



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

**Πτυχιακή Εργασία**

**ΕΞΥΠΙΝΟΙ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΙ**

**ΙΩΑΝΝΑ ΖΑΧΟΥ**

Αριθμός μητρώου: 7078

**ΝΑΥΣΙΚΑ ΘΕΟΥ**

Αριθμός μητρώου: 7083

Επιβλέπουσα:

**Δρ. ΝΙΚΗ ΜΠΕΣΚΟΥ**

Πάτρα, 2021

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο θα επιθυμούσαμε να εκφράσουμε τις θερμές μας ευχαριστίες σε όλους όσοι συνέβαλαν στην διεκπεραίωση της πτυχιακής μας εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες, οφείλουμε στην επιβλέπουσα της εργασίας, Δρ. Νίκη Μπέσκου για την καθοδήγηση, την εμπιστοσύνη και τις καίριες συμβουλές, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Θα θέλαμε, ακόμη, να ευχαριστήσουμε και τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τη Δρ. Ειρήνη Βγενοπούλου και τη Δρ. Χριστίνα Ρωμανού για τον χρόνο που διέθεσαν για την αξιολόγηση της εργασίας μας. Τέλος, θα επιθυμούσαμε να εκφράσουμε την ευγνωμοσύνη μας προς τα πρόσωπα της οικογένειας και του φιλικού μας περιβάλλοντος για τη συμπαράσταση που μας πρόσφεραν, ωστόσο ολοκληρωθεί η εργασία μας.

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κατάλογος Πινάκων .....	5
Κατάλογος Εικόνων .....	6
Περίληψη .....	7
Abstract .....	8
Εισαγωγή.....	9
Α' Μέρος – Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	11
1.1 Η εξέλιξη των οδών σύμφωνα με τις ανθρώπινες ανάγκες .....	11
1.1.1 Το αρχαίο οδικό δίκτυο της Αμερικής.....	11
1.1.2. “All roads lead to Rome” .....	13
1.1.3. Το οδικό δίκτυο στην αρχαία Ελλάδα .....	16
1.1.4. Plank Roads .....	17
1.1.5. Grand Trunk Road .....	18
1.1.6. Σπουδαίοι μηχανικοί.....	19
1.2. Σύγχρονα Οδοστρώματα.....	21
1.2.1. Ορισμοί οδοστρώματος.....	21
1.2.2. Κατηγορίες οδοστρωμάτων .....	22
1.2.3. Σύνθεση οδοστρώματος.....	23
2. Τεχνολογία Έξυπνου Αυτοκινητόδρομου .....	25
2.1. Ορισμός έξυπνου αυτοκινητόδρομου - Σκοπός προσέγγισης.....	25
2.2. Συστατικά πλαίσια ανάπτυξης εφαρμογής .....	27
2.2.1 Τεχνολογίες “Έξυπνου Αυτοκινητόδρομου” .....	27
2.2.2 Έξυπνος Αυτοκινητόδρομος και Πράσινη Ενέργεια .....	34
2.3 Internet of Things (IoT) και Smart Highways .....	41
2.3.1. Μοντέλο Αναφοράς του IoT .....	43
2.4 Σύστημα οδοφωτισμού έξυπνων LED .....	45
2.4.1. Έξυπνος Οδοφωτισμός και Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας .....	46
2.4.2. Ενεργειακή Απόδοση .....	47

2.4.2.1. Ενεργειακή Αποδοτικότητα .....	48
2.4.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συστημάτων φωτισμού των έξυπνων LED .....	49
2.5. Οφέλη των εφαρμογών .....	49
2.6 Αρνητική Πλευρά .....	54
2.7 Παραδείγματα εφαρμογής της τεχνολογίας.....	56
2.7.1. Ολλανδία.....	56
2.7.2. Ινδία .....	58
2.7.3. Κίνα.....	58
2.7.4 Γαλλία .....	59
2.7.5 Και άλλες εφαρμογές μικρότερης κλίμακας.....	59
3. Μεθοδολογία της έρευνας.....	61
3.1. Ερευνητικά Ερωτήματα .....	61
3.2. Στόχοι της Έρευνας.....	61
3.3. Στάδια της Έρευνας .....	62
3.3.1 Στάδιο 1ο.....	62
3.3.2 Στάδιο 2ο.....	62
3.3.3 Στάδιο 3ο.....	62
3.3.4 Στάδιο 4ο.....	62
3.3.5. Στάδιο 5 <sup>ο</sup> .....	63
3.3.6. Στάδιο 6 <sup>ο</sup> .....	64
3.2.8. Στάδιο 8ο.....	67
3.2.9. Στάδιο 9 <sup>ο</sup> .....	67
3.2.10. Στάδιο 10 <sup>ο</sup> .....	67
4. Β' Μερως – Έρευνα .....	68
4.1. Αντικατάσταση συμβατικών αυτοκινητόδρομων με ηλιακούς και υπολογισμός παραγόμενης ενέργειας .....	68
4.1.1 Μήκη Αυτοκινητόδρομων .....	68
4.1.3. Συνολική Παραγόμενη Ενέργεια .....	75
4.1.4. Επιλογή Υλικού Ηλιακού Συλλέκτη.....	75

4.1.5. Συμπεράσματα .....	78
4.2 Αποτελέσματα Ανάλυσης μέσω του προγράμματος ANSYS .....	78
4.2.1. Μοντέλο θερμικής και στατικής ανάλυσης για Ansys .....	78
4.2.2. Θερμική και στατική ανάλυση ηλιακού αυτοκινητόδρομου μέσω Ansys.....	79
4.2.3. Αποτελέσματα Αναλύσεων μέσω Ansys .....	80
4.2.3.1. Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης.....	80
4.2.3. Συμπεράσματα Ανάλυσης.....	89
4.3.1 Υπολογισμός Κόστους 1 km Ασφαλτοστρωμένου Αυτοκινητόδρομου.....	90
4.3.2 Υπολογισμός Κόστους 1km Ηλιακού Αυτοκινητόδρομου.....	91
4.3.3. Συμπεράσματα .....	92
5. Σύζητηση - συμπερασματα .....	93
6. Βιβλιογραφικές Αναφορές:.....	96
Ξενόγλωσση.....	96
Ελληνική: .....	101

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Table 1. Σύγκριση των χαρακτηριστικών των φωτιστικών που χρησιμοποιούνται στον δημόσιο φωτισμό.....	47
Table 2. Τα υλικά και οι ιδιότητες τους.....	66
Table 3. Μήκη αυτοκινητόδρομων και διαδρομές στην Ελλάδα .....	68
Table 4. Μήκη αυτοκινητόδρομων και διαδρομές ανά περιοχή.....	71
Table 5. Τιμές ημερήσιας ηλιακής απομόνωσης ανά περιοχή στην Ελλάδα.....	72
Table 6. Τιμές δυναμικού ημερήσιας φωτοβολταϊκής ισχύος ανά περιοχή στην Ελλάδα .....	74
Table 7. Υπολογισμένη συνολική παραγόμενη ενέργεια .....	75
Table 8. Χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων ηλιακών συλλεκτών .....	76
Table 9. Χαρακτηριστικά SunPower E20.....	77
Table 10. Χαρακτηριστικά υλικών του προσομοιωμένου ηλιακού συλλέκτη .....	78
Table 11. Αποτελέσματα Στατικής Ανάλυσης με διαφορετικά πάχη.....	87
Table 12. Αποτελέσματα Θερμικής Ανάλυσης.....	89
Table 13. Μέσο κόστος ασφαλτοστρωμένου αυτοκινητόδρομου ανά m <sup>2</sup> .....	90
Table 14. Μέσο κόστος 1 km ασφαλτοστρωμένου αυτοκινητόδρομου .....	91
Table 15. Κόστος 1 λωρίδας ηλιακού αυτοκινητόδρομου.....	91
Table 16. Κόστος 1 km ηλιακού αυτοκινητόδρομου.....	92

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Το οδικό δίκτυο των Μάγια (sacbeh) .....	12
Εικόνα 2. Οδοστρωσία αρχαίων ρωμαϊκών δρόμων .....	14
Εικόνα 3. Αρχαίο ρωμαϊκό οδικό δίκτυο .....	16
Εικόνα 4. Τύποι οδοστρωμάτων του 20ου αιώνα .....	21
Εικόνα 5. Τύποι οδοστρωμάτων .....	23
Εικόνα 6. Το κλειδί της επιτυχίας του έξυπνου δρόμου .....	27
Εικόνα 7. Τεχνολογίες Έξυπνου Αυτοκινητόδρομου .....	27
Εικόνα 8. Τεχνολογία "Glow in the dark lines" .....	29
Εικόνα 9. Τεχνολογία "Electric priority lane" .....	30
Εικόνα 10. Τεχνολογία "Wind lights" .....	31
Εικόνα 11. Τεχνολογία "Dynamic paints" .....	32
Εικόνα 12. Τεχνολογία του "Interactive light" .....	33
Εικόνα 13. Ηλιακοί συλλέκτες για αυτοκινητόδρομους .....	35
Εικόνα 14. Στρώσεις τυπικού ηλιακού συλλέκτη .....	36
Εικόνα 15. Λειτουργία ανεμογενήτριας .....	41
Εικόνα 16. Ηλιακή απομόνωση στην Ελλάδα .....	73
Εικόνα 17. Δυνατότητα φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα .....	74
Εικόνα 18. Μοντέλο ηλιακού αυτοκινητόδρομου .....	79
Εικόνα 19. Μοντέλο μετά την ανάλυση .....	80
Εικόνα 20. Ισοδύναμη πίεση φορτίων πίσω τροχών φορτηγού .....	81
Εικόνα 21. Συνολική παραμόρφωση από τα φορτία των πίσω τροχών φορτηγού .....	81
Εικόνα 22. Ισοδύναμη πίεση των φορτίων των τροχών αυτοκινήτου .....	82
Εικόνα 23. Συνολική παραμόρφωση από τα φορτία των τροχών αυτοκινήτου .....	82
Εικόνα 24. Ισοδύναμη πίεση των φορτίων των τροχών μοτοσυκλέτας .....	83
Εικόνα 25. Συνολική παραμόρφωση από τα φορτία των τροχών μοτοσυκλέτας .....	83
Εικόνα 26. Ισοδύναμη πίεση φορτίων πίσω τροχών φορτηγού σε πάχος .....	84
Εικόνα 27. Συνολική παραμόρφωση από τα φορτία των πίσω τροχών φορτηγού σε πάχος .....	84
Εικόνα 28. Ισοδύναμη πίεση των φορτίων των τροχών αυτοκινήτου σε πάχος .....	85
Εικόνα 29. Συνολική παραμόρφωση από τα φορτία των τροχών αυτοκινήτου σε πάχος .....	85
Εικόνα 30. Ισοδύναμη πίεση των φορτίων των τροχών μοτοσυκλέτας σε πάχος .....	86
Εικόνα 31. Συνολική παραμόρφωση από τα φορτία των τροχών μοτοσυκλέτας σε πάχος .....	86
Εικόνα 32. Τιμές θερμοκρασίας στην ανώτερη στρώση .....	87
Εικόνα 33. Τιμές συνολικής ροής θερμότητας στην ανώτερη στρώση .....	88
Εικόνα 34. Τιμές συνολικής ροής θερμότητας του ηλιακού συλλέκτη .....	88
Εικόνα 35. Τιμές συνολικής ροής θερμότητας του ηλιακού συλλέκτη .....	89

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποσκοπεί στην παρουσίαση και αξιολόγηση της νέας τεχνολογίας του έξυπνου αυτοκινητόδρομου. Παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά που καθιστούν έναν αυτοκινητόδρομο ευφυή και η αποτελεσματικότητα των εφαρμογών του σε διάφορες περιοχές ανά τον κόσμο, ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη προς διερεύνηση τεχνολογία για την Ελλάδα. Βασικός στόχος της έρευνας αποτελεί η αξιολόγηση της αποδοτικότητας ενός ηλιακού αυτοκινητόδρομου μετά από αντικατάσταση του μήκους όλων των συμβατικών αυτοκινητόδρομων με αυτόν στη χώρα μας. Επιπρόσθετα, συγκρίνεται το κόστος κατασκευής ενός έξυπνου αυτοκινητόδρομου με ηλιακούς συλλέκτες με έναν ασφαλτοστρωμένο δρόμο. Παράλληλα, πραγματοποιείται η δημιουργία μιας προσομοίωσης ενός έξυπνου αυτοκινητόδρομου, με βάση την ηλιακή ενέργεια. Η ανάλυση του στατικού και θερμικού μοντέλου υλοποιείται μέσω του προγράμματος ANSYS Academic R21, βασιζόμενη στα δεδομένα της ηλιακής συλλογής στην Ελλάδα και των ασκούμενων φορτίων των οχημάτων, που συναντάμε σε έναν αυτοκινητόδρομο. 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 έξυπνων αυτοκινητόδρομων με τη χρήση της ηλιακής ενέργειας κρίνεται, με εγκυρότητα και ικανοποιητικό βαθμό αξιοπιστίας, κατάλληλη και ικανή να αξιοποιηθεί σε πολλούς αυτοκινητόδρομους.

Λέξεις-Κλειδιά: έξυπνος αυτοκινητόδρομος, ηλιακός αυτοκινητόδρομος, ηλιακή ενέργεια, προσομοίωση, ANSYS, στατική ανάλυση, θερμική ανάλυση.



## ABSTRACT

The present thesis aims at presenting and evaluating the new technology of the Smart or Intelligent Highway. The characteristics rendering a highway smart and the effectiveness of its applications in various parts of the world are presented in order to select the most suitable technology for Greece. The main objective of this research is the evaluation of the effectiveness of a solar power highway and the comparison of the cost of its construction against that for a conventional highway. In addition, a simulation of a smart highway based on solar power is presented on the basis of a thermal and static analysis with the aid of the finite element program ANSYS. On the basis of the produced results, one can conclude that the use of smart highways with solar power is suitable in real applications with a high degree of confidence.

Keywords: smart highway, solar highway, solar energy, simulation, ANSYS, static analysis, thermal analysis.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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 αυτοκινητόδρομων. Μία νέα τεχνολογία αποτελεί ο έξυπνος αυτοκινητόδρομος, που χαρακτηρίζεται ως ένας ασφαλής και πιο ποιοτικός αυτοκινητόδρομος, με γνωρίσματα καλύτερου οδοφωτισμού, χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και δυνατότητα σύνδεσης στο Διαδίκτυο. Η ένταξη του έξυπνου αυτοκινητόδρομου στο σύγχρονο περιβάλλον 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 ανάγκη του ανθρώπου για εξέλιξη, μέσα από μία ιστορική αναδρομή των τεχνικών κατασκευής ενός δρόμου, ξεκινώντας από το 4000 π.Χ. με την χρήση του λίθου ως κύριο υλικό και φτάνοντας μέχρι τους σημερινούς ασφαλτοστρωμένους δρόμους. Επιπρόσθετα, παρατίθενται τα χαρακτηριστικά ενός ευφυή αυτοκινητόδρομου με τις ιδέες της εταιρείας Heijmans και του σχεδιαστή Daan Roosegaarde, αλλά και των τεχνολογιών που προσφέρονται μέσω της αξιοποίησης των αγαθών της φύσης και του Internet of Things (IoT). Η τεχνολογία του LED οδοφωτισμού 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. Ένα άλλο μέρος του θεωρητικού πλαισίου περιλαμβάνει την επισήμανση των προτερημάτων και των μειονεκτημάτων στην εφαρμογή μίας τέτοιας τεχνολογίας, ενώ γίνεται αναφορά σε παραδείγματα κατασκευής τους σε διάφορες χώρες.

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 τον υπολογισμό του μήκους των κατάλληλων προς αντικατάσταση με ηλιακούς συλλέκτες αυτοκινητόδρομων, με βάση τα χαρακτηριστικά τους, καθώς και τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας, βάσει την ηλιακή απομόνωση σε κάθε περιοχή της Ελλάδας,
- β) τη δημιουργία της προσομοίωσης ενός ηλιακού συλλέκτη χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Ansys Academic R21, αναπτύσσοντας τον γεωμετρικό του σχεδιασμό, επιλέγοντας τα πιο πρόσφορα με βάση τη βιβλιογραφία υλικά, αλλά και τον υπολογισμό μέσω της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία

και τις πληροφορίες που συλλέχθηκαν στο προηγούμενο επίπεδο της έρευνας του ποσοστού παραγόμενης ηλιακής ενέργειας,

γ) τη στατική ανάλυση του μέσω του Ansys Academic R21, σύμφωνα με τα ασκούμενα φορτία οχημάτων, που συναντάμε σε έναν αυτοκινητόδρομο,

δ) τη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων των αναλύσεων και την αξιολόγηση τους για περαιτέρω ανάλυση, χρησιμοποιώντας διαφορετική μορφή και γεωμετρία του μοντέλου, προκειμένου να ελεγχθεί ξανά η λειτουργικότητα του,

ε) τη σύγκριση του κόστους ενός έξυπνου, ηλιακού αυτοκινητόδρομου, επιλέγοντας ηλιακό συλλέκτη συγκεκριμένης εταιρίας με δεδομένα χαρακτηριστικά, σε σχέση με το κόστος ενός συμβατικού, ασφαλτοστρωμένου αυτοκινητόδρομου.

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

## 1.1 Η εξέλιξη των οδών σύμφωνα με τις ανθρώπινες ανάγκες

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.).

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.).

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).

### 1.1.1 Το αρχαίο οδικό δίκτυο της Αμερικής

“Sacbeh”, όπως το αποκαλούσαν **οι Μάγια**, είναι η γραμμική αναπαράσταση σύνδεσης των κοινοτήτων τους (Hirst, 2018). Οι “λευκοί δρόμοι” στις περισσότερες περιπτώσεις πέτρινοι ήταν πολύ σπουδαίοι για την κοινότητα των Μάγια, αφού τους συσχετίζουν με τα ταξίδια τους, την πάροδο του χρόνου, τις εορτές, ακόμα και με το πεπρωμένο τους. Σαφώς ο κύριος λόγος για την κατασκευή τους ήταν για την εύκολη μετακίνηση τους, αλλά και για πολιτική, στρατιωτική ωφέλεια (Keller, 2006: 10).

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ήταν στην όψη τους λευκοί λόγω της τελευταίας επίστρωσης ενός υλικού, του ασβέστη, εκτός από την περίπτωση της Ceren, όπου είχε χρησιμοποιηθεί τέφρα (Shaw, 2001: 2; Sheets et al., 2015: 14). Η κατασκευή τους γινόταν από λίθους διαφόρων μεγεθών και σχημάτων, ώστε να επιτυγχάνεται ομοιομορφία και ευθυγράμμιση. Το πλάτος τους ήταν 12-32 ft ανάλογα με την κίνηση της κάθε διαδρομής και 2-4 ft υψωμένοι από το φυσικό έδαφος, εκτός από την περίπτωση των βάτων, όπου ήταν πάνω από 8 ft (“Maya System of Transportation”, n.d.: 2).

Το μήκος τους δεν ήταν το πρωτεύον χαρακτηριστικό για το οποίο θα ενδιαφερόντουσαν να οριοθετήσουν και σχετιζόταν με τη σπουδαιότητα των δύο σημείων που θα συνέδεε (Keller, 2006: 10). Για αυτό τις ταξινομούσαν σε 3 κατηγορίες (Shaw, 2001: 3):

- αστική οδός, σύνδεση μεταξύ σημαντικών οικοδομικών συγκροτημάτων μέχρι 1 km
- υπεραστική οδός, σύνδεση με μέρη απόστασης 1-5km
- σύνδεση με μέρη απόστασης 5 km τουλάχιστον



Εικόνα 1. Το οδικό δίκτυο των Μάγια (sacbeh)  
(Yucatan today)

Με τη νέα τεχνολογία GIS έγιναν πολλές έρευνες σχετικά με τις οδούς των Μάγια. Οι επιστήμονες Fulan και Hutson ανακαλύψαν αρκετές οδούς μεταξύ αυτών και η “Sacbe1”, η οποία ήταν η μεγαλύτερη. Η έκταση της είναι 100km ανάμεσα στην Coba και τη Yaxuna. Κατά μήκος της παρατηρούνται τάφροι για τη σωστή απορροή των υδάτων και διάφορες μικρές κοινότητες των Μάγια. Το πλάτος της είναι 8m και υψώνεται 50cm από το φυσικό έδαφος. Για τη διευκόλυνση της κυκλοφορίας εκτείνονται κατά μήκος της ράμπες. Όλο το μήκος της χαρτογραφήθηκε στα μέσα του 1930 από τους Alfonso Villa Rojas και Robert Redfield (Hirst, 2018).

Μία άλλη έρευνα πραγματοποιήθηκε το 2013 από τους Loya Gonzalez και Stauton, η οποία έδειξε ότι ο σκοπός κατασκευής τους ήταν η σύνδεση του Coba με τα μεγάλα κέντρα αγοράς της Yaxuna και στη συνέχεια του Chichen Itza για τον έλεγχο του εμπορίου σε όλη τη χερσόνησο (Hirst, 2018).

Επιπρόσθετα, σύμφωνα με την έρευνα, που διεξάχθηκε με επικεφαλής τον αρχαιολόγο Richard D. Hansen στην κοινωνία του Mirador, ανιχνεύθηκαν οδοί με πλάτος 330cm, παραπάνω από 50cm υψωμένοι από το έδαφος και σε κάποιες περιπτώσεις η έκταση τους ήταν μέχρι και 25 μίλια. Κατασκευάστηκαν περίπου το 600π.Χ. και σε σύνολο η έκταση τους είναι 150 μίλια μέσα στη ζούγκλα του Mirador Basin (Lundin, 2017). Ανακαλύφθηκαν πόλεις, πυραμίδες, κανάλια και ένα δίκτυο 17 δρόμων με μήκος παραπάνω από 240km και 40m πλάτος για μεταφορά προϊόντων (“Ancient maya developed super highways network more than 1,000 years ago”, 2017) .

Μία άλλη φυλή της Αμερικής, που έχει μείνει στην ιστορία για το οδικό δίκτυο της είναι αυτή των Ίνκας. **Οι Ίνκας** είχαν περίπλοκους δρόμους, που διαφοροποιούνταν η κατασκευή τους ανάλογα με το ανάγλυφο του εδάφους (Shaw, 2001: 7).

Για παράδειγμα, στις ερήμους παρατηρήθηκε έντονη χρήση του ξύλινου και του πέτρινου μονοπατιού. Σε περιοχές με έντονη υγρασία κατασκεύαζαν πέτρινες οδούς δίνοντας βάση στο αποχετευτικό σύστημα τους. Στις περιπτώσεις κάποιων απότομων πλαγιών τοποθετούνταν σκαλοπάτια, τοίχοι αντιστήριξης και άλλες τεχνικές για να είναι πιο εύκολη η μετάβαση (Shaw, 2001: 7).

Ο κύριος σκοπός για ανάγκη κατασκευής ενός τέτοιου οδικού δικτύου ήταν εμπορικός και στόχευαν στην αύξηση της παραγωγής σε διάφορα κράτη, όπως και της πρωτεύουσας του Cuzco. Ιδίως σε εποχές κρίσης οι οδοί είχαν αμυντικό χαρακτήρα, καθώς στην κατάκτηση νέων εδαφών το πρωτεύον εγχείρημα τους ήταν η κατασκευή ή βελτίωση του υπάρχοντος οδικού δικτύου. Με αυτή την κίνηση τους ήταν πιο εύκολη η μετακίνηση των στρατευμάτων και κατά συνέπεια επιτυχής η άμυνα ενάντια στα άλλα κράτη (Shaw, 2001: 7).

### 1.1.2. “All roads lead to Rome”

Το οδικό δίκτυο των Ρωμαίων ήταν αξιοθαύμαστο λόγω της πρωτοπόρου, αλλά και αρκετά ικανοποιητικής μεθόδου κατασκευής του. Περιλάμβανε οδογέφυρες, σήραγγες και οδούς όσο το δυνατόν περισσότερο ευθύγραμμες ξεπερνώντας τις δυσκολίες, που εμφάνιζε το ανάγλυφο του εδάφους σε κάποιες περιπτώσεις (Bekker-Nielsen, 2000; Cartwright, 2014). Με χιλιάδες χιλιόμετρα οδών στην πλάτη τους, οι Ρωμαίοι συνεισέφεραν στη διευκόλυνση της επικοινωνίας μεταξύ των περιοχών τους, στην εξάπλωση του εμπορίου τους, της κουλτούρας και των εθίμων τους σε μακρινούς λαούς, αλλά φυσικά και στην επί χρόνια κυριαρχία τους στα Ευρωπαϊκά εδάφη (Cartwright, 2014).

Το αρχικό κίνητρο για την κατασκευή αξιόλογων δρόμων ήταν η επιθυμία τους για κατάκτηση εδαφών και οι πρώτοι μηχανικοί των οδών τους ήταν μέλη του στρατού για να διαθέτουν τέτοιου είδους χαρακτηριστικά (“Ancient Roman roads – a monument to history and road construction”, n.d.).



Με της καλής ποιότητας οδούς ο στρατός πέτυχε τη γρήγορη μετακίνηση του και ας υπήρχε και η δυνατότητα υπεράκτιας μετακίνησης, η οποία όμως δεν ήταν ικανοποιητική από άποψη καιρικών συνθηκών.

Σύμφωνα με τον Muench (2017) τα πρώτα χρόνια οι άνθρωποι μετέφεραν τα προϊόντα τους οι ίδιοι, όταν οι οδοί ήταν πιο δύσβατες ή τα φόρτωναν σε ζώα (μουλάρια, άλογα) για τη μεταφορά μεγαλύτερου φορτίου. Ο τροχός στη ρωμαϊκή αυτοκρατορία εμφανιζόταν σε δύο κατηγορίες, του μικρού, ο οποίος ήταν ξύλινος, συνδεόταν με άλογα ή μουλάρια και μετέφερε πολίτες και του μεγάλου, κατασκευασμένου από βαλανιδιά, συνδεδεμένου με βόδια μεταφέροντας τα ογκώδη προϊόντα.

Τα χαρακτηριστικά των οδών διαφοροποιούνταν ανάλογα με το ανάγλυφο του εδάφους και τα διαθέσιμα υλικά (“Ancient Roman roads – a monument to history and road construction”, n.d.). Κάποια από τα δεδομένα γνωρίσματα τους ήταν το μέσο πλάτος τους, το οποίο κυμαινόταν από 5.5-6 m και σε αυτό περιλαμβανόταν το πλάτος του δρόμου, όπου κυκλοφορούσαν τα οχήματα και το πλάτος των χαλικωτών πεζοδρομιών, το οποίο σχεδιαζόταν 1-3 m (“Ancient Roman roads – a monument to history and road construction”, n.d.; Cartwright, 2014; Muench, 2017).



Εικόνα 2. Οδοστρώση αρχαίων ρωμαϊκών δρόμων

(pinterest)

Για τη διευκόλυνση των ταξιδιών περιλάμβαναν στην κατασκευή τους υδρορροές, οι οποίες εγκαθίστανται στην αρχή για αποστράγγιση της οδού, αλλά και κάθε 3-5 m λίθινα τοίχια για να αφήνουν τα ζώα τους. Επιπλέον, έσκαβαν τάφρους εκατέρωθεν και κατασκεύαζαν τοίχους αντιστήριξης στο άνοιγμα τους σε βάθος εξαρτημένο από το είδος του εδάφους. Αυτή η τεχνική

παρατηρούνταν και στις στρατιωτικές τάφρους. Με αυτή τη διεργασία επιτυγχανόταν η δημιουργία κλίσης στο έδαφος με πιο υψωμένο το κεντρικό σημείο της οδού και συνάμα η σωστή υλοποίηση της αποχέτευσης της περιοχής. Η χρήση ασβεστοκονίας στόχευε στη βέλτιστη απορροή των όμβριων υδάτων, ώστε να αποφεύγεται η ολισθηρότητα του δρόμου (Muench, 2017).

