



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕ  
ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΚΤΩΜΕΝΟΥ ΑΣΦΑΛΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ**

**ΣΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**Επιβλέπουσα: Χριστίνα Πλατή, Καθηγήτρια**

**Αθήνα, Οκτώβριος 2024**



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Χριστίνα Πλατή, Καθηγήτρια ΕΜΠ, για την καθοδήγηση, την υποστήριξη και την εξαιρετική συνεργασία καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω την κ. Μαρία Τσακουμάκη, Υποψήφια Διδάκτορα ΕΜΠ, για την πολύτιμη βοήθεια και την επίλυση αποριών σχετικά με τη διαδικασία της πειραματικής ανάλυσης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη και τη βοήθεια που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η υιοθέτηση και εφαρμογή βιώσιμων στρατηγικών στα έργα συγκοινωνιακών υποδομών είναι απαραίτητη για τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, τη διατήρηση των φυσικών πόρων και τη βελτίωση του κοινωνικού αντίκτυπου της οδοποιίας. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η επίτευξη των παραπάνω στόχων με τη χρήση της μεθοδολογίας της ανάλυσης κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment, LCA), ως εργαλείο αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του οδοστρώματος. Αρχικά, αναλύεται η χρήση του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού (Reclaimed Asphalt Pavements, RAP) στην κατασκευή οδοστρωμάτων και γίνεται περιγραφή των διαφορετικών μεθοδολογιών αποξήλωσης, επεξεργασίας και επανατοποθέτησης του RAP στο οδόστρωμα, τονίζοντας την αναγκαιότητα της χρήσης ανακτώμενων ασφαλτικών υλικών στο πλαίσιο της βιώσιμης ανάπτυξης του συγκεκριμένου τομέα. Στη συνέχεια, προσδιορίζεται η έννοια της ανάλυσης κύκλου ζωής στα οδοστρώματα, περιγράφονται τα δομικά στοιχεία και τα στάδια από τα οποία αποτελείται η συγκεκριμένη μεθοδολογία, ενώ εισάγεται η έννοια της ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων. Τέλος, διεξάγεται μία ανάλυση κύκλου ζωής για ένα πειραματικό οδόστρωμα ενός αυτοκινητοδρόμου που περιλαμβάνει τη συγκριτική αξιολόγηση δύο εναλλακτικών σεναρίων επέμβασης ως προς τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις και το συνολικό κόστος υλοποίησης των δύο επεμβάσεων αναδεικνύοντας τα οφέλη της χρήσης ανακτώμενων ασφαλτικών υλικών στην κατασκευή οδών. Συνοψίζοντας, τονίζεται η σπουδαιότητα της χρήσης της μεθόδου LCA ως εργαλείο για τη λήψη αποφάσεων στην οδοποιία και παρατίθενται προτάσεις σχετικά με τον περιορισμό των ελλείψεων της μεθόδου.

Λέξεις κλειδιά: Ανάλυση Κύκλου Ζωής, Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής, βιωσιμότητα, βιώσιμα οδοστρώματα, ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό

## **ABSTRACT**

The adoption and implementation of sustainable strategies in transportation infrastructure projects is essential to reduce environmental impacts, conserve natural resources and improve the social impact of road construction. The aim of this thesis is to achieve the above objectives by using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology as a tool to assess the environmental impacts during the pavement life cycle. Firstly, the use of Reclaimed Asphalt Pavements (RAP) in pavement construction is analyzed and the different methodologies for milling, processing and reusing RAP on the pavement are described, highlighting the necessity of using reclaimed asphalt materials in the context of the sustainable development in the pavement construction. Moving forward, the concept of life cycle analysis in pavements is defined, a detailed description of the building blocks and stages that make up this methodology is given, and the concept of life cycle cost analysis of pavements is introduced. Finally, a life cycle analysis is carried out for an experimental highway pavement, including a comparative evaluation of two alternative intervention scenarios in terms of the environmental impacts, as well as the total cost of implementation of the two interventions, highlighting the benefits of using reclaimed asphalt materials in road construction. In summary, the importance of using LCA as a tool for decision making in road construction is highlighted and suggestions are made on how to mitigate the shortcomings of the method.

**Key words:** Life Cycle Assessment, Life Cycle Cost Analysis, sustainability, sustainable pavements, Reclaimed Asphalt Pavement,

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	Αντικείμενο .....	1
1.2	Στόχος και Μεθοδολογία.....	2
1.3	Δομή εργασίας.....	3
2	ΑΝΑΚΤΩΜΕΝΑ ΑΣΦΑΛΤΙΚΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ.....	4
2.1	Γενικά.....	4
2.1.1	Ιστορική αναδρομή.....	4
2.1.2	Ορισμός.....	5
2.2	Αξιολόγηση ανακτώμενων ασφαλτικών υλικών.....	7
2.3	Θραύση ασφαλτικού υλικού – Φρεζάρισμα.....	8
2.4	Χρήση ανακτώμενων ασφαλτικών υλικών στην οδοποιία.....	8
2.4.1	Γενικά.....	8
2.4.2	Εν θερμώ ανακύκλωση.....	10
2.4.3	Επιτόπου εν θερμώ ανακύκλωση.....	10
2.4.4	Επιτόπου εν ψυχρώ ανακύκλωση.....	12
2.4.5	Εν ψυχρώ ανακύκλωση σε βιομηχανία.....	13
2.4.6	Εις βάθος ανακύκλωση.....	14
3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ.....	15
3.1	Γενικά στοιχεία.....	15
3.1.1	Ιστορική αναδρομή.....	15
3.1.2	Σκοπός.....	16
3.2	Δομή.....	18
3.2.1	Γενική περιγραφή.....	18
3.2.2	Προσδιορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής.....	19
3.2.2.1	Ορισμός.....	19
3.2.2.2	Λειτουργική μονάδα.....	20
3.2.2.3	Όρια του συστήματος.....	20
3.2.3	Απογραφή του κύκλου ζωής.....	22
3.2.4	Εκτίμηση επιπτώσεων κύκλου ζωής.....	25
3.2.4.1	Γενικά στοιχεία.....	25
3.2.4.2	Μεθοδολογία εκτίμησης επιπτώσεων.....	27
3.2.4.3	Κατηγορίες επιπτώσεων.....	27
3.2.4.4	Ταξινόμηση και χαρακτηρισμός των επιπτώσεων.....	30
3.2.5	Ερμηνεία.....	31

3.2.6	Ανάλυση κύκλου ζωής οδοστρωμάτων.....	33
3.2.7	Ανάλυση κόστους κύκλου ζωής.....	37
4	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	40
4.1	Εισαγωγικά στοιχεία .....	40
4.2	Περιγραφή εναλλακτικών σεναρίων .....	41
4.2.1	1° Σενάριο.....	41
4.2.2	2° Σενάριο.....	42
4.3	Μοντέλο ανάλυσης κύκλου ζωής οδοστρωμάτων .....	43
4.3.1	Λειτουργική μονάδα και όρια του συστήματος.....	43
4.3.2	Ανάλυση απογραφής.....	44
4.4	Αποτελέσματα .....	46
4.5	Κοστολόγηση .....	59
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	63
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	66
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	71
	Π1 Πίνακες αποτελεσμάτων περιβαλλοντικών επιπτώσεων – 1° σενάριο.....	71
	Π2 Διαγράμματα ανάλυσης των αποτελεσμάτων περιβαλλοντικών επιπτώσεων – 1° σενάριο.....	72
	Π3 Πίνακες αποτελεσμάτων περιβαλλοντικών επιπτώσεων – 2° σενάριο.....	77
	Π4 Διαγράμματα ανάλυσης των αποτελεσμάτων περιβαλλοντικών επιπτώσεων – 2° σενάριο.....	78
	Π5 Πίνακας των αποτελεσμάτων της κοστολόγησης των διαδικασιών για το 1° σενάριο ..	83
	Π6 Διάγραμμα των αποτελεσμάτων της κοστολόγησης των διαδικασιών για το 1° σενάριο.....	84
	Π7 Πίνακας των αποτελεσμάτων της κοστολόγησης των διαδικασιών για το 2° σενάριο ..	84
	Π8 Διάγραμμα των αποτελεσμάτων της κοστολόγησης των διαδικασιών για το 2° σενάριο.....	85

## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ**

Εικόνα 2.1 Ειδικό μηχάνημα φρεζαρίσματος.....	8
Εικόνα 2.2 Ανακύκλωση και ανάκτηση οδοστρώματος για διαφορετικό δείκτη κατάστασης οδοστρώματος (PCI) (ARRA, 2015).....	9
Εικόνα 2.3 Διαδικασία μεθόδου επιφανειακής ανακύκλωσης (ARRA, 2015). ....	11
Εικόνα 2.4 Διαδικασία μεθόδου ανασχηματισμού (FHWA, 2014). ....	12
Εικόνα 2.5 Διαδικασία μεθόδου ανάμιξης (ARRA, 2015).....	12
Εικόνα 2.6 Επιτόπου εν ψυχρώ ανακύκλωση (Milad, 2020). ....	13
Εικόνα 2.7 Διαδικασία εις βάθος ανακύκλωσης (Full Depth Reclamation, FDR). ....	14
Εικόνα 3.1 Γενικό μοντέλο κύκλου ζωής προϊόντος (Harvey et al. , 2016).....	16
Εικόνα 3.2 Δομή ανάλυσης κύκλου ζωής (Harvey at al., 2016). ....	18
Εικόνα 3.3 Στάδια κύκλου ζωής και ομαδοποιημένες διαδικασίες (Sollazo et al., 2020).....	33
Εικόνα 3.4 Συσχέτιση LCCA και LCA (Liu et al., 2019). ....	38
Εικόνα 4.1 Υφιστάμενο Οδόστρωμα.....	40
Εικόνα 4.2 1 <sup>ο</sup> Σενάριο .....	42
Εικόνα 4.3 2ο Σενάριο.....	43
Εικόνα 4.4 Αρχική οθόνη PaLATE 2.0 (2011) .....	45
Εικόνα 4.5 Εισαγωγικά δεδομένα PaLATE 2.0 (2011).....	46
Εικόνα 4.6 Κατανάλωση Ενέργειας .....	49
Εικόνα 4.7 Κατανάλωση Νερού.....	50
Εικόνα 4.8 Υπερθέρμανση του πλανήτη.....	50
Εικόνα 4.9 Ευτροφισμός .....	51
Εικόνα 4.10 Εκπομπές σωματιδίων PM10.....	52
Εικόνα 4.11 Οξίνιση.....	52
Εικόνα 4.12 Εκπομπές Μονοξειδίου του Άνθρακα (CO) .....	53
Εικόνα 4.13 Ίχνη Υδραργύρου Hg.....	54
Εικόνα 4.14 Ίχνη Μόλυβδου Pb.....	54
Εικόνα 4.15 Επικίνδυνα σωματίδια RCRA.....	55
Εικόνα 4.16 Καρκινικοί Ρύποι .....	56
Εικόνα 4.17 Μη Καρκινικοί Ρύποι.....	56
Εικόνα 4.18 Ποσοστιαία μεταβολή σταδίων κατασκευής .....	57
Εικόνα 4.19 Αθροιστική ποσοστιαία μεταβολή σταδίων κατασκευής.....	58
Εικόνα 4.20 Συγκριτικό Διάγραμμα Προϋπολογισμών.....	62



## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

Πίνακας 2.1 Αξιολόγηση μεθόδων ανάκτησης (Milad, 2020).....	10
Πίνακας 3.1 Κατηγορίες επιπτώσεων (Bare, 2011). .....	31
Πίνακας 4.1 Παραγόμενοι Ρύποι 1 <sup>ου</sup> Σεναρίου .....	47
Πίνακας 4.2 Παραγόμενοι Ρύποι 2 <sup>ου</sup> Σεναρίου .....	48
Πίνακας 4.3 Προϋπολογισμός 1 <sup>ου</sup> Σεναρίου.....	60
Πίνακας 4.4 Προϋπολογισμός 2 <sup>ου</sup> Σεναρίου.....	61

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Αντικείμενο

Στη σημερινή εποχή, είναι γεγονός πως ένας αυξανόμενος αριθμός εταιριών, οργανισμών και διοικητικών οργάνων υιοθετεί τις αρχές της αειφορίας στην εφαρμογή των επιχειρηματικών ενεργειών και στη διαχείριση των δραστηριοτήτων τους. Βασικός στόχος των αρχών αυτών είναι η ενσωμάτωση περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών παραγόντων στη λήψη αποφάσεων. Για παράδειγμα, όσον αφορά στη μελέτη και την κατασκευή των οδοστρωμάτων, καταβάλλονται σημαντικές προσπάθειες για την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, με στόχο τη συμπερίληψη τους στη λήψη των αποφάσεων υπό το πρίσμα της βιώσιμης ανάπτυξης των συγκοινωνιακών έργων (Van Dam et al., 2015).

Ως βιώσιμη ανάπτυξη ορίζεται η ανάπτυξη που καλύπτει τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο η δυνατότητα των μελλοντικών γενιών να ικανοποιήσουν τις δικές τους ανάγκες (WCED, 1987). Όσον αφορά στον τομέα των μεταφορών και συγκοινωνιακών υποδομών και, πιο συγκεκριμένα, τη μελέτη και κατασκευή των οδοστρωμάτων, ο όρος της βιώσιμης ανάπτυξης εστιάζει στο τρίπτυχο που αποτελείται από το περιβάλλον, την οικονομία και την κοινωνία. Έτσι, ο σκοπός της βιωσιμότητας είναι η συσχέτιση των οδοστρωμάτων με τις επιπτώσεις που αφορούν τους τρεις αυτούς παράγοντες σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής, από τον σχεδιασμό μέχρι και το τέλος ζωής τους. Σε αυτό το πλαίσιο, τα παλαιότερα χρόνια, ο οικονομικός παράγοντας αποτελούσε τη σημαντικότερη παράμετρο σχετικά με τη λήψη αποφάσεων. Ωστόσο, με το πέρασ του χρόνου οι περιβαλλοντικοί και κοινωνικοί παράγοντες διαδραματίζουν όλο και σημαντικότερο ρόλο στο συγκεκριμένο ζήτημα. Βέβαια, η σημασία όλων των παραπάνω παραγόντων και ο τρόπος, με τον οποίο λαμβάνονται υπόψη, επηρεάζονται σημαντικά από τους στόχους, τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς του κάθε έργου (Harvey et al., 2016).

Τα έργα συγκοινωνιακών υποδομών, και πιο συγκεκριμένα τα οδοστρώματα, αποτελούν έναν σημαντικό παράγοντα που συμβάλλει στην επιβάρυνση του φυσικού περιβάλλοντος. Στο πλαίσιο του περιορισμού των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που οφείλονται στα έργα συγκοινωνιακών υποδομών, προκύπτει μεταξύ άλλων η ανάγκη για υιοθέτηση βιώσιμων στρατηγικών στην κατασκευή οδοστρωμάτων, ενώ κρίνεται απαραίτητη η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός οδοστρώματος. Έτσι, προκειμένου να επιτευχθεί η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των οδοστρωμάτων καθίσταται απαραίτητη η υιοθέτηση κατάλληλων μεθοδολογιών. Τέτοιου είδους μεθοδολογία αποτελεί η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment, LCA), η οποία προσεγγίζει ολοκληρωτικά την εκτίμηση

των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων ενός προϊόντος και των διεργασιών που αποτελούν τα στάδια του κύκλου ζωής του, εξετάζοντας τα δεδομένα εισροών και εκροών του στο περιβάλλον. Αυτή η προσέγγιση καθορίζει τις σημαντικότερες επιπτώσεις και τους τομείς που μπορούν να γίνουν οι σημαντικότερες βελτιώσεις με ταυτόχρονη αναγνώριση των πιθανών περιορισμών και των αναγκαίων συμβιβασμών (Harvey et al., 2016).

Συμπεραίνοντας, όσον αφορά τα οδοστρώματα, η μέθοδος LCA είναι ουσιαστικά η ποσοτικοποίηση των παραγόμενων ρύπων που προκαλούνται από τις διαδικασίες παραγωγής και μεταφοράς των υλικών, καθώς και από τη λειτουργία του εξοπλισμού που παρατηρούνται κατά τα στάδια του κύκλου ζωής ενός οδοστρώματος από την αρχή της κατασκευής του μέχρι και το τέλος της ζωής του. Έτσι, η μέθοδος LCA κρίνεται ότι είναι ένα κατάλληλο εργαλείο για την επίτευξη της βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων, αλλά μέχρι σήμερα αποτελεί ένα αναπτυσσόμενο πεδίο έρευνας. Ωστόσο, με την αντιμετώπιση των κενών της μεθοδολογίας και με την κάλυψη των κενών της, μπορεί να αποτελέσει ένα αξιολογικό εργαλείο για τον μηχανικό και για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων με απώτερο σκοπό την ανάπτυξη και τη βελτιστοποίηση των βιώσιμων οδοστρωμάτων.

## **1.2 Στόχος και Μεθοδολογία**

Με βάση τις ανωτέρω παρατηρήσεις, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάδειξη της μεθοδολογίας LCA ως εργαλείο αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τις φάσεις του κύκλου ζωής του οδοστρώματος μέσω της διερεύνησης των παραμέτρων της. Η διαδικασία αφορά στη διερεύνηση των παραμέτρων της μεθοδολογίας LCA και την εφαρμογή της σε σχετικό παράδειγμα αποκατάστασης οδοστρώματος.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου περιλαμβάνει την ανάλυση των παραμέτρων και των δομικών στοιχείων που συνιστούν τη μέθοδο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment, LCA) σύμφωνα με τα πρότυπα και τις προδιαγραφές. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα στάδια του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων που λαμβάνονται υπόψη σε μία μελέτη LCA, ενώ γίνεται αναφορά στις ελλείψεις και στους περιορισμούς της. Τα στοιχεία αυτά, αξιοποιούνται για την ανάπτυξη πειραματικών αναλύσεων, οι οποίες στοχεύουν στην ανάδειξη της συμβολής της χρήσης ανακτώμενου ασφαλικού υλικού για την κατασκευή και τη συντήρηση οδοστρωμάτων. Συγκεκριμένα, ορίζονται δύο εναλλακτικά σενάρια ανακατασκευής οδοστρώματος, αφενός με τη χρήση συμβατικών υλικών και αφετέρου με τη χρήση RAP και φυσικών αδρανών στις στρώσεις βάσης, στο πλαίσιο της αναβάθμισης ενός πειραματικού οδοστρώματος αυτοκινητοδρόμου. Τέλος, μέσω της συγκριτικής αξιολόγησης των σεναρίων αυτών ως προς τις περιβαλλοντικές τους

επιπτώσεις, προκύπτουν ορισμένα συμπεράσματα που αναδεικνύουν τη χρήση ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού στην κατασκευή οδοστρωμάτων.

### **1.3 Δομή εργασίας**

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από έξι κύρια κεφάλαια. Συγκριμένα, πέραν του παρόντος εισαγωγικού κεφαλαίου, στο υπόλοιπο τεύχος περιλαμβάνονται τα ακόλουθα:

Το δεύτερο κεφάλαιο, όπου γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση της χρήσης ανακτώμενων ασφαλτικών υλικών.

Το τρίτο κεφάλαιο, όπου παρουσιάζεται η μέθοδος LCA ως εργαλείο αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στα οδοστρώματα και γίνεται αναφορά στην ανάλυση κόστους κύκλου ζωής (LCCA) ως μία μέθοδος αξιολόγησης με εφαρμογή στη λήψη αποφάσεων για θέματα που αφορούν την κατασκευή οδοστρωμάτων.

Το τέταρτο κεφάλαιο, όπου περιλαμβάνεται η διεξαγωγή της πειραματικής ανάλυσης που αναφέρεται σε ένα οδόστρωμα αυτοκινητοδρόμου με εναλλακτικά σενάρια αναβάθμισης και συντήρησης του, τα οποία αξιολογούνται συγκριτικά ως προς τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους.

Το πέμπτο κεφάλαιο, όπου αναπτύσσονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανασκόπηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του κεφαλαίου της πειραματικής ανάλυσης. Παρατίθενται επίσης, ενδεικτικές προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Το έκτο κεφάλαιο, όπου περιλαμβάνονται οι βιβλιογραφικές αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, στο Παράρτημα, παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στο κεφάλαιο της πειραματικής ανάλυσης.

## 2 ΑΝΑΚΤΩΜΕΝΑ ΑΣΦΑΛΤΙΚΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ

### 2.1 Γενικά

#### 2.1.1 Ιστορική αναδρομή

Η χρήση ανακυκλώσιμων υλικών εμφανίζεται για πρώτη φορά στην κατασκευή οδοστρωμάτων το 1915 (Kandhal and Mallick, 1997), χωρίς να είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη. Συγκεκριμένα, παρατηρείται η χρήση ανακυκλώσιμων υλικών όπως είναι το γυαλί, τα χαλίκια και το ανακτώμενο λάστιχο (West, 2010) στις επιμέρους στρώσεις των οδοστρωμάτων. Αντίθετα, η ανακύκλωση των ασφαλτικών υλικών αναπτύχθηκε ιδιαίτερα κατά τη δεκαετία του 1970 και ο λόγος που η βιομηχανία οδοστρωμάτων στράφηκε σε αυτήν την εναλλακτική ήταν η εκτόξευση της τιμής της ασφάλτου εξαιτίας της πετρελαϊκής κρίσης. Με αυτόν τον τρόπο, περιορίστηκε η ανάγκη για χρήση της ασφάλτου στην κατασκευή οδοστρωμάτων, γεγονός που μείωσε σημαντικά το κόστος των ασφαλτομιγμάτων. Οι περισσότερες από τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν εκείνη την εποχή χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα σε απλές περιπτώσεις αποκατάστασης και κατασκευής οδοστρωμάτων.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, χρησιμοποιούνται από το υπουργείο μεταφορών των Η.Π.Α. ανακτώμενα ασφαλτικά υλικά (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) για αρκετά χρόνια πριν από την ανάπτυξη των μεθόδων σχεδιασμού μιγμάτων Superpave (Copeland, 2011). Το Υπουργείο Μεταφορών τυπικά χρησιμοποιούσε τη μέγιστη δυνατή ποσότητα ανακτώμενων ασφαλτικών υλικών σε επιφανειακές στρώσεις, με δεδομένο ότι η περιεκτικότητα RAP σε θερμά ασφαλτικά μίγματα δεν υπερέβαινε ποτέ το 15% (Milad, 2020). Ωστόσο, η αύξηση στο κόστος της ασφάλτου και η έλλειψη στην προσφορά αδρανών, ιδιαίτερα από το 2006 και έπειτα, είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή μεγαλύτερων ποσοτήτων ανακτώμενων ασφαλτικών υλικών προβληματίζοντας ιδιαίτερα τη βιομηχανία θερμών ασφαλτομιγμάτων (Thakur, 2013). Για παραπάνω από 30 χρόνια, οι δύο βασικές αρχές χρήσης του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού, ήταν οι εξής:

- Οι προδιαγραφές των παραγόμενων ασφαλτομιγμάτων θα έπρεπε να ήταν παρόμοιες με εκείνες των συμβατικών μιγμάτων, που αποτελούνται από φυσικά αδρανή.
- Η απόδοση των ασφαλτομιγμάτων που περιέχουν RAP, θα έπρεπε να είναι ισάξια ή καλύτερη από εκείνη των συμβατικών ασφαλτομιγμάτων.

Στις Η.Π.Α, η μέση περιεκτικότητα σε RAP στα νέα ασφαλτικά μείγματα κυμαινόταν μεταξύ 12 και 15%. Η αμερικανική εθνική υπηρεσία ασφαλτικών οδοστρωμάτων (National Asphalt Pavement Association, NAPA) επιδίωξε να αυξήσει αυτήν τη μέση

περιεκτικότητα σε 25% μέχρι το τέλος του 2013. Για δέκα χρόνια, υλοποιήθηκε με επιτυχία ο σχεδιασμός και η παραγωγή ασφαλτικών μιγμάτων υψηλής ποιότητας με ανακτώμενα ασφαλτικά υλικά, ενώ στη συνέχεια αποδείχτηκε ότι η απόδοση μιγμάτων που περιέχουν τουλάχιστον 30% RAP, είναι παρόμοια με την απόδοση εκείνων που περιλαμβάνουν συμβατικά αδρανή (West, 2010).

Σε μερικές ευρωπαϊκές χώρες η ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση των ασφαλτικών υλικών παρατηρήθηκε για πρώτη φορά πριν από 30 χρόνια, ενώ 50 εκατομμύρια τόνοι ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού παράγονται και χρησιμοποιούνται ετησίως. Στην Ελλάδα, ωστόσο, η ανακύκλωση ασφαλτικών υλικών είναι μία πρακτική που δεν εφαρμόζεται συχνά. Αντιθέτως, έχει τεθεί ως στόχος του ευρωπαϊκού οργανισμού ασφαλτικών οδοστρωμάτων (European Asphalt Pavement Association, EAPA) η αύξηση του ποσοστού χρήσης του RAP στο 100% (Joné, 2004).

### **2.1.2 Ορισμός**

Όταν το ασφαλτόμιγμα ενός οδοστρώματος παύει να διατηρεί τις μηχανικές του ιδιότητες, αφαιρείται από το οδόστρωμα με τη μέθοδο του φρεζαρίσματος (milling). Η ασφαλτική στρώση αφαιρείται και υπόκειται, στη συνέχεια, την κατάλληλη επεξεργασία (σύνθλιψη, κοσκίνισμα), ώστε να παραχθεί ένα ασφαλτόμιγμα υψηλής ποιότητας και καλής διαβάθμισης κόκκων αδρανών, το οποίο είναι πλέον έτοιμο για χρήση. Τα συγκεκριμένα υλικά ονομάζονται, όπως αναφέρθηκε, ανακτώμενα ασφαλτικά υλικά (Reclaimed Asphalt Pavements, RAP).

Το RAP αποτελείται από φυσικά αδρανή σε ποσοστό 93% - 97% κατά βάρος, ενώ η άσφαλτος καλύπτει το υπολειπόμενο 3% - 7% της σύστασης (Jaawani et al., 2021). Η προσφορά άμεσα διαθέσιμων αδρανών υλικών, που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κυρίως ασφαλτικών στρώσεων, έχει ελαττωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια εξαιτίας της υψηλής ζήτησης, γεγονός που καθιστά την ανακύκλωση υλικών από παλαιότερα οδοστρώματα και την επαναχρησιμοποίησή τους σε νέα, απαραίτητη για τη βιώσιμη ανάπτυξη (Sawyer, 2015). Η χρήση ανακτώμενων ασφαλτικών υλικών βρίσκει εφαρμογή κυρίως ως υλικό για την κατασκευή ασφαλτικών στρώσεων των οδοστρωμάτων, ωστόσο με τον συνδυασμό τους με συμβατικά αδρανή σε κατάλληλη αναλογία χρησιμοποιείται και σε στρώσεις βάσης και υπόβασης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, για την κατασκευή ασφαλτικών στρώσεων οδοστρωμάτων στο πλαίσιο της βιώσιμης ανάπτυξης, έχει διερευνηθεί η χρήση ανακυκλώσιμων υλικών όπως είναι το γυαλί, η σκυρία, ίνες από ανακυκλωμένο χαρτί και πολυμερή. Ωστόσο είναι αποδεδειγμένο πως η χρήση ανακτώμενων ασφαλτικών υλικών είναι αποτελεσματικότερη (Rochishnu et al., 2021). Συγκεκριμένα, αποσκοπώντας στην ελάττωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τη διαδικασία της κατασκευής και ανακατασκευής οδοστρωμάτων, αυξήθηκε η χρήση ανακτώμενων ασφαλτικών υλικών

στα ανακυκλωμένα ασφαλτομίγματα. Αυτό, όπως αποδείχτηκε, αφενός ωφέλησε τις παραπάνω διαδικασίες από οικονομικής άποψης και αφετέρου εξυπηρέτησε τη βιώσιμη ανάπτυξη της κατασκευής των οδοστρωμάτων χάρη στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και της εκμετάλλευσης φυσικών πόρων (Arpea et al., 2009, Maurin et al., 2009).

Γενικότερα, η κατασκευή και η αναδόμηση οδοστρωμάτων με τη χρήση ανακτώμενων ασφαλικών υλικών πρέπει να εξυπηρετεί τις εξής σημαντικές προϋποθέσεις (Kennedy et al., 1998, Hansen et al., 2011):

- Το συνολικό κόστος κατασκευής να είναι ελαττωμένο συγκριτικά με την κατασκευή οδοστρωμάτων από συμβατικά υλικά.
- Η διαδικασία να είναι φιλική προς το περιβάλλον.
- Τα οδοστρώματα να παρουσιάζουν ισάξια ή και βελτιωμένη δομική συμπεριφορά.

Το οικονομικό όφελος είναι ένας από τους κυριότερους λόγους της χρήσης RAP στην κατασκευή οδοστρωμάτων, καθώς η ανακύκλωση τέτοιου είδους υλικών φαίνεται να αποφέρει σημαντικά οικονομικά οφέλη (Enieb et al., 2021). Παρόλο που απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία των υλικών (σύνθλιψη, κοσκίνισμα) αυξάνοντας το συνολικό κόστος της διαδικασίας, υποστηρίζεται ότι η διαδικασία παραμένει οικονομικά συμφέρουσα, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για την επιλογή μεθόδων επαναχρησιμοποίησης των υλικών που εφαρμόζονται επί τόπου.

Εξίσου σημαντικός παράγοντας είναι τα περιβαλλοντικά οφέλη. Η σύσταση των νέων οδοστρωμάτων αποτελείται κατά ένα σημαντικό ποσοστό από υλικά της ασφαλικής στρώσης, τα οποία έπειτα από την αφαίρεση τους έχουν υποστεί την απαραίτητη επεξεργασία. Συνεπώς, η εξοικονόμηση φυσικών αδρανών ανήκει στα κυριότερα περιβαλλοντικά οφέλη (Enieb et al., 2021). Ιδιαίτερα σημαντική είναι η ενέργεια που εξοικονομείται από τη διαχείριση των βιομηχανικών αποβλήτων καθώς τα υλικά, που αφαιρούνται από την ασφαλική στρώση ενός οδοστρώματος και δεν επαναχρησιμοποιούνται, προσδιορίζονται ως βιομηχανικά απόβλητα. Επιπλέον, με την άμεση χρήση αυτού του ασφαλικού υλικού ελαττώνεται ο απαιτούμενος χώρος για την απόρριψή του. Επίσης, δεν θα μπορούσε να παραληφθεί η συμβολή της ανακύκλωσης ασφάλτου στις εκπομπές αερίων τόσο άμεσα με τον περιορισμό εκπομπών καύσεων με τη χρήση τεχνικών χαμηλής θερμοκρασίας, όσο και έμμεσα ελαττώνοντας τις απαραίτητες εκσκαφές και μεταφορές υλικών.

Όσον αφορά τη δομική επάρκεια, έχουν υλοποιηθεί εργαστηριακές δοκιμές και έρευνες στον χώρο της κατασκευής που αποδεικνύουν ότι με τον κατάλληλο σχεδιασμό, τα μίγματα ανακτώμενου ασφαλικού υλικού παρουσιάζουν διάρκεια ζωής και ποιότητα

παρόμοια ή και καλύτερη από μίγματα που χρησιμοποιούν φυσικά αδρανή (Pradhan and Biswal, 2022).

## 2.2 Αξιολόγηση ανακτώμενων ασφαλικών υλικών

Κάθε οδόστρωμα έχει ένα συγκεκριμένο χρονικό όριο για το οποίο μπορεί να διατηρήσει τα δομικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του σε ικανοποιητικό επίπεδο, ώστε να παραμένει λειτουργικό. Όταν αυτό το όριο ξεπεραστεί, το οδόστρωμα χρήζει αντικατάστασης. Αντίθετα, η αξία των υλικών από τα οποία αποτελείται το οδόστρωμα παραμένει ανεπηρέαστη ακόμη και όταν η ασφαλική του στρώση φτάσει στο τέλος του κύκλου ζωής της. Η ανάγκη για ελάττωση των φυσικών αδρανών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή οδοστρωμάτων, οδήγησε στην υλοποίηση ερευνών με σκοπό να αντικατασταθούν από ανακτώμενα ασφατικά υλικά. Προκειμένου να επιβεβαιωθεί ότι η ποιότητα οδοστρωμάτων που κατασκευάζονται από ανακτώμενα ασφατικά υλικά είναι ισάξια ή και καλύτερη από τα συμβατικά οδοστρώματα, λαμβάνονται υπόψη ποικίλες φυσικές και ρεολογικές μεταβλητές για τον συνδυασμό συνδετικών υλικών και αδρανών (Milad, 2020).

Για τον προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των ανακτώμενων ασφαλικών υλικών εφαρμόζονται πολυάριθμες εργαστηριακές δοκιμές. Οι σημαντικότερες από αυτές αφορούν τον προσδιορισμό των ορίων Atterberg, την σκληρότητα, τον προσδιορισμό του ειδικού βάρους, τη κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών, την περιεκτικότητα σε υγρασία και το ισοδύναμο άμμου. Πρόσφατα, στην κατασκευή οδοστρωμάτων το μέγιστο ποσοστό ανακτώμενου ασφαλικού υλικού που συστήνεται είναι 10% (Milad, 2020). Ακόμη, σε μίγματα RAP – φυσικών αδρανών, έχει αποδειχτεί ότι η υψηλή παρουσία παρθένων αδρανών στη σύσταση των ασφαλικών στρώσεων συνεπάγεται σε αύξηση του Καλιφορνιακού δείκτη φέρουσας ικανότητας (California Bearing Ratio, CBR) και σε υψηλές τιμές της ξηρής πυκνότητας (Deniz et al., 2009).

Η γνώση της σύνθεσης των υφιστάμενων ασφαλικών υλικών είναι απαραίτητη για την επαναχρησιμοποίηση του και το γεγονός ότι η ομοιομορφία της σπανίζει σε οδοστρώματα που χρησιμοποιούνται για μεγάλο χρονικό διάστημα εξαιτίας των συντηρήσεων ή των μέτρων αποκατάστασης που έχουν ληφθεί σε κάθε περίπτωση. Για τον έλεγχο της ομοιομορφίας, πραγματοποιούνται πυρηνοληψίες, τομές στο βάθος φρεζαρίσματος του οδοστρώματος και μετρήσεις φέρουσας ικανότητας και φυσικοχημικών ιδιοτήτων για τα ανακτώμενα ασφατικά υλικά (Guduru and Kuna, 2022). Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η αποξήλωση του ασφαλικού υλικού, το οποίο πρέπει να γίνει με τρόπο και εξοπλισμό παρόμοιο με αυτόν της ανάκτησης του. Τέλος, το ανακτώμενο ασφατικό υλικό αναμιγνύεται με αδρανή σε κατάλληλη αναλογία καθορίζοντας το πάχος και την πυκνότητα των στρώσεων.



## 2.3 Θραύση ασφαλτικού υλικού – Φρεζάρισμα

Η κυριότερη και πιο διαδεδομένη τεχνική θραύσης και αφαίρεσης των ασφαλτικών υλικών από τα οδοστρώματα είναι το φρεζάρισμα (milling). Σημαντική διαδικασία πριν την αφαίρεση των ασφαλτικών υλικών αποτελεί η αξιολόγηση των μηχανικών και δομικών ιδιοτήτων τους, εξετάζοντας εάν καλύπτουν τις προδιαγραφές προκειμένου να επαναχρησιμοποιηθούν σε νέες στρώσεις οδοστρωμάτων (NCHRP, 2004). Κατά τη διαδικασία του φρεζαρίσματος, η θραύση του οδοστρώματος πραγματοποιείται με τη χρήση ειδικού οχήματος (Εικόνα 2.1), η οποία εφαρμόζεται σε βάθος μέχρι και 50 mm ανά διέλευση του οχήματος.



