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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΔΥΟΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ

ΦΛΩΡΑ ΙΩΑΝΝΙΔΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Α. ΛΟΪΖΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2020

Σύνοψη

Η οικολογική κρίση έχει δημιουργήσει την ανάγκη για στροφή στην αντίληψη της βιωσιμότητας: ένα τρίπτυχο περιβαλλοντικής, κοινωνικής και οικονομικής ισορροπίας, για το οποίο υπάρχουν σημαντικές πολιτικές δεσμεύσεις. Σε αυτό το πλαίσιο, ο τομέας των οδοστρωμάτων καλείται να συμβαδίσει με τις αρχές τις βιωσιμότητας, στοχεύοντας στην ανάπτυξη βιώσιμων στρατηγικών, οι οποίες χρειάζεται να διερευνώνται και να αξιολογούνται με κατάλληλες μεθόδους. Στην παρούσα εργασία, με την βοήθεια της μεθόδου της 'ανάλυσης κύκλου ζωής', διερευνήθηκαν αναδυόμενες τεχνολογίες ασφαλτομιγμάτων ως προς τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις και πιο συγκεκριμένα η χρήση εναλλακτικών αδρανών υλικών, δηλαδή ανακτημένο ασφαλτικό οδόστρωμα (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP) και σκωρία χαλυβουργίας, στην αντιολισθηρή στρώση οδοστρώματος. Διερευνήθηκαν τρία εναλλακτικά σενάρια ασφαλτομιγμάτων, ένα με χρήση σκωρίας και δύο με συνδυασμένη χρήση σκωρίας και RAP σε ποσοστά 10% και 25%, σε σχέση με το σενάριο αναφοράς το οποίο αφορά ασφαλτόμιγμα με συμβατικά αδρανή λατομείων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι το εναλλακτικό ασφαλτόμιγμα με σκωρία έχει θετικό αντίκτυπο σε περιβαλλοντικούς δείκτες, όπως το διοξείδιο του άνθρακα και η κατανάλωση ενέργειας, λόγω της μειωμένης απαίτησης για παραγωγή και χρήση συμβατικών αδρανών. Αύξηση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης παρατηρείται για δείκτες όπως, ο υδράργυρος και τα επικίνδυνα απόβλητα, η οποία σχετίζεται με την αύξηση της απαιτούμενης ποσότητας ασφάλτου. Ωστόσο, η συνδυασμένη χρήση σκωρίας και RAP βελτιώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Ειδικότερα, μέσω της ενσωμάτωσης σκωρίας και RAP σε ποσοστό 25% επιτυγχάνεται μεσοσταθμική μείωση των περιβαλλοντικών δεικτών σε ποσοστό της τάξης του 12%.

Λέξεις κλειδιά: βιωσιμότητα οδοστρωμάτων, περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ανάλυση κύκλου ζωής, αντιολισθηρή στρώση, ανακτημένο ασφαλτικό οδόστρωμα, σκωρία χαλυβουργίας

Abstract

The ecological crisis has created the need to shift to the concept of sustainability: a triptych of environmental, social, and economic balance, which is the goal of several political frameworks. In this context, the road paving sector is called upon to comply with the principles of sustainability, aiming at the development of sustainable strategies and their evaluation by appropriate methods. In the present work, with the help of the 'life cycle analysis' method, emerging technologies of asphalt mixtures were investigated in terms of their environmental impact. Specifically, the use of alternative aggregates in the wearing course, namely reclaimed asphalt pavement (RAP) and steel slag were investigated. Three alternative scenarios of asphalt mixtures were analyzed: one with the use of steel slag and two with the combined use of steel slag and RAP at rates of 10% and 25%. These scenarios were compared to the reference scenario, which concerns an asphalt mixture with conventional aggregates. The results of the analysis showed that the alternative asphalt mixture with steel slag has a positive impact on some environmental indicators, such as carbon dioxide and energy consumption, due to the reduced demand for production and use of conventional aggregates. An increase in the environmental burden is observed for indicators such as mercury and hazardous waste, which is associated with a rise in the required amount of asphalt. However, the combined use of steel slag and RAP improves the environmental footprint. Through the incorporation of steel slag and RAP at a rate of 25%, an average reduction of environmental indicators is achieved at a rate of 12%.

Keywords: pavement sustainability, environmental impacts, life cycle analysis, wearing course, reclaimed asphalt pavement, steel slag

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 6

1.1 ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗ ΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ 6
1.2 ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ 11
1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 12

2 ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ 14

2.1 ΒΙΩΣΙΜΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ 14
2.2 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ 15
2.2.1 Εισαγωγή 15
2.2.2 Κύκλος ζωής οδοστρώματος 16
2.2.3 Βιώσιμες πρακτικές ανά στάδιο του κύκλου ζωής 19
2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ 34
2.3.1 'Συστήματα κατάταξης βιωσιμότητας - Sustainability Rating Systems' 34
2.3.2 'Ανάλυση κύκλου ζωής - LCA' 37
2.3.3 'Ανάλυση κόστους ζωής - LCC / LCCA' 39
2.3.4 'Ανάλυση βιωσιμότητας κύκλου ζωής - LCSA' 39

3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ 41

3.1 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ LCA 41
3.1.1 Καθορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής 42
3.1.2 Συλλογή και ανάλυση δεδομένων 43
3.1.3 Αξιολόγηση των επιπτώσεων 48
3.1.4 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων 50
3.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ 51

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 57

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 57
4.2 ΤΥΠΟΙ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ 57
4.3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ 60

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ 70

5.1 ΜΙΓΜΑ ΑΝΤΙΟΛΙΣΘΗΡΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ 70
5.1.1 Σενάριο αναφοράς 70
5.1.2 Συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων σε σχέση με το σενάριο αναφοράς . 73
5.1.3 Συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των εναλλακτικών σεναρίων 82
5.2 ΔΙΑΤΟΜΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ 84

6 ΣΧΟΛΙΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 87

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 90

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1. Αύξηση της μέσης θερμοκρασίας (Πηγή: https://climate.nasa.gov/) 6
Εικόνα 1.2 Μεταβολή του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα (Πηγή:https://climate.nasa.gov/) 7
Εικόνα 1.3 Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης (Πηγή: www.unric.org) 10
Εικόνα 2.1 Στάδια του κύκλου ζωής οδοστρώματος 16
Εικόνα 2.2 Ανακτημένο ασφαλτικό οδόστρωμα (RAP) 21
Εικόνα 2.3 Αδρανή ανακυκλωμένου σκυροδέματος (RCA)..... 22
Εικόνα 2.4 Σκωρία χαλυβουργίας (Steel Slag)..... 22
Εικόνα 2.5 Αδρανή σκωρίας υψικαμίνου (BFS) 23
Εικόνα 2.6 Ανακυκλωμένες Ασφαλτικές Πλάκες (RAS)..... 24
Εικόνα 2.7 Ανακυκλωμένο καουτσούκ ελαστικών (Crumb rubber) 24
Εικόνα 2.8 Απόβλητα από γυαλί (Waste Glass) 25
Εικόνα 2.9 Στρατηγικές βιωσιμότητας 33
Εικόνα 2.10 Παράδειγμα συστήματος αξιολόγησης (Πηγή:https://www.greenroads.org/.)..... 35
Εικόνα 2.11 Γενικό μοντέλο LCA (Harvey et al. 2014) 37
Εικόνα 2.12 Εφαρμογές της μεθόδου ανάλυσης κύκλου ζωής 40
Εικόνα 3.1 Στάδια της LCA και τα πρότυπα ISO που τα τυποποιούν..... 41
Εικόνα 3.2 Τυπικό μοντέλο διεργασίας για την ανάλυση κύκλου ζωής μιας τοστιέρας (Suh and Huppes 2005) 45
Εικόνα 3.3 Τμήμα ενός τυπικού EIO πίνακα (Πηγή: Bureau of Economic Analysis, US Department of Commerce)..... 47
Εικόνα 4.1 Διαστάσεις και σχεδιασμός οδοστρώματος 59
Εικόνα 4.2 Δομή PaLATE..... 61
Εικόνα 4.3 Υπολογισμοί στο PaLATE (Nathman et al., 2009) 62
Εικόνα 4.4 Περιβάλλον PaLATE..... 64
Εικόνα 4.5 Εξοπλισμός στο PaLATE 64
Εικόνα 5.1 Σενάριο Α- αποτελέσματα περιβαλλοντικών δεικτών (μέρος 1ο)..... 70
Εικόνα 5.2 Σενάριο Α- αποτελέσματα περιβαλλοντικών δεικτών (μέρος 2ο)..... 71
Εικόνα 5.3 Κατανομή στα στάδια για τους τρεις δείκτες που αποκλίνουν NOx , PM10 και Καρκινογόνα 72
Εικόνα 5.4 Επιρροή του κάθε σταδίου στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα-Μέσος όρος από 10 72
Εικόνα 5.5 Συνολική απόδοση σεναρίου Β, συγκρινόμενο με το σενάριο αναφοράς Α..... 73
Εικόνα 5.6 Επιρροή του κάθε σταδίου στην απόδοση-Σενάριο Β..... 74
Εικόνα 5.7 Συνολική απόδοση σεναρίου Γ, συγκρινόμενο με το σενάριο αναφοράς Α 76
Εικόνα 5.8 Επιρροή του κάθε σταδίου στην απόδοση-Σενάριο Γ 77
Εικόνα 5.9 Συνολική απόδοση σεναρίου Δ, συγκρινόμενο με το σενάριο αναφοράς Α..... 79
Εικόνα 5.10 Επιρροή του κάθε σταδίου στην απόδοση-Σενάριο Δ..... 80
Εικόνα 5.11 Περιβαλλοντική απόδοση εναλλακτικών ασφαλτομιγμάτων σε σύγκριση με το συμβατικό 82
Εικόνα 5.12 Σύγκριση περιβαλλοντικής απόδοσης μεταξύ των εναλλακτικών ασφαλτομιγμάτων 83
Εικόνα 5.13 Επιρροή κάθε στρώσης στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα του οδοστρώματος..... 84
Εικόνα 5.14 Περιβαλλοντική απόδοση εναλλακτικών οδοστρωμάτων σε σύγκριση με το συμβατικό 85
Εικόνα 5.15 Σύγκριση περιβαλλοντικής απόδοσης μεταξύ των εναλλακτικών σεναρίων σε επίπεδο οδοστρώματος..... 86

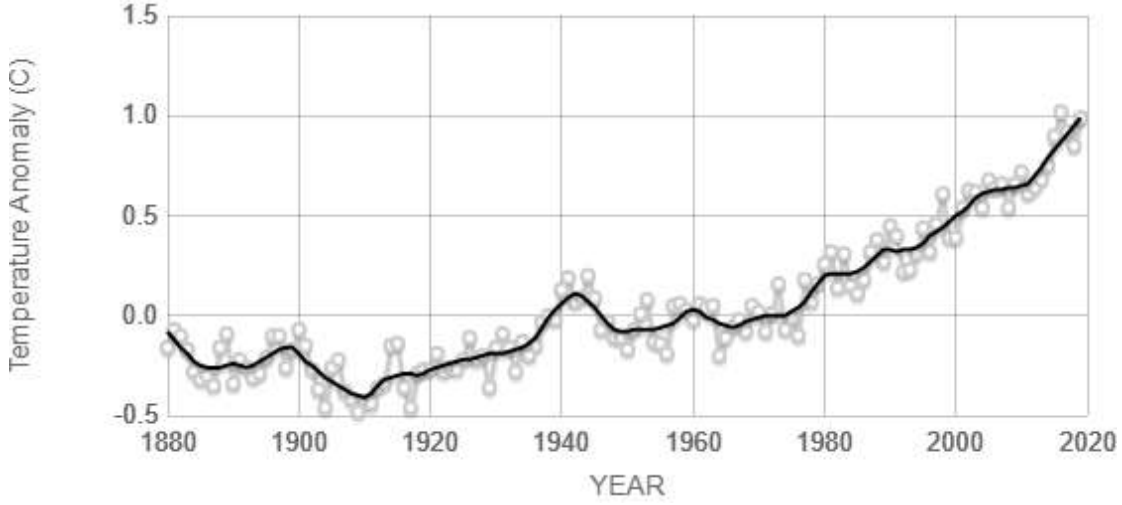
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1 Στοιχεία μιγμάτων αντιολισθηρής στρώσης - Σενάρια ανάλυσης..... 58
Πίνακας 4.2 Στοιχεία ασφαλτομιγμάτων και ασύνδετων υλικών 59

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

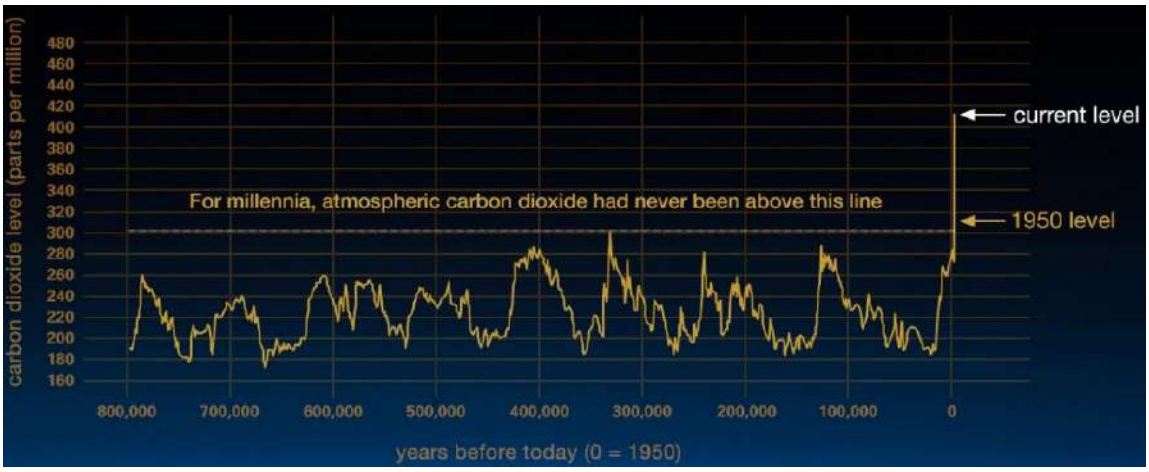
1.1 Οικολογική κρίση και βιωσιμότητα

Η πρωτοφανής οικολογική κρίση με την οποία έχει έρθει αντιμέτωπη η ανθρωπότητα τις τελευταίες δεκαετίες, έχει θέσει σε αμφισβήτηση τις ισχύουσες κοινωνικοοικονομικές, πολιτικές και ηθικές αξίες σε παγκόσμιο και εθνικό επίπεδο. Σύμφωνα με την έκθεση Living Planet Report (WWF, 2018), τα επιστημονικά στοιχεία δείχνουν ότι η ανθρώπινη δραστηριότητα ωθεί στα άκρα τα φυσικά συστήματα που υποστηρίζουν τη ζωή στη Γη. Σύμφωνα με την NASA (Εθνική Υπηρεσία Αεροναυπηγικής και Διαστήματος), η κλιματική αλλαγή, μια απ' τις μεγαλύτερες προκλήσεις του σήμερα, εκφράζεται με διάφορους τρόπους, όπως για παράδειγμα η παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας, η θέρμανση και οξίνιση των ωκεανών, το λιώσιμο των πάγων και η άνοδος της στάθμης της θάλασσας, τα οποία είναι κάποια απ' τα σημάδια συναγερμού που μας στέλνει ο πλανήτης. Στην εικόνα 1.1, απεικονίζεται η αλλαγή στην παγκόσμια θερμοκρασία σε σχέση με τις μέσες θερμοκρασίες των ετών 1951-1980 και επισημαίνεται ότι το έτος 2016 αποτελεί το θερμότερο, με πολύ μικρή διαφορά απ' το 2019.



Εικόνα 1.1. Αύξηση της μέσης θερμοκρασίας (Πηγή: https://climate.nasa.gov/)

Οι επιστήμονες αποδίδουν την τάση υπερθέρμανσης του πλανήτη που παρατηρείται από τα μέσα του 20ού αιώνα στο «φαινόμενο του θερμοκηπίου», δηλαδή στο φαινόμενο κατά το οποίο η θερμότητα που εκπέμπεται από τη Γη προς το διάστημα παγιδεύεται στην ατμόσφαιρα. Τα αέρια στην ατμόσφαιρα, τα οποία εμποδίζουν τη διαφυγή της θερμότητας, είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο, το οξείδιο του αζώτου και οι φθοροχλωράνθρακες (CFCs), τα οποία συνδέονται άμεσα με την ανθρώπινη δραστηριότητα. Ειδικά για το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), που είναι ένα απ' τα σημαντικότερα αέρια του θερμοκηπίου, η συγκέντρωση του στην ατμόσφαιρα έχει εκτοξευτεί απ' το 1950 και μετά σε πρωτοφανή επίπεδα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.2.



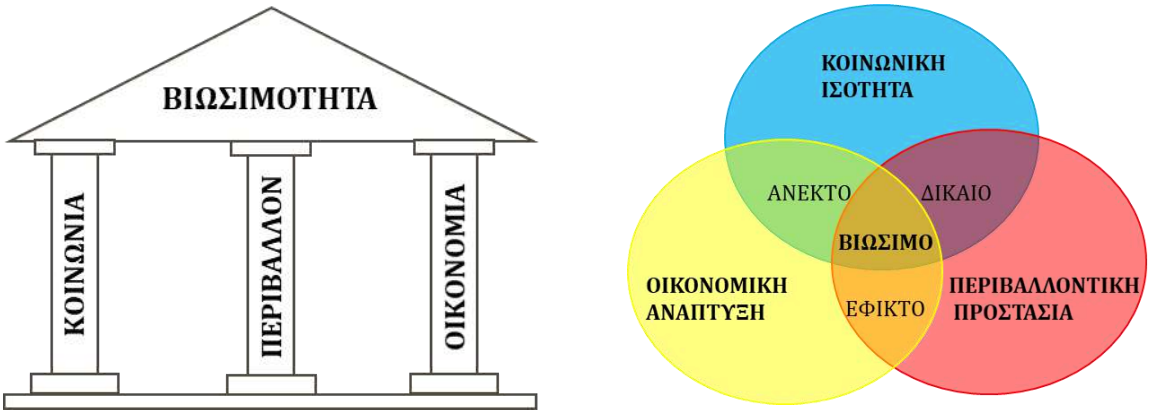
Εικόνα 1.2 Μεταβολή του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα (Πηγή:https://climate.nasa.gov/)

Η απαίτηση αντιμετώπισης της οικολογικής κρίσης γέννησε την ανάγκη να αντιληφθούμε τον κόσμο με άλλη οπτική και έφερε στο προσκήνιο την έννοια της βιωσιμότητας και της βιώσιμης ανάπτυξης. Αυτό συνέβη το 1987, όταν η Παγκόσμια Επιτροπή Περιβάλλοντος και Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών, υπό την προεδρία της Νορβηγού πρωθυπουργού Gro Harlem Brundtland, δημοσίευσε την έκθεσή της "Το κοινό μας μέλλον" (Brundtland, 1987). Η κεντρική σύσταση αυτού του εγγράφου, γνωστή ως έκθεση Brundtland, ήταν πως ο τρόπος να ικανοποιηθούν οι ανταγωνιστικές απαιτήσεις της προστασίας του περιβάλλοντος και της οικονομικής ανάπτυξης είναι μέσω μιας νέας προσέγγισης: της βιώσιμης ανάπτυξης, η οποία ορίστηκε ως:

«Βιώσιμη ανάπτυξη είναι η ανάπτυξη που ικανοποιεί τις ανάγκες της παρούσας γενιάς χωρίς να θέτει σε κίνδυνο την δυνατότητα των μελλοντικών γενεών να ικανοποιούν τις δικές τους ανάγκες».

Η Βιώσιμη ανάπτυξη βασίζεται στην έννοια της βιωσιμότητας. Η βιωσιμότητα αναφέρεται γενικά ως η ικανότητα συνύπαρξης των οικοσυστημάτων του πλανήτη και του ανθρώπινου πολιτισμού, εσαεί. Θα λέγαμε ότι είναι η κατάσταση κατά την οποία οι κοινωνίες εξελίσσονται στα πλαίσια ενός ισορροπημένου περιβάλλοντος, στο οποίο η εκμετάλλευση των πόρων, η κατεύθυνση των επενδύσεων, ο προσανατολισμός της τεχνολογικής ανάπτυξης και οι θεσμικές αλλαγές είναι όλα σε αρμονία και δεν διακυβεύεται τόσο η σημερινή όσο και η μελλοντική δυνατότητα για διατήρηση αυτής της ισορροπίας. Εν ολίγοις, ο όρος ‘βιωσιμότητα’ θεωρείται η ισορροπία μεταξύ οικοσυστημάτων και ανθρωπότητας, ενώ η "βιώσιμη ανάπτυξη αναφέρεται ως η ολιστική προσέγγιση που μας οδηγεί στο ζητούμενο της βιωσιμότητας (Shaker, 2015).

Όσον αφορά την βιωσιμότητα, αυτή συχνά αναφέρεται ότι αποτελείται από τρεις κύριους πυλώνες: οικονομικό, περιβαλλοντικό και κοινωνικό. Πιο συγκεκριμένα, θα λέγαμε ότι για να θεωρηθεί ένα σύστημα βιώσιμο ή μια λύση βιώσιμη είναι αναγκαίο να ικανοποιούνται οι ανάγκες σε επαρκή βαθμό και των τριών αυτών υποσυστημάτων, δηλαδή αυτές της κοινωνίας, της οικονομίας και του περιβάλλοντος. Η επίτευξη βιώσιμων συστημάτων, λύσεων κτλ. αποδεικνύεται πολύ συχνά μια πρόκληση, διότι οι τρεις πυλώνες της βιωσιμότητας έχουν συνήθως αντικρουόμενα συμφέροντα. Παραδείγματος χάρη, μια οικονομικότερη επιλογή συχνά αποβαίνει επιβλαβής για το περιβάλλον ή η ικανοποίηση κοινωνικών απαιτήσεων πλήγμα για την οικονομία. Συνεπώς, με στόχο την βιωσιμότητα, είναι κρίσιμο να επιτευχθεί μια ισορροπία μεταξύ των αναγκών αυτού του τριπτύχου. Το εγχείρημα αυτό καθώς είναι συχνά απαιτητικό, δημιουργεί την ανάγκη ανάπτυξης τεχνικών και εργαλείων, που θα έχουν την δυνατότητα να εκτιμούν τις επιπτώσεις, έτσι ώστε να καταστεί εφικτή η μέτρηση - προσέγγιση βιώσιμων λύσεων. Εξίσου σημαντική ανάγκη φαίνεται να είναι η σύγκριση διαφορετικών επιλογών-σεναρίων για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων, με στόχο την καθολική στρέψη προς βιώσιμες πρακτικές. Ο όρος ‘βιωσιμότητα’ (ή αειφορία), πρόκειται για μία αντίληψη ουσιαστικά του πως διαχειριζόμαστε τον πλανήτη και τις κοινωνίες μας, η οποία κατά συνέπεια μπορεί να έχει εφαρμογή σε όλες τις εκφάνσεις της σύγχρονης ζωής και χρειάζεται να ποσοτικοποιείται με κάποιον τρόπο.



Εικόνα 1.3 Οι πυλώνες της βιωσιμότητας

Με βάση τα παραπάνω, οι παγκόσμιοι φορείς και οργανισμοί κλήθηκαν να λάβουν θέση και μέτρα. Το 2015 υπήρξε ένα καθοριστικό έτος για την βιώσιμη ανάπτυξη παγκοσμίως. Οι παγκόσμιοι ηγέτες ενέκριναν στο πλαίσιο της 70ής Γενικής Συνέλευσης των Ηνωμένων Εθνών, που έλαβε χώρα την 25η Σεπτεμβρίου 2015 στη Νέα Υόρκη, ένα νέο παγκόσμιο πλαίσιο για τη βιώσιμη ανάπτυξη: την Ατζέντα 2030 για τη βιώσιμη ανάπτυξη (United Nations General Assembly, 2015), στο επίκεντρο της οποίας βρίσκονται οι Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΣΒΑ), οι οποίοι παρουσιάζονται στην εικόνα 1.3. Το ίδιο έτος εγκρίθηκαν επίσης η Συμφωνία των Παρισίων για το κλίμα (Horowitz, 2016), το πρόγραμμα δράσης της Αντίς Αμπέμπα (United Nations, 2015), ως αναπόσπαστο μέρος της Ατζέντας 2030, και το πλαίσιο Σεντάι για τη μείωση του κινδύνου καταστροφών (UNDRR, 2015).

Εικόνα 1.3 Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης (Πηγή: www.unric.org)

Σε αντίθεση με τις αποφάσεις που έχουν ληφθεί, επισημαίνεται ότι σύμφωνα με την έκθεση επισκόπησης προόδου για την Βιώσιμη ανάπτυξη στην Ευρωπαϊκή Ένωση για το 2020 της EUROSTAT (Hametner et al., 2020), οι δράσεις για την κλιματική αλλαγή παρουσιάζουν μέτρια πρόοδο, πολύ μικρότερη της προσδοκώμενης. Προκύπτει λοιπόν ότι οι προσπάθειες χρειάζεται να ενταθούν για την αντιμετώπιση της οικολογικής κρίσης, αλλά και την επίτευξη των στόχων της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Με βάση τα παραπάνω, ο τομέας των μεταφορών και της συγκοινωνιακής υποδομής δεν θα μπορούσε να μείνει ανέπαφος με τις εξελίξεις. Ως ένας σημαντικός τομέας του οικονομικού και κοινωνικού γίγνεσθαι, οφείλει να συμπορευτεί με την στροφή προς την βιωσιμότητα, προσπαθώντας να ποσοτικοποιήσει και να μετριάσει το αντίκτυπο του. Το 2017, το 22% των συνολικών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου στην ΕΕ προήλθαν από τον τομέα των μεταφορών, χωρίς να συμπεριληφθούν οι εκπομπές από τις διεθνείς αεροπορικές και θαλάσσιες μεταφορές. Επίσης θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) από τις μεταφορές αυξήθηκαν κατά 2,2% σε σύγκριση με το 2016 (EEA, 2019).

Τα οδοστρώματα ως ένα πολύ βασικό συστατικό μέρος των οδικών μεταφορών θα μπορούσε να παίξει ρόλο κλειδί στην επίτευξη βιώσιμων συστημάτων μεταφοράς. 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 οδοστρωμάτων και αποτελεί το ενδιαφέρον της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η οποία επικεντρώνεται στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση αναδυόμενων τεχνολογιών ασφαλτομιγμάτων σε εύκαμπτα οδοστρώματα.

1.2 Στόχοι και μεθοδολογία

Τα οδοστρώματα, ως ένα βασικό συστατικό του τομέα των μεταφορών και της συγκοινωνιακής υποδομής, θα ήταν αναμενόμενο να έχει ήδη συντονιστεί σε μεγάλο βαθμό στο πλαίσιο της βιωσιμότητας. Αντίθετα, είναι γεγονός ότι μόνο τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πιο συστηματικές προσπάθειες για την μελέτη των επιπτώσεων των οδοστρωμάτων και την ανάπτυξη βιώσιμων εφαρμογών τους.

Η απαίτηση για ανάπτυξη βιώσιμων λύσεων για οδοστρώματα προϋποθέτει ωστόσο ότι θα πρέπει να ελέγχονται και να συγκρίνονται με τις συμβατικές ως προς τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον, την κοινωνία και την οικονομία. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος για την εκπλήρωση του εν λόγω σκοπού είναι η μέθοδος της 'ανάλυσης κύκλου ζωής' (Life Cycle Analysis: LCA), η οποία αναδεικνύεται ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων καθ’ όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων, τα οποία διακρίνονται σε: παραγωγή των υλικών, σχεδιασμός, κατασκευή, συντήρηση/αποκατάσταση και τέλος ζωής.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα ανωτέρω, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση αναδυόμενων τεχνολογιών ασφαλτομιγμάτων ως προς το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα μέσω της μεθόδου ανάλυσης κύκλου ζωής. Πιο συγκεκριμένα, η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην διερεύνηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ασφαλτομιγμάτων αντιολισθηρής στρώσης που ενσωματώνουν εναλλακτικά αδρανή υλικά που προέρχονται από ανακυκλώσιμες πηγές ή παραπροϊόντα της βιομηχανίας σε αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών λατομείων. Τα υλικά που λήφθηκαν υπόψιν είναι το ανακτημένο ασφαλτικό οδόστρωμα (RAP) και η σκωρία χαλυβουργίας (steel slag). Επιπλέον, η μελέτη στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής

εργασίας εστιάζει στα στάδια της παραγωγής των υλικών και της κατασκευής του οδοστρώματος.

Για την εξυπηρέτηση του ανωτέρω σκοπού, δημιουργήθηκαν τέσσερα σενάρια ανάλυσης: ένα με συμβατικά υλικά που λειτουργεί ως σενάριο αναφοράς, ένα με σκωρία χαλυβουργίας και άλλα δύο με συνδυασμένη χρήση RAP και σκωρίας χαλυβουργίας σε διαφορετικά ποσοστά. Για κάθε σενάριο έγιναν αναλύσεις και αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων με βάση δώδεκα περιβαλλοντικούς δείκτες. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα του κάθε εναλλακτικού σεναρίου συγκρίθηκαν με αυτά του σεναρίου αναφοράς, αλλά και μεταξύ τους αυτά των εναλλακτικών σεναρίων, με σκοπό να αντληθούν χρήσιμα συμπεράσματα και πιθανά οφέλη της χρήσης των αναδυόμενων τεχνολογιών ασφαλτομιγμάτων. Η ανάλυση έγινε τόσο σε επίπεδο ασφαλτομίγματος, όσο και σε επίπεδο οδοστρώματος καθώς αυτό εντάχθηκε σε μια διατομή οδοστρώματος ίδια για όλα τα σενάρια, για να διαπιστωθεί η επιρροή της αντιολισθηρής στρώσης στην τελική κατασκευή. Παράλληλα, έγινε καταμερισμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ανά στάδιο: παραγωγή, μεταφορά, εξοπλισμός, με σκοπό να εντοπιστούν από που προέρχονται κατά κύριο λόγο οι περιβαλλοντικές εκπομπές.

1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από οκτώ κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του εισαγωγικού κεφαλαίου. Συγκεκριμένα, πέραν του παρόντος, περιλαμβάνονται τα ακόλουθα:

Το **δεύτερο κεφάλαιο** αναλύονται η έννοια της βιωσιμότητας και πως αυτή εφαρμόζεται στον τομέα των οδοστρωμάτων. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά σε διάφορες στρατηγικές που αποσκοπούν στην βιωσιμότητα ανά στάδιο κύκλου ζωής. Τέλος, γίνεται αναφορά στις μεθοδολογίες αξιολόγησης της βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η μέθοδος της ανάλυσης κύκλου ζωής και περιγράφονται οι βασικές αρχές, η δομή και οι διαδικασίες που απαιτούνται για μια πλήρη μελέτη με βάση τα ισχύοντα πρότυπα. Επίσης, γίνεται ανασκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας όσον αφορά το πεδίο της ανάλυσης κύκλου ζωής για εφαρμογές οδοστρωμάτων. Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η ανάδειξη των διαφόρων χρήσεων της ανάλυσης κύκλου ζωής για οδοστρώματα, καθώς και η εστίαση σε έρευνες με έμφαση στη χρήση εναλλακτικών υλικών.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** επεξηγείται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας, συμπεριλαμβανομένων του εργαλείου και των σεναρίων ανάλυσης.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης κύκλου ζωής και επισήμανση σημαντικών σημείων.

Στο **έκτο κεφάλαιο** συνοψίζονται τα συμπεράσματα και προτείνονται πεδία προς περαιτέρω διερεύνηση.

Το **έβδομο κεφάλαιο** περιλαμβάνει τη διεθνή βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για τη σύνταξη της παρούσας εργασίας.

2 ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ

2.1 Βιώσιμο οδόστρωμα και η σημασία του

Εστιάζοντας στον τομέα των οδοστρωμάτων, ο όρος βιωσιμότητα δεν μπορεί παρά να αναφέρεται στη συσχέτιση τους με τις επιπτώσεις σε περιβάλλον, οικονομία και κοινωνία και την εύρεσης της χρυσής τομής για την καλύτερη επίδοση και στους τρεις τομείς.

Σύμφωνα με την Ομοσπονδιακή διοίκηση εθνικών οδών του Υπουργείο Μεταφορών των ΗΠΑ (FHWA, 2014), ένα βιώσιμο οδόστρωμα είναι αυτό που επιτυγχάνει συγκεκριμένους μηχανικούς στόχους, ενώ παράλληλα ικανοποιεί βασικές ανθρώπινες ανάγκες, χρησιμοποιεί αποτελεσματικά τους διαθέσιμους πόρους και διατηρεί ή αποκαθιστά τα περιβάλλοντα οικοσυστήματα. Σε αυτό το πλαίσιο, για να θεωρήσουμε ένα οδόστρωμα βιώσιμο θα πρέπει σαφώς να επιτυγχάνει τους επιδιωκόμενους μηχανικούς στόχους του, αλλά ταυτόχρονα να μην διαταράσσει την ισορροπία των εμπλεκόμενων συστημάτων, χρησιμοποιώντας τους φυσικούς πόρους (οικονομικούς και περιβαλλοντικούς) με βέλτιστο τρόπο και καλύπτοντας τις απαιτούμενες ανάγκες της κοινωνίας.

Δεδομένου του βασικού ρόλου για τον τομέα των μεταφορών και της ευρείας χρήσης των οδοστρωμάτων, η βελτίωση της βιωσιμότητας των δομικών μερών του οδοστρώματος είναι βέβαιο ότι θα αποφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά οφέλη. Για το περιβάλλον, κάποια απ’ τα οφέλη που μπορούν να συσχετιστούν με την αύξηση της βιωσιμότητας του οδοστρώματος είναι η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και του θορύβου. Για την κοινωνία, η ασφάλεια των χρηστών από θάνατο ή τραυματισμό, η μείωση του κόστους λειτουργίας του οχήματος και η προσβασιμότητα, που επιφέρουν κοινωνική ισότητα είναι μερικά παραδείγματα για το πώς τα βιώσιμα οδοστρώματα μπορούν να επηρεάσουν την κοινωνία. Για την οικονομία, ένα βιώσιμο οδόστρωμα μπορεί να παρουσιάσει μειώσεις στα κόστη κατασκευής, συντήρησης και αποκατάστασης, που αποτελούν ένα κίνητρο για κίνηση της οικονομίας.

