



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ-
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ, ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΑΣ ΚΑΙ
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
“ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΡΓΩΝ, ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΟΣ
ΚΑΙ ΧΩΡΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ”**

Διπλωματική Εργασία

**ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΝΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ
ΚΑΙ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ
ΟΔΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ.**

ΑΝΔΡΕΑΔΗΣ ΑΓΓΕΛΟΣ

ΒΟΛΟΣ 2018

© 2018 Άγγελος Ανδρεάδης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Διαχείριση Έργων, Συγκοινωνιακός και Χωρικός Σχεδιασμός» δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του/της συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Ευχαριστίες.

Κατά τη διάρκεια της έρευνας και των τελικών τμημάτων τις εργασίας υπήρξαν μερικοί άνθρωποι των οποίων η συμβολή - μερικές φορές αόρατη - με βοήθησε να φτάσω στο στόχο μου. Αυτοί οι άνθρωποι με βοήθησαν να ξεπεράσω τις δυσκολίες, απλά και μόνο επειδή ήθελαν να συζητήσουν μαζί μου για τα προβλήματα που προέκυψαν και για τον τρόπο λύσης τους.

Ξεχωριστά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα και υπεύθυνο καθηγητή μου κ. Κοπελιά, του οποίου η κατανόηση και η άμεση ανταπόκριση, με βοήθησαν να διευκρινίσω έγκαιρα τους στόχους του έργου και να βελτιστοποιήσω όλη την έκθεση.

Περίληψη.

Η συλλογή ενέργειας αποτελεί μια από τις πιο πολλά υποσχόμενες τεχνικές για την αντιμετώπιση του παγκόσμιου ενεργειακού προβλήματος χωρίς εξάντληση των φυσικών πόρων. Οι τεχνολογίες συλλογής ενέργειας από τις οδικές υποδομές είναι ένας νέος ερευνητικός τομέας που εστιάζει σε τεχνολογίες που συλλέγουν την ενέργεια που δαπανάται στο οδικό δίκτυο, την συσσωρεύουν και την φυλάσσουν για μελλοντική χρήση. Λιθόστρωτες επιφάνειες με προσθήκη αγωγικών σωλήνων, φωτοβολταϊκά ηχοπετάσματα, αισθητήρες πίεσης και θερμοηλεκτρικές γεννήτριες είναι μόνο κάποιες από τις πιο πρόσφατες τεχνολογίες. Το αποτέλεσμα-προϊόν αυτών των τεχνολογιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τηλεθέρμανσης και ψύξης, αποπάγωση επιφανειών ή τροφοδοσία ασύρματων δικτύων και άλλα πολλά.

Ο στόχος της παρούσας διατριβής είναι να εξετάσει και να προσδιορίσει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών των τεχνολογιών, τα δυνατά και αδύνατα σημεία τους. Θα βασιστεί στο τι τεχνολογίες υπάρχουν για την εξοικονόμηση/παραγωγή ενέργειας ειδικά στο οδικό δίκτυο, σε εφαρμογές και περιπτώσεις που υφίστανται ήδη ανά τον κόσμο και θα ολοκληρωθεί αναφέροντας προοπτικές και μελλοντικές λύσεις που αυτή τη στιγμή δοκιμάζονται ή σχεδιάζονται.

Abstract.

Harvesting Energy can be considered as one of the most promising techniques for approaching the global energy problem without depleting natural resources. Energy harvesting technologies from road infrastructure is a new research territory that encompasses technologies that capture the wasted energy occurred at pavements, accumulate and store it for later use. Their most enticing characteristic is that they use the already offered extended paved surfaces of the existing infrastructure. Paved surfaces with conductive pipes, PV sound barriers, nanomaterials or Phase Change Materials, piezosensors and thermoelectrical generators and induction heating technique are just the most updated representatives. Their outputs can be listed as production of electric energy and district heating and cooling, deicing surfaces or powering wireless networks and monitoring pavements conditions along with the enhancement of their self-healing process. The objective of this thesis is to review them and identify their strong and weak points. The three Green Roadway Concepts that shaped, proposed and implemented, theoretically are identical for the long- and short-term challenges that they meet. Their forthcoming future is here and only their in-situ implementation can prove their viability and prominence.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	3
Abstract	4
1. Εισαγωγή	7
2. Σύγχρονες τεχνολογίες συλλογής ενέργειας	9
2.1. Εισαγωγή	9
2.1.1. Η χρήση της ασφάλτου ως ηλιακός συλλέκτης σε συνδυασμό με το σύστημα σωληνώσεων	10
2.1.2. Φωτοβολταϊκά (PV) και εφαρμογές στην οδική υποδομή.....	13
2.1.3. Γεννήτριες	17
2.1.3.1. Πιεζοηλεκτρισμός	17
2.1.3.2. Θερμοηλεκτρικές Γεννήτριες.....	21
2.1.4. Επαγωγική Θέρμανση.....	22
2.1.5. Υλικά.....	24
2.1.5.1. Ενσωματωμένα υλικά αλλαγής φάσης (PCM).....	24
2.2. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα	26
3. «Green Concept ROAD»: ένα βιώσιμο σύστημα Οδών	30
3.1. Εισαγωγή	30
3.2. Green Road Concept-1	31
3.3. Green Road Concept-2	35
3.4. Green Road Concept-3	41
4. Αξιολόγηση της δυνατότητας συγκομιδής ενέργειας από τις επιφάνειες των οδοστρωμάτων	43
4.1. Εισαγωγή	43
4.2. Άμεση εφαρμογή: PVSB & επαγωγική φόρτιση	45
4.3. Εφαρμογή ASC & πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων	47
4.4. Η μακροχρόνια εφαρμογή: ASC & PCMS	51
5. Επίλογος-Συμπεράσματα	54
6. Βιβλιογραφία	56

Λίστα Εικόνων.

Εικόνα 1-Εμφάνιση Εκδορών και Αυλακώσεων. (https://fix-your-city.today/).....	7
Εικόνα 2-Εφαρμογή Συστήματος Σωληνώσεων σε Οδόστρωμα (http://www.icax.co.uk).....	10
Εικόνα 3-Εγκατάσταση PVBS στην Ιταλία(http://www.worldhighways.com/sections/irf/features/photovoltaic-noise-barriers/).	14
Εικόνα 4- Πιεζοηλεκτρικός Μορφομετατροπέας ενσωματωμένος στο οδόστρωμα.....	18
Εικόνα 5-Πιεζοηλεκτρικός Μορφομετατροπέας-Cymbal(Zhao et. Al., 2010).....	19
Εικόνα 6-Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των τεχνολογιών.....	30
Εικόνα 7-Η ροή ενέργειας στο GRC-1	32
Εικόνα 8-Φωτοβολταϊκό Ηχοπέτασμα.....	33
Εικόνα 9-Διατομή Green Road Concept-2.....	39
Εικόνα 10-Διατομή Green Road Concept-3.....	42

1. Εισαγωγή.

Η ενέργεια βρίσκεται παντού γύρω μας και είναι διαθέσιμη σε πολλές διαφορετικές μορφές όπως η αιολική, η ηλιακή ενέργεια ή θερμική και η μηχανική ενέργεια. Η σύγχρονη εποχή χαρακτηρίζεται από αυξανόμενη ενεργειακή κατανάλωση που έχει αρνητικές συνέπειες στη βιωσιμότητα του περιβάλλοντος. Αυτή η υπερκαταναλωτική τάση έχει δημιουργήσει την ανάγκη για νέες μεθόδους συλλογής και εξοικονόμησης ενέργειας.

Η συλλογή της ενέργειας μπορεί να οριστεί ως η διαδικασία κατά την οποία η σπαταλημένη ενέργεια συλλέγεται, συσσωρεύεται και αποθηκεύεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, για μελλοντική χρήση.

Μία πηγή τέτοιου είδους ενέργειας αποτελούν τα οδοστρώματα που κατά την διάρκεια της ημέρας λαμβάνουν τεράστιες ποσότητες ηλιακής ενέργειας η οποία διαχέεται ως θερμική ενέργεια στην εσωτερική δομή τους. Η αυξημένη θερμοκρασία που προκύπτει σε συνδυασμό με τα φορτία της κυκλοφορίας επηρεάζουν δραματικά το περιβάλλον και τη διάρκεια ζωής των οδοστρωμάτων με συχνή εμφάνιση εκδορών, αυλακώσεων και λοιπών βλαβών (βλέπε Εικόνα 1). Επομένως, η συλλογή ενέργειας από τα οδοστρώματα αποτελεί μια υποδομή τεράστιας έκτασης που ήδη υπάρχει και μένει ανεκμετάλλευτη.



Εικόνα 1-Εμφάνιση Εκδορών και Αυλακώσεων. (<https://fix-your-city.today/>)

Σε ένα μεγάλο βαθμό, η ενεργειακή συγκομιδή από τα οδοστρώματα είναι ένας νέος ερευνητικός τομέας και περιλαμβάνει τεχνικές που, κατά κάποιο τρόπο χρησιμοποιούν τις ίδιες αρχές που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν, σε γενικές γραμμές και στην μηχανική κτιρίων, σχετικά με την χρήση των υλικών.

Η αποθήκευση, η διατήρηση και τέλος η χρησιμοποίηση της ενέργειας αυτής είναι διαδικασίες οι οποίες βασίζονται σε πολλαπλές επιστημονικές τεχνολογίες, όπως η νάνο-επιστήμη, η ηλεκτρική ενέργεια, η μηχανική και η περιβαλλοντική μηχανική.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να παρουσιάσει τις διαθέσιμες τεχνολογίες για την συλλογή ενέργεια αυτές εφαρμόζονται στο οδικό δίκτυο, με διαχωρισμό αυτών σε ομάδες όπως:

- Ηλιακοί συλλέκτες ασφάλτου σε συνδυασμό με σωληνώσεις.
- Φωτοβολταϊκές εφαρμογές (PV)
- Πιεζοηλεκτρικές και θερμοηλεκτρικές γεννήτριες
- Επαγωγικής θερμότητας
- κ.α.

2. Σύγχρονες τεχνολογίες συλλογής ενέργειας

2.1. Εισαγωγή.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, αναπτύσσονται τρία πιθανά ενεργειακά συστήματα συλλογής ενέργειας με τον συνδυασμό δύο από τις παραπάνω τεχνολογίες. Το επόμενο βήμα θα είναι η αξιολόγηση των νέων συστημάτων συλλογής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη διάφορους σημαντικούς παράγοντες και χαρακτηριστικά.

Οι τεχνολογίες ενεργειακής συλλογής ή ενεργειακής σάρωσης αναφέρονται στις εφαρμογές που συλλαμβάνουν και εκμεταλλεύονται την αχρησιμοποίητη και εξαντλημένη ενέργεια ώστε να την μετατρέψουν σε μια πιο χρησιμοποιήσιμη μορφή. Για να επιτευχθεί αυτό, κάθε είδος ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική, η κινητική ή ενέργεια παραμόρφωσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί

Επιπλέον, η θερμική ενέργεια λόγω των θερμικών διακυμάνσεων και των περιβαλλοντικών δονήσεων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες πηγές ενέργειας με μεγάλη δυνατότητα για συλλογή. Η συγκέντρωση ενέργειας είναι μια από τις πιο υποσχόμενες τεχνικές για την προσέγγιση του παγκοσμίου ενεργειακού προβλήματος χωρίς την μείωση των φυσικών πόρων. Η ιεραρχία στη διαδικασία της ενεργειακής συλλογής είναι αρχικά, η σύλληψη της ενέργειας, αφετέρου η αποθήκευση της ενέργειας και η τελική χρήση της.

Αυτό το κεφάλαιο, συνοψίζει μερικές από τις σημαντικότερες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί για την ενεργειακή συλλογή στον τομέα της μηχανικής των οδοστρωμάτων. Καθώς αναπόσπαστο τμήμα της κοινωνίας μας είναι η υποδομή, η χρήση των οδοστρωμάτων που συλλέγουν ηλιακή θερμότητα και των συστημάτων αποθήκευσης έχουν εξελιχθεί ως μια πιθανή καινοτόμα τεχνολογία. Με την επιλογή της κατάλληλης εφαρμογής για τη διαδικασία συλλογής, η παραγόμενη ενέργεια από αυτές τις επιφάνειες θα μπορούσε για παράδειγμα να χρησιμοποιηθεί για οικιακό ζεστό νερό, για θέρμανση ή ψύξη μιας περιοχής, για απόψυξη πεζοδρομίων, για επαναφόρτιση των αυτοκινήτων και για επούλωση των πεζοδρομίων.

2.1.1. Η χρήση της ασφάλτου ως ηλιακός συλλέκτης σε συνδυασμό με το σύστημα σωληνώσεων.

Η ενεργειακή συλλογή από τις επιφάνειες, οι οποίες χρησιμεύουν ως ηλιακοί συσσωρευτές, δεν θεωρείται πλέον μια νέα τεχνολογία αλλά χρησιμοποιείται συχνά σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση σωληνώσεων και αντλιών, σε συγκεκριμένες διατάξεις για την συγκέντρωση της παραγόμενης ηλιακής ενέργειας και την μετατροπή της σε θερμική ή ηλεκτρική. Αυτοί οι αποκαλούμενοι «συλλέκτες ασφάλτου» είναι, επίσης, γνωστοί ως ηλιακοί συσσωρευτές ασφάλτου (Asphalt Solar Collector) και επιτρέπουν το νερό να κυκλοφορεί μέσω μιας σειράς σωληνώσεων κάτω από την επιφάνεια των οδοστρωμάτων (βλέπε Εικόνα 2).



Εικόνα 2-Εφαρμογή Συστήματος Σωληνώσεων σε Οδόστρωμα
(<http://www.icax.co.uk>).

Αρχικά, η ακτινοβολία από τον ήλιο και την ατμόσφαιρα απορροφάται στο οδόστρωμα μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας η οποία συλλέγεται από το σύστημα σωληνώσεων νερού και αποθηκεύεται στο έδαφος ή σε άλλες δεξαμενές αποθήκευσης κατά την θερινή περίοδο (Wu et al., 2011). Η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την υποστήριξη κοντινών εγκαταστάσεων για θέρμανση και ψύξη περιοχών, για ηλεκτρισμό, για επαναφόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων ή για την απόψυξη των δρόμων (π.χ. μέσω ενός υδραυλικού συστήματος). (Wu et al, 2011.)

Οι Wu et al. (2012) ερεύνησαν το ρόλο της διαδικασίας τήξης στη θερμική μετάβαση κατά μήκος του οδοστρώματος.

Η επίδραση της διαδικασίας τήξης επί των θερμικών ιδιοτήτων του υδραυλικού συστήματος έπαιξε σημαντικό ρόλο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης της θερμοκρασίας και της περιοχής χωρίς χιόνι. Βρήκαν ότι τα βρεγμένα οδοστρώματα έχουν σημαντικά αυξημένη θερμική αγωγιμότητα κάτι που με τη σειρά του βελτιώνει την απόδοση τήξης του χιονιού.

Οι Liu et al. (2007) ανέπτυξαν ένα αριθμητικό πρότυπο για να αναλύσουν τη διαδικασία τήξης του χιονιού σε μια θερμαινόμενη επιφάνεια οδοστρωμάτων, μέσω ενός συστήματος ενεργειακής συγκέντρωσης. Σε αυτό το μοντέλο, πρόβλεψαν τις θερμοκρασίες της επιφάνειας, μελετώντας την ροή της θερμότητας κατά τη διάρκεια των εποχών. Προσομοιώνοντας το υδραυλικό σύστημα σε μια γέφυρα, έδειξαν ότι ο χρόνος για την προθέρμανση της γέφυρας μαζί με το κενό μεταξύ των υδροσωλήνων καθορίζει άμεσα την απόδοση ως προς την τήξη του χιονιού και τη μέγιστη θερμοκρασία του υγρού. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο ενός τέτοιου συστήματος ενεργειακής συγκέντρωσης πρέπει να βασιστεί στον υπολογισμό της απαραίτητης χωρητικότητας του συστήματος θέρμανσης, της θερμοκρασίας του υγρού και της πυκνότητας του ενσωματωμένου συστήματος σωληνώσεων. Επιπρόσθετα, η έρευνα έδειξε ότι προκειμένου να επιτευχθούν μικρότερες περίοδοι προθέρμανσης απαιτείται μια πυκνή διάταξη των σωλήνων. (Liu et al, 2007)

Ομοίως, οι Dawson et al. (2011) ονόμασαν αυτήν την δομή «θερμικά βελτιστοποιημένο οδόστρωμα» δεδομένου ότι πρότειναν την εγκατάσταση των σωλήνων είτε κοντά στην επιφάνεια (εξυπηρετώντας υδραυλικούς σκοπούς) είτε στον πυθμένα του οδοστρώματος (ως πηγή θερμότητας χαμηλής βαθμίδας κατά τη διάρκεια του χειμώνα και ως απαγωγέας θερμότητας κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού). (Dawson et al, 2011)

Οι Gao et al. (2010) διερεύνησαν, επίσης, την απόδοση ενός συστήματος τήξης πάγου στο δρόμο, σε συνδυασμό με μια πλακά ηλιακής συλλογής, η οποία συμπεριελάμβανε μια σειρά ενσωματωμένων σωλήνων και υπόγεια εποχιακή αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η αποτελεσματικότητα της συλλογής θερμότητας αυξάνεται με την αύξηση του ρυθμού ροής του υγρού των σωληνώσεων, την πυκνότητα των σωλήνων, λαμβάνοντας πάντα υπόψη παράγοντες όπως η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η ηλιακή ακτινοβολία και η ταχύτητα του ανέμου. (Gao et al, 2010)

Ιδιαίτερα, χρησιμοποιώντας την διαφορά θερμοκρασίας (μεταξύ της εισόδου και της εξόδου της πλάκας ηλιακής συλλογής ανά μήκος σωλήνα, ο Gao et al. (2010) απέδειξαν ότι, όταν αυξήθηκε ο ρυθμός ροής του υγρού των σωλήνων, ο πραγματικός χρόνος απορρόφησης θερμότητας του υγρού στο σωλήνα είχε μειωθεί. Η μετρούμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας έδειξε ότι ο υψηλότερος ρυθμός ροής και η μικρότερη απόσταση των σωλήνων, μπορούν να αυξήσουν την αποτελεσματικότητα συλλογής της θερμότητας και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι μια πυκνότερη διαμόρφωση των σωλήνων μπορεί να επιτύχει μια απόδοση θερμικής συλλογής της τάξης του 42.%. (Gao et al, 2010)

Οι Mallick et al. (2009, 2011β) υπογράμμισαν ότι τα προηγμένα οδοστρώματα τα οποία περιλαμβάνουν ένα σύστημα συλλογής ενέργειας, εκτός από το να μειώνουν τις επιπτώσεις της Αστικής Θέρμανσης (Αστική Θερμονησίδα- το φαινόμενο κατά το οποίο η θερμοκρασία στο κέντρο μιας πόλης είναι μεγαλύτερη απ' αυτή των προαστίων και της αγροτικής περιοχής που την περιβάλλει), ταυτόχρονα συμβάλουν σημαντικά και στην μείωση της δημιουργίας σπασμάτων-αυλακώσεων στα οδοστρώματα. Αστική Θερμονησίδα, ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο αυξάνεται η θερμοκρασία του αέρα και των επιφανειών στο εσωτερικό των πόλεων, σε σχέση με την θερμοκρασία που παρουσιάζεται στα περίχωρά τους. Κατά τη διάρκεια της έρευνά τους, πραγματοποίησαν ένα πείραμα μεγάλης κλίμακας για να διερευνήσουν την αλληλεπίδραση μεταξύ παραμέτρων όπως η αγωγιμότητα, η γεωμετρία των σωλήνων, η θερμοκρασία του νερού εισόδου και του ρυθμού της ροής του νερού. Πειραματικά δεδομένα όπως αυτά της ταχύτητας του ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας μετρήθηκαν, και τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας μοντελοποιήθηκαν σε σχέση με το χρόνο. Με τη χρήση μόνο ενός σωλήνα και με ένα συγκεκριμένο εύρος του ρυθμού ροής του υγρού, δεδομένα θερμοκρασίας συλλέχθηκαν σε διάφορα σημεία μέσα στην πλάκα. Μετά τη διαίρεση της πλάκας σε δυο τομείς, το πείραμα τροποποιήθηκε χρησιμοποιώντας την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, έτσι ώστε να προσδιοριστεί η θερμοκρασία, σε διαφορετικά επίπεδα, μέσα στο οδόστρωμα. (Mallick et al, 2009)

Σε γενικές γραμμές, τα πειραματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν από την πλάκα και τα θεωρητικά δεδομένα από το μοντέλο προσομοίωσης έδωσαν μια ικανοποιητική συσχέτιση όσον αφορά την θερμοκρασία εισόδου στο σύστημα του οδοστρώματος και αυτή στον περιβάλλοντα αέρα.

Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η παράμετρος που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την κατανομή της θερμοκρασίας στη πλάκα και την ψύξη της επιφάνειας του οδοστρώματος είναι η διάμετρος του σωλήνα, ενώ ο ρυθμός ροής του ρευστού δεν επηρεάζει σημαντικά τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου και της πλάκας . Συμπέραναν ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του σωλήνα, τόσο πιο απότομη γίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας που λαμβάνει χώρα από το σωλήνα προς την επιφάνεια του οδοστρώματος, καθώς η μεγαλύτερη διάμετρος οδηγεί σε ένα χαμηλότερο επίπεδο θερμοκρασιών του νερού και ένα υψηλότερο ρυθμό μείωσης της επιφανειακής θερμοκρασίας του οδοστρώματος. (Mallick et al, 2009)

Όπως υπογράμμισαν και οι Wu et al. (2011) «Η θερμική συλλογή αρχίζει εφόσον η θερμοκρασία στην θέση των σωληνώσεων φθάσει στη θερμοκρασία που απαιτείται για έναν συγκεκριμένο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας, όπως επίσης εξαρτάται και από τη ταχύτητα του ανέμου, από την ένταση της ακτινοβολίας και άλλες συνθήκες». Η κρύα επιφάνεια του οδοστρώματος μπορεί να ενισχύσει την ακαμψία του, ειδικά σε θερμές κλιματολογικές συνθήκες, και να μειώσει ή να αποτρέψει την παραμόρφωση του, και επομένως να παρατείνει τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος. Εν κατακλείδι, σε γενικές γραμμές, όταν προσπαθούμε να συλλέξουμε την αποθηκευμένη ενέργεια από τα οδοστρώματα, ενώ ταυτόχρονα προσπαθούμε να μετριάσουμε την επίδραση της Αστικής Θερμνησίδας, απαιτείται να λάβουμε υπόψη τις σημαντικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών όπως τον τύπο υλικού, το πάχος των διαφόρων επιπέδων οδοστρώματος κλπ. (Stempihar et al., 2011).

2.1.2. Φωτοβολταϊκά (PV) και εφαρμογές στην οδική υποδομή.

Ερευνητές στο Ινστιτούτο της Κορέας μελέτησαν επίσης διάφορες προσεγγίσεις για τη συλλογή της ηλιακής ενέργειας από τα οδοστρώματα. Εκτός από την θερμότητα που παράγεται μέσα στο ίδιο το πεζοδρόμιο, σκόπευαν επίσης, να προσδιορίσουν εάν είναι εφικτό να αξιοποιηθούν οι τρέχουσες τεχνολογίες ηλιακών κυττάρων ή φωτοβολταϊκών με την ενσωμάτωσή τους στην υποδομή του οδοστρώματος. (Kang-Won, 2010)

Θα πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι οι τρέχουσες τεχνολογίες των ηλιακών κύτταρων είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν σε επιφάνειες που λαμβάνουν μεγάλο μηχανικό φορτίο.

Επίσης, οι περιβαλλοντικές συνθήκες θα μπορούσαν να προκαλέσουν πρόωρη διάβρωση και φθορά αυτών των τεχνολογιών.

Για το λόγο αυτό, οι ερευνητές έχουν ξεκινήσει μια προσπάθεια ανάπτυξης νέων ηλιακών κυψελών που θα μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις για τη χρήση τους στο οδόστρωμα.

Κοιτάζοντας τη δυνητική συμβολή των φωτοβολταϊκών ηλιακών τεχνολογιών για συγκέντρωση ενέργειας από τις υποδομές της οδοποιίας, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τεχνολογίες, όπως τα φωτοβολταϊκά ηχοπετάσματα (Photo Voltaic Noise Barriers ή Photo Voltaic Sound Barriers) είναι μια εύλογη εναλλακτική λύση για να χρησιμοποιηθούν ως υποδομή σε τεχνικές συγκομιδής ενέργειας. Η υποδομή των μεταφορών έχει χρησιμοποιήσει φωτοβολταϊκά ηχοπετάσματα από τα τέλη της δεκαετίας του '90 ως ακουστικά εμπόδια - ιδιαίτερα στις πυκνοκατοικημένες και βιομηχανικές περιοχές - και ως μέθοδο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Υπάρχουν πολλές μελέτες που αποδίδουν ποσοτικά την αποτελεσματικότητα των φωτοβολταϊκών ηχοπετασμάτων κατά μήκος των εθνικών οδών και των σιδηροδρόμων στην Ευρώπη. Παρακάτω ακολουθεί μια περίληψη αυτών των μελετών.



Εικόνα 3-Εγκατάσταση PVBS στην ταλία([http://www.worldhighways.com /](http://www.worldhighways.com/)).

Ο Nordmann et al. (2004, 2005) εξέτασαν τις δυνατότητες της υπάρχουσας υποδομής φωτοβολταϊκών ηχοπετασμάτων (PVSΒ) για έξι ευρωπαϊκές χώρες.

Με δυνατότητα παραγωγής 800 MWp και τεχνικό δυναμικό 680GWh ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως, τα φωτοβολταϊκά ηχοπετάσματα, θα μπορούσαν να είναι μια σημαντική συμβολή στην ανάπτυξη της αγοράς της πράσινης ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη την ευρωπαϊκή νομοθεσία που απαιτεί ακουστικά μέτρα προστασίας κατά μήκος των σιδηροδρόμων και αυτοκινητοδρόμων. (Nordmann, 2004)

Ο Grasselli et al. (2007) μελέτησαν 6 διαφορετικά παραστατικά φωτοβολταϊκών ηχοπετασμάτων τοποθετημένα σε ειδικά διαμορφωμένες περιοχές, προκειμένου να εκτιμηθεί η ακουστική και η ενεργειακή τους απόδοση. Οι δοκιμασίες που διεξήχθησαν, ανέλυσαν παραμέτρους όπως την ορθή κατασκευή, την ασφάλεια υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας αλλά και σε καταστάσεις ατυχημάτων, την φωτοβολταϊκή και ακουστική απόδοση, την αξιολόγηση της αντοχής και την αξιολόγηση της συντήρησης. Οι παραπάνω δοκιμές, έδειξαν ότι η αξιοπιστία της φωτοβολταϊκής αυτής εγκατάστασης είναι στενά συνυφασμένη με τη συντήρησή της. Σημείωσαν ότι η υπερθέρμανση των φωτοβολταϊκών μονάδων σε συνδυασμό με τη μόλυνση από τα οχήματα δεν πρέπει να υποτιμάται, εφόσον απαιτείται η εξασφάλιση της μακροζωίας του συστήματος. (Grasselli et al, 2007)

Ο Shkrebtii et al. (2008) είχε αναπτύξει ένα αριθμητικό μοντέλο για τη βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας της φωτομετατροπής των a-Si:H (amorphous silicon) ηλιακών κύτταρων με την προσθήκη ενός πλέγματος επαφής. Ο σκοπός ήταν να εξακριβωθούν οι προοπτικές εφαρμογής των a-Si:H ηλιακών κύτταρων ως το φωτοβολταϊκό στοιχείο στα ηχοπετάσματα. Αυτό που κάνει τα άμορφα Si ηλιακά κύτταρα (σιλικόνης) ιδανικά για την υποδομή των ηχοπετασμάτων είναι το χαμηλό κόστος παραγωγής τους και η υψηλή απόδοση τους. Επιπλέον, αυτά τα κύτταρα μπορούν να τοποθετηθούν σε μια μεγάλη ποικιλία υποστρωμάτων. (Shkrebtii et al, 2008)

Με την πάροδο των χρόνων, τα φωτοβολταϊκά έχουν χρησιμοποιηθεί σε μικρή αλλά επαρκής έκταση σε χώρους στάθμευσης και γενικά στις οδικές υποδομές μικρής κλίμακας. Ο Golden et. al. (2007) ανέλυσε την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών ηλιακών συλλεκτών στα στέγαστρα των πάρκινγκ για την μείωση την επίδρασης του φαινομένου της Αστικής Θερμνησίδας στους χώρους στάθμευσης. Η ελάττωση των μέγιστων θερμοκρασιών στις επιφάνειες έχει ως αποτελέσματα το να μετριάσει την οξείδωση και της πτητικότητάς τους.

Όπως τόνισαν και οι ερευνητές , «αυτές οι διαδικασίες μπορούν να οδηγήσουν σε απώλεια της ελαστικότητας του υλικού, με αποτέλεσμα την δημιουργία “σκληρών” και εύθραυστων οδοστρωμάτων, επιρρεπή στη θραύση όταν βρίσκονται σε καταστάσεις υπό καταπόνηση». Μια σημαντική πτυχή για τη μελέτη είναι η χωρητικότητα αποθήκευσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε σχέση με τη θερμική χωρητικότητα αποθήκευσης των οδοστρωμάτων. (Golden et al, 2007)

Ο Strauss et al. (2009) ορίζουν τους χώρους στάθμευσης με διαφορετικό τρόπο. Εισάγουν μια φιλοσοφία «Vehicle Surfaces Parking Lot PV Solar Energy Power Generation System», που καλύπτει τα οχήματα και τα λεωφορεία με υψηλής απόδοσης φωτοβολταϊκά κύτταρα όπου η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται σε ένα συνεχές ρεύμα δικτύου και, στη συνέχεια, σε εναλλασσόμενο ρεύμα με τη χρήση μετατροπέων. Παρατήρησαν, ότι η χρήση ηλιακών συλλεκτών σε μικρές επιφάνειες στα οχήματα ,προκειμένου να καλύψουν την απαιτούμενη ενέργεια για εφαρμογές μικρής κλίμακας, όπως είναι η φόρτιση μπαταριών και κλιματισμού ,μπορεί να επεκταθεί με την εκμετάλλευση της ενέργειας.

Αυτή η ενέργεια, μπορεί να συλλεχθεί όταν τα οχήματα είναι σταθμευμένα για πολλές ώρες σε χώρους στάθμευσης χωρίς στέγες. Υπό αυτή την έννοια, τα αυτοκίνητα και τα λεωφορεία μεταμορφώνονται σε κάτι πολύ παραπάνω από απλά μέσα μεταφοράς. (Strauss et al, 2009)

Η ηλεκτρική, αυτή, σύνδεση του οχήματος με το δίκτυο καλωδιώσεων της υποδομής είναι μια νέα εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας που σχετίζεται με το V2G (Vehicle-to-Grid / Όχημα-Ηλεκτρικό δίκτυο). Η ιδέα αυτού του συστήματος είναι πολύ ενδιαφέρουσα όσον αφορά την έξυπνη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να καλυφθούν οι ενεργειακές απαιτήσεις των συστημάτων εξαερισμού των κτιρίων, του φωτισμού και της θέρμανσης ,κάτι που θα μπορούσε να προσφέρει σημαντικό οικονομικό όφελος λόγω της εξοικονόμησης της απαιτούμενης ενέργειας.

Σε γενικές γραμμές, κάθε υποδομή που αναβαθμίζεται ή κατασκευάζεται σήμερα θα πρέπει να εξεταστεί διεξοδικά ως προς τον οικολογικό της χαρακτήρα. Η θεωρία του Golder, η οποία αναλύθηκε προηγουμένως, εφαρμόστηκε στην Blackfriars Railway Bridge, στο Λονδίνο, όπου αναμένεται να παράγει 900 MWh πράσινης ηλεκτρικής ενέργειας κάθε χρόνο λόγω των 4.400 ηλιακών συλλεκτών που έχουν εγκατασταθεί υπό την μορφή στέγης πάνω από τις σιδηροδρομικές γραμμές.

Αν αυτό αναλυθεί με περιβαλλοντικούς όρους, μπορεί να μεταφραστεί σε 500 τόνους λιγότερων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (Mathiew, 2011).

Στην Ολλανδία, το έργο TNO-SolarRoad, χρησιμοποιεί τα ολλανδικά ποδηλατοδρόμια για την εφαρμογή ηλιακών συλλεκτών με σκοπό τον έλεγχο της θερμοκρασίας του οδοστρώματος (θέρμανση/ψύξη). Δεν υπάρχει καμία αμφιβολία ότι με την αυξανόμενη δημοτικότητα της ποδηλασίας, οι πόλεις θα πρέπει να ενσωματώσουν τα ποδηλατοδρόμια στο σχεδιασμό των υποδομών τους (TNO, 2011).

Το TNO, μαζί με την επαρχία Noord-Holland, τον Όμιλο Ooms Avenhorn και την Imtech εφάρμοσαν, το 2012, ένα πιλοτικό πρόγραμμα που αποτελείται από ένα σύστημα ποδηλατοδρόμου (TLC, 2011). Η ποδηλατική διαδρομή (100m) κατασκευάζεται από στοιχεία σκυροδέματος (1.5 - 2.5m) που καλύπτονται από ένα στρώμα υάλου (διαφανές κορυφή και οπτικό στρώμα μαζί, 1cm). Κάτω από το παχύ στρώμα ειδικού γυαλιού, τοποθετήθηκαν τα ηλιακά κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου.

Η λειτουργικότητα της μονάδας θα προσδιοριστεί από την πόση ενέργεια θα συλλεχθεί και θα αποθηκευτεί αλλά και από το κατά πόσο μπορεί το σύστημα να διαχειριστεί την ενέργεια που παράγεται σε περιόδους αιχμής (με πολύ ήλιο) έτσι ώστε να την διανέμει όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερα κατά την διάρκεια περιόδων με ελάχιστο ή ακόμα και καθόλου φως.

2.1.3. Γεννήτριες

2.1.3.1. Πιεζοηλεκτρισμός.

Στην συγκεκριμένα ενότητα θα μελετήσουμε την εφαρμογή των πιεζοηλεκτρικών συσκευών ή αισθητήρων στην υποδομή του οδοστρώματος. Αυτά τα συστήματα παράγουν μια ηλεκτρική τάση όταν εκτίθεται σε μεταβολές των διαστάσεων τους που προκαλούνται από μηχανικές καταπονήσεις (δονήσεις-φορτία). Ο πιεζοηλεκτρισμός αποτελεί ένα από τα πιο κατάλληλα μέσα μορφομετατροπής μεταξύ των ηλεκτρικών και μηχανικών ταλαντώσεων. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι ευρέως διαθέσιμα σε πολλές μορφές, συμπεριλαμβανομένων του απλού κρυστάλλου (π.χ. χαλαζία), πιεζοκεραμικά υλικά (π.χ. τιτανικό ζirkόνιο μόλυβδο ή PZT), λεπτή μεμβράνη (π.χ. οξείδιο του ψευδαργύρου), εκτυπώσιμο παχύ φιλμ που βασίζεται στις πιεζοκεραμικές σκόνες και πολυμερή υλικά όπως πολυβινυλιδενοφθορίδιο (PVDF) (Beeby et al., 2006).

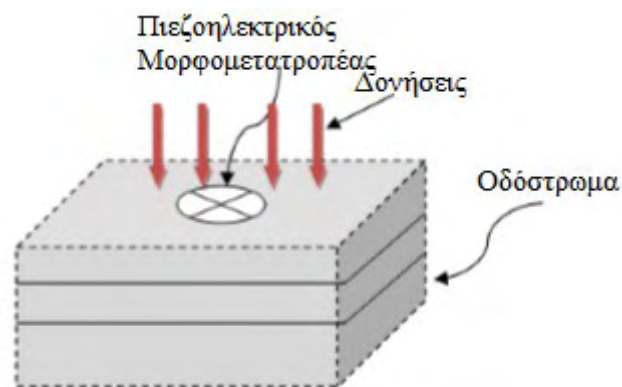
Μέχρι τώρα, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά έχουν μελετηθεί για την κατασκευή υλικών που φοριούνται, όπως τα γάντια που επιτρέπουν την διαχείριση ηλεκτρονικών συστημάτων ή την παραγωγή ενέργειας από μικρής κλίμακας δονήσεις, όπως ο βηματισμός. Για αυτές τις μικρής κλίμακας προκλήσεις της αγοράς, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά προσφέρουν την επιθυμητή λειτουργικότητα, καθώς μπορούν εύκολα να συνδυαστούν με υβριδικά υλικά. (Edmison, 2002)

Ο τύπος και το μέγεθος της εφαρμογής είναι οι παράγοντες που προσδιορίζουν την ισχύ που θα παραχθεί αλλά, σε γενικές γραμμές τα πιεζοηλεκτρικά υλικά παράγουν ένα ευρύ φάσμα τάσεων.

Ακόμη κι αν τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, μπορούν να ανταποκριθούν σε κάθε είδους φυσικό ερέθισμα (δύναμη έλξης, στρέψης, πίεση), δεν έχουν κάποιο απαιτούμενο ελάχιστο όριο δράσης για την παραγωγή αντίδρασης.

Ο Edmison et al. (2002) επεσήμαναν ότι η ανίχνευση του είδους και του μεγέθους του εφαρμοζόμενου ερεθίσματος κατά κάποιο τρόπο «περιορίζεται μόνο από την ευαισθησία του περιβάλλοντος και την τυχόν συμβολή των περιβαλλοντικών μεταβλητών». Τα οδοστρώματα, κατά τη διάρκεια της ζωής τους, υπομένουν βαριά και ελαφριά φορτία που προκαλούν πίεση, παραμόρφωση και δόνηση. Ταυτόχρονα, το οδόστρωμα δέχεται πιέσεις και κινητικές ενέργειες από τα φορτία των οχημάτων και τη βαρύτητα (Zhao et al, 2010)

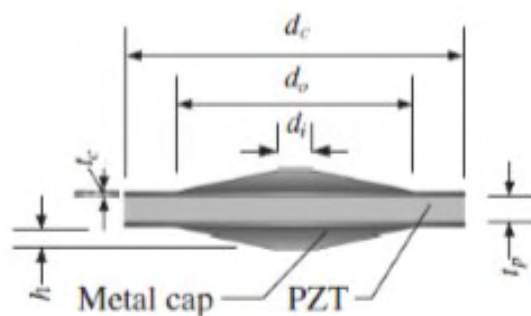
Οι πιεζοηλεκτρικοί μορφομετατροπείς που είναι ενσωματωμένοι εντός των πεζοδρομίων έχουν τη δυνατότητα να συλλέξουν αυτήν τη σπαταλημένη μηχανική ενέργεια, καθώς και να την αποθηκεύσουν σε ηλεκτρονικούς πυκνωτές.



Εικόνα 4- Πιεζοηλεκτρικός Μορφομετατροπέας ενσωματωμένος στο οδόστρωμα.

Αυτή η τεχνική της συλλογής ενέργειας, χρησιμοποιήθηκε, αρχικά, για την τροφοδοσία δικτύων με ασύρματους αισθητήρες, για την παρακολούθηση της κυκλοφορίας αλλά και για την κατάσταση των επιφανειών του σκυροδέματος. Η ενέργεια που συλλέγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οδικές εφαρμογές, μικρής κλίμακας, όπως τα οδικά φωτιστικά, οι φωτεινές διαφημίσεις, αλλά και η σήμανση σιδηροδρόμων και αεροδρόμων, όπου η εγκατάσταση και το κόστος συντήρησης της τεχνικής αυτής είναι χαμηλό.

Ο Zhao et al. (2010) μελέτησαν την απόδοση του Cymbal, ενός πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα, ο οποίος μπορεί να εφαρμοστεί σε επίπεδες επιφάνειες για την παρακολούθηση προβλημάτων, όπως για παράδειγμα η έναρξη των ρωγμών στο οδόστρωμα. Συσχέτισαν, ακόμη, την ηλεκτρική ενέργεια του μετατροπέα με γεωμετρικές παραμέτρους, όπως την κοιλότητα του βάθους, το πάχος του καλύμματος χάλυβα και τη διάμετρο του ακραίου καλύμματος.



