



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ
ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ**



ΚΑΝΕΛΛΑΚΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ

Επιβλέπουσα: Χριστίνα Πλατή, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Οκτώβριος 2024

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κλείνει ο κύκλος των προπτυχιακών μου σπουδών, και νιώθω την ανάγκη να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς όλους όσους στάθηκαν δίπλα μου σε αυτή την πορεία.

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την επιβλέπουσα της διπλωματικής εργασίας μου, την κ. Χριστίνα Πλατή, Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα. Η εξαιρετική καθοδήγησή της και οι πολύτιμες συμβουλές της, υπήρξαν καταλυτικοί παράγοντες για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες και την ειλικρινή μου εκτίμηση προς τη Μαρία Τσακουμάκη, πτυχιούχο Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και νυν υποψήφια διδάκτωρ, για την πολύτιμη συμβολή της στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Υπήρξε αρωγός σε κάθε στάδιο της διαδικασίας, προσφέροντας με προθυμία την καθοδήγησή της, τις γνώσεις της και τη στήριξή της.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την απεριόριστη ευγνωμοσύνη μου προς τους γονείς μου και τα αδέρφια μου, για την αμέριστη υποστήριξη και την αδιάκοπη ενθάρρυνσή τους σε κάθε μου βήμα. Η υπομονή, η αγάπη και η πίστη τους στις δυνατότητές μου ήταν καθοριστικοί παράγοντες για την ολοκλήρωση αυτής της διαδρομής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη σημερινή εποχή, η έννοια της βιωσιμότητας αποτελεί βασικό άξονα στη βιομηχανία των κατασκευών, συμπεριλαμβανομένου της κατασκευής των οδών, με στόχο τη μείωση των επιπτώσεων τους στο περιβάλλον. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη την αυξημένη ανάγκη για βιώσιμες πρακτικές στον τομέα των οδοστρωμάτων, η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη μεθοδολογία της ανάλυσης κύκλου ζωής (ΑΚΖ) ως εργαλείο αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με την παραγωγή του ασφαλτομίγματος. Αρχικά, γίνεται λεπτομερής περιγραφή των υλικών που συνθέτουν το ασφαλτόμιγμα, ενώ παράλληλα παρουσιάζεται η ανάλυση της διαδικασίας σύνθεσής του. Στη συνέχεια, αναλύονται ο όρος και τα στάδια της ανάλυσης κύκλου ζωής, καθώς και η εφαρμογή της στη διαδικασία παραγωγής ασφαλτομίγματος. Τέλος, εφαρμόζεται η μεθοδολογία της ΑΚΖ για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε τέσσερα πειραματικές διατομές εύκαμπτου οδοστρώματος κατά τη φάση παραγωγής του ασφαλτομίγματος, ενώ σε δεύτερη φάση, πραγματοποιείται η καταγραφή των περιβαλλοντικών ρύπων στη μονάδα παραγωγής ασφαλτομίγματος, δηλαδή σε πραγματικές συνθήκες. Συμπερασματικά, υπογραμμίζεται η αξία της ανάλυσης κύκλου ζωής ως εργαλείο υποστήριξης στη διαδικασία λήψης αποφάσεων σε θέματα που αφορούν την παραγωγή ασφαλτομίγματος, ενώ παράλληλα προτείνονται λύσεις για την μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και τη χρήση φιλικών και βιώσιμων επιλογών.

Λέξεις κλειδιά: Ασφαλτόμιγμα, Μονάδα παραγωγής ασφαλτομίγματος, Ατμοσφαιρική ρύπανση, Περιβαλλοντικό αποτύπωμα, Ανάλυση Κύκλου Ζωής

ABSTRACT

Nowadays, sustainability is a key factor when it comes to construction industry, including road construction, with the aim of reducing their impact on the environment. Thus, considering the increasing need for sustainable solutions in the field of pavements, this thesis focuses on the use of Life Cycle Assessment (LCA) as a tool to assess the environmental impacts associated with the production of the asphalt mixture. Firstly, a detailed description of the materials contained in the asphalt mixture and its design method is presented. Subsequently, the stages of a LCA study and its application in asphalt production phase are presented. Finally, a LCA study is conducted to assess the environmental impacts on four experimental cross-sections of flexible pavement during the asphalt mixture production phase, while the recording of air pollutants in an asphalt mixture production unit, i.e. in real conditions, is carried out. In conclusion, the value of life cycle assessment is highlighted as a decision-support tool for asphalt production, while solutions are proposed to reduce the environmental footprint and promote environmentally friendly and sustainable options.

Key words: Asphalt mix, Asphalt mix plant, Air pollution, Environmental footprint, Life Cycle Assessment

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Αντικείμενο.....	1
1.2	Στόχος διπλωματικής	2
1.3	Δομή εργασίας	2
2.	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ.....	4
2.1	Υλικά.....	4
2.1.1	Αδρανή υλικά	4
2.1.2	Άσφαλτος.....	6
2.1.3	Ασφαλτόμιγμα.....	8
2.1.3.1	Γενικά.....	8
2.2	Μελέτη σύνθεσης ασφαλτομίγματος	12
2.2.1	Γενικά στοιχεία.....	12
2.2.2	Συλλογή αδρανών υλικών	13
2.2.3	Επιλογή ασφάλτου	15
2.2.4	Προετοιμασία δοκιμών Marshall	18
2.2.5	Έλεγχος δοκιμών σε ευστάθεια και παραμόρφωση.....	20
2.2.6	Προσδιορισμός ογκομετρικών στοιχείων	21
2.2.7	Προσδιορισμός βέλτιστης περιεκτικότητας σε άσφαλτο	23
2.3	Περιγραφή μονάδας παραγωγής ασφαλτομίγματος	25
2.3.1	Συγκρότημα ανά παρτίδες	25
2.3.2	Συγκρότημα συνεχούς ροής.....	31
3.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ.....	33
3.1	Γενικά στοιχεία.....	33
3.1.1	Ιστορική αναδρομή	33
3.1.2	Βασικές αρχές.....	34
3.2	Δομή της μεθόδου ανάλυσης	35
3.2.1	Καθορισμός σκοπού και αντικειμένου της μελέτης	36
3.2.2	Απογραφή δεδομένων	39
3.2.3	Εκτίμηση επιπτώσεων.....	43
3.2.4	Ερμηνεία των αποτελεσμάτων	44
3.3	Φάση παραγωγής ασφαλτομίγματος	45
3.3.1	Γενικά στοιχεία.....	45
3.3.2	Διεθνείς έρευνες	46

4.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	50
4.1	Στόχος πειραματικής διαδικασίας	50
4.2	Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων	50
4.2.1	Καθορισμός σεναρίων ανάλυσης	50
4.2.2	Λειτουργική μονάδα και όρια συστήματος	51
4.2.3	Ανάλυση απογραφής	52
4.2.4	Αποτελέσματα αναλύσεων	56
4.3	Καταγραφή περιβαλλοντικών ρύπων στη μονάδα ασφαλτομίγματος με τη χρήση εργαστηριακού εξοπλισμού.....	59
4.3.1	Γενικά	59
4.3.2	Μέτρηση αιωρούμενων στερεών σωματιδίων (PM10).....	60
4.3.3	Μέτρησης αέριων ρύπων.....	61
4.3.4	Αποτελέσματα μετρήσεων εκπομπών	62
4.4	Σχολιασμός και σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων μέτρησης ρύπων	63
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	68
5.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	71
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	75

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Συλλεκτά αδρανή υλικά από ποταμίσιες αποθέσεις (www.haladjian-minerals.com).....	4
Εικόνα 2.2: Αδρανή υλικά από λατομείο (από προσωπικό αρχείο).....	5
Εικόνα 2.3: Αδρανή υλικά από ανακυκλωμένα οδοστρώματα (www.sripath.com).....	5
Εικόνα 2.4: (α) Λεπτόκοκκα αδρανή υλικά, (β) χονδρόκοκκα αδρανή υλικά, (γ) παιπάλη (από προσωπικό αρχείο).....	6
Εικόνα 2.5: Πετρελαϊκή άσφαλτος (Wikipedia).....	7
Εικόνα 2.6: Εξόρυξη φυσικής ασφάλτου στη λίμνη Trinidad (https://mtca.gov.tt)	7
Εικόνα 2.7: Τυπική διατομή οδοστρώματος	8
Εικόνα 2.8: Ασφαλτόμιγμα (https://korinthiaki-texniki.gr/paragogi-asfaltou/).....	9
Εικόνα 2.9: Ψυχρό ασφαλτόμιγμα (https://asfaltoemporiki.gr/).....	11
Εικόνα 2.10: Προσθήκη προσμίκτων (Λοΐζος & Πλατή, 2019).....	11
Εικόνα 2.11: Κοκκομετρική καμπύλη μίγματος αδρανών (από προσωπικό αρχείο).....	15
Εικόνα 2.12: Συσκευή δοκιμή διείσδυσης (Λοΐζος & Πλατή, 2019).....	16
Εικόνα 2.13: Συσκευή μάλθωσης (Λοΐζος & Πλατή, 2019).....	16
Εικόνα 2.14: Συσκευή δοκιμή ανάφλεξης (Λοΐζος & Πλατή, 2019).....	17
Εικόνα 2.15: Ιξωδόμετρο περιστρεφόμενου κυλίνδρου (Λοΐζος & Πλατή, 2019).....	17
Εικόνα 2.16: Συσκευή δοκιμής σημείου θραύσης Fraass (Λοΐζος & Πλατή, 2019).....	18
Εικόνα 2.17: Προσδιορισμός θερμοκρασιών ανάμιξης και συμπύκνωσης (ASTM D 2493)...	19
Εικόνα 2.18: (α) Συσκευή κρουστικής συμπύκνωσης, (β) Υδατόλουτρο (Λοΐζος & Πλατή, 2019).....	20
Εικόνα 2.19: Διαδικασία ελέγχου δοκιμών Marshall σε ευστάθεια-παραμόρφωση (Λοΐζος & Πλατή, 2019).....	21
Εικόνα 2.20: Ογκομετρική απεικόνιση ασφαλτομίγματος (Λοΐζος & Πλατή, 2019).....	22
Εικόνα 2.21: Διαγράμματα χαρακτηριστικών ιδιοτήτων (Λοΐζος & Πλατή, 2019).....	24
Εικόνα 2.22: Συγκρότημα παραγωγής ασφαλτομίγματος ανά παρτίδες (από προσωπικό αρχείο).....	26
Εικόνα 2.23: Τροφοδοσία αδρανών υλικών (από προσωπικό αρχείο).....	26
Εικόνα 2.24: Περιστρεφόμενο τύμπανο ξήρανσης αδρανών υλικών (από προσωπικό αρχείο)	27
Εικόνα 2.25: Κυκλώνας συλλογής σκόνης (από προσωπικό αρχείο).....	28
Εικόνα 2.26: Σακκόφιλτρα (baghouse) (από προσωπικό αρχείο).....	28
Εικόνα 2.27: Αναβατόριο (από προσωπικό αρχείο).....	29
Εικόνα 2.28: Αγωγοί μεταφοράς ασφάλτου (από προσωπικό αρχείο).....	29
Εικόνα 2.29: Αναμεικτήρας αδρανών υλικών και ασφάλτου.....	30
Εικόνα 2.30: Σιλό αποθήκευσης ασφαλτομίγματος (από προσωπικό αρχείο).....	30
Εικόνα 2.31: Κέντρου ελέγχου παραγωγής (από προσωπικό αρχείο).....	31
Εικόνα 2.32: Συγκρότημα παραγωγής ασφαλτομίγματος συνεχούς ροής (Μαρινέλλη & Πετρουτσάτου, 2014).....	32

Εικόνα 3.1: Στάδια κύκλου ζωής ενός προϊόντος σε μια μελέτη AKZ (Guinée et al., 2002).....	35
Εικόνα 3.2: Στάδια και δομή της AKZ (ISO 14040, 2006a; ISO 14044, 2006b).....	36
Εικόνα 3.3: Τυπικό μοντέλο διεργασίας για την ανάλυση κύκλου ζωής ενός αυτοκινήτου	40
Εικόνα 3.4: Πίνακας μοντέλου εισόδου-εξόδου (https://www.bea.gov/).....	41
Εικόνα 3.5: Υβριδικό μοντέλο εισροών - εκροών (Jun U. Shepard, 2020).....	42
Εικόνα 3.6: Στάδια του κύκλου ζωής ασφαλτομίγματος (Sollazzo et al., 2020).....	46
Εικόνα 4.5: Όρια συστήματος μελέτης AKZ.....	52
Εικόνα 4.1: Δομή Ανάλυσης PaLATE (PaLATE, 2011).....	52
Εικόνα 4.2: Περιβάλλον PaLATE - Design (PaLATE, 2011).....	56
Εικόνα 4.3: Περιβάλλον PaLATE - Initial construction (PaLATE, 2011).....	56
Εικόνα 4.4: Αποτελέσματα περιβαλλοντικού δείκτη CO ₂	57
Εικόνα 4.5: Αποτελέσματα περιβαλλοντικού δείκτη NO _x	57
Εικόνα 4.6: Αποτελέσματα περιβαλλοντικού δείκτη PM ₁₀	58
Εικόνα 4.8: Αποτελέσματα περιβαλλοντικού δείκτη SO ₂	58
Εικόνα 4.9: Αποτελέσματα περιβαλλοντικού δείκτη CO.....	59
Εικόνα 4.10: Σημεία δειγματοληψίας διατομής αγωγού εξόδου καυσαερίων.....	60
Εικόνα 4.11: Εξοπλισμός μέτρησης αιωρούμενων στερεών σωματιδίων.....	61
Εικόνα 4.12: Σχηματική περιγραφή μεθοδολογίας μέτρησης εκπομπών αέριων ρύπων.....	62
Εικόνα 4.13: Σύγκριση αποτελεσμάτων PM ₁₀	64
Εικόνα 4.14: Σύγκριση αποτελεσμάτων CO.....	64
Εικόνα 4.15: Σύγκριση αποτελεσμάτων SO ₂	65
Εικόνα 4.16: Σύγκριση αποτελεσμάτων CO ₂	65
Εικόνα 4.17: Σύγκριση αποτελεσμάτων NO _x	66
Εικόνα 4.18: Ποσοστιαία διαφορά μετρήσεων ρύπων.....	66

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης (Λοΐζος & Πλατή, 2019).....	14
Πίνακας 2.2: Απαιτήσεις ΠΕΤΕΠ χαρακτηριστικών ασφαλτικού σκυροδέματος για όλες τις ασφαλτικές στρώσεις (Λοΐζος & Πλατή, 2019).....	25
Πίνακας 4.1: Διαστασιολόγηση ασφαλτικών στρώσεων.....	50
Πίνακας 4.2: Σύθεση και ιδιότητες ασφαλτομίγματος.....	51
Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα εκπομπών εργαστηριακού εξοπλισμού.....	62
Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα μετρημένων και υπολογισμένων τιμών.....	63

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο

Η κλιματική κρίση που αντιμετωπίζει ο πλανήτης, αποτελεί ένα από τα πλέον κρίσιμα ζητήματα της εποχής. Η υπερθέρμανση του πλανήτη, η απώλεια βιοποικιλότητας και η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελούν άμεσες συνέπειες της υπερβολικής εκμετάλλευσης των φυσικών πόρων και της αλόγιστης κατανάλωσης ενέργειας. Παράλληλα, η συνεχής αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, κυρίως από βιομηχανικές και κατασκευαστικές δραστηριότητες, επιβαρύνει το οικοσύστημα και συμβάλλει στην επιδείνωση της κλιματικής κρίσης (Hansen et al., 2016). Ένα σημαντικό μέρος αυτής της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης προέρχεται από τις υποδομές μεταφορών, και ιδιαίτερα από τα οδοστρώματα, τα οποία απαιτούν τεράστιες ποσότητες πρώτων υλών και ενέργειας για την κατασκευή και συντήρησή τους, καθιστώντας αναγκαία την υιοθέτηση πιο βιώσιμων πρακτικών στον τομέα των οδοστρωμάτων.

Το ασφαλτόμιγμα αποτελεί βασικό δομικό στοιχείο των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, καθώς διασφαλίζει την ανθεκτικότητα της δομής ενός οδοστρώματος, την ποιότητα κύλισης των οχημάτων εξασφαλίζοντας την άνεση των χρηστών κατά τη λειτουργία της οδού, ενώ παράλληλα προστατεύει τις υποκείμενες στρώσεις του οδοστρώματος από τα φορτία της κυκλοφορίας και τις κλιματολογικές συνθήκες (Ferreira et al., 2019; Mashaan, 2022). Κατά τη φάση παραγωγής του, απαιτούνται η χρήση ενεργοβόρων τεχνολογιών και η εξόρυξη μεγάλης ποσότητας πρώτων υλών, συμβάλλοντας στην εξάντληση των φυσικών πόρων. Παράλληλα, παράγονται μεγάλες ποσότητες αέριων ρύπων που επιβαρύνουν το περιβάλλον. Ενδεικτικά, περίπου το 60% των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στη διαδικασία κατασκευής οδοστρωμάτων προέρχεται από την παραγωγή ασφαλτομίγματος (Huang et al. 2009).

Συνεπώς, με τα δεδομένα της σύγχρονης εποχής, κρίνεται απαραίτητη η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από την παραγωγή του ασφαλτομίγματος. Για το σκοπό αυτό, απαιτείται η εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων αξιολόγησης του κύκλου ζωής του. Η πιο σημαντική και διαδεδομένη μεθοδολογία είναι η ανάλυση κύκλου ζωής (ΑΚΖ), η οποία εξετάζει κάθε φάση του κύκλου ζωής του ασφαλτομίγματος, από την εξόρυξη και επεξεργασία των πρώτων υλών έως την τελική του χρήση στο οδόστρωμα. Αυτή η μεθοδολογία προσφέρει στους υπεύθυνους τη δυνατότητα να λαμβάνουν στρατηγικές αποφάσεις που ενισχύουν τη βιωσιμότητα και μειώνουν το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

1.2 Στόχος διπλωματικής

Δεδομένου των ανωτέρω παρατηρήσεων, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση της πρόβλεψης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τη φάση παραγωγής του ασφαλτομίγματος συγκριτικά με μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες. Η διαδικασία αφορά τη χρήση της μεθοδολογίας AKZ ως εργαλείο πρόβλεψης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά την παραγωγή του ασφαλτομίγματος, ενώ πραγματοποιούνται μετρήσεις των αντίστοιχων ατμοσφαιρικών ρύπων σε μονάδα παραγωγής ασφαλτομίγματος.

Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση πάνω σε θέματα που αφορούν τις βασικές αρχές παραγωγής ασφαλτομίγματος και της διάταξης μιας μονάδας παραγωγής ασφαλτομίγματος, καθώς και τα στοιχεία που υπεισέρχονται στην καταγραφή του περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος. Επίσης, περιγράφονται τα δομικά στοιχεία που συνιστούν τη μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής σύμφωνα με τα σχετικά πρότυπα και τις προδιαγραφές. Στη συνέχεια, αξιοποιώντας τα στοιχεία της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, διεξάγεται πειραματική ανάλυση πάνω σε τέσσερις διατομές εύκαμπτου οδοστρώματος με διαφορετικό φόρτο κυκλοφορίας, χρησιμοποιώντας το εργαλείο της AKZ. Παράλληλα, πραγματοποιείται καταγραφή των εκπομπών αέριων ρύπων σε μονάδα παραγωγής ασφαλτομίγματος σε πραγματικές συνθήκες. Τέλος, μέσω της συγκριτικής αξιολόγησης των δύο μεθόδων προκύπτουν ορισμένα συμπεράσματα που αναδεικνύουν τη σημασία λήψης στοχευμένων και βιώσιμων αποφάσεων στην παραγωγή ασφαλτομίγματος.

1.3 Δομή εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος εισαγωγικού κεφαλαίου.

Το **κεφάλαιο 2** αφορά τη διαδικασία παραγωγής ασφαλτομίγματος, εστιάζοντας στα υλικά και τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται. Πρώτα, παρουσιάζονται τα βασικά υλικά που συνθέτουν το ασφαλτόμιγμα, δηλαδή τα αδρανή υλικά και η άσφαλτος και στη συνέχεια, αναλύεται η μελέτη σύνθεσης του ασφαλτομίγματος. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση της μονάδας παραγωγής ασφαλτομίγματος, όπου περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας και τα στάδια παραγωγής του.

Το **κεφάλαιο 3** εστιάζει στην ανάλυση κύκλου ζωής, με γενικά στοιχεία για τη μεθοδολογία, τις βασικές αρχές και την ιστορική αναδρομή της. Στη συνέχεια,

περιγράφεται η δομή της και γίνεται ειδική αναφορά στην εφαρμογή της ΑΚΖ κατά την παραγωγή ασφαλτομίγματος, περιγράφοντας σχετικές έρευνες.

Το **κεφάλαιο 4** εξετάζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά την παραγωγή ασφαλτομίγματος, αναλύοντας τέσσερα πειραματικά σενάρια οδοστρώματος. Παράλληλα, συγκρίνονται τα αποτελέσματα με μετρήσεις που έγιναν με τη χρήση εργαστηριακού εξοπλισμού στην καμινάδα της μονάδας, προκειμένου να αξιολογηθεί η περιβαλλοντική της απόδοση.

Στο **κεφάλαιο 5** γίνεται συνοπτική αναφορά στα συμπεράσματα, τα οποία προκύπτουν από την ανακεφαλαίωση της διπλωματικής εργασίας και παρατίθενται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Το **κεφάλαιο 6** περιλαμβάνει τη διεθνή βιβλιογραφία για τη σύνταξη της παρούσας εργασίας.

Το **κεφάλαιο 7** περιέχει το παράρτημα με σημαντικές πληροφορίες, όπως πίνακες και δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της εργασίας.

2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ

2.1 Υλικά

2.1.1 Αδρανή υλικά

Αδρανή υλικά ονομάζονται τα λίθινα, φυσικά ή βιομηχανικά υλικά που χρησιμοποιούνται είτε αυτούσια σε τεχνικά έργα, όπως είναι τα έργα οδοστρώματος, είτε μετά από ανάμιξή τους με συγκολλητικά υλικά, όπως είναι το τσιμέντο, η άσβεστος, η άσφαλτος και το νερό. Η ονομασία "αδρανή" δόθηκε στα υλικά αυτά με την έννοια, ότι κατά την ανάμιξή τους με συγκολλητικά υλικά, δεν συμμετέχουν ενεργά στις διαδικασίες πήξης και σκλήρυνσης. Αυτό δεν ανταποκρίνεται εντελώς στην πραγματικότητα, καθώς η χημική αδράνεια των υλικών αυτών εξαρτάται από την ορυκτολογική τους σύσταση και τα υλικά με τα οποία έρχονται σε επαφή. Ανάλογα με την προέλευση τους, τα αδρανή διακρίνονται σε συλλεκτά, θραυστά και ανακυκλωμένα.

Συλλεκτά ονομάζονται τα αδρανή υλικά, τα οποία προέρχονται από φυσικές αποθέσεις, όπως είναι τα ποτάμια. Τα υλικά αυτά έχουν στρογγυλεμένες και λείες επιφάνειες λόγω της φυσικής διάβρωσης και της τριβής που υφίστανται από την έκθεση τους στις κλιματολογικές συνθήκες. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, τα συλλεκτά αδρανή υλικά έχουν περιορισμένη χρήση στις κατασκευές. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έχουν ή μετά από περαιτέρω επεξεργασία (θραύση, έκπλυση) ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου. Στην εικόνα 2.1, παρουσιάζεται ενδεικτικά ένας χώρος απόληψης συλλεκτών αδρανών υλικών.



Εικόνα 2.1: Συλλεκτά αδρανή υλικά από ποταμίσιες αποθέσεις (www.haladjian-minerals.com)

Τα **θραυστά** αδρανή υλικά προέρχονται από θραύση πετρωμάτων σε λατομείο και αποτελούν την κύρια κατηγορία αδρανών υλικών που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές στον Ελλαδικό χώρο. Τα συνηθέστερα πετρώματα είναι τα ασβεστολιθικά, καθώς προσδίδουν στις συνήθεις κατασκευές, υψηλή μηχανική αντοχή και έχουν μικρό κόστος θραύσης. Στην εικόνα 2.2, παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα λατομείο παραγωγής αδρανών υλικών.



Εικόνα 2.2: Αδρανή υλικά από λατομείο (από προσωπικό αρχείο)

Ανακυκλωμένα αδρανή υλικά είναι τα υλικά που προέρχονται από την επεξεργασία αποβλήτων κατεδαφίσεων, κατασκευών και εκσκαφών και μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν κυρίως στις κατασκευές για την παραγωγή σκυροδέματος και ασφαλτομίγματος αντικαθιστώντας εν μέρει ή ολικά τα φυσικά αδρανή. Η διαδικασία ανακύκλωσης περιλαμβάνει τη θραύση, διαλογή και καθαρισμό των αποβλήτων, με σκοπό την απομάκρυνση ακατάλληλων ή επικίνδυνων ουσιών. Στα έργα οδοστρώματος, τα αποτελέσματα πολλών σχετικών ερευνών που είναι άκρως ενθαρρυντικά για τις πρακτικές ανακύκλωσης, προσφέροντας περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη, καθώς μειώνουν την ανάγκη εξόρυξης φυσικών πόρων και περιορίζουν τη δημιουργία αποβλήτων (Cardoso et al., 2016). Στην εικόνα 2.3 παρουσιάζεται δείγμα ανακτημένου ασφαλτικού υλικού (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP).



Εικόνα 2.3 Αδρανή υλικά από ανακυκλωμένα οδοστρώματα (www.sripath.com)

Τα αδρανή υλικά, ανάλογα με το **μέγεθος των κόκκων**, διακρίνονται σε: χονδρόκοκκα, λεπτόκοκκα και παιπάλη, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.4. Σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN12620, τα λεπτόκοκκα υλικά έχουν μέγιστο μέγεθος κόκκου 4 mm, όπως είναι η άμμος, τα χονδρόκοκκα υλικά από 2 mm έως 4 mm, όπως είναι το χαλίκι, και η παιπάλη μέχρι 2 mm αντίστοιχα.



Εικόνα 2.4 : (α) Λεπτόκοκκα αδρανή υλικά, (β) χονδρόκοκκα αδρανή υλικά, (γ) παιπάλη (από προσωπικό αρχείο)

Τέλος, στην κατασκευή ενός οδοστρώματος, τα αδρανή υλικά αποτελούν το κύριο συστατικό για την παραγωγή του ασφαλτομίγματος και παράλληλα, χρησιμοποιούνται αυτούσια για την κατασκευή στρώσεων ασύνδετων υλικών, όπως είναι η βάση και υπόβαση ενός οδοστρώματος. Στην περίπτωση του ασφαλτομίγματος, χρησιμοποιείται μίγμα αδρανών υλικών κατάλληλης κοκκομετρικής διαβάθμισης, ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις σχεδιασμού του έργου. Έτσι, παρέχεται σταθερότητα και ανθεκτικότητα στις στρώσεις του οδοστρώματος και ενισχύεται η συνοχή και η αντοχή του, έναντι των φορτίων κυκλοφορίας.

2.1.2 Άσφαλτος

Η άσφαλτος είναι ένα υλικό που εμφανίζεται είτε σε ρευστή είτε σε στερεή μορφή και περιέχει κυρίως υδρογονάνθρακες και τα παράγωγά τους. Ιστορικά, χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στην αρχαία Μεσοποταμία και στην αρχαία Ελλάδα, ενώ τον 19ο αιώνα, άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως για την κατασκευή οδών. Τέλος, η άσφαλτος προέρχεται είτε από την απόσταξη αργού πετρελαίου, γνωστή ως πετρελαϊκή άσφαλτος, είτε από φυσικά αποθέματα. Σήμερα, η πετρελαϊκή άσφαλτος είναι η πιο διαδεδομένη, καθώς η εξαγωγή της φυσικής ασφάλτου είναι μία ακριβή και δύσκολη διαδικασία.

Η πετρελαϊκή άσφαλτος παράγεται ως παραπροϊόν από τη διύλιση του αργού πετρελαίου. Το αργό πετρέλαιο προέρχεται από οργανική ύλη η οποία, πριν από εκατομμύρια χρόνια, εναποτέθηκε σε πολύ μεγάλα πάχη, μαζί με λάσπη και κομμάτια βράχων, στον πυθμένα των ωκεανών. Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.5, η πετρελαϊκή άσφαλτος, είναι θερμοπλαστική, που σημαίνει ότι μαλακώνει όταν

θερμαίνεται και σκληραίνει όταν ψύχεται. Έχει καλή αντοχή έναντι των καιρικών συνθηκών και υψηλή συγκολλητική ικανότητα. Χρησιμοποιείται κυρίως στην κατασκευή ασφαλτοστρώσεων για οδούς, ευρύτερα καταστρώματα, καθώς και οδοστρώματα αεροδρομίων.



Εικόνα 2.5 Πετρελαϊκή ασφάλτος (Wikipedia)

Η φυσική ασφάλτος είναι αποτέλεσμα της φυσικής μεταλλαγής του πετρελαίου και συναντάται τόσο με τη μορφή παχύρρευστου υγρού όσο και ως πέτρωμα. Τα μεγαλύτερα αποθέματα παχύρρευστης υγρής ασφάλτου βρίσκονται στην νήσο Τρινιντάντ της Καραϊβικής, στη Βενεζουέλα και στην Καλιφόρνια. Εγγύτερα στον ελλαδικό χώρο, η ασφάλτος συλλέγεται υπό την μορφή πετρώματος (γκιλσονίτης) από περιοχές της Αλβανίας, αλλά η χρήση της είναι πολύ περιορισμένη, λόγω της δυσκολίας καθαρισμού και συλλογής της από το πέτρωμα. Ακόμη, τα περισσότερα ασφαλτικά έργα βασίζονται στην επεξεργασμένη ασφάλτο που προέρχεται από την διύλιση του πετρελαίου. Στην εικόνα 2.6, απεικονίζεται η εξόρυξη φυσικής ασφάλτου από τη λίμνη Trinidad.



