

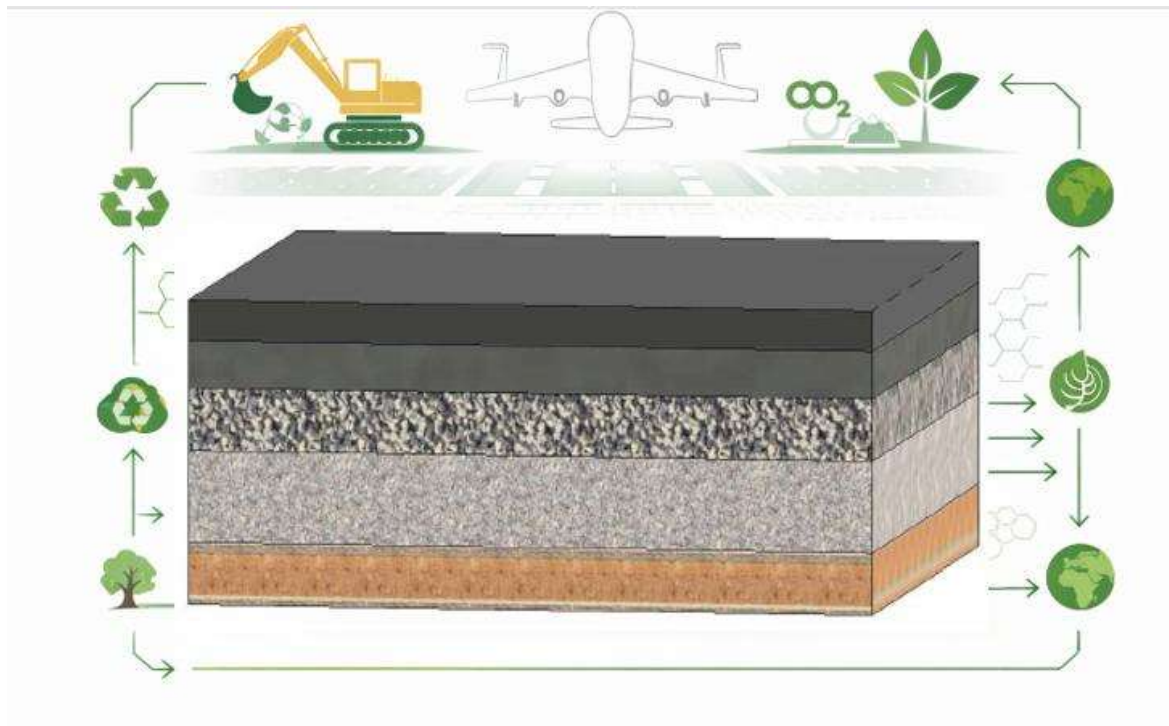


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Σχεδιασμός και Ανάλυση Κύκλου Ζωής «Πράσινων» Ασφαλτικών Οδοστρωμάτων σε Αεροδρόμια

Λουράκη Μερόπη (Μέη)



Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Πλατή Χριστίνα, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος, 2026

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται ένα από τα πλέον σύνθετα και επίκαιρα ζητήματα της σύγχρονης μηχανικής των αεροδρομίων, εστιάζοντας στη διερεύνηση της τεχνικής σκοπιμότητας και της βιωσιμότητας της ενσωμάτωσης Ανακτώμενου Ασφαλομίγματος (Reclaimed Asphalt Pavement - RAP) στις στρώσεις βάσης των εύκαμπτων ασφαλικών οδοστρωμάτων. Η ανάγκη αυτή προκύπτει από τις αυξανόμενες απαιτήσεις στις υποδομές, σε συνδυασμό με τους αυστηρούς περιβαλλοντικούς στόχους για μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος και τον περιορισμό της κατανάλωσης φυσικών πόρων. Στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, η αξιοποίηση του RAP αποτελεί μια εναλλακτική στρατηγική που δύναται να συμβάλει στη μείωση της κατανάλωσης πρωτογενών αδρανών και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των έργων οδοστρωσίας. Ωστόσο, η χρήση του υλικού αυτού ενδέχεται να επηρεάσει τη μηχανική συμπεριφορά της στρώσης βάσης, καθιστώντας αναγκαία τη διερεύνηση της ισορροπίας μεταξύ δομικής επάρκειας και περιβαλλοντικής αποδοτικότητας.

Για τον σκοπό αυτό, η εργασία βασίζεται σε ένα συνδυαστικό μεθοδολογικό πλαίσιο που περιλαμβάνει τον δομικό σχεδιασμό οδοστρωμάτων σύμφωνα με τη μεθοδολογία της Ομοσπονδιακής Διοίκησης Αεροπορίας (Federal Aviation Administration – FAA), μέσω του λογισμικού FAARFIELD 2.1.1, καθώς και την περιβαλλοντική αξιολόγηση μέσω της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment – LCA), με τη χρήση του εργαλείου PaLATE. Συνολικά, εξετάστηκαν έντεκα (11) διαφορετικά μίγματα, με αναφορά σε δύο σενάρια, για σύνθεση κυκλοφορίας αεροσκαφών που αντιστοιχεί σε αεροδρόμιο του ελλαδικού χώρου, και με ποσοστά RAP από 0% έως 100%, αξιοποιώντας πραγματικά εργαστηριακά δεδομένα Μέτρου Ελαστικότητας και πυκνότητας, προερχόμενα από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοστρωμάτων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Μέσω της μεθοδολογίας FAA προσδιορίστηκαν τα απαιτούμενα πάχη της στρώσης βάσης για κάθε σενάριο, ενώ τα αντίστοιχα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής, προκειμένου να εκτιμηθούν δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όπως η Κατανάλωση Πρωτογενούς Ενέργειας και το Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση RAP σε χαμηλά και μέτρια ποσοστά δρα ευεργετικά τόσο για τη μηχανική όσο και για την περιβαλλοντική απόδοση του οδοστρώματος. Συγκεκριμένα, για ποσοστά έως περίπου 50–60%, η αυξημένη δυσκαμψία του υλικού επιτρέπει τη διατήρηση των απαιτούμενων παχών σχεδιασμού σε επίπεδα συγκρίσιμα με εκείνα της συμβατικής κατασκευής, ενώ παράλληλα παρατηρείται σημαντική μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ωστόσο, η υπέρβαση του ποσοστού 60% RAP οδηγεί σε μια εκθετική αύξηση των απαιτούμενων παχών λόγω της σημαντικής δομικής εξασθένησης που παρουσίασε το υλικό στις εργαστηριακές δοκιμές, γεγονός που προκαλεί την πλήρη ακύρωση των περιβαλλοντικών οφελών λόγω του τεράστιου όγκου των απαιτούμενων υλικών και της ενέργειας που απαιτείται για τη μεταφορά και τη διάστρωσή τους. Ως εκ τούτου, το κρίσιμο σημείο ανακύκλωσης προσδιορίστηκε στην τάξη του 40% με 50% RAP, όπου επιτυγχάνεται η μέγιστη μείωση της Πρωτογενούς Ενεργειακής Ζήτησης και του Δυναμικού Υπερθέρμανσης του Πλανήτη χωρίς να διακυβεύεται η δομική επάρκεια του οδοστρώματος.

Συμπερασματικά, η εργασία τεκμηριώνει ότι η ενσωμάτωση RAP στις στρώσεις βάσης ασφαλικών οδοστρωμάτων αεροδρομίων αποτελεί μια τεχνικά εφικτή και περιβαλλοντικά βιώσιμη λύση, αναδεικνύοντας μέσω της συνδυαστικής εφαρμογής της μεθοδολογίας FAA και της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής τη σημασία ενός ολοκληρωμένου σχεδιασμού που υποστηρίζει τη μετάβαση προς τα «πράσινα αεροδρόμια του μέλλοντος».

ABSTRACT

This diploma thesis investigates the technical feasibility and environmental sustainability of integrating Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) into the base layers of flexible airport pavements. This need arises from the increasing infrastructure demands of modern aviation, combined with strict environmental targets for carbon footprint reduction and the conservation of natural resources. Within the framework of the circular economy, RAP represents a promising alternative material capable of reducing the consumption of virgin aggregates and minimizing the environmental impacts associated with pavement construction. However, the use of RAP may significantly influence the mechanical behavior of the base layer, making it necessary to identify the optimal balance between structural performance and environmental efficiency.

To address this objective, the research employs a multi-disciplinary methodology combining mechanistic pavement design according to the Federal Aviation Administration (FAA), implemented through FAARFIELD 2.1.1, with environmental evaluation through Life Cycle Assessment (LCA), implemented using the PaLATE tool. A total of eleven (11) different mixtures, considering two traffic scenarios, based on aircraft traffic composition corresponding to a representative airport in Greece, with RAP contents ranging from 0% to 100%, were analyzed utilizing real laboratory data of Resilient Modulus and density obtained from the database of the Pavement Laboratory of the National Technical University of Athens. The FAA design methodology was used to determine the required base layer thickness for each scenario, and the resulting material quantities were subsequently used as input for the LCA to quantify environmental impact indicators, including Primary Energy Consumption and Global Warming Potential.

The results demonstrated that the incorporation of RAP at low to moderate percentages improves both the mechanical and environmental performance of the pavement system. Specifically, RAP contents up to approximately 50–60% allowed the required structural thicknesses to remain comparable to those of conventional construction, while simultaneously reducing environmental impacts. However, exceeding a 60% RAP content triggers an exponential increase in required thicknesses due to the significant structural degradation observed in laboratory testing, which subsequently negated the environmental benefits due to the excessive material volumes and energy required for transport and placement. Consequently, the critical recycling threshold was identified in the range of 40% to 50% RAP, where the maximum reduction in Primary Energy Demand and Global Warming Potential is achieved without compromising structural integrity.

In conclusion, this diploma thesis demonstrates that the incorporation of RAP into the base layers of airport asphalt pavements constitutes a technically feasible and environmentally sustainable solution, highlighting through the combined application of the FAA design methodology and Life Cycle Assessment, the importance of an integrated design approach that supports the transition toward the 'green airports of the future'."

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	Εισαγωγή	1
1.1	Αντικείμενο	1
1.2	Στόχος και Μεθοδολογία	3
1.3	Δομή Εργασίας	4
2	Ανάλυση Κύκλου Ζωής και Βιωσιμότητα	5
2.1	Ανάλυση Κύκλου Ζωής	5
2.1.1	Ορισμός και Στάδια	5
2.1.2	Εργαλεία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής	7
2.2	Γενικές Αρχές Βιωσιμότητας	7
2.3	Σύνδεση Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και Βιωσιμότητας	8
2.4	Ανακτώμενο Ασφαλτόμιγμα στα αεροδρόμια	9
3	Γενικές Αρχές Μεθόδου FAA	12
3.1	Γενικά	12
3.2	Θεωρία Ελαστικών Στρώσεων	12
3.3	Μηχανισμοί Αστοχίας και Κρίσιμες Θέσεις	13
3.3.1	Ορισμός	13
3.3.2	Ρηγμάτωση λόγω Κόπωσης	14
3.3.3	Μόνιμη Παραμόρφωση Στρώση Έδρασης	15
3.4	Δείκτης Αθροιστικής Φθοράς – “Cumulative Damage Factor (CDF)”	15
3.5	Τυπικά Υλικά	16
3.6	Λογισμικό FAARFIELD	17
4	Γενικές Αρχές Ανάλυσης Κύκλου Ζωής	19
4.1	Κατηγορίες Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων	19
4.2	Υπολογιστικό Εργαλείο PaLATE	21
5	Πειραματική Ανάλυση	23
5.1	Καθορισμός Δεδομένων	23
5.2	Χαρακτηρισμός Υλικών	24

5.3	Σενάρια Ανάλυσης Δομικής Επάρκειας	26
5.4	Ανάλυση Απογραφής Κύκλου Ζωής (LCI)	28
6	Αποτελέσματα	30
6.1	Αξιολόγηση Εργαστηριακών Δεδομένων	30
6.2	Έλεγχος Επάρκειας Διατομών	32
6.2.1	Σενάριο 1 : Τυπική Διατομή	32
6.2.2	Σενάριο 2: Ενισχυμένη Διατομή	34
6.2.3	Κατασκευαστικά Όρια	36
6.3	Αποτελέσματα Ανάλυσης Κύκλου Ζωής	36
6.3.1	Σενάριο 1: Τυπική Διατομή	37
6.3.2	Σενάριο 2: Ενισχυμένη Διατομή	45
7	Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	53
7.1	Σύνοψη Αποτελεσμάτων	53
7.2	Περιορισμοί και Παραδοχές της Έρευνας	54
7.3	Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	55
8	Βιβλιογραφία	57

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2-1: Πλαίσιο LCA σύμφωνα με το πρότυπο ISO14040	6
Εικόνα 2-2: Οι τρεις πυλώνες της Βιώσιμης Ανάπτυξης (Κοινωνία, Περιβάλλον, Οικονομία)	8
Εικόνα 2-3: Δομή Συστήματος Διαχείρισης Οδοστρωμάτων (A-PMS) (Meneses, 2009)	9
Εικόνα 3-1: Τυπική διατομή Εύκαμπτου Οδοστρώματος κατά FAA. (Federal Aviation Administration, 2021)	14
Εικόνα 4-1: Ρύποι που υπολογίζονται στο PaLATE	21
Εικόνα 5-1: Η επιλεγμένη Σύσταση Κυκλοφορίας (Traffic Mix) στο περιβάλλον του FAARFIELD, αποτελούμενο από αεροσκάφη κατηγορίας ICAO C.	23
Εικόνα 5-2: Απεικόνιση Διατομής (Σενάριο 1)	26
Εικόνα 5-3: Απεικόνιση Διατομής (Σενάριο 2)	27
Εικόνα 6-1: Διακύμανση Μέτρου Ελαστικότητας ανά πρόσμιξη RAP	29
Εικόνα 6-2: Απαιτούμενο Πάχος Στρώσης Βάσης ανά πρόσμιξη RAP (Σενάριο 1)	32
Εικόνα 6-3: Απαιτούμενο Πάχος Στρώσης Βάσης ανά πρόσμιξη RAP (Σενάριο 2)	35
Εικόνα 6-4: Κατανάλωση Ενέργειας συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 1)	36
Εικόνα 6-5: Εκπομπές CO ₂ (Mg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 1)	37
Εικόνα 6-6: Εκπομπές NO _x (kg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 1)	38
Εικόνα 6-7: Εκπομπές Σωματιδίων PM-10 (kg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 1)	38
Εικόνα 6-8: Κατανάλωση Νερού συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 1)	39
Εικόνα 6-9: Καρκινικοί Ρύποι συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 1)	39
Εικόνα 6-10: Μη-καρκινικοί Ρύποι συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 1)	40
Εικόνα 6-11: Επικίνδυνα Απόβλητα (kg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 1)	40
Εικόνα 6-12: Εκπομπές CO (kg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 1)	41
Εικόνα 6-13: Ποσότητα Pb (kg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 1)	41
Εικόνα 6-14: Εκπομπές SO ₂ (kg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 1)	42
Εικόνα 6-15: Κατανάλωση Ενέργειας συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 2)	43
Εικόνα 6-16: Εκπομπές CO ₂ (Mg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 2)	44
Εικόνα 6-17: Εκπομπές NO _x (kg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 2)	44
Εικόνα 6-18: Εκπομπές Σωματιδίων PM-10 (kg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 2)	45
Εικόνα 6-19: Κατανάλωση Νερού συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 2)	45
Εικόνα 6-20: Καρκινικοί Ρύποι συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 2)	46
Εικόνα 6-21: Μη-καρκινικοί Ρύποι συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 2)	46
Εικόνα 6-22: Επικίνδυνα Απόβλητα (kg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 2)	47
Εικόνα 6-23: Εκπομπές CO (kg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 2)	47
Εικόνα 6-24: Ποσότητα Pb (g) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 2)	48
Εικόνα 6-25: Εκπομπές SO ₂ (kg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 2)	48

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 5-1: Εργαστηριακά Αποτελέσματα Μέτρου Ελαστικότητας και Πυκνότητας Μιγμάτων Βάσης	25
Πίνακας 5-2: Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά και Διαμόρφωση Στρώσεων ανά Σενάριο Σχεδιασμού	26
Πίνακας 6-1: Απαιτούμενα Πάχη Στρώσης Βάσης (mm) - Σενάριο 1	32
Πίνακας 6-2: Απαιτούμενα Πάχη Στρώσης Βάσης (mm) - Σενάριο 2	34
Πίνακας 6-3: Συγκεντρωτικά Περιβαλλοντικά Αποτελέσματα Σεναρίου 1 (Τυπική Διατομή)	36
Πίνακας 6-4: Συγκεντρωτικά Περιβαλλοντικά Αποτελέσματα Σεναρίου 2 (Ενισχυμένη Διατομή)	42

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο

Τα αεροδρόμια αποτελούν κρίσιμες συγκοινωνιακές υποδομές για την παγκόσμια οικονομική ανάπτυξη, αντιμετωπίζοντας παράλληλα πληθώρα προκλήσεων, τόσο λειτουργικές όσο και περιβαλλοντικές. Η βασική λειτουργική πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπίσει ένα σύγχρονο αεροδρόμιο είναι, σύμφωνα με τα πρόσφατα στοιχεία της Διεθνούς Ένωσης Αερομεταφορών, η ραγδαία ανάκαμψη της ζήτησης για αεροπορικά ταξίδια στη μετά την πανδημία εποχή, με τις προβλέψεις να κάνουν λόγο για διπλασιασμό της επιβατικής κίνησης εντός των επόμενων δύο δεκαετιών (IATA, 2023). Αυτή η δυναμική ανάπτυξη ασκεί μεγάλες πιέσεις στις υφιστάμενες υποδομές, οι οποίες καλούνται να εξυπηρετήσουν αυξημένους φόρτους λειτουργίας χωρίς εκπτώσεις στα επίπεδα ασφαλείας. Το δεδομένο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για χώρες με έντονα γεωγραφικά χαρακτηριστικά, όπως η Ελλάδα, όπου οι αεροπορικές μεταφορές δεν συνιστούν απλώς μέσο μετακίνησης, αλλά θεμελιώδη προϋπόθεση για την εδαφική συνοχή και την τουριστική ανάπτυξη.

Ανάμεσα στις περιβαλλοντικές προκλήσεις που σχετίζονται με τα αεροδρόμια, ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η συντήρηση των οδοστρωμάτων και των καταστροφών κίνησης και στάθμευσης των αεροσκαφών, ξεχωρίζουν λόγω της μεγάλης κατανάλωσης υλικών, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των τεράστιων απαιτήσεων ενέργειας και επένδυσης δημοσίων κεφαλαίων. Αυτή η κατασκευαστική δραστηριότητα εξαντλεί τα φυσικά αποθέματα και παράγει τεράστιους όγκους αποβλήτων, ενώ παράλληλα, η διαθεσιμότητα ποιοτικών αδρανών, κατάλληλων για τις αυστηρές προδιαγραφές των αεροδρομίων, μειώνεται σημαντικά (European Commission, 2020).

Ειδικότερα, η εξόρυξη και η επεξεργασία φυσικών αδρανών, σε συνδυασμό με την παραγωγή ασφάλτου, αποτελούν διαδικασίες υψηλής ενεργειακής έντασης που συμβάλλουν σημαντικά στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ("Greenhouse Gases"-GHG). Η μεταφορά των υλικών αυτών σε μεγάλες αποστάσεις, συχνά από την ηπειρωτική χώρα προς νησιωτικούς προορισμούς, όπως στην περίπτωση της Ελλάδας, επιβαρύνει περαιτέρω το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των έργων. Ως εκ τούτου, ο κλάδος των οδοστρωμάτων και ευρύτερα των καταστροφών συγκοινωνιακής υποδομής βρίσκεται αντιμέτωπος με τη μεγαλύτερη πρόκληση της σύγχρονης εποχής: την επιτακτική ανάγκη για δραστική μείωση του περιβαλλοντικού του αποτυπώματος. Σε αυτή την πρόκληση προστίθεται η ανάγκη διαχείρισης των αποβλήτων που προκύπτουν από την ανακατασκευή παλαιών οδοστρωμάτων, τα οποία συχνά καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής, σπαταλώντας πολύτιμους πόρους. Αποτέλεσμα αυτών των προκλήσεων είναι η θέσπιση αυστηρών πλαισίων, από διεθνείς οργανισμούς και ρυθμιστικές αρχές, όπως η δέσμευση για «Μηδενικές Καθαρές Εκπομπές» (Net Zero), τα οποία μεταβάλλουν ριζικά τον τρόπο σχεδιασμού και λειτουργίας των αερολιμένων (ACI Europe, 2023).

Σε αυτό το πλαίσιο, η ενσωμάτωση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής («Life Cycle Assessment» -LCA) στον βιώσιμο σχεδιασμό, εξελίσσεται σε ένα εργαλείο για την αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των οδοστρωμάτων καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους. Η LCA έχει γίνει μία μέθοδος που επιτρέπει στους μηχανικούς των αεροδρομίων να αναλύουν την κατανάλωση ενέργειας και πόρων, και τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζονται με κάθε στάδιο της κατασκευής και της συντήρησης του οδοστρώματος και καταστροφώματος. Διεθνείς οργανισμοί, όπως η Διεθνής Ακαδημία Οδοστρωμάτων (Academy of Pavement Science and

Engineering - APSE) προωθούν τη συστηματική εφαρμογή μεθοδολογιών LCA και την ενσωμάτωση ανακυκλωμένων υλικών, όπως το Ανακτώμενο Ασφαλτόμιγμα (Reclaimed Asphalt Pavement - RAP), στην πράξη του σχεδιασμού οδοστρωμάτων. Η προσέγγιση της παρούσας εργασίας εναρμονίζεται με τις κατευθύνσεις της APSE για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση τεχνολογιών κυκλικής οικονομίας στις συγκοινωνιακές υποδομές, συμβάλλοντας στην ευρύτερη προσπάθεια για την επίτευξη των στόχων βιωσιμότητας του κλάδου.

Το RAP είναι ένα υλικό που περιέχει ήδη επεξεργασμένα αδρανή και ασφαλτικό συνδετικό, προσφέροντας τη δυνατότητα σημαντικής εξοικονόμησης πόρων. Ωστόσο, προέρχεται από την απόξεση παλαιών οδοστρωμάτων, τα οποία έχουν εκτεθεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε περιβαλλοντικές δράσεις και οξειδωτικές διεργασίες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το συνδετικό ασφάλτου που περιέχεται στο RAP να έχει υποστεί γήρανση, οδηγώντας σε αύξηση της σκληρότητας και του ιξώδους του (Soleimani et al., 2021).

Η αυξημένη αυτή σκληρότητα μεταφράζεται σε υψηλότερο Μέτρο Ελαστικότητας (Resilient Modulus, Mr) για τα μίγματα που περιέχουν RAP, γεγονός που επηρεάζει την κατανομή των τάσεων εντός της διατομής του οδοστρώματος (Zhang et al., 2022). Όταν χρησιμοποιείται ως ασύνδετο υλικό της στρώσης βάσης αυξάνει τη δυσκαμψία της στρώσης και μπορεί θεωρητικά να βελτιώσει τη διασπορά των φορτίων και να προστατεύσει την εδαφική στρώση έδρασης του οδοστρώματος (subgrade) από μόνιμες παραμορφώσεις, ωστόσο συχνά συνοδεύεται από μείωση της ολκιμότητας του υλικού. Σε εφαρμογές αεροδρομίων, όπου τα φορτία των τροχών είναι εξαιρετικά υψηλά και οι πιέσεις επαφής υπερβαίνουν κατά πολύ αυτές των οδικών αξόνων, η μειωμένη ικανότητα του υλικού να παραμορφώνεται ελαστικά χωρίς να ρηγματώνεται αποτελεί κρίσιμο παράγοντα αστοχίας (Al-Qadi et al., 2012). Η αύξηση της δυσκαμψίας, εάν δεν ελεγχθεί, μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη αστοχία λόγω κόπωσης (fatigue cracking) στις υπερκείμενες ασφαλτικές στρώσεις ή ακόμα και σε αστοχία εντός της ίδιας της βάσης με προσθήκη RAP.

Ως εκ τούτου, προκύπτει το τεχνικό παράδοξο όπου η περιβαλλοντική επιδίωξη για μέγιστη ανακύκλωση μπορεί να οδηγήσει σε ανάγκη για σχεδιασμό παχύτερων διατομών προκειμένου να αντισταθμιστεί η μειωμένη αντοχή σε κόπωση. Η αύξηση του πάχους των στρώσεων, ωστόσο, απαιτεί μεγαλύτερες ποσότητες υλικών, αυξάνοντας την κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή, μεταφορά και διάστρωσή τους, γεγονός που δύναται να ακυρώσει ή και να αντιστρέψει το αρχικό περιβαλλοντικό όφελος.

Το πρόβλημα που καλείται να διερευνηθεί η παρούσα διπλωματική είναι ο εντοπισμός του σημείου ισορροπίας μεταξύ της μηχανικής επάρκειας και της περιβαλλοντικής αποδοτικότητας (FAA, 2021). Απαιτείται η διερεύνηση του κατά πόσον η τρέχουσα μεθοδολογία σχεδιασμού της Ομοσπονδιακής Διοίκησης Αεροπορίας (Federal Aviation Administration -FAA) επιτρέπει την ενσωμάτωση υψηλών ποσοστών RAP χωρίς να οδηγεί σε υπερδιαστασιολόγηση που καθιστά το έργο μη βιώσιμο ενεργειακά και οικονομικά. Επιπλέον, με την ενσωμάτωση του βιώσιμου σχεδιασμού με τη χρήση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA), η εργασία δεν περιορίζεται μόνο στις επιπτώσεις των αεροσκαφών, αλλά εστιάζει στην κατασκευή των οδοστρωμάτων/καταστρωμάτων ενός αεροδρομίου, τα οποία αποτελούν τη βάση πολλών οικονομικών δραστηριοτήτων. Όταν χρησιμοποιείται RAP ως ασύνδετο υλικό στρώσης βάσης σε ασφαλτικό οδόστρωμα αεροδρομίου, τίθεται ως κρίσιμη απαίτηση η υιοθέτηση μιας προσέγγισης που ενισχύει το ρόλο των υπόψη οδοστρωμάτων ως πρότυπα πράσινης ανάπτυξης, χωρίς να θυσιάζεται η αποδοτικότητά τους.

1.2 Στόχος και Μεθοδολογία

Στόχος της παρούσα διπλωματικής εργασίας είναι ο προσδιορισμός ενός βέλτιστου ποσοστού ενσωμάτωσης Ανακτώμενου Ασφαλτομίγματος (Reclaimed Asphalt Pavement – RAP) στις στρώσεις βάσης εύκαμπτων ασφαλτικών οδοστρωμάτων αεροδρομίων, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ταυτόχρονα μηχανική επάρκεια και περιβαλλοντική αποδοτικότητα. Το κεντρικό ερώτημα της έρευνας διατυπώνεται ως «Ανακύκλωση μέχρι πού;». Η εργασία διερευνά σε ποιο βαθμό η αύξηση του ποσοστού RAP μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς να οδηγεί σε υπερδιαστασιολόγηση της διατομής οδοστρώματος ή σε περιβαλλοντική επιβάρυνση που αναιρεί τα οφέλη της ανακύκλωσης.

Η μεθοδολογική προσέγγιση βασίζεται στη συνδυαστική αξιολόγηση της δομικής συμπεριφοράς και της περιβαλλοντικής επίδοσης των οδοστρωμάτων, διαμορφώνοντας ένα ενιαίο πλαίσιο ανάλυσης, από τον μηχανικό σχεδιασμό κατά την Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αεροπορίας (Federal Aviation Administration -FAA) έως την περιβαλλοντική αποτίμηση μέσω της μεθοδολογίας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA). Αρχικά, εξετάζεται η επίδραση της περιεκτικότητας σε RAP στις μηχανικές ιδιότητες της στρώσης βάσης, με έμφαση στη μεταβολή του Μέτρου Ελαστικότητας για ποσοστά ανακύκλωσης από 0% έως 100%. Η ανάλυση πραγματοποιείται στο πλαίσιο της μεθοδολογίας σχεδιασμού της FAA, μέσω της οποίας αξιολογείται η δομική επάρκεια του οδοστρώματος για περίοδο σχεδιασμού 20 ετών, βάσει του Δείκτη Αθροιστικής Φθοράς (Cumulative Damage Factor – CDF) και των κριτηρίων αστοχίας λόγω κόπωσης της ασφαλτικής στρώσης και παραμόρφωσης της στρώσης έδρασης (FAA, 2016).

Στο πλαίσιο αυτό, καθορίζονται οι παράμετροι εισόδου του σχεδιασμού, οι οποίες περιλαμβάνουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής, τις ιδιότητες του εδάφους έδρασης και τη σύνθεση της κυκλοφορίας των αεροσκαφών. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον χαρακτηρισμό των υλικών της στρώσης βάσης, όπου χρησιμοποιούνται τιμές Μέτρου Ελαστικότητας και πυκνότητας που προκύπτουν από εργαστηριακές μετρήσεις για διαφορετικά ποσοστά περιεκτικότητας σε RAP. Μέσω της εφαρμογής της Θεωρίας Ελαστικών Στρώσεων, υπολογίζεται η μηχανική απόκριση του οδοστρώματος υπό τα φορτία των αεροσκαφών και προσδιορίζεται το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος της στρώσης βάσης για κάθε εξεταζόμενο σενάριο.

Σε δεύτερο στάδιο, τα αποτελέσματα του δομικού σχεδιασμού, και συγκεκριμένα οι απαιτούμενοι όγκοι υλικών για την κατασκευή ενός τυπικού τμήματος διαδρόμου, αξιοποιούνται για την εκπόνηση Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA). Κατά την ανάλυση αυτή καθορίζονται τα όρια του συστήματος και λαμβάνονται υπόψη οι διεργασίες εξόρυξης, παραγωγής, μεταφοράς και κατασκευής των υλικών, με παραμέτρους προσαρμοσμένες στα ελληνικά δεδομένα. Η περιβαλλοντική αξιολόγηση βασίζεται σε δείκτες όπως η Κατανάλωση Πρωτογενούς Ενέργειας και το Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη (Global Warming Potential – GWP), επιτρέποντας τη σύγκριση των περιβαλλοντικών επιδόσεων των διαφορετικών σεναρίων με τη συμβατική λύση αναφοράς (Horvath, 2004).

Η τελική αξιολόγηση προκύπτει από τη συνδυαστική εξέταση των μηχανικών και περιβαλλοντικών αποτελεσμάτων των σεναρίων περιεκτικότητας σε RAP, με στόχο τον προσδιορισμό του ποσοστού εκείνου που προσφέρει τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ τεχνικής απόδοσης και περιβαλλοντικής αποδοτικότητας για εφαρμογές οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

1.3 Δομή Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος εισαγωγικού κεφαλαίου, αναπτύσσεται σε οκτώ (8) κεφάλαια, ακολουθώντας τη λογική αλληλουχία της ερευνητικής διαδικασίας.

Στο Κεφάλαιο 2 (Ανάλυση Κύκλου Ζωής και Βιωσιμότητα) , παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της Κυκλικής Οικονομίας, αναλύονται οι ιδιότητες του RAP και εξετάζεται το πλαίσιο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA).

Το Κεφάλαιο 3 (Γενικές Αρχές Μεθόδου FAA) εστιάζει στις αρχές της μηχανικής οδοστρωμάτων, στην εφαρμογή της μεθόδου FAA, τους νόμους αστοχίας που διέπουν την κόπωση των ασφαλικών στρώσεων και την παραμόρφωση της στρώσης έδρασης, τον προσδιορισμό των κρίσιμων θέσεων ελέγχου εντός της διατομής και την εφαρμογή της μεθόδου μέσω του λογισμικού FAARFIELD.

Στο Κεφάλαιο 4 (Γενικές Αρχές Ανάλυσης Κύκλου Ζωής) παρατίθεται το θεωρητικό πλαίσιο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, με αναφορά στους δείκτες επιπτώσεων και στη λειτουργία του λογισμικού PaLATE.

