



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΕΝΟΣ
ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ ΑΛΚΙΒΙΑΔΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: Χ. Πλατή, Επίκουρος Καθηγήτρια ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2017

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της επιτακτικής ανάγκης για υιοθέτηση βιώσιμων στρατηγικών στον τομέα των οδοστρωμάτων, η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την ανάδειξη της μεθοδολογίας της αξιολόγησης κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment – LCA) ως ένα χρήσιμο εργαλείο εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλούνται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός οδοστρώματος. Αρχικά, αναλύεται ο όρος αξιολόγηση κύκλου ζωής και γίνεται εκτενής περιγραφή των δομικών στοιχείων που συνθέτουν την εν λόγω μεθοδολογία. Ακολουθεί η ανάλυση του τρόπου με τον οποίο λαμβάνεται υπόψη κάθε στάδιο του κύκλου ζωής του οδοστρώματος και επισημαίνονται οι ελλείψεις της υπάρχουσας εμπειρίας και πρακτικής. Στη συνέχεια αναδεικνύεται η βιωσιμότητα της ανακύκλωσης στα οδοστρώματα μέσω της ανασκόπησης σχετικών διεθνών ερευνών όσον αφορά στην αξιολόγηση κύκλου ζωής οδοστρωμάτων, οι οποίες μας δείχνουν ότι η χρήση ανακυκλώσιμων υλικών και τεχνολογιών ανακύκλωσης παρουσιάζουν σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, σε σχέση με τα συμβατικά υλικά και τις παραδοσιακές μεθόδους. Τέλος, διεξάγεται μια αξιολόγηση κύκλου ζωής για ένα πειραματικό οδόστρωμα που αφορά τη σύγκριση δύο διαφορετικών επεμβατικών ενεργειών και γίνεται αντιληπτό πώς μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος LCA στην πράξη και ποια είναι τα οφέλη. Ανακεφαλαιώνοντας, τονίζεται η χρησιμότητα της αξιολόγησης κύκλου ζωής ως βοηθητικό εργαλείο στη λήψη αποφάσεων για θέματα οδοστρωμάτων και γίνονται προτάσεις για την εξάλειψη ελλείψεων της μεθόδου που εμποδίζουν την ευρεία εφαρμογή της.

ABSTRACT

In the context of the urgent need to adopt sustainable pavement strategies, this diploma thesis aims to highlight the Life Cycle Assessment (LCA) methodology as a useful tool for assessing the environmental impacts caused during the life cycle of a pavement. Initially, the term life cycle assessment is analyzed and an extensive description of key elements composing this methodology is made. An analysis of the way, in which each stage of the pavement life cycle is taken into account, follows and the shortcomings of the research and the current experience are underlined. The sustainability of pavement recycling is then highlighted through the review of relevant international LCA studies, which show us that the use of recycling materials and recycling technologies presents significant environmental benefits over conventional materials and traditional methods. Finally, a pavement LCA for an experimental pavement is conducted which compares two different rehabilitation actions and shows how LCA can be applied in practice and what are the benefits. Summing up, the usefulness of LCA as a helpful tool in decision-making on pavement related topics is emphasized and proposals for further research are made in order to eliminate the methodological deficiencies that serve as barriers to the widespread utilization of LCA.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Αντικείμενο	1
1.2	Στόχος-Μεθοδολογία	3
1.3	Δομή	4
2	Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής (Life-Cycle Assessment-LCA) στα οδοστρώματα	6
2.1	Εννοιολογικός προσδιορισμός	6
2.1.1	Ιστορική αναδρομή	6
2.1.2	Βασικές αρχές	7
2.2	Δομή	9
2.2.1	Γενικά	9
2.2.2	Ορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής	11
2.2.3	Ανάλυση απογραφής του κύκλου ζωής	17
2.2.4	Εκτίμηση επιπτώσεων του κύκλου ζωής	22
2.2.5	Ερμηνεία	28
2.3	Προσεγγίσεις για τρόπους εφαρμογής	30
2.4	Διεθνής πρακτική	31
3	Στάδια του κύκλου ζωής του οδοστρώματος	32
3.1	Γενικά	32
3.2	Παραγωγή υλικών	34
3.3	Κατασκευή	36
3.4	Χρήση	38
3.5	Συντήρηση και αποκατάσταση	46
3.6	Τέλος ζωής	48

4	Αξιολόγηση κύκλου ζωής και ανακύκλωση οδοστρωμάτων	50
4.1	Εισαγωγή	50
4.2	Ανακύκλωση οδοστρωμάτων	51
4.2.1	Ανακυκλώσιμα υλικά	51
4.2.2	Ανακύκλωση ασφαλτομιγμάτων	55
4.3	Σχετικές έρευνες	57
5	Πειραματική ανάλυση.....	76
5.1	Περιγραφή πειραματικού οδοστρώματος.....	76
5.2	Διαδικασία ανάλυσης	82
5.3	Αποτελέσματα	89
6	Ανακεφαλαίωση-συμπεράσματα	105
7	Βιβλιογραφία.....	110

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 2-1 Γενικός κύκλος ζωής ενός προϊόντος	7
Εικόνα 2-2 Η δομή του LCA (βασισμένη στη σειρά ISO 14040)	10
Εικόνα 2-3 Κύριες ομαδοποιημένες διαδικασίες σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής	18
Εικόνα 3-1 Κύκλος ζωής του οδοστρώματος και χρόνος-κόστος επέμβασης.....	33
Εικόνα 3-2 Στάδια κύκλου ζωής του οδοστρώματος.....	34
Εικόνα 3-3 Στάδιο χρήσης και οι περιβαλλοντικές συνιστώσες του	38
Εικόνα 4-1 Ανακτημένο ασφατικό οδόστρωμα (RAP)	52
Εικόνα 4-2 Ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος (RCA)	52
Εικόνα 4-3 Ανακυκλωμένες ασφατικές πλάκες στεγών πριν και μετά (RAS)	53
Εικόνα 4-4 Ιπτάμενη τέφρα δεξιά σε σύγκριση με συμβατικό τσιμέντο αριστερά.....	54
Εικόνα 4-5 Ασφαλτος τροποποιημένη με πολυμερή PMA	55
Εικόνα 4-6 Παραγωγή ενέργειας από την εξόρυξη και επεξεργασία των υλικών (Willis 2015)	65
Εικόνα 4-7 Παραγωγή CO ₂ από την εξόρυξη και επεξεργασία των υλικών (Willis 2015).....	65
Εικόνα 4-8 Παραγωγή ενέργειας από την παραγωγή των ασφαλτομιγμάτων (Willis 2015).....	66
Εικόνα 4-9 Παραγωγή CO ₂ από την παραγωγή των ασφαλτομιγμάτων (Willis 2015)	67
Εικόνα 4-10 Εξοικονομήσεις ενέργειας πάνω αριστερά, νερού πάνω δεξιά και εκπομπών CO ₂ κάτω για έξι πολιτείες των ΗΠΑ (Del Ponte et al. 2017)	72
Εικόνα 4-11 Ποσότητες ανακυκλώσιμων υλικών (κατακόρυφες στήλες) και εξοικονομήσεις εκπομπών CO ₂ (γκρίζα συνεχής γραμμή) (Del Ponte et al. 2017).....	74
Εικόνα 5-1 Υφιστάμενο οδόστρωμα.....	76
Εικόνα 5-2 Περίπτωση Α (CASE_A).....	79
Εικόνα 5-3 Περίπτωση Β (CASE_B)	82
Εικόνα 5-4 Γενικά στοιχεία εισόδου.....	85
Εικόνα 5-5 Στοιχεία σχεδιασμού	86
Εικόνα 5-6 Πρόγραμμα συντήρησης και αποκατάστασης.....	87
Εικόνα 5-7 Οξίνιση (kg SO ₂ eq)	91
Εικόνα 5-8 Φωτοχημικό νέφος (kg O ₃ eq).....	92
Εικόνα 5-9 Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11 eq).....	92
Εικόνα 5-10 Ευτροφισμός (kg N eq)	93
Εικόνα 5-11 Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO ₂ eq)	93
Εικόνα 5-12 Επιβλαβή σωματίδια (ανθρώπινη υγεία) (kg PM _{2.5} eq).....	94
Εικόνα 5-13 Κατανάλωση ενέργειας (MJ).....	94
Εικόνα 5-14 Σύγκριση οξίνισης	96
Εικόνα 5-15 Σύγκριση φωτοχημικού νέφους.....	97
Εικόνα 5-16 Σύγκριση εξάντλησης όζοντος.....	98

Εικόνα 5-17 Σύγκριση ευτροφισμού	99
Εικόνα 5-18 Σύγκριση υπερθέρμανσης του πλανήτη.....	100
Εικόνα 5-19 Σύγκριση επιβλαβών σωματιδίων (ανθρώπινη υγεία).....	101
Εικόνα 5-20 Σύγκριση κατανάλωσης ενέργειας.....	102

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 2-1 Κατηγορίες επιπτώσεων.....	28
Πίνακας 4-1 Αποτελέσματα δεδομένων σχεδιασμού (Planned) και κατασκευής (Constructed) των λογισμικών PaLATE και SimaPro (Bloom et al 2017).....	70
Πίνακας 5-1 Περιβαλλοντική επίδραση κάθε κατηγορίας (ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Α)	89
Πίνακας 5-2 Περιβαλλοντική επίδραση κάθε κατηγορίας (ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Β).....	90

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο

Τα τελευταία χρόνια ένας αυξανόμενος αριθμός οργανισμών, εταιρειών, ιδρυμάτων και διοικητικών οργάνων υιοθετεί αρχές βιωσιμότητας στη διαχείριση των δραστηριοτήτων του και στην άσκηση επιχειρηματικών ενεργειών. Οι αρχές αυτές επικεντρώνονται στον πρωταρχικό στόχο της ενεργής συμπερίληψης βασικών περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών παραγόντων στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Στον τομέα των μεταφορών και της συγκοινωνιακής υποδομής τα ζητήματα βιωσιμότητας δεν είναι καινούργια, καθώς συχνά έχουν συζητηθεί και θεωρηθεί έμμεσα ή ανεπίσημα στο παρελθόν. Ωστόσο, σε ότι αφορά τα οδοστρώματα, τα τελευταία χρόνια έχουν καταβληθεί μεγαλύτερες προσπάθειες για την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων της βιωσιμότητας με σκοπό τη συστηματική ενσωμάτωσή τους στη διαδικασία λήψης αποφάσεων με πιο οργανωμένο τρόπο (Van Dam et al. 2015).

Σύμφωνα με την Παγκόσμια Επιτροπή Περιβάλλοντος και Ανάπτυξης (World Commission on Environment and Development, WCED), βιώσιμη ανάπτυξη, είναι η ανάπτυξη που ανταποκρίνεται στις ανάγκες του παρόντος χωρίς να αποτρέπει τη δυνατότητα οι επόμενες γενιές να ανταποκριθούν στις δικές τους ανάγκες (WCED 1987). Αυτός είναι ένας γενικός ορισμός για τον όρο βιωσιμότητα, και αφορά όλα τα συστήματα ανεξαιρέτως. Εστιάζοντας στον τομέα των μεταφορών και της συγκοινωνιακής υποδομής και ειδικότερα στα οδοστρώματα, ο όρος βιωσιμότητα αναφέρεται στο λεγόμενο «τρίπτυχο» με συνιστώσες τις περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές ανάγκες. Αποσκοπεί δηλαδή στη συσχέτιση των οδοστρωμάτων με τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον, στην οικονομία και στην κοινωνία, σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής τους από το σχεδιασμό και την παραγωγή υλικών μέχρι και το τέλος ζωής τους.

Για πολλά χρόνια, ο οικονομικός παράγοντας υπήρξε ο κυρίαρχος παράγοντας στη λήψη αποφάσεων, αλλά τις τελευταίες δύο δεκαετίες παρατηρήθηκε η αυξανόμενη

εμφάνιση τόσο των περιβαλλοντικών όσο και των κοινωνικών συνιστωσών, αν και υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί που συνδέονται με τη μέτρηση και την εκτίμησή τους. Η εστίαση στη βιωσιμότητα μπορεί στη συνέχεια να ερμηνευτεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε όλα τα στοιχεία του «τρίπτυχου» να θεωρούνται σημαντικά. Φυσικά η σχετική σημασία αυτών των παραγόντων και του τρόπου με τον οποίο λαμβάνονται υπόψη θα επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τους στόχους, τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς ενός συγκεκριμένου έργου (FHWA 2016). Παρ' όλα αυτά, η περιορισμένη γνώση και κατανόησή μας για τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις των οδοστρωμάτων καθιστά τη χρήση περιβαλλοντικά βιώσιμων πρακτικών στα έργα οδοστρωμάτων μια μεγάλη πρόκληση.

Με αφορμή την πρόκληση αυτή, το ενδιαφέρον της παρούσας διπλωματικής εργασίας επικεντρώνεται στην περιβαλλοντική διάσταση του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων. Ενδεικτικά, ο τομέας των μεταφορών στο σύνολό του είναι υπεύθυνος για το 27% των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, μιας προηγμένης τεχνολογικά χώρας στον τομέα αυτό (EPA 2015b). Τα οδοστρώματα αποτελούν ιδιαίτερα σημαντικά στοιχεία της συγκοινωνιακής υποδομής και πέρα από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, συνδέονται και με άλλες αξιοσημείωτες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούνται σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής τους. Η κατανόηση των επιπτώσεων αυτών καθίσταται απαραίτητη για την ενίσχυση της βιωσιμότητας των συστημάτων μεταφοράς.

Για την επίτευξη της κατανόησης της περιβαλλοντικής διάστασης των οδοστρωμάτων απαιτείται η υιοθέτηση κατάλληλων μεθοδολογιών εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής τους. Μια τέτοια μεθοδολογία είναι η αξιολόγηση του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων (Life Cycle Assessment – LCA), που εφεξής θα αναφέρεται και με το σύντομο όρο, με τον οποίο είναι γνωστή διεθνώς, δηλαδή ως LCA. Το LCA παρέχει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την αξιολόγηση της συνολικής περιβαλλοντικής επιβάρυνσης ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας, εξετάζοντας όλες τις εισροές και εκροές κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής, από την παραγωγή πρώτων υλών έως το τέλος της ζωής τους. Αυτή η συστηματική προσέγγιση προσδιορίζει πού συμβαίνουν οι σημαντικότερες

επιπτώσεις και πού μπορούν να γίνουν οι σημαντικότερες βελτιώσεις με ταυτόχρονη αναγνώριση πιθανών περιορισμών και συμβιβασμών (FHWA 2016).

Ως εκ τούτου, το LCA είναι το κατάλληλο ολιστικό εργαλείο που μπορεί να βοηθήσει τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων σε έργα συγκοινωνιακής υποδομής να αντιμετωπίσουν τις περιβαλλοντικές πτυχές των οδοστρωμάτων, για να επιτύχουν το στόχο της βιωσιμότητας. Αντικείμενο της εργασίας αυτής, λοιπόν, αποτελεί η μεθοδολογία αξιολόγησης του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων ως βοηθητικό εργαλείο στη διαδικασία λήψης αποφάσεων σχετικών με τα οδοστρώματα, μέσω της ποσοτικοποίησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κάθε σταδίου του κύκλου ζωής τους.

1.2 Στόχος-Μεθοδολογία

Όπως προαναφέρθηκε, ο τομέας των μεταφορών και της συγκοινωνιακής υποδομής αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες που ασκούν σημαντική επιβάρυνση στο περιβάλλον, με τα οδοστρώματα να έχουν μεγάλη επίδραση ως κύρια συστατικά των συγκοινωνιακών υποδομών. Συνεπώς, στο πλαίσιο της ολοένα και πιο επιτακτικής ανάγκης για υιοθέτηση βιώσιμων στρατηγικών στον τομέα των οδοστρωμάτων, κρίνεται απαραίτητη η κατά το δυνατόν καλύτερη κατανόηση της περιβαλλοντικής διάστασης του κύκλου ζωής του οδοστρώματος.

Για να καταστεί αυτό εφικτό, απαιτείται η ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλούνται εξαιτίας των υλικών και του εξοπλισμού που χρησιμοποιούνται, των κατασκευαστικών διαδικασιών, των διάφορων συνιστωσών της χρήσης και λειτουργίας του οδοστρώματος, των διαδικασιών συντήρησης και αποκατάστασης, αλλά και των επιλογών στο τέλος ζωής του. Το πιο ολοκληρωμένο εργαλείο που παρέχει τη δυνατότητα αυτή είναι το LCA, η εφαρμογή του οποίου στα οδοστρώματα ερευνάται τα τελευταία χρόνια και συνεπώς είναι μεν ένα αναπτυσσόμενο πεδίο έρευνας, αλλά εμφανίζει προς το παρόν ορισμένους περιορισμούς. Ωστόσο, με τις κατάλληλες ενέργειες που στοχεύουν στην κάλυψη των κενών της υφιστάμενης μεθοδολογίας, το LCA μπορεί να αποτελέσει ένα πραγματικά αξιόλογο βοηθητικό εργαλείο για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων, με τελικό σκοπό την επίτευξη βιώσιμων λύσεων στα οδοστρώματα.

Λαμβάνοντας υπόψη και τα ανωτέρω, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάδειξη της μεθοδολογίας της αξιολόγησης του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων ως εργαλείο εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεών τους, μέσω της διερεύνησης σημαντικών παραμέτρων της. Η διερεύνηση αυτή αφορά τα δομικά στοιχεία που συνιστούν ένα ολοκληρωμένο LCA, όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός οδοστρώματος σχετικά με το πώς και σε τι βαθμό συμπεριλαμβάνονται σε ένα LCA. Επιπλέον, η εργασία αυτή στοχεύει και στην ανάδειξη της βιωσιμότητας των ανακυκλώσιμων υλικών και τεχνολογιών ανακύκλωσης στα οδοστρώματα με τη μέθοδο LCA.

Μεθοδολογικά, ακολουθείται η ανασκόπηση και η ανάλυση των στοιχείων και των παραμέτρων της αξιολόγησης του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων που προκύπτουν από τη μέχρι σήμερα έρευνα. Περιγράφονται λεπτομερώς τόσο τα δομικά στοιχεία που απαρτίζουν ένα LCA, όσο και τα στάδια του κύκλου ζωής του οδοστρώματος που εξετάζει ένα LCA, χωρίς φυσικά να παραλείπεται η αναφορά σε υπαρκτούς περιορισμούς και ελλείψεις της μεθόδου. Επιπρόσθετα, δίνεται έμφαση στη σημασία της ανακύκλωσης των οδοστρωμάτων και γίνεται ειδική ανασκόπηση πρόσφατων ερευνών LCA που περιλαμβάνουν τη χρήση ανακυκλώσιμων υλικών και τεχνολογιών ανακύκλωσης σε σύγκριση με συμβατικά υλικά και παραδοσιακές μεθόδους. Τέλος, διεξάγεται αξιολόγηση του κύκλου ζωής σε ένα πειραματικό οδόστρωμα με βάση την οποία διερευνούνται, αξιολογούνται και συγκρίνονται ως προς την περιβαλλοντική επιβάρυνση που προκαλούν, δύο διαφορετικές επεμβατικές ενέργειες στο πλαίσιο του σταδίου συντήρησης και αποκατάστασης.

1.3 Δομή

Η εργασία αυτή αποτελείται από επτά κύρια κεφάλαια, στο σύνολο. Συγκεκριμένα, πέραν του παρόντος, περιλαμβάνονται τα ακόλουθα:

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται διεξοδικά η έννοια της αξιολόγησης του κύκλου ζωής, τόσο ως γενικός όρος, όσο και ως αναφερόμενος στα οδοστρώματα. Περιγράφονται τα τέσσερα βασικά δομικά στοιχεία που συνθέτουν ένα πλήρες LCA, ενώ γίνεται και αναφορά σε προσεγγίσεις του τρόπου εφαρμογής του, αλλά και στη σημερινή διεθνή πρακτική του.

Εν συνεχεία το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται λεπτομερώς σε κάθε ένα από τα στάδια του κύκλου ζωής ενός οδοστρώματος και στον τρόπο με τον οποίο τα χαρακτηριστικά τους λαμβάνονται υπόψη σε ένα LCA. Επισημαίνονται τα στοιχεία κάθε σταδίου που διαδραματίζουν βασικό ρόλο στην πρόκληση περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων, ενώ θίγονται οι περιορισμοί και οι ελλείψεις ως προς την εκτίμηση κάποιων από αυτά.

Αντικείμενο του τετάρτου κεφαλαίου, είναι η ανασκόπηση πρόσφατων ερευνών που περιλαμβάνουν τη διεξαγωγή LCA. Σκοπός δε είναι η σύγκριση της χρήσης ανακυκλώσιμων υλικών και τεχνολογιών ανακύκλωσης έναντι συμβατικών υλικών και παραδοσιακών μεθόδων, αφού προηγουμένως περιγραφούν όλα τα σχετικά ανακυκλώσιμα υλικά και οι πρακτικές ανακύκλωσης.

Το πέμπτο κεφάλαιο αφορά την πειραματική ανάλυση δύο διαφορετικών επεμβατικών ενεργειών σε ένα υφιστάμενο οδόστρωμα ως προς τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις, με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού αξιολόγησης του κύκλου ζωής. Διεξάγεται δηλαδή ένα LCA με σκοπό τη σύγκριση δύο περιπτώσεων επέμβασης σε ένα πειραματικό οδόστρωμα και εξάγονται τα σχετικά αποτελέσματα.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται συνοπτική αναφορά στα συμπεράσματα, τα οποία προκύπτουν από την ανακεφαλαίωση της διπλωματικής εργασίας και παρατίθενται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Το έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη διεθνή βιβλιογραφία-οδηγό για τη σύνταξη της παρούσας εργασίας.

2 Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής (Life-Cycle Assessment-LCA) στα οδοστρώματα

2.1 Εννοιολογικός προσδιορισμός

2.1.1 Ιστορική αναδρομή

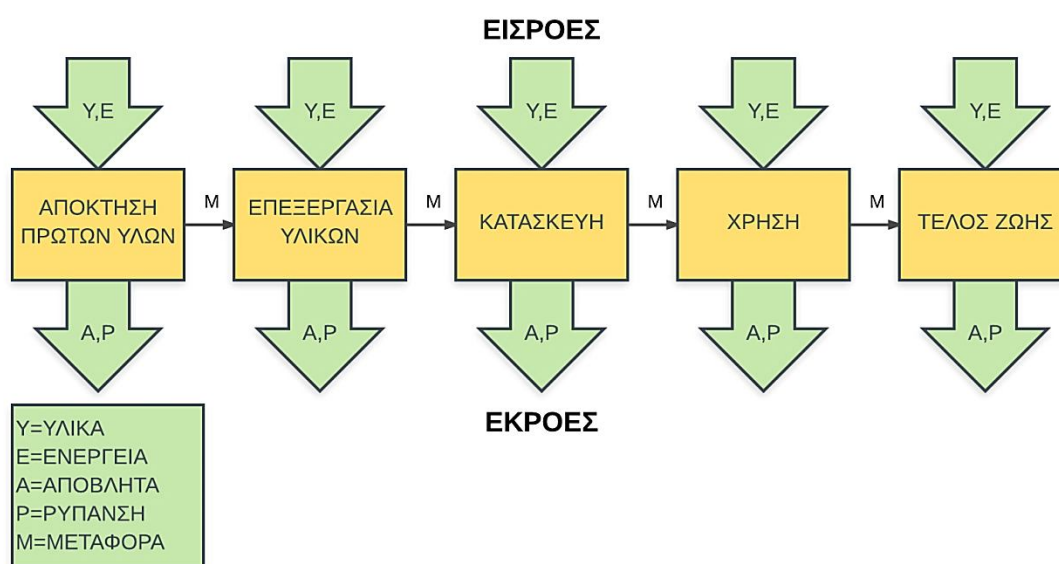
Το LCA αναπτύχθηκε επίσημα τη δεκαετία του 1970 και θεωρείται μια σχετικά νέα τεχνική. Χρησιμοποιείται για την ανίχνευση και ποσοτικοποίηση των συνολικών περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων ενός προϊόντος, καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του από την απόκτηση των πρώτων υλών, την παραγωγή, τη χρήση, μέχρι και την τελική διάθεση. Αρχικά, αναπτύχθηκε για την ανάλυση των εκπομπών των στερεών αποβλήτων στον αέρα, στο έδαφος και στο νερό. Αργότερα, οι αρχές του διευρύνθηκαν για να συμπεριλάβουν την ενέργεια που καταναλώνεται, τη χρήση των διάφορων πόρων και τις εκπομπές χημικών ουσιών, με επίκεντρο όμως τα καταναλωτικά προϊόντα και τη συσκευασία αυτών και όχι τα πιο σύνθετα συστήματα υποδομής (Hunt and Franklin 1996, Guinée 2012). Μεταξύ 1990 και 2000, οι εξελίξεις μετατοπίστηκαν στη δημιουργία πλήρων μεθόδων εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και ακολούθως στην τυποποίηση των μεθόδων αυτών από το Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης. Έτσι, δημιουργήθηκε διεθνές πρότυπο που αφορά το LCA το 1997, το οποίο αναθεωρήθηκε το 2006 και βρίσκεται σε ισχύ μέχρι σήμερα (ISO 14040:2006a,b).

Το LCA έχει χρησιμοποιηθεί σε σημαντικό βαθμό από ποικίλες βιομηχανίες ανά τον κόσμο, όπως στη βιομηχανία οικοδομικών υλικών στη Γαλλία (B.L.P. Peuportier 2001), τη γερμανική αυτοκινητοβιομηχανία (Mildenberger and Kahre 2000) και τις παγκόσμιας εμβέλειας εταιρίες χημικών και καταναλωτικών αγαθών (BASF, Proctor and Gamble κτλ.), για να παρακολουθούν και να αναφέρουν την οικολογική τους αποδοτικότητα και περιβαλλοντική τους διαχείριση (Huang 2007). Η εφαρμογή του στα πεδία του πολιτικού μηχανικού, αρχικά ως εργαλείο αξιολόγησης των επιλογών διαχείρισης στερεών αποβλήτων, παρατηρείται τις τελευταίες δύο δεκαετίες (Huang 2007). Συγκεκριμένα στον τομέα των μεταφορών, το LCA περιλαμβάνει την αξιολόγηση της παραγωγής ασφαλτομίγματος και τσιμέντου, την αξιολόγηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από τα καύσιμα των οδικών οχημάτων, την

εξέταση των δικτύων μεταφοράς, την εξέταση της αλληλεπίδρασης μεταξύ υποδομής μεταφορών, οχημάτων και ανθρώπινης συμπεριφοράς και ουσιαστικά χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που επιφέρουν τα οδοστρώματα. Αν και τα τελευταία χρόνια η χρήση του κερδίζει ολοένα και περισσότερο ενδιαφέρον, σε αντίθεση με άλλους κλάδους βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο εφαρμογής στα συστήματα υποδομών (Harvey et al. 2014).

2.1.2 Βασικές αρχές

Το LCA παρέχει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την αξιολόγηση της συνολικής περιβαλλοντικής επιβάρυνσης ενός συγκεκριμένου προϊόντος (όπως ενός τόνου αδρανών υλικών) ή πιο σύνθετων συστημάτων προϊόντων ή διαδικασιών (όπως μια μονάδα παραγωγής ή ένα δίκτυο μεταφορών), εξετάζοντας όλες τις εισροές και εκροές κατά τη διάρκεια της ζωής του από την παραγωγή πρώτων υλών μέχρι το τέλος της ζωής του. Ένα γενικό μοντέλο του κύκλου ζωής ενός προϊόντος για το LCA παρουσιάζεται στο σχήμα της εικόνας 2-1. Όπως φαίνεται, ο κύκλος ζωής αρχίζει με την απόκτηση πρώτων υλών, προχωρά σε διάφορα διακριτά στάδια, συμπεριλαμβανομένης της επεξεργασίας, της κατασκευής, της χρήσης και τελειώνει με το τέλος της ζωής, ενώ περιλαμβάνει και τη διαδικασία της μεταφοράς μεταξύ των σταδίων.



Εικόνα 2-1 Γενικός κύκλος ζωής ενός προϊόντος

Αυτός ο ορισμός του κύκλου ζωής ονομάζεται συχνά “cradle to grave”, δηλαδή «από τη γέννηση μέχρι την ταφή». Τα LCAs που δεν θεωρούν κάποια από τα παραπάνω στάδια (συνήθως το τέλος της ζωής) συχνά αναφέρονται ως “cradle to gate”, δηλαδή «από τη γέννηση μέχρι την πύλη» εννοώντας ως πύλη οποιοδήποτε στάδιο εκτός του τέλους ζωής (Harvey et al. 2014). Το τέλος της ζωής μπορεί να περιλαμβάνει ανακύκλωση εντός του κύκλου ζωής του ίδιου προϊόντος, επανακατασκευή, επαναχρησιμοποίηση χωρίς επανεπεξεργασία ή ανακύκλωση προς τον κύκλο ζωής άλλων προϊόντων. Η μεθοδολογία LCA παρακολουθεί τα υλικά και την ενέργεια ως εισροές σε κάθε ένα από αυτά τα στάδια, ενώ παρακολουθεί τα απόβλητα και τη ρύπανση ως εκροές. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να μεταφραστούν σε περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις.

Το LCA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς, όπως (Harvey et al. 2014):

- ❖ Προσδιορισμός των ευκαιριών βελτίωσης της περιβαλλοντικής επίδοσης των προϊόντων και των συστημάτων σε διάφορα σημεία του κύκλου ζωής τους.
- ❖ Ενημέρωση και καθοδήγηση των υπευθύνων λήψης αποφάσεων στη βιομηχανία, στην κυβέρνηση και στις μη κυβερνητικές οργανώσεις για πολλαπλούς σκοπούς, συμπεριλαμβανομένου του στρατηγικού σχεδιασμού, του καθορισμού προτεραιοτήτων, της επιλογής σχεδιασμού προϊόντων ή διαδικασιών και του επανασχεδιασμού.
- ❖ Επιλογή σχετικών δεικτών περιβαλλοντικής επίδοσης για ολόκληρο του σύστημα.
- ❖ Ποσοτικοποίηση των πληροφοριών σχετικά με την περιβαλλοντική επίδοση ενός προϊόντος ή συστήματος (π.χ. εφαρμογή πλαισίου οικολογικής σήμανσης, εφαρμογή περιβαλλοντικής απαίτησης ή κατάρτιση περιβαλλοντικής δήλωσης ενός προϊόντος).

Οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων του LCA μπορούν να καθοδηγήσουν τους υπεύθυνους για τη λήψη αποφάσεων, ώστε να μειωθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Van Dam et al. 2015). Επιπλέον, το LCA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των κρίσιμων σημείων στη λήψη αποφάσεων, καθώς επιτρέπει

την αξιολόγηση όλων των σταδίων του κύκλου ζωής και των πολλαπλών περιβαλλοντικών δεικτών. Εάν το LCA του οδοστρώματος δεν λαμβάνει υπόψη όλα τα σημαντικά στάδια του κύκλου ζωής και όλους τους κατάλληλους περιβαλλοντικούς δείκτες, οι πολιτικές, οι κανονισμοί και οι προδιαγραφές που προκύπτουν με σκοπό τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των συστημάτων υποδομής ενδέχεται να έχουν ανεπιθύμητες αρνητικές συνέπειες. Αυτός ο κίνδυνος είναι μεγαλύτερος όταν γίνονται αλλαγές σε ένα μόνο τμήμα του συστήματος ή σε ένα μόνο στάδιο του κύκλου ζωής χωρίς να αξιολογούνται οι επιπτώσεις των αλλαγών αυτών στο υπόλοιπο σύστημα και στα άλλα στάδια του κύκλου ζωής. Όταν εφαρμόζεται σωστά, το LCA είναι μια προσέγγιση για τη διερεύνηση των συνεπειών των αλλαγών που επιφέρουν επιπτώσεις σε ολόκληρο το σύστημα και ολόκληρο τον κύκλο ζωής (Harvey et al. 2014).

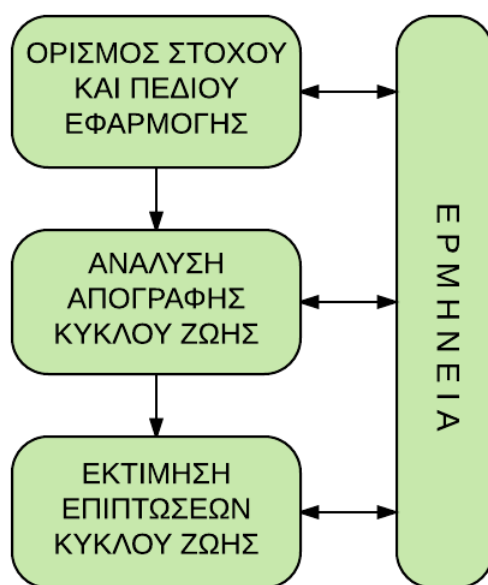
2.2 Δομή

2.2.1 Γενικά

Η μέθοδος του LCA καλεί τους επαγγελματίες να χρησιμοποιούν τη βασισμένη σε ολόκληρο το σύστημα προσέγγισή της, η οποία περιλαμβάνει τον πλήρη κύκλο ζωής ενός υλικού, ενός προϊόντος ή ενός συστήματος υλικών και προϊόντων όπως π.χ. ενός οδοστρώματος ή ενός συστήματος οδοστρωμάτων (“cradle to grave”). Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι το LCA μπορεί επίσης να εφαρμοστεί και μόνο σε επιλεγμένα στάδια του κύκλου ζωής (“cradle to gate”), ανάλογα με τους στόχους και το πεδίο εφαρμογής της μεθόδου. Για τα οδοστρώματα, ο κύκλος ζωής συνήθως περιλαμβάνει την εξόρυξη και παραγωγή των υλικών, την κατασκευή, τη χρήση, τη συντήρηση και αποκατάσταση, καθώς και το τέλος ζωής. Στο LCA οι φάσεις αυτές αναφέρονται ως στάδια του κύκλου ζωής, ενώ οι εισροές και εκροές αναφέρονται ως «περιβαλλοντικές ροές». Κάθε ένα από τα στάδια αυτά επηρεάζεται από το σχεδιασμό του οδοστρώματος, ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα την επιλογή της δομικής ικανότητας και των υλικών, που σε συνδυασμό με την ποιότητα κατασκευής καθορίζουν την επίδοση του οδοστρώματος για δεδομένη κυκλοφορία, κλίμα και έδαφος (FHWA 2016).

Η γενική διαδικασία LCA περιγράφεται και διέπεται από τη σειρά ISO 14040. Οι γενικές απαιτήσεις και κατευθυντήριες γραμμές παρουσιάζονται στο πρότυπο ISO 14044 : "Περιβαλλοντική διαχείριση – Life-Cycle Assessment - Απαιτήσεις και κατευθυντήριες γραμμές". Από αυτό το πρότυπο και όπως φαίνεται στο σχήμα της εικόνας 2-2, μια μελέτη LCA αποτελείται από τέσσερις φάσεις:

1. Ορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής
2. Ανάλυση απογραφής του κύκλου ζωής
3. Εκτίμηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής
4. Ερμηνεία



Εικόνα 2-2 Η δομή του LCA (βασισμένη στη σειρά ISO 14040)

Αυτά τα τέσσερα αλληλοεξαρτώμενα βήματα πρέπει να ακολουθηθούν, αφού πρώτα καθοριστούν με ακρίβεια και πληρότητα, ώστε να επιτευχθεί η κατά το δυνατόν πιο ολοκληρωμένη εφαρμογή της μεθόδου.

2.2.2 Ορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής

Η πρώτη φάση του LCA είναι ο καθορισμός των στόχων και του πεδίου εφαρμογής της αξιολόγησης. Αυτό συμβάλλει στον προσδιορισμό των βασικών χαρακτηριστικών της ανάλυσης, συμπεριλαμβανομένου του βάθους και του εύρους της, τα οποία μπορούν να διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με το γενικό στόχο του LCA.

Στόχος: Οι στόχοι ενός LCA πρέπει αρχικά να καθοριστούν από τον οργανισμό που εκτελεί το LCA προκειμένου να προσδιοριστεί ο τύπος της μελέτης, το πεδίο εφαρμογής και η προσέγγιση για την αξιολόγηση των επιπτώσεων και τη λήψη αποφάσεων. Οι στόχοι ενδέχεται να διαφέρουν μεταξύ των οργανισμών, ανάλογα με τους συνολικούς περιβαλλοντικούς στόχους, τις πολιτικές, τους νόμους και τους κανονισμούς και τις περιβαλλοντικές αξίες τους. Τα στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη στον καθορισμό του στόχου του LCA είναι (FHWA 2016):

- ❖ Η προβλεπόμενη εφαρμογή.
- ❖ Το κοινό στο οποίο απευθύνεται.
- ❖ Ερωτήματα που πρέπει να απαντηθούν.
- ❖ Αν η μελέτη προορίζεται για σύγκριση εναλλακτικών λύσεων ή για γνωστοποίηση μιας συγκεκριμένης απόφασης.

Ο στόχος θα πρέπει να είναι ακριβής και να γίνει πλήρως κατανοητός πριν προχωρήσουμε στα επόμενα στάδια του LCA, καθώς θα κατευθύνει όχι μόνο το πεδίο εφαρμογής της ανάλυσης αλλά και όλη την υπόλοιπη διαδικασία.

Πεδίο εφαρμογής: Το πεδίο εφαρμογής ενός LCA θέτει τα όρια του συστήματος (δηλ. τι πρόκειται να συμπεριληφθεί στο LCA και τι όχι). Θα πρέπει να καλύπτει τα στάδια και τις διαδικασίες του κύκλου ζωής του οδοστρώματος που περιλαμβάνονται, να προσδιορίζει τα γεωγραφικά και χρονικά όρια της ανάλυσης, να ορίζει τη λειτουργική μονάδα ανάλυσης και να καθορίζει την απαιτούμενη ποιότητα των δεδομένων. Το επιλεγμένο πεδίο εφαρμογής θα πρέπει να εξαρτάται από τους καθορισμένους στόχους του LCA. Τα σημαντικότερα στοιχεία του αναλύονται παρακάτω.

Λειτουργική μονάδα: Η λειτουργική μονάδα ορίζει το σύστημα που θα μελετηθεί και λειτουργεί ως μονάδα αναφοράς των δεδομένων εισόδου και εξόδου, σε οποιοδήποτε από τα στάδια του κύκλου ζωής του προϊόντος (Kendall and Santero 2010, CEN 2013). Για τα συστήματα οδοστρωμάτων η λειτουργική μονάδα πρέπει να είναι μια αναπαράσταση των φυσικών διαστάσεων και της ποσοτικοποιημένης απόδοσης του οδοστρώματος (Harvey et al. 2010), κάτι που συμπίπτει με τον ορισμό του ISO 14044 ότι η λειτουργική μονάδα είναι η «ποσοτικοποιημένη απόδοση ενός συστήματος προϊόντων για χρήση ως μονάδα αναφοράς» (ISO 2006a). Όταν δύο ή περισσότερα συστήματα προϊόντων συγκρίνονται χρησιμοποιώντας LCA, η λειτουργική μονάδα διαδραματίζει βασικό ρόλο στα αποτελέσματά του LCA (Jiménez et al. 2015). Συνεπώς, όταν ο στόχος της μελέτης είναι η σύγκριση των εναλλακτικών λύσεων, είναι απαραίτητο να υπάρχει ισοδυναμία του ορισμού των λειτουργικών μονάδων των εναλλακτικών μεθόδων, ώστε να μπορούν να συγκριθούν χωρίς προκατάληψη.

Τα φυσικά όρια της λειτουργικής μονάδας ορίζουν τα τμήματα της δομής του οδοστρώματος που πρέπει να θεωρούνται μέρος του συστήματος στην τοποθεσία που περιλαμβάνεται στη μελέτη. Οι διαστάσεις επιτρέπουν τον προσδιορισμό όγκων, μαζών, επιφανειακών περιοχών και άλλων ποσοτήτων που απαιτούνται για την εκτέλεση του LCA. Η πιο συχνή λειτουργική μονάδα είναι μια λωρίδα κυκλοφορίας ενός χιλιομέτρου ή ενός μιλίου. Άλλες φορές χρησιμοποιούνται μεγάλα μήκη ως λειτουργικές μονάδες, όπως πέντε ή δέκα χιλιόμετρα, όταν συνήθως εξετάζεται ένα έργο στο σύνολό του και προβλέπεται η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ολόκληρου του έργου.

Γενικά, μια μελέτη LCA ενός πλήρους συστήματος οδοστρώματος πρέπει να περιλαμβάνει τις διαδικασίες εντός του συνόλου των φυσικών ορίων της δομής του, συμπεριλαμβανομένων των ασφαλικών στρώσεων, της βάσης, της υπόβασης, των λωρίδων έκτακτης ανάγκης και του συστήματος όμβριων υδάτων και αποχέτευσης. Ωστόσο, εάν ο στόχος του LCA δεν περιλαμβάνει το πλήρες σύστημα οδοστρωσίας, τότε μπορούν να ρυθμιστούν τα όρια του συστήματος. Για παράδειγμα, τα φυσικά όρια μπορεί να περιλαμβάνουν το

οδόστρωμα της κύριας λωρίδας κυκλοφορίας, αλλά να αφήνουν έξω από το σύστημα τις λωρίδες έκτακτης ανάγκης και τις ράμπες (αν είναι οι ίδιες για όλες τις εναλλακτικές που εξετάζονται). Άλλες επιλογές που πρέπει να γίνουν κατά τον καθορισμό των φυσικών ορίων περιλαμβάνουν το αν πρέπει να συμπεριληφθούν ή όχι όλα τα στρώματα του οδοστρώματος. Για παράδειγμα, εάν εξετάζονται δύο εναλλακτικές λύσεις για την επιδιόρθωση της επιφανειακής στρώσης, τα στρώματα που δεν επηρεάζονται από καμία από τις δύο εναλλακτικές λύσεις μπορούν να αποκλειστούν, ανάλογα με το στόχο της μελέτης (FHWA 2016).

