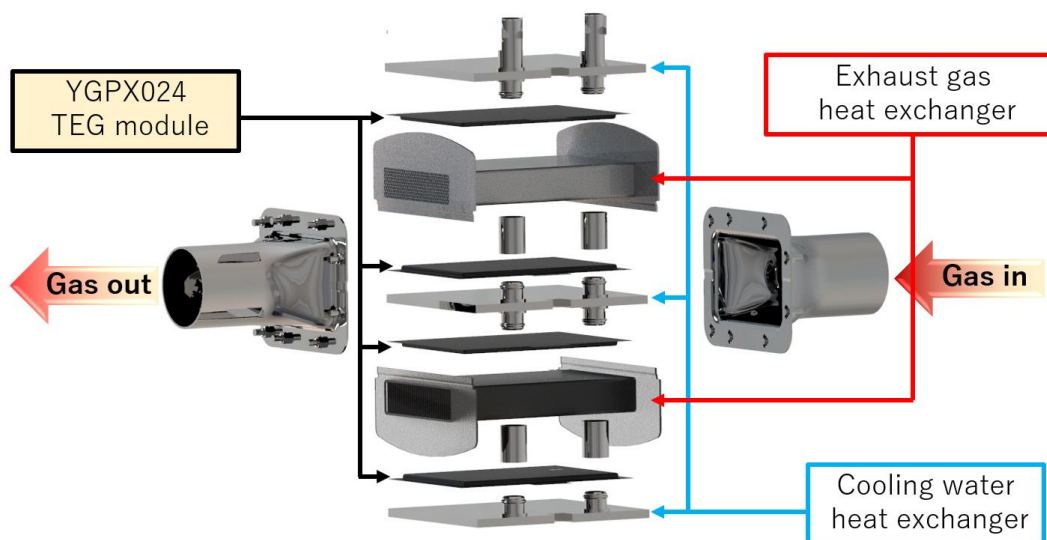




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ
ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΕ ΟΧΗΜΑ ΒΑΡΕΟΣ ΤΥΠΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ
ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΠΟΛΗΣ WTVC



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΣ ΙΟΡΔΑΝΙΔΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΓΙΑΚΟΥΜΗΣ,
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, 2022

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Ευάγγελο Γιακουμή, για τη δυνατότητα που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και σύγχρονο θέμα, καθώς και για την καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω και για τις γνώσεις που έλαβα στα φοιτητικά μου χρόνια μέσω των μαθημάτων του για τις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου, οι οποίοι με στήριξαν και συνεχίζουν να με στηρίζουν σε κάθε μου βήμα.

Περιεχόμενα

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8
ABSTRACT.....	9
1. ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	10
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	10
1.2 ΦΥΣΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	12
1.2.1 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ SEEBECK	12
1.2.2 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ PELTIER.....	12
1.2.3 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ THOMSON	12
1.2.4 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ JOULE	13
1.3 ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	13
1.4 ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ	15
1.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	16
1.5.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΗΓΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	17
1.5.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	18
1.5.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗΣ	19
1.5.4 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	19
1.5.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΘΑΡΗΣ ΑΝΑΚΤΟΥΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	20
1.5.6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	20
1.5.7 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	20
1.6 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	21
1.6.1 ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	21
1.6.2 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	22
1.7 ΣΥΣΤΗΜΑ ΨΥΞΗΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	23
1.8 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ	24
2. ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ ΠΟΛΗΣ	25
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	25
2.2 ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟ ΠΛΑΙΣΙΟΥ	27
2.3 ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	28
2.4 ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ CVS.....	29
2.5 ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΠΟΛΗΣ WTVS.....	31
3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ GT-Power.....	33

3.1 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ GT- SUITE	33
3.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ GT-POWER	34
3.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΕ ΒΑΡΕΟΣ ΤΥΠΟΥ ΟΧΗΜΑ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ GT-POWER	35
3.3.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ Diesel	35
3.3.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ GT-POWER	36
3.3.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΓΙΑ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΑ ΚΑΥΣΑΕΡΙΑ ΒΑΡΕΟΣ ΤΥΠΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ	43
4. ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΒΑΡΕΟΣ ΤΥΠΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	48
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	48
4.2 ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ DIESEL.....	49
4.3 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	62
4.4 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΑΣΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO ₂	63
4.5 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	63
4.6 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ	70
4.7 ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	71
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	77
5.1 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΑΖΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΤΡΕΙΛΕΡ	77
5.2 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΨΥΚΤΙΚΟΥ	80
5.3 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΞΟΔΟ ΤΩΝ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ	82
5.4 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕΤΩΠΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ	84
5.5 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	85
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	87
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	89

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Μέγεθος	Επεξήγηση	Μονάδες
C_{CO_2}	Συγκέντρωση εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα	ppm
C_{NO_x}	Συγκέντρωση εκπομπής οξειδίων αζώτου	ppm
C_p	Ειδική θερμοχωρητικότητα καυσαερίων	K/kgK
D	Διάμετρος εμβόλου	mm
D_h	Υδραυλική περιμετρος εναλλάκτη θερμότητας	m
\dot{E}	Εξέργεια συστήματος	W
f	Συντελεστής τριβών	-
$\dot{H}_{cool,in}$	Ενθαλπία ψυκτικού υγρού στην είσοδο	W
$\dot{H}_{cool,out}$	Ενθαλπία ψυκτικού υγρού στην έξοδο	W
$\dot{H}_{h,in}$	Ενθαλπία συστήματος θερμοηλεκτρικής γεννήτριας στην είσοδο	W
$\dot{H}_{h,out}$	Ενθαλπία συστήματος θερμοηλεκτρικής γεννήτριας στην έξοδο	W
I	Ηλεκτρικό ρεύμα	A
I_m	Ρεύμα εξόδου χαρακτηριστικού φορτίου	A
K	Θερμική αγωγιμότητα	W/mK
K_n	Θερμική αγωγιμότητα ημιαγωγού τύπου n	W/mK
K_p	Θερμική αγωγιμότητα ημιαγωγού τύπου p	W/mK
L	Μήκος αναφοράς συντελεστή τριβής	m
L_δ	Μήκος διωστήρα	mm
\dot{m}_{CO_2}	Εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα	kg _{CO₂} /h
\dot{m}_{exh}	Παροχή καυσαερίων	kg/h
M	Λόγος ηλεκτρικών αντιστάσεων θερμοζεύγους	-
MW_{CO_2}	Μοριακό βάρος διοξειδίου του άνθρακα	g/mol
MW_{NO_x}	Μοριακό βάρος οξειδίων αζώτου	g/mol
MW_{exh}	Μοριακό βάρος καυσαερίων	g/mol
Nu	Αριθμός Nusselt	-
P_{el}	Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς	W
P_{in}	Αποδιδόμενη ισχύς καυσίμου	W
P_L	Απώλειες άντλησης	W
P_{net}	Καθαρή ηλεκτρική ισχύς	W
P_{out}	Παραγόμενη ισχύς του κινητήρα	W
Q	Απορροφώμενη Θερμότητα από την θερμοηλεκτρική μονάδα	J
\dot{Q}	Διαθέσιμη θερμική ισχύς	W
\dot{Q}_{cool}	Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από το ψυκτικό υγρό	W
\dot{Q}_{exh}	Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας καυσαερίων	W
\dot{Q}_{TEM}	Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από την θερμοηλεκτρική μονάδα	W

R	Εσωτερική ηλεκτρική αντίσταση θερμοηλεκτρικής μονάδας	Ohm
R _L	Ηλεκτρική αντίσταση φορτίου συνδεδεμένου στο θερμοζεύγος	Ohm
R _n	Ηλεκτρική αντίσταση θερμοηλεκτρικής μονάδας	Ohm
R _p	Ηλεκτρική αντίσταση θερμοηλεκτρικής μονάδας	Ohm
S	Διαδρομή εμβόλου	Mm
T	Μέση θερμοκρασία υλικού	K
T _{amb}	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	K
T _{cold}	Θερμοκρασία ψυχρής επιφάνειας θερμοηλεκτρικής μονάδας	K
T _{exh}	Θερμοκρασία καυσαερίων	K
T _{hot}	Θερμοκρασία θερμής επιφάνειας θερμοηλεκτρικής μονάδας	K
THPC	Θερμο-υδραυλικός βαθμός απόδοσης	-
u	Ταχύτητα ρευστού	m/s
\dot{V}	Ογκομετρική παροχή καυσαερίων	m ³ /s
V _H	Συνολικός όγκος εμβολισμού	cm ³
V _m	Τάση εξόδου χαρακτηριστικού φορτίου	V
V _{seebeck}	Τάση Seebeck	V
W	Παραγόμενη ισχύς θερμοζεύγους	W
z	Αριθμός κυλίνδρων	-
α _{AB}	Συντελεστής Seebeck δύο άκρων AB	V/K
α _n	Συντελεστής Seebeck ημιαγωγού τύπου n	V/K
α _p	Συντελεστής Seebeck ημιαγωγού τύπου p	V/K
$\Delta\dot{H}_{TEG}$	Διαφορά ενθαλπίας εισόδου-εξόδου θερμοηλεκτρικής γεννήτριας	W
ΔP	Απώλειες πίεσης	Pa
ε	Βαθμός συμπίεσης	-
ε	Βαθμός απόδοσης καθαρής ηλεκτρικής ισχύς	-
Z	Δείκτης ποιότητας θερμοηλεκτρικού υλικού	K ⁻¹
ZT	Αδιάστατος δείκτης ποιότητας θερμοηλεκτρικού υλικού	-
η _{ins}	Βαθμός απόδοσης θερμομόνωσης	-
η _{n-p}	Βαθμός απόδοσης θερμοζεύγους n-p	-
η _{TEG}	Βαθμός απόδοσης θερμοηλεκτρικής γεννήτριας	-
η _{TEM}	Βαθμός απόδοσης θερμοηλεκτρικής μονάδας	-
η _{system}	Βαθμός απόδοσης συστήματος	-
Θ	Θερμική αντίσταση	W/mK
λ _a	Λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου	-
π _{AB}	Συντελεστής Peltier	V
ρ	Πυκνότητα	kg/m ³
σ	Ηλεκτρική αγωγιμότητα	S
τ	Συντελεστής Thomson	W/m
φ	Γωνία στροφάλου	°

Φ	Λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα	-
AFR	Λόγος αέρα-καυσίμου (Air-Fuel Ratio)	
BMEP	Μέση πραγματική πίεση (Brake mean effective pressure)	
BSFC	Ειδική κατανάλωση καυσίμου (Brake specific fuel consumption)	
CO₂	Διοξείδιο του άνθρακα (Carbon dioxide)	
CO	Μονοξείδιο του άνθρακα (Carbon monoxide)	
CVS	Δειγματοληψία σταθερού όγκου (Constant volume sampling)	
DC	Συνεχές ρεύμα (Direct Current)	
DI	Άμεση έγχυση (Direct injection)	
MPPT	Ανίχνευση Μέγιστου Σημείου Ισχύς (Maximum Power Point Tracking)	
NO_x	Οξείδια του αζώτου (Oxides of nitrogen)	
ORC	Οργανικός Κύκλος Rankine (Organic Rankine Cycle)	
RLT	Σε πραγματικού χρόνου (Real Time)	
RTG	Θερμοηλεκτρική γεννήτρια ραδιοϊσοτόπων (Radioisotope Thermoelectric Generator)	
Sub-TEG	Υπο-Θερμοηλεκτρική γεννήτρια (Sub-Thermoelectric generator)	
TEG	Θερμοηλεκτρική γεννήτρια (Thermoelectric Generator)	
TEM	Θερμοηλεκτρική μονάδα (Thermoelectric Module)	
UNECE	Οικονομική επιτροπή Ηνωμένων Εθνών για την Ευρώπη (United Nations Economic Commission for Europe)	
WTVC	Παγκόσμιος Μεταβατικός Κύκλος Οχημάτων (Worldwide Transient Vehicle Cycle)	
MEK	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης	
OHE	Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών	
4-X	Τετράχρονος	

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τεράστια σημασία του τομέα των μεταφορών, ο οποίος κυριαρχείται από τη χρήση μηχανών εσωτερικής καύσης, συνεπάγεται την πρόκληση της μείωσης της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων και των εκπομπών τους. Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό σενάριο, αναμένεται ότι οι επιβατικές και οι εμπορευματικές μεταφορές, οι οποίες πραγματοποιούνται με οχήματα βαρέος τύπου, να αυξηθούν κατά 40% και αντίστοιχα κατά 60% το 2050 σε σχέση με το 2010. Στην τεράστια πρόκληση για τη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, μία από τις υποσχόμενες μεθόδους αποτελεί η ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας από τα καυσαέρια. Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης, ως γνωστόν, έχουν πολλούς περιορισμούς οι οποίοι έχουν ως αποτέλεσμα τη διάχυση της ενέργειας του καυσίμου, μειώνοντας την αποδοτικότητά τους. Πιο συγκεκριμένα, για τα βαρέα οχήματα αξιοποιείται περίπου το 40% της ενέργειας του καυσίμου, ενώ ένα αρκετά σημαντικό ποσοστό κοντά στο 30% απορρίπτεται στο περιβάλλον με τα καυσαέρια [1]. Διάφορες μέθοδοι έχουν προταθεί για την ανάκτηση αυτής της απορριπτόμενης θερμότητας, όπως π.χ. ο οργανικός κύκλος Rankine (ORC), με πιο πρόσφατη πρόταση τη χρήση θερμοηλεκτρικής γεννήτριας (TEG)· το ενδιαφέρον για την θερμοηλεκτρική γεννήτρια έχει αυξηθεί αρκετά τα τελευταία χρόνια, καθώς η απλότητα της κατασκευής και μορφολογίας της προσφέρει μεγάλη ευελιξία σε εφαρμογές.

Στην παρούσα διπλωματική παρουσιάζεται η ανάλυση ενός οχήματος βαρέος τύπου εξοπλισμένο με μία θερμοηλεκτρική γεννήτρια ακριβώς πριν την έξοδο των καυσαερίων στο περιβάλλον, και η επίδρασή της στην απόδοση της μηχανής και δευτερευόντως στις εκπομπές ρύπων (χωρίς αντιρρυπαντικές συσκευές). Το όχημα που θα χρησιμοποιηθεί βασίζεται σε προηγούμενη διπλωματική εργασία και διαθέτει έναν υπερπληρωμένο εξακύλινδρο κινητήρα Diesel. Η σχεδίαση του κινητήρα και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας έγιναν με την βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος GT-Power της εταιρείας Gamma Technologies και η έρευνα επικεντρώθηκε κατά την διάρκεια του παγκόσμιου μεταβατικού κύκλου πόλης (WTV), ο οποίος αποτελεί μία τυποποιημένη μεταβατική δοκιμή για τον έλεγχο της εκπομπής ρύπων και κατανάλωσης των βαρέων οχημάτων.

ABSTRACT

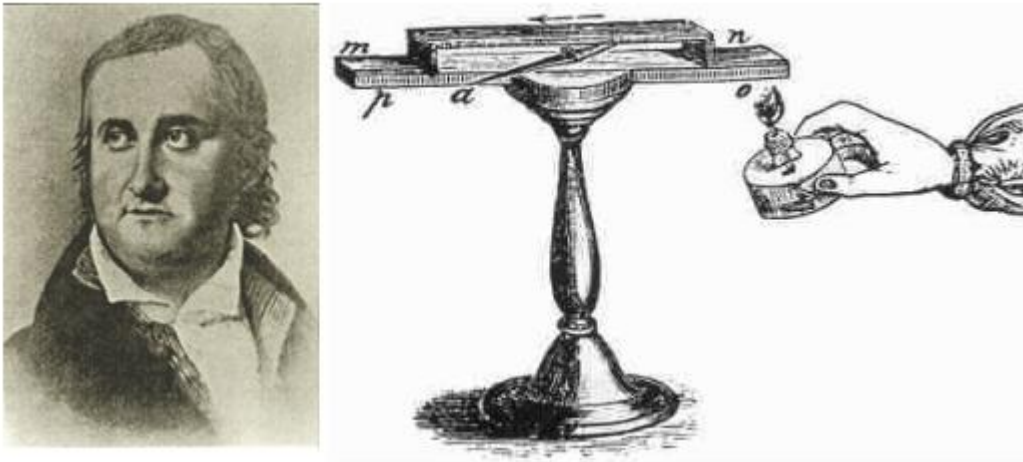
The huge importance of the transport sector, which is dominated by the use of internal combustion engines, implies the challenge of reducing fossil fuel consumption and emissions. According to the European scenario, passenger and freight transport, carried out by heavy-duty vehicles, is expected to increase by 40% and 60% respectively in 2050 compared to 2010. In the huge challenge of reducing carbon dioxide emissions, one of the promising methods is the recovery of waste heat from exhaust gases. Internal combustion engines are known to have many limitations which result in the dissipation of fuel energy, reducing their efficiency. In particular, for heavy-duty vehicles, about 40% of the fuel energy is utilized, while a fairly significant proportion, close to 30%, is discharged into the environment with the exhaust gases [1]. Various methods have been proposed to recover this waste heat, e.g., the organic Rankine cycle (ORC), with the most recent proposal being the use of a thermoelectric generator (TEG). Interest in the thermoelectric generator has increased considerably in recent years, as the simplicity of its construction and morphology offers great flexibility in applications.

In this thesis, the analysis of a heavy-duty vehicle equipped with a thermoelectric generator just before the exhaust gas is discharged to the environment is presented, and its effect on the engine performance and secondarily on the emissions. The vehicle to be used is based on a previous thesis and has a supercharged six-cylinder diesel engine. The design of the engine and the thermoelectric generator were carried out with the help of the GT-Power computer program from Gamma Technologies and the research was carried out during the World Transition Vehicle Cycle (WTVC), which is a standardized transient test to control the emission and consumption of heavy vehicles.

1. ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Οι πρώτες ενδείξεις της άμεσης μετατροπής μεταξύ θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας χρονολογούνται στα τέλη του 18^{ου} αιώνα από τον Ιταλό φυσικό και χημικό Alessandro Volta. Λίγα χρόνια αργότερα, το 1822, ο Γερμανός φυσικός Thomas Seebeck, παρατήρησε ότι σε ένα κλειστό κύκλωμα που αποτελείται από δύο ανόμοια μέταλλα με διαφορετικές θερμοκρασίες, προκαλείται εκτροπή μιας μαγνητικής πυξίδας που τοποθετείται κοντά στο κύκλωμα (Σχήμα 1.1). Έπειτα, πειραματιζόμενος με διάφορα υλικά κατέγραψε ότι η απόκλιση της μαγνητικής βελόνας της πυξίδας είναι ανάλογη της θερμοκρασιακής διαφοράς, καθώς και ότι για διαφορετικά υλικά δημιουργείται και διαφορετική ένταση μαγνητικού πεδίου. Στις επόμενες δεκαετίες ωστόσο, ο Hans Oersted απέδειξε με την έρευνα του ότι η θερμοκρασιακή διαφορά προκαλεί ηλεκτρική τάση και όχι την δημιουργία μαγνητικού πεδίου. Έτσι, σε ένα κλειστό κύκλωμα η ηλεκτρική τάση δημιουργεί ρεύμα, το οποίο με την σειρά του δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο από επαγωγή.

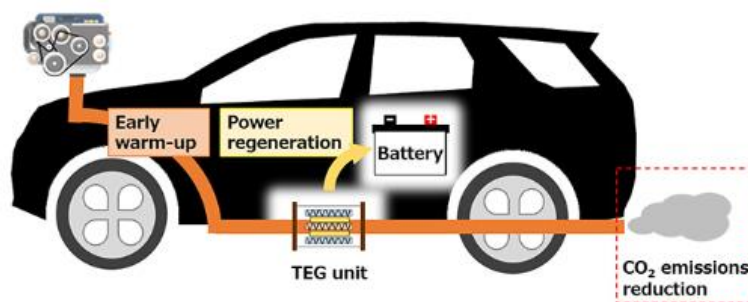


Σχήμα 1.1: Ο Thomas Seebeck και το όργανο που χρησιμοποίησε για να παρατηρήσει την μεταβολή μιας πυξίδας με βάση την θερμοκρασιακή διαφορά δύο ανόμοιων μετάλλων ο και η

Στη συνέχεια, το 1834, παρατηρήθηκε από τον Γάλλο φυσικό Jean Charles Peltier, ότι όταν υπάρχει διαφορά τάσης σε ένα κύκλωμα με δύο ανόμοια μέταλλα, τότε υπάρχει και η ανάλογη θερμοκρασιακή διαφορά στα άκρα των μετάλλων, δηλαδή το αντίστροφο του παραπάνω φαινομένου, το οποίο πήρε και την ονομασία του. Έπειτα, το 1851 ο William Thomson ένωσε τις δύο αυτές θεωρίες των Seebeck και Peltier, ανακαλύπτοντας το δικό του φαινόμενο, του οποίου η επίδραση έχει πολύ μικρότερη ισχύ σε σχέση με τα δύο προηγούμενα. Στα επόμενα χρόνια, οι

έρευνες πάνω στα θερμοηλεκτρικά στοιχεία αυξήθηκαν κατά κόρον, με αποτέλεσμα το 1911 να καταχτούν οι επιθυμητές ιδιότητες των θερμοηλεκτρικών υλικών από τον Γερμανό φυσικό Edmund Altenkirch. Στις έρευνές του ανέφερε ότι ένα καλό θερμοηλεκτρικό στοιχείο χρειάζεται να έχει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, μεγάλη τιμή της σταθεράς Seebeck και υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα [2].

Η κατασκευή των θερμοηλεκτρικών γεννητριών ξεκίνησε περίπου το 1940 με ταυτόχρονη ανάπτυξη σύνθετων ημιαγωγών που είναι τα πλέον κατάλληλα θερμοηλεκτρικά υλικά. Μια από τις βασικές ανάγκες που ώθησαν στην δημιουργία των θερμοηλεκτρικών γεννητριών ήταν αυτή της αυτονομίας. Για αυτό το λόγο, μια από τις αρχικές εφαρμογές της γεννήτριας ήταν στην διαστημική βιομηχανία, όπου η εξερεύνηση του διαστήματος απαιτούσε ασφαλή και αξιόπιστα συστήματα ισχύος με μεγάλη διάρκεια ζωής για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στα διαστημόπλοια. Κατά τα τέλη τις δεκαετίας του 1970, πολλά διαστημόπλοια είχαν εξοπλιστεί με θερμοηλεκτρικές συσκευές που βασίζονταν στη μετατροπή της θερμότητας από τη φυσική ραδιενεργό διάσπαση, συνήθως του ^{238}Pu , σε ηλεκτρική ενέργεια. Τέτοιες θερμοηλεκτρικές γεννήτριες ραδιοϊσοτόπων (RTG) έχουν χρησιμοποιηθεί από τη NASA σε διάφορες αποστολές. Για τους ίδιους λόγους αυτονομίας, περισσότεροι από χίλιοι RTGs αναπτύχθηκαν από τη δεκαετία του 1970 έως τη δεκαετία του 1990 για την παροχή ενέργειας σε φάρους, φάρους πλοήγησης και άλλες απομακρυσμένες τοποθεσίες παρακολούθησης που απαιτούσαν αυτόνομη πηγή ενέργειας. Αυτά τα RTG χρησιμοποιούσαν ραδιενεργό ^{90}Sr ως κύρια πηγή θερμικής ενέργειας [3]. Σήμερα, η θερμότητα που παρέχεται από την καύση φυσικού αερίου, βουτανίου ή προπανίου χρησιμοποιείται ως πηγή θερμότητας για θερμοηλεκτρικές γεννήτριες σε οχήματα, αγωγούς φυσικού αερίου, φρεάτια, υπεράκτιες πλατφόρμες, και στις τηλεπικοινωνίες. Στον χώρο των μεταφορών, μία από τις πρώτες προσπάθειες τοποθετήσεως θερμοηλεκτρικής γεννήτριας σε όχημα έγινε από την BMW το 2008 (Σχήμα 1.2)· η ενέργεια που παρήγαγε έφτανε κοντά στα 200-250 W. Στόχος της προσθήκης της γεννήτριας ήταν η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, εφόσον θα μειωνόταν ως έναν βαθμό η κατανάλωση του καυσίμου για τις ανάγκες φόρτισης της μπαταρίας. Τέλος, στην σημερινή εποχή όπου οι έρευνες έχουν πολλαπλασιαστεί, τα οφέλη της γεννήτριας έχουν αυξηθεί σημαντικά τόσο για τα ελαφριά όσο και για τα βαρέος τύπου οχήματα [4],[5].



Σχήμα 1.2: Σχηματικό διάγραμμα εφαρμογής θερμοηλεκτρικής γεννήτριας σε συμβατικό όχημα.

1.2 ΦΥΣΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

1.2.1 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ SEEBECK

Το φαινόμενο Seebeck αναφέρεται στη δημιουργία μιας διαφοράς δυναμικού, $V_{Seebeck}$, ως αποτέλεσμα μιας θερμοκρασιακής κλίσης, ∇T , σε έναν αγωγό. Η θερμική ισχύς που εισάγεται από το φαινόμενο Seebeck αντιπροσωπεύεται από τον συντελεστή Seebeck:

$$a_{AB} = \frac{V_{Seebeck}}{T_{hot} - T_{cold}} \quad (1.1)$$

ο οποίος ισούται με το λόγο της παραγόμενης ηλεκτρικής τάσης προς την διαφορά θερμοκρασίας της θερμής άκρης A με αυτήν της ψυχρής άκρης B.

1.2.2 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ PELTIER

Το φαινόμενο Peltier είναι το αντίστροφο του φαινομένου Seebeck και αναφέρεται όταν ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει το ηλεκτρικό κύκλωμα ενός θερμοζεύγους, οπότε θερμότητα απορροφάται από το ένα άκρο και εκλύεται στο άλλο άκρο. Έτσι, ορίζεται ο συντελεστής Peltier:

$$\pi_{AB} = \frac{Q}{I} \quad (1.2)$$

ο οποίος είναι ίσος με τον λόγο του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας προς το ρεύμα του αγωγού, όπου όταν το ρεύμα είναι θετικό, τότε απάγεται θερμότητα από την θερμή πλευρά και μεταφέρεται στην ψυχρή. Αναφέροντας προηγουμένως ότι τα φαινόμενα Seebeck και Peltier αλληλοσυμπληρώνονται μπορεί να γραφεί η παρακάτω σχέση που συνδέει τους δύο συντελεστές:

$$\pi_{AB} = a_{AB}T \quad (1.3)$$

1.2.3 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ THOMSON

Στο φαινόμενο Thomson, κατά την διέλευση ρεύματος μέσα από ένα ομογενές αγωγίμο υλικό με σταθερή θερμοκρασιακή διαβάθμιση, παράγεται ή απορροφάται θερμότητα. Επίσης, υπάρχει και ο συντελεστής Thomson τ , ο οποίος ορίζεται ως ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα μήκους που προκύπτει από τη διέλευση μοναδιαίου ρεύματος κατά μήκος ενός αγωγού στον οποίο υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά.

$$\tau = \frac{Q}{\Delta T} \quad (1.4)$$

Για μικρές θερμοκρασιακές διαφορές η σχέση που συνδέει τον συντελεστή Thomson και τον συντελεστή Seebeck είναι η εξής:

$$\tau_A - \tau_B = T \frac{da_{AB}}{dT} \quad (1.5)$$

1.2.4 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ JOULE

Κατά το φαινόμενο Joule, όταν ένα υλικό διαχέεται από ηλεκτρικό ρεύμα τότε παράγεται θερμότητα ανάλογη με το ρεύμα και την εσωτερική αντίσταση R του υλικού. Η σχέση που περιγράφει το φαινόμενο είναι η εξής:

$$Q = I^2 R \quad (1.6)$$

Το φαινόμενο αυτό είναι το μοναδικό από τα παραπάνω που δεν είναι θερμοδυναμικά αντιστρεπτό [6],[7].

1.3 ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

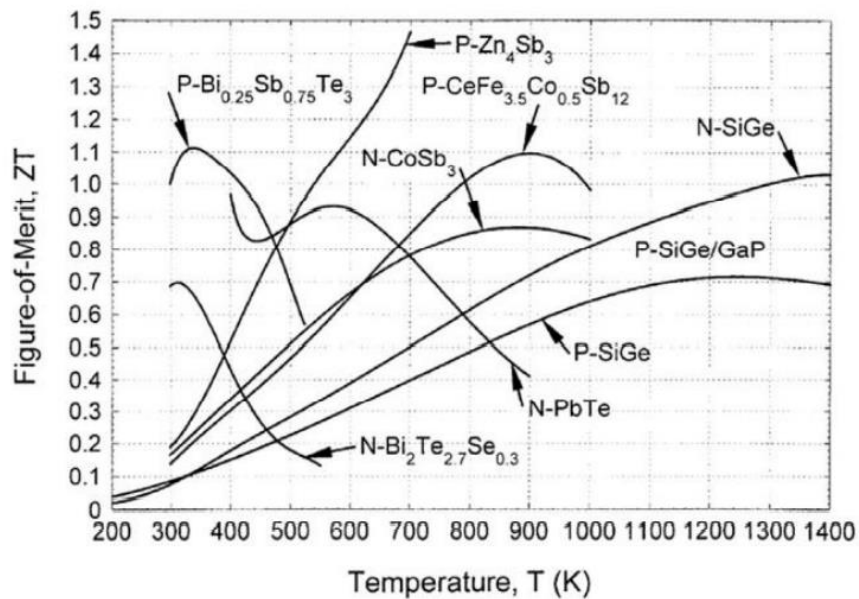
Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά ενός θερμοηλεκτρικού υλικού είναι η ανάγκη για υψηλή τιμή του δείκτη ποιότητας υλικού Z (figure of Merit), ο οποίος ορίζεται ως:

$$Z = \frac{a^2 \sigma}{k} \quad (1.7)$$

Όπου a είναι ο συντελεστής Seebeck, σ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα και k η θερμική αγωγιμότητα. Η εμφάνιση του συντελεστή Seebeck έχει να κάνει με το ίδιο το φαινόμενο και την μετατροπή της θερμότητας σε ηλεκτρισμό, η ηλεκτρική αγωγιμότητα εμφανίζεται στον όρο λόγω του φαινομένου Joule, καθώς όταν δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα τότε παράγεται και θερμότητα κατά Joule, η οποία μπορεί να διοχετευτεί και αυτή στην ψυχρή άκρη του θερμοστοιχείου και τέλος η θερμική αγωγιμότητα εμφανίζεται στον παρονομαστή, διότι η τιμή της χρειάζεται να είναι χαμηλή έτσι ώστε το υλικό να δρα και ως μονωτής της θερμότητας, μειώνοντας τις απώλειες στο περιβάλλον. Το μέγεθος Z έχει μονάδες K^{-1} και συχνά εμφανίζεται και ως γινόμενο με την

απόλυτη θερμοκρασία του υλικού, T με μονάδες K. Επομένως, έχει εδραιωθεί η χρήση του αδιάστατου δείκτη ποιότητας υλικού ZT.