Εικόνα 5-Πιεζοηλεκτρικός Μορφομετατροπέας-Cymbal(Zhao et. Al., 2010).

Οι ερευνητές προσπάθησαν να αξιολογήσουν την αποτελεσματικότητα του αισθητήρα χρησιμοποιώντας την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και τα αποτελέσματα σύζευξής της με το πεζοδρόμιο (μετατόπιση οδοστρώματος). Έτσι, αυξάνοντας τόσο τη διάμετρο και το πάχος του PZT όσο και το πάχος του καλύμματος χάλυβα, βρήκαν ότι η παραγόμενη ενέργεια αυξάνεται μαζί με το κόστος. Το Finite Element Modeling (Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων) έδωσε μια σειρά από παραμέτρους σχεδιασμού, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό του κατάλληλου αισθητήρα, ενσωματωμένου στο κάτω μέρος της πρώτης στρώσης του οδοστρώματος, ώστε να παράγονται περίπου 98 Volt ηλεκτρικό δυναμικό με 0,06 J χωρητικότητα αποθήκευσης. Η μέγιστη δυνατή παραγόμενη ισχύς του είναι περίπου 1.2MW σε 20 Hz συχνότητας του φορτίου του οχήματος. (Zhao et al, 2010)

Μια άλλη δυνατότητα των πιεζοηλεκτρικών συσκευών είναι η χρήση τους σε φρεάτια που καταπονούνται από οχήματα. Ο Ye et al. (2009) ερεύνησαν την βελτιστοποίηση ενός πιεζοηλεκτρικού συστήματος προβόλου χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση με βάση έναν αλγόριθμο (επιλέγοντας χειροκίνητα τις συχνότητες του συστήματος) με αριθμητικές προσομοιώσεις. Με τη χρήση καταγεγραμμένων δεδομένων από ένα φρεάτιο που δεχόταν φορτία από οχήματα, αξιολογήθηκε η μέγιστη παραγόμενη ισχύς του συστήματος.

Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η προσέγγιση που βασίζεται στον αλγόριθμο έχει δείξει μεγάλες δυνατότητες. (Ye et al, 2009)

Μία από αυτές είναι η δυνατότητα για συγκομιδή ενέργειας από τις δονήσεις του περιβάλλοντος - ιδιαίτερα από βαριά φορτία. Σε γενικές γραμμές, η ευρεία χρήση του συστήματος θα επέτρεπε πολύ πιο λεπτομερή εξέταση και ως εκ τούτου, κατανόηση της συμπεριφοράς των οδικών οχημάτων.

Ένα μειονέκτημα που σχετίζεται με τον κύκλο ζωής του συστήματος είναι η συντήρηση του καθώς απαιτείται τακτικός και συνεχής έλεγχος λόγω των βαρέων φορτίων κυκλοφορίας.

Ο Wischke et al. (2011) προσπάθησαν να μελετήσουν την εφαρμογή των πιεζοκεραμικών αισθητήρων σε σήραγγες. Οι μελέτες τους έδειξαν ότι οι δονήσεις του οχήματος σε οποιαδήποτε θέση κατά μήκος της σήραγγας (πεζοδρόμιο και τοίχοι) ήταν πολύ μικρές για την αποτελεσματική σάρωση ενέργειας λόγω των αναρτήσεων του οχήματος και των ελαστικά τους. Στην έρευνα σημειώθηκε, επίσης, ότι με την εκμετάλλευση των δονήσεων στους σιδηροδρόμους, η δυνατότητα συγκέντρωσης ενέργειας είναι πολύ υψηλότερη. Μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε σιδηροδρομικές τοποθεσίες έδειξαν ότι «τουλάχιστον 135 μ J παραδόθηκαν στο ηλεκτρικό φορτίο από το 85% του συνόλου των τρένων». (Wischke, 2011)

Παρ' όλα αυτά, θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα μοντέρνα σχέδια των συρμών και των οχημάτων έχουν ενσωματώσει νέα αμορτισέρ, έτσι ώστε να βελτιωθεί η άνεση στο ταξίδι μέσω της εξάλειψης των κραδασμών και των δονήσεων. Μηχανικοί στο Ισραήλ και η Innowattech έχουν αναπτύξει μια τεχνολογία, εστιάζοντας στη συλλογή και στη μετατροπή της μηχανικής καταπόνησης σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω πιεζοηλεκτρικών γεννητριών (IPEG).

Η μηχανική ενέργεια προέρχεται από την πίεση που δημιουργείτε κατά τη διάρκεια της κίνησης των οχημάτων στο δρόμο που έχει ως αποτέλεσμα την κάθετη παραμόρφωση της ασφάλτου. Αυτή η παραμόρφωση μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια αντί να σπαταλάτε ως θερμότητα. Η συσσωρευμένη ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται και αποθηκεύεται, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί αργότερα είτε για τοπικές ενεργειακές ανάγκες είτε για να αποσταλεί στο δίκτυο.

Η τεχνολογία IPEG έχει σχεδιαστεί ως μια πρωτοποριακή εφεύρεση στο πεδίο της Παρασιτικής Ενέργειας (Hanlon, 2008). Η εφαρμογή της IPEG στο οδικό δίκτυο μπορεί να γίνει μέσω ηλεκτρονικών καρτών, ώστε να αποθηκεύουν την ενέργεια κίνησης που δημιουργείται, καλυπτόμενες στην συνέχεια από ένα στρώμα ασφάλτου.

2.1.3.2. Θερμοηλεκτρικές Γεννήτριες

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (TEG-Thermo Electric Generators) αντιπροσωπεύουν μια τεχνική που συλλέγει ενέργεια από τη θερμική βαθμίδα του οδοστρώματος. Οι TEG αποτελούν μια τεχνική, φιλική προς το περιβάλλον, χωρίς να περιέχουν κινούμενα μέρη με αποτέλεσμα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συλλέξουν την «ελεύθερη» θερμότητα, η οποία έχει σπαταληθεί, για την παραγωγή ηλεκτρισμού (Wu et al., 2011).

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να τροφοδοτήσει προηγμένους αισθητήρες για την παρακολούθηση της χωρικής και χρονικής κατανομής των πιέσεων που επιδεινώνουν την υποδομή του πεζοδρόμιου. Αναλυτικά, αυτές οι συσκευές εκμεταλλεύονται τη διαφορετική κατανομή της θερμοκρασίας μεταξύ του υπεδάφους του οδοστρώματος και της επιφάνειάς του, που παρέχει μια πιθανή πηγή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση των θερμοηλεκτρικών αρχών. Δυστυχώς η χαμηλή αποδοτικότητα τους είναι και το πιο σημαντικό μειονέκτημα τους. Η χαμηλή αποδοτικότητα, θα μπορούσε να βελτιωθεί με τη χρήση νέων υλικών για την κατασκευή τους.

Ο Wu et al. (2011) μελέτησαν την εφαρμογή αυτών των θερμοηλεκτρικών μονάδων στην επιφάνεια των πεζοδρομίων και με τη διεξαγωγή προσομοιώσεων προσπάθησαν να βελτιστοποιήσουν το σχεδιασμό τους. Πιο συγκεκριμένα, ο σημαντικότερος παράγοντας από τον οποίο κρίνεται η αποδοτικότητά τους, είναι μία εγγυημένη διαφορά υψηλής θερμοκρασίας μεταξύ του άνω και κάτω μέρους της επιφάνεια της θερμοηλεκτρικής μονάδας (TE).

Αυτό που πρότειναν οι Wu et al., ήταν τη σύνδεση του κάτω τμήματος της μονάδας με το χόμα του υπεδάφους δια μέσου υλικών με υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Με αυτόν τον τρόπο, διευκολύνεται η θερμική μεταφορά και έτσι αυξάνεται η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι Hasebe et al. (2006) ανέπτυξαν ένα σύστημα ψύξης του οδοστρώματος χρησιμοποιώντας μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια. Ηλιακή θερμότητα συλλέγεται από ένα σύστημα σωληνώσεων νερού κάτω από το οδόστρωμα και το νερό ψύχεται από το νερό του ποταμού διαμέσου της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας που είναι εγκατεστημένη δίπλα από το δρόμο. Παρατήρησαν, ότι η παραγόμενη ισχύς με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ μεταφερόμενης θερμότητας και κρύου νερού ήταν επαρκής για την τροφοδότηση της αντλίας.

Τα εργαστηριακά πειράματα έδειξαν ότι υπό ιδιαίτερες ηλεκτρικές αντιστάσεις (καθοριζόμενες από το ηλεκτρικό φορτίο) η αύξηση του ρυθμού ροής αυξάνει την απόδοση ισχύος του συστήματος. Η προσομοίωση της πειραματικής συσκευής με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, έδειξε ότι η παραγόμενη ισχύς μειώνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας και παρατηρούμε την ελάχιστη τιμή της κατά τη στιγμή που η θερμοκρασία του ποταμού βρίσκεται στο πιο υψηλό της επίπεδο. Η θερμοκρασία της εισόδου στο σωλήνα συλλογής θερμότητας έδειξε να αυξάνεται πιο αργά από τη θερμοκρασία του νερού του ποταμού και η μεταξύ τους διαφορά έχει την ελάχιστη τιμή της, όταν το νερό του ποταμού βρίσκεται στην πιο υψηλή του θερμοκρασία.

Εν κατακλείδι, και οι δύο μελέτες κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι η απόδοση του συστήματος είναι πολύ χαμηλή για να τροφοδοτήσει οποιοδήποτε ηλεκτρικό εξάρτημα και μόνο συνδέοντας παράλληλα πολλά θερμοηλεκτρικά συστήματα θα μπορούσε να αυξηθεί η αποτελεσματικότητά της. (Hasebel et al, 2006)

2.1.4. Επαγωγική Θέρμανση.

Η ιδέα της εισαγωγής αγώγιμων σωματιδίων στο μίγμα ασφάλτου, με την προοπτική να θερμαίνονται μέσω επαγωγής, προσφέρει έναν εναλλακτικό τρόπο συλλογής ενέργειας μέσω του οδοστρώματος. Η συγκέντρωση ενέργειας μέσω συστημάτων μαγνητικής επαγωγής μπορεί να κυμανθεί έως 1 kW (Apparna, 2007) και έχει συσχετιστεί με τη βελτιωμένη επούλωση των ζημιών στις επιφάνειες της ασφάλτου.

Με αυτή την έννοια, η ιδέα της επαγωγικής επούλωσης είναι η ενεργοποίηση της ικανότητας αυτο-ίασης του πορώδους ασφαλικού σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες.

Ο Liu et al. (2012) μελέτησαν την βελτιστοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων ενός δείγματος σκυροδέματος ασφάλτου με προσθήκη χαλύβδινων ινών, έτσι ώστε να καταστεί ηλεκτρικώς αγωγίμο και να είναι κατάλληλο για επαγωγική θέρμανση. Πολυάριθμες δοκιμές διεξήχθησαν για το πώς το μίγμα μαλλιού χάλυβα (ατσαλόμαλλο-συρμάτινο μαλλί) επηρεάζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα, την ταχύτητα της επαγωγικής θέρμανσης, την απώλεια των σωματιδίων κ.α. Σε γενικές γραμμές, το μαλλί από χάλυβα ενισχύει σε μεγάλο βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες της ασφάλτου (καθυστερήση εμφάνισης των εκδορών) και ενισχύει την αυτο-ίαση της.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι για την ίδια ποσότητα μαλλιού χάλυβα, το δείγμα πίσσας επιδεικνύει την βέλτιστη μέγιστη ταχύτητα επαγωγής και τη μέγιστη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Επιπλέον, το επαγωγικά αγωγίμο δείγμα αποκάλυψε μια παράταση στην ζωή του υλικού(αντοχή του υλικού) κατά περίπου 190% περισσότερο από το αρχικό όριο ζωής. Αυτό το ποσοστό της αύξησης συσχετίζεται με την ικανότητά του να ανθίσταται υψηλότερη καταπόνηση χωρίς την ανάπτυξη βλαβών. (Liu et al, 2012)

Στο ίδιο πνεύμα, ο Heymsfield et al. (2011) εξέτασε την παραπάνω αγωγή διαμόρφωση μετά την εφαρμογή της σε ένα διάδρομο αεροδρομίου, εμποδίζοντας τη συσσώρευση του χιονιού / πάγου με την ταυτόχρονη διατήρηση της επιφάνεια της πλάκας του διαδρόμου, στην ελάχιστη θερμοκρασία ψύξης. Επιπλέον, αυτό το σύστημα αντι-τήξης αποτελείται από ένα ανεξάρτητο ενεργειακό πλέγμα καθώς χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια (DC) από μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια και ένα πλήθος μπαταριών. (Heymsfield, 2011)

Σε μια άλλη έρευνα ο Liu et al. (2011) αποκάλυψε ότι η επαγωγική θέρμανση της ασφαλικής μαστίχας (μείγμα ασφάλτου-χαλικιών-άμμου και ασφαλικού ασβεστόλιθου) και του πορώδους ασφαλικού σκυροδέματος μπορεί να ανακτήσει γρηγορότερα την ακαμψία των επιφανειών. Αναλυτικότερα, κατά τη διάρκεια της επαγωγικής θέρμανσης, οι ρωγμές στα πειραματικά δοκάρια μαστιχοτής ασφάλτου εξαφανίστηκαν λόγω της ροής της πίσσας.

Επίσης, ο παράγοντας της παράτασης της ζωής του υλικού χρησιμοποιήθηκε, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα του ρυθμού της επούλωσης όπου και αποδείχτηκε ότι εξαρτάται από την παρουσία του μαλλιού χάλυβα εντός του μίγματος που προσφέρει στο σύστημα την ενίσχυση να αντέξει βαριά φορτία. (Liu et al, 2011)

2.1.5. Υλικά.

2.1.5.1. Ενσωματωμένα υλικά αλλαγής φάσης (PCM).

Τα PCM (phase-changing materials) είναι νέα υλικά που μπορούν να αποθηκεύουν και να απελευθερώσουν θερμική ενέργεια κατά τη διάρκεια της μετάβασης τους από την φάση της τήξης στη φάση της ψύξης. Κατά τη διάρκεια της περιόδου ψύξης το υλικό απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας με τη μορφή της λανθάνουσας θερμότητας τήξης (ο όρος λανθάνουσα προκύπτει από το γεγονός ότι η θερμότητα που ανταλλάσσει το υλικό με τον περιβάλλον του κατά τη μεταβατική φάση, δεν είναι αισθητή, με την έννοια του ότι το υλικό δεν μεταβάλλει τη θερμοκρασία του αλλά διοχετεύεται εξ ολοκλήρου στη μεταβολή της ίδιας της κατάστασής του). Όταν το υλικό τίκεται, μια ίση ποσότητα ενέργειας απορροφάται από το άμεσο περιβάλλον καθώς αλλάζει από στερεό σε υγρό (PCM, 2009). Όπως οι Bo et al. (2011) επισημαίνουν, «τα PCM έχουν το πλεονέκτημα μιας υψηλής πυκνότητας συσσώρευση θερμότητας και θερμοστατική ικανότητα όταν απορροφούν και απελευθερώνουν θερμότητα». Αυτά τα υλικά, έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί ως δομικά υλικά. Υπό αυτή την έννοια, σχετικά με την υποδομή του οδοστρώματος, η θερμότητα που απελευθερώνεται από ένα PCM κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης μπορεί είτε να καθυστερήσει την μείωση της επιφανειακής θερμοκρασίας είτε μέσω της θερμότητας που απορροφάται και αποθηκεύεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας τήξης να μετριαστεί η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. (Bo et al, 2011)

Η συγκομιδή της ενέργειας από το οδόστρωμα με τη χρησιμοποίηση υλικών αλλαγής φάσης (PCM) σχετίζεται, επίσης, με τη διαδικασία της αυτο-ίασης. Η αυτο-ίαση του οδοστρώματος εξαρτάται από την θερμοκρασία καθώς τα επίπεδα υψηλής θερμοκρασίας έχουν θετική επίδραση στην περίοδο ανάκαμψης. Τα οδοστρώματα με PCM μπορούν να ελέγχουν τη θερμοκρασία τους, καθώς αυτή ρυθμίζεται - σε ένα σχετικά μικρό εύρος- μέσω της αποθήκευσης και της απελευθέρωσης της θερμικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αλλαγής φάσης (στερεού προς στερεό ή στερεό σε υγρό).

Οι Chen et al. (2011) εξέτασαν τη αποτελεσματικότητα του οδοστρώματος, που χρησιμοποιεί PCM για την ρύθμιση της θερμοκρασίας, ώστε να αποτραπεί η δημιουργία αυλακώσεων.

Η θεωρητική ανάλυση αποκάλυψε ότι η θερμοκρασία αλλαγής φάσης των PCM - οδοστρώματος θα πρέπει να είναι 3-5 °C μικρότερη από το σημείο μαλακώματος του ασφαλτικού δείγματος χωρίς την προσθήκη των PCM.

Η εξακρίβωση των θεωρητικών αυτών αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ως PCM-οδόστρωμα μια παραφίνη / διογκωμένου γραφίτη. Καθώς η θερμοκρασία αρχίζει να αυξάνεται, ο αυξανόμενος ρυθμός στο PCM-οδοστρώματος είναι μικρότερος από εκείνον της σκέτης ασφάλτου, ενώ κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ψύξης ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας της ασφάλτου με την προσθήκη των PCM είναι υψηλότερος από εκείνο του σκέτου δείγματος. (Chen et al, 2011)

Ακόμη με την ενσωμάτωση των PCM στο οδόστρωμα μπορεί να μετριαστεί δραματικά το φαινόμενο της Αστικής Θερμνησίδας (UHI), κάτι που είχε δοκιμαστεί πολύ κατά τη διάρκεια της χρήσης τους στον κτιριακό τομέα. Οι Bo et al. (2011) μελέτησε την προοπτική των PCM σε ένα μίγμα ασφάλτου (με μια αναλογία της τάξεως του 20%) δοκιμάζοντας την θερμική αγωγιμότητα τους και την αποτελεσματική θερμότητα. Και οι δύο αυτές παράμετροι έδειξαν ένα αύξον προφίλ μετά την έκθεση του υλικού σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Με τη χρήση της λειτουργίας ελέγχου της θερμοκρασίας των PCM, ο ρυθμός αλλαγής της θερμοκρασίας του μίγματος ασφάλτου μετά τη διαδικασία θέρμανσης / ψύξης μειώνεται. (Bo et al, 2011)

Με άλλα λόγια, στη PCM-άσφαλο η εμφάνιση των ακραίων θερμοκρασιών αιχμής καθυστερούν ενώ εν τω μεταξύ συντομεύεται η διάρκεια της ακραίας υψηλή / χαμηλή θερμοκρασίας. (Bo et al, 2011, Ma et al, 2010).

Τέλος, οι Ma et al. (2011) προσπάθησαν να λύσουν το πρόβλημα διαρροής του PCM από το μίγμα ασφάλτου. Τα PCM με διοξείδιο του πυριτίου και οξικό κυτταρίνης κατέληξαν να αντιπροσωπεύουν τους πιο αποτελεσματικούς φορείς καθώς ενισχύουν καλύτερα τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης του υλικού και τη λανθάνουσα θερμότητά του.

2.2. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Οι πηγές ενέργειας από τις επιφάνειες των οδοστρωμάτων μπορούν να προσδιοριστούν ως ηλιακή ακτινοβολία και μηχανική ενέργεια από τις καταπονήσεις που προκαλούνται από την κυκλοφορία. Η αποθήκευση της συγκομισθείσας ενέργειας είναι επιθυμητό να συμβαίνει στην εσωτερική δομή του οδοστρώματος ελαχιστοποιώντας με αυτό τον τρόπο τη χρήση των μπαταριών. Η μετάβαση της νέας αυτής παραγόμενης μορφής ενέργειας και η πιθανή μελλοντική χρήση της, εξαρτάται από το σύστημα μέσω του οποίου έγινε η συλλογή της.

