inventory με την μεγαλύτερη συνεισφορά στις ενδιάμεσες και τις τελικές κατηγορίες. Μία άλλη πολύ ενδιαφέρουσα παρατήρηση που μπορεί να γίνει στα ραβδογράμματα των Εικόνων 58 και 59 είναι η παρουσία ράβδων με αρνητικές τιμές που οφείλονται σε ανακύκλωση.⁸² Η διεργασία παραγωγής Prepreg ήταν η μοναδική για την οποία υπήρχαν δεδομένα ανακύκλωσης και χρησιμοποιήθηκαν κατά την εισαγωγή των δεδομένων της διεργασίας στη βιβλιοθήκη του SimaPro. Ειδικότερα, οι ράβδοι με τις αρνητικές τιμές είναι συνδεδεμένες με ανακύκλωση της χρησιμοποιημένης ακετόνης με τα υπολείμματα ρητίνης και ινών άνθρακα. Στα ραβδογράμματα η θετική επίδραση της ανακύκλωσης αποτυπώνεται με το αρνητικό πρόσημο του αποτυπώματός της.⁸³



Εικόνα 58 Ραβδογράμματα χαρακτηρισμού διεργασίας παραγωγής Prepreg με ανακύκλωση



Εικόνα 59 Ραβδογράμματα στάθμισης διεργασίας παραγωγής Prepreg με ανακύκλωση

Σε αυτό το σημείο αξίζει να διευκρινιστεί πως η παρουσία της ανακύκλωσης και των αρνητικών τμημάτων των ράβδων στα αντίστοιχα ραβδογράμματα μιας διεργασίας δεν περνάει σε επόμενη διεργασία που θα έχει ως τμήμα της την πρώτη. Έτσι, ενώ μπορεί να επιλέχθηκε ως τμήμα του inventory μία διεργασία με ανακύκλωση στα αποτελέσματα της AKZ αυτής της διεργασίας δε θα υπάρχουν ράβδοι με αρνητικές τιμές. Η επίδραση της ανακύκλωσης βέβαια περνάει από διεργασία σε διεργασία καθώς οι μονάδες του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος είναι μειωμένες λόγω ανακύκλωσης.

Στα ραβδογράμματα χαρακτηρισμού στην Εικόνα 58 φαίνεται πως η ενέργεια είναι hot spot σε όλες τις ενδιάμεσες κατηγορίες εκτός από αυτή της μείωσης της ζώνης του όζοντος και της εξόρυξης ορυκτών και ακολουθούν η ακετόνη η εποξειδική ρητίνη και τα επικουρικά πολυμερικά υλικά της διεργασίας. Στα ραβδογράμματα στάθμισης της Εικόνας 59 φαίνεται πως τα hot spot παραμένουν ίδια με αυτά της εικόνας 58 και είναι συνδεδεμένα με τις περισσότερες μονάδες στις τελικές κατηγορίες. Συνολικά, η διεργασία έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο στην τελική κατηγορία των

φυσικών πόρων και έπειτα στις τελικές κατηγορίες τις ανθρώπινης υγείας και της κλιματικής αλλαγής. Η ποιότητα του οικοσυστήματος επηρεάζεται λιγότερο από όλες τις τελικές κατηγορίες.

AKZ παραγωγής μπροστινού πτερυγίου αγωνιστικού αυτοκινήτου.

Όταν πλέον ήταν διαθέσιμα όλα τα απαραίτητα inventories για την μελέτη της AKZ για την παραγωγή του μπροστινού πτερυγίου αγωνιστικού αυτοκινήτου έπρεπε να συλλεχθούν τα δεδομένα και για την δημιουργία του τελικού inventory. Η μελέτη της AKZ για το μπροστινό πτερύγιο αγωνιστικών αυτοκινήτων βασίστηκε σε δεδομένα διεργασίας παραγωγής του σε βιομηχανική κλίμακα. Τα σημαντικότερα δεδομένα της διεργασίας παραγωγής παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. Η λειτουργική μονάδα που επιλέχθηκε για την μελέτη είναι η παραγωγή ενός τεμαχίου.

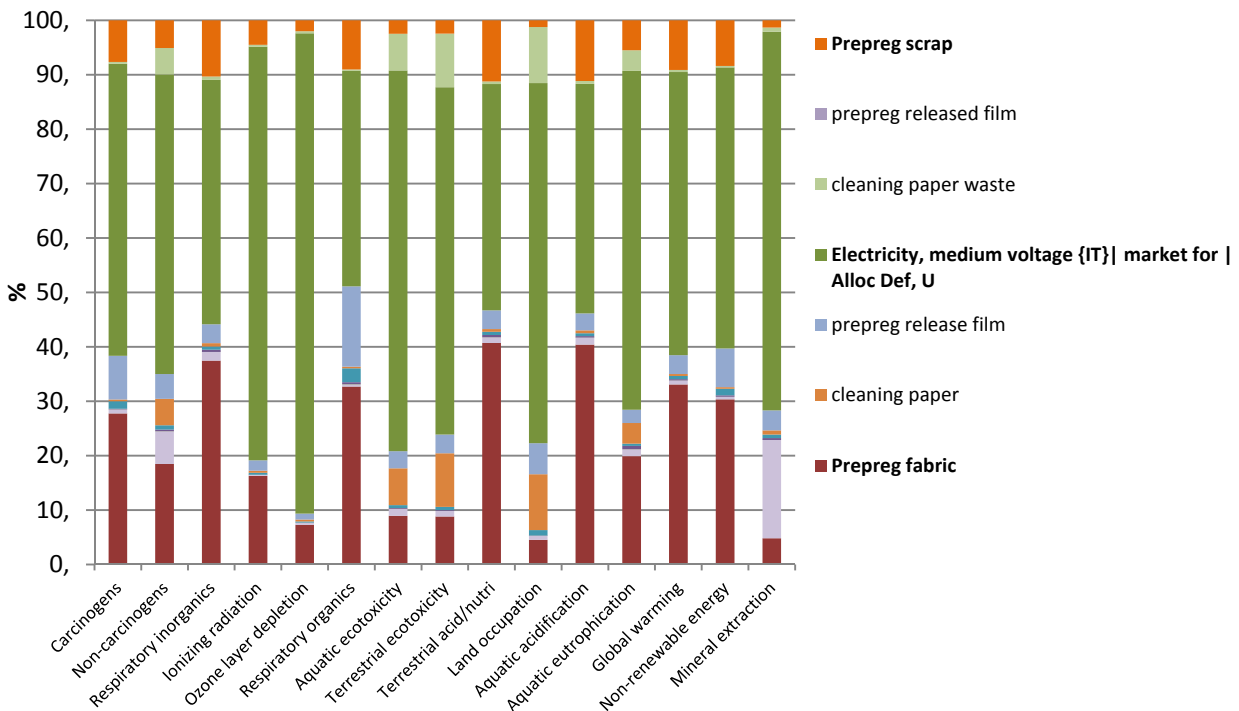
Πίνακας 6 Δεδομένα διεργασίας παραγωγής μπροστινού πτερυγίου αγωνιστικού αυτοκινήτου