Το Κεφάλαιο 5 (Πειραματική Ανάλυση), περιγράφει τη μεθοδολογία της έρευνας και τα δεδομένα εισόδου. Αναλύονται τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, η σύνθεση της κυκλοφορίας, οι ιδιότητες των υλικών, όπως προέκυψαν εργαστηριακά, και τα σενάρια σχεδιασμού που εξετάστηκαν.

Στο Κεφάλαιο 6 (Αποτελέσματα) παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα του σχεδιασμού κατά FAA και της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.

Το Κεφάλαιο 7 (Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα) συνοψίζει τα πορίσματα και προτείνει κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

Το Κεφάλαιο 8 (Βιβλιογραφία) περιλαμβάνει τη Βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

2 Ανάλυση Κύκλου Ζωής και Βιωσιμότητα

2.1 Ανάλυση Κύκλου Ζωής

2.1.1 Ορισμός και Στάδια

Η Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αεροπορίας (Federal Aviation Administration -FAA) προκειμένου να βελτιώσει την ασφάλεια, να ενισχύσει την ανθεκτικότητα και να μειώσει το κόστος των υποδομών των αεροδρομίων, υιοθέτησε τη μέθοδο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής («Life Cycle Assessment (LCA)»). Η μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής αποτελεί το πλέον αναγνωρισμένο επιστημονικό εργαλείο για την αντικειμενική ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με ένα σύστημα υποδομών καθ' όλη τη διάρκεια της ύπαρξής του, υπερβαίνοντας τις μονοδιάστατες προσεγγίσεις που εστιάζουν αποκλειστικά στην κατανάλωση καυσίμων κατά τη φάση της κατασκευής. Παράλληλα, αξιολογεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τις διαθέσιμες επιλογές για τη μείωση αυτών των επιπτώσεων (Aldridge, 2024).

Η εφαρμογή της LCA στον τομέα των οδοστρωμάτων διέπεται από τα διεθνή πρότυπα ISO 14040:2006 και ISO 14044:2006, τα οποία καθορίζουν τις αρχές, το πλαίσιο και τις ελάχιστες απαιτήσεις για τη διεξαγωγή μιας ολοκληρωμένης μελέτης. Κεντρικό στοιχείο της μεθοδολογίας είναι ο ορισμός της Λειτουργικής Μονάδας (Functional Unit), η οποία επιτρέπει τη σύγκριση εναλλακτικών λύσεων σχεδιασμού, όπως η ενσωμάτωση Ανακτώμενου Ασφαλτομίγματος έναντι φυσικών υλικών, σε μια κοινή και επιστημονικά τεκμηριωμένη βάση αναφοράς. Μέσω της εφαρμογής της LCA, οι μηχανικοί δύνανται να αξιολογήσουν όχι μόνο τις άμεσες εκπομπές ρύπων στο εργοτάξιο, αλλά και τις έμμεσες επιπτώσεις που προκύπτουν από την εξόρυξη των πρώτων υλών, τη διύλιση της ασφάλτου στα διυλιστήρια και τις πολλαπλές μεταφορές των αδρανών. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14040 ορίζεται μια δομημένη διαδικασία τεσσάρων σταδίων, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 2-1* . (ISO, 2006).

Βάσει των παραπάνω , η Αξιολόγηση του Κύκλου Ζωής αποτελείται από τα παρακάτω τέσσερα στάδια. (Butt et al., 2020)

ΣΤΑΔΙΟ 1: Καθορισμός Στόχου και Πεδίου Εφαρμογής.

Στο αρχικό αυτό βήμα προσδιορίζεται ο σκοπός της μελέτης, ορίζονται τα όρια του συστήματος (system boundaries) και επιλέγεται η λειτουργική μονάδα, ενώ παράλληλα καθορίζονται οι κατηγορίες επιπτώσεων, όπως το GWP, που θα εξεταστούν διεξοδικά.

ΣΤΑΔΙΟ 2: Ανάλυση Απογραφής (Life Cycle Inventory - LCI).

Πρόκειται για το πλέον απαιτητικό στάδιο, καθώς περιλαμβάνει τη συλλογή και τον ποσοτικό προσδιορισμό όλων των εισροών ενέργειας και υλικών, καθώς και των εκροών ρύπων προς το περιβάλλον για κάθε διεργασία εντός των ορίων του συστήματος. Η ακρίβεια της απογραφής εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα των δεδομένων που χρησιμοποιούνται, τα οποία στην παρούσα εργασία αντιστοιχούν σε πραγματικές μάζες υλικών από τον δομικό σχεδιασμό.

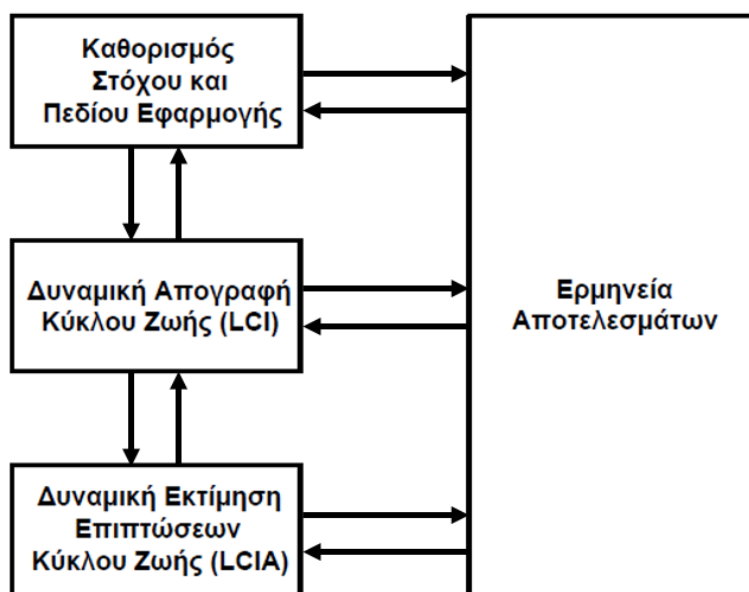
ΣΤΑΔΙΟ 3: Εκτίμηση Επιπτώσεων (Life Cycle Impact Assessment - LCIA).

Σε αυτό το στάδιο, τα δεδομένα της απογραφής κατατάσσονται σε συγκεκριμένες περιβαλλοντικές κατηγορίες και μετατρέπονται σε δείκτες επιπτώσεων, χρησιμοποιώντας

κατάλληλους συντελεστές χαρακτηρισμού που αντικατοπτρίζουν την επίδραση στην κλιματική αλλαγή.

ΣΤΑΔΙΟ 4: Ερμηνεία Αποτελεσμάτων.

Πραγματοποιείται η κριτική αξιολόγηση των ευρημάτων και η διατύπωση συμπερασμάτων που στοχεύουν στη λήψη αποφάσεων για τη βελτίωση της περιβαλλοντικής επίδοσης της υποδομής, λαμβάνοντας υπόψη τους μηχανικούς περιορισμούς των υλικών. Διαπιστώνεται ότι η διαδικασία αυτή είναι δυναμική, καθώς τα αποτελέσματα της ερμηνείας δύνανται να οδηγήσουν σε αναθεώρηση των αρχικών παραδοχών του πεδίου εφαρμογής. Επομένως, η LCA λειτουργεί ως ένας μηχανισμός διαρκούς βελτιστοποίησης του σχεδιασμού.



Εικόνα 2-1: Πλαίσιο LCA σύμφωνα με το πρότυπο ISO14040

Ο καθορισμός των ορίων του συστήματος αποτελεί μια από τις κρισιμότερες παραδοχές στη μεθοδολογία LCA, καθώς επηρεάζει άμεσα την έκταση των περιβαλλοντικών φορτίων που καταλογίζονται στο οδόστρωμα και τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων με τη διεθνή βιβλιογραφία. Τα τυπικά όρια του συστήματος κύκλου ζωής περιλαμβάνουν:

ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος, από την εξόρυξη των πρώτων υλών μέχρι το τέλος της ζωής του και τη διάθεσή του (Cradle to Grave)

αξιολόγηση του προϊόντος μόνο μέχρι τη φάση παραγωγής, χωρίς να περιλαμβάνεται η χρήση ή η διάθεση στο τέλος της ζωής του (Cradle to Gate)

όλα τα στάδια έως και την τοποθέτηση του οδοστρώματος στο έργο (Cradle to Laid)

ανάλυση ενός μεμονωμένου τμήματος της παραγωγικής διαδικασίας, συνήθως ένα συγκεκριμένο εργοστασιακό στάδιο (Gate to Gate)

ένας κύκλος ζωής στον οποίο τα υλικά ανακυκλώνονται και χρησιμοποιούνται ξανά σε συνεχείς κύκλους χωρίς να χάνουν την ποιότητά τους (Cradle to Cradle).

2.1.2 Εργαλεία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Κατά την εφαρμογή της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής σε έργα οδοστρωμάτων, έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί λογισμικά που εξυπηρετούν διαφορετικές ανάγκες της αξιολόγησης. Ενδεικτικά, το SimaPro είναι από τα πιο διαδεδομένα εργαλεία για την περιβαλλοντική αξιολόγηση, εκτιμώντας τις επιπτώσεις σε όλους τους τομείς του κύκλου ζωής του έργου.

Επιπλέον, ένα από τα πιο πρόσφατα εργαλεία που αναπτύχθηκαν είναι το LCA-AIR (Kulikowski, 2016). Το συγκεκριμένο λογισμικό σχεδιάστηκε για την εκτίμηση της βιωσιμότητας διαφορετικών στρατηγικών αποκατάστασης σε βασικά τμήματα των αεροδρομίων, δίνοντας έμφαση στο Παγκόσμιο Δυναμικό Θέρμανσης – “Global Warming Potential” (GWP). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται από διαχειριστές αεροδρομίου και μηχανικούς, στη διαδικασία λήψης αποφάσεων για τη διαμόρφωση βιώσιμων οδοστρωμάτων, παρέχοντας δεδομένα σε περιβάλλον Excel. Παράλληλα, το LCA – AIR, επί του παρόντος, αναλύει δύο διαδρόμους, τέσσερις τροχοδρόμους και δύο περιοχές στάθμευσης αεροσκαφών, ενώ δε λαμβάνει υπόψη το στάδιο τέλους ζωής. Στο LCA-AIR, όπως και στις αναλύσεις των αυτοκινητόδρομων, εξετάζονται οι φάσεις λειτουργίας των αεροσκαφών, για παράδειγμα η τροχοδρόμηση και η πτήση, και δεν περιλαμβάνονται οι επιπτώσεις της κατασκευής και της συντήρησης.

Παράλληλα, για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των οδοστρωμάτων χρησιμοποιείται το PaLATE (“Pavement Life-Cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects”). Με το λογισμικό αυτό υπολογίζονται οι εκπομπές και η κατανάλωση ενέργειας για διαφορετικές τεχνικές επιλογές και τύπους υλικών, και χρησιμοποιείται για την οικολογική και οικονομική αξιολόγηση. Στην παρούσα εργασία, η μεθοδολογία LCA εφαρμόζεται μέσω του εργαλείου PaLATE για την αξιολόγηση σεναρίων διατομής οδοστρώματος αεροδρομίου.

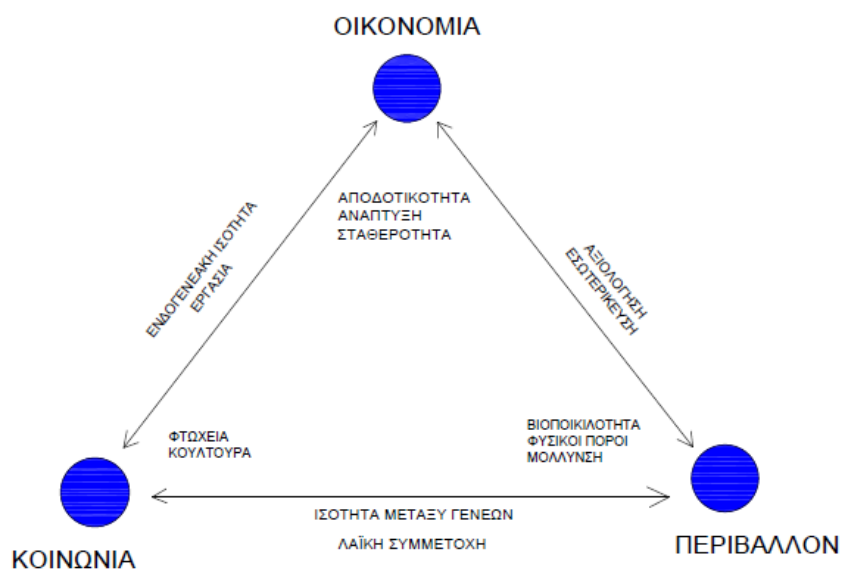
Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι, κάθε λογισμικό χρησιμοποιεί διαφορετικά δεδομένα, παραμέτρους και συντελεστές, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά συμπεράσματα και εκτιμήσεις. Για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό να επιλέγεται, κάθε φορά, το κατάλληλο εργαλείο, το οποίο θα προσαρμόζεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά και το είδος της ανάλυσης που απαιτείται.

2.2 Γενικές Αρχές Βιωσιμότητας

Η Παγκόσμια Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη δημοσίευσε την έκθεση «Το Κοινό μας Μέλλον» (Brundtland Report) (United Nations, 1987), στην οποία ορίζει την βιώσιμη ανάπτυξη ως «... Την ανάπτυξη που ανταποκρίνεται στις ανάγκες του παρόντος χωρίς να διακυβεύεται η ικανότητα των μελλοντικών γενεών να ανταποκριθούν στις δικές τους ανάγκες.»

Η έννοια της βιώσιμης ανάπτυξης και της βιωσιμότητας δεν έχουν την ίδια ερμηνεία. Η βιώσιμη ανάπτυξη αναφέρεται πρωτίστως στη διαδικασία της εξέλιξης που επιδιώκει στην κάλυψη των περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών αναγκών, στο παρόν αλλά και στο μέλλον (Fogarty, 2020) (Εικόνα 2-2). Η βιωσιμότητα δίνει προτεραιότητα στο περιβάλλον και

επικεντρώνεται στην προστασία των φυσικών πόρων, στοχεύοντας στην μακροπρόθεσμη περιβαλλοντική σταθερότητα έναντι της βραχυπρόθεσμης ανάπτυξης (Babashamsi, 2016). Συνεπώς, η βιώσιμη ανάπτυξη περιγράφει τη διαδικασία εξασφάλισης μίας ισορροπημένης προόδου στην οικονομία, την κοινωνία και το περιβάλλον, ενώ η βιωσιμότητα θέτει τα όρια που πρέπει να τηρούνται ώστε η ανάπτυξη να είναι διαρκής και υπεύθυνη.



Εικόνα 2-2: Οι τρεις πυλώνες της Βιώσιμης Ανάπτυξης (Κοινωνία, Περιβάλλον, Οικονομία)

Παρόλα αυτά, οι δύο έννοιες, τις περισσότερες φορές, χρησιμοποιούνται ως συνώνυμα και αναφέρονται στην δικαιοσύνη μεταξύ των γενεών, δηλαδή στην ίδια δυνατότητα ευημερίας μεταξύ των μελλοντικών γενεών και της σημερινής. Η δικαιοσύνη αυτή εξασφαλίζεται μέσω της προστασίας του περιβάλλοντος, δηλαδή μέσω της εξασφάλισης καθαρού αέρα, της προστασίας από την υπεριώδη ακτινοβολία, της δημιουργίας λειτουργικού περιβάλλοντος, αλλά και κοινωνικών μέτρων που διασφαλίζουν τη δημόσια υγεία και την κοινωνική ισότητα.

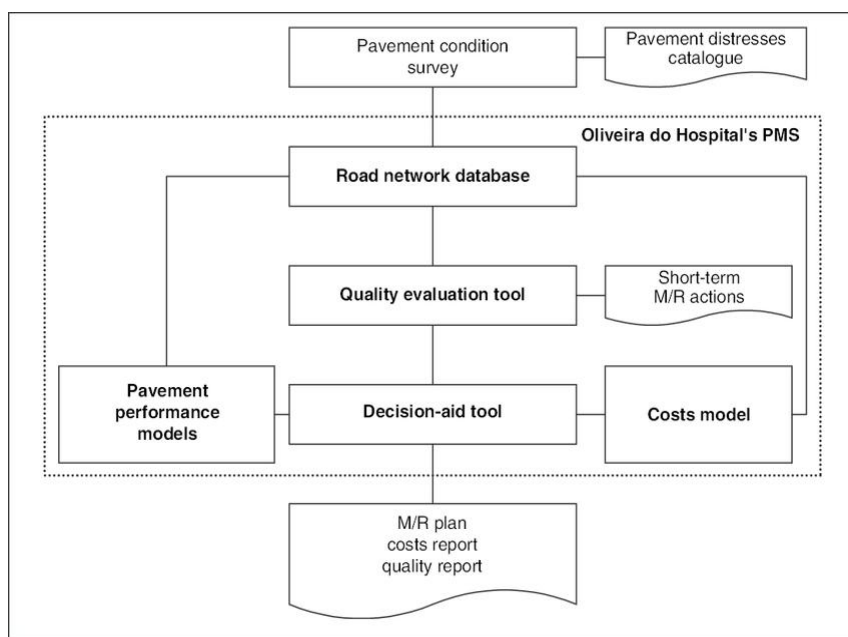
2.3 Σύνδεση Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και Βιωσιμότητας

Ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων ακολουθεί αυστηρά πρότυπα, καθώς προτεραιότητα αποτελεί η ασφάλεια, η αξιοπιστία των υποδομών και η τήρηση των αυστηρών προδιαγραφών. Τα οδοστρώματα πρέπει να αντέχουν επαναλαμβανόμενες φορτίσεις από αεροσκάφη μεγάλου βάρους και περιβαλλοντικές καταπονήσεις, χωρίς να εμφανίζουν πρόωρες φθορές. Επιπλέον, ο τομέας των υποδομών μεταφορών, και ειδικότερα η οδοποιία αεροδρομίων, ευθύνεται για την κατανάλωση περίπου του 40% των συνολικών αδρανών που παράγονται σε παγκόσμια κλίμακα, ενώ ταυτόχρονα παράγει μεγάλους όγκους αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΚΚ) κυρίως κατά τη φάση της δομικής συντήρησης ή της πλήρους ανακατασκευής των έργων.

Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μετατόπιση της φιλοσοφίας σχεδιασμού, με το ενδιαφέρον να μην περιορίζεται πλέον αποκλειστικά στις μηχανικές ιδιότητες των

οδοστρωμάτων, αλλά να επεκτείνεται και στην περιβαλλοντική τους απόδοση. Στο πλαίσιο αυτό, ενσωματώνονται σταδιακά περιβαλλοντικά κριτήρια στις απαιτήσεις της αεροπορικής υποδομής, όπως η μείωση των εκπομπών θορύβου και αερίων ρύπων και η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τόσο σε επίπεδο λειτουργίας των αεροσκαφών όσο και σε επίπεδο υποδομών.

Παρόλα αυτά, η ενσωμάτωση της βιωσιμότητας στο υφιστάμενο τεχνικό πλαίσιο παραμένει περιορισμένη. Ειδικότερα, διαπιστώνεται ένα σαφές κενό στην πλήρη ενσωμάτωση της έννοιας του Κύκλου Ζωής Οδοστρωμάτων στα Συστήματα Διαχείρισης Οδοστρωμάτων Αεροδρομίων (Airport Pavement Management Systems – A-PMS), καθώς τα περιβαλλοντικά κριτήρια σπάνια λαμβάνονται υπόψη στη διαδικασία λήψης αποφάσεων, κυρίως λόγω περιορισμών χρηματοδότησης (Εικόνα 2-3).



Εικόνα 2-3: Δομή Συστήματος Διαχείρισης Οδοστρωμάτων (A-PMS) (Meneses, 2009)

Για την κάλυψη αυτού του κενού και την ενσωμάτωση των περιβαλλοντικών κριτηρίων στη λήψη των αποφάσεων, έχουν αναπτυχθεί διεθνώς εξειδικευμένα συστήματα αξιολόγησης της βιωσιμότητας των υποδομών, με το σύστημα Envision να θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλο για έργα πολιτικού μηχανικού. Το Envision προμοδοτεί άμεσα τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών, αναγνωρίζοντας τη σημασία της μείωσης της εξόρυξης φυσικών πόρων και της ελαχιστοποίησης των αποστάσεων μεταφοράς (Berry et al., 2022).

Σε αυτό το πλαίσιο, η υιοθέτηση πρακτικών όπως η θερμή ανάμιξη ασφαλτομίγματος (Warm Mix Asphalt – WMA) σε συνδυασμό με υψηλά ποσοστά Ανακτώμενου Ασφαλτομίγματος (RAP) έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να μειώσει το συνολικό αποτύπωμα άνθρακα ενός έργου οδοποιίας κατά 20% έως 30%, σύμφωνα με διεθνείς μελέτες (Jones & Brown, 2023).

2.4 Ανακτώμενο Ασφαλτόμιγμα στα αεροδρόμια

Το Ανακτώμενο Ασφαλτόμιγμα (Reclaimed Asphalt Pavement - RAP) προέρχεται από την επιφάνεια παλαιότερων οδοστρωμάτων και χρησιμοποιείται στα οδοστρώματα των

αεροδρομίων για περισσότερα από 20 χρόνια. Το RAP προτιμάται στις ασφαλτικές στρώσεις, ως πρόσμιξη σε συγκεκριμένο ποσοστό επι των αδρανών, αλλά μπορεί να βρίσκεται και στις ασύνδετες στρώσεις, αντικαθιστώντας τα φυσικά αδρανή.

Η κατανόηση της μηχανικής απόκρισης του Ανακτώμενου Ασφαλτομίγματος (RAP) συνιστά προαπαιτούμενο για τον ασφαλή δομικό σχεδιασμό των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων, καθώς το υλικό αυτό παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις σε σχέση με τα φυσικά ασφαλικά μίγματα. Η διαδικασία παραγωγής του RAP εκκινεί με την ψυχρή απόξεση (cold milling) των υφιστάμενων στρώσεων, κατά την οποία το οδόστρωμα θρυμματίζεται μηχανικά προκειμένου να ανακτηθούν τα αδρανή και το συνδετικό υλικό. Η μέθοδος αυτή, αν και αποτελεσματική για την αφαίρεση του υλικού, αναμένεται να επηρεάσει καθοριστικά τη γεωμετρία των αδρανών, καθώς οι υψηλές διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται από τις κεφαλές του φρεζαρίσματος ενδέχεται να προκαλέσουν τη θραύση των μεγαλύτερων κόκκων, οδηγώντας σε μια κοκκομετρική διαβάθμιση με αυξημένο ποσοστό λεπτόκοκκων στοιχείων (Copeland, 2011). Επομένως, η διαχείριση του RAP απαιτεί τη λεπτομερή ανάλυση της κοκκομετρίας του, καθώς η περίσσεια παιτάλης (filler) μπορεί να υποβαθμίσει τη δομική ευστάθεια του νέου μίγματος εάν δεν εξισορροπηθεί με την προσθήκη χονδρόκοκκων φυσικών αδρανών υψηλής ποιότητας.

Η σωστή διαχείριση των αποθεμάτων RAP αποτελεί έναν εξίσου κρίσιμο παράγοντα, καθώς η ανομοιογένεια του υλικού που προέρχεται από διαφορετικά έργα ή διαφορετικά βάθη απόξεσης μπορεί να εισάγει μεγάλες αβεβαιότητες στον σχεδιασμό του μίγματος. Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι τα αποθέματα πρέπει να προστατεύονται από την υγρασία, καθώς η παρουσία νερού αυξάνει την ενέργεια που απαιτείται για τη θέρμανση του υλικού στο συγκρότημα παραγωγής, ενώ ταυτόχρονα ενδέχεται να οδηγήσει σε φαινόμενα αποφλοιώσεως του παλαιού συνδετικού από τους κόκκους των αδρανών. Η γεωμετρία και η υφή των αδρανών που περιέχονται στο RAP διατηρούν σε μεγάλο βαθμό τα χαρακτηριστικά των αρχικών φυσικών υλικών, ωστόσο η επιφάνειά τους καλύπτεται από ένα λεπτό στρώμα γηρασμένης ασφάλτου το οποίο μεταβάλλει την ικανότητα συνάφειάς τους με το νέο συνδετικό υλικό (McDaniel & Anderson, 2001).

Η αυξημένη περιεκτικότητα σε ασφαλτένια στο συνδετικό του RAP αναμένεται να μεταφραστεί σε σημαντικά υψηλότερο Μέτρο Ελαστικότητας (Resilient Modulus, M_r) του τελικού μίγματος, γεγονός που επηρεάζει άμεσα τον σχεδιασμό των στρώσεων βάσης. Οι Soleimani et al. (2021) επισημαίνουν ότι η παρουσία των αυξημένων ασφαλτικών ενδέχεται να προσδώσει στο υλικό μια χαρακτηριστική ψαθυρότητα, η οποία, ενώ ενισχύει την αντίσταση σε μόνιμες παραμορφώσεις και τροχοαυλάκωση, αυξάνει ταυτόχρονα την επιρρέπεια του οδοστρώματος σε ρηγμάτωση λόγω κόπωσης, ιδιαίτερα σε συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών όπου η ολκιμότητα της ασφάλτου περιορίζεται σημαντικά. Η έκταση της γήρανσης εξαρτάται από τον χρόνο παραμονής του υλικού στο πεδίο, το πάχος της αρχικής στρώσης και το τοπικό κλίμα, με αποτέλεσμα το RAP να παρουσιάζει συχνά υψηλή ανομοιογένεια ακόμη και εντός του ίδιου έργου, γεγονός που επιβάλλει τη διενέργεια εκτεταμένων εργαστηριακών ελέγχων για τον προσδιορισμό του βαθμού διείδυσης.

Στις υποδομές των αεροδρομίων, όπου οι πιέσεις επαφής των ελαστικών είναι εξαιρετικά υψηλές, η αύξηση της δυσκαμψίας της βάσης θεωρείται καταρχήν επιθυμητή, καθώς αναμένεται να βελτιώσει την ικανότητα της στρώσης να διανέμει τα φορτία σε ευρύτερη επιφάνεια του υπεδάφους. Αυτή η βελτίωση της φέρουσας ικανότητας επιτρέπει θεωρητικά τη μείωση των τάσεων στην κορυφή της στρώσης έδρασης, περιορίζοντας τον κίνδυνο μόνιμης παραμόρφωσης και αυξάνοντας τη δομική ζωή της (Willis et al., 2012). Ωστόσο, όπως

αναφέρθηκε και παραπάνω, η αύξηση αυτή της ακαμψίας δεν είναι γραμμική και συχνά συνοδεύεται από μια απότομη μείωση της ολκιμότητας του μίγματος, γεγονός που καθιστά τη στρώση βάσης ευάλωτη στην ανάπτυξη εφελκυστικών παραμορφώσεων στην κάτω ίνα της. Η κρίσιμη πρόκληση για τον μηχανικό σχεδιασμό έγκειται στην εύρεση του σημείου ισορροπίας όπου η δυσκαμψία του RAP προσφέρει προστασία στην έδραση χωρίς ταυτόχρονα να προκαλεί πρόωρη αστοχία της ίδιας της στρώσης λόγω κόπωσης.

Η εφαρμογή της LCA στη χρήση RAP έχει αναδείξει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, τα οποία ωστόσο παρουσιάζουν διακυμάνσεις ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες και τις αποστάσεις μεταφοράς. Μελέτες έχουν καταδείξει ότι η αντικατάσταση φυσικών αδρανών με RAP μπορεί να μειώσει το Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη (GWP) κατά 20% έως 30%, κυρίως λόγω της αποφυγής των ενεργοβόρων διαδικασιών θραύσης στα λατομεία και της μείωσης των αναγκών σε νέα άσφαλτο (Yang et al., 2015). Η εξοικονόμηση αυτή μεγιστοποιείται όταν η ανακύκλωση πραγματοποιείται επί τόπου (in-situ), καθώς εξαλείφονται οι εκπομπές ρύπων από τις κινήσεις των βαρέων φορτηγών προς απομακρυσμένες μονάδες επεξεργασίας.

Παράλληλα, η χρήση RAP συμβάλλει στη διατήρηση των φυσικών αποθεμάτων αδρανών υψηλής ποιότητας, τα οποία καθίστανται ολοένα και πιο σπάνια σε πολλές γεωγραφικές περιοχές, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας των υποδομών. Είναι αξιοσημείωτο ότι η περιβαλλοντική υπεροχή του RAP παραμένει ισχυρή ακόμη και όταν απαιτείται ελαφρά αύξηση του πάχους των στρώσεων, υπό την προϋπόθεση ότι η αύξηση αυτή δεν υπερβαίνει ένα κρίσιμο όριο που ακυρώνει την αρχική εξοικονόμηση πόρων (Smith et al., 2022). Η ακριβής ποσοτικοποίηση αυτού του οφέλους απαιτεί τη χρήση αξιόπιστων βάσεων δεδομένων απογραφής (LCI), οι οποίες πρέπει να ανταποκρίνονται στο τρέχον τεχνολογικό επίπεδο των μονάδων παραγωγής και του κατασκευαστικού εξοπλισμού.

3 Γενικές Αρχές Μεθόδου FAA

3.1 Γενικά

Η μέθοδος σχεδιασμού οδοστρωμάτων αεροδρομίων της Ομοσπονδιακής Διοίκησης Αεροπορίας των Ηνωμένων Πολιτειών (Federal Aviation Administration - FAA) αποτελεί την κυρίαρχη προσέγγιση για τον μηχανικό σχεδιασμό υποδομών αεροδρομίων σε διεθνές επίπεδο. Η μέθοδος FAA βασίζεται στη Θεωρία Ελαστικών Στρώσεων (Layered Elastic Theory - LET) και την αθροιστική φθορά κατά Miner για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων παχών των στρώσεων του οδοστρώματος, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα χαρακτηριστικά του αεροσκάφους όσο και τις ιδιότητες των υλικών κατασκευής. Η εφαρμογή της μεθόδου υλοποιείται μέσω του υπολογιστικού εργαλείου FAARFIELD (FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design), το οποίο αναπτύχθηκε από την FAA για την αυτοματοποίηση των πολύπλοκων υπολογισμών που απαιτούνται για την ανάλυση πολυστρωματικών συστημάτων (FAA, 2023). Το FAARFIELD αποτελεί το επίσημο εργαλείο σχεδιασμού που συνιστάται από την FAA για την ανάλυση εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Παρατηρείται ότι η μέθοδος FAA διακρίνεται από τις παραδοσιακές μεθόδους σχεδιασμού οδοστρωμάτων λόγω της μοντελοποίησης των μηχανισμών αστοχίας και της δυνατότητας προσομοίωσης μικτών στόλων αεροσκαφών με διαφορετικές διατάξεις συστημάτων προσγείωσης. Ως εκ τούτου, η κατανόηση των θεωρητικών αρχών της μεθόδου αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την ορθή ερμηνεία των αποτελεσμάτων του σχεδιασμού.

3.2 Θεωρία Ελαστικών Στρώσεων

Η μεθοδολογία σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων της FAA στηρίζεται στη Θεωρία των Ελαστικών Στρώσεων. Η Θεωρία των Ελαστικών Στρώσεων (Layered Elastic Theory - LET) αποτελεί το θεμελιώδες μαθηματικό υπόβαθρο στο οποίο βασίζεται η σύγχρονη προσέγγιση σχεδιασμού των εύκαμπτων οδοστρωμάτων οδών και αεροδρομίων, αντικαθιστώντας τις παλαιότερες μεθόδους που βασίζονταν αποκλειστικά σε εμπειρικούς δείκτες και στατικά νομογραφήματα. Ιστορικά, η εξέλιξη της θεωρίας αυτής σηματοδοτήθηκε από τις εργασίες του Burmister το 1945, ο οποίος επέκτεινε τις εξισώσεις του Boussinesq από το επίπεδο του ομογενούς ημχώρου σε συστήματα αποτελούμενα από επάλληλες στρώσεις με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά, επιτρέποντας έτσι τον υπολογισμό της έντασης σε οποιοδήποτε σημείο της διατομής.