Κατά κύριο λόγο, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να λαμβάνεται τόσο για τη βελτιστοποίηση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των υλικών του οδοστρώματος, εφόσον έχει σχεδιαστεί για να επιτρέπει τη μεταφορά και την αποθήκευση θερμότητας, όσο και για τη συμβολή στη μείωση του κινδύνου της εμφάνισης ζημιών λόγω ψύξης-απόψυξης σε ψυχρότερες περιοχές.

PCM

Όσον αφορά τα PCM, οι βασικές δυσκολίες για τη χρησιμότητά τους είναι η ανάγκη να διασφαλιστεί η αναστρεψιμότητα της αλλαγής φάσης του υλικού, ο ακριβής προσδιορισμός του κατάλληλου υλικού ώστε να είναι λειτουργικά στο εύρος των θερμοκρασιών που απαιτούνται από την εφαρμογή, οι περιορισμοί σχετικά με τη μεταφορά της ενέργειας από και προς τα PCM, η ενσωμάτωσή τους και η εφαρμογή τους και τέλος, η διατήρηση της απόδοσής τους με την πάροδο του χρόνου. (Cocci, 2010)

Σύστημα Σωληνώσεων

Θερμικά βελτιστοποιημένα οδοστρώματα με το σύστημα σωληνώσεων που εξυπηρετούν, επίσης και ως υδραυλικό σύστημα έχουν μελετηθεί εκτενώς και έχουν ήδη εφαρμοστεί σε περιοχές που δέχονται χαμηλά φορτία κυκλοφορίας, όπως χώρους στάθμευσης ή πλατείες. Αυτό που πρέπει να γίνει προκειμένου να βελτιστοποιηθεί αυτός ο τρόπος συλλογής ενέργειας είναι να μελετηθεί η επίδραση του βάθους του σωλήνα (ων) στην θερμική αγωγιμότητα του οδοστρώματος μαζί με την πίεση που δέχονται οι σωλήνες από τα φορτία κυκλοφορίας. Επιπλέον, η απόψυξη των οδοστρωμάτων αποτελεί ένα ακόμα αποτέλεσμα που μπορεί να επιτευχθεί μέσω της επαγωγικής θέρμανσης.

Πιεζοηλεκτρισμός

Η συλλογή ενέργειας από οδοστρώματα με την χρήση του πιεζοηλεκτρισμού είναι ένα νέο πεδίο έρευνας στον τομέα της μηχανικής του οδοστρώματος καθώς μέχρι τώρα έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως για τη συλλογή ενέργειας σε μικρής κλίμακας εφαρμογές από τους πεζούς ή τα ποδήλατα, ώστε να παρέχει ενέργεια στις μπαταρίες, στον οδικό φωτισμό κ.λπ. Είναι αρκετά δύσκολη η ιδέα της συγκέντρωσης ενέργειας που προέρχεται από βαριά φορτία κυκλοφορίας χρησιμοποιώντας μόνο μικρές πιεζοηλεκτρικές συσκευές / αισθητήρες που εφαρμόζονται σε συγκεκριμένες διατάξεις σε όλη την υποδομή του πεζοδρόμιου. Επιπλέον, τα πυροηλεκτρικά υλικά, όπως και οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι, παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), αλλά από την θερμοβαθμίδα.

Αυτά τα υλικά, θεωρούνται ότι είναι «η γέφυρα μεταξύ θερμοηλεκτρισμού και πιεζοηλεκτρισμού» και παρουσιάζουν ηλεκτρική πόλωση όταν υποβάλλονται σε μία ομοιόμορφη αλλαγή της θερμοκρασίας. Οι *Batra et al.* (2011) προσπάθησαν να εξετάσουν την ικανότητα των υψηλής ποιότητας μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών πυροηλεκτρικών υλικών που ενσωματώνονται στα πεζοδρόμια για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η όλη διαδικασία έγινε χρησιμοποιώντας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης πραγματικά θερμοκρασιακά δεδομένα που προέρχονται από τις κλιματικές βάσεις δεδομένων της περιοχής Huntsville-Alabama, στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής.

Η έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί, σχετικά με την αξιοποίηση των τεχνολογιών των ηλιακών πάνελ στις οδικές υποδομές έχει περιορισμένη έκταση.

Από αυτές τις τεχνολογίες μόνο τα φωτοβολταϊκά ηχοπετάσματα έχουν ερευνηθεί και εφαρμοστεί σε μεγαλύτερο βαθμό. Δημοσιευμένες μελέτες έχουν ήδη δείξει, ότι αυτή η τεχνολογία αποτελεί, σήμερα μια από τις πιο οικονομικές εφαρμογές των διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών για την συγκομιδή ενέργειας, με το επιπλέον όφελος των εγκαταστάσεων μεγάλης κλίμακας. Η εφαρμογή των φωτοβολταϊκών ηχοπετασμάτων κατά μήκος μιας λωρίδα γης, κοντά σε οδική ή σιδηροδρομική υποδομή, ενώ η δομή της ασφάλτου έχει τροποποιηθεί με πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες ή αγώγιμα υλικά, έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής ενέργειας στον τομέα της σύγχρονης μηχανικής του οδοστρώματος. (*Batra et al, 2011*)

Η μελέτη των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων τους είναι ένα από τα εργαλεία για την εξεύρεση μιας συνδυασμένης εφαρμογής ώστε να σχεδιαστούν και να δημιουργηθούν πιο αποτελεσματικά συστήματα συλλογής. Ανάμεσα στις τεχνολογίες συλλογής ενέργειας, αυτή που πρακτικά «αγωνίζεται» για την δυνατότητα εφαρμογής της είναι το μοντέλο των Solar Roadways (Ηλιακών δρόμων). Σύμφωνα με τον ερευνητή του, το Solar Roadways προσπαθεί να αντικαταστήσει χιλιάδες μίλια των αμερικανικών αυτοκινητοδρόμων με την ενσωμάτωση ηλιακών συλλεκτών, ώστε να συλλέξουν την ηλιακή ενέργεια που απορροφάτε και αφού την αποθηκεύσουν, να την διανέμουν, είτε για θέρμανση και ψύξη είτε για την ηλεκτροδότηση των κτιρίων και των λοιπών εγκαταστάσεων.

Παρόλο που στην αρχή το μοντέλο αυτό έμοιαζε με «επιστημονική φαντασία», οι ιδρυτές έχουν ήδη αναπτύξει ένα πρωτότυπο δρόμο 45 μιλίων μεταξύ Coeur D'Alene και Sandpoint, Idaho.

Επιπλέον, η Federal Highway Administration ήταν τόσο εντυπωσιασμένη από το πρωτότυπο που πρότεινε στην εταιρεία να υποβάλουν αίτηση για επιχορήγηση 750.000\$ για να συνεχίσει το έργο της. (Ynkoff, L., 2011. *Solar Roadways to build solar-powered parking lot*). Αυτά τα ηλιακά πάνελ δρόμου περιέχουν LED για το φωτισμό των οδικών γραμμών, ένα θερμαντικό στοιχείο για την πρόληψη της συσσώρευσης του χιονιού / πάγου και μια πλακέτα με μικροεπεξεργαστή για έλεγχο και επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο (Renewable Energy World, 2011).

Η Εικόνα 6 συνοψίζει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα για τις προαναφερθείσες τεχνολογίες συγκέντρωσης ενέργειας που έχουν εφαρμοστεί ή έχουν τη δυνατότητα να εφαρμοστούν στην υποδομή του οδοστρώματος.

	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Φωτοβολταϊκά Ηχοπετάσματα	<ul style="list-style-type: none"> Δεν υπάρχουν περιορισμοί σχετικά με την χρήση γης. Εγκαταστάσεις μεγάλης έκτασης. Εκμετάλλευση υπάρχουσας υποδομής. 	<ul style="list-style-type: none"> Η απόδοσή τους εξαρτάτε πολύ από την ποιότητα με αντίκτυπο στην τιμή.
Φωτοβολταϊκά Στέγαστρα	<ul style="list-style-type: none"> Μακροπρόθεσμη μείωση της Αστικής Θερμνησίδας. Μείωση της οξειδωσης και πτητικοποίησης των επιφανειών. 	<ul style="list-style-type: none"> Εκτενέστερη μελέτη απαιτείται λόγω της πολυπλοκότητας των μικρο-κλιμάτων στα

		οποία εφαρμόζετε.
Φωτοβολταϊκά V2G	<ul style="list-style-type: none"> • Έξυπνη παραγωγή ενέργειας για χρησιμοποίηση για λόγους φωτισμού και εξερισμού. • Ενίσχυση του ήδη υπάρχοντος ηλεκτρικού συστήματος. • Συνεργασία με παράπλευρες εφαρμογές του αυτοκινήτου. 	<ul style="list-style-type: none"> • Αυξημένο κόστος. • Το τελικό κόστος εξαρτάτε από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας.
Πιεζοηλεκτρικοί Αισθητήρες	<ul style="list-style-type: none"> • Εκμετάλλευση της σπαταλημένης μηχανικής ενέργειας. • Συνεργασία με παράπλευρες εφαρμογές του οδικού δικτύου (μπαταρίες, ηλεκτροδότηση φωτεινών σηματοδοτών, πινακίδων κ.α.) • Η καινούργια υβριδική τεχνολογία οχημάτων μπορεί να επωφεληθεί. 	<ul style="list-style-type: none"> • Συχνή και συνεχή επιτήρηση απαιτείται λόγο της καταπόνησης από τα φορτία κυκλοφορίας. • Ακατάλληλα για πολύ μεγάλης κλίμακας ενεργειακές απαιτήσεις.
Άσφαλτος-ηλιακός συλλέκτης/υδραυλική	<ul style="list-style-type: none"> • Περιπτώσεις που ήδη έχει εφαρμοστεί με επιτυχία. • Άμεση αντιμετώπιση του φαινομένου της Αστικής Θερμονησίδας. • Μείωση της απαιτούμενης ενέργειας για λόγους θέρμανσης ψύξης του οδικού δικτύου. • Βελτίωση του χρόνου ζωής του οδοστρώματος. • Μείωση της χρήσης χημικών για την απόψυξης του οδοστρώματος. 	<ul style="list-style-type: none"> • Η απόδοση είναι εξαρτώμενη από το κλίμα της περιοχής. • Οι υπολογισμοί για την εφαρμογή του έρχονται αντιμέτωποι με πολλές μεταβλητές όπως θερμοκρασιακές εναλλαγές, άνεμο, υγρασία κ.α.
TNO	<ul style="list-style-type: none"> • Χρησιμοποίηση υπάρχουσας υποδομής. • Μικρή διάρκεια απόσβεσης.4-5 έτη για Νότια Ευρώπη και 5-8 έτη για πιο βόρειες χώρες. • Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα από το τοπικό δίκτυο για παράπλευρες εφαρμογές όπως φωτεινούς σηματοδότες και πινακίδες. 	<ul style="list-style-type: none"> • Απαιτεί την χρήση εξελιγμένων φωτοβολταϊκών υλικών.

Επαγωγική Φόρτιση	<ul style="list-style-type: none"> • Ενισχύει την αντοχή στον εφελκυσμό, την αντίσταση στην απώλεια σωματιδίων και στην μηχανική καταπόνηση. • Πιθανή εφαρμογή σε υπάρχουσες υποδομές. 	<ul style="list-style-type: none"> • Περεταίρω ανάλυση απαιτείται στο τομέα της πρακτικής πειραματικής εφαρμογής.
Υλικά αλλαγής φάσης	<ul style="list-style-type: none"> • Ενίσχυση της δομής του οδοστρώματος μέσω της αυτό-ίασης. • Μείωση της Αστικής Θερμονησίδας. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ανάγκη για επίλυση του προβλήματος διαρροής των υλικών από το μίγμα ασφάλτου σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες.

Εικόνα 6-Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των τεχνολογιών.

3. «Green Concept ROAD»: ένα βιώσιμο σύστημα Οδών.

3.1. Εισαγωγή.

Το «Green Road Concept» θα πρέπει να εξυπηρετεί διπλό σκοπό. Αρχικά, εξασφαλίζει την συγκομιδή της ενέργειας που διαφορετικά θα χανόταν τόσο από τα οχήματα και τους πεζούς, όσο και της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Εν συνεχεία καταφέρνει να εξασφαλίσει η διάρκεια ζωής του οδοστρώματος μέσω της βελτίωσης των θερμικών και μηχανικών ιδιοτήτων τους. Αυτή η διαμόρφωση αποτελεί έναν βιώσιμο δρόμο που χρησιμοποιεί περιορισμένους φυσικούς πόρους για τη λειτουργία του, μειώνει την κατανάλωση της ενέργειας και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, απαγορεύει τη ρύπανση του αέρα, των υδάτων και του θορύβου και εξασφαλίζει την ασφάλεια και την υγεία της κυκλοφορίας.

Τα ερωτήματα που πρέπει να απαντηθούν, ώστε να αναλυθεί αποτελεσματικά η εφαρμογή περισσότερων από μια τεχνολογία σε ένα μελλοντικό σύστημα οδικών αξόνων, όπως το «Green Road Concept» είναι:

- Πώς είναι η ροή της ενέργειας και πώς επηρεάζετε από το περιβάλλον;
- Πώς η ενσωμάτωση των τεχνολογιών αυτών θα βελτιώσει την θερμική και μηχανική απόδοση της δομής του οδοστρώματος;
- Ποιοι παράγοντες καθορίζουν την ενεργειακή απόδοση;
- Οι τεχνολογίες επικαλύπτονται αποτελεσματικά ή υπάρχουν κενά στην απόδοση και λειτουργία τους;
- Ποιο είναι το μελλοντικό κόστος και η περίοδος απόσβεσης του κόστους;

Όποιος και αν είναι ο σκοπός της εφαρμογής μιας τεχνολογίας στο μελλοντικό βιώσιμο σύστημα οδοστρώματος, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στη βελτιστοποίηση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των υλικών του οδοστρώματος. Αυτό μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Είτε με τη χρήση συγκεκριμένων υλικών μέσα στο σκυρόδεμα, όπως ασβεστόλιθο, χαλαζίτες κ.α., είτε αντικαθιστώντας μία συγκεκριμένη ποσότητα του μίγματος της ασφάλτου με υλικά αλλαγής φάσης (PCM). Και οι δύο αυτοί τρόποι μπορούν να βελτιώσουν την απορροφητικότητα της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας και τη αποθήκευσή της σε όλη την επιφάνεια του οδοστρώματος καθώς επίσης και να συμβάλουν στην άμβλυση της Αστικής Θερμνησίδα με τη ρύθμιση της θερμοκρασίας στις επιφάνειες. Ως αποτέλεσμα, μπορεί να επεκτείνει τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος με τη μείωση των περιστατικών των εκδορών και της αυλάκωσης.

3.2. Green Road Concept-1

Λαμβάνοντας υπόψη την τοποθεσία και την ετοιμότητά τους για την εφαρμογή, τα φωτοβολταϊκά ηχοπετάσματα (PVSB) και οι τεχνικές επαγωγικής φόρτισης μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα κοινά διαμορφωμένο σύστημα. Αναλυτικά, τα PVSB από μονά τους συνδυάζουν τις ανάγκες της παραγωγής καθαρής ενέργειας με τον μετριασμό του θορύβου κυκλοφορίας (*Remmer et al, 2005*)

Ειδικά όταν πρόκειται να εφαρμοστεί σε αυτοκινητόδρομους που βρίσκονται κοντά σε αστικές και βιομηχανικές πόλεις, όπου οι ανάγκες για μείωση του ήχου και η ζήτηση για ενέργεια είναι υψηλή, μπορεί να είναι άμεσα συνδεδεμένα στο δίκτυο και η χρήση των μπαταριών να μην είναι απαραίτητη.

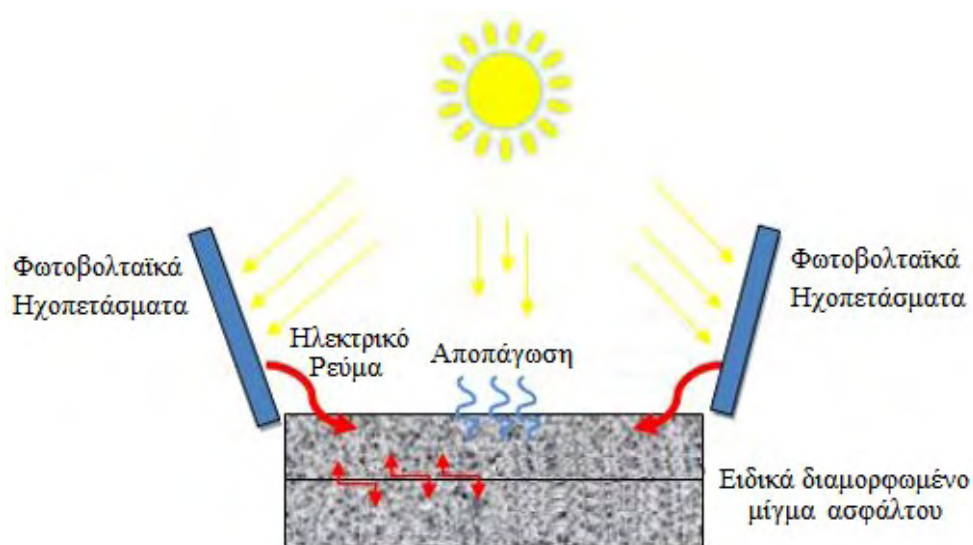
Από την άλλη πλευρά, η επαγωγική τεχνική φόρτισης επιτρέπει, θεωρητικά, την διαδικασία αυτο-ίασης της δομής του οδοστρώματος με την προσθήκη στο μίγμα της ασφάλτου αγώγιμα υλικά όπως το μαλλί χάλυβα ή χάλκινες ίνες έτσι ώστε να καταστεί ηλεκτρικώς αγώγιμο. Σε γενικές γραμμές, τα μίγματα ασφάλτου που περιέχουν χάλκινες ίνες ή μαλλί χάλυβα είχαν δείξει καλύτερη αντίσταση κατά της φθοράς (*Dawson et al., 2011*), ενώ η διασυνδετική συμπεριφορά των ινών χαλκού θα μπορούσε να ενισχύσει περαιτέρω την θερμική αγωγιμότητα.

Ωστόσο, αυτή η αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας είναι ακατόρθωτο να προσφέρει ανάλογο οικονομικό όφελος εξαιτίας του ύψους του κόστους που συνδέεται με την αγορά των ινών χαλκού (Dawson et al, 2011)

Σε αυτό το Green Road Concept ο ρόλος των PVSB είναι πολλαπλός. Καθώς είναι διασυνδεδεμένα μεταξύ τους, μειώνουν τα επίπεδα θορύβου και προσφέρουν την απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια για τη διαδικασία της επαγωγικής επούλωσης. Όταν συμβαίνουν μικρο-ρωγμές στην πορώδη άσφαλτο, η επαγωγική θέρμανση μπορεί να εφαρμοστεί στο υλικό για να αυξηθεί η θερμοκρασία. Δηλαδή, η διαδικασία που ακολουθείται για τη ροή της ενέργειας μεταξύ αυτών των τεχνολογιών, είναι η διάδοση της φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας στην εσωτερική δομή του οδοστρώματος, προκειμένου να αυξηθεί η θερμοκρασία. Η ροή της ενέργειας για την εν λόγω διαμόρφωση φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 7.

