

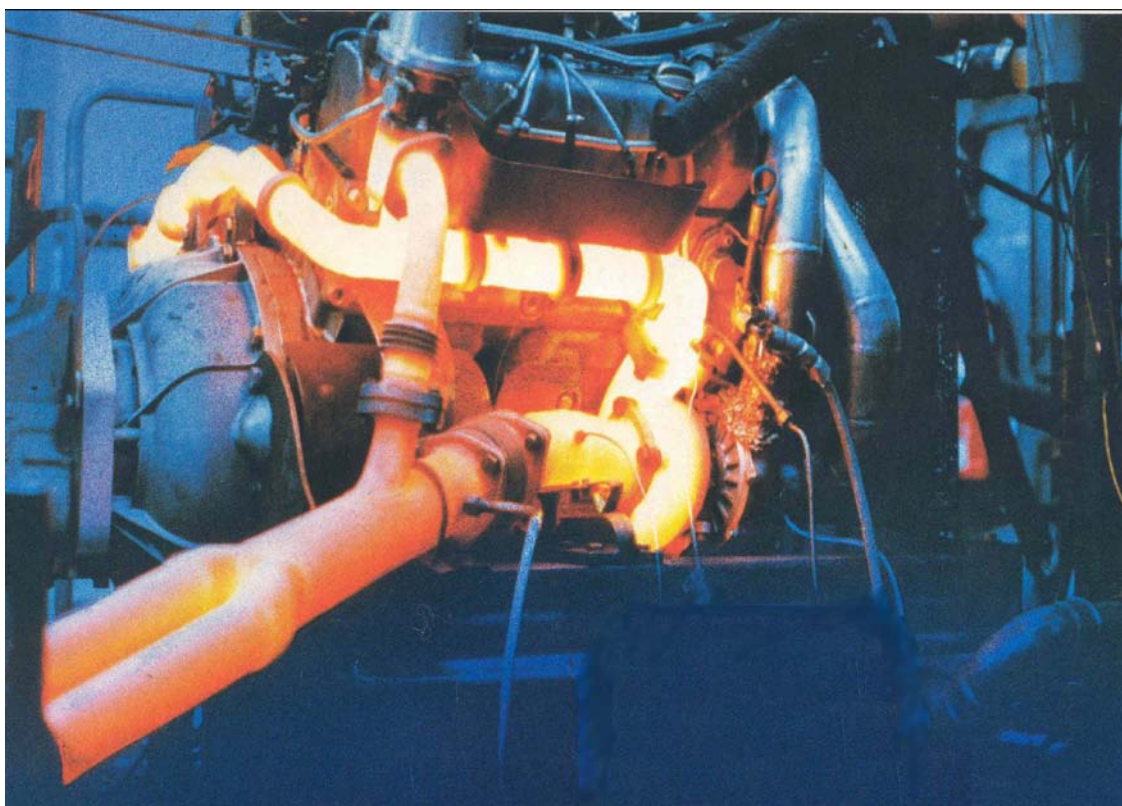


ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ  
ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΦΟΙΤΗΤΩΝ:  
ΔΑΣΚΑΛΟΠΟΥΛΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ  
ΧΑΤΖΗΠΑΡΑΔΕΙΣΗ ΓΕΩΡΓΙΟΥ

ΘΕΜΑ:

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ  
ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ  
ΓΙΑ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΑΠΟΡΡΙΠΤΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ  
ΤΟΝ ΒΕΝΖΙΝΟΚΙΝΗΤΗΡΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ.



Εισηγητής καθηγητής:  
Κωνσταντίνος Ζορμπάς

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### 1. ΓΕΝΙΚΑ

1.1 Εισαγωγή.....	σελ.3
1.2 Βαθμός απόδοσης και απορριπτόμενη θερμική ενέργεια των μηχανών εσωτερικής καύσης.....	σελ.5
1.3 Δυνατότητες ανάκτησης της απορριπτόμενης θερμικής ενέργειας και επίδραση στην κατανάλωση καυσίμου.....	σελ.6
1.4 Η θερμοκρασιακή κατανομή κατά μήκος του σωλήνα εξάτμισης βενζινοκινητήρα.....	σελ.10
1.5 Τα θερμοηλεκτρικά φαινόμενα.....	σελ.14
1.6 Θερμοηλεκτρικές συστοιχίες (TE modules): περιγραφή – τρόποι σύνδεσης θερμοηλεκτρικών στοιχείων.....	σελ.16
1.7 Τα θερμοηλεκτρικά (TE) υλικά.....	σελ.23
1.8 Εφαρμογές θερμοηλεκτρικών συστοιχιών στην παραγωγή ηλεκτρισμού [ηλεκτρικές γεννήτριες TE-generator (TEG)].....	σελ.27
1.9 Εφαρμογές θερμοηλεκτρικών διατάξεων στην παραγωγή ψύξης [TE-cooler (TEC)].....	σελ.30
1.10 Ιστορία των θερμοηλεκτρικών στοιχείων.....	σελ.33

### 2. ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΩΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ (TE Generator – TEG)

2.1 Υπολογισμός της ισχύος και απόδοσης TEG για διάφορες θερμοκρασίες $T_H$ και $T_C$ με χρήση του λογισμικού Aztec.....	σελ.35
2.2 Σχεδιαστικές αρχές μιας θερμοηλεκτρικής διάταξης που θα χρησιμοποιηθεί ως γεννήτρια.....	σελ.39
2.3 Συμπεράσματα.....	σελ.42

### 3. ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΓΙΑ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΡΡΙΠΤΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΒΕΝΖΙΝΟΚΙΝΗΤΗΡΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ

3.1 Σχεδιαστικές αρχές μιας θερμοηλεκτρικής διάταξης τοποθετημένης στον αγωγό της εξάτμισης αυτοκινήτου.....	σελ.43
--	--------

3.2 Η πειραματική διάταξη.....	σελ.46
3.3 Μετρήσεις σε δυναμοπέδη της θερμοκρασιακής κατανομής στο σωλήνα της εξάτμισης.....	σελ.51
3.4 Μετρήσεις σε συνθήκες πραγματικής οδήγησης, της αποδιδόμενης ισχύος στο σωλήνα της εξάτμισης με τη χρήση του TEG HT-9-3-25.....	σελ.54
3.5 Συμπεράσματα.....	σελ.59
<b>4. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....</b>	<b>σελ.60</b>
<b>5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....</b>	<b>σελ.61</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.....</b>	<b>σελ.63</b>

## **1. ΓΕΝΙΚΑ**

### **1.1 Εισαγωγή**

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία ασχοληθήκαμε με την μελέτη της θερμοκρασιακής κατανομής στον σωλήνα εξάτμισης ενός βενζινοκινητήρα και την πιθανή εκμετάλλευση της απορριπτόμενης από αυτόν θερμικής ενέργειας.

Στο πρώτο κεφάλαιο μελετήθηκε η απορριπτόμενη θερμική ενέργεια των μηχανών εσωτερικής καύσης και οι δυνατότητες ανάκτησης της. Γίνεται αναφορά στα θερμοηλεκτρικά φαινόμενα και στις εφαρμογές θερμοηλεκτρικών διατάξεων και εξετάζεται η δυνατότητα χρήσης μιας τέτοιας διάταξης για ανάκτηση ηλεκτρικής ενέργειας από την απορριπτόμενη θερμότητα των κινητήρων εσωτερικής καύσης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο μελετήθηκε, με χρήση λογισμικού, η αναμενόμενη ισχύς και απόδοση ενός θερμοηλεκτρικού στοιχείου σε διάφορες θερμοκρασίες του σωλήνα της εξάτμισης και οι σχεδιαστικές αρχές μιας θερμοηλεκτρικής διάταξης που θα χρησιμοποιηθεί ως γεννήτρια.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η υλοποίηση μιας τέτοιας θερμοηλεκτρικής διάταξης και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν σε δυναμοπέδη και σε πραγματικές συνθήκες οδήγησης. Γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων και σύγκριση με τα θεωρητικά.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα που προκύπτουν σχετικά με τις δυνατότητες και τα προβλήματα υλοποίησης μιας τέτοιας διάταξης για πρακτική εφαρμογή.

## 1.2 Βαθμός απόδοσης και απορριπτόμενη θερμική ενέργεια των μηχανών εσωτερικής καύσης

Σαν βαθμό απόδοσης ορίζουμε το λόγο (πηλίκο) της ενέργειας που λαμβάνουμε σε ένα χρονικό διάστημα από τον κινητήρα, προς την ενέργεια που δαπανήσαμε στο ίδιο χρονικό διάστημα. Συνεπώς, ο βαθμός απόδοσης μιας Μ.Ε.Κ. καθορίζει την ποσότητα καυσίμου που αυτή θα καταναλώσει, προκειμένου να λάβουμε μια ποσότητα ισχύος. Ο βαθμός απόδοσης αφορά κάθε μηχανή και κάθε συσκευή (π.χ. λέβητας, καυστήρας, θερμαντικό σώμα κ.τ.λ.) όπου λαμβάνει χώρα μια φυσική διεργασία (π.χ. καύση).

Ισχύς είναι ο χρονικός ρυθμός απόδοσης ενέργειας. Έτσι, μαθηματικά ορίζεται σαν τον χρονικό ρυθμό μεταβολής της ενέργειας (ενέργεια ανά χρόνο).

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό απόδοσης ενός κινητήρα είναι το μέγεθός του (κυβισμός), η προπορεία της ανάφλεξης, η ταχύτητα του εμβόλου, η σχέση συμπίεσης, το φορτίο του κινητήρα και ο λόγος λ στην καύση.

Βαθμός απόδοσης ενός κινητήρα, ονομάζεται το έργο ή η ενέργεια που παράγεται από τον κινητήρα, προς το έργο ή την ενέργεια αντίστοιχα, που προσφέρεται σε αυτόν.

$$\text{Βαθμός απόδοσης } (\eta) = \text{Παραγόμενο έργο } (W_{\pi}) / \text{Προσφερόμενο έργο } (W_{\pi p})$$

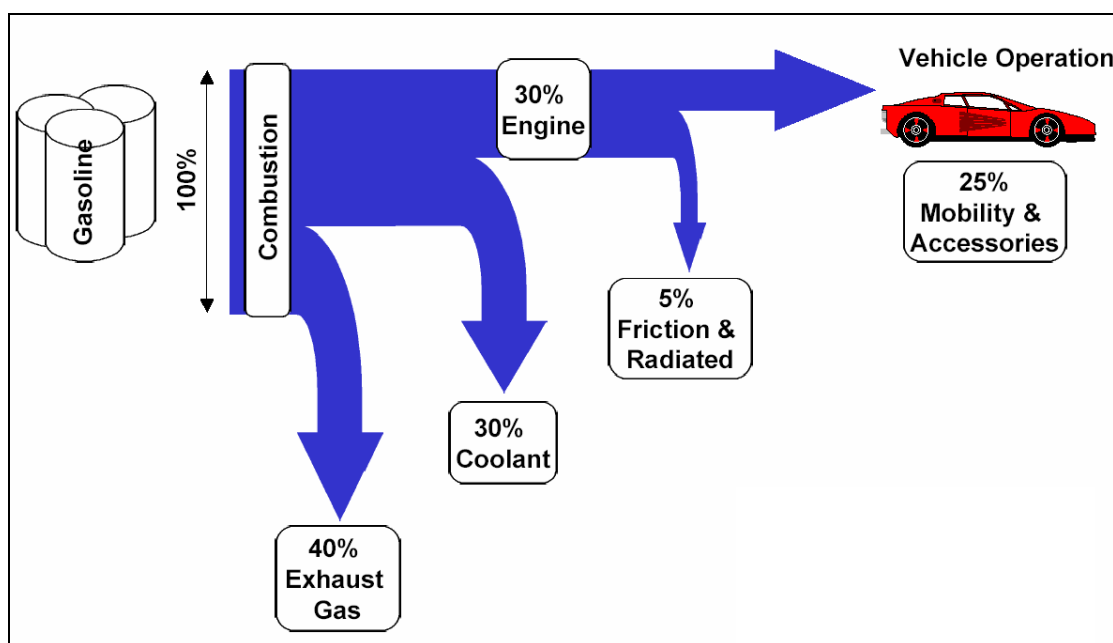
Ο βαθμός απόδοσης ( $\eta$ ) είναι πάντοτε μικρότερος της μονάδας, επειδή το έργο που παράγεται είναι πάντοτε μικρότερο από αυτό που προσφέρεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μέρος του έργου ή της ενέργειας που προσφέρεται χάνεται:

- α) σαν απώλεια θερμότητας προς το σύστημα ψύξης
- β) σαν απώλεια θερμότητας από τα καυσαέρια προς την ατμόσφαιρα
- γ) σαν απώλεια θερμότητας ακτινοβολίας του κινητήρα προς την ατμόσφαιρα
- δ) σαν απώλειες εξαιτίας των τριβών, γιατί ένα μέρος από το προσφερόμενο έργο, χρησιμοποιείται για την κίνηση διαφόρων βοηθητικών μηχανισμών. [1]

### 1.3 Δυνατότητες ανάκτησης της απορριπτόμενης θερμικής ενέργειας και επίδραση στην κατανάλωση καυσίμου

Η δυνατότητα χρήσης μιας θερμοηλεκτρικής διάταξης (Thermoelectric Generator - TEG) για ανάκτηση υπό μορφή ηλεκτρισμού μέρους της απορριπτόμενης θερμικής ενέργειας από κινητήρες εσωτερικής καύσης των οχημάτων μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην παγκόσμια προσπάθεια που γίνεται τελευταία για εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση των αερίων θερμοκηπίου. Οι λόγοι που ευνοούν την προσπάθεια εφαρμογής των θερμοηλεκτρικών στοιχείων στο πεδίο της αυτοκινητοβιομηχανίας, μπορούν να συνοψισθούν στα εξής:

- Η απορριπτόμενη θερμότητα από τους κινητήρες εσωτερικής καύσης είναι πολύ μεγάλο ποσοστό της συνολικής προσφερόμενης θερμότητας από το καύσιμο. Στους βενζινοκινητήρες, κατά μέσο όρο ένα ποσοστό 75% της συνολικής θερμότητας του καυσίμου απορρίπτεται στο περιβάλλον (σχ. 1.3.1), αναλυτικότερα 40% περίπου από τα καυσαέρια, 30% περίπου από το υγρό ψύξης του κινητήρα και 5% περίπου ως θερμικές απώλειες από το σώμα του κινητήρα [2]. Η ανάκτηση του 6% περίπου της ενέργειας των καυσαερίων, σημαίνει εξοικονόμηση καυσίμου έως 10% [3].



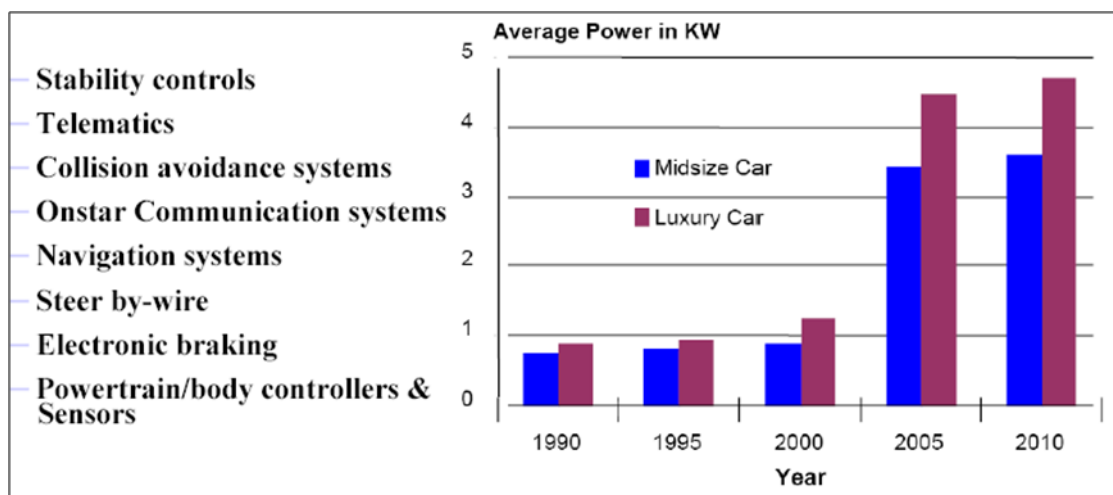
Σχήμα 1.3.1 – Ποσοστά απορριπτόμενης θερμότητας σε τυπικό βενζινοκινητήρα αυτοκινήτου [2]

- Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στα συστήματα αποβολής θερμότητας είναι από υψηλές (περί τους 900 °C στην πολλαπλή εξαγωγή)

έως μέσες (περί τους 100 °C στο υγρό ψύξης του κινητήρα), γεγονός που ευνοεί την απόδοση των θερμοηλεκτρικών στοιχείων.

- Λόγω του μεγέθους της αγοράς του αυτοκινήτου, η επίτευξη μιας (έστω και μικρής) βελτίωσης στην εξοικονόμηση ενέργειας, σημαίνει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας παγκόσμια. Επί πλέον, υπάρχει η δυνατότητα διάθεσης μεγάλων κεφαλαίων για έρευνα και ανάπτυξη πρωτοποριακών συστημάτων.
- Η μαζική παραγωγή των απαιτούμενων εξαρτημάτων, μπορεί να γίνει με πολύ μειωμένο κόστος, ενώ η ανταγωνιστικότητα των βιομηχανιών θα οδηγήσει γρήγορα στη βελτιστοποίησή τους.
- Η έλλειψη κινούμενων τμημάτων και η μεγάλη αξιοπιστία και διάρκεια ζωής των TEGs, τα καθιστούν σοβαρά υποψήφια υλικά κατασκευής για την αυτοκινητοβιομηχανία.

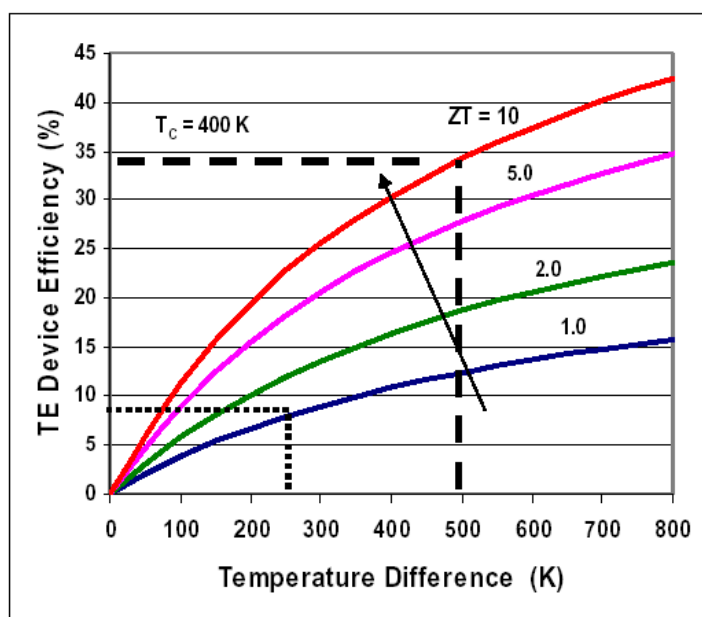
Η ηλεκτρική ισχύς, που θα παράγεται από την θερμοηλεκτρική διάταξη, προβλέπεται να χρησιμοποιηθεί παράλληλα με την παραγόμενη από τον εναλλακτήρα του αυτοκινήτου. Οι επικρατούσες σύγχρονες τάσεις στη σχεδίαση των αυτοκινήτων, οδηγεί στην συνεχή αύξηση των ηλεκτροκίνητων εξαρτημάτων (σχ. 1.3.2) (πχ. ηλεκτρικά παράθυρα, θερμαινόμενα καθίσματα - καθρέπτες κλπ) ενώ ταυτόχρονα μειώνεται ο διαθέσιμος χώρος κινητήρα για βελτίωση της αεροδυναμικής και αύξηση του χώρου της καμπίνας. Η χρήση της θερμοηλεκτρικής διάταξης, θα έχει αποτέλεσμα τη μείωση της ισχύος που απορροφά ο εναλλακτήρας από τον κινητήρα και ταυτόχρονα τη μείωση του μεγέθους του.



Σχήμα 1.3.2 – Αύξηση της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος από τον εναλλακτήρα του αυτοκινήτου [5]

Η εφαρμογή των TEG θα είναι ιδιαίτερα αποδοτική στα υβριδικά αυτοκίνητα (πχ Toyota Prius), επειδή ο βενζινοκινητήρας τους λειτουργεί σε σταθερό φορτίο στην οικονομική του λειτουργία και η κίνηση γίνεται με ηλεκτροκίνητες [4].

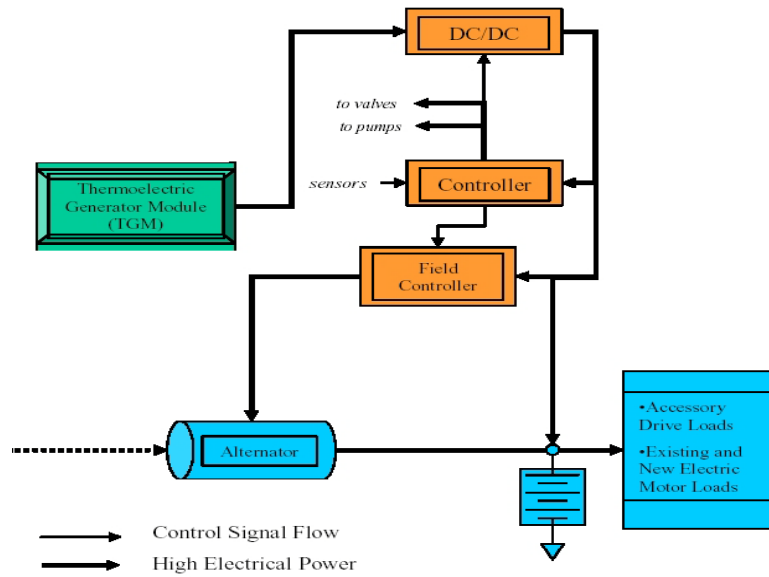
Περισσότερο μακροπρόθεσμοι στόχοι, που προϋποθέτουν σημαντική αύξηση της απόδοσης των θερμοηλεκτρικών στοιχείων, είναι η πλήρης κατάργηση του εναλλακτήρα, η αντικατάσταση μηχανικά κινούμενων εξαρτημάτων (όπως της αντλίας νερού ή του συμπιεστή του air-condition) με αντίστοιχα ηλεκτροκίνητα και περαιτέρω μείωση της κατανάλωσης καυσίμου έως 20%. Ένας σημαντικός μακροπρόθεσμος στόχος, που προϋποθέτει 35% απόδοση των TEG (με θερμοκρασιακή διαφορά  $\Delta T$  500  $^{\circ}\text{K}$ ) (σχ. 1.3.3), είναι η αντικατάσταση των κινητήρων εσωτερικής καύσης με θερμοηλεκτρική διάταξη, που θα μπορεί να λειτουργεί με οποιοδήποτε καύσιμο [5]. Αυτό σημαίνει και πιθανή υποκατάσταση των κυψελών καυσίμου, που σήμερα είναι σε ερευνητικό στάδιο, με θερμοηλεκτρικά στοιχεία.



Σχήμα 1.3.3 – Απόδοση της συστοιχίας των TEG για διαφορετικές τιμές επίδοσης  $ZT$  του θερμοηλεκτρικού υλικού [6]

Η προσαρμογή της θερμοηλεκτρικής διάταξης στο ηλεκτρικό κύκλωμα του αυτοκινήτου, προϋποθέτει την ύπαρξη ηλεκτρονικής διάταξης (σχ. 1.3.4) που θα προσαρμόζει την αντίσταση του φορτίου των TEG στην βέλτιστη τιμή για τις εκάστοτε θερμοκρασιακές συνθήκες και ταυτόχρονα θα μετατρέπει την τάση εξόδου στην τάση του ηλεκτρικού κυκλώματος του αυτοκινήτου (ονομαστική τιμή 12 V ή μελλοντική μετατροπή σε 42 V).





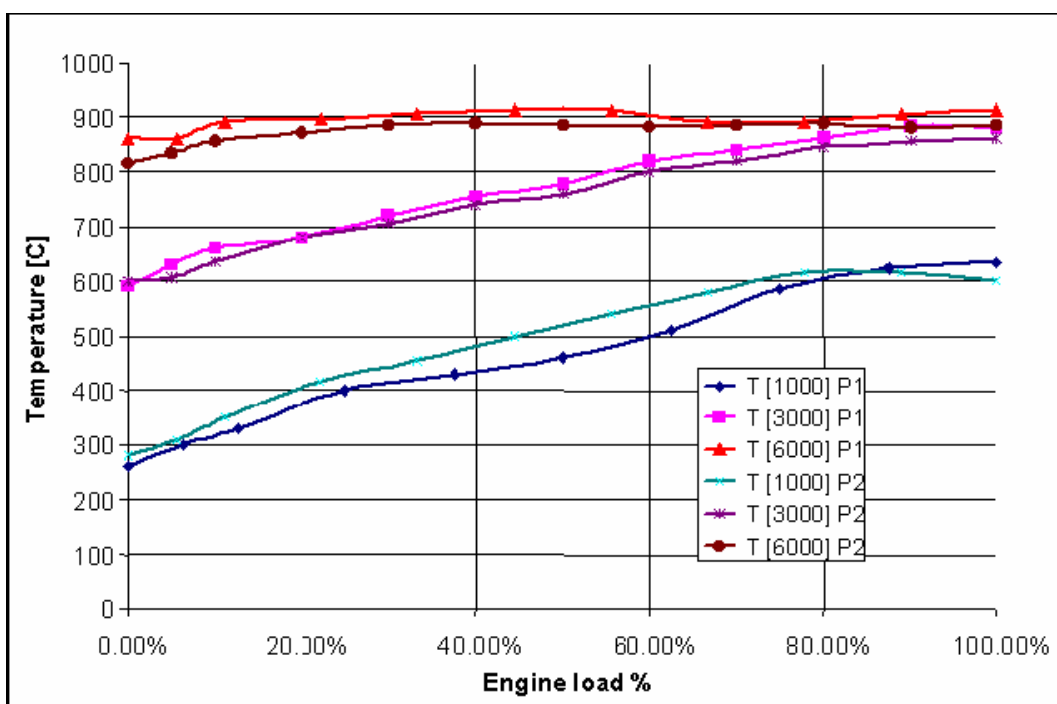
Σχήμα 1.3.4 – Σχηματική παράσταση ηλεκτρονικής διάταξης προσαρμογής της συστοιχίας των TEG στο ηλεκτρικό σύστημα του αυτοκινήτου [7]

Ανάμεσα στις πηγές απορριπτόμενης ενέργειας, που υπάρχουν στον βενζινοκινητήρα, περισσότερο πιθανή φαίνεται η αρχική εφαρμογή της θερμοηλεκτρικής διάταξης στον σωλήνα της εξάτμισης του αυτοκινήτου. Ο βασικός λόγος γι αυτό, είναι οι υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν εκεί και το μεγάλο ποσοστό θερμικής ισχύος που διέρχεται.