Εικόνα 2.1 Ειδικό μηχάνημα φρεζαρίσματος

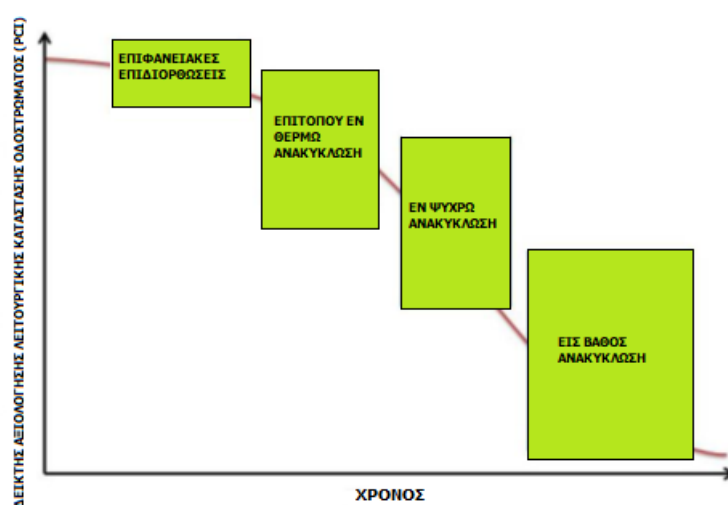
Η μηχανή φρεζαρίσματος φέρει τύμπανο με δόντια το οποίο περιστρέφεται με συχνότητα 200 στροφών το λεπτό χτυπώντας το οδόστρωμα και διασπώντας τα αδρανή και τη σύνθεσή του. Σημαντικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου θραύσης του οδοστρώματος αποτελεί το γεγονός ότι η συνολική διαδικασία παρουσιάζει σύντομη παρεμπόδιση της κυκλοφορίας, καθώς δεν επηρεάζει την κυκλοφορία στις υπόλοιπες λωρίδες της οδού (Harvey et al., 2016).

## 2.4 Χρήση ανακτώμενων ασφαλτικών υλικών στην οδοποιία

### 2.4.1 Γενικά

Οι ασφαλτικές στρώσεις κατασκευάζονται από στρώσεις ασφαλτομίγματος οι οποίες διαστρώνονται πάνω από τη βάση και την υπόβαση των ασύνδετων υλικών. Τα ανακτώμενα ασφαλτικά υλικά χρησιμοποιούνται στα ασφαλτομίγματα αντικαθιστώντας μέρος των φυσικών αδρανών, ή υπό περιπτώσεις, των ασφαλτικών υλικών. Οι κυριότερες τεχνικές με τις οποίες χρησιμοποιείται το ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό στις ασφαλτικές στρώσεις, σύμφωνα με τον Οργανισμό Ανακύκλωσης και Ανάκτησης Ασφάλτου (Asphalt Recycling and Reclamation

Association, ARRA), είναι η εν θερμώ ανακύκλωση (Hot Mix Asphalt Recycling, HMAR), η επιτόπου εν θερμώ ανακύκλωση (Hot In-place Recycling, HIR), η επιτόπου εν ψυχρώ ανακύκλωση (Cold In-place Recycling, CIR) και η εις βάθος ανακύκλωση (Full-Depth Reclamation, FDR). Υπάρχει, επίσης, και η εν ψυχρώ ανακύκλωση σε βιομηχανία (Cold Center Plant Recycling, CCPR), η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις λειτουργεί ως μέθοδος αντικατάστασης της CIR όταν οι συνθήκες δεν ευνοούν την εφαρμογή της. Κάθε πρόβλημα που προκύπτει στα οδοστρώματα, προσεγγίζεται με την καταλληλότερη από τις παραπάνω μεθόδους (Milad, 2020). Στην Εικόνα 2.2, παρατηρείται η άμεση συσχέτιση των τεχνικών ανακύκλωσης με τον δείκτη αξιολόγησης λειτουργικής κατάστασης οδοστρώματος (Pavement Condition Index, PCI) και τον χρόνο (ARRA, 2015).



**Εικόνα 2.2 Ανακύκλωση και ανάκτηση οδοστρώματος για διαφορετικό δείκτη κατάστασης οδοστρώματος (PCI) (ARRA, 2015).**

Όσον αφορά στην επιλογή της κατάλληλης μεθόδου ανακύκλωσης, τα σημαντικότερα κριτήρια είναι η κατάσταση του οδοστρώματος, η διαθεσιμότητα του απαιτούμενου εξοπλισμού, το κόστος της μακροχρόνιας συντήρησης και η επιρροή της μεθόδου στην κυκλοφοριακή ροή. Στον Πίνακα 2.1 που ακολουθεί, δίνεται η αξιολόγηση των επιμέρους μεθόδων σύμφωνα με εξίσου σημαντικούς παράγοντες, όπως είναι το κλίμα, ο κυκλοφοριακός φόρτος, το πρόβλημα προς αντιμετώπιση και οι αντενδείξεις.

**Πίνακας 2.1 Αξιολόγηση μεθόδων ανάκτησης (Milad, 2020).**

Μέθοδος εφαρμογής	Παράγοντες αξιολόγησης			
	Κλίμα	Κυκλοφορία	Επέμβαση	Αντενδείξεις
HMAR	Καλύτερη απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες	Δεν επηρεάζεται από την παρουσία φορτηγών οχημάτων	Αποκατάσταση παλιών οδοστρωμάτων	Παράταση διάρκειας ζωής για πάνω από 12 χρόνια
HIR	Καλύτερη απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες	Δεν επηρεάζεται από την παρουσία φορτηγών οχημάτων	Επιδιόρθωση επιφανειακής φθοράς μικρού βάθους	Παράταση διάρκειας ζωής κατά 10-12 χρόνια
CIR	Αποτελεσματική αποκατάσταση σε όλες τις καιρικές συνθήκες	Πολύ καλή σε οδούς χαμηλής και υψηλής κυκλοφορίας	Αποκατάσταση παλιών οδοστρωμάτων	Μεγάλη διάρκεια ζωής, παράταση κατά 10-15 χρόνια
FDR	Αποτελεσματική αποκατάσταση σε όλες τις καιρικές συνθήκες	Υψηλότερη φέρουσα ικανότητα κυκλοφορίας	Σταθεροποίηση στρώσης βάσης	Παράταση διάρκειας ζωής κατά 10 χρόνια

#### 2.4.2 Εν θερμώ ανακύκλωση

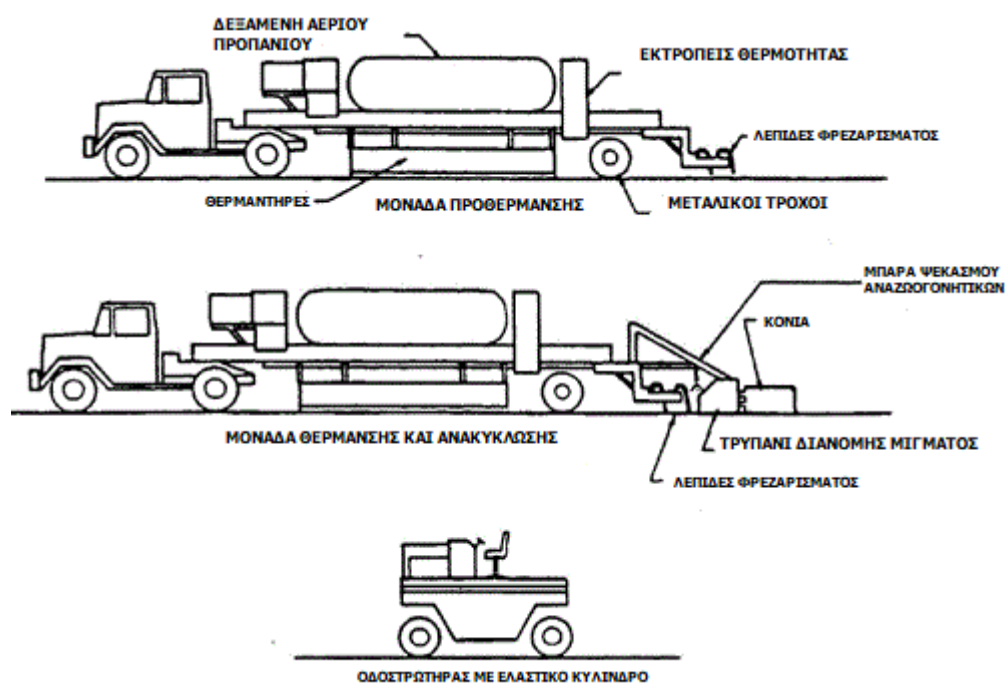
Η εν θερμώ ανακύκλωση είναι μία διαδικασία κατά την οποία ανακτώμενα ασφαλτικά υλικά, που έχουν αφαιρεθεί από την ασφαλτική στρώση ενός οδοστρώματος, αναμιγνύονται με νέα συμβατικά υλικά, φυσικά αδρανή και άσφαλτο, σε βιομηχανία ασφάλτου, προκειμένου να παραχθούν τα νέα ασφαλτικά μίγματα, τα οποία περιέχουν κατά 10-30% ανακτώμενα ασφαλτικά υλικά (Milad, 2020). Η διαδικασία τοποθέτησης και συμπύκνωσης των ασφαλτικών στρώσεων εφαρμόζονται ακριβώς όπως και στην περίπτωση των συμβατικών ασφαλτομιγμάτων με το πλεονέκτημα ότι δομικά στοιχεία του παραγόμενου ασφαλτομίγματος όπως είναι η αντοχή και η αντίσταση έναντι παραμορφώσεων και ρωγμών, μπορεί να εμφανιστούν σε ισάξια ή και καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τα συμβατικά ασφαλτομίγματα (Widyatmoko, 2008).

#### 2.4.3 Επιτόπου εν θερμώ ανακύκλωση

Στη συγκεκριμένη διαδικασία, η ασφαλτική στρώση του οδοστρώματος, αρχικά, θερμαίνεται προκειμένου να μαλακώσει και να γίνει η επιτόπου επιδιόρθωση των ατελειών ή να αφαιρεθούν τα επιφανειακά υλικά με τη μέθοδο του φρεζαρίσματος ή της μηχανικής χάραξης. Στη συνέχεια, έπειτα από την ανάμιξη του υλικού που έχει αφαιρεθεί με τα κατάλληλα ασφαλτικά υλικά, ακολουθεί η τοποθέτηση του ανακυκλωμένου ασφαλτομίγματος στην επιφανειακή ασφαλτική στρώση (FHWA, 2017). Κυριότερος σκοπός της διαδικασίας είναι η επιδιόρθωση επιφανειακών

ατελειών όπως είναι οι ρηγματώσεις, οι κοιλότητες στην επιφάνεια του εδάφους και τα φουσκώματα. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν τρεις διαφορετικές τεχνικές εφαρμογής της επιτόπου εν θερμώ ανακύκλωσης. Αυτές είναι η επιφανειακή ανακύκλωση, ο ανασχηματισμός και η ανάμιξη.

Κατά την τεχνική της **επιφανειακής ανακύκλωσης**, το υλικό που έχει αφαιρεθεί με τη μέθοδο του φρεζαρίσματος συνδυάζεται με άλλα υλικά και συμπυκνώνεται, ενώ η αναδιαμόρφωση της νέα επικάλυψης του ασφαλτομίγματος γίνεται με ταυτόχρονη συμπύκνωση και τοποθέτηση με τη χρήση των κατάλληλων μηχανημάτων, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.3 που ακολουθεί.



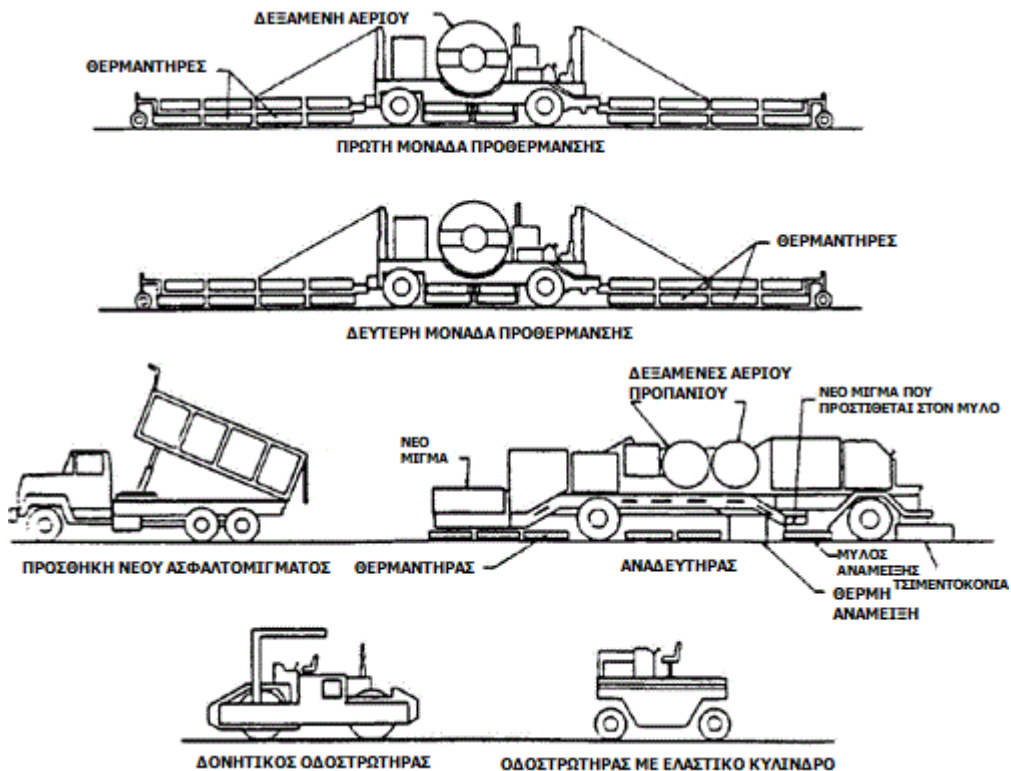
Εικόνα 2.3 Διαδικασία μεθόδου επιφανειακής ανακύκλωσης (ARRA, 2015).

Κατά την τεχνική του **ανασχηματισμού**, υπάρχει η δυνατότητα συνδυασμού του ανακτώμενου υλικού με το υφιστάμενο ασφαλτικό υλικό, ενώ εφαρμόζεται ταυτόχρονη συμπύκνωση και τοποθέτηση. Η συγκεκριμένη τεχνική εφαρμόζεται σε βάθος από 20 έως και 50 mm και επί της ουσίας αλλάζει επιφανειακά το σχήμα της οδού, αλλά η χημική σύνθεση του μίγματος παραμένει ίδια. Τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής παρατηρούνται στην Εικόνα 2.4.



Εικόνα 2.4 Διαδικασία μεθόδου ανασχηματισμού (FHWA, 2014).

Κατά την τελευταία τεχνική της **ανάμειξης**, το ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό αναμιγνύεται με ασφαλτόμιγμα παρθένων αδρανών, τροποποιώντας τη χημική σύνθεση του ασφαλτομίγματος. Τα απαραίτητα μηχανήματα για την υλοποίηση της μεθόδου ανάμειξης φαίνονται στην Εικόνα 2.5.

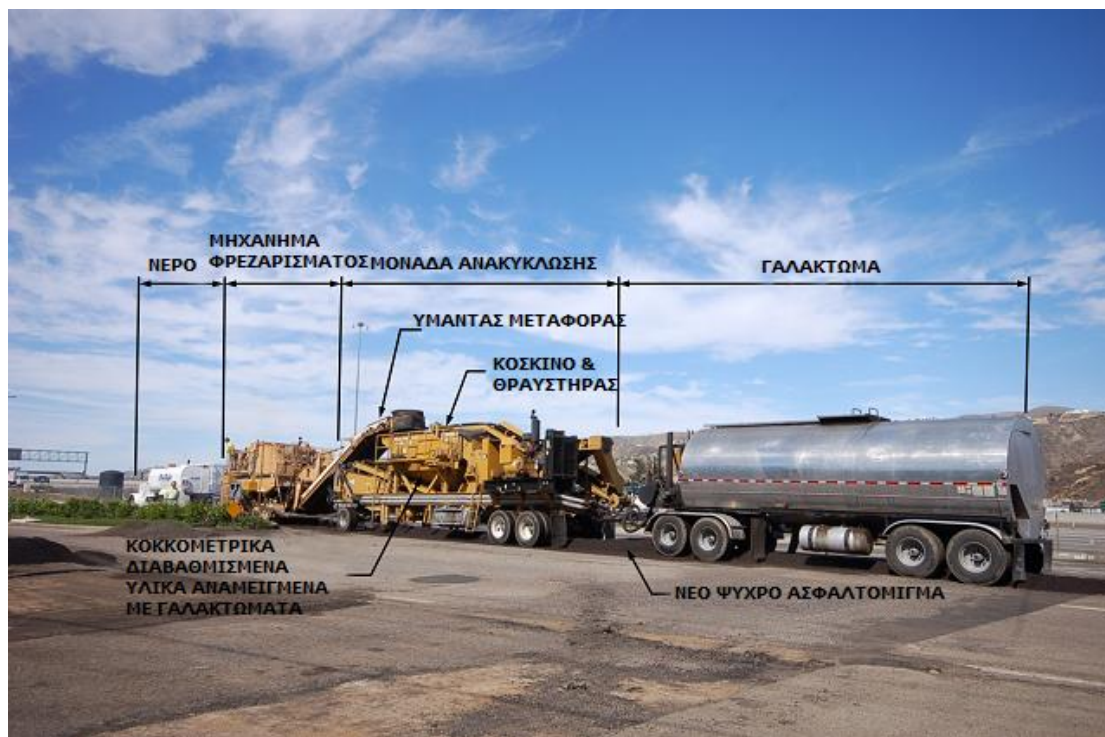


Εικόνα 2.5 Διαδικασία μεθόδου ανάμειξης (ARRA, 2015)

#### 2.4.4 Επιτόπου εν ψυχρώ ανακύκλωση

Η επιτόπου εν ψυχρώ ανακύκλωση είναι η διαδικασία κατά την οποία τα ανακτώμενα ασφαλτικά υλικά που αποκτώνται είτε με φρεζάρισμα είτε με θραύση της ασφαλτικής στρώσης του οδοστρώματος, αναμιγνύονται με συνδετικά υλικά, αφρώδη άσφαλτο, γαλακτώματα ασφάλτου ή άλλα συνδετικά υλικά για τον σχηματισμό του νέου οδοστρώματος. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα επιτόπου χωρίς να απαιτείται κάποια

περαιτέρω μεταφορά των υλικών και εφαρμόζεται συνήθως σε βάθος μεταξύ 75 και 100mm (Milad, 2020). Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η δυνατότητα διαπλάτυνσης του οδοστρώματος, η ελαχιστοποίηση της μεταφοράς και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, καθώς και η καλύτερη δομική επάρκεια και ποιότητα συγκριτικά με τα περισσότερα οδοστρώματα (Salomon and Newcome, 2000). Η διαδικασία της επιτόπου εν ψυχρώ ανακύκλωσης πραγματοποιείται με τη χρήση ειδικών μηχανημάτων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6 που ακολουθεί.



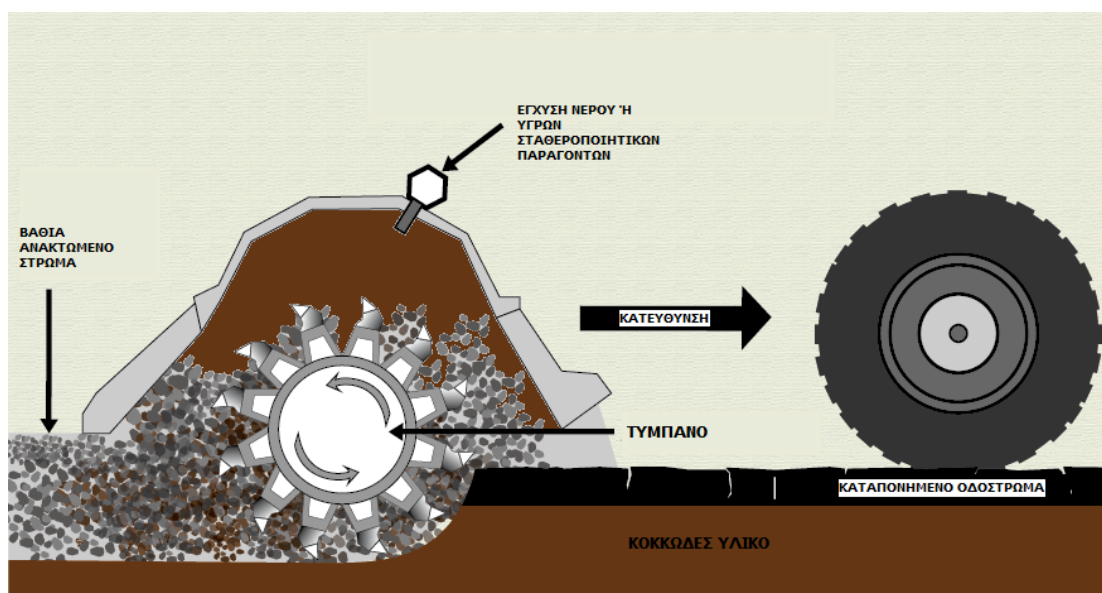
Εικόνα 2.6 Επιτόπου εν ψυχρώ ανακύκλωση (Milad, 2020).

#### 2.4.5 Εν ψυχρώ ανακύκλωση σε βιομηχανία

Η εν ψυχρώ ανακύκλωση σε βιομηχανία, σε αντίθεση με την επιτόπου εν ψυχρώ ανακύκλωση, είναι μία μέθοδος η οποία δεν εφαρμόζεται συχνά, καθώς προτιμάται κυρίως σε περιπτώσεις ανακατασκευής οδοστρωμάτων με χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο και, κυρίως, σε περιπτώσεις που η επιτόπου εν ψυχρώ ανακύκλωση δεν είναι εφικτή (Milad, 2020). Τα αρχικά στάδια των δύο ψυχρών μεθόδων παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες, αφού τα ανακτώμενα ασφαλτικά υλικά μεταφέρονται στη βιομηχανία ασφάλτου για την εφαρμογή της ψυχρής επεξεργασίας, και χρησιμοποιείται είτε ασφαλτικό γαλάκτωμα είτε αφρώδης άσφαλτος ως συνδετικό υλικό. Σημαντικό πλεονέκτημα της επεξεργασίας σε βιομηχανία αποτελεί η δυνατότητα αποθήκευσης της πλεονάζουσας ποσότητας ανακτώμενου υλικού προκειμένου να χρησιμοποιηθεί σε άλλες κατασκευές (VAA, 2019).

## 2.4.6 Εις βάθος ανακύκλωση

Η εις βάθος ανακύκλωση ή ανάκτηση πλήρους βάθους αποτελεί μέθοδο ανακύκλωσης κατά την οποία ολόκληρη η ασφαλτική στρώση και προκαθορισμένη ποσότητα υλικών της βάσης του οδοστρώματος αναμιγνύονται και επεξεργάζονται προκειμένου να παραχθεί μία σταθεροποιημένη βάση (VAA, 2019). Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί και αυτή μία μορφή ψυχρής επεξεργασίας, κατά την οποία περιλαμβάνονται πρόσθετα υλικά όπως ασφαλτικό γαλάκτωμα, χημικοί παράγοντες, ασβέστης, τσιμέντο Portland, χλωριούχο ασβέστιο και ιπτάμενη τέφρα που προστίθενται σε τελικό στάδιο για να ενισχύσουν τη δομή της βάσης. Τα τέσσερα σημαντικά βήματα αυτής της μεθόδου ανακύκλωσης είναι η κονιοποίηση, η συμπίκνωση, η μορφοποίηση της επιφανειακής στρώσης και η ενσωμάτωση των πρόσθετων (Milad, 2020). Η διαδικασία εφαρμογής της συγκεκριμένης μεθόδου περιγράφεται στην Εικόνα 2.7 που ακολουθεί.



Εικόνα 2.7 Διαδικασία εις βάθος ανακύκλωσης (Full Depth Reclamation, FDR).

Σε περίπτωση που το ανακτώμενο υλικό δεν επαρκεί για να καλύψει το απαιτούμενο πάχος της βάσης προστίθενται παρθένα αδρανή. Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται σε βάθος μεταξύ 100 και 300 mm (Kearney and Huffman, 1999).

## **3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ**

### **3.1 Γενικά στοιχεία**

#### **3.1.1 Ιστορική αναδρομή**

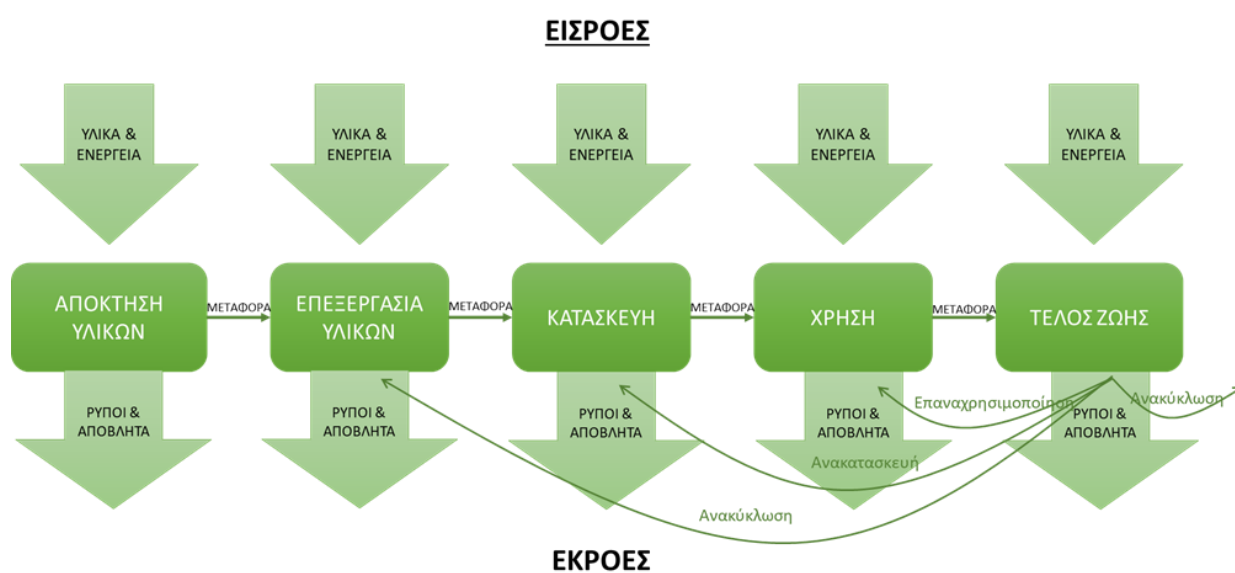
Η ανάλυση για την αξιολόγηση του κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment, LCA) εμφανίστηκε για πρώτη φορά το 1970 και χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση και την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των στερεών αποβλήτων στον αέρα, το νερό και το έδαφος. Οι βασικές αρχές και οι εφαρμογές του διευρύνθηκαν, προκειμένου να συμπεριλάβουν τις εκπομπές χημικών ουσιών και την κατανάλωση ενέργειας και φυσικών πόρων εστιάζοντας περισσότερο στην κατανάλωση και στην συσκευασία των προϊόντων, παρά σε πιο σύνθετα συστήματα υποδομών (Hunt and Franklyn, 1996, Guinée et al., 2011). Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990, οι εξελίξεις μετατοπίστηκαν στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων μεθόδων εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στην τυποποίηση των προκείμενων μεθόδων από τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (International Organization for Standardization, ISO). Όσον αφορά στον τομέα των μεταφορών, η θεματολογία της LCA περιλαμβάνει την αξιολόγηση των ασφαλικών υλικών και την παραγωγή τσιμέντου, την αξιολόγηση των πρότυπων καυσίμων με χαμηλές εκπομπές άνθρακα κατά την κίνηση των οχημάτων, την εξέταση των συγκοινωνιακών δικτύων και την αλληλεπίδραση μεταξύ συγκοινωνιακών υποδομών, οχημάτων και της ανθρώπινης συμπεριφοράς (Harvey et al., 2016). Αναφορικά με το πεδίο εφαρμογής στο αντικείμενο του πολιτικού μηχανικού, η LCA χρησιμοποιείται ως μέθοδος αξιολόγησης των τρόπων διαχείρισης στερεών αποβλήτων και παρατηρείται τις δύο τελευταίες δεκαετίες (Huang, 2007).

Η μέθοδος LCA, είναι μία τεχνική που έχει χρησιμοποιηθεί σε σημαντικό βαθμό από βιομηχανίες σε όλο τον κόσμο. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτές τις βιομηχανίες ανήκουν η βιομηχανία οικοδομικών υλικών στη Γαλλία (Peuportier, 2001), η γερμανική αυτοκινητοβιομηχανία (Mildenberger and Kahre, 2000) αλλά και παγκόσμιας εμβέλειας εταιρίες (BASF, Proctor and Gamble κλπ.) με σκοπό να προσδιορίσουν την οικολογική αποδοτικότητα και την περιβαλλοντική τους διαχείριση (Huang, 2007, ISO, 2006b). Επί της ουσίας, η LCA είναι μία τεχνική η οποία τα τελευταία χρόνια εξελίσσεται σταδιακά και, σε αντίθεση με άλλους κλάδους, βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο εφαρμογής όσον αφορά τα συστήματα υποδομών (Harvey et al, 2016).



### 3.1.2 Σκοπός

Η ανάλυση κύκλου ζωής αποτελεί αναλυτική προσέγγιση της αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είτε ενός προϊόντος είτε σύνθετων συστημάτων προϊόντων και διαδικασιών, εξετάζοντας τις εισροές και εκροές σε όλη τη διάρκεια της ζωής του, από την παραγωγή των πρώτων υλών μέχρι και το τέλος της ζωής του. Στην Εικόνα 3.1, παρατηρείται ένα γενικό μοντέλο του κύκλου ζωής ενός προϊόντος για την LCA. Ο κύκλος ζωής του προϊόντος περιλαμβάνει διάφορα ξεχωριστά στάδια, ξεκινώντας με την απόκτηση των πρώτων υλών, συνεχίζοντας με ενδιάμεσα στάδια όπως είναι η επεξεργασία των πρώτων υλών, η κατασκευή και η χρήση και τελικά καταλήγει στο τέλος της ζωής του προϊόντος αυτού, περιλαμβάνοντας σε κάθε περίπτωση τη μεταφορά των υλικών που είναι απαραίτητη για τη μετάβαση από κάθε φάση στην επόμενη της (Harvey et al., 2016).



Εικόνα 3.1 Γενικό μοντέλο κύκλου ζωής προϊόντος (Harvey et al. , 2016).

Η LCA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πληθώρα σκοπών, όπως είναι οι εξής (Harvey et al, 2016):

- Ο προσδιορισμός ευκαιριών με σκοπό τη βελτίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης του προϊόντος σε ποικίλα σημεία του κύκλου ζωής του.
- Ενημέρωση και καθοδήγηση των υπεύθυνων για τη λήψη αποφάσεων στις βιομηχανίες, στην κυβέρνηση αλλά και σε μη κυβερνητικούς οργανισμούς για συγκεκριμένους σκοπούς που περιλαμβάνουν τον καθορισμό των προτεραιοτήτων, τον στρατηγικό σχεδιασμό, την επιλογή σχεδιασμού προϊόντων και του επανασχεδιασμού.

- Η επιλογή σχετικών δεικτών της περιβαλλοντικής απόδοσης για ολόκληρο το σύστημα.
- Η ποσοτικοποίηση πληροφοριών που αφορούν την περιβαλλοντική απόδοση του προϊόντος ή ενός συστήματος.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της LCA μπορεί να κατευθύνει τους υπεύθυνους για τη λήψη αποφάσεων σε επιλογές που συνεπάγονται στον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Van Dam et al., 2015). Επίσης, η LCA μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη λήψη αποφάσεων, καθώς παρέχει τη δυνατότητα αξιολόγησης των σταδίων του κύκλου ζωής και των πολλαπλών περιβαλλοντικών δεικτών του προϊόντος. Τέλος, η LCA αποτελεί ένα είδος διερεύνησης των συνεπειών των αλλαγών που συμβαίνουν και λαμβάνει υπόψη τις επιπτώσεις σε όλο το σύστημα και όλο τον κύκλο ζωής (Harvey et al, 2016).

Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της ανάλυσης κύκλου ζωής είναι ο προσδιορισμός των ορίων του εξεταζόμενου συστήματος. Οι περιπτώσεις των συνοριακών συνθηκών, που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στην εφαρμογή της LCA, είναι τέσσερις και αποτελούνται από όλα ή μερικά από τα επόμενα στάδια:

- Cradle to Grave (από την αρχή μέχρι το τέλος): Η συγκεκριμένη περίπτωση περιλαμβάνει όλα τα στάδια της ανάλυσης κύκλου ζωής, δηλαδή, από την απόκτηση των πρώτων υλών μέχρι και το τέλος της ζωής. Αποσκοπεί στην αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίπτωσης ενός προϊόντος σε όλη τη διάρκεια της ζωής του.
- Cradle to Gate (από την αρχή μέχρι την πύλη): Η περίπτωση αυτή αποτελείται από τις διαδικασίες που εφαρμόζονται από την αρχή της μεθόδου, μέχρι και τη στιγμή που το προϊόν θα εξέλθει από την πύλη του εργοστασίου, δηλαδή περιλαμβάνει την απόκτηση των πρώτων υλών, την επεξεργασία των υλικών και την κατασκευή του προϊόντος. Χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τον προσδιορισμό της περιβαλλοντικής επίπτωσης που οφείλεται στην κατασκευή του.
- Gate to Grave (από την πύλη μέχρι το τέλος): Συμπεριλαμβάνονται τα στάδια από τη στιγμή που το προϊόν αρχίζει να χρησιμοποιείται μέχρι και το τέλος της ζωής του. Σκοπός της συγκεκριμένης περίπτωσης είναι ο προσδιορισμός της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης από τη στιγμή που το προϊόν θα φύγει από το εργοστάσιο μέχρι και το τέλος της ζωής του.
- Gate to Gate (από την πύλη μέχρι την πύλη): Η συγκεκριμένη περίπτωση περιλαμβάνει τις διαδικασίες παραγωγής του προϊόντος, με σκοπό τον καθορισμό της περιβαλλοντικής της επίπτωσης.

## 3.2 Δομή

### 3.2.1 Γενική περιγραφή

Με βάση τα στάδια που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, η προτεινόμενη επιλογή για την εφαρμογή της μεθόδου LCA είναι η καθολική προσέγγιση του θέματος που περιλαμβάνει τον πλήρη κύκλο ζωής του προϊόντος (Cradle to Grave). Ωστόσο, η LCA θα μπορούσε να εφαρμοστεί και σε συγκεκριμένα στάδια του κύκλου ζωής που έχουν επιλεγεί (Cradle to Gate), γεγονός που εξαρτάται από το τους στόχους και το πεδίο εφαρμογής της μεθόδου (Harvey et al., 2016).