Η οδός αποτελούνταν από κάποιες διακεκριμένες για την εποχή στρώσεις, οι οποίες ήταν οι εξής (“Ancient Roman roads – a monument to history and road construction”, n.d.) :

- στο συμπαγές τμήμα του εδάφους θεμελίωσης τοποθετούνταν άμμος ή ασβεστοκονίαμα
- η επίστρωση από θρυμματισμένο βράχο (πάχος στρώσης 25-60 cm)
- το κονίαμα θρυμματισμένου βράχου με τσιμέντο (πάχος στρώσης 20 cm)
- η βάση ήταν από σκυρόδεμα (μείγμα τσιμέντου, άμμου και χαλικιού) πάχους 30 cm
- η τελική στρώση αποτελούνταν από μεγάλους λίθους (πάχος στρώσης 15 cm)

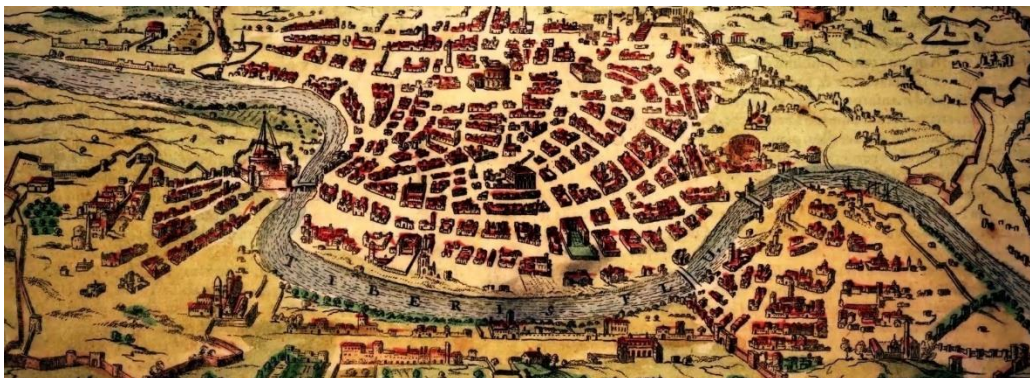
Η πιο διάσημη και η αρχαιότερη οδός της ρωμαϊκής αυτοκρατορίας, όπως την αποκαλούσαν οι Ρωμαίοι Via Appia (Appian Way) κατασκευάστηκε το 312 π.Χ. και η αρχική της διαδρομή εκτεινόταν 196 km από τη Ρώμη μέχρι την Capua. Ήταν ευθύγραμμη σε αντίθεση με τις δυνατότητες που έδινε το έδαφος για κάτι τέτοιο και στη συνέχεια επεκτάθηκε μέχρι την Αδριατική στο σημερινό Brindisi και το μήκος της ήταν 569 km. Η οδός αποκαλούνταν από πολλούς “Queen of Roads” (“Ancient Roman roads – a monument to history and road construction”, n.d.; Cartwright, 2014; “Roman Road System, n.d.).

Κάποια άλλα παραδείγματα αξιόλογων οδών στην Ιταλία ήταν οι Via Flaminia, Via Aemilia, Via Postumia και Via Popillia, τα οποία ήταν η αρχή της φράσης “All roads lead to Rome” (“Ancient Roman roads – a monument to history and road construction”, n.d.; “Roman Road System, n.d.).

Με τα χρόνια ξεκίνησαν να κατασκευάζονται και σε άλλα μέρη οι μέθοδοι των Ρωμαίων σχετικά με τις οδούς, από τη Βρετανία μέχρι και τη Συρία. Η Via Domitia της οποίας η κατασκευή χρονολογείται το 116 π.Χ. ξεκινούσε από τις γαλλικές Άλπεις και εκτεινόταν έως και τα Πυρηναία (Cartwright, 2014). Ένα άλλο σπουδαίο έργο ήταν αυτό της Via Egnatia (Εγνατία οδός) στα μέσα του 2ου αιώνα π.Χ., το οποίο ένωνε τα δυτικά με τα ανατολικά Βαλκάνια φτάνοντας μέχρι το Βυζάντιο (Cartwright, 2014; “Roman Road System, n.d.).

Δεν θα μπορούσε να παραλειφθεί ότι αυτές οι οδοί ήταν η βάση για τα σημερινά οδικά δίκτυα της Ευρώπης και της Μέσης Ανατολής (Cartwright, 2014).





Εικόνα 3. Αρχαίο ρωμαϊκό οδικό δίκτυο  
(drive thru history)

### 1.1.3. Το οδικό δίκτυο στην αρχαία Ελλάδα

Οι οδοί της αρχαίας Ελλάδας ήταν σε γενικές γραμμές σε καλή κατάσταση, όμως δεν ήταν από εκείνες που συνέβαλαν σημαντικά στη σύγχρονη κατασκευή των οδικών δικτύων. Σε αυτό στάθηκε εμπόδιο το γεωγραφικό ανάγλυφο του εδάφους, το οποίο αποτελούνταν από πολλές οροσειρές, επομένως δημιουργούσαν πιο απότομους δρόμους - με έντονες κλίσεις και όχι ευθύγραμμους. Άλλη μία συνθήκη που προβλημάτιζε τη κοινωνία για κατασκευή ικανοποιητικών οδών ήταν πολιτικής φύσης. Λίγες ήταν οι πόλεις, οι οποίες είχαν οικονομική δυνατότητα να συνεισφέρουν σε ένα τέτοιο έργο. Επιπλέον, λόγω της ευνοημένης μετακίνησης τους από τη θάλασσα δεν έδιναν σπουδαία έμφαση στις διαδρομές μέσω ξηράς. Κάτι που έχει παρατηρηθεί είναι ότι οι σύγχρονες διαδρομές έχουν σχεδιαστεί πάνω από αυτές της αρχαίας πολιτείας (“Roads and Land Traffic”, n.d; “Transportation and Travel”, n.d.: 462).

Στη μεγαλύτερη έκταση τους χαρακτηρίζονται από απλά, λιθόστρωτα μονοπάτια των 2m πλάτος, αλλά έχουν βρεθεί και ορισμένα πλακόστρωτα. Μέσα στις πόλεις οι δρόμοι ήταν αξιόλογοι, καθώς δεν δημιουργούνταν ποτάμια λάσπης λόγω βροχοπτώσεων (“Roads and Land Traffic”, n.d).

Δεν θα μπορούσαμε να παραλείψουμε ότι περίπου το 2000 π.Χ. στην Κρήτη, ο Μινωικός πολιτισμός, έχει στην ιστορία του έναν πλακόστρωτο 50 km δρόμο, που συνέδεε την Κνωσό με τη Βόρεια Κρήτη περνώντας μέσα από τις αμέτρητες οροσειρές της. Επιπλέον, ένα πεζοδρόμιο πάχους 200 mm, το οποίο ήταν κατασκευασμένο από κονίαμα πηλού και γύψου με μία επικάλυψη από βασαλτικές πέτρες. Αυτά τα στοιχεία του Μινωικού πολιτισμού πάνω στην κατασκευή οδικού δικτύου θεωρούνται από πολλούς ανώτερα και από του Ρωμαϊκού (“History of Road Transport”, n.d.).

Διάφοροι πλακόστρωτοι δρόμοι βρίσκονταν στην Αθήνα, όπως ο Παναθηναϊκός που ήταν διαδρομή σύνδεσης με το λόφο της Ακρόπολης, ο δρόμος για το λόφο της Πεντέλης και εκείνος για το λιμάνι του Πειραιά, ο οποίος ήταν 3.5 m μήκος, 4.5-5 m πλάτος με τοίχους αντιστήριξης και στις δύο μεριές. Ένα σπουδαίο έργο ήταν αυτό της Διορκού, που κατασκευάστηκε το 600 π.Χ. από τους Κορίνθιους για την εύκολη διέλευση από τη Στερεά Ελλάδα στην Πελοπόννησο. Χρησιμοποιήθηκε μέχρι τον 9ο

αιώνα μ. Χ.. Υπό τη Ρωμαϊκή αυτοκρατορία κατασκευάστηκαν αρκετοί οδοί στην Αθήνα, την Αχαΐα, αλλά και τη Μακεδονία. Η Εγνατία οδός αποτελεί ένα τέτοιο παράδειγμα, που άφησε ιστορία. Αυτή η διαδρομή συνέδεε την ανατολική με τη δυτική Μακεδονία (Wilson, 2013: 715).

Σύμφωνα με τον Πausανία, την κλασική περίοδο κατασκευάστηκε ο δρόμος εκείνος που συνέδεε την Αθήνα με την Κόρινθο, ο οποίος θύμιζε στην κατασκευή του ρωμαϊκό, όμως μειονεκτούσε στο πλάτος και έτσι δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από οχήματα, αλλά μόνο από πεζούς και ζώα. Μία οδός αξιόλογη ήταν αυτή από το Άργος στη Τεγαία και στη συνέχεια σε άλλες περιοχές της Πελοποννήσου, η οποία είχε πλάτος 3.5 m. Από την άλλη, η διαδρομή για τους Δελφούς ήταν επικίνδυνη λόγω του υψηλού υψομέτρου, όμως χάριζε όμορφες εικόνες γύρω η φύση (“Roads and Land Traffic”, n.d; Wilson, 2013: 715).

Ο κυριότερος σκοπός για την κατασκευή των οδών ήταν η διευκόλυνση της μετακίνησης των στρατευμάτων. Σε δεύτερη μοίρα ήταν η μετακίνηση των πολιτών για να επικοινωνούν μεταξύ τους και των αγροτών συγκεκριμένα για τη διάθεση των προϊόντων τους στην αγορά. Στην αρχή οι άνθρωποι χρησιμοποιούσαν ζώα, όπως μουλάρια και γαϊδούρια για να μετακινούνται. Τα άλογα τα διέθεταν μόνο οι πλούσιες οικογένειες σε αντίθεση με άλλες Ευρωπαϊκές χώρες. Στη συνέχεια η χρησιμότητα αυτού του είδους μετακίνησης περιορίστηκε λόγω την ανομοιομορφίας του εδάφους και έτσι έκαναν κάποιες καινοτομίες σχετικά με τον τροχό. Ήταν από τις πρώτες χώρες, που χρησιμοποιήθηκαν δίκυκλα αλλά και τετράκυκλα οχήματα, κάτι που αποτέλεσε σημαντική αρωγή στη μεταφορά του φορτίου τους (“Roads and Land Traffic”, n.d).

#### 1.1.4. Plank Roads

Αυτές οι οδοί ξεκίνησαν από τη Ρωσία, αλλά αναβαθμίστηκαν και αγαπήθηκαν αρκετά από τις χώρες της Αμερικής, όπου πρωτοκατασκευάστηκαν το 1834. Η πρώτη οδός κατασκευάστηκε το 1836 στη Βόρεια Αμερική κοντά στο Τορόντο. Στη Νέα Υόρκη έφτασε το 1846 αυτή η μέθοδος κατασκευής οδών (Abbott, 1981: 2; McCloskey, 1949: 3).

Κατασκευάζονταν τοποθετώντας αρχικά κομμάτια ξύλου σε απόσταση 3-4 ft μεταξύ τους και στη συνέχεια σανίδες από πάνω με πάχος 3-4 inz. Η προετοιμασία του δρόμου γινόταν ρίχνοντας λεπτό χαλίκι ή άμμο για να προστατευτεί από τα άλογα. (Abbott, 1981: 2; McCloskey, 1949: 3) Συνήθως, η έκταση τους ήταν 8 ft με πλάτος 12 ft εκτός από τις πόλεις, όπου το πλάτος ήταν μεγαλύτερο και διέθεταν κλίση για αποχετευτικούς λόγους (Longfellow, 2017).

Ένας από τους δρόμους που είχε τη μεγαλύτερη έκταση κατασκευάστηκε το 1949, βρισκόταν μεταξύ της Βόρειας Καρολίνας και του Winston-Salem και ήταν 129 μίλια (Longfellow, 2017). Ο πιο διαδεδομένος Plank Road ήταν αυτός από το Los Angeles προς το San Diego, που υπέστη πολλές επεμβάσεις λόγω της συνεχούς φθοράς του, καθώς η πρώτη κατασκευή του χρονολογείται το 1915 και η τελευταία το 1926. Το αρχικό θέμα του ήταν το πλάτος, που δεν έδινε τη δυνατότητα να μετακινούνται δύο οχήματα διαφορετικής κατεύθυνσης ταυτόχρονα. Οι άνεμοι και ο ήλιος δημιουργούσαν πολλά προβλήματα στις σανίδες και με την πάροδο των χρόνων καταστράφηκαν ολοσχερώς. Η τελευταία επέμβαση που πραγματοποιήθηκε το 1926 περιλάμβανε την

ασφαλτόστρωση της οδού πάνω από τις φθαρμένες με τα χρόνια σανίδες. Αυτός ο δρόμος είναι ο σημερινός Indersate 8 (“Old Plank Road”, n.d.).

#### 1.1.5. Grand Trunk Road

Ο Grand Trunk Road ή αλλιώς The Generals Road είναι ένας από τους μεγαλύτερους και παλαιότερους δρόμους της Ασίας (“Grand Trunk Road, one of Asia's oldest and longest roads”, n.d.). Η κατασκευή του ξεκίνησε από την Ινδία γύρω στο 47μ.Χ., πριν ακόμα και από την ανακάλυψη του περάσματος από την Ευρώπη στην Κεντρική Ασία. Η αιτία κατασκευής του, αρχικά ήταν η σύνδεση της χώρας με άλλες της Ανατολής, αφού ο πληθυσμός της Ινδίας ήταν πολύ μεγάλος και άλλης καταγωγής και έτσι θα υπήρχε ανάπτυξη του εμπορίου και φυσικά της οικονομίας. Για περίπου 2000 χρόνια αποτελούσε το κέντρο της στρατιωτικής ιστορίας της Ινδίας (Parkhurst, 1925). Η πρώτη μορφή του υπήρχε μέχρι την αυτοκρατορία του Chandragupta, δηλαδή μέχρι και τον 4ο αιώνα μ.Χ., και χρησιμοποιήθηκε κάποια στιγμή από τον Μέγα Αλέξανδρο (“Grand Trunk Road”, 2018).

Το 154μ.Χ. ανέβηκε στον θρόνο ο Sher Shah Suri, ο οποίος επέκτεινε σημαντικά τη διαδρομή και είχε ως στόχο την επικοινωνία μεταξύ των λαών μέσα από την εξέλιξη της οδού. Σημάδια της επιθυμίας του για βελτίωση του Grand Trunk Road ήταν η φύτευση δέντρων κατά μήκος του, η κατασκευή γεφυρών στους ποταμούς, τα πιο σύγχρονα υλικά που χρησιμοποίησε (τούβλο, πέτρα) και τέλος οι χώροι ανάπαυσης των ταξιδιωτών και των ζώων τους (Alonso, 2013; Parkhurst, 1925).

Το 1804 ξεκίνησε η ανακατασκευή του λόγω της απογοήτευσης των ταξιδιωτών, που ανέφεραν ότι ήταν στενός ο δρόμος με απότομες τάφρους στην άκρη. Επεκτάθηκε 148 μίλια και δόθηκε μεγάλη έμφαση στη στρατιωτική και διοικητική του σκοπιμότητα. Την περίοδο 1828-1835 ήταν το κυρίαρχο μέσο επικοινωνίας πολλών κρατών. Μεταξύ 1833-1860 (βρετανική περίοδος) υπέστη σημαντική αναβάθμιση και αποκαλέστηκε “River of Life” (“Grand Trunk Road-‘River of Life’”, 2017). Από τη Βρετανική κυβέρνηση και ύστερα η μορφή της οδού άλλαξε ριζικά και έχει τα εξής χαρακτηριστικά (Parkhurst, 1925):

- γεφυρωμένη οδός, χωρίς διακοπή από την κίνηση
- ελάχιστο πλάτος μετάλλου, 12 πόδια
- ελάχιστο πλάτος οδού πάνω σε γέφυρα, 15 πόδια

Σήμερα χαρακτηρίζεται ως ένας πλακόστρωτος δρόμος με έκταση ως και 2700km και σημείο σύνδεσης πολλών χωρών, όπως το Μπαγκλαντές, η Ινδία, το Πακιστάν και το Αφγανιστάν. Η διαδρομή συνεχίζει από το Πακιστάν στο Peshawan μέσα από το βραχώδες πέρασμα, Khyber Pass, που βρίσκεται σε ύψος 1070m πάνω από τη στάθμη της θάλασσας και συνδέει δύο πολιτισμούς, αυτόν του Αφγανιστάν και αυτόν του Πακιστάν. Το ταξίδι όμως δεν τελειώνει εδώ, αλλά εκτείνεται μέχρι και τα προάστια του Taxila, διασχίζει την Ινδία και φτάνει μέχρι την Kolkota (Alonso, 2013; “Grand Trunk Road, one of Asia's oldest and longest roads”, n.d.).

### 1.1.6. Σπουδαίοι μηχανικοί

Tresaguet Pierre, ο Γάλλος μηχανικός έφερε στην επιφάνεια το 1764 μία βελτιωμένη και προχωρημένη μέθοδο κατασκευής οδών. Αυτή η μέθοδος είχε τα εξής χαρακτηριστικά (“Highway Engineering”, 2016):

- πάχος κατασκευής 30cm
- το τελευταίο στρώμα αποτελούνταν από λίθους
- κλίση για απορροή υδάτων

John Metcalf, ο Βρετανός μηχανικός εργαζόταν ταυτόχρονα με τον Tresaguet, αλλά στην Αγγλία. Ήταν ο πρώτος επαγγελματίας στην κατασκευή οδών. Στην καριέρα του κατασκεύασε 290km δρόμο στα Yorkshire, Lancashire, Derbyshire όντας τυφλός (“Highway Engineering”, 2016). Το 1765 κατασκεύασε 5km δρόμο μεταξύ του Ferrensby και του Minskip. Είχε συμπεράνει ότι η καταστροφή των οδών πολλές φορές οφείλεται στα όμβρια ύδατα, για αυτό οι δρόμοι του είχαν κλίση και ήταν υπερυψωμένοι στο κέντρο, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα αποχέτευσης και να γίνεται σωστή απορροή. Μία σπουδαία δουλειά του ήταν η κατασκευή ενός δρόμου, που να διασχίζει έναν υγρότοπο. Αυτό το πέτυχε με τη χρήση μιας σειράς από σχεδίες και πολλά κομμάτια από θάμνους δεμένους για θεμέλια (Clissit, n.d.; “John Metcalf: The Blind Road Builder Who Built 180 Miles of Road”, 2017).

Τέλη 18ου αιώνα με αρχές 19ου, οι συνθήκες στη μετακίνηση στη Βρετανία δεν ήταν ευνοϊκές, αφού οι οδοί κατασκευάζονταν μόνο με πέτρα και άμμο χωρίς κάποιο άλλο συνδετικό υλικό. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μην είναι λείοι και οι άνθρωποι να μετακινούνται με τα πόδια ή με κάποιο ζώο, κυρίως άλογο, ενώ είχε εφευρεθεί ο τροχός.

Ο Tomas Telford ασχολούνταν τότε με την κατασκευή γεφυρών, κτηρίων και καναλιών, καθώς οι οδοί δεν είχαν τόσο μεγάλη αξία ακόμα για την διευκόλυνση της καθημερινότητας σε πολλούς τομείς. Η καριέρα του στην κατασκευή δρόμων ξεκίνησε το 1802, όταν του ζητήθηκε να αναλάβει το οδικό δίκτυο της πατρίδας του, της Σκωτίας. Αυτό το έργο διήρκεσε 20 χρόνια και συμπεριλάμβανε 1480 km οδικού δικτύου, αλλά και 1000 γέφυρες, 32 νέες εκκλησίες και βελτίωση σε υπάρχοντα κανάλια (“Telford’s Roads”, n.d.).

Τα κοινά γνωρίσματα που είχαν οι οδοί αυτές, καθώς και οι μεταγενέστερες του ήταν η χρήση λίθων πολλών μεγεθών, ώστε τα κενά που υπήρχαν από τους πρώτους μεγάλης έκτασης λίθους να καλύπτονται στη συνέχεια με τους μικρότερους. Στόχευε και στη στράγγιση τους πριν την εφαρμογή για αποφυγή τυχόν εγκλωβισμού υγρασίας στο οδόστρωμα, κάτι που δεν επιθυμούσε. Στο τέλος, η οδός είχε και μία επίστρωση από λεία βότσαλα. Όμως, δεν θα μπορούσαμε να παραλείψουμε την κλίση, που έδινε στο έδαφος για να γίνεται σωστή απορροή των υδάτων και να αποφεύγεται η ολίσθηση. Χρησιμοποιούσε τη μέθοδο των σπασμένων πετρών και τη βελτίωσε σημαντικά αναλύοντας το πάχος τους και την αντοχή τους στα φορτία των οχημάτων. Με το βελτιωμένο αισθητά



οδικό δίκτυο που κατασκεύασε σε πολλές περιοχές της Βρετανίας συνείσφερε στην επικοινωνία μεταξύ των κρατών και στη βιομηχανοποίηση του νησιού (“Telford’s Roads”, n.d.).

Άλλα σπουδαία έργα του ήταν η κατασκευή της πρώτης σιδερένιας γέφυρας στο Severn ποταμό, αλλά και της εκκλησίας St. Katharine στο Λονδίνο. Κατασκεύασε μία γέφυρα με σιδερένιες αλυσίδες και όχι με χυτοσίδηρο, όπως συνήθιζε, κάτι που αποδείχτηκε σωστό για την αντοχή της. Είχε μήκος 1400 ft και βρισκόταν 100 ft πάνω από τη στάθμη της θάλασσας. Ο δρόμος ήταν ξύλινος, αλλά με τα χρόνια μετατράπηκε σε ατσάλινος, όπως και οι σιδερένιες αλυσίδες σε ατσάλινες (Petroski. 2008). Μία δουλειά του που έχει αφήσει ιστορία ήταν ο δρόμος από το Shrewsbury στο Holyhead, ο οποίος υπάρχει ακόμα και σήμερα (A5) (Petroski, 2008; “Telford’s Roads”, n.d.). Ολοκληρώθηκε γύρω στο 1830 και αποτελούνταν από μεγάλες πολυγωνικές πέτρες και στη συνέχεια από άλλες μικρότερες και το υλικό της βάσης (McCloskey, 1949). Ο δρόμος ήταν πιο υψωμένος στο κέντρο και όχι στις άκρες. Σε αυτό το έργο του δόθηκε το όνομα “Telford construction”, διότι είχε όλα τα χαρακτηριστικά που περιέγραφαν τους δρόμους του. Ο Telford συνήθως ασχολούνταν με την κατασκευή νέων οδικών δικτύων, αλλά με μία δουλειά του πάνω στη βελτίωση της οδού από το Glasgow στο Carlisle, την τωρινή A74, κατασκευή του ανακηρύχθηκε “μοντέλο για μελλοντικούς μηχανικούς” (“Telford’s Roads”, n.d.) .

Οι ιδέες του υιοθετήθηκαν σε πολλά μέρη του κόσμου. Έντονη ήταν η επιρροή του στην Αμερική ύστερα από την εποχή του, αφού στα μέσα της δεκαετίας των ’60 χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι του στην κατασκευή μίας γέφυρας στον ποταμό Mississippi (Petroski. 2008).

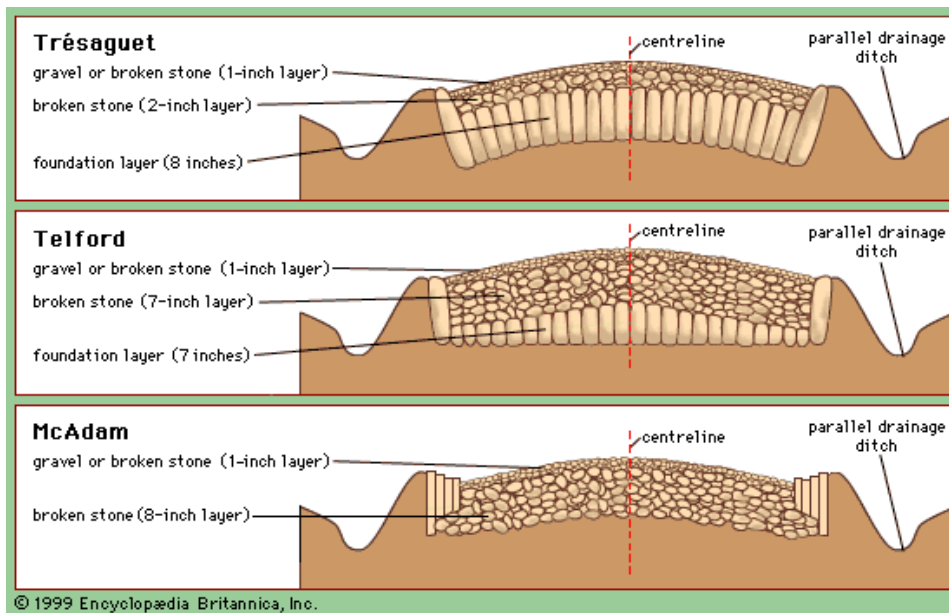
Ο John Loudon McAdam ξεκίνησε να ασχολείται με την κατασκευή οδών λίγο πριν τον Telford, δηλαδή στα μέσα του 18ου αιώνα. Η δυσμενής κατάσταση των οδών οδήγησε τον McAdam στην αναζήτηση μεθόδων για τη βελτίωση τους. Οι πρώτοι δρόμοι που κατασκεύασε ήταν στο Ayrshire και χρονολογούνται το 1783, οι οποίοι δεν βασιζόνταν στις θεωρίες του (Merdinger, 1952). Το 1798 έκανε μία πρόταση στο Cornwall σχετικά με τη σημαντικότητα της αποχέτευσης και με ποιον τρόπο θα επιτευχθεί. Επιπρόσθετα, έθεσε και το θέμα των υλικών, τα οποία περιλάμβαναν μικρές και μεγάλες πέτρες με μία επικάλυψη από λεπτό χαλίκι ή σκύρα (“John Loudon McAdam”, n.d.). Το οδικό δίκτυο επιθυμούσε να είναι λείο, μεγάλης αντοχής, αλλά σε συνδυασμό και με το χαμηλότερο κόστος . Χρησιμοποίησε τη μέθοδο των σπασμένων πετρών, οι οποίες ήταν συμπαγείς και ζύγιζαν μέχρι 6 ounce (McCloskey, 1949). Οι κατασκευές του δεν περιείχαν κανένα υλικό, που να απορροφά νερό, όπως ο πηλός και η κιμωλία, διότι θεωρούσε ότι θα δημιουργούσε παγετό. Τοποθετούσε τα υλικά σε επίπεδες, στραγγισμένες επιφάνειες μεταβάλλοντας το βάθος που θα τοποθετηθεί η πέτρα ως και 10 inz ανάλογα με το δρόμο .

Οι θεωρίες του αυτές είναι οι μέθοδοι κατασκευής οδών, που αποκαλούμε εμείς σήμερα traffic-bound McAdam και έχει εξελιχθεί σε διάφορους τύπους, όπως οι water bound, οι bituminous και οι cement-bound (Merdinger, 1952).

Το 1815 εφάρμοσε τις θεωρίες του σε πολλά έργα του, τα οποία στηρίζονταν στη βελτίωση ήδη υπάρχοντων οδικών δικτύων (McCloskey, 1949). Εκείνη τη χρονιά εργάστηκε ως επιβλέπων στο Metropolitan Turnpike Roads και μέσα από αυτό έγινε γνωστός και κατάφερε να κατασκευάσει οδούς

σε όλη τη Βρετανία. Με αυτό το οδικό δίκτυο που εκτεινόταν σε όλη τη Βρετανία διευκόλυνε την επικοινωνία των χωρών, αλλά συνετέλεσε και στην εμπορική εξέλιξη (“John Loudon McAdam”, n.d.;Merdinger, 1952).

Η McAdam μέθοδος υιοθετήθηκε από πολλές χώρες, ιδίως στις ΗΠΑ. Το 1827 λόγω της μεγάλης του επαγγελματικής εξέλιξης πήρε το όνομα Surveyor General of Metropolitan Roads στη Μ. Βρετανία. Τέλος, κάτι άλλο που μας έχει μείνει από εκείνον πέρα από τις κατασκευές του ως μηχανικός ήταν οι καταγεγραμμένες θεωρίες του στα Remarks on the System of Road-Making και Practical Essay on the Scientific Repair and Presentation of Roads (“John Loudon McAdam”, n.d.).



Εικόνα 4. Τύποι οδοστρωμάτων του 20ου αιώνα  
(Britannica.co.uk)

## 1.2. Σύγχρονα Οδοστρώματα

### 1.2.1. 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 ανόμοιες 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).

### 1.2.2. 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 ασφατικά, 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 5. Τύποι οδοστρώματων

(teiwest)

### 1.2.3. Σύνθεση οδοστρώματος

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 τάπητα κυκλοφορίας και κατασκευάζεται δίνοντας στο οδόστρωμα τις απαιτούμενες κλίσεις (Νικολαΐδης,1996).
- η ασφαλική στρώση αποτελεί την ανώτερη στρώση του οδοστρώματος και είναι υψίστης 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).