2.2 Στρατηγικές βιωσιμότητας οδοστρωμάτων

2.2.1 Εισαγωγή

Διάφορες προσπάθειες έχουν γίνει για την προσέγγιση της βιωσιμότητας για τον τομέα των οδοστρωμάτων. Σε γενικά πλαίσια, στόχος των βιώσιμων στρατηγικών είναι να μειώσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που παράγονται κατά την διάρκεια της ζωής του οδοστρώματος, χωρίς να διακυβεύσουν την απόδοση του αλλά και τις κοινωνικές, οικονομικές ισορροπίες. Τονίζεται βέβαια ότι κάθε οδόστρωμα, αφού εντάσσεται σε ένα συγκεκριμένο σύστημα (οικονομικό, κοινωνικό, περιβαλλοντικό), χρειάζεται διαφορετική μελέτη και τακτική για να χαρακτηριστεί βιώσιμο. Με άλλα λόγια, δεν υπάρχουν καθολικά χαρακτηριστικά ή χαρακτηριστικά σχεδιασμού που περιγράφουν ένα βιώσιμο οδόστρωμα. Παρόλο που μπορεί να καθοριστεί ένα γενικό πλαίσιο βιωσιμότητας για οδοστρώματα, είναι αδύνατο να υπάρξει ένα καθολικό, καθώς αυτό εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως την τοποθεσία, το κλίμα, τα διαθέσιμα υλικά, το πεδίο του έργου, το απαιτούμενο επίπεδο εξυπηρέτησης και τους γενικούς στόχους του κύριου του έργου. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι, σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί ακόμη και να είναι αντιπαραγωγικό να εισάγουμε ορισμένα χαρακτηριστικά που θεωρούνται βιώσιμα χωρίς πλήρη μελέτη επιπτώσεων. Για παράδειγμα, η αλόγιστη χρήση ανακυκλωμένων υλικών όταν αυτά βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση, θα μπορούσε να έχει τελικά περισσότερες αρνητικές περιβαλλοντικές συνέπειες παρά οφέλη. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι, η επίτευξη της βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων δεν πρόκειται για μια καθολική προσέγγιση, αλλά μάλλον για μια μοναδική πρόταση για κάθε εφαρμογή οδοστρώματος, η οποία πρέπει να προκύπτει έπειτα από ενδελεχή μελέτη επιπτώσεων.

Επισημαίνεται όμως ότι η μελέτη των επιπτώσεων χρειάζεται να εξετάζεται σε βάθος χρόνου, δηλαδή σε όλη την διάρκεια ζωής των οδοστρωμάτων. Πράγματι, η ‘Βιωσιμότητα‘ ή ‘Αειφορία’, και ετυμολογικά ακόμα, εμπεριέχει την έννοια της διάρκειας. Με δεδομένο τον ορισμό της βιωσιμότητας και του βιώσιμου οδοστρώματος, είναι ευνόητο ότι για να έχουν νόημα οι συγκεκριμένοι προσδιορισμοί, το οδόστρωμα θα πρέπει να μελετηθεί σε όλη την διάρκεια ζωής του. Για παράδειγμα, ένα οδόστρωμα το οποίο παρουσιάζει βέλτιστη περιβαλλοντική απόδοση στο στάδιο της κατασκευής, μπορεί στο στάδιο της συντήρησης ή του τέλους ζωής να επιφέρει αρνητικότερο αντίκτυπο για το περιβάλλον, τόσο που να υπερκαλύπτει τα οφέλη της κατασκευής.

Στην επόμενη υποενότητα, γίνεται μια αναφορά στον κύκλο ζωής του οδοστρώματος και στη συνέχεια αναλύονται στρατηγικές βιωσιμότητας ανά στάδιο του κύκλου ζωής σύμφωνα με τις συστάσεις της FHWA.

2.2.2 Κύκλος ζωής οδοστρώματος

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ένα οδόστρωμα για να θεωρηθεί βιώσιμο είναι αναγκαίο να μελετάται σε όλο τον κύκλο ζωής του, έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψιν όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση του, αλλά και τις επιπτώσεις του στους τρεις πυλώνες της βιωσιμότητας.

Τα στάδια κύκλου ζωής οδοστρωμάτων διακρίνονται σε (FHWA, 2014):

1. Παραγωγή υλικών
2. Σχεδιασμός
3. Κατασκευή
4. Χρήση
5. Συντήρηση και αποκατάσταση
6. Τέλος ζωής

Εικόνα 2.1 Στάδια του κύκλου ζωής οδοστρώματος

Εν συνεχεία, αναλύονται συνοπτικά οι επιμέρους φάσεις του κύκλου ζωής ενός οδοστρώματος:

Παραγωγή υλικών

Η ‘παραγωγή υλικών’ είναι το στάδιο εκείνο που εμπεριέχει όλες τις δραστηριότητες που εμπλέκονται στην απόκτηση υλικών για την κατασκευή του οδοστρώματος και την επεξεργασία τους, συμπεριλαμβανομένων των διεργασιών στις εγκαταστάσεις και της μεταφοράς. Η λατομική δραστηριότητα και η άντληση πετρελαίου αποτελούν παραδείγματα απόκτησης υλικών για την κατασκευή, ενώ η διύλιση και η ανάμιξη, παραδείγματα επεξεργασίας. Επίσης, σε αυτό το στάδιο ανήκουν και οι διάφορες διεργασίες όπως αυτές στις μονάδες παραγωγής ασφαλτομιγμάτων αλλά και όλες οι μεταφορές υλικών, μιγμάτων, εξοπλισμού κτλ.

Αυτό το στάδιο επιδρά σε αρκετούς περιβαλλοντικούς δείκτες, όπως: η εξάντληση των πόρων, η ποιότητα του νερού η παραγωγή αέριων του θερμοκηπίου, η κατανάλωση ενέργειας και η ευημερία του οικοσυστήματος.

Σχεδιασμός οδοστρώματος

Το στάδιο του ‘Σχεδιασμού’, αποτελείται από την διαδικασία εντοπισμού των λειτουργικών απαιτήσεων ενός οδοστρώματος, μέσω της συλλογής απαραίτητων πληροφοριών (π.χ. υπέδαφος, φορτίσεις κυκλοφορίας, καιρός) και στη συνέχεια επιλογή και καθορισμός υλικών και δομικής σύνθεσης του οδοστρώματος. Στον ‘Σχεδιασμό’ εμπεριέχονται εκτός από τις διαδικασίες σχεδιασμού ενός νέου οδοστρώματος, και εκείνες που σχετίζονται με την αποκατάστασή του, όπως για παράδειγμα οι δομικές επικαλύψεις.

Ο σχεδιασμός επηρεάζει την βιωσιμότητα σε μεγάλο βαθμό, καθώς η διάρκεια ζωής, η αντοχή και το κόστος του κύκλου ζωής μεταξύ άλλων είναι παράγοντες που εξαρτώνται άμεσα από τον σχεδιασμό.

Κατασκευή

Στο στάδιο της ‘Κατασκευής’ αποδίδονται όλες οι διαδικασίες και ο εξοπλισμός που χρειάζονται για την κατασκευή οδοστρωμάτων, συμπεριλαμβανομένης της αρχικής κατασκευής και της ανακατασκευής. Παραδείγματα τέτοιων εργασιών που ανήκουν σε αυτό το στάδιο που πρακτικά είναι όλα τα βήματα για την κατασκευή ενός οδοστρώματος, είναι ενδεικτικά η προετοιμασία του πεδίου (απόξεση, συμπύκνωση) και η διάστρωση.

Επισημαίνεται ότι η παραγωγή των ασφαλτομιγμάτων ανήκει στο στάδιο της παραγωγής υλικών.

Οι εργασίες κατά το στάδιο της 'Κατασκευής' επιδρούν σε βιώσιμους δείκτες όπως: κόστος και χρόνος έργου, ατμοσφαιρική ρύπανση από δομικά μηχανήματα και καθυστέρηση της κυκλοφορίας στην ζώνη εργασίας.

Χρήση

Η χρήση είναι το στάδιο που περιλαμβάνει το πως επηρεάζει το οδόστρωμα την λειτουργία των οχημάτων και του περιβάλλοντος. Χαρακτηριστικά οδοστρώματος (π.χ. τραχύτητα, ακαμψία) που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας του οχήματος και τις αντίστοιχες εκπομπές, καθώς και άλλους παράγοντες (π.χ. θόρυβος, απορροφητικότητα ήλιου ή ήχου) άπτονται στο πλαίσιο της χρήσης του οδοστρώματος.

Αυτό το στάδιο επηρεάζει θέματα βιωσιμότητας, όπως η ανθρώπινη υγεία (ασφάλεια) και το φαινόμενο της αστικής θερμονησίδας.

Συντήρηση και αποκατάσταση

Το στάδιο της συντήρησης περιλαμβάνει τις διαδικασίες που συμβάλλουν στη μείωση του ρυθμού φθοράς ενός οδοστρώματος. Σκοπός σε αυτό το στάδιο του κύκλου ζωής είναι ο προσδιορισμός και η αντιμετώπιση διάφορων ελλείψεων του οδοστρώματος που εντείνουν την αναμενόμενη φθορά. Παραδείγματα τέτοιων εργασιών είναι: τοπικές εξυγιάνσεις – μπαλώματα, επιφανειακή επίστρωση και πλήρωση ρωγμών με ασφαλτική μαστίχη.

Το στάδιο της συντήρησης επιδρά σημαντικά στο κόστος του κύκλου ζωής, στην χρήση υλικών πόρων και στην γενικότερη διάρκεια ζωής.

Τέλος ζωής

Ως τέλος του κύκλου ζωής θεωρούμε τις εργασίες που γίνονται κατά την χρονική περίοδο που το οδόστρωμα έχει φτάσει στο τέλος της λειτουργικής ζωής του. Οι εργασίες αυτές μπορούν να αφορούν όλες τις διαδικασίες για την απόθεση του οδοστρώματος σε χώρους υγειονομικής ταφής, είτε αυτές για την επαναχρησιμοποίηση του. Στην δεύτερη περίπτωση, το οδόστρωμα ή οποιοδήποτε δομικό μέρος του υπόκειται σε διάφορες διεργασίες όπως επεξεργασία, ανακύκλωση, μεταφορά κτλ. Επίσης, η αποκατάσταση του περιβάλλοντος χώρου περιλαμβάνεται σε αυτό το στάδιο.

Κατά το τέλος του κύκλου ζωής λαμβάνουν χώρα διαδικασίες, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά στην βιωσιμότητα, καθώς παράγοντες όπως η παραγωγή και διάθεση αποβλήτων, η ποιότητα του αέρα και των υδάτων και η χρήση υλικών πόρων εξαρτώνται άμεσα από αυτό το στάδιο.

2.2.3 Βιώσιμες πρακτικές ανά στάδιο του κύκλου ζωής

Στο παρόν υποκεφάλαιο, αναφέρονται βιώσιμες πρακτικές-συστάσεις για κάθε στάδιο του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων, με ιδιαίτερη έμφαση στα διάφορα εναλλακτικά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά το στάδιο της παραγωγής των υλικών.

2.2.3.1 Παραγωγή υλικών

Γενικά, οι βέλτιστες πρακτικές βιωσιμότητας για το στάδιο της παραγωγής των υλικών συνήθως περιλαμβάνουν ένα ή περισσότερα από τα ακόλουθα:

- Μείωση της χρήσης παρθένων υλικών με αντικατάσταση τους από υλικά που προέρχονται από ανακύκλωση, παραπροϊόντα βιομηχανίας και απόβλητα,
- Μείωση της χρήσης παρθένων υλικών μέσω βελτιωμένου σχεδιασμού μιγμάτων που στοχεύουν στην μακροζωία του οδοστρώματος,
- Μείωση των επιπτώσεων της παραγωγής υλικών βελτιώνοντας την απόδοση και μειώνοντας τις εκπομπές.

2.2.3.1.1 Αδρανή

Τα αδρανή αποτελούν το μεγαλύτερο μερίδιο της μάζας και του όγκου σε μια δομή οδοστρώματος, είτε χρησιμοποιούνται χωρίς συνδετικό υλικό (π.χ. ασύνδετες στρώσεις), είτε ως μέρος μιας ασφαλτικής στρώσης. Αν και τα αδρανή είναι σχετικά χαμηλού κόστους και έχουν σχετικά χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά μονάδα μάζας, έχουν σημαντικό αντίκτυπο στη βιωσιμότητα του οδοστρώματος επειδή είναι μη ανανεώσιμοι φυσικοί πόροι, ο οποίοι καταναλώνονται σε μεγάλες ποσότητες και συχνά δεν μπορούν να εξορύσσονται κοντά στο σημείο χρήσης τους, άρα συνδέονται με αυξημένες μεταφορές. Επίσης, η συνολική διαδικασία για την απόκτηση και επεξεργασία των αδρανών επηρεάζει το τοπικό περιβάλλον και τις γύρω κοινότητες. Οι βέλτιστες πρακτικές για την βιωσιμότητα που αφορούν τα αδρανή περιλαμβάνουν:

- Ελαχιστοποίηση της συνολικής μεταφοράς των αδρανών ή και βελτιστοποίηση των μέσων μεταφοράς που χρησιμοποιούνται. Αυτό μειώνει την ενέργεια και τις εκπομπές που σχετίζονται με τις μεταφορές και γενικά οδηγεί στη μέγιστη χρήση των τοπικά διαθέσιμων πηγών αδρανών υλικών.

- Μείωση της χρήσης παρθένων αδρανών με αντικατάσταση τους από εναλλακτικά αδρανή. Τέτοια υλικά μπορεί να προέρχονται από τεχνολογίες ανακύκλωσης, ή από πηγές αποβλήτων και παραπροϊόντων της βιομηχανίας. Κάποια από αυτά τα υλικά αναφέρονται στην συνέχεια.

Υλικά από ανακύκλωση

- **Reclaimed Asphalt Pavement, RAP - Ανακτημένο Ασφαλτικό Οδόστρωμα**

Το Ανακτημένο Ασφαλτικό Οδόστρωμα (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) είναι ο όρος που δίνεται σε αποξηλωμένα ή / και επανεπεξεργασμένα υλικά οδοστρωμάτων που περιέχουν άσφαλτο και αδρανή. Αυτά τα υλικά παράγονται όταν τα ασφαλτικά οδοστρώματα αφαιρεθούν για ανακατασκευή, συντήρηση ή για διάφορες ανάγκες εκσκαφής. Όταν συνθλίβεται και κοσκινίζεται σωστά, το RAP αποτελείται από υψηλής ποιότητας και διαβάθμισης αδρανή επικαλυμμένα με άσφαλτο.

Το ασφαλτικό είναι το πιο συχνά ανακυκλωμένο οδόστρωμα στις Η.Π.Α., με περίπου 100 εκατομμύρια τόνους παλαιού ασφαλτικού οδοστρώματος να ανακτώνται κάθε χρόνο (εκ των οποίων το 60% ανακυκλώνεται σε νέα μίγματα ασφάλτου και το 40% χρησιμοποιείται σε άλλες εφαρμογές οδοστρώματος) (NAPA, 2009). Για την Ευρώπη, το διαθέσιμο ανακτημένο ασφαλτικό οδόστρωμα ήταν 49,5 Mt το 2018 (EAPA, 2020). Από αυτό το σύνολο, η βιομηχανία ασφάλτου επαναχρησιμοποίησε το 76% στην κατασκευή νέων ασφαλτομιγμάτων και ανακυκλώθηκε επιπλέον 20% ως αδρανές υλικό για ασύνδετες στρώσεις οδοστρωμάτων και άλλες εφαρμογές πολιτικού μηχανικού. Συνεπώς, μόνο το 4% προορίστηκε για υγειονομική ταφή.

Το RAP αποτελείται από περίπου 95% αδρανή και 5% άσφαλτο. Όταν το RAP χρησιμοποιείται σε νέα ασφαλτομίγματα, μπορεί να προστεθεί συνδετικό ασφάλτου σε μικρότερα ποσοστά. Σύμφωνα με την FHWA, η αύξηση της ποσότητας RAP που χρησιμοποιείται σε νέα ασφαλτομίγματα είναι μια εξαιρετική στρατηγική για τη βελτίωση

της συνολικής βιωσιμότητας των ασφαλτικών οδοστρωμάτων, παρέχοντας επαρκή απόδοση και επιφανειακά χαρακτηριστικά όπως τριβή.

Εικόνα 2.2 Ανακτημένο ασφαλτικό οδόστρωμα (RAP)

- **Αδρανή ανακυκλωμένου σκυροδέματος (Recycled Concrete Aggregate, RCA)**

Είναι αδρανή τα οποία προέρχονται από τη θραύση σκυροδεματικών στρώσεων οδοστρωμάτων. Επίσης, έχει δοκιμαστεί η χρήση συντριμμάτων από κατεδαφίσεις κατασκευών σκυροδέματος ως χονδρόκοκκα αδρανή. Η ανακύκλωση σκυροδέματος είναι μια σχετικά απλή διαδικασία. Περιλαμβάνει το σπάσιμο, την αφαίρεση και τη σύνθλιψη του υπάρχοντος σκυροδέματος σε ένα υλικό με καθορισμένο μέγεθος και ποιότητα. Η ποιότητα του τελικού έργου με RCA εξαρτάται πολύ από την ποιότητα του ανακυκλωμένου υλικού που χρησιμοποιείται. Τα αδρανή από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα περιέχουν όχι μόνο τα αρχικά αδρανή, αλλά και ενυδατωμένο τσιμέντο. Αυτή η πάστα μειώνει το ειδικό βάρος και αυξάνει το πορώδες σε σύγκριση με παρόμοια φυσικά αδρανή. Δεδομένου του χαμηλότερου ειδικού βάρους του RCA, είναι οικονομικά ελκυστικό για τους κατασκευαστές, γιατί παρέχει μεγαλύτερο όγκο για ίδιο βάρος αδρανούς υλικού. Χρησιμοποιούνται κυρίως στην βάση και την υπόβαση.

Εικόνα 2.3 Αδρανή ανακυκλωμένου σκυροδέματος (RCA)

Υλικά από παραπροϊόντα της βιομηχανίας

- **Σκωρία χαλυβουργίας - Steel Slag**

Η Σκωρία χαλυβουργίας είναι ένα παραπροϊόν της χαλυβουργίας και παράγεται κατά τον διαχωρισμό του λιωμένου χάλυβα από προσμίξεις σε φούρνους που παράγουν χάλυβα. Η σκωρία εμφανίζεται ως λιωμένο υγρό και είναι ένα πολύπλοκο διάλυμα πυριτικών και οξειδίων που στερεοποιείται κατά την ψύξη.

Η χρήση χαλύβδινων σκωριών ως αντικατάσταση αδρανών θεωρείται συνήθης πρακτική, με εφαρμογές που περιλαμβάνουν τη χρήση του σε κοκκώδη βάση, επιχώματα, ΛΕΑ αυτοκινητόδρομου και οδοστρώματα ασφάλτου. Επίσης, βρίσκει εφαρμογές κυρίως ως αντιολισθηρό αδρανές στην οδοποιία (για αντιολισθηρές στρώσεις).

Εικόνα 2.4 Σκωρία χαλυβουργίας (Steel Slag)

- **Αδρανή σκωρίας υψικαμίνου (Blast furnace slag, BFS)**

Τα παραπροϊόντα των καμίνων είναι δυνατό να δώσουν μετά από αργή ψύξη και τεμαχισμό αδρανή με ιδιότητες που καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από την σύσταση της σκωρίας και τον ρυθμό ψύξης (Τριανταφύλλου, 2008). Χρησιμοποιείται ευρέως σε βάση, θερμό ασφαλτόμιγμα και επιχώματα ή εφαρμογές γεμίσματος. Το υλικό μπορεί να θρυμματιστεί και να κοσκινιστεί ώστε να ικανοποιεί συγκεκριμένες απαιτήσεις διαβάθμισης χρησιμοποιώντας συμβατικό εξοπλισμό επεξεργασίας αδρανών. Μπορεί να απαιτηθούν ειδικές διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου για την αντιμετώπιση της έλλειψης συνοχής σε ορισμένες ιδιότητες όπως διαβάθμιση, ειδικό βάρος και απορρόφηση.

Εικόνα 2.5 Αδρανή σκωρίας υψικαμίνου (BFS)

Υλικά από απόβλητα

- **Ανακυκλωμένες Ασφαλτικές Πλάκες κτιριακών στεγών (Recycled Asphalt Shingles, RAS)**

Προέρχονται από ανακύκλωση ασφαλτικών πλακών από στέγες κατοικιών (κυρίως του εξωτερικού). Αποτελούν μια εξαιρετική πηγή ασφάλτου (15-35%) και μπορούν να υποστούν επεξεργασία, να θερμανθούν και να χρησιμοποιηθούν σε νέα μίγματα ή σε ασύνδετες στρώσεις. Έχει διττή χρήση ως αντικαταστάτης συνδετικού (άσφαλτος), αλλά και αδρανών.

Εικόνα 2.6 Ανακυκλωμένες Ασφαλτικές Πλάκες (RAS)

- **Ανακυκλωμένο καουτσούκ από ελαστικά οχημάτων (Crumb rubber)**

Τα ελαστικά από οχήματα, που έχουν συμπληρώσει το χρόνο λειτουργίας τους, μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν. Παλαιά ελαστικά αυτοκινήτων έχουν χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο λεπτού αδρανούς σε οδοστρώματα ασφάλτου. Ειδικά στην κατασκευή αντιολισθητικού ασφαλτοτάπητα μπορεί να υπάρξει μεγάλη ζήτηση του προϊόντος, καθώς το τρίμμα ελαστικού τοποθετείται κατά την κατασκευή της στρώσης κυκλοφορίας των οχημάτων και χρησιμοποιείται τόσο στην κατασκευή νέων οδών και αεροδρομίων, όσο και στη συντήρηση και αναβάθμιση του υπάρχοντος οδικού δικτύου.

Εικόνα 2.7 Ανακυκλωμένο καουτσούκ ελαστικών (Crumb rubber)

- **Απόβλητα από γυαλί (Waste Glass)**

Όταν τα απορρίμματα γυαλιού συνθλίβονται σε μέγεθος σωματιδίων παρόμοιο με αυτό της φυσικής άμμου, τότε εμφανίζουν ιδιότητες αδρανούς υλικού. Το απόβλητα γυαλιού μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή οδοστρωμάτων ως υποκατάστατο αδρανούς υλικού στα ασφαλτομίγματα.

Εικόνα 2.8 Απόβλητα από γυαλί (Waste Glass)

2.2.3.1.2 Άσφαλτος

Η συντριπτική πλειονότητα της ασφάλτου που χρησιμοποιείται ως συνδετικό στα ασφαλτομίγματα προέρχεται από διυλιστήρια και ένα πολύ μικρό ποσοστό από κοιτάσματα. Οι πρώτες ύλες για την παραγωγή ασφαλτικών συνδετικών είναι υπολείμματα πετρελαίου από την απόσταξη αργού πετρελαίου. Από το πλήθος αργού πετρελαίου που διατίθεται στο εμπόριο, μόνο ένας περιορισμένος αριθμός θεωρείται κατάλληλος για την παραγωγή συνδετικού ασφάλτου της απαιτούμενης ποιότητας και σε εμπορικές ποσότητες. Για την παραγωγή συνδετικού ασφάλτου, απαιτείται μια σειρά από διαδικασίες, όπως εξαγωγή, επεξεργασία, διύλιση και μεταφορά, οι οποίες απαιτούν υψηλή ενέργεια, με σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και κόστος. Συνεπώς, τα ασφαλτικά υλικά κρίνονται ιδιαιτέρως σημαντικά για την τελική βιωσιμότητα των οδοστρωμάτων. Οι βέλτιστες πρακτικές για την βιωσιμότητα που αφορούν την άσφαλτο περιλαμβάνουν:

- Μείωση της περιεκτικότητας σε παρθένα συνδετικά υλικά με αύξηση της χρήσης των RAP και RAS, που είναι δύο τύποι αδρανών που περιέχουν άσφαλτο. Τόσο

το RAP όσο και το RAS περιέχουν άσφαλτο και μπορούν να αντικαταστήσουν μέρος της ασφάλτου στο μείγμα, συμβάλλοντας στη μείωση της ποσότητας παρθένου συνδετικού που χρησιμοποιείται σε ένα μείγμα.

- Χρήση εναλλακτικών καυσίμων για τη μείωση της μη ανανεώσιμης κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζονται με την παραγωγή μείγματος. Πολλές μονάδες παραγωγής ασφαλτομιγμάτων μπορούν να χρησιμοποιούν μαγειρικό λάδι ή χρησιμοποιημένο πετρέλαιο ως καύσιμο. Όταν χρησιμοποιούνται σωστά, τέτοιες λύσεις μπορούν να αντικαταστήσουν άλλες μη ανανεώσιμες πηγές καυσίμων ακόμα και σε χαμηλότερο κόστος.

- Μείωση της ενέργειας και των εκπομπών που σχετίζονται με την θερμοκρασία παραγωγής ασφαλτομίγματος, υιοθετώντας τεχνολογίες που αποσκοπούν στην μείωση της (μετρίως θερμό ασφαλτόμιγμα, warm mix asphalt - WMA). Με την προσθήκη διάφορων χημικών πρόσμικτων, επιτυγχάνεται η παραγωγή του ασφαλτομίγματος σε αρκετά χαμηλότερες θερμοκρασίες, της τάξεως των 15°C με 25°C. Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτής της τακτικής είναι η μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας από την μείωση της θερμοκρασίας παραγωγής, αλλά και από την επερχόμενη μείωση της απόστασης μεταφοράς, η οποία διευκολύνεται λόγω του ότι δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη εργοστασίου για τη θέρμανση και παραγωγή του ασφαλτομίγματος. Τονίζεται βέβαια ότι χρειάζεται κατάλληλη διερεύνηση για τις πιθανές επιπτώσεις της παραγωγής των χημικών πρόσμικτων, η οποία μπορεί να επηρεάζει σημαντικά την βιωσιμότητα.

- Χρήση πρόσθετων, που συμβάλλουν στην καθυστέρηση της επιφανειακής φθοράς του οδοστρώματος. Αυτό περιλαμβάνει τη χρήση τροποποιημένων συνδετικών από πολυμερή ή τρίμμα καουτσούκ. Τα πρόσθετα WMA μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συμπύκνωση, οδηγώντας έτσι σε αύξηση της διάρκειας ζωής του οδοστρώματος.

- Μείωση των επιπτώσεων των μεταφορών χρησιμοποιώντας τοπικά διαθέσιμα υλικά και επιτόπου ανακύκλωση. Αυτό μπορεί συχνά να σημαίνει επιλογή τοπικών διαθέσιμων αδρανών υλικών έναντι εισαγόμενων υψηλής ποιότητας, τουλάχιστον στις βαθύτερες στρώσεις της δομής του οδοστρώματος, έτσι ώστε να μην διακυβεύεται η απόδοση.

- Χρήση ασφαλτομιγμάτων ανοικτής διαβάθμισης (open-graded). Ο όρος αναφέρεται σε διαβάθμιση που περιέχει μόνο ένα μικρό ποσοστό αδρανών με μικρή διάσταση κόκκων, δηλαδή αποτελείται κυρίως από χονδρόκοκκα αδρανή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα περισσότερα κενά αέρα, επειδή δεν υπάρχουν αρκετά μικρά σωματίδια για να γεμίσουν τα κενά μεταξύ των μεγαλύτερων σωματιδίων και γενικώς θεωρείται υδατοδιαπερατό μίγμα. Αυτά χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν την τριβή μεταξύ οδοστρώματος και ελαστικών, να μειώσουν τον θόρυβο και τον κίνδυνο υδρολίσθησης.

2.2.3.2 Σχεδιασμός οδοστρώματος

Οι βέλτιστες πρακτικές βιωσιμότητας για τον δομικό σχεδιασμό ενός οδοστρώματος συνίστανται γενικά σε (1) εξέταση ολόκληρου του κύκλου ζωής οδοστρώματος κατά τη λήψη βασικών αποφάσεων, (2) χρήση καινοτόμων τύπων και υλικών οδοστρώματος για την αντιμετώπιση βασικών ζητημάτων βιωσιμότητας, και (3) βελτίωση του δομικού σχεδιασμού μέσω της χρήσης νέων εργαλείων ή της καλύτερης κατανόησης των παραμέτρων και της απόδοσης του σχεδιασμού. Οι βέλτιστες πρακτικές βιωσιμότητας κατά το στάδιο του σχεδιασμού οδοστρώματος περιλαμβάνουν:

- Χρήση βελτιωμένων μηχανικών-εμπειρικών (mechanistic-empirical, ME) διαδικασιών σχεδιασμού οδοστρώματος. Τέτοιες διαδικασίες σχεδιασμού οδοστρωμάτων (π.χ AASHTOWare Pavement ME Design Software) μπορούν να παράγουν πιο αποτελεσματικά σχέδια οδοστρώματος με επιθυμητή απόδοση, λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένη κυκλοφορία, κλίμα και άλλες συνθήκες σχεδιασμού για το έργο. Ο σχεδιασμός με τέτοια εργαλεία επιτρέπει καλύτερη ενσωμάτωση υλικών και σχεδιασμού οδοστρώματος, καθώς και καλύτερη εκτίμηση των απαιτήσεων ποιότητας κατασκευής.

- Βελτιστοποίηση της χρήσης των υλικών μέσα στη δομή του οδοστρώματος. Ο σχεδιασμός οδοστρώματος χρειάζεται να βελτιστοποιεί τη χρήση υλικών και διατομών που πληρούν τις απαιτήσεις απόδοσης, ενώ παράλληλα επιτυγχάνουν περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. Αυτό συχνά σημαίνει τη χρήση υλικών υψηλότερου κόστους και προδιαγραφών όπου απαιτείται περισσότερο, δηλαδή στο επιφανειακό στρώμα, και αντίστοιχα τη χρήση υλικών χαμηλότερου κόστους και προδιαγραφών βαθύτερα στη διατομή του οδοστρώματος. Σχεδιασμοί μακράς διαρκείας, που μπορεί να χρησιμοποιούν στην αρχική κατασκευή περισσότερο

υλικό, αλλά λιγότερο υλικό κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής, συνήθως ενισχύουν τη βιωσιμότητα.

- Ενσωμάτωση συστημάτων LCC, LCA και συστημάτων αξιολόγησης στη διαδικασία σχεδιασμού οδοστρώματος. Αυτά τα εργαλεία μπορούν να ενσωματώσουν οικονομικές, περιβαλλοντικές και άλλες βέλτιστες πρακτικές στη διαδικασία σχεδιασμού. Επιπλέον, αρκετά βασικά ζητήματα που συναντώνται κατά το στάδιο της χρήσης του οδοστρώματος, όπως η ομαλότητα, η τριβή, ο θόρυβος και η διαχείριση των όμβριων υδάτων, μπορούν να εξεταστούν κατά το στάδιο του σχεδιασμού για να βοηθήσουν στην αντιμετώπιση μεταγενέστερων επιπτώσεων της φάσης χρήσης.

- Εξέταση ειδικών σχεδίων οδοστρωμάτων, έτσι ώστε να αντιμετωπιστούν συγκεκριμένα ζητήματα βιωσιμότητας. Υπάρχουν διάφοροι σχεδιασμοί που μπορούν να αντιμετωπίσουν συγκεκριμένα ζητήματα βιωσιμότητας σε ένα έργο. Τέτοια παραδείγματα δομικών σχεδίων περιλαμβάνουν μεγιστοποίηση της χρήσης υλικών από πηγές ανακυκλωμένων, υποπροϊόντων και απόβλητων, την ταχεία κατασκευή, την μείωση θορύβου, τη διαχείριση των όμβριων υδάτων και γενικότερα την εξέταση των επιπτώσεων της φάσης χρήσης στη φάση σχεδιασμού. Για παράδειγμα, διαπερατά οδοστρώματα, τα οποία χρησιμοποιούν μείγματα ανοιχτής διαβάθμισης για ολόκληρη τη δομή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συμβάλουν σε λύσεις αποστράγγισης χαμηλού αντίκτυπου.

2.2.3.3 Κατασκευή

Οι περισσότερες κατασκευαστικές δραστηριότητες έχουν λιγότερες επιπτώσεις στη βιωσιμότητα από άλλες δραστηριότητες του κύκλου ζωής, επειδή η κατασκευή αποτελεί ένα σχετικά μικρό χρονικό διάστημα στον συνολικό κύκλο ζωής οδοστρώματος και συχνά δεν επηρεάζει τις μεταγενέστερες φάσεις. Εξαίρεση σε αυτό είναι η ποιότητα κατασκευής, η οποία μπορεί να έχει εκτεταμένες επιπτώσεις μέχρι το τέλος του κύκλου ζωής και ορίζεται σε μεγάλο βαθμό κατά αυτό το στάδιο. Οι βέλτιστες πρακτικές βιωσιμότητας για την κατασκευή περιλαμβάνουν συνήθως (1) προώθηση της χρήσης βέλτιστων πρακτικών βιωσιμότητας, (2) μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, της χρήσης ενέργειας και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που αποδίδονται σε κατασκευαστικές

δραστηριότητες και (3) βελτίωση της ποιότητας κατασκευής. Οι βέλτιστες πρακτικές βιωσιμότητας κατασκευής οδοστρώματος περιλαμβάνουν:

- Δημιουργία, τροποποίηση και χρήση προδιαγραφών που επιτρέπουν τις πρακτικές βιωσιμότητας. Οι προδιαγραφές κατασκευής πρέπει να αξιολογούνται για να διασφαλίζεται ότι δεν αποτελούν εμπόδιο σε πιο βιώσιμες λύσεις. Για παράδειγμα, πολλές προδιαγραφές περιέχουν αυθαίρετα εμπόδια που περιορίζουν τη χρήση εναλλακτικών υλικών από πηγές ανακυκλωμένων, υποπροϊόντων και απόβλητων και έτσι αποτρέπουν το αναμενόμενο περιβαλλοντικό όφελος που θα είχε μια τέτοια επιλογή. Οι οργανισμοί ενθαρρύνονται να αξιολογούν και να ανανεώνουν τις υπάρχουσες προδιαγραφές τους με βάση τις τρέχουσες γνώσεις για την άρση των όποιων ανυπόστατων εμποδίων σε βιώσιμες πρακτικές.

