



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«Σύγχρονες Τεχνολογίες Διαχείρισης Περιβαλλοντικών Κινδύνων»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

**«ΕΝΔΟΓΕΝΕΙΣ ΚΑΙ ΕΞΩΓΕΝΕΙΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ
ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ»**

Ονοματεπώνυμο Φοιτήτριας: Παράσχου Θεοδώρα

ΑΓΜ: ΜΟ61922007

Επιβλέπων Καθηγητής: Παπαγεωργίου Γρηγόρης

Βόλος, Οκτώβριος, 2023

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 16/10/2023.

Επιβλέπω: Παπαγεωργίου Γρηγόρης Ιδιότητα Επιβλέποντος

Αν καθηγητής Πανεπιστημίου

Βόλος, 10/2023

Παρασχου Θεοδώρα

Ονοματεπώνυμο Συγγραφέα

Ιδιότητα Μεταπτυχιακή φοιτήτρια

Copyright © Ονοματεπώνυμο Συγγραφέα, Παρασχου Θεοδώρα ,2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στο συγγραφέα.

Το περιεχόμενο της διπλωματικής εργασίας εκφράζει τις απόψεις του/της συγγραφέα και ουδεμία ευθύνη για το περιεχόμενο φέρουν ο επιβλέπων και η εξεταστική επιτροπή για αυτό.

Δ Η Λ Ω Σ Η Μ Η Λ Ο Γ Ο Κ Λ Ο Π Η Σ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπογράφως ότι είμαι αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας, για την ολοκλήρωση της οποίας κάθε βοήθεια είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στην εργασία αυτή.

Έχω αναφέρει πλήρως και με σαφείς αναφορές, όλες τις πηγές χρήσης δεδομένων, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών, είτε κατά κυριολεξία είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης.

Αναλαμβάνω την προσωπική και ατομική ευθύνη ότι σε περίπτωση αποτυχίας στην υλοποίηση των ανωτέρω δηλωθέντων στοιχείων, είμαι υπόλογος έναντι λογοκλοπής, γεγονός που σημαίνει αποτυχία στη Διπλωματική μου Εργασία και κατά συνέπεια αποτυχία απόκτησης του Μεταπτυχιακού Τίτλου των Μεταπτυχιακών Σπουδών, πέραν των λοιπών συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων.

Δηλώνω, συνεπώς, ότι αυτή η Μ.Δ.Ε. προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα προσωπικά και ότι, αναλαμβάνω πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής άλλης πνευματικής ιδιοκτησίας.

Ονοματεπώνυμο Συγγραφέα: Παράσχου Θεοδώρα

Υπογραφή:

Ημερομηνία:10/2023

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ *

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στο να φέρω σε πέρας την παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα της εργασίας αυτής, κ.Παπαγεωργίου Γρηγόρη για την πολύτιμη βοήθειά του και τη διαρκή υποστήριξή του.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση, βοήθεια και προ πάντων κατανόηση και ανοχή καθ' όλο το χρονικό διάστημα των σπουδών μου. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την μητέρα μου , που παρόλο των οικογενειακών της δυσκολιών ήταν εκεί για μένα πάντα όταν την χρειαζόμουν, χωρίς εκείνη δεν θα μπορούσα να ολοκληρώσω τις μεταπτυχιακές μου σπουδές.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	8
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
ΓΕΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	11
7.1 Λεπτή Επιφάνεια Μεμβράνη – Thin Membrane Surface)	25
2.1.1 Αρχικά μοντέλα πρόβλεψης θερμοκρασίας περιβάλλοντος στη θερμοκρασία του οδοστρώματος.....	38
2.3 Εσωτερικοί παράγοντες.....	41
2.3.1 Λευκάυγεια.....	41
2.3.2 Θερμική αγωγιμότητα	43
2.3.3 Θερμοχωρητικότητα.....	45
2.3.4 Εκπομπές.....	46
2.3.5 Σύγκριση επίδρασης εσωτερικών παραγόντων στην επιφάνεια του οδοστρώματος.....	47
2.4 Εξωτερικοί Παράγοντες	47
2.4.1 Θερμοκρασία αέρα.....	48
2.4.2 Ηλιακή Ακτινοβολία	49
2.4.3 Ταχύτητα ανέμου	51
2.4.4 Βροχή.....	53
2.4.5 Κυκλοφορία οχημάτων	54
2.4.6 Σκίαση οδοστρώματος από δέντρα.....	55
2.4.7 Υγρασία εδάφους.....	56
3.1 Επίστρωση και επεξεργασία επιφάνειας οδοστρώματος	58
3.2 Μέθοδοι σχεδιασμού.....	59
3.3 Υλικά που χρησιμοποιούνται.....	61
3.4 Μέθοδοι συλλογής ενέργειας.....	63

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Εισαγωγή: Η θερμοκρασία του οδοστρώματος είναι μία ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος η οποία επηρεάζει σε μεγάλο ποσοστό το κλίμα της γύρω περιοχής. Επίσης, καθορίζει τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος, την καταπόνηση των υλικών αλλά και τη πρόσφυση των οχημάτων πάνω σε αυτό, επηρεάζοντας με τον τρόπο αυτό την ασφάλεια. Η θερμοκρασία του οδοστρώματος επηρεάζεται τόσο από εξωτερικούς όσο και από εσωτερικούς παράγοντες. Οι εξωτερικοί παράγοντες είναι η ηλιακή ακτινοβολία (κύρια πηγή θερμότητας), η θερμοκρασία του αέρα (μεταφορά θερμότητας), η ταχύτητα του ανέμου (απαγωγή θερμότητας), οι βροχοπτώσεις (εξάτμιση) και η κυκλοφορία των οχημάτων (τριβή). Οι εσωτερικοί παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν το οδόστρωμα είναι η λευκαύγεια (απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας), η θερμική αγωγιμότητα (ρυθμός μεταφοράς θερμότητας), η θερμοχωρητικότητα (αποθήκευση θερμότητας) και η εκπομπές (απώλεια θερμότητας).

Σκοπός: Ο στόχος της διπλωματικής εργασίας που παρουσιάζεται, είναι η παροχή των πιο πρόσφατων βιβλιογραφικών δεδομένων σχετικά με τις επιδράσεις εξωτερικών και εσωτερικών παραγόντων που επηρεάζουν την επιφάνεια των ασφαλοστρωμένων δρόμων.

Μεθοδολογία: Διεξήχθη συστηματική βιβλιογραφική αναζήτηση στις βάσεις δεδομένων Scopus και Web of Science για τον εντοπισμό μελετών σχετικά με τη θερμική απόδοση ασφαλοστρώσεων. Οι σχετικές εργασίες επιλέχθηκαν με βάση προκαθορισμένα κριτήρια επιλεξιμότητας. Τα δεδομένα εξήχθησαν και συντέθηκαν για να αξιολογηθούν οι επιρροές των ως άνω παραγόντων στο οδόστρωμα.

Αποτελέσματα: Μεταξύ των παραγόντων που εξετάστηκαν, η λευκαύγεια έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στις μέγιστες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας τη μεγαλύτερη επίδραση στην ελάχιστη θερμοκρασία έχει η εκπομπή θερμότητας. Η θερμοκρασία του αέρα επηρεάζει σημαντικά τον ημερήσιο κύκλο θερμοκρασίας ενώ η ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζει τις παρατηρούμενες θερμοκρασιακές μεταβολές στις διάφορες εποχές. Σε σχέση με τις στρατηγικές για τον έλεγχο της θερμοκρασίας, επιτυχημένες είναι η αύξηση της εκπομπής μέσω χρήσης αντανάκλαστικών υλικών ή επικαλύψεων, η μείωση της θερμικής αγωγιμότητας μέσω

κατάλληλων υλικών και τοποθέτησης κενών αέρα. Τέλος, τα υλικά χαμηλής αγωγιμότητας ελαχιστοποιούν τη μεταφορά θερμότητας εντός του οδοστρώματος.

Συμπεράσματα: Η επιστημονική κοινότητα έχει μελετήσει εκτενώς πως επηρεάζεται η θερμοκρασία του οδοστρώματος μπορεί να επηρεαστεί από συγκεκριμένους εξωτερικούς και εσωτερικούς παράγοντες, ενώ έχει προτείνει και μεθοδολογίες για την αύξηση της θερμοκρασίας αυτής. Ωστόσο, δοκιμάζονται συνεχώς νέα υλικά για την κατασκευή οδοστρωμάτων, ενώ η κλιματική αλλαγή διαφοροποιεί τις περιβαλλοντικές συνθήκες έκθεσης των υλικών αυτών, κρίνεται απαραίτητη η συνεχής έρευνα στο συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο.

Λέξεις-κλειδιά: Οδόστρωμα; παράγοντες επιρροής, στα ελληνικά, εκπομπή, θερμική αγωγιμότητα, αστική θερμική νησίδα

ABSTRACT

Introduction: The temperature of the road surface is a particularly important parameter which affects to a large extent the climate of the surrounding area. It also determines the lifespan of the road surface, the strain on the materials and the adhesion of vehicles on it, thus affecting safety. The pavement temperature is affected by both external and internal factors. External factors are solar radiation (main heat source), air temperature (heat transfer), wind speed (heat dissipation), rainfall (evaporation) and vehicle traffic (friction). The internal factors affecting the pavement are luminescence (absorption of solar radiation), thermal conductivity (rate of heat transfer), heat capacity (heat storage) and emissivity (heat loss).

Aim: The aim of this thesis is to provide the latest literature data on the effects of external and internal factors affecting the surface of asphalt roads.

Methodology: A systematic literature search was conducted in the Scopus and Web of Science databases to identify studies on the thermal performance of asphalt pavements. Relevant papers were selected based on predefined eligibility criteria. Data were extracted and synthesized to assess the influences of the above factors on the pavement.

Results: Among the factors examined, luminescence has the greatest effect on maximum daytime temperatures, while during the night the greatest effect on minimum temperature is heat emission. Air temperature significantly affects the daily temperature cycle while solar radiation affects the observed temperature changes in the different seasons. In terms of temperature control strategies, increasing emissivity through the use of reflective materials or coatings, reducing thermal conductivity through appropriate materials, and placing air gaps have been successful. Finally, low-conductivity materials minimize heat transfer within the pavement.

Conclusions: The scientific community has extensively studied how the temperature of the pavement can be affected by specific external and internal factors, while it has also proposed methodologies to increase this temperature. However, new materials are constantly being tested for the construction of road surfaces, while climate change is differentiating the environmental exposure conditions of these materials, continuous research in this specific scientific field is deemed necessary.

Keywords: Road surface; influencing factors, in Greek, emission, thermal conductivity, urban heat island

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κατανομή της θερμοκρασίας είναι ένας σημαντικός περιβαλλοντικός παράγοντας που επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες των εύκαμπτων μιγμάτων ασφαλοστρώσεων και την υπάρχουσα ικανότητα των κατασκευών ασφαλικών οδοστρώματων (Arangi, 2015). Με απλούστερους όρους, η θερμοκρασία του οδοστρώματος αναφέρεται στις αλλαγές της θερμοκρασίας της επιφάνειας με την πάροδο του χρόνου λόγω των καιρικών συνθηκών και των ιδιοτήτων των υλικών οδοστρώματος (Nizetic, 2018). Οι καιρικές αυτές συνθήκες περιλαμβάνουν παράγοντες όπως η ηλιακή ανάκλαση, η θερμική αγωγιμότητα, η εκπομπή θερμότητας, η ειδική θερμότητα και η κατανομή της θερμοκρασίας στα υλικά του οδοστρώματος. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα ασφατικά μείγματα είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία, οδηγώντας σε διακυμάνσεις στην αντοχή και το μέτρο τους (Diefenderfer, 2002). Ως αποτέλεσμα, μπορεί να προκύψουν διαφορετικοί τύποι προβλημάτων σε οδοστρώματα όπου χρησιμοποιούνται τα υλικά αυτά ή μείγματα με βασικό χαρακτηριστικό την άσφαλτο, όπως δημιουργία ρωγμών σε χαμηλές θερμοκρασίες και η εμφάνιση αυλακώσεων σε υψηλές θερμοκρασίες (Milad, 2021).

Τα στρώματα ασφάλτου στους δρόμους, έχουν την ικανότητα να απορροφούν και να συκρατούν περισσότερη θερμότητα σε σύγκριση με τις φυσικές επιφάνειες, με αποτέλεσμα την εκπομπή υψηλών θερμοκρασιών στην ατμόσφαιρα και συμβάλλοντας στο φαινόμενο της αύξησης της θερμότητας, ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές. Για τον περιορισμό των αλλοιώσεων του οδοστρώματος λόγω μεταβολών στη θερμοκρασία, έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες στρατηγικές για την ψύξη ασφαλικών οδοστρώματων, όπως η χρήση προσθέτων και υλικών, επικαλύψεων επιφανειών και σχέδια στρώσεων (Li, 2012).

Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας μπορεί να συμβούν σε διαφορετικά τμήματα ενός ασφαλοστρώματος για διάφορους λόγους. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ηλιακή ακτινοβολία έχουν τον πιο σημαντικό αντίκτυπο στις αποκρίσεις του οδοστρώματος, ενώ η ταχύτητα του ανέμου και η υγρασία έχουν μικρότερη επίδραση στα υλικά αυτά (Wilson, 1976). Επομένως, αυτές η μελέτη και η παρακολούθηση αυτών των παραμέτρων θεωρείται απαραίτητη για την πρόβλεψη της

θερμοκρασίας του οδοστρώματος. Την τελευταία δεκαετία, έχουν γίνει αρκετές μελέτες σε διάφορες περιοχές με διαφορετικά κλίματα για την ανάπτυξη ακριβών μοντέλων πρόβλεψης της θερμοκρασίας οδοστρώματος (Adwan, 2021). Ωστόσο, ορισμένοι ερευνητές έχουν εκφράσει σημαντικές ανησυχίες σχετικά με την ακρίβεια των αλγορίθμων πρόβλεψης θερμοκρασίας για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του ασφαλικού οδοστρώματος (Salem, 2014). Επίσης, προβληματισμός έχει δημιουργηθεί σχετικά με την πρόβλεψη της επίδρασης των διαφορετικών αυτών παραγόντων στο οδόστρωμα, αφού οι παράγοντες που σχετίζονται με τη θερμοκρασία είναι πολυάριθμοι, μεταβάλλονται από περιοχή σε περιοχή και τα οδοστρώματα έχουν διαφορετική σύσταση, γεγονός που αποτρέπει την εξαγωγή γενικευμένων συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της θερμοκρασίας στο οδόστρωμα. Αυτό συνεπάγεται και αμφίβολα συμπεράσματα σχετικά με την ακαταλληλότητα των υλικών και τις συνέπειες αυτής στην ασφάλεια των οδηγών σε περιόδους ακραίων θερμοκρασιών (υψηλές και χαμηλές) κάτι το οποίο γίνεται όλο και συχνότερα εν μέσω της κλιματικής κρίσης (Andersson, 2011, Kwiatkowski, 2020).

Ο στόχος της πτυχιακής εργασίας είναι η παρουσίαση μιας των πιο πρόσφατων στοιχείων, όπως αυτά προκύπτουν από την τρέχουσα βιβλιογραφία, σχετικά με την επίδραση της θερμοκρασίας στα υλικά του οδοστρώματος, την περιγραφή μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση των ακραίων θερμοκρασιών, την διερεύνηση μοντέλων πρόβλεψης θερμοκρασίας και τους παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στη μεταβολή της θερμοκρασίας στο οδόστρωμα.

Το οδόστρωμα, είναι κατά κανόνα ένα ανθεκτικό υλικό που τοποθετείται σε μια περιοχή με σκοπό να υποστηρίξει την κίνηση οχημάτων ή πεζών, όπως δρόμους ή πεζοδρόμια. Στο παρελθόν, χρησιμοποιήθηκαν συνήθως διάφορα υλικά όπως χαλίκι, σκύρα, χόγκιν, λιθόστρωτα και γρανίτης, αλλά ως επί το πλείστον στη σύγχρονη οδοποιία, τα υλικά αυτά έχουν αντικατασταθεί από άσφαλτο ή σκυρόδεμα το οποίο τοποθετείται πάνω σε ένα συμπαγές υπόστρωμα. Η άσφαλτος χρησιμοποιείται για την κατασκευή εδώ και πολλά χρόνια και έχει διαχωρίσει τους δρόμους σε δύο βασικές κατηγορίες: οδοστρώματα με ασφαλτόστρωση και οδοστρώματα χωρίς ασφαλτόστρωση (Papagianakkis, 2008). Τα οδοστρώματα με ασφαλτόστρωση, έχουν σχεδιαστεί για να διαχειρίζονται το βάρος του οχημάτων και συνήθως χρησιμοποιούνται σε δρόμους με μεγάλη κυκλοφορία οχημάτων, ενώ τα οδοστρώματα χωρίς ασφαλτόστρωση, τα οποία είναι γνωστά σαν χωματόδρομοι, είναι πιο τραχείς επιφάνειες και

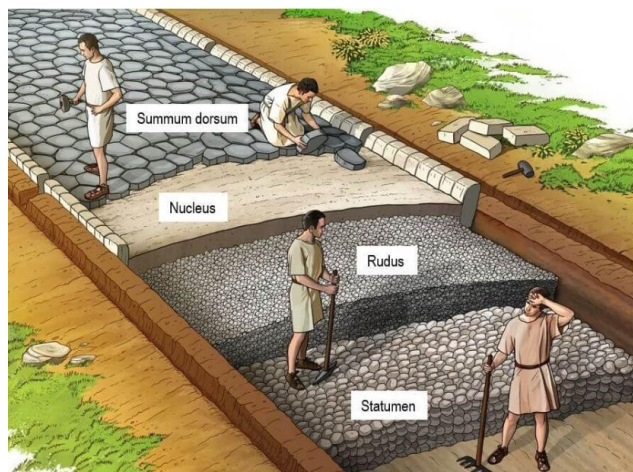
μπορούν να υποστηρίξουν λιγότερο βάρος. Οι επιφάνειες των δρόμων έχουν τις περισσότερες περιπτώσεις κάποια σήμανση για να παρέχουν καθοδήγηση στην κυκλοφορία (Elkins, 2003, Miller, 2003).

Σήμερα, οι μέθοδοι διαπερατής επίστρωσης έχουν ξεκινήσει να χρησιμοποιούνται για την κατασκευή οδοστρωμάτων και πεζοδρομίων χαμηλής κυκλοφορίας. Ο τύπος και οι ιδιότητες του οδοστρώματος είναι ιδιαίτερα σημαντικά για το σύνολο των ανεπτυγμένων χωρών, αφού το σύνολό τους βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις οδικές μεταφορές. Ως αποτέλεσμα, αρκετές μελέτες έχουν εστιάσει στη βελτίωση της διάρκειας ζωής οδοστρωμάτων διαφορετικού τύπου (Piryonesi, 2018).

2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Μετά την χρονική περίοδο της βιομηχανικής επανάστασης, η ανάπτυξη των τροχοφόρων μεταφορών απαιτούσε την κατασκευή καλύτερων δρόμων. Τα φυσικά υλικά, αν και είναι αρκετά μαλακά ώστε να δημιουργούν καλά διαβαθμισμένες επιφάνειες, δεν είναι αρκετά ισχυρά για να υποστηρίξουν τα τροχοφόρα οχήματα ενώ δεν είναι εύκολο να διατηρούνται ανέπαφα κατά την πάροδο του χρόνου, ειδικά όταν είναι βρεγμένα. Στις αστικές περιοχές ιδιαίτερα, από την αρχαιότητα ξεκίνησε η κατασκευή λιθόστρωτων δρόμων. Τα πρώτα στοιχεία για την κατασκευή πλακόστρωτων δρόμων χρονολογούνται από το 4000 π.Χ. στην Ουρ. Ιστορικά κείμενα αναφέρουν επίσης ότι δρόμοι από ξύλο χτίστηκαν στο Glastonbury της Αγγλίας γύρω στο 3300 π.Χ., ενώ πλακόστρωτοι δρόμοι κατασκευάστηκαν στον Πολιτισμό της κοιλάδας του Ινδού κατά την ίδια περίπου περίοδο. Η πρόοδος της μεταλλουργίας το 2000 π.Χ. έκανε τα εργαλεία κοπής πέτρας εύκολα διαθέσιμα στη Μέση Ανατολή και την Ελλάδα, επιτρέποντας την πλακόστρωση των τοπικών δρόμων. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι, γύρω στο 2000 π.Χ., οι Μινωίτες κατασκεύασαν έναν δρόμο με επίστρωση ο οποίος είχε συνολικό μήκος 50 χιλιομέτρων από την Κνωσό προς τη Γόρτυνα και τη Λέβena στη βόρεια Κρήτη, ο οποίος ήταν ανώτερος κατασκευαστικά από κάθε ρωμαϊκό δρόμο. Οι ρωμαϊκοί δρόμοι, από την άλλη πλευρά, κυμαίνονταν από απλούς χωμάτινους δρόμους μέχρι πλακόστρωτους δρόμους με βαθιά οδοστρώματα

όπου υπήρχαν αρκετές στρώσεις υλικών, προκειμένου να εξασφαλίζεται η σωστή αποστράγγιση και η αντοχή του οδοστρώματος στο χρόνο (Εικόνα 1) (Ejstrud, 2005, Rossi, 2016).



Εικόνα 1. Κατασκευή οδοστρώματος κατά τη Ρωμαϊκή εποχή.

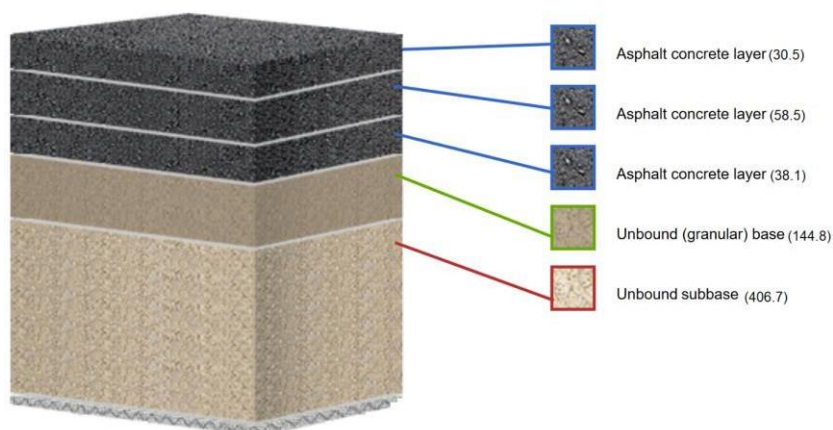
Παρά τις προσπάθειες να ανακαλυφθούν εκ νέου οι ρωμαϊκές μέθοδοι κατασκευής του οδοστρώματος πολύ αργότερα, μικρή πρόοδος σημειώθηκε στην οδοποιία μέχρι τον 18ο σημειώθηκε περιορισμένη πρόοδος στον τομέα της οδοποιίας. Ο Τζον Μέτκαλφ, ο πρώτος επαγγελματίας κατασκευαστής δρόμων ο οποίος έζησε κατά την περίοδο της Βιομηχανικής Επανάστασης, κατασκεύασε περίπου 290 χιλιόμετρα (180 μίλια) δρόμους με στροφές κυρίως στη βόρεια Αγγλία. Αυτό κατέστη δυνατό το 1765, όταν το Κοινοβούλιο ενέκρινε μία ειδική τροπολογία σχετικά με την κατασκευή δρόμων που χρηματοδοτούνται από διόδια στην περιοχή Knaresborough (Metcalf, 1977).

Ο Pierre-Marie-Jérôme Trésaguet είναι ευρέως αναγνωρισμένος στην επιστημονική κοινότητα, για την εισαγωγή της αρχικής επιστημονικής προσέγγισης στην κατασκευή οδών στη Γαλλία ταυτόχρονα με τον Metcalf. Ο Trésaguet, το 1775, κατέγραψε τη μέθοδό του σε ένα υπόμνημα, το οποίο στη συνέχεια έγινε η καθιερωμένη πρακτική οδοποιίας στη Γαλλία. Η μέθοδος περιελάμβανε την τοποθέτηση ενός στρώματος μεγάλων πετρωμάτων κάτω από ένα στρώμα μικρότερου χαλικιού (Conchon, 2006).

Αργότερα, το έργο των Thomas Telford και John Loudon McAdam οδήγησε στην ανάπτυξη νέων τεχνικών για την κατασκευή αυτοκινητοδρόμων. Η προσέγγιση του Telford περιλάμβανε το σκάψιμο μιας τάφρου και την τοποθέτηση θεμελίωσης από βαρύ βράχο, ενώ οι δρόμοι του σχεδιάστηκαν με κλίση προς τα κάτω για να επιτρέπουν

την αποστράγγιση. Ο McAdam, από την άλλη πλευρά, δημιούργησε ένα οικονομικά αποδοτικό υλικό επίστρωσης που ονομάζεται σκύρα, το οποίο αποτελείται από χώμα και αδρανή πέτρα. Πίστευε ότι τα ογκώδη θεμέλια από βράχο ήταν περιττά, και αντ' αυτού πρότεινε ότι το γηγενές έδαφος θα μπορούσε να υποστηρίξει το δρόμο, εφόσον προστατεύεται από ένα ειδικό κέλυφος. Ο McAdam τόνισε επίσης το μέγεθος των λίθων που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή δρόμων, με μέγιστο πάχος 200 χιλιοστών που περιορίζεται σε πέτρες όχι μεγαλύτερες από 75 χιλιοστά (Hunter, 2000).