Οι Santero et al. (2011b) αναφέρουν ότι ο καθορισμός της κατάλληλης λειτουργικής μονάδας αποτελεί ένα σημαντικό έλλειμμα στις υπάρχουσες ερευνητικές μελέτες LCA στα οδοστρώματα, κάτι που οφείλεται τόσο στην περιπλοκότητα των οδοστρωμάτων, όσο και στην έλλειψη ενός συγκεκριμένου σχετικού προτύπου. Μια βασική πτυχή, η οποία δε λαμβάνεται υπόψη στη θεώρηση των λειτουργικών μονάδων, είναι η λειτουργική κατάσταση των οδοστρωμάτων. Το επίπεδο εξυπηρέτησης των οδοστρωμάτων εξαρτάται από την κατάστασή τους. Ένα οδόστρωμα μπορεί να έχει λιγότερες επιπτώσεις του κύκλου ζωής ανά λωρίδα κυκλοφορίας, αλλά να είναι σε κακή κατάσταση, παρέχοντας έτσι χαμηλότερο επίπεδο εξυπηρέτησης. Ως εκ τούτου, η κατάσταση του οδοστρώματος και η εξυπηρετικότητα του θα πρέπει να ενσωματωθούν στις υφιστάμενες λειτουργικές μονάδες προκειμένου να παρασχεθεί μια καλύτερη βάση για τη σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (FHWA 2016).

Τέλος, ταυτόχρονα με τον καθορισμό της λειτουργικής μονάδας πρέπει ακόμη να καθορίζεται και η περίοδος ανάλυσης. Η περίοδος ανάλυσης ορίζεται ως «η χρονική περίοδος κατά την οποία αξιολογείται η λειτουργική μονάδα» (FHWA 2016). Δηλαδή αναφέρεται στη διάρκεια κατά την οποία αποτιμώνται οι εισροές και οι εκροές που σχετίζονται με τη λειτουργική μονάδα. Ειδικά τα οδοστρώματα επιβάλλουν σημαντικές προκλήσεις στον καθορισμό της, επειδή η αρχική κατασκευή και τα μελλοντικά γεγονότα συντήρησης και αποκατάστασης συχνά έχουν διαφορετικές λειτουργικές ζωές σχεδιασμού

(Harvey et al. 2010). Σήμερα είναι κοινά αποδεκτό ότι η περίοδος ανάλυσης πρέπει να είναι τόσο μεγάλη ώστε να καλύψει τουλάχιστον την επόμενη αποκατάσταση ή επιδιόρθωση σημαντικής κλίμακας, της οποίας η χρονική στιγμή επηρεάζεται από την τρέχουσα απόφαση (FHWA 2016). Ωστόσο, πρέπει να δοθεί προσοχή ώστε να μην αυξηθεί άσκοπα η περίοδος ανάλυσης γιατί στη συνέχεια θα αυξηθεί η δυσκολία και η αβεβαιότητα της πρόβλεψης μελλοντικών γεγονότων.

Όρια του συστήματος: Σύμφωνα με το ISO 14040, ο ορισμός των ορίων του συστήματος περιλαμβάνει την επιλογή των δραστηριοτήτων και των διαδικασιών που περιλαμβάνονται στα στάδια του κύκλου ζωής του οδοστρώματος (ISO 2006a). Τα όρια του συστήματος καθορίζουν ποιες μονάδες επεξεργάζονται και ποια στάδια του κύκλου ζωής πρέπει να συμπεριληφθούν στη μελέτη. Υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες διαδικασίες μονάδων ή ακόμη και στάδια του κύκλου ζωής μπορούν να αποκλειστούν από την ανάλυση. Ο ορισμός των ορίων του συστήματος επηρεάζει σημαντικά την έκβαση ενός LCA και καθορίζει εάν τα αποτελέσματα των μελετών μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους.

Οι διαδικασίες μονάδας αναφέρονται σε όλες τις διαδικασίες που αποτελούν μέρος της λειτουργικής μονάδας που λαμβάνεται υπόψη στη μελέτη LCA του οδοστρώματος. Τα όρια του συστήματος είναι το σύνολο των κριτηρίων που καθορίζουν ποιες διαδικασίες μονάδας αποτελούν μέρος του συστήματος που αναλύεται και ποιες όχι (ISO 2006a). Κάθε μία από τις διαδικασίες μονάδας που περιλαμβάνονται στη μελέτη θα πρέπει να ορίζεται με βάση:

- ❖ Πού ξεκινά η διαδικασία της μονάδας, όσον αφορά στην παραλαβή πρώτων υλών ή ενδιάμεσων προϊόντων.
- ❖ Τη φύση των μετασχηματισμών και των λειτουργιών που προκύπτουν ως μέρος της διαδικασίας μονάδας.
- ❖ Πού τελειώνει η διαδικασία της μονάδας, όσον αφορά στον προορισμό των ενδιάμεσων ή τελικών προϊόντων (ISO 2006b).

Τα όρια του συστήματος και τα στάδια του κύκλου ζωής που πρέπει να εξεταστούν θα πρέπει να επιλέγονται με βάση το στόχο της μελέτης. Με βάση τις απαιτήσεις του ISO 14044, η παράλειψη σταδίων του κύκλου ζωής, διαδικασιών ή εισροών και εκροών για μια δεδομένη διαδικασία θα πρέπει να συμβεί μόνο εάν δεν αλλάζει σημαντικά τα συνολικά συμπεράσματα της μελέτης. Επιπλέον, πρέπει να δηλώνονται με σαφήνεια οι αποφάσεις περί παραλείψεως σταδίων του κύκλου ζωής, διαδικασιών, εισροών ή εκροών και να εξηγούνται οι λόγοι και οι συνέπειες της παράλειψής τους.

Ο αποκλεισμός σταδίων του κύκλου ζωής από την ανάλυση θα μπορούσε να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα με σημαντικές ανεπιθύμητες συνέπειες. Για παράδειγμα, η παραγωγή ενός συγκεκριμένου υλικού μπορεί να έχει χαμηλό περιβαλλοντικό αντίκτυπο, αλλά η αντοχή του μπορεί να μην είναι επαρκής, οδηγώντας σε συχνή αντικατάσταση ή μπορεί να προκαλεί τραχύτητα που επηρεάζει τη χρήση καυσίμων από τα οχήματα ή μπορεί το υλικό να μην είναι ανακυκλώσιμο στο τέλος της ζωής του, χαρακτηριστικά τα οποία δεν θα εξετάζονταν εάν συμπεριληφθεί στη μελέτη μόνο το στάδιο παραγωγής του υλικού. Οι μελέτες συγκριτικής αξιολόγησης που περιλαμβάνουν μόνο ένα ή λίγα στάδια του κύκλου ζωής, πρέπει να περιλαμβάνουν δήλωση σχετικά με την αβεβαιότητα που προκαλείται από την περικοπή σταδίων του κύκλου ζωής στην τεκμηρίωση των περιορισμών (FHWA 2016).

Τα κριτήρια αποκοπής είναι τα κριτήρια για την εξαίρεση διαδικασιών μονάδας από την ανάλυση (ή την εξαίρεση εισροών ή εκροών από τις διαδικασίες μονάδας), όταν αυτές οι διαδικασίες (ή εισροές ή εκροές) δεν αναμένεται να επηρεάσουν τη λήψη αποφάσεων. Η θέσπιση κριτηρίων αποκοπής θεωρείται ως αποδεκτή πρακτική και συνήθως γίνεται για να εξαιρεθεί η προσπάθεια δημιουργίας καταγραφής δεδομένων για ροές που δεν είναι επιζήμιες. Τα προκαταρκτικά δεδομένα καταγραφής για τις διαδικασίες αυτές πρέπει όμως να συλλεχθούν και να αναλυθούν για να εξεταστούν οι αναμενόμενες επιπτώσεις και να καθοριστεί εάν πληρούνται τα κριτήρια αποκοπής (FHWA 2016).

Στη μέθοδο του LCA χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι κριτηρίων αποκοπής για να αποφασιστεί ποιες διαδικασίες, εισροές και εκροές πρέπει να συμπεριληφθούν στην αξιολόγηση. Αυτές περιλαμβάνουν το ισοζύγιο μάζας, το ενεργειακό ισοζύγιο και την περιβαλλοντική σημασία. Και τα τρία αυτά κριτήρια θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για την αποκοπή διαδικασιών ή εισροών και εκροών στο LCA του οδοστρώματος. Ο προσδιορισμός των εισροών ή εκροών, βάσει οποιωνδήποτε δύο κριτηρίων από τα τρία, μπορεί να οδηγήσει σε παράλειψη σημαντικών εισροών ή εκροών (δηλ. εισροών ή εκροών που έχουν σημαντικές επιπτώσεις στο τρίτο κριτήριο) από τη μελέτη. Για παράδειγμα, ορισμένα υλικά οδοστρωμάτων παρουσιάζουν μικρές συνεισφορές μάζας στο οδόστρωμα, αλλά μπορεί να έχουν μεγάλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις για συγκεκριμένους δείκτες.

Τέλος, ιδιαίτερα σημαντική κρίνεται και η εφαρμογή ανάλυσης ευαισθησίας σε ένα LCA, η οποία θα επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τα όρια του συστήματος. Η ανάλυση ευαισθησίας είναι η χρήση συστηματικών διαδικασιών για την εκτίμηση των επιπτώσεων των επιλογών που έγιναν σε υποθέσεις, μεθόδους και δεδομένα και οδήγησαν στο αποτέλεσμα της μελέτης (ISO 2006b). Μια διαδικασία και τα απαραίτητα κριτήρια για τη χρήση της ανάλυσης ευαισθησίας για τον έλεγχο των διαδικασιών και των εισροών και εκροών, που πρέπει να συμπεριληφθούν ή να αποκλειστούν, θα πρέπει να καθοριστούν ως μέρος του ορισμού του πεδίου εφαρμογής. Η εφαρμογή των κριτηρίων αποκοπής μπορεί να γίνει μόνο αφού έχει αρχίσει η συλλογή δεδομένων απογραφής. Καθώς τα δεδομένα απογραφής συλλέγονται και αρχίζει η ανάλυση επιπτώσεων, τα όρια του συστήματος ίσως χρειαστεί να προσαρμοστούν βάσει των αποτελεσμάτων της ανάλυσης ευαισθησίας και της εφαρμογής των κριτηρίων αποκοπής. Τα ακόλουθα στοιχεία της μελέτης LCA θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για ενδεχόμενες αλλαγές των ορίων του συστήματος (FHWA 2016):

- ❖ Η λειτουργική μονάδα.
- ❖ Η περίοδος ανάλυσης.

- ❖ Διαδικασίες αλλά και εισροές και εκροές διαδικασιών στην ανάλυση απογραφής του κύκλου ζωής.
- ❖ Στάδια του κύκλου ζωής.
- ❖ Στοιχεία κυκλοφορίας στο στάδιο χρήσης.
- ❖ Μελλοντικές δραστηριότητες συντήρησης και αποκατάστασης και χρονοδιάγραμμα αυτών.

2.2.3 Ανάλυση απογραφής του κύκλου ζωής

Η ανάλυση απογραφής του κύκλου ζωής (Life-Cycle Inventory ή LCI), η οποία εφεξής θα αναφέρεται και ως LCI, είναι η δεύτερη φάση ενός LCA, και χαρακτηρίζεται από τη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων που είναι απαραίτητα για την ικανοποίηση του στόχου και του πεδίου εφαρμογής. Το ISO 14040 ορίζει το LCI ως «τη φάση του LCA που περιλαμβάνει τη συλλογή και την ποσοτικοποίηση των εισροών και εκροών ενός προϊόντος καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του» (ISO 2006a). Στη φάση LCI πρέπει να συλλέγονται και να αναλύονται όλα τα σχετικά δεδομένα για όλα τα εξεταζόμενα στάδια του κύκλου ζωής σύμφωνα με τις μεθόδους, τους κανόνες και τις παραδοχές που καθορίζονται στον στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης. Τα αποτελέσματα της φάσης αυτής αποτελούν τη βάση για τη μετέπειτα φάση της εκτίμησης των επιπτώσεων του κύκλου ζωής.

Η συλλογή των δεδομένων απογραφής εφαρμόζεται για όλες τις διαδικασίες που περιλαμβάνονται στα όρια του συστήματος. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14044, μια διαδικασία μονάδας είναι το «μικρότερο στοιχείο που εξετάζεται στην ανάλυση απογραφής του κύκλου ζωής για το οποίο ποσοτικοποιούνται τα δεδομένα εισροών και εκροών» (ISO 2006b). Οι διαδικασίες πολλαπλών μονάδων μπορούν να ομαδοποιηθούν για να σχηματίσουν διαδικασίες αθροιστικής μονάδας που αντιπροσωπεύουν σύνθετες διαδικασίες (FHWA 2016). Παραδείγματα τέτοιων ομαδοποιημένων διαδικασιών στα LCAs οδοστρωμάτων για τα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής του παρουσιάζονται στην εικόνα 2-3.

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΛΙΚΩΝ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ	ΧΡΗΣΗ	ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	ΤΕΛΟΣ ΖΩΗΣ
Εξόρυξη	Διαδικασίες μηχανημάτων	Αλληλεπίδραση οδοστρώματος-οχημάτων	Διαδικασίες υλικών	Διαδικασίες απομάκρυνσης
Παραγωγή	Καθυστέρηση κυκλοφορίας	Λευκαύγεια	Διαδικασίες κατασκευής	Υγειονομική ταφή
Μεταφορά		Ενανθράκωση	Καθυστέρηση κυκλοφορίας	Μεταφορά
		Φωτισμός		
		Έκπλυση		

Εικόνα 2-3 Κύριες ομαδοποιημένες διαδικασίες σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής

Οι διαδικασίες μονάδας και τα σχετικά δεδομένα απογραφής μπορούν να θεωρηθούν τα δομικά στοιχεία κάθε LCA, καθώς περιγράφουν και χαρακτηρίζουν τόσο τις εισροές όσο και τις εκροές που σχετίζονται με το περιβάλλον και τα προϊόντα. Οι εισροές που εξετάζονται περιλαμβάνουν τις ροές υλικών ή ενέργειας που εισέρχονται σε μια διαδικασία μονάδας (όπως πρώτες ύλες, ενέργεια και χρήση νερού), ενώ οι εκροές που λαμβάνονται υπόψη είναι προϊόντα, παραπροϊόντα, υλικά ή ενεργειακές ροές που εξέρχονται από τη διαδικασία (όπως στερεά απόβλητα, ατμοσφαιρικές εκπομπές, εκπομπές στο νερό και εκπομπές στο έδαφος). Για μια τυπική εγκατάσταση παραγωγής ασφαλτομίγματος ή σκυροδέματος, οι τυπικές ροές περιλαμβάνουν: την κατανάλωση ενέργειας με τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας, πετρελαίου ή φυσικού αερίου και την κατανάλωση πρώτων υλών υπό μορφή αδρανών υλικών, ασφαλικού υλικού, τσιμέντου και νερού ως εισροές, ενώ ως εκροές τις εκπομπές και τα απόβλητα.

Η φάση LCI περιλαμβάνει τη συλλογή δεδομένων και τη μοντελοποίηση όλων των διαδικασιών μονάδων εντός των ορίων του συστήματος σε ένα LCA οδοστρώματος, όπως η παραγωγή αδρανών υλικών, η παραγωγή και αποθήκευση ασφαλικών υλικών, η παραγωγή ασφαλτομιγμάτων, η παραγωγή σκυροδέματος και διάφορες άλλες κατασκευαστικές δραστηριότητες. Οι τύποι δεδομένων και οι πηγές που

επιλέγονται εξαρτώνται από το στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης. Αυτά τα δεδομένα μπορούν να συλλέγονται από τους τόπους παραγωγής που σχετίζονται με τις διαδικασίες μονάδων ή μπορούν να ληφθούν ή να υπολογιστούν από άλλες πηγές. Στην πράξη, ένας συνδυασμός αυτών των προσεγγίσεων συλλογής δεδομένων μπορεί να είναι απαραίτητος.

Τα δεδομένα απογραφής που συλλέγονται ταξινομούνται γενικά σε δύο ομάδες: τα **πρωτογενή δεδομένα** και τα **δευτερογενή δεδομένα**. Τα πρωτογενή δεδομένα αναφέρονται σε δεδομένα που συλλέγονται από συγκεκριμένες διαδικασίες και αντιπροσωπεύουν την παραγωγή και κατασκευή του υπό μελέτη προϊόντος, όπως για παράδειγμα είναι τα δεδομένα εκπομπών σε συγκεκριμένη μονάδα παραγωγής τσιμέντου που παράγει πρώτες ύλες για συγκεκριμένο τύπο σκυροδέματος που χρησιμοποιείται σε ένα LCA οδοστρώματος. Τα δευτερογενή δεδομένα λαμβάνονται συχνά από τις υπάρχουσες, εμπορικά ή δημόσια διαθέσιμες στο κοινό, βάσεις δεδομένων και τη βιβλιογραφία και συνήθως αντιπροσωπεύουν μέσους όρους, όπως για παράδειγμα τα δεδομένα εκπομπών που συλλέγονται από όλες τις μονάδες παραγωγής τσιμέντου και αναφέρονται ως μέσος όρος από τους οργανισμούς τσιμέντου. Η ανάλυση απογραφής του κύκλου ζωής αποτελείται από τη συλλογή ενός συνδυασμού πρωτογενών και δευτερογενών δεδομένων, ανάλογα με τους στόχους και την προβλεπόμενη εφαρμογή του LCA (FHWA 2016).

Η διαδικασία που πρέπει να ακολουθείται για την ανάλυση απογραφής του κύκλου ζωής σύμφωνα με τις απαιτήσεις των προτύπων ISO 14040 και 14044 περιλαμβάνει έντεκα βήματα, τα οποία συνοψίζονται παρακάτω:

1. **Προετοιμασία για τη συλλογή δεδομένων:** Περιλαμβάνει την ανάπτυξη στρατηγικής συλλογής δεδομένων, σχεδίασης διαγραμμάτων ροής για κύριες διαδικασίες και προσδιορισμού των τύπων δεδομένων και των πηγών τους. Η προετοιμασία πρέπει να ξεκινά με τον έλεγχο των απαιτήσεων των δεδομένων, των υποθέσεων δεδομένων και άλλων πληροφοριών που σχετίζονται με τα δεδομένα απογραφής και ορίζονται στον ορισμό του στόχου και του πεδίου εφαρμογής.

2. **Συλλογή των αρχικών δεδομένων για το στάδιο παραγωγής υλικών:** Περιλαμβάνει τη χρήση πρωτογενών ή δευτερογενών πηγών δεδομένων. Αυτό είναι το βήμα όπου οι ροές εισροών και εκροών για τα κύρια υλικά οδοστρώματος και τις διαδικασίες παραγωγής συλλέγονται από τις προσδιορισμένες πηγές.
3. **Συλλογή των αρχικών δεδομένων και ανάπτυξη μοντέλων για τα άλλα στάδια του κύκλου ζωής:** Περιλαμβάνει την κατασκευή, τη συντήρηση και αποκατάσταση, τη χρήση και το τέλος ζωής. Σε αντίθεση με το στάδιο της παραγωγής υλικών, τα μοντέλα που συσχετίζουν άμεσα τα λειτουργικά και δομικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις θα πρέπει να αξιοποιηθούν στο στάδιο της χρήσης για την ανάπτυξη των ροών παραγωγής.
4. **Ολοκλήρωση συλλογής αρχικών δεδομένων:** Περιλαμβάνει τη χρήση μοντέλων και άλλων πηγών δεδομένων. Αυτό το βήμα απαιτείται όταν τα δεδομένα που συλλέγονται στα βήματα 2 και 3 δεν επαρκούν για τον χαρακτηρισμό των κατηγοριών επιπτώσεων που προσδιορίζονται στη φάση ορισμού του στόχου και πεδίου εφαρμογής. Η ολοκλήρωση συλλογής των δεδομένων μπορεί να γίνει με τη χρήση δεδομένων από άλλες πηγές ή με τη χρήση άλλων τύπων μοντέλων δεδομένων που είναι διαθέσιμα από τη βιβλιογραφία και τις εμπορικές βάσεις δεδομένων LCI.
5. **Επαλήθευση δεδομένων:** Περιλαμβάνει τον έλεγχο ότι οι εισροές και οι εκροές της απογραφής βρίσκονται εντός εύλογων διαστημάτων (π.χ. μέσω ελέγχου του ισοζυγίου μάζας και ενέργειας και της περιβαλλοντικής συνάφειας ή μέσω συγκριτικών αναλύσεων δεδομένων απογραφής από άλλες πηγές).
6. **Ομαδοποίηση δεδομένων:** Οι διαδικασίες μεμονωμένων μονάδων που αντιπροσωπεύουν τη ροή παραγωγής των κυρίων υλικών του οδοστρώματος ομαδοποιούνται όπου χρειάζεται.
7. **Αναφορά δεδομένων σε διαδικασίες μονάδων και στη λειτουργική μονάδα:** Οι εισροές και οι εκροές της απογραφής εκφράζονται ανά μονάδα μάζας ή όγκου παραγωγής ή ανά ροή αναφοράς. Στη συνέχεια, οι ροές που συνδέονται με μεμονωμένες διαδικασίες μονάδων ή με ομαδοποιημένες

διαδικασίες μονάδων (π.χ. παραγωγή ασφαλτομίγματος) καθορίζονται ανά λειτουργική μονάδα.

8. **Εφαρμογή κατανομής:** Οι εισροές και οι εκροές της απογραφής κατανέμονται στα προϊόντα ή το σύστημα που μελετάται, όπου χρειάζεται. Οι κανόνες κατανομής θα πρέπει να εφαρμόζονται στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Διαδικασίες παρασκευής με παραπροϊόντα (π.χ. διυλιστήρια πετρελαίου και διαδικασίες παραγωγής ασφάλτου).
- Διαδικασίες ή συστήματα που χρησιμοποιούνται από πολλαπλά προϊόντα (π.χ. μεταφορά πολλαπλών αγαθών και πρώτων υλών).
- Επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση οδοστρωμάτων στο τέλος της ζωής τους.
- Καταστάσεις πολλαπλών εισροών (π.χ. χώρος υγειονομικής ταφής, επεξεργασία αποβλήτων).

9. **Εφαρμογή κανόνων αποφάσεων και βελτίωση των ορίων του συστήματος:**

Οι εισροές και οι εκροές που πρέπει να περιλαμβάνονται ή να εξαιρούνται στην τελική βάση δεδομένων απογραφής καθορίζονται μετά την εφαρμογή των κανόνων αποκοπής που προσδιορίζονται στον καθορισμό του πεδίου εφαρμογής. Μετά από οποιαδήποτε συμπερίληψη ή αποκλεισμό από τα αρχικά συλλεχθέντα δεδομένα, τα όρια του συστήματος θα πρέπει να βελτιωθούν και τα βήματα 1 έως 9 να επαναληφθούν για τις διαδικασίες μονάδας που επηρεάζονται από οποιεσδήποτε αλλαγές.

10. **Αξιολόγηση της ποιότητας των δεδομένων:** Η ποιότητα των συλλεχθέντων δεδομένων ελέγχεται για συνέπεια και συμβατότητα με το στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης.

11. **Τεκμηρίωση:** Οι εισροές και οι εκροές της απογραφής ολοκληρώνονται και τεκμηριώνονται μαζί με τις πηγές δεδομένων, τους περιορισμούς, τις παραδοχές, τα μοντέλα, τη συγκριτική αξιολόγηση και τα αποτελέσματα αξιολόγησης ποιότητας.

2.2.4 Εκτίμηση επιπτώσεων του κύκλου ζωής

Η εκτίμηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής (Life-Cycle Impact Assessment ή LCIA), η οποία εφεξής θα αναφέρεται και ως LCIA, μεταφράζει τα αποτελέσματα της ανάλυσης απογραφής του κύκλου ζωής (LCI) σε επιπτώσεις στους ανθρώπους και στο περιβάλλον. Η μετάφραση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης απογραφής σε επιπτώσεις διεξάγεται χρησιμοποιώντας μια επιστημονική προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη την αλυσίδα επιπτώσεων (ή την αλυσίδα αιτίου-αποτελέσματος) μιας περιβαλλοντικής ροής στους ανθρώπους, το φυσικό περιβάλλον ή τους φυσικούς πόρους (European Commission JRC 2010). Η φάση LCIA εκχωρεί τα αποτελέσματα του LCI στις κατηγορίες επιπτώσεων. Για κάθε κατηγορία επιπτώσεων επιλέγεται ένας δείκτης της κατηγορίας επίπτωσης του κύκλου ζωής και υπολογίζεται το αποτέλεσμα. Η συλλογή των αποτελεσμάτων των δεικτών LCIA, που αναφέρεται ως το προφίλ LCIA, παρέχει πληροφορίες σχετικά με τα περιβαλλοντικά ζητήματα που σχετίζονται με τις περιβαλλοντικές ροές (εισροές και εκροές) του συστήματος (FHWA 2016).

Το LCIA είναι η τρίτη φάση ενός LCA. Σκοπός του είναι να παράσχει πρόσθετες πληροφορίες που θα βοηθήσουν στην εκτίμηση των αποτελεσμάτων ενός συστήματος LCI του συστήματος προϊόντων, ώστε να κατανοηθεί καλύτερα η περιβαλλοντική τους σημασία. Το ISO 14040 αναφέρει ότι ο σκοπός του LCIA είναι «η κατανόηση και η αξιολόγηση του μεγέθους και της σημασίας των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων για ένα σύστημα προϊόντων καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του προϊόντος» (ISO 2006a). Η διαδικασία εκτίμησης των επιπτώσεων τυπικά θεωρείται ως μια σειρά τεσσάρων βημάτων (FHWA 2016):

1. Επιλογή των κατηγοριών επιπτώσεων, των δεικτών των κατηγοριών και των μοντέλων χαρακτηρισμού που θα συμπεριληφθούν στην αξιολόγηση.
2. Ταξινόμηση των αποτελεσμάτων του LCI στις επιλεγμένες κατηγορίες επιπτώσεων.
3. Χρήση ενός μοντέλου χαρακτηρισμού για τη μετάφραση των αποτελεσμάτων του LCI σε δείκτες κατηγορίας επιπτώσεων.
4. Εξέταση των ακόλουθων προαιρετικών βημάτων:

- Ομαλοποίηση: Υπολογισμός του όγκου των αποτελεσμάτων του δείκτη κατηγορίας σε σχέση με τις πληροφορίες αναφοράς.
- Ομαδοποίηση: Ταξινόμηση (και ενδεχομένως κατάταξη) των κατηγοριών επιπτώσεων.
- Στάθμιση: Η μετατροπή (και ενδεχομένως η ομαδοποίηση) των δεικτών των διάφορων κατηγοριών επιπτώσεων χρησιμοποιώντας αριθμητικούς παράγοντες που βασίζονται σε επιλογές τιμών (τα αρχικά μη σταθμισμένα δεδομένα θα πρέπει να παραμείνουν διαθέσιμα).
- Ανάλυση ποιότητας δεδομένων: Ανάπτυξη καλύτερης κατανόησης της αξιοπιστίας της συλλογής από τα αποτελέσματα των δεικτών και του προφίλ LCIA.

Το LCA εξετάζει πολλαπλές κατηγορίες επιπτώσεων, σε αντίθεση με τις προσεγγίσεις που εξετάζουν μόνο μία ροή ή επίπτωση, όπως μόνο το αποτύπωμα άνθρακα ή το ενεργειακό ισοζύγιο. Αυτό είναι ένα από τα πλεονεκτήματα του LCA. Το LCA χρησιμοποιείται για την αποφυγή απρόβλεπτων συνεπειών και συνεπώς συνιστάται η συμπερίληψη και η αξιολόγηση όσων περισσότερων κατηγοριών επιπτώσεων είναι εφικτό. Τα περισσότερα LCAs οδοστρωμάτων περιλαμβάνουν τη χρήση ενέργειας ως αποτέλεσμα της ανάλυσης απογραφής και την υπερθέρμανση του πλανήτη ως αποτέλεσμα της εκτίμησης των επιπτώσεων ως κύριες παραμέτρους αναφοράς, αλλά συνιστάται η συμπερίληψη ενός ευρύτερου συνόλου κατηγοριών επιπτώσεων, όπως αυτές που ορίζονται από το αμερικανικό εργαλείο για τη μείωση και την αξιολόγηση των χημικών ουσιών και άλλων περιβαλλοντικών επιπτώσεων ή αλλιώς μεθοδολογία TRACI (Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Other Environmental Impacts) (Bare 2012). Εκτός από τις κατηγορίες επιπτώσεων που περιλαμβάνονται στη μεθοδολογία TRACI, άλλες κατηγορίες επιπτώσεων ή αποτελέσματα LCI μπορούν να συμπεριληφθούν εάν θεωρηθούν χρήσιμα ή απαιτούνται από το στόχο και το πεδίο εφαρμογής του LCA. Αυτό μπορεί να έχει ιδιαίτερη σημασία για τα τοπικά και συγκεκριμένου τύπου έργα (FHWA 2016).

Τα προαιρετικά στοιχεία εκτίμησης επιπτώσεων, όπως η ομαλοποίηση, ομαδοποίηση και η στάθμιση, μπορούν να προστεθούν μόνο όταν βοηθούν στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων του LCIA. Πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την παρουσίαση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων χρησιμοποιώντας αυτά τα στοιχεία, καθώς οι περισσότερες από τις διαθέσιμες μεθοδολογίες περιλαμβάνουν μια υποκειμενική βάση. Αντίθετα τα υποχρεωτικά στοιχεία της επιλογής των κατηγοριών επιπτώσεων, των δεικτών των κατηγοριών και των μοντέλων χαρακτηρισμού αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της μεθοδολογίας εκτίμησης επιπτώσεων (FHWA 2016).

Τα βασικά σημεία της διαδικασίας LCIA αναφέρονται παρακάτω:

Κατηγορίες επιπτώσεων

Υπάρχουν πολλές κατηγορίες επιπτώσεων, οι οποίες μπορεί να σχετίζονται είτε με εισροές (π.χ. που αντικατοπτρίζουν την κατανάλωση ενός πόρου) είτε με εκροές (π.χ. που αντανακλούν τις επιπτώσεις ενός ρύπου ή μιας ομάδας ρύπων). Οι κατηγορίες επιπτώσεων που περιλαμβάνονται στη μεθοδολογία TRACI περιγράφονται παρακάτω και χρησιμοποιούνται ευρέως στο LCA οδοστρωμάτων.

- ❖ **Οξίνιση:** Πρόκειται συνήθως για ατμοσφαιρικούς ρύπους (όπως διοξείδιο του θείου, SO₂) που εναποτίθενται στην επιφάνεια της γης (νερό, χώμα, φυτά κτλ.) είτε μέσω υγρών είτε ξηρών διεργασιών. Η όξινη βροχή είναι ίσως η πιο γνωστή μορφή εναπόθεσης όξινων ρύπων. Η διαδικασία οξίνισης «είναι η αυξανόμενη συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου (H⁺) σε τοπικό περιβάλλον» (Bare 2012). Η οξίνιση μπορεί να βλάψει τα οικοσυστήματα και τα ανθρώπινα συστήματα. Αυτές οι εκπομπές εμφανίζονται στο LCA του οδοστρώματος σχεδόν σε οποιοδήποτε σημείο όπου καίγονται καύσιμα (π.χ. στον κλίβανο που χρησιμοποιείται στην παραγωγή υλικών ή όπου το καύσιμο ντίζελ καίγεται στον ενεργειακό εξοπλισμό).
- ❖ **Υπερθέρμανση του πλανήτη:** Η EPA (Environmental Protection Agency) (2014) περιγράφει την υπερθέρμανση του πλανήτη ως «την πρόσφατη και συνεχή άνοδο της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας κοντά στην επιφάνεια

της Γης, η οποία προκαλείται κυρίως από την αύξηση των συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα». Η επιδείνωση των κλιματικών αλλαγών περιλαμβάνει την αύξηση της στάθμης της θάλασσας, την αύξηση της συχνότητας και της έντασης των ακραίων καιρικών φαινομένων και τις επιπτώσεις στους φυσικούς οικοτόπους, τη γεωργία και την ανθρώπινη υγεία. Η άνοδος της στάθμης της θάλασσας, οι ακραίες καιρικές συνθήκες και οι αυξημένες θερμοκρασίες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις υποδομές και άλλες πτυχές του δομημένου περιβάλλοντος (Muench and Van Dam 2015). Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου συνδέονται κατά κύριο λόγο με την καύση καυσίμων (π.χ. καύση βενζίνης από κυκλοφορία κατά τη χρήση), αλλά μπορεί επίσης να συμβούν κατά τη διάρκεια κάποιων παραγωγικών διαδικασιών.

- ❖ **Οικοτοξικότητα:** Η οικοτοξικότητα αναφέρεται στην επίδραση των χημικών ουσιών που απελευθερώνονται σε ένα οικοσύστημα και επικεντρώνεται συνήθως στις επιβλαβείς επιδράσεις στη φυτική και ζωική ζωή. Η οικοτοξικότητα εξαρτάται από την ποσότητα του ρύπου που απελευθερώνεται, τη μεταφορά του, την ισχύ του, καθώς και το περιβαλλοντικό σύστημα (αέρας, έδαφος ή νερό) στο οποίο απελευθερώνεται (Bare 2012). Στο LCA του οδοστρώματος, η οικοτοξικότητα είναι συνήθως σχετική με τις διεργασίες εξόρυξης ή τις ειδικές χημικές διεργασίες.
- ❖ **Ευτροφισμός:** Ο ευτροφισμός συμβαίνει όταν προστίθενται θρεπτικά συστατικά στα υδάτινα συστήματα, προκαλώντας αύξηση της ανάπτυξης των φυκιών και των φυτών. Μεταξύ άλλων επιπτώσεων, η αύξηση της ανάπτυξης των φυκιών και των υδρόβιων φυτών μπορεί τελικά να οδηγήσει σε μειώσεις του διαλυμένου οξυγόνου στα υδάτινα σώματα, προκαλώντας το θάνατο ψαριών.
- ❖ **Ανθρώπινη υγεία (καρκινικοί και μη καρκινικοί ρύποι):** Παρόλο που έχουν προταθεί πολλές διαφορετικές μέθοδοι μοντελοποίησης και χαρακτηρισμού των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία κατά τη διάρκεια των ετών, οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία (που σχετίζονται με τον καρκίνο) συνήθως

αξιολογούν την αύξηση της νοσηρότητας που προκαλείται από την έκθεση σε ρύπους.

- ❖ **Ανθρώπινη υγεία (σωματίδια):** Η ατμοσφαιρική ρύπανση των σωματιδίων περιλαμβάνει σωματίδια και εκπομπές που προκαλούν σχηματισμό σωματιδίων μέσω δευτερογενών αντιδράσεων. Αυτά τα σωματίδια προκαλούν αναπνευστικά προβλήματα στους ανθρώπους και μπορούν να οδηγήσουν σε ασθένειες όπως το άσθμα, καθώς και σε αυξημένα ποσοστά θνησιμότητας. Τα σωματίδια σχετίζονται με τη χρήση καυσίμων (κυρίως πετρελαίου) σε πολλές διαδικασίες στον κύκλο ζωής του οδοστρώματος, αλλά είναι ιδιαίτερα σημαντικά στη φάση της χρήσης.
- ❖ **Εξάντληση του όζοντος:** Το στρατοσφαιρικό όζον προστατεύει την επιφάνεια της γης από την υπεριώδη ακτινοβολία. Ορισμένες ουσίες καταστρέφουν το στρατοσφαιρικό όζον και οδηγούν σε αυξημένη διέλευση από ακτινοβολία, η οποία μπορεί να αυξήσει τον καρκίνο του δέρματος και να βλάψει τα φυτά αλλά και κάποια υλικά που παράγονται από τον άνθρωπο (Bare 2012).
- ❖ **Φωτοχημικό νέφος:** Αναφέρεται στην αντίδραση που οδηγεί στο όζον της τροπόσφαιρας (O_3). Το O_3 σχηματίζεται μέσω σύνθετων αντιδράσεων μεταξύ πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) και οξειδίων του αζώτου (NO_x), παρουσία ηλιακού φωτός και βλάπτει τους ζώντες ιστούς σε ανθρώπους, ζώα και φυτά ενώ μπορεί να προκαλέσει επίσης βλάβη στους πνεύμονες του ανθρώπου και να μειώσει την παραγωγικότητα των φυτών (Bare 2002). Οι εκπομπές από την κυκλοφορία κατά τη χρήση αποτελούν τη σημαντικότερη συμβολή στο σχηματισμό φωτοχημικού νέφους.
- ❖ **Εξάντληση πόρων:** Η εξάντληση πόρων αναφέρεται συνήθως στη μείωση της διαθεσιμότητας ορυκτών ή μη ανανεώσιμων πόρων, αλλά μπορεί επίσης να περιλαμβάνει μειώσεις στη χρήση γης και νερού. Το LCA του οδοστρώματος σχετίζεται με την εξάντληση των πόρων όταν χρησιμοποιούνται καύσιμα, πετρέλαιο ή μέταλλα.

Ταξινόμηση

Η αντιστοίχιση των αποτελεσμάτων του LCI στις κατηγορίες επιπτώσεων θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα ακόλουθα, εκτός εάν αλλιώς απαιτείται από το στόχο ή το πεδίο εφαρμογής:

- ❖ Αντιστοίχιση κάθε αποτελέσματος του LCI αποκλειστικά σε μία κατηγορία επιπτώσεων.
- ❖ Προσδιορισμός των αποτελεσμάτων του LCI που αφορούν περισσότερες από μία κατηγορίες επιπτώσεων.

Χαρακτηρισμός

Ο υπολογισμός των αποτελεσμάτων των δεικτών (χαρακτηρισμός) περιλαμβάνει τη μετατροπή των αποτελεσμάτων του LCI σε κοινές μονάδες και την ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων που αντιστοιχούν στην ίδια κατηγορία επιπτώσεων. Αυτή η μετατροπή εκτελείται χρησιμοποιώντας παράγοντες χαρακτηρισμού και το αποτέλεσμα του υπολογισμού είναι ένας αριθμητικός δείκτης. Ωστόσο, εάν τα αποτελέσματα του LCI δεν είναι διαθέσιμα ή εάν τα δεδομένα είναι ανεπαρκούς ποιότητας για το LCIA και την επίτευξη του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης, απαιτείται επαναληπτική συλλογή δεδομένων ή προσαρμογή του στόχου και του πεδίου εφαρμογής.

Ο πίνακας 2-1 περιλαμβάνει τις κατηγορίες επιπτώσεων, τα περιβαλλοντικά στοιχεία που επηρεάζονται και τις μονάδες των δεικτών των κατηγοριών επιπτώσεων :

Πίνακας 2-1 Κατηγορίες επιπτώσεων

Κατηγορία επιπτώσεων	Περιβαλλοντικό στοιχείο που επηρεάζεται	Μονάδα δείκτη
Οξίνιση	Αέρας	kg SO ₂ eq
Υπερθέρμανση του πλανήτη	Αέρας	kg CO ₂ e
Οικοτοξικότητα	Αέρας, νερό και έδαφος	CTU _{eco} /kg
Ευτροφισμός	Αέρας και νερό	kg N eq
Ανθρώπινη υγεία (καρκινικοί / μη καρκινικοί ρύποι)	Αέρας, νερό και έδαφος	CTU _{cancer} /kg CTU _{noncancer} /kg
Ανθρώπινη υγεία (σωματίδια)	Αέρας	kg PM _{2.5} eq
Τρύπα του όζοντος	Αέρας	kg CFC-11 eq
Φωτοχημικό νέφος	Αέρας	kg O ₃ eq
Εξάντληση ορυκτών πόρων	Πρώτες ύλες	MJ surplus (πλεόνασμα)

Σημειώνεται ότι τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα 2-1 αφορούν τις περιβαλλοντικές κατηγορίες επιπτώσεων που περιλαμβάνονται στη μεθοδολογία TRACI (Bare 2012).

2.2.5 Ερμηνεία

Η ερμηνεία είναι η τελική φάση μιας μελέτης LCA και αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα (ISO 2006b):

- ❖ Προσδιορισμός των σημαντικών θεμάτων με βάση τα αποτελέσματα των φάσεων LCI και LCIA του LCA.
- ❖ Αξιολόγηση, εξετάζοντας την πληρότητα, την ευαισθησία, τη συνοχή και τη μεταβλητότητα (αβεβαιότητα) των αποτελεσμάτων των φάσεων αυτών που

ενδέχεται να έχουν αντίκτυπο (και να απαιτούν τροποποιήσεις) στο στόχο και στο πεδίο εφαρμογής, στην ανάλυση απογραφής και στην εκτίμηση των επιπτώσεων.

- ❖ Ανάπτυξη συμπερασμάτων, δήλωση περιορισμών και προτάσεων.

Ως πρώτο βήμα στη φάση της ερμηνείας, τα ευρήματα του LCI και του LCIA της μελέτης οργανώνονται και παρουσιάζονται για να εντοπίσουν τα σημαντικά ζητήματα σχετικά με το στόχο της μελέτης. Για μελέτες συγκριτικής αξιολόγησης, τα ευρήματα θα είναι μόνο για το LCI, ενώ για άλλες περιπτώσεις χρήσης θα είναι και για το επιλεγμένο σύνολο δεικτών επιπτώσεων. Η οργάνωση των πληροφοριών των LCI και LCIA θα πρέπει να χρησιμοποιεί γραφικές απεικονίσεις και συνοπτικούς πίνακες για να διευκρινιστούν οι περιοχές όπου υπάρχουν οι μεγαλύτερες επιπτώσεις. Οι πληροφορίες θα πρέπει να παρουσιάζονται κατά τρόπο που να επιτρέπει στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να κατανοούν τα αποτελέσματα και να εντοπίζουν τις κρίσιμες περιοχές στις οποίες θα επικεντρωθούν.

Η αξιολόγηση είναι το επόμενο βήμα της φάσης ερμηνείας και περιλαμβάνει τον έλεγχο της πληρότητας, της συνέπειας και της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων, καθώς και κάθε άλλου ελέγχου ή ανάλυσης που απαιτείται στο στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης. Αυτό γίνεται για να αυξηθεί η εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα και να τεκμηριωθεί η ισχύς και η αξιοπιστία των συμπερασμάτων και των συστάσεων.