#### 1.4 Η θερμοκρασιακή κατανομή κατά μήκος του σωλήνα εξάτμισης βενζινοκινητήρα

Σε ένα τυπικό επιβατικό όχημα, ένα μεγάλο ποσοστό της συνολικής ενέργειας των καυσίμων, που συνήθως ξεπερνά το 70%, χάνεται ως θερμότητα, κυρίως μέσω του συστήματος ψύξης και του συστήματος της εξάτμισης.

Στο Σχήμα 1.4.1 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες των καυσαερίων της εξάτμισης ενός κινητήρα της BMW, για διάφορες ταχύτητες περιστροφής και φορτία. Οι θερμοκρασίες μπορούν να φθάσουν πάνω από τους 900°C και μπροστά και πίσω από τον καταλύτη, σε μέσα φορτία και υψηλές στροφές του κινητήρα.

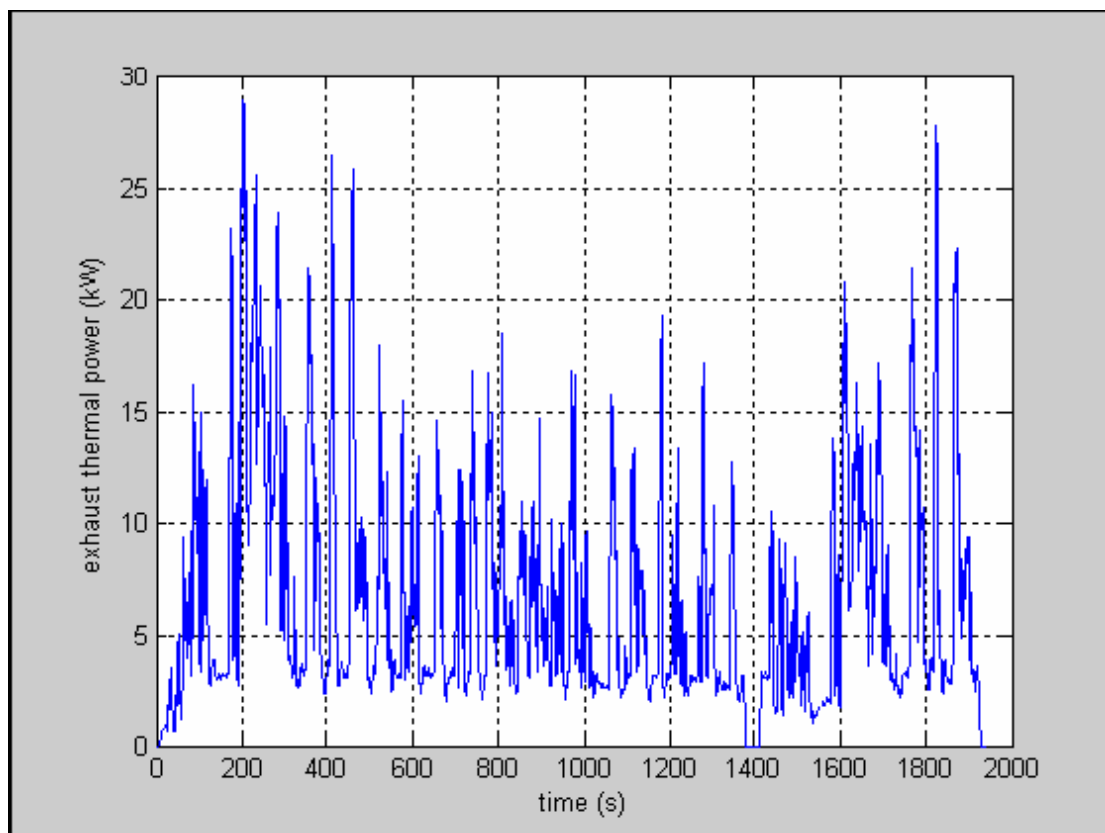


Σχήμα 1.4.1 – Θερμοκρασίες καυσαερίων, για διάφορες στροφές (1000, 3000, 6000 RPM), μετρούμενες πριν (P1) και μετά (P2) από τον καταλύτη [8].

Για τον δεδομένο κινητήρα της BMW και κατά τη διάρκεια μιας διαδρομής, σύμφωνα με τις παραμέτρους που ορίζει ο κύκλος κίνησης FTP-75 [9], οι θερμοκρασίες κυμαίνονται μεταξύ 500 – 650°C λόγω των χαμηλών έως μέσων φορτίων του κινητήρα και χαμηλής έως μέσης ταχύτητας περιστροφής. Διαφορετικές συνθήκες οδήγησης, θα μπορούσαν να παραγάγουν υψηλότερες θερμοκρασίες καυσαερίων.

Το ποσό της απορριπτόμενης θερμικής ενέργειας από το σύστημα της εξάτμισης για τον κύκλο κίνησης FTP-75, παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.4.2. Παρατηρούμε, ότι καθ' όλη τη διαδρομή, η θερμική ενέργεια στο σύστημα της εξάτμισης ξεπερνά τα 2 KW, παρόλο που ο κινητήρας λειτουργεί σε χαμηλά φορτία. Επομένως, σε κάθε

κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα, υπάρχει αρκετή διαθέσιμη θερμική ενέργεια, την οποία θα μπορούσαμε να εκμεταλλευτούμε.



Σχήμα 1.4.2 – Διαθέσιμη θερμική ισχύς στο σύστημα της εξάτμισης για τον κύκλο κίνησης FTP-75 και θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C.

Η παραγωγή ισχύος με τη χρήση θερμοηλεκτρικής διάταξης, εξαρτάται από τη θερμοκρασία της εξάτμισης και τη διαθέσιμη θερμική ισχύ, η οποία εξαρτάται πρώτιστα από τη ροή των καυσαερίων καθώς επίσης και τη θερμοκρασία τους.

Η διαθέσιμη θερμική ισχύς είναι καθορισμένη για ένα δεδομένο όχημα, σε συγκεκριμένο φορτίο του κινητήρα.

Η διατήρηση υψηλής θερμοκρασίας στην εξάτμιση είναι πιο αποτελεσματική στους βενζινοκινητήρες από ότι στους κινητήρες diesel. Αν και η αποδοτικότητα των βενζινοκινητήρων έχει βελτιωθεί πάρα πολύ (για παράδειγμα, λόγω των τεχνολογιών μεταβλητού χρονισμού), οι κινητήρες diesel λειτουργούν με υψηλότερη συμπίεση και έτσι έχουν υψηλότερη θεωρητική απόδοση. Αυτό έχει μεγάλη επίδραση στο ποσό θερμότητας που απελευθερώνει η μηχανή στο σύστημα της εξάτμισης.

Το σχήμα 1.4.3 παρουσιάζει τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός βενζινοκινητήρα (BMW 530i, ευρωπαϊκό μοντέλο) και ενός diesel (BMW 530d, ευρωπαϊκό μοντέλο).



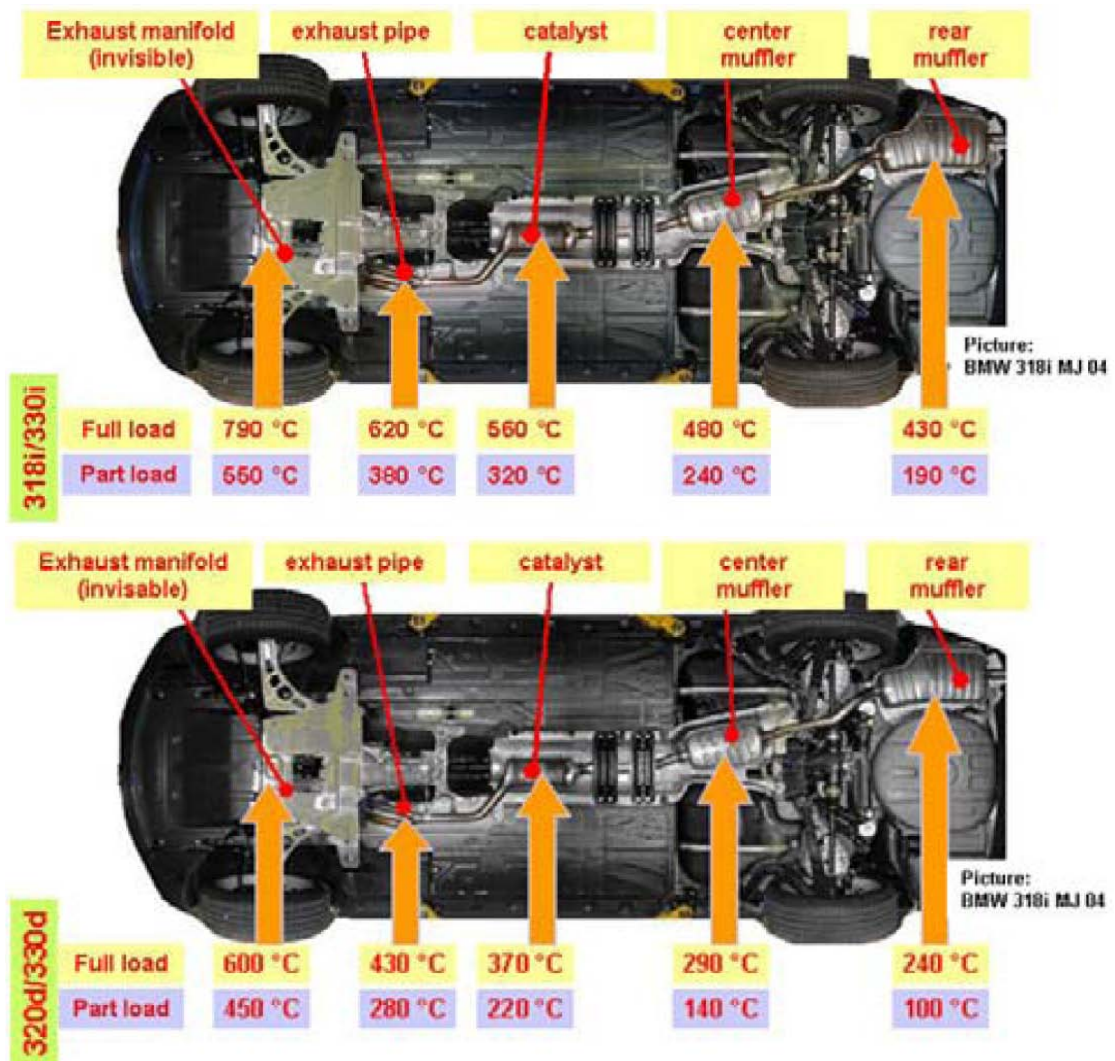
Engine:	Diesel	Gasoline
Vehicle:	BMW 530d	BMW 530i
Displ.:	2993 ccm	2996 ccm
Compr. ratio	17	10.7
Max. power	160 kW @ 4000 rpm	190 kW @ 6600 rpm
Max. torque	500 Nm @ 2000 rpm	300 Nm @ 2500 rpm
Fuel cons.	34,1 mpg	26,7 mpg
	(combined European Drive Cycle)	(combined European Drive Cycle)

*Σχήμα 1.4.3 – Χαρακτηριστικά ενός πετρελαιοκινητήρα και ενός βενζινοκινητήρα ίδιας χωρητικότητας, BMW*

Η ισχύς και των δύο κινητήρων που παρουσιάζονται παραπάνω, σε λειτουργία μέσου φορτίου είναι παρόμοια. Να σημειωθεί ότι τα καύσιμα diesel έχουν υψηλότερη πυκνότητα μέχρι και 17% από τη βενζίνη και ότι τα ποσά θερμότητας είναι συνήθως υπολογισμένα με βάση τη μάζα των χρησιμοποιούμενων καυσίμων. Οι μηχανές diesel έχουν υψηλότερες θερμικές απώλειες στα τοιχώματα των κυλίνδρων στη συγκεκριμένη λειτουργία (σε μέσο φορτίο). Ένας πετρελαιοκινητήρας απορρίπτει χαμηλότερο ποσοστό θερμότητας μέσω της εξάτμισης, έναντι ενός βενζινοκινητήρα (22 – 35% έναντι 34 – 45%), ενώ μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας απορρίπτεται στο ψυκτικό υγρό του πετρελαιοκινητήρα έναντι του βενζινοκινητήρα (16 – 35% έναντι 17 – 26%) [10].

Οι σύγχρονοι κινητήρες diesel εκμεταλλεύονται ένα μεγάλο μέρος της θερμότητας που αποβάλλεται από το σύστημα της εξάτμισης, για την κίνηση του συμπιεστή καυσαερίων. Έτσι, η χρήση συστημάτων ανάκτησης της θερμικής ενέργειας, όπως οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις, θα έχει χαμηλότερη απόδοση σε έναν σύγχρονο πετρελαιοκινητήρα, απ' ό,τι σε έναν ατμοσφαιρικό βενζινοκινητήρα.

Στο σχήμα 1.4.4, παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες του συστήματος της εξάτμισης ενός βενζινοκινητήρα, σε σύγκριση με έναν πετρελαιοκινητήρα. Για τους λόγους που αναφέρθηκαν, οι θερμοκρασίες των τμημάτων της εξάτμισης του πετρελαιοκινητήρα είναι χαμηλότερες από περίπου 100°C για μέσο φορτίο, μέχρι και 200°C σε συνθήκες πλήρους φορτίου.



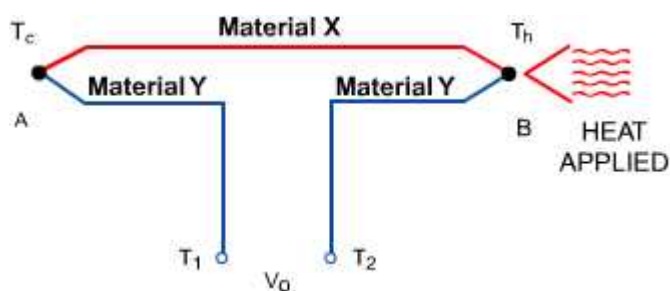
Σχήμα 1.4.4 – Θερμοκρασίες τμημάτων της εξάτμισης ενός βενζινοκινητήρα (επάνω) και ενός πετρελαιοκινητήρα (κάτω) [Πηγή: BMW AG, Germany].

Συμπερασματικά, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η θερμική ενέργεια που διατίθεται, καθώς και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο σωλήνα της εξάτμισης ενός επιβατικού αυτοκινήτου, επιτρέπουν την εφαρμογή ενός συστήματος ανάκτησης αυτής της θερμικής ενέργειας και τη μετατροπή της σε ηλεκτρική.

## 1.5 Τα θερμοηλεκτρικά φαινόμενα

### Το φαινόμενο Seebeck

Για να εξηγήσουμε το φαινόμενο Seebeck, ας εξετάσουμε ένα απλό κύκλωμα θερμοηλεκτρικού ζεύγους, όπως φαίνεται στον Σχήμα 1.5.1. Οι αγωγοί του θερμοζεύγους είναι δύο ανόμοια μέταλλα που δείχνονται ως υλικό X και υλικό Y.



Σχήμα 1.5.1

Σε μια χαρακτηριστική εφαρμογή μέτρησης θερμοκρασίας, το θερμοηλεκτρικό ζεύγος A χρησιμοποιείται ως «αναφορά» και διατηρείται σε μια σχετικά χαμηλή θερμοκρασία, την  $T_c$ . Το θερμοηλεκτρικό ζεύγος B χρησιμοποιείται για να μετρήσει τη θερμοκρασία ενδιαφέροντος ( $T_h$ ) που, σε αυτό το παράδειγμα, είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία  $T_c$ . Με τη θερμότητα που εφαρμόζεται στο θερμοηλεκτρικό ζεύγος B, θα εμφανιστεί τάση στα άκρα  $T_1$  και  $T_2$ . Αυτή η τάση ( $V_0$ ), μπορεί να εκφραστεί ως:

$$V_0 = a_{xy} \cdot (T_h - T_c)$$

όπου:

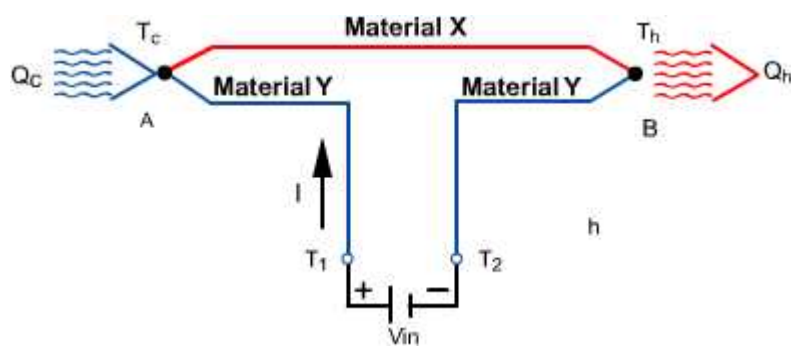
$V_0$ : η τάση παραγωγής, σε Volt

$a_{xy}$ : ο συντελεστής Seebeck μεταξύ των δύο υλικών, X και Y, σε Volts/ $^{\circ}$ K

$T_c$  και  $T_h$ : η θερμοκρασία της ψυχρής και θερμής επαφής των θερμοηλεκτρικών ζευγών A και B αντίστοιχα, σε  $^{\circ}$ K

### Το φαινόμενο Peltier

Εάν τροποποιήσουμε το παραπάνω κύκλωμα των θερμοηλεκτρικών ζευγών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5.2, θα παρατηρήσουμε το αντίθετο φαινόμενο, γνωστό ως φαινόμενο Peltier.



Σχήμα 1.5.2

Εάν εφαρμόσουμε μια τάση ( $V_{in}$ ) στα άκρα  $T_1$  και  $T_2$ , το κύκλωμα θα διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα ( $I$ ). Ως αποτέλεσμα, θα παρατηρήσουμε μικρή μείωση της θερμότητας ( $Q_c$ ) στη σύνδεση A των θερμοηλεκτρικών ζευγών και μια αύξηση της θερμότητας ( $Q_h$ ) στη σύνδεση B. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αντιστραφεί με την αλλαγή στην κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο θα αντιστρέψει την κατεύθυνση της ροής της θερμότητας. Το φαινόμενο Peltier μπορεί να εκφραστεί από μαθηματική άποψη ως:

$$Q_c \text{ ή } Q_h = p_{xy} \cdot I$$

όπου:

$p_{xy}$ : ο συντελεστής Peltier μεταξύ των δύο υλικών, X και Y, σε Volt

I: η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, σε Ampere

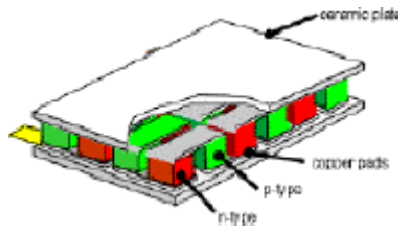
$Q_c$  και  $Q_h$ : το ποσό θερμότητας, σε Watt

### Το φαινόμενο Thomson

Όταν ένας αγωγός, ο οποίος παρουσιάζει μία θερμική αντίσταση κατά μήκος του, διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, τότε από τον αγωγό, είτε θα απορροφηθεί, είτε θα αποβληθεί θερμότητα. Το εάν η θερμότητα απορροφάται ή αποβάλλεται εξαρτάται από την κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος και τη θερμική αντίσταση του αγωγού. Αυτό το φαινόμενο, γνωστό ως φαινόμενο Thomson, είναι ενδιαφέρον όσον αφορά τις αρχές που ορίζει, αλλά διαδραματίζει έναν αμελητέο ρόλο στη λειτουργία των πρακτικών θερμοηλεκτρικών στοιχείων.



## 1.6 Θερμοηλεκτρικές συστοιχίες (TE modules): περιγραφή – τρόποι σύνδεσης θερμοηλεκτρικών στοιχείων



Σχήμα 1.6.1

Στο παραπάνω σχήμα (σχ. 1.6.1) φαίνεται μία τυπική θερμοηλεκτρική συστοιχία. Αποτελείται από ζεύγη ημιαγωγών τύπου p και τύπου n που σχηματίζουν θερμοηλεκτρικά στοιχεία, τα οποία από ηλεκτρική άποψη συνδέονται σε σειρά, ενώ από θερμική παράλληλα.

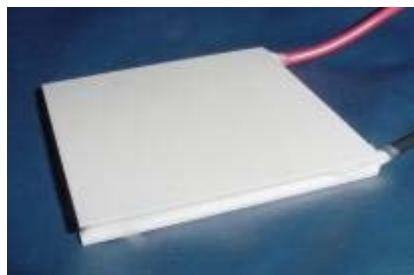
Ψύξη, θέρμανση: Όταν εφαρμόζεται συνεχές ρεύμα στο θερμοστοιχείο, τα ζεύγη ημιαγωγών τύπου p και τύπου n απορροφούν θερμότητα από τη μία επιφάνεια και την αποβάλλουν στην άλλη. Έτσι, η επιφάνεια από την οποία απορροφάται θερμότητα ψύχεται, ενώ η άλλη θερμαίνεται.

Κατά την ψύξη, η διάταξη τροφοδοτείται με μια πηγή ηλεκτρικής ισχύος. Έτσι, η θερμότητα ρέει από τη μία επιφάνεια στην άλλη (φαινόμενο Peltier), με αποτέλεσμα η μία επιφάνεια του στοιχείου να ψύχεται, ενώ η άλλη να θερμαίνεται.

Αν εφαρμόσουμε συνεχή τάση στους ακροδέκτες του στοιχείου peltier η θερμότητα θα μεταφερθεί από την μία επιφάνεια στην άλλη, με αποτέλεσμα η μία πλευρά να θερμανθεί και η άλλη να ψυχθεί. Η θερμότητα που αναπτύσσεται στην θερμή επιφάνεια του peltier διοχετεύεται στο περιβάλλον μέσω κάποιου θερμοαπαγωγού.

Την κρύα πλευρά χρησιμοποιούμε συνήθως για να ψύξουμε κάποιο ηλεκτρονικό εξάρτημα. Μπορούν ακόμα να χρησιμοποιηθούν και σε άλλες εφαρμογές, όπως τα φορητά ψυγεία αυτοκινήτου.

Σε πιο εξειδικευμένες εφαρμογές μπορούν να συνδεσμοποιηθούν παράλληλα για διαχείριση μεγαλύτερου θερμικού φορτίου ή να τοποθετηθούν το ένα πάνω στο άλλο (stacked modules) για να πετύχουν μεγαλύτερες διαφορές θερμοκρασίας.



Σχήμα 1.6.2 – Θερμοηλεκτρική συστοιχία



Οι θερμοηλεκτρικές συστοιχίες ψύξης ή **TEC** (thermoelectric coolers) είναι συσκευές solid-state οι οποίες λειτουργούν σαν αντλίες θερμότητας.

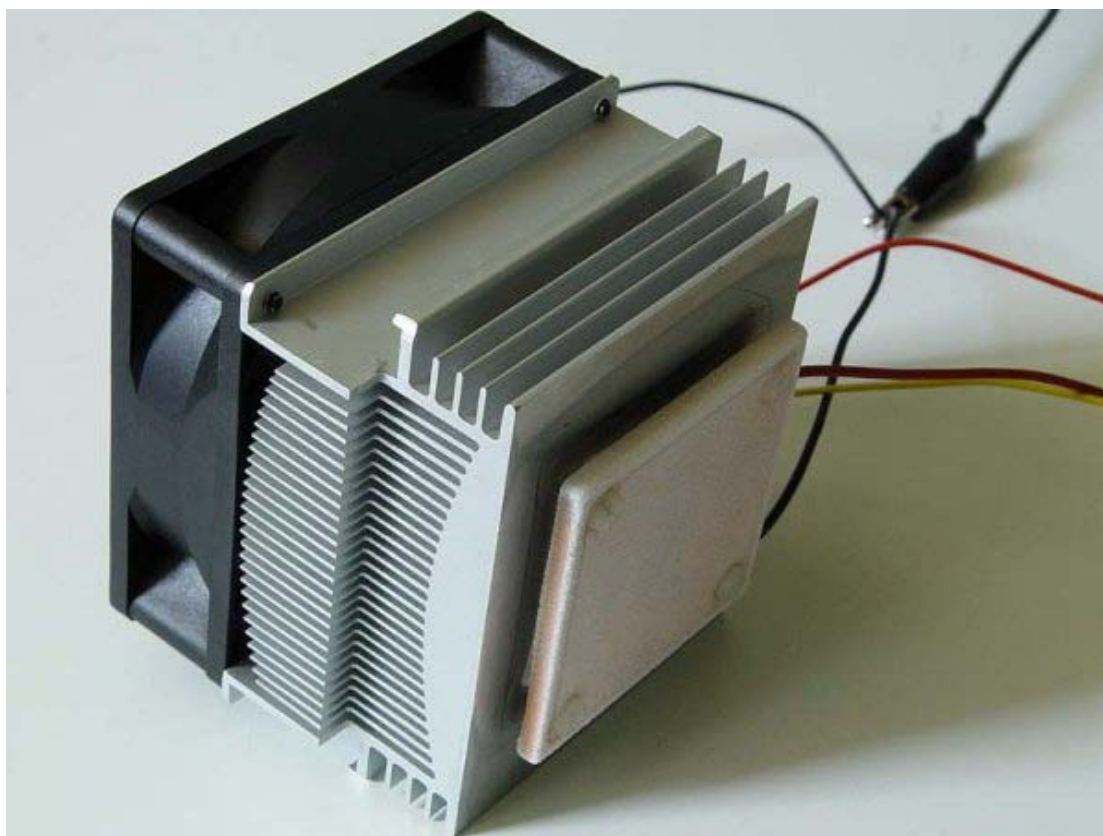
Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές ηλεκτρονικών για τον έλεγχο της θερμοκρασίας, συνήθως ψύξη κάποιων εξαρτημάτων, προκαλώντας μεταφορά θερμότητας από την μία επιφάνεια στην άλλη.