Παρασκευή 50 τεμαχίων μπροστινού πτερυγίου αγωνιστικού αυτοκινήτου	Ποσότητες
Δεδομένα εισόδου	
Φύλλα prepreg	2.9 m ²
Ένθετα αλουμινίου	40 g
Ενέργεια	92kWh
Μεμβράνη συσκευασίας	5.8 m ²
Αναλώσιμα εργαστηρίου	0.15 kg χαρτί εργαστηρίου
Εκπομπές/Απόβλητα	
Φύλλα prepreg	0.8 m ²

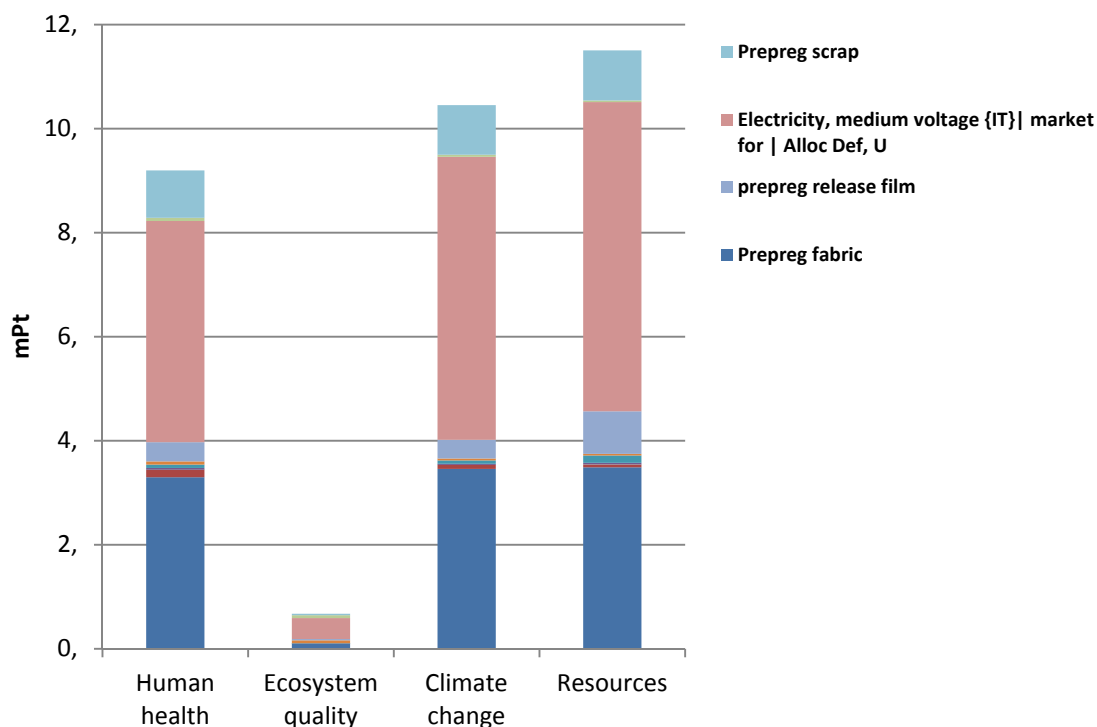
Στα ραβδογράμματα χαρακτηρισμού της διεργασίας στην Εικόνα 60 φαίνεται πως τα hotspot της παραγωγής πτερυγίου με τεχνολογία συμπίεσης θερμοσκληρυνόμενου prepreg είναι η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την διεργασία, το prepreg, τα υλικά συσκευασίας του καθώς και η φύρα που προκύπτει από την κοπή των φύλλων prepreg. Τα ίδια hot spot παρατηρούνται και στα ραβδογράμματα στάθμισης στην Εικόνα 61. Συγκεκριμένα οι περισσότερες μονάδες σε όλες τις τελικές κατηγορίες οφείλονται στην ενέργεια, στο prepreg (συμπεριλαμβανομένης της φύρας) και σε στα πολυμερικά υλικά συσκευασίας. Η τελική κατηγορία που επηρεάζεται περισσότερο

είναι οι φυσικοί πόροι και ακολουθούν η κλιματική αλλαγή, η ανθρώπινη υγεία και η ποιότητα του οικοσυστήματος.