Εικόνα 2.6: Εξόρυξη φυσικής ασφάλτου στη λίμνη Trinidad (https://mtca.gov.tt/tourism_facilities/la-brea-pitch-lake/)

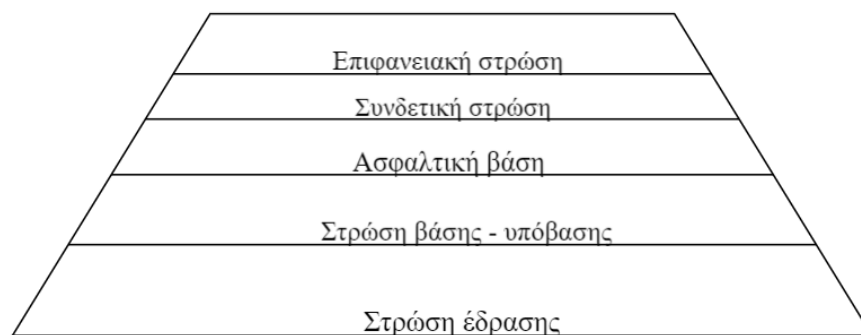
Στην περίπτωση των οδοστρωμάτων, η άσφαλτος χρησιμοποιείται για να συγκρατεί τα αδρανή υλικά, δημιουργώντας μια σταθερή δομή που προσφέρει συνοχή και αντίσταση στη διάτμηση. Χαμηλά ποσοστά ασφάλτου οδηγούν σε αποκόλληση των αδρανών και μείωση της συνοχής, ενώ υψηλά ποσοστά οδηγούν σε φαινόμενα τροχοαυλάκωσης, ανάδυσης και μειωμένα επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας. Τέλος, η μελέτη των ιδιοτήτων της, σε συνδυασμό με την αναλογία των αδρανών, είναι κρίσιμη για την επίτευξη του βέλτιστης σύνθεσης του ασφαλτομίγματος, το οποίο πρέπει να πληροί τις οικείες τεχνικές προδιαγραφές του έργου κατασκευής. Στα αρνητικά, σημειώνεται η μόλυνση του περιβάλλοντος λόγω των διαδικασιών παραγωγής τους, η συμβολή στην εξάντληση μη ανανεώσιμων πόρων όπως το ορυκτό πετρέλαιο, αλλά και η εκπομπή επικίνδυνων ουσιών για την υγεία του ανθρώπου, ειδικά με τη χρήση τροποποιητών και χημικών πρόσθετων.

Η άσφαλτος που χρησιμοποιείται στην οδοποιία κατηγοριοποιείται κυρίως βάσει του βαθμού διεσδυτικότητάς της. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η διεσδυτικότητα, τόσο πιο μαλακή είναι η άσφαλτος. Αντίθετα, η σκληρότερη άσφαλτος έχει μικρότερη διεσδυτικότητα. Ο βαθμός διεσδυτικότητας μετράται σε pen, όπου $1 \text{ pen} = 0,1 \text{ mm}$. Οι κυριότεροι τύποι ασφάλτων που χρησιμοποιούνται στην οδοστρωσία είναι: 40/50, 60/70, 80/100, 120/150 και 200/300 pen. Σε κάθε χώρα μπορεί να παράγονται και άλλοι τύποι ασφάλτου, ανάλογα με τις τοπικές ανάγκες και συνθήκες.

2.1.3 Ασφαλτόμιγμα

2.1.3.1 Γενικά

Το ασφαλτόμιγμα αποτελείται από δύο κύρια υλικά, τα αδρανή (χονδρόκοκκα, λεπτόκοκκα, παιπάλη) και την άσφαλτο, ενώ μέρος του όγκου του μίγματος καλύπτεται από αέρα, που γεμίζει τα κενά μεταξύ των υλικών. Το μίγμα αυτό χρησιμοποιείται για την κατασκευή των ανώτερων στρώσεων ενός οδοστρώματος, γνωστές ως ασφαλτικές στρώσεις. Αυτές περιλαμβάνουν την ασφαλτική βάση, την ισοπεδωτική στρώση και την επιφανειακή στρώση, όπως φαίνεται στη εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7: Τυπική διατομή οδοστρώματος

Τα ασφαλτομίγματα πρέπει να πληρούν ορισμένες βασικές προϋποθέσεις, όπως η αντοχή στην παραμένουσα παραμόρφωση και τη ρηγμάτωση από κόπωση, η διατήρηση της στεγανότητας των υποκείμενων στρώσεων και η συμβολή στη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος. Επιπλέον, η επιφανειακή στρώση πρέπει να προσφέρει καλή αντιολισθητική ικανότητα και ομαλή κύλιση. Έτσι, η σύνθεση του ασφαλτομίγματος μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα με τη στρώση στην οποία θα χρησιμοποιηθεί. Ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής τους και το είδος του οδοστρώματος χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, τα θερμά, τα ψυχρά και τα μετρίως θερμά ασφαλτομίγματα.

2.1.3.2 Θερμά ασφαλτομίγματα

Θερμό ασφαλτόμιγμα (Hot Mix Asphalt, HMA) είναι το μίγμα ασφάλτου και αδρανών υλικών, που παράγεται με θερμή επεξεργασία σε μόνιμες εγκαταστάσεις, ενώ η απόδοσή του θα πρέπει να ανταποκρίνεται σε ένα ευρύ φάσμα απαιτήσεων που έχουν προκύψει από τις σύγχρονες συνθήκες κυκλοφορίας. Από τη δεκαετία του '60, με την εισαγωγή των συστημάτων παραγωγής θερμών ασφαλτομιγμάτων στην Ελλάδα, μέχρι το τέλος της δεκαετίας του '90, χρησιμοποιούνταν σχεδόν αποκλειστικά ένας τύπος θερμού ασφαλτομίγματος, το ασφαλτικό σκυρόδεμα (Asphalt Concrete). Εφαρμόζεται σε όλες τις ασφαλτικές στρώσεις, με κύρια χρήση στην ασφαλτική βάση, τη συνδετική και την ισοπεδωτική στρώση, ενώ για την επιφανειακή στρώση προτιμάται για πολύ λεπτές στρώσεις. Η εικόνα 2.8 παρουσιάζει τη διάστρωση ασφαλτομίγματος σε οδόστρωμα.



Εικόνα 2.8: Ασφαλτόμιγμα (<https://korinthiaki-texniki.gr/paragogi-asfaltou/>)

Άλλα είδη θερμών ασφαλτομιγμάτων είναι: 1) Το ασφαλτόμιγμα για πολύ λεπτές στρώσεις, το οποίο παράγεται με μη συνεχούς κοκκομετρικής διαβάθμισης αδρανή υλικά και κοινή ή τροποποιημένη άσφαλτο, με πάχος εφαρμογής 2,5-3 cm. Προσφέρει υψηλή αντίσταση στην παραμόρφωση, μεγάλη ανθεκτικότητα σε καιρικές συνθήκες και συμβάλλει στη μείωση θορύβου και εκτόξευσης νερού, με διάρκεια ζωής 7 έως 9 έτη και σχετικά χαμηλό κόστος (Νικολαΐδης, 2011). 2) Το

πορώδες ασφαλτόμιγμα σχεδιάστηκε για να επιτρέπει τη διήθηση του νερού μέσω της επιφάνειάς του, μειώνοντας την απορροή και βελτιώνοντας την αποστράγγιση του οδοστρώματος. Χρησιμοποιείται κυρίως σε οδοστρώματα, χώρους στάθμευσης και άλλες επιφάνειες όπου είναι απαραίτητη η αποτελεσματική διαχείριση των όμβριων υδάτων. 3) Το θερμοκυλινδρούμενο ασφαλτόμιγμα πρόκειται για μίγμα πυκνής υφής με μη συνεχόμενη κοκκομετρική διαβάθμιση, όπου το ασφαλτοκονίαμα παίζει καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά του. Χρησιμοποιείται κυρίως σε συνδετικές και ασφατικές βάσεις, με διάστρωση που περιορίζεται σε θερμούς μήνες λόγω των απαιτούμενων υψηλών θερμοκρασιών για τη συμπύκνωση. 4) Το μαστιχικό ασφαλτόμιγμα είναι ένα από τα παλαιότερα μίγματα που χρησιμοποιήθηκαν στην οδοποιία και διακρίνεται για την υψηλή περιεκτικότητα σε φίλερ, την αυξημένη ποσότητα ασφάλτου και την αδιαπερατότητά του, με αποτέλεσμα το υψηλό κόστος κατασκευής. Χρησιμοποιείται κυρίως σε οδοποιία και αεροδρόμια, είτε ως επιφανειακή είτε ως συνδετική στρώση, και πρέπει να πληροί τις προδιαγραφές του προτύπου EN 13108-6. 5) Τέλος, το μαλακό ασφαλτόμιγμα χαρακτηρίζεται από τη χρήση ασφάλτου χαμηλού ιξώδους, γεγονός που το καθιστά πιο ελαστικό και εύκαμπτο σε σύγκριση με άλλα ασφαλτομίγματα. Χρησιμοποιείται κυρίως σε κρύες κλιματικές περιοχές, όπου οι χαμηλές θερμοκρασίες θα μπορούσαν να προκαλέσουν σκλήρυνση και ρηγμάτωση του ασφαλτομίγματος.

2.1.3.3 Ψυχρά ασφαλτομίγματα

Ψυχρά ασφαλτομίγματα (Cold Mix Asphalt, CMA) είναι αυτά στα οποία το συνδετικό υλικό αποτελείται από ασφατικό γαλάκτωμα. Ονομάζονται "ψυχρά", καθώς παράγονται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, σε αντίθεση με τα θερμά ασφαλτομίγματα, όπου η θέρμανση της ασφάλτου και των αδρανών είναι απαραίτητη. Τα ψυχρά ασφαλτομίγματα χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες, ανοιχτού τύπου και κλειστού τύπου. Τα ανοιχτού τύπου χαρακτηρίζονται από τα υψηλά ποσοστά κενών του μίγματος και χρησιμοποιούνται κυρίως για επιφανειακές στρώσεις. Αντίστοιχα, τα κλειστού τύπου αποτελούνται από συγκεκριμένη κοκκομετρική διαβάθμιση και μπορούν να εφαρμοστούν σε όλες τις επιφανειακές στρώσεις ενός οδοστρώματος, όπως στην ασφατική βάση, στη συνδετική στρώση, στην αντιολισθηρή στρώση και σε επιστρώσεις που χρησιμοποιούνται για την αποκατάσταση ή ενίσχυση των οδοστρωμάτων. Τα βασικά πλεονεκτήματά τους σε σχέση με τα ανοιχτού τύπου ασφαλτομίγματα είναι η αυξημένη αντοχή τους και η πολύ χαμηλότερη διαπερατότητα στο νερό. Στην Εικόνα 2.9, απεικονίζεται ένα ψυχρό ασφαλτόμιγμα.



Εικόνα 2.9: Ψυχρό ασφαλτόμιγμα (<https://asfaltoemporiki.gr/>)

Αξίζει να σημειωθεί ότι, τα ψυχρά ασφαλτομίγματα λόγω της δυνατότητας παραγωγής και εφαρμογής τους σε περιβαλλοντικές θερμοκρασίες προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία σε σχέση με τα θερμά. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει τη μεταφορά τους σε μεγαλύτερες αποστάσεις και την επιτυχή διαστρωμάτωση και συμπίκνωση, ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία του μίγματος.

2.1.3.4 Μετρίως θερμά ασφαλτομίγματα

Η τεχνολογία των μετρίως θερμών ασφαλτομιγμάτων (Warm mix Asphalt, WMA) εφαρμόζεται τα τελευταία χρόνια, με σκοπό την παραγωγή ασφαλτομιγμάτων σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σύγκριση με τα θερμά ασφαλτομίγματα, αλλά σε υψηλότερες από τα ψυχρά. Η μείωση των θερμοκρασιών παραγωγής του ασφαλτομίγματος επιτυγχάνεται μέσω της προσθήκης προσμίκτων (εικόνα 2.10) και διαδικασιών αφροποίησης.



Εικόνα 2.10: Προσθήκη προσμίκτων (Λοΐζος & Πλατή, 2019)

Η προσθήκη προσμίκτων είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία που εφαρμόζεται ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, καθώς εκτός των άλλων προσφέρει τη δυνατότητα μείωσης των εκπομπών του άνθρακα, του ενεργειακού κόστους και των αναθυμιάσεων για τους εργαζομένους. Ταυτόχρονα συμβάλλει στην προστασία των χαρακτηριστικών της ασφάλτου, στην καλή εργασιμότητα και στη βέλτιστη συμπύκνωση του ασφαλτομίγματος.

2.2 Μελέτη σύνθεσης ασφαλτομίγματος

2.2.1 Γενικά στοιχεία

Ως μελέτη σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων ορίζεται η διαδικασία βάσει της οποίας προσδιορίζονται οι αναλογίες των αδρανών (χονδρόκοκκα, λεπτόκοκκα, παιπάλη) και του ασφαλτικού συνδετικού υλικού, με σκοπό τη βελτιστοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων και συμπεριφοράς του, επιτυγχάνοντας το επιθυμητό επίπεδο προδιαγραφών του έργου. Όσον αφορά την κατηγορία παραγωγής θερμών ασφαλτομιγμάτων (Hot Mix Asphalt – HMA), συναντώνται αρκετές μέθοδοι σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων, οι οποίες διαφέρουν ως προς το μέγεθος του δείγματος δοκιμής, τον τρόπο συμπύκνωσης και τις προδιαγραφές που ορίζουν (Huang et al., 2009). Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος σύνθεσης είναι η Marshall.

Η μέθοδος **Marshall** (ASTM D1559) έχει χρησιμοποιηθεί για πάνω από πέντε δεκαετίες (από το 1940 μέχρι το 1990) ως η κύρια μέθοδος παρασκευής θερμών ασφαλτομιγμάτων. Πάνω από το 75% των οδοστρωμάτων στις Ηνωμένες Πολιτείες έχουν κατασκευαστεί με διάφορες παραλλαγές αυτής της μεθόδου (Kanneganti, 2002). Οι θεμελιώδεις αρχές της μεθόδου Marshall αναπτύχθηκαν το 1939 από τον Bruce Marshall, έναν μηχανικό που δούλευε για το τμήμα αυτοκινητοδρόμων της πολιτείας του Μισισιπή και αργότερα συνεργάστηκε ως σύμβουλος με την ένωση μηχανικών του Αμερικανικού στρατού. Η μέθοδος αυτή κέρδισε τη θέση της στην επιστημονική κοινότητα κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, καθώς χρησιμοποιήθηκε για την ενίσχυση των αεροδρομίων του στρατού της Αμερικής. Το 1958, τυποποιήθηκε από την Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών (ASTM) (Asphalt Institute).

Παρά το γεγονός ότι η μέθοδος αυτή έχει κάποιες αδυναμίες λόγω του εμπειρικού της χαρακτήρα, όπως η αδυναμία προσαρμογής σε μεταβαλλόμενες κυκλοφοριακές και κλιματικές συνθήκες (Asi, 2007), εξακολουθεί να αποτελεί τη δημοφιλέστερη μέθοδο για τη σύνθεση ασφαλτομιγμάτων. Οι θετικές πτυχές της μεθόδου, όπως επισημαίνουν οι Roberts et al. (1996) και Huang et al. (2009), περιλαμβάνουν:

- Γρήγορη και απλή στη χρήση
- Απαιτεί βασικό και οικονομικό εξοπλισμό
- Διασφαλίζει ότι οι ιδιότητες του μείγματος στο εργαστήριο αντιστοιχούν με την απόδοση στο πεδίο
- Μπορεί να προσαρμοστεί στα τοπικά υλικά και συνθήκες

Στην Ελλάδα, επίσης η πιο διαδεδομένη συμβατική μεθοδολογία σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων είναι η μέθοδος Marshall η οποία περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- Επιλογή αδρανών υλικών
- Επιλογή ασφάλτου
- Προετοιμασία δοκιμών Marshall
- Έλεγχο δοκιμών σε ευστάθεια και παραμόρφωση
- Προσδιορισμό ογκομετρικών στοιχείων
- Προσδιορισμό βέλτιστης περιεκτικότητας σε άσφαλτο

2.2.2 Συλλογή αδρανών υλικών

Το πρώτο βήμα στη μελέτη σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων είναι η επιλογή των αδρανών υλικών, τα οποία αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του μίγματος. Σύμφωνα με τον Jasim (2012), τα αδρανή διαμορφώνουν τη δομή του ασφαλτομίγματος και καθορίζουν την ανθεκτικότητα και τη δύναμη του οδοστρώματος. Κάθε πηγή αδρανών υπόκειται σε δοκιμές κοκκομετρικής διαβάθμισης, ανθεκτικότητας και άλλες που σχετίζονται με τις απαιτήσεις του έργου (Λοΐζος & Πλατή, 2019). Όπως αναφέρει ο Shrestha (2018), το τυπικό μέγεθος κόκκων για τα αδρανή είναι τα 25 mm, ενώ σε ειδικές περιπτώσεις μπορεί να φτάσει τα 38 mm. Περίπου 1.2 κιλά αδρανών απαιτούνται για κάθε δοκίμιο, δηλαδή περίπου 23 κιλά συνολικά για τη μελέτη 15 δοκιμών, υπολογίζοντας τις απώλειες. Τα αδρανή πρέπει να θερμαίνονται στους 105-110°C πριν από την κοκκομετρική διαβάθμιση για να απομακρυνθεί η υγρασία, η οποία θα μπορούσε να προκαλέσει ανακρίβειες στα δεδομένα βάρους. Οι κοκκομετρικές αναλύσεις θα πρέπει να ακολουθούν τα πρότυπα της κάθε περιοχής, όπως ορίζονται από το AASHTO, ASTM κ.λπ. (Diazgranados Diaz, 2003).

Σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς ΠΕΤΕΠ στην Ελλάδα, πρέπει να ακολουθούνται συγκεκριμένα όρια για τους πέντε βασικούς τύπους ασφαλτομιγμάτων που εφαρμόζονται ανάλογα με την ασφαλική στρώση, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.1. Προκειμένου να καλυφθούν αυτές οι απαιτήσεις, χρησιμοποιούνται διαφορετικές διαβαθμίσεις που βασίζονται σε ποικίλες αναλογίες και μεγέθη κόκκων (Özdemir, et al., 2019). Εφόσον ληφθούν υπόψη αυτές οι παράμετροι, καθώς και οι ιδιότητες των λεπτόκοκκων αδρανών, μπορούν

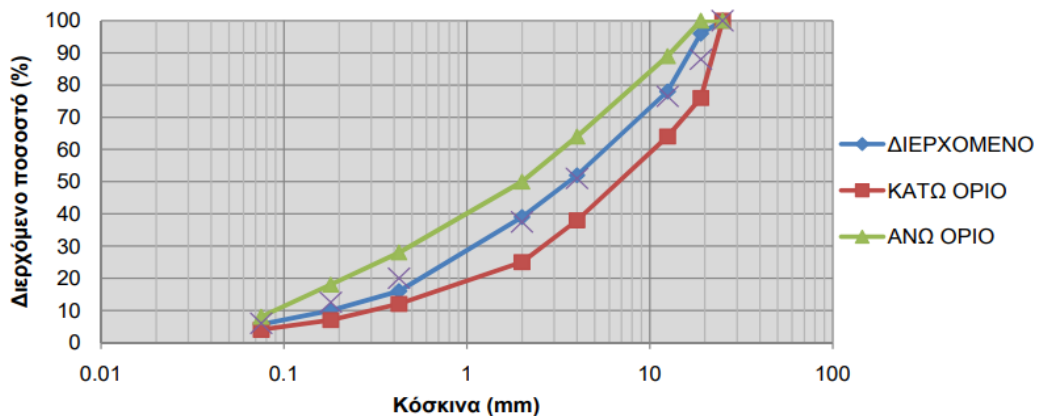
να γίνουν οι απαραίτητες τροποποιήσεις στην τελική σύνθεση, ώστε να διατηρηθούν οι απαιτούμενες τιμές των κενών αέρα και των κενών στον σκελετό των αδρανών.

Σύμφωνα με τον Shrestha (2018), υπάρχουν τρεις κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επιλογή των κλασμάτων αδρανών πριν την ανάμιξή τους με το ασφαλτικό συνδετικό υλικό. Αυτές οι μέθοδοι διαφέρουν τόσο στον χρόνο εκτέλεσης όσο και στην ακρίβεια που προσφέρουν. Η πρώτη μέθοδος αφορά τη μερική κλασμάτωση μεμονωμένων αδρανών, η δεύτερη βασίζεται στην προανάμιξη των δειγμάτων πριν από την κλασμάτωση των αδρανών και η τρίτη μέθοδος περιλαμβάνει την ολική κλασμάτωση όλων των αδρανών.

Πίνακας 2.1: Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης. (Λοΐζος & Πλατή, 2019)

Ονομαστικό άνοιγμα οπής κόσκινου κατά το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 933-2 (mm)	Τύπος ασφαλτομίγματος (ΑΣ)				
	ΑΣ 40	ΑΣ 31.5	ΑΣ 20	ΑΣ 12.5	ΑΣ 10
63	100				
40	90-100	100			
31.5	—	90-100	100		
20	58-81	—	90-100	100	
12.5	—	56-80	—	90-100	100
10	—	—	58-81	—	90-100
4	20-50	26-56	30-60	39-70	49-80
2	14-39	18-43	21-46	25-55	29-63
0.25	3-15	4-16	4-18	4-19	6-21
0.063	0-5	1-6	1-7	1-9	1-9
Προτεινόμενα μεγέθη χονδρόκοκκων αδρανών					
	X-10/40 & X-4/31.5	X-4/31.5	X-4/20	X-2/12.5	X-2/10
Συνιστώμενα πάχη μεμονωμένης στρώσης (mm)					
	70-100	50-80	40-60	25-40	<30
Προτεινόμενη χρήση					
				Ισοπεδωτική στρώση	
			Επιφανειακή στρώση		
					Συνδετική στρώση
Ασφαλτική βάση					

Κάθε τύπος ασφαλτομίγματος (ΑΣ 40, ΑΣ 31.5, ΑΣ 20, ΑΣ 12.5, και ΑΣ 10) αναφέρεται στο μέγιστο ονομαστικό μέγεθος των αδρανών που περιλαμβάνει το μίγμα. Οι τιμές στον πίνακα 2.1, δείχνουν τα ποσοστά διερχόμενου υλικού από τα κόσκινα συγκεκριμένων οπών σε χιλιοστά (mm).



Εικόνα 2.11: Κοκκομετρική καμπύλη μίγματος αδρανών

Σε γενικές γραμμές, η τελική κοκκομετρική καμπύλη του μείγματος αδρανών συνιστάται να είναι ομαλή και όσο το δυνατόν πιο παράλληλη με τις οριακές καμπύλες. Στην Εικόνα 2.11, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα κοκκομετρικής διαβάθμισης αδρανών με τις μέγιστες και ελάχιστες οριακές καμπύλες.

2.2.3 Επιλογή ασφάλτου

Η ασφαλτος είναι το συνδετικό υλικό του ασφαλτομίγματος, το οποίο προσφέρει την απαιτούμενη συνοχή και ανθεκτικότητα. Στη μέθοδο Marshall, η επιλογή της γίνεται με βάση την τιμή διείδυσης της, η οποία προσαρμόζεται στις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες ασφάλτους κυμαίνονται από 40/50 μέχρι 180/200 rep. Μετά την επιλογή της ασφάλτου, πρέπει να ελεγχθούν τα χαρακτηριστικά της για να διασφαλιστεί η καταλληλότητά της (Raha Bitumen Co). Πριν την κατασκευή δοκιμών ασφαλτικού σκυροδέματος, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μια σειρά **εργαστηριακών δοκιμών** στην ασφαλτο προκειμένου να καθοριστούν οι βασικές ιδιότητες και ο τύπος της. Οι βασικές δοκιμές που πραγματοποιούνται αναλύονται παρακάτω.

Δοκιμή διείδυσης (Penetration): Αυτή η διαδικασία αξιολογεί τη συνεκτικότητα της ασφάλτου. Χρησιμοποιώντας μια πρότυπη βελόνα, η δοκιμή εξετάζει τη διείδυση σε δείγμα ασφάλτου υπό συγκεκριμένο φορτίο και σε σταθερή θερμοκρασία για ορισμένο χρόνο (Εικόνα 2.12).



Εικόνα 2.12: Συσκευή δοκιμή διείσδυσης (Λοΐζος & Πλατή, 2019)

Δοκιμή Μάλθωσης: Αποτελεί μια σημαντική παράμετρος που αποκαλύπτει τη θερμοκρασία στην οποία η ασφάλτος μεταβαίνει από εύθραυστη σε πιο ρευστή κατάσταση (Εικόνα 2.13).



Εικόνα 2.13: Συσκευή μάλθωσης (Λοΐζος & Πλατή, 2019)

Δοκιμή ανάφλεξη: Αυτή η διαδικασία προσδιορίζει τη θερμοκρασία ανάφλεξης, δηλαδή τη στιγμή που οι ατμοί της ασφάλτου αναφλέγονται για πέντε δευτερόλεπτα κατά τη θέρμανση (Εικόνα 2.14).



Εικόνα 2.14: Συσκευή δοκιμή ανάφλεξης (Λοΐζος & Πλατή, 2019)

Διαλυτότητα : Στόχος είναι η επιβεβαίωση της καθαρότητας της ασφάλτου μέσω της ανίχνευσης ανεπιθύμητων συστατικών.

Ιξώδες : Το ιξώδες εκφράζει την εσωτερική αντίσταση της ασφάλτου, η οποία μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (Εικόνα 2.15).



Εικόνα 2.15: Ιξωδόμετρο περιστρεφόμενου κυλίνδρου. (Λοΐζος & Πλατή, 2019)

Σημείο θραύσης Fraass : Αυτή η δοκιμή προσδιορίζει την ελάχιστη θερμοκρασία όπου η ασφάλτος ραγίζει λόγω της υψηλής δυσκαμψίας της (Εικόνα 2.16).

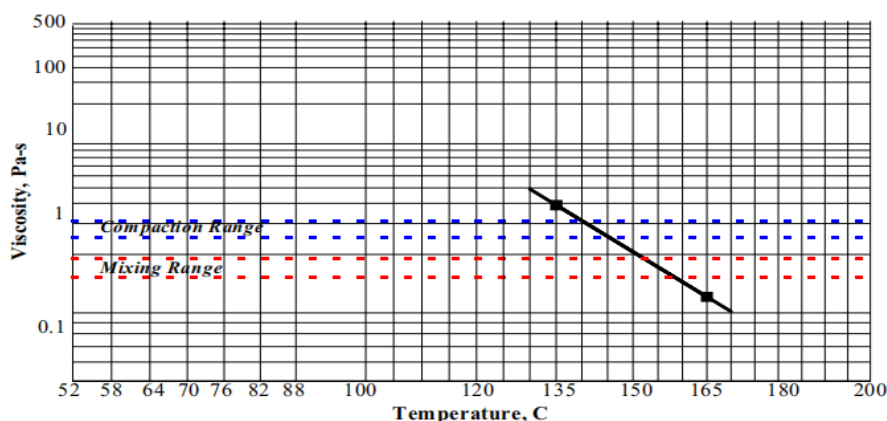


Εικόνα 2.16: Συσκευή δοκιμής σημείου θραύσης Fraass (Λοΐζος & Πλατή, 2019)

Δοκιμή Ελαστικής συμπεριφοράς: Αυτή η διαδικασία μετρά την ελαστική παραμόρφωση της ασφάλτου σε θερμοκρασία 25 °C.

2.2.4 Προετοιμασία δοκιμών Marshall

Αυτό το στάδιο καθορίζει τη **θερμοκρασία ανάμιξης και συμπύκνωσης** με βάση ένα διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση ιξώδους και θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.17. Η τρέχουσα διαδικασία για τον υπολογισμό των θερμοκρασιών ανάμιξης και συμπύκνωσης ορίζεται από το πρότυπο ASTM και δεν ενδείκνυται για μη τροποποιημένα ασφαλτικά συνδετικά. Το ιξώδες αποτελεί μέτρο της εσωτερικής τριβής ενός ρευστού. Συνεπώς, είναι σημαντικός παράγοντας κατά τη διάρκεια της ανάμιξης και συμπύκνωσης. Αν το ιξώδες είναι πολύ υψηλό, θα είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί η επιθυμητή πυκνότητα, και το δοκίμιο δεν θα μπορέσει να αναμειχθεί και να συμπιεστεί σωστά. Αν το ιξώδες είναι πολύ χαμηλό, μπορεί να είναι δύσκολο να επιτευχθεί ομοιόμορφη κατανομή του ασφαλτικού συνδετικού σε όλη τη δομή των αδρανών. Για αυτό, η θερμοκρασία έχει σημαντική επίδραση στο ιξώδες και σύμφωνα με τον Shrestha (2018), η ασφάλτος πρέπει να θερμαίνεται σε τέτοιο σημείο που να επιτυγχάνει ιξώδες 170 ± 20 centistokes για την ανάμιξη και 280 ± 30 centistokes για τη συμπύκνωση.



Εικόνα 2.17: Προσδιορισμός θερμοκρασιών ανάμιξης και συμπύκνωσης (ASTM D 2493)

Στην εικόνα 2.17, απεικονίζεται η γραφική συσχέτιση μεταξύ του **ιξώδους** (viscosity) και της **θερμοκρασίας** για το ασφαλτικό μίγμα. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή είναι το εύρος θερμοκρασιών (Mixing Range) που απαιτείται για να γίνει η σωστή ανάμιξη των υλικών. Το ιξώδες σε αυτή την περιοχή είναι χαμηλότερο, γεγονός που διευκολύνει την ανάμιξη του ασφαλτικού υλικού με τα αδρανή. Η μπλε διακεκομμένη γραμμή είναι το εύρος συμπύκνωσης (Compaction Range) και αντιπροσωπεύει το εύρος θερμοκρασιών που απαιτείται για τη συμπύκνωση του ασφαλτομίγματος. Σε αυτή τη θερμοκρασία, το ιξώδες είναι ελαφρώς υψηλότερο από την περιοχή ανάμιξης, διασφαλίζοντας ότι το υλικό είναι αρκετά παχύρρευστο ώστε να συμπυκνώνεται κατάλληλα. Τέλος, η γραμμή τάσης υποδεικνύει την πτώση του ιξώδους καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Αυτό φαίνεται λογικό, καθώς όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, το ασφαλτικό υλικό γίνεται πιο ρευστό, μειώνοντας το ιξώδες του.

Κατά τη διαδικασία ανάμιξης και συμπύκνωσης ασφαλτομίγματος, ακολουθούνται συγκεκριμένα βήματα για την παρασκευή των δοκιμών. Αρχικά, παρασκευάζεται επαρκής ποσότητα ασφαλτομίγματος ώστε να εξασφαλιστεί η κατασκευή τουλάχιστον τριών δοκιμών, το καθένα με βάρος 1.200 γραμμάρια. Στη συνέχεια, εξετάζονται τουλάχιστον τέσσερα με πέντε διαφορετικά μείγματα με περιεκτικότητα σε άσφαλτο που κυμαίνεται από 3,8% έως 5,3%, με στόχο να προσδιοριστεί το βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου. Η ανάδευση του μείγματος διαρκεί επαρκή χρόνο, περίπου πέντε λεπτά, ώστε να εξασφαλιστεί η πλήρης και ομοιόμορφη επικάλυψη των αδρανών με την άσφαλτο. Η διαδικασία ανάμιξης πραγματοποιείται σε θερμοκρασία που κυμαίνεται από 150°C έως 170°C.