Τα στοιχεία TEC μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκτός από ψύξη, για θέρμανση ή σταθεροποίηση της θερμοκρασίας. Επειδή γίνεται χρήση του φαινομένου Peltier, επικράτησε τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία να λέγονται και στοιχεία peltier.

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας: Υιοθετώντας το φαινόμενο Seebeck, ένα θερμοστοιχείο μπορεί να μετατρέψει τη θερμότητα σε ηλεκτρισμό. Όταν εφαρμόζεται μια διαφορά θερμοκρασίας στις δύο επιφάνειες του θερμοστοιχείου, παράγεται συνεχής τάση στα άκρα των αγωγών.

Οι θερμοηλεκτρικές συστοιχίες που μετατρέπουν τη θερμότητα σε ηλεκτρισμό, συνήθως ονομάζονται με τα αρχικά **TEG** (thermoelectric generators).

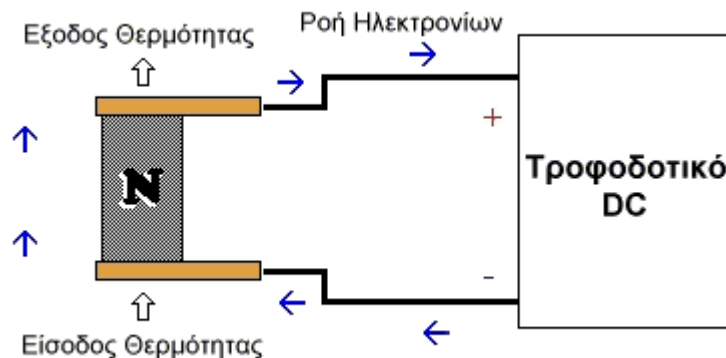
Κατά την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, εφαρμόζεται μία διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των επιφανειών του στοιχείου. Τότε, η ροή της θερμότητας μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ (φαινόμενο Seebeck).



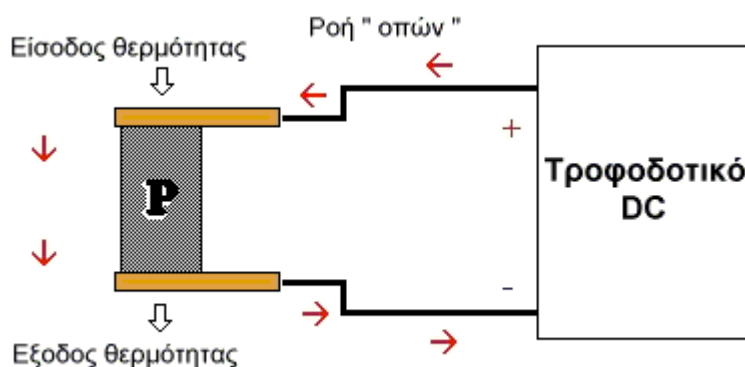
*Σχήμα 1.6.3 – TEC για την ψύξη μικροεπεξεργαστή*

Το μόνο τους μειονέκτημα είναι η χαμηλή απόδοση η οποία αντισταθμίζεται από την αντοχή τους, την αθόρυβη λειτουργία, τον ακριβή έλεγχο της θερμοκρασίας, και τον μικρό τους όγκο. [11]

### Τρόπος λειτουργίας των θερμοηλεκτρικών στοιχείων και κατασκευή των θερμοηλεκτρικών στοιχείων



Σχήμα 1.6.4



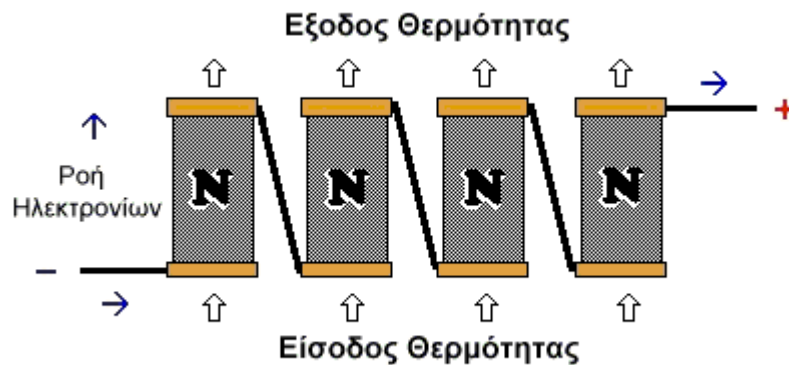
Σχήμα 1.6.5

Η απλούστερη μορφή ενός TEC/TEG αποτελείται από ένα κομμάτι ημιαγωγού P ή N με δύο αγωγούς κολλημένους στα άκρα του (σχήματα 1.6.4 και 1.6.5).

Στην περίπτωση αυτή σχηματίζονται 2 επαφές ανόμοιων υλικών. Αν δημιουργηθεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος στην διάταξη, τότε θα υπάρξει ροή θερμότητας από την μία επαφή στην άλλη. Στην περίπτωση που το υλικό είναι τύπου p, τότε η ροή θερμότητας έχει ίδια κατεύθυνση με την κατεύθυνση της μεταφοράς του ηλεκτρικού φορτίου, δηλαδή την πολικότητα του ρεύματος (σχήμα 1.6.5), ενώ όταν το υλικό είναι τύπου n, τότε η κατεύθυνση μεταφοράς του ηλεκτρικού φορτίου είναι αντίθετης κατεύθυνσης με τη ροή της θερμότητας (σχήμα 1.6.4).

Μία συστοιχία TEC δεν μπορεί να κατασκευαστεί με ένα μόνο κομμάτι ημιαγωγού, γιατί η τάση που χρειάζεται για την δημιουργία του απαιτούμενου

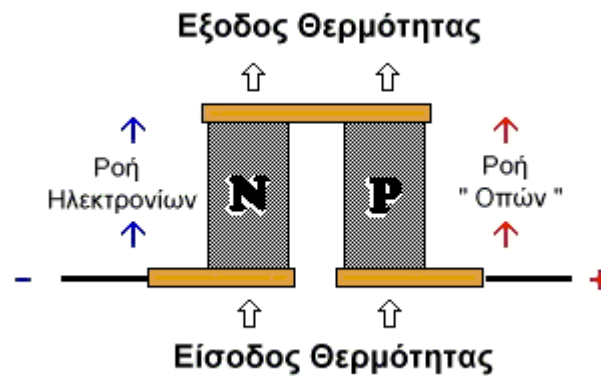
ρεύματος είναι μόλις 50 ~ 70mV. Μία λύση σε αυτό το πρόβλημα δόθηκε συνδέοντας τους ημιαγωγούς σε σειρά. Η συνδεσμολογία αυτή φαίνεται στο σχήμα 1.6.6.



Σχήμα 1.6.6

Ενώ η λύση αυτή λειτουργεί, οι διαγώνιες διασυνδέσεις είναι θερμικά αγωγίμες και αυξάνουν αρκετά τις απώλειες.

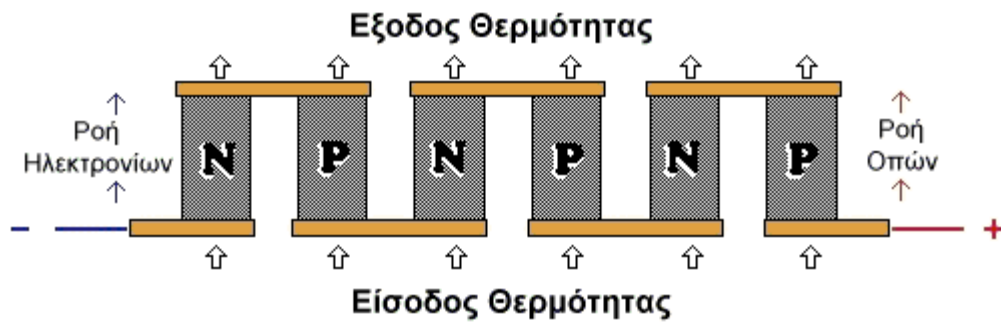
Τοποθετώντας δύο ημιαγωγούς p και n σε σειρά, η συνδεσμολογία που θα προκύψει θα έχει είσοδο θερμότητας από την μία πλευρά και έξοδο από την άλλη, χωρίς την ανάγκη διαγώνιων συνδέσεων. Αυτός είναι και ο λόγος που τα Peltier χρησιμοποιούν ημιαγωγούς p και n (Σχήμα 1.6.7).



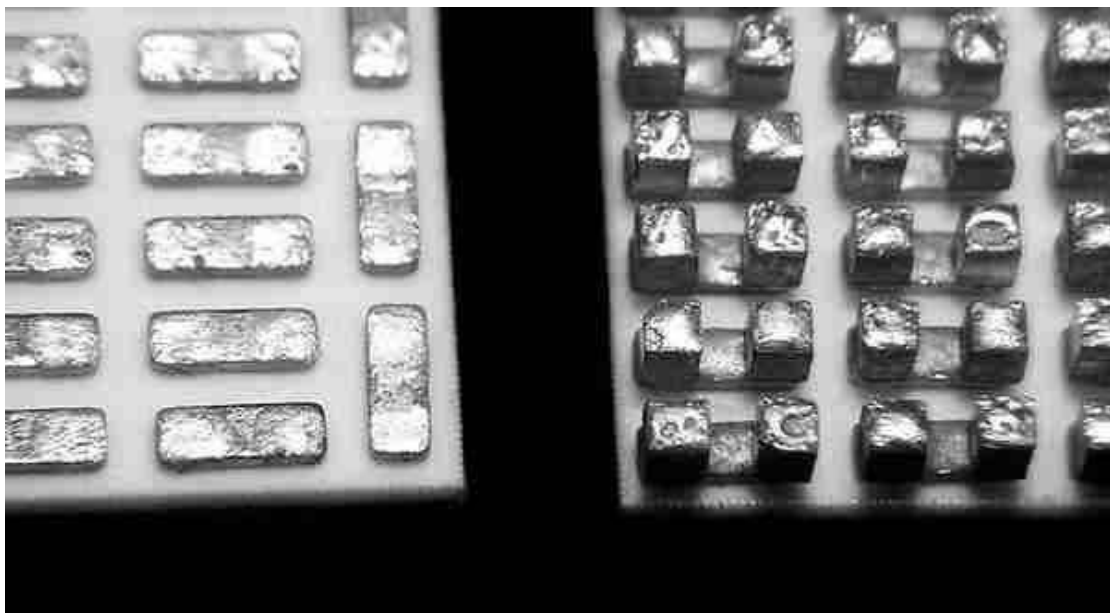
Σχήμα 1.6.7

Αυτή η διάταξη (σχήμα 1.6.7) μπορεί να επεκταθεί απεριόριστα. Αυτή είναι η συνδεσμολογία που χρησιμοποιείται στα TEC και TEG.

Ένα TEC υψηλής ισχύος συνήθως έχει 127 ζεύγη (couples) συνδέσεων οπότε τα ~55mV κάθε σύνδεσης μας δίνουν μια λογική τάση τροφοδοσίας ( $127 \times 2 \times 55\text{mV} = 14\text{V}$ ).



Σχήμα 1.6.8



Σχήμα 1.6.9 – Στοιχείο Peltier πριν τοποθετηθεί η μία κεραμική πλάκα. Είναι ευδιάκριτοι οι ημιαγωγοί σε ζεύγη όπως και οι αγωγοί διασύνδεσης.

### Ορολογία (TEC/TEG) [12]

Οι ηλεκτρικές και θερμικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται στα Peltier.

- $\Delta t$  (Dt): Η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στις δυο πλευρές του TEC/TEG.
- $Dt$  (max): Η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στις δυο πλευρές του TEC όταν αυτό λειτουργεί χωρίς θερμικό φορτίο.
- $T_{cold}$ : Η θερμοκρασία στην ψυχρή πλευρά του TEC/TEG.
- $T_{hot}$ : Η θερμοκρασία στην θερμή πλευρά του TEC/TEG.
- $V_{NL}$ : Είναι η τάση που έχουμε στα άκρα του θερμοστοιχείου, όταν δεν παρεμβάλλεται κάποιο ηλεκτρικό φορτίο (TEG).

- $V_L$ : Είναι η τάση που έχουμε στα άκρα του θερμοστοιχείου, όταν σε αυτά παρεμβάλλεται και κάποιο ηλεκτρικό φορτίο (TEG).
- $R_{int}$ : Είναι η εσωτερική αντίσταση του θερμοστοιχείου.
- $V_{max}$ : Δεν είναι η μέγιστη τάση τροφοδοσίας, αλλά η τάση που επιτυγχάνεται η μέγιστη  $\Delta t$ . Σε τάση λειτουργίας μικρότερη από  $V_{max}$  δεν επιτυγχάνεται η μέγιστη  $\Delta t$ , ενώ σε τάσεις μεγαλύτερες, η κατανάλωση ισχύος ανεβάζει την θερμοκρασία του TEC μειώνοντας την  $\Delta t$  (Μόνο για TEC).
- $I_{max}$ : Δεν είναι το μέγιστο ρεύμα του TEC, αλλά το ρεύμα που επιτυγχάνεται η μέγιστη  $\Delta t$ . Σε ρεύμα λειτουργίας μικρότερο από  $I_{max}$  δεν επιτυγχάνεται η μέγιστη  $\Delta t$ , ενώ σε ρεύμα μεγαλύτερο, από  $I_{max}$  η κατανάλωση ισχύος ανεβάζει την θερμοκρασία του TEC μειώνοντας την  $\Delta t$  (Μόνο για TEC).
- $Q_{max}$ : Η μέγιστη θερμική ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί σε Watt. Δεν πρέπει να συγχέεται με την ηλεκτρική ισχύ η οποία τροφοδοτεί το στοιχείο η οποία είναι αρκετά μεγαλύτερη. Αν το θερμικό φορτίο του TEC γίνει ίσο με το  $Q_{max}$  το  $\Delta t$  μηδενίζεται, δηλαδή και οι δύο πλευρές του TEC, έχουν την ίδια θερμοκρασία. Αν ξεπεραστεί το  $Q_{max}$  το TEC θα εξακολουθήσει να αντλεί θερμότητα αλλά το εξάρτημα θα καταλήξει, σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από αυτήν του θερμοαπαγωγού (Μόνο για TEC).
- Θερμικό φορτίο: Η ισχύς του εξαρτήματος που πρόκειται να ψύξουμε σε Watt (Μόνο για TEC).
- Coefficient Of Performance (Συντελεστής απόδοσης): Είναι ο λόγος της θερμικής ισχύος δια της ηλεκτρικής.  $COP = Q / V_{tec} \cdot I_{tec}$ . Συνήθως κυμαίνεται από 0.4 ~ 0.7. Το Q συμβολίζει το θερμικό φορτίο και  $V_{tec}$ ,  $I_{tec}$  η τάση και το ρεύμα του TEC.
- Couples: Ο αριθμός των ζευγών των ημιαγωγών σε ένα TEC/TEG.
- Η σχέση υπολογισμού διαφοράς θερμοκρασίας είναι (TEC):  

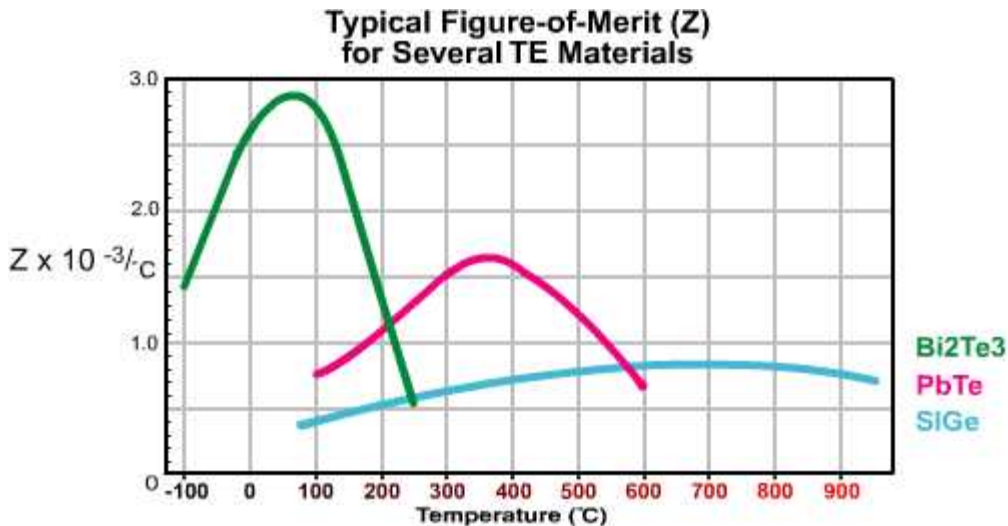
$$\Delta t = [1 - (P_{tot} / Q_{max})] \cdot Dt_{max}$$
όπου  
 $\Delta t$ : διαφορά θερμοκρασίας  
 $P_{tot}$ : ισχύς του υλικού που ψύχεται  
 $Q_{max}$  και  $Dt_{max}$ : παράμετροι του TEC.
- Ο βαθμός επίδοσης ενός θερμοηλεκτρικού υλικού ορίζεται από τον τύπο (TEG):  

$$Z = \alpha^2 \sigma / \lambda$$
όπου,  
 $\alpha$ : ο συντελεστής Seebeck του υλικού (σε  $\mu V/K$ ),  
 $\sigma$ : η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού  
 $\lambda$ : η θερμική αγωγιμότητα του υλικού

Επειδή ο βαθμός επίδοσης  $Z$  μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, ορίζουμε ως  $Z_T$ , έναν πιο εύχρηστο, αδιάστατο συντελεστή επίδοσης.

## 1.7 Τα θερμοηλεκτρικά (TE) υλικά

Τα θερμοηλεκτρικά υλικά, που χρησιμοποιούνται σήμερα για την κατασκευή των ημιαγωγών των διατιθέμενων στο εμπόριο θερμοστοιχείων, είναι συνήθως ενώσεις Βισμούθιου Τελλουρίου (Bismuth-Telluride), που έχουν δεχθεί κατάλληλες προσμίξεις, ώστε να παρέχουν μεμονωμένα ημιαγωγά στοιχεία τύπου  $-p$  και τύπου  $-n$ . Ένας από τους τρόπους κατασκευής των θερμοηλεκτρικών στοιχείων είναι με τη μέθοδο της κονιομεταλλουργίας. Κάθε μέθοδος κατασκευής έχει τα δικά της πλεονεκτήματα. Εκτός από το Bismuth-Telluride ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), υπάρχουν και άλλα θερμοηλεκτρικά υλικά όπως το Lead-Telluride ( $\text{PbTe}$ ), Silicon-Germanium ( $\text{SiGe}$ ) και κράματα Bismuth-Antimony ( $\text{Bi-Sb}$ ), τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συγκεκριμένες χρήσεις. Στο Σχήμα 1.7.1, παρουσιάζεται ο βαθμός επίδοσης (figure of merit)  $Z$  των διάφορων υλικών για μια σειρά θερμοκρασιών. [13]



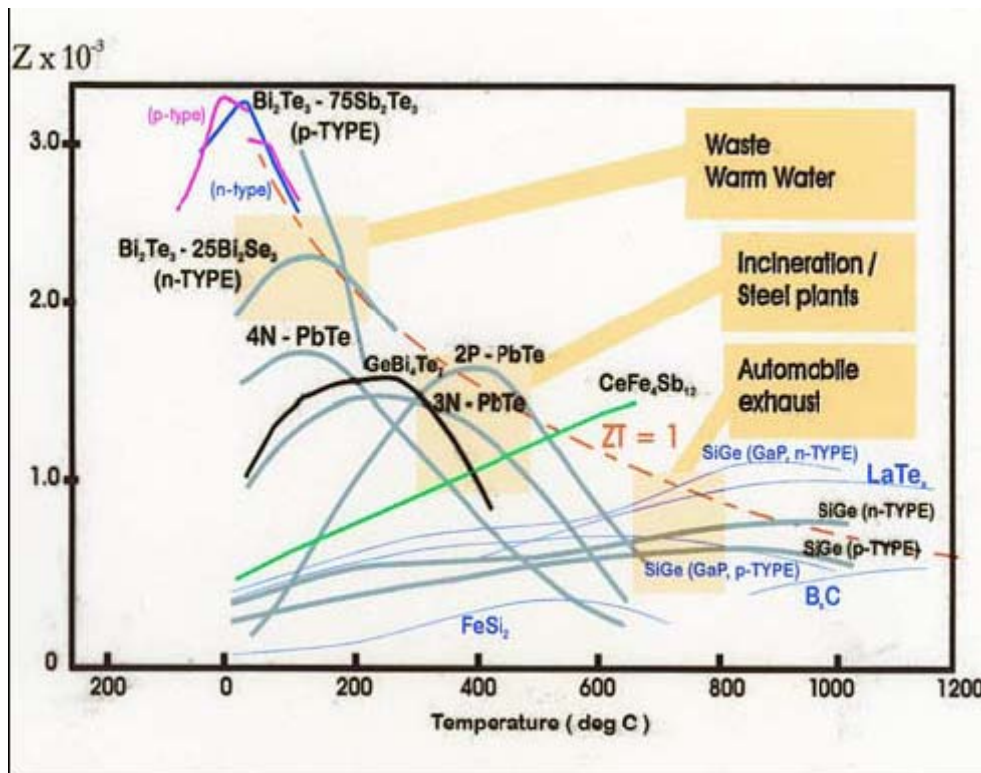
Σχήμα 1.7.1 – Απόδοση των θερμοηλεκτρικών υλικών σε διάφορες θερμοκρασίες

Στο Σχήμα 1.7.2 φαίνεται ο βαθμός επίδοσης  $Z$  διάφορων θερμοηλεκτρικών υλικών, σε συνδυασμό με κάποιες εφαρμογές.

### (i) Καθιερωμένα υλικά

Τα καθιερωμένα θερμοηλεκτρικά υλικά (αυτά που έχουν υιοθετηθεί σε εμπορικές εφαρμογές) μπορούν να διαιρεθούν σε τρεις ομάδες, ανάλογα με το εύρος των θερμοκρασιών στις οποίες λειτουργούν (Σχήμα 1.7.2). Κράματα που είναι βασισμένα στο βισμούθιο σε συνδυασμό με το αντιμόνιο, το τελλούριο ή το σελήνιο, αναφέρονται ως υλικά χαμηλής θερμοκρασίας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασίες μέχρι τους 450K, περίπου.





Σχήμα 1.7.2 [14]

Η υψηλότερη τιμή του βαθμού επίδοσης για ένα θερμοηλεκτρικό ζεύγος που κατασκευάζεται από n- και p- bismuth telluride είναι περίπου  $2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  [15].

Στο ενδιάμεσο εύρος θερμοκρασιών, γύρω στους 850K, βρίσκονται τα υλικά που είναι βασισμένα στα κράματα του μολύβδου, ενώ τα υλικά που υιοθετούνται στις υψηλότερες θερμοκρασίες κατασκευάζονται από κράματα silicon germanium και λειτουργούν έως τους 1300K.

Αν και τα προαναφερθέντα υλικά παραμένουν ακόμα ο ακρογωνιαίος λίθος για τις εμπορικές/πρακτικές εφαρμογές στη θερμοηλεκτρική παραγωγή, έχουν γίνει σημαντικές πρόοδοι στη σύνθεση νέων υλικών και την κατασκευή υλικών με βελτιωμένη θερμοηλεκτρική απόδοση [16].

### (ii) Νέα υλικά

Η προσπάθεια για μείωση της θερμικής αγωγιμότητας των κραμάτων, έχει επεκταθεί με τη χρήση των αποκαλούμενων “phonon glass electronic crystals”, στα οποία προτείνεται ότι οι κρυσταλλικές δομές, που αποτελούνται από αδύναμα συνδεδεμένα άτομα, πρέπει να άγουν τη θερμότητα όπως το γυαλί, αλλά να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα όπως σε ένα κρύσταλλο. [17]

Ένα υλικό που υπόσχεται υψηλή σχετική απόδοση ZT σε όλο το φάσμα θερμοκρασιών, μεταξύ εκείνων με βάση bismuth telluride και lead telluride, είναι ο σύνθετος ημιαγωγός  $\beta\text{-Zn}_4\text{Sb}_3$  [18]. Αυτό το υλικό παρουσιάζει εξαιρετικά χαμηλή θερμική αγωγιμότητα στη θερμοκρασία των 670K. Αυτό το υλικό είναι επίσης σχετικά φθινό και σταθερό σε αυτή τη θερμοκρασία.



Σημαντικές προσπάθειες γίνονται επίσης για τη βελτίωση των θερμοηλεκτρικών υλικών και προς άλλες κατευθύνσεις, εκτός από τη βελτίωση του βαθμού επίδοσής τους, όπως για παράδειγμα, στην αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος που αποδίδουν, τη μείωση του κόστους και την ανάπτυξη φιλικών προς το περιβάλλον υλικών. Για παράδειγμα, όταν το κόστος της απορριπτόμενης ενέργειας είναι χαμηλό ή πρακτικά μηδενικό, όπως στην ανάκτηση θερμότητας των αποβλήτων, τότε το κόστος ανά Watt καθορίζεται κυρίως από την ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας και την περίοδο λειτουργίας [19]. Οι σπάνιες ενώσεις  $\text{YbAl}_3$  [20], αν και έχουν ένα σχετικά χαμηλό βαθμό επίδοσης, μπορούν να αποδώσουν ισχύ σχεδόν τρεις φορές όσο οι ενώσεις bismuth telluride, ενώ οι ενώσεις  $\text{MgSn}$  έχουν σχεδόν την ίδια απόδοση, αλλά κοστίζει λιγότερο από το ένα τέταρτο της τιμής του [21].