Με βάση τα αποτελέσματα της ΑΚΖ μπορούν να προταθούν αλλαγές της παραγωγικής διεργασίας για τη μείωση των συνολικών μονάδων των τελικών κατηγοριών που προκύπτουν στα ραβδογράμματα της Εικόνας 61. Μια πρώτη πρόταση είναι να γίνει καλύτερος σχεδιασμός της κοπής των φύλλων prepreg ώστε να μειωθεί η συνολική ποσότητα των μικρών κομματιών που δεν χρησιμοποιούνται, μία ορθολογικότερη κοπή σύμφωνα με τα αποτελέσματα μπορεί να οδηγήσει σε μείωση μέχρι και 10% τις συνολικές μονάδες των τελικών κατηγοριών. Μία δεύτερη πρόταση που θα μπορούσε να επιφέρει σημαντική μείωση των συνολικών μονάδων είναι η επιλογή φιλικότερων προς το περιβάλλον μορφών ενέργειας.⁸¹



Εικόνα 60 Ραβδογράμματα χαρακτηρισμού παραγωγή μίας περυγίου αγωνιστικού αυτοκινήτων που προέκυψε με τεχνολογία συμπίεσης θερμοσκληρυνόμενου prepreg



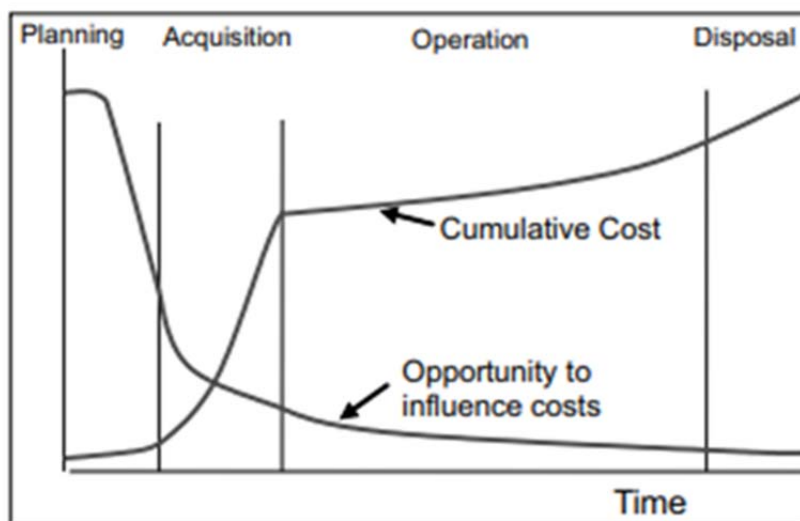
Εικόνα 61 Ραβδογράμματα στάθμισης διεργασίας παραγωγή μπροστινού πτερυγίου αγωνιστικού αυτοκινήτων που προέκυψε με τεχνολογία συμπίεσης θερμοσκληρυνόμενου prepeg.

3. Ανάλυση κόστους κύκλου ζωής των προϊόντων που μελετήθηκαν

Για την ολοκληρωμένη παρουσίαση των δύο προϊόντων για τα οποία πραγματοποιήθηκε η ΑΚΖ, η μελέτη επεκτάθηκε και στις οικονομικές επιπτώσεις από την παραγωγή τους. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε μια προκαταρκτική μελέτη του κόστους του κύκλου ζωής τους (ΚΚΖ).

Η μελέτη εστιάστηκε στην ανάλυση του ΚΚΖ της παραγωγικής διαδικασίας μέρος του συστήματος ψύξης CPU και του μπροστινού πτερυγίου αγωνιστικού αυτοκινήτου με βάση σύνθετα υλικά. Ακολούθησε η σύγκριση των αποτελεσμάτων με το ΚΚΖ των αντίστοιχων συμβατικών προϊόντων που στοχεύουν να αντικαταστήσουν τα προϊόντα που μελετήθηκαν. Ως λειτουργική μονάδα ορίστηκε η παρασκευή εκατό μονάδων προϊόντος. Για την εκτίμηση του κόστους του κύκλου ζωής λήφθηκαν υπόψη δεδομένα για τα κόστη της παραγωγής, της χρήσης και της διάθεσης των προϊόντων, ενώ τα κόστη της φάσης του σχεδιασμού και της τελικής απόθεσης των προϊόντων δε λήφθηκαν υπόψη.⁸⁴ Στην Εικόνα 61 παρουσιάζεται η συνεισφορά του κάθε τμήματος του κύκλου ζωής στο συνολικό κόστος αλλά και η δυνατότητα

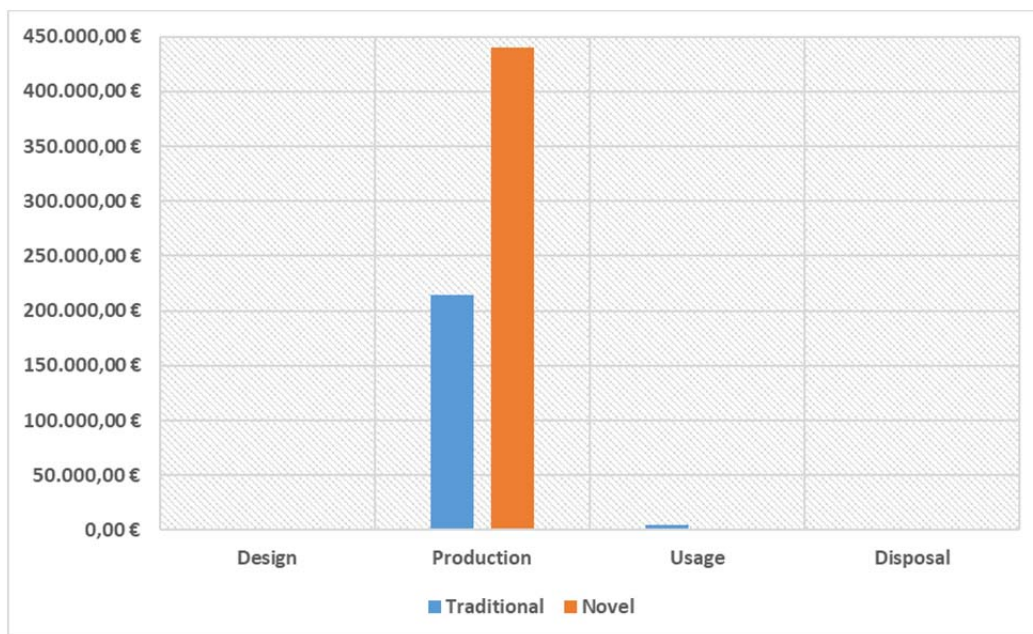
μείωσής του. Όλα τα κόστη που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν τον κύκλο ζωής από την απόκτηση των πρώτων υλών μέχρι το κόστος ανακύκλωσης που σχετίζονται με την παραγωγική διαδικασία και συμπεριλαμβάνουν τα κόστη μεταφοράς, προσωπικού, αποθήκευσης, χρήσης και συντήρησης. Ο χρονικός ορίζοντας της μελέτης ορίστηκε στα 10 χρόνια και το ποσοστό του προεξοφλητικού επιτοκίου για την μελέτη ορίστηκε στο 5%.