Μόλις το μίγμα είναι έτοιμο, ακολουθεί η προ-συμπύκνωση του ασφαλτομίγματος. Το μίγμα τοποθετείται στη μήτρα Marshall, η οποία έχει προθερμανθεί, και υπόκειται σε 25 χτυπήματα με ράβδο συμπύκνωσης για την αρχική του διαμόρφωση. Μετά την προ-συμπύκνωση, τα κυλινδρικά δοκίμια υπόκεινται σε συμπύκνωση με τη χρήση του κόπανου Marshall (Εικόνα 2.18α). Το κάθε δοκίμιο

δέχεται 75 χτυπήματα από κάθε επίπεδη πλευρά, προσομοιώνοντας έτσι τις συνθήκες ενός οδοστρώματος βαριάς κυκλοφορίας. Πριν από την εκτέλεση της δοκιμής Marshall, τα δοκίμια τοποθετούνται σε υδατόλουτρο (Εικόνα 2.18β) για 45 λεπτά, ώστε να αποκτήσουν θερμοκρασία 60°C, προετοιμάζοντάς τα για τις επόμενες δοκιμές.



Εικόνα 2.18: (α) Συσκευή κρουστικής συμπίκνωσης, (β) Υδατόλουτρο (Λοΐζος & Πλατή, 2019)

Με τη διαδικασία αυτή διασφαλίζεται η σωστή προετοιμασία των δοκιμίων και η επίτευξη της καταλληλότερης περιεκτικότητας σε ασφαλτικό συνδετικό, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις κυκλοφορίας και τις ιδιότητες του υλικού.

2.2.5 Έλεγχος δοκιμίων σε ευστάθεια και παραμόρφωση

Η **δοκιμή ευστάθειας και παραμόρφωσης κατά Marshall** αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά στάδια στον έλεγχο των ασφαλτομιγμάτων, καθώς παρέχει πολύτιμα δεδομένα για τη συμπεριφορά του υλικού υπό φορτίο. Η διαδικασία της δοκιμής (Εικόνα 2.19) περιλαμβάνει την καταγραφή της μέγιστης δύναμης που απαιτείται για τη θραύση του δοκιμίου, η οποία εκφράζεται ως ευστάθεια και μετριέται σε kilonewtons (kN). Παράλληλα, καταγράφεται και η παραμόρφωση του δοκιμίου, η οποία αναφέρεται ως ροή και μετριέται σε χιλιοστά (mm). Η δοκιμή πραγματοποιείται σε δείγμα ασφαλτομίγματος το οποίο έχει θερμανθεί στους 60°C, ενώ ο ρυθμός φόρτισης (συμπίεσης) είναι 50 mm ανά λεπτό. Αν και η δοκιμή Marshall θεωρείται εμπειρική, παρέχει σημαντικές πληροφορίες που σχετίζονται με την αντοχή του ασφαλτομίγματος σε διάφορες καταπονήσεις. Αυτές οι πληροφορίες είναι απαραίτητες για την αξιολόγηση της αντοχής του υλικού σε μετατοπίσεις, αυλακώσεις και παραμορφώσεις, οι οποίες συχνά προκύπτουν από την εσωτερική τριβή και τη συνοχή του υλικού. Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι, εάν το ύψος του δοκιμίου διαφέρει από το τυπικό ύψος των 63,5 mm, εφαρμόζεται ένας διορθωτικός συντελεστής στην τιμή της ευστάθειας. Αυτό

γίνεται για να διασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα της δοκιμής είναι ακριβή και συγκρίσιμα με τα τυπικά δεδομένα.



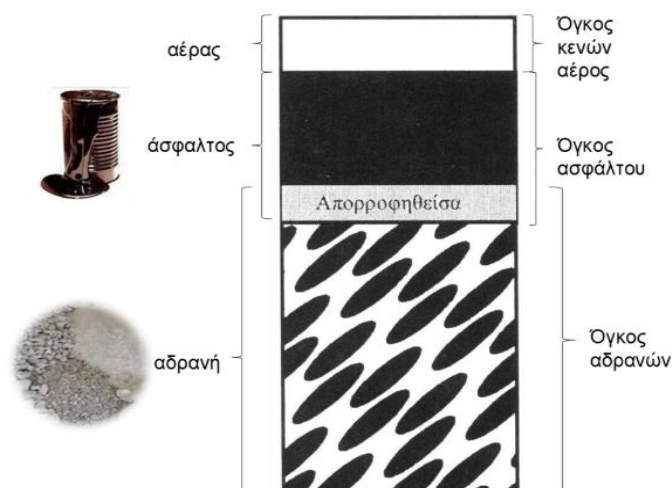
Εικόνα 2.19: Διαδικασία ελέγχου δοκιμών Marshall σε ευστάθεια-παραμόρφωση (Λοΐζος & Πλατή, 2019)

Η διαδικασία αυτή συμβάλλει στην εξασφάλιση της σωστής αξιολόγησης των ιδιοτήτων του ασφαλτομίγματος, ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει στις πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας και φόρτισης που θα αντιμετωπίσει στο οδόστρωμα.

2.2.6 Προσδιορισμός ογκομετρικών στοιχείων

Μετά τη διαδικασία ανάμιξης και συμπύκνωσης του ασφαλτομίγματος στο εργαστήριο, ο συνολικός όγκος του μίγματος αποτελείται από τρία κύρια συστατικά: τον όγκο που καταλαμβάνουν τα αδρανή, τον όγκο του ασφαλτικού συνδετικού υλικού και τον όγκο των κενών αέρα, όπως αποτυπώνεται στην εικόνα 2.20. Ο βασικός στόχος στον σχεδιασμό ενός ασφαλτομίγματος είναι να προσδιοριστούν τα ποσοστά του ασφαλτικού συνδετικού και των αδρανών σε όγκο, ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές ιδιότητες του μίγματος.

Επειδή οι μετρήσεις βάρους είναι συνήθως πιο πρακτικές και ακριβείς, αρχικά πραγματοποιούνται ζυγίσεις των συστατικών. Στη συνέχεια, τα βάρη μετατρέπονται σε όγκο με τη χρήση των αντίστοιχων ειδικών βαρών των υλικών, προκειμένου να αξιολογηθούν οι ογκομετρικές ιδιότητες του μείγματος. Γι' αυτό είναι απαραίτητο να υπάρχει καλή κατανόηση των σχέσεων μεταξύ βάρους και όγκου, ώστε να μπορεί να γίνει ο σωστός υπολογισμός και η αξιολόγηση της σύνθεσης του ασφαλτομίγματος.



Εικόνα 2.20: Ογκομετρική απεικόνιση ασφαλτομίγματος (Λοΐζος & Πλατή, 2019)

Οι μέθοδοι σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων βασίζονται στην πυκνότητα και τα κενά αέρα για τον καθορισμό των κύριων φυσικών χαρακτηριστικών του μείγματος. Συνήθως μετρώνται δύο διαφορετικές πυκνότητες: α) η φαινόμενη πυκνότητα (ρ_b), η οποία προκύπτει από τη σχέση μεταξύ του βάρους και του όγκου του συμπυκνωμένου δοκιμίου, και β) η μέγιστη θεωρητική πυκνότητα (ρ_m), που αντιπροσωπεύει την πυκνότητα του ασφαλτομίγματος χωρίς την ύπαρξη κενών αέρα. Οι πυκνότητες αυτές χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν οι **ογκομετρικές ιδιότητες** του ασφαλτομίγματος. Βασικοί δείκτες που αξιολογούνται είναι: α) τα κενά αέρα στο μίγμα (V_m), β) τα κενά που έχουν καλυφθεί με άσφαλτο (Voids Filled Asphalt), και γ) τα κενά στον σκελετό των αδρανών ή τα κενά συμπυκνωμένων αδρανών (Voids Mineral Aggregate).

Κενά αέρος (V_m):

Τα κενά αέρα είναι μικρές περιοχές που σχηματίζονται ανάμεσα στα αδρανή υλικά, τα οποία έχουν επικαλυφθεί με άσφαλτο στο τελικό συμπιεσμένο ασφαλτόμιγμα. Η ποιότητα και η πυκνότητα του ασφαλτικού οδοστρώματος σχετίζονται άμεσα με αυτά τα κενά. Όταν το ποσοστό των κενών είναι υψηλό, υπάρχει κίνδυνος να εισχωρήσει αέρας και νερό στο οδόστρωμα κατά την περίοδο χρήσης του, δημιουργώντας προβλήματα. Από την άλλη, αν τα κενά είναι ελάχιστα, η άσφαλτος μπορεί να διογκωθεί υπερβολικά (Christensen & Bonaquist, 2006). Επομένως, το ποσοστό των κενών στο ασφαλτόμιγμα πρέπει να είναι τέτοιο που να επιτρέπει μόνο ελαφριά περαιτέρω συμπύκνωση από τα κυκλοφοριακά φορτία κατά τη διάρκεια της χρήσης του. Με βάση τη μέγιστη θεωρητική πυκνότητα (ρ_m) του χαλαρού ασφαλτομίγματος αλλά και τη φαινόμενη πυκνότητα (ρ_b) των δοκιμών Marshall μπορούμε να υπολογίσουμε το ποσοστό των κενών αέρος V_m , σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100\% \quad (2.1)$$

Κενά στον σκελετό των αδρανών (VMA):

Τα κενά στον σκελετό των αδρανών (VMA) αντιπροσωπεύουν τους χώρους που υπάρχουν μεταξύ των κόκκων αδρανών και περιλαμβάνουν τόσο τα κενά αέρα όσο και τον όγκο της ασφάλτου. Τα αδρανή, λόγω των πορωδών ιδιοτήτων τους, απορροφούν μέρος της ασφάλτου, και η ποσότητα που τελικά παραμένει στο μείγμα και περιβάλλει τα αδρανή, ονομάζεται ενεργό ποσοστό ασφάλτου. Η σωστή διαχείριση αυτής της παραμέτρου έχει άμεση επίδραση στην απόδοση του οδοστρώματος, καθώς καθορίζει τη σχέση μεταξύ των αδρανών, της ασφάλτου και του αέρα μέσα στο μείγμα (Buchanan & Brown, 2001). Το VMA υπολογίζεται με την ακόλουθη σχέση:

$$VMA = V_m + B \times \frac{\rho_b}{\rho_B} \times 100\% \quad (2.2)$$

όπου B : ποσοστό ασφάλτου

Κενά πληρωμένα με άσφαλτο (VFA):

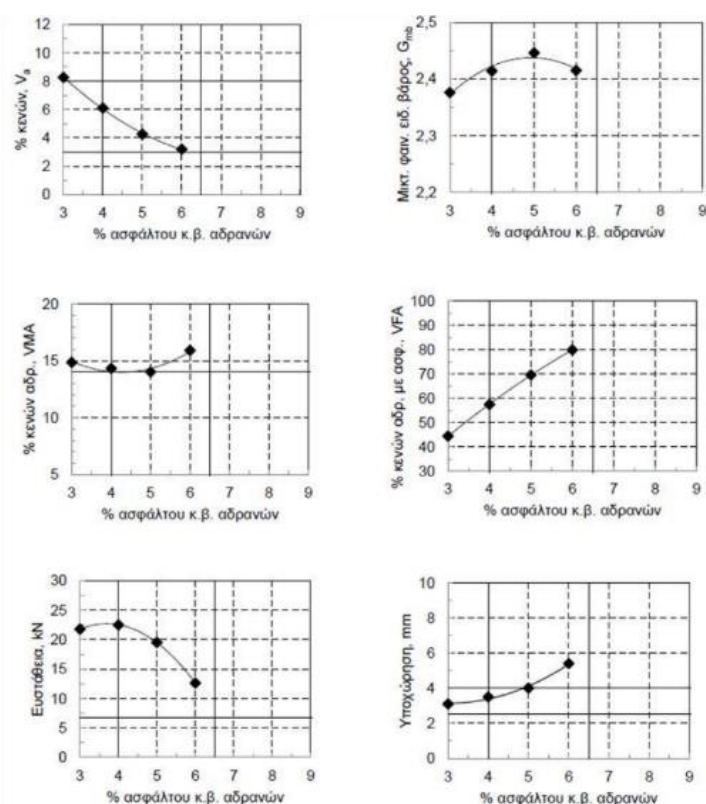
Αναφέρεται στο ποσοστό των κενών που έχουν γεμίσει με το ενεργό ποσοστό ασφάλτου. Ο δείκτης αυτός εξασφαλίζει ότι έχει καλυφθεί επαρκής αριθμός κενών με άσφαλτο, προσδιορίζοντας την ελάχιστη απαιτούμενη ποσότητα ασφάλτου για να διασφαλιστεί η συνοχή μεταξύ των κόκκων του μείγματος. Παράλληλα, καθορίζει τη μέγιστη ποσότητα ασφάλτου που μπορεί να δεχτεί το μείγμα, ώστε να αποτραπεί η εμφάνιση υπερβολικής ασφάλτου στην επιφάνεια ή πρόωρων παραμορφώσεων. Το VFA υπολογίζεται με την ακόλουθη σχέση:

$$VFA = \frac{VMA - V_m}{VMA} \times 100(\%) \quad (2.3)$$

2.2.7 Προσδιορισμός βέλτιστης περιεκτικότητας σε άσφαλτο

Το τελευταίο στάδιο της μεθόδου Marshall, αφορά στη βέλτιστη επιλογή περιεκτικότητας σε άσφαλτο και γίνεται βάσει των συνδυασμένων αποτελεσμάτων της ευστάθειας και παραμόρφωσης Marshall, καθώς και από την ανάλυση των ογκομετρικών δεδομένων. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τη δημιουργία έξι διαγραμμάτων που παρουσιάζουν τις ιδιότητες του μείγματος σε σχέση με τα διάφορα ποσοστά ασφάλτου, όπως φαίνεται στην αντίστοιχη εικόνα 2.21. Συνήθως, ως βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου επιλέγεται εκείνο που αντιστοιχεί στο μέσο

ποσοστό κενών αέρα, το οποίο σύμφωνα με τις προδιαγραφές είναι συνήθως 4%. Βέβαια, πρέπει να πληρούνται και όλες οι υπόλοιπες προδιαγραφές σχετικά με τα χαρακτηριστικά του μίγματος.



Εικόνα 2.21: Διαγράμματα χαρακτηριστικών ιδιοτήτων (Λοϊζος & Πλατή, 2019)

Από την ανάλυση των διαγραμμάτων μπορούν να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα:

Τα κενά αέρα (V_m) μειώνονται σταδιακά όσο αυξάνεται το ποσοστό ασφάλτου στο μείγμα. Ακόμα τα κενά στον σκελετό των αδρανών (VMA) αρχικά μειώνονται, λόγω της καλύτερης συμπύκνωσης, μέχρι να φτάσουν σε μια ελάχιστη τιμή και στη συνέχεια αρχίζουν να αυξάνονται. Όσο για τα κενά που γεμίζουν με άσφαλτο (VFA), αυτά αυξάνονται σταθερά καθώς προστίθεται περισσότερη άσφαλτος, καθώς η άσφαλτος γεμίζει τα VMA. Η καμπύλη του φαινομένου ειδικού βάρους δείχνει αρχικά μια μέγιστη τιμή καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε άσφαλτο και στη συνέχεια παρουσιάζει μείωση. Παρόμοια τάση παρατηρείται και στην καμπύλη της ευστάθειας (S), η οποία φτάνει σε μια μέγιστη τιμή με την αύξηση του ποσοστού ασφάλτου και μετά υποχωρεί. Τέλος, η παραμόρφωση (F) αυξάνεται συνεχώς καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα της ασφάλτου στο μείγμα.

Στον πίνακα 2.2, παρουσιάζονται ενδεικτικά οι οριακές τιμές που πρέπει να ικανοποιεί το ασφαλτόμικγμα για όλες τις στρώσεις, σύμφωνα με τις τρέχουσες προδιαγραφές (ΠΕΤΕΠ, 2016).

Πίνακας 2.2 : Απαιτήσεις ΠΕΤΕΠ χαρακτηριστικών ασφαλτικού σκυροδέματος για όλες τις ασφαλτικές στρώσεις (Λοΐζος & Πλατή, 2019)

Χαρακτηριστικά κριτήρια	Για όλες τις κατηγορίες			
Βαθμός συμπίκνωσης	2x75			
Ευστάθεια (KN)	> 8,0			
Παραμόρφωση (mm)	2,0 - 4,0			
Κενά αέρος (%)	3,0 - 5,0			
Κενά που γέμισαν με άσφαλτο (%)	65 - 74			
Κενά συμπυκνωμένων αδρανών (Κενά στο σκελετό των αδρανών) %	Για όλες τις περιπτώσεις			
	Ονομαστικό μέγεθος μίγματος αδρανών (mm)	Για κενά αέρος		
		3%	4%	5%
	40	> 10	> 11	> 12
	31,5	> 11	> 12	> 13
	20	> 12	> 13	> 14
	12,5	> 13	> 14	> 15
10	> 14	> 15	> 16	

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένες προδιαγραφές έχουν πρόσφατα αναθεωρηθεί και τεθεί σε δημόσια διαβούλευση, με την τελική έκδοση να αναμένεται σύντομα. Είναι πιθανό να υπάρξουν διαφοροποιήσεις στα όρια των απαιτήσεων, ιδίως σε ό,τι αφορά τις κοκκομετρικές διαβαθμίσεις και τα χαρακτηριστικά συμπεριφοράς του μείγματος.

2.3 Περιγραφή μονάδας παραγωγής ασφαλτομίγματος

Ο βασικός σκοπός μιας μονάδας παραγωγής ασφαλτομίγματος είναι να δοσολογήσει, να θερμάνει και να αναμίξει μια συγκεκριμένη ποσότητα αδρανών και ασφάλτου, ώστε να παραχθεί ένα μίγμα που να πληροί τις απαιτήσεις μιας συγκεκριμένης σύνθεσης. Τα βασικά μέρη των ασφαλτικών συγκροτημάτων διακρίνονται σε τρία κύρια τμήματα: το τμήμα τροφοδοσίας, το τμήμα ξήρανσης ή θέρμανσης και το τμήμα ανάμιξης. Η διάκριση του τύπου του συγκροτήματος βασίζεται στα δύο τελευταία τμήματα (ξήρανση και ανάμιξη), ενώ το τμήμα τροφοδοσίας παραμένει ίδιο για όλους τους τύπους. Οι βασικοί τύποι ασφαλτικών συγκροτημάτων είναι δύο: 1) Συγκροτήματα ανά παρτίδες ή ζυγιστικά (Batch Plant) και 2) Συγκροτήματα συνεχούς ροής (Drum Plant).

2.3.1 Συγκρότημα ανά παρτίδες

Το συγκρότημα ανά παρτίδες είναι συνήθως σταθερά εγκατεστημένο σε εργοστάσιο και μπορεί να παράγει όλους τους τύπους ασφαλτομιγμάτων. Είναι πολύ ευέλικτο

στην αλλαγή τύπων ασφαλτομιγμάτων και είναι το πιο κοινό που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα για την παραγωγή ασφαλτομιγμάτων. Στην εικόνα 2.22, απεικονίζεται ο τύπος του συγκροτήματος και τα βασικά μέρη που το αποτελούν.



Εικόνα 2.22: Συγκρότημα παραγωγής ασφαλτομίγματος ανά παρτίδες (από προσωπικό αρχείο)

Η παραγωγή ασφαλτομίγματος περιλαμβάνει πολλά στάδια, κάθε ένα από τα οποία συνεισφέρει στην τελική ποιότητα του προϊόντος. Αρχικά, η διαδικασία ξεκινά με την τροφοδοσία των αδρανών υλικών από ειδικές αποθήκες στο σύστημα προμήθειας αδρανών. Τα αδρανή αυτά, με τη χρήση ενός ελαστικοφόρου φορτωτή (εικόνα 2.23), οδηγούνται σε κωνικές αποθήκες όπου ταξινομούνται ανάλογα με το μέγεθός τους. Η τροφοδοσία των υλικών γίνεται ογκομετρικά, ώστε να εξασφαλιστούν οι σωστές αναλογίες, σύμφωνα με τις ανάγκες του έργου.



Εικόνα 2.23: Τροφοδοσία αδρανών υλικών (από προσωπικό αρχείο)

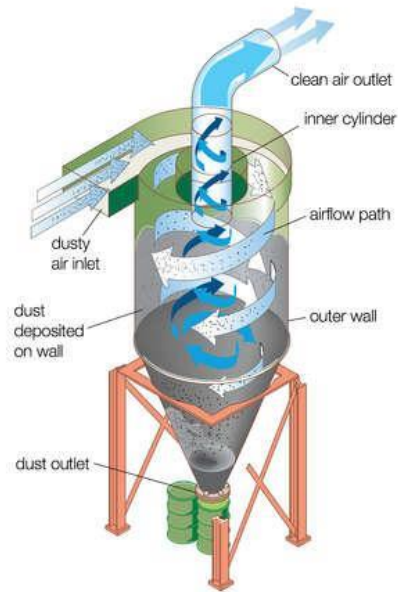
Ο κλίβανος ξήρανσης (εικόνα 2.24) αποτελεί το βασικό τμήμα της παραγωγικής διαδικασίας, καθώς εκεί τα αδρανή θερμαίνονται και αποβάλλουν την υγρασία τους. Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται κυμαίνεται από 180 έως 200 βαθμούς

Κελσίου, ώστε να επιτευχθεί η σωστή προθέρμανση των υλικών. Ο κλίβανος αποτελείται από ένα στρεφόμενο τύμπανο με ειδικά πτερύγια στο εσωτερικό του, που διευκολύνουν την ομοιόμορφη ανάδευση και μεταφορά των υλικών, ενώ παράλληλα μεγιστοποιούν την εκμετάλλευση της θερμότητας. Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι και η σκόνη που παράγονται κατά τη διαδικασία, συλλέγονται με τη βοήθεια του κυκλώνα, ο οποίος συμβάλλει τόσο στη βελτίωση της απόδοσης της καύσης όσο και στην προστασία του περιβάλλοντος.



Εικόνα 2.24: Περιστρεφόμενο τύμπανο ξήρανσης αδρανών υλικών (από προσωπικό αρχείο)

Μετά την ξήρανση, τα αδρανή μεταφέρονται μέσω ανεμιστήρα κυκλοφορίας σε έναν κυκλώνα συλλογής σκόνης (εικόνα 2.25). Ο κυκλώνας απομακρύνει τα λεπτά σωματίδια σκόνης, τα οποία στη συνέχεια αποθηκεύονται στα σακκόφιλτρα (εικόνα 2.26), τα οποία είναι ειδικές αποθήκες, εξοπλισμένες με υφασμάτινες σακούλες ανθεκτικές στις υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό το στάδιο είναι κρίσιμο, καθώς η σκόνη που συλλέγεται χρησιμοποιείται στη συνέχεια κατά την ανάμιξη, εμπλουτίζοντας το ασφαλτόμιγμα και συμβάλλοντας στην πλήρωση των κενών του υλικού.



Εικόνα 2.25: Κυκλώνας συλλογής σκόνης



Εικόνα 2.26: Σακκόφιλτρα (baghouse)

Μετά την ξήρανση, τα αδρανή μεταφέρονται στον πύργο ανάμιξης με τη βοήθεια του αναβατορίου (εικόνα 2.27), το οποίο διαθέτει μικρούς κάδους που διασφαλίζουν την ασφαλή και αποτελεσματική μεταφορά τους. Στη συνέχεια, τα αδρανή διαχωρίζονται ανάλογα με το μέγεθος τους μέσω ενός συστήματος δονούμενων κοσκίνων. Ο διαχωρισμός αυτός είναι απαραίτητος, καθώς εξασφαλίζει την κατάλληλη σύνθεση του μίγματος, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του έργου.



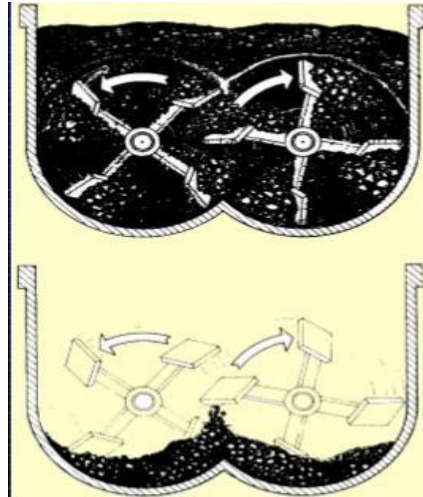
Εικόνα 2.27: Αναβατήριο (από προσωπικό αρχείο)

Το συνδετικό υλικό, δηλαδή η ασφάλτος, θερμαίνεται και τροφοδοτείται στον πύργο ανάμιξης μέσω αντλιών και αγωγών (εικόνα 2.28). Η θερμοκρασία της ασφάλτου διατηρείται σε επίπεδα μεταξύ 130 και 170 βαθμών Κελσίου, ανάλογα με τον τύπο του ασφαλτομίγματος. Παράλληλα, γίνεται ακριβής ζύγιση τόσο των αδρανών όσο και της ασφάλτου, ώστε να επιτευχθεί η σωστή δοσολογία σύμφωνα με τη μελέτη του μίγματος. Η ζύγιση αυτή πραγματοποιείται με τη χρήση ειδικών ζυγαριών υψηλής ακρίβειας.



Εικόνα 2.28: Αγωγοί μεταφοράς ασφάλτου (από προσωπικό αρχείο)

Αφού ολοκληρωθεί η ζύγιση, τα υλικά οδηγούνται στον αναμκτήρα (εικόνα 2.29). Εκεί, τα αδρανή αναμιγνύονται αρχικά χωρίς την προσθήκη της ασφάλτου και στη συνέχεια, με την προσθήκη του συνδετικού υλικού. Η ανάμιξη διαρκεί περίπου 45-60 δευτερόλεπτα, με στόχο την ομοιόμορφη κατανομή της ασφάλτου στα αδρανή και τη δημιουργία ενός συμπαγούς μίγματος υψηλής ποιότητας.



Εικόνα 2.29: Αναμικτήρας αδρανών υλικών και ασφάλτου

Το τελικό προϊόν, δηλαδή το ασφαλτόμιγμα, μπορεί είτε να αποθηκευτεί προσωρινά σε ειδικές δεξαμενές (εικόνα 2.30) είτε να διατεθεί άμεσα για χρήση στο έργο. Η παραγωγή του ασφαλτομίγματος ρυθμίζεται σύμφωνα με τις ανάγκες του έργου, ενώ η αποθήκευση του υλικού συνιστάται να μην υπερβαίνει τις δύο ημέρες, για να διασφαλιστεί η ποιότητα.



Εικόνα 2.30: Σιλό Αποθήκευση ασφαλτομίγματος (από προσωπικό αρχείο)

Όλες οι διαδικασίες παραγωγής ελέγχονται και ρυθμίζονται από το κέντρο ελέγχου (εικόνα 2.31), όπου οι χειριστές παρακολουθούν και επεμβαίνουν σε κρίσιμες παραμέτρους, όπως η ροή και η ζύγιση των υλικών, οι θερμοκρασίες στους ξηραντήρες και το τελικό προϊόν, καθώς και άλλες κρίσιμες λειτουργίες. Με τη βοήθεια του κέντρου ελέγχου, εξασφαλίζεται ότι η παραγωγή συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις του έργου και τηρεί τα απαραίτητα πρότυπα ποιότητας.

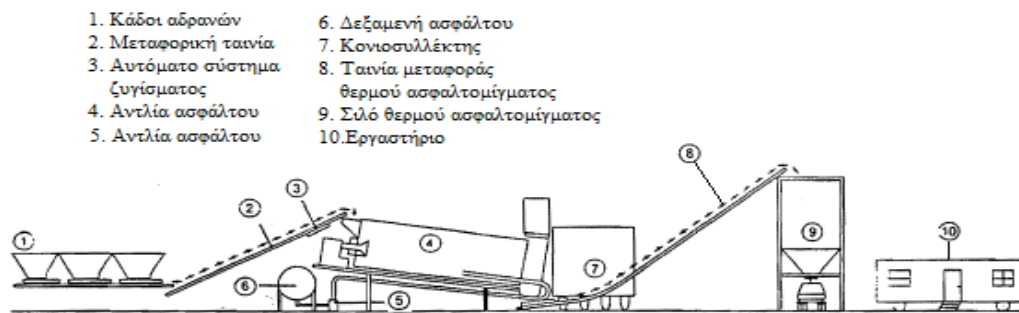


Εικόνα 2.31: Κέντρο ελέγχου παραγωγής (από προσωπικό αρχείο)

Όλη αυτή η λεπτομερής διαδικασία παραγωγής διασφαλίζει ότι το παραγόμενο ασφαλτόμιγμα πληροί τις απαιτήσεις για χρήση στις υποδομές, εξασφαλίζοντας αντοχή και υψηλή απόδοση στο τελικό έργο. Ωστόσο, εξίσου σημαντική είναι και η παρακολούθηση των ρύπων που εκλύονται από την καμινάδα κατά τη διαδικασία παραγωγής, καθιστώντας απαραίτητη τη μέτρηση και τον έλεγχο των εκπομπών για την προστασία του περιβάλλοντος.

2.3.2 Συγκρότημα συνεχούς ροής

Το συγκρότημα συνεχούς ροής είναι σχετικά πιο απλό και έχει μεγαλύτερη και συνεχής παραγωγή, καθώς τα αδρανή υλικά μετά την ξήρανση τους δεν ζυγίζονται όπως συμβαίνει στην μονάδα που λειτουργεί ανά παρτίδες. Αρχικά, η θέρμανση των αδρανών υλικών πραγματοποιείται σε έναν περιστροφικό ξηραντήρα, ώστε να απομακρυνθεί η υγρασία τους. Μόλις ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία, τα ξηρά αδρανή υλικά μεταφέρονται απευθείας χωρίς ζύγιση στο τμήμα ανάμιξης, όπου προστίθεται η άσφαλτος. Το κύριο μειονέκτημα είναι ότι η αλλαγή από έναν τύπο ασφαλτομίγματος σε άλλον απαιτεί χρόνο και δεν είναι τόσο εύκολη διαδικασία. Στην εικόνα 2.32, φαίνεται ο τύπος της εγκατάστασης και τα βασικά μέρη που τον απαρτίζουν.