Ο Βρετανός πολιτικός μηχανικός Edgar Purnell Hooley κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας τη σύγχρονη ασφαλτο αφού παρατήρησε ότι η χυμένη πίσσα στο δρόμο εμπόδιζε τη σκόνη και δημιουργούσε μια λεία και ομοιόμορφη επιφάνεια. Το 1901, απέκτησε ένα δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την ασφαλτο, η οποία περιελάμβανε τη διαδικασία μηχανικής ανάμειξης πίσσας και αδρανών πριν το μίγμα αυτό στρωθεί στο οδόστρωμα και στη συνέχεια χρησιμοποιούσε έναν ατμοκύλινδρο για να συμπυκνώσει το μείγμα. Για να τροποποιήσει την πίσσα, ο Hooley πρόσθεσε μικρές ποσότητες τσιμέντου Portland, ρητίνης και πίσσας (Εικόνα 2) (Baker, 2018, Sutton, 2016).



Εικόνα 2. Σχηματική απεικόνιση ενός σύγχρονου οδοστρώματος στην οποία απεικονίζονται οι διάφορες στρώσεις υλικών που χρησιμοποιούνται. Το συνολικό πάχος του οδοστρώματος μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το GBE (Granular Base Equivalence) (Πηγή: Haas, 1988).

ΤΥΠΟΙ ΤΑΠΗΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

1. ΑΣΦΑΛΤΟΣ

Η άσφαλτος, γνωστή και ως ασφαλτικό σκυρόδεμα, είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό στον κλάδο της οδοποιίας από τη δεκαετία του 1920. Αναφέρεται ως εύκαμπτο οδόστρωμα επειδή μπορεί να παραμορφωθεί ελαφρά υπό φορτίο λόγω του ιξώδους του. Το συνδετικό ασφάλτου στο ασφαλτικό σκυρόδεμα επιτρέπει την αντοχή του υλικού σε σημαντική πλαστική παραμόρφωση, αν και η επαναλαμβανόμενη φόρτωση πιθανόν να προκαλέσει κόπωση του υλικού και είναι η πιο κοινή αιτία αστοχίας (Εικόνα 3) (Hunter, 2000). Οι περισσότερες επιφάνειες ασφάλτου τοποθετούνται σε βάση από χαλίκι, η οποία τυπικά έχει τόσο πάχος όσο είναι και το στρώμα ασφάλτου. Ωστόσο, ορισμένες επιφάνειες που ονομάζονται "πλήρους βάθους" τοποθετούνται απευθείας στο φυσικό υπόβαθρο του εδάφους. Σε περιοχές με μαλακά ή διογκούμενα υποστρώματα όπως ο πηλός ή η τύρφη, μπορεί να είναι απαραίτητη η τοποθέτηση μιας βάσης αυξημένου πάχους από χαλίκι ή πραγματοποίηση σταθεροποίησης με τσιμέντο Portland ή ασβέστη. Για τον ίδιο σκοπό χρησιμοποιούνται επίσης γεωσυνθετικά από πολυπροπυλένιο και πολυεστέρα (Hoy, 2016). Σε ψυχρότερες περιοχές, προστίθενται σανίδες πολυστυρενίου για την καθυστέρηση και τη μείωση της διεύδυσης του παγετού στο υπόβαθρο του οδοστρώματος (Hyang, 2015).



Εικόνα 3. Κοντινή φωτογραφία της ασφάλτου στο οδόστρωμα

Ανάλογα με τη θερμοκρασία με την οποία εφαρμόζεται η άσφαλτος ταξινομείται ως μείγμα θερμής ανάμειξης, μείγμα ημίθερμης ανάμειξης ή μείγμα ψυχρής ανάμειξης. Η άσφαλτος μείγματος θερμής ανάμειξης απλώνεται με ελεύθερη επίστρωση σε θερμοκρασίες άνω των 150 °C (300 °F). Η άσφαλτος μείγματος ημίθερμης ανάμειξης εφαρμόζεται σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 95–120 °C (200–250 °F), με αποτέλεσμα τη μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και τη μείωση σε εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων. Η άσφαλτος ψυχρής ανάμειξης χρησιμοποιείται συνήθως σε αγροτικούς δρόμους με χαμηλότερο όγκο κυκλοφορίας, και η απώλεια στη θερμοκρασία του μείγματος οφείλεται στο γεγονός ότι η άσφαλτος θερμού μείγματος θα κρυώσει πάρα πολύ κατά τη μεταφορά από το εργοστάσιο κατασκευής της στο εργοτάξιο (Rubio, 2012).

Μια επιφάνεια ασφάλτου συνήθως κατασκευάζεται για βασικούς αυτοκινητόδρομους οι οποίοι έχουν μεγάλο όγκο κυκλοφορίας, δηλαδή αυτοκινητόδρομους με μέσο όρο κυκλοφορίας πάνω από 1.200 οχήματα την ημέρα. Οι ασφαλτοστρωμένοι δρόμοι έχουν αρκετά πλεονεκτήματα όπως χαμηλότερα επίπεδα θορύβου, συγκριτικά χαμηλότερο κόστος σε σύγκριση με εναλλακτικές μεθόδους επίστρωσης ενώ είναι ευκολότερο να επισκευαστούν τόσο λόγω υπάρχουσας τεχνογνωσίας όσο και λόγω μειωμένου κόστους (Button, 2007, d'Angelo, 2008)). Ωστόσο, έχουν επίσης μειονεκτήματα όπως μικρότερη ανθεκτικότητα από άλλες μεθόδους επίστρωσης, χαμηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό από το σκυρόδεμα, τάση να γίνονται ολισθηρές και μαλακές σε ζεστό καιρό και πιθανότητα δημιουργίας ρύπανσης από υδρογονάνθρακες στο έδαφος, τα υπόγεια ύδατα ή τις υδάτινες οδούς (Chowdburry, 2008).

Στα μέσα της δεκαετίας του 1960, χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά άσφαλτος με καουτσούκ, η οποία περιελάμβανε ανάμειξη κοννιορτοποιημένα κομμάτια ελαστικού από χρησιμοποιημένα ελαστικά οχημάτων με άσφαλτο. Αυτό θεωρήθηκε ως πιθανή λύση για τα ελαστικά που αποτελούν αιτία ρύπανσης και αυξάνουν τον κίνδυνο πυρκαγιάς στις τοποθεσίες που συγκεντρώνονται σαν απορρίματα (Wang, 2018). Ωστόσο, σε εύκρατες ζώνες, η άσφαλτος με καουτσούκ έχει αποδειχτεί ότι φθείρεται περισσότερο κατά τη διάρκεια των κύκλων κατάψυξης-απόψυξης λόγω της μη ομοιογενούς διαστολής και συστολής της η οποία προκαλείται από μη ελαστικά συστατικά (Wang, 2017). Η εφαρμογή της ασφάλτου με καουτσούκ εξαρτάται επίσης

περισσότερο από τη θερμοκρασία και μπορεί να γίνει μόνο σε ορισμένες περιόδους του έτους σε πολλές τοποθεσίες. Τα μακροπρόθεσμα οφέλη της ασφάλτου με καουτσούκ όσον αφορά την ηχορύπανση είναι ακόμα ασαφή, καθώς είναι ένα σχετικά καινούριο υλικό και οι μελέτες πάνω στο συγκεκριμένο τομέα είναι περιορισμένες. Οι μέχρι τώρα μελέτες αναφέρουν ότι ενώ η αρχική εφαρμογή μπορεί να μειώσει τις εκπομπές θορύβου από την πηγή του οδοστρώματος ελαστικών κατά 3–5 dB, η συνολική μείωση του θορύβου από την κυκλοφορία όταν συνδυάζεται με άλλους παράγοντες είναι μόνο 1–3 dB. Σε σύγκριση με τα παραδοσιακά μέτρα όπως τα ηχητικά φράγματα και οι χωμάτινες ράβδοι, η άσφαλτος με καουτσούκ παρέχει μικρότερης διάρκειας και λιγότερο σημαντικά οφέλη σε σχέση με την ηχορύπανση με υψηλότερο κόστος σε γενικές γραμμές (Knabben, 2016, Tehrani, 2015).

2. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Οι επιφάνειες από σκυρόδεμα, ειδικά αυτές που κατασκευάζονται από τσιμέντο Portland, σχηματίζονται με συνδυασμό τσιμέντου Portland, αδρανών υλικών μεγάλου διαμετρήματος, άμμου και νερού σε ένα μείγμα σκυροδέματος. Στα σύγχρονα μείγματα, συνήθως περιλαμβάνονται πρόσθετα πρόσμικτα υλικά με σκοπό το μείγμα να είναι περισσότερο διαχειρίσιμο, να μειωθεί η απαραίτητη ποσότητα νερού, να προληφθούν οι τυχόν επιβλαβείς χημικές αντιδράσεις και να μειωθεί και το κόστος κατασκευής του οδοστρώματος (Chandler, 2003). Σε ορισμένες περιπτώσεις, υποκατάστατα του τσιμέντου Πόρτλαντ, όπως η τέφρα, μπορούν επίσης να ενσωματωθούν προκειμένου να ενισχυθούν οι φυσικές ιδιότητες του σκυροδέματος. Το υλικό εφαρμόζεται ως πρόσφατα αναμεμειγμένος πολτός και επεξεργάζεται μηχανικά ώστε το εσωτερικό του να είναι περισσότερο στερεό, αλλά και η εξωτερική επιφάνειά του να είναι πιο λεία και πυκνή χωρίς να δημιουργούνται κυψελίδες. Η παρουσία νερού επιτρέπει τον μοριακό συνδυασμό του μείγματος σε μια χημική αντίδραση γνωστή ως ενυδάτωση (Εικόνα 4) (Walker, 1975).



Εικόνα 4. . Παράδειγμα κατασκευής οδοστρώματος σκυροδέματος (Πηγή: <https://cementconcrete.org/structural/cement-concrete-road-pavement/2780>).

Τρεις συνήθεις τύποι επιφανειών σκυροδέματος αναφέρονται στη βιβλιογραφία:

- με αρμό απλές (JPCP)
- με αρμούς οπλισμένους (JRCP)
- και με συνεχή οπλισμό (CRCP).

Ο παράγοντας διάκρισης μεταξύ κάθε τύπου έγκειται στο σύστημα αρμολόγησης που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση του σχηματισμού ρωγμών (Bautista, 2008).

Τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα έχουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των ασφαλτοστρωμένων οδοστρωμάτων. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι η αντοχή και η δύναμή τους τους, κάτι το οποίο δεν παρατηρείται στην άσφαλτο. Επιπλέον, στα οδοστρώματα από σκυρόδεμα μπορούν να σχηματιστούν αυλακώσεις για να παρέχουν μια επιφάνεια ανθεκτική στην ολίσθηση. Όσον αφορά την κατανάλωση καυσίμου, οι δρόμοι από μπετόν είναι πιο οικονομικοί. Επίσης αντανακλούν καλύτερα το φως και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε σύγκριση με άλλες επιφάνειες οδοστρώματος (Saydazimov, 2020). Από την άλλη πλευρά, παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα έχουν μικρότερο μερίδιο αγοράς από άλλες λύσεις επίστρωσης του οδοστρώματος (Thorpe, 2010). Ωστόσο, η πρόοδος στις μεθόδους επίστρωσης και σχεδιασμού έχει κάνει την επίστρωση από σκυρόδεμα πιο οικονομικά αποδοτική τόσο στο αρχικό κόστος όσο και κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του οδοστρώματος. Ένα άλλο πλεονέκτημα των οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα είναι η δυνατότητα χρήσης αδιάβροχου σκυροδέματος, εξαλείφοντας την ανάγκη για

κατασκευή παροχετεύσεων ομβρίων και την κατασκευή κλίσης. Αυτό όχι μόνο εξοικονομεί πόρους κατά την αρχική κατασκευή, αλλά επίσης αποτρέπει την ανάμειξη του νερού της βροχής με το μολυσμένο νερό (Treloar, 2004). Στο παρελθόν, το υψηλότερο αρχικό κόστος και ο χρόνος κατασκευής ήταν μειονεκτήματα των οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα. Ωστόσο, αυτό το κόστος μπορεί να δικαιολογηθεί από τη μακροζωία του οδοστρώματος και το υψηλότερο κόστος της πίσσας. Το οδόστρωμα από σκυρόδεμα μπορεί επίσης να διατηρηθεί με την πάροδο του χρόνου μέσω διαφόρων μεθόδων αποκατάστασης όπως αδαμαντοφόρος λείανση, μετασκευές πειρών και σφράγιση αρμών και ρωγμών. Η αδαμαντοφόρος λείανση μπορεί επίσης να μειώσει τον θόρυβο και να αποκαταστήσει την αντίσταση στην ολίσθηση σε παλαιότερα οδοστρώματα από σκυρόδεμα (Embacher, 2001).

Η Court Avenue στο Bellefontaine του Οχάιο έγινε ο πρώτος δρόμος στις Ηνωμένες Πολιτείες που στρώθηκε με σκυρόδεμα το 1893. Το 1909, η Woodward Avenue στο Ντιτρόιτ του Μίσιγκαν ήταν το πρώτο μίλι οδοστρώματος που επιστρώθηκε με σκυρόδεμα. Μετά από αυτές τις ρηξικέλευθες εξελίξεις, η Ένωση Αυτοκινητοδρόμων του Λίνκολν ιδρύθηκε τον Οκτώβριο του 1913 για να επιβλέψει τη δημιουργία ενός διεπειρωτικού αυτοκινητόδρομου επικοινωνίας των πολιτειών ανατολής-δύσης των ΗΠΑ για αυτοκίνητα (Karwatka, 2010).

Οι δρόμοι από σκυρόδεμα έχουν το μειονέκτημα ότι δημιουργούν μεγαλύτερο θόρυβο σε σύγκριση με την ασφαλτο λόγω του ήχου των ελαστικών στις ρωγμές και τους αρμούς διαστολής. Όταν ένα οδόστρωμα από σκυρόδεμα αποτελείται από πολλαπλές πλάκες ομοιόμορφου μεγέθους, κάθε όχημα θα βιώνει περιοδικό ήχο και δόνηση καθώς διασχίζει κάθε αρμό διαστολής. Η επαναλαμβανόμενη φύση αυτών των ήχων και δονήσεων μπορεί να οδηγήσει σε κόπωση του οδηγού ή σε υπνωτικό αποτέλεσμα κατά τη διάρκεια μεγάλων ταξιδιών, γεγονός που καθιστά προβληματικό τον τομέα της οδικής ασφάλειας (Cackler, 2006).

3. ΣΥΝΘΕΤΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ

Τα σύνθετα οδοστρώματα, τα οποία περιλαμβάνουν υποστρώματα σκυροδέματος από τσιμέντο Portland σε συνδυασμό με επικάλυψη ασφάλτου, χρησιμοποιούνται συνήθως για την αποκατάσταση ήδη εγκατεστημένων δρόμων παρά για νέους κατασκευαστικούς σκοπούς. Σε ορισμένες περιπτώσεις, επιστρώσεις ασφάλτου εφαρμόζονται σε φθαρμένες επιφάνειες από σκυρόδεμα για να ανανεώσουν μια επιφάνεια χωρίς ραφές και ομοιόμορφη φθορά. Αντίθετα, η κίνηση που συμβαίνει εντός των αρμών που συνδέουν τις υποκείμενες πλάκες σκυροδέματος, και προκαλείται από παράγοντες όπως η θερμική διαστολή και συστολή ή απόκλιση από τα βαριά φορτία φορτηγών, συχνά οδηγεί στο σχηματισμό ανακλαστικών ρωγμών στο ασφαλτικό στρώμα (Εικόνα 5) (Khazanovich, 2012).



Εικόνα 5.. Παράδειγμα σύνθετου οδοστρώματος (πηγή:

https://en.wikipedia.org/wiki/Road_surface#/media/File:Composite_pavement_x-sect.jpg)

Προκειμένου να μειωθούν οι ρωγμές, το οδόστρωμα από σκυρόδεμα μπορεί να διασπαστεί χρησιμοποιώντας μεθόδους όπως θραύση, δημιουργία ρωγμών ή τρίψιμο. Στις διεργασίες θραύσης και δημιουργίας ρωγμών, ένα μεγάλο τμήμα της εργασίας είναι η πρόκληση ρωγμών στο σκυρόδεμα, και η χρήση βαρέως κυλίνδρου

για τη στερέωση των τμημάτων που προκύπτουν στη βάση. Η κύρια διάκριση μεταξύ αυτών των δύο διαδικασιών έγκειται στον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για τη θραύση του οδοστρώματος από σκυρόδεμα και στο μέγεθος των τμημάτων που προκύπτουν (Moghadas, 2015). Η παρουσία συχνών μικρών ρωγμών θα κατανείμει τη θερμική καταπόνηση σε μεγαλύτερη περιοχή σε σύγκριση με τους σπάνιους μεγάλους αρμούς, μειώνοντας έτσι περαιτέρω την πίεση την οποία δέχεται το ασφαλικό οδόστρωμα. Από την άλλη πλευρά, η διαδικασία του “rabbilization” συνεπάγεται την πλήρη θραύση του παλιού, φθαρμένου σκυροδέματος, μετατρέποντάς το ουσιαστικά σε βάση αδρανούς υλικού για έναν νέο ασφαλτοστρωμένο δρόμο. Τέλος, η διαδικασία επικάλυψης περιλαμβάνει τη χρήση σκυροδέματος από τσιμέντο Πόρτλαντ για την επανεπένδυση ενός φθαρμένου ασφαλτοστρωμένου δρόμου (Lavin, 2003).

4. ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

Το οδοστρώματα τα οποία έχουν υποστεί βλάβες, μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί κατά την αποκατάσταση ενός οδοστρώματος με διάσπαση του υπάρχοντος οδοστρώματος και λείανση του επί τόπου μέσω μιας διαδικασίας γνωστής ως στίλβωση. Το προκύπτον οδόστρωμα, το οποίο ονομάζεται ανακυκλωμένο ασφαλικό οδόστρωμα (RAP – Recycled Asphaltic Pavement), μπορεί στη συνέχεια να μεταφερθεί σε ένα εργοστάσιο ασφάλτου και να αποθηκευτεί για μελλοντική χρήση σε νέα μείγματα επίστρωσης οδοστρώματος. Εναλλακτικά, μπορεί να ανακυκλωθεί επί τόπου χρησιμοποιώντας τις τεχνικές που περιγράφονται στις παρακάτω παραγράφους (Karlsson, 2006).

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την επιτόπια ανακύκλωση του οδοστρώματος. Μια μέθοδος περιλαμβάνει την άλεση του υπάρχοντος οδοστρώματος από σκυρόδεμα σε μικρότερα σωματίδια και την αφαίρεση τυχόν χαλύβδινων οπλισμών. Στη συνέχεια, το οδόστρωμα του εδάφους συμπιέζεται για να δημιουργηθεί η βάση ή/και τα υποβασικά στρώματα για νέο ασφαλικό οδόστρωμα. Αυτό το συμπαγές οδόστρωμα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή χωμάτινων οδοστρωμάτων (Galal, 1999).

Μια άλλη μέθοδος, γνωστή ως ψυχρή επιτόπια ανακύκλωση, περιλαμβάνει λείανση ή άλεση ασφαλτούχου οδοστρώματος σε μικρά σωματίδια. Αυτά τα σωματίδια στη συνέχεια αναμιγνύονται με ασφαλικό γαλάκτωμα, αφρισμένη πίσσα ή μαλακή άσφαλτο για να αναζωογονηθεί το παλαιωμένο συνδετικό υπόστρωμα της ασφάλτου.

Το ασφαλικό μείγμα που προκύπτει στρώνεται και συμπιέζεται, είτε χρησιμεύει ως το ανώτερο στρώμα οδοστρώματος είτε επικαλύπτεται με νέα άσφαλο μετά τη σκλήρυνση (Salomon, 2000).

Η εν θερμώ ανακύκλωση, από την άλλη πλευρά, περιλαμβάνει τη θέρμανση του ασφαλτούχου οδοστρώματος σε υψηλή θερμοκρασία, το άλεσμά του και τον συνδυασμό του με έναν παράγοντα αναζωογόνησης και/ή καθαρό συνδετικό ασφάλτου. Το μείγμα στη συνέχεια συμπιέζεται και μπορεί να επικαλυφθεί με νέο ασφαλικό σκυρόδεμα. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως για τη διόρθωση επιφανειακών ελαττωμάτων του οδοστρώματος (Ma, 2020).

Η ανάκτηση του πλήρους βάθους περιλαμβάνει την κονιοποίηση του πλήρους πάχους του ασφαλικού οδοστρώματος και του υποκείμενου υλικού για τη δημιουργία ενός ομοιόμορφου μείγματος. Στη συνέχεια, μπορεί να προστεθεί ένας συνδετικός παράγοντας ή κάποιο σταθεροποιητικό υλικό, προκειμένου να σχηματίσει μια τα θεμέλια για το νέο οδόστρωμα ή μπορεί να αφεθεί αδέσμευτο για να δημιουργηθεί ένα υπο-θεμελιακό στρώμα. Διάφορα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συνδετικοί παράγοντες, όπως ασφαλικό γαλάκτωμα, ιπτάμενη τέφρα, ένυδρος ασβέστης, τσιμέντο Portland και χλωριούχο ασβέστιο. Μπορεί επίσης να προστεθεί επιπλέον αδρανή ή θρυμματισμένο τσιμέντο Portland για τη βελτίωση του μείγματος. Η ανάκτηση πλήρους βάθους χρησιμοποιείται συνήθως για την αντιμετώπιση δομικών αστοχιών στο οδόστρωμα, όπως ρωγμές, αυλακώσεις και πτώση από τον ώμο (Malick, 2002).

5. CHIPSEAL

Το chipseal χρησιμοποιείται κυρίως σε δρόμους χαμηλής κυκλοφορίας, αλλά και ως στεγανοποιητική επίστρωση για την ανανέωση ενός οδοστρώματος το οποίο έχει επικάλυψη ασφάλτου. Γενικά αποτελείται από μία αδρανή επίστρωση που απλώνονται πάνω από ασφαλτούχο γαλάκτωμα ή ασφαλικό τσιμέντο. Το αδρανές αυτό υλικό, στη συνέχεια ενσωματώνεται στην άσφαλο μέσω κύλισης, συνήθως με έναν ελαστικό κύλινδρο. Αυτός ο τύπος επιφάνειας περιγράφεται στη βιβλιογραφία με αρκετούς

όρους, όπως για παράδειγμα, "πίσσα και ρινίσματα", "λάδι και πέτρα", "στεγανωτική επίστρωση", "σφράγιση ψεκασμού", "επικάλυψη επιφάνειας", «Microsurfacing» ή απλώς αναφέρεται ως «πίσσα» (Gransberg, 2005).

Τα chipseal οδοστρώματα κατασκευάζονται απλώνοντας ομοιόμορφα ένα λεπτό στρώμα καυτής πίσσας, πίσσας ή ασφάλτου σε έναν υπάρχοντα δρόμο και στη συνέχεια ακολουθεί η ενσωμάτωση ενός αδρανούς με λεπτό πάχος. Το αδρανές υλικό απλώνεται ομοιόμορφα πάνω από το θερμό σπρέι σφράγισης και συμπιέζεται στην ασφαλτο χρησιμοποιώντας βαρείς ελαστικούς κυλίνδρους για να δημιουργηθεί μια λεία επιφάνεια. Προαιρετικά, ένα οδοόστρωμα chipseal μπορεί να σφραγιστεί με ένα ανώτερο στρώμα, γνωστό ως στρώμα εμπλουτισμού (Εικόνα 6) (Rajagopal, 2010, Rahman, 2020).



Εικόνα 6. Χαρακτηριστικό παράδειγμα δρόμου chipseal (πηγή: Lawson, 2009)

Η προσθήκη τροποποιημένης με πολυμερή πίσσας και συνδετικού γαλακτώματος έχει ενισχύσει την ικανότητα του chipseal να αποτρέπει την ανάκλαση των ρωγμών και να βελτιώνει τη συγκράτηση των πετρών ενισχύοντας με τον τρόπο αυτό τις ιδιότητες του συνδετικού ασφάλτου. Αντί να χρησιμοποιούν ασφαλτο, οι νεότερες τεχνικές χρησιμοποιούν ασφαλτικό γαλάκτωμα, το οποίο είναι ένα μείγμα υγρής ασφάλτου, επιφανειοδραστικής ουσίας και νερού. Αυτή η μέθοδος έχει αποδειχθεί ότι μειώνει την

απώλεια αδρανών και έχει χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης, αλλά μπορεί επίσης να οδηγήσει σε απογύμνωση, στις περιοχές το συνδετικό υλικό διαχωρίζεται από το αδρανές υλικό (Outcalt, 2001). Επιπλέον, μειώνει την απελευθέρωση πτητικών οργανικών ενώσεων λόγω της μειωμένης ποσότητας διαλύτη. Οι νεότερες προσεγγίσεις στη κατασκευή αυτού του είδους των οδοστρωμάτων περιλαμβάνουν τη χρήση ακρυλικών πολυμερών στυρολίου με διασταυρούμενη σύνδεση, τα οποία παρέχουν επίσης αποτελεσματική αντοχή στο νερό. Για να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια του αδρανές υλικού και προκειμένου να δοθεί στην επιφάνεια μια πιο σκούρα εμφάνιση, έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία chipseals τα οποία έχουν περιεκτικότητα πίσσας περίπου 1% (Gransberg, 2005).

