

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

**Διπλωματική Εργασία**

**«Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στα  
οδοστρώματα»**

**Φοιτητές**

Φίλιππος Μαραγκός, Α.Μ.: 7558

Ιωάννης Παύλος, Α.Μ.: 7572

**Επιβλέπουσα**

Κωνσταντίνα Γεωργούλη, Επικ. Καθηγήτρια Πα.Πελ.

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2025

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα θέλαμε καταρχάς να ευχαριστήσουμε όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της πτυχιακής μας εργασίας. Πρώτα από όλους την καθηγήτρια μας, κυρία Γεωργούλη Κωνσταντίνα, για την καθοδήγηση και τις συμβουλές που μας παρείχε καθ'όλη τη διάρκεια της συγγραφής.

Τέλος θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε και τις οικογένειες μας, για τη συνεχή υποστήριξη στα χρόνια των σπουδών μας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναλύει τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα οδοστρώματα. Πρόκειται για ένα σύγχρονο φαινόμενο, που όλο και επιδεινώνεται και για το λόγο αυτό είναι βασικό τα οδοστρώματα να κατασκευάζονται πιο γερά και ανθεκτικά. Είναι γεγονός, άλλωστε, ότι στη σημερινή εποχή, τα δυσμενή καιρικά φαινόμενα έχουν ενταθεί επηρεάζοντας πολλές περιοχές του κόσμου, μεταξύ αυτών και την Ελλάδα.

Όλα τα παραπάνω αναμφίβολα προκαλούν ανησυχία και έχουν οδηγήσει στην ανάγκη επανεξέτασης, αλλά και αναβάθμισης του σχεδιασμού και της κατασκευής οδοστρωμάτων. Επιπλέον, τα οδοστρώματα είναι βασικό να κατασκευάζονται πιο ανθεκτικά, αλλά και λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες, όπως τις συνθήκες που επικρατούν σε διάφορες χώρες (για παράδειγμα, διαφορετικοί τύποι οδοστρωμάτων χρησιμοποιούνται στις βόρειες χώρες της ΕΕ και διαφορετικοί σε χώρες της Αφρικής).

**Λέξεις- κλειδιά:** κλιματική αλλαγή, οδοστρώματα, θεσμικό πλαίσιο, κατασκευή οδοστρωμάτων

## **ABSTRACT**

This thesis focuses on the effect's climate change in relation to road structures and surfaces. It's modern phenomenon, that it deteriorates as time goes by and, for this reason, it is considered crucial the surfaces of the roads to build stronger in order to be more durable. It's a fact that nowadays, the intense weather phenomena have intensified and as a result the affect many areas around the world, including Greece.

All of the above, undoubtedly, generate concern and they have also to the conclusion that it has to be a review as well as better design and construction of asphalts. In addition, it's crucial for road surfaces to be constructed in a way in order to be more durable, but it's also important a number of factors to be taken into consideration, such as the different conditions that exist in various countries (ex., in different countries different type of road surfaces need to be used).

**Keywords:** climate change, road asphalts, institutional framework, road construction

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	2
ABSTRACT .....	3
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	7
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	8
1.1 Αντικείμενο.....	8
1.2 Στόχος.....	9
1.3 Δομή.....	9
2 Κλιματική αλλαγή και κρίση.....	11
2.1 Εισαγωγή.....	11
2.2 Η έννοια της κλιματικής αλλαγής.....	11
2.3 Μετάβαση από την κλιματική αλλαγή στην κλιματική κρίση.....	12
2.4 Συνέπειες της κλιματικής αλλαγής.....	13
2.5 Μέτρα που έχουν ληφθεί για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής (Κόσμος-Ευρώπη-Ελλάδα).....	16
3 Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στα οδοστρώματα.....	21
3.1 Γενικά.....	21
3.2 Οδοστρώματα και είδη οδοστρωμάτων.....	21
3.3 Οδοστρώματα και περιβαλλοντικοί παράγοντες.....	26
3.4 Ακραία καιρικά φαινόμενα και επιπτώσεις αυτών στα οδοστρώματα.....	27
3.5 Αλλαγές που προκαλούνται στη δομική αντοχή των υλικών των οδοστρωμάτων... ..	28
3.6 Επιπτώσεις εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής στα οδοστρώματα.....	29
4 Αντιμετώπιση και προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή.....	31
4.1 Εισαγωγή.....	31
4.2 Αναγκαιότητα αντιμετώπισης και προσαρμογής της κλιματικής αλλαγής στα οδοστρώματα.....	31
4.3 Χρήση νέων τεχνολογιών και ανθεκτικών υλικών.....	33
4.4 Σχεδιασμός οδοστρωμάτων που είναι ανθεκτικά στις νέες κλιματικές συνθήκες που διαμορφώνονται.....	39
4.5 Χρήση πράσινων τεχνολογιών.....	44
4.6 Ο ρόλος του θεσμικού πλαισίου και των κανονισμών στην προσαρμογή των υποδομών.....	47
5 Μελέτες περίπτωσης.....	48
5.1 Εισαγωγή.....	48

5.2	Στρατηγικές προσαρμογής των οδοστρωμάτων στην κλιματική αλλαγή-σύγκριση	48
6	ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	51
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	53

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Αντιπροσωπευτικές πορείες συγκέντρωσης Ισοδύναμου CO <sub>2</sub> (ppm).....	13
Εικόνα 2.2: Προτεραιότητες ευρωπαϊκής ταξινόμησης - EU Taxonomy .....	18
Εικόνα 2.3: Εξέλιξη εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (2002-2019) .....	19
Εικόνα 3.1: Κυριότεροι τύποι Οδοστρωμάτων .....	22
Εικόνα 3.2: Δομή εύκαμπτου οδοστρώματος .....	23
Εικόνα 3.3: Πλακιδωτών οδόστρωμα.....	24
Εικόνα 3.4: Παράγοντες επιλογής του κατάλληλου οδοστρώματος.....	25
Εικόνα 4.1: Σημαντικές καινοτομίες αντιμετώπισης και προσαρμογής των οδοστρωμάτων στη κλιματική αλλαγή.....	35
Εικόνα 4.2: Ασφαλτικό υλικό που περιέχει πολυμερή.....	36
Εικόνα 4.3: Γεωφάσματα που χρησιμοποιούνται για την βελτίωση της σταθερότητας της ασφάλτου .....	37
Εικόνα 4.4: Παράγοντες σχεδιασμού ανθεκτικών οδοστρωμάτων .....	41
Εικόνα 4.5: Βασικές κατηγορίες πράσινων τεχνολογιών για τα οδοστρώματα .....	45
Εικόνα 4.6: Ανακυκλωμένη άσφαλτος .....	46

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 2-1 Τομείς της οικονομίας που πρόκειται να πληγούν περισσότερο στην Ελλάδα εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής .....</b>	<b>20</b>
---	-----------

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Αντικείμενο

Η κλιματική αλλαγή συνιστά μία από τις πλέον σημαντικές προκλήσεις του 21<sup>ου</sup> αιώνα, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι οι επιπτώσεις αυτής συνδέονται με τα φυσικά οικοσυστήματα, με τις κρίσιμες υποδομές, αλλά και ευρύτερα με τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Αναμφίβολα, οι μεταβολές που συμβαίνουν στο παγκόσμιο κλίμα, όπως είναι η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας, η μεταβολή των βροχοπτώσεων, η ένταση, αλλά και η συχνότητα των ακραίων καιρικών φαινομένων, επιδρούν άμεσα και έμμεσα στον τομέα των μεταφορών, αλλά και στις οδικές υποδομές (IOBE, 2023). Τα οδοστρώματα, καθώς αποτελούν κρίσιμο στοιχείο για τα συγκοινωνιακά δίκτυα, βρίσκονται διαρκώς εκτεθειμένα στις επιπτώσεις των κλιματικών μεταβολών και επηρεάζονται αφενός στη φάση της κατασκευής τους, αφετέρου δε, στη φάση της λειτουργίας και της συντήρησής τους.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παραδοσιακή προσέγγιση σχεδιασμού και κατασκευής των οδοστρωμάτων στηρίζεται σε ιστορικά κλιματικά δεδομένα, τα οποία όμως δεν επαρκούν προκειμένου να διασφαλιστεί η μακροχρόνια ανθεκτικότητα των υλικών και των κατασκευών. Εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής, απαντώνται υψηλότερες θερμοκρασίες, σε σχέση με το παρελθόν, όπως επίσης και καύσωνες, ενώ αλλαγές υπάρχουν και στην απορροή των υδάτων από έντονες βροχοπτώσεις, με τις εν λόγω αλλαγές να δημιουργούν παραμορφώσεις, καθώς και αστοχίες των οδοστρωμάτων. Καθώς απαντάται αδυναμία προσαρμογής των υφιστάμενων συστημάτων συντήρησης και σχεδιασμού μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο κόστος αποκατάστασης, όπως επίσης και σε διακοπές λειτουργίας του οδικού δικτύου, αλλά και σε μείωση της οδικής ασφάλειας.

Υπό το πρίσμα αυτό, είναι αναγκαίο να υπάρχει πλέον ενσωματωμένη η διάσταση της κλιματικής αλλαγής στον σχεδιασμό, στην κατασκευή, όπως επίσης και στην διαχείριση των οδοστρωμάτων. Προκειμένου να υπάρξει προσαρμογή στις νέες συνθήκες, αναπτύσσονται ανθεκτικά ασφαλτικά υλικά, τα οποία και διαθέτουν βελτιωμένες θερμικές ιδιότητες, όπως επίσης αναπτύσσονται και νέα σύνθετα υλικά, καθώς και προηγμένες μέθοδοι προσομοίωσης και πρόβλεψης της φθοράς. Ταυτόχρονα, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην εφαρμογή ευέλικτων στρατηγικών συντήρησης.

## 1.2 Στόχος

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η διερεύνηση της σχέσης που υπάρχει μεταξύ της κλιματικής αλλαγής και της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων, έτσι ώστε να γίνουν κατανοητές οι επιπτώσεις των κλιματικών παραμέτρων, αλλά και να αναζητηθούν τεχνικές λύσεις προσαρμογής.

## 1.3 Δομή

Αναφορικά με την δομή της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, αυτή αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια. Ειδικότερα, το πρώτο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην έννοια της κλιματικής αλλαγής και κρίσης, όπου προσδιορίζεται αρχικά η κλιματική αλλαγή. Ακολούθως, περιγράφεται η μετάβαση που λαμβάνει χώρα από την κλιματική αλλαγή στην κλιματική κρίση, ενώ έμφαση δίνεται στις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται και στα μέτρα που έχουν ληφθεί για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, εστιάζοντας τόσο σε παγκόσμιο επίπεδο, όσο και στην Ευρώπη, αλλά και στην Ελλάδα. Εν συνεχεία, στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας μελετάται η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στα οδοστρώματα, όπου περιγράφονται τα οδοστρώματα και τα είδη των οδοστρωμάτων, ενώ γίνεται λόγος για τα οδοστρώματα και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Ακόμη, μελετώνται τα ακραία φαινόμενα, τα οποία και δημιουργούν επιπτώσεις στα οδοστρώματα, καθώς και οι αλλαγές που συνδέονται με την δομική αντοχή των υλικών στα οδοστρώματα. Περαιτέρω, εξετάζονται οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα οδοστρώματα.

Στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας μελετάται η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, καθώς και η προσαρμογή των συνεπειών αυτής στα οδοστρώματα. Πιο αναλυτικά, περιγράφεται η αναγκαιότητα αντιμετώπισης και προσαρμογής της κλιματικής αλλαγής στα οδοστρώματα, ενώ δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη χρήση νέων τεχνολογιών και συνθετικών υλικών. Περαιτέρω, μελετάται ο σχεδιασμός οδοστρωμάτων, τα οποία είναι ανθεκτικά στις νέες κλιματικές συνθήκες που διαμορφώνονται, ενώ γίνεται λόγος και για τη χρήση πράσινων τεχνολογιών. Ακόμη, εξετάζεται ο ρόλος που διαδραματίζει το θεσμικό πλαίσιο και οι κανονισμοί στην προσαρμογή των υποδομών στην κλιματική αλλαγή.

Εν συνεχεία, το τέταρτο κεφάλαιο επικεντρώνεται σε μελέτες περιπτώσεων επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα οδοστρώματα, εστιάζοντας τόσο σε παγκόσμιο επίπεδο, όσο και στην Ευρώπη, αλλά και στην Ελλάδα. Ακόμη, περιγράφονται οι στρατηγικές προσαρμογής των οδοστρωμάτων στην κλιματική αλλαγή, ενώ παρουσιάζονται καλές πρακτικές και πιλοτικά έργα που έχουν υλοποιηθεί προς την κατεύθυνση αυτή. Στα συμπεράσματα αναφέρουμε ότι είναι βασικό να ακολουθούνται οι προδιαγραφές αλλά και επιπλέον να σχεδιάζονται σύμφωνα με τα σύγχρονα πρότυπα και κανονισμούς, για να είναι περισσότερο ανθεκτικά στις κλιματικές αλλαγές.

## **2 Κλιματική αλλαγή και κρίση**

### **2.1 Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η κλιματική αλλαγή, η οποία πλέον έχει εξελιχθεί σε μια διαρκή κρίση. Ειδικότερα, προσδιορίζεται εννοιολογικά η έννοια της κλιματικής αλλαγής, ενώ γίνεται λόγος για την μετάβαση από την κλιματική αλλαγή στην κλιματική κρίση. Έμφαση δίνεται στις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής, καθώς επίσης και στα μέτρα που έχουν ληφθεί για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής-κρίσης στον κόσμο, στην Ευρώπη, καθώς επίσης και στην Ελλάδα.

### **2.2 Η έννοια της κλιματικής αλλαγής**

Αρχικά, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η κλιματική αλλαγή επικεντρώνεται στις μεταβολές που αφορούν τα πρότυπα του κλίματος, με τις μεταβολές αυτές να παρουσιάζονται ως αυξομειώσεις στην θερμοκρασία, στις βροχοπτώσεις, στα επίπεδα υγρασίας, όπως επίσης και στη συχνότητα των ακραίων καιρικών φαινομένων. Παρόλο που το κλίμα της Γης έχει μεταβληθεί φυσικά στο παρελθόν μέσω ηφαιστειακών εκρήξεων, μεταβολών στην ηλιακή ακτινοβολία και άλλων φυσικών φαινομένων, η σημερινή αλλαγή του κλίματος, παρουσιάζει σημαντικές διαφορές σε σχέση με το παρελθόν, ως προς την σφοδρότητα, αλλά και ως προς την ταχύτητα εξέλιξης (European Environment Agency, 2012).

Βασικός παράγοντας που οδηγεί στην κλιματική αλλαγή είναι η διόγκωση του φαινομένου του θερμοκηπίου, η οποία με τη σειρά της συνδέεται με αυξημένες εκπομπές αερίων, όπως είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) κτλ. Οι αυξημένες αυτές εκπομπές προέρχονται από την καύση ορυκτών καυσίμων, όπως επίσης και την βιομηχανική δραστηριότητα, αλλά και από την αποψίλωση των δασών, ενώ σημαντική είναι και η συνεισφορά και του τομέα της γεωργίας. Ουσιαστικά, τα αέρια αυτά παγιδεύουν την θερμότητα στην ατμόσφαιρα και έτσι σταδιακά οδηγούν σε αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη (Giannakopoulos et al., 2009).

Εξαιτίας της ανθρώπινης παρέμβασης, η κλιματική αλλαγή εντείνεται όλο και περισσότερο. Κατά κάποιο τρόπο μπορεί να θεωρηθεί ότι σε παγκόσμιο επίπεδο δημιουργείται ένα κλίμα το οποίο διαφέρει από αυτό που υπήρχε μέχρι πρότινος και ουσιαστικά είναι διαφορετικό από το κλίμα των προηγούμενων ετών. Χαρακτηριστικό του

κλίματος αυτού είναι η έντονη αστάθεια, όπως επίσης και οι εντονότερες επιπτώσεις για τη φύση, τους παραγωγικούς τομείς, αλλά και ευρύτερα την οικονομία και την κοινωνία (Ιδρυμα Μποδοσάκη,2022).