Εικόνα 2.32: Συγκρότημα παραγωγής ασφαλτομίγματος συνεχούς ροής (Μαρινέλλη & Πετρουτσάτου, 2014)

Συμπερασματικά, τα συγκροτήματα παραγωγής ασφαλτομίγματος τόσο το ανά παρτίδες όσο και της συνεχούς ροής έχουν τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς τους, ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου. Μερικές από τις απαιτήσεις περιλαμβάνουν την απαιτούμενη ποσότητα ασφαλτομίγματος, το κόστος παραγωγής, η παραγωγική δυνατότητα του συγκροτήματος, ο τύπος του ασφαλτομίγματος, καθώς και οι εκπομπές ρύπων και θορύβων .

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

3.1 Γενικά στοιχεία

3.1.1 Ιστορική αναδρομή

Η αρχή της ανάλυσης του κύκλου ζωής (ΑΚΖ) χρονολογείται στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και θεωρείται μια καινοτόμος μέθοδος για την εποχή. Είναι μια τεχνική ανάλυση, η οποία χρησιμοποιείται για την εκτίμηση και την ποσοτικοποίηση των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος κατά τη διάρκεια της ζωής του. Η πρώτη γνωστή προσέγγιση πραγματοποιήθηκε το 1969 στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, όταν η Coca-Cola ανέλαβε την υλοποίηση μιας μελέτης, με τίτλο Resource and Environmental Profile Analysis (REPA). Η μελέτη επικεντρώθηκε στην ανάλυση και τη σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη χρήση διαφορετικών υλικών για συσκευασίες ποτών, ποσοτικοποιώντας την κατανάλωση πόρων και τις εκπομπές στη διαδικασία παραγωγής συσκευασιών. Αργότερα, σύμφωνα με τον Ferreira (2004), οι μελέτες REPA συνέχισαν να αναπτύσσονται και το 1974 ανατέθηκε από την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (USEPA) μια μελέτη, η οποία σύγκρινε διαφορετικά υλικά για συσκευασίες μπίρας, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο την παραγωγή συσκευασιών αλλά και τη διανομή των προϊόντων, καθώς και την προσθήκη διαφόρων υλικών, όπως το γυαλί, το αλουμίνιο και το πλαστικό. Παρά τις πρώιμες εφαρμογές, ο όρος **Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Analysis, LCA)** χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στις αρχές της δεκαετίας του 1990 στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Η δεκαετία του 1990 ήταν σημαντική για την καθιέρωσή της, καθώς ξεκίνησε η τυποποίηση της μεθοδολογίας σε διεθνές επίπεδο μέσω του **Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης (ISO)**. Το 1992, ο ISO δημιούργησε την Τεχνική Επιτροπή TC 207, η οποία ανέλαβε τη δημιουργία των προτύπων, ISO 14040 (2006α) και ISO 14044 (2006β) για την κανονικοποίηση της ΑΚΖ ως τεχνική περιβαλλοντικής διαχείρισης ISO 14001 (1992). Αυτά τα πρότυπα αποτελούν τη βάση για την εφαρμογή της ΑΚΖ σε παγκόσμιο επίπεδο, ορίζοντας τις αρχές, το πλαίσιο και τις κατευθυντήριες γραμμές για τη διεξαγωγή μιας πλήρους ανάλυσης. Με την τυποποίηση της ΑΚΖ μέσω των προτύπων ISO, η μέθοδος γνώρισε ταχεία εξάπλωση στις βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς πολλές εταιρείες άρχισαν να χρησιμοποιούν την ανάλυση κύκλου ζωής για τον υπολογισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των προϊόντων τους, από τον σχεδιασμό έως την τελική χρήση και διάθεση. Τα τελευταία χρόνια, η ΑΚΖ έχει επεκταθεί όχι μόνο στις περιβαλλοντικές, αλλά και στις κοινωνικές (Social LCA) και οικονομικές πτυχές (Economic LCA) ενός προϊόντος, επιτρέποντας μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της βιωσιμότητας.

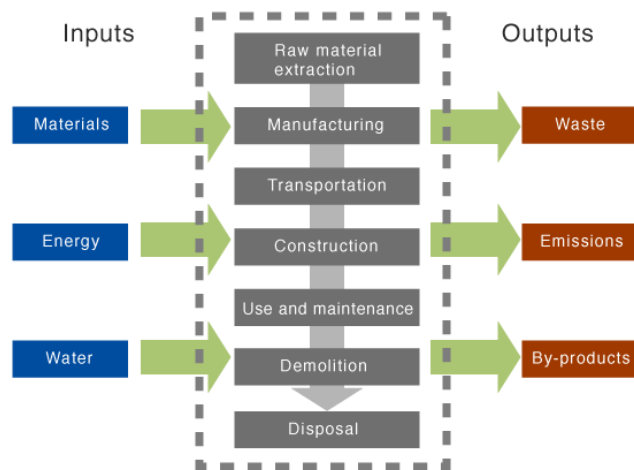
3.1.2 Βασικές αρχές

Η ΑΚΖ είναι μια προσέγγιση που εκτιμά το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα ενός συγκεκριμένου προϊόντος, όπως είναι ένας τόνος ασφαλτομίγματος ή ενός βιομηχανικού συστήματος, όπως είναι μια μονάδα παραγωγής ασφαλτομίγματος. Αυτή η προσέγγιση εξετάζει όλες τις εισροές και τις εκροές κατά τη διάρκεια ζωής ενός προϊόντος, καθώς ξεκινάει από τη συλλογή πρώτων υλών για την παραγωγή ενός προϊόντος και συνεχίζει μέχρι την τελική διάθεσή του, όπου όλα τα υλικά επιστρέφουν στη γη ή επαναχρησιμοποιούνται. Συχνά, όλη αυτή η διαδικασία αναφέρεται ως “cradle to grave”, δηλαδή από την “αρχή μέχρι το τέλος” (Guinée et al., 2002). Με αυτόν τον τρόπο, η ΑΚΖ εξετάζει όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, με κάθε στάδιο να επηρεάζει το επόμενο.

Πραγματοποιώντας μια μελέτη ΑΚΖ, οι ερευνητές μπορούν:

- Να αναπτύξουν μια σύνθετη αποτίμηση των περιβαλλοντικών συνεπειών που σχετίζονται με ένα συγκεκριμένο προϊόν.
- Να πραγματοποιούν ποσοτικό προσδιορισμό των περιβαλλοντικών εκροών στον αέρα, στο νερό και στο έδαφος σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή συστήματος.
- Να προσδιορίσουν κάθε σημαντική μετακίνηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μεταξύ των σταδίων του κύκλου ζωής και των περιβαλλοντικών μέσων.
- Να αποτιμήσουν τις επιπτώσεις στον άνθρωπο και στο περιβάλλον από την κατανάλωση υλικών αγαθών και των εκροών ενέργειας στα όρια μιας τοπικής κοινωνίας, μιας γεωγραφικής περιοχής και στον κόσμο.
- Να συγκρίνουν τις επιπτώσεις στην υγεία και στο περιβάλλον, δύο ή περισσότερων εφάμιλλων προϊόντων ή να προσδιορίσουν τις επιπτώσεις ενός συγκεκριμένου προϊόντος ή μιας συγκεκριμένης μεθόδου.
- Να προσδιορίσουν τις επιπτώσεις για ένα ή περισσότερους συγκεκριμένους περιβαλλοντικούς τομείς όπου υπάρχει ανησυχία.

Η εικόνα 3.1 δείχνει τα πιθανά στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή συστήματος, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε μια μελέτη ΑΚΖ και τις τυπικές εκροές και εισροές μεταξύ των σταδίων που πιθανόν να λαμβάνονται υπόψη σε μια μελέτη ΑΚΖ.



Εικόνα 3.1: Στάδια κύκλου ζωής ενός προϊόντος σε μια μελέτη AKZ (Guinée et al., 2002)

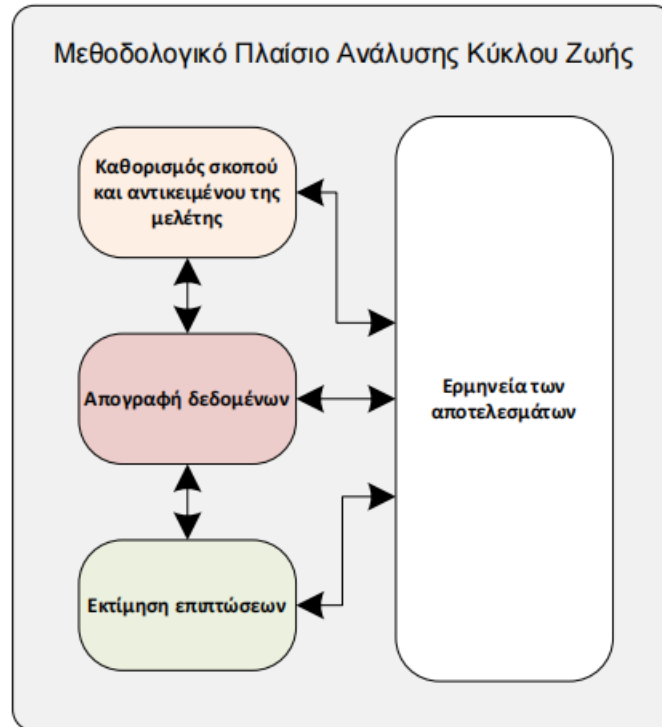
Όπως προκύπτει, ο κύκλος ζωής ενός προϊόντος ξεκινά με την απόκτηση των πρώτων υλών, περνά από διάφορα διακριτά στάδια, όπως είναι η επεξεργασία, η κατασκευή, η χρήση, και ολοκληρώνεται με το τέλος της ζωής, ενώ περιλαμβάνει επίσης τη διαδικασία της μεταφοράς μεταξύ των σταδίων του προϊόντος.

3.2 Δομή της μεθόδου ανάλυσης

Η εκτίμηση του κύκλου ζωής ενός προϊόντος είναι μια συστημική και σταδιακή προσέγγιση και καθορίστηκε αρχικά από τον **Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO)**, μέσω των προτύπων **ISO 14040 (2006α)** και **ISO 14044 (2006β)**, τα οποία περιγράφουν τις απαιτήσεις και τις οδηγίες για τη διεξαγωγή της ανάλυσης. Σύμφωνα με αυτά τα πρότυπα, η ανάλυση κύκλου ζωής περιλαμβάνει τέσσερα βασικά στάδια:

1. Καθορισμός σκοπού και αντικειμένου της μελέτης (Goal and scope definition)
2. Απογραφή δεδομένων (Life Cycle Inventory, LCI)
3. Εκτίμηση επιπτώσεων (Life Cycle Impact assessment, LCIA)
4. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Interpretation)

Η γενική διάταξη των σταδίων παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2: Στάδια και δομή της ΑΚΖ (ISO 14040, 2006a; ISO 14044, 2006b)

Τα τέσσερα αυτά στάδια είναι αλληλένδετα μεταξύ τους, ενώ πρέπει να εφαρμοστούν με ακρίβεια και πληρότητα, προκειμένου να εξασφαλιστεί η όσο το δυνατόν πιο ολοκληρωμένη υλοποίηση της μεθόδου ΑΚΖ.

3.2.1 Καθορισμός σκοπού και αντικειμένου της μελέτης

Ο **καθορισμός του σκοπού και του αντικειμένου** της μελέτης αποτελεί το πρώτο βήμα στην ανάλυση κύκλου ζωής (ΑΚΖ), το οποίο θέτει τις βάσεις για όλη την υπόλοιπη διαδικασία και καθορίζει την κατεύθυνση της ανάλυσης. Σε αυτή τη φάση, ορίζονται οι λόγοι για τους οποίους διεξάγεται η μελέτη, το επιθυμητό αποτέλεσμα και οι βασικές παράμετροι που θα καθορίσουν το πλαίσιο της ΑΚΖ. Τα σημαντικότερα ζητήματα που συνδέονται με το σκοπό και το αντικείμενο της εκτίμησης του κύκλου ζωής, είναι:

- Η ακριβής αποτύπωση του σκοπού για τον οποίο γίνεται η ΑΚΖ
- Ο λεπτομερής καθορισμός του κύκλου ζωής και της χρήσης του προϊόντος ή συστήματος
- Ο καθορισμός της λειτουργικής μονάδας (functional unit)
- Ο ορισμός και περιγραφή των ορίων του συστήματος
- Ο καθορισμός των ποιοτικών προδιαγραφών για τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν
- Οι υποθέσεις, περιορισμοί και απαιτήσεις για την επακόλουθη ερμηνεία

Ουσιαστικά, το πλαίσιο της μελέτης βασίζεται στο επίπεδο λεπτομέρειας που απαιτείται για την εφαρμογή των αποτελεσμάτων. Άλλωστε το τελικό αποτέλεσμα της μελέτης, εξαρτάται κυρίως από την ακρίβεια των στοιχείων που εισάγονται. Σε αυτή τη φάση της ανάλυσης, είναι ουσιαστικό να διευκρινιστούν κάποιες βασικές έννοιες που είναι απαραίτητες για την πραγματοποίηση της διαδικασίας, οι οποίες καθορίζονται από το πρότυπο ISO14040 (2006α) και αποτελούν τον οδηγό για τη σωστή υλοποίηση της ΑΚΖ.

Στόχος

Ο στόχος της ανάλυσης κύκλου ζωής αποτελεί το θεμέλιο πάνω στο οποίο στηρίζεται ολόκληρη η διαδικασία, καθώς καθορίζει το πλαίσιο και τη μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος ή σύνθετου συστήματος (ISO 14040, 2006α). Ο οργανισμός που διεξάγει την ανάλυση πρέπει από την αρχή να καθορίσει με ακρίβεια και σαφήνεια το στόχο της, ώστε να προσδιορίσει το είδος της μελέτης, το πεδίο εφαρμογής και τις προσεγγίσεις που θα χρησιμοποιηθούν.

Πεδίο εφαρμογής

Αφού καθοριστεί ο στόχος, πρέπει να προσδιοριστεί το πεδίο εφαρμογής της ΑΚΖ, το οποίο περιγράφει με ακρίβεια το πλαίσιο στο οποίο θα διεξαχθεί η μελέτη και τα όρια του συστήματος. Επιπλέον, προσδιορίζει με σαφήνεια το περιεχόμενο της ανάλυσης και τις προτεραιότητες που θα τεθούν. Τα κύρια στοιχεία του πεδίου εφαρμογής περιλαμβάνουν (Guinée et al., 2002):

Λειτουργική μονάδα: Καθορίζει το σύστημα που πρόκειται να αναλυθεί και χρησιμεύει ως σημείο αναφοράς για τα δεδομένα εισόδου και εξόδου σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του προϊόντος. Αποτελεί τη βάση, καθώς μέσω αυτής, καταγράφονται και συγκρίνονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τη λειτουργία του συστήματος. Η επιλογή της κατάλληλης λειτουργικής μονάδας είναι κρίσιμη, καθώς διασφαλίζει ότι η ανάλυση θα είναι συγκρίσιμη μεταξύ διαφορετικών προϊόντων. Εάν δεν οριστεί σωστά ή είναι ανακριβής, τότε τα αποτελέσματα της ανάλυσης ενδέχεται να είναι αναξιόπιστα ή να μην επιτρέπουν δίκαιη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών συστημάτων. Για παράδειγμα, στην παραγωγή ασφαλομίγματος, η λειτουργική μονάδα θα μπορούσε να είναι μια συγκεκριμένη ποσότητα του παραγόμενου προϊόντος, όπως ένας τόνος ασφαλομίγματος, η οποία χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για τη μέτρηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της διαδικασίας παραγωγής.

Περίοδος ανάλυσης: Μαζί με τον ορισμό της λειτουργικής μονάδας, προσδιορίζεται και η περίοδος ανάλυσης, η οποία ορίζεται ως το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο εξετάζεται η λειτουργία του συστήματος και οι επιπτώσεις που προκύπτουν από αυτό. Η περίοδος ανάλυσης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να περιλαμβάνει τουλάχιστον την επόμενη σημαντική επισκευή ή αποκατάσταση. Παρόλα αυτά, η υπερβολική επέκτασή της μπορεί να προκαλέσει αυξημένη αβεβαιότητα και δυσκολία στην πρόβλεψη μελλοντικών συμβάντων.

Όρια του συστήματος: Αποτελούν βασικό στοιχείο για την κατανόηση των δυνατοτήτων της μεθόδου, αλλά και για την εμβάθυνση στη λειτουργία της. Σύμφωνα με το πρότυπο **ISO 14040**, αφορά την επιλογή των δραστηριοτήτων και διαδικασιών που περιλαμβάνονται στα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος (ISO 14040, 2006a). Επίσης καθορίζουν τις διαδικασίες και τις διεργασίες που θα συμπεριληφθούν στην ανάλυση του συστήματος, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να αποκλειστούν συγκεκριμένα στάδια. Ο τρόπος με τον οποίο καθορίζονται τα όρια επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης κύκλου ζωής και καθορίζει τη δυνατότητα σύγκρισης των μελετών. Με αυτόν τον τρόπο, προσδιορίζεται η έκταση των σταδίων του κύκλου ζωής που θα εξεταστούν, από την εξόρυξη των πρώτων υλών και τη μεταφορά, μέχρι την κατασκευή, τη χρήση και τη διάθεση του προϊόντος στο τέλος ζωής του. Στην AKZ, οι τέσσερις συνηθέστεροι τύποι ορίων συστήματος είναι η εξής (Guinée et al., 2002):

- Από την αρχή μέχρι το τέλος (Cradle to Grave): Περιλαμβάνει όλα τα στάδια του κύκλου ζωής, από την απόκτηση των πρώτων υλών μέχρι και το τέλος της ζωής του προϊόντος.
- Από την αρχή μέχρι την πύλη (Cradle to Gate): Εστιάζει στις διαδικασίες από την απόκτηση των πρώτων υλών έως την τελική παραγωγή, δηλαδή πριν το προϊόν φτάσει στην αγορά ή στους τελικούς χρήστες.
- Από την πύλη μέχρι το τέλος (Gate to Grave): Λαμβάνει υπόψη τα στάδια από την έναρξη της χρήσης έως και το τέλος ζωής, δηλαδή όλες τις διεργασίες μετά την παραγωγή του προϊόντος.
- Από την πύλη μέχρι την πύλη (Gate to Gate): Εστιάζει αποκλειστικά στη φάση της παραγωγής, δηλαδή στη διαδικασία που συμβαίνει μέσα στα όρια της βιομηχανικής μονάδας.

Καταμερισμός: Εφαρμόζεται όταν κατά τη διάρκεια μιας παραγωγικής διαδικασίας παράγονται περισσότερα από ένα προϊόντα, είτε αυτά είναι κύρια είτε υποπροϊόντα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, δεν είναι δυνατόν να αποδοθούν όλες οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε ένα μόνο προϊόν και είναι απαραίτητο να μοιραστούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις μεταξύ των διαφόρων προϊόντων που παράγονται. Η κατανομή αυτή γίνεται για να διασφαλιστεί ότι κάθε προϊόν ή υποπροϊόν λαμβάνει το μερίδιο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που του

αναλογεί, σύμφωνα με τη συμμετοχή του στη συνολική παραγωγική διαδικασία. Για παράδειγμα, εάν μια παραγωγική διαδικασία παράγει τόσο κύρια προϊόντα όσο και παραπροϊόντα, οι επιπτώσεις που συνδέονται με τη χρήση πρώτων υλών, ενέργειας και άλλων πόρων πρέπει να κατανεμηθούν μεταξύ των προϊόντων αυτών με δίκαιο τρόπο.

3.2.2 Απογραφή δεδομένων

Το δεύτερο στάδιο της ανάλυσης κύκλου ζωής, γνωστό ως απογραφή κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory, LCI), περιλαμβάνει τη συλλογή και επεξεργασία όλων των απαραίτητων δεδομένων για την επίτευξη του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης. Το πρότυπο **ISO 14040** ορίζει την απογραφή κύκλου ζωής ως τη διαδικασία συλλογής και ποσοτικοποίησης των εισροών και εκροών ενός προϊόντος καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του (ISO 14040, 2006a). Η **συλλογή δεδομένων** πρέπει να γίνεται με ακρίβεια και να ανταποκρίνεται στους στόχους και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης, όπως αυτά καθορίζονται στο πρώτο στάδιο της ΑΚΖ (ISO 14044, 2006b). Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται, οι υποθέσεις και οι κανόνες που ακολουθούνται σε αυτή τη φάση πρέπει να συνάδουν με τους συνολικούς σκοπούς της ανάλυσης, ώστε να διασφαλίζεται η συνέπεια των δεδομένων και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια του LCI γίνεται λεπτομερής καταγραφή όλων των **φυσικών εισροών**, όπως η κατανάλωση ενέργειας και υλικών, καθώς και των **περιβαλλοντικών εκροών**, όπως οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, η παραγωγή αποβλήτων και η κατανάλωση νερού, σε κάθε στάδιο της παραγωγικής αλυσίδας. Για παράδειγμα, αν εξετάζουμε τον κύκλο ζωής ενός οδοστρώματος, το LCI θα περιλαμβάνει δεδομένα σχετικά με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά την παραγωγή, τη χρήση νερού για την επεξεργασία των υλικών, καθώς και τα απόβλητα που παράγονται κατά την κατασκευή και την απόρριψη του οδοστρώματος στο τέλος της χρήσης του. Η φάση αυτή είναι θεμελιώδης, καθώς τα δεδομένα που συλλέγονται και αναλύονται αποτελούν τη βάση για την επόμενη φάση μιας μελέτης ΑΚΖ. Οι ακριβείς εισροές και εκροές που καταγράφονται επιτρέπουν την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του προϊόντος, όπως η συνεισφορά του στην κλιματική αλλαγή, η εξάντληση φυσικών πόρων, η ρύπανση υδάτων και άλλες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις. Η πληρότητα και η ακρίβεια των δεδομένων του LCI επηρεάζουν άμεσα την αξιοπιστία των τελικών συμπερασμάτων, καθώς τα αποτελέσματα από αυτή τη φάση καθορίζουν το εύρος και την ένταση των επιπτώσεων που θα εκτιμηθούν στην επόμενη φάση. Επομένως, η σωστή και συστηματική συλλογή των στοιχείων σε αυτό το στάδιο είναι καθοριστικής σημασίας για την επιτυχία και την εγκυρότητα μιας ΑΚΖ.

Ο τρόπος με τον οποίο υλοποιείται το βήμα της απογραφής κύκλου ζωής (LCI) είναι ένα από τα πιο κρίσιμα κομμάτια της διαδικασίας ανάλυσης κύκλου ζωής. Στο στάδιο αυτό, χρησιμοποιούνται τρεις κύριες υπολογιστικές μέθοδοι (Suh & Huppes, 2005): 1) το μοντέλο βασισμένο σε διάγραμμα ροής διεργασίας (Process LCA), 2) το οικονομικό μοντέλο εισόδου-εξόδου (Economic Input-Output LCA) και 3) το υβριδικό μοντέλο (Hybrid Economic Input-Output LCA). Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή κάθε μεθόδου.

1. Μοντέλο Βασισμένο σε Διάγραμμα Ροής Διεργασίας

Το μοντέλο αυτό αποτελεί μια από τις πιο συνήθεις προσεγγίσεις για την απογραφή των δεδομένων της ΑΚΖ, η οποία βασίζεται στη λεπτομερή καταγραφή των ροών υλικών, ενέργειας και εκπομπών κατά τη διάρκεια των επιμέρους σταδίων μιας παραγωγικής διαδικασίας. Στόχος του μοντέλου είναι η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την αρχή της παραγωγής έως το τέλος της ζωής ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας, καταγράφοντας συγκεκριμένα δεδομένα από τα επιμέρους στάδια της παραγωγικής διαδικασίας. Ειδικότερα, το μοντέλο εστιάζει στην ανάλυση κάθε διεργασίας ξεχωριστά, εξετάζοντας τις εισροές και τις εκροές υλικών και ενέργειας, ώστε να επιτυγχάνεται μια ακριβής εκτίμηση των επιπτώσεων που προκύπτουν από αυτές τις διεργασίες. Η εικόνα 3.3 απεικονίζει τον κύκλο ζωής ενός οχήματος και αναδεικνύει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του, από την παραγωγή έως την τελική διάθεση και ανακύκλωση.



Εικόνα 3.3 Τυπικό μοντέλο διεργασίας για την ανάλυση κύκλου ζωής ενός αυτοκινήτου

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η ακρίβεια και δυνατότητα προσαρμογής στις ανάγκες κάθε συγκεκριμένης διεργασίας ή προϊόντος, καθώς επιτρέπει τη μοντελοποίηση με βάση συγκεκριμένες παραμέτρους που αφορούν τη λειτουργία της εκάστοτε μονάδας παραγωγής. Για αυτό το λόγο, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε τομείς όπως η κατασκευή οδοστρωμάτων, καθώς επιτρέπει τον εντοπισμό των σταδίων που έχουν τις μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και παρέχει τη δυνατότητα για στοχευμένες βελτιώσεις και μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή έχει υψηλό κόστος για την ανάλυση σύνθετων συστημάτων προϊόντων και απαιτεί σημαντική ποσότητα πληροφοριών, γεγονός που μπορεί να την καθιστά λιγότερο ελκυστική για τους αναλυτές.

2. Οικονομικό Μοντέλο Εισόδου-Εξόδου

Το οικονομικό μοντέλο εισόδου-εξόδου (EIO-LCA) προσφέρει μια διαφορετική προσέγγιση, εστιάζοντας στις οικονομικές συναλλαγές μεταξύ βιομηχανιών και τομέων της οικονομίας. Χρησιμοποιεί πίνακες εισόδου-εκροής για να μεταφράσει τις οικονομικές δραστηριότητες σε περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Για παράδειγμα η εικόνα 3.4, είναι ένας πίνακας οικονομικών στοιχείων όπου κάθε γραμμή αναφέρεται σε έναν συγκεκριμένο τομέα, όπως είναι η γεωργία, η εξόρυξη, οι κατασκευές, και κάθε στήλη αντιπροσωπεύει διάφορες οικονομικές κατηγορίες, όπως εμπόριο, υπηρεσίες, βιομηχανία.

Name	Farms	Forestry, fishing, and related activities	Oil and gas extraction	Mining, except oil and gas	Support activities for mining	Utilities	Construction	Wood products	Nonmetallic mineral products	Primary metals	Fabricated metal products	Machinery
Farms	149,222	183	---	45	21	---	3,837	---	---	---	---	---
Forestry, fishing, and related activities	27,934	9,440	---	145	---	---	---	22,506	1	---	---	---
Oil and gas extraction	---	---	30,944	11	83	29,608	---	25	5	10	6	---
Mining, except oil and gas	1,835	0	122	10,397	159	9,288	32,790	10	16,247	21,470	568	113
Support activities for mining	---	---	21,084	2,085	1,583	---	---	---	---	---	---	---
Utilities	10,527	68	11,093	3,719	312	35,503	14,401	2,125	4,374	6,671	4,610	2,416
Construction	2,066	31	276	3,178	1,288	5,669	525	532	1,205	1,684	1,582	989
Wood products	781	84	---	515	238	9	104,687	42,258	295	677	285	1,073
Nonmetallic mineral products	29	119	2,925	663	701	51	146,888	1,129	23,402	3,815	1,749	1,972
Primary metals	104	---	13,472	734	234	4	10,350	408	2,420	107,860	105,589	55,078
Fabricated metal products	2,017	219	16,256	1,259	624	1,347	180,563	4,160	2,884	6,965	46,132	30,468
Machinery	3,477	37	22,216	5,853	3,663	781	69,780	686	202	1,515	5,973	46,836
Computer and electronic products	29	1	116	23	97	118	12,084	1,712	962	2,685	7,545	9,584
Electrical equipment, appliances, and components	7,097	54	280	56	631	25	75,428	572	172	2,533	4,403	22,076
Motor vehicles, bodies and trailers, and parts	1,159	79	2,272	1,007	370	48	4,068	2,775	846	1,232	1,930	15,827
Other transportation equipment	---	22	---	4	---	---	22	22	---	---	84	276
Furniture and related products	0	---	---	---	---	---	34,925	310	0	---	---	248
Miscellaneous manufacturing	219	1	83	30	11	---	3,243	29	97	46	85	2,818
Food and beverage and tobacco products	53,164	157	---	---	---	---	---	32	741	6	---	---
Textile mills and textile product mills	17	8	---	1	---	---	3,485	640	326	---	2	849
Apparel and leather and allied products	32	---	---	---	---	0	---	---	0	---	---	---
Paper products	476	0	177	162	36	33	5,749	1,528	2,503	2,418	2,515	2,120
Printing and related support activities	10	---	12	1	---	10	64	2	---	---	10	4
Petroleum and coal products	10,103	376	9,683	3,429	1,440	24,281	71,044	1,003	880	2,860	1,608	1,091
Chemical products	39,243	1,814	12,954	2,283	1,222	1,614	28,984	8,303	5,271	2,404	8,665	2,997
Plastics and rubber products	2,379	98	198	1,309	438	27	65,910	1,958	1,432	957	2,909	12,180

Εικόνα 3.4 Πίνακας μοντέλου εισόδου-εξόδου (<https://www.bea.gov/>)

Τα δεδομένα του πίνακα απεικονίζουν τις οικονομικές σχέσεις μεταξύ αυτών των τομέων και σκοπός του είναι να δείξει πώς οι διάφοροι τομείς της οικονομίας αλληλοεπιδρούν μέσω των εισροών και των εκροών τους. Η μέθοδος επιτρέπει την ανάλυση ολόκληρης της αλυσίδας εφοδιασμού ενός προϊόντος, συμπεριλαμβανομένων των έμμεσων προμηθευτών, και παρέχει ένα πλήρες όριο συστήματος. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τη διαχείριση μεγάλων οικονομικών

αλυσίδων, όπως η παραγωγή αυτοκινήτων, όπου η ενέργεια και τα υλικά χρησιμοποιούνται σε διάφορες διαδοχικές διεργασίες. Παρόλο που το ΕΙΟ-LCA παρέχει μια ευρεία εικόνα και χρησιμοποιεί τυπικές πηγές δεδομένων, παρουσιάζει κάποιες αδυναμίες, όπως η χαμηλή λεπτομέρεια ανάλυσης και η εξάρτηση από μέσους όρους τομέα που μπορεί να μην είναι πλήρως αντιπροσωπευτικοί.