Η ανάγκη για αυτή την ακριβέστερη προσομοίωση προέκυψε από τη διαπίστωση της πολυστρωματικής φύσης των οδοστρωμάτων, όπου η δυσκαμψία των ανώτερων επιπέδων επηρεάζει καθοριστικά τη διάχυση των τάσεων προς το έδαφος έδρασης. Ως εκ τούτου, η LET επιτρέπει τον προσδιορισμό των κρίσιμων παραμορφώσεων λαμβάνοντας υπόψη τη μηχανική συνέργεια μεταξύ των στρώσεων, γεγονός που καθιστά δυνατή τη μοντελοποίηση σύνθετων υλικών όπως το Ανακτώμενο Ασφαλτόμιγμα. Παράλληλα, υπερέρχει των παλαιότερων εμπειρικών μεθόδων καθώς επιτρέπει την ταυτόχρονη εξέταση πολλαπλών τροχών και την αλληλεπίδραση των πεδίων τάσεων που αναπτύσσονται από τα σύγχρονα συστήματα προσγείωσης των αεροσκαφών ευρείας ατράκτου, καθιστώντας δυνατή την ορθολογική προσέγγιση για τη διαστασιολόγηση των στρώσεων (Garg & Marsey, 2002).

Επιπλέον, η εφαρμογή της Θεωρίας των Ελαστικών Στρώσεων στηρίζεται σε μια σειρά θεμελιωδών παραδοχών, οι οποίες καθιστούν δυνατή τη μαθηματική επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας και συμβιβαστού των παραμορφώσεων, διατηρώντας παράλληλα ένα αποδεκτό

επίπεδο υπολογιστικής πολυπλοκότητας για τις μηχανικές εφαρμογές. Συγκεκριμένα, κάθε στρώση του οδοστρώματος θεωρείται ομογενές, ισότροπο και γραμμικά ελαστικό μέσο, το οποίο χαρακτηρίζεται από πεπερασμένο πάχος, με εξαίρεση την στρώση έδρασης, η οποία προσομοιώνεται ως ένας ελαστικός ημίχωρος απείρου βάθους που αντιστοιχεί στο έδαφος έδρασης. Παράλληλα, υποτίθεται ότι όλες οι στρώσεις έχουν άπειρη έκταση στο οριζόντιο επίπεδο, ενώ η απόκριση των υλικών διέπεται από τον νόμο του Hooke, απαιτώντας τη γνώση δύο βασικών παραμέτρων: του Μέτρου Ελαστικότητας (E) και του λόγου του Poisson (ν) (Burmister, 1945). Σημειώνεται ότι, η ορθότητα των αποτελεσμάτων της LET εξαρτάται άμεσα από την αξιοπιστία των τιμών του Μέτρου Ελαστικότητας που εισάγονται στο μοντέλο. Επειδή τα ασφαλικά υλικά παρουσιάζουν ιξωδοελαστική συμπεριφορά, η επιλογή ενός αντιπροσωπευτικού ελαστικού μέτρου αποτελεί μια αναγκαία απλούστευση για την εφαρμογή της θεωρίας LET, διασφαλίζοντας τη συμβατότητα μεταξύ της θεωρητικής πρόβλεψης και της πραγματικής απόκρισης του οδοστρώματος στο πεδίο (Mallik & El-Korchi, 2013).

Οι παραδοχές αυτές επιτρέπουν τη μοντελοποίηση της στρώσης βάσης με Ανακτώμενο Ασφαλτόμιγμα ως ένα διακριτό ελαστικό μέσο, του οποίου η μεταβολή της δυσκαμψίας μεταβάλλει άμεσα το πεδίο των παραμορφώσεων σε ολόκληρη τη διατομή. Συνεπώς, η θεωρία LET παρέχει τη δυνατότητα διερεύνησης της επίδρασης του RAP στην προστασία των υποκείμενων στρώσεων (Huang, 2004).

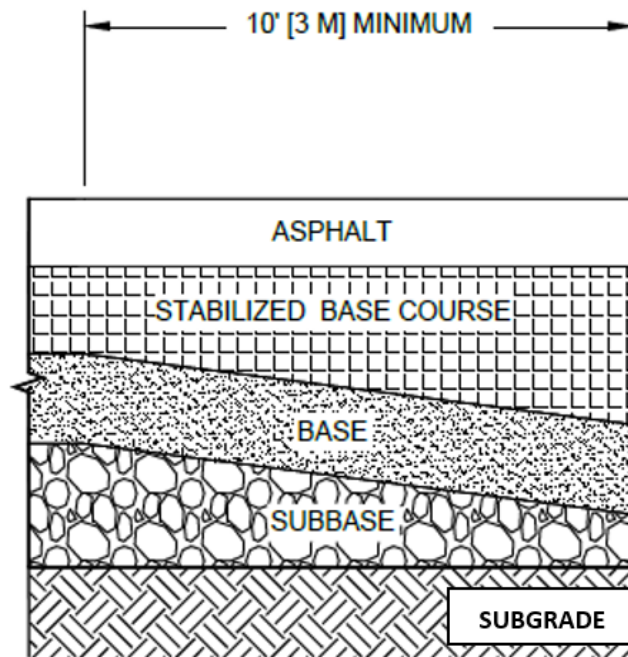
3.3 Μηχανισμοί Αστοχίας και Κρίσιμες Θέσεις

3.3.1 Ορισμός

Στη μέθοδο FAA, ο έλεγχος της δομικής επάρκειας των εύκαμπτων ασφαλτικών οδοστρωμάτων αεροδρομίων βασίζεται στην ανάλυση των αναπτυσσόμενων τάσεων και παραμορφώσεων υπό τα φορτία των αεροσκαφών, και στην αξιολόγηση της αντοχής της διατομής έναντι συγκεκριμένων μηχανισμών αστοχίας. Η κατανόηση των μηχανισμών μέσω των οποίων ένα οδόστρωμα αεροδρομίου οδηγείται σε δομική ανεπάρκεια αποτελεί προϋπόθεση για την εφαρμογή του σχεδιασμού, καθώς επιτρέπει τη σύνδεση των θεωρητικών τάσεων με τη φυσική υποβάθμιση της κατασκευής στο πεδίο.

Στα εύκαμπτα οδοστρώματα, η αστοχία εκδηλώνεται ως μια προοδευτική συσσώρευση βλαβών που προκύπτουν από τις επαναλαμβανόμενες διελεύσεις των αεροσκαφών και τις περιβαλλοντικές καταπονήσεις κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού. Παρατηρείται ότι η ένταση των φορτίων στα αεροδρόμια, σε συνδυασμό με τις υψηλές πιέσεις επαφής των ελαστικών, διαφοροποιεί τους μηχανισμούς αυτούς από τους αντίστοιχους των οδικών έργων, επιβάλλοντας τη χρήση αυστηρότερων κριτηρίων ελέγχου.

Επομένως, η αναγνώριση των κρίσιμων σημείων εντός της διατομής των οδοστρωμάτων, όπου αναπτύσσονται οι μέγιστες παραμορφώσεις, καθιστά δυνατή τη διαστασιολόγηση των στρώσεων με τρόπο που να διασφαλίζεται η λειτουργικότητα της υποδομής (Εικόνα 3-1).



Εικόνα 3-1: Τυπική διατομή Εύκαμπτου Οδοστρώματος κατά FAA. (Federal Aviation Administration, 2021)

Ως εκ τούτου, η ανάλυση επικεντρώνεται σε δύο κύριους μηχανισμούς αστοχίας: τη ρηγμάτωση λόγω κόπωσης των ασφαλτικών στρώσεων και τη μόνιμη παραμόρφωση που εκδηλώνεται στο έδαφος έδρασης (Garg, 2009).

3.3.2 Ρηγμάτωση λόγω Κόπωσης

Ο μηχανισμός της κόπωσης αποτελεί τη συνηθέστερη αιτία αστοχίας των ασφαλτικών στρώσεων, καθώς τα υλικά αυτά, λόγω της ιζωδοελαστικής τους φύσης, παρουσιάζουν πεπερασμένη αντοχή σε επαναλαμβανόμενους κύκλους εφελκυσμού. Κατά τη διέλευση ενός αεροσκάφους, το οδόστρωμα κάμπτεται υπό το βάρος των τροχών, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μέγιστων εφελκυστικών τάσεων στην κάτω επιφάνεια της ασφαλτικής στρώσης. Η συσσώρευση αυτών των εφελκυστικών τάσεων οδηγεί σταδιακά στη δημιουργία μικροσκοπικών ρωγμών στη βάση της ασφαλτικής στρώσης, οι οποίες, υπό τη συνεχιζόμενη καταπόνηση, συνενώνονται και διαδίδονται κατακόρυφα προς την επιφάνεια κύλισης (bottom-up cracking). Η κρίσιμη θέση για τον έλεγχο της κόπωσης ορίζεται επομένως στη διεπιφάνεια μεταξύ της ασφαλτικής στρώσης και της υποκείμενης στρώσης βάσης, όπου υπολογίζεται η μέγιστη οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση (ϵ_t). Στην περίπτωση χρήσης Ανακτώμενου Ασφαλτομίγματος (RAP) στη στρώση βάσης, η αύξηση δυσκαμψίας της υπόψη στρώσης επηρεάζει το μέγεθος αυτής της παραμόρφωσης, καθώς η βάση αναμένεται να λειτουργεί ως ένα πιο στιβαρό υπόβαθρο.

Παράλληλα, πρέπει να επισημανθεί ότι η κόπωση δεν επηρεάζεται μόνο από το πάχος των στρώσεων, αλλά και από τη θερμοκρασιακή εξάρτηση του ασφαλτικού συνδετικού, γεγονός που καθιστά τη μηχανική απόκριση της διατομής ιδιαίτερα σύνθετη. Η επίδραση του RAP είναι πολυδιάστατη, καθώς το ανακυκλωμένο υλικό μεταβάλλει ταυτόχρονα δύο παραμέτρους. Από τη μία πλευρά, η αύξηση της δυσκαμψίας της βάσης που περιέχει RAP ως ασύνδετο υλικό αναμένεται να μειώνει το μέγεθος της παραμόρφωσης ϵ_t στην υπερκείμενη ασφαλτο, δρώντας προστατευτικά. Από την άλλη πλευρά όμως, η μειωμένη ολκιμότητα των μιγμάτων με υψηλό RAP αναμένεται να τα καθιστά πιο ευάλωτα στη ρηγμάτωση για την ίδια στάθμη

παραμόρφωσης, απαιτώντας μια προσεκτική εξισορρόπηση των ιδιοτήτων κατά τον σχεδιασμό (Al-Qadi et al., 2012).

3.3.3 Μόνιμη Παραμόρφωση Στρώση Έδρασης

Ο δεύτερος κυρίαρχος μηχανισμός αστοχίας αφορά τη μόνιμη παραμόρφωση της κατασκευής, η οποία μπορεί να εμφανιστεί ως γενική καθίζηση του οδοστρώματος και οφείλεται στην αδυναμία της εδαφικής στρώσης έδρασης να παραλάβει τις κατακόρυφες πιέσεις. Παρατηρείται ότι, σε αντίθεση με την κόπωση, η κατακόρυφη παραμόρφωση της στρώσης έδρασης συνδέεται με τη θλιπτική καταπόνηση που μεταφέρεται μέσω του συστήματος των στρώσεων προς τα κατώτερα επίπεδα της οδοστρωσίας. Η κρίσιμη θέση ελέγχου για τον μηχανισμό αυτό εντοπίζεται στην κορυφή του εδάφους έδρασης (subgrade), όπου υπολογίζεται η μέγιστη κατακόρυφη θλιπτική παραμόρφωση (ϵ_p). Διαπιστώνεται ότι, εάν η παραμόρφωση αυτή υπερβεί τα όρια αντοχής του εδάφους, δημιουργούνται παραμορφώσεις στην επιφάνεια του οδοστρώματος, οι οποίες επηρεάζουν τη λειτουργικότητα και την ασφάλεια των πτήσεων, αυξάνοντας τον κίνδυνο υδρολίσθησης των αεροσκαφών.

Συνοψίζοντας, η μηχανική ανάλυση της διατομής επικεντρώνεται στον προσδιορισμό των παραμορφώσεων στα σημεία που είναι πλέον ευάλωτα στην εμφάνιση βλαβών. Η χρήση του Ανακτώμενου Ασφατομίγματος μεταβάλλει τη δυναμική της κατασκευής, απαιτώντας τον προσεκτικό έλεγχο της εφελκυστικής παραμόρφωσης στη βάση της ασφάλτου για την αποφυγή κόπωσης και της θλιπτικής παραμόρφωσης στην κορυφή της έδρασης για τον περιορισμό της μόνιμης παραμόρφωσης. Επομένως, η επιτυχία του σχεδιασμού κρίνεται από την ικανότητα της διατομής του οδοστρώματος να παραλαμβάνει τα επαναλαμβανόμενα φορτία των αεροσκαφών χωρίς να υπερβαίνει τα όρια αστοχίας σε καμία από τις δύο αυτές κρίσιμες θέσεις.

3.4 Δείκτης Αθροιστικής Φθοράς – “Cumulative Damage Factor (CDF)”

Η τελική αξιολόγηση της διατομής πραγματοποιείται μέσω του υπολογισμού του Δείκτη Αθροιστικής Φθοράς (Cumulative Damage Factor - CDF), ο οποίος ενσωματώνει τη συνδυασμένη επίδραση όλων των διαφορετικών τύπων αεροσκαφών που απαρτίζουν τη σύνθεση της κυκλοφορίας. Η μαθηματική θεμελίωση του CDF βασίζεται στην Υπόθεση του Miner για τη γραμμική συσσώρευση της αθροιστικής φθοράς, σύμφωνα με την οποία κάθε μεμονωμένη διέλευση (pass) ενός αεροσκάφους «καταναλώνει» ένα κλάσμα της διαθέσιμης δομικής ζωής του οδοστρώματος. Ο δείκτης ορίζεται ως το πηλίκο των προβλεπόμενων διελεύσεων προς τις επιτρεπόμενες διελεύσεις μέχρι την αστοχία, και το οδόστρωμα θεωρείται ότι έχει εξαντλήσει τη φέρουσα ικανότητά του όταν η αθροιστική φθορά ισούται με τη μονάδα ($CDF = 1.0$) (Federal Aviation Administration, 2023).

$$CDF = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (3.1)$$

όπου n_i είναι ο αριθμός των προβλεπόμενων διελεύσεων του αεροσκάφους τύπου i κατά την περίοδο σχεδιασμού, και N_i είναι ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός διελεύσεων.

Η χρήση Ανακτώμενου Ασφατομίγματος στη στρώση βάσης μεταβάλλει τις τιμές N_i για όλα τα αεροσκάφη του μίγματος κυκλοφορίας, καθώς η αλλαγή του μέτρου ελαστικότητας

αναμένεται να επηρεάζει το πεδίο των παραμορφώσεων σε ολόκληρη τη διατομή. Επομένως, ο CDF αποτελεί έναν δυναμικό δείκτη που αντανακλά την πραγματική καταπόνηση της υποδομής, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία των συστημάτων προσγείωσης και τη συχνότητα των αναχωρήσεων. Η εισαγωγή του RAP μεταβάλλει την ισορροπία μεταξύ της φθοράς λόγω κόπωσης και της φθοράς λόγω παραμόρφωσης της στρώσης έδρασης, απαιτώντας από το λογισμικό την εκτέλεση επαναληπτικών διαδικασιών για τη βελτιστοποίηση των παχών.

3.5 Τυπικά Υλικά

Η διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων αεροδρομίων κατά το πρότυπο της FAA προϋποθέτει τη χρήση υλικών που πληρούν συγκεκριμένες τεχνικές προδιαγραφές, όπως αυτές ορίζονται λεπτομερώς στην εγκύκλιο Advisory Circular 150/5370-10H. Διαπιστώνεται ότι η τυποποίηση αυτή είναι απολύτως αναγκαία για τη διασφάλιση της δομικής ομοιογένειας της κατασκευής και την ενίσχυση της αξιοπιστίας των υπολογισμών που εκτελούνται. Ως εκ τούτου, κάθε στρώση του οδοστρώματος χαρακτηρίζεται από έναν κωδικό που αντιστοιχεί σε αυστηρές απαιτήσεις κοκκομετρικής διαβάθμισης, ποιότητας αδρανών και χαρακτηριστικών του συνδετικού μέσου. Παρατηρείται ότι η επιλογή των υλικών επηρεάζει άμεσα το μέτρο ελαστικότητας που χρησιμοποιείται στη θεωρία LET, καθώς οι προκαθορισμένες τιμές του λογισμικού βασίζονται στην τήρηση αυτών των προδιαγραφών. Επομένως, η γνώση των τυπικών υλικών FAA αποτελεί το απαραίτητο υπόβαθρο για τη μοντελοποίηση της απόκρισης της διατομής υπό τα βαρέα φορτία των σύγχρονων αεροσκαφών (FAA, 2021).

Για τις ανώτερες στρώσεις των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, η FAA ορίζει τη χρήση του θερμού ασφαλτομίγματος P-401 (Asphalt Mix Pavement), το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλές απαιτήσεις αντοχής σε διατμητικές τάσεις και τροχοαυλάκωση, ενώ για τις υποκείμενες ασφατικές στρώσεις προβλέπεται η χρήση του υλικού P-403. Παρατηρείται ότι τα υλικά αυτά απαιτούν τη χρήση σκληρών αδρανών με υψηλό ποσοστό σπασμένων επιφανειών και ασφατικό συνδετικό που επιλέγεται με βάση το σύστημα Performance Grading (PG), λαμβάνοντας υπόψη τις κλιματικές συνθήκες και τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις της περιοχής του έργου.

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, το Ανακτώμενο Ασφαλτόμιγμα (RAP) εξετάζεται ως συστατικό στοιχείο της στρώσης βάσης, όπου η ενσωμάτωσή του αναμένεται να επηρεάζει καθοριστικά τη συνολική δυσκαμψία του συστήματος. Διαπιστώνεται ότι η χρήση του RAP επιτρέπεται από τις προδιαγραφές της FAA υπό συγκεκριμένους περιορισμούς, με στόχο τη διασφάλιση ότι το τελικό μίγμα θα παρουσιάζει μηχανική απόκριση ισοδύναμη με αυτή των φυσικών υλικών. Ως εκ τούτου, η αντικατάσταση μέρους των φυσικών αδρανών και του συνδετικού από το ανακτώμενο υλικό απαιτεί τον προσεκτικό έλεγχο της τελικής διαβάθμισης και των χαρακτηριστικών της ασφάλτου, ώστε να αποφευχθεί η πρόωρη γήρανση και η υπερβολική ψαθυρότητα της στρώσης. Παράλληλα, πρέπει να επισημανθεί ότι η χρήση των υλικών P-401 και P-403 εξασφαλίζει τη δομική συνέχεια των ασφατικών στρώσεων, λειτουργώντας ως το κύριο στοιχείο παραλαβής των εφελκυστικών τάσεων που οδηγούν στην κόπωση. Διαπιστώνεται ότι η τήρηση των ελάχιστων παχών που ορίζει η FAA για αυτές τις στρώσεις είναι θεμελιώδης για την αποφυγή επιφανειακών αστοχιών (Federal Aviation Administration, 2021).

Οι υποκείμενες κοκκώδεις στρώσεις αποτελούνται συνήθως από το υλικό P-209 (Crushed Aggregate Base), το οποίο αποτελείται από θραυστά αδρανή υψηλής ποιότητας με αυστηρούς

περιορισμούς ως προς την περιεκτικότητα σε παιπάλη και τον δείκτη πλαστικότητας. Διαπιστώνεται ότι η στρώση P-209 παρέχει ένα σταθερό υπόστρωμα για τις ασφαλικές στρώσεις, συμβάλλοντας στη διάχυση των πιέσεων προς την υπόβαση P-154 και τελικά προς το έδαφος έδρασης.

Συμπερασματικά, η χρήση των τυποποιημένων υλικών κατά FAA διασφαλίζει ότι η προσομοίωση ανταποκρίνεται σε ρεαλιστικές κατασκευαστικές πρακτικές. Παρατηρείται ότι η ακρίβεια των υπολογισμών είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη συμμόρφωση των υλικών προς τις απαιτήσεις των τεχνικών προδιαγραφών P-401, P-403 και P-209 (FAA, 2021).

3.6 Λογισμικό FAARFIELD

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας σχεδιασμού της FAA για εύκαμπτα οδοστρώματα υλοποιείται μέσω του εξειδικευμένου λογισμικού FAARFIELD (FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layer Design), το οποίο αποτελεί το επίσημο εργαλείο διαστασιολόγησης της FAA. Το FAARFIELD ενσωματώνει πλήρως τη Θεωρία των Ελαστικών Στρώσεων και τους αντίστοιχους μηχανισμούς αστοχίας, παρέχοντας ένα ολοκληρωμένο υπολογιστικό περιβάλλον για την ανάλυση σύνθετων φορτίσεων αεροσκαφών και την επαναληπτική βελτιστοποίηση της διατομής.

Στο λογισμικό FAARFIELD, η LET υλοποιείται μέσω του υπολογιστικού πλαισίου LEAF (Layered Elastic Analysis Framework), το οποίο επιτρέπει την ταχεία επίλυση των αναλυτικών εξισώσεων για σύνθετα συστήματα φόρτισης αεροσκαφών. Το LEAF υπολογίζει με ακρίβεια τις κρίσιμες παραμορφώσεις, όπως η οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση (ε_t) στη βάση της ασφαλικής στρώσης, και η κατακόρυφη θλιπτική παραμόρφωση (ε_v) στην κορυφή της στρώσης έδρασης.

Οι παραμορφώσεις αυτές αποτελούν τις βασικές παραμέτρους εισόδου στους νόμους αστοχίας και στον υπολογισμό του επιτρεπόμενου αριθμού διελεύσεων για κάθε τύπο αεροσκάφους. Στη συνέχεια, το λογισμικό εφαρμόζει τη φιλοσοφία της αθροιστικής φθοράς μέσω του Δείκτη Αθροιστικής Φθοράς (CDF), συνδυάζοντας τη συνεισφορά όλων των αεροσκαφών της κυκλοφοριακής σύνθεσης για την καθορισμένη περίοδο σχεδιασμού.

Η διαδικασία διαστασιολόγησης στο FAARFIELD είναι επαναληπτική, καθώς το πάχος των επιμέρους στρώσεων προσαρμόζεται διαδοχικά έως ότου ικανοποιούνται ταυτόχρονα τα κριτήρια αστοχίας για κόπωση και μόνιμη παραμόρφωση, με τελικό στόχο την επίτευξη τιμής CDF μικρότερης ή ίσης της μονάδας για την περίοδο λειτουργίας, η οποία συνήθως λαμβάνεται ίση με 20 έτη. Στο πλαίσιο αυτό, η στρώση βάσης διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο, καθώς λειτουργεί ως ο κύριος μηχανισμός διάχυσης και απόσβεσης των καταπονήσεων που μεταφέρονται προς το έδαφος έδρασης (Barker & Gonzalez, 2006).

Η ενσωμάτωση Ανακτώμενου Ασφαλτομίγματος (RAP) στη στρώση βάσης αναμένεται να επηρεάζει άμεσα τη λειτουργία του υπολογιστικού μοντέλου, μέσω της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης. Η αύξηση της δυσκαμψίας που αναμένεται λόγω της χρήσης RAP τροποποιεί το πεδίο των παραμορφώσεων σε ολόκληρη τη διατομή, μεταβάλλοντας τόσο τις τιμές της (ε_t) στην ασφαλική στρώση όσο και της (ε_v) στην κορυφή της έδρασης. Ως εκ τούτου, οι παραμορφώσεις ε_t και ε_v αποτελούν τους δείκτες που καθοδηγούν αυτή την επαναληπτική διαδικασία διαστασιολόγησης στο λογισμικό FAARFIELD, διασφαλίζοντας τη μακροπρόθεσμη ανθεκτικότητα του οδοστρώματος.

Συνεπώς, το FAARFIELD δεν αποτελεί απλώς ένα εργαλείο υπολογισμού παχών, αλλά ένα ολοκληρωμένο σύστημα αξιολόγησης της δομικής συμπεριφοράς των εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Η χρήση του επιτρέπει τη σύνδεση της Θεωρίας των Ελαστικών Στρώσεων με τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης και κυκλοφορίας, καθιστώντας δυνατή την τεκμηριωμένη διερεύνηση της επίδρασης εναλλακτικών υλικών, όπως το RAP, στη μακροχρόνια απόδοση της κατασκευής.

4 Γενικές Αρχές Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

4.1 Κατηγορίες Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων

Η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιδόσεων των οδοστρωμάτων αεροδρομίων μέσω της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής LCA προϋποθέτει την επιλογή και τον σαφή ορισμό συγκεκριμένων δεικτών επιπτώσεων, οι οποίοι επιτρέπουν τη μετατροπή των φυσικών ροών υλικών και ενέργειας σε ποσοτικοποιημένα μεγέθη οικολογικής επιβάρυνσης. Οι δείκτες αυτοί επιλέγονται με γνώμονα την ικανότητά τους να αποτυπώνουν τόσο τις παγκόσμιες κλιματικές μεταβολές όσο και τις τοπικές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα και τη δημόσια υγεία, που προκύπτουν από τις κατασκευαστικές δραστηριότητες. Διαπιστώνεται ότι η χρήση ενός πολυπαραμετρικού συνόλου δεικτών κρίνεται απαραίτητη, καθώς η εστίαση σε μία μόνο παράμετρο, όπως οι εκπομπές άνθρακα, ενδέχεται να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα λόγω της πιθανής μετατόπισης των επιβαρύνσεων μεταξύ διαφορετικών περιβαλλοντικών προβλημάτων. Ως εκ τούτου, η ανάλυση που ακολουθεί εστιάζει στην ποσοτικοποίηση μεγεθών που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή, την κατανάλωση ενεργειακών πόρων και την αέρια ρύπανση, προσφέροντας μια σφαιρική εικόνα της βιωσιμότητας των εξεταζόμενων διατομών. Παρατηρείται ότι η επιλογή των δεικτών αυτών εναρμονίζεται με τις διεθνείς πρακτικές και τις κατευθυντήριες οδηγίες του προτύπου ISO 14044, διασφαλίζοντας τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων με αντίστοιχες διεθνείς έρευνες στον τομέα των υποδομών (Guinée et al., 2002).

Ο πλέον διαδεδομένος δείκτης στην περιβαλλοντική αποτίμηση είναι το Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη (Global Warming Potential - GWP), το οποίο μετρά τη συμβολή των εκλυόμενων αερίων του θερμοκηπίου στην ακτινοβολία της ατμόσφαιρας. Ο δείκτης αυτός εκφράζεται σε ισοδύναμα διοξειδίου του άνθρακα (CO_2e) και υπολογίζεται με βάση τη θερμαντική ικανότητα κάθε αερίου, όπως το μεθάνιο και το υποξείδιο του αζώτου, σε έναν χρονικό ορίζοντα συνήθως εκατό ετών. Παρατηρείται ότι στις υποδομές αεροδρομίων, οι κύριες πηγές GWP εντοπίζονται στην καύση ορυκτών καυσίμων από τον κατασκευαστικό εξοπλισμό και στη διύλιση της ασφάλτου. Επομένως, η μείωση της χρήσης φυσικών υλικών μέσω της προσθήκης RAP επηρεάζει άμεσα την τιμή του GWP (IPCC, 2013).

Η ανάλυση της Πρωτογενούς Ενεργειακής Ζήτησης (Primary Energy Demand - PED) αποτελεί έναν εξίσου κρίσιμο δείκτη, καθώς ποσοτικοποιεί το σύνολο της ενέργειας που αποσπάται από τη φύση για την υλοποίηση του έργου, συμπεριλαμβανομένων τόσο των ανανεώσιμων όσο και των μη ανανεώσιμων πηγών. Διαπιστώνεται ότι στον κλάδο της συγκοινωνιακής υποδομής, η PED διακρίνεται σε ενέργεια διεργασιών, η οποία καταναλώνεται κατά την εξόρυξη, τη μεταφορά και την επεξεργασία των υλικών, και σε ενέργεια πρώτης ύλης (feedstock energy). Η ενέργεια πρώτης ύλης αντιπροσωπεύει το ενεργειακό περιεχόμενο των υλικών που δεν καίγονται αλλά ενσωματώνονται στην κατασκευή, με την ασφάλτο να αποτελεί το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα λόγω της πετρελαϊκής της προέλευσης. Ως εκ τούτου, η χρήση Ανακτώμενου Ασφαλτομίγματος προσφέρει τη δυνατότητα ανάκτησης αυτής της ενσωματωμένης ενέργειας, μειώνοντας δραστικά τις συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις του κύκλου ζωής. Παρατηρείται ότι η εξοικονόμηση PED συνδέεται άμεσα με τη μείωση της ανάγκης για διύλιση νέου αργού πετρελαίου και τη μείωση των τονοχιλιομέτρων μεταφοράς αδρανών. Επομένως, η PED λειτουργεί ως δείκτης της αποδοτικότητας της χρήσης των φυσικών πόρων και της ενεργειακής αυτονομίας του έργου. Διαπιστώνεται ότι η βελτιστοποίηση της PED

αποτελεί κεντρικό στόχο της κυκλικής οικονομίας, καθώς η ενέργεια που δαπανήθηκε στο παρελθόν για την παραγωγή του RAP επαναχρησιμοποιείται αποτελεσματικά (Hauschild et al., 2018).

Επιπλέον, η περιβαλλοντική αποτίμηση οφείλει να συμπεριλαμβάνει τους δείκτες της Οξίνισης (Acidification) και του Ευτροφισμού (Eutrophication), οι οποίοι αντικατοπτρίζουν τις τοπικές και περιφερειακές επιπτώσεις της αέριας ρύπανσης στα οικοσυστήματα. Οι δείκτες αυτοί συνδέονται άμεσα με τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) και διοξειδίου του θείου (SO_2), ρύπων που παράγονται κυρίως κατά την καύση καυσίμων σε κινητήρες υψηλής συμπίεσης και κατά τη θέρμανση των αδρανών στα ασφαλτικά συγκροτήματα. Η οξίνιση προκαλείται από την αντίδραση αυτών των ενώσεων με την ατμοσφαιρική υγρασία και την επακόλουθη πτώση του pH των υδάτων και του εδάφους μέσω της όξινης βροχής, προκαλώντας φθορές τόσο στη βιοποικιλότητα όσο και στις κτιριακές υποδομές της περιοχής. Αντίστοιχα, ο ευτροφισμός αφορά την υπερβολική συσσώρευση θρεπτικών συστατικών στα υδάτινα σώματα, οδηγώντας στη μείωση του διαλυμένου οξυγόνου, γεγονός που διαταράσσει την υδρόβια ζωή γύρω από τις αεροπορικές εγκαταστάσεις (Guinée et al., 2002).