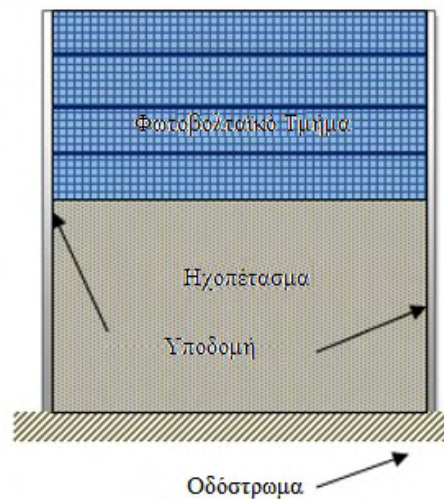
Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία παράγει ηλεκτρισμό σύμφωνα με φωτοβολταϊκό φαινόμενο και με τους κατάλληλους μηχανικούς συνδέσμους (ρυθμιστές, μετατροπείς, μπαταρίες), ενώ μέρος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας επιτρέπεται να διαρρεύσει στο οδόστρωμα, καθώς το υπόλοιπο εισάγεται στο δίκτυο. Το κλείσιμο των μικρο-ρωγμών αποτρέπει, τελικά, την χειροτέρευση της κατάστασης του οδοστρώματος με την εξάλειψη του σχηματισμού μακρο-ρωγμών. (Liu et al, 2012)

Με την κατάλληλη διαχείριση ενέργειας του συστήματος, η αύξηση της θερμοκρασίας θα μπορούσε ίσως ακόμα και να βοηθήσει στην απόψυξη της επιφάνειας του οδοστρώματος.



Εικόνα 7-Η ροή ενέργειας στο GRC-1

Η ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών σε υφιστάμενα ηχοπετάσματα (βλέπε Εικόνα 8) επιτρέπουν, κυρίως, τη μείωση του κόστους, καθώς αποτελούνται από ηχομονωτικά υλικά (Plexiglas ή γυάλινα φύλλα) και επιτρέπουν την αυτο-ίαση του οδοστρώματος καθώς προσφέρουν την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για τη διεργασία επαγωγής. Σε μεγάλο βαθμό, αυτή η επιπρόσθετη εξοικονόμηση κόστους βελτιώνει ακόμα περισσότερο την συνολική πρακτικότητα των φωτοβολταϊκών.



Εικόνα 8-Φωτοβολταϊκό Ηχοπέτασμα

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση είχε αναλύσει μόνο την επαγωγική θέρμανση για δείγματα μαστιχοτής και πορώδους ασφάλτου μετά από προσθήκη μιας μίξης από μαλλί και χάλυβα (τύπου 00) στη δομή τους.

Η τροποποιημένη με χάλυβα ασφάλτος μπορεί να στρωθεί στις υπάρχουσες επιφάνειες οδοστρώματος προσθέτοντας ένα ακόμη στρώμα στο οποίο έχει τοποθετηθεί μια συγκεκριμένη ποσότητα ινών χάλυβα κατά τη διαδικασία ανάμιξης.

Οι παράμετροι που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα των PVSB (φωτοβολταϊκών ηχοπετασμάτων) είναι ο προσανατολισμός των φωτοβολταϊκών, η γωνία κλίσης τους (προκειμένου να αξιοποιηθεί στο μέγιστο η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία) και ο αερισμός τους (δεν περιορίζεται σε κλειστές δομές). Όσον αφορά τον προσανατολισμό τους, μπορεί να διαφέρει από την βέλτιστη γωνία καθώς η θέση του ηχοπετάσματος εξαρτάται από την κατεύθυνση του δρόμου και τη διαμόρφωση της γύρο κατοικήσιμης περιοχής. Για το λόγο αυτό, η χρήση multi-oriented ή εύκαμπτων συστημάτων στερέωσης όπως top-mounted (αναβάθμιση των υφιστάμενων ηχοπετασμάτων) θα επέτρεπε στις φωτοβολταϊκές επιφάνειες να προσανατολίζονται σωστά ανεξάρτητα από την κατεύθυνση του δρόμου (Schirone et al., 2003).

Ο αρχική διαμόρφωση επιτυγχάνει την αποτελεσματική μείωση του θορύβου αλλά με την περιορισμένη απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, ενώ η παραπάνω μπορεί να επιτύχει τόσο την σημαντική μείωση του θορύβου όσο και την ικανοποιητική φωτοβολταϊκή απόδοση.

Τα PVSB συνοδεύονται με τους κατάλληλους μετατροπείς, έτσι ώστε να είναι εφικτή η αλλαγή του συνεχούς ρεύματος (DC) σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) λίγο πριν την είσοδο του στο δίκτυο. Είναι πολύ σημαντικό να υπάρχουν σωστές ρυθμίσεις για την σχέση μεταξύ του φάσματος λειτουργίας του μετατροπέα και των διακυμάνσεων της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, λόγω των τροποποιήσεων της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας, ώστε να αποφευχθούν σημαντικές απώλειες ενέργειας που μπορεί να συμβούν είτε με τη μορφή της διακοπής κατά τη διάρκεια ακραίων θερμοκρασιών ή ως πρόωρη διακοπή του μετατροπέα λόγω χαμηλής ακτινοβολίας (Schirone et al., 2003).

Η υψηλή ηλιακή ένταση μαζί με την κατάλληλη τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπορεί να εξασφαλίσει την άψογη απόδοση συγκομιδής ενέργειας σε σχέση με την υποδομή των PVSB. Όσον αφορά τον τομέα της επαγωγικής θέρμανσης η δυναμική απόδοσης είναι πιο περίπλοκη καθώς καθορίζεται κατά ένα μεγάλο βαθμό από το φορτίο κίνησης, τις περιόδους θέρμανσης και ανάπαυσης (μέχρι 85 ο C και γύρω από 20h, αντίστοιχα) και τους επαναλαμβανόμενους κύκλους τους. Όσο περισσότερα περιστατικά θέρμανσης και ανάπαυσης έχουμε, τόσο καλύτερη είναι η βελτίωση στην ικανότητα αυτο-ίασης και στην αντοχή του οδοστρώματος στις καταπονήσεις.

Επιπλέον, η θέρμανση δεν θα πρέπει να εφαρμόζεται πολύ νωρίς ή πολύ αργά όσον αφορά τις φθορές στο οδόστρωμα. Ο λόγος που αποτρέπει την εφαρμογή της είναι το γεγονός πως η πορώδης ασφαλτος μπορεί να θεραπεύσει τη ζημία από μόνη της καθώς οι φθορές είναι ακόμα πολύ μικρές αν αυτές γίνουν σε αρχικό στάδιο. Από την άλλη όμως αν γίνει σε μεταγενέστερο στάδιο, η απόδοση της επιδιόρθωσης θα είναι πολύ χαμηλή, καθώς παραμόρφωση που θα είχε συμβεί στη δομή του οδοστρώματος θα είναι πέρα από την ικανότητα επούλωσης του ασφαλτικού σκυροδέματος (Liu et al., 2011).

Μέχρι τώρα τα PVSB έχουν αποδείξει τις επιδόσεις τους και γενικότερα την αποδοτικότητα τους, καθώς αποτελούν μια ήδη καθιερωμένη τεχνολογία, ιδίως στις περιοχές χαμηλού γεωγραφικού πλάτους.

Όσον αφορά την τεχνολογία επαγωγικής φόρτισης, τα υπερβολικά ποσοστά των ιών από χαλκό ή χάλυβα που απαιτούνται μπορεί να επιδεινώσουν τη μηχανική απόδοση του οδοστρώματος με αποτέλεσμα τη φθορά του.

3.3. Green Road Concept-2

Ο εξοπλισμός της υποδομής του οδοστρώματος με σωλήνες για την κυκλοφορία υγρού σε συνδυασμό με την προσαρμογή των προ απαιτούμενων υλικών αποτελεί μια αρκετά δημοφιλή μελέτη στον τομέα της διαμόρφωση του οδοστρώματος. Πυρήνας αυτού του συστήματος, είναι οι σωλήνες που επιτρέπουν την κυκλοφορία του ρευστού, παρέχοντας την απαιτούμενη διαδρομή για να αξιοποιηθεί η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια. Τα οδοστρώματα απορροφούν μία μεγάλη ποσότητα θερμότητας και συνεπώς παρουσιάζουν αύξηση της θερμοκρασίας κάτω από θερμές κλιματολογικές συνθήκες λόγω της χαμηλής αγωγιμότητας τους (1.8kW/mK) και της μεγάλης θερμοχωρητικότητας (1200J / kgK) (Mallick, 2011a.) Η θερμική ενέργεια μεταφέρεται κατόπιν στο ρευστό μέσω συναγωγής, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του ρευστού και μειώνοντας τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος γύρο από τα οδοστρώματα.

Από μόνο του, αυτό το σύστημα συγκομιδής μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σκοπό την απόψυξη και την θέρμανση / ψύξη, έχοντας μια διπλή λειτουργία η οποία προσδιορίζεται από τις κλιματικές συνθήκες:

- Το καλοκαίρι, το κρύο νερό αντλείται από μια υπόγεια δεξαμενή αποθήκευσης και μεταφέρεται μέσω αγωγών στο ανώτερο στρώμα της ασφάλτου του οδοστρώματος. Λόγω του ήλιου, το νερό ζεσταίνεται και η θερμική ενέργεια μέσω του μετατροπέα θερμότητας μεταφέρεται σε μια άλλη υπόγεια δεξαμενή και διατηρείται σε αυτή τη θέση για όσο χρειαστεί.
- Το χειμώνα, το σύστημα αντιστρέφει τη λειτουργία του. Το αποθηκευμένο προηγούμενος θερμό νερό ρέει από τη δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού προς κοντινές εγκαταστάσεις για σκοπούς θέρμανσης ή να χρησιμοποιηθούν μέσω του οδοστρώματος για σκοπούς απόψυξης (Sullivan et al., 2007).

Dehdezi et al. (2011) και Dawson et al. (2011) πρότειναν όχι μόνο την εγκατάσταση σωληνώσεων πιο κοντά στην επιφάνεια της ασφάλτου, αλλά και σε μικρότερο βάθος.

Ενσωματώνοντας τους σωλήνες μέσα στο επιφανειακό στρώμα με την ταυτόχρονη εφαρμογή υλικών υψηλής διάχυσης (όπως ίνες χαλκού ή χαλαζίτες), ενώ παράλληλα στο χαμηλότερο επίπεδο τοποθετούνται θερμομονωτικά υλικά, ο χρόνος που απαιτείται από το υγρό για να απορροφήσει την υψηλής θερμοκρασίας θερμότητα, περιορίζεται. Υλικά υψηλής διαχυτικής ικανότητας επιτρέπουν στη θερμότητα να διεισδύσει γρήγορα στο πεζοδρόμιο αυξάνοντας σημαντικά τη θερμοκρασία στους επιφανειακούς σωλήνες, ενώ εκείνοι που έχουν τοποθετηθεί στα χαμηλότερα επίπεδα, λειτουργούν ως μόνωση ,αποτρέποντας την απορριφθείσα θερμότητα να διεισδύσει χαμηλότερα. Επιπρόσθετα, με αυτόν τον τρόπο μετριάζονται οι θερμικές καταπονήσεις που δέχεται το οδόστρωμα με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας παραμόρφωσης λόγω της διαστολής και συστολής.

Αυτό το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο ως υδραυλικό σύστημα για την απόψυξη της επιφάνειας του οδοστρώματος (κατά τη διάρκεια του χειμώνα, το ζεστό νερό που λαμβάνεται από το καλοκαίρι και αποθηκεύεται σε μονωμένο θαλάμους, μπορεί να ρεύσει για σκοπούς απόψυξης)όσο και για τον περιορισμό του φαινομένου της Αστικής Θερμνησίδας ρυθμίζοντας καλύτερα τη θερμοκρασία της επιφάνειας των οδοστρωμάτων σε χώρες που αντιμετωπίζουν εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες καλοκαιριού. (*Dehdezi, 2011*)

Επιπλέον, εφαρμόζοντας το εν λόγω σύστημα σε θέσεις με υψηλή ηλιακή ένταση, με τη βοήθεια μιας αντλίας που θα τροφοδοτείται με ηλιακή ενέργεια ή μέσω αντλιών θερμότητας εδάφους, το θερμαινόμενο νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας στις κοντινότερες εγκαταστάσεις.

Από την άλλη πλευρά, με την εγκατάσταση των σωλήνων σε μικρότερο βάθος ενώ παράλληλα εφαρμόζονται στην επιφάνεια υλικά με χαμηλή ικανότητα διάχυσης (χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα) και υψηλή ογκομετρική θερμοχωρητικότητα, περιορίζονται οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας που είναι υπεύθυνες για τις θερμικές καταπονήσεις.

Για να μετριαστούν οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας επιβάλλεται μια κατάσταση σταθεροποιημένης θερμοκρασίας για το πεζοδρόμιο που πρέπει πάντα να είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έτσι, κατά τη διάρκεια του χειμώνα οι εσωτερικές στρώσεις θα παραμείνουν σε υψηλότερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού το αντίστροφο.

Επιπλέον, τα υλικά που περιβάλλουν τους σωλήνες θα πρέπει να έχουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα έτσι ώστε να επιτρέπουν την ταχεία μεταφορά θερμότητας προς τις ανώτερες στρώσεις. Αυτό το σύστημα είναι ιδανικό για τα αεροδρόμια που αντιμετωπίζουν προβλήματα που σχετίζονται με χιονοπτώσεις, επειδή οι υποδομές των αεροδρομίων έχουν αποκτήσει μεγάλη ζήτηση για θέρμανση και ψύξη, καθώς είναι δίπλα στις τεράστιες επιφάνειες του οδοστρώματος των αεροδιαδρόμων. Σε γενικές γραμμές η εφαρμογή του συγκεκριμένου συστήματος σε ψυχρές περιοχές μπορεί να ελαχιστοποιήσει τον κίνδυνο ζημιάς λόγω του κύκλου της διαδικασίας ψύξης-απόψυξης, καθώς μετριάζονται οι ακραίες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. (*Dawson et al, 2011*)

Παρ' όλα αυτά, η εφαρμογή των PCM (υλικά αλλαγής φάσης) σε συνδυασμό με το υγρό σύστημα σωληνώσεων αντί των ήδη αναφερθέντων υλικών δεν έχει μελετηθεί, ακόμα. Μέχρι σήμερα τα PCM έχουν ήδη αποδείξει τη λειτουργικότητα και την αποτελεσματικότητά τους για την αποθήκευση πάγου, τη διατήρηση και τη μεταφορά ευαίσθητων θερμοκρασιακά υλικών κ.α. (*Zalba, 2003*)

Μόλις πρόσφατα, όμως, τα PCM έχουν αρχίσει να θεωρούνται ιδανικά συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στον τομέα της μηχανικής του οδοστρώματος μετά από τον εμποτισμό τους στο μείγμα της ασφάλτου και αυτό για την ενίσχυση της αυτο-ίασης ικανότητας του οδοστρώματος. Ίσως είναι πιο αποτελεσματικός ο εξοπλισμός του πάνω μέρος του οδοστρώματος με σωλήνες, εισάγοντας ταυτόχρονα στα ενδιάμεσα στρώματα του οδοστρώματος PCM υψηλής διαχύσεως προκειμένου να καταστεί δυνατή η ροή της ενέργειας και να εξαλειφθούν οι θερμικές καταπονήσεις. Αν η διάταξη των σωλήνων πρέπει να εφαρμοσθεί σε μικρότερο βάθος τότε PCM χαμηλής διαχύσεως στα ενδιάμεσα στρώματα μπορούν να διευκολύνουν την απορροφητικότητα της θερμικής ενέργειας, να ρυθμίσουν την διάχυσή της και τέλος, να αποτρέψουν τις απώλειες στο γύρω περιβάλλον. Μια άλλη ιδέα είναι να χρησιμοποιηθούν τα PCM ως οικοδομικό υλικό για τις δεξαμενές αποθήκευσης. Υπό αυτή την έννοια, τα PCM θα έχουν διπλό ρόλο σε αυτό το σύστημα συγκομιδής ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, θα χρησιμεύουν όχι μόνο ως υλικά τροποποίησης της δομής του οδοστρώματος για την βελτίωση της θερμικής απόδοσης του οδοστρώματος και άρα την ικανότητα αυτο-ίασής του, αλλά ταυτόχρονα και ως μέσο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES- Thermal Energy Storage). (*Zalba, 2003*)

Η μελέτη αυτού του 2^{ου} “concept” απαιτεί την κατανόηση των δύο τμημάτων που το αποτελούν:

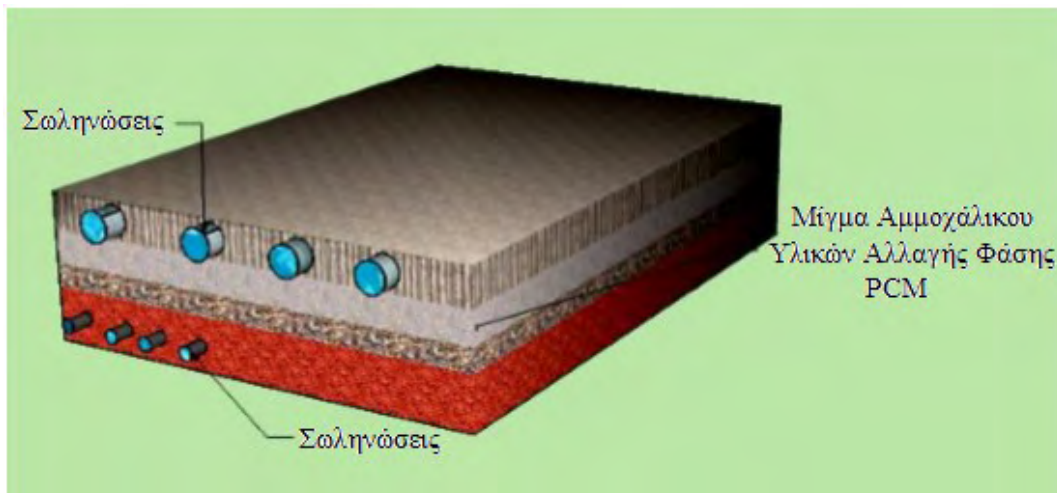
- διάταξη των σωλήνων
- PCM

Όσον αφορά την πρώτη, οι τρεις παράμετροι που καθορίζουν το ποσό της συγκομισθείσας ενέργειας είναι η τοποθεσία (γεωγραφικό πλάτος), η θερμοκρασία του υγρού και η διάταξη των σωλήνων (απόσταση, το βάθος, το υλικό και τη διάμετρο). Η έννοια της σάρωσης της ενέργειας από τα οδοστρώματα φαίνεται να είναι εφικτή για περιοχές με σχετικά υψηλότερη ηλιακή ακτινοβολία. Όσο για τους σωλήνες, η βιβλιογραφική επισκόπηση είχε αποκαλύψει ότι η εγκατάσταση μιας πυκνότερης διάταξης σωλήνων (κατά προτίμηση σε διάταξη σερπαντίνα), έτσι ώστε να διευρυνθεί το μήκος ροής του ρευστού, και το υψηλό ποσοστό ροής του ρευστού είναι απαραίτητες για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος.

Αυτά τα στοιχεία, θα ελαχιστοποιήσουν το χρονικό πλαίσιο που χρειάζεται το ρευστό για να απορροφήσει τη θερμότητα και με την κατάλληλη επιλογή των υλικών προσαρμογών (ανεξάρτητα από το βάθος εγκατάστασης των σωλήνων) θα ενισχύσουν την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας συγκομιδής.

Αν η εγκατάσταση του συστήματος σωληνώσεων γίνει πιο κοντά στην επιφάνεια, έτσι ώστε να λειτουργήσει ως υδραυλικό-σύστημα-συλλογής, τότε το κατάλληλο βάθος είναι περίπου 40 χιλιοστά από την επιφάνεια, έτσι ώστε να μην αυξηθεί ο χρόνος που απαιτεί το ρευστό για να απορροφήσει τη θερμότητα. Πιο συγκεκριμένα, όταν η θερμική αγωγιμότητα των στρωμάτων προσεγγίζει την τιμή του 3, ο χρόνος για το λιώσιμο του χιονιού μπορεί να περιοριστεί στην μισή (0,5) ώρα. (*Chen et al, 2011*)

Όσον αφορά το υλικό των σωλήνων, επιλέγοντας υλικά με μέτρια-προς-υψηλή θερμική αγωγιμότητα ενισχύεται η απορροφητικότητα της θερμικής ενέργειας από το ρευστό, αυξάνεται η θερμοκρασία του ρευστού και έτσι μειώνεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντος οδοστρώματος. (*Mallick, 2011b*) Επιπλέον, οι πλαστικοί σωλήνες είναι πιο αποτελεσματικοί στην εξαγωγή θερμότητας ενώ είναι σημαντικά φθηνότεροι από τις ίνες χαλκού (*Siebert et al., 2010*) .