Το τελευταίο βήμα στη φάση της ερμηνείας είναι η αναφορά των ευρημάτων και η διατύπωση συστάσεων για το ενδιαφερόμενο κοινό της μελέτης, ενώ τεκμηριώνονται και οι περιορισμοί της μελέτης LCA. Σε αυτό το στάδιο τα κύρια ευρήματα της μελέτης επανεξετάζονται με ιδιαίτερη προσοχή στον ορισμό του στόχου και του πεδίου εφαρμογής, έτσι ώστε οι συστάσεις να παρέχουν στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων τις σχετικές πληροφορίες για να λάβουν τεκμηριωμένη απόφαση. Οι περιορισμοί σε οποιαδήποτε φάση της μελέτης που ενδιαφέρουν τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων θα πρέπει επίσης να επαναδιατυπωθούν σε αυτό το βήμα (FHWA 2016).

2.3 Προσεγγίσεις για τρόπους εφαρμογής

Είναι γεγονός ότι οι έννοιες του LCA είναι νέες για πολλούς οργανισμούς και πιθανούς χρήστες. Τα παρακάτω βήματα μπορούν να ακολουθηθούν για να ξεκινήσουμε να συμπεριλαμβάνουμε τις έννοιες του LCA στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων, ακόμη και χωρίς να διεξάγουμε πλήρες LCA (Harvey et al. 2014):

1. Προσδιορισμός των ερωτημάτων που πρέπει να απαντηθούν και των συγκεκριμένων περιβαλλοντικών στόχων που πρέπει να επιτευχθούν. Σε πολλές περιπτώσεις, τα ερωτήματα αφορούν τον αντίκτυπο μιας αλλαγής στην πολιτική ή το σχεδιασμό ενός συγκεκριμένου έργου, σε σύγκριση με την τρέχουσα πρακτική.
2. Ορισμός των ορίων του συστήματος και προσδιορισμός των στοιχείων που είναι ίδια σε μια μελέτη σύγκρισης, ώστε να μην χρειάζεται να ληφθούν υπόψη στην ανάλυση.
3. Καθορισμός της λειτουργικής μονάδας και της προσέγγισης που απαιτείται, για την ανάλυση της αξιολόγησης μιας πολιτικής.
4. Προσδιορισμός των τύπων λειτουργιών και υλικών που συμβαίνουν και υπάρχουν στο σύστημα και καθορισμός του τρόπου με τον οποίο αλλάζουν οι τύποι και οι αριθμοί τους για τις επιλογές που εξετάζονται. Μια σύγκριση των μονάδων που χρησιμοποιούνται ή καταναλώνονται μπορεί να είναι αρκετή για να προσδιορίσει τα αποτελέσματα της προτεινόμενης αλλαγής στο σύστημα, ιδιαίτερα εάν αλλάξει μόνο ένας τύπος εισόδου ή εξόδου.
5. Προσδιορισμός των κατάλληλων περιβαλλοντικών βάσεων δεδομένων που απαιτούνται και συνέχεια με τις φάσεις LCI, LCIA και ερμηνείας του LCA όπως περιγράφηκε προηγουμένως.

Η ολοκλήρωση των πρώτων τεσσάρων βημάτων της διαδικασίας αυτής συχνά συμβάλλει στον προσδιορισμό του εάν πρέπει να ολοκληρωθεί ένα πλήρες LCA ή εάν είναι σαφές ότι μια εναλλακτική λύση θα έχει μειωμένο περιβαλλοντικό αντίκτυπο (Harvey et al. 2013).

2.4 Διεθνής πρακτική

Η τρέχουσα χρήση της LCA στον τομέα των οδοστρωμάτων είναι περιορισμένη και μόνο λίγοι οργανισμοί εφαρμόζουν το LCA με συνεπή τρόπο. Χάρη σε αυτούς υπάρχουν ορισμένα παραδείγματα που απεικονίζουν τον τρόπο με τον οποίο το LCA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς. Ορισμένα συγκεκριμένα παραδείγματα εφαρμογών LCA στα οδοστρώματα από φορείς στη Βόρεια Αμερική παρουσιάζονται παρακάτω (FHWA 2016):

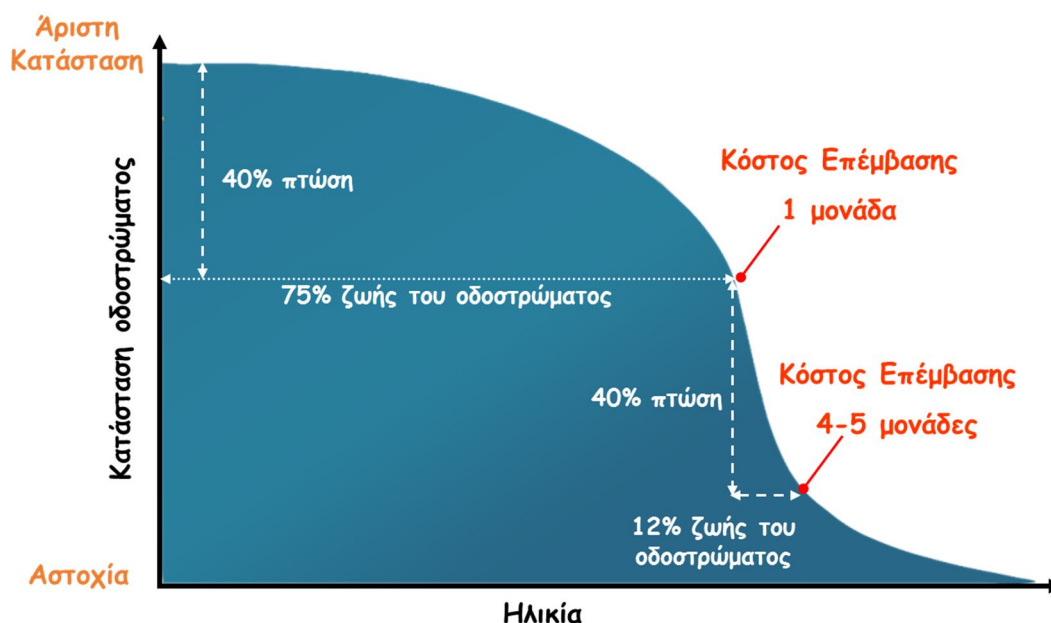
- ❖ Επιλογή υλικών ή δομικού σχεδιασμού του οδοστρώματος, σε συνδυασμό με ανάλυση κόστους του κύκλου ζωής.
- ❖ Αξιολόγηση των επιπτώσεων των πιθανών αλλαγών σε μια πολιτική.
- ❖ Ανάπτυξη εργαλείων LCA για παρακολούθηση ή λεπτομερούς LCA για το σχεδιασμό ενός έργου.
- ❖ Αξιολόγηση σεναρίων για αποφάσεις και στρατηγικές συντήρησης και αποκατάστασης σε επίπεδο δικτύου.
- ❖ Ανάπτυξη κατάρτισης περιβαλλοντικής δήλωσης για υλικά οδοστρώματος.

3 Στάδια του κύκλου ζωής του οδοστρώματος

3.1 Γενικά

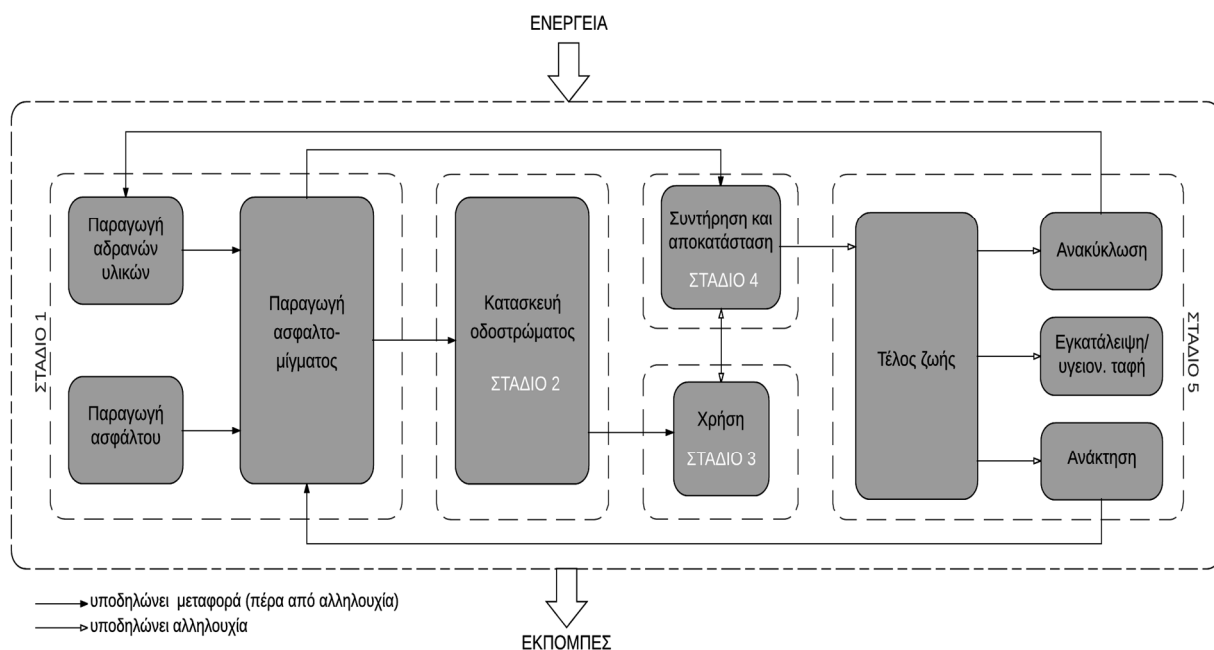
Τα οδοστρώματα έχουν έναν κύκλο ζωής, ξεκινούν από άριστη κατάσταση και με το πέρασμα των χρόνων καταλήγουν στο σημείο που θα πρέπει να αντικατασταθούν. Η διάρκεια ζωής των οδοστρωμάτων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το πόσο καλά κατασκευάζονται αρχικά, τις καιρικές και τοπικές συνθήκες, τον κυκλοφοριακό φόρτο που εξυπηρετούν και -το σημαντικότερο- πόσο καλά συντηρούνται. Ο καθορισμός του καταλληλότερου χρόνου επέμβασης για συντήρηση ή αποκατάστασή του οδοστρώματος αποτελεί κομβικό στοιχείο για τη σωστή διαχείριση τόσο ως προς το κόστος, όσο και ως προς την αποδοτικότητα του οδοστρώματος για τους χρήστες.

Ο βασικός σκοπός οποιασδήποτε μεθοδολογίας κύκλου ζωής είναι να αξιολογήσει ένα προϊόν ή μια υπηρεσία καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής τους, συμπεριλαμβανομένων τόσο των άμεσων, όσο και των έμμεσων επιπτώσεων. Είναι εξαιρετικά σημαντικό να γίνει αντιληπτό ότι καθίσταται αναγκαία η εξέταση των οδοστρωμάτων στο σύνολο του κύκλου ζωής τους και όχι η επιλεκτική θεώρηση μόνο κάποιων φάσεων αυτού. Το LCA είναι μια μέθοδος που προσφέρει αυτή την δυνατότητα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υιοθέτηση στρατηγικών μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των οδοστρωμάτων στη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, τη σύγκριση εναλλακτικών λύσεων αναλύοντας τους διαφορετικούς κύκλους ζωής αυτών, αλλά και τον εντοπισμό ευκαιριών βελτίωσης στο πλαίσιο του κύκλου ζωής του οδοστρώματος. Επιπλέον, η προσέγγιση ανάλυσης του κύκλου ζωής εξασφαλίζει ότι οι βραχυπρόθεσμες βελτιώσεις δε θα επιφέρουν μειονεκτήματα μακροπρόθεσμα και ότι οι έγκαιρες προληπτικές επεμβάσεις θα αποβούν αποτελεσματικότερες των καθυστερημένων επεμβάσεων (Εικόνα 3-1). Η υιοθέτηση μια μεθοδολογίας κύκλου ζωής, λοιπόν, είναι το κλειδί για την καθιέρωση μιας αποτελεσματικής προσέγγισης με σκοπό την επίτευξη περιβαλλοντικών στόχων και όχι μόνο στον τομέα των οδοστρωμάτων.



Εικόνα 3-1 Κύκλος ζωής του οδοστρώματος και χρόνος-κόστος επέμβασης

Ο κύκλος ζωής των οδοστρωμάτων σύμφωνα με τη μεθοδολογία του LCA χωρίζεται σε πέντε διακριτά στάδια (ή φάσεις): στην παραγωγή υλικών, στην κατασκευή, στη χρήση, στη συντήρηση και στο τέλος ζωής τους (Santero et al. 2010). Κάθε στάδιο αποτελείται από διάφορα στοιχεία, καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει μια μοναδική αλληλεπίδραση μεταξύ των οδοστρωμάτων και του περιβάλλοντος. Αυτά τα στοιχεία αντιπροσωπεύουν τόσο τις άμεσες διαδικασίες (πχ. καύση καυσίμων) με τις οποίες το οδόστρωμα επιδρά στο περιβάλλον, όσο και τις έμμεσες διαδικασίες (πχ. παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή παραγωγή καυσίμων). Μια σχηματική απεικόνιση των σταδίων του κύκλου ζωής με κάποια από τα στοιχεία τους φαίνεται στο σχήμα της εικόνας 3-2.



Εικόνα 3-2 Στάδια κύκλου ζωής του οδοστρώματος

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα 3-2, πέρα από τις λογικές σχέσεις αλληλουχίας που συνδέουν όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του οδοστρώματος, παρατηρούνται και σχέσεις μεταφοράς μεταξύ ορισμένων σταδίων που περιλαμβάνουν τις διαδικασίες μεταφοράς υλικών και εξοπλισμού και πρέπει να λαμβάνονται επίσης υπόψη για τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις.

3.2 Παραγωγή υλικών

Ο κύκλος ζωής των οδοστρωμάτων αρχίζει με την εξόρυξη των πρώτων υλών και περιλαμβάνει κάθε βήμα έως το μετασχηματισμό τους σε υλικά οδοστρώματος, καθώς επίσης και κάθε απαραίτητη διαδικασία μεταφοράς που πραγματοποιείται μεταξύ των εγκαταστάσεων. Τα αφαλτομίγματα αποτελούνται κυρίως από φυσικά αδρανή και συνδετικό υλικό, αν και άλλα υλικά μπορεί επίσης να εμφανίζονται σε μικρότερη έκταση. Τα διάφορα υλικά που συνθέτουν το ασφαλτόμιγμα κοσκινίζονται, ξηραίνονται και αναμιγνύονται στη μονάδα παραγωγής. Οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις που συνδέονται με αυτό το στάδιο προκύπτουν από τις εργασίες εξόρυξης, την παραγωγή των υλικών, τη μεταφορά τους προς και από το εργοστάσιο, τη χρήση υποδομών και εξοπλισμού, την κατανάλωση καυσίμων και

ηλεκτρικής ενέργειας και τις εκπομπές στον αέρα από τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται.

Γίνεται κατανοητό ότι η μοντελοποίηση του σταδίου παραγωγής υλικών απαιτεί η κάθε εισροή υλικού στο σύστημα οδοστρώματος να χαρακτηρίζεται από ένα LCI που περιλαμβάνει τις ακόλουθες διαδικασίες: απόκτηση πρώτων υλών, παραγωγή υλικών (όλες οι διεργασίες μετασχηματισμού από πρώτη ύλη σε προϊόν), διαδικασίες ανάμιξης (σε εγκαταστάσεις ασφάλτου ή σκυροδέματος) και μεταφορά πρώτων υλών ή τελικών υλικών μεταξύ των σταδίων. Όπως αναμένεται σε ένα ολοκληρωμένο LCA, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τόσο οι άμεσες διαδικασίες (πχ. κατανάλωση ενέργειας), όσο και οι έμμεσες (πχ. παραγωγή ενέργειας).

Μια έρευνα των Häkkinen και Mäkelä (1996) αναφέρει ότι οι αναλογίες των αερίων του θερμοκηπίου από τα στάδια παραγωγής υλικών και κατασκευής θεωρώντας ξεχωριστά την καθυστέρηση της κυκλοφορίας ήταν 96,6%, 2,1% και 1,3%, αντίστοιχα, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα στάδια υλικών και κατασκευής των εύκαμπτων οδοστρώματων. Σύμφωνα με τον Chan (2007), οι αναλογίες των αερίων θερμοκηπίου για εύκαμπτα οδοστρώματα που εκπέμπονται από τα στάδια παραγωγής υλικών, κατασκευής με ξεχωριστή θεώρηση της καθυστέρησης της κυκλοφορίας ήταν 58,3%, 3,5% και 38% αντίστοιχα. Πολλοί παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα ενός LCA και είναι πιθανό να εξηγήσουν αυτές τις αποκλίσεις, συμπεριλαμβανομένων των ορίων του συστήματος, της εγκυρότητας και της ποιότητας των δεδομένων απογραφής του κύκλου ζωής, της τοποθεσίας, της κυκλοφορίας και της διάρκειας της ανάλυσης (Kang 2013).

Όπως φαίνεται, λοιπόν, το στάδιο της παραγωγής υλικών διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο σε σχέση με τα υπόλοιπα στάδια όσον αφορά στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του κύκλου ζωής των οδοστρώματων. Αυτό απέδειξε και μια πρόσφατη μελέτη LCA των Kang et al. (2014) στην οποία βρέθηκε ότι η φάση παραγωγής υλικών είχε 19 με 29 φορές μεγαλύτερη εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου και 21 με 34 φορές μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας από τη φάση κατασκευής συμπεριλαμβανομένης και της καθυστέρησης της κυκλοφορίας (Kang et al. 2014).

3.3 Κατασκευή

Η κατασκευή ενός δρόμου περιλαμβάνει ποικίλες διαδικασίες: εκκαθάριση χώρου, εκσκαφή, κατασκευή των στρώσεων υπόβασης και βάσης, ασφαλτόστρωση και προσθήκη των διαφόρων ειδών εξοπλισμού που απαιτούνται στους δρόμους (οδικός φωτισμός, πινακίδες, μπάρες ασφαλείας κτλ.). Οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις που σχετίζονται με αυτό το στάδιο οφείλονται στην κατανάλωση καυσίμων και στις εκπομπές στον αέρα από τα μηχανήματα, αλλά και τις ατμοσφαιρικές εκπομπές και την έκπλυση ρύπων από το οδόστρωμα κατά την κατασκευή του.

Η μοντελοποίηση αυτού του σταδίου απαιτεί να λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθες διαδικασίες: μεταφορά εξοπλισμού από και προς το σημείο του έργου, χρήση του εξοπλισμού στην περιοχή του έργου, μεταφορά υλικών από την εγκατάσταση, μεταφορά υλικών από την περιοχή του έργου για τελική διάθεση, επαναχρησιμοποίηση ή ανακύκλωση, ενέργεια που χρησιμοποιείται επί τόπου (π.χ. φωτισμός για νυχτερινή κατασκευή) και μεταβολές στη ροή της κυκλοφορίας, συμπεριλαμβανομένων των αλλαγών της ταχύτητας στη ζώνης εργασίας και της καθυστέρησης και των εκτροπών, κατά περίπτωση (Harvey et al. 2014). Το τελευταίο από τα παραπάνω στοιχεία, αν και παραλείπεται στα περισσότερα LCAs, ενδεχομένως να έχει πολύ σημαντική επίδραση στις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις του σταδίου κατασκευής, γι' αυτό και θα γίνει μια πιο εκτενής αναφορά σε αυτό.

Καθυστέρηση της κυκλοφορίας: προκαλείται λόγω του κλεισίματος των λωρίδων ή και ολόκληρων οδών που απαιτείται για την κατασκευή και τη συντήρηση ενός οδοστρώματος. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται με την καθυστέρηση της κυκλοφορίας εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του έργου και της τοποθεσίας αυτού. Για μικρά και γρήγορα έργα σε δρόμους χαμηλής κυκλοφορίας, οι επιπτώσεις είναι πιθανό να είναι αμελητέες. Αντίθετα, σε μεγάλους αυτοκινητόδρομους που υποστηρίζουν εκατοντάδες χιλιάδες οχήματα ημερησίως, η επιπλέον κατανάλωση καυσίμου και οι επακόλουθες εκπομπές αερίων από τα αυτοκίνητα που μένουν για σημαντικό χρονικό διάστημα σε αδράνεια μπορούν

εύκολα να αποτελέσουν ένα επιπλέον ή ακόμη και κυρίαρχο στοιχείο του κύκλου ζωής του οδοστρώματος (Santero et al. 2010).

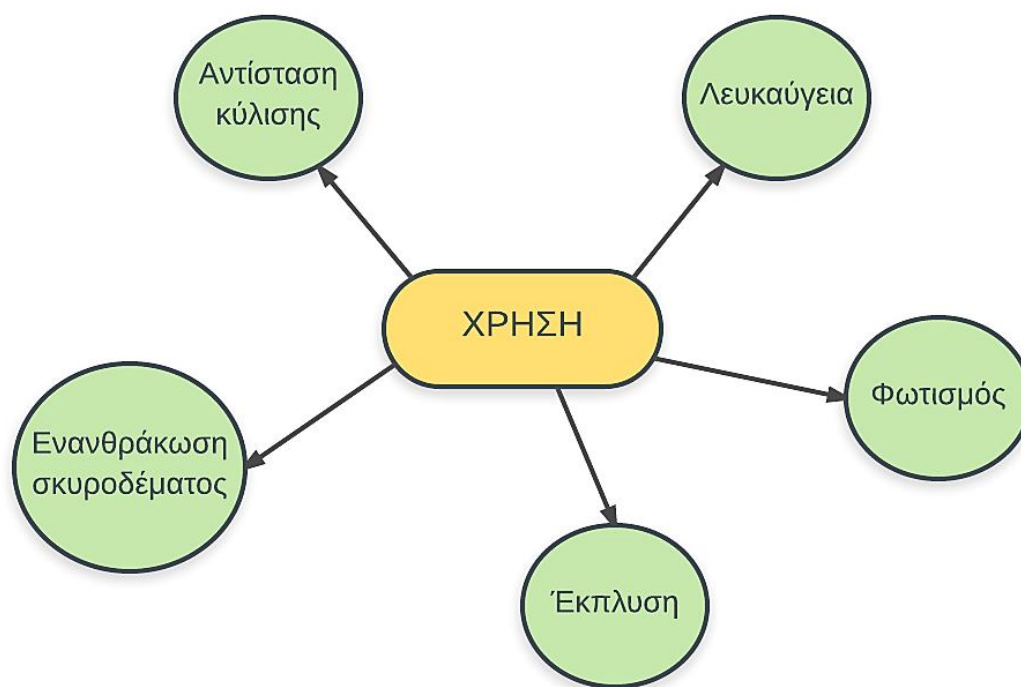
Ο αντίκτυπος της καθυστέρησης της κυκλοφορίας μπορεί να θεωρηθεί ως μια δύσκολα προσδιορίσιμη λειτουργία που εξαρτάται από τις ακόλουθες παραμέτρους (Santero et al. 2010):

- ❖ Κυκλοφοριακός φόρτος
 - Επιβατικά οχήματα
 - Βαρέα οχήματα
- ❖ Ωριαία κατανομή της κυκλοφορίας
- ❖ Διάρκεια του έργου
- ❖ Μήκος της ζώνης εργασίας
- ❖ Χρονοδιάγραμμα κλεισίματος λωρίδων ή οδών
 - Ώρες της ημέρας
 - Ημέρες της εβδομάδας
- ❖ Διαμόρφωση κλεισίματος (π.χ. αριθμός λωρίδων που κλείνονται)

Οι περιορισμένες πληροφορίες σχετικά με την καθυστέρηση της κυκλοφορίας και τη συνάφειά της στο πλαίσιο του κύκλου ζωής του οδοστρώματος καθιστούν δύσκολη τη γενίκευση των επιπτώσεών της. Σε οδούς με σημαντική κυκλοφορία, όπου η ζήτηση είναι κοντά στην ικανότητα, η καθυστερημένη κυκλοφορία διαδραματίζει ενδεχομένως πολύ σημαντικό ρόλο στο συνολικό αντίκτυπο του κύκλου ζωής. Αντίθετα, σε οδούς χαμηλής κυκλοφορίας με πλεονάζουσα χωρητικότητα, η καθυστέρηση στην κυκλοφορία θα έχει πιθανώς ελάχιστη σημασία σε σχέση με άλλα στοιχεία του κύκλου ζωής. Λόγω αυτής της ιδιαιτερότητας, δεν δικαιολογούνται ευρεία συμπεράσματα σχετικά με την καθυστέρηση της κυκλοφορίας και τον κύκλο ζωής του οδοστρώματος. Αντ' αυτού, η καθυστέρηση της κυκλοφορίας πρέπει να εξεταστεί για κάθε LCA οδοστρώματος ανεξάρτητα, για να προσδιοριστεί η συνάφεια του, δεδομένων των λεπτομερειών του έργου και του πεδίου εφαρμογής.

3.4 Χρήση

Το στάδιο χρήσης περιλαμβάνει όλα όσα συμβαίνουν ενώ το οδόστρωμα είναι σε λειτουργία και μπορούν να αποδοθούν άμεσα στις ιδιότητες και στα χαρακτηριστικά αυτού. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία του LCA τα στοιχεία αυτά, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3-3, είναι τα εξής:



Εικόνα 3-3 Στάδιο χρήσης και οι περιβαλλοντικές συνιστώσες του

Αντίσταση κύλισης: Περιγράφει την απώλεια ενέργειας του οχήματος που σχετίζεται με την αλληλεπίδραση οδοστρώματος-οχήματος και επηρεάζει άμεσα την κατανάλωση καυσίμων του οχήματος. Τόσο η δομή του οδοστρώματος, όσο και η ομαλότητά του, αλλά και η επιφανειακή υφή του (μακρουφή και μικρουφή), επηρεάζουν την αντίσταση κύλισης έχοντας μεγάλο αντίκτυπο στην κατανάλωση καυσίμων της κυκλοφορίας. Η κατανάλωση καυσίμων λόγω της αλληλεπίδρασης οδοστρώματος-οχήματος μπορεί να αντιπροσωπεύει το 72% των συνολικών επιπτώσεων της φάσης χρήσης σε οδούς μεγάλης κυκλοφορίας (Taylor et al. 2000). Πολύ μικρές αλλαγές στην κατανάλωση καυσίμων της κυκλοφορίας θα έχουν πολύ μεγάλη επίδραση στις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός οδοστρώματος

(Santero and Horvath, 2009). Ωστόσο, οι μηχανικές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών οδοστρώματος και της αντίστασης κύλισης δεν έχουν ακόμη οριστεί, καθιστώντας σχεδόν αδύνατη την ενσωμάτωσή τους στις διαδικασίες λήψης περιβαλλοντικών αποφάσεων μέσω της χρήσης τους σε ένα LCA.

Υπάρχουν εμπειρικά δεδομένα που ποσοτικοποιούν την αντίσταση κύλισης σε κάποια σενάρια, αλλά αυτές οι πληροφορίες δεν επαρκούν για να περιγράψουν συνολικά την αλληλεπίδραση οδοστρώματος-οχήματος για το πλήθος πιθανών συνθηκών λειτουργίας. Παρ'όλα αυτά, οι διαθέσιμες πληροφορίες παρέχουν κάποια κατεύθυνση και κάποιες προκαταρκτικές αριθμητικές σχέσεις της επίδρασης του οδοστρώματος στην κατανάλωση καυσίμων.

Ο αντίκτυπος της αντίστασης κύλισης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα επίπεδα κυκλοφορίας και την κατανομή των οχημάτων, επομένως οι οδοί μεγάλου κυκλοφοριακού όγκου με μεγάλη κυκλοφορία φορτηγών οχημάτων θα επηρεαστούν πολύ περισσότερο από τις οδούς μικρού κυκλοφοριακού όγκου που μεταφέρουν λίγα φορτηγά. Για το λόγο αυτό, η συμβολή της αντίστασης κύλισης στις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις θα ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό από οδόστρωμα σε οδόστρωμα, με βάση τις επιμέρους συνθήκες κυκλοφορίας. Παρακάτω περιγράφονται οι δύο σημαντικότερες συνιστώσες της αντίστασης κύλισης, που επηρεάζουν περισσότερο σύμφωνα με διάφορες έρευνες την κατανάλωση καυσίμων των οχημάτων.

Δομή οδοστρώματος: Η επίδραση της δομής του οδοστρώματος στην κατανάλωση καυσίμων σχετίζεται με την ιξωδοελαστική ιδιότητα της ασφάλτου (Beuving et al. 2004). Το επιχείρημα βασίζεται στην αρχή ότι τα εύκαμπτα οδοστρώματα αποκλίνουν καθώς τα οχήματα περνούν από πάνω τους, απορροφώντας έτσι ενέργεια που διαφορετικά θα χρησιμοποιούνταν για την επιτάχυνση του οχήματος (Zaniewski 1989). Έχει προταθεί ότι τα δύσκαμπτα οδοστρώματα εμποδίζουν την εμφάνιση του συγκεκριμένου φαινομένου, όμως υπάρχουν πολλές επιφυλάξεις και περιορισμοί που σχετίζονται με τις εν λόγω μελέτες. Ένα αξιοσημείωτο μειονέκτημα της υπάρχουσας βιβλιογραφίας σχετικά με το θέμα αυτό είναι η εστίαση στη σύγκριση μεταξύ ασφάλτου και

σκυροδέματος ως προς την επιφανειακή στρώση και όχι στην ίδια τη δομή του οδοστρώματος. Η επίδραση της δομής του οδοστρώματος στην αντίσταση κύλισης αφορά ολόκληρη τη δομή, όχι μόνο τον τύπο υλικού της επιφανειακής στρώσης. Τα πάχη και οι ιδιότητες των υλικών (π.χ. δυσκαμψίες) κάθε στρώματος που περιλαμβάνει η δομή θα επηρεάσουν την παραμόρφωση ενός οδοστρώματος κάτω από ένα δεδομένο φορτίο (Santero 2009). Υψηλότερη παραμόρφωση έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη αντίσταση κύλισης, καθώς η ενέργεια που κανονικά θα χρησιμοποιούνταν για την επιτάχυνση του οχήματος χρησιμοποιείται για την παραμόρφωση του οδοστρώματος. Συνολικά, οι υπάρχουσες πληροφορίες έχουν συνδέσει την κατανάλωση καυσίμων με τη δομή του οδοστρώματος, αλλά η ακριβής μηχανική σχέση παραμένει απροσδιόριστη. Η έλλειψη αριθμητικών σχέσεων που θα συσχετίζει τη δομή του οδοστρώματος και την κατανάλωση καυσίμων έχει αναμφίβολα συμβάλει στην απουσία εκτιμήσεων της δομής του οδοστρώματος στις αναλύσεις της φάσης χρήσης των υφιστάμενων LCA οδοστρώματος. Ωστόσο, δεδομένης της ενδεχόμενης επιρροής της στα αποτελέσματα, η μελλοντική ένταξή της ενδέχεται να μεταβάλλει σημαντικά τα συμπεράσματα. Η αριθμητική σχέση μεταξύ της δομής του οδοστρώματος και της κατανάλωσης καυσίμων πρέπει να καθοριστεί πριν συμπεριληφθεί σε οποιαδήποτε ανάλυση, αλλά πρέπει να γίνεται συζήτηση για τον πιθανό αντίκτυπό της έως ότου υπάρξει μια τέτοια σχέση (Santero et al.2010).

Ομαλότητα: Η ομαλότητα είναι συνυφασμένη με την κατατομή της επιφάνειας του οδοστρώματος. Με τον όρο ομαλότητα αναφερόμαστε κυρίως στην κατά μήκος επιπεδότητα. Σαν έλλειψη ομαλότητας ορίζεται το σύνολο των κατά μήκος αποκλίσεων του οδοστρώματος από την πραγματική επίπεδη επιφάνεια, με χαρακτηριστικές διαστάσεις που επηρεάζουν τη δυναμική συμπεριφορά των οχημάτων, τη δυναμική των φορτίσεων των οδοστρωμάτων και την ποιότητα κύλισης. Η έκφραση της ομαλότητας ενός οδοστρώματος γίνεται με τη χρήση διάφορων δεικτών. Ο ευρύτερα διαδεδομένος και χρησιμοποιούμενος δείκτης είναι ο διεθνής δείκτης ομαλότητας IRI (International Roughness Index) εκφρασμένος σε μονάδες κλίσης (π.χ. m/km) (Λοΐζος και Πλατή 2015). Σύμφωνα

με τους Calwell (2003) και Evans et al. (2009), μείωση της κατανάλωσης καυσίμων κατά 2% μπορεί να επιτευχθεί με 10% μείωση στην αντίσταση κύλισης που προκαλείται από την ομαλότητα της επιφάνειας. Το αμερικανικό Εθνικό Κέντρο Τεχνολογίας Ασφάλτου (National Center for Asphalt Technology-NCAT) ανέφερε στα αποτελέσματα δοκιμών του στην Αλαμπάμα, ότι για μια αλλαγή στο IRI από 1,08 m/km σε 1,18 m/km, η κατανάλωση καυσίμων αυξήθηκε κατά 2% (Hugo and Martin 2004). Μια περιορισμένη έρευνα που πραγματοποιήθηκε από το Πανεπιστήμιο της Βόρειας Φλόριντα μέτρησε το δείκτη IRI και την κατανάλωση καυσίμων σε πέντε αυτοκινητόδρομους της Φλόριντα και η προκαταρκτική έκθεση υπολόγισε αύξηση της κατανάλωσης καυσίμων κατά 1,3% για αύξηση του δείκτη IRI κατά 10% (Jackson 2004). Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικοί περιορισμοί στην εν λόγω έρευνα και σύμφωνα με αυτούς που την διεξήγαγαν τα αποτελέσματα επιδιώκουν να αποδείξουν μόνο ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του δείκτη IRI και της κατανάλωσης καυσίμων και όχι να προσδιοριστεί η ακριβής αριθμητική σχέση. Παρά τις όποιες έρευνες, τα υπάρχοντα δεδομένα δεν επαρκούν για τον καθορισμό ενός αξιόπιστου μαθηματικού προτύπου για το φαινόμενο. Στον κύκλο ζωής του οδοστρώματος, η ομαλότητα αποτελεί σημαντικό ζήτημα όταν αποφασίζεται ένα πρόγραμμα συντήρησης, όπου πρέπει να δοθεί έμφαση σε επιφανειακά χαρακτηριστικά φιλικά ως προς την κατανάλωση καυσίμων. Όπως και με τη δομή του οδοστρώματος, η ομαλότητα δεν ενσωματώνεται στις περισσότερες υπάρχουσες μελέτες LCA οδοστρώματος, λόγω της έλλειψης επαρκών πληροφοριών για το θέμα. Η επίδραση της ομαλότητας στα αποτελέσματα μπορεί να είναι σημαντική και πρέπει τουλάχιστον να συζητηθεί ποιοτικά, εάν δεν είναι εφικτή η ποσοτική εκτίμηση.

Λευκαύγεια: Η ικανότητα μιας δεδομένης επιφάνειας να ανακλά το φως - ή με άλλα λόγια την ενέργεια – καθορίζεται από την λευκαύγεια (albedo) αυτής. Η λευκαύγεια εκφράζεται ως ο λόγος της ανακλώμενης ηλιακής ενέργειας προς τη συνολική ηλιακή ενέργεια που προσλαμβάνεται και κυμαίνεται από 0 (πλήρης απορρόφηση) έως 1 (πλήρης ανάκλαση). Καθώς η ακτινοβολία του ήλιου φτάνει σε ένα οδόστρωμα, έχει τη δυνατότητα είτε να απορροφηθεί από το οδόστρωμα, είτε να

ανακλαστεί πίσω στην ατμόσφαιρα. Η βιβλιογραφία έχει δείξει ότι τόσο η ηλικία του οδοστρώματος, όσο και ο τύπος επιφάνειας έχουν επιρροή στη λευκαύγεια. Το αναμενόμενο εύρος λευκαύγειας για ένα τυπικό ασφαλτικό οδόστρωμα είναι 0,05-0,20, ενώ το εύρος για ένα τυπικό δύσκαμπτο οδόστρωμα κυμαίνεται από 0,25 έως 0,46 (Pomerantz et al. 1997, 2000a,b, Pomerantz and Akbari 1998, Golden and Kaloush 2006, Marceau and VanGeem 2007). Τα μεγάλης ηλικίας ασφαλτικά οδοστρώματα τείνουν να έχουν υψηλότερη λευκαύγεια, ενώ το αντίθετο ισχύει για τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα. Τα οδοστρώματα με υψηλότερη λευκαύγεια συμβάλλουν στην άμβλυνση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής μέσω της μείωσης της ποσότητας της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από την επιφάνεια της Γης, αλλά και της μείωσης της επίδρασης του φαινομένου της αστικής θερμονησίδας (Santero and Horvath 2009).

Το φαινόμενο της αστικής θερμονησίδας παρατηρείται σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, όπου η εισερχόμενη ακτινοβολία που απορροφάται από τα οδοστρώματα λόγω της μικρής ανακλαστικότητάς τους συμβάλλει στην αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Η αυξημένη θερμοκρασία με τη σειρά της αυξάνει τη ζήτηση ενέργειας για αστικές συσκευές ψύξης και επιταχύνει έτσι το σχηματισμό φωτοχημικού νέφους (Akbari et al. 2001). Σε μεγάλες πόλεις έχει μετρηθεί ότι η αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1°C οδηγεί σε αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας κατά 2-4%, όταν οι θερμοκρασίες υπερβαίνουν τους 15-20°C (Akbari et al. 1992).

Η επίδραση της λευκαύγειας δεν εξετάζεται στα περισσότερα από τα υπάρχοντα LCAs οδοστρώματος. Ωστόσο, τα οδοστρώματα σε αστικές περιοχές με υψηλές θερμοκρασίες το καλοκαίρι μπορεί να ωφεληθούν σημαντικά από την αύξηση της λευκαύγειας. Οι Yu και Lu (2013), ανέπτυξαν ένα μετεωρολογικό μοντέλο που μετέφραζε την επίδραση της λευκαύγειας σε εκπομπές CO₂ και απέδειξαν ότι η επίδραση της λευκαύγειας στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του οδοστρώματος μόνο αμελητέα δεν είναι. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη η εκτενέστερη έρευνα γύρω από το φαινόμενο αυτό.

Ενανθράκωση σκυροδέματος: Ακριβώς όπως το CO₂ απελευθερώνεται σαν αποτέλεσμα της διαδικασίας χημικής διάσπασης κατά τη διάρκεια της παραγωγής τσιμέντου, έτσι και απορροφάται από το σκυρόδεμα κατά τη διάρκεια ζωής του σαν αποτέλεσμα της αντίστροφης αντίδρασης, δηλαδή της ενανθράκωσης. Η ενανθράκωση αποκτά σημασία στον κύκλο ζωής του οδοστρώματος, όταν το σκυρόδεμα συνθλίβεται και μένει εκτεθειμένο για μια χρονική περίοδο πριν από την ανακύκλωση ή την τελική διάθεση (Pade and Guimaraes 2007). Η ενανθράκωση σκυροδέματος συμπεριλαμβάνεται ποσοτικά στην έρευνα των Häkkinen και Mäkelä (1996), τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζουν μια οριακή αλλά όχι ασήμαντη συμβολή στον κύκλο ζωής του οδοστρώματος. Ο Stripple (2001) συζητά επίσης την ενανθράκωση, αλλά τελικά αποφασίζει να μην την συμπεριλάβει στους υπολογισμούς του CO₂ με τον ισχυρισμό ότι μόνο μια μικρή ποσότητα θα απομονωθεί κατά τη διάρκεια της περιόδου ανάλυσης των 40 ετών. Σχεδόν όλες οι υπόλοιπες υπάρχουσες μελέτες LCA οδοστρωμάτων δεν λαμβάνουν υπόψη την ενανθράκωση. Η κατανόησή μας για την ενανθράκωση βελτιώνεται, αλλά η έρευνα του φαινομένου είναι τέτοια ώστε αυτή να μπορεί να συμπεριληφθεί ποσοτικά σε LCA οδοστρωμάτων, αν και με συνοδευτική ανάλυση αβεβαιότητας (Santero et. al 2010). Ο αντίκτυπος της ενανθράκωσης θα μπορούσε να είναι σημαντικός, ειδικά αν το σκυρόδεμα συνθλίβεται στο τέλος της ζωής του.

Φωτισμός οδοστρώματος: Ο ηλεκτρικός φωτισμός σχετίζεται με τον κύκλο ζωής του οδοστρώματος, μόνο εάν το ίδιο το οδόστρωμα επηρεάζει τη ζήτηση ενέργειας που απαιτείται για τον επαρκή φωτισμό του. Η περιορισμένη διαθέσιμη, δημοσιευμένη έρευνα σχετικά με αυτό το θέμα υποδεικνύει ότι τα οδοστρώματα μπορούν πράγματι να επηρεάσουν τις απαιτήσεις φωτισμού. Ο τύπος υλικού, η ηλικία, τα αδρανή και άλλοι παράγοντες επηρεάζουν την ανακλαστικότητα του φωτός, επηρεάζοντας έτσι την ισχύ φωτισμού που απαιτείται για τον κατάλληλο φωτισμό ενός δεδομένου οδοστρώματος. Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι ο αντίκτυπος της ζήτησης ενέργειας φωτισμού στον κύκλο ζωής του οδοστρώματος θα είναι πιθανώς μικρότερος, καθώς υιοθετούνται πιο αποδοτικές τεχνολογίες φωτισμού (Santero 2011a).

Έκπλυση: Τα οδοστρώματα έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν δυσμενώς τα υπόγεια ύδατα και το έδαφος μέσω της έκπλυσης ρύπων. Οι πιο συχνά διερευνημένοι ρύποι είναι τα βαρέα μέταλλα και οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), οι οποίοι είναι καρκινογόνοι. Τα μέταλλα που υπάρχουν τόσο σε υλικά από σκυρόδεμα, όσο και σε ασφατικά υλικά, αλλά και οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες που συναντώνται μόνο σε ασφατικά υλικά θα μπορούσαν να παρουσιάσουν ποικίλες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, είτε απευθείας μέσω του πόσιμου νερού, είτε έμμεσα μέσω καλλιεργειών ψαριών ή άλλων συστημάτων που έρχονται σε επαφή με το μολυσμένο νερό (Santero et. al 2010).