Σε τοπικό επίπεδο, ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στον δείκτη των Αιωρούμενων Σωματιδίων (Particulate Matter – PM-10), ο οποίος συνδέεται άμεσα με την ποιότητα του αέρα στην ευρύτερη περιοχή του αεροδρομίου και την προστασία της δημόσιας υγείας των εργαζομένων και των περιοίκων. Τα αιωρούμενα σωματίδια παράγονται τόσο κατά την καύση του ντίζελ όσο και από μηχανικές διεργασίες, όπως η θραύση αδρανών στα λατομεία και η απόξεση του υφιστάμενου οδοστρώματος με φρεζάρισμα. Διαπιστώνεται ότι η σκόνη που απελευθερώνεται κατά τη διακίνηση των υλικών σε μη ασφαλοστρωμένους δρόμους πρόσβασης αποτελεί μια σημαντική πηγή PM-10, η οποία συχνά υποεκτιμάται στις μελέτες LCA. Ως εκ τούτου, η υιοθέτηση της ανακύκλωσης RAP στο εργοτάξιο περιορίζει τις ανάγκες για νέες εξορύξεις και μειώνει τον αριθμό των δρομολογίων των βαρέων οχημάτων, οδηγώντας σε σαφή μείωση των συγκεντρώσεων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Παρατηρείται ότι ο δείκτης αυτός παρουσιάζει έντονη χωρική εξάρτηση, καθώς οι επιπτώσεις του εντοπίζονται κυρίως γύρω από τις πηγές εκπομπής και τις οδούς μεταφοράς. Επομένως, η χρήση Ανακτώμενου Ασφαλτομίγματος δεν προσφέρει μόνο παγκόσμια κλιματικά οφέλη, αλλά συμβάλλει ουσιαστικά στη βελτίωση των περιβαλλοντικών συνθηκών σε τοπικό επίπεδο, μειώνοντας την έκθεση σε επιβλαβείς ρύπους. Διαπιστώνεται ότι η ποσοτικοποίηση των PM-10 επιτρέπει την αξιολόγηση των επιπτώσεων της κατασκευής στην υγεία, γεγονός που καθίσταται ιδιαίτερα κρίσιμο για αεροδρόμια που γειτνιάζουν με αστικές περιοχές. Ως εκ τούτου, η περιβαλλοντική ανάλυση αποκτά μια κοινωνική διάσταση, καθώς η επιλογή βιώσιμων υλικών προστατεύει το βιοτικό επίπεδο των τοπικών κοινωνιών. Συμπερασματικά, η εξέταση των PM-10 συμπληρώνει το πλαίσιο της LCA, διασφαλίζοντας ότι η κατασκευαστική δραστηριότητα παραμένει εντός των αποδεκτών ορίων ποιότητας του περιβάλλοντος (Santero et al., 2011).

Η κατηγορία της τοξικότητας διακρίνεται σε καρκινικούς και μη καρκινικούς ρύπους, με τους πρώτους να περιλαμβάνουν ενώσεις όπως το βενζόλιο και βαρέα μέταλλα όπως ο μόλυβδος, που προέρχονται από την καύση και την επεξεργασία των ασφαλτικών υλικών. Οι ουσίες αυτές παρουσιάζουν αυξημένο κίνδυνο μακροχρόνιας έκθεσης, καθώς συσσωρεύονται στον οργανισμό και δύνανται να προκαλέσουν μεταλλάξεις του DNA που οδηγούν σε κακοήθειες νεοπλασίες. Οι μη καρκινικοί ρύποι, όπως τα οξείδια του θείου, προκαλούν οξείες αναπνευστικές ενοχλήσεις και δερματικούς ερεθισμούς, ιδιαίτερα σε εργαζόμενους που εκτίθενται σε υψηλές συγκεντρώσεις κατά τις διαδικασίες διάστρωσης της θερμής ασφάλτου.

Επιπλέον, η παραγωγή αποβλήτων, διακρινόμενη σε επικίνδυνα και μη επικίνδυνα, αντανακλά την αποδοτικότητα της διαχείρισης υλικών κατά τη φάση κατασκευής και συντήρησης. Τα επικίνδυνα απόβλητα περιλαμβάνουν μολυσμένα εδάφη από διαρροές καυσίμων, χρησιμοποιημένα λιπαντικά από τα μηχανήματα και υπολείμματα διαλυτών από τον καθαρισμό του εξοπλισμού, τα οποία απαιτούν ειδική επεξεργασία και διάθεση σε εγκεκριμένες εγκαταστάσεις. Τα μη επικίνδυνα απόβλητα προέρχονται κυρίως από την απόξεση παλαιών στρώσεων και από τα πλεονάσματα υλικών που δεν ενσωματώθηκαν στο έργο, τα οποία παραδοσιακά καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής, σπαταλώντας πολύτιμους πόρους που θα μπορούσαν να ανακυκλωθούν.

Συμπερασματικά, οι περιβαλλοντικοί δείκτες GWP, PED, οξίνιση, ευτροφισμός, PM-10, οι καρκινικοί και μη καρκινικοί ρύποι, και η παραγωγή επικίνδυνων αποβλήτων, συνθέτουν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την αποτίμηση της βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Η χρήση αυτών των δεικτών επιτρέπει τον εντοπισμό των κρίσιμων σημείων επιβάρυνσης σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής, από την παραγωγή των υλικών έως την τελική διάσπαση στο πεδίο. Η προσθήκη RAP αναμένεται να επηρεάζει το σύνολο αυτών των παραμέτρων, δημιουργώντας μια σύνθετη εικόνα περιβαλλοντικής απόδοσης που εξαρτάται από το ποσοστό ανακύκλωσης και τις απαιτήσεις δομικού σχεδιασμού. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής που ακολουθεί στα επόμενα κεφάλαια βασίζεται στην ποσοτικοποίηση αυτών των δεικτών για τον προσδιορισμό του βέλτιστου ποσοστού RAP. Παρατηρείται ότι η ισορροπημένη αξιολόγηση όλων των επιπτώσεων είναι απαραίτητη για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων που προάγουν την πράσινη μετάβαση των υποδομών. Επομένως, οι δείκτες αυτοί αποτελούν τα εργαλεία μέτρησης της προόδου προς την επίτευξη των στόχων της κλιματικής ουδετερότητας και της κυκλικής οικονομίας.

4.2 Υπολογιστικό Εργαλείο PaLATE

Η μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής για τα οδοστρώματα υλοποιείται μέσω του εξειδικευμένου υπολογιστικού εργαλείου PaLATE (Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects). Το συγκεκριμένο λογισμικό αναπτύχθηκε από τον καθηγητή Arpad Horvath στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας στο Berkeley και αποτελεί ένα υπολογιστικό μοντέλο βασισμένο σε περιβάλλον υπολογιστικών φύλλων, το οποίο επιτρέπει τη διενέργεια Ανάλυσης Κύκλου Ζωής με εστίαση στα έργα οδοποιίας. Διαπιστώνεται ότι η επιλογή του PaLATE βασίζεται στην ικανότητά του να διαχειρίζεται σύνθετα δεδομένα απογραφής και να μετατρέπει τις φυσικές ποσότητες των υλικών σε περιβαλλοντικούς δείκτες μέσω ενός δομημένου πλαισίου εισροών και εκροών. Το εργαλείο αυτό έχει σχεδιαστεί ειδικά για να υποστηρίξει τη λήψη αποφάσεων κατά τον σχεδιασμό υποδομών, επιτρέποντας στους μηχανικούς να αξιολογούν εναλλακτικές στρατηγικές κατασκευής και συντήρησης ως προς το ενεργειακό και περιβαλλοντικό τους κόστος. Επομένως, η χρήση του PaLATE διασφαλίζει την επιστημονική εγκυρότητα της ανάλυσης, καθώς βασίζεται σε αναγνωρισμένες βάσεις δεδομένων περιβαλλοντικής απογραφής που καλύπτουν το σύνολο των διεργασιών παραγωγής και κατασκευής των οδοστρωμάτων (Horvath, 2004).

Ο υπολογιστικός πυρήνας του PaLATE οργανώνεται σε μια σειρά αλληλένδετων φύλλων εργασίας, όπου πραγματοποιείται η εισαγωγή των δεδομένων και η επεξεργασία των περιβαλλοντικών φορτίων για κάθε στάδιο του κύκλου ζωής της υποδομής. Στο αρχικό στάδιο της ανάλυσης, ορίζονται οι παράμετροι του έργου, όπως τα πάχη των στρώσεων, οι πυκνότητες

των υλικών και οι μέσες αποστάσεις μεταφοράς από τις πηγές προμήθειας προς το εργοτάξιο. Με βάση αυτά τα δεδομένα εισόδου, το εργαλείο υπολογίζει αυτόματα τους όγκους και τις μάζες των απαιτούμενων υλικών. Διαπιστώνεται ότι το λογισμικό επιτρέπει τον λεπτομερή διαχωρισμό των υλικών σε φυσικά αδρανή, άσφαλτο και ανακτώμενα συστατικά, παρέχοντας τη δυνατότητα μοντελοποίησης της επίδρασης του RAP στη συνολική περιβαλλοντική απόδοση.

Παράλληλα, εισάγονται δεδομένα που αφορούν τον κατασκευαστικό εξοπλισμό, όπως οι τύποι των μηχανημάτων, ο χρόνος λειτουργίας τους και η κατανάλωση καυσίμου, εξασφαλίζοντας την ενσωμάτωση των εκπομπών που προκύπτουν κατά τη διάστρωση και τη συμπύκνωση των στρώσεων. Οι εκροές του μοντέλου περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα δεικτών, στους οποίους συγκαταλέγονται η κατανάλωση ενέργειας, η κατανάλωση ύδατος και οι εκπομπές αερίων ρύπων όπως το CO_2 , τα οξείδια του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια PM-10 (Εικόνα 4-1). Επομένως, η δομή του PaLATE επιτρέπει την εκτέλεση αναλύσεων ευαισθησίας, μέσω των οποίων προσδιορίζεται η συμβολή κάθε μεμονωμένης διεργασίας στο συνολικό αποτύπωμα του έργου. Προκύπτει ότι η ευελιξία του εργαλείου στην τροποποίηση των συντελεστών εκπομπών καθιστά δυνατή την προσαρμογή του μοντέλου στις ειδικές συνθήκες του ελληνικού κατασκευαστικού κλάδου. Ως εκ τούτου, το PaLATE λειτουργεί ως ένας μηχανισμός μετατροπής των τεχνικών προδιαγραφών σε οικολογικά μεγέθη, διευκολύνοντας τη σύγκριση μεταξύ των σεναρίων χρήσης RAP και της συμβατικής κατασκευής με φυσικά υλικά. Η συστηματική επεξεργασία των δεδομένων εισόδου εξασφαλίζει ότι τα αποτελέσματα αντικατοπτρίζουν την πραγματική ένταση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε όλο το εύρος του συστήματος (Horvath, 2004).

		Energy [MJ]	Water Consumption [kg]	CO ₂ [Mg] = GWP	NO _x [kg]	PM ₁₀ [kg]	SO ₂ [kg]	CO [kg]	Hg [g]	Pb [g]	RCRA Hazardous Waste Generated [kg]	Human Toxicity Potential	Human Toxicity Potential (Non-cancer)
Initial Construction	Materials Production	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Materials Transportation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Processes (Equipment)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maintenance	Materials Production	2.538.754	870	153	731	2.843	633	718	4	170	35.421	571.042	350.999.788
	Materials Transportation	29.308	5	2	117	25	7	10	0	1	211	628	770.746
	Processes (Equipment)	7.453	1	1	13	1	1	3	0	0	0	0	0
Total	Materials Production	2.538.754	870	153	731	2.843	633	718	4	170	35.421	571.042	350.999.788
	Materials Transportation	29.308	5	2	117	25	7	10	0	1	211	628	770.746
	Processes (Equipment)	7.453	1	1	13	1	1	3	0	0	0	0	0
Total		2.575.516	876	156	860	2.869	641	730	4	171	35.632	571.670	351.770.534

Εικόνα 4-1: Ρύποι που υπολογίζονται στο PaLATE

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής, το PaLATE χρησιμοποιείται για την αποτίμηση διαφορετικών σεναρίων που καθορίστηκαν για τον δομικό σχεδιασμό ενός εύκαμπτου ασφαλτικού οδοστρώματος στον διάδρομο προσγείωσης/απογείωσης ενός αεροδρομίου, δημιουργώντας μια άμεση σύνδεση μεταξύ της μηχανικής επάρκειας και της βιωσιμότητας. Διαπιστώνεται ότι η εισαγωγή των όγκων των υλικών, όπως αυτοί διαμορφώνονται συναρτήσει του ποσοστού RAP και του απαιτούμενου πάχους της στρώσης βάσης, αποτελεί την κρισιμότερη παράμετρο για τον υπολογισμό των εκπομπών. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής μέσω του PaLATE καθιστά εφικτό τον προσδιορισμό του βέλτιστου ποσοστού πρόσμιξης RAP, προσφέροντας μια ποσοτική βάση για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας των υποδομών των αεροδρομίων. Συμπερασματικά, το PaLATE αποτελεί το απαραίτητο υπολογιστικό εργαλείο για την ολοκλήρωση της μελέτης LCA, διασφαλίζοντας την ακρίβεια των περιβαλλοντικών συγκρίσεων (Santero et al., 2011).

5 Πειραματική Ανάλυση

5.1 Καθορισμός Δεδομένων

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναπτύσσεται μια μεθοδολογία για την ενσωμάτωση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής LCA στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων αεροδρομίων, με στόχο την αξιολόγηση του έργου από τεχνική και περιβαλλοντική σκοπιά. Η υλοποίηση της εργασίας βασίζεται στη διαμόρφωση ενός ολοκληρωμένου υπολογιστικού πλαισίου που προσομοιώνει τις λειτουργικές απαιτήσεις ενός σύγχρονου αερολιμένα εθνικής εμβέλειας, με πρωταρχικό στόχο την εξαγωγή αποτελεσμάτων που να χαρακτηρίζονται από υψηλή τεχνική αξιοπιστία και αντιπροσωπευτικότητα για τον ελληνικό χώρο.

Η εφαρμογή της Μεθόδου της FAA για τη διαστασιολόγηση οδοστρώματος αεροδρομίου εφαρμόζεται μέσω του υπολογιστικού εργαλείου FAARFIELD 2.1.1 (FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design), το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων παχών των στρώσεων του οδοστρώματος, ενώ η μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment - LCA), η οποία υλοποιήθηκε μέσω του εργαλείου PaLATE (Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects), επέτρεψε την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από τις κατασκευαστικές επιλογές.

Η επιλογή της γεωγραφικής θέσης και ο προσδιορισμός των λειτουργικών παραμέτρων, για τον μηχανικό σχεδιασμό, πραγματοποιήθηκαν με γνώμονα τη διαμόρφωση ενός αντιπροσωπευτικού και τεχνικά απαιτητικού πλαισίου, το οποίο να ανταποκρίνεται στις πραγματικές συνθήκες των ελληνικών αερολιμένων εθνικής σημασίας. Ως μελέτη περίπτωσης (Case Study) επιλέχθηκε ο Κρατικός Αερολιμένας Θεσσαλονίκης «Μακεδονία» (SKG), ο οποίος αποτελεί τη σημαντικότερη πύλη εισόδου της Βόρειας Ελλάδας και παρουσιάζει ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον λόγω της πολυμορφίας των εξυπηρετούμενων φορτίων και της έντονης εποχικότητας της κυκλοφορίας. Η επιλογή αυτή επιτρέπει τη διερεύνηση της χρήσης RAP σε ένα επιχειρησιακό περιβάλλον όπου η ανάγκη για δομική αναβάθμιση των υποδομών συνδυάζεται με την επιτακτική απαίτηση για βιώσιμη ανάπτυξη, δεδομένης της εγγύτητας του αεροδρομίου σε προστατευόμενα οικοσυστήματα και του υψηλού κόστους προμήθειας αδρανών υλικών από απομακρυσμένες πηγές. Επομένως, η ανάλυση εστιάζει στη μοντελοποίηση μιας τυπικής διατομής οδοστρώματος, η οποία καλείται να ανταποκριθεί στις αυστηρές προδιαγραφές ασφαλείας της FAA, ενώ παράλληλα ενσωματώνει τις αρχές της κυκλικής οικονομίας μέσω της αξιοποίησης των υλικών που προκύπτουν από την απόξεση των παλαιών ταπήτων (SKG, 2023).

Όσον αφορά τον γεωτεχνικό χαρακτηρισμό της περιοχής, έγιναν παραδοχές ως προς τις ιδιότητες του φυσικού εδάφους έδρασης (subgrade) με βάση τη θεώρηση ενός τυπικού εδάφους μέτριας προς υψηλής φέρουσας ικανότητας. Συγκεκριμένα, για το σύνολο των εξεταζόμενων σεναρίων και μιγμάτων, υιοθετήθηκε η τιμή του Δείκτη Καλιφόρνιας (CBR) ίση με 10%, η οποία θεωρείται αντιπροσωπευτική για σταθεροποιημένα εδάφη θεμελίωσης αεροδρομίων και εξασφαλίζει τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων. Η τιμή αυτή μετατρέπεται αυτόματα από το λογισμικό FAARFIELD σε Μέτρο Ελαστικότητας, αποτελώντας τη βάση για τον υπολογισμό της κατακόρυφης θλιπτικής παραμόρφωσης (Mallik & El-Korchi, 2013).

Η διαμόρφωση της «Σύνθεσης της Κυκλοφορίας» (Traffic Mix) συνιστά την πλέον κρίσιμη παράμετρο για τον υπολογισμό της αθροιστικής φθοράς, καθώς η δομική ζωή του οδοστρώματος εξαρτάται από το άθροισμα της φθοράς που προκαλεί κάθε αεροσκάφος ξεχωριστά καθ' όλη τη διάρκεια της 20ετούς περιόδου σχεδιασμού. Σε αντίθεση με παλαιότερες μεθοδολογίες, η σύγχρονη προσέγγιση επιβάλλει την εισαγωγή ενός πλήρους στόλου αεροσκαφών, ο οποίος στην παρούσα μελέτη σχεδιάστηκε ώστε να περιλαμβάνει αποκλειστικά αεροσκάφη κατηγορίας ICAO C. Η επιλογή αυτή βασίστηκε στην ανάλυση των στατιστικών στοιχείων κίνησης του αεροδρομίου Θεσσαλονίκης, όπου διαπιστώθηκε ότι η πλειονότητα των εμπορικών πτήσεων εκτελείται από αεροσκάφη τύπου Airbus A320-200, Airbus A321-200 και Boeing 737-800 (Εικόνα 5-1).

Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Percent GW on Gear
A320neo	70.400	11,169	0	223,380	0	0	0	1220,37	0.95
A321neo	97.400	2,775	0	55,500	0	0	0	1503,06	0.95
A319-100 std	64.400	802	0	16,040	0	0	0	1192,79	0.95
B737-800	79.242	6,544	0	130,880	0	0	0	1406,53	0.95
B737-900	79.242	179	0	3,580	0	0	0	1406,53	0.95

Εικόνα 5-1: Η επιλεγμένη Σύνθεση Κυκλοφορίας (Traffic Mix) στο περιβάλλον του FAARFIELD, αποτελούμενο από αεροσκάφη κατηγορίας ICAO C.

Τα συγκεκριμένα αεροσκάφη χαρακτηρίζονται από συστήματα προσγείωσης διπλού τροχού (dual wheel gear) και μέσες πιέσεις ελαστικών της τάξεως του 1.4 MPa, αποτελώντας την κύρια πηγή συσσώρευσης κόπωσης στις ασφαλτικές στρώσεις.

5.2 Χαρακτηρισμός Υλικών

Η ακριβής ποσοτικοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών που συνθέτουν τη διατομή του οδοστρώματος αποτελεί σημαντικό βήμα της μεθοδολογίας σχεδιασμού, καθώς οι παράμετροι αυτές καθορίζουν την ελαστική απόκριση της κατασκευής και την κατανομή των τάσεων υπό τα επιβαλλόμενα δυναμικά φορτία των αεροσκαφών. Για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας, κρίνεται απαραίτητος ο ακριβής προσδιορισμός του Μέτρου Ελαστικότητας (E) και της πυκνότητας (ρ) για κάθε εξεταζόμενο μίγμα, καθώς η ενσωμάτωση του Ανακτώμενου Ασφαλτομίγματος αναμένεται να μεταβάλλει τη δομική συμπεριφορά της στρώσης βάσης. Τα χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία προέρχονται από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοστρωμάτων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), διασφαλίζοντας την αξιοπιστία και την επιστημονική εγκυρότητα των δεδομένων που τροφοδοτούν το υπολογιστικό μοντέλο. Ως εκ τούτου, η ανάλυση δεν βασίζεται σε γενικευμένες βιβλιογραφικές παραδοχές ή θεωρητικές εκτιμήσεις, αλλά σε πραγματικές πειραματικές μετρήσεις που αντανακλούν την ιδιαιτερότητα των υλικών που ανακτώνται από το εθνικό δίκτυο, επιτρέποντας την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για τη δομική επάρκεια των διατομών.

Τα εργαστηριακά αποτελέσματα αφορούν στον χαρακτηρισμό έντεκα (11) διακριτών μιγμάτων στρώσης βάσης, ξεκινώντας από τη συμβατική σύνθεση αναφοράς η οποία αποτελείται από 100% φυσικά θραυστά αδρανή υλικά (Virgin Aggregates - VA) και προχωρώντας σε μια

συστηματική και σταδιακή υποκατάσταση αυτών με Ανακτώμενο Ασφαλτόμιγμα. Τα ποσοστά περιεκτικότητας σε RAP ορίστηκαν σε ένα εύρος από 10% έως 100%, με σταθερό βήμα αύξησης της τάξεως του 10% ανά μίγμα, ώστε να καταστεί δυνατή η χαρτογράφηση της μηχανικής συμπεριφοράς σε όλο το φάσμα των δυνατών συνθέσεων, διασφαλίζοντας ότι η επίδραση της γηρασμένης ασφάλτου απομονώνεται ως η κύρια μεταβλητή της μελέτης. Η επιλογή αυτών των ποσοστών υποκατάστασης βασίστηκε στην ανάγκη διερεύνησης των ορίων που θέτει η τρέχουσα τεχνολογία παραγωγής ασφαλτομιγμάτων.

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων αποκαλύπτουν μια ιδιαίτερα σύνθετη και μη γραμμική εξέλιξη της δυσκαμψίας της στρώσης βάσης, η οποία διαφοροποιείται σημαντικά από τις συνήθεις γραμμικές προσεγγίσεις που συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία (Witczak, 2003). Διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη Ανακτώμενου Ασφαλτομίγματος σε ποσοστά έως 20% οδηγεί σε μια αρχική αύξηση του Μέτρου Ελαστικότητας, η οποία κορυφώνεται στα 571 MPa, γεγονός που αποδίδεται στη συνεκτικότητα που προσδίδει το εναπομείναν γηρασμένο ασφαλικό συνδετικό στον σκελετό των αδρανών.

Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στην παρατήρηση που καταγράφηκε κατά τη διάρκεια των δοκιμών για τα μίγματα με εξαιρετικά υψηλή περιεκτικότητα σε ανακτώμενο υλικό, όπου η μηχανική απόκριση παρουσίασε σημεία πλήρους αποδιοργάνωσης. Συγκεκριμένα, κατά τον έλεγχο του μίγματος με 90% RAP και 10% φυσικά αδρανή, η εργαστηριακή διαδικασία δεν ολοκληρώθηκε λόγω της αδυναμίας του δοκιμίου να συμπληρώσει τους απαιτούμενους κύκλους φόρτισης, καθώς το υλικό παρουσίασε πρόωρη δομική κατάρρευση υπό το επιβαλλόμενο φορτίο. Η συμπεριφορά αυτή αποτελεί ένα κρίσιμο εύρημα που λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα εργασία, καθώς αποδεικνύει ότι για ποσοστά υποκατάστασης που προσεγγίζουν την πλήρη ανακύκλωση, η υπερβολική συγκέντρωση ψαθυρής γηρασμένης ασφάλτου εμποδίζουν τη δημιουργία ενός σταθερού σκελετού αδρανών, καθιστώντας το υλικό ακατάλληλο για την παραλαβή υψηλών καταπονήσεων. Διαπιστώθηκε ότι σε αυτό το επίπεδο, το μέτρο ελαστικότητας υποχώρησε στη χαμηλότερη τιμή των 174 MPa, γεγονός που υποδηλώνει ότι η στρώση βάσης μετατρέπεται από ένα δύσκαμπτο δομικό στοιχείο σε ένα μαλακό και παραμορφώσιμο υπόστρωμα που αδυνατεί να προστατεύσει αποτελεσματικά τις υπερκείμενες ασφαλικές στρώσεις από την κάμψη. Παρατηρείται ότι η αδυναμία ολοκλήρωσης της δοκιμής στο 90% RAP θέτει ένα σαφές όριο στην τεχνική εφικτότητα της ανακύκλωσης, αναδεικνύοντας τον κίνδυνο αστοχίας σε περίπτωση που αγνοηθούν οι μηχανικοί περιορισμοί των υλικών. Επομένως, η ανάλυση του 90% RAP λειτουργεί ως προειδοποιητικός δείκτης για τον αναλυτή, επιβάλλοντας την αποφυγή λύσεων που στερούνται μηχανικής ευστάθειας.

Παράλληλα με τη μεταβολή της δυσκαμψίας, η πυκνότητα των μιγμάτων ακολουθεί μια σταθερά φθίνουσα πορεία, μειούμενη από τα 2.305 kg/m^3 για το φυσικό υλικό, στα 2.050 kg/m^3 για την περίπτωση της πλήρους υποκατάστασης. Παρατηρείται ότι η παράμετρος της πυκνότητας επηρεάζει άμεσα τους υπολογισμούς των μαζών στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής, καθώς για τον ίδιο γεωμετρικό όγκο οδοστρωσίας, οι απαιτήσεις σε τόνους υλικού προς μεταφορά και διάστρωση διαφοροποιούνται αισθητά. Στον Πίνακα 5-1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας και της πυκνότητας για το σύνολο των έντεκα μιγμάτων, όπως αυτές προέκυψαν από την επεξεργασία των εργαστηριακών δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοστρωμάτων του ΕΜΠ.

Πίνακας 5-1: Εργαστηριακά Αποτελέσματα Μέτρου Ελαστικότητας και Πυκνότητας Μιγμάτων Βάσης

Μίγμα (RAP / VA)	Μέτρο Ελαστικότητας E (MPa)	Πυκνότητα Υλικού (kg/m^3)
0% RAP / 100% VA	516	2.305
10% RAP / 90% VA	444	2.295
20% RAP / 80% VA	571	2.280
30% RAP / 70% VA	567	2.272
40% RAP / 60% VA	514	2.262
50% RAP / 50% VA	466	2.258
60% RAP / 40% VA	253	2.230
70% RAP / 30% VA	211	2.195
80% RAP / 20% VA	212	2.180
90% RAP / 10% VA	174	2.173
100% RAP / 0% VA	198	2.050

Τα δεδομένα αυτά λαμβάνονται υπόψη στη Μέθοδο της FAA και εισάγονται συστηματικά στο λογισμικό FAARFIELD 2.1.1 μέσω του καθορισμού «user defined» υλικού, διασφαλίζοντας ότι η προσομοίωση ανταποκρίνεται με ακρίβεια στην πραγματική συμπεριφορά των εξεταζόμενων μιγμάτων, ενώ για τις υπόλοιπες στρώσεις της οδοστρωσίας υιοθετήθηκαν οι τυπικές προδιαγραφές της FAA. Η επιφανειακή στρώση και η ασφαλτική βάση, P-401/P-403 ορίστηκαν με σταθερό μέτρο ελαστικότητας 1.379 MPa, διασφαλίζοντας τη συμβατότητα του μοντέλου με τις διεθνείς απαιτήσεις για αεροσκάφη κατηγορίας C, ενώ η υπόβαση P-154 παραμετροποιήθηκε με μέτρο ελαστικότητας 141 MPa. Διαπιστώθηκε ότι η διατήρηση των ιδιοτήτων αυτών σε σταθερά επίπεδα είναι απαραίτητη για την απομόνωση της επίδρασης του RAP, καθώς η μεταβολή του Δείκτη Αθροιστικής Φθοράς πρέπει να αποδίδεται αποκλειστικά στη μηχανική απόκριση της στρώσης βάσης.

5.3 Σενάρια Ανάλυσης Δομικής Επάρκειας

Για την ολοκληρωμένη και επιστημονικά τεκμηριωμένη διερεύνηση της δομικής συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων διαδρόμου προσγείωσης/απογείωσης υπό την επίδραση της προσθήκης Ανακτώμενου Ασφαλτομίγματος, κρίθηκε απαραίτητος ο καθορισμός δύο διακριτών και συμπληρωματικών σεναρίων δομικής διαμόρφωσης, τα οποία διαφοροποιούνται ως προς τα πάχη των υπερκείμενων ασφαλτικών στρώσεων (Πίνακας 5-2). Η σύγκριση των δύο αυτών διαμορφώσεων προσφέρει πολύτιμα και κρίσιμα συμπεράσματα σχετικά με το κατά πόσον η στρατηγική αύξηση του πάχους της ασφάλτου μπορεί να αντισταθμίσει αποτελεσματικά τη μειωμένη φέρουσα ικανότητα των μιγμάτων με υψηλή περιεκτικότητα σε RAP.

Πίνακας 5-2: Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά και Διαμόρφωση Στρώσεων ανά Σενάριο Σχεδιασμού

Τύπος Στρώσης	Υλικό FAA	Πάχος - Σενάριο 1 (mm)	Πάχος - Σενάριο 2 (mm)
Επιφανειακή Στρώση	P-401 HMA Surface	110	120
Ασφαλτική Βάση	P-403 HMA Base	130	150
Στρώση Βάσης (Μεταβλητή)	RAP / P-209 Aggregates	Μεταβλητό	Μεταβλητό
Υπόβαση	P-154 Subbase	250	250
Στρώση Έδρασης (Subgrade)	CBR = 10%	∞	∞

Το Σενάριο 1 ορίστηκε ως η τυπική διατομή αναφοράς, ακολουθώντας τις συνήθειες κατασκευαστικές πρακτικές και τις κανονιστικές οδηγίες της FAA για αεροδρόμια που εξυπηρετούν αεροσκάφη κατηγορίας ICAO C. Συγκεκριμένα, το πάχος της επιφανειακής στρώσης καθορίστηκε στα 110 mm, ενώ η ασφαλτική βάση ορίστηκε στα 130 mm. Παρατηρείται ότι σε αυτή τη διαμόρφωση η συνολική δομική επάρκεια του οδοστρώματος εξαρτάται σε καθοριστικό βαθμό από τη μηχανική απόκριση της βάσης RAP, καθιστώντας τον έλεγχο της κόπωσης το κυρίαρχο κριτήριο σχεδιασμού (Εικόνα 5-2).

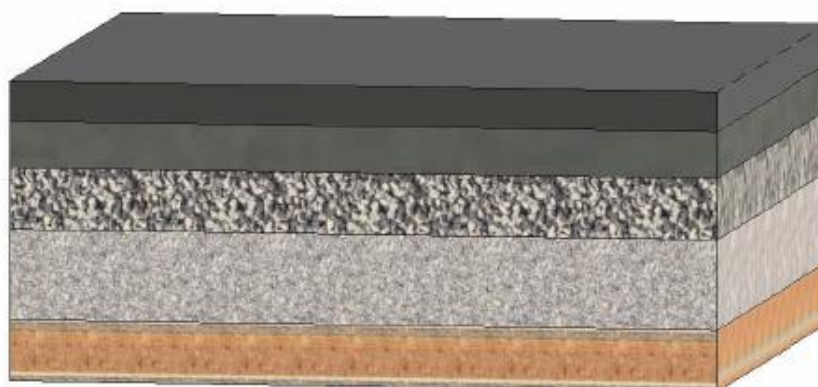
Επιφανειακή στρώση 110mm

Ασφαλτική Βάση 130mm

Στρώση Βάσης

Στρώση Υπόβασης

Στρώση Έδρασης CBR=10%



Εικόνα 5-2: Απεικόνιση Διατομής (Σενάριο 1)

Αντιθέτως, το Σενάριο 2 διαμορφώθηκε ως μια σαφώς ενισχυμένη δομική λύση. Σε αυτή την περίπτωση, το πάχος της επιφανειακής στρώσης αυξήθηκε στα 120 mm και το πάχος της ασφαλτικής βάσης στα 150 mm, δημιουργώντας μια πιο ανθεκτική επιφανειακή στρώση σε σύγκριση με το πρώτο σενάριο (Εικόνα 5-3). Διαπιστώνεται ότι η δομική αυτή ενίσχυση επιτρέπει θεωρητικά τη χρήση υλικών βάσης με χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας χωρίς την άμεση και πρόωρη υπέρβαση των ορίων του Δείκτη Αθροιστικής Φθοράς (CDF). Επομένως, το Σενάριο 2 αποτελεί τη βάση για τη διερεύνηση των ακραίων ορίων της προσθήκης ανακτώμενου υλικού, όπου η τυπική διατομή του Σεναρίου 1 αδυνατεί να ανταποκριθεί στις αυστηρές δομικές απαιτήσεις λόγω της μειωμένης δυσκαμψίας του ανακυκλωμένου υλικού. Ως εκ τούτου, η ανάλυση των αποτελεσμάτων θα καταδείξει εάν το αυξημένο περιβαλλοντικό

και οικονομικό κόστος της επιπλέον ασφάλτου αντισταθμίζεται επαρκώς από τη δυνατότητα ενσωμάτωσης μεγαλύτερων ποσοτήτων RAP στη στρώση βάσης. Παράλληλα, η σύγκριση των δύο σεναρίων θα επιτρέψει τον προσδιορισμό της βέλτιστης στρατηγικής σχεδιασμού για την επίτευξη του μέγιστου περιβαλλοντικού οφέλους χωρίς τη διακινδύνευση της δομικής ακεραιότητας της υποδομής σε βάθος χρόνου.