Εικόνα 9-Διατομή Green Road Concept-2

Όσον αφορά τη διάμετρο, μόνο οι Mallick et al. (2011b) μελέτησαν αυτόν τον παράγοντα, αποδεικνύοντας ότι όταν η διάμετρος του σωλήνα αυξάνεται, τότε προκαλείται μια πιο απότομη μεταβολή της θερμοκρασίας μεταξύ του σωλήνα και της επιφάνειας, με τον ρυθμό της ροής του ρευστού να αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα για την απόδοση της συγκομιδής.

Αυτό σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος, τόσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία του νερού, με αποτέλεσμα την γρηγορότερη ψύξη της επιφάνειας του οδοστρώματος (είναι ιδανικό για τοποθεσίες που αντιμετωπίζουν το φαινόμενο της Αστικής Θερμνησίδας κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού).

Η κατανομή της θερμοκρασίας είναι ομοιόμορφη μόνο σε σωλήνες μικρής διαμέτρου, ενώ γενικά αυτή μεταβάλλεται σταδιακά κατά μήκος της διαμέτρου του σωλήνα, κάτι που θα μπορούσε να οδηγήσει σε παραμόρφωση των σωλήνων (η πλευρά με την υψηλή θερμοκρασία θα είναι πιο επιρρεπής σε μόνιμη παραμόρφωση λόγω του κυκλοφοριακού φόρτου, ενώ η πλευρά με την χαμηλή θερμοκρασία θα είναι πιο ευπαθής στην θερμική πυρόλυση).

Τα PCM, δεν έχουν τόσα πολλά τεχνικά χαρακτηριστικά, εκτός από τον ακριβή προσδιορισμό της θερμοκρασίας τήξης και πήξης, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η αντιστρεψιμότητά τους, με άλλα λόγια, την επιλογή των πλέον κατάλληλων υλικών. Αυτό που θα πρέπει, λοιπόν, να αναλυθεί πριν από το σχεδιασμό και την ενσωμάτωση των δύο παραπάνω τεχνολογιών συγκομιδής είναι το πώς το σύστημα σωληνώσεων θα ανταποκριθεί στις μεταβατικές φάσεις των PCM αλλά και στην καταπόνηση που δέχεται από την κυκλοφορία.

Κατά πάσα πιθανότητα, αυτός ο παράγοντας αντιπροσωπεύει και την μοναδική ίσως «αδυναμία» αυτής της προοπτικής συνδυασμού των δύο αυτών τεχνολογιών(των σωληνώσεων και των PCM). Τα PCM δεν θα πρέπει να συμβάλουν στις εκδορές και στην αποδυνάμωση της δομής του οδοστρώματος, αλλά αντίθετα να την ενισχύουν μειώνοντας την καταπόνηση που δέχεται το οδόστρωμα από θερμοκρασιακές αλλαγές. (Chen et al, 2011)

Ένας άλλος παράγοντας που θα πρέπει να εξεταστεί, είναι η θερμική αγωγιμότητα του καινούργιου μίγματος ασφάλτου μετά την ενσωμάτωση των PCM ή του απλού μίγματος αμμοχάλικου.

Μέχρι τώρα, η βιβλιογραφία έχει αποκαλύψει ότι τα «εξωτερικά υλικά» (PCM) αναμιγνύονται σε αναλογίες 20% - 50% των ξηρών συστατικών και η τελική θερμική αγωγιμότητα που υπολογίστηκε κυμαίνεται μεταξύ 0,22 και 10,71 (W / mK) με τα απλούστερα μίγματα αμμοχάλικου να έχουν τις υψηλότερες τιμές. Επιπλέον, η θερμική αγωγιμότητα των μιγμάτων ασφάλτου με τα απλούστερα μίγματα αμμοχάλικου, υπό υγρή κατάσταση, αποκαλύπτει ένα αύξων προφίλ. (Dawson et al, 2011)

Η ποσότητα της θερμικής συλλογής εξαρτάται κατά ένα μεγάλο βαθμό από την τοποθεσία (ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, ταχύτητα του ανέμου και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος). Mallick et al. (2011a) υπολόγισε μέσω ενός υπολογιστικού μοντέλου ότι η εν δύναμη συγκομισθείσα ενέργεια που είναι διαθέσιμη σε 2 διαφορετικά βάθη (25 και 50 χιλιοστών) για την Boston (42.4ο) δεν είναι περισσότερη από 200 kWh ενώ για το Miami (25.8ο) προσεγγίζει τα 550kWh (με την αύξηση της ροής του ρευστού στο σωλήνα). Σε γενικές γραμμές, ανέφεραν ότι αυτή η διαμόρφωση του οδοστρώματος που αναφέρθηκε παραπάνω μπορεί να είναι εφικτή μόνο για περιοχές με σχετικά υψηλή ηλιακή ακτινοβολία. Για παράδειγμα, τοποθεσίες στην Σουηδία όπως Luleå, Lund και στην Στοκχόλμη με γεωγραφικά πλάτη από 55,7ο - 65,5ο η ετήσια ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι περισσότερη από 150 kWh / m² το οποίο αποκαλύπτει ότι τα ποσά αυτά της ηλιακής ενέργειας δεν μπορούν να συλλεχθούν επιτυχώς. Αλλά σε γενικές γραμμές, υπάρχει έλλειψη στην έρευνα σχετικά με την αξιολόγηση της εγκατάστασης των σωλήνων σε μικρότερο βάθος και για την εφαρμογή τους σε ψυχρότερες περιοχές. (Rönnelid et al, 1998)

3.4. Green Road Concept-3

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά ή τα πιεζοκεραμικά έχουν αποδειχθεί ικανά να συλλέξουν κινητική ενέργεια με τη μορφή των δονήσεων ούτως ώστε να τροφοδοτήσουν την ασύρματη συνδεσιμότητα των φορητών συσκευών και των διάφορων περιφερειακών ηλεκτρονικών υπολογιστών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν, επίσης ως αισθητήρες για την παρακολούθηση της υγείας του οδοστρώματος και την επιδιόρθωση των ρωγμών.

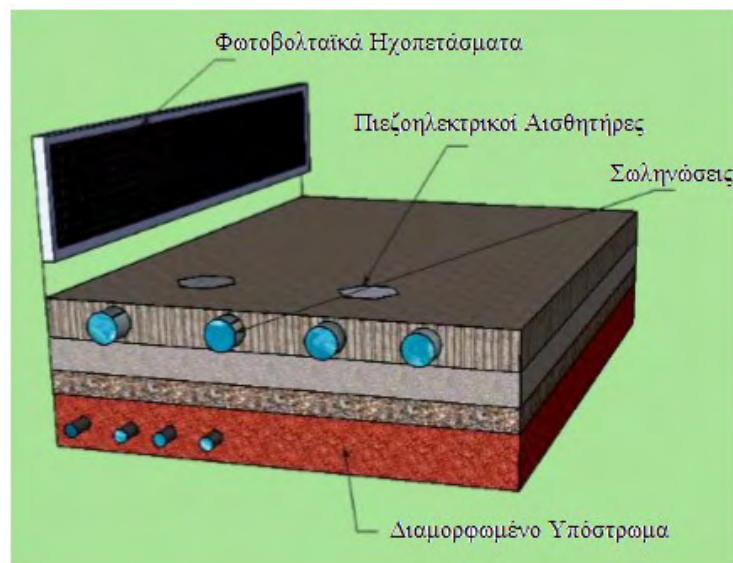
Τα πιεζοκεραμικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καταστολή των παθητικών κραδασμών όπου η δύναμη των δονήσεων τους δημιουργεί μια διαφορά τάσης (ηλεκτρική ενέργεια), η οποία μπορεί στη συνέχεια να διαχέεται μέσω ενός ωμικού κυκλώματος.

Μια άλλη τεχνική για να αφαιρέσει κάποιος τις δονήσεις είναι να εφαρμόσει ένα πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα σε ένα κάλυμμα φρεατίου. (*Wang et al, 2009*)

Αυτή η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το σύστημα της ασφάλτου που λειτουργεί ως ηλιακός συλλέκτης (ASC-asphalt solar collector) μετά από προσαρμογές υλικών (PCMS ή τροποποιημένα μείγματα ασφάλτου) σε περιοχές με πλήρη απασχόληση, όπως χώρους στάθμευσης ή σε δρόμους περιορισμένης κυκλοφορίας σε κοντινή απόσταση από εμπορικά κέντρα και κατοικημένες περιοχές. Αυτή η ρύθμιση θα μπορούσε να αποτελεί ιδανική λύση, επίσης, για αεροδιαδρόμους αφού τα φορτία κίνησης είναι βαρύτερα και πιο εντατικά και οι μεγάλης κλίμακας δονήσεις, με την κατάλληλη διαχείριση, είναι εφικτό να ηλεκτροδοτήσουν συσκευές όπως τους ασύρματους αισθητήρες κόμβων που εξυπηρετούν στην σήμανση της εναέριας κυκλοφορίας ή ακόμη και για τους σκοπούς της απόψυξης των αεροδιαδρόμων. Ενώ το σύστημα ASC μπορεί να χρησιμεύσει, όπως έχει ήδη αναφερθεί για υδραυλικούς σκοπούς, για χρήση θέρμανσης / ψύξης ή ως τροφοδοσία νερού για άλλες γειτονικές εφαρμογές, οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες μπορούν να παρακολουθούν σε πλήρη χρόνο τις συνθήκες του οδοστρώματος καθώς επηρεάζονται από τη συνδυασμένη καταπόνηση λόγω των θερμομηχανικών πιέσεων από την κλιμάκωση της θερμοκρασίας και των φορτίων των οχημάτων, καθώς επίσης και από την πίεσεις λόγω της τοποθέτησης των σωλήνων. (*Chen et al, 2011*)

Η ταυτόχρονη εφαρμογή της ASC τεχνικής (με τοποθέτηση των σωλήνων κοντά στην επιφάνεια ή σε μικρότερο βάθος) μαζί με την τοποθέτηση πιεζοηλεκτρικού συστήματος μπορεί να είναι επίσης ένας ιδανικός συνδυασμός για τη μείωση του θορύβου. Η παρουσία των φωτοβολταϊκών πάνελ μπορεί να καλύψει τις τυχόν ελλείψεις στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Έτσι, η τροφοδοσία των φαναριών και των φωτεινών σημάτων, των φωτεινών διαφημίσεων στο δρόμο, των φορητών συσκευών ή τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου αισθητήρων μπορεί να καλυφθεί χωρίς προβλήματα.



Εικόνα 10-Διατομή Green Road Concept-3

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (TEG) μπορούν να χρησιμοποιηθούν με παρόμοιο τρόπο με τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες, χωρίς να παραβλέπονται οι πιθανές τροποποιήσεις των υλικών που μπορούν να προσφέρουν τη βελτίωση στη διάρκεια της ζωής οδοστρώματος.

Παρόλα αυτά, ίσως να μην είναι εφικτή η ταυτόχρονη εφαρμογή ενός συστήματος ASC με ένα σύστημα TEG, καθώς το δεύτερο πρέπει να ενσωματωθεί βαθιά στη δομή του οδοστρώματος, σε αντίθεση με το πρώτο που η εφαρμογή του είναι πιο επιφανειακή.

4. Αξιολόγηση της δυνατότητας συγκομιδής ενέργειας από τις επιφάνειες των οδοστρωμάτων

4.1. Εισαγωγή

Τα οδοστρώματα δέχονται πολλές διακυμάνσεις στην θερμοκρασία τους, επειδή απορροφούν τεράστιες ποσότητες θερμότητας ιδιαίτερα υπό θερμές κλιματολογικές συνθήκες. Η χαμηλή θερμική τους αγωγιμότητα και η μεγάλη ικανότητα τους για θέρμανση τα κάνει ιδανικό μέσο για την συγκομιδή της χαμένης θερμικής ενέργειας καθώς, με την υποστήριξη των τεχνολογιών συγκομιδής ενέργειας, έχουν τη δυνατότητα να μετριάσουν κάποια ενεργειακά και περιβαλλοντικά προβλήματα.

Τα τρία προτεινόμενα συστήματα ή μοντέλα «Πράσινου Δρόμου» (GRCs-Green Road Concepts) που πρόκειται να αξιολογηθούν αποτελούνται από:

- GRC-1: Αγώγιμο οδόστρωμα ασφάλτου με φωτοβολταϊκά ηχοπετάσματα
- GRC-2: Άσφαλτος-Ηλιακός συλλέκτης (ASC) με ενσωματωμένους σωλήνες ρευστού και υλικά αλλαγής φάσης (PCM)
- GRC-3: Άσφαλτος-Ηλιακός Συλλέκτης με ενσωματωμένους σωλήνες και πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες

Εξχωριστά, η δυνατότητα της συγκομιδής θερμικής ενέργειας από μία συγκεκριμένη θέση εξαρτάται από έναν αριθμό παραγόντων που μπορούν να ομαδοποιηθούν ανάλογα με την τοποθεσία (ηλιακή ένταση, θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα του ανέμου, τη μέγιστη θερμοκρασία που επιτυγχάνεται για το ρευστό στους σωλήνες, κλπ), ανάλογα με τα υλικά (PCMS, απλούστερα υλικά τροποποιήσεις, υλικά για τα φωτοβολταϊκά κύτταρα και υλικά για τους σωλήνες) και ανάλογα με την μηχανική (φόρτος κυκλοφορίας, συχνότητα κλπ.).

Υπάρχουν αρκετές δομικές αναλύσεις και αρκετά θέματα του σχεδιασμού που πρέπει να αντιμετωπιστούν για να βεβαιωθούμε ότι ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να επιβιώσει τις διακυμάνσεις της καταπόνησης λόγω των φόρτων κυκλοφορίας και των μεταβαλλόμενων περιβαλλοντικών συνθηκών (Mallick et al., 2011).

Η αξιολόγηση των προτεινόμενων ενεργειακών συστημάτων συλλογής ενέργειας απαιτεί τη σύγκριση της λειτουργίας και της απόδοσης τους σε επτά ζωτικής σημασίας τμήματα τους.

- Η ήδη υπάρχουσα εμπειρία από προηγούμενες τεχνολογίες.
- Ροή της ενέργειας.
- Εν δυνάμει απόδοσης.
- Η απαιτούμενη τεχνολογία και ο αναγκαίος χώρος σε σχέση με τα κανονικά οδοστρώματα.
- Το κόστος και η περίοδος αποπληρωμής (χρόνος για την επίτευξη θετικών ταμειακών ροών).
- Χρονοδιάγραμμα και δυνατότητα ανακύκλωσης.
- Φιλικότητα προς το περιβάλλον.

Για ορισμένες τεχνολογίες, όπως η φόρτιση με την μέθοδο της επαγωγής και οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες, οι πληροφορίες σχετικά με το χρονοδιάγραμμα, το κόστος τους ή την εν δυνάμει αποτελεσματικότητά τους είναι περιορισμένη επειδή δεν έχουν δοκιμαστεί σε κάποια πρακτική εφαρμογή στο δρόμο. Προσπαθώντας να βελτιστοποιήσει αυτήν την αδυναμία, το μέρος αξιολόγησης αναλύει ποια από τα μελλοντικά συστήματα συγκομιδής ενέργειας μπορούν να υλοποιηθούν και να αναπτυχθούν σε βραχυπρόθεσμης, μέσης και μακράς διάρκειας μοντέλα, σε σχέση με τους παραπάνω παράγοντες. Πριν από την έναρξη της αξιολόγησης, κανείς δεν μπορεί να αμφισβητήσει πλήρως την φιλικότητα των παραπάνω συστημάτων προς το περιβάλλον, καθώς έχουν σχεδιαστεί για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, των επιπέδων ρύπανσης και των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Παρ'όλα αυτά, θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι δεν θέτουν σε κίνδυνο τη βιωσιμότητα του οδοστρώματος, κάτι που μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στις συνθήκες οδήγησης. Η αξιολόγηση της περιβαλλοντικής τους συμπεριφοράς απαιτεί τη διερεύνηση των αποτελεσμάτων τους κατά τη διάρκεια της κατασκευής, την υλοποίηση, τη λειτουργία και την απομάκρυνση από το σημείο όταν τεθούν εκτός λειτουργίας. Αυτό σημαίνει, ότι η βιωσιμότητα τους, θα πρέπει να αναλυθεί από την άποψη του κύκλου ζωής τους, κάτι που δεν είναι ο πραγματικός σκοπός αυτής της εργασίας. Ως εκ τούτου, συνιστάται μια πιο λεπτομερή αξιολόγηση της φιλικότητας τους προς το περιβάλλον από την άποψη του κύκλου ζωής. (*Mallick et al, 2009*)

4.2. Άμεση εφαρμογή: PVSB & επαγωγική φόρτιση

Τα φωτοβολταϊκά ηχοπετάσματα (Photo-Voltaic Sound Barriers-PVSB) αναπτύσσονται κατά μήκος των δρόμων ή μιας γενική λωρίδας γης και ο ρόλος τους είναι ευέλικτος καθώς παράγουν ηλεκτρική ενέργεια (διασυνδεδεμένο σε ένα ενιαίο δίκτυο) και ταυτόχρονα προσφέρουν άμβλυνση του κυκλοφοριακού θορύβου. Μέχρι τώρα, οι εγκαταστάσεις των PVSB χρησιμοποιούν πολυ-κρυσταλλικό και άμορφο πυρίτιο αλλά τα πολυενωτικά ηλιακά κελιά-κύτταρα (multijunction solar cells) - όντας σήμερα η πιο πολλά υποσχόμενη τεχνολογία φωτοβολταϊκών με αποδοτικότητα κοντά στο 40% - μπορούν να ενισχύσουν την αποτελεσματικότητα του συστήματος, ενώ παράλληλα μειώνουν το κόστος.

Η τεχνολογία της επαγωγικής θέρμανσης έχει σχεδιαστεί για να ενεργοποιήσει την ικανότητα αυτο-ίασης των οδοστρωμάτων με την αύξηση της θερμοκρασίας τους, ούτως ώστε να αποτραπεί σε ένα τελικό στάδιο, το ξέφτισμα και η αυλάκωση. Αυτό μπορεί να γίνει με την ενσωμάτωση συγκεκριμένων αναλογιών μαλλιού χάλυβα ή ίνες χαλκού μέσα στο μείγμα της ασφάλτου. Οι αναλογίες αυτές καθορίζονται από την έκταση του συστήματος και του φόρτου κυκλοφορίας.

Αυτό που κάνει αυτό το μοντέλο ενεργειακής συγκομιδής ιδανικό για άμεση εγκατάσταση είναι ότι χρησιμοποιεί τα υπάρχοντα ηχοπετάσματα για την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών κυττάρων και το αγωγίμο στρώμα ασφάλτου μπορεί να εφαρμοστεί σε υπάρχον δρόμο με τις κατάλληλες τροποποιήσεις της επιφάνειας. Επί πλέον, η ροή της ενέργειας έχει «συγκεκριμένα-καθαρά όρια», το οποίο διευκολύνει αφενός, τη θεωρητική ανάλυση και, αφετέρου, τη δομική και μηχανική σχεδίαση του συστήματος. Η φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια (συνεχές ρεύμα), μπορεί να παρέχεται απευθείας στο αγωγίμο ασφαλοτάπητα αναιρώντας την ανάγκη για αναστροφή σε εναλλασσόμενο. (Heymfield, 2011)

Η «Απομόνωση» της διάδοσης της ηλεκτρικής ενέργειας προς το οδόστρωμα από το δίκτυο σημαίνει ότι δεν απαιτείται επέκταση της ενέργειας και της γραμμής του δικτύου καθώς το ηλεκτρικό ρεύμα από το φωτοβολταϊκό σύστημα θα παρέχεται άμεσα για τη διαδικασία της επαγωγικής θέρμανσης

Αλλά σε αυτή την περίπτωση η ανάγκη των ρυθμιστών και των μπαταριών είναι επικείμενη, καθώς παρέχουν ενέργεια στο οδόστρωμα και αποθηκεύουν την περίσσεια ενέργεια για την περίπτωση των περιόδων που το φως του ήλιου δεν είναι διαθέσιμο. (Kirkgaard, T., 2006)

Αντίθετα, το κόστος των ηλεκτρικών μπαταριών δεν είναι αμελητέο και επειδή η διαδικασία της επαγωγικής θέρμανσης δεν πρόκειται να χρησιμοποιείται συνεχώς, ίσως η ιδέα της σύνδεσης του συστήματος με το ηλεκτρικό δίκτυο μπορεί να είναι πιο αποτελεσματική από τη χρήση μπαταριών. Η αποδοτικότητα του συστήματος προσδιορίζεται σε μεγάλο βαθμό, από τις φωτοβολταϊκές κυψέλες, τις μπαταρίες και τους μετατροπείς.