Η υπάρχουσα βιβλιογραφία συμφωνεί ότι η έκπλυση ρύπων από τα υλικά οδοστρωμάτων δε θέτουν κάποια αξιοσημείωτη απειλή για το περιβάλλον. Έρευνες του Kriech (1990, 1992) και των Brandt and De Groot (2001) προσδιόρισαν τα επίπεδα πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (PAH) πολύ κάτω από τα κατώτερα όρια συγκέντρωσης που καθορίζονται από τους Townsend and Brantley (1998). Μελέτες του Kriech (1990, 1992) και Vashisth et al. (1998) παρουσιάζουν συγκεντρώσεις μετάλλων κάτω των κατώτερων ορίων του Οργανισμού Προστασίας του Περιβάλλοντος (US EPA 2004) για το πόσιμο νερό. Οι Azizian et al. (2005) και Marion et al. (2005) καταλήγουν σε παρόμοια συμπεράσματα σχετικά με τις ασήμαντες επιπτώσεις της έκπλυσης των υλικών οδοστρώματος στην υδρόβια τοξικότητα.

Μολονότι δεν είναι αποδεδειγμένο, μια πιθανή εξαίρεση αποτελεί ο κίνδυνος έκπλυσης από οδοστρώματα που περιέχουν ανακυκλώσιμα υλικά. Το ανακυκλωμένο ασφατικό οδόστρωμα (RAP) προκαλεί κάποια ανησυχία λόγω της έκθεσης σε καυσαέρια, λιπαντικά έλαια, βενζίνη, καύσιμο ντίζελ και σωματίδια ελαστικών κατά τη διάρκεια της αρχικής του λειτουργικής ζωής (Brantley and Townsend, 1999). Η βιβλιογραφία, ωστόσο, δεν είναι σαφής ως προς τη σοβαρότητα του δυνητικού κινδύνου για την υγεία από τη χρήση και την αποθήκευση του RAP. Οι Brantley and Townsend (1999) και Legret et al. (2005) διαπιστώνουν ότι τα οδοστρώματα που χρησιμοποιούν RAP εκπέμπουν μεν υψηλότερα επίπεδα ρύπων από τα αντίστοιχα συμβατικά υλικά σχετικά με την

έκπλυση, αλλά εξακολουθούν να μην αποτελούν σοβαρή περιβαλλοντική απειλή. Λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση μεταξύ των υλικών του οδοστρώματος και του φαινομένου της έκπλυσης, υπάρχει μικρό κίνητρο να συμπεριληφθεί αυτή η συνιστώσα στα περισσότερα LCAs οδοστρωμάτων αυτή τη στιγμή. Αν και τα ανακυκλώσιμα υλικά μπορεί να θέτουν πράγματι λίγο μεγαλύτερο κίνδυνο, η αβεβαιότητα και η γενική διαφωνία στη βιβλιογραφία δεν υποστηρίζει τίποτα περισσότερο από την ποιοτική συμπερίληψη της έκπλυσης στα LCAs. Απαιτείται μελλοντική έρευνα για τον καλύτερο χαρακτηρισμό της δυνατότητας έκπλυσης των διαφόρων υλικών οδοστρωμάτων πριν την πραγματοποίηση ακριβών ποσοτικών αναλύσεων.

Συμπερασματικά, επειδή τα οδοστρώματα παραμένουν σε λειτουργία για πολλά χρόνια και εξυπηρετούν εκατομμύρια οχήματα, τα φαινόμενα της φάσης της χρήσης πιθανώς να είναι ο κυρίαρχος παράγοντας ενός LCA οδοστρώματος. Μια έρευνα που είχε ως σκοπό την ανάδειξη της σημασίας του σταδίου της χρήσης ως προς τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός οδοστρώματος έδειξε ότι η φάση χρήσης μπορεί να συμβάλει σχεδόν στο 60% της περιβαλλοντικής επίπτωσης του κύκλου ζωής του οδοστρώματος σε υπεραστικές οδούς και ότι η αλληλεπίδραση οδοστρώματος-οχήματος (Pavement Vehicle Interaction ή PVI) είναι το κυρίαρχο στοιχείο στη φάση χρήσης (Xu et al. 2015). Οι Araújo et al. (2014) συγκρίνοντας τα στάδια χρήσης και κατασκευής αναφέρουν ότι η κατανάλωση ενέργειας που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια της φάσης χρήσης ήταν περίπου 700 φορές υψηλότερη από αυτή της φάσης κατασκευής. Οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (CO_2 , CH_4 και N_2O) και NO_x κατά τη φάση χρήσης ήταν περισσότερο από 1000 φορές υψηλότερες από αυτές της κατασκευής οδοστρωμάτων. Οι εκπομπές SO_2 κατά τη διάρκεια της φάσης χρήσης ήταν, κατά μέσο όρο, 300 φορές υψηλότερες από αυτές που απελευθερώθηκαν κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

Παρ' όλα αυτά η φάση της χρήσης χαρακτηρίζεται από το οξύμωρο γεγονός ότι αν και έχει πιθανώς τη μεγαλύτερη επίδραση στο περιβάλλον είναι η λιγότερο ερευνημένη από τις φάσεις του κύκλου ζωής με αποτέλεσμα συχνά να παραλείπεται από τα LCAs οδοστρωμάτων που διεξάγονται. Τα χαρακτηριστικά

στοιχεία του σταδίου της χρήσης δεν είναι προς το παρόν καλά ποσοτικοποιημένα σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία και συνεπώς, υπάρχει σημαντική αβεβαιότητα ως προς την επίδρασή τους στο LCA. Άρα, καθίσταται έντονη η ανάγκη εκτενούς περαιτέρω έρευνας σχετικά με το στάδιο χρήσης του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων για την επίτευξη πληρότητας αλλά και ακρίβειας στα αποτελέσματα των μελλοντικών LCAs.

3.5 Συντήρηση και αποκατάσταση

Οι δραστηριότητες συντήρησης και αποκατάστασης ενός οδοστρώματος κατά τη διάρκεια ζωής του συχνά συμβάλλουν σημαντικά στη συνολική επίπτωση του κύκλου ζωής του. Τα οδοστρώματα που παραμένουν σε λειτουργία για εκτεταμένες χρονικές περιόδους υποβάλλονται σε πολυάριθμες δραστηριότητες συντήρησης που μπορούν να αποτελέσουν σημαντικό τμήμα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής του οδοστρώματος. Οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις που συνδέονται με την αφαίρεση των φθαρμένων στρώσεων του οδοστρώματος είναι οι ίδιες με εκείνες στο στάδιο του τέλους ζωής, ενώ οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις που συνδέονται με την τοποθέτηση νέων στρώσεων είναι οι ίδιες με εκείνες των σταδίων παραγωγής υλικών και κατασκευής.

Η ακρίβεια του χρονοδιαγράμματος συντήρησης και αποκατάστασης του οδοστρώματος που λαμβάνεται υπόψη σε ένα LCA εξαρτάται από το πόσο καλά η μελέτη μπορεί να προβλέψει το μέλλον. Παρόλο που δεν μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια η μελλοντική συντήρηση ενός οδοστρώματος, ιδανικά η φάση συντήρησης και αποκατάστασης ενός LCA οδοστρώματος θα πρέπει να βασίζεται σε ένα ρεαλιστικό χρονοδιάγραμμα των μελλοντικών δραστηριοτήτων που θα αντλούνται (όταν είναι δυνατόν) από προηγούμενη εμπειρία με παρόμοια οδοστρώματα. Γενικά, πρέπει να είναι γνωστά τρία βασικά στοιχεία ανάλυσης (Santero et. al 2010):

- ❖ Η προσδοκώμενη διάρκεια ζωής της αρχικής κατασκευής
- ❖ Η σειρά των δραστηριοτήτων που θα πραγματοποιηθούν
- ❖ Η προσδοκώμενη διάρκεια ζωής για κάθε μια από αυτές τις δραστηριότητες

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο αποτελούν οι συνήθεις διαδικασίες συντήρησης, όπως η σφράγιση ρωγμών και άλλες δραστηριότητες μικρής έκτασης. Αν και θεωρητικά πρέπει να συμπεριληφθούν σε ένα πλήρως ολοκληρωμένο LCA, είναι εύλογο να υποτεθεί ότι η συνολική επίδρασή τους είναι μικρή σε σύγκριση με τον υπόλοιπο κύκλο ζωής, δεδομένης της σχετικά μικρής ποσότητας υλικών και ενέργειας που απαιτείται για την εκτέλεση αυτών των δραστηριοτήτων. Μια πιο επείγουσα ανάγκη είναι να χρησιμοποιηθεί μια ρεαλιστική αναπαράσταση των δραστηριοτήτων συντήρησης και αποκατάστασης μεγαλύτερης έκτασης, δηλαδή εκείνων που απαιτούν σημαντική ποσότητα υλικών ή βαριές διαδικασίες (Santero et al. 2010).

Τα αποτελέσματα μιας μελέτης LCA (Salem and Ghorai 2015) έδειξε ότι για τα ασφατικά οδοστρώματα, οι καινοτόμες τεχνικές αποκατάστασης, όπως η μερικού ή πλήρους βάθους ανάκτηση (partial or full depth reclamation), έχουν μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις στον κύκλο ζωής από τις παραδοσιακές τεχνικές όπως το φρεζάρισμα και η επίστρωση (mill and overlay) ή η ολική ανακατασκευή (reconstruction). Ένας από τους κύριους λόγους είναι ότι στις καινοτόμες τεχνικές αποκατάστασης των οδοστρωμάτων δεν αφαιρείται μέρος της υπάρχουσας ασφατικής στρώσης, αλλά αυτή ανακυκλώνεται, για να παράγει ένα νέο σταθερό στρώμα, κάτι που ελαχιστοποιεί τις ανάγκες εξόρυξης πρώτων υλών και παραγωγής νέων υλικών σε αντίθεση με τις παραδοσιακές τεχνικές. Οι διαδικασίες μικρής κλίμακας, όπως η χρήση επισφραγιστικών ασφαλτοϋδαρών γαλακτωμάτων (fog seals, chip seals) και η παραδοσιακή σφράγιση ρωγμών (crack seal), έχουν ελάχιστες επιπτώσεις με μεγάλα πλεονεκτήματα όταν συγκρίνονται οι αντίστοιχες επεκτάσεις ζωής. Γενικώς, παρατηρήθηκε ότι τα προϊόντα και οι διαδικασίες με χαμηλότερη περιεκτικότητα ασφάλτου και λιγότερη απαίτηση θερμότητας χρησιμοποιούν λιγότερη ενέργεια και έχουν λιγότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Όσον αφορά στα δύσκαμπτα οδοστρώματα, όλες οι τεχνικές αποκατάστασης είναι σχετικά νέες. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και η κατανάλωση ενέργειας λόγω των χρησιμοποιούμενων υλικών, του εξοπλισμού και των μεταφορών βρέθηκαν να είναι παρόμοιες τόσο για τις παραδοσιακές τεχνικές, όπως η επισκευή πλήρους βάθους (full depth repair), όσο και για τις επιταχυνόμενες τεχνικές, όπως

τα προκατασκευασμένα συστήματα σκυροδέματος. Όπως και στα εύκαμπτα οδοστρώματα, οι μικρής κλίμακας διαδικασίες όπως η σφράγιση και πλήρωση αρμών σκυροδέματος (concrete seal joints), η τριβή της επιφάνειας με τη βοήθεια αδαμαντοφόρου εξοπλισμού (diamond grinding) και η επιδιόρθωση μερικού βάθους (partial depth repair) έχουν πολύ λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις στον κύκλο ζωής, με σημαντικά οφέλη όσον αφορά στο προσδόκιμο ζωής (Salem and Ghorai 2015). Έτσι, προκύπτει το συμπέρασμα ότι θα πρέπει να αξιοποιούνται πλήρως όλες οι διαδικασίες συντήρησης και αποκατάστασης και να δίνεται έμφαση στις καινοτόμες στρατηγικές, συμπεριλαμβανομένων των τεχνικών ανακύκλωσης, για την επίτευξη ενός βιώσιμου σχεδίου συντήρησης, επισκευής και αποκατάστασης του εκάστοτε οδοστρώματος.

Ένα στοιχείο που αναφέρθηκε και στο στάδιο της κατασκευής και δε λαμβάνεται υπόψη στα περισσότερα LCAs είναι η καθυστέρηση της κυκλοφορίας. Η έρευνα των Huang et al. (2009) έδειξε ότι η καθυστέρηση στην κυκλοφορία κατά τη διάρκεια των έργων συντήρησης ενός οδικού δικτύου αποτελεί σημαντικό μέρος του κύκλου ζωής του οδοστρώματος και συνεπώς πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο πλαίσιο ενός LCA οδοστρώματος. Οι Inti et al. (2016) κατέγραψαν τις διαφορές μεταξύ των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου με και χωρίς τις εκπομπές που οφείλονται στην καθυστέρηση της κυκλοφορίας και κατέληξαν ότι υπάρχει ανάγκη να συμπεριληφθούν οι εκπομπές καθυστερημένης κυκλοφορίας στα LCAs για να εκτιμηθούν καλύτερα οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του σταδίου συντήρησης και αποκατάστασης και κατ' επέκταση, του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων.

3.6 Τέλος ζωής

Το τελευταίο στάδιο του κύκλου ζωής του οδοστρώματος είναι το τέλος ζωής, το οποίο συμβαίνει όταν η υποδομή φτάσει στο τέλος της διάρκειας ζωής της. Οι επιπτώσεις που οφείλονται στη φάση του τέλους ζωής του οδοστρώματος εξαρτώνται από την τελική μοίρα του οδοστρώματος και των υλικών του, κάτι που είναι δύσκολο να προσδιοριστεί από την αρχή. Στο τέλος της ωφέλιμης ζωής του, ένα οδόστρωμα θα μπορούσε να απορριφθεί, να ανακυκλωθεί ή απλά να

παραμένει στη θέση του και να χρησιμεύσει ως τμήμα της υποκείμενης δομής για ένα άλλο νέο οδόστρωμα.

Για τα οδοστρώματα που έχουν αφαιρεθεί και ανακατασκευαστεί εξ ολοκλήρου, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις στο τέλος του κύκλου ζωής αντανακλούν τις διαδικασίες απομάκρυνσης και διάθεσης. Εάν η διαδικασία διάθεσης είναι η υγειονομική ταφή, τότε η ανάλυση είναι σχετικά απλή και περιλαμβάνει διαδικασίες κατεδάφισης, μεταφοράς και υγειονομικής ταφής. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της υγειονομικής ταφής έχουν μελετηθεί καλά από την σκοπιά του LCA και μπορούν να εφαρμοστούν σχετικά εύκολα στον κύκλο ζωής του οδοστρώματος. Αντιθέτως, όταν σε ένα LCA γίνεται η υπόθεση ότι τα υλικά του οδοστρώματος ανακυκλώνονται ή επαναχρησιμοποιούνται η ανάλυση γίνεται εξαιρετικά σύνθετη.

Λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας της πρόβλεψης του τι θα συμβεί στο τέλος ζωής ενός οδοστρώματος, το στάδιο αυτό συνήθως δε λαμβάνεται υπόψη στα LCAs με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν επαρκή στοιχεία για τη σύγκριση των εναλλακτικών επιλογών του τέλους ζωής.

4 Αξιολόγηση κύκλου ζωής και ανακύκλωση οδοστρωμάτων

4.1 Εισαγωγή

Από τη στιγμή που δημοσιεύθηκαν τα πρώτα LCAs οδοστρωμάτων στα μέσα της δεκαετίας του 1990, η προσέγγιση απέκτησε σταθερά ενδιαφέρον ως μέθοδος ποσοτικοποίησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των οδοστρωμάτων. Οι υφιστάμενες ερευνητικές μελέτες στα LCAs οδοστρωμάτων μέχρι το 2011 υιοθέτησαν σε μεγάλο βαθμό τη σύγκριση των υλικών ασφατικών και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων ως το βασικό περιβαλλοντικό ζήτημα που σχετίζεται με τα οδοστρώματα, παρόλο που αντιπροσωπεύει μόνο μία από τις πολλές διαφορετικές δυνατότητες μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Από το 2011 και μετά, όμως, το ερευνητικό ενδιαφέρον στράφηκε στη χρήση του LCA για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των οδοστρωμάτων με επίκεντρο την εφαρμογή νέων τεχνολογιών στην κατασκευή οδοστρωμάτων, τη χρήση ανακυκλώσιμων υλικών και τη διερεύνηση της επίδρασης αυτών στα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής τους.

Πολλές ερευνητικές μελέτες, λοιπόν, έχουν χρησιμοποιήσει τη μέθοδο του LCA για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη χρήση παραπροϊόντων και ανακυκλώσιμων υλικών στα οδοστρώματα. Αυτά περιλαμβάνουν προϊόντα όπως σκωρία χυτηρίου, τέφρα πυθμένα, ιπτάμενη τέφρα, ανακτημένο ασφατικό οδόστρωμα, φθαρμένα ελαστικά, θρυμματισμένο γυαλί, πλαστικά και θραυσμένο σκυρόδεμα. Αντί να τοποθετούνται σε χώρους υγειονομικής ταφής, τα προϊόντα αυτά μπορούν να αντικαταστήσουν τη χρήση αδρανών υλικών, συνδετικών υλικών και άλλων παρθένων υλικών στα οδοστρώματα.

Στην ιδανική περίπτωση, ένα LCA θα εξετάζει κάθε μία από τις φάσεις του κύκλου ζωής του προϊόντος με όλες τις απαραίτητες λεπτομέρειες. Ωστόσο, με δεδομένους τους περιορισμούς του χρόνου, των δεδομένων και των πληροφοριών, αυτή η διαδικασία είναι δύσκολη για τα οδοστρώματα. Ουσιαστικά όλες οι περιβαλλοντικές εκτιμήσεις αναγκάζονται να απλουστεύσουν το πεδίο εφαρμογής τους και να εξετάσουν μόνο τις φάσεις και τις διαδικασίες που μπορούν λογικά να εξεταστούν υπό τους προαναφερόμενους περιορισμούς (Santero et al. 2010). Το αποτέλεσμα είναι η υπάρχουσα βιβλιογραφία για τη μέθοδο του LCA να

περιλαμβάνει ερευνητικές μελέτες με διαφορετική κάλυψη, οι περισσότερες από τις οποίες δεν επιτυγχάνουν τον τελικό στόχο ενός πραγματικού και ολοκληρωμένου LCA. Ωστόσο, πολλές έρευνες ακολουθούν τις κατευθυντήριες γραμμές, το θεωρητικό υπόβαθρο, τη δομή και το σκοπό του LCA επαρκώς, ώστε να θεωρηθούν σε ικανοποιητικό βαθμό ως LCAs οδοστρωμάτων. Ακολούθως γίνεται μια ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας που αφορά στη χρήση ανακυκλώσιμων υλικών και τεχνολογιών ανακύκλωσης από τη σκοπιά του LCA, συμπεριλαμβανομένης της επιρροής τους στον κύκλο ζωής του οδοστρώματος.

4.2 Ανακύκλωση οδοστρωμάτων

4.2.1 Ανακυκλώσιμα υλικά

Τα χρησιμοποιούμενα ανακυκλώσιμα υλικά που αντικαθιστούν τα αδρανή υλικά έχουν σημαντικές προοπτικές βιωσιμότητας στον τομέα των οδοστρωμάτων, και προέρχονται σε μεγάλο βαθμό από την ανακύκλωση υφιστάμενων οδοστρωμάτων, όταν αυτά πλησιάζουν το τέλος του κύκλου ζωής τους. Κάποια από αυτά ερευνήθηκαν με τη βοήθεια του LCA για την ανάλυση των αποτελεσμάτων της χρήσης τους ως προς τον κύκλο ζωής των οδοστρωμάτων και θα αναφερθούν σε πολλές έρευνες της ανασκόπησης που θα γίνει παρακάτω. Τα υλικά αυτά είναι τα εξής (FHWA 2015, NCPTC 2012):

- ❖ **Ανακτημένο Ασφαλτικό Οδόστρωμα (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)**, όπου ανώτερα ασφαλτικά στρώματα, με κατάλληλη επεξεργασία όπως η ψυχρή άλεση-ανακύκλωση, ανακτώνται από το υφιστάμενο οδόστρωμα, προς απώτερη χρήση στη κατασκευή νέων, ως υλικό βάσης ή και υπόβασης (βλέπε Εικόνα 4-1). Επίσης, συνήθης είναι και η χρησιμοποίηση του σε νέα ασφαλτικά μίγματα.



Εικόνα 4-1 Ανακτημένο ασφαλτικό οδόστρωμα (RAP)

- ❖ **Ανακυκλωμένα Αδρανή Σκυροδέματος (Recycled Concrete Aggregate, RCA),** τα οποία προέρχονται από τη θραύση σκυροδεματικών στρώσεων οδοστρωμάτων (βλέπε Εικόνα 4-2). Τα αδρανή αυτά είναι κυρίως γωνιώδη, και χρησιμοποιούνται στην κατασκευή νέων οδοστρωμάτων, τις πλείστες περιπτώσεις ως βάση και ως υπόβαση. Παρά την ανακυκλώσιμη φύση τους, χαρακτηρίζονται από σημαντικά επίπεδα αντοχής, ικανή να συγκριθεί ακόμη και με αυτή των συμβατικών.



Εικόνα 4-2 Ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος (RCA)

- ❖ **Ανακυκλωμένες Ασφαλτικές Πλάκες κτιριακών στεγών (Recycled Asphalt Shingles, RAS)**, αποτέλεσμα ανακύκλωσης ασφαλτικών πλακών, που χρησιμοποιούνται ως στέγες σε κατοικίες κυρίως του εξωτερικού (βλέπε Εικόνα 4-3). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν αργότερα, σε ποσοστά της τάξεως του 50% ως ένας συνδυασμός ασφαλτικού συνδετικού υλικού, μαζί, συνήθως με λεπτόκοκκα αδρανή, σε νέα μίγματα ασφαλτικών στρώσεων.



Εικόνα 4-3 Ανακυκλωμένες ασφαλτικές πλάκες στεγών πριν και μετά (RAS)

Ένα ανακυκλώσιμο υλικό που μπορεί να αντικαταστήσει σε σημαντικό βαθμό το τσιμέντο στα οδοστρώματα από σκυρόδεμα και θα αναφερθεί στην ανασκόπηση ερευνών παρακάτω είναι το εξής:

- ❖ **Ιπτάμενη Τέφρα (Fly Ash)**, η οποία συλλέγεται από καπνοδόχους μονάδων παραγωγής ενέργειας που λειτουργούν με την καύση άνθρακα (βλέπε Εικόνα 4-4). Οι ιδιότητες της διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο του άνθρακα. Μπορούν να αντικαταστήσουν το συμβατικό τσιμέντο, σε ποσοστό μέχρι και 40%. Η αξιοποίηση της, καθώς αποτελεί παραπροϊόν, συμβάλλει θετικά στη μείωση της ζήτησης σε συμβατικό τσιμέντο. Σημαντικό στοιχείο, είναι και η μείωση της απαιτούμενης ποσότητας νερού στο μίγμα. Με κατάλληλη μελέτη και εργαστηριακές δοκιμές για την κατανόηση των ποικίλων

ιδιοτήτων της, αποφεύγονται προβλήματα αποδοτικότητας, ποιότητας αλλά και αξιοπιστίας.



Εικόνα 4-4 Ιπτάμενη τέφρα δεξιά σε σύγκριση με συμβατικό τσιμέντο αριστερά

Επιπλέον, η τεχνολογία στον τομέα των υλικών, σε συνεργασία με την ανακύκλωση, έχουν συμβάλλει στο λανσάρισμα νέων ασφαλικών υλικών και νέων πρωτοποριακών συστάσεων σε ασφαλικά μίγματα, ικανά να αποτελέσουν ένα σημαντικό βήμα προς τη βιωσιμότητα των οδοστρωμάτων. Αυτά που χρησιμοποιήθηκαν σε πολλές από τις έρευνες της ανασκόπησης που θα ακολουθήσει είναι τα εξής (FHWA 2015):

- ❖ **Ασφαλτικό Μίγμα Υψηλής Θερμοκρασίας (Hot-Mix Asphalt, HMA)**, που προέρχεται από την ανάμειξη υψηλής διαβάθμισης αδρανών υλικών μαζί με ασφαλικό τσιμέντο, σε θερμοκρασία 135 με 165 °C. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή των ασφαλικών στρώσεων των οδοστρωμάτων.
- ❖ **Θερμό Ασφαλτικό Μίγμα (Warm-Mix Asphalt, WMA)**, παρόμοιας σύστασης με του αντίστοιχου υψηλής θερμοκρασίας, με τη διαφορά όμως στην παρουσία χημικών πρόσθετων, τα οποία ευθύνονται για την εργασιμότητα και τη δυνατότητα επαρκούς συμπύκνωσης του ασφαλικού μίγματος, σε αρκετά χαμηλότερες θερμοκρασίες, της τάξεως των 15 με 25 °C. Αποτελεί μία νέα, πρωτοποριακή τεχνική, με αρκετές βιώσιμες προοπτικές, χάρη στη

μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά και στη διευκόλυνση σε θέματα μεταφοράς, αφού δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη εργοστασίου για τη θέρμανση και παραγωγή του ασφαλτικού μίγματος. Προσοχή απαιτείται στις επιπτώσεις των χημικών πρόσθετων στο περιβάλλον, καθώς η παρασκευή αυτών, έχει σημαντική επίδραση στο βαθμό της βιωσιμότητας.

- ❖ **Τροποποιημένο-ρητινούχο Ασφαλτικό Μίγμα (Polymer-Modified Asphalt, PMA)**, ασφαλτικό μίγμα με την παρουσία διάφορων τροποποιητών, με σκοπό την αύξηση της αντοχής και της απόδοσης, σε ακραίες μάλιστα θερμοκρασιακές συνθήκες (βλέπε Εικόνα 4-5). Συναντάται σε επιφανειακές στρώσεις οδοστρωσίας, αλλά και σε μίγματα ασφαλτοπολτού, κυρίως για εφαρμογές συντήρησης/αναμόρφωσης.



Εικόνα 4-5 Ασφαλτος τροποποιημένη με πολυμερή PMA

4.2.2 Ανακύκλωση ασφαλτομιγμάτων

Η «ανακύκλωση» (recycling) ορίζεται ως η ανάκτηση μέρους ενός χρησιμοποιημένου φθαρμένου υλικού για επανεπεξεργασία με ελάχιστη ή καθόλου μεταφορά από το έργο ή εντός των ορίων του έργου. Η ανακύκλωση ενός οδοστρώματος πραγματοποιείται όταν ολοκληρωθεί ο κύκλος ζωής του οδοστρώματος. Επίσης μπορεί να επιλεγεί λύση ανακύκλωσης όταν στο οδόστρωμα παρουσιάζονται αστοχίες που επηρεάζουν την επιφάνεια κύλισης. Η ανακύκλωση των ασφαλτομιγμάτων διαχωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες: τη θερμή και την

ψυχρή ανακύκλωση. Έστω και πολύ λίγες, υπήρξαν έρευνες που ανέλυσαν τις τεχνικές ανακύκλωσης από πλευράς LCA και παρουσίασαν τα αποτελέσματα που έχουν στον κύκλο ζωής των οδοστρωμάτων από περιβαλλοντικής άποψης, για τις οποίες θα γίνει λόγος στην ανασκόπηση που θα ακολουθήσει παρακάτω. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι τεχνικές ανακύκλωσης (Λοΐζος και Πλατή 2015):

Ανακύκλωση εν θερμώ-επί της οδού (Hot In-Place Recycling, HIR)

Η μέθοδος αυτή δίνει τη δυνατότητα να αποκαταστήσουμε και αναβαθμίσουμε ποιοτικά παλαιά οδοστρώματα. Χρησιμοποιείται προκειμένου να αποκατασταθούν επιφανειακές ανωμαλίες, που όμως δε δημιουργήθηκαν λόγω κακής κατασκευής. Μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα βασικά στάδια:

1. Θέρμανση του οδοστρώματος προκειμένου να “μαλακώσει” η άσφαλτος
2. Φρεζάρισμα της επιφανειακής στρώσης
3. Ανάμιξη παλαιού ασφαλτομίγματος με τα νέα υλικά
4. Διάστρωση και συμπίκνωση του καινούργιου ασφαλτικού

Η μέθοδος αυτή μπορεί να εκτελεστεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους: είτε με αναμόρφωση (reshape), είτε με επαναδιάστρωση (repaving), είτε με επανάμιξη (remixing).

Ανακύκλωση εν θερμώ-σε ασφατική εγκατάσταση (Hot In-Plant Recycling, HR)

Η παραγωγή ανακυκλωμένου ασφαλτομίγματος εν θερμώ σε μόνιμη εγκατάσταση παρουσιάζει μεγάλες ομοιότητες με τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής. Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή ποιότητα μίγματος και κατά συνέπεια καλή ποιότητα κατασκευής. Με την ανακύκλωση εν θερμώ βελτιώνεται αισθητά η αντοχή του οδοστρώματος. Το υπάρχον οδόστρωμα φρεζάρεται και μεταφέρεται στο χώρο όπου υπάρχει η μόνιμη εγκατάσταση. Εκεί το φρεζαρισμένο υλικό αναμιγνύεται με καινούργια αδρανή και άσφαλτο, με αποτέλεσμα να παραχθεί ασφαλτόμιγμα με ιδιότητες που είναι όμοιες με αυτές των θερμών ασφαλτομιγμάτων. Το ποσοστό ανακυκλωμένου ασφαλτομίγματος που θα

προσθεθεί εξαρτάται από τις απαιτήσεις του έργου. Η ποιότητα του ασφαλτομίγματος μπορεί και ελέγχεται άμεσα στο εργαστήριο της μονάδας.

Ψυχρή ανακύκλωση επί-της οδού (Cold In-place Recycling, CIR)

Η ψυχρή ανακύκλωση εφαρμόζεται στην περίπτωση που το οδόστρωμα εμφανίζει φθορές σε βάθος. Με την ψυχρή ανακύκλωση σε κανένα στάδιο των εργασιών δεν απαιτείται θέρμανση των υλικών και τα ασφαλτομίγματα που δημιουργούνται μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλες τις ασφατικές στρώσεις. Το φρεζαρισμένο υλικό αναμιγνύεται επί τόπου με ασφατικό γαλάκτωμα ή αφρώδη άσφαλτο, η οποία είναι και η πιο διαδεδομένη μέθοδος. Σε ορισμένες περιπτώσεις υπάρχει μεταφορά καινούργιων αδρανών, αλλά συνήθως το μοναδικό κόστος μεταφοράς είναι του ασφατικού γαλακτώματος. Η επιφάνεια κύλισης του οδοστρώματος διορθώνεται άμεσα και επιτυγχάνονται οι απαιτούμενες κλίσεις.

Ψυχρή ανακύκλωση-σε ασφατική εγκατάσταση (Cold In-Plant Recycling, CR)

Ο τρόπος παραγωγής ψυχρού ασφαλτομίγματος σε ασφατική εγκατάσταση, δε διαφέρει από το συμβατικό τρόπο παραγωγής που έχει ήδη αναφερθεί. Το προς ανακύκλωση υλικό μεταφέρεται στο χώρο του εργοταξίου όπου εν συνεχεία θα αναμιχθεί με τα καινούργια αδρανή και το γαλάκτωμα προκειμένου να παραχθεί το καινούργιο ασφαλτόμιγμα. Το πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να ελέγχεται άμεσα η ποιότητα παραγωγής. Επίσης στις περισσότερες περιπτώσεις το συγκρότημα ψυχρής ανακύκλωσης είναι κινητό και μπορεί να μεταφέρεται ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε έργου. Ψυχρό ασφαλτόμιγμα που παράγεται σε μόνιμη εγκατάσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις ασφατικές στρώσεις.

4.3 Σχετικές έρευνες

Οι **Vidal et al. (2013)** διεξήγαγαν ένα ολοκληρωμένο LCA οδοστρωμάτων, το οποίο περιλαμβάνει τη χρήση ασφατικού μίγματος υψηλής θερμοκρασίας (HMA) και θερμού ασφατικού μίγματος (WMA) που περιέχει συνθετικό ζεόλιθο, με και χωρίς την προσθήκη ανακτημένου ασφατικού οδοστρώματος (RAP). Όπως και στις περισσότερες μελέτες LCA των οδοστρωμάτων, εκτιμήθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται με την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές στην

ατμόσφαιρα, αλλά εκτιμήθηκαν και άλλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εξόρυξη και επεξεργασία των υλικών, την παραγωγή ασφάλτου, τη μεταφορά υλικών, την κυκλοφορία κατά τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος αλλά και την κατάληξή του στο τέλος ζωής του, ενώ πραγματοποιήθηκαν και προσομοιώσεις Monte Carlo για να ληφθεί υπόψη η μεταβλητότητα των κρίσιμων παραμέτρων εισόδου. Για αυτή την έρευνα χρησιμοποιήθηκε το LCA λογισμικό SimaPro και εξετάστηκαν τέσσερα διαφορετικά ασφαλτικά οδοστρώματα: δύο οδοστρώματα HMA, που περιείχαν 0% και 15% RAP και δύο οδοστρώματα WMA με συνθετικό ζεόλιθο, που περιείχαν επίσης 0%, και 15% RAP. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του κάθε ασφαλτικού οδοστρώματος εκτιμήθηκαν στο σύμφωνα με τρεις κατηγορίες επιπτώσεων: την βλάβη της ανθρώπινης υγείας, τη βλάβη στην ποικιλομορφία των οικοσυστημάτων και τη βλάβη στη διαθεσιμότητα πόρων. Στο πλαίσιο αυτό, οι επιπτώσεις κάθε σταδίου του κύκλου ζωής, καθώς και ο συνολικός αντίκτυπος, ομαδοποιήθηκαν σε αυτές τις τρεις ευρύτερες κατηγορίες επιπτώσεων.

Από τη σύγκριση του HMA και του WMA με συνθετικό ζεόλιθο, παρατηρήθηκε ότι οι συνολικές επιπτώσεις του WMA ήταν σχεδόν ίσες με τις συνολικές επιπτώσεις του HMA με το ίδιο περιεχόμενο RAP. Δεν υπήρξαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των επιπτώσεων των HMA και WMA στα στάδια της μεταφοράς, της κατασκευής και της λήξης της ζωής. Όσον αφορά στο στάδιο παραγωγής ασφάλτου, οι επιπτώσεις του WMA ήταν περίπου 14-15% χαμηλότερες από τις επιπτώσεις του HMA, λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας παραγωγής. Ωστόσο, οι συνολικές επιπτώσεις του σταδίου των υλικών ήταν υψηλότερες στο WMA. Έτσι, η μείωση της θερμοκρασίας παραγωγής αντισταθμίστηκε από την αύξηση των συνολικών επιπτώσεων του σταδίου των υλικών ως αποτέλεσμα της πιο σύνθετης σύνθεσης του WMA σε σύγκριση με το HMA.

Επιπλέον, συγκρίνοντας τον ίδιο τύπο ασφαλτικών μιγμάτων με διαφορετικά περιεχόμενα RAP, παρατηρήθηκε ότι οι συνολικές επιπτώσεις των μιγμάτων μειώθηκαν σημαντικά όταν προστέθηκε 15% RAP. Η μείωση των επιπτώσεων οφειλόταν κατά κύριο λόγο στα στάδια παραγωγής υλικών και τέλους ζωής. Συγκεκριμένα η μείωση των συνολικών επιπτώσεων με την προσθήκη 15% της RAP στα μίγματα ήταν η ακόλουθη: 13% τόσο για βλάβη της ανθρώπινης υγείας όσο και

για τη βλάβη στην ποικιλομορφία οικοσυστημάτων και 14% για τη βλάβη στη διαθεσιμότητα πόρων. Η αξιολόγηση αβεβαιότητας μέσω των προσομοιώσεων Monte Carlo επιβεβαίωσε ότι αυτές οι κρίσιμες επιπτώσεις θα μπορούσαν να μειωθούν με πιθανότητα περίπου 99% προσθέτοντας RAP στα ασφαλικά μίγματα. Το συμπέρασμα που προέκυψε για τη χρήση του WMA είναι ότι το βασικό πλεονέκτημά του έναντι του HMA είναι η πιθανώς μεγαλύτερη χρήση του RAP.

Συνεπώς, η μείωση των επιπτώσεων που επιτυγχάνεται με την προσθήκη μεγάλων ποσοτήτων του RAP σε WMA θα μπορούσε να αναδείξει αυτά τα μίγματα ασφάλτου σε μια καλή εναλλακτική λύση του HMA από περιβαλλοντική άποψη.

Οι **Santos et al. (2014)** παρουσίασαν στην έρευνά τους τα αποτελέσματα ενός LCA οδοστρωμάτων που διεξήχθη για ένα έργο αποκατάστασης με επί τόπου ανακύκλωση ενός οδοστρώματος στην πολιτεία της Βιρτζίνια των ΗΠΑ. Ανέπτυξαν ένα ολοκληρωμένο LCA που περιλαμβάνει το στάδιο της χρήσης στα όρια του συστήματος. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται με δύο άλλες εναλλακτικές λύσεις διαχείρισης οδοστρώματος: μια συμβατική πλήρη αποκατάσταση-ανακατασκευή οδοστρώματος και μια προσέγγιση συμβατικής διορθωτικής συντήρησης. Ο στόχος τους ήταν η εκτίμηση των πιθανών περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή τοπικών τεχνικών ανακύκλωσης οδοστρώματος σε σχέση με δύο παραδοσιακές μεθόδους συντήρησης και αποκατάστασης. Οι ερευνητές αναφέρουν λεπτομερώς τις ενέργειες που πραγματοποιήθηκαν στην αρχική μέθοδο αποκατάστασης για την κάθε εναλλακτική αλλά και τις μελλοντικές απαιτήσεις και δραστηριότητες συντήρησης όπως και το χρονικό τους προσδιορισμό.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το στάδιο της χρήσης είναι μακράν το στάδιο του κύκλου ζωής με τον μεγαλύτερο αντίκτυπο σε όλες σχεδόν τις κατηγορίες επιπτώσεων. Λόγω της υψηλής επιρροής του σταδίου χρήσης στις συνολικές περιβαλλοντικές επιδόσεις των στρατηγικών συντήρησης και αποκατάστασης, μπορεί να συναχθεί ότι η στρατηγική με τις χειρότερες περιβαλλοντικές επιδόσεις κατά τη διάρκεια του σταδίου χρήσης είναι ταυτόχρονα και η λιγότερο φιλική προς το περιβάλλον συνολικά. Επομένως, φαίνεται εύλογο να αναμένεται ότι η

υιοθέτηση μίας στρατηγικής συντήρησης και αποκατάστασης, ικανής να επιβραδύνει το ρυθμό επιδείνωσης της τραχύτητας και ομαλότητας του οδοστρώματος, θα οδηγούσε σε πολύτιμες βελτιώσεις στην περιβαλλοντική απόδοση του κύκλου ζωής ενός συστήματος οδοστρωμάτων. Η συγκεκριμένη έρευνα έδειξε ότι με την εφαρμογή της εναλλακτικής της επί τόπου ανακύκλωσης μπορεί να επιτευχθεί μείωση περίπου 28-30% στις συνολικές επιπτώσεις του κύκλου ζωής, σε σχέση με εκείνες της συμβατικής στρατηγικής διορθωτικής συντήρησης και αποκατάστασης. Αλλά ακόμα και στην περίπτωση που θεωρούνται μόνο τα στάδια υλικών, κατασκευής και συντήρησης ή αποκατάστασης στα όρια του συστήματος του LCA, η στρατηγική που βασίζεται στην ανακύκλωση εξακολουθούσε να αποδίδει καλύτερα από τις υπόλοιπες στρατηγικές.

Η στρατηγική που βασίζεται στην ανακύκλωση είναι επίσης η λιγότερο επιβλαβής για το περιβάλλον από την άποψη της κατανάλωσης ενέργειας. Συνολικά, μια μείωση περίπου 30-33% σε όλους τους τύπους ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί ως αποτέλεσμα της εφαρμογής της έναντι της διορθωτικής συντήρησης, ενώ ανάλογες μειώσεις μπορούν να επιτευχθούν και με την πλήρη αποκατάσταση-ανακατασκευή. Παρ' όλα αυτά μείωση κατά 75% των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σημειώθηκαν κατά τη φάση της εξόρυξης πρώτων υλών και της παραγωγής μιγμάτων παρατηρήθηκε μέσω της δραστηριότητας επί τόπου ανακύκλωσης ως εναλλακτική λύση στην παραδοσιακή πλήρη αποκατάσταση. Τέλος, η δραστηριότητα συντήρησης και αποκατάστασης που βασίζεται στην ανακύκλωση επιτρέπει την εξοικονόμηση περίπου 84% στη μεταφορά υλικών που αντιπροσωπεύει μείωση περίπου 81% στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Οι **Araújo et al. (2014)** ανέλυσαν τη σημασία του σταδίου χρήσης ενός οδοστρώματος χρησιμοποιώντας το LCA για διαφορετικές εναλλακτικές λύσεις, συγκεκριμένα με την αξιολόγηση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών αερίων σε όλη τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος. Ως εκ τούτου, αναπτύχθηκε μια νέα μεθοδολογία LCA και συζητήθηκαν τα αποτελέσματα της εφαρμογής της σε μια έρευνα που αφορά την κατασκευή εναλλακτικών δομών οδοστρώματος. Η έρευνα είχε σκοπό να εκτιμήσει την επιρροή της χρήσης πιο βιώσιμων εναλλακτικών κατασκευών στα οδοστρώματα (ανακύκλωση ασφάλτου έναντι συμβατικών

ασφαλικών μιγμάτων) ή/και διαφορετικών υλικών επιφανειακής στρώσης, τα οποία επηρεάζουν περισσότερο την αντίσταση κύλισης και συνεπώς επηρεάζουν την αλληλεπίδραση οδοστρώματος-οχημάτων κατά τη διάρκεια του σταδίου χρήσης. Η αναπτυχθείσα μεθοδολογία LCA της έρευνας αυτής περιέλαβε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του οδοστρώματος με ιδιαίτερη έμφαση στο στάδιο χρήσης, για το οποίο λήφθηκαν υπόψη παράγοντες που συνήθως εκλείπουν από τα περισσότερα LCAs.