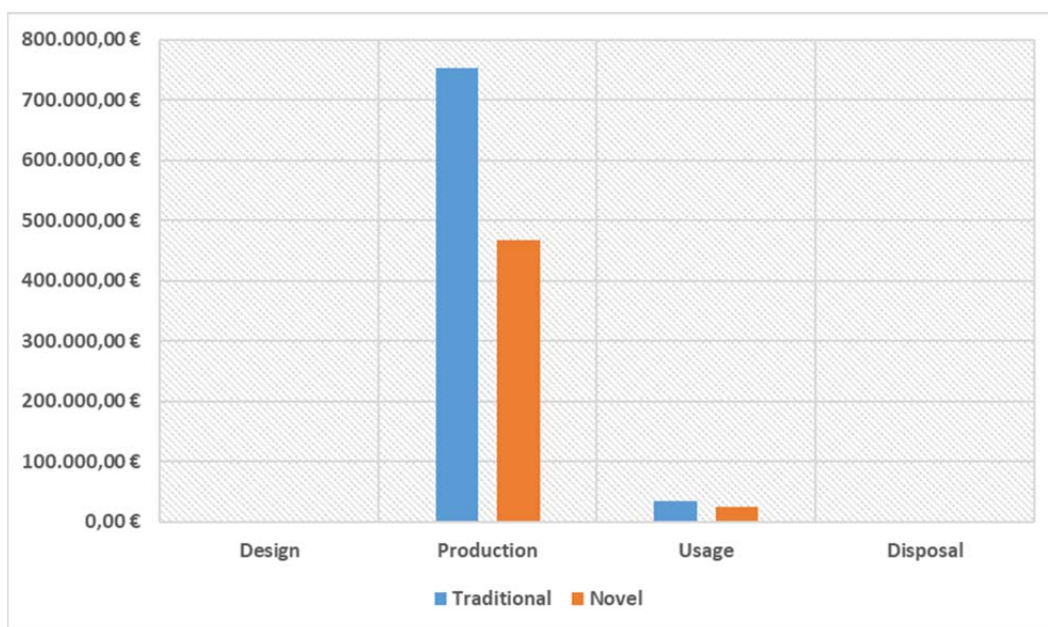
Εικόνα 62 Κόστος κύκλου ζωής⁸⁴

Κατά το στάδιο της παραγωγής υπολογίστηκαν οι πρώτες ύλες, η ενέργεια και το κόστος εργασίας. Στο στάδιο της χρήσης υπολογίστηκε το κόστος μεταφοράς, η αποθήκευση, η συντήρηση και το κόστος συσκευασίας. Ενώ τέλος στο στάδιο του διαχωρισμού υπολογίστηκε το κόστος της αποσυναρμολόγησης, της ανακύκλωσης και της ασφαλούς διάθεσης.

Τα συνολικά κόστη όλων των παραπάνω και η σχετική σύγκριση με τα αντίστοιχα συμβατικά προϊόντα παρουσιάζονται στις εικόνες 63 και 64 για το μέρος της ψήκτρας και το φτερό του αυτοκινήτου αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, το κόστος της παραγωγικής διαδικασίας μέρους του συστήματος ψύξης CPU κατασκευασμένο με σύνθετα υλικά με τεχνολογία τριδιάστατης εκτύπωσης συγκρίθηκε με το αντίστοιχο κόστος του συμβατικού συστήματος κατασκευασμένο από αλουμίνιο, ενώ το κόστος της παραγωγής του μπροστινού πτερυγίου αγωνιστικού αυτοκινήτου με τεχνολογία συμπίεσης θερμοσκληρυνόμενου prepreg συγκρίθηκε με το κόστος ανάλογου τμήματος για την κατασκευή του οποίου χρησιμοποιήθηκαν προηγμένα υλικά.



Εικόνα 63 Συγκριτικό ραβδόγραμμα κόστους κύκλου ζωής καινοτόμου και συμβατικού συστήματος ψύξης CPU



Εικόνα 64 Συγκριτικό ραβδόγραμμα κόστους κύκλου ζωής καινοτόμου και συμβατικού μπροστινού πτερυγίου αγωνιστικού αυτοκινήτου

Από τα αποτελέσματα των παραπάνω εικόνων είναι φαίνεται πως η παραγωγή καινοτόμων τμημάτων συστημάτων ψύξης CPU οδηγεί σε αύξηση του κόστους του κύκλου ζωής, αυτό οφείλεται αφενός στο γεγονός ότι η παραγωγή βρίσκεται ακόμα σε εργαστηριακή κλίμακα και αφετέρου στα πολύ ακριβά υλικά και τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται. Αντίθετα η παραγωγή μπροστινού πτερυγίου με σύνθετα υλικά με βάση των άνθρακα μειώνουν σημαντικά το κόστος του κύκλου ζωής σε αυτό βοηθά

το γεγονός πως η παραγωγή δεν γίνεται σε εργαστηριακή κλίμακα και πως τα συμβατικά προϊόντα με τα οποία γίνεται η σύγκριση απαιτούν για την παραγωγή του την χρήση προηγμένων υλικών των οποίων το κόστος είναι υψηλό.⁸⁵

Όπως ήταν αναμενόμενο από την ανάλυση της Εικόνας 62 το κόστος της παραγωγής συνεισφέρει το μεγαλύτερο κομμάτι στο συνολικό κόστος. Η μελέτη της ανάλυσης του κόστους θα μπορούσε να εμπλουτιστεί αν ήταν διαθέσιμα επιπλέον δεδομένα για τμήματα του σχεδιασμού και της τελικής απόθεσης παρόλα αυτά είναι αρκετά ασφαλές να πούμε πως δεν θα άλλαζε το συγκριτικό αποτέλεσμα για τα δύο συστήματα.