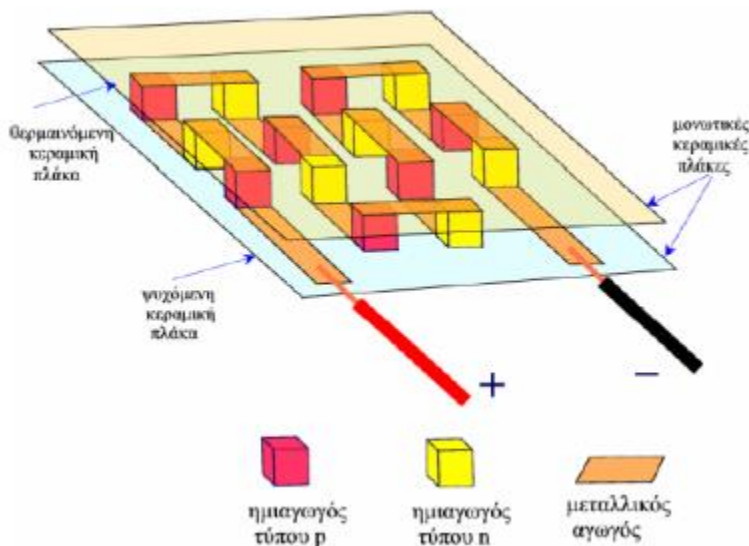
Τα υλικά με αυξημένες τιμές ZT είναι αρκετά δυσεύρετα, καθώς τα μονωτικά υλικά έχουν χαμηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας, ενώ τα μέταλλα έχουν σχετικά μικρές τιμές του συντελεστή Seebeck. Επιπρόσθετα, στα μεταλλικά υλικά η θερμική αγωγιμότητα, στην οποία κυριαρχούν τα ηλεκτρόνια, είναι ανάλογη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, όπως υπαγορεύεται από τον νόμο Wiedmann-Franz. Υλικά τα οποία καταπολεμούν τα παραπάνω μειονεκτήματα είναι οι ενισχυμένοι ημιαγωγοί, καθώς μέσω της κραμάτωσης τους επιτυγχάνεται διαφορά στη μάζα κατά μήκος του υλικού, η οποία μειώνει σημαντικά την θερμική αγωγιμότητα, χωρίς αυτή όμως να επηρεάζει την διάχυση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από το υλικό. Επομένως, κάποια από τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται πλέον είναι ο Τελλουριούχος Μόλυβδος (Lead Telluride, $PbTe$), το Τελλουριούχο Βισμούθιο (Bismuth Telluride, Bi_2Te_3) και το Πυρίτιο-Γερμάνιο (Silicon Germanium, $SiGe$), όπου το καθένα επιλέγεται ανάλογα την θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου, διότι η τιμή του συντελεστή ZT επηρεάζεται άμεσα από την θερμοκρασία που λαμβάνει το υλικό, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα του σχήματος 1.3. Σημαντικό ρόλο ωστόσο για την εμπορευματοποίησή των θερμοηλεκτρικών υλικών δεν έχει μόνο η απόδοσή τους αλλά και η αφθονία τους, η σταθερότητά τους και η καταλληλότητά τους για μαζική παραγωγή [8].



Σχήμα 1.3: Συντελεστής ZT διαφόρων υλικών σε σχέση με την θερμοκρασία

1.4 ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ

Αρχικά, το κύριο δομικό στοιχείο που αποτελεί τη γεννήτρια είναι η θερμοηλεκτρική μονάδα (Thermoelectric Module-TEM), (Σχήμα 1.4). Η ίδια αποτελείται από πλήθος ημιαγωγικών θερμοηλεκτρικών στοιχείων τύπου n και p, τα οποία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με υψηλά αγωγίμες μεταλλικές λωρίδες. Στη συνέχεια, πάνω και κάτω από τους ανόμοιους ημιαγωγούς υπάρχουν κεραμικές πλάκες, οι οποίες διασφαλίζουν την διέλευση της θερμότητας μεταξύ του θερμού ρεύματος, του ψυχρού ρεύματος και του TEM, ενώ επίσης προσφέρουν ηλεκτρική μόνωση στο κύκλωμα. Έτσι, τα στοιχεία είναι συνδεδεμένα θερμικά παράλληλα προς τις πλάκες και ηλεκτρικά σε σειρά μεταξύ τους. **Το κύριο πλεονέκτημα των θερμοηλεκτρικών μονάδων είναι η άμεση μετατροπή της θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια, χωρίς την ανάγκη κάποιας ενδιάμεσης μηχανής με κινούμενα μέρη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αποτελούν μονάδες χαμηλής συντήρησης με μηδενικούς ρύπους και μεγάλη διάρκεια ζωής.** Παρόλα αυτά, η δυσκολία ανάπτυξης θερμοηλεκτρικών υλικών με καλό συνδυασμό φυσικών ιδιοτήτων περιορίζει την απόδοση αυτών των μονάδων [6].



Σχήμα 1.4: Θερμοηλεκτρική μονάδα

Αναλυτικότερα, ο βαθμός απόδοσης ενός θερμοζεύγους p-n της θερμοηλεκτρικής μονάδας ορίζεται ως η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς προς το ρυθμό ροής θερμότητας. Η διαφορά δυναμικού που δημιουργείται από την θερμοκρασιακή διαφορά είναι ίση με $(a_p - a_n)(T_{hot} - T_{cold})$ και έτσι το παραγόμενο ρεύμα υπολογίζεται ως:

$$I = \frac{(a_p - a_n)(T_{hot} - T_{cold})}{R_p + R_n + R_L} \quad (1.8)$$

όπου οι συντελεστές α_p , α_n είναι οι συντελεστές Seebeck των δύο ημιαγωγών, οι συντελεστές R_p , R_n , R_L είναι οι ηλεκτρικές αντιστάσεις των ημιαγωγών, και ο τελευταίος όρος είναι η ηλεκτρική αντίσταση του φορτίου στο οποίο είναι συνδεδεμένο το θερμοζεύγος. Επομένως, η ισχύς που δίδεται στο φορτίο αυτό είναι:

$$W = I^2 R_L = \left\{ \frac{(\alpha_p - \alpha_n)(T_{hot} - T_{cold})}{R_p + R_n + R_L} \right\}^2 R_L \quad (1.9)$$

Μέρος της θερμότητας που αντλείται από το θερμό ρεύμα χρησιμοποιείται για την εξισορρόπηση της ψύξης Peltier που σχετίζεται με τη ροή του ρεύματος. Επιπλέον, υπάρχει η ροή θερμότητας λόγω θερμικής αγωγής κατά μήκος των ημιαγωγών. Έτσι, ο συνολικός ρυθμός ροής θερμότητας από το πηγή είναι:

$$\dot{Q} = (\alpha_p - \alpha_n)T_{hot} + (K_p + K_n)(T_{hot} - T_{cold}) \quad (1.10)$$

όπου K_p , K_n είναι οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας των ημιαγωγών p και n αντίστοιχα. Μπορεί πλέον να υπολογιστεί ο λόγος W/\dot{Q} .

Ο βαθμός απόδοσης μπορεί επίσης να εκφραστεί και με τον συντελεστή ZT του θερμοζεύγους. Αρχικά για την απλοποίηση των εξισώσεων ορίζεται ο συντελεστής M ως:

$$M = \frac{R_L}{R_p + R_n} = (1 + ZT_m)^{\frac{1}{2}} \quad (1.11)$$

όπου T_m είναι η μέση θερμοκρασία,

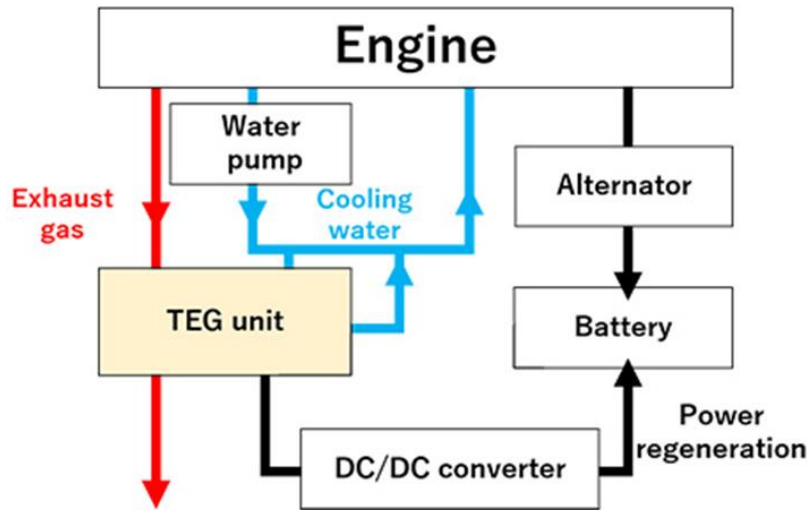
και στην συνέχεια εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση στον βαθμό απόδοσης βρίσκεται ότι [7]:

$$\eta_{n-p} = \frac{(T_{hot} - T_{cold})(M - 1)}{T_{hot} \left(M + \frac{T_{cold}}{T_{hot}} \right)} \quad (1.12)$$

1.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Στα πλαίσια της αυτοκινητοβιομηχανίας, η σχεδίαση μιας ολοκληρωμένης θερμοηλεκτρικής γεννήτριας έχει πολλές παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψη, έτσι ώστε ο βαθμός απόδοσης της να φτάνει σε μία ικανοποιητική τιμή. Η κύρια πρόκληση για μια τέτοιου είδους γεννήτρια είναι να διασφαλιστεί ότι η ηλεκτρική ισχύς που λαμβάνεται από τη ροή θερμότητας των καυσαερίων, η οποία μπορεί να ενισχυθεί από έναν εναλλάκτη θερμότητας, είναι μεγαλύτερη από τις πιθανές απώλειες ενέργειας που προκαλούνται από την εφαρμογή της στο σύστημα. Η

κύρια χρήση της παραγόμενης αυτής ηλεκτρικής ισχύος είναι για την κάλυψη των αναγκών των ηλεκτρικών συστημάτων του οχήματος, μειώνοντας έτσι την εξάρτησή τους από την κατανάλωση του καυσίμου (Σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5: Αναγκαία υποσυστήματα ενός κινητήρα εξοπλισμένου με θερμοηλεκτρική γεννήτρια

Κατά τη διαδικασία σχεδιασμού μπορούν να αξιολογηθούν διάφορες πτυχές: η πηγή θερμότητας, ο εναλλάκτης θερμότητας στη θερμή πλευρά, η θερμομόνωση, η καθαρή ενέργεια που ανακτάται από την συσκευή, η ενέργεια που λαμβάνεται από την ηλεκτρική ισχύ που παράγεται και, τέλος, η συνολική απόδοση του συστήματος μετά την τοποθέτηση της γεννήτριας και η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

1.5.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΗΓΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ένα από τα αρχικά βήματα για την σχεδίαση μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας είναι η μελέτη της πηγής θερμότητας του συστήματος στο οποίο αυτή θα τοποθετηθεί. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω μιας ενεργειακής και εξεργειακής ανάλυσης, όπου για αυτούς τους είδους την ανάλυση είναι σημαντικό να έχει συνυπολογιστεί και η επίδραση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Επομένως, έχει αναπτυχθεί ο παρακάτω τύπος 1.13 για την εύρεση της εξέργειας σε συστήματα που χρησιμοποιούν συσκευές ανάκτησης θερμότητας:

$$\dot{E} = \dot{Q} \left(1 - \frac{T_{cold}}{T_{hot}} \right) \quad (1.13)$$

Όπου \dot{Q} είναι η διαθέσιμη θερμική ισχύ, T_c είναι η θερμοκρασία του ψυκτικού και T_h είναι η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας. Με τον όρο αυτό μπορεί κανείς να υπολογίσει το μέγιστο έργο που μπορεί να ληφθεί από το σύστημα όταν αυτό λειτουργεί μεταξύ αυτών των δύο

θερμοκρασιών. Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα αυτής της έρευνας είναι ότι δίνει την δυνατότητα να τροποποιηθεί το σύστημα, με την επιλογή διαφόρων ψυκτικών μέσων, έως ότου βρεθεί μια ικανοποιητική θερμοκρασιακή διαφορά.

Πιο συγκεκριμένα, για εφαρμογές σε οχήματα η διαθέσιμη θερμική ισχύς υπολογίζεται μέσω της επόμενης σχέσης 1.14, όπου \dot{m}_{exh} , C_p , T_{exh} είναι η παροχή, η ειδική θερμοχωρητικότητα και η θερμοκρασία των καυσαερίων, και T_{amb} είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

$$\dot{Q}_{exh} = \dot{m}_{exh} C_p (T_{exh} - T_{amb}) \quad (1.14)$$

1.5.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ένα από τα σημαντικότερα στάδια κατά την δημιουργία μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας είναι η σχεδίαση του εναλλάκτη θερμότητας. Αυτό συμβαίνει διότι χρειάζεται να γίνει ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην μετάδοση θερμότητας και στις απώλειες πίεσης που εισάγει η γεννήτρια στο σύστημα. Σε πρώιμα στάδια της ανάλυσης, όπου η επίδοση των θερμοστοιχείων δεν είναι ακόμα γνωστή, το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την μεγιστοποίηση της μεταφοράς θερμότητας σε μία επιφάνεια, ανεξάρτητα με το ποια θερμοηλεκτρικά υλικά θα επιλεγούν για την παραγωγή της ενέργειας. Για αυτό έχει εισαχθεί ο θερμο-υδραυλικός βαθμός απόδοσης (Thermo-hydraulic performance coefficient - THPC), ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση ανάμεσα σε διάφορα σχέδια εναλλακτών, ελέγχοντας τις απώλειες πίεσης και της μετάδοση θερμότητας:

$$THPC = \frac{\frac{Nu}{Nu_o}}{\left(\frac{f}{f_o}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (1.15)$$

Ο αριθμός Nusselt-Nu υπολογίζει την βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας από μία βασική περίπτωση με τιμή Nu_o , ενώ ο συντελεστής τριβών f υπολογίζει την βελτίωση στις απώλειες πίεσης από την βασική περίπτωση με f_o . Πιο αναλυτικά, ο συντελεστής τριβών υπολογίζεται από τον τύπο:

$$f = \frac{\Delta p D_h}{2 \rho u^2 L} \quad (1.16)$$

Όπου Δp είναι οι απώλειες πίεσης, D_h είναι η υδραυλική περίμετρος, ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού, u είναι η ταχύτητα εισόδου και L είναι το μήκος αναφοράς. Επιπλέον, οι απώλειες άντλησης (Pumping Losses) του συστήματος μπορούν να υπολογιστούν ως το γινόμενο των απωλειών πίεσης και της ογκομετρικής παροχής που περνάει μέσα από τον εναλλάκτη θερμότητας:

$$P_L = \Delta p \dot{V} \quad (1.17)$$

1.5.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗΣ

Ένα κύριο ζήτημα κατά την σχεδίαση είναι η εξασφάλιση της μεταφοράς θερμότητας από την πηγή στα θερμοζεύγη χωρίς την ύπαρξη σημαντικών απωλειών στο περιβάλλον. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, τα ίδια τα θερμοηλεκτρικά υλικά δρουν ως μονωτές της θερμότητας, ωστόσο δεν είναι όλες οι επιφάνειες καλυμμένες με θερμοηλεκτρικές μονάδες. Επομένως, η προσθήκη μονωτικού υλικού κυρίως των πλαϊνών περιοχών της γεννήτριας είναι αναγκαία για την αποφυγή θερμικών απωλειών και την μεγιστοποίηση της ηλεκτρικής απόδοσης. Επιπρόσθετα, είναι σημαντικό να μελετηθεί και η πίεση σύσφιξης των θερμοηλεκτρικών μονάδων πάνω στις θερμές πλευρές του εναλλάκτη θερμότητας, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι θερμικές αντιστάσεις ανάμεσα στις δύο επιφάνειες και να αποφευχθούν περαιτέρω απώλειες. Για την εύρεση του βαθμού απόδοσης του συστήματος ως προς την μόνωσή του έχει οριστεί το παρακάτω μέγεθος, όπου \dot{Q}_{TEM} είναι η θερμότητα που φτάνει τις θερμοηλεκτρικές μονάδες TEM και $\Delta\dot{H}_{TEG}$ είναι η διαφορά ενθαλπίας ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο της συσκευής:

$$\eta_{ins} = \frac{\dot{Q}_{TEM}}{\Delta\dot{H}_{TEG}} \quad (1.18)$$

Για τον υπολογισμό της θερμότητας που φτάνει στις θερμοηλεκτρικές μονάδες χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος, όπου P_{el} είναι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και \dot{Q}_{cool} είναι η απορροφώμενη θερμότητα από το ψυκτικό υγρό:

$$\dot{Q}_{TEM} = P_{el} + \dot{Q}_{cool} = P_{el} + \dot{H}_{cool,out} - \dot{H}_{cool,in} \quad (1.19)$$

Ενώ, με αντίστοιχο τρόπο μπορεί να υπολογιστεί και η διαφορά ενθαλπίας του συστήματος ως:

$$\Delta\dot{H}_{TEG} = \dot{H}_{h,in} - \dot{H}_{h,out} \quad (1.20)$$

1.5.4 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Εφόσον οι θερμοηλεκτρικές μονάδες είναι θερμικές συσκευές, ένα μέρος της θερμότητας \dot{Q}_{TEM} που φτάνει στην μονάδα, μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ P_{el} , ενώ το υπόλοιπο μέρος μεταφέρεται ως απώλεια στην ψυχρή πλάκα \dot{Q}_{cool} . Επομένως, ο βαθμός απόδοσης της θερμοηλεκτρικής μονάδας TEM είναι:

$$\eta_{TEM} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{TEM}} \quad (1.21)$$

Ο βαθμός αυτός εξαρτάται από το θερμοηλεκτρικό υλικό που έχει επιλεγεί, καθώς η απόδοση του υλικού αλλάζει ανάλογα με την θερμοκρασία λειτουργίας του εκάστοτε συστήματος.

1.5.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΘΑΡΗΣ ΑΝΑΚΤΟΥΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατά την προσθήκη της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας προστίθενται στο σύστημα και παρασιτικές απώλειες P_L , οι οποίες θα πρέπει να αφαιρεθούν από την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ P_{el} , ώστε να βρεθεί το καθαρό κέρδος P_{net} . Επομένως, υπολογίζεται ο συντελεστής:

$$\epsilon = \frac{P_{net}}{P_{el}} = \frac{P_{el} - P_L}{P_{el}} \quad (1.22)$$

ο οποίος δείχνει από πλευράς ισχύος πόσο κερδοφόρο είναι το σύστημα. Το ιδανικό σενάριο είναι όταν ο συντελεστής είναι μονάδα, το οποίο σημαίνει ότι δεν προστίθενται παρασιτικές απώλειες. Ο όρος αυτός θα μπορούσε να είναι και αρνητικός υπό κάποιες συνθήκες, εάν ο συντελεστής ήταν θετικός στο μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας του συστήματος.

1.5.6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Η απόδοση ενός συστήματος TEG μπορεί να εκφραστεί ως η καθαρή ενέργεια που λαμβάνεται σε σχέση με τη θερμότητα που απορροφάται από την πηγή.

$$\eta_{TEG} = \frac{P_{net}}{\dot{Q}_{TEG}} = \frac{P_{el} - P_L}{\dot{Q}_{TEG}} \quad (1.23)$$

Η απόδοση μπορεί να εκφραστεί επίσης ως το συσσωρευμένο γινόμενο των προηγούμενων αποδόσεων και συντελεστών που παρουσιάστηκαν παραπάνω:

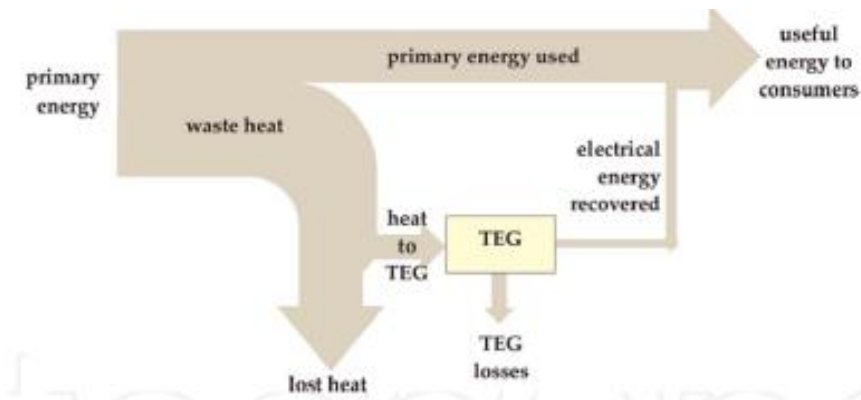
$$\eta_{TEG} = \eta_{ins} \eta_{TEM} \epsilon \quad (1.24)$$

1.5.7 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Ο στόχος της συσκευής ανάκτησης θερμότητας είναι η βελτίωση του συνολικού βαθμού απόδοσης της διάταξης, αξιοποιώντας την απορριπτόμενη θερμότητα των καυσαερίων (Σχήμα 1.6). Μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια μπορεί να προσδίδει ηλεκτρική ισχύ στο σύστημα αλλά παράλληλα αυξάνει την αρχική απαιτούμενη κατανάλωση P_{in} . Ανεξάρτητα λοιπόν με τους προηγούμενους βαθμούς απόδοσης, υπάρχει και ο συνολικός, ο οποίος ορίζεται ως:

$$\eta_{system} = \frac{P_{el} + P_{out}}{P_{in}} \quad (1.25)$$

όπου P_{out} είναι η ισχύς που παράγει το ίδιο το σύστημα.



Σχήμα 1.6: Διάγραμμα ροής ενέργειας

1.6 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

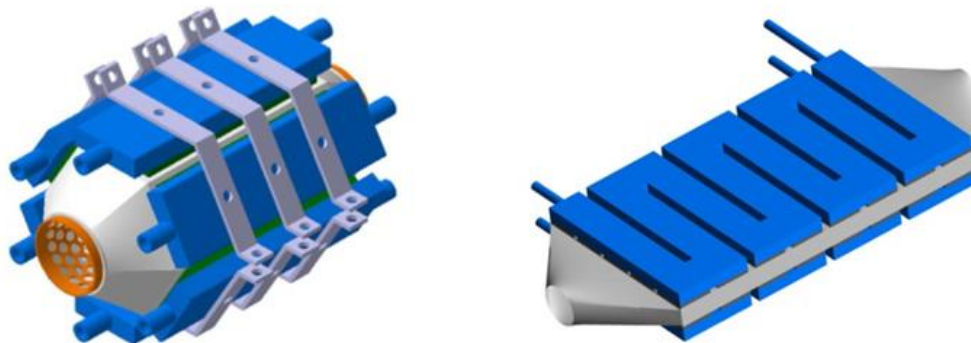
Η σχεδίαση του εναλλάκτη μιας συσκευής ανάκτησης θερμότητας έχει διαφορετικές απαιτήσεις από ότι ένας συνηθισμένος εναλλάκτης. Τα κύρια αυτά χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

- Μείωση των απωλειών θερμότητας στο περιβάλλον
- Επαρκής επιφάνεια για την τοποθέτηση του απαραίτητου πλήθους θερμοηλεκτρικών μονάδων
- Αύξηση της θερμής επιφάνειας του εναλλάκτη ώστε να υπάρχει ικανοποιητική θερμοκρασιακή διαφορά για την αποδοτική λειτουργία των θερμοηλεκτρικών στοιχείων
- Ελαχιστοποίηση των απωλειών πίεσης που εισάγονται στο σύστημα

Για την βελτιστοποίηση αυτών των κριτηρίων, σημαντικό ρόλο παίζει τόσο το εξωτερικό σχήμα της γεννήτριας όσο και η εσωτερική γεωμετρία της.

1.6.1 ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Έχουν προταθεί αρκετές μορφές εναλλακτών, με επικρατέστερες την επίπεδη και την εξαγωνική διάταξη, οι οποίες παρουσιάζονται στο σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.7: Διάταξη TEG με εξαγωνική διατομή (αριστερά) και με επίπεδη πλάκα (δεξιά)

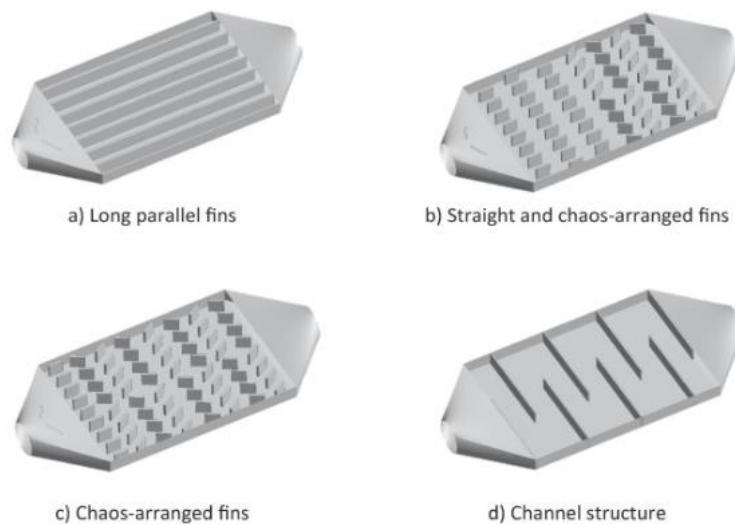
Ο επίπεδος εναλλάκτης θερμότητας βασίζεται σε μια ορθογωνική διατομή, όπου οι πλευρές που θα τοποθετηθούν οι θερμοηλεκτρικές μονάδες είναι σημαντικά πιο μακριές από τις υπόλοιπες. Με αυτό τον τρόπο, το ύψος της συσκευής μειώνεται αρκετά και μπορεί να ενσωματωθεί πιο εύκολα σε εφαρμογές με περιορισμένο χώρο, όπως είναι η εξάτμιση ενός αυτοκινήτου. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι οι δύο μικρότερου μήκους πλευρές δεν χρησιμοποιούνται για την αποκόμιση ενέργειας και έτσι υπάρχουν θερμικές απώλειες μέσω αυτών. Παρόλα αυτά, με κατάλληλη μόνωση οι απώλειες αυτές μπορούν να περιοριστούν αρκετά.

Αντίστοιχα, ο εξαγωνικός τύπος εναλλάκτη αποκτά μια πιο ομοιόμορφη θερμοκρασία κατά μήκος των τοιχωμάτων των θερμοηλεκτρικών μονάδων από ότι ο επίπεδος εναλλάκτης. Ωστόσο, το βασικό αρνητικό αυτής της διάταξης είναι ότι για να τοποθετηθεί ο ίδιος αριθμός θερμοηλεκτρικών στοιχείων ανά μονάδα μήκους, όπως σε έναν επίπεδο εναλλάκτη, η απόσταση της θερμής πλευράς από τον κεντρικό άξονα ολόενα και αυξάνεται με αποτέλεσμα να μειώνεται η θερμοκρασία της επιφάνειας των πλευρών.

Τέλος, έρευνες έχουν γίνει και για τριγωνικής μορφή εναλλάκτη, στον οποίο παρατηρήθηκε η υψηλότερη θερμοκρασία τοιχωμάτων. Ωστόσο, η σχεδίασή του εγκαταλείφθηκε, καθώς επέτρεπε να τοποθετηθούν πολύ λίγες θερμοηλεκτρικές μονάδες επάνω στις πλευρές του.

1.6.2 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Πέρα από το σχήμα του εναλλάκτη, σημαντικό ρόλο για την απόδοσή του έχει και η εσωτερική του γεωμετρία. Η κατάλληλη εσωτερική δομή επηρεάζει την προσέλευση της ροής, μειώνοντας τις απώλειες πίεσης και αυξάνοντας την μετάδοση θερμότητας προς τα τοιχώματα. Για αυτό το λόγο έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες με την χρήση CFD αλλά και πειραμάτων, που έχουν ως στόχο την αύξηση της επιφάνειας που λαμβάνει χώρα η μετάδοση θερμότητας και την μείωση της θερμικής αντίστασης συναγωγής. Μερικά παραδείγματα εσωτερικών διατάξεων παρουσιάζονται στο σχήμα 1.8:



Σχήμα 1.8: Διατάξεις πτερυγίων στο εσωτερικό το εναλλάκτη θερμότητας μιας TEG

Από τις εσωτερικές δομές του σχήματος 1.8 έχει βρεθεί ότι η πρώτη διάταξη με τα παράλληλα πτερύγια έχει τον μεγαλύτερο λόγο θερμικής μεταφοράς προς απώλειες πίεσης. Σε εφαρμογές όπου οι απώλειες πίεσης έχουν μεγάλη σημασία για την απόδοση του συστήματος, όπως σε περιπτώσεις κινητήρων οχημάτων, τότε έχει βρεθεί πως είναι προτιμητέα μία πιο απλή εσωτερική γεωμετρία [10].