Αναλύθηκαν τέσσερις εναλλακτικές δομές οδοστρώματος, προκειμένου να εκτιμηθεί ο συνολικός περιβαλλοντικός αντίκτυπος που προκαλείται από κάθε συνδυασμό δομικής και επιφανειακής λύσης, και ειδικότερα η κατανάλωση ενέργειας και το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (Global Warming Potential - GWP). Η βάση και η υπόβαση ήταν οι ίδιες και για τις τέσσερις εναλλακτικές. Για την ασφαλική βάση και την συνδετική στρώση χρησιμοποιήθηκαν δύο ασφατομίγματα, ένα με συμβατικά υλικά και ένα με 50% ανακτημένου ασφαλικού οδοστρώματος (RAP). Για την επιφανειακή στρώση επιλέχθηκαν ένα ασφαλτόμιγμα με συμβατικά υλικά και ένα με τροποποιημένο-ρητινούχο ασφατικό μίγμα (Polymer-Modified Asphalt, PMA). Τα πάχη των στρώσεων για κάθε συνδυασμό ήταν φυσικά διαφορετικά και τέτοια, ώστε κάθε εναλλακτική να προσφέρει την απαιτούμενη δομική επάρκεια για την υποστήριξη της ίδιας κυκλοφορίας.

Ως προς τα αποτελέσματα της έρευνας, το κύριο πλεονέκτημα της χρήσης ανακυκλώσιμων υλικών παρατηρείται κατά τη μέτρηση των εκπομπών αερίων των διάφορων εναλλακτικών λύσεων, ιδίως λόγω της μείωσης των εκπομπών που συνδέονται με την εξόρυξη πρώτων υλών. Συγκεκριμένα, η χρήση ανακυκλώσιμων υλικών επιτρέπει τη μείωση των εκπομπών αερίων σε 14% για το CO₂, 23% για το SO₂ και περίπου 15% για τα υπόλοιπα αέρια. Αναφορικά με το στάδιο χρήσης μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά 2,23% παρατηρήθηκε στο εργαστήριο όταν το μίγμα με τη χαμηλότερη αντίσταση κύλισης (PMA) χρησιμοποιήθηκε ως υλικό επιφανειακής στρώσης αντί για το συμβατικό ασφαλτόμιγμα.

Οι ερευνητές προχώρησαν και σε σύγκριση μεταξύ των σταδίων κατασκευής και χρήσης ως προς την καταναλισκόμενη ενέργεια και τις εκπομπές αερίων, τα αποτελέσματα της οποίας αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το συμπέρασμα της έρευνας ως προς τα ανακυκλώσιμα υλικά έδειξε ότι η βιωσιμότητα της κατασκευής οδοστρωμάτων μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με τη χρήση τους.

Οι **Aurangzeb and Al-Qadi (2014)** διεξήγαγαν μια πολύ ενδιαφέρουσα έρευνα με σκοπό να παρουσιάσουν τις οικονομικές και περιβαλλοντικές προοπτικές της χρήσης ασφαλικών μιγμάτων με υψηλή περιεκτικότητα σε ανακτημένο ασφαλικό οδόστρωμα (RAP). Τα εργαλεία ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η οικονομική ανάλυση του κύκλου ζωής (Life-Cycle Cost Analysis ή LCCA) και το LCA με βάση τα οποία συγκρίθηκαν οι εναλλακτικές λύσεις που βασίζονται στο κόστος, στην κατανάλωση ενέργειας και στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG). Ακόμη, πραγματοποιήθηκαν προσπάθειες για τον προσδιορισμό κάποιων οριακών επιπέδων απόδοσης των μιγμάτων αυτών που σύμφωνα με διαφορετικές πιθανές μεταβολές των επιπέδων απόδοσής τους στο πεδίο του έργου. Αναφορά θα γίνει μόνο στα αποτελέσματα του LCA της έρευνας, καθώς η χρήση της μεθόδου LCCA δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο LCA τους λήφθηκαν υπόψη τα στάδια παραγωγής υλικών, κατασκευής και συντήρησης και αποκατάστασης ενώ για να υπάρχει ένα λογικό πεδίο εφαρμογής εστίασαν, ως προς τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, μόνο στην κατανάλωση ενέργειας και στα αέρια του θερμοκηπίου (GHGs) (διοξείδιο του άνθρακα CO₂, μεθάνιο CH₄ και νιτρώδες οξείδιο N₂O) σε μονάδες ισοδύναμου CO₂. Στην ανάλυσή τους σύγκριναν τέσσερα διαφορετικά ασφαλικά μίγματα, ένα με συμβατικά υλικά και τρία με ανακυκλώσιμο υλικό (30%, 40% και 50% RAP). Η σύγκριση έδειξε ότι η αύξηση της ποσότητας RAP στα μίγματα ασφάλτου μειώνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα οι εξοικονομήσεις στην κατανάλωση ενέργειας και στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ήταν από 17% μέχρι 28%.

Τα αποτελέσματα αυτά, όπως αναφέρουν οι Aurangzeb και Al-Qadi, βασίζονται στην υπόθεση ότι όλα τα μίγματα έχουν ίδιες επιδόσεις. Εν τούτοις, μπορεί να

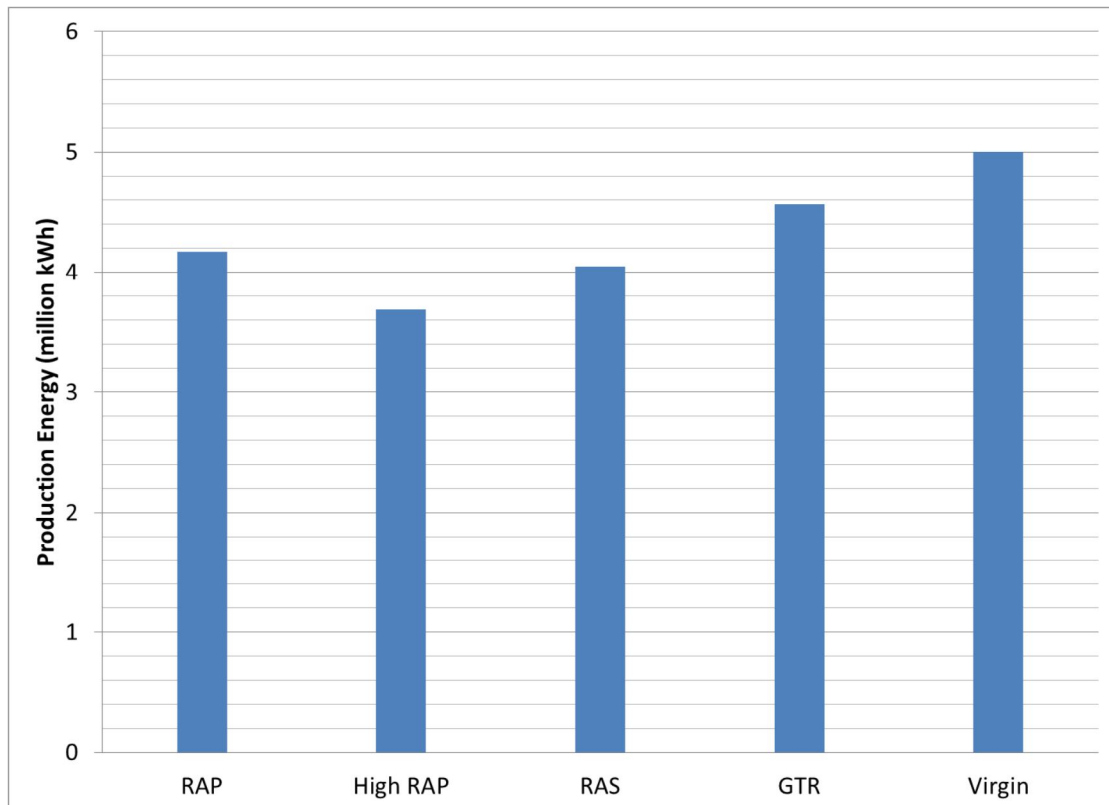
υποστηριχθεί ότι τα ανακυκλώσιμα μίγματα θα αποδώσουν χειρότερα από τα συμβατικά μίγματα λόγω της υψηλής τους δυσκαμψίας. Η πιθανή ανεπαρκής απόδοση των ανακυκλώσιμων μιγμάτων θα απαιτήσει περισσότερες δραστηριότητες συντήρησης και αποκατάστασης, αντισταθμίζοντας έτσι τα περιβαλλοντικά οφέλη της χρήσης του RAP. Έτσι χαρακτήρισαν το επίπεδο απόδοσης του οδοστρώματος στο οποίο τα περιβαλλοντικά οφέλη από τη χρήση του RAP αντισταθμίζονται από την περιβαλλοντική επιβάρυνση που συνδέεται με τις δραστηριότητες συντήρησης ως οριακό επίπεδο απόδοσης. Προσπάθησαν να προσδιορίσουν στην έρευνά τους το οριακό αυτό επίπεδο για τα μίγματα με RAP λαμβάνοντας υπόψη τρία σενάρια απόδοσης (90%, 80% και 70%) που σημαίνει ότι τα ανακυκλώσιμα μίγματα απέδιδαν σε αυτά τα ποσοστά ως προς το συμβατικό μίγμα επηρεάζοντας ανάλογα και τα χρονοδιαγράμματα συντήρησής τους. Το οριακό επίπεδο απόδοσης για το μίγμα με 30% RAP ώστε να παρουσιάζει πλεονεκτήματα ως προς τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του έναντι του συμβατικού μίγματος βρέθηκε στο 80%, ενώ για τα μίγματα με 40% και 50% RAP το οριακό επίπεδο απόδοσης ήταν 74% και 76% αντίστοιχα.

Συνεπώς προέκυψε το συμπέρασμα ότι ενώ τα ανακυκλώσιμα ασφατικά μίγματα με υψηλή περιεκτικότητα σε RAP παρουσίασαν μέχρι και 28% μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης σε σύγκριση με το συμβατικό μίγμα, οι εξοικονομήσεις αυτές επηρεάζονται σημαντικά από τα επίπεδα απόδοσής τους. Τα οριακά επίπεδα απόδοσης των ανακυκλώσιμων μιγμάτων, όπως ορίστηκαν παραπάνω, εξαρτώνται από τα κόστη των υλικών και τον κυκλοφοριακό όγκο και μπορεί να διαφέρουν σε σημαντικό βαθμό από έργο σε έργο.

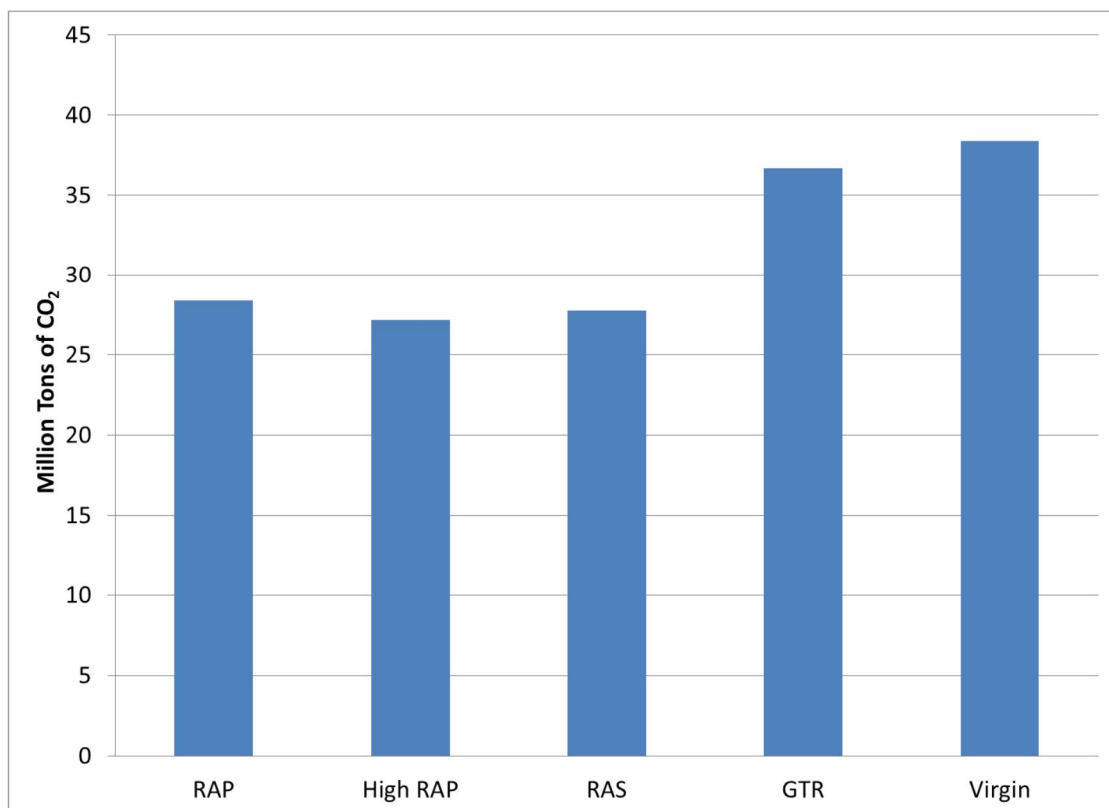
Το 2012 το National Center for Asphalt Technology (NCAT) στο Auburn της Alabama διεξήγαγε το πείραμα Green Group (GG), το οποίο σχεδιάστηκε για να μειώσει όχι μόνο το κόστος του κύκλου ζωής του οδοστρώματος, αλλά και τον περιβαλλοντικό αντίκτυπό του. Έτσι, το NCAT χρησιμοποίησε ανακυκλώσιμα υλικά όπως ανακτημένο ασφατικό οδόστρωμα (RAP), καουτσούκ από ελαστικά αυτοκινήτων (GTR) και ανακυκλωμένες ασφατικές πλάκες (RAS), σε συνδυασμό με θερμό ασφατικό μίγμα (WMA).

Ο **Willis (2015)** χρησιμοποίησε τη μέθοδο του LCA στα δοκιμαστικά τμήματα του πειράματος του Green Group και σύγκρινε τα αποτελέσματά τους με ένα ασφαλικό μίγμα που περιλάμβανε μόνο συμβατικά υλικά, σε συνήθεις θερμοκρασίες μίξης. Το LCA του περιλαμβάνει τα στάδια παραγωγής υλικών και κατασκευής ενώ δε λαμβάνει υπόψη του τα στάδια χρήσης, συντήρησης και τέλους ζωής. Τα δοκιμαστικά τμήματα του Green Group ήταν τέσσερα και προστέθηκε ένα πέμπτο για τις ανάγκες της σύγκρισης το οποίο περιλαμβάνει το συμβατικό μίγμα χωρίς καθόλου ανακυκλώσιμα υλικά. Το πρώτο τμήμα αποτελούνταν από ασφαλικές στρώσεις που περιείχαν από μέτρια έως υψηλά επίπεδα ανακτημένου ασφαλικού οδοστρώματος (RAP) και θερμό ασφαλικό μίγμα (WMA) στην επιφανειακή στρώση. Το δεύτερο τμήμα αποτελούνταν από ασφατικά μίγματα με υψηλά επίπεδα RAP, ενώ το τρίτο περιείχε τόσο ανακυκλώσιμες ασφαλικές πλάκες (RAS) όσο και RAP. Το τρίτο τμήμα περιλάμβανε τροποποιημένο ασφατικό συνδετικό υλικό από καουτσούκ ελαστικών (GRT) και RAP. Το τελευταίο τμήμα που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της σύγκρισης αποτελούνταν από ασφατικό μίγμα υψηλής θερμοκρασίας (HMA), που περιείχε μόνο συμβατικά υλικά (Virgin). Ανάμεσα σε αυτά τα δοκιμαστικά τμήματα έγινε η σύγκριση σχετικά με την ενέργεια που παράχθηκε και καταναλώθηκε, αλλά και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στο στάδιο της εξόρυξης και παραγωγής υλικών.

Όπως φαίνεται στο σχήμα της εικόνας 4-6, όλα τα τμήματα του πειράματος Green Group κατανάλωσαν λιγότερη ενέργεια από το τμήμα με τα συμβατικά υλικά, κατά τη φάση παραγωγής υλικών και η μείωση αυτή συνδέεται με τη χρήση ανακυκλώσιμων υλικών. Όσο αυξανόταν η ποσότητα του ανακυκλώσιμου υλικού τόσο μειωνόταν η καταναλισκόμενη ενέργεια. Τα ίδια αποτελέσματα βρέθηκαν και όσον αφορά στις εκπομπές CO₂, κάτι που δείχνει το σχήμα της εικόνας 4-7. Όταν στο μίγμα χρησιμοποιήθηκε RAP ή RAS πάνω από 25% CO₂ εξοικονομήθηκε μόνο στο πρώτο στάδιο του κύκλου ζωής.

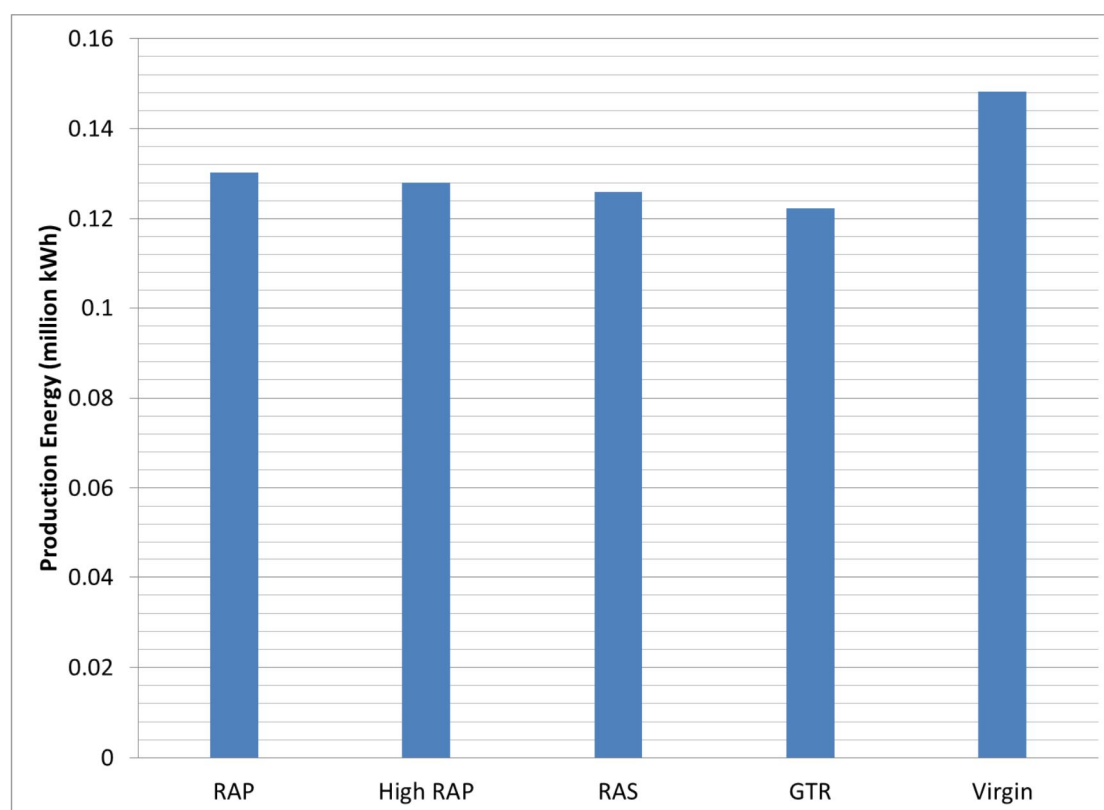


Εικόνα 4-6 Παραγωγή ενέργειας από την εξόρυξη και επεξεργασία των υλικών (Willis 2015)

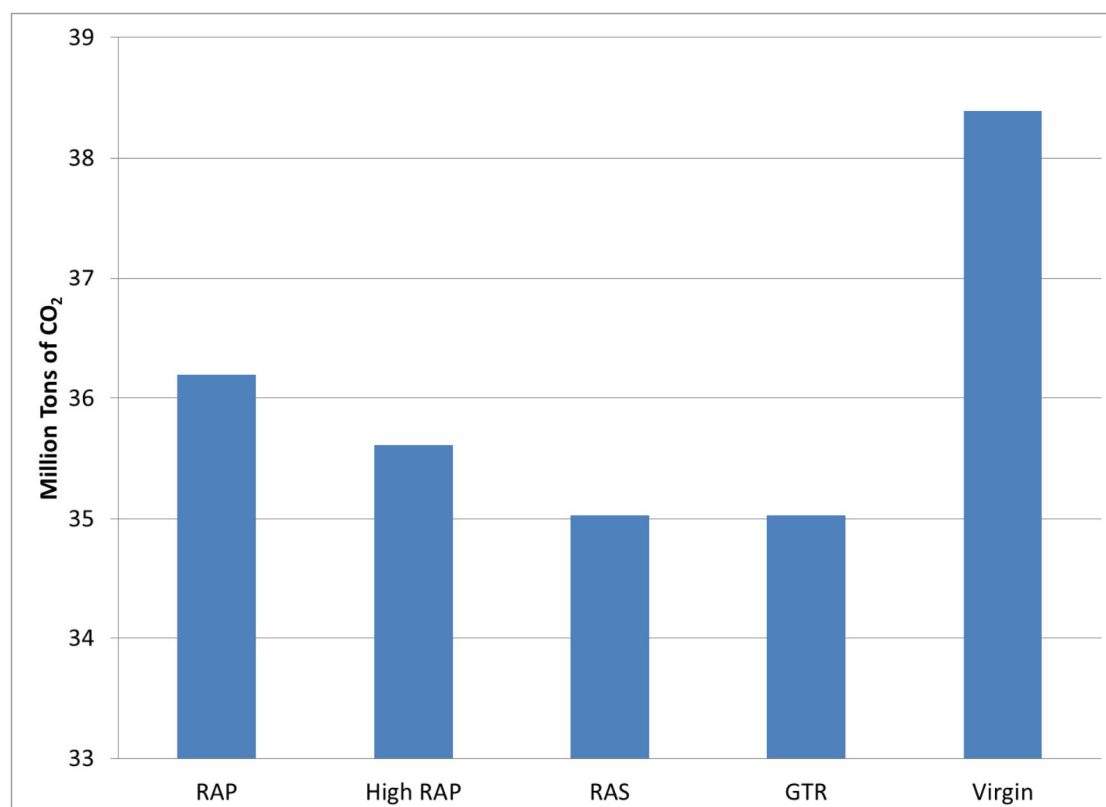


Εικόνα 4-7 Παραγωγή CO₂ από την εξόρυξη και επεξεργασία των υλικών (Willis 2015)

Στα διαγράμματα των εικόνων 4-8 και 4-9 φαίνεται η ποσότητα ενέργειας που απαιτήθηκε και η ποσότητα εκπομπών CO₂ αντίστοιχα για την παραγωγή των ασφαλικών μιγμάτων. Όπως είναι φανερό και τα τέσσερα δείγματα του πειράματος χρησιμοποίησαν λιγότερη ενέργεια και είχαν λιγότερες εκπομπές CO₂ σε σχέση με το συμβατικό HMA μίγμα. Το ανακυκλώσιμο υλικό δεν επηρεάζει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας κατά την παραγωγή του μίγματος. Η επίδραση οφείλεται στη χρήση της τεχνολογίας θερμού ασφαλικού μίγματος και συνεπώς στη μείωση της θερμοκρασίας στη μονάδα παραγωγής.



Εικόνα 4-8 Παραγωγή ενέργειας από την παραγωγή των ασφαλομιγμάτων (Willis 2015)



Εικόνα 4-9 Παραγωγή CO₂ από την παραγωγή των ασφαλτομιγμάτων (Willis 2015)

Συμπερασματικά σύμφωνα με την έρευνα του Willis η χρήση ανακυκλώσιμων υλικών αποδείχτηκε ότι μειώνει σημαντικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των ασφαλικών μιγμάτων. Συγκεκριμένα η αντικατάσταση των φυσικών αδρανών με ανακυκλώσιμα υλικά στα ασφαλικά μίγματα εξοικονόμησε μεταξύ 9% και 29% ενέργειας και μείωσε την παραγωγή CO₂ από 5% έως 29%. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιώντας χαμηλότερες θερμοκρασίες στην παραγωγή μιγμάτων με την ενσωμάτωση τεχνολογίας θερμών ασφαλικών μιγμάτων θα μειωθούν τόσο οι απαιτήσεις ενέργειας όσο και οι εκπομπές CO₂ στη μονάδα παραγωγής. Στη συγκεκριμένη έρευνα 12% με 17% λιγότερη ενέργεια απαιτήθηκε για να παραχθούν τα WMA μίγματα και παράχθηκε 6% με 9% λιγότερο CO₂.

Οι **Zhu et al. (2016)** διερεύνησαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ως προς την κατανάλωση ενέργειας και την εκπομπή αερίων θερμοκηπίου, νέων τεχνολογιών των οδοστρωμάτων, όπως είναι οι τεχνολογίες ανακύκλωσης και το θερμό ασφαλικό μίγμα (WMA), στην Κίνα, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του LCA. Τα

στάδια του κύκλου ζωής που συμπεριλήφθηκαν στην έρευνα αυτή ήταν αυτά της κατασκευής και της συντήρησης και αποκατάστασης. Οι τεχνολογίες ανακύκλωσης που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα ήταν η ανακύκλωση εν θερμώ - σε ασφαλική εγκατάσταση, η ψυχρή ανακύκλωση - σε ασφαλική εγκατάσταση, η ανακύκλωση εν θερμώ-επί τόπου και η ψυχρή ανακύκλωση-επί τόπου. Για καθεμία από αυτές έγινε σύγκριση με τη συμβατική τεχνική φρεζαρίσματος και επαναδιάστρωσης για την ανάλυση της εξοικονόμησης ενέργειας, της μείωσης των εκπομπών και της εξοικονόμησης πόρων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ψυχρή ανακύκλωση-επί τόπου έχει τα σημαντικότερα οφέλη εξοικονόμησης ενέργειας και μείωσης των εκπομπών, ακολουθούμενη από την ψυχρή ανακύκλωση-σε ασφαλική εγκατάσταση.

Για τη ανακύκλωση εν θερμώ-σε ασφαλική εγκατάσταση, η κατανάλωση ενέργειας και οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου μειώνονται με την αύξηση του περιεχομένου ανακτημένου ασφαλικού οδοστρώματος (RAP). Συγκεκριμένα με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα, η κατανάλωση ενέργειας και η εκπομπή αερίων θερμοκηπίου ήταν λίγο υψηλότερη από τις αντίστοιχες τιμές της συμβατικής τεχνικής όταν το περιεχόμενο RAP ήταν 10%. Ωστόσο, όταν η περιεκτικότητα σε RAP ήταν 30% και 50%, υπήρξαν σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη. Επιπλέον, έγινε σύγκριση του θερμού ασφαλικού μίγματος (WMA) και του ασφαλικού μίγματος υψηλής θερμοκρασίας (HMA) και το συμπέρασμα της έρευνας ήταν ότι το πλεονέκτημα της χαμηλότερης θερμοκρασίας κατασκευής αντισταθμίστηκε εν μέρει από την παραγωγή κάποιων χημικών πρόσθετων. Συνεπώς δεν παρουσιάζουν όλα τα θερμά ασφατικά μίγματα οφέλη στην εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών από την άποψη του κύκλου ζωής.

Οι **Bloom et al. (2017)** διεξήγαγαν LCAs για να ποσοτικοποιήσουν τα περιβαλλοντικά οφέλη που αποκομίστηκαν από τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών στην ανακατασκευή ενός αυτοκινητοδρόμου. Τα ανακυκλωμένα υλικά στην ανακατασκευή περιελάμβαναν ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνου, ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος (RCA), ανακυκλωμένες ασφαλικές πλάκες (RAS) και ανακτημένο ασφαλικό οδόστρωμα (RAP). Η ιπτάμενη τέφρα και η σκωρία υψικαμίνου χρησιμοποιήθηκαν ως μερική αντικατάσταση του τσιμέντου Portland

στο μίγμα σκυροδέματος. Το RAP χρησιμοποιήθηκε τόσο στο ασφαλικό μίγμα υψηλής θερμοκρασίας (HMA) όσο και στο υλικό βάσης. Για αυτόν τον αυτοκινητόδρομο, περίπου 20% RAS και 4% RAP χρησιμοποιήθηκε για αντικατάσταση συνδετικού υλικού στο μίγμα HMA. Το RAP χρησιμοποιήθηκε επίσης με RCA ως αδρανές βάσης και υλικό πλήρωσης. Η ανακατασκευή αφορούσε επέκταση από δύο σε τρεις λωρίδες σε κάθε κατεύθυνση. Το υφιστάμενο οδόστρωμα HMA αντικαταστάθηκε από δύσκαμπτο οδόστρωμα, σε ορισμένα σημεία πάνω από ασφαλική βάση.

Το αξιοσημείωτο στοιχείο αυτής της έρευνας αποτελεί το γεγονός ότι πρόσφερε μια μοναδική ευκαιρία να συγκριθούν τα -πριν την κατασκευή- εκτιμώμενα δεδομένα εισόδου (αναφέρονται ως δεδομένα σχεδιασμού ή *planned*) με δεδομένα που συλλέχθηκαν και εντοπίστηκαν, καθώς η κατασκευή του δρόμου ήταν σε εξέλιξη (αναφέρονται ως δεδομένα κατασκευής ή *constructed*), σε αντίθεση με παλαιότερες μελέτες σχετικά με LCAs οδοστρωμάτων που διεξήχθησαν είτε πριν είτε μετά την κατασκευή και συνεπώς έγιναν σημαντικές παραδοχές για τον προσδιορισμό των δεδομένων εισόδου.

Ακόμη, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά εργαλεία-λογισμικά LCA, το PaLATE και το SimaPro, για να παραχθούν και να συγκριθούν τα αποτελέσματα. Τα στάδια του κύκλου ζωής του οδοστρώματος που λήφθηκαν υπόψη σε αυτά τα LCAs ήταν σε πλήρες επίπεδο η παραγωγή των υλικών και σε μικρότερη έκταση η κατασκευή και η συντήρηση, αφού δε θεωρήθηκαν οι διαδικασίες κατασκευής παραμόνο οι απαιτούμενες ποσότητες των υλικών και οι διαδικασίες μεταφοράς τους.

Ο πραγματικός σχεδιασμός, που περιλαμβάνει τα παραπάνω ανακυκλώσιμα υλικά, συγκρίθηκε με έναν σχεδιασμό αναφοράς στον οποίο έγινε χρήση μόνο συμβατικών υλικών, ώστε να προσδιοριστεί η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Αναφορικά με τα αποτελέσματα της εν λόγω έρευνας αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 4-1. Όπως γίνεται αντιληπτό το πρώτο συμπέρασμα είναι ότι όλες οι αναλύσεις προβλέπουν μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τα δεδομένα κατασκευής σε σχέση με αυτές από τα δεδομένα σχεδιασμού, κάτι που οφείλεται στις μεγαλύτερες ποσότητες υλικών που εντοπίστηκαν κατά την κατασκευή

συγκριτικά με τις εκτιμώμενες ποσότητες του σχεδιασμού. Το δεύτερο συμπέρασμα αποτελεί η μεγάλη διαφορά σε κάποια από τα αποτελέσματα ανάμεσα στα δύο χρησιμοποιούμενα λογισμικά, το οποίο αποδίδεται στο διαφορετικό τρόπο εκτίμησης της μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ανά μονάδα παραγωγής υλικών του κάθε λογισμικού.

Πίνακας 4-1 Αποτελέσματα δεδομένων σχεδιασμού (Planned) και κατασκευής (Constructed) των λογισμικών PaLATE και SimaPro (Bloom et al 2017)

Data Set, LCA Tool, Design	Energy (GJ)	CO ₂ (Mg)	NO _x (kg)	SO ₂ (kg)	CO (kg)	Lead (g)
Planned, PaLATE						
Recycled	76,700	5,380	41,300	16,400	10,300	3,780
Virgin	99,200	6,980	44,600	20,600	11,500	4,700
Savings	22,500	1,600	3,300	4,200	1,200	920
Reduction	23%	23%	7%	20%	10%	20%
Planned, SimaPro						
Recycled	72,000	4,470	14,200	8,370	8,800	1,190
Virgin	85,700	5,840	16,800	11,300	12,400	1,890
Savings	13,700	1,370	2,600	2,930	3,600	700
Reduction	16%	23%	15%	26%	29%	37%
Constructed, PaLATE						
Recycled	97,100	6,930	51,400	20,500	13,100	4,760
Virgin	118,000	8,300	53,700	24,300	14,000	5,560
Savings	20,900	1,370	2,300	3,800	900	800
Reduction	18%	17%	4%	16%	6%	14%
Constructed, SimaPro						
Recycled	98,500	6,000	22,620	10,600	14,600	1,480
Virgin	115,000	7,510	22,600	16,800	19,000	2,760
Savings	16,500	1,510	-20	6,200	4,400	1,280
Reduction	14%	20%	-0.1%	37%	23%	46%

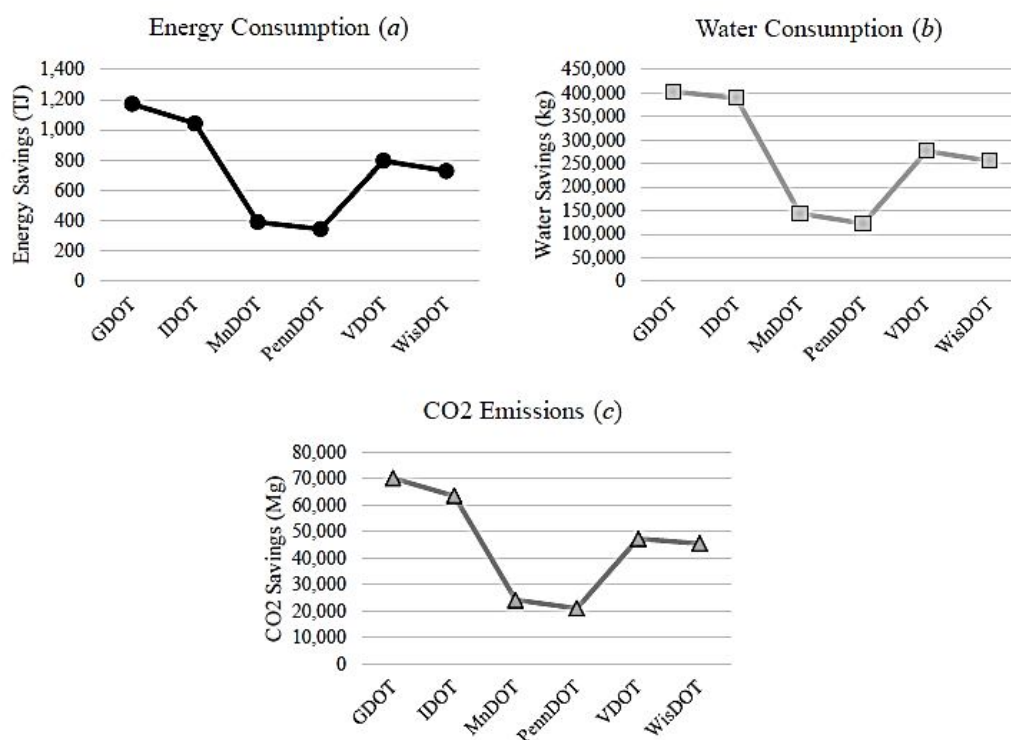
Το τρίτο και πιο σημαντικό συμπέρασμα, όμως, είναι πως η χρήση των ανακυκλωμένων υλικών μειώνει τις επιπτώσεις στα περισσότερα περιβαλλοντικά κριτήρια, συμπεριλαμβανομένων των κυριότερων κατηγοριών της κατανάλωσης ενέργειας (μείωση 15-25%) και των εκπομπών CO₂ (μείωση κατά 17-24%). Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα και αυτής της έρευνας υποδηλώνουν ότι η ενσωμάτωση ανακυκλωμένων υλικών βελτιώνει τη βιωσιμότητα οδοστρωμάτων.

Οι **Del Ponte et al. (2017)** ανέλυσαν τα περιβαλλοντικά οφέλη (σχετικά με τις εκπομπές CO₂, την κατανάλωση ενέργειας και την κατανάλωση νερού) που συνδέονται με την αντικατάσταση συμβατικών υλικών στην κατασκευή αυτοκινητοδρόμων από ανακυκλώσιμα υλικά. Στόχος της έρευνάς τους ήταν η ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών και οικονομικών οφελών του κύκλου ζωής που προσφέρει η ενσωμάτωση ανακυκλώσιμων υλικών και βιομηχανικών παραπροϊόντων στην κατασκευή των οδοστρωμάτων. Για να πραγματοποιηθεί αυτή η ποσοτικοποίηση συλλέχθηκαν δεδομένα των χρησιμοποιημένων ποσοτήτων ανακυκλώσιμων υλικών σε έξι πολιτείες των ΗΠΑ για το έτος 2013 και έγινε χρήση της μεθόδου LCA.

Οι ποσότητες ανακυκλωμένων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν από κάθε πολιτεία αναλύθηκαν στο λογισμικό PaLATE για να προσδιοριστούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τα οφέλη της χρήσης τους. Αυτές οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τα προκύπτοντα οφέλη αναλύθηκαν συγκριτικά υποθέτοντας τον ίδιο ισοδύναμο όγκο συμβατικών υλικών, παρά τις γνωστές διαφορές στις μηχανικές ιδιότητές τους.

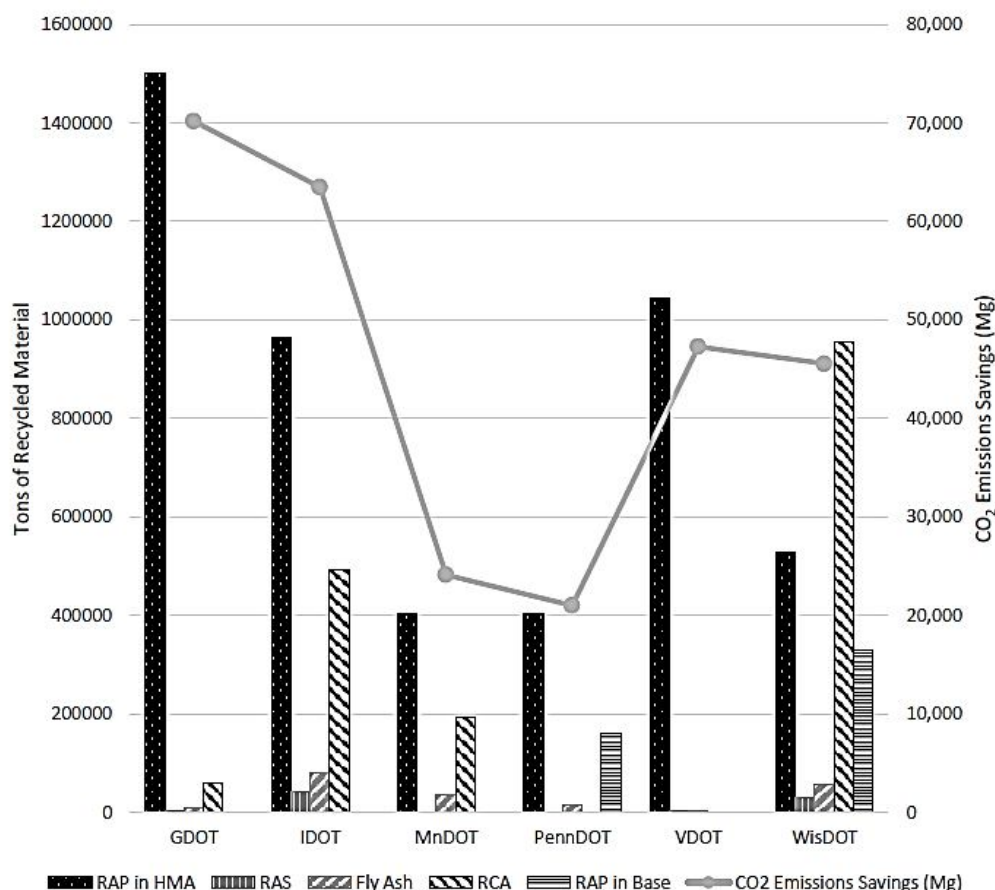
Τρεις παράγοντες περιβαλλοντικών επιπτώσεων κρίθηκαν επαρκείς για την αξιολόγηση των υλικών, οι εκπομπές CO₂, η κατανάλωση ενέργειας και η κατανάλωση νερού. Τα στάδια του κύκλου ζωής που λήφθηκαν υπόψη ήταν η παραγωγή υλικών και η κατασκευή συμπεριλαμβανομένων των διαδικασιών μεταφοράς των υλικών. Επιπλέον, διεξήχθη και οικονομική ανάλυση του κύκλου ζωής για την ανάδειξη των οικονομικών οφελών της χρήσης ανακυκλώσιμων υλικών αλλά αυτό δεν εμπίπτει στο αντικείμενο ενδιαφέροντος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αναφορικά με τα χρησιμοποιημένα ανακυκλώσιμα υλικά, ανακτημένο ασφαλικό οδόστρωμα (RAP) στα ασφατικά μίγματα υψηλής θερμοκρασίας (HMA) και ιπτάμενη τέφρα στα δύσκαμπτα οδοστρώματα χρησιμοποιήθηκαν και στις έξι πολιτείες, ενώ ανακυκλωμένες ασφατικές πλάκες (RAS) και ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος (RCA) χρησιμοποιήθηκαν από τουλάχιστον τέσσερις πολιτείες. Οι περιβαλλοντικές εξοικονομήσεις από τη χρήση ανακυκλώσιμων υλικών υπολογίστηκε ως η διαφορά μεταξύ των κατηγοριών επιπτώσεων για τα ανακυκλωμένα υλικά και τα συμβατικά ισοδύναμά τους με αναλογία αντικατάστασης ένα προς ένα (1:1) και παρουσιάζονται στην εικόνα 4-10. Υπάρχουν σημαντικές εξοικονομήσεις για όλες τις πολιτείες σε κάθε περιβαλλοντικό παράγοντα. Επιπλέον, οι τάσεις για όλες τις περιβαλλοντικές εξοικονομήσεις είναι πολύ παρόμοιες.