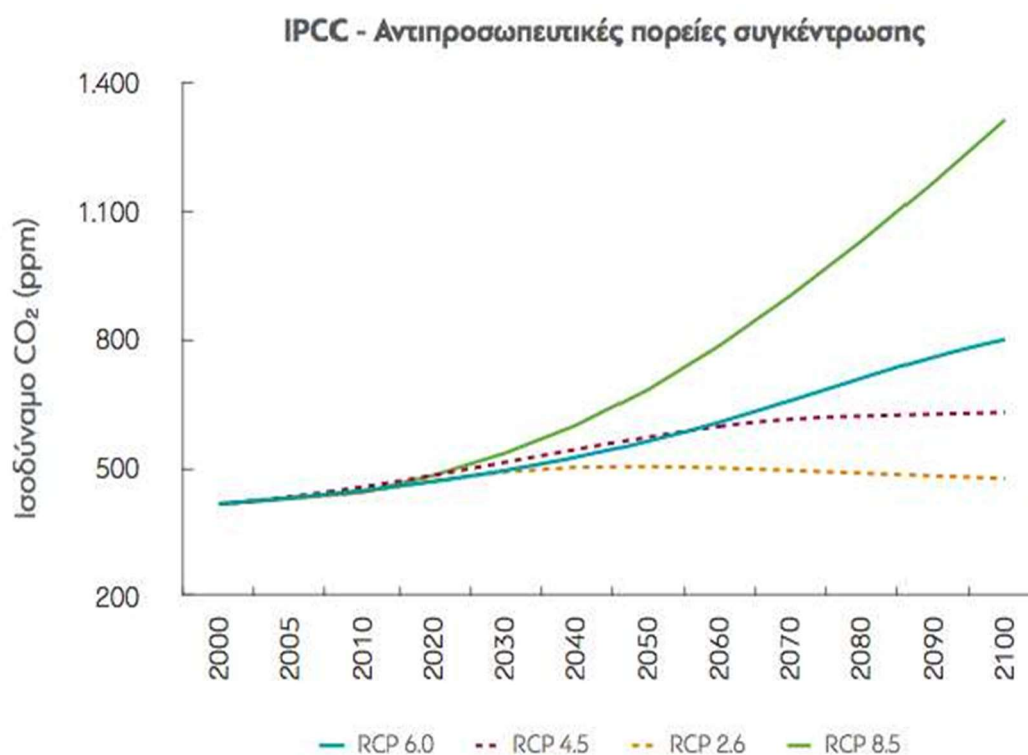
### **2.3 Μετάβαση από την κλιματική αλλαγή στην κλιματική κρίση**

Η κλιματική αλλαγή πλέον, μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί κρίση, η οποία και εξελίσσεται με ρυθμό που ξεπερνά τις αρχικές προβλέψεις, ενώ να σημειωθεί ότι διαρκώς επιδεινώνεται. Λόγω της κλιματικής αλλαγής διαμορφώνονται νέες ανάγκες, όπως επίσης και προτεραιότητες για τα κράτη, αλλά και για τις επιχειρήσεις, όπως επίσης και για τους πολίτες. Δεν θα πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός ότι οι νέες αυτές ανάγκες και προτεραιότητες που δημιουργούνται επηρεάζουν το αναπτυξιακό μοντέλο το οποίο ακολουθείται για μια περιοχή, μια πόλη, αλλά ακόμη και μια ολόκληρη χώρα (Τράπεζα της Ελλάδος, 2011).

Ιδιαίτερη αναφορά θα πρέπει να γίνει στην έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC), σύμφωνα με την οποία αναπτύσσονται ορισμένα σενάρια, τα οποία και επικεντρώνονται στην επίδραση της δραστηριότητας του ανθρώπου στο κλιματικό σύστημα. Λαμβάνοντας υπόψη το σενάριο πολύ χαμηλών εκπομπών RCP 2.6, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στις αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα παραμένουν σταθερές και στη συνέχεια περιορίζονται, έως ότου φθάσουν σε αρνητικά επίπεδα. Το εν λόγω σενάριο, προκειμένου να υλοποιηθεί, απαιτεί σημαντική και ταυτόχρονη μείωση των ορυκτών καυσίμων, όπως επίσης και αύξηση των καλλιεργούμενων εκτάσεων για βιοκαύσιμα, καθώς και μείωση των εκπομπών μεθανίου σε ποσοστό που ανέρχεται σε περίπου 40%. Αντίστοιχα, το σενάριο χαμηλών έως ήπιων εκπομπών RCP 4.5 προβλέπει περιορισμένη αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα έως και περίπου τα μέσα του 21<sup>ου</sup> αιώνα, οι οποίες προβλέπεται στη συνέχεια να περιοριστούν. Για να μπορέσει να επιτευχθεί το σενάριο αυτό απαιτείται μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, ενώ απαιτείται και αναδάσωση μεγάλης κλίμακας. Αναφορά θα πρέπει να γίνει και στο γεγονός ότι σύμφωνα με το σενάριο αυτό, περιορίζεται το μέγεθος της καλλιεργήσιμης γης, εξαιτίας της αύξησης της απόδοσης που επιτυγχάνεται, ενώ οι εκπομπές μεθανίου διατηρούνται σταθερές. Σχετικά με το σενάριο RCP 8.5 προβλέπεται ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά το έτος 2100 θα βρίσκονται σε επίπεδα τρεις φορές πιο υψηλά σε σχέση με τα σημερινά επίπεδα, με την κατανάλωση ενέργειας να αυξάνεται εξαιτίας της αύξησης των ορυκτών

καυσίμων. Να σημειωθεί ότι σύμφωνα με το σενάριο αυτό, προβλέπεται περιορισμένη διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο ενεργειακό μίγμα (Καρτάλης κ.ά., 2021).

Τα σενάρια αυτά αποτυπώνονται στην Εικόνα 1 που ακολουθεί, όπου απεικονίζονται οι αντιπροσωπευτικές πορείες συγκέντρωσης ισοδύναμου CO<sub>2</sub> (ppm) από το 2000 έως και το 2100 (Καρτάλης κ.ά., 2021).



*Εικόνα 2.1: Αντιπροσωπευτικές πορείες συγκέντρωσης Ισοδύναμου CO<sub>2</sub> (ppm)*

## 2.4 Συνέπειες της κλιματικής αλλαγής

Η κλιματική αλλαγή συνδέεται άμεσα με έντονες πιέσεις που δημιουργούνται τόσο στο ανθρωπογενές, όσο και στο φυσικό περιβάλλον. Λαμβάνοντας υπόψη σχεδόν το σύνολο των μελετών που έχουν εκπονηθεί για την επίδραση της κλιματικής αλλαγής, αυτή θεωρείται αρνητική. Ωστόσο, οι επιπτώσεις αυτές δεν είναι σε όλες τις χώρες και περιοχές ίδιας έντασης, καθώς διαφοροποιούνται σημαντικά. Ιδίως στην περίπτωση της Ελλάδας, το κλίμα γίνεται σταδιακά θερμότερο, όπως επίσης και ξηρότερο, ενώ όλο και πιο συχνά απαντώνται τα ακραία καιρικά φαινόμενα, τα οποία εκτιμάται ότι σε μελλοντικό χρόνο θα

είναι ακόμη συχνότερα, αλλά και ισχυρότερα, σε σχέση με το παρελθόν. Ενδιαφέρον έχει το γεγονός ότι οι εξελίξεις αυτές δεν επηρεάζουν μόνο την Ελλάδα, αλλά πλήττουν σημαντικά και άλλες περιοχές της ευρύτερης Μεσογείου, οι οποίες αναμένεται να δεχθούν ισχυρές πιέσεις λόγω της κλιματικής αλλαγής. Οι χώρες δε, που φαίνεται να ευθύνονται για τις περιβαλλοντικές αυτές πιέσεις βρίσκονται αρκετά μακριά από τις Μεσογειακές χώρες, καθώς πρόκειται για χώρες όπως είναι οι ΗΠΑ, η Ινδία, η Κίνα, η Βραζιλία κτλ. (Travers et al., 2010).

Οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής είναι έντονες και στον αστικό ιστό, καθώς επιδρούν στο σύνολο σχεδόν των λειτουργιών και των δραστηριοτήτων που πραγματοποιούνται εντός των πόλεων. Σε περίπτωση που υπάρξει αύξηση της θερμοκρασίας στον αστικό ιστό, προκαλούνται σημαντικές συνέπειες στους ανθρώπους και στην υγεία τους, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός οι υψηλές θερμοκρασίες σχετίζονται άμεσα με υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων της ατμόσφαιρας, όπως επίσης και με το φαινόμενο της αστικής νησίδας, το οποίο οδηγεί με τη σειρά του σε δυσφορία, όπως επίσης και σε δυσκολίες στην αναπνοή, αλλά και σε εξάντληση, τα οποία υπό ακραίες καιρικές συνθήκες μπορούν να οδηγήσουν ακόμη στον θάνατο. Οι συνθήκες αυτές είναι ακόμη περισσότερο επικίνδυνες για ευάλωτες ομάδες του πληθυσμού, όπως είναι τα βρέφη, τα μικρά παιδιά, καθώς επίσης και τα άτομα ηλικίας άνω των 65 ετών, αλλά και τα υπέρβαρα άτομα.

Εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής δημιουργούνται επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι οι υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν εντός του αστικού ιστού ευνοούν τη δημιουργία φωτοχημικής ρύπανσης, η οποία έχει ως κύριο παράγωγο το όζον ( $O_3$ ). Η πιθανότητα εμφάνισης φωτοχημικού νέφους αυξάνεται κατά 6% για κάθε αύξηση που συμβαίνει κατά  $1^\circ C$  πάνω από το όριο της μέγιστης ημερήσιας θερμοκρασίας, η οποία και έχει οριστεί στα επίπεδα των  $22^\circ C$ . Η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει και την ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων, καθώς κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών απαντώνται αυξημένες ανάγκες για κλιματισμό, ενώ την ίδια στιγμή το φορτίο αιχμής του ηλεκτρικού ρεύματος είναι αυξημένο (Carter et al., 2015).

Στον τομέα των μεταφορών, η κλιματική αλλαγή δημιουργεί επιπτώσεις, εξαιτίας κατά κύριο λόγο της μετακίνησης με ΙΧ, συνεκτιμώντας και το γεγονός ότι αρκετός πληθυσμός αποφεύγει να κινείται με τα δημόσια μέσα μεταφοράς. Την ίδια στιγμή, τα οχήματα συνεισφέρουν στην περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας, καθώς παράγουν

θερμότητα. Επιπροσθέτως, η κλιματική αλλαγή συνδέεται άμεσα με την οικονομία, ιδίως αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι κατά τις ημέρες όπου επικρατούν ακραία καιρικά φαινόμενα, περιορίζεται η κατανάλωση, ενώ αυξάνονται οι δημόσιες δαπάνες, προκειμένου να μπορέσουν να καλυφθούν οι σχετικές ζημίες. Ιδίως για τις πόλεις, εξίσου σημαντικό κίνδυνος που σχετίζεται άμεσα με την κλιματική αλλαγή είναι ο κίνδυνος εμφάνισης πλημμυρών, οι οποίες μπορεί να είναι και έντονες, θέτοντας σε κίνδυνο σημαντικά τμήματα του πληθυσμού, αλλά και δημιουργώντας προβλήματα στην υποδομή. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι εξαιτίας των περιορισμένων βροχοπτώσεων, κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών, υπάρχει αυξημένη ζήτηση για πόσιμο νερό, γεγονός που οξύνει περαιτέρω τις περιβαλλοντικές πιέσεις εντός των πόλεων (Bulkeley, 2013).

Ιδιαίτερη μνεία θα πρέπει να γίνει στις συνέπειες που προκαλεί η κλιματική αλλαγή στην Ελλάδα. Ειδικότερα, κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, όλο και περισσότερο η συχνότητα, αλλά και η σοβαρότητα των ακραίων καιρικών φαινομένων αυξάνεται, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται περισσότερες καταστροφές. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο κατά τη διάρκεια των τελευταίων δύο δεκαετιών. Για παράδειγμα, τα ακραία αυτά φαινόμενα αφορούν την εμφάνιση ισχυρών πυρκαγιών, οι οποίες μάλιστα εκδηλώνονται με σφοδρότητα κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών, αλλά και τα έντονα πλημμυρικά φαινόμενα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα των καταστροφών αυτών είναι κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας οι φονικές πλημμύρες στην Μάνδρα Αττικής, η πυρκαγιά στο Μάτι που εξελίχθηκε σε τραγωδία, καθώς επίσης και οι πλημμύρες της Θεσσαλίας που προξένησαν σημαντικά μεγάλες καταστροφές.

Πέρα όμως από τα ακραία καιρικά φαινόμενα, με την κλιματική αλλαγή σχετίζονται φαινόμενα τα οποία και εξελίσσονται με βραδύτερο ρυθμό, όπως είναι για παράδειγμα η απώλεια της βιοποικιλότητας που απαντάται, η ερημοποίηση, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας κτλ. Επιπρόσθετα, το πρόβλημα λειψυδρίας που απαντάται ιδίως στις νησιωτικές περιοχές σχετίζεται άμεσα με την κλιματική αλλαγή, ενώ εντείνει τα προβλήματα σε μια σειρά τομέων της οικονομίας, όπως είναι ο κλάδος της γεωργίας, αλλά και του τουρισμού. Σημαντικό είναι και το γεγονός ότι πέρα από τον κλάδο της οικονομίας, η κλιματική αλλαγή δημιουργεί προβλήματα και στην υγεία και ευημερία των πολιτών και ιδίως στις περισσότερες ευάλωτες ομάδες του πληθυσμού.

Σύμφωνα με σχετική μελέτη-εκτίμηση που πραγματοποιήθηκε από την Τράπεζα της Ελλάδος, οι σοβαρές επιπτώσεις που δημιουργούνται εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής

μπορούν να κοστολογηθούν ακόμη και σε 700 δισεκατομμύρια ευρώ, έχοντας ως χρονικό ορίζοντα το 2100. Η μεγάλη ένταση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής διαπιστώνεται και από το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών και συγκεκριμένα το 2021, στην Ελλάδα έγιναν οι περισσότερες ενεργοποιήσεις του Κέντρου Συντονισμού Αντιμετώπισης Έκτακτης Ανάγκης (Copernicus EMS) (Ντάφης, 2022).

## **2.5 Μέτρα που έχουν ληφθεί για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής (Κόσμος-Ευρώπη-Ελλάδα)**

Παγκοσμίως, ιδίως κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και προς την κατεύθυνση αυτή λαμβάνονται πρωτοβουλίες από υπερεθνικούς φορείς, όπως επίσης και από επιμέρους κράτη. Στο πλαίσιο αυτό, θα πρέπει να γίνει αναφορά στην σχετική πρόβλεψη που υπάρχει για το κλίμα στους 17 Παγκόσμιους Στόχους που έχουν τεθεί για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη (Sustainable Development Goals). Ωστόσο, πέρα από αυτόν τον στόχο, το ζήτημα της κλιματικής αλλαγής συνδέεται με όλους τους στόχους που έχουν τεθεί, καθώς με κάποιο τρόπο, άμεσα ή έμμεσα, οι επιμέρους δραστηριότητες επιδρούν στην κλιματική αλλαγή (Felipe et al., 2023). Ειδικότερα, ο Στόχος 13 αφορά τη Δράση για το Κλίμα και αποσκοπεί στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας και της προσαρμοστικής ικανότητας όλων των χωρών, απέναντι στους κινδύνους και στις φυσικές καταστροφές, οι οποίες και απορρέουν από την κλιματική αλλαγή. Ακόμη, ο εν λόγω στόχος περιλαμβάνει την ενσωμάτωση των μέτρων για την κλιματική αλλαγή, όπως επίσης και για τις εθνικές πολιτικές, στρατηγικές και τους σχεδιασμούς. Τέλος, ο στόχος αυτός περιλαμβάνει την βελτίωση της εκπαίδευσης, της ευαισθητοποίησης, όπως επίσης και της ανθρώπινης, αλλά και της θεσμικής ικανότητας αναφορικά με τα ζητήματα που σχετίζονται με τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, την προσαρμογή, την μείωση των επιπτώσεων, αλλά και την έγκαιρη προειδοποίηση (Ίδρυμα Μποδοσάκη, 2022).

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι πέρα από τις διεθνείς πρωτοβουλίες, που έχουν αναληφθεί σχετικά με τον μετριασμό και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει προβεί στην διαμόρφωση ενός κατάλληλου πλαισίου, για την αντιμετώπιση, αλλά και την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή. Από τις πλέον σημαντικές και ενδιαφέρουσες πρωτοβουλίες ήταν η θέσπιση της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας, που έλαβε χώρα το 2019. Ουσιαστικά, πρόκειται για ένα σύνολο

πρωτοβουλιών, μέσω των οποίων επιδιώκεται να επιτευχθεί κλιματική ουδετερότητα, έχοντας ως χρονικό ορίζοντα το έτος 2050.

Υπό το πρίσμα της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας έχει διαμορφωθεί ο Ευρωπαϊκός Κλιματικός Νόμος, στον οποίο περιλαμβάνονται και θεσμικοί στόχοι για την ενίσχυση της οικονομίας, έναντι του κλιματικού κινδύνου. Ειδικότερα, στον Κλιματικό Νόμο αναγνωρίζεται η σημασία της προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή μεταξύ των κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ωστόσο, δεν θα πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός ότι η Ε.Ε. εδώ και περισσότερο από μια δεκαετία έχει διαμορφώσει την πρώτη στρατηγική της, η οποία επικεντρώνεται στην κλιματική αλλαγή, ενώ έκτοτε η στρατηγική αυτή έχει υποστεί αναθεώρηση, συνεκτιμώντας και το γεγονός ότι οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής επηρεάζουν τόσο την οικονομία, όσο και την κοινωνία. Η στρατηγική της Ε.Ε. για προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή λειτουργεί κατά κύριο λόγο συμπληρωματικά με τη στρατηγική που αφορά τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, αλλά και συμπληρωματικά ως προς τους στόχους που έχουν τεθεί και αφορούν στην κλιματική ουδετερότητα (IOBE, 2023). Ιδιαίτερη αναφορά θα πρέπει να γίνει στην ευρωπαϊκή ταξινομία, η οποία συνδέεται με τις πράσινες και βιώσιμες δραστηριότητες, επιδιώκοντας να δημιουργηθούν και να συντηρηθούν περιβαλλοντικά βιώσιμες και οικονομικές δραστηριότητες. Απώτερος στόχος της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι η αύξηση των βιώσιμων επενδύσεων, στο πλαίσιο και εφαρμογής της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας. Στην Εικόνα 2 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι προτεραιότητες της ευρωπαϊκής ταξινομίας.



