



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

**Χρήση Ηλιακών Συστημάτων στην Οδοποιία**

**ΝΑΥΣΙΚΑ ΘΕΟΥ**

Αριθμός μητρώου: 7083

Επιβλέπουσα:

**Δρ. ΝΙΚΗ ΜΠΕΣΚΟΥ**

Πάτρα, 2023

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο θα επιθυμούσα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στην διεκπεραίωση της πτυχιακής μου εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες, οφείλω στην επιβλέπουσα της εργασίας, Δρ. Νίκη Μπέσκου για την καθοδήγηση, την εμπιστοσύνη και τις καίριες συμβουλές, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Θα ήθελα, ακόμη, να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, την Καθηγήτρια Ειρήνη Βγενοπούλου και την Αν. Καθηγήτρια Πηνελόπη Κοντονή για τον χρόνο, που διέθεσαν για την αξιολόγηση της εργασίας μου. Τέλος, θα επιθυμούσα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τα πρόσωπα της οικογένειας και του φιλικού μου περιβάλλοντος για τη συμπαράσταση, που μου πρόσφεραν, ωσότου ολοκληρωθεί η εργασία μου.

## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη .....	7
Abstract .....	8
Εισαγωγή .....	9
Κεφάλαιο 1: Ευφυία στην πόλη.....	11
1.1 Η έννοια της πόλης .....	11
1.2 Ορισμός της «έξυπνης πόλης».....	14
1.3 Σπουδαιότητα ένταξης έξυπνης πόλης.....	17
1.4 Τεχνολογίες της «έξυπνης πόλης» .....	19
1.4.1 Έξυπνα κτίρια και κατασκευές .....	22
1.4.2 Διαχείριση κυκλοφορίας.....	23
1.4.3 Έξυπνος φωτισμός οδών.....	23
1.4.4 Έξυπνη στάθμευση .....	23
1.4.5 Παρακολούθηση ενεργειακής κατανάλωσης.....	24
1.4.6 Ασφάλεια .....	24
1.4.7 Εφαρμογές MMM.....	25
1.4.8 Έξυπνη ύδρευση – αποχέτευση .....	25
1.4.9 Μετρήσεις επιπέδων ρύπων.....	25
1.5 Internet of Things (IoT) .....	25
1.6 Τροφή για σκέψεις .....	27
1.6.1 Οφέλη.....	28
1.6.2 Προκλήσεις .....	28
Κεφάλαιο 2: Έξυπνοι δρόμοι.....	30
2.1 Η σπουδαιότητα της οδοποιίας.....	30
2.2 Η έννοια του έξυπνου δρόμου .....	31
2.3 Ο ρόλος των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας .....	34
2.4 Εφαρμογές ευφυίας στην οδοποιία .....	39
2.4.1 Έξυπνος δρόμος Virginia.....	39
2.4.2 Έξυπνος Αυτοκινητόδρομος.....	40
2.5 Άλλες μορφές συστημάτων οδοποιίας.....	46
2.5.1 Electrified roads .....	46

2.5.2 Plastic Roads .....	48
2.5.3 LED Οδοφωτισμός .....	50
2.5.4 VANETs .....	53
2.5.5 Έξυπνα ασύρματα ψηφιακά σήματα κυκλοφορίας στους δρόμους.....	54
2.5.6 Οδοί με έξυπνες διασταυρώσεις .....	55
2.5.7 Αρχιτεκτονική διάσωσης έκτακτης ανάγκης με χρήση V2X .....	56
2.6 Παραδείγματα εφαρμογής .....	57
Κεφάλαιο 3: Ηλιακά συστήματα στην οδοποιία .....	59
3.1 Ηλιακά πλαίσια στην οδοποιία .....	59
3.1.1 Ηλιακή ενέργεια και χρήση στους δρόμους .....	59
3.1.2 Ηλιακή ακτινοβολία στην Ελλάδα.....	62
3.2 Σύγκριση συμβατών οδοστρωμάτων με ηλιακά .....	65
3.2.1 Συμβατά οδοστρώματα .....	65
3.2.2 Σχεδιασμός ηλιακών πλαισίων .....	72
3.3 Εφαρμογές των ηλιακών συστημάτων στην οδοποιία.....	77
3.3.1 Solar Roadways .....	78
3.3.2 TNO .....	78
3.3.3 Κενά δεδομένων.....	79
3.3.4 Παραδείγματα εφαρμογής .....	80
Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία της έρευνας .....	84
4.1 Ερευνητικά ερωτήματα.....	84
4.2 Στόχοι της έρευνας.....	84
4.3 Στάδια της έρευνας .....	85
4.3.1 Στάδιο 1 <sup>ο</sup> .....	85
4.3.2 Στάδιο 2 <sup>ο</sup> .....	85
4.3.3 Στάδιο 3 <sup>ο</sup> .....	85
4.3.4 Στάδιο 4 <sup>ο</sup> .....	87
4.3.5 Στάδιο 5 <sup>ο</sup> .....	88
4.3.6 Στάδιο 6 <sup>ο</sup> .....	88
Κεφάλαιο 5: Σχεδιασμός ηλιακών πλαισίων .....	89
5.1 Απαιτήσεις δομικού σχεδιασμού .....	89
5.2 Απαιτήσεις ισχύος.....	90

5.3 Ανάλυση και αξιολόγηση υλικού .....	90
5.3.1 Δομικά στρώματα .....	90
5.3.2 Διαφανής στρώση .....	92
5.4 Σχεδιασμός ηλεκτρικών συστημάτων.....	93
5.4.1 Επιλογή φωτοβολταϊκών κυψελών.....	94
5.4.2 Διασύνδεση κυψελών .....	94
5.4.3 Πρόσθετο υλικό .....	95
5.5 Σχεδιασμός διαφανών στρωμάτων .....	96
5.6 Σχεδιασμός δομικών στρωμάτων.....	97
5.6.1 Πάχος δομικού στρώματος .....	97
5.6.2 Σχεδιασμός οπτικών στρωμάτων.....	97
5.6.3 Σχεδιασμός του βασικού στρώματος.....	98
5.7 Πρωτότυπο πλαίσιο .....	99
Κεφάλαιο 6: Περιβαλλοντική ανάλυση.....	100
6.1 Σκίαση.....	101
6.2 Υγρασία .....	102
6.3 Παγετός.....	104
Κεφάλαιο 7: Ανάλυση μέσω Ansys.....	105
7.1 Μοντέλο προσομοίωσης.....	105
7.2 Διαδικασία στατικής ανάλυσης .....	105
7.3 Διαδικασία θερμικής ανάλυσης .....	107
7.4 Αποτελέσματα.....	108
7.4.1 Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης.....	108
7.4.2 Αποτελέσματα θερμικής ανάλυσης .....	113
7.5 Συμπεράσματα .....	114
Κεφάλαιο 8: Συζήτηση – Συμπεράσματα.....	115

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά LED οδοφωτισμού .....	51
Πίνακας 2: Μέση ημερήσια απομόνωση στην Ελλάδα .....	63
Πίνακας 3: Δυναμικό ημερήσιας φωτοβολταϊκής ισχύος στην Ελλάδα.....	64
Πίνακας 4: Ιδιότητες προτεινόμενων δομικών υλικών.....	91
Πίνακας 5: Ιδιότητες προτεινόμενων διαφανών υλικών.....	92
Πίνακας 6: Στρώσεις και υλικά που χρησιμοποιήθηκαν .....	105
Πίνακας 7: Ιδιότητες επιλεγμένων υλικών για τη στατική ανάλυση.....	106
Πίνακας 8: Ιδιότητες υλικών για τη θερμική ανάλυση.....	107
Πίνακας 9: Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης.....	112
Πίνακας 10: Αποτελέσματα θερμικής ανάλυσης.....	114

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Αύξηση πληθυσμού στις ΗΠΑ.....	12
Εικόνα 2: Αύξηση πληθυσμού στην Ευρώπη και την Ελλάδα.....	13
Εικόνα 3: Χαρακτηριστικά της ευφυούς πόλης.....	18
Εικόνα 4: Ανάλυση χαρακτηριστικών της ευφυούς πόλης.....	19
Εικόνα 5: Τα επίπεδα της έξυπνης πόλης.....	21
Εικόνα 6: Έξυπνη στάθμευση.....	24
Εικόνα 7: Αρχαία οδοποιία.....	31
Εικόνα 8: Χαρακτηριστικά των έξυπνων οδών.....	34
Εικόνα 9: Ηλιακό πλαίσιο με LED.....	35
Εικόνα 10: Λειτουργία ανεμογεννήτριας.....	38
Εικόνα 11: Απεικόνιση των glowing lines.....	42
Εικόνα 12: Απεικόνιση ηλεκτρικής λωρίδας.....	43
Εικόνα 13: Απεικόνιση wind lights.....	44
Εικόνα 14: Απεικόνιση τεχνολογίας dynamic paint.....	45
Εικόνα 15: Απεικόνιση interactive light.....	46
Εικόνα 16: Σχεδιασμός των πλαστικών οδών.....	49
Εικόνα 17: Ενεργειακή απόδοση LED.....	52
Εικόνα 18: Έξυπνες διασταυρώσεις.....	56
Εικόνα 19: Σχεδιασμός ηλιακού πλαισίου για οδοποιία [Northmore & Tighe, 2012a].....	60
Εικόνα 20: Ηλιακή απομόνωση στην Ελλάδα.....	64
Εικόνα 21: Δυναμικό φωτοβολταϊκής ισχύος.....	65
Εικόνα 22: Συμβατικά οδοστρώματα.....	67
Εικόνα 23: Solar Roadways.....	78
Εικόνα 24: Σχεδιασμός TNO.....	79
Εικόνα 25: Απεικόνιση σχεδιασμού ηλεκτρικών συστημάτων.....	94
Εικόνα 26: Διασύνδεση κυψελών.....	95
Εικόνα 27: Απεικόνιση οπτικών στρωμάτων.....	98
Εικόνα 28: Απεικόνιση ηλιακού πλαισίου στο Ansys.....	99
Εικόνα 29: FEM ανάλυση ηλιακού πλαισίου.....	106
Εικόνα 30: FEM ανάλυση ηλιακού πλαισίου για θερμική ανάλυση.....	108
Εικόνα 31: Ισοδύναμη πίεση πλαισίου από τον πίσω τροχό του φορτηγού.....	109
Εικόνα 32: Ολική παραμόρφωση πλαισίου από τον πίσω τροχό του φορτηγού.....	109
Εικόνα 33: Ισοδύναμη πίεση πλαισίου από τον εμπρόσθιο τροχό του φορτηγού.....	110
Εικόνα 34: Ολική παραμόρφωση πλαισίου από τον εμπρόσθιο τροχό του φορτηγού.....	110
Εικόνα 35: Ισοδύναμη πίεση πλαισίου από τροχό αυτοκινήτου.....	111
Εικόνα 36: Ολική παραμόρφωση πλαισίου από τροχό αυτοκινήτου.....	111
Εικόνα 37: Ισοδύναμη πίεση πλαισίου από μοτοσυκλέτα.....	112
Εικόνα 38: Ολική παραμόρφωση πλαισίου από μοτοσυκλέτα.....	112
Εικόνα 39: Ροή θερμότητας στην ανώτερη στρώση του πλαισίου.....	113
Εικόνα 40: Θερμοκρασία ηλιακού πλαισίου.....	113
Εικόνα 41: Θερμοκρασία στην ανώτερη στρώση του πλαισίου.....	114

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην παρουσίαση και αξιολόγηση της νέας τεχνολογίας των ηλιακών συστημάτων προκειμένου να αξιοποιηθεί στην κατασκευή οδών. Παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά που καθιστούν έναν δρόμο ευφυή και η αποτελεσματικότητα των εφαρμογών του σε διάφορες περιοχές ανά τον κόσμο. Βασικός στόχος της έρευνας αποτελεί η αξιολόγηση της αποδοτικότητας ενός ηλιακού δρόμου στα αστικά κέντρα της χώρας μας με πρώτο κριτήριο τη σωστή επιλογή των υλικών, που θα χρησιμοποιηθούν κατά την κατασκευή του. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται μία περιβαλλοντική ανάλυση για τη διερεύνηση της επίδρασης των ακραίων καιρικών συνθηκών, αλλά και της καθημερινής υγρασίας και σκίασης στην απόδοση του ηλιακού πλαισίου. Παράλληλα, πραγματοποιείται η δημιουργία μιας προσομοίωσης ενός έξυπνου δρόμου, με βάση την ηλιακή ενέργεια. Η ανάλυση του στατικού και θερμικού μοντέλου υλοποιείται μέσω του προγράμματος ANSYS Academic R22, βασιζόμενη στα δεδομένα της ηλιακής απομόνωσης στην Ελλάδα και των ασκούμενων φορτίων των οχημάτων, που συναντάμε σε έναν εμπορικό δρόμο. Τα αποτελέσματα εξάγονται από την πραγματοποίηση δύο διαφορετικών προσομοιώσεων και αξιολογούνται σε σχέση με τα αποτελέσματα παρόμοιων αναλύσεων. Με βάση τα αποτελέσματα, συνάγεται το συμπέρασμα πως η εφαρμογή των ηλιακών συστημάτων στην οδοποιία κρίνεται, με εγκυρότητα και ικανοποιητικό βαθμό αξιοπιστίας, κατάλληλη και ικανή να αξιοποιηθεί σε πολλούς δρόμους της Ελλάδας.

Λέξεις-κλειδιά: ηλιακοί δρόμοι, ηλιακή ενέργεια, αξιολόγηση υλικών, περιβαλλοντική ανάλυση, στατική ανάλυση, θερμική ανάλυση, Ansys



## Abstract

The purpose of this thesis is to propose and evaluate innovative solar system technologies for application in road pavements. The features that make a road intelligent are discussed, as well as the efficiency of its uses in various places throughout the world. The primary goal of the research is to study the efficiency of a solar road in our country's metropolitan centers, with the first parameter being the suitable material selection that will be utilized during its construction. Furthermore, an environmental study is conducted in order to assess the role of extreme weather conditions, as well as daily humidity and shading, on the efficiency of the solar panel. At the same time, it is concerned with the development of a simulation of a smart road powered by solar energy. Based on solar insolation data in Greece and applied vehicle loads observed on a commercial roadway, the static and thermal model study is carried out using the ANSYS Academic R22 program. The outcomes are generated through performing two distinct simulations and are compared to the outcomes of comparable analysis. Based on the results, it is determined that the application of solar systems in road pavements is feasible and capable of being utilized with validity and a reasonable degree of dependability on many roads in Greece.

Keywords: solar pavements, solar energy, material selection, environmental analysis, static analysis, thermal analysis, Ansys

## Εισαγωγή

Η σημερινή κοινωνία χαρακτηρίζεται από μία διαρκή τεχνολογική εξέλιξη με τον πολίτη να αξιοποιεί - εκμεταλλεύεται τη φύση, αντλώντας μια πληθώρα αγαθών που του προσφέρονται, όπως η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή, αιολική, κ.λπ.). Η αξιοποίηση των αγαθών της φύσης αντικατοπτρίζεται στις τεχνολογίες, που παρατηρούμε στις σύγχρονες πόλεις, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως έξυπνες. Η νέα προσέγγιση των πόλεων καθιστά σημαντική και την αλλαγή στην κατασκευή των δρόμων. Μία νέα τεχνολογία αποτελεί ο έξυπνος δρόμος με τη χρήση της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ενέργειας στην πόλη, αλλά ταυτοχρόνως και την ασφαλή και ποιοτική οδήγηση στα αστικά κέντρα, καθώς χρησιμοποιείται καλύτερος οδο φωτισμός και δίνεται η δυνατότητα σύνδεσης στο Διαδίκτυο. Επίσης, η ένταξη των ηλιακών συστημάτων στο σύγχρονο περιβάλλον της οδοποιίας αποφέρει ενεργειακά οφέλη, καθώς παρέχει τη δυνατότητα τροφοδοσίας των οχημάτων, με αποτέλεσμα την αποφυγή απελευθέρωσης επιβλαβών καυσίμων στο περιβάλλον. Η παρουσία του Διαδικτύου αποτελεί αρωγό στην ασφαλή κυκλοφορία των τροχοφόρων με τη συνεχή ενημέρωση για την καλύτερη διαχείριση της συμφόρησης.

Η εργασία διαρθρώνεται σε δύο τμήματα, το θεωρητικό και το ερευνητικό το οποίο διαχωρίζεται σε πέντε επίπεδα. Στο θεωρητικό πλαίσιο παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με την αστικοποίηση και την ένταξη της ευφυούς πόλης στις σύγχρονες κοινωνίες. Επιπρόσθετα, παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των έξυπνων πόλεων, αλλά και των τεχνολογιών που προσφέρονται μέσω της αξιοποίησης των αγαθών της φύσης και του Internet of Things (IoT). Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στην κατασκευή των οδών, στη σπουδαιότητα της και στις σύγχρονες ιδέες, που έχουν εφαρμοστεί σε διάφορα μέρη του κόσμου. Ένα άλλο μέρος του θεωρητικού πλαισίου περιλαμβάνει η αναφορά στην ηλιακή ενέργεια, τα ηλιακά πλαίσια που χρησιμοποιούνται στην οδοποιία και την αποτελεσματικότητα, που θα αποφέρουν στα παραπάνω ζητήματα, που μας απασχολούν στην Ελλάδα. Η τεχνολογία του LED οδο φωτισμού περιγράφεται μέσα από τις εφαρμογές της σε πολλών ειδών περιπτώσεις, τη σχέση που αναπτύσσεται μεταξύ της ηλιακής ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, αλλά και τη σωστή λειτουργικότητα της με βάση το IoT.

Η προβληματική και η στοχοθεσία της παρούσας έρευνας πηγάζει από τις προαναφερθείσες παραδοχές. Στο ερευνητικό πλαίσιο παρατίθενται τα ερευνητικά ερωτήματα και αναλύονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν για τα ερευνητικά επίπεδα, τα οποία απαρτίζονται από:

α) την αναζήτηση, τη συλλογή και την αξιολόγηση πληροφοριών σχετικά με τα υλικά, που βρίσκονται στο εμπόριο για εφαρμογή σε ηλιακά συστήματα,

β) την περιβαλλοντική ανάλυση των ηλιακών πλαισίων στην οδοποιία σε περιπτώσεις ακραίων καιρικών συνθηκών και καθημερινών φαινομένων, όπως υγρασία και σκίαση,

γ) τη δημιουργία της προσομοίωσης ενός ηλιακού συλλέκτη χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Ansys Academic R22, αναπτύσσοντας τον γεωμετρικό του σχεδιασμό, επιλέγοντας τα πιο πρόσφορα με βάση τη βιβλιογραφία υλικά. Επίσης, την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία με βάση τις πληροφορίες που συλλέχθηκαν στο προηγούμενο επίπεδο της έρευνας και τον υπολογισμό του ποσοστού παραγόμενης ηλιακής ενέργειας,

δ) τη στατική ανάλυση του μέσω του Ansys Academic R22, σύμφωνα με τα ασκούμενα φορτία οχημάτων, που συναντάμε σε έναν αστικό δρόμο,

ε) τη θερμική ανάλυση του μέσω του Ansys Academic R22, σύμφωνα με την ημερήσια ηλιακή απομόνωση στην Ελλάδα.

Τέλος, ακολουθεί η ανάλυση των αποτελεσμάτων και των πέντε ερευνητικών επιπέδων, ώστε να διεξαχθούν συμπεράσματα και να προταθούν μελλοντικές επεκτάσεις στην έρευνα.

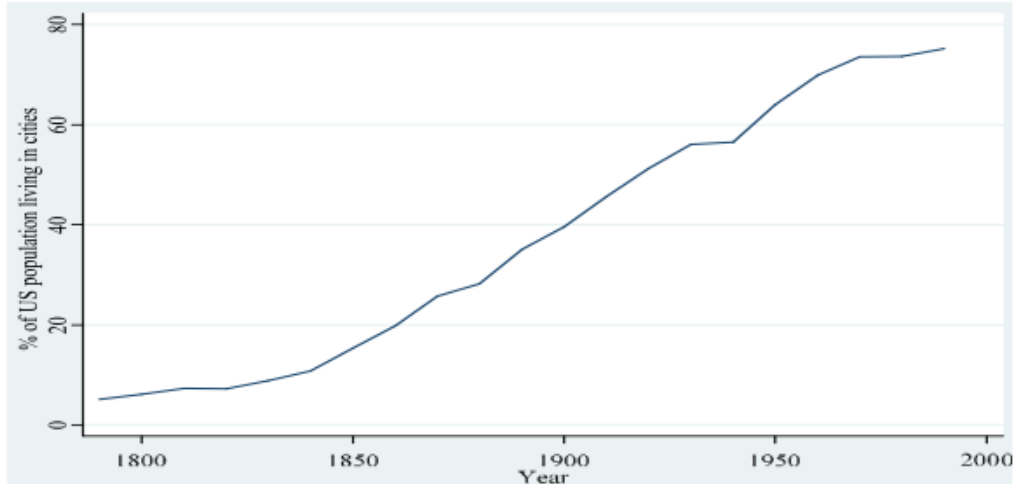
# Α' ΜΕΡΟΣ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

## Κεφάλαιο 1: Ευφυία στην πόλη

### 1.1 Η έννοια της πόλης

Οι πόλεις και ιδίως οι μεγαλουπόλεις αποτελούν κύριο γνώμονα ανάπτυξης σε κοινωνικό και οικονομικό επίπεδο παγκοσμίως, καθώς η πλειοψηφία του πληθυσμού κατοικεί σε αυτές. Σύμφωνα, με τις στατιστικές ο παγκόσμιος πληθυσμός έχει σταθερά αυξανόμενη συγκέντρωση στα αστικά κέντρα παρά τις δύσκολες αντιξοότητες και τις προκλήσεις, που συνδέονται με τη ζωή στους αστικούς ιστούς (Ashaolu, 2021).

Η έννοια της αστικοποίησης ξεκίνησε να εμφανίζεται, όμως, ακόμα και από τον 20<sup>ο</sup> αιώνα, αφού με το τέλος του 2<sup>ου</sup> Παγκοσμίου Πολέμου προέκυψαν καταγραφές από τον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών (ΟΗΕ) και τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (ΠΟΥ) με σημαντική αύξηση του πληθυσμού, που μετακινείται στις πόλεις και στα μεγάλα αστικά κέντρα και όμοια μείωση του πληθυσμού, που απομακρύνεται από την ύπαιθρο (Μυλωνάκης, 2018). Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε από την Απογραφική Υπηρεσία των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (Census Bureau) μία τεράστια αύξηση του πληθυσμού των κατοίκων στα αστικά κέντρα μεταξύ του τέλους του 18<sup>ου</sup> και την αρχή του 21<sup>ου</sup> αιώνα στην κλίμακα του 70%, καθώς το 1790 το 5.1% του πληθυσμού διέμενε στις πόλεις, ενώ το 2000 μόλις το 75% (Βογιατζής&Κολοκοτρώνης, 2017). Υπολογίζεται το ποσοστό των κατοίκων παγκοσμίως να ξεπεράσει το 68% του συνολικού πληθυσμού το 2050 αν και εφόσον παραμείνουν αμετάβλητα τα προαναφερθέντα δεδομένα. Συγκεκριμένα στην Ελλάδα ήδη από το 1950 μετά το τέλος ενός παγκοσμίου και ενός εμφύλιου πολέμου εμφάνιζε υψηλά ποσοστά αστικοποίησης λόγω της αστυφιλίας που χαρακτήριζε το ελληνικό τοπίο, δηλαδή την επιθυμία για ένα καλύτερο και πιο φιλόδοξο τρόπο ζωής στο αστικό περιβάλλον (Μυλωνάκης, 2018).



Εικόνα 1: Αύξηση πληθυσμού στις ΗΠΑ

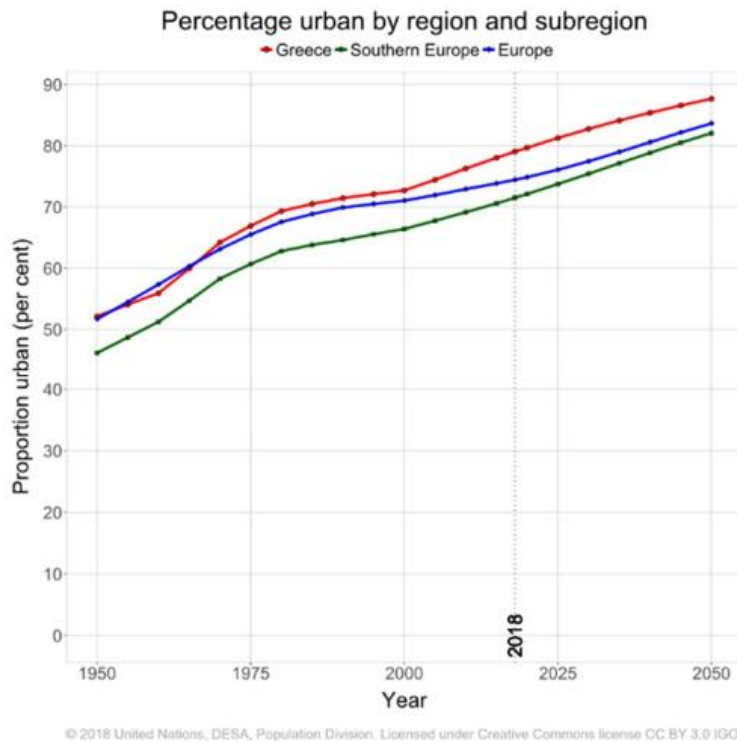
[Smart cities in Europe, Andrea Caragliu, Chiara Del Bo, Peter Nijkamp]

Οι αιτίες μετακίνησης του πληθυσμού στους αστικούς ιστούς ποικίλουν, αφού μία ζωή στην πόλη μπορεί να προσφέρει κυρίως περισσότερες επιλογές στον εργασιακό τομέα, αλλά και πιο ποιοτικές επιλογές υγειονομικού, εκπαιδευτικού χαρακτήρα και πολιτισμικού ενδιαφέροντος (Βογιατζής&Κολοκοτρώνης, 2017). Στις υπηρεσίες των πόλεων συγκαταλέγεται η παροχή στέγης, φαγητού, εύκολης μεταφοράς, ενεργειακών πόρων, θέσεων εργασίας, ασφάλειας, κάτι που επιτυγχάνεται με την επίτευξη κατάλληλων υποδομών. Δεν θα μπορούσε να παραληφθεί, το προνόμιο των πόλεων που σχετίζεται με την ενθάρρυνση των ανθρώπων να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω των δεξιοτήτων τους, αλλά και του ανταγωνισμού, που τους επιφέρει η ανάγκη τους για πιο ικανοποιητικό βιοτικό επίπεδο. Η αλληλεπίδραση με τους κατοίκους της ίδιας της πόλης, αλλά και με αυτούς άλλων χωρών τους φέρνει πιο κοντά (Ashaolu, 2021).

Παρ' όλα αυτά ο υπερπληθυσμός σε ένα μικρό γεωγραφικό τμήμα της κάθε χώρας δημιουργεί νέα θέματα στην κοινότητα, που χρήζουν προς επίλυση, όπως για παράδειγμα κυκλοφοριακή συμφόρηση, διαχείριση απορριμμάτων, κάτι που επιφέρει το κυρίως πρόβλημα την ατμοσφαιρική ρύπανση και την έλλειψη πόρων. Αναφέρεται πως οι πόλεις αποτελούν το κυρίαρχο σύμμαχο του μεγάλου ποσοστού εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου και της υδάτινης κατανάλωσης. Επιπρόσθετα, καταναλώνεται το 60-80% της παγκόσμιας ενέργειας από τα αστικά κέντρα. Ακόμη, χαρακτηρίζονται από έλλειψη οργάνωσης, ασφάλειας, αφού στο κοινωνικό πλαίσιο περιλαμβάνονται πολίτες με πολλών ειδών αξίες, συμφέροντα, κουλτούρες (Βογιατζής&Κολοκοτρώνης, 2017). Πλέον, δεν φαίνεται οι κάτοικοι των πόλεων να έχουν την ίδια διάθεση για ζωή και υποστηρίζεται πως «Σήμερα στις πόλεις έχουμε τον χειρότερο δυνατό συνδυασμό συνθηκών: κίνδυνο χωρίς απόλαυση, ασφάλεια χωρίς ερεθίσματα, κατανάλωση χωρίς επιλογές, μεγέθη χωρίς διαφορετικότητα και ποικιλομορφία» (Wilson E., 1991).

Παρατηρείται από τις έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί ότι ειδικά οι κάτοικοι των ανεπτυγμένων χωρών δεν είναι ικανοποιημένοι από την καθημερινότητα στις πόλεις, κάτι που χαρακτηρίζει και τους Ευρωπαίους πολίτες. Μόνο ένα 20% του πληθυσμού των αμερικάνικων πόλεων θεωρεί τις πόλεις ως την ιδανικότερη επιλογή για διαβίωση. Η απεικόνιση μίας πόλης θα μπορούσε να γίνει σύμφωνα με τον Fischer C.S. (1976) με την εξής λεκτική περιγραφή: «μοντάζ

ανομοιογενών και αντιθετικών στοιχείων [...] παράλογη και βάνανση εγκληματικότητα, προσωπική ελευθερία και απέραντη ελπίδα. Ποικιλία, επιλογή, ερεθίσματα. Άνθρωποι σκληροί και ασυγκίνητοι. Κοινωνικές ομάδες τέτοιας ποικιλίας, που καλύπτουν κάθε ιδιαίτερη ανάγκη ατομικής έκφρασης. Άκρατος και ισοπεδωτικός υλισμός. Πειραματισμός, καινοτομία και δημιουργικότητα. Αγχώδεις μέρες και νύχτες τρόμου» (Μυλωνάκης, 2018).



Εικόνα 2: Αύξηση πληθυσμού στην Ευρώπη και την Ελλάδα

[γράφημα ΟΗΕ, 2018]

Οι συνέπειες της τεχνολογικής εξέλιξης σε συνδυασμό με την υπέρμετρη αστικοποίηση είναι και θετικές από την άποψη της παγκοσμιοποίησης των σημερινών λαών, αλλά και αρνητικές λόγω των κοινωνικών ανισοτήτων που προκαλούν. Αυτές αντικατοπτρίζονται καθημερινά στις ζωές των πολιτών και χρήζουν προς έρευνα επίλυσης τους. Από τη μία πλευρά συζητάμε για προστασία του περιβάλλοντος, κάτι το οποίο αναμφισβήτητα δεν επιτυγχάνεται με την έντονη κατοίκηση στα αστικά κέντρα. Έτσι, οι αστικοί ιστοί καλούνται να αντιμετωπίσουν αυτό το φαινόμενο, που συνδέεται εκτός από τα περιβαλλοντικά ζητήματα και με θέματα οικονομίας, κοινωνικά και πολιτισμικά. Στις σύγχρονες κοινωνίες προκύπτει ο εξής προβληματισμός: Ποιο το όφελος να κατοικούμε σε πόλεις με απίστευτη τεχνολογική ανάπτυξη χωρίς δόση απόλαυσης και καρποφορίας από αυτές (Μυλωνάκης, 2018);

## 1.2 Ορισμός της «έξυπνης πόλης»

Ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του '70 στις ΗΠΑ παρατηρήσαμε κινήσεις για την έναρξη του κινήματος της «έξυπνης ανάπτυξης», το οποίο χαρακτηρίζεται ως η πιο κατάλληλη λύση στην αντιμετώπιση της αστικής ανάπτυξης και αποτέλεσε πόλο έλξης για πολλούς φορείς χάραξης πολιτικής (Μυλωνάκης, 2018). Το κίνημα της «έξυπνης ανάπτυξης» στηρίζεται στην άντληση των δυνατοτήτων των Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνίας (ΤΠΕ/ICT) για τη βελτίωση της αστικής βιωσιμότητας και συνδέεται κατά κόρον με την έννοια της «έξυπνης πόλης». Η έννοια «έξυπνη πόλη» τονίζει τη σπουδαιότητα των ΤΠΕ ως προς απάντηση στις προκλήσεις των σύγχρονων κοινωνιών, όπως οι έξυπνες μεταφορές, υπηρεσίες υγείας, έξυπνη ενέργεια, εκπαίδευση, ασφάλεια, κλ.π. μέσα σε ένα έξυπνο περιβάλλον (Βογιατζής&Κολοκοτρώνης, 2017).

Σύμφωνα με το B.I.S. (2013) η σχέση των πολιτών με την ενσωμάτωση της έξυπνης πόλης ανάγεται σε ενεργή και συμμετοχική σε αντίθεση με την υπάρχουσα, η οποία είναι απλά συμμετοχικού χαρακτήρα. Ο τωρινός τρόπος παροχής υπηρεσιών μεταβάλλεται σε πολιτοκεντρικός με την ανατροφοδότηση των πληροφοριών σε σχέση με την ποιότητα των υπηρεσιών ή ακόμη και την κατάσταση του κάθε οδικού δικτύου. Κατά συνέπεια η επικοινωνία αλλάζει από μονόδρομη σε αμφίδρομη (Βογιατζής&Κολοκοτρώνης, 2017).

Η πρώτη αναφορά στην τεχνολογία της έξυπνης πόλης χρονολογείται κατά το 1992, ενώ το διάστημα μεταξύ εκείνου του έτους και του 2001 δημοσιεύτηκαν μόλις 20 κείμενα επί του θέματος. Έκπληξη προκαλεί το γεγονός ότι το 86% της βιβλιογραφίας για αυτήν προκύπτει από τη διετία 2010-2012 και από τότε οι σχετικές δημοσιεύσεις αυξάνονται ολοένα και περισσότερο. Μαζί με την αναζωπύρωση του θέματος της έξυπνης πόλης σχηματίζονται δύο ομάδες πολιτών, αυτών που υποστηρίζουν θερμά την ιδέα, η οποία αποκαλείται και από πολλούς ως «η νέα γεύση του μήνα και το νέο brand» και αυτών, που караδοκούν για την πτώση της (Μυλωνάκης, 2018).

Ωστόσο, παρά το εύρος της βιβλιογραφίας για τις έξυπνες πόλεις, που συναντάμε δεν υπάρχει κάποιος καθορισμένος, σαφής ορισμός τους λόγω της ποικιλίας εφαρμογής τους σε προβλήματα που παρουσιάζονται, ανάλογα τα δεδομένα της κάθε κοινωνίας, στα 'χέρια' των ερευνητών, μελετητών. Χαρακτηρίζεται από τις «ανεπτυγμένες» χώρες ως ένα τεχνολογικό βοήθημα στην καθημερινότητα με την παροχή προηγμένων ψηφιακών δικτύων. Ο κύριος στόχος τους επικεντρώνεται σε μια διαδικασία μετατροπής των πόλεων σε ποιοτικές, πιο βιώσιμες με στοιχεία προσαρμοστικότητας στις ανάγκες της κάθε κοινωνίας ξεχωριστά (Βογιατζής&Κολοκοτρώνης, 2017).

Η «έξυπνη πόλη» μπορεί να αποδοθεί και να εντοπιστεί και με άλλες σχετικές έννοιες, όπως αυτές της «ευφυής πόλης» (intelligent city), της «έξυπνης κοινότητας» (smart community), της «εικονικής πόλης» (virtual city), της «συνδεδεμένης πόλης» (wired city), της «βιώσιμης πόλης» (sustainable city). Οι Κομνηνός, Pardo και Nam δημιούργησαν τρεις κατηγορίες, τις λεγόμενες «τρεις διαστάσεις» ή «μορφές ευφυΐας» αλληλένδετες μεταξύ τους, οι οποίες πλαισιώνουν την συνολική ιδέα μίας έξυπνης πόλης. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι εξής (Μυλωνάκης, 2018):

- Η τεχνολογική διάσταση, που ορίζεται σύμφωνα με τον Κομνηνό και ως «η τεχνητή ευφυΐα των ψηφιακών δικτύων και εφαρμογών», η οποία έχει ως βάση της υποδομές των ΤΠΕ,

- Η «θεσμική διάσταση» ή «σύμπραξη θεσμών καινοτομίας» (Κομνηνός), που βασίζεται στην ηλεκτρονική διακυβέρνηση και τη πολιτική διαμόρφωση,
- Η ανθρώπινη διάσταση ή «ανθρώπινη παρουσία», με βάση το ανθρώπινο κεφάλαιο, δηλαδή τη γνώση που έχει και λαμβάνει.

Κατά το 2000, μία από τις πρώτες ερμηνείες που δόθηκαν ήταν από τον Hall R. και αναφέρει ότι: *«η έξυπνη πόλη που παρακολουθεί όλες τις κρίσιμες υποδομές όπως δρόμους, γέφυρες, σήραγγες, υπόγειους σιδηρόδρομους, αεροδρόμια, λιμάνια, επικοινωνίες, ύδρευση, ενέργεια και τα πιο σημαντικά δημόσια κτίρια, μπορεί να βελτιστοποιήσει καλύτερα τους πόρους της, να προγραμματίσει προληπτικά τη συντήρησή τους, να επιβλέπει θέματα ασφαλείας και ταυτόχρονα να βελτιστοποιεί τις παρεχόμενες υπηρεσίες στους πολίτες. Η επίβλεψη των υποδομών μπορεί να γίνει με προηγμένα συστήματα παρακολούθησης και ενσωματωμένους έξυπνους αισθητήρες ώστε η πληροφορία να συλλέγεται και να εκτιμάται σε πραγματικό χρόνο, ενισχύοντας τη λήψη αποφάσεων σε θέματα διαχείρισης της πόλης. Με τον παραπάνω τρόπο η ανταπόκριση σε επείγουσες καταστάσεις τόσο σε φυσικές όσο και σε τεχνικές υποδομές μπορεί να είναι άμεση και εστιασμένη»* (Βογιατζής&Κολοκοτρώνης, 2017).

Προχωρώντας ένα βήμα παραπέρα προς τον ορισμό το 2009 οι Caragliu et.al. εισήγαγαν τα ΤΠΕ και έχουν ως βάση το ανθρώπινο και κοινωνικό «κεφάλαιο», τις υποδομές σε μεταφορές και επικοινωνίες και ανφέρονται σε *«μια πόλη είναι έξυπνη όταν οι επενδύσεις σε ανθρώπινο και κοινωνικό κεφάλαιο και οι παραδοσιακές (μεταφορές) και οι σύγχρονες υποδομές επικοινωνίας (ΤΠΕ), τροφοδοτούν μια βιώσιμη οικονομική ανάπτυξη, υψηλή ποιότητα ζωής σε συνδυασμό με σοφή διαχείριση των φυσικών πόρων, μέσω συμμετοχικής διακυβέρνησης»* (Βογιατζής&Κολοκοτρώνης, 2017).

Η συμβολή των πολιτών στην εξέλιξη της πόλης σε ευφυής θεωρείται αναγκαία, σύμφωνα με τον Giffinger (2007), παραθέτοντας παράλληλα έξι χαρακτηριστικά της, την οικονομία, τους ανθρώπους, τη διακυβέρνηση, την κινητικότητα, το περιβάλλον και τη διαβίωση, αναφερόμενος στο ότι: *«έξυπνη είναι μια πόλη με ικανοποιητικές επιδόσεις στα έξι αυτά χαρακτηριστικά, δομημένα στον έξυπνο συνδυασμό κληροδοτημάτων και δράσεων πολιτών οι οποίοι είναι ικανοί στη λήψη αποφάσεων, ανεξάρτητοι και συνειδητοποιημένοι»*.

Οι Wahburn & Sindhu (2010) πεπεισμένοι πλέον στη σπουδαιότητα της έξυπνης πόλης μέσα από την πληροφορική θεωρούν ζωτικής σημασίας της σύμφωνα με τα λεγόμενα τους: *«η χρήση έξυπνων τεχνολογιών πληροφορικής με σκοπό να γίνουν τα κρίσιμα συστατικά των υποδομών και οι υπηρεσίες μιας πόλης – που περιλαμβάνουν τη διοίκηση της πόλης, την εκπαίδευση, την υγεία, τη δημόσια ασφάλεια, την κτηματική περιουσία, τις μεταφορές και τις υπηρεσίες κοινής ωφελείας – πιο ευφρείς, διασυνδεδεμένες και αποτελεσματικές»* (Βογιατζής&Κολοκοτρώνης, 2017).

Οι Nam & Pardo (2011) αναφέρονται στην οργανική σύνδεση μεταξύ των τεχνολογιών, των ανθρώπινων και θεσμικών συστατικών θέτοντας θεσμική – πολιτική διάσταση στην έξυπνη πόλη. Ο συνδυασμός κρίκος μεταξύ της οικονομικής και τεχνολογικής εξέλιξης είναι η έμφαση στις επιπτώσεις στο κοινωνικό σύνολο και: *«η έξυπνη πόλη θα μπορούσε να γίνει αντιληπτή ως ορισμένη διανοητική διαδικασία που περιλαμβάνει αρκετές καινοτόμες κοινωνικό-τεχνολογικές και κοινωνικόοικονομικές πτυχές ανάπτυξης»* (Zygiaris, 2012) (Βογιατζής&Κολοκοτρώνης, 2017).

Οι Chourabi et.al. (2012) καθαρά επηρεασμένοι από τη σημασία της τεχνολογικής διάστασης, που είχε δοθεί τα προηγούμενα χρόνια προτείνουν μέσω του άρθρου στο “Understanding Smart Cities:



An Integrative Framework” το εξής: «οι έξυπνες πόλεις είναι σαν οργανισμοί που αναπτύσσουν ένα τεχνητό νευρικό σύστημα το οποίο τους επιτρέπει να συμπεριφέρονται με έξυπνους, συντονισμένους τρόπους», προσθέτοντας ότι «η νέα νοημοσύνη των πόλεων βρίσκεται στον ολόενα και περισσότερο αποτελεσματικό συνδυασμό που αποτελείται από (Βογιατζής&Κολοκοτρώνης, 2017):

- Τα ψηφιακά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα (τα οποία αποτελούν τα νεύρα)
- Την ενσωματωμένη ευφυΐα (που αποτελεί τον εγκέφαλο)
- Τους αισθητήρες και τις ετικέτες (που αποτελούν τα αισθητήρια όργανα) και
- Το λογισμικό (που αντιπροσωπεύει τη γνώση και τη γνωστική ικανότητα)».

Από την άλλη, ο Dameri (2013) θεωρεί πως ο κατάλληλος ορισμός για την έξυπνη πόλη πρέπει να λαμβάνει τέσσερις βασικούς παράγοντες υπόψιν (Βογιατζής&Κολοκοτρώνης, 2017):

- Τα συστατικά που την αποτελούν (components), δηλαδή από τη γη, τους πολίτες, την τεχνολογία και τη διακυβέρνηση.
- Τα όρια (boundaries). Μπορεί να εκτείνεται από μια τοπική αστική διάσταση μιας πόλης έως μία περιφέρεια, ή από το δίκτυο μιας πόλης, έως εθνική ή παγκόσμια διάσταση.
- Πλαίσιο δράσεων (scope). Πρέπει να έχει καλά ορισμένους και μετρήσιμους στόχους αναφορικά με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, τη δημιουργία έξυπνου «πνευματικού κεφαλαίου», την ευημερία και τη συμμετοχή των πολιτών.
- Ορολογία (terminology). Μια πόλη είναι έξυπνη, γιατί είναι ευφυής, ψηφιακή, διασυνδεδεμένη, βιώσιμη, δημοκρατική και χωρίς αποκλεισμούς.

Με βάση τα παραπάνω θεωρείται ευφυής μία πόλη, που: «Έχει επαρκώς καθορισμένη γεωγραφική έκταση, στην οποία, η υψηλή τεχνολογία όπως οι ΤΠΕ, η διοικητική μέριμνα, η παραγωγή ενέργειας και πολλά άλλα συνεργάζονται για να παράξουν οφέλη στους πολίτες αναφορικά με την ευημερία, τη συμμετοχή των πολιτών, την περιβαλλοντική ποιότητα και την έξυπνη ανάπτυξη. Διοικείται από μια σαφώς ορισμένη ομάδα ατόμων η οποία θέτει τους κανόνες και την πολιτική για την διακυβέρνηση και ανάπτυξη της πόλης» (Βογιατζής&Κολοκοτρώνης, 2017).

Δεν θα μπορούσε να παραληφθεί όμως, και ο ορισμός του Massachusetts Institute of Technology (MIT), ο οποίος παραθέτει νέα δεδομένα σχετικά με την εφαρμογή των ΤΠΕ: «Η έξυπνη πόλη επιδιώκει την αειφορία, τη βιωσιμότητα και την κοινωνική δικαιοσύνη μέσω καινοτομίας στην τεχνολογία και στον σχεδιασμό. Οι πόλεις είναι συστήματα άλλων συστημάτων και αναδεικνύουν ευκαιρίες για την εισαγωγή ψηφιακών νευρικών συστημάτων, ευφυή ανταπόκριση και βελτίωση σε κάθε επίπεδο ολοκλήρωσης τους συστήματος, από εκείνη των ατομικών συσκευών, ως εκείνη των κτιρίων και τελικά ολόκληρης πόλης ή αστικής περιοχής» (Βογιατζής&Κολοκοτρώνης, 2017).

Μέσω των δεδομένων αυτών αντιλαμβανόμαστε ότι οι έρευνες πραγματοποιούνται από πανεπιστημιακά ιδρύματα στην Ευρώπη, με την Ελλάδα να παίρνει τη δεύτερη θέση στην ΕΕ, ενώ στις ΗΠΑ διεξάγονται από την Ακαδημαϊκή κοινότητα σε συνεργασία με τα ΤΠΕ (ICT). Περίπου το μισό της συνολικής βιβλιογραφίας επί του θέματος που βρίσκουμε έχει ερευνηθεί από την IBM και τη Forrester Research. Οι έρευνες αυτών παρουσιάζουν αρκετές αποκλίσεις, καθώς η IBM υποστηρίζει ότι οι ΤΠΕ αποτελούν το κύριο τμήμα για την επίτευξη μέγιστης κατανόησης και

διαχείρισης των λειτουργιών μέσω της κατανάλωσης των περιορισμένων πόρων της (Μυλωνάκης, 2018).

Εν αντιθέσει η CISCO θεωρεί τη χρήση της ψηφιακής τεχνολογίας έξυπνη, όταν γίνεται με στόχο την προστασία, ενίσχυση της ζωής των πολιτών με την πλήρη ενημέρωσή τους σχετικά με τα κοινωνικά δίκτυα μέσω αισθητήρων IoT. Στην ουσία παρέχει στους πολίτες εμπιστοσύνη για τη διαχείριση και τη διεκπεραίωση σωστών ενεργειών με την ευκολία της έγκαιρης πληροφόρησής τους (Μυλωνάκης, 2018).

### 1.3 Σπουδαιότητα ένταξης έξυπνης πόλης

Η χρήση των τεχνολογιών που προσφέρει μία έξυπνη πόλη αποτελεί αναγκαιότητα, καθώς με την έντονη αστικοποίηση δημιουργούνται με την πάροδο του χρόνου περιβαλλοντικά προβλήματα. Από την άλλη πλευρά, υπάρχει το κρίσιμο σημείο του υπερμεγέθους κόστους τους, που όμως δεν αποτελεί θέμα, αφού με την εφαρμογή της μειώνεται ριζικά η κατανάλωση ενέργειας, νερού, οι εκπομπές άνθρακα και γενικά τα απόβλητα μίας παραδοσιακής πόλης (Chopra, Kumar, 2021; Dada, Musha, Shadare, 2016). Συναντάμε πολλά διαφορετικά επίπεδα ευφυΐας μίας πόλης λόγω των απαιτήσεων που έχει η κάθε κοινότητα, παρόλα αυτά έχουν θεσπιστεί κάποια συγκεκριμένα δεδομένα, στα οποία στηρίζεται η πλειοψηφία αυτών (Mohanty, Chopalli, Kougianos, n.d.).

Ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO) και άλλοι οργανισμοί με τη θέσπιση αυτών των προτύπων παρέχουν κατανοητές προδιαγραφές με στόχο την ποιότητα, αποτελεσματικότητα, κατανόηση και κατά συνέπεια ασφάλεια. Τα πρότυπα αυτά θέτονται με βάση τους διάφορες παραμέτρους, όπως για παράδειγμα τη διαχείριση των πόρων και την επιχειρηματικότητα για την παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας εφαρμογής της έξυπνης πόλης, έτσι ώστε να επιτευχθεί το βασικό κομμάτι της μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Chopra, Kumar, 2021; Mohanty, Chopalli, Kougianos, n.d.).

Η IEEE έχει αποδώσει διάφορα χαρακτηριστικά στις έξυπνες πόλεις, όπως τα έξυπνα δίκτυα, το IoT, την ηλεκτρονική υγεία και τα ΤΠΕ (Ashaolu, 2021; Mohanty, Chopalli, Kougianos, n.d.). Ένα παράδειγμα που πληροί αυτά τα χαρακτηριστικά είναι το ISO 37120, που περιλαμβάνει 100 δείκτες απόδοσης εκ των οποίων οι 46 είναι βασικοί, ενώ οι 54 δευτερεύοντες (για υποστήριξη των βασικών). Κάποιοι από αυτούς φαίνονται να είναι οι εξής (Ashaolu, 2021):

- Η οικονομία
- Η εκπαίδευση
- Η ενέργεια
- Το περιβάλλον

Χρησιμοποιούνται ως πρότυπα από την πολιτική της κάθε πόλης για αξιολόγηση απόδοσης τους, σύγκριση τους με το επιθυμητό αποτέλεσμα, μετέπειτα βελτιστοποίησή τους και τελικά εφαρμογής τους και σε περιπτώσεις άλλων πόλεων (Ashaolu, 2021).

Με την παρακολούθηση των συνθηκών μία έξυπνη πόλη ενσωματώνεται σε υποδομές, όπως δρόμους, γέφυρες, σήραγγες, υπόγειους σιδηροδρόμους, αεροδρόμια, λιμάνια και φυσικά σε κτίρια. Τα κοινά γνωρίσματα μίας ευφυούς πόλης αποτελούνται από (Ashaolu, 2021):

- Τους έξυπνους ανθρώπους, με την ενεργή τους συμμετοχή στα θέματα της ευρύτερης κοινωνίας
- Την έξυπνη διακυβέρνηση, που χαρακτηρίζεται ως ηλεκτρονική διακυβέρνηση και βασίζεται στη δημιουργία κοινωνικών δικτύων για τη συμμετοχή των πολιτών.
- Τα έξυπνα σπίτια
- Την έξυπνη τεχνολογία
- Την έξυπνη οικονομία, έχει ως βάση της την καινοτομία, την παραγωγικότητα και την εξέλιξη της αγοράς.
- Την έξυπνη κινητικότητα, που στηρίζεται στη σχεδίαση κατάλληλων υποδομών για διευκόλυνση της κυρίως της μετακίνησης με κύριο γνώμονα την καινοτομία.
- Την έξυπνη διαβίωση, που ενσωματώνει πολλά από τα υπόλοιπα γνωρίσματα της έξυπνης πόλης και αφορά ένα κοινωνικό ζήτημα.
- Την έξυπνη στάθμευση
- Το έξυπνο περιβάλλον, με διαχείριση φυσικών πόρων και σχεδιασμό εναλλακτικών τρόπων παραγωγής ενέργειας για την προστασία του.

Μία απεικόνιση κάποιων από αυτά τα στοιχεία γίνεται στην Εικόνα 3. Μία πόλη για να καταφέρει να χαρακτηριστεί ως έξυπνη δεν είναι αναγκαίο να πληροί όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά, αφού το πλήθος τους εξαρτάται από το διαθέσιμο κεφάλαιο και την αξιοποιήσιμη τεχνολογία (Ashaolu, 2021).

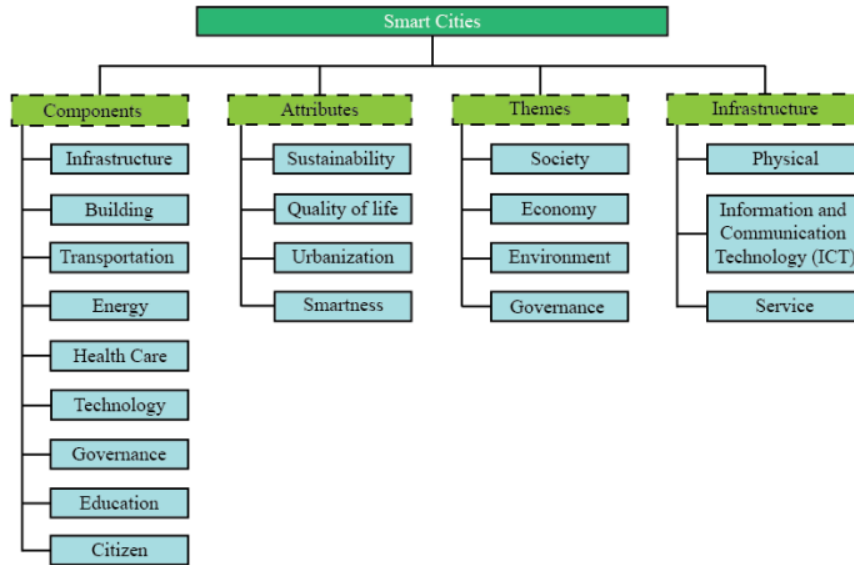


Εικόνα 3: Χαρακτηριστικά της ευφυούς πόλης

[“Smart Cities”, Ashaolu]

## 1.4 Τεχνολογίες της «έξυπνης πόλης»

Τα στοιχεία – χαρακτηριστικά, που καθιστούν μία πόλη ευφυή συνοψίζονται στην Εικόνα 4. Κάποια από αυτά είναι μεταξύ άλλων οι έξυπνες υποδομές, μεταφορές, τα έξυπνα κτίρια, η έξυπνη ενέργεια, διακυβέρνηση, υγειονομική περίθαλψη και οι έξυπνοι πολίτες. Ανάλογα με το που επιθυμεί η κάθε πόλη να εστιάσει, τα επίπεδα εφαρμογής τεχνολογιών ποικίλουν, αλλά έχουν όλα κοινή τη βιωσιμότητα, την ποιότητα ζωής (QoL) (Mohanty,Choppali,Kougianos, n.d.).