3. Υβριδικό Μοντέλο LCA

Το Υβριδικό μοντέλο συνδυάζει στοιχεία τόσο από την ΑΚΖ με βάση τις διεργασίες όσο και από το οικονομικό μοντέλο εισόδου-εξόδου, με σκοπό να ξεπεραστούν οι περιορισμοί που υπάρχουν όταν χρησιμοποιείται κάθε μέθοδος ξεχωριστά. Συγκεκριμένα, αναλύει λεπτομερώς τις εισροές και εκροές σε επίπεδο διεργασιών (π.χ. κατανάλωση υλικών, ενέργειας) για κάθε στάδιο μιας παραγωγικής διαδικασίας και εστιάζει στις οικονομικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των βιομηχανικών τομέων, καταγράφοντας τη ροή αγαθών και υπηρεσιών μέσω οικονομικών πινάκων εισόδου-εξόδου. Στην εικόνα 3.5 παρουσιάζεται η δομή ενός υβριδικού μοντέλου εισροών-εκροών, όπου συνδυάζονται οικονομικές ροές (\$/\$) και ροές ενέργειας (J/\$ ή J/J). Εδώ, το μοντέλο περιλαμβάνει διαχωρισμό ανάμεσα στους τομείς "Energy" και "Other" για κάθε περιοχή, ενσωματώνοντας τόσο ενεργειακά δεδομένα όσο και οικονομικές εισροές-εκροές.

		Region 1				Region 2				Region 3			
		Energy		Other		Energy		Other		Energy		Other	
		1	...	p	1	...	n	1	...	p	1	...	n
Region 1	Energy	1	...	$\alpha_{\pi,i \rightarrow j}^{q \rightarrow r}$	...	$\alpha_{\tau,i \rightarrow j}^{q \rightarrow r}$	...	...	...	...	...	...	...
	Other	p	...	(units: J/J)	...	(units: J/\$)	...	...	...	...	...	...	...
	n	...	...	$\alpha_{\theta,i \rightarrow j}^{q \rightarrow r}$	...	$\alpha_{\phi,i \rightarrow j}^{q \rightarrow r}$	...	...	...	...	...	...	...
		...	...	(units: \$/J)	...	(units: \$/\$)	...	...	...	...	...	...	...
Region 2	Energy	1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Other	p	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	n	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Region 3	Energy	1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Other	p	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	n	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Εικόνα 3.5: Υβριδικό μοντέλο εισροών - εκροών (Jun U. Shepard, 2020)

Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του υβριδικού μοντέλου είναι ότι προσφέρει μια πιο ολοκληρωμένη ανάλυση, συνδυάζοντας οικονομικές και περιβαλλοντικές πληροφορίες. Αυτό όμως απαιτεί τη συλλογή δεδομένων από διαφορετικές πηγές και τον συνδυασμό τους με έναν συνεπή τρόπο, καθιστώντας την εφαρμογή του πιο περίπλοκη σε σχέση με το οικονομικό μοντέλο.

3.2.3 Εκτίμηση επιπτώσεων

Η εκτίμηση των επιπτώσεων κύκλου ζωής (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) αποτελεί την τρίτη φάση της μεθόδου AKZ και αντιστοιχεί τα αποτελέσματα της απογραφής του κύκλου ζωής (LCI) σε συγκρίσιμες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αυτό πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας μια επιστημονική προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη την αλυσίδα επιπτώσεων μιας περιβαλλοντικής ροής στον άνθρωπο, το φυσικό περιβάλλον ή τους φυσικούς πόρους και συνδέει τις εκπομπές ή τη χρήση πόρων με τις τελικές επιπτώσεις τους (Ευρωπαϊκή Επιτροπή JRC 2010). Αυτό σημαίνει ότι η LCIA δεν περιορίζεται απλώς στη μέτρηση των εισροών και εκροών, αλλά επιχειρεί να κατανοήσει τις επιπτώσεις αυτών των ροών σε ένα ευρύτερο πλαίσιο. Για παράδειγμα, μια ροή διοξειδίου του άνθρακα δεν είναι απλά μια εκπομπή αερίου, αλλά ένα στοιχείο που συμβάλλει στην κλιματική αλλαγή, η οποία με τη σειρά της μπορεί να έχει επιπτώσεις στη θερμοκρασία του πλανήτη, στην ανθρώπινη υγεία και στη βιοποικιλότητα. Το LCIA κατατάσσει τα αποτελέσματα σε κατηγορίες επιπτώσεων, επιλέγοντας ένα δείκτη κατηγορίας επιπτώσεων για κάθε κατηγορία για να υπολογιστεί το αποτέλεσμα. Η συλλογή των αποτελεσμάτων των δεικτών παρέχει πληροφορίες για τα περιβαλλοντικά ζητήματα που σχετίζονται με τις περιβαλλοντικές ροές (εισροές και εκροές) του συστήματος προϊόντος.

Η διαδικασία εκτίμησης επιπτώσεων συνήθως περιλαμβάνει τα εξής βήματα (Guinée et al., 2002):

1. Επιλογή κατηγοριών επιπτώσεων (Impact Categories): Κάθε κατηγορία αντιπροσωπεύει ένα διαφορετικό είδος περιβαλλοντικού προβλήματος που σχετίζεται με τη χρήση πόρων ή τις εκπομπές κατά τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος. Συνήθεις κατηγορίες επιπτώσεων περιλαμβάνουν:

- Παγκόσμια θέρμανση
- Όξινη βροχή
- Εξάντληση του όζοντος
- Ευτροφισμός
- Τοξικότητα για το ανθρώπινο περιβάλλον

2. Κατηγοριοποίηση (Classification): Οι εισροές και εκροές που έχουν συλλεχθεί στο στάδιο της LCI ταξινομούνται στις επιλεγμένες κατηγορίες επιπτώσεων

3. Χαρακτηρισμός (Characterization): Οι εκροές από το στάδιο LCI μετατρέπονται σε δείκτες επίπτωσης μέσω "συντελεστών χαρακτηρισμού".

4. Κανονικοποίηση (Normalization): Το βήμα αυτό, το οποίο είναι προαιρετικό, περιλαμβάνει τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των χαρακτηρισμών με μια

αναφορά ή πρότυπο. Συνήθως, αυτή η αναφορά βασίζεται σε δεδομένα από μια συγκεκριμένη χώρα, ώστε να κατανοηθεί καλύτερα η σχετική σημασία των αποτελεσμάτων.

5. Σταθμισμένη αξιολόγηση (Weighting): Επίσης προαιρετικό στάδιο, αφορά την εκχώρηση βαρών σε διάφορες κατηγορίες επιπτώσεων, ανάλογα με τη σημασία τους.

6. Ερμηνεία αποτελεσμάτων (Interpretation): Τέλος, αναλύονται τα αποτελέσματα και εντοπίζονται οι τομείς όπου οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι σημαντικές. Εδώ γίνεται και η αξιολόγηση των αβεβαιοτήτων και των υποθέσεων που έχουν γίνει στα προηγούμενα στάδια, ώστε να εξαχθούν αξιόπιστα συμπεράσματα για τη βελτίωση των περιβαλλοντικών επιδόσεων.

Επίσης, η LCIA περιλαμβάνει μια επαναληπτική διαδικασία ανασκόπησης του στόχου και του πεδίου. Αν τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι οι αρχικοί στόχοι δεν είναι εφικτοί, τότε ο στόχος και το πεδίο μπορούν να αναθεωρηθούν, έως ότου φτάσουν στην επίτευξη τους.

3.2.4 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων αποτελεί το τέταρτο και τελευταίο στάδιο της ανάλυσης κύκλου ζωής και περιλαμβάνει την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της απογραφής (LCI) και της εκτίμησης επιπτώσεων (LCIA). Ουσιαστικά, η ερμηνεία της ΑΚΖ αφορά την ανάλυση και κατανόηση των αποτελεσμάτων, με σκοπό την υποστήριξη τεκμηριωμένων αποφάσεων. Αυτές οι αποφάσεις μπορούν να αφορούν τον σχεδιασμό προϊόντων ή υπηρεσιών, τη βελτίωση παραγωγικών διαδικασιών ή τη διαμόρφωση πολιτικών που στοχεύουν στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Επίσης, συγκρίνονται τα τελικά αποτελέσματα, ώστε να εντοπιστούν και να κανονικοποιηθούν οι παράγοντες με τη μεγαλύτερη συνεισφορά στις επιπτώσεις. Παράλληλα, προτείνει συστάσεις με βάση αυτές τις απαντήσεις. Πρόκειται για μια επαναληπτική διαδικασία, που μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στο πλαίσιο της ίδιας της φάσης της ερμηνείας όσο και σε ολόκληρη τη μελέτη LCA, βοηθώντας στην εξέλιξη, αναθεώρηση και αναπροσαρμογή του πεδίου εφαρμογής της μελέτης. Ακόμα, η διαδικασία αυτή εστιάζει στην αξιολόγηση της ακρίβειας και της ποιότητας των δεδομένων, καθώς και στον υπολογισμό των δεικτών κάθε κατηγορίας επιπτώσεων, με στόχο τη διόρθωση τυχόν σφαλμάτων και την αναθεώρηση των φάσεων LCI και LCIA, ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι της μελέτης. Τέλος, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί και οι αβεβαιότητες που συνοδεύουν τα αποτελέσματα της ΑΚΖ και να συνδυάζονται με άλλα εργαλεία και κριτήρια λήψης αποφάσεων, όπως οικονομικές, κοινωνικές και ηθικές παραμέτρους.

Οι βασικές διαδικασίες της φάσης ερμηνείας περιλαμβάνουν (ISO 14044, 2006b):

- 1. Εντοπισμός των σημαντικών ζητημάτων:** Σε αυτό το στάδιο, εντοπίζονται οι παράγοντες και οι διαδικασίες που έχουν τη μεγαλύτερη συνεισφορά στις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αυτά τα ζητήματα μπορεί να αφορούν συγκεκριμένες εκπομπές ρύπων, την κατανάλωση πόρων ή άλλες περιβαλλοντικές ροές, οι οποίες είναι κρίσιμες για τη συνολική αξιολόγηση του προϊόντος ή της υπηρεσίας. Ο εντοπισμός τους είναι απαραίτητος για να δοθεί έμφαση στα πιο σημαντικά σημεία βελτίωσης ή παρέμβασης.
- 2. Αξιολόγηση:** Περιλαμβάνει την εξέταση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις φάσεις LCI και LCIA, λαμβάνοντας υπόψη τέσσερις βασικούς παράγοντες:
 - **Πληρότητα:** Εξετάζεται αν τα δεδομένα και τα αποτελέσματα καλύπτουν επαρκώς όλα τα κρίσιμα στάδια του κύκλου ζωής.
 - **Ευαισθησία:** Αναλύεται ο βαθμός στον οποίο τα αποτελέσματα επηρεάζονται από πιθανές αλλαγές στις παραδοχές ή στις μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν.
 - **Συνέπεια:** Αξιολογείται η ομοιομορφία στην εφαρμογή των δεδομένων και των μεθοδολογικών προσεγγίσεων σε όλα τα στάδια της ανάλυσης.
 - **Μεταβλητότητα:** Εξετάζεται η διακύμανση των αποτελεσμάτων με βάση τις διαφορές στα δεδομένα εισροών ή τις μεθοδολογικές επιλογές.

Τέλος, η αξιολόγηση αυτή συμβάλλει στην αναγνώριση πιθανών αβεβαιοτήτων και μπορεί να επιφέρει τροποποιήσεις στον αρχικό στόχο ή στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

3.3 Φάση παραγωγής ασφαλτομίγματος

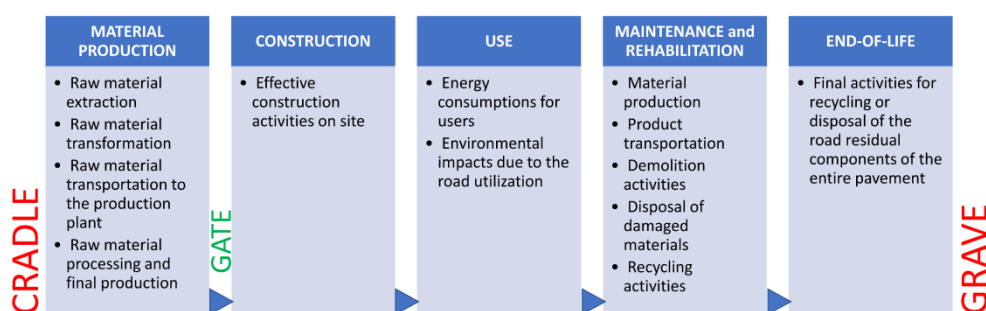
3.3.1 Γενικά στοιχεία

Η ΑΚΖ είναι μια μεθοδολογία που επιτρέπει την αξιολόγηση των οδοστρωμάτων και παρέχει τη δυνατότητα υιοθέτησης στρατηγικών που στοχεύουν στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των οδοστρωμάτων καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Μέσω αυτής της μεθόδου, είναι εφικτή η σύγκριση εναλλακτικών επιλογών, αναλύοντας τους αντίστοιχους κύκλους ζωής, καθώς και ο εντοπισμός δυνατοτήτων για βελτιώσεις σε διάφορα στάδια της ζωής του οδοστρώματος. Έτσι, η υιοθέτηση αυτής της μεθοδολογίας αποτελεί το κλειδί για μια αποτελεσματική στρατηγική που επιτυγχάνει όχι μόνο περιβαλλοντικούς στόχους αλλά και βελτιστοποιεί την απόδοση των οδοστρωμάτων. Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα της σειράς ISO 14040 (2006α) και τους κανόνες κατηγοριών προϊόντων για την

περιβαλλοντική δήλωση προϊόντων (EPD), ο κύκλος ζωής ενός οδοστρώματος χωρίζεται σε πέντε στάδια, τα οποία είναι τα εξής:

1. Παραγωγή υλικών (Material Production)
2. Κατασκευή (Construction)
3. Χρήση (Use)
4. Συντήρηση και αποκατάσταση (Maintenance and Rehabilitation):
5. Τέλος ζωής (End of Life)

Κάθε στάδιο περιλαμβάνει διαφορετικά στοιχεία που αντιπροσωπεύουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ του οδοστρώματος και του περιβάλλοντος. Μια σχηματική απεικόνιση αυτών των σταδίων φαίνεται στην εικόνα 3.6.



Εικόνα 3.6: Στάδια του κύκλου ζωής ασφαλτομίγματος (Sollazzo et al., 2020)

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στο στάδιο της παραγωγής υλικών και, συγκεκριμένα, στην παραγωγή του ασφαλτομίγματος. Το στάδιο αυτό, ξεκινά με την εξόρυξη των πρώτων υλών, όπως είναι τα αδρανή υλικά και η άσφαλτος, και περιλαμβάνει όλα τα βήματα που ακολουθούν, μέχρι τη μετατροπή τους σε υλικά κατασκευής οδοστρωμάτων. Στη μονάδα παραγωγής ασφαλτομίγματος, τα υλικά αυτά επεξεργάζονται μέσω των διαδικασιών κοσκινίσματος, ξήρασης και ανάμιξης. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται με αυτό το στάδιο περιλαμβάνουν τις επιβαρύνσεις από την εξόρυξη, την παραγωγή και τη μεταφορά των υλικών, τη χρήση εξοπλισμού και καυσίμων, την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και τις εκπομπές ρύπων από τα μηχανήματα. Οι Huang et al. (2009) έδειξαν ότι το στάδιο της παραγωγής υλικών είναι υπεύθυνο για ένα μεγάλο μέρος των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα και της κατανάλωσης ενέργειας, σε σύγκριση με τα άλλα στάδια, όπως η κατασκευή και η συντήρηση. Συνεπώς, το στάδιο της παραγωγής υλικών έχει καθοριστική συμβολή στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του κύκλου ζωής των ασφαλτομιγμάτων.

3.3.2 Διεθνείς έρευνες

Οι **Mohammed Alamri, et al. (2024)** αξιολόγησαν τη χρήση 100% ανακτώμενου ασφαλτικού οδοστρώματος (RAP) στην παραγωγή ασφαλτομίγματος, προσθέτοντας μικρές ποσότητες εποξικής ασφάλτου, μέσω της διεξαγωγής μελέτης LCA. Η

ερευνητική ομάδα πραγματοποίησε πειραματικές δοκιμές για την αξιολόγηση της απόδοσης των ασφαλτομιγμάτων σε διαφορετικούς τομείς. Συγκεκριμένα, μελέτησαν τη σταθερότητα Marshall, η οποία μετρά την αντοχή του ασφαλτομίγματος υπό συμπίεση, την αντοχή του μείγματος σε υγρασία και κόπωση, καθώς και την αντίσταση στις ρωγμές σε διαφορετικές θερμοκρασίες (8°C και 25°C). Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι τα ασφαλτομίγματα που περιείχαν 100% RAP, χωρίς την προσθήκη νέων συνδετικών υλικών, παρουσίασαν ικανοποιητική σταθερότητα και αντοχή σε συμπίεση, αλλά χαμηλή ανθεκτικότητα σε υγρασία και κόπωση. Ωστόσο, η προσθήκη μικρής ποσότητας εποξικής ασφάλτου (0,5% έως 2%) βελτίωσε σημαντικά την ανθεκτικότητα του μίγματος στις ζημιές που προκαλούνται από υγρασία και επαναλαμβανόμενες καταπονήσεις. Επιπλέον, σε θερμοκρασίες 8°C, η αντίσταση στις ρωγμές παρουσίασε σημαντική βελτίωση, ενώ σε θερμοκρασίες 25°C, η βελτίωση ήταν μικρότερη. Συνολικά, η μελέτη ανέδειξε τη καθοριστική συμβολή της εποξικής ασφάλτου στη βελτίωση των ιδιοτήτων των ασφαλτομιγμάτων που περιέχουν 100% RAP, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα αυτής της προσέγγισης για την παραγωγή τους.

Οι **R.M. Oliveira et al (2013)** μελέτησαν την εφαρμογή χημικών προσθέτων στη διαδικασία παραγωγής ασφαλτομίγματος με στόχο τη μείωση των θερμοκρασιών παραγωγής τους. Στη συγκεκριμένη έρευνα, εφαρμόστηκε η τεχνολογία θερμής ανάμιξης με αφρώδη άσφαλτο ως πρόσθετο, η οποία συμβάλλει στη βελτίωση των ιδιοτήτων του ασφαλτομίγματος, ιδιαίτερα όσον αφορά την αντοχή σε καταπόνηση και την ελαστικότητα. Η αφρώδης άσφαλτος λειτουργεί με αυτό τον τρόπο, όπου μειώνει το ιξώδες της και επιτρέπει την ανάμιξή της με τα αδρανή σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, διατηρώντας όμως την επιθυμητή σύνθεση του μίγματος. Αυτό καθιστά μια αποδοτική λύση για την παραγωγή του ασφαλτομίγματος, ειδικά σε περιπτώσεις όπου οι μειώσεις στις εκπομπές και η ενεργειακή εξοικονόμηση είναι κρίσιμοι παράγοντες για τη βιωσιμότητα των έργων οδοποιίας.

Οι **Y. Cao et al (2022)** επικεντρώθηκαν στη χρήση σκωρίας χάλυβα ως αδρανές υλικό σε ασφαλτομίγματα. Στόχος των ερευνητών ήταν η αξιολόγηση των θερμικών και μηχανικών ιδιοτήτων του ασφαλτομίγματος που περιέχει σκωρία χάλυβα, με ιδιαίτερη έμφαση στη θερμική αγωγιμότητα και την απόδοση αντοχής του υλικού. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, διαπιστώθηκε ότι η σκωρία χάλυβα βελτίωσε σημαντικά τη θερμική αγωγιμότητα του ασφαλτομίγματος, καθιστώντας το πιο ικανό να αντέχει σε ακραίες θερμοκρασίες. Αυτό οδήγησε σε βελτίωση της συνολικής απόδοσης του μίγματος, καθώς αύξησε την ανθεκτικότητά του σε υψηλές θερμοκρασίες και βελτίωσε τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος. Οι ερευνητές ανέφεραν επίσης ότι η χρήση σκωρίας χάλυβα συνέβαλε στην ενίσχυση της μηχανικής απόδοσης του ασφαλτομίγματος, καθιστώντας το πιο ανθεκτικό στη φθορά και τις καταπονήσεις που προκύπτουν από την κυκλοφορία. Συνολικά, τα

ευρήματα της μελέτης έδειξαν ότι η ενσωμάτωση σκωρίας χάλυβα στο ασφαλτόμιγμα προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα τόσο στις θερμικές όσο και στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, καθιστώντας το πιο βιώσιμο και ανθεκτικό για χρήση σε οδοστρώματα.

Οι **Tatari et al (2012)** επικεντρώθηκαν στη σύγκριση της βιωσιμότητας των μετρίως θερμών ασφαλτομιγμάτων (WMA) σε σχέση με τα θερμά ασφαλτομίγματα (HMA), χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της **ανάλυσης κύκλου ζωής (AKZ)**. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν ένα υβριδικό μοντέλο LCA για να αναλύσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την ενεργειακή αποδοτικότητα των μιγμάτων WMA σε όλα τα στάδια της παραγωγής και της ζωής του υλικού. Η μελέτη έδειξε ότι τα ασφαλτομίγματα WMA απαιτούν λιγότερη ενέργεια κατά την παραγωγή σε σύγκριση με τα HMA, λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας που απαιτείται για την ανάμιξη. Αυτή η μείωση στην απαιτούμενη θερμοκρασία παραγωγής οδηγεί επίσης σε μειωμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων του θερμοκηπίου, γεγονός που βελτιώνει το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα των WMA. Ακόμα, τα ασφαλτομίγματα WMA, παρά τη μείωση των θερμοκρασιών παραγωγής, διατηρούν τις μηχανικές ιδιότητες και την ανθεκτικότητα τους σε επίπεδα αντίστοιχα με τα HMA και παρουσιάζουν αντίστοιχη αντοχή και μακροχρόνια απόδοση, χωρίς να υπονομεύεται η ποιότητα του υλικού. Κατά συνέπεια, η έρευνα καταλήγει ότι η τεχνολογία WMA αποτελεί μια βιώσιμη επιλογή για την παραγωγή ασφαλτομίγματος, καθώς συνδυάζει μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις, χαμηλότερες εκπομπές ρύπων και διατήρηση της απόδοσης του υλικού.

Οι **Ranieri V. et al (2017)** επικεντρώθηκαν στη χρήση προσθέτων κεριού σε ασφαλτομίγματα και την επίδρασή τους στις ιδιότητες του υλικού. Στόχος της μελέτης ήταν η αξιολόγηση του τρόπου με τον οποίο τα πρόσθετα κεριού μπορούν να βελτιώσουν τη λειτουργικότητα και την ανθεκτικότητα των ασφαλτομιγμάτων, με κύριο αντικείμενο την αποστράγγιση και τη μακροχρόνια απόδοση του υλικού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση κεριού συμβάλλει στη μείωση της θερμοκρασίας παραγωγής του μίγματος, γεγονός που μειώνει την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές ρύπων. Παράλληλα, βελτιώθηκε η αποστράγγιση του νερού, κάτι που μείωσε τις φθορές των οδοστρωμάτων και αύξησε την ανθεκτικότητα στις καταπονήσεις από την κυκλοφορία και τις ακραίες καιρικές συνθήκες. Συνολικά, η έρευνα καταλήγει ότι η χρήση προσθέτων κεριού μπορεί να συμβάλλει στην αύξηση της αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας των ασφαλτομιγμάτων.

Οι **Budya H. et al. (2011)** εξέτασαν τη χρήση φυσικού αερίου και LPG ως καύσιμα στην παραγωγή ασφαλτομίγματος αντί για μαζούτ. Στην έρευνα τους, ανέλυσαν την επίδραση των καυσίμων στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και ιδιαίτερα του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), καθώς και άλλων επιβλαβών ρύπων. Η μελέτη

αναγνώρισε ότι η μετάβαση στο LPG είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των εκπομπών, γεγονός που καθιστά το LPG μια πιο καθαρή και βιώσιμη επιλογή σε σύγκριση με τα παραδοσιακά καύσιμα. Ακόμη, διερεύνησαν τις οικονομικές επιπτώσεις, αναφέροντας ότι η αλλαγή από την κηροζίνη στο LPG μειώνει σημαντικά το κόστος για τις βιομηχανίες, κάνοντας την ενέργεια πιο προσβάσιμη. Τέλος, αυτή η μελέτη αποδεικνύει ότι η χρήση LPG, αποτελεί μια πιο φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση στα ορυκτά καύσιμα και μπορεί να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές ρύπων, ενώ παράλληλα να βελτιώσει την οικονομική βιωσιμότητα σε βιομηχανίες όπως αυτή της παραγωγής ασφαλτομίγματος.

Η μελέτη των **González & Martinez (2018)** εξετάζει τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, εστιάζοντας την ενσωμάτωση της ηλιακής και αιολικής ενέργειας στην διαδικασία παραγωγή ασφαλτομίγματος. Η έρευνα αναλύει τα περιβαλλοντικά οφέλη και τις βελτιώσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα μέσω της χρήσης αυτών των πηγών, με κύριο στόχο τη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα, όπως το μαζούτ. Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ενσωμάτωση ηλιακής ενέργειας μπορεί να μειώσει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας, χρησιμοποιώντας ηλιακά πάνελ για τη θέρμανση των αδρανών υλικών. Αυτή η τεχνολογία συμβάλλει όχι μόνο στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, αλλά και στη συνολική ενεργειακή απόδοση της παραγωγικής διαδικασίας. Επιπλέον, η μελέτη εξετάζει και την πιθανή εφαρμογή αιολικής ενέργειας ως συμπληρωματική πηγή, η οποία μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες των εγκαταστάσεων όταν δεν υπάρχει επαρκής ηλιοφάνεια. Η έρευνα υπογραμμίζει ότι η μετάβαση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορεί να βελτιώσει τη βιωσιμότητα της παραγωγής ασφαλτομίγματος, χωρίς να επηρεάσει την αποδοτικότητα του τελικού προϊόντος. Η τεχνολογική πρόοδος στον τομέα της ηλιακής ενέργειας καθιστά την εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων σε εργοστάσια ασφαλτομίγματος οικονομικά εφικτή, ενώ ταυτόχρονα βοηθά στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Αυτή η έρευνα ανοίγει νέους ορίζοντες για τη βιώσιμη παραγωγή ασφαλτομίγματος, αξιοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για τη μείωση των εκπομπών ρύπων και την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4.1 Στόχος πειραματικής διαδικασίας

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιείται αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά την παραγωγή ασφαλτομίγματος βασισμένη στη μέθοδο ανάλυσης κύκλου ζωής (ΑΚΖ). Για το σκοπό αυτό, σε πρώτη φάση γίνεται εκτίμηση των περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση κατάλληλου προγράμματος (λογισμικού), ενώ σε δεύτερη φάση, πραγματοποιείται η καταγραφή τους με τη βοήθεια εργαστηριακού εξοπλισμού σε μονάδα παραγωγής ασφαλτομίγματος. Στη συνέχεια, συγκρίνονται τα περιβαλλοντικά αποτελέσματα του λογισμικού με τις επιτόπου μετρήσεις και διερευνώνται λύσεις και στρατηγικές για τη μείωση των εκπομπών ρύπων, με στόχο την περαιτέρω βελτίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης της μονάδας παραγωγής ασφαλτομίγματος. Έτσι το κεφάλαιο αυτό χωρίζεται σε δύο μέρη: 1) την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων με τη χρήση λογισμικού και 2) την καταγραφή των περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση εργαστηριακού εξοπλισμού.

4.2 Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων

4.2.1 Καθορισμός σεναρίων ανάλυσης

Για το σκοπό της μελέτης ΑΚΖ, θεωρήθηκαν τέσσερα διαφορετικά σενάρια, τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές διατομές εύκαμπτου οδοστρώματος με διαφορετικές απαιτήσεις κυκλοφορίας. Στο πίνακα 4.1, παρουσιάζονται συνοπτικά οι διαστάσεις της διατομής του οδοστρώματος για κάθε σενάριο, όπως αυτές θα χρησιμοποιηθούν στη μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Πίνακας 4.1: Διαστασιολόγηση ασφαλτικών στρώσεων

	Μήκος [km]	Πάχος ασφαλτικών στρώσεων [cm]	Λωρίδες ανά κατεύθυνση	Συνολικό πλάτος [cm]	Όγκος [m ³]
Σενάριο 1	1	20	4	26.5	5300
Σενάριο 2	1	15	1	7.00	1050
Σενάριο 3	1	10	1	6.50	650
Σενάριο 4	1	5	1	5.50	275

Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο σενάριο αφορά τη διατομή αυτοκινητοδρόμου με μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα 120 km/h. Η διατομή αυτή αποτελείται από τρεις λωρίδες κυκλοφορίας πλάτους 3.50 m ανά κατεύθυνση και μία λωρίδα έκτακτης ανάγκης (ΛΕΑ) πλάτους 2.50 m ανά κατεύθυνση. Το θεωρούμενο πάχος των ασφαλτικών στρώσεων και στις δύο κατευθύνσεις είναι 20 cm. Το δεύτερο σενάριο αφορά τη διατομή κύριας συλλεκτήριας οδού με μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα 80 km/h. Η διατομή αυτή περιλαμβάνει δύο λωρίδες κυκλοφορίας, μία ανά κατεύθυνση με πλάτος 3.50 m. Το θεωρούμενο συνολικό πάχος ασφαλτικών στρώσεων είναι 15 cm και στις δύο κατευθύνσεις. Το τρίτο σενάριο αφορά τη διατομή συλλεκτήριας - αγροτικής οδού με μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα 70 km/h. Περιλαμβάνει δύο λωρίδες κυκλοφορίας, μία ανά κατεύθυνση με πλάτος 3.25 m. Το θεωρούμενο συνολικό πάχος ασφαλτικών στρώσεων είναι 10 cm και στις δύο κατευθύνσεις. Τέλος, το τέταρτο σενάριο αφορά τη διατομή δευτερεύουσας αγροτικής οδού με μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα 50 km/h. Αποτελείται από δύο λωρίδες κυκλοφορίας, μία ανά κατεύθυνση με πλάτος 2,75 m. Το θεωρούμενο συνολικό πάχος ασφαλτικών στρώσεων είναι 5 cm και στις δύο κατευθύνσεις.

Επίσης, σημειώνεται ότι τα τέσσερα σενάρια διατομών οδοστρώματος έχουν διαφορετικό κυκλοφοριακό φόρτο, ο οποίος μειώνεται αν θεωρηθεί μια κλίμακα από τη διατομή 1 προς τη διατομή 4.