Ένα οδόστρωμα αυτού του τύπου είναι σε θέση να διατηρήσει την ακεραιότητά του για μεγάλο χρονικό διάστημα, αποτρέποντας τη διείσδυση του νερού, ωστόσο από την άλλη πλευρά, στερείται δομικής ενίσχυσης και μπορεί να διορθωθούν μόνο μικρές ρωγμές. Αν και η χρήση μικρών λίθων στην επιφάνεια δημιουργεί μια σχετικά ομοιόμορφη εμφάνιση χωρίς να υπάρχουν άκρα με μπαλώματα, δημιουργεί επίσης μια τραχιά επιφάνεια που προκαλεί αυξημένο θόρυβο από τους τροχούς των οχημάτων (Pourhassan, 2019)

Ενώ το chipseal είναι μια αποτελεσματική και φθηνή μέθοδος για επισκευές δρόμων, έχει ορισμένα μειονεκτήματα. Αυτά περιλαμβάνουν την παρουσία χαλαρής θρυμματισμένης πέτρας στην επιφάνεια, η οποία μπορεί να προκύψει είτε από πολύ λίγη πίσσα είτε από υπερβολική εφαρμογή πέτρας (Pidwerbesky, 2006). Εάν αυτή η χαλαρή πέτρα δεν αφαιρεθεί, μπορεί να προκαλέσει διάφορα ζητήματα ασφάλειας και περιβάλλοντος, όπως ραγισμένα παρμπρίζ, θρυμματισμένο χρώμα, ατυχήματα λόγω απώλειας ελέγχου (ειδικά για μοτοσικλετιστές, ποδηλάτες και μικρά φορτηγά) και εναπόθεση ξένων υλικών στο αποχετευτικό σύστημα. Επομένως, είναι ιδιαίτερα σημαντικό, κατά την κατασκευή του οδοστρώματος, να σκουπίζετε το δρόμο αφού έχει δέσει το γαλάκτωμα. Για να μετριαστεί αυτό το πρόβλημα σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται chipseal που έχουν προεπικαλυφθεί με πίσσα (Lawsan, 2009). Η υπερβολική εφαρμογή του γαλακτώματος μπορεί επίσης να οδηγήσει σε «αιμορραγία», μία κατάσταση όπου η περίσσεια ασφαλτος ανεβαίνει στην επιφάνεια, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια λεία και ολισθηρή επιφάνεια όταν είναι υγρή, ενώ

κατά τους θερμότερους καλοκαιρινούς μήνες δημιουργούνται φυσαλίδες. Καθώς τα οχήματα κινούνται πάνω από αυτήν την επιφάνεια, τα ελαστικά μπορούν να εκτοξεύσουν την κολλώδη ουσία στα πλαϊνά των αυτοκινήτων. Αυτή η ουσία μπορεί να αφαιρεθεί μόνο με εφαρμογή ειδικών διαλυτών (Rahman, 2012).

Η δημοτικότητα του ασφαλτομίγματος έχει τη βάση της όχι μόνο στην απλή εφαρμογή του αλλά και από στην προσαρμοστικότητά του, η οποία αποδεικνύεται ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας κατά την κατασκευή δρόμων σε ασταθές έδαφος που υφίστανται απόψυξη και επακόλουθα, τα υλικά του γίνονται μαλακότερα κατά την άνοιξη. Άλλοι τύποι ασφαλτομιγμάτων συμπεριλαμβάνουν το “micropaving”, τα στεγανωτικά υδατικά αιωρήματα και το Novachip, ωστόσο αυτοί οι τύποι εφαρμόζονται χρησιμοποιώντας εξειδικευμένο εξοπλισμό. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε αστικές περιοχές, όπου η παρουσία ανομοιομορφιών και χαλαρών πετρών στους αρμούς είναι μία ιδιότητα που πρέπει να αποφεύγεται (Musty, 2011, Hattery, 2018).

7.1 Λεπτή Επιφάνεια Μεμβράνη – Thin Membrane Surface)

Μια λεπτή επιφάνεια μεμβράνης (TMS – Thin membrane Surface) είναι ένα στρώμα αδρανών υλικών, επεξεργασμένων με πετρέλαιο το οποίο τοποθετείται στο οδόστρωμα ενός χωματόδρομου με σκοπό να δημιουργήσει έναν δρόμο χωρίς σκόνη. Αυτού του τύπου οι δρόμοι βοηθούν να μειωθούν τα προβλήματα λάσπης και παρέχει οδοστρώματα χωρίς πέτρες για τους κατοίκους μιας αντίστοιχης περιοχής, ωστόσο απαραίτητη προϋπόθεση είναι να μην υπάρχει κυκλοφορία βαρέων οχημάτων. Το στρώμα TMS δεν προσθέτει καμία σημαντική δομική αντοχή, επομένως χρησιμοποιείται συνήθως σε δευτερεύοντες αυτοκινητόδρομους με χαμηλή κυκλοφορία και ελάχιστο βάρος φορτίων. Η διαδικασία κατασκευής περιλαμβάνει μία ελάχιστη προετοιμασία στη βάση του οδοστρώματος, στη συνέχεια μία κάλυψη με ένα στρώμα αδρανούς ασφάλτου ψυχρού μίγματος πάχους 50 έως 100 χιλιοστών (Rahaman, 2012, Falls, 2011).

7.2 Otta Seal

Η Otta seal, μια ασφαλική επιφανειακή επεξεργασία, δημιουργήθηκε από το Norwegian Road Research Laboratory και πήρε το όνομά της από την κοιλάδα Otta. Αρχικά σχεδιάστηκε για προσωρινή επικάλυψη σε νέους δρόμους, ωστόσο σχετικές μελέτες απέδειξαν ότι έχει ιδιαίτερα υψηλή ανθεκτικότητα και για το λόγο αυτό, στη σύγχρονη οδοποιία, χρησιμοποιείται ως μόνιμο οδόστρωμα. Η διαδικασία δημιουργίας Otta Seal, περιλαμβάνει ανάμειξη διαβαθμισμένων αδρανών υλικών με ένα μαλακό ασφαλικό συνδετικό μέσο, συνήθως γαλακτωματοποιημένη άσφαλτο. Το υλικό της ασφάλτου που χρησιμοποιείται είναι κατά προσέγγιση μεταξύ 1,9 λίτρων/m² και 2,4 λίτρων/m², ανάλογα με τον τύπο και τη διαβάθμιση του αδρανούς. Το Otta seal χρησιμοποιεί συνήθως αδρναή υλικά χαμηλής ποιότητας, τοπικής προέλευσης με μέγιστο μέγεθος από 13 έως 25 mm. Συνήθως, χρησιμοποιούνται περίπου 27 kg/m² αδρανών υλικών. Η άμμος χρησιμοποιείται σε ορισμένες περιπτώσεις για να σκληρύνει εύκολα το Otta seal λόγω των μαλακών συνδετικών παραγόντων της (Overby, 1999).



Εικόνα 7. Επιφάνεια ασφαλτόστρωσης Otta Seal (Πηγή:

<http://lgam.wikidot.com/otta-seal>)

Η διαδικασία δημιουργίας ενός οδοστρώματος Otta seal, περιλαμβάνει την απαλλαγή από τη σκόνη και τα ξένα αντικείμενα από τη βάση, την προσθήκη μικρών ποσοτήτων νερού για την αποφυγή της σκόνης, την εφαρμογή θερμού συνδετικού υλικού με αναλογία 1,6 έως 1,9 λίτρα ανά τετραγωνικό μέτρο, την εφαρμογή αδρανών με ρυθμό 1,3 έως 2,0 κυβικά μέτρα ανά 100 τετραγωνικά μέτρα επιφάνειας δρόμου και ισοπέδωση της Otta seal, χρησιμοποιώντας έναν κύλινδρο μέχρι να πιεστεί το συνδετικό υλικό μεταξύ των σωματιδίων του αδρανούς. Κατά τη διάρκεια των πρώτων

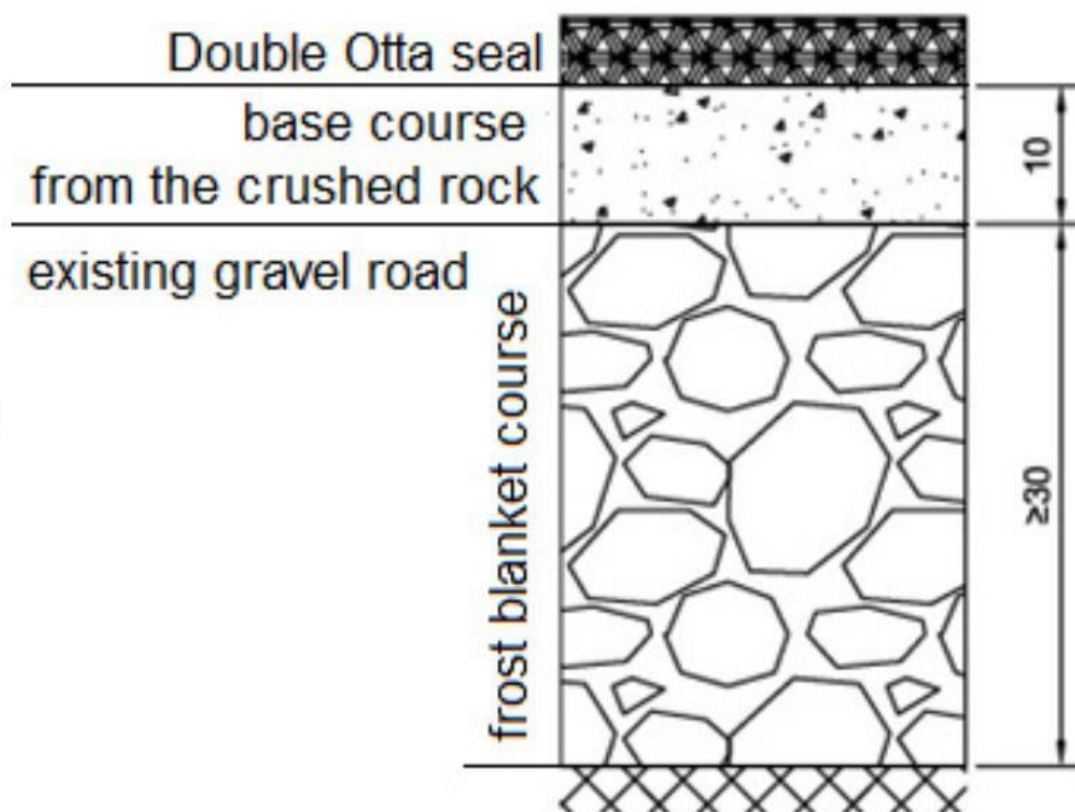
δύο έως τριών εβδομάδων, η κυκλοφορία επιτρέπεται να γίνεται με χαμηλές ταχύτητες για να συμβάλει στην περαιτέρω συμύκνωση της σφράγισης. Η κυκλοφορία θα προκαλέσει την απομάκρυνση των αδρανών, επομένως θα πρέπει να επανατοποθετηθούν ξανά στη σφράγιση (Gushgari, 2018).

Το Otta seal χρησιμοποιείται κυρίως σε περιοχές που δεν επιβάλλουν αυστηρά κριτήρια αντοχής, διαβάθμισης, σχήματος σωματιδίων, πρόσφυσης συνδετικού υλικού και περιεκτικότητας σε σκόνη και που έχουν περιορισμένους πόρους και χαμηλότερα επίπεδα κυκλοφορίας. Επί του παρόντος, εφαρμόζεται κυρίως στη Νορβηγία, τη Σουηδία, την Ισλανδία και τη Μποτσουάνα, και είναι επίσης ευρέως διαδεδομένη στο Μπαγκλαντές, την Αυστραλία και ορισμένες περιοχές της Αφρικής (Nahvi, 2019).

Από άποψη κόστους, το Otta Seal έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλες επιφάνειες δρόμων. Η αποδοτικότητά του είναι προφανής, καθώς επιτρέπει την ανακαίνιση δρόμων κάθε 5-10 χρόνια χωρίς να απαιτείται η πλήρης αποξήλωσή τους. Αυτό παρατείνει τη διάρκεια ζωής του δρόμου και τον καθιστά εξαιρετικά οικονομικό (Jibon, 2023). Όσον αφορά τον κοινωνικό αντίκτυπο, δεν προκαλεί μακροχρόνιες καθυστερήσεις στην κυκλοφορία, καθώς χρειάζονται μόνο λίγες ώρες, προκειμένου ο δρόμος να δοθεί στην κυκλοφορία, ακόμη και αν τα αυτοκίνητα πρέπει να κυκλοφορούν με περιορισμένη ταχύτητα. Δεδομένης της κύριας χρήσης του σε παράπλευρους οδούς, είναι σημαντικό να ολοκληρωθεί η διαδικασία γρήγορα για να διασφαλιστεί ότι οι κάτοικοι μπορούν να έχουν πρόσβαση στα σπίτια τους χωρίς ταλαιπωρία. Αν και το χαλαρό χαλίκι μπορεί περιστασιακά να προκαλέσει αμυχές ή μικροθραύσεις στο παρμπρίζ, η πιθανότητα τέτοιων περιστατικών μειώνεται στις περιοχές όπου υπάρχει πιο αργή κυκλοφορία. Όσον αφορά το περιβάλλον, το Otta seal βοηθά στη μείωση του επιπέδου της σκόνης, ωφελώντας έτσι το περιβάλλον με πολλούς τρόπους, όπως η ενίσχυση της ορατότητας της οδήγησης, ο μετριασμός προβλημάτων υγείας που σχετίζονται με τη σκόνη και η ελαχιστοποίηση των ζημιών στις καλλιέργειες. Επιπλέον, ένα άλλο πλεονέκτημα για το περιβάλλον είναι ότι τα προαναφερθέντα υλικά είναι εύκολα προσβάσιμα ενώ, παρατηρείται μείωση της περιβαλλοντικής υποβάθμισης (Overby, 2013).

Το Otta Seal θεωρείται ως ένας φθηνός τύπος στεγανοποίησης λόγω του χαμηλού αρχικού του κόστους και των ελάχιστων απαιτήσεων συντήρησης, γεγονός που το καθιστά μια εξαιρετικά προσιτή επιλογή για οδοστρώματα. Το κατά προσέγγιση κόστος του είναι περίπου 2,00 \$ έως 2,70 \$ ανά τετραγωνικό μέτρο και η διάρκεια ζωής της κυμαίνεται από 8 έως 15 χρόνια. Ως εκ τούτου, για έναν δρόμο μήκους 1,6 km και πλάτους 12 m, η εκτιμώμενη δαπάνη θα κυμαίνεται μεταξύ 39.000 \$ και 52.000 \$ ΗΠΑ. Σε σχέση με τις φυσικές του ιδιότητες, το Otta Seal είναι μια μέθοδος επιφανείας δρόμου που ενσωματώνει ένα ασφαλικό συνδετικό υλικό και ένα μείγμα πετρωμάτων αδρανών, που κυμαίνονται από χαλίκι έως λεπτά σωματίδια. Αυτή η τεχνική είναι πιο ανθεκτική σε σύγκριση με άλλες χαμηλού κόστους τεχνικές επίστρωσης οδοστρώματων, όπως για παράδειγμα η μέθοδος chipseal (Overby, 2013).

Η αντοχή του δρόμου εξαρτάται σημαντικά από τον τύπο της πίσσας που χρησιμοποιείται. Τα συνδετικά ασφάλτου με υψηλότερο ιξώδες τείνουν να περνούν μέσα από το αδρανή γρηγορότερα, αλλά δεν είναι τόσο σκληρά και δεν μπορούν να αντέξουν βαρύτερα φορτία. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του Otta seal σε σύγκριση με άλλες τεχνικές, είναι η ικανότητά του να χρησιμοποιεί ένα ευρύ φάσμα θρυμματισμένων πετρωμάτων ως αδρανή, ανεξάρτητα από τον τύπο ή το μέγεθός τους (Overby, 1999). Η αντοχή ενός τέτοιου είδους οδοστρώματος, μπορεί να ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με τη διαθεσιμότητα διαφορετικών τύπων πετρωμάτων στη συγκεκριμένη τοποθεσία όπου κατασκευάζεται ο δρόμος. Συνήθως, το χαλίκι που χρησιμοποιείται περιλαμβάνει ψαμμίτη, βασάλτη και μερικές φορές ακόμη και κοραλλιογενείς ή ηφαιστειακές πέτρες. Επιπλέον, το μέγεθος των σωματιδίων μπορεί να ποικίλλει πολύ, με μέγιστο προτιμώμενο μέγεθος 16 mm για μία στρώση Otta seal και 19 mm για διπλή στρώση. Συνήθως συνιστάται η συγκέντρωση λεπτών σωματιδίων μικρότερη από 0,075 mm που είναι μικρότερη από 10% (Εικόνα 8)(Greening, 2010).



Εικόνα 8. Αρχή κατασκευής της διπλής στρώσης Otta seal (Πηγή: Grazulyte, 2014).

6. ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΑΛΙΚΙ

Οι χωματόδρομοι είναι ένα είδος μη ασφαλτοστρωμένου δρόμου που καλύπτεται με χαλίκι. Εμφανίζονται συχνά σε λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες, καθώς και σε αγροτικές περιοχές αναπτυγμένων χωρών όπως ο Καναδάς και οι Ηνωμένες Πολιτείες. Αν και μπορεί να αναφέρονται ως «χωματόδρομοι» στην καθημερινή γλώσσα, αυτός ο όρος συνήθως προορίζεται για δρόμους που στερούνται πρόσθετου υλικού επιφάνειας. Οι επιφάνειες οδοστρώματος με χαλίκι είναι ταχύτερες και φθηνότερες στην κατασκευή τους σε σύγκριση με τα οδοστρώματα με ασφαλτόστρωση. Ωστόσο, η κατασκευή οδοστρωμάτων με χαλίκι οι οποίες έχουν σκοπό τη χρήση του οδοστρώματος σε όλες τις καιρικές συνθήκες, είναι σχετικά ακριβή σε σύγκριση με τους χωματόδρομους. Αυτό συμβαίνει επειδή απαιτεί τη χρήση πολλών βαρέων οχημάτων για τη δημιουργία μιας συμπαγούς βάσης από χώμα ή άλλα υλικά, συχνά καλυμμένα με πολλαπλά στρώματα χαλίκι και μερικές φορές με σκυρόστρωμα (Skorseth, 2000).

Τα βαρέα οχήματα, χρησιμοποιούνται για την ισοπέδωση της επιφάνειας του δρόμου και για τη δημιουργία μεγαλύτερης κλίσης σε σύγκριση με αυτή ενός ασφαλτοστρωμένου δρόμου, βοηθώντας στην αποστράγγιση των υδάτων. Δημιουργούν επίσης ένα υπερυψωμένο κεντρικό τμήμα του δρόμου που ονομάζεται «στέμμα» και συμμετέχουν στην κατασκευή αποστραγγιστικών τάφρων και αναχωμάτων σε περιοχές που είναι επιρρεπείς σε πλημμύρες. Η εφαρμογή συστημάτων κυτταρικού περιορισμού μπορεί να αποτρέψει αποτελεσματικά την εμφάνιση του φαινομένου έκπλυσης (Mwaipungu, 2012).

Η κατασκευή ενός χωματόδρομου ξεκινά με το υπόβαθρο, το οποίο πρέπει να λαμβάνει υπόψη τον αναμενόμενο όγκο οδικής κυκλοφορίας και τη μέση ημερήσια διέλευση φορτηγών. Αυτοί οι παράγοντες θα επηρεάσουν το πάχος της στρώσης, καθώς και τις αναλογίες χαλικιού. Επιπλέον, γεωύφασμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ενισχύσει τη σταθερότητα του στρώματος υποβάθρου. Μετά την κατασκευή του υποβάθρου και τοποθετείται στη συνέχεια το επιφανειακό στρώμα από πάνω. Κατά την επιλογή του μεγέθους του χαλικιού που θα χρησιμοποιηθεί, λαμβάνεται υπόψη η ποσότητα της βροχόπτωσης. Το επιφανειακό στρώμα θα διαμορφωθεί ώστε να ταιριάζει με το περίγραμμα του στρώματος υποβάθρου. Πριν προστεθεί το επιφανειακό στρώμα χαλικιού, το στρώμα υποβάθρου μπορεί να επεξεργαστεί κατάλληλα για να βελτιωθεί η ανάμειξη και η σύνδεση μεταξύ των στρωμάτων. Η επιφάνεια του δρόμου χτίζεται σταδιακά με την προσθήκη πολλαπλών στρώσεων χαλικιού, με κάθε στρώμα να συμπίεζεται πριν προστεθεί το επόμενο (Skorseth, 2000).

Οι χωματόδρομοι πρέπει να συντηρούνται συχνότερα από τους ασφαλτοστρωμένους δρόμους, ιδιαίτερα όταν υπάρχουν περίοδοι βροχής που κρατάνε για μεγάλο χρονικό διάστημα ή όταν υπάρχει περισσότερη κίνηση. Η κίνηση των τροχών σπρώχνει το υλικό στα πλάγια και μεταξύ των λωρίδων, προκαλώντας αυλάκια, μειωμένη αποστράγγιση του νερού και τελικά την καταστροφή του δρόμου αν δεν αντιμετωπιστεί. Εάν η διαδικασία διακοπεί νωρίς, αρκεί απλώς η ανακατάταξη του δρόμου για να επαναφέρει το υλικό στο αρχικό του σχήμα (Gesfrod, 2007).

Επιφάνειες οδοστρώματος με χαλίκι σε πλαγιές είναι επιρρεπείς σε αυλακώσεις λόγω της ροής του νερού. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται υδατοφράγματα κατά

τη διαβάθμιση ή την κατασκευή δρόμων για την εκτροπή του νερού μακριά από το δρόμο. Μια άλλη επιλογή είναι να δημιουργηθούν υπερυψωμένες περιοχές κατά μήκος του χωματόδρομου για να επιβραδυνθεί η ροή του νερού, ελαχιστοποιώντας έτσι τα τέλματα (Alzubaidi, 2002).

Ένα άλλο ζήτημα με τους χωματόδρομους είναι η εμφάνιση washboarding, που αναφέρεται στο σχηματισμό κορυφογραμμών στην επιφάνεια του δρόμου που εκτείνονται κάθετα προς την κατεύθυνση διαδρομής. Αυτές οι κορυφογραμμές, μπορούν να αναπτυχθούν σε στενές αποστάσεις λόγω των διαφορών στα επίπεδα υγρασίας στο χαλίκι, της χαμηλής ποσότητας του χαλικιού και της καταπόνησης που προκαλούν τα οχήματα. Το washboarding μπορεί επίσης να συμβεί όταν τα οχήματα κατασκευής του οδοστρώματος, υπερβαίνουν τις συνιστώμενες ταχύτητες κατά την κατασκευή ή τη συντήρηση, προκαλώντας αναπήδηση της λεπίδας και δημιουργία ραβδώσεων σε μεγάλες αποστάσεις (Huntington, 2007). Αυτές οι αυλακώσεις στο οδόστρωμα μπορεί να γίνουν αρκετά βαθιές ώστε να προκαλέσουν κραδασμούς στα οχήματα, οδηγώντας σε χαλάρωση ζημιές στην ανάρτηση και προβλήματα στην οδική ασφάλεια. Η σωστή διαβάθμιση είναι απαραίτητη για την αφαίρεση των ραβδώσεων και η χρήση χαλικιού υψηλής ποιότητας κατά την ανακατασκευή του οδοστρώματος, μπορεί να βοηθήσει στην αποφυγή της επανεμφάνισής τους. Επιπλέον, η εγκατάσταση ενός κυψελοειδούς συστήματος περιορισμού μπορεί να αποτρέψει το σχηματισμό αυλακώσεων (Aleadelat, 2019).

Ο έλεγχος της σκόνης είναι μια συνηθισμένη διαδικασία που πραγματοποιείται σε χωματόδρομους για την ελαχιστοποίηση της συχνότητας συντήρησης, την αντιμετώπιση προβλημάτων υγείας και την προστασία της βλάστησης στην άκρη του δρόμου από τις βλάβες που σχετίζονται με τη σκόνη. Αρκετές κοινές μέθοδοι για τον έλεγχο της σκόνης περιλαμβάνουν την εφαρμογή διαλυμάτων χλωρίου (όπως χλωριούχο ασβέστιο, χλωριούχο μαγνήσιο ή χλωριούχο νάτριο), χρησιμοποιώντας ένωση ρητίνης ή ενσωμάτωση φυσικού αργίλου στο μίγμα χαλικιών κατά την κατασκευή οδών. Το χλωριούχο ασβέστιο είναι σε θέση να καταστέλλει τη σκόνη τραβώντας και συγκρατώντας την υγρασία λόγω των υγροσκοπικών ιδιοτήτων του. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ξηρή μορφή (σφαιρίδια ή νιφάδες) ή σε υγρή μορφή (προπαρασκευασμένο διάλυμα). Η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής μπορεί να

διαρκέσει το πολύ για τρία χρόνια, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες του δρόμου και τις κυκλοφοριακές συνθήκες (Edvardsson, 2009, Edvardsson, 2010).

Οι χωματόδρομοι χρησιμοποιούνται συχνά σε περιοχές με ψυχρά κλίματα λόγω της μειωμένης ευαισθησίας τους σε ζημιές από παγετό/απόψυξη σε σύγκριση με τους ασφαλτοστρωμένους δρόμους. Η υποτυπώδης επιφάνεια του αμμοχάλικου γίνεται ασήμαντη όταν ο δρόμος παραμένει καλυμμένος με χιόνι και πάγο για παρατεταμένα χρονικά διαστήματα. Συνοπτικά, αν και οι δρόμοι με χαλίκι μπορεί να απαιτούν περισσότερη συντήρηση από τους ασφαλτοστρωμένους δρόμους, προσφέρουν μια οικονομική λύση για πολλές περιοχές και εξασφαλίζουν προσβασιμότητα σε όλες τις καιρικές συνθήκες, όταν κατασκευάζονται και συντηρούνται κατάλληλα (Gill, 2014, Walker, 2022).