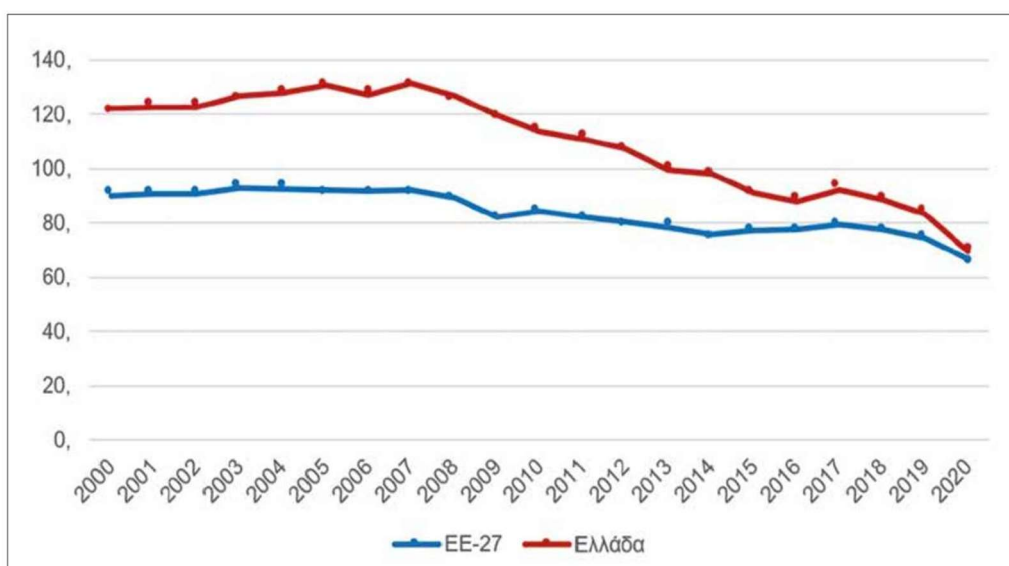
*Εικόνα 2.2: Προτεραιότητες ευρωπαϊκής ταξινόμησης - EU Taxonomy*

Τα επιμέρους κράτη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, προκειμένου να είναι σε θέση να εφαρμόσουν πολιτικές που έχουν θεσπιστεί διεθνώς, όπως για παράδειγμα είναι η Συμφωνία των Παρισίων, αναπτύσσουν εθνικά σχέδια, τα οποία και επιδιώκουν να συμβάλλουν στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, αλλά ταυτόχρονα και να αξιοποιήσουν με τρόπο αποτελεσματικό τις συνέπειες αυτής. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι περισσότερο από το 80% των κρατών σε παγκόσμιο επίπεδο έχουν προβεί στην δημιουργία κάποιου είδους εθνικού σχεδίου, το οποίο αφορά την κλιματική αλλαγή, είτε έχουν εφαρμόσει σχετική πολιτική προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή, με το ποσοστό αυτό να αυξάνεται κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών.

Ωστόσο, υπάρχουν κάποιες χώρες οι οποίες δεν έχουν σχεδιάσει κάποια σχετική πολιτική, όπως για παράδειγμα είναι ορισμένες χώρες της Ασίας και της Μέσης Ανατολής, οι οποίες είναι και περισσότερο ευάλωτες απέναντι στην κλιματική αλλαγή και κρίση.

Όσον αφορά την Ελλάδα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι μέχρι πρότινος τουλάχιστον υπήρχε μεγάλη εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα (εξάρτηση από το πετρέλαιο και τον άνθρακα), με αποτέλεσμα να υπάρχει και υψηλό επίπεδο έντασης άνθρακα της ελληνικής οικονομίας. Ωστόσο, σίγουρα τα τελευταία χρόνια, εν μέσω

οικονομικής κρίσης, το εθνικό κλιματικό αποτύπωμα περιορίστηκε. Η πιο σημαντική πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου είναι ο τομέας της ενέργειας, ενώ στην δεύτερη θέση κατατάσσονται οι μεταφορές, καθώς και οι τομείς της γεωργίας και των αποβλήτων. Ενδιαφέρον έχει και το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών στην Ελλάδα υπήρξε μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 1/3, σε σχέση με τα αντίστοιχα επίπεδα του 1990. Στην Εικόνα 3 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η εξέλιξη της πορείας των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά την περίοδο 2002 έως και 2019 (Ίδρυμα Μποδοσάκη, 2022).



Εικόνα 2.3: Εξέλιξη εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (2002-2019)

Η Ελλάδα, λοιπόν, ακολουθώντας τις διεθνείς τάσεις, όπως επίσης και τις αντίστοιχες επιταγές της Ευρωπαϊκής Ένωσης, έχει προβεί στην διαμόρφωση της Εθνικής Στρατηγικής για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή, ενώ έχει θεσπίσει και τον Εθνικό Κλιματικό Νόμο. Το 2016 θεσπίστηκε η εν λόγω στρατηγική, ενώ δέκα χρόνια μετά και, πιο συγκεκριμένα, το 2026 προβλέπεται να υπάρξει αναθεώρηση αυτής. Επιπρόσθετα, η στρατηγική αυτή εξειδικεύεται περαιτέρω σε δεκατρία Περιφερειακά Σχέδια για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή, τα οποία αντιστοιχούν στις δεκατρείς Περιφέρειες της χώρας. Προκειμένου να εφαρμοστούν οι στρατηγικές αυτές, η χώρα χρησιμοποιεί ευρωπαϊκούς, αλλά και εθνικούς πόρους, αντλώντας χρήματα για παράδειγμα από το ΕΣΠΑ, όπως επίσης και από άλλα χρηματοδοτικά εργαλεία, όπως είναι την περίοδο αυτή το Ταμείο Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας, ενώ προβλέπεται και χρηματοδότηση δράσεων από το Εθνικό Πρόγραμμα Ανάπτυξης (ΕΠΑ) 2021-2025 (IOBE, 2023).

Με τον Ν. 4414/2016 θεσπίστηκε η Εθνική Στρατηγική για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή, που ήταν και η πρώτη εθνική στρατηγική που εφάρμοσε η χώρα. Στην στρατηγική αυτή επισημαίνονται οι προκλήσεις, καθώς επίσης και οι κίνδυνοι που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή, σε επιμέρους κλάδους της οικονομίας. Η στρατηγική αυτή στηρίχθηκε σε τρεις βασικούς πυλώνες, οι οποίοι είναι οι ακόλουθοι (Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας & Κλιματικής Αλλαγής, 2016).

- Βελτίωση της γνώσης αναφορικά με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.
- Εφαρμογή συστημάτων παρακολούθησης των εξελίξεων του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής και των επιδράσεων που αυτή δημιουργεί στην ελληνική οικονομία.
- Ανάδειξη των καλών πρακτικών, οι οποίες μπορούν να συμβάλλουν στην βελτίωση της ανθεκτικότητας της ελληνικής οικονομίας, εστιάζοντας τις προκλήσεις που δημιουργούνται λόγω της κλιματικής αλλαγής.

Ιδιαίτερη μνεία θα πρέπει να γίνει στους τομείς που πρόκειται να επηρεαστούν περισσότερο λόγω της κλιματικής αλλαγής. Οι πλέον σημαντικοί τομείς, όπως αυτοί έχουν αναγνωριστεί από την εθνική πολιτική αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής, απεικονίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

*Πίνακας 2-1 Τομείς της οικονομίας που πρόκειται να πληγούν περισσότερο στην Ελλάδα εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής*

Γεωργία-Κτηνοτροφία	Υδάτινοι Πόροι
Δασικά Οικοσυστήματα	Παράκτιες Ζώνες
Βιοποικιλότητα-Οικοσυστήματα	Τουρισμός
Αλιεία	Υδατοκαλλιέργειες
Εξορυκτική Βιομηχανία	Πολιτιστική Κληρονομιά
Υγεία	Δομημένο Περιβάλλον
Ενέργεια	Υποδομές-Μεταφορές
Ασφαλιστικός Τομέας	

## **3 Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στα οδοστρώματα**

### **3.1 Γενικά**

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στα οδοστρώματα. Πιο αναλυτικά, μελετώνται τα οδοστρώματα και τα είδη αυτών (Εικόνα 5), όπως επίσης και τα οι περιβαλλοντικοί παράγοντες που συνδέονται με τα οδοστρώματα. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται για τα ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως επίσης και για τις επιπτώσεις αυτών στα οδοστρώματα. Τέλος, διερευνώνται αναλυτικά οι επιπτώσεις που προκαλούνται στα οδοστρώματα εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής.

### **3.2 Οδοστρώματα και είδη οδοστρωμάτων**

Αρχικά θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα οδοστρώματα αποτελούν βασικό στοιχείο της σύγχρονης υποδομής, καθώς διαδραματίζουν σημαίνοντα ρόλο στη λειτουργία του οδικού δικτύου, προσφέροντας ασφάλεια, άνεση, όπως επίσης και υψηλό επίπεδο αποτελεσματικότητας στις μετακινήσεις. Ουσιαστικά, πρόκειται για μια δομή, της οποίας η επιφάνεια έρχεται σε άμεση επαφή με τα φορτία των οχημάτων, όπως επίσης και με τους πεζούς, ενώ επιδρά καθοριστικά στην ποιότητα της κυκλοφορίας, καθώς και στην αντοχή του ίδιου του δικτύου.

Σχετικά με την έννοια του οδοστρώματος, πρόκειται για μια δομή, η οποία και κατασκευάζεται από διάφορες στρώσεις με διαφορετικά υλικά, ενώ έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο που αντέχει τις πιέσεις από την κυκλοφορία των οχημάτων, αλλά και από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Βασική επιδίωξη κατά την κατασκευή των οδοστρωμάτων είναι να παρέχουν ομαλή, ασφαλή, καθώς επίσης και ανθεκτική επιφάνεια κυκλοφορίας, έτσι ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν κατάλληλα τα οχήματα. Ταυτόχρονα, επιδιώκεται να υπάρχει ελαχιστοποίηση της φθοράς που προκαλείται εξαιτίας των διαφόρων καιρικών συνθηκών που επικρατούν, αλλά και λόγω της επαναλαμβανόμενης φόρτισης. Εξίσου σημαντικό είναι τα οδοστρώματα να έχουν σχεδιαστεί με τον κατάλληλο τρόπο, έτσι ώστε να αποτρέπεται η συσσώρευση νερού, αλλά και να εξασφαλίζεται η κατάλληλη πρόσφυση για τα οχήματα.

Τα οδοστρώματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν, ανάλογα με τα υλικά κατασκευής, καθώς επίσης και ανάλογα με τη χρήση τους. Στο Σχήμα 4 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι κυριότεροι τύποι των οδοστρωμάτων, ενώ αναλύονται στη συνέχεια.



*Εικόνα 3.1: Κυριότεροι τύποι Οδοστρωμάτων*

Ειδικότερα, τα εύκαμπα οδοστρώματα είναι και τα πλέον χρησιμοποιούμενα είδη σε δρόμους, εθνικούς οδούς, όπως επίσης και σε αστικές περιοχές. Η δομή των οδοστρωμάτων αυτών (Εικόνα 6) αποτελείται από δύο ομάδες στρώσεων, με διαφορετική συμπεριφορά και διαφορετικές ιδιότητες: Η μία ομάδα, που εδράζεται πάνω στο υπέδαφος, αποτελείται από ασύνδετα αδρανή και η άλλη ομάδα, που εδράζεται πάνω από την προηγούμενη ομάδα αποτελείται από ασφαλτόμιγμα. Ο διαχωρισμός αυτός βασίζεται στη διαφορετική συμπεριφορά των δύο ομάδων ως προς τη μηχανική τους ιδιότητα και επιπλέον χρησιμοποιείται ως βάση για άλλους είδους μεθοδολογίες. Αυτού του είδους τα οδοστρώματα αποτελούνται από διάφορες στρώσεις (από θραυστά αδρανή υλικά). Πρέπει να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να παραληφθεί η κατασκευή της βάσης και της υπόβασης, ενώ σε περιπτώσεις που διαπιστώνεται ότι υπάρχει ασθενές υπέδαφος, τότε ενδέχεται να κατασκευαστεί μία επιπλέον στρώση (μεταξύ υποβάσεως και υπεδάφους).

Επίσης, τα οδοστρώματα αυτά είναι βασικά να είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά, ώστε να αντέχουν κάθετα φορτία από βασικά και μη οχήματα, καθώς και να αντέχουν σε ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι και το γεγονός ότι το συγκεκριμένο είδος οδοστρώματος μπορεί να κατασκευαστεί με μεγάλη ταχύτητα, ενώ όταν απαιτούνται επιδιορθώσεις λόγω φθοράς και αυτές μπορούν να γίνουν με μεγάλη ταχύτητα και ευκολία. Σύμφωνα με τον Κοφίτσα (2006), κατά τη σύνθεση χρειάζεται για τα συγκεκριμένα οδοστρώματα χρειάζεται να εξασφαλίζεται η αντοχή του, με τη σωστή τοποθέτηση των στρώσεων στα οδοστρώματα, κάτι που γίνεται με αύξουσα φέρουσα ικανότητα με φορά προς τα πάνω από το έδαφος, έτσι ώστε να μην προκαλούνται

προβλήματα (Κοφίτσας 2006).



*Εικόνα 3.2: Δομή εύκαμπτου οδοστρώματος*

Όσον αφορά στα δύσκαμπτα οδοστρώματα (γνωστά, αλλιώς και ως άκαμπτα), αυτά κατασκευάζονται από σκυρόδεμα, το οποίο προσφέρει μια μεγαλύτερη αντοχή από τα εύκαμπτα, όπως επίσης και μακροχρόνια διάρκεια ζωής. Όπως χαρακτηριστικά τονίζει ο Νικολαΐδης (2011), τα οδοστρώματα αυτά χαρακτηρίζονται από μεγάλη ακαμψία (σε αντίθεση με τα εύκαμπτα) κι οι καθιζήσεις που πιθανώς μπορεί να εμφανιστούν σε αυτά δεν αντανakλώνται στην επιφάνεια κύλισης, ωστόσο μετά από κάποιο διάστημα ενδέχεται να φανούν κάποιες ρωγμές (Νικολαΐδης, 2011).

Το δύσκαμπτο οδοστρώμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές που υπόκεινται σε μεγάλα στατικά φορτία όπως σταθμούς διοδίων ή βιομηχανικούς χώρους, είτε σε συνθήκες όπου εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών τα ασφαλιστικά οδοστρώματα παρουσιάζουν προβλήματα. Ωστόσο, σημαντικό μειονέκτημα του συγκεκριμένου τύπου οδοστρώματος είναι το υψηλό κόστος κατασκευής, σε σχέση με τα εύκαμπτα οδοστρώματα. Παρ' όλα αυτά, ο τύπος αυτός οδοστρώματος προσφέρει μια περισσότερο μόνιμη λύση, η οποία χαρακτηρίζεται και από μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, προσφέρει καλύτερη ορατότητα το βράδυ και έχει συγκριτικά λιγότερο κόστος συντήρησης (Jain, 2016).

Πέραν των βασικών τύπων οδοστρωμάτων, υπάρχουν και ειδικές κατηγορίες οδοστρωμάτων, όπως τα λιθόστρωτα οδοστρώματα. Τα υπόψη οδοστρώματα κατασκευάζονται με φυσικά υλικά, όπως είναι η πέτρα ή οι πλάκες, σε περιοχές που παρουσιάζουν αισθητική αξία, όπως για παράδειγμα είναι ιστορικές περιοχές, είτε σε τουριστικές ζώνες. Παρά το γεγονός ότι τα πλακόστρωτα οδοστρώματα παρουσιάζουν

υψηλή αισθητική αξία, καθώς και φυσική εμφάνιση, η συντήρηση αυτών είναι ιδιαίτερα απαιτητική, ενώ η φθορά των πλακών μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη χρήση τους. Επίσης, τα οδοστρώματα της κατηγορίας αυτής διακρίνονται για την υψηλή ανθεκτικότητά τους σε βαριά φορτία, ενώ διακρίνονται και για την εξαιρετική τους αντίσταση στην φθορά που προκύπτει από καιρικές συνθήκες.



*Εικόνα 3.3: Πλακιδωτών οδόστρωμα*

Για την επιλογή του κατάλληλου τύπου οδοστρώματος λαμβάνονται υπόψη ορισμένοι παράγοντες, με τους πλέον σημαντικούς να απεικονίζονται στο σχήμα που ακολουθεί και αναλύονται ακολούθως.