Η γενική διαδικασία της ανάλυσης κύκλου ζωής περιγράφεται και καθορίζεται από μία σειρά προτύπων που ορίζονται από τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (International Standardization Organization, ISO). Οι βασικές προδιαγραφές και οι κανονισμοί παρουσιάζονται από το πρότυπο ISO 14044 (Περιβαλλοντική διαχείριση - Ανάλυση Κύκλου Ζωής – προδιαγραφές και κανονισμοί, ISO 2006b). Επομένως, σύμφωνα με το συγκεκριμένο πρότυπο και όπως διακρίνεται και στην Εικόνα 3.2, η μελέτη της LCA αποτελείται από 4 βασικές φάσεις, οι οποίες είναι οι εξής:

- Προσδιορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής (Goal & Scope definition)
- Απογραφή του κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory, LCI)
- Εκτίμηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)
- Ερμηνεία (Interpretation)



Εικόνα 3.2 Δομή ανάλυσης κύκλου ζωής (Harvey et al., 2016).

Η κάθε φάση και τα επιμέρους στοιχεία της αναλύονται στα κεφάλαια που ακολουθούν.

## 3.2.2 Προσδιορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής

### 3.2.2.1 Ορισμός

Οι φάσεις της διαδικασίας της ανάλυσης κύκλου ζωής ξεκινούν με τον προσδιορισμό του στόχου και του πεδίου εφαρμογής, με σκοπό τον προσδιορισμό των σημαντικών χαρακτηριστικών της ανάλυσης, συμπεριλαμβανομένου του βάθους και του εύρους της, τα οποία ποικίλουν ανάλογα με τον γενικό στόχο της μεθόδου.

**Στόχος (Goal):** Ο στόχος της ανάλυσης κύκλου ζωής πρέπει, αρχικά, να καθοριστεί από τον οργανισμό που έχει αναλάβει την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου, με σκοπό να προσδιοριστεί ο τύπος της μελέτης, το πεδίο εφαρμογής και η προσέγγιση για την εκτίμηση των επιπτώσεων και τη λήψη των αποφάσεων. Ο στόχος είναι πιθανό να διαφέρει μεταξύ των οργανισμών, καθώς εξαρτάται από τους γενικούς περιβαλλοντικούς στόχους, την πολιτική και τους κανονισμούς, οι οποίοι θα πρέπει να λειτουργούν με γνώμονα τις περιβαλλοντικές αξίες κάθε οργανισμού. Τα δεδομένα που είναι απαραίτητα να ληφθούν υπόψη για τον προσδιορισμό του στόχου, είναι τα εξής (Harvey et al., 2016):

- Η προβλεπόμενη εφαρμογή.
- Οι αποδέκτες (κοινό).
- Τα ερωτήματα που πρέπει να απαντηθούν.
- Αν ο στόχος της μελέτης είναι η σύγκριση εναλλακτικών λύσεων, αναφερόμενη ως συγκριτική μελέτη, ή αν αφορά αποκλειστικά τη λήψη μίας απόφασης.
- Αν πρόκειται για μελέτη απόδοσης ή μελέτη συνεπειών.

**Πεδίο εφαρμογής (Scope):** Το πεδίο εφαρμογής μιας LCA καθορίζει τα όρια του συστήματος ανάλυσης, δηλαδή το τι θα συμπεριλαμβάνεται και τι όχι σε αυτό. Το πεδίο εφαρμογής πρέπει να διευθύνει τα στάδια και τις διαδικασίες που περιλαμβάνονται στην ανάλυση κύκλου ζωής, να καθορίζει τα γεωγραφικά και προσωρινά όρια αλλά και τη λειτουργική μονάδα της ανάλυσης. Τέλος, το πεδίο εφαρμογής πρέπει να προσδιορίζει την απαιτούμενη ποιότητα των δεδομένων (Harvey et al., 2016).

### **3.2.2.2 Λειτουργική μονάδα**

Η λειτουργική μονάδα καθορίζει το σύστημα που πρόκειται να μελετηθεί και λειτουργεί ως αναφορά για τα δεδομένα εισόδου και εξόδου σε καθένα από τα στάδια της ανάλυσης κύκλου ζωής του προϊόντος (Harvey et al, 2010). Όταν συγκρίνονται τουλάχιστον δύο συστήματα προϊόντων με τη χρήση της μεθόδου LCA, η λειτουργική μονάδα διαθέτει καθοριστικό ρόλο στον σχηματισμό των αποτελεσμάτων της (Jiménez et al., 2015). Έτσι, όταν η μελέτη στοχεύσει στη σύγκριση των εναλλακτικών λύσεων, είναι απαραίτητη η ισοδυναμία του ορισμού των λειτουργικών μονάδων των εναλλακτικών συστημάτων, προκειμένου η σύγκριση αυτή να πραγματοποιηθεί χωρίς προκατάληψη.

Η περίοδος ανάλυσης αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που συμβάλλουν στον καθορισμό της λειτουργικής μονάδας. Πιο συγκεκριμένα, αποτελεί τη χρονική περίοδο κατά την οποία αξιολογείται η λειτουργική μονάδα (Harvey et al., 2016), δηλαδή, εκφράζει τη χρονική διάρκεια κατά την οποία πραγματοποιείται η αποτίμηση των εισροών και εκροών σύμφωνα με τη λειτουργική μονάδα, που είχε επιλεγεί αρχικά για το εξεταζόμενο έργο.

### **3.2.2.3 Όρια του συστήματος**

Προκειμένου να καθοριστούν τα όρια και τα στάδια του κύκλου ζωής του συστήματος, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν και να ορισθούν οι ακόλουθες διαδικασίες:

- Διαδικασίες μονάδας.
- Κριτήρια αποκοπής.
- Ανάλυση ευαισθησίας.

#### **Διαδικασίες μονάδας**

Ο όρος διαδικασίες μονάδας, αναφέρεται σε όλες τις διαδικασίες που αποτελούν μέρος της λειτουργικής μονάδας και περιλαμβάνονται στη μελέτη της ανάλυσης κύκλου ζωής του προϊόντος. Τα όρια του συστήματος ορίζονται ως το σύνολο των κριτηρίων σύμφωνα με τα οποία καθορίζεται ποιες από τις διαδικασίες μονάδας αναφέρονται στο σύστημα που αναλύεται και ποιες όχι (ISO, 2006a). Συνήθως, προτιμάται η χρήση ενός διαγράμματος ροής για την περιγραφή του συστήματος, στο οποίο απεικονίζονται οι διαδικασίες μονάδας και οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Κάθε διαδικασία που περιλαμβάνεται στη μελέτη θα πρέπει να ορίζεται με βάση τα εξής:

- Την αρχή της διαδικασίας μονάδας, αναφορικά με την παραλαβή των πρώτων υλών ή των ενδιάμεσων προϊόντων.
- Τη φύση των μετατροπών και των λειτουργιών που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας.
- Το τέλος της διαδικασίας μονάδας, όσον αφορά τον προορισμό των ενδιάμεσων ή τελικών προϊόντων (ISO, 2006b).

### **Κριτήρια αποκοπής**

Τα όρια και τα στάδια του κύκλου ζωής του συστήματος που θα συμπεριληφθούν στην ανάλυση κύκλου ζωής, θα πρέπει να επιλεγθούν με βάση τον στόχο της μελέτης. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προτύπου ISO 14044, η αφαίρεση σταδίων του κύκλου ζωής, διαδικασιών και εισροών ή εκροών μιας δεδομένης διαδικασίας είναι απαραίτητο να συμβεί μόνο σε περίπτωση που η διαγραφή δεν επηρεάζει τα τελικά συμπεράσματα της μελέτης σε σημαντικό βαθμό. Επιπλέον, οποιαδήποτε απόφαση παράληψης κάποιων από τα προαναφερόμενα στοιχεία θα πρέπει να δηλώνεται με σαφήνεια, ενώ οι αιτίες και οι επιπτώσεις της θα πρέπει να εξηγούνται.

Τα κριτήρια αποκοπής αφορούν τον αποκλεισμό των διαδικασιών μονάδας από την ανάλυση, όταν οι διαδικασίες αυτές δεν πρόκειται να επηρεάσουν τη λήψη αποφάσεων για το έργο που μελετάται. Η καθιέρωση των συγκεκριμένων κριτηρίων χαρακτηρίζεται ως αποδεκτή πρακτική και, συνήθως, εφαρμόζεται με σκοπό την εξάλειψη της προσπάθειας δημιουργίας απογραφών δεδομένων για ροές, που η επίδραση τους θεωρείται αμελητέα. Τα προκαταρκτικά δεδομένα απογραφής των διαδικασιών αυτών είναι απαραίτητο να συλλέγονται και να αναλύονται, προκειμένου να εξεταστούν οι αναμενόμενες επιπτώσεις τους που θα καθορίσουν τον αποκλεισμό τους ή όχι από τη μελέτη (Harvey et al., 2016).

Συμπεραίνοντας, όταν η μελέτη αποσκοπεί στην ανάπτυξη συγκριτικών ισχυρισμών που προορίζονται για δημόσια αποκάλυψη, η τελική ανάλυση των δεδομένων των εισροών και των εκροών θα πρέπει να περιλαμβάνει κριτήρια, όπως η μάζα και η ενεργειακή και περιβαλλοντική σημασία των υλικών. Έτσι, οι διαδικασίες που συμπεριλαμβάνονται έως ότου άνω του 95 τοις εκατό των παραγόντων που επιδρούν στο σύνολο του καθενός από τα τρία κριτήρια θα έχουν συμπεριληφθεί στη μελέτη (ISO, 2006b).

### **Ανάλυση ευαισθησίας**

Η ανάλυση ευαισθησίας για τα όρια του συστήματος είναι η χρήση των διαδικασιών για την εκτίμηση των επιπτώσεων των επιλογών που έγιναν σχετικά με τις υποθέσεις,

τις μεθόδους και τα δεδομένα του αποτελέσματος της μελέτης (ISO, 2006b). Τα κριτήρια της ανάλυσης ευαισθησίας, που χρησιμοποιούνται, εξετάζουν ποιες από τις διαδικασίες, εισροές και εκροές δεδομένων θα έπρεπε να εξαιρεθούν ή να συμπεριληφθούν ως μέρος του ορισμού του πεδίου εφαρμογής της μελέτης. Η εφαρμογή των κριτηρίων αποκοπής μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο εφόσον η συλλογή των δεδομένων απογραφής έχει ξεκινήσει. Μόλις ολοκληρωθεί η συλλογή των δεδομένων απογραφής και ξεκινήσει η εκτίμηση των επιπτώσεων, είναι πιθανό να χρειαστεί τα όρια του συστήματος να προσαρμοστούν σύμφωνα με τα δεδομένα της ανάλυσης ευαισθησίας και την εφαρμογή των κριτηρίων αποκοπής.

### **3.2.3 Απογραφή του κύκλου ζωής**

Η ανάλυση απογραφής του κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory, LCI) αποτελεί τη δεύτερη κατά σειρά φάση μιας μελέτης LCA. Η φάση αυτή χαρακτηρίζεται από τη συλλογή και την επεξεργασία των απαραίτητων δεδομένων προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες του στόχου και του πεδίου εφαρμογής. Το πρότυπο ISO 14040 είναι αυτό που ορίζει το LCI ως το στάδιο της ανάλυσης κύκλου ζωής, στο οποίο πραγματοποιείται ο συνδυασμός και η ποσοτικοποίηση των εισροών και εκροών ενός προϊόντος καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του (ISO, 2006a). Στη συγκεκριμένη φάση, όλα τα σχετικά δεδομένα για μερικά, ή και όλα τα στάδια της LCA, συλλέγονται και αναλύονται με βάση τις τεχνικές, τους κανόνες και τις παραδοχές που ορίζονται από τον στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης, συμπεριλαμβανομένων των διαδικασιών μονάδας, τα κριτήρια αποκοπής, τις απαιτήσεις αναφορικά με την ποιότητα των δεδομένων και των διαδικασιών που εκτελούνται για την εκτίμηση τυχόν υπολειπόμενων δεδομένων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης απογραφής του κύκλου ζωής του προϊόντος θα αποτελέσουν τη βάση της φάσης εκτίμησης των επιπτώσεων που ακολουθεί (Harvey et al., 2016).

Η συλλογή των δεδομένων απογραφής εφαρμόζεται για κάθε διαδικασία που περιλαμβάνεται στα όρια του συστήματος. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14044, η διαδικασία μονάδας θεωρείται το «μικρότερο» στοιχείο που λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση απογραφής κύκλου ζωής του προϊόντος, για το οποίο γίνεται ποσοτικοποίηση των δεδομένων εισροών και εκροών (ISO, 2006b). Πολλές διαδικασίες μονάδας μπορεί να ομαδοποιηθούν μεταξύ τους, προκειμένου να σχηματιστούν συγκεντρωτικές μονάδες εργασιών που αντιπροσωπεύουν πολύπλοκες διαδικασίες παραγωγής. Το LCI καλύπτει όλες τις μονάδες ή τις συγκεντρωτικές μονάδες εργασιών που εμπίπτουν στα όρια του συστήματος και έχουν εδραιωθεί κατά τη διάρκεια της φάσης του στόχου και του πεδίου εφαρμογής (Harvey et al., 2016).

Οι λειτουργίες μονάδας και τα σχετικά δεδομένα απογραφής χαρακτηρίζονται ως τα θεμέλια κάθε ανάλυσης κύκλου ζωής, καθώς περιγράφουν τις ροές των εισροών και

των εκροών από το περιβάλλον και τα προϊόντα. Οι εισροές που εξετάζονται περιλαμβάνουν ροές ενέργειας και υλικών που εισάγονται στις διαδικασίες μονάδας ως ακατέργαστα υλικά, ενέργεια και χρήση νερού. Οι εκροές που εξετάζονται είναι προϊόντα, υποπροϊόντα, υλικά και ενεργειακές ροές που εξέρχονται από τις διαδικασίες μονάδας, όπως είναι για παράδειγμα, τα στερεά απόβλητα και εκπομπές ουσιών στον αέρα, το έδαφος και το νερό (Harvey et al., 2016).

Οι τύποι και οι πηγές των δεδομένων που επιλέγονται για την ανάλυση κύκλου ζωής καθορίζονται από τον στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης. Τα συγκεκριμένα δεδομένα συλλέγονται είτε από μέρη παραγωγής που σχετίζονται με τις διαδικασίες μονάδας είτε αποκτώνται και υπολογίζονται από άλλες πηγές.

Τα δεδομένα που συλλέγονται διαχωρίζονται σε δύο επιμέρους κατηγορίες, τα πρωτογενή, γνωστά και ως ειδικά δεδομένα, και τα δευτερογενή, γνωστά και ως γενικά δεδομένα (Harvey et al., 2016). Τα πρωτογενή αναφέρονται ως δεδομένα που έχουν συλλεχθεί από συγκεκριμένες διαδικασίες και αποσκοπούν στη μοντελοποίηση του κύκλου ζωής ενός προϊόντος. Αυτά τα δεδομένα αντιπροσωπεύουν την παραγωγή του μελετώμενου προϊόντος από τη στιγμή που αποκτήθηκε, χρησιμοποιώντας δεδομένα που αποκτήθηκαν αποκλειστικά για τη διαδικασία αυτή. Τα δευτερογενή δεδομένα συλλέγονται από τη βιβλιογραφία ή βάσεις δεδομένων που είτε είναι εμπορικές είτε είναι ελεύθερες στο κοινό και αντιπροσωπεύουν τον μέσο όρο των βιομηχανιών. Οι δύο διαφορετικές κατηγορίες, είναι πιθανό να παρέχουν εξίσου αξιόπιστα δεδομένα. Ωστόσο, απαραίτητος χαρακτηρίζεται ο έλεγχος διασφάλισης ποιότητας των δεδομένων αυτών, με βάση τις απαιτήσεις που έχουν οριστεί από τον στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης (Harvey et al., 2016).

Η ανάλυση απογραφής αποτελείται από τη συλλογή πρωτογενών και δευτερογενών δεδομένων με βάση τον στόχο και την εφαρμογή της μελέτης LCA. Οι προδιαγραφές της ανάλυσης απογραφής ορίζονται σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044, αλλά και με βάση τους Ευρωπαϊκούς Πρότυπους Κανόνες (European Standard Norms, ESN), εξυπηρετούν τη βιωσιμότητα των κατασκευαστικών έργων και περιλαμβάνουν τα ακόλουθα έντεκα βήματα (Harvey et al., 2016):

- 1. Προετοιμασία συλλογής δεδομένων:** Το πρώτο βήμα της διαδικασίας περιλαμβάνει την ανάπτυξη μεθόδων για τη συλλογή δεδομένων, σχεδιασμό διαγραμμάτων ροής για τις σημαντικές διεργασίες και προσδιορισμό των τύπων δεδομένων και πηγών. Η προετοιμασία ξεκινάει με τον έλεγχο των προδιαγραφών και των παραδοχών των δεδομένων, καθώς και άλλων πληροφοριών που σχετίζονται με τα δεδομένα απογραφής που καθορίζονται από τον στόχο και το πεδίο εφαρμογής.



2. **Συλλογή αρχικών δεδομένων για το στάδιο παραγωγής υλικών:** Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιούνται πρωτογενή και δευτερογενή δεδομένα, ενώ συλλέγονται οι εισροές και εκροές των κύριων υλικών του προϊόντος και οι διαδικασίες παραγωγής από τις καθορισμένες πηγές.
3. **Συλλογή αρχικών δεδομένων και ανάπτυξη μοντέλων για τα άλλα στάδια του κύκλου ζωής:** Περιλαμβάνονται τα στάδια κατασκευής, συντήρησης και αποκατάστασης, χρήσης και τέλους ζωής. Αντίθετα με το στάδιο παραγωγής υλικών, τα μοντέλα που συσχετίζουν άμεσα τα δομικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος με τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν στο στάδιο χρήσης για την ανάπτυξη των ροών παραγωγής.
4. **Ολοκλήρωση συλλογής αρχικών δεδομένων:** Σε αυτό το στάδιο χρησιμοποιούνται μοντέλα και άλλες πηγές δεδομένων. Η ολοκλήρωση συλλογής αρχικών δεδομένων είναι απαραίτητη, όταν τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί στο 2ο και στο 3ο βήμα δεν επαρκούν για τον καθορισμό των κατηγοριών επιπτώσεων που ορίστηκαν από τον στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης. Στο συγκεκριμένο βήμα, χρησιμοποιούνται δεδομένα από άλλες πηγές ή παράγοντες εκπομπών και άλλοι τύποι μοντέλων δεδομένων (μοντέλα χρήσης νερού, εδάφους, ενέργειας, κατανάλωσης καυσίμων κλπ.), που συνήθως συλλέγονται από βιβλιογραφία ή από βάσεις δεδομένων που είναι διαθέσιμες στο κοινό. Όταν τα δεδομένα αυτά δεν είναι διαθέσιμα ή επαρκή μπορούν να χρησιμοποιηθούν συντελεστές εκπομπών και άλλα μοντέλα από συγκεκριμένες διαδικασίες μονάδας, με σκοπό τη συμπλήρωση των υπολειπόμενων.
5. **Επαλήθευση δεδομένων:** Στο πέμπτο στάδιο, εξετάζεται αν οι τιμές των εισροών και εκροών απογραφής βρίσκονται εντός λογικών πλαισίων μέσω του ελέγχου του ισοζυγίου μάζας και ενέργειας, της περιβαλλοντικής συνάφειας ή άλλων συγκριτικών αναλύσεων δεδομένων απογραφής από άλλες πηγές.
6. **Συγκεντρωτικά δεδομένα:** Σε αυτό το βήμα, κάθε μεμονωμένη διαδικασία μονάδας που αντιπροσωπεύει τις αλυσίδες ανεφοδιασμού και τις ροές παραγωγής των κύριων υλικών του προϊόντος ομαδοποιούνται, όταν είναι απαραίτητο. Οι διαδικασίες μονάδας που συμπεριλαμβάνονται στην ομαδοποίηση δεδομένων καθορίζονται από τα διαγράμματα ροής και τα όρια συστήματος για κάθε υλικό.
7. **Μετατροπή δεδομένων σε διαδικασίες μονάδας και στη λειτουργική μονάδα:** Εδώ οι εισροές και εκροές απογραφής μπορούν να εκφράζονται ανά μονάδα μάζας ή όγκου παραγωγής, ή ανά ροή αναφοράς. Έπειτα, οι ροές των

εισροών και των εκροών που συσχετίζονται με μια διαδικασία μονάδας ή κάποιο σύνολο διαδικασιών μονάδας καθορίζονται ανά λειτουργική μονάδα.

**8. Εκτέλεση κατανομής:** Σε αυτό το στάδιο οι εισροές και εκροές απογραφής κατανέμονται στα προϊόντα ή στο μελετώμενο σύστημα σύμφωνα με τις μεθόδους κατανομής που ορίστηκαν στη φάση του πεδίου εφαρμογής. Οι κανόνες των κατανομών θα πρέπει να εφαρμόζονται στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Διαδικασίες παραγωγής με παραπροϊόντα (δυλιστήρια πετρελαίου, ασφαλτικά συνδετικά υλικά και διαδικασίες παραγωγής).
- Διαδικασίες ή συστήματα που χρησιμοποιούνται από πολλαπλά προϊόντα (μεταφορά ακατέργαστων υλικών).
- Ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση του προϊόντος στο τέλος της ζωής τους.
- Περιπτώσεις πολλαπλών εισροών (χώροι υγειονομικής ταφής, επεξεργασία αποβλήτων).

**9. Εφαρμογή κανόνων λήψης αποφάσεων και βελτίωση των ορίων συστήματος:** Σε αυτό το στάδιο οι εισροές και εκροές, που πρόκειται να συμπεριληφθούν ή να εξαιρεθούν από την τελική βάση δεδομένων απογραφής, καθορίζονται μετά την εφαρμογή των κανόνων αποκοπής που αναφέρονται στη φάση προσδιορισμού του πεδίου εφαρμογής. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας συμπερίληψης ή αποκλεισμού των αρχικών δεδομένων, τα όρια του συστήματος βελτιώνονται και τα βήματα 1 έως 9 επαναλαμβάνονται για τις διαδικασίες μονάδας που επηρεάζονται από τις αλλαγές.

**10. Εκτίμηση ποιότητας δεδομένων:** Στο δέκατο βήμα, τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί εξετάζονται ως προς τη συνέπεια και τη συμβατότητα τους με τον στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης.

**11. Τεκμηρίωση:** Τέλος, οι εισροές και εκροές απογραφής οριστικοποιούνται και τεκμηριώνεται μαζί με τις πηγές δεδομένων, τους σημαντικούς περιορισμούς, τις εύλογες παραδοχές, τα μοντέλα, τη συγκριτική αξιολόγηση και τα αποτελέσματα αξιολόγησης ποιότητας.

### 3.2.4 Εκτίμηση επιπτώσεων κύκλου ζωής

#### 3.2.4.1 Γενικά στοιχεία

Η εκτίμηση επιπτώσεων κύκλου ζωής (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) είναι η φάση της ανάλυσης κύκλου ζωής κατά την οποία τα αποτελέσματα της διαδικασίας της

απογραφής μεταφράζονται σε ανθρώπινες και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η συγκεκριμένη διαδικασία διεξάγεται, χρησιμοποιώντας μια επιστημονική προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη μια αλυσιδωτή σειρά επιπτώσεων της περιβαλλοντικής ροής στους ανθρώπους και στο φυσικό περιβάλλον (European Commission JRC, 2010). Επίσης, το LCIA εκχωρεί τα αποτελέσματα του LCI σε κατηγορίες επιπτώσεων. Ουσιαστικά, επιλέγεται ένας δείκτης για κάθε κατηγορία επίπτωσης και το αποτέλεσμα υπολογίζεται βάσει αυτού. Τέλος, η συλλογή των αποτελεσμάτων των δεικτών παρέχει πληροφορίες σε ζητήματα που σχετίζονται με τις περιβαλλοντικές ροές του συστήματος του προϊόντος (Harvey et al., 2016).

Σκοπός της φάσης εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι η παροχή πληροφοριών που θα βοηθήσουν στην εκτίμηση των αποτελεσμάτων της διαδικασίας απογραφής ενός συστήματος προϊόντος, προκειμένου να γίνει αντιληπτή η περιβαλλοντική τους σημασία. Ειδικά, το πρότυπο ISO 14040 αναφέρει ότι ο στόχος του LCIA είναι να κατανοηθεί και να αξιολογηθεί το μέγεθος και η σημασία των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων για ένα σύστημα προϊόντος μέσα από τον κύκλο ζωής του (ISO, 2006b).

Η διαδικασία διεξαγωγής της φάσης εκτίμησης των επιπτώσεων συνήθως θεωρείται ως μία σειρά των εξής βημάτων:

1. Επιλογή των κατηγοριών επιπτώσεων, του σχετικού δείκτη κάθε κατηγορίας και προσδιορισμός των μοντέλων αξιολόγησης που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη συγκεκριμένη φάση.
2. Ταξινόμηση των αποτελεσμάτων της απογραφής στις επιλεγμένες κατηγορίες επιπτώσεων.
3. Χρήση των μοντέλων αξιολόγησης για τη μετάφραση των αποτελεσμάτων της απογραφής σε δείκτες των κατηγοριών επιπτώσεων.
4. Εξέταση των ακόλουθων προαιρετικών βημάτων:
  - Ομαλοποίηση: Υπολογισμός του μεγέθους των αποτελεσμάτων των δεικτών σε σχέση με τις πληροφορίες αναφοράς.
  - Ομαδοποίηση: Κατάταξη των κατηγοριών επιπτώσεων.
  - Στάθμιση: Μετατροπή ή και ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων των δεικτών κατηγοριών επιπτώσεων με τη χρήση αριθμητικών παραγόντων που βασίζονται σε επιλογές τιμών.
  - Ανάλυση ποιότητας δεδομένων: Ανάπτυξη καλύτερης αντίληψης της αξιοπιστίας της συλλογής από τα αποτελέσματα των δεικτών.

Ακόμη, η φάση εκτίμησης των επιπτώσεων του κύκλου ζωής μπορεί να περιλαμβάνει μία επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία αναθεωρείται ο στόχος και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης ανάλυσης κύκλου ζωής, έτσι ώστε να διαπιστωθεί αν έχουν επιτευχθεί οι στόχοι της διαδικασίας. Για αυτό το σκοπό, τροποποιείται ο στόχος και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης LCA, σε περίπτωση που τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι δεν είναι εφικτά.

### 3.2.4.2 Μεθοδολογία εκτίμησης επιπτώσεων

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της ανάλυσης κύκλου ζωής ενός προϊόντος είναι ότι εξετάζει πολλαπλές κατηγορίες επιπτώσεων. Αντίθετα, υπάρχουν και άλλες μέθοδοι προσέγγισης που εξετάζουν μια επίπτωση μονομερώς, όπως είναι για παράδειγμα το ανθρακικό αποτύπωμα και το ενεργειακό ισοζύγιο.

Επίσης, σημειώνεται ότι τα προαιρετικά βήματα της εκτίμησης επιπτώσεων μπορούν να προστεθούν σε περιπτώσεις που η συμβολή τους χρίζεται απαραίτητη για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της φάσης εκτίμησης επιπτώσεων του κύκλου ζωής (LCIA). Ιδιαίτερη προσοχή συνιστάται κατά την παρουσίαση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων με τη χρήση των προαιρετικών βημάτων, καθώς οι περισσότερες περιλαμβάνουν μία υποκειμενική βάση (Harvey et al., 2016).

### 3.2.4.3 Κατηγορίες επιπτώσεων

Υπάρχουν πολυάριθμες κατηγορίες επιπτώσεων οι οποίες σχετίζονται είτε με τις εισροές, αντικατοπτρίζοντας την κατανάλωση των πόρων, είτε με τις εκροές του μελετώμενου συστήματος του προϊόντος, αντανακλώντας τις επιπτώσεις των ρύπων. Στη συνέχεια, αναγράφονται και αναλύονται οι κατηγορίες επιπτώσεων που περιλαμβάνονται στη μεθοδολογία TRACI (Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and other environmental Impacts) (Harvey et al., 2016):

- **Οξίνιση (Acidification).** Η συγκεκριμένη κατηγορία αναφέρεται στους ατμοσφαιρικούς ρύπους που εναποτίθενται στην επιφάνεια της γης με τη διεξαγωγή τόσο υγρών όσο και ξηρών διεργασιών. Η όξινη βροχή αποτελεί το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα των ατμοσφαιρικών ρύπων που αναφέρονται σε αυτήν την κατηγορία επιπτώσεων. Επί της ουσίας, η διαδικασία της οξίνισης είναι η αύξηση της συγκέντρωσης ιόντων υδρογόνου (H<sup>+</sup>) στο περιβάλλον (Bare, 2011). Η συγκεκριμένη κατηγορία χαρακτηρίζεται ιδιαίτερα επικίνδυνη τόσο για τα οικοσυστήματα όσο και για το ανθρωπογενές περιβάλλον. Αναφορικά με τη μελέτη LCA στα οδοστρώματα, τέτοιου είδους ρύποι εμφανίζονται σε μέρη που παρατηρείται έντονη κατανάλωση καυσίμων.

- **Υπερθέρμανση του πλανήτη (Global warming).** Η υπερθέρμανση του πλανήτη ορίζεται ως η συνεχής αύξηση της μέσης θερμοκρασίας την επιφάνεια του πλανήτη (EPA, 2014). Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην αυξανόμενη συγκέντρωση αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα και προκαλεί αλλαγές στις κλιματικές συνθήκες. Οι επιπτώσεις του φαινομένου περιλαμβάνουν την άνοδο της στάθμης της θάλασσας, την αύξηση της συχνότητας και της έντασης των ακραίων καιρικών φαινομένων στην καθημερινότητα, καθώς και επιδράσεις σε φυσικούς οικοτόπους, τη γεωργία και την ανθρώπινη υγεία. Οι περισσότερες από τις προαναφερόμενες επιπτώσεις είναι πολύ πιθανό να προκαλέσουν σημαντικές επιδράσεις σε έργα υποδομών και στο δομημένο περιβάλλον (Muench and Van Dam, 2015). Ακόμη, οι εκπομπές των αερίων θερμοκηπίου σχετίζονται άμεσα με την κατανάλωση καυσίμων, αλλά μπορούν να προκληθούν και κατά την εκτέλεση ορισμένων διαδικασιών παραγωγής προϊόντων, όπως είναι η πύρωση ασβεστόλιθου κατά την παραγωγή τσιμέντου Portland.
- **Οικοτοξικότητα (Ecotoxicity).** Η οικοτοξικότητα ανήκει στις επιπτώσεις των χημικών ουσιών που εκλύονται σε ένα οικοσύστημα, εστιάζοντας περισσότερο στις επιβλαβείς επιδράσεις ως προς τη χλωρίδα και την πανίδα. Αυτή η κατηγορία επιπτώσεων οφείλεται στην ποσότητα των ρύπων που απελευθερώνονται, στη μεταφορά, την ισχύ τους καθώς και στο οικοσύστημα στο οποίο εισέρχονται (Bare, 2011). Συχνά παρατηρείται διαχωρισμός μεταξύ χερσαίας και υδάτινης οικοτοξικότητας, γιατί η συσχέτιση αίτιου και αποτελέσματος οφείλεται σε μεγάλο βαθμό από το αν τα οικοσυστήματα που εκτίθενται είναι χερσαία ή υδάτινα. Όσον αφορά στην ανάλυση κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων, η οικοτοξικότητα σχετίζεται περισσότερο με δευτερεύουσες διαδικασίες όπως είναι η εξόρυξη ή ειδικές χημικές διεργασίες.
- **Ευτροφισμός (Eutrophication).** Ο ευτροφισμός παρατηρείται σε περιπτώσεις που θρεπτικά συστατικά προστίθενται σε υδάτινα συστήματα, προκαλώντας την αύξηση ανάπτυξης σε υδρόβια φυτά και φύκια, γεγονός που συνεπάγεται στην ελάττωση του διαλυμένου οξυγόνου στο υδάτινο οικοσύστημα, προκαλώντας έμμεσα τον θάνατο των ψαριών.
- **Ανθρώπινη Υγεία – Καρκινικοί και μη καρκινικοί ρύποι (Human Health – Cancer and Non-Cancer).** Παρόλο που με το πέρασ του χρόνου έχουν προταθεί πολλές διαφορετικές μέθοδοι και μοντέλα αξιολόγησης των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία, οι επιπτώσεις αυτές, είτε σχετίζονται είτε όχι με τον καρκίνο, εκτιμούν τη νοσηρότητα που προκαλείται από την έκθεση σε ρύπους.

- **Ανθρώπινη Υγεία – Σωματίδια (Human Health – Particulate Matter).** Η συγκεκριμένη κατηγορία περιλαμβάνει την ατμοσφαιρική ρύπανση από σωματίδια και εκπομπές που προκαλούν τον σχηματισμό σωματιδίων μέσω δευτερογενών αντιδράσεων. Αυτά τα σωματίδια επηρεάζουν άμεσα το αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου και μπορεί να προκαλέσουν ασθένειες όπως είναι το άσθμα. Γενικότερα, οι επιπτώσεις των ρύπων που αναφέρονται σε αυτήν την κατηγορία εξαρτώνται από την τοποθεσία των εκπομπών, τις μεταφορές και τον εκτιθέμενο πληθυσμό (Bare, 2011). Τα σωματίδια συσχετίζονται άμεσα με τη χρήση καυσίμων και κυρίως του πετρελαίου, σε πολλές διαδικασίες του κύκλου ζωής ενός οδοστρώματος, αλλά κατά κύριο λόγο στη φάση που αυτό χρησιμοποιείται.
- **Εξάντληση του Όζοντος (Ozone depletion).** Το όζον βρίσκεται στη στρατόσφαιρα και προστατεύει την επιφάνεια της γης από την υπεριώδη ακτινοβολία. Ορισμένες ουσίες καταστρέφουν το όζον, με αποτέλεσμα να προκαλείται αύξηση στη διέλευση της ακτινοβολίας, η οποία αυξάνει τις πιθανότητες καρκίνου του δέρματος και έχει επιβλαβείς συνέπειες για τα φυτά (Bare, 2011).
- **Φωτοχημικό Νέφος (Photochemical Oxidant Formation).** Αναφέρεται στην αντίδραση που προκαλεί η συγκέντρωση όζοντος στην τροπόσφαιρα. Το όζον στην τροπόσφαιρα σχηματίζεται μέσω σύνθετων αντιδράσεων μεταξύ πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) και οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) με την παρουσία του ηλιακού φωτός. Το φωτοχημικό νέφος είναι επιβλαβές για τους ανθρώπους, τη χλωρίδα και την πανίδα, προκαλώντας ασθένειες στο αναπνευστικό σύστημα και μειώνοντας την παραγωγικότητα των φυτών (Bare, 2002). Οι επιπτώσεις του συγκεκριμένου ατμοσφαιρικού ρύπου μεταβάλλονται ανάλογα με τον χρόνο και την τοποθεσία, ενώ οι εκπομπές ρύπων κατά τη φάση χρήσης των οδοστρωμάτων από τα οχήματα είναι ο σημαντικότερος παράγοντας του έργου ως προς τη συμβολή στο σχηματισμό του φωτοχημικού νέφους.
- **Εξάντληση πόρων (Resource Depletion).** Η εξάντληση πόρων αναφέρεται στη μείωση της διαθεσιμότητας ορυκτών ή ανανεώσιμων πόρων και στην ελάττωση των διαθέσιμων υδάτινων και εδαφικών πόρων. Η μελέτη ανάλυσης κύκλου ζωής για τα οδοστρώματα σχετίζεται με την εξάντληση πόρων όταν χρησιμοποιούνται καύσιμα, πετρέλαιο, αδρανή και μέταλλα.