7. ΑΛΛΟΙ ΤΥΠΟΙ

Οι διαστρωτήρες οδοποιίας, χρησιμοποιούνται συνήθως με τη μορφή προκατασκευασμένων τσιμεντόλιθων, συχνά για αισθητικούς λόγους ή, σε ορισμένες περιπτώσεις, σε εγκαταστάσεις οι οποίες αντέχουν παρατεταμένη φόρτωση οδοστρώματος. Ωστόσο, οι επιστρώσεις σπάνια χρησιμοποιούνται σε περιοχές με έντονη κυκλοφορία οχημάτων (Shahin, 1990).

Τούβλα, λιθόστρωτα, κυβόλιθοι, ξύλινες σανίδες και οδοστρώματα από ξύλο, όπως το οδόστρωμα Nicolson, χρησιμοποιούνταν παλιότερα με μεγάλη συχνότητα σε αστικές κυρίως περιοχές σε όλο τον κόσμο. Ωστόσο, στη σύγχρονη οδοποιία έχουν γίνει λιγότερο δημοφιλή στις περισσότερες χώρες, λόγω του υψηλού κόστους εργασίας που απαιτείται για την εγκατάσταση και τη συντήρησή τους. Στις μέρες μας διατηρούνται κυρίως για ιστορικούς ή αισθητικούς σκοπούς και χρησιμοποιούνται κυρίως σε τοποθεσίες με τουριστικό ενδιαφέρον. Για παράδειγμα, στην Ολλανδία, η πλακόστρωση δρόμων με τούβλα έγινε και πάλι δημοφιλής μετά την εφαρμογή ενός εθνικού προγράμματος για την ασφάλεια της κυκλοφορίας το 1997. Στο πλαίσιο αυτής της πρωτοβουλίας, πάνω από 41.000 km δρόμων σε αστικές περιοχές μετατράπηκαν σε δρόμους περιορισμένης κυκλοφορίας, με όριο ταχύτητας 30 km. Μια αποτελεσματική μέθοδος για τη μείωση της ταχύτητας των οχημάτων που χρησιμοποιείται είναι η χρήση πλακόστρωσης από τούβλα, η οποία αυξάνει τον θόρυβο

και τους κραδασμούς, επιβραδύνοντας ταυτόχρονα τους οδηγούς. Από την άλλη, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες οι ποδηλατόδρομοι δίπλα σε δρόμους με πλακόστρωση να έχουν πιο λεία επιφάνεια από τον ίδιο την κύρια οδική αρτηρία (Sharma, 2016).

Παρά το γεγονός ότι στη σύγχρονη οδοποιία κατασκευάζονται με περιορισμένη συχνότητα, τα οδοστρώματα πρώιμου τύπου σκυρώματος και πίσσας, σε ορισμένες περιπτώσεις βρίσκονται κάτω από σύγχρονα οδοστρώματα από ασφάλτινο σκυρόδεμα ή μπετό Πόρτλαντ. Κατά την αποκατάσταση ενός οδοστρώματος, σε ορισμένες περιπτώσεις, η αφαίρεσή τους μειώνει την ανθεκτικότητα και τη μακροζωία της νεότερης επιφάνειας ενώ αυξάνει και το κόστος κατασκευής.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να επιτευχθεί η εμφάνιση ενός οδοστρώματος με τούβλα χωρίς την χρήση πραγματικών τούβλων η οποία είναι ιδιαίτερα ακριβή. Μια μέθοδος περιλαμβάνει τη θέρμανση ενός ασφαλικού οδοστρώματος και τη χρήση μεταλλικών συρμάτων για τη δημιουργία ενός μοτίβου από τούβλα μέσω της χρήσης ενός συμπιεστή. Μια άλλη μέθοδος περιλαμβάνει τη χρήση εργαλείων αποτύπωσης από καουτσούκ τα οποία πιέζονται πάνω από ένα λεπτό στρώμα τσιμέντου, με το ανάλογο αισθητικό αποτέλεσμα. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί μία μεμβράνη με μοτίβο από τούβλα, με ένα υλικό επιφανείας που εφαρμόζεται πάνω από τη μεμβράνη αυτή (Johnston, 2008). Επίσης χρησιμοποιούνται υλικά για την τροποποίηση του τελικού αποτελέσματος, προκειμένου να δώσουν συγκεκριμένο χρώμα και να αυξήσουν την αντοχή στην ολίσθηση. Χαρακτηριστικά παραδείγματα, αποτελούν οι έγχρωμοι πολτοί σκυροδέματος οι οποίοι τροποποιούνται με πολυμερή ή θερμοπλαστικά και ενισχύονται με αδρανή (Liu, 2022). Άλλες επιλογές περιλαμβάνουν τη χρήση χρωμάτων ή εποξικής επίστρωσης δύο τμημάτων ως υλικά επίστρωσης πάνω από άσφαλτο (Chen, 1993).

3, ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

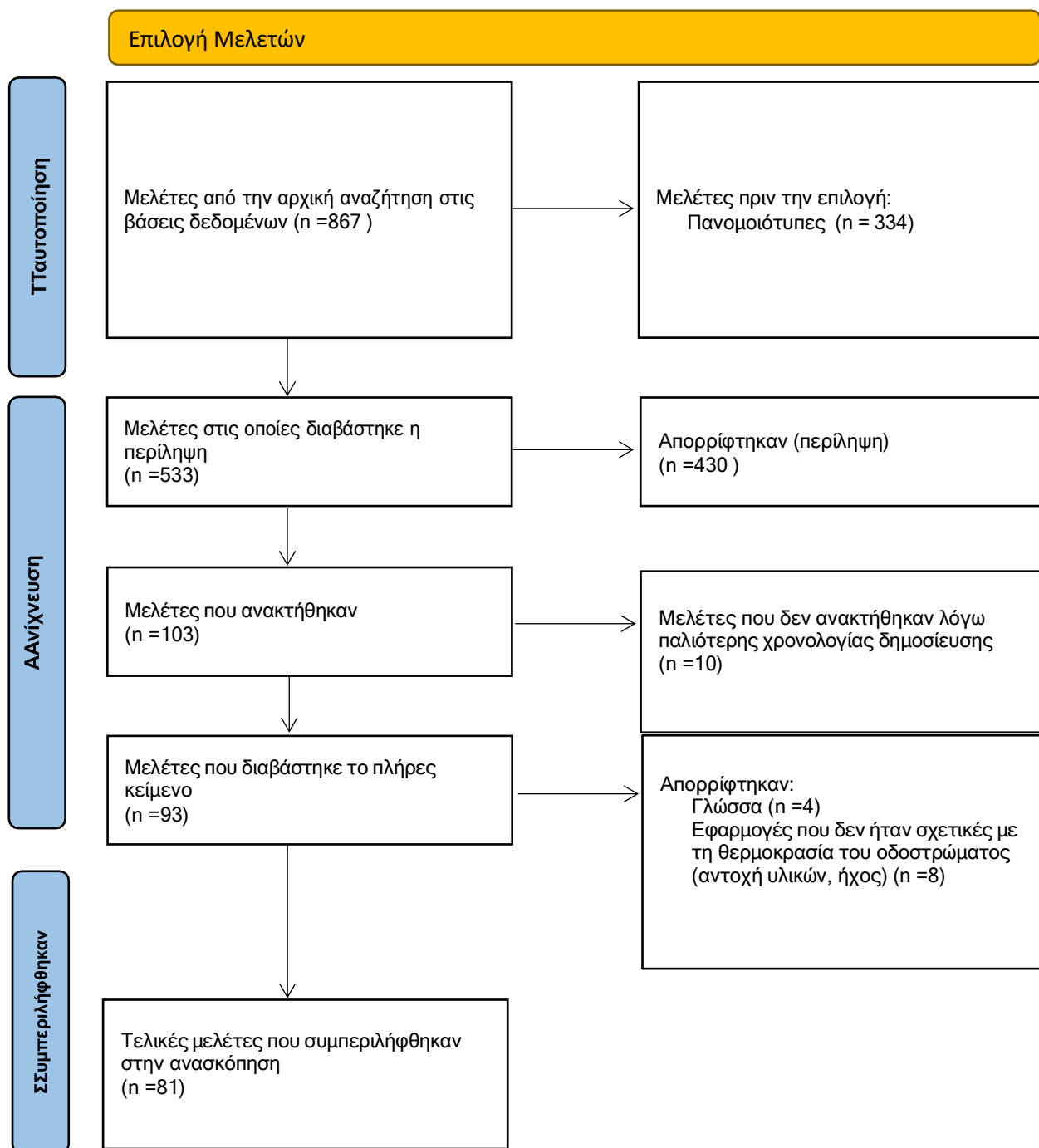
Σύμφωνα με τα δεδομένα που προέκυψαν από το ερευνητικό μέρος της εργασίας και το θέμα, προκύπτουν το ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα:

- Πώς επηρεάζουν οι ιδιότητες της επιφάνειας του οδοστρώματος, όπως το albedo (ΣΤΑ ΕΛΛΗΝΙΚΑ), η θερμική αγωγιμότητα, η θερμοχωρητικότητα και η εκπομπή, το προφίλ θερμοκρασίας του κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου;
- Ποια είναι η σχετική συμβολή των εσωτερικών παραγόντων του οδοστρώματος στη μέγιστη θερμοκρασία;
- Πώς εξωτερικοί παράγοντες επηρεάζουν τη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος μέσω μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας;
- Πως διαφοροποιούν τη θερμοκρασία του οδοστρώματος οι εσωτερικοί και οι εξωτερικοί παράγοντες σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα;
- Μπορεί ο χειρισμός των ιδιοτήτων της επιφάνειας του οδοστρώματος μέσω της επιλογής υλικών και του σχεδιασμού να μετριάσει το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας;
- Ποιοι τύποι υλικών, επιστρώσεων ή σχεδίων πεζοδρομίων είναι πιο αποτελεσματικοί στην αύξηση του albedo και της εκπομπής;
- Πώς μπορούν να εφαρμοστούν επιτυχώς οι στρατηγικές οδοστρώματος ψύξης με οικονομικά αποδοτικό τρόπο;

Για τη συλλογή δεδομένων προκειμένου να απαντηθούν τα ερευνητικά ερωτήματα που προέκυψαν, ακολουθήθηκε η μεθοδολογία της συστηματικής ανασκόπησης της βιβλιογραφίας. Εφαρμόστηκε ο ακόλουθος αλγόριθμος αναζήτησης στις βάσεις δεδομένων επιστημονικής βιβλιογραφίας Scopus, Google Scholar και Web of Science:

"asphalt pavement" OR "asphalt concrete" OR "pavement surface" OR "road surface"
AND "surface temperature" OR "thermal property" OR "heat island" "albedo" OR
"emissivity" OR "heat capacity" OR reflectance OR absorptance OR emittance) AND
"cool pavement" OR "cool road" OR "cold pavement" OR "cold road"

Τα κριτήρια ένταξης περιλάμβαναν τη γλώσσα δημοσίευσης (αγγλικά) της μελέτης, την χρονολογία δημοσίευσης (μετά το 2000) και τη συνάφεια του αντικειμένου της μελέτης με το θέμα της πτυχιακής εργασίας. Από την άλλη πλευρά, μελέτες οι οποίες ήταν γραμμένες σε άλλη γλώσσα, ήταν δημοσιευμένες πριν το 2000 και αναφέρονταν σε δρόμους χωρίς ασφαλτόστρωση, αναφέρονταν σε άλλες παραμέτρους (ανθεκτικότητα, ήχος, πρόσφυση κλπ) δεν συμπεριλήφθηκαν στην τελική σύνθεση της συστηματικής ανασκόπησης. Επίσης, δεν συμπεριλήφθηκαν διδακτορικές και μεταπτυχιακές διατριβές, καθώς επίσης και τεκμηριωμένες επιστημονικές απόψεις. Στο διάγραμμα ροής του σχήματος 1, απεικονίζεται η διαδικασία επιλογής των άρθρων που συμπεριλήφθηκαν στη συστηματική ανασκόπηση.



Σχήμα 1. Διάγραμμα ροής της επιλογής μελετών για τη συστηματική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμοκρασία του οδοστρώματος

Στις αστικές περιοχές, η χρήση ασφάλστινων οδοστρωμάτων υψηλής θερμοκρασίας προκαλεί την απελευθέρωση ακτινοβολίας μακρών κυμάτων και θερμότητας μέσω μεταφοράς στην τοπική ατμόσφαιρα (Yinfei, 2018). Αυτό έχει διάφορες επιπτώσεις στις πόλεις, συμπεριλαμβανομένης της μείωσης του δείκτη θερμικής άνεσης (Irmak, 2017), της αυξημένης κατανάλωσης ενέργειας και της εμφάνισης ασθενειών που σχετίζονται με τη ζέστη (Tan, 2010). Μία από τις πιο γνωστές αστικές κλιματικές καταστροφές είναι εμφάνιση της αστικής θερμικής νησίδα (UHI -Urban Heat Island), η οποία αναφέρεται στο φαινόμενο των σημαντικά υψηλότερων θερμοκρασιών που επικρατούν στο αστικό περιβάλλον, σε σύγκριση με τις θερμοκρασιακές συνθήκες που επικρατούν εκτός της πόλης (Shimazaki, 2021).

Από τη δεκαετία του 1980, η αστική ανάπτυξη έχει εντείνει ιδιαίτερα πρόβλημα της UHI και για το λόγο αυτό, είναι αντικείμενο μελέτης. Οι κύριες αιτίες του UHI περιλαμβάνουν αλλαγές στα υποκείμενα στρώματα του εδάφους των αστικών κέντρων, την αστική ατμοσφαιρική ρύπανση, την παράλογη διάταξη των αστικών κέντρων και τις τεχνητές πηγές θερμότητας (He, 2022).

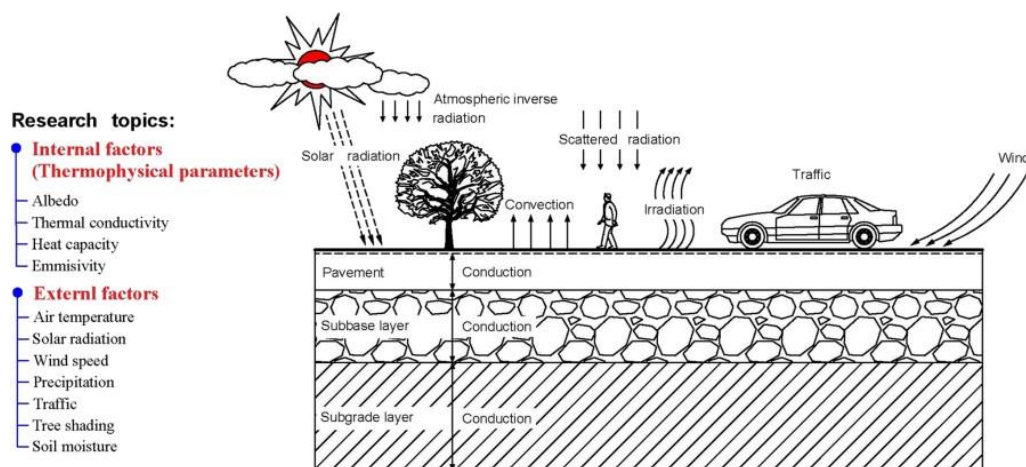
Επί του παρόντος, το ασφαλικό σκυρόδεμα με χαμηλή λευκάγεια, είναι το υλικό που χρησιμοποιείται συνήθως στην κατασκευή των αστικών οδοστρωμάτων. Κατά τις ώρες που υπάρχει ηλιοφάνεια, η επιφάνεια του πεζοδρομίου απορροφά ακτινοβολούμενη θερμότητα, η οποία στη συνέχεια απελευθερώνεται ως ακτινοβολία μακρών κυμάτων στο γύρω περιβάλλον, τις ώρες που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια. Επιπλέον, τα αδιαπέραστα από νερό οδοστρώματα περιορίζουν την κυκλοφορία του νερού μέσα στην πόλη, μειώνοντας την εξάτμιση και επιδεινώνοντας περαιτέρω το φαινόμενο UHI (Wang et al., 2022). Ως εκ τούτου, οι πολεοδομικοί σχεδιαστές πρέπει να αναπτύξουν κατάλληλα αστικά μοντέλα για να προσαρμοστούν σε αυτό το αυξανόμενο ζήτημα, το οποίο εντείνεται όλο και περισσότερο λόγω της εμφάνισης της κλιματικής κρίσης.

2.1.1 Αρχικά μοντέλα πρόβλεψης θερμοκρασίας περιβάλλοντος στη θερμοκρασία του οδοστρώματος

Η ακριβής εκτίμηση της επίδρασης της UHI είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον επιστημονικό σχεδιασμό της αστικής ανάπτυξης (Zhao, 2021b). Η θερμοκρασία του οδοστρώματος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τον σχεδιασμό και την απόδοση των άκαμπτων και εύκαμπτων οδοστρωμάτων (Mohd, 2016). Η ακριβής πρόβλεψη της θερμοκρασίας της επιφάνειας του οδοστρώματος, με βάση παραμέτρους όπως η θερμοκρασία του αέρα, μπορεί να βοηθήσει τους μηχανικούς στον πολεοδομικό σχεδιασμό. Οι Christison και Anderson (1972) χρησιμοποίησαν μαθηματική ανάλυση για να δημιουργήσουν ένα μοντέλο για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας του οδοστρώματος σε χαμηλές θερμοκρασίες. Οι Ongel και Harvey αργότερα, το 2004, ανέπτυξαν ένα μοντέλο πρόβλεψης θερμοκρασίας για να αναλύσουν ποιοτικά την επίδραση του κλίματος στην απόδοση του οδοστρώματος και να καθορίσουν πως επηρεάζει η θερμοκρασία των καιρικών φαινομένων τα πρότυπα θερμοκρασίας του οδοστρώματος. Ο Nuijten 2016 πρότεινε ότι η θερμοκρασία του αέρα είναι ένας αξιόπιστος δείκτης της διακύμανσης της θερμοκρασίας της επιφάνειας του οδοστρώματος και στη συνέχεια, εισήγαγε ένα φυσικό μοντέλο πρόβλεψης που μπορεί να συνδυαστεί με προγνώσεις καιρού. Οι Chen et al. το 2013, ανέλυσαν τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν την κατανομή θερμοκρασίας στους διάφορους τύπους οδοστρώματος με βάση τη θεωρία μεταφοράς θερμότητας και καθιέρωσαν ένα θεωρητικό-εμπειρικό μοντέλο πρόβλεψης. Η κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν τη θερμοκρασία του οδοστρώματος είναι ιδιαίτερα σημαντικοί για την επιλογή των κατάλληλων υλικών οδοστρώματος και την εφαρμογή αντίστοιχων μέτρων τεχνητής ψύξης (Chen, 2019c, Gui, 2007, Qin, 2019).

Η θερμοκρασία του οδοστρώματος επηρεάζεται τόσο από εσωτερικούς παράγοντες όπως θερμοφυσικές παραμέτρους όσο και από εξωτερικούς παράγοντες όπως ο τοπικός καιρός (Εικόνα 9). Οι θερμοφυσικές παράμετροι του οδοστρώματος αποτελούνται από τη λευκαύγεια και την εκπομπή θερμότητας του επιφανειακού στρώματος, καθώς και τη θερμική αγωγιμότητα, τη θερμοχωρητικότητα και την πυκνότητα των στρωμάτων του. Η θερμοκρασία επιφάνειας οδοστρωμάτων με διαφορετικές θερμοφυσικές παραμέτρους έχει ερευνηθεί εκτενώς προκειμένου να δημιουργηθούν στρατηγικές για τη μείωση της θερμοκρασίας στα οδοστρώματα. Από την άλλη πλευρά, η επίδραση του

τοπικού καιρού στη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος είναι μία παράμετρος η οποία είναι πιο δύσκολο να ελεγχθεί (Qin, 2022).



Εικόνα 9.. Τυπική κατάτμηση της θερμοκρασίας σε ένα οδόστρωμα (Πηγή': Qin, 2022)

2.2 Θεωρία των παραγόντων που επηρεάζουν τη θερμοκρασία του οδοστρώματος

Η θεωρία μεταφοράς θερμότητας ελέγχει τη μεταβολή της θερμοκρασίας του οδοστρώματος και αποκαλύπτει τους βασικούς παράγοντες που την επηρεάζουν. Η κατανόηση των νόμων της αλλαγής της θερμοκρασίας του οδοστρώματος είναι σημαντική για την ελαχιστοποίηση της φθοράς του οδοστρώματος αλλά και την ανάπτυξη οδοστρωμάτων με μικρότερη θερμοκρασία. Στην παρούσα παράγραφο περιγράφονται οι παράμετροι που καθορίζουν τη θερμοκρασία του οδοστρώματος και οι εξισώσεις της θεωρίας μεταφοράς θερμότητας. Η αγωγιμότητα της θερμότητας, η συναγωγή και η ακτινοβολία είναι οι μέθοδοι με τις οποίες το οδόστρωμα ανταλλάσσει θερμότητα. Η αγωγιμότητα της θερμότητας είναι ο κύριος τρόπος μεταφοράς θερμότητας εντός της δομής του οδοστρώματος, ενώ η επιφάνεια του οδοστρώματος ανταλλάσσει θερμότητα με το εξωτερικό περιβάλλον μέσω ακτινοβολίας και μεταφοράς. Άλλες ροές θερμότητας στην επιφάνεια του οδοστρώματος περιλαμβάνουν λανθάνουσα ροή θερμότητας από αλλαγές φάσης, ροή θερμότητας που προκαλείται από αναταράξεις κυκλοφορίας και το αποτέλεσμα ψύξης της επιφανειακής απορροής

(Chen, 2019). Οι Chen et al. πρότειναν μια εξίσωση για το ενεργειακό ισοζύγιο του οδοστρώματος που λαμβάνει υπόψη διάφορες ροές θερμότητας:

$$k \frac{\partial T_1(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_{ns} - q_{nl} - q_c \pm q_h \pm q_v - q_p$$

Στην παραπάνω εξίσωση, στην αριστερή πλευρά αντιπροσωπεύεται η καθαρή ροή θερμότητας στη δομή του οδοστρώματος, το k υποδηλώνει τη θερμική αγωγιμότητα, το $T_1(x, t)$ αντιπροσωπεύει το πεδίο θερμοκρασίας στο επιφανειακό στρώμα σε βαθμούς Κελσίου, το x αντιπροσωπεύει το βάθος σε μέτρα και το t αντιπροσωπεύει το χρόνο σε δευτερόλεπτα. Επιπλέον, το q_{ns} αντιπροσωπεύει την καθαρή ηλιακή ακτινοβολία, το q_{nl} αντιπροσωπεύει την ακτινοβολία μακρών κυμάτων που εξέρχεται από το οδόστρωμα και τα q_c , q_h , q_v και q_p αντιπροσωπεύουν τη ροή θερμότητας που προκαλείται από συναγωγή, αλλαγή φάσης, οχήματα και επιφανειακή απορροή, αντίστοιχα (Chen, 2019).

Από την παραπάνω εξίσωση, φαίνεται ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος σχετίζεται στενά με τις ροές θερμότητας. Αυτές οι ροές θερμότητας προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας δεδομένα που προκύπτουν από τις καιρικές συνθήκες. Επομένως, η διαδικασία μεταφοράς θερμότητας είναι υπεύθυνη για την επίδραση φυσικών παραγόντων στο πεδίο θερμοκρασίας του οδοστρώματος. Εκτός από τους φυσικούς παράγοντες, οι θερμικές φυσικές ιδιότητες του υλικού του οδοστρώματος έχουν επίσης σημαντικό αντίκτυπο στο πεδίο θερμοκρασίας. Ενώ η θερμοκρασία του οδοστρώματος διαφοροποιείται σημαντικά κατά τη διάρκεια της ημέρας, η σημαντικότερη παράμετρος στις σχετικές μελέτες είναι η μέγιστη θερμοκρασία οδοστρώματος. Οι Qin et al., πρότειναν ένα θεωρητικό μοντέλο για τον υπολογισμό αυτής της μέγιστης θερμοκρασίας, γνωστής ως T_x , χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$T_x = \beta \frac{(1-r)R_s - \varepsilon \delta}{P \sqrt{\omega}} + T_0$$

Όπου Όπου το β αντιπροσωπεύει μια σταθερά που χρησιμοποιείται για την ακρίβεια συναρμολόγησης, το r αντιπροσωπεύει το τη λευκάυγεια της επιφάνειας του

οδοστρώματος και το ε αντιπροσωπεύει την ικανότητα εκπομπής του οδοστρώματος. Το δ ($W\ m^{-2}$) είναι μια σταθερά και το R_s ($W\ m^{-2}$) είναι το ημερήσιο μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας. P είναι η θερμική αδράνεια του οδοστρώματος, η οποία τυπικά κυμαίνεται από 800 έως 2400 για κοινά οδοστρώματα. Το T_0 είναι μια σταθερά που προσδιορίζεται μέσω παλινδρόμησης. Από τις δύο αυτές εξισώσεις, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος μπορεί να επηρεαστεί από εξωτερικούς και εσωτερικούς παράγοντες. Λιγότερο σημαντικοί αλλά ωστόσο αναφερόμενοι στη βιβλιογραφία είναι οι πιθανές επιπτώσεις της σκίασης των δέντρων και της υγρασίας του εδάφους στη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος (Qin, 2019).