*Εικόνα 3.4: Παράγοντες επιλογής του κατάλληλου οδοστρώματος*

Ειδικότερα, όσον αφορά το είδος κυκλοφορίας, θα πρέπει να αναφερθεί ότι για δρόμους όπου απαντάται υψηλή κυκλοφορία βαρέων οχημάτων, προτιμώνται περισσότερο ανθεκτικά υλικά, όπως είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα. Τα εύκαμπτα χρησιμοποιούνται κυρίως σε τοπικές οδούς, εθνικές και αυτοκινητόδρομους. Τα δύσκαμπτα σε διόδους, θέσεις στάθμευσης, τροχόδρομους και σε θέσεις στάθμευσης αεροσκαφών. Τα ημι-εύκαμπτα σε αυτοκινητόδρομους με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο βαρέων οχημάτων, όπου η κατασκευή εύκαμπτου οδοστρώματος είναι ασύμφορη, λόγω αυξημένου πάχους ασφαλτικών στρώσεων.

Οι καιρικές συνθήκες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην επιλογή του οδοστρώματος, καθώς ορισμένοι τύποι οδοστρωμάτων παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση σε ζεστό ή ψυχρό κλίμα. Για παράδειγμα, το εύκαμπτο οδόστρωμα δύναται να έχει μεγαλύτερη φθορά εξαιτίας της ζέστης, ενώ από τη άλλη, το δύσκαμπτο οδόστρωμα παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή.

Αναφορικά με την συντήρηση και τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος, ο κάθε τύπος οδοστρώματος παρουσιάζει διαφορετικές ανάγκες συντήρησης. Έτσι, τα εύκαμπτα οδοστρώματα χρειάζονται συχνότερη συντήρηση εξαιτίας της διάβρωσης, είτε λόγω της δημιουργίας ρωγμών, ενώ το δύσκαμπτο απαιτεί λιγότερη συντήρηση στο πέρασμα του χρόνου. Ωστόσο, η αντικατάσταση επιμέρους τμημάτων του είναι περισσότερο σύνθετη.

Τέλος, η κατασκευή ενός οδοστρώματος επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το κόστος των υλικών, καθώς και από την απαιτούμενη εργασία. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα εύκαμπτα οδοστρώματα είναι περισσότερο οικονομικά στην κατασκευή τους, ενώ τα δύσκαμπτα, έχουν μεγαλύτερο κόστος.

### **3.3 Οδοστρώματα και περιβαλλοντικοί παράγοντες**

Αναμφίβολα, το περιβάλλον επιδρά στα οδοστρώματα, γι' αυτό και ειδικά στις μέρες μας ακολουθούνται νέες κατασκευές, πιο σταθερές, ανάλογα και με τη γεωγραφική θέση μιας περιοχής, τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν, τον τύπο κυκλοφορίας που επικρατούν και άλλα στοιχεία. Αξίζει να επισημανθεί σε αυτό το σημείο ότι παλαιότερα πρότυπα που χρησιμοποιούνταν, δεν είναι κατάλληλα για τη σημερινή εποχή, λόγω της κλιματικής αλλαγής. Κατά συνέπεια, όπως ισχυρίζονται οι μελετητές, δεν μπορούν να ανταποκριθούν στις νέες συνθήκες του περιβάλλοντος όπως αυτές έχουν δημιουργηθεί, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται δυσμενείς συνέπειες, όπως αστοχίες, βλάβες, ρωγμές και άλλα προβλήματα. Για τους λόγους αυτούς, επίσης, εκτός από τους νέους τύπους οδοστρωμάτων, χρειάζεται να υπάρχει και συνεχής συντήρηση και επίβλεψη των οδοστρωμάτων, για να προλαμβάνονται προβλήματα και για να γίνονται οι ανάλογες επιδιορθώσεις όπου χρειάζεται. Σύμφωνα με τους Saleh & Hashemian (2022), υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επιφέρουν μία σειρά από προβλήματα και δυσμενείς επιπτώσεις στα οδοστρώματα, όπως οι ακραίες θερμοκρασίες, το λιώσιμο των πάγων, οι κατολισθήσεις, οι πλημμύρες, η ξηρασία κ.λπ.

Σε διάφορες χώρες στον κόσμο έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές σχετικές μελέτες για το ζήτημα αυτό. Πιο αναλυτικά, το 2022, στις ΗΠΑ, έγινε μία μελέτη από τους Underwood et al. (2017) για την αναβάθμιση του ασφαλτικού συνδετικού υλικού. Διαπιστώθηκε ότι ένα ποσοστό της τάξεως του 35%, με βάση δεδομένα προηγούμενων δεκαετιών, είναι διαφορετικό από τους βαθμούς συνδετικού υλικού με βάση τα δεδομένα μέχρι και το 2014 (Underwood et al., 2017). Το συμπέρασμα της εν λόγω μελέτης ήταν ότι τα σενάρια που εξετάστηκαν προέβλεπαν το πολύ δύο βαθμούς αλλαγής στις ΗΠΑ στο κλίμα για το μέλλον (Swarna & Hossain, 2022). Επίσης, από πολλούς μελετητές παρατηρήθηκε ότι η κλιματική αλλαγή έχει μεγαλύτερες δυσμενείς συνέπειες στα εύκαμπτα οδοστρώματα. Σε μια σχετική έρευνα που έγινε από το Πανεπιστήμιο του Waterloo, στον Καναδά, από τους μελετητές Mills et al. (2006) διαπιστώθηκε ότι η

μεταβολή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, η αύξηση των βροχοπτώσεων, καθώς και η αύξηση της κυκλοφορίας των οχημάτων αποτελούν παράγοντες που έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στα οδοστρώματα, επιδεινώνοντας περισσότερο τα εύκαμπτα (Mills et al., 2006). Σε μία άλλη έρευνα που έλαβε χώρα το 2021, οι Sarrouck et al., στο Μαρόκο, θέλησαν να ερευνήσουν ποιο είδος ασφάλτου μπορεί να ανταπεξέλθει καλύτερα στις κλιματικές συνθήκες της χώρας αυτής, που έχει υψηλές θερμοκρασίες αρκετούς μήνες του χρόνου. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι τα οδοστρώματα που μπορούν να ανταποκριθούν καλύτερα σε αυτές τις περιπτώσεις είναι η απλή ασφαλτος οδοστρωσίας (20/30 και 35/50), καθώς και η εμπλουτισμένη ασφαλτος με πολυμερή. Παράλληλα διαπιστώθηκε ότι για την αποφυγή άλλων θεμάτων, όπως οι αυλακώσεις, οι ρωγμές, αλλά και εν γένει για την προστασία του οδοστρώματος, ειδικά όταν η θερμοκρασία είναι υψηλή, είναι καλύτερα να χρησιμοποιείται η χρήση τροποποιημένης ασφάλτου (PMB) (Sarroukh et al., 2021). Πάνω στο ίδιο θέμα, και άλλοι μελετητές προτείνουν τη χρήση της τροποποιημένης ασφάλτου σε περιοχές που υπάρχουν αρκετά μεγάλα διαστήματα καύσωνα (Sarnowski et al., 2019).

### **3.4 Ακραία καιρικά φαινόμενα και επιπτώσεις αυτών στα οδοστρώματα**

Στην Ευρώπη, επίσης, έχουν γίνει πολλές έρευνες για να εκτιμηθούν όλοι οι παράγοντες που σχετίζονται με τις καιρικές συνθήκες, που επιφέρουν διάφορα προβλήματα στα οδοστρώματα, έτσι ώστε να γίνεται καλύτερος σχεδιασμός αλλά και καλύτερη κατασκευή στο μέλλον.

Για παράδειγμα στις βόρειες χώρες της ΕΕ χρειάζεται να υπάρχουν διαφορετικά είδη ασφάλτου σε σχέση για παράδειγμα με αυτά του Μαρόκου και άλλων περιοχών που έχουν ζέστη και καύσωνες. Πιο συγκεκριμένα, σε σχετική μελέτη του 2013, που πραγματοποιήθηκε από τους Wistuba & Walther, για τη Γερμανία και την Αυστρία, όσον αφορά στην απόδοση των οδοστρωμάτων σε διάφορες κλιματικές συνθήκες, διαπιστώθηκε ότι η ταχύτητα του ανέμου, καθώς και η θερμοκρασία επιδεινώνουν τυχόν ρωγμές, παραμορφώσεις και άλλα προβλήματα που ήδη υπάρχουν. Κατά συνέπεια, προτάθηκε η χρήση παγκόσμιων κλιματικών μοντέλων (γνωστά, αλλιώς, και ως GCMs) για τη σωστή αξιολόγηση όσον αφορά στην κατασκευή και στο σχεδιασμό οδοστρωμάτων, σύμφωνα με τα προβλήματα που εντόπισαν στις βόρειες αυτές χώρες της ΕΕ. Κατά συνέπεια, για τις

συγκεκριμένες χώρες, που έχουν αρκετούς μήνες με κρύο και παγετούς, προτάθηκε η αναβάθμιση στεγανοποιημένων οδοστρωμάτων, που είναι πιο ανθεκτικά σε παγετούς κ.λπ. (Wistuba & Walther, 2013).

### **3.5 Αλλαγές που προκαλούνται στη δομική αντοχή των υλικών των οδοστρωμάτων**

Τα οδοστρώματα αποτελούν από τα πλέον ευάλωτα στοιχεία των μεταφορικών δικτύων απέναντι στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Η δομή αυτών, η οποία αποτελείται από διάφορα υλικά, όπως είναι η ασφάλτος, το σκυρόδεμα, τα αδρανή και τα εδαφικά υλικά, υπόκειται σε μηχανικές και θερμοκρασιακές καταπονήσεις, οι οποίες επιδεινώνονται εξαιτίας της υψηλής μεταβλητότητας του κλίματος. Η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα τη μάλθωση της ασφάλτου, η οποία συνδέεται με μειωμένη φέρουσα ικανότητα και κατ' επέκταση με την εμφάνιση ρωγμών και παραμενουσών παραμορφώσεων. Η επαναλαμβανόμενη εμφάνιση αυτών των φαινομένων μειώνει τη διάρκεια ζωής των οδοστρωμάτων, ενώ συνάμα αυξάνει με εκθετικό βαθμό το κόστος συντήρησης και αποκατάστασης. Παράλληλα, σε περιοχές όπου το οδικό δίκτυο συνιστά βασική δίοδο πρόσβασης σε νοσοκομεία, σχολεία, είτε οικονομικές δραστηριότητες, η υποβάθμιση των οδοστρωμάτων έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται ζητήματα τόσο σε οικονομικό, όσο και σε κοινωνικό επίπεδο (Knott et al., 2019).

Από τα πλέον σημαντικά προβλήματα, τα οποία και καθιστούν απαραίτητη την προσαρμογή των οδοστρωμάτων στην κλιματική είναι η αβεβαιότητα που αφορά τις κλιματικές προβλέψεις. Η κατασκευή οδοστρωμάτων παραδοσιακά στηρίζεται σε μακροχρόνια κλιματικά δεδομένα, τα οποία σήμερα λόγω των κλιματικών μεταβολών που λαμβάνουν χώρα δεν θεωρούνται αξιόπιστα. Ουσιαστικά, τα υφιστάμενα πρότυπα σχεδιασμού δεν ανταποκρίνονται πλέον στις νέες συνθήκες και πρέπει να αναθεωρηθούν με βάση τις αναμενόμενες κλιματικές τάσεις, λαμβάνοντας υπόψη πλήθος διαφορετικών σεναρίων. Υπό το πρίσμα αυτό απαιτείται η αξιοποίηση σύγχρονων εργαλείων μοντελοποίησης, όπου για παράδειγμα μπορεί να αφορούν τις προσομοιώσεις καταιγίδων, μέσω των οποίων μπορεί να υπάρξει αποτελεσματικότερη εκτίμηση της ευπάθειας των υλικών σε συγκεκριμένες τοπικές συνθήκες, ενώ συνάμα προβλέπουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα πιθανά προβλήματα που απαντώνται (Qiao, 2015). Οι μελετητές Ktari et al.

(2021), χρησιμοποιώντας διάφορα μοντέλα (αμερικανικό και γαλλικό) απέδειξαν ότι τα οδοστρώματα καταπονούνται από τις κλιματικές επιδράσεις. Πιο συγκεκριμένα, μελέτησαν τα οδοστρώματα στη γαλλική πόλη Μπορντό μελέτησαν αν το πάχος του οδοστρώματα παίζει ρόλο, ενώ στο Κεμπέκ του Καναδά (που έχει πολύ κρύο) διερεύνησαν αν τα ασύνδετα υλικά που χρησιμοποιούνται στα οδοστρώματα επιβαρύνονται από κλιματικές συνθήκες (π.χ., υγρασία και άλλα). Τα αποτελέσματά τους και στις δύο περιπτώσεις έδειξαν ότι τα οδοστρώματα καταπονούνται και, κατ' επέκταση, προκαλούνται παραμορφώσεις κ.λπ. (Ktari et al., 2021).

Για την αντιμετώπιση τέτοιων καταστάσεων, που υπάρχουν σε διάφορα μέρη στον κόσμο όσον αφορά στα οδοστρώματα, προτάθηκαν διάφορες εναλλακτικές λύσεις, όπως αύξηση του πάχους των στρώσεων, χρήση πιο σκληρών συνδετικών υλικών, καθώς και άλλες προσθήκες όπου είναι απαραίτητο, όπως γεωφασμάτων. Παράλληλα, προτάθηκαν και άλλες στρατηγικές που αφορούσαν θέματα καλύτερης επίβλεψης και συντήρησης, καθώς και εναλλακτικές κατασκευές.

### **3.6 Επίπτώσεις εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής στα οδοστρώματα**

Πρέπει να τονιστεί ότι τα φαινόμενα αυτά του καιρού οδηγούν σε εμφάνιση διαφορετικών προβλημάτων στα οδοστρώματα σύμφωνα με την εκάστοτε κλιματική αλλαγή. Έτσι, όπως τονίζουν οι ίδιοι μελετητές, για παράδειγμα, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας επιφέρει περισσότερα προβλήματα για πλημμύρες που, όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, αποδυναμώνουν τα οδοστρώματα, όπως τη βάση και την υπόβασή τους, κάνοντάς τα πιο αδύναμα, ενώ την ίδια στιγμή δημιουργούνται και προβλήματα διαβρώσεων (Saleh & Hashemian, 2022). Επίσης, οι έντονες καταιγίδες μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα μείωσης ορατότητας, μεγάλη συσσώρευση νερού σε κάποια σημεία. Από την άλλη σε περιπτώσεις μεγάλου καύσωνα, τα οδοστρώματα και ειδικά τα εύκαμπτα παρουσιάζουν διάφορα προβλήματα όπως αυλακώσεις μεταξύ άλλων, ενώ στα δύσκαμπτα προκαλείται σε μια τέτοια περίπτωση διαστολή του σκυροδέματος. Επιπλέον, σε χώρες που υπάρχουν παγετοί και πολύ κρύο μπορεί να επηρεαστεί η ομαλή κατάσταση των οδοστρωμάτων, αλλά και η ανθεκτικότητά τους, ενώ μπορούν να προκληθούν και παραμορφώσεις του υπεδάφους (κάτι που βέβαια εξαρτάται πάντα και από το μέγεθος διεύθυνσης του παγετού στο υπέδαφος). Κατά συνέπεια διαπιστώνεται ότι η κλιματική αλλαγή επιφέρει προβλήματα διαφορετικά στα εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα

(Saleh & Hashemian, 2022).

## **4 Αντιμετώπιση και προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή**

### **4.1 Εισαγωγή**

Το κεφάλαιο αυτό επικεντρώνεται στην προσαρμογή των οδοστρωμάτων στην κλιματική αλλαγή. Ειδικότερα, αναδεικνύεται η ανάγκη χρήσης νέων τεχνολογιών και ανθεκτικότερων υλικών, καθώς και ο σχεδιασμός οδοστρωμάτων προσαρμοσμένων στις νέες κλιματικές συνθήκες με έμφαση στις πράσινες τεχνολογίες. Τέλος, διερευνάται ο ρόλος του θεσμικού πλαισίου και των κανονισμών στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας των υποδομών.

### **4.2 Αναγκαιότητα αντιμετώπισης και προσαρμογής της κλιματικής αλλαγής στα οδοστρώματα**

Αναμφίβολα, η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής δεν αποτελεί μία θεωρητική ανάγκη, αλλά συνιστά άμεση προτεραιότητα για τις σύγχρονες κοινωνίες, συνεκτιμώντας τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, οι οποίες και είναι ορατές στην καθημερινότητα, ιδίως στις υποδομές μεταφορών, αλλά και στα οδοστρώματα. Η διαρκής έκθεση των οδικών δικτύων σε διαρκώς μεταβαλλόμενες και συνάμα έντονες κλιματικές συνθήκες, όπως είναι για παράδειγμα οι παρατεταμένοι καύσωνες, οι έντονες βροχοπτώσεις, οι μεταβολές στην υγρασία του υπεδάφους, καθώς επίσης και οι απότομες εναλλαγές θερμοκρασίας, καθιστούν αναγκαία την επανεκτίμηση, αλλά και των ανασχεδιασμό των πολιτικών, των τεχνικών, αλλά και των οικονομικών στρατηγικών που συνδέονται με τη διαχείριση των υποδομών αυτών (Saleh & Hashemian,2022).