Από την προηγούμενη δεκαετία οι επιστήμονες είναι αισιόδοξοι στην πεποίθησή τους ότι οι μικρές σε διαστάσεις δομές όπως τα κβαντικά φρεάτια (quantum wells) (υλικά που είναι τόσο λεπτά ώστε να ουσιαστικά να είναι δύο διαστάσεων, 2D), κβαντικά σύρματα (quantum wires) (εξαιρετικά μικρή διατομή και θεωρητικά σαν μονοδιάστατα και αναφερόμενα ως νανο-σύρματα), κβαντικές κουκίδες (quantum dots) που περιορίζονται κβαντικά σε όλες τις κατευθύνσεις και τα υπερπλέγματα (μια δομή κβαντικών φρεατίων, πολλαπλών επιπέδων), θα δώσουν ώθηση για την επίτευξη σημαντικής βελτίωσης του θερμοηλεκτρικού βαθμού επίδοσης [22]. Η προσδοκία είναι ότι οι μειωμένες διαστάσεις αυτών των δομών θα οδηγήσουν σε μια μείωση της θερμικής αγωγιμότητας του δικτυωτού πλέγματος με συνέπεια τη βελτίωση του βαθμού επίδοσης Z.

Αν και οι χαμηλές σε διαστάσεις δομές αναμενόταν αρχικά ότι θα έβρισκαν άμεση εφαρμογή στη μικροηλεκτρονική, η τεχνολογία είναι ακριβή και η εφαρμογή της σε μαζικές συσκευές προβληματική. Κατά κάποιον τρόπο τα νάνο-σύρματα φαίνονται να είναι μια πιο ελκυστική πρόταση για τις θερμοηλεκτρικές εφαρμογές από ότι τα κβαντικά υπερπλέγματα, επειδή η γεωμετρία της ροής ισχύος είναι ευνοϊκότερη και η διαδικασία επεξεργασίας και παραγωγής πιο συμβατή με την ήδη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία, από ότι η τεχνολογία με μοριακή επιταξία (MBE – τρόπος παραγωγής πολύ λεπτών στρωμάτων πάνω σε πυρίτιο).

Ένα πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Μίσιγκαν, επιδιώκει να ανακαλύψει νέα υλικά με μια πολύ βελτιωμένη θερμοηλεκτρική απόδοση. Ο στόχος του προγράμματος είναι να ανακαλυφθούν και να μελετηθούν νέα υλικά τριών και τεσσάρων καταστάσεων με στενά ενεργειακά χάσματα και σύνθετες ηλεκτρονικές δομές. Μετά από δεκαετή έρευνα, ανακάλυψαν μια νέα σύνθεση που περιέχει άργυρο, μόλυβδο, αντιμόνιο και τελλούριο δημιουργώντας ένα υλικό που μπορεί να παράγει μεγάλη τάση. Η επίδοσή του (ο συντελεστής ZT είναι μεγαλύτερος του 2,2) δείχνει να είναι η υψηλότερη, για υλικά που φτιάχνονται κατά μαζικό τρόπο, στις υψηλές θερμοκρασίες. Το υλικό αυτό, φαίνεται να είναι αποδοτικότερο στη μετατροπή της θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια από οποιοδήποτε άλλο παρόμοιο υλικό. Το κράμα αυτό, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στη μετατροπή σε

ηλεκτρισμό της θερμότητας από την εξάτμιση του αυτοκινήτου ή από τις καπνοδόχους των εργοστασίων ηλεκτροπαραγωγής. Μέχρι στιγμής έχει επιτευχθεί πειραματικά μετατροπή με βαθμό απόδοσης ως και 18%, ποσοστό που θεωρείται ιδιαίτερα υψηλό.

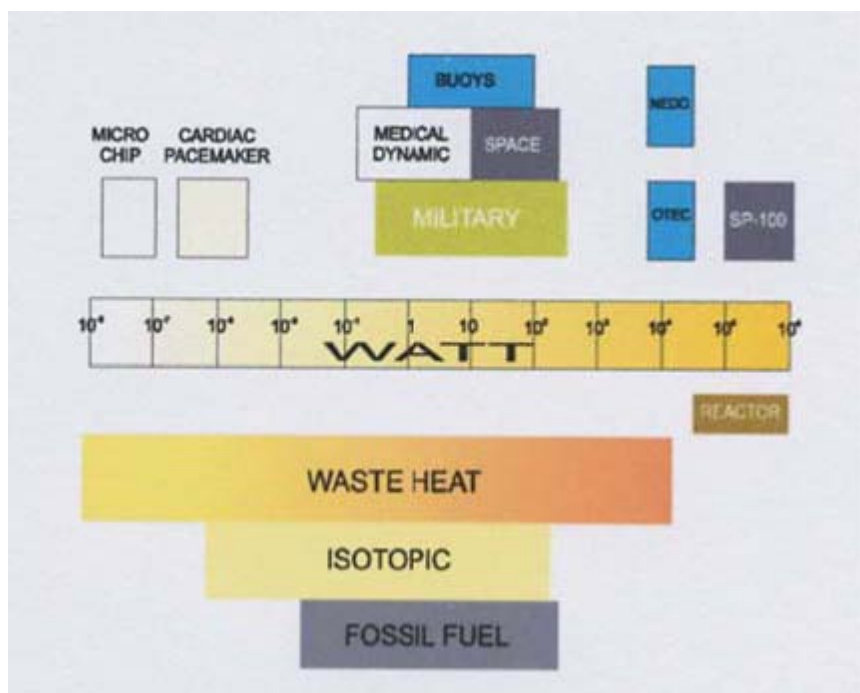
## 1.8 Εφαρμογές θερμοηλεκτρικών συστοιχιών στην παραγωγή ηλεκτρισμού [ηλεκτρικές γεννήτριες TE-generator (TEG)]

Πολλές μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως η καύση των ορυκτών καυσίμων και η πυρηνική διάσπαση, δημιουργούν τεράστιες ποσότητες απορριπτόμενης θερμότητας. Τα θερμοηλεκτρικά υλικά που μετατρέπουν τη θερμότητα άμεσα σε ηλεκτρική ενέργεια θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να ανακτήσουν μέρος αυτής της ενέργειας, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την απόδοση των συμβατικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Τα θερμοηλεκτρικά υλικά θα μπορούσαν, επίσης, να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα των ηλιακών κυψελών αλλά και να παραγάγουν ηλεκτρική ενέργεια από άλλες πηγές αποβολής θερμότητας, όπως είναι τα τσιπ και τα ψυγεία.

Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτοκίνητα και φορτηγά χρησιμοποιώντας τη θερμότητα που παράγεται από τον κινητήρα, ώστε να παραχθεί ηλεκτρισμός για τις ανάγκες του οχήματος. Τα δύο τρίτα της ενέργειας που παράγεται από την καύση των καυσίμων αποβάλλεται ως θερμότητα. Μόνο το ένα τρίτο χρησιμοποιείται για να κινηθεί το όχημα. Υπάρχει επομένως πολύ διαθέσιμη θερμότητα από την οποία μπορούμε να προσπαθήσουμε να δημιουργήσουμε ενέργεια.

Οπουδήποτε αλλού και αν υπάρχει θερμότητα, όπως σε κουζίνες, σταθερές μηχανές, ακόμη και σε συστήματα συλλογής ηλιακής ενέργειας, μπορεί να γίνει προσπάθεια μετατροπής της θερμότητας που "χάνεται" σε ενέργεια.

Υπό τον όρο ότι εφαρμόζεται μια διαφορά θερμοκρασίας στις επιφάνειες μιας θερμοηλεκτρικής συσκευής, θα μπορούσε να αποδοθεί ηλεκτρική ισχύς σε ένα εξωτερικό φορτίο. Η τάξη ισχύος που μπορούν να προσδώσουν οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες, κυμαίνεται από μερικά milli-microwatt, έως και εκατοντάδες watt στις ισοτοπικά τροφοδοτούμενες γεννήτριες για χρήση στην εξερεύνηση του διαστήματος. Οι εφαρμογές γεννητριών TEG μπορούν να ταξινομηθούν ως προς την πηγή θερμότητας που χρησιμοποιούν, σε τροφοδοτούμενες από ορυκτά καύσιμα, από ισότοπα (isotopic) και από τη θερμότητα αποβλήτων.



Σχήμα 1.8.1 – Εφαρμογές θερμοηλεκτρικών γεννητριών, τάξεις ισχύος και πηγές θερμότητας.

Θερμοηλεκτρικές γεννήτριες τροφοδοτούμενες από ορυκτά καύσιμα.

Η συχνότερη χρήση είναι στη βιομηχανία επικοινωνιών (στο ραδιόφωνο, την τηλεόραση, τα μικροκύματα και το τηλέφωνο), όπου η ανεξαρτησία της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας είναι σαφές πλεονέκτημα όταν δεν υπάρχουν ηλεκτρικά δίκτυα. Επίσης, είναι περισσότερο αξιόπιστες σε σύγκριση με τις μηχανοκίνητες γεννήτριες ή τις εναλλακτικές λύσεις ηλιακής ενέργειας.

Θερμοηλεκτρικές γεννήτριες τροφοδοτούμενες ισοτοπικά

Ενώ αρχικά αναπτύχθηκαν για να παρέχουν ισχύ σε διαστημικά οχήματα, οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες που τροφοδοτούνται με ραδιοϊσότοπο (RTG) έχουν ως τώρα βρει εφαρμογή σε ποικίλες επίγειες, θαλάσσιες και ιατρικές εφαρμογές [23].

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από θερμοηλεκτρικά στοιχεία έχει γνωρίσει μεγάλη εφαρμογή στις διαστημικές αποστολές [24]. Ένα μέρος της απαίτησης των δορυφόρων κατά τη διάρκεια της πρώτης δεκαετίας εξερεύνησης του διαστήματος της τάξης των 4 Watt παραγόταν από φωτοβολταϊκά συστήματα. Εντούτοις, από τη δεκαετία του '70, που η προσοχή στρέφεται προς τους απόμακρους πλανήτες και στις αποστολές στο Δία και παραπέρα, η χρήση των θερμοηλεκτρικών γεννητριών (TEG) προσφέρει πλεονεκτήματα βάρους έναντι των ηλιακών κυττάρων, δεδομένου ότι η ηλιακή ακτινοβολία είναι μειωμένη στις αποστάσεις αυτές.

Το πρώτο σύστημα σχετικά με τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία που χρησιμοποίησε η ΕΣΣΔ πήρε τον χαρακτηριστικό προσδιορισμό NNP-Buk. Το σύστημα αυτό παρήγαγε 2.5 έως 3 KW ηλεκτρική ισχύ. Περισσότερα από 30 συστήματα Buk προωθήθηκαν εντός της περιόδου 1970-1988. Η ισχύς αυξήθηκε στα 6kW στα

συστήματα NPP-Toraz που χρησιμοποιήθηκαν το 1987 και το 1988. Αν και απέδιδαν σχετικά υψηλή ισχύ, ένα σημαντικό μειονέκτημα ήταν η πολύ μικρή διάρκεια ζωής τους (1-2 έτη).

#### Θερμοηλεκτρικές γεννήτριες τροφοδοτούμενες από τη θερμότητα των αποβλήτων

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες που τροφοδοτούνται από θερμότητα αποβλήτων, μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τα επίπεδα ισχύος που υμνο ρύ να αποδώσουν.

Οι μικρής ισχύος αποδίδουν λιγότερο από 1 Watt. Ένα παράδειγμα εφαρμογής είναι η χρήση της θερμότητας που αποβάλλεται από το ανθρώπινο σώμα, για να τροφοδοτήσει ένα ρολόι χειρός [25].

Οι εφαρμογές σε ενδιάμεσα επίπεδα ισχύος, δεκάδων έως εκατοντάδων Watt, καλύπτουν καθημερινές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων κάποιων παρασιτικών εφαρμογών όπου η θερμοηλεκτρική γεννήτρια χρησιμοποιεί μέρος της θερμότητας που προορίζεται για κάποιον άλλο σκοπό και τη χρησιμοποίηση της θερμότητας που αποβάλλεται από εμβολοφόρους κινητήρες (αυτοκίνητα). Θερμοστοιχεία βασισμένα στην τεχνολογία lead-telluride με θερμοκρασίες της θερμής και ψυχρής επιφάνειας 550°C και 50°C, μπορούν να αποδώσουν 50 W, ισχύ που θα μπορούσε να τροφοδοτήσει την αντλία κυκλοφορίας του συστήματος.

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες έχουν χρησιμοποιηθεί με σκοπό να παρέχουν μικρές ποσότητες ηλεκτρικής ισχύος σε μακρινές περιοχές, όπως για παράδειγμα σε περιοχές της βόρειας Σουηδίας [26], ως εναλλακτική λύση των δαπανηρών γεννητριών βενζίνης. Η γεννήτρια χρησιμοποιεί τη θερμότητα από μια σόμπα, με την ψυχρή επιφάνεια να ψύχεται από ένα ανεμιστήρα ισχύος 2,2W (12V). Η γεννήτρια αυτή παράγει περίπου 10 Watt. Ένα άλλο παράδειγμα είναι σε ένα σύστημα κεντρικής θέρμανσης, με τα θερμοστοιχεία τοποθετημένα μεταξύ της πηγής θερμότητας και του υδροθαλάμου [27].

Αν και ένας εμβολοφόρος κινητήρας μετατρέπει τη χημική ενέργεια των καυσίμων σε μηχανικό έργο, ένα μη αμελητέο ποσό ενέργειας διαχέεται στο περιβάλλον μέσω των καυσαερίων της εξάτμισης, του ψυκτικού υγρού, του συστήματος λίπανσης και της ακτινοβολίας. Η μελέτη θερμοηλεκτρικών διατάξεων για χρήση στο αυτοκίνητο είχε ξεκινήσει ήδη από το 1914.

Τα μεγάλα ποσά θερμότητας συνδέονται με τους μεγάλους πετρελαιοκινητήρες φορτηγών. Έχει δημιουργηθεί ένα σύστημα θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, το οποίο χρησιμοποιεί τη θερμότητα του λιπαντικού μέσου του κινητήρα και μπορεί να προσδώσει έως και 500W [28].

Θερμοηλεκτρικές γεννήτριες για χρήση σε επιβατικά αυτοκίνητα έχουν κατασκευαστεί από διάφορους κατασκευαστές [29, 30], έχοντας όμως σχετικά χαμηλή απόδοση, περίπου 1~2%. [31].

## 1.9 Εφαρμογές θερμοηλεκτρικών διατάξεων στην παραγωγή ψύξης [TE-cooler (TEC)]

Οι εφαρμογές των θερμοηλεκτρικών διατάξεων καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα προϊόντων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για στρατιωτικούς, ιατρικούς, βιομηχανικούς και επιστημονικούς εξοπλισμούς, καθώς και από οργανισμούς τηλεπικοινωνιών. Οι χρήσεις τους μπορεί να περιλαμβάνουν από τα απλά δοχεία ψύξης τροφίμων και ποτών, ως τα εξαιρετικά περίπλοκα συστήματα ελέγχου θερμοκρασίας στα βλήματα και τα διαστημικά οχήματα. Θερμοηλεκτρικές διατάξεις χρησιμοποιούνται στα μικρά ψυγεία ποτών, που συνδέονται στην υποδοχή του αναπτήρα στα αυτοκίνητα ή ακόμη και σε περιλαίμια που κρατούν ζεστούς τους ανθρώπους το χειμώνα ή τους ψύχουν το καλοκαίρι.

Αντίθετα από μία απλή ψύκτρα, μια θερμοηλεκτρική διάταξη επιτρέπει τη μείωση της θερμοκρασίας ενός αντικειμένου κάτω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, καθώς επίσης και τη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας αντικειμένων, τα οποία υπόκεινται σε μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου απαιτείται αφαίρεση θερμότητας, η οποία μπορεί να είναι της τάξης των μερικών milliwatt έως και αρκετές χιλιάδες Watt. Τα μεγάλα θερμοηλεκτρικά συστήματα της τάξης των KW έχουν κατασκευαστεί στο παρελθόν για εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως η ψύξη μέσα σε υποβρύχια και σε τρένα.

Μερικές από τις εφαρμογές των θερμοηλεκτρικών διατάξεων [32] είναι:

- Θερμιδομετρητές
- Ψύξη αιθουσών
- Συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας
- Αφυγραντές
- Ψύξη ηλεκτρονικών συσκευών
- Ψύξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων
- Υπέρυθροι ανιχνευτές
- Υπέρυθρα ραντάρ
- Ενισχυτές ήχου
- Εξοπλισμός νυχτερινής όρασης
- Ψυγεία και συστήματα ψύξης σε αεροσκάφη, αυτοκίνητα, βάρκες, ξενοδοχεία, φορητά ψυγεία, φαρμακευτικά είδη
- Φωριαμοί εστιατορίων
- Θερμικά γυαλιά
- Θερμικές συσκευές ανάλυσης DNA και αίματος
- Δοχεία ψύξης νερού και ποτών
- Αποθήκες κρασιού

### Πλεονεκτήματα θερμοηλεκτρικής ψύξης

- Η χρήση των θερμοηλεκτρικών διατάξεων παρέχει συχνά λύσεις και σε μερικές περιπτώσεις τη μοναδική λύση, στη διαχείριση της θερμότητας. Ενώ καμία μέθοδος ψύξης δεν είναι ιδανική από κάθε άποψη, οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των εναλλακτικών τεχνολογιών. Μερικά από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των θερμοηλεκτρικών διατάξεων περιλαμβάνουν:
- Κανένα κινούμενο μέρος: Μια θερμοηλεκτρική διάταξη TE λειτουργεί ηλεκτρικά χωρίς οποιαδήποτε κινούμενα μέρη, οπότε δε χρειάζονται συντήρηση.
- Μικρά σε μέγεθος και βάρος: Ένα θερμοηλεκτρικό σύστημα ψύξης είναι πολύ μικρότερο και ελαφρύτερο από ένα αντίστοιχο μηχανικό σύστημα. Επιπλέον, διατίθενται σε διάφορα τυποποιημένα μεγέθη, ώστε να καλύψουν τις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής.
- Δυνατότητα ψύξης κάτω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος: Αντίθετα από μία συμβατική ψύκτρα της οποίας η θερμοκρασία είναι απαραίτητως πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, μια θερμοηλεκτρική διάταξη ψύξης που εφάπτεται με την ίδια ψύκτρα έχει τη δυνατότητα να μειώσει τη θερμοκρασία κάτω από αυτή του περιβάλλοντος.
- Δυνατότητα θέρμανσης και ψύξης με την ίδια διάταξη: Οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις μπορούν είτε να θερμάνουν, είτε να ψύξουν, ανάλογα με την πολικότητα της εφαρμοζόμενης τάσης. Αυτό το χαρακτηριστικό απαλείφει την ανάγκη ξεχωριστών συστημάτων ψύξης και θέρμανσης.
- Ακριβής έλεγχος θερμοκρασίας: Με ένα κατάλληλο κύκλωμα ελέγχου θερμοκρασίας, οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις μπορούν να ελέγξουν τη θερμοκρασία με ακρίβεια  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ .
- Υψηλή αξιοπιστία: Οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις παρέχουν πολύ υψηλή αξιοπιστία, λόγω της συμπαγούς κατασκευής τους. Αν και η αξιοπιστία εξαρτάται από την κάθε εφαρμογή, η διάρκεια ζωής μιας τυπικής θερμοηλεκτρικής διάταξης είναι μεγαλύτερη από 200.000 ώρες λειτουργίας.
- Λειτουργία σε οποιοδήποτε προσανατολισμό: Οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιοδήποτε προσανατολισμό και σε περιβάλλον μηδενικής βαρύτητας. Κατά συνέπεια χρησιμοποιούνται σε πολλές διαστημικές εφαρμογές.
- Ψύξη σημείων: Με μία θερμοηλεκτρική διάταξη είναι δυνατό να ψυχθεί ένα συγκεκριμένο σημείο μόνο, καθιστώντας περιττή την ψύξη ολόκληρου του συστήματος.
- Φιλικό προς το περιβάλλον: Τα συμβατικά συστήματα ψύξης δεν μπορούν να κατασκευαστούν χωρίς χρησιμοποίηση των χλωροφθορανθράκων ή

άλλων χημικών ουσιών που είναι επιβλαβή στο περιβάλλον. Οι θερμοηλεκτρικές συσκευές δεν χρησιμοποιούν ή δεν παράγουν αέρια οποιουδήποτε είδους.



## 1.10 Ιστορία των θερμοηλεκτρικών στοιχείων

Η μελέτη των θερμοηλεκτρικών φαινομένων άρχισε το 1822, όταν ο Γερμανός φυσικός Thomas Johann Seebeck (1770-1831), στο άρθρο του *“The Magnetic Polarization of Metals and Ores Produced by Temperature Difference (Magnetische Plarisation der Matalle und Erze durch Temperatur-Differenz)”*, που δημοσιεύθηκε στα πρακτικά της Πρωσικής Ακαδημίας Επιστημών, παρατήρησε ότι ένα ηλεκτρικό κύκλωμα κατασκευασμένο από δύο διαφορετικά μέταλλα, εφ’ όσον οι επαφές τους διατηρούνται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, προκαλεί μια απόκλιση στην βελόνα μαγνητικής πυξίδας. Παρατήρησε ακόμη, ότι η απόκλιση της βελόνας είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στα δύο μέταλλα και ότι η ένταση του μαγνητικού πεδίου μεταβάλλεται για διαφορετικά ζεύγη μετάλλων στην ίδια θερμοκρασιακή διαφορά. Πειραματίστηκε με πλήθος υλικών, ανάμεσα στα οποία υπήρχαν και κάποιοι ημιαγωγοί και τα κατέταξε με βάση το γινόμενο  $\alpha \cdot \sigma$ , όπου  $\sigma$  η ηλεκτρική τους αγωγιμότητα. Η σταθερά αναλογίας  $\alpha$  είναι σήμερα γνωστή, ως συντελεστής Seebeck.

Ο Seebeck πίστευε ότι η θερμοκρασιακή διαφορά προκαλεί μαγνητικό πεδίο, αρνούμενος την ηλεκτρική φύση του φαινομένου, σύντομα όμως διευκρινίστηκε από τον Hans Oersted, ότι η θερμοκρασιακή διαφορά προκαλεί ηλεκτρική τάση, η οποία σε ένα κλειστό κύκλωμα παράγει ρεύμα ανάλογο της θερμοκρασιακής διαφοράς. Το ρεύμα αυτό δημιουργεί από επαγωγή το μαγνητικό πεδίο. Ο Oersted ονόμασε το φαινόμενο θερμοηλεκτρικό, ενώ ο Seebeck επέμενε στον όρο θερμομαγνητισμός.

Το 1834 ο Γάλλος ωρολογοποιός Jean Charles Athanase Peltier, παρατήρησε ότι το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο μπορεί να λειτουργήσει και προς την αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή η εφαρμογή μιας τάσης, δημιουργεί μια θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στα δύο διαφορετικά μέταλλα. Όπως και ο Seebeck, ο Peltier δεν είχε αντιληφθεί πλήρως την φύση του φαινομένου, ισχυριζόμενος ότι δεν ισχύει για χαμηλές εντάσεις ο νόμος των Joule – Lenz, που προβλέπει ότι η διέλευση ρεύματος προκαλεί εκπομπή θερμότητας. Τέσσερα χρόνια αργότερα, ο Ρώσος ακαδημαϊκός Emily Lenz, έδειξε ότι πρόκειται για αυτόνομο φυσικό φαινόμενο, που συνίσταται στην απορρόφηση ή απελευθέρωση πρόσθετης θερμότητας (πέραν της θερμότητας Joule) και η ψύξη ή θέρμανση της επαφής, εξαρτάται από την φορά του ρεύματος που διέρχεται απ’ αυτή.

Η θερμοδυναμική θεώρηση των δύο φαινομένων από τον William Thomson (μετέπειτα λόρδο Kelvin) το 1851, έδωσε μια επαρκή εξήγησή τους, έδειξε την συσχέτιση μεταξύ τους και τον οδήγησε στην πρόβλεψη ενός τρίτου φαινομένου, που σήμερα είναι γνωστό ως φαινόμενο Thomson. Στο φαινόμενο αυτό, κατά την διέλευση ρεύματος μέσα από ένα ομογενές αγωγίμο υλικό με σταθερή θερμοκρασιακή διαβάθμιση, παράγεται ή απορροφάτε θερμότητα, ανάλογη με την ένταση του ρεύματος και με την θερμοκρασιακή διαβάθμιση.

Σε δυο εργασίες του το 1905 και 1911 ο Γερμανός Edmund Altenkirch έδειξε ότι τα υλικά που είναι κατάλληλα για αποδοτική εφαρμογή των θερμοηλεκτρικών φαινομένων, θα πρέπει να παρουσιάζουν μεγάλη τιμή του συντελεστή Seebeck, με ταυτόχρονα χαμηλή θερμική αγωγιμότητα  $\lambda$  και υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Τα χαρακτηριστικά αυτά ενσωματώθηκαν στην τιμή  $Z = \alpha^2 \sigma / \lambda$  που σήμερα είναι γνωστή ως ενδείκτης ποιότητας του υλικού.