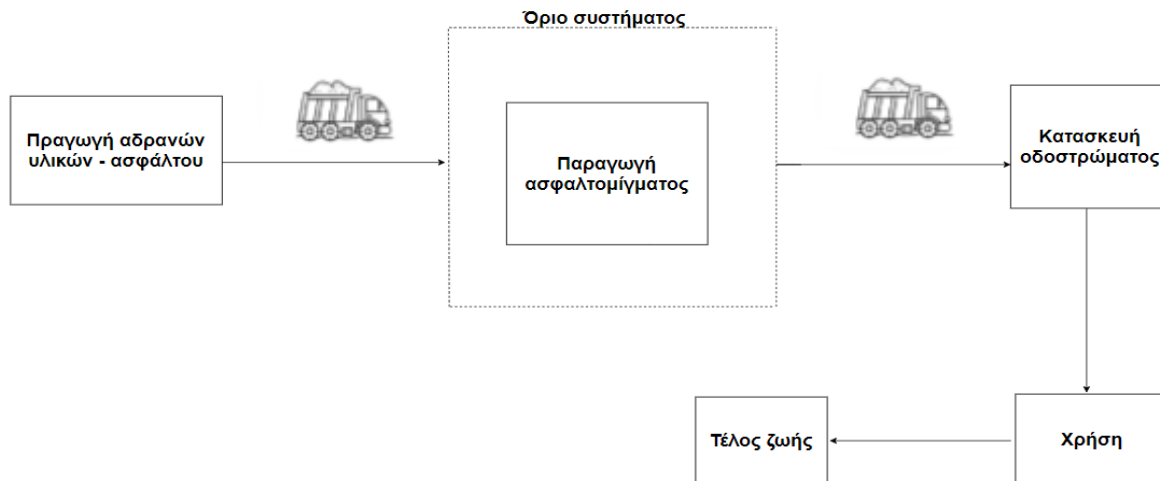
Σε κάθε σενάριο, οι ασφαλτικές στρώσεις αποτελούνται από θερμό ασφαλτόμιγμα (Hot Mix Asphalt, HMA) και η σύνθεσή του είναι κοινή για όλα τα σενάρια. Η ποσοστιαία σύσταση του μίγματος και η πυκνότητα των υλικών που το αποτελούν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Σύνθεση και ιδιότητες ασφαλτομίγματος

ΥΛΙΚΑ	ΣΥΝΘΕΣΗ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (kg/m ³)
Λεπτόκοκκο αδρανές	30%	2620
Χονδρόκοκκο αδρανές	70%	2670
Σύνολο αδρανών		2646
Άσφαλτος κ.β. ασφαλτομίγματος	4,6%	1100
Ασφαλτόμιγμα		2362

4.2.2 Λειτουργική μονάδα και όρια συστήματος

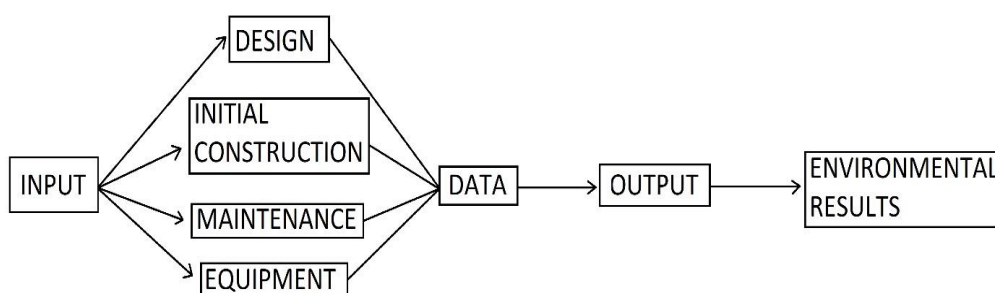
Για όλα τα σενάρια, η λειτουργική μονάδα έχει θεωρηθεί ίση με μήκος ενός χιλιομέτρου. Σχετικά με τα όρια συστήματος, αυτά περιλαμβάνουν όλες τις διαδικασίες που γίνονται στη μονάδα ασφαλτομίγματος για την παραγωγή του τελικού υλικού, που χρησιμοποιείται στην κατασκευή των ασφαλτικών στρώσεων. Στην εικόνα 4.1 παρουσιάζονται τα στάδια του κύκλου ζωής του οδοστρώματος και με διακεκομμένη γραμμή τα όρια του συστήματος.



Εικόνα 4.1: Όρια συστήματος μελέτης AKZ

4.2.3 Ανάλυση απογραφής

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects (PaLATE), ως εργαλείο ανάλυσης. Το πρόγραμμα αυτό σχεδιάστηκε από μια ομάδα πολιτικών μηχανικών του πανεπιστημίου της Καλιφόρνιας. Επίσης, επιτρέπει την παρακολούθηση συγκεκριμένων δεικτών ή μέτρων απόδοσης και ενσωματώνει περιβαλλοντικές παραμέτρους στη διαδικασία λήψης αποφάσεων για τα οδοστρώματα. Η εικόνα 4.2 περιγράφει μια διαδικασία από εισροές που σχετίζονται με το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη συντήρηση και τον εξοπλισμό, και παράγει δεδομένα, που με τη σειρά τους οδηγούν σε περιβαλλοντικά αποτελέσματα (PaLATE, 2011).



Εικόνα 4.2: Δομή Ανάλυσης PaLATE

Το PaLATE δίνει αποτελέσματα για δώδεκα κατηγορίες επίπτωσης, οι οποίες είναι οι εξής:

1. Κατανάλωση ενέργειας: Αναφέρεται στη συνολική ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή, κατασκευή, μεταφορά και συντήρηση ενός έργου ή υλικού. Μετρείται σε μεγατζάουλ (MJ) και περιλαμβάνει ενέργεια από ορυκτά καύσιμα, ηλεκτρισμό, και άλλες μορφές ενέργειας. Η κατανάλωση ενέργειας συνδέεται άμεσα με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, καθώς η καύση ορυκτών καυσίμων παράγει διοξείδιο του άνθρακα και άλλους ρύπους. Σε μέρες αυξημένης ζήτησης παρατηρείται μείωση των ορυκτών καυσίμων, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ενεργειακή, οικονομική και περιβαλλοντική κρίση.

2. Κατανάλωση νερού: Πρόκειται για την ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται σε όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής ενός έργου, από την εξόρυξη πρώτων υλών έως την κατασκευή και τη συντήρηση. Το νερό χρησιμοποιείται συχνά στις διεργασίες ψύξης και στον καθαρισμό των υλικών, ενώ η κατανάλωσή του συμβάλλει στην εξάντληση των υδάτινων πόρων και εάν δεν διαχειριστεί σωστά, μπορεί να οδηγήσει σε περιβαλλοντική επιβάρυνση.

3. Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂): Είναι ένα άχρωμο αέριο που έχει λεπτή, έντονη οσμή και ξινή γεύση, με πυκνότητα περίπου 60% μεγαλύτερη από αυτή του ξηρού αέρα. Αποτελείται από ένα άτομο άνθρακα συνδεδεμένο με δύο άτομα οξυγόνου. Το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί μια ουσία που αποβάλλεται στην ατμόσφαιρα σε τεράστιες ποσότητες ως αποτέλεσμα της τεχνολογικής εξέλιξης της ανθρωπότητας και των αναγκών της σε ενέργεια. Ειδικά, τα τελευταία χρόνια επηρεάζεται από διεργασίες καύσης ορυκτών καυσίμων, άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου. Η ετήσια εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα εκτιμάται ότι είναι της τάξης των 100 τρισεκατομμυρίων τόνων ανά έτος από διεργασίες βιολογικής αποσύνθεσης, που έχουν ως αρχικό βήμα την παραγωγή μεθανίου και κατόπιν την οξείδωση αυτού προς διοξείδιο του άνθρακα προς την ατμόσφαιρα. Σύμφωνα με ερευνητές μπορεί να διπλασιαστεί στο άμεσο μέλλον, με αποτέλεσμα την έντονη ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου.

4. Οξειδία του αζώτου (NO_x): Είναι χημικές ενώσεις οξυγόνου και αζώτου που σχηματίζεται αντιδρώντας μεταξύ τους κατά την καύση σε υψηλές θερμοκρασίες, κυρίως από την καύση καυσίμου, όπως είναι το πετρέλαιο και την παραγωγή ηλεκτρική ισχύος. Τα οξειδία του αζώτου είναι ένας γενικός όρος που σχετίζεται περισσότερο με την ατμοσφαιρική ρύπανση και περιλαμβάνει διαφορετικά οξειδία, όπως είναι το μονοξείδιο του αζώτου (NO) και το διοξείδιο του αζώτου (NO₂). Είναι επιβλαβή για την ανθρώπινη υγεία προκαλώντας σοβαρές ασθένειες του

αναπνευστικού και είναι επίσης υπεύθυνο για την αιθαλομίχλη που καλύπτει τις πόλεις και την παραγωγή κακής ποιότητας αέρα.

5. Αιωρούμενα στερεά σωματίδια: Είναι μικροσκοπικά σωματίδια και χωρίζονται ανάλογα με το μέγεθός τους σε PM10 (διάμετρο μικρότερη των 10 μm) και PM2,5 (διάμετρο μικρότερη των 2,5 μm). Αποτελούνται από πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες, μικροσκοπικά κομμάτια άνθρακα, ανόργανες και οργανικές ουσίες. Αυτά τα σωματίδια είναι τόσο μικρά, ώστε ποτέ δεν ακινητοποιούνται στην ατμόσφαιρα εξαιτίας της άτακτης κίνησης που οφείλεται στις συγκρούσεις τους με τα μόρια αερίων. Εκπέμπονται κυρίως από τα καυσαέρια των βιομηχανιών και των αυτοκινήτων και ευθύνονται για την παραγωγή της ιπτάμενης τέφρας, η οποία περιέχει άνθρακα και οξείδια του πυριτίου. Η κυριότερη ανησυχία για τη σωματιδιακή ύλη που αιωρείται στην ατμόσφαιρα προέρχεται από το γεγονός ότι εισπνέεται και κατακρατείται από το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα και μπορεί να προκαλέσει βλάβη στην ορατότητα. Μάλιστα τα σωματίδια όσο πιο μικρή διάμετρο έχουν, τόσο πιο εύκολα μπορούν να εισχωρήσουν στον ανθρώπινο οργανισμό.

6. Διοξείδιο του θείου (SO₂): Είναι ένα άορατο αέριο με δυσάρεστη έντονη μυρωδιά και αποτελεί την πιο κακόφημη και καταστροφική ομάδα ατμοσφαιρικών ρύπων σχετίζεται με το στοιχείο του θείου. Ειδικά, το διοξείδιο του θείου είναι η πλέον συνηθισμένη πρωτογενής εκπομπή από αυτή την ομάδα των ρύπων. Πρωτεύοντα ρόλο στη εκπομπή τους παίζει η καύση άνθρακα στις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (πάνω από 100 εκατομμύρια τόνοι ανά έτος), οι διεργασίες καύσης και διύλισης πετρελαίου και οι μεταλλουργικές βιομηχανίες. Ακόμα, υπάρχει στα μηχανοκίνητα οχήματα και επηρεάζει τους ανθρώπους όταν αναπνεύσουν ερεθίζοντας το λαιμό, τη μύτη και τους αεραγωγούς.

7. Μονοξείδιο του άνθρακα (CO): Είναι ένα άχρωμο και άοσμο αέριο, ελάχιστα διαλυτό στο νερό, αναφλέξιμο και ιδιαίτερα τοξικό. Ο χρόνος παραμονής του στη τροπόσφαιρα κυμαίνεται από 30 έως 90 ημέρες. Είναι ένας από τους μαζικότερα παραγόμενους πρωτογενείς ρύπους. Γενικά, προέρχεται από την ατελή καύση των υδρογονανθράκων που χρησιμοποιούνται ως καύσιμα στα αυτοκίνητα, ενώ σε μικρότερο ποσοστό συνεισφέρουν και οι μονάδες θέρμανσης, οι βιομηχανικές κατεργασίες και η καύση στερεών αποβλήτων. Αυτή η ατελής καύση συμβαίνει όταν υπάρχει ανεπαρκής ποσότητα οξυγόνου, με αποτέλεσμα να επηρεάζει τον άνθρωπο όταν αναπνέει και στερεί οξυγόνο από ζωτικά όργανα, όπως η καρδιά.

8. Μόλυβδος: Είναι ένα βαρύ μέταλλο που χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία, κυρίως σε μπαταρίες, χρώματα, σωληνώσεις και καύσιμα. Παρά την περιορισμένη του χρήση σήμερα λόγω της τοξικότητάς του, ο μόλυβδος

εξακολουθεί να προκαλεί σημαντικές περιβαλλοντικές και υγειονομικές ανησυχίες. Όταν ο μόλυβδος εισέρχεται στο περιβάλλον (μέσω απόβλητων ή διαρροών), μπορεί να μολύνει το έδαφος και τα υπόγεια ύδατα, καθώς δε διασπάται φυσικά και παραμένει για μεγάλο χρονικό διάστημα στο περιβάλλον. Η έκθεση σε μολυσμένο νερό ή σωματίδια μόλυβδου έχει σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.

9. Υδράργυρος: Είναι ένα βαρύ μέταλλο που είναι γνωστό για την τοξικότητά του και τη ρευστή του μορφή σε θερμοκρασία δωματίου. Προέρχεται κυρίως από βιομηχανικές δραστηριότητες, όπως είναι η καύση άνθρακα, η εξόρυξη χρυσού, και η κατασκευή ηλεκτρονικών προϊόντων. Έχει τη δυνατότητα να συσσωρεύεται στα υδάτινα οικοσυστήματα και να μετατρέπεται σε μεθυλυδράργυρο. Η έκθεσή του, μπορεί να προκαλέσει βλάβες στο κεντρικό νευρικό σύστημα, με αποτέλεσμα προβλήματα κινητικότητας, μνήμης, λόγου και όρασης.

10. Επικίνδυνα απόβλητα (RCRA): Το RCRA (Resource Conservation and Recovery Act) είναι ένας κανονισμός στις Ηνωμένες Πολιτίες της Αμερικής, που καθορίζει τα κριτήρια για την ασφαλή διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων. Στο πλαίσιο του PaLATE, αυτό περιλαμβάνει εκτίμηση των επικίνδυνων αποβλήτων που παράγονται κατά την κατασκευή και τη συντήρηση ενός έργου και πώς αυτά επηρεάζουν το περιβάλλον.

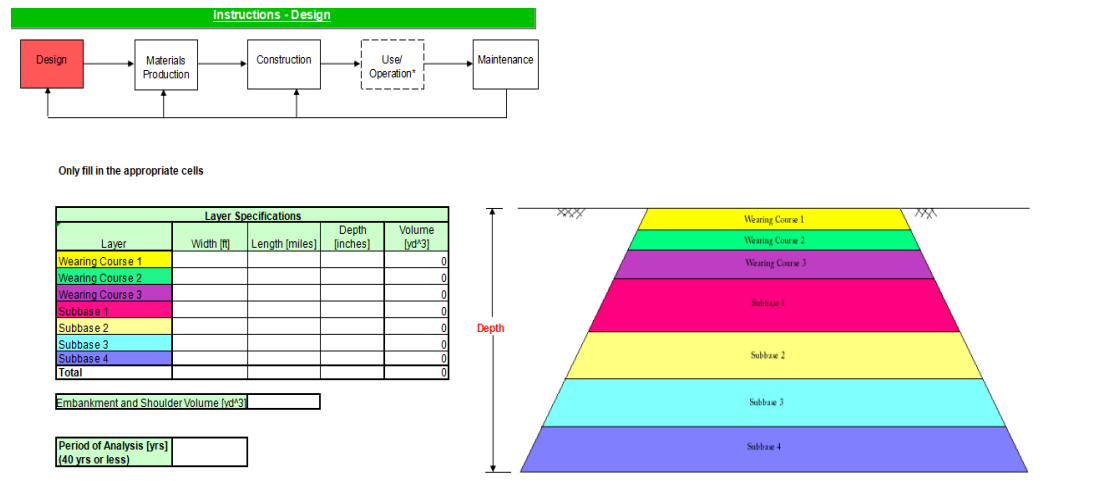
11. Καρκινογόνος Τοξικότητα για τον Άνθρωπο: Αυτή η κατηγορία επίπτωσης εκτιμά την πιθανότητα να προκαλέσουν καρκίνο συγκεκριμένα χημικά ή ρυπογόνες ουσίες που εκλύονται στο περιβάλλον κατά τη διάρκεια της κατασκευής, της λειτουργίας ή της αποδόμησης των έργων. Ο κίνδυνος υπολογίζεται βάσει τοξικολογικών δεδομένων που προέρχονται από διεθνείς οργανισμούς υγείας και περιβάλλοντος.

12. Μη Καρκινογόνος Τοξικότητα για τον Άνθρωπο: Αυτή η κατηγορία επίπτωσης εξετάζει την επίδραση των ρύπων που μπορεί να προκαλέσουν τοξικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία χωρίς να είναι καρκινογόνες. Αυτές οι επιπτώσεις μπορεί να περιλαμβάνουν νευροτοξικότητα, προβλήματα στο αναπνευστικό σύστημα, ή επιδράσεις στα αναπαραγωγικά όργανα.

Στο λογισμικό έγινε εισαγωγή και επεξεργασία δεδομένων στα εξής φύλλα εργασίας:

- Σχεδιασμός (Design)
- Αρχική κατασκευή (Initial construction)
- Εξοπλισμός (Equipment)

Αφορούν πληροφορίες σχετικά με την γεωμετρία του οδοστρώματος, τα υλικά και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκαν για την σύνθεση του μίγματος. Για παράδειγμα, στις εικόνες 4.3 και 4.4 φαίνονται η εισαγωγή στοιχείων που αφορούν τις διαστάσεις της διατομής του οδοστρώματος και η ανάλυση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνθεση του ασφαλτομίγματος αντίστοιχα.



Εικόνα 4.3: Περιβάλλον PaLATE - Design

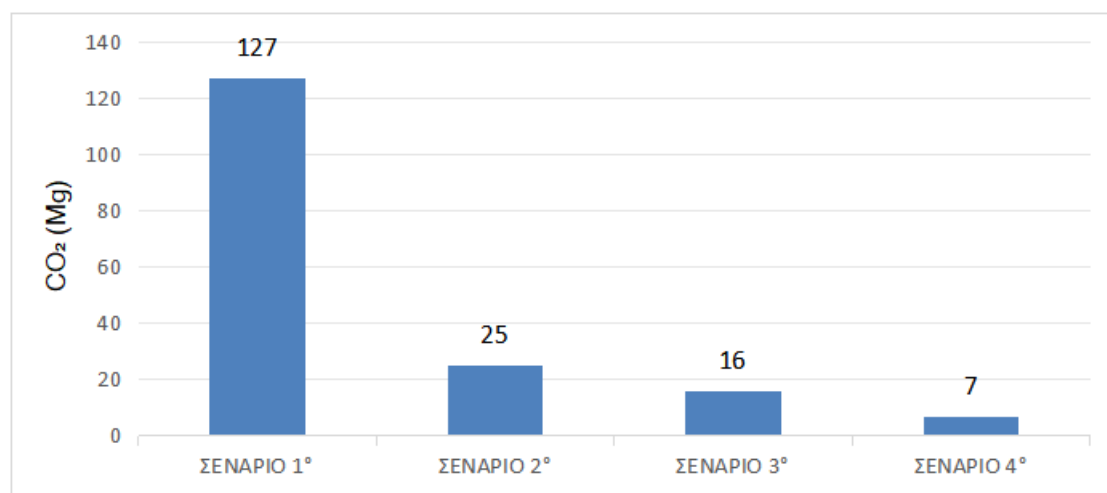
	Material	Density [tons/(yd ³)]	New Asphalt Pavement	New Concrete Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
			Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	One-way transport distance (mi)	Transportation mode
Wearing Course 1	Virgin Aggregate	2.23		0		0	
	Bitumen	0.84				0	
	Cement	1.27		0		0	
	Concrete Additives	0.84		0		0	
	RAP	1.85	0	0		0	
	FRAP	1.85	0	0		0	
	RAS	1.12	0	0		0	
	RCA	1.88	0	0		0	
	Coal Fly Ash	2.20	0	0		0	
	Coal Bottom Ash	2.00	0	0		0	
	Blast Furnace Slag	1.72	0	0		0	
	Foundry Sand	1.50	0	0		0	
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	1.92	0	0		0	
	Glass Cullet	1.93	0	0		0	
	Water	0.84					
	Steel Reinforcing Bars	0.24					
	Total: Asphalt mix to site	1.23	0			0	dump truck
Total: Ready-mix concrete mix to site	2.03			0	0	mixing truck	

Εικόνα 4.4: Περιβάλλον PaLATE - Initial construction

4.2.4 Αποτελέσματα αναλύσεων

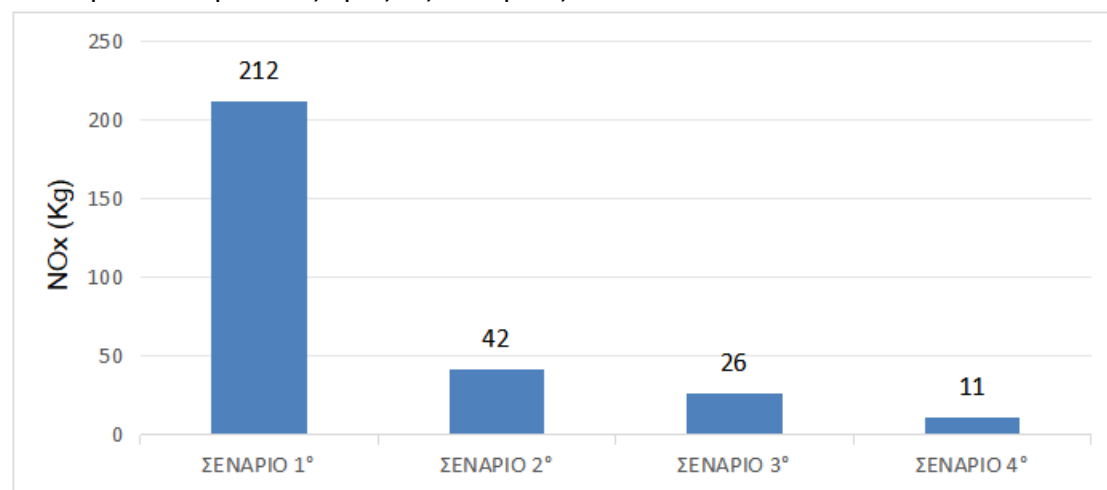
Το σενάριο 1 παρουσιάζει σημαντική διαφορά στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα σενάρια. Συγκεκριμένα, οι εκπομπές φτάνουν τα 127 Mg, λόγω της αυξημένης χρήσης υλικών και διαδικασιών στο συγκρότημα παραγωγής ασφαλτομίγματος. Αντίθετα, όταν εξετάζονται τα σενάρια 2, 3 και 4, οι εκπομπές μειώνονται στα 25 Mg, 16 Mg, και 7 Mg αντίστοιχα. Αυτή η μείωση συνδέεται άμεσα με τη λιγότερη κατανάλωση καυσίμων και ενέργειας για τη θέρμανση και ανάμιξη στο συγκρότημα, καθώς οι μικρότερες ποσότητες υλικών

απαιτούν λιγότερους πόρους. Στην εικόνα 4.5, απεικονίζονται τα περιβαλλοντικά αποτελέσματα των τεσσάρων σεναρίων ως προς τις εκπομπές του CO₂.



Εικόνα 4.5: Αποτελέσματα περιβαλλοντικού δείκτη CO₂

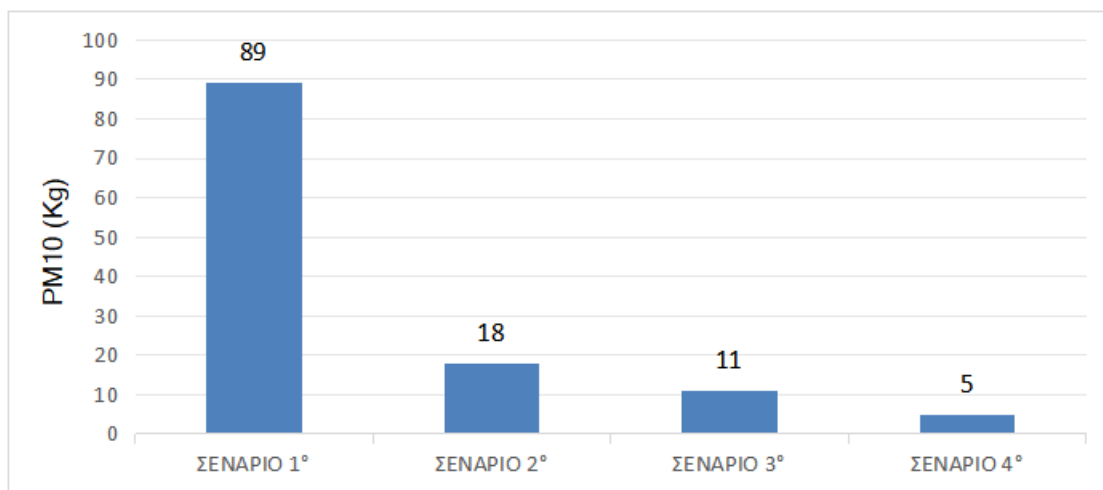
Οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου έχουν επίσης σημαντική διαφορά, ειδικά στο σενάριο 1, όπου παρατηρούνται οι υψηλότερες εκπομπές (212 kg). Αυτές οι εκπομπές προέρχονται κυρίως από τον εξοπλισμό θέρμανσης και ανάμιξης στο συγκρότημα παραγωγής ασφαλτομίγματος, ο οποίος απαιτεί μεγαλύτερη καύση καυσίμων για να επεξεργαστεί τον αυξημένο όγκο υλικών. Καθώς ο όγκος ασφαλτομίγματος μικραίνει, οι εκπομπές μειώνονται δραστικά, με το σενάριο 4 να φτάνει τα 11 kg, αντικατοπτρίζοντας τη μικρότερη χρήση ενέργειας και υλικών στο συγκρότημα. Στην εικόνα 4.6, φαίνονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των τεσσάρων σεναρίων ως προς τις εκπομπές NO_x.



Εικόνα 4.6: Αποτελέσματα περιβαλλοντικού δείκτη NO_x

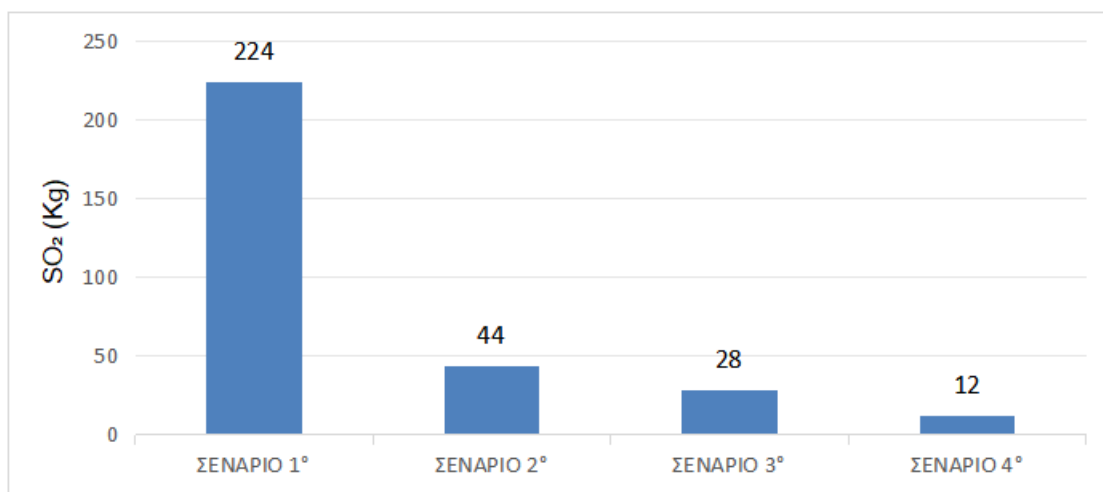
Οι εκπομπές των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων (PM₁₀) στα τέσσερα σενάρια παρουσιάζουν σημαντική μείωση, καθώς διαφοροποιούνται οι διαστάσεις των ασφαλτικών στρώσεων. Στο σενάριο 1, παρατηρούνται οι υψηλότερες εκπομπές

(89 kg), λόγω της μεγάλης κατανάλωσης ενέργειας για την παραγωγή του μίγματος. Στα σενάρια 2, 3, και 4, οι εκπομπές μειώνονται σταδιακά (18 kg, 11 kg και 5 kg αντίστοιχα), αντανακλώντας τη μικρότερη χρήση εξοπλισμού και καυσίμων καθώς μειώνεται η ποσότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται. Στην εικόνα 4.7 απεικονίζονται τα περιβαλλοντικά αποτελέσματα των τεσσάρων σεναρίων ως προς την παραγωγή PM10.



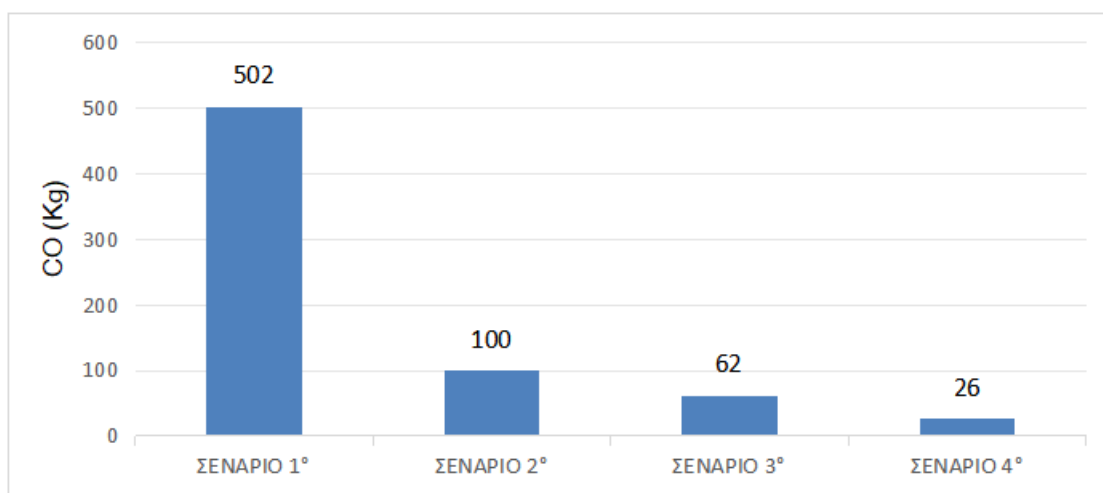
Εικόνα 4.7: Αποτελέσματα περιβαλλοντικού δείκτη PM10

Στη συνέχεια, η εικόνα 4.8 δείχνει ότι οι εκπομπές διοξειδίου του θείου (SO_2) μειώνονται δραστικά, καθώς αλλάζει η διαστασιολόγηση του κάθε σεναρίου. Στο σενάριο 1, οι εκπομπές είναι οι υψηλότερες, με 224 kg SO_2 , κάτι που εξηγείται από την αυξημένη χρήση ενέργειας και καυσίμων στο συγκρότημα παραγωγής ασφαλτομίγματος για τη θέρμανση και την ανάμιξη μεγαλύτερων όγκων υλικών. Σταδιακά, στα σενάρια 2, 3, και 4, οι εκπομπές μειώνονται (44 kg, 28 kg και 12 kg αντίστοιχα), αντικατοπτρίζοντας τη μειωμένη κατανάλωση καυσίμων λόγω των μικρότερων αναγκών παραγωγής.