- Μείωση των αρνητικών επιπτώσεων που σχετίζονται με την κατασκευή. Αυτό περιλαμβάνει την κατανάλωση καυσίμου, τις εκπομπές καυσαερίων, την παραγωγή σωματιδίων και τον θόρυβο που σχετίζονται άμεσα με τις κατασκευαστικές δραστηριότητες, καθώς και τις καθυστερήσεις και την κυκλοφοριακή συμφόρηση που σχετίζονται με την κατασκευή. Επιπλέον, η περιοχή στην οποία εντάσσεται το έργο επηρεάζεται επίσης από την κατασκευή, επηρεάζοντας ενδεχομένως τους κατοίκους, τις επιχειρήσεις και τα τοπικά οικοσυστήματα.

- Βελτιστοποίηση ή βελτίωση της αποτελεσματικότητας των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων. Αυτό επιτυγχάνεται με βελτιώσεις στην κατασκευή οδοστρώματος που μπορεί να πραγματοποιηθούν μέσω της βελτιστοποίησης του σχεδιασμού και της αλληλουχίας των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων, της διαχείρισης των καθυστερήσεων κυκλοφορίας που σχετίζονται με την κατασκευή, του μειωμένου θορύβου κατασκευής, της καλύτερης διαχείρισης απορριμμάτων και της χρήσης νέων τεχνικών και εξοπλισμού κατασκευής όπως για παράδειγμα η αυτοματοποιημένη καθοδήγηση μηχανής. Ταυτόχρονα, οι κανονισμοί απαιτούν συνεχείς βελτιώσεις στην αποδοτικότητα λειτουργίας του κατασκευαστικού εξοπλισμού και μείωση των εκπομπών καύσης όπως εκπομπές πτητικού οργανικού άνθρακα (VOC) και οξειδίου του αζώτου (NO_x), σωματιδίων ντίζελ και φυγοκεντρικών σωματιδίων.

- Βελτίωση της ποιότητας κατασκευής. Η ποιότητα είναι ένα ουσιαστικό στοιχείο για την κατασκευή ενός ανθεκτικού οδοστρώματος και, κατά συνέπεια, είναι θεμελιώδες για τη βελτίωση της συνολικής βιωσιμότητας του. Η αυξημένη ποιότητα κατασκευής μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του αριθμού των συντηρήσεων και αποκαταστάσεων, με αντίστοιχη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής. Επιπλέον, οι προδιαγραφές κατασκευής μπορούν να διαδραματίσουν βασικό ρόλο στην παροχή κινήτρων για μακροπρόθεσμη ποιότητα. Καινοτόμες τεχνολογίες υιοθετούνται για τη βελτίωση της ποιότητας κατασκευής και της παρακολούθησης της, συμπεριλαμβανομένων τεχνικών όπως η έξυπνη συμπύκνωση, η υπέρυθρη θερμογραφική σάρωση και οι μετρήσεις ομαλότητας σε πραγματικό χρόνο. Η κατασκευή ομαλών οδοστρωμάτων έχει βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα οφέλη βιωσιμότητας, ειδικά για εγκαταστάσεις με υψηλό όγκο κυκλοφορίας.

2.2.3.4 Συντήρηση / αποκατάσταση

Γενικά, τα οφέλη βιωσιμότητας για το στάδιο της συντήρησης / αποκατάστασης επιτυγχάνονται με τους ακόλουθους τρόπους: (1) η συντήρηση διατηρεί τα οδοστρώματα ομαλά για περισσότερο καιρό, που έχει ως αποτέλεσμα καλύτερη απόδοση καυσίμου για τους χρήστες και (2) η συντήρηση επεκτείνει τη διάρκεια λειτουργίας και τη δομική ζωή των οδοστρωμάτων και έτσι γίνεται λιγότερη χρήση υλικών κατά τη διάρκεια ζωής τους. Οι βέλτιστες πρακτικές συντήρησης και συντήρησης περιλαμβάνουν:

- Ενσωμάτωση μετρήσεων βιωσιμότητας στα τρέχοντα συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων. Καθώς οι μετρήσεις βιωσιμότητας αποκτούν όλο και περισσότερη σημασία, πρέπει να παρακολουθούνται με κατάλληλα εργαλεία διαχείρισης. Αυτό θα παρέχει ένα μέσο για τη συγκριτική αξιολόγηση των μέτρων που έχουν ήδη ληφθεί έναντι των προηγούμενων επιδόσεων βιωσιμότητας και θα εντοπίσει πιο εύκολα ευκαιρίες για περαιτέρω βελτίωση. Οι κρίσιμοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή μιας κατάλληλης θεραπείας συντήρησης και της χρονικής στιγμής που θα πραγματοποιηθεί, περιλαμβάνουν την υφιστάμενη κατάσταση οδοστρώματος, το ιστορικό των θεραπειών συντήρησης, τις συνολικές ανάγκες ή απαιτήσεις απόδοσης, διάφορους περιορισμούς κατασκευής, και τις μελέτες LCCA και LCA.

- Κατανόηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής των θεραπειών συντήρησης. Η κατανόηση των πλήρων επιπτώσεων του κύκλου ζωής είναι ουσιαστικό στοιχείο για τον προσδιορισμό των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων κάθε δεδομένης θεραπείας.

- Πιο εντατική χρήση μεθόδων συντήρησης / αποκατάστασης. Με αυτόν τον τρόπο, είναι γνωστό ότι επεκτείνεται τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος, διατηρώντας παράλληλα την ομαλότητα του. Για ασφαλτικά οδοστρώματα, ορισμένες επιφανειακές επεξεργασίες και λεπτές επικαλύψεις έχουν βρεθεί ότι είναι αποτελεσματικές.

2.2.3.5 Τέλος ζωής

Οι στρατηγικές κατά το τέλος του κύκλου ζωής οδοστρωμάτων, έχουν μεγάλο αντίκτυπο στη βιωσιμότητα, τόσο για τα εύκαμπτα όσο και για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα, διότι περιλαμβάνουν μεγάλο όγκο υλικών με σημαντικές δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης ή ανακύκλωσης. Συνήθως οι βέλτιστες πρακτικές βιωσιμότητας περιλαμβάνουν (1) αποφυγή ή καθυστέρηση της απόθεσης του οδοστρώματος και (2) αύξηση τεχνικών ανακύκλωσης / επαναχρησιμοποίησης. Οι βέλτιστες πρακτικές βιωσιμότητας στο τέλος του κύκλου ζωής περιλαμβάνουν:

- Εξέταση στρατηγικών σχεδιασμού, αποκατάστασης και συντήρησης για αποφυγή του σεναρίου της τελικής απόθεσης των οδοστρωμάτων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η συνέχιση της χρήσης οδοστρωμάτων είναι προτιμότερη από την ανακύκλωση ή την απόρριψη παλαιών οδοστρωμάτων. Στρατηγικές όπως ο σχεδιασμός οδοστρώματος μεγάλης διάρκειας ζωής, οι επικαλύψεις την κατάλληλη χρονική στιγμή και οι έγκαιρες δραστηριότητες συντήρησης που αποκαθιστούν ή διατηρούν την ομαλότητα μπορούν να βοηθήσουν ένα οδόστρωμα να αποφύγει/καθυστερήσει το τέλος του κύκλου ζωής του. Τέτοιες δραστηριότητες βελτιστοποιούν την χρήση των υλικών και τείνουν να αποφεύγουν τις πιο δαπανηρές οικονομικά και ενεργειακά εργασίες ανακύκλωσης ή απόρριψης οδοστρωμάτων.

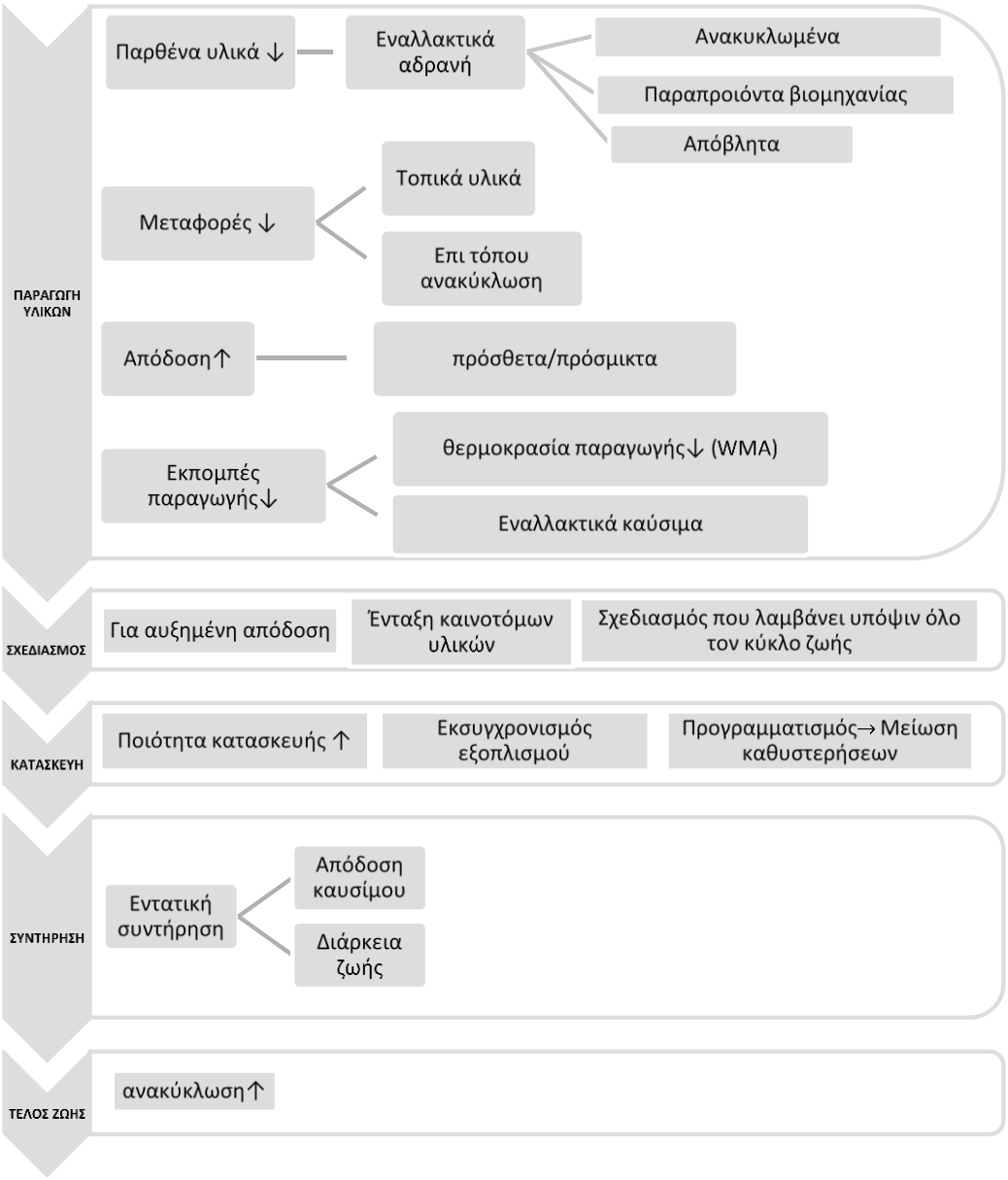
- Αποφυγή της υγειονομικής ταφής παλαιών οδοστρωμάτων. Η υγειονομική ταφή ως επιλογή γίνεται λιγότερο ελκυστική λόγω της αξίας που έχει η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση προϊόντων αποξήλωσης οδοστρώματος, καθώς και τον περιορισμό του χώρου υγειονομικής ταφής.

- Εξέταση τεχνικών επαναχρησιμοποίησης / ανακύκλωσης. Ορισμένες τεχνικές επιτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση ή την ανακύκλωση των υλικών επί της οδού, όπως η ανακύκλωση εν θερμώ, η ανακύκλωση εν ψυχρώ, η αποκατάσταση πλήρους βάθους και η επικάλυψη ρωγμών. Αυτές οι τεχνικές, αν και δεν είναι τόσο βιώσιμες όσο η συνεχής χρήση ή επαναχρησιμοποίηση, διατηρούν τα αρχικά υλικά στη θέση τους (εξοικονομώντας έτσι κόστος μεταφοράς, ενέργεια και εκπομπές) και τους επιτρέπουν να συμμετέχουν σε μια νέα δομή οδοστρώματος. Συνολικά, αυτό εξοικονομεί υλικά και χρόνο σε σύγκριση με μια δομή οδοστρώματος κατασκευασμένη με εντελώς νέα υλικά.

- Εξέταση της υψηλότερης δυνατής χρήσης ανακυκλωμένων υλικών. Ως υψηλότερη δυνατή χρήση αναφέρεται αυτή που παρουσιάζει την μεγαλύτερη απόδοση όσον αφορά τη βιωσιμότητα. Αυτό απαιτεί την εκτίμηση όλων των δαπανών (οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών) που σχετίζονται με την ανακύκλωση και τη χρήση ενός συγκεκριμένου υλικού. Μια τέτοια προσέγγιση, προτείνει ότι ένα υλικό όπως το RAP για παράδειγμα, θα πετύχει την υψηλότερη χρήση του ως υποκατάστατο τόσο του συνδετικού όσο και του αδρανούς σε ένα νέο μείγμα ασφάλτου, αντί να χρησιμοποιείται μόνο ως αντικατάσταση αδρανών υλικών. Αυτή η προσέγγιση λαμβάνει επίσης υπόψη το κόστος μεταφοράς υλικών και της απόθεσης σε χώρους υγειονομικής ταφής για να διασφαλίσει ότι τα υλικά χρησιμοποιούνται σύμφωνα με την υψηλότερη αξία τους.

- Αύξηση των ανακτημένων υλικών σε νέα οδοστρώματα. Τα RAP και RCA έχουν καθιερωμένο ιστορικό χρήσης σε νέα οδοστρώματα, τόσο σε εύκαμπτα όσο και σε δύσκαμπτα, καθώς και σε ασύνδετες στρώσεις βάσης. Οι διαδικασίες ανακύκλωσης μπορούν να διεξαχθούν επιτόπου (εξοικονομώντας έτσι κόστος μεταφοράς, ενέργειας και εκπομπές) ή εκτός πεδίου (π.χ. σε μόνιμες εγκαταστάσεις). Οι επιπτώσεις, τόσο οικονομικές όσο και περιβαλλοντικές, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την εξέταση της χρήσης του RAP και του RCA σε νέα οδοστρώματα. Για παράδειγμα, σε ορισμένα σενάρια, η απόσταση από τις κατάλληλες πηγές εναλλακτικών υλικών μπορεί να είναι απαγορευτικά μεγάλη και να αυξάνει το κόστος, την ενέργεια ή τις εκπομπές σε σύγκριση με κοντινές πηγές παρθένων υλικών.

Συμπερασματικά, παρατίθεται η παρακάτω εικόνα (Εικ. 2.2), η οποία παρουσιάζει σχηματικά τις στρατηγικές που αναπτύχθηκαν προηγουμένως.



Εικόνα 2.9 Στρατηγικές βιωσιμότητας

Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας διερευνήθηκε το στάδιο της παραγωγής υλικών και πιο συγκεκριμένα η αντικατάσταση συμβατικών αδρανών λατομείου από εναλλακτικά αδρανή που προέρχονται από παραπροϊόντα της βιομηχανίας και ανακυκλωμένα υλικά και συγκεκριμένα σκωρία χαλυβουργίας (steel slag) και ανακτημένο ασφαλτικό οδόστρωμα (RAP), αντίστοιχα.

2.3 Μέθοδοι αξιολόγησης της βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων

Με δεδομένα το πως ορίζεται η βιωσιμότητα, τι πρεσβεύει και πως μπορεί να επιτευχθεί, είναι έκδηλη η ανάγκη ύπαρξης ενός τρόπου για την μέτρηση της. Πράγματι, χρειάζεται κάποια τεχνική έτσι ώστε να μπορούμε να ποσοτικοποιήσουμε το πόσο βιώσιμες είναι οι στρατηγικές που αναλύθηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, με ξεκάθαρο και κατανοητό τρόπο. Η μέτρηση της βιωσιμότητας είναι αναγκαία για την επίτευξη στόχων βιωσιμότητας και απόδοσης, καθώς και για την υποστήριξη λήψης εμπεριστατωμένων αποφάσεων. Επίσης, η μέτρηση της βιωσιμότητας μπορεί να λύσει λογιστικές ανάγκες, να επιφέρει βελτιώσεις στην διαδικασία της κατασκευής οδοστρωμάτων γενικότερα και ενδεχομένως εντοπίσει και να βρει λύσεις για παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση του οδοστρώματος.

Η μέτρηση της βιωσιμότητας θεωρείται ακόμα ένας εξελισσόμενος τομέας έρευνας τόσο για τα οδοστρώματα όσο και για τις μεταφορές γενικότερα, αλλά και γενικότερα για πολλούς τομείς (π.χ. κατασκευαστικός). Από πολλές απόψεις, οι προσπάθειες για την μέτρηση της βιωσιμότητας δεν είναι κάτι καινούριο, δεδομένου ότι έχουν θιχτεί θέματα βιωσιμότητας έμμεσα ή ανεπίσημα στο παρελθόν, όμως τα τελευταία χρόνια σημειώθηκαν αυξημένες προσπάθειες για ποσοτικοποίηση και ενσωμάτωσή της βιωσιμότητας με πιο συστηματικό και οργανωμένο τρόπο στις ατζέντες των υπεύθυνων λήψης αποφάσεων. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι τόσο η ανάγκη μέτρησης της βιωσιμότητας για τα πολύπλευρα οφέλη που προσφέρει, όσο και για την γενικότερη ροπή προς την βιωσιμότητα που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια, έχει φέρει στο προσκήνιο την ανάγκη ανάπτυξης τεχνικών για την μέτρηση της βιωσιμότητας.

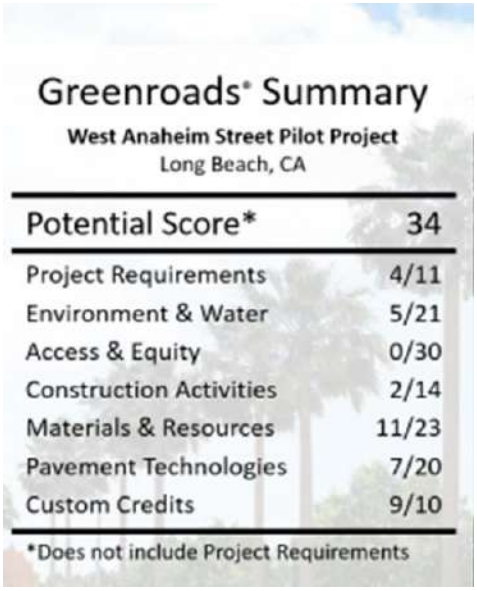
Σύμφωνα με την FHWA, μέχρι στιγμής έχουν αναπτυχθεί δύο κύριες τεχνικές μέτρησης της βιωσιμότητας για τα οδοστρώματα. Οι δύο αυτές τεχνικές μέτρησης της βιωσιμότητας είναι η ‘Ανάλυση κύκλου ζωής – Life Cycle Assesment’ ή πιο σύντομα ‘LCA’ και τα ‘Συστήματα αξιολόγησης βιωσιμότητας - Sustainability Rating Systems’, που αναπτύσσονται συνοπτικά παρακάτω.

2.3.1 ‘Συστήματα κατάταξης βιωσιμότητας - Sustainability Rating Systems’

Τα συστήματα αξιολόγησης είναι πρακτικά λίστες βιώσιμων πρακτικών συσχετισμένες σε ένα κοινό σύστημα μέτρησης. Με αυτό το σύστημα μέτρησης, το οποίο είναι συνήθως πόντοι, ποσοτικοποιείται κάθε βιώσιμη πρακτική με μια κοινή μονάδα μέτρησης. Κατ’

αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η ποσοτικοποίηση και η σύγκριση κάθε βέλτιστης πρακτικής, χρησιμοποιώντας μια κοινή μονάδα. Έτσι, οι διάφορες μονάδες μέτρησης βέλτιστων πρακτικών βιωσιμότητας (π.χ. τόνοι ανακυκλωμένων υλικών, κατανάλωση/εξοικονόμηση ενέργειας) μπορούν να είναι όλες σε σύγκριση.

Στην απλούστερη μορφή του, ένα σύστημα αξιολόγησης μπορεί να μετρά κάθε βέλτιστη πρακτική εξίσου (π.χ., όλες αξίζουν έναν βαθμό), οπότε το σύστημα αξιολόγησης αντιστοιχεί στον αριθμό των βέλτιστων πρακτικών που χρησιμοποιούνται. Σε πιο περίπλοκες μορφές, τα συστήματα αξιολόγησης σταθμίζουν τις διάφορες πρακτικές, συνήθως σε σχέση με τον αντίκτυπό τους στη βιωσιμότητα ή την διαθεσιμότητα τους. Με αυτή την στάθμιση μπορεί να βοηθηθεί η επιλογή των προτιμότερων πρακτικών που θα χρησιμοποιηθούν στο εν λόγω έργο, ειδικά σε περιπτώσεις περιορισμένου πεδίου εφαρμογής ή προϋπολογισμού. Ένα παράδειγμα συστήματος αξιολόγησης φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, η οποία δείχνει αποτελέσματα ενός γνωστού συστήματος αξιολόγησης, του Greenroads.



Greenroads® Summary

West Anaheim Street Pilot Project
Long Beach, CA

Potential Score*	34
Project Requirements	4/11
Environment & Water	5/21
Access & Equity	0/30
Construction Activities	2/14
Materials & Resources	11/23
Pavement Technologies	7/20
Custom Credits	9/10

*Does not include Project Requirements

Εικόνα 2.10 Παράδειγμα συστήματος αξιολόγησης
(Πηγή:https://www.greenroads.org/.)

Επί του παρόντος, υπάρχουν πολλές εθνικές και διεθνείς προσπάθειες συστήματος αξιολόγησης εντός του τομέα των μεταφορών. Αυτά τα συστήματα ποικίλλουν ως προς το πεδίο και την πολυπλοκότητα, αλλά γενικά έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν καθοδήγηση, βαθμολόγηση και πιθανές ανταμοιβές για τη χρήση βέλτιστων πρακτικών βιωσιμότητας. Τα συστήματα αξιολόγησης επικεντρώνονται συνήθως σε πρακτικές που

είναι συμβατές με τους ισχύοντες κανονισμούς, όμως κρίνουν υπέρ το δέον ακόμα και τις υπάρχουσες ελάχιστες κανονιστικές απαιτήσεις. Τα συστήματα αξιολόγησης είναι ιδιαίτερα ελκυστικά επειδή:

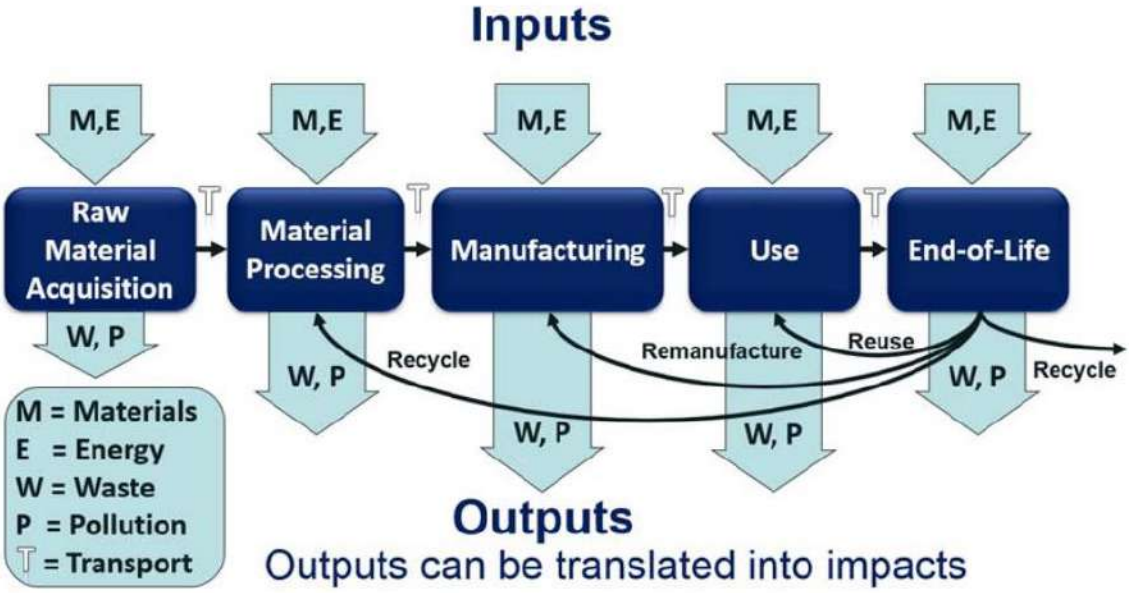
- Παρέχουν μια κοινή μέτρηση (βαθμοί) για όλο το φάσμα των βιώσιμων λύσεων,
- Μετρούν την βιωσιμότητα και κατά συνέπεια μπορούν να επιτρέψουν την διαχείρισή της,
- Επιτρέπουν την καταγραφή στόχων, προσπαθειών και επιτευγμάτων βιωσιμότητας,
- Παρέχουν ένα λογικό πλαίσιο εντός του οποίου οι σχεδιαστές, οι εργολάβοι και οι προμηθευτές υλικών μπορούν να είναι καινοτόμοι στις λύσεις τους.

Ενώ υπήρξε και συνεχίζει να υπάρχει πολλή συζήτηση σχετικά με την επιστημονική αξία και βάση των συστημάτων αξιολόγησης, μια τέτοια συζήτηση μπορεί να χάσει το ζητούμενο. Ο βασικός σκοπός των περισσότερων συστημάτων αξιολόγησης δεν είναι μια επιστημονικά ορθή ταξινόμηση της βιωσιμότητας, αλλά μάλλον ένα εργαλείο για ενθάρρυνση πρακτικών αειφορίας πέρα από το ελάχιστο των κανονιστικών διατάξεων και για την επικοινωνία της βιωσιμότητας με κατανοητό τρόπο. Συγκεκριμένα, τα συστήματα αξιολόγησης παρέχουν έναν κατανοητό τρόπο επικοινωνίας της βιωσιμότητας, είτε πρόκειται για ένα πρακτορείο ή έργο, είτε για επαγγελματίες του σχεδιασμού και των κατασκευών, ή το ευρύ κοινό. Επιπλέον, τα συστήματα αξιολόγησης προτιμώνται συχνά όταν άλλα μέσα ποσοτικοποίησης (π.χ. LCA) αποτυγχάνουν να αποτυπώσουν το πλήρες φάσμα των βέλτιστων πρακτικών βιωσιμότητας. Για παράδειγμα, ενώ η LCA είναι ικανή να υπολογίζει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζονται με την κατασκευή οδοστρώματος, δεν είναι σε θέση να συλλάβει πιο αφηρημένα, αλλά αρκετά σημαντικά, χαρακτηριστικά αειφορίας, όπως η οικολογική συνδεσιμότητα και η αισθητική.

Τα συστήματα αξιολόγησης συχνά επικρίνονται επειδή τείνουν να θυσιάζουν τις λεπτομέρειες για απλότητα και είναι δύσκολο να υπάρξει συναίνεση σχετικά με τα στοιχεία που πρέπει να περιλαμβάνονται / αποκλείονται. Επίσης, συχνά δεν καταγράφουν ολόκληρο το εύρος των βιώσιμων λύσεων και η αλόγιστη χρήση τους θα μπορούσε αποτελέσει πλήγμα για τον σχεδιασμό. Ωστόσο, ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα αξιολόγησης που χρησιμοποιείται με μια σωστή οργανωτική προσέγγιση για τη βιωσιμότητα μπορεί να ξεπεράσει αυτά τα ζητήματα και να προσφέρει οφέλη για τους ενδιαφερόμενους, καθώς και για το περιβάλλον και την κοινωνία γενικότερα.

2.3.2 ‘Ανάλυση κύκλου ζωής - LCA’

Η ανάλυση κύκλου ζωής (LCA) είναι μια δομημένη μεθοδολογία αξιολόγησης που ποσοτικοποιεί τις επιπτώσεις σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος ή συστήματος, λαμβάνοντας υπόψιν εισροές και εκροές. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι η μόνη διεθνώς πιστοποιημένη μέθοδος εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων, σύμφωνα με τα Διεθνή πρότυπα ISO. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (κατά ISO) ορίζεται ως: η συγκέντρωση και ο υπολογισμός των εισροών, εκροών και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός παραγωγικού συστήματος κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής του. Με τον όρο κύκλος ζωής (κατά ISO) ορίζονται τα συνεχή και αλληλοεπιδρώμενα στάδια ενός παραγωγικού συστήματος από την συλλογή ή την δημιουργία των πρώτων υλών έως την τελική αποσυναρμολόγηση του τελικού προϊόντος ή συστήματος.



Εικόνα 2.11 Γενικό μοντέλο LCA (Harvey et al. 2014)

Για την σωστή διεξαγωγή αναλύσεων κύκλου ζωής, ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (International Organization for Standardization, ISO) διαμόρφωσε μια σειρά προτύπων ISO για την τυποποίηση των μεθόδων εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Έτσι, δημιουργήθηκε από τον ISO η οικογένεια προτύπων 14000 για την εκτέλεση της LCA μεθόδου, με τα βασικότερα πρότυπα της σειράς να είναι τα Διεθνή πρότυπα 14040, 14041 και 14043 (1997-2000) και οι αναθεωρήσεις τους 14040 (ISO, 2006a) και 14044 (ISO,

2006b). Στο επόμενο κεφάλαιο αναφέρεται με λεπτομέρεια η διαδικασία που τυποποιείται με τα παραπάνω πρότυπα.

Η LCA παρέχει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την αξιολόγηση της συνολικής περιβαλλοντικής επιβάρυνσης ενός συγκεκριμένου προϊόντος (όπως ένας τόνος αδρανών) ή πιο περίπλοκων συστημάτων προϊόντων ή διαδικασιών (όπως μια εγκατάσταση μεταφοράς ή δίκτυο), εξετάζοντας όλες τις εισόδους και τα αποτελέσματα κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής, από την παραγωγή πρώτων υλών έως το τέλος της ζωής του προϊόντος.

Η ανάλυση κύκλου ζωής παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Προσφέρει ολιστική εικόνα των επιπτώσεων, καθώς δίνει αποτελέσματα για διάφορους δείκτες, που μπορούν να σκιαγραφούν το συνολικό αντίκτυπο. Επίσης, δίνει την δυνατότητα να εντοπιστούν οι λόγοι από τους οποίους απορρέουν οι επιπτώσεις και να μετριαστούν. Τέλος, είναι η μόνη παγκοσμίως αποδεκτή μέθοδος, η οποία αναγνωρίζεται ευρέως ως η καλύτερη τακτική για την μέτρηση των επιπτώσεων στον κύκλο ζωής.

Αντίθετα, η LCA έχει και περιορισμούς που μερικές φορές οδηγούν σε αμφιβολίες σχετικά με τα αποτελέσματα της. Οι μελέτες LCA εξαρτώνται από υποθέσεις και σενάρια, καθώς η LCA αξιολογεί τον πραγματικό κόσμο με ένα απλοποιημένο μοντέλο, το οποίο συχνά μπορεί να καταλήγει ελλιπή. Επιπλέον, η πραγματοποίηση μελέτης LCA απαιτεί μεγάλο όγκο δεδομένων, ο οποίος είναι δύσκολο να ανακτηθεί. Τέλος, η LCA, καθώς εξετάζει διάφορους δείκτες, είναι πιθανό να δώσει αντικρουόμενα αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, πολύ συχνά είναι δύσκολο για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να επιλέξουν, για παράδειγμα, τη διατήρηση του τρέχοντος υψηλού επιπέδου εκπομπών αερίων θερμοκηπίου ή τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου με δυσμενείς επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού και τη βιοποικιλότητα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η βιωσιμότητα αποτελείται από τρεις πυλώνες: τον περιβαλλοντικό, οικονομικό και κοινωνικό (Κεφ. 1). Η τεχνική ανάλυσης κύκλου ζωής μπορεί να εφαρμοστεί για να αναλύσει αντίστοιχα περιβαλλοντικές, οικονομικές ή κοινωνικές επιπτώσεις. Παραδοσιακά οι αναλύσεις κύκλου ζωής είχαν περιβαλλοντικό χαρακτήρα, γι’ αυτό τον λόγο η ονομασία LCA παραπέμπει σε ανάλυση περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Όμως, η ανάπτυξη της μεθόδου, καθώς και η ανάγκη για επίτευξη βιώσιμων συστημάτων/έργων, άρα και κατά συνέπεια συμπερίληψη και των υπόλοιπων πτυχών της βιωσιμότητας (οικονομία, κοινωνία), δημιούργησε διάφορες υποπεριπτώσεις ή παραλλαγές της μεθόδου LCA. Αυτές βασίζονται εξ’ ολοκλήρου στην μέθοδο LCA, με μόνη

διαφορά την σκοπιά των επιπτώσεων η οποία μπορεί να είναι περιβαλλοντική, κοινωνική, οικονομική ή μίξη δύο ή και των τριών. Πιο συγκεκριμένα, με βάση ποιες είναι οι επιπτώσεις που μελετώνται σε μία ανάλυση κύκλου ζωής ή καλύτερα σε ποιον από τους τρεις τομείς δίνεται βάση, η ανάλυση ονομάζεται διαφορετικά, και έτσι δημιουργούνται οι παρακάτω υποπεριπτώσεις/παραλλαγές της LCA, οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω και στην Εικόνα 2.2.