Κεφάλαιο 4

Συμπεράσματα

Μέσω της AKZ αξιολογήθηκε το περιβαλλοντικό φορτίο που σχετίζεται με την παραγωγή σύνθετων υλικών με βάση των άνθρακα και των διεργασιών που χρησιμοποιούν σύνθετα υλικά για την παραγωγή άλλων προϊόντων. Για να συμβεί αυτό είχε προηγηθεί η ταυτοποίηση και ποσοτικοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται, των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται και των αποβλήτων που απελευθερώνονται στο περιβάλλον ή ανακυκλώνονται. Επιπλέον, δημιουργήθηκαν και προστέθηκαν στη βιβλιοθήκη του λογισμικού τα inventories που δεν υπήρχαν και χρειαζόντουσαν για την μελέτη.

Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή περιελάμβανε το τμήμα cradle to gate του κύκλου ζωής και συγκεκριμένα την επεξεργασία των πρώτων υλών για την παραγωγή προϊόντων, τη συσκευασία αυτών των προϊόντων και την ανακύκλωση τμήματος των εκπομπών της διεργασίας παραγωγής. Η ανάλυση αυτή πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού SimaPro και του μεθοδολογικού πλαισίου IMPACT 2002+ για την εκτίμηση αποτυπωμάτων.

Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε η AKZ νημάτων σύνθετων υλικών και βρέθηκε πως τα hot spot της διεργασίας παραγωγής τους είναι η ενέργεια, η πολυμερικές μήτρες και τα εγκλείσματα. Τα νήματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη της AKZ της διεργασίας παραγωγής τμήματος του συστήματος ψύξης μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης και από τη συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων προέκυψε πως το

σύνθετο υλικό με το χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα είναι αυτό με πολυμερική μήτρα PP και εγκλείσματα CFs. Στη συνέχεια μελετήθηκε η AKZ της παραγωγή φύλλων prepreg και διαπιστώθηκε πως τα hot spots της διεργασίας είναι η ενέργεια, η εποξειδική ρητίνη και η ακετόνη. Έπειτα, το inventory για τα φύλλα prepreg χρησιμοποιήθηκε για την AKZ της διεργασία παραγωγής τμήματος μπροστινού πτερυγίου αγωνιστικού αυτοκινήτου, τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν πως τα hot spots αυτής της διεργασίας είναι τα φύλλα prepreg και η ενέργεια. Από τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των κύκλων ζωής των δύο συστημάτων που μελετήθηκαν. Με χρήση αυτών των αποτελεσμάτων μπορεί να προταθεί η βελτίωση των διεργασιών ώστε να επιτευχθεί η δημιουργία προϊόντων με τις επιθυμητές ιδιότητες μέσω διεργασιών παραγωγής που προκαλούν μικρότερη περιβαλλοντική υποβάθμιση.

Για μία πιο ολοκληρωμένη μελέτη των κύκλων ζωής των παραγόμενων προϊόντων παράλληλα με την εκτίμηση των περιβαλλοντικών αποτυπωμάτων του κύκλου ζωής τους πραγματοποιήθηκε και εκτίμηση του κόστους κύκλου ζωής. Το κόστος του κύκλου ζωής του τμήματος του συστήματος ψύξης και του μπροστινού πτερυγίου αγωνιστικού αυτοκινήτου υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη τα κόστη παραγωγής, χρήσης και διάθεσης των προϊόντων. Τα κόστη για τα καινοτόμα προϊόντα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τα κόστη συμβατικών προϊόντων που φιλοδοξούν να αντικαταστήσουν. Στην περίπτωση του τμήματος του συστήματος ψύξης το KKZ ήταν αυξημένο σε σχέση με το συμβατικό προϊόν ενώ για την περίπτωση του μπροστινού πτερυγίου αγωνιστικού αυτοκινήτου το KKZ μειώθηκε. Ο συνδυασμός των δύο εκτιμήσεων προσφέρει σημαντικά δεδομένα που βοηθούν στη λήψη αποφάσεων για τον περιορισμό της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης και τη μείωση του κόστους των κύκλων ζωής των προϊόντων.

Η μελέτη αυτή θα μπορούσε να αποτελέσει την αρχή μίας πιο διευρυμένης έρευνας που θα περιελάμβανε ολόκληρο τον κύκλο ζωής των προϊόντων. Αρχικά, θα μπορούσε να συμπεριληφθεί στην AKZ η ανακύκλωση ή η τελική απόρριψη των παραγόμενων υλικών μετά το τέλος της χρήσης τους ώστε να συμβάλει ακόμα πιο ουσιαστικά στην ενίσχυση της ιδέας της αειφόρου ανάπτυξης και της κυκλικής οικονομίας. Ένα άλλο στοιχείο το οποίο θα μπορούσε να λειτουργήσει ενισχυτικά στη μελέτη της AKZ θα ήταν η παράλληλη μελέτη της AKZ συμβατικών υλικών που ήδη κυκλοφορούν στην αγορά τα οποία πρόκειται να αντικατασταθούν από τα νέα

προϊόντα που παράγονται με τα σύνθετα υλικά. Μία τέτοια μελέτη που θα επέτρεπε τη σύγκριση των συμβατικών και των καινοτόμων προϊόντων θα έπρεπε να λαμβάνει υπόψη μία σειρά από παράγοντες ώστε τα τελικά αποτελέσματα να έχουν την επιθυμητή εγκυρότητα. Αρχικά, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο χρόνος ζωής του κάθε προϊόντος έτσι ώστε να εφαρμοστεί ο αντίστοιχος συντελεστής στα αποτυπώματα αλλά και στα συνολικά κόστη. Ένας δεύτερος σημαντικός παράγοντας είναι η ταύτιση των επιθυμητών ιδιοτήτων των υλικών ώστε να έχει κοινή βάση η σύγκριση των αποτυπωμάτων. Ο τρίτος και ίσως πιο πολύπλοκος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η επίδραση που έχουν οι αλλαγές των ιδιοτήτων που δεν επιβάλλεται να παραμείνουν σταθερές στην κατανάλωση ενέργειας και καυσίμων.