1.7 ΣΥΣΤΗΜΑ ΨΥΞΗΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

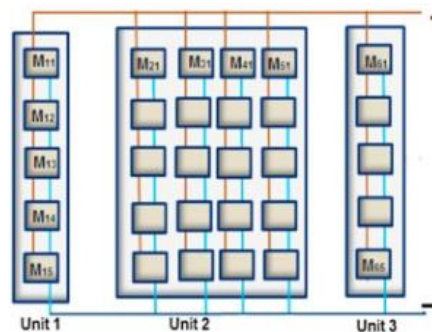
Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες χρειάζονται ένα ψυκτικό υγρό για να εξασφαλίσουν ότι η ψυχρή πλευρά των θερμοηλεκτρικών μονάδων παραμένει σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα ψυκτικά υγρά αλλά και ο αέρας. Η ψύξη με υγρό έχει το πλεονέκτημα της υψηλότερης απόδοσης εξαιτίας της μεγαλύτερης ειδικής θερμοχωρητικότητάς του από τον αέρα. Ωστόσο, η ύπαρξη κάποιου ψυκτικού συστήματος με υγρό συνεπάγεται απώλειες για την άντληση του υγρού και αύξηση στο βάρος της εγκατάστασης, το οποίο είναι μια σημαντική παράμετρος για τις εφαρμογές σε οχήματα. Επιπρόσθετα, προσθέτει και μια πολυπλοκότητα στην θερμοηλεκτρική γεννήτρια. Από την άλλη πλευρά, η ψύξη με αέρα οδηγεί σε απλούστερα συστήματα και μικρότερη αύξηση βάρους. Στην αερόψυξη, είναι επίσης δυνατή η προσθήκη ανεμιστήρα για εξαναγκασμένη συναγωγή για την εξασφάλιση χαμηλότερων θερμοκρασιών, ωστόσο η επιλογή αυτή χαρακτηρίζεται επίσης από κατανάλωση ισχύος.

Για εφαρμογές σε επίγεια μέσα μεταφοράς, το ψυκτικό υγρό της μηχανής αποτελεί την τυπική επιλογή για το εργαζόμενο μέσο. Αυτό συμβαίνει διότι ο εξωτερικός αέρας δεν είναι αρκετά κρύος ή μεγάλης ταχύτητας για να ψύξει μία θερμοηλεκτρική γεννήτρια που βρίσκεται στο κάτω μέρος

του οχήματος. Επίσης, η θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού της μηχανής είναι συνήθως κοντά στους 80-90°C, το οποίο είναι πολύ υψηλό εύρος για την βέλτιστη λειτουργία της γεννήτριας.

1.8 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ

Μία ακόμη εκτίμηση κατά το σχεδιασμό ενός μεγάλου συστήματος ισχύος TEG πέρα από την επιλογή των κατάλληλων μονάδων TEM που θα πρέπει να πληρούν τις ειδικές απαιτήσεις της εφαρμογής, είναι και η διάταξή τους σε μια κατάλληλη διαμόρφωση ώστε να πληρούν τις προδιαγραφές του ηλεκτρικού κυκλώματος. Για την παροχή της απαιτούμενης ισχύος εξόδου, οι μονάδες μπορούν εύκολα να τοποθετηθούν σε συστοιχία και να συνδεθούν ηλεκτρικά σε σειρά ή/και παράλληλα (Σχήμα 1.9). Η μέθοδος σύνδεσης των TEGs συνήθως εκτιμάται από την επιθυμητή τάση ή/και ρεύμα. Στη συνέχεια το κύκλωμα συνδέεται με έναν εναλλάκτη DC-DC, ο οποίος αυξομειώνει την τάση κατάλληλα για τις ανάγκες της μπαταρίας που είναι συνδεδεμένη μετά από αυτόν [11]. Παράλληλα χρειάζεται και ένα σύστημα παρακολούθησης του σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking-MPPT), το οποίο χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που η πηγή ενέργειας είναι μεταβλητή. Καθώς οι συνθήκες της πηγής ποικίλουν, αλλάζει το χαρακτηριστικό φορτίο που δίνει την μεγαλύτερη μεταφορά ισχύος. Επομένως, το MPPT προσπαθεί να κρατάει το σύστημα στην βέλτιστη κατάσταση αλλάζοντας το φορτίο ώστε να διατηρείται η μεταφορά ισχύος στην υψηλότερη απόδοση.

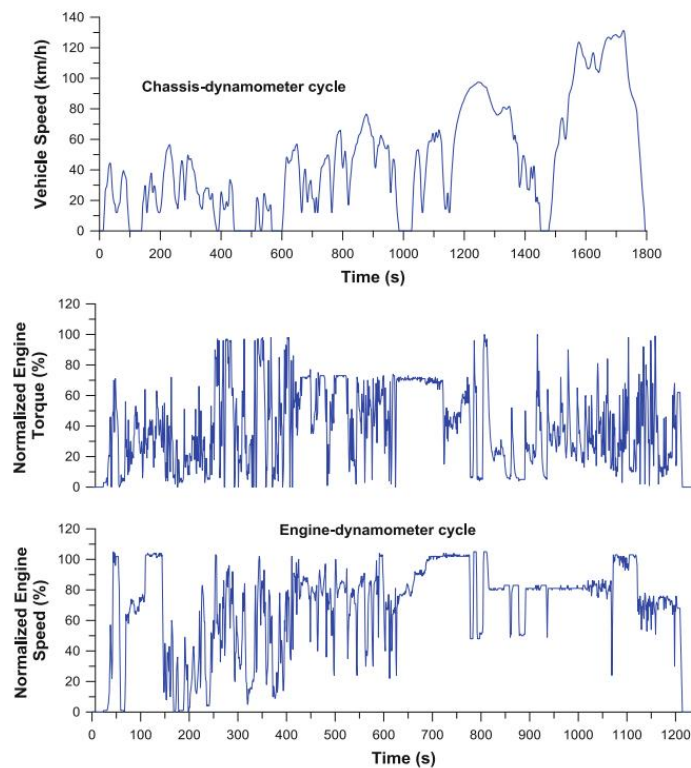


Σχήμα 1.9: Ηλεκτρική σύνδεση ανάμεσα στις θερμοηλεκτρικές μονάδες

2. ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ ΠΟΛΗΣ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Από τις αρχές της δεκαετίας του '60, τα οχήματα ελέγχονται για τη συμμόρφωσή τους με τα πρότυπα εκπομπών ρύπων μέσω της χρήσης τυποποιημένων δοκιμών. Αυτές οι δοκιμές είναι επίσης γνωστές και ως κύκλοι δοκιμών ή μεταβατικοί κύκλοι πόλης (driving cycles), σε περίπτωση που δοκιμάζεται ολόκληρο το όχημα και όχι μόνο η μηχανή του. Ένας κύκλος δοκιμών ορίζεται ως μια αλληλουχία σημείων, που το καθένα έχει μια ορισμένη ταχύτητα οχήματος ή έναν συνδυασμό ταχύτητας περιστροφής και φορτίου, την οποία ακολουθεί το όχημα που βρίσκεται υπό μελέτη. Τα σημεία αυτά χωρίζονται σε χρονικά βήματα, συνήθως σε δευτερόλεπτα, κατά τη διάρκεια των οποίων η επιτάχυνση και η επιβράδυνση θεωρούνται σταθερές. Οι κύκλοι οδήγησης διαρκούν συνήθως μέχρι και 30 λεπτά, παρόλο που έχουν αναπτυχθεί και μοντέλα με μεγαλύτερους χρόνους δοκιμής. Κατά την διάρκεια αυτού του χρόνου παρατηρούνται διάφορες απότομες αλλαγές ταχύτητας και φορτίου, έτσι ώστε να καλυφθεί μεγάλο εύρος λειτουργίας του κινητήρα. Στην συνέχεια στο σχήμα 2.1 ακολουθεί και ένα τυπικό διάγραμμα κύκλου οδήγησης για ένα συμβατικό όχημα:



Σχήμα 2.1: Τυπική ταχύτητα οχήματος σε σχέση με τον μεταβατικό κύκλο για ελαφριά οχήματα (άνω υποδιάγραμμα), και ταχύτητα/ροπή κινητήρα σε σχέση με τον κύκλο για δοκιμές με δυναμόμετρο κινητήρα (κάτω υποδιάγραμμα) [14]

Οι κύκλοι δοκιμών είναι σημαντικοί για διάφορους λόγους. Για αρχή, κατέχουν κύριο ρόλο στην προστασία του περιβάλλοντος, καθώς λειτουργούν παγκοσμίως ως τυποποιημένες μέθοδοι μέτρησης της κατανάλωσης και της εκπομπής ρύπων κατά την πιστοποίηση ενός οχήματος. Η τυποποιημένη μορφή τους καθιστά εφικτή και την σύγκριση ανάμεσα σε διαφορετικά οχήματα και τους κινητήρες τους, καθώς επίσης επιτρέπει στους κατασκευαστές να ελέγχουν ότι οι συσκευές αντιρρύπανσης λειτουργούν κανονικά, επιβεβαιώνοντας και στην πράξη ότι οι εκπομπές ρύπων είναι χαμηλές. Για να είναι ωστόσο τα αποτελέσματα αξιόπιστα, ο κύκλος δοκιμών θα πρέπει να είναι αρκετά αντιπροσωπευτικός των πραγματικών συνθηκών οδήγησης. Ιδανικά ο μεταβατικός κύκλος πόλης θα πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Να παρέχει αποτελέσματα αντιπροσωπευτικά των καθημερινών συνθηκών οδήγησης αλλά και της μέσης οδικής συμπεριφοράς όσον αφορά την «επιθετική» οδήγηση και το μοτίβο αλλαγής ταχυτήτων ενός μέσου οδηγού. Για το σκοπό αυτό, και ανάλογα την συγκεκριμένη εφαρμογή, οι κύκλοι δοκιμών ακολουθούν τις παρακάτω καθημερινές συνθήκες οδήγησης:
 - Ψυχρή εκκίνηση.
 - Θερμή εκκίνηση (όταν η λειτουργία του κινητήρα συνεχίζεται μετά από μια σύντομη διακοπή μερικών λεπτών).
 - Φάσεις επιτάχυνσης, επιβράδυνσης και αυξομειώσεις του φορτίου.
 - Συνθήκες άφορτης λειτουργία του κινητήρα ('ρελαντί') που είναι χαρακτηριστικές της αστικής οδήγησης, π.χ. κατά την αναμονή σε κάποιο φανάρι.
 - Οδική συμπεριφορά σε προαστιακούς ή αγροτικούς δρόμους
 - Οδική συμπεριφορά σε αυτοκινητόδρομους
- Να είναι πρακτικός, δηλαδή να μην είναι πολύ μεγάλος, περίπλοκος ή κοστοβόρος.
- Να έχει επαναληψιμότητα
- Να είναι πλήρως ελεγχόμενος.

Ο έλεγχος για την συμμόρφωση των οχημάτων και των κινητήρων με τα πρότυπα εκπομπών καυσαερίων γίνεται κατεξοχήν σε συνθήκες εργαστηρίου. Ο λόγος που γίνεται αυτό, είναι επειδή σε ένα περιβάλλον εργαστηρίου οι τεχνικοί μπορούν εύκολα να ελέγξουν σημαντικούς παράγοντες, όπως την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, την ταχύτητα του οχήματος, ενώ παράλληλα μπορούν να υπολογίσουν και την επίδραση του ανέμου και γενικότερα όλων των καιρικών συνθηκών στις επιδόσεις του οχήματος. Η διαδικασία αυτή εγγυάται την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων και τη σύγκρισή τους με άλλα πρότυπα αποτελέσματα. Η διεκπεραίωση ενός κύκλου δοκιμής σε ένα εργαστήριο απαιτεί πολύπλοκες πειραματικές εγκαταστάσεις, όπως πλήρως αυτοματοποιημένη κλίνη δοκιμών με ηλεκτρονικά ελεγχόμενα δυναμόμετρα, συσκευές άμεσης απόκρισης για την ανάλυση των καυσαερίων, σήραγγες αραίωσης κ.α.

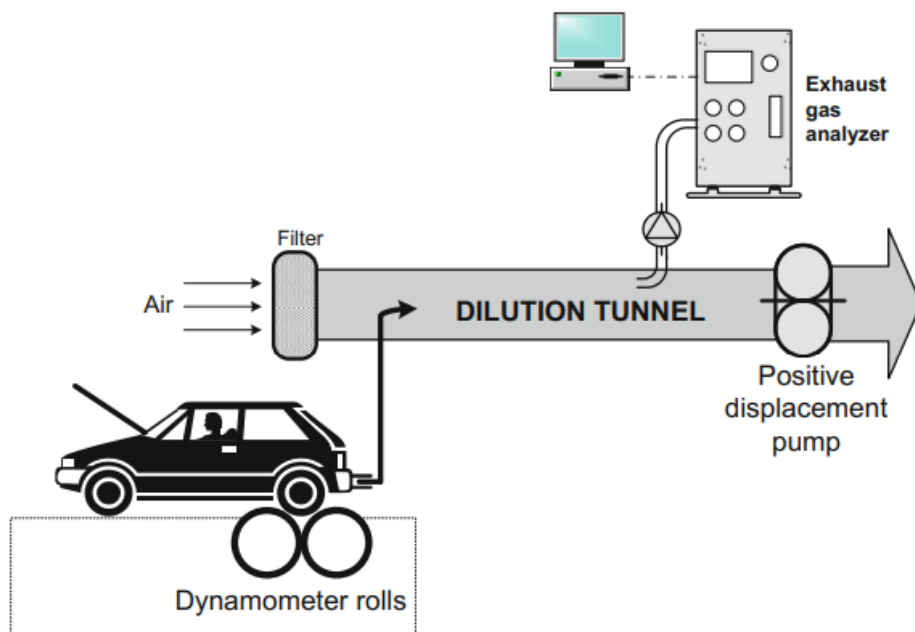
Υπάρχουν διάφορες κατηγοριοποιήσεις που χρησιμοποιούνται για τους κύκλους δοκιμής. Η κυριότερη από αυτές είναι αν δοκιμάζεται ολόκληρο το όχημα ή μόνο ο κινητήρας του, συνεπώς υπάρχουν οι δύο μεγάλες κατηγορίες κύκλων:

- Κύκλοι δυναμόμετρου πλαισίου.
- Κύκλοι δυναμόμετρου κινητήρα.

Χρήση του δυναμόμετρου πλαισίου γίνεται κατά βάση στα επιβατικά οχήματα, τις μοτοσυκλέτες και τα ελαφρού τύπου φορτηγά, τα οποία είναι πιο εύκολο να τοποθετηθούν ολόκληρα πάνω στην δοκιμαστική κλίση. Αυτό ωστόσο είναι αρκετά πιο δύσκολο για τα βαρέος τύπου οχήματα, όπως λεωφορεία, φορτηγά και εκτός δρόμου οχήματα (τρακτέρ, εκσκαφείς κλπ), εξαιτίας του μεγάλου μήκους και βάρους τους, με αποτέλεσμα να γίνεται συχνότερα εφαρμογή του δυναμόμετρου κινητήρα. Ένας ακόμη λόγος που προτιμάται το δυναμόμετρο κινητήρα στα βαρέος τύπου οχήματα είναι επειδή για το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών των οχημάτων, ο κινητήρας και το φορτηγό δεν σχεδιάζονται μαζί, κάτι το οποίο επιτρέπει μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών/συνδυασμών, αλλά καθιστά τον έλεγχο τους αρκετά πιο χρονοβόρο και ακριβό.

2.2 ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Κατά τη δοκιμή σε δυναμόμετρο πλαισίου, το όχημα παραμένει ακίνητο κατά τη διάρκεια της δοκιμής, αλλά τουλάχιστον δύο από τους τροχούς του περιστρέφονται πάνω στο δυναμόμετρο για την προσομοίωση της οδήγησης σε διαφορετικές ταχύτητες, οπότε ολόκληρο το σύστημα μετάδοσης κίνησης βρίσκεται υπό δοκιμή (Σχήμα 2.2). Οι κύλινδροι του δυναμόμετρου, πάνω στους οποίους στηρίζεται το αυτοκίνητο, έχουν ως στόχο να προσομοιώνουν τις αντιστάσεις που αντιμετωπίζει το όχημα κατά την οδήγηση. Πιο συγκεκριμένα, οι δυνάμεις αυτές είναι η αεροδυναμική αντίσταση, η αντίσταση τριβής κύλισης και η αντίσταση εξαιτίας της αδράνειας του οχήματος. Κατά την συγκεκριμένη πιστοποίηση, ο δρόμος θεωρείται ευθύς με μηδενική κλίση. Τέλος, το όχημα οδηγείται από έναν ειδικά εκπαιδευμένο οδηγό που ακολουθεί πιστά το προκαθορισμένο χρονοδιάγραμμα του κύκλου, εντός ορισμένων νομοθετημένων ανοχών.

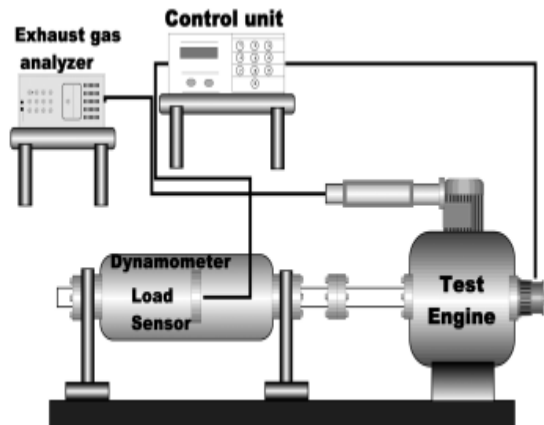


Σχήμα 2.2: Όχημα πάνω σε δυναμόμετρο πλαίσιο για την μέτρηση εκπομπών [14]

Κατά την διεξαγωγή της δοκιμής, τα καυσαέρια του οχήματος συλλέγονται και αναλύονται, με βάση ένα πρωτόκολλο δοκιμής που περιέχει όλες τις λεπτομέρειες του κύκλου, για τον υπολογισμό των επιπέδων εκπομπών και της κατανάλωσης καυσίμου. Το πρωτόκολλο αυτό περιέχει την ακριβή μεθοδολογία όσο αφορά τις συνθήκες εκκίνησης (ψυχρή ή θερμή), τον προσδιορισμό της μάζας, το οδικό φορτίο, τις συνθήκες περιβάλλοντος κ.α.

2.3 ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

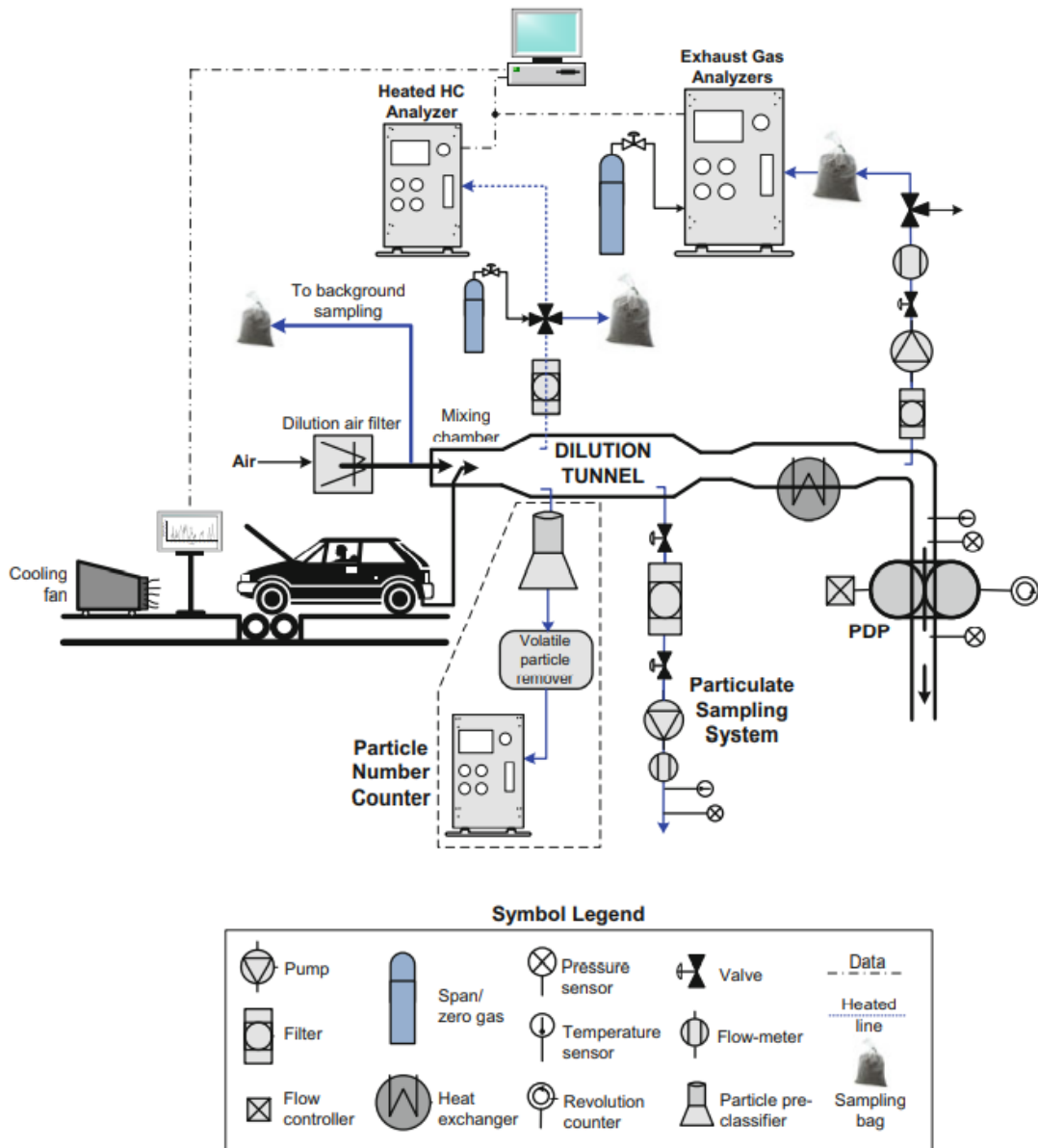
Κατά τη διάρκεια των δοκιμών με δυναμόμετρο κινητήρα, ο υπό μελέτη κινητήρας είναι άμεσα συνδεδεμένος σε μία πέδη και ακολουθεί μια προδιαγεγραμμένη ακολουθία σημείων λειτουργίας με τη μορφή ταχύτητας και ροπής σε σχέση με το χρόνο (Σχήμα 2.3). Η ακολουθία αυτή έχει προκύψει από ένα μοτίβο ταχύτητας οχήματος-χρόνου, με εφαρμογή κατάλληλου μοντέλου συστήματος κίνησης. Υπάρχουν διάφορα τέτοια μοντέλα, όπου το καθένα λαμβάνει υπόψη διαφορετικές ιδιότητες για το όχημα, όπως το εμβαδόν της μετωπικής επιφάνειας, τον συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης, το βάρος του οχήματος, τον αριθμό των ταχυτήτων και την σχέση μετάδοσης της κάθε μιας κλπ. Σε αυτήν την περίπτωση, η ποσότητα των εκπομπών είναι ανάλογη του συνολικού παραγόμενου έργου του κινητήρα κατά την διάρκεια της δοκιμής, σε αντίθεση με το δυναμόμετρο πλαίσιο που είναι ανάλογη της απόστασης.



Σχήμα 2.3: Έλεγχος κινητήρα με δυναμόμετρο

2.4 ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ CVS

Η κύρια μέθοδος μέτρησης των καυσαερίων κατά την διάρκεια του μεταβατικού κύκλου πόλης είναι με τη δειγματοληψία σταθερού όγκου CVS (Constant Volume Sampling). Κατά αυτή τη μέθοδο, αέρας αναρροφάται μέσω ενός φίλτρου άνθρακα, ώστε η συγκέντρωση του εισερχόμενου αέρα σε υδρογονάνθρακες να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρή. Έπειτα, ο αέρας αυτός αναμειγνύεται με τα καυσαέρια που έρχονται από τον κινητήρα, δημιουργώντας ένα ομοιογενές μίγμα μέσα στον θάλαμο ανάμιξης. Εν συνεχεία, το μίγμα περνά μέσα από τον σωλήνα αραίωσης, στον οποίο υπάρχει μια θετική αντλία εκτόπισης ώστε να παραμένει σταθερή η παροχή όγκου, καθώς επίσης υπάρχει και ένας εναλλάκτης θερμότητας για να κρατάει την θερμοκρασία του μίγματος εντός των σχεδιασμένων τιμών λειτουργίας. Τέλος, μέσω δειγματοληπτικών γραμμών και βοηθητικών αντλιών το μίγμα συλλέγεται στους διάφορους αναλυτές, ο καθένας κατάλληλος και για διαφορετική εκπομπή, και γίνεται η ψηφιακή καταμέτρηση των συγκεντρώσεων. Συμπληρωματικά με όλα τα προαναφερθέντα, υπάρχουν επιπλέον αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας και πίεσης εξασφαλίζοντας την σωστή λειτουργία του συστήματος, παροχόμετρα για την ρύθμιση και παρακολούθηση της ροής κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας, ενώ τέλος υπάρχουν και σάκοι για την συλλογή των αραιωμένων δειγμάτων καυσαερίων (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Τυπικό σύστημα δειγματοληψίας σταθερού όγκου CVS με αντλία θετικής εκτόπισης για την πιστοποίηση των οχημάτων [14]

2.5 ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΠΟΛΗΣ WTV

Η διαδικασία για την δημιουργία μιας παγκόσμιας εναρμονισμένης πιστοποίησης για βαρέος τύπου οχήματα ξεκίνησε τον Ιούνιο του 1997 από την ομάδα εμπειρογνομόνων για θέματα ρύπανσης και ενέργειας (GRPE) της οικονομικής επιτροπής των Ηνωμένων Εθνών, UNECE. Στόχος τους ήταν η ανάπτυξη ενός μεταβατικού κύκλου πόλης που θα τηρούσε τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

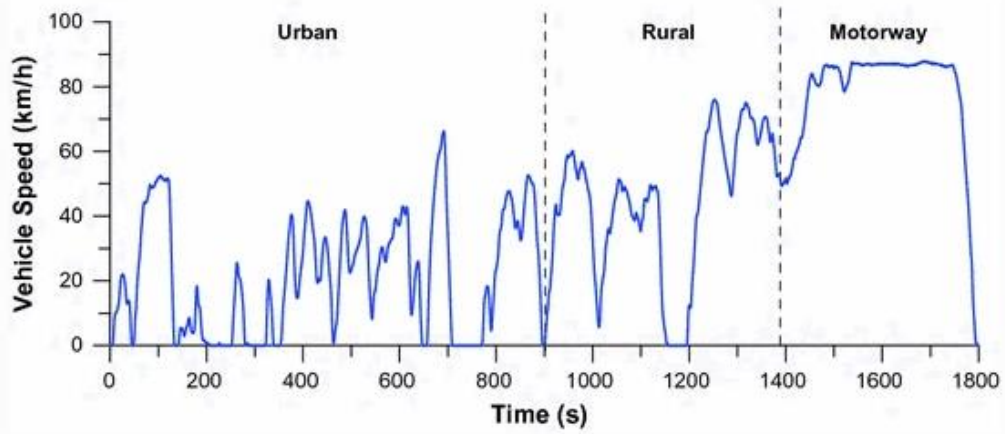
- Να είναι μια ενιαία παγκόσμια «σταθερά» για την πιστοποίηση των εκπομπών καυσαερίων των κινητήρων
- Να είναι αντιπροσωπευτικός της πραγματικής λειτουργίας των βαρέων κινητήρων, σε παγκόσμια κλίμακα
- Να παρέχει τις υψηλότερες δυνατότητες για τον έλεγχο των πραγματικών εκπομπών
- Να εφαρμόζεται εύκολα σε μελλοντικές συσκευές με τεχνολογίες αιχμής
- Να μπορεί να συσχετίζει τις εκπομπές διαφορετικών κινητήρων, έτσι ώστε να υπάρχει μια ακριβής ταξινόμηση τους

Προκειμένου να προχωρήσει στην ανάπτυξη του παγκόσμιου εναρμονισμένου κύκλου δοκιμών, η ερευνητική ομάδα του ΟΗΕ διεξήγαγε αρχικά μια έρευνα και ανάλυση των δεδομένων οδηγικής συμπεριφοράς, καθώς και μια στατιστική διερεύνηση της χρήσης βαρέων οχημάτων σε διάφορες περιοχές του κόσμου. Τα στοιχεία που έλαβε η ερευνητική ομάδα αποτελούνταν από 65 οχήματα προερχόμενα από την Αυστραλία, την Ευρώπη, την Ιαπωνία και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Πιο αναλυτικά, τα οχήματα αυτά ήταν:

- 10 ελαφρού τύπου φορτηγά (μέγιστη μάζα < 7500 kg), με συνολική διανυθείσα απόσταση 2850 χλμ.
- 20 φορτηγά (μέγιστη μάζα > 7500 kg) και 1 πούλμαν, με συνολική διανυθείσα απόσταση 13,430 χλμ.
- 23 φορτηγά με φορτίο, με συνολική διανυθείσα απόσταση 61,370 χλμ.
- 11 αστικά λεωφορεία, με συνολική διανυθείσα απόσταση 2500 χλμ.

Τα δεδομένα περιλάμβαναν οδήγηση σε διάφορες κατηγορίες δρόμων (αστικούς, αγροτικούς, αυτοκινητόδρομους), κατηγορίες οχημάτων, φορτία οχημάτων και αναλογίες ισχύος προς μάζα. Το επόμενο βήμα ήταν να καθοριστούν οι συντελεστές βαρύτητας για κάθε συνδυασμό περιοχής, κατηγορίας οχήματος, υποκατηγορίας λόγου ισχύος προς μάζα και κατηγορίας δρόμου. Αυτό καθορίστηκε με βάση τον πραγματικό συνολικό χρόνο λειτουργίας των βαρέων οχημάτων, ο οποίος καθορίστηκε από στατιστικές πληροφορίες για την παγκόσμια χρήση βαρέων οχημάτων. Σε αυτό το στάδιο δόθηκε εξωτερική βοήθεια από συμβουλευτικές εταιρείες κυκλοφορίας, ενώσεις μεταφορών και τη βιομηχανία βαρέων οχημάτων.