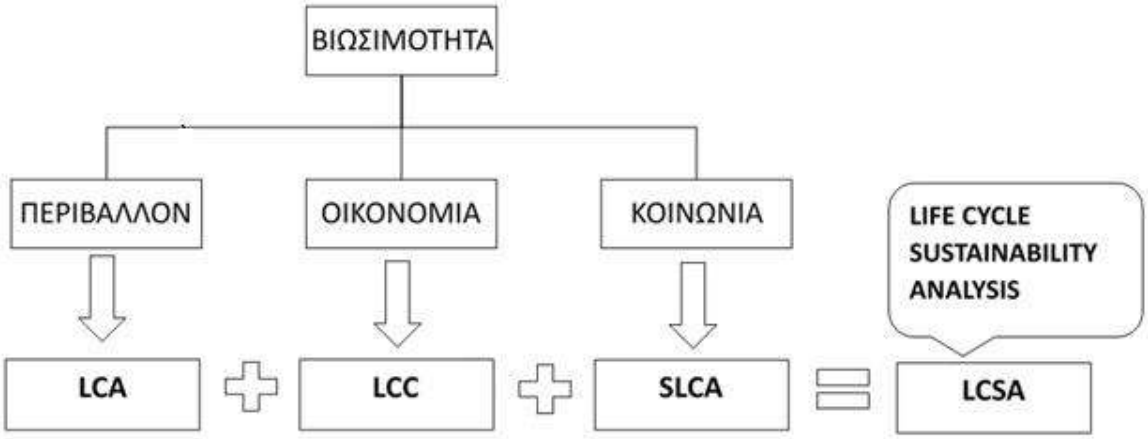
2.3.3 'Ανάλυση κόστους ζωής - LCC / LCCA'

'Ανάλυση κόστους ζωής' ή LCC / LCCA (Life Cycle Cost Assessment) είναι μια διαδικασία που καθορίζει το συνολικό ποσό όλων των δαπανών που συνδέονται με την παραγωγή ενός προϊόντος ή έργου σε όλο τον κύκλο ζωής του. Είναι η ανάλυση κύκλου ζωής που δίνει βάση στον οικονομικό παράγοντα και πρόκειται ουσιαστικά για καταγραφή των οικονομικών σε επίπεδο κύκλου ζωής.

2.3.4 'Ανάλυση βιωσιμότητας κύκλου ζωής - LCSA'

Η 'Ανάλυση βιωσιμότητας κύκλου ζωής' ή LCSA (Life Cycle Sustainability Assessment) είναι η ανάλυση που είναι βασισμένη και στους τρεις πυλώνες της βιωσιμότητας. Η LCSA περιλαμβάνει την περιβαλλοντική LCA, το κόστος κύκλου ζωής (LCC) και την κοινωνική LCA (SLCA), λαμβάνοντας υπόψιν τις επιπτώσεις στην κοινωνία, οικονομία και περιβάλλον ταυτόχρονα. Πρόκειται για την πιο σύγχρονη εκδοχή της ανάλυσης κύκλου ζωής και είναι ένα αναπτυσσόμενο πεδίο ακόμα.

Αυτά που αναφέρθηκαν ανωτέρω παρουσιάζονται σχηματικά στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 2.4). Τονίζεται σε αυτό το σημείο ότι η 'Κοινωνική ανάλυση κύκλου ζωής' ή SLCA (Social Life Cycle Assessment) επικεντρώνεται στο κοινωνικό αντίκτυπο ενός προϊόντος ή έργου, χρησιμοποιώντας κοινωνικούς δείκτες επιπτώσεων.



Εικόνα 2.12 Εφαρμογές της μεθόδου ανάλυσης κύκλου ζωής

Συμπερασματικά, για την παρούσα διπλωματική εργασία, δόθηκε βάση στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των οδοστρωμάτων. Εστιάσαμε δηλαδή, σε έναν από τους τρεις πυλώνες και συγκεκριμένα στο περιβάλλον, ως μέρος της συνολικής ανάλυσης βιωσιμότητας.

3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

3.1 Δομή της μεθόδου LCA

Με βάση τα πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044, η LCA πρέπει να έχει τέσσερα βασικά βήματα (ISO, 2006a; ISO, 2006b):

1. Καθορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής (Goal and Scope Definition),
2. συλλογή και ανάλυση δεδομένων (Inventory Analysis),
3. αξιολόγηση των επιπτώσεων (Impact Assessment), και
4. ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Interpretation).

Στα επόμενα υπό-κεφάλαια, επεξηγούνται συνοπτικά τα τέσσερα παραπάνω βήματα με βάση τα πρότυπα ISO και την Ομοσπονδιακή Διοίκηση Εθνικών Οδών των ΗΠΑ (FHWA), έτσι ώστε να κατανοηθεί πλήρως η διαδικασία της ανάλυσης κύκλου ζωής.

Σχηματικά φαίνεται στην παρακάτω εικόνα τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν, αλλά και τα πρότυπα που τυποποιούν τα επιμέρους βήματα.

Εικόνα 3.1 Στάδια της LCA και τα πρότυπα ISO που τα τυποποιούν

3.1.1 Καθορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής

Το πρώτο στάδιο της ανάλυσης κύκλου ζωής - LCA είναι ο καθορισμός των στόχων και του πεδίου εφαρμογής και καλύπτεται από το πρότυπο ISO 14040 (ISO, 2006a). Σε αυτό το βήμα, ουσιαστικά επιλέγονται τα βασικά στοιχεία της μελέτης, τα οποία ποικίλουν σημαντικά με βάση τον γενικό στόχο της ανάλυσης κύκλου ζωής - LCA .

Περιλαμβάνει τον ορισμό και την περιγραφή του προϊόντος, της διαδικασίας ή δραστηριότητας αναφοράς. Καθορίζει το πλαίσιο με το οποίο θα γίνει η εκτίμηση και προσδιορίζει τα όρια του συστήματος που θα ληφθούν υπόψιν και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που θα πρέπει να επανεξεταστούν στο τέλος της μελέτης.

3.1.1.1 Στόχος (Goal)

Ο στόχος ή στόχοι μιας μελέτης ανάλυσης κύκλου ζωής – LCA, διαμορφώνονται στην αρχή από τους ερευνητές και με βάση αυτούς καθορίζονται και άλλα χαρακτηριστικά όπως το πεδίο εφαρμογής και η μεθοδολογία για την εκτίμηση των επιπτώσεων.

Προτού η LCA μέθοδος συνεχιστεί, θα πρέπει ο στόχος να έχει γίνει πλήρως κατανοητός καθώς θα καθορίσει τόσο το πεδίο εφαρμογής της ανάλυσης, όσο και ολόκληρη τη διαδικασία. Συνεπώς, είναι αναγκαίο ο στόχος που ορίζεται να είναι ακριβής.

3.1.1.2 Πεδίο Εφαρμογής (Scope)

Το πεδίο εφαρμογής μιας LCA ανάλυσης ορίζει τι θα ληφθεί υπόψιν στα πλαίσια της ανάλυσης και τι όχι, δηλαδή ουσιαστικά ορίζει τα όρια του συστήματος. Σύμφωνα με την FHWA, το πεδίο εφαρμογής χρειάζεται να (Harvey et al., 2016) :

• Καλύπτει τα στάδια και τις διαδικασίες του κύκλου ζωής του οδοστρώματος,

• προσδιορίζει τα γεωγραφικά και χρονικά όρια της ανάλυσης,

• ορίζει τη λειτουργική μονάδα ανάλυσης,

• καθορίζει την απαιτούμενη ποιότητα των δεδομένων και,

• υπηρετεί τους καθορισμένους στόχους της LCA

- **Όρια συστήματος**

Γίνεται μια ιδιαίτερη αναφορά στα όρια συστήματος της ανάλυσης κύκλου ζωής, καθώς κρίνονται σημαντικά για την εμπέδωση των διαφορετικών δυνατοτήτων της μεθόδου, αλλά και την βαθύτερη κατανόηση της.

Τα όρια συστήματος έχουν άμεση σχέση με τα στάδια του κύκλου ζωής, για τα οποία έχει γίνει λόγος ήδη στο κεφάλαιο 2.1.1. Ο κύκλος ζωής των οδοστρωμάτων σύμφωνα με τη μεθοδολογία της LCA χωρίζεται σε πέντε διακριτά στάδια: στην παραγωγή υλικών, στην κατασκευή, στη χρήση, στη συντήρηση και στο τέλος ζωής (Santero et al. 2011). Ουσιαστικά, παραλείπεται το στάδιο του σχεδιασμού (Κεφ . 2.2.2) από την μέθοδο LCA.

Ανάλογα την επιλογή των ερευνητών ως προς τα στάδια του κύκλου ζωής που θα συμπεριλάβουν στην μελέτη τους, προκύπτουν διαφορετικές περιπτώσεις συνοριακών συνθηκών. Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές, οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

• **Cradle to Grave**: δηλαδή «από τη γέννηση έως την ταφή». Όλα τα στάδια του κύκλου ζωής περιλαμβάνονται, από την απόκτηση των πρώτων υλών έως και το τέλος ζωής.

• **Cradle to Gate**: δηλαδή «από τη γέννηση έως την πύλη». Εστιάζει σε όλες τις διαδικασίες μέχρι πριν την παράδοση στην αγορά ή στους χρήστες, δηλαδή από την απόκτηση πρώτων υλών μέχρι και την τελική παραγωγή.

• **Gate to Grave**: δηλαδή «από την πύλη έως την ταφή». Λαμβάνει υπόψιν τα στάδια από την έναρξη της χρήσης έως και το τέλος ζωής, δηλαδή όλες τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μετά την παραγωγή.

• **Gate to Gate**: δηλαδή «από πύλη σε πύλη». Εστιάζει μόνο στο στάδιο της παραγωγής.

3.1.2 Συλλογή και ανάλυση δεδομένων

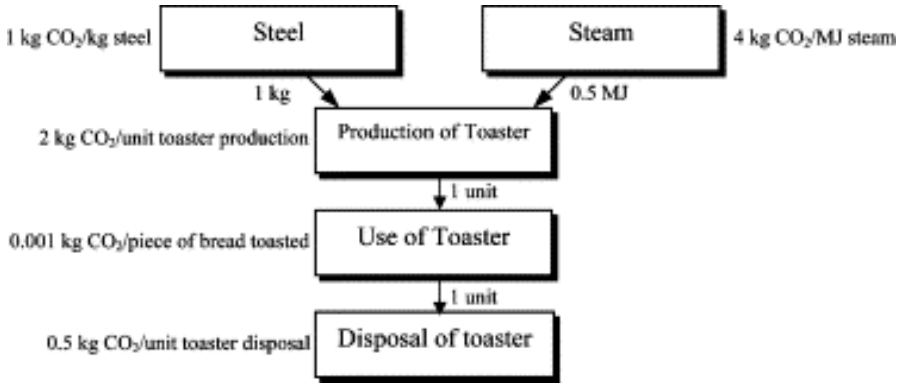
Το δεύτερο στάδιο, δηλαδή η απογραφή κύκλου ζωής ή LCI (Life Cycle Inventory) αποτελεί τη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων που είναι απαραίτητα για την ικανοποίηση του στόχου και του πεδίου εφαρμογής. Ουσιαστικά, προσδιορίζει και ποσοτικοποιεί τους φυσικούς πόρους και την ενέργεια που χρησιμοποιούνται (input) και

τα περιβαλλοντικά παράγωγα (output) (π.χ. ατμοσφαιρικές εκπομπές, υγρά ή στερεά απόβλητα). 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.

Ο τρόπος με τον οποίο θα εκτελεστεί το παραπάνω βήμα είναι ένα ενδιαφέρον κομμάτι της διαδικασίας ανάλυσης κύκλου ζωής. Για την διεξαγωγή του LCI, δηλαδή την απογραφή κύκλου ζωής (2ο βήμα), ξεχωρίζουν τρεις βασικές υπολογιστικές μέθοδοι: process, economic input-output (EIO), και hybrid, που επεξηγούνται συνοπτικά παρακάτω.

3.1.2.1 Μοντέλο με βάση το διάγραμμα ροής διεργασίας (Process LCA: P-LCA)

Η συλλογή και ανάλυση δεδομένων χρησιμοποιώντας ένα διάγραμμα ροής διεργασίας ήταν η πιο συνηθισμένη πρακτική μεταξύ των επαγγελματιών που ασχολούνται με την ανάλυση κύκλου ζωής. Τα διαγράμματα ροής διαδικασίας δείχνουν το πώς οι διαδικασίες ενός συστήματος προϊόντων διασυνδέονται μέσω ροών εμπορευμάτων. Στα διαγράμματα ροής διεργασιών, τα πλαίσια αντιπροσωπεύουν γενικά διαδικασίες και τα βέλη ροές εμπορευμάτων. Κάθε διαδικασία αντιπροσωπεύεται ως λόγος μεταξύ ενός αριθμού εισόδων και εξόδων. Χρησιμοποιώντας απλή άλγεβρα, λαμβάνεται το ποσό των εμπορευμάτων που πληρούν μια συγκεκριμένη λειτουργική μονάδα και πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των περιβαλλοντικών παρεμβάσεων που παράγονται για την παραγωγή τους, υπολογίζεται το LCI του συστήματος προϊόντος. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται ένα απλό διάγραμμα ροής διαδικασίας. Πρόκειται για μία μέθοδο αρκετά κατανοητή και bottom-up, που αναλύει τις περιβαλλοντικές εισροές και εκροές σε επίπεδο μεμονωμένων διαδικασιών.



Εικόνα 3.2 Τυπικό μοντέλο διεργασίας για την ανάλυση κύκλου ζωής μιας τοστιέρας (Suh and Huppes 2005)

Το μοντέλο που βασίζεται σε διάγραμμα ροής διεργασίας πλεονεκτεί ως προς το ότι είναι ακριβές εντός ενός καθορισμένου ορίου συστήματος και είναι ανεξάρτητο από τη διακύμανση των οικονομικών τιμών. Επιπλέον, παρουσιάζει υψηλή αξιοπιστία δεδομένων χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες και λεπτομερείς πηγές, καθώς και χαμηλή αβεβαιότητα. Διευκολύνει την ανάλυση σε επίπεδο διαδικασίας μονάδας και κατά συνέπεια τον εντοπισμό των επιμέρους διαδικασιών που είναι περισσότερο ρυπογόνες.

Ένα από τα μειονεκτήματα αυτού του μοντέλου φαίνεται να είναι το υψηλό κόστος για σύνθετα συστήματα προϊόντων. Επίσης, το μοντέλο διαδικασίας παρέχει ατελή όρια συστήματος εγγενώς, καθώς η καταγραφή διαδικασιών που διεξάγεται κατά την ανάλυση κύκλου ζωής χρειάζεται να σταματά σε ένα δεδομένο σημείο, άρα κατά συνέπεια υπάρχουν πεπερασμένα όρια. Τέλος, το συγκεκριμένο μοντέλο είναι αρκετά απαιτητικό και χρονοβόρο ως προς τις πληροφορίες που χρειάζεται, γεγονός το οποίο το καθιστά συχνά όχι ελκυστικό για τους αναλυτές. Συνεπώς, αυτή η προσέγγιση είναι δαπανηρή και χρονοβόρα, επειδή τα δεδομένα εισροών πόρων και περιβαλλοντικών εκροών πρέπει να εκτιμώνται για καθεμία από τις ξεχωριστές διαδικασίες του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας.

3.1.2.2 Οικονομικό μοντέλο εισόδου-εξόδου (Economic Input Output LCA: EIO-LCA)

Το οικονομικό μοντέλο εισόδου-εξόδου LCA (EIO LCA) αποτελεί μια εναλλακτική μακροοικονομική προσέγγιση για τον υπολογισμό των εισροών και εκροών για το δεύτερο στάδιο της ανάλυσης κύκλου ζωής. Σύμφωνα με αυτό, λαμβάνονται υπόψη οι οικονομικές κινήσεις μεταξύ των βιομηχανιών για διάφορα σύνολα προϊόντων ή διεργασιών. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται πίνακες οικονομικών εισροών-εκροών από τομέα σε τομέα

της οικονομίας και περιβαλλοντικά δεδομένα που σχετίζονται με αυτές τις πληροφορίες. Συμπερασματικά, το οικονομικό μοντέλο εισόδου-εξόδου LCA προτείνει τη χρήση πινάκων (ένας τέτοιος τυπικός πίνακας έχει δεκάδες έως εκατοντάδες τομείς και παρουσιάζεται ενδεικτικά παρακάτω εικ. 3.5) που καταγράφουν ετήσιες συναλλαγές μεταξύ όλων των παραγωγικών δραστηριοτήτων μιας οικονομίας και τις μεταφράζει σε περιβαλλοντικές περιπτώσεις. Η μέθοδος αποτελεί μια συνεκτική, top-down προσέγγιση για τον υπολογισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, υπό την προϋπόθεση ότι προστίθενται κατάλληλες πληροφορίες σχετικά με τις εκπομπές και τη χρήση των φυσικών πόρων.

Η χρήση οικονομικών μοντέλων εισόδου-εξόδου είναι επωφελής, δεδομένου ότι λαμβάνουν υπόψη ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού για ένα προϊόν (συμπεριλαμβανομένων των έμμεσων προμηθευτών), επιτρέπουν την ανίχνευση του πλήρους φάσματος εισόδων σε μια διαδικασία, και συνεπώς παρέχουν ένα πλήρες όριο συστήματος (system boundary). Πιο συγκεκριμένα, εφόσον μια τέτοια ανάλυση μπορεί να αντιπροσωπεύει μεγάλες οικονομικές αλυσίδες, το πρόβλημα του μοντέλου διαδικασίας LCA μπορεί ελαφρυνθεί σημαντικά. Για παράδειγμα, η κατασκευή ενός αυτοκινήτου απαιτεί ενέργεια, αλλά η παραγωγή ενέργειας απαιτεί οχήματα και η κατασκευή αυτών των οχημάτων απαιτεί ενέργεια κτλ. Η χρήση λοιπόν ενός μοντέλου EIO σε αυτή την περίπτωση, αντιπροσωπεύει όλες εκείνες τις ανταλλαγές μεταξύ των τομέων της παραγωγής ενέργειας και της αυτοκινητοβιομηχανίας. Επίσης, αυτή η μεθοδολογία φαίνεται αρκετά προσβάσιμη, διότι επιτρέπει τη χρήση τυπικών πηγών δεδομένων, όπως είναι οι εθνικοί πίνακες εισροών-εκροών.

Name	Agriculture, forestry, fishing, and hunting	Mining	Utilities	Construction	Manufacturing	Wholesale trade	Retail trade
Agriculture, forestry, fishing, and hunting	454438	...	...	...	...	807	154
Mining	...	554505	101	...	895	...	...
Utilities	...	...	470055	...	...	...	...
Construction	744	17466	2662	1605712	7324	4427	8131
Manufacturing	12	33509	...	...	5910121	6466	15091
Wholesale trade	...	1240	...	...	62670	1698862	...
Retail trade	...	...	16	...	...	...	1441322
Transportation and warehousing	...	...	2920	...	...	2095	4345
Information	...	...	...	...	...	...	1059
Finance, insurance, real estate, rental, and leasing	...	...	...	...	22	13473	11088
Professional and business services	0	2672	650	844	203418	18494	10200
Educational services, health care, and social assistance	...	...	...	...	...	...	2232
Arts, entertainment, recreation, accommodation, and food services	2914	...	...	...	...	...	45101
Other services, except government	...	...	...	...	119	64551	102313
Government	...	...	1863	...	...	...	...
Scrap, used and secondhand goods	...	...	...	...	3772	...	...
Noncomparable imports and rest-of-the-world adjustment	...	...	...	...	...	...	...

Εικόνα 3.3 Τμήμα ενός τυπικού EIO πίνακα (Πηγή: Bureau of Economic Analysis, US Department of Commerce)

Οι κύριοι προβληματισμοί που σχετίζονται με αυτήν τη μεθοδολογία είναι το χαμηλό επίπεδο αποσυναρμολόγησης της οικονομίας (χρειάζεται πάρα πολλούς τομείς για να προσεγγιστεί η πραγματικότητα), η γραμμικότητα του μοντέλου, η εξάρτησή του από τις πληροφορίες κόστους, το γεγονός ότι το αποτέλεσμα παραλείπει την περιβαλλοντική παρέμβαση που σχετίζεται με τα αγαθά κεφαλαίου και ότι η χρονική διαφορά μπορεί να προκαλέσει πρόσθετο σφάλμα, καθώς η οικονομία είναι ένα ευμετάβλητο πεδίο. Επιπλέον, εγγενώς το EIO-LCA βασίζεται στην υπόθεση ότι σε έναν τομέα παραγωγής, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι ανάλογες με την τιμή του προϊόντος. Τέλος, είναι κρίσιμο να δοθεί προσοχή στο ότι η EIO LCA βασίζεται σε μέσους όρους τομέα που μπορεί και να μην είναι αντιπροσωπευτικοί του συγκεκριμένου υποσυνόλου που εξετάζεται και επομένως η χρήση τους πρέπει να στοιχειοθετείται λεπτομερώς.

3.1.2.3 Υβριδικό μοντέλο LCA (Hybrid Economic Input Output LCA: HEIO-LCA)

Τόσο το LCA όσο και το EIO-LCA παρέχουν ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά και συμπληρωματικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Το συγκεκριμένο μοντέλο ουσιαστικά συνδυάζει τις δύο παραπάνω μεθόδους, δηλαδή την Process LCA και EIO

LCA, σε μία προσπάθεια των ερευνητών να επωφεληθούν και από τις δύο μεθόδους, μειώνοντας τόσο τα σφάλματα λόγω περικοπής των ορίων συστήματος (P-LCA), όσο αυτά λόγω υπεραπλούστευσης - διεύρυνσης αυτών (EIO-LCA).

Το υβριδικό LCA έχει αναπτυχθεί ως συμβιβαστική λύση για τη διόρθωση του σφάλματος που προκύπτει απ' τα πεπερασμένα όρια συστήματος του P-LCA, ενώ παράλληλα εκμεταλλεύεται την λεπτομέρεια που το χαρακτηρίζει. Το υβριδικό LCA είναι ένας συνδυασμός Process LCA και EIO LCA και μπορεί να παρουσιάζει διαφορετικούς βαθμούς ενσωμάτωσης των δύο συστατικών μεθόδων (Suh και Huppes, 2005). Αυτή η τεχνική, το HEIO-LCA, (υβριδικό EIO-LCA), είναι μια μεθοδολογία που βασίζεται στο διάγραμμα ροής διεργασίας (P-LCA), αλλά αντικαθιστά την υπόθεση της αναλογικότητας με βάση την τιμή με μια υπόθεση αναλογικότητας με φυσικά μεγέθη. Συνδυάζοντας P-LCA στο λεπτομερές σύστημα προσκηνίου και EIO-LCA στο πιο γενικό σύστημα παρασκηνίου, το υβριδικό LCA υποστηρίζεται ότι επιτυγχάνει τόσο την λεπτομέρεια όσο και την πληρότητα του συστήματος. Στην υβριδική μέθοδο, υιοθετείται ένας νέος αλγεβρικός τρόπος που περιλαμβάνει στον ίδιο πίνακα τις διεργασίες υποβάθρου που βασίζονται σε δεδομένα EIO και τις διεργασίες προσκηνίου που είναι ειδικές για το σύστημα προς ανάλυση και παρέχουν μεγαλύτερη λεπτομέρεια κατά την ανάλυση. Αυτές οι διαδικασίες μοντελοποιούνται συμπεριλαμβανομένων των υλικών εισροών, των περιβαλλοντικών εκπομπών και της αλληλεπίδρασής τους με την οικονομική δραστηριότητα.

3.1.3 Αξιολόγηση των επιπτώσεων

Η αξιολόγηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής ή LCIA (Life Cycle Impact Assessment) αντιστοιχίζει τα αποτελέσματα της απογραφής (2ο βήμα, LCI) σε τιμές επιπτώσεων. Αυτή είναι η τρίτη φάση μιας ανάλυσης κύκλου ζωής. Το ISO 14040 αναφέρει ότι σκοπός της 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 αυτή πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας μια επιστημονική προσέγγιση, η οποία λαμβάνει υπόψη την αλυσίδα των επιπτώσεων (ή την αλυσίδα αιτίου-αποτελέσματος) μιας περιβαλλοντικής ροής στους ανθρώπους, το φυσικό περιβάλλον ή τους φυσικούς πόρους (European Commission, 2010). Το LCIA αντιστοιχεί τα αποτελέσματα του LCI σε κατηγορίες επιπτώσεων και επιλέγοντας ένα κατάλληλο δείκτη για κάθε κατηγορία επιπτώσεων, υπολογίζονται τα αποτελέσματα. Το σύνολο των

αποτελεσμάτων των LCIA δεικτών, το οποίο αναφέρεται ως προφίλ LCIA, παρέχει πληροφορίες για τα περιβαλλοντικά ζητήματα που σχετίζονται με τις περιβαλλοντικές ροές (εισροές και εκροές) του υπό μελέτη συστήματος (Harvey, et al., 2016).

Ο σκοπός του LCIA, δηλαδή της αξιολόγησης αντικτύπου κύκλου ζωής (3ο βήμα), είναι να χρησιμοποιηθούν τα στοιχεία που προέκυψαν από το LCI και να αντιστοιχηθούν σε κατηγορίες επιπτώσεων. Για να γίνει αυτό όμως χρειάζεται να ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα (Harvey, et al., 2016).

Η φάση LCIA αποτελείται από τέσσερα διαδοχικά βήματα, τρία υποχρεωτικά και ένα προαιρετικό:

- **Βήμα 1**. Επιλογή των κατηγοριών επιπτώσεων, των δεικτών κάθε κατηγορίας και των μοντέλων αξιολόγησης που θα συμπεριληφθούν στη φάση LCIA.

- **Βήμα 2**. Ταξινόμηση των αποτελεσμάτων της απογραφής (2ο βήμα) στις αντίστοιχες κατηγορίες επιπτώσεων.

- **Βήμα 3**. Χρήση ενός μοντέλου υπολογισμού για τη μετάφραση των αποτελεσμάτων της απογραφής (2ο βήμα) σε δείκτες κατηγορίας επιπτώσεων.

- **Βήμα 4**. Εξέταση των ακόλουθων προαιρετικών βημάτων και προαιρετική εφαρμογή τους:

    - **Ομαλοποίηση**

      Υπολογισμός του μεγέθους των αποτελεσμάτων των δεικτών κατηγορίας επιπτώσεων σε σχέση με τις πληροφορίες αναφοράς.

    - **Ομαδοποίηση**

      Ταξινόμηση (και ενδεχομένως κατάταξη) των κατηγοριών επιπτώσεων.

    - **Στάθμιση**

      Η μετατροπή (και ενδεχομένως η άθροιση) των δεικτών των διάφορων κατηγοριών επιπτώσεων, χρησιμοποιώντας αριθμητικούς παράγοντες που βασίζονται σε επιλογές τιμών. Σημειώνεται ότι τα αρχικά μη σταθμισμένα δεδομένα θα πρέπει να παραμείνουν διαθέσιμα, γιατί μέσω της στάθμισης προάγεται η υποκειμενικότητα του αναλυτή.

- **Ανάλυση ποιότητας δεδομένων**

  Ανάπτυξη καλύτερης κατανόησης της αξιοπιστίας του συνόλου των αποτελεσμάτων των δεικτών και του προφίλ LCIA. Η LCIA φάση μπορεί επίσης να περιλαμβάνει μια επαναληπτική διαδικασία αναθεώρησης του στόχου και του εύρους της LCA μελέτης, για να διαπιστωθεί εάν έχουν επιτευχθεί οι στόχοι που έχουν ορισθεί και στη συνέχεια, να τροποποιηθεί ο στόχος και το πεδίο εφαρμογής, εάν τα αποτελέσματα της μελέτης LCA δείχνουν ότι δεν είναι εφικτά.

3.1.4 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Interpretation) ουσιαστικά αποτελεί την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης απογραφής και των επιπτώσεων, δηλαδή αξιολογεί τα αποτελέσματα των δύο προηγούμενων βημάτων. Είναι το τέταρτο και τελευταίο βήμα μιας ανάλυσης κύκλου ζωής. Η φάση της ερμηνείας απαντά στις ερωτήσεις που τίθενται από το στόχο και το αντικείμενο της μελέτης και διατυπώνει συστάσεις βάσει αυτών των απαντήσεων. Πρόκειται για μια επαναληπτική διαδικασία, τόσο μέσα στα δικά της πλαίσια, όσο και στα πλαίσια ολόκληρης της μελέτης LCA, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.2 (Κεφ. 3.2). Η επαναληπτική προσέγγιση της φάσης της ερμηνείας συμβάλλει στην ανάπτυξη, την αναθεώρηση και την επαναξιολόγηση του πεδίου εφαρμογής της μελέτης LCA. Επιπλέον, αξιολογεί τη φύση και την ποιότητα των συλλεχθέντων δεδομένων, καθώς και τον υπολογισμό των δεικτών κάθε κατηγορίας επιπτώσεων, έτσι ώστε να γίνουν οι τυχόν απαραίτητες τροποποιήσεις και αναθεωρήσεις στις φάσεις LCI και LCIA και να ικανοποιούν τα αποτελέσματα τους στόχους της μελέτης.

Πρόκειται ουσιαστικά για την τελευταία φάση μίας LCA μελέτης και αποτελείται από τις ακόλουθες διαδικασίες (ISO, 2006b):

• Αναγνώριση των σημαντικών θεμάτων βάσει των αποτελεσμάτων των σταδίων LCI και LCIA της μελέτης LCA.

• Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των ανωτέρω φάσεων, εξετάζοντας την πληρότητα, την ευαισθησία, τη συνοχή και τη μεταβλητότητα (αβεβαιότητα). Τα αποτελέσματα ενδέχεται να επηρεάζουν το στόχο, πεδίο εφαρμογής, την ανάλυση απογραφής και την εκτίμηση των επιπτώσεων, σε σημείο ώστε να απαιτούνται τροποποιήσεις.

Οι υπόψη προδιαγραφές ορίζουν πως η φάση της ερμηνείας περιλαμβάνει:

• Τα αποτελέσματα της μελέτης

• Υποθέσεις και περιορισμούς που σχετίζονται τόσο με τη μεθοδολογία όσο και με τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση.

• Αξιολόγηση της ποιότητας των δεδομένων, συμπεριλαμβανομένης της απόκλισης από τα μέσα αποτελέσματα.

• Πλήρη και διαφανή παρουσίαση όλων των επιλογών κρίσεως, λογικής και τιμών.

Επιπρόσθετα στοιχεία μπορούν να προστεθούν στο πλαίσιο της ερμηνείας εάν αυτό κρίνεται απαραίτητο.

3.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται μια συνοπτική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, όσον αφορά τις εφαρμογές ανάλυσης κύκλου ζωής για τα οδοστρώματα. Παρατηρήθηκε μεγάλη ποικιλομορφία ως προς τα υλικά και τις τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν, αλλά και διαφορετική προσέγγιση για την διεξαγωγή της ανάλυσης κύκλου ζωής. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση όσον αφορά τις μελέτες ανάλυσης κύκλου ζωής, οι οποίες έχουν ως κοινό ότι εξετάζουν εναλλακτικά αδρανή (σκωρία χαλυβουργίας και ανακτημένο ασφαλτικό οδόστρωμα) ως αντικατάσταση συμβατικών αδρανών.

Οι **Aurangzeb et al. (2014)** είχαν στόχο να αξιολογήσουν και να συγκρίνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μιγμάτων ασφάλτου με και χωρίς ανακτημένο ασφαλτικό οδόστρωμα (RAP) μέσω της διεξαγωγής ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA). Οι ερευνητές χρησιμοποιήσαν ένα υβριδικό LCA για την ανάλυση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της χρήσης διαφόρων ποσοστών ανακτημένου ασφαλτικού οδοστρώματος (RAP) σε μίγματα ασφάλτου. Η ανάλυση έλαβε υπόψη την παραγωγή των υλικών, την κατασκευή και τις φάσεις συντήρησης και αποκατάστασης του κύκλου ζωής του οδοστρώματος.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση της περιεκτικότητας σε RAP συνεπάγεται σημαντικές μειώσεις στην κατανάλωση ενέργειας και στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHG). Η συνεισφορά της φάσης κατασκευής στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου και στη κατανάλωση ενέργειας είναι ελάχιστη καθ’ όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του οδοστρώματος. Επίσης, η ενέργεια για την παραγωγή πρώτων υλών έχει σημαντικό

αντίκτυπο στη συνολική ενέργεια που καταναλώνεται, γεγονός όμως που δεν ισχύει μόνο για τα μίγματα ασφάλτου. Με βάση την ανάλυση κύκλου ζωής που διεξήχθη για διάφορα σενάρια απόδοσης, τα επίπεδα απόδοσης και τα οφέλη για μίγματα με RAP θεωρήθηκαν ισοζυγισμένα. Τέλος, η μελέτη υπογράμμισε τη σημασία επίτευξης ισοδύναμης απόδοσης στο πεδίο για μίγματα με ανακτημένο οδόστρωμα ασφάλτου (RAP) και με φυσικά αδρανή.

Οι **Giani et al. (2014)** διεξήγαγαν μία ανάλυση κύκλου ζωής με βάση το διάγραμμα ροής διεργασίας (Process-LCA) σε ένα έργο 1 χλμ. οδοστρώματος, που περιλάμβανε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής: από την εξόρυξη φυσικών υλικών έως το τέλος ζωής. Συγκρίνονται τρεις τύποι οδοστρωμάτων, ένας συμβατικός που χρησιμοποιείται ως αναφορά με φυσικά υλικά και παραδοσιακές τεχνολογίες, ένας με χρήση ανακτημένου ασφαλτικού οδοστρώματος (RAP) και ένας με συνδυασμό RAP και μετρίως θερμού ασφαλτομίγματος (WMA). Επίσης, γίνεται σύγκριση μεταξύ της θερμής ανακύκλωσης σε μόνιμη εγκατάσταση και της ψυχρής επιτόπου ανακύκλωσης (CIR). Οι επιπτώσεις αξιολογούνται χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθόδους.