Εικόνα 4: Ανάλυση χαρακτηριστικών της ευφυούς πόλης

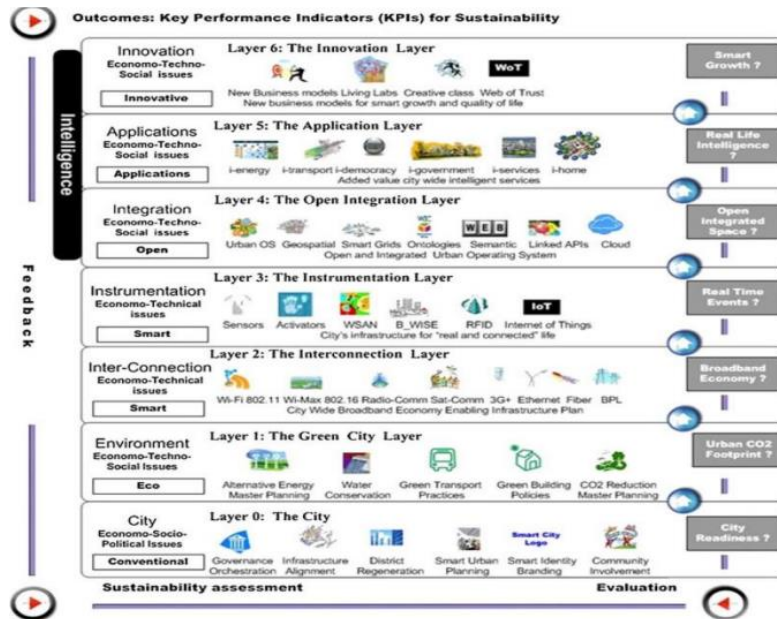
[“Everything You wanted to Know about Smart Cities”, Mohanty et al.]

Η βιωσιμότητα μίας τέτοιας πόλης βασίζεται στις υποδομές της και τη γενική διακυβέρνηση και εστιάζει στην εξοικονόμηση ενέργειας για τη μείωση της κλιματικής αλλαγής και της ρύπανσης, ενώ δίνει βάση και στην οικονομία και στην υγεία. Η ποιότητα ζωής (QoL) επιτυγχάνεται με την οικονομική και συναισθηματική άνεση των πολιτών (Mohanty,Choppali,Kougianos, n.d.).

Στις βασικές πτυχές μίας έξυπνης πόλης περιλαμβάνονται η κοινωνία, η οικονομία, το περιβάλλον και η διακυβέρνηση. Το κοινωνικό πλαίσιο αφορά τη συνύπαρξη μεταξύ των πολιτών και της πόλης, όπου κατοικούν, ενώ το οικονομικό αποτελείται από τη συνεχή ευδοκίμηση των θέσεων εργασίας και κατ’ επέκταση της οικονομίας. Το θέμα του περιβάλλοντος πηγάζει από την ανάγκη διατήρησης μίας καλής ποιότητας ζωής για τις επόμενες γενιές, κάτι που συγχρονίζεται μαζί με τα υπόλοιπα με την ισχυροποίηση της διακυβέρνησης, η οποία έχει ως στόχο τη σωστή διαχείριση πολιτικών για τον έλεγχο και τη ρύθμιση των διάφορων τεχνολογιών της πόλης (Ashaolu, 2021;Θεοδώρου, 2012).

Για τη μέτρηση της αποτελεσματικότητας μίας έξυπνης πόλης έχει προταθεί από τον Zygiaris S. (2012) ένα Μοντέλο Αναφοράς Έξυπνης Πόλης (Smart City Reference Model), το οποίο χωρίζεται σε επτά (7) επίπεδα. Αυτά τα επίπεδα (layers) είναι τα εξής (Ashaolu, 2021;Μυλωνάκης, 2018):

- Επίπεδο 0: Το επίπεδο που σχετίζεται με το βαθμό ετοιμότητας της πόλης να ενσωματώσει τα έξυπνα στοιχεία δίνοντας προτεραιότητες και έμφαση στην καινοτομία.
- Επίπεδο 1: Η εφαρμογή έξυπνων υποδομών, όπως ευρυζωνικά δίκτυα, αισθητήρες κ.α., ώστε να επιτευχθεί η περιβαλλοντική προστασία και να συζητάμε πλέον για μία πράσινη συνείδηση.
- Επίπεδο 2: Χαρακτηρίζεται ως επίπεδο διασύνδεσης, δηλαδή ψηφιακής διασύνδεσης σε όλους τους χώρους της πόλης για γρήγορη πρόσβαση σε όλες τις λειτουργίες της και εκμετάλλευση από τους πολίτες της.
- Επίπεδο 3: Όπως λέγεται το επίπεδο οργάνωσης, όπου η διαθεσιμότητα πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο με τη βοήθεια του IoT (Internet of Things), στο οποίο περιλαμβάνονται τα συστήματα RFI (Radio Frequency Identification), οι ασύρματοι αισθητήρες (wireless sensors), τα δίκτυα δεκτών – ενεργοποιητών, αλλά και όλες οι συσκευές δικτύωσης. Οι αισθητήρες (sensors) έχουν ως κύρια λειτουργία την ανίχνευση σημάτων και την παραγωγή πληροφοριών από μία μετρήσιμη έξοδο. Κάποιες από τις ποσότητες που μπορούν να μετρήσουν περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων τη θέση, την ταχύτητα, τη δύναμη(π.χ. του ανέμου), την πίεση, την ατμοσφαιρική ρύπανση τη θερμοκρασία, την φωτεινότητα, την επιτάχυνση, κ.α.. Η διασύνδεση αυτών των συσκευών πραγματοποιείται, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, από το 2<sup>ο</sup> επίπεδο, ακολούθως επιβλέπονται από το 4<sup>ο</sup> επίπεδο, ενώ η τροφοδότηση των εφαρμογών με δεδομένα πραγματικού χρόνου αποτελεί στοιχείο του 5<sup>ου</sup> επιπέδου.
- Επίπεδο 4: Πρόβλεψη για ανοιχτή και διαμοιρασμένη αποθήκευση δεδομένων με εξασφάλιση επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών συστημάτων καταγραφής και άντλησης δεδομένων, ώστε να επιτευχθεί η συνεργασία μεταξύ τους.
- Επίπεδο 5: Αποτελεί το επίπεδο εφαρμογής μέσω των ΤΠΕ, όπως για παράδειγμα τα έξυπνα ενεργειακά δίκτυα, οι έξυπνες μεταφορές, ο έλεγχος του κυκλοφοριακού φόρτου, αλλά και η έξυπνη διακυβέρνηση και οι ηλεκτρονικές πληρωμές.
- Επίπεδο 6: Αυτό το επίπεδο είναι εξίσου σημαντικό για την εξέλιξη της πόλης, καθώς αφορά την καινοτομία με την τροποποίηση της πόλης, έτσι ώστε να προσελκύει με τον καιρό όλο και περισσότερες επιχειρήσεις.



Εικόνα 5: Τα επίπεδα της έξυπνης πόλης

Όσο και αν είναι ο βαθμός της συμμετοχής του ανθρώπου σε αυτές τις τεχνολογίες αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι, καθώς αυτός τις επινοεί, τις τροποποιεί και τις χρησιμοποιεί σαν εργαλεία συλλογής και αξιοποίησης των πληροφοριών.

Ακόμη η ευφυής πόλη μπορεί να χωριστεί και σε άλλα τρία επίπεδα, που αναφέρονται στα είδη ευφυΐας, όπως η ατομική (διανοητικό κεφάλαιο), η συλλογική (κοινωνικό κεφάλαιο) και η τεχνητή ευφυΐα (ψηφιακός χώρος). Όσον αφορά τη φάση του σχεδιασμού οι λήψεις αποφάσεων κατηγοριοποιούνται σε δύο αντιλήψεις, τη top down (από πάνω προς τα κάτω) και τη bottomup, δηλαδή από κάτω προς τα πάνω. Η κύρια διαφορά των κατηγοριών αυτών είναι ότι στη δεύτερη περίπτωση συναντάμε μία ανθρωποκεντρική ανάπτυξη, δηλαδή η λήψη των αποφάσεων γίνεται από τις «ρίζες» της πόλης και αναμεταδίδονται στους υπόλοιπους (Μυλωνάκης, 2018).

Σε αντίθεση στην top down έχουμε μία μορφή κεντρικής ανάπτυξης, ο σχεδιασμός τους πραγματοποιείται συνήθως από την Αρχή διακυβέρνησης της πόλης και πρέπει να ακολουθηθεί από τους υπόλοιπους φορείς και πολίτες ως έχει. Σε αυτή την περίπτωση όμως έχουμε το φαινόμενο μίας μηδενικής συμμετοχής των πολιτών στις αποφάσεις, κάτι που έχει φανερά ενοχλήσει τις κοινωνίες, καθώς δεν πληρούν τις ανάγκες των πολιτών αλλά μόνο των επιχειρήσεων (Μυλωνάκης, 2018).

Οι πόλεις bottomup έχουν βάση τους το σχεδιασμό καινοτομιών από τους πολίτες με ποικίλους τρόπους, που ακολουθείται από την εφαρμογή και μεταφορά στους θεσμούς προς εκμετάλλευσή τους. Η εφαρμογή αυτών φυσικά επιτυγχάνεται με οδηγό τα ΤΠΕ, τα οποία χρησιμοποιούνται από τους ίδιους τους πολίτες της κάθε κοινωνίας (Μυλωνάκης, 2018).

Σύμφωνα με τον Giffinger (2007) για το βέλτιστο σχεδιασμό μίας έξυπνης πόλης είναι αναγκαία η χρήση κάποιων τομέων δραστηριοτήτων, που εντοπίζονται μέσα στην κοινωνία. Η πρόταση του περιείχε τους εξής τομείς (Μυλωνάκης, 2018):

- Την έξυπνη οικονομία, η οποία έχει ως βάση της τον εκσυγχρονισμό και την εξέλιξη γενικά της αγοράς, τα οποία πηγάζουν από την παραγωγικότητα και την ανταγωνιστικότητα
- Τους έξυπνους ανθρώπους με τη συμμετοχή τους σε κοινά ζητήματα της κοινωνίας
- Την έξυπνη κινητικότητα με το σχεδιασμό νέου ασφαλούς οδικού δικτύου για μετακινήσεις
- Την έξυπνη (ηλεκτρονική) διακυβέρνηση με τη χρήση κοινωνικών δικτύων
- Το έξυπνο περιβάλλον με την εξάντληση φυσικών πόρων και εύρεση εναλλακτικών τρόπων παραγωγής ενέργειας, οι οποίοι θα χαρακτηρίζονται πιο φιλικό προς το περιβάλλον
- Την έξυπνη διαβίωση, της οποία στόχος είναι η ποιοτική ζωή στις πόλεις, η οποία θα απαντάται σε όλους τους τομείς

Οι παραπάνω τομείς δραστηριοτήτων έχουν συνδεδετικό τους κρίκο το στόχο τους για περιφερειακή και αστική ανάπτυξη και καθένας από αυτούς αναφέρεται σε μία θεωρία αντίστοιχα, όπως περιφερειακής ανταγωνιστικότητας, μεταφορών, οικονομίας, ΤΠΕ, φυσικών πόρων, ανθρωπίνου και κοινωνικού κεφαλαίου, συμμετοχής πολιτών σε θέματα δημόσιου βίου και ποιότητας ζωής. Αυτοί οι τομείς μπορούν να συμπεριληφθούν στις εξής πιο γενικευμένες κατηγορίες:

1. Υποδομές.
2. Διακυβέρνηση και
3. Οικονομίας της καινοτομίας.

#### 1.4.1 Έξυπνα κτίρια και κατασκευές

Η τεχνολογία που αφορά την ενσωμάτωση «δομικής υγείας» στα κτίρια και γενικά τις κατασκευές περιλαμβάνει αισθητήρες, οι οποίες χρησιμοποιούνται μέσω κάποιων εφαρμογών, ώστε να δύναται η παρακολούθηση και καταγραφή διάφορων δεδομένων. Αυτά τα δεδομένα αποτελούνται είτε από μικρομετακινήσεις λόγω σεισμών ή άλλων τυχηματικών φαινομένων, είτε ακόμα και μετρήσεις επιπέδων υγρασίας, θερμοκρασίας και ρύπων. Οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται μέσω των αισθητήρων έχουν χρησιμότητα και ως προς τη πιο σωστή λειτουργία των χώρων, όπως γίνεται και στις περιπτώσεις των συστημάτων ελεγχόμενης παρακολούθησης και ανανέωσης του αέρα της ατμόσφαιρας των κλειστών χώρων για την άνεση των χρηστών (Μυλωνάκης, 2018).

#### 1.4.2 Διαχείριση κυκλοφορίας

Η διαχείριση της κυκλοφορίας επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση αισθητήρων εντός ή άνω του οδοστρώματος, οι οποίοι παρακολουθούν την κυκλοφοριακή ροή και συνδέονται με διάφορα άλλα εργαλεία για τη συλλογή, επεξεργασία και μετάδοση μέσω ηλεκτρονικών πινακίδων μηνυμάτων (πινακίδες VMS, variable message signs) ή εφαρμογών σε έξυπνα κινητά των δεδομένων θέσης ή/και κίνησης των οχημάτων. Με τη διαχείριση της κυκλοφορίας στοχεύεται έμμεσα η προτροπή των πολιτών σε μία πιο οικολογική μετακίνηση, είτε με μέσα μαζικής μεταφοράς, είτε με την πιο ορθή χρήση των οχημάτων τους (Μυλωνάκης, 2018).

#### 1.4.3 Έξυπνος φωτισμός οδών

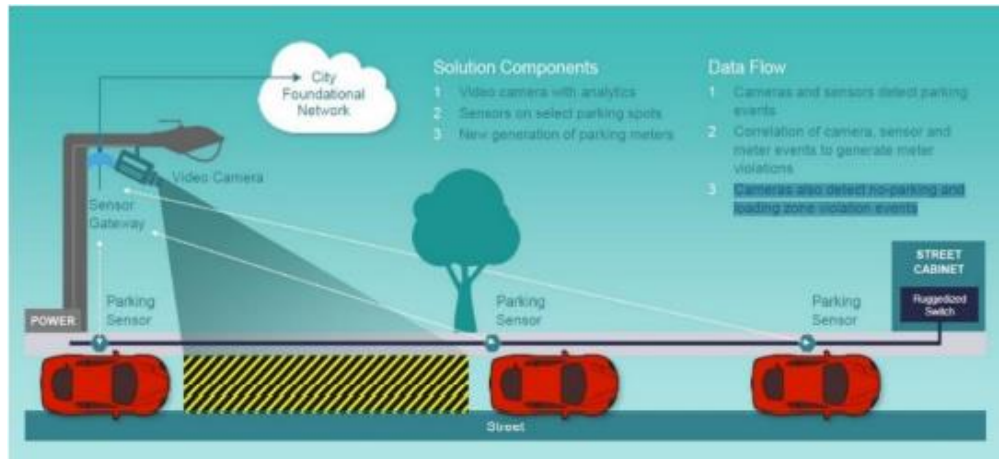
Οι εφαρμογές για τον έξυπνο φωτισμό ποικίλλουν, καθώς ο οδοφωτισμός αποτελεί ένα σπουδαίο κεφάλαιο της ευφυούς πόλης. Η εξέλιξη των εφαρμογών αυτών χαρακτηρίζεται ως τεράστια, καθώς κάθε φωτιστικό σώμα έχει τη δυνατότητα μετατροπής σε έναν κόμβο συλλογής και αποστολής διαφόρων πληροφοριών προς το κέντρο αποφάσεων της πόλης. Πραγματοποιείται, έτσι, παρακολούθηση λειτουργιών της πόλης με τη συνδεσιμότητα των εφαρμογών οδοφωτισμού με άλλες πλατφόρμες εφαρμογών είτε σε παγκόσμιο είτε σε τοπικό επίπεδο. Στον οδοφωτισμό δίνονται οι παρακάτω δυνατότητες (Μυλωνάκης, 2018):

- Προγραμματισμού της έναυσης και του σβήσιματος φωτιστικών σωμάτων σε πραγματικό χρόνο, είτε μέσω των εφαρμογών που χρησιμοποιούνται από τους χρήστες, είτε σε συνθήκες μειωμένου φωτισμού ή σε συνθήκες μειωμένης κυκλοφοριακής ροής αντίστοιχα.
- Αύξησης της έντασης των φωτιστικών σωμάτων τη στιγμή διέλευσης οχημάτων και μόνο.
- Προσαρμογής της έντασης τους σε σχέση με τις τοπικές συνθήκες φωτισμού γειτνίασης.
- Προσαρμογής της έντασης ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες ή έκτακτων καταστάσεων.

#### 1.4.4 Έξυπνη στάθμευση

Τα οχήματα κατά την διάρκεια αναζήτησης ελεύθερης θέσης για στάθμευση εκπέμπουν το 30% των συνολικών ρύπων από οχήματα, το οποίο κυμαίνεται στο 80%. Έτσι, το θέμα της ανάπτυξης εφαρμογών Ευφώνων Συστημάτων Μεταφορών αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της έξυπνης πόλης. Μία λύση υιοθέτησης για τις θέσεις στάθμευσης αποτελείται από την εφαρμογή αισθητήρων στο οδόστρωμα, οι οποίοι χαρακτηρίζονται ως ευαίσθητοι στην αλλαγή του μαγνητικού πεδίου και ενεργοποιούνται μεταξύ του διαστήματος, που πλησιάζει και απομακρύνεται ένα όχημα. Την χρονική στιγμή που απομακρύνεται από τη θέση το όχημα, καταγράφεται ως ελεύθερη δίνοντας σήμα στον πλησιέστερο κόμβο και μετέπειτα σε εφαρμογές στις κινητές συσκευές ή σε κατάλληλους πίνακες VMS (Variable Message Signs) (Μυλωνάκης, 2018).





Εικόνα 6: Έξυπνη στάθμευση

[Solutions for a Smart City, Cisco]

#### 1.4.5 Παρακολούθηση ενεργειακής κατανάλωσης

Στόχος της παρακολούθησης της ενεργειακής κατανάλωσης δεν αποτελεί μόνο η οικονομική και περιβαλλοντική ακμή των πόλεων, αλλά και η ποιοτική χρήση των δημοτικών εγκαταστάσεων. Η παρακολούθηση αυτή επιτυγχάνεται με την χρήση λαμπτήρων led με την κατάλληλη διαχείριση τους και αισθητήρων παρακολούθησης της ποιότητας τους αέρα, κ.α.. Μία ακόμη ενέργεια που θα έπαιξε σημαντικό ρόλο θα ήταν η προσθήκη ενός συστήματος επιβράβευσης για τους χρήστες, οι οποίοι μείωσαν την ενεργειακή κατανάλωση των κατοικιών ή των επιχειρήσεων τους (Μυλωνάκης, 2018).

#### 1.4.6 Ασφάλεια

Για την εξασφάλιση μίας ασφαλούς διαβίωσης στην πόλη έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες, όπως (Μυλωνάκης, 2018):

- Ο έξυπνος οδοφωτισμός, ο οποίος αυξάνει την οδική ασφάλεια, αλλά και αυτή των πεζών.
- Οι αισθητήρες ήχου για τον εντοπισμό απότομων αυξήσεων ήχων και στη συνέχεια αξιοποίηση τους στην παραγωγή ενέργειας.
- Η χρήση καμερών για παρακολούθηση, οι οποίες λειτουργούν προγραμματισμένα ή έπειτα από εντολή άλλων αισθητήρων. Η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει το μειονέκτημα της καταπάτησης της ιδιωτικότητας των πολιτών.
- Οι αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας, οι οποίοι τοποθετούνται σε μέρη ευαίσθητα σε πυρκαγιές (δάση, άλση, κ.α.), ώστε να αποφευχθούν τέτοιου είδους φαινόμενα.
- Οι αισθητήρες καταγραφής ρύπων στην ατμόσφαιρα για υγειονομικούς λόγους.

#### 1.4.7 Εφαρμογές MMM

Μία έξυπνη πόλη επιδιώκει την ενίσχυση της χρήσης των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς (MMM), το οποίο πραγματοποιείται με ποικίλους τρόπους άμεσα ή και έμμεσα. Κάποιες άμεσες εφαρμογές περιλαμβάνονται από την τηλεματική ενημέρωση για τον χρόνο άφιξης των μέσων και τη χρήση λεωφορείων χωρίς οδηγό (Δήμος Τρικκαίων). Ταυτόχρονα, με την πληροφόρηση των χρηστών για την κυκλοφορική συμφόρηση ή με την αύξηση του κομίστρου των διοδίων θα επιδίωκαν οι πολίτες την χρήση των MMM πιο συχνά. Επιπρόσθετα, σημαντικός αποτελεί ο σωστός σχεδιασμός των δρομολογίων, τα οποία θα πρέπει να είναι τακτικά (Μυλωνάκης, 2018).

#### 1.4.8 Έξυπνη ύδρευση – αποχέτευση

Μία εφαρμογή αποτελεί η παρακολούθηση του ποσοστού ποιότητας του πόσιμου νερού μέσω αισθητήρων, που συλλέγουν δεδομένα από το δίκτυο ύδρευσης. Με τη χρήση των αισθητήρων, όμως, σε κόμβους ελέγχου ροής στο δίκτυο επιτυγχάνεται και η εύρεση διαρροών, κάτι που βοηθάει στην άμεση αντιμετώπιση τους από τα συνεργεία βλαβών. Στην περίπτωση των νησιωτικών περιοχών, μία αρκετά αξιόλογη εφαρμογή αποτελεί η παρακολούθηση της στάθμης του αποθηκευμένου νερού στις δεξαμενές, ώστε σε ζητήματα ελάχιστων αποθεμάτων να ενεργοποιείται άμεσα η άντληση μέσω γεωτρήσεων (Μυλωνάκης, 2018).

#### 1.4.9 Μετρήσεις επιπέδων ρύπων

Με χρήση αισθητήρων μετρώνται οι ρύποι της ατμόσφαιρας (π.χ. CO<sub>2</sub>), των δικτύων ή και των οικοσυστημάτων (λίμνες, θάλασσες, ποτάμια, κ.λπ.). Στην ουσία ανιχνεύεται η ατμοσφαιρική ρύπανση σε υπαίθριους χώρους και απεικονίζεται σε χάρτες, ώστε να πραγματοποιείται παρακολούθηση του φαινομένου ανά πάσα στιγμή. Με τα δεδομένα αυτά λαμβάνονται αποφάσεις για την προστασία των περιοχών, οι οποίες μπορεί να αποτελούνται με μερική ή/και ολική απαγόρευση κυκλοφορίας των οχημάτων σε αυτές ή από ενεργοποίηση συστημάτων εξαερισμού σε περιπτώσεις κλειστών χώρων. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούνται αισθητήρες και για παρακολούθηση του επιπέδου μόλυνσης ενός οικοσυστήματος (Μυλωνάκης, 2018).

### 1.5 Internet of Things (IoT)

Η αξιοποίηση της πληροφορίας που συλλέγεται ανέπτυξε τον χώρο του διαδικτύου αρχικά από μία μορφή μονόδρομης επικοινωνίας σε μία αμφίδρομης και τελικά σε μία ευφυής. Το σύστημα λειτουργίας του διαδικτύου αποτελείται από αισθητήρες, οι οποίοι συλλέγουν πληροφορίες τις οποίες μεταβιβάζουν στις διάφορες μηχανές (υπολογιστές, κινητές και ηλεκτρικές συσκευές, αυτοκίνητα, κατασκευές κ.α.), ώστε να την αξιοποιήσουν και να ληφθούν αποφάσεις (Ashaolu, 2021;Dada,Musa,Shadare, 2016;Μυλωνάκης, 2018). Τα έξυπνα τηλέφωνα περιλαμβάνουν

διάφορους αισθητήρες, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αρωγοί από τους χρήστες, όπως (Μυλωνάκης, 2018):

- Αισθητήρες θέσης, επιτάχυνσης και γυροσκοπικοί για εφαρμογές πλοήγησης (GPS).
- Μικρόφωνο για μέτρηση στάθμης θορύβου ή ηχογραφήσεις στην τηλεϊατρική.
- Αισθητήρες φωτός για προσαρμογή φωτεινότητας και μετρήσεις λαμπρότητας.
- Αισθητήρες μαγνητικού πεδίου για εφαρμογές έξυπνης ελεγχόμενες στάθμευσης.

Τα έξυπνα τηλέφωνα επικοινωνούν, είτε μεταξύ τους, είτε με υπολογιστές και με αυτόν τον τρόπο μεταδίδονται οι πληροφορίες στο πεδίο σε εφαρμογές της έξυπνης πόλης (τοπικές καιρικές συνθήκες, σταθμευμένα οχήματα κ.α.) και έτσι καθίστανται εργαλεία συμμετοχής στην «έξυπνη ζωή» των χρηστών των πόλεων (Μυλωνάκης, 2018). Καθώς, το IoT εφαρμόζεται ως ένα εργαλείο ΤΠΕ λειτουργεί σύμφωνα με νέες τάσεις, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία προβλημάτων στο επίπεδο της διαλειτουργικότητας. Τα προβλήματα στη διαλειτουργικότητα αποτελούν φαινόμενα της πολυπλοκότητας των διασυνδεδεμένων πραγμάτων σε ένα ήδη κορεσμένο περιβάλλον (Βογιατζής&Κολοκοτρώνης, 2017.Μυλωνάκης, 2018). Η επικοινωνία μέσω IoT πραγματοποιείται σε ελεγχόμενες περιοχές (intranet of things) και σε δημόσια προσβάσιμες (Επιτροπή Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, 2009) και περιλαμβάνεται από τρεις τύπους (Βογιατζής&Κολοκοτρώνης, 2017):

- Αντικείμενο προς άνθρωπο
- Αντικείμενο προς αντικείμενο
- Μηχανή προς μηχανή (M2M)

Δύο είναι τα κύρια οφέλη της χρήσης του IoT σύμφωνα με τους Hernández-Muñoz et al. (2011), όπως η αύξηση της αποτελεσματικότητας και της ακρίβειας στη λειτουργία και διαχείριση του πολύπλοκου αστικού συστήματος και επιπλέον η υποστήριξη στις νέες καινοτόμες εφαρμογές και υπηρεσίες. Ταυτόχρονα, η αύξηση της επεξεργαστικής ισχύος και του εύρους ζώνης (bandwidth) των διαύλων των δεδομένων μέσω της ενσωμάτωσης του IoT στην πόλη δίνεται η δυνατότητα συλλογής, αποθήκευσης και επεξεργασίας των big data (BD), που έχουν παραχθεί από τους αισθητήρες (Βογιατζής&Κολοκοτρώνης, 2017). Παρόλα αυτά αποτελεί πρόκληση ο προγραμματισμός των συσκευών, που συνδέονται με τους αισθητήρες για συλλογή δεδομένων, αλλά και τα ανομοιόμορφα χαρακτηριστικά των πληροφοριών (big data) ως προς την επεξεργασία τους (Μυλωνάκης, 2018).

## 1.6 Τροφή για σκέψεις

Τα προβλήματα της ανάπτυξης έξυπνων πόλεων είναι πολλά και περίπλοκα. Το κόστος, η αποτελεσματικότητα, η βιωσιμότητα, η επικοινωνία και η ασφάλεια είναι μερικά παραδείγματα. Το φυσικό περιβάλλον, οι κυβερνητικές πολιτικές, οι κοινωνικές κοινότητες και η οικονομία επηρεάζουν όλες αυτές τις δυσκολίες σχεδιασμού (Mohanty,Chopalli,Kougianos, n.d.).

Η πιο ουσιαστική πτυχή του σχεδιασμού έξυπνης πόλης είναι το κόστος. Το κόστος καλύπτει τόσο το κόστος σχεδιασμού όσο και το κόστος λειτουργίας. Το κόστος του σχεδιασμού είναι μια δαπάνη για τις έξυπνες πόλεις. Το κόστος λειτουργίας είναι το κόστος της διατήρησης της λειτουργίας της έξυπνης πόλης. Για να γίνει πραγματικότητα μια έξυπνη πόλη, το κόστος σχεδιασμού πρέπει να είναι χαμηλό. Ταυτόχρονα, το χαμηλό λειτουργικό κόστος θα διευκολύνει τη λειτουργία των πόλεων μακροπρόθεσμα με ελάχιστη πίεση στον προϋπολογισμό της πόλης. Η βελτιστοποίηση κόστους σε όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος μπορεί να είναι μια δύσκολη εργασία (Mohanty,Chopalli,Kougianos, n.d.).

Η αποδοτικότητα λειτουργίας των έξυπνων πόλεων είναι μια σημαντική πρόκληση: η αυξημένη αποδοτικότητα μπορεί να μειώσει το λειτουργικό κόστος και να βελτιώσει τη βιωσιμότητα της έξυπνης πόλης. Απαιτούνται μειωμένες εκπομπές άνθρακα και δημοτικά σκουπίδια για να βελτιωθεί η βιωσιμότητα και η αποδοτικότητα, με ταυτόχρονη μείωση του λειτουργικού κόστους (Mohanty,Chopalli,Kougianos, n.d.).

Οι έξυπνες πόλεις πρέπει να προσαρμόσουν την πληθυσμιακή επέκταση, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα με χαμηλό λειτουργικό κόστος. Οι έξυπνες πόλεις πρέπει να είναι ανθεκτικές απέναντι σε καταστροφές και αποτυχίες. Μπορεί να συμβούν φυσικές καταστροφές και βλάβες στο σύστημα μπορεί να προκύψουν για ποικίλες αιτίες, όπως διακοπή ICT ή διακοπή ρεύματος. Οι φυσικές καταστροφές μπορούν ενδεχομένως να προκαλέσουν αποτυχία πολλών στοιχείων των έξυπνων πόλεων. Οποιοσδήποτε σχεδιασμός έξυπνης πόλης πρέπει να λαμβάνει υπόψη αυτές τις καταστροφές και αποτυχίες, ώστε να μπορούν να ανακάμψουν από τέτοια γεγονότα όσο το δυνατόν γρηγορότερα (Mohanty,Chopalli,Kougianos, n.d.).

Αυτά τα προβλήματα θα έχουν αντίκτυπο στο κόστος σχεδιασμού και λειτουργίας των έξυπνων πόλεων. Οι έξυπνες πόλεις γίνονται εφικτές με την επιτυχή χρήση διαφόρων έξυπνων στοιχείων, όπως οι ΤΠΕ, οι αισθητήρες και το IoT, και θα απαιτήσουν την επεξεργασία και αποθήκευση τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων. Η ασφάλεια των πληροφοριών και των υποδομών είναι ένα σημαντικό θέμα σχεδιασμού. Πάνω απ' όλα, η δημόσια ασφάλεια είναι ένα βασικό πρόβλημα σχεδιασμού για τις έξυπνες πόλεις, καθώς η ασφάλεια των ανθρώπων είναι ζωτικής σημασίας, γεγονός που μπορεί να αυξήσει το κόστος σχεδιασμού και λειτουργίας (Mohanty,Chopalli,Kougianos, n.d.).

Με τα πολλά χαρακτηριστικά των πόλεων σε όλο τον κόσμο, μπορεί να είναι δύσκολο να σχεδιαστεί ένα καθολικό σταθερό σύστημα. Ωστόσο, έχει διαπιστωθεί ότι οι ορισμοί που προτείνονται από ορισμένες πόλεις που ισχυρίζονται ότι είναι «έξυπνες πόλεις» στερούνται ομοιομορφίας (Albino,Berardi&Dangelico, 2016).

Μια αξιολόγηση έξυπνων πόλεων πρέπει να λαμβάνει υπόψη ότι οι πόλεις έχουν ποικίλες ιδέες και προτεραιότητες για την επίτευξη των στόχων τους, αλλά πρέπει να ενθαρρύνουν την ολοκληρωμένη ανάπτυξη όλων των περιοχών (Albino, Berardi & Dangelico, 2016).

### 1.6.1 Οφέλη

Οι έξυπνες πόλεις είναι ουσιαστικά τεχνολογικά προηγμένες κοινότητες που χρησιμοποιούν ψηφιακή τεχνολογία για τη διεξαγωγή επιχειρήσεων και τη δημιουργία ενός πιο αποτελεσματικού και δια βιώσιμου περιβάλλοντος. Η αναβάθμιση μιας πόλης σε έξυπνη πόλη έχει πολλά πλεονεκτήματα. Οι έξυπνες πόλεις υπόσχονται βιώσιμη ανάπτυξη και καλή ποιότητα ζωής για τους πολίτες τους. Οι έξυπνες πόλεις προσελκύουν άτομα με υψηλή εκπαίδευση και ικανούς εργαζόμενους. Προωθούν την κοινωνική, περιβαλλοντική, οικονομική και πολιτιστική ανάπτυξη. Αποτελούν μια ενδιαφέρουσα τοποθεσία για να ζήσετε και μια εστία καινοτόμων ιδεών. Σύμφωνα με τους ειδικούς, οι έξυπνες πόλεις μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικά και ευχάριστα μέρη για να ζεις. Τα προγράμματα έξυπνων πόλεων έχουν υψηλές φιλοδοξίες για τη βελτίωση της διοίκησης και την ενίσχυση της ποιότητας ζωής των κατοίκων. Αυτές παρέχουν πολλά οφέλη στην κυβέρνηση και στους κατοίκους, όπως βελτιωμένη παροχή υπηρεσιών, ποιότητα ζωής και ασφάλεια. Ο τουρισμός, η υγεία, τα εκπαιδευτικά ιδρύματα, η έξυπνη υγειονομική περίθαλψη, η έξυπνη ενέργεια, η έξυπνη στέγαση, η πρόληψη του εγκλήματος, οι έξυπνες υποδομές, η ασφάλεια και η ασφάλεια, η διαχείριση καταστροφών και η διαχείριση σκουπιδιών είναι μεταξύ των πλεονεκτημάτων (Ashaolu. 2021; Shadare & Dada, 2016).

Η επικρατούσα άποψη είναι ότι με τη συμμετοχή των πολιτών, αναλαμβάνουν ενεργό ρόλο, αναλαμβάνουν την ευθύνη και επιδεικνύουν οικολογική συμπεριφορά. Στην πραγματικότητα, θεωρούνται κυρίαρχοι του εαυτού τους. Οι πολίτες συμμετέχουν ενεργά στην πόλη όντας οι ίδιοι αισθητήρες ή χρησιμοποιώντας τα κινητά τους τηλέφωνα. Τα δεδομένα που συλλέγουν αυτά τα κέντρα κατευθύνονται σε περιοχές που συλλέγουν μεγάλο όγκο δεδομένων για διάφορα θέματα (big data), ώστε να μπορούν να αναλυθούν τα δεδομένα και να εξαχθούν συμπεράσματα για την καλύτερη εξυπηρέτηση των πολιτών (Μυλωνάκης, 2018).

### 1.6.2 Προκλήσεις

Οι τρέχουσες πρωτοβουλίες για τη δημιουργία έξυπνων πόλεων αντιμετωπίζουν πολλά εμπόδια. Τα ακραία καιρικά φαινόμενα, οι αυξανόμενες ελλείψεις τροφίμων, ο ανταγωνισμός πόρων, η αυξανόμενη μετανάστευση από την ύπαιθρο προς την πόλη, η αυξημένη συμφόρηση, η γήρανση του πληθυσμού και η αύξηση των δαπανών του δημόσιου τομέα είναι όλα κοινά ζητήματα. Αν και οι γρήγορες πρόοδοι στις ΤΠΕ βοηθούν στην ψηφιοποίηση των πόλεων, εισάγουν επίσης νέα εμπόδια λόγω της αυξανόμενης πολυπλοκότητας και του δυναμισμού των έξυπνων πόλεων (Ashaolu. 2021).

Η οικοδόμηση έξυπνων πόλεων είναι γεμάτη εμπόδια. Τα χαρακτηριστικά των έξυπνων πόλεων σε όλο τον κόσμο ποικίλλουν. Για να αξιοποιήσετε πλήρως τα οφέλη του IoT, απαιτείται μια ομοιόμορφη πλατφόρμα και μια δομή «δοκιμασμένη στη μάχη» για την επόμενη γενιά έξυπνων πόλεων. Η διεθνής τυποποίηση είναι κρίσιμη για τη διασφάλιση της συμβατότητας υπηρεσιών και

συσκευών. Τα πρότυπα (όπως αυτά που ορίζονται από το ISO και το IEEE) μπορεί να είναι κρίσιμα για τη δημιουργία έξυπνων πόλεων. Πρέπει να διασφαλίσουμε ότι τόσο οι πληροφορίες όσο και τα άτομα είναι ασφαλή. Επειδή τα δίκτυα θεωρούνται τα λιγότερο ασφαλή στοιχεία του συστήματος, οι πόλεις πρέπει να επαληθεύουν την ασφάλεια του δικτύου πριν ξεκινήσουν τις προσπάθειες για έξυπνες πόλεις. Εκτός από αυτά τα ζητήματα, η παγκόσμια κλιματική αλλαγή θα έχει επίδραση στις πόλεις (Ashaolu. 2021).

Μεγάλη κριτική ασκείται στις έξυπνες πόλεις και στον τρόπο που σχεδιάζονται και εφαρμόζονται. Οι πιο έντονες πολεμικές εναντίον τους αφορούν τις κοινωνικές ανάγκες, την ιδιωτικότητα και την ελευθερία των ατόμων σε αυτές τις πόλεις. Πολλοί επιστήμονες έχουν εκφράσει ανησυχίες για την κατεύθυνση της τεχνολογίας και αυτή η κριτική δεν περιορίζεται στους κοινωνικούς επιστήμονες. Σύμφωνα με πολλούς, οι έξυπνες πόλεις είναι η αστική ουτοπία του 21ου αιώνα. Η έννοια της «έξυπνης πόλης» δεν είναι σαφώς καθορισμένη και έχει διαφορετικές έννοιες ανάλογα με το πού συζητείται. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να σχετίζεται με συγκεκριμένα σχέδια, έργα και πειράματα. Ωστόσο, αυτό δεν συμβαίνει πάντα και ο ορισμός μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την περιοχή στον κόσμο. Η ιδέα της έξυπνης πόλης παραμένει νεφελώδης και απροσδιόριστη, παρά τη σημαντική επένδυση της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Πολλά αναπάντητα ερωτήματα παραμένουν και υπάρχουν πολλά ανταγωνιστικά ενδιαφέροντα. Το ποσοστό των κριτικών, που προστίθενται σε ιστότοπους αυξάνεται (Μυλωνάκης, 2018).

Υπάρχει πολλή κριτική για τις έξυπνες πόλεις, από όλες τις διαφορετικές οπτικές γωνίες. Αυτό συμβαίνει επειδή δεν υπάρχει ένας σαφής ορισμός της «έξυπνης πόλης» και διαφορετικοί σχεδιαστές προσεγγίζουν την ιδέα από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Ορισμένες πόλεις είναι χτισμένες από την αρχή και κατακλύζονται από τεχνολογικές λύσεις, που έχουν σχεδιαστεί από άτομα στα γραφεία που γνωρίζουν ήδη τις ανάγκες των πολιτών. Αυτές οι νέες πόλεις, σύμφωνα με τον συγγραφέα, αφήνουν ελάχιστες ευκαιρίες στους πολίτες να αντιδράσουν στις πολιτικές τους ενέργειες, καθώς σπάνια βλέπονται ή ακούγονται από πολιτικά όντα (Μυλωνάκης, 2018).

Υπάρχει φόβος ότι η τεχνολογία θα γίνει εκτός ελέγχου και ότι οι πολίτες θα χάσουν τη φωνή τους. Για τις πόλεις που συμμετέχουν ενεργά και έχουν κάποιο ρόλο να διαδραματίσουν σε αυτές, υπάρχουν πολλά οφέλη. Ταυτόχρονα, οι ίδιοι οι πολίτες συμμετέχουν ενεργά στη λειτουργία της πόλης, παίζοντας ενεργό ρόλο σε αυτήν, ακόμη και ως αισθητήρες οι ίδιοι ή οι έξυπνες συσκευές τους (Μυλωνάκης, 2018).

Ορισμένοι επικριτές αυτής της άποψης υποστηρίζουν ότι προσφέροντας στους πολίτες κίνητρα για να ευαισθητοποιηθούν κοινωνικά και να συμμετάσχουν στη λειτουργία της πόλης, η νεοφιλελεύθερη προσέγγιση δημιουργεί ένα «δόλωμα» που τελικά θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη ευαισθητοποίηση και συμμετοχή των πολιτών στη ζωή της πόλης. Η επικρατούσα άποψη είναι ότι με τη συμμετοχή των πολιτών, αναλαμβάνουν ενεργό ρόλο, αναλαμβάνουν την ευθύνη και επιδεικνύουν οικολογική συμπεριφορά. Στην πραγματικότητα, θεωρούνται κυρίαρχοι του εαυτού τους (Μυλωνάκης, 2018).

## Κεφάλαιο 2: Έξυπνοι δρόμοι

### 2.1 Η σπουδαιότητα της οδοποιίας

Ήδη από την αρχαιότητα ο άνθρωπος λόγω της επιθυμίας του για επικοινωνία και για επιβίωση ξεκίνησε να δημιουργεί πιο οριοθετημένα μονοπάτια, αρχικά με υλικά, όπως το χώμα και η άμμος και στη συνέχεια τα εξέλιξε με τη χρήση της πέτρας, έτσι ώστε να μετακινείται πιο εύκολα και γρήγορα. Για τη μεταφορά των προϊόντων στην αγορά χρησιμοποιούνταν άλογα, γαϊδούρια, μουλάρια και άλλα ζώα για το βαρύ φορτίο (“History of Road Transport”, n.d.). Περιπλανώμενοι άνθρωποι φορτωμένοι με προϊόντα, περπατώντας σε αυθαίρετα μονοπάτια, διαβαίνοντας βάλτους και ποτάμια ήταν η εικόνα για πολλά χρόνια προτού ανακαλυφθούν όλες αυτές οι ευκολίες που έχουμε σήμερα (“History of Road Transport”, n.d.).

Σύμφωνα με τον Abrams (2013) οι δρόμοι παρουσίαζαν αρκετά προβλήματα, όμως, ειδικά τις βροχερές μέρες, όπου δημιουργούνταν ποτάμια λάσπης, επομένως αναγκάστηκαν να προβούν σε χρήση διαφορετικών υλικών κατασκευής. Γύρω στο 4000 π.Χ. κατασκευάστηκαν οι πρώτοι πέτρινοι δρόμοι στην Ινδία και σε κάποια μέρη της Μεσοποταμίας για την επικοινωνία μεταξύ των περιοχών. Στην Κίνα κατασκευάστηκαν αρκετές οδοί με τη πιο σπουδαία τη Silk road, η οποία ήταν από τις αρχαιότερες και ήταν κατασκευασμένη από μεγάλους σχιστόλιθους (“Streets and Roads”, n.d.).

Με την ανακάλυψη του τροχού διευκολύνθηκε αρκετά η μετακίνηση των ανθρώπων και η μεταφορά των προϊόντων τους, αλλά ήταν και η πηγή αναζήτησης νέων, καλύτερων μεθόδων κατασκευής οδών (“History of Road Transport”, n.d.). Σε όλο τον κόσμο υπήρξαν αρκετές ιδέες για την εξέλιξη της οδοποιίας, αλλά αυτοί που ξεχώρισαν ήταν οι Ρωμαίοι. Κατασκεύασαν δρόμους στη ρωμαϊκή αυτοκρατορία, αλλά και στην υπόλοιπη Ευρώπη και στη Βόρεια Αφρική. Λίθινοι οδοί, με αποχέτευση, με πολλές διαφορετικές στρώσεις αποτελούσαν πλέον το οδικό δίκτυο. Εκτενής οδικά έργα σε άλλα μέρη του κόσμου είναι το απέραντο οδικό δίκτυο των Ίνκας, που εξυπηρετούσε πολλούς στρατιωτικούς και θρησκευτικούς σκοπούς, αλλά και το Σινικό Τείχος της Κίνας, ένα δίκτυο 8.800 km ανυψωμένων δρόμων, που εξασφάλιζε την αποφυγή εισβολών. Στα μέσα του 18ου αιώνα, αρκετοί μηχανικοί χρησιμοποίησαν τις θεωρίες τους για τις οδούς και υπήρξαν αρωγοί για τους σύγχρονους δρόμους (“Road Construction: History and Current Methods”, 2009).



*Εικόνα 7: Αρχαία οδοποιία*

[pinterest]

Οι μεταφορές αγαθών και οι μετακινήσεις ανθρώπων συνέβαλλαν στην ανάπτυξη των οδικών δικτύων όλων των κοινωνιών, καθώς αποτελούν τους κύριους γνώμονες ανάπτυξης τους σε επίπεδο οικονομικό, πολιτισμικό και επικοινωνιακό. Με τη μεταφορά προϊόντων διαμορφώνεται η ποιότητα ζωής της κάθε κοινωνίας προς το καλύτερο, επιτυγχάνεται η αλληλεπίδραση των πολιτών μεταξύ των χωρών και έτσι δημιουργούνται σύνδεσμοι ανάμεσα σε πόλεις, έθνη και κατασκευαστές. Νέες πόλεις δημιουργήθηκαν με την ανάπτυξη των οδικών δικτύων, τα οποία αποτέλεσαν δίοδο προς την πρόοδο των επιχειρήσεων και τη γενική εξέλιξη των κοινωνιών (Chopra&Kumar, 2021;Sanguesa&Martinez, 2020;Sadiku,Shadare,Musa, 2017) .

## 2.2 Η έννοια του έξυπνου δρόμου

Ο όρος «έξυπνος δρόμος» αναφέρεται σε οδικές υποδομές που έχουν συνδυαστεί με σύγχρονη τεχνολογία δικτύων και επικοινωνιών. Ένας έξυπνος δρόμος, με άλλα λόγια, αποτελείται από εξελιγμένα δομικά υλικά, δίκτυα αντίληψης, κέντρα πληροφοριών, δίκτυα επικοινωνίας και ενεργειακά συστήματα και μπορεί να εκτελέσει ενεργή αντίληψη, αυτοματοποιημένη διάκριση, αυτοπροσαρμογή, δυναμική αλληλεπίδραση και συνεχή παροχή ενέργειας. Ένας έξυπνος δρόμος, σε σύγκριση με έναν κανονικό δρόμο, θα πρέπει να μπορεί να παρατείνει τη διάρκεια ζωής του, να ενισχύει την απόδοσή του, να ελαχιστοποιεί τις ανησυχίες για την ασφάλεια και να βελτιώνει την ποιότητα των υπηρεσιών. Η ιδέα ενός έξυπνου δρόμου επικεντρώνεται στην επίτευξη ευφυνών δυνατοτήτων όπως αυτές που περιγράφονται παραπάνω (Sun et al, 2018).

Ευφυή υλικά, καταναμημένες οπτικές ίνες, ευφύς φιλμ, πιεζοηλεκτρικές συσκευές, συμβατικοί αισθητήρες και άλλες τεχνολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή και τη χρήση ενός έξυπνου δρόμου. Ένας έξυπνος δρόμος χρησιμοποιεί έξυπνα υλικά ή αισθητήρες για να



παρακολουθεί ενεργά τη δική του κατάσταση, την απόδοση, το περιβάλλον και τη συμπεριφορά του. Στη συνέχεια, τα δεδομένα που αποκτώνται βαθμονομούνται, ενσωματώνονται, διαχειρίζονται, αναλύονται, διαγιγνώσκονται και αξιολογούνται αυτόματα. Ο έξυπνος δρόμος μπορεί στη συνέχεια να αυτοπροσαρμόζεται στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, της υγρασίας, της κυκλοφορίας και ούτω καθεξής και μπορεί να ελέγχει και να επιδιορθώνει ενεργά οποιαδήποτε ζημιά με βάση τα επεξεργασμένα ευρήματα. Εν τω μεταξύ, ο έξυπνος δρόμος μπορεί να αλληλοεπιδρά με εξωτερικά στοιχεία σε πραγματικό χρόνο μέσω της αίσθησης και της διάκρισης (Sun et al, 2018).

Ένας έξυπνος δρόμος θα πρέπει να είναι ένα αυτοσυντηρούμενο σύστημα που εκτελεί όλα τα καθήκοντα που αναφέρονται παραπάνω χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μόνο του. Η διάταξη των πληροφοριών είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη έξυπνων δρόμων. Πρέπει να δημιουργηθεί ένα σύστημα «δρόμου προς τα πάντα» (R2X) εντός του συστήματος μεταφοράς, μαζί με ένα ανάλογο σύστημα «όχημα προς τα πάντα» (V2X). Πρέπει επίσης να κατασκευαστεί ένα σύστημα όχημα-δρόμος προς όλα (VR2X) για να επιτρέπει ένα ολοκληρωμένο σύστημα οχήματος-δρόμου. Οι πληροφορίες μέσα στο ενσωματωμένο σύστημα οχήματος-δρόμου μπορεί να είναι σωστά δομημένες ανάλογα με την πλατφόρμα TIM4, η οποία αποτελείται από τέσσερα στοιχεία (Sun et al, 2018).

Η μοντελοποίηση πληροφοριών οδηγού μεταφοράς (TDIM), η μοντελοποίηση πληροφοριών μεταφορικών οχημάτων (TVIM), η μοντελοποίηση πληροφοριών κτιρίου μεταφορών (TBIM) και η μοντελοποίηση πληροφοριών περιβάλλοντος μεταφοράς αποτελούν την πλατφόρμα TIM4 (TEIM). Οι πληροφορίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις ομάδες με βάση τις απαιτήσεις ταχύτητας μετάδοσης και όγκου δεδομένων: δυναμική, σχεδόν δυναμική, σχεδόν στατική και στατική. Για την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των διαφόρων τμημάτων του συστήματος μεταφοράς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλοί μηχανισμοί επικοινωνίας (Sun et al, 2018).

Το μελλοντικό σύστημα μεταφορών οραματίζεται ως ένα σύστημα «πέντε μηδέν», με μηδέν θύματα, μηδενικές καθυστερήσεις, μηδενική συντήρηση, μηδενικές εκπομπές ρύπων και μηδενική βλάβη. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου συστήματος απαιτεί μια συστηματική βελτιστοποίηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των στοιχείων και τον συντονισμό κάθε στοιχείου στο σύστημα μεταφορών, δηλαδή άνθρωποι, αυτοκίνητα, δρόμος και περιβάλλον (Sun et al, 2018).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ανάγκη για μετακίνηση, ιδίως στις σύγχρονες κοινωνίες, είναι αδιαμφισβήτητη και η σημαντικότητα της έχει άμεση σχέση με την οικονομία της κάθε πολιτείας, η οποία εμφανίζει μια βελτίωση στη μετακίνηση των ανθρώπων από τόπο σε τόπο για τη μεταφορά των προϊόντων τους και τη μετέπειτα βιομηχανοποίηση των κοινωνιών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του πληθυσμού στα μεγάλα συγκοινωνιακά κέντρα και έτσι και τη χρήση διαφόρων και πολυάριθμων τρόπων μετακίνησης για τη διευκόλυνση της (αυτοκίνητα, ποδήλατα, μηχανές). Με τη χρήση αυτών των μέσων κυκλοφορίας των πολιτών έχουν προκύψει προβλήματα στις «μοντέρνες» κοινωνίες, όπως κίνηση και ατυχήματα στους δρόμους. Κάποια δευτερεύοντα προβλήματα είναι η ρύπανση του περιβάλλοντος, αλλά και τα οικονομικά θέματα, τα οποία πηγάζουν από τα υψηλά κόστη στα αέρια, που χρησιμοποιούνται για την κίνηση των οχημάτων (Cano et.al., 2019 :2).

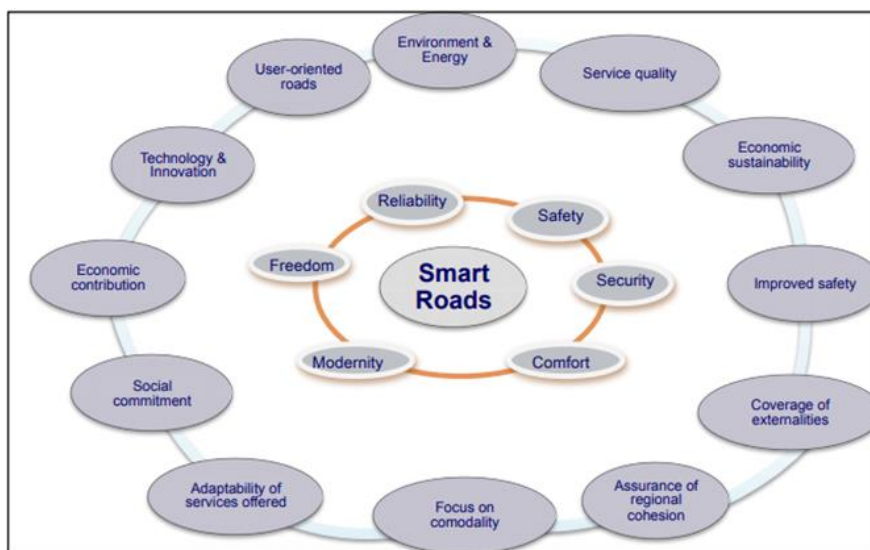
Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες και ενέργειες για την επίλυση αυτού του διεθνούς προβλήματος, οι οποίες οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι η συντήρηση των συμβατών οδών δεν είναι αρκετή, αλλά η αντικατάστασή τους με δρόμους νέους και έξυπνα

διαμορφωμένους κρίνεται αναγκαία. Τα προηγούμενα χρόνια οι μεταφορές αντιμετωπίζονταν ως θέματα που χρήζουν πολιτικής και δομικής αντιμετώπισης, ενώ με τον ερχομό του έξυπνου κινούμενου κόσμου προστίθενται οι τεχνολογίες πληροφοριακής επικοινωνίας, οι οποίες καθιστούν την πόλη πλέον δικτυωμένη ψηφιακά (Sun et al, 2018).

Η φιλοσοφία του έξυπνου δρόμου κινείται πάνω στην κατασκευή καλύτερων οδών με σωστό οδοφωτισμό, πινακίδες και σήματα, ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα προβλήματα που συναντάμε στις σύγχρονες κοινωνίες (Sun et.al., 2018). Επιπρόσθετα, αυτή η ιδέα δεν είναι απαραίτητο να αφορά μόνο το σχεδιασμό ή την κατασκευή νέων υποδομών βάσει των χαρακτηριστικών που την περιγράφουν, αλλά και τη συντήρηση και τον εκσυγχρονισμό υφιστάμενων οδικών δικτύων (Pena, 2015).