## 2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΞΥΠΝΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΥ

### 2.1. Ορισμός έξυπνου αυτοκινητόδρομου - Σκοπός προσέγγισης

Αυτοκινητόδρομος θεωρείται κάθε δημόσια οδός. Παρ'όλα αυτά, συνήθως, χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει μείζονες διαδρομές. Από την άλλη μεριά "Έξυπνος Αυτοκινητόδρομος" αποκαλείται η ιδέα ενός πιο «ευφυή» δρόμου με χαρακτηριστικά οδικής ασφάλειας μέσα από τον καλύτερης ποιότητας οδοφωτισμό σε συνδυασμό με νέες τεχνολογίες. Οι νέες τεχνολογίες σχετίζονται με τη χρήση πηγών ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, για την τροφοδοσία των οχημάτων, αλλά και για τον έλεγχο των συνθηκών του αυτοκινητόδρομου (Abass et.al., 2020 :8;Choudhary,Joshi,Kalyani, 2015 :4).

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, 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 μετ'έπειτα 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).

Η φιλοσοφία του έξυπνου αυτοκινητόδρομου 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 ("Smart Roads: a Vision", 2015). Γενικότερα, σε σχέση με έναν αυτοκινητόδρομο με τις συμβατικές εφαρμογές του, ο έξυπνος αυτοκινητόδρομος 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 αυτοκινητόδρομων θα περιλαμβάνει τα εξής ("Smart Roads: a Vision", 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

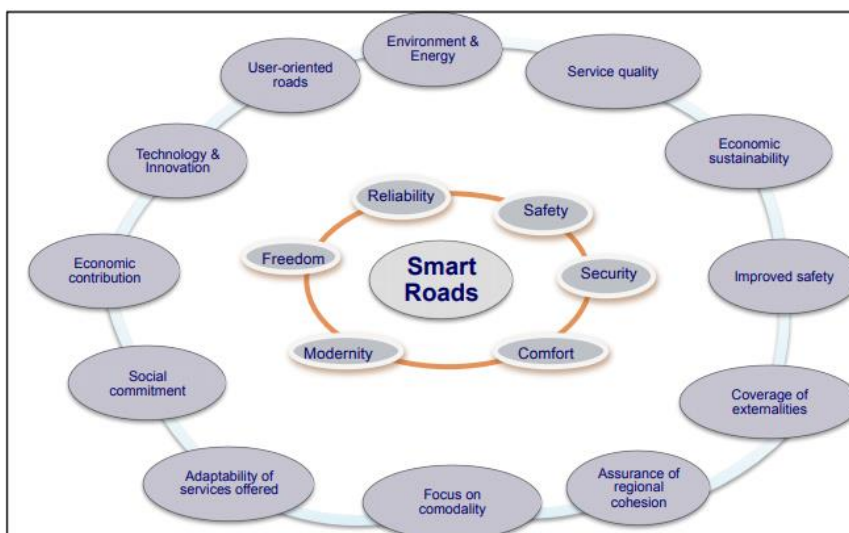
- τη στενευμένη εκτέλεση των υπηρεσιών, οι οποίες βασίζονται στην ανά πάσα στιγμή ενημέρωση των οδηγών για την κατάσταση του αυτοκινητόδρομου σε σχέση με τον κυκλοφοριακό φόρτο του
- την οικονομική βιωσιμότητα, η οποία σχετίζεται απόλυτα με την κατασκευή νέων αυτοκινητόδρομων, ιδίως εκείνων με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο, αλλά και με τη συντήρηση υφιστάμενων οδικών δικτύων
- τη διασφάλιση της ασφάλειας, η οποία επιτυγχάνεται με τον σχεδιασμό νέων αυτοκινητόδρομων 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 αυτοκινητόδρομου 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 αιεφόρων μεθόδων συντήρησης των υφιστάμενων αυτοκινητόδρομων

Επιπλέον, οι έξυπνοι αυτοκινητόδρομοι σχεδιάζονται, ώστε να καλύπτουν τις συναισθηματικές ανάγκες των χρηστών-οδηγών, όπως («Smart Roads: a Vision», 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



Εικόνα 6. Το κλειδί της επιτυχίας του έξυπνου δρόμου

## 2.2. Συστατικά πλαίσια ανάπτυξης εφαρμογής

### 2.2.1 Τεχνολογίες “Έξυπνου Αυτοκινητόδρομου”



Εικόνα 7. Τεχνολογίες Έξυπνου Αυτοκινητόδρομου  
(stories by williams)

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,Dilip,Vasudeo,et. al., 2017).

“Άρχισα 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 (Έξυπνος Αυτοκινητόδρομος) αποτελούν οι εξής εφαρμογές (Sebastian,Dilip,Vasudeo,et. al., 2017):

## 1. Glow in the dark lines



Εικόνα 8. Τεχνολογία "Glow in the dark lines"

(new atlas.com)

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 διάρκειας, 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,Dilip,Vasudeo,et. al., 2017).

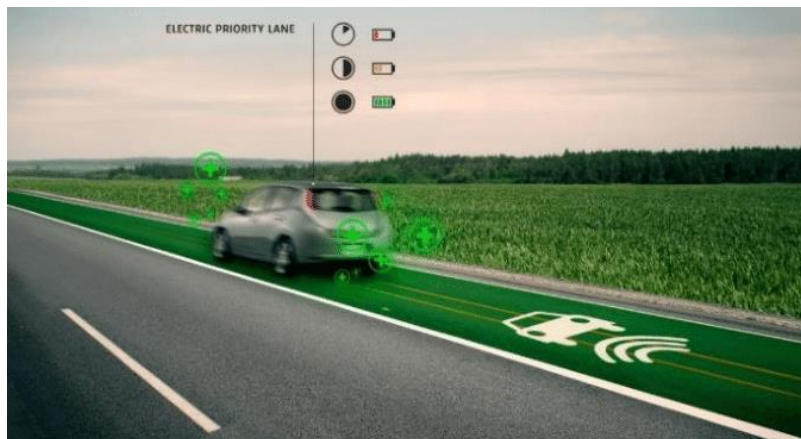
Τοποθετούνται στους ήδη υπάρχοντες αυτοκινητόδρομους, δηλαδή αυτών που είναι κατασκευασμένοι από μπετόν. Για τη διασφάλιση συνεχούς ποιότητας και ασφάλειας, γίνεται η χρήση ενέργειας για την περαιτέρω ενεργοποίηση του συστήματος. Διαθέτουν μία πράσινη χρωστική λάμψη στο σκοτάδι και τοποθετούνται σε πλάτος 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).

## 2. Electric Priority Lane



Εικόνα 9. Τεχνολογία "Electric priority lane"

(new atlas.com)

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, Dilip, Vasudeo, et. al., 2017).



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,Dilip,Vasudeo,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,Dilip,Vasudeo,et. al., 2017).

### 3. Wind lights

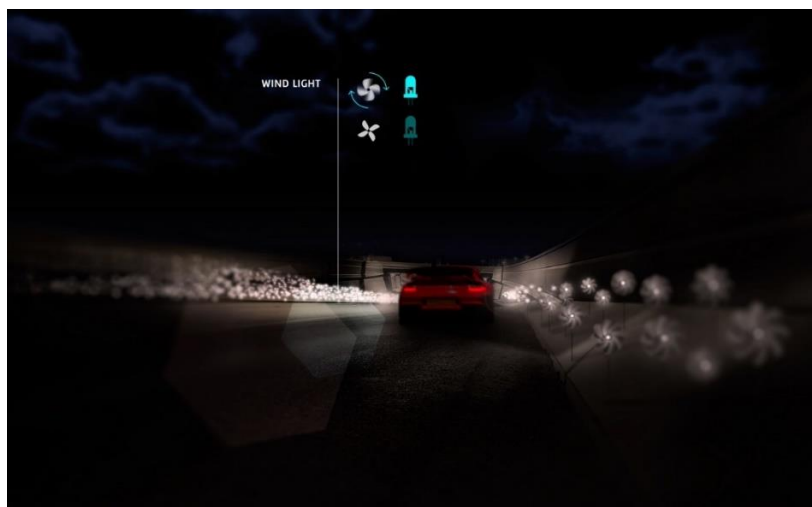
Η αιολική ενέργεια, όπως προαναφέρθηκε, λειτουργεί ως εναλλακτική λύση αντί της χρήσης ορυκτών καυσίμων και αποτελεί μία ανανεώσιμη, “καθαρή”, ευρέως διανεμημένη πηγή ενέργειας. Έως το Δεκέμβριο του 2014 παρατηρήθηκε αύξηση της χωρητικότητας της έως τα 369553 MW, ενώ μέχρι και σήμερα διαρκώς αυξάνεται 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,Dilip,Vasudeo,et. al., 2017).



Εικόνα 10. Τεχνολογία "Wind lights"  
(in habitat)



#### 4. Dynamic paints



Εικόνα 11. Τεχνολογία "Dynamic paints"

(new atlas.com)

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 φωταύγειάς στο θερμικό τους περιβάλλον (Sebastian,Dilip,Vasudeo,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.).

## 5. Interactive light



Εικόνα 12. Τεχνολογία του "Interactive light"

(new atlas.com)

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, Dilip, Vasudeo, 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.).

### 2.2.2 Έξυπνος Αυτοκινητόδρομος και Πράσινη Ενέργεια

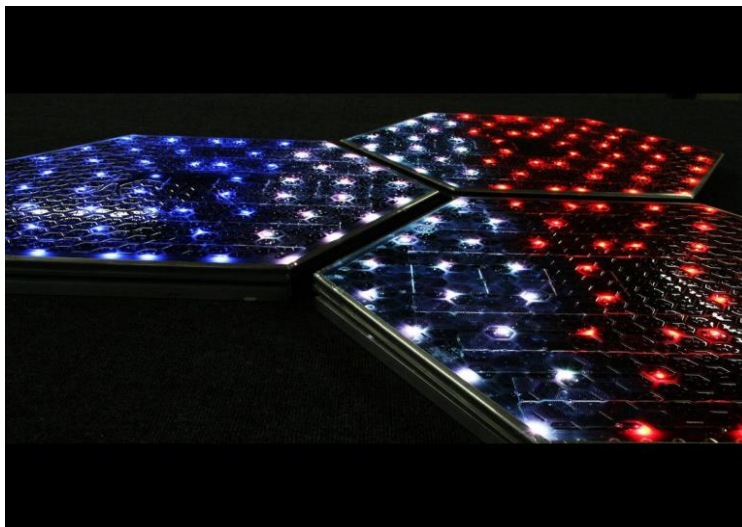
Άλλων ειδών έξυπνες εφαρμογές στους αυτοκινητόδρομους αποτελούν και η εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Πράσινη Ενέργεια), καθώς επιτυγχάνονται η φόρτιση των οχημάτων, ο οδο φωτισμός και η παρακολούθηση του οδικού δικτύου με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της ηλιακής, της αιολικής και της ενέργειας δόνησης. Παρακάτω αναλύονται οι εφαρμογές στον Έξυπνο Αυτοκινητόδρομο 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).

Ως ηλιακός αυτοκινητόδρομος 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 αυτοκινητόδρομοι 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 αυτοκινητόδρομοι 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 αυτοκινητόδρομος ήταν εγχείρημα ενός ζευγαριού από τις ΗΠΑ, το 2011, οι οποίοι οραματίστηκαν έναν αυτοκινητόδρομο από ηλιακά πάνελ,

ο οποίος όμως να κατέχει την απαραίτητη αντοχή για τις διελεύσεις πολυάριθμων οχημάτων (Pawar, et.al., 2018).



Εικόνα 13. Ηλιακοί συλλέκτες για αυτοκινητόδρομους  
(solar roadways.com)

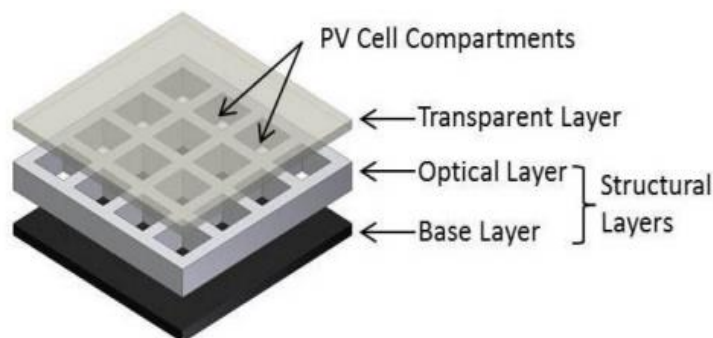
Τα ηλιακά πάνελ είναι σχεδιασμένα σε μορφή κυψελών και περιλαμβάνουν φωτοβολταϊκό υλικό (Aggrawal, Mehta, Tiwari, 2015;Chaitanya, Kurre, Praveen, 2018;Renoald, et.al., 2016). Κάποια από τα φωτοβολταϊκά υλικά, που χρησιμοποιούνται αποτελούνται από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, άμορφο 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 αυτοκινητόδρομος 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

οδοστρώμα (οχημάτων, χιονιού - πάγου) για τη μείωση ή την οριστική εξάλειψη τους μέσω της θερμαντικής τεχνολογίας. Ο έλεγχος του οδοφωτισμού, των διαφόρων επικοινωνιών και παρακολουθήσεων του αυτοκινητόδρομου, 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 14. Στρώσεις τυπικού ηλιακού συλλέκτη

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 αυτοκινητόδρομου, 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 μόλυβδων, 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 υπέρυθρη ακτινοβολία, την κίνηση, αλλά και τη θερμοότητα 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 αυτοκινητόδρομων είναι απαραίτητο να εξασφαλιστούν κάποιες παράμετροι, όπως (Pawar, et.al., 2018; Renoald, et.al., 2016):

- η τοποθέτηση σε καθαρούς αυτοκινητόδρομους, 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)

## 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 αυτοκινητόδρομο 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 αυτοκινητόδρομους 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 αυτοκινητόδρομους, 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-Εξυπνος Αυτοκινητόδρομος” του 1km μπορεί να δώσει ενέργεια σε 40 σπίτια (Kaur,Vishnoy, 2016). Επιπρόσθετα, υποστηρίζεται ότι αυτή η μέθοδος μπορεί να πραγματοποιηθεί εκτός των αυτοκινητόδρομων 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 διάφορων 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 ασφαλτικό 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

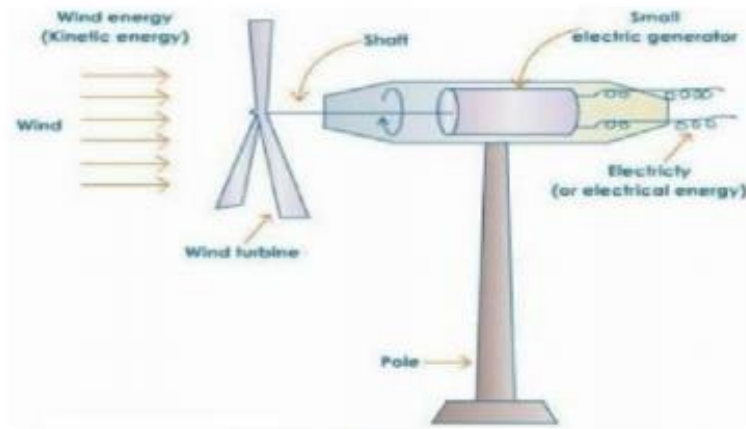


ανέμου, το οποίο όμως δεν συναντάται στις περιπτώσεις των αυτοκινητόδρομων λόγω της “σταθερής” διέλευσης των οχημάτων (Malave, Shivraj, Bhosale, 2013).

Οι ανεμογεννήτριες που τοποθετούνται στους αυτοκινητόδρομους 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

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 περύγια 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. Ενώ άλλου τύπου ανεμογεννήτριες είναι αυτές που τα περύγια 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 περύγια της συνδέονται με σύγχρονη ηλεκτρική γεννήτρια για τη διατήρηση της σταθερότητας της περιστροφικής RPM (περιστροφή ανά λεπτό) (Kalyani, Joshi, Choudhary, 2015).



Εικόνα 15. Λειτουργία ανεμογεννήτριας  
(tutorvista.com)

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 αυτοκινητόδρομους μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε αυτοκινητόδρομο με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο (Malave, Shivraj, Bhosale, 2013).

### 2.3 Internet of Things (IoT) και Smart Highways

Από τότε που εισήχθη πρώτη φορά από τον Kevin Ashton το 1999 ο όρος, Internet of Things (μεταφρ: Διαδίκτυο των πραγμάτων), έχει επαναπροσδιοριστεί και χρησιμοποιείται από αρκετούς μελετητές. Το Διαδίκτυο των πραγμάτων είναι μια έννοια που αναπαριστά ένα νέο κύμα τεχνολογίας στο οποίο πληθώρα συσκευών και αντικειμένων διαθέτουν τα κατάλληλα ηλεκτρονικά μέσα, λογισμικό και αισθητήρες με αποτέλεσμα να έχουν την δυνατότητα να βρίσκονται σε σύνδεση μεταξύ τους σε ένα ευρύτερο δίκτυο. Η γενικότερη φιλοσοφία του διαδικτύου των πραγμάτων είναι η σύνδεση όλων των ηλεκτρονικών συσκευών σε ένα κοινό δίκτυο με απώτερο σκοπό την ανταλλαγή δεδομένων που μετά από κάποια επεξεργασία μετατρέπονται σε χρήσιμα συμπεράσματα για την ζωή του ανθρώπου. (Azmat, et.al., 2019)

Σύμφωνα με τον Τύπο, η Forbes εκτιμά ότι περίπου το 87% του πληθυσμού μέχρι το 2014 δεν γνώριζε τον όρο Internet of Things, ωστόσο, δεν είναι μια καινούρια έννοια και αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 90. Πολλές εφευρέσεις και εξελίξεις κατέστησαν το IoT δυνατό όπως το γνωρίζουμε σήμερα, αυτές οι τεχνολογίες περιλαμβάνουν αλλά δεν περιορίζονται από: τα barcodes, scanners, την αναγνώριση ραδιοσυχνοτήτων (RFID), τις ετικέτες και δέκτες, το Δίκτυο Αντιπροσωπείας Ερευνητικών Έργων Προόδου (ARPAnet), και μετά το Διαδίκτυο κτλ. Τα

συνδεδεμένα αυτοκίνητα emπίπτουν επίσης σε αυτή την κατηγορία, καθώς είναι σε θέση να ανταλλάσσουν δεδομένα με άλλα οχήματα, στοιχεία υποδομής και άλλες συσκευές. Τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν σήμερα οι αυτοκινητόδρομοι και οι αστικές περιοχές μπορούν να αντιμετωπιστούν χρησιμοποιώντας λύσεις βασισμένες στις τεχνολογίες όπως το IoT. Αυτές οι τεχνολογίες περιλαμβάνουν κυρίως το Διαδίκτυο και το GPS (Παγκόσμιο Σύστημα Τοποθεσίας) ενεργοποιημένες συσκευές, για να παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες από διάφορα σημεία δεδομένων, σε συνδυασμό με κάμερες, αισθητήρες, συχνότητες ραδιοφώνων και άλλα εργαλεία που χρησιμοποιούν παρόμοιες τεχνολογίες. (Azmat, et.al., 2019)

Πάνω από δύο δισεκατομμύρια άνθρωποι σε όλο τον κόσμο χρησιμοποιούν το Διαδίκτυο για καθημερινές εργασίες, από την αποστολή και λήψη email μέχρι για τον έλεγχο οικιακών συσκευών. Καθώς όλο και περισσότεροι συμμετέχουν στο δίκτυο της παγκόσμιας υποδομής πληροφοριών και επικοινωνιών, ένα άλλο μεγάλο άλμα που έρχεται, είναι η χρήση του Διαδικτύου ως καθολική βάση για την αλληλοσύνδεση μηχανών και έξυπνων αντικειμένων με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ο διάλογος, υπολογισμός και συντονισμός. Αυτή η ιδέα των φυσικών αντικειμένων που συνδέονται στο Διαδίκτυο με έναν ασύγκριτο ρυθμό φέρνει την κοινωνία ένα βήμα πιο κοντά στην υλοποίηση της ιδέας του Διαδικτύου των πραγμάτων (IoT). Αυτή η τεχνολογία θα μετατρέψει τα παραδοσιακά αντικείμενα σε έξυπνα αντικείμενα αξιοποιώντας τα υποκείμενα των τεχνολογιών, όπως είναι, η διαπερατή και επίμονη πληροφορική, η επικοινωνία, τα δίκτυα αισθητήρων και τα πρωτόκολλα Διαδικτύου (IP). Το IoT έχει απίστευτες δυνατότητες μεταμόρφωσης του μέλλοντος, όπου σχεδόν κάθε καταναλωτική συσκευή, από ένα αυτοκίνητο έως μία κούπα, μπορεί να συνδεθεί μέσω του Διαδικτύου. Αυτό θα θέσει την ίδρυση σημείων δεδομένων, που θα οδηγούσαν σε μια καλύτερη κοινωνία παρέχοντας τεράστιες ποσότητες πολύτιμων αισθητηρίων δεδομένων για την χρήση αναλυτικών στοιχείων και άλλων. (Azmat, et.al., 2019)

Καθώς το Διαδίκτυο των Πραγμάτων έχει αρχίσει να παίζει ενεργό ρόλο στην καθημερινή μας ζωή, αναμένεται να έχει την δυνατότητα να μετατρέψει τους συμβατικούς τρόπους της επιχειρηματικής δραστηριότητας σε αυτοκινητόδρομους. Πάνω από το 90% των έμπειρων ερωτηθέντων μιας ερευνάς, οι οποίοι υπερέχουν στον τομέα τους, πιστεύουν ότι το IoT μπορεί να φέρει επανάσταση στους συμβατικούς τρόπους είσπραξης των φόρων διοδίων. Καθώς όλο και περισσότερα οχήματα θα είναι συνδεδεμένα στο Διαδίκτυο, θα είναι ευκολότερο να εντοπιστούν και να αφαιρεθούν τα διόδια για τη χρήση αυτοκινητοδρόμων. Επιπλέον, το 98% των ερωτηθέντων είναι πεπεισμένοι ότι το Διαδίκτυο των πραγμάτων θα βοηθήσει στον αυτοκινητόδρομο την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο (RTC) και διαχείριση της κυκλοφορίας. Η σε πραγματικό χρόνο επικοινωνία των εθνικών οδών αναφέρεται στην άμεση εκταμίευση των πληροφοριών σε ζωντανή ροή χρησιμοποιώντας την τεχνολογία του IoT. Με αυτό τον τρόπο θα βοηθήσει το δίκτυο συνδεδεμένων και αυτόνομων αυτοκινήτων να χρησιμοποιούν πολλά σημεία δεδομένων. Για παράδειγμα, οι πληροφορίες σχετικά με τον καιρό, τα ατυχήματα και την αλλαγή των ορίων ταχύτητας, τη συμφόρηση ή άλλες καταστάσεις έκτακτης ανάγκης θα μπορούσαν να μεταδοθούν σε πραγματικό χρόνο, ως εκ τούτου, αφήνοντας τα οχήματα να αναδρομολογήσουν το δρομολόγιό τους. Θα βοηθήσει επίσης στην καλύτερη διαχείριση της κυκλοφορίας στις εθνικές οδούς, προκειμένου να συμβαδίζει με το χρόνο. Μπορεί επίσης να οδηγήσει σε διαφορετικές στρατηγικές διοδίων, κατανέμοντας ομοιόμορφα την κυκλοφορία εφαρμόζοντας υψηλότερες τιμές διοδίων κατά τις ώρες συμφόρησης. Αυτό θα μπορούσε

να οδηγήσει σε μεταβλητούς χρόνους αιχμής και μη αιχμής και τα οχήματα θα ενημερώνονταν για τέτοιες αλλαγές μέσω της RTC (real time communication). Το Διαδίκτυο των πραγμάτων θα έχει ίσο αντίκτυπο τόσο στην εθνική οδό RTC όσο και στη διαχείριση της κυκλοφορίας στις εθνικές οδούς. Ωστόσο, σύμφωνα με τους ειδικούς, θα υπάρξει σημαντική επίδραση του Διαδικτύου των πραγμάτων στην είσπραξη διοδίων στις εθνικές οδούς. (Azmat, et.al., 2019)

Αξίζει να σημειωθεί ότι το IoT μπορεί να συμβάλλει στο σύστημα φωτισμού με LED λαμπτήρες, που θα αναλυθεί στην ενότητα 2.4. Το συνδεδεμένο στο Διαδίκτυο φωτιστικό δρόμου, μπορεί αποτελεσματικά να διαχειριστεί και να δώσει τη δυνατότητα της εύκολης αναγνώρισης μιας βλάβης ή σφάλματος. Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, πολλές συσκευές, εργοστάσια, δημόσιος φωτισμός, κ.λπ., έχουν αυτοματοποιηθεί, λόγω της εξέλιξης της ηλεκτρονικής, των τηλεπικοινωνιών και της τεχνολογίας των υπολογιστών. Η δυνατότητα του ελέγχου του φωτισμού με βάση την κυκλοφορία των οχημάτων ή των ανθρώπων και της επικοινωνίας για κάθε είδους πληροφορίες πραγματοποιήθηκε με την εμφάνιση του Διαδικτύου. Σήμερα, τα πιο έξυπνα συστήματα φωτισμού LED επικοινωνούν ασύρματα μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας ZigBee, σε ορισμένες ειδικές περιπτώσεις με χαμηλό αριθμό φωτιστικών και εξοπλισμού, χρησιμοποιείται Wi-Fi. Πολλά έξυπνα συστήματα φωτισμού, με ή χωρίς λαμπτήρες LED, χρησιμοποιούν γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για τη μετάδοση πληροφοριών. Αυτός ο τρόπος επικοινωνίας ήταν ο πρώτος που χρησιμοποιήθηκε πριν από την ύπαρξη πρωτοκόλλων ασύρματης επικοινωνίας. Οι πληροφορίες αποστέλλονται ως bits, τα οποία αποστέλλονται με συχνότητα περίπου 80 kHz μέσω φίλτρων που λειτουργούν με μικροελεγκτή. Αυτός ο τρόπος μετάδοσης πληροφοριών αποδείχθηκε αξιόπιστος στην πράξη, σε σημείο που εξακολουθεί να χρησιμοποιείται και χρησιμοποιείται επίσης σε νέα έργα έξυπνου φωτισμού (Rodriguez, 2019).

### 2.3.1. Μοντέλο Αναφοράς του IoT

Το σχήμα 4 δείχνει το μοντέλο αναφοράς του IoT. Αποτελείται από τέσσερα επίπεδα, καθώς και η διαχείριση των δυνατοτήτων και οι δυνατότητες της ασφάλειας σχετίζονται με τα τέσσερα επίπεδα. Τα τέσσερα επίπεδα είναι τα εξής («Next Generation Networks», 2012):

- Επίπεδο εφαρμογής, περιέχει εφαρμογές του IoT
- Επίπεδο υποστήριξης υπηρεσιών και υποστήριξης εφαρμογών
- Επίπεδο δικτύου
- Επίπεδο συσκευής

#### 1. Επίπεδο υποστήριξης υπηρεσιών και υποστήριξης εφαρμογών

Το επίπεδο υποστήριξης υπηρεσιών και υποστήριξης εφαρμογών αποτελείται από τις δύο ακόλουθες κατηγορίες («Next Generation Networks», 2012):

- Γενικές δυνατότητες υποστήριξης: Οι γενικές δυνατότητες υποστήριξης είναι κοινές δυνατότητες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από διαφορετικές εφαρμογές του IoT, όπως επεξεργασία δεδομένων ή αποθήκευση δεδομένων. Αυτές οι δυνατότητες μπορεί επίσης να επικαλεστούν από συγκεκριμένες δυνατότητες υποστήριξης, π.χ. για την κατασκευή άλλων ειδικές δυνατότητες υποστήριξης.
- Ειδικές δυνατότητες υποστήριξης: Οι συγκεκριμένες δυνατότητες υποστήριξης είναι συγκεκριμένες δυνατότητες που καλύπτουν τις απαιτήσεις των διαφοροποιημένων εφαρμογών. Στην πραγματικότητα, μπορεί να αποτελούνται από διάφορες λεπτομερείς ομάδες δυνατοτήτων, προκειμένου να παρέχονται διαφορετικές λειτουργίες υποστήριξης σε διαφορετικές εφαρμογές του IoT.