Η παραπάνω προτεινόμενη επέκταση της μελέτης παρόλο που είναι πολλά υποσχόμενη υπόκειται σε πολλούς περιορισμούς που την καθιστούν αρκετά δύσκολη στην υλοποίηση. Οι βασικότεροι είναι η δυσκολία εύρεσης ποιοτικών και αξιόπιστων δεδομένων για όλες τις απαιτούμενες διεργασίες παραγωγής και η έλλειψη στοιχείων για την πραγματική διάρκεια ζωής των καινοτόμων προϊόντων.

Κλείνοντας, αξίζει να υπογραμμιστεί πως η AKZ και η παράλληλη εκτίμηση του ΚΚΖ των διεργασιών παραγωγής είναι ένα ισχυρό εργαλείο που μπορεί να βοηθήσει στη λήψη αποφάσεων για την ελάττωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Ωστόσο, το εργαλείο αυτό, θα πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή και συνυπολογίζοντας την επίδραση των παραδοχών που γίνονται σε κάθε μελέτη καθώς και την υποκειμενικότητα και τον τοπικό χαρακτήρα τους.

Βιβλιογραφία

- (1) Composite Materials. In *Materials Handbook: A Concise Desktop Reference*; Springer London: London, 2008, p 1019-1035.
- (2) Harris, B.; Materials, I. o. *Engineering Composite Materials*; IOM, 1999.
- (3) Pandey, J. K.; Ahn, S. H.; Lee, C. S.; Mohanty, A. K.; Misra, M., "Recent Advances in the Application of Natural Fiber Based Composites" *Macromolecular Materials and Engineering* **2010**, *295*, 975-989.
- (4) Loos, M. Chapter 2 - Composites. In *Carbon Nanotube Reinforced Composites*; Loos, M., Ed.; William Andrew Publishing: Oxford, 2015, p 37-72.
- (5) Razak, N. I. A. I., N.A.; Zainuddin, N.; Rayung, M.; Saad, W.Z. , "The Influence of Chemical Surface Modification of Kenaf Fiber using Hydrogen Peroxide on the Mechanical Properties of Biodegradable Kenaf Fiber/Poly(Lactic Acid) Composites. " *Molecules* **2014**, *19*, 2957-2968

- (6) Luz, F. S. d.; Ramos, F. J. H. T. V.; Nascimento, L. F. C.; Figueiredo, A. B.-H. d. S.; Monteiro, S. N., "Critical length and interfacial strength of PALF and coir fiber incorporated in epoxy resin matrix" *Journal of Materials Research and Technology* **2018**, *7*, 528-534.
- (7) <https://docplayer.gr/640174-Syntheta-ylika-composites.html>,".
- (8) Sathishkumar, T.; Satheeshkumar, S.; Naveen, J., "Glass fiber-reinforced polymer composites – a review" *Journal of Reinforced Plastics and Composites* **2014**, *33*, 1258-1275.
- (9) İskender, M.; Karasu, B., "Glass Fibre Reinforced Concrete (GFRC)" *El-Cezeri Journal of Science and Engineering (EJCSE)* **2018**, *5*, 136–162.
- (10) Krishna S R, G.; Cherian, P.; Menon, D.; Prasad, A. Glass Fibre Reinforced Gypsum Panels for Sustainable Construction: Select Proceedings of SEC 2016. 2019, p 855-867.
- (11) Mechanical Properties of Glasses. In *Materials Science and Technology*.
- (12) DiBenedetto, A. T., "Tailoring of interfaces in glass fiber reinforced polymer composites: a review" *Materials Science and Engineering: A* **2001**, *302*, 74-82.
- (13) Wu, Y.; Xia, C.; Cai, L.; Garcia, A. C.; Shi, S. Q., "Development of natural fiber-reinforced composite with comparable mechanical properties and reduced energy consumption and environmental impacts for replacing automotive glass-fiber sheet molding compound" *Journal of Cleaner Production* **2018**, *184*, 92-100.
- (14) Mittal, G.; Rhee, K. Y.; Mišković-Stanković, V.; Hui, D., "Reinforcements in multi-scale polymer composites: Processing, properties, and applications" *Composites Part B: Engineering* **2018**, *138*, 122-139.
- (15) Automotive Composite Structures for Crashworthiness. In *Advanced Composite Materials for Automotive Applications*, p 99-127.

