

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



## **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΧΡΗΣΗΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΑ**  
**ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ ΣΙΑΜΑΝΤΑΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ**  
**ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ ΓΕΩΡΓΟΥΛΗ**

ΕΤΟΣ 2024

## Περιεχόμενα

Περιεχόμενα .....	2
Κατάλογος Σχημάτων .....	4
Κατάλογος Πινάκων .....	5
Περίληψη .....	6
Abstract .....	8
1. Εισαγωγή.....	9
2. Κατασκευή οδοστρωμάτων .....	10
2.1 Τύποι οδοστρωμάτων.....	10
2.1.1 Εύκαμπτα οδοστρώματα .....	11
2.2 Υλικά οδοστρώματος .....	17
2.2.1 Αδρανή και εδαφικά υλικά.....	17
2.2.2 Ασφαλτομίγματα.....	19
2.3 Αστοχία οδοστρωμάτων .....	20
3. Βιωσιμότητα οδοστρωμάτων (Pavement sustainability) .....	22
3.1 Γενικά .....	22
3.2 Κοινωνικές πτυχές.....	23
3.3 Οικονομικές πτυχές.....	25
3.4 Περιβαλλοντικές πτυχές .....	26
3.5 Πρακτικές υπέρ της βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων .....	27
3.5.1 Παραγωγή υλικών .....	27
3.5.2 Κατασκευή οδοστρώματος .....	30
3.5.3 Συντήρηση.....	32
3.5.4 Φάση λειτουργίας .....	34
3.5.5 Τέλος ζωής οδοστρώματος .....	36
4. Χρήση εναλλακτικών υλικών στην κατασκευή οδοστρωμάτων .....	36
4.1 Γενικά .....	36
4.2 Πεδίο εφαρμογής δευτερευόντων υλικών .....	38
4.2.1 Απορρίμματα Ανθρακωρυχείου.....	39
4.2.2 Απορρίμματα αργίλου .....	42
4.2.3 Απόβλητα σχιστόλιθου .....	46

4.2.4	Στάχτη σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με άνθρακα .....	48
4.2.5	Σκωρία υψικαμίνων .....	55
4.2.6	Σκωρία χάλυβα.....	60
4.2.7	Γύψος.....	62
4.2.8	Σκόνη κλιβάνου τσιμέντου.....	64
4.3	Σύνοψη.....	66
5.	Συμπεράσματα .....	69
	Βιβλιογραφία .....	70

## Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1 Εύκαμπτο (αριστερά) και δύσκαμπτο (δεξιά) οδόστρωμα .....	10
Εικόνα 2 Συμπεριφορά εύκαμπτου (αριστερά) και δύσκαμπτου (δεξιά) οδοστρώματος.....	11
Εικόνα 3 Τύποι δύσκαμπτου οδοστρώματος .....	13
Εικόνα 4 Κατασκευή συνεχούς οδοστρώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα (CRCP). .....	16
Εικόνα 5 Πάνελ προεντεταμένου σκυροδέματος που τοποθετείται πάνω από βάση. ....	17
Εικόνα 6 Τυπικές στρώσεις σε οδόστρωμα .....	19
Εικόνα 6.1 Παράδειγμα αποστράγγισης δύσκαμπτου οδοστρώματος .....	21
Εικόνα 6.2 Μηχανισμός ανισοσταθμίας πλακών οδοστρώματος .....	22
Εικόνα 6.3 Παράδειγμα ανισοσταθμίας πλακών σε δύσκαμπτο οδόστρωμα .....	22
Εικόνα 7 Κύκλος ζωής οδοστρώματος .....	23
Εικόνα 8 Επεξεργασία ορυχείου στο Gascoigne Wood Mine, Yorkshire .....	40
Εικόνα 9 Εργασίες αργίλου Κίνας .....	43
Εικόνα 10 Επεξεργασία άμμου αργίλου Κίνας .....	43
Εικόνα 11 Απόβλητα σχιστολίθου .....	46
Εικόνα 12 Ιπτάμενη τέφρα .....	48
Εικόνα 13 Σκωρία υψικαμίνων .....	55
Εικόνα 14 Σκωρία χάλυβα .....	60
Εικόνα 15 Γύψος .....	62
Εικόνα 16 Σκόνη κλιβάνου τσιμέντου .....	64

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Περιβαλλοντικές πτυχές και επιπτώσεις της Παραγωγής Σκυροδέματος.....	28
Πίνακας 2 Σχεδιασμός κατασκευής και αποκατάστασης οδοστρώματος για τη βελτίωση της βιωσιμότητας του οδοστρώματος (Chan and Tighe 2010; Van Dam et al. 2015) .....	31
Πίνακας 3 Τεχνικές βιώσιμης συντήρησης οδοστρωμάτων με βάση τον τύπο επιφάνειας οδοστρώματος .....	32
Πίνακας 4 Σύνοψη των υλικών που εξετάστηκαν, του τρόπου χρήσης τους στην κατασκευή οδοστρωμάτων και της συμπεριφοράς τους όπως προκύπτει από την υφιστάμενη έρευνα .....	66

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία διερευνά την αξιοποίηση εναλλακτικών υλικών στην κατασκευή οδοστρωμάτων, με τη διεξαγωγή μιας εκτεταμένης βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Η μελέτη αναγνωρίζοντας την αυξανόμενη παγκόσμια ανησυχία σχετικά με την περιβαλλοντική και οικονομική βιωσιμότητα των παραδοσιακών υλικών οδοστρώματος διερευνούνται εναλλακτικές επιλογές για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων. Μέσω μιας συστηματικής ανασκόπησης της υπάρχουσας έρευνας, η εργασία στοχεύει να παρέχει πληροφορίες για τη βιωσιμότητα, τα οφέλη και τις προκλήσεις που σχετίζονται με την ενσωμάτωση εναλλακτικών υλικών στις παραδοσιακές πρακτικές κατασκευής οδοστρωμάτων.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφέρεται σε διάφορες πτυχές που σχετίζονται με εναλλακτικά υλικά, συμπεριλαμβανομένης της σύνθεσης, των ιδιοτήτων, της απόδοσης και των περιβαλλοντικών επιπτώσεών τους. Εξετάζει μια σειρά εναλλακτικών υλικών, όπως ανακυκλωμένα αδρανή, βιομηχανικά υποπροϊόντα και υλικά βιολογικής βάσης, τονίζοντας τις δυνατότητές τους ως βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις στα συμβατικά υλικά οδοστρώματος. Επιπλέον, η ανασκόπηση αξιολογεί την καταλληλότητα εναλλακτικών υλικών για διαφορετικές εφαρμογές οδοστρώματος και λαμβάνει υπόψη παράγοντες όπως η ανθεκτικότητα, η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και η διαθεσιμότητα.

Τα βασικά ευρήματα υποδεικνύουν ότι τα εναλλακτικά υλικά εντάσσονται στο πλαίσιο της βιωσιμότητας της κατασκευής οδοστρώματος. Δίνεται δυνατότητα να μειώσης της εξάρτησης από τους φυσικούς πόρους, ελαχιστοποίησης της δημιουργίας αποβλήτων και μετρίασης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τα παραδοσιακά υλικά. Επιπλέον, τα εναλλακτικά υλικά μπορεί να συμβάλουν στη βελτιωμένη απόδοση του οδοστρώματος, συμπεριλαμβανομένης της ενισχυμένης αντοχής και αντοχής σε μηχανισμούς κινδύνου.

Ωστόσο, εντοπίζονται αρκετές προκλήσεις και περιορισμού που σχετίζονται με τη χρήση εναλλακτικών υλικών, όπως η μεταβλητότητα στις ιδιότητες των υλικών, μακροπρόθεσμη απόδοση και ανθεκτικότητα και πιθανά ζητήματα συμβατότητας με τις υπάρχουσες τεχνολογίες οδοστρώματος.



## Abstract

The thesis explores the utilization of alternative materials in pavement construction, by conducting a comprehensive literature review. The study acknowledges the increasing global concern regarding the environmental and economic sustainability of traditional pavement materials and proposes an examination of alternative options to address these challenges. Through a systematic review of existing research, the thesis aims to provide insights into the viability, benefits, and challenges associated with incorporating alternative materials into pavement construction practices.

The literature review covers various aspects related to alternative materials, including their composition, properties, performance, and environmental impact. It examines a range of alternative materials such as recycled aggregates, industrial by-products, and bio-based materials, highlighting their potential as sustainable alternatives to conventional pavement materials. Furthermore, the review assesses the suitability of alternative materials for different pavement applications and considers factors such as durability, cost-effectiveness, and availability.

Key findings from the literature review indicate that alternative materials offer promising opportunities to enhance the sustainability of pavement construction. They have the potential to reduce the reliance on natural resources, minimize waste generation, and mitigate environmental impacts associated with traditional materials. Additionally, alternative materials may contribute to improved pavement performance, including enhanced durability and resistance to distress mechanisms.

However, the literature review also identifies several challenges and limitations associated with the use of alternative materials, such as variability in material properties, concerns regarding long-term performance and durability, and potential compatibility issues with existing pavement technologies. Addressing these challenges will require further research, innovation, and collaboration across multidisciplinary fields.



## 1. Εισαγωγή

Την τελευταία δεκαετία, έχει σημειωθεί μια δραματική αύξηση στη χρήση ανακυκλωμένων υλικών/υποπροϊόντων ως εναλλακτικών οικοϋλικών στην κατασκευή οδοστρωμάτων. Η αύξηση αυτή οφείλεται στη εξάντληση των φυσικών πόρων και στην ανάγκη μεγάλων ποσοτήτων υλικών για την κατασκευή στρώσεων οδοστρώματος. Πολλά είδη ανακυκλωμένων υλικών ή υποπροϊόντων χρησιμοποιούνται αποκλειστικά στην κατασκευή οδοστρωμάτων, όπως ανακυκλωμένο ασφαλτικό οδόστρωμα (Reclaimed Asphalt Pavement - RAP), απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων (Construction And Demolition - C&D), απόβλητα πετρώματα, γυαλί, σκωρία χάλυβα, σκόνη τσιμέντου, φλοιός και άχυρο ρυζιού, πριονίδι ξύλου, πλαστικές σακούλες απορριμμάτων, απορρίμματα ελαστικών, απόβλητα λάδια κινητήρων και μαγειρικής και άλλα. Αναμφίβολα, η χρήση αυτών των ανακυκλωμένων υλικών/υποπροϊόντων στην κατασκευή οδοστρωμάτων έχει πολλά οφέλη βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα. Μερικά από αυτά τα οφέλη είναι η ελαχιστοποίηση της χρήσης φυσικών πόρων, η εξοικονόμηση εκατομμυρίων κυβικών μέτρων σε χωματερές, η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και η κατασκευή βιώσιμων οδοστρωμάτων. Ωστόσο, μια σειρά εμποδίων στην αξιοποίηση των υλικών αυτών εξακολουθούν να υφίστανται, όπως η έλλειψη εμπιστοσύνης των πελατών σε τέτοια υλικά, η έλλειψη προδιαγραφών και νομιμοποίησης μεταξύ άλλων.

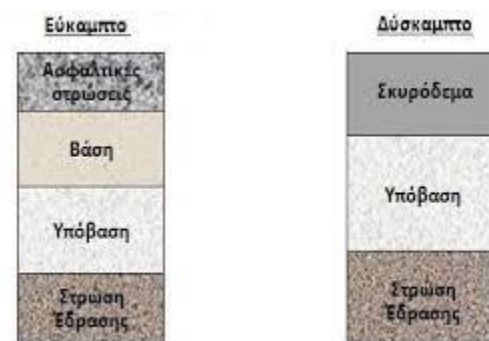
Η παρούσα εργασία εξετάζει την τρέχουσα κατάσταση της χρήσης ανακυκλωμένων υλικών/υποπροϊόντων στην κατασκευή οδοστρωμάτων παγκοσμίως, τις προδιαγραφές και τα οφέλη που προέκυψαν από την άποψη της οικονομικής εξοικονόμησης, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και της βιωσιμότητας. Επίσης, περιγράφονται τα υπάρχοντα εμπόδια και περιορισμοί για την επικράτηση των ανακυκλωμένων υλικών/υποπροϊόντων στην κατασκευή οδοστρωμάτων. Τέλος, τεκμηριώνονται πρόσφατες προσεγγίσεις και στρατηγικές για την υπέρβαση ορισμένων από αυτούς τους περιορισμούς για την επιτυχή εφαρμογή τέτοιων υλικών στην κατασκευή οδοστρωμάτων.

## 2. Κατασκευή οδοστρωμάτων

Ένα οδόστρωμα αποτελείται από ένα σύστημα στρώσεων που περιλαμβάνει διάφορα επίπεδα φυσικών και επεξεργασμένων υλικών τοποθετημένα πάνω σε κατάλληλα επεξεργασμένο φυσικό έδαφος που αποτελεί τη στρώση έδρασης. Κύριος στόχος του οδοστρώματος είναι να καταλείπει και να ανομειώσει την τάση των φορτίων που καταλήγουν στη στρώση έδρασης χωρίς να προκαλεί φθορές σε αυτό. Το οδόστρωμα πρέπει να διαθέτει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: αποδεκτή ποιότητα οδήγησης, επαρκή αντίσταση στην ολίσθηση, καλή ανακλαστικότητα του φωτός και χαμηλή παραγωγή θορύβου. Ο στόχος είναι να διασφαλιστεί ότι τα φορτία που μεταδίδονται από τους τροχούς των οχημάτων μειώνονται αρκετά, ώστε να μην υπερβαίνουν την αντοχή όλων των στρωμάτων του οδοστρώματος. Αυτή η ενότητα παρέχει μια σύντομη επισκόπηση των διαφόρων τύπων οδοστρωμάτων, των διαφορετικών στρωμάτων και των λειτουργιών τους, καθώς και των μεθόδων που χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό του οδοστρώματος.

### 2.1 Τύποι οδοστρωμάτων

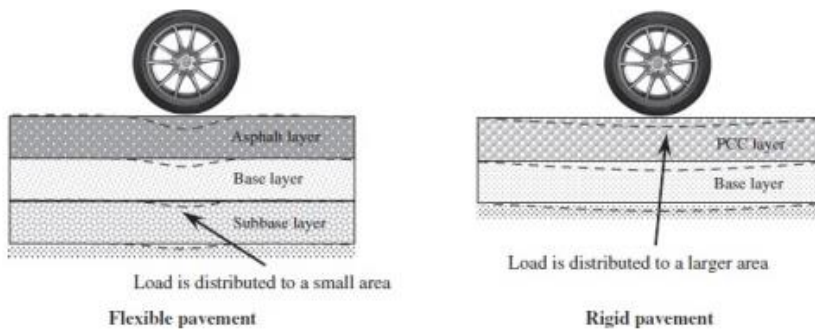
Γενικώς αναγνωρίζουμε δύο βασικούς τύπους οδοστρωμάτων: το εύκαμπτο οδόστρωμα και το δύσκαμπτο οδόστρωμα, όπως παρατηρείται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1 Εύκαμπτο (αριστερά) και δύσκαμπτο (δεξιά) οδόστρωμα

### 2.1.1 Εύκαμπτα οδοστρώματα

Τα εύκαμπτα οδοστρώματα ονομάζονται έτσι διότι έχουν τη δυνατότητα να κάμπτονται ή να καμπυλώνονται υπό τη φόρτιση των οχημάτων. Για την κατασκευή ενός εύκαμπτου οδοστρώματος, απαιτούνται διάφορες στρώσεις υλικών για την κατανομή και απομείωση των τάσεων. Συνήθως, κάτω από την ασφαλτική στρώση, υπάρχει μια βάση που αποτελείται από θραυστό αδρανές υλικό. Επιπλέον, χρησιμοποιείται μια στρώση υπόβασης από θραυστό αδρανές υλικό (Εικόνα 2), η οποία επιλέγεται ανάλογα με την αντοχή των στρώσεων έδρασης. Η δομή του οδοστρώματος εδράζεται στη στρώση έδρασης, η οποία αποτελείται κατ' ελάχιστο από το συμπυκνωμένο φυσικό έδαφος.



Εικόνα 2 Συμπεριφορά εύκαμπτου (αριστερά) και δύσκαμπτου (δεξιά) οδοστρώματος

Ασφαλτικές στρώσεις -

**Η επιφανειακή στρώση** (ασφαλτική) – ανώτερη στρώση που έρχεται σε άμεση επαφή με τα φορτία της κυκλοφορίας. Ο κύριος σκοπός της στρώσης είναι να παρέχει ασφάλεια (αντιολισθητική ικανότητα) και άνεση (ομαλή επιφάνεια) στο χρήστη της οδού.

**Ισοπεδωτική (εξομαλυντική) στρώση** είναι η ασφαλτική στρώση μεταβλητού πάχους που διαστρώνεται πάνω σε υφιστάμενη παλαιά επιφάνεια οδοστρώματος για την επίτευξη της απαιτούμενης επίκλισης του οδοστρώματος, ή της εξάλειψη επιφανειακών ανωμαλιών. Επί της ισοπεδωτικής στρώσης διαστρώνονται οι προβλεπόμενες επικείμενες στρώσεις.

**Η ασφαλτική βάση** κατασκευάζεται σε μια ή περισσότερες στρώσεις πάχους 5,0 – 10,0 cm. Συνίσταται η ασφαλτική βάση, σε περίπτωση που έχει πάχος έως 10cm, να διαστρώνεται εφάπαξ.

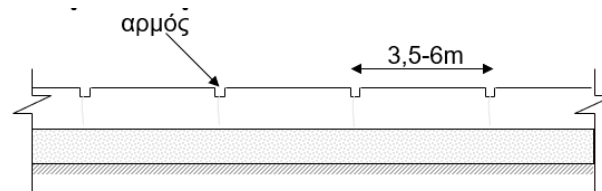
Στρώση βάσης – Στρώση αμέσως κάτω από την επιφανειακή πορεία που προσφέρει πρόσθετη φέρουσα ικανότητα και αποστράγγιση καθώς η περίσσεια νερού που παγιδεύεται στα κάτω στρώματα του οδοστρώματος μπορεί να μειώσει σημαντικά τη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος. Το στρώμα βάσης κατασκευάζεται συνήθως από θρυμματισμένο λίθο με μέγιστο μέγεθος (κατά τις ελληνικές προδιαγραφές ΕΤΕΠ πλάτος) 20mm-40mm (NZTA, 2006).

Στρώση υπόβασης – Στρώση που κάθεται μεταξύ της βάσης και του υποστρώματος που αποτελείται από θρυμματισμένη πέτρα μεγέθους περίπου 60 mm (και όχι μεγαλύτερο από 100 mm) (NZTA, 1986). Αυτό η στρώση απομείνει ακόμα περισσότερο τις τάσεις και εξυπηρετεί την αποστράγγιση. Εάν το οδόστρωμα διαθέτει ήδη επαρκή αντοχή, αυτό το στρώμα μπορεί μερικές φορές να παραλειφθεί εντελώς υπέρ μόνο μιας στρώσης βάσης

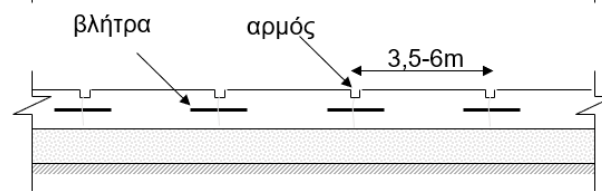
### 2.1.2 Δύσκαμπτα Οδοστρώματα

Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα αποτελούνται από σκυρόδεμα κατασκευασμένο από τσιμέντο Portland (PCC) είτε οπλισμένο με χάλυβα είτε χωρίς. Αυτά τα οδοστρώματα είναι λιγότερο ελαστικά από τα εύκαμπτα οδοστρώματα λόγω του υψηλού συντελεστή ελαστικότητας του υλικού PCC, ο οποίος συνήθως κυμαίνεται από 21000 έως 28000MPa για το PCC και από 3400 έως 6900MPa για την ασφαλτική βάση. Επίσης, μπορεί να περιλαμβάνουν ενίσχυση με χάλυβα για την αντιμετώπιση θερμικών ρωγμών ή την εξάλειψη αρμών. Κάθε ένας από αυτούς τους τύπους οδοστρωμάτων κατανέμει το φορτίο στη στρώση έδρασης με διαφορετικό τρόπο. Η εικόνα 3 παρουσιάζει τους κυριότερους τύπους δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Το δύσκαμπτο οδόστρωμα, λόγω της υψηλής ελαστικότητας του PCC, τείνει να κατανέμει το φορτίο σε μια σχετικά ευρεία περιοχή της στρώσης έδρασης (βλ. Εικόνα 2). Η πλάκα σκυρόδεματος αποτελεί τον κύριο παράγοντα της δομικής αντοχής ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος.

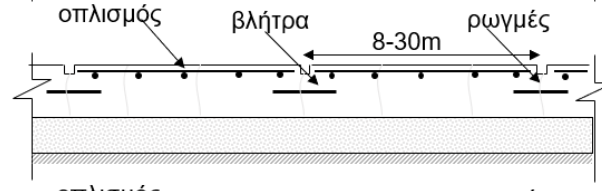
i. Οδόστρωμα από άοπλο σκυρόδεμα με αρμούς χωρίς βλήτρα



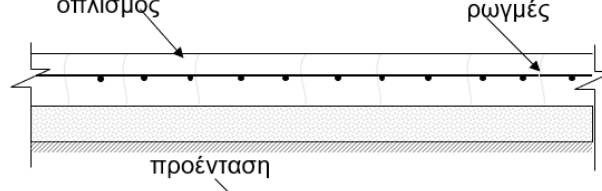
ii. Οδόστρωμα από άοπλο σκυρόδεμα με αρμούς ενισχυμένους με βλήτρα



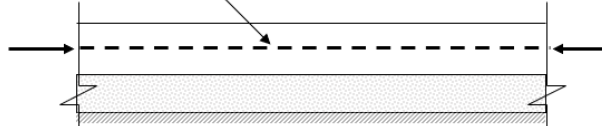
iii. Οδόστρωμα από οπλισμένο σκυρόδεμα



iv. Οδόστρωμα από σκυρόδεμα χωρίς αρμούς με συνεχή οπλισμό



v. Οδόστρωμα από προεντεταμένο σκυρόδεμα



Εικόνα 3 Τύποι δύσκαμπτου οδοστρώματος

Σε σύγκριση με τα εύκαμπτα οδοστρώματα, τα δύσκαμπτα οδοστρώματα τοποθετούνται είτε απευθείας στην κατάλληλα διαμορφωμένη στρώση έδρασης είτε στη στρώση βάσης (σταθεροποιημένη ή μη) . Σε ένα δύσκαμπτο οδόστρωμα, η κατανομή του φορτίου γίνεται με την θεώρηση ότι το οδόστρωμα λειτουργεί ως μια ελαστική πλάκα που στηρίζεται σε ένα ελαστικό μέσο. Για να αναλυθούν τα δύσκαμπτα οδοστρώματα, χρησιμοποιείτε η θεωρία πλακών, υποθέτοντας ότι η πλάκα σκυροδέματος είναι μια πλάκα με μεσαίο πάχος που παραμένει επίπεδη πριν και μετά τη φόρτιση. Η κάμψη της πλάκας λόγω του βάρους των τροχών και της θερμικής αλλαγής προκαλεί τάσεις και παραμορφώσεις στις στρώσεις του οδοστρώματος. Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις κύριους τύπους:

#### 2.1.2.1 Οδόστρωμα από άοπλο σκυρόδεμα με αρμούς χωρίς βλήτρα

Το οδόστρωμα αυτό (Εικ. 3i) χρησιμοποιεί απλές πλάκες σκυροδέματος χωρίς οπλισμό και περιλαμβάνει εγκάρσιους και διαμήκεις αρμούς ανάμεσα στις πλάκες. Συνήθως, σε εγκάρσιους αρμούς χρησιμοποιούνται βλήτρα για να μεταφέρουν το φορτίο. Αυτά τα βλήτρα συνήθως έχουν εποξειδική επίστρωση και διάμετρο 2,50 ή 3,75 εκατοστά και μήκος 45 εκατοστά και χρησιμοποιούνται ευρέως στο JPCP. Σήμερα, τα βλήτρα ενισχυμένα με πολυμερή υλικά (FRP) χρησιμοποιούνται για την πρόληψη της διάβρωσης (FHWA-HRT-06-106) (FHWA, 2009).