## 2. Επίπεδο δικτύου

Το επίπεδο δικτύου αποτελείται από τους ακόλουθους δύο τύπους δυνατοτήτων («Next Generation Networks», 2012):

- Δυνατότητες δικτύωσης: παροχή σχετικών λειτουργιών ελέγχου της συνδεσιμότητας του δικτύου, όπως λειτουργίες ελέγχου πρόσβασης και μεταφοράς πόρων, διαχείριση κινητικότητας ή έλεγχος ταυτότητας, εξουσιοδότηση και λογιστική.
- Δυνατότητες μεταφοράς: εστίαση στην παροχή συνδεσιμότητας για τη μεταφορά της υπηρεσίας του IoT και πληροφορίες δεδομένων για συγκεκριμένες εφαρμογές, καθώς και τη μεταφορά ελέγχου που σχετίζεται με το IoT και πληροφορίες διαχείρισης.

## 3. Επίπεδο συσκευής

Οι δυνατότητες επιπέδου συσκευής μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο είδη δυνατοτήτων («Next Generation Networks», 2012):

- Δυνατότητες Συσκευής:

Οι δυνατότητες της συσκευής περιλαμβάνουν, αλλά δεν περιορίζονται στη:

1. Άμεση αλληλεπίδραση με το δίκτυο επικοινωνίας: Οι συσκευές μπορούν να συλλέγουν και να ανεβάζουν πληροφορίες απευθείας (δηλαδή, χωρίς χρήση δυνατοτήτων πύλης) στην επικοινωνία του δικτύου και μπορεί να λαμβάνει απευθείας πληροφορίες (π.χ. εντολές) από την επικοινωνία του δικτύου.
2. Έμμεση αλληλεπίδραση με το δίκτυο επικοινωνίας: Οι συσκευές μπορούν να συλλέγουν και να ανεβάζουν πληροφορίες στο δίκτυο επικοινωνίας έμμεσα, δηλαδή μέσω δυνατοτήτων πύλης. Από την άλλη πλευρά, οι συσκευές μπορούν έμμεσα να λαμβάνουν πληροφορίες (π.χ. εντολές) από το δίκτυο επικοινωνίας.

3. Δικτύωση επί τούτω: Οι συσκευές ενδέχεται να μπορούν να κατασκευάζουν δίκτυα με έναν επί τούτω τρόπο σε ορισμένα σενάρια που χρειάζονται αυξημένη επεκτασιμότητα και γρήγορη ανάπτυξη.

4. Ύπνος και αφύπνιση: Οι δυνατότητες της συσκευής μπορεί να υποστηρίζουν το "ύπνο" και το "ξύπνημα" μηχανισμοί εξοικονόμησης ενέργειας.

- Δυνατότητες πύλης:

Οι δυνατότητες πύλης περιλαμβάνουν αλλά δεν περιορίζονται στη:

1. Υποστήριξη πολλαπλών διασυνδέσεων: Στο επίπεδο της συσκευής, οι δυνατότητες πύλης υποστηρίζουν συσκευές που συνδέονται μέσω διαφορετικών ειδών ενσύρματων ή ασύρματων τεχνολογιών, όπως ένας ελεγκτής λεωφορείο δικτύου δικτύου (CAN), ZigBee, Bluetooth ή Wi-Fi. Στο επίπεδο δικτύου, οι δυνατότητες της πύλης μπορεί να είναι η επικοινωνία μέσω διαφόρων τεχνολογιών, όπως τα κοινά δίκτυα τηλεφωνικού δικτύου (PSTN), δεύτερης γενιάς ή τρίτης γενιάς (2G ή 3G), μακροπρόθεσμα δίκτυα εξέλιξης (LTE), Ethernet ή ψηφιακές γραμμές συνδρομητών (DSL).

2. Μετατροπή πρωτοκόλλου: Υπάρχουν δύο καταστάσεις όπου απαιτούνται οι δυνατότητες της πύλης. Η μία κατάσταση είναι όταν οι επικοινωνίες στο επίπεδο της συσκευής χρησιμοποιούν διαφορετικά πρωτόκολλα επιπέδου συσκευής, π.χ., πρωτόκολλα τεχνολογίας ZigBee και πρωτόκολλα τεχνολογίας Bluetooth, το άλλο είναι όταν οι επικοινωνίες που αφορούν τόσο το επίπεδο συσκευής όσο και το επίπεδο δικτύου χρησιμοποιούν διαφορετικά πρωτόκολλα π.χ. ένα πρωτόκολλο τεχνολογίας ZigBee στο επίπεδο της συσκευής και μια τεχνολογία 3G πρωτόκολλο στο επίπεδο δικτύου.

## 2.4 Σύστημα οδοφωτισμού έξυπνων LED

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.

#### 2.4.1. Έξυπνος Οδοφωτισμός και Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ο έξυπνος οδοφωτισμός με LED λαμπτήρες σε συνεργασία με μία ανανεώσιμη πηγή ενέργεια θα επιφέρει εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους. Μεγαλύτερος στόχος είναι η επίτευξη της πλήρους ενεργειακής αποδοτικότητας, όπου οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα χρησιμοποιηθούν για να παρέχουν στο σύστημα φωτισμού των έξυπνων LED την ενέργεια που απαιτείται για να ανάψουν τις συσκευές φωτισμού των LED και να ενεργοποιήσουν το ολόκληρο σύστημα ελέγχου τους (Rodriguez, 2019).

Λόγω της οικονομικής προσιτότητας, την ευκολία και τη συνάφεια που έχει η ηλιακή ενέργεια, τα τρέχοντα έργα χρησιμοποιούν φωτοβολταϊκά ηλιακά πάνελ ως κύριο ανανεώσιμο πόρο. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η τοποθέτηση ενός ηλιακού πίνακα στον ίδιο τον πόλο, παρέχει μια ανεξάρτητη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος για κάθε λαμπτήρα στο ευφύες σύστημα των LED, υποδηλώνοντας ότι ο λαμπτήρας εξαρτάται όσο το δυνατόν περισσότερο από τη φωτοβολταϊκή ενέργεια (Rodriguez, 2019).

Για την αποθήκευση ενέργειας που είναι αναγκαία για τη νυχτερινή λειτουργία του λαμπτήρα, τα φωτοβολταϊκά πάνελ διαθέτουν μπαταρία ή τράπεζα μπαταριών. Με την πάροδο του χρόνου, η χωρητικότητα των μπαταριών γίνεται μεγαλύτερη. Επομένως, μια ενιαία μπαταρία αναμένεται να συντηρήσει πολλούς πόλους με λαμπτήρες και τον αντίστοιχο εξοπλισμό τους. Με βάση εκτιμήσεις σχετικά με άλλες εναλλακτικές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, όπως τον αέρα, το νερό και τις γεωθερμικές πηγές, κ.λπ., η εναλλαγή τους θα δημιουργήσει ένα πιο έξυπνο και βιώσιμο σύστημα (Rodriguez, 2019).

Οι περιπτώσεις για την λειτουργία της ενεργειακής απόδοσης είναι δύο (Rodriguez, 2019):

- Η ανανεώσιμη ενέργεια που λειτουργεί κοντά στη θάλασσα, όπου η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας παλιρροιακής προέλευσης, η οποία συνίσταται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την κίνηση των κυμάτων της θάλασσας, μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη σε μέρη κοντά στη θάλασσα.



- Η φωτοβολταϊκή ενέργεια που λειτουργεί σε απομακρυσμένες περιοχές που δεν υπάρχει εταιρεία διανομής, ή σε μικρά χωριά όπου απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια για δημόσιο φωτισμό, είναι αποδοτική.

#### 2.4.2. Ενεργειακή Απόδοση

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):

Table 1. Σύγκριση των χαρακτηριστικών των φωτιστικών που χρησιμοποιούνται στον δημόσιο φωτισμό.

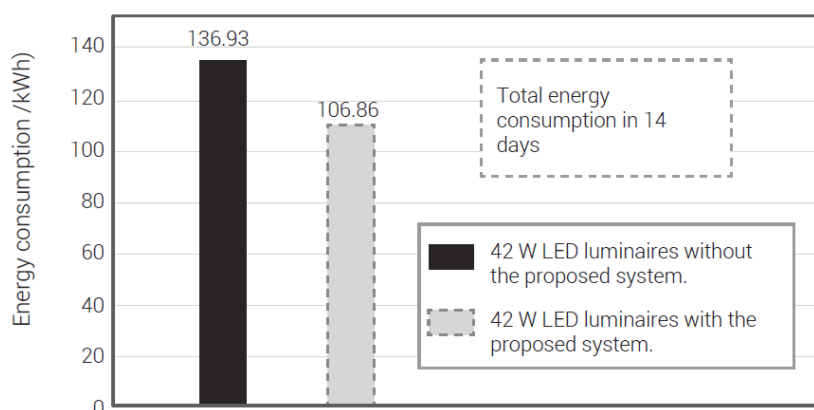
Παράμετρος	LED	HPS (Νάτριο υψηλής πίεσης)	HPM (Υδράργυρος υψηλής πίεσης)	HID (Απαλλαγή υψηλής έντασης)
Ενεργός Δύναμη [W]	63	70	80	100
Φωτεινή Απόδοση [Lm / W]	52	85	46	80
Ωφέλιμη ζωή [ώρες]	> 50.000	28.000	16.000	10.000
CRI (χρωματικός δείκτης αναπαραγωγής)	>80	30	48	70
Φωτεινότητα [Lm]	3.225	6.000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

#### 2.4.2.1. Ενεργειακή Αποδοτικότητα

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 το σχήμα 1, 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).

#### 2.4.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συστημάτων φωτισμού των έξυπνων LED

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 επαρκής 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. Οφέλη των εφαρμογών

#### 1. Internet of Things

Στην περίπτωση των αυτοκινητοδρόμων, το IoT θα είχε πολλά οφέλη, για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας τα αυτοκίνητα ως έξυπνα αντικείμενα, θα είναι δυνατό να αποφευχθεί η συμφόρηση παρακολουθώντας τα προβλήματα σε πραγματικό χρόνο και την ανάπτυξη υπηρεσιών που προσφέρουν συμβουλές δρομολόγησης της κυκλοφορίας για την καλύτερη διαχείρισή της. Οι συνδεδεμένοι στο Διαδίκτυο αισθητήρες μπορούν να παρακολουθούν τη ροή των αυτοκινήτων στους αυτοκινητόδρομους και να συλλέγουν χρήσιμες πληροφορίες, όπως τον αριθμό των αυτοκινήτων σε οποιοδήποτε δεδομένο χρονικό σημείο και τόπο και τη μέση ταχύτητα τους. Τα εργαλεία που δημιουργούνται από το IoT σε αυτοκινητόδρομους είναι η ανίχνευση του επιπέδου του διοξειδίου του άνθρακα, των ΑΣ10, κλπ. με αποτέλεσμα οι πληροφορίες αυτές να διανέμονται σε οργανισμούς υγείας. Επιπλέον, οι συνδεδεμένοι αισθητήρες και άλλες συσκευές θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε ορισμένες ρυθμίσεις αυτοκινητοδρόμων για τον εντοπισμό παραβιάσεων κυκλοφορίας και ταχύτητας και τη διαβίβαση των σχετικών δεδομένων στις υπηρεσίες επιβολής του νόμου για την αναγνώριση του παραβάτη ή για την αποθήκευση λεπτομερειών για την παρακολούθηση της έρευνας μιας σκηνής ατυχήματος (Azmat, et.al., 2019).

#### 2. Solar Roadways (Ηλιακοί Αυτοκινητόδρομοι)

Οι ηλιακοί αυτοκινητόδρομοι χαρακτηρίζονται από πολλά πλεονεκτήματα, όπως:

- Ανανεώσιμη και διάρκεια ζωής:

Το κύριο πλεονέκτημα της έννοιας Solar Roadway είναι ότι χρησιμοποιεί μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έχει τη δυνατότητα να μειώσει την εξάρτησή μας από συμβατικές πηγές ενέργειας όπως τον άνθρακα, το πετρέλαιο και άλλα ορυκτά καύσιμα. Επίσης, η διάρκεια ζωής των ηλιακών συλλεκτών είναι περίπου 30-40 χρόνια, πολύ μεγαλύτερη από την κανονική ασφάλτο, η οποία διαρκεί μόνο 7-12 χρόνια (Kulkarni, 2013).

- Δεν υπάρχουν απαιτήσεις για την ανάπτυξη περιβαλλοντικά ευαίσθητων εκτάσεων:

Ένα άλλο πλεονέκτημα του Solar Roadway είναι ότι δεν απαιτεί την ανάπτυξη αγροεξοικονομικών και δυνητικά περιβαλλοντικά ευαίσθητων εκτάσεων. Αυτό είναι επί του παρόντος ένα πολύ αμφιλεγόμενο ζήτημα με μεγάλες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις στις νοτιοδυτικές ΗΠΑ και σε άλλα μέρη. Αλλά επειδή οι δρόμοι είναι ήδη εκεί, αυτό δεν είναι ζήτημα. Επίσης, σε αντίθεση με τις μεγάλες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, δεν θα απαιτηθούν νέοι διάδρομοι μετάδοσης - σε ολόκληρη την περιβαλλοντικά ευαίσθητη γη - για την παροχή ισχύος στους καταναλωτές στις αστικές περιοχές. Οι γραμμές μεταφοράς θα μπορούσαν απλώς να εκτελούνται κατά μήκος ήδη καθιερωμένων οδών (Kulkarni, 2013).

- Εν κινήσει φόρτιση:

Με επαγωγική επένδυση ενσωματωμένη σε αυτούς τους δρόμους, όλα τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα μπορούν να επαναφορτιστούν ενώ κινείται πάνω από αυτούς τους δρόμους. Αυτό θα μείωνε το κόστος και την αναστάτωση χρόνου για να περιμένετε σε ένα σταθμό φόρτισης (Kulkarni, 2013).

### 3. Αιολική Ενέργεια (Wind power)

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, που προσφέρει:

- Πιθανή μείωση της χρήσης καυσίμου του οχήματος

Η οδήγηση κατά μήκος μιας μακράς σειράς ανεμογεννητριών κάνει κάποιον να αναρωτιέται αν οι στρόβιλοι προκαλούν αντίσταση στην διέλευση της κυκλοφορίας. Εάν συνέβαινε αυτό, τα οχήματα θα κατανάλωναν επιπλέον καύσιμα και χωρίς ανεμογεννήτριες. Ωστόσο, οι ανεμογεννήτριες περιστρέφονται γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα και τοποθετούνται στο διάμεσο. Η οδήγηση κατά μήκος αυτής της εθνικής οδού θα μπορούσε ενδεχομένως να εξοικονομήσει καύσιμα αντί να κοστίζει περισσότερα καύσιμα. Εμπειρογνώμονες του ανέμου οι Zaaijer, Van Raemsdonk και Stevenhagen όλοι αισθάνονται ότι εάν υπάρχει οποιαδήποτε επίδραση, θα κλίνει περισσότερο προς την μείωση των καυσίμων αντί για την επιπλέον κατανάλωση καυσίμου. Λόγω του υψηλού βαθμού αβεβαιότητας και της έλλειψης συγκεκριμένων μελετών, αυτό το αποτέλεσμα περιλαμβάνεται στο SCBA (ανάλυση κοινωνικού κόστους-οφέλους) έχει όφελος με άγνωστη αξία (Jong, 2015).

- Μεγαλύτερη οδική ασφάλεια

Πολλοί οδηγοί χρησιμοποιούν προβολείς xenon ή πίσω φώτα στα οχήματά τους. Μια δημοσκόπηση μεταξύ περισσότερων από δεκατρείς χιλιάδες οδηγούς έδειξε ότι πάνω από το 90% των ερωτηθέντων

πιστεύουν ότι ο φωτισμός χενοπ είναι επικίνδυνος (Bagott, 2011). Μια μελέτη από το Πανεπιστήμιο του Κάνσας έδειξε ότι ειδικά οι ηλικιωμένοι υποφέρουν από προβολείς λόγω εκφόρτισης υψηλής έντασης που προκαλούν εκτυφλωτική λάμψη (Mainster & Timberlake, 2003). Έτσι, βελτιώνοντας παράλληλα την ασφάλεια ενός οδηγού, η χρήση αυτών των λαμπτήρων μειώνει την ασφάλεια των οδηγών που αντιμετωπίζουν τα φώτα σε μια άλλη λωρίδα (Jong, 2015).

Ο Arjan de Bakker, διευθυντής προγράμματος στο ANWB, έχει παρατηρήσει υψηλό ποσοστό κριτικής σχετικά με την αυξανόμενη ποσότητα ατόμων που οδηγούν με προβολείς Χενοπ στις Κάτω Χώρες (de Bakker, 2014). Η οικοδόμηση ενός τοίχου από ανεμογεννήτριες θα μπορούσε να μειώσει δραστικά την εκτυφλωτική επίδραση για τους οδηγούς στην άλλη πλευρά της εθνικής οδού. Αυτό σημαίνει λιγότερο επικίνδυνες καταστάσεις λόγω τύφλωσης και λιγότερης αγανάκτησης για τους οδηγούς, αυξάνοντας την άνεση οδήγησης (Jong, 2015).

- Πλεονέκτημα πρώτης μετακίνησης

Η κατασκευή ανεμογεννητριών για αυτοκινητόδρομους και η τοποθέτησή τους είναι εντελώς νέα. Πουθενά στον κόσμο δεν έχει χρησιμοποιηθεί ένας αυτοκινητόδρομος για να τοποθετήσει μια σειρά από εκατοντάδες έως χιλιάδες ανεμογεννήτριες. Ως εκ τούτου, η χώρα που θα το υλοποιήσει πρώτη θα μπορούσε να επωφεληθεί από ένα "πλεονέκτημα πρώτης μετακίνησης" (Jong, 2015).

- Υψηλότερη διαθεσιμότητα θέσεων εργασίας

Η παραγωγή και εγκατάσταση χιλιάδων ανεμογεννητριών κατά μήκος της εθνικής οδού απαιτεί κάποιο εκτεταμένο ανθρώπινο δυναμικό. Μετά την εγκατάσταση των στροβίλων, πρέπει επίσης να διατηρηθούν. Αυτό θα σήμαινε τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας. Παρόλο που η παραγωγή των ανεμογεννητριών πιθανότατα δεν θα πραγματοποιηθεί στις Κάτω Χώρες, η συναρμολόγηση, εγκατάσταση και συντήρηση των ανεμογεννητριών θα γίνει από ολλανδούς εργαζόμενους. Προκειμένου να δημιουργηθούν κοινωνικά οφέλη, οι δημιουργούμενες θέσεις εργασίας πρέπει να είναι πρόσθετες θέσεις εργασίας. Εάν οι εργαζόμενοι αναδιανέμονται σε νέες θέσεις εργασίας, δεν υπάρχει πρόσθετη διαθεσιμότητα θέσεων εργασίας, επομένως δεν υπάρχουν κοινωνικές παροχές (Jong, 2015).

Η ανάλυση Algemene Leidraad Maatschappelijke Kosten Baten αναφέρει ότι εκτός εάν ένα έργο παρέχει άμεσες επιπτώσεις στην αγορά εργασίας, δεν υπάρχουν κοινωνικά οφέλη εκτός εάν το έργο οδηγεί σε επιπτώσεις συσσωμάτωσης (CPB, 2013). Οι μελέτες κοινωνικού κόστους-οφέλους της CPB και η απόφαση για την κατασκευή υπεράκτιων αιολικών πάρκων συνήχθησαν σύμφωνα με το Algemene Leidraad. Η κατασκευή νέων υπεράκτιων αιολικών πάρκων δεν οδηγεί σε πρόσθετες θέσεις εργασίας. Ωστόσο, υπάρχουν SCBA που παρέχουν αντεπιχειρήματα κατά του Leidraad και συμπεριέλαβαν υψηλότερη διαθεσιμότητα θέσεων εργασίας ως κοινωνικό όφελος στις σπουδές τους (VNG, 2013, CE Delft, 2013, CE Delft, 2012). Η κοινή συμφωνία μεταξύ των μελετών είναι ότι η μεγάλη πλειοψηφία των εργαζομένων αναδιανέμεται σε νέες θέσεις εργασίας, αλλά όχι όλες. Αυτό οδηγεί σε περιορισμένο αριθμό πρόσθετων θέσεων εργασίας, με αποτέλεσμα ορισμένα κοινωνικά οφέλη. Η κοινή συμφωνία μεταξύ των μελετών είναι ότι η μεγάλη πλειοψηφία των εργαζομένων αναδιανέμεται σε νέες θέσεις εργασίας, αλλά όχι όλες. Αυτό οδηγεί σε περιορισμένο αριθμό πρόσθετων θέσεων εργασίας, με αποτέλεσμα ορισμένα κοινωνικά οφέλη. Μια διεθνής μελέτη

σχετικά με τις επενδύσεις υπεράκτιων αιολικών πάρκων στο Ηνωμένο Βασίλειο καταλήγει επίσης στο συμπέρασμα ότι θα δημιουργηθεί περιορισμένος αριθμός πρόσθετων θέσεων εργασίας (CE, 2012). Όλες οι μελέτες συμφωνούν ότι οποιαδήποτε επίδραση στη διαθεσιμότητα θέσεων εργασίας θα ήταν μεγαλύτερη βραχυπρόθεσμα και όχι μακροπρόθεσμα. Στην περίπτωση του έργου ανεμογεννητριών αυτοκινητοδρόμων, η SCBA περιλαμβάνει την επίδραση διαθεσιμότητας θέσεων εργασίας ως όφελος, αλλά η αξία της δεν έχει ακόμη καθοριστεί (Jong, 2015).

#### 4. Ενέργεια Δόνησης (Vibration Energy)

Ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα της ενέργειας δόνησης είναι ότι η κίνηση των οχημάτων είναι πάντα σταθερή στους πολυσύχναστους δρόμους αλλά και στους αυτοκινητόδρομους, με αποτέλεσμα η δύναμη να παράγεται διαρκώς. Αυτή η πηγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια μακροπρόθεσμη επένδυση που την καθιστά διαρκής, ανεξάρτητη και ανεπηρέαστη από τις κλιματολογικές συνθήκες. Επίσης η δύναμη που παράγεται από την έννοια των «πιεζοηλεκτρικών-έξυπνων δρόμων» είναι Green power («πράσινη» ενέργεια) και δεν προκαλεί καμία ζημιά στο περιβάλλον. Για παράδειγμα, συμβάλλει στην μηδενική εκπομπή των αερίων του θερμοκηπίου. Ακόμη, η χρήση αυτής της δύναμης μπορεί να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά για τον οδικό φωτισμό και για άλλους μικρής κλίμακας σκοπούς (Kumar , 2013;Walubita, et.al., 2018;Symeoni, n.d.).

#### 5. Τεχνολογίες Smart Highway

Τα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση της έξυπνης υποδομής μπορούν να παρέχονται σε διαφορετικές ομάδες χρηστών του συστήματος. Κάποιοι από αυτούς είναι οι οδηγοί χειροκίνητων, ημι-αυτόνομων και αυτόνομων αυτοκινήτων, ο χειριστής του αυτοκινητόδρομου και ένας τελεστής ενός αυτόνομου αυτοκίνητο.

- Πρόγραμμα οδήγησης χειροκίνητου, ημιαυτόνομου και αυτόνομα αυτοκίνητα

Τα μηχανοκίνητα οχήματα δεν έχουν πολλές πληροφορίες αισθητήρα αλλά μπορούν να επωφεληθούν από τις πληροφορίες υποδομής από ενσωματωμένες συσκευές. Σε περίπτωση που ο οδηγός χρησιμοποιεί το τηλέφωνό του για πληροφορίες πλοήγησης, πληροφορίες για την υποδομή μπορούν να προσφερθούν στον οδηγό. Οι προειδοποιήσεις για επικίνδυνες καταστάσεις κυκλοφορίας ή πληροφορίες διαδρομής μπορούν να μεταδοθούν. Μπορεί να προειδοποιηθεί ο οδηγός ενός ημι-αυτόνομου αυτοκινήτου διαφορετικών σεναρίων κυκλοφορίας που μπορούν να ταξινομηθούν βάσει των πληροφοριών που παρέχεται από το σύστημα αισθητήρων. Μετά την ατελή λίστα περιλαμβάνει μερικά παραδείγματα σεναρίων κυκλοφορίας (Wiegand, 2019):

- Ακίνητοποιημένο όχημα (Standing Vehicle):

Σε περίπτωση οχήματος που καταρρέει στην εθνική οδό, τα υπόλοιπα αυτοκίνητα στον αυτοκινητόδρομο μπορούν να προειδοποιηθούν ότι ένα όχημα είναι ακίνητοποιημένο.

- Οδηγός φαντασμάτων (Ghost Rider):



Σε περίπτωση οδηγού που εισέρχεται κατά λάθος στον αυτοκινητόδρομο με λάθος τρόπο, το σύστημα αισθητήρων μπορεί να αναγνωρίσει αυτό το όχημα και να προειδοποιήσει άλλα οχήματα στον αυτοκινητόδρομο για τον οδηγό φαντασμάτων.

- Κακές καιρικές συνθήκες:

Κατά τη διάρκεια κακών καιρικών συνθηκών, ο προσανατολισμός στον αυτοκινητόδρομο μπορεί να είναι δύσκολος για τον οδηγό. Σε αυτήν την περίπτωση, η γύρω κυκλοφορία και η απόσταση μεταξύ οχημάτων μπορεί να παρασχεθεί στον χρήστη. Συνδυάζοντας δεδομένα αισθητήρων από τα οχήματα στο δρόμο και δεδομένα αισθητήρων από την Providentia, η ακρίβεια των εντοπισμένων αντικειμένων θα μπορούσε να αυξηθεί. Οι κάμερες που χρησιμοποιούν βαθιά μάθηση για την προσέγγιση ανίχνευσης αντικειμένων και τα ραντάρ που παρέχουν ανίχνευση αντικειμένων συγχωνεύουν τα δεδομένα σε μια μονάδα σύντηξης δεδομένων. Συνδυάζοντας τις δυνατότητες των αισθητήρων (οι κάμερες είναι καλοί αισθητήρες ταξινόμησης και τα ραντάρ καθορίζουν ταχύτητες και γωνίες) χρησιμοποιείται ένα πιο στιβαρό σύστημα που καλύπτει όλες τις καιρικές συνθήκες από τα συστήματα αισθητήρων μεμονωμένων οχημάτων (Wiegand, 2019).

- Έγκαιρη προειδοποίηση:

Σε περίπτωση συστήματος αισθητήρων αυτοκινητοδρόμων που διανέμεται κατά μήκος αρκετά χιλιόμετρα της εθνικής οδού ο οδηγός, μπορεί να προειδοποιηθεί νωρίς για πιθανά ατυχήματα ή επικίνδυνες καταστάσεις κατά μήκος της οδού. Το σύστημα υποδομής έχει το πλεονέκτημα του έχοντας μια συνολική επισκόπηση των ακριβών πληροφοριών σχετικά με τη κίνηση στην εθνική οδό. Σήμερα τα συστήματα προηγμένης βοήθειας οδηγού ανιχνεύουν αντικείμενα και καταστάσεις κυκλοφορίας σε κοντινή απόσταση και προειδοποιεί τον οδηγό για καταστάσεις πέδησης σε κοντινή απόσταση από το ego vehicle. Η Providentia όμως είναι ικανή να ανιχνεύσει σενάρια πέδησης που οδηγούν σε καταρράκτες φρένων. Ένας καταρράκτης φρένων προέρχεται από ένα γρήγορο φρενάρισμα αυτοκινήτου και μπορεί να οδηγήσει σε κυκλοφοριακή συμφόρηση και σε ατυχήματα από αυτοκίνητα που ακολουθούν. Μία έγκαιρη προειδοποίηση για αυτοκίνητα ταχείας πέδησης μπορεί, ως εκ τούτου, να οδηγήσει σε ομαλότερη ροή κυκλοφορίας και ταχύτερη και ασφαλέστερη διαδρομή (Wiegand, 2019).