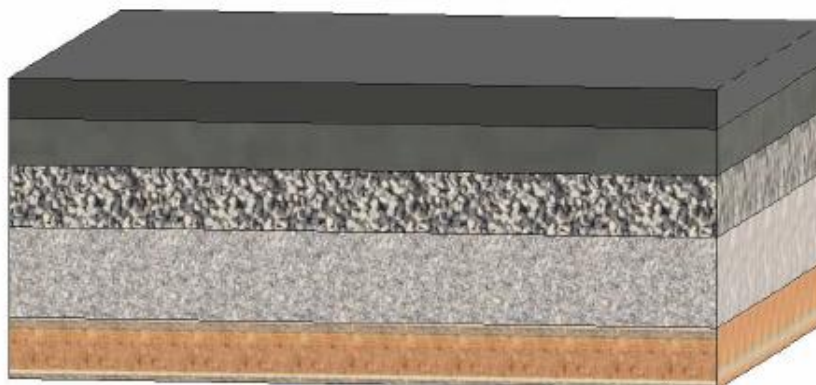
Επιφανειακή Στρώση 120mm

Ασφαλτική Βάση 150mm

Στρώση Βάσης

Στρώση Υπόβασης 250mm

Στρώση Έδρασης CBR=10%



Εικόνα 5-3: Απεικόνιση Διατομής (Σενάριο 2)

Για το σύνολο των εξεταζόμενων σεναρίων, η υπόβαση P-154 διατηρήθηκε σταθερή στο πάχος των 250 mm, λειτουργώντας ως απαραίτητη προστατευτική στρώση πάνω από το έδαφος έδρασης με δείκτη CBR 10%. Η διαφοροποίηση των σεναρίων περιορίζεται αποκλειστικά στις ασφαλτικές στρώσεις, επιτρέποντας την ακριβή και στοχευμένη αξιολόγηση της επίδρασης του RAP στη συνολική απόκριση.

5.4 Ανάλυση Απογραφής Κύκλου Ζωής (LCI)

Η Ανάλυση Απογραφής Κύκλου Ζωής (Life Cycle Inventory - LCI) συνιστά το πλέον κρίσιμο και απαιτητικό σε δεδομένα στάδιο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, καθώς περιλαμβάνει τη συστηματική καταγραφή και τον λεπτομερή ποσοτικό προσδιορισμό όλων των εισροών ενέργειας και υλικών, καθώς και των εκροών ρύπων που σχετίζονται με την κατασκευή του οδοστρώματος. Ως Λειτουργική Μονάδα (Functional Unit) της παρούσας ανάλυσης ορίστηκε η κατασκευή ενός τμήματος διαδρόμου προσγείωσης/απογείωσης μήκους 1.000 μέτρων (1 km) και πλάτους 50 μέτρων, επιλογή η οποία επιτρέπει τη συγκρισιμότητα μεταξύ των εναλλακτικών σεναρίων RAP. Η διαδικασία της απογραφής ξεκίνησε με τη μετατροπή των γεωμετρικών δεδομένων, δηλαδή των παχών των στρώσεων που προέκυψαν από τον σχεδιασμό με τη Μέθοδο της FAA στο FAARFIELD 2.1.1, σε φυσικές μάζες υλικών, λαμβάνοντας υπόψη τις ειδικές πυκνότητες κάθε μίγματος. Η εισαγωγή των δεδομένων αυτών πραγματοποιήθηκε στα αντίστοιχα φύλλα εργασίας του λογισμικού PaLATE (Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects), όπου πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός των απαιτούμενων ποσοτήτων αδρανών και ασφάλτου για κάθε ένα από τα εξεταζόμενα μίγματα ανά σενάριο σχεδιασμού (Horvath, 2004).

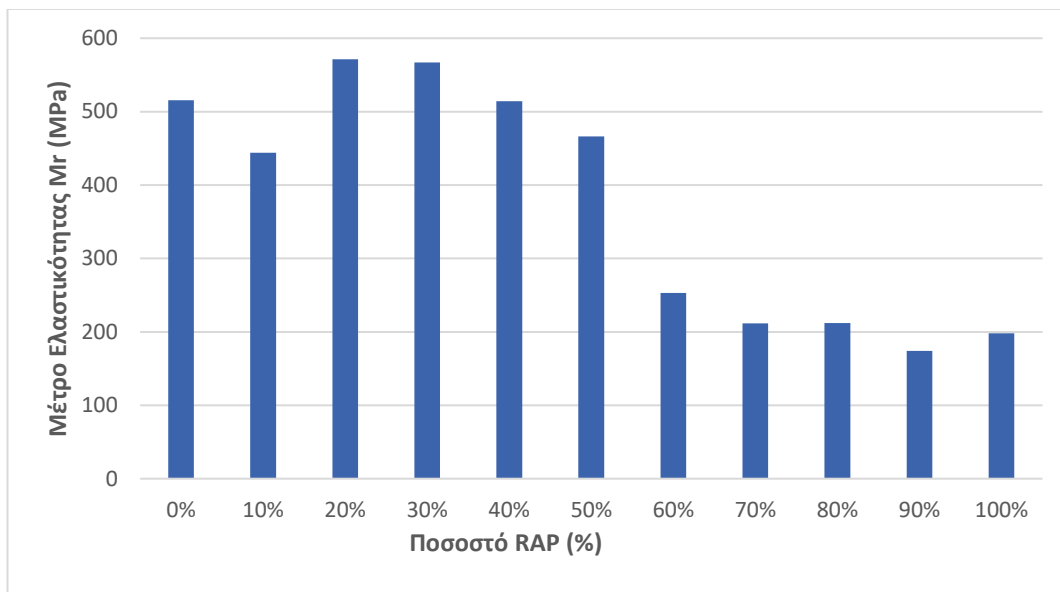
Μια κρίσιμη τεχνική απαίτηση για την υλοποίηση της περιβαλλοντικής αποτίμησης αφορά τη μετατροπή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διατομής από το μετρικό σύστημα στο αγγλοσαξονικό, δεδομένου ότι το υπολογιστικό εργαλείο PaLATE χρησιμοποιεί αποκλειστικά μονάδες όπως ίντσες (in), πόδια (ft) και μίλια (miles). Συγκεκριμένα, το μήκος της λειτουργικής μονάδας των 1.000 m αντιστοιχεί σε 0,6214 miles, το πλάτος των 50 m μετατρέπεται σε 164,04 ft, και τα πάχη των στρώσεων που προέκυψαν από το λογισμικό FAARFIELD σε χιλιοστά (mm) μετατρέπονται σε ίντσες, μεγέθη τα οποία προσδιορίζουν τη συνολική επιφάνεια κατασκευής που εισάγεται στο μοντέλο για τον υπολογισμό των περιβαλλοντικών ροών. Διαπιστώνεται ότι η ακρίβεια αυτών των μετατροπών είναι θεμελιώδης, καθώς ακόμη και μικρές αποκλίσεις στον γεωμετρικό όγκο δύνανται να οδηγήσουν σε σημαντικά σφάλματα κατά τον υπολογισμό των απαιτούμενων μαζών των υλικών και της ενσωματωμένης ενέργειας πρώτης ύλης

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην ενσωμάτωση των μεταβλητών πυκνοτήτων που προέκυψαν από τον εργαστηριακό έλεγχο, καθώς η παράμετρος αυτή διαφοροποιεί ριζικά την περιβαλλοντική αποτίμηση κάθε μίγματος. Η πυκνότητα της στρώσης βάσης μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό του RAP, από τα 2.305 kg/m^3 για το φυσικό υλικό, στα 2.050 kg/m^3 για την πλήρη υποκατάσταση (100% RAP). Αυτή η μείωση της πυκνότητας συνεπάγεται ότι για τον ίδιο γεωμετρικό όγκο οδοστρωσίας, η απαιτούμενη μάζα υλικών προς μεταφορά και επεξεργασία είναι μικρότερη στα σενάρια με υψηλότερα ποσοστά Ανακτώμενου Ασφαλτομίγματος, γεγονός που επηρεάζει άμεσα τον υπολογισμό των εκπομπών ρύπων και της κατανάλωσης ενέργειας.

6 Αποτελέσματα

6.1 Αξιολόγηση Εργαστηριακών Δεδομένων

Σύμφωνα με τα διατιθέμενα εργαστηριακά αποτελέσματα φαίνεται ότι μεταβολή του ποσοστού RAP στο μίγμα ασύνδετων αδρανών επηρεάζει σημαντικά τη μηχανική συμπεριφορά του υλικού, με αποτέλεσμα η σχέση μεταξύ περιεκτικότητας σε ανακυκλωμένο υλικό και δυσκαμψίας να μην είναι γραμμική. Επομένως, η κατανόηση της εξέλιξης του Μέτρου Ελαστικότητας συναρτήσει του RAP αποτελεί προαπαιτούμενο για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων του σχεδιασμού που θα παρουσιαστούν στα επόμενα εδάφια.



Εικόνα 6-1: Διακύμανση Μέτρου Ελαστικότητας ανά πρόσμιξη RAP

Η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων (Εικόνα 6-3) αναδεικνύει μια σύνθετη και μη γραμμική εξέλιξη της δυσκαμψίας. Η συμπεριφορά του Ανακτώμενου Ασφαλτομίγματος μπορεί να χωριστεί σε τρεις διακριτές φάσεις, καθεμία από τις οποίες χαρακτηρίζεται από διαφορετικούς μηχανισμούς και διαφορετική επίδραση στη δομική ακεραιότητα της στρώσης βάσης.

Φάση 1: Αρχική Ενίσχυση και Σταθεροποίηση (0%-20% RAP)

Το συμβατικό μίγμα (0% RAP) παρουσιάζει Μέτρο Ελαστικότητας 516 MPa, αντιπροσωπεύοντας την απόκριση των φυσικών θραυστών αδρανών υλικών χωρίς την παρουσία ασφαλτικού συνδετικού. Η προσθήκη 10% RAP οδηγεί σε μείωση της δυσκαμψίας στα 444 MPa. Ωστόσο, η συνέχιση της υποκατάστασης οδηγεί σε ανατροπή της τάσης. Στο 20% RAP, το Μέτρο Ελαστικότητας φτάνει στην μέγιστη τιμή των 571 MPa, υπερβαίνοντας κατά 11% τη δυσκαμψία του συμβατικού υλικού και κατά 29% τη δυσκαμψία του μίγματος 10% RAP. Διαπιστώνεται ότι το 20% RAP αντιπροσωπεύει το σημείο όπου μεγιστοποιείται η δομική δυσκαμψία του μίγματος (McDaniel & Anderson, 2001).

Φάση 2: Σταθεροποίηση και Οριακή Μείωση (20%-50% RAP)

Η δεύτερη φάση χαρακτηρίζεται από μια σταδιακή αλλά ελεγχόμενη υποχώρηση του Μέτρου Ελαστικότητας. Από τη μέγιστη τιμή των 571 MPa (20% RAP), η δυσκαμψία μειώνεται ελαφρώς στα 567 MPa για το 30% RAP. Η μικρή αυτή μείωση δείχνει ότι η αύξηση του ποσοστού RAP στο εύρος 20%-30% δεν επηρεάζει σημαντικά τη μηχανική απόκριση. Ωστόσο, η συνέχιση της υποκατάστασης οδηγεί σε πιο εμφανή μείωση. Στο 40% RAP, το Μέτρο Ελαστικότητας υποχωρεί στα 514 MPa, τιμή η οποία εξακολουθεί να είναι συγκρίσιμη με το συμβατικό υλικό (516 MPa), αλλά αντιπροσωπεύει μείωση 10% σε σχέση με τη μέγιστη τιμή. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η συνεχής αύξηση της περιεκτικότητας σε γηρασμένο συνδετικό αρχίζει να επηρεάζει αρνητικά τη διάταξη των κόκκων.

Το κρίσιμο όριο της Φάσης 2 εντοπίζεται στο 50% RAP, όπου το Μέτρο Ελαστικότητας μειώνεται στα 466 MPa. Αν και η τιμή αυτή εξακολουθεί να κρίνεται τεχνικά αποδεκτή, αντιπροσωπεύει μείωση 18% σε σχέση με τη μέγιστη δυσκαμψία του 20% RAP και μείωση 10% σε σχέση με το συμβατικό υλικό. Διαπιστώνεται ότι το 50% RAP αποτελεί το τελευταίο σημείο όπου η δυσκαμψία παραμένει σε επίπεδα συγκρίσιμα με τη συμβατική λύση χωρίς την ανάγκη σημαντικών κατασκευαστικών προσαρμογών. Επομένως, το εύρος 20%-50% RAP ορίζει μια ζώνη σταθερότητας, εντός της οποίας η μηχανική απόκριση του υλικού δεν αποκλίνει δραστικά από τα αναμενόμενα επίπεδα απόδοσης (Garg & Hayhoe, 2009).

Φάση 3: Δομική Εξασθένηση (60%-100% RAP)

Η τρίτη φάση χαρακτηρίζεται από μια απότομη μείωση της δυσκαμψίας. Η μετάβαση από το 50% στο 60% RAP σηματοδοτεί ένα σημείο καμψής (tipping point), όπου το Μέτρο Ελαστικότητας μεταβάλλεται από τα 466 MPa στα 253 MPa, σημειώνοντας μια απώλεια 46% της δυσκαμψίας. Αυτή η εκθετική πτώση δεν είναι μια απλή συνέχεια της προηγούμενης γραμμικής μείωσης, αλλά αντιπροσωπεύει μια θεμελιώδη μεταβολή του μηχανισμού συμπεριφοράς του υλικού.

Η ερμηνεία αυτού του φαινομένου συνδέεται με την υπέρβαση ενός κρίσιμου ορίου περιεκτικότητας σε γηρασμένο συνδετικό. Όταν το ποσοστό RAP υπερβαίνει το 50%-60%, ο όγκος του ασφαλτικού συνδετικού γίνεται τόσο μεγάλος που αρχίζει να κυριαρχεί έναντι του σκελετού των αδρανών. (Zaumanis et al., 2014).

Στο 70% RAP, το Μέτρο Ελαστικότητας μειώνεται περαιτέρω στα 211 MPa, ενώ στο 80% RAP η τιμή παραμένει σχεδόν σταθερή στα 212 MPa. Αυτή η σταθεροποίηση σε χαμηλά επίπεδα δεν αντανακλά βελτίωση της συμπεριφοράς, αλλά υποδηλώνει ότι το υλικό έχει φτάσει σε ένα σημείο δυσκαμψίας, κάτω από το οποίο δεν μπορεί να υποχωρήσει περαιτέρω χωρίς την πλήρη αποδόμηση του σκελετού. Διαπιστώνεται ότι σε αυτά τα επίπεδα, το υλικό δεν μπορεί πλέον να θεωρηθεί ως στρώση βάσης οδοστρώματος, αλλά προσεγγίζει τη συμπεριφορά μιας μαλακής υπόβασης ή ακόμα και εδάφους χαμηλής φέρουσας ικανότητας.

Στο μίγμα με 90% RAP, καταγράφηκε το χαμηλότερο Μέτρο Ελαστικότητας 174 MPa. Ωστόσο, η σημασία αυτής της τιμής δεν έγκειται μόνο στο απόλυτο μέγεθός της, αλλά στο γεγονός ότι η εργαστηριακή δοκιμή δεν ολοκληρώθηκε λόγω της αδυναμίας του δοκιμίου να αντέξει τους απαιτούμενους κύκλους φόρτισης. Αυτή η συμπεριφορά αποτελεί ένα κρίσιμο προειδοποιητικό σήμα, καθώς αποδεικνύει ότι για ποσοστά υποκατάστασης που προσεγγίζουν την πλήρη ανακύκλωση, το υλικό δεν διαθέτει την ελάχιστη δομική ακεραιότητα που απαιτείται για να παραλάβει τα φορτία των αεροσκαφών. Η μηχανική αστοχία κατά τη διάρκεια της εργαστηριακής δοκιμής υποδηλώνει ότι στην πράξη, ένα οδόστρωμα με τέτοια σύνθεση θα

αστοχούσε πρόωρα, πιθανώς ακόμα και κατά την κατασκευή ή κατά τις πρώτες διελεύσεις αεροσκαφών (Montepara & Tosi, 2012).

Τέλος, το μίγμα με 100% RAP παρουσιάζει Μέτρο Ελαστικότητας 198 MPa, ελαφρώς υψηλότερο από το 90% RAP. Αυτή η μικρή ανάκαμψη δεν αντικατοπτρίζει πραγματική βελτίωση, αλλά οφείλεται στη μεγαλύτερη ομοιογένεια του μίγματος, το οποίο αποτελείται αποκλειστικά από RAP χωρίς φυσικά αδρανή. Ωστόσο, η τιμή των 198 MPa είναι 62% χαμηλότερη από το συμβατικό υλικό και 65% χαμηλότερη από τη μέγιστη τιμή του 20% RAP, καθιστώντας το μίγμα ακατάλληλο για χρήση σε στρώσεις βάσης αεροδρομίων. Επομένως, η πλήρης υποκατάσταση των φυσικών αδρανών με RAP θα πρέπει να απορριφθεί ως τεχνικά ανέφικτη για εφαρμογές υψηλής καταπόνησης (Jialin Zhang & T. S., 2022).

Συμπερασματικά, στο εύρος 0%-50% RAP, όπου το Μέτρο Ελαστικότητας παραμένει σε αποδεκτά επίπεδα (444-571 MPa), αναμένεται ότι η διατομή του οδοστρώματος θα απαιτεί μικρές προσαρμογές στα πάχη των στρώσεων. Επομένως, για αυτό το εύρος ποσοστών RAP, η χρήση ανακυκλωμένου υλικού δεν αναμένεται να απαιτήσει σημαντική αύξηση του όγκου των υλικών, διατηρώντας έτσι τα περιβαλλοντικά οφέλη της ανακύκλωσης. Αντίθετα, η πτώση της δυσκαμψίας πέραν του 60% RAP αναμένεται να οδηγήσει σε αύξηση των απαιτούμενων παχών. Καθώς το Μέτρο Ελαστικότητας μειώνεται στα 253 MPa και χαμηλότερα, η στρώση βάσης αδυνατεί να προσφέρει την απαραίτητη υποστήριξη στις υπερκείμενες ασφαλτικές στρώσεις. Ως αποτέλεσμα, κατά τη διέλευση των αεροσκαφών, οι ασφαλτικές στρώσεις θα υφίστανται έντονη κάμψη, αναπτύσσοντας υψηλές εφελκυστικές παραμορφώσεις στην κάτω ίνα τους, οι οποίες θα οδηγήσουν σε πρόωρη αστοχία λόγω κόπωσης. Η μέθοδος FAA, εντοπίζοντας τον κίνδυνο υπέρβασης του Δείκτη Αθροιστικής Φθοράς (Cumulative Damage Factor - CDF > 1), θα επιχειρήσει να αντισταθμίσει την αδυναμία του υλικού αυξάνοντας το πάχος της στρώσης βάσης, ώστε να μειώσει τις τάσεις που φτάνουν στη στρώση έδρασης και να περιορίσει τις παραμορφώσεις των ασφαλτικών στρώσεων (Federal Aviation Administration, 2021).

6.2 Έλεγχος Επάρκειας Διατομών

Ο προσδιορισμός των απαιτούμενων παχών της στρώσης βάσης για κάθε ένα από τα έντεκα μίγματα RAP πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή της μεθόδου της FAA μέσω του λογισμικού FAARFIELD 2.1.1. Η ανάλυση διεξήχθη για τα δύο πειραματικά σενάρια, τα οποία διαφοροποιούνται ως προς τα πάχη των ασφαλτικών στρώσεων, προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα αντισταθμίσεως της μειωμένης δυσκαμψίας του RAP μέσω της ενίσχυσης των υπερκειμένων στρώσεων.

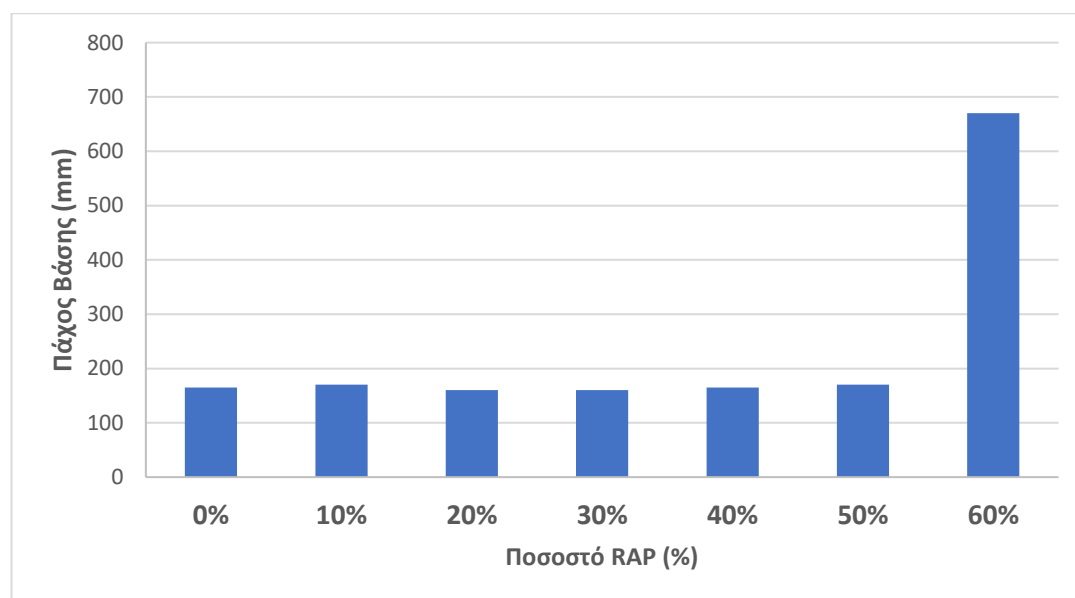
6.2.1 Σενάριο 1 : Τυπική Διατομή

Το Σενάριο 1 εξετάζει μια τυπική διατομή αεροδρομίου με πάχος επιφανειακής στρώσης 110 mm και πάχος ασφαλτικής βάσης 130 mm, προσομοιώνοντας τις συνήθεις συνθήκες κατασκευής σε ελληνικά αεροδρόμια που εξυπηρετούν αεροσκάφη κατηγορίας ICAO C. Τα απαιτούμενα πάχη για τα διαφορετικά μίγματα RAP παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-1.

Πίνακας 6-1: Απαιτούμενα Πάχη Στρώσης Βάσης (mm) - Σενάριο 1

Ποσοστό RAP	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Πάχος Βάσης (mm)	Παρατήρηση
0%	516	165	Βάση Σύγκρισης
10%	444	170	Οριακή Αύξηση
20%	571	160	Αποδεκτό
30%	567	160	Αποδεκτό
40%	514	165	Βέλτιστο Περιβαλλοντικά
50%	466	170	Οριακή Σταθερότητα
60%	253	670	Σημείο Αιχμής (Spike)

Για τα μίγματα με ποσοστά RAP από 0% έως 50%, όπου το Μέτρο Ελαστικότητας κυμαίνεται από 444 MPa έως 571 MPa, το απαιτούμενο πάχος της στρώσης βάσης παραμένει σχετικά σταθερό και διαχειρίσιμο. Συγκεκριμένα, η συμβατική λύση (0% RAP, $M_r = 516$ MPa) απαιτεί πάχος βάσης 165 mm, το οποίο αυξάνεται οριακά καθώς το ποσοστό RAP αυξάνεται: 170 mm για 10% RAP ($M_r = 444$ MPa), 160 mm για 20% RAP ($M_r = 571$ MPa), 160 mm για 30% RAP ($M_r = 567$ MPa), 165mm για 40% RAP ($M_r = 514$ MPa) και 170 mm για 50% RAP ($M_r = 466$ MPa) (Εικόνα 6-2). Αυτή η σταδιακή αύξηση, από το 0% στο 50% RAP, είναι αποδεκτή από κατασκευαστική άποψη και δεν επηρεάζει ουσιαστικά το κόστος ή τη διάρκεια του έργου.



Εικόνα 6-2: Απαιτούμενο Πάχος Στρώσης Βάσης ανά πρόσμιξη RAP (Σενάριο 1)

Η σχετικά σταθερή συμπεριφορά σε αυτό το εύρος ποσοστών RAP επιβεβαιώνει ότι η υψηλή δυσκαμψία της στρώσης βάσης ($M_r > 440$ MPa) επιτρέπει την αποτελεσματική κατανομή των τάσεων, προστατεύοντας τις ασφαλτικές στρώσεις από υπερβολική κάμψη και διατηρώντας τις εφελκυστικές παραμορφώσεις σε αποδεκτά επίπεδα. Διαπιστώνεται ότι η μέθοδος FAA, μέσω της επαναληπτικής διαδικασίας του FAARFIELD, υπολογίζει το πάχος που απαιτείται ώστε ο Δείκτης Αθροιστικής Φθοράς (CDF) να μην υπερβαίνει την τιμή 1.0, διασφαλίζοντας έτσι ότι η

διατομή θα επιβιώσει της 20ετούς περιόδου σχεδιασμού χωρίς την εμφάνιση ρηγματώσεων λόγω κόπωσης (Federal Aviation Administration, 2021).

Ωστόσο, το σημείο αιχμής εντοπίζεται στο 60% RAP, όπου το Μέτρο Ελαστικότητας φτάνει τα 253 MPa. Η απότομη αυτή μείωση της δυσκαμψίας κατά 46% σε σχέση με το 50% RAP οδηγεί σε μια ανάλογη εκθετική αύξηση του απαιτούμενου πάχους, το οποίο μεταβάλλεται στα 670 mm, σημειώνοντας μια αύξηση 294% σε σχέση με το προηγούμενο μίγμα (50% RAP, 170 mm) και αύξηση 306% σε σχέση με τη συμβατική λύση (0% RAP, 165 mm) (Εικόνα 6-2).

Η στρώση βάσης, έχοντας χάσει το 46% της δυσκαμψίας της, αδυνατεί να προσφέρει επαρκή υποστήριξη στις υπερκείμενες ασφαλτικές στρώσεις. Ως αποτέλεσμα, κατά τη διέλευση των αεροσκαφών, οι ασφαλτικές στρώσεις υφίστανται έντονη κάμψη, αναπτύσσοντας υψηλές εφελκυστικές παραμορφώσεις στην κάτω ίνα τους. Η μέθοδος FAA, εντοπίζοντας τον κίνδυνο άμεσης αστοχίας λόγω κόπωσης ($HMA\ CDF > 1$), επιχειρεί να αντισταθμίσει την αδυναμία του υλικού αυξάνοντας τον όγκο του, ώστε να μειώσει τις τάσεις που φτάνουν στη στρώση έδρασης. Επομένως, το “άλμα” στο πάχος δεν οφείλεται σε ευθραυστότητα του RAP, αλλά στη δομική ανεπάρκεια του μίγματος να λειτουργήσει ως στιβαρή βάση οδοστρώματος (Mallik & El-Korchi, 2013).

Διαπιστώνεται ότι το κρίσιμο όριο χρήσης RAP για τυπικές διατομές αεροδρομίων βρίσκεται στο 50%, πέραν του οποίου η εκθετική αύξηση των απαιτούμενων παχών καθιστά τη λύση μη βιώσιμη. Επομένως, για το Σενάριο 1, το ανώτατο τεχνικά αποδεκτό και περιβαλλοντικά ωφέλιμο όριο χρήσης RAP είναι το 50%, με το εύρος 40%-50% να αντιπροσωπεύει τη βέλτιστη ζώνη λειτουργίας.

6.2.2 Σενάριο 2: Ενισχυμένη Διατομή

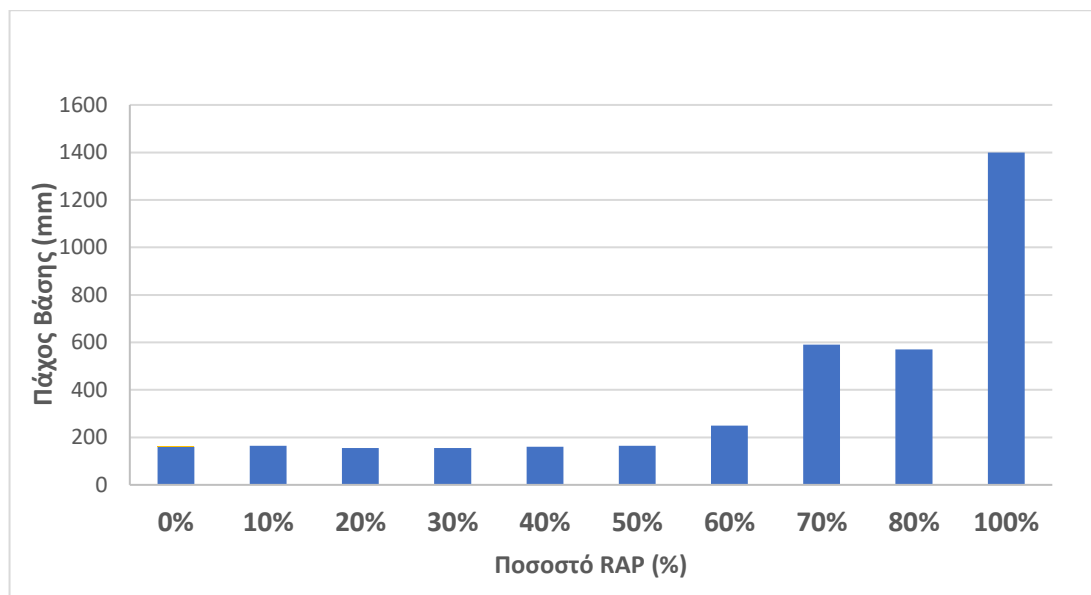
Το Σενάριο 2 εξετάζει μια ενισχυμένη διατομή με αυξημένο πάχος επιφανειακής στρώσης 120 mm και πάχος ασφαλτικής βάσης 150 mm, αποσκοπώντας στην αντιμετώπιση μέρους της δομικής καταπόνησης που προκαλείται από την υποβάθμιση του υλικού της βάσης. Η στρατηγική αυτή εξετάζει κατά πόσον η ενίσχυση των υπερκείμενων στρώσεων δύναται να επεκτείνει το όριο χρήσης του RAP πέραν του 50% που προσδιορίστηκε στο Σενάριο 1, προσφέροντας μια εναλλακτική λύση για έργα όπου το κόστος της επιπλέον ασφάλτου δικαιολογείται από την αυξημένη περιβαλλοντική απόδοση.