2.3 Εσωτερικοί παράγοντες

2.3.1 Λευκάυγεια

Η λευκάυγεια (albedo) είναι ένα μέτρο του ποσοστού ακτινοβολίας η οποία ανακλάται από μια επιφάνεια σε σύγκριση με το πόση ακτινοβολία λαμβάνεται από την ίδια επιφάνεια. Υποδηλώνει τη δυνατότητα που έχει η επιφάνεια να απορροφά την τη θερμότητα του ήλιου και αντιπροσωπεύεται από μια κλίμακα μεταξύ 0 και 1. Το χρώμα της επιφάνειας του οδοστρώματος, το οποίο αλλοιώνεται με την πάροδο χρονικού διαστήματος, έχει σημαντικό αντίκτυπο στο albedo. Οι επιφάνειες με υψηλότερο albedo, σε σύγκριση με τα παραδοσιακά υλικά οδοστρώματος, μπορούν να μειώσουν αποτελεσματικά τις επιφανειακές θερμοκρασίες αντανακλώντας περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία. Συχνά χρησιμοποιούνται θερμοανακλαστικές επιστρώσεις διαφορετικών χρωμάτων για δροσερά ασφαλτοστρώματα. Για παράδειγμα, μια λευκή επίστρωση μπορεί να μειώσει τις επιφανειακές θερμοκρασίες ενός μαύρου οδοστρώματος κατά 18-25 °C και ενός γκρίζου οδοστρώματος κατά 12 °C το καλοκαίρι (Zheng, 2013). Η αλλαγή του albedo ενός ασφαλτικού οδοστρώματος από 0,37 (μαύρο) σε 0,91 (λευκό) έχει τη δυνατότητα να ελαττώσει τη μέση θερμοκρασία του οδοστρώματος κατά περίπου 13 °C το καλοκαίρι. Μια άλλη μελέτη διαπίστωσε ότι η αλλαγή της μαύρης ασφάλτου σε λευκή αύξησε το albedo κατά 0,24, με αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του οδοστρώματος κατά τη διάρκεια της ημέρας κατά

7,7 °C το καλοκαίρι (Taleghani, 2014). Διαφορετικά υλικά οδοστρώματος έχουν επίσης διαφορετικά πεδία επιφανειακής θερμοκρασίας λόγω των χρωματικών τους παραλλαγών. Τα παραδοσιακά ασφαλτικά μείγματα, με την πιο σκούρα επιφάνειά τους, απορροφούν περισσότερη ακτινοβολία και επομένως έχουν υψηλότερες θερμοκρασίες σε σύγκριση με τα υλικά από τσιμεντοκονία υπό την επίδραση έντονης ηλιακής ακτινοβολίας (Guldentops, 2016).

Η αύξηση του της λευκάγειας μπορεί να μειώσει τη μέγιστη θερμοκρασία στην επιφάνεια (Li et al. 2013, Qin 2016). Ωστόσο, οι Li et al. ανακάλυψαν ότι η ύπαρξη υψηλού albedo δεν οδηγεί πάντα σε χαμηλότερες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της νύχτας κατά τη σύγκριση διαφορετικών υλικών οδοστρώματος. Η επίδραση του albedo στη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος απεικονίζεται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 1. Εκτός από την καθημερινή τάση, η επίδραση του albedo στη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος αλλάζει κατά τη διάρκεια των εποχών. Σύμφωνα με τους Li et al, το χειμώνα, η επίδραση του albedo στη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος στην Καλιφόρνια είναι περίπου το 50% σε σύγκριση με την επιρροή του παράγοντα αυτού στο οδόστρωμα τους καλοκαιρινούς μήνες (Li, 2013).

Πίνακας 1. Μελέτες στη βιβλιογραφία σχετικά με την επίδραση του αυξημένου albedo στη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος

Ευρήματα	Μελέτη
$\left. \frac{\partial T_x}{\partial r} \right _{r=0.1} = -3 \sim -4^{\circ}\text{C}$	Chen et al., 2019
$\max \left(\frac{\partial T_x}{\partial r} \right) = -15^{\circ}\text{C}$	Kinouchi et al. (2003)

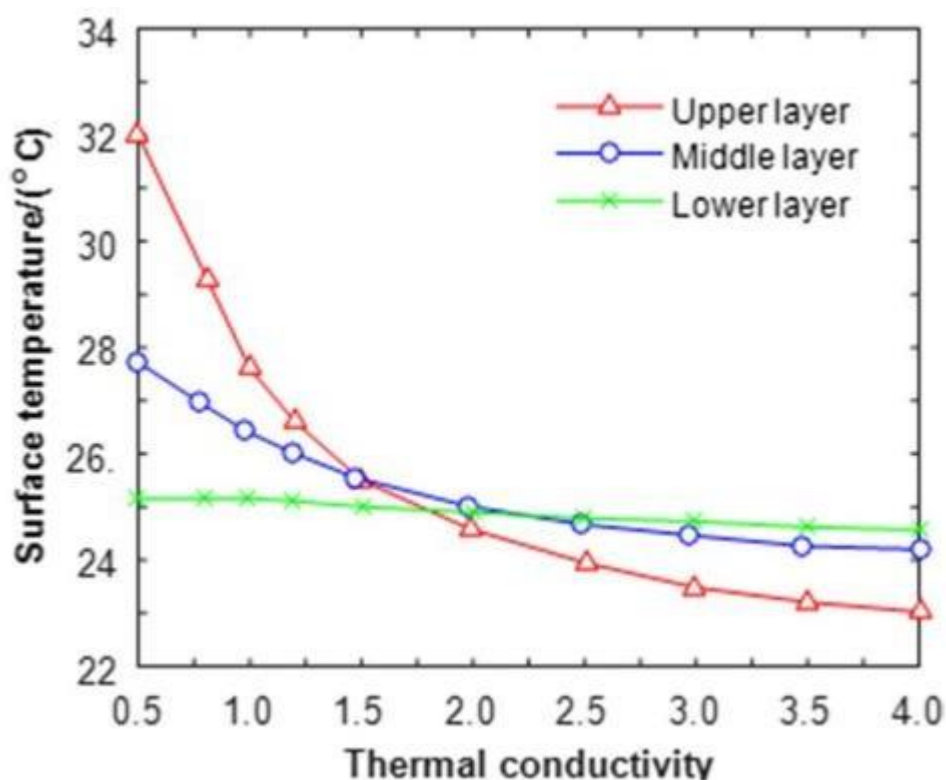
$\max \left(\frac{\partial T_x}{\partial r} \right) = -12^\circ\text{C}$	Synnefa et al. (2011a)
$\frac{\partial T_x}{\partial r} = -8 \sim -20^\circ\text{C}$	Carnielo et al., 2013
$T_x = -37.7r + 65.2, T_i = -7.4r + 21.0$	Qin et al., 2019
$\left. \frac{\partial T_x}{\partial r} \right _{r=0.1} = -2.48^\circ\text{C}$	Dutta et al. 2021

2.3.2 Θερμική αγωγιμότητα

Η θερμική αγωγιμότητα, η οποία αναφέρεται στη βιβλιογραφία και με το συντελεστή k , είναι μια θερμοφυσική παράμετρος που έχει σημαντικό αντίκτυπο στην κατανομή της ηλιακής απορρόφησης στην επιφάνεια των οδοστρωμάτων. Η ηλιακή απορρόφηση στην επιφάνεια του οδοστρώματος, στη συνέχεια, επηρεάζει και τη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος. Διάφορες μελέτες έχουν μελετήσει την επίδραση της συγκεκριμένης παραμέτρου στη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος (Chen, 2015, Zhang, 2017). Τα αποτελέσματα των μελετών αυτών δείχνουν ότι η επίδραση της θερμικής αγωγιμότητας στο οδόστρωμα, παρόμοια με την επίδραση του albedo, διαφέρει κατά την χρονική περίοδο ηλιοφάνειας. Αυτό συμβαίνει επειδή η υψηλή θερμική αγωγιμότητα επιτρέπει στην απορροφούμενη θερμότητα να μεταφέρεται γρήγορα προς τα κατώτερα στρώματα του οδοστρώματος κατά τη διάρκεια της ημέρας, μειώνοντας τη μέγιστη θερμοκρασία επιφάνειας. Ωστόσο, η θερμότητα συσσωρεύεται στα στρώματα του οδοστρώματος λόγω συνεχούς απορρόφησης, με αποτέλεσμα τη σταδιακή απελευθέρωση και την άνοδο της ελάχιστης θερμοκρασίας τη νύχτα (Sreedhar, 2016, Wan, 2012).

Διαφορετικά στρώματα οδοστρώματος έχουν και διαφορετικές επιπτώσεις στη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος. (Εικόνα 10). Η θερμική αγωγιμότητα του ανώτερου στρώματος, ειδικότερα, επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος. Ένα οδόστρωμα με υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα στο ανώτερο στρώμα έχει μικρότερη διαβάθμιση θερμοκρασίας. Κατά συνέπεια, το

οδόστρωμα δέχεται χαμηλότερο θερμικό επαγόμενο κυκλικό στρες. Η αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας σε αυτό το στρώμα μπορεί έτσι να μειώσει τη φθορά από τη διακύμανση της θερμοκρασίας του οδοστρώματος μέχρι κάποιο συγκεκριμένο βαθμό. Η ανάλυση της επίδρασης της θερμικής αγωγιμότητας σε διαφορετικά βάθη στη θερμοκρασία του οδοστρώματος μπορεί να χρησιμεύσει ως αναφορά για το σχεδιασμό των υλικών του ανώτερου στρώματος ή του στρώματος τριβής του οδοστρώματος (Li, 2012).



Εικόνα 10. Επίδραση διαφορετικής θερμικής αγωγιμότητας των διαφορετικών στρωμάτων του οδοστρώματος στη θερμοκρασία του οδοστρώματος (πηγή: Li, 2012)

2.3.3 Θερμοχωρητικότητα

Η ογκομετρική θερμοχωρητικότητα, που αναφέρεται στη βιβλιογραφία και σαν c , είναι μια θερμική παράμετρος που έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει την απορρόφηση και τη διάχυση της θερμότητας στο οδόστρωμα (Zhou, 2016). Σύμφωνα με προσομοιώσεις, η αύξηση της θερμοχωρητικότητας οδηγεί σε μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας επιφάνειας και αύξηση της ελάχιστης θερμοκρασίας επιφάνειας. Μια μελέτη που διεξήχθη από τους Dawson et al., διερεύνησε τις θερμικές ιδιότητες του θερμού

μίγματος ασφαλικού σκυροδέματος από σκωρία χαλκού και ασβεστόλιθο. Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι η θερμική αγωγιμότητα και η θερμοχωρητικότητα του ασφαλικού σκυροδέματος θερμού μίγματος αυξήθηκαν κατά 104% και 122% αντίστοιχα, με αποτέλεσμα τη μείωση της μέγιστης επιφανειακής θερμοκρασίας του ασφαλικού μίγματος χαλαζίτη κατά 4 °C (Dawson, 2012). Κατά τη διάρκεια της ημέρας, μια υψηλή θερμοχωρητικότητα μπορεί να αυξήσει τη θερμική μάζα του οδοστρώματος, επιβραδύνοντας με τον τρόπο αυτό την ανοδική μεταφορά θερμότητας. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της νύχτας, η ελάχιστη θερμοκρασία επιφάνειας αυξάνεται επειδή η θερμική μάζα εκπέμπει τη θερμότητα, επιστρέφοντάς τη στα ανώτερα στρώματα (Zhou, 2016).

2.3.4 Εκπομπές

Οι Cehn et al., ανέπτυξαν μία εξίσωση η μέγιστη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος μειώνεται όσο αυξάνεται η ικανότητα εκπομπής (ε). Η εκπομπή ακτινοβολίας αναφέρεται στον λόγο της ακτινοβολούμενης ροής ανά μονάδα επιφάνειας, στην επιφάνεια ενός αντικειμένου προς την ακτινοβολούμενη ροή ενός μαύρου σώματος στην ίδια θερμοκρασία (Chen, 2012). Είναι σημαντικός παράγοντας για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας της επιφάνειας στο οδόστρωμα, δεδομένου ότι οι επιφάνειες του οδοστρώματος είναι συνήθως μη μεταλλικές, ενώ η εκπομπή τους συνήθως κυμαίνεται από 0,85 έως 0,93 (Tang, 2014). Μια ενδεικτική τιμή η οποία χρησιμοποιείται συνήθως κατά την προσομοίωση της θερμοκρασίας του οδοστρώματος είναι το 0,90 (Qin, 2011a). Αρκετές μελέτες διεξήγαγαν προσομοιώσεις με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης της εκπομπής στο πεδίο θερμοκρασίας του οδοστρώματος (Πίνακας 2). Η επίδραση της εκπομπής στη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος είναι σχετικά απλή να διερευνηθεί, αφού ένα οδόστρωμα με υψηλότερη εκπομπή εκπέμπει περισσότερη θερμότητα στο περιβάλλον, μειώνοντας έτσι τη θερμοκρασία της επιφάνειάς του (Tang, 2014; Zhao, 2013).

Πίνακας 2. Μελέτες που εξετάζουν την επίδραση της εκπομπής θερμότητας στη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος

Ευρήματα	Μελέτη
$\left. \frac{\partial T_s}{\partial \varepsilon} \right _{\varepsilon=0.1} = -0.4^{\circ}C$	Phelan et al. (2015)
$T_x = -18.1\varepsilon + 75.7, T_i = -12.6\varepsilon + 30.6$	Qin et al. (2019)
$\max \left(\frac{\partial T_s}{\partial \varepsilon} \right) = -2^{\circ}C$	Mammeri et al. (2015)

2.3.5 Σύγκριση επίδρασης εσωτερικών παραγόντων στην επιφάνεια του οδοστρώματος

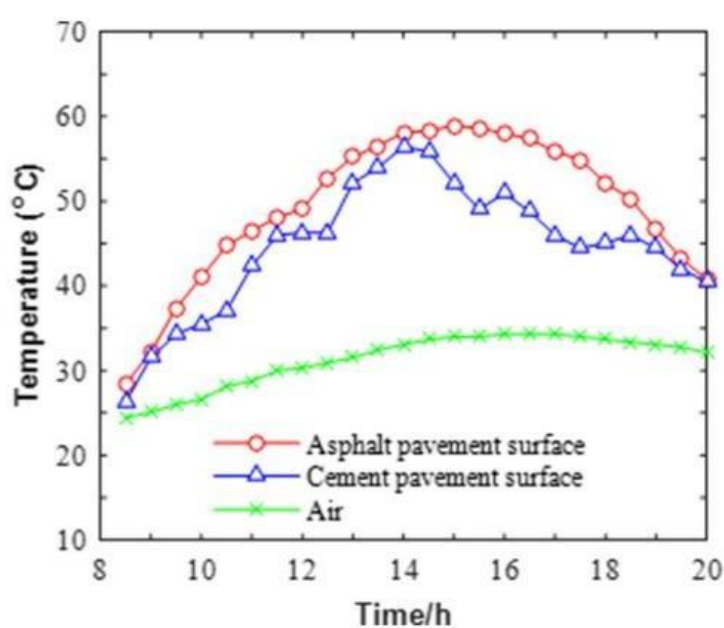
Η σύγκριση της επίδρασης διαφορετικών θερμοφυσικών παραμέτρων στο πεδίο θερμοκρασίας είναι ιδιαίτερα πολύτιμη, αφού μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην μελέτη σχεδιασμού του οδοστρώματος. Οι μελέτες που έχουν γίνει επικεντρώνονται στην διαστασιακή ανάλυση και συμπεραίνουν ότι το albedo, η θερμική αγωγιμότητα, η θερμοχωρητικότητα και η εκπομπή είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο τη μέγιστη θερμοκρασία επιφάνειας. Εάν ο στόχος είναι η μεταβολή της ελάχιστης θερμοκρασίας της επιφάνειας του οδοστρώματος, το albedo και η εκπομπή μπορούν να ελεγχθούν. Ωστόσο, η ρύθμιση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του οδοστρώματος μέσω θερμικής αγωγιμότητας είναι πιο αποτελεσματική σε σύγκριση με τον έλεγχο μέσω της ογκομετρικής θερμοχωρητικότητας (Feng, 2011). Μια πρόσφατη μελέτη των Shi et al. διερεύνησε το αναμενόμενο εύρος διακύμανσης της θερμικής αγωγιμότητας και της θερμικής ικανότητας για τυπικά αδρανή και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι και οι δύο παράμετροι έχουν παρόμοια επίδραση στη μέγιστη/ελάχιστη θερμοκρασία επιφάνειας. Η αλλαγή στη θερμική αγωγιμότητα μπορεί να οδηγήσει σε διαφορά έως και 5,4 °C στη θερμοκρασία της επιφάνειας, ενώ η αλλαγή στη θερμοχωρητικότητα μπορεί να οδηγήσει σε διαφορά έως και 5,0 °C (Shi, 2019).

2.4 Εξωτερικοί Παράγοντες

Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες έχουν πιο σύνθετη επίδραση στη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος. Η θερμοκρασία του οδοστρώματος επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες και την κυκλοφορία του αέρα (Qin, 2013, Yang et al. 2016), ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι αυτοί οι παράγοντες δρουν συνδυαστικά και όχι μεμονωμένα. Επομένως, οι εξωτερικοί παράγοντες επηρεάζουν τη θερμοκρασία του οδοστρώματος επηρεάζοντας τη θερμική κατανομή στην επιφάνειά του (Qin, 2013).

2.4.1 Θερμοκρασία αέρα

Υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της θερμοκρασίας της επιφάνειας (T_s) θερμοκρασίας (T_a). Η θερμοκρασία του αέρα στην επιφάνεια του οδοστρώματος επηρεάζεται άμεσα από τα σύννεφα και την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία μπορεί να ελέγξει τη μεταφορά θερμότητας και ακτινοβολίας. Η υψηλότερη θερμοκρασία επιφάνειας, T_x , σχετίζεται με το γεωγραφικό πλάτος. Το γεωγραφικό πλάτος έχει μια συγκεκριμένη περιοριστική επίδραση στη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος, ιδιαίτερα όσον αφορά την επιρροή του στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Η χαμηλότερη θερμοκρασία επιφάνειας αυξάνεται γραμμικά με την ελάχιστη θερμοκρασία αέρα (Nivitah, 2014) (Εικόνα 11).



Εικόνα 11. Σύγκριση μεταξύ της θερμοκρασίας του αέρα και της θερμοκρασίας του οδοστρώματος με υλικό επίστρωσης το τσιμέντο (μπλε γραμμή), την άσφαλτο (κόκκινη γραμμή) (Πηγή: Ma, 2013)

Σε ένα πείραμα που διεξήχθη στον αυτοκινητόδρομο Interstate 40 στο Νέο Μεξικό των ΗΠΑ, διαπιστώθηκε ότι η ακραία θερμοκρασία του οδοστρώματος δεν εμφανίζεται ταυτόχρονα με αυτή του αέρα. Το συνολικό εύρος και η τάση των δύο θερμοκρασιών (αέρα και οδοστρώματος) είναι παρόμοια. Η θερμοκρασία του οδοστρώματος είναι κατά το μεγαλύτερο ποσοστό μεγαλύτερη από τις δύο, γεγονός που τεκμηριώνει ένα φαινόμενο υστέρησης μεταξύ των δύο. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην πολύπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ των παραμέτρων του ενεργειακού ισοζυγίου της επιφάνειας του οδοστρώματος, όπως η καθαρή ακτινοβολία, η αποθήκευση θερμότητας και η ανθρωπογενής θερμότητα (Islam, 2015). Το φαινόμενο υστέρησης είναι αντίθετο με τη φορά των δεικτών του ρολογιού, υποδεικνύοντας ότι η μέγιστη θερμοκρασία αέρα εμφανίζεται μετά τη μέγιστη θερμοκρασία επιφάνειας. Παρά τις μικρές διαφορές στους συντελεστές παλινδρόμησης, τα φαινόμενα υστέρησης ακολουθούν το ίδιο μοτίβο (Song, 2017).

2.4.2 Ηλιακή Ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία, η οποία περιλαμβάνει τόσο τη διάχυτη όσο και την άμεση ακτινοβολία, είναι η κύρια πηγή θερμότητας στο δρόμο, όσον αφορά τους εξωτερικούς παράγοντες. Η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας, R_s , εξαρτάται κυρίως από τη γωνία μεταξύ του κάθετου διανύσματος της επιφάνειας και της κατεύθυνσης της ακτινοβολίας. Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία ταξιδεύει μέσω της ατμόσφαιρας σε σύντομα κύματα, η έντασή της μειώνεται λόγω απορρόφησης και σκέδασης που προκαλούνται από την κάλυψη των νεφών και τους ατμοσφαιρικούς ρύπους. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στην επιφάνεια του δρόμου, μέρος της απορροφάται από τη δομή του στρώματος του δρόμου και μετατρέπεται σε θερμότητα για αποθήκευση. Το υπόλοιπο τμήμα αντανακλάται πίσω στην ατμόσφαιρα (Bobes-Jesus, 2013, Cao, 2015).

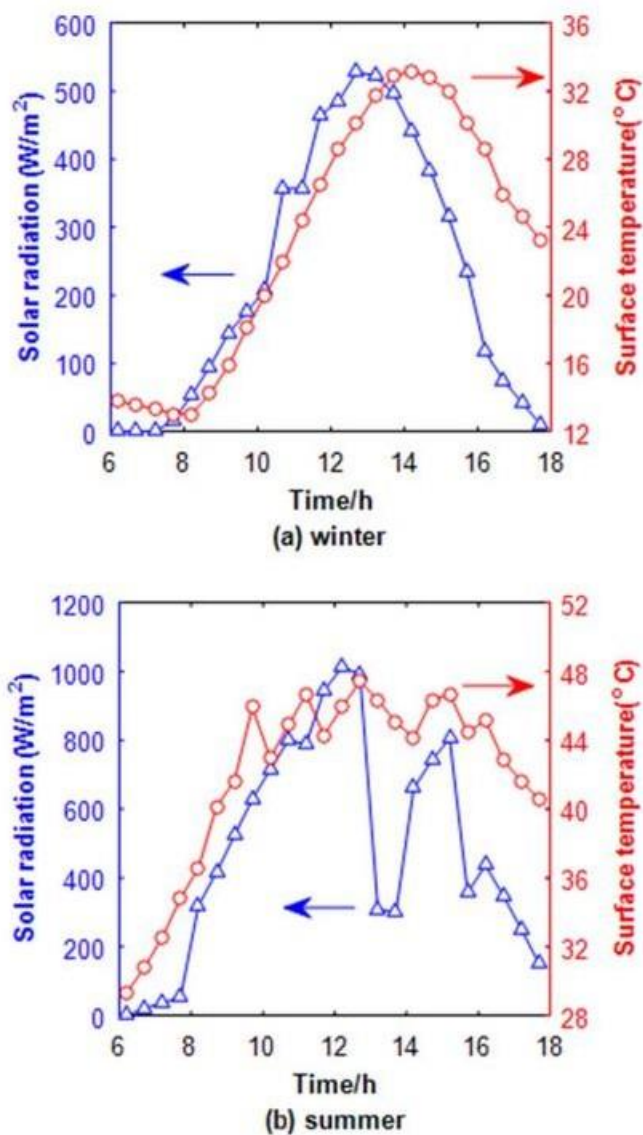
Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη θερμοκρασία της επιφάνειας (Qin, 2011). Κατά τη διάρκεια του ηλιακού μεσημέρι, η επιφάνεια του οδοστρώματος μπορεί να φτάσει σε θερμοκρασίες έως και 70 °C λόγω της αυξημένης ηλιακής απορρόφησης. Ωστόσο, αυτή η απορροφούμενη από την ασφαλτο θερμότητα δεν μεταφέρεται άμεσα σε όλα τα κατώτερα στρώματα του οδοστρώματος (Mingyu, 2010, Zhou, 2015). Η σχέση μεταξύ της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας της επιφάνειας του οδοστρώματος έχει τεκμηριωθεί σε αρκετές μελέτες, η πιο πρόσφατη εκ των οποίων είναι η μελέτη των Asefzadeh et al, οι οποίοι αποτυπώνουν την εν λόγω αλληλεπίδραση στην εξίσωση:

$$T_m = 0.651T_{am} - 1.7853 + 3.37 \times 10^{-4}R_s,$$

$$T_m = 1.1288T_{am} + 3.9832 + 2.68 \times 10^{-5}R_s$$

Όπου η πάνω εξίσωση αναφέρεται στην επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του οδοστρώματος κατά τους χειμερινούς μήνες και η δεύτερη εξίσωση στην ίδια επίδραση στους θερμούς μήνες του έτους (Asefzadeh, 2017).

Χρησιμοποιώντας μια γραμμική σχέση, οι ημερήσιες μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες της επιφάνειας του οδοστρώματος μπορούν να προσομοιωθούν με βάση τη στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία. Ωστόσο, η ακρίβεια της μεθόδου αυτής μπορεί να μειωθεί, εάν η ωριαία ακτινοβολία αντικατασταθεί με τον συνολικό ημερήσιο συντελεστή ακτινοβολίας. Ο Rumney, πρώτος το 1970, αντιμετώπισε αυτό το ζήτημα συλλέγοντας και συμπεριλαμβάνοντας τη θερμοκρασία της επιφάνειας του δρόμου και την ωριαία ηλιακή ακτινοβολία ταυτόχρονα για να βελτιώσει την ακρίβεια. Καθώς οι εποχές αλλάζουν, υπάρχει μία εποχική διαφορά ανάμεσα στην απορρόφηση της θερμότητας από τις ακτίνες του ήλιου από την επιφάνεια του οδοστρώματος. Σε χρονικό εύρος ενός έτους, η τάση και η διακύμανση της θερμοκρασίας ακολουθούν την αντίστοιχη τάση και διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η τάση αυτή είναι σημαντικά μειωμένη τους χειμερινούς μήνες, αφού η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία είναι χαμηλότερη σε σύγκριση με τους καλοκαιρινούς μήνες (Εικόνα 12) (Oliveira, 2002, Sabziparvar, 2008).