Ο οδηγός ενός αυτόνομου αυτοκινήτου επωφελείται από την έξυπνη υποδομή μάλλον έμμεσα καθώς δεν κάνει διάκριση μεταξύ των πηγών ότι το όχημα πρέπει να οδηγήσει. Το σύστημα αισθητήρων στην εθνική οδό είναι ένα πλεονάζον σύστημα αισθητήρων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον αλγόριθμο του αυτόνομου αυτοκινήτου για την επικύρωση των πληροφοριών του αισθητήρα ή επεκτείνει τις πληροφορίες αισθητήρα του αυτοκινήτου. Αυτόνομα φορτηγά που είναι συνδεδεμένα με άλλα φορτηγά μέσω αισθητήρων που μπορούν να οδηγούν σε μια διμοιρία ο αυτοκινητόδρομος. Οι αισθητήρες υποδομής παρέχουν έναν τρόπο προσθήκης αισθητήρα πληροφορίες και τιμές ελέγχου σε αυτά τα πλατόνια. Με βελτιστοποιημένη επισκεψιμότητα ροή, αυτά τα πλατόνια μπορούν να λάβουν πληροφορίες σχετικά με την επόμενη διαδρομή για να βελτιώσουν το σχεδιασμό των δρομολογίων τους. Τρέχοντα έργα που ερευνούν την εκτόξευση αυτοκινήτου έχει ως στόχο να διατηρήσει ένα σταθερό κενό μεταξύ οχήματα ή εκτελούν αποφυγή ελιγμών, όπως πέδηση έκτακτης ανάγκης (Wiegand, 2019).



- Χειριστής της εθνικής οδού

Ο χειριστής της εθνικής οδού πρέπει να συντηρήσει τον αυτοκινητόδρομο σχετικά με ζημιές και ατυχήματα προκειμένου να ανακατευθύνετε τη ροή της κυκλοφορίας. Οι πρόσθετες πληροφορίες που συλλέγονται από την έξυπνη υποδομή μπορούν να μεταδοθούν στον αερομεταφορέα προκειμένου να βελτιωθεί ο σχεδιασμός της κυκλοφορίας. Τα οχήματα έκτακτης ανάγκης μπορούν να επιβλέπονται από μακριά για να βρουν τον καλύτερο και ταχύτερο τρόπο για ένα ατύχημα. Αυτήν τη στιγμή, η κυκλοφορία στον αυτοκινητόδρομο κατευθύνεται χειροκίνητα αλλάζοντας τους περιορισμούς ταχύτητας ή υποδεικνύοντας ότι η λωρίδα έκτακτης ανάγκης μπορεί να χρησιμοποιηθεί από οχήματα. Η διαχείριση της ροής της κυκλοφορίας θα μπορούσε να ενεργοποιηθεί από την έξυπνη υποδομή προβλέποντας τις τροχιές και τη συμπεριφορά των οχημάτων. Παρέχοντας ο χειριστής με ακριβή πυκνότητα κυκλοφορίας στο δρόμο, ο μέσος όρος ταχύτητα των οχημάτων και προβλεπόμενη ελιγμούς μέρος της κυκλοφορίας ο έλεγχος ροής θα μπορούσε να αυτοματοποιηθεί. Η προσοχή του οδηγού μπορεί να κατευθύνεται σε κρίσιμες καταστάσεις στην εθνική οδό και ως εκ τούτου δημιουργεί το χρόνο αντίδρασης πιο γρήγορα (Wiegand, 2019).

- Τηλε-χειριστής αυτόνομου αυτοκινήτου

Τα αυτόνομα αυτοκίνητα πιθανότατα θα αντιμετωπίσουν όρια λειτουργικότητας σε ορισμένες καταστάσεις στις οποίες οι αισθητήρες τους καταρρέουν ή δεν υπάρχουν αρκετές πληροφορίες περιβάλλοντος για ασφαλή λειτουργία του αυτοκινήτου. Σε τέτοιες καταστάσεις, ένας τηλε-χειριστής μπορεί να είναι σε θέση να κατευθύνει το αυτοκίνητο στον προορισμό του. Παρέχοντας στον τηλε-χειριστή πληροφορίες σχετικά με το περιβάλλον από το αυτοκίνητο είναι σε θέση να κατευθύνει το αυτοκίνητο από την απόσταση για παράδειγμα με joystick. Ακόμη και αν οι αισθητήρες του ίδιου του οχήματος δεν εργάζονται, το περιβάλλον του αυτοκινήτου παρακολουθείται από την υποδομή αισθητήρων και επομένως δεν αντιμετωπίζουν τους ίδιους περιορισμούς όπως οι αισθητήρες του αυτοκινήτου. Μέσω αυτής της περιττής διασύνδεσης, οι χαμένες πληροφορίες του αυτοκινήτου μπορούν να αντικατασταθούν. Η απεικόνιση της εθνικής οδού αποτρέπει καταστάσεις στις οποίες οι επιβάτες του αυτοκινήτου δεν είναι σε θέση για να συνεχίσουν το ταξίδι τους (Wiegand, 2019).

## 2.6 Αρνητική Πλευρά

### 1. Internet of Things

Καθώς ο κόσμος γίνεται πιο διασυνδεδεμένος μέσω του Διαδικτύου, γεννά ένα ενδιαφέρον ψηφιακό φαινόμενο στον κόσμο της τεχνολογίας γνωστό ως το Internet of Things (IoT), αλλά αυτή η τεχνολογία φέρνει μαζί του πολλές νομικές προκλήσεις. Αυτές οι προκλήσεις μπορεί να περιλαμβάνουν, αλλά δεν περιορίζονται, σε παραβιάσεις απορρήτου και σε κινδύνους ασφαλείας. Σύμφωνα με τους Miorandi και Bandyopadhyay & Sen , η ασφάλεια είναι μια κρίσιμη πτυχή της ευρείας υιοθέτησης τεχνολογιών και εφαρμογών του IoT. Οι φορείς είναι απίθανο να υιοθετήσουν τις λύσεις του IoT σε μεγάλη κλίμακα, εκτός εάν η εμπιστευτικότητα, η αυθεντικότητα και προστασία της ιδιωτικής ζωής είναι εγγυημένη. Προσέθεσαν περαιτέρω την εμπιστευτικότητα των δεδομένων,

η οποία σηματοδοτεί ένα ουσιαστικό ζήτημα στις ρυθμίσεις του IoT και ότι μόνο τα επικυρωμένοι οργανισμοί θα πρέπει να έχουν πρόσβαση και να τροποποιούν τα δεδομένα. Η συζήτηση επίσης περιλαμβάνει ότι η ιδιωτικότητα και η εμπιστοσύνη είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες κατά την αντιμετώπιση των εφαρμογών και των κανόνων του IoT, όπου πρέπει να οριοθετείτε ότι, τα δεδομένα που αφορούν μεμονωμένους χρήστες μπορούν να ανακτηθούν. Περαιτέρω, τα ζητήματα απορρήτου αντιμετωπίζονται καθώς η νομική κοινότητα καλείται να προετοιμαστεί για την ανησυχητική ανάδευση της ψηφιακής εποχής αλλά και για τις προκλήσεις της ιδιωτικής ζωής που θα συνοδεύσουν την άφιξή της (Azmat, et.al., 2019).

## 2. Solar Roadways (Ηλιακοί Αυτοκινητόδρομοι)

Παρά αυτά τα πλεονεκτήματα, αρχικά, το κόστος εκκίνησης και συντήρησης της κατασκευής τέτοιων οδών και χώρων στάθμευσης μπορεί να είναι εξαιρετικά υψηλό. (Ωστόσο, οι εξελίξεις σε αυτήν την τεχνολογία θα (ελπίζουμε) να μειώσουν το κόστος.) Ένα άλλο ζήτημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η αποδοτικότητα των ηλιακών συλλεκτών. Η μέση απόδοση είναι επί του παρόντος θέμα ανησυχίας. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι δεν μπορεί να κατασκευαστεί στις φτωχότερες αναπτυσσόμενες χώρες λόγω του υψηλού αρχικού κόστους εκκίνησης. Οι οδικές επιφάνειες συσσωρεύουν επίσης καουτσούκ, αλάτι κ.λπ., που εμποδίζουν το φως του ήλιου. Το αλάτι μπορεί να ξεπλυθεί εύκολα, αλλά όχι καουτσούκ. Θα ήταν επίσης αρκετά δαπανηρό. Οι ηλιακοί δρόμοι ενδέχεται να μην είναι εφικτοί και οικονομικοί καθώς το αρχικό κόστος και το κόστος εγκατάστασης μπορεί να είναι τριπλάσιο σε σύγκριση με τους οδικούς μας δρόμους, αλλά εάν αυτό αξιολογηθεί ως μακροπρόθεσμη επένδυση, αυτό μπορεί να αποδειχθεί πολύ πιο οικονομικό καθώς μας πληρώνει (Kulkarni, 2013).

## 3. Ενέργεια Δόνησης (Vibration Energy)

Η συγκομιδή πιεζοηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα νέο ερευνητικό πεδίο της μηχανικής δρόμων, με συνέπεια την έλλειψη ερευνητικών προσπαθειών. Μέχρι τώρα έχει χρησιμοποιηθεί για τη συγκομιδή ενέργειας μικρής κλίμακας από πεζούς ή ποδήλατα για την τροφοδοσία μπαταριών, οδικού φωτισμού και επίπλων κλπ. Είναι αρκετά δύσκολο η ιδέα της εξόρυξης της ενέργειας να προέρχεται από βαριά φορτία κυκλοφορίας χρησιμοποιώντας μόνο μικρές πιεζοηλεκτρικές συσκευές/αισθητήρες που εφαρμόζονται σε συγκεκριμένες διατάξεις σε όλη την υποδομή πεζοδρομίων. Επιπλέον, τα πυροηλεκτρικά υλικά παρόμοια με τους πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) αλλά από κλίση θερμοκρασίας. Αυτά θεωρούνται ως " η γέφυρα μεταξύ σιδηροηλεκτρικών και πιεζοηλεκτρικών " και παρουσιάζουν ηλεκτρική πόλωση όταν υποβάλλονται σε ομοιόμορφη αλλαγή θερμοκρασίας. Αυτό το πυροηλεκτρικό φαινόμενο συμβαίνει μόνο σε κρυστάλλους που δεν έχουν κέντρο συμμετρίας και έχουν επίσης πολικό άξονα (Lang, 2005). Batra et al ((2011) προσπάθησε να εξετάσει την ικανότητα των υψηλής ποιότητας μονό - και πολυκρυσταλλικών πυροηλεκτρικών υλικών που ενσωματώνονται στα πεζοδρόμια να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Η όλη διαδικασία διεξήχθη χρησιμοποιώντας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης δεδομένα πραγματικής θερμοκρασίας που ελήφθησαν από την κλιματική βάση

δεδομένων για την περιοχή του Huntsville Alabama, ΗΠΑ. Επιπροσθέτως, οι δρόμοι θα πρέπει να ανακατασκευαστούν προκειμένου να εφαρμοστεί αυτή η τεχνολογία, με αποτέλεσμα την κυκλοφοριακή συμφόρηση κατά μήκος του αυτοκινητόδρομου (Kumar , 2013;Walubita, et.al., 2018;Symeoni, n.d.).

#### 4. Τεχνολογίες Smart Highway

Παρόλο που τα οφέλη του συστήματος υπόσχονται μεγάλες δυνατότητες στο μέλλον της αυτόνομης οδήγησης υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Για να χρησιμοποιήσετε το σύστημα ως περιττό σύστημα αισθητήρων για έναν τηλε-χειριστή, το σύστημα πρέπει να διαδοθεί σε όλο το μήκος της θεωρούμενης εθνικής οδού. Η τηλεμεταφερόμενη οδήγηση είναι κατά προτίμηση λανθάνουσα ελεύθερη, επομένως μια ελάχιστη καθυστέρηση μεταξύ απόφαση διεύθυνσης του τηλε-χειριστή και κίνηση του αυτοκινήτου θα ήταν επιθυμητό. Ο χρήστης μπορεί να μην έχει διαφάνεια στο χρησιμοποιούμενο σύστημα που ελέγχει το όχημά του / της. Προκειμένου να επανακτήσετε τον έλεγχο του οχήματος αυτές οι πληροφορίες μπορεί να είναι απαραίτητες ωστόσο. Ως εκ τούτου, μια σαφής και διαφανής επικοινωνία του μεταχειρισμένα συστήματα είναι απαραίτητη για να κερδίσει την εμπιστοσύνη του χρήστη. Προκειμένου οι άλλοι να αποφύγουν την επιβλαβή αλληλεπίδραση με το σύστημα, η ασφάλεια είναι επίσης σημαντικό θέμα που πρέπει να αντιμετωπιστεί. Αν παράνομες πληροφορίες διανεμηθούν στον αλγόριθμο του αυτοκινήτου μπορεί να λάβει μια απόφαση που μπορεί να οδηγήσει σε ατύχημα ή ανεπιθύμητη συμπεριφορά. Ως εκ τούτου, η ακρίβεια των αισθητήρων και των ταξινομημένων και αναγνωρισμένων οχημάτων ο δρόμος πρέπει να είναι αρκετά υψηλός ώστε να κάνει ακριβή οδήγηση απόφαση (Wiegand, 2019).

### 2.7 Παραδείγματα εφαρμογής της τεχνολογίας

#### 2.7.1. 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 σημάσεις 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 συγκρητικά 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 εμπεριστατώμενη 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 οδο φωτισμού («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).

### 2.7.2. 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 οδο φωτισμό 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 διήρκεσε 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).

### 2.7.3. 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 οδο φωτισμό, 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).

#### 2.7.4 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).

#### 2.7.5 Και άλλες εφαρμογές μικρότερης κλίμακας

Στην Ευρώπη έχει παρατηρηθεί αύξηση στην χρήση του έξυπνου οδοφωτισμού 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 οδοφωτισμού 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 (Rodríguez, 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 (Rodríguez, 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 (Rodríguez, 2019).



## 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

### 3.1. Ερευνητικά Ερωτήματα

Η έρευνα μας επικεντρώνεται γύρω από τα εξής ερωτήματα:

- Είναι εφικτή η αντικατάσταση των συμβατικών αυτοκινητόδρομων με πιο έξυπνους, που βασίζονται στην ηλιακή, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας;
- Τι ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας επιτυγχάνεται με την αντικατάσταση όλου του μήκους των αυτοκινητόδρομων της Ελλάδας με ηλιακούς αυτοκινητόδρομους;
- Τι ποσοστό αντοχής έχουν οι ηλιακοί συλλέκτες ως προς τα φορτία όλων των τύπων οχημάτων, που συναντάμε σε έναν αυτοκινητόδρομο;
- Ποια είναι η αποδοτικότητα ενός υλικού, υαλικού τύπου στην πρόσφυση και ταυτόχρονα στην απορρόφηση ηλιακής ενέργειας;
- Ποιο είναι το κόστος ενός ηλιακού αυτοκινητόδρομου μικρής έκτασης;
- Μία χώρα σαν την Ελλάδα έχει τη δυνατότητα να επενδύσει σε ένα τέτοιο έργο υψηλότερου κόστους από τους κοινούς, ασφαλτοστρωμένους αυτοκινητόδρομους;

### 3.2. Στόχοι της Έρευνας

Ο κύριος στόχος της έρευνας εκφράζεται μέσα από την αντικατάσταση των συμβατικών, ασφαλτοστρωμένων αυτοκινητόδρομων, που συναντάμε σήμερα στη χώρα μας με αυτοκινητόδρομους πιο “έξυπνους”. Αυτό επιτυγχάνεται στην προκειμένη περίπτωση με την εφαρμογή ηλιακών αυτοκινητόδρομων, 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 σχετικά με τη σκοπιμότητα της εφαρμογής των ηλιακών αυτοκινητόδρομων με βάση την ενεργειακή τους απόδοση και τις μετρήσεις ηλιακής απομόνωσης στην Ελλάδα
- μία θερμική ανάλυση μέσω του προγράμματος Ansys για το ποσοστό απορρόφησης ηλιακής ενέργειας ημερησίως από υλικό ανώτερης στρώσης ενός εμπορικού ηλιακού συλλέκτη
- μία στατική ανάλυση μέσω του προγράμματος Ansys όμοιου ηλιακού συλλέκτη με την τοποθέτηση φορτίων οχημάτων, που συναντάμε σε έναν αυτοκινητόδρομο
- μία σύγκριση του κόστους μεταξύ ενός ασφαλτοστρωμένου αυτοκινητόδρομου και ενός ηλιακού

### 3.3.Στάδια της Έρευνας

#### 3.3.1 Στάδιο 1ο

Η έρευνα μας στηρίχτηκε σε πληροφορίες, που συλλέχθηκαν από το διαδίκτυο σχετικά με τους αυτοκινητόδρομους που έχουν κατασκευαστεί στην Ελλάδα ή που βρίσκονται υπό κατασκευή. Αρχικά, συλλέχθηκαν αυτές τις πληροφορίες, ώστε να υπολογιστεί το συνολικό μήκος των αυτοκινητόδρομων στη χώρα μας και στη συνέχεια διαχωρίστηκαν ανά περιοχή ενδιαφέροντος. Σύμφωνα με πληροφορίες μέσω διαδικτύου σχετικά με το μέσο πλάτος των λωρίδων σε έναν ελληνικής κατασκευής αυτοκινητόδρομο και τα συνολικά μήκη των σηράγγων, που εκτείνονται στον κάθε αυτοκινητόδρομο, υπολογίστηκε το συνολικό μήκος, που θα παρείχε τη δυνατότητα αντικατάστασης του με ηλιακούς συλλέκτες.

#### 3.3.2 Στάδιο 2ο

Το 2<sup>ο</sup> στάδιο περιλάμβανε τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με την ημερήσια, αλλά και ετήσια ηλιακή απομόνωση σε κάθε γεωγραφικό διαμέρισμα στη χώρα μας. Επιπρόσθετα, έγινε εύρεση δεδομένων για τη φωτοβολταϊκή δυνατότητα εφαρμογής στην Ελλάδα μέσα από ενεργειακής απόδοσης χάρτες ανά περιοχή.

#### 3.3.3 Στάδιο 3ο

Με βάση τα δεδομένα που συλλέχθηκαν στα προηγούμενα στάδια, έγινε υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας μέσω ενός τυπικού ηλιακού συλλέκτη για αυτοκινητόδρομους (4m x 4m) για κάθε περιοχή της Ελλάδας. Η συνολική παραγόμενη ενέργεια εκτιμήθηκε από τους εξής παράγοντες:

- το συνολικό μήκος αυτοκινητόδρομων ανά περιοχή
- τη συνολική επιφάνεια οδοστρώματος με βάση το μέσο πλάτος αυτοκινητόδρομων
- την ετήσια ηλιακή απομόνωση ανά περιοχή

Η εκτίμηση αυτή είχε ως σκοπό την ανάλυση της σκοπιμότητας της αντικατάστασης των ασφαλτοστρωμένων αυτοκινητόδρομων με ηλιακούς, με βάση την ενεργειακή τους απόδοση σε μία χώρα με μεγάλο ποσοστό ηλιακής απομόνωσης καθημερινά.

#### 3.3.4 Στάδιο 4ο

Συλλέχθηκαν πληροφορίες σχετικά με τους τύπους ηλιακών πάνελ για αυτοκινητόδρομους, που υπάρχουν στην αγορά, καταγράφηκαν τα προτερήματα και μειονεκτήματα του κάθε είδους και εκτιμήθηκε η εφαρμογή ενός πολυκρυσταλλικού ηλιακού συλλέκτη ως η καταλληλότερη. Στη συνέχεια, επιλέχθηκε ένας συγκεκριμένος ηλιακός συλλέκτης, το SunPower E20, καταγράφηκαν τα χαρακτηριστικά του για τη μετ' έπειτα σύγκριση με την ανάλυση του ηλιακού συλλέκτη και υπολογίστηκε το κόστος του σε σχέση με τους ασφαλτοστρωμένους αυτοκινητόδρομους.

Η SunPower είναι μία εταιρία καθαρής ενέργειας με εξειδίκευση στη δημιουργία μεγάλης απόδοσης ηλιακών συλλεκτών με έδρα στις ΗΠΑ από το 1985. Ο σχεδιασμός της είναι και οικιακός, αλλά και εμπορικός και αποτελεί φαινόμενο πολλών χρόνων εγγύησης, έως και 25 χρόνων. Έχουν απονεμηθεί περισσότερα από 1000 βραβεία στην SunPower, τα οποία αφορούν την ευρεσιτεχνία στην ηλιακή καινοτομία των αντιπροσώπων της (SunPower, n.d.).

### 3.3.5. Στάδιο 5<sup>ο</sup>

Το 5<sup>ο</sup> στάδιο περιλαμβάνει τη θερμική ανάλυση ενός ηλιακού αυτοκινητόδρομου μέσω του προγράμματος Ansys Academic R21.

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. Ίδρυτής της εταιρίας είναι ο John Swanson, ο οποίος άφησε την εταιρία το 1993 σε επιχειρηματίες καπιταλιστές. 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 αυτοκινητόδρομου, όπως η πυκνότητα, η ισοτροπική 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 σκυρόδεμα και είναι το στρώμα που 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 ακρυλικό πλαστικό.

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε η προσομοίωση του ηλιακού αυτοκινητόδρομου. Κατασκευάστηκε ένα ηλιακό πάνελ με τις προαναφερθείσες στρώσεις με τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά (Mwani, n.d.;Selvaraju, 2012):

- στρώση βάσης τετραγωνικής διατομής μήκους και πλάτους 4m και πάχους 0.5m (4x4x0.5)
- ανώτερης στρώσης τετραγωνικής διατομής μήκους και πλάτους 4m και πάχους 0.01m (4x4x0.01)

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 αυτοκινητόδρομου πληρούσαν τις προϋποθέσεις, προχωρήσαμε στην ανάλυση μέσω πεπερασμένων στοιχείων (meshing), για να πραγματοποιηθεί, μέσω του προηγμένου πλέγματος που παρέχεται, η γεωμετρική ανάλυση του ηλιακού αυτοκινητόδρομου. 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.

### 3.3.6. Στάδιο 6<sup>ο</sup>

Το 6<sup>ο</sup> 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 αυτοκινητόδρομος 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 μ, 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 μικρότερο από το μήκος του ηλιακού αυτοκινητόδρομου στην ανάλυση μας, οπότε θα ληφθεί το φορτίο και από τους τέσσερις τροχούς του αυτοκινήτου.
- Το μεταξόνιο της μοτοσυκλέτας είναι 1.5 m, εξίσου μικρότερο από το μήκος του ηλιακού αυτοκινητόδρομου στην ανάλυση μας, οπότε θα ληφθεί το φορτίο και από τους δύο τροχούς της μοτοσυκλέτας.

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 εξής ιδιότητες (Selvaraju, 2012):

Table 2. Τα υλικά και οι ιδιότητες τους

Ιδιότητες Υλικών	Ακρυλικό Πλαστικό	Σκυρόδεμα
Πυκνότητα	1190 [kg/m <sup>3</sup> ]	2300 [kg/m <sup>3</sup> ]
Μέτρο του Young	50.8x10 <sup>9</sup> [Pa]	25x10 <sup>9</sup> [Pa]
Λόγος του Poisson	0.37	0.33

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, τοποθετήθηκαν, όπως προαναφέρθηκε, μόνο οι πίσω τροχοί του, που λαμβάνουν και το μεγαλύτερο βάρος, επομένως και μεγαλύτερες τιμές φορτίου. Λόγω του μεγάλου πλάτους του φορτηγού, τοποθετήθηκαν καλύπτοντας σχεδόν και τα 4m πλάτους του ηλιακού συλλέκτη. Το όχημα τοποθετήθηκε σε σημείο, όπου οι μπροστινοί τροχοί του βρίσκονταν στα 3.5 m του ηλιακού συλλέκτη, ενώ ο μπροστινός τροχός της μοτοσυκλέτας ασκούσε δύναμη στα 3m του μοντέλου μας. Καθώς, πραγματοποιείται μία στατική ανάλυση, 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). Σε περίπτωση αποτυχίας στην ανοχή των φορτίων των οχημάτων σχεδιάσαμε νέα μοντέλα ηλιακών συλλεκτών του όμοιου μήκους και πλάτους, αλλά διαφορετικού πάχους. Τα πάχη της ανώτερης στρώσης, που επιλέγονται ύστερα από την αποτυχία του 0.01 m πάχους είναι το 0.015 m και το 0.024 m. Στη συνέχεια ακολουθείται η ίδια διαδικασία στατικής ανάλυσης με τα φορτία στα ίδια σημεία πάνω στον ηλιακό συλλέκτη. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης περιλαμβάνουν την ισοδύναμη πίεση και τη συνολική παραμόρφωση.

### 3.2.7. Στάδιο 7<sup>ο</sup>

Στο 7<sup>ο</sup> στάδιο πραγματοποιείται η σύγκριση κόστους μεταξύ των ασφαλτοστρωμένων 1 km αυτοκινητόδρομων και του ίδιου μήκους ηλιακών αυτοκινητόδρομων. Στην περίπτωση του συμβατικού αυτοκινητόδρομου επιλέγεται ασφαλτόστρωση με τη χρήση τροποποιημένης ασφάλτου πάχους 0.05 m και υπολογίζεται το συνολικό κόστος σε αυτοκινητόδρομο 1 km με 2 και με 3 λωρίδες κυκλοφορίας πλάτους 3 m η καθεμία. Ο ηλιακός αυτοκινητόδρομος που επιλέγεται για σύγκριση κόστους, αποτελείται από ηλιακούς συλλέκτες SunPower E20 με διαστάσεις 3.66 m x 3.66 m. Αρχικά, υπολογίζεται το πλήθος των ηλιακών συλλεκτών που θα απαιτηθεί να εφαρμοστούν για την κάλυψη 1 km μήκος αυτοκινητόδρομου και στη συνέχεια το κόστος τους με βάση τα δεδομένα της εταιρίας SunPower στις περιπτώσεις 2 και 3 λωρίδων κυκλοφορίας.

### 3.2.8. Στάδιο 8<sup>ο</sup>

Το 8<sup>ο</sup> στάδιο απαρτίζεται από τα τελικά συμπεράσματα για τη σύγκριση κόστους των δύο περιπτώσεων για την Ελλάδα.

### 3.2.9. Στάδιο 9<sup>ο</sup>

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, αλλά και της τωρινής οικονομικής ευχέρειας είναι εφικτή η εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών σε κάποιο υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου αυτοκινητόδρομο;

### 3.2.10. Στάδιο 10<sup>ο</sup>

Αποτελείται από τις προτάσεις, που παραθέτουμε για μελλοντική έρευνα.



## 4. Β' ΜΕΡΟΣ – ΈΡΕΥΝΑ

### 4.1. Αντικατάσταση συμβατικών αυτοκινητόδρομων με ηλιακούς και υπολογισμός παραγόμενης ενέργειας

Το κύριο οδικό δίκτυο της Ελλάδας αποτελούν οι αυτοκινητόδρομοι και οι Εθνικές Οδοί. Οι αυτοκινητόδρομοι χαρακτηρίζονται από ποιοτικό τρόπο κατασκευής, αποτελούνται από τέσσερις ή έξι λωρίδες (δύο ή τρεις για κάθε κατεύθυνση) και μία λωρίδα έκτακτης ανάγκης. Επιπρόσθετα, δεν υπάρχουν φανάρια και οι εισοδοι και έξοδοι πραγματοποιούνται μόνο σε διασταυρωμένους κόμβους. Παρατηρούνται στην κατασκευή τους πολλές σήραγγες και γέφυρες στην ηπειρωτική Ελλάδα λόγω της αρκετά ορεινής μορφολογίας του εδάφους. Από το 2020 το Ελληνικό οδικό δίκτυο των αυτοκινητόδρομων αποτελεί το μεγαλύτερο στη Νοτιοανατολική Ευρώπη και ένα από τα μεγαλύτερα σε ολόκληρη την Ευρώπη, αφού μετράει 2320 km. Παρατηρείται έντονος εκσυγχρονισμός στο ελληνικό οδικό δίκτυο κατά τη διάρκεια του 21ου αιώνα, αλλά ακόμα ένα μέρος του χαρακτηρίζεται μη ολοκληρωμένο.