### 3.2.4.4 Ταξινόμηση και χαρακτηρισμός των επιπτώσεων

Η εκχώρηση των αποτελεσμάτων της απογραφής σε κατηγορίες επιπτώσεων πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα ακόλουθα:

1. Εκχώρηση των αποτελεσμάτων απογραφής αποκλειστικά σε μία κατηγορία επιπτώσεων.
2. Προσδιορισμός των αποτελεσμάτων απογραφής που σχετίζονται με παραπάνω από μια κατηγορία.
3. Διαχωρισμός μεταξύ παράλληλων μηχανισμών. Για παράδειγμα, το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) κατανέμεται μεταξύ των κατηγοριών ανθρώπινης υγείας και οξίνισης.
4. Αντιστοίχιση σε συσχετιζόμενους μηχανισμούς. Για παράδειγμα, οι ενώσεις αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) ταξινομούνται με τη θεώρηση ότι επιδρούν στον σχηματισμό όζοντος στο έδαφος και στην οξίνιση.

Ο χαρακτηρισμός των αποτελεσμάτων δεικτών των κατηγοριών επιπτώσεων περιλαμβάνει τη μετατροπή των αποτελεσμάτων απογραφής σε κοινές μονάδες και την ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων που έχουν μετατραπεί και ανάγονται στην ίδια κατηγορία επιπτώσεων. Η μετατροπή αυτή πραγματοποιείται με τη χρήση παραγόντων χαρακτηρισμού και το αποτέλεσμα του υπολογισμού είναι ένας αριθμητικός δείκτης. Ωστόσο, σε περίπτωση που τα δεδομένα απογραφής δεν είναι διαθέσιμα ή αξιόπιστα, απαιτείται συλλογή των δεδομένων με τη χρήση επαναληπτικής διαδικασίας ή προσαρμογή του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης.

Η χρησιμότητα των δεικτών για ένα δεδομένο στόχο και πεδίο εφαρμογής εξαρτάται από την ακρίβεια, την εγκυρότητα και τα χαρακτηριστικά των μοντέλων αξιολόγησης και τους παράγοντες χαρακτηρισμού. Ο αριθμός και το είδος των παραδοχών και των χαρακτηριστικών τιμών στα μοντέλα αξιολόγησης για τον δείκτη κυμαίνεται μεταξύ των κατηγοριών επιπτώσεων και εξαρτάται από τη γεωγραφική περιοχή. Η διακύμανση στην ποιότητα των δεικτών κατηγορίας είναι πιθανό να επηρεάσει συνολική ακρίβεια της LCA εξαιτίας των ακόλουθων διαφορών (Harvey et al., 2016):

- Η πολυπλοκότητα των περιβαλλοντικών μηχανισμών μεταξύ των αποτελεσμάτων απογραφής και τον καθορισμό της κατηγορίας επίπτωσης.
- Τα χωρικά και χρονικά χαρακτηριστικά, όπως είναι η διάρκεια παραμονής μιας ουσίας στο περιβάλλον.
- Τα χαρακτηριστικά δόσης – απόκρισης.

Ο πίνακας 3.1 περιέχει τις κατηγορίες επιπτώσεων, τα περιβαλλοντικά στοιχεία που επηρεάζονται από αυτές καθώς και τις μονάδες των δεικτών για κάθε κατηγορία επίπτωσης.

**Πίνακας 3.1 Κατηγορίες επιπτώσεων (Bare, 2011).**

Κατηγορίες Επιπτώσεων	Περιβαλλοντικά στοιχεία	Μονάδες δείκτη
Οξίνιση	αέρας	kg SO <sub>2</sub> eq
Οικοτοξικότητα	αέρας, νερό, έδαφος	CTU <sub>eco</sub> /kg
Ευτροφισμός	αέρας, νερό, έδαφος	kg N eq
Εξάντληση ορυκτών καυσίμων	ακατέργαστα υλικά	MJ surplus
Παγκόσμια υπερθέρμανση	αέρας	kg CO <sub>2</sub> eq
Ανθρώπινη υγεία - καρκινικοί	αέρας, νερό, έδαφος	CTU <sub>cancer</sub> /kg
Ανθρώπινη υγεία - μη καρκινικοί	αέρας, νερό, έδαφος	CTU <sub>noncancer</sub> /kg
Ανθρώπινη υγεία - σωματίδια	αέρας	kg PM <sub>2.5</sub> eq
Εξάντληση όζοντος	αέρας	kg CFC-11 eq
Φωτοχημικό νέφος	αέρας	kg O <sub>3</sub> eq

### 3.2.5 Ερμηνεία

Η ερμηνεία (interpretation) είναι η τελική φάση της ανάλυσης κύκλου ζωής και αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα (ISO, 2006b):

- Προσδιορισμός των σημαντικών ζητημάτων της διαδικασίας βάσει των αποτελεσμάτων των φάσεων LCI και LCIA της μελέτης.
- Αξιολόγηση λαμβάνοντας υπόψη την ευαισθησία, την πληρότητα, τη συνέπεια και τη μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων των προηγούμενων φάσεων, που είναι πιθανό να επηρεάσουν αρνητικά τον στόχο, το πεδίο εφαρμογής, την ανάλυση απογραφής και την εκτίμηση επιπτώσεων της μελέτης.
- Ανάπτυξη συμπερασμάτων, ορισμός περιορισμών και προτάσεων.

Σύμφωνα με το πρότυπο EN15804 (CEN, 2013), ορίζονται οι εξής προδιαγραφές για τη φάση της ερμηνείας:

- Τα αποτελέσματα της φάσης.
- Εύλογες παραδοχές και περιορισμοί που σχετίζονται τόσο με τη μεθοδολογία όσο και με τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση.



- Αξιολόγηση της ποιότητας των δεδομένων, συμπεριλαμβάνοντας την απόκλιση από τη μέση τιμή των αποτελεσμάτων.
- Πλήρη περιγραφή των επιλογών, κρίσεων και συλλογισμών.

Το πρώτο βήμα της συγκεκριμένης φάσης της μελέτης LCA είναι η οργάνωση και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των φάσεων απογραφής και εκτίμησης επιπτώσεων, με σκοπό να προσδιοριστούν τα σημαντικά ζητήματα αναφορικά με τον στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης. Για μελέτες συγκριτικής αξιολόγησης, τα ευρήματα θα αφορούν αποκλειστικά τη φάση ανάλυσης απογραφής, ενώ για άλλες περιπτώσεις χρήσης θα είναι και για το επιλεγμένο σύνολο δεικτών επιπτώσεων. Η φάση της ερμηνείας θα πρέπει να εκφράζει ότι τα αποτελέσματα είναι ενδείξεις πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων και όχι των πραγματικών επιπτώσεων σε τελικό τους στάδιο, των περιθωρίων ασφαλείας και των σχετικών κινδύνων (ISO, 2006a).

Η οργάνωση των πληροφοριών των φάσεων ανάλυσης απογραφής και εκτίμησης επιπτώσεων θα πρέπει να επιδεικνύει τους τομείς στους οποίους πρόκειται να εμφανιστούν οι σημαντικότερες επιπτώσεις. Η παρουσίαση των πληροφοριών συνίσταται να πραγματοποιηθεί με τη χρήση διαγραμμάτων ροής, γραφικών απεικονίσεων και συνοπτικών πινάκων κατευθύνοντας τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων στον προσδιορισμό των «κρίσιμων περιοχών» της μελέτης (ISO, 2006b).

Το επόμενο βήμα κατά τη φάση της ερμηνείας είναι η αξιολόγηση και αποτελείται από τον έλεγχο πληρότητας, συνέπειας και ευαισθησίας των αποτελεσμάτων, καθώς και κάθε άλλου είδους έλεγχος και ανάλυσης που απαιτείται από τη φάση καθορισμού του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης. Αυτό συμβαίνει με σκοπό να αυξηθεί η εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα και να τεκμηριωθεί η ισχύς και η αξιοπιστία των συμπερασμάτων και των προτάσεων (Harvey et al., 2016).

Το τελικό βήμα της ερμηνείας των αποτελεσμάτων είναι να γίνει αναφορά των ευρημάτων και να διατυπωθούν προτάσεις στο κοινό της μελέτης, ενώ παράλληλα τεκμηριώνονται οι περιορισμοί. Σε αυτό το βήμα, τα σημαντικά ευρήματα της μελέτης επανεξετάζονται με έμφαση στον στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης, έτσι ώστε οι συστάσεις που θα προκύψουν, να παρέχουν στους υπεύθυνους σχετικές πληροφορίες για τη λήψη τεκμηριωμένης απόφασης. Οι περιορισμοί, που θα διατυπωθούν σε κάθε φάση αποτελούν το πιο ενδιαφέρον τμήμα της μελέτης για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων, γι' αυτό κρίζεται απαραίτητο να επαναδιατυπωθούν και να οριστικοποιηθούν σε αυτό το βήμα (Harvey et al., 2016).

Τέλος, άξιο αναφοράς χαρακτηρίζεται το γεγονός ότι οι μελλοντικές τάσεις στη μελέτη LCA θα επηρεάσουν τον τρόπο προσέγγισης της ανάλυσης κύκλου ζωής και την πληρότητα της ερμηνείας τους όπως αναφέρεται στη συνέχεια (Rosenbaum, 2014):

- Επέκταση της κλασικής μεθόδου LCA, περιλαμβάνοντας την κοινωνική ανάλυση κύκλου ζωής (Social – Life Cycle Assessment, S-LCA).
- Αξιολόγηση της βιωσιμότητας του κύκλου ζωής (Life Cycle Sustainability Assessment, LCSA).
- Δυναμική ανάλυση LCA σε πραγματικό χρόνο.
- LCA για περιοχές και οργανισμούς.
- Καθορισμός ορίων που αφορούν ολόκληρο τον πλανήτη.

### 3.2.6 Ανάλυση κύκλου ζωής οδοστρωμάτων

Ο κύκλος ζωής των οδοστρωμάτων περιλαμβάνει την εξόρυξη και την παραγωγή των υλικών, την κατασκευή, τη χρήση, τη συντήρηση, την αποκατάσταση και το τέλος ζωής. Στη συγκεκριμένη φάση, όλα τα δεδομένα που αφορούν τα στάδια της ανάλυσης κύκλου ζωής και τις ομαδοποιημένες διαδικασίες αυτών (Εικόνα 3.3), θα πρέπει να συλλέγονται και να αναλύονται σύμφωνα με τις μεθόδους, τους κανονισμούς και τις προϋποθέσεις που ορίζονται από τον στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης. Όλες αυτές οι φάσεις αποτελούν τα στάδια του κύκλου ζωής, ενώ επίσης οι εισροές και οι εκροές προσδιορίζονται ως περιβαλλοντικές ροές. Καθένα από τα προαναφερόμενα στάδια επηρεάζεται από τον σχεδιασμό του οδοστρώματος, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα η επιλογή των δομικών στρώσεων του οδοστρώματος μαζί με την ποιότητα της κατασκευής του οδοστρώματος να καθορίζουν την επίδοση του για καθορισμένες τιμές κυκλοφοριακού φόρτου, το κλίμα και το έδαφος.



Εικόνα 3.3 Στάδια κύκλου ζωής και ομαδοποιημένες διαδικασίες (Sollazo et al., 2020).

Η λειτουργική μονάδα αποτελεί μία αναπαράσταση των φυσικών διαστάσεων και της ποσοτικοποιημένης απόδοσης του οδοστρώματος (Harvey et al., 2010), γεγονός που ταυτίζεται με τον ορισμό του προτύπου ISO 14044, δηλαδή ότι η λειτουργική μονάδα είναι “η ποσοτικοποιημένη απόδοση ενός συστήματος προϊόντων με τη χρήση της μονάδας αναφοράς” (ISO, 2006a). Τα φυσικά όρια της λειτουργικής μονάδας ορίζουν τα μέρη της δομής του οδοστρώματος, τα οποία θα θεωρηθούν μέρος του συστήματος

του στην περιοχή που περιλαμβάνεται στη μελέτη. Οι διαστάσεις επιτρέπουν τον καθορισμό του όγκου, της μάζας, των επιφανειακών περιοχών και άλλων δεδομένων που απαιτούνται για την εφαρμογή της LCA. Η λειτουργική μονάδα που συνηθίζεται να χρησιμοποιείται είναι η μία λωρίδα κυκλοφορίας ενός χιλιομέτρου ή μιλίου, ενώ σπανιότερα παρατηρείται η επιλογή μεγάλων μηκών, όπως είναι τα 5 ή 10 χιλιόμετρα σε περιπτώσεις που εξετάζεται το σύνολο ενός έργου και επιδιώκεται η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αυτού (Harvey et al., 2016).

Γενικά, η μελέτη ανάλυσης κύκλου ζωής ενός πλήρους συστήματος οδοστρώματος περιλαμβάνει τις διαδικασίες που διαδραματίζονται εντός των φυσικών ορίων της δομής του, η οποία αποτελείται από την ασφαλική στρώση, τη βάση και την υπόβαση λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες ως προς τις λωρίδες έκτακτης ανάγκης και τα συστήματα απορροής ομβρίων και αποχέτευσης. Ωστόσο, αν ο στόχος της LCA δεν περιλαμβάνει ολόκληρο το σύστημα του οδοστρώματος, τότε τα όρια του συστήματος μπορούν να προσαρμοστούν ανάλογα, όπως για παράδειγμα όταν τα φυσικά όρια περιλαμβάνουν το οδόστρωμα της κύριας λωρίδας κυκλοφορίας, αλλά αφήνουν εκτός τις λωρίδες έκτακτης ανάγκης και τα στηθαία ασφαλείας. Μία άλλη επιλογή που απαιτείται για τον καθορισμό των φυσικών ορίων είναι αν θα συμπεριληφθούν σε αυτά όλες οι στρώσεις του οδοστρώματος, καθώς σε περίπτωση εξέτασης εναλλακτικών λύσεων για την αντικατάσταση της ασφαλικής στρώσης, οι στρώσεις που δεν επηρεάζονται από καμία από τις εναλλακτικές μπορούν να παραληφθούν από τη μελέτη, γεγονός που καθορίζεται από τον στόχο της (Harvey et al., 2016).

Σε περίπτωση που η ανάλυση κύκλου ζωής οδοστρωμάτων δεν λαμβάνει υπόψη όλα τα σημαντικά στάδια της διαδικασίας και όλους τους καθοριστικούς περιβαλλοντικούς δείκτες, οι πολιτικές, οι κανονισμοί και οι προδιαγραφές που προκύπτουν και στοχεύουν στον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, δύναται να προκαλέσουν ανεπιθύμητες και αρνητικές συνέπειες. Αυτός ο κίνδυνος γίνεται ακόμη μεγαλύτερος σε περιπτώσεις που πραγματοποιούνται αλλαγές σε μέρος του συστήματος ή σε κάποιο συγκεκριμένο στάδιο του κύκλου ζωής, παραλείποντας την αξιολόγηση των συνεπειών που θα επιφέρουν οι παρακείμενες αλλαγές στο υπόλοιπο σύστημα και στα άλλα στάδια της διαδικασίας.

Συνεχίζοντας, ο καθορισμός της κατάλληλης λειτουργικής μονάδας αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα των υφιστάμενων μελετών LCA που αναφέρονται στα οδοστρώματα, γεγονός που οφείλεται αφενός στην πολυπλοκότητα των οδοστρωμάτων και αφετέρου στην έλλειψη ενός ενιαίου σχετικού προτύπου (Santero et al., 2011). Συνήθως, η λειτουργική κατάσταση του οδοστρώματος αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα που αμελείται. Ακόμη, η κατάσταση του οδοστρώματος ανήκει στους παράγοντες που καθορίζουν το επίπεδο εξυπηρέτησης του. Πιο συγκεκριμένα, ένα

οδόστρωμα μπορεί να βρίσκεται σε κακή κατάσταση, παρέχοντας χαμηλό επίπεδο εξυπηρέτησης στους χρήστες, ενώ έχει λίγες, σχετικά, επιπτώσεις του κύκλου ζωής ανά λωρίδα κυκλοφορίας. Συμπεραίνοντας, γίνεται αντιληπτό πως η εξυπηρετικότητα και η κατάσταση του οδοστρώματος ανήκουν στους παράγοντες που ενδείκνυται να συμπεριληφθούν στις υπάρχουσες λειτουργικές μονάδες ώστε να βελτιωθεί η βάση της σύγκρισης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Harvey et al., 2016).

Επιπλέον, χαρακτηριστικό πρόβλημα αποτελεί η δυσκολία καθορισμού της περιόδου ανάλυσης, καθώς η λειτουργική ζωή με την οποία σχεδιάζεται η αρχική κατασκευή, δύναται κατά περιπτώσεις, να διαφέρει από τα στοιχεία και τα γεγονότα συντήρησης και αποκατάστασης (Harvey et al., 2010). Πλέον, η περίοδος ανάλυσης που επιλέγεται σε τέτοιες περιπτώσεις πρέπει να έχει το απαραίτητο μέγεθος ώστε να καλύπτει χρονικά την επόμενη αποκατάσταση ή ανακατασκευή του οδοστρώματος. Μία ενδεικτική τιμή για την περίοδο ανάλυσης, που συχνά προτιμάται, είναι τα 100 έτη και αντιστοιχίζεται σε περιπτώσεις που κάποιο από τα στοιχεία του οδοστρώματος έχει μακρά διάρκεια ζωής. Εναλλακτικά, σε περίπτωση που το στοιχείο του οδοστρώματος με τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής πρόκειται να χρειαστεί μόνο συντήρηση, όπως παρατηρείται σε περιπτώσεις οδοστρωμάτων με χαμηλές τιμές κυκλοφοριακών φόρτων, τότε η προτεινόμενη τιμή της περιόδου ανάλυσης είναι τα 35 έτη (Walls and Smith, 1998).

Σχετικά με τα στάδια του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων, ο αποκλεισμός τους είναι δυνατό να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα με σημαντικές επιπτώσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το γεγονός ότι η παραγωγή συγκεκριμένων υλικών μπορεί να μην έχει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να παρουσιάζει προβλήματα όπως είναι η ανεπαρκής αντοχή κατά τη χρήση που οδηγεί στη συχνή αντικατάσταση του και η αύξηση της δυσκαμψίας των οδοστρωμάτων αυξάνοντας έμμεσα την κατανάλωση των καυσίμων των οχημάτων. Καθεμία από τις παραπάνω περιπτώσεις, δεν θα ληφθεί υπόψη, εκτός και αν η φάση της παραγωγής του υλικού αυτού συμπεριληφθεί στη μελέτη. Η συγκριτική αξιολόγηση μελετών που περιλαμβάνουν μόνο ένα ή και μερικά στάδια του κύκλου ζωής πρέπει να περιέχουν σχετική δήλωση που να αναφέρεται στην αβεβαιότητα που προκαλεί η αποκοπή των σταδίων στην τεκμηρίωση και στους περιορισμούς (Harvey et al., 2016).

Στη μελέτη ανάλυσης κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων, χρησιμοποιούνται κριτήρια αποκοπής διαφόρων τύπων για να αποφασιστεί ποιες διαδικασίες, εισροές ή εκροές θα συμπεριληφθούν στη μελέτη. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν το ισοζύγιο μάζας το ενεργειακό ισοζύγιο ή και την περιβαλλοντική τους σημασία. Καθένα από αυτά τα κριτήρια λαμβάνεται υπόψη για τον αποκλεισμό διαδικασιών σε μελέτες LCA που αναφέρονται σε οδοστρώματα. Η εξέταση των εισροών, παραλείποντας οποιοδήποτε

από τα παραπάνω κριτήρια, είναι πιθανό να επιφέρει ιδιαίτερα σημαντικές επιπτώσεις στη λήψη των αποφάσεων. Για παράδειγμα, ορισμένα από τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα οδοστρώματα παρουσιάζουν πολύ μικρή επίδραση στη διατομή του οδοστρώματος, ενώ μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις τιμές των περιβαλλοντικών δεικτών που χρησιμοποιούνται. Αντίστοιχα, άλλα υλικά με μεγάλη μάζα ή ενεργειακή σημασία μπορεί να επηρεάζουν έμμεσα, αλλά σημαντικά, την αύξηση της κατανάλωσης του καυσίμων των οχημάτων που απαιτούνται για τη μεταφορά τους (Harvey et al., 2016).

Τα στοιχεία της μελέτης που ακολουθούν, συνιστάται να λαμβάνονται υπόψη για αλλαγές των ορίων του συστήματος, στην ανάλυση κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων:

- Λειτουργική μονάδα.
- Περίοδος ανάλυσης.
- Διαδικασίες, εισροές και εκροές για συγκεκριμένες διαδικασίες της απογραφής του κύκλου ζωής.
- Στάδια του κύκλου ζωής.
- Στοιχεία κυκλοφοριακού φόρτου κατά τη φάση χρήσης του οδοστρώματος.
- Μελλοντικό πλάνο συντήρησης και αποκατάστασης, στο οποίο λαμβάνονται υπόψη το χρονοδιάγραμμα και το είδος των εργασιών.
- Κατανομές ταχύτητας, αλλαγές λόγω αύξησης κυκλοφοριακού φόρτου, βελτίωση της τεχνολογίας των οχημάτων και εκπομπές ρύπων.
- Μέθοδοι κατανομής.

Σχετικά με τη φάση του LCI, εμπεριέχει τη συλλογή και μοντελοποίηση των δεδομένων όλων των διαδικασιών μονάδας που περιλαμβάνονται στα όρια του συστήματος στο πλαίσιο της μελέτης ανάλυσης κύκλου ζωής ενός οδοστρώματος. Τέτοιου είδους διαδικασίες είναι η παραγωγή και αποθήκευση ασφαλικών υλικών, η παραγωγή αδρανών, ασφαλτομιγμάτων, τσιμέντου και σκυροδέματος, καθώς και άλλες διαδικασίες που αφορούν την κατασκευή του οδοστρώματος.

Αντίστοιχα, χαρακτηριστικό παράδειγμα πρωτογενών δεδομένων αποτελούν τα δεδομένα εκπομπών σε συγκεκριμένη μονάδα παραγωγής τσιμέντου που παράγει πρώτη ύλη για συγκεκριμένο είδος σκυροδέματος που χρησιμοποιείται στη μελέτη LCA οδοστρώματος. Αντιθέτως, παράδειγμα δευτερογενών δεδομένων αποτελούν τα δεδομένα εκπομπών ή διεργασιών που συλλέγονται από όλες τις μονάδες παραγωγής τσιμέντου και χαρακτηρίζονται ως μέσος όρος από τους οργανισμούς τσιμέντου.

Καταληκτικά, οι περισσότερες μελέτες LCA οδοστρωμάτων περιλαμβάνουν την κατανάλωση ενέργειας ως αποτέλεσμα είτε της απογραφής και της υπερθέρμανσης του πλανήτη είτε της εκτίμησης επιπτώσεων ως παραμέτρους αναφοράς. Ωστόσο, συστήνεται η συμπερίληψη ενός ευρύτερου συνόλου κατηγοριών επιπτώσεων, όπως ορίζεται από τη μεθοδολογία TRACI (Bare, 2011). Εκτός από τις κατηγορίες της μεθοδολογίας TRACI μπορούν να προστεθούν και άλλες κατηγορίες επιπτώσεων ή δεδομένα απογραφής, εφόσον κρίνονται χρήσιμα ή απαιτούνται από τον στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης. Αυτή η περίπτωση μπορεί να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμη σε τοπικά και συγκεκριμένου τύπου έργα.

### **3.2.7 Ανάλυση κόστους κύκλου ζωής**

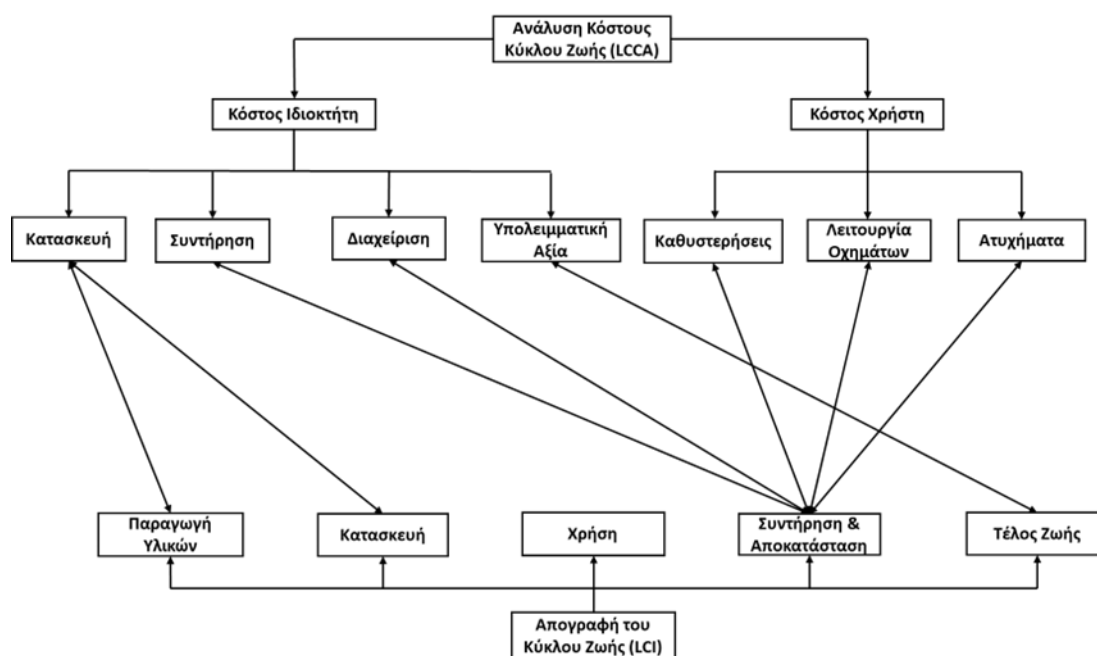
Η ανάλυση κόστους κύκλου ζωής (Life Cycle Cost Analysis, LCCA) αποτελεί μια μέθοδο αξιολόγησης με εφαρμογή στη λήψη αποφάσεων για επενδύσεις σε έργα συγκοινωνιακών υποδομών. Η συγκεκριμένη τεχνική αποσκοπεί στον προσδιορισμό του οικονομικότερου τρόπου υλοποίησης μέσω της συγκριτικής αξιολόγησης των εναλλακτικών σχεδιασμού ενός έργου ή γενικότερα μιας επένδυσης. Στην ανάλυση συμπεριλαμβάνονται οι αρχικές δαπάνες για την κατασκευή του έργου, το συνολικό κόστος κατά τη διάρκεια των σταδίων του κύκλου ζωής του αλλά και η οικονομική επίδραση του στους χρήστες του έργου (Qiao et al, 2019).

Η έννοια της ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής στον ευρύτερο κλάδο των συγκοινωνιακών υποδομών εισάγεται για πρώτη φορά το 1960 από την Αμερικανική Ένωση Εθνικών Οδών (American Association of State Highway Officials, AASHO). Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1960 υλοποιήθηκαν δύο έργα που προήγαγαν την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου στον σχεδιασμό οδοστρωμάτων και στην επιλογή κατάλληλου τύπου οδοστρώματος. Το National Cooperative Highway Research Program διεξήγαγε μία έρευνα με σκοπό την προώθηση της έννοιας του LCCA, ενώ στη συνέχεια το Υπουργείο Μεταφορών του Τέξας (Texas Department of Transportation, TxDOT) χρηματοδότησε ένα έργο για την ανάπτυξη συστήματος άκαμπτων οδοστρωμάτων (Rigid Pavement System, RPS) όπου με την εφαρμογή της LCCA αξιολογούνται τα εναλλακτικά σχέδια με βάση το συνολικό κόστος κύκλου ζωής του έργου. Το 1986 και το 1993, η Αμερικανική Ένωση Εθνικών Οδών και Μεταφορών (American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO) ενθάρρυνε την έννοια της ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής και συνέβαλε στον προσδιορισμό των στοιχείων για τα διάφορα κόστη που πρέπει να ληφθούν υπόψη σε μια LCCA, με την έκδοση του Οδηγού Σχεδιασμού Οδοστρωμάτων (AASHTO) (Harrison et al., 1999).

Το κόστος κύκλου ζωής αναφέρεται στο σύνολο των δαπανών που προέκυψαν κατά τον πλήρη κύκλο ζωής του οδοστρώματος. Αυτό περιλαμβάνει το κόστος για τα στάδια

του κύκλου ζωής του έργου, όπως είναι η κατασκευή, η χρήση, η συντήρηση, η αποκατάσταση, αλλά και η υπολειμματική του αξία εφόσον αυτή υπάρχει. Ο υπολογισμός του κόστους κύκλου ζωής πραγματοποιείται με στόχο την ορθολογική κατανομή του κεφαλαίου της επένδυσης προσδιορίζοντας τον οικονομικότερο τρόπο υλοποίησης του έργου. Για παράδειγμα, σε περίπτωση που δαπανηθούν περισσότερα χρήματα για την αρχική κατασκευή ενός καλύτερου ποιοτικά οδοστρώματος, θα εξοικονομηθούν χρήματα κατά τη φάση συντήρησης και αποκατάστασης του, συγκριτικά με την κατασκευή ενός οδοστρώματος χαμηλής ποιότητας, το οποίο θα απαιτεί συχνότερη συντήρηση και θα έχει μικρότερη διάρκεια κύκλου ζωής (Mallick and El-Korchi, 2008).

Στην Εικόνα 3.4 που ακολουθεί, γίνεται αντιληπτή η συσχέτιση μεταξύ της μεθόδου της ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής (LCCA) και της ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA) ενός οδοστρώματος.



Εικόνα 3.4 Συσχέτιση LCCA και LCA (Liu et al., 2019).

Επίσης, τα απαραίτητα βήματα για την εφαρμογή μιας ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής είναι τα ακόλουθα (Ditrani et al., 2009):

- Διατύπωση εναλλακτικών στρατηγικών σχεδιασμού.
- Προσδιορισμός του χρονοδιαγράμματος των δραστηριοτήτων.
- Εκτίμηση κόστους κατασκευαστή.
- Εκτίμηση κόστους χρήστη.

- Υπολογισμός του συνολικού κόστους κύκλου ζωής για τις εναλλακτικές στρατηγικές σχεδιασμού.

Πιο συγκεκριμένα, για τη διεξαγωγή LCCA ενός οδοστρώματος είναι απαραίτητες οι εξής παράμετροι (Mallick and El-Korchi, 2008):

- Χαρακτηριστικά του υπό μελέτη οδοστρώματος (μήκος, πλάτος ύπαρξη ερεισμάτων κ.α.).
- Το αρχικό κόστος κατασκευής του οδοστρώματος.
- Το κόστος των επερχόμενων δραστηριοτήτων συντήρησης και αποκατάστασης.
- Το κόστος του χρήστη του έργου (καθυστερήσεις, ατυχήματα, λειτουργικό κόστος οχημάτων).
- Ο χρόνος μεταξύ της κατασκευής και κάθε επέμβασης που θα πραγματοποιηθεί στο οδόστρωμα.
- Η περίοδος ανάλυσης.
- Το επιτόκιο προεξόφλησης.
- Η υπολειμματική αξία της τελευταίας επέμβασης ή γενικά του οδοστρώματος.

Επιπλέον, ο σχεδιασμός των εναλλακτικών στρατηγικών προσεγγίσεων του οδοστρώματος θα πρέπει να γίνει με κοινά στοιχεία για την ποιότητα του εδάφους και τον κυκλοφοριακό φόρτο για όλες τις εναλλακτικές προκειμένου τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να είναι συγκρίσιμα (ACPA, 2005). Για την εφαρμογή της οικονομικής ανάλυσης που είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους κύκλου ζωής χρησιμοποιούνται τεχνικές που εξαρτώνται από παράγοντες, όπως είναι το επίπεδο στο οποίο διεξάγεται η ανάλυση του έργου, η δυνατότητα εφαρμογής των τεχνικών για το συγκεκριμένο είδος έργου και η θεώρηση του επιπέδου αποδοχής από τον λήπτη της απόφασης και το κοινό. Ωστόσο, κάθε τεχνική που εφαρμόζεται θα πρέπει να εξετάζει μακροπρόθεσμα τα κόστη και τα οφέλη του έργου (Mallick and El-Korchi, 2008).



## 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

### 4.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Στο παρόν κεφάλαιο διεξάγεται μια ανάλυση κύκλου ζωής που αναφέρεται στο πειραματικό οδόστρωμα ενός αυτοκινητοδρόμου του εθνικού οδικού δικτύου. Στην Εικόνα 4.1 που ακολουθεί, παρατίθενται τα δεδομένα του υφιστάμενου οδοστρώματος. Συγκεκριμένα, το οδόστρωμα αποτελείται από στρώσεις βάσης και υπόβασης συνολικού πάχους εικοσιπέντε εκατοστών (25 cm) από ασύνδετο υλικό και από ασφαλτικές στρώσεις συνολικού πάχους δεκαεπτά εκατοστών (17 cm) από ασφαλτόμιγμα υψηλής θερμοκρασίας (Hot Mix Asphalt, HMA).



Εικόνα 4.1 Υφιστάμενο Οδόστρωμα

Με αφορμή την απαίτηση ανύψωσης της ερυθράς του οδοστρώματος κατά δεκατρία εκατοστά (13 cm), λόγω μεταβολής του κυκλοφοριακού φόρτου, κρίθηκε απαραίτητη η ενίσχυση του υφιστάμενου οδοστρώματος. Αρχικά, πραγματοποιείται φρεζάρισμα δεδομένου πάχους των ασφαλτικών στρώσεων του οδοστρώματος και, στη συνέχεια, τοποθετούνται νέες στρώσεις από ασύνδετα υλικά και νέες ασφαλτικές στρώσεις, σχηματίζοντας τη νέα διατομή του. Αυτή η ενέργεια επέμβασης αποτελεί το πρώτο σενάριο και περιγράφεται με λεπτομέρειες στην επόμενη ενότητα. Στη συγκεκριμένη λύση, το ασφαλτικό υλικό που αφαιρείται, απορρίπτεται μετά την αποξήλωση του. Ωστόσο, υπάρχει η δυνατότητα το αποξηλωμένο ασφαλτικό υλικό, έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία να επαναχρησιμοποιηθεί ως υλικό νέου οδοστρώματος. Στο πλαίσιο της αναβάθμισης του συγκεκριμένου οδοστρώματος, διερευνάται η χρήση του ασφαλτικού υλικού που έχει αφαιρεθεί, έναντι των φυσικών αδρανών, στη νέα στρώση ασύνδετου υλικού. Αυτή η ενέργεια αποτελεί το δεύτερο εναλλακτικό σενάριο που περιγράφεται λεπτομερώς στη συνέχεια.

Τονίζεται πως τα τελικά οδοστρώματα που προκύπτουν από τις δύο περιπτώσεις ενίσχυσης είναι μεταξύ τους ισοδύναμα, δηλαδή πρόκειται να φέρουν τις ίδιες προβλεπόμενες διελεύσεις και να έχουν την ίδια φθορά. Αντικείμενο της διαδικασίας της πειραματικής ανάλυσης που ακολουθεί, αποτελεί η σύγκριση των περιβαλλοντικών

επιπτώσεων που αναφέρονται στην εφαρμογή των δύο εναλλακτικών σεναρίων επέμβασης.