Τα βλήτρα τοποθετούνται σε μια διάταξη αρσενικού-θηλυκού σύνδεσης έτσι ώστε να μην υπάρχει τάση εφελκυσμού κατά τη συστολή των πλακών. Απλά, τα βλήτρα συνδέονται στενά σε μια πλάκα και μετακινούνται αξονικά ελεύθερα σε μια άλλη πλάκα. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας απλά μεταφέρει το φορτίο από τη μια πλάκα στην άλλη, χωρίς να δημιουργείται τάση εφελκυσμού κατά τη συστολή των πλακών. Η απόσταση μεταξύ των εγκάρσιων αρμών επιλέγεται έτσι ώστε οι τάσεις λόγω θερμοκρασίας και υγρασίας να μην προκαλούν ενδιάμεση ρωγμή μεταξύ των αρμών. Συνήθως, αυτό οδηγεί σε μια απόσταση που δεν υπερβαίνει περίπου τα 6 μέτρα.

Τα βλήτρα συνήθως χρησιμοποιούνται σε διαμήκεις αρμούς ή μεταξύ ενός ακραίου αρμού και ενός κράσπεδου για τη στήριξη των πλακών στη θέση τους και τη διατήρηση της στερεότητας των αδρανών υλικών. Οι ράβδοι δεσίματος δεν είναι συσκευές μεταφοράς μεγάλων φορτίων, αλλά μεταφέρουν μικρότερα φορτία. Συνήθως, οι ράβδοι δεσίματος έχουν διάμετρο περίπου 12,5 χιλιοστά και μήκος μεταξύ 0,6 και 1,0 μέτρου.

Στα οδοστρώματα JPCP, όταν δεν παρέχονται αρκετοί ή επαρκείς βλήτρα, η μεταφορά του φορτίου κατά μήκος της σύνδεσης προκαλεί σημαντικά υψηλότερες τάσεις και παραμορφώσεις λόγω της φόρτισης των αρμών σε σύγκριση με εκείνες που οφείλονται στην εσωτερική φόρτιση. Κάθε ράβδος μεταφέρει μέρος του φορτίου που ασκεί ο τροχός από τη φορτιζόμενη πλάκα κατά μήκος της αρθρώσεως στην παρακείμενη πλάκα που δεν έχει φορτίο. Η μεταφορά του φορτίου μέσω των ράβδων πείρου επιφανειακά μειώνει τις τάσεις και τις παραμορφώσεις λόγω της φόρτισης των αρμών και ελαχιστοποιεί την ανισοσταθμία και την άντληση. Η ανισοσταθμία αφορά τη διαφορά υψομέτρου κατά μήκος των αρμών μεταξύ των δύο πλακών, ενώ η άντληση ορίζεται ως η απορροή υλικού από το υπόβαθρο μέσω των αρμών και κατά μήκος των άκρων του οδοστρώματος.

#### *2.1.2.2 Οδοστρώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα με αρμούς ενισχυμένους με βλήτρα*

Με τη χρήση ενισχυμένων πλακών (Εικ. 3ii) , η εγκάρσια απόσταση αρμών μπορεί να είναι μεγαλύτερη από αυτήν που βρίσκουμε στα JPCP, κυμαινόμενη από περίπου 7,5 έως 15 μέτρα. Αναμένεται ότι οι επιδράσεις της θερμοκρασίας και της υγρασίας θα προκαλέσουν ρωγμές μεταξύ των αρμών. Για την αποφυγή αυτών των ρωγμών ή τη συγκράτησή τους μεταξύ τους, χρησιμοποιείται ενίοτε χάλυβας οπλισμού ή χαλύβδινο πλέγμα. Επιπλέον, οι ράβδοι πείρου χρησιμοποιούνται συνήθως σε εγκάρσιων αρμών προκειμένου να συμβάλουν στη μεταφορά του φορτίου.

#### *2.1.2.3 Οδόστρωμα από σκυρόδεμα χωρίς αρμούς με συνεχή οπλισμό (Continuous Reinforced Concrete Pavement - CRCP)*

Το οδόστρωμα με συνεχή οπλισμό δεν έχουν αρμούς (Εικ. 3iv) , εκτός αν απαιτούνται σε συγκεκριμένα σημεία, όπως στο τέλος της οδόστρωσης ή σε προσεγγίσεις γεφυρών και μεταβάσεις σε άλλα τμήματα του οδοστρώματος. Αυτό παρέχει συνεχή ενίσχυση, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 4. Στην αρχική κατασκευή του CRCP, οι αλλαγές στον όγκο προκαλούνται από την ενυδάτωση του τσιμέντου, τις θερμικές επιδράσεις και την εξωτερική ξήρανση. Αυτή η αλλαγή στον όγκο περιορίζεται από το υποκείμενο στρώμα βάσης και προκαλεί τάσεις εφελκυσμού στο CRCP. Αυτές οι εξελίξεις στις τάσεις εφελκυσμού οδηγούν στον σχηματισμό εγκάρσιων ρωγμών πλήρους βάθους που χωρίζουν το οδόστρωμα σε μικρές, ανεξάρτητες πλάκες. Παρόλα αυτά, το CRCP παρέχει μακροχρόνια και αποτελεσματική μεταφορά του φορτίου μέσω των εγκάρσιων ρωγμών, προσφέροντας μια ομαλή και αθόρυβη οδήγηση.



Placing reinforcement



Reinforcement ready for concrete



Pouring concrete



Compaction

Εικόνα 4 Κατασκευή συνεχούς οδοστρώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα (CRCP).

#### 2.1.2.4 Οδόστρωμα από προεντεταμένο σκυρόδεμα (Prestressed Concrete Pavement- PCP)

Το οδόστρωμα από προεντεταμένο σκυρόδεμα κατασκευάζεται με τη χρήση προκατασκευασμένων πλακών οδοστρώματος από σκυρόδεμα που παράγονται στο εργοστάσιο των κατασκευαστών και στη συνέχεια μεταφέρονται και τοποθετούνται στον τόπο του έργου. Αυτό το PCP είναι εξαιρετικά κατάλληλο για περιοχές με υψηλή κυκλοφορία, όπου απαιτείται ανθεκτικό οδόστρωμα και ο χρόνος κατασκευής είναι περιορισμένος. Τα πάνελ (όπως φαίνεται στην εικόνα 5 και 3v) κατασκευάζονται σε διαστάσεις που αντιστοιχούν στο πλάτος μίας, δύο ή τριών λωρίδων του οδοστρώματος, επιτρέποντας την ανακατασκευή μίας ή περισσότερων λωρίδων ενός υπάρχοντος οδοστρώματος ταυτόχρονα. Τα πάνελ τεντώνονται κατά μήκος της μεγαλύτερης διάστασης τους κατά τη διάρκεια της κατασκευής και συνδυάζονται μεταξύ τους σε γκρουπ κατά μήκος του οδοστρώματος (στην κατεύθυνση της κυκλοφορίας). Έτσι, οι τοποθετημένες πλάκες δημιουργούν ένα συνεχές οδόστρωμα.





*Εικόνα 5 Πάνελ προεντεταμένου σκυροδέματος που τοποθετείται πάνω από βάση.*

## 2.2 Υλικά οδοστρώματος

### 2.2.1 Αδρανή και εδαφικά υλικά

Όπως φαίνεται στην εικόνα 6, το οδόστρωμα κατασκευάζεται πάνω από το διαμορφωμένο φυσικό έδαφος (στρώση έδρασης). Πάνω από τη στρώση έδρασης, κατασκευάζεται η στρώση βάσης, οι οποίες αποτελούνται από ασύνθετα χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα αδρανή υλικά που συμπυκνώνονται σε μεγάλο βαθμό, επιτυγχάνοντας τη βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία. Οι ανώτερες στρώσεις, είτε είναι ασφαλτικές (AC) είτε από σκυρόδεμα (PCC), εδράζονται στη στρώση βάσεως. Οι ιδιότητες των αδρανών και εδαφικών υλικών είναι κρίσιμες για την αντοχή και την συμπεριφορά του οδοστρώματος σε όλη τη διάρκεια ζωής του, και για τον λόγο αυτό, πριν από την κατασκευή, είναι απαραίτητο να πραγματοποιούνται οι κατάλληλοι έλεγχοι για τον προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών τους.

Τα αδρανή υλικά διακρίνονται σε οικογένειες

**A) Με βάση την προέλευσή τους σε :**

- φυσικής προέλευσης,

- **τεχνητά ή βιομηχανικά**
- **και ανακυκλωμένα.**

**Φυσικής προέλευσης** είναι τα αδρανή τα οποία έχουν ληφθεί από το φυσικό περιβάλλον και δεν έχουν υποστεί τίποτε περισσότερο από μηχανική επεξεργασία θραύσης, πλυσίματος και διαλογής (πχ θραύστη πετρώματα, αλλουβιακοί σχηματισμοί , ποταμίσιες λιμναίες ή θαλάσσιες αποθέσεις, αποθέσεις άμμων ή χαλίκων, λάβα, ηφαιστειακοί τόφοι , λατομικά προϊόντα κλπ).

**Τεχνητά ή βιομηχανικά** είναι τα αδρανή που έχουν προκύψει ως προϊόντα ή παραπροϊόντα βιομηχανικής δραστηριότητας από χημική ή θερμική επεξεργασία πρώτων υλών ορυκτής ή άλλης προέλευσης (πχ τέφρες , σκωρίες , υπολείμματα καύσεων, άργιλοι, βερμικουλίτης, περλίτης , υλικά στίλβωσης , κλπ)

**Ανακυκλωμένα** είναι τα αδρανή που προκύπτουν από την επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση δομικών υλικών από υφιστάμενες κατασκευές (υλικά κατεδαφίσεως σκυροδέματος , τοιχοποιίας , ασφαλικών έργων κλπ)

## **B) Με βάση την πηγή λήψης σε:**

- «Φυσικά» ή συλλεκτά αδρανή
- Αδρανή λατομείων

Οι παραπάνω κατηγορίες αναφέρονται στα πρωτογενή αδρανή φυσικής προέλευσης ,ανεξάρτητα αν ακολουθεί άλλη κατεργασία που μπορεί να τα μετατρέψει σε τεχνητά – βιομηχανικά.

«Φυσικά» ή συλλεκτά ονομάζονται τα αδρανή που η λήψη τους γίνεται από φυσικές αποθέσεις (π.χ. ποτάμια , ορυχεία κτλ.). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έχουν ή να επεξεργαστούν περαιτέρω ανάλογα με τις απαιτήσεις ( π.χ. θραύση , πλύσιμο , κτλ.) Επειδή σε αυτά τα υλικά υπάρχει αυξημένος ο κίνδυνος αργιλικής παιπάλης , έχουν κατά κανόνα αυξημένες απαιτήσεις ως προς αυτή.

Αδρανή λατομείων ονομάζονται τα αδρανή που προκύπτουν από εξόρυξη και θραύση όγκων πετρώματος. Τα λεπτόκοκκα κλάσματα περιέχουν ποσοστό παιπάλης πολύ μεγαλύτερο από αντίστοιχα φυσικά αδρανή, με κίνδυνο μεγαλύτερη ρύπανση προς το περιβάλλον.

Είναι η κύρια κατηγορία αδρανών υλικών που χρησιμοποιούνται στο Ελλαδικό χώρο.



Εικόνα 6 Τυπικές στρώσεις σε οδόστρωμα

### 2.2.2 Ασφαλτομίγματα

Το ασφαλτικό μίγμα, ή αλλιώς (AC), αποτελείται από αδρανή και άσφαλτο. Οι ανολογίες των κλασμάτων του μίγματος, χαλίκια, άμμος και αδρανών, καθορίζονται από τις εκάστοτε προδιαγραφές. Στη βιομηχανία οδοστρωμάτων, χρησιμοποιείται επίσης ο όρος "άσφαλτος θερμού μίγματος (HMA)" αντί για "ασφαλτικό σκυρόδεμα (AC)," αν και το AC περιλαμβάνει επίσης άλλες μορφές υλικού, όπως αναλύονται αργότερα σε αυτή την ενότητα.

Η άσφαλτος, η οποία έχει σκούρο καφέ έως μαύρο χρώμα, αποτελεί έναν υδρογονάνθρακα που παράγεται από υπολείμματα απόσταξης πετρελαίου. Αυτή η απόσταξη μπορεί να λάβει χώρα φυσικά, προκειμένου να προκύψουν λίμνες ασφάλτου, ή σε διυλιστήριο πετρελαίου, όπου χρησιμοποιείται αργό πετρέλαιο. Η άσφαλτος, διαθέτει εξαιρετικές ιδιότητες στεγανότητας και συγκόλλησης. Η άσφαλτος αντλείται από υπολείμματα ακατέργαστου πετρελαίου ή από φυσικές λίμνες ασφάλτου. Το ασφαλτικό υλικό αποτελείται κυρίως από άνθρακα και υδρογόνο, ενώ

κάποια δευτερεύοντα στοιχεία που εντοπίζονται περιλαμβάνουν θείο, άζωτο και οξυγόνο, με τη σποραδική παρουσία βαναδίου και νικελίου (Peterson, 1984),(Halstead, 1985).

Σε ό,τι αφορά τη σημασία του AC, ας λάβουμε για παράδειγμα τις Ηνωμένες Πολιτείες. Στη χώρα αυτή, υπάρχουν περίπου 4.000 μονάδες επεξεργασίας ασφάλτου που παράγουν περίπου 525 εκατομμύρια τόνους ασφάλτου, με συνολική αξία πάνω από 3 δισεκατομμύρια δολάρια. Υπάρχουν περίπου 300.000 εργαζόμενοι που απασχολούνται σε αυτόν τον κλάδο. Στις ΗΠΑ υπάρχουν συνολικά 8,7 εκατομμύρια μίλια οδοστρωμάτων, από τα οποία το 2,5% είναι διακρατικά και το 97,5% μη διακρατικά. Τα διακρατικά οδοστρώματα αποτελούνται κατά 65% από δύσκαμπτα και κατά 35% εύκαμπτα. Αντίθετα, τα μη διακρατικά οδοστρώματα αποτελούνται κατά 94% από εύκαμπτα και κατά 6% από δύσκαμπτα (Riveraetal., 2017). Συνεπώς, είναι εμφανής η τεράστια σημασία του ασφαλικού σκυροδέματος στον τομέα των οδοστρωμάτων, καθώς και στην Ελλάδα το 95 % είναι εύκαμπτα.

### 2.3 Αστοχία οδοστρωμάτων

Πλέον έχει αναπτυχθεί μεγάλος αριθμός αναλυτικών μεθόδων διαστασιολόγησης οδοστρώματος που βασίζονται στην εκτίμηση των τάσεων και των παραμορφώσεων στο οδόστρωμα, όπως και στις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των υλικών οδοστρωσίας και μπορούν να εφαρμοστούν ανεξαρτήτως έχει διαπιστωθεί ότι δύο είναι οι κρίσιμες θέσεις αστοχίας για την εντατική κατάσταση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος . Η πρώτη θέση αστοχίας βρίσκεται στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων , η οποία προκαλείται όταν οι εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις είναι μεγάλες και ονομάζεται αστοχία λόγω κόπωσης του ασφαλομίγματος (fatigue) , Η δεύτερη θέση αστοχίας βρίσκεται στην κορυφή της στρώσης έδρασης και εξαρτάται κυρίως από τη γεωτεχνική υποδομή και ειδικότερα από τη στρώση έδρασης . Εάν το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους είναι χαμηλό, τότε οι τάσεις που αναπτύσσονται προκαλούν παραμένουσα παραμόρφωση στο οδόστρωμα που εμφανίζεται και στην επιφάνεια του δρόμου (Arnold et al. 2002, Acikgöz and Rauf 2010) . Η παραμένουσα παραμόρφωση επιφέρει την υποβάθμιση τόσο των χαρακτηριστικών του οδοστρώματος , όσο και του επιπέδου εξυπηρετικότητας προς τους χρήστες της οδού . Για αυτόν τον λόγο είναι σημαντικό κατά την διαστασιολόγηση , να πραγματοποιηθεί η πρόβλεψη της κατά τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος. Έτσι λοιπόν , έχουν αναπτυχθεί πειραματικοί νόμοι αστοχίας που

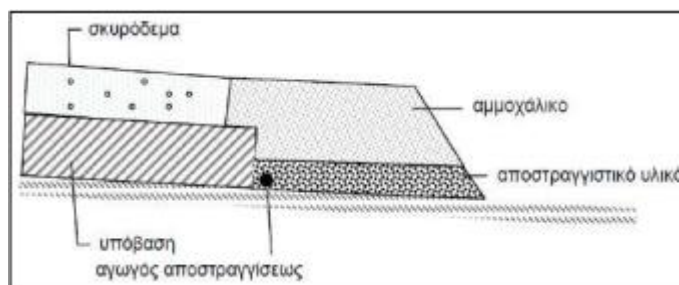
συμπεριλαμβάνονται σε μεθόδους σχεδιασμού οδοστρωμάτων για την αποφυγή τέτοιου είδους αστοχίας .

Σημαντική είναι και η στρώση της υπόβασης που κατασκευάζεται για τους ακόλουθους λόγους:

- διευκόλυνση της κατασκευής (εξομάλυνση του εδάφους),
- αύξηση της αντοχής του οδοστρώματος (δηλ. της πλάκας του σκυροδέματος),
- αποφυγή καθιζήσεων του εδάφους,
- παροχή προστασίας από τον παγετό και
- αποφυγή της ανόδου του νερού λόγω τριχοειδών φαινομένων.

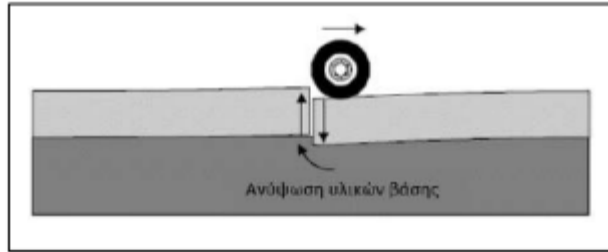
Άλλος ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον σχεδιασμό της στρώσης της υπόβασης είναι η αποστράγγιση, η οποία μπορεί να τοποθετηθεί μεταξύ του πυθμένα της πλάκας και της επιφάνειας της υπόβασης.

Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται ένα τυπικό παράδειγμα αποστράγγισης [Λοΐζος & Πλατή, 2020].



Εικόνα 6.1 Τυπικό παράδειγμα αποστράγγισης δύσκαμπτου οδοστρώματος

Άλλη μια μορφή αστοχίας/φθοράς είναι η ανισοσταθμία μεταξύ γειτονικών πλακών (“faulting”) , αντιπροσωπεύει τη διαφορά ύψους μεταξύ των επιφανειών δύο γειτονικών πλακών. Η διαφορά αυτή είναι αποτέλεσμα της ανύψωσης των υλικών που βρίσκονται κάτω από την πλάκα που μετακινείται προς τα πάνω και συχνά της απώλειας υλικών κάτω από την πλάκα που μετακινείται προς τα κάτω



Εικόνα 6.2 Μηχανισμός ανισοσταθμίας πλακών οδοστρώματος

Το φαινόμενο αυτό οφείλεται, κυρίως, στο συνδυασμό βαρέων φορτίων αξόνων, των υλικών των υποκείμενων στρώσεων που μπορούν να διογκωθούν κάτω από την πλάκα σκυροδέματος και της ύπαρξης υγρασίας κάτω από το οδόστρωμα. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου απαιτείται καλή λειτουργία μεταβίβασης φορτίου μεταξύ των πλακών, χρήση μη διαβρώσιμων υλικών που δεν μεταφέρονται και εξάλειψη του νερού που υπάρχει στα υποκείμενα στρώματα της πλάκας [Harvey&Roesler, 2000].



Εικόνα 6.3 Παράδειγμα ανισοσταθμίας πλακών σε δύο σκαμπτο οδόστρωμα

### 3. Βιωσιμότητα οδοστρωμάτων (Pavement sustainability)

#### 3.1 Γενικά

Όλοι οι ενδιαφερόμενοι στην κοινότητα του οδοστρώματος –από εταιρείες ιδιοκτητών μέχρι σχεδιαστές και από προμηθευτές υλικών μέχρι εργολάβους και συμβούλους- ενστερνίζονται συνεχώς τις πιο πρόσφατες τεχνικές πληροφορίες και καθοδήγηση που είναι διαθέσιμες για να συμβάλλουν στην βελτίωση αυτών των πρακτικών. Είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι δεν υπάρχει καθολικός ορισμός του «βιώσιμου» οδοστρώματος. Η βιωσιμότητα είναι πολύ ευαίσθητη στο πλαίσιο, καθώς κάθε έργο είναι μοναδικό, με συγκεκριμένες ανάγκες ανάλογα με

την τοποθεσία, το κλίμα, τα διαθέσιμα υλικά, τον τύπο της εγκατάστασης και το απαιτούμενο επίπεδο εξυπηρέτησης, καθώς και με τους γενικούς στόχους του οργανισμού. Ουσιαστικά, η βιωσιμότητα είναι σε μεγάλο βαθμό ένα χαρακτηριστικό του συστήματος και τα οδοστρώματα αντιπροσωπεύουν μόνο ένα μικρό μέρος του συστήματος υποδομής μεταφορών. Κατά συνέπεια, οποιεσδήποτε βελτιώσεις στα χαρακτηριστικά βιωσιμότητας των συστημάτων οδοστρωμάτων δεν μπορούν να γίνουν μεμονωμένα από το σύστημα υποδομής μεταφορών ή από άλλα συστήματα με τα οποία αλληλεπιδρούν τα οδοστρώματα.



Εικόνα 7 Κύκλος ζωής του οδοστρώματος

Ο κύκλος ζωής του οδοστρώματος (Εικ.7) περιλαμβάνει την παραγωγή υλικών, το σχεδιασμό, την κατασκευή (που περιλαμβάνει τη νέα κατασκευή καθώς και τη συντήρηση, ενίσχυση και την αποκατάσταση), τη χρήση και τα στάδια λήξης ζωής.

### 3.2 Κοινωνικές πτυχές

Η βιωσιμότητα των οδοστρωμάτων αποτελεί ένα σημαντικό θέμα που αφορά στην κοινωνική πτυχή της αειφορίας. Τόσο οι ασφαλτικές όσο και οι στρώσεις από σκυρόδεμα αποτελούν

καθοριστικά στοιχεία της υποδομής μας και η αποτελεσματική διαχείρισή τους είναι ουσιώδης για την κοινωνία. Οι κοινωνικές πτυχές της βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων, περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα παραγόντων που επηρεάζουν την ποιότητα ζωής, την ασφάλεια και την κοινωνική ευημερία των ανθρώπων που χρησιμοποιούν αυτές τις υποδομές.