Με βάση την παραπάνω διαδικασία δημιουργήθηκε ο παγκόσμιος εναρμονισμένος κύκλος βαρέων τύπου οχημάτων (WTV-Worldwide transient vehicle cycle) (Σχήμα 2.5). Ο WTV παράχθηκε με την χρήση δυναμομετρικού πλαισίου και έχει διάρκεια 1800 δευτερόλεπτα και μέση ταχύτητα 40 km/h· αποτελείται από τρία μέρη: το αστικό (900 δευτερόλεπτα), το αγροτικό (480 δευτερόλεπτα) και τον αυτοκινητόδρομο (420 δευτερόλεπτα) [14].



Σχήμα 2.5: Προφίλ ταχύτητας κύκλου WTC [14]

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ GT-Power

3.1 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ GT- SUITE

Το GT-SUITE, της αμερικανικής εταιρείας Gamma Technologies, είναι εκ των κορυφαίων στον κλάδο εργαλείο προσομοίωσης, με δυνατότητες και βιβλιοθήκες που απευθύνονται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Το λογισμικό αυτό προσφέρει στους μηχανικούς λειτουργίες που κυμαίνονται από τον γρήγορο σχεδιασμό έως λεπτομερείς αναλύσεις συστημάτων ή υποσυστημάτων, τη βελτιστοποίηση σχεδιασμού και τη βαθύτερη διερεύνηση αιτιών. Το GT-SUITE είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας, καθώς παρέχει στους χρήστες ποικίλα εργαλεία για την γρήγορη προσομοίωση κινητήρων, συστημάτων μετάδοσης κίνησης, αντιρρυπαντικών συσκευών κλπ.

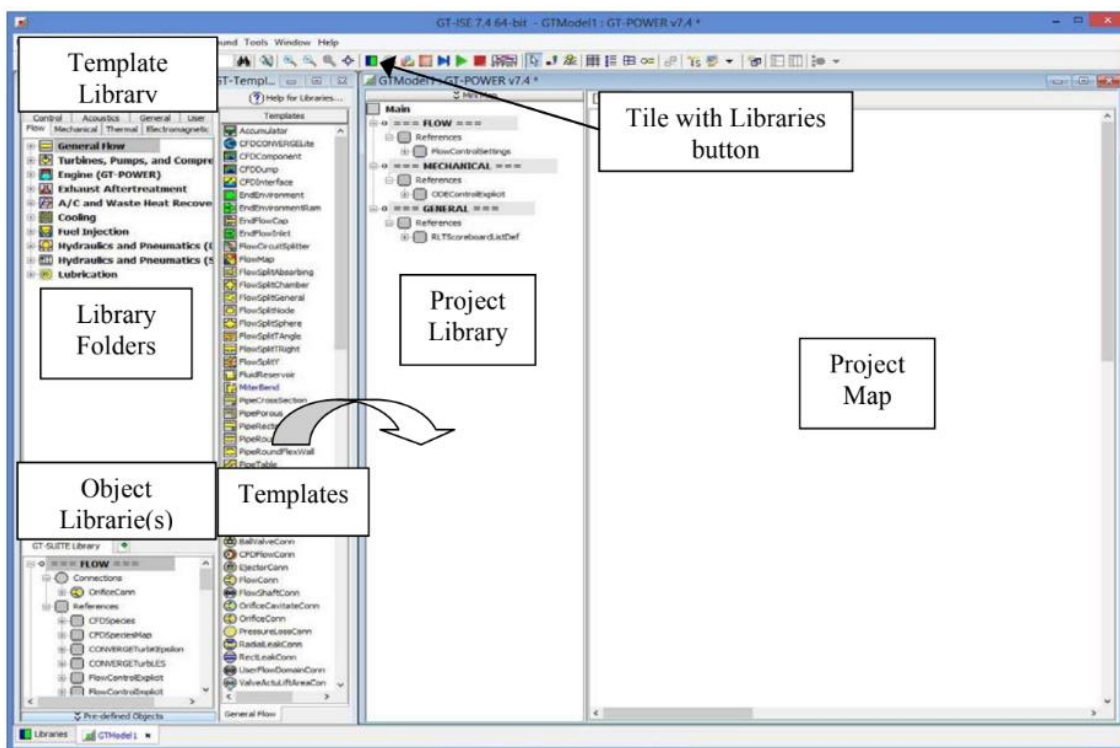
Πιο αναλυτικά, το πρόγραμμα προσφέρει την εύκολη και με μέγιστη ακρίβεια προσομοίωση πάνω σε θέματα όπως:

- Μοντελοποίηση κινητήρων
- (μετ)Επεξεργασία καυσαερίων και ρύπων
- Μελέτη δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων
- Προβλήματα ακουστικής ανάλυσης
- Δυναμική οχήματος
- Προσομοίωση μοντέλων σε πραγματικό χρόνο
- Συστήματα λίπανσης
- Υδραυλικά συστήματα και συστήματα κλιματισμού
- Συστήματα ψύξης κινητήρων και θέρμανσης
- Κιβώτια ταχυτήτων και μαντοκίνηση
- Κυψέλες καυσίμου και υβριδικά συστήματα
- Συστήματα έγχυσης καυσίμου
- Συστήματα ενεργειακής διαχείρισης του οχήματος

Στην εν λόγω διπλωματική γίνεται χρήση του προγράμματος GT-POWER, μιας εφαρμογής του λογισμικού GT-SUITE, που επικεντρώνεται στην μοντελοποίηση κινητήρων, και του οποίου η άδεια παρέχεται μέσω του Εργαστηρίου Μ.Ε.Κ του Ε.Μ.Π.

3.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ GT-POWER

Η μοντελοποίηση στο περιβάλλον GT-POWER (Σχήμα 3.1) έχει αντικειμενοστραφή δομή η οποία αποτελείται από τρία επίπεδα: τα πρότυπα εργαλεία-στοιχεία (templates), τα αντικείμενα (objects) και τα κομμάτια (parts). Τα πρότυπα εργαλεία παρέχονται στην βιβλιοθήκη της συγκεκριμένης εργασίας (project library) μέσω προϋπαρχουσών βιβλιοθηκών του προγράμματος (template libraries), οι οποίες παρέχουν όλα τα απαραίτητα εργαλεία για την προσομοίωση κάθε μέρους ενός οχήματος. Εφόσον έχουν προστεθεί τα εργαλεία, θα πρέπει να συμπληρωθούν ορισμένα χαρακτηριστικά (attributes) τους που εξαρτώνται από το σύστημα που θέλει να μοντελοποιήσει ο χρήστης.



Σχήμα 3.1: Περιβάλλον εργασίας GT-Power

Με αυτόν τον τρόπο, τα πρότυπα μετατρέπονται σε αντικείμενα και μπορούν να μεταφερθούν στον χάρτη εργασίας (map project). Τα αντικείμενα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν όσες φορές χρειάζονται, και το καθένα μπορεί να επικαλείται αντικείμενα αναφοράς, όπως ιδιότητες αέρα και καυσίμου, αντικείμενα μεταφοράς θερμότητας, αντικείμενα καύσης κλπ, όποτε αυτό χρειάζεται. Αφότου λοιπόν έχουν τοποθετηθεί στον χάρτη όλα τα απαραίτητα αντικείμενα, θα πρέπει να προστεθούν και οι κατάλληλες συνδέσεις μετατρέποντας τα αντικείμενα σε κομμάτια ενός μεγαλύτερου συνόλου, όπως π.χ. ενός οχήματος.

Μετά την ολοκλήρωση του μοντέλου, ο χρήστης θα πρέπει να εισάγει πληροφορίες απαραίτητες για την προσομοίωση όπως: το είδος της λειτουργίας της (μεταβατική ή σταθερή), τις μεθόδους που θα επιλέξει το πρόγραμμα για να λύσει τις εξισώσεις, τις αρχικές συνθήκες του συστήματος κλπ. Τέλος, μετά την λήξη του «τρεξίματος» αν ο χρήστης κρίνει ότι τα αποτελέσματα του είναι πλήρως λειτουργικά, έχει την δυνατότητα να δημιουργήσει διάφορα σενάρια (cases), τα οποία του δίνουν την δυνατότητα να παραμετροποιήσει το σύστημα, διερευνώντας έτσι την επίδραση κάθε μεταβλητής στο μοντέλο του. Ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο του GT-SUITE είναι το GT-POST, με το οποίο μπορεί κανείς εύκολα να δει τα αποτελέσματα σε μορφή πινάκων, διαγραμμάτων αλλά και animation πραγματικού χρόνου (Real Time animation-RLT animation).

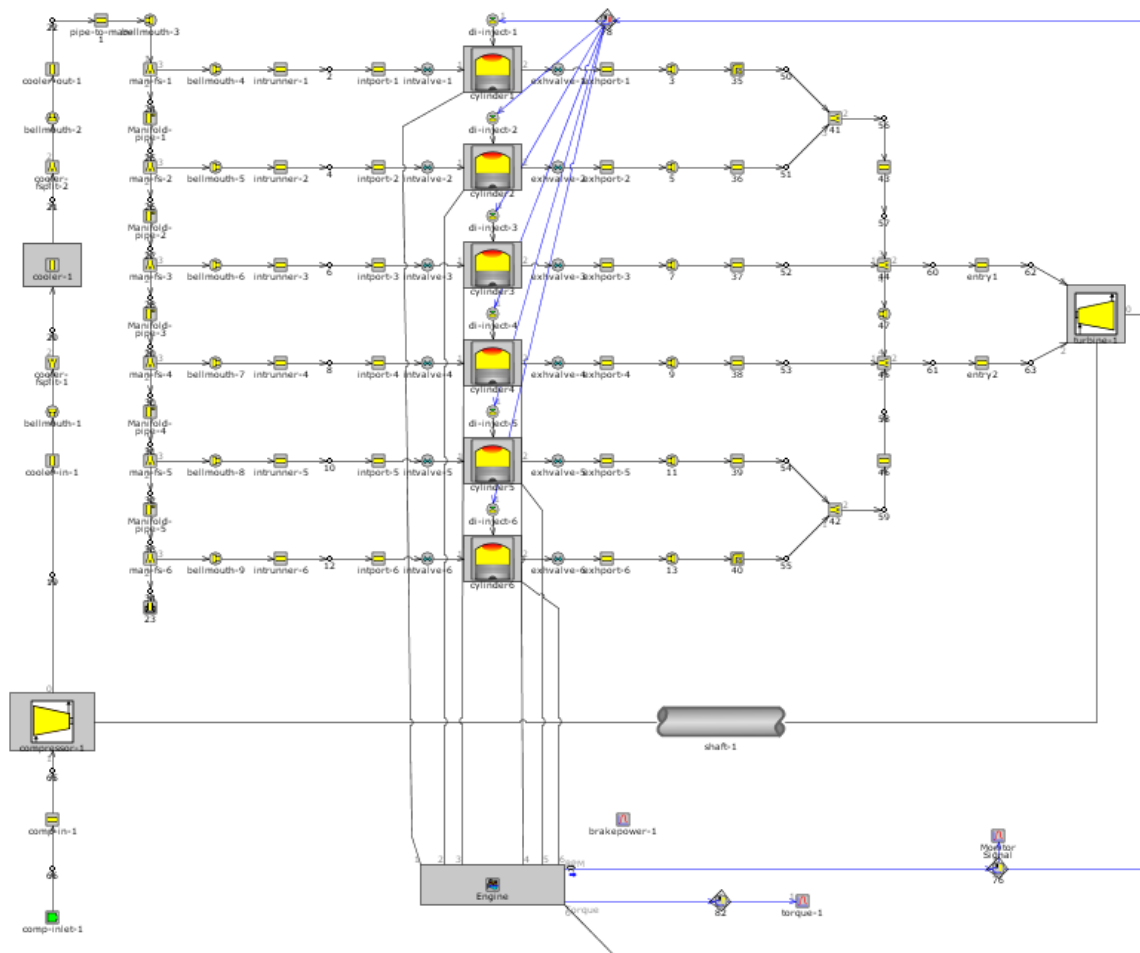
3.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΕ ΒΑΡΕΟΣ ΤΥΠΟΥ ΟΧΗΜΑ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ GT-POWER

3.3.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ Diesel

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί συνέχεια μίας ήδη περατωθείσας διπλωματικής εργασίας [19]. Η σχεδίαση του κινητήρα Diesel που χρησιμοποιείται για την διεκπεραίωση του μοντέλου έχει βασιστεί πάνω στον κινητήρα **Mercedes-Benz OM366LA** (Σχήμα 3.2) ο οποίος είναι εγκατεστημένος στο εργαστήριο Μ.Ε.Κ. της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Πρόκειται για έναν 4-Χ κινητήρα Diesel, άμεσης έγχυσης καυσίμου (DI), στροβιλο-υπερπληρωμένο με ενδιάμεση ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης (aftercooling). Παρακάτω παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά του κινητήρα:

- Διαδρομή εμβόλου: $S = 133 \text{ mm}$
- Διάμετρος εμβόλου: $D = 97.5 \text{ mm}$
- Μήκος διωστήρα: $L_{\delta} = 230 \text{ mm}$
- Γωνία στροφάλου κατά τη στιγμή ανοίγματος της βαλβίδας εξαγωγής: $\varphi = 112^{\circ}$ μετά το ΑΝΣ
- Βαθμός συμπίεσης: $\varepsilon = 18$
- Κύλινδροι: $z = 6$ σε σειρά
- Συνολικός όγκος εμβολισμού: $V_H = \left(\frac{\pi D^2}{4} S\right) z = 5958 \text{ cm}^3$

Οι κύλινδροι του κινητήρα αναφλέγονται με την εξής σειρά: 1-5-3-6-2-4, έτσι ώστε να υπάρχει τέλεια εγγενής ζυγοστάθμιση, καθώς και βολική σύνδεση των κυλίνδρων στην πολλαπλή εξαγωγής από χωροταξική άποψη (ανά τρεις κύλινδροι συνδεδεμένοι στην ίδια πολλαπλή εξαγωγής: οι 1-2-3 μαζί και οι 4-5-6 μαζί σε δεύτερη πολλαπλή εξαγωγής). Επίσης, όσον αφορά τις διεργασίες που διεκπεραιώνονται στο εσωτερικό των κυλίνδρων, αυτές προσομοιώνονται σε επίπεδο γωνίας στροφάλου (filling and emptying method), ενώ για την μοντελοποίηση της καύσης γίνεται χρήση των εξισώσεων του Wiebe. Τέλος, για τις απώλειες θερμότητας χρησιμοποιείται η σχέση του Woschni, ενώ για τις πολλαπλές εξαγωγής χρησιμοποιείται η μέθοδος των χαρακτηριστικών (pressure wave action simulation).



Σχήμα 3.2: Μοντέλο κινητήρα Diesel με απλή στροβίλο-υπερπλήρωση στο χάρτη εργασίας του GT-Power

3.3.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ GT-POWER

Η σχεδίαση του οχήματος βαρέος τύπου και του συστήματος μετάδοσης κίνησης του έχουν γίνει με βάση την περατωθείσα διπλωματική που έχει προαναφερθεί. Η μοντελοποίηση των δύο αυτών συστημάτων καθίσταται αναγκαία για την μελέτη απόκρισης του εν λόγω κινητήρα κατά την διάρκεια του κύκλου πόλης WTVC. Παράλληλα, στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούν όλα τα επιμέρους κομμάτια του μοντέλου (το όχημα, ο συμπλέκτης, το διαφορικό, ο οδηγός, το σύστημα μετάδοσης κίνησης, ο ελεγκτής εκκίνησης, ο ελεγκτής οχήματος), τα διάφορα χαρακτηριστικά τους και ο τρόπος κατασκευής τους με την βοήθεια του λογισμικού GT-POWER.

ΒΑΡΕΟΥ ΤΥΠΟΥ ΟΧΗΜΑ (HEAVY-DUTY VEHICLE)

Παρακάτω παρατίθενται τα μεγέθη που εισήχθησαν για την σχεδίαση του υπό μελέτη οχήματος, μαζί με μία εικόνα ενός τυπικού βαρέος οχήματος (Σχήμα 3.3).



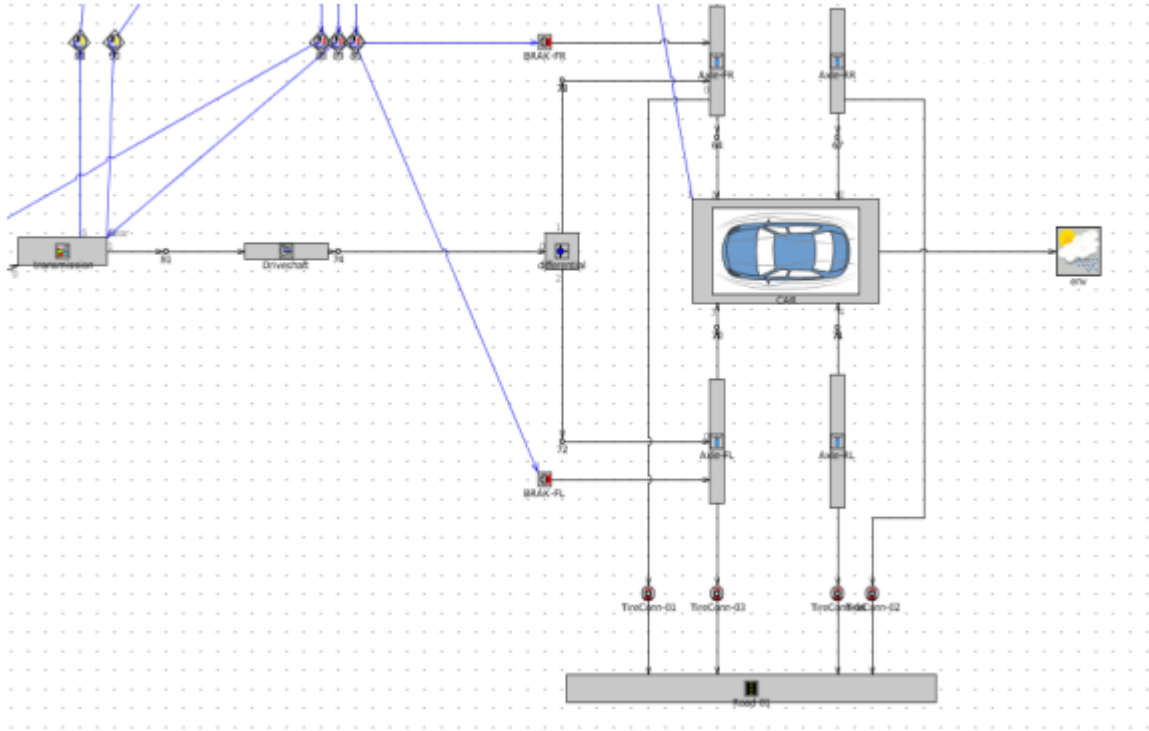
Σχήμα 3.3: Παράδειγμα παραπλήσιου με το υπό μελέτη οχήματος βαρέος τύπου

Πίνακας 3.1: Ιδιότητες οχήματος

Μάζα οχήματος	8.2 t
Μάζα φορτίου-τρέιλερ	0 t
Μετωπική επιφάνεια	6 m ²
Μεταξόνιο	3.8 m
Συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης	0.6
Ακτίνα τροχού	0.4131 m

Αρχίζοντας την μοντελοποίηση θα πρέπει να προστεθούν στο αντικείμενο του οχήματος τα βασικά χαρακτηριστικά του, δηλαδή η πυκνότητα του καυσίμου που χρησιμοποιεί και όλα τα μεγέθη που απεικονίζονται στον παραπάνω πίνακα 3.1. Το αντικείμενο αυτό χρειάζεται για τον υπολογισμό της διαμήκουσ κίνησης του οχήματος, καθώς και των φορτίων που επιβαρύνουν τον κάθε άξονα του. Γύρω από το όχημα θα πρέπει να προστεθούν και το μεταξόνιο, τα ημιαξόνια, τα φρένα, τα ελαστικά, το οδόστρωμα και ο καιρός, παράμετροι που περιέχουν όλες τις πληροφορίες για το περιβάλλον του μοντέλου αλλά και την κατανομή των δυνάμεων πάνω στο όχημα (Σχήμα 3.4).

Επίσης, ο συντελεστής αντίστασης κύλισης του ελαστικού, το οποίο έχει άμεση συσχέτιση με την τραχύτητα του οδοστρώματος, πήρε την τιμή 0.0115 . Με την επιλογή αυτής της τιμής σημαίνει ότι το οδόστρωμα βρίσκεται υπό κανονικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του είναι φυσιολογικά.



Σχήμα 3.4: Απεικόνιση του οχήματος βαρέος τύπου στο χάρτη εργασίας του GT-Power

ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΟΥΣ ΤΡΟΧΟΥΣ

Μετά την σχεδίαση των κομματιών που αποτελούν το όχημα, γίνεται η μοντελοποίηση του συστήματος μετάδοσης κίνησης και των επιμέρους τμημάτων του. Η λειτουργία του συστήματος αυτού είναι η κατάλληλη σύνδεση του κινητήρα με τα κινούμενα μέρη του οχήματος, ώστε να υπάρχει ομαλή μετάδοση της ισχύος κατά μήκος του άξονα.

ΣΥΜΠΛΕΚΤΗΣ ΤΡΙΒΗΣ (CLUTCH)

Ο συμπλέκτης είναι μια μηχανική διάταξη που συνδέει και αποσυνδέει τη μετάδοση ισχύος. Στην απλούστερη εφαρμογή του, ο συμπλέκτης συνδέει και αποσυνδέει δύο περιστρεφόμενους άξονες, την στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα (το κινητήριο μέλος) και τον άξονα του κιβωτίου ταχυτήτων (το οδηγούμενο μέλος), με την βοήθεια δύο πλακών. Δηλαδή λειτουργεί ως μηχανικός σύνδεσμος, όπου κάθε φορά που πατιέται το πεντάλ του συμπλέκτη, οι δύο πλάκες

αποσυμπλέκονται, επιτρέποντας στον οδηγό να αλλάζει ομαλά ταχύτητες. Επομένως, η τοποθέτηση του συμπλέκτη είναι μεταξύ του κινητήρα (engine) και του συστήματος μετάδοσης κίνησης (transmission).

ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ (TRANSMISSION)

Το σύστημα μετάδοσης κίνησης αποτελεί ουσιαστικά το κιβώτιο ταχυτήτων του οχήματος, εισάγοντας τις σχέσεις μετάδοσης (gear ratios). Η λειτουργία του είναι να κρατάει χαμηλά τις στροφές του κινητήρα, έτσι ώστε να μην υπάρχει μεγάλη κατανάλωση καυσίμου αλλά και να μην υπερφορτώνεται η μηχανή. Κάθε όχημα, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του, έχει και διαφορετικές σχέσεις μετάδοσης. Στο συγκεκριμένο όχημα υπάρχουν έξι σχέσεις μετάδοσης, όπου η επιλογή της εκάστοτε σχέσης κατά την διάρκεια της οδήγησης εξαρτάται από την ταχύτητα του οχήματος. Το σύστημα μετάδοσης κίνησης βρίσκεται αμέσως μετά τον συμπλέκτη και πριν το διαφορικό. Επίσης, είναι συνδεδεμένο με τον οδηγό του οχήματος, μέσω του οποίου γίνεται η αλλαγή των σχέσεων ταχυτήτων μέσα στο κιβώτιο. Τέλος, το σύστημα είναι συνδεδεμένο και με τον ελεγκτή οχήματος και τον ελεγκτή εκκίνησης από τα οποία αντλεί πληροφορίες για την ομαλή λειτουργία του.

Πίνακας 3.2: Σχέσεις μετάδοσης κιβωτίου ταχυτήτων ονομαστικού οχήματος

1 ^η	9,201:1
2 ^η	5,2301:1
3 ^η	3,145:1
4 ^η	2,034:1
5 ^η	1,374:1
6 ^η	1,000:1

ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ (DIFFERENTIAL)

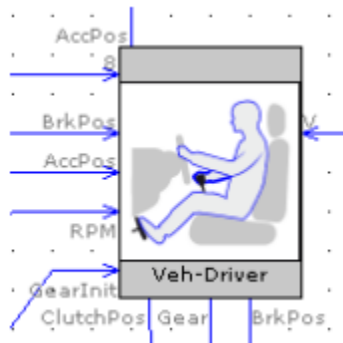
Το διαφορικό μπορεί να ορισθεί ως ο μηχανισμός που λαμβάνει δεδομένα σχετικά με την επαφή καθενός κινητήριου τροχού με το οδόστρωμα και αναλαμβάνει το διαμοιρασμό της ισχύος ή της ροπής του κινητήρα στους άξονες των τροχών.

ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ (ALTERNATOR)

Για την αναγκαία σύγκριση του συμβατικού και του εξοπλισμένου με θερμοηλεκτρική γεννήτρια οχήματος, χρειάστηκε να προστεθεί ένα ηλεκτρικό φορτίο που χρησιμοποιείται για βοηθητικές λειτουργίες, όπως τα εξωτερικά και εσωτερικά φώτα, αντλίες ψυκτικού και λαδιού κλπ. Η προσθήκη αυτού του φορτίου γίνεται μέσω ενός εναλλάκτη (alternator), ο οποίος χρησιμοποιεί την μηχανική ισχύ του κινητήρα για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι ηλεκτρικές ανάγκες του οχήματος (~3000 W).

ΟΔΗΓΟΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ (VEHICLE DRIVER)

Με την προσθήκη του εικονικού οδηγού (Σχήμα 3.5), το μοντέλο καθίσταται πιο ρεαλιστικό και υπάρχει καλύτερος συντονισμός ανάμεσα στα υποσυστήματα. Μέσω αυτού ελέγχεται το κιβώτιο ταχυτήτων, ο συμπλέκτης, το πεντάλ επιτάχυνσης και τα φρένα. Για το συγκεκριμένο αντικείμενο, το GT-POWER δίνει τη δυνατότητα να ενσωματωθεί μια στρατηγική αλλαγής ταχυτήτων, το οποίο σημαίνει ότι ο οδηγός μπορεί να αλλάζει τις σχέσεις μετάδοσης στο κιβώτιο ταχυτήτων και να συνδυάζει την κάθε αλλαγή της ανάλογα με την γραμμική ταχύτητα του οχήματος.



Σχήμα 3.5: Απεικόνιση του εικονικού οδηγού (Vehicle Driver) στο περιβάλλον εργασίας του GT-Power

Όπως και στην πραγματικότητα, ο εικονικός οδηγός συνδέεται στον χάρτη του προγράμματος μόνο με το πεντάλ επιτάχυνσης, το φρένο, τον συμπλέκτη και το κιβώτιο ταχυτήτων. Στην συνέχεια συμπληρώθηκαν όλα τα απαιτούμενα στοιχεία με ζητούμενο η απόκριση του οχήματος να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική. Αναλυτικότερα, στα χαρακτηριστικά του πεντάλ επιτάχυνσης εισάγεται ένας χάρτης που προσομοιώνει την συμπεριφορά του κατά την διάρκεια των αλλαγών σχέσης μετάδοσης (shiftaccel). Για τον συμπλέκτη τριβής, εισάγονται δύο αντίστοιχοι χάρτες, ο ένας για τον έλεγχο της συμπεριφοράς του συμπλέκτη στις αλλαγές σχέσης (shiftclutch) και ο άλλος για την εκκίνηση του οχήματος (driveclutch). Επίσης, εισάγονται και ο χρόνος που διαρκεί η εκκίνηση του οχήματος αλλά και ο χρόνος που διαρκεί η αλλαγή σχέσης μετάδοσης.

Παράλληλα, για την σωστή συμπεριφορά του συστήματος χρειάζεται να προστεθεί άμεσα με τον οδηγό και μια συνάρτηση που ελέγχει την εγγεόμενη ποσότητα καυσίμου στους κυλίνδρους,

ανάλογα με την αυξομείωση του φορτίου. Ο χάρτης αυτός δημιουργήθηκε βασιζόμενος σε εμπειρικά στοιχεία και ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας, με κατακόρυφο άξονα Y την εγγεόμενη ποσότητα καυσίμου σε $\frac{mg}{cycle}$ και οριζόντιο άξονα X το φορτίο σε ποσοστό (%), δηλαδή το ποσοστό πατήματος του πεντάλ επιτάχυνσης. Στη συνέχεια, ο χάρτης είναι συνδεδεμένος και με τους έξι εγχυτήρες, μέσω ενός κατάλληλου ενεργοποιητή (actuator), στους οποίους στέλνει το απαραίτητο σήμα. Μια ακόμη λειτουργία του χάρτη είναι οι στροφές του κινητήρα να παραμένουν κοντά στις 950 RPM όταν αυτός βρίσκεται στο ρελαντί.

Παρακάτω ακολουθούν τα αναγκαία αντικείμενα που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο έτσι ώστε αυτό να ελέγχεται εύκολα, καθώς επίσης να εξασφαλίζεται η ακριβής απόκριση του οχήματος στις πληροφορίες που λαμβάνει από τον εκάστοτε κύκλο πόλης τον οποίο «τρέχει».