## **4.2 Περιγραφή εναλλακτικών σεναρίων**

### **4.2.1 1<sup>ο</sup> Σενάριο**

Το πρώτο σενάριο επέμβασης που προτάθηκε για την επίλυση του προβλήματος ανύψωσης της ερυθράς του υφιστάμενου οδοστρώματος του αυτοκινητοδρόμου, περιλαμβάνει, αρχικά, το φρεζάρισμα της υφιστάμενης ασφαλτικής στρώσης με ΗΜΑ σε δεδομένο βάθος. Στη συνέχεια, σύμφωνα με την απαίτηση ανύψωσης του οδοστρώματος, θα τοποθετηθεί πάνω στην υπάρχουσα στρώση από ΗΜΑ μία στρώση από αδρανή υλικά, αποτελώντας τη νέα στρώση βάσης του. Πάνω από αυτή τη στρώση θα κατασκευαστεί μία στρώση ασφαλτικής βάσης και μία αντιολισθηρή ασφαλτική στρώση.

Συγκριμένα, το απαιτούμενο βάθος φρεζαρίσματος είναι ίσο με δώδεκα εκατοστά (12cm), η στρώση ασύνδετων υλικών θα έχει πάχος δέκα εκατοστά (10 cm), ενώ η ασφαλτική στρώση βάσης και η αντιολισθηρή θα κατασκευαστούν με πάχος δώδεκα εκατοστά (12 cm) και τρία εκατοστά (3 cm) αντίστοιχα. Τα στοιχεία αυτά απεικονίζονται στην πρώτη διατομή της Εικόνας 4.2 που αναφέρεται ως αρχικός σχεδιασμός.

Στην Εικόνα 4.2, εκτός του αρχικού σχεδιασμού απεικονίζονται και οι μελλοντικές εργασίες συντήρησης που απαιτούνται με την εφαρμογή του σεναρίου επέμβασης. Η πρώτη συντήρηση είναι προγραμματισμένη να υλοποιηθεί 12 χρόνια μετά την ολοκλήρωση της αρχικής κατασκευής. Περιλαμβάνει το φρεζάρισμα της αντιολισθηρής ασφαλτικής στρώσης των τριών εκατοστών (3 cm), αλλά και των επτά εκατοστών (7 cm) της ασφαλτικής βάσης, δηλαδή συνολικό βάθος φρεζαρίσματος δέκα εκατοστών (10 cm). Στη συνέχεια, προβλέπεται αντικατάσταση του τμήματος που αφαιρέθηκε με την κατασκευή στρώσης ασφαλτικής βάσης από ασφαλτόμιγμα υψηλού μέτρου δυσκαμψίας (EME - Enrobés à Module Elevé) πάχους δέκα εκατοστών (10 cm), καθώς και κατασκευή νέας αντιολισθηρής ασφαλτικής στρώσης πάχους τριών εκατοστών (3 cm). Τα στοιχεία της πρώτης περίπτωσης συντήρησης συναντώνται στη δεύτερη διατομή της Εικόνας 4.2.

Η δεύτερη περίπτωση συντήρησης είναι προγραμματισμένη να διενεργηθεί 24 χρόνια μετά την ολοκλήρωση του αρχικού σχεδιασμού και περιλαμβάνει μόνο την κατασκευή μιας πρόσθετης επιφανειακής στρώσης τριών εκατοστών (3 cm) πάνω στην ήδη υφιστάμενη. Τα στοιχεία της συγκεκριμένης συντήρησης φαίνονται αναλυτικά στην τρίτη διατομή της Εικόνας 4.2.

Αρχικός Σχεδιασμός	1η Συντήρηση	2η Συντήρηση
Αντιολισθηρή Στρώση h=30 mm, E=4320	Αντιολισθηρή Στρώση h=30 mm, E=4320	Αντιολισθηρή Στρώση h=30 mm, E=4320
Ασφαλτική Βάση h=120mm, E=8870MPa	EME h=100mm, E=12200MPa	EME h=100mm, E=12200MPa
Ασύνδετο Υλικό h=100mm, E=600MPa	Ασφαλτική Βάση h=50mm, E=8870MPa	Ασφαλτική Βάση h=50mm, E=8870MPa
Υφιστάμενες Στρώσεις HMA h=50mm, E=3000MPa	Ασύνδετο Υλικό h=100mm, E=600MPa	Ασύνδετο Υλικό h=100mm, E=600MPa
Ασύνδετο Υλικό h=250mm, E=500MPa	Υφιστάμενες Στρώσεις HMA h=50mm, E=3000MPa	Υφιστάμενες Στρώσεις HMA h=50mm, E=3000MPa
Στρώση Εδρασης h=6m, E=200MPa	Ασύνδετο Υλικό h=250mm, E=500MPa	Ασύνδετο Υλικό h=250mm, E=500MPa
	Στρώση Εδρασης h=6m, E=200MPa	Στρώση Εδρασης h=6m, E=200MPa

Εικόνα 4.2 1<sup>ο</sup> Σενάριο

Έτσι, συνολικά, στην Εικόνα 4.2 απεικονίζονται αναλυτικά το πρώτο σενάριο επέμβασης που προτείνεται για την αντιμετώπιση του προβλήματος ανύψωσης της ερυθράς της υφιστάμενης οδού και περιλαμβάνει τόσο τον αρχικό σχεδιασμό του οδοστρώματος όσο και τις επερχόμενες φάσεις αποκατάστασης του.

#### 4.2.2 2<sup>ο</sup> Σενάριο

Κατά το δεύτερο σενάριο, τα ασφαλτικά υλικά που αφαιρούνται από το υφιστάμενο οδόστρωμα με τη μέθοδο του φρεζαρίσματος, έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία, αποτελούν τα ανακτώμενα ασφαλτικά υλικά (RAP), περιέχοντας πολύτιμο ασφαλτικό συνδετικό υλικό και αδρανή. Έτσι, πρόκειται να κατασκευαστεί μία στρώση βάσης από μίγμα RAP – VA σε ποσοστό 60 – 40%. Η στρώση αυτή θα τοποθετηθεί πάνω στην υπάρχουσα στρώση από HMA, μετά το φρεζάρισμα των ασφαλτικών στρώσεων του υφιστάμενου οδοστρώματος. Στη συνέχεια, όπως και στο πρώτο σενάριο επέμβασης, θα κατασκευαστούν, πάνω από αυτή τη στρώση, μία στρώση ασφαλτικής βάσης και μία αντιολισθηρή ασφαλτική στρώση.

Συγκεκριμένα, το απαιτούμενο βάθος φρεζαρίσματος θα είναι ίσο με δέκα εκατοστά (10cm), με αποτέλεσμα το πάχος της υφιστάμενης ασφαλτικής στρώσης από HMA να είναι πλέον επτά εκατοστά (7 cm). Πάνω σε αυτήν θα εδρασθεί η στρώση βάσης από RAP, η οποία θα έχει πάχος δέκα εκατοστά (10 cm), ενώ η ασφαλτική στρώση βάσης και η αντιολισθηρή θα κατασκευαστούν με πάχος δώδεκα εκατοστά (12 cm) και τρία εκατοστά (3 cm) αντίστοιχα. Τα στοιχεία αυτά απεικονίζονται στην πρώτη διατομή της Εικόνας 4.3 που αναφέρεται ως αρχικός σχεδιασμός.

Όσον αφορά την πρώτη και τη δεύτερη περίπτωση συντήρησης, που πρόκειται να εφαρμοστούν 12 και 24 χρόνια μετά την ολοκλήρωση της πρώτης κατασκευής αντίστοιχα, είναι πανομοιότυπες με τις περιπτώσεις του πρώτου σεναρίου επέμβασης. Οι τελικές διατομές του νέου οδοστρώματος που προκύπτουν σε κάθε περίπτωση συντήρησης, απεικονίζονται στην Εικόνα 4.3 που ακολουθεί.

Αρχικός Σχεδιασμός	1η Συντήρηση	2η Συντήρηση
Αντιολισθηρή Στρώση h=30 mm, E=4320	Αντιολισθηρή Στρώση h=30 mm, E=4320	Αντιολισθηρή Στρώση h=30 mm, E=4320
Ασφαλτική Βάση h=100mm, E=8870MPa	ΕΜΕ h=100mm, E=12200MPa	Αντιολισθηρή Στρώση h=30 mm, E=4320
60% RAP - 40% VA h=100mm, E=600MPa	Ασφαλτική Βάση h=30mm, E=8870MPa	ΕΜΕ h=100mm, E=12200MPa
Υφιστάμενες Στρώσεις HMA h=70mm, E=3000MPa	60% RAP - 40% VA h=100mm, E=600MPa	Ασφαλτική Βάση h=30mm, E=8870MPa
Ασύνδετο Υλικό h=250mm, E=500MPa	Υφιστάμενες Στρώσεις HMA h=70mm, E=3000MPa	60% RAP - 40% VA h=100mm, E=600MPa
Στρώση Εδρασης h=6m, E=200MPa	Ασύνδετο Υλικό h=250mm, E=500MPa	Υφιστάμενες Στρώσεις HMA h=70mm, E=3000MPa
	Στρώση Εδρασης h=6m, E=200MPa	Ασύνδετο Υλικό h=250mm, E=500MPa
		Στρώση Εδρασης h=6m, E=200MPa

Εικόνα 4.3 2ο Σενάριο

Τέλος, στην Εικόνα 4.3 αποδίδεται πλήρως η εναλλακτική λύση που αφορά την αντιμετώπιση του προβλήματος ανύψωσης της ερυθράς της υφιστάμενης οδού και περιλαμβάνει τόσο τον αρχικό σχεδιασμό του οδοστρώματος όσο και τις επερχόμενες φάσεις αποκατάστασης του.

### 4.3 Μοντέλο ανάλυσης κύκλου ζωής οδοστρωμάτων

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας εξετάζεται η χρήση ανακτώμενων ασφαλτικών υλικών στην κατασκευή νέου οδοστρώματος για τον υπό μελέτη αυτοκινητόδρομο, μέσω της συγκριτικής αξιολόγησης δύο εναλλακτικών σεναρίων επέμβασης στο υφιστάμενο οδόστρωμα. Επιδιώκοντας τον ορισμό του πεδίου εφαρμογής της ανάλυσης κύκλου ζωής για το συγκεκριμένου τμήμα οδοστρώματος, θα καθοριστούν τόσο η λειτουργική μονάδα όσο και τα όρια του συγκεκριμένου συστήματος.

#### 4.3.1 Λειτουργική μονάδα και όρια του συστήματος

Ως λειτουργική μονάδα της μελέτης εξετάζεται το μήκος ενός χιλιομέτρου του υφιστάμενου οδοστρώματος του αυτοκινητοδρόμου, το οποίο αποτελείται από δύο λωρίδες ανά κατεύθυνση κυκλοφορίας πλάτους 3,5 μέτρων και λωρίδας έκτακτης ανάγκης (ΛΕΑ) πλάτους 2,30 μέτρων. Η λειτουργική μονάδα σχεδιάζεται με σκοπό να

παρέχει οικονομικές, ασφαλείς και άνετες συνθήκες οδήγησης για 24 χρόνια. Επιπλέον, στη λειτουργική μονάδα λήφθηκαν υπόψη οι απαιτούμενες αποστάσεις μεταφοράς των υλικών σύμφωνα με τις συνθήκες της συγκεκριμένης περίπτωσης. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε πως τα αδρανή που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της διατομής του οδοστρώματος θα προμηθευτούν από το πλησιέστερο λατομείο του σημείου αποκατάστασης, διανύοντας απόσταση πενήντα χιλιομέτρων (50 km) μέχρι το σημείο της επέμβασης. Αντιστοίχως, οι ποσότητες της ασφάλτου που θα χρησιμοποιηθούν θεωρείται πως θα αποκτηθούν από την πλησιέστερη μονάδα παραγωγής ασφάλτου, η οποία απέχει ενενήντα χιλιόμετρα (90 km) από το σημείο της επέμβασης. Όσον αφορά στα ανακτώμενα ασφατικά υλικά (RAP), δεν λαμβάνονται υπόψη για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από τη μεταφορά των υλικών.

Τα όρια του συστήματος της παρακείμενης μελέτης περιλαμβάνουν τα στάδια παραγωγής υλικών, κατασκευής, συντήρησης και αποκατάστασης του οδοστρώματος, ενώ παραλείπονται τα στάδια της χρήσης και του τέλους ζωής.

#### **4.3.2 Ανάλυση απογραφής**

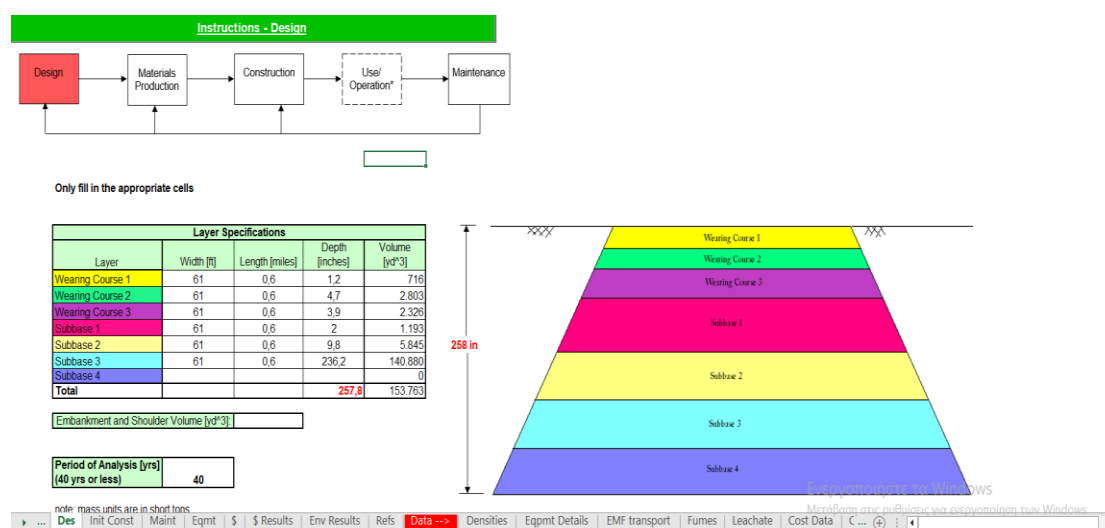
Η διαδικασία της ανάλυσης απογραφής πραγματοποιείται με τη χρήση του λογισμικού PaLATE 2.0 (Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economics Effects, 2011). Το PaLATE (2011) επί της ουσίας είναι ένα πρόγραμμα υπολογιστικών φύλλων LCA και LCCA που σχεδιάστηκε από το Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια – Μπέρκλεϋ. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών και οικονομικών επιπτώσεων από την κατασκευή οδοστρωμάτων. Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι ένα εργαλείο, το οποίο μέσω της εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για τον κύκλο ζωής των οδοστρωμάτων βοηθάει στη σύγκριση εναλλακτικών λύσεων σχεδιασμού και κατασκευής των οδοστρωμάτων από περιβαλλοντικής άποψης. Οι χρήστες εισάγουν τον αρχικό σχεδιασμό, τα υλικά της αρχικής κατασκευής, τα υλικά και τις διαδικασίες συντήρησης, τον εξοπλισμό και το κόστος ανά μονάδα του έργου. Οι περιβαλλοντικές εκροές που προκύπτουν περιλαμβάνουν τις ακόλουθες κατηγορίες επιπτώσεων:

- Κατανάλωση ενέργειας (MJ).
- Κατανάλωση νερού (g).
- Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>).
- Ευτροφισμός (NO<sub>x</sub>).
- Αιωρούμενα σωματίδια PM<sub>10</sub>.
- Οξίνιση (SO<sub>2</sub>).

- Εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO).
- Ίχνη υδραργύρου (Hg).
- Ίχνη μόλυβδου (Pb).
- Επικίνδυνα σωματίδια RCRA (g).
- Ανθρώπινη Υγεία – Καρκινικοί Ρύποι (CTU/Kg).
- Ανθρώπινη Υγεία – Μη Καρκινικοί Ρύποι (CTU/Kg).

Τέλος, το πρόγραμμα PaLATE 2.0 περιλαμβάνει ανάλυση κόστους κύκλου ζωής του οδοστρώματος (LCCA), στην οποία συγκρίνεται το κόστος που σχετίζεται με τις διαδικασίες και τα υλικά των εναλλακτικών σεναρίων κατά τη διάρκεια του έργου.

Συγκεκριμένα, στην αρχική οθόνη του λογισμικού απαιτείται ο προσδιορισμός της περιόδου ανάλυσης του έργου, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι τα 24 έτη, αλλά και οι διαστάσεις της διατομής της αρχικής κατασκευής του υπό μελέτη οδοστρώματος καθώς και τα πάχη των επιμέρους στρώσεων της, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.4.



Εικόνα 4.4 Αρχική οθόνη PaLATE 2.0 (2011)

Στη συνέχεια, στην επόμενη καρτέλα του υπολογιστικού φύλλου εισάγονται από τον χρήστη τα δεδομένα του όγκου των στρώσεων που πρόκειται να αποξηλωθούν ή να κατασκευαστούν στις προβλεπόμενες συντηρήσεις καθώς και δεδομένα για τον εξοπλισμό που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, σύμφωνα με την Εικόνα 4.5.



Εικόνα 4.5 Εισαγωγικά δεδομένα PaLATE 2.0 (2011)

Τέλος, με βάση τα δεδομένα που έχουν οριστεί ποσοτικοποιούνται οι προβλεπόμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ενεργειών που έχουν επιλεγεί, ταξινομούνται ανά κατηγορία επίπτωσης και ομαδοποιούνται σε μορφή πίνακα.

#### 4.4 Αποτελέσματα

Επόμενο στάδιο της ανάλυσης κύκλου ζωής οδοστρωμάτων είναι η εκτίμηση των επιπτώσεων, δηλαδή, προκύπτουν τα αποτελέσματα της διαδικασίας ανάλυσης απογραφής τα οποία καθορίζουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των κατηγοριών που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Στο πρόγραμμα PaLATE 2.0 (2011), που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, λαμβάνονται υπόψη οι διαδικασίες παραγωγής και μεταφοράς υλικών και ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την επίτευξη της αρχικής κατασκευής των διατομών του οδοστρώματος.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί ορθολογικά η συγκριτική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μεταξύ των δύο σεναρίων επέμβασης, παρατίθεται μία σειρά γραφημάτων που για κάθε κατηγορία επίπτωσης παρουσιάζονται οι συνολικές τιμές εκπομπών κάθε σεναρίου. Στη συγκεκριμένη σύγκριση, λαμβάνονται υπόψη τα στάδια παραγωγής και μεταφοράς των υλικών και η λειτουργία του εξοπλισμού. Τονίζεται ότι πρόκειται για δύο εναλλακτικές περιπτώσεις επέμβασης που αφορούν ισοδύναμα οδοστρώματα.

Αρχικά, στον Πίνακα 4.1 και στον Πίνακα 4.2 παρατίθενται για κάθε κατηγορία επίπτωσης οι συνολικές τιμές των περιβαλλοντικών ρύπων που παράγονται στα στάδια της παραγωγής και μεταφοράς των υλικών, καθώς και στη λειτουργία του εξοπλισμού κατά τη διάρκεια των διεργασιών για τα δύο σεναρία επέμβασης.

**Πίνακας 4.1 Παραγόμενοι Ρύποι 1<sup>ο</sup> Σεναρίου**

<b>Στάδια/ Κατηγορίες Επιπτώσεων</b>	<b>Παραγωγή Υλικών</b>	<b>Μεταφορά Υλικών</b>	<b>Εξοπλισμός</b>	<b>Σύνολο</b>
<b>Κατανάλωση Ενέργειας [MJ]</b>	11443679,773	665719,280	84541,949	12193941,002
<b>Κατανάλωση Νερού [Kg]</b>	2943,014	113,344	11,964	3068,322
<b>Παγκόσμια Υπερθέρμανση (CO<sub>2</sub>) [Mg]</b>	572,610	49,769	6,345	628,724
<b>Ευτροφισμός (NO<sub>x</sub>) [Kg]</b>	4308,090	2651,496	150,592	7110,178
<b>Αιωρούμενα σωματίδια PM<sub>10</sub> [Kg]</b>	3293,065	513,000	19,873	3825,938
<b>Οξίνιση (SO<sub>2</sub>) [Kg]</b>	185344,428	159,0897833	9,95851119	185513,4763
<b>Εκπομπές μονοξειδίου του Άνθρακα (CO) [Kg]</b>	1721,061	220,958	32,450	1974,469
<b>Ίχνη Υδραργύρου Hg [g]</b>	10,767	0,481	0,019	11,267
<b>Ίχνη Μολύβδου Pb [g]</b>	560,503	22,380	0,873	583,755
<b>Επικίνδυνα σωματίδια RCRA [Kg]</b>	110704,702	4796,937	187,094	115688,734
<b>Καρκινικοί Ρύποι [CTU/Kg]</b>	1939322,474	14270,165	0,000	1953592,638
<b>Μη Καρκινικοί Ρύποι [CTU/Kg]</b>	3505143513,722	17507330,234	0,000	3522650844

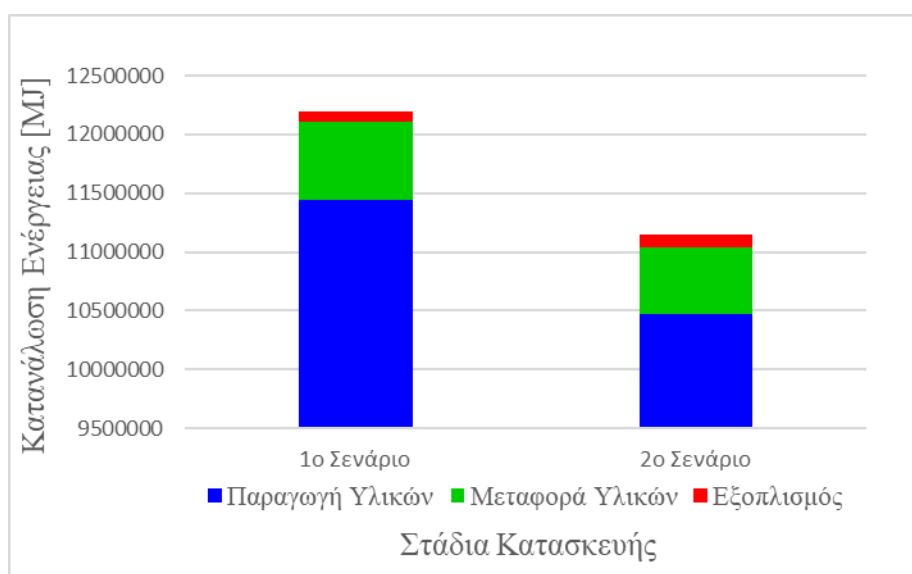


**Πίνακας 4.2 Παραγόμενοι Ρύποι 2<sup>ο</sup> Σεναρίου**

<b>Στάδια/ Κατηγορίες Επιπτώσεων</b>	<b>Παραγωγή Υλικών</b>	<b>Μεταφορά Υλικών</b>	<b>Εξοπλισμός</b>	<b>Σύνολο</b>
<b>Κατανάλωση Ενέργειας [MJ]</b>	10474922,931	562957,290	107364,183	11145244,404
<b>Κατανάλωση Νερού [Kg]</b>	2711,877	95,848	23,503	2831,228
<b>Παγκόσμια Υπερθέρμανση (CO<sub>2</sub>) [Mg]</b>	518,795	42,086	8,058	568,939
<b>Ευτροφισμός (NO<sub>x</sub>) [Kg]</b>	4039,987	2242,205	188,520	6470,712
<b>Αιωρούμενα σωματίδια PM<sub>10</sub> [Kg]</b>	2807,054	433,209	22,551	3262,813
<b>Οξίνιση (SO<sub>2</sub>) [Kg]</b>	176315,345	134,532	12,467	176462,344
<b>Εκπομπές μονοξειδίου του Ανθρακα (CO) [Kg]</b>	1586,903	186,850	40,623	1814,376
<b>Ίχνη Υδραργύρου Hg [g]</b>	10,063	0,407	0,019	10,488
<b>Ίχνη Μολύβδου Pb [g]</b>	518,391	18,925	0,873	538,190
<b>Επικίνδυνα σωματίδια RCRA [Kg]</b>	103159,094	4056,471	187,094	107402,659
<b>Καρκινικοί Ρύποι [CTU/Kg]</b>	1811384,377	12067,389	0,000	1823451,766
<b>Μη Καρκινικοί Ρύποι [CTU/Kg]</b>	2999976626,394	14804857,669	0,000	3014781484,063

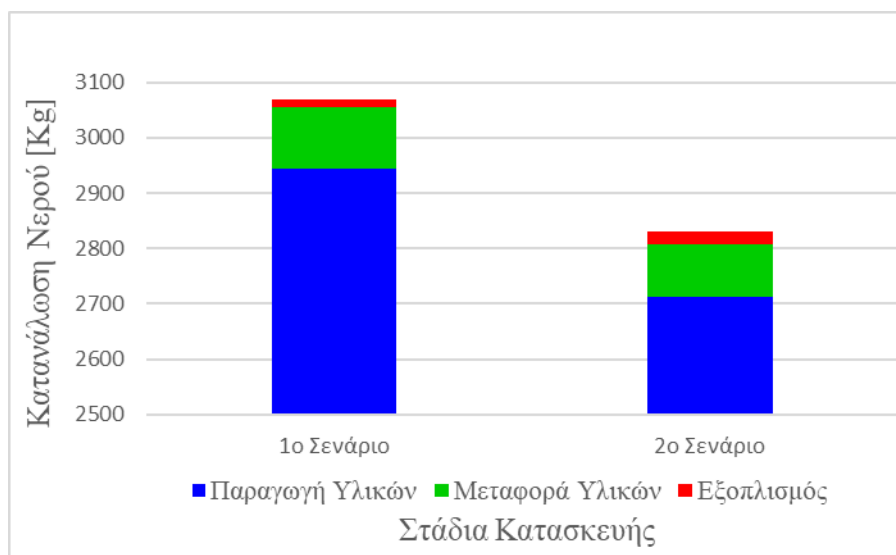
Στη συνέχεια, παρατίθενται τα συγκριτικά διαγράμματα για κάθε κατηγορία επίπτωσης για τα στάδια της παραγωγής και της μεταφοράς των υλικών, καθώς και για τη λειτουργία του εξοπλισμού. Επίσης, σημειώνεται πως, ως βάση της σύγκρισης έχουν τεθεί οι τιμές που αφορούν το πρώτο σενάριο επέμβασης. Επομένως, οι ποσοστιαίες μεταβολές με θετικό πρόσημο αναφέρονται στη μείωση των παραγόμενων ρύπων με την εφαρμογή του δεύτερου σεναρίου επέμβασης, ενώ αντιθέτως, οι ποσοστιαίες μεταβολές με αρνητικό πρόσημο υποδηλώνουν πως η χαμηλότερη τιμή των παραγόμενων ρύπων παρουσιάστηκε με την εφαρμογή του πρώτου σεναρίου.

Στο διάγραμμα της Εικόνας 4.6, απεικονίζεται η συνολική κατανάλωση ενέργειας για την υλοποίηση καθενός από τα δύο σενάρια επέμβασης. Σύμφωνα με την Εικόνα 4.6, παρατηρείται ότι, στο δεύτερο σενάριο που χρησιμοποιούνται ανακτώμενα ασφαλτικά υλικά η συνολική κατανάλωση ενέργειας έχει μειωθεί από 12.193.941 MJ σε 11.145.244 MJ. Η προκείμενη διαφορά προκύπτει κατά κύριο λόγο κατά τη φάση παραγωγής των υλικών, στην οποία οφείλεται το 92,4% της συνολικής μείωσης μεταξύ των δύο σεναρίων, αλλά και κατά τη φάση της μεταφοράς τους, όπου εξοικονομείται το 9,8%. Η διαφορά της ενεργειακής κατανάλωσης κατά τη φάση λειτουργίας του εξοπλισμού υπολογίζεται σε -2,18%, με το πρώτο σενάριο να παρουσιάζει τη χαμηλότερη τιμή. Ωστόσο, συγκριτικά με τη συνολική τιμή των δύο σεναρίων, η διαφορά αυτή θα μπορούσε να χαρακτηριστεί αμελητέα.



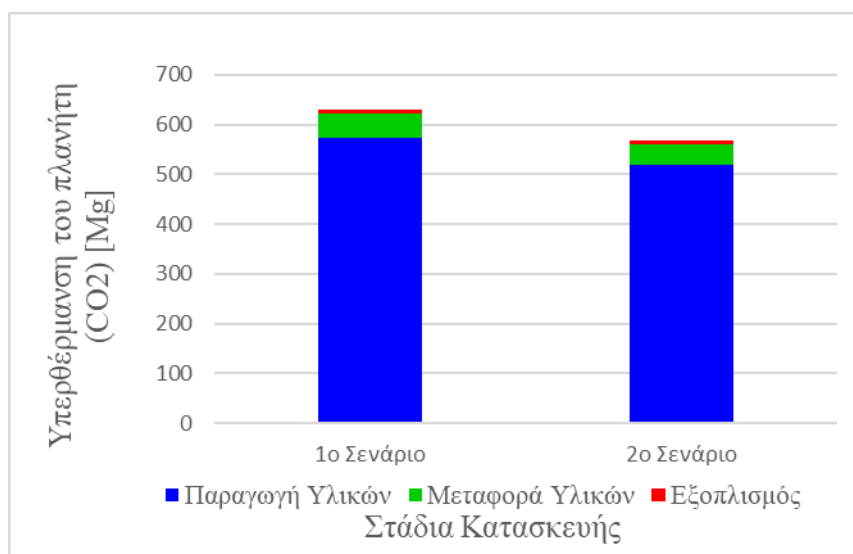
**Εικόνα 4.6 Κατανάλωση Ενέργειας**

Ιδιαίτερα σημαντική κατηγορία επίπτωσης αποτελεί η κατανάλωση νερού κατά την υλοποίηση των επεμβάσεων. Η χρήση ανακτώμενων ασφαλτικών υλικών στις στρώσεις βάσης περιορίζει σημαντικά την κατανάλωση νερού κατά την κατασκευή του οδοστρώματος. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται μείωση της συνολικής κατανάλωσης από 3.068 Kg σε 2831 Kg, σε σύγκριση με το πρώτο σενάριο επέμβασης που για την κατασκευή του οδοστρώματος χρησιμοποιούνται συμβατικά υλικά, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.7. Το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής μείωσης παρατηρείται στην παραγωγή των υλικών (97,5%), ενώ στη μεταφορά τους οφείλεται το 7,4% της συνολικής μείωσης. Όσον αφορά τη λειτουργία του εξοπλισμού, η ποσοστιαία μεταβολή ισούται με το -4,9% της συνολικής τιμής με το πρώτο σενάριο επέμβασης να παρουσιάζει τη χαμηλότερη τιμή.



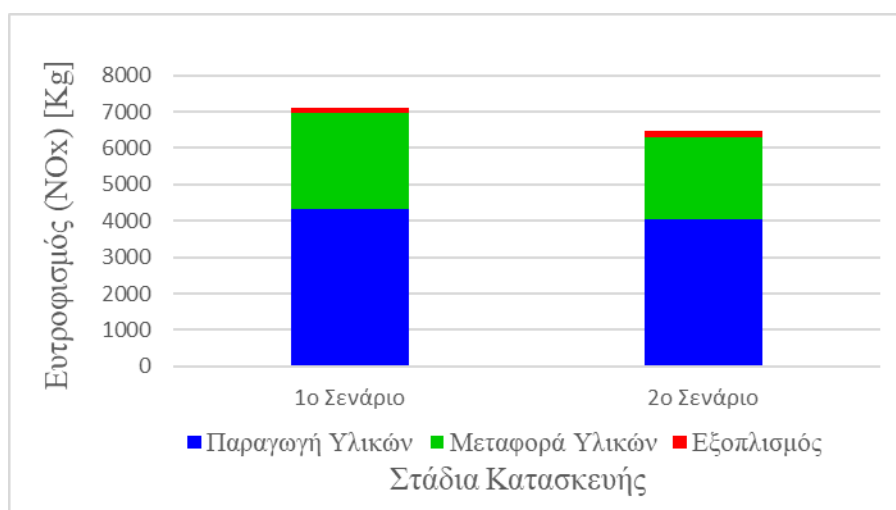
**Εικόνα 4.7 Κατανάλωση Νερού**

Η κατασκευή οδοστρωμάτων είναι μια ενέργεια που έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή σημαντικών ποσοτήτων διοξειδίων του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) στην ατμόσφαιρα, συμβάλλοντας στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Συγκρίνοντας τις τιμές των δύο σεναρίων επέμβασης με βάση την Εικόνα 4.8, παρατηρείται πως το αποτέλεσμα είναι παρόμοιο με αυτό της Εικόνας 4.7 που αναφέρεται στην ενεργειακή κατανάλωση. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση μίγματος RAP - VA στις στρώσεις βάσης του οδοστρώματος έναντι των παρθένων αδρανών περιορίζει τις εκπομπές CO<sub>2</sub> από 573 Mg σε 519 Mg και από 50 Mg σε 42 Mg, προκαλώντας μείωση της συνολικής τιμής κατά 90% και 12,9% στις φάσεις παραγωγής και μεταφοράς των υλικών αντίστοιχα. Για ακόμη μία περίπτωση, παρά τη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων στη φάση λειτουργίας του εξοπλισμού (-2.9%) για τα δύο σεναρία επέμβασης, η μεταβολή στη συνολική τιμή των εκπομπών δεν χαρακτηρίζεται σημαντική.



**Εικόνα 4.8 Υπερθέρμανση του πλανήτη**

Η εκπομπή οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) είναι αποτέλεσμα της αντίδρασης του οξυγόνου με το ατμοσφαιρικό άζωτο σε υψηλές θερμοκρασίες και είναι επιβλαβής για το αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου προκαλώντας ασθένειες, όπως είναι το άσθμα και η χρόνια βρογχίτιδα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η καύση των κινητήρων των οχημάτων μεταφοράς, στο οποίο οφείλεται η αυξημένη συμβολή της φάσης μεταφοράς των υλικών στη συνολική τιμή των εκπομπών  $\text{NO}_x$ , συγκριτικά με τις υπόλοιπες περιπτώσεις, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.9. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, παρατηρείται ελάττωση των εκπομπών  $\text{NO}_x$  από 7110 Kg σε 6471 Kg με τη χρήση μίγματος RAP - VA έναντι φυσικών αδρανών να αποτελεί τη βέλτιστη λύση. Η προκείμενη διαφορά παρατηρείται κατά τις φάσεις παραγωγής και μεταφοράς των υλικών, 41,9% και 64% αντίστοιχα, ενώ κατά τη φάση λειτουργίας του εξοπλισμού παρουσιάζεται διαφορά -5,9%, χωρίς όμως να επηρεάζεται σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα.



Εικόνα 4.9 Ευτροφισμός

Τα αιωρούμενα σωματίδια ( $\text{PM}_{10}$ ) είναι σωματίδια στερεής ή υγρής μορφής που η εκπομπή τους στην ατμόσφαιρα προέρχεται από ένα ευρύ φάσμα υλικών, όπως το έδαφος και σταγονίδια αιθάλης, αμιάντου και θεικού οξέος. Είναι σωματίδια επιβλαβή για το αναπνευστικό σύστημα και ευθύνονται για την πρόκληση ασθενειών, όπως είναι τα καρδιακά νοσήματα, η βρογχίτιδα και ο καρκίνος. Σύμφωνα με την Εικόνα 4.10, η χρήση ανακτώμενων ασφαλικών υλικών στην κατασκευή του οδοστρώματος περιορίζει την εκπομπή αιωρούμενων σωματιδίων συγκριτικά με τη χρήση φυσικών αδρανών από 3826 Kg σε 3262 Kg. Η σημαντικότερη μείωση γίνεται αισθητή κατά την παραγωγή υλικών (86,3%), καθώς και στη μεταφορά τους (14,2%) αντίστοιχα για τα δύο σενάρια. Η λειτουργία του εξοπλισμού, στη συγκεκριμένη περίπτωση, παρουσιάζει ιδιαίτερα χαμηλές τιμές (-0,5%) για τη συγκεκριμένη κατηγορία επίπτωσης και η διαφορά μεταξύ των δύο περιπτώσεων δεν θεωρείται σημαντική.