Εικόνα 12. Συσχέτιση ανάμεσα στην ηλιακή ακτινοβολία και την επιφάνεια του οδοστρώματος σε διαφορετικές εποχές (Πηγή: Qin, 2013).

2.4.3 Ταχύτητα ανέμου

Η μεταφορά θερμότητας της επιφάνειας του οδοστρώματος επηρεάζεται άμεσα από την τιμή της ταχύτητας του αέρα, η οποία έχει επίσης σημαντικό αντίκτυπο στην κατανομή της θερμοκρασίας στο οδόστρωμα. Η παρακάτω εξίσωση δείχνει τη σημασία της συναγωγής στη διατήρηση της ισορροπίας θερμότητας του οδοστρώματος. Το ποσοστό θερμότητας που μεταφέρεται μεταξύ της επιφάνειας του οδοστρώματος και

του αέρα που το περιβάλλει γίνεται μέσω θερμικής μεταφοράς, η οποία ακολουθεί την εξίσωση ψύξης του Νεύτωνα (Yang, 2017).

$$q_c = h_c (T_s - T_a)$$

Όπου το q_c ($W m^{-2} K^{-1}$) αντιπροσωπεύει τον συντελεστή μεταφοράς, το T_s (K) είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος και το T_a (K) είναι η θερμοκρασία του αέρα. Επιπλέον, το h_c ($W m^{-2} K$) αντιπροσωπεύει τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Ο συντελεστής μεταφοράς, q_c , εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, h_c , ο οποίος επηρεάζεται κυρίως από την ταχύτητα του ανέμου. Οι σημαντικότεροι τύποι που αναφέρονται στη βιβλιογραφία σχετικά με την εκτίμηση των συντελεστών μεταφοράς με βάση την ταχύτητα του ανέμου συνοψίζονται στον Πίνακα 3 (Yang, 2017).

Πίνακας 3. Σημαντικότεροι τύποι για τη επίδραση της ταχύτητας του αέρα στη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος.

Μοντέλο	Παράδειγμα	Μελέτη
Μοντέλο Ταχύτητας του αέρα	$h_c = 5.6 + 4.0W, W \leq 5 m s^{-1}$	Qin, 2016
	$h_c = 6 + 3.7W$	Huang, 2017
Μοντέλο Vehrencamp	$h_c = 977.54 \left[0.00144 T_{as}^{0.3} W^{0.5} + 0.00097 (T_s - T_a)^{0.3} \right]$	Alavi, 2014
	$h_c = 768.06 \left[0.00144 T_{as} ^{0.3} W^{0.5} + 0.00097 (T_s - T_a)^{0.3} \right]$	Alavi, 2014

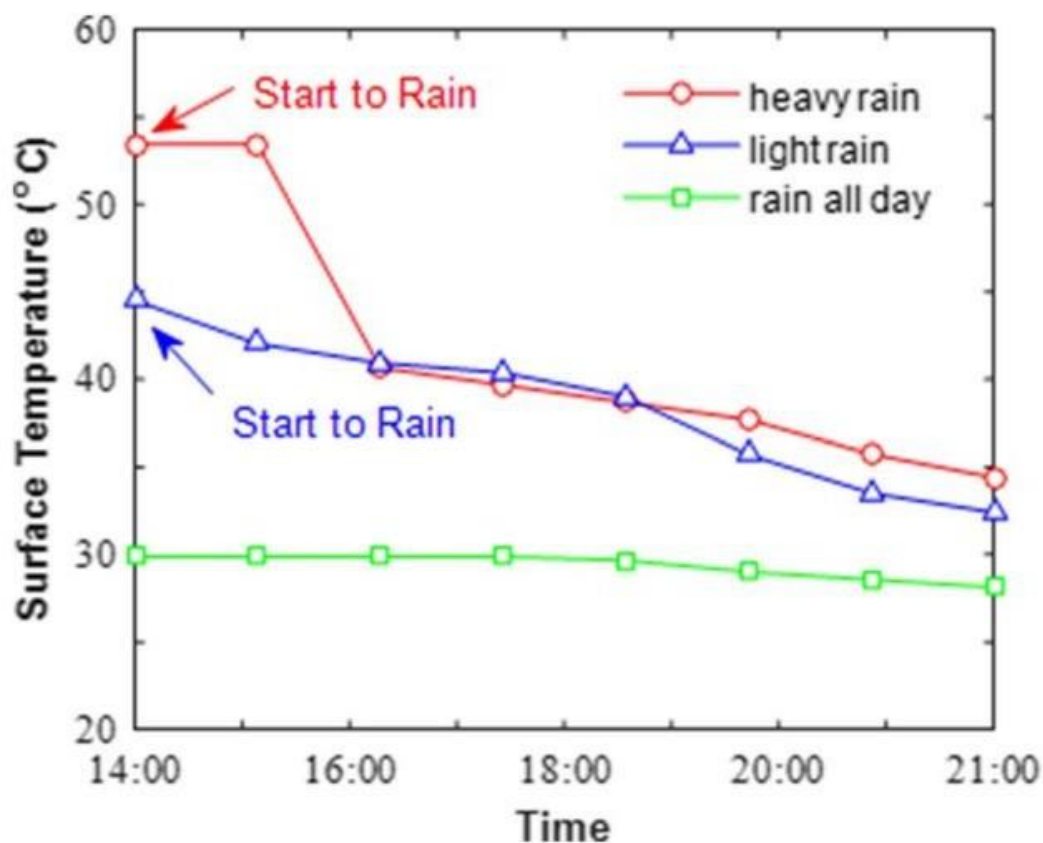
Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3, η ταχύτητα ανέμου είναι η μόνη μεταβλητή που χρησιμοποιείται στην εξίσωση κατά την εκτίμηση του συντελεστή μεταφοράς, αν και

μπορεί επίσης να ληφθεί υπόψη μαζί με άλλες παραμέτρους, όπως π.χ. θερμοκρασία του αέρα. Επομένως, τα δεδομένα ταχύτητας ανέμου παίζουν σημαντικό ρόλο για τον προσδιορισμό του συντελεστή μεταφοράς της θερμότητας. Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου μπορεί να ενισχύσει τον συντελεστή μεταφοράς, να προωθήσει τη μεταφορά θερμότητας, να επιταχύνει την ανταλλαγή θερμότητας και να μειώσει την επίδραση του albedo (Pomerantz 2003, Yang et al. 2017).

Επειδή και παράγοντες εκτός από τη θερμοκρασία του αέρα επηρεάζουν τη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος, οι ερευνητές έλαβαν υπόψη διάφορες παραμέτρους στο μοντέλο πρόβλεψης της θερμοκρασίας της επιφάνειας του οδοστρώματος. Στόχος τους ήταν να ενισχύσουν την ακρίβεια των μοντέλων που επικεντρώνονταν στην επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα στην θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος (Qin, 2013).

2.4.4 Βροχή

Η θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος μειώνεται με η βροχόπτωση, και το η μείωση αυτή σχετίζεται στενά με τη φύση της βροχόπτωσης (Zhang et al. 2015). Έχει παρατηρηθεί ότι η δυνατή βροχή προκαλεί τη μέγιστη πτώση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του οδοστρώματος έως τους 13 °C, και αυτή η ψύξη έχει αποτέλεσμα υστέρησης (Εικόνα 13). Η μείωση της έντασης της βροζόπτωσης έχει σαν αποτέλεσμα την αντίστοιχη μείωση στο εύρος πτώσης της θερμοκρασίας και στο οδόστρωμα. Σε περίπτωση που η βροχόπτωση συνεχίζεται για μεγάλο χρονικό διάστημα (πολλές ώρες), ο ήλιος καλύπτεται τελείως από χαμηλή και πυκνή νέφωση, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα την συνεχή ψύξη της επιφάνειας του οδοστρώματος (Zhang, 2015).



Εικόνα 13. Αλλαγές στη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος κατά τη βροχόπτωση (Zhang, 2014).

2.4.5 Κυκλοφορία οχημάτων

Τα μεγάλα φορτία οχημάτων έχουν σημαντική επίδραση στη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος, μέσω διαφόρων μέσων, συμπεριλαμβανομένης της ροής θερμότητας τριβής ελαστικών, της ροής θερμότητας ακτινοβολίας του οχήματος, της αισθητής ροής θερμότητας που προκαλείται από το όχημα και την προστασία ακτινοβολίας θερμότητας του οχήματος (Chapman, 2005, Fujimoto, 2014). Το όχημα εκπέμπει ακτινοβολούμενη ροή θερμότητας στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Σε έναν δρόμο με πολλές λωρίδες, μια αύξηση του αριθμού των αργών οχημάτων στην αριστερή λωρίδα μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας κατά περίπου 2 °C. Επιπλέον, η θερμοκρασία της επιφάνειας στην περιοχή όπου περνούν οχήματα με αυξημένο ρυθμό, όπως για παράδειγμα συμβαίνει κατά τη διάρκεια μιας περιόδου αυξημένης κίνησης είναι περίπου 0,2 °C υψηλότερη από ό,τι

σε περιοχές με το ίδιο οδόστρωμα όπου υπάρχει κανονική ροή της κυκλοφορίας (Fujimoto, 2008).

Η θερμοκρασία της επιφάνειας αλλάζει ανάλογα με τη θερμότητα που παράγεται στην περιοχή τα οχήματα σταματούν και ξεκινούν συνεχώς. Όταν τα οχήματα σταματούν να κινούνται και ταυτόχρονα υπάρχει ηλιοφάνεια, η θερμοκρασία μειώνεται επειδή εμποδίζεται η θερμότητα από τον ήλιο. Ωστόσο, η θερμότητα τριβής από τα ελαστικά και η θερμότητα που παράγεται όταν το όχημα σταματά και ξεκινά μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση παραπάνω θερμοκρασίας, κατά περίπου 3,5 °C, ειδικά τη νύχτα. Η θερμοκρασία της επιφάνειας είναι χαμηλότερη σε περιοχές όπου δεν υπάρχει στάση. Αυτό συμβαίνει επειδή τα κινούμενα οχήματα προκαλούν την ανάμιξη του αέρα πάνω από το δρόμο, δημιουργώντας αναταράξεις κοντά στο έδαφος. Συμπερασματικά, η θερμοκρασία της επιφάνειας μειώνεται όταν το όχημα βρίσκεται σε κίνηση και αυξάνεται όταν είναι σταματημένο, λόγω αλλαγών στη θερμότητα που εκπέμπεται από το κάτω μέρος του οχήματος (Fujimoto, 2012).

2.4.6 Σκίαση οδοστρώματος από δέντρα

Η αστική δασοκομία παίζει καθοριστικό ρόλο στη ρύθμιση του μικροκλίματος στις αστικές περιοχές. Η παρουσία δέντρων παρέχει σκιά και εξατμισοδιαπνοή, η οποία έχει άμεσο αντίκτυπο στη μεταφορά θερμότητας στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ στην περίπτωση του οδοστρώματος, μειώνει τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην επιφάνειά του και ενισχύει την εξωτερική άνεση για τον άνθρωπο (Holst, 2011, Lee, 2018, Mayer, 2008). Τα δέντρα παρεμποδίζουν επίσης την ακτινοβολία βραχέων κυμάτων του ήλιου και εμποδίζουν τη θέρμανση της επιφάνειας του δρόμου (Brandani, 2016). Ο τύπος του δέντρου, τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά, η πυκνότητα των φύλλων και η φυλλική επιφάνεια επηρεάζουν το πόσο τα δέντρα μετριάζουν το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας (Greene, 2018). Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας χρησιμοποιείται συχνά για τη μέτρηση της ψυκτικής επίδρασης της κάλυψης των δέντρων στις επιφάνειες των πεζοδρομίων (Mirzaei, 2015). Υποδεικνύει την πυκνότητα της φυτικής κάλυψης και τον ρυθμό εξατμισοδιαπνοής, ποσοτικοποιώντας την επιφάνεια των φύλλων των δέντρων που μπορούν να

ανταλλάζουν θερμότητα και ύλη με την ατμόσφαιρα. Αυτός ο δείκτης καθορίζεται κυρίως από παράγοντες όπως η ηλικία του δέντρου, ο τύπος, τα θρεπτικά συστατικά του εδάφους, οι συνθήκες των υπόγειων υδάτων και η ταχύτητα του ανέμου (Mayer, 2008).

Η ψύξη που παρέχουν τα δέντρα σε μια αστική περιοχή, ποικίλλει ανάλογα με το είδος τους. Διαφορετικά είδη έχουν διαφορετική επίδραση στην ηλιακή ακτινοβολία, η οποία αφού τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών ειδών, επηρεάζουν την ποσότητα σκιάς που παρέχεται στο οδόστρωμα. Όταν υπάρχει μεγαλύτερη ποσότητα φυτικής κάλυψης, η επιφάνεια του δρόμου απορροφά λιγότερη ηλιακή ενέργεια. Στη μελέτη των Jamei et al. διερευνάται η επίδραση του γεωμετρικού σχήματος που έχουν τα μοντέλα πρασίνου στις πόλεις, τα οποία χρησιμοποιούνται για να μειώσουν το φαινόμενο UHI και να ενισχύσουν το αστικό μικροκλίμα (Jamei, 2016). Σε μια άλλη μελέτη οι Leuzinger et al., συμπεραίνουν ότι τα δέντρα με μικρότερα φύλλα ήταν πιο αποτελεσματικά στην ψύξη των οδοστρωμάτων. Επίσης, αναφορικά με την ποσοτικοποίηση της τοπικής επίδρασης του όγκου των δέντρων στην ένταση της θερμικής νησίδας τη νύχτα φαίνεται ότι εντός της περιοχής δοκιμής, ο όγκος των δέντρων είχε τη μεγαλύτερη επίδραση στο UHI σε ακτίνα 40 μέτρων (Leuzinger, 2010).

2.4.7 Υγρασία εδάφους

Η υγρασία του εδάφους παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στον κύκλο του νερού, και της ενέργειας (Shi, 2011). Η θερμοκρασία της επιφάνειας και η υγρασία του εδάφους είναι σημαντικοί παράγοντες που αντανakλούν τη ροή ενέργειας και την ανταλλαγή υλικών στα αστικά συστήματα μικροκλίματος. Η παρουσία υγρασίας του εδάφους επηρεάζει τη θερμοκρασία της επιφάνειας του, επηρεάζοντας τη θερμική ικανότητα του εδάφους και την επιφανειακή εξατμισοδιαπνοή. Η θερμοχωρητικότητα του εδάφους αυξάνεται καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε νερό. Υπό τις ίδιες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας, τα ξηρά εδάφη έχουν υψηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες και μεγαλύτερες διακυμάνσεις θερμοκρασίας σε σύγκριση με τα υγρά εδάφη (Li, 2012). Σε πρόσφατη μελέτη έχει εξεταστεί η συσχέτιση μεταξύ της περιεκτικότητας σε νερό του εδάφους και των εγγύς υπέρυθρων κυμάτων της ηλιακής ακτινοβολίας (Zhao

et al., 2021). Η ίδια μελέτη προτείνει ένα θεωρητικό μοντέλο για την πιο εμπειριστατωμένη μελέτη ανάμεσα στη σχέση της υγρασίας του εδάφους και του albedo, προκειμένου να μεγιστοποιήσουν το αποτέλεσμα ψύξης των οδοστρωμάτων χρησιμοποιώντας υπάρχοντες πόρους. Προτάθηκε επίσης ότι η υγρασία του εδάφους μειώνεται καθώς αυξάνεται το albedo και επιβεβαιώνεται η ύπαρξη μιας γραμμικής σύνδεσης μεταξύ της περιεκτικότητας σε νερό του εδάφους και του albedo (Zhao, 2021).

ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΨΥΞΗΣ

Οι μελέτες που υπάρχουν στη βιβλιογραφία δείχνουν ότι οι στρατηγικές που έχουν χρησιμοποιηθεί για την ψύξη των οδοστρωμάτων μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες: ανακλαστικά οδοστρώματα και διαπερατά οδοστρώματα με μηχανισμό ψύξης νερού (Anting, 2018). Αυτά τα οδοστρώματα έχουν μελετηθεί εκτενώς, λαμβάνοντας υπόψη την αποδοτικότητά τους ως προς το κόστος και την ικανότητά τους να καταπολεμούν το φαινόμενο UHI μειώνοντας τις θερμοκρασίες του οδοστρώματος και του περιβάλλοντος και ωφελώντας το περιβάλλον (Yang, 2015). Τα ανακλαστικά οδοστρώματα έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία παγκοσμίως με θετικά αποτελέσματα. Συνολικά, παράγοντες όπως το χρώμα, το πόσο επίπεδη είναι η επιφάνειά τους και η επιφανειακή διαπερατότητα επηρεάζουν το albedo των οδοστρωμάτων και συμβάλλουν στη βελτίωση της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας (Santamouris, 2013). Από την άλλη πλευρά, τα διαπερατά οδοστρώματα, συμπεριλαμβανομένων των οδοστρωμάτων εξάτμισης και συγκράτησης νερού, έχουν σχεδιαστεί με υψηλούς αναλογίες κενών αέρα ανάμεσα στα στρώματά των υλικών κατασκευής τους. Τα συμβατικά πορώδη ασφαλικά οδοστρώματα έχουν επιφάνειες ασφάλτου ανοιχτής διαβάθμισης που εφαρμόζονται σε βασικά στρώματα (NAPA, 2003). Αυτός ο σχεδιασμός επιτρέπει στο νερό να ρέει μέσα στα υποστρώματα για να ψύχει το οδόστρωμα και σε ορισμένες περιπτώσεις, τα όμβρια ύδατα συγκρατούνται εντός του οδοστρώματος. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τα οδοστρώματα που συγκρατούν νερό πρέπει να πληρούν τρεις αρχές: (1) οι επιφανειακές τους

θερμοκρασίες πρέπει να είναι χαμηλότερες από ό,τι υπό κανονικές καιρικές συνθήκες. (2) θα πρέπει να μειώνουν συνεχώς τις αυξήσεις της θερμοκρασίας μετά από βροχή και τέλος, (3) μεγάλο ποσοστό ανθεκτικότητας και ελάχιστη μείωση του ποσοστού της απόδοσής τους σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (Santamouris, 2013).

3.1 Επίστρωση και επεξεργασία επιφάνειας οδοστρώματος

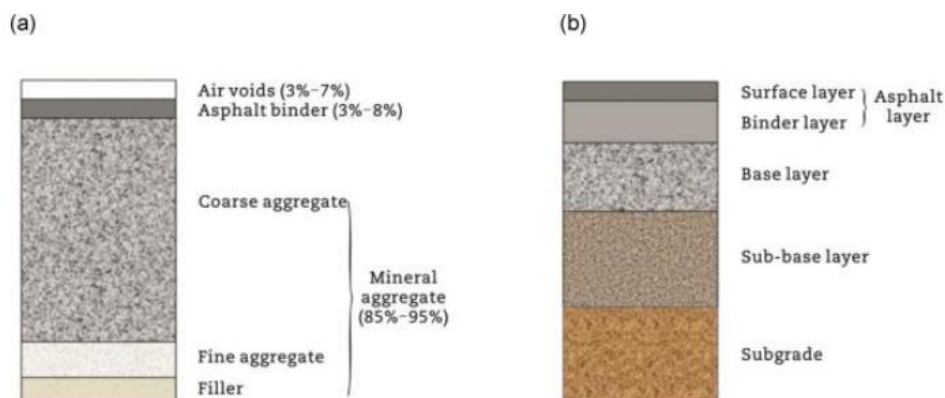
Η επίστρωση της επιφάνειας ενός οδοστρώματος αυξάνει την ανάκλασή του (albedo) και μειώνει την ηλιακή απορρόφηση και τη θερμική αγωγιμότητα λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας του οδοστρώματος. Τα τυπικά χρώματα τα οποία χρησιμοποιούνται, ιδιαίτερα στα νέα ασφαλτικά πεζοδρόμια, απορροφούν σημαντική ποσότητα ενέργειας από το ηλιακό φως (Santamouris, 2013). Ένας τρόπος για να αυξηθεί το albedo μιας σφράγισης τσιπ (chip sealing) είναι χρησιμοποιώντας ένα ανοιχτόχρωμο υλικό, όπως ανοιχτόχρωμο αδρανές υλικό, αν και αυτή η τιμή μπορεί να μειωθεί μετά από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (O' Malley, 2015). Η χρήση λευκής σφράγισης δεν είναι συνηθισμένη λόγω του υψηλού κόστους χρήσης ενός ακριβού γαλακτωματοποιητή (Pomerantz, 2003). Η έννοια της χρήσης ανοιχτόχρωμων αδρανών, συμπεριλαμβανομένων των απορριμμάτων όπως τα πλακάκια, για την αύξηση του albedo και της εκπομπής έχει επίσης διερευνηθεί σε μια μελέτη από τους Guntor et al., όπου το albedo έφτασε στην τιμή του 0,52 και η εκπομπή την τιμή 0,93 (Guntor, 2014).

Στη μελέτη των Carnielo et al., εξετάστηκαν διαφορετικά χρώματα που χρησιμοποιούνται ως επικαλύψεις και διαπίστωσαν ότι οι διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ των πράσινων, μπλε και γκρι δειγμάτων σε σύγκριση με το χρώμα ελέγχου έλεγχο κυμαίνονταν από 8 °C έως 10 °C (Carnielo, 2013). Η κόκκινη επίστρωση είχε χαμηλότερες τιμές, ενώ το υπόλευκο δείγμα είχε διαφορά θερμοκρασίας περίπου 20 °C. Οι Synnefa et al. διερεύνησαν επίσης τη χρήση διαφόρων χρωμάτων ως επιστρώσεις για ασφαλτοστρώσεις οδοστρώματων (Synnefa, 2011). Οι μετρήσεις πεδίου τους αποκάλυψαν ότι το υπόλευκο δείγμα ασφάλτου είχε την υψηλότερη ηλιακή ανάκλαση στο 55% και διαφορά θερμοκρασίας 11,9 °C σε σύγκριση με τη συμβατική ασφαλτο. Η μελέτη διαπίστωσε επίσης ότι η κόκκινη επίστρωση είχε ως αποτέλεσμα τη μικρότερη διαφορά θερμοκρασίας. Οι Kyriakodis et al., επικεντρώθηκαν στη

σύγκριση ενός λεπτού στρώματος ανοιχτοκίτρινης ασφάλτου με τη συμβατική ασφαλτο. Τα ευρήματά τους έδειξαν ότι το ανοιχτό χρώμα αύξησε το albedo και οδήγησε σε μείωση της θερμοκρασίας κατά 7,5 °C (Kyriakodis, 2018).

3.2 Μέθοδοι σχεδιασμού

Ο σχεδιασμός του οδοστρώματος επηρεάζεται από την ποσότητα των συστατικών που χρησιμοποιούνται και την αναλογία κενών αέρα πρέπει να είναι κατάλληλη για το κάθε οδόστρωμα ανάλογα με την τοποθεσία όπου πρέπει αυτό να εγκατασταθεί. Η Εικόνα 14, απεικονίζει τα βασικά στοιχεία και τη δομή ενός ασφαλτοστρώματος. Η δομή αυτή, αποτελείται από ασφαλτικά επιφανειακά στρώματα που τοποθετούνται πάνω από μία βάση και στη συνέχεια μια υποβάση, η οποία τοποθετείται στο υπόβαθρο (Mohajerani, 2017). Το επιφανειακό στρώμα είναι αυτό που επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τη θερμότητα, ενώ τα κατώτερα στρώματα εξαρτώνται από την αναλογία θερμότητας που απορροφάται από την επιφάνεια και την αγωγιμότητα μεταξύ των στρωμάτων του οδοστρώματος. Οι θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του ασφαλτικού οδοστρώματος καθορίζονται από τις αναλογίες των υλικών στο ασφαλτικό μείγμα (Mohajerani, 2017).



Εικόνα 14. Τυπική δομή και συστατικά για διαφορετικούς τύπους ασφαλτικού οδοστρώματος . (α) συστατικά των ασφαλτικών στρωμάτων και (β) δομή των ασφαλτικών οδοστρωμάτων (Πηγή: Mohajerani, 2017).