Γενικότερα, σε σχέση με έναν δρόμο με τις συμβατικές εφαρμογές του, ο έξυπνος δρόμος θα έχει τη δυνατότητα επέκτασης της διάρκειας ζωής και της απόδοσης του βάσει της βελτιωμένης ποιότητας των υπηρεσιών και των προηγμένων τεχνολογιών που προσφέρει και κατ' επέκταση θα συμβάλλει στη μείωση των κινδύνων ασφαλείας (Sun et.al., 2018). Συγκεκριμένα, ο δομικός τομέας των έξυπνων δρόμων θα περιλαμβάνει τα εξής (Pena, 2015):

- την πιο φιλική στο περιβάλλον κατασκευή, σε σχέση με την ενέργεια που καταναλώνεται. Αυτή η ιδέα περιλαμβάνει τρόπους διαχείρισης της κατανάλωσης ενέργειας και εκπομπής αερίων, τα οποία είναι επιβλαβή προς το περιβάλλον, αλλά και τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών στην κατασκευή των έξυπνων οδικών δικτύων
- τη στενευμένη εκτέλεση των υπηρεσιών, οι οποίες βασίζονται στην ανά πάσα στιγμή ενημέρωση των οδηγών για την κατάσταση του δρόμου σε σχέση με τον κυκλοφοριακό φόρτο του
- την οικονομική βιωσιμότητα, η οποία σχετίζεται απόλυτα με την κατασκευή νέων δρόμων, ιδίως εκείνων με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο, αλλά και με τη συντήρηση υφιστάμενων οδικών δικτύων
- τη διασφάλιση της ασφάλειας, η οποία επιτυγχάνεται με τον σχεδιασμό νέων δρόμων με τις βέλτιστες πρακτικές και την επιμελή και τακτική συντήρηση των υπαρχόντων οδικών δικτύων
- την κάλυψη εσωτερικότητων, δηλαδή τα “εξωτερικά” κόστη, τα οποία προκύπτουν από την μετακίνηση των ανθρώπων και των εμπορευμάτων τους και κατά συνέπεια την αύξηση του θορύβου και των ατυχημάτων
- τη διασφάλιση της περιφερειακής συνεκτικότητας, με την αύξηση της μέριμνας σχετικά με τους προαστιακούς δρόμους και όχι μόνο των αστικών
- την εστίαση στη συντροπικότητα (co-modality), η οποία στοχεύει στην εύκολη μετάβαση μέσω του δρόμου σε λιμάνια, αεροδρόμια, σταθμούς μεταφοράς, σύνδεση με λεωφορεία, κ.λπ.
- την άμεση σχέση με τους οδηγούς, η οποία θα σχετίζεται με τις απαιτήσεις τους
- την τεχνολογική καινοτομία με την εξέλιξη των υλικών κατασκευής νέων οδικών δικτύων και με την ανάπτυξη αειφόρων μεθόδων συντήρησης των υφιστάμενων δρόμων



Εικόνα 8: Χαρακτηριστικά των έξυπνων οδών

[“Smart Roads: A Vision”]

Επιπλέον, οι έξυπνοι δρόμοι σχεδιάζονται, ώστε να καλύπτουν τις συναισθηματικές ανάγκες των χρηστών-οδηγών, όπως (Pena, 2015):

- την αξιοπιστία ως προς τον κυκλοφοριακό φόρτο των οδικών δικτύων με τις προηγμένες τεχνολογίες που προσφέρουν
- την ασφάλεια, που επιθυμούν οι οδηγοί, ώστε να χρησιμοποιήσουν την οποιαδήποτε διαδρομή, χωρίς να διατρέχει κάποιος κίνδυνος ατυχήματος
- την άνεση στην οδήγηση όσον αφορά την επαρκή ορατότητα και σήμανση
- τον εκσυγχρονισμό, ο οποίος είναι εξίσου σημαντικός ειδικά για μεγαλύτερης έκτασης διαδρομές, ώστε να ικανοποιούν όσο το δυνατόν περισσότερο τους οδηγούς
- την ελευθερία ως προς την προσφορά υπηρεσιών, όποτε τη χρειαστεί ο χρήστης

### 2.3 Ο ρόλος των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Άλλων ειδών έξυπνες εφαρμογές στους δρόμους αποτελούν και η εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Πράσινη Ενέργεια), καθώς επιτυγχάνονται η φόρτιση των οχημάτων, ο οδοφωτισμός και η παρακολούθηση του οδικού δικτύου με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της ηλιακής, της αιολικής και της ενέργειας δόνησης. Παρακάτω αναλύονται οι εφαρμογές στον Έξυπνο Δρόμο με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Abass.Kant.Kumar.Murari, 2020).

## 1. Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια είναι η ακτινοβολούμενη θερμότητα από τον Ήλιο, η οποία επηρεάζει το κλίμα της κάθε περιοχής και αποτελεί παράγοντα μείζονος σημασίας για τη διατήρηση της ζωής στον πλανήτη (Chaitanya, Kurre, Praveen, 2018; Pawar, et.al., 2018). Επιπρόσθετα, έχει παρατηρηθεί ότι δύναται να χρησιμοποιηθεί και ως πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω διαφόρων ενεργών και παθητικών ηλιακών τεχνολογιών. Ο σωστός προσανατολισμός του κτηρίου στον Ήλιο και η χρήση υλικών με ευνοϊκές θερμικές μάζες ή ιδιότητες διασποράς φωτός είναι ορισμένα από τα χαρακτηριστικά της παθητικής ηλιακής τεχνολογίας. Για τη συλλογή ηλιακής ενέργειας και μετ' έπειτα την εκπομπή ηλεκτρικής ενέργειας τοποθετούνται ηλιακά πάνελ (φωτοβολταϊκά) και ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες, οι οποίοι ανήκουν στις μεθόδους ενεργής ηλιακής τεχνολογίας (Chaitanya, Kurre, Praveen, 2018).



Εικόνα 9: Ηλιακό πλαίσιο με LED

[solar roadways.com]

Ως ηλιακός δρόμος ορίζεται το τμήμα του οδοστρώματος, το οποίο είναι κατασκευασμένο από ηλιακά (φωτοβολταϊκά) πάνελ, που αποσκοπούν στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική (Rathod, et.al., 2019; Pawar, et.al., 2018; Kulkarni, 2013). Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο από το δεδομένο οδικό δίκτυο, αλλά και από τις κοντινές περιοχές, τα σπίτια, τις βιομηχανίες κ.α., τα οποία συνδέονται στο σύστημα αυτό μέσω των χώρων στάθμευσης και των οδών τους. Οι ηλιακοί δρόμοι αποτελούν αγωγό, ώστε να επιτευχθεί η λειτουργία συσκευών, όπως η τηλεόραση και το τηλέφωνο και για τη χρήση διαδικτύου υψηλής ταχύτητας. Η ηλεκτρική ενέργεια, η οποία δεν διανέμεται σε κάποιο μέσο,

αποθηκεύεται μέσα στο σύστημα του δρόμου ή δίπλα σε αυτόν κι έτσι αντικαθίσταται η ανάγκη για τρέχοντα ορυκτά καύσιμα, τα οποία μειώνουν τα αέρια του θερμοκηπίου και κατ' επέκταση συντελούν στην αειφόρο ανάπτυξη (Kulkarni, 2013). Όλα τα μέσα μετακίνησης (δημόσιοι δρόμοι, αυτοκινητόδρομοι) και οι χώροι στάθμευσης περιλαμβάνονται στην επιχείρηση ανάπτυξης της τεχνολογίας αυτής και αν όλοι οι υφιστάμενοι δρόμοι αντικαθιστούνταν με ηλιακά πάνελ, θα επιτυγχανόταν παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτήν που χρειάζεται για να τροφοδοτηθούν όλες οι επιχειρήσεις και τα σπίτια σε εθνικό επίπεδο (Aggrawal, Mehta, Tiwari, 2015; Renoald, et.al., 2016). Ο πρώτος ηλιακός δρόμος ήταν εγχείρημα ενός ζευγαριού από τις ΗΠΑ, το 2011, οι οποίοι οραματίστηκαν έναν δρόμο από ηλιακά πάνελ, ο οποίος όμως να κατέχει την απαραίτητη αντοχή για τις διελεύσεις πολυάριθμων οχημάτων (Pawar, et.al., 2018).

## 2. Ενέργεια δόνησης (Vibration Energy)

Η ενέργεια δόνησης πηγάζει από τη δόνηση μορίων, κυρίως από μηχανήματα σε εργοστάσια. Μία από τις πιο ισχυρές πηγές δονητικής ενέργειας παρατηρείται στην κίνηση των αυτοκινήτων σε ένα οδικό δίκτυο, γι' αυτό τον λόγο η κίνηση των οχημάτων στον δρόμο θεωρείται ένας καλός αγωγός εκπομπής δονητικής ενέργειας για τη μετατροπή της σε ηλεκτρική, ακολουθώντας συγκεκριμένες μεθόδους. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι μετατροπής της δονητικής ενέργειας σε ηλεκτρική, μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται η ηλεκτρομαγνητική, η ηλεκτροστατική, η μαγνητική επαγωγή και η πιεζοηλεκτρική, η οποία θεωρείται και η πιο αποδοτική (Kaur, Vishnoy, 2016).

Πιεζοηλεκτρικό σημαίνει κάτι που παράγει ηλεκτρισμό ασκώντας του πίεση και προέρχεται από τις αρχαίες ελληνικές λέξεις “πιέζω” και “ηλεκτρικό”. Η πιεζοηλεκτρική μέθοδος ανακαλύφθηκε από τους Γάλλους επιστήμονες, Jacques και Pierre Curie, το 1880. Διάφορες παράμετροι διαδραματίζουν βασικό ρόλο για την ποσότητα της συλλεχθείσας ενέργειας, όπως η μέθοδος συλλογής δονητικής ενέργειας και παράλληλα η αιτία παραγωγής αυτής. Στην περίπτωση συλλογής ενέργειας με δόνηση (πίεση, που προκαλείται από τα οχήματα στην προκειμένη περίπτωση), αρχικά, συλλέγεται και αποθηκεύεται σε πυκνωτές και στη συνέχεια χρησιμοποιείται, όπου είναι απαραίτητο (Kumar, 2013).

Πρόσφατα, ερευνητές του MIT ανακάλυψαν ότι μπορούν να ενσωματωθούν πιεζοηλεκτρικά υλικά κάτω από επιφάνειες, που κινούνται άνθρωποι κι έτσι να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια. Αρχικά, αυτά χρησιμοποιήθηκαν κάτω από πίστες χορού, όπου συλλέχθηκαν 5-10 watts ενέργειας από κάθε άτομο ξεχωριστά. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε έρευνα από τον ιαπωνικό λαό, ο οποίος τοποθέτησε πιεζοηλεκτρικούς μηχανισμούς κάτω από τον Ανατολικό Ιαπωνικό Σιδηροδρομικό Σταθμό, όπου παρατηρήθηκε ότι με τη διέλευση των επιβατών σε αυτά τα 25m<sup>2</sup> παράγονταν 1400 kW κάθε δευτερόλεπτο. Παρακολουθώντας αυτές τις έρευνες επικεντρώθηκαν οι επιστήμονες στην εξέλιξη αυτής της μεθόδου παραγωγής μηχανολογικής ενέργειας και μετατροπής της σε ηλεκτρική, με την ενσωμάτωση της στους δρόμους τοποθετώντας πιεζοηλεκτρικά συστήματα κάτω από το οδόστρωμα (Selvaraju, 2012). Η πιεζοηλεκτρική ενέργεια αποφέρει αποτελέσματα μόνο, όταν έρχεται σε επαφή με δύο υλικά, το κρύσταλλο και το κεραμικό (Kumar, 2013).

Σύμφωνα με τους Priyanshu et al. οποιοδήποτε όχημα κινείται επάνω στο οδικό δίκτυο ασκεί πολύ μικρές κάθετες παραμορφώσεις και πιέσεις (δονήσεις) στους δρόμους, ενώ η αύξηση της κυκλοφορίας των οχημάτων με τη χρήση αυτής της μεθόδου μπορεί να αντισταθμίσει την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων. Εξίσου σημαντικό είναι να επιτευχθεί προστασία αυτού του

συστήματος με την κατασκευή και άλλων στρωμάτων πάνω και κάτω από αυτό που προορίζεται για την ενσωμάτωση του μηχανισμού. Η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να συλλεχθεί με τη δονητική μέθοδο υπολογίζεται στα 400 kW του 1 km αυτοκινητόδρομου. Ένας “Πιεσό-Έξυπνος Δρόμος” του 1km μπορεί να δώσει ενέργεια σε 40 σπίτια (Kaur,Vishnoy, 2016). Επιπρόσθετα, υποστηρίζεται ότι αυτή η μέθοδος μπορεί να πραγματοποιηθεί εκτός των δρόμων και σε αεροδιάδρομους (Kaur,Vishnoy, 2016). Παρακάτω αναλύονται δύο μέθοδοι δονητικής ενέργειας (Kalyani,Joshi,Choudhary, 2015).

Η μέθοδος των πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων, σύμφωνα με έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί, μπορεί να ανταγωνιστεί σε επεκτασιμότητα, συμβατότητα, αλλά και σε μέγεθος ενεργειακής πυκνότητας την ισχύ που εκπέμπεται από διαφόρων ειδών ηλεκτρονικές τεχνολογίες. Η εφαρμογή της στηρίζεται στη μηχανική καταπόνηση, που πραγματοποιείται πάνω στην κρυσταλλική της δομή με αποτέλεσμα παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Η πιεζοηλεκτρική ενέργεια, που παράγεται από τη συγκεκριμένη μέθοδο χωρίζεται σε δύο τμήματα, την άμεση πιεζοηλεκτρική επιρροή, η οποία χαρακτηρίζεται από την ικανότητα του υλικού για απευθείας μετατροπή από μηχανική σε ηλεκτρική ενέργεια και την αντίστροφη επιρροή, στην οποία παράγεται μηχανική ενέργεια μέσα από την ηλεκτρική (Kalyani,Joshi,Choudhary, 2015).

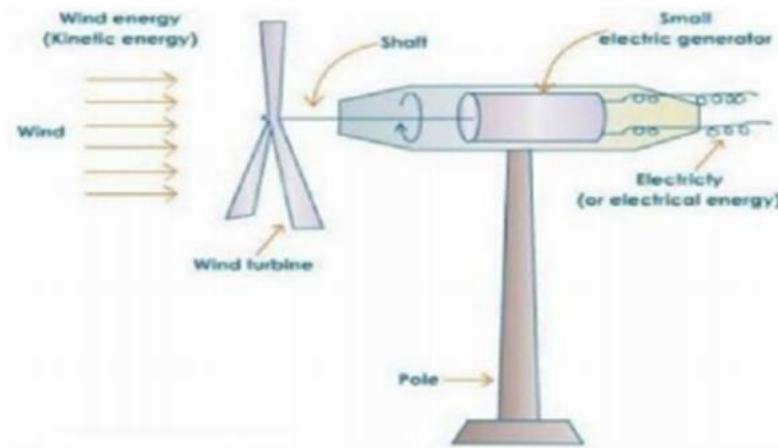
Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται και με μαγνητική επαγωγή, η οποία λειτουργεί με την προσθήκη επαγωγικών πηνίων (coils) κάτω από τον ασφαλικό αυτοκινητόδρομο. Συγκεκριμένα, εφαρμόζεται σε ορισμένες λωρίδες, οι οποίες χρησιμοποιούνται από τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, ώστε με τη διέλευση τους να φορτίζονται με ηλεκτρική ενέργεια μέσω αυτών των επαγωγικών πηνίων, τα οποία αποτελούν τεράστια πηγή δονητικής ενέργειας και κατ' επέκταση ηλεκτρικής (Kalyani,Joshi,Choudhary, 2015).

### 3. Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μία από τις παλαιότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η οποία προκαλείται από τη δύναμη που αναπτύσσεται στα διαφορετικά στρώματα της ατμοσφαιρικής πίεσης. Η παραγωγή της στηρίζεται στη χρήση ανεμογεννητριών, κάτι που θεωρείται φιλικό προς το περιβάλλον, καθώς δεν απελευθερώνονται επιβλαβή αέρια στην ατμόσφαιρα (π.χ. αέρια θερμοκηπίου) (Kalyani,Joshi,Choudhary, 2015). Ένα ζήτημα, το οποίο θα μπορούσε να μας απασχολήσει σε αυτή την ανανεώσιμη πηγή ενέργειας είναι η συνεχής διακύμανση της πίεσης του ανέμου, το οποίο όμως δεν συναντάται στις περιπτώσεις των δρόμων λόγω της “σταθερής” διέλευσης των οχημάτων (Malave, Shivraj, Bhosale, 2013).

Οι ανεμογεννήτριες, που τοποθετούνται στους δρόμους βρίσκονται στο κέντρο της κορυφής του οποιοδήποτε οδοφωτισμού, ώστε να παραλαμβάνουν ενέργεια από την κίνηση των οχημάτων και στις δυο λωρίδες κατεύθυνσης. Στην περίπτωση διέλευσης την ίδια στιγμή οχημάτων και από τις δύο κατευθύνσεις, δημιουργείται μεγάλη κινητική ενέργεια και κατ' επέκταση αιολική, ενώ λόγω της πίεσης μεταφέρεται στα γύρω αντικείμενα. Έτσι, οι ανεμογεννήτριες συλλέγουν αυτήν την ενέργεια και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική (Kalyani,Joshi,Choudhary, 2015). Σύμφωνα με έρευνες, μία ανεμογεννήτρια τύπου ENLIL μπορεί να παράγει 1 kW σε μία ώρα, το οποίο χρειάζονται δύο νοικοκυριά για τη λειτουργία των ηλεκτρικών τους συσκευών σε αυτή τη μία ώρα. Φυσικά, διάφορες παράμετροι παίζουν ρόλο για την ποσότητα παραγόμενης ισχύος από τις ανεμογεννήτριες, όπως (Davis, 2020):

- η ταχύτητα του ανέμου
- η ταχύτητα του οχήματος
- η μάζα του οχήματος
- το άνοιγμα των παραθύρων του αυτοκινήτου, στην οποία περίπτωση δημιουργείται υψηλότερη πίεση με τη διέλευση οχημάτων με ανοιχτά παράθυρα



Εικόνα 10: Λειτουργία ανεμογεννήτριας

[tutorvista.com]

Οι Kerem Deveci και Sarp Paratya έχουν επιχειρήσει την τοποθέτηση ανεμογεννητριών στους αυτοκινητόδρομους της Κωνσταντινούπολης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των ανεμογεννητριών φτάνει στα 6 εκατομμύρια kW, τα οποία ικανοποιούν τις ηλεκτρικές ανάγκες 1500 νοικοκυριών (Davis, 2020). Γενικά, υπάρχουν διάφορα είδη ανεμογεννητριών, αλλά συναντάμε κάποια κοινά χαρακτηριστικά στις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες, όπως τον οριζόντιο άξονα με τα τρία πτερύγια στον φορέα στροφής. Το θέμα με τις συγκεκριμένες ανεμογεννήτριες είναι ότι πρέπει να τοποθετούνται στην κατεύθυνση του ανέμου και απαιτούν για τη λειτουργία τους μεγάλες δυνάμεις αιολικής ενέργειας.

Ενός άλλου τύπου ανεμογεννήτριες είναι αυτές που τα πτερύγια τοποθετούνται κάθετα στον άξονα περιστροφής κι έτσι βρίσκονται πάντα προς την κατεύθυνση του ανέμου. Συνδυασμός γεννητριών μεταβλητής ταχύτητας με μετατροπέα ισχύος μερικής ή ολικής κλίμακας μεταξύ της τουρμπίνας και του συστήματος συλλεκτών χρησιμοποιείται επίσης για την κατασκευή τους. Τα πτερύγια της συνδέονται με σύγχρονη ηλεκτρική γεννήτρια για τη διατήρηση της σταθερότητας της περιστροφικής RPM (περιστροφή ανά λεπτό) (Kalyani, Joshi, Choudhary, 2015).

Ενώ με την τοποθέτηση μίας και μόνο ανεμογεννήτριας δεν μπορούν να παραχθούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας, με πλήθος αυτών έχουμε τη δυνατότητα να αξιοποιήσουμε την παραγόμενη ενέργεια ακόμα και για οδοφωτισμό, σε διάφορες δημόσιες υποδομές ή και να την αποθηκεύσουμε

για μελλοντική χρήση στο δίκτυο. Οι ανεμογεννήτριες στους δρόμους μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε δρόμο με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο (Malave, Shivraj, Bhosale, 2013).

## 2.4 Εφαρμογές ευφυίας στην οδοποιία

### 2.4.1 Έξυπνος δρόμος Virginia

Ο έξυπνος δρόμος Virginia είναι μια μοναδική, πλήρους κλίμακας, ερευνητική εγκατάσταση κλειστού κρεβατιού δοκιμής που διαχειρίζεται το Virginia Tech Transportation Institute (VTTI) και ανήκει και λειτουργεί από το Τμήμα Μεταφορών της Βιρτζίνια (VDOT). Είναι ένας δρόμος δύο λωρίδων, μήκους 2,2 μιλίων, κατασκευασμένος σύμφωνα με τα πρότυπα της Ομοσπονδιακής Διοίκησης Αυτοκινητοδρόμων (FHWA). Περισσότερες από 18.000 ώρες έρευνας έχουν ήδη δαπανηθεί στον Έξυπνο Δρόμο και είναι προς το παρόν η μόνη εγκατάσταση στη Βόρεια Αμερική, που μπορεί να προσφέρει ένα τόσο ποικίλο φάσμα σεναρίων δοκιμών στον τομέα της έρευνας μεταφορών (VirginiaTech, n.d.).

Επτά ασύρματες μονάδες οδικού εξοπλισμού, που απέχουν περίπου 2.000 πόδια μεταξύ τους, έχουν τοποθετηθεί κατά μήκος του Smart Road. Αυτές οι συσκευές επιτρέπουν την επικοινωνία από όχημα σε όχημα μεταξύ αυτοκινήτων, υποδομών και gadget. Στο Smart Road, υπάρχουν επίσης δύο θέσεις κινητού οδικού εξοπλισμού (VirginiaTech, n.d.).

Ο Έξυπνος Δρόμος έχει 75 πύργους καιρικών συνθηκών, που μπορούν να δημιουργήσουν βροχή, χιόνι και ομίχλη. Οι πύργοι τροφοδοτούνται από μια δεξαμενή νερού 500.000 γαλονιών, η οποία παράγει καθορισμένες καιρικές συνθήκες σε μια έκταση 0,5 μιλίων του δρόμου υπό αποδεκτές συνθήκες θερμοκρασίας και ανέμου. Τα ποσοστά βροχοπτώσεων κυμαίνονται από 0.8 έως 2.5 ίντσες ανά ώρα, η ορατότητα ομίχλης κυμαίνεται από 10 έως 300 πόδια και τα ποσοστά χιονόπτωσης μπορούν να φτάσουν τις τέσσερις ίντσες ανά ώρα. Σε απόσταση ενός μιλίου από τον Smart Road, υπάρχουν δύο επίσημοι μετεωρολογικοί σταθμοί της Εθνικής Ωκεανικής και Ατμοσφαιρικής Διοίκησης (VirginiaTech, n.d.).

Το Smart Road έχει μεταβλητό φωτισμό για τη διερεύνηση της επίδρασης της τεχνολογίας φωτισμού στην ορατότητα. Η μεταβλητή απόσταση πόλων προορίζεται να μιμείται το 95% των εθνικών συστημάτων φωτισμού οδοστρωμάτων. Υπάρχουν πολλές διαθέσιμες κεφαλές φωτιστικών, συμπεριλαμβανομένων των μονάδων διόδου εκπομπής φωτός (LED). Όπως απαιτείται, πρόσθετοι πύργοι που τοποθετούνται σε κινητές πλατφόρμες μπορούν να προσομοιώσουν διάφορες τοποθεσίες (π.χ. διαβάσεις πεζών). Για την αξιολόγηση της ορατότητας των διαγραμμίσεων του οδοστρώματος και άλλων αντικειμένων, χρησιμοποιούνται δύο οδικά τμήματα (στατικό και δυναμικό) (VirginiaTech, n.d.).

Υπό αυτές τις συνθήκες, ένα φορητό μηχάνημα δημιουργίας καιρού μπορεί να δημιουργήσει διάφορες καταστάσεις ορατότητας. Οι σημάνσεις του οδοστρώματος μπορούν να αναδιαταχθούν, ώστε να αντιπροσωπεύουν κάθε τύπο κατάστασης του δρόμου. Προηγούμενη έρευνα σχετικά με τις σημάνσεις οδοστρωμάτων περιλάμβανε σημάνσεις ανακλαστικές με υπεριώδη ακτινοβολία, πρωτότυπα ανακλαστικά μείγματα για σημάνσεις, τρισδιάστατες σημάνσεις και την επίδραση της ποιότητας εγκατάστασης στην ορατότητα της σήμανσης. Άλλα οπτικά στοιχεία που



χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη περιλαμβάνουν πεζούς, πινακίδες και δοκιμαστικούς στόχους (VirginiaTech, n.d.).

Άλλες τεχνολογίες που προσφέρει το σύστημα Virginia Smart Road είναι (VirginiaTech, n.d.):

- Σύστημα επικοινωνίας οπτικών ινών
- Πομποδέκτες ινών Ethernet και διακόπτες Ethernet
- Μοντέλο ελεγκτή διασταύρωσης συμβατό με συνδεδεμένο όχημα
- Δεκατέσσερα τμήματα οδοστρώματος, συμπεριλαμβανομένου ενός ανοιχτού μαθήματος τριβής
- Αισθητήρες στο οδόστρωμα που ανιχνεύουν υγρασία, θερμοκρασία, καταπόνηση, κραδασμούς, και ζύγιση σε κίνηση
- Ένα τμήμα οδοστρώματος μηδενικής κορώνας σχεδιασμένο για δοκιμή πλημμυρισμένου οδοστρώματος
- Διαφορικός σταθμός βάσης GPS για ακριβή εντοπισμό θέσης οχήματος
- Σηματοδοτημένη διασταύρωση με πλήρη έλεγχο φάσης σήματος και χρονισμού μέσω τηλεχειριστηρίων

#### 2.4.2 Έξυπνος Αυτοκινητόδρομος

Ο «Έξυπνος Αυτοκινητόδρομος» αποτελεί μία πρωτοποριακή ιδέα για πιο «έξυπνους», διαδραστικούς αυτοκινητόδρομους και γενικά μία απεικόνιση του τοπίου του μέλλοντος. Προέρχεται από την ένταξη των νέων τεχνολογιών ακόμα και στον τρόπο κατασκευής του οδικού δικτύου με την υπογραφή μίας μεγάλης Ολλανδικής εταιρίας, τη “Heijmans” και του καταξιωμένου Ολλανδού σχεδιαστή, Daan Roosegaarde (“Beyond Technology”, n.d.).

Η εταιρία Heijmans ασχολείται με δραστηριότητες, που σχετίζονται με την κτηριακή ανάπτυξη, αλλά και γενικά με την εξέλιξη των εφαρμογών του Πολιτικού Μηχανικού. Παρατηρείται ενεργή στις Κάτω Χώρες, το Βέλγιο και τη Γερμανία και έχει ως στόχο στη βελτίωση της ποιότητας της ζωής μέσα από τις καινοτομίες, που επιφέρει με τα έργα της (“Beyond Technology”, n.d.).

Τα έργα τέχνης του σχεδιαστή Daan Roosegaarde έχουν ως κοινό γνώρισμα την αλληλεπίδραση μεταξύ των ανθρώπινων αναγκών και την εξέλιξη των τεχνολογικών εφαρμογών. Ο στόχος του Daan Roosegaarde παρατηρείται κοινός με αυτόν της εταιρίας Heijmans, καθώς επιχειρεί στη δημιουργία νέων, έξυπνων τεχνασμάτων για καλύτερη ποιότητα ζωής (“Beyond Technology”, n.d.).

Ο «Έξυπνος Αυτοκινητόδρομος» δεν αποτελεί μία ποικιλία προϊόντων, αλλά είναι μία συνεχώς εξελισσόμενη τεχνολογία με καινοτομίες κατά όλη τη διάρκεια εφαρμογής του για την εξέλιξη των κοινωνιών προς το βέλτιστο (“Beyond Technology”, n.d.).

Ο «Έξυπνος Αυτοκινητόδρομος» αποτελεί ένα πρόγραμμα εφαρμογής πέντε βημάτων εκσυγχρονισμού των Ευρωπαϊκών Οδών μέσα από προτάσεις, όπως την ενημέρωση των οδηγών

για τυχόν ολισθηρότητα του αυτοκινητόδρομου, την «φόρτιση» του αυτοκινήτου με ηλεκτρισμό για την κίνηση του, αλλά και την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και για τον φωτισμό των αυτοκινητόδρομων. Αποτελεί μία εφαρμογή που μπορεί να είναι επέκταση των ήδη υπάρχοντων αυτοκινητόδρομων και όπως την αποκαλεί ο δημιουργός της Daan Roosegaarde, Τεχνο-ποίηση (Techno-poetry), καθιστά μία νέα προσέγγιση από τις κοινωνίες στους αυτοκινητόδρομους, η οποία χαρακτηρίζεται και όμορφη αισθητικά, αλλά και οικονομικά αποδοτική (Sebastian, et. al., 2017).

«Αρχισα να φαντάζομαι τη διαδρομή Route 66 του μέλλοντος, όπου η τεχνολογία πηδάει από την οθόνη του υπολογιστή και γίνεται μέρος μας», Daan Roosegaarde.

Τα πέντε βήματα εκσυγχρονισμού των αυτοκινητόδρομων (Εξυπνος Αυτοκινητόδρομος) αποτελούν οι εξής εφαρμογές (Sebastian, et. al., 2017):

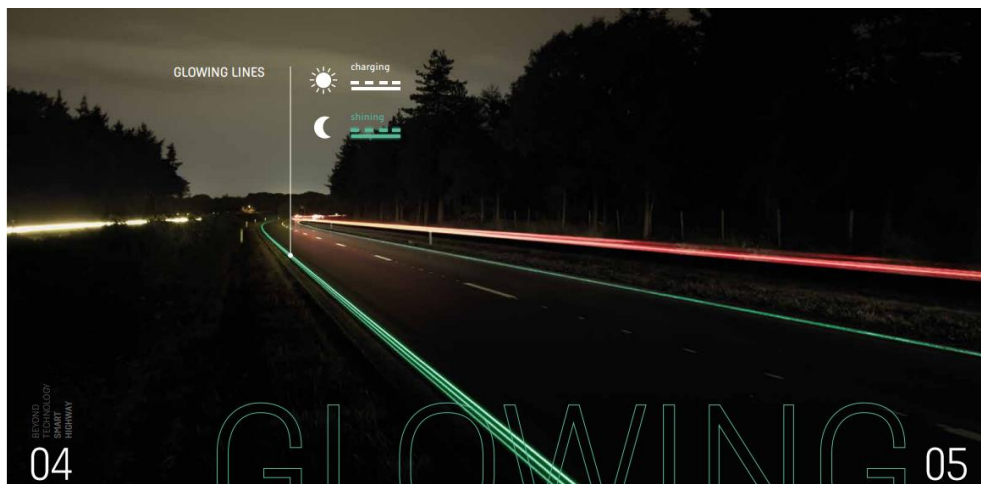
### 1. Glow in the dark lines

Αυτές οι φωτεινές ενδείξεις στους αυτοκινητόδρομους αποτελούνται από φωτοβόλα υλικά, όπως ο φθορισμός, ο φωσφορισμός και ο ράδιο-φωτισμός. Τα φθορίζοντα χρώματα διαθέτουν ποικιλία χρωμάτων, ιδίως όταν έρχονται σε επαφή με υπεριώδεις ακτινοβολίες (UV), οι οποίες βρίσκονται στην ηλιακή ακτινοβολία και το φως που εκπέμπουν είναι ευρέως γνωστό ως “Black light”. Η φωσφορούχα λάμψη εκπέμπει ένα ανοιχτό πράσινο ή μπλε-πράσινο χρώμα και συναρτάται από φωσφόρους, όπως ο θειούχος ψευδάργυρος ενεργοποιημένος με άργιλο ή από αργιλικό στρόντιο. Η διαδικασία εκπομπής φωτός παρουσιάζεται όμοια με αυτή των φθορίζοντων χρωμάτων, με τη διαφορά ότι η λάμψη των φωτεινών ενδείξεων από φώσφορο είναι πιο μακράς διαρκείας, καθώς έχουν τη δυνατότητα λάμψης έως και 12 ώρες από την έκθεση τους στην ηλιακή ακτινοβολία. Η λάμψη από ράδιο αποτελείται από ραδιενεργό ισότοπο, το ραδιονουκλίδιο, σε σύνθεση με ραδιοφωταυγή ουσία, όπου τα προαναφερόμενα ισότοπα είναι ισχυροί εκπομποί γρήγορων ηλεκτρονίων κι έτσι δεν υπάρχει κίνδυνος εισχώρησης της ακτινοβολίας στα πιο μέσα στρώματα. Η διάρκεια εκπομπής λάμψης με αυτή τη σύνθεση χωρίς έκθεση στον ήλιο μπορεί να κρατήσει μέχρι την αποσύνθεση των ισότοπων ή την υποβάθμιση του φωσφόρου, κάτι το οποίο μπορεί να διαρκέσει και έτη. Επομένως, αυτές οι φωτεινές ενδείξεις έχουν ως πηγή ενέργειας τον Ήλιο, ενώ εκπέμπουν λάμψη έως και 12 ώρες τη νύχτα και το αποτέλεσμα που προσφέρουν θεωρείται πιο αισθητό από ό,τι αυτό των ενδείξεων στους συμβατικούς αυτοκινητόδρομους (Sebastian, et. al., 2017).

Τοποθετούνται στους ήδη υπάρχοντες αυτοκινητόδρομους, δηλαδή αυτών που είναι κατασκευασμένοι από μπετόν. Για τη διασφάλιση συνεχούς ποιότητας και ασφάλειας, γίνεται η χρήση ενέργειας για την περαιτέρω ενεργοποίηση του συστήματος. Διαθέτουν μία πράσινη χρωστική λάμψη στο σκοτάδι και τοποθετούνται σε πλάτος 0.5 inz ύψους 0.7 inz και το μήκος αυτής της συνεχούς γραμμής φτάνει έως τα 295 ft. Για μεγαλύτερες εκτάσεις οδών τοποθετούνται και άλλες συνεχείς φωτεινές λωρίδες. Για τη σωστή λειτουργία του συστήματος πρέπει να ακολουθούνται κάποιες συγκεκριμένες προϋποθέσεις (“Beyond Technology”, n.d.):

1. τοποθετούνται μόνο σε αυτοκινητόδρομους από άσφαλτο με ελάχιστο πάχος 4 inz
2. ο καθαρισμός των αυτοκινητόδρομων είναι κοινός με αυτόν των συμβατικών οδών
3. γίνονται αισθητές και σε ακραίες καιρικές συνθήκες, όπως με την παρουσία χιονόπτωσης, αλλά όχι όταν καλύπτονται από μεγάλη στρώση χιονιού

Οι φωτοβόλες οδικές ενδείξεις είναι το ιδανικότερο υποκατάστατο για τον οδοφωτισμό γενικά, καθώς μπορούν να αποθηκεύσουν αρκετή ηλεκτρική ενέργεια καθημερινά (Choudhary, Joshi, Kalyani, 2015).



Εικόνα 11: Απεικόνιση των glowing lines

[new atlas.com]

## 2. Electric Priority Lane

Οι εκπομπές αερίων στο περιβάλλον, όπως η βενζίνη ή το ντίζελ, από τα οχήματα προβληματίζει ιδιαίτερα τις σύγχρονες κοινωνίες και γι' αυτόν το λόγο έχουν προχωρήσει σε λύσεις κατασκευής ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Όμως παρατηρούνται αρκετά θέματα και στη χρήση αυτών λόγω του περιορισμένου εύρους τους, που έχει ως αιτία τη χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα των υφιστάμενων χημικών μπαταριών. Σε αυτό το σημείο μπαίνει η τεχνολογία του έξυπνου αυτοκινητόδρομου από την πλευρά της ηλεκτρικής τροφοδοσίας των οχημάτων μέσω των ηλεκτρομαγνητών, ώστε να επιτευχθεί ασύρματη και όχι ενσύρματη ηλεκτροδότηση. Ο ηλεκτρομαγνήτης αποτελείται από δύο μέρη, αυτό που τοποθετείται στον αυτοκινητόδρομο (πρωτεύον πηνίο) και αυτό που ενσωματώνεται στο κάτω μέρος των οχημάτων (δευτερεύον πηνίο) (Sebastian, et. al., 2017).



Εικόνα 12: Απεικόνιση ηλεκτρικής λωρίδας

[new atlas.com]

Σύμφωνα με το γνωστό νόμο επαγωγής του Faraday, με τη ροή ρεύματος στο πρωτεύον πηνίο δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο και έτσι μεταφέρεται ρεύμα στο δευτερεύον πηνίο. Όταν βρίσκονται τα δύο πηνία σε συντονισμό έχουμε την αποτελεσματικότερη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ τους, σε αντίθεση με την περίπτωση, που είναι τοποθετημένα αρκετά μακριά, στην οποία δεν λειτουργεί αυτή η τεχνολογία. Παρουσιάζονται διάφορες κατηγορίες σε σχέση με το είδος φόρτισης, όπως (Sebastian, et. al., 2017):

- η στατική, στην οποία μεταφέρεται ηλεκτρική ενέργεια σε σταθμευμένο όχημα
- η ψευδό-δυναμική, στην οποία ένα πρωτεύον πηνίο μικρής έκτασης μεταφέρει ενέργεια σε ένα δευτερεύον πηνίο, όπου βρίσκεται σε όχημα χαμηλής ταχύτητας
- η δυναμική, στην οποία έχουμε ένα πρωτεύον πηνίο με υψηλή ισχύ, που μεταφέρει ενέργεια σε αυξημένης ταχύτητας όχημα

Οι ηλεκτρικές λωρίδες προτεραιότητας συνεισφέρουν στη βιώσιμη μεταφορά (Sebastian, et. al., 2017).

### 3. Wind lights

Η αιολική ενέργεια, όπως προαναφέρθηκε, λειτουργεί ως εναλλακτική λύση αντί της χρήσης ορυκτών καυσίμων και αποτελεί μία ανανεώσιμη, “καθαρή”, ευρέως διανεμημένη πηγή ενέργειας. Έως το Δεκέμβριο του 2014 παρατηρήθηκε αύξηση της χωρητικότητας της έως τα 369553 MW, ενώ μέχρι και σήμερα διαρκώς αυξάνεται και περισσότερο η παραγωγή της, η οποία αποτελεί το 4% της παγκόσμιας εκπομπής ηλεκτρικής ενέργειας. Στην περίπτωση των Wind lights τοποθετούνται ανεμογεννήτριες στην άκρη των αυτοκινητόδρομων, των οποίων οι έλικες περιστρέφονται με τη διέλευση των οχημάτων και κατ' επέκταση με τη σύνδεση των γεννητριών με τον οδοφωτισμό έχουμε ενεργοποίηση του συστήματος φωτισμού (Sebastian, et. al., 2017).



*Εικόνα 13: Απεικόνιση wind lights*

*[in habitat]*

#### 4. Dynamic paints

Τα δυναμικά χρώματα έχουν ως κύριο γνώρισμα τους την ευαισθησία στις θερμοκρασιακές μεταβολές και ενεργοποιούνται, ώστε να ειδοποιηθούν οι οδηγοί μέσω διάφορων συμβόλων στο οδόστρωμα ότι μπορεί να παρουσιαστούν κάποια προβλήματα στη διαδρομή τους, όπως ολισθηρότητα στον αυτοκινητόδρομο από την παρουσία πάγου. Μέσα από αρκετές έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί παρατηρούνται ότι αυτά τα χρώματα μπορούν να μετρήσουν τη θερμοκρασία σε υψηλή ανάλυση χωρίς κάποια ιδιαίτερη παρέμβαση (TSP). Το TSP αποτελείται από διάφορα φωταυγή μόρια, που συνδέονται με ένα υλικό αδιαπέραστο από το οξυγόνο, ενώ με τα ευαίσθητα χρώματα στη θερμοκρασία επιχειρείται να προκληθεί ευαισθησία των μορίων φωταύγειας στο θερμικό τους περιβάλλον (Sebastian, et. al., 2017). Με αυτή την τεχνολογία του έξυπνου αυτοκινητόδρομου υπάρχει μία συνεχής επαφή των οδηγών με τον αυτοκινητόδρομο για την αποφυγή ατυχημάτων. Ο συμβολισμός στους αυτοκινητόδρομους είναι ευκρινής και κατανοητός, όπως για παράδειγμα η παρουσία χιονονιφάδων στο οδόστρωμα στην περίπτωση παγετού ή χιονόπτωσης (“Beyond Technology”, n.d.).

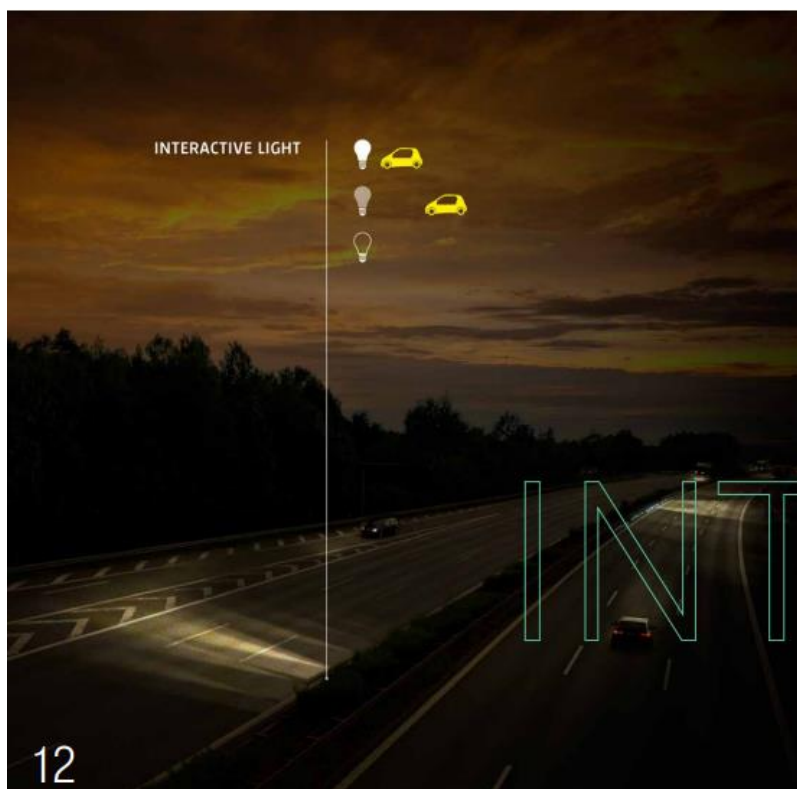


Εικόνα 14: Απεικόνιση τεχνολογίας *dynamic paint*

[[newatlas.com](http://newatlas.com)]

## 5. Interactive light

Ο συμβατικός οδοφωτισμός που παρατηρείται στους τωρινούς αυτοκινητόδρομους (διαδραστικός φωτισμός οδού) αποτελεί μία περίπτωση έντονης σπατάλης ενέργειας, καθώς λάμπει διαρκώς και όταν δεν είναι απαραίτητο, όπως όταν ο αυτοκινητόδρομος είναι κενός από οχήματα. Στις ΗΠΑ καταναλώνονται 120 TW/h για τον φωτισμό αυτοκινητόδρομων και χώρων στάθμευσης, κάτι που θεωρείται επιβλαβές για το περιβάλλον και την οικονομία. Αυτή η ποσότητα ενέργειας, που σπαταλάται με το 30% αυτών των φωτεινών σωμάτων να εμφανίζονται απροστάτευτα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των αναγκών των ΗΠΑ για δύο ολόκληρα χρόνια και να προστατεύσει το περιβάλλον από την εκτενή απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα (Sebastian, et. al., 2017). Για τη λύση αυτού του προβλήματος, η τεχνολογία του έξυπνου αυτοκινητόδρομου χρησιμοποιεί αισθητήρες, ώστε να φωτίζονται οι οδοί στην περίπτωση διέλευσης οχημάτων και της σταθερά μεταβαλλόμενης αύξησης-μείωσης του φωτισμού, ανάλογα με την απόσταση που βρίσκονται τα οχήματα μεταξύ τους. Έχει τη δυνατότητα ακόμη να υποδείξει στους οδηγούς την κατάλληλη ταχύτητα, καθώς και τις διαδρομές που χρησιμοποιούνται από ποδηλάτες (“Beyond Technology”, n.d.).



Εικόνα 15: Απεικόνιση interactive light

[new atlas.com]

## 2.5 Άλλες μορφές συστημάτων οδοποιίας

### 2.5.1 Electrified roads

Ένας ηλεκτρικός δρόμος, γνωστός και ως e-road ή ηλεκτρικό οδικό σύστημα (ERS), είναι ένας δρόμος που παρέχει ηλεκτρική ενέργεια στα αυτοκίνητα που ταξιδεύουν σε αυτόν. Οι εναέριες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας πάνω από το δρόμο και η παροχή ισχύος στο επίπεδο του εδάφους μέσω αγωγίων σιδηροτροχιών ή επαγωγικών πηνίων, που είναι θαμμένα στο δρόμο αποτελούν κοινές μεθόδους. Οι εναέριες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας είναι διαθέσιμες μόνο σε επαγγελματικά αυτοκίνητα, αλλά η ηλεκτρική ενέργεια στο επίπεδο του εδάφους είναι διαθέσιμη σε όλα τα οχήματα, επιτρέποντας τη δημόσια χρέωση μέσω συστημάτων μέτρησης ισχύος και τιμολόγησης. Οι αγωγίμες ράγες στο επίπεδο του εδάφους αναμένεται να είναι οι πιο αποδοτικές από τις τρεις τεχνολογίες (Wikipedia, 2018).

Αφού δημιούργησε μια πειραματική υπηρεσία μεταφοράς το 2009, η Κορέα ήταν η πρώτη, που κατασκεύασε δημόσιο ηλεκτρικό δρόμο με εμπορική λεωφορειακή γραμμή το 2013 (Wikipedia, 2018). Η Σουηδία αξιολογεί αρκετές τεχνολογίες ηλεκτρικών οδών από το 2013, με σχέδια να ξεκινήσει την ανάπτυξη ενός εθνικού ηλεκτρικού οδικού συστήματος το 2022 και να ολοκληρώσει τον σχεδιασμό έως το 2033 (Hasselgren, 2019).



Το TRL (προηγουμένως Εργαστήριο Έρευνας Μεταφορών) καθορίζει τις τρεις μεθόδους τροφοδοσίας για δυναμική φόρτιση ή φόρτιση ενώ το όχημα κινείται, που προαναφέρθηκαν. Η TRL θεωρεί ότι η εναέρια ισχύς είναι η πιο προηγμένη τεχνολογικά εναλλακτική λύση, παρέχοντας τη μεγαλύτερη ισχύ, αλλά η τεχνολογία είναι ακατάλληλη για μη εμπορικά αυτοκίνητα. Το Rail είναι μια τεχνολογία με καλή μετάδοση ισχύος και εύκολα προσβάσιμα και ελεγμένα κομμάτια και χαρακτηρίζεται κατάλληλη για όλα τα οχήματα. Η επαγωγική φόρτιση χρησιμοποιεί τη λιγότερη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας και απαιτεί περισσότερες υποδομές στο δρόμο από τις εναλλακτικές (Wikipedia, 2018).

Ένα εθνικό ηλεκτρικό οδικό δίκτυο, σύμφωνα με τη Σουηδική Διοίκηση Μεταφορών, απαιτεί διασυνδέσεις μεταξύ πολλών φορέων, όπως του προμηθευτή ηλεκτρικής ενέργειας, της εταιρείας ηλεκτρικού δικτύου, του κατασκευαστή του οχήματος, του ιδιοκτήτη του δρόμου, του χειριστή ηλεκτρικής οδικής τεχνολογίας, του παρόχου μέτρησης και τιμολόγησης και του χρήστη του ηλεκτρικού δρόμου. Η εταιρεία ηλεκτρικού δικτύου μπορεί να κατέχει τους δευτερεύοντες οδικούς ηλεκτρικούς υποσταθμούς, οι οποίοι τροφοδοτούν την ηλεκτρική οδική υποδομή. Όμως υπάρχει και η περίπτωση κατοχής από άλλες εταιρείες και παράλληλα το σύστημα ανάγνωσης και πληρωμής ισχύος να ανήκει σε διαφορετικό φορέα από αυτόν της εκμετάλλευσης της υποδομής (Hasselgren, 2019).

Σύμφωνα με ανάλυση του 2019 από το Σουηδικό Κέντρο Ηλεκτροκίνησης, εκτιμώνται οι ετήσιες κοινωνικές δαπάνες του συνολικού σουηδικού στόλου αυτοκινήτων στο πλαίσιο καθενός από τα τρία συστήματα (Wikipedia, 2018).

Οι εναέρια γραμμές ηλεκτρικού ρεύματος, παρά το γεγονός ότι διαθέτουν την πιο παλιά τεχνολογία και τη φθηνότερη υποδομή, είναι συνολικά οι πιο ακριβές, επειδή επιτρέπουν μόνο σε ψηλά επαγγελματικά οχήματα, όπως φορτηγά και λεωφορεία να φορτίζουν κατά την οδήγηση, ενώ τα μη επαγγελματικά οχήματα δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα καλώδια για φόρτιση – οδήγηση. Κάτι που καθιστά αναγκαία τη χρήση στατικής φόρτισης, η οποία απαιτεί μεγαλύτερες μπαταρίες με μεγαλύτερη χωρητικότητα από τις μπαταρίες, που απαιτούνται από τη δυναμική φόρτιση (Wikipedia, 2018).

Οι πηγές ισχύος στο έδαφος παρέχουν δυναμική φόρτιση για όλα τα οχήματα, μειώνοντας την απαραίτητη χωρητικότητα και μέγεθος της μπαταρίας, αφού η μπαταρία φορτίζεται κατά τη λειτουργία. Το μικρότερο μέγεθος και η χωρητικότητα της μπαταρίας εξοικονομεί στον σουηδικό στόλο αυτοκινήτων περίπου πέντε δισεκατομμύρια ευρώ κάθε χρόνο. Εκτός από την υποδομή, οι δύο τύποι συστημάτων ισχύος σε επίπεδο εδάφους εκτιμάται ότι έχουν ίσο κόστος για όλα τα εξαρτήματα συνολικά (Wikipedia, 2018).

Η αγωγίμη σιδηροδρομική υποδομή εκτιμάται ότι κοστίζει περίπου 1 δισεκατομμύριο ευρώ ετησίως, ενώ η ασύρματη επαγωγική υποδομή εκτιμάται ότι κοστίζει περίπου 2,8 δισεκατομμύρια ευρώ ετησίως (Wikipedia, 2018).

Ο τρόπος λειτουργίας του ηλεκτρικού δρόμου αποτελείται από τα παρακάτω βήματα (Alfredsson et al, n.d.):

1. Εντοπισμός του eHighway

Ένας αισθητήρας καθορίζει εάν η λωρίδα κυκλοφορίας έχει γραμμή επαφής. Το όχημα προηγουμένως κινούνταν με κινητήρα εσωτερικής καύσης, ενώ τώρα ο οδηγός σηκώνει τον παντογράφο.



## 2. Προσαρμογή στη γραμμή επαφής

Όταν είναι συνδεδεμένος, ο παντογράφος κατευθύνει ενέργεια στον ηλεκτροκινητήρα, ενώ ταυτόχρονα φορτίζει την μπαταρία. Καθώς, η ροή της ενέργειας αντιστρέφεται κατά το φρενάρισμα, δημιουργείται ηλεκτρισμός, φορτίζοντας την ενσωματωμένη μπαταρία.

## 3. Αποσύνδεση κατά την προσπέραση

Ο παντογράφος χαμηλώνει όταν το φορτηγό προσπερνά ή πλησιάζει στο τέλος μιας ηλεκτρικής τάσης. Ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί με μπαταρία για όσο διάστημα είναι εφικτό. Ο οδηγός μπορεί να επιστρέψει στον eHighway μετά από προσπέραση.

### 2.5.2 Plastic Roads

Οι πλαστικοί δρόμοι αποτελούνται εξ ολοκλήρου από πλαστικό ή από πλαστικά, σύνθετα υλικά. Οι περισσότεροι πλαστικοί δρόμοι παγιδεύουν πλαστικά υπολείμματα στην ασφαλτο ως αδρανή. Χαρακτηρίζεται ακόμα αβέβαιο πώς θα συμπεριφερθούν αυτά τα μεσοπρόθεσμα έως μακροπρόθεσμα μεγέθη ή ποιες επιπτώσεις μπορεί να έχει η υποβάθμισή τους στα κοντινά οικοσυστήματα (Wikipedia, 2015). Η πλειονότητα των πλαστικών δρόμων είναι κατασκευασμένα από παλιοσίδερα που έχουν αναμειχθεί με ανακυκλωμένη ασφαλτο για να αντικαταστήσουν τη συμβατική ασφαλτο. Το Plastic Asphalt είναι ένα άλλο όνομα για αυτό το είδος υλικού (Adele, 2019).

Ο Rajagopalan Vasudevan επινόησε πλαστικούς δρόμους το 2001 (Kamala, 2018), αποτελούμενοι από ένα ασφαλτικό μείγμα που περιείχε πλαστικά σκουπίδια. Τα πλαστικά στους δρόμους μπορεί να αποτελέσουν μια πρόσθετη εναλλακτική λύση για την ανακύκλωση πλαστικών μετά την κατανάλωση (Patel, 2003). Η Αυστραλία, η Ινδονησία, η Ινδία, το Ηνωμένο Βασίλειο, οι Ηνωμένες Πολιτείες και πολλά άλλα έθνη έχουν δοκιμάσει συστήματα για την ενσωμάτωση πλαστικών απορριμμάτων σε ασφαλτικά μείγματα (“TheJakartaPost”, n.d.).



*Εικόνα 16: Σχεδιασμός των πλαστικών οδών*

*[Road makers turn to recycled plastic for tougher surface]*

Ο Rajagopalan Vasudevan του Κολεγίου Μηχανικής Thiagarajar εφήυρε και κατοχύρωσε την τεχνική. Επινόησε μια τεχνική για την κατασκευή καλύτερων, πιο ανθεκτικών και πιο οικονομικών δρόμων. Οι δρόμοι είναι πιο ανθεκτικοί σε ζημιές από έντονες βροχοπτώσεις. «*Τα πλεονεκτήματα της χρήσης απορριμμάτων πλαστικών για την κατασκευή δρόμων είναι πολλά*», σημείωσε σε συνέντευξή του στο The Better India. Επίσης, πρόσθεσε ότι «*Η διαδικασία είναι απλή και δεν απαιτεί την αγορά πρόσθετου εξοπλισμού. Κάθε κιλό πέτρας απαιτεί 50 γραμμάρια πίσσας, με το 1/10 αυτού να είναι πλαστικά απόβλητα. Αυτό ελαχιστοποιεί την ποσότητα ασφάλτου που χρησιμοποιείται. Το πλαστικό βελτιώνει την ποιότητα των εύκαμπτων οδοστρωμάτων αυξάνοντας τη συνολική τιμή πρόσκρουσης (Wikipedia, 2015). Η φθορά στο δρόμο έχει μειωθεί σημαντικά*». Το Thiagarajar College of Engineering εξασφάλισε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για τη διαδικασία τοποθέτησης δρόμων από πλαστική πίσσα το 2006 (Menon, 2016).