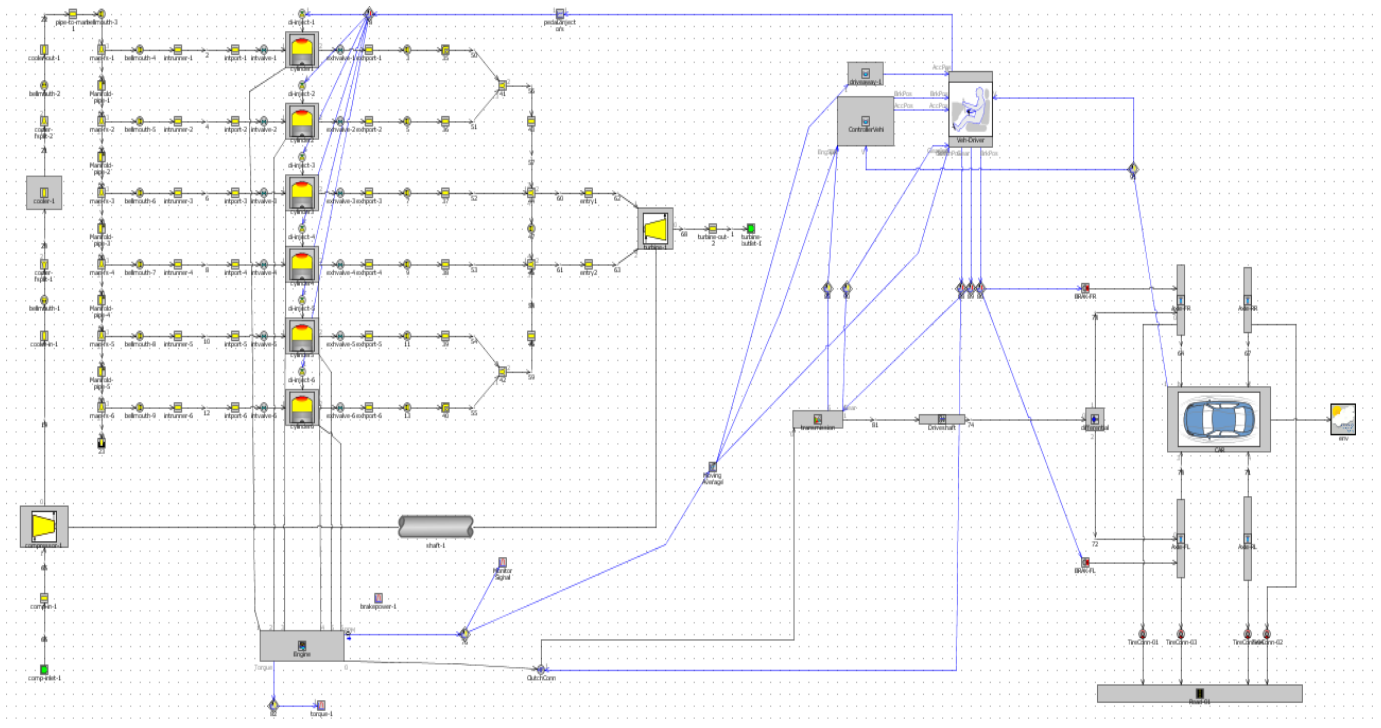
ΕΛΕΓΚΤΗΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ (CONTROLLER VEHICLE)

Ο ελεγκτής ταχύτητας είναι μέγιστης σημασίας, εφόσον αποτελεί έναν απλουστευμένο «εγκέφαλο» του οχήματος. Μέσω αυτού συλλέγονται πληροφορίες από τα υπόλοιπα υποσυστήματα, δηλαδή το πεντάλ επιτάχυνσης και το φρένο, και επενεργεί έτσι ώστε το όχημα να ακολουθεί το προφίλ ταχύτητας που του ορίζεται από τον μεταβατικό κύκλο πόλης WTVC.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό του ελεγκτή οχήματος που θα πρέπει να συμπληρωθεί είναι ο χάρτης μέσης πραγματικής πίεσης (BMEP) του κινητήρα. Ειδικότερα, η δημιουργία του χάρτη BMEP πραγματοποιήθηκε με αρκετά «τρεξίματα» του μοντέλου, στα οποία ο κινητήρας είναι αποσυνδεδεμένος από το όχημα. Στα τρεξίματα αυτά, ο κινητήρας δοκιμάστηκε σε διάφορα σενάρια φορτίου και στροφών με τιμές 0-100% και 500-3000 RPM αντίστοιχα. Επομένως, γίνεται μια χαρτογράφηση της λειτουργίας του κινητήρα με βάση τον συνδυασμό στροφών και φορτίου.

ΕΛΕΓΚΤΗΣ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ (DRIVEWAY)

Ο ελεγκτής εκκίνησης έχει αντίστοιχη λειτουργία με τον ελεγκτή οχήματος, με τη μόνη διαφορά ότι ενεργοποιείται αποκλειστικά και μόνο στην περίπτωση της εκκίνησης. Τέλος, ο ελεγκτής εκκίνησης είναι συνδεδεμένος ανάμεσα στον κινητήρα και τον εικονικό οδηγό.



Σχήμα 3.6: Ολοκληρωμένη απεικόνιση του μοντέλου οχήματος βαρέος τύπου και του συστήματος μετάδοσης κίνησης, με ταυτόχρονη σύνδεσή τους με τον κινητήρα Diesel στο περιβάλλον του GT-Power

Με στόχο την καλύτερη εποπτεία του ολοκληρωμένου μοντέλου προστίθεται και η παραπάνω εικόνα 3.6, όπου φαίνονται αναλυτικά όλες οι συνδέσεις μεταξύ των αντικειμένων στον χάρτη εργασίας του GT-POWER. Τέλος, για την βαθύτερη κατανόηση του συστήματος θα γίνει και μια σύντομη αναφορά στον τρόπο που λειτουργίας του.

Όσον αφορά τον εικονικό οδηγό, αυτός αποτελείται από τρεις διαφορετικές καταστάσεις: την εκκίνηση, την αλλαγή ταχύτητας και την κανονική οδήγηση.

- Αρχικά, ο οδηγός (vehicle driver) λαμβάνει το σήμα του διεγερμένου πεντάλ επιτάχυνσης (pedal accelerator) και του φρένου (brake pedal) από τον ελεγκτή οχήματος (controller vehicle) και στην συνέχεια μεταβάλλει το πεντάλ επιτάχυνσης, το φρένο και το κιβώτιο ταχυτήτων ανάλογα με ποια από τις τρεις προαναφερθείσες καταστάσεις ισχύει την δεδομένη χρονική στιγμή.
- Αν βρίσκεται σε κατάσταση εκκίνησης, τότε ο οδηγός αγνοεί το σήμα εισόδου από τον ελεγκτή οχήματος και ακολουθεί το σήμα που έρχεται από τον ελεγκτή εκκίνησης (driveway).
- Αν βρίσκεται σε κατάσταση αλλαγής ταχύτητας, ο οδηγός σε αυτήν την περίπτωση αγνοεί και τα δύο σήματα από τους ελεγκτές και μεταβάλλει το πεντάλ επιτάχυνσης και τον συμπλέκτη με βάση τους αντίστοιχους χάρτες λειτουργίας.
- Τέλος, αν βρίσκεται σε κατάσταση κανονικής οδήγησης, ο οδηγός ακολουθεί το σήμα που έρχεται από τον ελεγκτή οχήματος.

3.3.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΓΙΑ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΑ ΚΑΥΣΑΕΡΙΑ ΒΑΡΕΟΣ ΤΥΠΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Για την πλήρη μοντελοποίηση του συστήματος θα πρέπει να προστεθεί στο παραπάνω συμβατικό όχημα βαρέος τύπου με κινητήρα Diesel και η θερμοηλεκτρική γεννήτρια. Η επιλογή της θέσης έγινε με βάση την θερμότητα των καυσαερίων, η οποία έχει βρεθεί ότι είναι πιο μεγάλη ακριβώς μετά την έξοδο από τον στροβιλο-υπερπληρωτή. Σκοπός της γεννήτριας σε αυτό το απλοποιημένο κύκλωμα είναι η απαλοιφή ηλεκτρικού φορτίου από τον εναλλάκτη (alternator) του κινητήρα, με αποτέλεσμα την επερχόμενη μείωση της κατανάλωσης και κατ' επέκταση του CO₂.

Η γεννήτρια αποτελείται από 4 υπο-θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (Sub-TEGs), το ψυκτικό κύκλωμα και τις σωληνώσεις τροφοδοσίας καυσαερίου. Αναλυτικότερα, η κάθε μια υπο-γεννήτρια αποτελείται από έναν εναλλάκτη θερμότητας, δύο ψυκτικές πλάκες και 88 θερμοηλεκτρικές μονάδες (thermoelectric modules-TEMs).

ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Με βάση το Κεφάλαιο 1.6, ο εναλλάκτης με τον μεγαλύτερο λόγο θερμικής μεταφοράς προς απώλειες πίεσης είναι ο εναλλάκτης επίπεδης πλάκας, τετραγωνικής διατομής με παράλληλα περυσία στο εσωτερικό του. Οι διαστάσεις του είναι

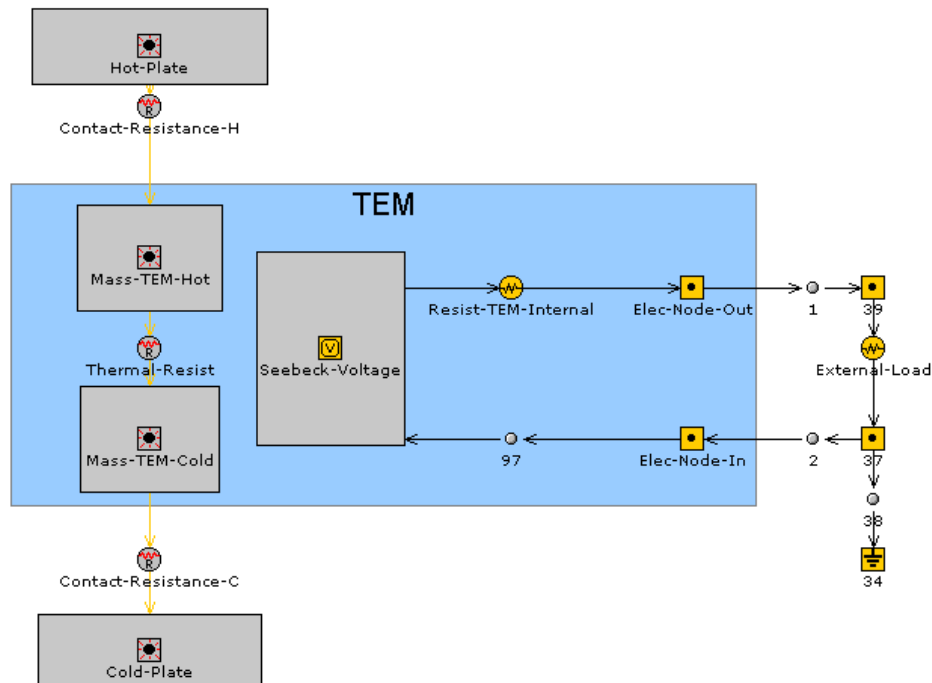
$$440 \times 50 \times 164 \text{ mm (Length } \times \text{ Height } \times \text{ Width)}.$$

Το ύψος του εναλλάκτη χρειάζεται να είναι σχετικά μικρό, λόγω του περιορισμένου χώρου στο όχημα αλλά και για να παραμένουν χαμηλές οι απώλειες θερμότητας των πλαϊνών πλευρών, όπου δεν τοποθετούνται θερμοηλεκτρικά στοιχεία. Παράλληλα ωστόσο δεν θα πρέπει να είναι πολύ χαμηλό, καθώς εμποδίζει την ροή δημιουργώντας περαιτέρω απώλειες πίεσης. Επίσης, το μήκος του θα πρέπει να χωράει το απαραίτητο πλήθος θερμοηλεκτρικών στοιχείων, ενώ δε θα πρέπει να ξεπερνά κάποια όρια, πέρα από τα οποία οι απώλειες πίεσης αυξάνονται αρκετά. Τέλος, η πυκνότητα των περυσίων στο εσωτερικό είναι ανά 20 mm και το πάχος τους είναι 0.5 mm.

Για την κατάλληλη προσομοίωση της μετάδοσης θερμότητας ανάμεσα στον εναλλάκτη και τις δύο ροές ρευστών χρειάστηκε να προστεθούν στο εξωτερικό των τοιχωμάτων του εναλλάκτη δύο θερμικές αντιστάσεις και μία θερμική μάζα. Ειδικότερα, τοποθετείται μία θερμική αντίσταση που αντιπροσωπεύει την θερμική συναγωγή από το ρευστό προς το τοίχωμα, έπειτα παρεμβάλλεται η θερμική μάζα που προσομοιώνει τα τοιχώματα του εναλλάκτη που παραλαμβάνουν την επερχόμενη θερμότητα από το ρευστό και στην συνέχεια την μεταδίδουν στις θερμοηλεκτρικές μονάδες μέσω της τελικής αντίστασης, που συμβολίζει την μετάδοση θερμότητας δια αγωγής.

ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ-TEM

Ενδιάμεσα της θερμής και ψυχρής ροής τοποθετούνται τα 88 θερμοηλεκτρικά στοιχεία (44 βρίσκονται στην πάνω πλευρά του εναλλάκτη και τα υπόλοιπα στην κάτω), ενώ συνολικά η γεννήτρια περιέχει 352 TEMs. Το αντικείμενο (template) ενός TEM αποτελείται κυρίως από ηλεκτρικά και θερμικά κομμάτια (parts), όπως θερμικές και ηλεκτρικές αντιστάσεις, θερμικές μάζες, ηλεκτρικούς κόμβους και μία γείωση. Η συνδεσμολογία στο εσωτερικό ενός TEM μπορεί να φανεί αναλυτικά και στην παρακάτω εικόνα 3.7.



Σχήμα 3.7: Υποσύστημα θερμοηλεκτρικής μονάδας

Στην συνέχεια χρειάζεται να συμπληρωθούν τα αναγκαία μεγέθη που συντελούν στη σωστή λειτουργία της θερμοηλεκτρικής μονάδας. Τα μεγέθη αυτά είναι ο συντελεστής Seebeck, η εσωτερική ηλεκτρική αντίσταση, η θερμική αντίσταση, το ύψος και το εμβαδόν διατομής της μονάδας και τέλος το υλικό των τοιχωμάτων του θερμοηλεκτρικού υλικού. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο θερμοηλεκτρικής μονάδας TEG1B-12610-5.1 από την εταιρεία Thermoamic με τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά TEM

Υλικό θερμοηλεκτρικής μονάδας	Τελλουριούχο Βισμούθιο Bi-Te
Εμβαδόν επιφάνειας	40x40 mm ²
Ύψος	3.6 mm
Τάση εξόδου χαρακτηριστικού φορτίου (V _m)	3.6 V
Ρεύμα εξόδου χαρακτηριστικού φορτίου (I _m)	3 A

Στη συνέχεια, με χρήση των παρακάτω σχέσεων βρέθηκε η θερμική αντίσταση Θ [m²K/W], η εσωτερική ηλεκτρική αντίσταση R [Ohm] και ο συντελεστής Seebeck α [V/K] της θερμοηλεκτρικής μονάδας συναρτήσει της θερμοκρασίας του καυσαερίου T_h [9].

$$\alpha = \frac{V_m}{T_h} \quad (3.1)$$

$$R = \frac{V_m (T_h - \Delta T)}{I_m T_h} \quad (3.2)$$

$$\theta = \frac{\Delta T}{I_m V_m} \frac{2T_h}{T_h - \Delta T} \quad (3.3)$$

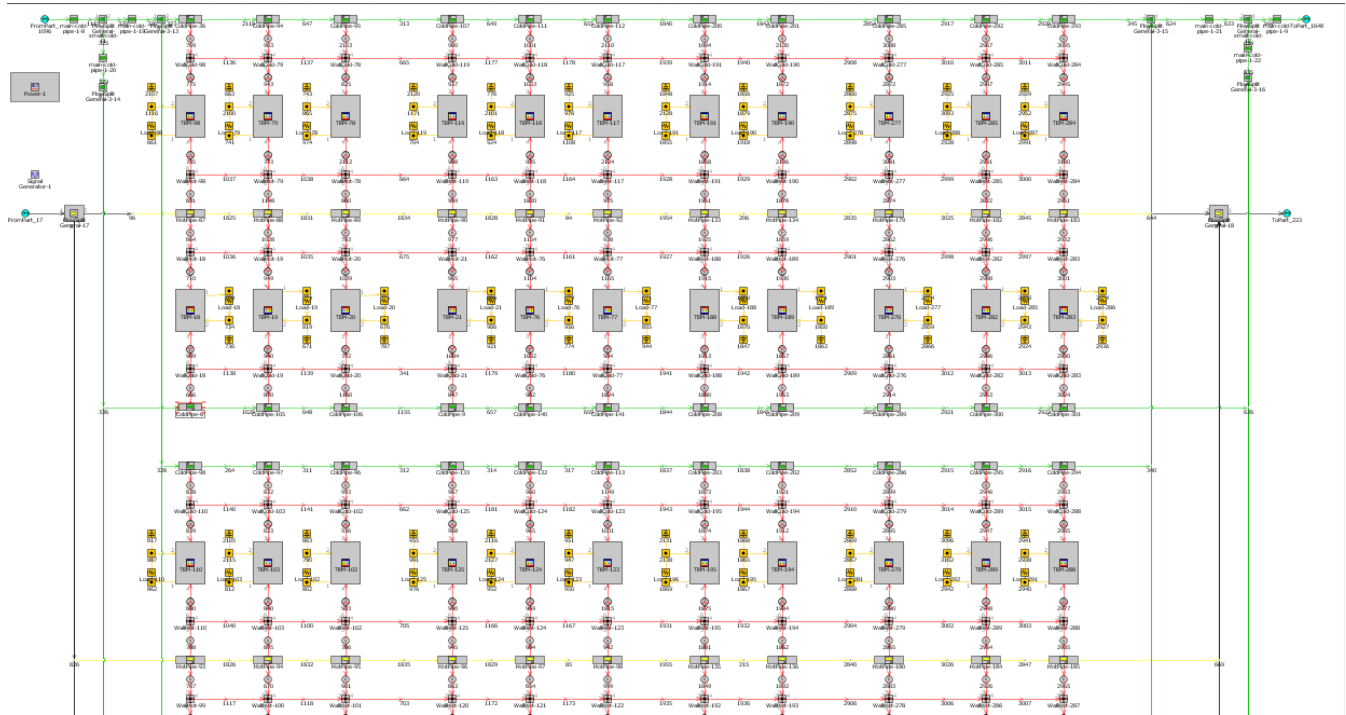
όπου ΔT είναι η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην θερμή πλάκα και την ψυχρή πλάκα. Τέλος, προστίθεται και μία παραπάνω αντίσταση εξωτερικά του TEM εξαιτίας του συνδεδεμένου σε αυτό φορτίου.

ΠΛΑΚΑ ΨΥΞΗΣ

Η πλάκα ψύξης αποτελείται από έναν σωλήνα τετραγωνικής διατομής 440x40x2.5 mm (Length x Width x Height) και εσωτερικά περιέχει πτερύγια που απέχουν μεταξύ τους 10 mm. Στο εσωτερικό της ρέει ψυκτικό υγρό egl-5050 σε θερμοκρασία 40°C και η συνολική παροχή ψυκτικού υγρού σε όλη την θερμοηλεκτρική γεννήτρια είναι 1000 kg/h. Τέλος, η πίεση του ψυκτικού κυκλώματος είναι στα 1.1 bar.

Στη συνέχεια, για την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης της υπο-θερμοηλεκτρικής γεννήτριας θα πρέπει να γίνει η κατάλληλη συνδεσμολογία ανάμεσα στους αγωγούς των δύο ρευμάτων, τις

θερμικές αντιστάσεις, τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία και το ηλεκτρικό κύκλωμα. Αυτό μπορεί να φανεί και στην παρακάτω εικόνα 3.8, όπου παρατηρείται ένα κομμάτι του εναλλάκτη σε διακριτοποιημένη μορφή.

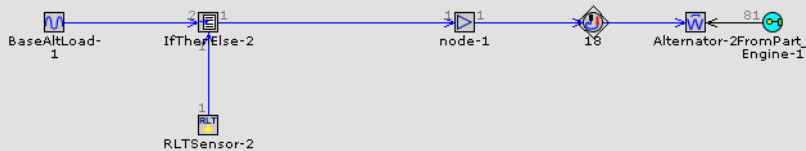


Σχήμα 3.8: Μοντελοποίηση θερμοηλεκτρικής υπο-γεννήτριας

Επίσης, η γεννήτρια αποτελείται από ένα πλήθος σωληνώσεων και ακροφυσίων που δουλεύει τους είναι ο σωστός διαμερισμός της παροχής του ψυκτικού και των καυσαερίων, έτσι ώστε όλες οι υπο-γεννήτριες να έχουν σχεδόν τον ίδιο βαθμό αποτελεσματικότητας. Επιπλέον, τα μήκη, τα πάχη και οι κλίσεις των σωλήνων έχουν επιλεγεί κατάλληλα έτσι ώστε να μην εισάγονται πολλές παρασιτικές απώλειες στο σύστημα.

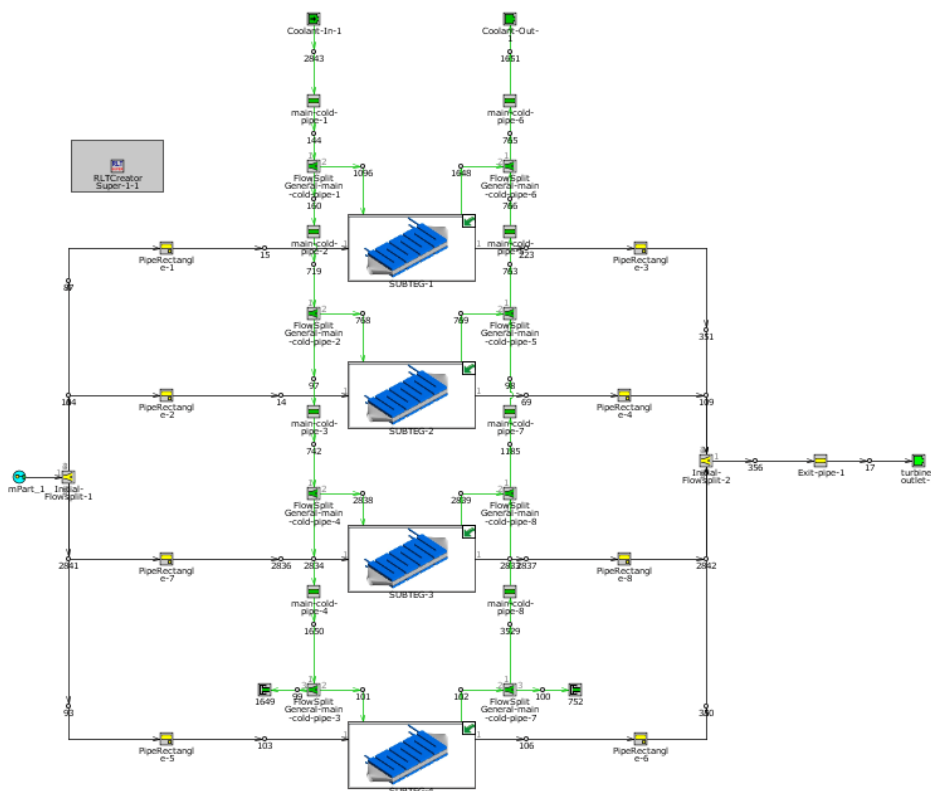
Τέλος, εφόσον έχει συλλεχθεί η παραγόμενη ισχύς από τις θερμοηλεκτρικές μονάδες, τότε αυτή θα σταλεί στον εναλλάκτη (alternator), ο οποίος παίρνει ισχύ $\sim 3000 \text{ W}$ από τον κινητήρα για την κάλυψη ηλεκτρικών αναγκών. Στο σημείο αυτό, με μια λογική εντολή θα αφαιρεθεί το ποσό της παραγόμενης ισχύος από το φορτίο των 3 kW με αποτέλεσμα να μειώνεται η ζήτηση από τον κινητήρα (Σχήμα 3.9).

an assumed base electrical load (headlights, radio, etc.) to determine alternator load. This load is then applied to the crankshaft as an auxiliary load



Σχήμα 3.9: Προσθήκη ηλεκτρικών αναγκών μέσω εναλλάκτη (alternator)

Τέλος, παρουσιάζεται η συνολική εικόνα της γεννήτριας (Σχήμα 3.10), η οποία σε σχέση με τα υπόλοιπα μέρη του κινητήρα βρίσκεται αμέσως μετά από την έξοδο του στροβίλο-υπερπληρωτή.



Σχήμα 3.10: Μοντελοποίηση θερμοηλεκτρικής γεννήτριας

4. ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΒΑΡΕΟΣ ΤΥΠΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη ενός οχήματος βαρέος τύπου εξοπλισμένο με θερμοηλεκτρική γεννήτρια κατά την διάρκεια του Παγκόσμιου Μεταβατικού Κύκλου Οχημάτων-WTVC. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται μια συγκριτική μελέτη ανάμεσα σε έναν συμβατικό όχημα βαρέος τύπου με υπερπληρωμένο κινητήρα Diesel και σε ένα πανομοιότυπο όχημα με κατάλληλη προσαρμοσμένη θερμοηλεκτρική γεννήτρια, ώστε να βρεθεί η επίδραση της γεννήτριας στις επιδόσεις του κινητήρα αλλά και στην κατανάλωσή του. Η έρευνα διεξήχθη μέσω του λογισμικού GT-Power και τα αποτελέσματα μέσω του εργαλείου GT-Post.

Όπως ήδη προαναφέρθηκε, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της λειτουργίας του οχήματος κατά την διάρκεια του WTVC, τα οποία αφορούν τις επιδόσεις του κινητήρα Diesel και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Όσον αφορά τις εκπομπές καυσαερίων του κινητήρα, η συγκεκριμένη μελέτη επικεντρώνεται στην εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και δευτερευόντως στην εκπομπή των παρακάτω ρύπων: οξείδια του αζώτου (NO_x) και αιθάλη (Soot) (η τελευταία ως ενδεικτική των σωματιδίων PM). Το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε κατά την προσομοίωση του μοντέλου είναι τυπικό diesel κίνησης πυκνότητας $\rho = 830 \text{ kg/m}^3$.

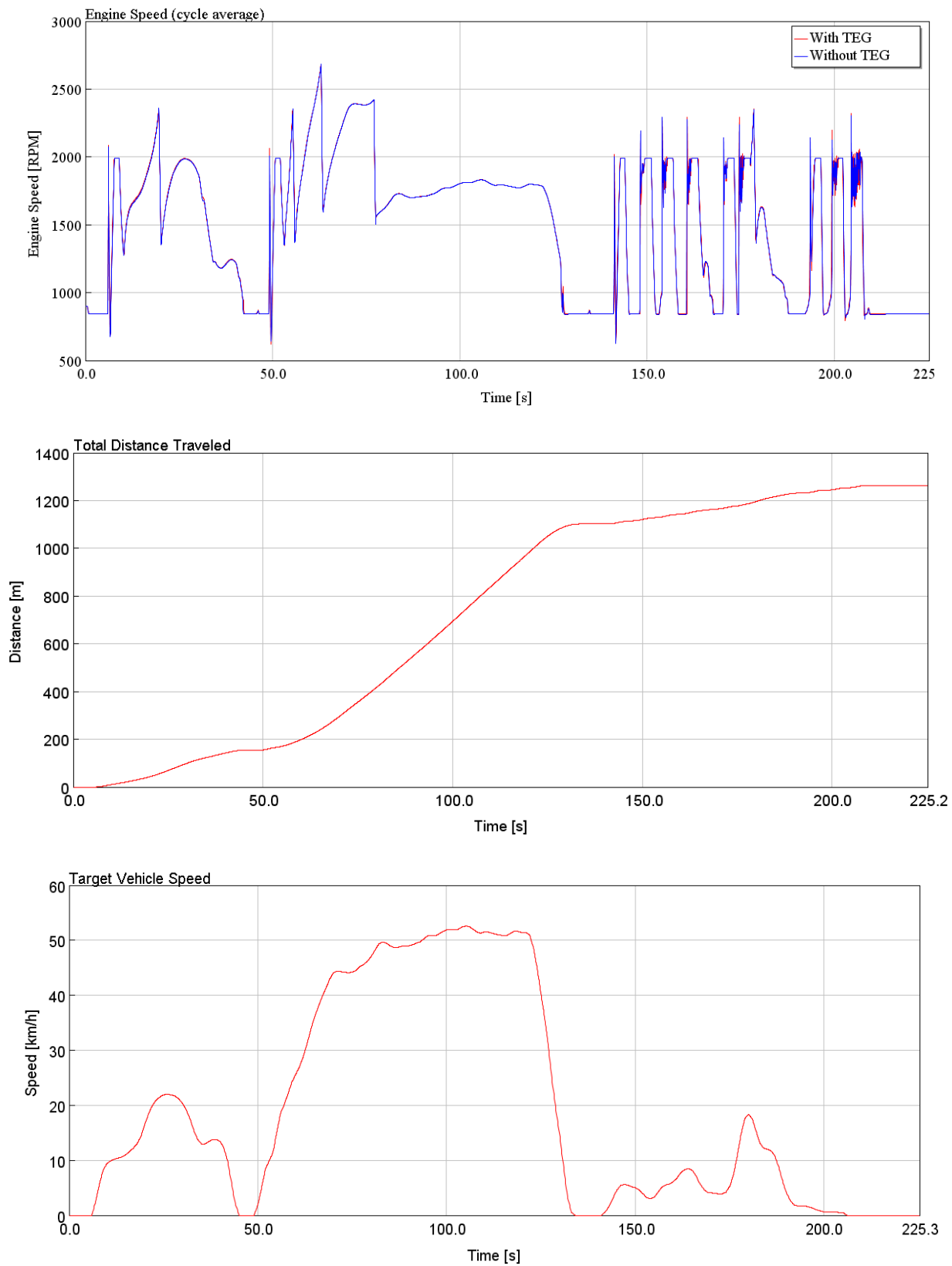
Στην έρευνα αυτή έχουν χρησιμοποιηθεί (για λόγους ‘λογικού’ χρόνου εκτέλεσης του προγράμματος) όχι ολόκληρος ο κύκλος αλλά δύο χρονικά κομμάτια διάρκειας 225 δευτερολέπτων του WTVC, ο οποίος διαρκεί συνολικά 1800 δευτερόλεπτα. Το πρώτο διάστημα είναι από 0-225 sec (urban-αστική οδήγηση) και το δεύτερο είναι από 1525-1750 sec (motorway). Τα διαστήματα αυτά επιλέχθηκαν έτσι ώστε να καλύπτεται ολόκληρο το φάσμα ταχυτήτων του κινητήρα. Επομένως, παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα για το καθένα χρονικό διάστημα και συγκρίνονται οι επιδόσεις του κινητήρα με ή χωρίς την θερμοηλεκτρική γεννήτρια.