Εικόνα 4.8: Αποτελέσματα περιβαλλοντικού δείκτη SO_2

Τέλος, η εικόνα 4.9 απεικονίζει τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO) για τα τέσσερα σενάρια. Στο σενάριο 1, οι εκπομπές είναι ιδιαίτερα υψηλές, φτάνοντας τα 502 kg, λόγω του μεγαλύτερου όγκου υλικών που απαιτούνται για την παραγωγή ασφαλτομίγματος, καθώς και της αυξημένης χρήσης καυσίμων και ενέργειας στον εξοπλισμό του συγκροτήματος παραγωγής. Σταδιακά, παρατηρείται μείωση στα υπόλοιπα σενάρια, με τις εκπομπές να φτάνουν τα 26 kg στο σενάριο 4, γεγονός που αντικατοπτρίζει τη μικρότερη χρήση πόρων και καυσίμων.

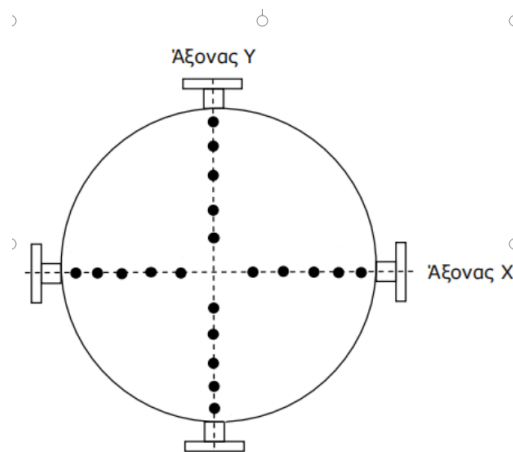


Εικόνα 4.9: Αποτελέσματα περιβαλλοντικού δείκτη CO

4.3 Καταγραφή περιβαλλοντικών ρύπων στη μονάδα ασφαλτομίγματος με τη χρήση εργαστηριακού εξοπλισμού

4.3.1 Γενικά

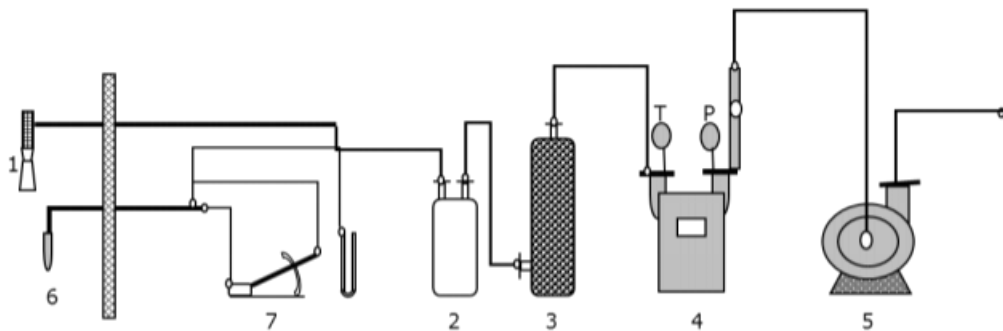
Το παρών κεφαλαίο αναλύει τις μετρήσεις των εκπομπών που πραγματοποιήθηκαν στην καμινάδα της μονάδας κατά την παραγωγική διαδικασία του ασφαλτομίγματος. Οι μετρήσεις έγιναν σε πραγματικές συνθήκες και αφορούσαν 1) τα ολικά αιωρούμενα στερεά σωματίδια και 2) τις εκπομπές συμβατικών αερίων ρυπαντών. Συγκεκριμένα, στην καπνοδόχο του συγκροτήματος, έγιναν μετρήσεις της ταχύτητας σε δέκα σημεία σε κάθε άξονα (εικόνα 4.10), έτσι ώστε η αναρρόφηση του δείγματος να γίνει με την ίδια ταχύτητα με την οποία ρέουν τα απαέρια. Ο αγωγός εξόδου καυσαερίων είναι κυλινδρικός διαμέτρου 1,05 m, επιφάνειας 0,866 m² και συνολικού ύψους 12 m.



Εικόνα 4.10: Σημεία δειγματοληψίας διατομής αγωγού εξόδου καυσαερίων

4.3.2 Μέτρηση αιωρούμενων στερεών σωματιδίων (PM10)

Η μέτρηση συγκέντρωσης σωματιδίων στον αέρα διενεργείται με διάταξη ισοκινητικής δειγματοληψίας σύμφωνα με το ISO 9096 και EN 13284.01, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα του παραρτήματος Π1. Αυτή η μέθοδος εξασφαλίζει ότι η ταχύτητα του αέρα που εισέρχεται στη συσκευή δειγματοληψίας είναι ίση με την ταχύτητα του αέρα στη καμινάδα καυσαερίων. Στην εικόνα 4.11, απεικονίζεται η αρχή λειτουργίας της μεθόδου, η οποία περιλαμβάνει την αναρρόφηση δείγματος από τον αγωγό καυσαερίων σε προκαθορισμένα σημεία με ελεγχόμενη ισοκινητική αναρρόφηση και μέτρηση του όγκου αναρρόφησης. Η διάταξη αποτελείται από κεφαλή με ακροφύσιο και φίλτροθήκη εντός της καμινάδας, η οποία περιέχει διαφορετικό τύπο φίλτρου ανάλογα με το αναμενόμενο φορτίο σκόνης. Ακολουθεί η συνδεσμολογία με υδατοπαγίδα, πύργο ξήρανσης (silica gel), ροόμετρο, ογκομετρητή ξηράς λειτουργίας και αντλία κενού. Τα σωματίδια που εισέρχονται στη γραμμή συλλέγονται σε κατάλληλα προετοιμασμένα επίπεδα φίλτρα που βρίσκονται εκτός του αγωγού. Έπειτα το φίλτρο ξηραίνεται σε μικρό φούρνο (κλίβανο) του εργαστηρίου και ζυγίζεται. Επικαθίσεις στον εξοπλισμό ανάντη του φίλτρου ανακτώνται και ζυγίζονται. Αφού γίνει η μέτρηση, ακολουθείται πάλι η ίδια διαδικασία της ξήρανσης και της ζύγισης, όπως φαίνεται στην εικόνα του παραρτήματος Π2. Η διαφορά της μάζας πριν και μετά τη ζύγιση του φίλτρου δείχνει την συγκέντρωση των σωματιδίων σκόνης και τον όγκο του αέρα που διήλθε στη συσκευή δειγματοληψίας, όπως απεικονίζεται στην εικόνα του παραρτήματος Π3. Το σύστημα δειγματοληψίας συμπληρώνει η μέτρηση ταχυτήτων με σωλήνα Pitot. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται σε πολλά σημεία μέσα στην καμινάδα, ώστε να καλύψει όσο μεγαλύτερη επιφάνεια γίνεται. Το αποτέλεσμα ανάγεται σε κανονικές και ξηρές συνθήκες και εκφράζεται σε Mg/Nm^3 , όπως παρουσιάζεται στην εικόνα του παραρτήματος Π4. Η διάρκεια της δειγματοληψίας είναι 86 min.

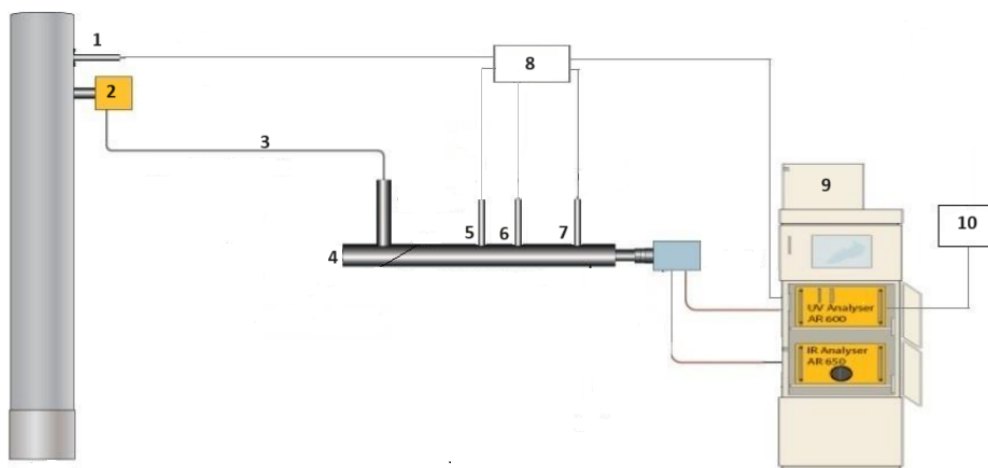


1. Suction nozzle and filter - Ακροφύσιο αναρρόφησης και φίλτρο συγκράτησης σωματιδίων
2. Gas washing bottle - Δοχείο συγκράτησης υγρασίας
3. Silica gel
4. Flowmeter (m^3/h), rotameter (%), pressure, temperature - Ογκομετρητής Ξηράς λειτουργίας
5. Suction pump - Αντλία αναρρόφησης Ξηρού καυσαερίου
6. S-type Pitot tube with thermocouple - Σωλήνας pitot τύπου S με θερμοστοιχείο
7. Inclined micromanometer and U-manometer - Μικρομανόμετρο και U-μανόμετρο

Εικόνα 4.11: Εξοπλισμός μέτρησης αιωρούμενων στερεών σωματιδίων

4.3.3 Μέτρησης αέριων ρύπων

Για τις μετρήσεις των εκπομπών αέριων ρύπων στη μονάδα ασφαλτομίγματος έγινε αναρρόφηση καυσαερίου στο θερμαινόμενο θάλαμο προετοιμασίας δείγματος καυσαερίου της μονάδας, το οποίο οδηγήθηκε στους αναλυτές του μέσω θερμαινόμενης γραμμής. Οι στιγμιαίες μετρήσεις από τους αναλυτές των αέριων ρύπων του καταγράφονται ανά ένα (1) λεπτό σε ψηφιακό καταγραφικό, όπως φαίνεται στην εικόνα του παραρτήματος Π5. Στην καπνοδόχο εξόδου καυσαερίων της μονάδας, υπάρχει εγκατεστημένο σύστημα αναρρόφησης που περιλαμβάνει ένα ακροφύσιο συλλογής ρύπων και θερμαινόμενη γραμμή. Το δείγμα καυσαερίου, που αναρροφάται με τη βοήθεια αντλίας αναρρόφησης, οδηγείται σε θερμαινόμενο θάλαμο (heated chamber) προετοιμασίας δείγματος και κατόπιν οδηγείται στους αναλυτές. Στο θάλαμο προετοιμασίας δείγματος υπάρχει μανόμετρο και θερμομέτρο για τη μέτρηση της πίεσης (P_k σε hPa) και της θερμοκρασίας (T_k σε $^{\circ}C$) του καυσαερίου. Οι μετρήσεις αυτές οδηγούνται σε Programmable Logic Controller (PLC). Επιπλέον, στο θερμαινόμενο θάλαμο υπάρχει ζιρκόνιο για τη μέτρηση O_2 (%), ενώ στην καπνοδόχο υπάρχει όργανο μέτρησης παροχής καυσαερίων (Durag flow meter) σε m^3/h . Οι μετρήσεις του O_2 και της παροχής καυσαερίων οδηγούνται επίσης στο PLC. Οι μετρήσεις της πίεσης και της θερμοκρασίας καυσαερίων οδηγούνται στους δύο αναλυτές και γίνεται κανονικοποίηση των ενδείξεων NO , NO_2 , NO_x , SO_2 , CO_2 και CO ως προς την πίεση και τη θερμοκρασία σε mg/Nm^3 (Εικόνα Π6). Σχηματική περιγραφή της μεθοδολογίας μέτρησης του συστήματος συνεχούς μέτρησης των αέριων ρύπων της μονάδας περιγράφεται στην εικόνα 4.12.



1. Ροόμετρο αερίων
2. Ανιχνευτής δειγματοληψίας
3. Θερμαινόμενη γραμμή δειγματοληψίας
4. Θερμαινόμενος θάλαμος μέτρησης
5. Μανόμετρο
6. Θερμόμετρο
7. Μετρητής Οξυγόνου
8. PLC
9. Αναλυτές μετρήσεων
10. Λογισμικό επεξεργασίας - αποθήκευσης εκπομπών αερίων

Εικόνα 4.12: Σχηματική περιγραφή μεθοδολογίας μέτρησης εκπομπών αέριων ρύπων

4.3.4 Αποτελέσματα μετρήσεων εκπομπών

Σύμφωνα με τις διαδικασίες που περιεγράφηκαν στα κεφάλαια 4.3.2 και 4.3.3, στον πίνακα 4.3, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετρήσεων των ολικών αιωρούμενων στερεών σωματιδίων (PM10) και των αέριων ρύπων (CO₂, CO, SO₂ και NO_x) σε πραγματικές συνθήκες μετά τη χρήση αντιρρυπαντικού εξοπλισμού (σακκόφιλτρα).

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα εκπομπών εργαστηριακού εξοπλισμού

Παράμετρος	Μονάδα μέτρησης	Μετρημένες τιμές	Οριακή τιμή	Περίοδος μέσου όρου
PM10	μg/m ³	24,56	50	1 day
CO	mg/m ³	0,5	10	8 hours
SO ₂	μg/m ³	1,98	125	1 day
NO _x	μg/m ³	5	200	1 h
CO ₂	mg/m ³	53788	720	1 h

Αυτό που παρατηρείται και αξίζει να σημειωθεί, είναι ότι όλες οι περιβαλλοντικές κατηγορίες βρίσκονται σε αποδεκτά επίπεδα, εκτός από το διοξείδιο του άνθρακα που υπερβαίνει τα θεσπισμένα όρια, σύμφωνα με αυτά που προβλέπονται για τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν την ανάγκη για προσαρμογές στη διαχείριση εκπομπών, με σκοπό τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος κατά την παραγωγή ασφαλτομίγματος.

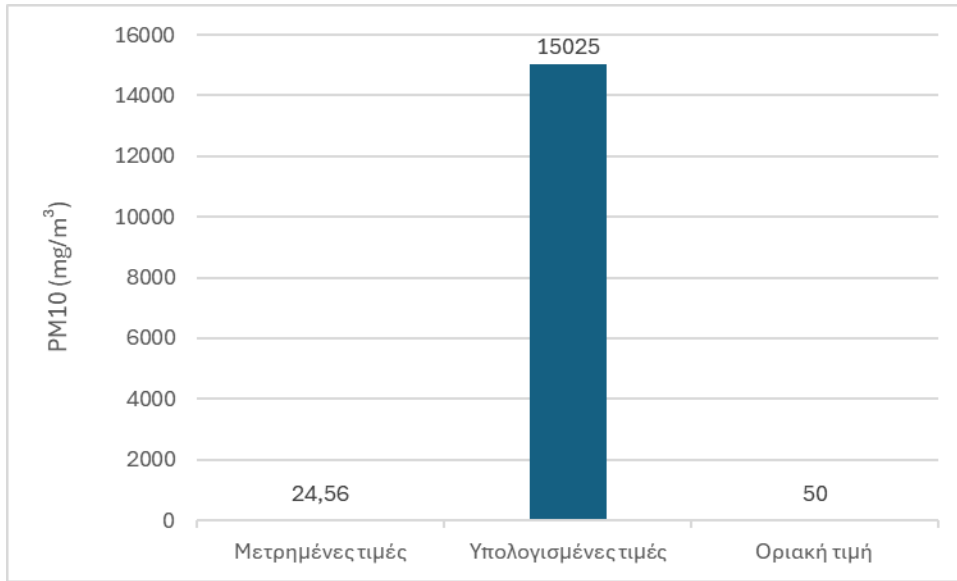
4.4 Σχολιασμός και σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων μέτρησης ρύπων

Στον πίνακα 4.4, παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές εκπομπές που προέκυψαν από τις μετρήσεις του λογισμικού PaLATE, αναφερόμενες ως υπολογισμένες τιμές, σε σύγκριση με εκείνες που καταγράφηκαν με τη βοήθεια του εργαστηριακού εξοπλισμού, αναφερόμενες ως μετρημένες τιμές. Καθώς πρέπει να συγκριθούν τα αποτελέσματα με τα νομοθετικά όρια, τα οποία είναι εκφρασμένα σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ή mg/m^3 , πραγματοποιήθηκε μετατροπή των μονάδων τους από kg/h σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$, διατηρώντας την ίδια παροχή καυσαερίων ($27571 \text{ Nm}^3/\text{h}$), η οποία έχει προκύψει από τις μετρήσεις που έγιναν με τον εργαστηριακό εξοπλισμό.

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα μετρημένων και υπολογισμένων τιμών

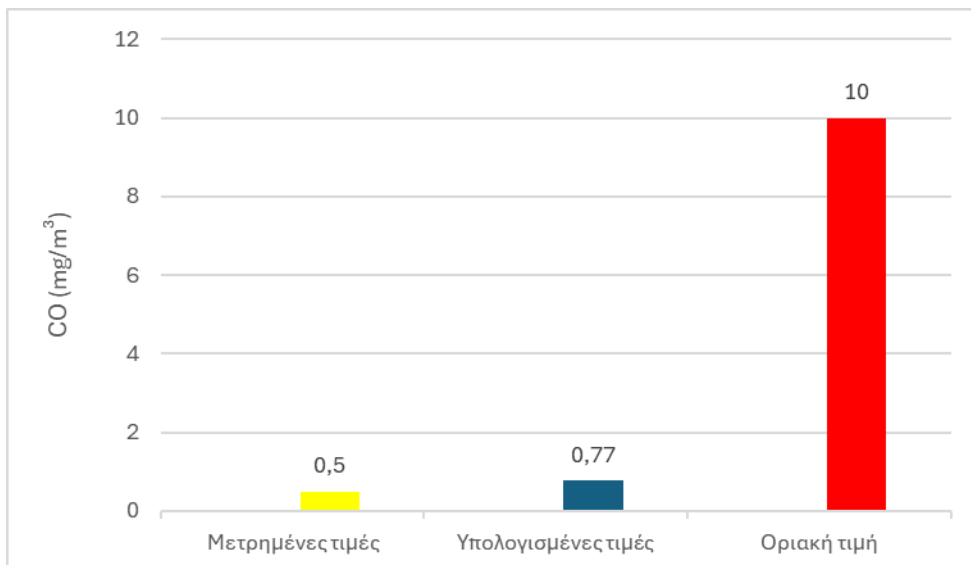
Παράμετρος	Μονάδα μέτρησης	Μετρημένες τιμές	Υπολογισμένες Τιμές	Οριακή τιμή	Περίοδος μέσου όρου
PM10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	24,56	15025	50	1 day
CO	mg/m^3	0,5	0,77	10	8 hours
SO ₂	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1,98	1.51	125	1 day
NO _x	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	5	5,7	200	1 h
CO ₂	mg/m^3	53788	130354	720	1 h

Στην εικόνα 4.13, παρατηρείται ότι, οι υπολογισμένες εκπομπές των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων από το εργαλείο PaLATE ανέρχονται στα $15025 \text{ mg}/\text{m}^3$, μια τιμή εξαιρετικά υψηλή σε σύγκριση με την οριακή τιμή των $50 \text{ mg}/\text{m}^3$. Παράλληλα, διαφέρει σημαντικά από την τιμή των $24,56 \text{ mg}/\text{m}^3$ που προκύπτει από τις μετρήσεις με τον εργοστασιακό εξοπλισμό. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι το λογισμικό δεν λαμβάνει υπόψη τη χρήση αντιρρυπαντικού εξοπλισμού, όπως γίνεται στην πραγματικότητα κατά τις μετρήσεις.



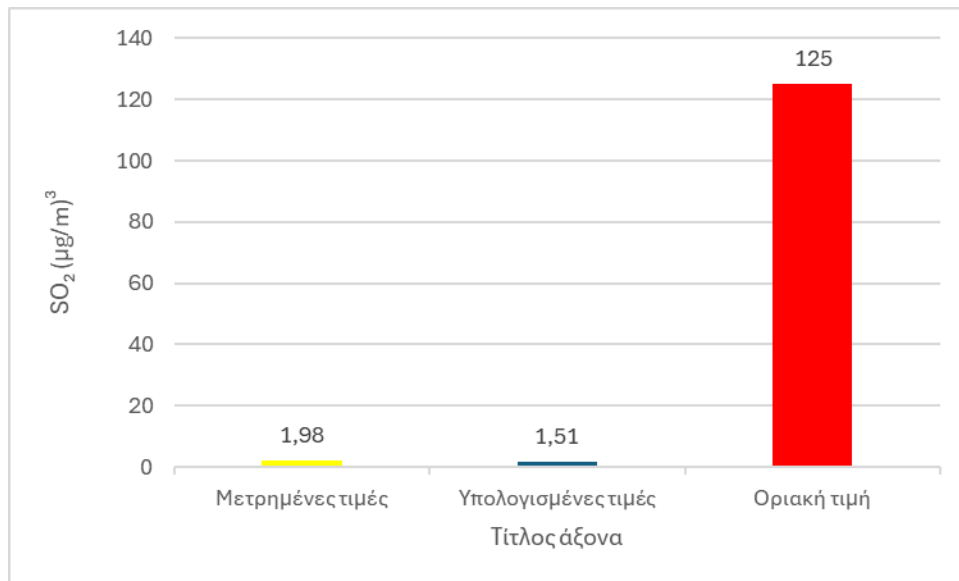
Εικόνα 4.13: Σύγκριση αποτελεσμάτων PM10

Στην εικόνα 4.14 απεικονίζονται οι μετρημένες ($0,5 \text{ mg/m}^3$) και οι υπολογισμένες εκπομπές του μονοξειδίου του άνθρακα ($0,77 \text{ mg/m}^3$), οι οποίες είναι πολύ χαμηλότερες από το επιτρεπόμενο όριο των 10 mg/m^3 και δεν τίθεται θέμα ανησυχίας για την ποιότητα του αέρα.



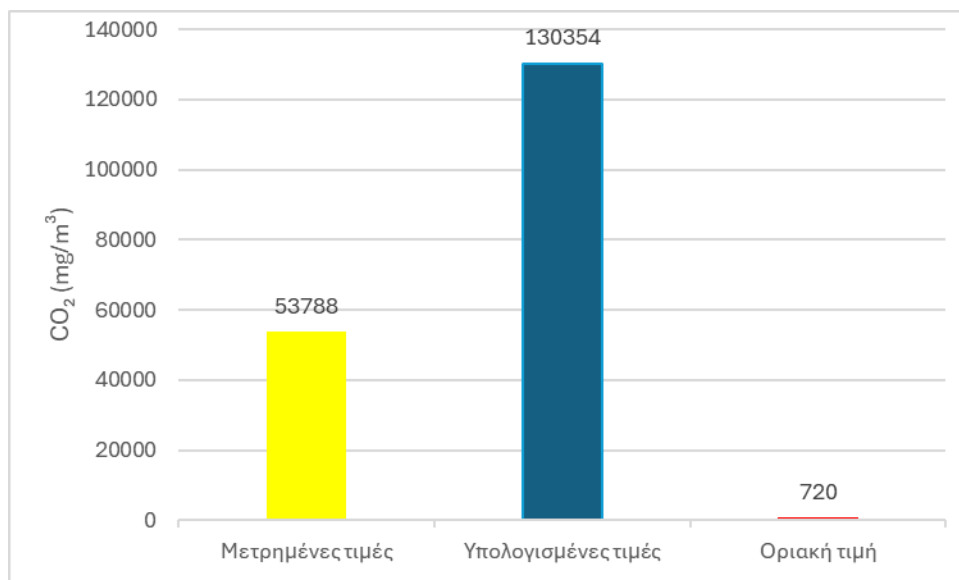
Εικόνα 4.14: Σύγκριση αποτελεσμάτων CO

Στην εικόνα 4.15 φαίνονται οι μετρημένες ($1,98 \text{ μg/m}^3$) και οι υπολογισμένες τιμές ($1,51 \text{ μg/m}^3$) του διοξειδίου του θείου, οι οποίες είναι επίσης πολύ χαμηλότερες από το όριο των 125 μg/m^3 . Αυτό υποδηλώνει ότι οι εκπομπές είναι αμελητέες και δεν υπάρχει ζήτημα υπέρβασης των επιτρεπόμενων ορίων.



Εικόνα 4.15: Σύγκριση αποτελεσμάτων SO₂

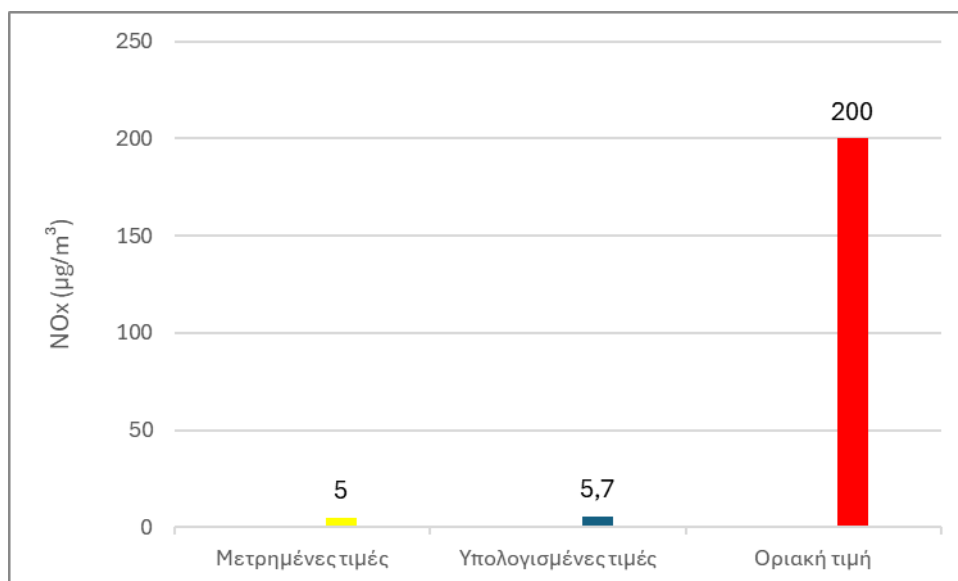
Στην περίπτωση του διοξειδίου του άνθρακα, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.16, οι δύο τιμές είναι σημαντικά υψηλότερες από το φυσιολογικό επίπεδο του εξωτερικού αέρα, το οποίο είναι **720 mg/m³**. Αυτή η διαφορά υποδηλώνει ότι υπάρχουν έντονες εκπομπές στο ασφαλτικό συγκρότημα, πιθανώς λόγω των διεργασιών καύσης που σχετίζονται με την παραγωγή ασφαλτικών υλικών. Ακόμα, αυτές οι εκπομπές μπορεί να έχουν σημαντική επίπτωση στη συνολική ποιότητα του αέρα, ειδικά αν συγκριθούν με τα χαμηλότερα επίπεδα του εξωτερικού αέρα σε περιοχές χωρίς έντονη βιομηχανική δραστηριότητα.



Εικόνα 4.16: Σύγκριση αποτελεσμάτων CO₂

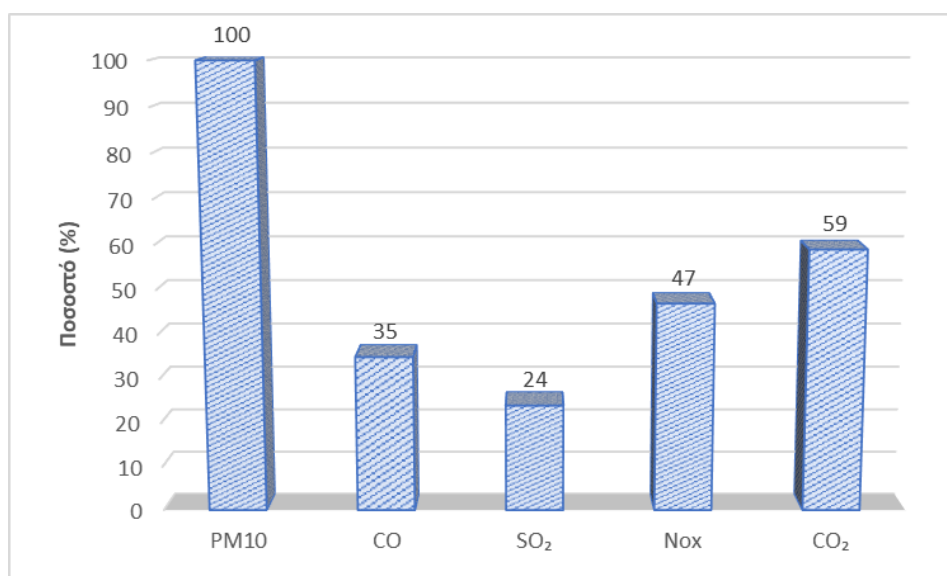
Τέλος, στη εικόνα 4.17, απεικονίζονται οι συγκεντρώσεις των οξειδίων του αζώτου, οι οποίες σύμφωνα με τις μετρήσεις και τους υπολογισμούς ανέρχονται σε 5 µg/m³

και 5,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ αντίστοιχα. Οι τιμές τους είναι πολύ χαμηλές σε σύγκριση με το όριο των 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, επιβεβαιώνοντας τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς για την ποιότητα του αέρα.



Εικόνα 4.17: Σύγκριση αποτελεσμάτων NOx

Στην εικόνα 4.18, φαίνεται η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με το PaLATE και εκείνων που έγιναν με τον εργαστηριακό εξοπλισμό για κάθε περιβαλλοντική κατηγορία ρύπων. Αξίζει να σημειωθεί ότι, τα αιωρούμενα στερεά σωματίδια παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη διαφορά, ενώ το διοξείδιο του θείου την μικρότερη.