Παρά το γεγονός ότι ο αρχικός σχεδιασμός για την προσαρμογή των οδοστρωμάτων στις κλιματικές μεταβολές συνεπάγεται υψηλότερο κόστος, σε μακροπρόθεσμη βάση, αποδεικνύεται ότι είναι οικονομικά αποδοτικός. Ενδιαφέρον έχει το γεγονός ότι σύμφωνα με οργανισμούς όπως είναι η Παγκόσμια Τράπεζα, αλλά και ο ΟΟΣΑ (Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης), οι οποίοι και έχουν μελετήσει το θέμα, η πρόληψη μέσω ανθεκτικού σχεδιασμού θεωρείται έως και τέσσερις φορές πιο συμφέρουσα, σε σχέση με την αποκατάσταση ζημιών σε μελλοντικό χρόνο από την κατασκευή. Η εφαρμογή βιώσιμων τεχνικών, όπου για παράδειγμα μπορεί να περιλαμβάνει αποστραγγιστικά συστήματα ή σταθεροποιημένες βάσεις, έχει ως αποτέλεσμα να παρατείνεται η διάρκεια ζωής των οδοστρωμάτων, ενώ συνάμα μειώνονται

δραστικά οι λειτουργικές διακοπές του δικτύου. Επιπρόσθετα, η ελαχιστοποίηση των ζημιών από κλιματικά φαινόμενα αποτρέπει αλυσιδωτές επιπτώσεις στην οικονομία, όπως είναι οι καθυστερήσεις στη μεταφορά προϊόντων, η αυξημένη κατανάλωση καυσίμων λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης, καθώς και η αύξηση των ατυχημάτων εξαιτίας ολισθηρότητας ή ανωμαλιών στην επιφάνεια κύλισης (Swarna et al., 2022).

Εκτός από την τεχνική και οικονομική διάσταση, η ανάγκη για προσαρμογή επιδρά σημαντικά τόσο σε κοινωνικό, όσο και περιβαλλοντικό επίπεδο. Τα οδοστρώματα τα οποία καταστρέφονται συχνά από ακραία φαινόμενα πλήττουν σε δυσανάλογο βαθμό τις περισσότερο ευάλωτες κοινωνικές ομάδες, όπως είναι οι κάτοικοι των αγροτικών ή απομονωμένων περιοχών, οι ηλικιωμένοι, αλλά και οι άνθρωποι που αντιμετωπίζουν κινητικά προβλήματα. Η απώλεια προσβασιμότητας δύναται να οδηγήσει σε αποκλεισμό από υπηρεσίες, καθώς επίσης και από επιδείνωση της κοινωνικής ανισότητας. Ταυτόχρονα, η κλιματική προσαρμογή στα οδοστρώματα είναι αναγκαίο να ενσωματώνει και περιβαλλοντικές παραμέτρους όπως είναι η διατήρηση της βιοποικιλότητας, η ορθολογική χρήση των φυσικών πόρων, όπως επίσης και η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από τις εργασίες κατασκευής και συντήρησης. Η εφαρμογή «πράσινων» οδοστρωμάτων, τα οποία χρησιμοποιούν ανακυκλωμένα υλικά, διαπερατές επιφάνειες, αλλά και υδατοσυλλεκτικές τεχνολογίες, εξυπηρετεί αφενός τον μετριασμό, αφετέρου δε, την προσαρμογή της κλιματικής αλλαγής (Knott et al., 2019).

Ωστόσο, η προσαρμογή αυτή δεν μπορεί να επιτευχθεί χωρίς να υπάρχει σαφής στρατηγική υποστήριξη, τόσο σε πολιτικό, όσο και σε θεσμικό επίπεδο. Η ένταξη κλιματικών κριτηρίων στους κανόνες δημόσιων έργων, στα πρότυπα μελέτης και στους κανονισμούς τεχνικών προδιαγραφών θα μπορούσε να είναι προς την κατεύθυνση αυτή της προσαρμογής. Επιπλέον, απαιτείται θεσμοθέτηση μηχανισμών αξιολόγησης κινδύνου και παρακολούθησης απόδοσης των οδοστρωμάτων υπό μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες (Saleh & Hashemian, 2022).

Ιδιαίτερη αναφορά θα πρέπει να γίνει στο γεγονός ότι η Ελλάδα έχει κάνει ήδη σημαντικά βήματα προς την κατεύθυνση αυτή, όπως για παράδειγμα συμβαίνει μέσω της Εθνικής Στρατηγικής για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή (ΕΣΠΚΑ), η οποία αναγνωρίζει τις μεταφορές ως έναν από τους τομείς υψηλής τρωτότητας. Ωστόσο, η εφαρμογή της στρατηγικής αυτής παραμένει περιορισμένη σε πολλές περιοχές, εξαιτίας της έλλειψης εξειδικευμένου προσωπικού, αλλά και λόγω της έλλειψης χρηματοδοτικών

εργαλείων, αλλά ακόμη και διαδημοτικής συνεργασίας. Συνεπώς, θα πρέπει να υπάρξει ενδυνάμωση της διοικητικής ικανότητας, καθώς επίσης και ενσωμάτωση των περιβαλλοντικών κινδύνων στον αναπτυξιακό σχεδιασμό, δίνοντας έμφαση στην αξιοποίηση των κοινοτικών πόρων, αλλά και στην συμμετοχή των τοπικών κοινωνιών, αξιοποιώντας και σύγχρονα ψηφιακά εργαλεία, τα οποία και ενδυναμώνουν τη διαβούλευση.

Η επιτυχής αντιμετώπιση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα οδοστρώματα απαιτεί, πέρα από τεχνικές και θεσμικές παρεμβάσεις, και τη διαμόρφωση μιας νέας «κουλτούρας» μηχανικής και σχεδιασμού, με την κουλτούρα αυτή να στηρίζεται στις αρχές της αειφορίας. Προς την κατεύθυνση αυτή κρίσιμη θεωρείται η εκπαίδευση των μηχανικών και των τεχνικών στελεχών στη χρήση νέων υλικών, εργαλείων προσομοίωσης, αλλά και προτύπων σχεδιασμού, τα οποία και ενσωματώνουν τις κλιματικές διαστάσεις. Ταυτόχρονα, θα πρέπει να υπάρξει ενίσχυση της έρευνας και καινοτομίας, εστιάζοντας στη συνεργασία μεταξύ των πανεπιστημίων, των τεχνικών επιμελητηρίων, αλλά και του ιδιωτικού τομέα. Η ανάπτυξη «έξυπνων» οδοστρωμάτων που διαθέτουν αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας ή καταπόνησης, μπορεί να προσφέρει άμεση πληροφόρηση για τη συντήρηση, αλλά και να συμβάλλει στην πρόληψη των ζημιών. Ταυτόχρονα, η εφαρμογή Τεχνητής Νοημοσύνης, αλλά και Μηχανικής Μάθησης, μπορεί να οδηγήσει σε εντοπισμό των προτύπων φθοράς, προτείνοντας βέλτιστες λύσεις προσαρμογής ανά περιοχή, αλλά και ανά κλιματικό σενάριο που διαμορφώνεται (Saleh & Hashemian, 2022).

### **4.3 Χρήση νέων τεχνολογιών και ανθεκτικών υλικών**

Η διαρκώς αυξανόμενη ένταση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στις οδικές υποδομές και ιδίως στα οδοστρώματα έχει ως αποτέλεσμα να αναζητούνται διαρκώς τεχνολογικά καινοτόμα υλικά, αλλά και περισσότερο ανθεκτικές λύσεις. Η παραδοσιακή πρακτική σχεδιασμού και κατασκευής οδοστρωμάτων στηρίζεται σε σταθερές, ιστορικές κλιματικές συνθήκες, οι οποίες όμως δεν ισχύουν πλέον. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε ανάγκη υιοθέτησης νέων τεχνολογιών, υλικών και κατασκευαστικών τεχνικών που είναι ικανά να ανταποκριθούν στις σύγχρονες προκλήσεις που απορρέουν από την αύξηση της θερμοκρασίας, τις μεταβολές στην υγρασία του υπεδάφους, την ένταση των βροχοπτώσεων και τις εναλλαγές μεταξύ ξηρών και υγρών περιόδων κατά τη διάρκεια του έτους (Saleh & Hashemian, 2022).

Αναμφίβολα, η τεχνολογική καινοτομία μπορεί να συμβάλλει καθοριστικά στην αύξηση της διάρκειας ζωής των οδοστρωμάτων, όπως επίσης και στη βελτίωση της ανθεκτικότητας αυτών απέναντι στα ακραία φαινόμενα, ενώ σημαντικό είναι και το γεγονός ότι μπορεί να περιοριστεί το κόστος συντήρησης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι καινοτόμες λύσεις δεν σχετίζονται μόνο με την αντικατάσταση υλικών, αλλά και με τον εκσυγχρονισμό των μεθόδων σχεδιασμού, παρακολούθησης, αλλά και αξιολόγησης των κατασκευών. Για παράδειγμα, η χρήση ψηφιακών εργαλείων και μοντέλων πρόγνωσης συμπεριφοράς των υλικών υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες, επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας των οδοστρωμάτων στο χρόνο (Almeida & Picado-Santos, 2022).

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, ήδη σε αρκετές χώρες αξιοποιούνται τεχνολογίες όπως είναι η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI), καθώς και η ανάλυση Μεγάλων Δεδομένων (Big Data), μέσω των οποίων γίνεται πρόγνωση φθορών, αλλά και διαχείριση των κυκλοφοριακών φορτίων, καθώς και βελτιστοποίηση των εργασιών συντήρησης. Ταυτόχρονα, η χρήση αισθητήρων στο εσωτερικό των οδοστρωμάτων, δίνει τη δυνατότητα άμεσης ανίχνευσης παραμορφώσεων, ρωγμών, διαρροών ή υπερθέρμανσης, πριν ακόμη εμφανιστούν στην επιφάνεια του δρόμου.

Από τις πλέον σημαντικές πτυχές της προσαρμογής θεωρείται η ανάπτυξη και η χρήση υλικών, τα οποία και μπορούν να ανταπεξέλθουν σε νέες κλιματικές απαιτήσεις. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι πλέον σημαντικές καινοτομίες, οι οποίες και αναλύονται στη συνέχεια (Knott et al., 2019).



*Εικόνα 4.1: Σημαντικές καινοτομίες αντιμετώπισης και προσαρμογής των οδοστρώματων στη κλιματική αλλαγή*

Ειδικότερα, τα τροποποιημένα ασφαλτικά υλικά τα οποία περιλαμβάνουν πολυμερή παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την κοινή άσφαλτο, καθώς έχουν υψηλή θερμική αντοχή, μειωμένη ευαισθησία στην παραμόρφωση, αλλά και αυξημένη ελαστικότητα, γεγονός που οδηγεί σε μείωση του κινδύνου ρηγματώσεων. Η χρήση τροποποιημένων ασφαλτικών υλικών είναι διαδεδομένη σε χώρες με έντονα κλιματικά φαινόμενα, όπως για παράδειγμα είναι η Αυστραλία, οι Ηνωμένες Πολιτείες, καθώς επίσης και οι χώρες του Περσικού Κόλπου (Ismael et al., 2024).



*Εικόνα 4.2: Ασφαλτικό υλικό που περιέχει πολυμερή*

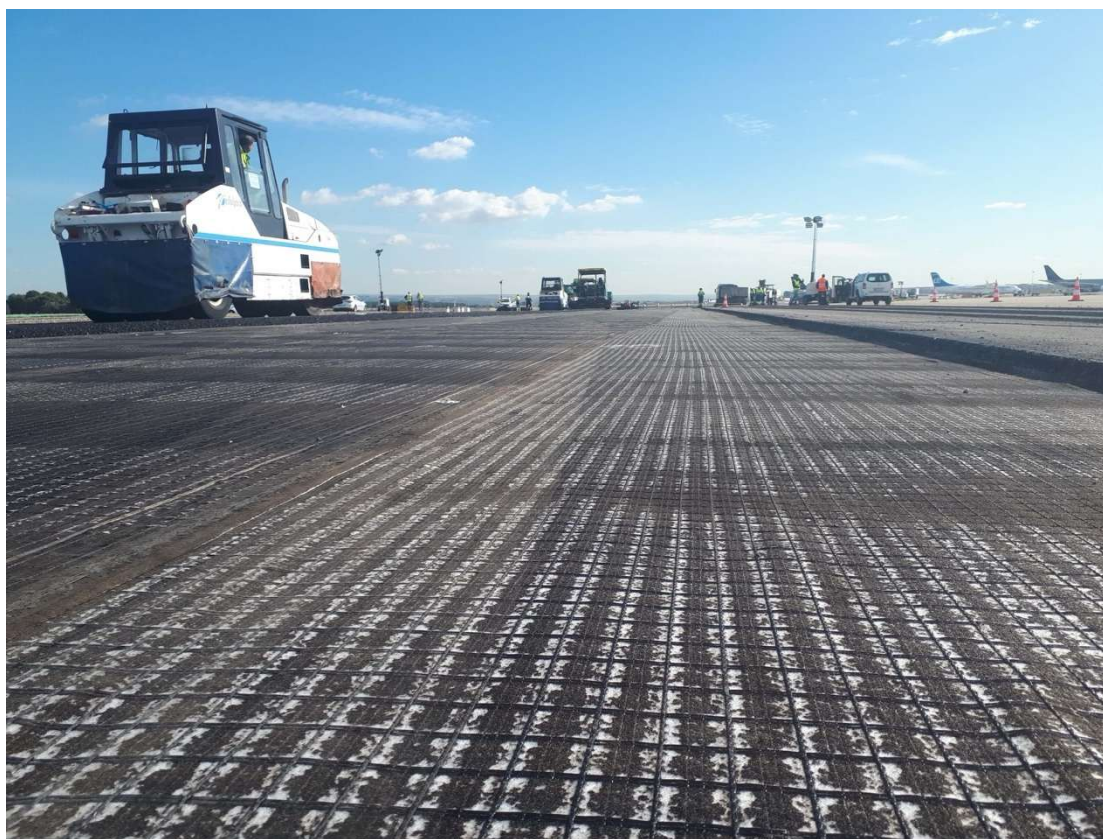
Περαιτέρω, το σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης αποτελεί μια επιλογή για περιοχές όπου απαντάται μεγάλος κυκλοφοριακός φόρτος, είτε υπάρχει υψηλή θερμική καταπόνηση. Προς την κατεύθυνση αυτή έχουν αναπτυχθεί νέα σύνθετα σκυροδέματα που είναι εμπλουτισμένα με νανοσωματίδια, ιπτάμενη τέφρα, είτε άλλα συμπληρωματικά υλικά, τα οποία και προσφέρουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα, έναντι της διάβρωσης, στους κύκλους παγετού-απόψυξης και στη διείδυση υγρασίας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η χρήση ινοπλισμένων σκυροδεμάτων, που προσφέρουν αυξημένη αντοχή σε θλίψη και κάμψη.

Επιπροσθέτως, η τάση για βιώσιμη ανάπτυξη οδηγεί στην αύξηση της χρήσης ανακυκλωμένων υλικών, όπως για παράδειγμα είναι η ανακυκλωμένη άσφαλτος τα ανακυκλωμένα ελαστικά, καθώς και τα υποπροϊόντα βιομηχανιών, όπως είναι οι σκωρίες, η ιπτάμενη τέφρα κτλ. Τα υλικά αυτά, εφόσον ενσωματωθούν κατάλληλα, οδηγούν σε βελτιωμένη απόδοση, περιορίζοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και προσφέροντας εναλλακτικές λύσεις χαμηλού κόστους, ιδίως σε έργα συντήρησης.

Τα γεωσυνθετικά υλικά, όπως είναι τα γεωφάσματα (Εικόνα 2), τα γεωπλέγματα, οι γεωμεμβράνες χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως για τη βελτίωση της σταθερότητας της

υπόβασης, όπως επίσης και για τον έλεγχο των διαρροών (π.χ., από διάτρηση), καθώς και για την αποστράγγιση. Ιδιαίτερα σε περιοχές με συχνές βροχοπτώσεις ή πλημμυρικά φαινόμενα, επιτρέπουν τη βελτίωση της απόδοσης του οδοστρώματος και την επιμήκυνση του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων.

Ιδιαίτερη μνεία θα πρέπει να γίνει στα αυτοθεραπευόμενα υλικά, όπου πρόκειται για μια καινοτόμο τεχνολογία, η οποία θεωρείται ότι βρίσκεται ακόμη σε πιλοτικό στάδιο. Τα υλικά αυτά περιέχουν μικροκάψουλες που περιλαμβάνουν ειδικές ουσίες, οι οποίες απελευθερώνονται όταν δημιουργείται ρωγμή, σφραγίζοντας το σημείο με τρόπο αυτόματο. Παρά το γεγονός ότι η εμπορική εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής είναι σε αρχικό στάδιο, δύναται να αποτελέσει σημαντική ευκαιρία για τη μείωση της ανάγκης επεμβατικής συντήρησης (Fleury et al., 2023).