4.2 ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ DIESEL

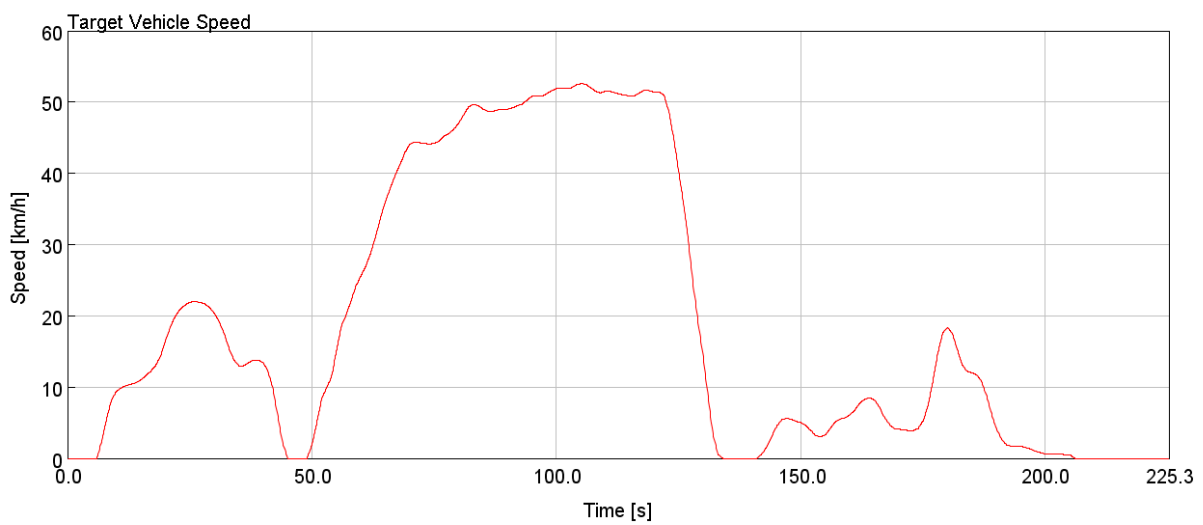
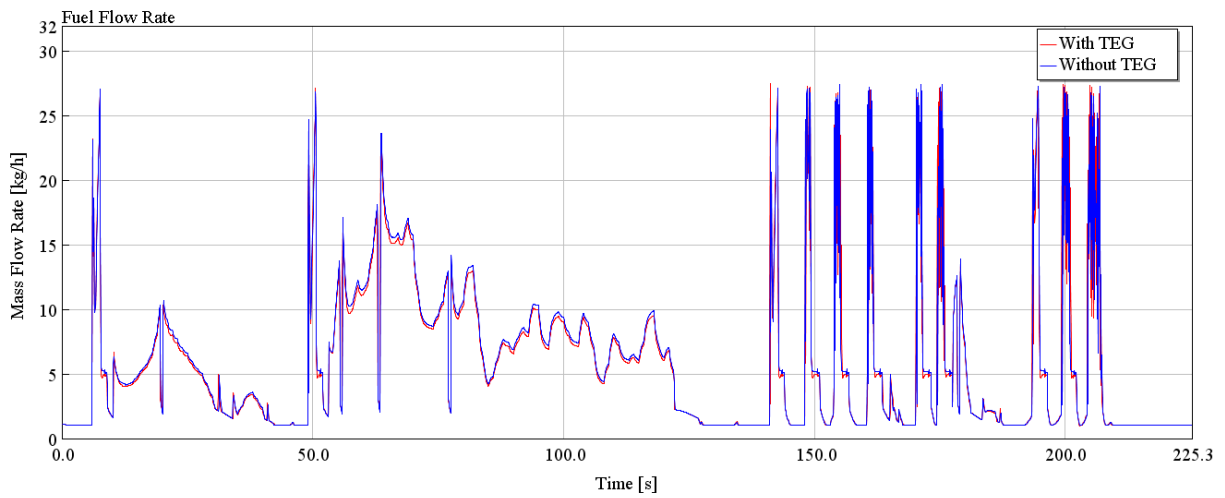
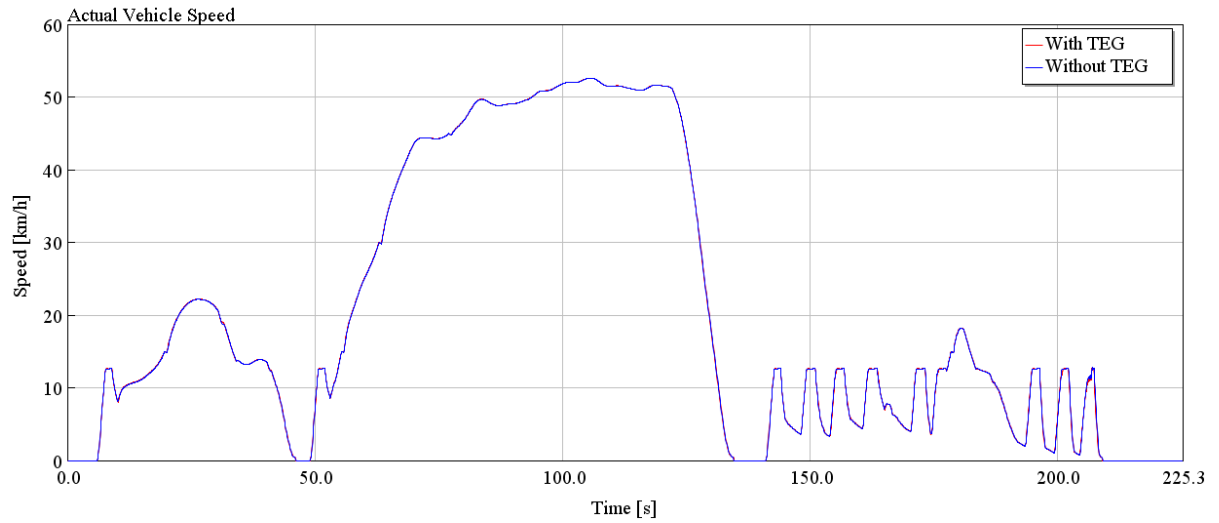
Στη συνέχεια με την βοήθεια του GT-Post παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά μεγέθη του κινητήρα Diesel και πως αυτά μεταβάλλονται με την προσθήκη της γεννήτριας στο σύστημα του οχήματος. Πιο αναλυτικά, τα μεγέθη που απεικονίζονται παρακάτω συναρτήσκει του χρόνου είναι τα εξής:

- Ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα (rpm)
- Διανύμενη απόσταση από το όχημα (m)
- Πραγματική ταχύτητα οχήματος (km/h)
- Πάτημα πεντάλ επιτάχυνσης (%)
- Πάτημα πεντάλ φρένου (%)
- Ισχύς του κινητήρα (kW)
- Ροπή του κινητήρα (Nm)
- Παροχή μάζας καυσίμου (kg/h)
- Ειδική κατανάλωση καυσίμου BSFC (g/kWh)
- Μέση πραγματική πίεση (bar)
- Ταχύτητα περιστροφής του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης (rpm)
- Λόγος πιέσεων συμπίεσής

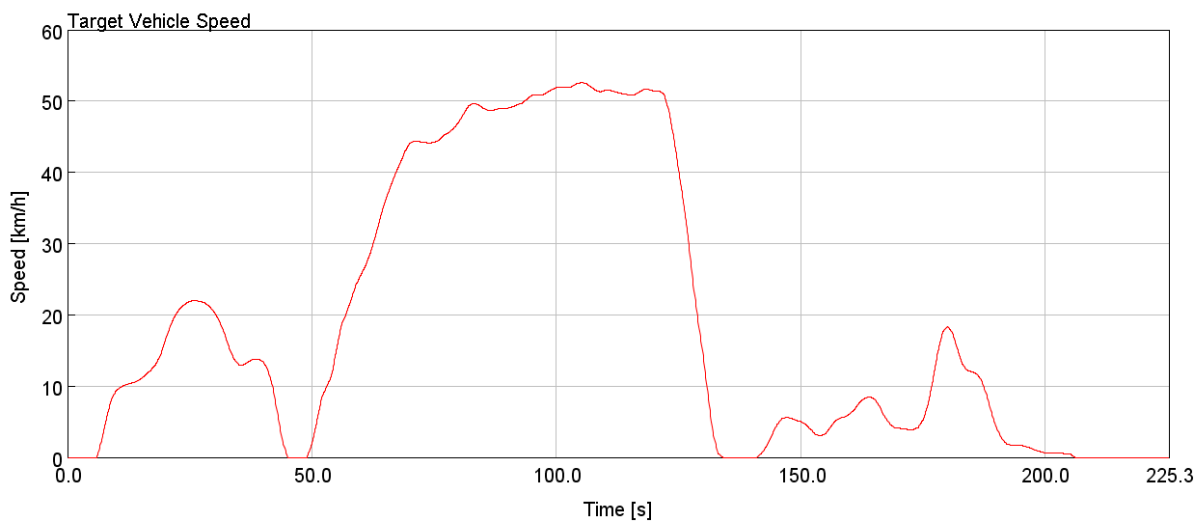
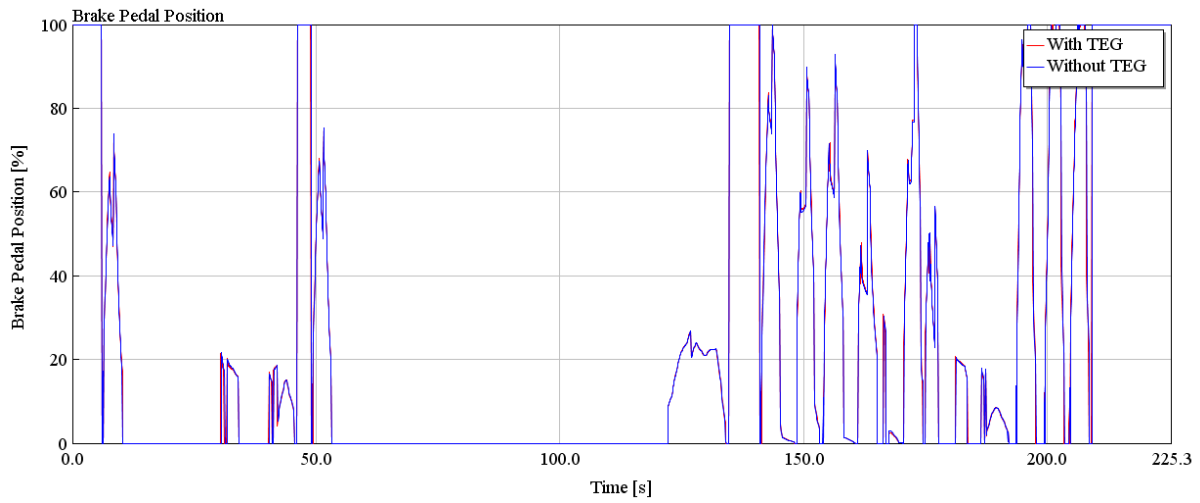
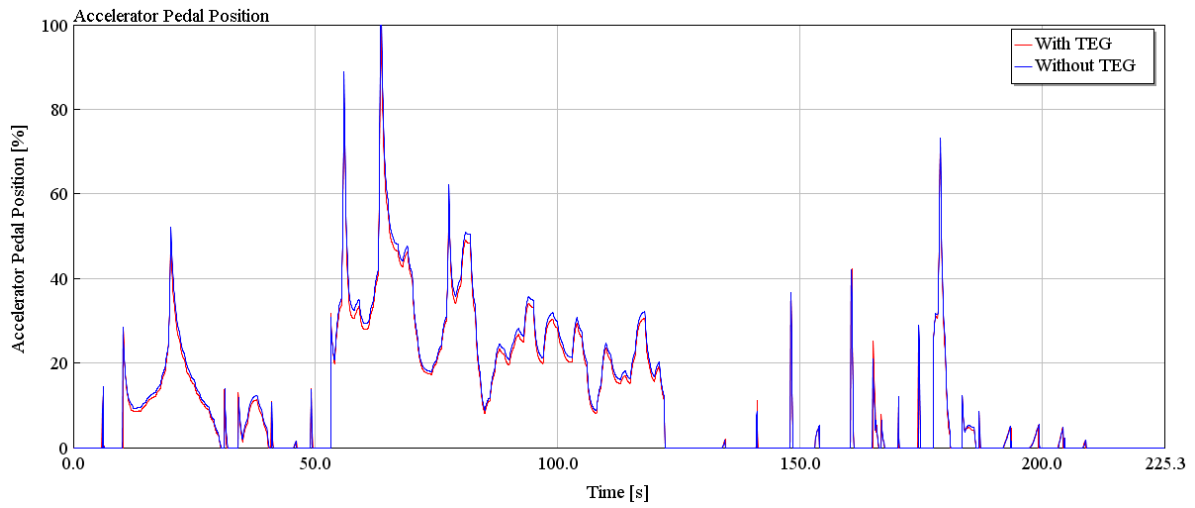
Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα για το χρονικό διάστημα των 0-225 sec (Σχήματα 4.1 – 4.6) και στη συνέχεια για το διάστημα 1525-1750 sec (Σχήματα 4.7 – 4.12) συνοδευόμενα πάντα από το διάγραμμα ταχύτητας του οχήματος.



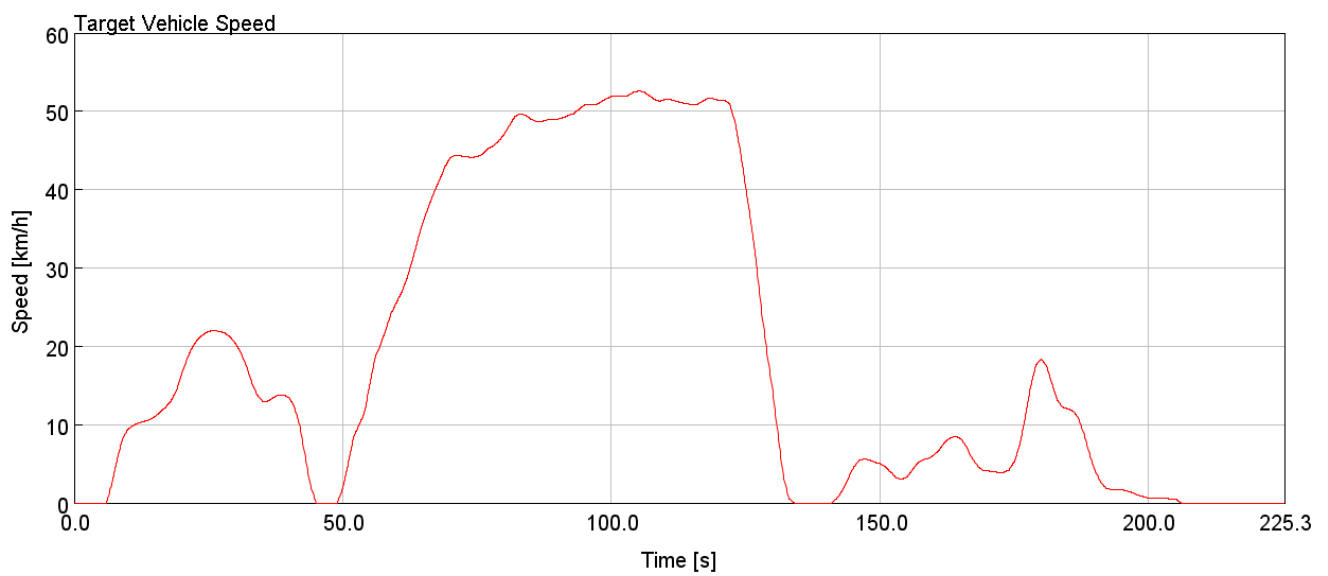
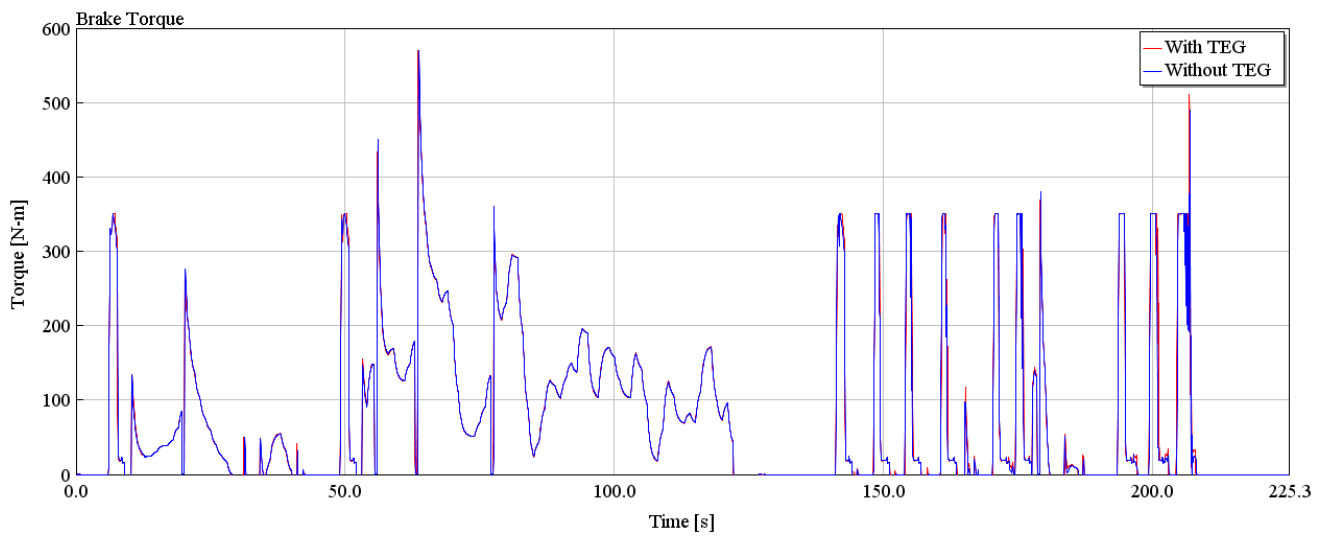
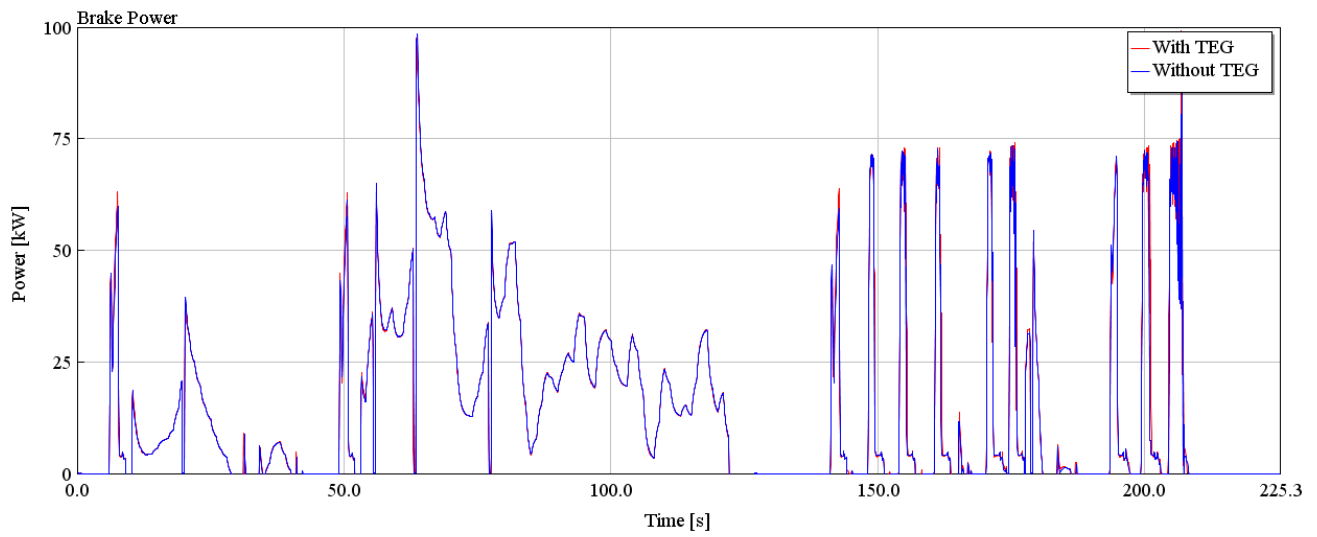
Σχήμα 4.1: Ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, διανυόμενη απόσταση και η πραγματική ταχύτητα συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια των 0 - 225s του κύκλου WTVC



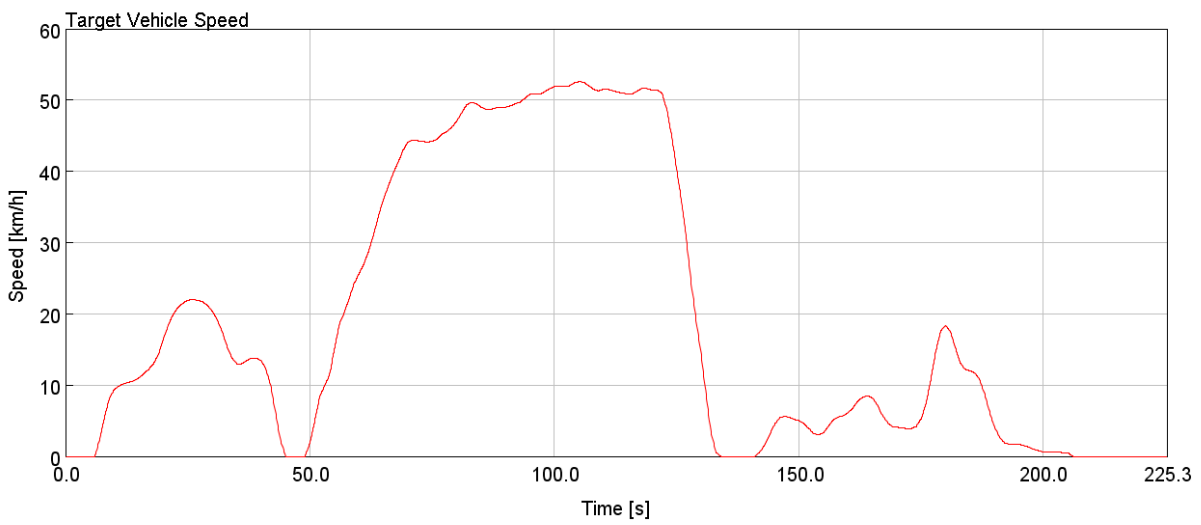
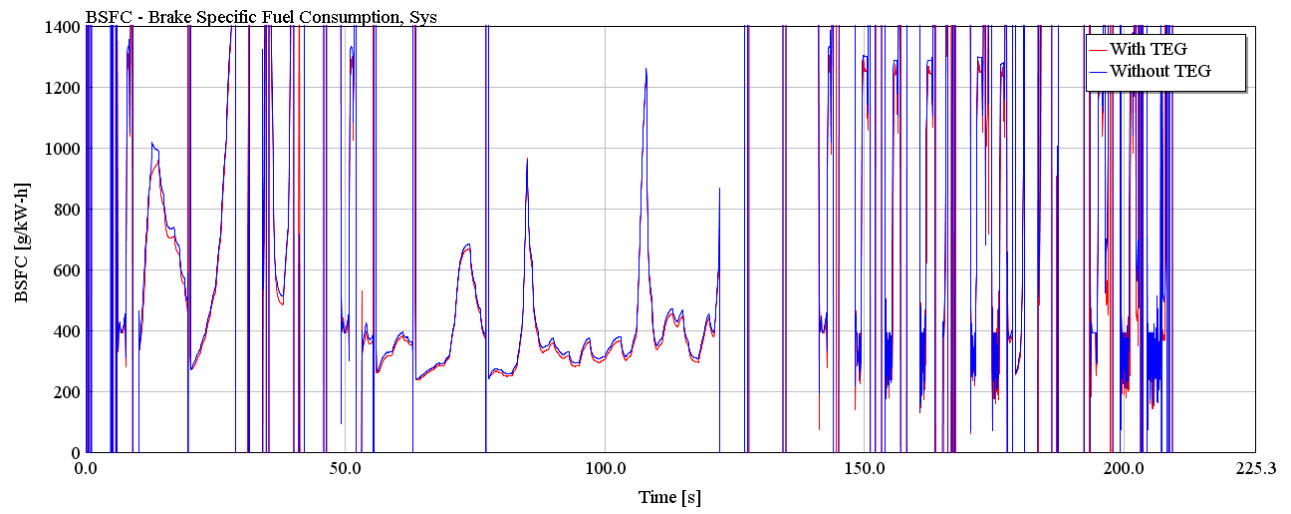
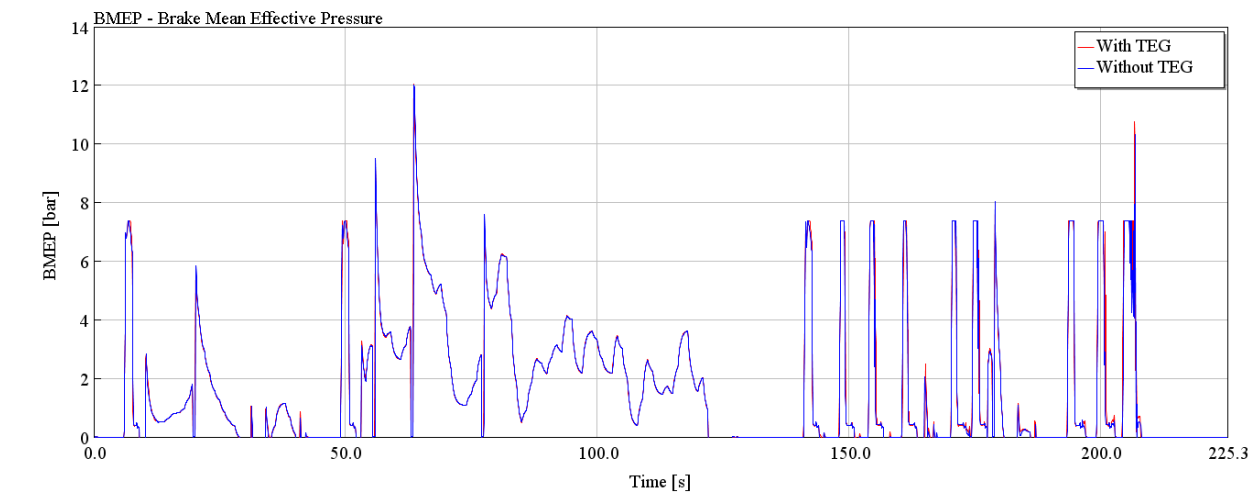
Σχήμα 4.2: Πραγματική ταχύτητα οχήματος και παροχή καυσίμου συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια των 0 - 225s του κύκλου WTVC