Τα σχέδια ασφαλτικών μειγμάτων, τα οποία μπορούν να περιλαμβάνουν στοιχεία όπως ασφαλτική σκυρομαστίχη και πορώδη ασφαλτο, μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις

κατηγορίες: πυκνή διαβάθμιση, ανοικτή διαβάθμιση και διαβάθμιση με διάκενο. Το μεγαλύτερο ποσοστό των ασφαλικών οδοστρωμάτων είναι πυκνής διαβάθμισης και έχει «τιμή ανάκλασης» που κυμαίνεται από 0,04 - 0,45. Κατά συνέπεια, οι επιφανειακές θερμοκρασίες των παραδοσιακών ασφαλτοστρωμάτων μπορούν να φτάσουν σε θερμοκρασίες 48 °C–67 °C με μέγιστη ηλιακή ένταση (Beddu, 2014). Πολυάριθμες μελέτες έχουν διερευνήσει την επίδραση των διαπερατών ασφαλικών οδοστρωμάτων στη θερμοκρασία του οδοστρώματος (Buyung, 2017, Wang, 2018). Οι ερευνητές έχουν εξετάσει τις επιπτώσεις των αστικών θερμικών νησιών λαμβάνοντας υπόψη τον ημερήσιο κύκλο θερμοκρασίας (Pourshams-Manzouri, 2015). Μερικοί ερευνητές αναφέρουν ότι τα πορώδη οδοστρώματα είναι πιθανώς πιο δροσερά, λόγω της υψηλής διαπερατότητάς τους, η οποία επιτρέπει στο νερό να περάσει και να εξατμιστεί. Η πορώδης ασφαλτος απορροφά περισσότερη θερμότητα στην επιφάνειά ιδιαίτερα όταν επικρατούν ξηρές συνθήκες. Επίσης, απελευθερώνει θερμότητα ταχύτερα και ως εκ τούτου είναι πιο δροσερή από άλλες επιφάνειες ασφαλικών οδοστρωμάτων τη νύχτα (Toraldo, 2015). Οι Takebayashi και Moriyama συνέκριναν τις επιφάνειες των συμβατικών πεζοδρομίων, της πορώδης ασφάλτου και της ασφάλτου συγκράτησης νερού με έναν λευκό υγρό παράγοντα κατακράτησης νερού που εγχύθηκε στα κενά. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μείωση της αισθητής ροής θερμότητας για μια ασφαλική επιφάνεια που συγκρατεί το νερό είναι περίπου 140 W/m² κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ είναι κοντά στο 0 για μια πορώδη ασφαλική επιφάνεια (Takebayashi, 2012).

Σε άλλες μελέτες χρησιμοποιήθηκε το υπέρυθρο φως για τη δοκιμή αποξηραμένων και κορεσμένων δειγμάτων ασφάλτου με διαφορετικά ποσοστά κενού αέρα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα κενά αέρα έχουν αντίκτυπο στην ειδική θερμοχωρητικότητα και τη θερμική αγωγιμότητα των ασφαλικών μιγμάτων όταν αυτά είναι στεγνά. Ωστόσο, όταν τα μείγματα είναι υγρά, η διαδικασία εξάτμισης μειώνει τη θερμοκρασία του ασφαλικού μείγματος. Η μελέτη συνέκρινε διαφορετικές αναλογίες κενών αέρα για να καταδείξει την επίδραση των κενών αέρα στην απόκριση θερμότητας των ασφαλικών οδοστρωμάτων. Τα ευρήματα έδειξαν ότι τα συμβατικά οδοστρώματα πυκνής διαβάθμισης με περιεκτικότητα σε κενό αέρα 4% και 7% έχουν την υψηλότερη θερμοχωρητικότητα και αγωγιμότητα, ενώ το μείγμα ασφάλτου-

καουτσούκ ανοιχτής διαβάθμισης έχει τη χαμηλότερη ειδική θερμοχωρητικότητα και αγωγιμότητα (Hassn, 2016). Η σύγκριση αυτή, διαφοροποιείται σε σημαντικό βαθμό, από διακυμάνσεις στην περιεκτικότητα σε συνδετικό υλικό και κενά αέρα μεταξύ των μειγμάτων. Μια άλλη μελέτη επικεντρώθηκε στη συμβατική πορώδη πορεία τριβής και παρακολούθησε την επίδρασή της στη μέση θερμοκρασία του δείγματος του οδοστρώματος. Οι συγγραφείς, αναφέρουν συμπερασματικά, ότι το οδόστρωμα δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως δροσερό οδόστρωμα κατά την ξηρή περίοδο (Sreedhar, 2016). Επιπλέον, μια μέθοδος που ονομάζεται «κασσιτεροποίηση» χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία μικρών περιοχών σκιάς στις επιφάνειες του οδοστρώματος, οι οποίες επηρέασαν την τιμή albedo και την ηλιακή ακτινοβολία (Wang, 2015).

3.3 Υλικά που χρησιμοποιούνται

Τα αδρανή, το υλικό πλήρωσης και η άσφαλτος είναι τα θεμελιώδη στοιχεία ενός τυπικού οδοστρώματος με ασφαλτόστρωση. Κατά συνέπεια, οποιαδήποτε αλλαγή σε αυτά τα υλικά οδηγεί σε ένα τροποποιημένο οδόστρωμα που αντιδρά διαφορετικά στην ηλιακή ακτινοβολία. Ως αποτέλεσμα, αυτά τα υλικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τη θερμική τους απόδοση και τις φυσικές τους ιδιότητες (Doulos, 2004). Για παράδειγμα, οι Toraldo et al., διεξήγαγαν δοκιμές σε πέντε μείγματα ανοιχτής και πυκνής διαβάθμισης (που αναφέρονται ως δείγματα ελέγχου), δύο μείγματα ανοιχτής και πυκνής διαβάθμισης με τσιμεντοκονία (που παράγουν πιο ανοιχτό χρώμα) και ένα μείγμα ανοιχτής διαβάθμισης με τσιμεντοκονία και TiO₂. Σε σύγκριση με την τυπική άσφαλτο πυκνής διαβάθμισης, το ασφαλτικό μείγμα ανοιχτής διαβάθμισης με τσιμεντοκονία έδειξε μείωση της θερμοκρασίας κατά περίπου 14 °C (Toraldo, 2015).

Στη μελέτη τους, οι Xie et al., ενσωμάτωσαν υπέρυθρη σκόνη στην άσφαλτο και κατέγραψαν τις θερμοκρασίες των δειγμάτων υπό τις ίδιες συνθήκες. Η προσθήκη τροποποιημένης πίσσας αύξησε την ειδική θερμοχωρητικότητα και μείωσε τη θερμική αγωγιμότητα, με αποτέλεσμα τη μείωση της μεταφοράς θερμότητας μέσω του οδοστρώματος (Xie, 2015). Άλλες έρευνες εξέτασαν επίσης τη χρήση θερμοχρωμικής σκόνης, όπως η κόκκινη, η μπλε και η μαύρη σκόνη αναμεμιγμένη με άσφαλτο. Αυτές

οι μελέτες αποκάλυψαν ότι η ασφαλτος που περιέχει μαύρη σκόνη είχε τη χαμηλότερη θερμοκρασία, ακολουθούμενη από το κόκκινο και το μπλε (Hu, 2015a,b).

Σε άλλη πρόσφατη μελέτη σκοπός ήταν η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας δύο αμφίδρομων δομών που προκαλούνται από τη θερμότητα. Η πρώτη δομή είχε μια σύνθεση κλίσης, με ένα ανώτερο στρώμα που περιείχε 15% σφαιρίδια εμφράξεων, το και στη συνέχεια ένα μεσαίο στρώμα με 5% γραφίτη και ένα κάτω στρώμα με 10% γραφίτη. Η δεύτερη δομή είχε την ίδια σύνθεση, αλλά ήταν επικαλυμμένη με ένα στρώμα ανακλαστικής θερμότητας (με ανακλαστικότητα 0,4). Αυτή η επίστρωση είχε ως αποτέλεσμα μια μείωση 12,73% στην απορρόφηση θερμότητας. Λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της σκόνης στους δείκτες όγκου και την απόδοση του μείγματος, καθώς και τον συνδυασμό των τριών τεχνολογιών, διαπιστώθηκε ότι το οδόστρωμα με την επικαλυμμένη δομή ήταν σε θέση να κρατήσει τη θερμότητα έξω και να μειώσει την απορρόφηση θερμότητας 35% (Du, 2015).

Στη μελέτη τους, οι Xie et al., χρησιμοποίησαν υπέρυθρη σκόνη σε ασφαλτο και μέτρησαν τις θερμοκρασίες των δειγμάτων υπό ίδιες συνθήκες.. Η τροποποιημένη ασφαλτος αύξησε την ειδική θερμοχωρητικότητα, μείωσε τη θερμική αγωγιμότητα και κατά συνέπεια μείωσε τη δυνατότητα μεταφοράς θερμότητας μέσω του οδοστρώματος (Xie, 2015). Άλλοι ερευνητές εξέτασαν επίσης τη χρήση θερμοχρωμικής σκόνης, συγκεκριμένα κόκκινου, μπλε και μαύρου σε συνδυασμό με πίσσα. Ανακάλυψαν ότι η ασφαλτος με μαύρη σκόνη παρουσίαζε τη χαμηλότερη θερμοκρασία, ακολουθούμενη από το κόκκινο και το μπλε (Hu and Yu, 2015a,b).

Τέλος, στη μελέτη των Du et al., αναλύθηκε η αποτελεσματικότητα δύο αμφίδρομων δομών που προκαλούνται από τη θερμότητα. Η πρώτη δομή αποτελούνταν από ένα ανώτερο στρώμα που περιείχε 15% σφαιρίδια εμφράξεων, στη συνέχεια από ένα μεσαίο στρώμα με 5% γραφίτη και ένα κατώτερο στρώμα με 10% γραφίτη. Η δεύτερη δομή χρησιμοποίησε τον ίδιο συνδυασμό διαβάθμισης της θερμικής αγωγιμότητας, αλλά με την προσθήκη ενός στρώματος ανακλαστικής θερμότητας (με ανακλαστικότητα 0,4). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα μια αισθητή μείωση της απορρόφησης θερμότητας κατά 12,73%. Λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της σκόνης στον όγκο και την απόδοση του μείγματος, καθώς και τον συνδυασμό των τριών

τεχνολογιών, το πεζοδρόμιο κατάφερε να κρατήσει τη θερμότητα έξω πιο αποτελεσματικά, με 35% μείωση στην απορρόφηση θερμότητας για τη δομή που είχε η θερμοανακλαστική επίστρωση (Du et al., 2014, 2015).

3.4 Μέθοδοι συλλογής ενέργειας

Για της συλλογή ενέργειας από τα οδοστρώματα με σκοπό τη μείωση της θερμοκρασίας της επιφάνειάς τους, χρησιμοποιήθηκαν φωτοβολταϊκά υλικά σε πεζοδρόμια. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι πρόσφατες εξελίξεις στα φωτοβολταϊκά οδοστρώματα έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια (Golden, 2005). Μια άλλη νέα εφαρμοζόμενη και καινοτόμα τεχνολογία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η έννοια των υδρονικών ασφαλικών οδοστρωμάτων, η οποία περιλαμβάνει την κυκλοφορία ρευστού μέσω ενός δικτύου σωλήνων που είναι ενσωματωμένοι στην ασφάλτο για τη σύλληψη και αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας για μελλοντική χρήση (Pan, 2015). Διάφοροι ερευνητές έχουν επίσης μελετήσει την αποτελεσματικότητα του νερού που κυκλοφορεί σε σωλήνες εντός του ασφαλικού οδοστρώματος για σκοπούς ψύξης (García, 2014, Jiang, 2017). Μια άλλη μελέτη περιελάμβανε την εγκατάσταση μιας μόνο σειράς σωλήνων κάτω από το στρώμα φθοράς του οδοστρώματος για να επιτρέπεται η φυσική μεταφορά και η ροή αέρα. Αυτό το σύστημα μείωσε επιτυχώς τις επιφανειακές θερμοκρασίες έως και 5,5 °C (Chiarelli, 2017).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο σύνολο του κειμένου της εργασίας, έγινε μια προσπάθεια διερεύνησης και παρουσίασης των δεδομένων σχετικά με τη μεταβολή της θερμοκρασίας του οδοστρώματος από εξωτερικούς και εσωτερικούς παράγοντες, καθώς επίσης και τις μελέτες που αφορούν μεθοδολογίες για την ελάττωση της θερμοκρασίας αυτής, όπως αυτά προκύπτουν από πρόσφατες δημοσιεύσεις. Τα δεδομένα της βιβλιογραφίας έδειξαν ότι, η ικανότητα του οδοστρώματος να απορροφά, να μεταφέρει, να αποθηκεύει και να απελευθερώνει θερμότητα επηρεάζεται άμεσα από εσωτερικούς παράγοντες όπως το albedo, η θερμική αγωγιμότητα, η θερμοχωρητικότητα και η εκπομπή. Μεταξύ αυτών των παραγόντων, το albedo έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στις μέγιστες θερμοκρασίες κατά τις περιόδους που υπάρχει ηλιοφάνεια, ενώ η εκπομπή

θερμότητας έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στις ελάχιστες θερμοκρασίες τη νύχτα. Εξωτερικοί παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας, της ηλιακής ακτινοβολίας, της ταχύτητας του ανέμου, της βροχόπτωσης, της κυκλοφορίας των οχημάτων και της σκιάς, επηρεάζουν τη θερμοκρασία της επιφάνειας μέσω της αγωγής θερμότητας, της μεταφοράς και της ακτινοβολίας. Η θερμοκρασία του αέρα έχει σημασία στον ημερήσιο κύκλο θερμοκρασίας, ενώ η ηλιακή ακτινοβολία στις παρατηρούμενες θερμοκρασιακές διαφορές ανάλογα με την εποχή. Οι στρατηγικές για τον μετριασμό των αστικών θερμικών νησιών περιλαμβάνουν την αύξηση της εκπομπής albedo και της επιφάνειας μέσω της χρήσης ανακλαστικών υλικών ή επικαλύψεων, καθώς και μείωση της θερμικής αγωγιμότητας μέσω επιλογών υλικών και σχεδίασης κενών αέρα. Υλικά υψηλού albedo, όπως ανοιχτόχρωμα αδρανή και επιστρώσεις, αντανακλούν περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία, ενώ τα υλικά υψηλής εκπομπής απελευθερώνουν περισσότερη θερμική ακτινοβολία τη νύχτα. Τα υλικά χαμηλής αγωγιμότητας, όπως η ανοιχτή ασφάλτος, ελαχιστοποιούν τη μεταφορά θερμότητας εντός του οδοστρώματος. Είναι σημαντικό να επιτευχθεί μια ισορροπία μεταξύ των στρατηγικών ψύξης και άλλων παραγόντων όπως το κόστος, η ανθεκτικότητα, η αντίσταση στην ολίσθηση και ο φωτισμός. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τη βελτιστοποίηση των σχεδίων ασφάλτου για τον μετριασμό του UHI ενώ πληρούνται τα προαναφερθέντα κριτήρια.

Σε μία περίοδο που ο πλανήτης βιώνει μία κλιματική κρίση, οι περίοδοι ακραίων θερμοκρασιών και ακραίων καιρικών φαινομένων έχουν αυξηθεί. Συνεπώς, είναι σημαντικό να διερευνηθούν οι παράμετροι οι οποίοι μεταβάλλουν σημαντικά τη θερμοκρασία του οδοστρώματος προκειμένου να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά το φαινόμενο UHI, ενώ θα πρέπει να βρεθούν και νέες λύσεις αφού το εύρος της θερμοκρασίας έχει διαφοροποιηθεί. Τα χαρακτηριστικά της αστικής μορφολογίας επηρεάζουν διάφορες μικρο-μετεωρολογικές μεταβλητές που σχετίζονται με την εκτίμηση της θερμικής άνεσης, συμπεριλαμβανομένης της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας, της ηλιακής ακτινοβολίας, του μέσου ποσοστού υγρασίας και της ταχύτητας του ανέμου (Alexandri, 2008, Chapman, 2017).

Σε παλαιότερες μελέτες αστικού πολεοδομικού σχεδιασμού έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις για τη μείωση της θερμοκρασίας του οδοστρώματος, όπως η χρήση

οδοστρωμάτων με υψηλή albedo για τη μείωση της συσσώρευσης θερμότητας και την ενσωμάτωση πράσινης σκίασης σε παρακείμενους χώρους όπως είναι οι νησίδες (Champman, 2017). Επιπλέον, ο σωστός σχεδιασμός αστικού χώρου μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της θερμοκρασίας της επιφάνειας, για παράδειγμα, μεγιστοποιώντας τις ταχύτητες ανέμου γύρω από τα κτίρια μέσω κατάλληλων διατάξεων διάταξης (Hunter, 1990).

Η επιλογή των υλικών του οδοστρώματος είναι ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας στο αστικό περιβάλλον και θα πρέπει να δοθεί η αντίστοιχη σημασία στον μελλοντικό πολεοδομικό σχεδιασμό. Με την ανάλυση των θερμικών παραμέτρων του υλικού, είναι δυνατός ο ενεργός έλεγχος της θερμοκρασίας του οδοστρώματος μέσω επιλογής υλικού και λογικών δομικών συνδυασμών με τον τελικό σκοπό να είναι η μείωση της θερμοκρασίας του οδοστρώματος. Το albedo της δομής του οδοστρώματος έχει την πιο σημαντική επίδραση στο πεδίο θερμοκρασίας και η αύξηση του albedo μπορεί να μετριάσει αποτελεσματικά τις ακραίες θερμοκρασίες του οδοστρώματος. Κατά την επιλογή και την ανάπτυξη υλικών οδοστρώματος, οι πολεοδομικοί σχεδιαστές θα πρέπει συνυπολογίζουν τους ακόλουθους παράγοντες:

- Την προτεραιότητα στο albedo, και στη συνέχεια τη θερμική αγωγιμότητα, την εκπομπή και την ειδική θερμική ικανότητα των υλικών.
- Την ενσωμάτωση διαπερατών πλακιδίων δαπέδου στις πόλεις για τη βελτίωση της διαπερατότητας του οδοστρώματος και τη διευκόλυνση της φυσικής εξάτμισης των υδρατμών, μειώνοντας έτσι τη θερμοκρασία του οδοστρώματος.
- Τη χρήση αντανακλαστικών επικαλύψεων για τον μετριασμό των επιπτώσεων UHI, λαμβάνοντας υπόψη το χρώμα, τις εποχιακές διακυμάνσεις, το αστικό μικροκλίμα και τη θερμική απόδοση και ανθεκτικότητα τέτοιων επικαλύψεων τόσο σε ελεγχόμενες πειραματικές συνθήκες, όσο και στις πραγματικές συνθήκες.

Η ανάπτυξη εκτάσεων βλάστησης στο αστικό περιβάλλον μπορεί να παίζει καθοριστικό ρόλο στον έλεγχο των αλλαγών στην επιφάνεια της πόλης και στις θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Ένας πιθανός τρόπος για να μειωθεί το φαινόμενο UHI είναι η αύξηση της ποσότητας κάλυψης του οδοστρώματος από τη βλάστηση. Η

φύτευση δέντρων παρέχει σκιά, η οποία βοηθά στη μείωση της θερμότητας στα οδοστρώματα, μειώνοντας ταυτόχρονα και το κόστος συντήρησης. Συνεπώς, κατά το σχεδιασμό αστικών περιοχών, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη το γεγονός ότι τα δέντρα και η βλάστηση μπορούν να μετριάσουν το φαινόμενο UHI, λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητα των κτιρίων και τις εποχιακές διακυμάνσεις (Gajewska, 2003, Tong, 2016). Για τον προσδιορισμό των πιο αποτελεσματικών ειδών δέντρων για τη μείωση του UHI, θα πρέπει να διεξαχθούν οικολογικές μελέτες για να αξιολογηθούν τα οφέλη σκίασης και ψύξης τόσο των ιθαγενών όσο και των εξωτικών δέντρων, λαμβάνοντας υπόψη τα ποσοστά επιβίωσής τους. Είναι επίσης σημαντικό να θεσπιστούν σχετικές πολιτικές αντίδρασης που ενθαρρύνουν τις επενδύσεις στη διαχείριση της βλάστησης για την καταπολέμηση των θερμικών νησιών (Tong, 2016).

Ο άνεμος μπορεί να απομακρύνει αποτελεσματικά τη θερμότητα από τα αστικά περιβάλλοντα και συνεπακόλουθα μειώνει τη θερμοκρασία του οδοστρώματος και την ανακούφιση από το φαινόμενο UHI. Κατά το σχεδιασμό των αστικών κτιρίων, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη η τοπική κατεύθυνση του ανέμου και να δημιουργείται μια διάταξη που προάγει την κυκλοφορία του αέρα (Pomerantz, 2000). Επιπλέον, η ανάπτυξη ενός συστήματος δημόσιων μεταφορών στις αστικές περιοχές μπορεί όχι μόνο να μειώσει τις κυκλοφοριακές υποδομές που απαιτούνται, αλλά και να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές ρύπων και θερμότητας από τα οχήματα. Η ενθάρρυνση της χρήσης οχημάτων καθαρής ενέργειας μπορεί επίσης να συμβάλει στη μείωση της ακτινοβολίας θερμότητας από τα οχήματα στο οδόστρωμα (Imai, 2015). Επιπλέον, καθώς αυξάνεται ο αστικός πληθυσμός, αυξάνεται και η ζήτηση για στέγαση και δρόμους αυξημένης κυκλοφορίας, οδηγώντας στη δημιουργία τεχνητής θερμότητας (Makino, 2018).

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Adwan, I., Milad, A., Memon, Z. A., Widayatmoko, I., Ahmat Zanuri, N., Memon, N. A., & Yusoff, N. I. M. (2021). Asphalt pavement temperature prediction models: A review. *Applied Sciences*, 11(9), 3794.
- Alavi, M. Z., Pouranian, M. R., & Hajj, E. Y. (2014). Prediction of asphalt pavement temperature profile with finite control volume method. *Transportation Research Record*, 2456(1), 96–106.
- Aleadelat, W., Wulff, S., & Ksaibati, K. (2019). Development of performance prediction models for gravel roads using Markov chains. *American Journal of Civil Engineering*, 7(3), 73–81.
- Alexandri, E., & Jones, P. (2008). Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment*, 43(4), 480–493.
- Alzubaidi, H., & Magnusson, R. (2002). Deterioration and rating of gravel roads: State of the art. *Road Materials and Pavement Design*, 3(3), 235–260.
- Anak Guntor, N. A., Md Din, M. F., Ponraj, M., & Iwao, K. (2014). Thermal performance of developed coating material as cool pavement material for tropical regions. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(4), 755–760.
- Andersson, A. K., & Chapman, L. (2011). The impact of climate change on winter road maintenance and traffic accidents in West Midlands, UK. *Accident Analysis & Prevention*, 43(1), 284–289.

- Anfosso-Lédée, F., & Pichaud, Y. (2007). Temperature effect on tyre–road noise. *Applied Acoustics*, 68(1), 1–16.
- Anting, N., Din, M. F. M., Iwao, K., Ponraj, M., Siang, A. J. L. M., Yong, L. Y., & Prasetyo, J. (2018). Optimizing of near infrared region reflectance of mix-waste tile aggregate as coating material for cool pavement with surface temperature measurement. *Energy and Buildings*, 158, 172–180.
- Arangi, S. R., & Jain, R. (2015). Review paper on pavement temperature prediction model for Indian climatic condition. *Int. J. of Innovative Research in Adv. Engineering*, 2(8), 1–9.
- Asefzadeh, A., Hashemian, L., & Bayat, A. (2017). Development of statistical temperature prediction models for a test road in Edmonton, Alberta, Canada. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(5), 369–382.
- Baker, I., & Baker, I. (2018). Asphalt. *Fifty Materials That Make the World*, 11–13.
- Beddu, S., Talib, S. H. A., & Itam, Z. (2016). The potential of heat collection from solar radiation in asphalt solar collectors in Malaysia. 32(1), 012045.
- Bobes-Jesus, V., Pascual-Muñoz, P., Castro-Fresno, D., & Rodriguez-Hernandez, J. (2013). Asphalt solar collectors: A literature review. *Applied Energy*, 102, 962–970.
- Button, J. W., Estakhri, C. K., & Wimsatt, A. J. (2007). A synthesis of warm-mix asphalt.
- Buyung, N. R., & Ghani, A. N. A. (2017). Permeable pavements and its contribution to cooling effect of surrounding temperature. 1892(1).

- Cao, X., Tang, B., Zou, X., & He, L. (2015). Analysis on the cooling effect of a heat-reflective coating for asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 16(3), 716–726.
- Carnielo, E., & Zinzi, M. (2013). Optical and thermal characterisation of cool asphalts to mitigate urban temperatures and building cooling demand. *Building and Environment*, 60, 56–65.
- Chandler, J., Phillips, S., Roe, P., & Viner, H. (2003). Quieter concrete roads: Construction, texture, skid resistance and noise. *TRL REPORT TRL 576*.
- Chapman, L., & Thornes, J. E. (2005). The influence of traffic on road surface temperatures: Implications for thermal mapping studies. *Meteorological Applications: A Journal of Forecasting, Practical Applications, Training Techniques and Modelling*, 12(4), 371–380.
- Chapman, S., Watson, J. E., Salazar, A., Thatcher, M., & McAlpine, C. A. (2017). The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: A systematic review. *Landscape Ecology*, 32, 1921–1935.
- Chen, J., Chu, R., Wang, H., Zhang, L., Chen, X., & Du, Y. (2019). Alleviating urban heat island effect using high-conductivity permeable concrete pavement. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117722.
- Chen, J., Wang, H., & Xie, P. (2019). Pavement temperature prediction: Theoretical models and critical affecting factors. *Applied Thermal Engineering*, 158, 113755.