#### 4.1.1 Μήκη Αυτοκινητόδρομων

Τα συνολικά μήκη των αυτοκινητόδρομων με τις ονομασίες τους περιγράφονται σύμφωνα με το υπουργικό διάταγμα του 2015 στον παρακάτω πίνακα (Wikipedia, 2008):

Table 3. Μήκη αυτοκινητόδρομων και διαδρομές στην Ελλάδα

Αυτοκινητόδρομος	Διαδρομή	
A1 Αθήνα – Θεσσαλονίκη - Εύζονοι	Αθήνα – Θήβα – Χαλκίδα – Λαμία – Βόλος – Λάρισα – Κατερίνη - Θεσσαλονίκη	550/550 km
A2 Εγνατία Οδός	Ηγουμενίτσα – Ιωάννινα – Γρεβενά – Κοζάνη – Βέροια – Θεσσαλονίκη – Καβάλα – Ξάνθη – Κομοτηνή - Αλεξανδρούπολη	670/670 km
A3	Λαμία – Καρδίτσα - Τρίκαλα	80/175 km

Αυτοκινητόδρομος Κεντρικής Ελλάδας		
A5 Ιωνία Οδός	Πάτρα – Μεσολόγγι – Άρτα - Ιωάννινα	196/196 km
A6 Αττική Οδός	Αττική	48/48 km
A7 Αυτοκινητόδρομος Μωρέας	Κόρινθος – Άργος – Τρίπολη - Καλαμάτα	149/149 km
A8 Ολυμπία Οδός	Αθήνα – Κόρινθος – Πάτρα - Τσάκωνα	205/373 km
A11 Σχυματάρι - Χαλκίδα	Χαλκίδα	11/26 km
A12 Βελεστίνο - Βόλος	Βόλος	0/40 km
A13 Θήβα - Ελευσίνα	Θήβα - Ελευσίνα	0/40 km
A24 Θεσσαλονίκη – Νεά Μουδανιά	Θεσσαλονίκη – Νεά Μουδανιά	72/72 km
A25 Θεσσαλονίκη – Σέρρες - Προμαχώνας	Θεσσαλονίκη - Σέρρες	105/105 km

A27 Κοζάνη – Πτολεμαΐδα - Νίκη	Κοζάνη – Πτολεμαΐδα - Φλώρινα	40/79 km
A29 Σιάτιστα- Κρυσταλλοπηγή	Καστοριά – Κοζάνη - Φλώρινα	72/72 km
A52 Άκτιο – Αμβρακία	Βόνιτσα - Άκτιο	15/49 km
A62 Υμηττός - Ραφήνα	Αττική	13.5/20 km
A64 Κορωπί - Αεροδρόμιο	Εθνικός Αθηναιϊκός Αερολιμένας	6/6 km
A71 Λεύκτρο - Σπάρτη	Τρίπολη - Σπάρτη	45.5/45.5 km
A90 Αυτοκινητόδρομος Βόρεια Κρήτης	Χανιά – Ρέθυμνο – Ηράκλειο - Άγιος Νικόλαος	41/310 km
<b>Συνολικό</b>	<b>2319 km</b>	

Παρατηρείται στον παραπάνω πίνακα ότι κάποιοι αυτοκινητόδρομοι δεν έχουν κατασκευαστεί ακόμη, επομένως δεν θα αποτελέσουν περιεχόμενο προς μελέτη για την ανακατασκευή τους με χαρακτηριστικά έξυπνου αυτοκινητόδρομου και κατ' επέκταση στην παραγωγή ενέργειας μέσω αυτών. Επιπρόσθετα, οι διαδρομές που διανύονται μέσω σηράγγων, οι οποίες είναι αρκετά μεγάλης κλίμακας δεν θα αποτελέσουν περιεχόμενο έρευνας. Το μέσο πλάτος των αυτοκινητόδρομων στην Ελλάδα χαρακτηρίζεται εκμεταλλεύσιμο για την εφαρμογή ηλιακών συλλεκτών. Το συνολικό διαθέσιμο μήκος για εφαρμογή ηλιακών συλλεκτών (πάνελ) είναι 1870 km. Ο παρακάτω πίνακας

δείχνει τα συνολικά μήκη αυτοκινητόδρομων σύμφωνα με το γεωγραφικό διαμέρισμα, που βρίσκονται.

Table 4. Μήκη αυτοκινητόδρομων και διαδρομές ανά περιοχή

Περιοχή	Αυτοκινητόδρομοι	Συνολική Διαδρομή
Αττική	A1, A6, A8, A11, A62, A64	226 km
Κρήτη	A90	41 km
Πελοπόννησος και Δυτική Ελλάδα	A5, A7, A8, A71	262 km
Ήπειρος και Δυτική Μακεδονία	A2, A5, A27, A29, A52	436 km
Μακεδονία και Θράκη	A1, A2, A24, A25	535.9 km
Θεσσαλία και Κεντρική Ελλάδα	A1, A3	356 km
<b>Σύνολο</b>		<b>1870 km</b>

#### 4.1.2. Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στη χώρα μας

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 δε ν φτάνει με άμεση διαδρομή από τον Ήλιο, αλλά διασκορπείται 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>. Για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ενέργειας, που μπορεί να παραχθεί μέσω της εφαρμογής των ηλιακών συλλεκτών στους αυτοκινητόδρομους 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  $m^2$  (“Solar Resource Maps of Greece”, n.d.).

Table 5. Τιμές ημερήσιας ηλιακής απομόνωσης ανά περιοχή στην Ελλάδα

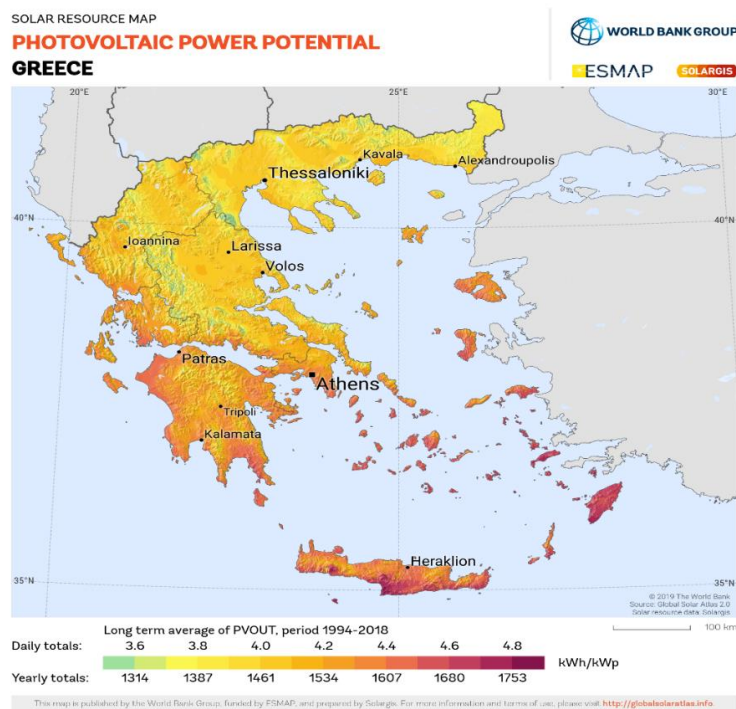
Περιοχή	Μέση ημερήσια απομόνωση (kWh/m <sup>2</sup> )	
	Ελάχιστη	Μέγιστη
Αιγαίο	4.50	5.20
Αττική	4.45	5.00
Ήπειρος και Δυτική Μακεδονία	3.80	4.68
Θεσσαλία και Κεντρική Ελλάδα	3.80	4.73
Κρήτη	4.57	5.32
Μακεδονία και Θράκη	3.72	4.40
Πελοπόννησος και Δυτική Ελλάδα	4.09	4.96





Table 6. Τιμές δυναμικού ημερήσιας φωτοβολταϊκής ισχύος ανά περιοχή στην Ελλάδα

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



Εικόνα 17. Δυνατότητα φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα  
 (global solar atlas.com)

#### 4.1.3. Συνολική Παραγόμενη Ενέργεια

Με βάση το διαθέσιμο για εφαρμογή ηλιακών αυτοκινητόδρομων συνολικό μήκος σε κάθε γεωγραφικό διαμέρισμα, τις διαστάσεις ενός τυπικού ηλιακού συλλέκτη (4m x 4m) και τα δεδομένα της ηλιακής απομόνωσης γίνεται ο υπολογισμός της συνολικής παραγόμενης ενέργειας ετησίως (Mwani, n.d.; Selvaraju, 2012).

Table 7. Υπολογισμένη συνολική παραγόμενη ενέργεια

Περιοχή	Συνολικό μήκος Αυτοκινητόδρομων (km)	Συνολική Επιφάνεια Οδοστρώματος (km <sup>2</sup> )	Ετήσια απομόνωση (kWh/m <sup>2</sup> )	Συνολική παραγόμενη ενέργεια (kWh)
Αττική	226	0.79	1753	3.9 x 10 <sup>8</sup>
Κρήτη	41	0.14	1899	7.8 x 10 <sup>7</sup>
Ήπειρος και Δυτική Μακεδονία	436	1.53	1461	6.4 x 10 <sup>8</sup>
Πελοπόννησος και Δυτική Ελλάδα	262	1.92	1607	4.2 x 10 <sup>8</sup>
Θεσσαλία και Κεντρική Ελλάδα	356	1.25	1607	5.7 x 10 <sup>8</sup>
Μακεδονία και Θράκη	535.9	1.88	1461	7.9 x 10 <sup>8</sup>

#### 4.1.4. Επιλογή Υλικού Ηλιακού Συλλέκτη

Η επιλογή του καταλληλότερου ηλιακού συλλέκτη πραγματοποιείται σύμφωνα με την αποτελεσματικότητα τους στην μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Σύμφωνα με τον Πίνακα, η περίπτωση του μονοκρυσταλλικού ηλιακού συλλέκτη αποτελεί την πιο αποδοτική λύση,

καθώς το ποσοστό απόδοσης του φτάνει μέχρι και το 20% της ολικής ηλιακής απομόνωσης στην περιοχή, αλλά έχει και μεγάλη διάρκεια ζωής. Το μειονέκτημα της εφαρμογής ενός μονοκρυσταλλικού ηλιακού πλαισίου συναντάται στο κόστος, το οποίο είναι αρκετά υψηλότερο από μία πολυκρυσταλλική λύση. Από την άλλη μεριά, η περίπτωση του πολυκρυσταλλικού ηλιακού συλλέκτη αποτελεί μία αρκετά αποδοτική λύση από άποψη θερμικής αγωγιμότητας, χαμηλότερου κόστους με το μειονέκτημα της ευαισθησίας του στις υψηλές θερμοκρασίες και την πιο συχνή συντήρηση ή αποκατάσταση του (Kohak et.al., 2019). Στην περίπτωση της Ελλάδας, θεωρήσαμε αποτελεσματικότερη την εφαρμογή ενός ηλιακού αυτοκινητόδρομου με πολυκρυσταλλικό πυρίτιο.

Table 8. Χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων ηλιακών συλλεκτών

Τύπος Ηλιακού Συλλέκτη	Ποσοστό Απόδοσης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μονοκρυσταλλικό (Mono - Si)	~ 20%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• υψηλό ποσοστό απόδοσης</li> <li>• βελτιστοποιημένο για εμπορική χρήση</li> <li>• μεγάλη διάρκεια ζωής</li> </ul>	ακριβό
Πολυκρυσταλλικό (p - Si)	~ 15%	καλό κόστος	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ευαίσθητο σε υψηλές θερμοκρασίες</li> <li>• μικρότερη διάρκεια ζωής και λιγότερο ποσοστό απόδοσης</li> </ul>
Λεπτό Στρώμα: Αμορφο Πυρίτιο	~ 7-10%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• αρκετά καλό κόστος</li> <li>• εύκολο στην παραγωγή του</li> </ul>	μικρότερη διάρκεια ζωής και ποσοστό απόδοσης

Συμπυκνωμένες Κυψέλες	~ 41%	πολύ μεγάλο ποσοστό απόδοσης	απαίτηση ηλιακού ιχνηλάτη και συστήματος ψύξης για μέγιστο ποσοστό απόδοσης
-----------------------	-------	------------------------------	---

Μία περίπτωση πολυκρυσταλλικού ηλιακού συλλέκτη, που θα συμπεριλάβουμε είναι το SunPower E20 για την μετέπειτα σύγκριση με τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης, αλλά και για τη σύγκριση του κόστους του σε σχέση με έναν ασφαλτοστρωμένο αυτοκινητόδρομο. Στον Πίνακα παρατίθενται τα χαρακτηριστικά του. Οι προδιαγραφές για το ηλιακό πλαίσιο βασίζονται στις τυπικές συνθήκες δοκιμής (STC) της ηλιακής ακτινοβολίας  $1000 \text{ W / m}^2$ , μάζα αέρα 1.5 και η μάζα λειτουργίας κυψέλης  $21^\circ\text{C}$  (Mwani, n.d.).

Table 9. Χαρακτηριστικά SunPower E20

Χαρακτηριστικά Ηλιακού Συλλέκτη	
Μέγιστη Ισχύς	250 W
Τάση Ανοιχτού Κυκλώματος	64.9 V
Ρεύμα Βραχυκύκλωσης	6.46 A
Ποσοστό Απόδοσης	42%
Διαμορφώσεις Κελιών	60 στη σειρά
Ανοχή της Μέγιστης Ισχύος	+5/-0%
Μέγιστη Τάση Ισχύος	30.1 V
Τύπος Κελιών	Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο
Μέγιστο Ρεύμα Ισχύος	8.30 A
Διαστάσεις (μήκος x πλάτος x ύψος)	1644mm x 972 mm x 50mm

#### 4.1.5. Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάστηκε η δυνατότητα εφαρμογής των ηλιακών αυτοκινητόδρομων στους αυτοκινητόδρομους της Ελλάδας με υπολογισμό της συνολικής έκτασης τους και της παραγόμενης ενέργειας από αυτούς με βάση τα δεδομένα ηλιακής απομόνωσης. Η Ελλάδα αποτελεί ένα αρκετά αξιόλογο περιεχόμενο μελέτης προς αντικατάσταση των δρόμων της με έξυπνους αυτοκινητόδρομους με βάση τους την ηλιακή ενέργεια, καθώς παρατηρείται ότι έχει υψηλές τιμές ηλιακής απομόνωσης σε όλη την έκταση της. Αυτό σημαίνει μεγάλη ετήσια παραγόμενη ενέργεια στη χώρα μας μέσω της λειτουργίας των ηλιακών συλλεκτών σε αυτοκινητόδρομους με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο και κατ' επέκταση εξοικονόμηση ενέργειας για τις κατοικίες και τις βιομηχανίες.

## 4.2 Αποτελέσματα Ανάλυσης μέσω του προγράμματος ANSYS

### 4.2.1. Μοντέλο θερμικής και στατικής ανάλυσης για Ansys

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 αυτοκινητόδρομων 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. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα στοιχεία των υλικών που θα χρησιμοποιήσουμε για τις αναλύσεις με ανώτερη στρώση το ακρυλικό πλαστικό και ως βάση του ηλιακού αυτοκινητόδρομου το σκυρόδεμα.

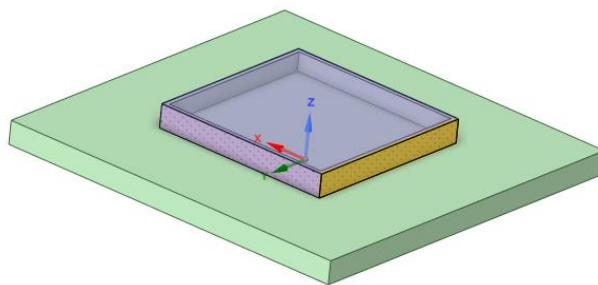
Table 10. Χαρακτηριστικά υλικών του προσομοιωμένου ηλιακού συλλέκτη

Χαρακτηριστικά Υλικών	Ακρυλικό Πλαστικό	Σκυρόδεμα
Πυκνότητα [kg/m <sup>3</sup> ]	1190	2300
Ισοτροπική Θερμική Αγωγιμότητα [W / m <sup>2</sup> K]	1.3	0.72
Ειδική Θερμότητα c <sub>p</sub> [J/kg K]	0.499	780
Μέτρο του Young [Pa]	50.80	25000
Λόγος Poisson	0.37	0.18

Η βάση του ηλιακού συλλέκτη αποτελείται από ένα στρώμα τετράγωνης γεωμετρίας με πλευρές 4m x 4m, ύψους 0.5 m και πάχους 0.1 m. Αυτή η βάση επιστρώνεται από σκυρόδεμα και καλύπτεται από πάνω με την ανώτερη στρώση του ηλιακού συλλέκτη, η οποία είναι από ακρυλικό πλαστικό πάχους 0.01 m και με τη γεωμετρία της βάσης. Τα φύλλα του ακρυλικού έχουν εύρος θερμοκρασίας σφυρηλάτησης 40°C – 93°C και οι ελαστικές ιδιότητες του παραμένουν αμετάβλητες σε αυτή την κλίμακα θερμοκρασίας.

#### 4.2.2. Θερμική και στατική ανάλυση ηλιακού αυτοκινητόδρομου μέσω Ansys

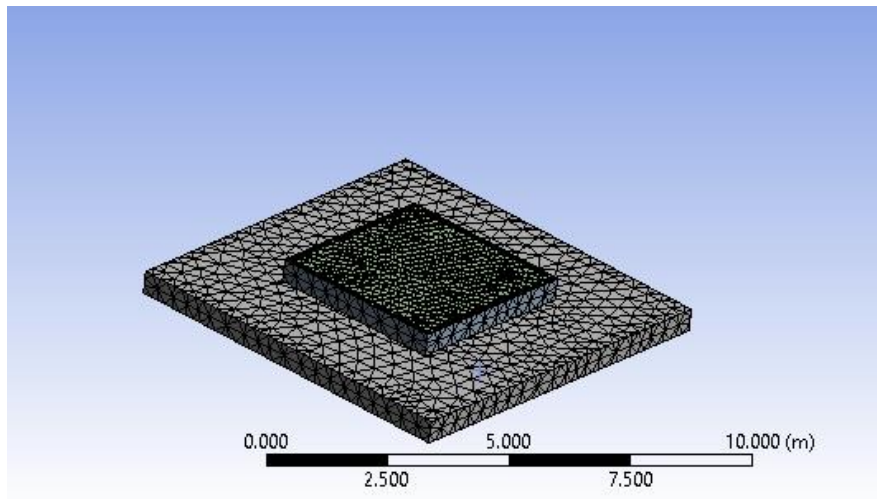
Για τη στατική ανάλυση, χρησιμοποιήσαμε τις πλατφόρμες Workbench και Mechanical. Αρχικά, καταχωρήσαμε τα στοιχεία για τα υλικά που αποτελούν το μοντέλο του ηλιακού μας συλλέκτη και στη συνέχεια πραγματοποιήσαμε την ανάλυση μέσω πεπερασμένων στοιχείων. Το τελικό βήμα περιλάμβανε η τοποθέτηση των φορτίων του κάθε οχήματος για τον υπολογισμό της ισοδύναμης πίεσης και της ολικής παραμόρφωσης του ηλιακού αυτοκινητόδρομου.



Εικόνα 18. Μοντέλο ηλιακού αυτοκινητόδρομου για την ανάλυση

Για τη θερμική ανάλυση, αρχικά, καταχωρήθηκαν μέσω της πλατφόρμας Workbench τα χαρακτηριστικά των υλικών, που θα τοποθετηθούν σε κάθε στρώση του ηλιακού αυτοκινητόδρομου, όπως η πυκνότητα, η ιστροπική θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμότητα του σκυροδέματος και του ακρυλικού πλαστικού. Τα χαρακτηριστικά των υλικών δίνονται στον Πίνακα. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή model για την τρισδιάστατη αναπαράσταση του ηλιακού αυτοκινητόδρομου 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).





Εικόνα 19. Μοντέλο μετά την ανάλυση μέσω πεπερασμένων στοιχείων (meshing)

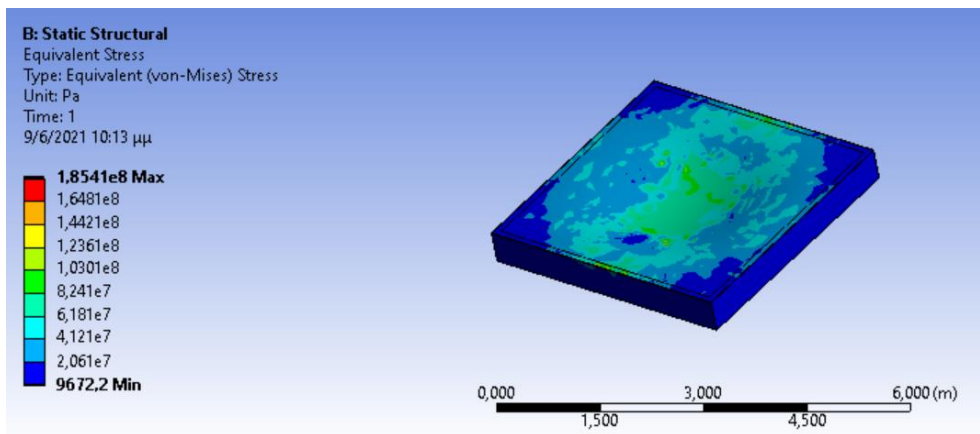
Αφού, έγινε μία πρώτη ανάλυση του ηλιακού αυτοκινητόδρομου προστέθηκε η μέγιστη ημερήσια ηλιακή απομόνωση στην περιοχή της Αττικής (Πίνακας) και η διάδοση θερμότητας στα στρώματα με χαρακτηριστικά της πιο απλουστευμένης περίπτωσης. Το τελικό βήμα περιλάμβανε τη λύση της θερμικής ανάλυσης με την προσθήκη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

### 4.2.3. Αποτελέσματα Αναλύσεων μέσω Ansys

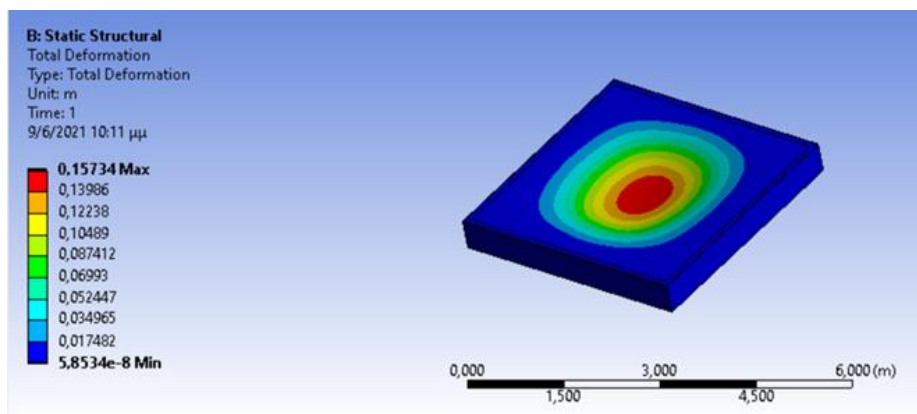
#### 4.2.3.1. Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης

Αφού πραγματοποιήθηκε η στατική ανάλυση διεξάχθηκαν τα εξής αποτελέσματα σύμφωνα με τα φορτία των πίσω τροχών ενός φορτηγού, που ασκούνται πάνω σε ηλιακούς συλλέκτες ενός έξυπνου αυτοκινητόδρομου με πάχος ανώτερης στρώσης 10 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 αυτοκινητόδρομος με ανώτερη του στρώση το ακρυλικό πλαστικό με πάχος 10 mm αποτελεί περιεχόμενο εφαρμογής αν κινούνται πάνω σε αυτόν οχήματα μεγάλου βάρους οχήματα, όπως φορτηγά, καθώς η συνολική πίεση που ασκείται από τους τροχούς του προσομοιωμένου φορτηγού παίρνει τιμές αρκετά μεγαλύτερες (18.5 MPa) του μέτρου Young (50.80 MPa) του υλικού. Επιπρόσθετα, η συνολική παραμόρφωση του ηλιακού συλλέκτη συναντάται αρκετά μεγάλη με την τιμή των 157 mm.

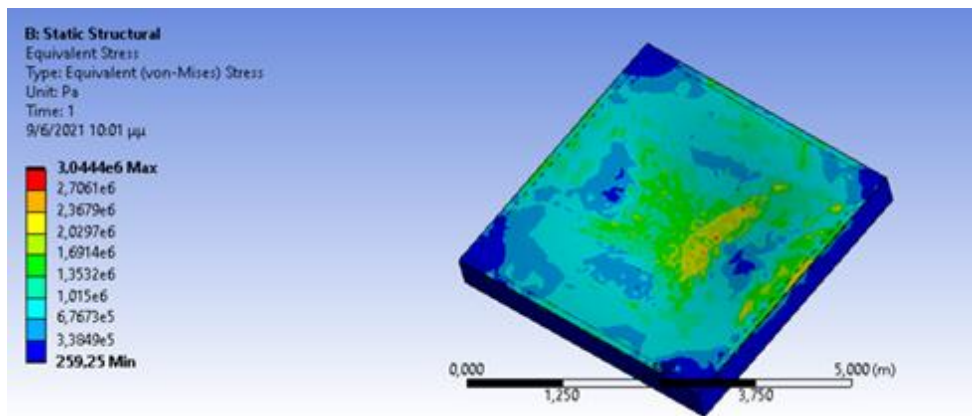


Εικόνα 20. Ισοδύναμη πίεση φορτίων πίσω τροχών φορτηγού σε πάχος ανώτερης στρώσης 10 mm

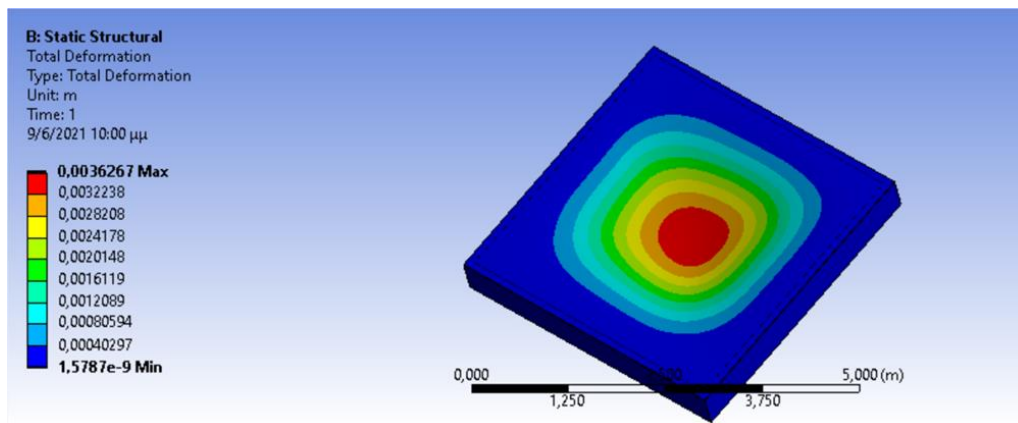


Εικόνα 21. Συνολική παραμόρφωση από τα φορτία των πίσω τροχών φορτηγού σε πάχος ανώτερης στρώσης 10 mm

Τα φορτία των τεσσάρων τροχών ενός αυτοκινήτου αναλύθηκαν και αποφέραν τα παρακάτω αποτελέσματα σε υλικό ανώτερης στρώσης ακρυλικού τύπου με πάχος 10 mm. Παρατηρούμε ότι το προσομοιωμένο ηλιακό πάνελ με τα χαρακτηριστικά, που του δώσαμε καταφέρνει να αντέξει τα φορτία των τροχών ενός αυτοκινήτου, αφού η ισοδύναμη πίεση που ασκείται από τους τροχούς έχει τιμή 3.044 MPa, η οποία αποτελεί τιμή αρκετά μικρότερη των 50.80 MPa και η συνολική παραμόρφωση του είναι 3.62 mm, που αποτελεί σχεδόν αμελητέα παραμόρφωση.