Επειδή οι πλαστικοί δρόμοι είναι μια σχετικά νέα έννοια, οι μέθοδοι κατασκευής ποικίλλουν. Οι δρόμοι στο Jamshedpur της Ινδίας είναι κατασκευασμένοι από ένα μείγμα πλαστικού και πίσσας (Patel, 2003). Δρόμοι σε διάφορα μέρη της Ινδονησίας, συμπεριλαμβανομένων των Μπαλί, Σουραμπάγια, Μπεκάσι, Μακασσάρ, Σόλο και Τανγκεράνγκ, αναπτύσσονται επίσης με μείγμα πλαστικού-ασφάλτου (“TheJakartaPost”, n.d.).

Αυτοί οι δρόμοι αποτελούνται από ανακυκλωμένα πλαστικά και το πρώτο στάδιο στην κατασκευή τους είναι η συλλογή και η διαχείριση του πλαστικού. Τα πλαστικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή αυτών των δρόμων είναι ως επί το πλείστον συνηθισμένα προϊόντα μετά την κατανάλωση, όπως η συσκευασία προϊόντων. Το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET ή PETE), το πολυπροπυλένιο (PP) και το πολυαιθυλένιο υψηλής και χαμηλής πυκνότητας είναι μερικά από τα πιο διαδεδομένα πολυμερή που χρησιμοποιούνται στη συσκευασία (HDPE και LDPE) (Patel, 2003). Το υλικό καθαρίζεται, στεγνώνει και τεμαχίζεται μετά τη διαλογή. Σε περίπου 170 °C, το τεμαχισμένο πλαστικό συνδυάζεται και λιώνει (Wikipedia, 2015). Το λιωμένο πλαστικό στη

συνέχεια συνδυάζεται με καυτή πίσσα. Μετά την ανάμειξη, το υλικό εξάγεται με τον ίδιο τρόπο, όπως το συμβατικό ασφαλτο-μπετόν (Larlykova, 2020).

### 2.5.3 LED Οδοφωτισμός

Η αρχιτεκτονική ενός συστήματος οδοφωτισμού των έξυπνων LED συναρτάται από έξυπνες ηλεκτρονικές συσκευές προηγμένου εξοπλισμού και λογισμικού οι οποίες δίνουν την δυνατότητα λειτουργίας σε όλη την έκτασή τους. Μία τυπική μορφή έξυπνου LED οδοφωτισμού περιλαμβάνει τον πόλο λαμπτήρα αλλά και άλλα εξαρτήματα που στοχεύουν στην λειτουργικότητα του, όπως (Rodriguez, 2019):

- Αισθητήρες φωτός και κίνησης: Ο αισθητήρας φωτός στοχεύει το φως κατά την διάρκεια της ημέρας με σκοπό την ενεργοποίηση του λαμπτήρα κατά την δύση του ηλίου. Ο αισθητήρας κίνησης ενεργοποιείται με την ανίχνευση οχημάτων σε κοντινή απόσταση από τον λαμπτήρα ώστε να σταλεί σήμα στον μικροελεγκτή.
- Μικροελεγκτής: Έχει την ευθύνη λήψης αποφάσεων προς την μείωση ή την αύξηση της έντασης του λαμπτήρα, είτε ενεργώντας ανεξάρτητα, είτε σε συνεργασία με την κεντρική μονάδα διαχείρισης.
- Εξοπλισμός μέτρησης: Συλλέγει δεδομένα σχετικά με τις εξωτερικές μεταβλητές, όπως την θερμοκρασία, την κυκλοφορία των οχημάτων και την μέση ταχύτητά τους, τα επίπεδα υγρασίας και την κατάσταση του λαμπτήρα.
- Εξοπλισμός επικοινωνίας: Στέλνει τις πληροφορίες που συλλέχθηκαν από το σύνολο των λαμπτήρων στο κέντρο διαχείρισης για την ερμηνεία και αποθήκευση τους.

Το κέντρο διαχείρισης για παράδειγμα, λαμβάνει αποφάσεις σχετικά με την μείωση της έντασης πολλών λαμπτήρων αλλά και στην αποθήκευση πληροφοριών για μετ' έπειτα χρήση ή/και πρόβλεψη γεγονότων (Rodriguez, 2019).

Η προσέγγιση της χρήσης της φωτεινής απόδοσης των λαμπτήρων LED σε δημόσια συστήματα οδοφωτισμού, ξεκίνησε όταν οι λαμπτήρες LED άρχισαν να κερδίζουν δημοτικότητα στην αγορά. Τα σημαντικά χαρακτηριστικά των συσκευών LED φωτισμού, όπως η μεγάλη αποδοτικότητα στις μονάδες Lumen ανά Watt [Lm/W], η μακριά διάρκεια ζωής (μεταξύ 5 έως 8 ετών), η δυνατότητα της συχνής χρήσης [ON-OFF] χωρίς την καταστροφή της διάρκειας ζωής της, η χαμηλή μείωση της ελαφριάς έντασης και η καλή αναπαραγωγή χρώματος, καθιστούν τους λαμπτήρες LED ως έξυπνο φωτισμό (Rodriguez, 2019).

Η μεγάλη ικανότητα του LED φωτισμού στην εκπομπή φωτός επιτρέπει στην αναπαραγωγή χρωμάτων κατάλληλη για νυχτερινό φωτισμό. Ιδανική είναι η γωνιακή προσέγγιση του φωτός για τον φωτισμό αυτοκινητοδρόμων και δρόμων. Η διαφορετική γκάμα χρωμάτων, από απόλυτα λευκά έως σχεδόν φθορίζοντα χρώματα μπορεί να αποκτηθεί με την ανάλογη επιλογή υλικού του ημιαγωγού, χωρίς να προκληθεί η αύξηση της θερμοκρασίας ή η εκπομπή υπεριωδών ακτινοβολιών (Rodriguez, 2019).

Ο έλεγχος της ωφέλιμης ζωής και απόδοσης του λαμπτήρα LED μπορεί να πραγματοποιηθεί με την σύγκριση άλλων τύπων λαμπτήρων που χρησιμοποιούνται στον οδοφωτισμό, όπως τα

διαλύματα νατρίου υψηλής πίεσης (HPS), υδραργύρου υψηλής πίεσης (HPM) και εκ φόρτισης υψηλής έντασης (HID). Στον Πίνακα 1, τα χαρακτηριστικά μεταξύ διαφορετικών τύπων φωτιστικών μπορούν να συγκριθούν (Rodriguez, 2019):

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά LED οδοφωτισμού

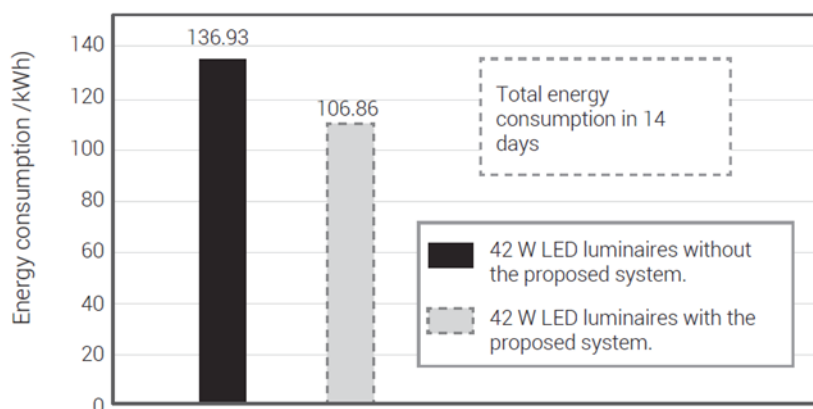
Παράμετρος	LED	HPS (Νάτριο υψηλής πίεσης)	HPM (Υδράργυρος υψηλής πίεσης)	HID (Απαλλαγή υψηλής έντασης)
Ενεργός Δύναμη [W]	63	70	80	100
Φωτεινή Απόδοση [Lm / W]	52	85	46	80
Ωφέλιμη ζωή [ώρες]	> 50.000	28.000	16.000	10.000
CRI (χρωματικός δείκτης αναπαραγωγής)	>80	30	48	70
Φωτεινότητα [Lm]	3.225	6.000	3.700	80.000

Από τον Πίνακα, παρατηρείται ότι τα φωτιστικά HPS και HPM έχουν σημαντική μέση διάρκεια ζωής και κατάλληλη φωτεινή απόδοση. Όμως, κάποια χαρακτηριστικά, όπως η έλλειψη στιγμιαίας ενεργοποίησης-απενεργοποίησης και η εξασθένηση της έντασης, δεν είναι κατάλληλα για την σωστή λειτουργία του έξυπνου φωτισμού, σε αντίθεση με τους λαμπτήρες LED που είναι κατάλληλοι για αυτόν τον τύπο φωτισμού. Στην περίπτωση του φωτιστικού HID που διαθέτει ισχυρή φωτεινότητα και μεγάλη χωρητικότητα χρωματικής αναπαραγωγής, τον καθιστά ακατάλληλο για έξυπνο φωτισμό, λόγω της έλλειψης της στιγμιαίας ενεργοποίησης και της εξασθένησης της χαμηλής έντασης (Rodriguez, 2019).

Σε διάφορες περιοχές έχει παρατηρηθεί ότι η αυτοματοποίηση έχει γίνει δημοφιλής, ο φωτισμός του δρόμου δεν ήταν η εξαίρεση. Ο έξυπνος LED φωτισμός στοχεύει στην μείωση της ετήσιας κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας και το κόστος, που αντιστοιχεί σε αυτή την κατανάλωση. Η μείωση της ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με τον έξυπνο τρόπο, όπου το φως σβήνει στην απουσία πεζών ή οχημάτων. Επί του παρόντος αυτό επιδιώκεται ενεργειακή απόδοση, ικανή να παρέχει επαρκή φωτισμό, όταν είναι απαραίτητο και, ταυτόχρονα, να μειώνει την τιμή που προκύπτει από την κατανάλωση αυτή (Rodriguez, 2019).

Η σύγκριση της ενεργειακής απόδοσης μεταξύ ενός φωτισμού LED χωρίς σύστημα ελέγχου και ενός με σύστημα ελέγχου έντασης, μέσω της ενεργειακής απόδοσης του καθενός, είναι δυνατή. Αυτό πραγματοποιείται με τη σύγκριση της κατανάλωσης ενέργειας [kWh] ενός συστήματος φωτισμού στο ίδιο διάστημα. Το σχήμα παρουσιάζει τα αποτελέσματα και των δύο συστημάτων φωτισμού όταν δοκιμάζονται για 14 ημέρες σε διαφορετικούς χώρους, όπως κτίριο γραφείων, αποθήκη και χώρο στάθμευσης οι οποίοι είναι δημόσιοι χώροι (Rodriguez, 2019).

Αναλύοντας την Εικόνα 17, το σύστημα φωτιστικού LED χωρίς έλεγχο είχε κατανάλωση ενέργειας 136,93 kWh, ενώ το σύστημα φωτιστικών LED με έξυπνο έλεγχο είχε κατανάλωση 106,86 kWh. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η προσθήκη ενός συστήματος ελέγχου έντασης στο φωτισμό LED μειώνει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά περίπου 21,9%. Αυτό είναι λογικό, καθώς το έξυπνο σύστημα ενεργοποιεί τα φωτιστικά LED, όταν είναι αναγκαία και να μειώνουν την έντασή τους, όταν δεν απαιτείται φωτισμός (Rodriguez, 2019).



Εικόνα 17: Ενεργειακή απόδοση LED

[Rodriguez, 2019]

Παρόλου που το σύστημα οδοφωτισμού με LED έχει θετικό αντίκτυπο στο περιβάλλον, όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας, ωστόσο ορισμένα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή συστημάτων φωτισμού περιέχουν στοιχεία που είναι επιβλαβή για την πανίδα και τη χλωρίδα όπως ο υδράργυρος ή ο μόλυβδος (Rodriguez, 2019).

Για την λειτουργία των έξυπνων συστημάτων φωτισμού LED απαιτούνται μπαταρίες. Οι μπαταρίες, που χρησιμοποιούνται και στα φωτοβολταϊκά ηλιακά πάνελ, περιέχουν ρυπογόνα στοιχεία όπως τον μόλυβδο. Η έλλειψη επαρκούς περιοδικής συντήρησης ή η μη πλήρης φόρτιση, οδηγεί στην θειοποίηση των μπαταριών, δημιουργώντας εξαιρετικά τοξικά διπροϊόντα (Rodriguez, 2019).

Ο λόγος που οι διεθνείς κανονισμοί απαιτούν την μείωση της ποσότητας του υδραργύρου κατά την κατασκευή των φωτιστικών είναι, διότι τα φωτιστικά χρησιμοποιούν ατμούς υδραργύρου που είναι εξαιρετικά τοξικός. Στην περίπτωση, της απόρριψης αυτών των φωτιστικών, είναι πιθανό να έρθουν σε επαφή με ποτάμια και πηγές νερού και να προκαλέσουν επιπλέον παρεμβολές στα δίκτυα έξυπνων δικτύων (Rodriguez, 2019).

## 2.5.4 VANETs

Τα VANETs παρέχουν επικοινωνία υψηλής απόδοσης και χαμηλής καθυστέρησης μεταξύ των οχημάτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα επικοινωνίες έκτακτης ανάγκης. Σε περίπτωση ατυχήματος, για παράδειγμα, ένα μήνυμα ειδοποίησης που μεταδίδεται μεταξύ των αυτοκινήτων μπορεί να είναι ταχύτερο και, επομένως, πιο έγκαιρο από τα σήματα που αποστέλλονται μέσω ενός δικτύου υποδομής (όπως τα κυψελωτά συστήματα). Για να εξασφαλιστεί η οικονομική βιωσιμότητα των VANET, πρέπει να ληφθούν υπόψη αρκετοί διαφορετικοί και συχνά ανταγωνιστικοί σχεδιαστικοί στόχοι.

Αν και ορισμένες πτυχές των VANET είναι παρόμοιες με εκείνες των MANET, υπάρχουν ορισμένες διαφορές που μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής (Kumar, Mishra, Chand, 2012):

### 1. Τοπολογία που είναι πολύ δυναμική

Η δυναμική αρχιτεκτονική των VANET καθορίζεται από τη γρήγορη ταχύτητα των οχημάτων, καθώς και από τη διαθεσιμότητα διαφορετικών διαδρομών.

### 2. Συχνές αποσυνδέσεις δικτύου

Η γρήγορη ταχύτητα των αυτοκινήτων καθορίζει τη δυναμική τοπολογία με έναν τρόπο, αλλά χρειάζεται επίσης συχνές απαιτήσεις της μονάδας στην άκρη του δρόμου, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα πολλές αποσυνδέσεις.

### 3. Πρόβλεψη και μοντελοποίηση κινητικότητας

Η πρόβλεψη της θέσης και της κίνησης του οχήματος είναι αρκετά δύσκολη. Η διαθεσιμότητα προκαθορισμένων μοντέλων οδικού χάρτη υποστηρίζει τις λειτουργίες μοντελοποίησης, κινητικότητας και πρόβλεψης των VANET. Και πάλι, η ταχύτητα του οχήματος είναι κρίσιμη για τον βέλτιστο σχεδιασμό του δικτύου.

### 4. Κατάσταση Επικοινωνίας

Έχουμε ένα μοντέλο κινητικότητας, αλλά δεν έχουμε τελειώσει. Επειδή το μοντέλο κινητικότητας μπορεί να αλλάξει με βάση την αρχιτεκτονική του δρόμου, τους αυτοκινητόδρομους ή τα μητροπολιτικά περιβάλλοντα. Η επικοινωνία σε αυτές τις περιπτώσεις πρέπει να γίνεται με προσοχή.

### 5. Αυστηροί χρονικοί περιορισμοί

Όταν υπάρχει έκτακτη ανάγκη, η έγκαιρη μετάδοση των επικοινωνιών είναι ζωτικής σημασίας. Ως αποτέλεσμα, η αντιμετώπιση τέτοιων καταστάσεων αντί απλώς η συζήτηση για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων είναι ανεπαρκής.

### 6. Αλληλεπίδραση με αισθητήρες

Οι αισθητήρες χρησιμεύουν ως μέσο επικοινωνίας. Οι αισθητήρες μπορούν να διαβάσουν δεδομένα σχετικά με την ταχύτητα και την κατεύθυνση του οχήματος και να συνδεθούν με το κέντρο δεδομένων. Οι αισθητήρες μπορούν επομένως να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή ζευξέων, καθώς και σε μεθόδους δρομολόγησης.

## 7. Ατελείωτη μπαταρία και αποθήκευση

Επειδή οι κόμβοι στα VANET δεν έχουν τους ίδιους περιορισμούς ισχύος και αποθήκευσης με τα δίκτυα αισθητήρων, η βελτίωση του κύκλου λειτουργίας δεν είναι τόσο σημαντική. Το RSU μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σημείο πρόσβασης, δρομολογητής ή σημείο προσωρινής αποθήκευσης, αποθηκεύοντας και παρέχοντας δεδομένα, όπως απαιτείται. Τα οχήματα ανεβάζουν και κατεβάζουν όλα τα δεδομένα στις RSU. Κατηγοριοποιεί τις εφαρμογές ως εφαρμογές Car to Car Traffic, Car to Car εφαρμογές Infrastructure, Car to Home εφαρμογές και Routing εφαρμογές (Kumar,Mishra,Chand, 2012).

Κατηγοριοποιούμε τις εφαρμογές VANET στους ακόλουθους τύπους με βάση το είδος της επικοινωνίας (V2I ή V2V) (Kumar,Mishra,Chand, 2012):

1. Ανησυχία για την ασφάλεια. Η παρακολούθηση του περιβάλλοντος δρόμου, των εισερχόμενων αυτοκινήτων, του οδοστρώματος, των στροφών του δρόμου και ούτω καθεξής είναι όλα παραδείγματα εφαρμογών ασφάλειας.
2. Ασχολία με το κέρδος. Οι εμπορικές εφαρμογές θα προσφέρουν ψυχαγωγία και υπηρεσίες όπως διαδικτυακή πρόσβαση, ροή ήχου και βίντεο στον οδηγό.
3. Φιλικές προς το χρήστη. Οι εφαρμογές αυτές ασχολούνται κυρίως με τη διαχείριση της κυκλοφορίας, με σκοπό την αύξηση της αποδοτικότητας της κυκλοφορίας αυξάνοντας την άνεση του οδηγού.
4. Παραγωγικές εφαρμογές. Τις ονομάζουμε παραγωγικές λόγω της λειτουργίας τους σε συνδυασμό με τα άλλα προγράμματα που περιγράφονται παραπάνω.

### 2.5.5 Έξυπνα ασύρματα ψηφιακά σήματα κυκλοφορίας στους δρόμους

Εδώ και πολύ καιρό υπήρχαν και χρησιμοποιούνται πινακίδες κυκλοφορίας. Στην πραγματικότητα, το Ηνωμένο Βασίλειο και οι Ηνωμένες Πολιτείες ήταν από τις πρώτες χώρες στον κόσμο, που χρησιμοποίησαν τα σήματα κυκλοφορίας για να προειδοποιήσουν τους οδηγούς και να επιβάλουν τους κανονισμούς κυκλοφορίας. Ωστόσο, υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με τα σήματα κυκλοφορίας, όπως (Sanguesa&Martinez, 2020):

- χαμηλή ορατότητα των σημάτων κυκλοφορίας,
- δυσκολίες στην τοποθέτηση πινακίδων και
- πρόβλημα στην απομνημόνευση του κώδικα οδικής κυκλοφορίας.

Υπάρχουν περίπου 60 πινακίδες στις Ηνωμένες Πολιτείες και 170 πινακίδες στο Ηνωμένο Βασίλειο για μελέτη και ανάκληση, γεγονός που καθιστά δύσκολο για τους ηλικιωμένους οδηγούς και για όσους έχουν μειωμένη μνήμη. Η ιδέα πίσω από ένα ασύρματο ψηφιακό σήμα κυκλοφορίας είναι να εισαγάγετε έναν διακομιστή μέσα στον πίνακα σημάτων κυκλοφορίας. Στη συνέχεια, το συγκεκριμένο σήμα αποστέλλεται ασύρματα στην επερχόμενη κυκλοφορία. Μετέπειτα, μια μονάδα δέκτη στο αυτοκίνητο θα ανιχνεύσει το σήμα ασύρματου σήματος και θα ειδοποιήσει τον

οδηγό (προφορικά ή στην οθόνη). Αυτό εξαλείφει την ανάγκη του οδηγού να παρακολουθεί τα σήματα κατά την οδήγηση, επιτρέποντάς του να συγκεντρωθεί σε αυτό που έχει μπροστά του (Sanguesa&Martinez, 2020).

Η χρήση αυτού του νέου ασύρματου σήματος κυκλοφορίας έχει διάφορα πλεονεκτήματα (Sanguesa&Martinez, 2020):

1. εξαλείφει την ανάγκη να είναι ορατή η πινακίδα στο ανθρώπινο μάτι,
2. απαλλάσσει τον οδηγό από το βάρος της παρακολούθησης πινακίδων κατά την οδήγηση,
3. ανακουφίζει τον οδηγό του φόρτου της απομνημόνευσης όλων των σημάτων κυκλοφορίας,
4. δεν επηρεάζεται από κακές καιρικές συνθήκες και συνθήκες φωτισμού,
5. η πινακίδα είναι προγραμματιζόμενη, που σημαίνει ότι η αλλαγή πινακίδας είναι τόσο απλή όσο ο επαναπρογραμματισμός της,
6. δεν υπάρχει ανάγκη για πολύπλοκη επεξεργασία σήματος και εικόνας.

Στους δρόμους, μπορεί να υπάρχουν πολλά ασύρματα ψηφιακά σήματα κυκλοφορίας, επομένως η κατεύθυνση που δίνεται από το σήμα είναι κρίσιμης σημασίας, επειδή τα σήματα προορίζονται για αυτοκίνητα που έρχονται από το αντίθετο ρεύμα. Δεν τους ενδιαφέρουν πλέον τα σημάδια από τα οποία έχει περάσει αυτοκίνητο. Ως αποτέλεσμα αυτού που προσφέρουν οι κατευθυντικές κεραίες, η σήμανση μπορεί να απευθύνεται σε πολλά αυτοκίνητα, που βρίσκονται απέναντι σε όλες τις λωρίδες που ταξιδεύουν προς την ίδια κατεύθυνση. Αυτή η νέα αρχιτεκτονική επιτρέπει, επίσης την ανάπτυξη διαφόρων νέων εφαρμογών, όπως η αυτόματη μέτρηση του όγκου της κυκλοφορίας και η αυτόματη ανίχνευση και αναφορά κυκλοφοριακών παραβάσεων (Sanguesa&Martinez, 2020).

#### 2.5.6 Οδοί με έξυπνες διασταυρώσεις

Οι οδικοί κόμβοι είναι επιρρεπείς σε ατυχήματα λόγω των οδικών διασταυρώσεων και του περιορισμού της θέας των αυτοκινήτων, που πλησιάζουν από διαφορετικές κατευθύνσεις, όπως φαίνεται στην Εικόνα 18. Ως αποτέλεσμα, η ανάπτυξη τεχνολογιών και λύσεων έξυπνων διασταυρώσεων έχει προχωρήσει διαχρονικά. Μια ευρωπαϊκή πρωτοβουλία που διερευνά αυτές τις ανησυχίες είναι η Συνεταιριστική Ασφάλεια Διασταυρώσεων (INTERSAFE-2 2008-2011) (Sanguesa&Martinez, 2020).

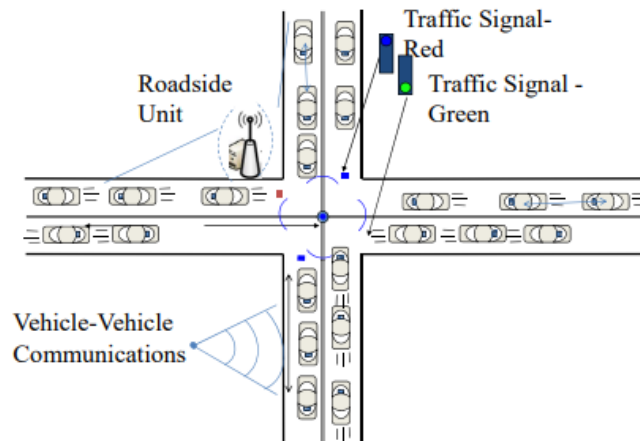
Για την πρόληψη θανατηφόρων ατυχημάτων και τη βελτίωση της ασφάλειας σε οδικούς κόμβους, το έργο χρησιμοποιεί αισθητήρες για την αναγνώριση οχημάτων και αντικειμένων, καθώς και τεχνολογίες V2I, χαρτογράφησης και εντοπισμού. Η έρευνα διεξάγει μια ενδεδειγμένη διερεύνηση ατυχημάτων, βρίσκοντας τυπικές καταστάσεις και είδη ατυχημάτων σε διαβάσεις σε διάφορα ευρωπαϊκά έθνη (Sanguesa&Martinez, 2020).

Τα αντικείμενα σε αυτό το έργο κατηγοριοποιούνται ως (Sanguesa&Martinez, 2020):

- σταθμευμένα οχήματα,
- κινούμενα οχήματα και



- πεζοί.



Εικόνα 18: Έξυπνες διασταυρώσεις

Αποστέλλονται προειδοποιήσεις στους χρήστες του δρόμου (πεζούς, ποδηλάτες και οδηγούς) με αυτόματο φρενάρισμα των αυτοκινήτων σε κόμβους στην πρωτοβουλία ασφάλειας διασταυρώσεων VRUITS (ITS για ευάλωτους χρήστες του δρόμου). Οι διασταυρώσεις στο σύστημα έξυπνων διασταυρώσεων της Miovision Inc. μπορούν να παρακολουθούν και να ερμηνεύουν τις συνθήκες του δρόμου και να προκαλούν αντιδράσεις σε πραγματικό χρόνο. Μεταξύ των απαντήσεων που λαμβάνουν οι χρήστες του δρόμου είναι (Sanguesa&Martinez, 2020):

1. Παράταση των χρόνων του πράσινου φωτός για να βοηθηθούν οι ποδηλάτες, επιτρέποντάς τους να πλοηγηθούν με ασφάλεια στη διάβαση.
2. Ανίχνευση πεζών και ειδοποίηση οδηγών συνδεδεμένων αυτοκινήτων, που πλησιάζουν σε κόμβο κυκλοφορίας.
3. Παροχή προτεραιότητας πρόσβασης στα οχήματα έκτακτης ανάγκης στα σήματα κυκλοφορίας.
4. Ανάπτυξη νοημοσύνης, έτσι, ώστε το σύστημα διασταύρωσης να μπορεί να ερμηνεύει και να αναλύει «παραλίγο αστοχίες» σε διαβάσεις από πεζούς, ποδήλατα και αυτοκίνητα.
5. Μείωση του χρόνου ταξιδιού με δυναμικό προγραμματισμό σημάτων κυκλοφορίας.

#### 2.5.7 Αρχιτεκτονική διάσωσης έκτακτης ανάγκης με χρήση V2X

Τα τροχαία ατυχήματα συνεχίζουν να συμβαίνουν σε τακτική βάση και 1,35 εκατομμύρια άνθρωποι σκοτώνονται σε τροχαία ατυχήματα κάθε χρόνο. Άλλοι σκοτώνονται ως αποτέλεσμα του δυστυχήματος. Η τάση στις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης για τροχαία έχει προχωρήσει από τη

χρήση κινητών τηλεφώνων για την αναφορά ατυχήματος στη χρήση δικτύων eCall, OnStar και οχημάτων ad hoc (VANETs) σε διάφορα κανάλια ασύρματης επικοινωνίας. Μετά από ένα ατύχημα, η κρίσιμη ώρα είναι γνωστή ως «χρυσή ώρα», κατά την οποία τα βήματα πρέπει να εκτελούνται γρήγορα για να διατηρηθούν ζωές (Sanguesa&Martinez, 2020).

Η «χρυσή ώρα», σε αυτή την περίπτωση, αναφέρεται στο χρόνο μεταξύ του ατυχήματος και της άφιξης στο νοσοκομείο. Με τη μείωση αυτής της περιόδου, οι τραυματίες έχουν περισσότερες πιθανότητες να διατηρήσουν τη ζωή τους και να μειώσουν τη σοβαρότητα των τραυματισμών τους (Sanguesa&Martinez, 2020).

Επιπλέον, η χρήση των δυνατοτήτων επικοινωνίας οχημάτων μπορεί να βοηθήσει τις υπηρεσίες διάσωσης και τους παραϊατρικούς να παρέχουν ιατρική περίθαλψη και διάσωση το συντομότερο δυνατό. Κάθε φορά που ένα όχημα συγκρούεται, μια αυτοματοποιημένη ειδοποίηση σύγκρουσης παραδίδεται στο τοπικό κέντρο επαφής έκτακτης ανάγκης χρησιμοποιώντας τον τρέχοντα μηχανισμό eCall. Στη συνέχεια, τα τηλεφωνικά κέντρα θα αποστείλουν βοήθεια και υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης στην τοποθεσία του ατυχήματος. Ενώ είναι επιτυχής, είναι επιρρεπής σε καθυστερήσεις και υπάρχει έλλειψη προηγούμενης γνώσης σχετικά με τη σοβαρότητα της καταστροφής και την κατάσταση των ατόμων που τραυματίστηκαν (Sanguesa&Martinez, 2020).

Επιπλέον, τα γειτονικά αυτοκίνητα μπορούν να αποκτήσουν και να επικοινωνήσουν ζωτικής σημασίας και ακριβείς πληροφορίες σχετικά με το ατύχημα, όπως η κατάσταση του οχήματος και των επιβαινόντων του, στα κέντρα έκτακτης ανάγκης. Ως αποτέλεσμα, τα κέντρα διάσωσης θα μπορούν να επεξεργάζονται κατάλληλα και να μεταφέρουν όλες τις πληροφορίες στις αρμόδιες υπηρεσίες (όπως η πυροσβεστική, τα επείγοντα νοσοκομεία κ.λπ.). Πριν ταξιδέψουν στον τόπο του ατυχήματος, οι διοικητές της ομάδας διάσωσης μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτές τις πληροφορίες για να σχεδιάσουν καλύτερα την προσπάθεια διάσωσης (Sanguesa&Martinez, 2020).

## 2.6 Παραδείγματα εφαρμογής

Στην Ευρώπη έχει παρατηρηθεί αύξηση στην χρήση του έξυπνου οδο φωτισμού με LED λόγω των πολιτικών που προωθούνται από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Για παράδειγμα, το 2013 **στην πόλη της Γλασκώβης της Σκωτίας**, επενδύθηκαν 24 εκατομμύρια λίρες για την αντικατάσταση του οδο φωτισμού και τον εκσυγχρονισμό του συστήματος φωτισμού, μέσω του ελέγχου του Διαδικτύου. Σε συγκεκριμένα σημεία της πόλης μελετήθηκαν τα απαιτούμενα επίπεδα έντασης του φωτός. Ειδικά σε τουριστικά σημεία της πόλης, όπως στο Riverside Walkway, προγραμματίστηκε ανάλογα με την συχνότητα κυκλοφορίας των πεζών, όπου οι αισθητήρες όταν δεν ανιχνεύουν κίνηση να διατηρούν την έντασή τους στο 20%, ενώ στην ανίχνευση παρουσίας ανθρώπων να προσαρμόζεται στο 100% της έντασής τους. Σε ένα άλλο σημείο της πόλης, Gordon Street, οι πόλοι ήταν εξοπλισμένοι με αισθητήρες ικανούς να μετρήσουν το επίπεδο θορύβου, την ατμοσφαιρική ρύπανση και την παρουσία περαστικών, προκειμένου να βελτιώσουν την πληροφόρηση των σημείων υψηλής κυκλοφορίας των ανθρώπων στην πόλη (Rodriguez, 2019).

**Στη Σουηδία**, η πολιτική αντικατάσταση και εκσυγχρονισμού φωτισμού ξεκίνησε το 2006 και κορυφώθηκε το 2009, στο πλαίσιο μιας επένδυσης που προέρχεται από το πρόγραμμα Κλιματικής Αλλαγής Klimp. Έκτοτε, το Γκέτεμποργκ αύξησε την εξοικονόμηση ενέργειας κατά περισσότερο από 60% και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μειώθηκε κατά 132 MWh ετησίως. Επίσης, οι

εκπομπές CO<sub>2</sub> μειώθηκαν κατά 0,16 τόνους, το οξείδιο του αζώτου κατά 85 τόνους και οι σωματιδιακοί ρύποι κατά 1,3 τόνους ετησίως, χάρη στο σύστημα ανίχνευσης σφαλμάτων, το οποίο μείωσε σημαντικά το λειτουργικό κόστος. Τα τελευταία χρόνια έχουν προστεθεί νέα χαρακτηριστικά στους πόλους των φωτιστικών, όπως η παρακολούθηση της θερμοκρασίας και τα συστήματα ανίχνευσης παράνομης στάθμευσης σε περιοχές της πόλης (Rodriguez, 2019).

Με τα χρόνια, η **Τουρκία** έχει επενδύσει μεγάλο χρηματικό ποσό στον εκσυγχρονισμό της υποδομής της χώρας και του δημόσιου φωτισμού. Αυτή η χώρα εξακολουθεί να χρησιμοποιεί συμβατικά φωτιστικά HPS και κάποιες άλλες τεχνολογίες φωτισμού, οι οποίες ενεργοποιούνται με πλήρη ένταση όλη τη νύχτα. Ωστόσο, αυτή η χώρα ενθαρρύνει επί του παρόντος τη χρήση τεχνολογίας LED σε διάφορες περιοχές μεγάλων πόλεων, όπως η Κωνσταντινούπολη ή η Άγκυρα. Ένα σχέδιο για την προσαρμογή του ευφυούς φωτισμού ξεκίνησε πρόσφατα, λόγω των επιτυχημένων περιπτώσιολογικών μελετών στην ευρωπαϊκή ήπειρο και για τα ικανοποιητικά αποτελέσματα που προσφέρει αυτό το σύστημα σε νομισματικούς και περιβαλλοντικούς όρους (Rodriguez, 2019).

**Στην Πορτογαλία**, μελετάται επί του παρόντος η δομή ενός σύγχρονου ευφυούς φωτισμού στην πρωτεύουσα της, τη Λισαβόνα. Υπάρχουν επί του παρόντος σχέδια για την εγκατάσταση συστημάτων φωτιστικών LED, που μπορούν να παρακολουθούνται για συντήρηση και να έχουν έλεγχο έντασης φωτός σε ιστορικά κέντρα με βάση τη ροή των τουριστών (Rodriguez, 2019).

Υπάρχουν δύο ποδηλατόδρομοι κατασκευασμένοι εξ ολοκλήρου από πεταμένο πλαστικό στις **ολλανδικές πόλεις** Zwolle και Giethoorn. Αυτό είναι το προϊόν της δημιουργίας των Simon Jorritsma και Anne Koudstaal ("Road...surfaces", 2018). Συνεργασία τριών εταιρειών: VolkerWessels, Wavin και Total. Το "Plastic Road" των τριών εταιρειών είναι κατασκευασμένο από προκατασκευασμένα, κοίλα, αρθρωτά τμήματα, που δημιουργούνται από καταναλωτικά απόβλητα πλαστικών. Οι υποστηρικτές επισημαίνουν πλεονεκτήματα σε σχέση με τους συμβατικούς δρόμους, όπως το κοίλο δωμάτιο για την αποθήκευση υπερβολικής βροχόπτωσης και τα οφέλη από την ελαφριά και πιθανώς βιώσιμη φύση αυτών των αυτοκινητοδρόμων ("PlasticRoad, n.d.).

Μέχρι στιγμής, καμία χώρα δεν έχει χρησιμοποιήσει μια μεγάλης κλίμακας, συστηματική μέθοδο για τη δημιουργία οδοστρωμάτων αποκλειστικά από πλαστικό. Η Volkerwessels, μια ολλανδική εταιρεία, ανέπτυξε μια διαδρομή ανακυκλωμένου πλαστικού ποδηλάτου στο Zwolle, στα βορειοανατολικά της Ολλανδίας, στις 13 Σεπτεμβρίου 2018. «Ένα δεύτερο μονοπάτι πρόκειται να τοποθετηθεί στο Giethoorn στο Overijssel και το Ρότερνταμ είναι η πόλη που είναι πιο πιθανό να ακολουθήσει την τεχνολογία», σύμφωνα με τον Guardian. ά διαχωρίζονται πρώτα από τα πλαστικά σκουπίδια (Boffey, 2018).

## Κεφάλαιο 3: Ηλιακά συστήματα στην οδοποιία

### 3.1 Ηλιακά πλαίσια στην οδοποιία

#### 3.1.1 Ηλιακή ενέργεια και χρήση στους δρόμους

Για τη συλλογή ηλιακής ενέργειας και μετ' έπειτα την εκπομπή ηλεκτρικής ενέργειας τοποθετούνται ηλιακά πάνελ (φωτοβολταϊκά) και ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες, οι οποίοι ανήκουν στις μεθόδους ενεργής ηλιακής τεχνολογίας (Chaitanya, Kurre, Praveen, 2018). Ως ηλιακός δρόμος ορίζεται το τμήμα του οδοστρώματος, το οποίο είναι κατασκευασμένο από ηλιακά (φωτοβολταϊκά) πάνελ, που αποσκοπούν στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική (Rathod, et.al., 2019; Pawar, et.al., 2018; Kulkarni, 2013).

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο από το δεδομένο οδικό δίκτυο, αλλά και από τις κοντινές περιοχές, τα σπίτια, τις βιομηχανίες κ.α., τα οποία συνδέονται στο σύστημα αυτό μέσω των χώρων στάθμευσης και των οδών τους. Οι ηλιακοί δρόμοι αποτελούν αγωγό, ώστε να επιτευχθεί η λειτουργία συσκευών όπως η τηλεόραση και το τηλέφωνο και για τη χρήση διαδικτύου υψηλής ταχύτητας. Η ηλεκτρική ενέργεια, η οποία δεν διανέμεται σε κάποιο μέσο, αποθηκεύεται μέσα στο σύστημα του δρόμου ή δίπλα σε αυτόν κι έτσι αντικαθίσταται η ανάγκη για τρέχοντα ορυκτά καύσιμα, τα οποία μειώνουν τα αέρια του θερμοκηπίου και κατ' επέκταση συντελούν στην αειφόρο ανάπτυξη (Kulkarni, 2013). Όλα τα μέσα μετακίνησης (δημόσιοι δρόμοι, αυτοκινητόδρομοι) και οι χώροι στάθμευσης περιλαμβάνονται στην επιχείρηση ανάπτυξης της τεχνολογίας αυτής και αν όλοι οι υφιστάμενοι δρόμοι αντικαθιστούνταν με ηλιακά πάνελ, θα επιτυγχανόταν παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτήν που χρειάζεται για να τροφοδοτηθούν όλες οι επιχειρήσεις και τα σπίτια σε εθνικό επίπεδο (Aggrawal, Mehta, Tiwari, 2015; Renoald, et.al., 2016).

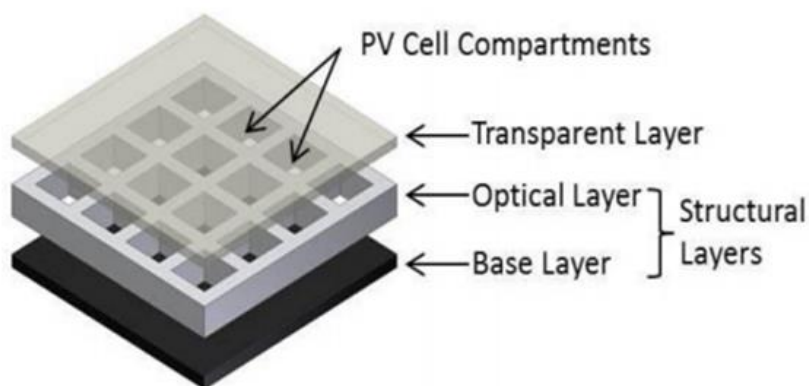
Τα ηλιακά πάνελ είναι σχεδιασμένα σε μορφή κυψελών και περιλαμβάνουν φωτοβολταϊκό υλικό (Aggrawal, Mehta, Tiwari, 2015; Chaitanya, Kurre, Praveen, 2018; Renoald, et.al., 2016). Κάποια από τα φωτοβολταϊκά υλικά, που χρησιμοποιούνται αποτελούνται από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, άμορφο πυρίτιο, τελλουριούχο κάδμιο και σεληνιούχο/ σουλφίδιο χαλκού ινδίου (Chaitanya, Kurre, Praveen, 2018). Η ζήτηση για χρήση ηλιακών πάνελ και φωτοβολταϊκών έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, λόγω της ανάγκης για αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Aggrawal, Mehta, Tiwari, 2015; Chaitanya, Kurre, Praveen, 2018; Renoald, et.al., 2016).

Ο ηλιακός δρόμος χωρίζεται σε τρεις στρώσεις, ανάλογα με τα υλικά και τον στόχο κατασκευής του. Οι τρεις στρώσεις παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω (Rathod, et.al., 2019; Renoald, et.al., 2016; Aggrawal, Mehta, Tiwari, 2015; Kulkarni, 2013):

1. Η επιφάνεια του οδοστρώματος, η οποία αποτελείται από ημιδιαφανές και υψηλής αντοχής γυαλί, το οποίο σχεδιάζεται με μεγάλη τραχύτητα, ώστε να παρέχεται επαρκής πρόσφυση. Θα πρέπει όμως να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην τραχύτητα του γυαλιού, ώστε να διαπερνάται το φως του ήλιου στο εσωτερικό, που ενσωματώνονται τεχνολογίες για

οδοφωτισμό και θέρμανση του οδοστρώματος. Επιπρόσθετα, πρέπει να είναι αδιάβροχο για την προστασία των παρακάτω στρωμάτων.

2. Η ηλεκτρονική στρώση, στην οποία ενσωματώνονται τα φωτοβολταϊκά κύτταρα για την απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας και μία πλακέτα μικροεπεξεργαστή από πυρίτιο με κύκλωμα στήριξης. Η πλακέτα μικροεπεξεργαστή αποσκοπεί στην ανίχνευση φορτίων στο οδόστρωμα (οχημάτων, χιονιού - πάγου) για τη μείωση ή την οριστική εξάλειψη τους μέσω της θερμαντικής τεχνολογίας. Ο έλεγχος του οδοφωτισμού, των διαφόρων επικοινωνιών και παρακολούθησεων του δρόμου, κ.λπ., τα οποία είναι τοποθετημένα σε απόσταση 12m γίνεται μέσω του μικροεπεξεργαστή.
3. Η βάση οδοστρώματος, όπου πραγματοποιείται η διανομή της ηλιακής ενέργειας στα σπίτια και τις επιχειρήσεις, τα οποία συνδέονται με το σύστημα του ηλιακού αυτοκινητόδρομου. Φυσικά, πρέπει να είναι και αυτό αδιάβροχο, ώστε να αποφεύγεται η μετάδοση υγρασίας στο ηλεκτρονικό στρώμα.



Εικόνα 19: Σχεδιασμός ηλιακού πλαισίου για οδοποιία [Northmore & Tighe, 2012a]

Η μεγαλύτερη πρόκληση του σχεδιασμού ενός ηλιακού πάνελ προκύπτει από το ότι οι προϋποθέσεις σχεδιασμού για δομές οδοστρώματος και ηλιακών μονάδων συχνά έρχονται σε αντιπαράθεση μεταξύ τους. Αυτές οι προϋποθέσεις περιγράφονται παρακάτω, χωρισμένες σε δύο κατηγορίες, αυτές των δομικών και αυτές των ηλεκτρικών απαιτήσεων (Chaitanya, Kurre, Praveen, 2018;Northmore, 2012).

Οι προϋποθέσεις δομικού σχεδιασμού για ένα ηλιακό πάνελ είναι οι εξής (Chaitanya, Kurre, Praveen, 2018;Northmore, 2012):

- η κατασκευή θα πρέπει να σχεδιάζεται με τάση πάνω από 480kPa, η οποία είναι μία τυπική τιμή τάσης, που προέρχεται από τα ελαστικά των οχημάτων. Η αιτία σχεδιασμού μίας τέτοιας τιμής τάσης αφορά τη ασφάλεια του οδοστρώματος, δηλαδή την αποφυγή παραμορφώσεων, όπως αυλακώσεις ή ακόμα και θραύσεις.
- το διαφανές στρώμα του οδοστρώματος δεν έχει τη δυνατότητα αντανάκλασης των ηλιακών τμημάτων, ώστε να μεταφερθεί φορτίο μέχρι και τα ηλιακά πάνελ.

- πρέπει να σχεδιάζεται με υψηλή ανθεκτικότητα σε πιθανούς ρύπους και πιθανότητες διαβρώσεις
- η κατασκευή των ηλιακών πάνελ πρέπει να πραγματοποιηθεί από άμεσα διαθέσιμα υλικά και εξαρτήματα, ώστε να διευκολυνθεί η συντήρησή τους
- για την εξυπηρέτηση της κατασκευής, της δοκιμής και τις διαστάσεις των διαθέσιμων εξαρτημάτων, προτείνεται να σχεδιάζεται με πλευρικά μήκη των 0.91m και με πάχος, τέτοιο ώστε να ικανοποιούνται οι παραπάνω απαιτήσεις
- για την επίτευξη εύκολων δοκιμών προς την εγκατάστασή του, το βάρος του ηλιακού πάνελ πρέπει να είναι σχετικά χαμηλό

Οι προϋποθέσεις ηλεκτρικού σχεδιασμού ενός ηλιακού πάνελ αποτελούνται από (Chaitanya, Kurre, Praveen, 2018;Northmore, 2012):

- συγκεκριμένης μορφής σχεδιασμό, ώστε να αποφεύγεται η σκίαση των ηλιακών πάνελ
- σχεδιασμό υψηλής σύνδεσης μεταξύ των ηλιακών κυψελών
- μεγάλης ανθεκτικότητας ηλιακά πάνελ προς όλες τις πιθανές καιρικές συνθήκες, όπως βροχοπτώσεις, ώστε να αποφεύγεται η εισχώρηση υγρασίας στο ηλεκτρονικό στρώμα
- εγκατάσταση διόδου στην ηλεκτρική γραμμή εξόδου του πάνελ για να μπλοκάρει τα αντίστροφα ρεύματα, τα οποία είναι επιβλαβή για το ηλεκτρονικό στρώμα

Δεν θα μπορούσαν να παραληφθούν οι τεχνολογίες, που περιλαμβάνουν τα φωτοβολταϊκά σε σχέση με τον φωτισμό του δρόμου, οι οποίες στοχεύουν στην εισχώρηση ηλιακής ενέργειας στο οδόστρωμα κατά τη διάρκεια της ημέρας και αποθήκευση της μέσω των μπαταριών για χρήση της κατά τη διάρκεια της νύχτας σε μορφή φωτισμού. Χρησιμοποιούνται δύο τεχνολογίες οδοφωτισμού, μεταξύ αυτών είναι και η τεχνολογία LED (Choudhary, Joshi, Kalyani, 2015).

Ένα ηλιακό φωτοβολταϊκό σύστημα φωτισμού LED περιλαμβάνει ηλιακούς συλλέκτες, αυτόματη συσκευή εναλλαγής, μπαταρίες και ελεγκτή φόρτισης. Ο στόχος του ελεγκτή φόρτισης περιορίζεται στη ρύθμιση τάσης και κατ' επέκταση στην προφύλαξη των μπαταριών από υπερφόρτιση, δηλαδή επιδιώκει να διατηρεί τις μπαταρίες ασφαλείς με σταθερή τροφοδοσία για μεγάλο χρονικό διάστημα. Μία δίοδος εκπομπής φωτός LED είναι μία πηγή φωτός ημιαγωγού δύο μολυβδών, μία δίοδος σύνδεσης P-N, που εκπέμπει φως όταν ενεργοποιείται. Λειτουργούν σύμφωνα με το φαινόμενο της ηλεκτροφωταύγειας, το οποίο παρατηρείται σε κατάλληλη τάση στα καλώδια και απελευθερώνονται ηλεκτρόνια, για να εκπέμψουν ηλεκτρική ενέργεια σε μορφή φωτονίων (Choudhary, Joshi, Kalyani, 2015). Οι λυχνίες LED είναι φιλικές προς το περιβάλλον, αλλά εξίσου αποδοτικές και ανθεκτικές, ενώ χαρακτηρίζονται από μικρή κατανάλωση και χαμηλές απώλειες ενέργειας (Grabinski, 2019).

Η χρήση αισθητήρων αποτελεί μία ακόμη περίπτωση οδοφωτισμού με φωτοβολταϊκά, η οποία παρέχει τη δυνατότητα φωτισμού του οδοστρώματος με τη διέλευση των οχημάτων και απενεργοποίηση αυτού στο ενδεχόμενο άδειων δρόμων. Έτσι, εξοικονομείται μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Με τη χρήση ενός υπέρυθρου αισθητήρα (IR Sensor) καταφέρνουμε να μετρήσουμε την υπέρυθη ακτινοβολία, την κίνηση, αλλά και τη θερμοκρασία ενός αντικειμένου. Περιλαμβάνεται ένας πομπός IR LED (δίοδος εκπομπής φωτός) και παράλληλα ένας ανιχνευτής IR φωτοδίοδος, ο οποίος παρουσιάζει ευαισθησία στο φως, που εκπέμπεται από το IR LED σε

ίδιο μήκος κύματος. Ανάλογα με το μέγεθος του φωτός IR που λαμβάνεται στη φωτοδίοδο, οι αντιστάσεις και τάσεις εξόδου εμφανίζουν αλλαγές (Choudhary, Joshi, Kalyani, 2015).

Για τη σωστή λειτουργία των ηλιακών δρόμων είναι απαραίτητο να εξασφαλιστούν κάποιες παράμετροι, όπως (Pawar, et.al., 2018; Renoald, et.al., 2016):

- η τοποθέτηση σε καθαρούς δρόμους, χωρίς την περίσσεια λάσπης, καθώς υπάρχει πιθανότητα να περιοριστεί η εκπομπή ηλεκτρικής ενέργειας
- η διασφάλιση ύπαρξης αρκετής ενέργειας στον καθορισμένο αυτοκινητόδρομο πριν τη μετάδοση της υπόλοιπης ενέργειας στο δίκτυο (σπίτια, βιομηχανίες)

### 3.1.2 Ηλιακή ακτινοβολία στην Ελλάδα

Η Παγκόσμια Οριζόντια Ακτινοβολία (GHI) είναι η συνολική ποσότητα ακτινοβολίας βραχυκυμάτων από παραπάνω από μία επιφάνεια οριζόντια προς το έδαφος. Στην τιμή της περιλαμβάνονται και το DNI (= ηλιακή ακτινοβολία που έρχεται σε ευθεία γραμμή από την κατεύθυνση του Ήλιου στην τρέχουσα θέση του στον ουρανό) και το DIF (= η ακτινοβολία που δεν φτάνει με άμεση διαδρομή από τον Ήλιο, αλλά διασκορπάζεται από μόρια και σωματίδια στην ατμόσφαιρα). Το GHI αποτελεί σημαντική τιμή για την αποτελεσματικότητα των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων (Vaisala, n.d.). Το μέτρο της ηλιακής ακτινοβολίας λαμβάνεται από μία δεδομένη περιοχή σε μία δεδομένη χρονική περίοδο και η μονάδα μέτρησης της είναι είτε το MJ/m<sup>2</sup> είτε kWh/m<sup>2</sup>.

Έχουν διερευνηθεί αρκετές μέθοδοι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αυτόν τον πόρο. Το πρώτο επιτεύχθηκε με τη μετατροπή των συμβατικών ασφαλικών οδοστρωμάτων σε ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες (Bijsterveld, 2001). Ενώ αυτή ήταν μια λογική επιλογή λόγω της γνωστής συγκράτησης θερμότητας της ασφάλτου, διαταράσσει τις παραδοσιακές μεθόδους συντήρησης. Πιο πρόσφατη έρευνα διεξάγεται σχετικά με τη χρήση θερμοηλεκτρικών γεννητριών για την άμεση εξαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη θερμική κλίση σε κατασκευές ασφαλικών οδοστρωμάτων (G. Wu & Yu, 2012), αν και αυτή η έρευνα είναι ακόμα στα αρχικά της στάδια και έχει πολύ χαμηλή απόδοση μετατροπής. Η ανάπτυξη ηλιακών πλασίων δρόμου είναι η πιο πολλά υποσχόμενη τεχνολογία σε αυτόν τον τομέα, καθώς και η πιο καινοτόμος και η μόνη που αγνοεί εντελώς τις παραδοσιακές πρακτικές επίστρωσης.

Για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ενέργειας, που μπορεί να παραχθεί μέσω της εφαρμογής των ηλιακών συλλεκτών στους δρόμους στην Ελλάδα είναι απαραίτητα τα δεδομένα της μέσης ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε περιοχή, ώστε να επιτευχθεί μία πιο ορθή εκτίμηση του ποσοστού υπό πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες (Mwani, n.d.; Selvaraju, 2012).

Με στόχο την ορθή εκτίμηση της μέσης ηλιακής απομόνωσης έχουν ληφθεί υπόψιν οι παρακάτω παράμετροι (Selvaraju, 2012):

- ο ηλιακός συλλεκτήρας δεν θα έχει κλίση, καθώς εφαρμόζεται σε αυτοκινητόδρομους
- η περίοδος, που θα εργαστούμε παρατηρείται ετήσια, αλλά μπορεί να εφαρμοστεί και με μηνιαίες ή και ημερήσιες συνθήκες για πιο ακριβή αποτελέσματα

- μέγιστη και ελάχιστη ημερήσια ηλιακή απομόνωση, ώστε να προβλεφθούν και τα μέγιστα αλλά και τα ελάχιστα ποσοστά παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των ηλιακών αυτοκινητόδρομων

Ο παρακάτω πίνακας περιλαμβάνει τις τιμές της μέσης ημερήσιας απομόνωσης (GHI) στην χώρα μας κάθε ώρα σε κάθε m<sup>2</sup> (“Solar Resource Maps of Greece”, n.d.).

*Πίνακας 2: Μέση ημερήσια απομόνωση στην Ελλάδα*

Περιοχή	Μέση ημερήσια απομόνωση (kWh/m <sup>2</sup> )	
	Ελάχιστη	Μέγιστη
Αιγαίο	4.50	5.20
Αττική	4.45	5.00
Ήπειρος και Δυτική Μακεδονία	3.80	4.68
Θεσσαλία και Κεντρική Ελλάδα	3.80	4.73
Κρήτη	4.57	5.32
Μακεδονία και Θράκη	3.72	4.40
Πελοπόννησος και Δυτική Ελλάδα	4.09	4.96

Στον παρακάτω πίνακα περιγράφονται οι δυνατότητες εφαρμογής ηλιακών συλλεκτών σε κάθε περιοχή της Ελλάδας (“Global Solar Atlas”, n.d).