Πίνακας 6-2: Απαιτούμενα Πάχη Στρώσης Βάσης (mm) - Σενάριο 2

Ποσοστό RAP	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Πάχος Βάσης (mm)	Παρατήρηση
0%	516	160	Βάση Σύγκρισης
10%	444	165	Οριακή Αύξηση
20%	571	155	Αποδεκτό
30%	567	155	Αποδεκτό
40%	514	160	Βέλτιστο
50%	466	165	Βέλτιστο
60%	253	255	Διαχειρίσιμο
70%	211	590	Μη Οικονομικό
80%	212	570	Μη Οικονομικό
100%	198	1400	Μη Ρεαλιστικό

Τα αποτελέσματα δείχνουν βελτίωση σε σχέση με το Σενάριο 1, αλλά η θεμελιώδης τάση παραμένει η ίδια (Πίνακας 6-2). Για τα χαμηλά ποσοστά RAP (0%-50%), τα απαιτούμενα πάχη βάσης είναι ελαφρώς μικρότερα σε σχέση με το Σενάριο 1, καθώς η παχύτερη ασφαλτική στρώση προσφέρει επιπλέον δομική προστασία, μειώνοντας τις εφελκυστικές παραμορφώσεις στη βάση των επιφανειακών στρώσεων. Συγκεκριμένα: 0% RAP ($M_r = 516$ MPa) απαιτεί 160 mm (έναντι 165mm στο Σενάριο 1), 10% RAP ($M_r = 444$ MPa) απαιτεί 165 mm (έναντι 170 mm), 20% και 30% RAP ($M_r = 571$ MPa και $M_r = 567$ αντίστοιχα MPa) απαιτούν 155 mm (έναντι 160 mm), 40% RAP ($M_r = 514$ MPa) απαιτεί 160 mm (έναντι 165 mm) και 50% RAP ($M_r = 466$ MPa) απαιτεί 165 mm (έναντι 170 mm). Η μείωση αυτή, επιβεβαιώνει ότι η συνολική αύξηση του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων κατά 30 mm μειώνει ελαφρώς τις απαιτήσεις στη στρώση βάσης, χωρίς ωστόσο να αλλάζει θεμελιωδώς τη δομική απόκριση του συστήματος.

Το μίγμα 60% RAP ($M_r = 253$ MPa) απαιτεί πάχος βάσης 255 mm αντί των 670 mm που απαιτούνταν στο Σενάριο 1. Αυτή η σημαντική μείωση κατά 62% αποδεικνύει ότι η ενίσχυση της ασφαλτικής στρώσης κατά 30 mm (12,5% αύξηση) αναλαμβάνει σημαντικό μέρος της φέρουσας ικανότητας, απορροφώντας τις εφελκυστικές τάσεις και μειώνοντας την ανάγκη για μεγάλο πάχος βάσης. Η παχύτερη ασφαλτική στρώση λειτουργεί ως ένα προστατευτικό στρώμα υψηλής δυσκαμψίας ($M_r = 1379$ MPa), το οποίο περιορίζει την κάμψη της διατομής και διατηρεί τις παραμορφώσεις εντός των επιτρεπτών ορίων. Διαπιστώνεται ότι το απαιτούμενο πάχος των 255 mm είναι διαχειρίσιμο από κατασκευαστική άποψη. Επομένως, το Σενάριο 2 επιτρέπει τη χρήση του 60% RAP (Εικόνα 6-3) (Garg & Hayhoe, 2009).



Εικόνα 6-3: Απαιτούμενο Πάχος Στρώσης Βάσης ανά πρόσμιξη RAP (Σενάριο 2)

Ωστόσο, για τα υψηλότερα ποσοστά RAP, τα απαιτούμενα πάχη παραμένουν υψηλά, ακόμα και με την ενισχυμένη επιφανειακή στρώση. Στο 70% RAP ($M_r = 211 \text{ MPa}$), το πάχος ανέρχεται σε 590 mm, υποδεικνύοντας ότι η ενίσχυση της ασφάλτου δεν μπορεί να αντισταθμίσει την ακραία μείωση της δυσκαμψίας. Στο 80% RAP ($M_r = 212 \text{ MPa}$), το απαιτούμενο πάχος μειώνεται στα 570 mm, ενώ για την πλήρη υποκατάσταση (100% RAP, $M_r = 198 \text{ MPa}$), το πάχος ανέρχεται στα 1400 mm (Εικόνα 6-3).

6.2.3 Κατασκευαστικά Όρια

Η αξιολόγηση των δύο σεναρίων επιτρέπει τον καθορισμό των κατασκευαστικών ορίων για το αεροδρόμιο μελέτης, όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί RAP στη στρώση βάσης ενός οδοστρώματος. Διαπιστώνεται ότι για τυπικές διατομές (Σενάριο 1), το ανώτατο τεχνικά αποδεκτό όριο χρήσης RAP είναι το 50%. Πέραν αυτού, η απαίτηση για κατασκευή βάσης πάχους 670 mm είναι οικονομικά ασύμφορη και κατασκευαστικά χρονοβόρα, καθώς απαιτεί πολλαπλές στρώσεις διάστρωσης και συμπύκνωσης.

Στην περίπτωση που επιλεγεί η ενίσχυση των ασφαλικών στρώσεων (Σενάριο 2), το όριο αυτό δύναται να επεκταθεί οριακά έως το 60%, όπου το απαιτούμενο πάχος των 255 mm είναι διαχειρίσιμο. Ωστόσο, οποιαδήποτε σκέψη για χρήση ποσοστών της τάξεως του 80-100% πρέπει να απορριφθεί, καθώς τα πάχη που προκύπτουν (570-1400 mm) στερούνται κάθε τεχνικής λογικής και θα οδηγούσαν σε υπέρογκη κατανάλωση πόρων, ακυρώνοντας τον περιβαλλοντικό σκοπό της ανακύκλωσης (Federal Aviation Administration, 2021).

6.3 Αποτελέσματα Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Η επεξεργασία των δεδομένων για την Ανάλυση Κύκλου Ζωής μέσω του λογισμικού PaLATE επέτρεψε την ολοκληρωμένη ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, μετατρέποντας τις γεωμετρικές παραμέτρους και τους όγκους των υλικών που προέκυψαν από τον σχεδιασμό σε μετρήσιμα μεγέθη οικολογικής επιβάρυνσης. Η ανάλυση επικεντρώθηκε στην

αξιολόγηση των εξεταζόμενων μιγμάτων, προσφέροντας μια λεπτομερή αποτύπωση της περιβαλλοντικής απόδοσης συναρτήσει της περιεκτικότητας σε RAP για τη λειτουργική μονάδα του ενός χιλιομέτρου (1 km) διαδρόμου με πλάτος 50 μέτρων. Διαπιστώνεται ότι η εισαγωγή του ανακυκλωμένου υλικού μεταβάλλει το ενεργειακό προφίλ της υποδομής, καθώς η υποκατάσταση των φυσικών αδρανών οδηγεί σε άμεση μείωση των απαιτήσεων εξόρυξης και μεταφοράς, υπό την απαραίτητη προϋπόθεση ότι η διατομή παραμένει δομικά επαρκής και δεν απαιτεί υπερβολικές αυξήσεις πάχους (Horvath, 2004).

6.3.1 Σενάριο 1: Τυπική Διατομή

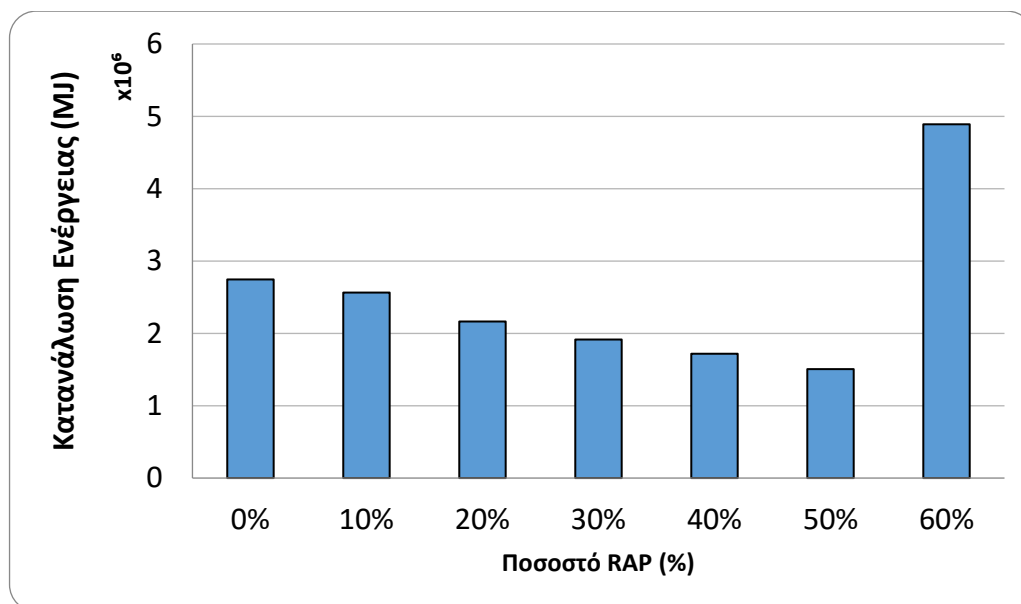
Στον Πίνακα 6-3 παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικοί δείκτες που προέκυψαν από την Ανάλυση Κύκλου Ζωής για τα διαφορετικά μίγματα φυσικών αδρανών με Ανακτώμενο Ασφαλτόμιγμα για το Σενάριο 1.

Πίνακας 6-3: Συγκεντρωτικά Περιβαλλοντικά Αποτελέσματα Σεναρίου 1 (Τυπική Διατομή)

Μίγμα (RAP/V)	Ενέργεια (MJ)	Νερό (kg)	CO₂ - GWP (Mg)	NO_x (kg)	PM₁₀ (kg)	Επικ. Απόβλητα (kg)
0% / 100%	2.745.516	385	195	514	2.722	3.690
10% / 90%	2.564.056	358	184	512	2.527	3.554
20% / 80%	2.164.143	302	158	466	2.117	3.110
30% / 70%	1.915.052	265	142	449	1.855	2.876
40% / 60%	1.718.503	237	130	447	1.644	2.728
50% / 50%	1.505.923	205	117	443	1.415	2.561
60% / 40%	4.890.105	657	397	1.673	4.482	9.098

Πρωτογενής Ενεργειακή Ζήτηση και Ενεργειακό Ισοζύγιο

Η ανάλυση της Πρωτογενούς Ενεργειακής Ζήτησης (PED) αποτελεί τον πλέον αντιπροσωπευτικό δείκτη της αποδοτικότητας του συστήματος, καθώς αθροίζει το σύνολο της ενέργειας που δαπανάται για την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διάστρωση των υλικών στο εργοτάξιο. Στην *Εικόνα 6.4* παρουσιάζεται η κατανάλωση ενέργειας συναρτήσει του ποσοστού RAP για το Σενάριο 1.

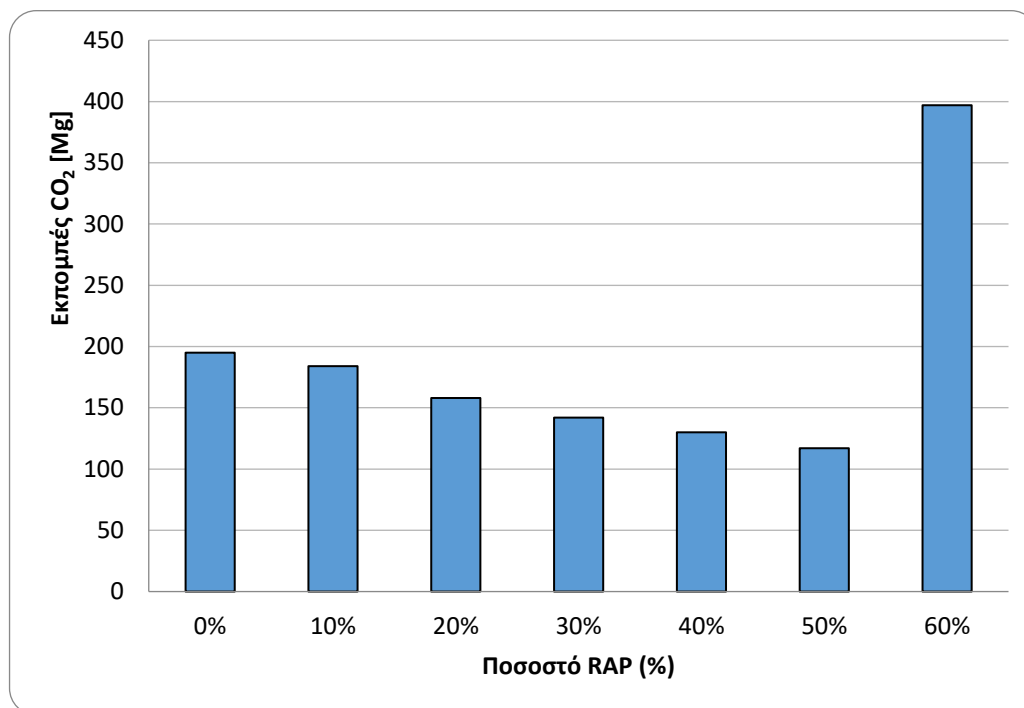


Εικόνα 6-4: Κατανάλωση Ενέργειας συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 1)

Για το Σενάριο 1, παρατηρείται μια σταθερή και σημαντική πτωτική τάση της ενεργειακής κατανάλωσης καθώς το ποσοστό RAP αυξάνεται από το 0% έως το 50%, σημείο στο οποίο καταγράφεται η μέγιστη εξοικονόμηση. Συγκεκριμένα, η ενέργεια μειώνεται από τα 2.745.516 MJ (0% RAP) στα 1.718.503 MJ (40% RAP) και τελικά στο ελάχιστο των 1.505.923 MJ (50% RAP), επιτυγχάνοντας μια καθαρή μείωση της τάξεως του 45,1%. Η βελτίωση αυτή αποδίδεται πρωτίστως στην αποφυγή της ενεργοβόρου θραύσης φυσικών πετρωμάτων και στη δραστική μείωση των τονοχιλιομέτρων μεταφοράς, καθώς το RAP θεωρείται διαθέσιμο εντός του αερολιμένα. Διαπιστώνεται ωστόσο ότι η ενεργειακή καμπύλη παρουσιάζει μια ανατροπή στο σημείο του 60% RAP, όπου η PED εκτινάσσεται στα 4.890.105 MJ. Αυτή η εκθετική αύξηση, η οποία υπερβαίνει κατά 78% την κατανάλωση του συμβατικού σεναρίου, οφείλεται αποκλειστικά στον τεράστιο όγκο υλικών που επιβάλλει ο μηχανικός σχεδιασμός (πάχος βάσης 670 mm), αποδεικνύοντας ότι η απεριόριστη ανακύκλωση δεν είναι ενεργειακά αποδοτική (Santero et al., 2011).

Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη (GWP)

Το αποτύπωμα άνθρακα, εκφρασμένο ως Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη σε Mg CO_2e , ακολουθεί μια πορεία απόλυτα συνδεδεμένη με τις απαιτήσεις μάζας και τις αποστάσεις μεταφοράς των υλικών (Εικόνα 6-5).

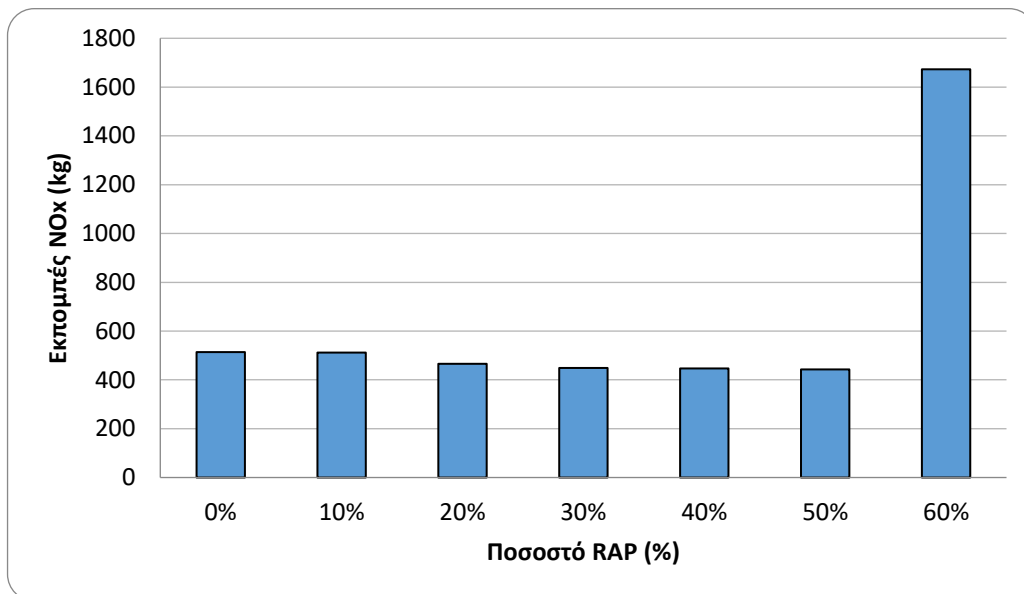


Εικόνα 6-5: Εκπομπές CO₂(Mg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 1)

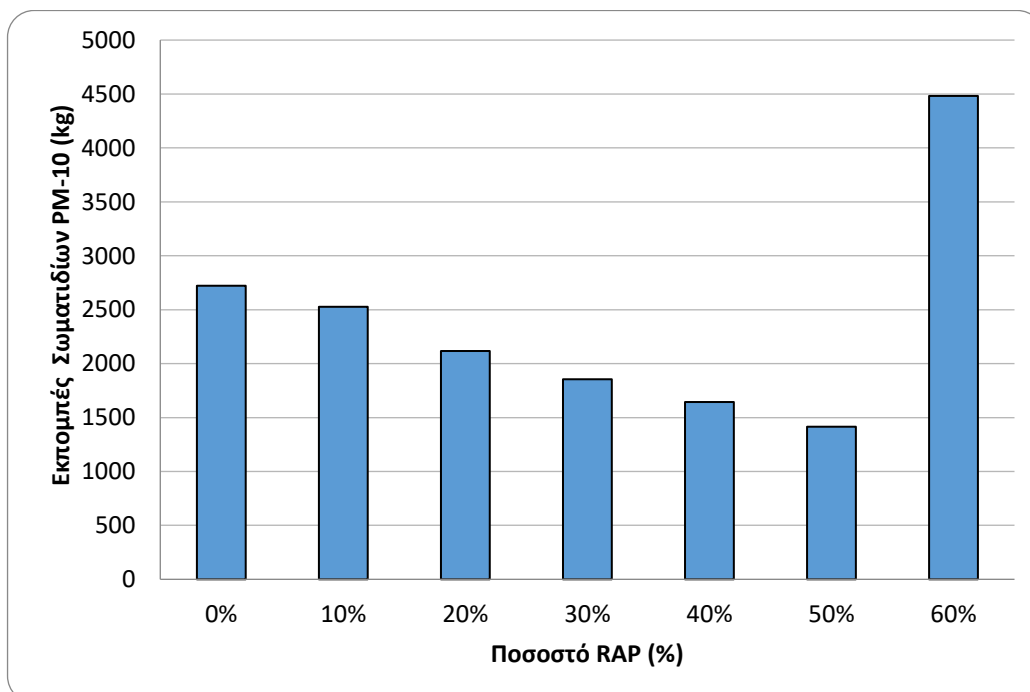
Στο Σενάριο 1, οι εκπομπές CO₂ μειώνονται από τα 195 Mg (0% RAP) στα 130 Mg (40% RAP) και 117 Mg (50% RAP), επιτυγχάνοντας μια καθαρή μείωση της τάξεως του 33,3% και 40% αντίστοιχα. Η αύξηση του πάχους στο 60% RAP οδηγεί σε εκπομπές 397 Mg CO₂e, για το Σενάριο 1, τιμή υπερδιπλάσια της συμβατικής κατασκευής. Η διαπίστωση αυτή ενισχύει το επιχείρημα ότι η περιβαλλοντική υπεροχή του RAP εξαρτάται άμεσα από τη διατήρηση των μηχανικών ιδιοτήτων του μίγματος σε επίπεδα που δεν απαιτούν υπερδιαστασιολόγηση της βάσης.

Ατμοσφαιρικοί Ρύποι και Τοπικές Επιπτώσεις

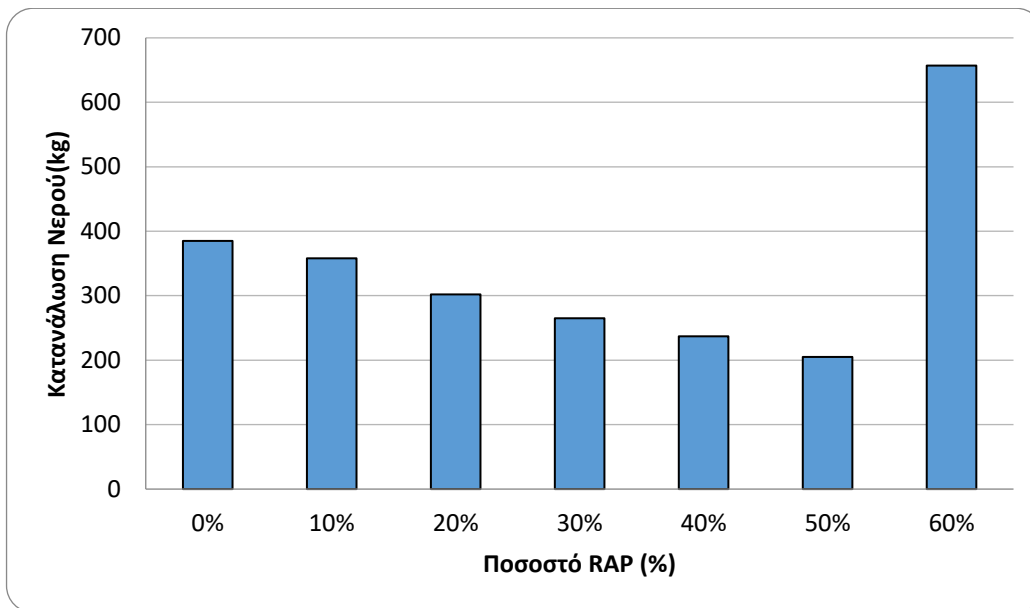
Πέραν των παγκόσμιων δεικτών, η ανάλυση μέσω του PaLATE προσέφερε πολύτιμα στοιχεία για τους ρύπους που επηρεάζουν άμεσα την τοπική ποιότητα του αέρα και τη δημόσια υγεία γύρω από τις εγκαταστάσεις των αεροδρομίων, όπως φαίνεται στις *Εικόνες 6-6 έως 6-11*.



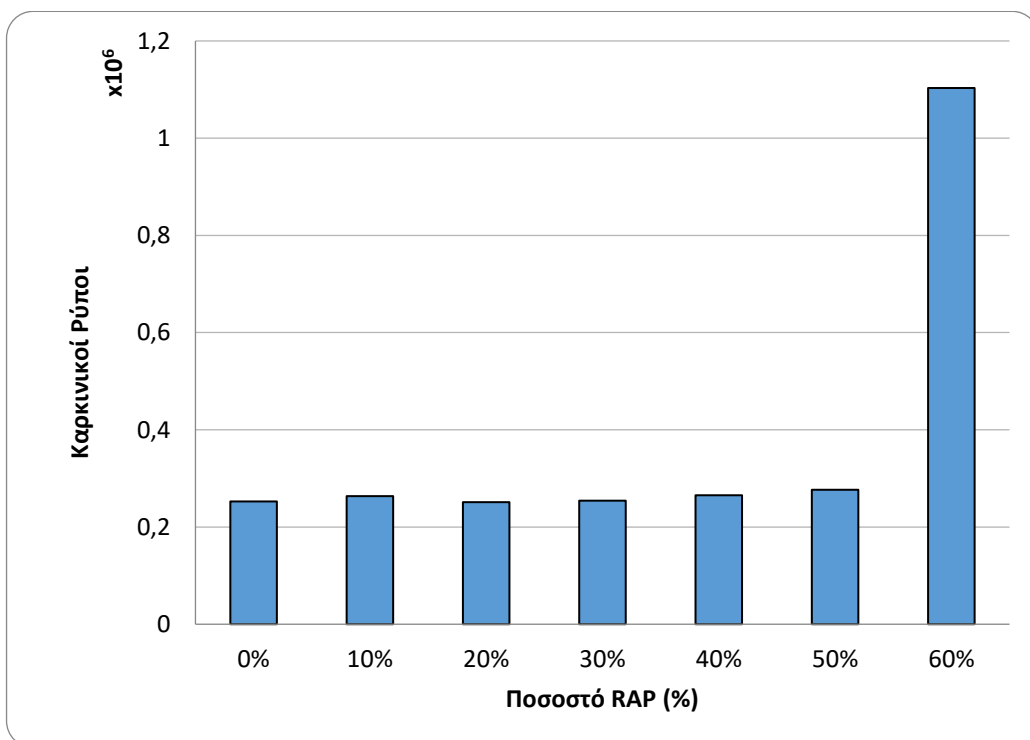
Εικόνα 6-6: Εκπομπές NOx (kg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 1)



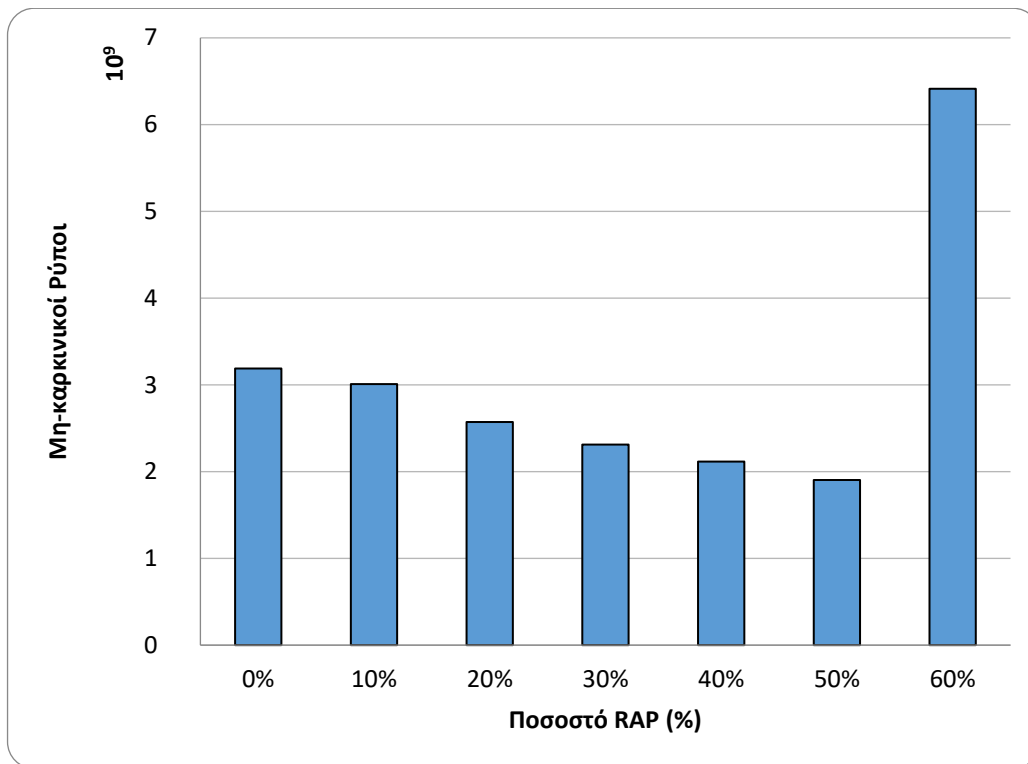
Εικόνα 6-7: Εκπομπές Σωματιδίων PM-10 (kg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 1)



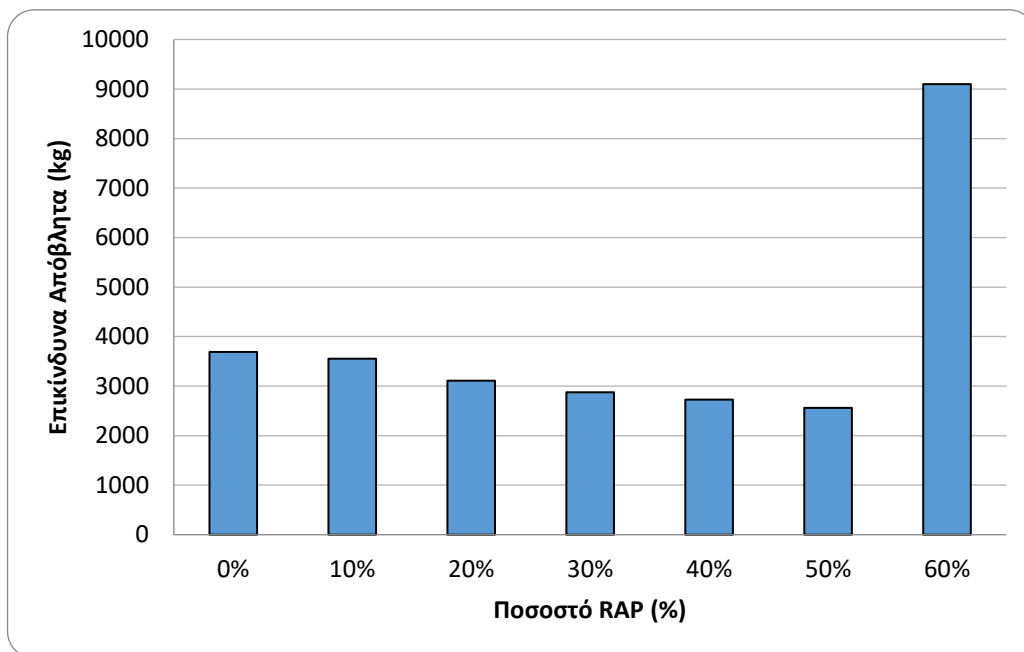
Εικόνα 6-8: Κατανάλωση Νερού συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 1)



Εικόνα 6-9: Καρκινικοί Ρύποι συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 1)



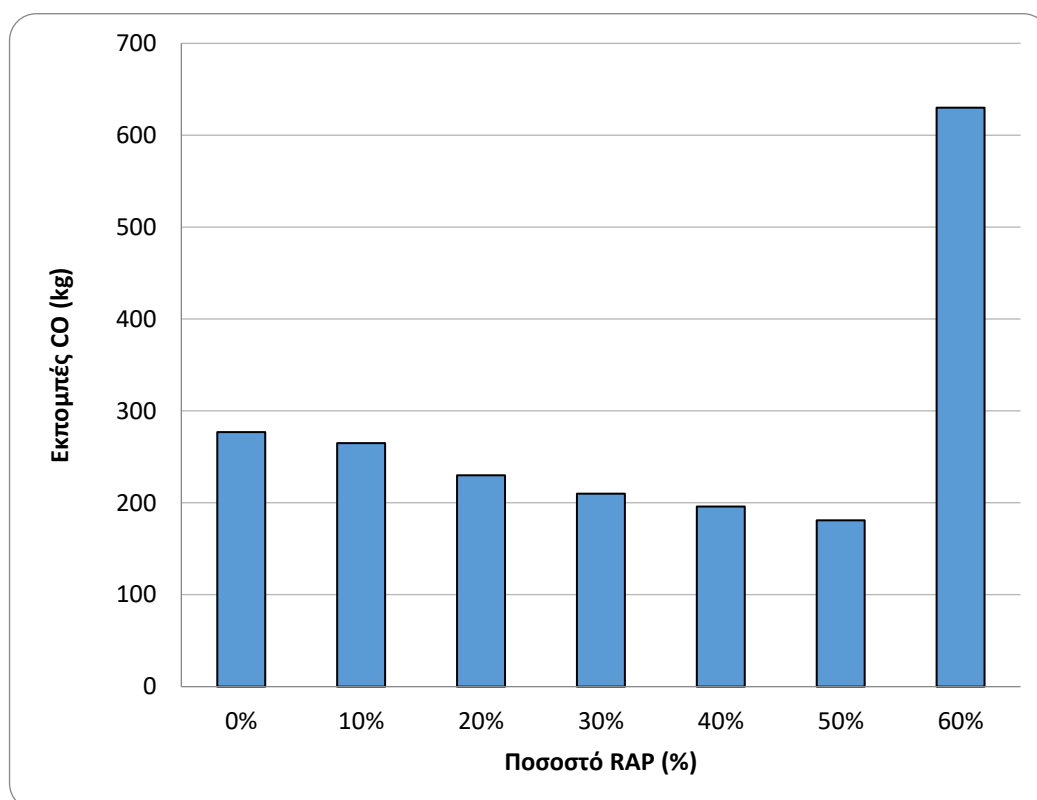
Εικόνα 6-10: Μη-καρκινικοί Ρύποι συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 1)



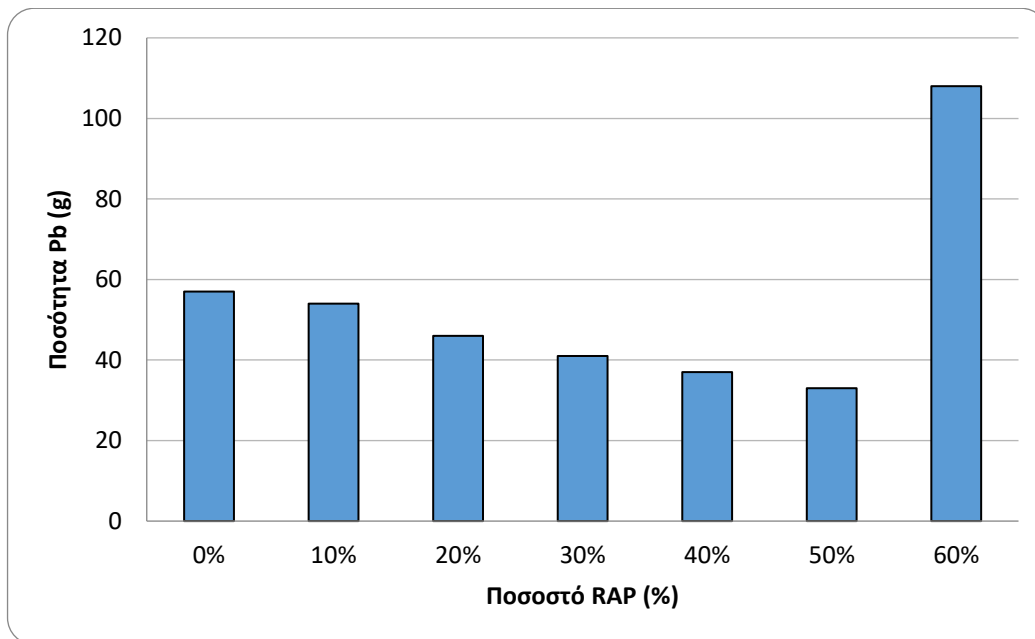
Εικόνα 6-11: Επικίνδυνα Απόβλητα (kg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 1)

Οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) παρουσίασαν μείωση από 514 kg (0% RAP) σε 447 kg (40% RAP) και 443 kg (50% RAP) στο Σενάριο 1, γεγονός που συνδέεται άμεσα με τον περιορισμό της καύσης ντίζελ στους κινητήρες των βαρέων οχημάτων (Εικόνα 6-6). Ιδιαίτερη σημασία έχει η μείωση των αιωρούμενων σωματιδίων (PM_{10}), η οποία αγγίζει το 48%, καθώς η αποφυγή των διαδικασιών θραύσης στα λατομεία και η μείωση της κίνησης φορτηγών σε μη ασφαλοστρωμένες οδούς πρόσβασης περιορίζουν τη σκόνη που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα (Εικόνα 6-7). Επιπλέον, η κατανάλωση νερού μειώθηκε δραστικά από 385 kg σε 237 kg (-38,4%) και 205 kg (-46,8%), καθώς η επεξεργασία του RAP απαιτεί λιγότερη διαβροχή σε σχέση με την παραγωγή φυσικών αδρανών (Εικόνα 6-8). Η αξιολόγηση της τοξικότητας έδειξε ότι οι καρκινικοί (Εικόνα 6-9) και μη καρκινικοί ρύποι (Εικόνα 6-10) παραμένουν εντός ασφαλών ορίων για το βέλτιστο εύρος, ωστόσο παρατηρείται μια αύξηση των επικίνδυνων αποβλήτων στα σενάρια αστοχίας, όπου οι ποσότητες φτάνουν τα 9.098 kg (Εικόνα 6-11). (Butt et al., 2020).