Επιπλέον, η επιλογή του κατάλληλου συστήματος στήριξης με τη σωστή γωνία κλίσης είναι παράγοντες που μπορούν να ενισχύσουν την αποτελεσματικότητα του συστήματος. (Dehdezi, 2011)

Όσο για τα αγώγιμα πρόσθετα στο μίγμα της ασφάλτου, η ομαδοποίηση τους θα πρέπει να αποφεύγεται επειδή μπορεί να επιδεινωθεί η αντοχή του οδοστρώματος διότι η διάβρωση του μαλλιού χάλυβα μπορεί να οδηγήσει στο ξέφτισμα και στην αυλάκωση του οδοστρώματος. Επίσης, απαιτείται περισσότερη έρευνα για να εξεταστεί το κατά πόσο αυτή η συμπερίληψη των ινών προκαλεί ή όχι πρόωρη βλάβη λόγω της αυξημένης τοπικής καταπόνησης που δέχεται το οδόστρωμα.

Το συνολικό κόστος αυτού του συστήματος καθορίζεται κυρίως από την υποδομή των φωτοβολταϊκών ηχοπετασμάτων, τα υλικά των φωτοβολταϊκών κελιών-κυττάρων, τον εξοπλισμό για την ηλεκτρική υποστήριξη του συστήματος (μπαταρίες, μετατροπείς, ρυθμιστές, καλώδια κλπ.), και τέλος την υποδομή για την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων πάνω στα ηχοπετάσματα. Όσο για την υποδομή της επαγωγικής θέρμανσης, το ποσοστό των ινών χάλυβα / χαλκού στο μείγμα της ασφάλτου έχει σταθερά υψηλό κόστος. Παρ' όλα αυτά, το κόστος μειώνεται όταν το αγώγιμο στρώμα ασφάλτου πρόκειται να εγκατασταθεί αρχικά, κατά την κατασκευή οδοστρώματος και όχι να προστεθεί στη πορεία.

Θα μπορούσε να επιφέρει μόνο ένα οριακό επιπρόσθετο κόστος καθώς το κόστος της κατασκευής του οδοστρώματος, πιθανότατα θα χρηματοδοτούνταν ήδη από ξεχωριστό προϋπολογισμό (δηλαδή έναν προϋπολογισμό για τη μεταφορά και όχι για σκοπούς συλλογής ενέργειας).

Η περίοδος αποπληρωμής και μέχρι την κερδοφορία αυτού του μοντέλου συλλογής ενέργειας εξαρτάται σε ένα μεγάλο βαθμό από τα κέρδη που προέρχονται από την κάλυψη των τοπικών ηλεκτρικών αναγκών μετά τη σύνδεση του φωτοβολταϊκού συστήματος στο ηλεκτρικό δίκτυο της περιοχής. Για το λόγο αυτό, η τοποθεσία του συστήματος παίζει τον πιο σημαντικό ρόλο. (Dehdezi, 2011)

Επιπλέον, επεκτείνοντας τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος, μετριάζοντας τις φθορές είναι ένας παράγοντας που θα πρέπει να προστεθεί στο γενικό όρο της «περιόδου αποπληρωμής». Η διάρκεια ζωής της των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι μεταξύ 20 και 30 έτη, ενώ για τους μετατροπείς δεν είναι περισσότερο από 20 χρόνια. Η αντικατάσταση των ηχοπετασμάτων εξαρτάται κατά βάση από το υλικό τους (σκυρόδεμα, χάλυβα, ξύλο ή βινύλιο) και καθορίζεται μεταξύ 10 και 20 έτη. Έτσι η αντικατάστασή τους πριν από το τέλος της ζωής του φωτοβολταϊκού συστήματος, δεν είναι καθόλου απίθανο.

4.3. Εφαρμογή ASC & πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων.

Το μοντέλο της ασφάλτου που λειτουργεί ως ηλιακός συλλέκτης (ASC) με ένα ενσωματωμένο δίκτυο σωλήνων υγρού χρησιμοποιείται για σκοπούς θέρμανσης / ψύξης περιοχή καθώς και για απόψυξη. Μέχρι τώρα πολλά έργα που χρησιμοποιούν τις αρχές του παραπάνω συστήματος έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί σε όλη την Ευρώπη όπως το έργο SERSO (Ελβετία, 1989) το TRL Report (UK, 2007) και το RES (Ολλανδία, 2007) τα οποία σχετίζονται με αεροδιαδρόμους, γέφυρες ή δρόμους περιορισμένης κυκλοφορίας (Siebert et al., 2010). Η καρδιά του συστήματος είναι η διάταξη των σωλήνων που εφαρμόζονται στο οδόστρωμα.

Η σημαντικότητά του δικαιολογεί κατά κάποιο τρόπο τα ειδικά υλικά που απαιτούνται για τις διάφορες τροποποιήσεις έτσι ώστε, να εξασφαλιστεί την διασφαλιστεί η διάρκεια της ζωής των σωλήνων, όσον αφορά τις θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις που δέχονται. Ο συνδυασμός του παραπάνω συστήματος σωλήνων μαζί με τους αισθητήρες πιεζοηλεκτρισμού, μπορεί να είναι μια ιδανική τεχνική που μπορεί να εφαρμόζεται σε πλήρους απασχόλησης κατεχόμενες περιοχές, όπως χώρους στάθμευσης ή λωρίδες κυκλοφορίας λεωφορείων, καθώς και σε αεροδιαδρόμους όπου η κίνηση είναι πιο έντονη και βαριά.

Μπορούν να χρησιμεύσουν για σκοπούς θέρμανσης / ψύξης, απόψυξης επιφανειών, την παρακολούθηση των συνθηκών του οδοστρώματος και με την κατάλληλη χρήση των ηλεκτρικών πυκνωτών, μπορούν να αποθηκεύουν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια για πιθανή μελλοντική χρήση της. Το μελλοντικό συνδυαστικό αυτό σύστημα έχει δύο τμήματα συγκομιδής ενέργειας. Πρώτον, την ασφάλτο που λειτουργεί ως ηλιακός συλλέκτης και δεύτερον, τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες.

Τα συνδυασμένα συστήματα, όσον αφορά τη μεταφορά της ενέργειας, δεν αλληλοεπιδρούν. Η μόνη τους επαφή είναι η επιφάνεια του οδοστρώματος, όπου οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες πρόκειται να εφαρμοστούν. Για το λόγο αυτό, τα δομικά υλικά για τα μίγματα της ασφάλτου θα πρέπει να διασφαλίζουν όχι μόνο την ασφαλή λειτουργία της διάταξης των σωλήνων, αλλά και τη διάρκεια ζωής των αισθητήρων. Από την άλλη πλευρά, η ενσωμάτωση των αισθητήρων είτε κοντά στην επιφάνεια είτε στα όρια μεταξύ του 1^{ου} και του 2^{ου} στρώματος πρέπει να εξασφαλίσουν τη θερμική και την μηχανική απόδοση της ασφάλτου ως ηλιακού συλλέκτη ειδικά όταν οι μετατοπίσεις της επιφάνειας τείνουν να επηρεάζουν αρνητικά τη λειτουργία των σωλήνων.

Η αξιολόγηση της εφαρμογής και της απόδοσης των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων χρειάζεται για τη βελτιστοποίηση του αποτελέσματος σύνδεσης τους με την επιφάνεια του οδοστρώματος. Αυτό θα εξασφαλίσει, όχι μόνο τη μηχανική σταθερότητα τους, αλλά και την διάρκεια ζωής των σωλήνων και της λειτουργίας τους. Η αποτελεσματικότητά τους καθορίζεται από τον ηλεκτρομαγνητικό συντελεστή ζεύξης “k” και το συντελεστή μετάδοσης ενέργειας “λ”.

Δυστυχώς, αυτοί οι παράγοντες δεν έχουν ακόμα υπολογιστεί πρακτικά επί τόπου σε κάποιο πειραματικό οδόστρωμα και για το λόγο αυτό η βιβλιογραφική ανασκόπηση αξιολογεί την απόδοση συγκομιδής ενέργειας των PZT χρησιμοποιώντας την αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια στο ανοικτό κύκλωμα (που σχετίζεται με την αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια και την απόδοση παραγωγής) (Zhao, (2010).

Ταυτόχρονα, η ελαχιστοποίηση της μετατόπισης της επιφάνειας μετά την ενσωμάτωση των αισθητήρων στην επιφάνεια του οδοστρώματος είναι απαραίτητη για να μην επιδεινώνεται η απόδοση του οδοστρώματος και η διάρκεια ζωής των σωληνώσεων, καθώς επίσης και να μην αυξάνετε η κατανάλωση πετρελαίου των οχημάτων λόγω της κακής κατάστασης της επιφάνειας του οδοστρώματος.

Σε αυτό το πνεύμα, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στην επαφή μεταξύ των ελαστικών των οχημάτων και του οδοστρώματος, που περιλαμβάνει τους αισθητήρες και τους σωλήνες, στα χαρακτηριστικά του σχήματος των ασφαλτικών στρώσεων και στο φορτίο, στο μέγεθος και στο υλικό των αισθητήρων (διάμετρος του PZT, υλικό και η διάμετρος της βάσης κοιλότητας κλπ). Η επιλογή των σωστών παραμέτρων είναι ένας παράγοντας που μπορεί να σιγουρέψει ότι η διαφορά της μετατόπισης της επιφάνεια με τον αισθητήρα είναι μικρότερη από ότι χωρίς τον αισθητήρα. (Zhao, 2010)

Μέχρι τώρα, η μόνη μέθοδος που έχει χρησιμοποιηθεί για την επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων και την μελέτη των επιπτώσεων τους στην δυνατότητα ηλεκτρικής παραγωγής, είναι αυτή των Πεπερασμένων Στοιχείων. Επιπλέον, ελαχιστοποιώντας το μήκος των συρμάτων, ώστε να αποφεύγεται η παρεμβολή και ο θόρυβος που κατά πάσα πιθανότητα θα καταλήξουν σε απώλειες της παραγόμενης ενέργειας είναι ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη (Edmison, (2002). “Using Piezoelectric Materials for Wearable Electronic Textiles”). Από την άλλη πλευρά, η ενσωμάτωση ενός πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα σε ένα φρεάτιο (που διαμορφώθηκε ως ένα σύστημα ελατήριου-αποσβεστήρα) απαιτεί για τη βελτιστοποίηση της παραγόμενης τάσης, τη μελέτη των παραμέτρων, όπως η μετατόπιση του αισθητήρα (μάζα), η ακαμψία του προβόλου, τον ηλεκτρικά επαγόμενο αποσβεστήρα, το ωμικό φορτίο κλπ. (Ye et al, 2009)

Το κόστος για το σχεδιασμό και την ολοκλήρωση ενός τέτοιου συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εγκατάστασή του (η εργασία και ο μηχανικός εξοπλισμός), το επιλεγμένο υλικό για τους σωλήνες και τις τροποποιήσεις της ασφάλτου, την πολλαπλές πιθανές χρήσεις της παραγόμενης ενέργειας, τους ηλεκτρονικούς πυκνωτές για την αποθήκευση της ενέργειας από τους αισθητήρες και τη συντήρηση του συστήματος (Mallik et al., 2009). Η βιβλιογραφική ανασκόπηση έδειξε ότι η διάρκεια ζωής των σωλήνων δεν είναι περισσότερη από 30 χρόνια και καθορίζεται από το βάθος στο οποίο εφαρμόζονται. Μέχρι στιγμής οι πλαστικοί και μεταλλικοί σωλήνες ή οι σωλήνες πηνίου είναι πολύ φθηνότεροι από τους χάλκινους, αλλά έχουν χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα. Σε γενικές γραμμές, η επιλογή φθηνού αλλά καλής απόδοσης υλικού σωλήνα, η οικονομικά αποδοτική εγκατάσταση των σωληνώσεων (θερμαντική ικανότητα, διάταξη σωληνώσεων, σύστημα ελέγχου) και τα κατάλληλα τροποποιημένα μίγματα ασφάλτου μπορούν να μειώσουν σημαντικά το αρχικό κόστος. (Chen et al, 2011)

Επιπλέον, η κατασκευή των πιεζοηλεκτρικών υλικών για τους μετατροπείς, προστίθεται στο συνολικό κόστος μαζί με τις τακτικές και συνεχείς επιθεωρήσεις του συστήματος, έτσι ώστε να μετριαστούν οι συνέπειες του μεγάλου φόρτου κυκλοφορίας. Παρόλα αυτά, σύμφωνα με την βιβλιογραφική ανασκόπηση, σε σύγκριση με άλλους τύπους αισθητήρων κίνησης, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι πιο λειτουργικά και αποδοτικά, όχι μόνο επειδή μπορούν εύκολα να αισθανθούν τις κινήσεις, αλλά επειδή χρειάζονται λιγότερη ενέργεια για την λειτουργία τους και είναι πιο εύκολο να διασυνδεθούν με πρόσθετες συσκευές. Η περίοδος αποπληρωμής ορίζεται από την ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας σε σχέση με το γεωγραφικό πλάτος, την διάρκεια ζωής του δικτύου σωληνώσεων και του δικτύου διαχείρισης της ενέργειας που απαιτείται ως συμπληρωματικός εξοπλισμός για την σωστή λειτουργία των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων. (*Edmison, 2002*)

Οι διαστάσεις του συστήματος συλλογής ενέργειας καθορίζονται ανάλογα με την χρήση για την οποία έχει προγραμματιστεί η εφαρμογή της ασφάλτου ως ηλιακού-συλλέκτη, υδραυλική ή θέρμανσης / ψύξης.

Επιπλέον, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τους μορφομετατροπείς μεταφέρεται και αποθηκεύεται, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί αργότερα για την κάλυψη τοπικών αναγκών ενέργειας ή δρομολογείται στο δίκτυο. Σε γενικές γραμμές, είναι αρκετά δύσκολο να τυποποιηθούν οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες επειδή είναι ακόμα υπό έρευνα σχετικά με τη χρήση τους σε εφαρμογές οδικού δικτύου.

Τέλος, το χρονοδιάγραμμα και η ανακύκλωση του συστήματος έχει να κάνει με την έκθεσή του σε φορτία κυκλοφορίας, με τις επιθεωρήσεις συντήρησης, τις πιθανές μετατοπίσεις των αισθητήρων στην επιφάνεια του οδοστρώματος και την αλληλεπίδρασή τους με την διάταξη των σωλήνων. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί η ανάγκη για εκτεταμένη έρευνα σχετικά με τις δομικές επιπτώσεις των αγωγίμων σωλήνων στην απόδοση του οδοστρώματος που, σε μακροπρόθεσμη βάση, επηρεάζουν την δυνατότητα ανακύκλωσης και τη διάρκεια ζωής του.

Η βιβλιογραφία σχετικά με την ASC (Asphalt Solar Collector) έχει αποκαλύψει ότι η παρουσία της διάταξης των σωλήνων στην ασφάλτο ενισχύει την κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων με τις μέγιστες τιμές να εμφανίζονται γύρω από τους σωλήνες. (*Bijsterveld et al, 2012*)

Η Ooms Avenhorn Holding είχε αναπτύξει τα ήδη αναφερθέντα Ενεργειακά Οδικά Συστήματα (RES-Road Energy System) που χρησιμοποιούν ένα ειδικά σχεδιασμένο τρισδιάστατο δίκτυο πολυπροπυλενίου με σωλήνες πολυαιθυλενίου. Μετά από εργαστηριακές δοκιμές και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων με τη χρήση της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων, οι αναλύσεις έδειξαν ότι όταν τα πειραματικά δείγματα διογκώνονται τότε το μοντέλο των Πεπερασμένων Στοιχείων παραμένει σε ευθεία θέση, αποτέλεσμα που υποδηλώνει την σταθερότητα του συστήματος εξετάζοντάς του από την οπτική της καταπόνησης και παραμόρφωσης.

4.4. Η μακροχρόνια εφαρμογή: ASC & PCMS

Έχει ήδη αναλυθεί η χρησιμότητα της ASC και πώς αυτή η εφαρμογή μπορεί να εφαρμοστεί με PCM στο ίδιο σύστημα συγκομιδής ενέργειας. Στη τελευταία παράγραφο αναλύεται το πώς κάποια σημαντικά μηχανικά χαρακτηριστικά των ASC επηρεάζουν αρνητικά ή θετικά την αποδοτικότητα του συστήματος συγκομιδής κατά τη διάρκεια λειτουργίας του αλλά και στην ανακύκλωσή του. Για αυτό και δεν προσθέτει κάτι περισσότερο για να επαναλάβει ξανά τις ίδιες πληροφορίες.

Η ροή της ενέργειας μεταξύ των σωληνώσεων και των PCM, και οι επιβαλλόμενες μηχανικές καταπονήσεις είναι δύο παράγοντες που καθορίζουν σημαντικά την αποδοτικότητα του συστήματος συλλογής ενέργειας. Τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής των σωλήνων πλησιέστερα προς την επιφάνεια (αυξάνοντας την θερμοκρασία του ρευστού του σωλήνα) μπορεί να αντισταθμίζεται από την πιθανότητα υποχώρησής τους καθώς οι σωλήνες δέχονται τεράστιες καταπονήσεις από τα φορτία των οχημάτων.

Το Σύστημα Οδικής Ενέργειας (RES) χρησιμοποιεί σχετικά μαλακό μίγμα ασφάλτου και ένα αλληλένδετο δίκτυο σωλήνων που δίνουν στην ασφαλτο μεγαλύτερη αντίσταση κατά της ανάπτυξης ρωγμών (Siebert et al., 2010). Η ταυτόχρονη εφαρμογή, των PCMS στα κάτω στρώματα θα έπρεπε να εξασθενούν τις μηχανικές καταπονήσεις κάτι που φαίνεται αρκετά δύσκολο αν αναλογιστούμε τις αλλαγές στην φάση των υλικών.

Για αυτό το λόγο τα PCM θα πρέπει να επιλέγονται σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες και πιέσεις για την τήξη τους και την στερεοποίηση τους τέτοια που να αντιδρά θετικά με τη λειτουργία των σωλήνων.

Με άλλα λόγια, για να λειτουργήσει αυτό το σύστημα σωστά απαιτείται ενίσχυση της θερμικής απόδοσης του οδοστρώματος και της ικανότητάς του για αυτο-ίαση, εξασθένηση των μηχανικών καταπονήσεων που επιβάλλονται στους σωλήνες και διευκόλυνση της αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας και της μελλοντικής απελευθέρωσής της σχετικά με τους σκοπούς του συστήματος.

Το κόστος για το σχεδιασμό και την ολοκλήρωση ενός τέτοιου συστήματος ορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την ASC, που έχει ήδη αναλυθεί παραπάνω, ενώ επιλέγοντας να τροποποιηθεί το μίγμα ασφάλτου με PCM, που τα υλικά του είναι σχετικά πιο ακριβά από τα απλούστερα υλικά τροποποίησης. Με αυτόν τον τρόπο, αυξάνεται το συνολικό κόστος, λόγω της κατασκευής τους.