Ένας σημαντικός παράγοντας είναι η ασφάλεια των οδηγών και των πεζών. Τα καλά σχεδιασμένα οδοστρώματα εξασφαλίζουν τη μείωση των ατυχημάτων και των τραυματισμών που συνδέονται με την οδική κυκλοφορία. Επιπλέον, η βελτίωση της προσβασιμότητας για όλους, συμπεριλαμβανομένων των ατόμων με αναπηρία, συμβάλλει στην προώθηση της κοινωνικής συμπερίληψης και της ισότητας. Επίσης, η πρόσβαση σε καλά διατηρημένες οδοστρωμάτων βοηθά στη μείωση του χρόνου ταξιδιού και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών (Cerezo & Merchan, 2020).

Η κατασκευή και η συντήρηση των οδοστρωμάτων επηρεάζει επίσης το περιβάλλον και την υγεία των κοινοτήτων. Η χρήση βιώσιμων υλικών και μεθόδων κατασκευής, όπως η ανακύκλωση ασφαλικών υλικών ή η εφαρμογή τεχνολογιών που μειώνουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, συμβάλλει στη μείωση του οικολογικού αποτυπώματος των οδοστρωμάτων. Επιπλέον, η μείωση του θορύβου από την κυκλοφορία είναι ένας παράγοντας που βελτιώνει την ποιότητα ζωής των κατοίκων κοντά σε οδούς και αυτοκινητοδρόμους (Nijboer & van der Burg, 2019).

Επιπλέον, οι κοινωνικές επιπτώσεις των οδοστρωμάτων ανακλούν την ανάγκη για αειφόρο διαχείριση των πόρων. Η εξυπηρέτηση των αναγκών των κοινοτήτων και η ανταπόκριση στις εκκλήσεις για βελτίωση της υποδομής δεν πρέπει να γίνεται εις βάρος των μελλοντικών γενεών. Επίσης, η συντήρηση των οδοστρωμάτων απαιτεί συχνά τη συμμετοχή της τοπικής κοινότητας σε διαδικασίες όπως ο προγραμματισμός της συντήρησης και η επιλογή των εργασιών. Η διαφάνεια και η συμμετοχή των ενδιαφερομένων μπορεί να βελτιώσει την αποδοχή των αποφάσεων και να ενισχύσει την κοινοτική συνοχή (European Union, 2018)

Τέλος, η εκπαίδευση και η κατάρτιση των εργαζομένων στον τομέα της οδοποιίας είναι άλλος ένας σημαντικός παράγοντας για την κοινωνική βιωσιμότητα των οδοστρωμάτων. Η επαγγελματική εκπαίδευση και η συνεχής επιμόρφωση στις βέλτιστες πρακτικές και τις νέες τεχνολογίες συμβάλλουν στην αύξηση της αποτελεσματικότητας και της ασφάλειας των



εργασιών κατασκευής και συντήρησης, ενισχύοντας έτσι το κοινωνικό και οικονομικό όφελος από την υποδομή οδικών μεταφορών (Harvey&Smith, 2017).

### 3.3 Οικονομικές πτυχές

Η οικονομική βιωσιμότητα των οδοστρωμάτων, είτε αυτά είναι ασφαλτικά είτε από σκυρόδεμα, αποτελεί καίριο παράγοντα στην ανάπτυξη και την αποτελεσματική λειτουργία της κοινωνίας. Οι οδικές υποδομές διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην οικονομική δραστηριότητα και την εξυπηρέτηση των μεταφορικών αναγκών των κοινοτήτων. Επομένως, η βιωσιμότητα των οδοστρωμάτων από οικονομική άποψη είναι αναγκαία για την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας της κοινωνίας και της ανάπτυξης της (Καραγιάννης,2021, Παπαδοπούλου, 2019).

Μια σημαντική πτυχή της οικονομικής βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων είναι η αποδοτικότητα των επενδύσεων σε αυτά. Η κατασκευή και η συντήρηση των οδοστρωμάτων απαιτούν σημαντικούς οικονομικούς πόρους, και είναι σημαντικό να εξεταστεί η αποδοτικότητα των δαπανών σε σχέση με τα οφέλη που προσφέρουν. Οι οικονομικά αποδοτικές επενδύσεις σε οδοστρώματα είναι εκείνες που προσφέρουν μακροπρόθεσμα οφέλη με χαμηλότερο κόστος συντήρησης και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (Καραγιάννης,2021, Παπαδοπούλου, 2019).

Επιπλέον, η οικονομική βιωσιμότητα των οδοστρωμάτων συνδέεται στενά με την ανταγωνιστικότητα της επιχειρηματικής δραστηριότητας και την ευημερία των περιοχών. Καλά συντηρημένα οδοστρώματα βοηθούν στη μείωση του κόστους μεταφοράς εμπορευμάτων και υπηρεσιών, προωθώντας έτσι την επιχειρηματικότητα και την εμπορική δραστηριότητα. Επίσης, η βελτίωση της συνδεσιμότητας μεταξύ περιοχών δημιουργεί νέες ευκαιρίες για επενδύσεις και ανάπτυξη, συμβάλλοντας στη διασύνδεση της οικονομίας και στη μείωση των ανισοτήτων μεταξύ περιοχών (Καραγιάννης,2021, Παπαδοπούλου, 2019).

Ακόμη, η επίπτωση των οδοστρωμάτων στην απασχόληση είναι σημαντική. Η κατασκευή και η συντήρηση των οδοστρωμάτων δημιουργούν θέσεις εργασίας σε διάφορους τομείς, όπως η κατασκευαστική βιομηχανία, οι μεταφορές και οι υπηρεσίες συντήρησης. Επιπλέον, η βελτίωση των οδοστρωμάτων δημιουργεί ευκαιρίες επαγγελματικής ανάπτυξης και εξειδίκευσης για τους εργαζομένους στον τομέα των μεταφορών και της κατασκευής.

Τέλος, η κατασκευή και η λειτουργία βιώσιμων οδοστρωμάτων συνεισφέρει στη μείωση του κόστους της ζωής για τους κατοίκους. Η βελτίωση της κυκλοφοριακής ροής και η μείωση του χρόνου ταξιδιού οδηγούν σε εξοικονόμηση χρόνου και καυσίμων για τους ατομικούς και επιχειρησιακούς χρήστες. Αυτό συμβάλλει στη μείωση των κοστών μεταφορών και τη βελτίωση της οικονομικής ευημερίας των κατοίκων (Καραγιάννης,2021, Παπαδοπούλου, 2019).

### 3.4 Περιβαλλοντικές πτυχές

Η περιβαλλοντική βιωσιμότητα των οδοστρωμάτων, είτε αυτά είναι ασφαλτικά είτε από σκυρόδεμα, αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη διατήρηση της φυσικής ισορροπίας και την προστασία του περιβάλλοντος. Η κατασκευή και η λειτουργία των οδοστρωμάτων μπορεί να επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, όπως η ρύπανση του αέρα, του νερού και του εδάφους, η απώλεια βιοποικιλότητας και η αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή περιβαλλοντικά φιλικών πρακτικών στην κατασκευή και τη συντήρηση των οδοστρωμάτων είναι απαραίτητη για τη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων και τη διασφάλιση της βιώσιμης χρήσης των φυσικών πόρων.

Ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει το περιβάλλον είναι η επιλογή των υλικών και η μέθοδος κατασκευής των οδοστρωμάτων. Η παραγωγή της ασφάλτου και του σκυροδέματος απαιτεί σημαντικούς φυσικούς πόρους και ενέργεια, ενώ η καύση των καυσίμων κατά τη διάρκεια της κατασκευής μπορεί να προκαλέσει ρύπανση του ατμοσφαιρικού αέρα. Ως αποτέλεσμα, η χρήση αειφορικών υλικών και η εφαρμογή εναλλακτικών μεθόδων κατασκευής, όπως η χρήση ανακυκλώσιμων υλικών και η χρήση πιο βιώσιμων διαδικασιών κατασκευής, μπορεί να μειώσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των οδοστρωμάτων.

Επιπλέον, η συντήρηση των οδοστρωμάτων επηρεάζει επίσης το περιβάλλον. Η ανάγκη για συχνές επισκευές και ανακατασκευές μπορεί να οδηγήσει σε μείωση φυσικών πόρων και αύξηση των αποβλήτων. Επιπλέον, η χρήση τοξικών χημικών για τη συντήρηση των οδοστρωμάτων μπορεί να προκαλέσει ρύπανση του εδάφους και των υδάτων. Ως αποτέλεσμα, η εφαρμογή μεθόδων συντήρησης που χρησιμοποιούν φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες και υλικά μπορεί να συμβάλει στη μείωση της περιβαλλοντικής επίπτωσης.

Επιπλέον, η σχεδιαστική διαδικασία των οδοστρωμάτων πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη διατήρηση της φυσικής και πολιτιστικής κληρονομιάς. Η κατασκευή οδοστρωμάτων μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις σε οικοσυστήματα και πολιτιστικά μνημεία, εάν δεν ληφθούν κατάλληλα μέτρα προστασίας και αναδάσωσης. Επομένως, η εφαρμογή των αρχών της πράσινης κατασκευής και η διαχείριση του υδάτινου συστήματος μπορούν να συμβάλουν στη διατήρηση του περιβάλλοντος και της πολιτιστικής κληρονομιάς.

### 3.5 Πρακτικές υπέρ της βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων

#### 3.5.1 Παραγωγή υλικών

Τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται στα υποδομή οδοστρώματα περιλαμβάνουν φυσικά αδρανή (NaturalAggregate) (χαλίκι/θρυμματισμένη πέτρα, άμμος), υλικά ασφάλτου, υλικά τσιμέντου Portland και άλλα μικτά υλικά, όπως χάλυβας και ίνες. Περίπου το 55% των αδρανών υλικών που παράγονται στο Οντάριο χρησιμοποιείται για την κατασκευή και την αποκατάσταση δρόμων. Πάνω από 42 εκατομμύρια τόνοι αδρανών υλικών καταναλώθηκαν μεταξύ 2005 και 2008 (Kazmierowski 2013; LVM-JEGEL 2010). Η όλη διαδικασία παραγωγής αδρανών, συμπεριλαμβανομένων των διεργασιών εξόρυξης, σύνθλιψης και κοσκινίσματος, και η μεταφορά αδρανών καταναλώνει ενέργεια, παρθένο υλικό και νερό. Επίσης, παράγει εκπομπές από τα καύσιμα που καταναλώνονται από τον εξοπλισμό και τα οχήματα και επηρεάζει τα υπόγεια ύδατα και τη βιοποικιλότητα των λατομείων (VanDametal. 2015). Η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να επιφέρει μεγαλύτερη περιβαλλοντική επιβάρυνση ανάλογα με τις πηγές ενέργειας, για παράδειγμα άνθρακα, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, υδροηλεκτρικά, πυρηνικά, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το συνδετικό υλικό ασφάλτου που χρησιμοποιείται στο οδόστρωμα είναι ένα συμποϊόν της διαδικασίας απόσταξης αργού πετρελαίου στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου που είναι ο μεγαλύτερος εκπομπός αερίων του θερμοκηπίου (ThivesandGhisi 2017). Το τσιμέντο Portland παράγεται από πρώτη ύλη, όπως ο ασβέστης και ο άργιλος, των οποίων οι εξορυκτικές εργασίες συχνά οδηγούν σε εκτεταμένη αποψίλωση των

δασών και απώλεια φυτικού εδάφους. Η παραγωγή 1 τόνου κλίνκερ τσιμέντου απελευθερώνει περίπου 1 τόνο διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα (Damtoftetal. 2008). Το ασφαλτόμιγμα και το σκυρόδεμα που χρησιμοποιούνται για τις ανώτερες στρώσεις οδοστρώματος έχουν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1 Περιβαλλοντικές πτυχές και επιπτώσεις της Παραγωγής Σκυροδέματος

Πτυχή	Επιπτώσεις	Διαδικασία παραγωγής ασφαλτομίγματος και σκυροδέματος
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Χρήση παρθένων υλικών (συνδετικά και αδρανή)</li> <li>• Χρήση ηλεκτρικής ενέργειας</li> <li>• Χρήση υδάτινων πόρων</li> <li>• Χρήση καυσίμων</li> <li>• Χρήση διαλυτών και χημικών προσθέτων</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ατμόσφαιρα – Αιωρούμενα σωματίδια, αέρια θερμοκηπίου, οξείδια θείου, οξείδια αζώτου, μονοξίδιο άνθρακα και συνολικές οργανικές ενώσεις</li> <li>• Θόρυβος</li> <li>• Οσμές</li> <li>• Κατανάλωση ενέργειας</li> <li>• απορρίμματα - πληρωτικά θείου</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αποθήκευση και χειρισμός των αδρανών</li> <li>• Θέρμανση και ξήρανση των αδρανών</li> <li>• καύση σε θερμοαντήρες ξηραντήρων, τυμπάνου και θερμού λαδιού, καυστήρες ή γεννήτριες</li> <li>• Σιλό αποθήκευσης θερμού μίγματος</li> <li>• Παράδοση υλικών και διαδικασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης</li> <li>• Διαδικασίες καθαρισμού               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Γεννήτριες ντίζελ</li> <li>• Άλλος εξοπλισμός και λειτουργία οχημάτων</li> </ul> </li> </ul>

Οι κύριες στρατηγικές για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής υλικών οδοστρώματος και μειγμάτων είναι:

- Μείωση του αρνητικού αντίκτυπου των παρθένων υλικών στο μείγμα αντικαθιστώντας με Ανακυκλωμένα, Συμπροϊόντα ή Απόβλητα Υλικά (RCWM) και εναλλακτικά υλικά όπως βιοσυνδετικά (που παράγονται από βιομάζα όπως δέντρα, φυτά και ζωικά απόβλητα).

- Ελαχιστοποίηση της χρήσης αυτών των προσθέτων που μπορεί να αυξήσουν τον αντίκτυπο της παραγωγής υλικών (πολυμερή, παρθένο καουτσούκ ή χημικά πρόσθετα ) και αλλάζοντας τις προδιαγραφές για να επιτραπεί αυξημένη χρήση τοπικά διαθέσιμων αλλά χαμηλότερης ποιότητας αδρανών.
- Αύξηση της απόδοσης των μιγμάτων οδοστρώματος και βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του μίγματος. Αυξάνεται έτσι ο χρόνος μεταξύ μελλοντικών εργασιών συντήρησης και αποκατάστασης.

Η αναγνώριση της κρισιμότητας των φυσικών πόρων και το αυξανόμενο κόστος των υλικών έχουν οδηγήσει στην παγκόσμια εξερεύνηση εναλλακτικών υλικών για την ανάπτυξη υποδομών. Έμφαση έχει δοθεί στη χρήση RCWM και άλλου καινοτόμου υλικού στην κατασκευή και συντήρηση οδοστρωμάτων. Τα παραδείγματα περιλαμβάνουν (VanDametal. 2015; Gopalakrishnanetal. 2014; J. T. Harveyetal. 2016; LVM-JEGEL 2010; TigheandGransberg 2011):

- Ανακυκλωμένο υλικόRAP: ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος (RCA), ανακυκλωμένο ασφαλτικό οδόστρωμα, άσφαλο μεμονωμένα, τρίμμα καουτσούκ, ανακυκλωμένο λάδι κινητήρα, ανακυκλωμένο γυάλινο χαλίκι
- Συμπροϊόντα: ιπτάμενη τέφρα, αερόψυκτη σκωρία υψικαμίνου, τέφρα πυθμένα, θρυμματισμένη σκωρία, σκωρία χαλύβδινου κλιβάνου
- Απόβλητα υλικά: χαλίκι, σκύρα, σκόνη κλιβάνου, άμμος χυτηρίου
- Άλλες εναλλακτικές λύσεις: βιο-συνδετικό, ελαφρύ σκυρόδεμα, συμπλεγμένο σκυρόδεμα, ελαφρό σκυρόδεμα

Στη βιομηχανία οδοποιίας, το κόστος είναι ο κύριος μοχλός για τη χρήση των εναλλακτικών υλικών (Butler, Tighe και West 2013). Υπολογίστηκε ότι περίπου 1760 φορτηγά (περίπου 16.000 τόνοι) φυσικού αδρανούς (NA) καταναλώνονται για την κατασκευή ενός χιλιομέτρου αυτοκινητόδρομου 4 λωρίδων, το οποίο κοστίζει περίπου 650.000 CAD \$ (MNRO 2010). Επιπλέον, έχουν αναφερθεί οι δυνατότητες επιτυχών εφαρμογών ορισμένων RCWM, όπως το RCA, (Cavalline 2017), οδοστρώματα από σκυρόδεμα (Butleretal. 2013) και στρώσης ασφαλτικής βάσης (Wong, Sun, andLai 2007). Αυτές οι μελέτες, ωστόσο, υπογραμμίζουν επίσης ορισμένες προκλήσεις απόδοσης λόγω της παρουσίας στρώματος τσιμέντου στην επιφάνεια του RCA μετά τη διαδικασία ανακύκλωσης. Αυτό επηρεάζει την ποιότητα του RCA όσον αφορά την

αύξηση του πορώδους, τη μείωση της πυκνότητας των σωματιδίων και την αλλαγή της ικανότητας απορρόφησης νερού (Pasandín και Pérez 2014, Tam, Tam και Le 2007). Οι ιδιότητες του RCA μπορούν εύκολα να βελτιωθούν με έναν συνδυασμό διαφορετικών μεθόδων επεξεργασίας, συμπεριλαμβανομένου του εμποτισμού με οξύ και της θερμικής επεξεργασίας (Al-Bayati, Tighe και Achebe 2018). Άλλες προκλήσεις που σχετίζονται με τον έλεγχο της σκόνης και την παρουσία ανεπιθύμητων αλκαλικών ενώσεων και βαρέων μετάλλων στα απόβλητα σκυροδέματος μπορεί να οδηγήσουν σε δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις και κινδύνους ανθρώπινης τοξικότητας. Έχουν εκφραστεί ανησυχίες σχετικά με τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις του αρσενικού, του χρωμίου, του μολύβδου και του στραγγίσματος σεληνίου σε επίπεδα υψηλότερα από το μέγιστο επίπεδο ρύπων για το πρότυπο πόσιμο νερό. Οι Donalson, Curtis και Najafi (2011) συνέκριναν τη χρήση του RCA με το NA από ασβεστόλιθο στην κατασκευή αυτοκινητοδρόμων. Οι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι η δυνατότητα έκπλυσης του RCA ήταν μικρότερη από αυτή του NA και διαπίστωσαν ότι το RCA μπορεί να μειώσει τις εκπομπές GHG κατά 10 τόνους ισοδυνάμου CO<sub>2</sub>. Από την άλλη, οι Marinković et al. (2010) έδειξαν ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του υδραυλικού σκυροδέματος με RAC είναι υψηλότερες από συγκριτικά με το σκυρόδεμα με NA, ανάλογα με τις αποστάσεις μεταφοράς υλικών και τους τύπους οχημάτων έλξης. Η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι αποστάσεις μεταφοράς RCA πάνω από 20 km μπορούν να αυξήσουν τις επιπτώσεις σε ένα εύρος από 11,3% έως 36,6% σε σύγκριση με το NA, ανάλογα με την κατηγορία περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

### 3.5.2 Κατασκευήοδοστρώματος

Υπάρχουν πολλές εναλλακτικές τεχνικές που μπορούν να προταθούν για την ανάπτυξη και τη διατήρηση των επιπέδων εξυπηρέτησης που αναμένονται από ένα οδόστρωμα (Chan 2010). Η διαδικασία σχεδιασμού του οδοστρώματος, πρέπει να ξεκινά με τον καθορισμό του σχεδιασμού και των στόχων πολιτικής του ιδιοκτήτη/φορέα καθώς και τυχόν στόχους βιωσιμότητας. Η απόφαση θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη μακροπρόθεσμη απόδοση και διαθεσιμότητα υλικών, εξοπλισμού/τεχνολογιών και εμπειρογνωμοσύνης, καθώς και τις επιπτώσεις ολόκληρου του κύκλου ζωής σε όλες τις πτυχές της βιωσιμότητας (VanDametal. 2015). Θα πρέπει να ληφθούν υπόψη το οικονομικό, περιβαλλοντικό και κοινωνικό κόστος και τα οφέλη. Παραδείγματα

σχεδίων κατασκευής και αποκατάστασης οδοστρώματων που χρησιμοποιούνται συνήθως για τη βελτίωση της απόδοσης βιωσιμότητας παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2 Σχεδιασμός κατασκευής και αποκατάστασης οδοστρώματος για τη βελτίωση της βιωσιμότητας του οδοστρώματος (Chan and Tighe 2010; Van Dam et al. 2015)

	Εύκαμπτα οδοστρώματα	Δύσκαμπτα οδοστρώματα
Σχεδιασμός κατασκευής νέου οδοστρώματος	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Πορώδης άσφαλτος</li> <li>• Θερμό ασφαλτικό μίγμα</li> <li>• Χαμηλό επίπεδο θορύβου</li> <li>• Ψυχρό οδόστρωμα</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Προηγούμενο σκυρόδεμα</li> <li>• διαπερατό εμπλεκόμενο σκυρόδεμα</li> <li>• Ψυχρό οδόστρωμα</li> <li>• Χαμηλό επίπεδο θορύβου</li> </ul>
Σχεδιασμός αποκατάστασης οδοστρώματος	<ul style="list-style-type: none"> <li>• δομική επίστρωση ασφάλτου</li> <li>• συνδεδεμένη επίστρωση σκυροδέματος</li> <li>• μη συνδεδεμένη επίστρωση σκυροδέματος</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• συνδεδεμένη επίστρωση σκυροδέματος</li> <li>• μη συνδεδεμένη επίστρωση σκυροδέματος</li> <li>• δομική επίστρωση ασφάλτου: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ συμβατική</li> <li>○ κάλυψη ρωγμών</li> </ul> </li> </ul>

Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τις απαιτήσεις σε υλικά και ενέργεια αυτών των τεχνικών, ώστε να προσδιοριστεί η συμβολή τους στους στόχους βιωσιμότητας. Ο τρόπος παραγωγής τους αλλάζει τη συνολική περιβαλλοντική απόδοση και, σε ορισμένες περιπτώσεις, μετατοπίζονται οι επιπτώσεις σε άλλες φάσεις του κύκλου ζωής του οδοστρώματος ή σε άλλα υποστηρικτικά περιβαλλοντικά συστήματα. Για παράδειγμα, τα χημικά πρόσθετα που χρησιμοποιούνται σε ορισμένες ζεστού μίγματος ασφάλτου έχουν συχνά μεγαλύτερο όφελος στη διατήρηση της ικανότητας συμπύκνωσης σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από εκείνα που βασίζονται στην αφρώδη άσφαλτο, αλλά τα χημικά πρόσθετα μπορεί επίσης να έχουν υψηλότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο κατά την παραγωγή τους. Μια πρόσφατη έρευνα της χρήσης (WMA: Warm Mix Asphalt (Ζεστό ασφαλτόμικρο)) από καναδικές υπηρεσίες υποδηλώνει ότι μια ποικιλία πρόσθετων έχει χρησιμοποιηθεί στα καναδικά οδικά δίκτυα, αλλά μόνο οι μισοί περίπου από αυτούς τους φορείς εξέτασαν στοιχεία αειφορίας (περιβαλλοντικές πτυχές) στο σχεδιασμό και τη διαχείριση σε σχέση με την εφαρμογή των τεχνολογιών WMA (VaraminiandTighe 2015).