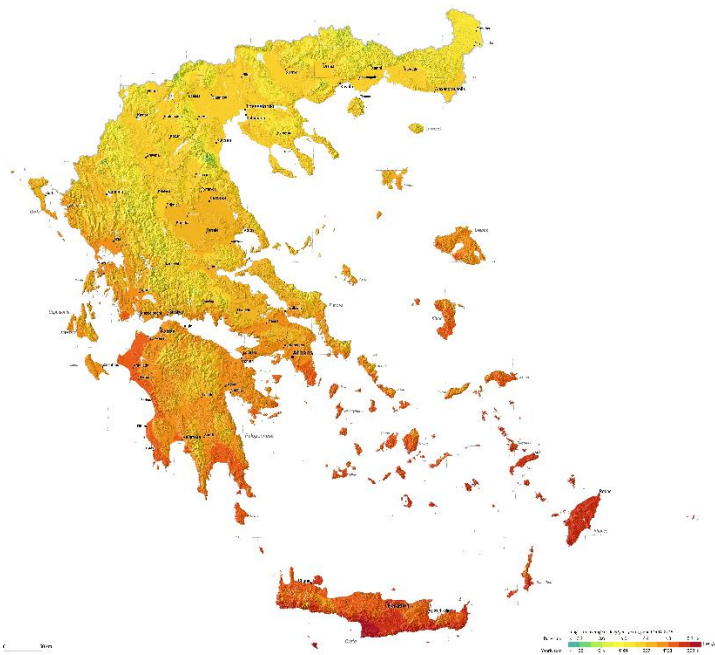
SOLAR RESOURCE MAP

**GLOBAL  
HORIZONTAL  
IRRADIATION**  
**GREECE**



**ΕΠΙΣΤΡΟΦΗ**  
 Η παρούσα κάρτα παρουσιάζει την ετήσια μέση οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία στην Ελλάδα. Η ακτινοβολία αυτή είναι το αποτέλεσμα της διαφοράς μεταξύ της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης και της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από την επιφάνεια της γης. Η ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης είναι το αποτέλεσμα της διαφοράς μεταξύ της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης και της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από την επιφάνεια της γης. Η ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης είναι το αποτέλεσμα της διαφοράς μεταξύ της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης και της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από την επιφάνεια της γης.

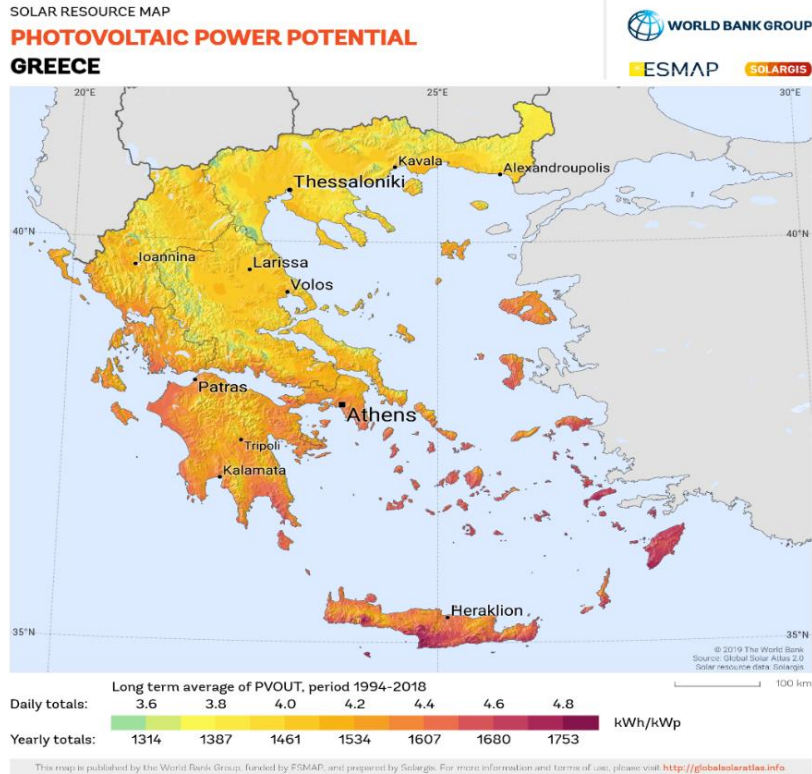
**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ**  
 Η ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης είναι το αποτέλεσμα της διαφοράς μεταξύ της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης και της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από την επιφάνεια της γης. Η ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης είναι το αποτέλεσμα της διαφοράς μεταξύ της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης και της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από την επιφάνεια της γης.



Εικόνα 20: Ηλιακή απομόνωση στην Ελλάδα  
 [global solar atlas.com]

Πίνακας 3: Δυναμικό ημερήσιας φωτοβολταϊκής ισχύος στην Ελλάδα

Περιοχή	Δυναμικό ημερήσιας φωτοβολταϊκής ισχύος (kWh/kWp)	
	Ελάχιστη	Μέγιστη
Αιγαίο	4.08	4.74
Αττική	3.98	4.54
Ήπειρος και Δυτική Μακεδονία	4.01	4.82
Θεσσαλία και Κεντρική Ελλάδα	3.46	4.34
Κρήτη	3.46	4.14
Μακεδονία και Θράκη	3.68	4.52
Πελοπόννησος και Δυτική Ελλάδα	3.40	4.37



Εικόνα 21: Δυναμικό φωτοβολταϊκής ισχύος

[[global.solaratlas.com](http://global.solaratlas.com)]

Παρόλο που είναι δυνατό να μετατραπεί μόνο το 5-10% της ενέργειας που παράγεται από την ελληνική λιθόστρωτη υποδομή σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω συστημάτων μετατροπής ηλιακής ενέργειας, αυτός ο πόρος δεν είναι ακόμη ασήμαντος. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που έχουν μελετηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την χρήση ηλιακών συστημάτων.

### 3.2 Σύγκριση συμβατών οδοστρωμάτων με ηλιακά

#### 3.2.1 Συμβατά οδοστρώματα

##### 3.2.1.1 Ορισμοί οδοστρώματος

Σύμφωνα με τους Μακρίδου & Πανιώρας (2009) ως οδόστρωμα ορίζεται το σύνολο των επάλληλων στρώσεων που είναι τοποθετημένες πάνω από το φυσικό έδαφος για τη δημιουργία της οδού. Αποτελεί μία σύνθετη κατασκευή που έχει να επιτελέσει διάφορες λειτουργίες οι οποίες είναι ανάμοιες μεταξύ τους.

Οδόστρωμα ονομάζεται το τμήμα της υποδομής της οδού, το οποίο κατασκευάζεται για να χρησιμοποιηθεί από τα οχήματα κυκλοφορίας και να διανέμει τα φορτία κυκλοφορίας πριν φτάσουν στο έδαφος. Μια τυπική διατομή οδοστρώματος ξεκινώντας από τις κατώτερες στρώσεις, αποτελείται από το υπέδαφος και την διαμορφωμένη του στρώση, την στρώση υπόβασης, βάσης και τις ασφαλικές στρώσεις (ΕΑΡΑ, 2010).

### *3.2.1.2 Κατηγορίες οδοστρωμάτων*

Δύο παράμετροι που ορίζουν τα οδοστρώματα σε εύκαμπτα ή δύσκαμπτα είναι το μέτρο ελαστικότητας τους και ο κυκλοφοριακός φόρτος. Η σημαντική διαφορά αυτών των δύο κατηγοριών οδοστρώματος έγκειται στο ότι η ανώτερη στρώση στα εύκαμπτα έχει κατασκευαστεί από ασφαλικό υλικό, ενώ στα δύσκαμπτα από άοπλο ή οπλισμένο σκυρόδεμα (Κοφίτσας, 1997).

Οι στρώσεις βάσης και υπόβασης κατασκευάζονται στα εύκαμπτα οδοστρώματα για:

- αποφυγή ανόδου του ύδατος λόγω τριχοειδών
- προστασία από τον παγετό
- αποστράγγιση
- μεγαλύτερες τιμές φέρουσας ικανότητας
- σωστή κατανομή φορτίων στο οδόστρωμα

Τα εύκαμπτα οδοστρώματα κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τα υλικά κατασκευής σε ασφαλικά, κυκλοφοριόπηκτα, σταθεροποιημένα και σκυρωτά. Οι ιδιότητες των στρώσεων των δύσκαμπτων είναι στο μεγαλύτερο βαθμό κοινές με τα εύκαμπτα, καθώς αποτρέπεται η άνοδος του ύδατος, προστατεύονται από τον παγετό και γίνεται αποστράγγιση. Επιπρόσθετα, βοηθάνε στην αποφυγή καθίζησης του εδάφους και στην αύξηση της αντοχής του οδοστρώματος. Η κατηγοριοποίηση των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων χωρίζονται σε δύο κατηγορίες με βάση τα υλικά τους, αυτά που είναι κατασκευασμένα από σκυρόδεμα και τα λιθόστρωτα (Μακρίδου & Πανιώρας, 2009).



Εικόνα 22: Συμβατικά οδοστρώματα

[teiwest]

### 3.2.1.3 Σύνθεση οδοστρωμάτων

Λόγω της άμεσης επαφής των τροχών των οχημάτων στην τελευταία στρώση του οδοστρώματος, η αντοχή του υλικού, που θα χρησιμοποιηθεί συνιστάται να είναι αναλογικά μεγαλύτερη των προηγούμενων στρώσεων. Το οδόστρωμα αποτελείται από διάφορες και άλλης σύστασης στρώσεις, οι οποίες είναι οι εξής:

- η στρώση έδρασης, που αποτελείται από δύο στρώσεις, μία στρώση από επιλεγμένο υλικό ή μεταφερόμενο αμμοχάλικο πάχους 50-70 cm και μία ή δύο στρώσεις από σταθεροποιημένο εδαφικό υλικό πάχους 40-80 cm (Παναγοπούλου, 2011).
- η εξυγιαντική στρώση τοποθετείται μόνο σε περιπτώσεις όπου ο δείκτης CBR είναι μικρότερος από 5%, ώστε να αυξήσει τη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης (Νικολαΐδης, 1996).
- η υπόβαση, που αποτελείται από φυσικό ή θραυστό αμμοχάλικο (ασύνδετα αδρανή) και αποσκοπεί στη μείωση των τάσεων προς τη στρώση έδρασης. Σε περιπτώσεις με μεγάλη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης μπορεί και να αποφευχθεί η κατασκευή της (Νικολαΐδης, 1996. Παναγοπούλου, 2011).
- η βάση, που αποτελείται από υλικά όπως η υπόβαση (ασύνδετα αδρανή), αλλά σε κάποιες περιπτώσεις και από ασφαλτοκονία ή τσιμέντο. Είναι η κυριότερη στρώση δομικά και παρέχει βασικές λειτουργίες, όπως η κατανομή των φορτίων στις προηγούμενες στρώσεις, η παροχή δυσκαμψίας και η αντοχή στην κόπωση (Νικολαΐδης, 1996).
- η συνδετική στρώση συνήθως παραλείπεται αλλά χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις πορώδους τάπτητα κυκλοφορίας και κατασκευάζεται δίνοντας στο οδόστρωμα τις απαιτούμενες κλίσεις (Νικολαΐδης, 1996).

- η ασφαλτική στρώση αποτελεί την ανώτερη στρώση του οδοστρώματος και είναι υνίστης αντοχής. Για εξασφάλιση αντίστασης έναντι ολίσθησης και για άνετη κυκλοφορία των οχημάτων και των ανθρώπων δεν πρέπει να παρουσιάζει αστοχίες οδοστρώματος, όπως ρηγματώσεις, αυλακώσεις (ΕΑΡΑ, 2010). Ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε περιοχής χρησιμοποιούνται και διαφορετικά υλικά στη στρώση. Τα βασικά συστατικά παρ'όλα αυτά είναι η άσφαλτος και τα αδρανή (Λεβέντης, 2011). Δεν θα μπορούσε να παραληφθεί ότι η παρουσία νερού δεν είναι επιθυμητή για να αποφευχθεί η διείδυση στις προηγούμενες στρώσεις (Νικολαΐδης, 1996).

#### 3.2.1.4 Αιτίες αστοχίας

Ο κυκλοφοριακός φόρτος και οι περιβαλλοντικές συνθήκες έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στη φθορά μιας κατασκευής οδοστρώματος, επειδή καθορίζουν τις τάσεις που ασκούνται στην κατασκευή, η οποία προσπαθεί να αντέξει. Για να ληφθούν υπόψη οι διάφοροι τύποι οχημάτων, που αναμένεται να κινηθούν στη δομή του οδοστρώματος, η κυκλοφοριακή φόρτιση μετράται με δύο τρόπους. Η πρώτη μέτρηση είναι η μέση ετήσια ημερήσια κίνηση, με ένα δεδομένο ποσοστό αυτής της κίνησης να είναι φορτηγά (Northmore, 2014).

Αν και παλαιότερες μέθοδοι σχεδιασμού έδειξαν συσχετισμούς με την απόδοση του οδοστρώματος, οι νεότερες μεθοδολογίες απαιτούν τον αριθμό των ισοδύναμων φορτίων μονού άξονα (EASL), που θα διανύσουν το συγκεκριμένο τμήμα (MTO, 1990). Μέσω ενός συντελεστή ισοδυναμίας φορτίου (LEF), που προσεγγίζει έναν τέταρτο νόμο ισχύος με βάση το βάρος του οχήματος, αυτή η μέθοδος μετατρέπει κάθε μεμονωμένο όχημα σε έναν αριθμό EASL, καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει ένα φορτίο άξονα 80 kN με διπλά ελαστικά (Northmore, 2014).

Η θερμοκρασία και η υγρασία είναι οι δύο περιβαλλοντικοί παράγοντες που έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στην υποβάθμιση του οδοστρώματος. Η υφή της επιφάνειας μιας κατασκευής είναι ένα άλλο σημαντικό στοιχείο σχεδιασμού για τους μηχανικούς οδοστρωμάτων. Η επιφάνεια πρέπει να παρέχει αρκετή πρόσφυση για να πιάσουν τα ελαστικά, ώστε τα οχήματα να διασχίζουν με ασφάλεια τη δομή (TAC, 2012).

Τα ασφαλτοστρώματα δεν απαιτούν πρόσθετη εργασία για να επιτευχθεί αυτό, ενώ οι κατασκευές από σκυρόδεμα απαιτούν πρόσθετη στρώση μετά την τοποθέτησή τους. Συνήθως, αυτό επιτυγχάνεται τοποθετώντας ένα τραχύ υλικό σε όλη την επιφάνεια, ενώ το υλικό σκληραίνει ή με μηχανική εφαρμογή μιας στρώσης μετά τη σκλήρυνση του σκυροδέματος (TAC, 2012).

Οι καιρικές συνθήκες έχουν βραχυπρόθεσμο αντίκτυπο στην υφή της επιφάνειας και η κυκλοφορία των οχημάτων έχει μακροπρόθεσμο αντίκτυπο. Η συσσώρευση νερού και πάγου στο πεζοδρόμιο μπορεί να κάνει το περπάτημα πολύ ολισθηρό εάν η αποστράγγιση είναι ανεπαρκής, ενώ η κυκλοφορία των οχημάτων φθείρει την επιφάνεια και απαιτεί συντήρηση για την αποκατάσταση της υφής (TAC, 2012).

### 3.2.1.5 Άλλα παραδοσιακά υλικά για οδοστρώματα

#### 1. Τάπητες

Ως οπλισμός για μαλακά υποστρώματα ή ως δομικές επιφάνειες, απαιτούνται άλλα υλικά εκτός από την τυπική άσφαλτο και το σκυρόδεμα λόγω των πολλών ιδιαίτερων χρήσεων. Τα πιο διαδεδομένα από αυτά περιλαμβάνουν ημιδιαφανή υλικά, που χρησιμοποιούνται σε αρχιτεκτονικά δάπεδα, υλικά που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση των υπαρχόντων εδαφών για στρατιωτικές επιχειρήσεις και ειδικά υλικά που χρησιμοποιούνται στα καταστρώματα γεφυρών (Northmore, 2014).

Από τα τέλη της δεκαετίας του 1930, το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ έχει πραγματοποιήσει πολλή έρευνα για μη συμβατικά υλικά οδοποιίας. Προκειμένου να υποστηριχθούν καλύτερα οι στρατιωτικές επιχειρήσεις στόχος αυτής της προσπάθειας είναι η κατασκευή υλικών, που μπορούν να τοποθετηθούν γρήγορα ως αυτοκινητόδρομοι και επιφάνειες προσγείωσης σε διάφορες τοποθεσίες. Δεδομένων των επιχειρησιακών συνθηκών που ανακαλύφθηκαν κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, αυτή η μελέτη κρίθηκε κρίσιμη και οι αμερικανικές στρατιωτικές επιχειρήσεις σε όλο τον κόσμο στηρίζονται σε μεγάλο βαθμό σε αυτήν από τότε (Robinson, 2005).

Τα υλικά για την προσγείωση έχουν ένα αυστηρότερο σύνολο σχεδιαστικών προδιαγραφών από τα άλλα δύο. Το τεράστιο βάρος των στρατιωτικών φορτηγών αεροσκαφών και η εξάτμιση αεριοθουμένων υψηλής θερμοκρασίας από τα μαχητικά αεροσκάφη, καθώς και οι αυξημένες φορτίσεις στις οποίες υπόκεινται αυτά τα χαλάκια, είναι οι κύριες αιτίες. Αυτά πρέπει να είναι ελαφριά για να αναπτύσσονται γρήγορα, κάτι που είναι ένα άλλο κρίσιμο στοιχείο σχεδιασμού (Northmore, 2014).

Είναι κατασκευασμένα από κράματα αλουμινίου, τα οποία έχουν το πλεονέκτημα ότι έχουν πολύ υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος. Όταν χρησιμοποιούνται σε υποβάθμια με αντοχή μεταξύ 1,3 και 8,0 CBR, μπορούν κανονικά να αντισταθούν σε 1000 κινήσεις αεροσκαφών (Ulegy & Wolf, 1971). Δεδομένης της γρήγορης φύσης των στρατιωτικών δραστηριοτήτων, αυτό υποδηλώνει μια σύντομη διάρκεια ζωής, η οποία τονίζει πόσο ακριβά είναι τα υλικά από εξώθηση αλουμινίου σε σύγκριση με άλλα στιβαρά υλικά. Πολλές επιχειρήσεις έχουν δημιουργήσει τα δικά τους συστήματα τάπητα προσγείωσης ως αποτέλεσμα των σύγχρονων βελτιώσεων στην τεχνολογία των υλικών, αλλά όλες συνεχίζουν να βασίζονται σε εξωθήσιμα κράματα υψηλής αντοχής (Northmore, 2014).

#### 2. Καταστρώματα γεφυρών

Ο σχεδιασμός καταστρωμάτων γεφυρών είναι μια από τις πιο συχνές χρήσεις μη παραδοσιακών υλικών σε υποδομές οδοποιίας. Αν και οι γέφυρες αυτοκινητοδρόμων είναι συνήθως κατασκευασμένες από σκυρόδεμα με ουσιαστικό οπλισμό και στηρίγματα από χάλυβα, πολλές άλλες εφαρμογές απαιτούν οι γέφυρες να κατασκευάζονται από άλλα υλικά, είτε λόγω μοναδικών περιπτώσεων φόρτωσης, είτε λόγω της ανάγκης για αρθρωτή κατασκευή, είτε λόγω κόστους (Northmore, 2014).

Τα καταστρώματα γέφυρας από χαλύβδινη πλάκα είναι μια από τις παλαιότερες εναλλακτικές λύσεις για την κατασκευή καταστρωμάτων γεφυρών. Ο χάλυβας, ένα ανώτερο δομικό υλικό, έχει αξιοθαύμαστη απόδοση σε εφαρμογές καταστρώματος γεφυρών, όσον αφορά την ικανότητα φόρτωσης και την ακαμψία (Northmore, 2014).

Ωστόσο, λόγω της χαμηλότερης αντοχής και του υψηλότερου κόστους σε σύγκριση με πιο συμβατικές επιλογές, αυτά τα κράματα αλουμινίου υψηλής αντοχής έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως σε εφαρμογές πεζών, φορητών ή εύχρηστων επισκευών παρά ως υλικά καταστρώματος γεφυρών. Από άποψη αντοχής και ανθεκτικότητας, το εξωθημένο αλουμίνιο έχει αποδειχθεί μια καλή εναλλακτική λύση, όταν είναι σχετικά ζητήματα γρήγορης κατασκευής ή βάρους γέφυρας (Northmore, 2014).

Σύμφωνα με πρόσφατη έρευνα, τα εξωθημένα πάνελ FRP είναι καλά τοποθετημένα για να αντέχουν τη φόρτωση του οχήματος ως ανοιχτό κατάστρωμα γέφυρας. Η εργασία που έγινε στο Πανεπιστήμιο του Κεντάκι έδειξε ότι ο τυπικός συντελεστής ασφάλειας έναντι αστοχίας κυμαινόταν από 3 έως 8 για μια ποικιλία εμπορικά διαθέσιμων υλικών, όταν τα σύνθετα πάνελ καταστρώματος γέφυρας φορτώθηκαν σύμφωνα με την προδιαγεγραμμένη φόρτιση τροχού AASHTO MS 22.5 (HS25). Η αποκόλληση και η διάτμηση κάμψης των δειγμάτων ήταν οι κυρίαρχοι τρόποι αστοχίας σε όλη αυτή τη δοκιμή (Alagusundaramoorthy, Harik, & Choo, 2006).

### 3. Αρχιτεκτονικό δάπεδο

Το αρχιτεκτονικό γυάλινο δάπεδο είναι ένα κρίσιμο πεδίο για διερεύνηση, επειδή αυτή η έρευνα τονίζει επίσης την απαίτηση για διαφανή υλικά στις υποδομές μεταφορών. Συνήθως, το γυάλινο δάπεδο χρησιμοποιείται ως ξεχωριστό στοιχείο σχεδιασμού σε εσωτερικούς χώρους. Εγκαταστάσεις σε κλιμακοστάσια, γέφυρες, διαδρόμους και τμήματα δαπέδου με πρόβολο έχουν παρατηρηθεί σε πολλές περιπτώσεις. Τα πιο αξιοσημείωτα από αυτά βρίσκονται συχνά σε καταστρώματα παρατήρησης, όπως αυτό στον Πύργο CN στο Τορόντο, ή σε γραφικούς πεζόδρομους, όπως αυτός που βρίσκεται πάνω από ένα τμήμα του Γκραντ Κάνυον στην Αριζόνα (Torontoist, 2013; Εθνικό Πάρκο Grand Canyon, 2013).

Η διασφάλιση ότι υπάρχει σημαντική πτυχή ασφάλειας στο σχεδιασμό είναι ένα από τα βασικά ζητήματα με την κατασκευή γυάλινου δαπέδου. Δεδομένου ότι πολλοί άνθρωποι φοβούνται τα ύψη, η διέλευση μιας γυάλινης επιφάνειας μπορεί να είναι αρκετά τεταμένη. Η κοινή πρακτική είναι να δημιουργηθεί ένα γυάλινο πλαίσιο τριών υαλοπινάκων για τη γυάλινη επιφάνεια βάδισης προκειμένου να κατασκευαστούν αυτά τα τμήματα, έτσι ώστε να είναι αρκετά ασφαλή για να περπατούν οι άνθρωποι (Alsop & Saunders, 1999). Το γυαλί είναι αρκετά παχύ, ώστε να διασφαλίζει ότι ακόμη και αν σπάσει ένα από τα τρία τζάμια, τα άλλα δύο θα μπορούσαν να αντέξουν το προβλεπόμενο φορτίο. Οι τρεις υαλοπίνακες είναι πλαστικοποιημένοι μεταξύ τους χρησιμοποιώντας μια κοινή ρητίνη (Northmore, 2014).

Επειδή ο συντελεστής τριβής καουτσούκ-γυαλιού μειώνεται σημαντικά όταν η επιφάνεια είναι υγρή, το μεγαλύτερο μέρος αυτών των εγκαταστάσεων βρίσκεται στο εσωτερικό. Λόγω αυτής της μειωμένης τριβής, συνήθως δεν επιτρέπεται στους ανθρώπους να περπατούν πάνω από την επιφάνεια σε κακές καιρικές συνθήκες, ακόμη και σε υπαίθριες εγκαταστάσεις. Αυτό μπορεί να διορθωθεί δίνοντας στην επιφάνεια μια υφή, αλλά με αυτόν τον τρόπο μειώνεται επίσης η διαφάνεια του δαπέδου και μέρος της αρχιτεκτονικής σημασίας της εγκατάστασης (Northmore, 2014).

### 3.2.1.6 Δομική ανάλυση οδοστρωμάτων

Η δομική ικανότητα των οδοστρωμάτων αξιολογείται χρησιμοποιώντας μια ποικιλία τεχνικών. Ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιούνται ελεγχόμενες δοκιμές σε δομικά τμήματα οδοστρώματος σε εργαστήριο ή ερευνητικό περιβάλλον είναι υψίστης σημασίας για αυτήν τη μελέτη (Northmore, 2014).

Ο στόχος της δομικής δοκιμής είναι να εξακριβωθεί πώς θα συμπεριφέρεται μια κατασκευή κάτω από διάφορα σενάρια φόρτισης, που αντιπροσωπεύουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματική περίπτωση φόρτισης της κατασκευής. Το καλύτερο σενάριο δοκιμής στα οδοστρώματα επιτρέπει στην κυκλοφορία να διασχίζει την περιοχή, που έχει εξοπλιστεί για τη μέτρηση της καταπόνησης που ασκείται στο οδόστρωμα. Δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται συνήθως για να γίνει αυτό, είτε με κατασκευή διαδρομών δοκιμών οδοστρώματος είτε, με κατασκευή νέων τμημάτων οδοστρώματος του υπάρχοντος οδικού συστήματος (Northmore, 2014).

Το βασικό πλεονέκτημα των δρόμων με όργανα είναι ότι είναι συχνά καλύτερο αντίγραφο των συνθηκών σε αυτήν την περιοχή από μια πίστα δοκιμών, ενώ μια πίστα δοκιμών έχει το πλεονέκτημα ενός πιο ελεγχόμενου σεναρίου φορτίου από τους ανοιχτούς δρόμους. Και οι δύο τύποι εγκαταστάσεων επιτρέπουν στους ερευνητές να κατανοήσουν καλύτερα την απόδοση συγκεκριμένων υλικών οδοστρώματος στο περιβάλλον της τοποθεσίας. Αυτά χρησιμοποιούνται συχνά μόνο κατά την αξιολόγηση της απόδοσης μιας νέας κατασκευής οδοστρώματος στην περιοχή λόγω του κόστους της απαραίτητης υποδομής και για τα δύο (Northmore, 2014).

Εκτενής δοκιμή δομής οδοστρώματος έχει επίσης πραγματοποιηθεί σε εργαστηριακές ρυθμίσεις που χρησιμοποιούν περιορισμένες κατασκευές οδοστρώματος σε πολύ μικρότερη κλίμακα από τις δοκιμαστικές διαδρομές. Η ιδέα είναι ότι μόνο ένα κλάσμα των συνολικών υλικών θεμελίωσης και υποστρώματος παραμορφώνεται, όταν εφαρμόζεται ένα φορτίο σε ένα σύστημα οδοστρώματος. Τα αποτελέσματα του πραγματικού κόσμου μπορούν να επιτευχθούν εάν ένα περιορισμένο δείγμα μπορεί να κρατήσει αρκετό υλικό, ώστε η παραμόρφωση να επηρεάσει μόνο ένα μικρό μέρος του υλικού του αντιγράφου στο εργαστήριο. Η εξέταση γεωσυνθετικών ενισχυτικών στρωμάτων σε εύκαμπτα οδοστρώματα είναι εκεί που γίνεται πιο συχνά (Northmore, 2014).

Ανάλογα με το προγραμματισμένο καθεστώς δοκιμών, οι τυπικές διαμορφώσεις συνεπάγονται το σχεδιασμό ενός μεγάλου κουτιού από χάλυβα ή σκυρόδεμα, που χωράει μεταξύ 0.25 και 4.5 κυβικά μέτρα δομικών στοιχείων του οδοστρώματος (Tingle & Jersey, 2005). Προκειμένου να προσομοιωθεί η κυκλοφορία των αυτοκινήτων, τα φορτία εφαρμόζονται συχνά από υδραυλικούς ενεργοποιητές σε χαμηλή συχνότητα (Tingle & Jersey, 2005). Αυτή η δοκιμή έχει γίνει σε μεγαλύτερη κλίμακα σε λάκκους από σκυρόδεμα, που θα επέτρεπε επίσης στα αυτοκίνητα να ταξιδεύουν πάνω από τη δοκιμαστική εγκατάσταση (Pokharel et al., 2011). Το κόστος δημιουργίας μιας τέτοιας εγκατάστασης και το μικρό μέγεθος των δειγμάτων δοκιμής είναι τα βασικά μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου δοκιμής (Northmore, 2014).

Αν και τα εργαστηριακά αποτελέσματα μπορεί να μην αντικατοπτρίζουν απαραίτητα την απόδοση στο πεδίο, έχουν καθοριστεί συσχετισμοί που κάνουν αυτά τα δεδομένα σημαντικά. Αρκετά συχνά, τα χαρακτηριστικά απόδοσης, που αποκτήθηκαν από αυτά τα πειράματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα για μηχανιστικά συστήματα σχεδιασμού οδοστρώματος. Για δείγματα ασφάλτου, αυτές οι δοκιμές μπορεί να περιλαμβάνουν δυναμικό μέτρο, δέσμη κόπωσης



και ελέγχους ευαισθησίας στην υγρασία, ενώ για τα δείγματα σκυροδέματος, μπορεί να περιλαμβάνουν ελέγχους αντοχής σε θλίψη, αντοχή σε κάμψη και αντοχή σε διάτμηση. Τέλος, για τα συγκεντρωτικά δείγματα, μπορεί να περιλαμβάνουν ελέγχους σταθερότητας, απορρόφησης, τριβής και διαβάθμισης (Northmore, 2014).

Ενώ η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) χρησιμοποιείται περιστασιακά σε συγκεκριμένες εφαρμογές για τον υπολογισμό της ανάπτυξης παραμόρφωσης, που αναμένεται εντός του οδοστρώματος και των υλικών υποστρώματος για μια δεδομένη τοποθεσία, η πλειοψηφία του σχεδιασμού του οδοστρώματος πραγματοποιείται μέσω εμπειρικών και μηχανιστικών συνδέσεων (Northmore, 2014).

Η ποικιλία των ιδιοτήτων του οδοστρώματος και των υλικών του εδάφους, το κόστος μοντελοποίησης ιξωδοελαστικών υλικών, η μεταβλητότητα, που εισάγεται κατά την κατασκευή του εργοταξίου και η ικανότητα πλήρους μοντελοποίησης όλων των πτυχών σχεδιασμού οδοστρώματος μέσα στο λογισμικό FEA είναι μερικοί από τους λόγους για τους οποίους η FEA δεν χρησιμοποιείται εκτενώς. Ως αποτέλεσμα, η FEA εμφανίζεται συχνά σε εξειδικευμένες εφαρμογές σχεδιασμού οδοστρωμάτων (Northmore, 2014).

Όταν αντιμετωπίζετε δύσκολες ή απροσδόκητες περιστάσεις ή προσπαθείτε να βελτιώσετε τη μηχανική κατανόηση των μηχανισμών αστοχίας μιας κατασκευής οδοστρώματος, αυτό είναι συχνά ευεργετικό. Ωστόσο, ορισμένες από αυτές τις καταστάσεις προσφέρουν επαληθευμένα, συμπυκνωμένα μοντέλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσέγγιση της δομικής απόδοσης του οδοστρώματος. Η πρώτη βασική προϋπόθεση είναι ότι τα υλικά παρουσιάζουν αποκλειστικά ελαστική συμπεριφορά. Αν και αυτή είναι μια λογική υπόθεση για την εκτίμηση της στατικής απόκρισης στα φορτία του οδοστρώματος δεν λαμβάνει υπόψη τις δυναμικές επιπτώσεις. Αυτά τα μοντέλα συχνά προϋποθέτουν επίσης ομοιόμορφες ιδιότητες υλικών σε ένα στρώμα, κάτι που προϋποθέτει πολλές ιδανικές τεχνικές κατασκευής και απαιτήσεις υλικών (Northmore, 2014).

### 3.2.2 Σχεδιασμός ηλιακών πλαισίων

#### 3.2.2.1 Μετατροπή φωτοβολταϊκής ενέργειας

Οι βασικές αρχές της μετατροπής ενέργειας των φωτοβολταϊκών (ΦΒ) θα συζητηθούν σε αυτόν τον τομέα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, μαζί με τις απαιτήσεις που θέτει αυτό στο σχεδιασμό ηλιακών μονάδων. Θα αξιολογηθούν οι πιο πρόσφατες εξελίξεις στο σχεδιασμό ηλιακών μονάδων, καθώς και οι ανάγκες υποδομής για φωτοβολταϊκές ηλιακές συστοιχίες (Northmore, 2014).

Το ηλιακό κύτταρο, το οποίο χρησιμοποιείται για τη συλλογή φωτονίων και την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος είναι το θεμελιώδες συστατικό μιας φωτοβολταϊκής μονάδας. Δεδομένου ότι οι φωτοβολταϊκές κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου προσφέρουν επί του παρόντος την καλύτερη απόδοση μετατροπής για κυψέλες μαζικής παραγωγής (Luque & Hegedus, 2003), αυτές θα είναι το επίκεντρο του σχεδιασμού του ηλεκτρικού συστήματος του ηλιακού πάνελ δρόμου. Αυτό το έργο μπορεί να επιτευχθεί με μια ποικιλία τεχνολογιών από συσκευές λεπτής μεμβράνης έως κρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα (Northmore, 2014).

Λεπτές στρώσεις από ένα μόνο κρυσταλλικό πλινθίο πυριτίου, που έχουν κοπεί σε ένα συγκεκριμένο μέγεθος και έχουν προστεθεί στο επάνω και το κάτω μέρος της κυψέλης για να διευκολύνουν τη μετάδοση ηλεκτρονίων κατά μήκος της στρώσης αποτελούν τη βάση των ηλιακών κυψελών μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Το κάτω μέρος του στοιχείου έχει μόνο ένα μέτριο θετικό φορτίο, ενώ το πάνω μέρος του στοιχείου έχει ένα ισχυρό αρνητικό φορτίο. Όταν τα φωτόνια εισέρχονται στο κύτταρο κινούνται έως ότου η ενέργεια, που μεταφέρουν βγάλει ένα ηλεκτρόνιο από τη θέση του. Στη συνέχεια, το ηλεκτρόνιο διαχέεται στην αρνητικά φορτισμένη κορυφή του κυττάρου, ενώ η προκύπτουσα οπή μετακινείται προς τη βάση. Ενώ τα επανειλημμένα προσπίπτοντα φωτόνια δημιουργούν τη ροή ηλεκτρονίων μεταξύ των στρωμάτων, αυτή η απελευθέρωση δημιουργεί το ηλεκτρικό δυναμικό σε όλο το κύτταρο. Όταν τα κύτταρα συνδέονται σε ένα κύκλωμα, η ροή των ηλεκτρονίων μετακινείται από το ένα κύτταρο στο άλλο και όταν υπάρχουν αρκετά κύτταρα, αυτό οδηγεί σε χρήσιμη ισχύ (Luque & Hegedus, 2003; Neamen, 2003).

Τα ηλιακά πάνελ βαθμού βοηθητικής χρήσης χρησιμοποιούν συχνά ηλιακά κύτταρα με μικρό δυναμικό τάσης, αλλά με υψηλή ατομική χωρητικότητα ρεύματος. Για να ληφθεί υπόψη αυτό, οι ηλιακές κυψέλες μέσα σε μια μονάδα συνδέονται σε σειρά, επιτρέποντας στην τάση να αυξάνεται διατηρώντας ένα σταθερό ρεύμα. Για να αποκτήσει τα κατάλληλα χαρακτηριστικά ισχύος εξόδου, μια σειρά από σειρές ηλιακών κυψελών μπορεί να συνδεθεί παράλληλα, ανάλογα με το μέγεθος της μονάδας. Στην κατασκευή μιας τυπικής ενότητας, δύο παράλληλες σειρές των 36 κυψελών, δηλαδή συνολικά 72 κυψέλες (Luque & Hegedus, 2003).

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του ηλιακού στοιχείου έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην ικανότητα του στοιχείου να μετατρέπει ενέργεια. Κάθε τύπος υλικού μπορεί να φτάσει μόνο ένα ορισμένο δυναμικό διάκενου ζώνης και είναι αυτό το δυναμικό που πρέπει να υπερβεί ένα εισερχόμενο φωτόνιο για να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο (Neamen, 2003). Εάν, δεν πληρούται αυτή η ελάχιστη προϋπόθεση δεν μπορεί να παραχθεί ενέργεια και όλη η ενέργεια του φωτονίου σπαταλιέται ως θερμότητα (Northmore, 2014).

### *3.2.2.2 Απαιτήσεις σχεδιασμού*

Λόγω των διαφόρων καταπονήσεων που ενδέχεται να ασκηθούν στα ηλιακά στοιχεία κατά τη λειτουργία, υπάρχουν ορισμένα κριτήρια σχεδιασμού. Τα παραδοσιακά ηλιακά πάνελ υπόκεινται σε έναν αριθμό στρεσογόνων παραγόντων, συμπεριλαμβανομένου του κύκλου της θερμοκρασίας, της μηχανικής πίεσης από τα συστήματα τοποθέτησης και των μεταβλητών περιβάλλοντος, την υπεριώδη ακτινοβολία (UV), την υγρασία και άλλα κλιματικά στοιχεία (Perret-Aebi, Li, Chapuis, & Heinstejn, 2011).

Για διάφορους λόγους, ο θερμικός κύκλος είναι ένα σημαντικό πρόβλημα στο σχεδιασμό των ηλιακών μονάδων. Η μονάδα πρέπει πρώτα να δοκιμαστεί για να βεβαιωθεί ότι μπορεί να επιβιώσει στη θερμική διαστολή και συστολή, που θα βιώσουν τα υλικά κατά τη διάρκεια ενός έτους (Askeland & Phule, 2006). Αυτό είναι κρίσιμο δεδομένου ότι τα κρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα των μονάδων είναι εύθραυστα και δεν μπορούν να αντέξουν πολλές πλευρικές τάσεις εφελκυσμού (Luque & Hegedus, 2003). Ένα άλλο πρόβλημα με τη θερμική απόδοση είναι ότι τα φωτοβολταϊκά ηλιακά κύτταρα έχουν μέση απώλεια απόδοσης 0,5% κάθε βαθμό Κελσίου, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία τους (Σκοπλακή & Παλυβός, 2009). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η

θερμοκρασία επηρεάζει τη συμπεριφορά του ημιαγωγίμου στοιχείου, αυξάνοντας το παραγόμενο ρεύμα βραχυκυκλώματος λόγω μείωσης του κενού ζώνης, ενώ μειώνει την τάση ανοιχτού κυκλώματος λόγω διακυμάνσεων στην εγγενή συγκέντρωση του φορέα (Neamen, 2003). Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να λάβετε υπόψη τη θερμική διαστολή και την άμεση αφαίρεση των επιπλέον απωλειών θερμοποίησης από τη μετατροπή των φωτοβολταϊκών κατά την επιλογή υλικών για ηλιακές μονάδες (Northmore, 2014).

Ο σχεδιασμός ηλιακών πλαισίων λαμβάνει πολύ σοβαρά υπόψη τα μηχανικά φορτία. Προκειμένου να παρέχεται στα πάνελ η καλύτερη δυνατή έκθεση στην ακτινοβολία της ηλιακής ακτινοβολίας, η πλειονότητα των τυπικών ηλιακών μονάδων είναι τοποθετημένα σε σταθερή ή ηλιακή δέσμη δομικών στοιχείων. Ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο τοποθετούνται, η επάνω και η κάτω πλευρά αυτών των μιάντων αφήνουν τις ηλιακές μονάδες εκτεθειμένες σε φόρτιση ανέμου και χιονιού. Για την πλειονότητα των ηλιακών μονάδων, η φόρτιση κανονικής κατάστασης, συμπεριλαμβανομένης της φόρτισης από περιβαλλοντικές μεταβλητές, δεν αποτελεί πρόβλημα, αλλά η πρόσκρουση ή άλλη παροδική φόρτιση μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα που οδηγούν σε πρόωρη αστοχία των ηλιακών μονάδων (Chung, Chang, & Liu, 2008). Εξασφαλίζοντας ότι ο πίνακας είναι αρκετά άκαμπτος, ώστε να αντέχει κατάλληλα φορτία από χαλάζι, συντριβές πτηνών και παρόμοια φορτία, πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό (Northmore, 2014).

Η επιλογή των υλικών για τις ηλιακές μονάδες αντιμετωπίζει πρόβλημα από την υπερϊώδη ακτινοβολία. Τα ηλιακά πάνελ δημιουργούνται με σκοπό τη διάρκεια ζωής σε εξωτερικούς χώρους άνω των είκοσι ετών, αλλά η πλειονότητα των υλικών προστατεύεται κατάλληλα για βραχυπρόθεσμη εξωτερική χρήση. Αυτό οδηγεί σε μεγάλη έκθεση σε πηγές υπερϊώδους ακτινοβολίας, καθώς η ηλιακή μονάδα πρέπει να είναι προσανατολισμένη προς την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία για να είναι αποτελεσματική. Τα εξαρτήματα των ηλιακών μονάδων πρέπει να είναι κατασκευασμένα από προσεκτικά επιλεγμένα υλικά για την αποφυγή υποβάθμισης υπό αυτές τις συνθήκες λειτουργίας (Holley Jr, Agro, Galica, & Yorgensen, 1996).

Μια άλλη σημαντική σχεδιαστική δυσκολία για όσους δημιουργούν ηλιακές μονάδες είναι η υγρασία και οι κλιματικές συνθήκες. Η μονάδα πρέπει να είναι επαρκώς στεγανή για να αποτρέψει την είσοδο υγρασίας και την πρόκληση οποιαδήποτε ζημιάς στα ηλεκτρονικά, τα οποία είναι κλειστά μέσα. Το ίδιο είδος φθοράς μπορεί να προκύψει από τα αιωρούμενα σωματίδια που φθείρουν το περίβλημα ή χαράσσουν τη γυάλινη επιφάνεια. Σύμφωνα με την επιλεγμένη τεχνική τοποθέτησης, η διείσδυση υγρασίας μπορεί επίσης να προκύψει από την άμεση επαφή κάτω από το πλαίσιο. Για συσκευές που τοποθετούνται στο έδαφος ή στην οροφή, αυτό ισχύει ιδιαίτερα. Ως εκ τούτου, τα σωστά υλικά θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για την αποτροπή της διείσδυσης υπερβολικής υγρασίας στο πάνελ για την ολοκλήρωση της στεγανοποίησης των καιρικών φαινομένων για τον ίδιο σκοπό και για την παροχή εξαιρετικής προστασίας από διάφορα κλιματικά σωματίδια (Jorgensen et al., 2006).

### 3.2.2.3 Σχεδιασμός

Οι ηλιακές μονάδες κρυσταλλικού πυριτίου δημιουργούνται συνήθως με την πλαστικοποίηση ενός σύνθετου πάνελ που αποτελείται από πέντε στρώματα υλικού και την τήξη των μεσαίων πλαστικών στρωμάτων. Γυαλί, δύο στρώσεις στρωμάτων ενθυλάκωσης οξικού βινυλίου

αιθυλενίου (EVA), Φ/Β κύτταρα και οι διασυνδέσεις τους και ένα πίσω φύλλο Tedlar είναι τα συστατικά που συνθέτουν αυτήν τη σύνθετη δομή. Λόγω αυτής της διαμόρφωσης, κάθε εξάρτημα πάνελ έχει σημαντικό αντίκτυπο στη συνολική απόδοση της ηλιακής μονάδας (El Amrani, Mahrane, Moussa, & Boukennous, 2007).

- Στρώμα γυαλιού

Το γυαλί, το οποίο είναι το ανώτερο στρώμα, είναι κρίσιμο γιατί πρέπει να αφήνει ελεύθερη τη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας και να δίνει στο πάνελ το μεγαλύτερο μέρος της δομικής του στήριξης (Luque & Hegedus, 2003). Λόγω της καλής διαπερατότητάς του, της ικανότητας επίστρωσης, της αντοχής στις καιρικές συνθήκες και της αντοχής στην υπεριώδη ακτινοβολία, το γυαλί ανθρακικού ασβέστη με χαμηλή συγκέντρωση σιδήρου χρησιμοποιείται συνήθως για τη δημιουργία φωτοβολταϊκών μονάδων (Deubener, Hensch, Moiseev, & Bornhöft, 2009).

Μια στρώση τοποθετείται συχνά στην επιφάνεια του ηλιακού γυαλιού υψηλής απόδοσης για να βελτιώσει τη συνολική απόδοση. Αυτή η στρώση δημιουργήθηκε ειδικά για να αντανακλά το προσπίπτον φως πίσω στο γυαλί και να μειώνει την ανάκλαση από την επιφάνεια του γυαλιού. Και τα δύο αυτά χαρακτηριστικά είναι ζωτικής σημασίας επειδή αυξάνουν τη συνολική απόδοση της ηλιακής μονάδας, καθώς μια ηλιακή μονάδα δεν μπορεί να επωφεληθεί από το φως που δεν χρησιμοποιείται για μετατροπή. Το σχήμα του πάνελ λήφθηκε ιδιαίτερα υπόψη κατά τη δημιουργία της στρώσης αφού, όταν το φως περάσει μέσα από το γυαλί, οι κύριες πηγές ανάκλασης είναι οι διεπαφές με τη ρητίνη EVA και, πιο κάτω, οι διεπαφές με τις ηλιακές κυψέλες. Η γνώση αυτών καθιστά εύκολη τη δομή του γυαλιού για τη βελτιστοποίηση της εσωτερικής ανάκλασης του φωτός, με έμφαση στα μήκη κύματος φωτός που σχετίζονται στενότερα με το διάκενο ζώνης των ηλιακών κυψελών που χρησιμοποιούνται (Deubener et al., 2009).

Μπορούν να ληφθούν υπόψη αρκετοί στόχοι απόδοσης κατά την υφή του γυαλιού. Η υφή επιφάνειας μπορεί να ενισχύσει τη συνολική απόδοση ενός πάνελ κατά τη διάρκεια της ημέρας και να συγκεντρώσει την ακτινοβολία στα χρησιμοποιήσιμα μέρη του ηλιακού κυττάρου, παρόλο που πολλές έρευνες επικεντρώνονται κυρίως στην παγίδευση φωτός. Είναι εφικτό να βελτιωθεί η απόδοση του ηλιακού γυαλιού στο φως, που χτυπά το πάνελ σε ευρεία γωνία πρόσπτωσης χρησιμοποιώντας δομημένη υφή. Σε μια περίπτωση, ανακαλύφθηκε ότι η προσθήκη μιας τριγωνικής ή ημιτονοειδούς τραχύτητας επιφάνειας στο γυαλί όταν το φως προσπίπτει υπό γωνία 80° ως προς την κανονική επιφάνεια αύξησε την απόδοση κατά 35% έως 55%. Το γεγονός ότι η βέλτιστη απόδοση επιτυγχάνεται με γωνία πρόσπτωσης κοντά στο μηδέν και ότι η απόδοση μειώνεται και στις δύο πλευρές αυτής της ένδειξης έχει σημαντική επίδραση σε ένα από τα ζητήματα σχεδιασμού για ηλιακές μονάδες. Ενώ, οι περισσότερες εγκαταστάσεις ηλιακών μονάδων είναι σταθερές και αυτή η τεχνολογία θα είχε σημαντική ευεργετική επίδραση στην απόδοσή τους, οι ηλιακές μονάδες που παρακολουθούν τη φαινομενική κίνηση του ήλιου θα είχαν περιορισμένη αξία σε αυτό (Sánchez-Plascas et al., 2008).

Υπάρχουν πολλά τμήματα μιας ηλιακής μονάδας που δεν είναι εκτεθειμένα στο φωτοβολταϊκό ηλιακό στοιχείο, όπως τα κενά μεταξύ των κυψελών και των ράβδων διαύλου και των δακτύλων στο ηλιακό στοιχείο. Η εστίαση του φωτός μακριά από αυτές τις θέσεις και στο κύριο ημιαγώγιμο στοιχείο προσφέρει το πλεονέκτημα της αύξησης της απόδοσης, καθώς οποιοδήποτε φως που λάμπει σε αυτές τις περιοχές δεν χρησιμοποιείται για να διεγείρει τα ηλεκτρόνια. Έχει αποδειχθεί ότι οι απώλειες σκιάς σε μια ηλιακή μονάδα μπορεί να μειωθούν κατά 50% με ειδική υφή του γυαλιού πάνω από αυτές τις θέσεις, αλλά λόγω των περιορισμών της ανίχνευσης ακτίνων, αυτό το

πλεονέκτημα μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέσω μονάδων που έχουν πλήρη ή μερική ηλιακή ενέργεια παρακολούθηση (Bergamin & Sammarae, 2010).

Ενώ, η τραχύτητα του γυαλιού επηρεάζει το πόσο ανακλαστική είναι η μονάδα, ένα άλλο κρίσιμο στοιχείο είναι η αντιανακλαστική επίστρωση, που προστίθεται συχνά στη γυάλινη επιφάνεια που είναι εκτεθειμένη στο περιβάλλον. Τις περισσότερες φορές, αυτές οι επικαλύψεις είναι λεπτές στρώσεις SiO<sub>2</sub> ή Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, που εναποτίθενται αραιά στην επιφάνεια του γυαλιού και δημιουργούν μια κλίση δείκτη διάθλασης στη μετάβαση υάλου επίστρωσης, που μεγιστοποιεί τη μετάδοση. Δεδομένου ότι αυτές οι ιδιαίτερες ιδιότητες είναι κατά κύριο λόγο επιθυμητές για εφαρμογές αποκλειστικά ηλιακών πάνελ, οι περισσότεροι παραγωγοί αναφέρονται σε αυτόν τον τύπο υαλοπίνακα με υφή ως ηλιακό γυαλί (Deubener et al., 2009).

Όπως αναφέρθηκε ήδη, το γυαλί είναι σημαντικό από δομική άποψη. Το γυαλί είναι απαραίτητο για να δώσει στο πάνελ την ακαμψία του, καθώς το EVA και το Tedlar είναι υλικά που είναι συγκρίσιμα με το γυαλί όσον αφορά την ευελιξία και το πλαίσιο αλουμινίου είναι ελάχιστο δεδομένου του μεγέθους της οθόνης. Καθώς, το γυαλί είναι ένα σχετικά στιβαρό και άκαμπτο υλικό σε χαμηλή πίεση, αυτό δεν αποτελεί μεγάλο πρόβλημα δεδομένων των περιβαλλοντικών φορτίων που πρέπει να αντέχουν οι ηλιακές μονάδες. Ωστόσο, τα κρουστικά φορτία μπορεί να έχουν σημαντική αρνητική επίδραση στην απόδοση των ηλιακών μονάδων. Αν και τα πάνελ δευτερογενούς αγοράς ή χομπίστας κατασκευάζονται συνήθως με παχύτερα στρώματα για καλύτερη στιβαρότητα, αλλά με υψηλότερο κόστος (Luque & Hegedus), τα περισσότερα ηλιακά πάνελ καταναλωτών θεωρούν ότι έχουν σχετικά λεπτό γυαλί (Luque & Hegedus, 2003).

- Προστατευτικά στρώματα

Το υλικό πλαστικοποίησης για την πλειοψηφία των ηλιακών συλλεκτών είναι μια ένωση EVA. Για την ηλιακή μονάδα, αυτό το στρώμα εξυπηρετεί μια ποικιλία λειτουργιών, όπως η προστασία των ηλεκτρονικών ειδών από την υγρασία, η αποτροπή της υπερϊόδους ακτινοβολίας από το να φτάσει στις κυψέλες και το πίσω φύλλο, προστατεύει τις ηλιακές κυψέλες από φορτία που επιβάλλονται στο γυαλί ή το πίσω φύλλο και συγκρατεί τη δομή μαζί (El Amrani et al., 2007).

Όταν η μονάδα είναι πλαστικοποιημένη, το EVA λιώνει και σχηματίζεται γύρω από τις ηλιακές κυψέλες, κρατώντας το πάνελ ενωμένο. Σε μονάδες μαζικής παραγωγής, αυτό το στρώμα τοποθετείται ως δύο πλαστικά στρώματα, το ένα εκατέρωθεν των ηλιακών κυψελών (Luque & Hegedus, 2003). Αυτό μπορεί, επίσης, να επιτευχθεί σε έργα DIY χρησιμοποιώντας χυμένη ρητίνη, αν και η πλαστικοποίηση μιας ηλιακής μονάδας χωρίς τα κατάλληλα εργαλεία μπορεί να είναι δύσκολη (Northmore, 2014).

Οι πρόσθετες απαιτήσεις για το υλικό πλαστικοποίησης περιλαμβάνουν ελάχιστες απαιτήσεις για ηλεκτρική, οπτική, μηχανική και χημική απόδοση (Lange, Luo, Polo, & Zahnd, 2011). Καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας συναρμολόγησης της ηλιακής μονάδας, η απόδοση κόστους και η αξιοπιστία του laminate είναι επίσης κρίσιμες (Agro & Tucker, 2004). Ο κατασκευαστής επιλέγει το συγκεκριμένο υλικό και μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά στα οποία στοχεύει, όπως πρότυπα για το χρόνο σκλήρυνσης, τα χαρακτηριστικά μεταφοράς υγρασίας και την τεχνική γενικής συναρμολόγησης. Η σιλικόνη, η πολυβινυλοβουτυράλη, η θερμοπλαστική πολυουρεθάνη και το ιονομερές είναι περαιτέρω υλικά που χρησιμοποιούνται συχνά ως ελάσματα (Agro & Tucker, 2004; Rose, Jester, & Bunea, 2008).

- Διασυνδέσεις μεταξύ ηλιακών κυψελών

Το επόμενο σημαντικό μέρος των ηλιακών μονάδων είναι οι διασυνδέσεις κυψελών. Αυτά τα στοιχεία χρησιμεύουν ως σύνδεση μεταξύ κάθε ηλιακής κυψέλης, σχηματίζοντας τις σειρές των ηλιακών κυψελών, που παράγουν ενέργεια όπως απαιτείται μέσω του πάνελ. Ως εκ τούτου, είναι ζωτικής σημασίας αυτά τα εξαρτήματα να επιλέγονται προσεκτικά και να προστατεύονται προκειμένου να μειωθεί ο κίνδυνος αστοχίας. Για να δημιουργηθεί ένα κύκλωμα μεταξύ δύο ηλιακών κυψελών, ένας αγωγός πρέπει να συγκολληθεί τόσο στον κάτω ζυγό του επόμενου στοιχείου όσο και στον επάνω ζυγό του πρώτου ηλιακού στοιχείου. Η πλειονότητα των λωρίδων σύνδεσης και των υλικών συγκόλλησης περιλαμβάνει μόλυβδο, ωστόσο η μετάβαση σε συγκόλληση χωρίς μόλυβδο είναι ένας εξέχων τομέας μελέτης, καθώς θα διευκόλυνε και θα βελτίωνε την ανακύκλωση των ηλιακών πλαισίων. Καθώς αυτό έχει αποδειχθεί ότι έχει σημαντικό αντίκτυπο όταν αξιολογείται σε εφαρμογές πραγματικού κόσμου, το κύριο πρόβλημα σχεδιασμού με τις διασυνδέσεις είναι η διασφάλιση ότι δεν υπάρχουν σημαντικές απώλειες ισχύος μεταξύ των σειρών των ηλιακών κυψελών εντός της μονάδας (Hsieh, Lin, & Yu, 2011).