Στα τέλη της δεκαετίας του '30, η ανάπτυξη των συνθετικών ημιαγωγών έδωσε θερμοηλεκτρικά υλικά με συντελεστή Seebeck μεγαλύτερο κατά μια τάξη μεγέθους, σε σχέση με τα μέταλλα και κράματά του που είχαν μελετηθεί ως τότε και το επιστημονικό ενδιαφέρον για τα θερμοηλεκτρικά φαινόμενα ανανεώθηκε. Το 1947 στα εργαστήρια της Westinghouse η Maria Telkes κατασκεύασε θερμοηλεκτρική γεννήτρια που χρησιμοποιούσε την ηλιακή θερμότητα, με βαθμό απόδοσης γύρω στο 3%. Το 1949 ο Abram Fedorovich Ioffe ανέπτυξε μια θεωρία για τα ημιαγωγά θερμοστοιχεία, η οποία χρησιμοποιείται έως σήμερα. Η έρευνα σε σύνθετους ημιαγωγούς (κυρίως για πιθανές εφαρμογές τρανζίστορ), οδήγησε σε νέα υλικά με βελτιωμένες θερμοηλεκτρικές ιδιότητες. Το 1956 ο Ioffe έδειξε ότι ο λόγος της θερμικής προς την ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός θερμοηλεκτρικού υλικού, μπορεί να μειωθεί με την προσθήκη ενός ισόμορφου στοιχείου ή ένωσης. Την εποχή αυτή, κυρίως λόγω των πιθανών στρατιωτικών εφαρμογών της θερμοηλεκτρικής τεχνολογίας, άρχισε μια εντατική έρευνα πάνω στα υλικά, η οποία οδήγησε στην ανακάλυψη ημιαγωγών με αδιάστατο  $ZT$  που προσεγγίζει την τιμή 1,5.

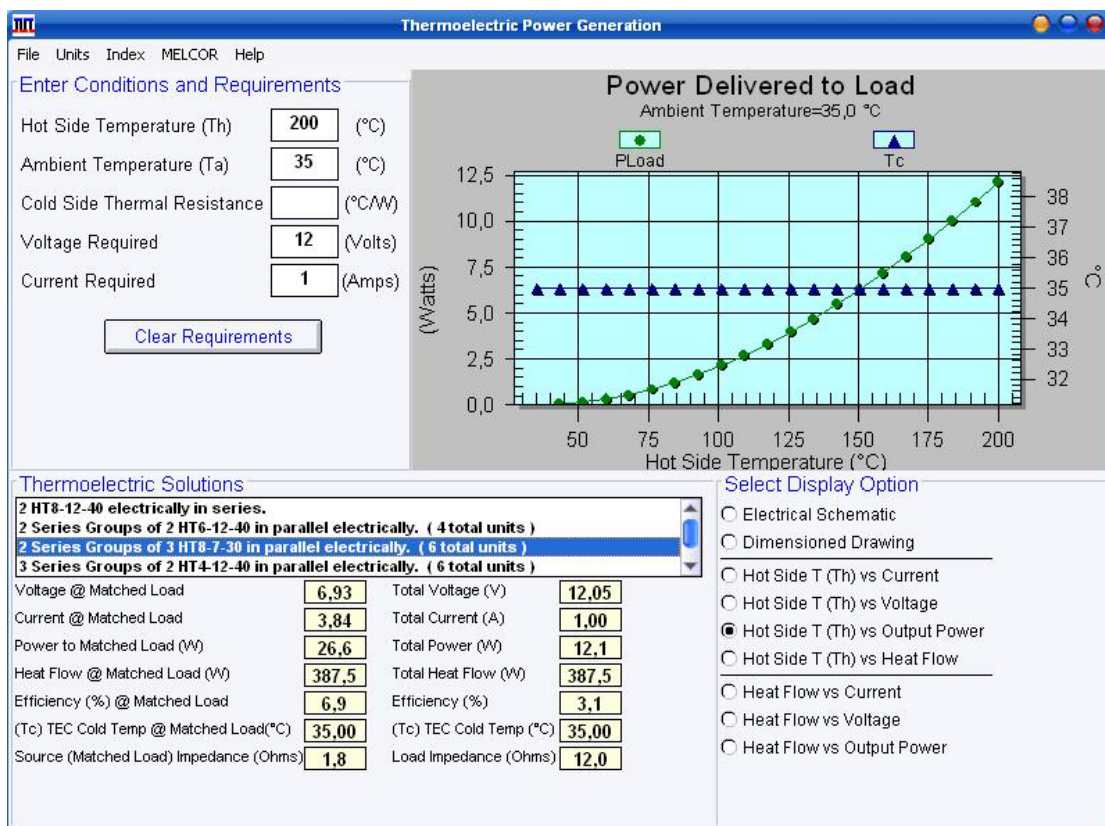
Σήμερα, η ανάπτυξη των θερμοηλεκτρικών υλικών και διατάξεων συνεχίζει να έχει σημαντικό ενδιαφέρον, λόγω των πιθανών εφαρμογών τους τόσο στην ανάκτηση απορριπτόμενης θερμικής ενέργειας και σε εφαρμογές ήπιων μορφών ενέργειας, όσο και στην ψύξη ευαίσθητων ηλεκτρονικών διατάξεων.

## 2. ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΩΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ (TE Generator – TEG)

### 2.1 Υπολογισμός της ισχύος και απόδοσης TEG για διάφορες θερμοκρασίες $T_h$ και $T_c$ με χρήση του λογισμικού Aztec

Κάθε εταιρία κατασκευής θερμοηλεκτρικών γεννητριών έχει αναπτύξει κάποιο λογισμικό ή κάποιο αλγόριθμο, το οποίο σύμφωνα με τις ανάγκες μας, μας παρέχει πληροφορίες για τον τύπο του θερμοηλεκτρικού στοιχείου που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε. Έτσι, γνωρίζοντας τις θερμοκρασίες στις οποίες θα λειτουργήσει το σύστημά μας, καθώς και τις τιμές της ισχύος που θα θέλαμε να αποδώσει η διάταξή μας, το κάθε λογισμικό μας πληροφορεί για τον τύπο του στοιχείου που είναι καταλληλότερος για τις ανάγκες μας, καθώς και για το πλήθος που πρέπει να χρησιμοποιήσουμε, ώστε να έχουμε την επιθυμητή ισχύ.

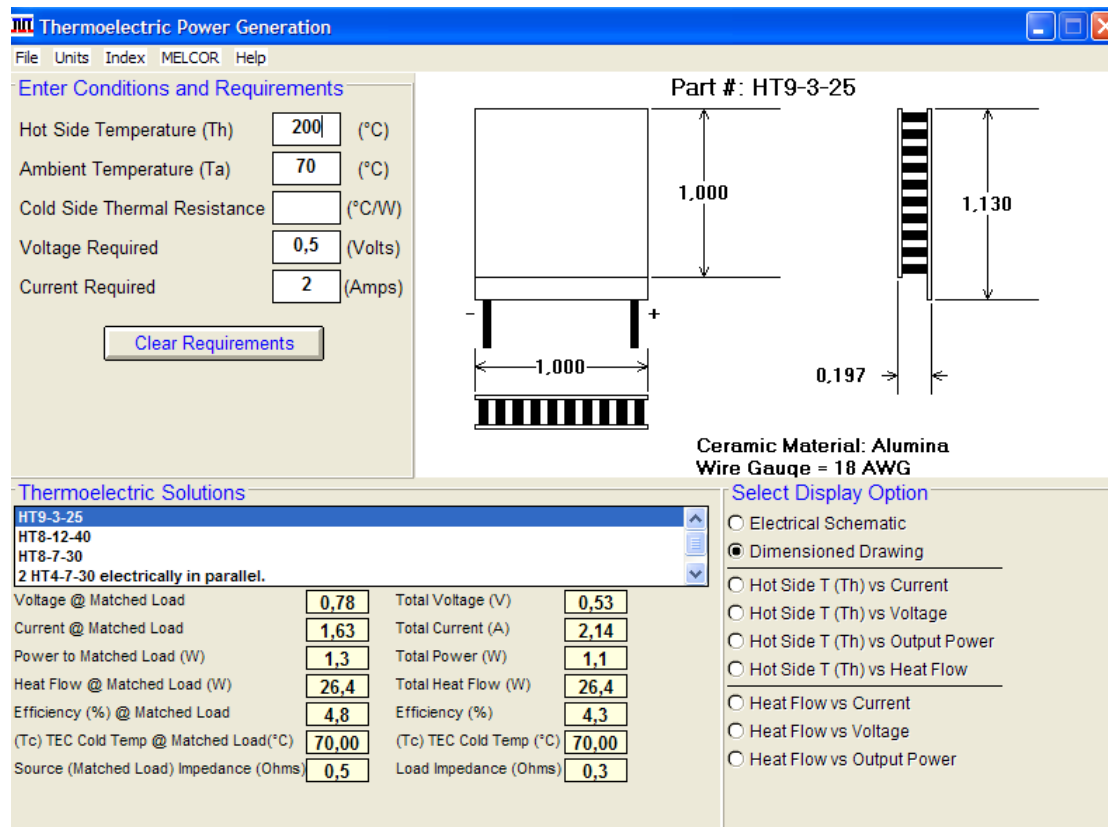
Ένα τέτοιο λογισμικό είναι το “Aztec” της εταιρίας “Melcor”. Το συγκεκριμένο λογισμικό, μπορεί να υπολογίζει τον κατάλληλο τύπο θερμοηλεκτρικού στοιχείου που πρέπει να χρησιμοποιήσουμε, είτε πρόκειται για ψύξη/θέρμανση είτε πρόκειται για χρήση του ως γεννήτρια. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 2.1.1.



Σχήμα 2.1.1 – Το λογισμικό Aztec

Έτσι, εισάγοντας τις θερμοκρασίες του συστήματός μας, δηλαδή τις τιμές της θερμοκρασίας της θερμής και της ψυχρής επιφάνειας του θερμοστοιχείου, καθώς και τις τιμές της τάσης και της έντασης που θα θέλαμε να έχουμε ως έξοδο από αυτό, το λογισμικό μας δίνει κάποιες λύσεις. Μας πληροφορεί για τα κατάλληλα, σύμφωνα με τα δεδομένα που δώσαμε θερμοστοιχεία, το πλήθος που θα χρειαστούμε ανάλογα με την επιλογή μας, καθώς και για τον τρόπο σύνδεσής τους. Υπολογίζει επίσης θεωρητικά, την ισχύ που θα πάρουμε, το βαθμό απόδοσης του συστήματος και δημιουργεί διαγράμματα, έτσι ώστε να μπορέσουμε να δούμε σε ποιες θερμοκρασίες μπορεί να αποδώσει σωστά το κάθε θερμοηλεκτρικό στοιχείο.

Στο παράδειγμα του σχήματος 2.1.1, η θερμοκρασία της θερμής επιφάνειας του θερμοστοιχείου είναι 200°C, της ψυχρής 35°C, ενώ η απαιτούμενη από εμάς τάση και ένταση, είναι 12V και 1A. Εφόσον έχουμε εισάγει αυτά τα στοιχεία, το λογισμικό υπολογίζει ποια θερμοστοιχεία μπορούν να ανταπεξέλθουν. Για παράδειγμα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε δύο TEG HT8-12-40 συνδεδεμένα σε σειρά, είτε (όπως και έχουμε επιλέξει) 6 συνολικά TEG HT8-7-30, τα οποία θα είναι συνδεδεμένα παράλληλα ανά τρία και έπειτα σε σειρά. Με αυτό τον τρόπο, το θερμοηλεκτρικό στοιχείο θα αποδώσει 12,05V, 1A και 12,1W συνολική ισχύ. Επίσης, ο βαθμός απόδοσής του θα είναι 3,1%.



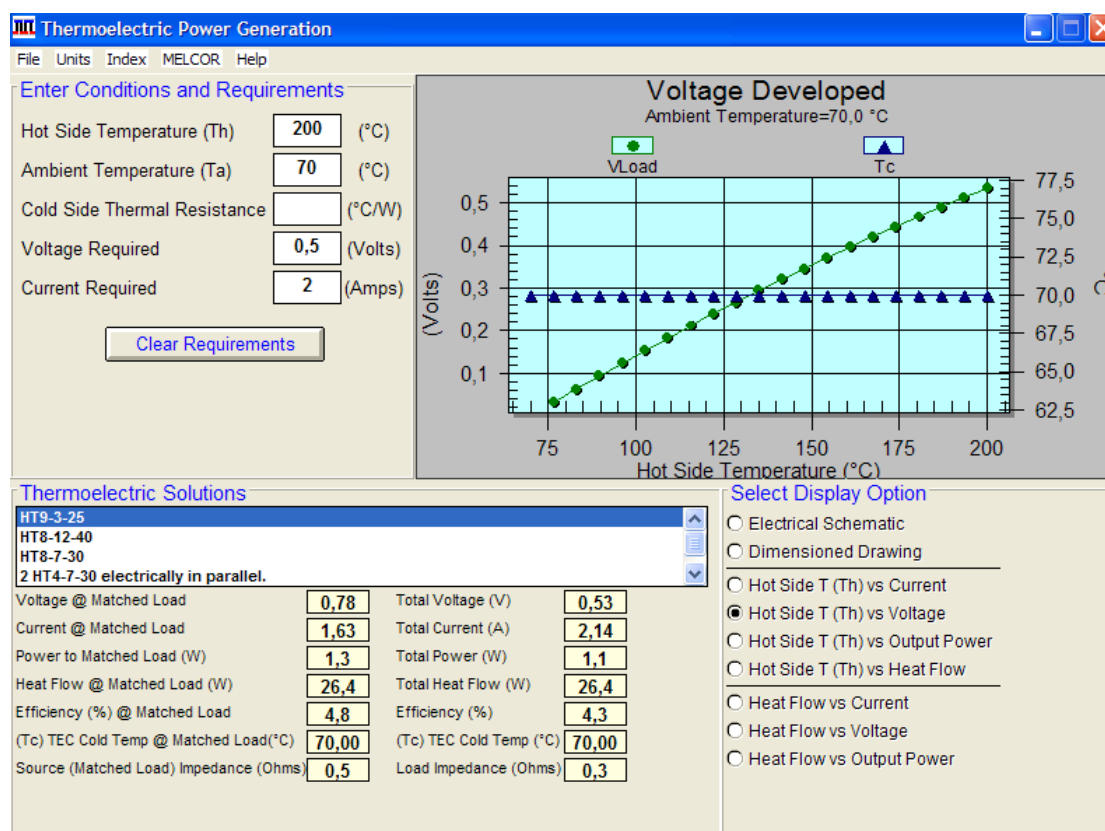
Σχήμα 2.1.2 – Αποδιδόμενη ισχύς, τάση, ένταση, βαθμός απόδοσης και θερμικές ροές του TEG HT9-3-25 για θερμοκρασίες  $T_H=200$  και  $T_C=70$  C.

Χρησιμοποιήσαμε το λογισμικό αυτό για να υπολογίσουμε την αναμενόμενη απόδοση του TEG HT9-3-25 που είχαμε διαθέσιμο στην πειραματική μας συσκευή, για διάφορες θερμοκρασίες της θερμής και ψυχρής πλευράς.

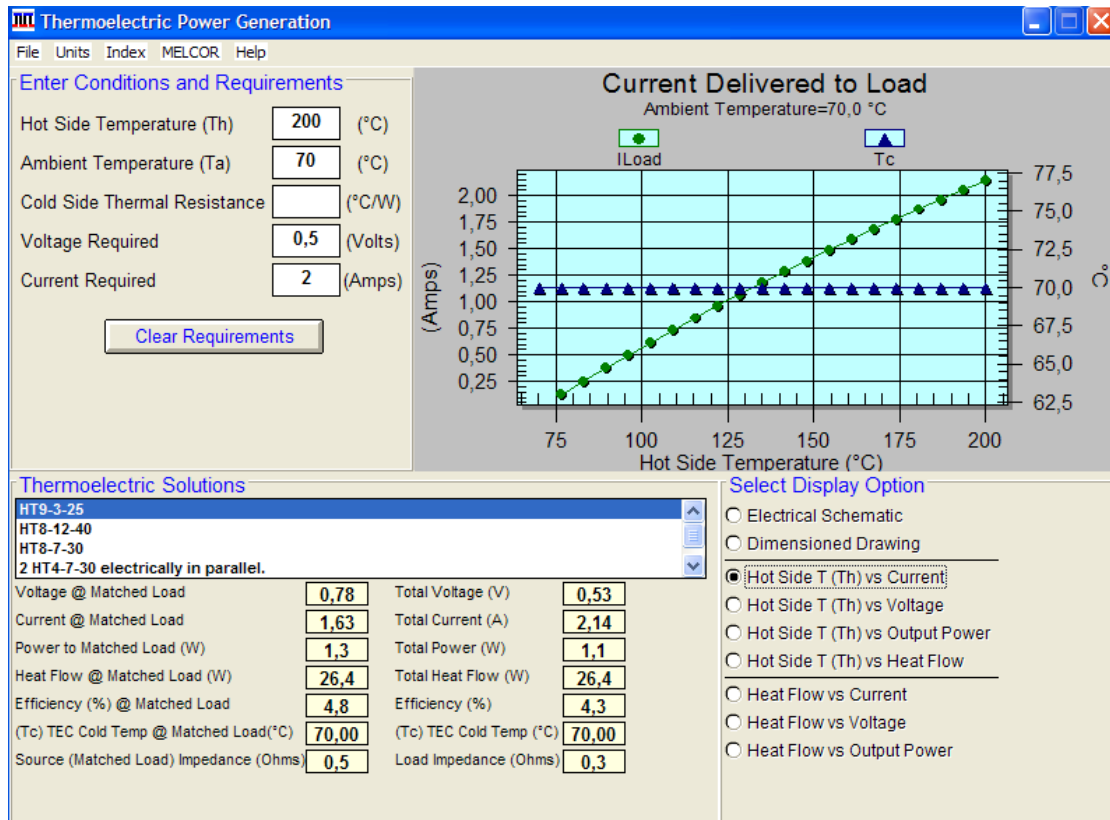
Έτσι π.χ. για θερμοκρασίες της θερμής και ψυχρής πλευράς  $T_H=200\text{ C}$  και  $T_C=70\text{ C}$  αντίστοιχα (σχήμα 2.1.2), το λογισμικό δίνει αναμενόμενη μέγιστη απόδοση ισχύος 1,3 W. Για να πάρουμε τη μέγιστη αυτή ισχύ, πρέπει η αντίσταση του ηλεκτρικού φορτίου μας να είναι ίση με την εσωτερική αντίσταση του TEG στη συγκεκριμένη θερμοκρασία, δηλαδή ίση με 0,5 Ω.

Αντίστοιχα, για το ίδιο TEG, το λογισμικό υπολογίζει πως μεταβάλλεται η αναμενόμενη τάση (σχήμα 2.1.3) και η αναμενόμενη ένταση (σχήμα 2.1.4) συναρτήσει της θερμοκρασίας της θερμής πλευράς.

Με δεδομένο ότι η θερμοκρασία της θερμής πλευράς δεν πρέπει να ξεπεράσει τους 220 C, λόγω κινδύνου καταστροφής του TEG, η αναμενόμενη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς της συσκευής μας εκτιμήθηκε περί το 1 – 1,5 W.



Σχήμα 2.1.3 – Αποδιδόμενη τάση του TEG HT9-3-25 συναρτήσει της θερμοκρασίας της θερμής πλευράς.



Σχήμα 2.1.4 – Αποδιδόμενη ένταση του TEG HT9-3-25 συναρτήσει της θερμοκρασίας της θερμής πλευράς.

## 2.2 Σχεδιαστικές αρχές μιας θερμοηλεκτρικής διάταξης που θα χρησιμοποιηθεί ως γεννήτρια

Μία βασική αρχή για την σχεδίαση μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας (TE-Generator, TEG) με δεδομένες τις θερμοκρασίες της ψυχρής και θερμής δεξαμενής αντίστοιχα και δεδομένο θερμοηλεκτρικό υλικό, είναι η μεγιστοποίηση των θερμικών ροών διαμέσου του TEG και η ελαχιστοποίηση των θερμικών ροών που παρακάμπτουν το TEG.

Ένα πολύ σημαντικό θέμα είναι η επιλογή των βέλτιστων εναλλακτών θερμότητας από το θερμαίνον ρευστό προς το TEG και από το TEG προς το ψύχον ρευστό. Γενικά οι εναλλάκτες θερμότητας υγρού έχουν για την ίδια τάξη μεγέθους σημαντικά καλύτερο συντελεστή μετάδοσης θερμότητας από αυτούς με αέρα. Αν το ρευστό που προσφέρει ή απάγει την θερμότητα είναι αέρας, τότε πρέπει για τον συγκεκριμένο χώρο που προσφέρεται να επιλεγεί εναλλάκτης με βέλτιστο αριθμό, μέγεθος και μορφή πτερυγίων. Η υποβοήθηση της κυκλοφορίας του αέρα (με προσθήκη ανεμιστήρα) αυξάνει σημαντικά τον συντελεστή μετάδοσης της θερμότητας ή ακόμα μειώνει τον όγκο του εναλλάκτη, αλλά πρέπει να εξεταστεί κατά πόσο η δαπάνη ηλεκτρικής ενέργειας από τον ανεμιστήρα μειώνει τον συνολικό βαθμό απόδοσης της όλης διάταξης.

Για την μεγιστοποίηση των θερμικών ροών διαμέσου του TEG, πρέπει να ελαχιστοποιηθούν όσο είναι δυνατόν οι θερμικές αντιστάσεις των επιφανειών και των υλικών που μεσολαβούν. Για να επιτευχθεί αυτό, είναι απαραίτητο να επιλεγούν τα πλέον θερμοαγώγιμα υλικά που ταυτόχρονα εκπληρώνουν τις απαιτήσεις μηχανικών ιδιοτήτων και αντοχής στις θερμοκρασίες λειτουργίας του TEG. Αντίστοιχα, οι επιφάνειες επαφής θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο επίπεδες και λείες (με μέση τραχύτητα 25  $\mu\text{m}$  και μέγιστη 75  $\mu\text{m}$ ) για μέγιστη επαφή. Για την αντικατάσταση του αέρα στα ενδιάμεσα κενά επαφής των επιφανειών, συνιστάται η χρήση κάποιας θερμοαγώγιμης ουσίας (thermal compound, thermal grease). Τέτοιες ουσίες (με συντελεστή θερμοαγωγιμότητας μεγαλύτερο από του αέρα αλλά μικρότερο των μετάλλων ή των κεραμικών υλικών), είναι διάφοροι τύποι θερμοαγώγιμης σιλικόνης καθώς και μη σιλικονούχες συνθέσεις γραφίτη,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , κ.α. Ωστόσο, η τοποθέτηση της θερμοαγώγιμης ουσίας πάνω στις επιφάνειες κατά την συναρμολόγηση, είναι μια ευαίσθητη διαδικασία που πρέπει να γίνει με μεγάλη προσοχή, επειδή η προσθήκη μεγάλης ποσότητας αποτρέπει την μέγιστη επαφή μετάλλου-μέταλλου (που έχει πολύ μεγαλύτερο συντελεστή θερμοαγωγιμότητας), ενώ πολύ μικρή ποσότητα θερμοαγώγιμης ουσίας αφήνει ενδιάμεσα κενά αέρος. Η σύσφιξη των επιφανειών, είναι επίσης σημαντικός παράγοντας στην επίτευξη μικρής θερμικής αντίστασης, επειδή βελτιστοποιεί την επαφή και διορθώνει ενδεχόμενες μικροαποκλίσεις επιπεδότητας των επιφανειών. Η συνιστώμενη πίεση επαφής είναι 2 – 4 MPa. [33]

Για την ελαχιστοποίηση των θερμικών ροών που παρακάμπτουν το TEG, απαιτείται η χρήση θερμομονωτικού υλικού όπως π.χ. υαλοβάμβακας, που να συνδυάζει αντοχή στις θερμοκρασίες λειτουργίας του TEG και μεγάλη μονωτική ικανότητα. Μακροσκοπικά, τα θερμομονωτικά υλικά είναι κατά κανόνα στερεά υλικά με συντελεστή θερμοαγωγιμότητας μεγαλύτερο του αέρα, που εγκλωβίζουν κυψελίδες αέρα ή άλλου αερίου σε πολύ μεγάλο ποσοστό του συνολικού τους όγκου. Ουσιαστικά εμποδίζουν την μετάδοση θερμότητας λόγω συναγωγής (δηλ. μετάδοση θερμότητας με κίνηση του αέρα). Για την αποτελεσματική λειτουργία τους σύμφωνα με τις προδιαγραφές, τα υλικά αυτά δεν πρέπει να συμπιέζονται. Πέρα από τα μονωτικά υλικά του τύπου αυτού, υπάρχουν και τα διαφόρων τύπων συμπαγή θερμομονωτικά υλικά με μεγαλύτερη μηχανική αντοχή, τα οποία όμως έχουν κατά κανόνα μεγαλύτερο συντελεστή θερμοαγωγιμότητας από τα προηγούμενα. Σε αντικατάσταση του μονωτικού υλικού, έχει προταθεί από ερευνητές η χρήση ατμόσφαιρας κενού (με λείανση των επιφανειών για μείωση των θερμικών απωλειών από ακτινοβολία), αλλά η λύση αυτή δεν προσφέρεται για πρακτικές εφαρμογές.

Η μείωση των θερμογεφυρών, είναι ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας στη σχεδίαση μιας διάταξης TEG. Όταν πρέπει να χρησιμοποιηθούν κοχλίες για τη σύσφιξη, οι θερμογέφυρες δεν μπορούν να αποφευχθούν, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μονωτικά παρεμβύσματα στις επιφάνειες επαφής των περικοχλίων. Δυστυχώς όμως, το υλικό των παρεμβυσμάτων είναι ευαίσθητο σε πλαστική παραμόρφωση, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της απαραίτητης σύσφιξης με την πάροδο του χρόνου.

Όλες οι παραπάνω απαιτήσεις, προϋποθέτουν πολύ επιμελημένη συναρμολόγηση της διάταξης. Οι επιφάνειες επαφής πρέπει αφού λειανθούν, να καθαριστούν και να απολιπανθούν με επιμέλεια. Η τοποθέτηση του ενδιάμεσου θερμοαγωγίμου λιπαντικού πρέπει να γίνει πολύ προσεκτικά (συνιστάται η χρήση ενός ελαστικού roller) και στη συνέχεια οι επιφάνειες να συρθούν η μία πάνω στην άλλη ώστε να γεμίσουν τα ενδιάμεσα κενά και να απομακρυνθεί η υπερβάλλουσα ποσότητα. Πριν τη σύσφιξη, τα τμήματα της διάταξης πρέπει να συμπιεστούν για μερικές ώρες με ένα μικρό βάρος ώστε να πάρουν την οριστική τους θέση. Για να είναι ελεγχόμενη η σύσφιξη με κοχλίες, πρέπει να γίνει με ροπόκλειδο διαδοχικά και κατά βήματα, ώστε να αποφευχθούν οι ανομοιόμορφες τάσεις.