Εικόνα 4-10 Εξοικονομήσεις ενέργειας πάνω αριστερά, νερού πάνω δεξιά και εκπομπών CO₂ κάτω για έξι πολιτείες των ΗΠΑ (Del Ponte et al. 2017)

Από τις παραπάνω εικόνες διαπιστώθηκε ότι όλες οι περιβαλλοντικές κατηγορίες παρουσιάζουν παρόμοιες τάσεις. Έτσι, η εξοικονόμηση εκπομπών CO₂ χρησιμοποιήθηκε για να αντιπροσωπεύει όλες τις περιβαλλοντικές κατηγορίες (κατανάλωση ενέργειας, κατανάλωση νερού και εκπομπές CO₂). Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει τους τόνους κάθε ανακυκλωμένου υλικού και τις εκπομπές CO₂ που εξοικονομούνται σε κάθε πολιτεία (εικόνα 4-11) και καταδεικνύει ότι οι πολιτείες που χρησιμοποιούν περισσότερα ανακυκλωμένα υλικά θα πρέπει να αναμένουν περισσότερες εξοικονομήσεις εκπομπών CO₂, ενώ αυτές που χρησιμοποιούν τη μικρότερη ποσότητα ανακυκλωμένου υλικού εξοικονομούν λιγότερες εκπομπές CO₂. Εξαιρείται μία πολιτεία που αν και χρησιμοποίησε περισσότερους τόνους ανακυκλωμένων υλικών από δύο άλλες δεν παρουσίασε καλύτερα αποτελέσματα, καθώς σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και ο τύπος των υλικών αφού ορισμένα υλικά έχουν μεγαλύτερη ικανότητα εξοικονόμησης CO₂ εκπομπών από άλλα. Επιπλέον, παρατηρείται μία τάση μεταξύ της εξοικονόμησης εκπομπών CO₂ και της χρήσης RAP σε HMA που υποδηλώνει ότι οι πολιτείες που χρησιμοποίησαν μεγάλες ποσότητες RAP σε HMA παρουσίασαν υψηλές περιβαλλοντικές εξοικονομήσεις. Ωστόσο, η συνολική χρήση ανακυκλωμένων υλικών έχει επίσης σημαντική επίδραση.



Εικόνα 4-11 Ποσότητες ανακυκλώσιμων υλικών (κατακόρυφες στήλες) και εξοικονομήσεις εκπομπών CO₂ (γκρίζα συνεχής γραμμή) (Del Ponte et al. 2017)

Όσον αφορά στην ποσοστιαία μείωση των περιβαλλοντικών παραγόντων για κάθε πολιτεία υπήρξαν υψηλά ποσοστά εξοικονόμησης για όλους τους περιβαλλοντικούς παράγοντες, ενώ η εξοικονόμηση κατανάλωσης νερού έχει το υψηλότερο (94% - 99%) και η εξοικονόμηση ενέργειας έχει το χαμηλότερο (78% - 83%). Παρά την κατανάλωση ενέργειας που παρουσιάζει το χαμηλότερο ποσοστό εξοικονόμησης από τους τρεις περιβαλλοντικούς παράγοντες, είναι σημαντική η μείωση της ενέργειας που απαιτείται για την κατασκευή οδοστρώματος κατά τουλάχιστον 78% λόγω της χρήσης ανακυκλωμένων υλικών.

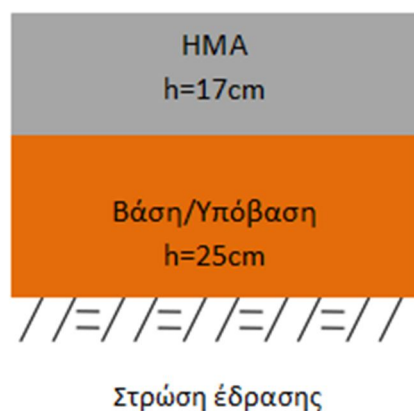
Μπορεί επομένως να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η χρήση ανακυκλωμένων υλικών, σε όλες τις μελέτες, μειώνει σημαντικά την περιβαλλοντική επιβάρυνση που συνδέεται με την κατασκευή του οδοστρώματος. Στη συγκεκριμένη έρευνα οι

συνολικές περιβαλλοντικές εξοικονομήσεις από ανακυκλωμένα υλικά σε όλες τις πολιτείες υπολογίστηκαν σε 4.500 TJ ενέργειας, 1.6 εκατομμύρια κιλά νερού και 49.000 mg CO₂. Αυτό περίπου ισοδυναμεί με την κατανάλωση ενέργειας 110.000 νοικοκυριών στις ΗΠΑ ετησίως, την κατανάλωση 1.139.250 λίτρων νερού και με εκπομπές CO₂ που παράγονται από 58.000 αυτοκίνητα ετησίως. Η χρήση του RAP σε ΗΜΑ είχε ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη περιβαλλοντική εξοικονόμηση σε σύγκριση με τα άλλα υπό εξέταση υλικά, καθώς ήταν και η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη. Ωστόσο, τα συνολικά περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών στα οδοστρώματα επηρεάζονται από το συνδυασμό τόσο της ποσότητας όσο και του τύπου των χρησιμοποιούμενων υλικών.

5 Πειραματική ανάλυση

5.1 Περιγραφή πειραματικού οδοστρώματος

Λαμβάνοντας υπόψη τα ευρήματα από τη διερεύνηση της διεθνούς βιβλιογραφίας, στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η αξιολόγηση του κύκλου ζωής ενός πειραματικού, υφιστάμενου ασφαλικού οδοστρώματος του εθνικού οδικού δικτύου. Όπως φαίνεται στην εικόνα 5-1, το υφιστάμενο οδόστρωμα αποτελούνταν από στρώσεις βάσης και υπόβασης πάχους εικοσιπέντε εκατοστών (25cm) από ασύνδετο υλικό και από ασφατικές στρώσεις πάχους δεκαεφτά εκατοστών (17cm) από ασφατικό μίγμα υψηλής θερμοκρασίας (HMA).



Εικόνα 5-1 Υφιστάμενο οδόστρωμα

Ενώ το υφιστάμενο οδόστρωμα βρισκόταν σε λειτουργία δημιουργήθηκε η απαίτηση αλλαγής της υπάρχουσας χάραξης της οδού, με τη νέα χάραξη να προβλέπει ότι η ερυθρά θα πρέπει να ανέβει σε συγκεκριμένο ύψος. Συγκεκριμένα, η νέα χάραξη της οδού απαιτούσε η ερυθρά να ανυψωθεί κατά δεκατρία εκατοστά (13cm). Για το λόγο αυτό κρίθηκε απαραίτητη μια επέμβαση ενίσχυσης του υπάρχοντος οδοστρώματος μέσω του φρεζαρίσματος κάποιου πάχους των ασφαλικών στρώσεων και τοποθέτηση στρώσεων από ασύνδετο υλικό και ασφαλικών στρώσεων. Η επεμβατική αυτή λύση αναφέρεται στη συνέχεια ως Περίπτωση Α (CASE_A) και περιγράφεται λεπτομερώς.

Σύμφωνα με την επεμβατική αυτή ενέργεια το υλικό των ασφαλικών στρώσεων, το οποίο θα αφαιρεθεί λόγω του φρεζαρίσματος θα απορριφθεί. Ωστόσο, υπάρχει η δυνατότητα το υλικό αυτό να επεξεργαστεί και να χρησιμοποιηθεί ξανά ως ανακτημένο ασφατικό οδόστρωμα (RAP). Ως εκ τούτου διερευνάται μια εναλλακτική επεμβατική λύση, η οποία περιλαμβάνει τη χρήση RAP αντί νέου ασύνδετου υλικού στη νέα στρώση βάσης, μετά το φρεζάρισμα του υφιστάμενου οδοστρώματος. Η εναλλακτική αυτή επεμβατική ενέργεια αναφέρεται στη συνέχεια ως Περίπτωση Β (CASE_B) και περιγράφεται λεπτομερώς.

Σημειώνεται ότι και οι δύο περιπτώσεις ενίσχυσης του οδοστρώματος είναι ισοδύναμες, δηλαδή το τελικό οδόστρωμα τόσο στη μία, όσο και στην άλλη, δύναται να φέρει τις ίδιες προβλεπόμενες διελεύσεις και να έχει την ίδια φθορά, με βάση τα αποτελέσματα αναλυτικού σχεδιασμού (French Design Manual for Pavement Structures 1997). Αντικείμενο της πειραματικής ανάλυσης, που θα ακολουθήσει την περιγραφή των δύο περιπτώσεων, αποτελεί η σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της επέμβασης που προορίζεται για εφαρμογή (Περίπτωση Α) και της εναλλακτικής επέμβασης με τη χρήση RAP (Περίπτωση Β).

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Α (CASE_A)

Η προτεινόμενη για εφαρμογή επεμβατική λύση περιλαμβάνει το φρεζάρισμα σε ένα δεδομένο βάθος στις υπάρχουσες ασφαλικές στρώσεις με ΗΜΑ. Αφού το απαιτούμενο τμήμα αφαιρεθεί, εφαρμόζεται συγκολλητική επάλειψη για την επίτευξη επαρκούς σύνδεσης μεταξύ της υφιστάμενης επιφάνειας του οδοστρώματος και των νέων στρώσεων οδοστρώματος που πρόκειται να κατασκευαστούν.

Το φρεζάρισμα των υφιστάμενων στρώσεων ΗΜΑ εξυπηρετεί δύο σκοπούς. Ο πρώτος είναι να εξαλειφθούν τυχόν επιφανειακά ελαττώματα και ο άλλος σχετίζεται με τεχνολογικές πτυχές όπως η καλύτερη δυνατή επίτευξη σύνδεσης μεταξύ του υφιστάμενου και του νέου υλικού για την αποφυγή ολίσθησης.

Ανάλογα και με την απαίτηση ανύψωσης, το νέο εύκαμπτο οδόστρωμα θα τοποθετηθεί πάνω στην υπάρχουσα στρώση ΗΜΑ μετά το φρεζάρισμα κάποιου

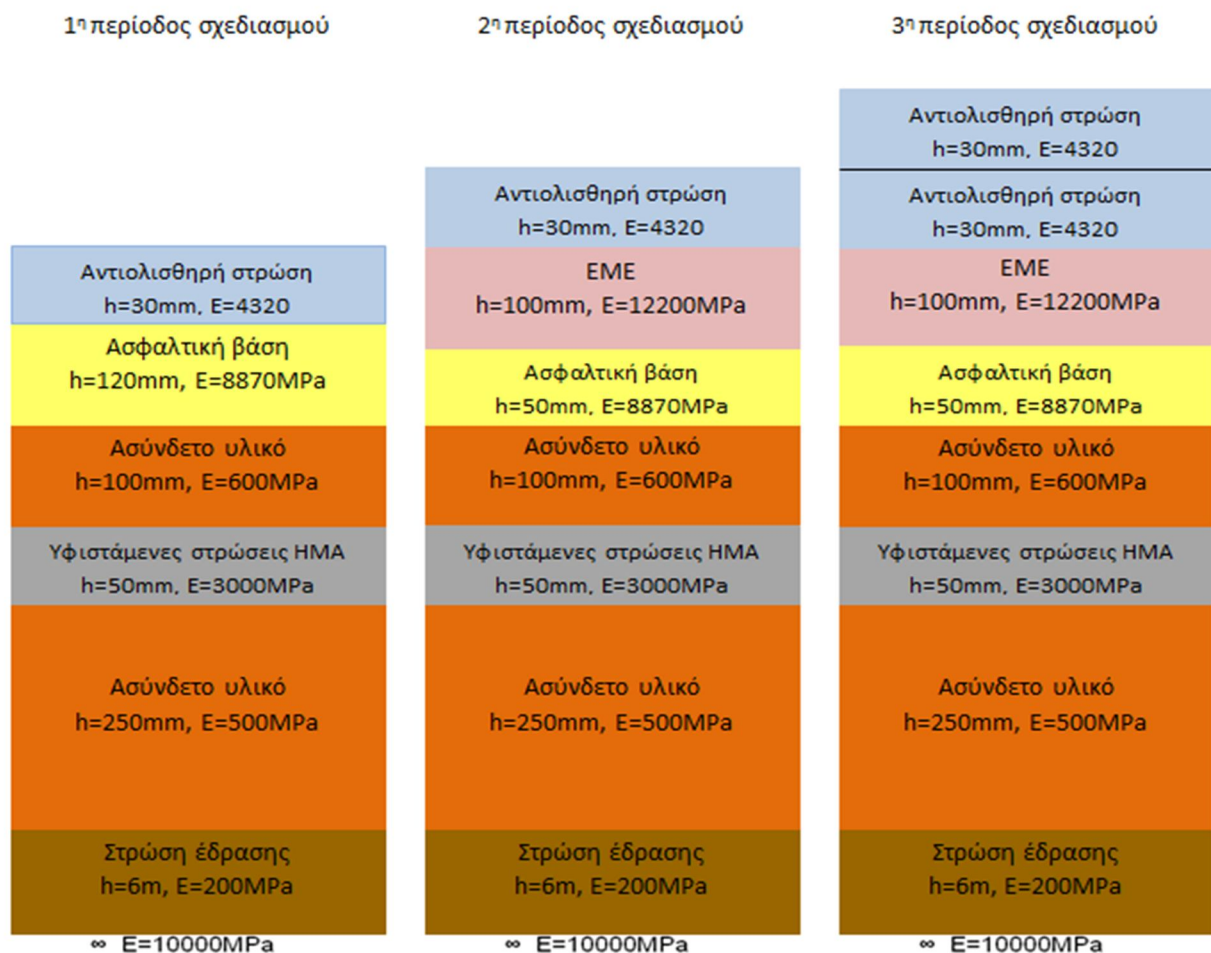
τμήματός της. Στην κορυφή του στρώματος από αδρανή υλικά θα κατασκευαστεί η ασφαλική στρώση βάσης και η επιφανειακή στρώση από ΗΜΑ. Η δομή του υφιστάμενου οδοστρώματος μετά το φρεζάρισμα θα χρησιμεύσει ως στρώμα έδρασης για το νέο οδόστρωμα.

Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις που λήφθηκαν υπόψη για την ανάλυση σχεδιασμού, η περίπτωση πάχους πέντε εκατοστών (5cm) για το υπάρχον στρώμα ΗΜΑ μετά το φρεζάρισμα αντιστοιχεί σε απαίτηση ανύψωσης ίση με δεκατρία εκατοστά (13cm). Αυτή είναι η κρίσιμη περίπτωση του μέγιστου βάθους φρεζαρίσματος για να επιτευχθεί το ελάχιστο πάχος του υπάρχοντος στρώματος ΗΜΑ, με βάση τη συντηρητική προσέγγιση που παρουσιάζεται.

Το βάθος φρεζαρίσματος θα είναι ίσο με δώδεκα εκατοστά (12cm) προκειμένου να επιτευχθεί ένα στρώμα δέκα εκατοστών (10cm) ασύνδετου υλικού και να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις ανύψωσης. Η ασφαλική στρώση βάσης και η επιφανειακή ασφαλική στρώση θα έχουν πάχος δώδεκα εκατοστά (12cm) και τρία εκατοστά (3cm) αντίστοιχα. Τα στοιχεία αυτά απεικονίζονται στην πρώτη διατομή της εικόνας 5-2 που αναφέρεται ως πρώτη περίοδος σχεδιασμού.

Εκτός του αρχικού σχεδιασμού απεικονίζονται και οι μελλοντικές εργασίες συντήρησης και αποκατάστασης του οδοστρώματος που θα απαιτηθούν αν επιλεγεί η συγκεκριμένη αρχική επεμβατική λύση. Η πρώτη ενέργεια συντήρησης, η οποία αναφέρεται στην εικόνα 5-2 ως δεύτερη περίοδος σχεδιασμού, είναι προγραμματισμένη να γίνει μετά από δώδεκα χρόνια λειτουργίας της οδού και περιλαμβάνει τις εξής ενέργειες: φρεζάρισμα της επιφανειακής στρώσης των τριών εκατοστών αλλά και επτά εκατοστών της ασφαλικής βάσης, δηλαδή συνολικό βάθος φρεζαρίσματος δέκα εκατοστών (10cm), αντικατάσταση του τμήματος που αφαιρέθηκε με την κατασκευή ασφαλικής συνδετικής στρώσης από ασφαλτόμιγμα υψηλού μέτρου δυσκαμψίας (EME - Enrobés à Module Elevé) πάχους δέκα εκατοστών (10cm) και τέλος κατασκευή της επιφανειακής ασφαλικής στρώσης τριών εκατοστών (3cm).

Η δεύτερη εργασία συντήρησης είναι προγραμματισμένη να διενεργηθεί δώδεκα χρόνια μετά την πρώτη ενέργεια συντήρησης που περιγράφηκε παραπάνω και περιλαμβάνει μόνο την κατασκευή μιας πρόσθετης επιφανειακής στρώσης τριών εκατοστών (3cm) πάνω σε αυτή που θα υπάρχει ήδη για την εξάλειψη επιφανειακών ανωμαλιών.



Εικόνα 5-2 Περίπτωση Α (CASE_A)

Η παραπάνω εικόνα, λοιπόν, αποδίδει πλήρως την πρώτη περίπτωση επεμβατικής ενέργειας που προτάθηκε για την επίλυση του προβλήματος ανύψωσης της ερυθράς της υπάρχουσας οδού, περιλαμβάνοντας τόσο την αρχικό σχεδιασμό του νέου οδοστρώματος όσο και το μελλοντικό πρόγραμμα συντήρησης και αποκατάστασης.

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Β (CASE B)

Τα υπάρχοντα υλικά ασφαλικού οδοστρώματος συνήθως απομακρύνονται κατά τις εργασίες αποκατάστασης ή ανακατασκευής. Αφού αφαιρεθούν και υποστούν επεξεργασία, τα συγκεκριμένα υλικά οδοστρώματος συγκροτούν το ανακτημένο ασφαλικό οδόστρωμα (RAP), το οποίο περιέχει πολύτιμο ασφαλικό συνδετικό υλικό και αδρανή. Όταν τα υλικά συνθλίβονται και συμπιέζονται σωστά, το RAP αποτελείται από υψηλής ποιότητας, καλά διαβαθμισμένα αδρανή υλικά επικαλυμμένα με άσφαλτο.

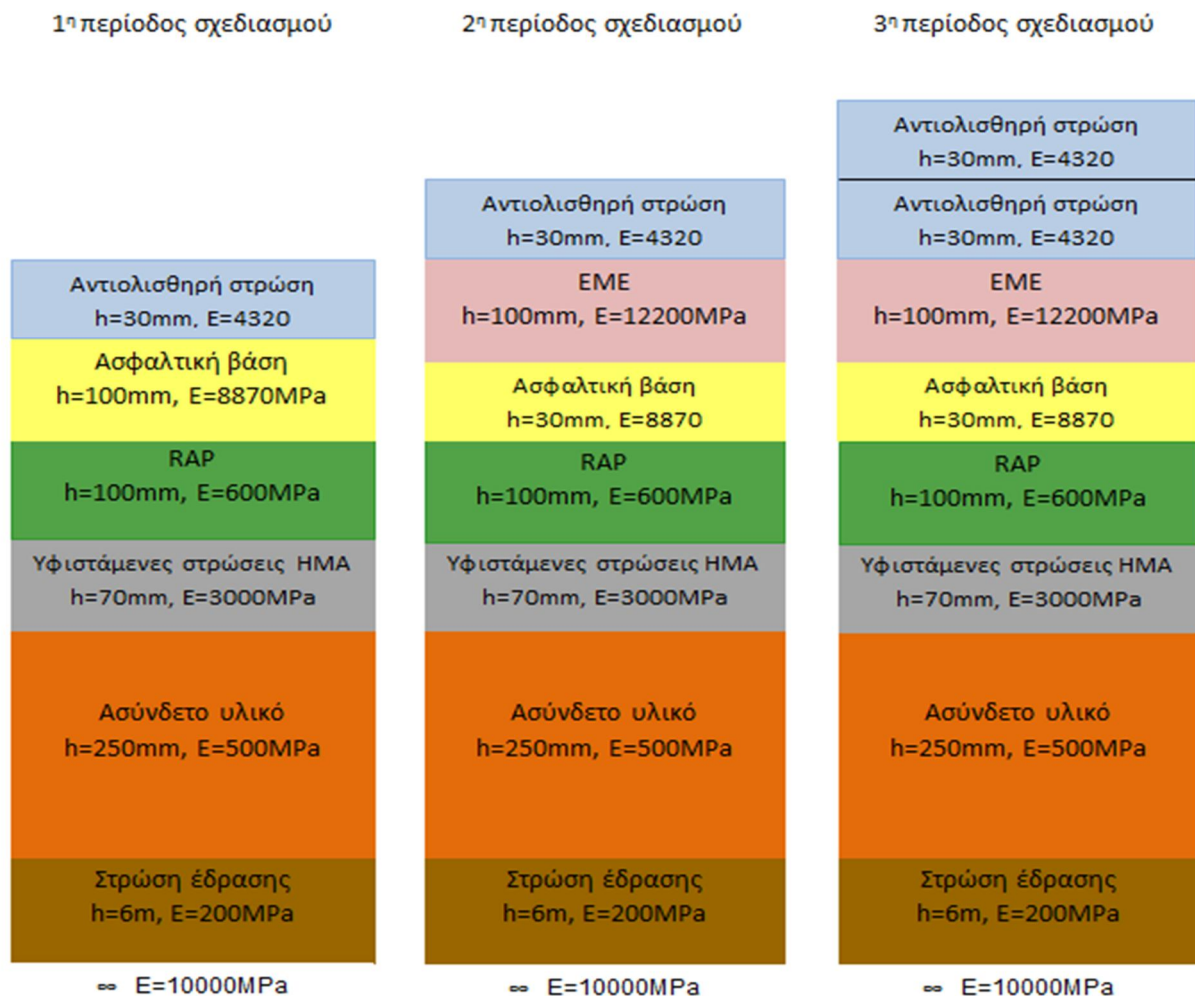
Το RAP χρησιμοποιείται συνήθως ως υποκατάστατο στην ανακύκλωση ασφαλικού οδοστρώματος, αλλά χρησιμοποιείται επίσης και ως υλικό βάσης ή υπόβασης. Η επαναχρησιμοποίηση υλικού οδοστρώματος αποτελεί χρήσιμη εναλλακτική λύση για τα συμβατικά υλικά, επειδή μειώνει τη χρήση των παρθένων αδρανών υλικών. Επίσης, εξοικονομεί ενέργεια, καθώς μειώνει το κόστος μεταφοράς που απαιτείται για την παραγωγή ποιοτικών παρθένων αδρανών υλικών και συμβάλλει στη διατήρηση των πόρων. Επιπλέον, μειώνει την ποσότητα των απορριμμάτων κατασκευής που τοποθετούνται σε χώρους υγειονομικής ταφής και δεν καταστρέφει μη ανανεώσιμους φυσικούς πόρους, όπως παρθένο αδρανές και ασφαλικό συνδετικό υλικό.

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, για τους σκοπούς του παρόντος σχεδιασμού που αποτελεί την εναλλακτική περίπτωση αρχικής επεμβατικής προσέγγισης, διερευνάται η δυνατότητα απομάκρυνσης και επεξεργασίας δέκα εκατοστών (10cm) του υφιστάμενου ασφαλικού μίγματος HMA, ώστε να γίνει RAP που θα χρησιμεύσει ως υλικό στρώσης βάσης του νέου οδοστρώματος.

Εφόσον το μέτρο δυσκαμψίας του υπάρχοντος υλικού ασφαλικού μίγματος είναι σημαντικά υψηλό και το RAP θα περιέχει μια ποσότητα συνδετικού υλικού ασφάλτου, μια τιμή μέτρου δυσκαμψίας 600 MPa θεωρείται αντιπροσωπευτική. Σημειώνεται ότι αυτή είναι μια συντηρητική προσέγγιση υπέρ της ασφαλείας.

Έτσι, λοιπόν, το πάχος της υπάρχουσας ασφαλικής στρώσης από ΗΜΑ θα είναι πλέον εφτά εκατοστά (7cm) και πάνω σε αυτή θα εδρασθεί η στρώση βάσης από RAP πάχους δέκα εκατοστών (10cm), όσο δηλαδή και το βάθος φρεζαρίσματος. Στην κορυφή της στρώσης βάσης θα κατασκευαστούν οι ασφαλικές στρώσεις βάσης και επιφανειακή στρώση με πάχη δέκα εκατοστά (10cm) και τρία εκατοστά (3cm) αντίστοιχα. Όλα τα στοιχεία αυτά φαίνονται στην πρώτη διατομή της εικόνας 5-3 που αναφέρεται ως πρώτη περίοδος σχεδιασμού.

Όπως και προηγουμένως δεν απεικονίζεται μόνο ο αρχικός σχεδιασμός της εναλλακτικής επεμβατικής λύσης που διερευνάται, αλλά και οι απαιτούμενες μελλοντικές ενέργειες συντήρησης και αποκατάστασης του οδοστρώματος. Τόσο το χρονοδιάγραμμα των εργασιών συντήρησης και αποκατάστασης, όσο και οι ενέργειες που θα πρέπει να πραγματοποιηθούν στο πλαίσιο των εργασιών αυτών συμπίπτουν με αυτά της περίπτωσης Α και συμπεριλαμβάνονται επίσης στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5-3 Περίπτωση Β (CASE_B)

Η παραπάνω εικόνα αποδίδει πλήρως την éναλλακτική περίπτωση επεμβατικής ενέργειας που διερευνάται για την επίλυση του προβλήματος ανύψωσης της ερυθράς της υπάρχουσας οδού, περιλαμβάνοντας τόσο την αρχικό σχεδιασμό του νέου οδοστρώματος όσο και το μελλοντικό πρόγραμμα συντήρησης και αποκατάστασης.

5.2 Διαδικασία ανάλυσης

Με βάση τα στοιχεία, που περιγράφηκαν προηγουμένως, ακολούθησε η ανάλυση και σύγκριση των δύο διαφορετικών περιπτώσεων επέμβασης σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις που προκαλούν, μέσω της μεθοδολογίας της αξιολόγησης του κύκλου ζωής (LCA), σύμφωνα και με τα όσα έχουν αναφερθεί στο

δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο. Τονίζεται ότι από άποψη σχεδιασμού και επάρκειας του οδοστρώματος, οι δύο περιπτώσεις αφορούν σε ισοδύναμες διατομές.

Στόχο της παρούσας διαδικασίας ανάλυσης αποτελεί η σύγκριση δύο εναλλακτικών λύσεων που αφορούν το στάδιο συντήρησης και αποκατάστασης του κύκλου ζωής του οδοστρώματος, ενώ στο πλαίσιο του ορισμού του πεδίου εφαρμογής θα καθορισθούν τόσο η λειτουργική μονάδα, όσο και τα όρια του συστήματος. Ως λειτουργική μονάδα στην ανάλυσή μας ορίζεται το μήκος ενός χιλιομέτρου του πειραματικού οδοστρώματος που περιλαμβάνει δύο λωρίδες κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση πλάτους τρεισήμισι μέτρων (3,50m) και ΛΕΑ πλάτους δύο μέτρων και τριάντα εκατοστών (2,30m). Τα όρια του συστήματος της ανάλυσής μας περιλαμβάνουν τα στάδια παραγωγής υλικών, κατασκευής και συντήρησης και αποκατάστασης, ενώ παραλείπονται τα στάδια χρήσης και τέλους ζωής.

Ως εργαλείο για την πραγματοποίηση της διαδικασίας ανάλυσης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Athena Pavement LCA του ινστιτούτου βιώσιμων υλικών Athena (Athena Sustainable Materials Institute-Impact Estimator for Highways:User Guide 2013). Πρόκειται για έναν μη κερδοσκοπικό ερευνητικό οργανισμό στον Καναδά που συνεργάζεται με τους υπεύθυνους για την επίτευξη βιωσιμότητας στον τομέα της παραγωγής προϊόντων, του σχεδιασμού των κτιρίων, των οδών και άλλων κατασκευών και των πράσινων προγραμμάτων περιβαλλοντικής επισήμανσης, για να επιτρέψει μικρότερες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις στην παραγωγή και κατανάλωση δομικών και άλλων υλικών.

Στον τομέα των οδοστρωμάτων το Athena Institute έχει δημιουργήσει το συγκεκριμένο λογισμικό, ώστε ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος του σχεδιασμού οδοστρωμάτων να αποτελέσει έναν παράγοντα που θα λαμβάνεται υπόψη στη λήψη αποφάσεων. Αποτελείται από ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο ανάλυσης απογραφής και εκτίμησης επιπτώσεων του κύκλου ζωής, το οποίο βοηθάει τους επαγγελματίες στον τομέα των μεταφορών να συγκρίνουν τις εναλλακτικές λύσεις σχεδιασμού από περιβαλλοντική άποψη. Παρέχει στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων αξιόλογες πληροφορίες σχετικά με τις επιπτώσεις της παραγωγής υλικών, των διαδικασιών μεταφοράς, των διαδικασιών κατασκευής, συντήρησης και

αποκατάστασης αλλά και της αλληλεπίδρασης οδοστρώματος-οχήματος. Το λογισμικό Pavements LCA βασίζεται στα πρότυπα μεθοδολογίας LCA που καθορίζονται από τις σειρές Διεθνών Οργανισμών Προτύπων (ISO) 14040 και 14044. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται από το εν λόγω εργαλείο προέρχονται από τη βάση δεδομένων απογραφής του κύκλου ζωής υλικών του Καναδά και των ΗΠΑ.

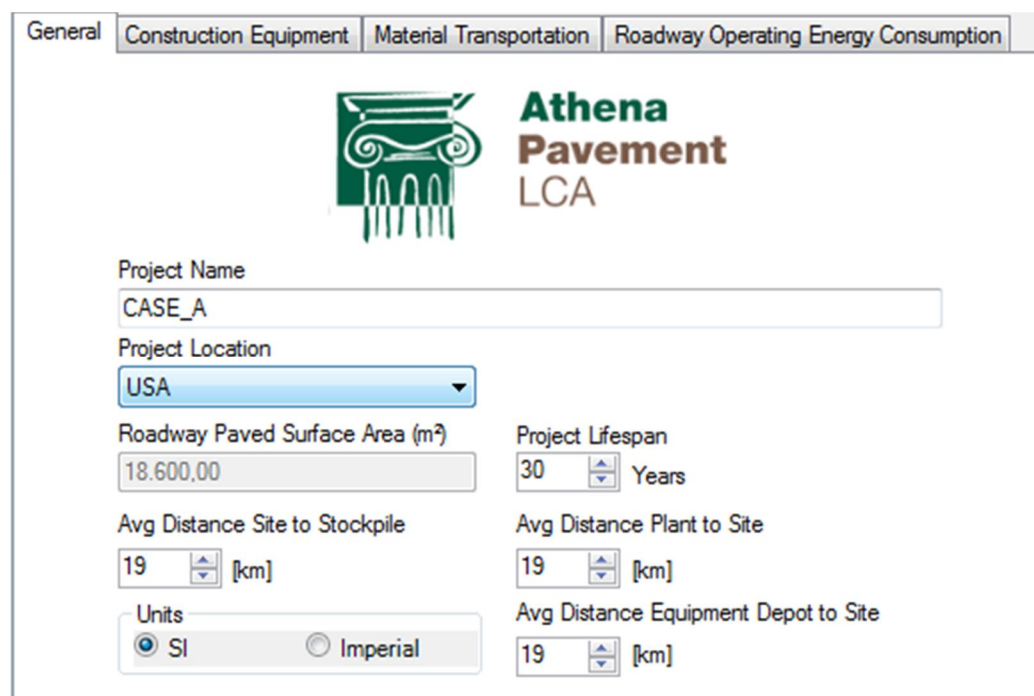
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης απογραφής περιλαμβάνουν τις ροές από και προς τη φύση: ροές ενέργειας και πρώτων υλών, καθώς και εκπομπές στον αέρα, το νερό και τη γη. Οι χρήστες περιγράφουν γρήγορα τις παραμέτρους της οδού μέσω μερικών εύκολων βημάτων εισόδου στοιχείων και μπορούν να δουν τα αποτελέσματα με διάφορους τρόπους. Οι εισροές μπορούν να περιλαμβάνουν διάφορους τύπους βάσης, υπόβασης και οδοστρώματος χρησιμοποιώντας ένα απλό περιβάλλον εργασίας γραφικών. Το λογισμικό στη συνέχεια εκτελεί τις παραμέτρους μέσω μιας ευρείας γκάμας από βάσεις δεδομένων υλικών, ενέργειας, εξοπλισμού και μεταφορών που αντλούνται από τις πηγές του Athena Institute. Τα δεδομένα υλικών περιλαμβάνουν εθνικούς και βιομηχανικούς μέσους όρους σχετικά με τις ροές τους για τις διαδικασίες του κύκλου ζωής, όπως η εξόρυξη, η επεξεργασία και η παραγωγή κάθε υλικού.

Η διαδικασία ανάλυσης συνεχίζεται με την εκτίμηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής, δηλαδή δημιουργούνται τα αποτελέσματα της ανάλυσης απογραφής τα οποία παρουσιάζουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις όσον αφορά στην υπερθέρμανση του πλανήτη, την οξίνιση, την εξάντληση του όζοντος, την ανθρώπινη υγεία, το φωτοχημικό νέφος και τον ευτροφισμό, όπως προτείνει η μεθοδολογία TRACI (Tool for Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts) σύμφωνα με τον αμερικανικό Οργανισμό Προστασίας του Περιβάλλοντος (US Environmental Protection Agency – EPA). Επιπρόσθετα αναφέρει και την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων.

Το λογισμικό Athena Pavements LCA λαμβάνει υπόψη τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ακόλουθων σταδίων του κύκλου ζωής: παραγωγής υλικών, συμπεριλαμβανομένης της εξόρυξης πόρων, του ανακυκλωμένου περιεχομένου αν υπάρχει και των σχετικών μεταφορών, κατασκευής, συντήρησης και

αποκατάστασης, ενώ μπορούν να συμπεριληφθούν οι ετήσιες και συνολικές λειτουργικές ενεργειακές επιπτώσεις, αλλά και η επίδραση της αλληλεπίδρασης οδοστρώματος-οχήματος που είναι ένας παράγοντας του σταδίου χρήσης. Η κατεδάφιση και τελική διάθεση δε συμπεριλαμβάνονται, καθώς οι αυτοκινητόδρομοι έχουν συνήθως αρκετά μεγάλη διάρκεια ζωής.

Συγκεκριμένα, στην οθόνη έναρξης απαιτούνται μερικά γενικά στοιχεία εισόδου δεδομένων (Εικόνα 5-4). Η θέση του έργου είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό ορισμένων αποστάσεων μεταφοράς υλικών κατασκευής και για τον προσδιορισμό των περιφερειακών βάσεων δεδομένων υλικών του λογισμικού που θα χρησιμοποιηθούν. Η προεπιλεγμένη διάρκεια ζωής ενός έργου είναι τα πενήντα χρόνια, ενώ υπάρχει η δυνατότητα να γίνουν οποιεσδήποτε αλλαγές επιθυμεί ο χρήστης χειροκίνητα. Επίσης, το λογισμικό παρέχει μια πλήρη λίστα από μηχανήματα και εξοπλισμό που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή και συντήρηση και αποκατάσταση των οδοστρωμάτων, από την οποία γίνεται αυτόματη επιλογή για κάθε τυπική δραστηριότητα.



The screenshot shows the 'General' tab of the 'Athena Pavement LCA' software. The interface includes a logo and several input fields for project data:

- Project Name:** CASE_A
- Project Location:** USA (selected from a dropdown menu)
- Roadway Paved Surface Area (m²):** 18.600,00
- Project Lifespan:** 30 Years
- Avg Distance Site to Stockpile:** 19 [km]
- Avg Distance Plant to Site:** 19 [km]
- Units:** SI (selected), Imperial
- Avg Distance Equipment Depot to Site:** 19 [km]

Εικόνα 5-4 Γενικά στοιχεία εισόδου

Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή της γεωμετρίας της οδού, του αριθμού των διάφορων στρώσεων και του πάχους αυτών και σχηματίζεται μια τυπική διατομή του εξεταζόμενου οδοστρώματος, πάνω στην οποία βασίζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ανάλογα και με την επιλεγμένη λειτουργική μονάδα (Εικόνα 5-5).

The screenshot displays the 'Design' tab of a pavement design software. It includes input fields for survey details (Name: CASE_A, Scenario: Select a quick start road design scenario), cost (Total Initial Cost: 0.00 \$), lane length (1.000 km), number of lanes (4), and number of pavement lifts (1). It also features sections for Pavement Types (Flexible and Rigid), Reinforcing Steel (Steel Calculator, Epoxy Coated Steel, Galvanized Steel, Black Steel), and Left/Right Side Elements (Shoulder, Rounding, Fore Slope). A 'Roadway Cross Section' diagram shows a 4-lane road with paved shoulders and a granular layer. Below this is a 'Roadway Design Details' table.

Element Name	Material	Width [m]	Thickness [mm]	Density [Tonnes/m3]	Mass [Tonnes]	Area [m2]	Volume [m3]
Granular Layer 1	Granular A	18.6	250	2.4000	11.160,00	4.65	4.650
Lane 1 Lift 1	HMA PG-64-22	3.5	170	2.4600	1.463,70	0.595	595
Lane 2 Lift 1	HMA PG-64-22	3.5	170	2.4600	1.463,70	0.595	595
Lane 3 Lift 1	HMA PG-64-22	3.5	170	2.4600	1.463,70	0.595	595
Lane 4 Lift 1	HMA PG-64-22	3.5	170	2.4600	1.463,70	0.595	595
Left Side Shoulder Paved Lift 1	HMA PG-64-22	2.3	170	2.4600	961,86	0.391	391
Right Side Shoulder Paved Lift 1	HMA PG-64-22	2.3	170	2.4600	961,86	0.391	391

Εικόνα 5-5 Στοιχεία σχεδιασμού

Τέλος, περιγράφεται αναλυτικά το μελλοντικό πρόγραμμα συντήρησης και αποκατάστασης (Εικόνα 5-6) και αν υπάρχουν τα απαραίτητα στοιχεία υπάρχει η επιλογή συμπερίληψης και της αλληλεπίδρασης οδοστρώματος-οχήματος κατά τη χρήση.

Design

Rehabilitation Schedule

Pavement Vehicle Interaction

Add

Duplicate

Remove

Clear

Calculate

Sort

Activity Timing			Activity Details			Affected Road		% of Element Affected by Activity				
	Year after Initial Construction	Expected Lifespan [Years]	Activity Type	Description	Total Cost	Paved Shoulders	Lanes	% Surface Area	% Length	ysicalQuantit	Unit	
▶		20	12	Asphalt Partial Depth Reclamation	Mill of 12cm HMA	0,00	☒	☒	100	0	18.600,0000	m2
		20	12	Asphalt Paving		0,00	☒	☒	100	0	18.600,0000	m2
		20	12	Base & Subbase Preparation	Placement of new unbound layer	0,00	☒	☒	100	0	18.600,0000	m2
		32	12	Asphalt Partial Depth Reclamation	Mill of 7cm HMA base course and 3cm HMA wearing course & paving 10cm of EME	0,00	☒	☒	100	0	18.600,0000	m2
		32	12	Asphalt Paving		0,00	☒	☒	100	0	18.600,0000	m2
		44	10	Asphalt Paving		0,00	☒	☒	100	0	18.600,0000	m2

Εικόνα 5-6 Πρόγραμμα συντήρησης και αποκατάστασης

Με βάση όλα τα παραπάνω εξάγονται τα αποτελέσματα με τη μορφή πίνακα ή γραφημάτων, τόσο ως απόλυτες τιμές για κάθε έργο ξεχωριστά όσο και ως συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ των έργων.

Στο πλαίσιο της παρούσας διαδικασίας ανάλυσης του πειραματικού οδοστρώματος, λόγω της έλλειψης στοιχείων, αλλά και τους περιορισμούς του λογισμικού ως προς την τοποθεσία έργου επιλέχθηκαν τα προεπιλεγμένα αρχικά στοιχεία εισόδου που παρέχει το Athena Pavements LCA για την περίπτωση των ΗΠΑ, ενώ ως αρχική διάρκεια ζωής θεωρήθηκαν τα τριάντα χρόνια. Αυτό δεν επηρεάζει ουσιαστικά τα αποτελέσματα, καθώς πρόκειται για σύγκριση δύο διαφορετικών επεμβατικών λύσεων μεν που θα εφαρμοστούν όμως στο ίδιο υφιστάμενο οδόστρωμα, επομένως ο παράγοντας της τοποθεσίας του έργου και κατ' επέκταση οι αποστάσεις μεταφοράς υλικών και η χρήση εξοπλισμού δε θα διαδραματίσει κάποιο ρόλο.

Στη συνέχεια ακολούθησε η περιγραφή της γεωμετρίας της οδού και ο σχηματισμός της τυπικής διατομής του πειραματικού οδοστρώματος σύμφωνα με τις διαστάσεις και τα πάχη που περιγράφονται αναλυτικά στην προηγούμενη ενότητα. Ως προς τα υλικά ασφαλικών στρώσεων έγινε η κατά το δυνατόν καλύτερη αντιστοίχιση με τα τυπικά ασφαλτομίγματα που χρησιμοποιούνται στις ΗΠΑ και μπορούσαν να επιλεγθούν από τις βάσεις δεδομένων του λογισμικού. Ωστόσο, αυτό μικρή σημασία έχει ως προς τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα της ανάλυσης μας, καθώς

και στις δύο περιπτώσεις οι ασφαλικές στρώσεις αποτελούνται από τα ίδια υλικά και αυτό που μας ενδιαφέρει δεν είναι τα αποτελέσματα κάθε περίπτωσης ως απόλυτες τιμές, αλλά η σύγκριση αυτών.