- Κατώτερη στρώση

Το στρώμα πίσω φύλλου Tedlar είναι το τελευταίο μέρος μιας ηλιακής μονάδας. Εκτός από την εγγύηση της σταθερότητας ολόκληρης της μονάδας, αυτό το στρώμα είναι υπεύθυνο για την παροχή πρόσθετης προστασίας για τις ηλιακές κυψέλες, ιδιαίτερα από οποιεσδήποτε συνθήκες εφαρμόζονται στην πίσω πλευρά του πάνελ. Το Tedlar είναι ένα από τα πιο δημοφιλή υλικά που χρησιμοποιούνται ως οπίσθιο φύλλο, αλλά άλλες δυνατότητες, συμπεριλαμβανομένων των μονομερών αιθυλενοπροπυλενοδιενίου, έχουν επίσης ληφθεί υπόψη για χρήση, καθώς νέοι συνδυασμοί υλικών μπορούν να βοηθήσουν στην επιτάχυνση της συναρμολόγησης, αποφεύγοντας την ανάγκη για το δεύτερο στρώμα EVA (Kemp & Thapa, 2008). Η υψηλή αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία και η μικρή μεταφορά υγρασίας είναι τυπικές ιδιότητες που αναζητούνται σε ένα κάτω φύλλο, επειδή εκτίθεται αμέσως στο περιβάλλον και πρέπει να παρέχει προστασία για το EVA και τις ηλεκτρονικές στρώσεις (El Amrani et al., 2007).

### 3.3 Εφαρμογές των ηλιακών συστημάτων στην οδοποιία

Η επόμενη φάση είναι να κατανοήσουμε την παρούσα κατάσταση της πρακτικής στον σχεδιασμό ηλιακών πάνελ δρόμων μετά τη δημιουργία μιας γερής βάσης στους τομείς του μη παραδοσιακού σχεδιασμού οδοστρωμάτων και του σχεδιασμού ηλιακών μονάδων και να καθορίσουν τα γνωστικά κενά που πρέπει να καλυφθούν για την επίτευξη των στόχων αυτής της πτυχιακής εργασίας (Northmore, 2014).

Γενικά, η έρευνα για τα ηλιακά πάνελ δρόμων βρίσκεται ακόμη στα αρχικά της στάδια. Η εταιρία Solar Roadways στις Ηνωμένες Πολιτείες και το TNO στην Ολλανδία είναι οι μοναδικοί οργανισμοί που εργάζονται για την ανάπτυξη αυτών των πάνελ. Τα πρωτότυπα αυτών των ομάδων αναπτύσσονται με λιγότερη έμφαση στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού μιας σύνθετης κατασκευής οδοστρώματος για να λειτουργεί ως ηλιακή μονάδα δρόμου σε μια ποικιλία δομικών σεναρίων και κανένας δεν εξετάζει πώς να μετριάσει τα ζητήματα της πιθανής αλάτισης και του παγετού, που παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια του χειμώνα (Northmore, 2014).

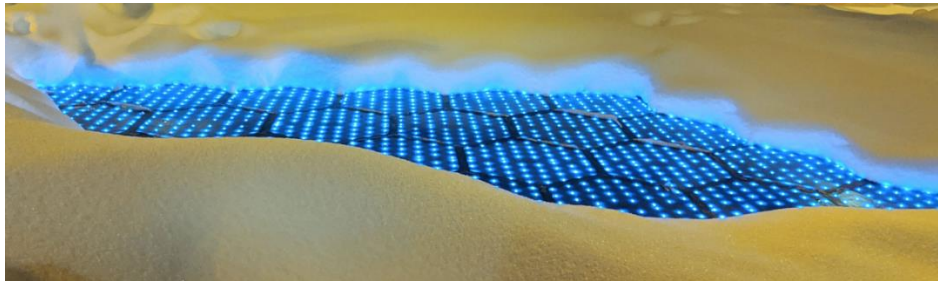
### 3.3.1 Solar Roadways

Μια επιχείρηση που ονομάζεται Solar Roadways, με έδρα το Αϊντάχο, δημιουργεί ένα ηλιακό πάνελ δρόμου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτοκινητόδρομους. Η Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αυτοκινητοδρόμων των ΗΠΑ παρείχε οικονομική υποστήριξη για την ανάπτυξη του πρωτότυπου πάνελ τους, που ξεκίνησε το 2009 (FHWA). Αφού δημιούργησαν το πρωτότυπό τους, τους χορηγήθηκε άλλη μια επιχορήγηση από το FHWA για να δημιουργήσουν άλλα πρωτότυπα και να τα τοποθετήσουν στο πάρκινγκ της επιχείρησής τους. Η εγκατάσταση αυτών των τριών πλαισίων προγραμματίστηκε τότε να γίνει την άνοιξη του 2013 (Solar Roadways, 2013).

Το τετράγωνο πάνελ μήκους 3,66 μέτρων, που έχει δημιουργήσει η Solar Roadways αποτελείται από τρία στρώματα (Northmore, 2014):

- ένα διαφανές επάνω στρώμα από ανάγλυφο γυαλί,
- ένα στρώμα ηλεκτρονικών που περιέχει πλακέτες κυκλωμάτων, που τροφοδοτούν τις ηλεκτρικές συνδέσεις μεταξύ των ηλιακών κυψελών και άλλων συστημάτων και
- μία στρώση που προστατεύει το πάνελ από τα στοιχεία.

Το πρωτότυπο Solar Roadways ενσωματώνει φωτισμό LED ενσωματωμένο στα διαμερίσματα των κυψελών για να προσφέρει μηνύματα και σημάσεις λωρίδας από την επιφάνεια του δρόμου εκτός από την απλή σύνδεση των ηλιακών κυψελών σε αυτό το σύστημα. Περιλαμβάνονται επίσης θερμαντήρες αντίστασης για την αντιμετώπιση τυχόν προβλημάτων χιονιού ή πάγου που μπορεί να προκύψουν στην επιφάνεια κατά τη διάρκεια της χειμερινής λειτουργίας (Solar Roadways, 2013).



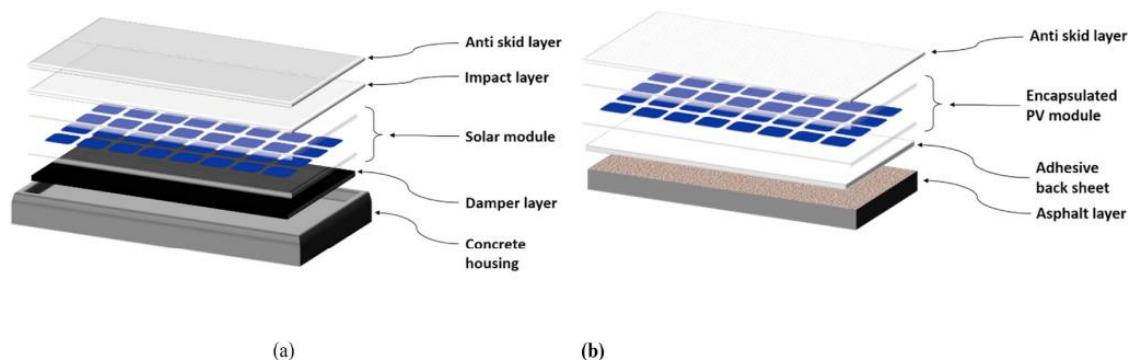
*Εικόνα 23: Solar Roadways*

*[solarroadways.com]*

### 3.3.2 TNO

Η TNO, ο Ολλανδικός Οργανισμός Εφαρμοσμένης Επιστημονικής Έρευνας, είναι ένας οργανισμός γνώσης με τοποθεσία στο Ντελφτ που βοηθά τις τοπικές επιχειρήσεις και τους κυβερνητικούς οργανισμούς να δημιουργούν λύσεις αιχμής για την αντιμετώπιση τεχνολογικών προβλημάτων, τόσο στο εσωτερικό, όσο και στο εξωτερικό. Η δημιουργία ηλιακών πλαισίων

δρόμου είναι μόνο ένα μικρό μέρος της έρευνας αυτού του οργανισμού για λύσεις ενεργειακής απόδοσης. Προκειμένου να παράγουν ηλιακά πάνελ δρόμου στο πλαίσιο του ολλανδικού περιβάλλοντος, έχουν συνεργαστεί με την Ooms Avenhoo Groep, μια επιχείρηση μηχανικών πολιτικών υποδομών, και την Imtech, μια συμβουλευτική ομάδα ηλεκτρολόγων και μηχανολογικών μηχανικών (TNO, 2013).



Εικόνα 24: Σχεδιασμός TNO

[TNO]

Η αρχική έκδοση της ιδέας SolaRoad της TNO δημιουργείται για χρήση σε ποδηλατόδρομους, έναν τύπο υποδομής που είναι αρκετά κοινός στην Ολλανδία. Τα πάνελ 1,5 m επί 2,5 m που κατασκευάζουν αποτελούνται από ηλιακά κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου, ένα περίβλημα από τσιμεντόλιθο και ένα επιφανειακό στρώμα γυαλιού. Αν και η εγκατάσταση της διαδρομής στη Βόρεια Ολλανδία είχε προγραμματιστεί για το καλοκαίρι του 2012, δεν έχει ακόμη ολοκληρωθεί (TNO, 2013).

### 3.3.3 Κενά δεδομένων

Παρά τα πρωτότυπα που δημιουργήθηκαν από τη Solar Roadways και την TNO, υπάρχουν πολλά κενά γνώσης στον τομέα του σχεδιασμού ηλιακών πάνελ δρόμων. Ωστόσο, τα δύο βασικά που δίνονται έμφαση σε αυτή την ανάλυση είναι η συνολική δομική ανάλυση ενός συστήματος ηλιακών οδικών πάνελ και οι επιπτώσεις των χειμερινών περιβαλλοντικών συνθηκών και των διαδικασιών συντήρησης σε τέτοια σύνθετα πάνελ (Northmore, 2014).

Το γεγονός ότι καμία γεωγραφική περιοχή δεν έχει ακριβώς τις ίδιες συνθήκες για την κατασκευή δρόμων είναι ένας από τους βασικούς λόγους για τους οποίους ο παραδοσιακός σχεδιασμός οδοστρωμάτων είναι τόσο διαφορετικός. Αυτό είναι ένα κρίσιμο μάθημα για τους σχεδιαστές ηλιακών πλαισίων δρόμων καθώς, γίνεται γρήγορα προφανές ότι δεν μπορείτε να εφαρμόσετε μια ομοιόμορφη μέθοδο σχεδίασης παντού, όταν αρχίσετε να λαμβάνετε υπόψη την κυκλοφορία, τον καιρό, το υπάρχον έδαφος και τις συνθήκες προσβάσιμων πόρων για μια περιοχή (Northmore, 2014).



Ένα ηλιακό πάνελ δρόμου θα ήταν ουσιαστικά ένα κομμάτι αρθρωτού υλικού, παρόμοιο με τα σχέδια της Solar Roadway και της TNO, αλλά πρέπει να λαμβάνετε υπόψη προσεκτικά τι θα τοποθετηθεί σε αυτά τα πάνελ πάνω και από ποια υλικά θα πρέπει να είναι κατασκευασμένα για τη βέλτιστη απόδοση σε μια συγκεκριμένη εδαφολογική κατάσταση. Σε κάθε περίπτωση, ένα ηλιακό πάνελ δρόμου πρέπει να εγκατασταθεί σε σταθερή βάση και υπάρχει χώρος για βελτίωση μεταξύ των διαφορετικών διαμορφώσεων υλικών ηλιακών πάνελ δρόμου και των πολλών βάσεων που μπορείτε να προσφέρετε (συμπυκνωμένο χώμα, κοκκώδες υπόστρωμα, τσιμεντένιο ή ασφαλτόπανο κ.λπ.). Αυτό το πρόβλημα δεν καλύπτεται καλά στη βιβλιογραφία (Northmore, 2014).

Επιπλέον, δεν έχει γίνει πολλή σκέψη για το πώς θα λειτουργούσαν τα ηλιακά πάνελ σε κρύο καιρό. Είναι μια ανεπάρκεια στο σχεδιασμό από την Solar Roadways, αλλά είναι κατάλληλος σχεδιασμός για TNO, δεδομένου ότι η Ολλανδία έχει μόνο 25 χιονισμένες ημέρες κατά μέσο όρο ετησίως (KNMI, 2013).

Ο σχεδιασμός της Solar Roadways περιέχει, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, μια αντίσταση στο πάνελ για να λιώσει κάθε χιόνι ή πάγο που μπορεί να αναπτυχθεί, αλλά αυτό δεν είναι μια πλήρης απάντηση στο χειμερινό κλίμα και τις δυσκολίες συντήρησης. Αν και επιλύει το ζήτημα των εργασιών εκχιονισμού που βλάπτουν τα πάνελ, το αλάτισμα εξακολουθεί να αποτελεί σημαντικό συστατικό των δραστηριοτήτων χειμερινής συντήρησης. Ακόμα κι αν αποφασιζόταν ότι η επιφάνεια του ηλιακού δρόμου δεν χρειαζόταν αλάτι, τα αυτοκίνητα που είχαν οδηγήσει σε δρόμους καλυμμένους με αλάτι θα εξακολουθούσαν να φέρνουν πολύ αλάτι στην επιφάνεια του ηλιακού δρόμου. Οι δραστηριότητες αλάτισης συμβάλλουν σημαντικά στην καταστροφή των αστικών υποδομών, επομένως προβλέπεται ότι αυτό θα πρέπει επίσης να διερευνηθεί, όσον αφορά την απόδοση των ηλιακών συλλεκτών οδοποιίας (Northmore, 2014).

### 3.3.4 Παραδείγματα εφαρμογής

#### 3.3.4.1 Ολλανδία

Ο πρώτος αυτοκινητόδρομος με έξυπνο οδοφωτισμό είναι ο N329, ο οποίος βρίσκεται στην Ολλανδία, καταλαμβάνει 500m και αποτέλεσε σημείο εξέτασης της αποτελεσματικότητας αυτής της τεχνολογίας για δύο χρόνια. Η τεχνολογία του έξυπνου αυτοκινητόδρομου με εφαρμογές έξυπνου οδοφωτισμού και διάφορων άλλων πρακτικών για οδήγηση σε ασφαλέστερες οδούς με καλύτερη ορατότητα διερευνάται από το 2012 από την κατασκευαστική εταιρία Heijmans και την εταιρία σχεδιασμού Studio Roosegaarde («First highway...Netherlands», 2014; «Glow in the dark road unveiled in the Netherlands», 2014).

Ο έξυπνος οδοφωτισμός χαρακτηρίζεται από φωτοβόλο χρώμα, το οποίο λαμβάνει ενέργεια από τον ήλιο κατά την διάρκεια της ημέρας και στο σκοτάδι λάμπει για περίπου 10 ώρες. Αναφέρεται ότι είναι αρκετά σημαντικό να εξεταστούν διάφορα θέματα, όπως πόσο ορατές είναι οι φωτοβόλες σημάνσεις και από ποια απόσταση γίνονται αισθητές από τους οδηγούς. Επιπρόσθετα, να προσφέρουν ασφάλεια στους χρήστες και από την πλευρά της ολίσθησης, ώστε να αποφεύγονται τα ατυχήματα. Εξίσου σημαντική είναι η εξέταση ενδεχόμενης μείωσης της ηλιακής ενέργειας κατά τις ημέρες που δεν παρατηρείται ιδιαίτερη ηλιοφάνεια, όπως την εποχή του χειμώνα. Τέλος,

βρίσκεται υπό συζήτηση για προσθήκη και άλλων πρακτικών αυτής της τεχνολογίας, όπως σύμβολα στον δρόμο για ενημέρωση του χρήστη για ολίσθηση του οδοστρώματος λόγω κακών καιρικών συνθηκών κ.ά. («First highway...Netherlands», 2014; «Glow in the dark road unveiled in the Netherlands», 2014).

Σε δύο μέρη της Ολλανδίας στη Noord-Holland και στη Zuid-Holland τοποθετήθηκαν ηλιακά πάνελ στους δρόμους, κάτι το οποίο αποτελεί αρωγό στην εξέλιξη αυτής της ιδέας και προσφέρει περισσότερη εμπειρία στη διαχείρισή τους. Κατασκευάστηκαν παράλληλα στη N232 οδό κοντά στην περιοχή Haarlamemeer και στη N218 οδό στην περιοχή Spijkensisse. Έχουν τοποθετηθεί ηλιακά πάνελ μόνο σε μικρού μήκους δρόμους και σε ποδηλατόδρομους, επομένως αποτελεί το πρώτο έργο στην Ολλανδία τόσο μεγάλης κλίμακας («The Netherlands introduces SolaRoad paving», 2019).

Η ενέργεια που θα παραχθεί από τα ηλιακά πάνελ προορίζεται για οδοφωτισμό, για εγκαταστάσεις κυκλοφορίας, αλλά φυσικά και για τροφοδοσία των νοικοκυριών και των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Οι πρώτοι οδηγοί και γενικά οι κάτοικοι αυτών των περιοχών δείχνουν να είναι ιδιαίτερα ενθουσιασμένοι από το αποτέλεσμα. Προβλέπεται εξέλιξη αυτού του τύπου οδοστρώματος με κατασκευή επιφανειών με διπλή λειτουργία χωρίς όμως αυτό να αποτελέσει πρόβλημα στους οδηγούς ή στο γύρω περιβάλλον («The Netherlands introduces SolaRoad paving», 2019).

Στις 24 Μαΐου του 2018, τοποθετήθηκαν φωτοβολταϊκά «Wattway» στη N401 οδό στην Ουτρέχτη της Ολλανδίας, ώστε να παραχθεί καθαρή, ανανεώσιμη ενέργεια σε όλους τους τύπους κυκλοφοριακού φόρτου. Οι επιστήμονες υποστηρίζουν ότι μπορεί να προσφέρει ηλεκτρική ενέργεια τόση ώστε να μπόρεσει να φωτίσει μία πόλη των 5000 κατοίκων και ότι βοηθάει στη βιωσιμότητα των υποδομών. Η ιδέα εξέτασης της τεχνολογίας στη συγκεκριμένη οδό πηγάζει από τον κυκλοφοριακό φόρτο της, ο οποίος παρατηρείται στα 10000 οχήματα καθημερινά. Η διάρκεια της εξέτασης υπολογίζεται στα 2 έτη, κατά τα οποία οι μηχανικοί στοχεύουν στον έλεγχο της αποτελεσματικότητας αυτής της τεχνολογίας συγκριτικά με τη μέθοδο κατασκευής των συμβατικών δρόμων (Modijefsky, 2018).

Τον Οκτώβριο του 2014 κατασκευάστηκε ο πρώτος ποδηλατόδρομος με στρώση από ηλιακά πάνελ, ο οποίος βρίσκεται στην Ολλανδία δίπλα στην οδό N203 κοντά στην περιοχή Krommenie. Το μήκος του καλύπτει τα 70 m, είναι 3.5 m πλατύς και αποτελεί ένα έργο των Province of Noord-Holland, Strukton Civiel. Αυτοί οι αυτοκινητόδρομοι έχουν τη δυνατότητα να παράγουν αρκετή «πράσινη» ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να είναι ορατά τα πάνελ, ενώ είναι δυνατόν να κατασκευαστούν σε οποιαδήποτε περιοχή ανεξάρτητα από τον πληθυσμό της (Venter, 2018).

Εξετάστηκαν διάφορων ειδών στρώσεις της οδού, δίνοντας έμφαση στην ανώτερη στρώση, η οποία είναι πιο εκτεθειμένη. Μετά από εμπειριστατώμενη μελέτη παρατηρήθηκε ότι όσο πιο λεπτό είναι το στρώμα (σε αυτή την περίπτωση με πάχος 1cm), τόσο περισσότερη ενέργεια παράγεται αποδίδοντας ανθεκτικότητα στο στρώμα προς αποφυγή ολίσθησης των οχημάτων (Venter, 2018). Τα υλικά, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σε όλο το εύρος της κατασκευής αποτελούν μία μίξη γυαλιού, καουτσούκ πυριτίου και σκυροδέματος (McDonald, 2015). Κάθε ηλιακό πάνελ συνδέεται με έξυπνους μετρητές, οι οποίοι τροφοδοτούν το δίκτυο και έτσι επιτυγχάνεται ακόμη ένας στόχος αυτής της τεχνολογίας, δηλαδή του έξυπνου οδοφωτισμού («The dutch...expanding», 2017).

Το έργο γέννησε μεγάλο ενδιαφέρον στους κατοίκους της Ολλανδίας και όχι μόνο, ενώ από το πρώτο έτος ύπαρξης του έχει φιλοξενήσει 300000 ποδηλάτες. Επιπρόσθετα, η ενέργεια, η οποία παράχθηκε από τα ηλιακά πάνελ ξεπέρασε από τον αναμενόμενο υπολογισμό φτάνοντας τον πρώτο χρόνο μέχρι και 9800kWh, το οποίο ισοδυναμεί με την ετήσια μέση κατανάλωση τριών Ολλανδικών νοικοκυριών («The dutch...expanding», 2017).

Με την πραγματοποίηση του έργου παρατηρήθηκαν κάποια θέματα σχετικά με την ανώτερη στρώση, όπως μεταβολές στην παραγωγή ενέργειας λόγω κλιματικών αλλαγών, αλλά και κάποιες περιπτώσεις αποκόλλησης μικρότερων τμημάτων από την επιφάνεια. Έτσι, αποφασίστηκε να προχωρήσουν σε κάποιες τροποποιήσεις για τη βελτίωση του έργου, ώστε να αξιοποιηθούν και στα επόμενα έργα (McDonald, 2015; Venter, 2018).

#### 3.3.4.2 *Ινδία*

Ο αυτοκινητόδρομος Delhi-Meerut, ο οποίος συνδέει το Δελχί με τα ανατολικά του Uttar Pradesh, αποτελεί και τον πρώτο έξυπνης τεχνολογίας αυτοκινητόδρομο στην Ινδία. Εκτείνεται στα 135 km ξεκινώντας από τη Nizamuddin γέφυρα και χωρίζεται σε 4+4 λωρίδες αυτοκινητόδρομου, εκ των οποίων οι 6 είναι ταχείας κυκλοφορίας και η κάθε μία έχει πλάτος 2.5 m για τα οχήματα και 1.5 m για τους πεζούς. Τα ηλιακά πάνελ εκτείνονται σε όλο το μήκος του και ο στόχος της εφαρμογής του αφορά τον οδοφωτισμό και τον φωτισμό των υπόγειων διαβάσεων, αλλά και τη μείωση τόσο του χρόνου μετακίνησης των οχημάτων όσο και της ρύπανσης της πόλης, γεγονός που επιτυγχάνεται με τη χρήση της ηλιακής ενέργειας με σκοπό την εκπομπή ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχει σύστημα συλλογής των όμβριων υδάτων κάθε 500 m και 8 σταθμοί ηλιακών πάνελ των 4MW το καθένα. Το έργο διήρκησε 17 μήνες (Shah, 2018).

Έχουν καταγραφεί σκέψεις για περαιτέρω εξέλιξη και εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών, όπως έξυπνες δυνατότητες ασφαλείας και εφαρμογή διαδραστικής υποδομής, όπως για παράδειγμα ένα έξυπνο σύστημα διαχείρισης της κυκλοφορίας των αυτοκινητόδρομων (HTMS) και ένα σύστημα ανίχνευσης συμβάντων σε μορφή βίντεο (VIDS) (Shah, 2018).

#### 3.3.4.3 *Κίνα*

Το 2017 στο Shandong, στην πρωτεύουσα της Jinan, κατασκευάστηκε έξυπνος αυτοκινητόδρομος με ενσωματωμένα ηλιακά πάνελ του 1 km. Η υλοποίηση του συγκεκριμένου αυτοκινητόδρομου είχε ως στόχο την παροχή ενέργειας του 1GWh τον χρόνο για να τροφοδοτεί μέχρι και 800

νοικοκυριά. Τα ηλιακά πάνελ αποσκοπούν στον οδοφωτισμό, στον φωτισμό των πινακίδων, στην τροφοδοσία καμερών CCTV και στη θέρμανση της οδού σε περιπτώσεις παγετού (Todd, 2019).

Οι στρώσεις του οδοστρώματος αποτελούνται αρχικά από ένα προστατευτικό οδόστρωμα από διαφανές σκυρόδεμα, από κάτω υπάρχει ένα στρώμα μπαταριών ηλιακής ενέργειας, το οποίο παράγει ηλεκτρικό ρεύμα στον δρόμο, ενώ η κατώτερη στρώση είναι αδιάβροχη για να αποφευχθεί η μετάδοση υγρασίας από το έδαφος σε αυτή (Todd, 2019). Επιπρόσθετα, η ανώτερη στρώση αποτελείται από καλώδια και αισθητήρες επαναφόρτισης σπειρώματος, τα οποία χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας του οδοστρώματος, του κυκλοφοριακού φόρτου και το βάρος των φορτίων («China's built...car», 2018). Ο

αυτοκινητόδρομος αυτός έχει έντονο κυκλοφοριακό φόρτο, καθώς παρατηρείται η διέλευση 4000 οχημάτων καθημερινά και αποτελείται από δύο λωρίδες + 1 επείγουσας ανάγκης (Todd, 2019). Το συγκεκριμένο project δουλεύεται 10 χρόνια, ενώ χρειάστηκαν μόνο 55 μέρες για να πραγματοποιηθεί και 2.7 εκατομμύρια για κάθε 458 m<sup>2</sup>, δηλαδή 90 φορές μεγαλύτερο κόστος από έναν συμβατικό δρόμο («China's built...car», 2018;Huang, 2017;Todd, 2019).

#### *3.2.4.4 Γαλλία*

Η εφαρμογή Wattway 2800 ηλιακών πάνελ σε έναν δρόμο 1 km, που οδηγεί στη βόρεια πόλη της Νορμανδίας, τη Tourouver-au-Perch, αποτελεί την πρώτη απόπειρα παγκοσμίως στη χρήση ηλιακών πάνελ αυτής της κατηγορίας. Τα ηλιακά πάνελ καλύπτονται με ρητίνη, που περιέχει πυρίτιο, ώστε να επιτευχθεί η αντοχή ακόμα και με τη διέλευση 18 τροχών. Παρ'όλα αυτά, διαπιστώθηκαν κάποιες αστοχίες σχετικά με αυτό το έργο. Παραδείγματος χάρη, η έντονη οχλαγωγία λόγω της χρήσης ρητίνης, αλλά και η μειωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συγκρητικά με αυτή που είχε προβλεφθεί από τους επιστήμονες (Grossman, 2019).

## Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία της έρευνας

### 4.1 Ερευνητικά ερωτήματα

Η έρευνα μας επικεντρώνεται γύρω από τα εξής ερωτήματα:

- Είναι εφικτή η αντικατάσταση των συμβατικών δρόμων μίας πόλης με πιο έξυπνους, οι οποίοι βασίζονται στην ηλιακή, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας;
- Ποια υλικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή ενός ηλιακού πλαισίου για χρήση στην οδοποιία με βέλτιστη απόδοση;
- Τι ποσοστό αντοχής έχουν οι ηλιακοί συλλέκτες που συναντάμε σε έναν δημόσιο δρόμο ως προς τα φορτία όλων των τύπων οχημάτων;
- Ποια είναι η αποδοτικότητα ενός υλικού υαλικού τύπου στην πρόσφυση και ταυτόχρονα στην απορρόφηση ηλιακής ενέργειας;
- Πόσο και με ποιον τρόπο επηρεάζουν οι ακραίες καιρικές συνθήκες, που συναντάμε σε μία χώρα σαν την Ελλάδα;

### 4.2 Στόχοι της έρευνας

Ο κύριος στόχος της έρευνας εκφράζεται μέσα από την αντικατάσταση των συμβατικών, ασφαλτοστρωμένων δρόμων, που συναντάμε σήμερα στα αστικά κέντρα της χώρας μας με δρόμους πιο “έξυπνους”. Αυτό επιτυγχάνεται στην προκειμένη περίπτωση με την εφαρμογή ηλιακών δρόμων, καθώς σύμφωνα με τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που προηγήθηκε αποτελούν την καταλληλότερη περίπτωση μελέτης για την Ελλάδα.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου έχουν ληφθεί υπόψη τα ακόλουθα:

- μία λεπτομερής ανάλυση των προτεινόμενων υλικών για τη βέλτιστη απόδοση των ηλιακών πλαισίων από όλες τις πτυχές.
- μία περιβαλλοντική ανάλυση στηριζόμενη σε βιβλιογραφική ανασκόπηση και σε άλλες ερευνητικές εργασίες αναφορικά με την επίδραση των διαφόρων καιρικών φαινομένων στα ηλιακά πλαίσια.
- μία θερμική ανάλυση μέσω του προγράμματος Ansys για το ποσοστό απορρόφησης ηλιακής ενέργειας ημερησίως από υλικό ανώτερης στρώσης του συλλέκτη, που επιλέξαμε να χρησιμοποιηθεί με βάση την ανωτέρω ανάλυση υλικών.
- μία στατική ανάλυση μέσω του προγράμματος Ansys όμοιου ηλιακού συλλέκτη με την τοποθέτηση φορτίων οχημάτων, που συναντάμε σε έναν δρόμο.

## 4.3 Στάδια της έρευνας

### 4.3.1 Στάδιο 1<sup>ο</sup>

Η έρευνα μας στηρίχτηκε σε πληροφορίες, που συλλέχτηκαν από το διαδίκτυο σχετικά με τα υλικά, που υπάρχουν διαθέσιμα για την κατασκευή ενός ηλιακού πλαισίου, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στα αστικά οδικά δίκτυα. Σύμφωνα με τις παραπάνω πληροφορίες αξιολογήθηκαν το καθένα υλικό ξεχωριστά για την αποδοτικότητα του στις διάφορες στρώσεις του πλαισίου. Η αξιολόγηση έγινε με κριτήριο την απορροφητικότητα στην περίπτωση της ανώτερης στρώσης, την πιθανότητα διάβρωσης του στο ηλεκτρικό στρώμα και τη συνεργασία με τα υπόλοιπα υλικά γενικά σε όλες τις στρώσεις. Επίσης, κρίθηκε ιδιαίτερα σημαντική η κατάλληλη επιλογή του υλικού της ανώτερης στρώσης και από πλευράς στατικής επάρκειας, σύμφωνα με τις ιδιότητες του, όπως η αντοχή του σε θλίψη, το μέτρο του Young, αλλά και η πυκνότητα του. Εξίσου σημαντική ήταν και ο καθορισμός της βέλτιστης γεωμετρίας του πλαισίου και του πάχους του, ώστε να επιτευχθεί στατική επάρκεια, αλλά και θερμική αποδοτικότητα.

### 4.3.2 Στάδιο 2<sup>ο</sup>

Το 2<sup>ο</sup> στάδιο του ερευνητικού μέρους της εργασίας αποτέλεσε η περιβαλλοντική ανάλυση του ηλιακού δρόμου. Αυτή περιλάμβανε την ανάλυση της επίδρασης ακραίων καιρικών συνθηκών στη χώρα μας σύμφωνα με πληροφορίες από το διαδίκτυο. Στη συνέχεια τη συλλογή δεδομένων και αποτελεσμάτων από άλλες ερευνητικές εργασίες σχετικά με την επιρροή της σκίασης, του παγετού και της υγρασίας στην απόδοση του ηλιακού πλαισίου.

### 4.3.3 Στάδιο 3<sup>ο</sup>

Το 3<sup>ο</sup> στάδιο περιλαμβάνει τη θερμική ανάλυση ενός ηλιακού αυτοκινητόδρομου μέσω του προγράμματος Ansys Academic R22.

Το Ansys, Inc. είναι μία αμερικανική εταιρία με ισχύ από το 1970 με έδρα το Canonsburg της Πενσυλβανία. Αναπτύσσει και εμπορεύεται λογισμικό μηχανικής προσομοίωσης, με στόχο τον σχεδιασμό προϊόντων, την επίτευξη δοκιμών και την εκτίμηση της λειτουργίας τους. Ιδρυτής της εταιρίας είναι ο John Swanson, ο οποίος άφησε την εταιρία το 1993 σε άλλους επιχειρηματίες. Από τον 21<sup>ο</sup> αιώνα, το Ansys έχει διευρύνει περισσότερο τις δυνατότητες που προσφέρει, καθώς απέκτησε περισσότερη τεχνολογία για δυναμική ρευστού, σχεδιασμό ηλεκτρονικής φύσης και ανάλυση φυσικής. Το Ansys προσφέρει λογισμικό για διαχείριση δεδομένων και δημιουργία αντιγράφων ασφαλείας, αλλά και δυνατότητες ακαδημαϊκής έρευνας και διδασκαλίας (Wikipedia, 2005).

Αρχικά, αξιοποιήθηκε το Ansys Workbench, για την τοποθέτηση των υλικών των στρώσεων και την επιλογή της επιθυμητής ανάλυσης (Steady – State Thermal).

Το Ansys Workbench αποτελεί το ουσιαστικότερο τμήμα του Ansys για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης. Προσφέρει εξαιρετικής ποιότητας προσομοιώσεις με την αμφίδρομη συνδεσιμότητα CAD, τον αυτοματοποιημένο μηχανισμό ενημέρωσης του επιπέδου του έργου και τα ενσωματωμένα εργαλεία για βελτιστοποίηση (Ansys, n.d.).

Μέσω της προκείμενης πλατφόρμας επιλέχθηκε η θερμική ανάλυση και στη συνέχεια συμπληρώθηκαν τα μηχανικής φύσης χαρακτηριστικά του ηλιακού δρόμου, όπως η ιστροπική θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμότητα των υλικών των στρώσεων. Οι στρώσεις είναι οι εξής (Mwani, n.d.;Selvaraju, 2012):

- η στρώση βάσης, αποτελείται από υαλοβάμβακα πάχους δύο στρώσεων, εκ των οποίων η μία είναι 12.70mm και η άλλη 6.35mm, που επιλέχθηκε στο πρώτο στάδιο της έρευνας.
- το οπτικό στρώμα, το οποίο είναι υαλοβάμβακας πάχους δύο στρώσεων 6.35mm και συνολικά 12.70mm.
- το δομικό στρώμα, το οποίο αποτελείται από υαλοβάμβακα πάχους 3mm.
- το ηλεκτρικό στρώμα με τις ηλιακές κυψέλες γεωμετρίας 125mmx125mm και πάχους 3mm. Αυτό επιλέχθηκε να αποτελείται από μονοκρυσταλλική σιλικόνη, καθώς περιλαμβάνει τους μηχανισμούς μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική.
- η ανώτερη στρώση, στην οποία πραγματοποιείται η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας και απαιτείται να διαθέτει χαρακτηριστικά έντονης διαπερατότητας, αλλά και τραχύτητας για την αποφυγή πρόσφυσης. Για την ανάλυση επιλέχθηκε το σκληρυμένο γυαλί.
- το περίβλημα από αλουμίνιο

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε η προσομοίωση του ηλιακού αυτοκινητόδρομου. Κατασκευάστηκε ένα ηλιακό πάνελ με τις προαναφερθείσες στρώσεις με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, που προαναφέρθηκαν, 1625mmx1625mm.

Το τελευταίο βήμα της θερμικής ανάλυσης πραγματοποιήθηκε με την πλατφόρμα Ansys Mechanical, η οποία παρέχει δυνατότητα επίλυσης σύνθετων προβλημάτων δομικής μηχανικής μέσω διαλυτών πεπερασμένων στοιχείων (FEA) (Ansys, n.d.). Αρχικά, προστέθηκε το νέο μοντέλο και καταχωρήθηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά από το πρόγραμμα στην πλατφόρμα Ansys Workbench, ώστε να προβούμε στην καταχώρηση των μηχανικών χαρακτηριστικών στις στρώσεις, που επιθυμούμε. Αφού, οι στρώσεις του ηλιακού δρόμου πληρούσαν τις προϋποθέσεις, προχωρήσαμε στην ανάλυση μέσω πεπερασμένων στοιχείων (meshing), για να πραγματοποιηθεί, μέσω του προηγμένου πλέγματος που παρέχεται, η γεωμετρική ανάλυση του ηλιακού δρόμου.

Στη συνέχεια, προσθέσαμε τη μετάδοση θερμότητας σε συνθήκες με θερμοκρασία 21°C σε κάθε στρώση και τα δεδομένα της μέγιστης ημερήσιας ηλιακής απομόνωσης στην περιοχή της Αττικής, σύμφωνα με τα στοιχεία των GHI χαρτών της χώρας μας. Η θερμική επίλυση πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοκρασία του ηλιακού αυτοκινητόδρομου, αλλά και αυτή της ανώτερης στρώσης ξεχωριστά, όπως και της συνολικής θερμικής ροής στην ανώτερη στρώση του ηλιακού αυτοκινητόδρομου.

#### 4.3.4 Στάδιο 4<sup>ο</sup>

Αυτό το στάδιο περιλάμβανε τη στατική ανάλυση ενός ηλιακού αυτοκινητόδρομου μέσω του προγράμματος Ansys.

Το βασικό ηλιακό πλαίσιο αποτελείται από τα ηλιακά κελιά που τοποθετούνται μόνιμα ενθυλακωμένα μεταξύ ενός μετριασμένου στρώματος κάλυψης γυαλιού και ενός πίσω φύλλου που εξασφαλίζεται σε ένα πλαίσιο αλουμινίου. Ομοίως, ο ηλιακός δρόμος πρέπει επίσης να έχει ισχυρά στρώματα βάσης που μπορούν να συγκρατήσουν τα ηλιακά κελιά και τα σχετικά ηλεκτρικά τους συστήματα, για να αξιοποιήσουν την ισχύ που παράγεται από τα ηλιακά κελιά και να τα συνδέσουν με το σύστημα σύνδεσης δικτύου. Προκειμένου να καλυφθεί αυτό το στρώμα βάσεων, χρησιμοποιείται μια πλάκα κάλυψης. Αυτή η πλάκα πρέπει να είναι αρκετά διαφανής, ώστε να επιτρέπει στο φως του ήλιου να περάσει και επίσης να διαθέτει υψηλή αντοχή, για να αντέξει το φορτίο των οχημάτων που περνούν από πάνω. Επιπλέον, αυτή η πλάκα άνω καλύμματος θα πρέπει να είναι αρκετά τραχιά, ώστε να παρέχει αρκετή πρόσφυση για τα οχήματα (Selvaraju, 2012).

Αρχικά, επιλέχθηκαν τρία είδη τροχοφόρων, ένα φορτηγό, ένα επιβατικό αυτοκίνητο και μία μοτοσυκλέτα. Τα βάρη που επιλέχθηκαν είναι τα μέση βάρη για το κάθε όχημα ξεχωριστά και είναι τα εξής (Selvaraju, 2012):

- Το συνολικό βάρος του φορτηγού στην έρευνα μας είναι 18143.70 Kg. Οι μπροστινοί τροχοί καταλαμβάνουν το 20% του συνολικού βάρους του φορτηγού, ενώ οι πίσω τροχοί το 80% του συνολικού βάρους του φορτηγού. Το βάρος του φορτηγού μετατρέπεται σε δύναμη, με τη σχέση:  $F = m \times g$ , δηλαδή  $18143.70 \times 9.81 = 177989.697$  N. Οπότε, οι δυνάμεις στους μπροστινούς τροχούς θα είναι 17799 N στον κάθε τροχό και στους πίσω τροχούς οι δυνάμεις θα είναι 71172 N στον κάθε τροχό.
- Το συνολικό βάρος του επιβατικού αυτοκινήτου είναι 616.90 Kg. Οι μπροστινοί τροχοί καταλαμβάνουν το 60% του συνολικού βάρους του επιβατικού αυτοκινήτου, ενώ οι πίσω τροχοί το 40% του συνολικού βάρους του οχήματος. Το βάρος του αυτοκινήτου μετατρέπεται σε δύναμη, με τη σχέση:  $F = m \times g$ , δηλαδή  $616.90 \times 9.81 = 6051.789$  N. Οπότε, οι δυνάμεις στους μπροστινούς τροχούς θα είναι 1815.50 N στον κάθε τροχό και στους πίσω τροχούς οι δυνάμεις θα είναι 1210 N στον κάθε τροχό.
- Το συνολικό βάρος της μοτοσυκλέτας είναι 213.2 Kg. Ο μπροστινός τροχός καταλαμβάνει το 50% του συνολικού βάρους και ο πίσω τροχός αντίστοιχα. Το βάρος της μοτοσυκλέτας μετατρέπεται σε δύναμη, με τη σχέση:  $F = m \times g$ , δηλαδή  $213.2 \times 9.81 = 2091.492$  N. Οπότε, οι δυνάμεις θα είναι 1046 N σε κάθε τροχό.

Τα μεταξόνια των οχημάτων είναι τα εξής (Selvaraju, 2012):

- Δεδομένου ότι το τυποποιημένο μήκος του φορτηγού που χρησιμοποιείται είναι 4.3 m, το οποίο είναι μακρύτερο από το μήκος του ηλιακού πλαισίου που διαμορφώνεται για τα ηλιακά οδοστρώματα, μόνο ένα βάρος αξόνων ενεργεί στα ηλιακά πλαίσια ανά πάσα στιγμή. Γι' αυτό χρησιμοποιείται για την ανάλυση ο οπίσθιος άξονας, ο οποίος λαμβάνει μεγαλύτερο ποσοστό του βάρους του φορτηγού.



- Το μεταξόνιο του αυτοκινήτου είναι 2.04 m, δηλαδή μεγαλύτερο από το μήκος του ηλιακού δρόμου στην ανάλυση μας, οπότε θα ληφθεί το φορτίο πάλι μόνο του ενός τροχού.
- Το μεταξόνιο της μοτοσυκλέτας είναι 1.5 m, μικρότερο από το μήκος του ηλιακού αυτοκινητόδρομου στην ανάλυση μας, οπότε θα ληφθεί το φορτίο και από τους δύο τροχούς της μοτοσυκλέτας. Στην περίπτωση της μοτοσυκλέτας διεξάχθηκαν αποτελέσματα δυναμικής ανάλυσης.

Για την επίτευξη της στατικής ανάλυσης, εργαστήκαμε στο Ansys Workbench, στην καρτέλα Static Structural. Η στατική ανάλυση καθορίζει μετατοπίσεις, πιέσεις, τάσεις, δυνάμεις που ασκούνται σε διάφορα δομικά στοιχεία, τα οποία προκαλούνται από φορτία, που περιέχουν αμελητέες τιμές αδράνειας και απόσβεσης. Πρώτα, πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση του αυτοκινητοδρόμου μας με τις διαστάσεις και τις στρώσεις που προαναφέρθηκαν. Έπειτα, τοποθετήθηκαν για κάθε όχημα τα μεταξόνια με τα μήκη τους. Επόμενο βήμα, ήταν η καταχώρηση των υλικών στην καρτέλα Materials, με τις ιδιότητες τους.

Στη συνέχεια εργαστήκαμε πραγματοποιώντας τη στατική ανάλυση μέσω πεπερασμένων στοιχείων (meshing) στην πλατφόρμα Mechanical. Στην καρτέλα Model της πλατφόρμας Mechanical πραγματοποιήθηκε η επιλογή κάθε στρώσης με το αντίστοιχο υλικό. Το επόμενο βήμα, περιλάμβανε την προσθήκη στήριξης του μοντέλου οδοστρώματος μας και την τοποθέτηση των φορτίων, που υπολογίστηκαν προηγουμένως στα σημεία, όπου εφαρμόζονται οι τροχοί στον ηλιακό συλλέκτη. Στην περίπτωση του φορτηγού, τοποθετήθηκε, όπως προαναφέρθηκε, μόνο ο πίσω τροχός του, που λαμβάνουν και το μεγαλύτερο βάρος, επομένως και μεγαλύτερες τιμές φορτίου. Καθώς, πραγματοποιείται μία στατική ανάλυση στις περιπτώσεις του φορτηγού και του αυτοκινήτου, τα οχήματα παρουσιάζονται στάσιμα, άρα οι ταχύτητες τους είναι μηδενικές και κατά συνέπεια και η μεταβολή του χρόνου.

Το τελικό βήμα αποτελούσε τη στατική ανάλυση σύμφωνα με τα δεδομένα και την ανάλυση μέσω πεπερασμένων στοιχείων που προηγήθηκε. Η επίλυση της στατικής ανάλυσης επιτεύχθηκε με τα αποτελέσματα της ισοδύναμης πίεσης (Stress von- Mises) και της συνολικής παραμόρφωσης (Total Deformation). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης περιλαμβάνουν την ισοδύναμη πίεση και τη συνολική παραμόρφωση.

#### 4.3.5 Στάδιο 5°

Περιλαμβάνει τα συμπεράσματα της ολικής έρευνας και τις απαντήσεις των ερευνητικών ερωτημάτων, που θέσαμε. Σε μία χώρα σαν την Ελλάδα με τέτοιες τιμές ηλιακής απομόνωσης ημερησίως είναι εφικτή η εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών σε κάποιο υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου εμπορικό δρόμο; Διασφαλίζεται ασφάλεια, αλλά και δίνεται η επίλυση στο θέμα της παραγωγής ενέργειας από τον ήλιο;

#### 4.3.6 Στάδιο 6°

Αποτελείται από τις προτάσεις, που παραθέτουμε για μελλοντική έρευνα.

## Β' Μέρος – Έρευνα

### Κεφάλαιο 5: Σχεδιασμός ηλιακών πλαισίων

Το πρωτότυπο του ηλιακού πάνελ δρόμου σχεδιάστηκε σε τρία στάδια. Αρχικά τη δημιουργία απαιτήσεων σχεδιασμού και στη συνέχεια την ανάλυση του υλικού. Η μελέτη υλικών καθόρισε ποια υλικά είναι πιο κατάλληλα για χρήση σε ηλιακό πάνελ δρόμου.

Το συνολικό σύστημα χωρίστηκε σε δύο ομάδες με ξεχωριστές ανάγκες κατά τον σχεδιασμό των κριτηρίων σχεδιασμού για ένα ηλιακό πάνελ δρόμου, οι οποίες χωρίζονται σε δομικές και ηλεκτρικές.

#### 5.1 Απαιτήσεις δομικού σχεδιασμού

Η πιο σημαντική απαίτηση δομικού σχεδιασμού είναι ότι τα ηλιακά πάνελ δρόμων μπορούν να αντέχουν τα κυκλικά φορτία των οχημάτων χωρίς να αποτυγχάνουν λόγω στατικής ή κυκλικής φόρτισης (Northmore & Tighe, 2012b).

Η δεύτερη βασική δομική ανάγκη είναι η επιφάνεια του πάνελ να προσφέρει αρκετή τριβή για να περάσουν τα αυτοκίνητα με ασφάλεια. Αυτή είναι μια σημαντική δυσκολία, καθώς η επιφάνεια πρέπει επίσης να είναι αρκετά διαφανής για να επιτρέπει στην ηλιακή ακτινοβολία να φτάσει στα ηλιακά κύτταρα, που είναι τοποθετημένα βαθύτερα στα δομικά στρώματα και οποιαδήποτε υφή μπορεί να εμποδίσει τη μετάδοση του φωτός εάν δεν κατασκευαστεί σωστά (Northmore & Tighe, 2012b).

Επειδή, οι σύγχρονες ηλιακές κυψέλες υψηλής απόδοσης κατασκευάζονται από εύθραυστα πλακίδια πυριτίου, το φορτίο πρέπει να δρομολογηθεί γύρω από τις κυψέλες σε σχέδιο ηλιακού πάνελ δρόμου. Η προβολή του διαφανούς στρώματος πάνω από τα διαμερίσματα των ηλιακών κυψελών μπορεί να το καλύψει αυτό. Ωστόσο, το διαφανές στρώμα πρέπει να είναι αρκετά στιβαρό, ώστε να μην εκτρέπεται και να μην φορτώνει τις ηλιακές κυψέλες (Northmore & Tighe, 2012b).

Το πάνελ πρέπει επίσης να είναι αδιάβροχο για να λειτουργεί σωστά. Αυτό είναι κρίσιμο για το νερό και η διείσδυση των ρύπων θα επιδεινώσει τη δομική ακεραιότητα του σύνθετου πίνακα και θα καταστρέψει τα ενσωματωμένα ηλεκτρονικά (Northmore & Tighe, 2012b).

## 5.2 Απαιτήσεις ισχύος

Πολλές από τις απαιτήσεις του ηλεκτρικού σχεδιασμού επικεντρώνονται στην έκθεση των φωτοβολταϊκών στοιχείων στην ηλιακή ακτινοβολία, καθώς, και στη φυσική αντοχή του ηλεκτρικού κυκλώματος που είναι κατασκευασμένο μεταξύ των μεμονωμένων κυψελών.

Η σκίαση είναι μια σοβαρή ανησυχία για τους ηλιακούς συλλέκτες, καθώς οι περιοχές κυψελών που δεν εκτίθενται σε ακτινοβολία δεν μπορούν να λειτουργήσουν ως μέρος του ηλεκτρικού κυκλώματος, υποβαθμίζοντας έτσι την απόδοση των πάνελ. Επειδή, οι ηλιακές κυψέλες πρέπει να είναι σε εσοχή από το διαφανές στρώμα βάσει σχεδίου, πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε οι προεξοχές των δομικών στρωμάτων να μην δημιουργούν εσωτερική σκίαση στα ηλιακά κύτταρα. Επιπλέον, εάν το υλικό στην επιφάνεια αρχίσει να παρεμβαίνει στη συνολική ακτινοβολία που φτάνει στα ηλιακά κύτταρα, πρέπει να αφαιρεθεί με σκούπισμα δρόμου, αφαίρεση καουτσούκ ή άλλες μεθόδους (Northmore & Tighe, 2012b).

Εκτός από το ότι τα ηλιακά κύτταρα είναι εξαιρετικά ευαίσθητα, τα καλώδια σύνδεσης μεταξύ των κυψελών είναι επίσης. Οι διασυνδέσεις κυψελών συνήθως γίνονται με μια κορδέλα από κασσίτερο, που συγκολλάται μεταξύ της κορυφής μιας ηλιακής μονάδας και του κάτω μέρους της επόμενης σειράς. Αυτές οι συνδέσεις θα πρέπει να είναι πιο ανθεκτικές σε ένα ηλιακό πάνελ δρόμου λόγω των αυξημένων φορτίων στο πάνελ και των μεγαλύτερων αποστάσεων μεταξύ των ηλιακών κυψελών, που δημιουργούνται λόγω των νευρώσεων στο σχεδιασμό του δομικού στρώματος (Northmore & Tighe, 2012b).

## 5.3 Ανάλυση και αξιολόγηση υλικού

Η ανάλυση υλικού για τα δομικά και διαφανή στρώματα του σχεδιασμού του ηλιακού πάνελ δρόμου έγινε ανεξάρτητα λόγω των αντίθετων απαιτήσεων υλικού.

### 5.3.1 Δομικά στρώματα

Πολλά μη παραδοσιακά υλικά οδοστρώματος, όπως τονίζεται στη βιβλιογραφική έρευνα, έχουν δείξει την κατάλληλη απόδοση ως ενισχυτικό στρώμα για εδάφη με κακή υποβάθμιση. Καθώς, θεωρείται ότι τα ηλιακά πάνελ δρόμου θα τοποθετούνται πάντα σε τουλάχιστον ένα κατάλληλα συμπίεσμένο στρώμα υποβάθρου, αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να είναι προσβάσιμες διάφορες δυνατότητες σχεδιασμού.

Στο εννοιολογικό μοντέλο σχεδιασμού, τα δομικά στρώματα του ηλιακού οδικού πάνελ είναι τα οπτικά και βασικά στρώματα. Οι κύριες απαιτήσεις για την επιλογή υλικού για αυτά τα στρώματα είναι ότι το υλικό μπορεί να προσφέρει αποδεκτή δομική απόδοση για το πάνελ, όπως περιγράφεται από τις απαιτήσεις σχεδιασμού.

Έχοντας υπόψη αυτά τα κριτήρια, τα πιθανά υλικά για τα δομικά στρώματα που προσδιορίστηκαν ήταν χάλυβας A36, αλουμίνιο 6061-T6 και πλαστικά ενισχυμένα με υαλοβάμβακα (FRPs). Ο

Πίνακας 4, συγκρίνει τις μηχανικές ιδιότητες αυτών των υλικών με τις μηχανικές παραμέτρους των τυπικών υλικών επίστρωσης που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα.

Ένας από τους πρωταρχικούς στόχους της απόδοσης του υλικού είναι να μειωθούν οι παραμορφώσεις εντός του πάνελ που προκαλούνται από εξωτερικά φορτία προκειμένου να προστατεύονται τα ηλιακά κύτταρα. Τα A36 και 6061-T6 είναι οι ιδανικές εναλλακτικές λύσεις για αυτό λόγω της υψηλής αντοχής θλίψης και του συντελεστή Young, που σημαίνει ότι μπορούν να ανεχθούν μεγάλα φορτία και απαιτούν τεράστια φορτία πριν συμβεί σημαντική παραμόρφωση στο υλικό.

Οι αντοχές διαρροής των υλικών FRP είναι πιο συγκρίσιμες με την τελική αντοχή των τυπικών οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα, αλλά το γεγονός ότι το μέτρο του Young είναι μόνο δύο έως τρεις φορές μεγαλύτερο από ένα τυπικό ασφαλτικό οδόστρωμα δείχνει ότι αυτά τα υλικά είναι πιο επιρρεπή σε υψηλές καταπονήσεις, ενώ σε χαμηλές φορτώνει σε σύγκριση με τις επιλογές A36 και 6061-T6.