Η επιλογή του καταλληλότερου τύπου και αριθμού των TEG-modules, ανάλογα με την εφαρμογή και το προβλεπόμενο ηλεκτρικό φορτίο, είναι επίσης πολύ σημαντική. Όπως προαναφέρθηκε, η παραγόμενη ισχύς του TEG μεγιστοποιείται όταν η αντίσταση του φορτίου γίνει ίση με την εσωτερική αντίσταση του TEG, ενώ η απόδοση μεγιστοποιείται για λίγο μεγαλύτερη αντίσταση φορτίου. Επομένως ανάλογα με τις απαιτήσεις της σχεδίασης σε ισχύ ή απόδοση, αλλά και με τις απαιτήσεις του προβλεπόμενου φορτίου σε τάση και ένταση ρεύματος, θα πρέπει κάθε φορά να γίνει η βέλτιστη επιλογή TE-module. Οι περισσότερες εταιρείες κατασκευής θερμοηλεκτρικών στοιχείων συνήθως παρέχουν κάποιο software ή



αλγόριθμο επιλογής TE-module, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, που μπορεί να βοηθήσει τον σχεδιαστή ενός συγκεκριμένου TE-Generator.

### 2.3 Συμπεράσματα

Με τη χρήση του κατάλληλου λογισμικού, διερευνήσαμε την απόδοση διαφόρων τύπων θερμοηλεκτρικών στοιχείων του εμπορίου. Για τον συγκεκριμένο τύπο HT9\_3\_25, εκτιμήσαμε τις αναμενόμενες αποδόσεις ισχύος, σε διαφορετικές θέσεις της εξάτμισης.

Βάσει των παραπάνω, για να λειτουργήσει σωστά ένα θερμοηλεκτρικό στοιχείο ως γεννήτρια, πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν ορισμένοι παράγοντες, οι οποίοι παίζουν σημαντικό ρόλο στην απόδοσή του.

Καταρχάς, πρέπει να επιλεγούν καλής ποιότητας εναλλάκτες θερμότητας και να ελαχιστοποιηθούν οι θερμικές αντιστάσεις των επιφανειών και των υλικών που χρησιμοποιούνται. Ακόμα, να υπάρχει καλή μόνωση με κατάλληλα θερμομονωτικά υλικά, ώστε να μην υπάρχουν απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον, καθώς και μεταφορά θερμότητας μεταξύ θερμών και ψυχρών επιφανειών. Τέλος, θα πρέπει με βάση τις θερμοκρασιακές συνθήκες στις οποίες θα χρησιμοποιηθεί το θερμοηλεκτρικό στοιχείο, να επιλεγεί ο κατάλληλος τύπος και αριθμός θερμοηλεκτρικών συστοιχιών (TEG-modules).

### **3. ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΓΙΑ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΡΡΙΠΤΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΟΝ BENZINOKINHTHRA AYTOKINHTOY**

#### **3.1 Σχεδιαστικές αρχές μιας θερμοηλεκτρικής διάταξης τοποθετημένης στον αγωγό της εξάτμισης αυτοκινήτου**

Οι απαιτήσεις κατά τη σχεδίαση κάθε συστήματος, που πρόκειται να τοποθετηθεί στο σύγχρονο τυπικό αυτοκίνητο, είναι πολύ υψηλές. Το σύστημα θα πρέπει να μπορεί να λειτουργήσει αξιόπιστα, με μηδενικές ή ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης, για τουλάχιστον 10 έτη (ή 300.000 Km), σε θερμοκρασίες εξωτερικού περιβάλλοντος που μπορεί να κυμαίνονται από  $-40$  έως  $50$  °C και σε συνθήκες περιστασιακά μεγάλης υγρασίας. Πρέπει ακόμη να είναι ανθεκτικό σε δονήσεις κυμαινόμενου μεγέθους και ισχυρές μηχανικές καταπονήσεις και να έχει όσο το δυνατό μικρό βάρος και όγκο.

Ειδικότερα, μια θερμοηλεκτρική διάταξη που πρόκειται να τοποθετηθεί στην εξάτμιση, θα πρέπει να είναι ανθεκτική σε θερμικά shock κατά την εκκίνηση του κινητήρα, καθώς η θερμοκρασία της εξάτμισης ανεβαίνει από την θερμοκρασία περιβάλλοντος στους  $400 - 600$  °C σε χρόνο μικρότερο του ενός λεπτού. Επιπλέον, πρέπει να είναι ανθεκτική στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες (έως και  $900$  °C ανάλογα με τη θέση τοποθέτησης και τον τύπο του κινητήρα), που μπορεί να αναπτυχθούν για μικρή ή παρατεταμένη χρονική περίοδο σε διάφορες αναμενόμενες καταστάσεις λειτουργίας του κινητήρα. Επιπλέον, απαιτείται η απόδοσή της να παραμένει σταθερή, παρ' όλες τις συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας. Ταυτόχρονα με τις προηγούμενες απαιτήσεις, στην σημερινή πολύ ανταγωνιστική αυτοκινητοβιομηχανία, η σχεδίαση θα πρέπει να ικανοποιεί τον παράγοντα του χαμηλού κόστους.

Ανεξάρτητα από τον βαθμό απόδοσης των θερμοηλεκτρικών στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν, η κρίσιμη παράμετρος είναι η σχεδίαση και η βελτιστοποίηση των εναλλακτών θερμότητας. Αυτοί πρέπει να μπορούν να μεταφέρουν με ελάχιστη θερμική αντίσταση τη θερμότητα των καυσαερίων στην θερμή πλευρά του TEG και να παράγουν εξ ίσου υαπο ελεσματικά την θερμότητα από την ψυχρή πλευρά. Ταυτόχρονα, πρέπει να ικανοποιείται η απαίτηση του μικρού βάρους και όγκου, με δεδομένο τον περιορισμένο χώρο στο κάτω μέρος του αυτοκινήτου και την επίδρασή του στον χώρο της καμπίνας. Η απόδοση θερμότητας από τα καυσαέρια προς το TEG δεν είναι ικανοποιητική αν η ροή των καυσαερίων είναι ελεύθερη στον σωλήνα της εξάτμισης. Επομένως η σχεδίαση του εναλλάκτη πρέπει να γίνει έτσι ώστε να αυξηθεί όσο το δυνατό ο χρόνος παραμονής των καυσαερίων. Ταυτόχρονα όμως, πρέπει να μην αυξηθεί η συνολική αντίθλιψη, που προκαλεί συνολικά ο σωλήνας της εξάτμισης στην ροή των καυσαερίων, πάνω από ένα επιτρεπτό όριο. Σε αντίθετη περίπτωση, οι

επιπτώσεις στην επίδοση του κινητήρα και στην κατανάλωση είναι αισθητά αρνητικές, ιδιαίτερα σε πλήρες φορτίο και υψηλές στροφές λειτουργίας.

Η στήριξη των θερμοηλεκτρικών στοιχείων πάνω στον εναλλάκτη επηρεάζει επίσης σημαντικά τον βαθμό απόδοσης της όλης διάταξης. Η σύσφιξη και η ποιότητα των επιφανειών επαφής, καθώς και η ελαχιστοποίηση των θερμογεφυρών, είναι σημαντικοί παράγοντες. Μια επιπλέον απαίτηση εδώ, είναι η δυνατότητα της στήριξης να παραλαμβάνει χωρίς προβλήματα τις θερμικές διαστολές και τις ταλαντώσεις ενώ ταυτόχρονα να διατηρείται η μικρή θερμική αντίσταση. Η συγκόλληση της μιας τουλάχιστον πλευράς του TEG είναι μια καλή λύση, αρκεί να ληφθεί μέριμνα ώστε το υλικό της συγκόλλησης να διατηρεί τις ιδιότητές του στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας.

Η επιλογή του τρόπου ψύξης της θερμοηλεκτρικής διάταξης είναι επίσης μια σημαντική παράμετρος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο αέρας του περιβάλλοντος, ή νερό ψύξης του κινητήρα, ή ανεξάρτητο κύκλωμα υγρού ψύξης. Στην πρώτη περίπτωση, υπάρχει το πλεονέκτημα της απλής κατασκευής και του μικρού βάρους, με μειονέκτημα την αστάθεια στην ταχύτητα του αέρα ψύξης, επομένως και αστάθεια στην απόδοση των TEG. Η χρήση ανεμιστήρα που θα λειτουργεί κατά περίπτωση, πέρα από τη δυσκολία τοποθέτησης, πιθανότατα να μειώσει ή να ακυρώσει το συνολικό κέρδος απόδοσης από τη θερμοηλεκτρική διάταξη. Ο όγκος επίσης της όλης διάταξης είναι μεγάλος, καθιστώντας προβληματική την εξεύρεση κατάλληλης θέσης κάτω από το δάπεδο του αυτοκινήτου. Η χρήση του υγρού ψύξης του κινητήρα, έχει το πλεονέκτημα της σταθερής θερμοκρασίας ψύξης και παροχής και του μεγάλου βαθμού απόδοσης του εναλλάκτη θερμότητας (μεγαλύτερος συντελεστής μετάδοσης θερμότητας από υγρό σε στερεό). Επίσης συνεπάγεται ταχύτερη θέρμανση του κινητήρα και σχετικά μικρό κόστος, λόγω χρήσης του ήδη υπάρχοντος συστήματος, με μια μικρή επιβάρυνση στην ισχύ της αντλίας νερού και πιθανή μεγέθυνση του ψυγείου του αυτοκινήτου. Παραβλέποντας τις πιθανότητες και τους ενεχόμενους σοβαρούς κινδύνους μη επαρκούς ψύξης του κινητήρα, λόγω της ανταγωνιστικότητας των δύο μηχανισμών μετάδοσης θερμότητας, το μεγαλύτερο μειονέκτημα της λύσης αυτής είναι η υψηλή θερμοκρασία του υγρού ψύξης (περί τους 100 °C) που μειώνει την απόδοση, τουλάχιστον στα στοιχεία από  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . Η χρήση ανεξάρτητου συστήματος υγρού ψύξης, επιτρέπει την αποτελεσματική ψύξη της διάταξης σε χαμηλές θερμοκρασίες σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας και μειώνει τον χώρο που απαιτείται για την τοποθέτηση της διάταξης. Απαιτεί όμως επιπλέον χώρο στην περιοχή του κινητήρα για την τοποθέτηση του επιπλέον ψυγείου και της αντλίας, κατανάλωση ισχύος από την αντλία και (πιθανό) ανεμιστήρα ενώ έχει αυξημένο κόστος και βάρος.

Η επιλογή της θέσης τοποθέτησης της θερμοηλεκτρικής διάταξης στον σωλήνα εξάτμισης, εξαρτάται από το είδος των θερμοηλεκτρικών στοιχείων που θα τοποθετηθούν (μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας και θερμοκρασιακή περιοχή

βέλτιστης απόδοσης) και τον διατιθέμενο χώρο για την συσκευή και τα τυχόν παρελκόμενα εξαρτήματα.

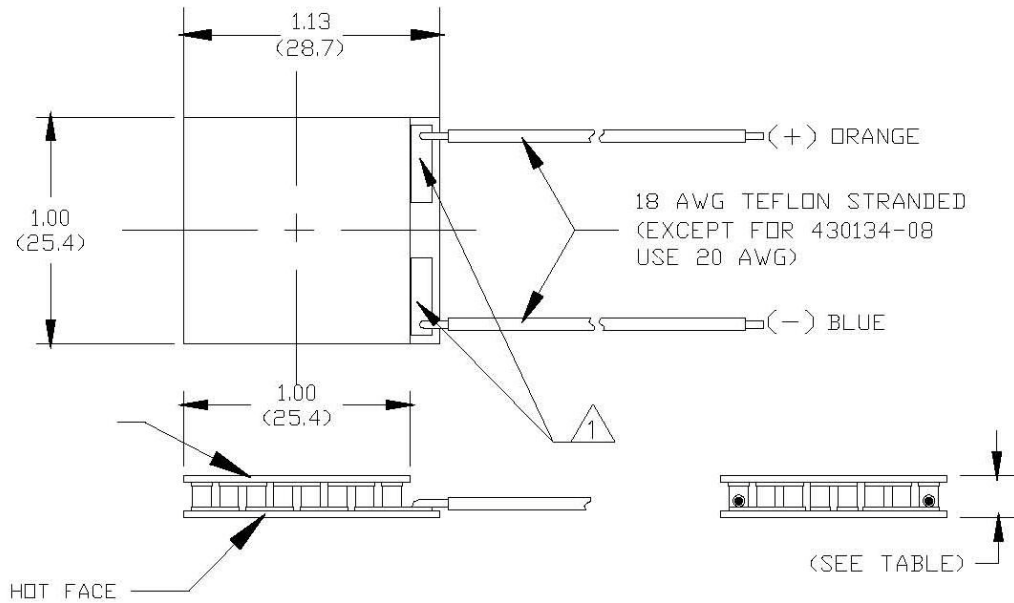
Οι θέσεις στις οποίες το TEG, θα μπορούσε να έχει ικανοποιητική απόδοση είναι οι εξής:

- Στην πολλαπλή εξαγωγή, όπου ο μέσος όρος θερμοκρασίας των καυσαερίων είναι σύμφωνα με τη βιβλιογραφία μεταξύ των 750° C και 1000° C.
- Ανάμεσα στην πολλαπλή εξαγωγή και στον καταλύτη του αυτοκινήτου, όπου ο μέσος όρος θερμοκρασίας των καυσαερίων είναι μεταξύ των 400° C και 750° C.
- Αμέσως μετά τον καταλύτη, όπου ο μέσος όρος θερμοκρασίας των καυσαερίων είναι μεταξύ των 200° C και 400° C.

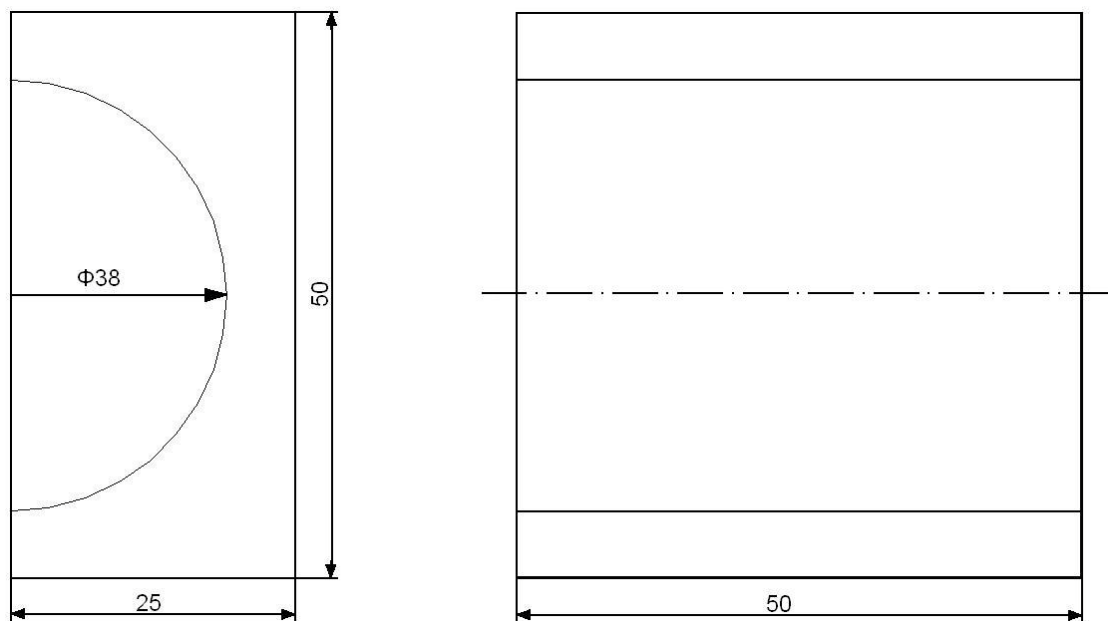
Η τοποθέτηση της διάταξης πριν τον καταλύτη γενικά δεν είναι επιθυμητή, επειδή η επακόλουθη μείωση της θερμοκρασίας του καταλύτη και του αισθητήρα λ, δυσχεραίνει την κανονική τους λειτουργία. Η επικρατέστερη θέση είναι μετά τον καταλύτη (και μετά τον δεύτερο αισθητήρα λ που υπάρχει σε όλα τα, μετά το 2000, βενζινοκίνητα οχήματα) και όσο το δυνατό πλησιέστερα σ' αυτόν. Θα πρέπει όμως να ληφθεί ειδική μέριμνα για την αποφυγή υπερθέρμανσης των θερμοηλεκτρικών στοιχείων και για την αντοχή των υλικών του εναλλάκτη, ιδιαίτερα σε καταστάσεις υπερφόρτωσης του κινητήρα.

### 3.2 Η πειραματική διάταξη

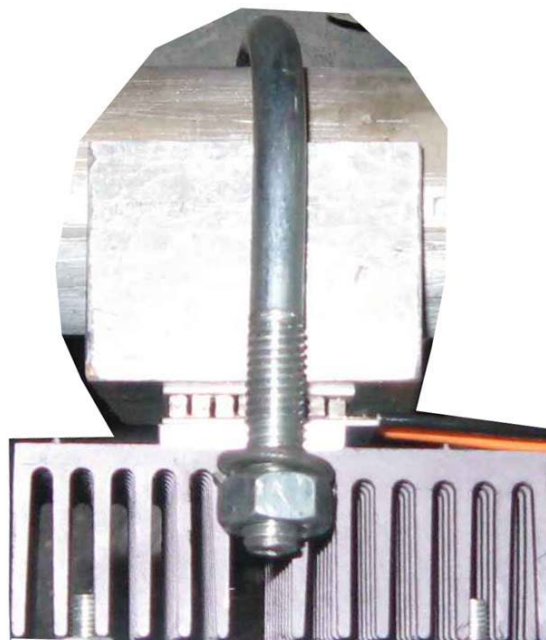
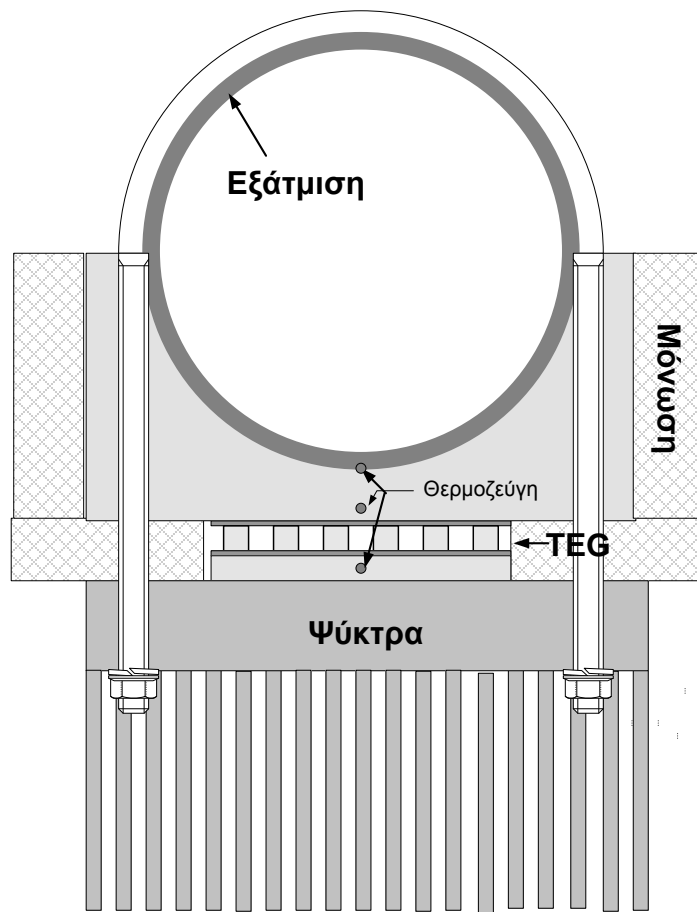
Το θερμοηλεκτρικό στοιχείο που χρησιμοποιήσαμε είναι το HT9-3-25 της εταιρίας Melcor (σχήμα 3.2.1), του οποίου η θερμή πλευρά είχε όριο μέγιστης θερμοκρασίας τους 220 °C. Επιλέξαμε τον τύπο αυτό επειδή είναι ο ανθεκτικότερος σε υψηλές θερμοκρασίες, από όλους τους άλλους τύπους που είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο.



Σχήμα 3.2.1 Διαστάσεις του HT9-3-25



Σχήμα 3.2.2 – Το εξάρτημα προσαγωγής της θερμότητας στο TEG



Σχήμα 3.2.3 – Η πειραματική διάταξη μέτρησης στο σωλήνα της εξάτμισης

Για την προσαγωγή της θερμότητας, διαμορφώσαμε ένα κομμάτι αλουμινίου με φρέζα έτσι ώστε να προσαρμόζεται στην εξάτμιση του αυτοκινήτου και να μεταδίδει τη θερμότητά της σε όλη την επιφάνεια του θερμοστοιχείου. Το κομμάτι περιελάμβανε μία ημικυλινδρική πλευρά με διάμετρο ίδια με αυτή του σωλήνα της εξάτμισης και μία επίπεδη πλευρά, όπου προσαρμόστηκε το TEG. Κοντά στην επίπεδη πλευρά, ανοίχτηκε μία οπή διαμέτρου 2mm, όπου τοποθετήθηκε το θερμοζεύγος μέτρησης της θερμοκρασίας  $T_H$ . Το σχήμα και οι διαστάσεις αυτού του κομματιού φαίνονται στο σχήμα 3.2.2.

Στη δεύτερη επιφάνεια του θερμοστοιχείου (ψυχρή) τοποθετήσαμε ένα αλουμινένιο πλακίδιο, για να μπορέσουμε να μετρήσουμε τη θερμοκρασία  $T_C$ , της ψυχρής πλευράς του TEG, η οποία είναι προσκολλημένη σε αυτό. Με τον τρόπο αυτό, μετρούσαμε τις θερμοκρασίες της κάθε επιφάνειας του θερμοστοιχείου.

Τα τεμάχια που χρησιμοποιήσαμε τα συναρμολογήσαμε με τη σειρά που φαίνεται στο σχήμα 3.2.3, αφού πρώτα αλείψαμε τις επιφάνειές τους με ειδική σιλικόνη, για να γεμίσουν οι πόροι τους και να έχουμε καλύτερη μεταφορά θερμότητας. Το θερμό τμήμα της διάταξης μονώθηκε εξωτερικά με υαλοβάμβακα και αλουμινόχαρτο.

Το ενιαίο αυτό σύνολο, το προσαρμόσαμε στην εξάτμιση ενός TOYOTA STARLET 1300cc με τη χρήση σφινγκτήρα. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αυτοκινήτου φαίνονται στο σχήμα 3.2.4 και τα διαγράμματα ισχύος και ροπής ενός παρόμοιου αυτοκινήτου φαίνονται στο σχήμα 3.2.5.

Χρησιμοποιήθηκαν 4 θερμοζεύγη τύπου K, με τα οποία μετρούσαμε τις θερμοκρασίες της θερμής και της ψυχρής επιφάνειας του θερμοστοιχείου και τις θερμοκρασίες της εξάτμισης και του περιβάλλοντος. Επίσης μετρούνταν η τάση που απέδιδε το θερμοστοιχείο με ηλεκτρικό φορτίο και χωρίς φορτίο και η ένταση με φορτίο. Για την καταγραφή των τιμών χρησιμοποιήθηκε ένας καταγραφέας δεδομένων τύπου "MultiLog". Επίσης χρησιμοποιήθηκαν δύο πολύμετρα και ένα ακόμη πολύμετρο με δυνατότητα ένδειξης τιμών θερμοκρασίας από θερμοζεύγος.

Κατά τη διάρκεια διεξαγωγής της εργασίας μας, δημιουργήθηκαν διάφορα προβλήματα, όπως η εύρεση αλουμινένιου τεμαχίου στις απαιτούμενες διαστάσεις, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο θα το κατεργαζόμασταν. Ένα ακόμα πρόβλημα ήταν ο τρόπος σύσφιξης της διάταξης στο σωλήνα της εξάτμισης. Έπρεπε να βρούμε τον κατάλληλο σφινγκτήρα, ώστε η σύσφιξη των τεμαχίων μεταξύ τους να είναι ομοιόμορφη και να μην έχουμε απώλειες θερμότητας.