Οι ερευνητές υποστηρίζουν ότι η παραγωγή ασφαλτομίγματος με χρήση RAP (που εξοικονομεί παρθένα υλικά), σε συνδυασμό με μετρίως θερμή θερμοκρασία παραγωγής είναι το κλειδί για έναν βιώσιμο σχεδιασμό οδοστρωμάτων. Αυτό βασίστηκε στην μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για το τρίτο σενάριο που συνδυάζει τη χρήση RAP και WMA, φτάνοντας έως και ένα ποσοστό μείωσης 12% για CO_2eq, 15% για κατανάλωση ενέργειας, 15% για κατανάλωση νερού. Όσον αφορά τη φάση αποκατάστασης, η ψυχρή επιτόπου ανακύκλωση απαιτεί περισσότερη άσφαλτο και για το τρίτο σενάριο, που συνδυάζει τη χρήση RAP και WMA, υπάρχει μείωση των επιπτώσεων σε σχέση με την θερμή ανακύκλωση σε μόνιμη εγκατάσταση. Εφαρμογή ψυχρής επιτόπιας ανακύκλωσης συνεπάγεται μείωση της χρήσης αδρανών, μεταφοράς και κατανάλωσης της μονάδας παραγωγής, τα οποία έχουν οφέλη όσον αφορά το CO_2eq που εκπέμπεται (μείωση 9% σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής και 54% λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη φάση της ανακύκλωσης). Από την άλλη πλευρά, η εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται όσον αφορά στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) δεν παρουσιάζεται και στην απαιτούμενη ενέργεια, καθώς η επί τόπου ανακύκλωση οδήγησε μόλις σε μείωση 0.5% της κατανάλωσης.

Οι **Anastasiou et al. (2015)** σύγκριναν με την βοήθεια της μεθόδου LCA διάφορα εναλλακτικά υλικά. Στα πλαίσια της έρευνας τους έλαβαν υπόψιν τρεις τύπους συνδετικών υλικών: ένα ποζολανικό τσιμέντο Portland, ένα νέο υδραυλικό συνδετικό υλικό και ένα συνδετικό μικτού τύπου από τσιμέντο Portland και ιπτάμενη τέφρα, καθώς και δύο

διαφορετικούς τύπους αδρανών υλικών· θρυμματισμένο ασβεστόλιθο και χαλύβδινη σκωρία. Τα στάδια του κύκλου ζωής που περιλήφθηκαν στην έρευνα ήταν η κατασκευή, η χρήση, η συντήρηση και η ανακύκλωση στο τέλος του κύκλου ζωής για περίοδο 40 ετών.

Φαίνεται ότι η χρήση ιπτάμενης τέφρας ή άλλων συμπληρωματικών υλικών τσιμέντου, που η παραγωγή τους προκαλεί ελάχιστες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη μείωση του περιβαλλοντικού φόρτου της κατασκευής δρόμων. Η επίτευξη υψηλού ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου κλίνκερ στα μίγματα σκυροδέματος είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας, ενώ οι αποστάσεις μεταφοράς έχουν ελάχιστη επίδραση στην αντικατάσταση συνδετικών υλικών. Η μείωση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου από εναλλακτική χρήση αδρανών, από την άλλη πλευρά, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις αποστάσεις μεταφοράς και η χρήση αδρανών σκωριών από χάλυβα συνιστάται μόνο για μικρότερες αποστάσεις. Η ελαχιστοποίηση της εξάντλησης των πόρων, ωστόσο, είναι δυνατή με τη χρήση βιομηχανικών παραπροϊόντων ως αδρανή και με την ανακύκλωση του σκυροδέματος στο τέλος της ζωής του.

Οι **Pasetto et al. (2017)** πραγματοποίησαν μια ανάλυση κύκλου ζωής για μια πραγματική οδική υποδομή σχεδιασμένη στην Ιταλία. Οι ερευνητές σύγκριναν παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής και συντήρησης με τεχνολογίες ανακύκλωσης, δηλαδή την χρήση βιομηχανικών παραπροϊόντων (σκωρίες χαλυβουργίας) και ανακτημένου ασφαλτικού οδοστρώματος (RAP) αντί των φυσικών αδρανών. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη το μήκος ενός τμήματος αυτοκινητόδρομου 1000 m και τη σύγκριση διαφορετικών σεναρίων: A) απόσταση μεταφοράς ίση με 100 km και μόνο παρθένα αδρανή για κατασκευή, B) απόσταση μεταφοράς ίση με 100 km και επαναχρησιμοποίηση υποπροϊόντων (χαλύβδινες σκωρίες και RAP) σε μερική αντικατάσταση φυσικών αδρανών υλικών, C) απόσταση μεταφοράς ίση με 10 km (διαθέσιμα υλικά in situ) και μόνο παρθένα αδρανή, D) απόσταση μεταφοράς ίση με 10 km (διαθέσιμα υλικά σε situ) και επαναχρησιμοποίηση υποπροϊόντων (χαλύβδινες σκωρίες και RAP) σε μερική αντικατάσταση παρθένων αδρανών.

Η σύγκριση των διαφορετικών σεναρίων έδειξε ότι η απόσταση μεταφοράς και η αντικατάσταση φυσικών αδρανών με ανακυκλωμένα υλικά (RAP ή σκωρία χαλυβουργίας), έπαιξε βασικό ρόλο στο κόστος και τις επιπτώσεις στο περιβάλλον. Δεδομένου ότι η κατανάλωση φυσικών υλικών (άσφαλτος και αδρανή) αντιπροσωπεύει έναν σημαντικό παράγοντα για την εκτίμηση των επιπτώσεων, οι πρακτικές ανακύκλωσης αναδείχθηκαν μια κατάλληλη επιλογή για την προώθηση της διατήρησης των πόρων λόγω μειωμένων αναγκών διάθεσης αποβλήτων.

Οι **Vidal et al. (2017)** διεξήγαγαν μια αξιολόγηση κύκλου ζωής των ασφαλτικών οδοστρωμάτων για την διερεύνηση των επιπτώσεων του θερμού ασφαλτομίγματος (HMA), του μετρίως θερμού ασφαλτομίγματος (WMA) με την προσθήκη προσμίκτου από συνθετικούς ζεόλιθους και του ασφαλτομίγματος με ανακτημένο οδόστρωμα ασφάλτου (RAP). Εκτιμήθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές αέριων, καθώς και άλλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εξόρυξη και επεξεργασία ορυκτών, όπως και από τα συνδετικά και χημικά πρόσμικτα, την παραγωγή ασφάλτου, τη μεταφορά υλικών, την κυκλοφορία στο οδόστρωμα, τη χρήση γης, την απόξεση του οδοστρώματος στο τέλος ζωής του και τη διάθεση ή ανακύκλωση σε χώρους υγειονομικής ταφής.

Λαμβάνοντας υπόψη ολόκληρο τον κύκλο ζωής, οι επιπτώσεις των οδοστρωμάτων από μετρίως θερμό ασφαλτόμιγμα (WMA) ήταν σχεδόν ίσες με τις επιπτώσεις των οδοστρωμάτων από θερμό ασφαλτόμιγμα (HMA) με το ίδιο περιεχόμενο RAP. Η μείωση των επιπτώσεων του WMA που προκύπτει από τη μείωση της θερμοκρασίας κατασκευής αντισταθμίστηκε από τις μεγαλύτερες επιπτώσεις των χρησιμοποιούμενων υλικών για να επιτευχθεί η μείωση της θερμοκρασίας, ιδίως από τις επιπτώσεις των συνθετικών ζεόλιθων. Επιπλέον, συγκρίνοντας μίγματα ασφάλτου με διαφορετικά ποσοστά ανακτημένου ασφαλτικού οδοστρώματος (RAP), αποδείχθηκε ότι οι επιπτώσεις των ασφαλτομιγμάτων μειώθηκαν σημαντικά με την προσθήκη RAP. Όλες οι τελικές επιπτώσεις, καθώς και η κλιματική αλλαγή, η εξάντληση των ορυκτών και η συνολική αθροιστική ζήτηση ενέργειας μειώθηκαν κατά 13-14%, προσθέτοντας 15% RAP. Ένα βασικό πλεονέκτημα του WMA είναι η πιθανώς μεγαλύτερη χρήση RAP. Έτσι, οι ερευνητές συμπεραίνουν ότι η μείωση των επιπτώσεων που επιτεύχθηκαν με την προσθήκη μεγάλων ποσοτήτων RAP στο μετρίως θερμό ασφαλτόμιγμα (WMA) θα μπορούσε να μετατρέψει αυτά τα μίγματα ασφάλτου σε μια καλή εναλλακτική λύση του θερμού ασφαλτομίγματος (HMA) από περιβαλλοντική άποψη.

Οι **Shi et al. (2018)** εντόπισαν την έλλειψη ποσοτικών εκτιμήσεων βιωσιμότητας της χρήσης ανακτημένου ασφαλτικού οδοστρώματος (RAP) ως αντικατάσταση των αδρανών του μίγματος σε εφαρμογές οδοστρώματος με σκυρόδεμα με τσιμέντο τύπου Πόρτλαντ (PCC). Για τον σκοπό αυτό, οι ερευνητές διεξήγαγαν μια ανάλυση κύκλου ζωής, έτσι ώστε να καλύψουν το κενό της έρευνας και να ενθαρρύνουν την ευρύτερη χρήση οδοστρώματος από σκυρόδεμα με αδρανή από ανακτημένο ασφαλτικό οδόστρωμα. Σχεδιάστηκαν τρεις διαφορετικοί τύποι οδοστρωμάτων. Πιο συγκεκριμένα, ένα οδόστρωμα μίας στρώσης από απλή πλάκα σκυροδέματος (PCC), ένα μίας στρώσης από πλάκα σκυροδέματος με

αδρανή από ανακτημένο ασφαλτικό οδόστρωμα (RAP-PCC) και ένα σκυροδέματος δύο στρώσεων που χρησιμοποιεί το RAP-PCC ως το υλικό της κάτω στρώσης. Στη συνέχεια, ακολουθείται μια εκτεταμένη αξιολόγηση της βιωσιμότητας με την προσέγγιση του οικονομικού μοντέλου εισόδου-εξόδου κύκλου ζωής (EIO-LCA).

Τα αποτελέσματα αυτής της αξιολόγησης, ανέδειξαν οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά οφέλη της χρήσης του RAP-PCC για εφαρμογές οδοστρωμάτων. Μεταξύ των τριών οδοστρωμάτων που μελετήθηκαν σε αυτή τη συγκεκριμένη μελέτη, οι ερευνητές υποστηρίζουν ότι το οδόστρωμα RAP-PCC μίας στρώσης θα μπορούσε να αποφέρει τα υψηλότερα οικονομικά οφέλη, ενώ η κατασκευή δύο στρώσεων που χρησιμοποιεί RAP-PCC στην κάτω στρώση θα μπορούσε να έχει τις υψηλότερες θετικές επιπτώσεις από κοινωνική και περιβαλλοντική σκοπιά. Επιπλέον, οι ερευνητές επισημαίνουν ότι η ιδέα της χρήσης του RAP-PCC ως υλικό της κάτω στρώσης σε οδόστρωμα σκυροδέματος δύο στρώσεων μπορεί να μεγιστοποιήσει τη χρήση του RAP με ελάχιστη διακινδύνευση για τις επιδόσεις του οδοστρώματος και απέδειξαν ότι αυτή η κατασκευαστική στρατηγική μπορεί να είναι εφικτή και οικονομικά συμφέρουσα.

Οι **Zheng et al.** (**2019**) προτείνουν μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία ανάλυσης βιωσιμότητας (LCSA) οδοστρώματος που ενσωματώνει την ανάλυση κόστους κύκλου ζωής (C-LCA), την παραδοσιακή ανάλυση κύκλου ζωής, που επικεντρώνεται στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (E-LCA) και την κοινωνική ανάλυση κύκλου ζωής (S-LCA). Επιπλέον, εφαρμόστηκε ένα μοντέλο λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων για την ενοποίηση των τριών διαστάσεων βιωσιμότητας και την επιλογή της κατάλληλης εναλλακτικής βιώσιμου οδοστρώματος. Οι ερευνητές διαμόρφωσαν εναλλακτικές λύσεις συντήρησης οδοστρώματος και τις μελέτησαν κατά τις τέσσερις κύριες φάσεις του κύκλου ζωής, δηλαδή την παραγωγή πρώτων υλών, την κατασκευή, την χρήση και την συντήρηση. Οι εν λόγω στρατηγικές συντήρησης που αναπτύχθηκαν ήταν τρεις: η λεπτή επικάλυψη σκυροδέματος HMA (THMACO), HMA με WMA Sasobit (HMAW) και HMA με RAP (HMAR), για ένα υπάρχον οδόστρωμα από θερμό ασφαλτόμιγμα (HMA) στα νοτιοανατολικά της Κίνας.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η βασισμένη στην ανακύκλωση HMAR παρουσίασε την καλύτερη οικονομική και κοινωνική απόδοση, ενώ η HMAW πέτυχε την καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση. Το HMAR αναδείχτηκε ως η βέλτιστη εναλλακτική λύση για την συντήρηση, μέσω της εφαρμογής ενός συνδυαστικού μοντέλου AHP και VIKOR, το οποίο είχε σκοπό την ενοποίηση των τριών διαστάσεων βιωσιμότητας από τη σκοπιά της λήψης αποφάσεων. Άλλο ένα σημαντικό συμπέρασμα της έρευνας φαίνεται να είναι ότι ο

οικονομικός παράγοντας επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα της απόφασης. Αυτό προέκυψε έπειτα από ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας 21 περιπτώσεις, οι οποίες διέφεραν σε τρία κριτήρια βάση οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών διαστάσεων.

Ο στόχος της παρακάτω μελέτης (**Hasan et al. (2020)**) ήταν να υπολογίσει και να συγκρίνει τις περιβαλλοντικές εκπομπές και την κατανάλωση ενέργειας μεταξύ: διαφορετικών ανακυκλωμένων επιλογών (RCW και RAP), διαφορετικών θερμοκρασιών παραγωγής μίγματος (WMA αντί HMA) και βιομηχανικών παραπροϊόντων (GGBFS) ως μερική αντικατάσταση του τσιμέντου Πόρτλαντ για οδικές εργασίες. Έλαβε υπόψιν τα ακόλουθα στάδια κύκλου ζωής: εξαγωγή υλικών και παραγωγή, μεταφορά υλικών και εξοπλισμού, κατασκευή, συντήρηση ή ανακατασκευή και 30 χρόνια διάρκεια ζωής. Οι ερευνητές εκτίμησαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από εκπομπές αέριων ρύπων και κατανάλωση ενέργειας που παράγονται από πλήρη οδικά έργα, συγκεκριμένα: χωματουργικά έργα, οδοστρώματα, εργασίες από σκυρόδεμα για εμπόδια κυκλοφορίας, κράσπεδα, στηθαία, πινακίδες κυκλοφορίας και συστήματα φωτισμού. Ως εναλλακτικά υλικά χρησιμοποιήσαν ανακυκλωμένα απορρίμματα από κατασκευές, ανακτημένο οδόστρωμα ασφάλτου, μετρίως θερμό μίγμα ασφάλτου με πρόσμικτα συνθετικών ζεόλιθων και σκωρία. Ως αναφορά λήφθηκε συμβατικό ασφαλτόμιγμα με φυσικά αδρανή και σκυρόδεμα με τσιμέντο τύπου Portland. Θεωρήθηκε επίσης συνήθης συντήρηση και περιοδική αποκατάσταση με φρεζάρισμα και επιφανειακή επίστρωση κάθε 5 χρόνια. Η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την μέθοδο ReCiPe.

Μετά τη σύζευξη όλων των εναλλακτικών σεναρίων, τα αποτελέσματα ανέδειξαν σημαντική μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε όλους τους δείκτες: 34% σε CO_2eq, 48% στην κατανάλωση ενέργειας, 24,4% σε NO_xeq, 21,53% σε $PM_{2,5}$eq, 21,2% στην οξίνιση και 10,4% στη χρήση γης. Επιπλέον, σημαντικό πόρισμα ήταν ότι τα αποτελέσματα των επιπτώσεων του κύκλου ζωής θερμού και μετρίως θερμού ασφαλτομίγματος ήταν σχεδόν ισοδύναμα λόγω της προσθήκης συνθετικών ζεόλιθων. Σε γενικές γραμμές, το στάδιο της παραγωγής πρώτων υλών είχε την υψηλότερη συνεισφορά στο δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP), καθώς δημιούργησε το 63,96% των εκπομπών για τις βασικές περιπτώσεις. Το στάδιο κατασκευής ήταν το δεύτερο υψηλότερο (21,78%), ακολουθούμενο από τη μεταφορά υλικών (14,18%) και τη μεταφορά εξοπλισμού (0,05%). Τέλος, τα χωματουργικά έργα αντιπροσωπεύουν σημαντικό μέρος (26% ισοδύναμου CO_2), των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για πλήρη οδικά έργα.

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

4.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας διεξάγεται μια ανάλυση κύκλου ζωής, με σκοπό την αξιολόγηση της χρήσης εναλλακτικών υλικών ως αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών στην αντιολισθηρή στρώση κυκλοφορίας του οδοστρώματος. Σκοπός είναι να εκτιμηθούν τα πιθανά οφέλη της αντικατάστασης συμβατικών αδρανών μέσω τεχνολογιών ασφαλτομιγμάτων που προτείνουν χρήση σκωρίας χαλυβουργίας και ανακτημένου ασφαλτικού οδοστρώματος (RAP). Επιλέξαμε να στοχεύσουμε στην μείωση του αντικτύπου κατά το στάδιο της παραγωγής, γιατί από την μελέτη της βιβλιογραφίας προέκυψε ότι αυτό το στάδιο είναι το πιο επιζήμιο. Η αντιολισθηρή στρώση κυκλοφορίας, επιλέχθηκε ως η πιο συχνά συντηρούμενη και η αντικατάσταση αδρανών ως το μεγαλύτερο ποσοστό του μίγματος. Η ανάλυση έγινε τόσο σε επίπεδο ασφαλτομίγματος, όσο και σε επίπεδο οδοστρώματος, για να σκιαγραφηθεί η ακριβής επίδραση της κάθε τεχνολογίας.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται εκτενώς η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για την ανάλυση, καθώς και η συλλογιστική πορεία για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

4.2 Τύποι ασφαλτομιγμάτων

Στη μελέτη λήφθηκαν υπόψιν τέσσερεις διαφορετικοί τύποι ασφαλτομίγματος, που προορίζονται για την αντιολισθηρή στρώση κυκλοφορίας και περιλαμβάνουν αδρανή διαφορετικής σύνθεσης και προέλευσης, δημιουργώντας τα τέσσερα διαφορετικά σενάρια που εξετάζονται.

- Το πρώτο σενάριο περιλαμβάνει μίγμα μόνο από συμβατικά αδρανή, λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα αντιολισθηρά και θα αναφέρεται ως ‘ΣΕΝΑΡΙΟ Α’.
- Το δεύτερο σενάριο περιλαμβάνει μίγμα με αδρανή από σκωρία χαλυβουργίας και θα αναφέρεται ως ‘ΣΕΝΑΡΙΟ Β’
- Το τρίτο και τέταρτο σενάριο περιλαμβάνουν μίγμα με αδρανή από σκωρία χαλυβουργίας και ανακτημένο ασφαλτικό οδόστρωμα (RAP), σε διαφορετικές

αναλογίες. Το τρίτο περιλαμβάνει 10% RAP και στο εξής θα αναφέρεται ως ‘ΣΕΝΑΡΙΟ Γ’ και το τέταρτο ονομάζεται ‘ΣΕΝΑΡΙΟ Δ’ και περιέχει 25% RAP.

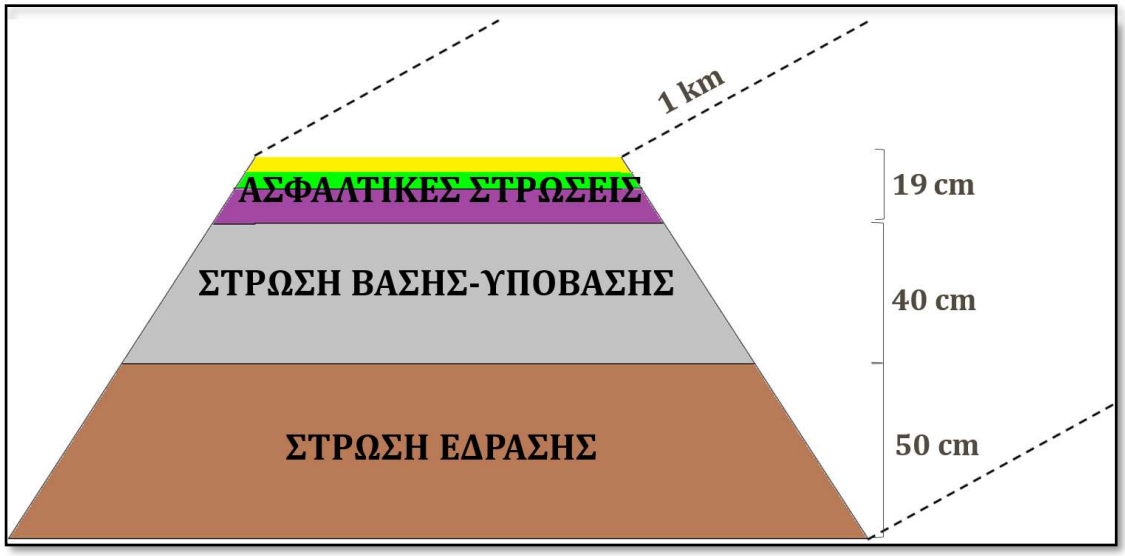
Τα στοιχεία των τεσσάρων μιγμάτων αντιολισθηρής στρώσης που αποτελούν τη βάση των σεναρίων ανάλυσης φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 4.1 Στοιχεία μιγμάτων αντιολισθηρής στρώσης - Σενάρια ανάλυσης

Σενάρια	Συστατικά	Σύνθεση	Πυκνότητα (kg/m^3)
Α	Άσφαλτος (κ.β αδρανών)	4.8%	1020
	Λεπτόκοκκο αδρανές	30%	2550
	Χονδρόκοκκο αδρανές	70%	2880
	Ασφαλτόμιγμα	-	2310
Β	Άσφαλτος (κ.β αδρανών)	4.8%	1020
	Λεπτόκοκκο αδρανές	29%	2650
	Σκωρία	71%	3255
	Ασφαλτόμιγμα	-	2500
Γ	Άσφαλτος (κ.β αδρανών)	4.8%	1020
	Λεπτόκοκκο αδρανές	24%	2650
	Σκωρία	66%	3255
	RAP	10%	2810
	Ασφαλτόμιγμα	-	2490
Δ	Άσφαλτος (κ.β αδρανών)	4.8%	1020
	Λεπτόκοκκο αδρανές	15%	2650
	Σκωρία	60%	3255
	RAP	25%	2810
	Ασφαλτόμιγμα	-	2490

Αυτά τα ασφαλτομίγματα εντάσσονται σε διατομή ασφαλτικού οδοστρώματος. Κάθε διατομή αποτελείται από τρεις ασφαλτικές στρώσεις (δηλαδή ασφαλτική βάση, συνδετική στρώση και αντιολισθηρή στρώση), ενοποιημένη ασύνδετη στρώση αμμοχάλικων (βάσης-υπόβασης) και στρώση έδρασης, με κοινά πάχη στρώσεων ως φαίνονται στην Εικόνα 4.1. Διαφοροποίηση υπάρχει μόνο ως προς το υλικό της αντιολισθηρής στρώσης, σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 4.1. Στον Πίνακα 4.2 φαίνονται τα στοιχεία των υλικών των υπόλοιπων στρώσεων κάθε διατομής. Επίσης, αναφέρεται ότι τα ασφαλτομίγματα

ασφαλτικής βάσης και συνδετικής στρώσης περιλαμβάνουν συνδετικό υλικό 4.6% και 4.8% (κ.β. αδρανών), αντίστοιχα.



Εικόνα 4.1 Διαστάσεις και σχεδιασμός οδοστρώματος

Πίνακας 4.2 Στοιχεία ασφαλτομιγμάτων και ασύνδετων υλικών

Στρώσεις	Συστατικά	Πυκνότητα (kg/m^3)
Συνδετική στρώση	Άσφαλτος	1020
	Αδρανή	2650
	Ασφαλτόμιγμα	2350
Ασφαλτική βάση	Άσφαλτος	1020
	Αδρανή	2650
	Ασφαλτόμιγμα	2320
Βάση-Υπόβαση	Αδρανή	2200
Στρώση έδρασης	Εδαφικά υλικά	2050

4.3 Λογισμικό

− Εισαγωγή

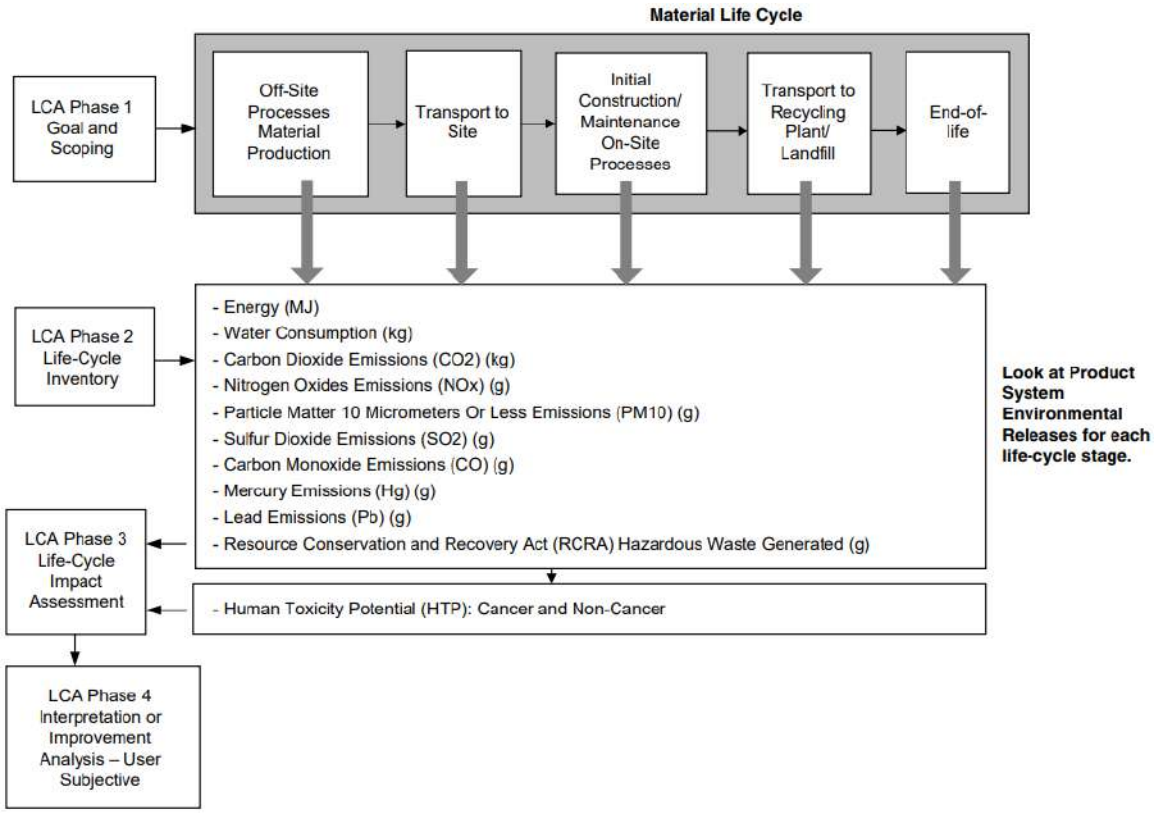
Η ανάλυση γίνεται χρησιμοποιώντας το ηλεκτρονικό εργαλείο PaLATE. Το PaLATE αναπτύχθηκε από μία ομάδα με επικεφαλή τον Arpad Horvath του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας, Μπέρκλεϋ, το 2003. Οι ερευνητές είχαν ως στόχο να δημιουργήσουν ένα εργαλείο ανάλυσης κύκλου ζωής για τα οδοστρώματα, το οποίο θα επιτρέπει στους ενδιαφερόμενους να αξιολογούν την χρήση διαφόρων υλικών στην κατασκευή οδοστρωμάτων και να συγκρίνουν εναλλακτικά σενάρια. Το PaLATE μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση συγκεκριμένων δεικτών ή μέτρων απόδοσης (οι έξοδοι του εργαλείου) και για την ενσωμάτωση περιβαλλοντικών προοπτικών στη διαδικασία λήψης αποφάσεων οδοστρωμάτων.

Το PaLATE είναι ένα εργαλείο σε περιβάλλον Excel που βασίζεται στη μέθοδο LCA (βλ. Κεφάλαιο 3). Πρακτικά αποτελεί μια αξιολόγηση κύκλου ζωής (LCA) σε επίπεδο έργου, που περιλαμβάνει πρωτογενή και δευτερεύοντα δομικά υλικά και τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στη διάρκεια του κύκλου ζωής του οδοστρώματος. Αυτά τα στοιχεία μέσω καταγραφής (LCI) μεταφράζονται σε εκπομπές στον αέρα, επικίνδυνες εκροές υλικών και αξιολογούνται οι επιπτώσεις τους στον άνθρωπο.

Το PaLATE είναι ένα βιβλίο εργασίας σε περιβάλλον Microsoft Excel που περιλαμβάνει συνολικά 18 φύλλα εργασίας. Τα δύο προορίζονται για να συμπληρώσει ο χρήστης τα δεδομένα εισόδου, τα άλλα δύο είναι για την εξαγωγή των δεδομένων εξόδου και τα υπόλοιπα περιέχουν αναφορές και δεδομένα που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς από διάφορες δημόσιες πηγές. Τα δεδομένα που είναι αποθηκευμένα στα φύλλα εργασίας για αποθήκευση συνδυάζονται με τα δεδομένα από τα φύλλα εργασίας που προορίζονται για την συμπλήρωση δεδομένων, δημιουργώντας περιβαλλοντικά δεδομένα εξόδου στα φύλλα εργασίας εξόδου.

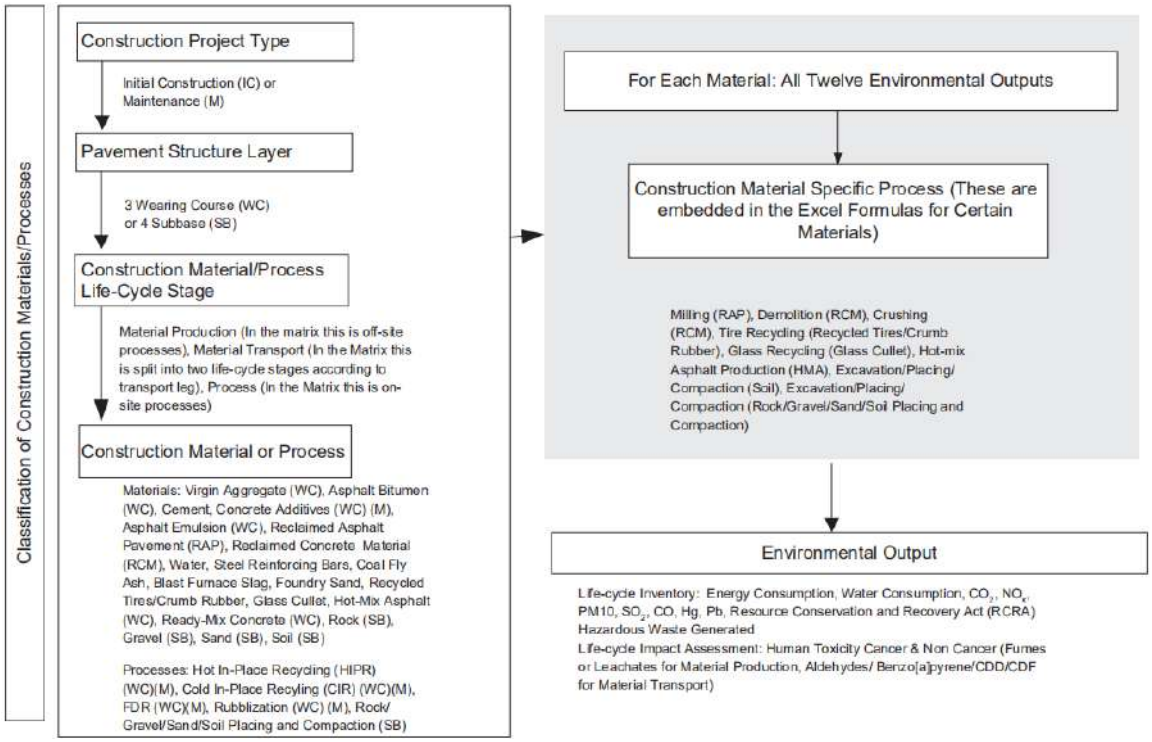
Τα δεδομένα εξόδου οργανώνονται στα αντίστοιχα φύλλα εργασίας για κάθε δομικό υλικό του οδοστρώματος ή διαδικασία και για τις δώδεκα περιβαλλοντικές εξόδους. Ως αποτέλεσμα, σε κάθε υλικό έχουν εκχωρηθεί δώδεκα υπολογισμοί για κάθε στάδιο του κύκλου ζωής του υλικού, ένας για κάθε περιβαλλοντική έξοδο, άρα τελικά για δώδεκα περιβαλλοντικές εξόδους.

Ο στόχος της προσέγγισης LCA είναι να προσδιοριστεί η συνολική περιβαλλοντική απόδοση με ανάλυση του κάθε σταδίου κύκλου ζωής. Η υλοποίηση ενός LCA πραγματοποιείται σε φάσεις: Το 'LCA Phase 1' είναι ο στόχος και το πεδίο εφαρμογής, το 'LCA Phase 2' είναι η απογραφή κύκλου ζωής, το 'LCA Phase 3' είναι η αξιολόγηση αντικτύπου κύκλου ζωής και το 'LCA Phase 4' είναι η ανάλυση ερμηνείας ή βελτίωσης. Αυτές οι φάσεις και η γενικότερη δομή του ηλεκτρονικού εργαλείου PaLATE παρουσιάζονται συνοπτικά στο παρακάτω σχήμα (Nathman et al., 2009).



Εικόνα 4.2 Δομή PaLATE

Η εικόνα 4.2 δείχνει πώς το PaLATE οργανώνει τα φύλλα εργασίας εξόδου και κάθε ένα από τα περιβαλλοντικά δεδομένα εξόδου. Η αριστερή πλευρά της εικόνας 4.2 δείχνει τα βήματα που γίνονται για να καταλήξουμε στους σχετικούς με το υλικό υπολογισμούς και στην κάτω δεξιά πλευρά εμφανίζονται οι αναλυτικοί περιβαλλοντικοί υπολογισμοί.