Πίνακας 4: Ιδιότητες προτεινόμενων δομικών υλικών

Κατηγορία	Υλικό	Αντοχή σε θλίψη [MPa]	Μέτρο του Young [GPa]	Πυκνότητα [gr/cm <sup>3</sup> ]
Δομικό	Χάλυβας-A36 (ACI, 2013)	152	200	7.85
Δομικό	Αλουμίνιο-6061-T6 (ACI, 2013)	276	68.9	2.70
Δομικό	Υαλοβάμβακας GPO-3 (Rochling, 2013)	55	12	1.90
Δομικό	HDPE Υαλοβάμβακας (ACI, 2013)	36.9	7.38	1.25
Δομικό	ABS Υαλοβάμβακας (ACI, 2013)	120	5.55	1.56
Οδοποιίας	Σκυρόδεμα (ARA, 2011)	32	29.6	2.32
Οδοποιίας	Άσφαλτος (AASHTO, 1993)	N/A	2.76	2.46

Το κύριο πλεονέκτημα των υψηλότερων αντοχών των μετάλλων έναντι των πολυμερών είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί λιγότερο υλικό για ίδιο επίπεδο απόδοσης, με αποτέλεσμα φθηνότερο συνολικό κόστος και βάρος. Αν και αυτό αποδείχτηκε σε αρκετές από τις έννοιες του τάπητα προσγείωσης, που συζητήθηκε στη μελέτη της βιβλιογραφίας, ο περιορισμός του υλικού που χρησιμοποιείται στο πρωτότυπο σχέδιο για να ταιριάζει στα ηλεκτρονικά, το γυαλί και το περίβλημα με ευρέως προσβάσιμα εξαρτήματα μπορεί να μην είναι βιώσιμο.

Ο χάλυβας και το αλουμίνιο θα απαιτούσαν επίσης επιστρώσεις για να μην σκουριάσουν και να μην λειτουργούν ως αγωγοί του ηλεκτρικού ρεύματος του ηλιακού συστήματος, που ρέει μέσα από το πάνελ. Επειδή, η μήτρα του πολυμερούς διαλύεται σε διαβρωτικές συνθήκες, τα δύο πολυμερή γεμάτα γυαλί έχουν συνήθως χαμηλή περιβαλλοντική ανθεκτικότητα. Η ουσία GPO-3 προορίζεται να είναι ηλεκτρικός μονωτήρας καθώς και αδρανής σε σκληρά περιβάλλοντα.

### 5.3.2 Διαφανής στρώση

Επειδή το καθαρό στρώμα του πρωτοτύπου ηλιακού δρόμου πρέπει να είναι οπτικά διαφανές, υπάρχουν αναπόφευκτα λιγότερες εναλλακτικές υλικών. Αυτό περιόρισε την επιλογή σε ακρυλικό, πολυανθρακικό και σκληρυσμένο γυαλί, καθώς αυτά είναι κοινά υλικά, που χρησιμοποιούνται σε διαφανείς δομικές εφαρμογές, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Ιδιότητες προτεινόμενων διαφανών υλικών

Κατηγορία	Υλικό	Αντοχή σε θλίψη [MPa]	Μέτρο του Young [GPa]	Πυκνότητα [gr/cm <sup>3</sup> ]
Διαφανές	Ακρυλικό (ACI, 2013)	95.0	2.87	0.655
Διαφανές	Πολυανθρακικό-Οπτικό (ACI,2013)	70.0	2.35	1.13
Διαφανές	Σκληρυσμένο γυαλί (Alsop&Saunders, 1999)	>5000	72.0	2.50
Οδοποιίας	Σκυρόδεμα (ARA, 2011)	32	29.6	2.32
Οδοποιίας	Άσβεστος (AASHTO, 1993)	N/A	2.76	2.46

Αυτά τα υλικά έχουν όλα υψηλότερες αντοχές σε θλίψη από τα συμβατικά οδοστρώματα από σκυρόδεμα. Αυτό σημαίνει ότι όλα θα πρέπει να μπορούν να λειτουργούν ως ένα διαφανές στρώμα μέσα σε ένα ηλιακό πάνελ δρόμου μέσω προσεκτικού σχεδιασμού. Η σημαντική δομική διαφορά προκαλείται από το Modulus Young του. Το σκληρυσμένο γυαλί είναι σημαντικά πιο άκαμπτο υπό πίεση από το σκυρόδεμα, αν και είναι ακρυλικό και το πολυανθρακικό θα είναι σχεδόν τόσο εύκαμπτο όσο είναι τώρα το ασφαλτικό οδόστρωμα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα, καθώς προβάλλονται πάνω από το ηλιακό πάνελ, για την κατασκευή του διαφανούς στρώματος για τα πολυμερή υλικά. Οι ηλιακές κυψέλες και οι σημαντικές παραμορφώσεις πρέπει να αποφεύγονται, καθώς μπορεί να προκαλέσουν ζημιά.

Μια άλλη σημαντική διάκριση μεταξύ αυτών των υλικών είναι το πώς είναι πιο πιθανό να σπάσουν υπό πίεση. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική μελέτη, τα πολυμερή υλικά που υπόκεινται σε καταπόνηση του οχήματος συχνά παρουσιάζουν πλαστική παραμόρφωση με τη μορφή

αυλάκωσης και ώθησης των ανώτερων στρωμάτων του χυτού υλικού. Επιπλέον, οι εκδόσεις οπτικού βαθμού αυτών των πολυμερών, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη βελτιστοποίηση της ηλιακής ενέργειας, που φθάνει στα φωτοβολταϊκά στοιχεία, καθορίζονται κανονικά για θερμοκρασίες άνω των 0°C, γεγονός που σημαίνει ότι δεν θα λειτουργούν όπως προβλέπεται σε ακραίες καιρικές συνθήκες στην Ελλάδα.

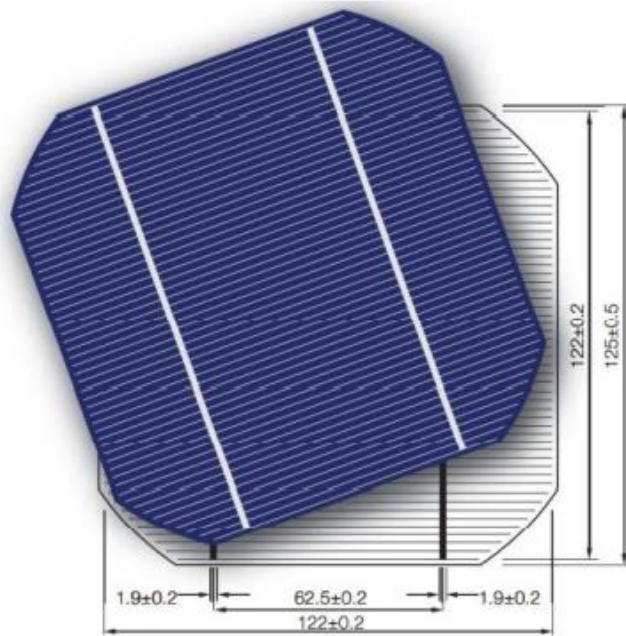
Το σκληρυσμένο γυαλί, από την άλλη πλευρά, δεν αποτυγχάνει λόγω πλαστικής παραμόρφωσης, όπως οι επιλογές πολυμερών, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχουν λιγότερα στοιχεία υποβάθμισης της απόδοσης πριν από την αστοχία. Για τους λόγους που περιγράφονται στη βιβλιογραφική μελέτη, προκειμένου να κατασκευαστεί με ασφάλεια ένα πάνελ σκληρυσμένου γυαλιού, πρέπει να ανταποκρίνεται στις συνήθεις απαιτήσεις υαλοπινάκων δαπέδου, επομένως η κατασκευή πρέπει να χρησιμοποιεί πολυάριθμους πλεονάζοντες υαλοπίνακες σκληρυσμένου γυαλιού που συνδέονται μεταξύ τους. Λόγω της διαδικασίας σκλήρυνσης, εάν ένας υαλοπίνακας αστοχήσει καταστροφικά, θα σπάσει σε εξαιρετικά μικρά θραύσματα και όχι σε ογκώδη φύλλα γυαλιού και η πλαστικοποίηση θα βοηθήσει να συνδεθούν αυτά τα σπασμένα θραύσματα με τα άλλα στρώματα γυαλιού στο πάνελ αντί να διασκορπιστούν στο υπόλοιπο του περιβάλλοντος.

Η τελευταία σημαντική διάκριση μεταξύ αυτών των υλικών είναι στην τιμή και την υφή. Το σκληρυσμένο γυαλί είναι μια πολύ πιο ακριβή εναλλακτική σχεδιασμού από τα χυτά πλαστικά. Επιπλέον, οποιοδήποτε από αυτά τα υλικά μπορεί να έχει επιφανειακές υφές που τους δίνονται με μια ποικιλία τεχνικών κατά τη χύτευση ή κατά την επεξεργασία αργότερα μέσω χάραξης.

#### 5.4 Σχεδιασμός ηλεκτρικών συστημάτων

Ήταν κρίσιμο να καθοριστεί πώς το ηλεκτρικό σύστημα θα τοποθετηθεί εντός του πίνακα μετά τον προσδιορισμό των υλικών που είναι διαθέσιμα για χρήση στην κατασκευή των πρωτοτύπων ηλιακών πάνελ δρόμου. Αυτή η ενότητα χωρίζεται στα παρακάτω τρία μέρη:

- επιλογή φωτοβολταϊκών στοιχείων,
- συνδέσεις κυψελών και
- εξωτερικό υλικό.



Εικόνα 25: Απεικόνιση σχεδιασμού ηλεκτρικών συστημάτων

[RMSolar, 2012]

#### 5.4.1 Επιλογή φωτοβολταϊκών κυψελών

Επειδή η παρούσα διατριβή εστιάζεται στον δομικό σχεδιασμό του πίνακα, καθορίστηκε ότι το ηλεκτρικό σύστημα θα χρησιμοποιεί τυπικά εξαρτήματα υψηλής απόδοσης και θα επιτρέπει μελλοντικές δοκιμές άλλων ηλιακών τεχνολογιών σε εφαρμογές ηλιακών πάνελ δρόμου. Σε αυτό το βαθμό, η επιλογή των ηλιακών κυψελών περιοριζόταν σε μονοκρυσταλλικά κύτταρα πυριτίου.

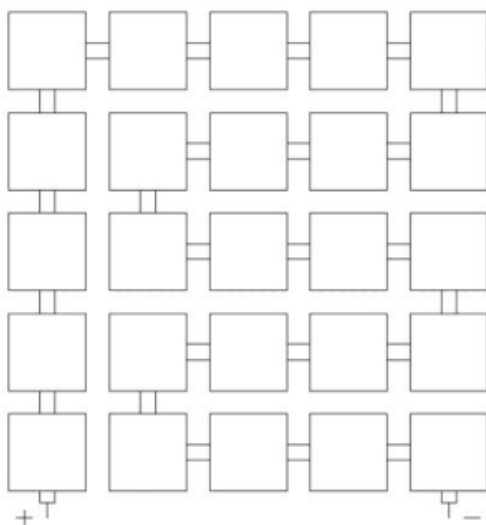
Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα μονοκρυσταλλικού πυριτίου διατίθενται σε μια σειρά μεγεθών για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις συγκεκριμένων προϊόντων OEM. Τα τετράγωνα ηλιακά κύτταρα 150 mm χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές παραγωγής ενέργειας κοινής ωφέλειας, επειδή μπορούν να κατασκευαστούν αποτελεσματικά και έχουν καλούς ρυθμούς μετατροπής ενέργειας. Επειδή, τα 150 mm είναι μια μεγάλη περιοχή για την κάλυψη του διαφανούς υλικού, ελήφθη η απόφαση να χρησιμοποιηθούν τετράγωνα ηλιακά κύτταρα υψηλής απόδοσης 125 mm. Αυτά, ωστόσο, διατηρούν ένα μεγάλο μέρος της επιφάνειας του πάνελ ανοιχτό για παραγωγή ενέργειας, ενώ παρέχουν αρκετό χώρο για μεταφορά φορτίου γύρω από τα ηλιακά κύτταρα.

#### 5.4.2 Διασύνδεση κυψελών

Όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3, η πιο κοινή τεχνική σύνδεσης φωτοβολταϊκών στοιχείων σε μια ηλιακή μονάδα είναι η συγκόλληση μιας κορδέλας από κασσίτερο στις ράβδους διαύλου στο

επάνω μέρος μιας κυψέλης και στο κάτω μέρος της επόμενης κυψέλης. Αυτό λειτουργεί καλά στην κανονική κατασκευή ηλιακών μονάδων λόγω των μέτριων φορτίων, που επιβάλλονται στις συνδέσεις και επειδή οι κυψέλες είναι κοντά η μία στην άλλη. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, κανένα από αυτά τα χαρακτηριστικά δεν θα είναι προσβάσιμο στην κατασκευή ενός ηλιακού πάνελ δρόμου.

Η διεπαφή κυψέλης σχεδιάστηκε για να είναι ένας συνδυασμός παραδοσιακής κορδέλας από κασσίτερο και ηλεκτρικού καλωδίου για να το προσαρμόσει. Η συγκολλημένη ταινία θα εξακολουθεί να είναι απαραίτητη για τη δημιουργία σταθερής σύνδεσης μεταξύ της ράβδου διαύλου του στοιχείου και του ηλεκτρικού αγωγού, αλλά θα επεκταθεί μόνο ως μια μικρή γλωττίδα από το ηλιακό στοιχείο και ένα ηλεκτρικό καλώδιο θα συνδεθεί μεταξύ του συγκολλημένες γλωττίδες γειτονικών κυψελών (Northmore & Tighe, 2012b).



Εικόνα 26: Διασύνδεση κυψελών

[Northmore & Tighe, 2012b]

#### 5.4.3 Πρόσθετο υλικό

Μια διάοδος προστασίας αντίστροφου ρεύματος είναι απαραίτητη επιπλέον του ηλεκτρικού κυκλώματος που έχει εγκατασταθεί μέσα στον πίνακα για να εγγραφεί ότι δεν επιτρέπεται να περάσει ρεύμα με λάθος τρόπο μέσω του πίνακα, κάτι που θα είχε ως αποτέλεσμα την καταστροφή των ευαίσθητων ηλεκτρονικών. Αποφασίστηκε ότι αυτό θα γινόταν έξω από τον πίνακα χρησιμοποιώντας συρμάτινες συνδέσεις σε μια λωρίδα φραγμού, που ενσωματώνει τη διάοδο προστασίας αντίστροφου ρεύματος για απλοποίηση της συσκευασίας. Η διάοδος που επιλέχθηκε για το σκοπό αυτό παρέχει προστασία αντίστροφου ρεύματος έως και 5-A σε τάσεις έως 40-V, η



οποία είναι κατάλληλη για τις σχεδιαστικές προδιαγραφές του πρωτότυπου ηλιακού πάνελ δρόμου, με την προϋπόθεση ότι το πάνελ μπορεί να χειριστεί με τέτοιο τρόπο ώστε μόνο υποβάλλεται σε αυτό ένα περιορισμένο αντίστροφο ρεύμα.

## 5.5 Σχεδιασμός διαφανών στρωμάτων

Επειδή τα διαφανή πολυμερή έχουν επιδείξει δυνατότητες αυλάκωσης, αποφασίστηκε ότι το πρωτότυπο πάνελ θα πρέπει να διαθέτει διαφανές κάλυμμα από σκληρυμένο γυαλί. Η χρήση ενός πολυμερούς υλικού θα χρειαζόταν την καθιέρωση ενός προγράμματος συντήρησης, που αλλάζει το διαφανές στρώμα των πάνελ σε τακτική βάση και ο χαμηλός συντελεστής Young θα είχε ως αποτέλεσμα σημαντικές παραμορφώσεις του διαφανούς στρώματος μέσω του οπτικού στρώματος.

Το πάχος του διαφανούς στρώματος είναι η πιο κρίσιμη παράμετρος σχεδιασμού που πρέπει να εκτιμηθεί από δομική άποψη αφού επιλεγεί το υλικό. Λόγω ανησυχιών για την ασφάλεια, απαιτούνται πολυάριθμοι υαλοπίνακες συνδεδεμένοι μεταξύ τους για να διατηρήσουν τη φόρτωση και σε αυτήν την περίπτωση επιλέχθηκε ένας σχεδιασμός δύο υαλοπινάκων, έτσι ώστε αν σπάσει το ένα τζάμι, το άλλο μπορεί να μεταφέρει μόνο του το φορτίο του οχήματος. Η τάση σχεδιασμού για τα μέλη από σκληρυμένο γυαλί είναι 42-MPa υπό αυτές τις συνθήκες (Alsop & Saunders, 1999).

Με αυτές τις παραμέτρους, ήταν εφικτός ο υπολογισμός της τάσης κάμψης σε ένα πρόβολο τμήμα γυαλιού. Τα προβαλλόμενα αναμενόταν να είναι τετράγωνα 140 mm, αρκετά μεγάλα για ηλιακή κυψέλη 125 mm και χώρο σύνδεσης, και ότι η μεγαλύτερη κατάσταση φορτίου θα έβλεπε ομοιόμορφα κατανεμημένη δύναμη από ένα διερχόμενο ελαστικό οχήματος, με πίεση 480 kPa. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία χαμηλής κάμψης, αυτές οι πληροφορίες εφαρμόστηκαν σε συσχετίσεις που δημιουργήθηκαν για σχέσεις τάσεων (Roark & Young, 1975).

Όπως φαίνεται, όλες αυτές οι διαμορφώσεις παράγουν εξαιρετικά μικρές παραμορφώσεις ακόμα και όταν χρησιμοποιούνται λεπτά στρώματα σκληρυμένου γυαλιού, επικυρώνοντας έτσι τη χρήση των υποθέσεων της θεωρίας χαμηλής κάμψης. Η ελάχιστη αποδεκτή διαμόρφωση για μεμονωμένους υαλοπίνακες είναι ο σχεδιασμός των 10 mm, επομένως επιλέχθηκαν δύο υαλοπίνακες 10 mm, που θα χρησιμοποιηθούν στο πρωτότυπο του ηλιακού πάνελ δρόμου.

Πρέπει να τοποθετηθεί μια υφή στην επιφάνεια της γυάλινης κατασκευής προτού μπορέσει να χρησιμοποιηθεί σε ηλιακό πάνελ δρόμου και πρέπει να προβλεφθεί χώρος για να ενωθεί το πάνελ μαζί με ένα πλαίσιο. Επειδή, η κύρια εστίαση αυτής της έρευνας είναι στις δομικές ιδιότητες ενός ηλιακού πάνελ δρόμου και όχι στις λειτουργικές, επιλέχθηκε ένα βασικό σχέδιο χάραξης από τον πάροχο του καταλόγου της γυάλινης κατασκευής. Αυτή η υφή θα προσφέρει κάποια ελκτική ικανότητα στον πίνακα χωρίς να μειώνει σημαντικά την οπτική ποιότητα.

Για να πλαισιώσει το πάνελ, συνήχθη το συμπέρασμα ότι ο σχεδιασμός μιας προεξοχής στη συνολική κατασκευή του γυάλινου πάνελ ήταν ο καλύτερος τρόπος για να διασφαλιστεί ότι το γυαλί ήταν αγκυρωμένο στο πάνελ. Αυτό επιτεύχθηκε με πλαστικοποίηση δύο υαλοπινάκων 10 mm κομμένα σε διάφορα τετράγωνα μεγέθη και κεντραρισμένα το ένα στο άλλο.

## 5.6 Σχεδιασμός δομικών στρωμάτων

Επειδή καθένα από τα υλικά χάλυβα, αλουμινίου και υαλοβάμβακα που μελετήθηκαν θα παρείχε αρκετή απόδοση για τα δομικά στρώματα του πρωτοτύπου ηλιακού πάνελ δρόμου, η τελική απόφαση για το υλικό βασίστηκε στη δυνατότητα κατασκευής. Τα μέταλλα πρέπει να χυτεύονται, να κοπούν με λείζερ ή να κοπούν με πίδακα νερού για να κατασκευαστούν τα κατάλληλα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά, ενώ το fiberglass μπορεί να κοπεί σε μέγεθος χρησιμοποιώντας συνηθισμένο εξοπλισμό. Τα πρωτότυπα δομικά στρώματα αποτελούνταν από υαλοβάμβακα με πιστοποίηση GPO-3 για το σκοπό αυτό.

### 5.6.1 Πάχος δομικού στρώματος

Το συνολικό πάχος του πάνελ προσδιορίστηκε ως η επόμενη φάση στο σχεδιασμό του δομικού στρώματος. Αφού προσδιορίστηκε το πάχος του γυαλιού στα 20 mm, το επόμενο βήμα ήταν να προσδιοριστεί το κατάλληλο μέγεθος πλαισίου για ολόκληρη την κατασκευή.

Λόγω των χαρακτηριστικών μετάδοσης φορτίου, το πλαίσιο του πίνακα θα έχει σημαντική επίδραση στη συνολική δομική απόδοση κατά την κατασκευή ενός πρωτοτύπου με δυνατότητα δοκιμής στο δρόμο. Το υλικό του πλαισίου θα πρέπει επίσης να είναι εύκολα προσβάσιμο και λειτουργικό. Για το σκοπό αυτό, αποφασίστηκε ότι το πλαίσιο πρέπει να αποτελείται από μέλη καναλιού αλουμινίου 6063T5.

Αφού αποφασίστηκε για ένα υλικό, οι εναλλακτικές λύσεις για το συνολικό πάχος του πάνελ περιορίστηκαν. Οι τυπικές διαστάσεις καναλιού 6063T5 είναι 25,4 mm, 38,1 mm, 50,8 mm και 76,2 mm. Η διάσταση ελέγχου για το πάχος του πάνελ είναι mm πλάτη καναλιού. Συμπεριλαμβανομένου του γυαλιού, που χρειάζεται πάχος 20 mm, διαπιστώθηκε ότι τα 50,8 mm είναι το μικρότερο αποδεκτό μέγεθος καναλιού. Είναι σημαντικό να χρησιμοποιηθούν πολλά στρώματα από υαλοβάμβακα για τη σύνθεση του οπτικού και του βασικού στρώματος.

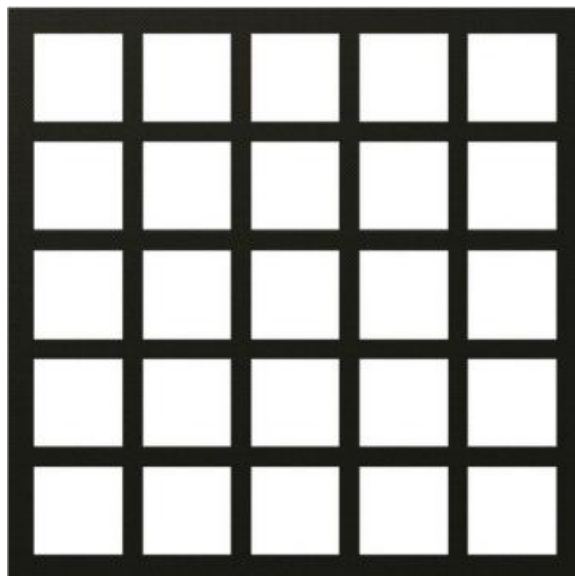
Από πλευράς κατασκευής, ένα παχύτερο στρώμα από υαλοβάμβακα θα έδινε μεγαλύτερη αντίσταση κάμψης, ωστόσο, λόγω των πρακτικών περιορισμών στην παροχή υαλοβάμβακα, επιλέχθηκε το πάχος καναλιού 50,8 mm., ενώ το πλάτος του καναλιού είναι στα 76,2 mm.

### 5.6.2 Σχεδιασμός οπτικών στρωμάτων

Το ημιδιαφανές στρώμα και το πλαίσιο έχουν σχεδιαστεί για να αφήνουν 31,75 mm χώρου για δομικά στρώματα από υαλοβάμβακα. Επειδή το στρώμα θεμελίωσης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο παχύ, το οπτικό στρώμα δημιουργήθηκε πρώτα επειδή έχει πιο πολύπλοκες απαιτήσεις σχεδιασμού.

Όπως, ορίζεται στις προδιαγραφές σχεδιασμού, το οπτικό στρώμα του πρωτοτύπου ηλιακού πάνελ δρόμου πρέπει να είναι λεπτό ώστε να ελαχιστοποιείται η σκίαση των ηλιακών κυψελών. Αυτό το

στρώμα πρέπει επίσης να επιτρέπει περικοπές συνδεσιμότητας κυψελών, καθιστώντας ευκολότερη τη δημιουργία μιας δομής δύο επιπέδων για το οπτικό στρώμα. ένα με εγκοπές διασύνδεσης και ένα χωρίς για τη στήριξη του διαφανούς στρώματος.



*Εικόνα 27: Απεικόνιση οπτικών στρωμάτων*

*[Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis, Northmore]*

Το laminate fiberglass GPO-3 είναι ευρέως προσβάσιμο σε αυξήσεις πάχους 3,175 mm. Μόνο φύλλα υαλοβάμβακα πάχους 6,35 mm και 12,70 mm χρησιμοποιήθηκαν για να διατηρηθεί σταθερό το πάχος του υλικού μεταξύ του οπτικού και του βασικού στρώματος, ελαχιστοποιώντας την ποσότητα του υλικού που απαιτείται.

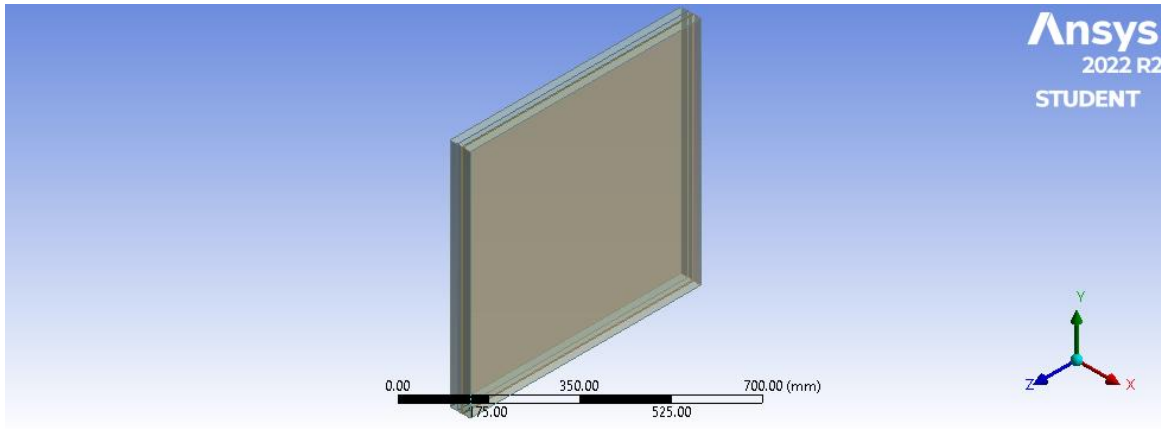
Αυτό σημαίνει ότι το οπτικό στρώμα θα αποτελείται από δύο στρώματα χυτού φύλλου υαλοβάμβακα πάχους 6,35 mm. Το μοτίβο του πλέγματος χωρίστηκε σε μικρότερες ορθογώνιες ράβδους.

### 5.6.3 Σχεδιασμός του βασικού στρώματος

Το οπτικό στρώμα έχει συνολικό πάχος 12,70 mm, αφήνοντας 19,05 mm για το στρώμα θεμελίωσης. Αυτό αποτελείται από δύο κομμάτια fiberglass, ένα των 12,70 mm και ένα άλλο των 6,35 mm, σύμφωνα με την επιλογή πάχους υλικού που αναφέρεται παραπάνω. Για να ταιριάζει στο σχέδιο του πλαισίου, ήταν απαραίτητο ένα μικρό τμήμα γύρω από το βασικό στρώμα, όπως ενσωματώθηκε στο σχέδιο του διαφανούς στρώματος. Αυτό επιτεύχθηκε κάνοντας την πλάκα 6,35 χιλιοστών μικρότερη από την πλάκα των 12,70 χιλιοστών και κεντρώνοντάς τα το ένα πάνω στο άλλο, όπως συμβαίνει με το διαφανές στρώμα.

## 5.7 Πρωτότυπο πλαίσιο

Το πλαίσιο είναι κατασκευασμένο από κανάλι αλουμινίου 50,8 mm 6065T6, όπως περιγράφεται στην Εικόνα 28.



Εικόνα 28: Απεικόνιση ηλιακού πλαισίου στο Ansys

## Κεφάλαιο 6: Περιβαλλοντική ανάλυση

Τα ηλιακά πάνελ έχουν σχεδιαστεί για να αντέχουν σε ακραίες καιρικές συνθήκες. Έχουν συμβεί τα πάντα, από σεισμούς έως ανέμους ταχύτητας 160 μίλια/ώρα, καθώς και χαλάζι και καταιγίδες. Το σκληρυμένο γυαλί δεν θα σπάσει ακόμα και αν ραγίσει και οι περισσότεροι κατασκευαστές έχουν τα πάνελ τους εγκεκριμένα με UL. Ακραία καιρικά φαινόμενα μπορεί να εμφανιστούν οπουδήποτε στον κόσμο και κάθε περιοχή φαίνεται να έχει έναν μοναδικό τρόπο να αντιμετωπίσει αυτές τις ξεχωριστές δυσκολίες (Panjwani, 2014).

Η ηλιακή ενέργεια έχει αυξηθεί σε δημοτικότητα τα τελευταία χρόνια, με περισσότερους ανθρώπους παγκοσμίως να επενδύουν στην πράσινη ενέργεια. Ορισμένες ανησυχίες για τις σκληρές καιρικές συνθήκες περιλαμβάνουν το πώς είναι ανθεκτικά στις καιρικές συνθήκες τα ηλιακά πάνελ σε ακραίες καιρικές συνθήκες (Panjwani, 2014). Τις περισσότερες φορές, ο καιρός είναι πολύ προβλέψιμος και έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, που επιτρέπουν στους κατασκευαστές να προγραμματίσουν, όπως (“Solar Power Genie, 2019):

1. Τυφώνες και χαλαζοπτώσεις
2. Ανεμοστρόβιλοι
3. Καταιγίδες και κεραυνοί
4. Σεισμοί
5. Υπερβολική ζέστη
6. Χιόνι και ακραίο κρύο
7. Πλημμύρα

Τα περισσότερα ηλιακά πάνελ έχουν σχεδιαστεί για να αντέχουν τους δυνατούς ανέμους. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα ηλιακά πάνελ μπορούν να αντέξουν ταχύτητες έως και 140 μίλια την ώρα. Η πλειοψηφία των ανθρώπων ανησυχεί επίσης, για τις ζημιές από το χαλάζι. Για να μπορέσουν να εγκατασταθούν, τα ηλιακά πάνελ πρέπει να υποβληθούν σε δοκιμή UL (“Solar Power Genie, 2019).

Κατά τη διάρκεια του βήματος πιστοποίησης UL, ένας επιστήμονας UL ρίχνει μια χαλύβδινη σφαίρα 1 ιντσών σε γωνία 90 μοιρών πάνω στο ηλιακό πάνελ, προσομοιώνοντας μια επίπεδη οροφή. Ακόμα κι αν το γυαλί σπάσει, το τεστ εξακολουθεί να περνάει, αλλά μετράται για ασφάλεια (“Solar Power Genie, 2019).

Πρέπει να έχει ακραίες συνθήκες, ώστε το χαλάζι να σπάσει το τζάμι σε ένα ηλιακό πάνελ. Ένα χαλάζι 1 ίντσας έχει δύναμη κρούσης 1,44 πόδια-λίβρες ή 1,44 λίβρες ανά τετραγωνικό πόδι πίεσης. Φυσικά, αυτή είναι μια πέτρα που πέφτει ελεύθερα, δηλαδή εάν υπάρχουν ισχυρότεροι άνεμοι, η πίεση αυξάνεται (“Solar Power Genie, 2019).

Σε αντίθεση με τη δημοφιλή άποψη, η θερμότητα είναι εξαιρετικά επιβλαβής για τους ηλιακούς συλλέκτες. Τα ηλιακά πάνελ παράγουν ηλεκτρισμό απορροφώντας ηλιακά φωτόνια, μεταμορφώνοντάς τα και ερεθίζοντας τα ηλεκτρόνια σε μια κυψέλη πυριτίου. Τα φωτόνια από τον ήλιο αντιδρούν με τα ηλεκτρόνια στο κύτταρο, παράγοντας ηλεκτρισμό (“Solar Power Genie, 2019).

Η καλοκαιρινή παραγωγικότητα είναι υψηλότερη μόνο λόγω των μεγαλύτερων ημερών, όχι λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών. Η ακραία θερμότητα μπορεί να βλάψει ένα ηλιακό σύστημα

προκαλώντας έγκαιμα κυττάρων και άλλα προβλήματα. Το πυρίτιο πρέπει να είναι εντάξει και τα άλλα συστατικά απλά θα λιώσουν μαζί (“Solar Power Genie, 2019).

Τα ηλιακά πάνελ παράγουν θερμότητα μέσω της κίνησης, καθώς και της ουσίας από την οποία αποτελούνται. Σε μια τυπική ημέρα 100 μοιρών σε άμεση ηλιοφάνεια, οι θερμοκρασίες σε ένα όχημα μπορεί να φτάσουν έως και τους 172 βαθμούς. Κατά συνέπεια, το εσωτερικό του ηλιακού πάνελ είναι σημαντικά πιο ζεστό από το εξωτερικό. Η τοποθέτηση του ηλιακού συστήματος με τρόπο που να προωθεί τη ροή του αέρα στο σύστημα είναι μια άλλη επιλογή για την καταπολέμηση των ζωνών υψηλής θερμοκρασίας (“Solar Power Genie, 2019).

Τα ηλιακά πάνελ είναι σχεδιασμένα να αντέχουν ισχυρή πίεση στο γυαλί, ενώ παραμένουν στεγανά. Για την αποφυγή ζημιών από το νερό από έντονες βροχοπτώσεις, τα ίδια τα πάνελ είναι σφραγισμένα με νερό, όπως και η πλειοψηφία των συνδέσεων (“Solar Power Genie, 2019).

## 6.1 Σκίαση

Σε παρόμοιο σημείο, πολλοί πελάτες και υποψήφιοι ιδιοκτήτες ηλιακών κατοικιών είναι περίεργοι για την απόδοση των ηλιακών συλλεκτών σε σκιά. Τα ηλιακά πάνελ παράγουν περίπου τη μισή ηλεκτρική ενέργεια κάτω από τα σύννεφα και τη σκιά από ό,τι στο άμεσο ηλιακό φως. (Με άλλα λόγια, οι ηλιακοί συλλέκτες συνεχίζουν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια ακόμα και όταν βρίσκονται στη σκιά.) (Selvaraju, 2012).

Η σκιά μπορεί να παρέχεται από διάφορες πηγές, όπως δέντρα, εξαρτήματα στέγης όπως καμινάδες και κοιτώνες. Η ταχύτητα του οχήματος και το μήκος του οχήματος είναι οι δύο πιο βασικές παράμετροι, που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον προσδιορισμό της περιόδου για την οποία θα υπάρχει η σκιά πάνω από τους ηλιακούς συλλέκτες κατά τη μελέτη των επιπτώσεων των αποχρώσεων που δημιουργούνται από αυτοκίνητα που ταξιδεύουν πάνω από τους ηλιακούς συλλέκτες (Selvaraju, 2012).

Σύμφωνα με την έρευνα, τρεις τύποι οχημάτων περιλαμβάνονται σε αυτήν την ανάλυση: ένα ημιρυμουλκούμενο τρακτέρ, ένα υπεραστικό λεωφορείο και ένα αυτοκίνητο πλήρους μεγέθους. Και οι τρεις τύποι οχημάτων πιστεύεται ότι κινούνται με σταθερή ταχύτητα 13.889 m/s (50 km/h). Η ηλιακή ακτινοβολία θεωρείται ότι είναι 1 KW/m<sup>2</sup> στην αρχή της προσομοίωσης, η οποία είναι η συνήθης τιμή συνθήκης δοκιμής (Selvaraju, 2012).

Η περιοχή του ηλιακού πάνελ που καλύπτεται από σκιά αυξάνεται, καθώς το όχημα κινείται από πάνω του και όταν το ηλιακό πάνελ καλύπτεται πλήρως από το όχημα, η ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνουν οι ηλιακές κυψέλες θεωρείται ότι είναι κοντά στο μηδέν. Επειδή, το μήκος του οχήματος είναι μεγαλύτερο από το μήκος του ηλιακού πάνελ που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη, η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας παραμένει στο 0 για λίγα δευτερόλεπτα. Προβλέπεται ότι αυτή η κατάσταση θα οδηγήσει σε απότομη μείωση της παραγωγής ενέργειας από το ηλιακό πάνελ (Selvaraju, 2012).

Όταν το όχημα αρχίζει να απομακρύνεται από το ηλιακό πάνελ, η περιοχή του ηλιακού πάνελ, που είναι σκιασμένη προβλέπεται να μειωθεί, ενώ η αντίστοιχη τιμή ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνουν οι ηλιακές κυψέλες προβλέπεται να αυξηθεί και να πλησιάσει το 1 KW/m<sup>2</sup>. Όταν, το

όχημα απομακρυνθεί πλήρως από το ηλιακό πάνελ, η παραγωγή ενέργειας από τα πάνελ προβλέπεται να αυξηθεί και να φτάσει στο μέγιστο επίπεδο (Selvaraju, 2012).

Η επίδραση της ταχείας κινούμενης σκιάς στην έξοδο των ηλιακών πλαισίων που προκαλείται από το όχημα που οδηγεί πάνω τους, καθώς και πολλές άλλες απώλειες που σχετίζονται με την εφαρμογή Solar Roadways, έχουν διερευνηθεί σε αυτό το κεφάλαιο. Η ποσότητα της ενέργειας που χάνεται στα ηλιακά πάνελ έχει αποδειχθεί ότι είναι ανάλογη με το μήκος και την ταχύτητα του οχήματος. Τα κυμαινόμενα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας που πέφτουν πάνω από το ηλιακό πάνελ χρησιμοποιήθηκαν για την πρόβλεψη του αποτελέσματος χρησιμοποιώντας την ανάλυση Monte Carlo, μια προσέγγιση ανάλυσης κινδύνου. Αυτή η έρευνα έδειξε πώς αντιδρούν τα ηλιακά πάνελ, όταν η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από τη συνήθη τιμή συνθήκης δοκιμής των 1000 W/m<sup>2</sup> (Selvaraju, 2012).

## 6.2 Υγρασία

Όταν πρόκειται για την ενέργεια που λαμβάνεται από τον Ήλιο, η Γη λαμβάνει περίπου 1413 W/m<sup>2</sup>, ενώ η πραγματική κατανάλωση, όπως μετρήθηκε από την Υπηρεσία Δασών Βορειοδυτικών Δασών και Πειραματικών Σταθμών Ειρηνικού, Υπουργείο Γεωργίας των ΗΠΑ, Πόρτλαντ, Όρεγκον, ΗΠΑ το 1972, είναι περίπου 1050W/m<sup>2</sup>. Σύμφωνα με τα στοιχεία, περίπου το 30% της ενέργειας σπαταλάται στη μετάβαση. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία, η ένταση του ηλιακού φωτός στην κορυφή της ατμόσφαιρας της Γης είναι περίπου 30% μεγαλύτερη από αυτή που παρατηρείται στο έδαφος. Στα ηλιακά πάνελ που χρησιμοποιούμε σήμερα, χρησιμοποιούμε πραγματικά το 70% της ενέργειας που προέρχεται από τον Ήλιο και χρησιμοποιούμε τη λειτουργία των πάνελ μας για να καλύψουμε τις ενεργειακές μας απαιτήσεις (Coutu et al., 2020).

Επειδή ο παγκόσμιος φλοιός αποτελείται κατά 70% από νερό, η ενέργεια που επηρεάζει τη γη χτυπά έμμεσα το νερό/τους ωκεανούς, γεγονός που βοηθά στη γενική αύξηση της υγρασίας. Η υγρασία όχι μόνο δημιουργεί εμπόδια για την ενέργεια, που λαμβάνεται στην κορυφή της ατμόσφαιρας, αλλά έχει επίσης ένα ευρύ φάσμα επιπτώσεων στη χρήση της συσκευής (Coutu et al., 2020).

Η επίδραση της υγρασίας στα ηλιακά πάνελ δημιουργεί εμπόδια για σημαντικές διακυμάνσεις στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστώντας έμμεσα τη λειτουργία της συσκευής λιγότερο αποτελεσματική. Πόλεις με επίπεδα υγρασίας πάνω από το τυπικό εύρος των 30 έχουν ως αποτέλεσμα μια μικροσκοπική επίστρωση νερού στην κορυφή του ηλιακού πάνελ, με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης (Coutu et al., 2020).

Σύμφωνα με τα γεγονότα, όταν το φως που περιέχει ενέργεια/φωτόνια φτάνει στο πιο πυκνό στρώμα νερού, συμβαίνει διάθλαση, με αποτέλεσμα τη μείωση της έντασης του φωτός, η οποία φαίνεται να είναι η βασική αιτία της μειωμένης απόδοσης. Επιπλέον, εμφανίζονται ελάχιστα συστατικά ανάκλασης που εμφανίζονται επίσης στο χώρο, και σε αυτό, φαίνεται ότι το φως χτυπά υπόκειται σε περισσότερες απώλειες, οι οποίες μετά τα πειράματα που διεξήχθησαν οδήγησαν σε απώλεια περίπου 30% της συνολικής ενέργειας που δεν υπόκειται σε χρήση Ενέργεια για το ηλιακό πάνελ (Coutu et al., 2020).

Όσον αφορά την απόδοση των ηλιακών κυψελών, η απόδοση ορίζεται ως η ποσότητα φωτός που μπορεί να μετατραπεί σε μια χρησιμοποιήσιμη μορφή ενέργειας. Επειδή, η απόδοση ενός ηλιακού

στοιχείου καθορίζεται από την τιμή του Μέγιστου Σημείου Ισχύος του, η προαναφερθείσα επίδραση της υγρασίας προκαλεί απόκλιση του σημείου μέγιστης ισχύος, με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης της ηλιακής κυψέλης (Coutu et al., 2020).

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ρύθμισης υγρασίας για την αξιολόγηση της μηχανικής και λειτουργικής ανθεκτικότητας των SRP σε υγρές συνθήκες. Επειδή η επάνω γυάλινη επιφάνεια των SRP είναι αδιαπέραστη, η υγρασία έχει πολύ μικρή επίδραση. Ο σκοπός αυτής της δοκιμής ήταν να προσδιοριστεί η επίδραση στο εκτεθειμένο στρώμα πολυμερούς μεταξύ των αδιαπέραστων γυάλινων πλακών (Coutu et al., 2020).

Για την αξιολόγηση των επιπτώσεων της απορρόφησης νερού ή της έκθεσης στην υγρασία στο στρώμα πολυμερούς, χρησιμοποιήθηκε το ASTM Active Standard D570-98 (2010) e1, "Τυπική μέθοδος δοκιμής για την απορρόφηση νερού πλαστικών". Η δοκιμή έχει δύο βασικούς στόχους, πρώτον, να αξιολογήσει την ποσότητα του νερού που απορροφάται από το πολυμερές υλικό και δεύτερον, να προσδιορίσει τη μεταβολή ή τη φθορά των ηλεκτρικών, μηχανικών, διαστάσεων και ιδιοτήτων εμφάνισης του πολυμερούς στρώματος (Coutu et al., 2020).

Μια χαλύβδινη δεξαμενή 300 γαλονιών γεμίστηκε με τρία SRP. Η στάθμη του νερού ήταν μία ίντσα υψηλότερη από τα πάνελ και όλα τα SRP δέχονταν την ίδια πίεση νερού. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, το καλώδιο και η πρίζα που συνδέονται με τον πίνακα ανυψώθηκαν πάνω από τη γραμμή νερού για να διασφαλιστεί η ηλεκτρική σύνδεση (Coutu et al., 2020).

Οι επιστρώσεις υποβλήθηκαν σε ρύθμιση υγρασίας με τους ακόλουθους τρόπους: (1) για 24 ώρες, (2) για επτά ημέρες και (3) για δύο διαστήματα 14 ημερών. Τα πάνελ δοκιμάστηκαν στη γραμμή βάσης πριν από κάθε δοκιμή (αρχικές ηλεκτρικές ιδιότητες και βάρος). Οι πλακόστρωτες βυθίστηκαν για τον απαιτούμενο χρόνο, ανασύρθηκαν από τη δεξαμενή νερού, ζυγίστηκαν και στη συνέχεια επανατοποθετήθηκαν για ηλεκτρικές δοκιμές (δηλαδή λειτουργικότητα LED). Αφού ολοκληρώθηκε η ηλεκτρική δοκιμή, οι επιστρώσεις ζυγίστηκαν ξανά και τοποθετήθηκαν ξανά στις δεξαμενές νερού για να ξεκινήσει ο επόμενος κύκλος δοκιμής. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση υγρασίας για συνολικά 36 ημέρες (Coutu et al., 2020).

Η απορρόφηση υγρασίας επηρεάζει την περιεκτικότητα του πολυμερούς σε νερό και συνδέεται άμεσα με την ηλεκτρική αγωγιμότητα, τη μηχανική αντοχή, τη διάσταση και τη φυσική εμφάνιση. Η ποσότητα της απορρόφησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο της έκθεσης στο νερό (δηλαδή, έκθεση σε βύθιση ή υψηλή υγρασία), το σχήμα και τη θερμοκρασία και τα χαρακτηριστικά του πολυμερούς. Η δοκιμή υγρασίας διεξήχθη σε SRP πλήρους μεγέθους και όχι σε μικροσκοπικά δείγματα δοκιμής όπως ορίζεται στο ASTM Active Standard. Δεν υπήρξε αύξηση βάρους μετά το τεστ 24 ωρών. Μετά από μια δοκιμή επτά ημερών, ωστόσο, ένα πάνελ αποκάλυψε αύξηση βάρους 9,07 g. Με βάση αυτό το αποτέλεσμα, διεξήχθησαν δύο δοκιμές 14 ημερών, με και τα τρία πάνελ να κέρδισαν 18,14 γρ (Coutu et al., 2020).

Ένας πίνακας απέτυχε στον ηλεκτρικό έλεγχο μετά την αρχική δοκιμή 14 ημερών. Αυτό δεν μπορεί να αποδοθεί σε αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία επειδή οι λυχνίες LED στα άλλα δύο πάνελ λειτουργούσαν τόσο κατά τη διάρκεια της περιόδου πριν όσο και μετά τη δοκιμή υγρασίας (Coutu et al., 2020).

Η Solar Roadway Inc. (SRI) ανέλαβε μια εκτεταμένη μελέτη για να προσδιορίσει τη βασική αιτία της αναφερόμενης βλάβης και ανακάλυψε ότι ένα διαβρωμένο καλώδιο ήταν η πηγή της βλάβης. Έγιναν φωτοβολταϊκές δοκιμές στα ελεγμένα με υγρασία πάνελ στο εργαστήριο SRI. Και τα τρία



πάνελ παρήγαγαν την αναμενόμενη ποσότητα ισχύος (εύρος 24,5 W έως 26,7 W). Τέλος, η δοκιμή ρύθμισης υγρασίας αποκάλυψε ουσιαστικά καμία μετρήσιμη αύξηση βάρους χρησιμοποιώντας κυψέλη φορτίου 45,36 kg με ανάλυση 9,07 g. Τα πρότυπα δοκιμής διάρκειας ρύθμισης υγρασίας που καθορίζονται στο ASTM D570-98 (2010) e1 πληρούνταν ή ξεπεράστηκαν από τα SRP που δοκιμάστηκαν στο EMSTL στην πανεπιστημιούπολη MU (Coutu et al., 2020).

### 6.3 Παγετός

Καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, οι δρόμοι υπόκεινται σε δύσκολες καιρικές συνθήκες. Οι ακραίες θερμοκρασίες προκαλούν αλλοίωση ορισμένων υλικών του οδοστρώματος. Τα SRP είναι κατασκευασμένα από πολυστρωματικό υλικό, που βρίσκεται ανάμεσα σε στρώματα γυαλιού. Οι συντελεστές θερμικής διαστολής αυτών των δύο υλικών διαφέρουν (CTE). Σε πραγματικές ρυθμίσεις, αυτό το στοιχείο μπορεί να έχει αρνητικό αντίκτυπο στη μηχανική και ηλεκτρική λειτουργικότητα του SRP (Coutu et al., 2020).

Στο πείραμά μας, υποβάλαμε τα πάνελ μας σε επαναλαμβανόμενο κύκλο ακραίων θερμοκρασιών. Οι καινοτόμες δοκιμές μας εμπνεύστηκαν από το ASTM Active Standard C1645/C1645 M, "Τυπική μέθοδος δοκιμής για ανθεκτικότητα κατάψυξης-απόψυξης και αποπάγωσης αλατιού των μονάδων επίστρωσης στερεού σκυροδέματος" (Coutu et al., 2020).

Η πειραματική ρύθμιση Freeze/Thaw Cycling ήταν συγκρίσιμη με το σύστημα δοκιμής υγρασίας. Έξι SRP δοκιμάστηκαν πριν από τη δοκιμή για να προσδιοριστούν οι συνθήκες έναρξης (βάρους και ηλεκτρική λειτουργικότητα). Τρία πάνελ τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή γλυκού νερού 1135,62 λίτρων και τρία πάνελ τοποθετήθηκαν σε ξεχωριστή δεξαμενή διαλύματος NaCl 3% για μίμηση χημικών συνθηκών αποπάγωσης. Και οι δύο μπανιέρες τοποθετήθηκαν σε περιβαλλοντικό θάλαμο ESPEC που εναλλάσσεται μεταξύ 20 και 50 βαθμών Κελσίου για 48 ώρες. Ένας κύκλος δοκιμής ολοκληρώθηκε κατά τη διάρκεια μιας περιόδου πέντε ημερών. Τα SRP ελήφθησαν από τις δεξαμενές νερού στο τέλος κάθε κύκλου δοκιμής, στέγνωσαν με μια πετσέτα χωρίς χνούδι, ζυγίστηκαν, εξετάστηκαν για φυσικές δομικές παραβιάσεις και στη συνέχεια δοκιμάστηκαν ηλεκτρικά (Coutu et al., 2020).

Η συσκευή ζύγισης που χρησιμοποιήθηκε στη δοκιμή ρύθμισης υγρασίας ήταν η ίδια. Όταν ολοκληρώθηκε η ηλεκτρική δοκιμή, οι επιστρώσεις επέστρεψαν στις δεξαμενές νερού για να ξεκινήσει ο επόμενος κύκλος δοκιμής. Ολόκληρη η δοκιμή περιελάμβανε δέκα κύκλους κατάψυξης/απόψυξης. Μετά την ολοκλήρωση των δέκα κύκλων, τα πάνελ δεν παρουσίασαν αύξηση βάρους εντός της ανάλυσης 9,07 g της ζυγαριάς. Δεν ανακαλύφθηκαν σωματικά ελαττώματα ή ζημιές. Τα LED λειτουργούσαν όλα κατά τη διάρκεια των κύκλων δοκιμής κατάψυξης/απόψυξης (Coutu et al., 2020).

## Κεφάλαιο 7: Ανάλυση μέσω Ansys

### 7.1 Μοντέλο προσομοίωσης

Οι τυπικοί ηλιακοί συλλέκτες αποτελούνται από ηλιακές κυψέλες, οι οποίες είναι από γυάλινο υλικό και από τη βάση, η οποία περιβάλλεται από αλουμίνιο. Στην περίπτωση όμως των ηλιακών δρόμων χρησιμοποιείται ως ανώτερη στρώση κάποιο υλικό μεγάλης διαπερατότητας για την παγίδευση των ηλιακών ακτινών, αλλά ταυτόχρονα και μεγάλης αντοχής για την υπεκφυγή πρόσφυσης από τα φορτία των τροχών των αυτοκινήτων.

Η βάση του ηλιακού συλλέκτη περιγράφεται από ένα στρώμα τετράγωνης γεωμετρίας με πλευρές 625mm x 625mm και πάχους 50.8 mm. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω και φαίνεται και στον πίνακα, οι ηλιακοί συλλέκτες που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση περιλαμβάνουν τα στρώματα της βάσης, το οπτικό στρώμα, το δομικό στρώμα, το ηλεκτρονικό στρώμα και ως ανώτερη στρώση το απορροφητικό. Η βάση αποτελείται από δύο στρώσεις υαλοβάμβακα, εκ των οποίων η μία είναι 12.70 mm και η επόμενη 6.35 mm. Το οπτικό στρώμα έχει ως υλικό και αυτό τον υαλοβάμβακα σε δύο στρώσεις των 6.35 mm η καθεμιά. Στη συνέχεια, το δομικό στρώμα περιλαμβάνει πολλές στρώσεις υαλοβάμβακα, που σχηματίζουν ένα πλέγμα. Επιπρόσθετα, το ηλεκτρονικό στρώμα στο οποίο δημιουργούνται οι κυψέλες των 125 mm καλύπτεται από μονοκρυσταλλική σιλικόνη. Τέλος, το απορροφητικό στρώμα, δηλαδή η ανώτερη στρώση, η οποία πρέπει να έχει χαρακτηριστικά διαπερατότητας, αλλά και αντοχής, έχει επιλεγθεί να σχεδιαστεί από σκληρυσμένο γυαλί πάχους δύο στρώσεων πάχους 10 mm η καθεμιά.

Πίνακας 6: Στρώσεις και υλικά που χρησιμοποιήθηκαν

Στρώσεις	Υλικά	Πάχος στρώσεων [mm]
Βάση	Υαλοβάμβακας	19.05
Οπτικό	Υαλοβάμβακας	12.70
Δομικό	Υαλοβάμβακας	3
Ηλεκτρικό	Μονοκρυσταλλική σιλικόνη	3
Απορροφητικό	Σκληρυσμένο γυαλί	20

### 7.2 Διαδικασία στατικής ανάλυσης

Για τη στατική ανάλυση, χρησιμοποιήσαμε τις πλατφόρμες Workbench, Design Modeler και Mechanical. Αρχικά, καταχωρήσαμε τα στοιχεία για τα υλικά που αποτελούν το μοντέλο του ηλιακού μας συλλέκτη και στη συνέχεια πραγματοποιήσαμε την ανάλυση μέσω πεπερασμένων

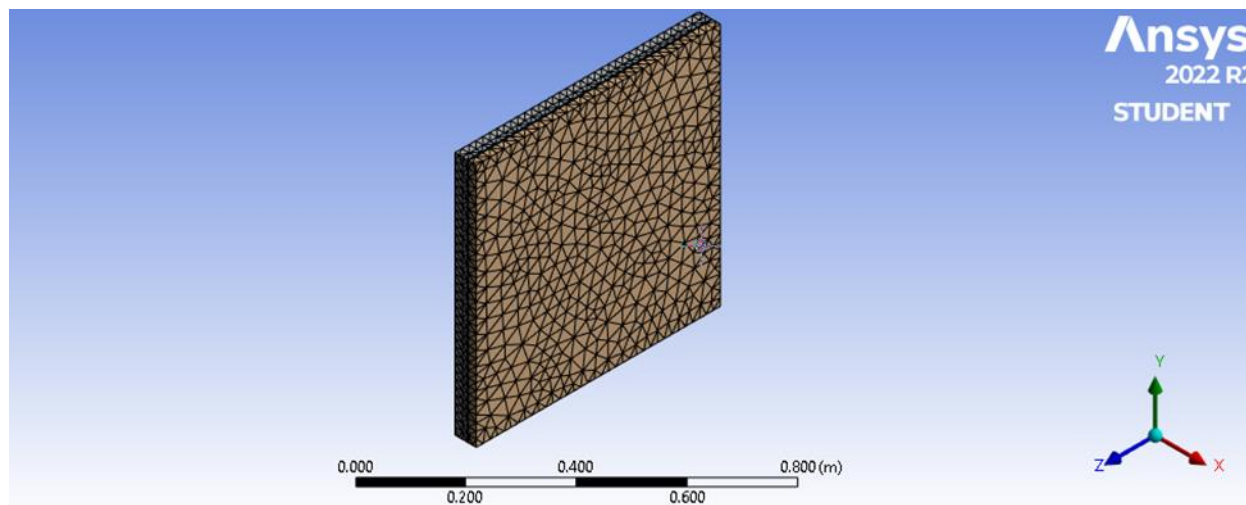
στοιχείων (meshing). Προσθέσαμε στη γεωμετρία τα φορτία, τα οποία ασκούνται σε έναν δημόσιο δρόμο, δηλαδή τα φορτία των τροχών αυτοκινήτου, φορτηγού και μηχανής.