**Εικόνα 4.10 Αιωρούμενα σωματίδια PM10**

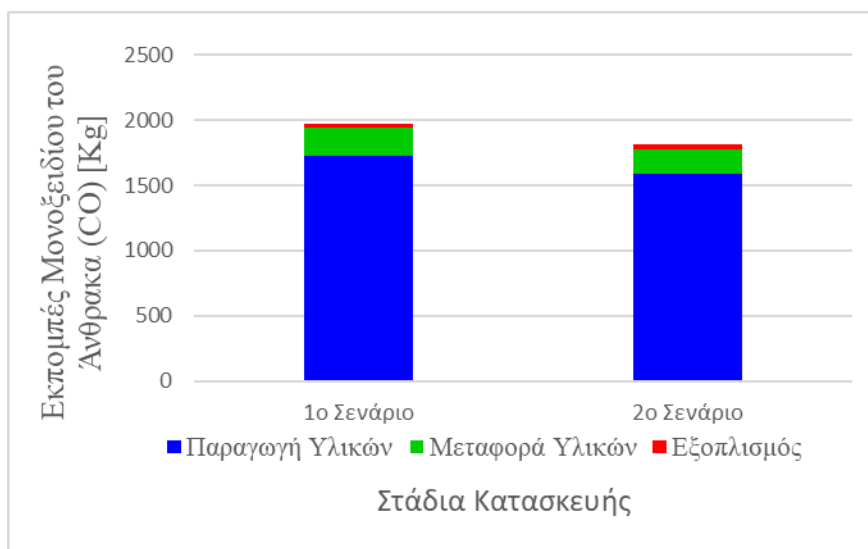
Το διοξείδιο του θείου παράγεται από την αντίδραση του οξυγόνου με το θείο και οι επιπτώσεις από την έκλυση του στην ατμόσφαιρα είναι παρόμοιες με αυτές των αιωρούμενων σωματιδίων (PM<sub>10</sub>), ενώ αποτελεί βασικό παράγοντα της όξινης βροχής. Η χρήση μίγματος RAP - VA στις στρώσεις βάσης του οδοστρώματος μειώνει σε μεγάλο βαθμό τις εκπομπές διοξειδίων του θείου (SO<sub>2</sub>), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.11. Για την ακρίβεια, με την εφαρμογή του δεύτερου σεναρίου οι εκπομπές SO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα περιορίζονται από 185.513 Kg σε 176.462 Kg. Η διαφορά μεταξύ των δύο τιμών παρατηρείται στη φάση παραγωγής των υλικών (99,8%), ενώ στις φάσεις μεταφοράς των υλικών και λειτουργίας του εξοπλισμού η διαφορά που προκύπτει θεωρείται ασήμαντη (0.3% και -0.02% αντιστοίχως).



**Εικόνα 4.11 Οξίνιση**

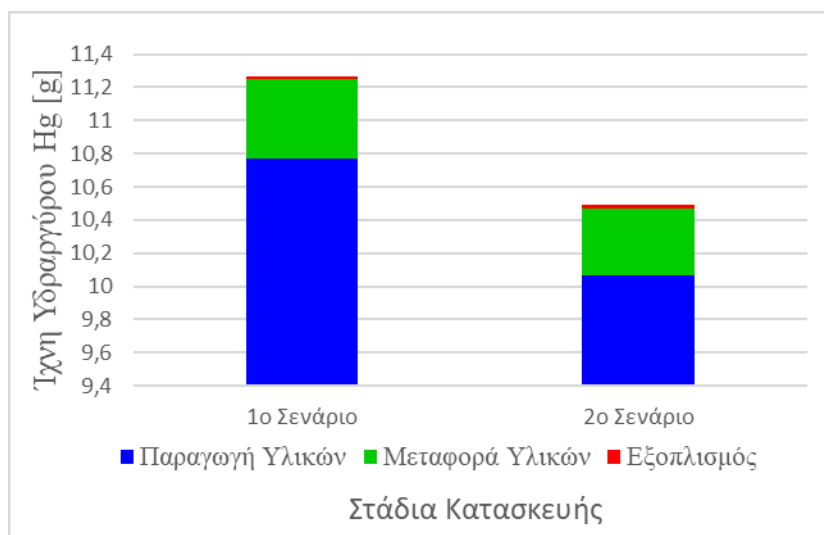
Το μονοξείδιο του άνθρακα συμβάλλει σημαντικά στην ατμοσφαιρική ρύπανση και αποτελεί βασικό συστατικό της αιθαλομίχλης. Κυριότερη επίπτωση του ως προς τον

ανθρώπινο παράγοντα είναι ότι παρεμβαίνει στην ικανότητα του αίματος για μεταφορά του οξυγόνου. Σύμφωνα με την Εικόνα 4.12, η υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου επέμβασης περιορίζει τις εκπομπές CO από 1974 Kg σε 1814 Kg. Η παρακείμενη διαφοροποίηση παρατηρείται κατά τη φάση παραγωγής των υλικών (83,8%) και κατά τη φάση της μεταφοράς τους (21,3%) ενώ κατά τη λειτουργία του εξοπλισμού η διαφοροποίηση δεν είναι τόσο σημαντική (-5,1%).



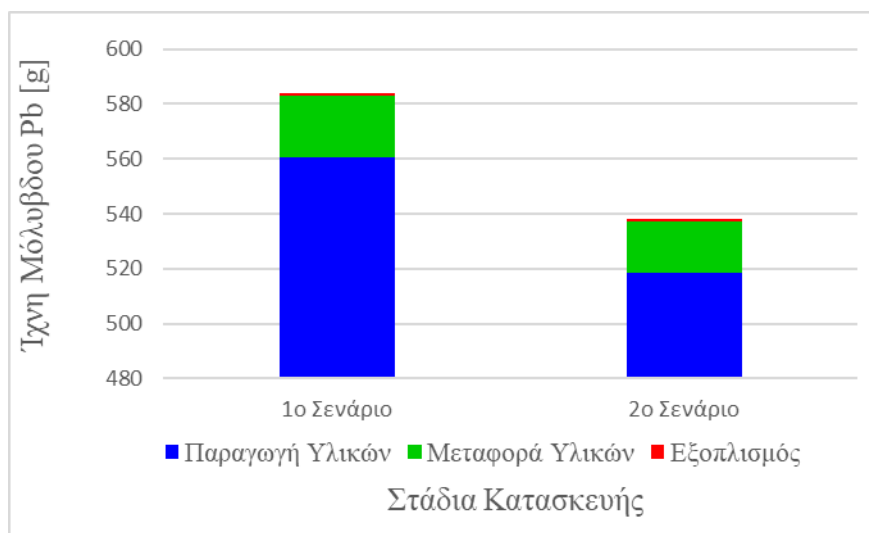
**Εικόνα 4.12 Εκπομπές Μονοξειδίου του Ανθρακα (CO)**

Ο υδράργυρος είναι ένα πολύ ισχυρό και επιβλαβές στοιχείο για την ανθρώπινη υγεία. Σύμφωνα με την Εικόνα 4.13, και οι δύο περιπτώσεις παρουσιάζουν εκπομπές υδραργύρου που η τιμή τους είναι πολύ κοντά στο μηδέν. Συγκεκριμένα, στο δεύτερο σενάριο, η ποσότητα του εκλυόμενου στην ατμόσφαιρα υδραργύρου ανέρχεται στα 10,5 g και παρατηρείται μείωση σε σχέση με το πρώτο σενάριο, όπου η αντίστοιχη ποσότητα ανέρχεται στα 11,3 g. Η μεγαλύτερη συμβολή στην εκπομπή του στοιχείου παρατηρείται κατά τη φάση της παραγωγής των υλικών αποτελώντας το 90,5% της συνολικής μείωσης της τιμής. Οι εκπομπές κατά τη φάση της μεταφοράς των υλικών συμβάλλουν στη συνολική μείωση σε ποσοστό 9,5%, ενώ, όσον αφορά στη λειτουργία του εξοπλισμού, οι εκπομπές παρουσιάζουν την ίδια ακριβώς τιμή και στις δύο περιπτώσεις.



**Εικόνα 4.13 Τύχη Υδραργύρου Hg**

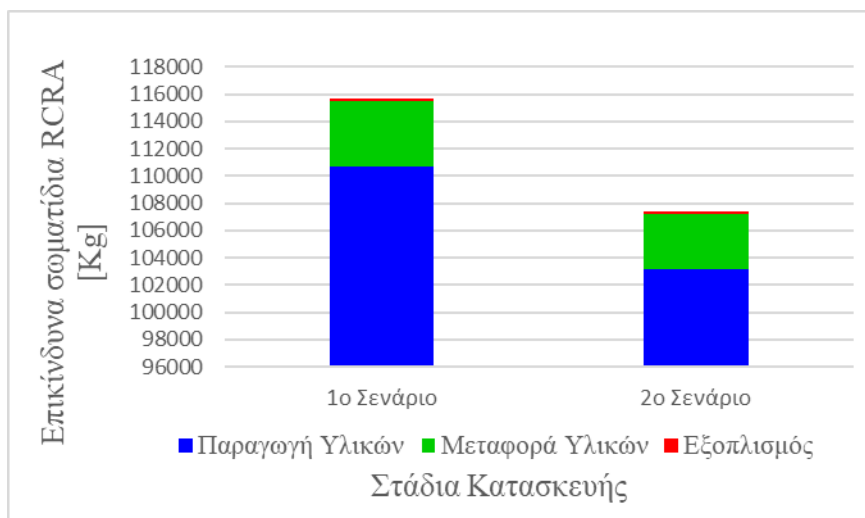
Ιδιαίτερα σημαντική και επιβλαβής για την ανθρώπινη υγεία χαρακτηρίζεται η εκπομπή μόλυβδου (Pb) στην ατμόσφαιρα, η οποία παρατηρείται κατά τη διαδικασία παραγωγής ασφάλτου. Σύμφωνα με την Εικόνα 4.14, στο σενάριο επέμβασης που χρησιμοποιούνται ανακτώμενα ασφαλτικά υλικά παρουσιάζεται ελάττωση των εκπομπών Pb από 584 g σε 538 g. Στη φάση της παραγωγής των υλικών προκύπτει το 92,4% της μείωσης της τιμής και στη φάση μεταφοράς τους οφείλεται το υπολειπόμενο 7,6% της μείωσης. Όπως και στην περίπτωση του υδραργύρου, στη φάση λειτουργίας του εξοπλισμού, οι εκπομπές παρουσιάζουν την ίδια ακριβώς τιμή και στις δύο περιπτώσεις.



**Εικόνα 4.14 Τύχη Μόλυβδου Pb**

Σύμφωνα με την Εικόνα 4.15, παρατηρείται πως, με την εφαρμογή του δεύτερου σεναρίου επέμβασης, η εκπομπή επικίνδυνων αποβλήτων RCRA περιορίζεται από

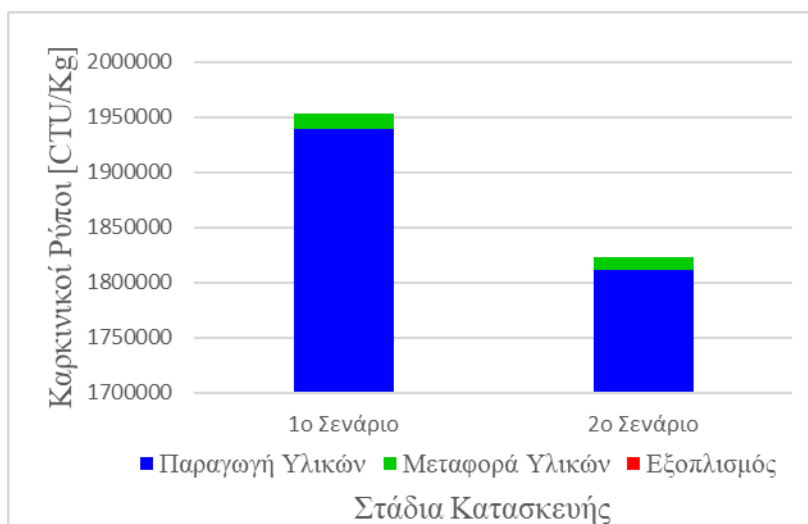
115.688 Kg σε 107.402 Kg. Η παρακείμενη μείωση οφείλεται στην ελάττωση των ρύπων κατά τη φάση παραγωγής των υλικών των δύο σεναρίων (91,1%). Κατά τη φάση της μεταφοράς τους, διακρίνεται το 8,9% της μείωσης μεταξύ των δύο σεναρίων, ενώ για ακόμη μία περίπτωση, κατά τη φάση λειτουργίας του εξοπλισμού, οι εκπομπές των επικίνδυνων αποβλήτων παρουσιάζουν το ίδιο αποτέλεσμα για τα δύο σεναρία.



**Εικόνα 4.15 Επικίνδυνα σωματίδια RCRA**

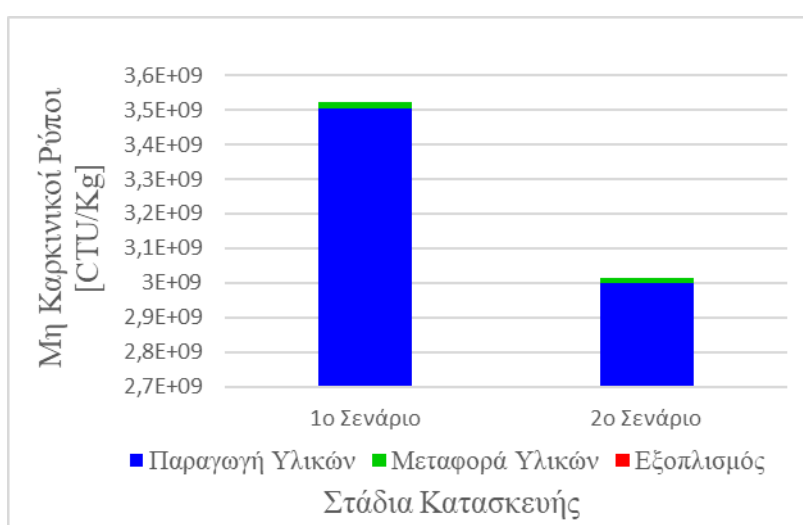
Ο σημαντικότερος παράγοντας συμβολής στη συγκεκριμένη κατηγορία επίπτωσης είναι η διαδικασία παραγωγής των υλικών και αυτό οφείλεται στα στραγγίσματα που δημιουργούνται κατά την παραγωγή των αδρανών και στις αναθυμιάσεις κατά την παραγωγή και επεξεργασία της ασφάλτου (1.953.152 CTU/Kg και 1.823.451 CTU/Kg για τα δύο σεναρία αντίστοιχα). Σύμφωνα με την Εικόνα 4.16, η εκπομπή καρκινικών ρύπων στο στάδιο της λειτουργίας του εξοπλισμού είναι μηδενική, ενώ κατά το στάδιο μεταφοράς των υλικών παρατηρείται μείωση της τάξης του 1,7%, χωρίς να αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα. Η συνολική εκπομπή καρκινικών ρύπων περιορίστηκε κατά τη φάση παραγωγής των υλικών, δηλαδή στο 98,3% της συνολικής μείωσης.





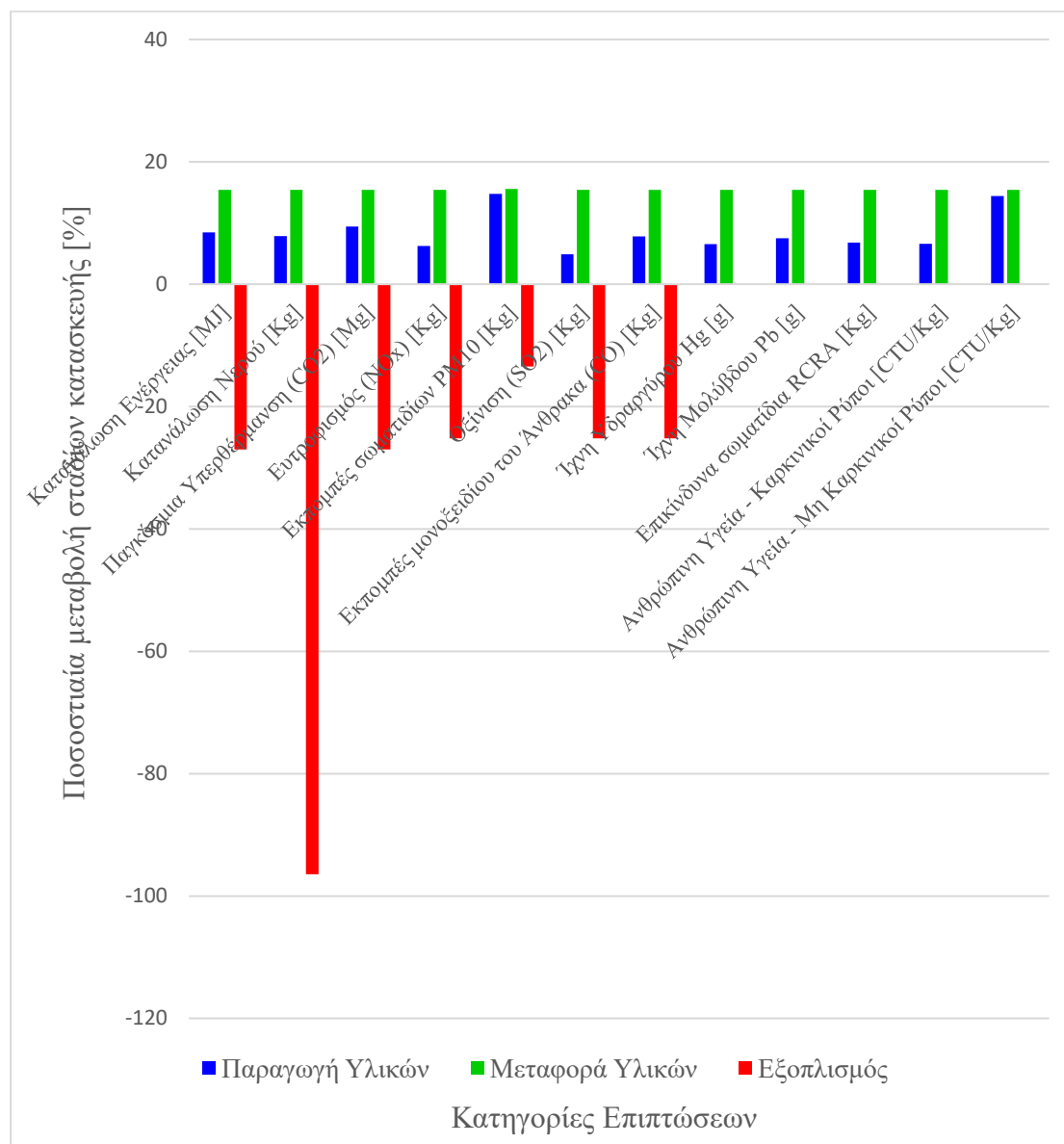
**Εικόνα 4.16 Καρκινικοί Ρύποι**

Αναφορικά με την κατηγορία επιπτώσεων των μη καρκινικών περιβαλλοντικών ρύπων παρατηρείται, με βάση την Εικόνα 4.17, ότι το σημαντικότερο στάδιο παραγωγής τους είναι αυτό της παραγωγής των υλικών (99,5% της συνολικής μείωσης). Όπως και στην περίπτωση των καρκινικών ρύπων, η εκπομπή τους οφείλεται κυρίως στα στραγγίσματα από τη διαδικασία παραγωγής των αδρανών αλλά και στις αναθυμιάσεις που προκαλούνται από την επεξεργασία της ασφάλτου. Το υπολειπόμενο 0,5% της μείωσης της συνολικής τιμής των ρύπων για τα δύο σενάρια επέμβασης προκύπτει κατά τη φάση της μεταφοράς των υλικών, ενώ οι εκπομπές κατά τη φάση λειτουργίας του εξοπλισμού είναι μηδενικές. Στο δεύτερο σενάριο επέμβασης που χρησιμοποιούνται ανακτώμενα ασφαλτικά υλικά έναντι φυσικών αδρανών κατά 60%, παρατηρείται μείωση των παραγόμενων μη καρκινικών ρύπων από 3.522.650.844 CTU/Kg σε 3.014.781.484 CTU/Kg.



**Εικόνα 4.17 Μη Καρκινικοί Ρύποι**

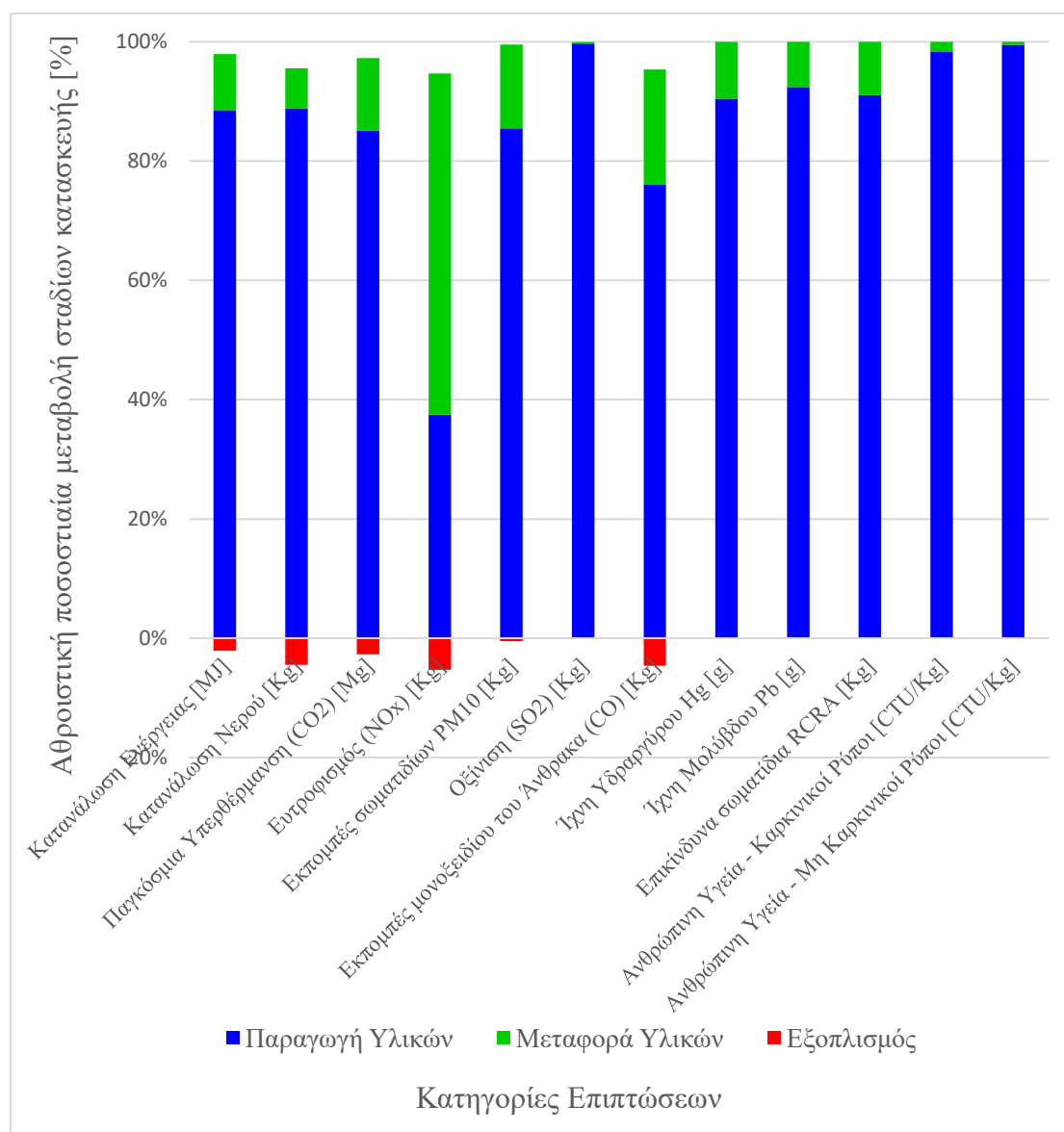
Στην Εικόνα 4.18 που ακολουθεί, παρατίθεται ένα διάγραμμα που αφορά την ποσοστιαία μεταβολή, για κάθε κατηγορία περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ανά στάδιο διεργασίας μεταξύ των δύο σεναρίων.



**Εικόνα 4.18 Ποσοστιαία μεταβολή σταδίων κατασκευής**

Με βάση την παραπάνω εικόνα (Εικόνα 4.18), γίνεται αντιληπτό πως οι μεγαλύτερες ποσοστιαίες μεταβολές μεταξύ των δύο σεναρίων επέμβασης παρατηρούνται κατά τη φάση λειτουργίας του εξοπλισμού. Παρά το γεγονός αυτό και σύμφωνα με την Εικόνα 4.19 που ακολουθεί, η διαφορά των παραγόμενων ρύπων κατά τη φάση αυτή για τα δύο σενάρια χαρακτηρίζεται μη σημαντική. Αντίθετα, για τις φάσεις παραγωγής και μεταφοράς των υλικών, που παρουσιάζουν μικρή σχετική μεταβολή στα δύο σενάρια, τα αποτελέσματά τους ως προς τις συνολικές τιμές των παραγόμενων ρύπων ήταν ιδιαίτερα σημαντικά.

Στη Εικόνα 4.19 που ακολουθεί, περιλαμβάνεται ένα συγκριτικό διάγραμμα που περιέχει αναλυτικά τις αθροιστικές ποσοστιαίες διαφορές ανά στάδιο διεργασίας ως προς τη συνολική μείωση που παρατηρήθηκε μεταξύ των δύο σεναρίων επέμβασης, που αφορά τις συντηρήσεις των οδοστρωμάτων και κατηγοριοποιούνται στις αντίστοιχες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η σημασία του παρακάτω διαγράμματος είναι ιδιαίτερη, καθώς αναδεικνύονται τα στάδια που παρατηρείται σημαντικό όφελος κατά την εφαρμογή του δεύτερου σεναρίου.



**Εικόνα 4.19 Αθροιστική ποσοστιαία μεταβολή σταδίων κατασκευής**

Με βάση την παραπάνω εικόνα (Εικόνα 4.19), γίνεται αντιληπτό πως η φάση της παραγωγής υλικών είναι ιδιαίτερα σημαντική, όσον αφορά στις επιπτώσεις των διεργασιών ως προς το φυσικό περιβάλλον, γεγονός που οφείλεται στον περιορισμό της απαιτούμενης ποσότητας επεξεργασίας φυσικών αδρανών. Η φάση της μεταφοράς των υλικών στις περισσότερες περιπτώσεις διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, γεγονός

που οφείλεται στον περιορισμό των μεταφορών στην περίπτωση του δεύτερου σεναρίου επέμβασης, όπου τα ασφαλικά υλικά αφαιρούνται από το υφιστάμενο οδόστρωμα, επεξεργάζονται και επανατοποθετούνται σε αυτό. Αντίθετα, η φάση λειτουργίας του εξοπλισμού παρουσιάζει ιδιαίτερα χαμηλές τιμές ως προς τη μεταβολή των παραγόμενων ρύπων για τα δύο σενάρια, ενώ σε άλλες περιπτώσεις είναι και μηδενικές.

Με βάση τα αποτελέσματα της σύγκρισης των δύο σεναρίων επέμβασης, προκύπτουν οι ακόλουθες μειώσεις των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στο δεύτερο σενάριο σε σχέση με το πρώτο:

- 8,6% για την κατηγορία κατανάλωσης ενέργειας.
- 7,7% για την κατηγορία κατανάλωσης νερού.
- 9,5% ως προς τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>).
- 9% για την κατηγορία του ευτροφισμού.
- 14,7% ως προς τα αιωρούμενα σωματίδια PM10.
- 4,9% για την κατηγορία της οξίνισης.
- 8,1% ως προς τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO).
- 6,9% ως προς τις εκπομπές ιχνοστοιχείων υδραργύρου (Hg).
- 7,8% ως προς τις εκπομπές ιχνοστοιχείων μόλυβδου (Pb).
- 7,2% ως προς τις εκπομπές επικίνδυνων σωματιδίων RCRA.
- 6,7% για την κατηγορία των καρκινικών ρύπων.
- 14,4% για την κατηγορία των μη καρκινικών ρύπων.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι, στην εναλλακτική περίπτωση χρήσης ανακτώμενων ασφαλικών υλικών ως ασύνδετο υλικό στη στρώση βάσης, παρατηρείται σημαντική μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε όλες τις κατηγορίες επίπτωσης. Το συγκεκριμένο γεγονός αναδεικνύει τα σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη της υιοθέτησης βιώσιμων στρατηγικών στον τομέα που αφορά τον σχεδιασμό και την κατασκευή οδοστρωμάτων.

## **4.5 Κοστολόγηση**

Τελικό στάδιο της συγκριτικής αξιολόγησης των δύο σεναρίων αποτελεί η σύγκριση του συνολικού κόστους υλοποίησης των δύο επεμβάσεων. Στον Πίνακα 4.3 και στον Πίνακα 4.4 που ακολουθούν, γίνεται αναλυτικός καταμερισμός της κοστολόγησης των δύο σεναρίων, σύμφωνα με το περιγραφικό τιμολόγιο εργασιών έργων οδοποιίας που

έχει αναρτηθεί από το Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών, ανά είδος εργασίας που προβλέπεται να πραγματοποιηθεί. Σημειώνεται πως στις τιμές των συνολικών δαπανών έχει συμπεριληφθεί και το κόστος μεταφοράς των υλικών. Για την υλοποίηση των υπολογισμών, έχει θεωρηθεί ότι το κόστος για τη μεταφορά των υλικών είναι δεκαεννέα λεπτά ανά μονάδα όγκου (0,19€/m<sup>3</sup>) του μεταφερόμενου υλικού. Επιπλέον, θεωρήθηκε πως τα αδρανή που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της διατομής του οδοστρώματος θα προμηθευτούν από το πλησιέστερο λατομείο του σημείου αποκατάστασης, διανύοντας απόσταση πενήντα χιλιομέτρων (50 km) μέχρι το σημείο της επέμβασης. Αντιστοίχως, οι ποσότητες της ασφάλτου που θα χρησιμοποιηθούν θεωρήθηκε πως αποκτήθηκαν από την πλησιέστερη μονάδα παραγωγής ασφάλτου, η οποία απέχει ενενήντα χιλιόμετρα (90 km) από το σημείο της επέμβασης. Στη συνέχεια παρατίθενται οι πίνακες των προϋπολογισμών για τα δύο σενάρια επέμβασης.

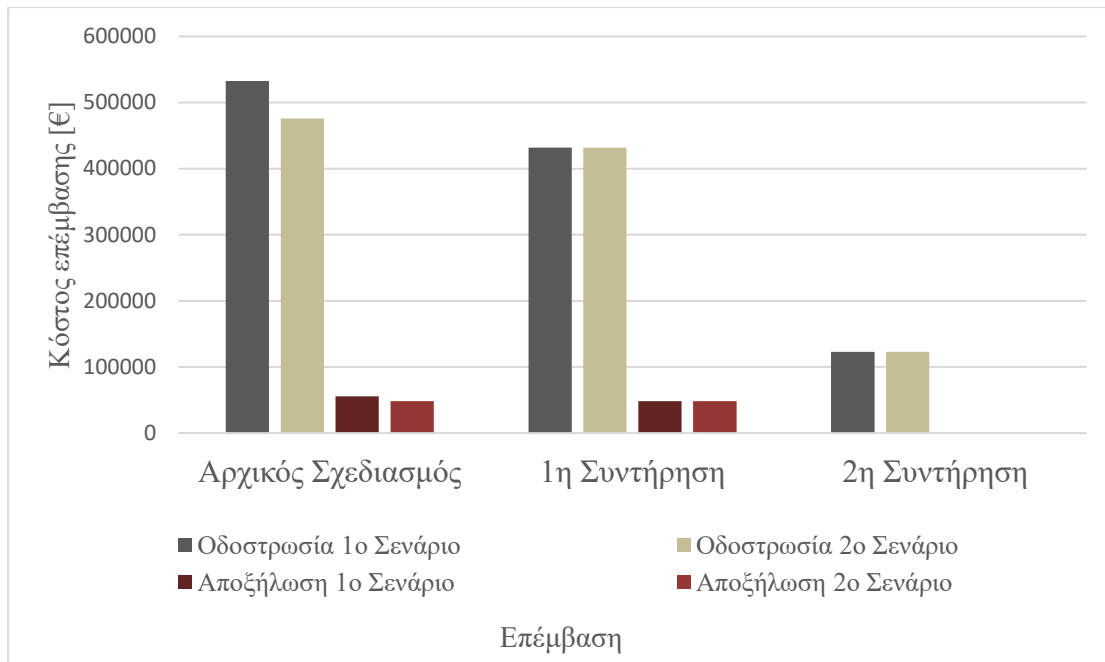
**Πίνακας 4.3 Προϋπολογισμός 1<sup>ου</sup> Σεναρίου**

α/α	α/α Τιμολογ.	Είδος εργασίας	Άρθρο Αναθεώρησης	Μονάδα	Τιμή ανά μονάδα	ΔΑΠΑΝΗ
<b>ΟΜΑΔΑ Γ: ΟΔΟΣΤΡΩΣΙΑ</b>						
1	Γ-2.2	Βάση πάχους 0,10 m (Π.Τ.Π. Ο-155)	ΟΔΟ-3211.Β	m2	1,20*	47.058,00*
<b>ΟΜΑΔΑ Δ: ΑΣΦΑΛΤΙΚΑ</b>						
2	Δ-2.1	Απόξεση ασφαλτικού οδοστρώματος (φρεζάρισμα) σε βάθος έως 4 cm	ΟΔΟ-1132	m2	1,15*	42.780,00*
3	Δ-2.2	Απόξεση ασφαλτικού οδοστρώματος (φρεζάρισμα) σε βάθος έως 6 cm	ΟΔΟ-1132	m2	1,45*	26.970,00*
4	Δ-2.3	Απόξεση ασφαλτικού οδοστρώματος (φρεζάρισμα) σε βάθος έως 8 cm	ΟΔΟ-1132	m2	1,85*	34.410,00*
5	Δ-5.1	Ασφαλτική στρώση βάσης συμπυκνωμένου πάχους 0,05 m	ΟΔΟ-4321B	m2	7,10*	308.648,00*
6	Δ-5.2	Ασφαλτική στρώση βάσης συμπυκνωμένου πάχους 0,06 m	ΟΔΟ-4321B	m2	8,30*	362.194,00*
7	Δ-10.1	Ανπολισθηρή στρώση ασφαλτικής σκυρομαστίχης πάχους 30 mm με κοινή άσφαλτο	ΟΔΟ-4521B	m2	5,90*	369.297,00*
<b>Σύνολο:</b>		1.191.357,00				

**Πίνακας 4.4 Προϋπολογισμός 2<sup>ου</sup> Σεναρίου**

α/α	α/α Τιμολογ.	Είδος εργασίας	Άρθρο Αναθεώρησης	Μονάδα	Τιμή ανά μονάδα	ΔΑΠΑΝΗ
<b>ΟΜΑΔΑ Γ: ΟΔΟΣΤΡΩΣΙΑ</b>						
1	Γ-2.2	Βάση πάχους 0,10 m (Π.Τ.Π. Ο-155)	ΟΔΟ-3211.Β	m2	1,20*	44.082,00*
<b>ΟΜΑΔΑ Δ: ΑΣΦΑΛΤΙΚΑ</b>						
2	Δ-2.1	Απόξεση ασφαλτικού οδοστρώματος (φρεζάρισμα) σε βάθος έως 4 cm	ΟΔΟ-1132	m2	1,15*	42.780,00*
3	Δ-2.2	Απόξεση ασφαλτικού οδοστρώματος (φρεζάρισμα) σε βάθος έως 6 cm	ΟΔΟ-1132	m2	1,45*	53.940,00*
4	Δ-2.3	Απόξεση ασφαλτικού οδοστρώματος (φρεζάρισμα) σε βάθος έως 8 cm	ΟΔΟ-1132	m2	1,85*	0,00*
5	Δ-5.1	Ασφαλτική στρώση βάσης συμπυκνωμένου πάχους 0,05 m	ΟΔΟ-4321Β	m2	7,10*	617.296,00*
6	Δ-5.2	Ασφαλτική στρώση βάσης συμπυκνωμένου πάχους 0,06 m	ΟΔΟ-4321Β	m2	8,30*	0,00*
7	Δ-10.1	Ανπολισθηρή στρώση ασφαλτικής σκυρομαστίχης πάχους 30 mm με κοινή άσφαλτο	ΟΔΟ-4521Β	m2	5,90*	369.297,00*
<b>Σύνολο:</b>			1.127.395,00			

Στην Εικόνα 4.20 που ακολουθεί, παρατηρείται το συγκριτικό διάγραμμα για τους προϋπολογισμούς των δύο σεναρίων για κάθε επέμβαση που πρόκειται να εφαρμοστεί. Το κόστος κάθε εργασίας έχει καταμεριστεί στις διαδικασίες οδοστρωσίας και αποξήλωσης και καθεμία από αυτές περιλαμβάνει το συνολικό κόστος των επιμέρους εργασιών που απαιτούνται σε κάθε στάδιο της επέμβασης (παραγωγή υλικών, μεταφορά, λειτουργία εξοπλισμού).