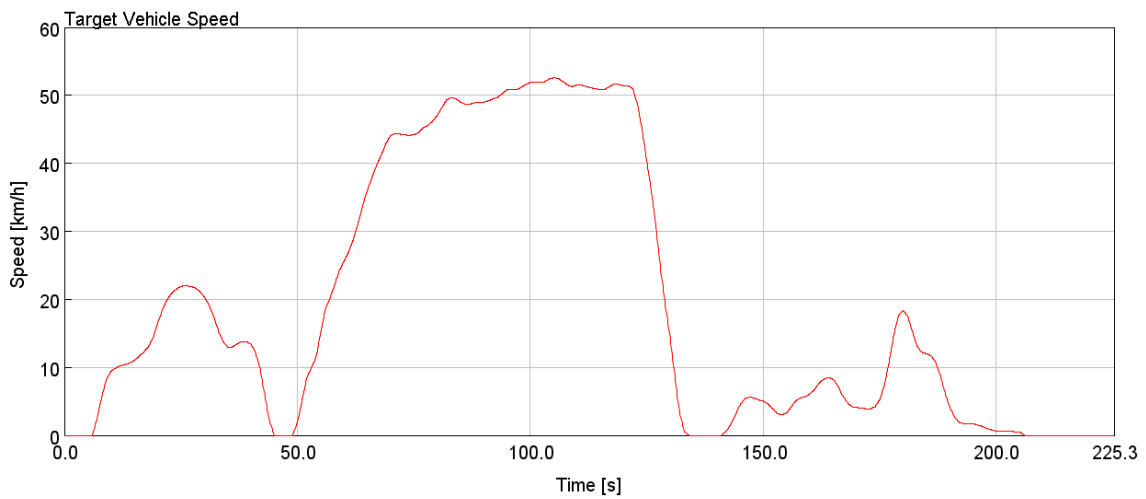
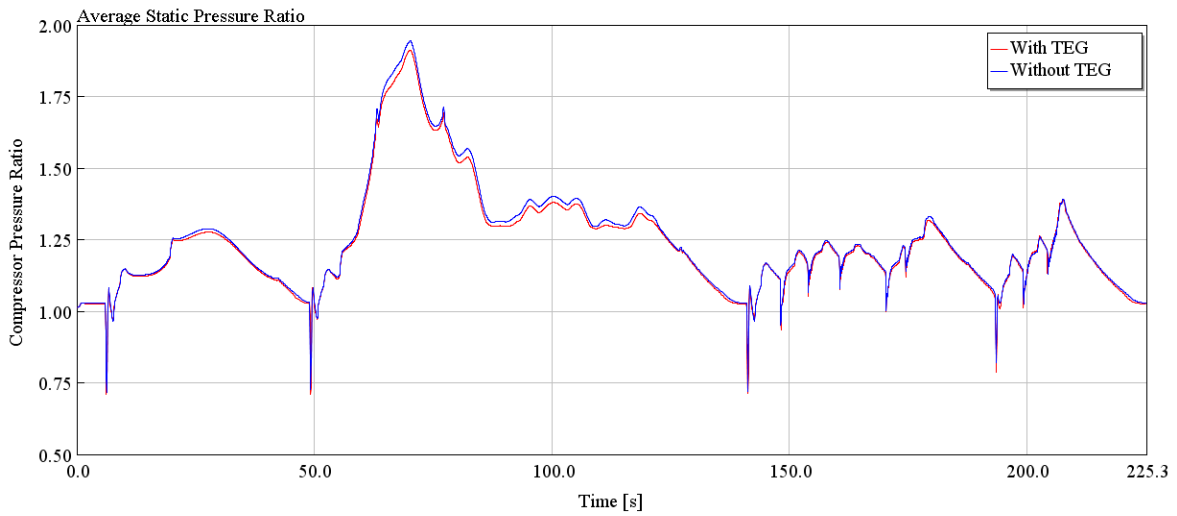
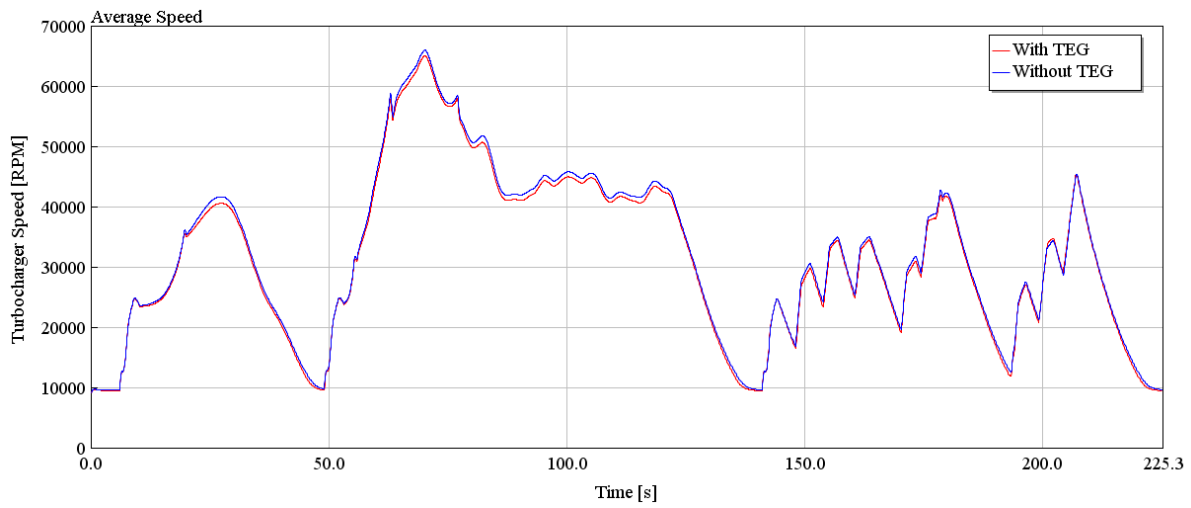
Σχήμα 4.3: Πάτημα πεντάλ επιτάχυνσης και φρένου συναρτήσεις του χρόνου κατά την διάρκεια των 0 – 225s του κύκλου WTVC



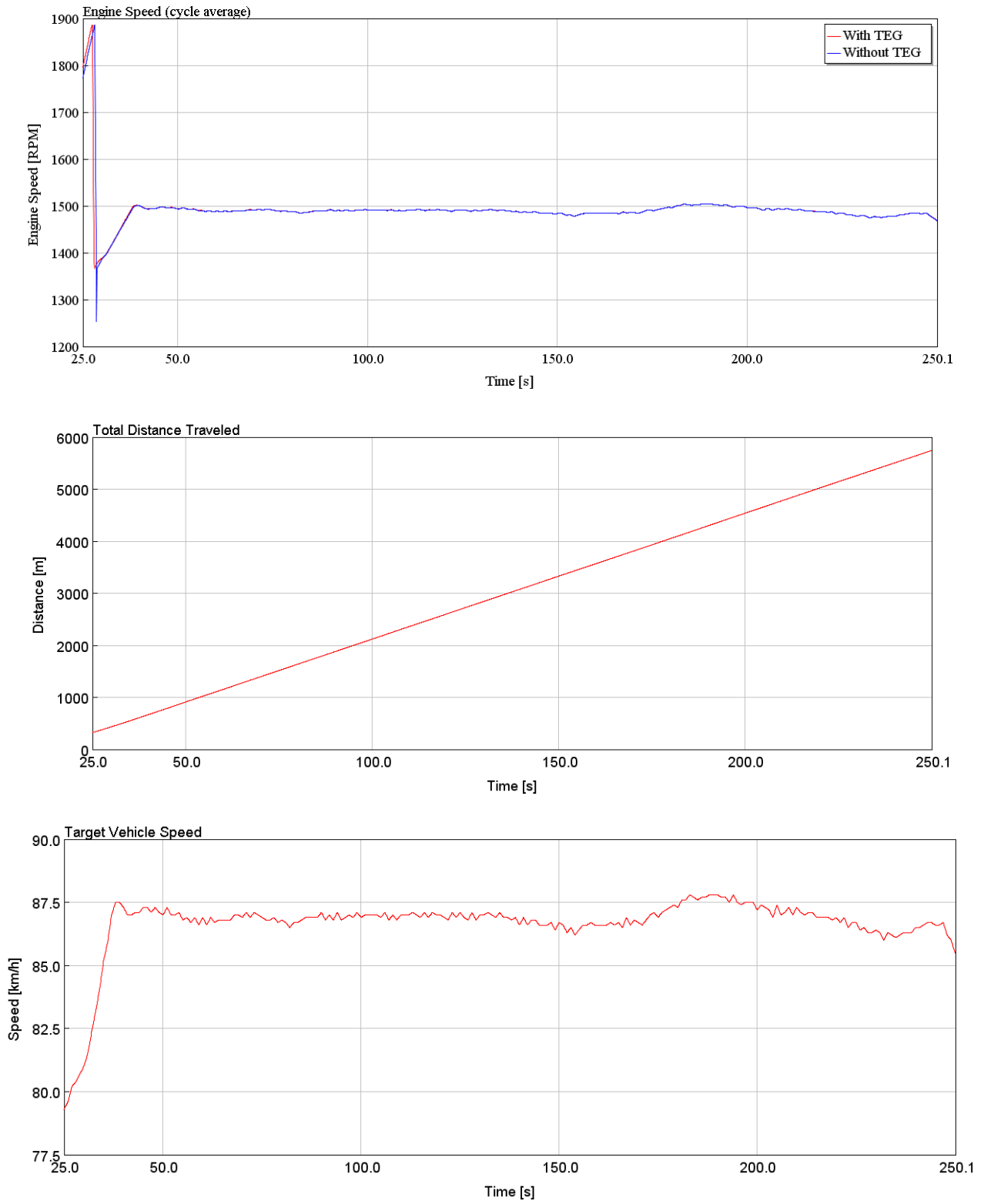
Σχήμα 4.4: Ισχύς και ροπή του κινητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια των 0-225s του κύκλου WTCV



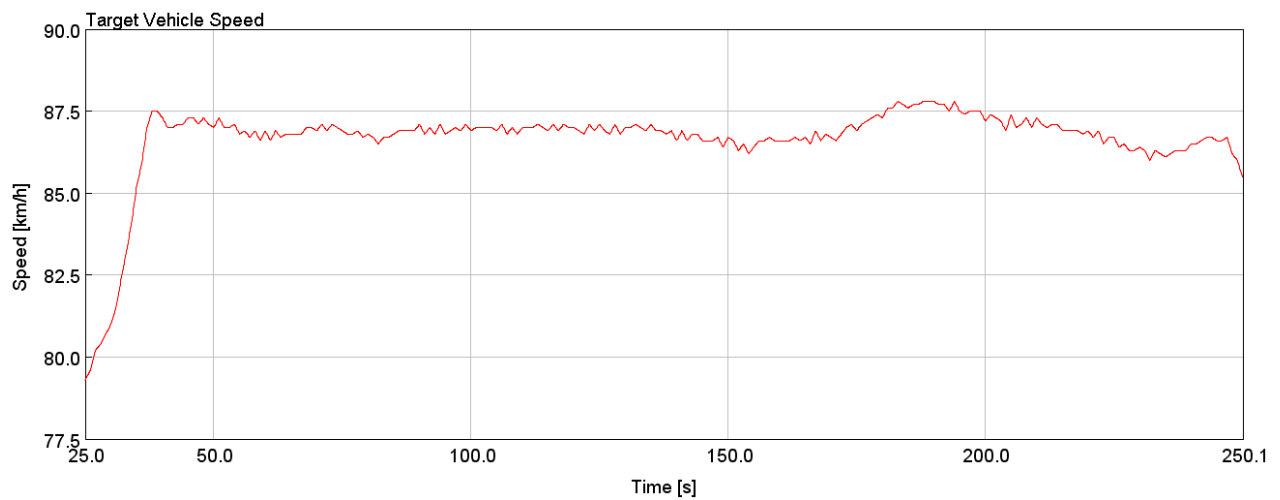
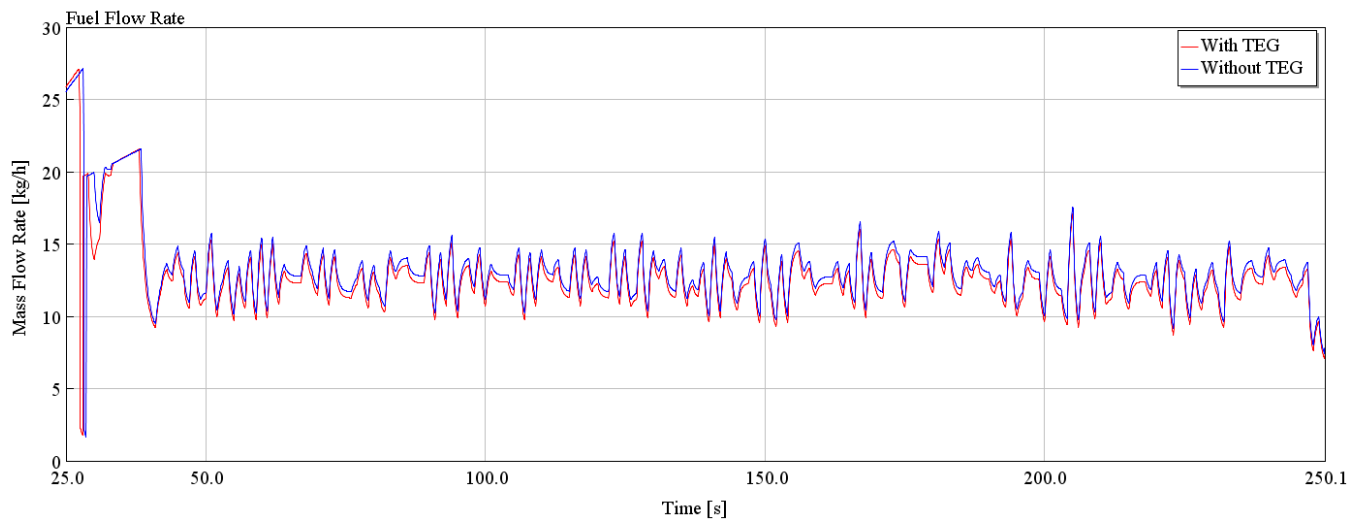
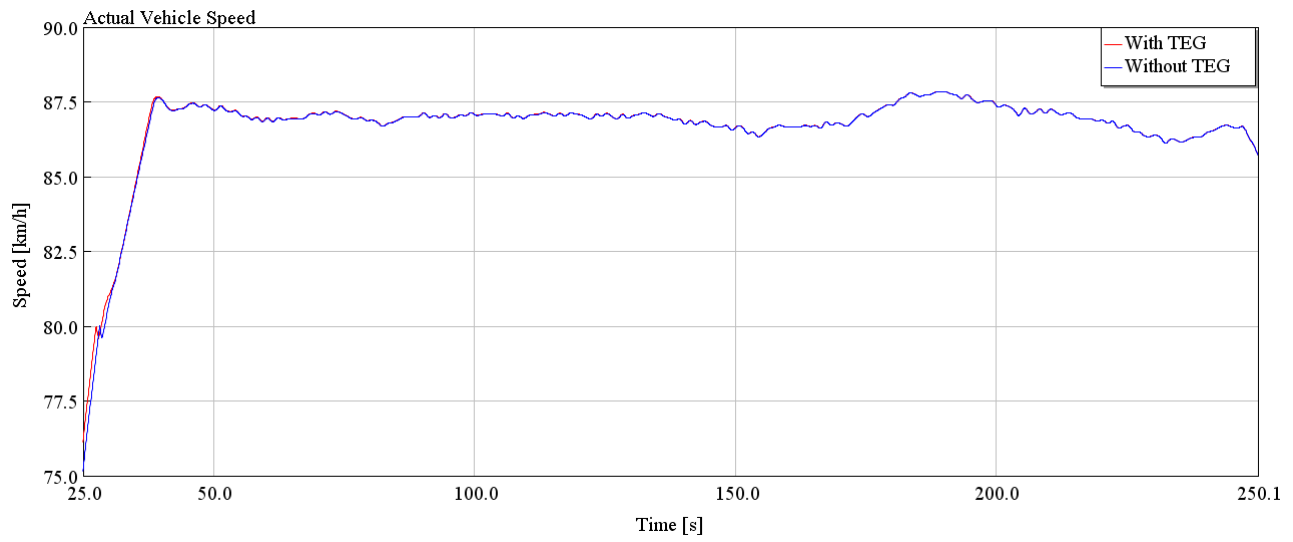
Σχήμα 4.5: Μέση πραγματική πίεση κινητήρα και ειδική κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια των 0-225s του κύκλου WTV



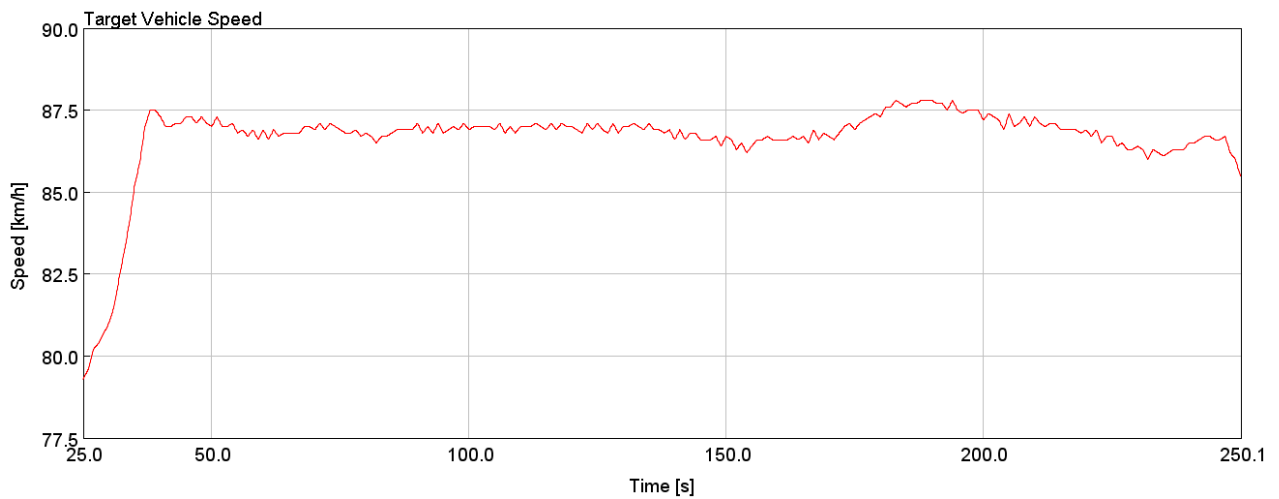
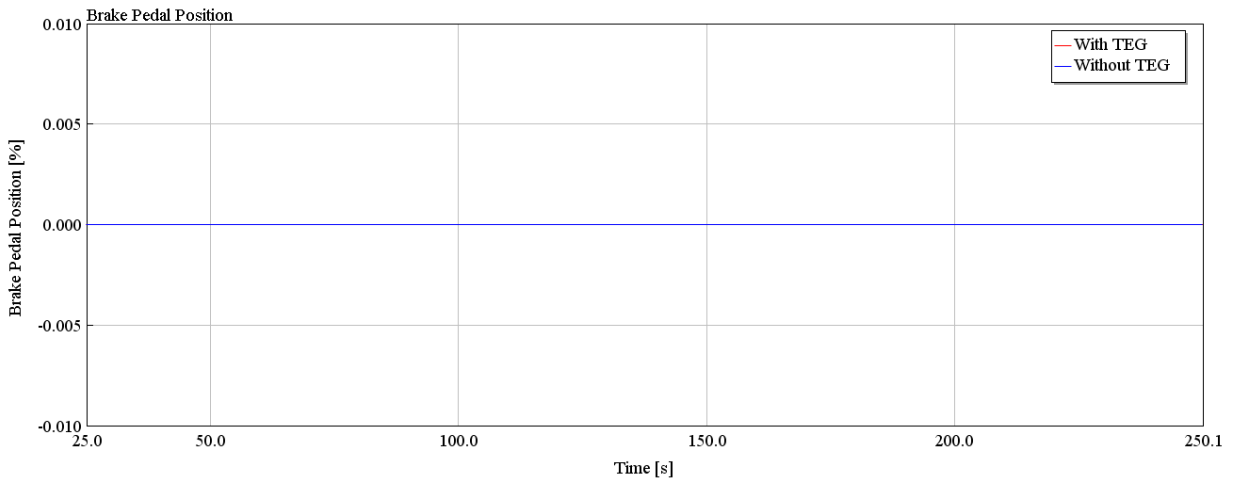
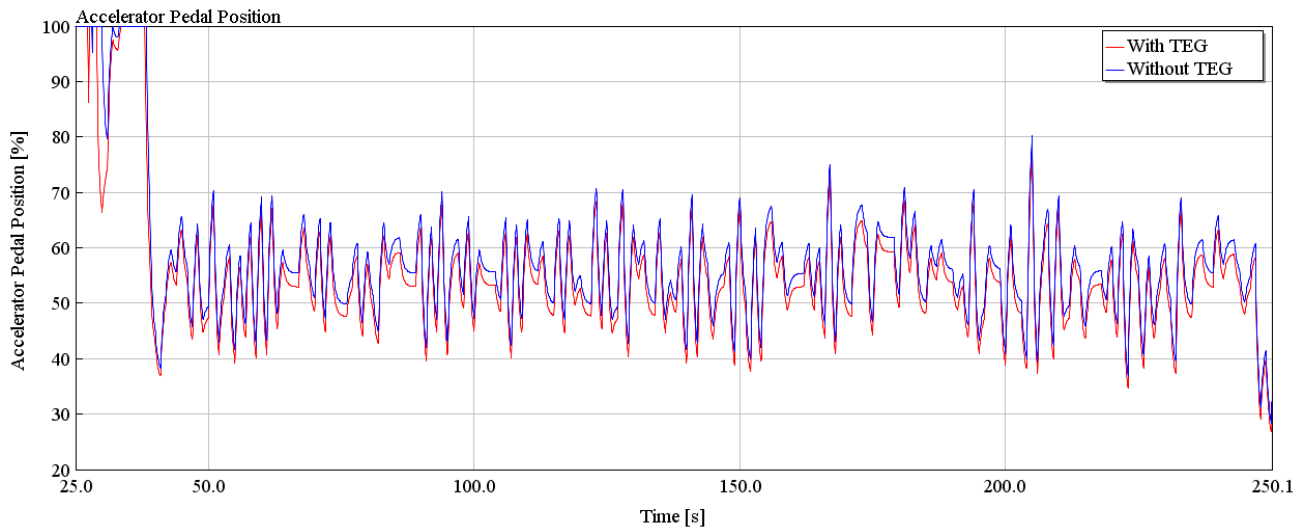
Σχήμα 4.6: Ταχύτητα περιστροφής ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης και λόγος πιέσεων συμπίεσής συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια των 0 - 225s του κύκλου WTC



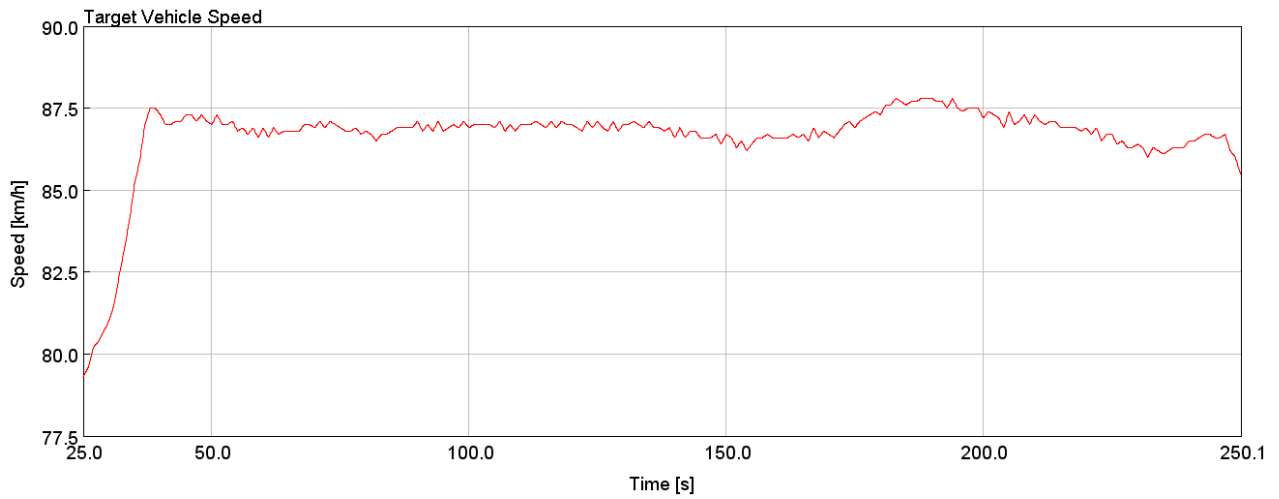
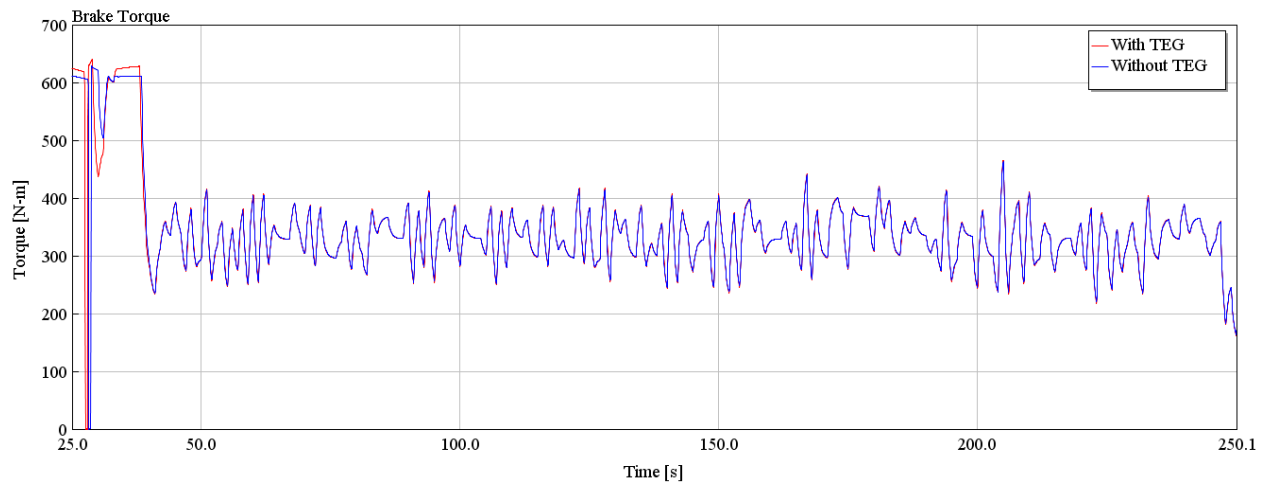
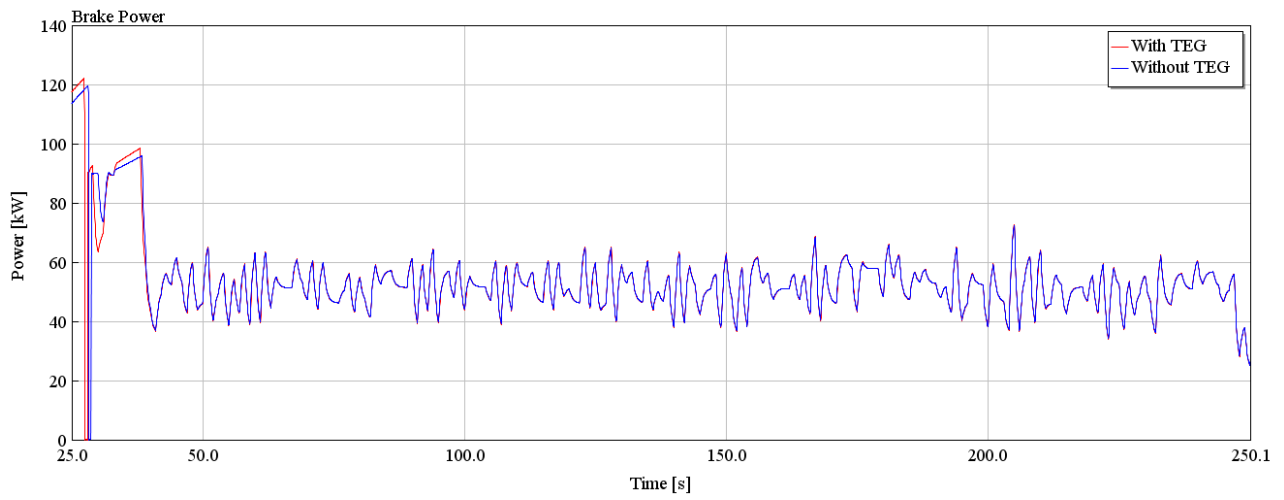
Σχήμα 4.7: Ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα και διανυόμενη απόσταση συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια των 1525-1750s του κύκλου WTVC



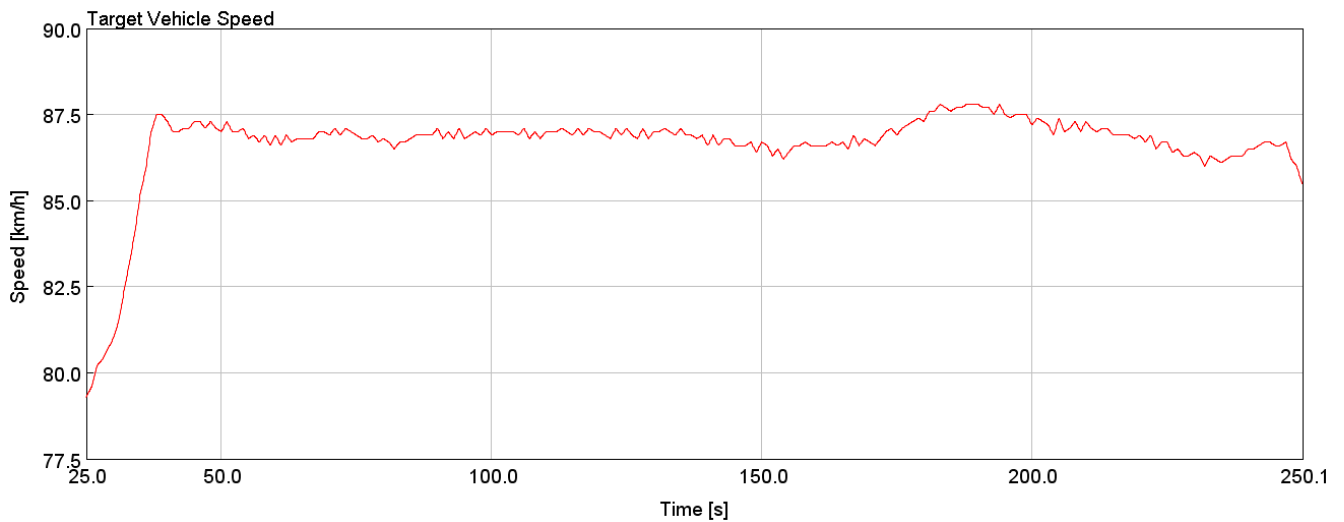
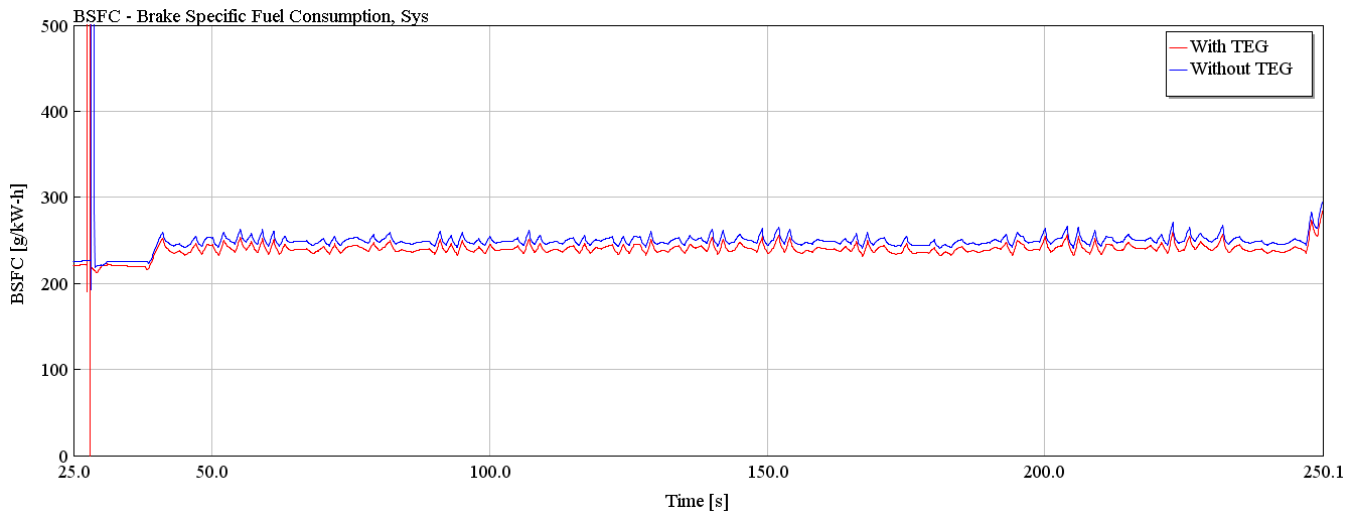
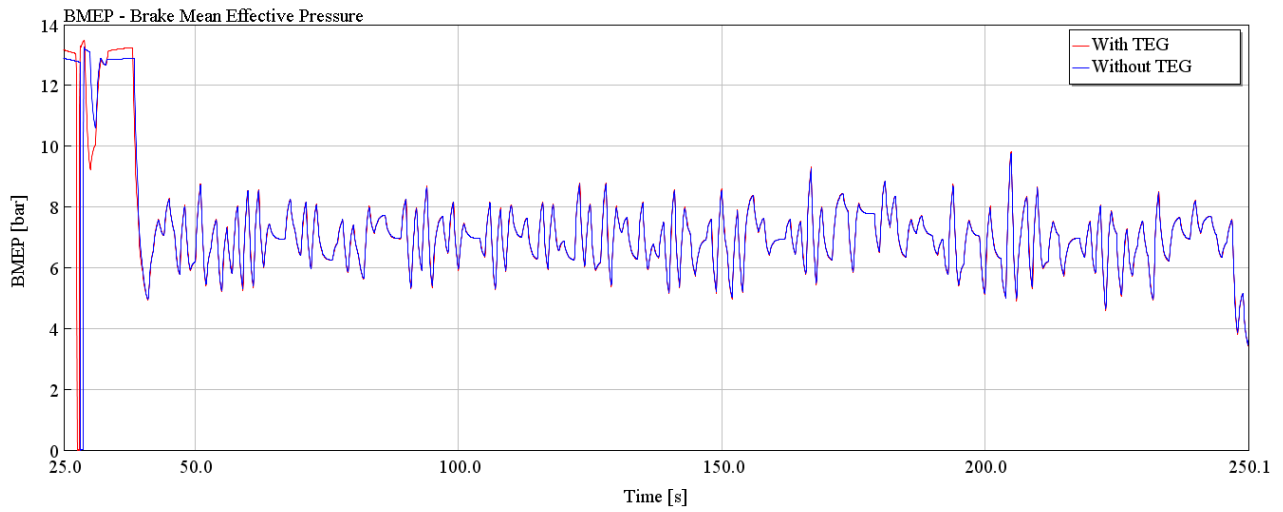
Σχήμα 4.8: Πραγματική ταχύτητα οχήματος και παροχή μάζας καυσίμου κατά την διάρκεια των 1525 – 1750s του κύκλου WTC