## General

Model year	1998
Mileage, km	2590
Gearbox type	5 - speed manual
Drive wheels	Front

## Engine

Cylinders / Valves	4 / 4
Displacement, cc	1331
Bore / Stroke, mm	74 / 77.4
Type / Configuration	SI NA / Inline
Location / Orientation	Front / Transverse
Compression ratio	9.6:1

## Wheels / Fuel / Weights

Tyre dimension	165/70R13
Test fuel	95 RON
Curb weight, kg	903
Weight dist front / rear, %	61 / 39

## Performance

### Powertrain performance

Wheel power	
kW (PS / bhp) at 1/min	49 (66 / 65) at 5398
Total wheel torque / total reduction	
Nm (lb-ft) at 1/min	104 (77) at 4312

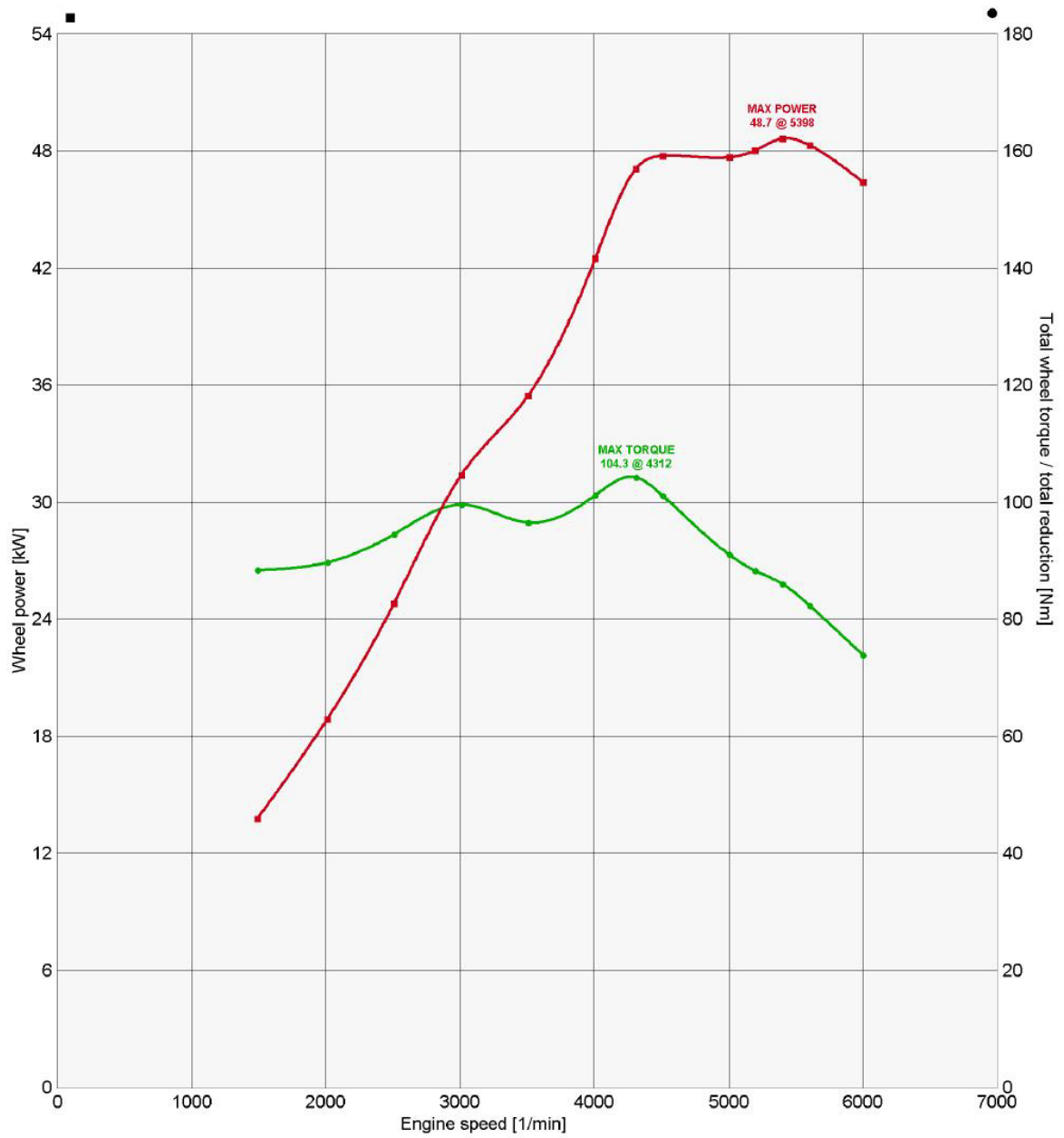
### Stated engine performance

Engine power	
kW (PS / bhp) at 1/min	55 (75 / 74) at 5400
Engine torque	
Nm (lb-ft) at 1/min	115 (85) at 4300

### Discrepancy (measured/stated)

Power / Torque	-11.5% / -9.5%
----------------	----------------

Σχήμα 3.2.4 – Πίνακας χαρακτηριστικών Toyota Starlet

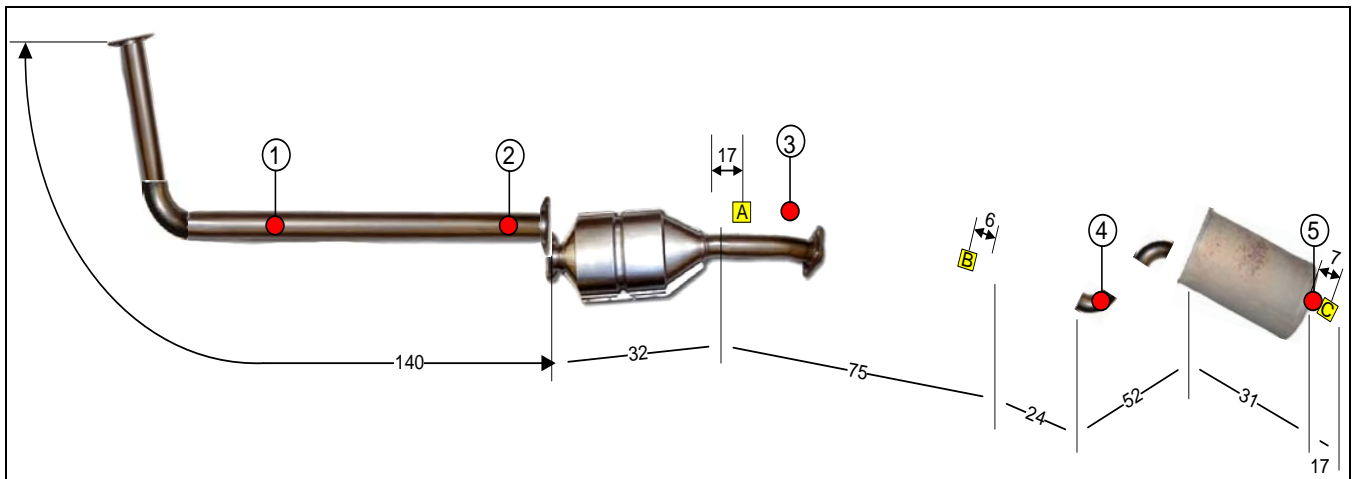


Σχήμα 3.2.5 – Διαγράμματα ισχύος και ροπής στους τροχούς [Πηγή: Rototest Research Institute]

### 3.3 Μετρήσεις σε δυναμοπέδη της θερμοκρασιακής κατανομής στο σωλήνα της εξάτμισης

Προτού ξεκινήσουμε τις μετρήσεις στο δρόμο μετρήσαμε τις θερμοκρασίες κατά μήκος της εξάτμισης με πλήρες φορτίο. Αυτό το κάναμε για να έχουμε μια εικόνα της ισχύος του κινητήρα και της θερμοκρασιακής κατανομής στο σωλήνα της εξάτμισης. Έτσι γνωρίζαμε την κατανομή των θερμοκρασιών κατά μήκος της εξάτμισης, για να μπορέσουμε να εκμεταλλευτούμε καλύτερα τη θερμότητα και να πάρουμε τη μέγιστη δυνατή απόδοση από το TEG. Επίσης, οι μετρήσεις στη δυναμοπέδη έγιναν επειδή θέλαμε να δούμε τυχόν προβλήματα στην όλη διάταξη των μετρήσεων και να τα επιλύσουμε πιο εύκολα από ότι θα γινόταν στο δρόμο.

Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 3.3.1) φαίνονται τα σημεία όπου τοποθετήσαμε τα θερμοζεύγη για να μετρήσουμε τη θερμοκρασία της εξάτμισης, σε πλήρες φορτίο και σε διαφορετικές στροφές του κινητήρα.



Σχήμα 3.3.1 – Σχέδιο του σωλήνα της εξάτμισης και σημεία τοποθέτησης θερμοζευγών

Αρχικά, αφού τοποθετήσαμε το αυτοκίνητο στη δυναμοπέδη και το ετοιμάσαμε για μέτρηση, το αφήσαμε να λειτουργεί στο ρελαντί ώστε να φτάσει σε θερμοκρασία λειτουργίας. Έπειτα μετρήσαμε τη θερμοκρασία και στα πέντε σημεία της εξάτμισης στο ρελαντί (1000 rpm). Η δεύτερη μέτρηση έγινε στις 2000 rpm με ταχύτητα 40 km/h, η τρίτη στις 3000 rpm και ταχύτητα 60 km/h και η τέταρτη στις 3950 rpm και ταχύτητα 80 km/h. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 23,5 °C. Μπροστά από το αυτοκίνητο υπήρχε ανεμιστήρας, για τη σωστή ψύξη του κινητήρα και για να έχουμε εξομοίωση συνθηκών δρόμου.

Σημεία τοποθέτησης θερμοζευγών:

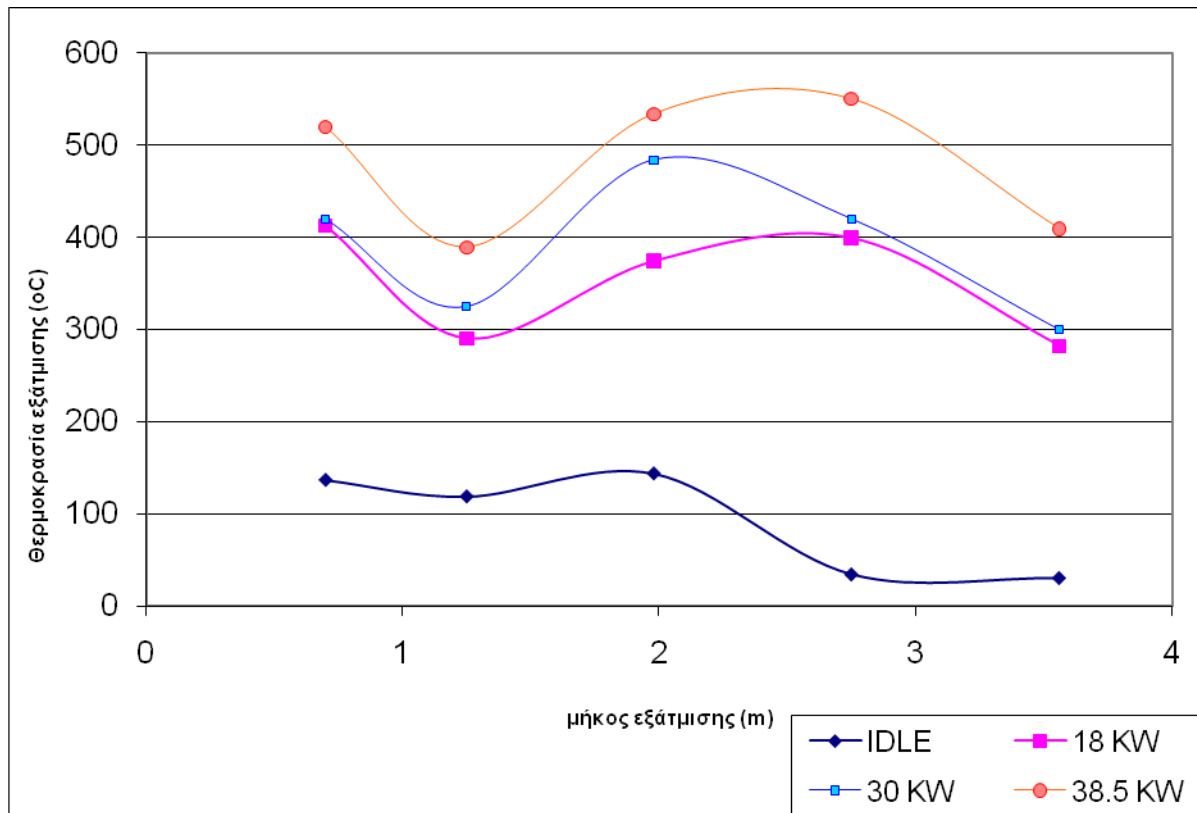
Θέση 1: 70 cm μετά την πολλαπλή εξαγωγής

Θέση 2: 16 cm πριν τον καταλύτη

Θέση 3: 25 cm μετά τον καταλύτη

Θέση 4: 47 cm πριν το τελευταίο καζανάκι

Θέση 5: 6 cm μετά το τελευταίο καζανάκι



Σχήμα 3.3.2–Διαγραμμα διακύμανσης θερμοκρασιών κατά μήκος του σωλήνα της εξάτμισης

Στο παραπάνω διάγραμμα (σχήμα 3.3.2), μπορούμε να δούμε τη διακύμανση της θερμοκρασίας κατά μήκος του σωλήνα της εξάτμισης, σύμφωνα με τις μετρήσεις. Παρατηρούμε ότι η τιμή της θερμοκρασίας φτάνει στο μέγιστο στις θέσεις γύρω από τον καταλύτη (θέσεις 2 και 3), καθώς και στα σημεία που είναι κοντά στην πολλαπλή εξαγωγής (θέση 1).

Η ύπαρξη αυξημένων θερμοκρασιών ακριβώς μετά τον καταλύτη και στο υπόλοιπο τμήμα της εξάτμισης, μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι ο κινητήρας απέδιδε πλήρη ισχύ (τέρμα γκάζι) και επομένως είχαμε πλούσιο μίγμα και αυξημένες οξειδωτικές εξώθερμες αντιδράσεις στον καταλύτη. Επίσης, ο ανεμιστήρας δημιουργούσε σχετικά ανεπαρκή ψύξη στο σωλήνα της εξάτμισης μετά τον καταλύτη.

Διαπιστώνουμε ότι στις θέσεις 2 και 3 θα μπορούσαμε να έχουμε τη μέγιστη δυνατή απόδοση ισχύος από το TEG, οπότε και για το πείραμά μας, αποφασίσαμε να το τοποθετήσουμε κοντά στη θέση 3.

Ισχύς κινητήρα (rpm)	1000
Θέση	Θερμοκρασία εξάτμισης (°C)
1	137
2	119
3	144
4	34
5	30

Ισχύς κινητήρα (rpm)	18KW (2000)
Θέση	Θερμοκρασία εξάτμισης (°C)
1	413
2	290
3	375
4	419
5	282

Ισχύς κινητήρα (rpm)	29,2KW (3000)
Θέση	Θερμοκρασία εξάτμισης (°C)
1	420
2	325
3	484
4	420
5	

Ισχύς κινητήρα (rpm)	38,4KW (3950)
Θέση	Θερμοκρασία εξάτμισης (°C)
1	520
2	390
3	534
4	550
5	410

*ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2.1- Θερμοκρασίες της εξάτμισης στις πέντε επιλεγμένες θέσεις μέτρησης για διάφορα φορτία του κινητήρα.*

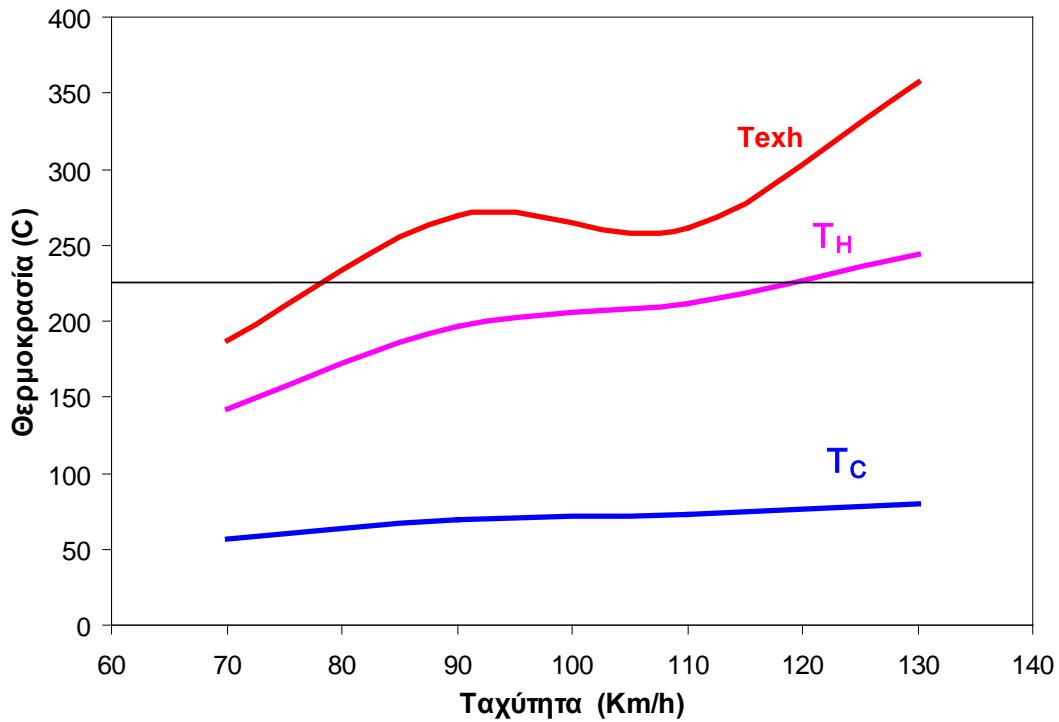
### **3.4 Μετρήσεις σε συνθήκες πραγματικής οδήγησης, της αποδιδόμενης ισχύος στο σωλήνα της εξάτμισης με τη χρήση του TEG HT-9-3-25**

Οι μετρήσεις της απόδοσης του TEG έγιναν στο δρόμο, σε πραγματικές οδηγικές συνθήκες, με τις οποίες είχαμε ψύξη του κινητήρα και της διάταξής μας με τον αέρα κίνησης και μπορούσαμε να πάρουμε μετρήσεις σε διάφορα φορτία. Με τον τρόπο αυτό, τα αποτελέσματα των μετρήσεων ήταν κοντά στον καθημερινό κύκλο λειτουργίας ενός αυτοκινήτου.

Ωστόσο, πέρα από αυτά, οι μετρήσεις στο δρόμο παρουσιάζουν και αρκετές δυσκολίες. Μία από αυτές είναι ότι από τις δονήσεις, ορισμένες φορές, δεν έκαναν καλή επαφή τα θερμοστοιχεία με τα αλουμινένια πλακίδια, έτσι ώστε να χρειάζεται πολύ προσεκτική και επιμελημένη στερέωση της συσκευής και των καλωδίων. Επίσης, δεν είχαμε το απαιτούμενο ρεύμα για όργανα μετρήσεων που λειτουργούν με 230 V και συνήθως χρησιμοποιούνται με θερμοζεύγη, δεν είχαμε πολύ ελεύθερο χώρο μέσα στο αυτοκίνητο για τις απαιτούμενες κινήσεις και για όλα τα όργανα μέτρησης και επιπλέον όλα τα καλώδια της συσκευής έπρεπε να προεκταθούν ώστε να φτάνουν έως την καμπίνα. Έτσι χρησιμοποιήσαμε δύο πολύμετρα, όπου στο ένα από αυτά μετρούσαμε την τάση του TEG με φορτίο και χωρίς φορτίο ενώ στο άλλο μετρούσαμε την ένταση. Επίσης, με το τρίτο πολύμετρο που είχε δυνατότητα ένδειξης θερμοκρασίας, εναλλάσσαμε τη σύνδεση των θερμοζευγών. Σε κάθε μέτρηση αναπτύσσαμε την προβλεπόμενη ταχύτητα, περιμέναμε κάποιο χρονικό διάστημα να σταθεροποιηθούν οι θερμοκρασίες και καταγράφαμε τις ενδείξεις. Μια δεύτερη σειρά μετρήσεων έγινε με τη χρήση του multilog, με το οποίο μπορούσαμε να καταγράφουμε σε υπολογιστή τις τιμές των θερμοκρασιών της εξάτμισης και της θερμής πλευράς του TEG και ταυτόχρονα την παραγόμενη τάση, συναρτήσει του χρόνου.

Οι μετρήσεις έγιναν στην Εγνατία Οδό, από το ύψος της Ασπροβάλτας μέχρι την έξοδο στην Εθνική Οδό Θεσσαλονίκης – Αθηνών. Η επιλογή αυτής της διαδρομής έγινε για δική μας ευκολία, λόγω του ότι ο δρόμος είναι τριών λωρίδων και στο μεγαλύτερο μέρος του επίπεδος. Έτσι, μπορούσαμε να διατηρήσουμε τις ταχύτητες τις οποίες θέλαμε, χωρίς να δημιουργούμε πρόβλημα στην κυκλοφορία.

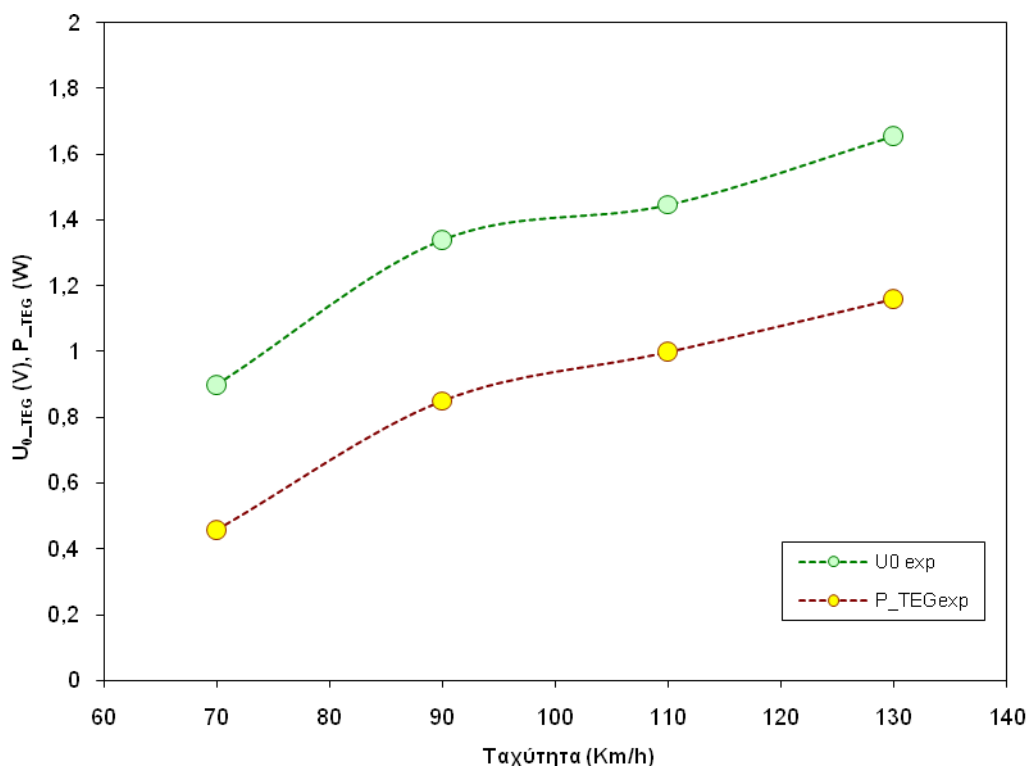
Στο παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 3.4.1) βλέπουμε τις θερμοκρασίες του σωλήνα της εξάτμισης, καθώς και της θερμής και ψυχρής πλευράς του θερμοηλεκτρικού στοιχείου (TEG), σε ταχύτητες μεταξύ 70 και 130 km/h. Παρατηρούμε ότι, όσο αυξάνεται η ταχύτητα του οχήματος, καθώς και το φορτίο του κινητήρα, αυξάνει και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ θερμής και ψυχρής πλευράς του TEG. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης που παρουσιάζεται στα άκρα του TEG, καθώς και της αποδιδόμενης ισχύος του (σχήμα 3.4.2).



Σχήμα 3.4.1 – Θερμοκρασίες της εξάτμισης και της θερμής και ψυχρής πλευράς του θερμοστοιχείου

Απ' ότι παρατηρούμε στο σχήμα 3.4.1, η θερμοκρασία της θερμής πλευράς δεν ακολουθεί ακριβώς την καμπύλη της θερμοκρασίας της εξάτμισης λόγω θερμοκρασιακής αδράνειας, εξαιτίας της σχετικά γρήγορης μεταβολής της ταχύτητας και του φορτίου.

Ακόμα, η θερμοκρασία στη θερμή επιφάνεια έφτασε σε τιμές κοντά στα όρια λειτουργίας του TEG με κίνδυνο την καταστροφή του σε περίπτωση γρήγορης - "επιθετικής" οδήγησης.

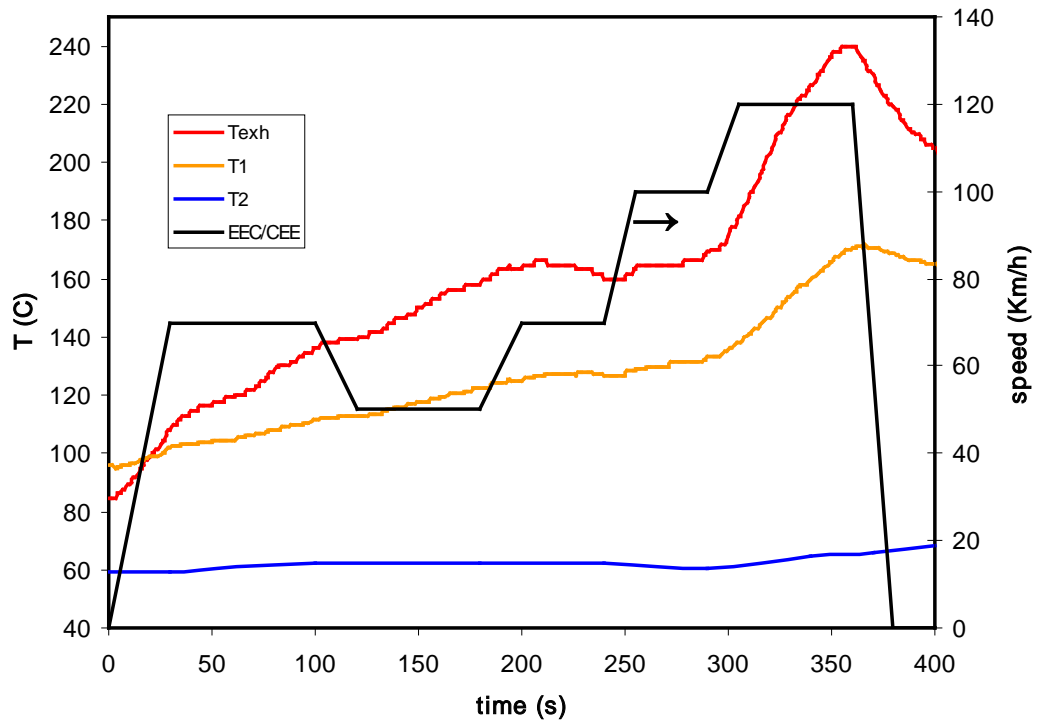


Σχήμα 3.4.2 – Αποδιδόμενη ισχύς και τάση του TEG συναρτήσει της ταχύτητας του αυτοκινήτου

Στο σχήμα 3.4.2. παρατηρούμε ότι με ταχύτητες γύρω στα 100 Km/h, μπορούμε να έχουμε από το TEG μια απόδοση ισχύος 1 W περίπου, σε τάση περί το 1,5 V.