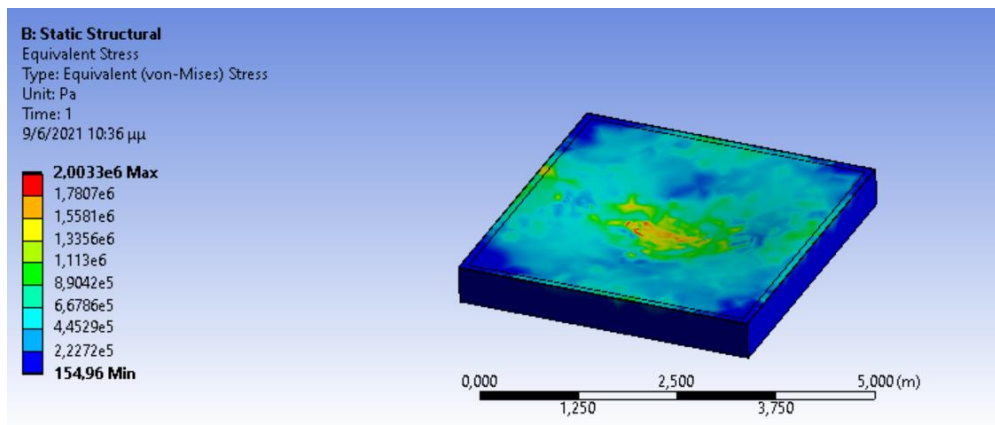


Εικόνα 22. Ισοδύναμη πίεση των φορτίων των τροχών αυτοκινήτου σε πάχος ανώτερης στρώσης 10 mm

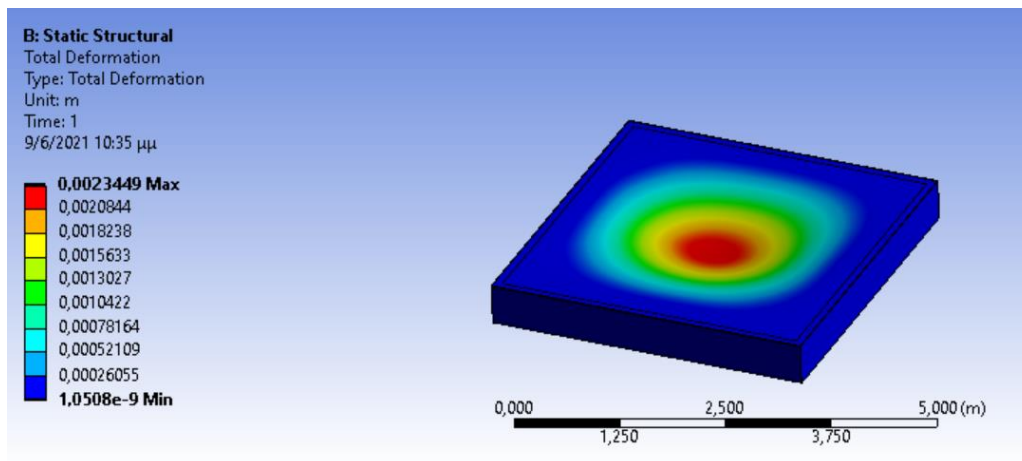


Εικόνα 23. Συνολική παραμόρφωση από τα φορτία των τροχών αυτοκινήτου σε πάχος ανώτερης στρώσης 10 mm

Τα αποτελέσματα από τη στατική ανάλυση της μοτοσυκλέτας σε ηλιακό συλλέκτη με πάχος ανώτερης στρώσης 10 mm παρατίθενται παρακάτω. Παρατηρούμε ότι ο ηλιακός αυτοκινητόδρομος με τα προκείμενα χαρακτηριστικά καταφέρνει να αντέξει και το φορτίο της μοτοσυκλέτας, καθώς διεξάχθηκαν αποτελέσματα με τιμές ισοδύναμης πίεσης των τροχών του στον ηλιακό συλλέκτη ίσες με 2.003 MPa και συνολικής παραμόρφωσης 2.34 mm.



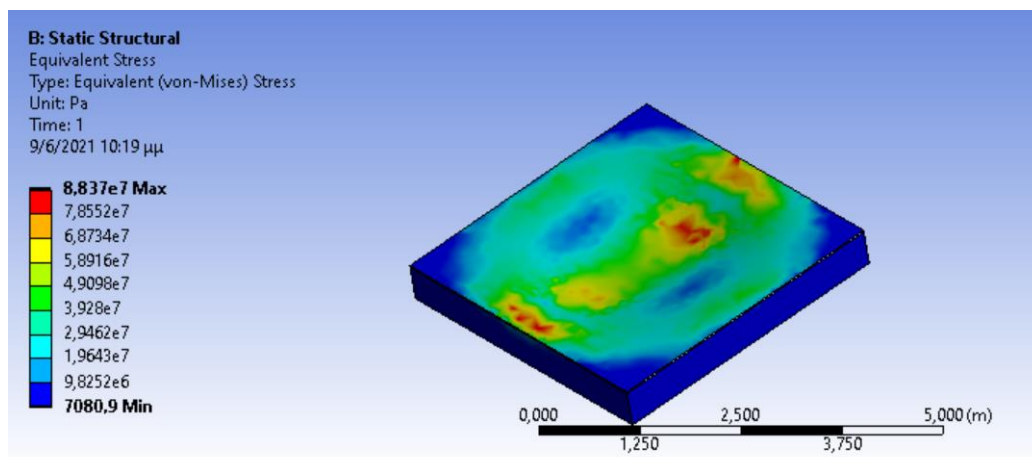
Εικόνα 24. Ισοδύναμη πίεση των φορτίων των τροχών μοτοσυκλέτας σε πάχος ανώτερης στρώσης 10 mm



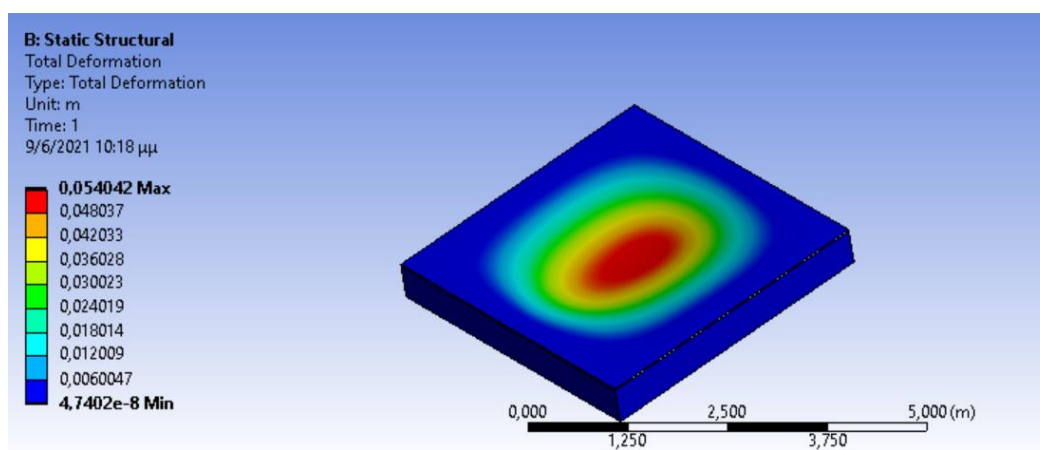
Εικόνα 25. Συνολική παραμόρφωση από τα φορτία των τροχών μοτοσυκλέτας σε πάχος ανώτερης στρώσης 10 mm

Για καλύτερα αποτελέσματα από την ανάλυση πραγματοποιήσαμε το σχεδιασμό νέου μοντέλου ανάλυσης με ανώτερη στρώση όμοιου υλικού, αλλά πάχους 24 mm. Τα αποτελέσματα διεξάχθηκαν και για τις τρεις περιπτώσεις τροχοφόρων.

Η ισοδύναμη πίεση και η συνολική παραμόρφωση του ηλιακού συλλέκτη από τους τροχούς του φορτηγού φαίνονται παρακάτω. Και στην περίπτωση των 24 mm πάχους ανώτερης στρώσης ο ηλιακός αυτοκινητόδρομος, όπως αναμέναμε, δείχνει επιτυχία στην αντοχή των τροχών ενός φορτηγού, καθώς οι τιμές της ισοδύναμης πίεσης παρατηρούνται μεγαλύτερες από το μέτρο του Young του υλικού ανώτερης στρώσης 8.37 MPa έναντι 50.80 MPa. Επιπρόσθετα, η παραμόρφωση του ηλιακού συλλέκτη υπολογίζεται στα 54.04 mm.

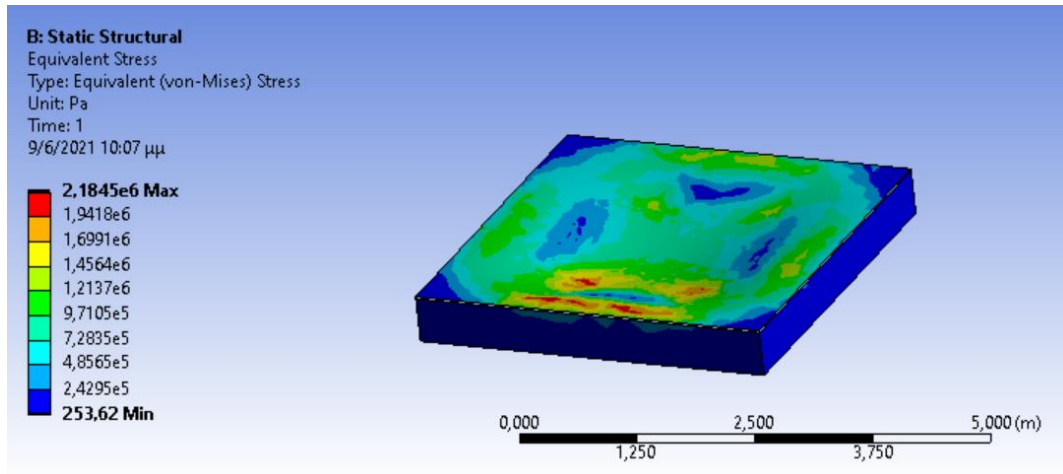


Εικόνα 26. Ισοδύναμη πίεση φορτίων πίσω τροχών φορτηγού σε πάχος ανώτερης στρώσης 24 mm

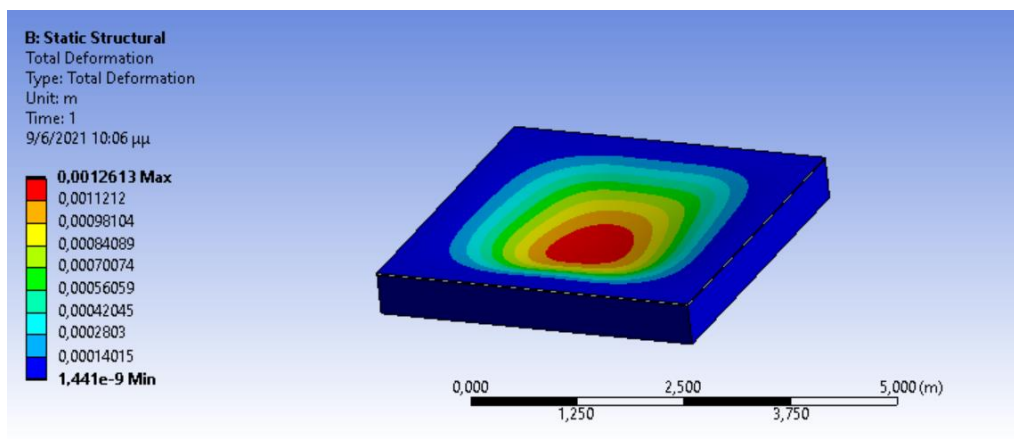


Εικόνα 27. Συνολική παραμόρφωση από τα φορτία των πίσω τροχών φορτηγού σε πάχος ανώτερης στρώσης 24 mm

Τα αποτελέσματα του αυτοκινήτου ήταν αναμενόμενα, καθώς και στην προηγούμενη περίπτωση με μοντέλο ηλιακού συλλέκτη με πάχος 10 mm, προέκυψαν θετικά. Στην περίπτωση των 24 mm πάχους ανώτερης στρώσης προέκυψαν αποτελέσματα, φυσικά, με μικρότερες τιμές από την περίπτωση του μικρότερου πάχους. Όπως, φαίνεται παραπάνω η ισοδύναμη πίεση, που ασκείται από τους τροχούς του αυτοκινήτου είναι 2.18 MPa, δηλαδή αρκετά μικρότερη από την τιμή του μέτρου Young (50.80 MPa). Η συνολική παραμόρφωση λαμβάνει πολύ μικρές τιμές σχεδόν αμελητέες, αφού παρατηρείται η μέγιστη τιμή της στα 1.26 mm.



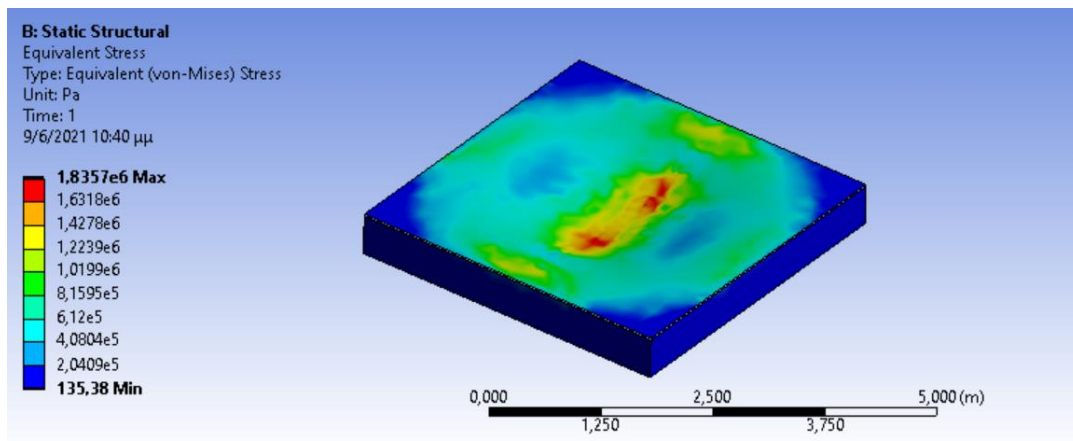
Εικόνα 28. Ισοδύναμη πίεση των φορτίων των τροχών αυτοκινήτου σε πάχος ανώτερης στρώσης 24 mm



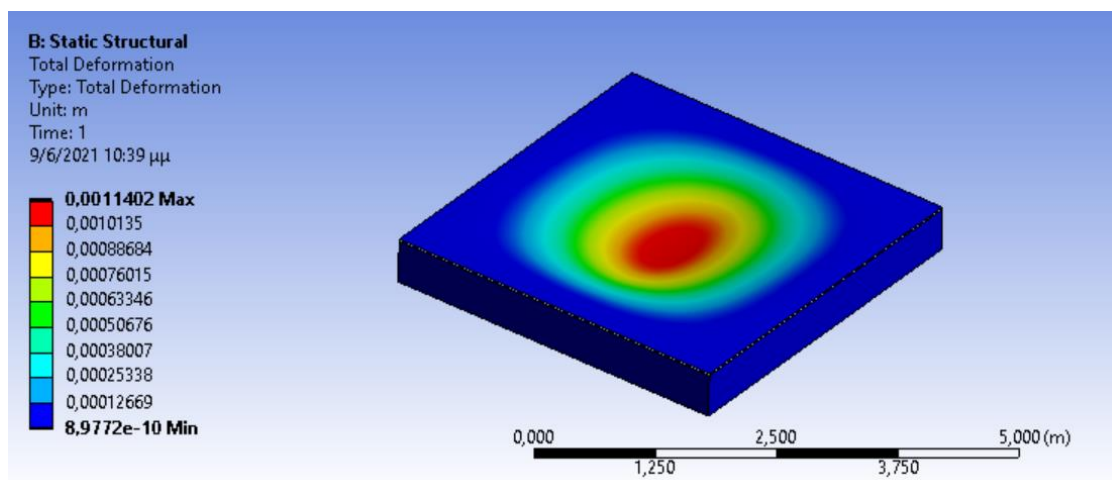
Εικόνα 29. Συνολική παραμόρφωση από τα φορτία των τροχών αυτοκινήτου σε πάχος ανώτερης στρώσης 24 mm

Η στατική ανάλυση της μοτοσυκλέτας απόφερε αποτελέσματα με αρκετά μικρές τιμές. Η συνολική πίεση, που ασκείται από τους τροχούς μίας μοτοσυκλέτας είναι της τάξεως του 1.83 MPa και η συνολική παραμόρφωση που δημιουργείται στον ηλιακό αυτοκινητόδρομο παίρνει μέγιστες τιμές του 1.14 mm.





Εικόνα 30. Ισοδύναμη πίεση των φορτίων των τροχών μοτοσυκλέτας σε πάχος ανώτερης στρώσης 24 mm



Εικόνα 31. Συνολική παραμόρφωση από τα φορτία των τροχών μοτοσυκλέτας σε πάχος ανώτερης στρώσης 24 mm

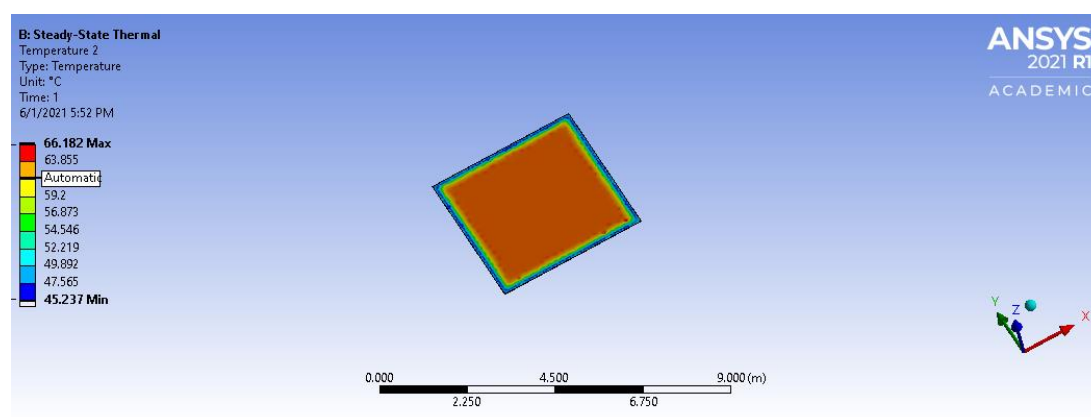
Table 11. Αποτελέσματα Στατικής Ανάλυσης με διαφορετικά πάχη

Αποτελέσματα Στατικής Ανάλυσης				
	Πάχος Ανώτερης Στρώσης 10 mm		Πάχος Ανώτερης Στρώσης 24 mm	
	Ισοδύναμη Πίεση [MPa]	Συνολική Παραμόρφωση [mm]	Ισοδύναμη Πίεση [MPa]	Συνολική Παραμόρφωση [mm]
<b>Φορηγό</b>	18.5	157	8.83	54.04
<b>Αυτοκίνητο</b>	3.044	3.62	2.18	1.26
<b>Μοτοσυκλέτα</b>	2.003	2.34	1.83	1.14

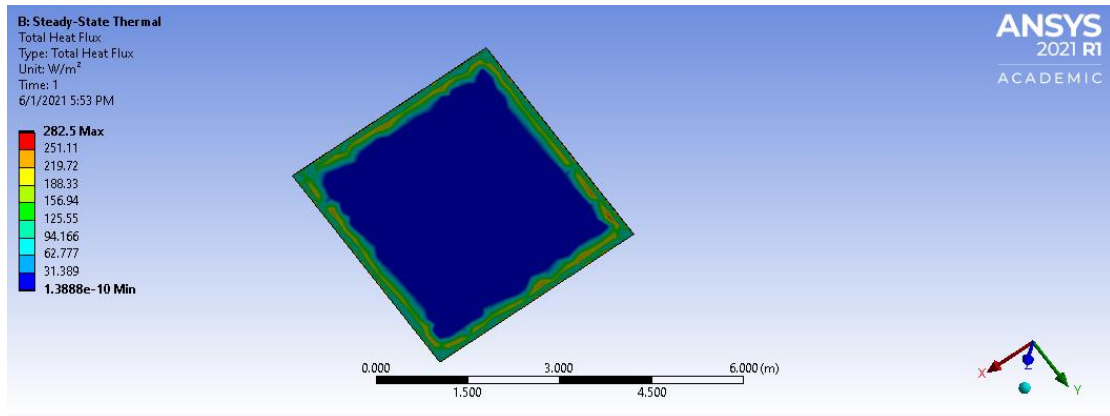
#### 4.2.2 Αποτελέσματα Θερμικής Ανάλυσης

Παρακάτω περιγράφονται τα αποτελέσματα από τη θερμική ανάλυση σχετικά με τις τιμές της θερμοκρασίας σε °C σε όλα τα στρώματα του ηλιακού αυτοκινητόδρομου, αλλά και στην ανώτερη στρώση του ηλιακού αυτοκινητόδρομου ξεχωριστά. Με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε έχουμε και τη συνολική ροή θερμότητας στην ανώτερη στρώση του ηλιακού αυτοκινητόδρομου πάχους 10 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 10 mm έχει μέγιστη τιμή 66.182°C και η μέση ροή θερμότητας στην ανώτερη στρώση είναι 56 W/m<sup>2</sup>, που αποτελεί το 26% της συνολικής ροής θερμότητας στην περιοχή της Αττικής (208.33 W/m<sup>2</sup>).

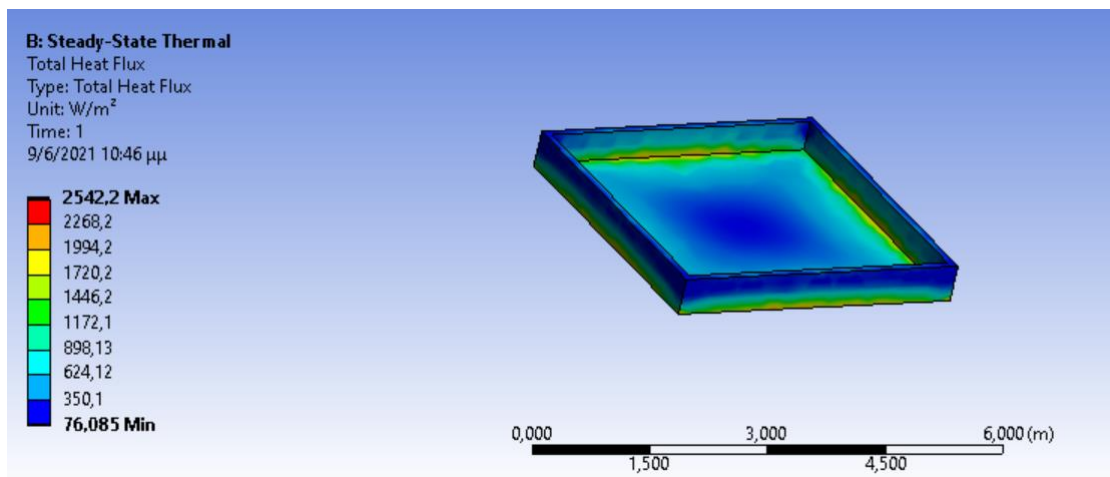


Εικόνα 32. Τιμές θερμοκρασίας στην ανώτερη στρώση του ηλιακού συλλέκτη πάχους 10 mm

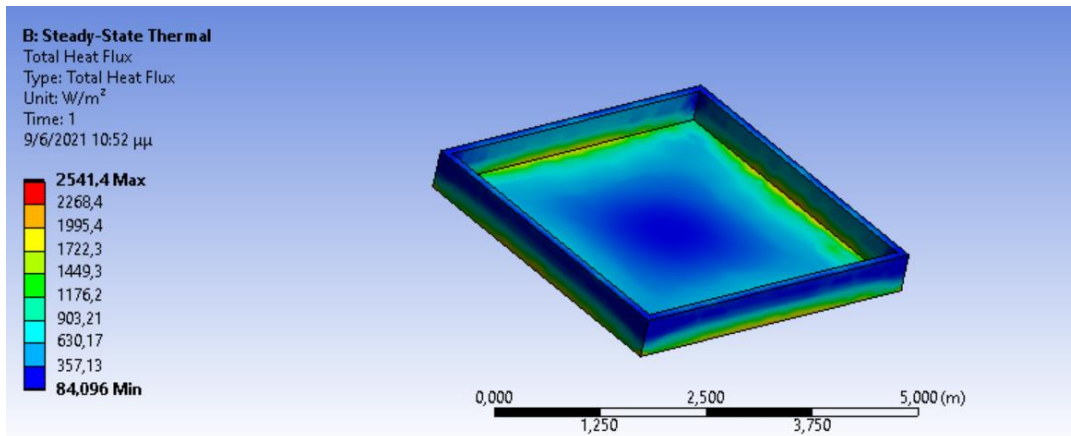


Εικόνα 33. Τιμές συνολικής ροής θερμότητας στην ανώτερη στρώση του ηλιακού συλλέκτη πάχους 10 mm

Τα αποτελέσματα από τη συνολική ροή θερμότητας που υπάρχει στις στρώσεις του ηλιακού συλλέκτη (βάση, ανώτερη στρώση) παρατίθενται παρακάτω και στις δύο προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με διαφορετικά πάχη ανώτερης στρώσης. Παρατηρείται ότι υπάρχει μία μικρή πτώση στην τιμή της ροής θερμότητας στη δεύτερη περίπτωση των 24 mm πάχους, καθώς με την αύξηση του πάχους έχουμε μείωση της διαπερατότητας του υλικού. Επιπρόσθετα, η ροή της θερμότητας σε σχέση με τη μέση ηλιακή απομόνωση στην Ελλάδα αποτελεί μία αρκετά αξιόλογη περίπτωση.



Εικόνα 34. Τιμές συνολικής ροής θερμότητας του ηλιακού συλλέκτη με πάχος ανώτερης στρώσης 10 mm



Εικόνα 35. Τιμές συνολικής ροής θερμότητας του ηλιακού συλλέκτη με πάχος ανώτερης στρώσης 24 mm

Table 12. Αποτελέσματα Θερμικής Ανάλυσης

Αποτελέσματα Θερμικής Ανάλυσης		
	Πάχος ανώτερης στρώσης 10 mm	Πάχος ανώτερης στρώσης 24 mm
Θερμοκρασία ανώτερης στρώσης (°C)	66.182	
Ροή θερμότητας ανώτερης στρώσης (W/m <sup>2</sup> )	282.5	
Ροή θερμότητας ηλιακού συλλέκτη (W/m <sup>2</sup> )	2542.2	2541.4

#### 4.2.3. Συμπεράσματα Ανάλυσης

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 στην στατική ανάλυση, συμπεραίνεται ότι το ακρυλικό πλαστικό για κάλυψη της ανώτερης στρώσης του ηλιακού συλλέκτη αποτελεί μη αξιόλογη επιλογή για την περίπτωση των φορτίων του φορτηγού και στις δυο

περιπτώσεις μελέτης των 10 mm και 24 mm. Από την άλλη πλευρά, το ακρυλικό πλαστικό αποτελεί επαρκής λύση για τα φορτία του αυτοκινήτου και της μοτοσυκλέτας, καθώς οι τιμές της ισοδύναμης πίεσης και της συνολικής παραμόρφωσης χαρακτηρίζονται από μικρές τιμές σε σχέση με 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 αυτοκινητόδρομου αλλά και την τιμή της θερμοκρασίας στην ανώτερη στρώση. Η τιμή της θερμικής ροής στην ανώτερη στρώση αποτελεί το 26 % του συνολικού ποσοστού της μέγιστης ηλιακής απομόνωσης στην Ελλάδα, κάτι το οποίο έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς είναι το μέσο ποσοστό ηλιακής εκπομπής από τους ηλιακούς συλλέκτες για αυτοκινητόδρομους. Επιπρόσθετα, παρατηρείται μία μικρή μεταβολή στις δύο περιπτώσεις διαφορετικών παχών της ανώτερης στρώσης αφού στο ενδεχόμενο των 24 mm πάχους η θερμική ροή μειώνεται. Η μείωση αυτή όμως θεωρείται αμελητέα.

#### 4.3 Σύγκριση Κόστους ενός Ασφαλτοστρωμένου και ενός Ηλιακού Αυτοκινητόδρομου

##### 4.3.1 Υπολογισμός Κόστους 1 km Ασφαλτοστρωμένου Αυτοκινητόδρομου

Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την κοστολόγηση της κατασκευής 1 km αυτοκινητόδρομου, όπως η τοποθεσία, το ανάγλυφο του εδάφους, τα χαρακτηριστικά των λωρίδων (αριθμός, πλάτος), ο τρόπος κατασκευής, η ανθεκτικότητα που απαιτείται, η ύπαρξη και το πλήθος γεφυρών, κ.λπ.. Σχετικά με την κατασκευή ενός νέου ασφαλτοστρωμένου αυτοκινητόδρομου το κόστος παρουσιάζεται μεγαλύτερο από το κόστος αποκατάστασης ενός υφιστάμενου αυτοκινητόδρομου από άσφαλτο. Επιπρόσθετα, παρατηρούνται υψηλότερα τα κόστη στην ασφαλτόστρωση αυτοκινητόδρομων σε αστικές περιοχές από ότι στην ύπαιθρο, όπως επίσης και σε ορεινές από ότι σε πεδινές περιοχές (Mwani, n.d.). Ωστόσο, μία μέση κοστολόγηση μίας ασφαλτικής στρώσης κυκλοφορίας πάχους 0.05 m με τη χρήση τροποποιημένης ασφάλτου παρατίθεται στον παρακάτω πίνακα σε σχέση με το πλήθος λωρίδων, που συναντάμε σε έναν τυπικό αυτοκινητόδρομο στη χώρα μας.