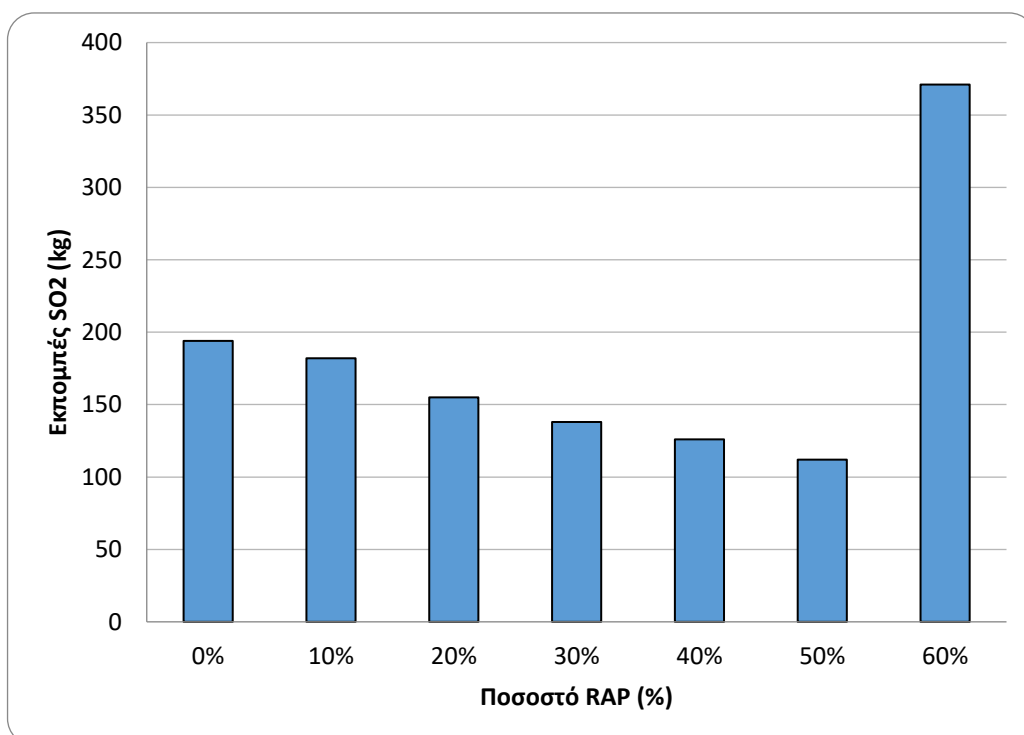
Τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής για εκπομπές CO (kg), την ποσότητα Pb (kg) και τις εκπομπές SO₂ παρουσιάζονται στην Εικόνα 6-12, Εικόνα 6-13 και Εικόνα 6-14 αντίστοιχα.



Εικόνα 6-12: Εκπομπές CO (kg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 1)



Εικόνα 6-13: Ποσότητα Pb (kg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 1)



Εικόνα 6-14: Εκπομπές SO2 (kg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 1)

Στις εκπομπές CO(kg) παρατηρείται μείωση από τα 277 kg ,για ποσοστό RAP 0%, στα 196 kg και 181 kg, για ποσοστά 40% και 50% (Εικόνα 6-12). Αντίστοιχα, η ποσότητα Pb (kg) από τα 57 kg μειώνεται στα 37 kg (40% RAP) και 33 kg (50% RAP), ενώ για ποσοστό RAP 60% φτάνει στα 108

kg (Εικόνα 6-13). Τέλος, οι εκπομπές SO₂ παρουσιάζουν μια μεταβολή κατά (-35%) ,για ποσοστό RAP 40%, και (-42%) , για 50% RAP (Εικόνα 6-14) .

6.3.2 Σενάριο 2: Ενισχυμένη Διατομή

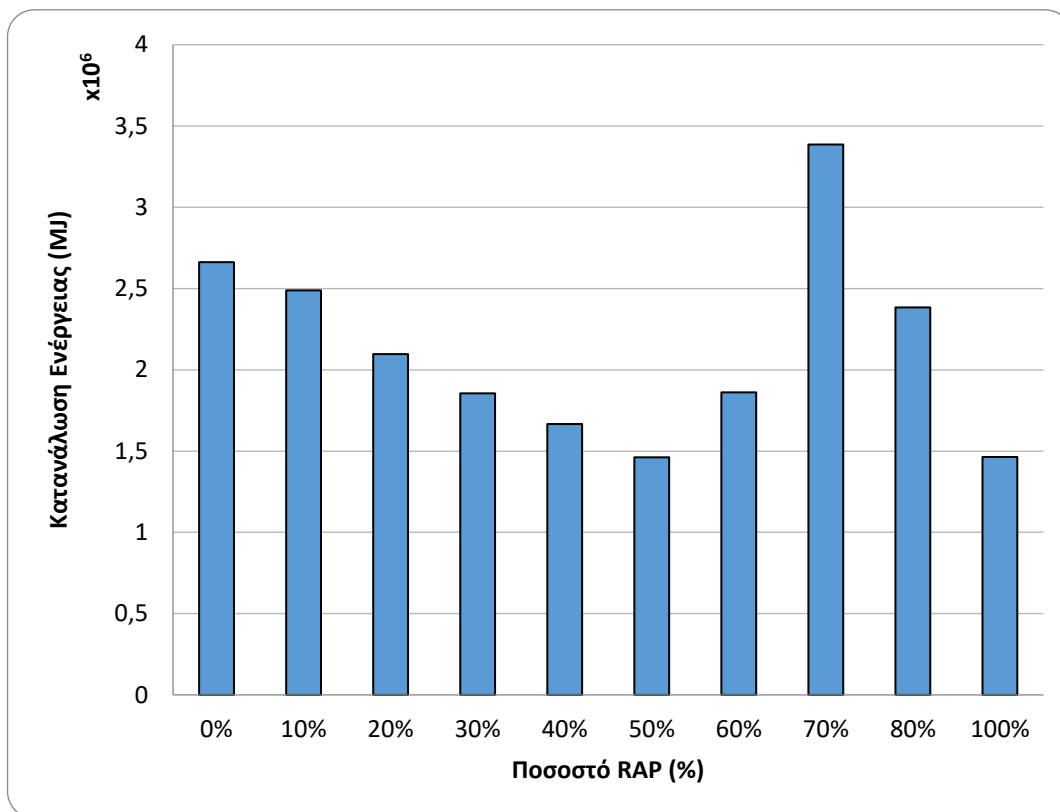
Στον Πίνακα 6-4 παρουσιάζονται τα περιβαλλοντικά αποτελέσματα του Σεναρίου 2, στο οποίο εξετάστηκε η επίδραση υψηλότερων ποσοστών ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού στη στρώση βάσης του οδοστρώματος. Για τη διερεύνηση ποσοστών RAP μεγαλύτερων του 60%, κρίθηκε απαραίτητη η ενίσχυση της διατομής, ώστε να διασφαλιστεί η δομική της επάρκεια και να καταστεί εφικτή η συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών συνθέσεων.

Πίνακας 6-4: Συγκεντρωτικά Περιβαλλοντικά Αποτελέσματα Σεναρίου 2 (Ενισχυμένη Διατομή)

Μίγμα (RAP/V)	Ενέργεια (MJ)	Νερό (kg)	CO ₂ - GWP (Mg)	NO _x (kg)	PM ₁₀ (kg)	Επικ. Απόβλητα (kg)
0% / 100%	2.662.318	374	189	498	2.640	3.579
10% / 90%	2.488.643	348	178	497	2.453	3.449
20% / 80%	2.096.512	292	153	451	2.051	3.013
30% / 70%	1.855.207	257	138	435	1.797	2.786
40% / 60%	1.666.427	229	126	433	1.593	2.645
50% / 50%	1.461.631	199	114	430	1.374	2.485
60% / 40%	1.861.159	250	151	637	1.706	3.462
70% / 30%	3.385.988	446	291	1.410	2.981	7.135
80% / 20%	2.383.830	302	225	1.304	1.949	6.058
100% / 0%	1.463.525	106	278	2.859	203	10.546

Πρωτογενής Ενεργειακή Ζήτηση και Ενεργειακό Ισοζύγιο

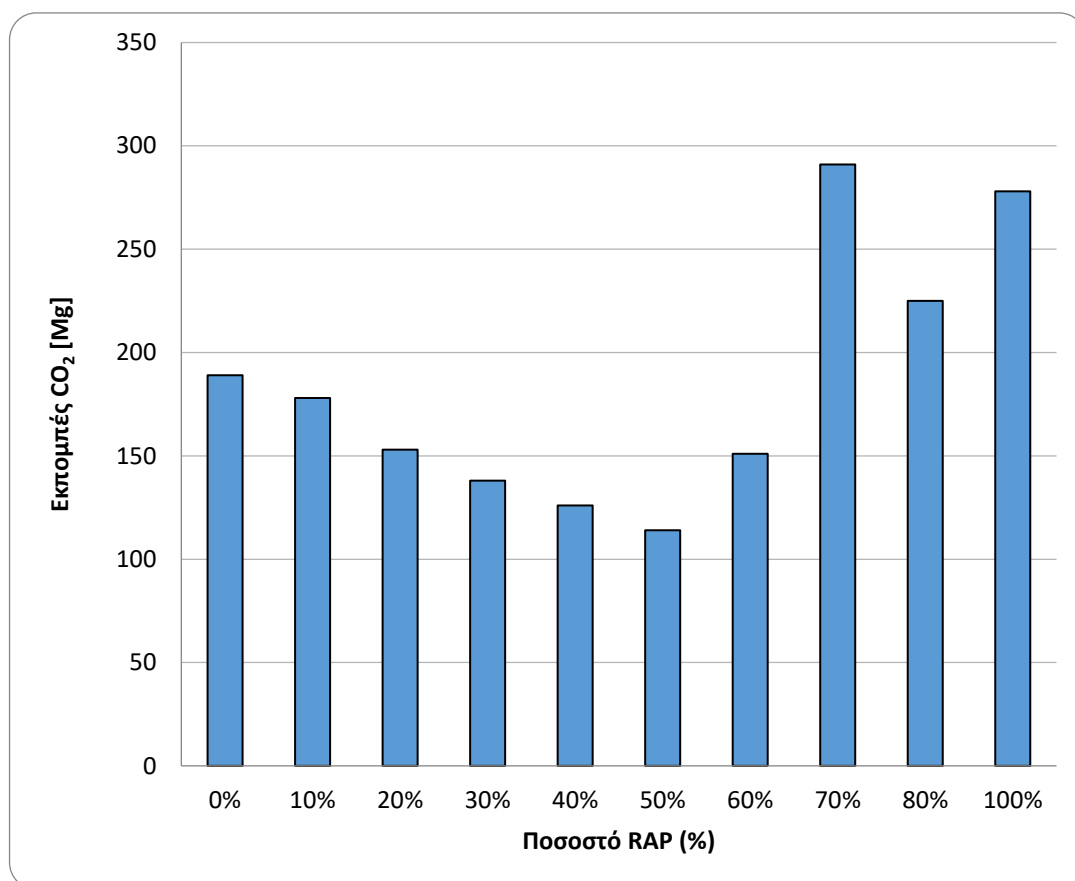
Στο Σενάριο 2, η ενεργειακή συμπεριφορά παρουσιάζει παρόμοια χαρακτηριστικά, με την κατανάλωση να μειώνεται από τα 2.662.318 MJ (0% RAP) στα 1.461.631 MJ (50% RAP). Παρατηρείται ότι η ενίσχυση των ασφαλικών στρώσεων επιτρέπει τη διατήρηση χαμηλής ενεργειακής ζήτησης έως και το 60% RAP (1.861.159 MJ), ωστόσο η πλήρης υποκατάσταση (100% RAP) οδηγεί σε μια τιμή 14.635.250 MJ (Εικόνα 6-15). Η σύγκριση των δύο σεναρίων αναδεικνύει ότι το Σενάριο 1 παραμένει ενεργειακά προτιμότερο, καθώς η παραγωγή της επιπλέον ασφάλτου στο Σενάριο 2 απαιτεί υψηλότερα ποσά ενέργειας διεργασιών και πρώτης ύλης (Yang et al., 2015).



Εικόνα 6-15: Κατανάλωση Ενέργειας συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 2)

Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη (GWP)

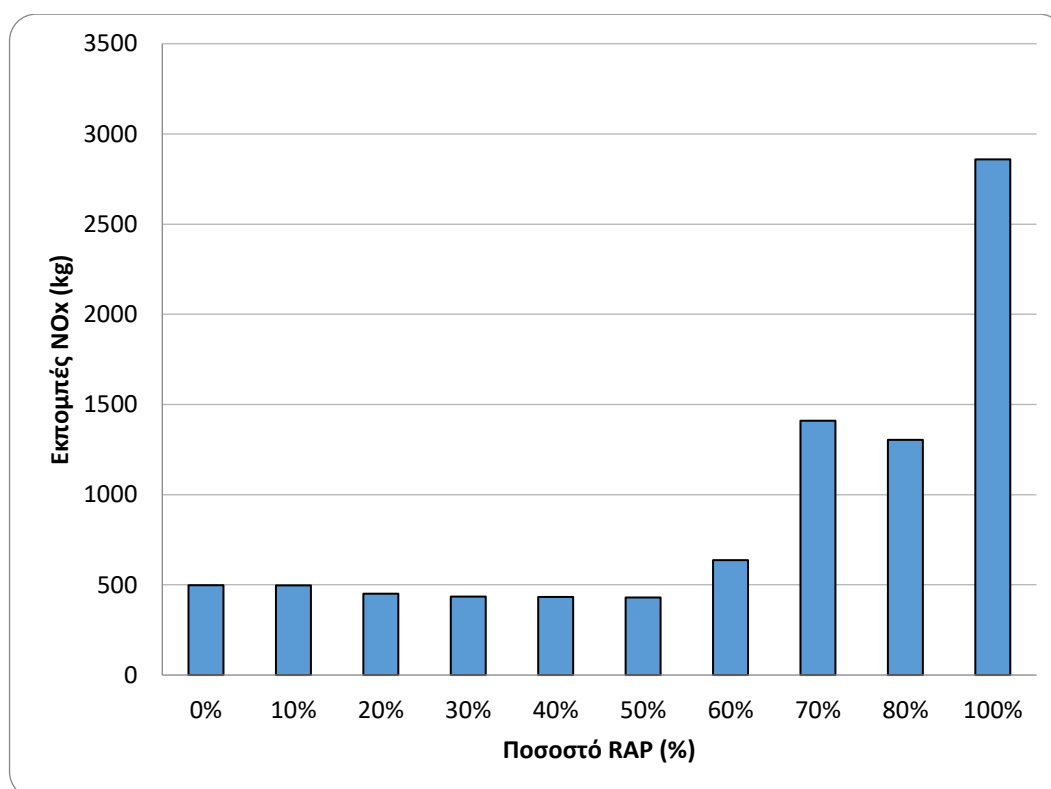
Στο Σενάριο 2, οι εκπομπές μειώνονται από τα 189 Mg (0% RAP) στα 126 Mg (40% RAP) και 114 Mg (50% RAP), δηλαδή κατά 33,3% και 69,7% αντίστοιχα, ενώ για 60% RAP φτάνουν μια τιμή 151 Mg (Εικόνα 6-16). Η χρήση του RAP μετατρέπει το εργοτάξιο σε μια αυτόνομη μονάδα παραγωγής πόρων, εξαλείφοντας τους ρύπους χιλιάδων δρομολογίων φορτηγών που θα απαιτούνταν για την προμήθεια φυσικών αδρανών από απομακρυσμένες περιοχές.



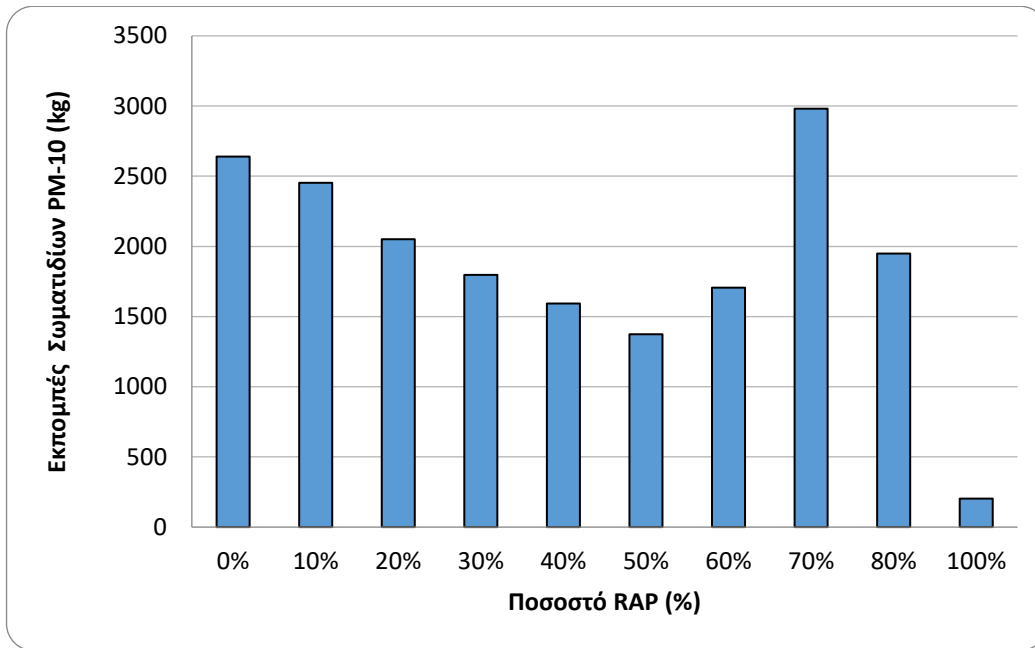
Εικόνα 6-16: Εκπομπές CO₂(Mg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 2)

Ατμοσφαιρικοί Ρύποι και Τοπικές Επιπτώσεις

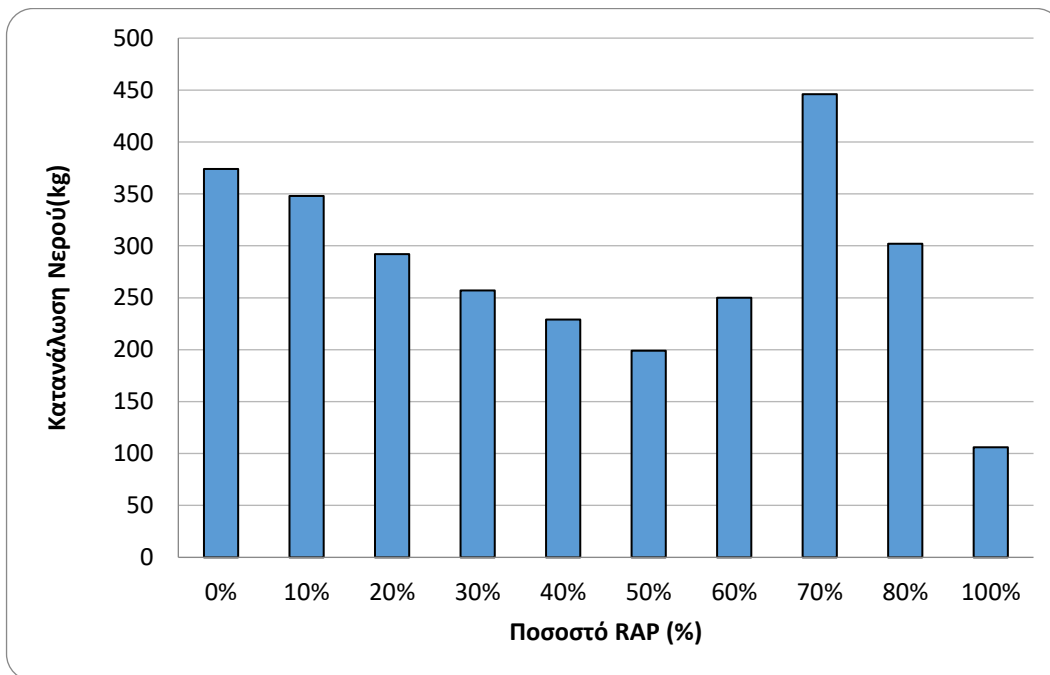
Οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) παρουσιάζουν μείωση με την αύξηση του ποσοστού RAP, από 498 kg στη συμβατική λύση (0% RAP) σε 433 kg, για 40% RAP και 430 kg, για 50% RAP, ωστόσο φτάνουν στα 637 kg, για 60% RAP (Εικόνα 6.17). Αντίστοιχη τάση παρατηρείται και στα αιωρούμενα σωματίδια (PM-10), των οποίων η ποσότητα μειώνεται από 2.640 kg σε 1.593 kg, για 40% RAP, και 1.374 kg, για 50% RAP, ενώ για 60% οι εκπομπές είναι 1.706 kg (Εικόνα 6.18). Παράλληλα, η κατανάλωση νερού εμφανίζει σημαντική μείωση της τάξης του 38,7%–46,8%, από 374 kg στα 229 kg και 199 kg, για ποσοστά RAP 40% και 50% αντίστοιχα. Σε ποσοστό RAP 60%, προσεγγίζει μια τιμή 250 kg (Εικόνα 6.19). Οι καρκινικοί (Εικόνα 6-20) και οι μη καρκινικοί ρύποι (Εικόνα 6-21) παραμένουν εντός αποδεκτών ορίων, ωστόσο, η παραγωγή επικίνδυνων αποβλήτων, στο σενάριο 100% προσθήκης RAP, αυξάνεται σημαντικά, φτάνοντας τα 10.546 kg (Εικόνα 6-22), υπογραμμίζοντας την ανάγκη προσεκτικού σχεδιασμού για την αποφυγή περιβαλλοντικών κινδύνων.



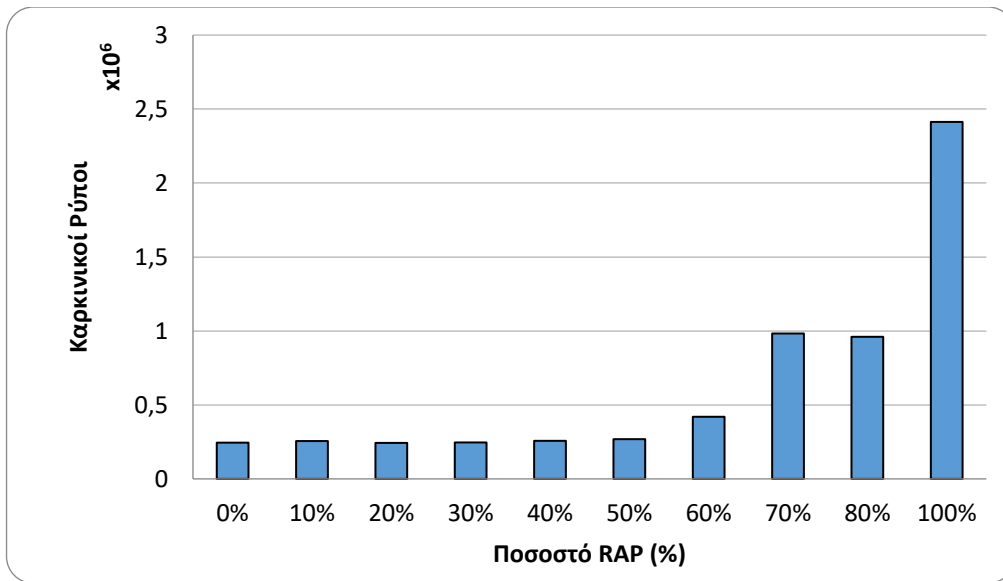
Εικόνα 6-17: Εκπομπές NO_x (kg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 2)



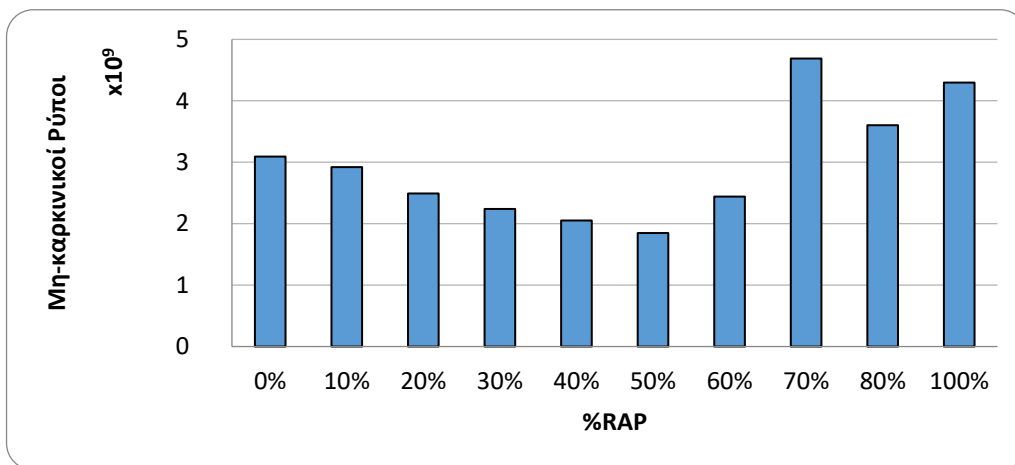
Εικόνα 6-18: Εκπομπές Σωματιδίων PM-10 (kg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 2)



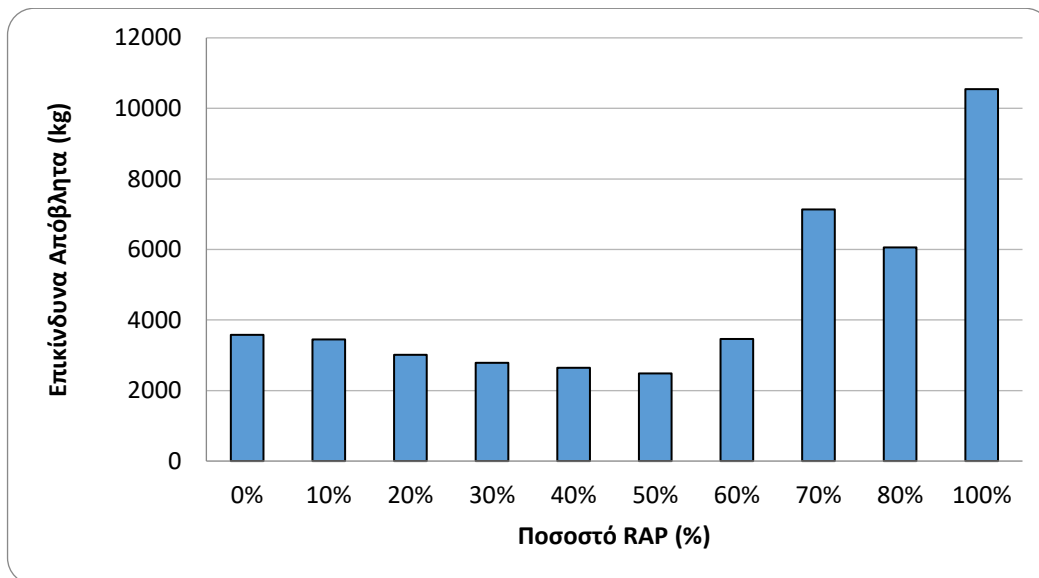
Εικόνα 6-19: Κατανάλωση Νερού συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 2)



Εικόνα 6-20: Καρκινικοί Ρύποι συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 2)

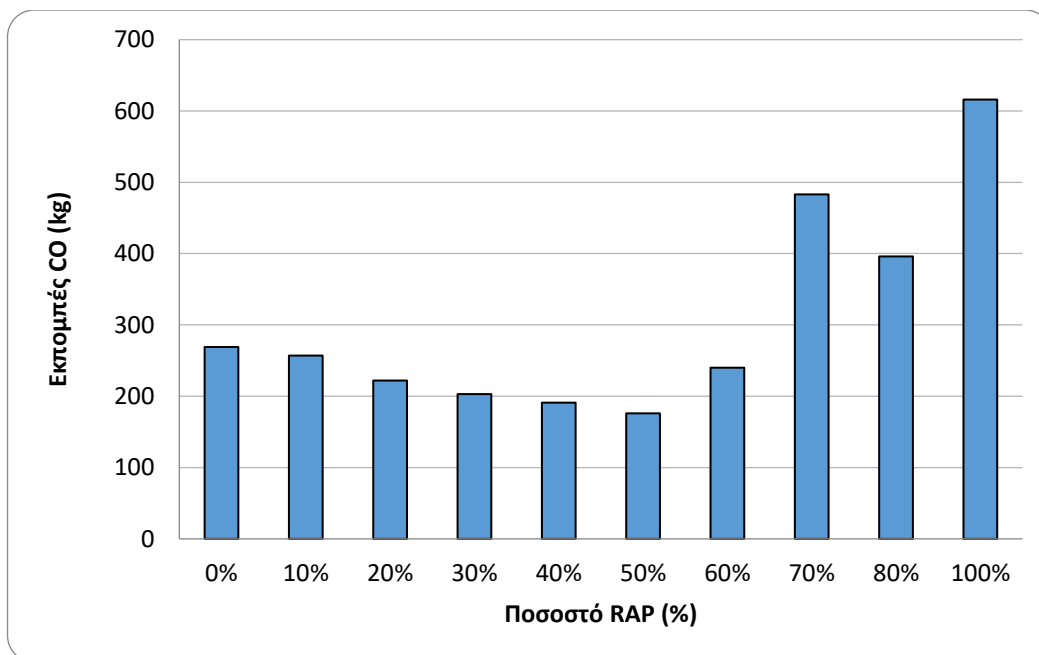


Εικόνα 6-21: Μη-καρκινικοί Ρύποι συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 2)