- (16) Das, S., "Life cycle assessment of carbon fiber-reinforced polymer composites" *The International Journal of Life Cycle Assessment* **2011**, *16*, 268-282.
- (17) Trompeta, A.-F. A.; Koumoulos, E. P.; Stavropoulos, S. G.; Velmachos, T. G.; Psarras, G. C.; Charitidis, C. A., "Assessing the Critical Multifunctionality Threshold for Optimal Electrical, Thermal, and Nanomechanical Properties of Carbon Nanotubes/Epoxy Nanocomposites for Aerospace Applications" *Aerospace* **2019**, *6*, 7.
- (18) Tjong, S. C., "Structural and mechanical properties of polymer nanocomposites" *Materials Science and Engineering: R: Reports* **2006**, *53*, 73-197.
- (19) www.airbus.com.
- (20) Salernitano, E.; Migliaresi, C., "Composite Materials for Biomedical Applications: A Review" *Journal of Applied Biomaterials and Biomechanics* **2003**, *1*, 3-18.
- (21) Sahbaz Karaduman, N.; Karaduman, Y.; Özdemir, H.; Ozdemir, G. Textile Reinforced Structural Composites for Advanced Applications. 2017.
- (22) Camargo, P. H. C.; Satyanarayana, K. G.; Wypych, F., "Nanocomposites: synthesis, structure, properties and new application opportunities" *Materials Research* **2009**, *12*, 1-39.
- (23) Hári, J.; Pukánszky, B. 8 - Nanocomposites: Preparation, Structure, and Properties. In *Applied Plastics Engineering Handbook*; Kutz, M., Ed.; William Andrew Publishing: Oxford, 2011, p 109-142.
- (24) 3D nanoparticle structures emerge from the fog" *Nano Today* **2017**, *14*, 6.
- (25) Zaumseil, J.; Meitl, M. A.; Hsu, J. W. P.; Acharya, B. R.; Baldwin, K. W.; Loo, Y.-L.; Rogers, J. A., "Three-Dimensional and Multilayer Nanostructures Formed by Nanotransfer Printing" *Nano Letters* **2003**, *3*, 1223-1227.
- (26) Hussein, S.; Alraziqi, Z., "Nano-reinforcement effect on PMMA denture base mechanical properties after immersing in different solution" *Iraqi Journal of Science* **2019**, 57-68.
- (27) Efzan, E.; Nordin, S., "A Review on Effect of Nanoreinforcement on Mechanical Properties of Polymer Nanocomposites" *Solid State Phenomena* **2018**, *280*, 284-293.
- (28) Ajayan, P. M.; Schadler, L. S.; Braun, P. V. *Nanocomposite Science and Technology*; Wiley, 2006.
- (29) Geim, A. K.; Novoselov, K. S., "The rise of graphene" *Nature Materials* **2007**, *6*, 183-191.
- (30) Iijima, S., "Helical microtubules of graphitic carbon" *Nature* **1991**, *354*, 56-58.
- (31) Iijima, S.; Ichihashi, T., "Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter" *Nature* **1993**, *363*, 603-605.
- (32) Ma, P.-C.; Siddiqui, N. A.; Marom, G.; Kim, J.-K., "Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* **2010**, *41*, 1345-1367.
- (33) Manawi YM, I., Samara A, Al-Ansari T, Atieh MA.11(5):822., "A Review of Carbon Nanomaterials' Synthesis via the Chemical Vapor Deposition (CVD) Method" *Materials* **2018**, 822.
- (34) Chrzanowska, J.; Hoffman, J.; Malolepszy, A.; Mazurkiewicz, M.; Kowalewski, T.; Szymanski, Z.; Stobinski, L., "Synthesis of carbon nanotubes by the laser ablation method: Effect of laser wavelength" *physica status solidi (b)* **2015**, *8*, 1860 – 1867.
- (35) Wang, X.; Bradford, P. D.; Liu, W.; Zhao, H.; Inoue, Y.; Maria, J.-P.; Li, Q.; Yuan, F.-G.; Zhu, Y., "Mechanical and electrical property improvement in CNT/Nylon composites through drawing and stretching" *Composites Science and Technology* **2011**, *71*, 1677-1683.
- (36) Yi, M.; Shen, Z., "A review on mechanical exfoliation for the scalable production of graphene" *Journal of Materials Chemistry A* **2015**, *3*, 11700-11715.
- (37) Somani, P. R.; Somani, S. P.; Umeno, M., "Planer nano-graphenes from camphor by CVD" *Chemical Physics Letters* **2006**, *430*, 56-59.
- (38) Mynbaeva, M.; Lavrent'ev, A.; Mynbaev, K., "Formation of graphite/sic structures by the thermal decomposition of silicon carbide" *Semiconductors* **2016**, *50*, 138-142.
- (39) Novoselov, K. S.; Geim, A. K.; Morozov, S. V.; Jiang, D.; Zhang, Y.; Dubonos, S. V.; Grigorieva, I. V.; Firsov, A. A., "Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films" *Science* **2004**, *306*, 666-669.
- (40) Life Cycle Assessment. In *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, p 1-28.
- (41) Baumann, H.; Tillman, A. M. *The Hitch Hiker's Guide to LCA: An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application*; Professional Publishing House, 2004.
- (42) O'Neill, T. J. *Life Cycle Assessment and Environmental Impact of Polymeric Products*; Rapra Technology Limited, 2003.