Αφού πρόκειται για το ίδιο υφιστάμενο οδόστρωμα τόσο στην πρώτη, όσο και στη δεύτερη περίπτωση τα στάδια παραγωγής υλικών και κατασκευής θα έχουν ακριβώς την ίδια περιβαλλοντική επίδραση και στις δύο περιπτώσεις, καθώς θεωρούν ότι έχει συμβεί πριν την επεμβατική ενέργεια που συζητείται. Το κρίσιμο στάδιο της διαδικασίας ανάλυσης είναι αυτό της συντήρησης και αποκατάστασης, κατά το οποίο συντελούνται όλες οι ενέργειες που αναφέρθηκαν αναλυτικά για κάθε περίπτωση στην προηγούμενη ενότητα. Θεωρήθηκε ότι το υφιστάμενο οδόστρωμα είχε δέκα χρόνια εναπομένουσα διάρκεια ζωής, όταν θα γινόταν η κάθε μια αρχική επεμβατική ενέργεια. Δημιουργήθηκε στο λογισμικό το πρόγραμμα συντήρησης και αποκατάστασης για την κάθε περίπτωση με την επιλογή στοιχείων όπως οι επιμέρους διαδικασίες κάθε εργασίας, το πλάτος και η επιφάνεια οδοστρώματος που θα επηρεαστεί, το χρονικό σημείο επέμβασης και η προσδοκώμενη επέκταση της διάρκειας ζωής λόγω της ενέργειας.

Λόγω έλλειψης των απαιτούμενων στοιχείων εισόδου αγνοήθηκε η επίδραση του παράγοντα της αλληλεπίδρασης οδοστρώματος-οχήματος που είναι το στοιχείο του σταδίου χρήσης που λαμβάνεται υπόψη από το Athena Pavements LCA, ενώ επίσης παραλείπεται και το στάδιο του τέλους ζωής αφού δε συμπεριλαμβάνεται καθόλου στο λογισμικό.

Μετά τη συμπλήρωση και περιγραφή όλων αυτών των απαιτούμενων στοιχείων και παραμέτρων για κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις επέμβασης στο πειραματικό οδόστρωμα, πραγματοποιήθηκε η διαδικασία ανάλυσης όπως περιγράφηκε παραπάνω και κατέστη δυνατή η εξαγωγή των αποτελεσμάτων σύγκρισης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά στην ενότητα που ακολουθεί και με την ερμηνεία αυτών ολοκληρώνεται η αξιολόγηση του κύκλου ζωής για το πειραματικό οδόστρωμα.

5.3 Αποτελέσματα

Από τη διαδικασία ανάλυσης του λογισμικού Athena Pavements LCA που περιγράφηκε παραπάνω προέκυψαν τα αποτελέσματα για τις δύο περιπτώσεις του πειραματικού οδοστρώματος που αφορούν τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις που προκαλούνται σε κάθε περίπτωση και κατατάσσονται στις εξής περιβαλλοντικές κατηγορίες: υπερθέρμανση του πλανήτη, οξίνιση, εξάντληση του όζοντος, βλαβερά σωματίδια για την ανθρώπινη υγεία, φωτοχημικό νέφος, ευτροφισμός και κατανάλωση ενέργειας.

Οι περιβαλλοντικές αυτές επιπτώσεις ποσοτικοποιήθηκαν για τα στάδια παραγωγής υλικών, κατασκευής και συντήρησης και αποκατάστασης του κύκλου ζωής. Έτσι, ακολουθεί η αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων του LCA με τη βοήθεια πινάκων και γραφημάτων για την καλύτερη απεικόνισή τους ως προς τη σύγκριση των δύο περιπτώσεων.

Αρχικά στους παρακάτω πίνακες 5-1 και 5-2 φαίνονται αναλυτικά, για κάθε περιβαλλοντική κατηγορία με τις μονάδες μέτρησης της κάθε μιας, οι ποσοτικοποιημένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που οφείλονται στα υλικά, τον εξοπλισμό και τις διαδικασίες μεταφοράς τόσο για κάθε εξεταζόμενο στάδιο του κύκλου ζωής ξεχωριστά, όσο και τη συνολική περιβαλλοντική επίπτωση της κατηγορίας όλων των σταδίων αθροιστικά.

Πίνακας 5-1 Περιβαλλοντική επίδραση κάθε κατηγορίας (ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Α)

Περιβαλλοντική κατηγορία	Μονάδα	Παραγωγή υλικών			Κατασκευή			Συντήρηση και αποκατάσταση			Σύνολα		
		Υλικά	Μεταφορά	Σύνολο	Εξοπλισμός	Μεταφορά	Σύνολο	Υλικά και εξοπλ.	Μεταφορά	Σύνολο	Υλικά και εξοπλ.	Μεταφορά	Σύνολο
Υπερθέρμανση του πλανήτη	kg CO ₂ eq	5,21E+05	5,36E+04	5,75E+05	6,48E+05	3,26E+04	6,81E+05	7,39E+05	4,83E+04	7,87E+05	1,91E+06	1,35E+05	2,04E+06
Οξίνιση	kg SO ₂ eq	3,14E+03	4,83E+02	3,62E+03	5,84E+03	2,94E+02	6,13E+03	5,55E+03	4,35E+02	5,99E+03	1,45E+04	1,21E+03	1,57E+04
Επιβλαβή σωματίδια (ανθρώπινη υγεία)	kg PM _{2.5} eq	1,24E+03	2,85E+01	1,27E+03	3,44E+02	1,73E+01	3,61E+02	8,74E+02	2,56E+01	8,99E+02	2,46E+03	7,14E+01	2,53E+03
Ευτροφισμός	kg N eq	1,68E+02	3,19E+01	2,00E+02	3,86E+02	1,94E+01	4,05E+02	3,41E+02	2,87E+01	3,70E+02	8,95E+02	8,01E+01	9,75E+02
Εξάντληση όζοντος	kg CFC-11eq	9,52E-06	1,86E-06	1,14E-05	2,25E-05	1,14E-06	2,37E-05	1,97E-05	1,68E-06	2,14E-05	5,17E-05	4,68E-06	5,64E-05
Φωτοχημικό νέφος	kg O ₃ eq	4,24E+04	1,62E+04	5,86E+04	1,96E+05	9,87E+03	2,06E+05	1,43E+05	1,46E+04	1,57E+05	3,81E+05	4,07E+04	4,22E+05
Συνολική πρωτογενής ενέργεια	MJ	3,05E+07	7,79E+05	3,13E+07	9,42E+06	4,74E+05	9,89E+06	2,72E+07	7,01E+05	2,79E+07	6,71E+07	1,95E+06	6,91E+07

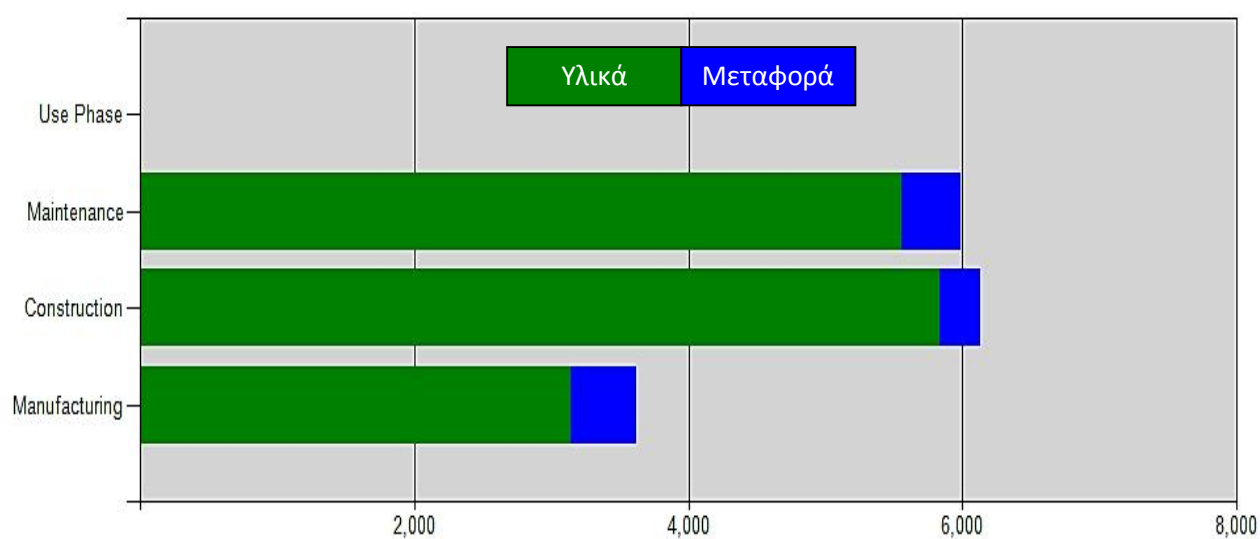
Πίνακας 5-2 Περιβαλλοντική επίδραση κάθε κατηγορίας (ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Β)

		Παραγωγή υλικών			Κατασκευή			Συντήρηση και αποκατάσταση			Σύνολο		
Περιβαλλοντική κατηγορία	Μονάδα	Υλικά	Μεταφορά	Σύνολο	Εξοπλισμός	Μεταφορά	Σύνολο	Υλικά και εξοπλ.	Μεταφορά	Σύνολο	Υλικά και εξοπλ.	Μεταφορά	Σύνολο
Υπερθέρμανση του πλανήτη	kg CO ₂ eq	5,21E+05	5,36E+04	5,75E+05	6,48E+05	3,26E+04	6,81E+05	6,29E+05	3,55E+04	6,65E+05	1,80E+06	1,22E+05	1,92E+06
Οξίνιση	kg SO ₂ eq	3,14E+03	4,83E+02	3,62E+03	5,84E+03	2,94E+02	6,13E+03	4,71E+03	3,20E+02	5,03E+03	1,37E+04	1,10E+03	1,48E+04
Επιβλαβή σωματίδια (ανθρώπινη υγεία)	kg PM _{2.5} eq	1,24E+03	2,85E+01	1,27E+03	3,44E+02	1,73E+01	3,61E+02	7,11E+02	1,89E+01	7,30E+02	2,29E+03	6,46E+01	2,36E+03
Ευτροφισμός	kg N eq	1,68E+02	3,19E+01	2,00E+02	3,86E+02	1,94E+01	4,05E+02	2,89E+02	2,11E+01	3,10E+02	8,43E+02	7,25E+01	9,15E+02
Εξάντληση όζοντος	kg CFC-11 eq	9,52E-06	1,86E-06	1,14E-05	2,25E-05	1,14E-06	2,37E-05	1,67E-05	1,24E-06	1,79E-05	4,87E-05	4,24E-06	5,30E-05
Φωτοχημικό νέφος	kg O ₃ eq	4,24E+04	1,62E+04	5,86E+04	1,96E+05	9,87E+03	2,06E+05	1,20E+05	1,07E+04	1,31E+05	3,58E+05	3,68E+04	3,95E+05
Συνολική πρωτογενής ενέργεια	MJ	3,05E+07	7,79E+05	3,13E+07	9,42E+06	4,74E+05	9,89E+06	2,35E+07	5,16E+05	2,40E+07	6,34E+07	1,77E+06	6,52E+07

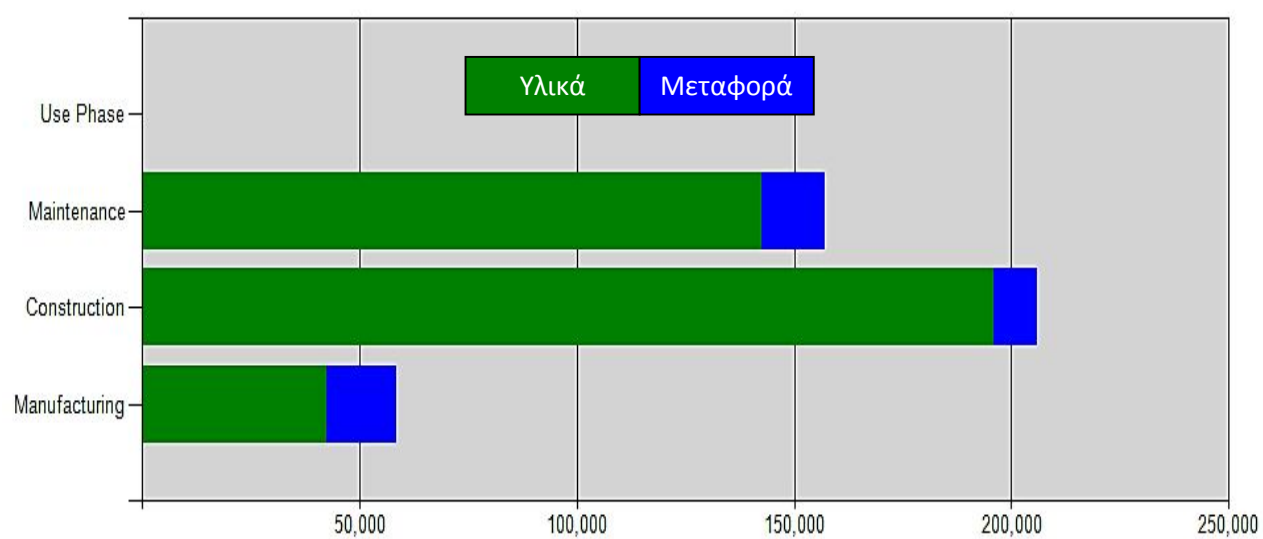
Αυτό που παρατηρείται και για τις δύο περιπτώσεις από τους πίνακες 5-1 και 5-2 και αξίζει να σημειωθεί είναι ότι από τις περιβαλλοντικές κατηγορίες, των οποίων η επίδραση μετράται σε kg χημικού στοιχείου ή χημικής ένωσης, οι μεγαλύτερες ποσότητες εκπομπών με διαφορά αντιστοιχούν στην κατηγορία της υπερθέρμανσης του πλανήτη με αποτέλεσμα να είναι αυτή ίσως η πιο σημαντική περιβαλλοντική κατηγορία πέραν της κατανάλωσης ενέργειας. Η κατανάλωση ενέργειας κρίνεται επίσης ιδιαίτερα σημαντική περιβαλλοντική κατηγορία καθώς είναι η μόνη που ουσιαστικά αναφέρεται και στην εξάντληση πόρων, όπως ορυκτά καύσιμα και μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτά συμφωνούν και με τις περισσότερες συναφείς έρευνες που αναφέρθηκαν στο τέταρτο κεφάλαιο, στις οποίες ήταν οι μόνες περιβαλλοντικές κατηγορίες για τις οποίες εξαγονταν αποτελέσματα και συμπεράσματα ως αρκετά πιο σημαντικές από τις υπόλοιπες που αμελούνταν.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα στοιχεία των παραπάνω πινάκων με τη μορφή γραφημάτων, για να γίνει εύκολα αντιληπτή η συνεισφορά κάθε σταδίου του κύκλου ζωής από αυτά που περιλαμβάνονται στην ανάλυσή μας στην περιβαλλοντική επίπτωση κάθε κατηγορίας. Επίσης, φαίνεται ξεκάθαρα και η επίδραση που ασκούν σε κάθε στάδιο για κάθε περιβαλλοντική κατηγορία, τόσο οι διαδικασίες που σχετίζονται με τα υλικά, όσο και οι διαδικασίες μεταφοράς.

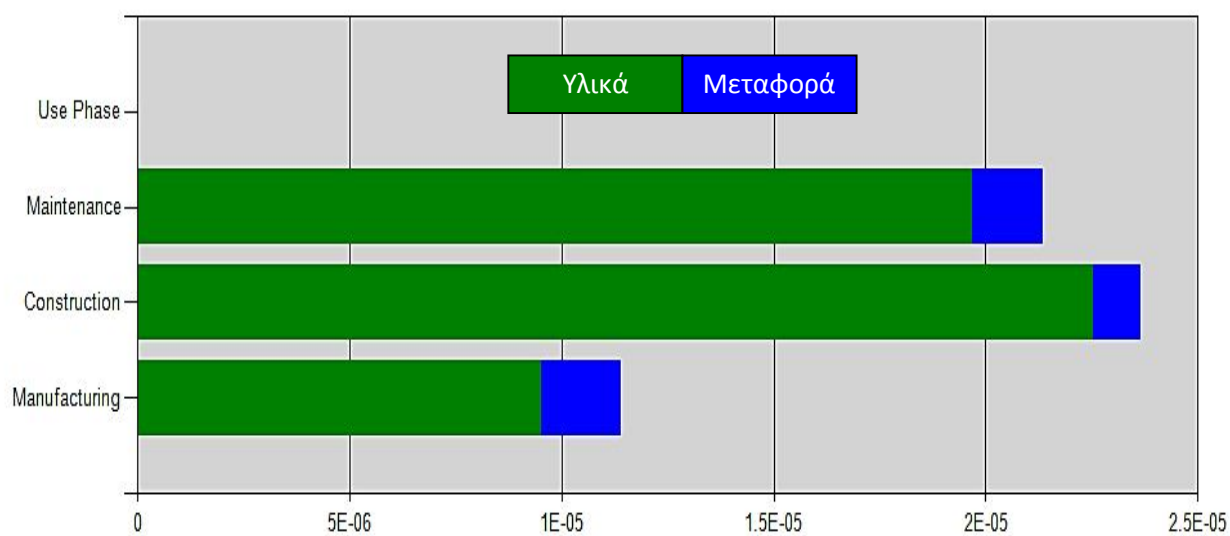
Κάθε μία από τις εικόνες 5-7, 5-8, 5-9, 5-10, 5-11, 5-12 και 5-13 αντιπροσωπεύει κάθε μία περιβαλλοντική κατηγορία που εξετάζεται στην ανάλυση και απεικονίζει την περιβαλλοντική επιβάρυνση σε απόλυτες τιμές των σταδίων παραγωγής υλικών (manufacturing), κατασκευής (construction) και συντήρησης και αποκατάστασης (maintenance) συμπεριλαμβανομένης της σχετικής επίδρασης των διαδικασιών των υλικών (πράσινο χρώμα) και των διαδικασιών μεταφοράς (μπλε χρώμα). Επειδή τα γραφήματα και των δύο περιπτώσεων παρουσιάζουν ακριβώς την ίδια τάση παρατίθενται τα γραφήματα μόνο της Περίπτωσης Α ως αντιπροσωπευτικής και για τις δύο περιπτώσεις.



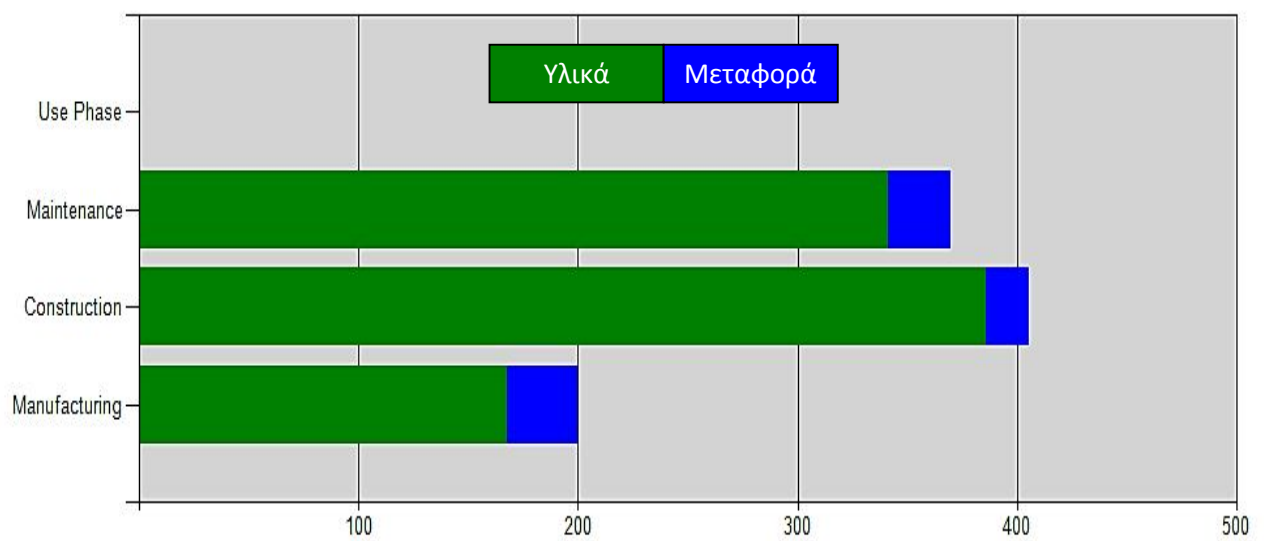
Εικόνα 5-7 Οξίνιση (kg SO₂ eq)



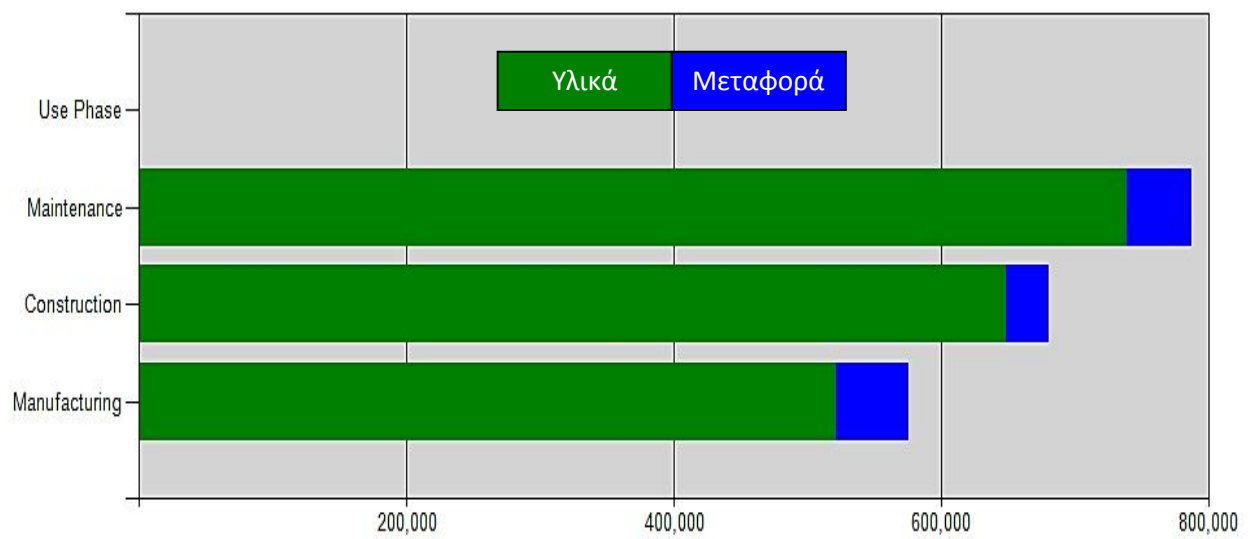
Εικόνα 5-8 Φωτοχημικό νέφος (kg O₃ eq)



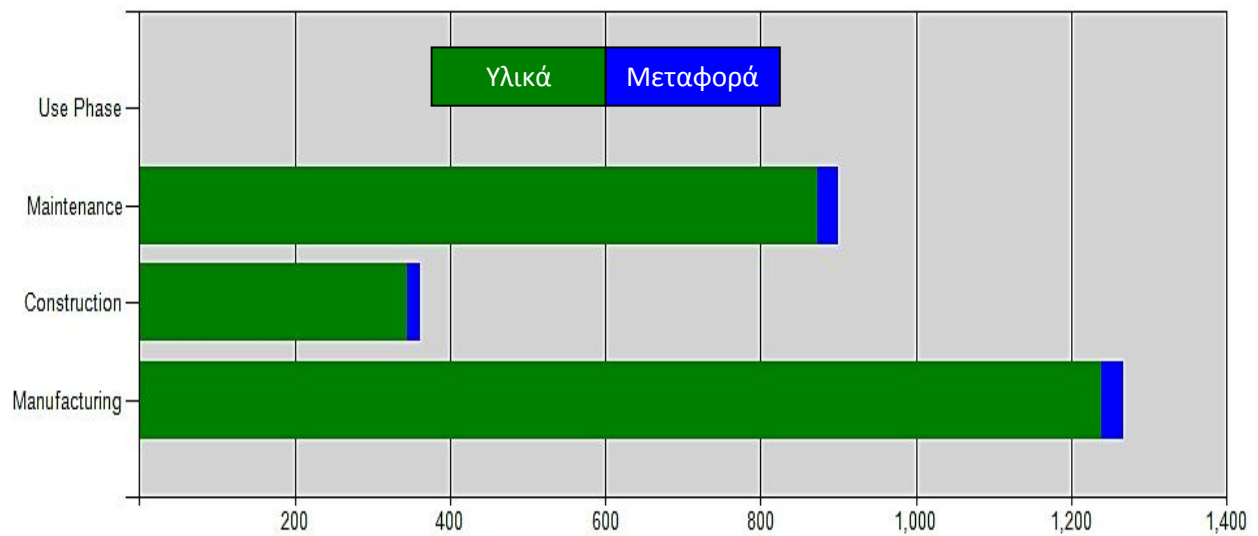
Εικόνα 5-9 Εξάντληση του όζοντος (kg CFC-11 eq)



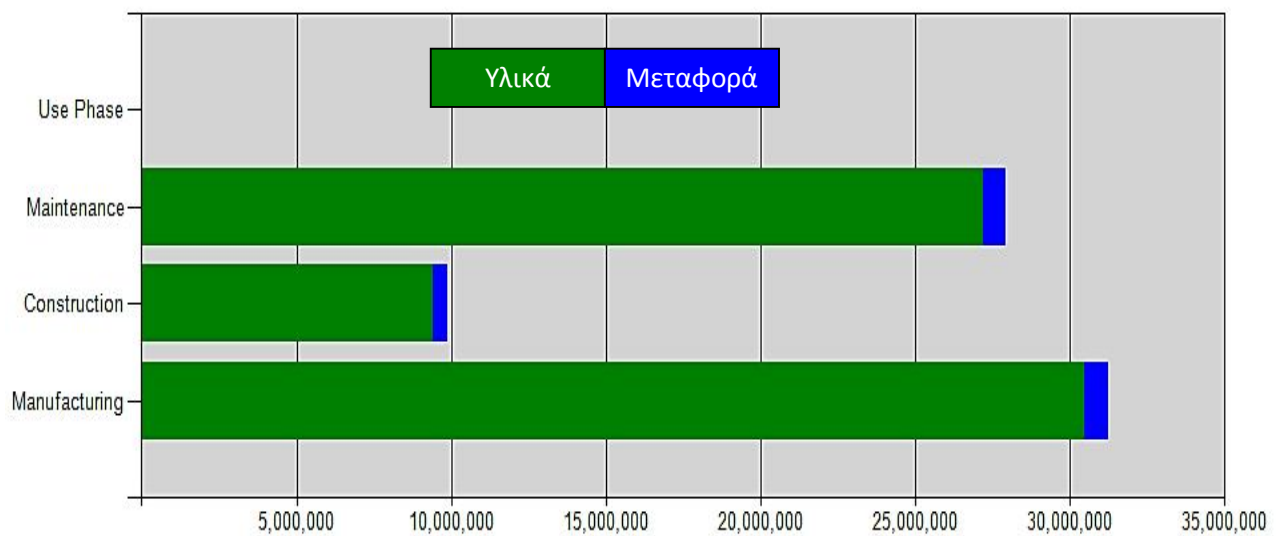
Εικόνα 5-10 Ευτροφισμός (kg N eq)



Εικόνα 5-11 Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO2 eq)



Εικόνα 5-12 Επιβλαβή σωματίδια (ανθρώπινη υγεία) (kg PM2.5 eq)



Εικόνα 5-13 Κατανάλωση ενέργειας (MJ)

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι για τις περιβαλλοντικές κατηγορίες της οξίνισης, του φωτοχημικού νέφους, της εξάντλησης του όζοντος και του ευτροφισμού τα στάδια κατασκευής και συντήρησης και αποκατάστασης παρουσιάζουν παρόμοιες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις και σημαντικά

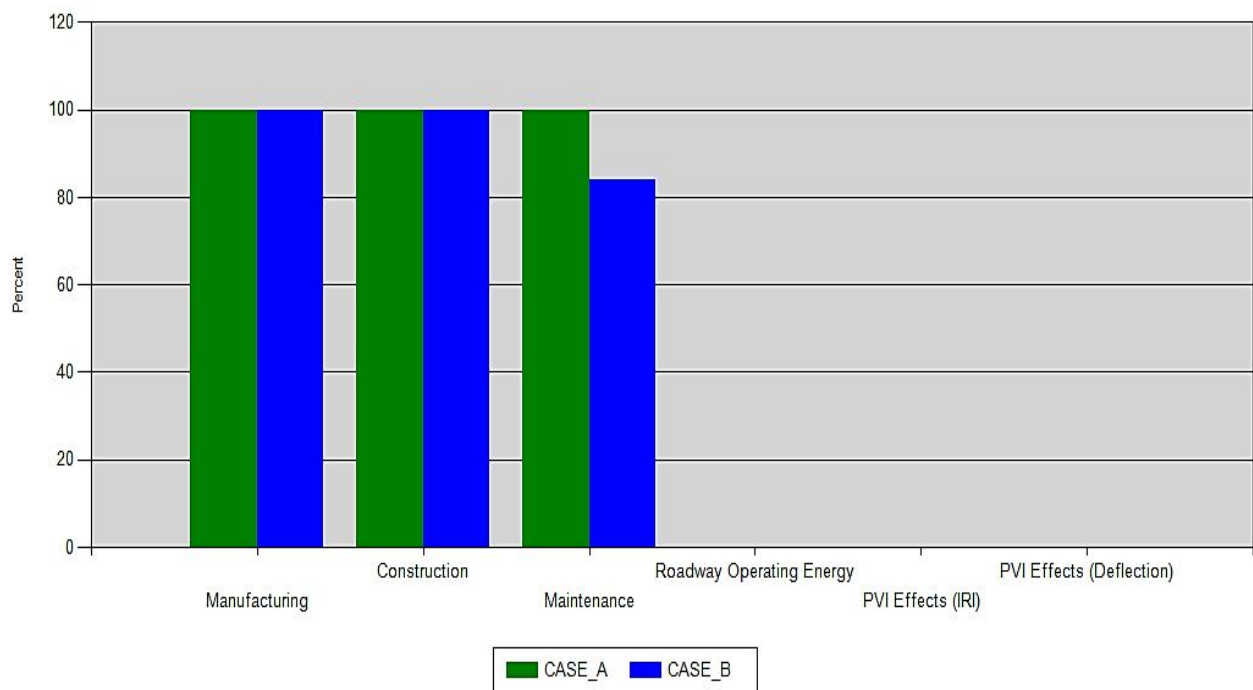
μεγαλύτερες σε σχέση με το στάδιο παραγωγής υλικών. Αντίθετα, για τις κατηγορίες των επιβλαβών σωματιδίων για την ανθρώπινη υγεία και της κατανάλωσης ενέργειας τα στάδια της παραγωγής υλικών και συντήρησης και αποκατάστασης είναι αυτά που παρουσιάζουν παρόμοιο περιβαλλοντικό αντίκτυπο και σημαντικά μεγαλύτερο από το στάδιο κατασκευής, καθώς στο στάδιο συντήρησης και αποκατάστασης συμπεριλαμβάνεται η παραγωγή των νέων υλικών. Όσον αφορά στην υπερθέρμανση του πλανήτη και τα τρία στάδια έχουν κοινές περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις, κάτι που αποδεικνύει την κρισιμότητα της συγκεκριμένης κατηγορίας.

Η παρόμοια τάση του σταδίου συντήρησης και αποκατάστασης και με τα δύο άλλα στάδια οφείλεται στο ότι περιλαμβάνει τόσο κατασκευαστικές διαδικασίες όσο και διαδικασίες παραγωγής των νέων υλικών που θα χρησιμοποιηθούν. Το κοινό στοιχείο και των τριών σταδίων του κύκλου ζωής για όλες τις περιβαλλοντικές κατηγορίες είναι ότι οι διαδικασίες που αφορούν τα υλικά και τον εξοπλισμό επηρεάζουν την εκάστοτε περιβαλλοντική επιβάρυνση σε αρκετά μεγαλύτερο βαθμό από ότι οι διαδικασίες μεταφοράς, με το στάδιο παραγωγής υλικών να είναι αυτό στο οποίο η μεταφορά έχει ποσοστιαία μεγαλύτερη επίδραση συγκριτικά με τα άλλα δύο στάδια στις περισσότερες κατηγορίες.

Μέχρι τώρα έγινε αναφορά για τα κοινά στοιχεία που παρουσιάζουν οι δύο περιπτώσεις ως προς την αξιολόγηση του κύκλου ζωής του πειραματικού οδοστρώματος. Στη συνέχεια ακολουθεί το πιο ενδιαφέρον και σημαντικό αποτέλεσμα της διαδικασίας ανάλυσης που είναι η σύγκριση των δύο περιπτώσεων ως προς το ποια είναι φιλικότερη προς το περιβάλλον.

Στις εικόνες 5-14, 5-15, 5-16, 5-17, 5-18, 5-19 και 5-20 φαίνεται για κάθε περιβαλλοντική κατηγορία η ποσοστιαία διαφορά των δύο περιπτώσεων ως προς την περιβαλλοντική επίπτωσή τους για κάθε στάδιο του κύκλου ζωής. Η Περίπτωση Α (CASE_A) (πράσινο χρώμα) έχει ορισθεί ως «βάση» της σύγκρισης και γι' αυτό η επίπτωσή της θεωρείται στο 100% και ως προς αυτό το ποσοστό απεικονίζεται η μεταβολή στην επίπτωση που οφείλεται στην Περίπτωση Β (CASE_B) (μπλε χρώμα). Τα στάδια παραγωγής υλικών (Manufacturing) και κατασκευής (Construction) έχουν

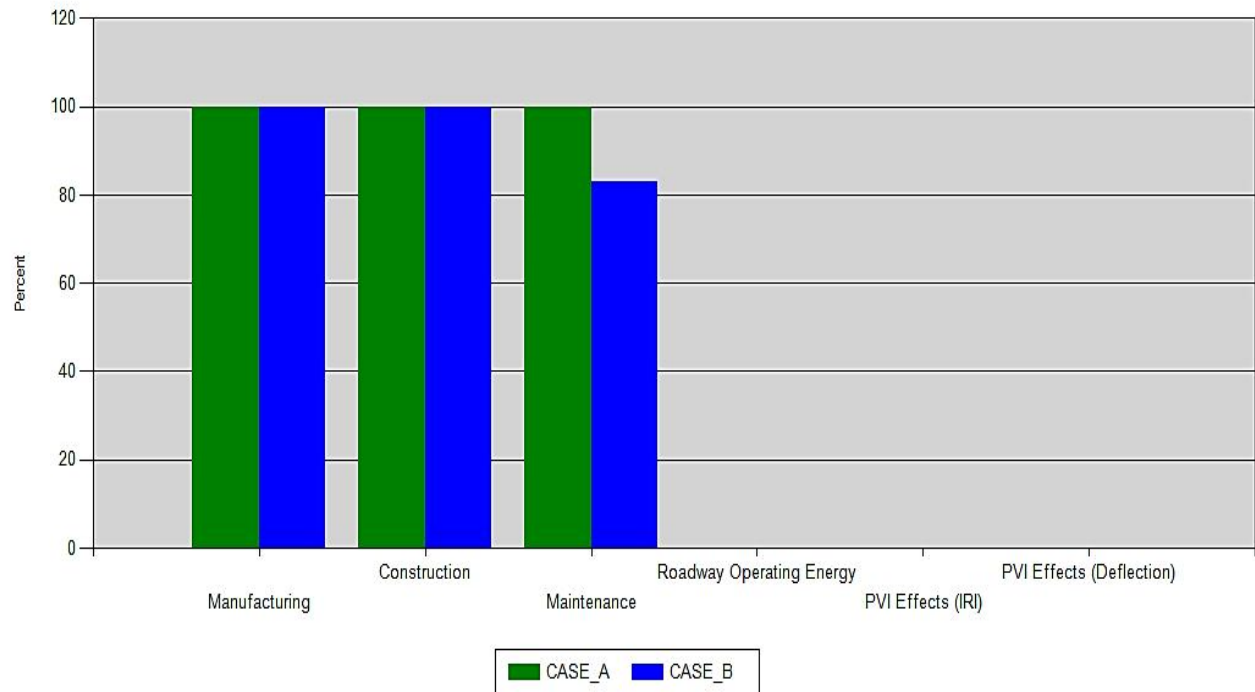
την ίδια επίδραση αφού αναφέρονται στο υφιστάμενο οδόστρωμα, όμως το στάδιο συντήρησης και αποκατάστασης (Maintenance) που αφορά τις επεμβατικές ενέργειες που έχουν περιγραφεί παρουσιάζει αξιοσημείωτες διαφορές.



Project Name	Manufacturing	Construction	Maintenance	Roadway Operating Energy	PVI Effects (IRI)	PVI Effects (Deflection)
CASE_A	100.00%	100.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%
CASE_B	100.00%	100.00%	84.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Εικόνα 5-14 Σύγκριση οξίνισης

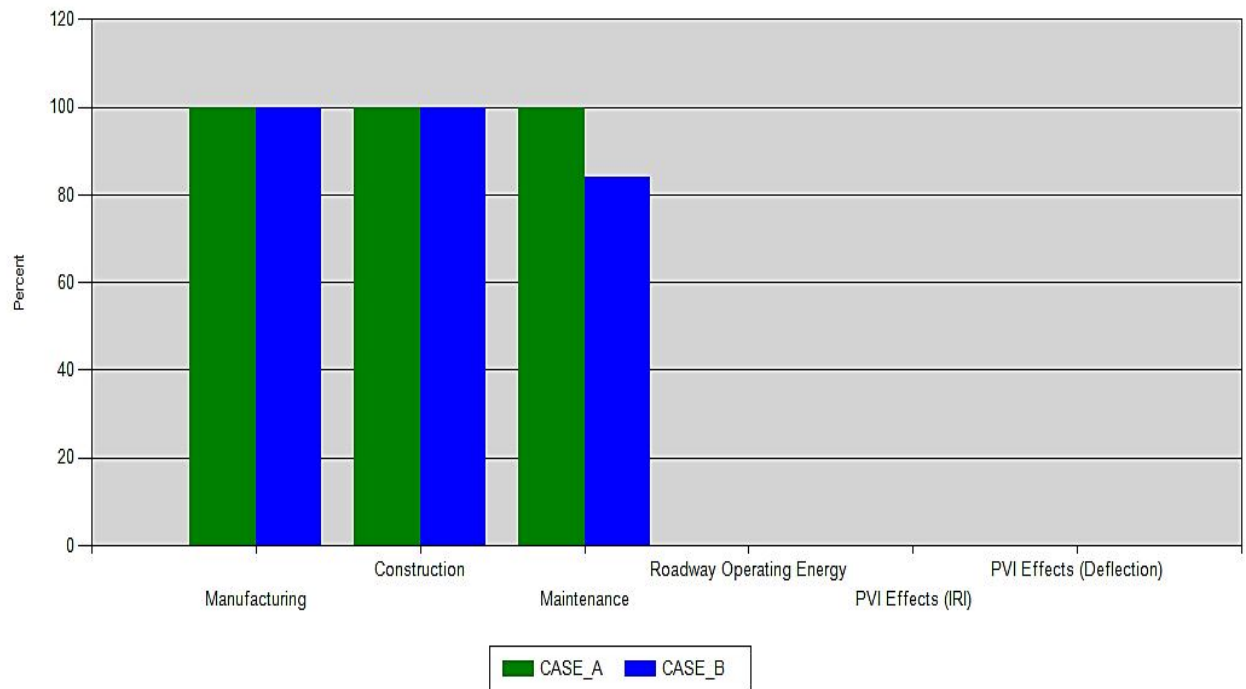
Για την περιβαλλοντική κατηγορία της οξίνισης η επιβάρυνση της Περίπτωσης Β ανέρχεται στο 84% της επιβάρυνσης της Περίπτωσης Α, δηλαδή η εναλλακτική επεμβατική λύση της χρήσης RAP παρουσιάζει μείωση της συγκεκριμένης περιβαλλοντικής επίπτωσης κατά 16% σε σχέση με την προτεινόμενη για εφαρμογή επεμβατική λύση της χρήσης νέου ασύνδετου υλικού.