### 3.5.3 Συντήρηση

Το στάδιο της συντήρησης και λειτουργίας του οδοστρώματος περιλαμβάνει τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τις φάσεις συντήρησης και χρήσης ενός κύκλου ζωής οδοστρώματος. Οι αποφάσεις έχουν μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στο περιβάλλον και τη βιωσιμότητα παράλληλα με τη μείωση των επιπτώσεων στο κόστος κύκλου ζωής ενός έργου (Uddinetal. 2013). Πρέπει να πραγματοποιηθεί συντήρηση, ενίσχυση και αποκατάσταση (Pavement, Maintenance&Restoration) για να παραμείνει το οδόστρωμα σε καλή κατάσταση. Υπάρχει ένα μεγάλο εύρος τεχνικών συντήρησης και αποκατάστασης διαθέσιμες, ευρέως ομαδοποιημένες σε προληπτική(proactive) και αντιδραστική (reactive) συντήρηση. Η προληπτική συντήρηση περιλαμβάνει προληπτικές και τακτικές εργασίες που εκτελούνται στο οδόστρωμα πριν από την εμφάνιση αστοχιών. Η αντιδραστική συντήρηση είναι συνήθως διορθωτική και καλείται να εξαλείψει τις αστοχίες ώστε η δομική κατάσταση του οδοστρώματος να είναι σε αποδεκτό επίπεδο. Η βιώσιμη συντήρηση θα ήταν οικονομικά αποδοτική, τεχνικά αποτελεσματική και όχι επιβλαβής για το περιβάλλον (Gopalakrishnanetal. 2014). Ο Πίνακας 3 δείχνει αρκετές από αυτές τις τεχνικές που έχουν διαπιστωθεί ότι έχουν βιώσιμα στοιχεία.

Πίνακας 3 Τεχνικές βιώσιμης συντήρησης οδοστρωμάτων με βάση τον τύπο επιφάνειας οδοστρώματος

Τεχνική	Προληπτική συντήρηση	Αποκατάσταση	Σχόλιο
Ασφαλτικό οδόστρωμα	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Σφράγιση ρωγμών</li> <li>• Λεπτοτάπητας</li> <li>• Λεπτή επίστρωση</li> <li>• Σφράγιση με γαλάκτωμα</li> <li>• Με ψυχρή ασφαλτο μπαλώματα</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ψυχρή ανακύκλωση επιτόπου</li> <li>• Ψυχρή ανακύκλωση διογκωμένο ασφαλτικό μείγμα</li> <li>• Αποκατάσταση πλήρους βάθους</li> </ul>	Οι επί τόπου τεχνικές ανακύκλωσης μειώνουν την ανάγκη για παρθένα υλικά και τη μεταφορά υλικών, μειώνοντας έτσι τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην αποκατάσταση του οδοστρώματος, όπως οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από οδικά οχήματα
Δύσκαμπτο	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Απόξεσημε</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Προκατασκευασμένα</li> </ul>	Η προληπτική

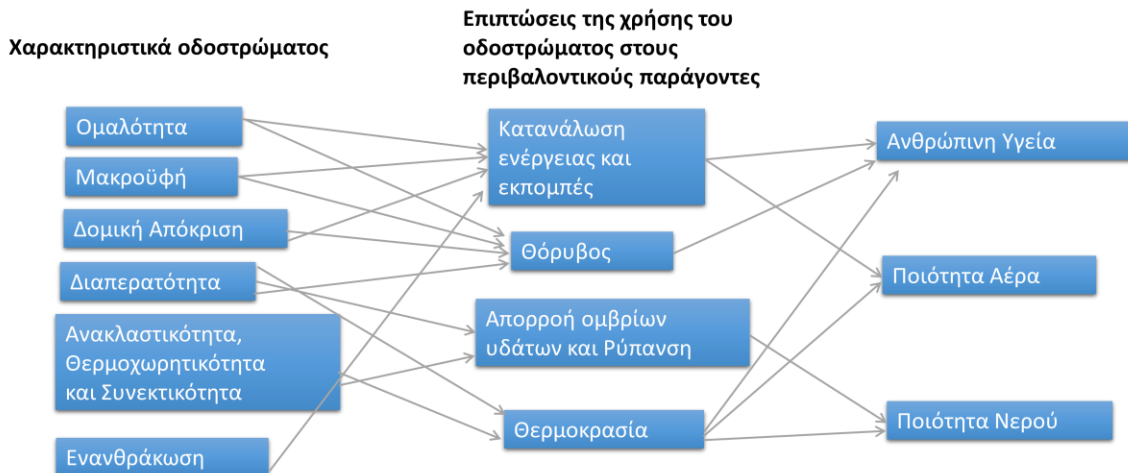


οδόστρωμα	διαμάντι <ul style="list-style-type: none"> <li>• Σφράγιση αρμών</li> <li>• Σφράγιση ρωγμών</li> <li>• Λευκή επικάλυψη</li> <li>• Σφαιροβολή</li> </ul>	πάνελ από σκυρόδεμα <ul style="list-style-type: none"> <li>• Επικαλύψεις σκυρόδεμα</li> </ul>	από συντήρηση, όπως η στεγανοποίηση ρωγμών, παρατείνει τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος και μειώνει την ανάγκη για μέτρα αποκατάστασης υψηλής κατανάλωσης υλικού και ενέργειας
Ανεπίστρωτα οδοστρώματα	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Έλεγχος σκόνης</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Τοπική άλεση</li> </ul>	Ο έλεγχος της σκόνης είναι πολύ σημαντικός για τη μείωση των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία με τη μείωση της ποσότητας των σωματιδίων από το οδόστρωμα

Μια έρευνα του 2010 για τις πρακτικές συντήρησης οδοστρώματος από τους Tighe και Gransberg (2011) διαπίστωσε ότι το 4% των ερωτηθέντων υπηρεσιών μεταφορών των ΗΠΑ και του Καναδά εξέτασαν περιβαλλοντικά κριτήρια στην επιλογή και τον προγραμματισμό συντήρησης. Η συντήρηση μπορεί να βελτιώσει την απόδοση βιωσιμότητας ενός οδικού δικτύου, εάν η στρατηγική είναι οικονομικά αποδοτική, τεχνικά αποτελεσματική και όχι επιβλαβής για το περιβάλλον (Gopalakrishnanetal. 2014). Η ποιότητα των υλικών, η επιλογή και ο χρόνος συντήρησης μπορούν να επηρεάσουν την περιβαλλοντική βιωσιμότητα στις πρακτικές συντήρησης του οδοστρώματος. Η κατάσταση και τα χαρακτηριστικά του δρόμου μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση καυσίμου του οδικού οχήματος καθώς και τον θόρυβο του οδοστρώματος των ελαστικών και την ποιότητα του νερού. Η χρονική διάρκεια της συντήρησης επηρεάζει τη συνολική κατάσταση του δικτύου ,καθώς σχετίζεται με τις εκπομπές ρύπων των μηχανημάτων οδοστρώσεως, την παραγωγή θορύβου και την ποιότητα του νερού,

### 3.5.4 Φάση λειτουργίας

Πίσω στη δεκαετία του 1990, δεν υπήρχε συμφωνία σχετικά με τη σημασία της φάσης λειτουργίας στη βιώσιμη ανάπτυξη του οδοστρώματος (Santero, Masanet και Horvath 2010· Santeroetal. 2011). Επί του παρόντος, υπάρχει μια γενική συναίνεση ότι τα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος έχουν αντίκτυπο στο περιβάλλον, καθώς συνδέονται με την παραγωγή θορύβου, την ατμοσφαιρική ρύπανση και την απελευθέρωση επικίνδυνων χημικών συστατικών (J. T. Harveyetal. 2016; Pellecueretal. 2014) όπως φαίνεται στην εικόνα 11. Τα βασικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος περιλαμβάνουν την τραχύτητα, την ιξωδοελαστική διάχυση ενέργειας, την ομαλότητα και την μακρουφή. Αυτά τα χαρακτηριστικά έχουν μεγάλες επιπτώσεις στην κατανάλωση καυσίμου του οχήματος και στο λειτουργικό κόστος του οχήματος, με αποτέλεσμα την αυξημένη χρήση ενέργειας και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Μελέτες έχουν δείξει ότι οι δραστηριότητες συντήρησης και αποκατάστασης οδοστρώματος που μειώνουν την τραχύτητα του οδοστρώματος μπορούν να επηρεάσουν την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές GHG από τα οχήματα που χρησιμοποιούν το οδόστρωμα (Lidickeretal. 2013; Loijos, Santero, andOchsendorf 2013; SanteroandHorvath 2009; Wangetal. 201; Wang, HarveyκαιKendall 2014· YuandLu 2012· Zhang, Keoleian, etal. 2010· Zhang, Lepech, etal. 2010). Άλλες περιβαλλοντικές πτυχές όπως η διάθεση όμβριων υδάτων, ο θόρυβος του οδοστρώματος κατά την κίνηση των οχημάτων, η θερμοχωρητικότητα και η ανακλαστικότητα του οδοστρώματος μπορούν επίσης να επηρεάσουν άλλες παραμέτρους βιωσιμότητας όπως η ανθρώπινη υγεία, το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας και η ακτινοβολία σε παγκόσμια κλίμακα (Azarijafarietal. 2016· VanDametal. 2015· Santeroetal. 2011).



Εικόνα 8 Επιλεγμένα χαρακτηριστικά οδοστρώματος και οι επιπτώσεις τους στους στόχους της φάσης χρήσης (Van Dam et al. 2015)

Μεγάλο μέρος της έρευνας σχετικά με τον αντίκτυπο της φάσης λειτουργίας του οδοστρώματος έχει επικεντρωθεί στην αλληλεπίδραση οχήματος-οδοστρώματος (PVI: Pavement Vehicle Interaction) ή στην αλληλεπίδραση ελαστικού-οδοστρώματος όπου η υπερβολική κατανάλωση καυσίμου, οι εκπομπές και ο θόρυβος λόγω της αντίστασης κύλισης του οδοστρώματος σε ποσοτικοποιούνται. Το PVI είναι ο κύριος παράγοντας στην αντίσταση κύλισης. Επηρεάζεται από διάφορες μεταβλητές, όπως: μακρο-υφή, δυσκαμψία οδοστρώματος, τραχύτητα, αυλάκωση και εγκάρσια κλίση του οδοστρώματος. Αρκετά ερευνητικά έργα έχουν ποσοτικοποιήσει την επίδραση των χαρακτηριστικών του οδοστρώματος στην κατανάλωση ενέργειας των οχημάτων. Ένα ερευνητικό έργο του Izenbekhai (2012) έδειξε ότι η αντίσταση κύλισης είναι υπεύθυνη για το 25% της κατανάλωσης καυσίμου σε όλες τις συνθήκες οδήγησης. Έτσι, η μείωση της αντίστασης κύλισης ενός οδοστρώματος μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση κατανάλωσης καυσίμου για οχήματα που κινούνται κατά μήκος αυτού του οδοστρώματος. Μια μελέτη των Evans et al. (2009) διαπίστωσε ότι 1% έως 2% εξοικονόμηση κατανάλωσης καυσίμου μπορεί να επιτευχθεί με ένα όχημα που ταξιδεύει κατά μήκος ενός οδοστρώματος με 10% μείωση στην αντίσταση κύλισης. Αν και οι αλλαγές στην αντίσταση κύλισης μπορεί να φαίνεται να παρέχουν σχετικά μικρές αλλαγές στην κατανάλωση καυσίμου, ο αντίκτυπός τους γίνεται σημαντικός όταν εξετάζουμε δρόμους υψηλής κυκλοφορίας.

### 3.5.5 Τέλος ζωής οδοστρώματος

Το τέλος ζωής του οδοστρώματος αναφέρεται στην τελική διάθεση και επακόλουθη επαναχρησιμοποίηση, επεξεργασία ή ανακύκλωση οποιουδήποτε τμήματος ενός οδοστρώματος που έχει φτάσει στο τέλος της ωφέλιμης ζωής του (VanDametal. 2015). Οι αποφάσεις σχετικά με την ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση υλικού για ανακατασκευή, αποκατάσταση γης και υιοθέτηση αρχών μηδενικής διαχείρισης αποβλήτων είναι βασικές για τη βελτίωση της βιωσιμότητας ενός οδοστρώματος σε επίπεδο έργου ή για ολόκληρο το οδικό δίκτυο (TAC 2013). Είναι σημαντικό να διερευνηθεί η δυνατότητα ανακύκλωσης των υλικών όταν επιλέγονται σενάρια και τεχνικές κατασκευής για τον καλύτερο σχεδιασμό των ενεργειών στο τέλος του κύκλου ζωής του οδοστρώματος και της διάθεσης του υλικού. Τέτοιες εκτιμήσεις επηρεάζουν παράγοντες βιωσιμότητας όπως η παραγωγή και διάθεση απορριμμάτων, η ποιότητα του αέρα και του νερού και η χρήση υλικών.

## 4. Χρήση εναλλακτικών υλικών στην κατασκευή οδοστρωμάτων

### 4.1 Γενικά

Τα εναλλακτικά υλικά, που ονομάζονται επίσης δευτερεύοντα υλικά, είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να συμπεριλάβει όλα εκείνα τα υλικά που σχηματίζονται ή προέρχονται από απόβλητα, απορριπτόμενα υλικά ή υποπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών (οικιακά, βιομηχανικά, μεταλλευτικά και ορυκτά υποπροϊόντα). προκύπτουν από ανθρώπινη δραστηριότητα, και μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ή να ανακυκλωθούν με κάποιο τρόπο, παίζοντας έτσι σημαντικό ρόλο στη διαχείριση των απορριμμάτων. Η λέξη «δευτερεύον» χρησιμοποιείται για να διαφοροποιηθεί από τα «πρωτογενή» αδρανή που προέρχονται από φυσικές πηγές με βασικό στόχο την παραγωγή αδρανών.

Τα υποπροϊόντα και τα απορρίμματα είναι δυο έννοιες οι οποίες συχνά συγχέονται. Τα υποπροϊόντα είναι υλικά που παράγονται ως αποτέλεσμα της διαδικασίας παραγωγής ενός άλλου προϊόντος και υπό αυτή την έννοια, είναι απόβλητα που προκύπτουν από μια παραγωγική διαδικασία (για παράδειγμα, στάχτες σταθμών παραγωγής ενέργειας και μεταλλουργικές σκωρίες). Τα απόβλητα είναι υλικά που απομένουν μετά την ολοκλήρωση του κύκλου κατανάλωσης, δηλαδή προκύπτουν από μια διαδικασία κατανάλωσης. Αυτή η διάκριση έγινε επίσης όσον αφορά στην αγοραία αξία (Bertolini, 1992): τα υποπροϊόντα είναι εκείνα με θετική αγοραία αξία και τα απόβλητα υλικά εκείνα που έχουν μηδενική ή αρνητική αγοραία αξία. Μερικές φορές το όριο μεταξύ των δύο δεν είναι σαφές και η φράση «απόβλητα υλικά» τείνει να χρησιμοποιείται με την ευρεία έννοια προκειμένου να συμπεριλάβει όλα τα είδη αποβλήτων.

Θα πρέπει επίσης να γίνει διάκριση μεταξύ της έννοιας της επαναχρησιμοποίησης, της ανακύκλωσης και της διάθεσης. Η επαναχρησιμοποίηση προϋποθέτει ότι το υλικό χρησιμοποιείται στην ίδια εφαρμογή ή λειτουργία. Η ανακύκλωση προϋποθέτει την επιλογή και την επεξεργασία του υλικού με σύνθλιψη, σπάσιμο ή τροποποίηση προκειμένου να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετική εφαρμογή· και διάθεση σημαίνει απόρριψη του υλικού. Η αποτέφρωση αστικών στερεών αποβλήτων θα πρέπει να αντιμετωπίζεται ως τρόπος απόρριψης υλικών, εκτός εάν η προκύπτουσα τέφρα χρησιμοποιείται με κάποιο τρόπο.

Υπάρχουν πολλές βιομηχανίες που παράγουν απόβλητα και έτσι είναι διαθέσιμο ένα ευρύ φάσμα δευτερογενών υλικών με δυνατότητα χρήσης στην κατασκευή οδοστρωμάτων. Μερικά από αυτά που αναφέρονται πιο συχνά στην τρέχουσα βιβλιογραφία είναι:

### **1. Αστικά και οικιακά απορρίμματα**

- Τέφρα αστικών αποβλήτων :ιπτάμενη τέφρα (Πυριτική (V) ή Ασβεστούχος (w))και τέφρα πυθμένα αποτεφρωτήρα(ΤΠΑ)
- υπολείμματα ελαστικών.
- ανακυκλωμένο γυαλί.
- ανακυκλωμένο πλαστικό.
- χρησιμοποιημένα ορυκτέλαια.

### **2. Βιομηχανικά απόβλητα**

- Παραπροϊόν γύψου, συμπεριλαμβανομένου κυρίως φθορογύψου, γύψου αποθείωσης καυσαερίων (Flue-gas desulfurization) και φωσφογύψου για οδικές εφαρμογές.

- σκόνη τσιμέντου και ασβεστοκάμινου.
- απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων: θρυμματισμένο σκυρόδεμα, θρυμματισμένο τούβλο, θρυμματισμένα μπάζα, οδοστρώματα ανακτώμενης ασφάλτου (ReclaimedConcretePavement), οδοστρώματα από ανακτώμενο σκυρόδεμα (ReclaimedAsphaltPavement).
- Μεταλλουργικά απόβλητα: σιδηρούχες σκωρίες (σκωρίες φουσκωτών και σκωρίες χάλυβα), μη σιδηρούχες σκωρίες, απόβλητα χυτηρίου, απόβλητα χαλυβουργείων.
- εδάφη μολυσμένα με πετρέλαιο.
- Τέφρα σταθμού ηλεκτροπαραγωγής: κονιοποιημένη τέφρα καυσίμου και τέφρα από το κάτω μέρος του κλιβάνου.
- ανακυκλωμένες και απόβλητες ίνες.
- απορρίμματα κατασκευής στέγης.
- Απόβλητά πυριτίου.

### **3. Απόβλητα ορυχείων και ορυκτών**

- απόβλητα αργίλου.
- Απόβλητα ανθρακωρυχείου: άκαυστος σχιστόλιθος ανθρακωρυχείου (ορυχείο), καμένος σχιστόλιθος ανθρακωρυχείου.
- απόβλητα λατομείων (για παράδειγμα, αυτά που προέρχονται από την εξόρυξη και την επεξεργασία συμβατικών θρυμματισμένων αδρανών).
- απόβλητα σχιστόλιθου.
- χρησιμοποιημένος σχιστόλιθος πετρελαίου.
- Απορρίμματα ορυχείων.

## **4.2 Πεδίο εφαρμογής δευτερευόντων υλικών**

Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα δευτερευόντων υλικών που διατίθενται όπως περιγράφηκε προηγουμένως και ένα τεράστιο πεδίο εφαρμογών. Μερικές από τις πιο σημαντικές χρήσεις είναι:

- επιχώσεις και επιλεγμένα υλικά πλήρωσης.
- βάσεις, υποβάσεις και ασφαλικές στρώσεις ή επιφανειακές.
- ως υλικό τσιμέντου (CBM) για τη σταθερότητα της υποβάσεως

- στρώσεις αποστράγγισης και ως ελαφρύ αποστραγγιστικό υλικό πίσω από κατασκευές.
- συρματοκιβώτια.
- Βιομηχανία κατασκευής μπλοκ, συγκεκριμένα η κατασκευή ελαφρών μπλοκ.
- παραγωγή ελαφρών αδρανών.
- δομικό σκυρόδεμα και οικοδομικό κονίαμα.
- Βιομηχανία τσιμέντου.
- ως μερική αντικατάσταση τσιμέντου.
- ως μερική αντικατάσταση της άμμου για κοκκομετρικής διαβάθμισης.
- ως πληρωτικό ή ως αδρανή σε ασφαλτικά υλικά.

Ορισμένα υλικά έχουν υψηλότερες δυνατότητες από άλλα και μερικά μπορεί να μην είναι επαρκή για όλες τις χρήσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Αυτό θα εξεταστεί λεπτομερώς στις επόμενες ενότητες όπου πραγματοποιείται η ανάλυση κάθε υλικού.

Γενικά, στη στρώση υπόβασης είναι πιο εφικτό να χρησιμοποιηθούν τα υλικά αυτά λόγω των χαμηλότερων απαιτήσεων προδιαγραφών σε αυτές τις στρώσεις και επειδή αντιπροσωπεύουν, τη μεγαλύτερη απαίτηση για αδρανή στην κατασκευή οδοστρωμάτων.

#### 4.2.1 Απορρίμματα Ανθρακωρυχείου

Τα απορρίμματα ανθρακωρυχείων είναι τα απόβλητα που παράγονται από τη βιομηχανία εξόρυξης άνθρακα, που αποτελούνται κυρίως από αργόλιθους, σχιστόλιθους και εδάφη. Ωστόσο, η πιο σημαντική αναλογία απορριμμάτων εξάγεται από το ορυχείο με τον άνθρακα να βγαίνει στην επιφάνεια και να διαχωρίζεται από το απόρριμμα στο εργοστάσιο καθαρισμού άνθρακα.

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι απορριμμάτων ανθρακωρυχείων: άκαυστα και καμένα. Τα καμένα απορρίμματα ανθρακωρύχων προκύπτουν από την αυθόρμητη καύση της πρώτης ύλης και γίνονται πιο σπάνια λόγω παραγόντων όπως (Sherwood, 1995):

- Βελτιώσεις στις τεχνικές διαχωρισμού των απορριμμάτων άνθρακα που μειώνουν την ποσότητα του εύφλεκτου υλικού που παραμένει.
- πτυχές ασφάλειας που λαμβάνονται υπόψη για την κατασκευή σωρών λάσπης, μειώνοντας την πιθανότητα αυθόρμητης καύσης.

- μεγαλύτερη ζήτηση αυτού του υλικού για οδοποιία.

Τα άκαυστα απορρίμματα ανθρακωρυχείου, εμπορικά γνωστά ως minestone, είναι γενικά ένα πολύ μεταβλητό υλικό στη σύνθεση ως αποτέλεσμα της ανατροπής στους ίδιους σωρούς όλων των απορριμμάτων που προκύπτουν από τη δραστηριότητα εξόρυξης.

Αυτό το υλικό παρουσιάζει κάποια χαρακτηριστικά που πρέπει να μελετηθούν προσεκτικά εάν πρόκειται να εφαρμοστεί στην οδοποιία. Τα κύρια προβλήματα που μπορούν να αποκλείσουν τη χρήση του αφορούν:

- ετερογένεια σε ποιότητα και σύνθεση που οφείλεται κυρίως στη διαδικασία παραγωγής απορριμμάτων. Στις μέρες μας, οι σύγχρονες τεχνικές παραγωγής έχουν περιορίσει σε ένα βαθμό αυτό το πρόβλημα και ήδη γίνεται κάποια επεξεργασία, κυρίως όσον αφορά τον έλεγχο της ταξινόμησης (Εικόνα 12). Για τους μεγάλους όγκους υλικού που βρίσκονται ήδη σε αποθέματα, το πρόβλημα παραμένει.



Εικόνα 8 Επεξεργασία ορυχείου στο GascoigneWoodMine, Yorkshire



- Η τοποθέτηση σε υγρό καιρό αναφέρεται μερικές φορές ως πρόβλημα, που οδηγεί στον αποκλεισμό της ή στην επιβολή επιπλέον κόστους (Whitbread, Marsay & Tunnel, 1991).
- Υψηλή περιεκτικότητα σε θειικά άλατα κυρίως με καμμένα απορρίμματα, στα οποία τα θειικά άλατα μπορούν να εμφανιστούν σε μεγάλες συγκεντρώσεις ως αποτέλεσμα της οξείδωσης των πυριτών κατά την καύση (Sherwood & Ryley, 1970). Αυτό δεν είναι γενικά πρόβλημα με τα απόβλητα ορυχείου άνθρακα (Rainbow, 1989). Για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε θειικά άλατα πρέπει να έχουμε κατά νου ότι όταν το υλικό πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε σταθεροποιημένη μορφή, η σημαντική προϋπόθεση είναι ο προσδιορισμός της συνολικής περιεκτικότητας σε θειικά (σε όρους περιεκτικότητας σε διαλυτά οξέα) και όταν χρησιμοποιείται σε μη δεσμευμένη μορφή, η περιεκτικότητα σε υδατοδιαλυτά θειικά άλατα πρέπει να προσδιορίζεται επειδή αυτά αντικατοπτρίζουν τη διαθεσιμότητα θεικών σε αυτές τις διαφορετικές χρήσεις.
- Περιεκτικότητα σε σουλφίδια με τη μορφή σιδηροπυριτών.