Πίνακας 7: Ιδιότητες επιλεγμένων υλικών για τη στατική ανάλυση

Υλικά	Αντοχή σε θλίψη [MPa]	Μέτρο του Young [GPa]	Πυκνότητα [gr/cm <sup>3</sup> ]
Υαλοβάμβακας	55	12	1.90
Σκληρυμένο γυαλί	5000	72.0	2.50
Αλουμίνιο	276	68.9	2.70

Στη συνέχεια, στην πλατφόρμα Ansys Mechanical προστέθηκαν στηρίξεις μεταξύ των στρωμάτων και της γεωμετρίας των τροχών. Το επόμενο βήμα ήταν η καταχώρηση των πιέσεων από τους τροχούς των οχημάτων. Στην περίπτωση του φορτηγού και του αυτοκινήτου ασκείται πίεση μόνο από τον έναν τροχό λόγω της γεωμετρίας του ηλιακού πάνελ (625mm x 625mm).

Αντιθέτως, στην περίπτωση της μηχανής υπολογίστηκε η πίεση στο ηλιακό πλαίσιο και από τους δύο τροχούς και εν κινήσει. Το τελικό βήμα περιλάμβανε τον υπολογισμό της ισοδύναμης πίεσης και της ολικής παραμόρφωσης του ηλιακού δρόμου σε συνέχεια με την καταχώρηση των παραπάνω δεδομένων.



Εικόνα 29: FEM ανάλυση ηλιακού πλαισίου

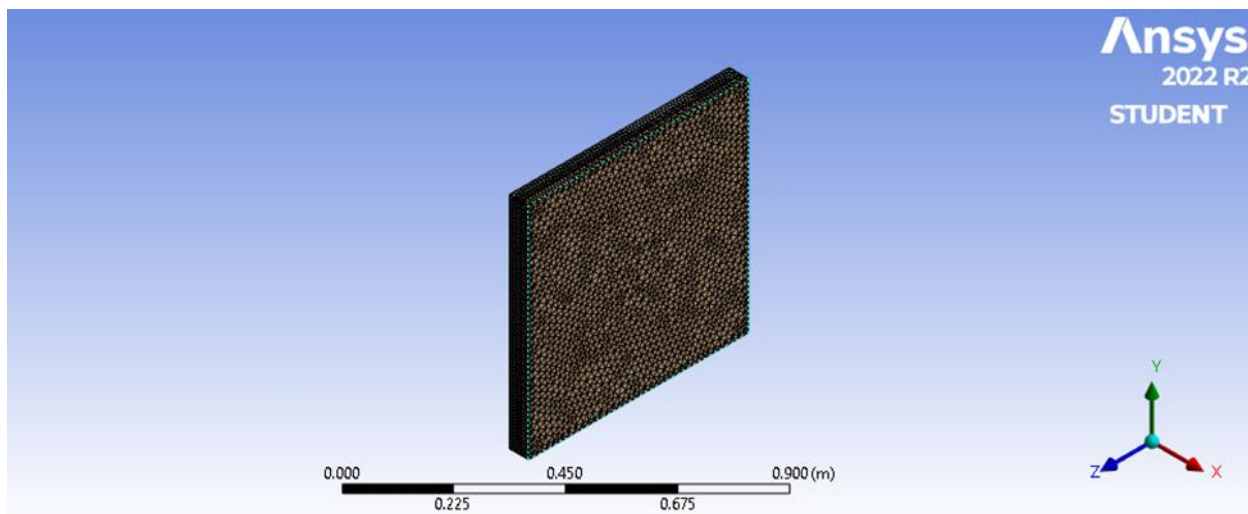
### 7.3 Διαδικασία θερμικής ανάλυσης

Για τη θερμική ανάλυση, αρχικά, καταχωρήθηκαν μέσω της πλατφόρμας Workbench τα χαρακτηριστικά των υλικών, που θα τοποθετηθούν σε κάθε στρώση του ηλιακού δρόμου, όπως η πυκνότητα, η ιστροπική θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμότητα όλων των υλικών των στρωμάτων. Τα χαρακτηριστικά των υλικών δίνονται στον Πίνακα 8. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα Design Modeler για την τρισδιάστατη αναπαράσταση του ηλιακού δρόμου με το διαχωρισμό των στρώσεων και την καταχώρηση κάποιων χαρακτηριστικών τους (π.χ. διαπερατότητα ανώτερης στρώσης). Το επόμενο βήμα έγινε μέσω του Ansys Mechanical, καθώς προσθέσαμε τα χαρακτηριστικά των υλικών στις στρώσεις του μοντέλου, που δημιουργήσαμε και προχωρήσαμε στη θερμική ανάλυση του μέσω πεπερασμένων στοιχείων (meshing).

Πίνακας 8: Ιδιότητες υλικών για τη θερμική ανάλυση

Υλικά	Ισοτροπική θερμική αγωγιμότητα
Υαλοβάμβακας	0.2773 Wm/C
Σκληρυσμένο γυαλί	6.9334 BTU
Αλουμίνιο	1160 BTU

Αφού, έγινε μία πρώτη ανάλυση του ηλιακού δρόμου προστέθηκε η μέγιστη ημερήσια ηλιακή απομόνωση στην περιοχή της Αττικής (Πίνακας) και η διάδοση θερμότητας στα στρώματα με χαρακτηριστικά της πιο απλουστευμένης περίπτωσης. Το τελικό βήμα περιλάμβανε τη λύση της θερμικής ανάλυσης με την προσθήκη θερμοκρασίας σε όλες τις στρώσεις του ηλιακού δρόμου, αλλά και στην ανώτερη στρώση ξεχωριστά και τον υπολογισμό του ποσοστού πρόσληψης της ηλιακής απομόνωσης ημερησίως από τον ηλιακό δρόμο.

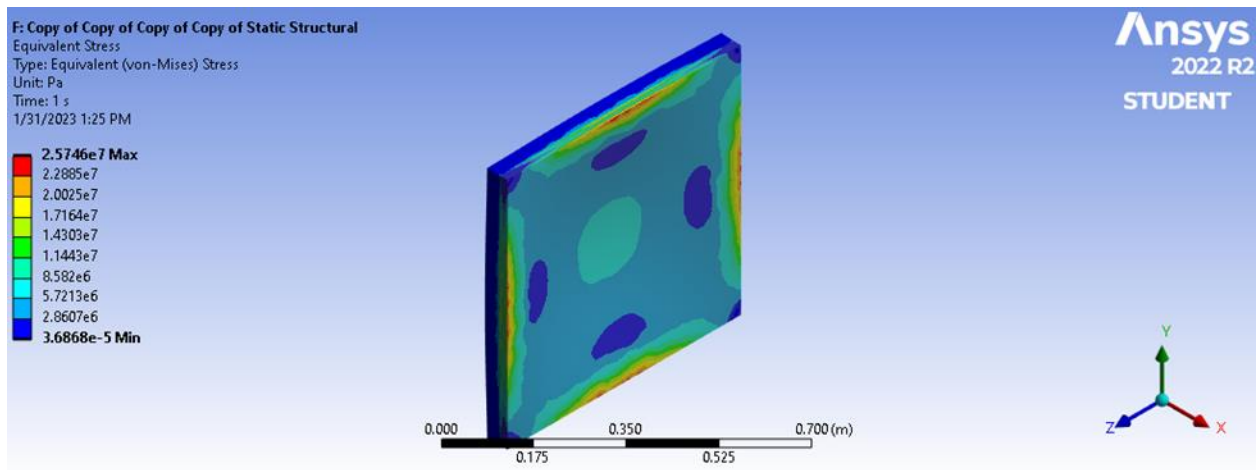


Εικόνα 30: FEM ανάλυση ηλιακού πλαισίου για θερμική ανάλυση

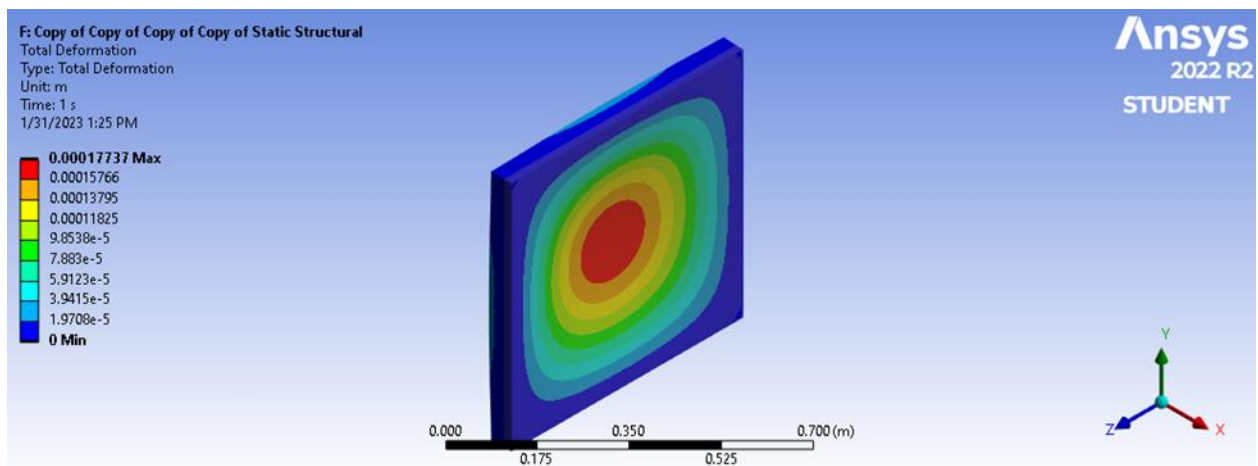
## 7.4 Αποτελέσματα

### 7.4.1 Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης

Αφού πραγματοποιήθηκε η στατική ανάλυση διεξάχθηκαν τα εξής αποτελέσματα σύμφωνα με τα φορτία του πίσω τροχού ενός τυπικού φορτηγού, που ασκούνται πάνω σε ηλιακούς συλλέκτες ενός έξυπνου δρόμου με πάχος ανώτερης στρώσης 20 mm. Τα αποτελέσματα απαρτίζονται από την ισοδύναμη πίεση, που ασκείται από τα φορτία και τις τιμές της συνολικής παραμόρφωσης στον ηλιακό συλλέκτη. Παρατηρούμε ότι ένας ηλιακός δρόμος με ανώτερη του στρώση το σκληρυμένο ύαλο με πάχος 20 mm αποτελεί περιεχόμενο εφαρμογής αν κινούνται πάνω σε αυτόν οχήματα μεγάλου βάρους, όπως φορτηγά, καθώς η συνολική πίεση που ασκείται από τους τροχούς του προσομοιωμένου φορτηγού παίρνει τιμές αρκετά μικρότερες (25.746 GPa) του μέτρου Young (72 GPa) του υλικού. Επιπρόσθετα, η συνολική παραμόρφωση του ηλιακού συλλέκτη συναντάται αρκετά μικρή, σχεδόν αμελητέα, με την τιμή των 0.177 mm.

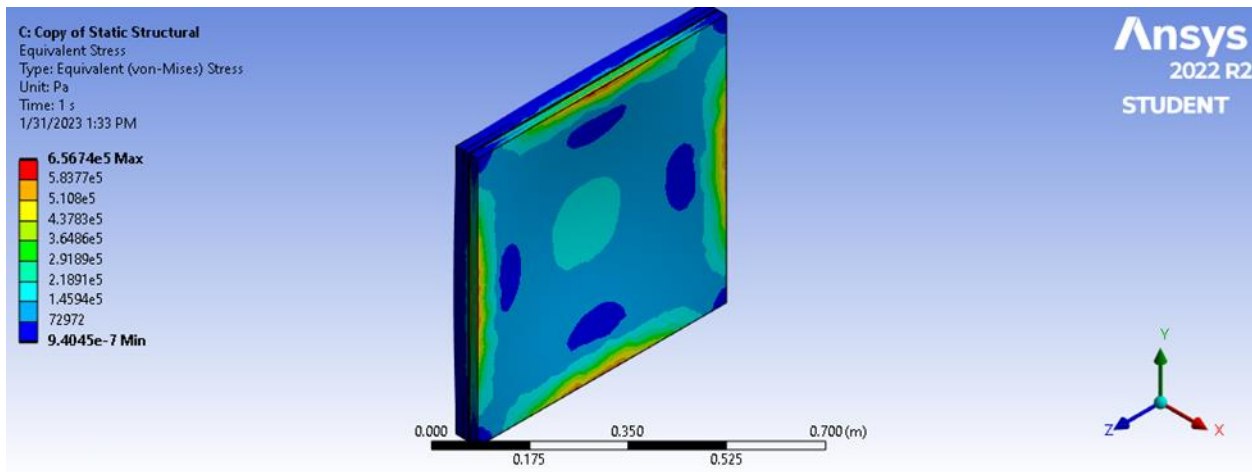


Εικόνα 31: Ισοδύναμη πίεση πλαισίου από τον πίσω τροχό του φορτηγού

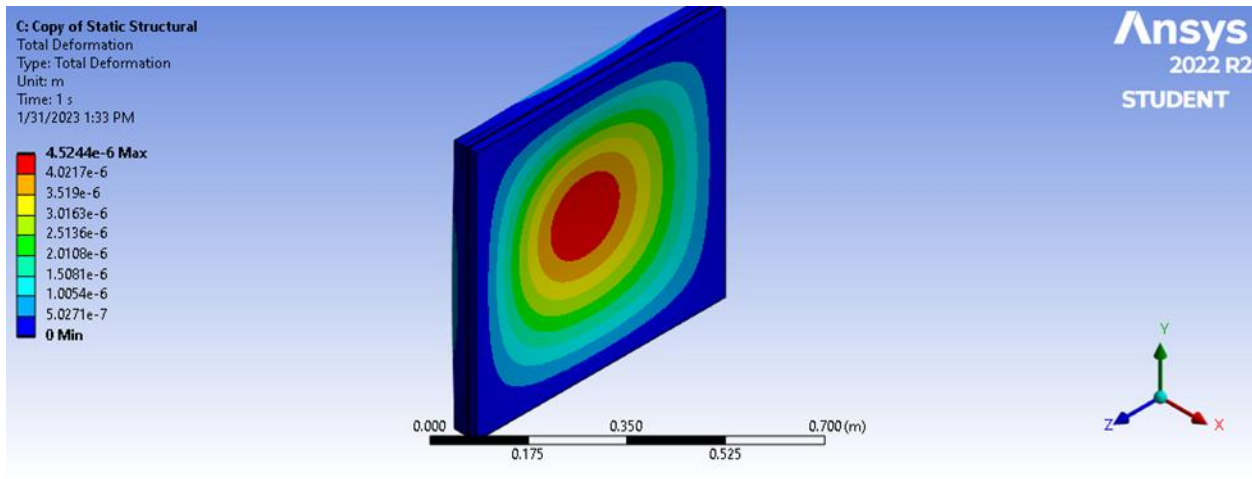


Εικόνα 32: Ολική παραμόρφωση πλαισίου από τον πίσω τροχό του φορτηγού

Τα φορτία του ενός εμπρόσθιου τροχού, ο οποίος είναι πιο ελαφρύς από τον πίσω ενός φορτηγού αναλύθηκε και αποφέρει τα παρακάτω αποτελέσματα σε υλικό ανώτερης στρώσης σκληρυσμένου γυαλιού με πάχος 20 mm. Παρατηρούμε ότι το προσομοιωμένο ηλιακό πάνελ με τα χαρακτηριστικά, που του δώσαμε καταφέρνει να αντέξει τα φορτία των τροχών ενός φορτηγού, όπως ήταν αναμενόμενο, αφού άντεξε και τα φορτία του πίσω τροχού, ο οποίος είναι πιο βαρύς. Η ισοδύναμη πίεση που ασκείται από τον τροχό έχει τιμή 0.65674 GPa, η οποία αποτελεί τιμή αρκετά μικρότερη των 72 GPa και η συνολική παραμόρφωση του είναι  $4.5244 \times 10^{-3}$  mm, που αποτελεί αμελητέα παραμόρφωση.



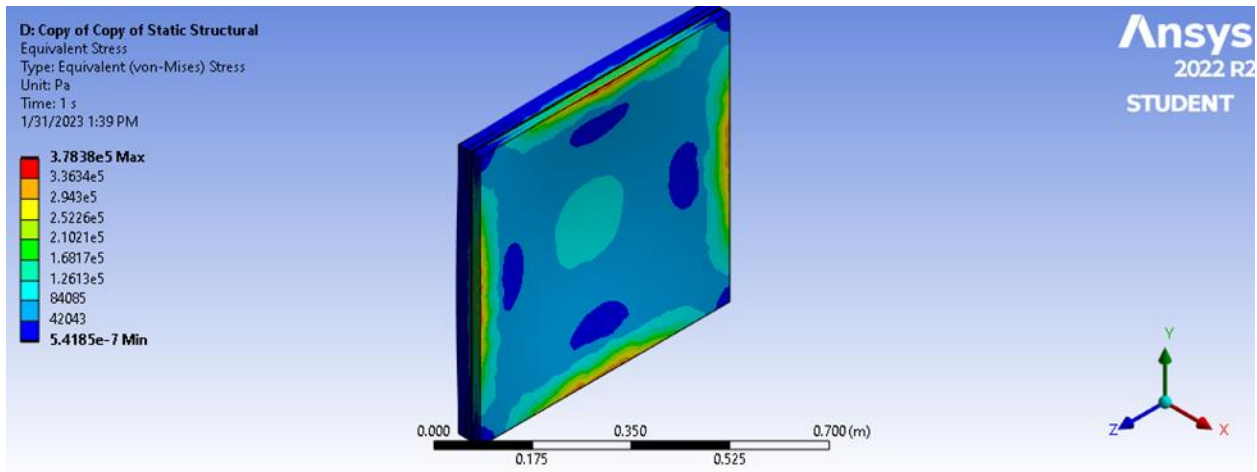
Εικόνα 33: Ισοδύναμη πίεση πλαισίου από τον εμπρόσθιο τροχό του φορτηγού



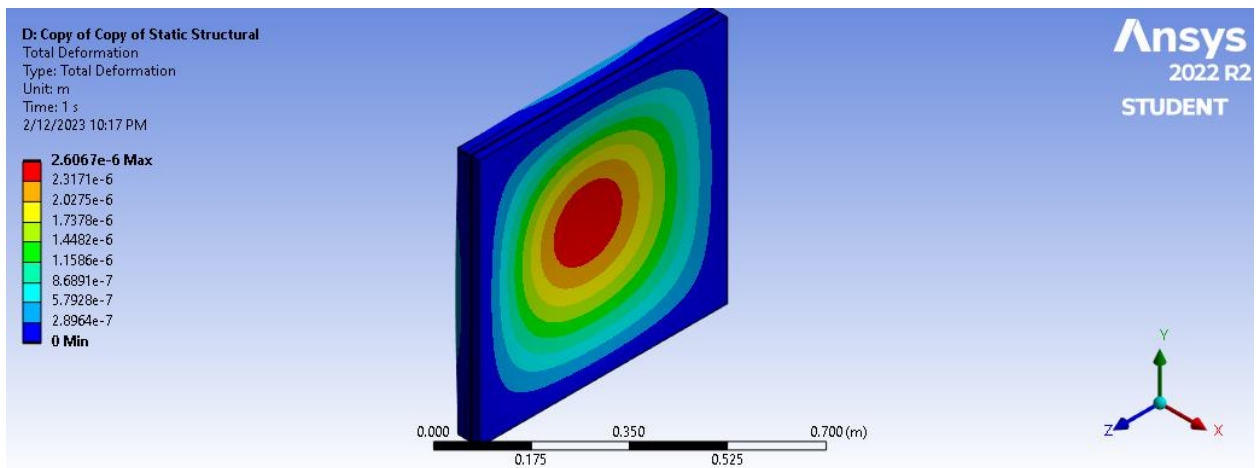
Εικόνα 34: Ολική παραμόρφωση πλαισίου από τον εμπρόσθιο τροχό του φορτηγού

Καθώς, ο ηλιακός δρόμος αντέχει το φορτίο του τροχού ενός φορτηγού κατ' επέκταση θα αντέχει και στην μικρότερη πίεση, η οποία ασκείται από τον τροχό ενός αυτοκινήτου. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα και από αυτή την ανάλυση, όπου η πίεση του τροχού είναι 1046 N. Η ισοδύναμη πίεση που ασκείται από τον τροχό έχει τιμή 0.37838 GPa, η οποία αποτελεί τιμή αρκετά μικρότερη των 72 GPa και η συνολική παραμόρφωση του είναι  $2.6067 \times 10^{-3}$  mm, που αποτελεί αμελητέα παραμόρφωση.





Εικόνα 35: Ισοδύναμη πίεση πλαισίου από τροχό αυτοκινήτου

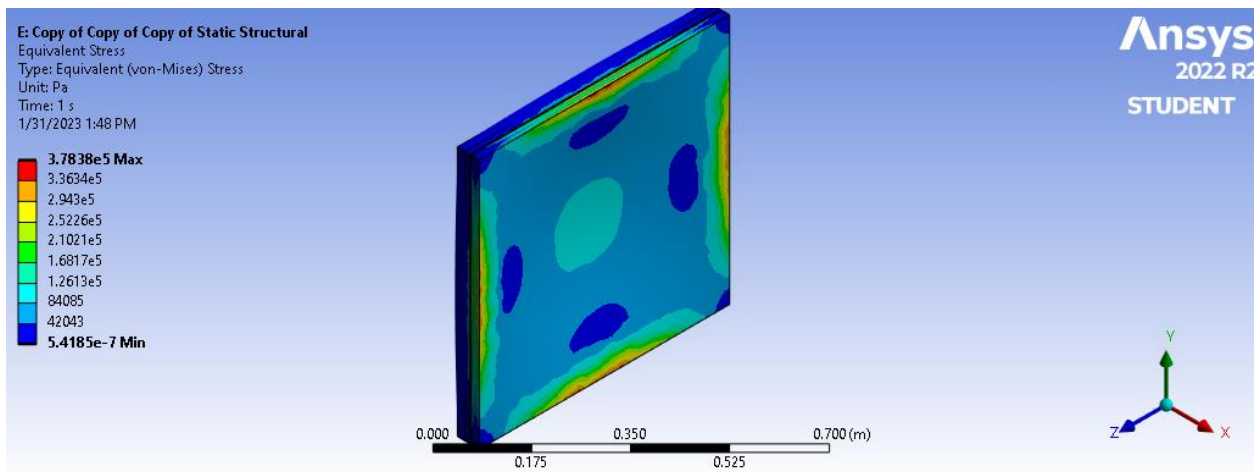


Εικόνα 36: Ολική παραμόρφωση πλαισίου από τροχό αυτοκινήτου

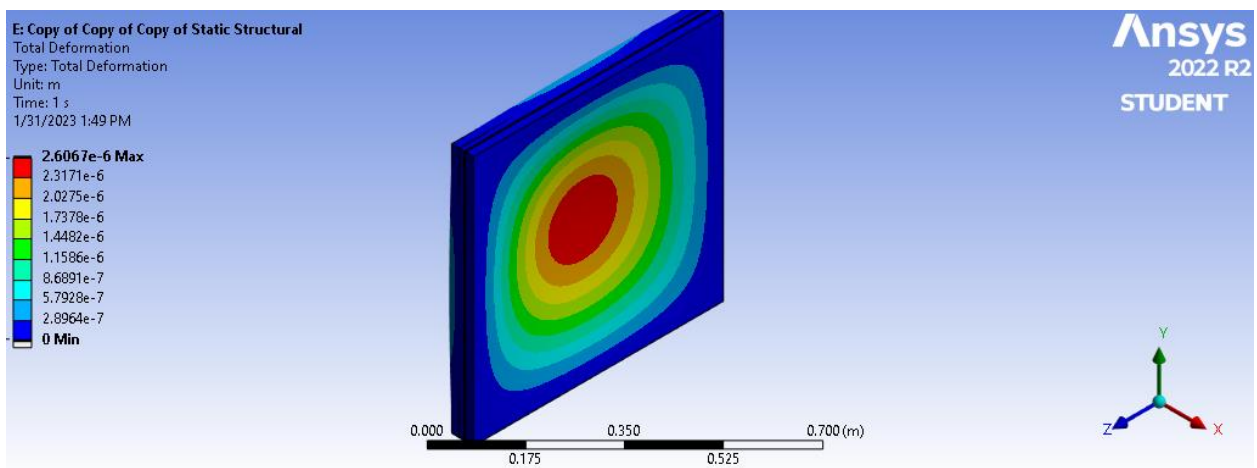
Στην περίπτωση της μοτοσυκλέτας διεξάχθηκαν αποτελέσματα δυναμικής ανάλυσης, που παρατηρούμε το μέτρο της πίεσης του τροχού της μοτοσυκλέτας σε διάφορα σημεία του ηλιακού συλλέκτη. Επιλέχθηκε να παρθούν 12 διαφορετικά σημεία για αυτή την ανάλυση, όπου σε τρεις περιπτώσεις παρατηρείται διπλάσια πίεση στον ηλιακό δρόμο λόγω του ότι βρίσκονται και οι δύο τροχοί πάνω στη στρώση.

Τα αποτελέσματα από τη δυναμική ανάλυση της μοτοσυκλέτας σε ηλιακό συλλέκτη με πάχος ανώτερης στρώσης 20 mm παρατίθενται παρακάτω. Παρατηρούμε ότι ο ηλιακός δρόμος με τα προκειμένα χαρακτηριστικά καταφέρνει να αντέξει και το φορτίο της μοτοσυκλέτας, όπως αναμέναμε, καθώς διεξάχθηκαν αποτελέσματα με τιμές ισοδύναμης πίεσης του τροχού του στον ηλιακό συλλέκτη ίσες με 0.037838 GPa και συνολικής παραμόρφωσης  $2.6067 \times 10^{-3}$  mm.





Εικόνα 37: Ισοδύναμη πίεση πλαισίου από μοτοσυκλέτα



Εικόνα 38: Ολική παραμόρφωση πλαισίου από μοτοσυκλέτα

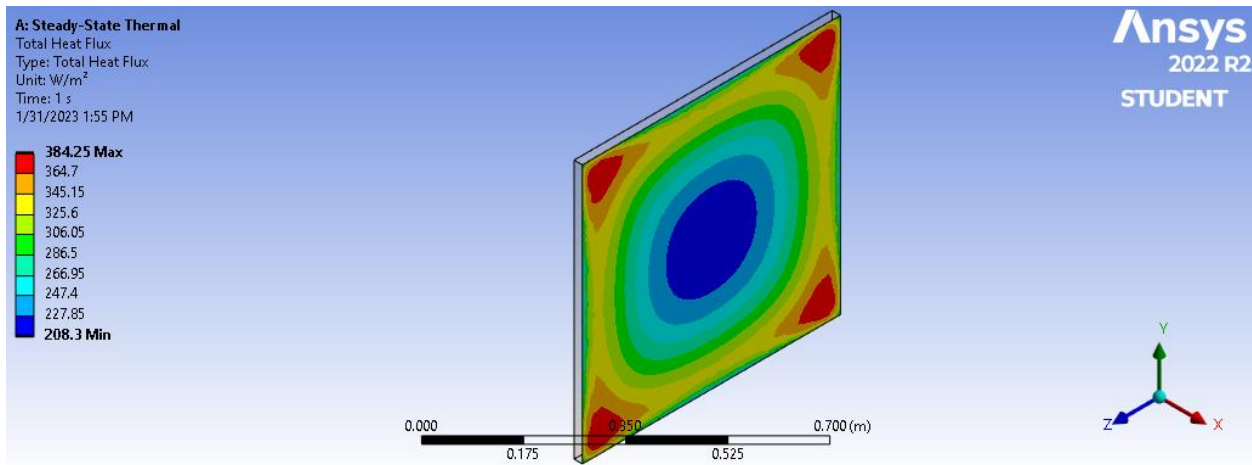
Πίνακας 9: Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης

Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης		
	Ισοδύναμη πίεση [GPa]	Συνολική παραμόρφωση [mm]
Φορηγό	25.746	0.177
Αυτοκίνητο	0.65674	$4.5244 \times 10^{-3}$
Μοτοσυκλέτα	0.037838	$2.6067 \times 10^{-3}$

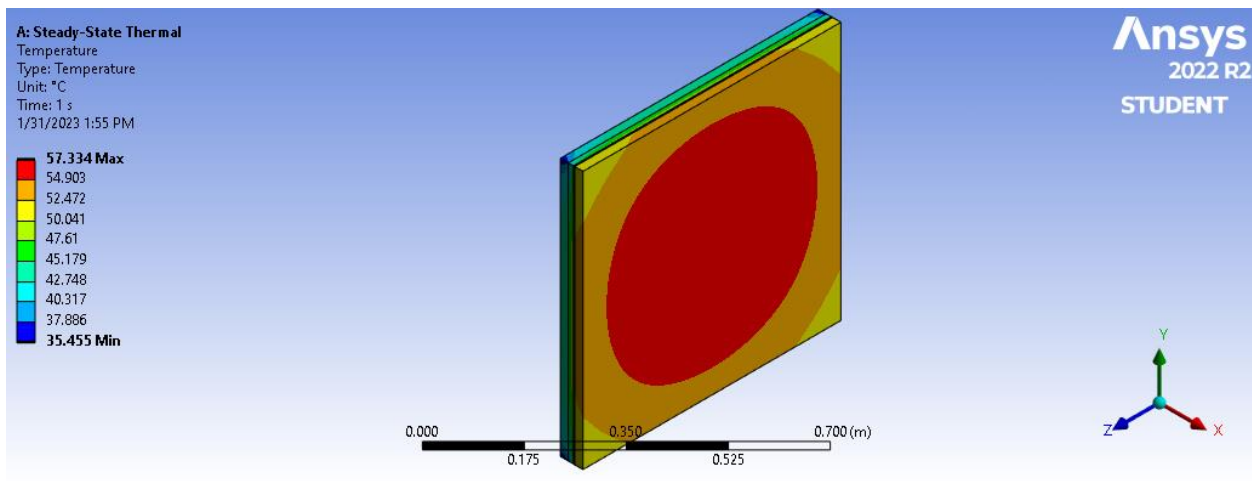
## 7.4.2 Αποτελέσματα θερμικής ανάλυσης

Παρακάτω περιγράφονται τα αποτελέσματα από τη θερμική ανάλυση σχετικά με τις τιμές της θερμοκρασίας σε °C στην ανώτερη στρώση του ηλιακού δρόμου. Με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε έχουμε και τη συνολική ροή θερμότητας στην ανώτερη στρώση του ηλιακού δρόμου πάχους 20 mm. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης με τα δεδομένα της περιοχής της Αττικής στην Ελλάδα σχετικά με τις τιμές της ηλιακής απομόνωσης.

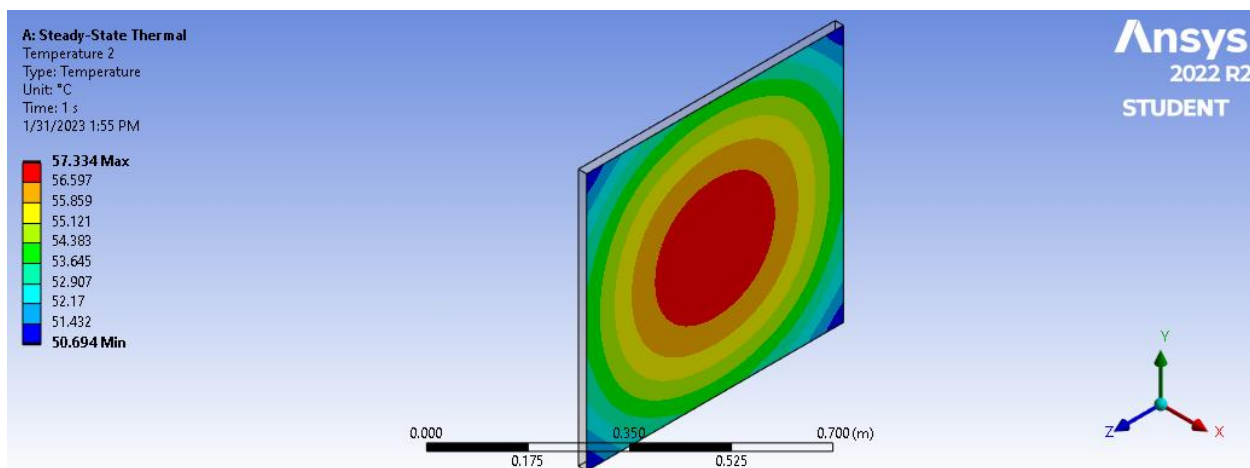
Η τιμή της θερμοκρασίας στην ανώτερη στρώση του ηλιακού συλλέκτη με πάχος 20 mm έχει μέγιστη τιμή 57.334°C και η μέση ροή θερμότητας στην ανώτερη στρώση είναι 208.33 W/m<sup>2</sup>, που αποτελεί το 100% της συνολικής ροής θερμότητας στην περιοχή της Αττικής (208.33 W/m<sup>2</sup>), κάτι που αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της ανώτερης στρώσης, που επιλέχθηκε.



Εικόνα 39: Ροή θερμότητας στην ανώτερη στρώση του πλαισίου



Εικόνα 40: Θερμοκρασία ηλιακού πλαισίου



Εικόνα 41: Θερμοκρασία στην ανώτερη στρώση του πλαισίου

Πίνακας 10: Αποτελέσματα θερμικής ανάλυσης

Αποτελέσματα θερμικής ανάλυσης	
Θερμοκρασία ανώτερης στρώσης [°C]	57.334
Θερμοκρασία πλαισίου [°c]	57.334
Ροή θερμότητας ανώτερης στρώσης [W·m <sup>2</sup> ]	208.33

## 7.5 Συμπεράσματα

Σε αυτή την ενότητα, όπως προαναφέρθηκε πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός του μοντέλου προσομοίωσης με κάποια ορισμένα χαρακτηριστικά και αναλύθηκε η θερμική του ικανότητα και η στατική του συμπεριφορά. Με βάση τα αποτελέσματα που διεξάχθηκαν στη στατική ανάλυση, συμπεραίνεται ότι το σκληρυσμένο γυαλί για κάλυψη της ανώτερης στρώσης του ηλιακού συλλέκτη αποτελεί μία αξιόλογη επιλογή για την περίπτωση των φορτίων όλων των οχημάτων, που συναντάμε σε έναν δημόσιο δρόμο. Αυτό συμπεραίνεται από τις τιμές της ισοδύναμης πίεσης και της συνολικής παραμόρφωσης, οι οποίες διεξάχθηκαν από την ανάλυση και χαρακτηρίζονται πολύ μικρότερες από την αντοχή του υλικού.

Η θερμική ανάλυση περιλάμβανε τα αποτελέσματα σχετικά με τις τιμές της θερμικής ροής στην ανώτερη στρώση του ηλιακού συλλέκτη και γενικά του δρόμου, αλλά και την τιμή της θερμοκρασίας στην ανώτερη στρώση και σε όλο το ηλιακό πλαίσιο. Με βάση τα αποτελέσματα διαπιστώνουμε ότι η επιλογή του σκληρυσμένου γυαλιού ως ανώτερη στρώση του ηλιακού πλαισίου αποτελεί 100% αποδοτική, καθώς απορροφάται σχεδόν όλο το ποσοστό της ημερήσιας ηλιακής απομόνωσης. Επιπρόσθετα, η θερμοκρασία στο ηλιακό πλαίσιο κυμαίνεται σε καλές τιμές σύμφωνα με τη βιβλιογραφία.

## Κεφάλαιο 8: Συζήτηση – Συμπεράσματα

Η εκτενής ανάλυση και η εμπειριστατωμένη μελέτη των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας καταλήγει σε κάποια καίρια και αξιόλογα συμπεράσματα, τα οποία αφορούν όλες τις πτυχές της εργασίας.

Η αναζήτηση, η συλλογή και ο σχολιασμός των χαρακτηριστικών του έξυπνου δρόμου μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι νέες τεχνολογίες, που αναπτύσσονται προς βελτίωση του βιοτικού επιπέδου των πόλεων και στη συγκεκριμένη περίπτωση των δρόμων, αποτελεί περιεχόμενο προς συνεχή εξέλιξη.

Η τεχνολογία του Έξυπνου Δρόμου απαρτίζεται από διάφορες εφαρμογές με κοινό τους χαρακτηριστικό την εξοικονόμηση ενέργειας με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ήλιος, άνεμος, κ.λπ.), κάτι το οποίο αποφέρει πολλά οφέλη στην οικονομία των χωρών. Με βάση τις πληροφορίες, που συλλέχθηκαν για την κάθε εφαρμογή έξυπνου δρόμου σχετικά με τα προτερήματα και μειονεκτήματα της καθεμίας ξεχωριστά καταλήξαμε στο συμπέρασμα, ότι η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μία πιο αποτελεσματική λύση γενικά και ειδικά για την Ελλάδα και για αυτό διερευνάται η χρήση των ηλιακών συστημάτων στην παρούσα εργασία.

Οι τεχνολογίες του ηλιακού δρόμου συναρτώνται από το Internet of Things (IoT), καθώς ο στόχος της διασφάλισης ασφάλειας μέσω του βέλτιστου οδο φωτισμού και άλλων τεχνασμάτων επιτυγχάνεται μέσω της σωστής διαχείρισης των εφαρμογών με τη χρήση του internet. Με τη λανθασμένη διαχείριση της τεχνολογίας υπάρχει επικινδυνότητα για αρνητικές επιπτώσεις στην κυκλοφορία στους ηλιακούς δρόμους, δηλαδή την αύξηση ατυχημάτων.

Αξίζει να σημειωθούν, τα παραδείγματα εφαρμογής της τεχνολογίας σε διάφορες περιοχές ανά τον κόσμο, είτε με τη χρήση μόνο ηλιακών συλλεκτών ή LED οδο φωτισμού είτε με τη χρήση συνδυασμών τους, τα οποία αξιολογήθηκαν και αποτελεσματικά, αλλά και μη επαρκή.

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε σχετικά με την αντικατάσταση των συμβατικών δρόμων με ηλιακούς μας οδήγησε στα συμπεράσματα ότι αποτελεί μία αξιόλογη μελέτη περίπτωσης, αφού οι τιμές της ηλιακής απομόνωσης και του δυναμικού φωτοβολταϊκής ισχύος στην Ελλάδα παρατηρούνται πολύ υψηλές σε όλα τα γεωγραφικά διαμερίσματα, που μας ενδιαφέρουν.

Η αξιολόγηση και λεπτομερή ανάλυση των διαφόρων υλικών στο εμπόριο για τη χρήση τους στα ηλιακά πλαίσια κρίθηκε απαραίτητη. Πολλές παράμετροι έπαιξαν ρόλο στην τελική επιλογή των υλικών, όπως οι θερμικές και στατικές τους ιδιότητες.

Η εφαρμογή της προσομοίωσης του ηλιακού δρόμου ανέδειξε πλήθος αξιόλογων αποτελεσμάτων, τα οποία οδηγούν σε χρήσιμα συμπεράσματα, σχετικά με την αποτελεσματικότητα, εγκυρότητα και αξιοπιστία της. Οι παρόμοιες ερευνητικές εργασίες και η αξιολόγηση τους υπήρξαν ιδιαίτερα σημαντικά για τα τελικά συμπεράσματα της έρευνας μας.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα, όπου σημειώθηκε απόκλιση αποτέλεσαν τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης, καθώς φαίνεται στην περίπτωση του ηλιακού δρόμου, που σχεδιάστηκε από εμάς με τα ίδια υλικά, να έχει μικρότερη ισοδύναμη πίεση και παραμόρφωση. Γενικά, παρουσιάζονται κάποιες αποκλίσεις στις τιμές της ισοδύναμης πίεσης και της ολικής παραμόρφωσης, κάτι που οφείλεται στη δημιουργία και ανάλυση μοντέλων από διαφορετικά

προγράμματα και από την έλλειψη στοιχειωδών δεδομένων ανάλυσης από τις άλλες εργασίες (παράμετροι ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία, διαστάσεις οχημάτων).

Στην περίπτωση της θερμικής ανάλυσης οδηγηθήκαμε σε αρκετά θετικά συμπεράσματα, αφού το ποσοστό, που επιτυγχάνεται με την εφαρμογή του προκειμένου ηλιακού συλλέκτη στους δρόμους αποτελούσε στόχο μας και επιτεύχθηκε απόλυτα.

Το επόμενο βήμα ήταν να αξιολογηθεί σύμφωνα με άλλες έρευνες η αποδοτικότητα του ηλιακού πλαισίου σε κατάσταση ακραίων καιρικών συνθηκών. Το συμπέρασμα είναι ότι επηρεάζεται η απόδοση από όλες τις πλευρές, αλλά σε μικρό βαθμό.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα πως χαρακτηρίζονται από ικανοποιητική αποτελεσματικότητα με στοιχεία προς βελτίωση. Επίσης, Θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν παραπάνω έρευνες αξιοποιώντας το συγκεκριμένο ερευνητικό πλαίσιο.

Προτάσεις για μελλοντική επέκταση της έρευνας:

- Η ανάλυση των ηλιακών συστημάτων και σε καταστάσεις ακραίων καιρικών συνθηκών (καταιγίδες, παγετός)
- Ο υπολογισμός της επίδρασης της σκίασης του πλαισίου από κτίρια, τον γενικό περιβάλλοντα χώρο αλλά και οχήματα στην θερμική του απόδοση
- Η επίδραση της ημερήσιας υγρασίας στην πρόσφυση των ηλιακών δρόμων
- Η ιδανικότερη λύση του ηλιακού δρόμου και από την πλευρά του κόστους.

Οι προκλήσεις εφαρμογής μίας τέτοιας έρευνας συντίθενται από το σωστό καθορισμό της διάρκειας ζωής και συντήρησης ενός τέτοιου ηλιακού πλαισίου, την εφαρμογή των ιδανικότερων υλικών για στατική και θερμική επάρκεια, αλλά ταυτοχρόνως και τον υπολογισμό ενός εφικτού κόστους κατασκευής του.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

### Ξενόγλωσσες:

AASHTO. (1993). AASHTO guide for design of pavement structures. (). Washington, DC: AASHTO.

ACI. (2013). Matweb material property data. Retrieved December 13, 2022, from <http://www.matweb.com/index.aspx>

Aggrawal N., Mehta A., Tiwari A.. (2015). Retrieved 05 November, 2022, from mehta.pdf

Albino V., Berardi U. & Dangelico R. (2015). Retrieved 05 November, 2022, from Leit 01 - ALBINO, BERARDI, DANGELICO (2015) Smart Cities Definitions Dimensions Performance and Initiatives.pdf

Alsop, D. J. A., & Saunders, R. J. (1999). Structural use of glass in buildings. London: Institute of Structural Engineers.

Ansys. (2007). Wikipedia. Retrieved 05 November, 2022, from <https://en.wikipedia.org/wiki/Ansys>

Ansys Mechanical. (n.d.). Ansys. Retrieved 05 November, 2022, from <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-mechanical>

Ansys Workbench. (n.d.). Ansys. Retrieved 05 November, 2022, from <https://www.ozeninc.com/ansys-workbench/>

ARA. (2011). Methodology for the development of equivalent pavement structural design matrix for municipal roadways. ( No. 000830). Toronto, Ontario: RMCAO.

ASCE. (2013). Orthotropic bridge. Retrieved December, 5, 2022, from <http://www.orthotropicbridge.org/>

Ashaolu T. (2021). Smart cities. Retrieved 02 July, 2022, from (PDF) Smart Cities (researchgate.net)

DOI: 10.51542/ijscia.v2i5.18

Bergamin, L., & Sammarae, T. (2010). Waved glass: Towards optimal light distribution on solar cell surfaces for high efficient modules.

Beyond Technology. (n.d.). Retrieved 4 November, 2022, from [https://www.planning.org.nz/Attachment?Action=Download&Attachment\\_id=3288](https://www.planning.org.nz/Attachment?Action=Download&Attachment_id=3288)

Bijsterveld, W. T. e. a. (2001). Using pavement as solar collector: Effect on pavement temperature and structural response. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1778, 140

Cano J., Martinez F., Sanguesa J., Toh C. (2019). Retrieved 3 November, 2022, from <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.2019.0439>

Chopra A. & Kumar A. (2021). Descriptive ... architectures. Retrieved 08 June, 2022, from [DESCRIPTIVEANALYSISOFVARIOUSSMARTROADARCHITECTURES.pdf](#)

Chung, K., Chang, K., & Liu, Y. (2008). Reduction of wind uplift of a solar collector model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(8), 1294-1306.

Coutu R. et al. (2020). Engineering tests... and highways. Retrieved 20 October, 2022, from [technologies-08-00009-v2 \(2\).pdf](#)

Davis A. (2020). Highway turbines...passing cars. Retrieved 23 October, 2022, from <https://highways.today/2020/04/09/highway-wind-turbines/>

“Electric road.” (2018). Wikipedia. Retrieved 10 October, 2022, from [https://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_road](https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_road)

El Amrani, A., Mahrane, A., Moussa, F., & Boukennous, Y. (2007). Solar module fabrication. *International Journal of Photoenergy*, 2007

Global Solar Atlas. (n.d.). Retrieved 16 October, 2022, from [https://globalsolaratlas.info/map?r=GRC:GRC.3\\_1&c=37.094622,23.499756,7](https://globalsolaratlas.info/map?r=GRC:GRC.3_1&c=37.094622,23.499756,7)

Glow in the dark road unveiled in the Netherlands. (14 April, 2014). Retrieved 21 October, 2022, from <https://www.bbc.com/news/technology-27021291>

Glow in the dark road unveiled in the Netherlands. (14 April, 2014). Retrieved 21 October, 2022, from <https://www.bbc.com/news/technology-27021291>

History of Road Transport. (n.d.). Retrieved 10 March, 2022, from [https://www.wikiwand.com/en/History\\_of\\_road\\_transport](https://www.wikiwand.com/en/History_of_road_transport)

“How weather resistant are solar panels. (2019). Solar Power Genie. Retrieved 03 October, 2022, from <https://solarpowergenie.com/how-weather-resistant-are-solar-panels/>

Hsieh, H. H., Lin, F. M., & Yu, S. P. (2011). Performance of low series-resistance interconnections on the polycrystalline solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(1), 39-44.

Jajan M. et al. (2016). Insitu... from smart roads. Retrieved 20 October, 2022, from [insitu-intelligent-power-generation-from-smart-roads-IJERTCONV4IS17011.pdf](#)

Jones B. (2018). Measuring externalities... LED streetlights. Retrieved 20 October, 2022, from [1-s2.0-S0928765517301252-main.pdf](#)

Kalyani V., Joshi S. & Choudhary V. (2015). Smart highway... green energy. Retrieved 10 October, 2022 [JMEITDEC0206002.pdf](#)

Kant K. et al. (2020). A study report... in future time. Retrieved 10 October, 2022, from [IJEAS0706002.pdf](#)

Kaur J. & Vichnoi A. (2016). A review of piezoelectric smart road sensor. Retrieved 08 October, 2022, from [11-259-146562014186-88.pdf](#)

Kulkarni A. (2013). Retrieved 10 October, 2022, from [https://www.ijera.com/papers/Vol3\\_issue3/IJ3314291436.pdf](https://www.ijera.com/papers/Vol3_issue3/IJ3314291436.pdf)

- Kumar P. (2013). Piezo-smart roads. Retrieved 10 October, 2022, from 10.1.1.379.1786.pdf
- Luque, A., & Hegedus, S. (2003). Handbook of photovoltaic science and engineering. Chichester: Wiley.
- Malave S. & Bhosale S. (2013). Highway wind turbine (quite revolution turbine). Retrieved 22 October, 2022, from ijertv6n6spl\_10.pdf
- McDonald F. (2015). Retrieved 20 November, 2022, from <https://www.sciencealert.com/solar-roads-in-the-netherlands-are-working-even-better-than-expected>
- Modijefsky M. (2018). Retrieved 21 October, 2022, from <https://www.eltis.org/discover/news/electric-roads-innovative-pilot-projects-launched-sweden-and-netherlands>
- Mohanty S., Choppali U. & Kougianos E. (n.d.). Everything you wanted to know about smart cities. Retrieved 05 May, 2022, from Mohanty\_IEEE-CEM\_2016-July\_Smart-Cities.pdf
- Northmore A. (2014). Canadian solar road... analysis. Retrieved 10 October, 2022, from 144147213.pdf
- Northmore, A., & Tighe, S. (2012a). Developing innovative roads using solar technologies. CSCE 9th International Transportatoin Specialty Conference, Edmonton.
- Northmore, A., & Tighe, S. (2012b). Innovative pavement design: Are solar roads feasible? 2012 Conference of the Transportation Association of Canada, Fredericton.
- Panjwani M. (2014). Effect of... photovoltaic. Retrieved 22 October, 2022, from Humidity.pdf
- Pawar M., et. al. (2018). Retrieved 02 November, 2022, from 91901\_66428228.pdf
- Pena E. (2015). Smart roads: A vision. Retrieved 03 October, 2022, from STA\_DP\_1\_2015\_Def.pdf
- “Plastic road.” (2021). Wikipedia. Retrieved 03 September, 2022, from [https://en.wikipedia.org/wiki/Plastic\\_road](https://en.wikipedia.org/wiki/Plastic_road)
- Pompigna A. & Mauro R. (2021). Smart roads... in the smart age. Retrieved 03 June, 2022, from 1-s2.0-S2215098621000872-main.pdf
- Rathod K., et. al. (2019). Retrieved 23 October, 2022, from <https://www.irjet.net/archives/V6/i4/IRJET-V6I4810.pdf>
- Renoald J., et. al. (2016). Retrieved 03 November, 2022, from <http://large.stanford.edu/courses/2017/ph240/cook2/docs/mehta.pdf>
- Robinson, M. C. (2005). Landing mat development at WES. In B. M. Fowle (Ed.), Builders and fighters (pp. 195-206) University Press of the Pacific.
- Rodriguez D. (2019). Revision of Smart Street Lighting LED. Retrieved 17 September, 2022, from [https://www.researchgate.net/publication/335451835\\_Revision\\_of\\_Smart\\_Street\\_Lighting\\_LED](https://www.researchgate.net/publication/335451835_Revision_of_Smart_Street_Lighting_LED) doi: 10.16925/2357-6014.2019.02.09



Road Construction: History and Current Methods. (20 December, 2009). Retrieved 20 October, 2022 from <https://www.brightengineering.com/structural-engineering/59665-road-construction-history-and-procedure/>

Sanguesa J. & Martinez F. (2020). Advances in smart roads for future smart cities. Retrieved 10 October, 2022, from (PDF) Advances in smart roads for future smart cities (researchgate.net)

DOI: 10.1098/rspa.2019.0439

Sebastian G. et al. (2017). Smart highways... mobility. Retrieved 03 October, 2022, from 91901\_66428228.pdf

Selvaraju R. (2012). Characterization of... Investigations. Retrieved 20 October, 2022, from 61634461.pdf

Shadare A. & Dada E. (2016). Smart cities. Retrieved 05 July, 2022, from (PDF) Smart Cities (researchgate.net)

Shadare A. & Musa S. (2017). Smart transportation: A primer. Retrieved 05 July, 2022, from (PDF) Smart Transportation: A Primer (researchgate.net)

DOI:10.23956/ijarcsse/V7I3/01312

Streets and Roads. (n.d.). Retrieved 20 October, 2022, from <https://worldhistory.weebly.com/streets-and-roads.html>

Solar Roadways. (2013). Solar roadways - A real solution. Retrieved 13 December, 2022, from <http://solarroadways.com/main.html>

Södertälje (2019). How electric roads work. Retrieved 03 October, 2022, from [https://www.volkswagen.com/en/news/2019/05/scania\\_e\\_roads.html](https://www.volkswagen.com/en/news/2019/05/scania_e_roads.html)

Sun L. et al. (2019). The smart road: Practice and concept. Retrieved 03 October, 2022, from TheSmartRoad-PracticeandConcept.pdf

The dutch....expanding. (3 July, 2017). Retrieved 20 November, 2022, from <https://www.iamgreek.nl/technology/2017/07/03/the-dutch-solar-bike-path-solaroad-works-successfully-and-expanding/>

The Netherlands introduces SolaRoad paving. (13 March, 2019). Retrieved 22 November, 2022, from <https://www.offgridenergyindependence.com/articles/16755/the-netherlands-introduces-solaroad-paving>

TNO. (2013). SolaRoad combines road and solar cells. Retrieved 13 December, 2022, from [http://www.tno.nl/content.cfm?context=thema&content=inno\\_case&laag1=895&laag2=912&item\\_id=1234](http://www.tno.nl/content.cfm?context=thema&content=inno_case&laag1=895&laag2=912&item_id=1234)

“Virginia Smart Road”. (n.d.). Retrieved 03 October, 2022, from Home | Virginia Tech Transportation Institute (vt.edu)

## Ελληνόγλωσσες:

Βογιατζής Ν. & Κολοκοτρώνης Δ. (2017). Συλλογή... Δήμους της Ελλάδας. Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Σχολή Θετικών Επιστημών. Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών & Επικοινωνιακών Συστημάτων. Ανακτήθηκε 05 Μαΐου, 2022 από Διπλωματική Έξυπνες Πόλεις\_Βογιατζής\_Κολοκοτρώνης\_2017.pdf

Θεοδώρου Γ. (2012). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Πολυτεχνική Σχολή. Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας και Ανάπτυξης. Ανακτήθηκε 10 Μαΐου, 2022, από THEODOROUee.pdf

Μυλωνάκης Ι. (2018). «Έξυπνες οδοί...στην Ελλάδα.». Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών. Διαχείριση Τεχνικών Έργων. Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας. Ανακτήθηκε 25 Απριλίου, 2022, από SMART ROADS ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΔΧΤ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΜΥΛΩΝΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ AM102817 (5).pdf