Table 13. Μέσο κόστος ασφαλτοστρωμένου αυτοκινητόδρομου ανά m<sup>2</sup>

	Πλήθος Λωρίδων	Μέσο Κόστος m/km
Αυτοκινητόδρομος	2	20.28 €
	3	30.42 €

Το κόστος προμήθειας ποικίλλει σημαντικά από οδικό δίκτυο σε οδικό δίκτυο. Στον Πίνακα υπολογίστηκαν τα μέση κόστη ασφαλτόστρωσης του 1m μήκους αυτοκινητόδρομου στις

περιπτώσεις των 2 και 3 λωρίδων κυκλοφορίας πλάτους 3m η καθεμία και με βάση την κοστολόγηση του 1m<sup>2</sup>, η οποία είναι στα 3.38 (Μαυριάς, χ.χ.).

Στον παρακάτω πίνακα υπολογίζεται το συνολικό μέσο κόστος για την ασφαλτόστρωση 1km αυτοκινητόδρομου και στις δύο περιπτώσεις.

Table 14. Μέσο κόστος 1 km ασφαλτοστρωμένου αυτοκινητόδρομου

	Πλήθος Λωρίδων	Μέσο Κόστος 1km
Αυτοκινητόδρομος	2	20280 €
	3	30420 €

#### 4.3.2 Υπολογισμός Κόστους 1km Ηλιακού Αυτοκινητόδρομου

Οι διαστάσεις ενός τυπικού ηλιακού συλλέκτη που εφαρμόζεται σε αυτοκινητόδρομους είναι 3.66m x 3.66m ή 13.4m<sup>2</sup> και η διάρκεια ζωής του παρατηρείται στα 20 χρόνια. Με βάση τον μέσο όρο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 4.2 kWh/m<sup>2</sup>, ο ηλιακός συλλέκτης παράγει 56.28 kWh ημερησίως (Mwani, n.d.).

Για τον υπολογισμό του κόστους 1km ηλιακού αυτοκινητόδρομου πρέπει να συλλεχθούν τα χαρακτηριστικά του.

Table 15. Κόστος 1 λωρίδας ηλιακού αυτοκινητόδρομου

Πλάτος μίας Λωρίδας Αυτοκινητόδρομου	Διαστάσεις Ηλιακού Συλλέκτη	Πλήθος Ηλιακών Συλλεκτών	Μέσο Κόστος Ηλιακού Συλλέκτη	Κόστος 1 Λωρίδας Ηλιακού Αυτοκινητόδρομου
3	3.66 x 3.66	274	7010.89	1.920.000 €



Table 16. Κόστος 1 km ηλιακού αυτοκινητόδρομου

	Πλήθος Λωρίδων	Μέσο Κόστος 1 km
Ηλιακός Αυτοκινητόδρομος	2	3.840.000 €
	3	5.760.00 €

#### 4.3.3. Συμπεράσματα

Στο προκείμενο κεφάλαιο συλλέχθηκαν στοιχεία σχετικά με το μέσο κόστος 1 m<sup>2</sup> ασφαλτοστρωμένου αυτοκινητόδρομου στην Ελλάδα και την τιμή ενός ηλιακού πλαισίου της εταιρίας SunPower. Με βάση τα δεδομένα αυτά υπολογίστηκε το κόστος 1 km αυτοκινητόδρομου και στις δύο περιπτώσεις. Η διαφορά στο κόστος τους παρατηρείται αρκετά μεγάλη, καθώς το 1 km αυτοκινητόδρομου από άσφαλτο με 3 λωρίδες κοστίζει 30420 €, ενώ η τιμή του ηλιακού πλαισίου είναι χιλιάδες φορές υψηλότερη, στα 5760000 €. Η λύση του ηλιακού αυτοκινητόδρομου θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με εύρεση χαμηλότερου κόστους εφαρμογής και απόδοση ενέργειας. Οι συντηρήσεις στους συμβατικούς δρόμους πραγματοποιούνται αρκετά πιο συχνά, ενώ η διάρκεια ζωής ενός ηλιακού αυτοκινητόδρομου υπολογίζεται στα 20 χρόνια. Επιπρόσθετα, τα ηλιακά πλαίσια αποτελούν αδιάβροχη λύση σε αντίθεση με την άσφαλτο. Η τιμή της ασφάλτου ανεβαίνει κατά τη διάρκεια των χρόνων χωρίς τη βελτίωση της σύστασης της. Επομένως, η εφαρμογή των ηλιακών αυτοκινητόδρομων στην Ελλάδα και σε χώρες του ίδιου βιοτικού επιπέδου γίνεται αποδεκτή με κάποιες επεκτάσεις της τεχνολογίας.

## 5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

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 αυτοκινητόδρομου 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 Αυτοκινητόδρομου 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 αυτοκινητόδρομου 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. Οι τεχνολογίες του έξυπνου αυτοκινητόδρομου 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 έξυπνους αυτοκινητόδρομους, 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. Με τη διερεύνηση των παραδειγμάτων οδηγηθήκαμε στο συμπέρασμα ότι η χρήση των ηλιακών συλλεκτών στους αυτοκινητόδρομους αποτελεί μία αρκετά αποδοτική λύση, καθώς τροφοδοτήθηκαν μέσω αυτών αρκετές βιομηχανίες και κατοικίες σε πολλές χώρες.

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε σχετικά με την αντικατάσταση των συμβατικών αυτοκινητόδρομων με ηλιακούς μας οδήγησε στα συμπεράσματα ότι αποτελεί μία αξιόλογη μελέτη περίπτωσης, αφού οι τιμές της ηλιακής απομόνωσης στην Ελλάδα παρατηρούνται πολύ υψηλές σε όλα τα γεωγραφικά διαμερίσματα, που μας ενδιαφέρουν. Σε αντίθεση με το δύσκολο ανάγλυφο εδάφους στη χώρα μας τα αποτελέσματα προέκυψαν αρκετά θετικά.

Η εφαρμογή της προσομοίωσης του ηλιακού αυτοκινητόδρομου 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 αυτοκινητόδρομου με πάχος 10 mm να απορρίπτεται και από τους τρεις τύπους τροχοφόρων, ενώ στην δική μας περίπτωση κρίνεται επαρκές το πάχος και για τους τρεις τύπους. 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 μέσο ποσοστό, που επιτυγχάνεται με την εφαρμογή πολυκρυσταλλικού ηλιακού συλλέκτη στους αυτοκινητόδρομους αποτελούσε στόχο μας και επιτεύχθηκε απόλυτα. Η ανάλυση με το νέο πάχος ανώτερης στρώσης των 24 mm δεν αποτέλεσε εν τέλει πρόβλημα, καθώς η τιμή της ροής θερμότητας στον ηλιακό αυτοκινητόδρομο μειώθηκε στο ελάχιστο.

Το τελευταίο βήμα της μελέτης της εφαρμογής ενός έξυπνου αυτοκινητόδρομου με βάση του την ηλιακή ενέργεια αποτέλεσε η σύγκριση του κόστους του με το κόστος ενός συμβατικού αυτοκινητόδρομου από ασφάλτο. Τα συμπεράσματα στο προκείμενο μέρος είναι ανάμεικτα, αφού το κόστος των ηλιακών πλαισίων, που επιλέχθηκαν είναι αρκετά μεγαλύτερο από αυτό της κατασκευής ενός ασφαλτοστρωμένου αυτοκινητόδρομου, κάτι που το καθιστά δύσκολο προς επίτευξη στη χώρα μας. Από την άλλη μεριά, η διάρκεια ζωής του ηλιακού πλαισίου παρατηρείται αρκετά μεγαλύτερη και η τεχνολογία αποδοτικότερη σε πολλές πτυχές (ασφάλεια, εξοικονόμηση ενέργειας, ενημέρωση, κ.λπ.).

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω πορίσματα για κάθε κριτήριο αξιολόγησης ενός έξυπνου αυτοκινητόδρομου με όλες τις τεχνολογίες του, αλλά και στην εμβάθυνση της τεχνολογίας του ηλιακού αυτοκινητόδρομου, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα πως χαρακτηρίζονται από ικανοποιητική αποτελεσματικότητα με στοιχεία προς βελτίωση. Θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν παραπάνω έρευνες αξιοποιώντας το συγκεκριμένο ερευνητικό πλαίσιο.

Προτάσεις για μελλοντική επέκταση της έρευνας:

- Η ανάλυση για χρήση άλλου υλικού ανώτερης στρώσης, το οποίο να χαρακτηρίζεται από καλές τιμές πρόσφυσης, αλλά και να είναι αρκετά διαπερατό για την επίτευξη του στόχου της εξοικονόμησης ενέργειας.
- Η δημιουργία προσομοίωσης ενός ηλιακού αυτοκινητόδρομου με σχεδιασμό και ανάλυση όλων των στρωμάτων, που τον αποτελούν για πιο επακριβή αποτελέσματα.
- Η ιδανικότερη λύση του ηλιακού αυτοκινητόδρομου και από την πλευρά του κόστους.

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

## 6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ:

### Ξενόγλωσση

1. Abass I., Kant K., Kumar A., Murari K. (2020). Retrieved 3 January, 2021, from [https://www.ijeas.org/download\\_data/IJEAS0706002.pdf](https://www.ijeas.org/download_data/IJEAS0706002.pdf)
2. Abbott C. (1981). Plank Roads and Wood-Block Pavements. Retrieved 5 November, 2020, from \*Plank Roads and Wood-Block Pavements (jstor.org)
3. Abrams S. (2013). The Unseen History of our Roads. Retrieved 20 October, 2020, from <https://www.roadandtrack.com/car-culture/a4447/the-road-ahead-road-evolution/>
4. Aggrawal N., Mehta A., Tiwari A.. (2015). Retrieved 03 February, 2021, from mehta.pdf
5. Alonso I. (2013). Jernal Sarak (The Grand Trunk Road). Retrieved 30 November, 2020, from Jarnali\_Sarak\_The\_Grand\_Trunk\_Road\_Excer.pdf
6. Ancient Maya developed super highways network more than 1,000 years ago. (2017). Retrieved 15 November, 2020, from <https://www.theyucatanimes.com/2017/01/ancient-maya-developed-super-highways-network-more-than-1000-years-ago/>
7. Ancient Roman Roads - a monument to history and road construction. (n.d.). Retrieved 29 October, 2020, from <https://www.geotech.hr/en/ancient-roman-roads-a-monument-to-history-and-road-construction/>
8. Ansys. (2007). Wikipedia. Retrieved 05 April, 2021, from <https://en.wikipedia.org/wiki/Ansys>
9. Ansys Mechanical. (n.d.). Ansys. Retrieved 05 April, 2021, from <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-mechanical>
10. Ansys Workbench. (n.d.). Ansys. Retrieved 05 April, 2021, from <https://www.ozeninc.com/ansys-workbench/>
11. Andriopoulou S. (n.d.). Retrieved 15 April, 2021, from <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:549685/fulltext01.pdf>
12. Azmat M., et.al. (2019). Retrieved 11 March,2021, from <https://epub.wu.ac.at/7001/1/logistics-03-00015.pdf>
13. Bas de Jong (2015). Retrieved 8 April, 2021, from <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:816151fb-14b9-45e6-8d5a-023787f54ab5?collection=education>
14. Bekker-Nielsen T. (2000). New Approaches to the Study of Roman Roads. 19th International Congress of Historical Sciences. Retrieved 29 October, 2020, from [New\\_Approaches\\_to\\_the\\_Study\\_of\\_Roman\\_Roa.pdf](#)
15. Beyond Technology. (n.d.). Retrieved 4 January, 2021, from [https://www.planning.org.nz/Attachment?Action=Download&Attachment\\_id=3288](https://www.planning.org.nz/Attachment?Action=Download&Attachment_id=3288)
16. Cartwright M. (2014). Roman Roads. Retrieved 29 October, 2020, from <https://www.ancient.eu/article/758/roman-roads/>

17. Cano J., Martinez F., Sanguesa J., Toh C. (2019). Retrieved 3 January, 2021, from <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.2019.0439>
18. Chaitanya V., Kurre P., Praveen S. (2018). Retrieved 02 February. 2021, from [https://www.ijsr.in/upload/682325403Chapter\\_71.pdf](https://www.ijsr.in/upload/682325403Chapter_71.pdf)
19. China's built...car. (12 April, 2018). Retrieved 23 February, 2021 from <https://www.nsenergybusiness.com/features/china-solar-highway-energy/>
20. Clissitt C. (n.d.). Blind Jack. Retrieved 27 November, 2020, from <https://www.historic-uk.com/HistoryUK/HistoryofEngland/Blind-Jack/>
21. Davis A. (2020). Highway turbines...passing cars. Retrieved 23 February, from <https://highways.today/2020/04/09/highway-wind-turbines/>
22. Engineering 4. Sun L., Tian Y., Tu H., Zhao H. (2018). Retrieved 3 January, 2021, from [https://www.researchgate.net/profile/Hongduo-Zhao/publication/326528252\\_The\\_Smart\\_Road\\_Practice\\_and\\_Concept/links/5d40e4dc92851cd04694b1ea/The-Smart-Road-Practice-and-Concept.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Hongduo-Zhao/publication/326528252_The_Smart_Road_Practice_and_Concept/links/5d40e4dc92851cd04694b1ea/The-Smart-Road-Practice-and-Concept.pdf)
23. First Highway...Netherlands. (22 October,2014). Retrieved 21 February, 2021, from <https://newatlas.com/smart-highway-glowing-lines/34363/>
24. Global Solar Atlas. (n.d.). Retrieved 16 March, 2021, 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)
25. Glow in the dark road unveiled in the Netherlands. (14 April, 2014). Retrieved 21 February, 2021, from <https://www.bbc.com/news/technology-27021291>
26. Grabinski S. (2019). DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012150

Retrieved 05 February, 2021, from [https://www.researchgate.net/publication/337435156\\_Improved\\_Visibility\\_-\\_Solar\\_Powered\\_Road\\_Markers\\_on\\_Polish\\_Roads](https://www.researchgate.net/publication/337435156_Improved_Visibility_-_Solar_Powered_Road_Markers_on_Polish_Roads)

27. Grand Trunk Road. (2018). Retrieved 30 November, 2020, from <https://www.globalsecurity.org/military/world/india/grand-trunk-road.htm>
28. Grand Trunk Road-'River of Life. (2017). Retrieved 30 November, 2020,from <https://www.britishpakistanfoundation.com/grand-trunk-road-grand-trunk-project-initiative/>
29. Grand Trunk Road, one of Asia's oldest and longest roads. (n.d.). Retrieved 30 November, 2020, from <https://www.dangerousroads.org/asia/india/119-grand-trunk-road-india.html>
30. Grossman D. (2019). Retrieved 23 February, 2021 from <https://www.popularmechanics.com/technology/infrastructure/a28720252/french-solar-road-failure/>
31. Highway Engineering. (2016). Retrieved 27 November, 2020, from <http://keyofdevelopment.blogspot.com/2016/09/highway-engineering.html>
32. Hirst K. (2018). Sacbe, the Ancient Maya System. Retrieved 15 November, 2020, from <https://www.thoughtco.com/sacbe-the-ancient-maya-road-system-172953>

33. History of Road Transport. (n.d.). Retrieved 10 November, 2020, from [https://www.wikiwand.com/en/History\\_of\\_road\\_transport](https://www.wikiwand.com/en/History_of_road_transport)
34. Huang E. (2017). Retrieved 23 February, 2021, from <https://qz.com/1166975/a-new-solar-highway-in-china-perfectly-captures-its-clean-energy-ambitions/>
35. John Loudon McAdam. (n.d.). Retrieved 27 November, 2020, from Britannica site <https://www.britannica.com/biography/John-Loudon-McAdam>
36. John Metcalf: The Blind Road Builder Who Built 180 Miles of Road. (2017). Retrieved 27 November, 2020, from <https://historydaily.org/john-metcalf-blind-road-builder-built-180-miles-road>
37. Kalyani V., Joshi S., Choudhary V. (2015). Retrieved 27 February, from [https://www.researchgate.net/publication/289249442\\_Smart\\_Highway\\_of\\_the\\_Future\\_Utilizing\\_Green\\_Energy](https://www.researchgate.net/publication/289249442_Smart_Highway_of_the_Future_Utilizing_Green_Energy)
38. Kaur J., Vishnoy A. (2016). Retrieved 26 February, 2021, from [http://pep.ijieeee.org.in/journal\\_pdf/11-259-146562014186-88.pdf](http://pep.ijieeee.org.in/journal_pdf/11-259-146562014186-88.pdf)
39. Keller A. (2006). A Road by Any Other Name: Trails, Paths, and Roads in Maya Language and Thought. Retrieved 26 November, 2020, from [Keller\\_1\\_24May06.pdf \(upenn.edu\)](#)
40. Kulkarni A. (2013). Retrieved 23 February, 2021, from [https://www.ijera.com/papers/Vol3\\_issue3/IJ3314291436.pdf](https://www.ijera.com/papers/Vol3_issue3/IJ3314291436.pdf)
41. Kumar P. (2013). Piezo-Smart Roads. Retrieved 27 February, from <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.379.1786&rep=rep1&type=pdf>
42. Longfellow R. (2017). Plank Roads. Retrieved 2 November, 2020, from <https://www.fhwa.dot.gov/infrastructure/back0508.cfm>
43. Walubita L., et. al. (2018). Retrieved 8 April, 2021, from <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/2/383>
44. Malave S., Bhosale S. (2013). Highway Wind Turbine (Quid Revolution Turbine). Retrieved 04 March, 2021, from [https://www.ripublication.com/irph/ijert\\_spl/ijertv6n6spl\\_10.pdf](https://www.ripublication.com/irph/ijert_spl/ijertv6n6spl_10.pdf)
45. McCloskey J. (1949). History of Military Road Construction. Retrieved 2 November, 2020, from \*History of Military Road Construction (jstor.org)
46. McDonald F. (2015). Retrieved 20 February, 2021, from <https://www.sciencealert.com/solar-roads-in-the-netherlands-are-working-even-better-than-expected>
47. Mayan System of Transportation. (n.d.). Retrieved 15 November, 2020, from <https://www.mayaincaaztec.com/highinterestreading/mayan-system-of-transportation>
48. Merdinger C. (1952). Roads — through the Ages: I. Early Developments. Retrieved 27 November, 2020, from Roads — through the Ages: I. Early Developments (jstor.org)
49. Modijefsky M. (2018). Retrieved 21 February, 2021, from <https://www.eltis.org/discover/news/electric-roads-innovative-pilot-projects-launched-sweden-and-netherlands>
50. Muench S. (2017). An Ancient Network: The Roads of Rome. Retrieved 29 October, 2020, from <https://brewminate.com/an-ancient-network-the-roads-of-rome/>



51. Mwani D. (n.d.). Investigation...Solar Roadway. Retrieved 02 March, 2021, from <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUK EwjWi9nXoIXxAhWRiqQKHQsaD6EQFnoECAYQAA&url=http%3A%2F%2Fwww.onlinejournal.in%2FIJIRV3I2%2F340.pdf&usg=AOvVaw2M91zo6aQlpeFf5-VEGWR7>
52. National Roads and Motorways in Greece. (2008). Wikipedia. Retrieved 10 March, 2021, from [https://en.wikipedia.org/wiki/National\\_Roads\\_and\\_Motorways\\_in\\_Greece](https://en.wikipedia.org/wiki/National_Roads_and_Motorways_in_Greece)
53. Netherlands highways...2013. (30 October,2012). Wired. Retrieved 06 January, 2021, from <https://www.wired.co.uk/article/smart-highway-glow-in-the-dark>
54. Next Generation Networks – Frameworks and functional architecture models (2012). Retrieved 3 April, 2021, from <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I>
55. Northmore A. (2012). Retrieved 22 February, 2021, from <http://conf.tac-atc.ca/english/annualconference/tac2012/docs/session3/northmore.pdf>
56. Old Plank Road. (n.d.). Retrieved 2 November, 2020, from <https://www.desertusa.com/sandhills/plankrd.html>
57. Parkhurst R. (1925). India and the Grand Trunk Road. Retrieved 30 November, 2020, from India and the Grand Trunk Road (jstor.org)
58. Pawar M., et. al. (2018). Retrieved 02 February, 2021, from 91901\_66428228.pdf
59. Petroski H. (2008). Engineering: Thomas Telford. Retrieved 5 December, 2020, from Engineering: Thomas Telford (jstor.org)
60. Schiller P., Bruun E., Kenworthy J. (2010). An Introduction to Sustainable Transportation: Policy, Planning and Implementation. Earthscan. Retrieved 18 December, 2020 from [https://books.google.gr/books?id=JTQGDOevGq0C&pg=PA54&lpg=PA54&dq=Lay+\(1992\),+p25&source=bl&ots=6HQPqazrWP&sig=ACfU3U2pzGApAuqCCaHIITAZ3Y518W-2eA&hl=el&sa=X&ved=2ahUKEwjMz-mV8MPtAhUlz4UKHbn3DLgQ6AEwDXoECACQAg#v=onepage&q=Lay%20\(1992\)%2C%20p25&f=false](https://books.google.gr/books?id=JTQGDOevGq0C&pg=PA54&lpg=PA54&dq=Lay+(1992),+p25&source=bl&ots=6HQPqazrWP&sig=ACfU3U2pzGApAuqCCaHIITAZ3Y518W-2eA&hl=el&sa=X&ved=2ahUKEwjMz-mV8MPtAhUlz4UKHbn3DLgQ6AEwDXoECACQAg#v=onepage&q=Lay%20(1992)%2C%20p25&f=false)
61. Rathod K., et. al. (2019). Retrieved 23 February, 2021, from <https://www.irjet.net/archives/V6/i4/IRJET-V6I4810.pdf>
62. Renoald J., et. al. (2016). Retrieved 03 February, 2021, from <http://large.stanford.edu/courses/2017/ph240/cook2/docs/mehta.pdf>
63. Roads and Land Traffic. (n.d.). Retrieved 10 November, 2020, from [encyclopedia.com/history/news-wires-white-papers-and-books/roads-and-land-traffic](https://encyclopedia.com/history/news-wires-white-papers-and-books/roads-and-land-traffic)
64. Road Construction: History and Current Methods. (20 December, 2009). Retrieved 20 October, 2020 from <https://www.brighthubengineering.com/structural-engineering/59665-road-construction-history-and-procedure/>

65. Rodriguez D. (2019). Revision of Smart Street Lighting LED. Retrieved 17 March, 2021, 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
66. Roman Road System. (n.d.). Retrieved 29 October, 2020, from Britannica site <https://www.britannica.com/technology/Roman-road-system>
67. Sebastian G., Dilip R., Vasudeo M., et.al.. (2017). Smart Highways – An Innovation Towards Mobility. Retrieved 05 January, 2021, from [https://www.technoarete.org/common\\_abstract/special\\_pdf/special\\_31407.pdf](https://www.technoarete.org/common_abstract/special_pdf/special_31407.pdf)
68. Selvaraju R. (2012). Retrieved 02 March, 2021, from <https://ir.lib.uwo.ca/etd/906/>
69. Shah S. (2018). Retrieved 23 February, 2021 from <http://www.greenworldinvestor.com/2018/05/28/yes-you-heard-it-right-india-has-its-first-solar-powered-expressway/>
70. Shaw J. (2001). Maya “Sacbeob” : Form and Function. Retrieved 26 November, 2020, from MAYA "SACBEOB": Form and function ([jstor.org](https://www.jstor.org))
71. Sheets P. et al. (2015). The Sociopolitical Economy of an Ancient Maya Village: Ceren and its Sacbe. Retrieved 26 November, 2020, from THE SOCIOPOLITICAL ECONOMY OF AN ANCIENT MAYA VILLAGE: CERÉN AND ITS SACBE ([jstor.org](https://www.jstor.org))
72. Smart Transportation Aliance. Smart Roads: a Vision. (January, 2015). Retrieved 29 December, 2020, from [http://smart-transportation.org/wp-content/uploads/2015/01/STA\\_DP\\_1\\_2015\\_Def.pdf](http://smart-transportation.org/wp-content/uploads/2015/01/STA_DP_1_2015_Def.pdf)
73. Solar Resource Maps of Greece. (n.d.). Solargis. Retrieved 16 March, 2021, from <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/greece>
74. Streets and Roads. (n.d.). Retrieved 20 October, 2020, from <https://worldhhistory.weebly.com/streets-and-roads.html>
75. Sunpower. (n.d.). About Company. Retrieved 16 March, 2021, from <https://us.sunpower.com/company>
76. Telford’s Roads. (n.d.). Retrieved 5 December, 2020, from <https://www.ice.org.uk/what-is-civil-engineering/what-do-civil-engineers-do/telfords-roads>
77. The dutch....expanding. (3 July, 2017). Retrieved 20 February, 2021, from <https://www.iamgreek.nl/technology/2017/07/03/the-dutch-solar-bike-path-solaroad-works-successfully-and-expanding/>
78. The Netherlands introduces SolaRoad paving. (13 March, 2019). Retrieved 22 February, 2021, from <https://www.offgridenergyindependence.com/articles/16755/the-netherlands-introduces-solaroad-paving>
79. Todd F. (2019). Retrieved 23 February, 2021 from <https://www.nsenergybusiness.com/features/china-solar-highway-energy/>
80. Transportation and Travel. (n.d.). Retrieved 10 November, 2020, from <https://erenow.net/ancient/ancient-greece-and-rome-an-encyclopedia-for-students-4-volume-set/462.php>

81. Venter I. (2018). Retrieved 20 February, 2021, from <https://www.engineeringnews.co.za/article/dutch-solar-road-proves-successful-moves-on-to-heavy-traffic-road-trial-2018-10-19>
82. What is Global Horizontal Irradiance. (n.d.). Vaisala Energy. Retrieved 15 March, 2021, from <https://www.3tier.com/en/support/solar-online-tools/what-global-horizontal-irradiance-solar-prospecting/>
83. Wiegand G. (2019). Retrieved 8 April, 2021, from <http://ceur-ws.org/Vol-2327/IUI19WS-IUIoT-4.pdf>
84. Wilson N. (2013). Encyclopedia of Ancient Greece. Retrieved 11 November, 2020, from <https://books.google.gr/books?id=-aFtPdh6-2QC&pg=PA715&dq=ancient+greek+roads&hl=el&sa=X&ved=0ahUKEwi2oqjyw7boAhXP-ioKHeV9AiAQ6AEIMzAB#v=onepage&q=ancient%20greek%20roads&f=false>

## Ελληνική:

85. Γερόνικος Κ. (2018). Ανάπτυξη Μοντέλου Βελτιστοποίησης Κατανομής Πόρων για την Επιδιόρθωση και Συντήρηση των Οδοστρωμάτων (σε μια Διοικητική Περιφέρεια). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα. Ανακτήθηκε 6 Δεκεμβρίου, 2020, από [Διπλωματική\\_Γερονίκος.pdf](#)
86. Γιουβανούδης Ι. & Καραγιώτας Ε. (2018). Οδική Ασφάλεια – Κατασκευή και Συντήρηση Οδοστρωμάτων. Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα., Θεσσαλονίκη. Ανακτήθηκε 4 Δεκεμβρίου, 2020, από [Giouvanoudis\\_Karagiotas.pdf](#)
87. Γκουτζούμπας Α. & Μιχαήλ Μ. & Στρατής Α. (2020). Σχεδιασμός Οδοστρωμάτων : Συγκρίση Μεθόδων Διαστασιολόγησης. Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Πάτρα. Ανακτήθηκε 4 Δεκεμβρίου, 2020, από [Πτυχιακή Εργασία-teliko.pdf](#)
88. Μαυριάς Γ. (χ.χ.). Πλεονεκτήματα από... ανακυκλωμένο ελαστικό. Ecoelastica. Ανακτήθηκε 19 Μαρτίου, 2021, από <https://www.ecoelastika.gr/nea/pleonektimata-apo-ti-xrisi-tropopoiimenis-asfaltou-me-anakyklwmeno-elastiko/>
89. Παπαγιάννης, Κ. (2017). Βελτιστοποίηση Κατανομής Πορών Συστήματος Διαχείρισης Οδοστρωμάτων με Χρήση Γενετικού Αλγορίθμου. Πανεπιστήμιο Πατρών. Πολυτεχνική Σχολή, Πάτρα. Ανακτήθηκε 6 Δεκεμβρίου, 2020, από [final thesis \(nemertis\).pdf \(upatras.gr\)](#)
90. Σωτηροπούλου Μ. (2015). Ανάπτυξη Συστήματος Διαχείρισης Οδοστρωμάτων με Αξιολόγηση Στοιχείων Βιωσιμότητας. Πανεπιστήμιο Πατρών. Πολυτεχνική Σχολή, Πάτρα. Ανακτήθηκε 6 Δεκεμβρίου, 2020, από [MDE\\_Sotiropoulou.pdf](#)