Εικόνα 4.3 Υπολογισμοί στο PaLATE (Nathman et al., 2009)

Ο κύκλος ζωής για καθορισμένα δομικά υλικά ή διαδικασίες περιλαμβάνει διεργασίες εκτός του πεδίου για την παραγωγή υλικών, μεταφορά στο πεδίο του έργου, επιτόπιες διαδικασίες για την κατασκευή (αρχική κατασκευή ή συντήρηση), μεταφορά σε χώρο υγειονομικής ταφής ή ανακύκλωσης και διάφορες επιλογές για το τέλος του κύκλου ζωής. Αν και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των επιλογών για το τέλος του κύκλου ζωής δεν αξιολογούνται άμεσα, το PaLATE μπορεί να περιλαμβάνει ένα επιτόπιο έργο ανακύκλωσης ή διαδικασίες παραγωγής υλικών στα πλαίσια της ανακύκλωσης υλικών.

Το PaLATE παρέχει επίσης τη δυνατότητα ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής, λαμβάνοντας υπόψη τις οικονομικές επιπτώσεις των αποφάσεων κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του οδοστρώματος και όχι μόνο αυτές της κατασκευαστικής διαδικασίας. Αυτό το γνώρισμα του PaLATE είναι πιο οικείο στην κοινότητα διαχείρισης οδοστρωμάτων και

αποτελεί βασική συμβολή στη λήψη αποφάσεων. Επισημαίνεται ωστόσο ότι η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην περιβαλλοντική ανάλυση.

Το PaLATE, χωρίζει τον κύκλο ζωής του οδοστρώματος σε τρεις φάσεις: ‘Παραγωγή Υλικών΄, ‘Μεταφορά υλικών’ και ‘Διαδικασίες - Εξοπλισμός’, τόσο για την ‘Αρχική κατασκευή’, όσο και για την ΄Συντήρηση’. Επισημαίνεται σε αυτό το σημείο ότι στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, δεν λήφθηκε υπόψιν η συντήρηση του οδοστρώματος, αλλά μόνο η αρχική κατασκευή.

Τέλος, το γενικότερο περίγραμμα του εν λόγω εργαλείου θα λέγαμε ότι είναι το εξής: με βάση τα στοιχεία κατασκευής του οδοστρώματος που εισάγονται από τον αναλυτή και τους συντελεστές εκπομπής αερίων και αποβλήτων υπολογίζεται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, το οποίο εκφράζεται μέσω κατάλληλων δεικτών.

- **Δεδομένα εισαγωγής**

Ο χρήστης καλείτε να δώσει πληροφορίες για τα παρακάτω στοιχεία: ‘Σχεδιασμός οδοστρώματος’, ‘Αρχική κατασκευή’ και ’Εξοπλισμός’. Σε αυτές τις κατηγορίες, που αποτελούν τα δεδομένα εισόδου του λογισμικού, προστίθενται δεδομένα για τα ογκομετρικά στοιχεία του οδοστρώματος, τα υλικά που το δομούν, τις διαδικασίες και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείτε για αυτές, καθώς και τις αποστάσεις που διανύονται για την μεταφορά των υλικών στο πεδίο κατασκευής. Για παράδειγμα, στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η συμπλήρωση των στοιχείων που αφορούν τις διαστάσεις της διατομής του οδοστρώματος, σε περιβάλλον PaLATE.

Layer Specifications				
Layer	Width [ft]	Length [miles]	Depth [inches]	Volume [yd^3]
Wearing Course 1	34.43	0.62	1.57	550.06
Wearing Course 2	34.43	0.62	1.97	687.58
Wearing Course 3	34.43	0.62	3.94	1375.15
Subbase 1	34.43	0.62	15.75	5500.61
Total			**23.22834646**	8,113
Embankment and Shoulder Volume [yd^3]:		6,876		

Εικόνα 4.4 Περιβάλλον PaLATE

Τα παραπάνω στοιχεία, μέσω ενός οικονομικού μοντέλου εισόδου εξόδου - ΕΙΟ (Κεφ 3.1.2) μετατρέπονται σε επιπτώσεις για το περιβάλλον και τον άνθρωπο, που αποτελούν τα δεδομένα εξόδου του προγράμματος.

Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της διαφάνειας του προγράμματος ο αναλυτής ενθαρρύνεται να επέμβει με δικές του τιμές ή / και τον τύπο εξοπλισμού για μια δεδομένη εργασία. Για παράδειγμα, για την παρούσα ανάλυση εισάχθηκαν τιμές για μηχανήματα που χρησιμοποιούνται σε Ελληνικά έργα οδοποιίας.

ACTIVITY	Equipment	Brand/Model		Engine Capacity	Productivity	Fuel Consumption
Asphalt Paving	Paver	VOGELE SUPER 1900-2		191 hp	149 tons/h	14.2 l/h
	Pneumatic roller	HAMM GRW10		114 hp	358 tons/h	11.5 l/h
	Tandem roller	HAMM HD 75		74 hp	368 tons/h	6.0 l/h
Milling	Milling machine	HAMM HD 75		700 hp	1,183 tons/h	120.5 l/h
Grinding	Grinding machine	RM 70GO!		140 hp	160 tons/h	16.0 l/h
placing and compaction of subbase	Motor grader	CATERPILLAR 160K		196 hp	25,845 tons/h	16.1 l/h
	Vibratory soil compactor	HAMM H20i		215 hp	2165.98 tons/h	20.9 l/h
embankment	Excavator	CATERPILLAR 385 C		523 hp	697.52 tons/h	51.1 l/h
	Vibratory soil compactor	HAMM 3520		208 hp	1877.50 tons/h	20.0 l/h

Εικόνα 4.5 Εξοπλισμός στο PaLATE

- **Απογραφή κύκλου ζωής**

Η απογραφή του κύκλου ζωής βασίζεται στη μέθοδο EIO (Κεφ. 3.1.2). Συγκεκριμένα, η οικονομία χωρίζεται σε ένα τετράγωνο πίνακα 480 τομέων βασικών προϊόντων. Κάθε σειρά και στήλη αντιπροσωπεύει έναν τομέα και κάθε κελί αντιπροσωπεύει τις οικονομικές συναλλαγές σε δολάρια μεταξύ δύο αντίστοιχων τομέων. Έτσι, ο πίνακας παρουσιάζει συνολικά πωλήσεις και αγορές από έναν τομέα σε άλλους, ή από τον ίδιο τομέα (εάν πρόκειται για κυκλική οικονομία), για την παραγωγή ενός δολαρίου προϊόντος. Το οικονομικό μοντέλο εμπλουτίζεται από μια σειρά περιβαλλοντικών δεικτών, προκειμένου να ποσοτικοποιηθούν η κατανάλωση ενέργειας και νερού, καθώς και οι εκπομπές αερίων και επικίνδυνων απόβλητων.

Οι συντελεστές εκπομπών EIO-LCA εκφράζονται σε τόνους ανά δολάριο και πολλαπλασιάζονται με μέσες τιμές κόστους κατασκευής των ΗΠΑ σε δολάριο ανά τόνο. Με αυτό τον τρόπο, προκύπτουν σταθερές οι οποίες εκφράζουν το μέγεθος του περιβαλλοντικού δείκτη ανά κατασκευαστική διαδικασία ή χρήση υλικού.

- **Αποτελέσματα ανάλυσης**

Τα δεδομένα εξόδου του PaLATE περιλαμβάνουν αποτελέσματα από την καταγραφή κύκλου ζωής (ενέργεια, κατανάλωση νερού, εκπομπές αερίων και παραγόμενα επικίνδυνα απόβλητα) και από την εκτίμηση επιπτώσεων του κύκλου ζωής (επιπτώσεις στους ανθρώπους λόγω έκπλυσης του εδάφους, αναθυμιάσεων και σωματιδίων).

Ειδικότερα, το PaLATE δίνει αποτελέσματα για δώδεκα δείκτες επιπτώσεων, οι οποίες παρουσιάζονται και επεξηγούνται συνοπτικά παρακάτω.

1. **Κατανάλωση ενέργειας**

Η ενέργεια που καταναλώνεται σε όλο τον κύκλο ζωής του σεναρίου οδοστρώματος, καταγράφεται και μετριέται σε μέγα τζάουλ (MJ). Η κατανάλωση ενέργειας αποτελεί έναν σημαντικό δείκτη, επειδή η παραγωγή ενέργειας αποτελεί ένα βασικό υπεύθυνο για τα αέρια του θερμοκηπίου. Επίσης, μείωση της κατανάλωσης ενέργειας συνεπάγεται καλύτερη διαχείριση των φυσικών αποθεμάτων (λιγνίτη, γαιάνθρακα, πετρελαίου). Συνεπώς, υπάρχει ανάγκη για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, που θα επιφέρει περιβαλλοντικά, αλλά και οικονομικά οφέλη από την μείωση του ενεργειακού κόστους.

2. Κατανάλωση νερού

Το νερό που καταναλώνεται σε όλο τον κύκλο ζωής του σεναρίου οδοστρώματος, καταγράφεται και μετριέται σε κιλά (kg). Η εξοικονόμηση υδάτινων πόρων, ακόμη και σε περιοχές χωρίς ελλείψεις, συμβάλλει στη μείωση της ανάγκης κατασκευής φραγμάτων ή εξόρυξης νερού από ποτάμια, μειώνει τα λύματα που παράγονται και υφίστανται επεξεργασία σε εγκαταστάσεις αποχέτευσης, μειώνει τις ενεργειακές απαιτήσεις για την επεξεργασία και μεταφορά νερού και λυμάτων, μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

3. Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)

Το Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) αποτελεί παράγωγο από καύση ορυκτών καυσίμων (γαιάνθρακας (καύσιμο), πετρέλαιο, βενζίνη, φυσικό αέριο κλπ.) και άλλων υλικών όπως ξύλο και πλαστικό . Επίσης, είναι ένα από τα αέρια που συμβάλλουν σημαντικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως η καύση ορυκτών καυσίμων και η αποψίλωση των δασών έχουν προκαλέσει αύξηση της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα κατά περίπου 35% από την αρχή της εποχής της βιομηχανοποίησης. Οι εκπομπές του CO_2 από τις ανθρώπινες δραστηριότητες ανέρχονται σήμερα περίπου σε 27 δισεκατομμύρια τόνους ετησίως. Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, στοχεύεται η μείωση των εκπομπών άνθρακα κατά τουλάχιστον 50% έως το 2030 και η επίτευξη ουδετερότητας άνθρακα έως το 2050 ((Varrenti, 2020).

4. Οξείδια του αζώτου (NO_x)

Με τον γενικό όρο οξείδια του αζώτου (NO_x) γίνεται αναφορά στο αέριο μίγμα μονοξειδίου του αζώτου (NO) και διοξειδίου του αζώτου (NO_2) που υπάρχει στην γήινη ατμόσφαιρα, αποτελώντας έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες ρύπανσής της. Συνήθως στην ομάδα αυτή των οξειδίων περιλαμβάνεται και το υποξείδιο του αζώτου (N_2O), αέριο το οποίο συμβάλλει σημαντικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Τα οξείδια του αζώτου σχηματίζονται κατά τις διαδικασίες καύσεως κυρίως ορυκτών καυσίμων (βενζίνης, πετρελαίου, γαιανθράκων) σε κινητήρες οχημάτων και εργοστάσια, αλλά και από κατασκευές οικιακής χρήσης.

Τα οξείδια του αζώτου συμβάλλουν στην δημιουργία ασθματικών καταστάσεων και αναπνευστικών προβλημάτων, καθώς σε συνθήκες βροχής σχηματίζουν αντιδρώντας με το νερό, νιτρικό οξύ (όξινη βροχή), ενώ σε συνθήκες υψηλής υγρασίας σχηματίζουν

ατμούς νιτρικού οξέος, οι οποίοι είναι δυνατόν να εισχωρήσουν στο αναπνευστικό σύστημα προκαλώντας του σοβαρές βλάβες. Τα μικροσωματίδια που σχηματίζονται, επίσης, μπορούν να εισχωρήσουν στους πνεύμονες και να προκαλέσουν εμφύσημα και βρογχίτιδα και να επιδεινώσουν καρδιακές παθήσεις.

5. Αιωρούμενα σωματίδια (PM_{10})

Τα Αιωρούμενα σωματίδια (PM_{10}) είναι ατμοσφαιρικά σωματίδια που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα, σε υγρή ή σε στερεά φάση με μέγεθος από 1nm ως και 100 μm. Προκαλούνται κατά κύριο λόγο από την βιομηχανική δραστηριότητα, την καύση αποβλήτων και την καύση ορυκτών καυσίμων σε οχήματα. Τα σωματίδια είναι η πιο επιβλαβής μορφή ατμοσφαιρικής ρύπανσης λόγω της ικανότητάς τους να διεισδύουν βαθιά στους πνεύμονες, την ροή αίματος και τον εγκέφαλο, προκαλώντας προβλήματα υγείας, όπως καρδιακή προσβολή, αναπνευστικές ασθένειες και πρόωρο θάνατο.

6. Διοξείδιο του θείου (SO_2)

Το διοξείδιο του θείου (SO_2) απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα κατά τις εκρήξεις ηφαιστείων και σε μικρότερες ποσότητες από διάφορες βιομηχανίες και την καύση ορυκτών καυσίμων. Επειδή οι γαιάνθρακες (κάρβουνο) και το πετρέλαιο περιέχουν ενώσεις του θείου, αναπόφευκτα η καύση τους εκλύει διοξείδιο του θείου. Επειδή τα διάφορα καυσαέρια ορυκτών καυσίμων, όπως το πετρέλαιο και οι γαιάνθρακες, περιέχουν συχνά όξινα οξείδια του θείου και του αζώτου, μεταξύ άλλων, παράγεται όξινη βροχή που περιέχει σε διάλυση τα αντίστοιχα οξέα.

7. Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)

Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) είναι τοξικό για τους ανθρώπους, ακόμα και σε μικρές συγκεντρώσεις. Περίπου το ήμισυ του μονοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα της Γης προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων και βιομάζας. Κάποιες σύγχρονες διεργασίες, όπως η μεταλλουργία σιδήρου, παράγουν μονοξείδιο του άνθρακα, ως παραπροϊόν. Επίσης στα ορυχεία, μπορεί να βρεθεί σε περιορισμένους χώρους κακού εξαερισμού τόσο σε ορυχεία επιφανείας όσο και σε υπόγεια ορυχεία. Οι πιο κοινές πηγές μονοξειδίου του άνθρακα στις εργασίες εξόρυξης είναι ο κινητήρας εσωτερικής καύσης και τα εκρηκτικά.

8. Υδράργυρος (Hg)

Ο υδράργυρος είναι χημικό στοιχείο και ανήκει στην κατηγορία των μετάλλων. Ο υδράργυρος βρίσκεται στην φύση σε κοιτάσματα κινναβαρίτη (θειούχος υδράργυρος). Ο κινναβαρίτης είναι άκρως τοξικός εάν καταποθεί ή εισπνευσθεί η σκόνη του. Οι εκπομπές που προκαλούνται από τον άνθρωπο περιλαμβάνουν τον υδράργυρο που απελευθερώνεται από καύσιμα ή πρώτες ύλες ή από χρήσεις σε προϊόντα ή βιομηχανικές διεργασίες. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η βιοτεχνική και μικρής κλίμακας εξόρυξη χρυσού είναι η μεγαλύτερη πηγή ανθρωπογενών εκπομπών υδραργύρου (37,7%), ακολουθούμενη από σταθερή καύση άνθρακα (21%). Άλλες μεγάλες πηγές εκπομπών είναι η παραγωγή μη σιδηρούχων μετάλλων (15%) και η παραγωγή τσιμέντου (11%). Επίσης, σημαντική εκπομπή αερίων με υδράργυρο προέρχεται από την παραγωγή σιδηρούχων μετάλλων, την διύλιση πετρελαίου και την καύση πετρελαίου και φυσικού αερίου. (UNEP, 2019).

9. Μόλυβδος (Pb)

Ο μόλυβδος είναι χημικό στοιχείο και ανήκει στην κατηγορία των βαρέων μετάλλων. Ο μόλυβδος εφόσον εκτεθεί στην φύση και έρθει σε επαφή με τον άνθρωπο, μπορεί να προκαλέσει σοβαρές βλάβες και καρκινογενέσεις. Ο μόλυβδος που εκπέμπεται στον αέρα μπορεί να εισπνευστεί ή, αφού εγκατασταθεί σε επιφάνειες, μπορεί να καταποθεί**.** Η κύρια οδός έκθεσης του ανθρώπου σε μόλυβδο είναι η ακούσια κατάποση του από επιφάνειες. Αυτό συμβαίνει διότι οι εκπομπές μόλυβδου που αρχικά βρίσκονται στον αέρα στην συνέχεια εναποθέτονται σε επιφάνειες.

Οι κύριες εκπομπές μόλυβδου από ανθρωπογενείς πηγές είναι οι: 1) «Καύση καυσίμου», η οποία περιλαμβάνει εκπομπές από μονάδες παραγωγής ενέργειας από άνθρακα, φυσικό αέριο και πετρέλαιο, καθώς και θερμοσίφωνες και λέβητες κατοικιών, 2) Χημική παραγωγή και διύλιση πετρελαίου, 3) Οχήματα εντός και 4) εκτός δρόμου, 5) Βιομηχανική επεξεργασία μετάλλων (EPA, 2018).

10. Επικίνδυνα απόβλητα

Τα επικίνδυνα απόβλητα είναι απόβλητα με ιδιότητες που τα καθιστούν επικίνδυνα ή ικανά να έχουν επιβλαβείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία ή στο περιβάλλον. Τα επικίνδυνα απόβλητα δημιουργούνται από πολλές πηγές, από απόβλητα βιομηχανικής διαδικασίας έως μπαταρίες και μπορεί να προέρχονται σε πολλές μορφές, όπως υγρά, στερεά αέρια και λάσπες. Τα στερεά απόβλητα είναι επικίνδυνα απόβλητα εάν αναφέρονται συγκεκριμένα ως γνωστά επικίνδυνα απόβλητα ή πληρούν τα χαρακτηριστικά

επικίνδυνων αποβλήτων. Τα γνωστά επικίνδυνα απόβλητα είναι απόβλητα από κοινές παραγωγικές και βιομηχανικές διεργασίες, συγκεκριμένες βιομηχανίες και μπορούν να παραχθούν από απορρίμματα εμπορικών προϊόντων. Απόβλητα που χαρακτηρίζονται επικίνδυνα χρειάζεται να εμφανίζουν μία ή περισσότερες από τις ακόλουθες χαρακτηριστικές ιδιότητες: αναφλεξιμότητα, διαβρωτικότητα, αντιδραστικότητα ή τοξικότητα.

11. & 12. Τοξικότητα για τον άνθρωπο (καρκινογόνες και μη-καρκινογόνες ουσίες)

Η πιθανή τοξικότητα για τον άνθρωπο (Human Toxicity Potential: HTP) είναι ένας δείκτης που υπολογίζεται με βάση τόσο στην εγγενή τοξικότητα μιας ένωσης όσο και στην πιθανή δόση της και αντικατοπτρίζει την πιθανή βλάβη που μπορεί να προκληθεί από μια μονάδα χημικής ουσίας που απελευθερώνεται στο περιβάλλον. Στο εξής θα αναφέρεται ως 'Τοξικότητα-Μη καρκινογόνα' και Τοξικότητα-Καρκινογόνα' ή απλούστερα 'Μη καρκινογόνα' και 'Καρκινογόνα' για χάριν συντομίας. Είναι μια ετερογενής κατηγορία LCIA που μετατρέπει εκπομπές και περιβαλλοντικές εκλύσεις που δρουν με διαφορετικούς μηχανισμούς και εισέρχονται σε διαφορετικά περιβαλλοντικά μέσα, όπως ο αέρας, το νερό και η γη, σε μια κοινή μονάδα για σύγκριση. Στο PaLATE, τα δεδομένα που απαιτούνται για την αξιολόγηση του HTP διαφέρουν ανάλογα με το στάδιο του κύκλου ζωής και το υλικό:

Δυνατότητα έκπλυσης. Για το στάδιο του κύκλου ζωής της παραγωγής υλικών, το δυναμικό έκπλυσης ορισμένων υλικών καθορίζεται με βάση τις μέσες συγκεντρώσεις μετάλλων. Η καρκινογόνα τοξικότητα για τον άνθρωπο βασίζεται σε συγκεντρώσεις αρσενικού και μόλυβδου και η μη-καρκινογόνα τοξικότητα βασίζεται σε ποικιλία συγκεντρώσεων μετάλλων.

Αναθυμιάσεις ασφάλτου. Και οι δύο δείκτες προσδιορίζονται με βάση τη χημική ανάλυση της δεξαμενής αποθήκευσης και των εργαστηριακών αναθυμιάσεων ασφάλτου.

Για το στάδιο του κύκλου ζωής της μεταφοράς υλικών, και οι δύο δείκτες βασίζονται στις αλδεϋδες, το βενζο [a] πυρένιο, την χλωριωμένη διβενζοδιοξίνη και το χλωριωμένο διβενζοφουράνιο για βαριές μηχανές.

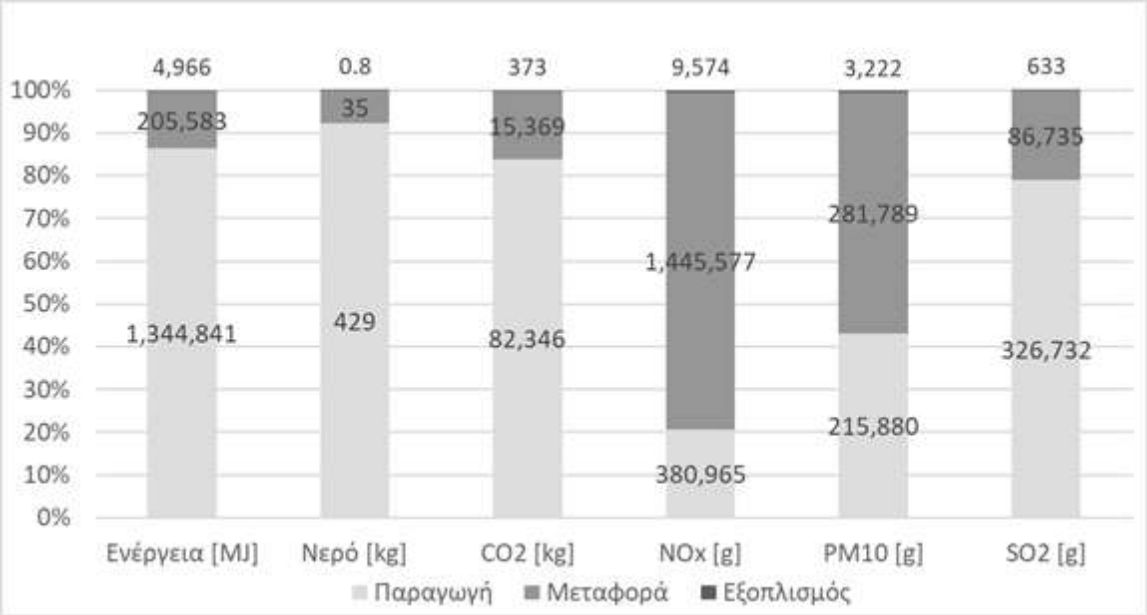
5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται ενδελεχώς τα αποτελέσματα της ανάλυσης με το εργαλείο PaLATE, εντοπίζονται σημαντικά σημεία και επισημαίνονται τα συμπεράσματα που απορρέουν από αυτά. Εξετάζεται τόσο η επίδραση ανά διαφορετικό ασφαλτόμιγμα, όσο και ανά όλη την διατομή του οδοστρώματος, ενώ παράλληλα γίνεται και αναφορά στην επιρροή των επιμέρους σταδίων του κύκλου ζωής του οδοστρώματος.

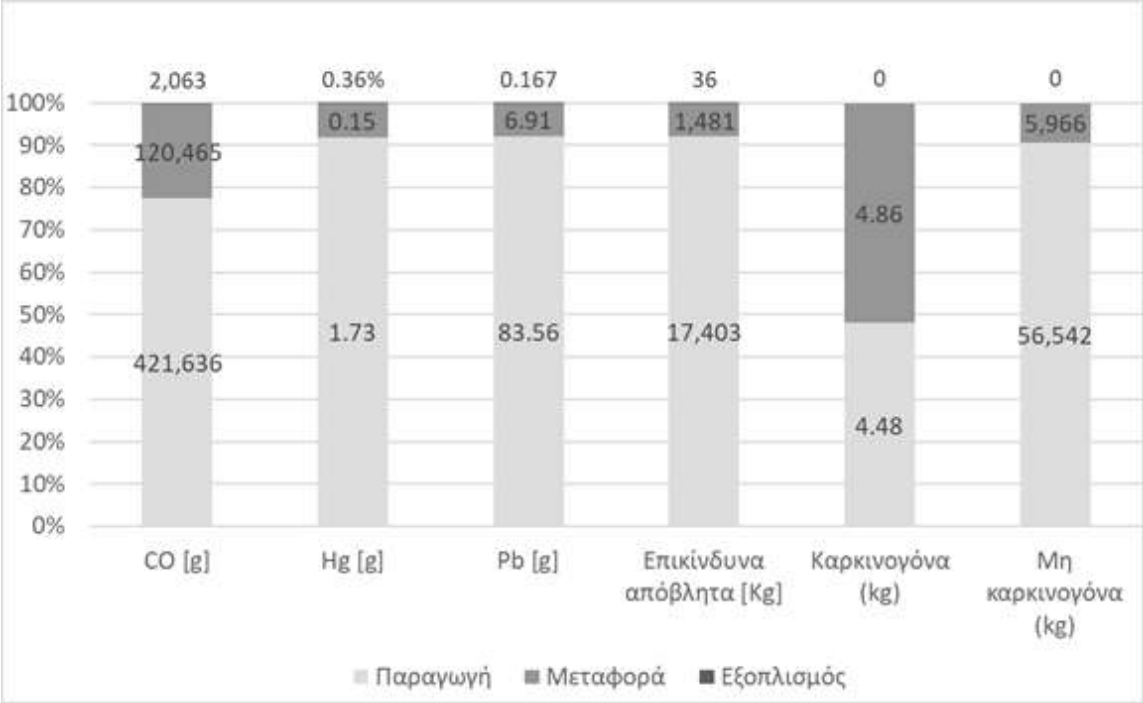
5.1 Μίγμα αντιολισθηρής στρώσης

5.1.1 Σενάριο αναφοράς

Στα επόμενα γραφήματα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του συμβατικού ασφαλτομίγματος Α, που αποτελεί το σενάριο αναφοράς. Τα αποτελέσματα αφορούν και τους δώδεκα δείκτες που έχει ως δεδομένα εξόδου το εργαλείο PaLATE και παρατίθενται αφενός για λόγους πληρότητας και αφετέρου με σκοπό να αποκτήσει ο αναγνώστης μια εικόνα για τα μεγέθη για τα οποία γίνεται λόγος στα πλαίσια της ανάλυσης.

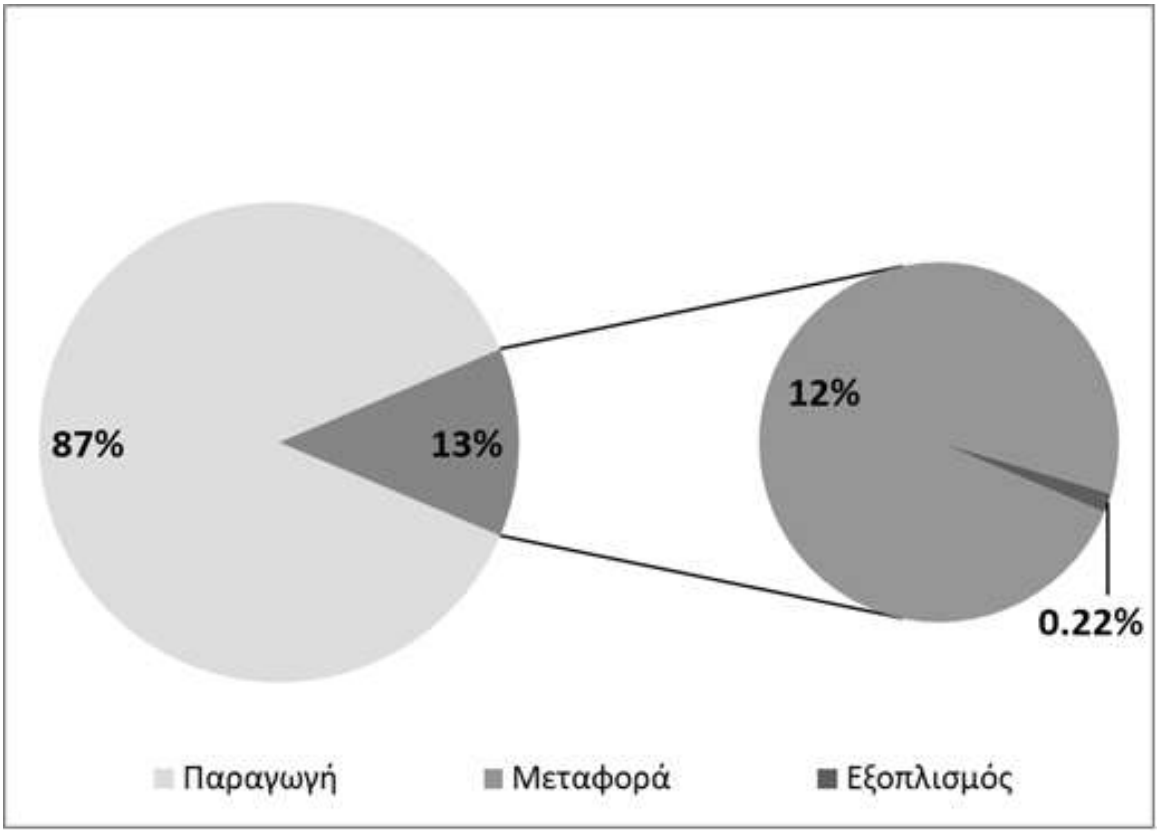


Εικόνα 5.1 Σενάριο Α- αποτελέσματα περιβαλλοντικών δεικτών (μέρος 1ο)

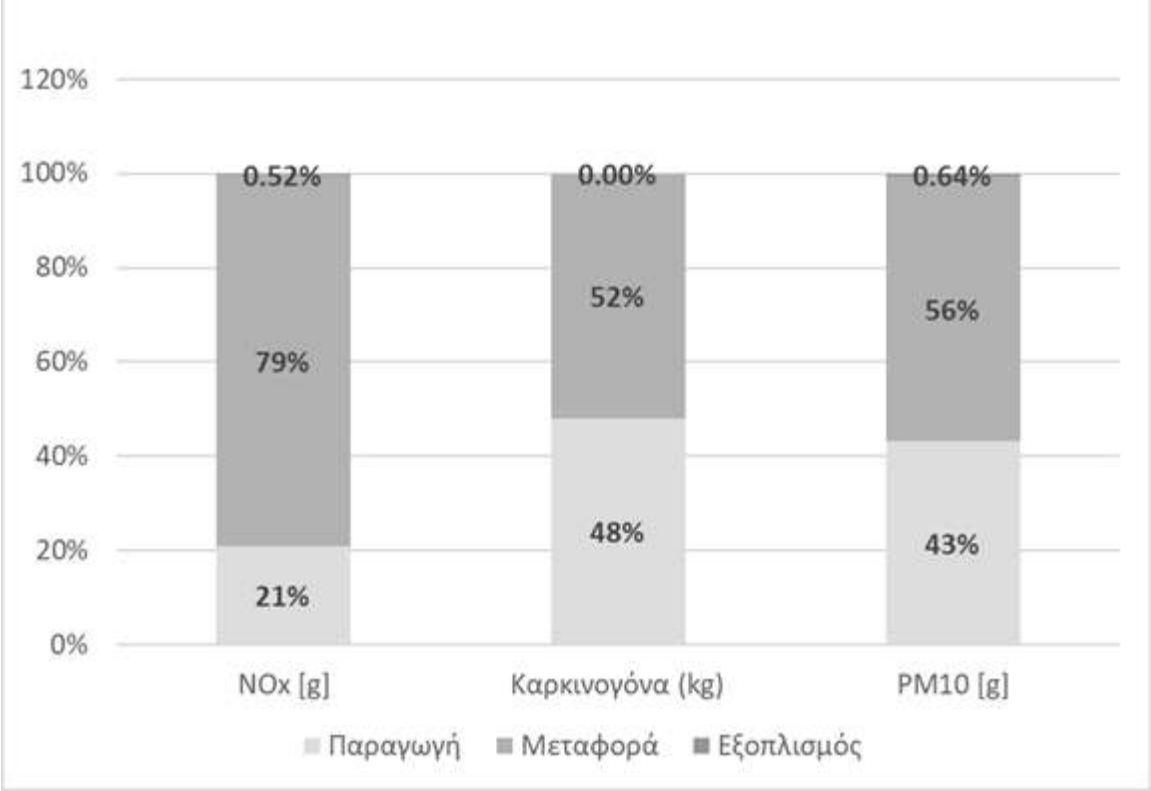


Εικόνα 5.2 Σενάριο Α- αποτελέσματα περιβαλλοντικών δεικτών (μέρος 2ο)

Έπειτα από ανάλυση των αποτελεσμάτων, προσπαθήσαμε να κατατάξουμε κατά στάδιο του κύκλου ζωής το μέγεθος των περιβαλλοντικών δεικτών. Η εν λόγω ανάλυση ανέδειξε ότι το στάδιο της παραγωγής των υλικών για την αντιολισθηρή στρώση συμβάλλει καθοριστικά στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, με μέσο ποσοστό 87% για όλους τους δώδεκα δείκτες εκτός από τρεις: τον δείκτη 'NOx', 'PM_{10}', και 'Καρκινογόνα'. Για τους τρεις αυτούς δείκτες, το στάδιο της μεταφοράς φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο στην παραγωγή τους. Πιο συγκεκριμένα, η Μεταφορά κρίνεται καθοριστική για τον δείκτη NOx (~79%) και σημαντική για τους δείκτες PM_{10} και Καρκινογόνα (~54%). Τα παραπάνω ευρήματα παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες και το στάδιο του εξοπλισμού έχει γενικά μικρή συμβολή, με μεγαλύτερη συμμετοχή της τάξης του 0,64%.