- Chen, J., Zhang, M., Wang, H., & Li, L. (2015). Evaluation of thermal conductivity of asphalt concrete with heterogeneous microstructure. *Applied Thermal Engineering*, 84, 368–374.
- Chen, X., & Ellis, B. (1993). Coatings and other applications of epoxy resins. In *Chemistry and technology of epoxy resins* (pp. 303–325). Springer.
- Chiarelli, A., Al-Mohammedawi, A., Dawson, A., & Garcia, A. (2017). Construction and configuration of convection-powered asphalt solar collectors for the reduction of urban temperatures. *International Journal of Thermal Sciences*, 112, 242–251.
- Chowdhury, A., & Button, J. W. (2008). *A review of warm mix asphalt*.
- Conchon, A. (2006). *Road Construction in Eighteenth Century France*. 1, 791–797.
- d'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowser, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, W., & Newcomb, D. (2008). *Warm-mix asphalt: European practice*. United States. Federal Highway Administration. Office of International Programs.
- Dawson, A. R., Dehdezi, P. K., Hall, M. R., Wang, J., & Isola, R. (2012). Enhancing thermal properties of asphalt materials for heat storage and transfer applications. *Road Materials and Pavement Design*, 13(4), 784–803.
- De Oliveira, A., Machado, A., Escobedo, J. F., & Soares, J. (2002). Diurnal evolution of solar radiation at the surface in the city of São Paulo: Seasonal variation and modeling. *Theoretical and Applied Climatology*, 71, 231–249.
- Diefenderfer, B. K. (2002). *Moisture content determination and temperature profile modeling of flexible pavement structures*.

- Doulos, L., Santamouris, M., & Livada, I. (2004). Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. *Solar Energy*, 77(2), 231–249.
- Dutta, K., Basu, D., & Agrawal, S. (2022). Evaluation of seasonal variability in magnitude of urban heat islands using local climate zone classification and surface albedo. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(9), 8677–8698.
- Edvardsson, K. (2009). Gravel roads and dust suppression. *Road Materials and Pavement Design*, 10(3), 439–469.
- Edvardsson, K. (2010). *Evaluation of dust suppressants for gravel roads: Methods development and efficiency studies*.
- Ejstrud, B. (2005). Cost surface analysis and ancient roads: A comparison. *Temps et Espaces de l'homme En Société: Analyses et Modèles Spatiaux En Archéologie, Association Pour La Promotion et La Diffusion Des Connaissances Archaeologiques, Antibes*, 135–139.
- Elkins, G. E., Schmalzer, P. N., Thompson, T., & Simpson, A. (2003). *Long-term pavement performance information management system: Pavement performance database user reference guide*. Turner-Fairbank Highway Research Center.
- Embacher, R. A., & Snyder, M. B. (2001). Life-cycle cost comparison of asphalt and concrete pavements on low-volume roads; case study comparisons. *Transportation Research Record*, 1749(1), 28–37.
- Falls, L. C., Clary, L., Hamad, A., & Abdelfattah, A. (2011). Direct Measurement of the Impact of Heavy Loads on Thin Membrane Pavements. *Transportation Research Record*, 2205(1), 229–237.

- Feng, D., Hu, W., Yu, F., Cao, P., & Zhang, X. (2011). Impact of asphalt pavement thermophysical property on temperature field and sensitivity analysis. *Gonglu Jiaotong Keji/ Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 28(11).
- Fujimoto, A., Saida, A., & Fukuhara, T. (2012). A new approach to modeling vehicle-induced heat and its thermal effects on road surface temperature. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(11), 1980–1993.
- Fujimoto, A., Tokunaga, R., Kiriishi, M., Kawabata, Y., Takahashi, N., Ishida, T., & Fukuhara, T. (2014). A road surface freezing model using heat, water and salt balance and its validation by field experiments. *Cold Regions Science and Technology*, 106, 1–10.
- Gajewska, B., & Rafalski, L. (2003). *Vegetation cover in road environment*. The 25th International Baltic Road Conference, August 25–25.
- Galal, K. A., Coree, B. J., Haddock, J. E., & White, T. D. (1999). Structural adequacy of rubblized portland cement concrete pavement. *Transportation Research Record*, 1684(1), 172–177.
- García, A., & Partl, M. N. (2014). How to transform an asphalt concrete pavement into a solar turbine. *Applied Energy*, 119, 431–437.
- Gesford, A. L., & Anderson, J. A. (2007). *Environmentally sensitive maintenance for dirt and gravel roads*. Pennsylvania. Dept. of Transportation.
- Gill, H. K., Lantz, T. C., O'Neill, B., & Kokelj, S. V. (2014). Cumulative impacts and feedbacks of a gravel road on shrub tundra ecosystems in the Peel Plateau, Northwest Territories, Canada. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 46(4), 947–961.

- Golden, J. S., Carlson, J., Kaloush, K. E., & Phelan, P. (2007). A comparative study of the thermal and radiative impacts of photovoltaic canopies on pavement surface temperatures. *Solar Energy*, 81(7), 872–883.
- Golden, J. S., & Kaloush, K. (2005). A hot night in the big city. *Public Works*, 136(13), 40–43.
- Gransberg, D. D., & James, D. M. (2005). *Chip seal best practices* (Vol. 342). Transportation Research Board.
- Grazulyte, J., Zilioniene, D., & Tuminienė, F. (2014). *Otta seal-the new way to solve problems of maintenance of gravel roads in Lithuania*. 9, 1.
- Greene, C. S., & Kedron, P. J. (2018). Beyond fractional coverage: A multilevel approach to analyzing the impact of urban tree canopy structure on surface urban heat islands. *Applied Geography*, 95, 45–53.
- Greening, T., & O'Neill, P. (2010). *Traffic generated dust from unpaved roads: An overview of impacts and options for control*. 1st AFCAP Practitioners Conference, 23rd–25th November.
- Gui, J., Phelan, P. E., Kaloush, K. E., & Golden, J. S. (2007). Impact of pavement thermophysical properties on surface temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(8), 683–690.
- Guldentops, G., Nejad, A. M., Vuye, C., & Rahbar, N. (2016). Performance of a pavement solar energy collector: Model development and validation. *Applied Energy*, 163, 180–189.

- Gushgari, S. Y., Zhang, Y., Nahvi, A., Ceylan, H., & Kim, S. (2018). *Otta Seal Construction for Asphalt Pavement Resurfacing*. 177–184.
- Haas, R., Walls, J., & Carroll, R. (1988). Geogrid reinforcement of granular bases in flexible pavements. *Transportation Research Record*, 1188(1), 19–27.
- Hassn, A., Chiarelli, A., Dawson, A., & Garcia, A. (2016). Thermal properties of asphalt pavements under dry and wet conditions. *Materials & Design*, 91, 432–439.
- Hattery, M. R. (2018). *Existing Conditions Summary—Rhinebeck Highway Study*.
- He, B.-J., Wang, J., Zhu, J., & Qi, J. (2022). Beating the urban heat: Situation, background, impacts and the way forward in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112350.
- Holst, J., & Mayer, H. (2011). Impacts of street design parameters on human-biometeorological variables. *Meteorologische Zeitschrift*, 20(5), 541.
- Hoy, M., Horpibulsuk, S., & Arulrajah, A. (2016). Strength development of recycled asphalt pavement–fly ash geopolymer as a road construction material. *Construction and Building Materials*, 117, 209–219.
- Hu, J., & Yu, X. (2016). Innovative thermochromic asphalt coating: Characterisation and thermal performance. *Road Materials and Pavement Design*, 17(1), 187–202.
- Huang, K., Zollinger, D. G., Shi, X., & Sun, P. (2017). A developed method of analyzing temperature and moisture profiles in rigid pavement slabs. *Construction and Building Materials*, 151, 782–788.
- Hunter, L. J., Watson, I., & Johnson, G. (1990). Modelling air flow regimes in urban canyons. *Energy and Buildings*, 15(3–4), 315–324.

- Hunter, R. N. (2000). *Asphalts in road construction*. Thomas Telford.
- Huntington, G., & Ksaibati, K. (2007). Gravel roads surface performance modeling. *Transportation Research Record*, 2016(1), 56–64.
- Imai, K., & Yamamoto, K. (2015). An evaluation of measures regarding road traffic against the urban heat island in the Tokyo Ward Area, Japan. *Journal of Environmental Protection*, 6(09), 957.
- Islam, M. R., Ahsan, S., & Tarefder, R. A. (2015). Modeling temperature profile of hot-mix asphalt in flexible pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 8(1), 47.
- Jamei, E., Rajagopalan, P., Seyedmahmoudian, M., & Jamei, Y. (2016). Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1002–1017.
- Jiang, W., Yuan, D., Xu, S., Hu, H., Xiao, J., Sha, A., & Huang, Y. (2017). Energy harvesting from asphalt pavement using thermoelectric technology. *Applied Energy*, 205, 941–950.
- Jia-zuo, Z., Chang-fu, W., Hou-zhen, W., & Pan, C. (2016). Applicability of line heat source method in measuring thermal parameters of frozen soil. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 38(4), 681–687.
- Jibon, M., Mahedi, M., Yang, B., Ceylan, H., & Kim, S. (2023). Evaluating and modeling aggregate loss of Otta seal for low-volume roads. *Construction and Building Materials*, 398, 132467.

- Johnston, K. (2008). Pavement Gets More Creative. *Pavement Maintenance & Reconstruction*, 23(6).
- Karwatka, D. (2010). America's First Concrete Street. *Tech Directions*, 69(8), 14.
- Khazanovich, L., Rita, L., & Tompkins, D. (2012). Guidelines for the Rehabilitation of concrete pavements using asphalt overlays. *Report No: FHWA TPF-5 (149), University of Minnesota*.
- Kinouchi, T., Yoshinaka, T., Fukae, N., & Kanda, M. (2003). 4.7 Development of cool pavement with dark colored high albedo coating. *Target*, 50(40), 40.
- Knabben, R. M., Trichês, G., Gerges, S. N., & Vergara, E. F. (2016). Evaluation of sound absorption capacity of asphalt mixtures. *Applied Acoustics*, 114, 266–274.
- Kwiatkowski, K. P., Stipanovic Oslakovic, I., Ter Maat, H., Hartmann, A., Chinowsky, P., & Dewulf, G. P. (2020). Modeling cost impacts and adaptation of freeze–thaw climate change on a porous asphalt road network. *Journal of Infrastructure Systems*, 26(3), 04020022.
- Kyriakodis, G., & Santamouris, M. (2018). Using reflective pavements to mitigate urban heat island in warm climates-Results from a large scale urban mitigation project. *Urban Climate*, 24, 326–339.
- Lavin, P. (2003). *Asphalt pavements: A practical guide to design, production and maintenance for engineers and architects*. CRC Press.
- Lawson, W. D., & Senadheera, S. (2009). Chip seal maintenance: Solutions for bleeding and flushed pavement surfaces. *Transportation Research Record*, 2108(1), 61–68.

- Lee, H., & Mayer, H. (2018). Maximum extent of human heat stress reduction on building areas due to urban greening. *Urban Forestry & Urban Greening*, 32, 154–167.
- Leuzinger, S., Vogt, R., & Körner, C. (2010). Tree surface temperature in an urban environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(1), 56–62.
- Li, H. (2012). *Evaluation of cool pavement strategies for heat island mitigation*. University of California, Davis.
- Li, H., Harvey, J., & Kendall, A. (2013). Field measurement of albedo for different land cover materials and effects on thermal performance. *Building and Environment*, 59, 536–546.
- Li, Y., Zhang, Q., Xie, L., He, Y., & Liu, J. (2012). Testing of asphalt mixture thermal conductivity and its influences on asphalt pavement temperature field. *Functional Materials*, 43(B08), 129–132.
- Liu, L., Zhao, P., Liang, C., Wang, S., Huang, Y., Cui, N., & Lu, L. (2022). Assessment and mechanism of inorganic hydrophobic flake incorporated into a polymer-modified cement-based coating. *Journal of Building Engineering*, 60, 105185.
- Ma, Y., Polaczyk, P., Park, H., Jiang, X., Hu, W., & Huang, B. (2020). Performance evaluation of temperature effect on hot in-place recycling asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 277, 124093.
- Makino, H., Tamada, K., Sakai, K., & Kamijo, S. (2018). Solutions for urban traffic issues by ITS technologies. *IATSS Research*, 42(2), 49–60.

- Mallick, R. B., Bonner, D. S., Bradbury, R. L., Andrews, J. O., Kandhal, P. S., & Kearney, E. J. (2002). Evaluation of performance of full-depth reclamation mixes. *Transportation Research Record*, 1809(1), 199–208.
- Mammeri, A., Ulmet, L., Petit, C., & Mokhtari, A. (2015). Temperature modelling in pavements: The effect of long-and short-wave radiation. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(3), 198–213.
- Mayer, H., Holst, J., Dostal, P., Imbery, F., & Schindler, D. (2008). Human thermal comfort in summer within an urban street canyon in Central Europe. *Meteorologische Zeitschrift*, 17(3), 241–250.
- Metcalf, J. (1977). *Principles and Application of Cement and Lime Stabilisation*.
- Milad, A., Adwan, I., Majeed, S. A., Yusoff, N. I. M., Al-Ansari, N., & Yaseen, Z. M. (2021). Emerging technologies of deep learning models development for pavement temperature prediction. *IEEE Access*, 9, 23840–23849.
- Miller, J. S., & Bellinger, W. Y. (2003). *Distress identification manual for the long-term pavement performance program*. United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure
- Mirzaei, P. A. (2015). Recent challenges in modeling of urban heat island. *Sustainable Cities and Society*, 19, 200–206.
- Moghadas Nejad, F., Noory, A., Toolabi, S., & Fallah, S. (2015). Effect of using geosynthetics on reflective crack prevention. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(6), 477–487.

- Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, 197, 522–538.
- Mohd Hasan, M. R., Hiller, J. E., & You, Z. (2016). Effects of mean annual temperature and mean annual precipitation on the performance of flexible pavement using ME design. *International Journal of Pavement Engineering*, 17(7), 647–658.
- Mu-lian, Z., Li-tao, H., Xuan, G., Fei, W., & Cheng, C. (2013). Analysis of heat-reflective coating property for asphalt pavement based on cooling function. *交通运输工程学报*, 13(5), 10–16.
- Mwaipungu, R. R., & Allopi, D. (2012). *The appropriate material specifications and manual are key for effective gravel roads design, construction and maintenance practice*.
- Nahvi, A., Zhang, Y., Arabzadeh, A., Ceylan, H., Kim, S., Gransberg, D. D., Jähren, C. T., & Gushgari, S. Y. (2019). Deterministic and stochastic life-cycle cost analysis for Otta seal surface treatment on low volume roads. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 12, 101–109.
- Nivitha, M., & Krishnan, J. (2014). Development of pavement temperature contours for India. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 95(2), 83–90.
- Nižetić, S., & Papadopoulos, A. (2018). *The role of exergy in energy and the environment*. Springer.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.
- Outcalt, W. (2001). *SHRP Chip Seal*.

- Øverby, C. (1999). *A Guide to the use of Otta seals*.
- Pan, P., Wu, S., Xiao, Y., & Liu, G. (2015). A review on hydronic asphalt pavement for energy harvesting and snow melting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 624–634.
- Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2008). *Pavement design and materials*. John Wiley & Sons.
- Phelan, P. E., Kaloush, K., Miner, M., Golden, J., Phelan, B., Silva III, H., & Taylor, R. A. (2015). Urban heat island: Mechanisms, implications, and possible remedies. *Annual Review of Environment and Resources*, 40, 285–307.
- Pidwerbesky, B. D., & Waters, J. C. (2006). *Preventing and Solving Chipseal Problems Using a Transverse Variable Application Sprayer*. Research into Practice: 22nd ARRB ConferenceARRB.
- Piroozfar, P., Farr, E. R., & Pomponi, F. (2015). Urban Heat Island (UHI) mitigating strategies: A case-based comparative analysis. *Sustainable Cities and Society*, 19.
- Piryonesi, S. M., & El-Diraby, T. (2018). *Using Data Analytics for Cost-Effective Prediction of Road Conditions: Case of The Pavement Condition Index:[summary report]*. United States. Federal Highway Administration. Office of Research
- Pomerantz, M. (2000). *The effect of pavements' temperatures on air temperatures in large cities*.
- Pomerantz, M., Akbari, H., Chang, S.-C., Levinson, R., & Pon, B. (2003). *Examples of cooler reflective streets for urban heat-island mitigation: Portland cement concrete and chip seals*.

- Pourhassan, A., Gheni, A., & ElGawady, M. (2019). *Effect of aggregate size on the retention of conventional and rubberized chip seal*. IABSE Congress.
- Pourshams-Manzouri, T. (2013). *Pavement temperature effects on overall urban heat island*. Arizona State University.
- Qin, Y. (2016). Pavement surface maximum temperature increases linearly with solar absorption and reciprocal thermal inertial. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 97, 391–399.
- Qin, Y., & Hiller, J. E. (2013). Ways of formulating wind speed in heat convection significantly influencing pavement temperature prediction. *Heat and Mass Transfer*, 49, 745–752.
- Qin, Y., Hiller, J. E., & Meng, D. (2019). Linearity between pavement thermophysical properties and surface temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(11), 04019262.
- Qin, Y., Zhang, X., Tan, K., & Wang, J. (2022). A review on the influencing factors of pavement surface temperature. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(45), 67659–67674.
- Rahaman, F., Musty, H., & Hossain, M. (2012). Evaluation of recycled asphalt pavement materials from ultra-thin bonded bituminous surface. In *GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering* (pp. 1612–1621).
- Rahman, F., Islam, M. S., Musty, H., & Hossain, M. (2012). Aggregate retention in chip seal. *Transportation Research Record*, 2267(1), 56–64.

- Rahman, M. N., Sarkar, M. T. A., Elseifi, M. A., Mayeux, C., & Cooper III, S. B. (2020). Effects of emulsion types, application rates, and crumb rubber on the laboratory performance of chip seal. *Construction and Building Materials*, 260, 119787.
- Rajagopal, A. (2010). *Effectiveness of chip sealing and micro surfacing on pavement serviceability and life*.
- Rossi, C., Chondros, T. G., Milidonis, K. F., Savino, S., & Russo, F. (2016). Ancient road transport devices: Developments from the Bronze Age to the Roman Empire. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 11, 12–25.
- Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L., & Moreno, F. (2012). Warm mix asphalt: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 24, 76–84.
- Sabziparvar, A. A. (2008). A simple formula for estimating global solar radiation in central arid deserts of Iran. *Renewable Energy*, 33(5), 1002–1010.
- Salem, H. A., Uzelac, D., & Crvenkovic, Z. L. (2014). Development of a model to predict pavement temperature for Ghat region in Libya. *Applied Mechanics and Materials*, 587, 1115–1124.
- Salomon, A., & Newcomb, D. E. (2000). *Cold in-place recycling literature review and preliminary mixture design procedure*.
- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224–240.

- Saydazimov, N., Mutalibov, I., Qo'Ysinaliyev, N., & O'ktamov, S. (2020). IMPROVING THE ELASTICITY OF CEMENT-CONCRETE ROADS. *Теория и Практика Современной Науки*, 11 (65), 6–10.
- Shahin, M. Y., & Walther, J. A. (1990). *Pavement maintenance management for roads and streets using the PAVER system*. US Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Laboratory.
- Sharma¹, P., & Batra, R. K. (2016). Cement concrete paver blocks for rural roads. *Futuristic Trends in Engineering, Science, Humanities, and Technology FTESHT-16*, 70.
- Shi, C., Xie, Z., Qian, H., Liang, M., & Yang, X. (2011). China land soil moisture EnKF data assimilation based on satellite remote sensing data. *Science China Earth Sciences*, 54, 1430–1440.
- Shi, X., Rew, Y., Ivers, E., Shon, C.-S., Stenger, E. M., & Park, P. (2019). Effects of thermally modified asphalt concrete on pavement temperature. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(6), 669–681.
- Shimazaki, Y., Aoki, M., Nitta, J., Okajima, H., & Yoshida, A. (2021). Experimental determination of pedestrian thermal comfort on water-retaining pavement for UHI adaptation strategy. *Atmosphere*, 12(2), 127.
- Skorseth, K. (2000). *Gravel roads: Maintenance and design manual*. US Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Song, J., Wang, Z.-H., Myint, S. W., & Wang, C. (2017). The hysteresis effect on surface-air temperature relationship and its implications to urban planning: An examination in Phoenix, Arizona, USA. *Landscape and Urban Planning*, 167, 198–211.

- Sreedhar, S., & Biligiri, K. P. (2016a). Comprehensive laboratory evaluation of thermo-physical properties of pavement materials: Effects on urban heat island. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(7), 04016026.
- Sreedhar, S., & Biligiri, K. P. (2016b). Development of pavement temperature predictive models using thermophysical properties to assess urban climates in the built environment. *Sustainable Cities and Society*, 22, 78–85.
- Sutton, E. S. (2016). Aesthetes, A roads, and cricketing criminals: Annotating The Voyage Out. *Virginia Woolf Bulletin*.
- Synnefa, A., Karlessi, T., Gaitani, N., Santamouris, M., Assimakopoulos, D., & Papakatsikas, C. (2011). Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate. *Building and Environment*, 46(1), 38–44.
- Takebayashi, H., & Moriyama, M. (2012). Study on surface heat budget of various pavements for urban heat island mitigation. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012.
- Taleghani, M., Sailor, D. J., Tenpierik, M., & van den Dobbelsteen, A. (2014). Thermal assessment of heat mitigation strategies: The case of Portland State University, Oregon, USA. *Building and Environment*, 73, 138–150.
- Tan, J., Zheng, Y., Tang, X., Guo, C., Li, L., Song, G., Zhen, X., Yuan, D., Kalkstein, A. J., & Li, F. (2010). The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *International Journal of Biometeorology*, 54, 75–84.

- Tehrani, F. M. (2015). Noise abatement of rubberized hot mix asphalt: A brief review. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 8(1), 58.
- Thorpe, D., & Zhuge, Y. (2010). *Advantages and disadvantages in using permeable concrete as a pavement construction material*. 2, 1341–1350.
- Tong, Z., Baldauf, R. W., Isakov, V., Deshmukh, P., & Zhang, K. M. (2016). Roadside vegetation barrier designs to mitigate near-road air pollution impacts. *Science of the Total Environment*, 541, 920–927.
- Toraldo, E., Mariani, E., Alberti, S., & Crispino, M. (2015). Experimental investigation into the thermal behavior of wearing courses for road pavements due to environmental conditions. *Construction and Building Materials*, 98, 846–852.
- Treloar, G. J., Love, P. E., & Crawford, R. H. (2004). Hybrid life-cycle inventory for road construction and use. *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(1), 43–49.
- Walker, B. J., & Beadle, D. (1975). *Mechanized Construction of Concrete Roads*.
- Walker, D. A., Raynolds, M. K., Kanevskiy, M. Z., Shur, Y. S., Romanovsky, V. E., Jones, B. M., Buchhorn, M., Jorgenson, M. T., Šibík, J., & Breen, A. L. (2022). Cumulative impacts of a gravel road and climate change in an ice-wedge-polygon landscape, Prudhoe Bay, Alaska. *Arctic Science*, 8(4), 1040–1066.
- Wan, W. C., Hien, W. N., Ping, T. P., & Aloysius, A. Z. W. (2012). A study on the effectiveness of heat mitigating pavement coatings in Singapore. *Journal of Heat Island Institute International Vol*, 7(2).

- Wang, J., Meng, Q., Tan, K., Zhang, L., & Zhang, Y. (2018). Experimental investigation on the influence of evaporative cooling of permeable pavements on outdoor thermal environment. *Building and Environment*, 140, 184–193.
- Wang, J., Meng, Q., Zou, Y., Qi, Q., Tan, K., Santamouris, M., & He, B.-J. (2022). Performance synergism of pervious pavement on stormwater management and urban heat island mitigation: A review of its benefits, key parameters, and co-benefits approach. *Water Research*, 221, 118755.
- Wang, S. (2015). *Pavement albedo assessment: Methods, aspects, and implication*.
- Wang, T., Xiao, F., Zhu, X., Huang, B., Wang, J., & Amirkhanian, S. (2018). Energy consumption and environmental impact of rubberized asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*, 180, 139–158.
- Wilson, A. H. (1976). *The distribution of temperatures in experimental pavements atalconbury by-pass*.
- Xie, J., Yang, Z., & Liang, L. (2015). Investigation of low heat accumulation asphalt mixture and its impact on urban heat environment. *Plos One*, 10(7), e0133829.
- Yang, J., Wang, Z.-H., & Kaloush, K. E. (2015). Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a ‘silver bullet’ for mitigating urban heat island? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 830–843.
- Yang, J., Wang, Z.-H., Kaloush, K. E., & Dylla, H. (2016). Effect of pavement thermal properties on mitigating urban heat islands: A multi-scale modeling case study in Phoenix. *Building and Environment*, 108, 110–121.

- Yang, X., You, Z., Hiller, J., & Watkins, D. (2017). Sensitivity of flexible pavement design to Michigan's climatic inputs using pavement ME design. *International Journal of Pavement Engineering*, 18(7), 622–632.
- Yinfei, D., Shengyue, W., & Jian, Z. (2015). Cooling asphalt pavement by a highly oriented heat conduction structure. *Energy and Buildings*, 102, 187–196.
- Yinfei, D., Zheng, H., Jiaqi, C., & Weizheng, L. (2018). A novel strategy of inducing solar absorption and accelerating heat release for cooling asphalt pavement. *Solar Energy*, 159, 125–133.
- Zhao, D., Arshad, M., Wang, J., & Triantafilis, J. (2021). Soil exchangeable cations estimation using Vis-NIR spectroscopy in different depths: Effects of multiple calibration models and spiking. *Computers and Electronics in Agriculture*, 182, 105990.
- Zhao, Z., Sharifi, A., Dong, X., Shen, L., & He, B.-J. (2021). Spatial variability and temporal heterogeneity of surface urban heat island patterns and the suitability of local climate zones for land surface temperature characterization. *Remote Sensing*, 13(21), 4338.