*Εικόνα 4.3: Γεωφάσματα που χρησιμοποιούνται για την βελτίωση της σταθερότητας της ασφάλτου*

Στη σημερινή εποχή, η κλιματική αλλαγή έχει σημαντικές αρνητικές συνέπειες για τα οδοστρώματα (όπως για παράδειγμα στην περίπτωση των εύκαμπτων περισσότερο), με αποτέλεσμα να προκαλεί διάφορα προβλήματα. Για παράδειγμα, λόγω της αύξησης της

θερμοκρασίας, που είναι ένα φαινόμενο που παίρνει όλο και περισσότερες διαστάσεις στις μέρες μας, μειώνεται η διάρκεια ζωής των οδοστρωμάτων, καθώς και επηρεάζουν την απόδοσή τους, προκαλεί ρωγμές και άλλες αστοχίες.

Η ενσωμάτωση των τεχνολογιών της 4<sup>ης</sup> Βιομηχανικής Επανάστασης στον τομέα των μεταφορών επηρέασε την κατασκευή και διαχείριση των οδοστρωμάτων, ώστε αυτά να κατασκευάζονται με τέτοιον τρόπο ώστε να είναι πιο ανθεκτικά σε κάποιες καταστάσεις, όπως και στην περίπτωση της κλιματικής αλλαγής. Στο πλαίσιο αυτό εφαρμόζονται τα έξυπνα οδοστρώματα, που αποτελούν και μια καινοτομία σε παγκόσμιο επίπεδο, όπου ενσωματώνουν αισθητήρες, αλλά και συστήματα που παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο την κυκλοφορία, τη θερμοκρασία, την υγρασία, αλλά και τα δομικά φορτία που δέχεται η επιφάνεια. Τα συστήματα αυτά συλλέγουν δεδομένα, τα οποία αποστέλλονται σε κεντρικές βάσεις για ανάλυση, επιτρέποντας την πρόβλεψη φθοράς και την άμεση παρέμβαση πριν την εμφάνιση σοβαρών ζημιών (Volkon et al., 2024).

Κατά συνέπεια, η επιλογή υλικών και τεχνολογιών είναι βασικό να λαμβάνει υπόψη το τοπικό μικροκλίμα, τις ιδιαιτερότητες του υπεδάφους, τη συχνότητα κυκλοφορίας, αλλά και τον κίνδυνο εμφάνισης φυσικών φαινομένων, όπως είναι οι πλημμύρες, οι καθιζήσεις, καθώς επίσης και οι κατολισθήσεις. Κι αυτό διότι σήμερα τα φαινόμενα αυτά γίνονται όλο και πιο συχνά με αποτέλεσμα να καταπονούν τα οδοστρώματα. Για παράδειγμα, σε αστικές περιοχές όπου απαντάται υψηλή πυκνότητα πληθυσμού και υψηλές θερμοκρασίες, προτείνεται να χρησιμοποιούνται υλικά που παρουσιάζουν υψηλή ανακλαστικότητα, μέσω των οποίων περιορίζεται το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας. Ταυτόχρονα, μπορούν να αξιοποιηθούν διαπερατά υλικά, μέσω των οποίων επιτρέπεται η διήθηση των όμβριων υδάτων προς τον υδροφόρο ορίζοντα και έτσι περιορίζεται ο κίνδυνος πλημμυρών (Abbondati et al., 2021).

Από την άλλη, στις ορεινές περιοχές όπου είναι αρκετά σύνηθες να παρατηρούνται παγετοί, αλλά και υψηλή διακύμανση των θερμοκρασιών, είναι αναγκαίο να γίνεται χρήση σκυροδεμάτων με ειδικές προσμίξεις, είτε η χρήση ασφαλτικών υλικών, τα οποία και παρουσιάζουν αυξημένη ελαστικότητα, αλλά και συχνή αντοχή στον κύκλο ψύξης-απόψυξης. Περαιτέρω, στις παραθαλάσσιες ή νησιωτικές περιοχές, οι υψηλές συγκεντρώσεις αλατιού στην ατμόσφαιρα, αλλά και η υγρασία απαιτούν υλικά που παρουσιάζουν αυξημένη ανθεκτικότητα στη διάβρωση. Στις περιπτώσεις αυτές, ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην προστασία των υλικών από τη χημική επίδραση θαλάσσιων αλάτων

και κυρίως για τις μεταλλικές ενισχύσεις ή τα οπλισμένα σκυροδέματα.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση των νέων τεχνολογιών και υλικών και συμβάλλει στον περιβαλλοντικό μετασχηματισμό των οδοστρωμάτων, ώστε να είναι πιο ανθεκτικά στην κλιματική αλλαγή. Για παράδειγμα, ο σχεδιασμός «ψυχρών οδοστρωμάτων» μετριάξει τη θερμοκρασία του αστικού περιβάλλοντος, βελτιώνοντας τη δημόσια υγεία.

Παρά το γεγονός ότι σε διεθνές επίπεδο αναπτύσσονται διαρκώς καινοτομίες, στην Ελλάδα η εφαρμογή των νέων υλικών και τεχνολογιών στα οδοστρώματα μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ακόμη περιορισμένη. Ουσιαστικά, η χαμηλή αυτή ανάπτυξη συνδέεται με μια σειρά εμποδίων, όπως είναι η απουσία επικαιροποιημένων τεχνικών κανονισμών, οι οποίοι και ενσωματώνουν την κλιματική παράμετρο στον σχεδιασμό, όπως επίσης και η απουσία συμμόρφωσης μηχανικών και τεχνικών σε νέες τεχνολογίες υλικών. Εξίσου σημαντικό πρόβλημα δημιουργείται λόγω των χρονικών καθυστερήσεων που αφορούν τις εγκρίσεις και τις πιστοποιήσεις νέων υλικών, αλλά και ο ίδιος ο συντηρητικός χαρακτήρας των δημόσιων διαγωνισμών έργων, οι οποίοι και προτιμούν συχνά τυποποιημένες και φθηνότερες λύσεις. Ενδιαφέρον έχει το γεγονός ότι ήδη σε ορισμένα έργα εντάσσονται στις τεχνικές προδιαγραφές ασφαλτικά μίγματα με πολυμερή, ενώ δίνεται έμφαση και στα πιλοτικά έργα πράσινων οδοστρωμάτων. Ενδιαφέρον έχει και το γεγονός ότι η Εγνατία Οδός, αλλά και η Ολυμπία Οδός έχουν εντάξει έξυπνες τεχνολογίες παρακολούθησης σε επιλεγμένα τμήματα του δικτύου τους.

Εν κατακλείδι, η χρήση νέων τεχνολογιών και ανθεκτικών υλικών αποτελεί μια από τις βασικότερες συνιστώσες για την επιτυχή προσαρμογή των οδοστρωμάτων στην κλιματική αλλαγή. Οι λύσεις αυτές αποτελούν πλέον αναγκαιότητα, καθώς μπορούν να συμβάλλουν στην μείωση της φθοράς, καθώς και στην παράταση της διάρκειας ζωής των υποδομών, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα των επενδύσεων. Παράλληλα, συμβάλλουν στην ενεργειακή αποδοτικότητα, στην προστασία του περιβάλλοντος και στη διασφάλιση της κοινωνικής συνοχής, ιδίως σε περιοχές που είναι περισσότερο ευάλωτες στις επιπτώσεις της κλιματικής κρίσης (Volkov et al., 2024).

#### **4.4 Σχεδιασμός οδοστρωμάτων που είναι ανθεκτικά στις νέες κλιματικές συνθήκες που διαμορφώνονται**

Η εξέλιξη της κλιματικής αλλαγής επιβάλλει ριζικές αλλαγές όχι μόνο στα υλικά

και τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των οδοστρωμάτων, αλλά κυρίως στον τρόπο με τον οποίο αυτά σχεδιάζονται. Ο παραδοσιακός σχεδιασμός βασιζόταν σε σταθερές παραδοχές σχετικά με τις κλιματικές συνθήκες μιας περιοχής, λαμβάνοντας υπόψη ιστορικά μετεωρολογικά δεδομένα, όπως είναι η μέση θερμοκρασία, οι βροχοπτώσεις, καθώς και η υγρασία εδάφους. Ωστόσο, οι έντονες διακυμάνσεις του σημερινού κλίματος, με ακραία καιρικά φαινόμενα, απροσδόκητες θερμικές μεταβολές και αύξηση της έντασης των βροχοπτώσεων, καθιστούν τα υφιστάμενα πρότυπα ανεπαρκή και γενικά μη βιώσιμα.

Η έννοια της ανθεκτικότητας (resilience) αφορά την ικανότητα ενός συστήματος, όπου στην περίπτωση της παρούσας εργασίας είναι το οδόστρωμα, να αντέχει, να ανταποκρίνεται και να προσαρμόζεται σε μεταβολές και πιέσεις χωρίς να υπάρξει υποβάθμιση της λειτουργικότητας ή της ασφάλειάς του. Ένα ανθεκτικό οδόστρωμα έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να προλαμβάνει ή να ελαχιστοποιεί τη φθορά που προκαλείται από ακραίες συνθήκες, αλλά και να αποκαθίσταται γρήγορα έπειτα από καταπονήσεις. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το χαμηλό κόστος συντήρησης μακροπρόθεσμα, αλλά και η δυνατότητα παροχής ασφάλειας και άνεσης προς τους χρήστες σε όλη τη διάρκεια ζωής του. Η έννοια αυτή είναι θεμελιώδης στο σύγχρονο σχεδιασμό οδοστρωμάτων, διότι υπερβαίνει το τεχνικό πλαίσιο και, επιπλέον, συνδέεται με την έννοια της αειφορίας, της ανθεκτικότητας των πόλεων.

Η ανάγκη προσαρμογής στις νέες κλιματικές συνθήκες οδηγεί στην ανάπτυξη ενός νέου μοντέλου, του προσαρμοστικού σχεδιασμού. Ο σχεδιασμός αυτός χαρακτηρίζεται από τη χρήση μελλοντικών προβλέψεων και όχι μόνο ιστορικών στοιχείων, όπως επίσης και από την εκτίμηση κινδύνου και ευπάθειας της εκάστοτε περιοχής. Ιδιαίτερα σημαντική θεωρείται και η ευελιξία κατασκευής, έτσι ώστε να μπορούν να πραγματοποιηθούν επεμβάσεις, εφόσον τα κλιματικά δεδομένα αλλάζουν ταχύτερα από το αναμενόμενο. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό γίνεται σταδιακή εφαρμογή έργων, έχοντας τη δυνατότητα αξιολόγησης και προσαρμογής σε κάθε στάδιο. Ουσιαστικά, το νέο αυτό πρότυπο απαιτεί διεπιστημονική προσέγγιση, με τη συμμετοχή των κατάλληλων εμπλεκομένων, δηλαδή πολιτικών μηχανικών, μετεωρολόγων, περιβαλλοντολόγων, γεωτεχνικών, καθώς και συγκοινωνιολόγων.

Ξεχωριστή αναφορά θα πρέπει να γίνει στους παράγοντες σχεδιασμού ανθεκτικών οδοστρωμάτων. Ο σχεδιασμός οδοστρωμάτων που διατηρούν τη λειτουργικότητα και την

ασφάλειά τους υπό μεταβαλλόμενες καιρικές και κλιματικές συνθήκες απαιτεί την ενσωμάτωση συγκεκριμένων παραμέτρων, οι οποίες παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα και αναλύονται στη συνέχεια.



*Εικόνα 4.4: Παράγοντες σχεδιασμού ανθεκτικών οδοστρωμάτων*

Ειδικότερα, όσον αφορά στη θερμική αντοχή, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μάλθωση της ασφάλτου και εμφάνιση παραμενουσών παραμορφώσεων. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο αυτό είναι αναγκαίο ο σχεδιασμός να περιλαμβάνει ασφατικά μείγματα τροποποιημένα με πολυμερή, όπως επίσης και επιλογή χρωματιστών επιφανειών υψηλής ανακλαστικότητας, αλλά και θερμικές μονώσεις μεταξύ των στρώσεων. Περαιτέρω, οι έντονες βροχοπτώσεις και η απότομη απορροή νερού μπορούν να οδηγήσουν σε διάβρωση, καθίζηση ή καθαίρεση υλικών. Ο σχεδιασμός οφείλει να περιλαμβάνει συνεχή εγκάρσια και διαμήκη κλίση για απορροή, όπως επίσης και συστήματα επιφανειακής αποστράγγισης και υπόγειων αγωγών. Εξίσου σημαντική είναι η χρήση διαπερατών υλικών στην ανώτερη στρώση, όπως και η φύτευση βιολογικών φραγμάτων στα άκρα του οδοστρώματος για φιλτράρισμα ή καθυστέρηση της απορροής.

Περαιτέρω, όσον αφορά στην ενίσχυση της θεμελίωσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αυξημένη υγρασία, όπως επίσης και η εναλλαγή ξηρασίας/υγρασίας αποσταθεροποιούν την θεμελίωση, ιδίως σε αργιλικά εδάφη. Στο πλαίσιο αυτό, η

ανθεκτικότητα ενισχύεται μέσω της βελτίωσης του εδάφους, η οποία επιτυγχάνεται με σταθεροποίηση με τσιμέντο, ασβέστη, είτε ιπτάμενη τέφρα, ενώ σημαντική είναι η τοποθέτηση γεωφασμάτων για ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου. Ακόμη, ενίσχυση της ανθεκτικότητας επιτυγχάνεται μέσω διπλής στρώσης θεμελίωσης, χρησιμοποιώντας συμπιεσμένα υλικά μεταβλητής κοκκομετρίας (Saleh & Hashemian, 2022).

Σε περιοχές με κύκλους παγετού/απόψυξης, οι ρωγμές και οι αυλακώσεις της επιφάνειας είναι συχνές. Για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας στους παγετούς, ενδείκνυται η χρήση σκυροδεμάτων με αντοχή στον πάγο, η αποφυγή εγκλωβισμού νερού μεταξύ των στρώσεων και η πρόβλεψη αρμών διαστολής.

Σε κάθε περίπτωση, οι σχεδιαστικές πρακτικές θα πρέπει να προσαρμόζονται τοπικά και να διαφοροποιούνται μεταξύ των επιμέρους περιοχών. Η ανθεκτικότητα επιτυγχάνεται μόνο όταν λαμβάνεται υπόψη ο τοπικός κλιματικός χαρακτήρας. Πιο συγκεκριμένα, σε αστικά περιβάλλοντα δίνεται έμφαση σε επιφάνειες υψηλής ανακλαστικότητας και διαχείρισης της θερμότητας, ενώ σε ορεινές περιοχές όπου υπάρχει κύκλος παγετού-απόψυξης πρέπει να δίνεται έμφαση στην αποστράγγιση και στην ευστάθεια του υπεδάφους. Αντίστοιχα, σε παραθαλάσσιες περιοχές είναι αναγκαία η προστασία από χημική διάβρωση λόγω αλατιού και υγρασίας. Οι προσαρμογές αυτές πρέπει να ενσωματώνονται ήδη από το στάδιο της προκαταρκτικής μελέτης, ώστε το έργο να ανταποκρίνεται πραγματικά στις συνθήκες που θα κληθεί να αντιμετωπίσει καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του.

Η επιτυχία ενός ανθεκτικού οδοστρώματος δεν εξαρτάται μόνο από τα υλικά ή τα κατασκευαστικά πρότυπα, αλλά συνδέεται άμεσα και με τη μεθοδολογία αξιολόγησης της τρωτότητας και της προσαρμοστικότητας ικανότητας πριν από την υλοποίηση του έργου. Υπό το πρίσμα αυτό εφαρμόζονται εργαλεία όπως είναι το Life Cycle Cost Analysis (LCCA), όπου γίνεται εκτίμηση σε όλη τη διάρκεια της ζωής του έργου, λαμβάνοντας υπόψη την ανάγκη για συντήρηση εξαιτίας των κλιματικών επιβαρύνσεων. Επίσης, μπορεί να εφαρμοστεί και το Vulnerability Impact Assessment (VIA), όπου γίνεται χαρτογράφηση των σημείων ευαλωτότητας του έργου, όπου ουσιαστικά αξιολογούνται παράμετροι όπως είναι οι κλίσεις, οι υδατορροές, τα εδάφη υψηλού κινδύνου καθίζησης και προτείνονται εναλλακτικές σχεδιαστικές λύσεις. Ακόμη, χρησιμοποιούνται stress testing σε μοντέλα προσομοίωσης, προκειμένου να υπάρξει προσομοίωση ακραίων φαινομένων και έτσι να διαπιστωθεί η ανταπόκριση του υπό σχεδίαση οδοστρώματος στις συνθήκες αυτές. Τέλος,

σημαντικός είναι και ο ρόλος των εργαλείων γεωγραφικής ανάλυσης, τα οποία λειτουργούν σε συνδυασμό με κλιματικές βάσεις δεδομένων, έτσι ώστε να υπολογιστεί η καταπόνηση ανά περιοχή. Η αξιοποίηση αυτών των μεθόδων αυτών συμβάλλει σε έναν τεκμηριωμένο και ορθολογικό σχεδιασμό, μετριάζοντας το ρίσκο και διασφαλίζοντας την αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων (Asres et al., 2021).