**Εικόνα 4.20 Συγκριτικό Διάγραμμα Προϋπολογισμών**

Με βάση την Εικόνα 4.20, παρατηρείται πως το σενάριο επέμβασης που περιλαμβάνει τη χρήση ανακτώμενων υλικών στις στρώσεις βάσης του οδοστρώματος, αποτελεί την οικονομικότερη λύση. Συγκεκριμένα, το κόστος οδοστρωσίας για την περίπτωση του αρχικού σχεδιασμού ελαττώνεται από 532.000 €, για το πρώτο σενάριο, σε 476.000 €, για το δεύτερο. Η μείωση αυτή οφείλεται στην ελάττωση των απαιτούμενων πρώτων υλών για την κατασκευή της στρώσης βάσης και στον περιορισμό των απαιτούμενων μεταφορών. Επιπλέον, παρατηρείται μείωση του κόστους κατά τη διαδικασία αποξήλωσης του υφιστάμενου οδοστρώματος από 55.800 € σε 48.400 €, η οποία οφείλεται στην ελάττωση του απαιτούμενου πάχους αποξήλωσης της στρώσης των ασύνδετων υλικών από δώδεκα εκατοστά (12cm) σε δέκα εκατοστά (10 cm). Επομένως, προκύπτει συνολική μείωση του κόστους υλοποίησης του αρχικού σχεδιασμού από 587.800 € σε 524.400 €. Όσον αφορά την πρώτη και τη δεύτερη συντήρηση του οδοστρώματος, δεν προκύπτει κάποια διαφοροποίηση ως προς το κόστος υλοποίησης τους, καθώς είναι πανομοιότυπες μεταξύ τους.

Συμπεραίνοντας, η εφαρμογή του σεναρίου επέμβασης που χρησιμοποιούνται ανακτώμενα ασφαλτικά υλικά είναι οικονομικότερη από αυτήν της συμβατικής μεθόδου. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται ότι το συνολικό κόστος της επέμβασης θα μειωθεί κατά 5,4%, με το 88% της μείωσης αυτής να παρατηρείται στη διαδικασία οδοστρωσίας και το υπολειπόμενο 12% να παρατηρείται στη διαδικασία αποξήλωσης του αρχικού σχεδιασμού. Συνεπώς, πέραν των περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων, φαίνεται πως το δεύτερο σενάριο επέμβασης υπερτερεί του πρώτου και ως προς τον οικονομικό παράγοντα.

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στην ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων, τονίζοντας έτσι τη σημασία τους για τη λήψη αποφάσεων σε θέματα που αφορούν την κατασκευή οδών. Σε πρώτη φάση, έγινε βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τα ανακυκλώσιμα υλικά και κυρίως το ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό. Ακόμα, έγινε ενδελεχής περιγραφή της μεθοδολογίας της ανάλυσης κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων (LCA), ως μία τεχνική που εξυπηρετεί την ποσοτικοποίηση των παραγόμενων ρύπων σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής του οδοστρώματος, από τη διαδικασία παραγωγής των υλικών μέχρι και το τέλος της ζωής του.

Σε δεύτερη φάση, με βάση τα ευρήματα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση πραγματοποιήθηκε μία ανάλυση κύκλου ζωής για την περίπτωση ενός πειραματικού οδοστρώματος αυτοκινητοδρόμου χρησιμοποιώντας ως εργαλείο το λογισμικό PaLATE 2.0 (2011). Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται μία συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ δύο εναλλακτικών σεναρίων επέμβασης, που πρόκειται να εφαρμοστούν στο πλαίσιο της ενίσχυσης του υφιστάμενου οδοστρώματος, για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν στα στάδια της παραγωγής και μεταφοράς των υλικών αλλά και κατά τη λειτουργία του εξοπλισμού για την κατασκευή του νέου οδοστρώματος. Για την ακρίβεια, το πρώτο σενάριο επέμβασης περιλαμβάνει την κατασκευή του οδοστρώματος με τη χρήση συμβατικών υλικών, ενώ στο δεύτερο σενάριο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό στις στρώσεις βάσης του νέου οδοστρώματος. Τέλος, πραγματοποιήθηκε συγκριτική ανάλυση του κόστους υλοποίησης των δύο σεναρίων επέμβασης.

Κοινό στοιχείο και για τα δύο εναλλακτικά σενάρια αποτελεί το γεγονός ότι οι δύο σημαντικότερες κατηγορίες επιπτώσεων της LCA, δηλαδή αυτές με τη μεγαλύτερη περιβαλλοντική επίδραση παρουσιάζουν σχετικά υψηλές τιμές. Αυτές οι κατηγορίες είναι η κατανάλωση ενέργειας που είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς είναι η μοναδική κατηγορία που σχετίζεται άμεσα με την εξάντληση των φυσικών πόρων, ενώ η άλλη κατηγορία είναι η υπερθέρμανση του πλανήτη που σχετίζεται άμεσα με το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής.

Από τα αποτελέσματα της διεξαγωγής της LCA προκύπτουν ορισμένα συμπεράσματα για τα δύο σενάρια επέμβασης. Συγκεκριμένα:

- Και στις δύο περιπτώσεις το στάδιο με τις μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι αυτό της παραγωγής των υλικών, με πιο χαρακτηριστική την παραγωγή ασφαλτομίγματος, για την οποία καταναλώνεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας.



- Το στάδιο της μεταφοράς των υλικών είναι το επόμενο όσον αφορά στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς παρουσιάστηκαν σημαντικά υψηλές τιμές στην κατηγορία των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>), οι οποίες ευθύνονται για το φαινόμενο του ευτροφισμού.
- Το στάδιο της λειτουργίας του εξοπλισμού, κατά τις διεργασίες οδοστρωσίας, έδωσε τιμές ιδιαίτερα χαμηλές συγκριτικά με αυτές των άλλων δύο σταδίων και σε ορισμένες κατηγορίες επιπτώσεων ήταν μηδενικές.

Επιπλέον, από τη σύγκριση των δύο εναλλακτικών σεναρίων επέμβασης προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι κατηγορίες που παρουσίασαν τη σημαντικότερη βελτίωση ως προς τις εκπομπές των παραγόμενων ρύπων, είναι αυτές των εκπομπών σωματιδίων PM10 και οι εκπομπές μη καρκινικών ρύπων, όπου παρατηρήθηκε σχετική μείωση της τάξης του 14,5%.
- Όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας και στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), οι οποίες όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως είναι οι δύο σημαντικότερες, παρατηρήθηκε μείωση των παραγόμενων ρύπων κατά 8,6% και 9,6% αντίστοιχα, οι οποίες μπορούν να χαρακτηριστούν ιδιαίτερα σημαντικές.
- Σχετικά με τις εκπομπές ιχνοστοιχείων υδραργύρου (Hg) και μόλυβδου (Pb), παρατηρείται μείωση των παραγόμενων ρύπων κατά 6,9% και 7,8% αντίστοιχα, διατηρώντας τις τιμές τους σε ιδιαίτερα χαμηλό βαθμό, γεγονός που είναι ιδιαίτερα σημαντικό δεδομένης της υψηλής επικινδυνότητας των στοιχείων.
- Από τη συγκριτική αξιολόγηση της ανάλυσης κόστους των δύο σεναρίων επέμβασης, παρατηρείται μείωση του συνολικού κόστους των επεμβάσεων κατά 5,4% στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μίγμα RAP και φυσικών αδρανών στη στρώση βάσης. Το ποσό αυτό εξοικονομείται από την επαναχρησιμοποίηση του RAP και παρατηρείται αφενός στις διαδικασίες κατασκευής του νέου οδοστρώματος και αφετέρου στις διαδικασίες αποξήλωσης του υφιστάμενου.

Από τα αποτελέσματα της σύγκρισης, όπως ήταν αναμενόμενο, το σενάριο που η επέμβαση πραγματοποιείται με τη συμβατική μέθοδο, παρουσίασε τις υψηλότερες τιμές περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ενώ το σενάριο, που χρησιμοποιούνται ανακτώμενα ασφαλτικά υλικά στις στρώσεις βάσης, παρουσίασε σημαντικές μειώσεις σε κάθε κατηγορία περιβαλλοντικής επίπτωσης. Συνεπώς, η χρήση ανακτώμενων υλικών στις στρώσεις βάσης των οδοστρωμάτων επιφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά

οφέλη περιορίζοντας τους παραγόμενους ρύπους σε κάθε κατηγορίας επίπτωσης, καθώς δεν απαιτείται η παραγωγή νέων υλικών και χρησιμοποιούνται τα ήδη υπάρχοντα. Παράλληλα, παρατηρείται και ένα οικονομικό όφελος με την υλοποίηση του συγκεκριμένου σεναρίου περιορίζοντας το συνολικό κόστος του έργου.

Τέλος, δεδομένου ότι η ανάλυση κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων ως μεθοδολογία αποτελεί ακόμη ένα αναπτυσσόμενο ερευνητικό πεδίο που στο εγγύς μέλλον πρόκειται να έχει σημαντική εφαρμογή, παρατίθενται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα που αποσκοπούν στην κάλυψη των ερευνητικών κενών και στην επίτευξη της μέγιστης δυνατής αξιοποίησης της μεθόδου:

- Προτείνεται η πραγματοποίηση μελέτης ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής του οδοστρώματος της πειραματικής ανάλυσης, προκειμένου η εκτίμηση του συνολικού κόστους των σεναρίων επέμβασης να συμπεριλαμβάνει τις αρχικές δαπάνες για την κατασκευή του έργου, το κόστος κατά τη διάρκεια των σταδίων του κύκλου ζωής του και την οικονομική επίδραση του στους χρήστες του.
- Συστήνεται η υλοποίηση της ανάλυσης κύκλου ζωής του οδοστρώματος να επικεντρώνεται σε μεγαλύτερο βαθμό στην ανάλυση ευαισθησίας και αβεβαιότητας, προκειμένου να γίνεται πιο εύκολα αντιληπτή η συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων και των δεδομένων εισαγωγής με τα αποτελέσματα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.
- Συνιστάται η διεξαγωγή έρευνας LCA για πειραματικά οδοστρώματα, στην οποία εξετάζεται και συγκρίνεται η κατασκευή στρώσεων από ανακτώμενα ασφατικά υλικά αφενός ως στρώσεις βάσης και αφετέρου ως ασφατικές στρώσεις με στόχο τη μεγιστοποίηση της περιεκτικότητας τους σε RAP.

## 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

American Concrete Pavement Association (ACPA), 2005. Understanding Life Cycle Cost Analysis, A review of the simple calculation. *Concrete Pavement Progress*, 18 May, 41(5).

Appea A. K., Rorrer T., Clark T., 2009. Case studies on processes involved in the production and placement of high RAP asphalt concrete mixes in 2007 on selected routes in Virginia.. *In: Proceedings of the 88th Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington DC, USA, 11-15 January, 2009*, p. 22.

Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA), 2015. *Basic Asphalt Recycling Manual*. 2nd Edition, Glen Ellyn, IL: Asphalt Recycling and Reclaiming Association.

Bare J. C., 2002. The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts. *Journal of Industrial Ecology*, 6(3-4), pp. 49-78.

Bare J. C., 2011. TRACI 2.0: Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13, pp. 687-696.

CEN, 2013. Sustainability of Construction Works - Environmental Product Declarations - Core Rules for the Product Category of Construction Products. *European Standard EN 15804:2012+A1*, CEN-CENELEC Management Centre, Brussels, Belgium.

Copeland A., 2011. *Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice, Report FHWA-HRT-11-021*, McLean, VA, USA: Turner-Fairbank Highway Research Center Federal Highway Administration.

Corte J. F., 1997. *French Design Manual for Pavement Structures*. Paris, France: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

Delatte N., 2017. *Concrete Pavement Design, Construction, and Performance*. 1st Edition επιμ. Florida, USA: CRC PRESS.

Deniz D., Tutumluer E., Popovic J. S., 2009. Expansive Characteristics of RAP Materials for Use as Aggregates in the Pavement Substructure Layers. *In : Proceedings of the 8th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Champaign IL, USA, 29 June - 2 July 2009*, pp. 1187-1196.

Ditrani M., Elfgrén L., Eriksen J., Enochsson O., Veljkovic M., Andersson P., Eriksson P., 2009. Improving Transportation Investment Decisions Through Life-Cycle Cost Analysis. Στο: *Sustainability of Constructions - Integrated Approach to Life-time Structural Engineering*, pp. 266-275.

- Enieb M., Al-Jumaili M. A. H., Al-Jameel H. A. E., Eltwati A. S., 2021. Sustainability of using reclaimed asphalt pavement. *Journal of Physics: Conference Series*, 1973, 012242.
- Environmental Protection Agency, EPA, 2014. *Climate Change: Basic Information*, Washington, DC, USA: Environmental Protection Agency.
- European Commission Joint Research Center, (European Commission JRC), 2010. Assessment, Analysis of Existing Environmental Impact Assessment Methodologies for Use in Life Cycle Assessment, ILCD Handbook. European Union, Ispra, Italy.
- Federal Highway Administration (FHWA), 2017. *Hot In-Place Recycling (Construction Methods And Equipment)*, Washington DC: U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, URL: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/09.cfm> (πρόσβαση στις 17/10/2022).
- Guduru G., Kuna K. K., 2022. Classification of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) material using simple indicative tests. *Construction and Building Materials*, 328, 127075.
- Guinée J. B., Heijungs R., Huppes G., Zamagni A., Masoni P., Buonamici R., Ekvall T., Rydberg T., 2011. Life Cycle Assessment: Past, Present and Future. *Environmental Science and Technology*, 45(1), pp. 90-96.
- Hansen K., Newcomb D., Cervarich M., 2011. Asphalt Tops the Charts for Environmental Stewardship. *HMAT: Hot Mix Asphalt Technology*, 16(5), pp. 20-25.
- Harrison R., Waalkes S., Wilde W. J., 1999. *A Life Cycle Cost Analysis of Rigid Pavements*, Austin: Center for Transportation Research, University of Texas.
- Harvey J. T., Meijer J., Ozer H., Al-Qadi I. L., Saboori A., Kendall A., 2016. *Pavement Life Cycle Assessment Framework*, Washington DC: Federal Highway Administration (FHWA).
- Harvey J., Kendall A., Lee I. S., Santero N., Van Dam T., Wang T., 2010. Pavement Life Cycle Assessment Workshop: Discussion Summary and Guidelines, Report UCPRC-TM-2010-03. *University of California, Davis, CA, USA*.
- Huang Y., 2007. *Life Cycle Assessment of Use of Recycled Materials in Asphalt Pavements*, Thesis submitted to the Newcastle University for the Degree of Doctor of Philosophy, Newcastle: School of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University.
- Hunt R. G., Franklyn W. E., 1996. LCA – How it Came About, Personal Reflections on the Origin and the Development of LCA in the USA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1, pp. 4-7.

ISO, 2006a. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework. *ISO Standard 14040, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.*

ISO, 2006b. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines. *ISO 14040, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.*

Jaawani S., Franco A., De Luca G., Coppola O., Bonati A., 2021. Limitations on the Use of Recycled Asphalt Pavement in Structural Concrete. *Applied Sciences*, 11(22), 10901.

Jiménez C., Barra M., Josa A., Valls S., 2015. LCA of recycled and conventional concretes designed using the Equivalent Mortar Volume and classic methods. *Construction and Building Materials*, 84, pp. 245-252.

Jové M. J., 2004. Enhanced Recycling Techniques for Asphalt Pavements, as Studied in the PARAMIX Project. Στο: *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*. Barcelona: RILEM Publications SARL, pp. 39-48.

Kandhal P. S., Mallick R. B., 1997. *Pavement recycling guidelines for state and local governments - Participant's Reference Book, Report FHWA-SA-98-042*, Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology.

Kearney E. J., Huffman J. E., 1999. Full-Depth Reclamation Process. *Transportation Research Board*, 1684, pp. 203-209.

Kennedy T. W., Tam W. O., Solaimanian M., 1998. Optimizing use of reclaimed asphalt pavement with the superpave system. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*, 67, ISSN: 0270-2932, pp. 311-333.

Liu J., Li H., Wang Y., Ge N., 2019. Integrated Life Cycle Economic and Environmental Impact Assessment for Transportation Infrastructure. Στο: *Transportation Systems Analysis and Assessment*. London, UK: IntechOpen, chapter 5.

Mallick R. B., El-Korchi T., 2008. *Pavement Engineering: Principles and Practice*. 1st Edition, Florida: CRC PRESS.

Maupin Jr. G. W., Diefenderfer S. D., Gillespie J. S., 2009. Performance and economic evaluation of Virginia's higher RAP specification. *Transportation research board*, 2126(1), pp. 142-150.

Milad A., Taib A. M., Ahmeda A., Solla M., Yusoff N. I. M., 2020. A Review of the Use of Reclaimed Asphalt Pavement for Road Paving Applications. *Jurnal Teknologi*, 82(3), pp. 35-44.

- Mildenberger U., Kahre A., 2000. Planning for an Environment-Friendly Car. *Technovation*, 20(4), pp. 205-214.
- Muench S., Van Dam T., 2015. Climate Change Adaptation for Pavements, Tech Brief, FHWA-HIF-15-015. *Federal Highway Administration, Washington DC*.
- National Cooperative Highway Research Program, 2004. *Guide for Mechanical-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures, Report NCHRP 1-37A*, Washington DC: Transportation Research board.
- PaLATE v2.2 for Green roads 2011. Software and user guide modified by Civil & Environmental Engineering Department, University of Washington (UW). URL: <https://rmrc.wisc.edu/palate/> (πρόσβαση στις 9/10/2022).
- Peuportier B.L.P., 2001. Life Cycle Assessment Applied to the Comparative Evaluation of Single Family Houses in the French Context. *Energy and Buildings*, 33(5), pp. 443-450.
- Pradhan S. K., Biswal G., 2022. Utilization of reclaimed asphalt pavement (RAP) as granular sub-base material in road construction. *Materials today : Proceedings*, Τόμος 60, pp. 288-293.
- Rochishnu E., Ramesh A., Ramayya V. V., 2021. Sustainable pavement technologies - performance of high RAP in WMA surface mixture containing nano glass fibers. *Materials Today : Proceedings*, Τόμος 43, pp. 1009-1017.
- Rosenbaum R. K., 2014. *Towards The Big Picture: The Path From One-Dimensional Footprints to Complete Environmental Sustainability Assessments, Technical Presentation*, Davis, CA: International Symposium on Pavement LCA 2014.
- Salomon A., Newcome D., 2000. Cold In-place Recycling Literature Review and Preliminary Mixture Design Procedure, Report Mn/DOT 2000-21. *Minnesota Department of Transportation*.
- Santero N. J., Masanet E., Horvath A., 2011. Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical Review. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9-10), pp. 801-809.
- Sawyer V., 2015. Sand And Aggregate: Diminishing Natural Resources And Potential Sources. *SRK News Issue*, Issue 58, <https://www.srk.com/en/publications/sand-and-aggregate-diminishing-natural-resources-and-potential-sources> (πρόσβαση στις 5/11/2022).
- Sollazo G., Longo S., Cellura M., Celauro C., 2020. Impact Analysis Using Life Cycle Assessment of Asphalt Production from Primary Data. *Sustainability*, 12(24), 10171.
- Thakur J. K., 2013. *Geocell-reinforced Unpaved and Paved Roads with Recycled Asphalt Pavement (RAP)*, Thesis submitted to the University of Kansas for the Degree of Doctor of Philosophy, Kansas: University of Kansas.

Van Dam T. J., Harvey J. T., Muench S. T., Smith K. D., Snyder M. B., Al-Qadi I. L., Ozer H., Meijer J., Ram P. V., Roesler J. R., Kendall A., 2015. *Towards Sustainable Pavement Systems: A Reference Document, Report FHWA-HIF-15-002*, Washington DC: Federal Highway Administration.

Virginia Asphalt Association, 2019. *Pavement Recycling*, Richmond, VA: Virginia Asphalt Association (VAA), <https://vaasphalt.org/pavement-guide/recycling/pavement-recycling-tech-brief/> (πρόσβαση στις 27/10/2022).

Walls J., Smith M. R., 1998. Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design, Report FHWA-SA-98-079. *Federal Highway Administration (FHWA), Washington, DC*.

West R. C., 2010. *Reclaimed Asphalt Pavement Management: Best Practices*, Auburn, Alabama: National Center for Asphalt Technology Auburn University.

Widyatmoko I., 2008. Mechanistic-empirical Mixture Design for Hot Mix Asphalt Pavement Recycling. *Construction and Building Materials*, 22(2), pp. 77-87.

World Commission on Environment and Development (WCED), 1987. *Our Common Future: the Report of the World Commission on Environment and Development. Document A/42/427*, University of Oxford, UK: Oxford University Press.

Qiao Y., Dave E., Parry T., Valle O., Mi L., Ni G., Yuan Z., Zhu Y., 2019. Life Cycle Costs Analysis of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Under Future Climate. *Sustainability*, 11(19), 5414.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### Π1 Πίνακες αποτελεσμάτων περιβαλλοντικών επιπτώσεων – 1<sup>ο</sup> σενάριο

Πίνακας Π.1.1 1<sup>ο</sup> Σενάριο – Αρχικός Σχεδιασμός

Στάδια/ Κατηγορίες Επιπτώσεων	Κατανάλωση Ενέργειας [MJ]	Κατανάλωση Νερού [Kg]	Παγκόσμια Υπερθέρμανση (CO2) [Mg]	Ευτροφισμός (NOx) [Kg]	Εκπομπές σωματιδίων ν PM10 [Kg]	Οξίνιση (SO2) [Kg]	Εκπομπές μονοξειδίου ν του Ανθρακα (CO) [Kg]	Hg [g]	Pb [g]	Επικίνδυνα σωματίδια RCRA [Kg]	Καρκανικοί Ρύποι [CTU/Kg]	Μη Καρκανικοί Ρύποι [CTU/Kg]
Παραγωγή Υλικών	6281594	1480,537	309,1445	2410,437	2011,504	114477,3	870,6837	5,207135	279,466	54007,65	976884,4	2,19E+09
Μεταφορά Υλικών	413210,9	70,35245	30,89129	1645,779	322,2582	98,74677	137,1483	0,29855	13,89116	2977,451	8857,468	10866771
Εξοπλισμός	50583,99	7,179303	3,796602	89,87811	6,432227	5,943552	19,36728	0	0	0	0	0
Σύνολο	6745389	1558,069	343,8323	4146,094	2340,194	114582	1027,199	5,505685	293,3572	56985,11	985741,9	2,2E+09

Πίνακας Π.1.2 1<sup>ο</sup> Σενάριο – 1<sup>η</sup> Συντήρηση

Στάδια/ Κατηγορίες Επιπτώσεων	Κατανάλωση Ενέργειας [MJ]	Κατανάλωση Νερού [Kg]	Παγκόσμια Υπερθέρμανση (CO2) [Mg]	Ευτροφισμός (NOx) [Kg]	Εκπομπές σωματιδίων ν PM10 [Kg]	Οξίνιση (SO2) [Kg]	Εκπομπές μονοξειδίου ν του Ανθρακα (CO) [Kg]	Hg [g]	Pb [g]	Επικίνδυνα σωματίδια RCRA [Kg]	Καρκανικοί Ρύποι [CTU/Kg]	Μη Καρκανικοί Ρύποι [CTU/Kg]
Παραγωγή Υλικών	4175350	1182,562	213,09	1535,038	1037,136	57354,89	687,629	4,495261	227,2408	45841,29	778233	1,06E+09
Μεταφορά Υλικών	204369,2	34,79548	15,27846	813,9829	154,3828	48,83897	67,83191	0,147659	6,8704	1472,612	4380,798	5374575
Εξοπλισμός	29007,49	3,941737	2,177169	52,05062	8,26972	3,442057	11,21607	0,015183	0,706458	151,4232	0	0
Σύνολο	4408726	1221,299	230,5456	2401,071	1199,788	57407,17	766,6769	4,658104	234,8177	47465,32	782613,8	1,07E+09

Πίνακας Π.1.3 1<sup>ο</sup> Σενάριο – 2<sup>η</sup> Συντήρηση

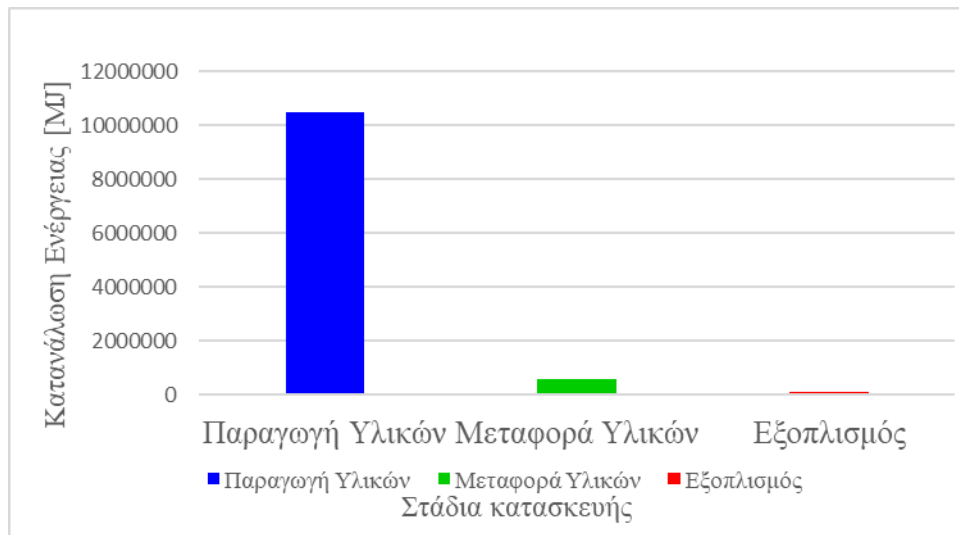
Στάδια/ Κατηγορίες Επιπτώσεων	Κατανάλωση Ενέργειας [MJ]	Κατανάλωση Νερού [Kg]	Παγκόσμια Υπερθέρμανση (CO2) [Mg]	Ευτροφισμός (NOx) [Kg]	Εκπομπές σωματιδίων ν PM10 [Kg]	Οξίνιση (SO2) [Kg]	Εκπομπές μονοξειδίου ν του Ανθρακα (CO) [Kg]	Hg [g]	Pb [g]	Επικίνδυνα σωματίδια RCRA [Kg]	Καρκανικοί Ρύποι [CTU/Kg]	Μη Καρκανικοί Ρύποι [CTU/Kg]
Παραγωγή Υλικών	986735,5	279,9142	50,37539	362,6153	244,4256	13512,2	162,7481	1,064664	53,79577	10855,76	184205,1	2,51E+08
Μεταφορά Υλικών	48139,26	8,196095	3,59885	191,7341	36,35934	11,50405	15,97784	0,034781	1,618326	346,8744	1031,899	1265984
Εξοπλισμός	4950,463	0,842856	0,371559	8,663396	5,170634	0,572902	1,866822	0,003577	0,166423	35,67128	0	0
Σύνολο	1039825	288,9531	54,34579	563,0128	285,9556	13524,27	180,5928	1,103022	55,58052	11238,31	185237	2,52E+08

Πίνακας Π.1.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις 1<sup>ο</sup> σεναρίου

Στάδια/ Κατηγορίες Επιπτώσεων	Κατανάλωση Ενέργειας [MJ]	Κατανάλωση Νερού [Kg]	Παγκόσμια Υπερθέρμανση (CO2) [Mg]	Ευτροφισμός (NOx) [Kg]	Εκπομπές σωματιδίων ν PM10 [Kg]	Οξίνιση (SO2) [Kg]	Εκπομπές μονοξειδίου ν του Ανθρακα (CO) [Kg]	Hg [g]	Pb [g]	Επικίνδυνα σωματίδια RCRA [Kg]	Καρκανικοί Ρύποι [CTU/Kg]	Μη Καρκανικοί Ρύποι [CTU/Kg]
Παραγωγή Υλικών	11443680	2943,014	572,6098	4308,09	3293,065	185344,4	1721,061	10,76706	560,5026	110704,7	1939322	3,51E+09
Μεταφορά Υλικών	665719,3	113,344	49,7686	2651,496	513,0003	159,0898	220,958	0,48099	22,37988	4796,937	14270,16	17507330
Εξοπλισμός	84541,95	11,9639	6,34533	150,5921	19,87258	9,958511	32,45017	0,01876	0,87288	187,0945	0	0
Σύνολο	12193941	3068,322	628,7238	7110,178	3825,938	185513,5	1974,469	11,26681	583,7554	115688,7	1953593	3,52E+09



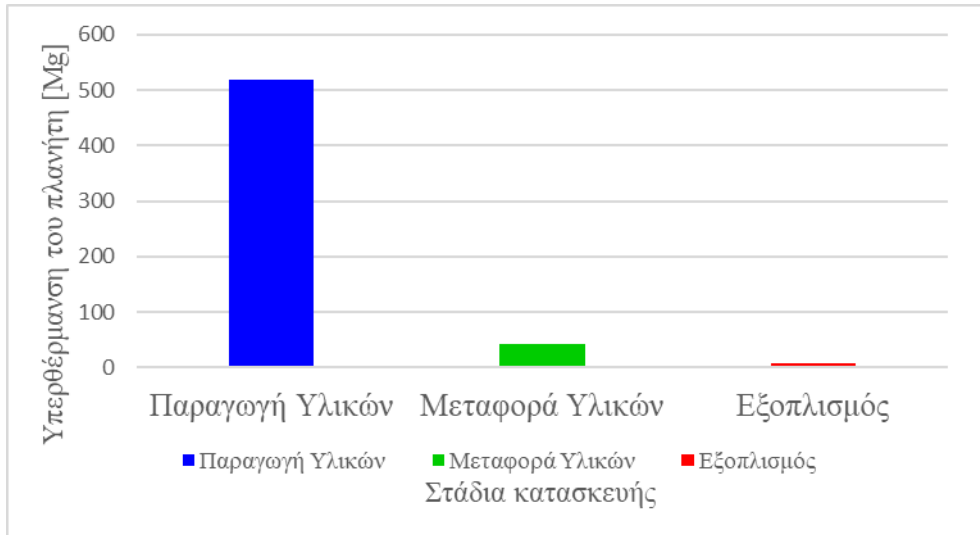
## Π2 Διαγράμματα ανάλυσης των αποτελεσμάτων περιβαλλοντικών επιπτώσεων – 1<sup>ο</sup> σενάριο