Η παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων θεικών και/ή πυρίτη στη λεία του ανθρακωρυχείου έχει ως αποτέλεσμα σημαντική διαστολή του σταθεροποιημένου υλικού. Οι Carr και Withers (1987) προσδιόρισαν δύο διαφορετικούς τύπους διαστολής στην περίπτωση της σταθεροποίησης τσιμέντου:

- βραχυπρόθεσμη διαστολή, ως αποτέλεσμα της ενυδάτωσης των ορυκτών αργίλου εντός της πρώτης ύλης. Είναι δυνατό να ελαχιστοποιηθεί αυτή η διόγκωση με ανάμιξη άμμου σε υψηλά ποσοστά (> 30 %) με τα άλλα συστατικά.
- μακροχρόνια διαστολή, λόγω προσβολής θεικών στοκαλούπι τσιμέντου του σταθεροποιημένου υλικού. Σε αυτή την περίπτωση η χρήση συνδετικών όπως το θειικό τσιμέντο και η κονιοποιημένη τέφρα καυσίμου είναι ευεργετική.

Η βραχυπρόθεσμη ανθεκτικότητα ουσιαστικά ελέγχεται από ιδιότητες του ορυχείου όπως: κατανομή μεγέθους σωματιδίων, πλαστικότητα, περιεκτικότητα σε θειικά άλατα. (Thomas, Kettle & Morton, 1987). Αν οι παραπάνω αυτές οι ιδιότητες χρησιμοποιηθούν για την έμμεση εκτίμηση της διαστολής, οι μακροπρόθεσμες μελέτες ανθεκτικότητας και γεωτεχνικής ευστάθειας είναι απαραίτητες για την πλήρη αξιολόγηση του ορυχείου που έχει σταθεροποιηθεί με τσιμέντο σε σχέση με την ανθεκτικότητα (Thomas, 1986). Οι επταήμερες περίοδοι

εμβάπτισης αναφέρεται ότι δεν επαρκούν για την αξιολόγηση της πλήρους έκτασης της αποικοδόμησης του, που μπορεί να διαρκέσει μήνες και όχι ημέρες.

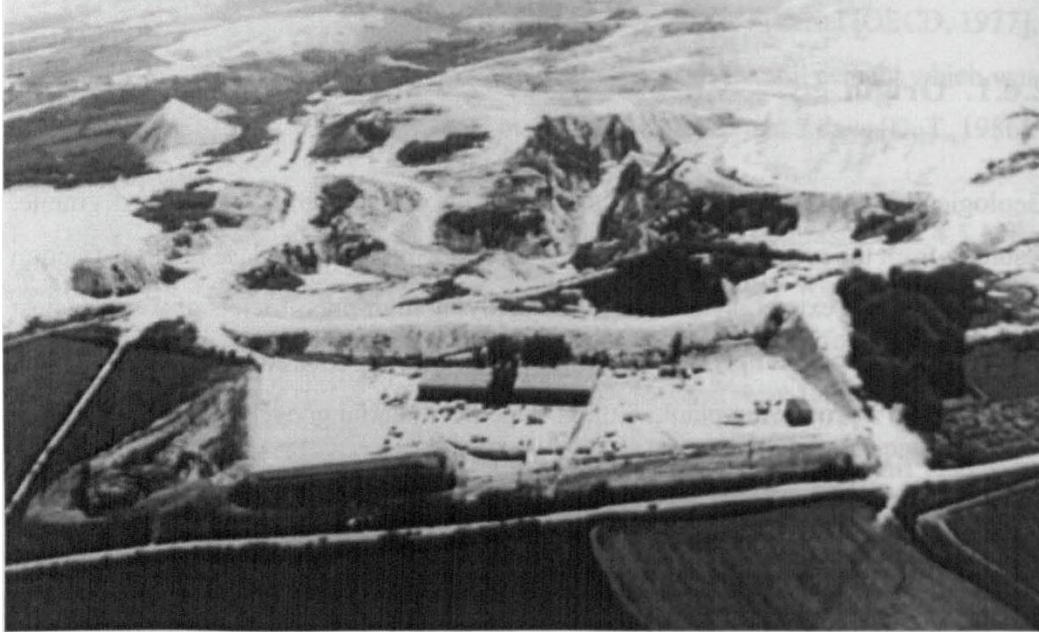
Τα άκαυστα απορρίμματα ανθρακωρυχείων εξαιρούνται από διάφορες εφαρμογές στην κατασκευή στρωμάτων οδοστρώματος όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Ο αποκλεισμός ως μη δεσμευμένου υλικού δικαιολογείται επειδή τα χονδροειδή σωματίδια είναι, γενικά, συσσωματώσεις μικρότερων σωματιδίων, με αποτέλεσμα αμφισβητήσιμη μακροπρόθεσμη σταθερότητα σωματιδίων (Sherwood, 1995). Ωστόσο, η απαγόρευση χρήσης του ως σταθεροποιητή φαίνεται δύσκολη, καθώς το ίδιο υλικό μπορεί να εφαρμοστεί στην πιο απαιτητική στρώση υπόβασης, εφόσον πληροί όλες τις απαιτήσεις για υλικά δεσμευμένα με τσιμέντο.

Η δοκιμή ανθεκτικότητας που πραγματοποιείται για υλικά δεσμευμένα με τσιμέντο ή η δοκιμή εμβάπτισης θα πρέπει να μπορεί να προβλέψει οποιοδήποτε πρόβλημα του σταθεροποιημένου υλικού και, επομένως, δεν μπορεί να δικαιολογηθεί ο αποκλεισμός του για στρώσεις κάλυψης εκ των προτέρων.

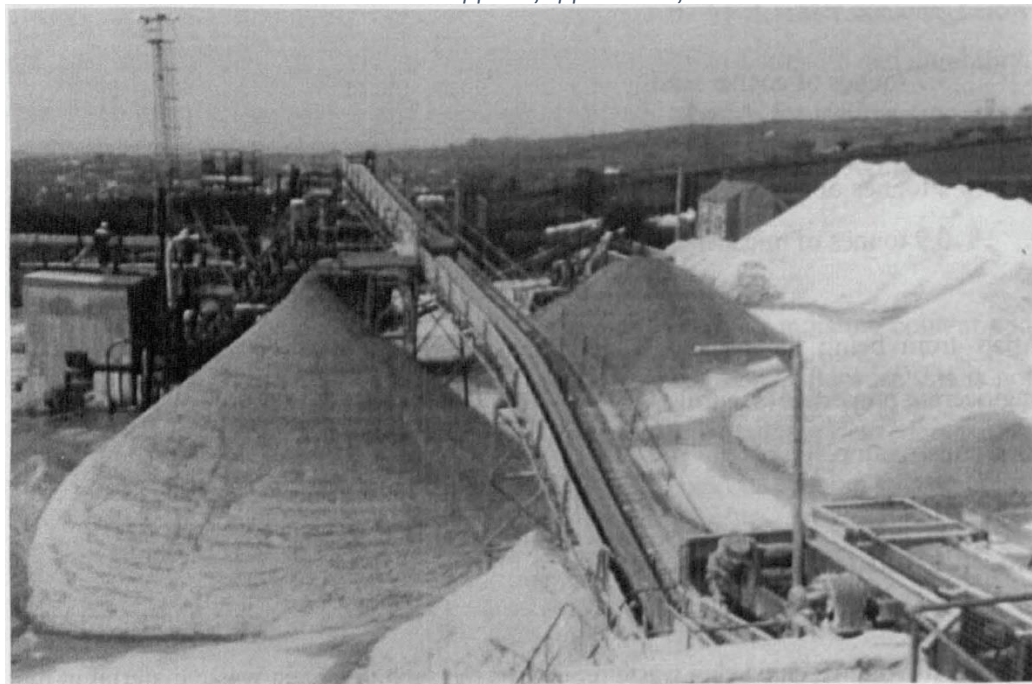
Ορισμένα καμένα απορρίμματα ανθρακωρυχείων διαθέτουν ποζολανικές ιδιότητες, ισοδύναμες με εκείνες που εκδηλώνονται από πυριτιοαργιλώδεις κονιοποιημένες στάχτες καυσίμου, οι οποίες δεν έχουν ληφθεί πλήρως υπόψη στην κατασκευή οδοστρώματος (Chi, 1992).

#### 4.2.2 Απορρίμματα αργίλου

Γεωλογικά, ο πηλός Κίνας ή ο καολίνης σχηματίζεται κατά τη διαδικασία ψύξης του γρανίτη, που προκύπτει από τη δράση του ατμού και του διοξειδίου του άνθρακα στο κλάσμα άστριου ορθοκλάσης στο γρανίτη. Η εξαγωγή του επιτυγχάνεται με την εφαρμογή πίδακων νερού υψηλής πίεσης στις όψεις του βράχου σε ανοιχτούς λάκκους. Αυτή η διαδικασία σπάει το πέτρωμα σχηματίζοντας ένα εναιώρημα που αντλείται σε μια μονάδα επεξεργασίας. Σε αυτό το στάδιο το υλικό περνάει από δύο διαφορετικές διαδικασίες: πρώτον, για να διαχωρίσει τα μεγαλύτερα σωματίδια από τα απόβλητα της άμμου και, δεύτερον, να διαχωρίσει τη λεπτή αργιλώδη άμμο και τα υπολείμματα μαρμαρυγίας από την άμμο αργίλου Κίνας, αφαιρώντας το νερό του υπολειμματικού πολτού (Εικόνες 13 και 14).



*Εικόνα 9 Εργασίες αργίλου Κίνας*



*Εικόνα 10 Επεξεργασία άμμου αργίλου Κίνας*

Ο πηλός Κίνας χρησιμοποιείται στη βιομηχανία κεραμικών και χαρτιού και, όπως και σε πολλές άλλες βιομηχανίες εξόρυξης ορυκτών, η διαδικασία εκμετάλλευσης οδηγεί στη δημιουργία μεγάλων ποσοτήτων απορριμμάτων. Αυτά τα απόβλητα παράγονται σε αναλογία 1 τόνου αργίλου Κίνας προς 9 τόνους απορριμμάτων που αποτελούνται ως εξής (ΟΟΣΑ, 1977):

- 3,7 τόνοι χοντρής άμμου.
- 2 τόνοι απορριμμάτων πετρωμάτων.
- 2 τόνοι υπερφόρτωσης.
- 0,9 τόνοι υπολειμμάτων μίκας (mica).

Εκτός από το κύριο συστατικό των απορριμμάτων, η άμμος από πορσελάνη έχει καλές μηχανικές ιδιότητες και, ως εκ τούτου, περισσότερες δυνατότητες χρήσης στην οδοποιία.

Οι ιδιότητες αυτού του υλικού είναι παρόμοιες με μια συμβατική άμμο. Έχουν αναφερθεί ορισμένες δυσκολίες συμπίεσης του υλικού (ΟΟΣΑ, 1977) κυρίως με άμμους που έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε μίκα. Παρόλα αυτά, η άμμος από άργιλο Κίνας είναι χημικά αδρανής, δηλαδή δεν αναμένεται κανένα πρόβλημα λόγω της χημικής της σύστασης.

Η μίκα σχηματίζεται από μια ομάδα ορυκτών που αποτελείται από ένυδρο πυριτικό αλουμίνιο, το οποίο μπορεί να περιέχει επιπλέον μικρές ποσότητες στοιχείων όπως τιτάνιο, σίδηρο και μαγνήσιο.

Οι επιδράσεις της μίκας στις ιδιότητες των υλικών οδοποιίας έχουν μελετηθεί από τους Tubey και Webster (1978) χρησιμοποιώντας αργλική άμμο Κίνας από διαφορετικές πηγές και αυξάνοντας τεχνητά την περιεκτικότητα σε μαρμαρυγία προσθέτοντας διαφορετικές ποσότητες λεπτής και χονδροειδούς μαρμαρυγίας. Για να διαχωριστούν τα αποτελέσματα της περιεκτικότητας σε μαρμαρυγία από εκείνα της αλλαγής της ταξινόμησης ως αποτέλεσμα της προσθήκης λεπτών, μελετήθηκαν επίσης δείγματα άμμου αργίλου Κίνας αντικαθιστώντας την προσθήκη μαρμαρυγίας με την προσθήκη πυριτίων παρόμοιας κατανομής μεγέθους σωματιδίων. Συνοπτικά, εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι δοκιμές κατανομής μεγέθους σωματιδίων (κόκκων) ή κοκκομετρική ανάλυση, που χρησιμοποιούν μεθόδους καθίζησης δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν με υλικά που περιέχουν μίκα λόγω του σχήματος, της δομής και της αναλογίας του εμβαδού επιφάνειας I όγκος (ειδική επιφάνεια). Τα σωματίδια μίκας είναι πολύ λεπτά και διαφέρουν σημαντικά από το σφαιρικό σχήμα για το οποίο ισχύει ο νόμος του Stokes που διέπει τις τεχνικές καθίζησης. Επιπλέον, σε σωματίδια με πολλαπλές νιφάδες, σημαντικές ποσότητες υγρού μπορούν να συγκρατηθούν μεταξύ των μεμονωμένων νιφάδων. Τέλος,

η ειδική επιφάνεια είναι υψηλή και ως αποτέλεσμα τα σωματίδια μίκας μπορούν να επιπλέουν σε υγρά με χαμηλή πυκνότητα.

- η προσθήκη μίκας μειώνει την πυκνότητα που λαμβάνεται μετά τη συμπίκνωση για μια δεδομένη ενέργεια και, κατά συνέπεια συμπίκνωσης, παρατηρήθηκε μείωση της αντοχής (χρησιμοποιώντας τη δοκιμή California Bearing Ratio - CBR). Αυτό οφείλεται στις ελαστικές ιδιότητες της μίκας που επιτρέπει στο υλικό να παραμορφωθεί και να ανακτήσει μέρος της παραμόρφωσης μετά τη συμπίεση, αλλά κυρίως λόγω της αλλαγής κοκκομετρική διαβάθμιση που προκύπτει από την προσθήκη λεπτών λεπτών. Αυτή η επίδραση είναι πιο σημαντική με τη χονδροειδή μίκα.
- Η λεπτόκοκκη μίκα αυξάνει διόγκωση λόγω της αλλαγής κοκκομετρικής διαβάθμισης. Η λεπτή μίκα αυξάνει τον αριθμό των πόρων με τριχοειδείς διαστάσεις, αυξάνοντας έτσι την αναρρόφηση και διευκολύνοντας τη διείσδυση του νερού στο υλικό.
- Η επίδραση της παρουσίας μίκας στην αντοχή του τσιμέντου ή της σταθεροποιημένης με ασβέστη άμμου αργίλου Κίνας περιορίζεται στα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αλλαγές στις πυκνότητες. Όταν συμπυκνώνεται επαρκώς, η παρουσία μίκας δεν έχει καμία επιβλαβή επίδραση.

Άλλα χαρακτηριστικά κακής εργασιμότητας και η απαίτηση υψηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο για σταθεροποίηση έχουν επίσης αναφερθεί (Whitbread, Marsay & Tunnel, 1991).

Η αργιλική άμμος Κίνας έχει ήδη ερευνηθεί στο παρελθόν ως υλικό οδοποιίας μέσω εργαστηριακών δοκιμών για τον προσδιορισμό των μηχανικών και φυσικών χαρακτηριστικών (Tubey , 1978). Η εργαστηριακές δοκιμές αφορούν στον χαρακτηρισμό των υλικών, προκειμένου να διερευνηθεί η καταλληλότητά τους σύμφωνα με τις υφιστάμενες προδιαγραφές, συγκεκριμένα: κοκκομετρική ανάλυση, ειδικό βάρος, δοκιμές συμπίκνωσης, δοκιμές CBR, διάσπαση υπό συμπίεση, πλαστικότητα, επιδεκτικότητα παγετού και δοκιμές αντοχής σε θλίψη 7 ημερών. Παρόλο που για έναν από τους πηλούς Κίνας που δοκιμάστηκαν το ποσοστό των λεπτών για επιλεγμένη χρήση κοκκώδους πλήρωσης και η διόγκωση ήταν εκτός των ορίων της προδιαγραφής DoT (DoT, 1993), γενικά, η έρευνα επιβεβαίωσε την καταλληλότητα του υλικού για τις περισσότερες χρήσεις στην οδοποιία.



#### 4.2.3 Απόβλητα σχιστόλιθου

Τα απόβλητα σχιστόλιθου είναι τα απόβλητα που προκύπτουν από τη βιομηχανία εξόρυξης σχιστόλιθου (εικ. 11). Η κύρια εφαρμογή του σχιστόλιθου ήταν ως υλικό στέγης και, για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται μόνο ο βράχος που είναι κατάλληλος για θραύση. Όλος ο αποξηραμένος βράχος κοντά στην επιφάνεια, το υλικό με κακή διάσπαση ή με αρμούς σε κοντινή απόσταση και τα θραύσματα από την ανατίναξη έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή απορριμμάτων (Watson, 1980). Επιπλέον, οι επακόλουθες διεργασίες θραύσεως και κοπής των μεγάλων τεμαχίων καλής πλάκας για την παραγωγή σχιστόλιθων στέγης δημιουργούν περαιτέρω μεγάλες ποσότητες απορριμμάτων. Η συνολική αναλογία απορριμμάτων προς τελικό προϊόν είναι περίπου 20 προς 1 και ως αποτέλεσμα, τεράστιες ποσότητες απορριμμάτων συσσωρεύονται σε αποθήκες.



*Εικόνα 11 Απόβλητα σχιστολίθου*

Ο Goulden (1992) πραγματοποίησε μια μελέτη για τα απόβλητα σχιστόλιθου από διάφορες πηγές εκτελώντας ένα ολοκληρωμένο συμβατικό πρόγραμμα δοκιμών. Αρχικά, τα απόβλητα

σχιστόλιθου από έξι διαφορετικά λατομεία μελετήθηκαν για διάφορες φυσικές, χημικές και μηχανικές ιδιότητες και, λόγω της συνοχής του υλικού, τα απόβλητα σχιστόλιθου από το Penrhyn Quarry επιλέχθηκαν ως αντιπροσωπευτικό υλικό υπόβασης Τύπου Ι για περαιτέρω δοκιμή. Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη ήταν:

- Τα σωματίδια των απορριμμάτων σχιστόλιθου παρουσιάζουν υψηλούς δείκτες πλακοειδούς και επιμήκυνσης.
- Οι υψηλές τιμές του δείκτη πλακοειδούς και επιμήκυνσης δεν είχαν αρνητική επίπτωση στη δοκιμή συμπίεσεως. Ειδικότερα, δεν παρατηρήθηκε υπερβολική παραμορφωση ή αυλάκωση κατά τη διέλευση του κυλίνδρου συμπίεσης που υποδηλώνει καλή εσωτερική τριβή του υλικού.
- Οι τιμές απορρόφησης νερού ήταν ιδιαίτερα χαμηλές, κάτι που είναι σύμφωνο με τη χρήση σχιστόλιθου ως υλικού στέγης, και έτσι το συμπυκνωμένο υλικό δεν είναι πιθανό να επηρεαστεί από τις διακυμάνσεις της περιεκτικότητας σε υγρασία.
- Αυτή η χαμηλή απορρόφηση νερού, σε συνδυασμό με τη μη πλαστική φύση του κλάσματος κάτω από 425 μm, δίνει στα απόβλητα σχιστόλιθου ένα πλεονέκτημα έναντι άλλων συμβατικών αδρανών όσον αφορά την αντοχή στις καιρικές συνθήκες και την ανθεκτικότητα. Αυτό επιβεβαιώθηκε επίσης από τα αποτελέσματα της δοκιμής ορθότητας θειικού μαγνησίου, όπου προέκυψαν πολύ υψηλά ποσοστά.
- Οι τιμές αντοχής ήταν χαμηλότερες από ό,τι αναμενόταν για άλλα συμβατικά αδρανή.
- Η υψηλή διαπερατότητα εξασφαλίζει καλή αποστράγγιση των επιφανειακών υδάτων.
- Οι τιμές που ελήφθησαν στις δοκιμές CBR ήταν τυπικές για καλής ποιότητας αδρανή οδοστρώματος και πάνω από το ελάχιστο 30 % που καθορίζεται για τις υποβάσεις Τύπου 2 (DoT, 1993).

Το αδρανές σχιστόλιθου έχει χρησιμοποιηθεί ως υπόβαστο υλικό κυρίως στη Βόρεια Ουαλία. Ένας από τους δρόμους στους οποίους εφαρμόστηκε αστόχησε πρόωρα ως αποτέλεσμα της έντονης κυκλοφορίας βαρέων οχημάτων και λόγω κακού σχεδιασμού της ασφαλτικής στρώσης από macadam (που περιλαμβάνει ένα συμβατικό αδρανή). Κατά τη διάρκεια της ανακατασκευής πραγματοποιήθηκαν ορισμένες δοκιμές για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του υλικού σχιστόλιθου στο πεδίο (Goulden, 1992). Οι δοκιμές αυτές αποτελούνταν από:

- μετρήσεις του συντελεστή αντίδρασης υπόβασης και

- ανάλυση βαθμολόγησης του υλικού υπόβασης μετά από επτά χρόνια υπηρεσίας.

Οι συντελεστές αντίδρασης της υποβάσης κυμαίνονταν από 378 έως 646 MPa (Goulden, 1992) επιβεβαιώνοντας την καλή κατάσταση του αδρανούς σχιστόλιθου. Η υποβάθμιση του υλικού ήταν πολύ μικρή από ό,τι θα περίμενε κανείς για τα συμβατικά αδρανή. Παρέμεινε σταθερό κατά την ανακατασκευή.

#### 4.2.4 Στάχτη σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με άνθρακα

Οι στάχτες των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής είναι υποπροϊόντα της βιομηχανίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με καύση άνθρακα. Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα χρησιμοποιούν γενικά κονιοποιημένο άνθρακα που καίγεται σε κλίβανο που δημιουργεί δύο τύπους στάχτης. Το πρώτο είναι λεπτή ουσία που ονομάζεται ιπτάμενη τέφρα ή τέφρα καπνού(εικ. 12), απελευθερώνεται από τους θαλάμους καύσης άνθρακα και σταματά από συσκευές ελέγχου εκπομπών, όπως πλυντρίδες, ηλεκτροστατικούς κατακρημιστές και υφασμάτινα φίλτρα.. Ο δεύτερος τύπος τέφρας είναι γνωστός ως τέφρα πυθμένα κλιβάνου. Σχηματίζεται από τα χονδρότερα και βαρύτερα σωματίδια τέφρας, τα οποία πέφτουν στον πυθμένα του κλιβάνου σε μια χοάνη.