Αρκετές χώρες, αλλά και περιφέρειες στο πέρασμα του χρόνου έχουν εφαρμόσει καινοτόμες προσεγγίσεις σχεδιασμού ανθεκτικών οδοστρωμάτων, με τις πρακτικές αυτές να μπορούν να αξιοποιηθούν από ποικίλες χώρες μεταξύ αυτών και από την Ελλάδα. Για παράδειγμα, στην Ολλανδία, όπου υπάρχει μεγάλη πιθανότητα πλημμυρικών φαινομένων, τα οδοστρώματα κατασκευάζονται από υπερυψωμένες βάσεις, έχοντας αυξημένη κλίση απορροής, αλλά και ενισχυμένα φρέατα αποστράγγισης. Ταυτόχρονα, έχει εφαρμοστεί πρότυπο που αφορά στα νέα έργα μεταφορών, σύμφωνα με το οποίο απαιτείται μελέτη προσαρμογής σύμφωνα με τα κλιματικά σενάρια έως και το 2100. Αντίστοιχα, στην περίπτωση του Καναδά και ιδίως στις βόρειες περιοχές της χώρας, όπου απαντώνται ισχυροί κύκλοι παγετού/απόψυξης, τα οδοστρώματα σχεδιάζονται με εύκαμπτες βάσεις και ειδικά στρώματα διαχωρισμού, τα οποία και αποτρέπουν την άνοδο του πάγου. Προκειμένου να γίνονται οι κατάλληλες προσαρμογές, υπάρχουν σχετικοί κώδικες ανά περιοχή που εφαρμόζονται από τους μηχανικούς.

Περαιτέρω, στην Αυστραλία, οι αυξημένες θερμοκρασίες στα αστικά κέντρα οδήγησαν στην ανάπτυξη ασφαλικών επιφανειών υψηλής ανακλαστικότητας, οι οποίες μειώνουν τη θερμοκρασία κατά 8-10°C σε σχέση με την κλασική άσφαλο, αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής του υλικού. Από την άλλη, στο Ηνωμένο Βασίλειο, κατόπιν σχετικής κατεύθυνσης της Εθνικής Υπηρεσίας Μεταφορών, η συντήρηση των οδοστρωμάτων στηρίζεται στην πρόγνωση καιρού και στους αισθητήρες καταπόνησης. Επομένως, τα έργα προγραμματίζονται πριν την ραγδαία υποβάθμιση της κατάστασης του οδοστρώματος, γεγονός που περιορίζει την κυκλοφοριακή επιβάρυνση (Babashamsi et al., 2016).

Η Ελλάδα, λόγω γεωγραφικής ποικιλομορφίας και ιδιαιτεροτήτων ανά περιφέρεια, αντιμετωπίζει πλήθος προκλήσεων στη διαχείριση των οδικών της υποδομών. Οι θερμοκρασιακές κορυφώσεις το καλοκαίρι, η έντονη βροχόπτωση το φθινόπωρο και η υψηλή σεισμικότητα σε ορισμένες περιοχές δημιουργούν ένα πολύπλοκο περιβάλλον για τον σχεδιασμό ασφαλών και ανθεκτικών οδοστρωμάτων. Επιπλέον, η γήρανση πολλών τμημάτων του εθνικού και επαρχιακού οδικού δικτύου επιβάλλει άμεσες παρεμβάσεις,

εστιάζοντας στη βιωσιμότητα. Στο πλαίσιο αυτό απαιτείται να υπάρξει επικαιροποίηση των Τεχνικών Προδιαγραφών Έργων Οδοποιίας, όπου θα πρέπει να υπάρχει και υποχρεωτική πρόβλεψη σεναρίων κλιματικής επιβάρυνσης. Παράλληλα, είναι αναγκαίο να χρησιμοποιούνται εργαλεία εκτίμησης ρίσκου και τρωτότητας σε κάθε νέα μελέτη οδοποιίας, ενώ σημαντικός μπορεί να είναι ο ρόλος ανάπτυξης πιλοτικών έργων, ιδίως σε νησιωτικές, αλλά και ημιορεινές περιοχές, όπου επικρατούσες καιρικές συνθήκες είναι εντονότερες και οι επιπτώσεις είναι ταχύτερες. Επίσης, σημαντικό είναι να υπάρξει η κατάλληλη εκπαίδευση μηχανικών, αλλά και των τεχνικών υπηρεσιών που αφορούν την εκπόνηση μελετών που λαμβάνουν υπόψη την κλιματική διάσταση.

#### **4.5 Χρήση πράσινων τεχνολογιών**

Η χρήση πράσινων τεχνολογιών στον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη διαχείριση οδοστρωμάτων αποτελεί κρίσιμο πυλώνα της προσπάθειας για την προσαρμογή των υποδομών στις προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής, αλλά και για τη μετάβαση προς μια αειφόρο και περιβαλλοντικά φιλική ανάπτυξη. Οι πράσινες τεχνολογίες, στην περίπτωση των οδοστρωμάτων, αναφέρονται σε εκείνες τις τεχνολογικές πρακτικές και τα υλικά που επιτρέπουν τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας, αλλά και την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των κατασκευών, χωρίς να δημιουργούνται ζητήματα με την απόδοση και την ασφάλεια. Η εφαρμογή τέτοιων τεχνολογιών συμβάλλει όχι μόνο στον μετριασμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, μέσω μείωσης των εκπομπών και της ενεργειακής κατανάλωσης, αλλά και στην ενίσχυση της ικανότητας των οδοστρωμάτων να προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες.

Ο κατασκευαστικός τομέας, και ιδίως τα έργα οδοποιίας, συγκαταλέγονται στους σημαντικότερους καταναλωτές φυσικών πόρων και παραγωγούς εκπομπών CO<sub>2</sub>. Η παραγωγή σκυροδέματος και ασφαλτικού υλικού περιλαμβάνει ενεργοβόρες διαδικασίες, με εκπομπές που αγγίζουν τα 800-900 κιλά CO<sub>2</sub> ανά τόνο παραγόμενου υλικού. Παράλληλα, η εξόρυξη πρώτων υλών, η μεταφορά, η διάστρωση και η συντήρηση συμβάλλουν στην περαιτέρω αύξηση του περιβαλλοντικού κόστους. Επιπλέον, τα συμβατικά οδοστρώματα ενισχύουν περαιτέρω το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας, καθώς απορροφούν θερμότητα και αυξάνουν τη θερμοκρασία των πόλεων κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών, δημιουργώντας επιπτώσεις στην κατανάλωση ενέργειας και στη δημόσια υγεία.

Στο σχήμα που ακολουθεί αποτυπώνονται οι βασικές κατηγορίες των πράσινων τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στα οδοστρώματα (Εικόνα 13).



*Εικόνα 4.5: Βασικές κατηγορίες πράσινων τεχνολογιών για τα οδοστρώματα*

Ειδικότερα, τα πορώδη οδοστρώματα αποτελούνται από υλικά τα οποία και επιτρέπουν τη διήθηση των όμβριων υδάτων προς το υπέδαφος, περιορίζοντας τον κίνδυνο πλημμυρών, αλλά και την επιβάρυνση των αστικών αποχετευτικών συστημάτων. Η τεχνολογία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε αστικά περιβάλλοντα με υψηλό ποσοστό στεγανοποιημένων επιφανειών. Ταυτόχρονα, μέσω των οδοστρωμάτων αυτών επιτυγχάνεται βελτίωση της ποιότητας του νερού, καθώς λειτουργεί ως φίλτρο, απομακρύνοντας τα αιωρούμενα σωματίδια, αλλά και τους ρύπους, ενώ υποστηρίζεται η αναπλήρωση του υδροφόρου ορίζοντα.

Περαιτέρω, η χρήση ανακυκλωμένων υλικών στην οδοποιία αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο της κυκλικής οικονομίας. Για παράδειγμα, τέτοια υλικά μπορεί να είναι η ανακυκλωμένη άσφαλτος (Εικόνα 14), όπου επαναχρησιμοποιείται σε νέες ασφαλτικές στρώσεις με τροποποιημένα ποσοστά συνδετικών υλικών. Ακόμη, μπορεί να χρησιμοποιούνται ανακυκλώμενα ελαστικά, υπό τη μορφή κόκκων, τα οποία αναμειγνύονται σε ασφαλτικά μίγματα και έτσι μπορεί να βελτιωθεί η ηχομόνωση και η ελαστικότητα, όπως επίσης και βιομηχανικά υποπροϊόντα (π.χ. ιπτάμενη τέφρα ή σκωρία γάλυβα), που υποκαθιστούν ποσοστά του τσιμέντου στο σκυρόδεμα. Σε ορισμένες

περιπτώσεις χρησιμοποιούνται πλαστικά απόβλητα ως ενισχυτικά ή πρόσθετα σε ασφαλτικά μίγματα, περιορίζοντας τον όγκο των απορριμμάτων. Η ανακύκλωση μειώνει τις εκπομπές που σχετίζονται με την εξόρυξη και επεξεργασία πρώτων υλών, περιορίζει το κόστος και υποστηρίζει την τοπική οικονομία μέσω μικρών μονάδων επεξεργασίας.



*Εικόνα 4.6: Ανακυκλωμένη άσφαλτος*

Τα «ψυχρά οδοστρώματα», διαθέτουν υλικά ή επικαλύψεις που παρουσιάζουν υψηλό δείκτη ανακλαστικότητας, επιτρέποντας την αντανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη μείωση της θερμικής απορρόφησης. Η εφαρμογή τους μπορεί να μειώσει τη θερμοκρασία της επιφάνειας του δρόμου έως και 10°C σε σχέση με τη συμβατική άσφαλτο. Τα ψυχρά οδοστρώματα περιορίζουν το φαινόμενο της θερμικής νησίδας, όπως επίσης μειώνουν την ανάγκη χρήσης των κλιματιστικών στις γειτονικές περιοχές, ενώ συνάμα αυξάνουν τη διάρκεια ζωής των υλικών, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι μειώνεται η καταπόνηση από θερμική διαστολή.

Αναφορικά με τις πράσινες υποδομές, αυτές περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση των φυσικών στοιχείων στον σχεδιασμό του δρόμου. Για παράδειγμα, μέσω των φυτεμένων κρασπέδων και πρανών, μπορεί να υπάρξει συγκράτηση του νερού και των ρύπων, ενώ μέσω των βιοφραγμάτων, διαμορφώνονται ειδικές τάφροι με φυτικό υλικό που καθυστερούν και φιλτράρουν την απορροή. Ακόμη, οι φυτεμένες νησίδες και οι φυτεύσεις σε χώρους στάθμευσης και υπέργειες διαβάσεις συμβάλλουν στην αύξηση της βιοποικιλότητας. Οι λύσεις αυτές έχουν ιδιαίτερη σημασία στις πόλεις, καθώς συνδυάζουν

λειτουργικότητα, περιβαλλοντική διαχείριση και αισθητική αναβάθμιση.

#### **4.6 Ο ρόλος του θεσμικού πλαισίου και των κανονισμών στην προσαρμογή των υποδομών**

Το θεσμικό πλαίσιο που αφορά σε κανονισμούς για την προσαρμογή των υποδομών στην κλιματική αλλαγή στη χώρα μας πρέπει να επισημανθεί ότι συμπεριλαμβάνει μία σειρά από εθνικές και διεθνείς συμφωνίες (π.χ., Συμφωνία των Παρισίων) για καλύτερα και πιο στοχευμένα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, η Συμφωνία του Παρισιού αναφέρει γενικά θέματα όσον αφορά στη μείωση εκπομπών του θερμοκηπίου. Όσον αφορά στην Ελλάδα ακολουθείται εθνική στρατηγική με ανάλογο Νόμο και κανονισμούς για την ενίσχυση και την καλύτερη ανθεκτικότητα των υποδομών της χώρας σε διάφορους τομείς της κοινωνίας. Βασικός σκοπός είναι η καλύτερη ανθεκτικότητα και αντοχή των ήδη υπάρχοντων υποδομών, κάτι που ενισχύεται με νέες και πιο σύγχρονες προδιαγραφές χωρικών σχεδίων για καλύτερη αντοχή σε ακραίες καιρικές καταστάσεις.

Πιο συγκεκριμένα, το 2019 αναθεωρήθηκε το Εθνικό σχέδιο της χώρας μας για το κλίμα (ΦΕΚ 4893B / 31.12.2019), για να θωρακιστεί καλύτερα η χώρα απέναντι σε προκλήσεις του κλίματος και να «οχυρωθεί» καλύτερα η χώρα, αλλά και να διασφαλιστεί η μετάβασή της στην κλιματική ουδετερότητα ως το 2050.

Πρέπει να επισημανθεί ότι ο ρόλος του θεσμικού αυτού πλαισίου είναι ιδιαίτερα σημαντικός, αλλά αποτελεί και ένα βασικό «εργαλείο» για την ανακατασκευή και την καλύτερη σχεδίαση οδών και οδοστρωμάτων, με γνώμονα τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης και κινητικότητας (Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, 2016). Αναλυτικότερα αναθεωρούνται οι προδιαγραφές για κατασκευή υποδομών, έτσι ώστε να είναι πιο ανθεκτικές σε κλιματικές αλλαγές, όπως για παράδειγμα στην Ελλάδα γίνεται αλλαγές στον πολεοδομικό σχεδιασμό, κατασκευάζονται αντιπλημμυρικά έργα (π.χ., αναχώματα) (Καρτάλης κ.ά., 2021).

## **5 Μελέτες περίπτωσης**

### **5.1 Εισαγωγή**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στη σύγχρονη εποχή, η κλιματική αλλαγή επιφέρει μία σειρά από επιπτώσεις στα οδοστρώματα ανά τον κόσμο, λόγω των ακραίων καιρικών φαινομένων (π.χ., υψηλές θερμοκρασίες, τυφώνες κ.λπ.), με αποτέλεσμα να προκαλούνται στα οδοστρώματα παραμορφώσεις, φθορές, ρήγματα και άλλα προβλήματα. Κυριότερα προβλήματα αποτελούν οι πλημμύρες και οι σφοδρές βροχές, που αυξάνουν τις διαβρώσεις και εντείνουν άλλα ζητήματα. Πολλοί είναι οι μελετητές, μεταξύ των οποίων και ο King (2023) και οι Saleh & Hashemian (2022), που συμφωνούν ότι το ζήτημα αυτό είναι αρκετά σημαντικό και επιφέρει μία σειρά από ερωτήματα για τη σχεδίαση και την κατασκευή των οδοστρωμάτων, τονίζοντας βασικά θέματα ευπάθειας, αλλά και μέτρα προσαρμογής (King, 2023; Saleh & Hashemian, 2022).

### **5.2 Στρατηγικές προσαρμογής των οδοστρωμάτων στην κλιματική αλλαγή-σύγκριση**

Η αντιμετώπιση των συνεπειών της κλιματικής αλλαγής στα οδοστρώματα έχει μεγάλη σημασία ειδικά στη σημερινή εποχή, που το κλίμα αλλάζει και επιδεινώνεται συνεχώς. Γι' αυτό και χρειάζεται να υπάρξουν οι ανάλογες στρατηγικές για τη σωστή διευθέτηση του θέματος (Swarna & Hossain, 2022). Οι στρατηγικές αυτές συμπεριλαμβάνουν εφαρμογή νέων μέτρων θωράκισης σε ακραίες καταστάσεις του καιρού, ενίσχυση της ανθεκτικότητας των οδοστρωμάτων (όπως με νέα υλικά ή πιο σύγχρονες κατασκευές) ώστε να αντέχουν κάτω από διάφορες καιρικές συνθήκες. Σε κάθε περίπτωση στόχος είναι να υπάρξει ασφάλεια, αλλά και να ελαχιστοποιηθούν οι κίνδυνοι που ελλοχεύουν. Μία από τις στρατηγικές είναι η χρήση πιο ανθεκτικών υλικών (π.χ., οπλισμένο σκυρόδεμα, αντιολισθητική άσφαλτος κ.λπ.), που να αντέχουν σε ακραίες καιρικές συνθήκες, όπως σε έντονες βροχοπτώσεις. Σύμφωνα με τον Potter (2012), οι υποδομές αποτελούν έναν κρίσιμο παράγοντα και, ανάλογα με το κόστος αλλά και τα προβλήματα που προκύπτουν. Έτσι, σε σχέση την περιοχή και τις συνθήκες, είναι βασικό να γίνεται χρήση αναβαθμισμένων υλικών που αντέχουν (Potter, 2012). Όπως χαρακτηριστικά αναφέρει ο King (2023), ένας βασικός στόχος πρέπει να είναι η ανθεκτικότητα των οδοστρωμάτων, υπό την έννοια της ελαχιστοποίησης ενός «αρνητικού

σοκ» σε περίπτωση εκτάκτων αναγκών. Επισημαίνει, παράλληλα, ότι η ευαισθησία ενός οδοστρώματος σε καιρικές αλλαγές εκδηλώνεται κυρίως από την επιρρέπεια που έχει σε ρωγμές και άλλες βλάβες (King, 2023).