- (43) Haylock, R.; Rosentrater, K. A., "Cradle-to-Grave Life Cycle Assessment and Techno-Economic Analysis of Polylactic Acid Composites with Traditional and Bio-Based Fillers" *Journal of Polymers and the Environment* **2018**, *26*, 1484-1503.
- (44) Cecchel, S.; Chindamo, D.; Collotta, M.; Cornacchia, G.; Panvini, A.; Tomasoni, G.; Gadola, M., "Lightweighting in light commercial vehicles: cradle-to-grave life cycle assessment of a safety-relevant component" *The International Journal of Life Cycle Assessment* **2018**, *23*, 2043-2054.
- (45) McDonough, W.; Braungart, M. *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*; Farrar, Straus and Giroux, 2010.
- (46) <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/what-is-the-circular-economy>.
- (47) Dhillon, B. S. *Life Cycle Costing for Engineers*; CRC Press, 2009.
- (48) Dhillon, B. *Life Cycle Costing: Techniques, Models and Applications*; Taylor & Francis, 1989.
- (49) Rebitzer, G.; Ekvall, T.; Frischknecht, R.; Hunkeler, D.; Norris, G.; Rydberg, T.; Schmidt, W. P.; Suh, S.; Weidema, B. P.; Pennington, D. W., "Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications" *Environment International* **2004**, *30*, 701-720.
- (50) EC-JRC, International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance., 1st ed. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010".
- (51) <https://www.setac.org/store/viewproduct.aspx?id=1038144>.
- (52) Pfister, S.; Boulay, A.-M.; Berger, M.; Hadjikakou, M.; Motoshita, M.; Hess, T.; Ridoutt, B.; Weinzettel, J.; Scherer, L.; Döll, P.; Manzano, A.; Núñez, M.; Veronesi, F.; Humbert, S.; Buxmann, K.; Harding, K.; Benini, L.; Oki, T.; Finkbeiner, M.; Henderson, A., "Understanding the LCA and ISO water footprint: A response to Hoekstra (2016) "A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA"" *Ecological Indicators* **2017**, *72*, 352-359.
- (53) <https://www.iso.org/standard/37456.html>.
- (54) Li, T.; Zhang, H.-C.; Liu, Z.-C.; Ke, Q.; Alting, L., "A System Boundary Identification Method for Life Cycle Assessment" *The International Journal of Life Cycle Assessment* **2013**, *19*.
- (55) Ekvall, T.; Weidema, B. P., "System boundaries and input data in consequential life cycle inventory analysis" *The International Journal of Life Cycle Assessment* **2004**, *9*, 161-171.
- (56) <http://www.ecoil.tuc.gr/dissemination.html>.
- (57) Mousiopoulos, N., Ntziachristos, L., Slini, T., "Environmental Engineering. **2015**.
- (58) Ciambone, D. F. *Environmental Life Cycle Analysis*; Taylor & Francis, 1997.
- (59) Μουσιόπουλος, Ν., Ντζιαχρήστος, Λ., Σλίνη, Θ., 2015. Τεχνική προστασία περιβάλλοντος. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα:Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών".
- (60) Harris, D. J., "A quantitative approach to the assessment of the environmental impact of building materials" *Building and Environment* **1999**, *34*, 751-758.
- (61) Boura, A.; Koroneos, C.; Moussiopoulos, N., "Overview of LCA activities in Greece from LHTEE" *International Journal of Life Cycle Assessment - INT J LIFE CYCLE ASSESS* **2000**, *5*, 203-204.
- (62) Jolliet, O.; Margni, M.; Charles, R.; Humbert, S.; Payet, J.; Rebitzer, G.; Rosenbaum, R., "IMPACT 2002+: a new life cycle assessment methodology. Int J Life Cycle Assess 8:324-330" *The International Journal of Life Cycle Assessment* **2003**, *8*, 324-330.
- (63) Jolliet, O.; Margni, M.; Charles, R.; Humbert, S.; Payet, J.; Rebitzer, G.; Rosenbaum, R., "IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology" *The International Journal of Life Cycle Assessment* **2003**, *8*, 324.
- (64) Tsalidis, G. A.; Gkranas, G.; Yakaboylu, O.; Harinck, J.; Korevaar, G.; Jong, W. *Life Cycle Assessment: the functional unit and avoided emissions effect*, 2016.
- (65) U.S. EPA (2006). Life Cycle Assessment: Principles and Practice. National Risk Management Research Laboratory. EPA/600/R-06/060. May 2006".
- (66) Πανταζή Ε.Διπλωματική εργασία "Συγκριτική μελέτη μεθόδων εκτίμησης επιπτώσεων κύκλου ζωής." ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ".
- (67) Klöpffer, W.; Ciroth, A., "Is LCC relevant in a sustainability assessment? Int J Life Cycle Assess" *International Journal of Life Cycle Assessment - INT J LIFE CYCLE ASSESS* **2011**, *16*, 99-101.
- (68) E. Griffing and M. Overcash, "Carbon fiber HS from PAN E." www.environmentalclarity.com **1999**.

- (69) E. Griffing and M. Overcash, "PAN emulsion for PAN fiber" www.environmentalclarity.com **1999**.
- (70) E. Griffing and M. Overcash, "PAN Precursor Fiber from PAN Emulsion" www.environmentalclarity.com **1999**, 1999.
- (71) Sahoo, N. G.; Rana, S.; Cho, J. W.; Li, L.; Chan, S. H., "Polymer nanocomposites based on functionalized carbon nanotubes" *Progress in Polymer Science* **2010**, *35*, 837-867.
- (72) Zhang, Q.; Huang, J.-Q.; Qian, W.-Z.; Zhang, Y.-Y.; Wei, F., "The Road for Nanomaterials Industry: A Review of Carbon Nanotube Production, Post-Treatment, and Bulk Applications for Composites and Energy Storage" *Small* **2013**, *9*, 1237-1265.
- (73) Cataldi, P.; Athanassiou, A.; Bayer, I., "Graphene Nanoplatelets-Based Advanced Materials and Recent Progress in Sustainable Applications" *Applied Sciences* **2018**, *8*.
- (74) https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1_%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BD_%CE%95%CE%BB%CE%BB%CE%AC%CE%B4%CE%B1.
- (75) <https://www.nrcan.gc.ca/science-data/data-analysis/energy-data-analysis/energy-facts/electricity-facts/20068>.
- (76) Arnold, J. C.; Alston, S. M., "Life cycle assessment of the production and use of polypropylene tree shelters" *Journal of Environmental Management* **2012**, *94*, 1-12.
- (77) Liptow, C.; Tillman, A.-M., "A Comparative Life Cycle Assessment Study of Polyethylene Based on Sugarcane and Crude Oil" *Journal of Industrial Ecology* **2012**, *16*, 420-435.
- (78) Morão, A.; de Bie, F., "Life Cycle Impact Assessment of Polylactic Acid (PLA) Produced from Sugarcane in Thailand" *Journal of Polymers and the Environment* **2019**, *27*, 2523-2539.
- (79) Groot, W. J.; Borén, T., "Life cycle assessment of the manufacture of lactide and PLA biopolymers from sugarcane in Thailand" *The International Journal of Life Cycle Assessment* **2010**, *15*, 970-984.
- (80) Engineers, S. o. A.; Research, N. I. f. A. *Composite Materials Handbook*; Society of Automotive Engineers, 2012.
- (81) Varun; Bhat, I. K.; Prakash, R., "LCA of renewable energy for electricity generation systems—A review" *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2009**, *13*, 1067-1073.
- (82) Smetana, S. *LCA and Recycled Materials: innovative approaches in assessment, counting and sustainability*, 2014.
- (83) Koltun, P.; Tharumarajah, A.; Ramakrishnan, S. 2005.
- (84) Life Cycle Costing. In *Physical Asset Management*; Springer London: London, 2010, p 197-208.
- (85) Gibson, T. L., "Life Cycle Assessment of Advanced Materials for Automotive Applications" *SAE Transactions* **2000**, *109*, 1932-1941.