Εικόνα 5.4 Επιρροή του κάθε σταδίου στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα-Μέσος όρος από 10



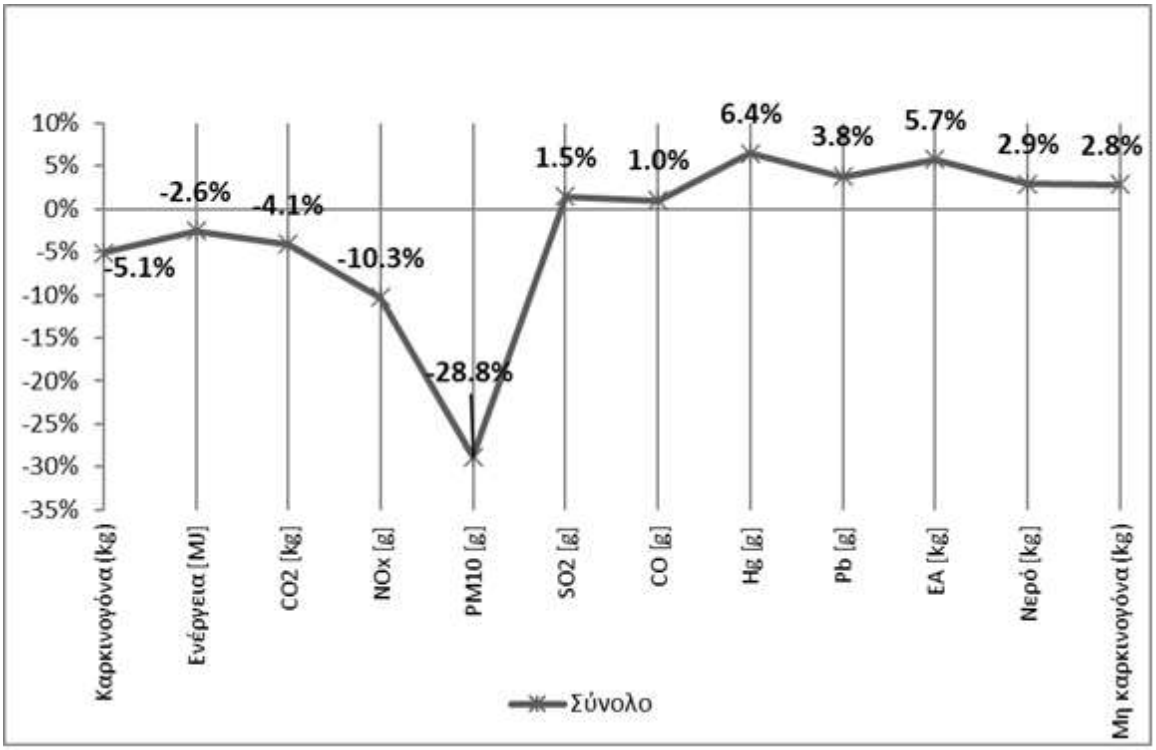
Εικόνα 5.3 Κατανομή στα στάδια για τους τρεις δείκτες που αποκλίνουν NOx , PM_{10} και Καρκινογόνα

5.1.2 Συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων σε σχέση με το σενάριο αναφοράς

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε σύγκριση του συμβατικού ασφαλτομίγματος Α, με τα υπόλοιπα τρία εναλλακτικά ασφαλτομίγματα. Υπολογίσθηκαν οι ποσοστιαίες μεταβολές, τόσο για τα συνολικά, όσο και για τα επιμέρους στάδια του κύκλου ζωής, και για τους δώδεκα δείκτες επιπτώσεων. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης παρουσιάζονται παρακάτω ανά σενάριο Β,Γ,Δ.

- **ΣΕΝΑΡΙΟ Β**

Στην Εικόνα 5.5 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του σεναρίου Β, το οποίο περιλαμβάνει την ενσωμάτωση σκωρίας σε αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών και της μεταβολής των περιβαλλοντικών δεικτών σε σχέση με το σενάριο αναφοράς.

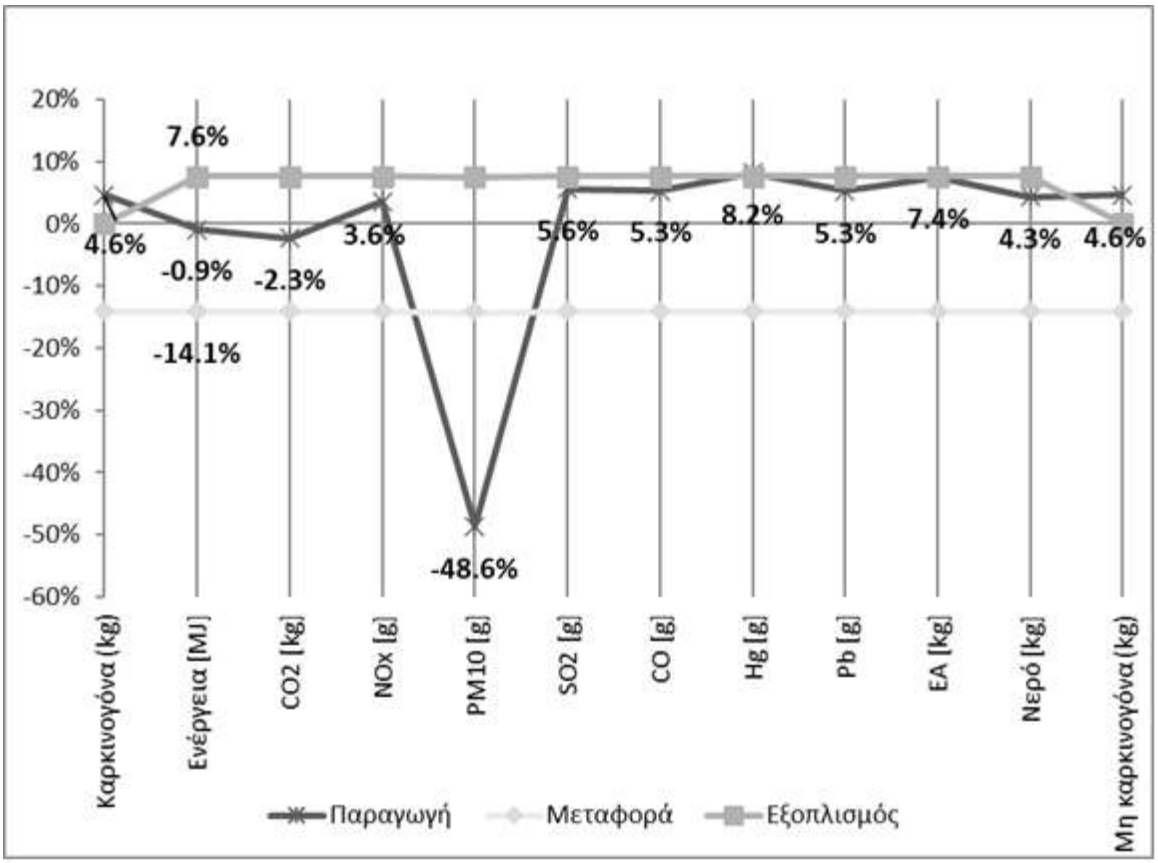


Εικόνα 5.5 Συνολική απόδοση σεναρίου Β, συγκρινόμενο με το σενάριο αναφοράς Α

Παρατηρούμε ότι κάποιοι δείκτες παρουσιάζουν ποσοστιαία αύξηση και κάποιοι άλλοι ποσοστιαία μείωση. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει ποσοστιαία μείωση στους εξής πέντε δείκτες: 'Καρκινογόνα-τοξικότητα για τον άνθρωπο', 'Κατανάλωση ενέργειας', 'Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)', 'Οξείδια του αζώτου (NO_x)' και 'Αιωρούμενα σωματίδια (PM_{10})', με

μέσο όρο -10.2%. Αντίθετα, υπάρχει ποσοστιαία αύξηση σε επτά δείκτες με μέσο όρο +3.5%. Οι δείκτες που παρουσιάζουν ποσοστιαία αύξηση είναι οι: 'Διοξείδιο του θείου (SO_2)', 'Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)', 'Υδράργυρος (Hg)', 'Μόλυβδος (Pb)', 'Επικίνδυνα Απόβλητα', 'Κατανάλωση νερού', 'Μη καρκινογόνα- τοξικότητα για τον άνθρωπο'.

Αυτές οι συνολικές ποσοστιαίες μεταβολές οφείλονται από τα επιμέρους στάδια του κύκλου ζωής 'Παραγωγή', 'Μεταφορά' και 'Εξοπλισμός'. Η μέση ποσοστιαία μεταβολή για τους δώδεκα περιβαλλοντικούς δείκτες υπολογίστηκε ίση με -2.2% και μπορεί να θεωρηθεί ένδειξη μιας γενικά καλύτερης απόδοσης του μίγματος Β σε σχέση με το Α. Αυτή οφείλεται στην κατά μέσο όρο αύξηση στο στάδιο της παραγωγής κατά 1.3% και του εξοπλισμού κατά 0.02%, η οποία όμως αντισταθμίζεται από την μείωση στο στάδιο της μεταφοράς κατά -3,5%. Η ανάλυση των ποσοστιαίων μεταβολών ανά στάδιο (δηλαδή παραγωγή, μεταφορά και εξοπλισμό) φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 5.6 Επιρροή του κάθε σταδίου στην απόδοση-Σενάριο Β

Παρατηρούμε ότι για τα στάδια 'Μεταφορά' και 'Εξοπλισμός' οι ποσοστιαίες μεταβολές είναι σταθερές για κάθε δείκτη, ενώ η μεταφορά παρουσιάζει ποσοστιαία μείωση, σε

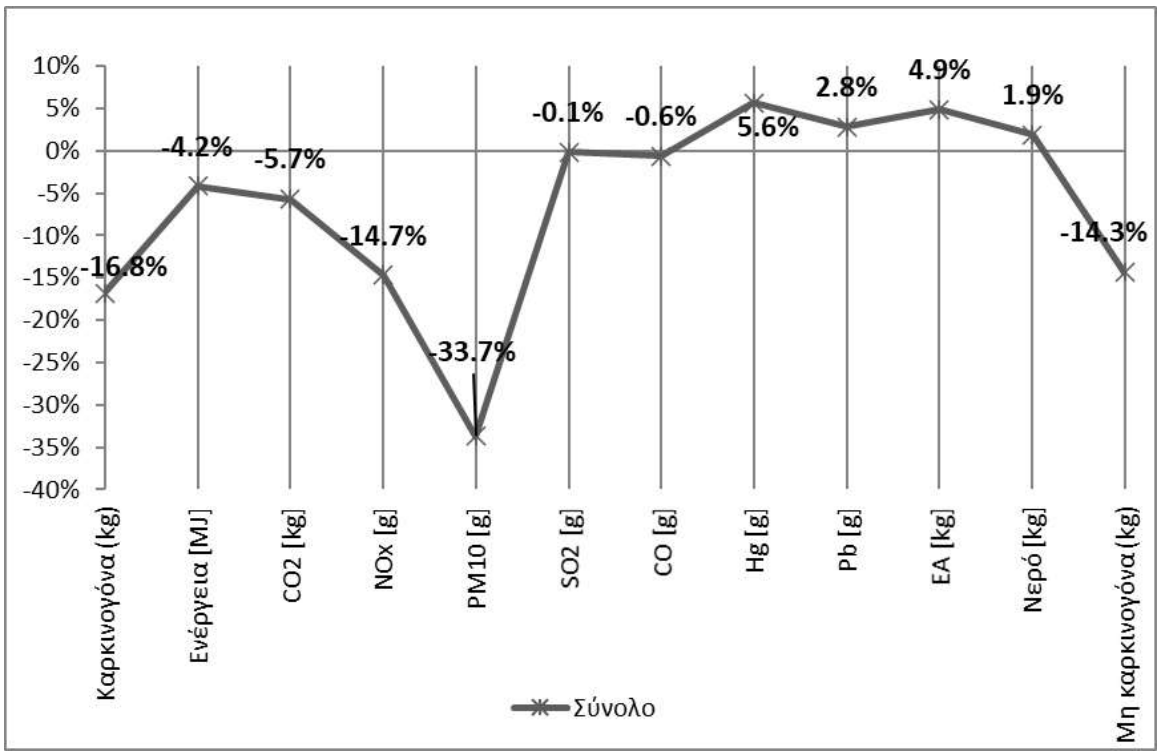
αντίθεση με τον εξοπλισμό που παρουσιάζει ποσοστιαία αύξηση. Το ποσοστό αυτό για την μεταφορά είναι μείωση -14.1%, ενώ για τον εξοπλισμό αύξηση +7.6%.

Για το στάδιο της παραγωγής, βλέπουμε ότι υπάρχουν διαφορές ανά δείκτη. Πιο συγκεκριμένα, έχουμε μείωση τριών δεικτών και αύξηση των υπόλοιπων εννιά. Οι δείκτες που μειώνονται είναι οι : 'Κατανάλωση ενέργειας', 'Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)' και 'Αιωρούμενα σωματίδια (PM_{10})'. Ο μέσος όρος των δύο πρώτων δεικτών είναι -1.6% και ξεχωρίζει η πολύ μεγάλη μείωση ίση με -48.6% για τον δείκτη 'Αιωρούμενα σωματίδια (PM_{10})'. Για τους δείκτες που παρουσιάζουν αύξηση, ο μέσος όρος διαμορφώνεται στο +5.4% και θα λέγαμε ότι δεν παρουσιάζει έντονη διακύμανση των τιμών.

Η μείωση κατά το στάδιο της μεταφοράς αποδίδεται στη μικρότερη απόσταση μεταφοράς της σκωρίας χαλυβουργίας σε σχέση με την αντίστοιχη των συμβατικών χονδρόκοκκων αδρανών. Οι μειώσεις κατά το στάδιο της παραγωγής οφείλονται στην μείωση των αδρανών που χρησιμοποιείται στο μίγμα, ενώ οι αυξήσεις στην αύξηση της ποσότητας ασφάλτου στο εναλλακτικό μίγμα Β. Όσο για την αύξηση κατά το στάδιο του εξοπλισμού, αυτή αποδίδεται στην αύξηση της πυκνότητας του ασφαλτομίγματος.

− ΣΕΝΑΡΙΟ Γ

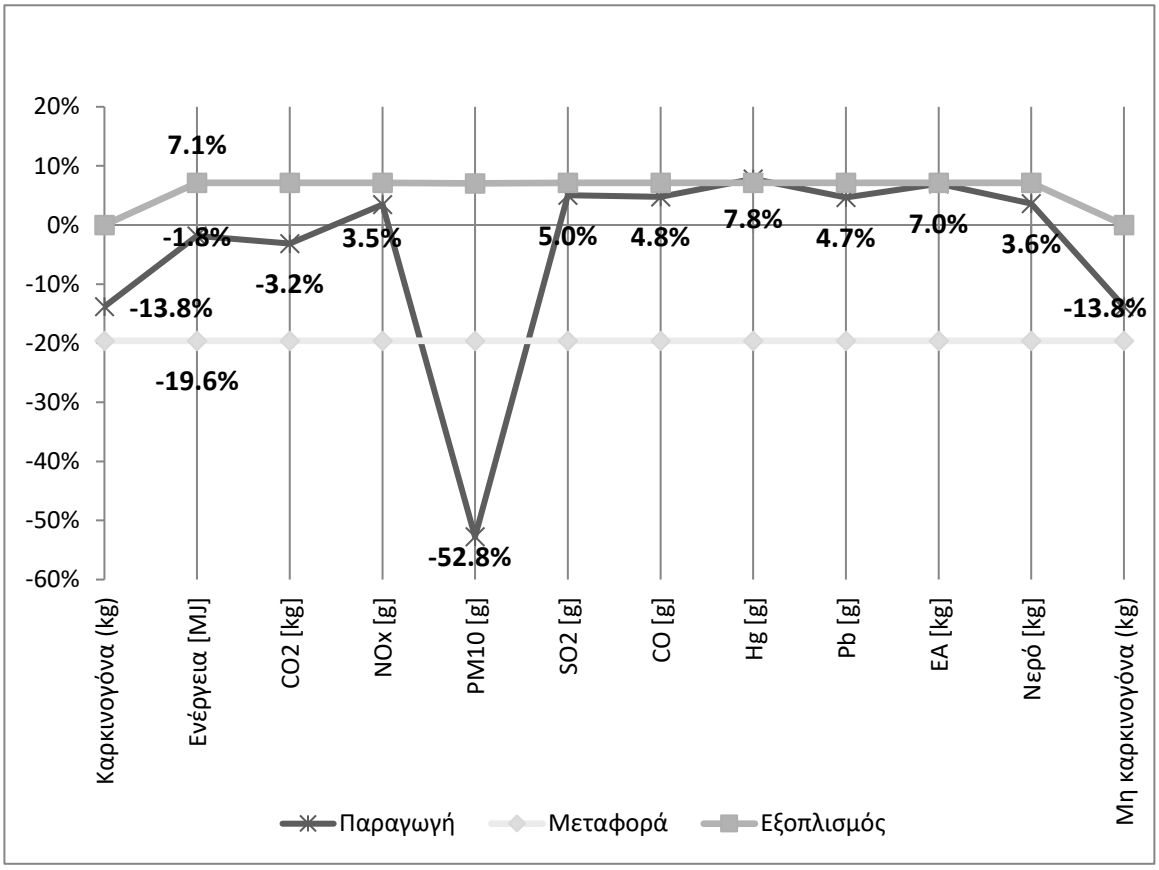
Αντίστοιχα, στην Εικόνα 5.7 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του σεναρίου Γ, το οποίο περιλαμβάνει την ενσωμάτωση συνδυαστικά σκωρίας και ανακτημένου ασφαλτικού οδοστρώματος σε ποσοστό 10% σε αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών και της μεταβολής των περιβαλλοντικών δεικτών σε σχέση με το σενάριο αναφοράς.



Εικόνα 5.7 Συνολική απόδοση σεναρίου Γ, συγκρινόμενο με το σενάριο αναφοράς Α

Παρατηρούμε ότι όμοια με το προηγούμενο σενάριο Β, κάποιοι δείκτες παρουσιάζουν ποσοστιαία αύξηση και κάποιοι άλλοι ποσοστιαία μείωση. Όμως, με την προσθήκη RAP, παρατηρούμε πλέον ποσοστιαία μείωση σε οκτώ δείκτες αντί πέντε σε σχέση με το σενάριο Β. Αυτοί είναι όμοια με πριν οι: 'Καρκινογόνα-τοξικότητα για τον άνθρωπο', 'Κατανάλωση ενέργειας', 'Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)', 'Οξείδια του αζώτου (NO_x)', 'Αιωρούμενα σωματίδια (PM_{10})' και επιπλέον οι: 'Διοξείδιο του θείου (SO_2)', 'Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)' και 'Μη καρκινογόνα- τοξικότητα για τον άνθρωπο'. με μέσο όρο -11.3%. Αντίθετα, υπάρχει ποσοστιαία αύξηση σε τέσσερις δείκτες με μέσο όρο +3.8%. Οι δείκτες που παρουσιάζουν ποσοστιαία αύξηση είναι οι 'Υδράργυρος (Hg)', 'Μόλυβδος (Pb)', 'Επικίνδυνα Απόβλητα' και 'Κατανάλωση νερού'.

Αυτές οι συνολικές ποσοστιαίες μεταβολές οφείλονται από τα επιμέρους στάδια του κύκλου ζωής 'Παραγωγή', 'Μεταφορά' και 'Εξοπλισμός'. Η μέση ποσοστιαία μεταβολή για τους δώδεκα περιβαλλοντικούς δείκτες υπολογίστηκε ίση με -6,2%, δηλαδή η προσθήκη RAP στο μίγμα προσέφερε επιπλέον οφέλη σε σχέση με το μίγμα Β ίσα με -4%. Τα οφέλη προέκυψαν από την κατά μέσο όρο μείωση στο στάδιο της παραγωγής κατά -1.4% και της μεταφοράς κατά -4,9%, οι οποίες σαφώς υπερτερούν της ελάχιστης αύξησης της τάξης του 0.02% στο στάδιο του εξοπλισμού. Η ανάλυση των ποσοστιαίων μεταβολών ανά στάδιο (δηλαδή παραγωγή, μεταφορά και εξοπλισμό) φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 5.8 Επιρροή του κάθε σταδίου στην απόδοση-Σενάριο Γ

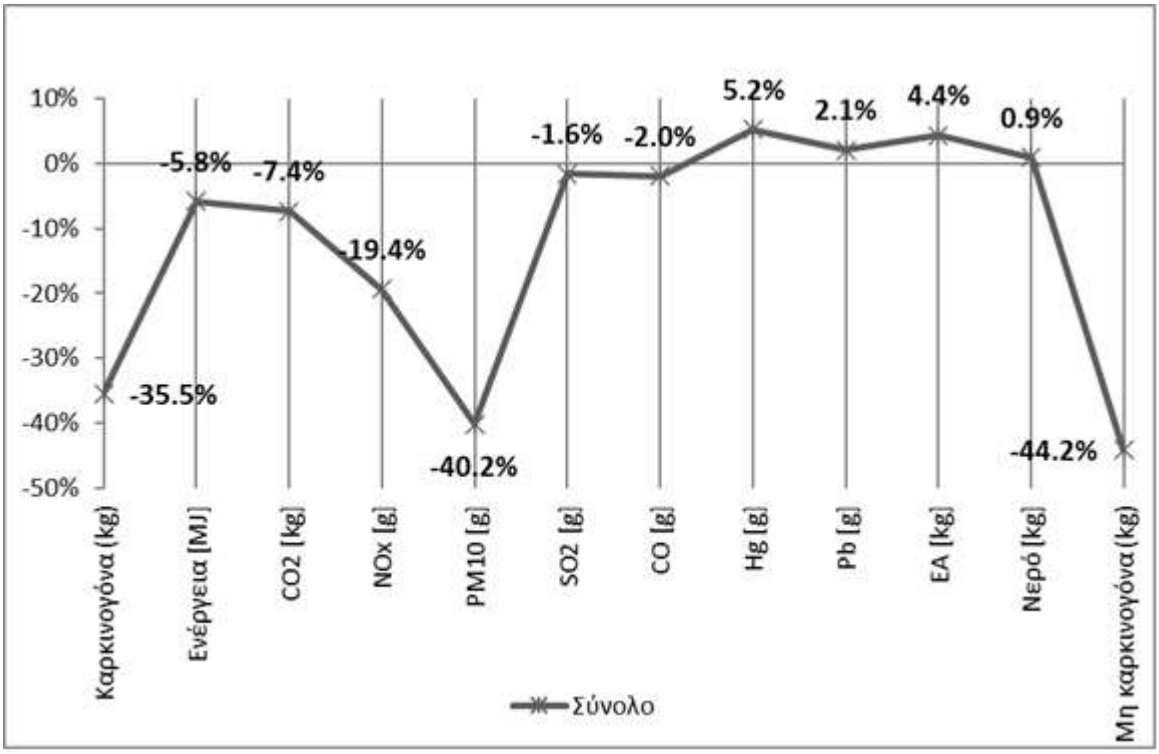
Παρατηρούμε ότι για τα στάδια 'Μεταφορά' και 'Εξοπλισμός', που οι ποσοστιαίες μεταβολές είναι σταθερές για κάθε δείκτη, έχουμε πάλι ποσοστιαία μείωση για την μεταφορά και ποσοστιαία αύξηση για τον εξοπλισμό. Το ποσοστό αυτό για την μεταφορά είναι μείωση -19.6%, ενώ για τον εξοπλισμό αύξηση +7.1%, που διαφέρουν κατά -5.5% και -0.5% από το προηγούμενο σενάριο Β.

Για το στάδιο της παραγωγής, βλέπουμε ότι υπάρχουν διαφορές ανά δείκτη. Πιο συγκεκριμένα, έχουμε μείωση πέντε δεικτών αντί τριών στο σενάριο Β και αύξηση των υπόλοιπων επτά. Οι δείκτες που μειώνονται είναι όμοια με πριν οι : 'Κατανάλωση ενέργειας', 'Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)', 'Αιωρούμενα σωματίδια (PM_{10})' και επιπλέον οι: 'Μη καρκινογόνα-τοξικότητα για τον άνθρωπο' και 'Καρκινογόνα-τοξικότητα για τον άνθρωπο'. Ο μέσος όρος αυτών των δεικτών είναι -8.1%, εκτός από τη πολύ μεγάλη μείωση ίση με -52.8% για τον δείκτη 'Αιωρούμενα σωματίδια (PM_{10})'. Για τις αυξήσεις, ο μέσος όρος διαμορφώνεται στο +5.2% και θα λέγαμε ότι δεν παρουσιάζει έντονη διακύμανση των τιμών.

Η μείωση κατά το στάδιο της μεταφοράς αποδίδεται στις σημαντικά μικρότερες αποστάσεις μεταφοράς της σκωρίας χαλυβουργίας και του RAP σε σχέση με την αντίστοιχη των συμβατικών χονδρόκοκκων αδρανών. Οι ποσοστιαίες μειώσεις κατά το στάδιο της παραγωγής οφείλονται στην μείωση των συμβατικών αδρανών που χρησιμοποιούνται, ενώ οι ποσοστιαίες αυξήσεις στην αύξηση της ποσότητας ασφάλτου στο εναλλακτικό μίγμα Γ. Όσο για την αύξηση κατά το στάδιο του εξοπλισμού, αυτή αποδίδεται στην αύξηση της πυκνότητας του ασφαλτομίγματος.

− ΣΕΝΑΡΙΟ Δ

Τέλος, στην Εικόνα 5.9 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του σεναρίου Δ, το οποίο περιλαμβάνει την ενσωμάτωση συνδυαστικά σκωρίας και ανακτημένου ασφαλτικού οδοστρώματος σε ποσοστό 25% σε αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών και της μεταβολής των περιβαλλοντικών δεικτών σε σχέση με το σενάριο αναφοράς.

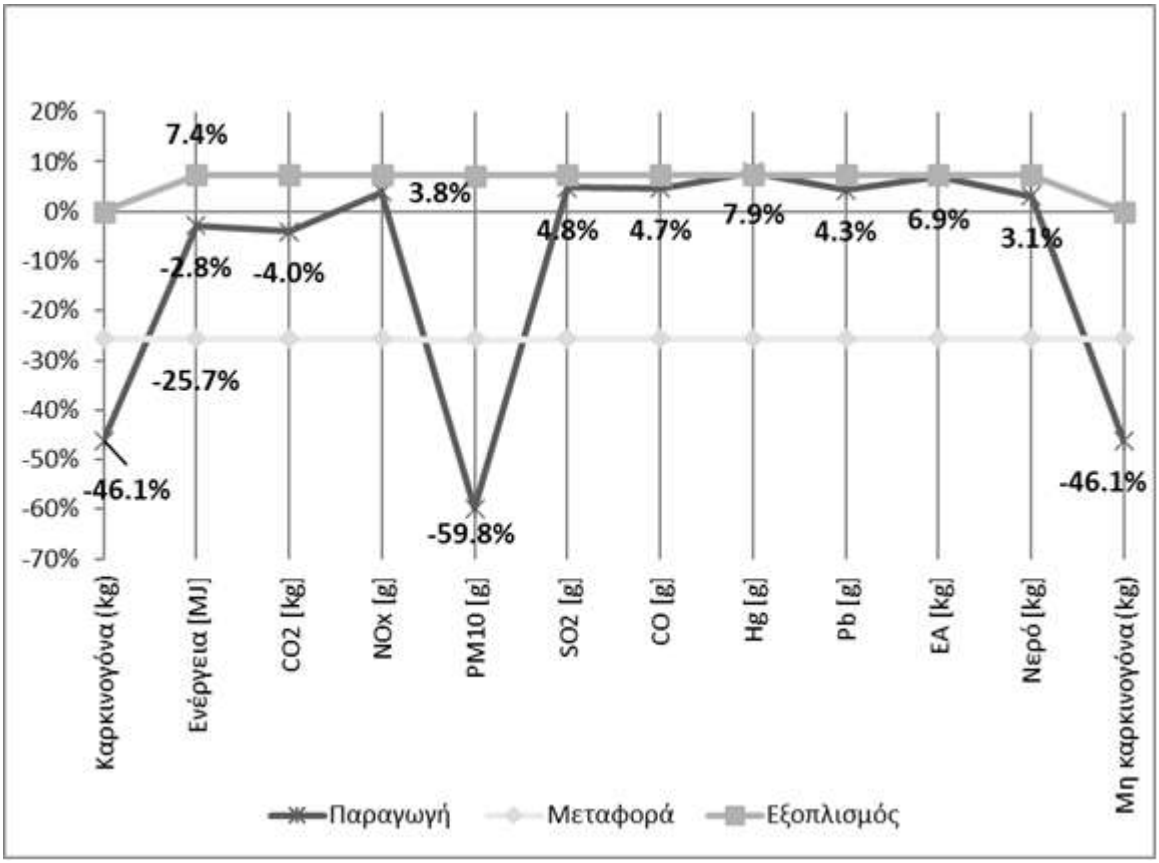


Εικόνα 5.9 Συνολική απόδοση σεναρίου Δ, συγκρινόμενο με το σενάριο αναφοράς Α

Παρατηρούμε ότι όμοια με το προηγούμενο σενάριο Γ, υπάρχει ποσοστιαία μείωση στους εξής οκτώ δείκτες: 'Καρκινογόνα-τοξικότητα για τον άνθρωπο', 'Κατανάλωση ενέργειας', 'Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)', 'Οξείδια του αζώτου (NO_x)', 'Αιωρούμενα σωματίδια (PM_{10})', 'Διοξείδιο του θείου (SO_2)', 'Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)' και 'Μη καρκινογόνα-τοξικότητα για τον άνθρωπο με μέσο όρο -19,5%. Επίσης, υπάρχει ποσοστιαία αύξηση σε τέσσερις δείκτες με μέσο όρο +3.1%. Οι δείκτες που παρουσιάζουν ποσοστιαία αύξηση είναι οι 'Υδράργυρος (Hg)', 'Μόλυβδος (Pb)', 'Επικίνδυνα Απόβλητα' και 'Κατανάλωση νερού'.

Η μέση ποσοστιαία μεταβολή για τους δώδεκα περιβαλλοντικούς δείκτες υπολογίστηκε ίση με -12%, δηλαδή η αύξηση RAP στο μίγμα μείωσε τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά μέσο όρο - 5.7% σε σχέση με το μίγμα Γ. Η πτώση ίση με -12% οφείλεται στην κατά

μέσο όρο μείωση στο στάδιο της παραγωγής κατά -5.6% και της μεταφοράς κατά -6,4%, οι οποίες σαφώς υπερτερούν της ελάχιστης αύξησης της τάξης του 0.02% στο στάδιο του εξοπλισμού. Στη συνέχεια, η ανάλυση των ποσοστιαίων μεταβολών ανά στάδιο (δηλαδή παραγωγή, μεταφορά και εξοπλισμό) φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 5.10 Επιρροή του κάθε σταδίου στην απόδοση-Σενάριο Δ

Παρατηρούμε ότι για τα στάδια 'Μεταφορά' και 'Εξοπλισμός', που οι ποσοστιαίες μεταβολές είναι σταθερές για κάθε δείκτη, έχουμε πάλι ποσοστιαία μείωση για την μεταφορά και ποσοστιαία αύξηση για τον εξοπλισμό, ίση με -25.7% και +7.4%, αντίστοιχα. Συνεπώς συμπεραίνουμε ότι η χρήση περισσότερου RAP, απέδωσε επιπλέον περιβαλλοντικά οφέλη για το στάδιο της μεταφοράς ίσα με -6.1% σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο Γ. Αντίθετα, για το στάδιο του εξοπλισμού παρουσιάζεται αύξηση +0.3% σε σχέση με το σενάριο Γ, που αποδίδεται στον μεγαλύτερο όγκο υλικών (κατά 1.3m^3) του ασφαλτομίγματος Δ, που επιβαρύνει τις κατασκευαστικές διαδικασίες.