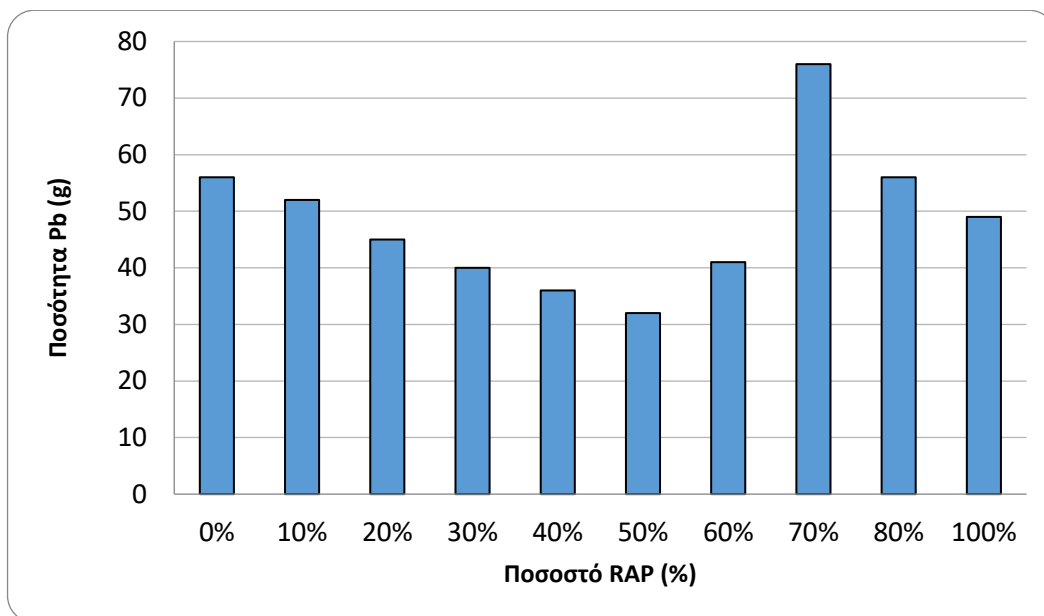


Εικόνα 6-22: Επικίνδυνα Απόβλητα (kg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 2)

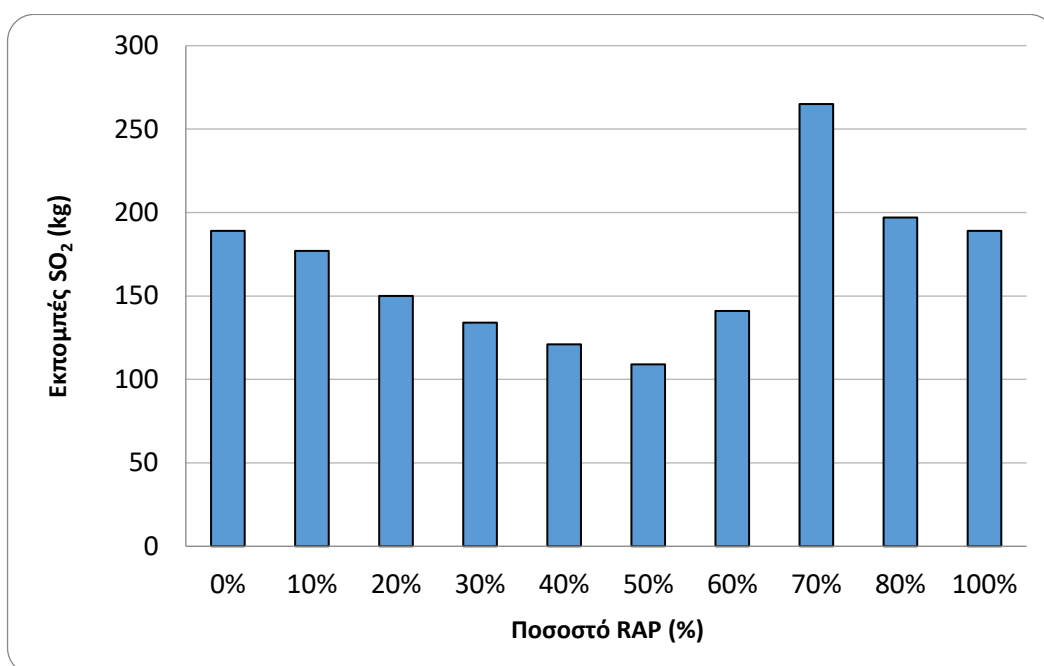
Τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής για εκπομπές CO (kg), την ποσότητα Pb (kg) και τις εκπομπές SO₂ παρουσιάζονται στην Εικόνα 6-23, Εικόνα 6-24 και Εικόνα 6-25 αντίστοιχα.



Εικόνα 6-23: Εκπομπές CO (kg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 2)



Εικόνα 6-24: Ποσότητα Pb (g) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 2)



Εικόνα 6-25: Εκπομπές SO₂ (kg) συναρτήσει του ποσοστού RAP (Σενάριο 2)

Στις εκπομπές CO παρατηρείται σταδιακή μείωση με την αύξηση του ποσοστού RAP, από 269kg, για 0% RAP, σε 191 kg και 176 kg, για 40% και 50% RAP αντίστοιχα, και σε 240 kg, για 60% (Εικόνα 6-23). Παρόμοια τάση εμφανίζεται στις εκπομπές Pb, οι οποίες μειώνονται από 56 kg στο σενάριο αναφοράς σε 36 kg, για 40% RAP, και 32 kg, για 50% RAP, ενώ για 60% RAP παρουσιάζουν μια μικρή αύξηση, συγκριτικά με τις τιμές για τα προηγούμενα ποσοστά (Εικόνα 6-24). Οι εκπομπές SO₂ παρουσιάζουν επίσης σημαντική μείωση, κατά 36%, για 40% RAP, 42%, για 50% RAP και 25% για 60% RAP (Εικόνα 6-25), υπογραμμίζοντας τη θετική επίδραση της ενσωμάτωσης ανακυκλωμένων υλικών στις περιβαλλοντικές επιδόσεις του οδοστρώματος.

7 Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

7.1 Σύνοψη Αποτελεσμάτων

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας διερευνήθηκε η επίδραση της πρόσμιξης RAP ως ασύνδετο υλικό στρώσης βάσης σε εύκαμπτο ασφαλτικό οδόστρωμα διαδρόμου προσγείωσης/απογείωσης αεροδρομίου, τόσο από δομική πλευρά όσο και από άποψη περιβαλλοντικής επιβάρυνσης της κατασκευής. Μέσα από τη συνδυαστική εφαρμογή της μεθοδολογίας της FAA και της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA), κατέστη δυνατή η χαρτογράφηση της συμπεριφοράς της διατομής υπό ένα ευρύ φάσμα ποσοστών χρήσης RAP, αναδεικνύοντας τη μη γραμμική φύση των ωφελειών που προκύπτουν από την κυκλική οικονομία. Διαπιστώθηκε ότι η χρήση RAP επιφέρει μια ουσιαστική μεταβολή στη δομική απόκριση του οδοστρώματος, η οποία ωστόσο οριοθετείται αυστηρά από τη συμπεριφορά του ασφαλτικού συνδέσμου. Η έρευνα απέδειξε ότι η βιωσιμότητα ενός έργου αεροδρομίου δεν αποτελεί μια στατική ιδιότητα, αλλά μια δυναμική συνάρτηση που εξισορροπεί την αποφυγή εξόρυξης φυσικών πόρων με τις αυξημένες κατασκευαστικές απαιτήσεις που επιβάλλει η μηχανική εξασθένιση των ανακυκλωμένων υλικών σε υψηλά ποσοστά ανάμιξης (Federal Aviation Administration, 2021).

Κεντρικό εύρημα της αξιολόγησης των εργαστηριακών δεδομένων αποτέλεσε το παράδοξο της «δομικής εξασθένισης» του ελληνικού RAP, καθώς διαπιστώθηκε ότι το Μέτρο Ελαστικότητας (M_r) φτάνει τη μέγιστη τιμή στο 20% RAP (571 MPa) και ακολούθως υποχωρεί. Στην περίπτωση της πλήρους υποκατάστασης (100% RAP), η δυσκαμψία μειώθηκε στα 198 MPa, τιμή η οποία είναι σημαντικά χαμηλότερη από αυτή των συμβατικών αδρανών, μετατρέποντας τη στρώση βάσης σε ένα δομικά ανεπαρκές υπόστρωμα.

Η μηχανική αυτή συμπεριφορά οδήγησε στον προσδιορισμό ενός κρίσιμου σημείου μέσω των προσομοιώσεων με τη μέθοδο FAA στο FAARFIELD 2.1.1. Για το Σενάριο 1 (Τυπική Διατομή), η χρήση RAP έως 50% κρίθηκε τεχνικά αποδεκτή με πάχη βάσης περί τα 170 mm, ωστόσο η μετάβαση στο 60% RAP επέβαλε μια αύξηση του πάχους στα 670 mm προκειμένου να αντιμετωπιστεί η πρόωρη κόπωση των ασφαλτικών στρώσεων. Αντίστοιχα, το Σενάριο 2 (Ενισχυμένη Διατομή) λειτούργησε ως μηχανισμός αντιστάθμισης, επιτρέποντας τη χρήση ανακυκλωμένου υλικού έως και 60% με διαχειρίσιμο πάχος βάσης (255 mm). Παρ' όλα αυτά, η πλήρης υποκατάσταση (100% RAP) οδήγησε σε μη ρεαλιστικές σχεδιαστικές λύσεις πάχους 1,4 μέτρου, επιβεβαιώνοντας ότι η δομική αδυναμία του υλικού θέτει εμπόδια στην απεριόριστη ανακύκλωση, ανεξαρτήτως της ενίσχυσης των ασφαλτικών στρώσεων (Garg & Hayhoe, 2009).

Σε επίπεδο Ανάλυσης Κύκλου Ζωής με χρήση του λογισμικού PaLATE, τα αποτελέσματα τεκμηριώνουν μια δραστική μείωση του οικολογικού αποτυπώματος για το βέλτιστο εύρος του 40-50% RAP. Συγκεκριμένα, για το Σενάριο 1, οι μέσες εκπομπές GWP μειώθηκαν από τους 195 Mg CO₂ (0% RAP) στους 117 Mg CO₂ (50% RAP), σημειώνοντας μια βελτίωση της τάξεως του 40%, ενώ για το Σενάριο 2 μειώθηκαν από τους 189 Mg CO₂ (0% RAP) στους 114 Mg CO₂ (50% RAP), δηλαδή κατά 39,7%. Η μείωση αυτή αποδίδεται σχεδόν αποκλειστικά στον περιορισμό της εξόρυξης φυσικών αδρανών και στην εξάλειψη των ρύπων που σχετίζονται με τις μακρινές μεταφορές. Ωστόσο, η υπέρβαση του 60% οδήγησε σε εκτόξευση του αποτυπώματος άνθρακα, στο Σενάριο 1, στους 397 Mg CO₂, ενώ στο Σενάριο 2, σε ποσοστό RAP 70%, το αποτύπωμα

άνθρακα αυξήθηκε στους 291 Mg CO₂, γεγονός που αποδεικνύει ότι η υπερβολική ανακύκλωση μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή περιβαλλοντική επιβάρυνση εάν αγνοηθούν οι μηχανικοί περιορισμοί (Santero et al., 2011).

Συμπερασματικά, η εργασία τεκμηριώνει ότι η βιώσιμη ανάπτυξη των αεροπορικών υποδομών απαιτεί μια ολιστική θεώρηση που να ενσωματώνει τη μηχανική απόκριση των υλικών στον περιβαλλοντικό σχεδιασμό. Η υιοθέτηση του RAP στις στρώσεις βάσης, υπό την απαραίτητη προϋπόθεση της τήρησης του κρίσιμου ορίου πρόσμιξης 40-50%, αποτελεί την πλέον αποδοτική στρατηγική για την κατασκευή «πράσινων» ασφατικών οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Η στρατηγική αυτή προσφέρει μια ρεαλιστική οδό προς την κλιματική ουδετερότητα, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα τη δομική ακεραιότητα και τη λειτουργική αξιοπιστία των αερολιμένων σε ένα περιβάλλον αυξανόμενης έλλειψης φυσικών πόρων (Butt et al., 2020).

7.2 Περιορισμοί και Παραδοχές της Έρευνας

Παρά τα χρήσιμα συμπεράσματα, η παρούσα εργασία υπόκειται σε συγκεκριμένους περιορισμούς που απορρέουν από τη φύση της θεωρητικής μοντελοποίησης και των διαθέσιμων δεδομένων απογραφής. Η αναγνώριση αυτών των περιορισμών κρίνεται απαραίτητη για την ορθή ερμηνεία των αποτελεσμάτων και τον καθορισμό του βαθμού αβεβαιότητας που συνοδεύει τα εξαγόμενα συμπεράσματα, ιδιαίτερα κατά τη γενίκευσή τους σε διαφορετικά επιχειρησιακά περιβάλλοντα.

Αρχικά, τα εργαστηριακά δεδομένα του Μέτρου Ελαστικότητας προέρχονται από ένα μοναδικό σύνολο δειγμάτων RAP ελληνικής προέλευσης, γεγονός που σημαίνει ότι η γήρανση του συνδετικού και η κοκκομετρία των αδρανών αντικατοπτρίζουν τις τοπικές συνθήκες κλίματος και κατασκευής. Επομένως, η γενίκευση των αποτελεσμάτων σε διεθνές επίπεδο απαιτεί επαλήθευση με RAP διαφορετικής προέλευσης, ιδιαίτερα σε περιοχές με πιο ακραίες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις

Μια βασική παραδοχή της μελέτης αφορά τη θεώρηση των υλικών ως γραμμικά ελαστικών και ισότροπων μέσων στο πλαίσιο της Θεωρίας των Ελαστικών Στρώσεων (LET) στην οποία βασίζεται η Μέθοδος της FAA. Αν και η προσέγγιση αυτή αποτελεί το καθιερωμένο βιομηχανικό πρότυπο για τον σχεδιασμό αεροδρομίων, στην πραγματικότητα τα ασφατικά μίγματα με υψηλό RAP επιδεικνύουν σύνθετη ιξωδοελαστική συμπεριφορά, οι ιδιότητες των οποίων μεταβάλλονται σημαντικά ανάλογα με τη θερμοκρασία και τον ρυθμό φόρτισης, γεγονός που ενδέχεται να εισάγει αποκλίσεις σε ακραίες κλιματικές συνθήκες.

Επιπλέον, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής βασίστηκε στις βιβλιοθήκες δεδομένων του λογισμικού PaLATE, οι οποίες αντικατοπτρίζουν το τεχνολογικό επίπεδο και το ενεργειακό μίγμα των Ηνωμένων Πολιτειών, επιβάλλοντας προσοχή κατά τη γενίκευση των απόλυτων τιμών των ρύπων στην ελληνική αγορά.

Συγκεκριμένα, οι συντελεστές εκπομπών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη διύλιση της ασφάλτου ενδέχεται να διαφέρουν σημαντικά λόγω της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ελληνικό δίκτυο, ενώ η παλαιότητα του στόλου των φορτηγών οχημάτων στην Ελλάδα μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερες εκπομπές NO_x και σωματιδίων σε σχέση με τις προβλέψεις του μοντέλου. Επίσης, η μελέτη περιόρισε τα όρια του συστήματος στη φάση της

κατασκευής, παραλείποντας τη φάση χρήσης του οδοστρώματος και την επίδραση της τραχύτητας της επιφάνειας στην κατανάλωση καυσίμου των αεροσκαφών. (Hauschild et al., 2018).

7.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η παρούσα εργασία θέτει τις βάσεις για μια ολιστική προσέγγιση στον σχεδιασμό των υποδομών των αεροδρομίων, ωστόσο η πλήρης ενσωμάτωση του RAP απαιτεί την εκτέλεση ενός εκτεταμένου εργαστηριακού προγράμματος πειραματικής επαλήθευσης των μηχανικών παραμέτρων. Οι προτάσεις που ακολουθούν στοχεύουν στην επέκταση της γνώσης σε τρεις βασικούς άξονες: τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του RAP, την ολοκλήρωση της περιβαλλοντικής αξιολόγησης και τη διεθνή συνεργασία για την ανάπτυξη κοινών προτύπων βιωσιμότητας.

Στον άξονα της μηχανικής βελτίωσης, κρίνεται αναγκαία η διερεύνηση τεχνολογιών αναζωογόνησης (rejuvenation) του γηρασμένου συνδετικού που περιέχεται στο RAP. Η χρήση αναζωογονητικών πρόσθετων (rejuvenators) δύναται να αποκαταστήσει την ολκιμότητα της ασφάλτου, επιτρέποντας την ασφαλή χρήση υψηλότερων ποσοστών RAP χωρίς τη μεγάλη μείωση του Μέτρου Ελαστικότητας που παρατηρήθηκε στην παρούσα μελέτη. Επιπλέον, η ανάπτυξη υβριδικών μιγμάτων που συνδυάζουν RAP με πολυμερικά πρόσθετα ή ίνες ενίσχυσης ενδέχεται να προσφέρει τη δυνατότητα διατήρησης της δυσκαμψίας χωρίς την απώλεια της αντίστασης σε κόπωση.

Στον άξονα της περιβαλλοντικής ολοκλήρωσης, επιβάλλεται η επέκταση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής ώστε να περιλαμβάνει το πλήρες φάσμα του κύκλου ζωής του οδοστρώματος (cradle-to-grave), συμπεριλαμβανομένων των φάσεων συντήρησης, αποξέσεων και τελικής διάθεσης. Η μακροχρόνια παρακολούθηση των οδοστρωμάτων με RAP σε λειτουργικά αεροδρόμια θα επιτρέψει τη σύγκριση της πραγματικής διάρκειας ζωής με τις θεωρητικές προβλέψεις του FAARFIELD, αναδεικνύοντας κατά πόσον τα ανακυκλωμένα μίγματα απαιτούν συχνότερες επεμβάσεις που θα μπορούσαν να ακυρώσουν τα αρχικά περιβαλλοντικά οφέλη.

Στο πλαίσιο της διεθνούς συνεργασίας για την προώθηση βιώσιμων πρακτικών στα οδοστρώματα αεροδρομίων, προτείνεται η συστηματική διασύνδεση της παρούσας έρευνας με τις δραστηριότητες διεθνών οργανισμών. Η υλοποίηση πιλοτικών έργων σε επιλεγμένα ελληνικά αεροδρόμια, με την τεχνική υποστήριξη αυτών των οργανισμών, όπως η Διεθνής Ακαδημία Οδοστρωμάτων (Academy of Pavement Science and Engineering - APSE) θα επέτρεπε την επαλήθευση των θεωρητικών προβλέψεων υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η εγκατάσταση αισθητήρων παραμόρφωσης και θερμοκρασίας στις δοκιμαστικές διατομές θα παρέχει δεδομένα για την πραγματική μηχανική απόκριση των μιγμάτων RAP υπό την κυκλοφορία των αεροσκαφών, επιτρέποντας τη βαθμονόμηση των μοντέλων του FAARFIELD. Παράλληλα, η μακροχρόνια παρακολούθηση της κατάστασης του οδοστρώματος μέσω ετήσιων επιθεωρήσεων θα αποκαλύψει την εξέλιξη των ρηγματώσεων και των μόνιμων παραμορφώσεων (rutting) σε σχέση με τα συμβατικά οδοστρώματα, παρέχοντας απτά στοιχεία για την ανθεκτικότητα των ανακυκλωμένων λύσεων.

Επιπρόσθετα, η ψηφιοποίηση της κατασκευαστικής διαδικασίας μέσω της ενσωμάτωσης των δεδομένων LCA σε περιβάλλον Building Information Modeling (BIM) συνιστά μια αναγκαία ερευνητική κατεύθυνση για την κατασκευή βιώσιμων οδοστρωμάτων. Η ανάπτυξη «Ψηφιακών Διδύμων» (Digital Twins) του οδοστρώματος, τα οποία θα τροφοδοτούνται με δεδομένα από

έξυπνους αισθητήρες (smart sensors) παραμόρφωσης και θερμοκρασίας, θα επιτρέψει την παρακολούθηση του ανθρακικού αποτυπώματος σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η διασύνδεση προσφέρει τη δυνατότητα στους διαχειριστές να προβλέπουν την υπολειπόμενη δομική ζωή του RAP και να προγραμματίζουν επεμβάσεις συντήρησης με γνώμονα τη μεγιστοποίηση της περιβαλλοντικής αποδοτικότητας και την ελαχιστοποίηση των εκπομπών (Orella & Harvey, 2020).

Μια επιπλέον προοπτική για την υπέρβαση των περιορισμών που εντοπίστηκαν στην παρούσα μελέτη αφορά τη διερεύνηση της συνέργειας μεταξύ RAP και τεχνολογιών Θερμής Ανάμιξης Ασφάλτου (Warm Mix Asphalt - WMA). Ο συνδυασμός υψηλών ποσοστών RAP με WMA προσφέρει τη δυνατότητα περαιτέρω μείωσης του ενεργειακού αποτυπώματος κατά το στάδιο της παραγωγής στο εργοστάσιο, καθώς οι χαμηλότερες θερμοκρασίες ανάμιξης περιορίζουν την περαιτέρω οξείδωση του υλικού και μειώνουν δραστικά τις εκπομπές ρύπων και την κατανάλωση καυσίμου. Προτείνεται η εκπόνηση μιας συγκριτικής LCA μελέτης που θα αξιολογεί το περιβαλλοντικό όφελος αυτών των σύνθετων συστημάτων, λαμβάνοντας υπόψη την ενσωματωμένη ενέργεια των χημικών προσθέτων και την επίδρασή τους στη μακροπρόθεσμη ανθεκτικότητα του οδοστρώματος. Η έρευνα αυτή θα μπορούσε να οδηγήσει στην ανάπτυξη «υβριδικών» στρώσεων βάσης, όπου το RAP συνδυάζεται με άλλα ανακυκλωμένα υλικά, όπως το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα (RCA) ή βιομηχανικά παραπροϊόντα (Fly Ash), ενισχύοντας τη σταθερότητα της υποδομής σε αεροδρόμια μηδενικών αποβλήτων (Zaumanis et al., 2014).

Τέλος, η ανάγκη για προσαρμογή των υποδομών στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής επιβάλλει τη μελέτη της ανθεκτικότητας των ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων σε ακραία καιρικά φαινόμενα. Οι παρατεταμένοι καύσωνες και οι έντονες βροχοπτώσεις στη λεκάνη της Μεσογείου μεταβάλλουν το πεδίο των τάσεων και την κατάσταση υγρασίας στο εσωτερικό της οδοστρωσίας, επηρεάζοντας άμεσα τη φέρουσα ικανότητα της βάσης RAP. Μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες οφείλουν να ενσωματώσουν κλιματικά σενάρια (IPCC models) στις προσομοιώσεις του FAARFIELD, αξιολογώντας κατά πόσον η αυξημένη δυσκαμψία του ανακυκλωμένου υλικού προσφέρει πλεονέκτημα στην αποφυγή τροχοαυλάκωσης υπό συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών. Η ολιστική αυτή προσέγγιση θα διασφαλίσει ότι η στροφή προς την κυκλική οικονομία δεν θα αποτελέσει απλώς μια περιβαλλοντική παρέμβαση, αλλά μια στρατηγική ενίσχυσης της ανθεκτικότητας και της λειτουργικής αξιοπιστίας των αεροπορικών μεταφορών για τον 21ο αιώνα (Butt et al., 2019).

8 Βιβλιογραφία

Abouelsaad, A., White, G. and Jamshidi, A., 2024. *State of the Art Review of Ageing of Bituminous Binders and Asphalt Mixtures: Ageing Simulation Techniques, Ageing Inhibitors and the Relationship between Simulated Ageing and Field Ageing*. *Infrastructures*, 9(1), Article 8.

ACI Europe, 2023. *Net Zero 2050: The airport industry's commitment to climate action*. Brussels: Airports Council International Europe.

Al-Qadi, I.L., Aurangzeb, Q., Carpenter, S.H., Pine, W.J. and Trepanier, J., 2012. *Impact of High RAP Content on Structural and Performance Properties of Asphalt Mixtures*. Research Report FHWA-ICT-12-002. Rantoul, IL: Illinois Center for Transportation.

Al-Qadi, I.L., Ozer, H., Lambros, J., El Khatib, A., Singhvi, P., Khan, T., Rivera-Perez, J. and Doll, B., 2019. *Testing Protocols to Ensure Performance of High Asphalt Binder Replacement Mixes Using RAP and RAS*. Report No. ICT-15-017. Rantoul, IL: Illinois Center for Transportation.

Aurangzeb, Q., Al-Qadi, I.L. and Ozer, H., 2014. 'Impact of High RAP Content on Structural and Performance Properties of Asphalt Mixtures'. *Frontiers in Structural and Civil Engineering*, 8(2), pp. 135-146.

Babashamsi, P. M. (2016). *Sustainable development factors in pavement life-cycle: highway/airport review*. *Sustainability*, 8(3), 248.

Barker, W.R. and Gonzalez, C.R., 2006. *Pavement Design and Evaluation*. Report No. ERDC/GSL TR-06-12. Vicksburg, MS: U.S. Army Corps of Engineers.

Berry, F., Hernandez, S. and Scullion, T., 2022. 'Sustainable Pavement Evaluation Practices in Airport Infrastructure'. *Transportation Research Record*, 2676(4), pp. 45-56.

Burmister, D.M., 1943. 'The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Applications to the Design of Airport Runways'. *Proceedings of the Highway Research Board*, 23.

Burmister, D.M., 1945. 'The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems'. *Journal of Applied Physics*, 16(2), pp. 89-94.

Butt, A.A., Birgisson, B. and Kringos, N., 2016. 'Optimizing the sustainable development of pavement infrastructures through Life Cycle Assessment'. *Road Materials and Pavement Design*, 17, pp. 1-15.

Butt, A.A., Birgisson, B. and Kringos, N., 2020. 'Optimizing the sustainable development of pavement infrastructures through Life Cycle Assessment'. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120135.

Butt, A.A., Harvey, J., Saboori, A., Ostovar, M. and Bejarano, M., 2019. *Resilience of Pavement Infrastructures to Climate Change*. Cham: Springer.

Copeland, A., 2011. *Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice*. Reference Number FHWA-HRT-11-021. McLean, VA: Federal Highway Administration.

European Commission, 2020. *Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe*. Brussels: EC.

Federal Aviation Administration (FAA), 2016. *Airport Pavement Design and Evaluation*. Advisory Circular 150/5320-6F. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation.

Federal Aviation Administration (FAA), 2021. *Advisory Circular 150/5320-6G: Airport Pavement Design and Evaluation*. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation.

Federal Aviation Administration (FAA), 2021. *Advisory Circular 150/5370-10H: Standard Specifications for Construction of Airports*. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation.

Federal Aviation Administration (FAA), 2023. *FAARFIELD 2.1.1 User's Manual*. Atlantic City: William J. Hughes Technical Center.

Fraport Greece, 2023. *Sustainability Report 2022: Developing the Future of Greek Regional Airports*. Athens.

Fogarty, A. &. (2020). *Durability and Sustainability of Pavement Quality Concrete in Airfields*.

Garg, N. and Hayhoe, G.F., 2009. *Overview of FAA's Comprehensive Airport Pavement Design Software FAARFIELD*. Atlantic City: FAA William J. Hughes Technical Center.

Garg, N. and Marsey, W.H., 2002. *Comparison Between FE and LEA Computed Pavement Responses for NAPTF Test Sections*. Atlantic City: FAA William J. Hughes Technical Center.

Guinée, J.B. et al., 2002. *Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Hauschild, M.Z., Rosenbaum, R.K. and Olsen, S.I., 2018. *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham: Springer International Publishing.

Heukelom, W. and Klomp, A.J.G., 1962. 'Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction'. *Proceedings of the International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, MI, pp. 667-679.

Horvath, A., 2004. *PaLATE User Manual: Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects*. Berkeley, CA: Consortium on Green Design and Manufacturing.

Huang, Y.H., 2004. *Pavement Analysis and Design*. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.

IATA, 2023. *Global Outlook for Air Transport: Recovery and Beyond*. Geneva: International Air Transport Association.

IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press.

ISO, 2006. *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework (ISO 14040:2006)*. Geneva: International Organization for Standardization.

ISO, 2006. *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines (ISO 14044:2006)*. Geneva: International Organization for Standardization.

Jialin Zhang, T. S. (2022). *Maximizing the Application of RAP in Asphalt Concrete and Its Long-Term Performance: A Review*. Basel, Switzerland. doi:<https://doi.org/10.3390/polym14214736>

Jones, R. and Brown, L., 2023. 'Life Cycle Assessment of Airport Infrastructure: A review of current practices'. *Journal of Sustainable Infrastructure*, 12(1), pp. 88-102.

Mallick, R.B. and El-Korchi, T., 2013. *Pavement Engineering: Principles and Practice*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press.

McDaniel, R.S. and Anderson, R.M., 2001. *Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual*. NCHRP Report 452. Washington, D.C.: National Academy Press.

Meneses, S. V. (2009). *Alternative decision-aid tool for pavement management*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport*, 162(1), pp. 3–17. <https://doi.org/10.1680/tran.2009.162.1.3>.

Miner, M.A., 1945. 'Cumulative Damage in Fatigue'. *Journal of Applied Mechanics*, 12(3), pp. A159-A164

Montepara A., T. G. (2012). Effect on Pavement Performance of a Subbase Layer Composed by Natural Aggregate and RAP. *SIIV - 5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures*. Elsevier Ltd.

Orella, J. and Harvey, J.T., 2020. *Life Cycle Assessment of Airfield Pavements: Methodology and Case Studies*. Report No. DOT/FAA/TC-20/12. Washington, D.C.: Federal Aviation Administration.

Papadimitriou, G., 2023. *Recycled Materials in Pavement Construction: A Review of Greek and International Standards*. Athens: NTUA Press.

Pittenger, D. M. (2014). *Sustainable Airport Pavements*. In *Climate Change, Energy, Sustainability and Pavements* (pp. 353-371). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Santero, N.J., Masanet, E. and Horvath, A., 2011. 'Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review'. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9-10), pp. 801-809.

SKG (Thessaloniki Airport), 2023. *Annual Aeronautical Data and Infrastructure Report*. Thessaloniki: Fraport Greece.

Smith, J., Miller, R. and Taylor, K., 2022. 'Quantifying the environmental benefits of high-RAP mixtures in airfield pavements'. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(11), pp. 3845-3859.

Soleimani, S. M. (2021). Incorporation of recycled tire products in pavement-grade concrete: An experimental study. *Crystals*, 11(2), 161. <https://doi.org/10.3390/cryst11020161> .

United Nations. (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development*

Witczak, M.W., 2003. *Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design*. NCHRP Project 1-28A. Washington, D.C.: Transportation Research Board.

Yang, R., Kang, S., Ozer, H. and Al-Qadi, I.L., 2015. 'Environmental and economic analyses of recycled asphalt concrete mixtures based on material production and construction'. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, pp. 141-151.

Zaumanis, M., Mallick, R.B., Poulikakos, L. and Frank, R., 2014. 'Influence of Six Rejuvenators on the Performance Properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Binder and 100% Recycled Asphalt Mixtures'. *Construction and Building Materials*, 71, pp. 538-550.