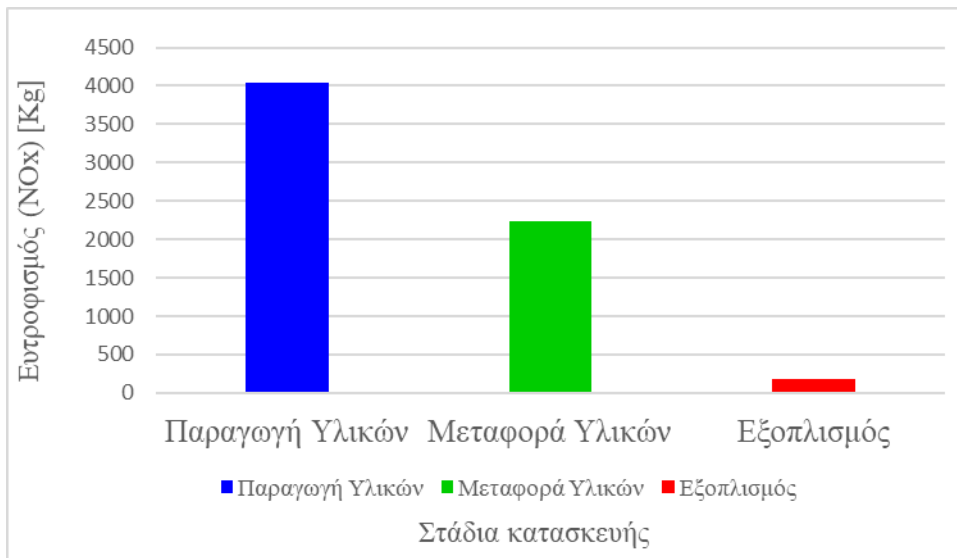
Εικόνα Π.2.1 Κατανάλωση ενέργειας



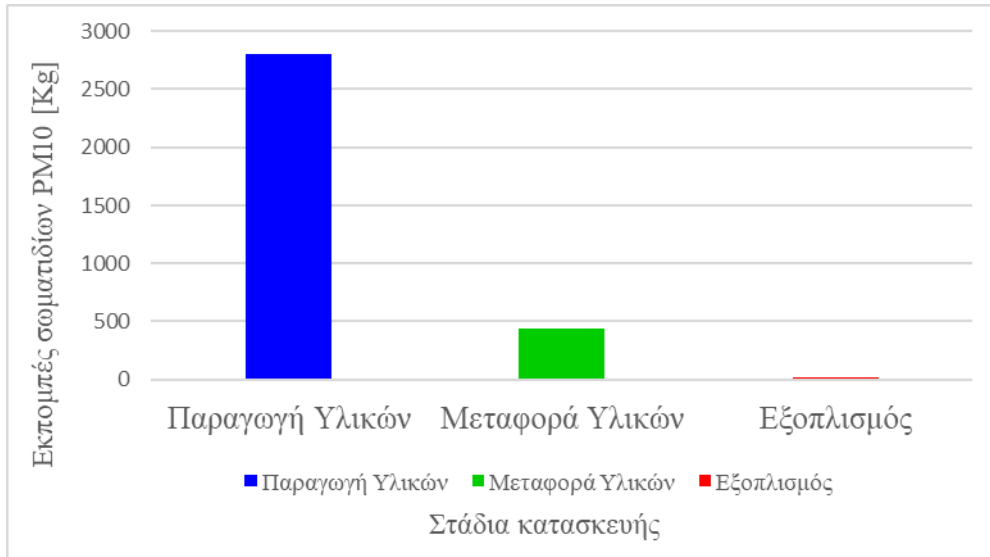
Εικόνα Π.2.2 Κατανάλωση νερού



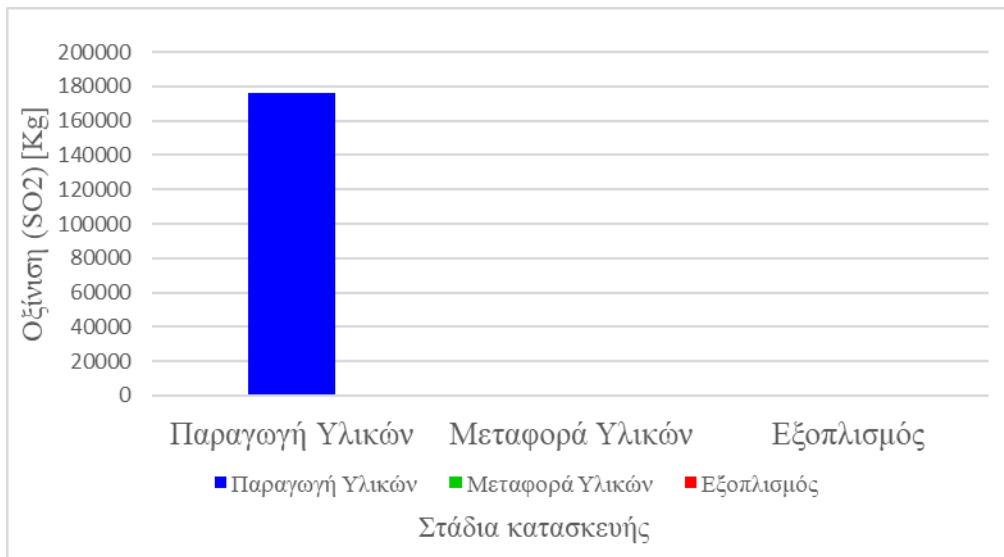
Εικόνα Π.2.3 Υπερθέρμανση του πλανήτη



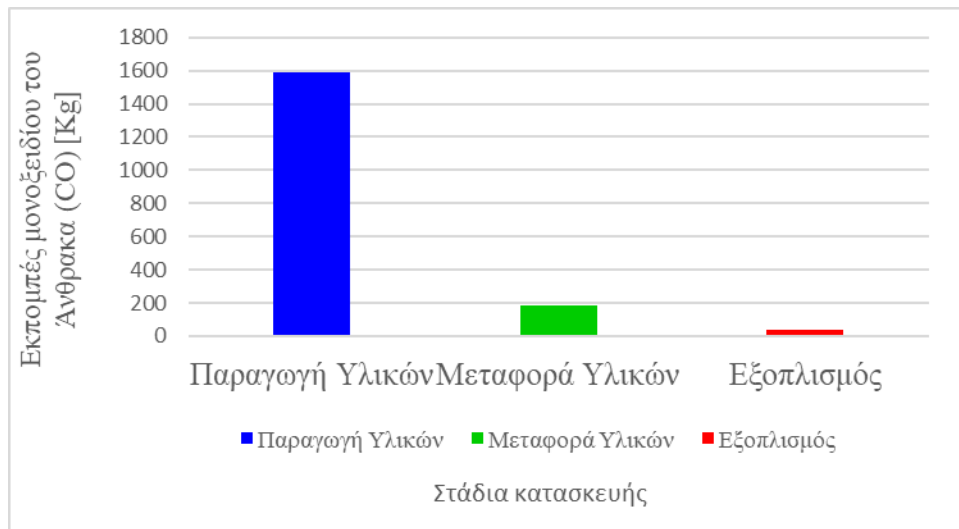
Εικόνα Π.2.4 Ευτροφισμός



Εικόνα Π.2.5 Εκπομπές σωματιδίων PM10



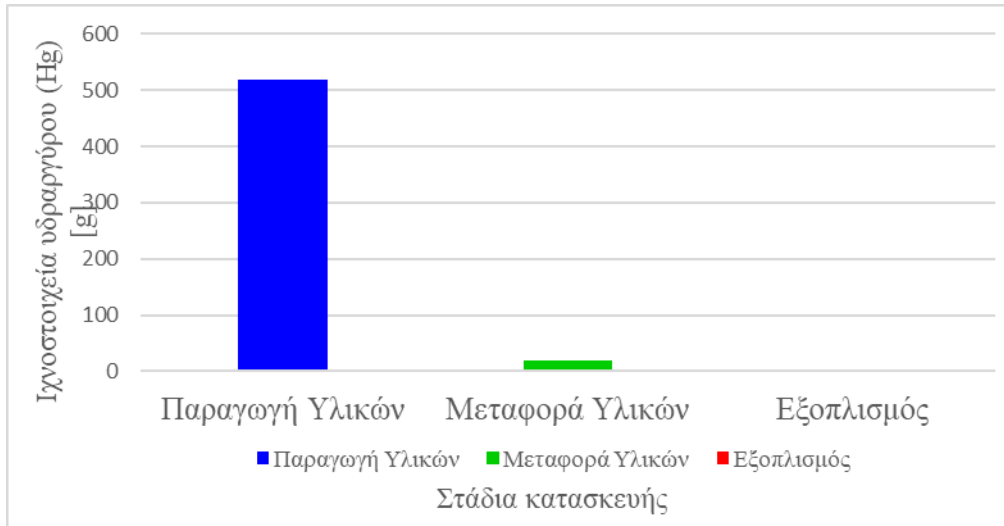
Εικόνα Π.2.6 Οξίνιση



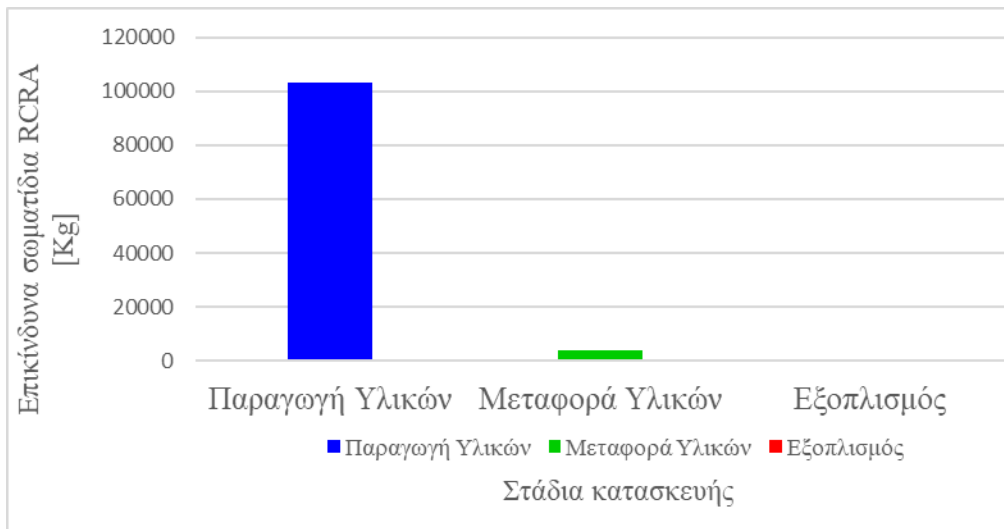
Εικόνα Π.2.7 Εκπομπές μονοξειδίου του Άνθρακα (CO)



Εικόνα Π.2.8 Ιχνοστοιχεία υδραργύρου (Hg)



Εικόνα Π.2.9 Ιχνοστοιχεία μόλυβδου (Pb)



Εικόνα Π.2.10 Επικίνδυνα σωματίδια RCRA



Εικόνα Π.2.11 Καρκινικοί ρύποι



Εικόνα Π.2.12 Μη καρκινικοί ρύποι

### Π3 Πίνακες αποτελεσμάτων περιβαλλοντικών επιπτώσεων – 2<sup>ο</sup> σενάριο

Πίνακας Π.3.1 2<sup>ο</sup> Σενάριο – Αρχικός σχεδιασμός

Στάδια/ Κατηγορίες Επιπτώσεων	Κατανάλωση Ενέργειας [MJ]	Κατανάλωση Νερού [Kg]	Παγκόσμια Υπερθέρμανση (CO2) [Mg]	Ευτροφισμός (NOx) [Kg]	Εκπομπές σωματιδίων ν PM10 [Kg]	Οξίνιση (SO2) [Kg]	Εκπομπές μονοξειδίου ν του Ανθρακα (CO) [Kg]	Hg [g]	Pb [g]	Επικίνδυνα σωματίδια RCRA [Kg]	Καρκινικοί Ρύποι [CTU/Kg]	Μη Καρκινικοί Ρύποι [CTU/Kg]
Παραγωγή Υλικών	5312838	1249,401	255,3295	2142,334	1525,493	105448,3	736,5259	4,502846	237,3548	46462,05	848946,3	1,68E+09
Μεταφορά Υλικών	310448,9	52,8564	23,20889	1236,488	242,4664	74,18929	103,0407	0,224303	10,43654	2236,984	6654,692	8164298
Εξοπλισμός	74403,11	18,71805	5,584356	129,7108	9,245556	8,577653	27,9506	0	0	0	0	0
Σύνολο	5697690	1320,975	284,1228	3508,533	1777,205	105531	867,5172	4,727149	247,7913	48699,03	855601	1,69E+09

Πίνακας Π.2 2<sup>ο</sup> Σενάριο – 1<sup>η</sup> Συντήρηση

Στάδια/ Κατηγορίες Επιπτώσεων	Κατανάλωση Ενέργειας [MJ]	Κατανάλωση Νερού [Kg]	Παγκόσμια Υπερθέρμανση (CO2) [Mg]	Ευτροφισμός (NOx) [Kg]	Εκπομπές σωματιδίων ν PM10 [Kg]	Οξίνιση (SO2) [Kg]	Εκπομπές μονοξειδίου ν του Ανθρακα (CO) [Kg]	Hg [g]	Pb [g]	Επικίνδυνα σωματίδια RCRA [Kg]	Καρκινικοί Ρύποι [CTU/Kg]	Μη Καρκινικοί Ρύποι [CTU/Kg]
Παραγωγή Υλικών	4175350	1182,562	213,09	1535,038	1037,136	57354,89	687,629	4,495261	227,2408	45841,29	778233	1,06E+09
Μεταφορά Υλικών	204369,2	34,79548	15,27846	813,9829	154,3828	48,83897	67,83191	0,147659	6,8704	1472,612	4380,798	5374575
Εξοπλισμός	28010,61	3,941737	2,102348	50,14554	8,134521	3,316076	10,80556	0,015183	0,706458	151,4232	0	0
Σύνολο	4407730	1221,299	230,4708	2399,166	1199,653	57407,04	766,2664	4,658104	234,8177	47465,32	782613,8	1,07E+09

Πίνακας Π.3.3 2<sup>ο</sup> Σενάριο – 2<sup>η</sup> Συντήρηση

Στάδια/ Κατηγορίες Επιπτώσεων	Κατανάλωση Ενέργειας [MJ]	Κατανάλωση Νερού [Kg]	Παγκόσμια Υπερθέρμανση (CO2) [Mg]	Ευτροφισμός (NOx) [Kg]	Εκπομπές σωματιδίων ν PM10 [Kg]	Οξίνιση (SO2) [Kg]	Εκπομπές μονοξειδίου ν του Ανθρακα (CO) [Kg]	Hg [g]	Pb [g]	Επικίνδυνα σωματίδια RCRA [Kg]	Καρκινικοί Ρύποι [CTU/Kg]	Μη Καρκινικοί Ρύποι [CTU/Kg]
Παραγωγή Υλικών	986735,5	279,9142	50,37539	362,6153	244,4256	13512,2	162,7481	1,064664	53,79577	10855,76	184205,1	2,51E+08
Μεταφορά Υλικών	48139,26	8,196095	3,59885	191,7341	36,35934	11,50405	15,97784	0,034781	1,618326	346,8744	1031,899	1265984
Εξοπλισμός	4950,463	0,842856	0,371559	8,663396	5,170634	0,572902	1,866822	0,003577	0,166423	35,67128	0	0
Σύνολο	1039825	288,9531	54,34579	563,0128	285,9556	13524,27	180,5928	1,103022	55,58052	11238,31	185237	2,52E+08

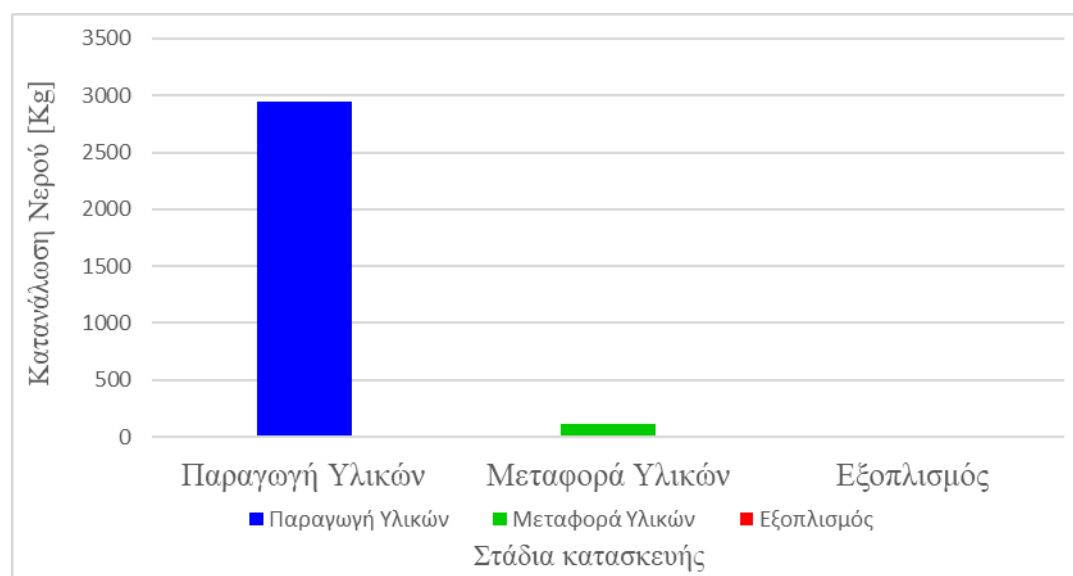
Πίνακας Π.3.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις 2<sup>ου</sup> σεναρίου

Στάδια/ Κατηγορίες Επιπτώσεων	Κατανάλωση Ενέργειας [MJ]	Κατανάλωση Νερού [Kg]	Παγκόσμια Υπερθέρμανση (CO <sub>2</sub> ) [Mg]	Ευτροφισμός (NO <sub>x</sub> ) [Kg]	Εκπομπές σωματιδίων PM10 [Kg]	Οξίνιση (SO <sub>2</sub> ) [Kg]	Εκπομπές μονοξειδίου του Ανθρακα (CO) [Kg]	Hg [g]	Pb [g]	Επικίνδυνα σωματίδια RCRA [Kg]	Καρκινογόνοι Ρύποι [CTU/Kg]	Μη Καρκινογόνοι Ρύποι [CTU/Kg]
Παραγωγή Υλικών	10474923	2711,877	518,7949	4039,987	2807,054	176315,3	1586,903	10,06277	518,3914	103159,1	1811384	3E+09
Μεταφορά Υλικών	562957,3	95,84798	42,0862	2242,205	433,2085	134,5323	186,8504	0,406743	18,92527	4056,471	12067,39	14804858
Εξοπλισμός	107364,2	23,50264	8,058262	188,5198	22,55071	12,46663	40,62297	0,01876	0,87288	187,0945	0	0
Σύνολο	11145244	2831,228	568,9394	6470,712	3262,813	176462,3	1814,376	10,48827	538,1895	107402,7	1823452	3,01E+09

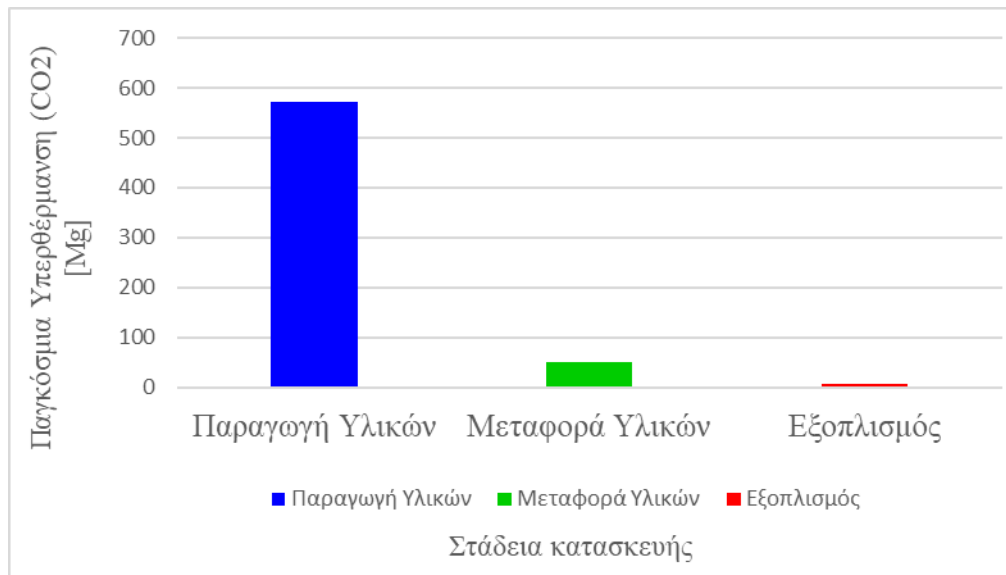
#### Π4 Διαγράμματα ανάλυσης των αποτελεσμάτων περιβαλλοντικών επιπτώσεων – 2<sup>ο</sup> σενάριο



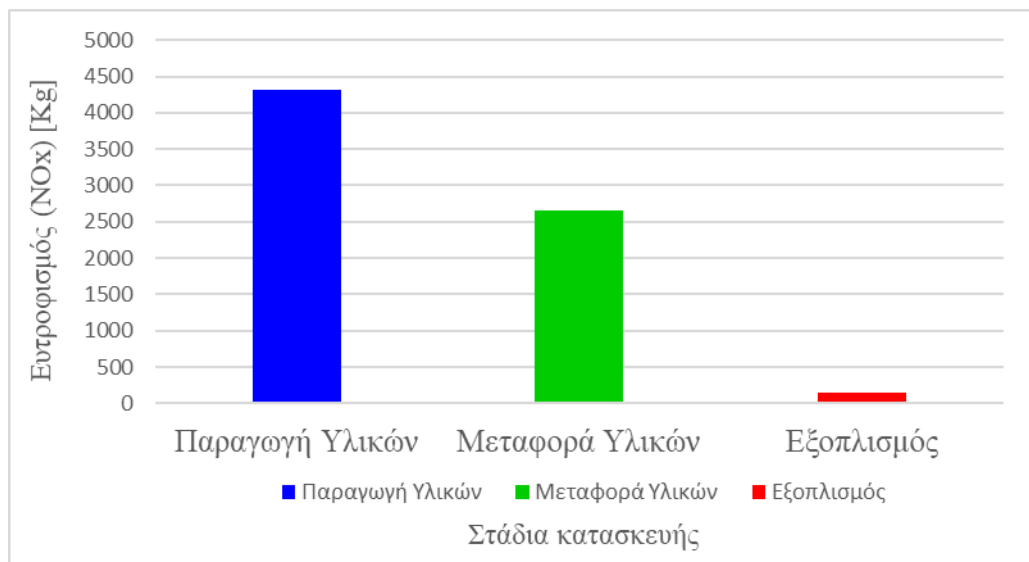
Εικόνα Π.4.1 Κατανάλωση ενέργειας



Εικόνα Π.4.2 Κατανάλωση νερού

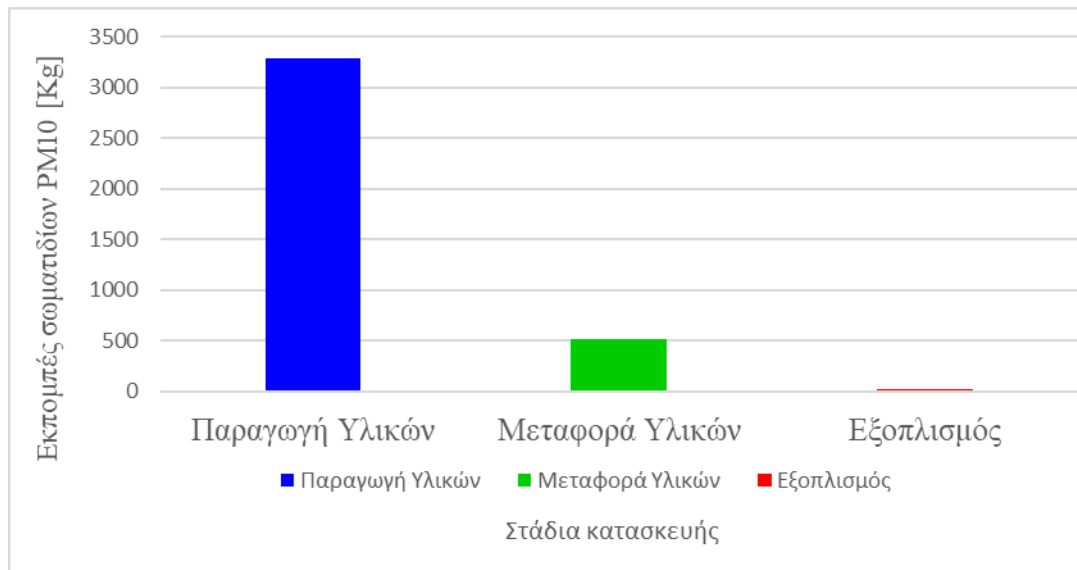


Εικόνα Π.4.3 Υπερθέρμανση του πλανήτη

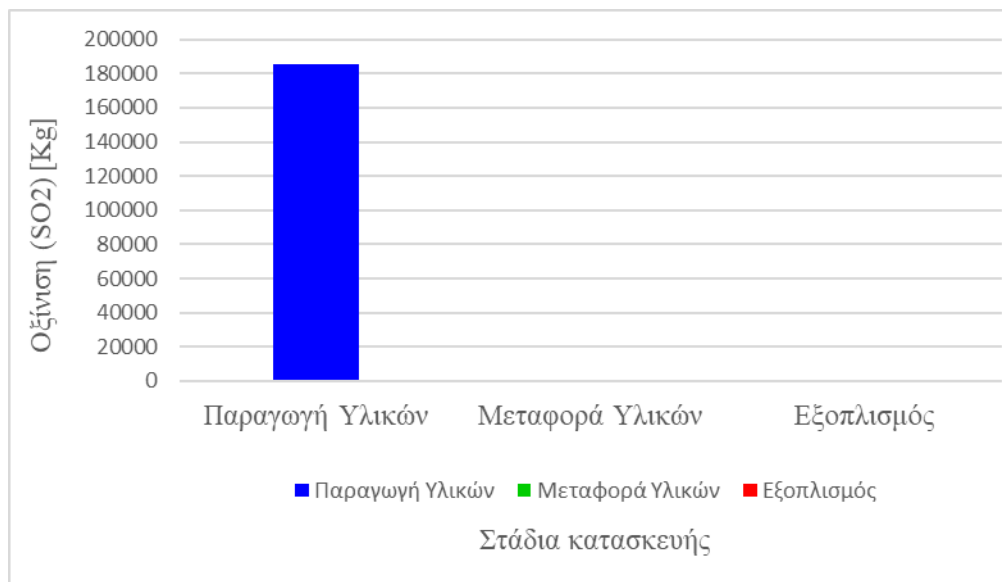


Εικόνα Π.4.4 Ευτροφισμός

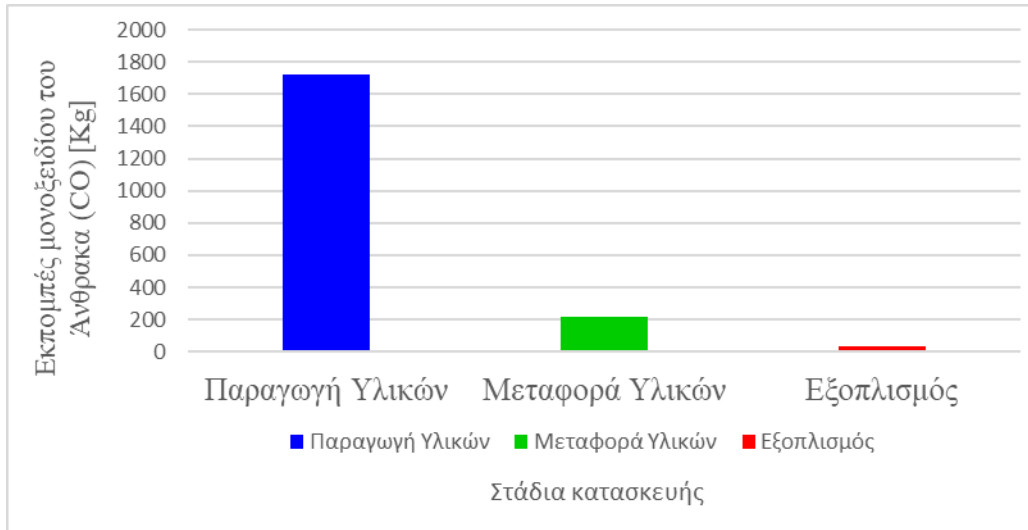




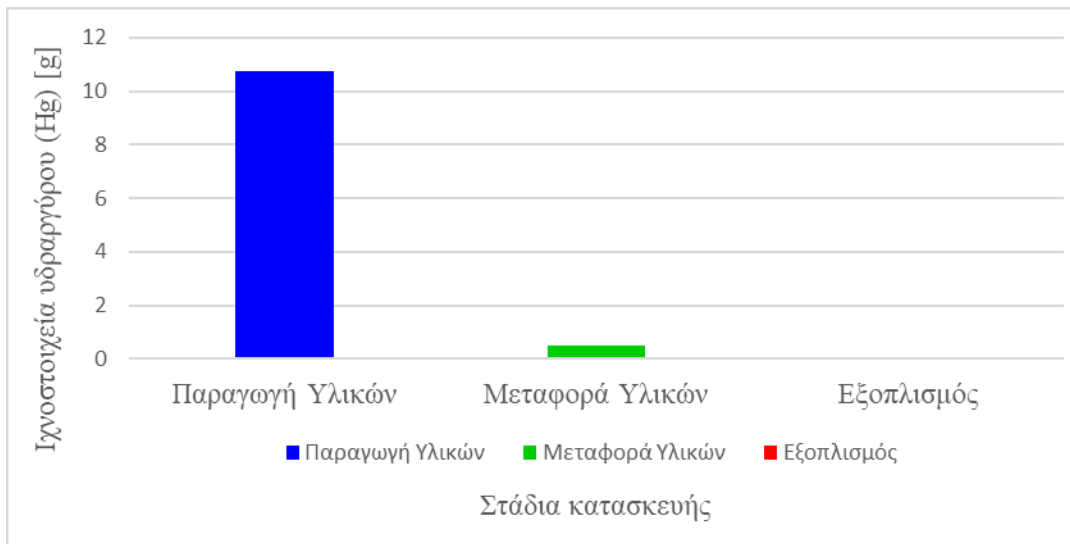
Εικόνα Π.4.5 Εκπομπές σωματιδίων PM10



Εικόνα Π.4.6 Οξίνιση



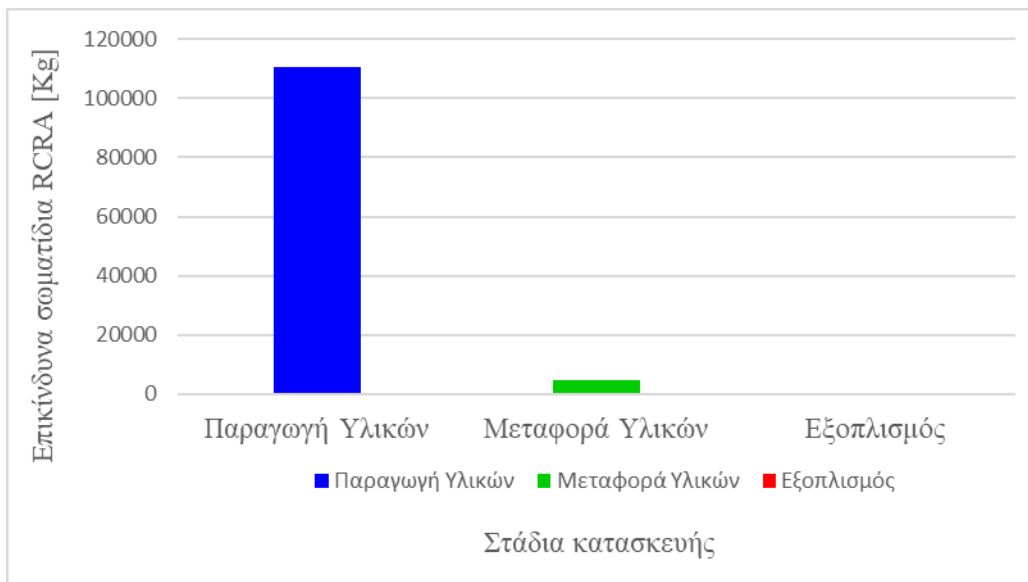
Εικόνα Π.4.7 Εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO)



Εικόνα Π.4.8 Ιχνοστοιχεία υδραργύρου (Hg)



Εικόνα Π.4.9 Ιχνοστοιχεία μολυβδου (Pb)



Εικόνα Π.4.10 Επικίνδυνα σωματίδια RCRA



Εικόνα Π.4.11 Καρκινικοί ρύποι



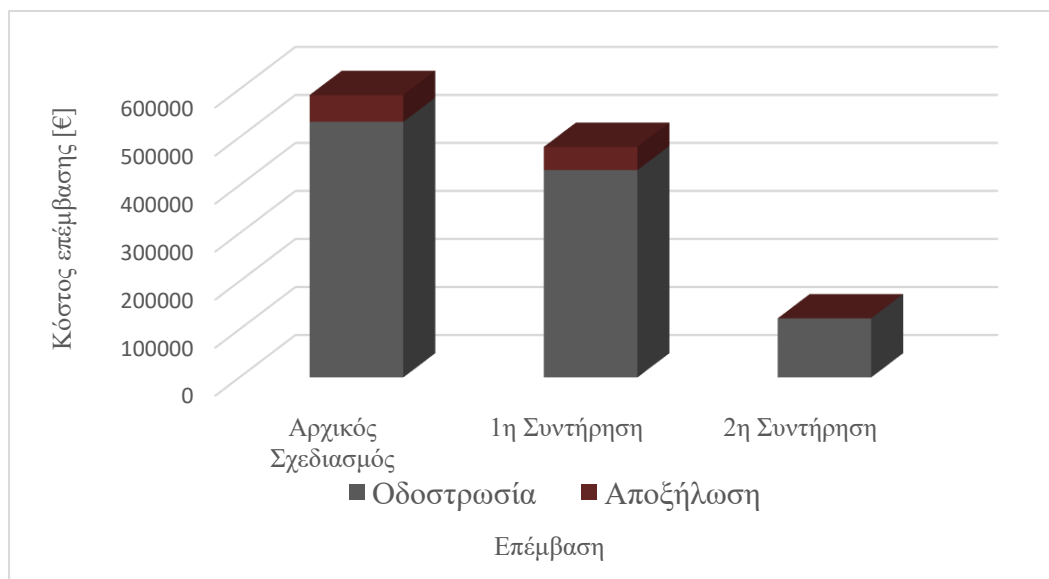
Εικόνα Π.4.12 Μη καρκινικοί ρύποι

## Π5 Πίνακας των αποτελεσμάτων της κοστολόγησης των διαδικασιών για το 1<sup>ο</sup> σενάριο

Πίνακας Π.5.1 Κοστολόγηση 1<sup>ου</sup> σεναρίου

	Αρχικός Σχεδιασμός	1η Συντήρηση	2η Συντήρηση
Οδοστρωσία	532351	431747	123099
Αποξήλωση	55800	48360	-
Επιμέρους σύνολα	588151	480107	123099
<b>ΣΥΝΟΛΟ:</b>		1191356	

**Π6 Διάγραμμα των αποτελεσμάτων της κοστολόγησης των διαδικασιών για το 1<sup>ο</sup> σενάριο**



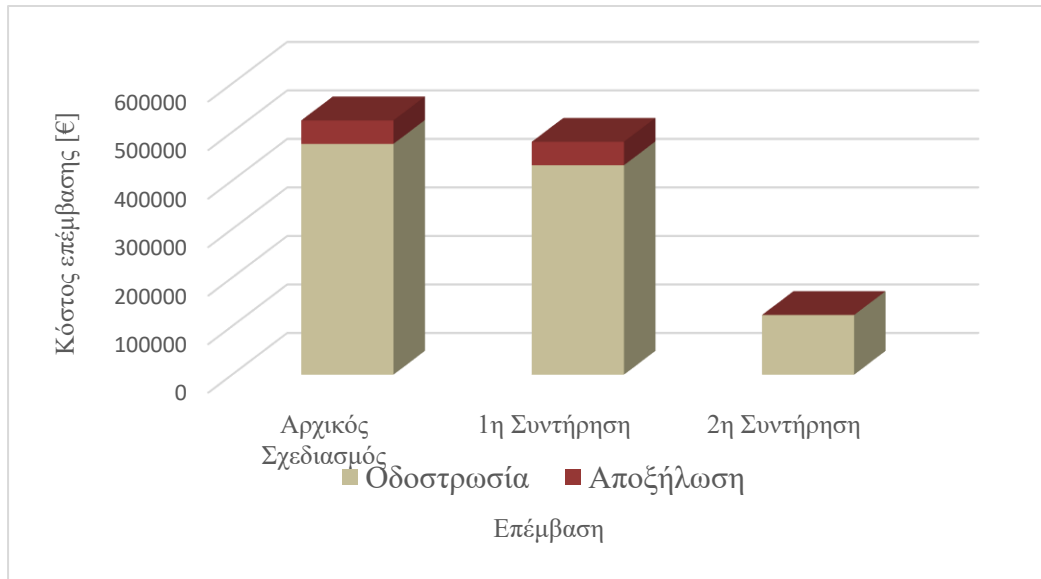
Εικόνα Π.6.1 Κοστολόγηση 1<sup>ου</sup> σεναρίου

**Π7 Πίνακας των αποτελεσμάτων της κοστολόγησης των διαδικασιών για το 2<sup>ο</sup> σενάριο**

Πίνακας Π.7.1 Κοστολόγηση 2<sup>ου</sup> σεναρίου

	Αρχικός Σχεδιασμός	1η Συντήρηση	2η Συντήρηση
Οδοστρωσία	475829	431747	123099
Αποξήλωση	48360	48360	-
Επιμέρους σύνολα	524189	480107	123099
<b>ΣΥΝΟΛΟ:</b>	<b>1127394</b>		

**Π8 Διάγραμμα των αποτελεσμάτων της κοστολόγησης των διαδικασιών για το 2<sup>ο</sup> σενάριο**



Εικόνα Π.8.1 Κοστολόγηση 2<sup>ου</sup> σεναρίου