Αρκετές χώρες έχουν πάρει μέτρα και έχουν προχωρήσει σε ανάλογες στρατηγικές. Στη Νορβηγία, η ανάλογη διοίκηση δημοσίων δρόμων (NPRA), για παράδειγμα, προχώρησε σε νέες κατευθυντήριες προτάσεις για τις μεταφορές, γενικά, σε σχέση με την κλιματική κρίση, για την αντιμετώπιση θεμάτων, όπως πλημμυρών, κατολισθήσεων, καθώς η χώρα αντιμετωπίζει αρκετά τέτοια προβλήματα (NPRA, 2013). Στην Ελλάδα έχουν προωθηθεί διάφορα έργα για μείωση των εκπομπών του θερμοκηπίου, αλλά έχουν γίνει και σημαντικά βήματα (κυρίως προπαρασκευαστικά) εφαρμογής ΣΔΟ στην Εγνατία Οδό στη Θεσσαλονίκη. Για παράδειγμα, έχουν γίνει σημαντικά έργα συντήρησης του οδοστρώματος, αλλά έχει υπάρξει και ανάπτυξη εφαρμογής κυκλοφοριακού μοντέλου για την Εγνατία Οδό όσον αφορά σε πρόβλεψη μετακινήσεων, όπως και ανάπτυξη συστήματος GIS (Μαυρίδου). Έχουν γίνει πολλές μελέτες για συλλογή μετρήσεων μετά από αντιολισθητικές στρώσεις, με σκοπό τον καθορισμό των ορίων προειδοποίησης και επέμβασης.

Πολλές χώρες έχουν προχωρήσει σε διάφορες σημαντικές καλές πρακτικές και ανάλογα έργα για την καλύτερη κατασκευή και διαχείριση οδοστρωμάτων. Αναλυτικότερα, η Παγκόσμια Ένωση Οδών (γνωστή, αλλιώς, και ως PIARC) έχει προχωρήσει σε μία σειρά από καλές πρακτικές για το θέμα της κλιματικής κρίσης και τις επιπτώσεις που έχει στα οδοστρώματα. Πιο συγκεκριμένα, προωθεί την καλύτερη συντήρηση αυτών σε τακτά χρονικά διαστήματα, καθώς και την αποκατάσταση και ανακατασκευή στο οδόστρωμα και, επιπλέον, τονίζει και την ανάγκη για ασφαλτοστρώσεις σε πιο τακτά χρονικά διαστήματα, αλλά και τονίζει και την προώθηση σχεδιασμών νέων οδοστρωμάτων για να είναι πιο ανθεκτικά (Saleh & Hashemian, 2022). Αξίζει να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι οι ΗΠΑ πρωτοπορούν στον κόσμο, αναπτύσσοντας τις καλύτερες πρακτικές αλλά και ενισχύοντας τις έρευνες όσον αφορά στα ΣΔΟ στις διάφορες αμερικανικές Πολιτείες, όπου επισημαίνεται ότι πρέπει να εμπλέκονται πολλοί φορείς για την κατάλληλη διαχείριση των οδοστρωμάτων.

Η Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αυτοκινητοδρόμων FHWA (Federal Highway Administration), σε σχετική έρευνα διαπίστωσε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας και η ξηρότητα πρέπει να αντιμετωπίζονται με ανάλογες στρατηγικές. Δηλαδή, σε αυτή την

περίπτωση χρειάζεται να γίνεται νέος σχεδιασμός, τόσο όσον αφορά τα εύκαμπτα όσο και τα δύσκαμπτα οδοστρώματα. Πιο αναλυτικά, για το εύκαμπτο οδόστρωμα προτάθηκε να χρησιμοποιηθεί πιο σκληρό συνδετικό υλικό στην ασφαλτική επικάλυψη, ενώ στο δύσκαμπτο προτάθηκε αύξηση σε περιεκτικότητα του οπλισμού στην κατασκευή, για μείωση πλάτους ρωγμών. Ακόμη προτάθηκε και η χρήση πολυμερών υλικών (τροποποιημένης ασφάλτου) για μείωση τυχόν αυλακώσεων στα οδοστρώματα. Παράλληλα, προωθήθηκαν και καλύτερα μέτρα για αποστράγγιση (όπως με εισαγωγή γεωυφασμάτων) στα άκρα των οδοστρωμάτων, με κύριο στόχο την αποφυγή ανάπτυξης υγρασίας (Flintsch et al., 2004).

## 6 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη σημερινή εποχή, λόγω και της κλιματικής κρίσης, τα οδοστρώματα πλέον είναι σημαντικό να κατασκευάζονται κάτω από νέες προδιαγραφές και σύμφωνα με τους νέους παγκόσμιους και εθνικούς κανονισμούς. Κι αυτό διότι πλέον οι κλιματικές συνθήκες επιφέρουν μία σειρά από προβλήματα στα οδοστρώματα και κατά συνέπεια πρέπει να εξασφαλίζεται η ανθεκτικότητα και η βιωσιμότητά τους.

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η επίδραση της κλιματικής κρίσης σε διάφορους τύπους οδοστρωμάτων. Γίνεται εμφανές ότι όλα τα οδοστρώματα πρέπει να σχεδιάζονται και να κατασκευάζονται σύμφωνα με κάποιες στρατηγικές, αλλά και σύμφωνα με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε περιοχή. Έτσι, η κάθε χώρα και οι ανάλογες υπηρεσίες αυτοκινητοδρόμων πρέπει να επιλέγουν τον τύπο οδοστρώματος και το σχεδιασμό του ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν αλλά και σύμφωνα με τις στρατηγικές και τους κανονισμούς που υπάρχουν σε εθνικό επίπεδο. Για παράδειγμα, σε περίπτωση που υπάρχει ασθενές έδαφος ή μεγάλη κίνηση στους δρόμους, η επιλογή των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι η καλύτερη. Αντίθετα, σε κατοικημένες περιοχές, με λιγότερη κυκλοφορία οχημάτων, η ιδανικότερη επιλογή είναι τα εύκαμπτα οδοστρώματα. Πάντα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη διάφορα στοιχεία, όπως το κλίμα, οι συνθήκες, οι υποδομές, αλλά και οι κανονισμοί που ισχύουν σε μια χώρα.

Η παρούσα μελέτη δύναται να αποτελέσει αφετηρία για μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες που θα εξετάσουν τη συμπεριφορά και ανθεκτικότητα των οδοστρωμάτων υπό τις μεταβαλλόμενες κλιματολογικές συνθήκες ανά γεωγραφική περιοχή. Γενικότερα, το ζήτημα αυτό προσφέρεται για περαιτέρω διερεύνηση μέσα από την εξέταση διαφορετικών σεναρίων και προσεγγίσεων, όπως:

- Εξέταση επιδόσεων διαφόρων ασφαλικών επιλογών (π.χ., μειγμάτων) σε σχέση με τις καιρικές συνθήκες, όπως είναι τα ασφαλτομίγματα με ειδικές ιδιότητες (π.χ. θερμοανакλαστικές) ή αυτά με ενισχυμένα υλικά, με βασικό στόχο και την προστασία αυτών από την επιδείνωση του κλίματος, αλλά και την αποφυγή περισσότερων προβλημάτων (όπως περισσότερων ρηγμάτων ή αυλακώσεων).

- Σε περιοχές με πολλές βροχοπτώσεις είναι καλά να μελετώνται περαιτέρω τα χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος που χρησιμοποιούνται, ώστε να λαμβάνονται περισσότερο υπόψη αυτά που έχουν αποστραγγιστική ικανότητα, έτσι ώστε να ερευνώνται

σε μεγαλύτερο βάθος πιθανές μελλοντικές προσθήκες για κάλυψη προβλημάτων και αδυναμιών από τις ελλείψεις στο ασφαλτόμιγμα.

- Ανάλυση οικονομικού κόστους και οφέλους σε σχέση με την περιοχή και την οικονομικο-πολιτική κατάσταση που επικρατεί. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να εξετάζονται επιλογές που είναι οικονομικά συμφέρουσες για κάθε χώρα, ενώ παράλληλα πρέπει να διερευνάται και σε μεγαλύτερο επίπεδο και η κάθε επιλογή βιωσιμότητας της ασφατικής κατασκευής.

-Εισαγωγή της τροποποιημένης ασφάλτου ως μια ενδεχόμενα επιλογή (π.χ., με πολυκριτηριακά κριτήρια), που να εξετάζει την επιρροή του κλίματος και την επίδραση που έχει στα διάφορα οδοστρώματα.

- Συλλογή περισσότερων στοιχείων και δεδομένων ανά περιοχή, ανάλογα με ακραία φαινόμενα όπως πλημμυρικά, για περαιτέρω διερεύνηση αλλαγών και σχεδιασμών των οδοστρωμάτων, για μέγιστη ασφάλεια και προστασία.

- Πραγματοποίηση ανάλυσης με μία μεγαλύτερη γκάμα κριτηρίων (π.χ., οικονομικής και μηχανικής φύσεως), όπως είναι για παράδειγμα κριτήρια που σχετίζονται με θέματα υδρολίστεσης, κόστος αλλαγών και αποκατάστασης και άλλα.

## 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

AASHTO. (1990). Guidelines for Pavement Management Systems, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A.L., Rossi, F., Santamouris, M., Synnefa, A., Wong, N.H., Zinzi, M. (2016). Local climate change and urban heat island mitigation techniques-The state of the art. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22, 1-16.

Bulkeley, H. (2013). *Cities and Climate Change, Critical Introductions to Urbanism and the City*. Abington: Routledge.

Carter, J.G., Cavan, G., Connelly, A., Guy, S., Handley, J. &Kazmierczak, A. (2015). *Climate change and the city: Building capacity for urban adaptation, in Progress in Planning*, 95, 1- 66.

European Environment Agency (2012). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012. An indicator-based report, EEA Report No 12/2012*. Denmark-Copenhagen: European Environment Agency.

Felipe, V., Uribe, M.-C., Del Castillo, S. (2023). *Climate Action and the Paris Agreement: the Role of Cities in Latin America and the Caribbean*. Inter-American Development Bank (IDB).

Flintsch G. W., Dymond R. Collura, J. (2004). Pavement Management Applications using Geographic Information Systems, National Cooperative Highway Research Project 20-5, Synthesis Topic 34-11, Washington, DC

Giannakopoulos, C., Le Sager, P., Bindi, M., Moriondo, M., Kostopoulou, E., Goodes, S.M. (2009). Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2°C global warming. *Global and Planetary change*, 68(3), 209-224.

Jain, R. (2016). "Rigid Pavement". M. Tech. Assignment Report, Civil Engineering Department N.I.T Hamirpur. Retrieved from <https://www.slideshare.net/pjainrahul/rigid-pavement-68226961>

King, D. (2023). Climate Change, Resilience, and Concrete Pavements. *Moving Advancements into Practice*, 7.

Ktari, R., Saint-Laurent, D., Hornyach, P., Hammoum, F., Marsac, P., & Nguyen, M. L. (2022). Effect of climate on asphalt pavement performance using two mechanistic-empirical methods. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(5), 80

Mills, B., S. Tighe, J. Andrey, J. & Huen, K. & Parm, S. (2006). *Climate Change and the Performance of Pavement Infrastructure in Southern Canada: Context and Case Study, Proceedings of EIC Climate Change Technology Conference*. Ontario, Canada

NPRA, 2013. Klima og Transport, s.l.: Norwegian Public Road Administrator. 2011,

Potter, J. (2012). *U.S. Transportation and Climate Change: Addressing the Adaptation Challenge*. Alexandroupolis, Unece.

Ravi, C. & Parag, K. (2022). *It's Time to Invest in Climate Adaptation*. Harvard Business Review.

Saleh, M. (2022). *Addressing Highway Pavement Resilience amid Climate Change: A Review of the Major Vulnerabilities and Adaptation Strategies*

Saleh, M., & Hashemian, L. (2022). Addressing Highway Pavement Resilience amid Climate Change: A Review of the Major Vulnerabilities and Adaptation Strategies. *Innovations in Pavement Management, Engineering and Technologies*, 12.

Saleh, M., & Hashemian, L. (2022b). Addressing Highway Pavement Resilience amid Climate Change: A Review of the Major Vulnerabilities and Adaptation Strategies. *Innovations in Pavement Management, Engineering and Technologies*, 12

Sarnowski, M., Kowalski, K., Król, J., & Radziszewski, P. (2019). Influence of Overheating Phenomenon on Bitumen and Asphalt Mixture Properties. *Materials*, 12(4), 19

Sarroukh, M., Lahlou, K. & Farah, M. (2021). Effect of the bitumen type on the temperature resistance of hot mix asphalt. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4

Swarna, S.T. & Hossain, K. (2022). Climate Change Impact and Adaptation for Highway Asphalt Pavements: A Literature Review. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol 49 (No7), 1109-1116.

Travers, A., Elrick, C., Kay, R. (2010). *Background Paper: Climate Change in Coastal Zones of the Mediterranean*. Split, Priority Actions Programme.

Underwood B.S., Guido Z., Gudipudi P., Feinberg Y. (2017) > Increased costs to US pavement infrastructure from future temperature rise. *Nat. Clim. Change*, 7, 704–707

Wistuba, M.P.; Walther, A. (2013). Consideration of Climate Change in the Mechanistic Pavement Design. *Road Mater. Pavement Des.*, 14, 227–24

IOBE (2023). *Προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή: Προκλήσεις και προοπτικές για την ελληνική οικονομία*. Αθήνα: Ίδρυμα Οικονομικών & Βιομηχανικών Ερευνών (IOBE).

Ίδρυμα Μποδοσάκη (2022). *Σχέδιο Δράσης για το Περιβάλλον και το Κλίμα- Δεδομένα και Προτάσεις 2022-2030*. Διαθέσιμο στο: [https://www.bodossaki.gr/wp-content/uploads/2022/11/%CE%8A%CE%B4%CF%81%CF%85%CE%BC%CE%B1-%CE%9C%CF%80%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CF%83%CE%AC%CE%BA%CE%B7\\_%CE%A3%CF%87%CE%AD%CE%B4%CE%B9%CE%BF\\_%CE%94%CF%81%CE%AC%CF%83%CE%B7%CF%82\\_%CE%B3%CE%B9%CE%B1\\_%CF%84%CE%BF\\_%CE%A0%CE%B5%CF%81%CE%B9%CE%B2%CE%AC%CE%BB%CE%BB%CE%BF%CE%B\\_D\\_%CE%BA%CE%B1%CE%B9\\_%CF%84%CE%BF\\_%CE%BA%CE%BB%CE%AF%CE%BC%CE%B1.pdf](https://www.bodossaki.gr/wp-content/uploads/2022/11/%CE%8A%CE%B4%CF%81%CF%85%CE%BC%CE%B1-%CE%9C%CF%80%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CF%83%CE%AC%CE%BA%CE%B7_%CE%A3%CF%87%CE%AD%CE%B4%CE%B9%CE%BF_%CE%94%CF%81%CE%AC%CF%83%CE%B7%CF%82_%CE%B3%CE%B9%CE%B1_%CF%84%CE%BF_%CE%A0%CE%B5%CF%81%CE%B9%CE%B2%CE%AC%CE%BB%CE%BB%CE%BF%CE%B_D_%CE%BA%CE%B1%CE%B9_%CF%84%CE%BF_%CE%BA%CE%BB%CE%AF%CE%BC%CE%B1.pdf) [Πρόσβαση 30 Μαρτίου 2025].

Καρτάλης, Κ., Κοκκώσης, Χ., Φιλιππόπουλος, Χ., Πολύδωρος, Α., Λάππα, Κ., & Μαυράκου, Θ. (2021). Ενσωματώνοντας την κλιματική αλλαγή στον μετασχηματισμό του αναπτυξιακού μοντέλου της Ελλάδας

Καρτάλης, Κ., Κοκκώσης, Χ., Φιλιππόπουλος, Κ., Λάππα, Κ., Μαυράκου, Θ. (2021). *Ενσωματώνοντας την κλιματική αλλαγή στον μετασχηματισμό του αναπτυξιακού μοντέλου της Ελλάδας*. Αθήνα: διαΝΕΟσις-Οργανισμός Έρευνας & Ανάλυσης.

Κοφίτσας, Ι. (2006). *Στοιχεία οδοποιίας* (2η έκδοση). Αθήνα: Εκδόσεις Ίων

Μουρατίδης, Α. (2008). *Η Διαχείριση των Οδικών έργων*. Θεσσαλονίκη: University Studio Press

Νικολαΐδης, Α. Φ. (2011). *Οδοποιία, Οδοστρώματα-Υλικά - Έλεγχος ποιότητας*. Θεσσαλονίκη.

Ντάφης, Σ. (2022). *10 χρόνια COPERNICUS EMS: Το 2021 η Ελλάδα χρειάστηκε τις περισσότερες ενεργοποιήσεις του Κέντρου Συντονισμού Αντιμετώπισης Έκτακτης*

*Ανάγκης παγκοσμίως. Climate Book-Δίκτυο Ενημέρωσης για τον καιρό και το κλίμα.*  
Διαθέσιμο στο: <https://climatebook.gr/2022/04/25/10-χρόνια-%20copernicus-ems-to-2021-η-ελλάδα-χρειάστηκε-τις/> [Πρόσβαση 30 Μαρτίου 2025].

Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (2016). *Εθνική Στρατηγική για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή.* Διαθέσιμο στο: <https://ypen.gov.gr/perivallon/klimatiki-allagi/prosarmogi-stin-klimatiki-allagi/> [Πρόσβαση 30 Μαρτίου 2025].