*Εικόνα 12 Ιπτάμενη τέφρα*

Τα φυσικά χαρακτηριστικά της τέφρας του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής εξαρτώνται από παράγοντες όπως: σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (τύπος μέγεθος και διάταξη κλιβάνου) όπου παράγονται, η πηγή, ο τύπος και ο βαθμός κονιοποίησης του άνθρακα που χρησιμοποιείται, οι συνθήκες καύσης και συλλογής και επεξεργασίας. Η πηγή και το είδος του άνθρακα είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες

Τα κύρια συστατικά της κονιοποιημένης τέφρας καυσίμου είναι το διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ), το οξείδιο του αργιλίου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) και το οξείδιο του σιδήρου ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Με βάση τον τύπο του άνθρακα και την περιεκτικότητα αυτών των τριών ενώσεων, η ιπτάμενη τέφρα ταξινομείται στα Αμερικανικά Πρότυπα ως εξής (ASTM C618, 1989):

- Κατηγορία F, πυριτιοαργιλώδης ιπτάμενη τέφρα, με ποζολανικές ιδιότητες, που παράγεται συνήθως από ανθρακίτη ή ασφαλτούχο άνθρακα και με ελάχιστη περιεκτικότητα ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ίση με 70 %.

- Κατηγορία C, σουλφοασβεστική ιπτάμενη τέφρα, με ποζολανικές και υδραυλικές ιδιότητες, που παράγεται συνήθως από λιγνίτη ή υποασφαλτικό άνθρακα και με ελάχιστη περιεκτικότητα ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ίση με 50 %.

Οι τέφρες που ταξινομούνται ως κατηγορία C έχουν υψηλότερα ποσοστά ελεύθερης άσβεστου (μερικές μπορεί να περιέχουν περισσότερο από 10 % και έως και 60 % (Thijs, 1992) έχοντας τσιμεντοειδείς ιδιότητες εκτός από τα κανονικά ποζολανικά χαρακτηριστικά της τέφρας κατηγορίας F. Για το λόγο αυτό, η κονιοποιημένη τέφρα καυσίμου κατηγορίας C, που ονομάζεται επίσης υδραυλική τέφρα, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως ενεργοποιητής δευτερευόντων συνδετικών.

Η χημική τέφρα δεν δημιουργεί μεγάλα προβλήματα (Sherwood, 1995):

- περιέχει θειικά άλατα, μερικές φορές σε υψηλές συγκεντρώσεις. Ωστόσο, καθώς η διαπερατότητα της συμπαγούς τέφρας είναι χαμηλή, οι πιθανότητες προβλημάτων που προκύπτουν από την παρουσία θεικών αλάτων είναι πιο περιορισμένες. Στην περίπτωση της σουλφοασβεστικής τέφρας (Thijs, 1992), η οποία μπορεί να περιέχει υψηλή περιεκτικότητα σε θειικά άλατα (έως και 12 % έχει αναφερθεί), η προσθήκη τους στην παραγωγή τσιμέντου πρέπει να περιοριστεί για να αποφευχθεί ο κίνδυνος διόγκωσης.
- περιέχει ελεύθερο ασβέστη και, κατά συνέπεια, πολλές ιπτάμενες στάχτες είναι αλκαλικές. Όταν έρθει σε επαφή με μέταλλα όπως η ιπτάμενη τέφρα αλουμινίου μπορεί να προκαλέσει διάβρωση.

Ένα σημαντικό ζήτημα είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση κονιοποιημένης τέφρας καυσίμου. Αυτή η διαδικασία επηρεάζει τις τελικές ιδιότητες του υλικού και δεν μπορεί να αποφευχθεί προσωρινή αποθήκευση, καθώς οι αιχμές στην παραγωγή και την κατανάλωση δεν είναι ταυτόχρονες. Αφενός, η παραγωγή αυξάνεται κατά τη διάρκεια του χειμώνα, όταν απαιτείται να παραχθεί περισσότερη ενέργεια για την κάλυψη της ζήτησης του καταναλωτή, αφετέρου τα υψηλότερα επίπεδα δραστηριότητας στον κατασκευαστικό κλάδο παρατηρούνται το καλοκαίρι, όταν η παραγωγή βρίσκεται στο χαμηλότερο επίπεδο. Η κονιοποιημένη τέφρα καυσίμου μπορεί να αποθηκευτεί και στη συνέχεια να παρασχεθεί με τις ακόλουθες μορφές:

- σε ξηρή κατάσταση, απευθείας από τα σιλό αποθήκευσης όπου συλλέγεται.

- ρυθμισμένο, δηλαδή με ελεγχόμενες ποσότητες νερού που προστίθενται για την αποφυγή σκόνης κατά την αποθήκευση και τη μεταφορά ή
- από λιμνοθάλασσες, που μερικές φορές χρησιμοποιούνται για αποθήκευση ιπτάμενης τέφρας.

Όταν αποθηκεύεται σε ξηρές συνθήκες επιτυγχάνεται η καλύτερη ομοιομορφία και ποιότητα, αλλά η κατασκευή των κατάλληλων σιλό απαιτεί πολύ υψηλό κόστος. Όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ρυθμισμένη ιπτάμενη τέφρα σε εφαρμογές οδοστρώματος, η περιεκτικότητά της σε υγρασία πρέπει να παρακολουθείται στενά, καθώς η υπερβολική περιεκτικότητα σε νερό μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη ενυδάτωση του οξειδίου του ασβεστίου. Αυτό είναι μείζονος σημασίας όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ιπτάμενη τέφρα με υψηλή περιεκτικότητα σε CaO. Οι διακυμάνσεις της υγρασίας μπορεί να προκαλέσουν διακυμάνσεις στην περιεκτικότητα σε υγρασία του μείγματος μειώνοντας την εργασιμότητα και εμποδίζοντας τον βέλτιστο συνδυασμό συστατικών του μείγματος. Απαιτούνται περισσότερες προφυλάξεις κατά τη χρήση ιπτάμενης τέφρας λιμνοθάλασσας λόγω της μεγαλύτερης μεταβλητότητάς τους. Είναι πιο χονδροειδείς από την ξηρή ή ρυθμισμένη ιπτάμενη τέφρα και η τραχύτητα τους αυξάνεται με την εγγύτητα στις εκροές. Αυτός ο τύπος ιπτάμενης τέφρας αναμειγνύεται συχνά με τέφρα πυθμένα κλιβάνου.

Όταν χρησιμοποιείται σε σκυρόδεμα, αναμένονται πολλά οφέλη από τη συμπερίληψη της τέφρας, αν και πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ορισμένα από αυτά τα οφέλη δεν θα παρατηρηθούν σε ορισμένες περιπτώσεις, ανάλογα με την τέφρα και το τσιμέντο που χρησιμοποιείται και τις συνθήκες του πεδίου. Μια γενική λίστα πλεονεκτημάτων παρουσιάζεται παρακάτω:

- ενισχυμένη εργασιμότητα λόγω του σχήματος και της λεπτότητας των σωματιδίων.
- μειωμένη εφίδρωση ως αποτέλεσμα της μείωσης της ζήτησης νερού.
- χαμηλότερη συρρίκνωση.
- μειωμένη θερμότητα ενυδάτωσης.
- Αυξημένη μακροπρόθεσμη αντοχή.
- βελτιωμένη χημική αντοχή του σκυροδέματος (για παράδειγμα σε χημικές προσβολές θεικών και αλκαλίων) και, επομένως, πιο ανθεκτικό σκυρόδεμα.
- χαμηλότερη διαπερατότητα.
- Δυνατότητα χαμηλότερου κόστους με μερική αντικατάσταση τσιμέντου.

Για χρήση στην κατασκευή οδοστρωμάτων, ένα από τα πιο ελκυστικά χαρακτηριστικά της κονιοποιημένης τέφρας καυσίμου είναι η ποζολανότητά της. Μια ποζολάνα μπορεί να οριστεί ως ένα πυριτικό και αλουμίνιο υλικό, που δεν έχει τσιμεντοειδείς ιδιότητες, αλλά περιέχει ορισμένα συστατικά τα οποία, σε συνήθεις θερμοκρασίες και παρουσία νερού, αντιδρούν χημικά με το υδροξείδιο του ασβεστίου σχηματίζοντας ενώσεις με υψηλή σταθερότητα στο νερό και με ιδιότητες τσιμέντου. (LNEC, 1962).

Οι ποζολανικές αντιδράσεις μπορούν να αναπτυχθούν μόνο μετά την έναρξη της ενυδάτωσης, μια πτυχή που επηρεάζει την απόδοση των μειγμάτων. Ως εκ τούτου, αυτά τα υλικά δεν εμφανίζουν συνδετικές ιδιότητες εκτός εάν συνδυαστούν με άλλα, που συνήθως ονομάζονται ενεργοποιητές. Αυτά έχουν υψηλά ποσοστά οξειδίου του ασβεστίου που παράγει το απαιτούμενο υδροξείδιο του ασβεστίου παρουσία νερού. Η κονιοποιημένη τέφρα καυσίμου αντιδρά με αυτή την ένωση, παράγοντας περαιτέρω τσιμεντοειδή υλικά και επομένως έχουν υψηλότερη αντοχή, σταθερότητα και ανθεκτικότητα μακροπρόθεσμα. Επομένως, τα υλικά που έχουν υποστεί επεξεργασία με ιπτάμενη τέφρα παρουσιάζουν μειωμένη αντοχή σε νεαρή ηλικία, αλλά υψηλότερη αντοχή μακροπρόθεσμα σε σύγκριση με υλικά που σταθεροποιούνται με υδραυλικά συνδετικά.

Η ποζολανική δραστηριότητα της τέφρας και τα λεπτόκοκκα της κλάσματα συνδέονται στενά και είναι γενικά αποδεκτό ότι οι λεπτόκοκκες ιπτάμενες τέφρες έχουν τις υψηλότερες ποζολανικές δραστηριότητες και αρχική φέρουσα ικανότητα (Bolt, 1987). Το ποσοστό του υλικού που συγκρατείται στο κόσκινο των 45 μm και στην ειδική επιφάνεια του τσιμέντου Blaine, η οποία είναι ενδεικτική της λεπτότητας των σωματιδίων, είναι καλοί δείκτες αυτής της δραστηριότητας.

Για χρήση σε σταθεροποιημένες υποβάσεις και βάσεις, η χρήση κονιοποιημένης τέφρας καυσίμου μπορεί να έχει σημαντικά οφέλη:

- δυνατότητα εξοικονόμησης κόστους και ενέργειας.
- Αύξηση της μακροπρόθεσμης αντοχής.
- Βελτίωση της αντοχής σε χημικές επιθέσεις, για παράδειγμα θεικών αλάτων.

- τη δυνατότητα επανατσιμεντοποίησης των ρωγμών παρουσία υγρασίας, όταν οι επιφάνειες παραμένουν σε επαφή και όταν η ιπτάμενη τέφρα και ο ενεργοποιητής που δεν έχει αντιδράσει είναι ακόμα διαθέσιμα.

Από την άλλη πλευρά, ορισμένες προφυλάξεις είναι απαραίτητες όταν χρησιμοποιείται ως δευτερεύον συνδετικό υλικό για να επιτραπεί η ανάπτυξη της ελάχιστης αντοχής που απαιτείται. Ο κρύος καιρός καθυστερεί σημαντικά την εξέλιξη της αντοχής και σε αυτή την περίπτωση η χρήση τσιμέντου είναι προτιμότερη από τη χρήση ασβέστη για την αύξηση της βραχυπρόθεσμης αντοχής. Επιπλέον, η περιεκτικότητα σε υγρασία που χρησιμοποιείται για τη συμπύκνωση θα πρέπει να διατηρείται κατά τη διάρκεια της περιόδου σκλήρυνσης για να διασφαλιστεί η επαρκής ανάπτυξη των χημικών αντιδράσεων και, ως εκ τούτου, η αύξηση της αντοχής. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη σφράγιση της σταθεροποιημένης στρώσης, χρησιμοποιώντας ασφαλικά γαλακτώματα.

Η κονιοποιημένη τέφρα καυσίμου έχει επίσης ορισμένα πλεονεκτήματα όταν χρησιμοποιείται για τη σταθεροποίηση του εδάφους και των κοκκωδών υλικών. Το σχήμα των σωματιδίων, κυρίως σφαιρικό, έχει πλαστικοποιητική δράση με αποτέλεσμα σημαντική μείωση της ανάγκης ενυδάτωσης. Η χαμηλή πυκνότητα σωματιδίων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του σχετικού όγκου των τσιμεντοειδών υλικών στο μείγμα. Αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να βοηθήσουν στη μείωση των επιπτώσεων της χαμηλότερης πρώιμης ηλικίας αντοχής.

Υλικά που σταθεροποιούνται με ιπτάμενη τέφρα έχουν συνήθως καλύτερη συμπεριφορά έναντι ρηγματώσεων συγκριτικά με τα σταθεροποιημένα με τσιμέντο υλικά. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ποζολανικές αντιδράσεις με το υδροξείδιο του ασβεστίου που παράγονται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου είναι πιο αργές από τις υδραυλικές αντιδράσεις που αναπτύσσονται κάθε φορά που χρησιμοποιείται τσιμέντο ως σταθεροποιητής.

Εκτός από την ποζολανότητά τους, μερικές ιπτάμενες στάχτες διαθέτουν ιδιότητες αυτοτσιμεντοποίησης μετά τη συμπίεση. Παρά αυτές τις ιδιότητες, πιστεύεται ότι η μη δεσμευμένη τέφρα δεν είναι επαρκής για την κατασκευή της στρώσης έδρασης και επομένως δεν θα είναι κατάλληλη για τη στρώση υπόβασης λόγω των παρακάτω (Thijs, 1992):

- υψηλή ευαισθησία στον παγετό.

- πιθανή απώλεια φέρουσας ικανότητας που παρουσιάζεται όταν αυτό το υλικό έρχεται σε επαφή με νερό
- πολύ χαμηλών τιμών που προέκυψαν από τη δοκιμή CBR (Littleton & Willavise, 1992).

Η πυκνότητα σωματιδίων της τέφρας είναι πολύ χαμηλή σε σύγκριση με άλλα συμβατικά υλικά και όταν συμπυκνώνεται δημιουργεί μια ελαφριά στρώση.

Η τέφρα πυθμένα φούρνου έχει μελετηθεί στο Πανεπιστήμιο του Nottingham με έμφαση σε εκείνες τις ιδιότητες που σχετίζονται με την εφαρμογή της ως κοκκώδες υλικό υπόβασης. Έχει γίνει σημαντικός όγκος εργασίας που περιλαμβάνει εργαστηριακές δοκιμές, τόσο με συμβατικές δοκιμές χαρακτηρισμού και ταξινόμησης όσο και με επαναλαμβανόμενες τριαξονικές δοκιμές φόρτισης. Η επιτόπου συμπεριφορά έχει διερευνηθεί με τη μελέτη της τέφρας του πυθμένα σε πιλοτικά τμήματα και στο Pavement Test Facility του Πανεπιστημίου του Nottingham, με ιδιαίτερη έμφαση στα χαρακτηριστικά παραμένουσας παραμόρφωσης (αυλακώσεις), τις ιδιότητες αυτοτσιμεντοποίησης και την συμπεριφορά του υλικού υπό συμπίεση. Αυτή η εργασία έχει αναφερθεί επαρκώς σε τεχνικές εκθέσεις και εργασίες συνεδρίων (Dawson, Brown & Thom, 1989; Dawson, 1989; Bullen & Dawson, 1990; Dawson & Bullen, 1991; Dawson & Nunes, 1993) και μια περίληψη των κύριων συμπερασμάτων παρουσιάζονται παρακάτω.

Από χημική άποψη, η τέφρα του βυθού μοιάζει πολύ με την ιπτάμενη τέφρα. Ωστόσο, διαφέρει σημαντικά στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, λόγω των πιο χονδρόκοκκων κλασμάτων της τέφρας του πυθμένα. Το υλικό έχει μια πιο ομοιόμορφη κοκκομετρική καμπύλη (με λιγότερο χονδρόκοκκο και λιγότερο λεπτόκοκκο υλικό) από τα συμβατικά αδρανή τύπου 1. Αυτό συμβάλλει σε μια μάλλον κακή συμπεριφορά παραμένουσας παραμόρφωσης και στις δυσκολίες συμπύκνωσης, αλλά, από την άλλη πλευρά, δημιουργεί υψηλή διαπερατότητα. Η υψηλή διαπερατότητα θα επιτρέψει την ελεύθερη αποστράγγιση της συμπαγούς υπόβασης και την εργασιμότητα σε υγρό καιρό. Τα περισσότερα συμβατικά υλικά Τύπου 1 δεν αποστραγγίζονται ελεύθερα (Dawson, Brown & Thom, 1989).

Η τέφρα αυτή έχει χαμηλή πυκνότητα, η οποία είναι στην περίπτωση μεγάλης καταπόνησης της στρώσης έδρασεις. Οδηγεί επίσης σε χαμηλότερο κόστος μεταφοράς. Σε σύγκριση με τα συμβατικά αδρανή, η συμπύκνωση μειγμάτων με χαμηλά ποσοστά σε κενών αέρα είναι

δύσκολη. Η προσθήκη νερού και η χρήση συμπιεστή με πνευματικό ελαστικό επιφέρει καλύτερη συμπίκνωση. Η τέφρα βυθού έχει λογικές, αν και όχι μεγάλες, εργαστηριακές τιμές CBR.

Η τέφρα του πυθμένα του κλιβάνου έχει ικανοποιητικό μέτρο ελαστικότητας αλλά όχι υψηλό σε σύγκριση με τα συμβατικά αδρανή. Από την άλλη πλευρά, η τέφρα του πυθμένα έχει μέτρια αντοχή στην παραμένουσα παραμόρφωση, ειδικά όταν δοκιμάζεται σε ξηρές συνθήκες. Με προσθήκη νερού, η συμπεριφορά της είναι παρόμοια με ένα συμβατικό αδρανές. Προκειμένου να περιοριστεί η παραμένουσα παραμόρφωση, θα πρέπει να αυξηθεί η πυκνότητα.

#### 4.2.5 Σκωρία υψικαμίνων

Η κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνου είναι ένα υποπροϊόν της βιομηχανίας παραγωγής σιδήρου, που παράγεται όταν το σιδηρομετάλλευμα μετατρέπεται σε μεταλλικό σίδηρο (που ονομάζεται χυτοσίδηρος σε αυτή τη φάση της διαδικασίας παραγωγής) σε μια υψικάμινο (Εικ. 13).



Εικόνα 13 Σκωρία υψικαμίνων

Η υψικάμιнос τροφοδοτείται συνεχώς με σιδηρομετάλλευμα, οπτάνθρακα (που χρησιμοποιείται ως καύσιμο) και ρέουσα πέτρα (ασβεστόλιθος ή δολομίτης). Ο προθερμασμένος αέρας διοχετεύεται στον αναπνευστήρα, δουλεύοντας σε θερμοκρασίες μεταξύ 1300 και 1600 °C, και ως αποτέλεσμα το οξυγόνο αντιδρά με τον άνθρακα από το κοκ παράγοντας θερμότητα και μονοξείδιο του άνθρακα. Το σιδηρομετάλλευμα σχηματίζεται από οξείδια του σιδήρου, του πυριτίου και της αλουμίνης. Από τη μία πλευρά, τα οξείδια του σιδήρου συνδυάζονται με το μονοξείδιο του άνθρακα και δημιουργούν μεταλλικό σίδηρο και διοξείδιο του άνθρακα. Από την άλλη πλευρά, το πυρίτιο και η αλουμίνη αντιδρούν με τις προκύπτουσες ενώσεις από την

πύρωση της πέτρας που ρέει, οι οποίες είναι οξειδία ασβεστίου και μαγνησίου, παράγοντας σκωρία (Lee, 1974). Σε αυτό το στάδιο, οι σκωρίες σχηματίζουν ένα υγρό στρώμα που επιπλέει πάνω από τον υγρό σίδηρο μέσα στον κλίβανο.

Υπάρχουν αέρια υπό πίεση στην υγρή σκωρία και η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την ψύξη της, μαζί με τη χημική της σύνθεση, θα καθορίσει την ποσότητα και το μέγεθος των φυσαλίδων που δεν μπορούν να διαφύγουν από το υγρό πριν από τη στερεοποίηση και, κατά συνέπεια, θα επηρεάσουν ιδιότητες όπως το πορώδες και η πυκνότητα.

Η σκωρία υψικάμινού παράγεται σε τρεις κύριες μορφές:

- αερόψυκτη
- Αφρώδης ή διογκωμένη.
- κοκκοποιημένη και σφαιροποιημένη.

Στην περίπτωση της αερόψυκτης σκωρίας, η υγρή σκωρία χύνεται σε κοιλώματα και αφήνεται να κρυώσει αργά στην ύπαιθρο και, όταν στερεοποιηθεί, αλλά είναι ακόμα ζεστή, απλώνεται νερό στο υλικό για να δημιουργηθούν ρωγμές. Αυτά θα διευκολύνουν τη θραύση, τη σύνθλιψη και το κοσκίνισμά του σύμφωνα με τις συνήθεις διαδικασίες λατομείου, παράγοντας ένα υλικό πολύ παρόμοιο με ένα φυσικό πέτρωμα σε υφή και διαβάθμιση.

Για την παραγωγή κοκκοποιημένης σκωρίας η υγρή σκωρία ψύχεται ξαφνικά σε νερό ή ατμό προκαλώντας τον κατακερματισμό της. Ο σχηματισμός κρυστάλλων παρεμποδίζεται, λόγω της ταχύτητας της μεθόδου ψύξης, παράγοντας ένα υαλώδες υλικό σε μικρούς κόκκους (0 έως 3 mm).

Η σφαιροποιημένη σκωρία παράγεται με τον ψεκάσμό ελεγχόμενων ποσοτήτων νερού στο ρεύμα της τετηγμένης σκωρίας και την προβολή του μείγματος σε μια ατμόσφαιρα υπερκορεσμένη με νερό, χρησιμοποιώντας ένα τύμπανο που περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα. Η πλαστική σκωρία στη συνέχεια χωρίζεται σε σωματίδια που κυμαίνονται από 0 έως 13 mm. Το μεγαλύτερο υλικό σχηματίζεται από διογκωμένα σωματίδια μικρότερης πυκνότητας. Είναι δυνατός ο έλεγχος της αναλογίας υλικού κάτω των 3 mm που παράγεται τροποποιώντας τις συνθήκες λειτουργίας. Αυτό το κλάσμα υλικού είναι παρόμοιο με την κοκκοποιημένη σκωρία και χρησιμοποιείται ως συνδετικό.



Η αφρώδης ή διογκωμένη σκωρία λαμβάνεται με ψύξη της τετηγμένης σκωρίας με τη χρήση μικρών ποσοτήτων νερού, με πίδακες στην υγρή σκωρία ενώ αυτή απορρίπτεται σε μια δεξαμενή. Αυτή η μέθοδος παράγει μεγάλες ποσότητες ατμού μέσα στη λιωμένη σκωρία σχηματίζοντας έτσι ένα διογκωμένο υλικό, με πολύ χαμηλές πυκνότητες.

Αποτελείται κυρίως από οξείδια ασβεστίου και μαγνησίου (CaO και MgO) με πυρίτιο (SiO<sub>2</sub>) και αλουμίνα (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) που αντιπροσωπεύουν περίπου το 95% της σύνθεσης της σκωρίας (Lee, 1974).

Χημικά αυτό το υλικό δεν αποτελεί σημαντικό πρόβλημα και έχει προταθεί για εκτεταμένη χρήση σε εφαρμογές οδοστρώματος (Baldwin, Addis, Clark & Rosevear, 1995). Επιπλέον, οι σκωρίες υψικαμίνου παράγονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις ποιότητας που καθορίζονται από το Βρετανικό Ίδρυμα Προτύπων (BSI 1047, 1983; BS 3797, 1990; BS 6699, 1992) περιορίζοντας περαιτέρω την πιθανότητα χημικών προβλημάτων για υλικά που συμμορφώνονται με αυτές τις προδιαγραφές. Μερικές από τις απαιτήσεις προδιαγραφών για αερόψυκτες σκωρίες υψικαμίνου όσον αφορά στα οδοστρώματα παρατίθενται παρακάτω:

- Η πυκνότητα συμπιεσμένου υλικού στην περιοχή από 10 έως 14 mm, δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 1,1 Mg/m<sup>3</sup>.
- Η συνολική περιεκτικότητα σε θείο δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 2, 75 % για τα δεσμευμένα υλικά και η περιεκτικότητα σε υδατοδιαλυτά θειικά δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 2,0 g/L για τα μη δεσμευμένα υλικά.
- Οι τιμές απορρόφησης νερού δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 10 %;
- Ο δείκτης πλακοειδούς των χονδρόκοκκων αδρανών δεν πρέπει να υπερβαίνει το 35.