Εικόνα 4.18: Ποσοστιαία διαφορά μετρήσεων ρύπων

Η διαφορά στις εκπομπές αιωρούμενων στερεών σωματιδίων (PM10) φτάνει το 100%, γεγονός που δείχνει ότι οι εκπομπές σωματιδίων είναι εξαιρετικά υψηλές όταν δεν χρησιμοποιείται αντιρρυπαντικός εξοπλισμός. Αυτή η απόκλιση αναδεικνύει τη σημαντική συμβολή του εξοπλισμού στη μείωση των εκπομπών, καθώς χωρίς τη χρήση του, οι εκπομπές είναι πολύ υψηλότερες, υπογραμμίζοντας την αναγκαιότητα της χρήσης του για τον περιορισμό των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Ως προς τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO), το ποσοστό διαφοράς είναι 35%, γεγονός που δείχνει κάποια απόκλιση μεταξύ των μεθόδων. Αυτό υποδηλώνει ότι οι μετρήσεις είναι πιο σταθερές, αλλά ακόμα υπάρχουν διαφοροποιήσεις μεταξύ των μεθόδων. Επίσης, η διαφορά στις εκπομπές διοξειδίου του θείου (SO₂) είναι 24%, υποδηλώνοντας ότι οι δύο μέθοδοι μέτρησης είναι πιο κοντά η μία στην άλλη. Για τα οξείδια του αζώτου (NO_x), η απόκλιση είναι στο 47%, κάτι που δείχνει σημαντική απόκλιση. Αυτό πιθανώς οφείλεται σε διαφορές στις παραμέτρους που χρησιμοποιεί κάθε μέθοδος για να υπολογίσει τις εκπομπές NO_x. Τέλος, η διαφορά στο διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) φτάνει το 59%, γεγονός που δείχνει ότι υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των δύο μεθόδων. Δεδομένης της σημασίας του για την κλιματική αλλαγή, αυτή η απόκλιση μπορεί να υποδηλώνει την ανάγκη για περαιτέρω έλεγχο των υποθέσεων που χρησιμοποιούν οι μέθοδοι.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη διερεύνηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος κατά την παραγωγή του ασφαλτομίγματος. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, εξετάστηκε λεπτομερώς η μεθοδολογία της ανάλυσης κύκλου ζωής (AKZ) ως εργαλείο εκτίμησης της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης που προκαλείται από την παραγωγή του ασφαλτομίγματος. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση των περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση κατάλληλου προγράμματος (PaLATE), ενώ στη συνέχεια καταγράφηκαν οι ρύποι με τη βοήθεια εργαστηριακού εξοπλισμού στην καπνοδόχο μιας μονάδας παραγωγής ασφαλτομίγματος σε πραγματικές συνθήκες.

Η μελέτη AKZ περιλαμβάνει τέσσερα σενάρια ανάλυσης, τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές διατομές εύκαμπτου οδοστρώματος και απαιτήσεις κυκλοφορίας, αλλά με κοινή σύνθεση ασφαλτομίγματος. Ως όρια συστήματος, ορίστηκαν όλες οι διαδικασίες που πραγματοποιούνται στη μονάδα ασφαλτομίγματος για την παραγωγή του τελικού υλικού, το οποίο χρησιμοποιείται στη διαμόρφωση των ασφατικών στρώσεων οδοστρώματος οδών. Για κάθε σενάριο αξιολογήθηκαν δώδεκα περιβαλλοντικοί κατηγορίες επίπτωσης και προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Οι εκπομπές του διοξειδίου του θείου (SO_2), του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και των οξειδίων του αζώτου (NO_x) βρίσκονται εντός των επιτρεπόμενων νομοθετικών ορίων.
- Οι κατηγορίες του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων (PM10) παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη απόκλιση σε σχέση με τα νομοθετικά όρια. Ειδικότερα, στα αιωρούμενα στερεά σωματίδια, οι υπολογισμένες τιμές φτάνουν τα $15.025 \mu\text{g}/\text{m}^3$, πολύ υψηλότερες από τις μετρημένες τιμές ($24,56 \mu\text{g}/\text{m}^3$) και την οριακή τιμή της νομοθεσίας ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Αυτή η διαφορά οφείλεται στην απουσία του αντιρρυπαντικού εξοπλισμού στον υπολογισμό των τιμών, υπογραμμίζοντας τη σημασία της χρήσης τέτοιου εξοπλισμού για τον περιορισμό των εκπομπών. Όσον αφορά το διοξείδιο του άνθρακα, οι μετρημένες και υπολογισμένες τιμές υπερβαίνουν κατά πολύ την οριακή τιμή των $720 \text{mg}/\text{m}^3$, υποδεικνύοντας ότι η παραγωγή ασφαλτομίγματος εκπέμπει σημαντικές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα, κάτι το οποίο επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα του αέρα.
- Υπάρχουν σημαντικές ποσοστιαίες αποκλίσεις στις εκπομπές ρύπων μεταξύ των δύο μεθόδων μέτρησης (PaLATE και εργαστηριακού εξοπλισμού). Στην περίπτωση των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων (PM10), η διαφορά αγγίζει

το 100%, τονίζοντας την αναγκαιότητα της χρήσης αντιρρυπαντικού εξοπλισμού για τον περιορισμό των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Αυτή η μεγάλη απόκλιση μπορεί να οφείλεται σε διαφορετικές παραδοχές ή παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στις δύο μεθόδους. Αντίθετα, για το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), η απόκλιση είναι μικρότερη, στο 24%, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι μετρήσεις παρουσιάζουν μικρότερες διαφορές και μεγαλύτερη σταθερότητα μεταξύ των δύο μεθόδων.

Τέλος, με αφορμή ότι η ανάλυση κύκλου ζωής είναι ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο που ποσοτικοποιεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε κάθε στάδιο της διαδικασίας παραγωγής και βοηθά τους υπεύθυνους στη λήψη αποφάσεων, ακολουθούν ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα, με στόχο την ανάπτυξη βιώσιμων στρατηγικών και την περαιτέρω βελτίωση της μεθόδου.

- Χρήση αντιρρυπαντικού εξοπλισμού

Η χρήση αντιρρυπαντικού εξοπλισμού, όπως τα σακκόφιλτρα, στη μονάδα παραγωγής ασφαλτομίγματος είναι αποτελεσματική στη μείωση των εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων, προστατεύοντας την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Τα σακκόφιλτρα κατακρατούν τα σωματίδια που παράγονται στη διαδικασία παραγωγής, ενώ ο καθαρός αέρας διαφεύγει. Η μονάδα καταγράφει εκπομπές 24,56 mg/m³, πολύ χαμηλότερες από το επιτρεπόμενο όριο των 50 mg/m³, επιβεβαιώνοντας την αποδοτικότητα του συστήματος. Παρά την ανάγκη για αρχική επένδυση και τακτική συντήρηση, τα σακκόφιλτρα προσφέρουν μακροπρόθεσμα εξοικονόμηση κόστους, βελτιώνοντας την ποιότητα αέρα και συμμορφώνοντας τη μονάδα με τα περιβαλλοντικά πρότυπα.

- Χρήση ανακτημένου υλικού (Reclaimed Asphalt Pavement) στην παραγωγή ασφαλτομίγματος

Η χρήση ανακτημένου υλικού (RAP) στην παραγωγή ασφαλτομίγματος μειώνει τις εκπομπές ρύπων και ενισχύει την περιβαλλοντική απόδοση. Το RAP προέρχεται από παλιά οδοστρώματα και η ενσωμάτωσή του μειώνει την ανάγκη για νέες πρώτες ύλες, εξοικονομώντας ενέργεια και περιορίζοντας τη ρύπανση. Σύμφωνα με μελέτη της EPA, η χρήση του μπορεί να μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) έως και 15%. Επιπλέον, η εφαρμογή του μειώνει τις εκπομπές σκόνης και βελτιώνει την ποιότητα του αέρα, καθιστώντας την παραγωγή ασφαλτομίγματος πιο βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον.

- Χρήση καθαρότερων καυσίμων (υγραέριο, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας)

Η αντικατάσταση πετρελαίου και μαζούτ με υγραέριο στις μονάδες παραγωγής ασφαλτομίγματος μειώνει τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), του διοξειδίου του θείου (SO₂), των οξειδίων του αζώτου (NO_x) και των αιωρούμενων σωματιδίων (PM10), βελτιώνοντας την ποιότητα του αέρα και την υγεία. Επίσης, το υγραέριο προσφέρει καλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα και χαμηλότερο κόστος. Τέλος, η αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική, συμβάλλει στη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα.

- Βελτίωση διαχείρισης των υλικών

Ο περιορισμός της σκόνης κατά τη μεταφορά των αδρανών μπορεί να επιτευχθεί μέσω της κάλυψης των υλικών με προστατευτικά υφάσματα, όπως είναι οι μουσαμάδες. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η έκθεσή της σκόνη στον αέρα και οι πιθανότητες διασποράς σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον, η χρήση συστημάτων καταβρέγματος κατά τη μεταφορά και την αποθήκευση των αδρανών μπορεί να μειώσει δραστικά την παραγωγή σκόνης.

- Συντήρηση εξοπλισμού

Η συντήρηση του εξοπλισμού παραγωγής ασφαλτομίγματος, όπως είναι τα φίλτρα, οι καυστήρες και οι σωληνώσεις, μειώνει τις εκπομπές ρύπων και βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση. Ο τακτικός έλεγχος και η σωστή ρύθμιση των μηχανών εξασφαλίζουν αποδοτική λειτουργία, καίγοντας λιγότερο καύσιμο και παράγοντας λιγότερους ρύπους, όπως CO₂ και αιωρούμενα σωματίδια.

Εν κατακλείδι, η ανάλυση κύκλου ζωής παρέχει μια ολιστική προσέγγιση, που επιτρέπει τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων για τη μείωση των εκπομπών και την ενίσχυση της βιωσιμότητας στη βιομηχανία παραγωγής ασφαλτομίγματος. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την ενσωμάτωση πιο ακριβών δεδομένων, η μέθοδος μπορεί να βελτιωθεί, συμβάλλοντας ακόμη περισσότερο στην επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Asphalt Institute. (2014). MS-2 Asphalt Mix Design Methods. 7th revision ed 2014. Lexington, Ky United States.

Alamri, M., Chen, C., & Elmagarhe, A. (2024). Evaluation of an Asphalt Mixture Containing a High Content of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Materials with Epoxy Asphalt. *Sustainability*, 16(12), 4988.

Asi, I. M. (2007). Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes. *Building and Environment*, 42(1), pp. 325-329.

ASTM D1559-89. (1989). Standard test method for resistance to plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D2493-09. (2009). Standard Viscosity-Temperature Chart for Asphalts. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA

Bruce G. Marshall. (1992). Asphalt Institute. Ανακτήθηκε από: <https://www.asphaltinstitute.org/timeline/roh-1992-bruce-g-marshall/>

Buchanan, M. S., & Brown, E. R. (2001). Effect of Superpave Gyrotory Compactor Type on Compacted Hot-Mix Asphalt Density. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1761(1), pp. 50-60.

Budya, V., & Hajek, H. (2011). Life Cycle Environmental Impacts of Road Pavement Systems: Asphalt vs. Concrete. *Environmental Impact Assessment Review*, 31(4), pp. 423-431.

Cao, S.Y., Wu, S., Zhou, X., & Huang, X. (2022). Life Cycle Assessment and Environmental Impact of Asphalt Pavement Materials: A Comprehensive Review. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129836.

Cardoso, F. A., Santos, J., & Ferreira, A. (2016). Sustainability Assessment of Pavement Maintenance Strategies in Urban Roads: Application of LCA and LCCA. *Journal of Cleaner Production*, 112, pp. 2693-2704.

Christensen, D., Bonaquist, R. (2006). Advanced Asphalt Mix Design and Performance Analysis. *Transportation Research Record*, 1940, Journal of the Transportation Research Board, pp. 39-46.

CYS EN 13108-1:2016. (2016). *Ασφαλτικά μίγματα – Προδιαγραφές υλικών – Μέρος 1: Ασφαλτοσκυρόδεμα*. Εθνικό Προσάρτημα της Κυπριακής Δημοκρατίας, Κυπριακός Οργανισμός Τυποποίησης (CYS), Λευκωσία.

Diazgranados Diaz, F. (2003). Analysis of aggregate properties and standards for road construction. *ASTM Standards and Testing*, 12(1), pp. 45-58

EN 13284-1. (2001). Stationery Source Emissions – Determination of Low Range Mass Concentration of Dust – Part 1: Manual Gravimetric Method. European Committee Standardization: Brussels, Belgium.

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

EPA. (2009). *Potential for reducing greenhouse gas emissions in the construction sector: A life cycle assessment*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. <https://www.epa.gov/>

European Commission JRC. (2010). ILCD Handbook: General Guide for Life Cycle Assessment – Detailed Guidance. *Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability*.

Ferreira, A. (2004). Life Cycle Analysis of Road Pavements: A Resource-Based Approach. *Journal of Environmental Management*, 73(1), pp. 189-199

Ferreira, W.L.G., Castelo Branco, V.T.F., Caro, S., Vasconcelos, K. (2019). Analysis of water flow in an asphalt pavement surface layer with different thicknesses and different permeability coefficients. *Road Materials and Pavement Design*. 2019, 22, pp. 82–100.

Franzitta, V., Longo, S., Sollazzo, G., Cellura, M., Celauro, C. (2020). Primary data collection and environmental/energy audit of hot mix asphalt production. *Energies*, 13, 2045.

González, A., Martínez, G. (2018). Sustainable Asphalt Production: Utilizing Renewable Energy Sources for Heating Aggregates in Asphalt Plants. *Journal of Cleaner Production*, 180, pp. 243-252.

Guinée, J.B., Marieke Gorrée, Reinout Heijungs Gjaltp Huppes, René Kleijn, Arjan de Koning, Laurant van Oers Anneke Wegener Sleswijk, Sangwon Suh, Helias A. Udo de Haes (2002). Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards. *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht, The Netherlands. Dordrecht, pp. 121-389.

Hansen, J., Sato, M., Hearty, P., Ruedy, R., Kelley, M., Masson-Delmotte, V., Russell, G., Tselioudis, G., Cao, J., Rignot, E., Velicogna, I., Kandiano, E., von Schuckmann, K., Kharecha, P., Legrande, A. N., Bauer, M., Lo, K-W. (2016). Ice Melt, Sea Level Rise and Superstorms: Evidence from Paleoclimate Data, Climate Modeling, and Modern Observations that 2°C Global Warming is Highly Dangerous. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. 15(14), 20059-20179, pp. 159-179.

Huang, Y., Bird, R., Bell, M. (2009). A Comparative Study of the Emissions by Road Maintenance Works and the Disrupted Traffic Using Life Cycle Assessment and Micro-Simulation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(3), pp. 197-204.

ISO 14001. (1992). Technical Committee 207: Environmental Management Systems. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland.

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

- ISO 14044. (2006β). Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland.
- ISO 9096. (2022). Stationary source emissions – Manual determination of mass concentration of particulate matter. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland.
- Jasim, R. (2012). The role of aggregates in pavement durability and performance. *Journal of Pavement Engineering*, 15(2), pp. 123-130
- Kanneganti, S. (2002). A Study on Asphalt Mix Design for Highway Pavements. *Journal of Pavement Engineering*, pp. 45-53.
- Marshall, B. (1939). Development of Asphalt Mix Design Method. *Mississippi Department of Highways*.
- Mashaan, N. (2022). Engineering Characterization of Wearing Course Materials Modified with Waste Plastic. *Recycling*, 7.
- Mukherjee, A. (2016). Life Cycle Assessment of Asphalt Mixtures in Support of an Environmental Product Declaration. *ISO 14040 Compliant Life Cycle Assessment Study Supporting the National Asphalt Pavement Association*.
- Oliveira, R.M., Silva, H.M.R.D., & Abreu, L.P.F. (2013). Life Cycle Assessment of Pavement Rehabilitation Strategies. *Resources, Conservation & Recycling*, 78, pp. 54-63.
- Özdemir, M., et al. (2019). Sustainability in Asphalt Mixtures: A Comparative Study. *Journal of Cleaner Production*, pp. 160-170.
- PaLATE v2.2 for Green roads 2011. Software and user guide modified by Civil & Environmental Engineering Department, University of Washington (UW). Available online: <https://rmrc.wisc.edu/palate/>
- Peight, J.G. (2014). *Asphalt Materials Science and Technology*. Elsevier, Oxford, UK. 1-540.
- Plati, C. (2019). Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review. *Construction and Building Materials*, 211, pp. 539–555.
- Pouranian, M. R., & Shishehbor, M. (2019). Sustainability assessment of green asphalt mixtures: A review. *Environments*, 6(6), 73. <https://doi.org/10.3390/environments6060073>
- Raha Bitumen Co. *Penetration Grade Bitumen – Road Bitumen – Paving Grade Bitumen*. <https://rahabitumen.com>.
- Ranieri, V., Giustozzi, F., & Crispino, M. (2017). A Comparative Life Cycle Assessment of Asphalt Mixtures: Traditional vs. Recycled Materials. *Journal of Cleaner Production*, pp. 80-90.
- Resource and Environmental Profile Analysis (REPA). (2004). Methodological Framework for Pavement Sustainability Assessment. *Environmental Protection Agency, United States*

Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D.Y., & Kennedy, T.W. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*. National Asphalt Pavement Association (NAPA) Research and Education Foundation, Lanham, Maryland, USA. pp. 150-200

Shrestha, R. N., 2018. Marshall Method of HMA Mix Design. Manual for Dense Graded Bituminous Mixes (DBM/BC). s.l.:Government of Nepal, pp. 33-60.

Sollazzo, G., Marini, M., Guglielmi, P. (2020). Life Cycle Assessment of Asphalt Mixtures with Recycled Materials: A Case Study. *Sustainability*, 12(16), 6462.

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

Tatari, T., Kucukvar, M., Onat, N. (2012). Sustainability Assessment of Asphalt Pavements: A Multi-Criteria Decision Analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(4), pp. 280-289.

Technodomiante. (n.d.). Παραγωγή και Εμπορία Ασφαλτομίγματος. [Ηλεκτρονικό Ανακτήθηκε από <https://technodomiante.gr/υπηρεσίες/παραγωγή-και-εμπορία-ασφαλτομίγματο/>].

White, G. (1985). Marshall Mix Design Principles. *Journal of Transportation Engineering*.

Yevu, S. K., Akudugu, M. A. (2020). Examining the determinants of climate change adaptation strategies among smallholder farmers in the northern savannah zone of Ghana. *Sustainability*, 12(24), 10171.

ΕΛΟΤ EN12620. Αντιολισθηρή στρώση ασφαλτικού σκυροδέματος. Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης (ΕΛΟΤ). Σελίδες 1-12. Ανακτήθηκε από: <https://www.ggde.gr/dmdocuments/05-03-12-01.pdf>.

ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-05-03-12-01:2009. (2009). Ασφαλτοσκυρόδεμα - Προδιαγραφές και Τεχνικές Οδηγίες. Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης (ΕΛΟΤ). Σελίδες 1-12. Ανακτήθηκε από: <https://sate.gr/html/pdfDocuments/05-03-12-01.pdf>.

Λοΐζος Α. & Πλατή Χ. (2019). Σημειώσεις για το Μάθημα κατασκευή οδών ενότητα: Υλικά & Δομή. *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών*, Φεβρουάριος 2019.

Λοΐζος Α. & Πλατή Χ. (2021). Σημειώσεις για το Μάθημα Ειδικά Θέματα Οδοστρωμάτων. *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών*, Οκτώβριος 2021.

Λοΐζος Α. & Πλατή Χ. (2021). Σημειώσεις για το Μάθημα Οδοστρώματα Οδών και Αεροδρομίων – Τεύχος Β: Συστήματα παρακολούθησης και διαχείρισης οδοστρωμάτων. *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών*, Οκτώβριος 2021.

ΠΕΤΕΠ 08-11-04-03. (2016). Ασφαλτικά Μίγματα – Παραγωγή, Μεταφορά και Διάστρωση. Ελληνικό Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών. Σελίδες 1-32. Ανακτήθηκε από: <https://www.sate.gr/html/pdfDocuments/05-03-11-04.pdf>.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με τον εργαστηριακό εξοπλισμό. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνονται ζυγίσεις φίλτρων, μετρήσεις βασικών στοιχείων καναλιού, καθώς και δεδομένα που αφορούν εκπομπές αέριων ρύπων και τις συγκεντρώσεις τους σε σχέση με τα νομοθετικά όρια. Όλα τα δεδομένα καταγράφουν τις απαραίτητες παραμέτρους που συμβάλλουν στην αξιολόγηση της περιβαλλοντικής ποιότητας και συμμόρφωσης με τις ισχύουσες περιβαλλοντικές προδιαγραφές.



Εικόνα Π1: Διάταξη μέτρηση σκόνης κατά EN 13284.01

Διάμετρος ακροφυσίου	8	mm	Διάμετρος λήπτη	50	mm
			Μήκος λήπτη	3.0	m
Μέσα Δέσμευσης					
Αριθμός & Είδος δειγμάτων				Κωδικός	
Φίλτρο συγκράτησης σκόνης				13447	
Φίλτρο	είδος	Flat	τύπος	ΤΣΙΓΚΙΝΑ	κατασκευαστής
	διαστάσεις	∅	0		0
					απόδοση %
					99.9
ΖΥΓΙΣΗ ΦΙΛΤΡΟΥ			Θερμοκρασία Ξήρασης		
Βάρος πριν		Βάρος μετά		Πριν	Μετά
29416.3 mg		29419.7 mg		180 °C	160 °C
Διαφορά Ζύγισης		3.39 mg			
Διαλύματα Έκπλυσης	Ακετόνη καθαρότητας	≥ 99,8 %			
	Δις-απεσταγμένο νερό				
	"τυφλό"	mg ΣΚΟΝΗΣ			
Βάρος πριν		Βάρος μετά		Διαφορά Ζύγισης	
0.0000 g		0.0000 g		0 mg	
ΜΑΡΤΥΡΕΣ ΦΙΛΤΡΟΥ					
Βάρος 1 ^{ου} Μάρτυρα (mg)		Βάρος 2 ^{ου} Μάρτυρα (mg)		Μέση Διαφορά Ζύγισης Δειγμάτων Μάρτυρα	Επιτρεπόμενο Όριο μέσης Διαφοράς Δειγμάτων μάρτυρα
πριν	μετά	πριν	μετά		Εντός ορίων
166.58	166.48	166.91	166.95	-0.03 mg	< 2 %
ΜΑΡΤΥΡΕΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΕΚΠΛΥΣΗΣ					
Βάρος 1 ^{ου} Μάρτυρα (g)		Βάρος 2 ^{ου} Μάρτυρα (g)		Μέση Διαφορά Ζύγισης Δειγμάτων Μάρτυρα	Επιτρεπόμενο Όριο μέσης Διαφοράς Δειγμάτων μάρτυρα
πριν	μετά	πριν	μετά		Εντός ορίων
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00 g	< 2 %
ΤΥΦΛΟ ΠΕΔΙΟΥ					
Βάρος τυφλού πεδίου (g)	πριν	μετά	Επιτρεπόμενο Όριο μέσης διαφοράς δειγμάτων μάρτυρα (mgr)		Εντός ορίων
	0.13788	0.13786			✓

Εικόνα Π2: Ζυγίσεις φίλτρου πριν και μετά την ξήρανση

Βαρομετρική πίεση		Θερμοκρασία στο δειγματολήπτη						
997 mbar		75.0 °C						
Ώρα Μέτρησης	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΝΑΛΙΟΥ (διορθωμένα)							
	Σημείο Μέτρησης	Θερμοκρασία °C	Στατική πίεση mbar	Ταχύτητα m/s	ΔΡ mbar	O ₂ % dry	CO ₂ % dry	
9:55								
	1_01	75	-0.8	13.0	1.18	17.9	2.1	
	1_02	75	-0.8	12.1	1.01	17.7	2.2	
	1_03	75	-0.8	12.4	1.07	17.8	2.2	
	1_04	75	-0.8	11.7	0.96	17.7	2.2	
	2_01	75	-0.8	12.1	1.01	17.8	2.2	
	2_02	75	-0.8	12.1	1.01	17.7	2.2	
	2_03	75	-0.8	11.7	0.96	17.9	2.1	
	2_04	75	-0.8	11.7	0.96	17.7	2.2	
10:00								
Μέσος Όρος :		75.01	-0.8		1.0	17.8	2.2	
• Γραμμή δειγματοληψίας ΣΚΟΝΗΣ							Διαρροή	
Ενδειξη Ογκομετρική		Μέση Παροχή	Μέση Θερμοκρασία	Μέση Πίεση	Δεσμειμένο νερό	Επιπρόσθετο όρος Διαρροής < 2% της Μέσης Παροχής	Πριν τη δειγματοληψία	Μετά
Αρχική m ³	Τελική m ³	m ³ /h avg	°C	mbar	g		l/min	l/min
1158.4690	1161.0040	1.8346	16.2	-98.20	98.0	0.0	0.0	
Διάρκεια Δειγματοληψίας		86	min				Εντός ορίου	✓

Εικόνα Π3: Μετρήσεις βασικών στοιχείων καναλιού με χρονικό βήμα 5 λεπτά

Όγκος Δειγματοληψίας ΣΚΟΝΗΣ					
σε O ₂ ως έχει	2.63	m ³ _{dry}		σε O ₂ αναφοράς	m ³ _{dry}
	2.32	Nm ³ _{wet}			Nm ³ _{wet}
17.78 %	2.20	Nm ³ _{dry}		-	Nm ³ _{dry}

Ισοκινητικό Σφάλμα	Επιτρεπόμενα Όρια	Εντός ορίων
-4.25 %	-5% + +15%	✓

Μέση Τιμή Στοιχείων των Απαιριών (ΚΑΝΑΛΙ) κατά τη διάρκεια της μέτρησης παροχής					
Ταχύτητα	12.10	m/s	Στατική πίεση	-0.80	mbar
Παροχή	37709	m ³ /h _{wet}	Πυκνότητα	0.981	kg/m ³ _{wet}
	29098	Nm ³ /h _{wet}		1.271	kg/Nm ³ _{wet}
	27571	Nm ³ /h _{dry}			
O ₂	17.78	%	Θερμοκρασία	74.94	°C
CO ₂	2.17	%	Υγρασία	44.50	g/Nm ³ _{dry}
				5.25	%

				ΣΚΟΝΗ
• Σε O ₂ ως έχει 17.8 % :				
ΣΚΟΝΗ	1.54	mg/Nm ³ _{dry}	±	0.07
	1.46	mg/Nm ³ _{wet}	±	0.06
	1.13	mg/m ³	±	0.05
• Σε O ₂ αναφοράς - % :				
ΣΚΟΝΗ		mg/Nm ³ _{dry}	±	
		mg/Nm ³ _{wet}	±	
		mg/m ³	±	
Σε kg/h :				
Σκόνη	0.04	kg/h	±	0.00

Εικόνα Π4: Αποτελέσματα Σκόνης και όγκου αέρα σε ξηρές - κανονικές συνθήκες

ΑΕΡΙΟΙ ΡΥΠΑΝΤΕΣ						
• Σε O ₂ ως έχει 17.8 % :						
	%		ppm		mg/Nm ³ _{dry}	
		Διευρυμένη αβεβαιότητα		Διευρυμένη αβεβαιότητα		Διευρυμένη αβεβαιότητα
O ₂	17.8	± 0.55	-	-	-	-
CO ₂	2.9	± 0.52	-	-	-	-
CO	-	-	762.9	± 26	953.6	± 32.8
SO ₂	-	-	7.5	± 3	21.5	± 7.5
NO	-	-	47.6	± 3	97.7	± 5.3
NO ₂	-	-	2.4	± 3	5.0	± 5.3
NO _x	-	-	50.1	± 4	102.6	± 7.6
• Σε O ₂ αναφοράς - % :						
	%		ppm		mg/Nm ³ _{dry}	
		Διευρυμένη αβεβαιότητα		Διευρυμένη αβεβαιότητα		Διευρυμένη αβεβαιότητα
O ₂	-	-				
CO ₂	-	-				
CO	-	-				
SO ₂	-	-				
NO	-	-				
NO ₂	-	-				
NO _x	-	-				
Σημείωση: Τα mg/Nm ³ _{dry} NO, NO ₂ , NO _x είναι εκφρασμένα ως NO ₂						
Σε kg/h :						
				Διευρυμένη αβεβαιότητα		
CO ₂	1483	kg/h	±	271		
CO	25.0	kg/h	±	0.9		
SO ₂	0.56	kg/h	±	0.20		
NO _x (ως NO ₂)	2.7	kg/h	±	0.2		

Εικόνα Π6: Αποτελέσματα αέριων ρύπων

3. Συνοπτικά αποτελέσματα

Στο Παράρτημα δίδονται τα αναλυτικά στοιχεία των μετρήσεων. Τα κυριότερα αποτελέσματα έχουν ως εξής:

Μετρήσεις στην ατμόσφαιρα

Παράμετρος	Μονάδα	Αποτελέσματα	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
PM10	μg/m ³	24,56	Διάρκεια μέτρησης 8 ώρες Τις υπόλοιπες ώρες του 24ώρου δεν υπάρχει δραστηριότητα στην περιοχή Στην περίπτωση 24ωρης μέτρησης η αναμενόμενη τιμή θα ήταν < 15 μg/m ³
NO ₂	μg/m ³	5,0	
	ppb	2,4	
SO ₂	μg/m ³	<1,98	
	ppb	<0,68	
CO	mg/m ³	<0,5	Διάρκεια δειγματοληψίας 10 λεπτά (10:00-10:10)

ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΟΡΙΑΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Ρύπος	Περίοδος μέσου όρου	Οριακή τιμή	Σύμφωνα με:
Σωματίδια ΑΣ10 στην ατμόσφαιρα	1 Ημέρα	50 μg/m ³	Η.Π.14122/549/Ε.103
	Ημερολογιακό έτος	40 μg/m ³	
SO ₂ στην ατμόσφαιρα (προστασία της υγείας)	1 Ημέρα	125 μg/m ³	
NO ₂ στην ατμόσφαιρα (προστασία της υγείας)	1 Ώρα	200 μg/m ³	
	Ημερολογιακό έτος	40 μg/m ³	
Μονοξείδιο του Άνθρακα στην ατμόσφαιρα	8 Ώρες	10 mg/m ³	

Εικόνα Π7: Αποτελέσματα ρύπων (μg/m³) με σχέση τα νομοθετικά όρια