Project Name	Manufacturing	Construction	Maintenance	Roadway Operating Energy	PVI Effects (IRI)	PVI Effects (Deflection)
CASE_A	100.00%	100.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%
CASE_B	100.00%	100.00%	83.00%	0.00%	0.00%	0.00%

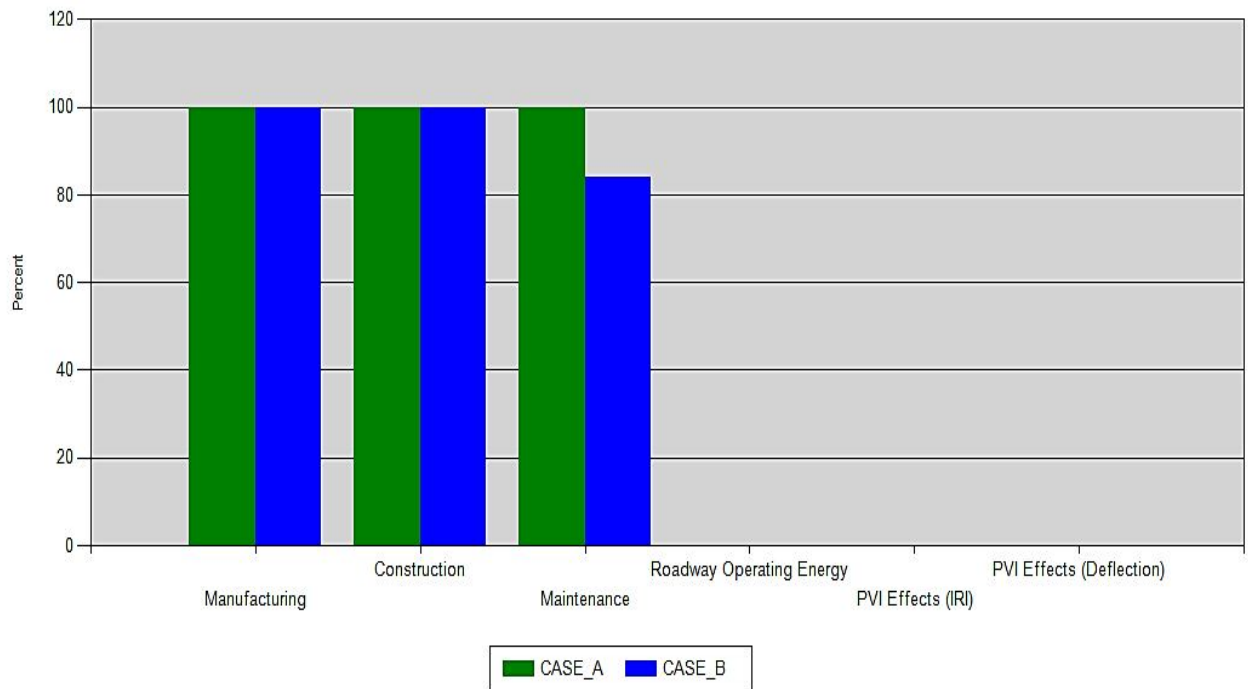
Εικόνα 5-15 Σύγκριση φωτοχημικού νέφους

Για την περιβαλλοντική κατηγορία του φωτοχημικού νέφους η επιβάρυνση της Περίπτωσης Β ανέρχεται στο 83% της επιβάρυνσης της Περίπτωσης Α, δηλαδή η εναλλακτική επεμβατική λύση της χρήσης RAP παρουσιάζει μείωση της συγκεκριμένης περιβαλλοντικής επίπτωσης κατά 17% σε σχέση με την προτεινόμενη για εφαρμογή επεμβατική λύση της χρήσης νέου ασύνδετου υλικού.



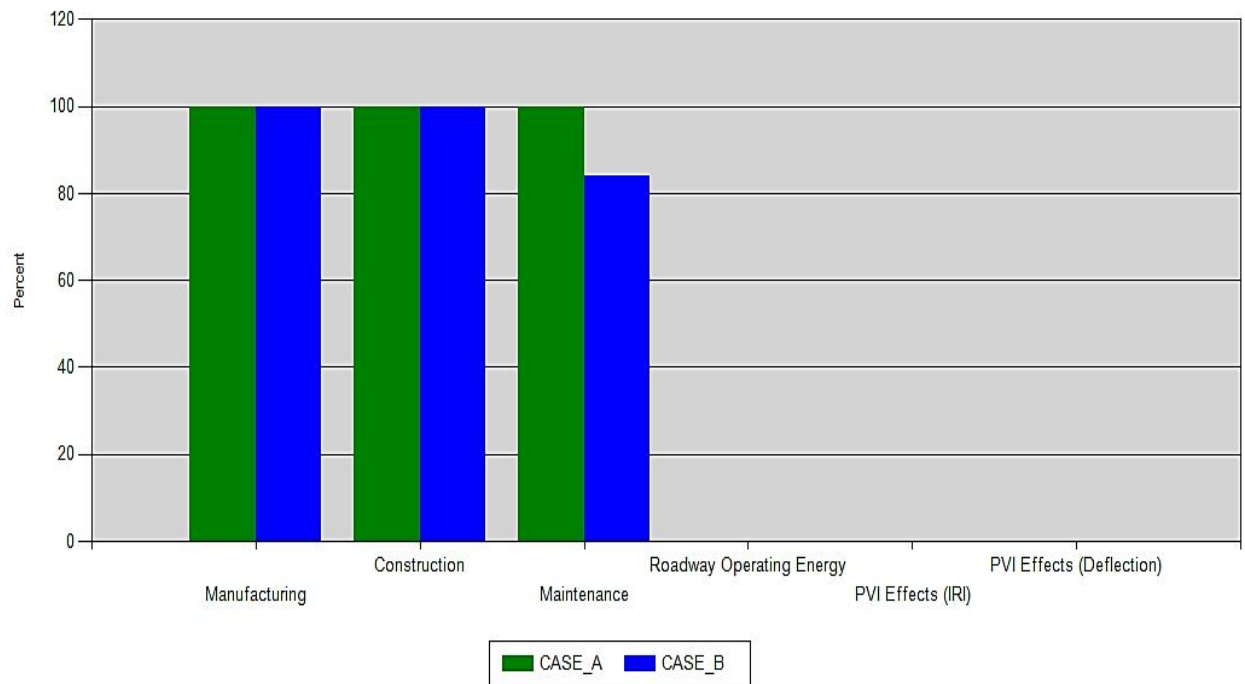
Εικόνα 5-16 Σύγκριση εξάντλησης όζοντος

Για την περιβαλλοντική κατηγορία της εξάντλησης του όζοντος η επιβάρυνση της Περίπτωσης Β ανέρχεται στο 84% της επιβάρυνσης της Περίπτωσης Α, δηλαδή η εναλλακτική επεμβατική λύση της χρήσης RAP παρουσιάζει μείωση της συγκεκριμένης περιβαλλοντικής επίπτωσης κατά 16% σε σχέση με την προτεινόμενη για εφαρμογή επεμβατική λύση της χρήσης νέου ασύνδετου υλικού.



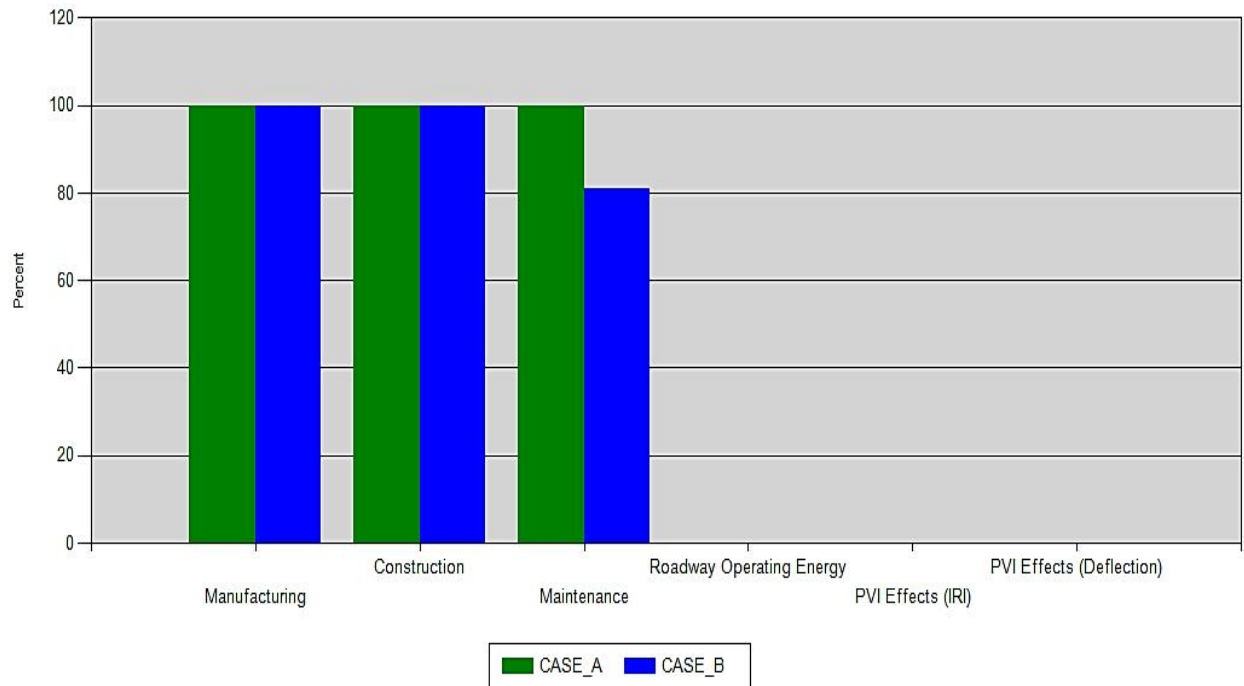
Εικόνα 5-17 Σύγκριση ευτροφισμού

Για την περιβαλλοντική κατηγορία του ευτροφισμού η επιβάρυνση της Περίπτωσης Β ανέρχεται στο 84% της επιβάρυνσης της Περίπτωσης Α, δηλαδή η εναλλακτική επεμβατική λύση της χρήσης RAP παρουσιάζει μείωση της συγκεκριμένης περιβαλλοντικής επίπτωσης κατά 16% σε σχέση με την προτεινόμενη για εφαρμογή επεμβατική λύση της χρήσης νέου ασύνδετου υλικού.



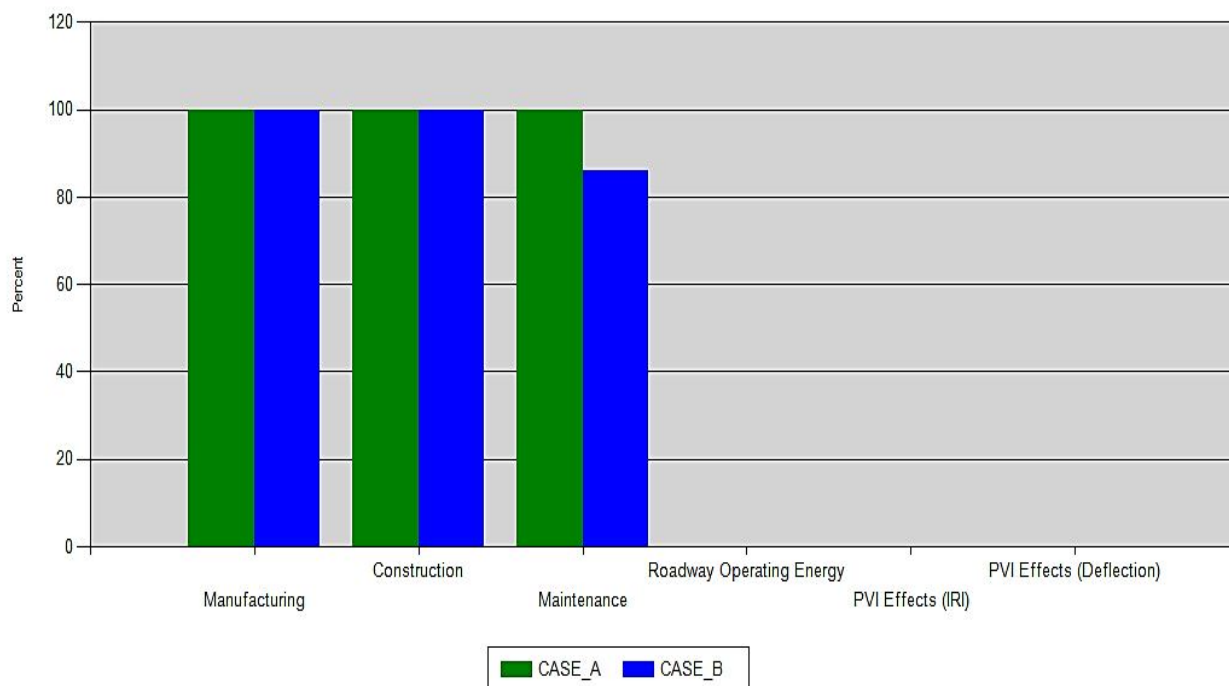
Εικόνα 5-18 Σύγκριση υπερθέρμανσης του πλανήτη

Για την περιβαλλοντική κατηγορία της υπερθέρμανσης του πλανήτη η επιβάρυνση της Περίπτωσης Β ανέρχεται στο 84% της επιβάρυνσης της Περίπτωσης Α, δηλαδή η εναλλακτική επεμβατική λύση της χρήσης RAP παρουσιάζει μείωση της συγκεκριμένης περιβαλλοντικής επίπτωσης κατά 16% σε σχέση με την προτεινόμενη για εφαρμογή επεμβατική λύση της χρήσης νέου ασύνδετου υλικού.



Εικόνα 5-19 Σύγκριση επιβλαβών σωματιδίων (ανθρώπινη υγεία)

Για την περιβαλλοντική κατηγορία των επιβλαβών για την ανθρώπινη υγεία σωματιδίων η επιβάρυνση της Περίπτωσης Β ανέρχεται στο 81% της επιβάρυνσης της Περίπτωσης Α, δηλαδή η εναλλακτική επεμβατική λύση της χρήσης RAP παρουσιάζει μείωση της συγκεκριμένης περιβαλλοντικής επίπτωσης κατά 19% σε σχέση με την προτεινόμενη για εφαρμογή επεμβατική λύση της χρήσης νέου ασύνδετου υλικού.



Εικόνα 5-20 Σύγκριση κατανάλωσης ενέργειας

Για την περιβαλλοντική κατηγορία της κατανάλωσης ενέργειας η επιβάρυνση της Περίπτωσης Β ανέρχεται στο 86% της επιβάρυνσης της Περίπτωσης Α, δηλαδή η εναλλακτική επεμβατική λύση της χρήσης RAP παρουσιάζει μείωση της συγκεκριμένης περιβαλλοντικής επίπτωσης κατά 14% σε σχέση με την προτεινόμενη για εφαρμογή επεμβατική λύση της χρήσης νέου ασύνδετου υλικού.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα της σύγκρισης των δύο περιπτώσεων παρατηρήθηκαν οι εξής μειώσεις των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για την Περίπτωση Β σε σχέση με την Περίπτωση Α: 16% για τις κατηγορίες οξίνισης, εξάντλησης του όζοντος, ευτροφισμού και υπερθέρμανσης του πλανήτη, 17% για την κατηγορία φωτοχημικού νέφους, 19% για την κατηγορία επιβλαβών για την ανθρώπινη υγεία σωματιδίων και 14% για την κατηγορία κατανάλωσης ενέργειας.

Είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτο ότι στην εναλλακτική περίπτωση επέμβασης της χρήσης RAP στη στρώση βάσης έναντι συμβατικού ασύνδετου υλικού, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων σε όλες τις περιβαλλοντικές κατηγορίες. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τα ευρήματα των περισσότερων ερευνών LCA που περιγράφηκαν στο τέταρτο κεφάλαιο σχετικά με τη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης των οδοστρωμάτων χάρη στη χρήση RAP στις ασφατικές στρώσεις, καταδεικνύει τα σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη του υλικού αυτού είτε χρησιμοποιηθεί στις στρώσεις ασύνδετων υλικών είτε στα ασφαλτομίγματα. Ενδεχομένως, η συνδυαστική χρήση του RAP τόσο στη στρώση βάσης, όσο και στις ασφατικές στρώσεις στο ίδιο οδόστρωμα να παρέχει εξαιρετικά σημαντικές περιβαλλοντικές εξοικονομήσεις.

Συμπερασματικά, το βασικότερο στοιχείο της ανάλυσής μας αποτελεί η σημαντική υπεροχή της Περίπτωσης Β έναντι της Περίπτωσης Α ως προς τη σύγκριση των δύο επεμβατικών λύσεων, για το ποια είναι φιλικότερη προς το περιβάλλον. Αυτό αποδεικνύεται από το γεγονός ότι η Περίπτωση Β παρουσιάζει στο στάδιο συντήρησης και αποκατάστασης μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε κάθε μια από τις επτά περιβαλλοντικές κατηγορίες που εξετάζονται και τα ποσοστά μείωσης των επιπτώσεων αυτών κρίνονται σημαντικά.

Αυτό δε σημαίνει απαραίτητα ότι θα έπρεπε να επιλεγεί αυτή για εφαρμογή, καθώς ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος του κύκλου ζωής ενός οδοστρώματος δεν είναι ο μοναδικός παράγοντας που επηρεάζει τη λήψη αποφάσεων. Συγκεκριμένα απαιτείται και η ανάλυση κόστους του κύκλου ζωής για τις δύο περιπτώσεις, ώστε να υπάρχει μια ολοκληρωμένη εικόνα. Ωστόσο, αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η αξιολόγηση του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων (LCA), που σημαίνει

ότι μας ενδιαφέρει η εξέταση των δύο περιπτώσεων μόνο από περιβαλλοντικής άποψης και η Περίπτωση Β κρίνεται ιδανικότερη.

6 Ανακεφαλαίωση-συμπεράσματα

Τα τελευταία χρόνια γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική η ανάγκη υιοθέτησης βιώσιμων λύσεων στα έργα υποδομών. Συγκεκριμένα στον τομέα των μεταφορών έχει αποδειχτεί η μεγάλη επίδραση της συγκοινωνιακής υποδομής στις κλιματικές αλλαγές που οδηγούν στην επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Φυσικά, η επίδραση αυτή συνδέεται άμεσα με τα οδοστρώματα, καθώς αποτελούν πολύ σημαντικό μέρος της συγκοινωνιακής υποδομής και ως εκ τούτου αναδεικνύεται η ανάγκη ενσωμάτωσης περιβαλλοντικά βιώσιμων στρατηγικών σε αυτά. Για το λόγο αυτό, η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στην περιβαλλοντική διάσταση του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων, κρίνοντάς τη απαραίτητο συστατικό στη διαδικασία λήψης αποφάσεων για θέματα οδοστρωμάτων.

Στο πλαίσιο αυτό, αναλύθηκε λεπτομερώς η μεθοδολογία της αξιολόγησης του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων ως εργαλείο εκτίμησης της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης που επιφέρει ένα οδόστρωμα από την παραγωγή των υλικών του μέχρι και το τέλος ζωής του. Από την ανάλυση αυτή προέκυψε ότι το LCA συνιστά ένα πολύ σημαντικό εργαλείο, το οποίο ποσοτικοποιεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός οδοστρώματος που σχετίζονται με κάθε στάδιο του κύκλου ζωής του, δηλαδή με την παραγωγή υλικών, την κατασκευή, τη χρήση, τη συντήρηση και αποκατάσταση, αλλά και το τέλος ζωής. Γίνεται συνεπώς αντιληπτή η χρησιμότητά του για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων, καθώς παρέχει τη δυνατότητα «μέτρησης» της περιβαλλοντικής επίδρασης που ασκεί το οδόστρωμα κατά τη διάρκεια ζωής του και μπορεί να τους βοηθήσει σε θέματα σχεδιασμού, επιλογής υλικών, κατασκευαστικών διαδικασιών, επιλογής μεθόδων συντήρησης και αποκατάστασης, αλλά και σύγκρισης εναλλακτικών λύσεων.

Ωστόσο, η εν λόγω μεθοδολογία εμφανίστηκε στο προσκήνιο για τα οδοστρώματα μόλις τις τελευταίες δύο δεκαετίες και εξακολουθεί να ωριμάζει ως πεδίο έρευνας. Συνεπώς, κάποιες από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ οδοστρωμάτων και περιβάλλοντος δεν είναι επαρκώς ερευνημένες και κατανοητές στην τρέχουσα βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, ενώ τα στάδια παραγωγής υλικών, κατασκευής και συντήρησης και αποκατάστασης έχουν ερευνηθεί σε σημαντικό βαθμό, δεν ισχύει

το ίδιο και για τα στάδια χρήσης και τέλους ζωής, με αποτέλεσμα συχνά να παραλείπονται από τις αναλύσεις και να μην προκύπτει μια ολοκληρωμένη εικόνα για τη συνολική περιβαλλοντική επιβάρυνση του οδοστρώματος. Αν και το στάδιο του τέλους ζωής ίσως να μη διαδραματίζει τόσο σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση του κύκλου ζωής, λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής των οδοστρωμάτων, δεν μπορεί να γίνει ο ίδιος ισχυρισμός και για το στάδιο χρήσης. Πολλές συναφείς έρευνες καταδεικνύουν την τεράστια σημασία εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του σταδίου χρήσης, καθώς συνδέεται με αρκετές και διαφορετικές πτυχές επίδρασης του περιβάλλοντος.

Μια άλλη παράμετρος, η οποία διερευνήθηκε με τη μεθοδολογία αξιολόγησης του κύκλου ζωής, είναι η χρήση ανακυκλώσιμων υλικών, νέων τεχνολογιών και τεχνολογιών ανακύκλωσης στα οδοστρώματα και η σύγκρισή τους με συμβατικά υλικά και παραδοσιακές μεθόδους. Τα αποτελέσματα όλων των σχετικών ερευνών που αναλύθηκαν είναι άκρως ενθαρρυντικά για τις πρακτικές ανακύκλωσης αφού ήταν υπεύθυνες για την επίτευξη αξιόλογων μειώσεων των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων σε σχέση με τις συμβατικές πρακτικές. Το κοινό χαρακτηριστικό πολλών από αυτές τις έρευνες ήταν η χρήση του ανακτημένου ασφαλικού οδοστρώματος (RAP) στο LCA με πολύ θετικά και υποσχόμενα αποτελέσματα, κάτι που σε συνδυασμό με το γεγονός ότι πρόκειται για ένα καλά ερευνημένο και για άλλα χαρακτηριστικά του υλικό, το καθιστά ως μια περιβαλλοντικά φιλικότερη λύση με δυνατότητα άμεσης εφαρμογής στα έργα οδοστρωμάτων.

Δεδομένων των ανωτέρω, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας διεξήχθη μέσω του λογισμικού Athena Pavements LCA η αξιολόγηση του κύκλου ζωής ενός πειραματικού οδοστρώματος. Η διαδικασία ανάλυσης είχε στόχο τη σύγκριση δύο διαφορετικών περιπτώσεων επεμβατικής ενέργειας σε ένα υφιστάμενο οδόστρωμα ως προς τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούν και περιλάμβανε τα στάδια παραγωγής υλικών, κατασκευής και συντήρησης και αποκατάστασης με το τελευταίο να αποτελεί και το κρίσιμο στάδιο της ανάλυσης. Η διαφορά των δύο λύσεων αφορούσε τη χρήση RAP έναντι συμβατικού ασύνδετου υλικού στη νέα στρώση βάσης που θα κατασκευαζόταν. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζουν τόσο κοινά στοιχεία που προσφέρονται για γενικές διαπιστώσεις για

το LCA, όσο φυσικά και διαφορές που αφορούν ειδικότερα τις δύο περιπτώσεις επέμβασης.

Κοινό στοιχείο και στις δύο περιπτώσεις αποτελεί το γεγονός ότι οι δυο πιο σημαντικές περιβαλλοντικές κατηγορίες κατά το LCA, δηλαδή αυτές που έχουν τη μεγαλύτερη περιβαλλοντική επίδραση, είναι η κατανάλωση ενέργειας λόγω του ότι είναι η μοναδική κατηγορία που συνδέεται με την εξάντληση μη-ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η υπερθέρμανση του πλανήτη, καθώς αποτελεί τη μοναδική κατηγορία που επηρεάζεται εφάμιλλα και σε μεγάλο βαθμό σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής. Σε αντίθεση με την υπερθέρμανση του πλανήτη, στις υπόλοιπες κατηγορίες συγκριτικά μεγάλη επίδραση συναντάται μόνο στα δύο από τα τρία στάδια. Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε επίσης και στις δύο περιπτώσεις, ότι σε κάθε περιβαλλοντική κατηγορία και σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής, οι διαδικασίες που σχετίζονται με τα υλικά και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιούνται έχουν αισθητά μεγαλύτερη επίδραση στις επιπτώσεις από ότι οι διαδικασίες μεταφοράς τους. Ωστόσο, η συνεισφορά των διαδικασιών μεταφοράς δεν είναι αμελητέα, ενώ το στάδιο στο οποίο παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συγκριτικά επίδραση είναι αυτό της παραγωγής υλικών.

Όσον αφορά στο κύριο αποτέλεσμα της σύγκρισης των δύο επεμβατικών ενεργειών ως προς το ποια αποτελεί τη φιλικότερη περιβαλλοντικά λύση, όπως ήταν αναμενόμενο η εναλλακτική λύση που περιλαμβάνει τη χρήση RAP παρουσίασε σημαντικές μειώσεις περιβαλλοντικής επιβάρυνσης σε σχέση με την προτεινόμενη λύση της χρήσης ασύνδετου υλικού στη νέα στρώση βάσης. Εκτιμήθηκε δε ότι οι υπόψη μειώσεις είναι εύρους 14% με 19% για όλες τις περιβαλλοντικές κατηγορίες που λήφθηκαν υπόψη. Συγκεκριμένα στις δύο σημαντικότερες περιβαλλοντικές κατηγορίες, η μείωση ήταν 14% για την κατανάλωση ενέργειας και 16% για την υπερθέρμανση του πλανήτη.

Σε συμφωνία με συναφείς έρευνες που εξέτασαν τη χρήση RAP αντί συμβατικού υλικού κυρίως σε ασφατικές στρώσεις, η παρούσα συγκεκριμένη ανάλυση ανέδειξε ότι το RAP έχει σημαντικά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα λόγω της μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της χρήσης του, καθώς δεν απαιτείται η

παραγωγή νέων υλικών αλλά η επαναχρησιμοποίηση του υπάρχοντος υλικού. Αυτό καταδεικνύει τα πιθανά εξαιρετικά σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη που μπορεί να προκύψουν από τη συνδυαστική χρήση RAP, τόσο σε ασφατικές στρώσεις όσο και στις στρώσεις από ασύνδετα υλικά τόσο στην κατασκευή όσο και στη συντήρηση και αποκατάσταση των οδοστρωμάτων.

Τέλος, με αφορμή το ότι η αξιολόγηση του κύκλου ζωής οδοστρωμάτων συνιστά ένα ταχέως αναπτυσσόμενο πεδίο έρευνας και δύναται να έχει σημαντική εφαρμογή στο εγγύς μέλλον, ακολουθούν κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα με σκοπό την κάλυψη των ερευνητικών κενών και την επίτευξη της μέγιστης δυνατής πληρότητας της μεθόδου. Φυσικά, το κυριότερο αντικείμενο που χρήζει εκτεταμένης έρευνας είναι ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος του σταδίου της χρήσης των οδοστρωμάτων μέσω της εξέτασης μιας ή περισσότερων συνιστωσών που απαρτίζουν το συγκεκριμένο στάδιο από περιβαλλοντικής άποψης, όπως η αλληλεπίδραση οδοστρώματος-οχήματος και η σύνδεσή του δείκτη IRI με την κατανάλωση καυσίμων, η λευκαύγεια, η ενανθράκωση σκυροδέματος για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα, η έκπλυση και οι ανάγκες φωτισμού. Ένα άλλο στοιχείο που έχει αναφερθεί σε κάποιες έρευνες πως ίσως έχει σημαντικές περιβαλλοντικές επιδράσεις και χρήζει περαιτέρω έρευνας, είναι η καθυστέρηση της κυκλοφορίας που προκαλείται από τις διαδικασίες κατασκευής ή συντήρησης και αποκατάστασης κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του οδοστρώματος. Ως λιγότερο σημαντικές αλλά όχι αμελητέες οι επιπτώσεις των επιλογών του σταδίου τέλους ζωής προτείνεται επίσης να αναλυθούν.

Όσον αφορά στα ανακυκλώσιμα υλικά και τις ανακυκλώσιμες τεχνικές, προτείνεται η εφαρμογή περισσότερων LCAs που θα περιλαμβάνουν διάφορα ανακυκλώσιμα υλικά, αλλά και που θα στηρίζονται στη θερμή και ψυχρή ανακύκλωση, ώστε να αναδειχθεί η σημασία και άλλων λύσεων πέρα από τη χρήση RAP. Ακόμη, σε όλα τα μελλοντικά LCAs οδοστρωμάτων συνιστώνται ιδιαίτερα η διεξαγωγή αναλύσεων ευαισθησίας και αβεβαιότητας για να υπάρχει η δυνατότητα καλύτερης κατανόησης της συσχέτισης των στοιχείων που αποτελούν ένα LCA με τα αποτελέσματα αλλά και της ακρίβειας αυτών.

Κλείνοντας, το απόσταγμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι πως η αξιολόγηση του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων προσφέρεται ως ένα πολύτιμο εργαλείο για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος που συνδέεται με ένα τεράστιο κομμάτι του συγκοινωνιακού συστήματος υποδομής. Η βελτίωση των ελλείψεων της υφιστάμενης μεθοδολογίας, μέσω της υποστήριξης των απαραίτητων ερευνητικών πεδίων και η μεγαλύτερη χρήση ανακυκλώσιμων υλικών και τεχνολογιών ανακύκλωσης θα οδηγήσουν αναμφίβολα στη βελτίωση των περιβαλλοντικών επιδόσεων των οδοστρωμάτων και θα βοηθήσουν τους οργανισμούς μεταφορών και άλλων ενδιαφερόμενων μερών στην εύρεση λύσεων βιωσιμότητας. Η αξιοποίηση των σημερινών γνώσεων και η μελλοντική ενίσχυσή τους μέσω της περαιτέρω έρευνας αποτελούν το βασικό βήμα για να καταστεί το LCA οδοστρώματος μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των οδοστρωμάτων.

7 Βιβλιογραφία

Akbari, H., Davis, S., Dorsano, S., Huang, J., and Winnett, S., 1992. *“Cooling Our Communities: A Guide to Tree Planting and Light-Colored Surfacing”*, United States Environmental Protection Agency, Office of Policy Analysis, Climate Change Division.

Akbari, H., Pomerantz, M., and Taha, H., 2001. *“Cool Surfaces and Shade Trees to Reduce Energy Use and Improve Air Quality in Urban Areas”*, Solar Energy, 70, (3), 295-310.

Araújo, J.P.C., Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D., 2014. *“The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements”*, Transportation Research Part D 32, 97–110.

Athena Sustainable Materials Institute 2013. *“Impact Estimator for Highways: User Guide”*, Ottawa, Ontario, Canada.

Aurangzeb, Q., and I. L. Al-Qadi, 2014. *“Asphalt pavements with high RAP content: economic and environmental perspectives”*, Paper Number 14-3488, Submitted to: Transportation Research Board, 93rd Annual Meeting, January 12-16, 2014, Washington, D.C.

Azizian, M.F., Nelson, P.O., Thayumanavan, P., and Williamson, K.J., 2005. *“Environmental Impacts of Leachate from Portland Cement Concrete (PCC) with and Without Plasticizer in Highway Construction”*, in Handbook of Environmental Chemistry, 5, Part F, 2, 43-60.

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

Bare, J. 2012. *“Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts (TRACI), TRACI Version 2.1 User's Guide”*, EPA/600/R-12/554, Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.

Beuving, E., De Jonghe, T., Goos, D., Lindahl, T., and Stawiarski, A., 2004. *“Environmental Impacts and Fuel Efficiency of Road Pavements”*, Europe Asphalt Pavement Association and Eurobitume.

Bloom, E., Canton, A., Ahlman, A.P., and Edil, T., 2017. *“Life Cycle Assessment of highway reconstruction: a case study”*, TRB 2017 Annual Meeting.

B.L.P.Peuportier 2001. *“Life Cycle Assessment Applied to the Comparative Evaluation of Single Family Houses in the French Context”*, Energy and Buildings 33, 443-450.

Brandt, H.C.A. and De Groot, P.C., 2001. *“Aqueous Leaching of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Bitumen and Asphalt”*, Water Research, 35, (17), 4200- 4207.

Brantley, A.S. and Townsend, T.G., 1999. *“Leaching of Pollutants from Reclaimed Asphalt Pavement”*, Environmental Engineering Science, 16, (2), 105-116.

Calwell, C. 2003. *“California State Fuel-Efficient Tire Report”*, Volume II, California Energy Commission, January.

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.

Chan, A.W.-C. 2007. *“Economic and Environmental Evaluations of Life Cycle Cost Analysis Practice: A Case Study of Michigan DOT Pavement Projects”*, Master of Science Thesis in Natural Resource and Environment, University of Michigan.

Del Ponte, K., Madras Natarajan, B., Pakes Ahlman, A., Baker, A., Elliott, E., Edil T.B., 2017. *“Life Cycle benefits of recycled material in highway construction”*, TRB 2017 Annual Meeting.

Environmental Protection Agency (EPA) 2014. *“Climate Change: Basic Information”*, Environmental Protection Agency, Washington, DC.

Environmental Protection Agency (EPA) 2015b. *"Sources of Greenhouse Gas Emissions"*, Environmental Protection Agency, Washington, DC.

European Commission Joint Research Centre (European Commission JRC). 2010. *"ILCD Handbook. Analysis of Existing Environmental Impact Assessment Methodologies for Use in Life Cycle Assessment"*, European Union, Ispra, Italy.

Evans, L., J. MacIsaac Jr, J. Harris, K. Yates, W. Dudek, J. Holmes, J. Popio, D. Rice, and M. Salaani, 2009. *"NHTSA Tire Fuel Efficiency Consumer Information Program Development: Phase 2-Effects of Tire Rolling Resistance Levels on Traction, Treadwear, and Vehicle Fuel Economy"*, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC.

Federal Highway Administration (FHWA) 2015. *"Towards Sustainable Pavement Systems: A Reference Document"*, FHWA-HIF-15-002, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Federal Highway Administration (FHWA) 2016. *"Pavement Life-Cycle Assessment Framework"*, FHWA-HIF-16-014, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC.

French Design Manual for Pavement Structures, Edition May 1997.

Golden, J.S. and Kaloush, K.E., 2006. *"Mesoscale and Microscale Evaluation of Surface Pavement Impacts on the Urban Heat Island Effect"*, International Journal of Pavement Engineering, 7, (1), 37-52.

Guinée, J. B. 2012. *"Life Cycle Assessment: Past, Present and Future"*, International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction. July 10-12, Nantes, France. Keynote Address, RILEM Publications, France.

Häkkinen, T. and Mäkelä, K. 1996. *"Environmental Impact of Concrete and Asphalt Pavements, in Environmental adaption of concrete"*, Technical Research Center of Finland, Research Notes 1752.

Harvey, J., A. Kendall, D. Jones, and T. Wang, 2013. *“Life Cycle Assessment for Local Government Pavements: What Questions Should We Be Addressing and How?”*, Proceedings, ASCE Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements, Transportation & Development Institute of ASCE, Reston, VA.

Harvey, J., A. Kendall, I. S. Lee, N. Santero, T. Van Dam, and T. Wang, 2010. *“Pavement Life Cycle Assessment Workshop: Discussion Summary and Guidelines”*, UCPRC-TM-2010-03, University of California, Davis, CA.

Harvey, J., J. Meijer and A. Kendall, 2014. *“Tech Brief : Life Cycle Assessment of Pavements”*, FHWA-HIF-15-001, Federal Highway Administration, Washington, DC.

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.

Huang, Y., Bird, R., and Bell, M., 2009. *“A comparative study of the emissions by road maintenance works and the disrupted traffic using life cycle assessment and microsimulation”*, Transportation Research Part D, 14, (3), 197-204.

Hugo, F. and Martin, A.E., 2004. *“Significant Findings from Full-Scale Accelerated Pavement Testing”*, National Cooperative Highway Research Program and Transportation Research Board, NCHRP Synthesis 325.

Hunt, R. and W. Franklin 1996. *“LCA – How it Came About, Personal Reflections on the Origin and the Development of LCA in the USA”*, International Journal of Life Cycle Assessment, 1, (1), Ecomed Publishers, Landsberg, Germany.

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

International Organization for Standardization (ISO). 2006b. *“Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines”*, ISO Standard 14044, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

Inti, S., Martin, S.A., Tandon, V., 2016. *“Necessity of Including Maintenance Traffic Delay Emissions in Life Cycle Assessment of Pavements”*, International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction, Procedia Engineering 145, 972 – 979.

Jackson, N.M. 2004. *“An Evaluation of the Relationship Between Fuel Consumption and Pavement Roughness (Preliminary Report)”*, Universtiy of North Florida.

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

Kang, S. 2013. *“The Development of a Regional Inventory Database for the Material Phase of the Pavement Life-Cycle with Updated Vehicle Emission Factors Using MOVES”*, MS thesis, University of Illinois at Urbana– Champaign.

Kang, S., R. Yang, H. Ozer, and I. L. Al-Qadi, 2014. *“Life-Cycle Greenhouse Gases and Energy Consumption for Material and Construction Phases of Pavement with Traffic Delay”*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2428, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 27–34.

Kendall, A. and N. Santero, 2010. *“Introduction to Life Cycle Assessment”*, Pavement Life Cycle Assessment Workshop, Technical Presentation, University of California Pavement Research Center, Davis and Berkeley, CA.

Kriech, A.J. 1990. *“Evaluation of Hot Mix Asphalt for Leachability”*, Asphalt Institute, Heritage research group, Indianapolis, Indiana, USA.

Kriech, A.J. 1992. *“Leachability of Asphalt and Concrete Pavements”*, Asphalt Institute, Heritage research group, Indianapolis, Indiana, USA.

Legret M, Odie L, Demare D, Jullien A., 2005. *“Leaching of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons from reclaimed asphalt pavement”*, Water Res, 39, 3675–85.

Marceau, M.L. and VanGeem, M.G., 2007. *"Solar Reflectance of Concretes for LEED Sustainable Sites Credit: Heat Island Effect"*, Portland Cement Association, PCA R&D Serial No. 2982.

Marion, A.-M., Lanève, M.D., and Grauw, A.D., 2005. *"Study of the leaching behaviour of paving concretes: quantification of heavy metal content in leachates issued from tank test using demineralized water"*, Cement and Concrete Research, 35, (5), 951-957.

Mildenberger, U. and A. Khare, 2000. *"Planning for an Environment-Friendly Car"*, Technovation 20, 205-214.

Muench, S., and T. Van Dam, 2015. *"Climate Change Adaptation for Pavements"*, Tech Brief, FHWA-HIF-15-015, Federal Highway Administration, Washington, DC.

National Concrete Pavement Technology Center (NCPTC) 2012. *"Sustainable Concrete Pavements: A Manual of Practice"*, Iowa State University, Institute for Transportation, Ames, IA.

Pade, C. and Guimaraes, M., 2007. *"The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective"*, Cement and Concrete Research, 37, (9), 1348-1356.

Pomerantz, M., Akbari, H., Chen, A., Taha, H., and Rosenfeld, A.H., 1997. *"Paving Materials for Heat Island Mitigation"*, Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-38074.

Pomerantz, M. and Akbari, H., 1998. *"Cooler Paving Materials for the Heat Island Mitigation"*, Proceedings of The 1998 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency, Washington, DC.

Pomerantz, M., Akbari, H., and Harvey, J.T., 2000. *"The benefits of cooler pavements on durability and visibility"*, Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-43443.

Pomerantz, H., Pon, B., Akbari, H., and Change, S.-C., 2000. *"The Effect of Pavements' Temperatures on Air Temperatures in Large Cities"*, Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-43442.

Salem, O.S., Ghorai, S., 2015. "Environmental Life-Cycle Assessment of pavement, maintenance, repair and rehabilitation activities", TRB 2015 Annual Meeting.

Santero, N.J, Horvath, A., 2009. *"Global warming potential of pavements"*, Environ. Res. Lett. 4 : 034011.

Santero, N.J., Masanet, E., and Horvath, A., 2010. *"Life-Cycle Assessment of Pavements: A Critical Review of Existing Literature and Research"*, SN3119a, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA.

Santero, N.J., E. Masanet, and A. Horvath, 2011a. *"Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps"*, Resources, Conservation and Recycling 55, 810-818.

Santero, N.J., E. Masanet, and A. Horvath 2011b. *"Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review"*, Resources, Conservation and Recycling 55, 801-809.

Santos João, James Bryce, Gerardo Flintsch, Adelino Ferreira & Brian Diefenderfer, 2014. *"A life cycle assessment of in-place recycling and conventional pavement construction and maintenance practices"*, Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance.

Stripple, H. 2001. *"Life Cycle Assessment of Road: A Pilot Study for Inventory Analysis (Second Revised Edition)"*, Swedish National Road Administration, IVL B 1210 E.

Taylor, G., Marsh, P., and Oxelgren, E., 2000. *"Effect of Pavement Surface Type on Fuel Consumption - Phase II: Seasonal Tests"*, Portland Cement Association, CSTT-HWV-CTR- 041.

Townsend, T.G. and Brantley, A., 1998. *"Leaching Characteristics of Asphalt Roadways"*, Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management, Report 98-2.

United States Environmental Protection Agency 2004. *"2004 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories"*, EPA 822-R-04-005.

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

Vashisth, P., Lee, K.W., and Wright, R.M., 1998. *“Assessment of Water Pollutants from Asphalt Pavement Containing Recycled Rubber in Rhode Island”*, Transportation Research Record, 1626.

Vidal, R., Moliner, E., Martínez, G., Rubio, M.C., 2013. *“Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement”*, Resources, Conservation and Recycling 74, 101– 114.

Willis, J.R., 2015. *“Effect of recycled materials on pavement Life-Cycle Assessment: a case study”*, Submitted to the 94th Annual Meeting of the Transportation Research Board.

World Commission on Environment and Development (WCED) 1987. *“Our Common Future: The Report of the World Commission on Environment and Development”*, Oxford University Press, University of Oxford, United Kingdom.

Xu, X., Gregory, J., Kirchain, R., 2015. *“Role of the Use Phase and Pavement-Vehicle Interaction in 1 Comparative Pavement Life Cycle Assessment”*, A Paper Submitted for Presentation at the Transportation Research Board 94th Annual Meeting.

Yu, B., Lu, Q., 2013. *“Estimation of albedo effect in pavement life cycle assessment”*, Journal of Cleaner Production, 1-4.

Zaniewski, J.P. 1989. *“Effect of Pavement Surface Type on Fuel Consumption”*, Portland Cement Association, PCA R&D SR289.

Zhu, H., Cai H., Yan J., Lu Y., Li H., and Li H., 2016. *“Development of Life Cycle Inventory of Emerging Asphalt Pavement Technologies and Life Cycle Evaluation System in China”*, Submitted on July 23, 2015, for consideration for presentation and publication at the 95th Transportation Research Board Annual Meeting, January 10-14, 2016.

Λοΐζος Α. & Χ. Πλατή 2015. *“Σημειώσεις για το Μάθημα Οδοστρώματα Οδών και Αεροδρομίων – Τεύχος Β: Συστήματα παρακολούθησης και διαχείρισης οδοστρωμάτων”*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Οδοποιίας, Οκτώβριος 2015.

Λοΐζος Α. & Χ. Πλατή 2015. *“Σημειώσεις για το Μάθημα Ειδικά Θέματα Οδοστρωμάτων”*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Οδοποιίας, Οκτώβριος 2015.