Ωστόσο, στην περίπτωση υλικού που προέρχεται από προηγούμενη παραγωγή, πρέπει να ληφθούν πρόσθετες προφυλάξεις, καθώς η μεταβλητότητα των παλαιότερων αποθεμάτων είναι σημαντικά υψηλότερη από την τρέχουσα παραγωγή (Sherwood, 1995). Η αερόψυκτη σκωρία υψικαμίνου έχει μια ομάδα χαρακτηριστικών που την καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλη για την αντικατάσταση φυσικών αδρανών και μπορεί εύκολα να υποστεί επεξεργασία προκειμένου να παραχθεί ένα υλικό που συμμορφώνεται με τις τρέχουσες προδιαγραφές (Lee, 1974):

- καλό σχήμα κόκκων και τραχύτητα επιφάνειας, ενισχύοντας τις ιδιότητες τριβής του και την πρόσφυση μεταξύ κόκκων και συνδετικού.
- χαμηλό συντελεστής θερμικής διαστολής.

- υψηλή αντοχή στη φωτιά, που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον όταν χρησιμοποιείται σε κατασκευές από σκυρόδεμα και στην κατασκευή οικοδομικών λίθων.

Από την άλλη πλευρά, το πορώδες του είναι υψηλό και, κατά συνέπεια, οι υψηλές τιμές απορρόφησης νερού είναι κοινές για αυτό το υλικό. Ωστόσο, αυτό το χαρακτηριστικό είναι αποτέλεσμα της φυσαλιδώδους φύσης και δεν αποτελεί ένδειξη μειωμένης αντοχής. Από την άλλη πλευρά, έχει ως αποτέλεσμα την υψηλότερη περιεκτικότητα σε συνδετικό υλικό για τη σταθεροποίησή του, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται ασφαλικά συνδετικά, και πρόσθετες ποσότητες νερού για σκυρόδεμα. Επιπλέον, απαιτείται μεγάλο ποσοστό συνδετικού υλικού ώστε η θλιπτική αντοχή να μην μειωθεί όπως και η ρευστότητα.

Η κοκκοποιημένη σκωρία, με χημική σύνθεση παρόμοια με το τσιμέντο, έχει υδραυλικές ιδιότητες όταν συνδυάζεται με έναν βασικό ενεργοποιητή όπως ασβέστη, τσιμέντο, υδραυλική ιπτάμενη τέφρα, ασβέστιο ή υδροξείδιο του νατρίου και άλλα προϊόντα που σχηματίζονται από ασβέστη, γύψο και σόδα (Chi, 1992). Η εμπορική της αξία είναι πολύ υψηλή για να χρησιμοποιηθεί ως αδρανής στην οδοποιία και, ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται ως πρόσθετο για το τσιμέντο ή γενικότερα ως συνδετικό. Οι λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες θα εξαρτηθούν από παράγοντες όπως η χημική σύνθεση, οι συνθήκες κοκκοποίησης και η περιεκτικότητα σε λεπτά. Ωστόσο, η αντιδραστικότητα της σκωρίας είναι ουσιαστικά συνάρτηση της ειδικής επιφάνειας του υλικού μετά τη συμπύκνωση.

Σύμφωνα με αυτόν τον συντελεστή, οι κοκκοποιημένες σκωρίες ταξινομούνται σε τέσσερις ομάδες (ΟΟΣΑ, 1977):

- κατηγορία 1,  $a < 20$ , σκωρία που δεν χρησιμοποιείται στην οδοποιία.
- Κατηγορία 2,  $20 < a < 40$ , σκωρία που χρησιμοποιείται συχνότερα για μείγματα χαλίκι-σκωρίας και άμμου-σκωρίας.
- κλάση 3,  $40 < a < 60$ , χρησιμοποιείται με υλικά δύσχρηστα.
- κλάση 4,  $a > 60$ , χρησιμοποιείται μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις.

Η χρησιμότητα των σκωριών μπορεί ακόμη να βελτιωθεί με μερική άλεση (περίπου 10 % των λεπτών που παράγονται) ή ολική άλεση, και στην περίπτωση αυτή λαμβάνεται αλεσμένη σκωρία υψικαμίνου. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, ένας ενεργοποιητής όπως τσιμέντο ή ασβέστης μπορεί να εισαχθεί για να παραχθεί ένα υλικό με αυξημένη σκλήρυνση,

εργασιμότητα-ανθεκτικότητα, αντοχής σε θλίψη ,αντοχής σε διάβρωσης ακόμη και στην πρόσφυση του.

Συνοπτικά, η κοκκοποιημένη σκωρία με την αργή και προοδευτική πήξη και σκλήρυνση έχει την ιδιαιτερότητα να συνδυάζει ευκαμψία κατά την κατασκευή, καλή μηχανική σταθερότητα πρώιμης ηλικίας (παρόμοια με μια καθαρή άμμο) την ικανότητα προσαρμογής κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου και να μπορούν να προσφέρουν κάποια ικανότητα αυτοθεραπείας. Η μειωμένη ευαισθησία στις καιρικές συνθήκες και η εργασιμότητα είναι επίσης σημαντικοί παράγοντες που ενισχύουν τη χρησιμότητα αυτού του εναλλακτικού υλικού.

Η σφαιροποιημένη σκωρία αποτελείται από υλικό κάτω από 12 - 13 mm. Το λεπτό κλάσμα, από 0 έως 3 mm, έχει ίδιες υδραυλικές ιδιότητες με εκείνες της σκωρίας υψικαμίνου σε κόκκους και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τους ίδιους σκοπούς στην τσιμεντοβιομηχανία και την οδοποιία. Η δραστηριότητα του μπορεί να αυξηθεί με άλεση, όπως για την κοκκοποιημένη σκωρία. Το πιο χοντρό κλάσμα, που είναι από διογκωμένα σωματίδια, έχει πολύ χαμηλές πυκνότητες και χρησιμοποιείται ως ελαφρύ αδρανές

Η αφρώδης σκωρία σχηματίζεται από διογκωμένα σωματίδια με κυτταρική δομή ως αποτέλεσμα της διαδικασίας που χρησιμοποιείται για την ψύξη της τηγμένης σκωρίας. Γενικά, συνθλίβεται μετά τη σκλήρυνση και παρουσιάζει τις ακόλουθες ιδιότητες: χαμηλές πυκνότητες, καλή θερμομόνωση και υψηλή αντοχή στη φωτιά (ΟΟΣΑ, 1977).

Όσον αφορά τη μεταβλητότητα των σκωριών υψικαμίνου από διαφορετικές πηγές, αποδείχθηκε ότι οι ιδιότητες της σκωρίας που παράγονται σε μια συγκεκριμένη χαλυβουργία είναι ομοιόμορφες και ότι η μεταβλητότητα τους είναι αντίστοιχη με αυτή των φυσικών αδρανών (Lee, 1974). Οι ιδιότητες της σκωρίας εξαρτώνται κυρίως από τις συνθήκες λειτουργίας του κλιβάνου. Ως εκ τούτου, εάν αλλάξει ο τύπος του σιδηρομεταλλεύματος που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη, θα υπάρξουν σημαντικές διακυμάνσεις στις ιδιότητες της σκωρίας, μεγαλύτερες από αυτή που προκύπτει όταν συγκρίνονται σκωρίες από διαφορετικούς κλιβάνους αλλά από τις ίδιες πηγές υλικού.

Παρά τις υψηλές τιμές απορροφητικότητας νερού που παρουσιάζονται, έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι η σκωρία υψικαμίνου δεν είναι ευαίσθητη στον παγετό. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην στρώση βάσης/υπόβασης (Cronney & Jacobs, 1967).

#### 4.2.6 Σκωρία χάλυβα

Η σκωρία χάλυβα είναι ένα υποπροϊόν της βιομηχανίας παραγωγής χάλυβα. Μπορεί να παραχθεί από χυτοσίδηρο, από σκραπ χάλυβα ή συνδυασμό και των δύο. Για την κατασκευή του χάλυβα, είναι απαραίτητο να αφαιρεθεί η περίσσεια άνθρακα και πυριτίου από το μεταλλικό σίδηρο με οξείδωση και προσθήκη άλλων συστατικών (Lee, 1974). Ο ασβέστης ή ο δολομίτης που χρησιμοποιείται συνήθως συνδυάζονται με τα οξειδωμένα συστατικά σχηματίζοντας σκωρία χάλυβα (Εικ. 14). Χημικά, οι σκωρίες χάλυβα αποτελούνται κυρίως από ασβέστη, πυρίτιο και οξείδιο του σιδήρου.



Εικόνα 14 Σκωρία χάλυβα

Επί του παρόντος, χρησιμοποιείται ήδη ένα ποσοστό της ετήσιας παραγωγής σκωριών (BasicOxygenSteelmaking). Το κύριο μειονέκτημα που αποτρέπει την περαιτέρω χρήση σχετίζεται με τη χημική τους σύνθεση, δηλαδή την περιεκτικότητα σε ελεύθερο ασβέστη (1 έως 15 % και μερικές φορές έως 20 %), το μαγνήσιο, το πυριτικό όξινο ασβέστιο και τα υπολειμματικά οξείδια του σιδήρου και τον σίδηρο που μπορεί να ενυδατωθούν ή να οξειδωθούν. Ο ελεύθερος ασβέστης και το μαγνήσιο όταν έρθουν σε επαφή με το νερό μπορεί να προκαλέσουν σημαντική διαστολή που μπορεί να οδηγήσει στη διάσπαση των σωματιδίων. Η αντίδραση του οξειδίου του ασβεστίου με το νερό και η μετατροπή του σε υδροξείδιο του ασβεστίου είναι, γενικά, γρήγορη και η διαστολή θα γίνει σε λίγες εβδομάδες, εκτός εάν αυτές οι αντιδράσεις παγιδευτούν μέσα στα σωματίδια και για το λόγο αυτό καθυστερήσουν χρονικά. Από την άλλη πλευρά, η αντίδραση του οξειδίου του μαγνησίου αναπτύσσεται για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Για να μειωθεί αυτός ο κίνδυνος διαστολής, οι σκωρίες αποθηκεύονται σε εξωτερικό χώρο, ανοιχτό στο περιβάλλον, για χρονικές περιόδους έως ενός έτους. Αυτό επιτρέπει την ανάπτυξη διαστολής ή αστάθειας κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Άλλες τεχνικές που υιοθετούνται για την ελαχιστοποίηση των προβλημάτων επέκτασης ή αστάθειας είναι:

- το μείγμα σκωρίας χάλυβα με συμβατικά αδρανή.
- η χρήση του σε επιχρισμένα υλικά και η παρεμβολή στρώσης άμμου, με ελάχιστο πάχος 150-200 mm, που διαχωρίζει τη σκωρία χάλυβα από το υλικό επικάλυψης.

Αυτή η τελευταία τεχνική βρέθηκε ότι μειώνει αποτελεσματικά ή λύνει πλήρως το πρόβλημα της μόνιμης ζημιάς στη δομή του οδοστρώματος (Verhasselt & Choquet, 1989). Αυτό το στρώμα άμμου έχει τις ακόλουθες λειτουργίες: να εξυπηρετεί εν μέρει τη διαστολή του στρώματος σκωρίας χάλυβα, να εξαπλώνει τις τάσεις που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας και να γεμίζει μερικά από τα κενά και τις ρωγμές που δημιουργούνται στο στρώμα σκωρίας. Η προκαταρκτική έρευνα στον Καναδά (Emery, 1975) παρουσίασε πειραματικά αποτελέσματα που υποδηλώνουν ότι η γήρανση, η αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων (δηλαδή ο περιορισμός της ποσότητας των λεπτών σωματιδίων) και η επεξεργασία με θειικό οξύ θα μείωναν τη διαστολή των σκωριών χάλυβα.

Σε σχέση με την επίδραση του μεγέθους της σκωρίας χάλυβα στην επέκταση, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται στον Καναδά έρχονται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα από μελέτες περιπτώσεων που πραγματοποιήθηκαν στο Βέλγιο, όπου έχει διεξαχθεί εκτενής έρευνα σχετικά με τη συμπεριφορά των σκωριών χάλυβα ως υλικό οδοστρώματος (Choquet, 1984; Verhasselt & Choquet, 1989; Verhasselt, 1991; Gorle, Verhasselt, Thijs & Kerkhof, 1992). Όσον αφορά την εργαστηριακή μελέτη των σκωριών BOS, η προσέγγιση περιελάμβανε:

- Η βασική παραγωγή χάλυβα οξυγόνου περιελάμβανε τη βύθιση δειγμάτων υλικού σε νερό, στους 70 °C, με σκοπό την επιτάχυνση του μηχανισμού.
- δοκιμές διόγκωσης σε δείγματα με ικανοποιητική απόδοση στη δοκιμή αποσύνθεσης, με βάση την εμβάπτιση συμπιεσμένων δειγμάτων για 6 - 7 μήνες, στους 20 °C.
- ποσοτικοποίηση των αλλαγών στην πυκνότητα των σωματιδίων, πριν και μετά τη βύθιση σε νερό στους 60 - 70 °C, μετρούμενη στο ίδιο δείγμα σκωρίας.

- οπτική εξέταση του υλικού και των συμπυκνωμένων δοκιμίων μετά από εμβάπτιση σε νερό.

Σε επιτόπου μελέτες που πραγματοποιήθηκαν, παρατηρήθηκαν προβλήματα σε αναχώματα, υποβάσεις και οδοστρώματα όπου χρησιμοποιήθηκαν μη δεσμευμένες σκωρίες χάλυβα. Οι ακόλουθες πτυχές επισημάνθηκαν ως υπεύθυνες για αυτές τις καταστάσεις: ακανόνιστη κατανομή ασβέστη, διάβρωση υλικών μη πλήρη ή ανεπαρκή και διαβάθμιση (> 30 mm) που θεωρείται πολύ χονδρόκοκκη. Πράγματι, είναι γενικά αποδεκτό ότι με τη χρήση λεπτότερων διαβαθμίσεων (< 20-25 mm) είναι δυνατό να επιτευχθεί πιο αποτελεσματική διάβρωση των σκωριών, καθώς η αύξηση της επιφάνειας επαφής μεταξύ των σκωριών και του διαλυτικού μέσου, όπως το νερό, επιταχύνει την αντίδραση και τη διάβρωση του υλικού, χαμηλότερες καταπονήσεις θα προκύψουν από τη διαστολή και το ράγισμα των σωματιδίων και τις τάσεις στα σημεία επαφής μεταξύ των σωματιδίων θα μειωθεί, με αποτέλεσμα μια πιο ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων λόγω διαστολής.

Η σκωρία EAF(ElectricArcFurnace) έχει χαμηλότερη περιεκτικότητα σε ελεύθερο ασβέστη, η οποία ευθύνεται για την υψηλότερη χρήση της στον κατασκευαστικό κλάδο. Και πάλι υποβάλλεται σε επεξεργασία με διάβρωση, σύνθλιψη και κοσκίνισμα.

Τα σωματίδια σκωρίας χάλυβα έχουν καλύτερο σχήμα. Διότι, έχουν υψηλότερες πυκνότητες, χαμηλότερες απορροφήσεις νερού και υψηλότερη αντοχή σωματιδίων, αντοχή στην τριβή και αντιολισθητικότητα (OECD, 1977). Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν τη σκωρία πιο κατάλληλη στην επιφανειακή στρώση. Επιπλέον, η ενσωμάτωση σκωριών χάλυβα σε ασφατικό υλικό θα εμποδίσει την εισχώρηση του νερού στα σωματίδια της σκωρίας και, ως εκ τούτου, θα μειώσει τον κίνδυνο διαστολής. Η σχετικά υψηλή πυκνότητα των σκωριών χάλυβα αποτελεί μειονέκτημα όσον αφορά στο κόστος μεταφοράς,

#### 4.2.7 Γύψος

Ο γύψος ως υποπροϊόν περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα προϊόντων που παράγονται από διαφορετικές βιομηχανικές διεργασίες. Οι πιο κοινές εφαρμογές για οδοστρώματα είναι: ο γύψος αποθείωσης καυσαερίων, ο φωσφογύψος και ο fluoogypsum(εικ. 15). Ο φωσφογύψος και ο φθορόγυψος προκύπτουν από την παραγωγή φωσφορικού και υδροφθορικού οξέος,

αντίστοιχα. Ο γύψος αποθείωσης καυσαερίων (FGD) ορίζεται από την Eurogypsum, που αντιπροσωπεύει την ευρωπαϊκή βιομηχανία γύψου, ως:



Εικόνα 15 Γύψος

Ο γύψος FGD(FlueGasDesulfurization) ή γύψος αφυγραντήρα, που ονομάζεται επίσης δεσουλφογύψος ή συνθετικός γύψος, παράγεται σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας που καίνε λιγνίτη ή κάρβουνα μολυσμένα με θείο. Όταν καίγονται, το υπάρχον θείο μετατρέπεται σε οξείδια του θείου, κυρίως διοξείδιο του θείου, το οποίο μπορεί να συμβάλει στο σχηματισμό όξινης βροχής όταν απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Ως αποτέλεσμα της περιβαλλοντικής νομοθεσίας που περιορίζει τις εκπομπές διοξειδίου του θείου, εισήχθησαν συστήματα καθαρισμού αερίου στους σταθμούς παραγωγής ενέργειας για την απομάκρυνση του θείου από τα καυσαέρια. Η διαδικασία συνίσταται στον εξαναγκασμό της αντίδρασης αυτών των αερίων με έναν παράγοντα εξουδετέρωσης, συνήθως έναν ασβεστόλιθο ή πολύ ασβέστη, μέσα στα συστήματα πλύσης. Ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται, το παραγόμενο παραπροϊόν μπορεί να είναι γύψος FGD.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, έχει διεξαχθεί έρευνα σχετικά με τη χρήση του φωσφογύψου στην κατασκευή στρώσεων βάσης. Μερικοί από τους παράγοντες που έδειξαν σημαντική επίδραση στη δυνατότητα χρήσης του ήταν (Saylak, Taha & Little, 1988):

- οξύτητα του υλικού όπως χαρακτηρίζεται από την τιμή του pH. Το υλικό που παρήχθη, με χαμηλότερες τιμές pH (2,5 περίπου), ανέπτυξε χαμηλότερη αντοχή από το υλικό που είχε αποθηκευτεί με υψηλότερες τιμές pH (5,5 περίπου).
- Η σωστή ταξινόμηση και το σχήμα των σωματιδίων έχουν σημαντική επίδραση στη συμπίκνωση, οδηγώντας σε υψηλότερες πυκνότητες και πιο σταθερά υλικά.

Συγκριτικά, ο γύψος αποθείωσης καυσαερίων παρουσιάζει κατάλληλη διαβάθμιση και τιμή pH αμέσως μετά την παραγωγή. Η κύρια διαφορά μεταξύ του πρόσφατα παραγόμενου και παλαιωμένου γύψου αποθείωσης καυσαερίων έγκειται στην περιεκτικότητά του σε  $\text{CaSO}_3$  και στη μετατροπή του σε  $\text{CaSO}_4$  που είναι σχετικά γρήγορη. Επομένως, δεν υπάρχει κάποιο ιδιαίτερο πλεονέκτημα στη γήρανση αυτού του υλικού και, αντίθετα, προκαλεί σημαντικής μείωση της αντοχής (Saylak, Taha & Little, 1988).

Έχει αποδειχθεί ότι ο γύψος παραπροϊόντος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε στρώσειςυπόβασης και βάσης όταν σταθεροποιείται με τσιμέντο Portland ή κονιοποιημένη τέφρα καυσίμου, είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό (Taha, 1989; Saylak, Scullion & Golden, 1993). Στη Γαλλία, ο γύψος υποπροϊόντος ενδείκνυται ιδιαίτερα για την ενεργοποίηση σταθεροποίησης I της ιπτάμενης τέφρας (SETRA & LCPC, 1980).

#### 4.2.8 Σκόνη κλιβάνου τσιμέντου

Η σκόνη κλιβάνου τσιμέντου (ckd), επίσης γνωστή ως τέφρα καπνού τσιμέντου ή τέφρα κατακρημιστή τσιμέντου, είναι ένα υποπροϊόν της βιομηχανίας τσιμέντου. Παρόμοια με αυτό που συμβαίνει με την κονιοποιημένη τέφρα καυσίμου, τα αέρια που παράγονται κατά την παραγωγή του τσιμέντου Πόρτλαντ μεταφέρουν πολύ λεπτά και ελαφριά σωματίδια από τους κλιβάνους (εικ. 16). Αυτό το υλικό εξάγεται από τα αέρια, για την πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης χρησιμοποιώντας ηλεκτροστατικούς κατακρημιστές, διαχωριστές κυκλώνων, πύργους καθαρισμού και φίλτρα σακουλών.



Εικόνα 16 Σκόνη κλιβάνου τσιμέντου



Το ποσοστό της παραγόμενης σκόνης μπορεί να είναι σημαντικό, από 5 έως 15 % της παραγωγής κλίνκερ τσιμέντου (Sherwood, Tubey & Roe, 1977). Ωστόσο, μέρος αυτού του υλικού επαναχρησιμοποιείται στους κλιβάνους και μόνο το υλικό με υψηλή περιεκτικότητα σε αλκάλια, που δεν είναι κατάλληλο για επαναχρησιμοποίηση, διατίθεται ως δευτερεύον συνδετικό.

Η διαθέσιμη σκόνη του κλιβάνου τσιμέντου αντιστοιχεί στο κλάσμα της σκόνης με υψηλή περιεκτικότητα σε αλκάλια. Ωστόσο, αυτά τα άλατα αλκαλίων είναι πολύ διαλυτά και για αυτό το λόγο το υλικό που αφήνεται να ξεπεράσει τις καιρικές συνθήκες θα έχει μειωμένη περιεκτικότητα σε αλκάλια και θειικά σε σύγκριση με τη σκόνη κλιβάνου που παράγεται πρόσφατα (Sherwood, Tubey & Roe, 1977). Από την άλλη πλευρά, οι τσιμεντοειδείς ιδιότητές του μετά την αποθήκευση για μεγάλο χρονικό διάστημα θα μειωθούν πολύ λόγω της ενυδάτωσης του ελεύθερου ασβέστη, περιορίζοντας δραματικά τη δυνατότητα χρήσης του ως δευτερεύον συνδετικό υλικό.

Όταν η σκόνη του κλιβάνου τσιμέντου χρησιμοποιείται στο σκυρόδεμα ως μερική αντικατάσταση του τσιμέντου Portland, παρατηρούνται τα ακόλουθα (Ravindraiah, 1982): καθυστερημένη πήξη, αυξημένη ανάγκη νερού για την ίδια συνοχή και μειωμένη αντοχή. Αυτές οι μειώσεις, ωστόσο, δεν είναι σημαντικές για ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου έως και 15 %.

Ορισμένες ιδιότητες που αναφέρονται για εφαρμογή ως υλικό πλήρωσης σε επιχώματα είναι (Sherwood, Tubey & Roe, 1977): καλή εργασιμότητα ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες, υψηλές τιμές CBR (80 %) και πολύ χαμηλές πυκνότητες ξηρού αγρού, μεταξύ  $0,97 \text{ Mg/m}^3$  και  $1,18 \text{ Mg/m}^3$ , όταν συμπιέζεται με περιεκτικότητα σε υγρασία που κυμαίνεται από 37 έως 49 %.