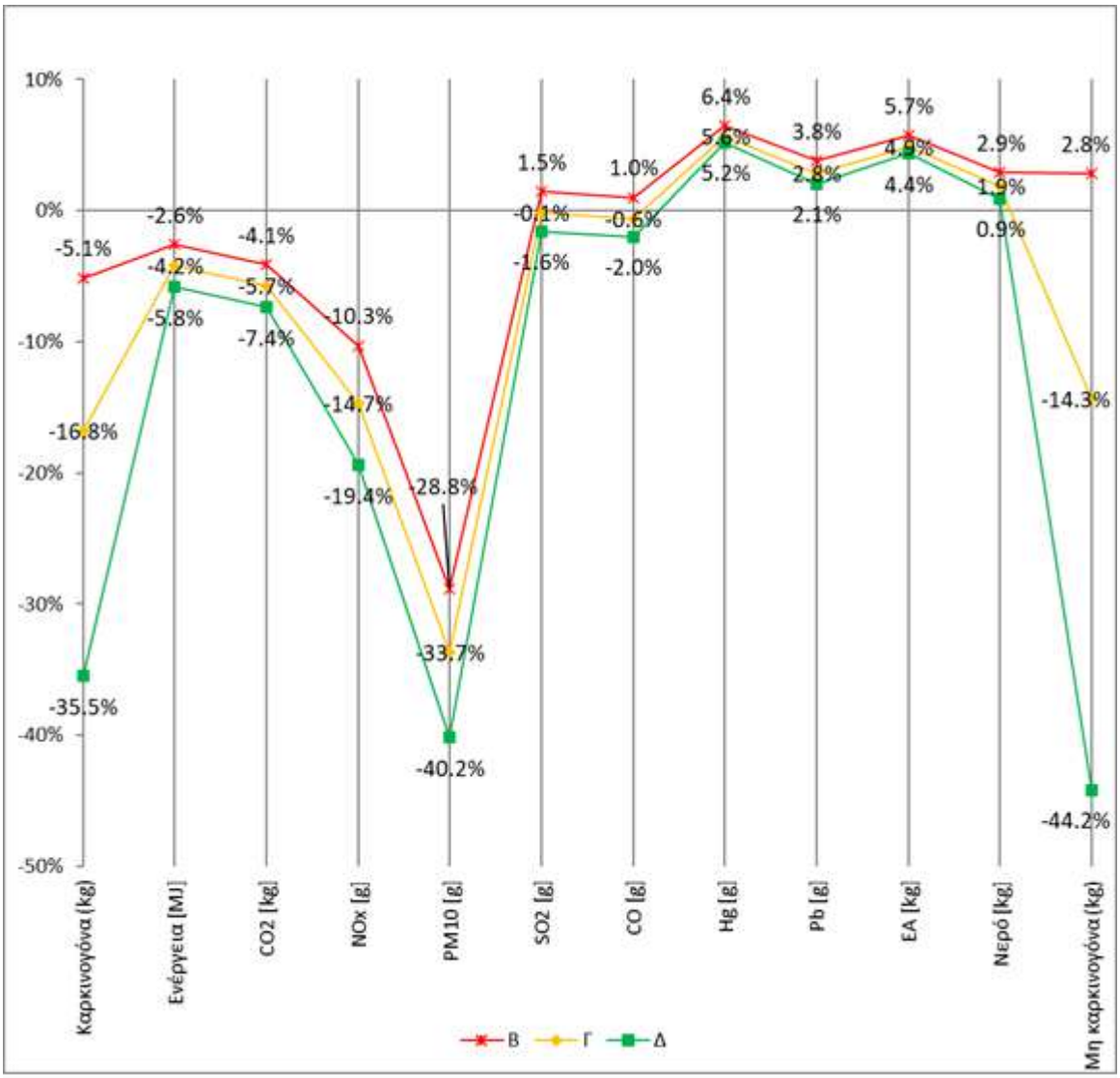
Για το στάδιο της παραγωγής, βλέπουμε ότι υπάρχουν διαφορές ανά δείκτη. Πιο συγκεκριμένα, έχουμε μείωση πέντε δεικτών και αύξηση των υπόλοιπων επτά, όμοια με

το σενάριο Γ. Οι δείκτες που μειώνονται είναι όμοια με το σενάριο Γ οι : ‘Κατανάλωση ενέργειας’, ‘Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)’, ‘Αιωρούμενα σωματίδια (PM_{10})’, ‘Μη καρκινογόνα-τοξικότητα για τον άνθρωπο’ και ‘Καρκινογόνα-τοξικότητα για τον άνθρωπο’. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν έντονη διακύμανση, με τους δείκτες ‘Κατανάλωση ενέργειας’ και ‘Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) να έχουν μέσο όρο -3.4%, σε αντίθεση με τους υπόλοιπους τρεις που έχουν μέσο όρο -50.7%. Για τις αυξήσεις, ο μέσος όρος διαμορφώνεται στο +5.1% και θα λέγαμε ότι δεν παρουσιάζει έντονη διακύμανση των τιμών.

Όπως και στην ανάλυση του μίγματος Γ, η μείωση κατά το στάδιο της μεταφοράς αποδίδεται στις σημαντικά μικρότερες αποστάσεις μεταφοράς της σκωρίας χαλυβουργίας και του RAP σε σχέση με την αντίστοιχη των συμβατικών χονδρόκοκκων αδρανών.. Έτσι λοιπόν, η χρήση περισσότερου RAP συνεπάγεται σημαντική μείωση των δεικτών για την μεταφορά, τουλάχιστον για τα Ελληνικά δεδομένα. Οι ποσοστιαίες μειώσεις κατά το στάδιο της παραγωγής οφείλονται στην μείωση των συμβατικών αδρανών που χρησιμοποιούνται, ενώ οι ποσοστιαίες αυξήσεις στην αύξηση της ποσότητας ασφάλτου στο εναλλακτικό μίγμα Δ. Όσο για την αύξηση κατά το στάδιο του εξοπλισμού, αυτή αποδίδεται στην αύξηση της πυκνότητας του ασφαλτομίγματος, η οποία δυσχεραίνει τις κατασκευαστικές διαδικασίες.

5.1.3 Συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των εναλλακτικών σεναρίων

Εάν τοποθετήσουμε σε ένα διάγραμμα τις συνολικές επιδόσεις για τους δώδεκα δείκτες των εναλλακτικών μιγμάτων σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς, προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα (Εικ. 5.11), απ' το οποίο φαίνεται εύκολα ότι το μίγμα Δ υπερτερεί των άλλων δύο εναλλακτικών μιγμάτων Β,Γ για όλους τους δείκτες.

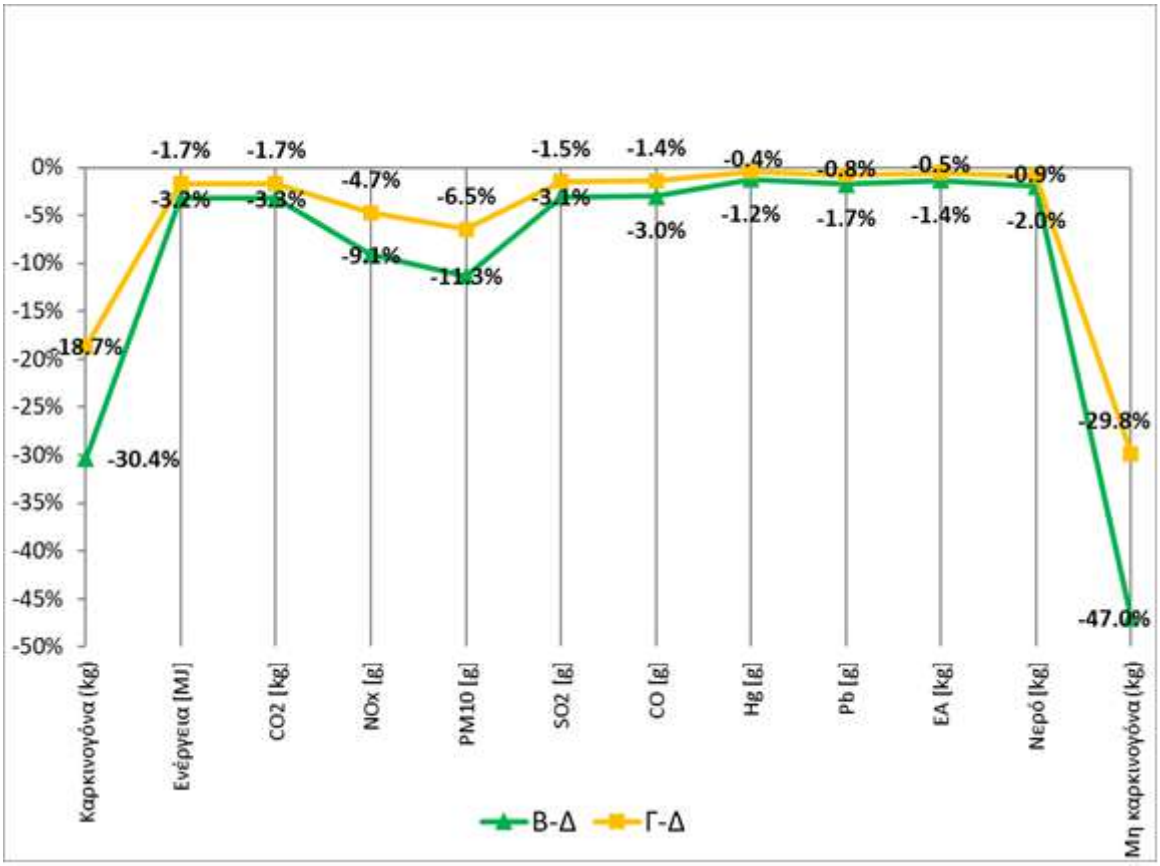


Εικόνα 5.11 Περιβαλλοντική απόδοση εναλλακτικών ασφαλτομιγμάτων σε σύγκριση με το συμβατικό

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η ποσοστιαία διαφορά του μίγματος Δ με την καλύτερη απόδοση, με τα άλλα δύο εναλλακτικά Β,Γ και τοποθετείται σχηματικά σε γράφημα (Εικ. 5.12). Από τον εν λόγω γράφημα, λαμβάνουμε το συμπέρασμα οι ποσοστιαίες διαφορές

κινούνται μεταξύ (-1.24%, -46.98%) για το μίγμα Β, και (-29.83%, -0.44%) για το μίγμα Γ. Συμπερασματικά, το μίγμα Δ υπερτερεί των άλλων δύο εναλλακτικών μιγμάτων κατά μέσες ποσοστιαίες μονάδες:

- **-9,7%** σε σχέση με το Β και,
- **-5,7%** σε σχέση με το Γ



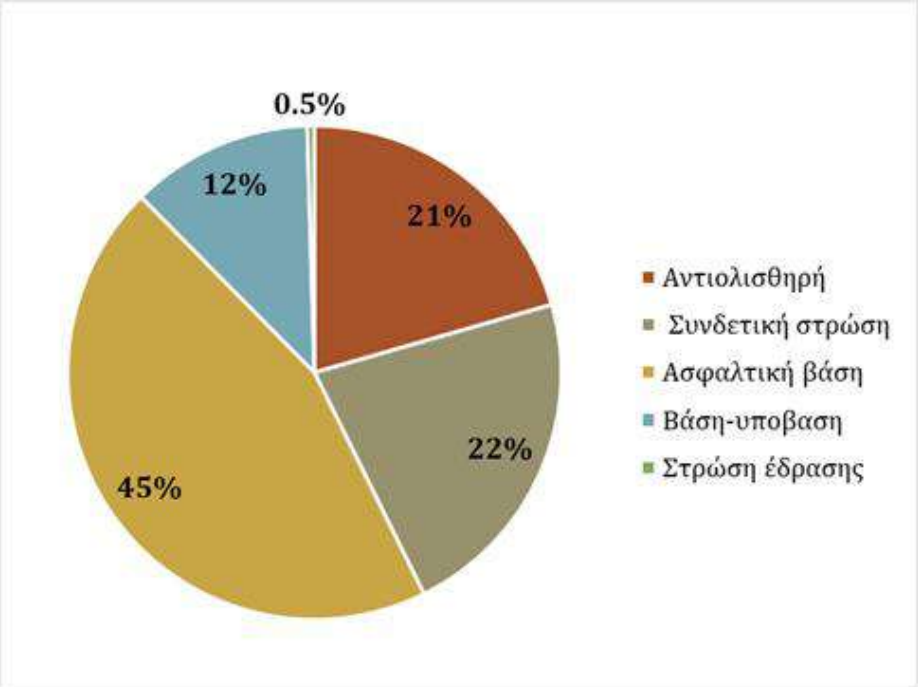
Εικόνα 5.12 Σύγκριση περιβαλλοντικής απόδοσης μεταξύ των εναλλακτικών ασφαλτομιγμάτων

Τα οφέλη του μίγματος Δ σε σχέση με τα εναλλακτικά μίγματα προκύπτουν κατά κύριο λόγο από την μείωση των συμβατικών αδρανών στο μίγμα. Τα ανωτέρω οφέλη λοιπόν συνδέονται άμεσα με την με την μείωση της μάζας συμβατικών αδρανών στο μίγμα ίσης με -48% για το μίγμα Β και -38% για το Γ.

5.2 Διατομή Οδοστρώματος

Στην προηγούμενη υποενότητα, εξετάσαμε το πως επηρεάζει η προσθήκη εναλλακτικών υλικών στο ασφαλτόμιγμα της αντιολισθηρής στρώσης, την αυτή καθ' αυτή την στρώση. Σε αυτό το σημείο, διευρύνουμε το πεδίο, θέλοντας να υπολογίσουμε την επίδραση των διαφόρων σεναρίων στο συνολικό οδόστρωμα.

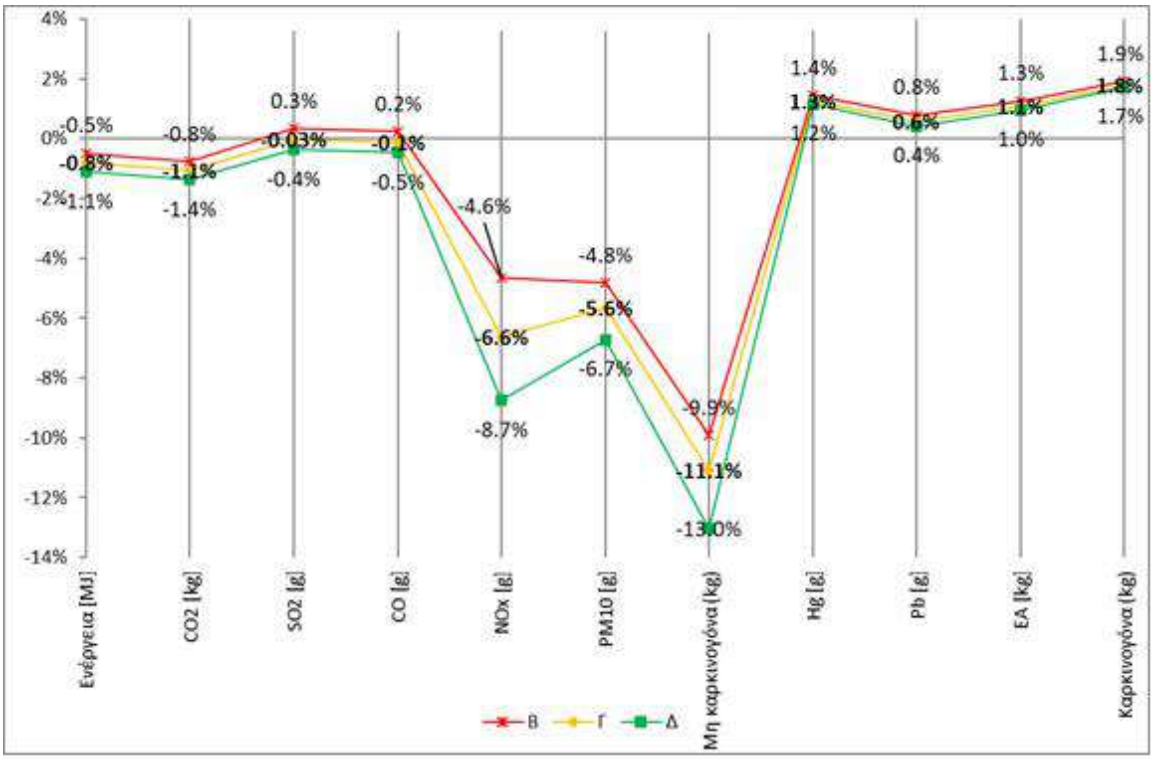
Από την σχετική επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η αντιολισθηρή στρώση επιδρά στο συνολικό αντίκτυπο του οδοστρώματος κατά μέσο όρο 21%. Η κατανομή των επιπτώσεων στις επιμέρους στρώσεις του οδοστρώματος, παρουσιάζεται σε μορφή πίτας στην Εικ. 5.13. Συνεπώς, αναμένουμε μειωμένα οφέλη για την συνολική διατομή σε σχέση με την προηγούμενη ανάλυση σε επίπεδο οδοστρώματος. Η μόνη εξαίρεση αυτής της κατανομής που φαίνεται στο σχήμα είναι ο δείκτης 'Οξείδια του αζώτου (NO_x)' για τον οποίο η αντιολισθηρή στρώση ευθύνεται κατά περίπου 45%.



Εικόνα 5.13 Επιρροή κάθε στρώσης στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα του οδοστρώματος

Τα τρία εναλλακτικά οδοστρώματα, συγκρίνονται με το οδόστρωμα του σεναρίου αναφοράς Α. Οι ποσοστιαίες διαφορές των οδοστρωμάτων υπολογίζονται και

παρουσιάζονται σε γράφημα (Εικ. 5.14). Παρατηρούμε ότι με τα εναλλακτικά υλικά μπορούμε να πετύχουμε μείωση με μέσο όρο -0.9% για τους δείκτες 'Κατανάλωση ενέργειας' και 'Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)' για το συνολικό οδόστρωμα. Για τους δείκτες 'Διοξείδιο του θείου (SO_2)' και 'Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)', με το σενάριο Β δεν πετυχαίνουμε μείωση, ενώ με τα Γ,Δ (προσθήκη RAP) πετυχαίνουμε μείωση -0.2%. Για τους επόμενους τρεις δείκτες, δηλαδή τους: 'Οξείδια του αζώτου (NOx)', 'Αιωρούμενα σωματίδια (PM10)' και 'Μη καρκινογόνα- τοξικότητα για τον άνθρωπο', χρησιμοποιώντας εναλλακτικά αδρανή καταφέρνουμε μειώσεις της τάξης του -7.9%. Τέλος, για τους δείκτες: 'Καρκινογόνα-τοξικότητα για τον άνθρωπο', 'Υδράργυρος (Hg)', 'Μόλυβδος (Pb)' και 'Επικίνδυνα Απόβλητα', τα εναλλακτικά οδοστρώματα δεν εμφανίζουν οφέλη, καθώς παρουσιάζουν αύξηση με μέσο όρο +1%.

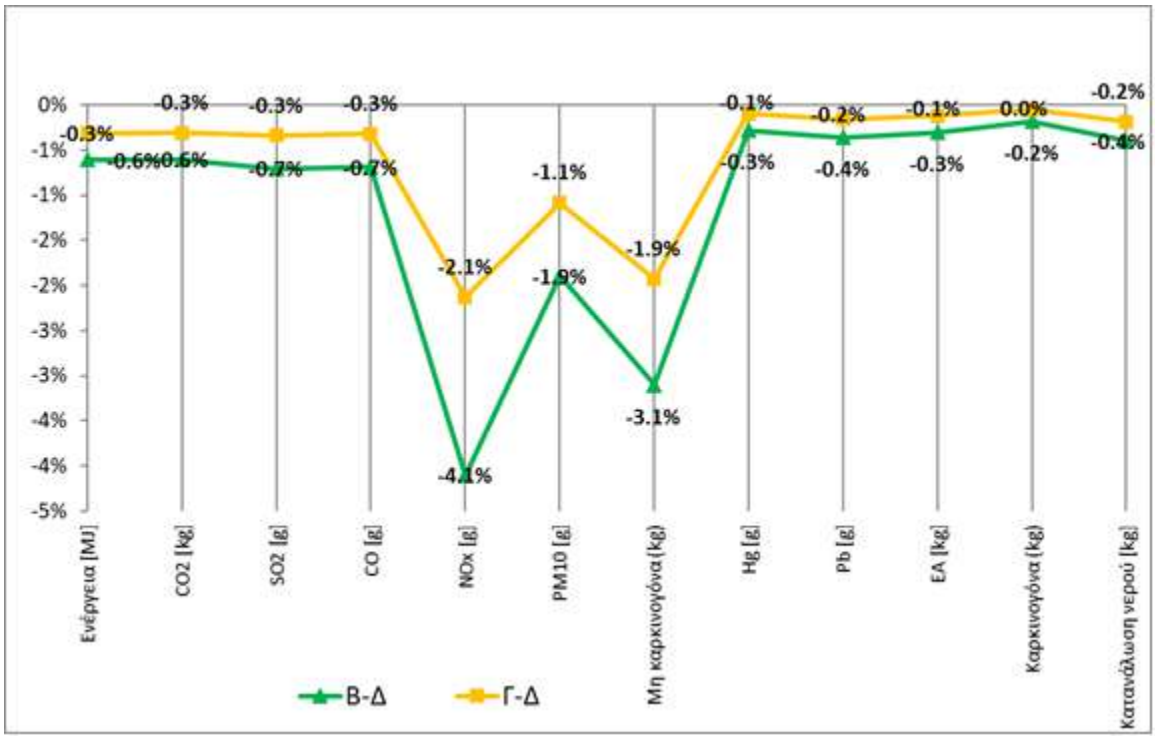


Εικόνα 5.14 Περιβαλλοντική απόδοση εναλλακτικών οδοστρωμάτων σε σύγκριση με το συμβατικό

Βέβαια, απ' το παραπάνω γράφημα φαίνεται επίσης, το αναμενόμενο, ότι το οδόστρωμα Δ έχει την καλύτερη απόδοση συγκριτικά με τα άλλα δύο εναλλακτικά Β, Γ. Υπολογίζοντας τις ποσοστιαίες διαφορές του οδοστρώματος Δ με τα άλλα δύο εναλλακτικά προκύπτει το παρακάτω γράφημα (Εικ. 5.15), απ' όπου φαίνονται τα οφέλη που παρουσιάζει το

οδόστρωμα Δ. Το οδόστρωμα Δ υπερτερεί των άλλων δύο εναλλακτικών οδοστρωμάτων κατά μέσες ποσοστιαίες μονάδες:

- **-1,1%** σε σχέση με το Β,
- **-0,6%** σε σχέση με το Γ



Εικόνα 5.15 Σύγκριση περιβαλλοντικής απόδοσης μεταξύ των εναλλακτικών σεναρίων σε επίπεδο οδοστρώματος

6 ΣΧΟΛΙΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εξετάστηκαν αναδυόμενες τεχνολογίες ασφαλτομιγμάτων με γνώμονα την περιβαλλοντική απόδοση τους. Στόχος της εργασίας ήταν η διερεύνηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ασφαλτομιγμάτων αντιολισθηρής στρώσης, που ενσωματώνουν εναλλακτικά αδρανή υλικά που προέρχονται από ανακυκλώσιμες πηγές ή παραπροϊόντα της βιομηχανίας, σε αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών λατομείων.

Για να εξυπηρετηθούν αυτοί οι στόχοι, δημιουργήθηκαν τέσσερα σενάρια ανάλυσης: ένα με συμβατικά υλικά που λειτουργεί ως σενάριο αναφοράς, ένα με σκωρία χαλυβουργίας και άλλα δύο με συνδυασμένη χρήση RAP και σκωρίας χαλυβουργίας σε διαφορετικά ποσοστά. Για κάθε σενάριο έγιναν αναλύσεις και αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων με βάση δώδεκα περιβαλλοντικούς δείκτες. Από την ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η χρήση σκωρίας χαλυβουργίας (σενάριο Β) είχε μεσοσταθμική επίπτωση **-2.2%** για τους δώδεκα δείκτες σε σχέση με το συμβατικό μίγμα**.** Συγκεκριμένα, παρουσίασε ποσοστιαία μείωση στους εξής πέντε δείκτες: 'Τοξικότητα-Καρκινογόνα', 'Κατανάλωση ενέργειας', 'Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)', 'Οξείδια του αζώτου (NO_x)', 'Αιωρούμενα σωματίδια (PM_{10})' και ποσοστιαία αύξηση σε επτά, τους εξής: 'Διοξείδιο του θείου (SO_2)', 'Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)', 'Υδράργυρος (Hg)', 'Μόλυβδος (Pb)', 'Επικίνδυνα Απόβλητα', 'Κατανάλωση νερού' και 'Τοξικότητα-Μη καρκινογόνα'. Αυτό το ποσοστό προκύπτει από την μεσοσταθμική αύξηση του σταδίου παραγωγής κατά 1.3%, η οποία αποδίδεται στην αύξηση της ποσότητας ασφάλτου στο εναλλακτικό μίγμα Β και αντισταθμίζεται από την μείωση στο στάδιο της μεταφοράς κατά -3,5%, η οποία αποδίδεται στη μικρότερη απόσταση μεταφοράς της σκωρίας χαλυβουργίας σε σχέση με την αντίστοιχη των συμβατικών χονδρόκοκκων αδρανών. Συνεπώς, το στάδιο που συνέβαλε καθοριστικά σε αυτό το αποτέλεσμα ήταν αυτό της μεταφοράς. Το στάδιο του εξοπλισμού αυξήθηκε ελάχιστα κατά 0.02% και οφείλεται στην αύξηση της πυκνότητας του ασφαλτομίγματος, η οποία δυσχεραίνει τις κατασκευαστικές διαδικασίες.

- Η προσθήκη RAP σε ποσοστό 10% συνδυαστικά με σκωρία χαλυβουργίας (σενάριο Γ) είχε μεσοσταθμική επίπτωση **-6.2%** για τους δώδεκα δείκτες σε σχέση με το συμβατικό μίγμα και συγκεκριμένα παρουσίασε ποσοστιαία μείωση σε τρεις επιπλέον

δείκτες σε σχέση με το σενάριο Β, τους: ‘Διοξείδιο του θείου (SO_2)’, ‘Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)’ και ‘Τοξικότητα-Μη καρκινογόνα’, δηλαδή οκτώ συνολικά. Με την προσθήκη RAP, παρατηρήθηκε μεσοσταθμική μείωση του σταδίου παραγωγής κατά -1.4%, σε αντίθεση με το σενάριο Β που υπήρξε αύξηση. Αυτή η μείωση συνδέεται με την μειωμένη απαίτηση για παραγωγή και χρήση συμβατικών αδρανών. Το στάδιο της μεταφοράς παρουσίασε μείωση κατά -4,9%, η οποία αποδίδεται στις σημαντικά μικρότερες αποστάσεις μεταφοράς του RAP και της σκωρίας χαλυβουργίας σε σχέση με την αντίστοιχη των συμβατικών χονδρόκοκκων αδρανών. Συμπερασματικά, και σε αυτό το σενάριο η μεταφορά συνέβαλε καθοριστικά στο τελικό αποτέλεσμα. Όμοια με το σενάριο Β, το στάδιο του εξοπλισμού αυξήθηκε αμελητέα κατά 0.02% και δεν επηρεάζει ουσιαστικά το αποτέλεσμα.

- Η αύξηση του ποσοστού RAP σε 25% συνδυαστικά με σκωρία χαλυβουργίας (σενάριο Δ) είχε μεσοσταθμική επίπτωση **-12%** για τους δώδεκα δείκτες σε σχέση με το συμβατικό μίγμα και συγκεκριμένα παρουσίασε, όμοια με το σενάριο Γ, ποσοστιαία μείωση στους ίδιους οκτώ δείκτες και ποσοστιαία αύξηση σε τέσσερις. Παρατηρήθηκε ακόμα μεγαλύτερη μεσοσταθμική μείωση για το στάδιο της παραγωγής, το οποίο διαμορφώθηκε σε -5.6% και προκλήθηκε από την μειωμένη απαίτηση για παραγωγή και χρήση συμβατικών αδρανών. Η μεσοσταθμική μείωση για το στάδιο της μεταφοράς ήταν -6,4% και οφείλεται στις σημαντικά μικρότερες αποστάσεις μεταφοράς της σκωρίας χαλυβουργίας και του RAP σε σχέση με την αντίστοιχη των συμβατικών χονδρόκοκκων αδρανών. Εκτός από το στάδιο της μεταφοράς, συμπεραίνουμε ότι και το στάδιο της παραγωγής συνέβαλαν καθοριστικά στο τελικό αποτέλεσμα για το σενάριο Δ. Τέλος, και για το σενάριο Δ, άρα για όλα τα σενάρια, το στάδιο του εξοπλισμού αυξήθηκε ελάχιστα κατά 0.02%, λόγω της αύξησης της πυκνότητας του ασφαλτομίγματος.

- Με τα εναλλακτικά υλικά παρατηρήθηκε μείωση λόγω της μειωμένης απαίτησης για παραγωγή και χρήση συμβατικών αδρανών, με κυριότερους δείκτες τους: ‘Οξείδια του αζώτου (NO_x)’, ‘Αιωρούμενα σωματίδια (PM_{10})’ και ‘Τοξικότητα-μη καρκινογόνα’, με μέσο όρο **-7.9%.** Όμως, παρατηρείται μικρή αύξηση της τάξης του **+1%** στους δείκτες ‘Υδράργυρος (Hg)’, ‘Μόλυβδος (Pb)’, ‘Επικίνδυνα Απόβλητα’ και Τοξικότητα-καρκινογόνα’, η οποία αποδίδεται στην αύξηση της ποσότητας ασφάλτου στα εναλλακτικά μίγματα. Επιπλέον, θα πρέπει να λαμβάνει κανείς υπόψη ότι οι αποστάσεις μεταφοράς των υλικών παίζουν σημαντικό ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα.

- Σε επίπεδο οδοστρώματος τα οφέλη αυτά μειώνονται σε -1.2% (από -2.2%) για το μίγμα Β, -1.7% (από -6.2%) για το μίγμα Γ και -2.3% (από -12%) για το μίγμα Δ. Η μείωση των οφελών οφείλεται στο μικρό πάχος της αντιολισθηρής στρώσης, σε σχέση με την συνολική διατομή του οδοστρώματος. Οι ασφαλτικές στρώσεις αναδείχτηκε ότι έχουν την μεγαλύτερη συμβολή στις επιπτώσεις σε σχέση με τις ασύνδετες, οι οποίες αποτελούν το 12% του περιβαλλοντικού αντικτύπου. Τέλος, επισημαίνεται ότι η ασφαλτική βάση συνέβαλλε κατά 45% στο συνολικό αντίκτυπο, συνεπώς προτείνεται η εξέταση και της ασφαλτικής βάσης, καθώς είναι πιθανό να επιφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη.

- Τα παραπάνω δείχνουν τη σημασία της LCA στη λήψη αποφάσεων και στην ανάδειξη στόχων για περαιτέρω βελτίωση των περιβαλλοντικών οφελών.

- Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων προϋποθέτει έγκυρα δεδομένα και μοντέλα ανάλυσης, τα οποία θα περιγράφουν επαρκώς τις επιπτώσεις των οδοστρωμάτων, ενσωματώνοντας όλα τα στάδια του κύκλου ζωής. Μια τέτοια ανάλυση θα έδινε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις στον κύκλο ζωής του οδοστρώματος. Σε αντιστοιχία, προτείνεται επίσης η ανάλυση να περιλαμβάνει και άλλες πτυχές της βιωσιμότητας, δηλαδή οικονομικούς ή και κοινωνικούς παράγοντες πέρα από περιβαλλοντικούς. Διεξαγωγή ανάλυσης κόστους ζωής (LCCA) ή ακόμα και πλήρη ανάλυση βιωσιμότητας (LCSA), θα έδινε πιο ολοκληρωμένα συμπεράσματα και θα άνοιγε τον δρόμο για την επίτευξη πιο βιώσιμων οδοστρωμάτων.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Anastasiou, E., Liapis, A., & Papayianni, I. (2015). Comparative life cycle assessment of concrete road pavements using industrial by-products as alternative materials. *Resources Conservation and Recycling, 101*, 1-8.

Aurangzeb, Q., Al-Qadi, I., Ozer, H., & Yang, R. (2014). Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. *Resources Conservation and Recycling, 83*, 77-86.

Brundtland, G. (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future.* United Nations General Assembly .

EAPA (2020). *Asphalt in Figures 2018.* European Asphalt Pavement Association (EAPA), Brussels, Belgium.

EEA (2019). *Greenhouse gas emissions from transport in Europe.* European Environment Agency (EEA), https://www.eea.europa.eu/.

EPA (2018). *Report on the Environment-Lead Emissions.* Environmental Protection Agency (EPA), https://www.epa.gov/report-environment.

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

Eurostat (2020). *Sustainable Development in the European Union. Monitoring report on progress towards the SDGs in an EU context.* Eurostat, Imprimerie Bietlot, Belgium.

FHWA (2014). *Pavement Sustainability.* Federal Highway Administration (FHWA), FHWA-HIF-14-012.

Giani, M., Dotelli, G., Brandini, N., & Zampori, L. (2015). Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. *Resources Conservation and Recycling, 104*, 224-238.

Harvey, J., Meijer, J., Ozer, H., et al. (2016). *Pavement Life-Cycle Assessment Framework.* Federal Highway Administration (FHWA), FHWA-HIF-16-014, Washington, DC.

Hasan, U., Whyte, A., & Jassmi, H. (2020). Life cycle assessment of roadworks in United Arab Emirates: Recycled construction waste, reclaimed asphalt pavement, warm-

mix asphalt and blast furnace slag use against traditional approach. *Journal of Cleaner Production, 257*, 120531.

Horowitz (2016). Paris Agreement. International Legal Materials 55(4)., 740-755.

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

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

NAPA (2009). *How to Increase RAP Usage and Ensure Pavement Performance.* National Asphalt Pavement Association (NAPA), Lanham, Maryland.

Nathman, R., McNeil, S., & Dam, T. (2009). Integrating Environmental Perspectives into Pavement Management: Adding the Pavement Life-Cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects to the Decision-Making Toolbox. *Transportation Research Record, 2093*, 40-49.

Pasetto, M., Pasquini, E., Giacomello, G., & Baliello, A. (2017). *Life-cycle assessment of road pavements containing marginal materials: Comparative analysis based on a real case study.* In Proceedings: Symposium on Life-Cycle Assessment of Pavements (Pavement LCA 2017), Champaign, Illinois, USA.

Santero, N., Masanet, E., & Horvath, A. (2011). Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resources Conservation and Recycling, 55*(9), 801-809.

Shaker, R. (2015). The spatial distribution of development in Europe and its underlying sustainability correlations. *Applied Geography, 63*, 304-314.

Shi, X., Mukhopadhyay, A., & Zollinger, D. (2018). Sustainability assessment for portland cement concrete pavement containing reclaimed asphalt pavement aggregates. *Journal of Cleaner Production, 192*, 569-581.

Suh, S., & Huppes, G. (2005). Methods for Life Cycle Inventory of a product. *Journal of Cleaner Production, 13*(7), 687-697.

UNDRR (2015). Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 - 2030. *UN World Conference.* Sendai, Japan.

UNEP (2019). Global Mercury Assessment 2018. UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch Geneva, Switzerland.

United Nations (2015a). Addis Ababa Action Agenda. New York. www.un.org.

United Nations (2015b). Transforming our world : The 2030 Agenda for Sustainable Development.

Varrenti, M. (2020). What the ‘European Green Deal’ Means for the EU’sExternal Action. College of Europe Policy Brief #1.20 February 2020.

Vidal, R., Moliner, E., Martínez, G., & Rubio, M. (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.

WWF (2018). *Living Planet Report - 2018: Aiming Higher.* Grooten, M. and Almond, R.E.A.(Eds). WWF, Gland, Switzerland.

Zheng, X., Easa, S., Yang, Z., Ji, T., & Jiang, Z. (2019). Life-cycle sustainability assessment of pavement maintenance alternatives: Methodology and case study. *Journal of Cleaner Production, 213*, 659-672.

Τριανταφύλλου, Α. (2008). *ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.* Πάτρα 2008-8η έκδοση.

Copy protected with Online-PDF-No-Copy.com