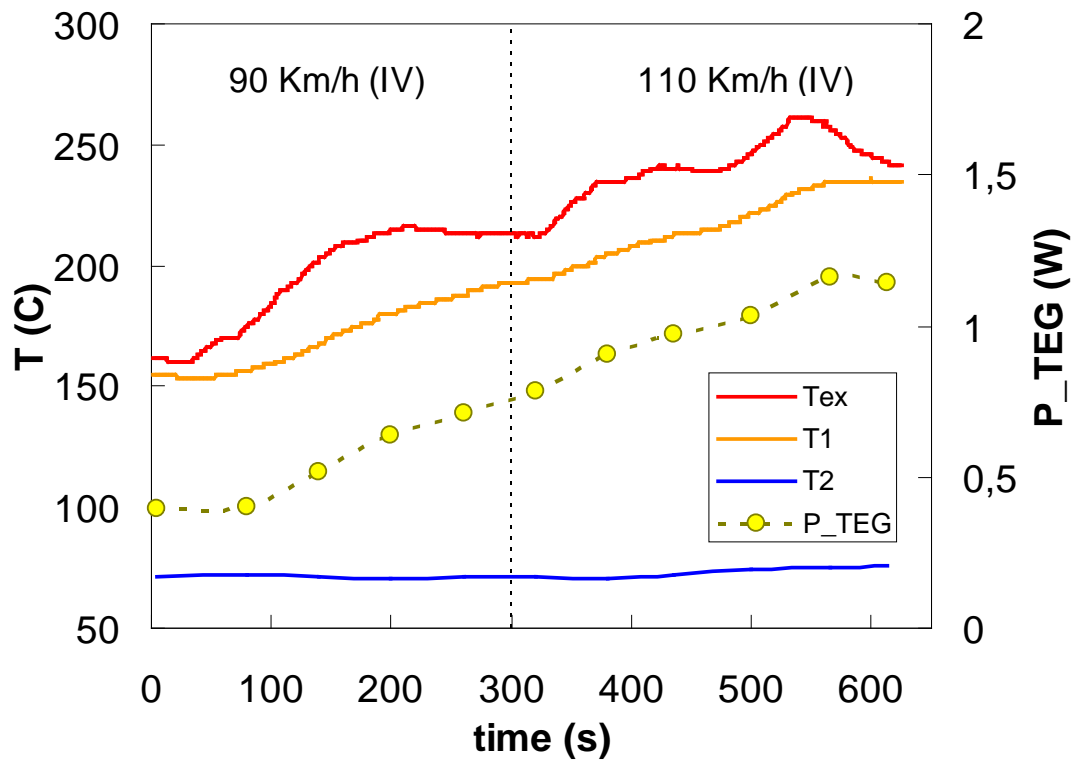
Ένα μέρος των μετρήσεων, περιελάμβανε την κίνηση του οχήματος, κατά τα πρότυπα του κύκλου κίνησης EEC/CEE (τμήμα κύκλου σε ημιαστική περιοχή). Ο κύκλος αυτός εξομοιώνει την καθημερινή οδήγηση με μεσαίες και υψηλές ταχύτητες, με μέγιστη ταχύτητα τα 120 km/h. Έχει διάρκεια 400 δευτερόλεπτα και διανύουμε απόσταση 6,955 χιλιομέτρων με μέση ταχύτητα 62,6 km/h. Με τη χρήση του Multilog, λάβαμε τις μετρήσεις που φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 3.4.3) και οι οποίες αντιστοιχούν στον ευρωπαϊκό κύκλο κίνησης (Παράρτημα I) με τον οποίο μετρούνται οι ρύποι και η κατανάλωση καυσίμου ενός οχήματος.





Σχήμα 3.4.3 – Θερμοκρασίες εξάτμισης και θερμοκρασίες θερμής και ψυχρής πλευράς του TEG κατά τη διάρκεια κύκλου οδήγησης κατά EEC/CEE (τμήμα κύκλου σε ημιαστική περιοχή)

Όπως βλέπουμε στο παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 3.4.3) η θερμοκρασία της εξάτμισης ακολουθεί αδρά την καμπύλη της ταχύτητας, η δε μεταβολή της θερμοκρασίας της θερμής πλευράς του TEG μεταβάλλεται ομαλότερα, λόγω της θερμικής αδράνειας της συσκευής. Ακόμα παρατηρούμε ότι η T2 παραμένει περίπου σταθερή, οπότε η μεγαλύτερη ισχύς του TEG αποδίδεται στις ψηλότερες ταχύτητες, όπου υπάρχει η μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην θερμή και ψυχρή πλευρά.



Σχήμα 3.4.4 – Θερμοκρασίες και αποδιδόμενη ισχύς κατά τη διάρκεια κίνησης του αυτοκινήτου για 10 min με ταχύτητες 90 και 110 Km/h

Τέλος με τη χρήση του Multilog και αμπερομέτρου – βολτομέτρου, μετρήσαμε τις θερμοκρασίες εξάτμισης και την απόδοση ισχύος του TEG, σε μια συνηθισμένη διαδρομή σε επίπεδο δρόμο στις ταχύτητες των 90 και 110 Km/h (Σχήμα 3.4.4). Παρατηρούμε και στη μέτρηση αυτή, ότι κινούμενοι με μια μέση ταχύτητα γύρω στα 100 Km/h, μπορούμε να έχουμε μια απόδοση ισχύος από το TEG περί το 1W.

### 3.5 Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι με τη χρήση θερμοηλεκτρικών διατάξεων, είναι δυνατό να ανακτήσουμε ένα σημαντικό ποσό ηλεκτρικής ισχύος, με την κατάλληλη τοποθέτησή τους στο σωλήνα της εξάτμισης του αυτοκινήτου.

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, διαπιστώσαμε ότι η μέση ισχύς που λάβαμε από τη διάταξή μας φτάνει το 1 W. Το μήκος της εξάτμισης από τον καταλύτη και μέχρι πριν το καζανάκι είναι περίπου 1510 mm και το πλάτος του θερμοστοιχείου είναι 26 mm. Οπότε αν κατασκευάσουμε ένα ειδικό τεμάχιο που να προσαρμόζεται σε αυτό το μήκος της εξάτμισης, θα μπορούσαν να τοποθετηθούν σε αυτό περίπου 58 θερμοστοιχεία, σε μία σειρά, το ένα δίπλα στο άλλο. Έτσι η συνολική μέγιστη ισχύς θα μπορούσε να φτάσει τα 58 W. Θα μπορούσαμε να πάρουμε σχεδόν τη διπλάσια ισχύ με την κατασκευή ενός παρόμοιου κομματιού, που θα το τοποθετούσαμε στην υπόλοιπη μισή πλευρά της εξάτμισης. Τότε, η μέγιστη ισχύς θα έφτανε τα 116 W με την προϋπόθεση ότι θα μπορούσαμε να εξασφαλίσουμε συνθήκες ψύξης παρόμοιες με αυτές των μετρήσεών μας.

Παράλληλα όμως, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και κάποιοι παράγοντες, οι οποίοι παίζουν σημαντικό ρόλο στη λειτουργία των διατάξεων. Τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν, πρέπει να είναι ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες και σε απότομες μεταβολές τους και να προβλέπεται κάποιος τρόπος προστασίας τους απέναντι στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες που μπορούν να αναπτυχθούν σε μεγάλες ισχύεις του κινητήρα. Τα υλικά της διάταξης θα πρέπει να είναι κατάλληλα ώστε να γίνεται εύκολα η μεταφορά θερμότητας στις χαμηλές ισχύεις του κινητήρα, δηλαδή να έχουμε τις ελάχιστες θερμικές αντιστάσεις των υλικών και να τοποθετηθούν ώστε να εφαρμόζουν σωστά στο σωλήνα της εξάτμισης.

#### 4. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στη συγκεκριμένη εργασία, μελετήσαμε την κατανομή των θερμοκρασιών κατά μήκος της εξάτμισης ενός μικρού επιβατικού βενζινοκίνητου αυτοκινήτου και τις δυνατότητες ανάκτησης ενός τμήματος της θερμικής ενέργειας που αποβάλλεται από τον κινητήρα του. Η ανάκτηση αυτή θα αύξανε την συνολική απόδοση του κινητήρα με αποτέλεσμα τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπεμπόμενων ρύπων.

Η δυνατότητα που έχουν τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία να μετατρέπουν άμεσα τη θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική, τα κάνει να είναι υποψήφια υλικά σε μια τέτοια εφαρμογή. Τα σημεία στα οποία μία θερμοηλεκτρική διάταξη δίνει τη μέγιστη απόδοση, είναι αυτά όπου έχουμε τη μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ θερμής και ψυχρής επιφάνειας. Έτσι, σαν πηγή θερμότητας για τη λειτουργία τους, θα μπορούσε να είναι ο σωλήνας της εξάτμισης, όπου και παρουσιάζονται οι υψηλότερες θερμοκρασίες σε ένα αυτοκίνητο, αλλά και το ψυκτικό υγρό, καθώς και το μπλοκ του κινητήρα, όπου και η τοποθέτηση μιας διάταξης TEG θα βοηθούσε και στην καλύτερη ψύξη του. Στην εργασία αυτή, επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε τον σωλήνα της εξάτμισης, όπου τοποθετήσαμε θερμοηλεκτρικά στοιχεία.

Αρχικά μετρήσαμε τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στον σωλήνα της εξάτμισης και επιλέχθηκε η θέση τοποθέτησης της θερμοηλεκτρικής διάταξης. Σχεδιάσαμε και κατασκευάσαμε την συσκευή, όπου προσαρμόσαμε μια θερμοηλεκτρική συστοιχία (TE module) και έγινε μια σειρά μετρήσεων της απόδοσης της συσκευής σε πραγματικές οδηγικές συνθήκες.

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, διαπιστώσαμε ότι η μέση ισχύς που λάβαμε από τη διάταξή μας φτάνει το 1 W. Η συνολική ισχύς θα μπορούσε να φτάσει τα 58 W ή τα 116 W με εφαρμογή μιας μεγαλύτερης διάταξης με περισσότερα θερμοστοιχεία.

Με βάση των παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι με την κατάλληλη χρήση ορισμένων επιφανειών του αυτοκινήτου, από όπου αποβάλλεται θερμότητα, με την εφαρμογή κατάλληλων θερμοηλεκτρικών διατάξεων, υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής σημαντικού ποσού ηλεκτρικής ισχύος, η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία ηλεκτρικών εξαρτημάτων του αυτοκινήτου.

## 5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Τεχνολογία αυτοκινήτου πέρα από το 2000, 8<sup>η</sup> έκδοση, 2004, Ζαχμάνογλου – Καπετανάκης – Καραμπίλας – Πατσιαβός
- [2] Francis Stabler, “*Automotive applications for high efficiency thermoelectrics*,” High efficiency thermoelectric workshop, San Diego, California, March 24-27, 2002
- [3] Jorge Vázquez et al., *State of the Art of Thermoelectric Generators Based on Heat Recovered from the Exhaust Gases of Automobiles*, Proceedings of the 7<sup>th</sup> European Workshop on Thermoelectrics, Pamplona, Spain (2002)
- [4] “*Toyota Hybrid System THS II*”, Hybrid Transmission, [www.toyota.co.jp/en/tech/environment/](http://www.toyota.co.jp/en/tech/environment/)
- [5] John W. Fairbanks, “*Thermoelectric Developments for Vehicular Applications*”, *Diesel Engine-Efficiency and Emissions Research (DEER) Conference, Detroit, MI, August 24, 2006*
- [6] John Fairbanks, “*DOE’s Launch of High-Efficiency*”, Thermoelectrics Projects, 10<sup>th</sup> Diesel Engine Emissions Reduction Conference, San Diego, California, August 29-September 2, 2004
- [7] J. LaGrandeur et al, “*Vehicle Fuel Economy Improvement through Thermoelectric Waste Heat Recovery*”, 2005 Diesel Engine Emissions Reduction (DEER) Conference Presentations, Chicago, Illinois, August 21-25, 2005
- [8] Eder, A., et. al. *Vision of Possible Thermoelectrics for Vehicle Application*. in *DOE/EPRI High Efficiency Thermoelectrics Workshop*. 2004. San Diego
- [9] [www.epa.gov/otaq/sftp.htm](http://www.epa.gov/otaq/sftp.htm)
- [10] Heywood, J.B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, ed. J.P. Holman. 1988, New York: McGraw-Hill
- [11] <http://new-electronics.gr/peltier/peltier.html>
- [12] <http://new-electronics.gr/peltier/003.html>
- [13] <http://new-electronics.gr/peltier/002.html>
- [14] International Journal of Innovations in Energy Systems and Power, Vol. 1, no. 1 (November 2006)
- [15] H.J. Goldsmid Applications of Thermoelectricity, Methuen Monograph, London, 1960
- [16] Thermal Conduction in Semiconductors, C.M. Bhandari, and D.M. Rowe, Wiley Eastern Ltd, 1988

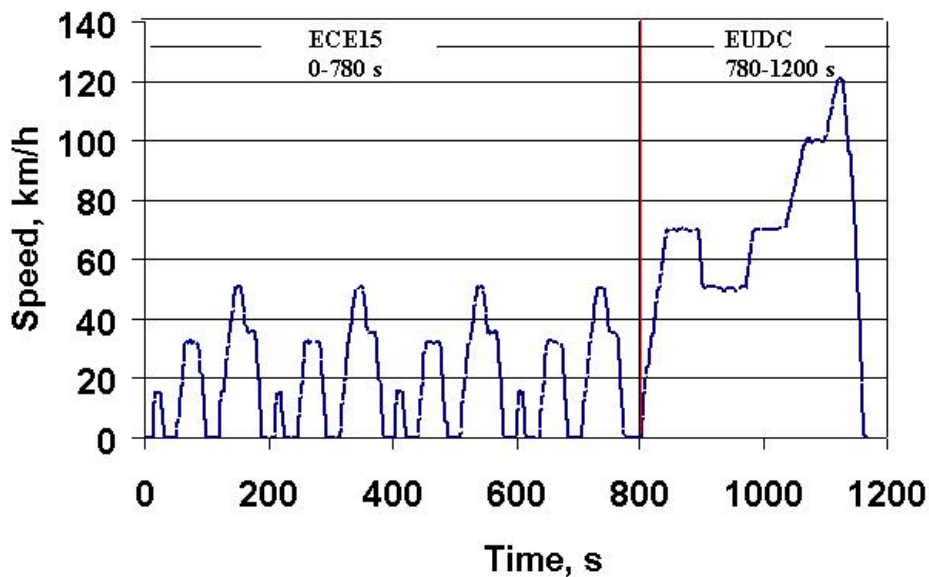
- [17] G.A. Slack, 'Design Concepts for improved thermoelectric materials' Mat. Res. Symp. Proc. Vol 478 pp. 47-54, 1997
- [18] G. Chen, Phys. Rev. B 57(23), p. 14958, 1998
- [19] D.M. Rowe and G. Min, 'Evaluation of Thermoelectric Modules for Power Generation', Journal of Power Sources, pp. 193-198, ISBN 0950-0839, 1998
- [20] D.M. Rowe, V.L. Kuznetsov, L.A. Kuznetsova and G. Min, 'Electrical and thermal transport properties of intermediate-valence  $\text{YbAl}_3$ ' J. Phys. D: Appl. Phys. 35 (2002), ISBN 2183-2186
- [21] D.M. Rowe and G. Min, 'Multiple Potential Barriers as a possible mechanism to increase the Seebeck Coefficient and Electrical Power Factor' Proc. of 13<sup>th</sup> IT Conf. Kansas, USA, pp. 339, 1994
- [22] X.Y. Yu, G. Chen, A. Verma and J.S. Smith, J. Appl.Phys. 67, pp. 3553, 68, pp. 1303, 1995
- [23] D.M. Rowe, Thermoelectric Power Generation. Proc. IEE Vol 125, No11R Nov. 1978
- [24] D.M. Rowe. 'United States Thermoelectric Activities in Space', Proceedings VIII<sup>th</sup> Int Conf on Thermoelectric Energy Conversion, 10-13 July 1989, Nancy, France, pp. 133-142
- [25] S. Saiki, S.I. Takeda, Y. Onuma. and M. Kobayashi 'Thermoelectric Properties of deposited semiconductor films and their application' Electrical Engineering in Japan, Vol. 105,2, pp. 387, 1985
- [26] A. Killander and J. Bass, 'A stove-top generator for cold areas' Proc. 15<sup>th</sup> ICT Conf, pp. 390-393, Pasadena, Ca. USA, 1996
- [27] J.L. Creveling, A thermoelectric generator to use waste heat, US Patent No 1118269, 1914
- [28] K. Matsuura and D.M. Rowe, 'Thermoelectricity to hydrogen energy conversion for waste heat recovery' Proc Third European Workshop on Thermoelectrics Sept 16-17 1996, Cardiff UK, pp. 22-27, ISBN 0-9519286-3-5
- [29] E. Takanase and H. Tamakoshi,, 'The development of thermoelectric generator for passenger car' Proc 12<sup>th</sup> Int Conf Thermoelectrics, Ed. Matsuura K., pp. 46 1994
- [30] K. Ikoma, M. Munkiyo, K. Furuiya, M. Koyayashi, H. Komatsu and K.J. Shinohara, 'Thermoelectric generator for gasoline engine using  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  modules', Japan Inst. Metals, 63 (11), 1475, 1999
- [31] International Journal of Innovations in Energy Systems and Power, Vol. 1, no. 1 (November 2006)
- [32] <http://www.ferrotec.com/technology/thermoelectric>
- [33] Melcor: Handbook of thermoelectric

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

### Κύκλοι δοκιμής οχημάτων

Τα νέα πρότυπα εκπομπής της ΕΕ και των ΗΠΑ απαιτούν τη βελτιστοποίηση όλων των στοιχείων που συμβάλλουν στην απόδοση του συστήματος ελέγχου εκπομπής ρύπων. Προκειμένου να ελεγχθούν οι εκπομπές ενός οχήματος, έχουν αναπτυχθεί διάφορες διαδικασίες δοκιμής και έχουν τυποποιηθεί. Οι πιο κοινές διαδικασίες δοκιμής είναι ο ευρωπαϊκός κύκλος οδήγησης (EC2000) και ο κύκλος FTP (Federal Test Procedure) που έχουν καθιερωθεί από την ΕΕ και την Αμερικανική Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος (EPA), αντίστοιχα. Η διαδικασία δοκιμής είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ των πραγματικών συνθηκών οδήγησης και των επαναλαμβανόμενων εργαστηριακών μετρήσεων, και πρέπει να αντιπροσωπεύει σε κάποιο βαθμό, το πραγματικό ύψος και συνθήκες οδήγησης. (Heck & Farrauto 1996, Sideris 1998)

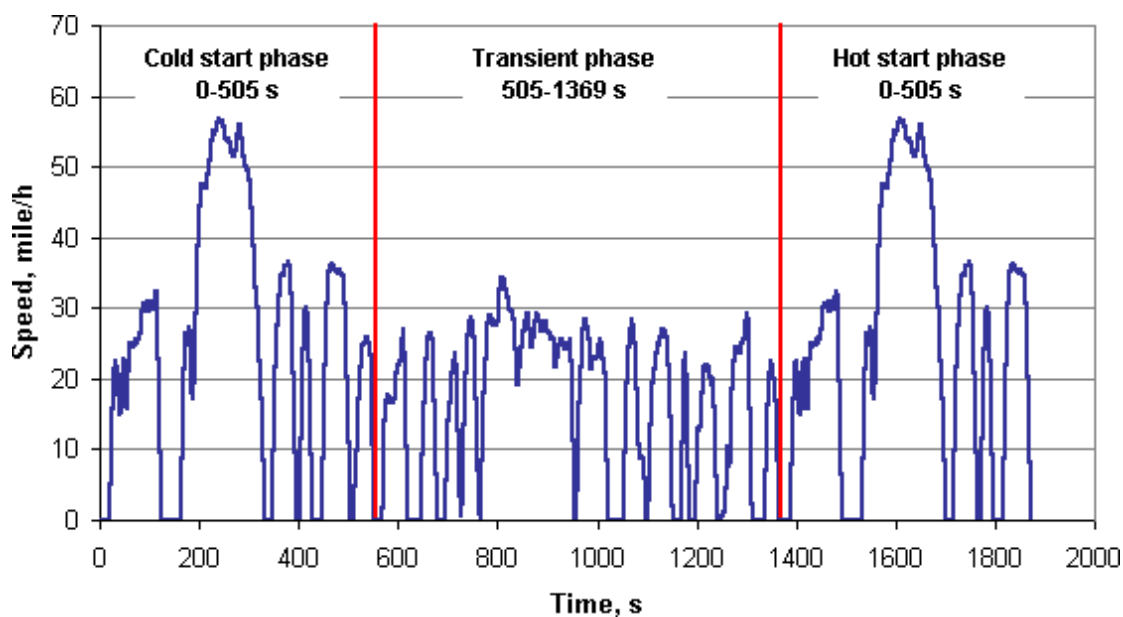
Οι κύκλοι δοκιμής εκτελούνται σε δυναμόμετρο. Κατά τη διαδικασία της δοκιμής, γίνεται δειγματοληψία ρύπων από μια δειγματοληπτική συσκευή σταθερού όγκου (CVS) και εκφράζονται σε g/km. Οι μέθοδοι και οι συνθήκες δοκιμής είναι τυποποιημένοι. Ο ευρωπαϊκός κύκλος οδήγησης είναι βασισμένος στο Euro III και παρουσιάζεται στο σχήμα I.1. Ο κύκλος οδήγησης αποτελείται από δύο μέρη, το ECE15 και το EUDC, τα οποία αντιστοιχούν σε συνθήκες οδήγησης εντός και εκτός πόλης αντίστοιχα. Ο κύκλος οδήγησης ECE15 εξομοιώνει μία μετακίνηση εντός πόλης 4,052 χιλιομέτρων, με μια μέση ταχύτητα 18,7 km/h και με μέγιστη ταχύτητα 50 km/h. Η διάρκειά της είναι 780 δευτερόλεπτα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται τέσσερις φορές, ώστε να λάβει την επαρκή απόσταση και θερμοκρασία. Ο κύκλος EUDC, αντιθέτως, εξομοιώνει την επιθετική οδήγηση με υψηλές ταχύτητες, με μέγιστη ταχύτητα 120 km/h. Η διάρκειά της είναι 400 δευτερόλεπτα σε απόσταση 6,955 χιλιομέτρων, με μέση ταχύτητα 62,6 km/h. (Heck & Farrauto 1997, Koltsakis & Stamatelos 1997)



*Σχήμα I.1 – Ο ευρωπαϊκός κύκλος οδήγησης (EC2000): Η ταχύτητα ενός οχήματος σε συνάρτηση με το χρόνο*

Ο κύκλος δοκιμής FTP, όπως φαίνεται στο σχήμα I.2, είναι ο αντίστοιχος του Ευρωπαϊκού κύκλος δοκιμής στις ΗΠΑ. Απεικονίζει τον πραγματικό χρόνο και συνθήκες οδήγησης, μετρώντας την ταχύτητα ενός οχήματος ως συνάρτηση του χρόνου. Ο κύκλος δοκιμής FTP εξομοιώνει 17,7 χιλιόμετρα (11,4 μίλια) οδήγησης στο Λος Άντζελες με μέση ταχύτητα 34,1 km/h (21,2 miles/h). Η δοκιμή μετρά τις εκπομπές των CO, HC και NO<sub>x</sub>, και περιλαμβάνει μια κρύα εκκίνηση της μηχανής, μια θερμή εκκίνηση, και ένα συνδυασμό κίνησης εντός και εκτός πόλης (Heck & Farrauto 1996, Sideris 1998). Μια αλλαγή προς επέκταση του FTP, είναι να συμπεριλάβει συνθήκες επιθετικής οδήγησης σε υψηλές ταχύτητες και επιταχύνσεις, γρήγορες διακυμάνσεις στην ταχύτητα και το ξεκίνημα αφότου η μηχανή είναι εκτός λειτουργίας για μικρό χρόνο. Αυτό θα οδηγήσει στις υψηλότερες συγκεντρώσεις ρύπων και σε μεγαλύτερες απαιτήσεις από τον καταλύτη. (Heck & Farrauto 1996, Sideris 1998)





Σχήμα I.2 – Ο κύκλος οδήγησης FTP-75, καθιερωμένος από την EPA.

Η σύγκριση αυτών των δύο κύκλων δοκιμής, των EC2000 και FTP, είναι αρκετά δύσκολη, επειδή τα σχεδιαγράμματα ταχύτητας και χρόνου του κάθε κύκλου είναι διαφορετικά μεταξύ τους. Στην αρχή του κύκλου ECE15, η ταχύτητα οδήγησης είναι μικρή και το φορτίο του κινητήρα χαμηλότερο σε σύγκριση με τον κύκλο FTP. Κατά συνέπεια, στον ευρωπαϊκό κύκλο δοκιμής, και η μηχανή και ο καταλύτης θερμαίνονται αργά. Αυτό παρατηρείται επίσης με την εξέταση των τιμών εκπομπής CO και HC, που είναι πολύ μικρότερες στην περίπτωση του κύκλου FTP. Έτσι, ο ευρωπαϊκός κύκλος δοκιμής είναι πιο αξιόπιστος, επειδή λαμβάνονται υπόψη και οι εκπομπές που διαμορφώνονται κατά τη διάρκεια της ψυχρής εκκίνησης. Επιπλέον, ο κύκλος δοκιμής FTP είναι ένας προσωρινός κύκλος δοκιμής με μια ιδιαίτερα δυναμική φύση, ενώ ο ευρωπαϊκός κύκλος δοκιμής είναι πιο στατικός. Επομένως, ο κύκλος δοκιμής FTP ανταποκρίνεται καλύτερα στις εκπομπές ρύπων κατά τη διάρκεια της πραγματικής οδήγησης, όπου η θερμοκρασία των καυσαερίων αυξάνεται βαθμιαία. (Laurikko 1994, Lox & Engler 1997, Sideris 1998, Laurikko 2001)

<http://herkules.oulu.fi/isbn9514269543/html/x787.html>