Στην πειραματική μελέτη των (Sherwood, Tubey & Roe, 1977) διευρύνθηκε η επάρκεια της σκόνης κλιβάνου τσιμέντου ως σταθεροποιητικού παράγοντα. Λήφθηκαν αρκετά δείγματα από διαφορετικές τσιμεντοβιομηχανίες και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για τη σταθεροποίηση μιας καλά διαβαθμισμένης άμμου. Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν ως προς την ανεμπόδιστη αντοχή σε θλίψη συγκρίθηκαν με αυτά που ελήφθησαν με δείγματα ελέγχου, στα οποία η ίδια άμμος σταθεροποιήθηκε με τσιμέντο. Κανένα από τα δείγματα CKD δεν έφτασε στην ελάχιστη αντοχή σε θλίψη των 2,8 MPa, μετά από 7 ημέρες ωρίμανσης, όπως ορίζεται από την

Προδιαγραφή DoT για Έργα Δρόμων και Γεφυρών (DoT, 1976), και το καλύτερο αποτέλεσμα που επιτεύχθηκε με τη σκόνη κλιβάνου τσιμέντου ήταν μόλις το 20% αυτού που επιτεύχθηκε με το τσιμέντο Portland. Ως αποτέλεσμα αυτής της μελέτης, η σκόνη του κλιβάνου τσιμέντου θεωρήθηκε ακατάλληλη ως συνδετικό υλικό για την αντικατάσταση του τσιμέντου.

Παρά τα αρνητικά αποτελέσματα όταν χρησιμοποιείται μεμονωμένα ως συνδετικό υλικό, έχει χρησιμοποιηθεί με κονιοποιημένη τέφρα καυσίμου για τη σταθεροποίηση αδρανών στρώσεων οδοστρωμάτων (Miller, Bensch & Colony, 1980). Στην παρατήρηση και τη δοκιμή μετά την κατασκευή, διαπιστώθηκε ότι οι παραμορφώσεις στο οδόστρωμα μειώθηκαν με το χρόνο ωρίμανσης, δεν παρατηρήθηκαν ρωγμές ή ζημιές στην επιφάνεια (με εξαίρεση μια εντοπισμένη περιοχή) και υπήρχαν ενδείξεις αυτοθεραπευτικών ιδιοτήτων του μίγματος. Παρόμοια μείγματα που μελετήθηκαν στο εργαστήριο βρέθηκαν να έχουν την ίδια συμπεριφορά με εκείνη των αντίστοιχων μιγμάτων ασβέστη - ιπτάμενη τέφρα - αδρανών (Collins & Emery, 1983). Σε ορισμένες περιπτώσεις ανέπτυξαν υψηλότερη αρχική αντοχή.

### 4.3 Σύνοψη

Ο πίνακας 4 που ακολουθεί συνοψίζει τα αναφερόμενα στο παρόν κεφάλαιο.

*Πίνακας 4 Σύνοψη των υλικών που εξετάστηκαν, του τρόπου χρήσης τους στην κατασκευή οδοστρωμάτων και της συμπεριφοράς τους όπως προκύπτει από την υφιστάμενη έρευνα*

<b>Υλικό</b>	<b>Υπόστρωμα</b>	<b>Συμπεριφορά</b>
Απορρίμματα Ανθρακωρυχείου	Στρώση υποβάσης σταθεροποιητή	ως Εν γένει ικανή λειτουργία ως σταθεροποιητής. Εντούτοις, έχουν υπάρξει ερωτήματα σε σχέση με την καταλληλότητα του σήμερα λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε θειικά άλατα και σουλφίδια.
Απορρίμματα αργίλου	Στρώμα υπόβασης και στρώμα βάσης ως πληρωτικό	Η έρευνα έχει επιβεβαιώσει την καταλληλότητα των υλικών αυτών για χρήση στην οδοποιία.
Απόβλητα σχιστόλιθου	Στρώματα βάσης υπόβασης ως αδρανή	και Χαμηλή απορρόφηση νερού, υψηλή διαπερατότητα που επιτρέπει την καλή αποστράγγιση, τιμές CBR πολύ καλές. Ωστόσο,

Στάχτη ηλεκτροπαραγωγής άνθρακα	σταθμών με	Στρώμα υπόβασης και στρώμα βάσης ως πληρωτικό και σταθεροποιητής	χαμηλότερη αντοχή από τα συμβατικά αδρανή.
			<p>Θετικά:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• δυνατότητα εξοικονόμησης κόστους και ενέργειας.</li> <li>• Αύξηση της μακροπρόθεσμης αντοχής.</li> <li>• Βελτίωση της αντοχής σε χημικές επιθέσεις, για παράδειγμα θεικών αλάτων.</li> <li>• Δυνατότητα επανασιμεντοποίησης των ρωγμών παρουσία υγρασίας, όταν οι επιφάνειες παραμένουν σε επαφή και όταν η ιπτάμενη τέφρα και ο ενεργοποιητής που δεν έχει αντιδράσει είναι ακόμα διαθέσιμα</li> </ul>
			<p>Αρνητικά:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• υψηλή ευαισθησία στον παγετό.</li> <li>• πιθανή απώλεια φέρουσας ικανότητας που παρουσιάζεται όταν αυτό το υλικό έρχεται σε επαφή με νερό</li> <li>• πολύ χαμηλές τιμές που προέκυψαν από τη δοκιμή CBR</li> </ul>
Σκωρία υψικαμίνων		Στρώματα βάσης υποβάσης ως αδρανή	<p>και Η αερόψυκτη σκωρία υψικαμίνου έχει μια ομάδα χαρακτηριστικών που την καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλη για την αντικατάσταση φυσικών αδρανών και μπορεί εύκολα να υποστεί επεξεργασία προκειμένου να παραχθεί ένα υλικό που συμμορφώνεται με</p>

---

		τις τρέχουσες προδιαγραφές (Lee, 1974):
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• καλό σχήμα κόκκων και τραχύτητα επιφάνειας, ενισχύοντας τις ιδιότητες τριβής του και την πρόσφυση μεταξύ κόκκων και συνδετικού.</li> <li>• χαμηλό συντελεστής θερμικής διαστολής.</li> </ul>
Σκωρία γάλυβα	Επιφανειακή και Ισοπεδωτική στρώση, σαν πρόσθετο	Μείωση εισχώρησης νερού, βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων
Γύψος	Στρώματα βάσης και υπόβασης ως αδρανή	Έχει αποδειχθεί ότι ο γύψος παραπροϊόντος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε στρώσεις υπόβασης και βάσης όταν σταθεροποιείται με τσιμέντο Portland ή κονιοποιημένη τέφρα καυσίμου, είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό
Σκόνη κλιβάνου τσιμέντου	Στρώμα υπόβασης και στρώμα βάσης ως πληρωτικό και σταθεροποιητής	καλή εργασιμότητα ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες, υψηλές τιμές CBR (80 %) και πολύ χαμηλές πυκνότητες ξηρού αγρού

---

## 5. Συμπεράσματα

Η χρήση εναλλακτικών υλικών στην κατασκευή οδοστρωμάτων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την επίτευξη της βιωσιμότητας και της αειφορίας στον τομέα των μεταφορών. Η παραδοσιακή κατασκευή εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων έχει επιφέρει σημαντικές περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις, ενώ η ανάγκη για νέες προσεγγίσεις που σέβονται το περιβάλλον είναι ολοένα και πιο επιτακτική. Σε αυτό το πλαίσιο, η χρήση εναλλακτικών υλικών αναδύεται ως αναγκαιότητα και προοπτική για τη βελτίωση της ποιότητας των οδοστρωμάτων και τη μείωση του αντίκτυπου τους στο περιβάλλον. Επίσης ως εναλλακτικό υλικό για οδοστρώματα χρησιμοποιούνται περισσότερο οι Στάχτη σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με άνθρακα και Σκόνη κλιβάνου τσιμέντου σύμφωνα με την έρευνα ενώ τα εναλλακτικά υλικά χρησιμοποιούνται κυρίως στη στρώση της υπόβασης στα οδοστρώματα. Τέλος, σύμφωνα με την έρευνα ο συνδυασμός εναλλακτικών υλικών με παρθένα υλικά στην κατασκευή οδοστρωμάτων μπορεί να προσφέρει οικονομικά οφέλη και βιωσιμότητα.

Παρόλο που υπάρχει πληθώρα εναλλακτικών υλικών τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή οδοστρωμάτων, η υιοθέτηση και εφαρμογή τους είναι μικρής κλίμακας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός έλλειψης προδιαγραφών οι οποίες προβλέπουν και επιτρέπουν την χρήση τους.

## Βιβλιογραφία

- A. Ossa, J. L. G., E. Botero. (2016). Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 135, 379 - 386.
- Abdelfattah, H. F., Al-Shamsi, K., & Al-Jabri, K. (2018). Evaluation of rutting potential for asphalt concrete mixes containing copper slag. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(7), 630-640.
- Achebe, Jessica, Rebecca Saari, and Susan L. Tighe. 2021. Greenhouse Gas Mitigation in Highway Design, Construction and Maintenance - Jurisdictional Scan - HIIFP 2018-02. St. Catharines.
- Ahammed, Alauddin M., Sherry Sullivan, Grant Finlayson, Chris Goemans, and Jamie Meil. 2016. Life Cycle Environmental Assessment Using Athena Pavement LCA Tool: A Manitoba Case Study. in 2016 Conference of the Transportation Association of Canada. Toronto: Transportation Association of Canada, TAC.
- Ahmari, S., Chen, R., & Zhang, L. (2012). Utilization of mine tailings as road base material. In *GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering* (pp. 3654-3661).
- Alkins, Andrew E., Becca Lane, and Tom Kazmierowski. 2008. Sustainable Pavements: Environmental, Economic, and Social Benefits of In Situ Pavement Recycling. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2084):100–103. doi: 10.3141/2084-11.
- Ameri, M., Hesami, S., & Goli, H. (2013). Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag. *Construction and Building materials*, 49, 611-617.
- Arena, U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste management*, 32(4), 625-639.

- Arulrajah, A., Mohammadinia, A., Horpibulsuk, S., & Samingthong, W. (2016). Influence of class F fly ash and curing temperature on strength development of fly ash recycled concrete aggregate blends. *Construction and Building Materials*, 127, 743- 750.
- Brunner, P. H., & Rechberger, H. (2015). Waste to energy—key element for sustainable waste management. *Waste Management*, 37, 3-12.
- Cascione, A. A., Williams, R. C., & Yu, J. (2015). Performance testing of asphalt pavements with recycled asphalt shingles from multiple field trials. *Construction and Building Materials*, 101, 628-642.
- Cerezo, V. C., & Merchan, R. A. (2020). The importance of sustainable pavement construction and maintenance for social development. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 11(2), 1-14.
- Chen, W.; Wei, J.; Xu, X.; Zhang, X.; Han, W.; Yan, X.; Hu, G.; Lu, Z. Study on the optimum steel slag content of sma-13 asphalt mixes based on road performance. *Coatings* 2021, 11, 1436.
- Choudhary, A. K., Jha, J. N., & Gill, K. S. (2010). A study on CBR behavior of waste plastic strip reinforced soil. *Emirates Journal for Engineering Research*, 51-57.
- Choudhary, A. K., Jha, J. N., Gill, K. S., & Shukla, S. K. (2014). Utilization of fly ash and waste recycled product reinforced with plastic wastes as construction materials in flexible pavement. In *Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability* (pp. 3890-3902).
- Choudhary, J.; Kumar, B.; Gupta, A. Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review. *Constr. Build. Mater.* 2020, 234, 117271.
- da Conceição Leite, F., dos Santos Motta, R., Vasconcelos, K. L., & Bernucci, L. (2011). Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and building materials*, 25(6), 2972-2979.

- Dahlbo, H., Bacher, J., Lahtinen, K., Jouttijaravi, T., Suoheimo, P., Mattila, T & Saramaki, . (2015). construction and demolition waste management- a holistic evaluation of enviromental perfotmance. *journal of cleaner production*.
- Damilola, O. M. (2013). Syntheses, characterization and binding strength of geopolymers: A review. *International Journal of Materials Science and Applications*, 2(6), 185-193.
- Delatte, N. (2018). *Concrete pavement design, construction, and performance*. Crc Press.
- Dos Reis, G.S.; Quattrone, M.; Ambrós, W.M.; Cazacliu, B.G.; Sampaio, C.H. Current applications of recycled aggregates from construction and demolition: A review. *Mater.* 2021, 14, 1700.
- European Commission. A New Circular Economy Action Plan for a Cleaner and More Competitive Europe; European Commission: Brussels, Belgium, 2020.
- European Union. (2018). *European Roadmap towards a Single European Transport Area*. Brussels: European Commission.
- Faleschini, F., Zanini, M. A., Pellegrino, C., & Pasinato, S. (2016). Sustainable management and supply of natural and recycled aggregates in a medium-size integrated plant. *Waste Management*, 49, 146-155.
- Fatemi, S.; Imaninasab, R. Performance evaluation of recycled asphalt mixtures by construction and demolition waste materials. *Constr. Build. Mater.* 2016, 120, 450–456
- Gedik, A. A review on the evaluation of the potential utilization of construction and demolition waste in hot mix asphalt pavements. *Resour. Conserv. Recycl.* 2020, 161, 104956.
- Goli, A. The study of the feasibility of using recycled steel slag aggregate in hot mix asphalt. *Case Stud. Constr. Mater.* 2022, 16, e00861.
- Hainin, M. R., & Aziz, M. M. A. (2014). Characteristics and utilization of steel slag in road construction. *Jurnal Teknologi*, 70(7)
- Harvey, J. T., & Smith, R. W. (2017). Social impacts of transportation infrastructure. *JournalofTransportGeography*, 65, 1-3



- Holubka, M. (2013). Waste Tire Rubber Processing in View of Advanced Recycling Asphalt Rubber Technologies. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & mining Ecology Management*, 1, 1203.
- Jiang, Y.; Ling, T.C.; Shi, C.J.; Pan, S.Y. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete-A review. *Resour. Conserv. Recycl.* 2018, 136, 187–197.
- Khan, I. M., Kabir, S., Alhussain, M. A., & Almansoor, F. F. (2016). Asphalt design using recycled plastic and crumb-rubber waste for sustainable pavement construction. *Procedia Engineering*, 145, 1557-1564.
- Kong, D.; Chen, M.; Xie, J.; Zhao, M.; Yang, C. Geometric characteristics of BOF slag coarse aggregate and its influence on asphalt concrete. *Materials* 2019, 12, 741.
- Koushal, V., Sharma, R., Sharma, M., Sharma, R., & Sharma, V. (2014). Plastics: issues challenges and remediation. *Int. J. Waste Resourc*, 4(1), 6.
- Kowalski, K. J., Król, J., Radziszewski, P., Casado, R., Blanco, V., Pérez, D., & Wayman, M. (2013). Study on use of plastic waste in road construction. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2(3), 633-638.
- Kozhukova, N.I.; Chizhov, R.V.; Zhervovsky, I.V.; Strokova, V.V. (2016). Structure Formation of Geopolymer Perlite Binder Vs. Type of Alkali Activating Agent, *International Journal of Pharmacy & Technology*, vol. 8, iss. no. 3, pp. 15,339.
- Kua, T. A., Arulrajah, A., Mohammadinia, A., Horpibulsuk, S., & Mirzababaei, M. (2017). Stiffness and deformation properties of spent coffee grounds based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 138, 79-87.
- Kumar, H.; Varma, S. A review on utilization of steel slag in hot mix asphalt. *Int. J. Pavement Res. Technol.* 2021, 14, 232–242.
- Lee, K.-H.; Noh, J.; Khim, J.S. The Blue Economy and the United Nations' sustainable development goals: Challenges and opportunities. *Environ. Int.* 2020, 137, 105528.

- Li, S.; Xiong, R.; Zhai, J.; Zhang, K.; Jiang, W.; Yang, F.; Yang, X.; Zhao, H. Research progress on skid resistance of basic oxygen furnace (BOF) slag asphalt mixtures. *Materials* 2020, 13, 2169.
- M. Fall, T. Belem, S. Samb, M. Benzaazoua, "Experimental characterization of the stress-strain behaviour of cemented paste backfill," *Journal of Materials Sciences*, vol. 42, pp. 3914-3922, 2007
- Manjarrez, L., & Zhang, L. (2018). Utilization of Copper Mine Tailings as Road Base Construction Material through Geopolymerization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(9), 04018201.
- Menegaki, M.; Damigos, D. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* 2018, 13, 8–15.
- Moura, C.; Nascimento, L.; Loureiro, C.; Rodrigues, M.; Oliveira, J.; Silva, H. Viability of Using High Amounts of Steel Slag Aggregates to Improve the Circularity and Performance of Asphalt Mixtures. *Appl. Sci.* 2022, 12, 490.
- Moustafa Ahmed, k., Satish, C., & Praveen, k. (2004). Behaviour of Subgrade Soil Reinforced with Geogrid. *The International Journal of Pavement Engineering*, 201-209.
- Naik, T. R., & Kumar, R. (2013). Geopolymer concrete for sustainable developments: Opportunities, limitations, and future needs. In *Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*,
- Nam, B., Maherinia, H., & Behzadan, A. H. (2014). Mechanical characterization of asphalt tear-off roofing shingles in Hot Mix Asphalt. *Construction and Building Materials*, 50, 308-316.
- Neupane, K., Chalmers, D., & Kidd, P. (2018). High-strength geopolymer concrete properties, advantages and challenges. *Advances in Materials*, 7(2), 15-25.
- Nijboer, A. C., & van der Burg, E. S. (2019). Social sustainability of road infrastructure: A review of current approaches. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 70, 18-33.

- Ozerkan, N., Maki, O., Anayeh, M., Tangen, S., & M Abdullah, A. (2014). The effect of aluminium dross on mechanical and corrosion properties of concrete.
- Paje, S. E., Luong, J., Vázquez, V. F., Bueno, M., & Miro, R. (2013). Road pavement rehabilitation using a binder with a high content of crumb rubber: Influence on noise reduction. *Construction and building materials*, 47, 789-798.
- Pan, S. Y., Du, M. A., Huang, I. T., Liu, I. H., Chang, E. E., & Chiang, P. C. (2015). Strategies on implementation of waste-to-energy (WTE) supply chain for circular economy system: a review. *Journal of Cleaner Production*, 108, 409-421
- Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2008). *Pavement design and materials*. John Wiley & Sons.
- Pasetto, M.; Baldo, N. Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag. *Constr. Build. Mater.* 2011, 25, 3458–3468.
- Patil, S. B., Lole, A. A., Bavane, N. U., & Shinde, S. S. (2016). Use of waste tyres in road construction.
- Pelisser, F., Zavarise, N., Longo, T. A., & Bernardin, A. M. (2011). Concrete made with recycled tire rubber: effect of alkaline activation and silica fume addition. *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7), 757-763.
- Pérez , P., Agrela , F., Herra, R. & Ordoñez, J. (2013). Application of cement-treated recycled materials in the construction of a section of road in Malaga, Spain. *Construction and Building Materials*, Vol. 44, 593-599.
- Plati, C. Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review. *Constr. Build. Mater.* 2019, 211, 539–555.
- Poweth, M. J., George, S., & Paul, J. (2013). Study on use of plastic waste in road construction. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2(3), 633-638.

- Prasad, D.; Singh, B.; Suman, S.K. Utilization of recycled concrete aggregate in bituminous mixtures: A comprehensive review. *Constr. Build. Mater.* 2022, 326, 126859.
- Presti, D. L. (2013). Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: a literature review. *Construction and Building Materials*, 49, 863-881
- Purohit, S.; Panda, M.; Chattaraj, U. Use of Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate for Bituminous Paving Mixes: A Simple Approach. *J. Mater. Civ. Eng.* 2021, 33, 04020395.
- Ruiz, L.A.L.; Ramón, X.R.; Domingo, S.G. The circular economy in the construction and demolition waste sector—A review and an integrative model approach. *J. Clean. Prod.* 2020, 248, 119238.
- S. Chandra, P. Kumar, & B. A. Feyissa, “Use of marble dust in road construction,” *Road Materials and Pavement Design*, vol. 3, no. 3, pp. 317-330, 2002.
- S. Dimter, T. Rukavina, & V. Dragèevic, “Strength properties of fly ash stabilized mixes,” *Road Materials and Pavement Design*, vol. 12, no. 3, pp. 687-697, 2011
- Shiha, M.; El-Badawy, S.; Gabr, A. Modeling and performance evaluation of asphalt mixtures and aggregate bases containing steel slag. *Constr. Build. Mater.* 2020, 248, 118710.
- Skaf, M.; Manso, J.M.; Aragon, A.; Fuente-Alonso, J.A.; Ortega-Lopez, V. EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. *Resour. Conserv. Recycl.* 2017, 120, 176–185.
- Soos, Z., Geber, R., Toth, C., Igazvoelgyi, Z., & Udvardi, B. (2017). Utilization of aluminium dross as asphalt filler. *Építőanyag-Journal of Silicate Based & Composite Materials*, 69(3).
- Sutradhar, D., Miah, M., Chowdhury, G. J., & Sobhan, M. A. (2015). Effect of using waste material as filler in bituminous mix design. *American Journal of Civil Engineering*, 3(3), 88-94.
- Topini, D.; Toraldo, E.; Andena, L.; Mariani, E. Use of recycled fillers in bituminous mixtures for road pavements. *Constr. Build. Mater.* 2018, 159, 189–197

- Troschinetz, A. M., & Mihelcic, J. R. (2009). Sustainable recycling of municipal solid waste in developing countries. *Waste management*, 29(2), 915-923.
- Wang, G.; Wang, Y.; Gao, Z. Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria. *J. Hazard. Mater.* 2010, 184, 555–560.
- Wietzke, S., Reuter, M., Nestle, N., Klimov, E., Zadok, U., Fischer, B. M., & Koch, M. (2011). Analyzing morphology and thermal history of polybutylene terephthalate by THz time-domain spectroscopy. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 32(7), 952
- Wozuk, A.; Bandura, L.; Franus, W. Fly ash as low cost and environmentally friendly filler and its effect on the properties of mix asphalt. *J. Clean. Prod.* 2019, 235, 493–502.
- Xie, J.; Wang, Z.; Wang, F.; Wu, S.; Chen, Z.; Yang, C. The life cycle energy consumption and emissions of asphalt pavement incorporating basic oxygen furnace slag by comparative study. *Sustainability* 2021, 13, 4540.
- Xu, X.; Luo, Y.; Sreeram, A.; Wu, Q.; Chen, G.; Cheng, S.; Chen, Z.; Chen, X. Potential use of recycled concrete aggregate (RCA) for sustainable asphalt pavements of the future: A state-of-the-art review. *J. Clean. Prod.* 2022, 344, 130893.
- Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1991). *Principles of pavement design*. John Wiley & Sons.
- Zhao, X.; Sheng, Y.; Lv, H.; Jia, H.; Liu, Q.; Ji, X.; Xiong, R.; Meng, J. Laboratory investigation on road performances of asphalt mixtures using steel slag and granite as aggregate. *Constr. Build. Mater.* 2022, 315, 125655.
- Καραγιάννης, Ν. (2021). Οικονομική ανάλυση των οδοστρωμάτων. Αθήνα: Εκδόσεις Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος.
- Παπαδοπούλου, Α. (2019). Ανάπτυξη και οικονομική απόδοση των οδοστρωμάτων. *Περιοδικό Οδοποιία*, 15(2), 45-57