Όσον αφορά τη περίοδο αποπληρωμής (χρόνος για την επίτευξη θετικών ταμειακών ροών), αυτό σχετίζεται άμεσα με την ποσότητα της θερμικής ενέργειας που είναι διαθέσιμη σε αντιστοιχία με τη τοποθεσία, τη λειτουργική απόδοση της διαμόρφωσης των σωληνώσεων και τον όγκο των δεξαμενών αποθήκευσης. Σε γενικές γραμμές, όσο υψηλότερο είναι το γεωγραφικό πλάτος, τόσο υψηλότερη είναι η περίοδος απόσβεσης. Το χρονοδιάγραμμα των συστημάτων σχετικά με την ASC έχει ήδη αναλυθεί. Σχετικά με τα PCM, τα επιχειρήματά μας βασίζονται στη θεωρία λόγω των περιορισμένων πληροφοριών σχετικά με την αλληλεπίδραση μεταξύ της διάταξη των σωλήνων και των PCMS. (*Mallik, 2011a*)

Οι διαστάσεις του συνδυασμένου συστήματος καθορίζονται και εδώ από τους σκοπούς για τους οποίους έχει σχεδιαστεί να εξυπηρετήσει, υδραυλική και θέρμανσης / ψύξης. Η τυποποίηση των διαστάσεων σχετίζεται με την περιοχή που πρέπει να θερμαίνεται / ψύχεται, τη ικανότητα άντλησης, το ρυθμός ροής που απαιτείται στους σωλήνες καθώς και τις δεξαμενές αποθήκευσης. Και όλοι αυτοί οι παράγοντες είναι απαραίτητο να εξεταστούν ταυτόχρονα με τα επιλεγμένα PCM ή τα άλλα πιθανά υλικά τροποποίησης του μίγματος. Για παράδειγμα, τα Σύστημα Οδικής Ενέργειας (RES) αναφέρει ότι ένα κτίριο γραφείων με ένα χώρο 10.000 μ² απαιτεί μία έκταση ασφάλτου που λειτουργεί ως συλλέκτης ίση με 4,000 m², αποθήκευση ενέργειας με χωρητικότητα άντλησης των 110m³/h και χωρητικότητα θερμικής αντλίας του 340kW με βάση τις Ολλανδικές κλιματικές συνθήκες (*Siebert et al., 2010*).

Έτσι, οι ερωτήσεις που θα απαντηθούν εδώ σχετίζονται με την αποτελεσματικότητα και το κόστος των PCM σε σύγκριση με τα απλούστερα μίγματα αμμοχάλικου της ασφάλτου (ασβεστόλιθος, χαλαζίτη, κλπ) και τις επιβαλλόμενες συνέπειες στις σωληνώσεις, λόγω της μετάβασής τους από το στάδιο τήξης στο στάδιο της στερεοποίησής τους. Μέχρι τώρα, τα PCM που έχουν ερευνηθεί για την ενίσχυση της ικανότητας αυτό-ίασης των οδοστρωμάτων (που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί για κατασκευαστικές εφαρμογές) είναι κεριά παραφίνης με την κατάλληλη προσθήκη ουσιών σταθεροποίησης για την αποφυγή πιθανής διαρροής του PCM. Το μοντέλο αυτό είναι εφικτό μόνο για μακροπρόθεσμη εφαρμογή λόγω του όγκου του και της περιορισμένης πληροφόρησης που υπάρχει σχετικά με την αλληλεπίδραση των σωλήνων με τα μεταβατικά στάδια των PCM. (*Chen et al, 2011*)

Υπό πολύ χαμηλές θερμοκρασιακές συνθήκες - όπως αυτές στη Σουηδία - η βέλτιστη διαμόρφωση απαιτεί την ενσωμάτωση του συστήματος σωληνώσεων σε μικρότερο βάθος, ενώ ενσωματώνει στα άνω στρώματα υλικά με ικανότητα χαμηλής διαχύσεως (για PCMS: χαμηλό σημείο θερμοκρασίας στερεοποίησης, περίπου 2 C). Η ουσιαστική ποσότητα θερμότητας που απελευθερώνεται από ένα PCM κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης μπορεί, πράγματι, να καθυστερήσει την μείωση της θερμοκρασίας της επιφάνειας προσφέροντας με αυτόν τον τρόπο ένα εναλλακτικό τρόπο απόψυξης. Οι σωλήνες στο κάτω μέρος θα έχουν δευτερεύοντα ρόλο, καθώς θα εγγυώνται την αποθήκευση της θερμικής ενέργειας με σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του οδοστρώματος σε υψηλότερες θερμοκρασίες από εκείνες του γύρω περιβάλλοντος. (*Cocu et al, 2010*)

5. Επίλογος-Συμπεράσματα.

Οι τεχνολογίες συγκομιδής ενέργειας μπορούν να εγγυηθούν την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού, καθώς μετριάζουν τα προβλήματα της απαιτούμενης ενεργειακής κατανάλωσης. Κατά κύριο λόγο ο όρος χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή αυτόνομων συσκευών συγκομιδής. Τώρα όμως υπάρχει μια τάση προς την αξιοποίηση όλης αυτής της ενέργειας από μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις, όπως δρόμοι ή λιθόστρωτες επιφάνειες που δέχονται κάθε μέρα τεράστιες ποσότητες ηλιακής ενέργειας και δονήσεων.

Τα τρία βιώσιμα συστήματα οδικών αξόνων που αναπτύχθηκαν σε αυτή τη διατριβή σχεδιάστηκαν για να συλλέξουν την ενέργεια που κερδίζεται και χάνεται από τις οδικές υποδομές. Οι μελλοντικές χρήσεις είναι η ηλεκτρική παραγωγή, η θέρμανση ή ψύξη σε κοντινές εγκαταστάσεις, η απόψυξη της επιφάνειας του οδοστρώματος ή η ενεργοποίηση ασύρματων δικτύων και παρακολούθηση των συνθηκών του οδοστρώματος, μαζί με την ενίσχυση της διαδικασίας αυτο-ίασής τους. Η μελέτη των υποψήφιων εφαρμογών απαιτεί την αξιολόγηση παραγόντων όπως η απόδοση τους, η απαραίτητη τεχνολογία, η περίοδος αποπληρωμής κ.α. Αν και ο κυρίως σκοπός από την αρχή ήταν να αξιολογηθούν τα Πράσινα Οδικά Μοντέλα ένα-ένα με κοινά κριτήρια, δυστυχώς για πολλές από τις προτεινόμενες τεχνολογίες συγκομιδής, η βιβλιογραφία είναι περιορισμένη σχετικά με την εμπειρία από την εφαρμογή τους στη πράξη. Για το λόγο αυτό, το μέρος της αξιολόγησης διεξήχθη βαθμολογώντας αυτές τις τεχνολογίες με βάση την άμεση ή μακροπρόθεσμη εφαρμογή τους.

Η GRC-3 (το 3^ο ενεργειακό οδικό μοντέλο) είναι το πιο πολύπλοκο καθώς απαιτεί εκτεταμένη έρευνα σχετικά με την αρνητική συμπεριφορά της στατικής δομής μεταξύ της διάταξης των σωλήνων και τα στάδια τήξης και πήξης των PCMS'.

Η GRC-1 είναι το πιο πολλά υποσχόμενο σύστημα για την άμεση εφαρμογή όσον αφορά την υπάρχουσα διαθεσιμότητα των ηχοπετασμάτων ή των υφιστάμενων PVSB (φωτοβολταϊκών ηχοπετασμάτων). Αλλά και πάλι, εδώ οι κίνδυνοι για τα προβλήματα διάβρωσης ως αποτέλεσμα της ομαδοποίησης μεταξύ των ινών χάλυβα κάνουν αυτο το σύστημα συλλογής αμφισβητήσιμο.

Τέλος, αλλά όχι λιγότερο σημαντικό το GRC-2 μπορεί να θεωρηθεί ως το «ηπιότερο» και το πιο έξυπνο σύστημα, καθώς οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες παρόλο που ξεχωρίζουν για την χαμηλή ενεργειακή τους απόδοση, με το κατάλληλο δίκτυο διαχείρισης της τροφοδοσίας μπορούν να συμπληρώσουν με αποτελεσματικό τρόπο τη όλη διαδικασία της ενεργειακής συγκομιδής.

Κανείς δεν μπορεί να αρνηθεί ότι ο συνδυασμός των τεχνολογιών συγκομιδής ενέργειας και η εφαρμογή τους σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις, όπως οι δρόμοι και οι λιθόστρωτες επιφάνειες, δεν είναι ενδιαφέρον και πολλά υποσχόμενος. Εάν τα μελλοντικά μοντέλα οδοστρώματος μπορούν να σχεδιαστούν για τη συγκομιδή ενέργειας με οικονομικό τρόπο, τότε αυτό θα έχει μακροπρόθεσμα οφέλη για την ανάπτυξη βιώσιμων οδοστρωμάτων εμποδίζοντας την φθορά τους, το φαινόμενο της Αστικής Θερμνησίδας ενώ ταυτόχρονα θα μετριάζονται τα προβλήματα της ενεργειακής κατανάλωσης και γιατί όχι, μακροπρόθεσμα, να εξασφαλίζονται ασφαλείς συνθήκες οδήγησης.

6. Βιβλιογραφία.

1. Batra, A.K., Bhattacharjee, S. and Chilvery, A.K., 2011. “Energy Harvesting Roads via Pyroelectric Effect: A Possible Approach”, *Journal of Energy Harvesting and Storage: Materials, Devices, and Applications II*, SPIE
2. Beeby, S., P., Tudor, M., J. and White, N., M., 2006. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Journal of Measurement Science & Technology*, 17: 175–195
3. Bijsterveld, W.,T. and Bondt, A.,H., 2012. “Structural Aspects of Asphalt Pavement Heating and Cooling Systems”, *Third International symposium on 3D Fine Element Modeling, Design and Research*, April 2002, Amsterdam, The Netherlands
4. Bo, G., Biao, M. and Fang, Q. “Application of Asphalt Pavement with Phase Change Materials to Mitigate Urban Heat Island Effect”, *Proceedings of International Symposium on Water Resource and Environmental Protection (ISWREP)*, May 2011, Xian, Shaanxi China
5. Chen, M., Hong, J., Wu, S., Wan, L. and Xu, G., 2011. “Optimization of Phase Change Materials Used in Asphalt Pavement to Prevent Rutting”, *Journal of Advanced Materials Research*, Vols. 219-220: 1375-1378
6. Cocu, X., Nicaise, D. and Rachidi, S., n.d. “The use of phase change materials to delay pavement freezing”, *Belgian Road Research Centre (BRRC)*. [Online] Available at: <http://www.brcc.be/pdf/tra/2010_Cocu.pdf> [Accessed February 2017]
7. Dawson R.A., Dehdezi, P.K., Hall, R.M., Wang, J. and Isola, R., 2011. “Thermo-Physical Optimization of Asphalt Paving Materials”, *Transportation Research Board (TRB), Annual Meeting*, Washington, USA, January 2012
8. Dehdezi, P.K., Hall, R.M. & Dawson, A., 2011. “Thermo-Physical Optimisation of Specialized Concrete Pavement Materials for Surface Heat Energy Collection and Shallow Heat Storage Applications”, *TRM*
9. Edmison, J., Jones, M., Nakad, Z. & Martin, T., (2002). “Using Piezoelectric Materials for Wearable Electronic Textiles”
10. Gao, Q., Huang, Y., Li, M., Liu, Y. and Yan, Y., Y., 2010. “Experimental study of slab solar collection on the hydronic system of road”, *Journal of Solar Energy*, 84: 2096–2102

11. Goh, S., W., Akin, M., You, Z. and Shi, X., 2011. "Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro- or nano-modified asphalt mixture", *Journal of Construction and Building Materials*, 25: 195–200
12. Golden, J., S., Carlson, Kaloush, E., K, and Phelan, P., 2007. "A comparative study of the thermal and radiative impacts of photovoltaic canopies on pavement surface temperatures", *Journal of Solar energy*, 81: 872–883
13. Grasselli, U., Schirone, L. and Bellucci, P. "Infrastructures Integration of Photovoltaic Power", *Proceedings of the International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP '07)*, May 2007, Capri, Italy
14. Hanlon, M., 2008. "Piezoelectric road harvests traffic energy to generate electricity". [Online] Available at: <<http://www.gizmag.com/piezoelectric-road-harvests-traffic-energy-to-generate-electricity/10568/>> [Accessed December 2016]
15. Hasebel, M., Kamikawa, Y. & Meiarashi, S. "Thermoelectric Generators using Solar Thermal Energy in Heated Road Pavement", *25th International Conference on Thermoelectrics (ICT)*, Vienna, August 2006
16. Heymsfield, E., Selvam, P., Kuss, M. and Osweiler, A., 2011. "Developing anti-icing airfield runways using solar energy and conductive concrete", *Presentation of the TRB Annual Meeting and publication in the Transportation Research Record*
17. Humphries Matthew, "London's solar bridge to produce 900,000 kWh of electricity", October, 2011 [online] Available at: <<http://www.geek.com/articles/geek-cetera/londons-solar-bridge-to-produce-900000-kwh-of-electricity-2011107/>> [Accessed December, 2016]
18. Kang-Won, W. and Correia, A., J., 2010. "A Pilot Study for Investigation of Novel Methods to Harvest Solar Energy from Asphalt Pavements". *Korea Institute of Construction Technology (KICT)*
19. Kay, M. 2011, *Netherlands Looks at Combining Solar Energy with Cycle Paths*, TLC [online] Available at: <<http://tlc.howstuffworks.com/family/netherlands-looks-at-combining-solarenergy-with-cycle-paths.htm>> [Accessed, December, 2016]
20. Kirkgaard, T., 2006. *Home Power Magazine*, "Low Cost PV Regulator", *Home Power*, [online] Available at: <http://homepower.com/view/?file=HP70_pg40_Kirkgaard> [Accessed 20 March 2017]

21. Liu, X., Rees, J. S. and Spitler, D., J., 2007. "Modeling snow melting on heated pavement surfaces. Part I: Model development", *Journal of Applied Thermal Engineering*, 27: 1115–1124
22. Liu, Q., Garcia, A., Schlangen, E. & Van de Ven, M., 2011. "Induction healing of asphalt mastic and porous asphalt concrete", *Journal of Construction and Building Materials*, 25: 3746–3752
23. Liu, Q., Schlangen, E., Ven, M., Bochove, G. & Montfort, J., 2012. "Construction Evaluation of the induction healing effect of porous asphalt concrete through four point bending fatigue test", *Construction and Building Materials*, 29: 403–409
24. Ma, B., Wang, S. & Li, J., 2006. "Study on Application of PCM in Asphalt Mixture", *Journal of Advanced Materials Research*, 168-170: 2625-2630
25. Mallick, R.B., Chen, B. L. and Bhowmick, C., 2009. "Harvesting energy from asphalt pavements and reducing the heat island effect", *International Journal of Sustainable Engineering*, 2:3, 214228
26. Mallick, R.B, Carelli, J., Albano, L., Bhowmick, S. and Veeraragavan, A, 2011a. "Evaluation of the potential of harvesting heat energy from asphalt pavements", *International Journal of Sustainable Engineering*, 4:02, 164-171
27. Mallick, R.B., Chen, B. L. and Bhowmick, C., 2011b. "Harvesting heat energy from asphalt pavements: development of and comparison between numerical models and experiment", *International Journal of Sustainable Engineering*, [DOI:10.1080/19397038.2011.574742]
28. Nordmann, T., Froelich, A., Goetzberger, A., Kleiss, G, et al., "The Potential of PV Noise Barrier Technology in Europe", *Proceedings at the 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, , Glasgow, United Kingdom, May 2000
29. Nordmann, T. and Clavadetscher, L., 2004. "PV on Noise Barriers", *Journal of Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 12: 485–495
30. Remmer, D. & Rocha, J. "Photovoltaic Noise Barrier – Canada", *Proceedings of Conference SESCI*, Burnaby, British Columbia, Canada, 2005
31. Rönnelid, M. & Karlsson, B., "The latitude dependent irradiation distribution in Europe and its implication for the design of stationary solar concentrators", *Swedish National Energy Administration and Vattenfall Utveckling AB*, 1998
32. Sanchez, F. & Sobolev, K., 2010. "Nanotechnology in concrete – A review", *Journal of Construction and Building Materials*, 24: 2060–2071

33. Shkrebtii, A., Kryuchenk. Y.V., Kupchak, M., GasRari, F., Sachenk, A.V., Sokolovskyi, O., and Kazakevitch, A., 2008. "Hydrogenated Amorphous silicon (A-Si:H) Based Solar Cell: Material characterization and Optimization, IEEE
34. Stempihar, J. J., Pourshams-Manzouri, T., Kaloush, K.E. & Rodezno, M.K, 2011. "Porous Asphalt Pavement Temperature Effects for Urban Heat Island Analysis" Transportation Research Board (TRB), Annual Meeting, Washington, USA, January 2012.
35. Strauss, D., Fehr, R., and Cain, A., 2009. "Vehicle Surfaces: A Parking Lot PV Solar Energy Power Generation System", SAE International
36. Wischke, M., Masur, M., Kröer, M. and Woias, P., 2011. "Vibration harvesting in traffic tunnels to power wireless sensor nodes", Journal of Smart Materials and Structures, 20.
37. Wu, G & Yu, X., 2011. "Thermal Energy Harvesting Across Pavement Structure", Transportation Research Board (TRB), Annual Meeting, Washington, USA, January 2012
38. Xu, H. and Yi, T., 2012. "Development and testing of a heat and mass coupled snow melting model for hydronic heated pavement", Transportation Research Board (TRB), Annual Meeting, Washington, USA, January 2012
39. Ye, G., Yan, J., Wong, J.Z., Soga, K. and Seshia, A. "Optimisation of a Piezoelectric System for Energy Harvesting from Traffic Vibrations", Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium, Rome, Italy 2009
40. You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J.M, Roy, S., Odegard, G.M, Dai, Q., Goh, S.W., 2011. "Nanoclaymodified asphalt materials: Preparation and characterization", Journal of Construction and Building Materials, 25: 1072–1078
41. Yvkoff, L., 2011. Solar Roadways to build solar-powered parking lot, C|NET [online] Available at: <http://reviews.cnet.com/8301-13746_7-20092232-48/solar-roadways-to-build-solar-poweredparking-lot/> [Accessed March, 2017]
42. Wang, D.S., Li, Q., Zhu, H.,P. & Jing, K., 2009. "Experimental study of waterproof technology of piezoelectric impedance transducer in concrete", Proceedings of the Symposium on Frequency Control Technology & Joint Conference of the Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAUDA), China, 2009
43. Zalba, B., Marin, J., M., Cabeza, F., L. and Mehling, H., 2003. "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and application", Journal of Applied Thermal Engineering, 23: 251–283

44. Zhao, H., Yu, J. and Ling, J., (2010). “Finite element analysis of Cymbal piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement”, Journal of the Ceramic Society of Japan, 118: 909915

Ιστοσελίδες.

45. Solar Roadways Awarded Federal Highway Administration Phase II SBIR Contract For \$750,000 over 2 Years, Renewable Energy World, (Anon., 2011) [online] Available at: <<http://www.renewableenergyworld.com/rea/partner/idaho-department-ofcommerce/news/article/2011/08/solar-roadways-awarded-federal-highway-administrationphase-ii-sbir-contract-for-750000-over-2-years>> [Accessed April 2017]
46. PCM, 2009 [online] available at: <<http://www.pcmproducts.net/>> [Accessed March, 2017]
47. <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/piezo.html>>, (Anon) [Accessed January, 2017]
48. TNO, 2011 [online] Available at: http://www.tno.nl/downloads/Presentation%20SolaRoad%20definitief_uk.pdf
49. Philip Park, Development of High-Performance Fiber Reinforced Asphalt Concrete [εικόνα] Available at: <http://philippark.weebly.com/research-at-um.html>
50. Zhao, H., Yu, J. and Ling, J., (2010). “Finite element analysis of Cymbal piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement”, [εικόνα] Available at: <https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcersj2/118/1382/118_1382_909/_pdf>
51. Road traffic Technology <http://www.roadtraffic-technology.com/> [εικόνα] Available at: <http://www.roadtrafficechnology.com/uploads/newsarticle/655904/images/136730/large/5%20-%20rotterdam%20bridge.jpg>
52. ICAX International Heat Transfer Available at: <http://www.icax.co.uk/> [εικόνα] http://www.icax.co.uk/images/laying_pipe_arrays.jpg
53. World Highways Available at: <http://www.worldhighways.com>. [εικόνα] <http://www.worldhighways.com/sections/irf/features/photovoltaic-noise-barriers/>