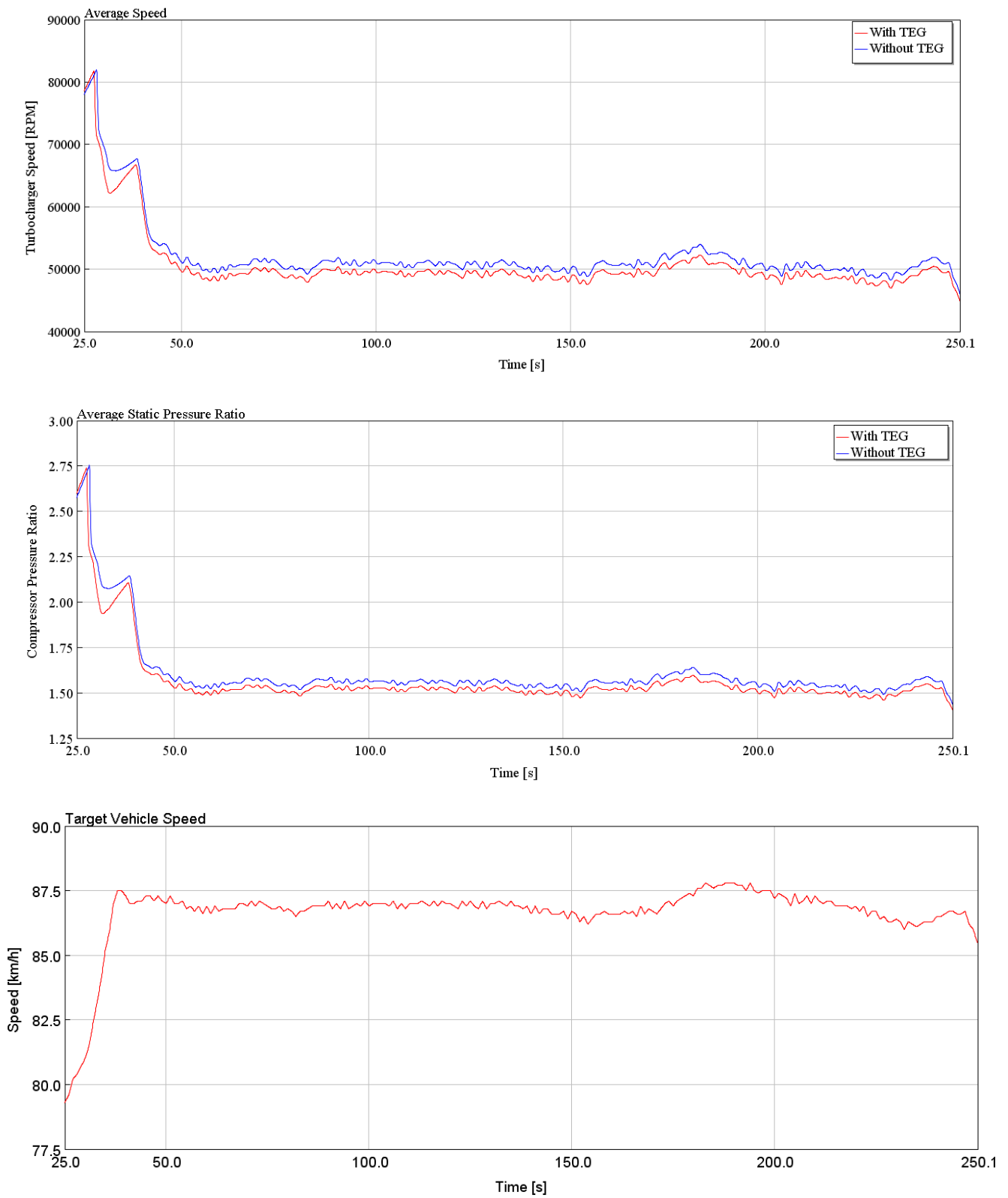
Σχήμα 4.9: Πάτημα πεντάλι επιτάχυνσης και φρένου συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια των 1525-1750s του κύκλου WTC



Σχήμα 4.10: Ισχύς και ροπή του κινητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια των 1525-1750s του κύκλου WTCV



Σχήμα 4.11: Μέση πραγματική πίεση κινητήρα και ειδική κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια των 1525-1750s του κύκλου WTVC



Σχήμα 2.12: Ταχύτητα περιστροφής ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης και λόγος πίεσης συμπιεστή συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια των 1525-1750s του κύκλου WTCV

4.3 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται κατανοητό ότι η προσθήκη της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας δεν προκαλεί μεγάλες αλλαγές στις επιδόσεις του κινητήρα. Ωστόσο, η επίδραση της μπορεί να φανεί στα διαγράμματα του πεντάλ επιτάχυνσης, της έγχυσης καυσίμου, των στροφών του υπερπληρωτή και του λόγου πιέσεων του συμπιεστή.

Αναλυτικότερα, το πεντάλ στην περίπτωση που υπάρχει στο σύστημα η γεννήτρια είναι λιγότερο πατημένο, το οποίο προκαλεί μια ποσοστιαία πτώση στην παροχή καυσίμου κοντά στο 2-4 %. Αυτό μπορεί να φανεί άμεσα και από τα διαγράμματα παροχής μάζας εγγεόμενου καυσίμου, και ισχύει τόσο κατά την διάρκεια της κίνησης εντός πόλης όσο και της κίνησης σε αυτοκινητόδρομο. Για την καλύτερη εποπτεία της διαφοράς στην κατανάλωση καυσίμου, κατασκευάστηκε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ο Πίνακας 4.1 που απεικονίζει την κατανάλωση καυσίμου (L/100km) του οχήματος με και χωρίς την θερμοηλεκτρική γεννήτρια κατά την κίνηση του σε δρόμους εντός και εκτός πόλης (urban και motorway). Στον Πίνακα 4.1 γίνεται επίσης σύγκριση της κατανάλωσης καυσίμου τόσο σε ποσοτικό όσο και σε ποσοστιαίο επίπεδο.

Πίνακας 4.1: Μεταβολή της κατανάλωσης καυσίμου

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	Urban (0-225 s)	Motorway (1525-1750 s)
Όχημα χωρίς TEG	42.58	18.22
Όχημα με TEG	41.86	17.45
Ποσοτική μεταβολή	0.72	0.77
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.7 %	-4.2 %

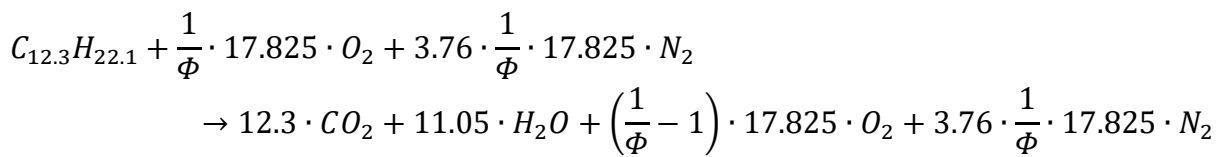
Με βάση τα αποτελέσματα, η ποσοστιαία μείωση της κατανάλωσης καυσίμου είναι μεγαλύτερη για το χρονικό διάστημα των 1525 - 1750 s, διότι λόγω της προσπάθειας του κινητήρα για επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων/φορτίων υπάρχει αυξημένη θερμοκρασία, άρα και δυναμικό, καυσαερίων, γεγονός που μεγαλώνει την παραγωγή ισχύος της γεννήτριας από 1.35 kW σε 2.5 kW.

Επίσης, κάτι το οποίο δεν μπορεί να φανεί στα διαγράμματα ροπής και ισχύος είναι μια μείωση κοντά στο 3% με την προσθήκη της γεννήτριας, εφόσον μέρος της παραγόμενης ισχύος του κινητήρα, η οποία χρειαζόταν για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών μέσω του συνδεδεμένου σε αυτόν εναλλάκτη (alternator), μπορεί πλέον να καλυφθεί από την θερμοηλεκτρική γεννήτρια. Ωστόσο, η μείωση της ισχύος του κινητήρα υπάρχει επίσης λόγω της προσθήκης από τη γεννήτρια απωλειών πίεσης, οι οποίες φτάνουν έως και τα 550 Pa. Επιπρόσθετα, εξαιτίας αυτών των απωλειών πίεσης που προσθέτει στη ροή η γεννήτρια, παρατηρείται και μια μικρή πτώση της ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου του υπερπληρωτή και του λόγου πιέσεων του συμπιεστή.

Τέλος, όσον αφορά τα υπόλοιπα μεγέθη δεν χρήζουν κάποιον ιδιαίτερο σχολιασμό, καθώς δεν παρουσιάζεται κάποια αξιοσημείωτη διαφορά.

4.4 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΑΣΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO₂

Για την άμεση συσχέτιση της κατανάλωσης με το διοξείδιο του άνθρακα, θα δειχθεί με την παρακάτω εξίσωση πως αυτά τα δύο μεγέθη αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Το καύσιμο ντίζελ που παράγεται από πετρέλαιο αποτελείται από περίπου 75% κορεσμένους υδρογονάνθρακες και 25% αρωματικούς υδρογονάνθρακες. Ο μέσος χημικός τύπος για το συνηθισμένο καύσιμο ντίζελ είναι C_{12.3}H_{22.1}, κυμαινόμενος περίπου από C₁₀H₂₀ μέχρι C₁₅H₂₈. Χρησιμοποιώντας τον μέσο χημικό τύπο για μια πλήρη αντίδραση καύσης, προκύπτει η παρακάτω χημική εξίσωση:



Από τους συντελεστές της παραπάνω χημικής αντίδρασης και για μια παροχή καυσίμου Diesel 1 kg/h, βρίσκεται η εκπομπή του διοξειδίου του άνθρακα:

$$\dot{m}_{CO_2} = 12.3 \cdot 44 \frac{kg}{kmol} \cdot \frac{1 \frac{kg}{h}}{169.7 \frac{kg}{kmol}} = 3.189 \frac{kg_{CO_2}}{h}$$

Όπου το 44 kg/kmol και το 169.7 kg/kmol είναι αντίστοιχα τα μοριακά βάρη του διοξειδίου του άνθρακα και του καυσίμου Diesel. Επομένως, γίνεται άμεσα κατανοητό ότι η κατανάλωση καυσίμου έχει άμεση επίπτωση (συσχέτιση 'ένα προς ένα') στις εκπομπές CO₂.

4.5 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Στόχος της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας είναι η μείωση της κατανάλωσης και κατ' επέκταση του διοξειδίου του άνθρακα. Ωστόσο για την πληρέστερη κατανόηση της επίδρασης της στον κινητήρα παρουσιάζονται και οι μεταβολές της αιθάλης (soot) και των NO_x. Για την κατάλληλη παρουσίαση των εκπομπών σε μονάδες g/km χρειάστηκε να γίνει επεξεργασία των αποτελεσμάτων του GT-Post, καθώς το πρόγραμμα τα αποδίδει μόνο σε ppm. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση που αξιοποιεί την μορφή συγκέντρωσης τους σε ppm και την μετατρέπει σε g/km [17].

$$CO_2 = \frac{MW_{CO_2}}{MW_G} \cdot \dot{m}_{exh} \cdot \frac{C_{CO_2}}{U} \quad \left[\frac{g}{km}\right] \quad (5.1)$$

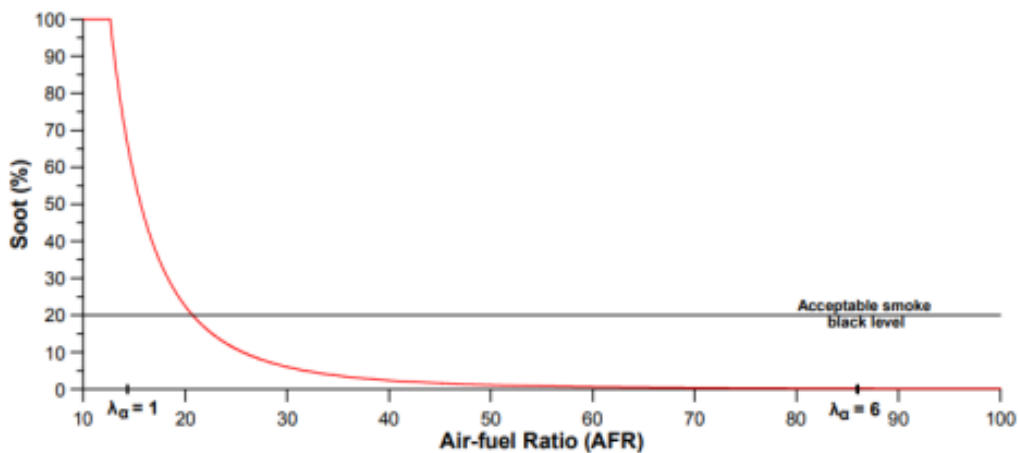
$$NO_x = \frac{MW_{NO_x}}{MW_G} \cdot \dot{m}_{exh} \cdot \frac{C_{NO_x}}{U} \quad \left[\frac{g}{km} \right] \quad (5.2)$$

Όπου $MW_{CO_2} = 44,01 \frac{g}{mol}$, $MW_{NO_x} = 46,01 \frac{g}{mol}$, $MW_{exh} = 28,98 \frac{g}{mol}$ είναι τα μοριακά βάρη του διοξειδίου του άνθρακα, των οξειδίων του αζώτου και του καυσαερίου αντίστοιχα, \dot{m}_G είναι η παροχή καυσαερίου σε g/h, C_{CO_2} , C_{NO_x} είναι οι συγκεντρώσεις σε ppm και U είναι η ταχύτητα του οχήματος σε km/h. Επίσης, η συνολική παροχή του καυσαερίου βρέθηκε ως το άθροισμα της παροχής του αέρα και του καυσίμου.

Όσον αφορά την επεξεργασία της αιθάλης, αυτή έγινε με βάση προσεγγιστική μέθοδο παλαιότερης διπλωματικής εργασίας [18], η οποία υπολογίζει την αιθάλη ως ποσοστό αδιαφάνειας σε σχέση με την αναλογία αέρα-καυσίμου (AFR).

$$Soot (\%) = 380190 \cdot AFR^{-3,25} \quad (5.3)$$

Σύμφωνα με αυτή τη σχέση προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα 4.11 *Soot (%)*-*AFR*, στο οποίο έχουν επισημανθεί τα σημεία όπου το μείγμα είναι στοιχειομετρικό ($\lambda_a = 1$, $AFR = 14,33$) και φτωχό ($\lambda_a = 6$). Ειδικότερα, η στοιχειομετρική τιμή είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα, καθώς στη μεταβατική λειτουργία ενός κινητήρα Diesel, το λ_a εμφανίζεται συχνά κοντά στην τιμή 1 εξαιτίας της υστέρησης του στροβιλο-υπερπληρωτή (turbocharger lag).

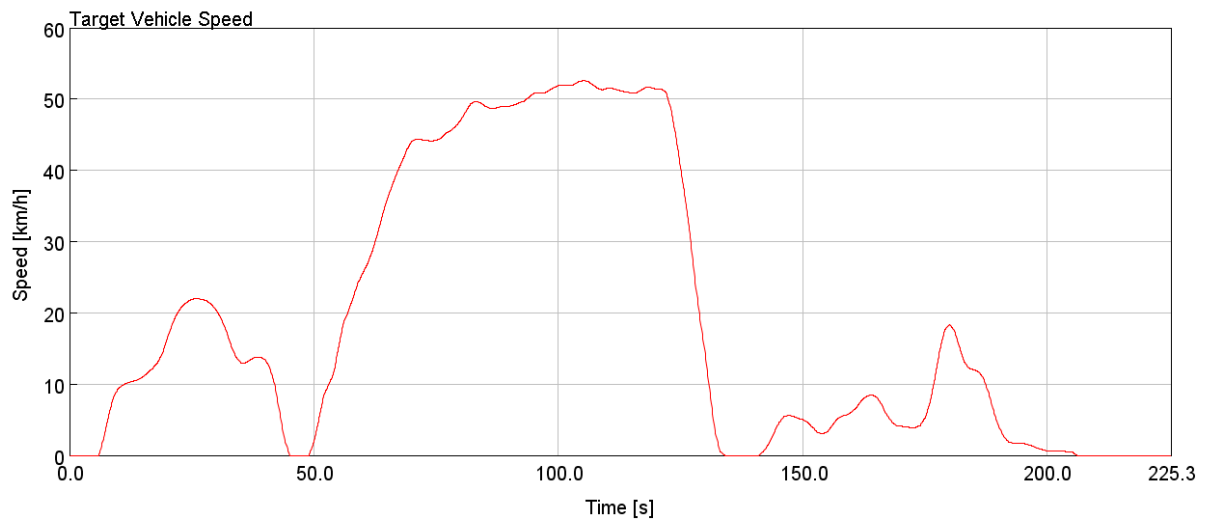
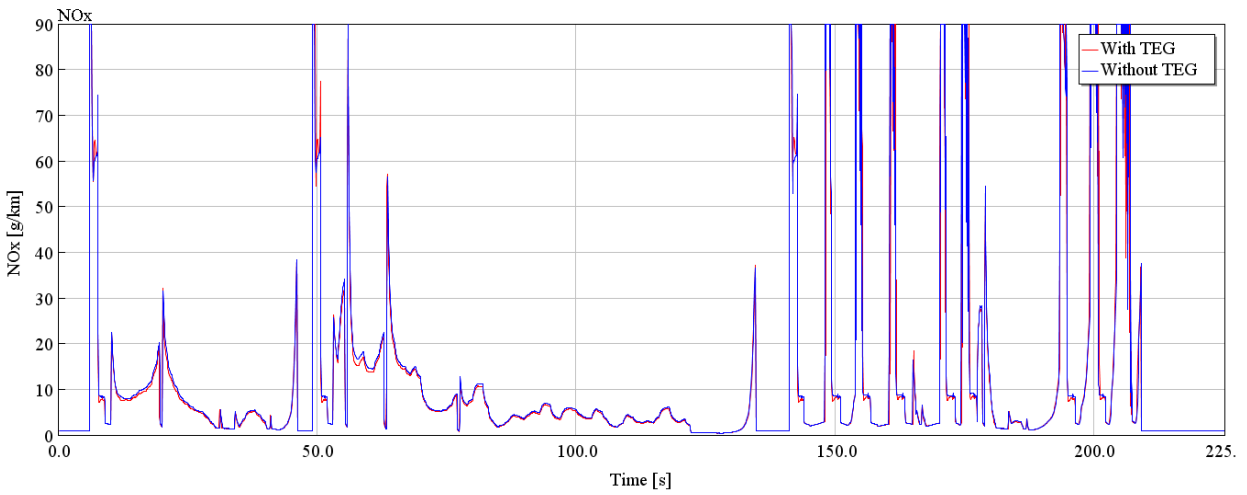
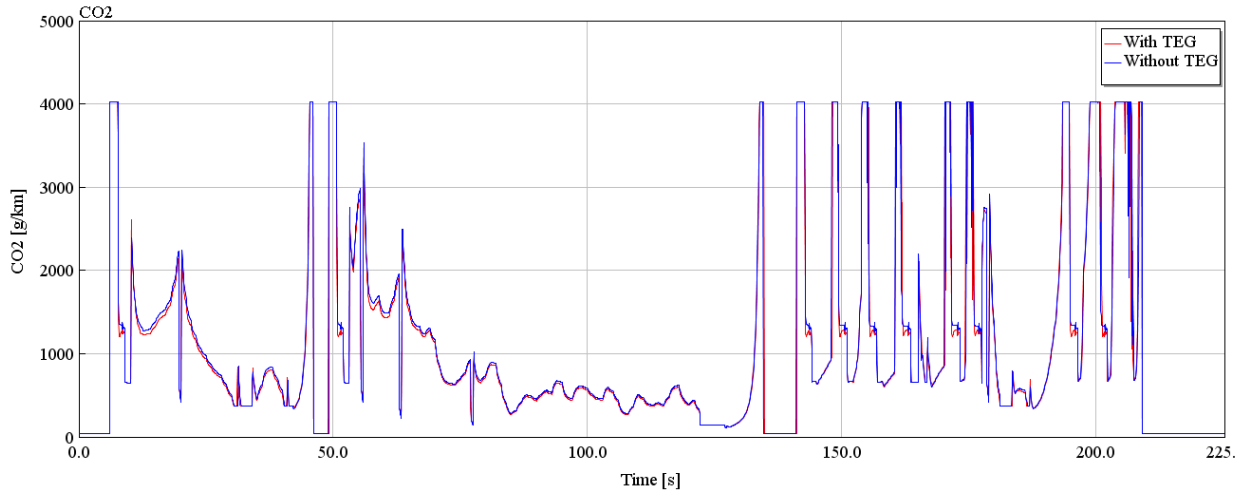


Σχήμα 4.13: Συσχέτιση εκπομπών αιθάλης (%) με την αναλογία αέρα-καυσίμου (AFR)

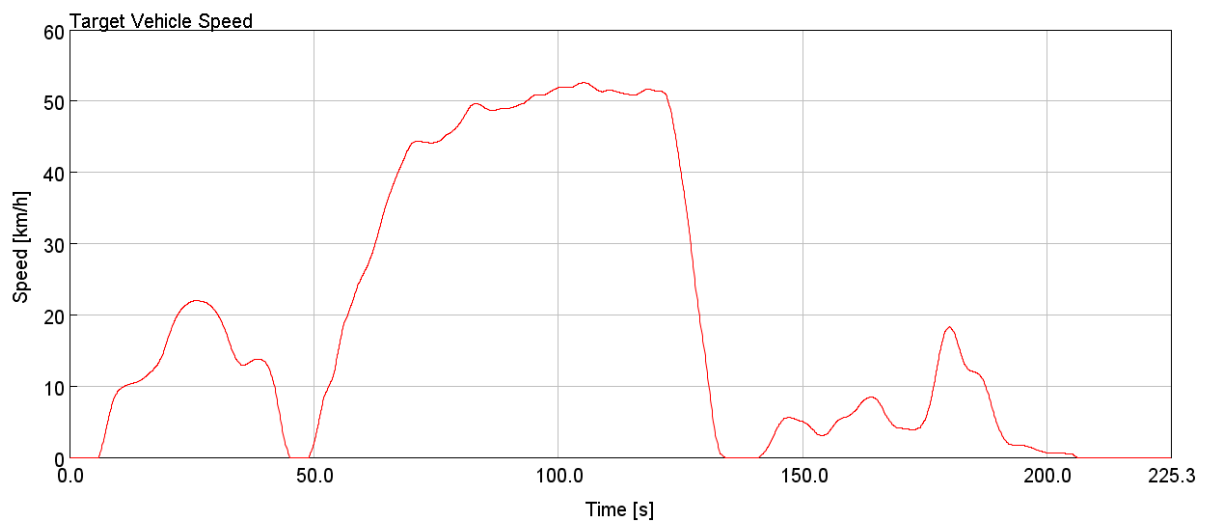
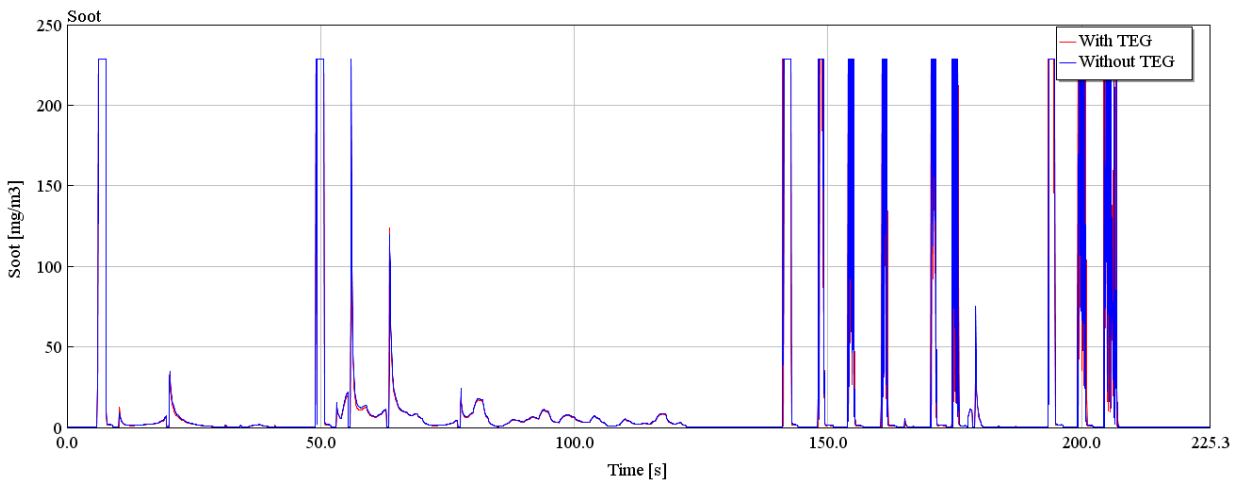
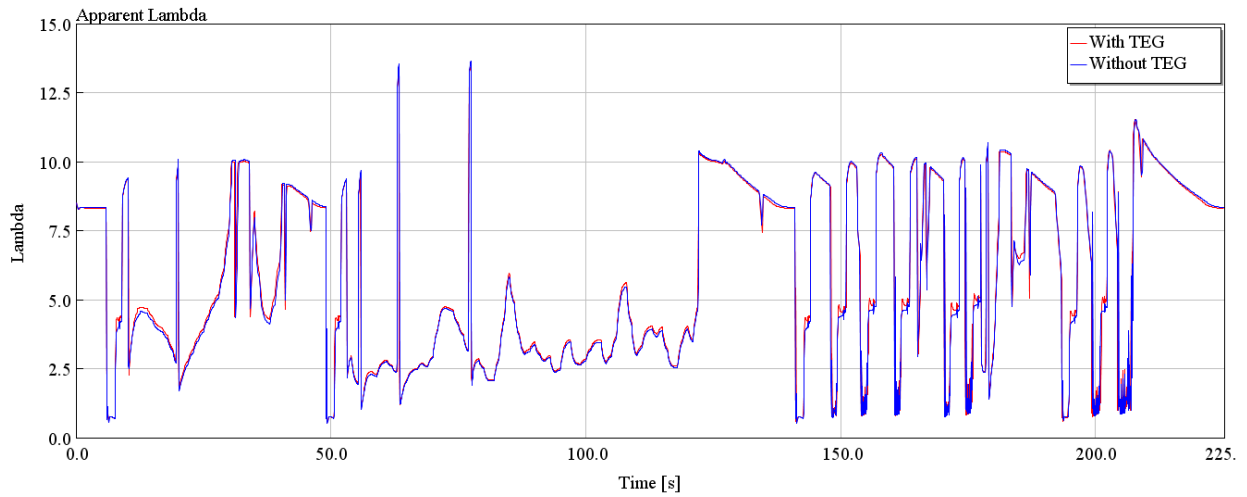
Όμοια με τις εκπομπές των οξειδίων του αζώτου (NO_x), τα αποτελεσμάτων της αιθάλης δεν αντιμετωπίζονται σε επίπεδο απόλυτων τιμών (αφού δεν έχει προηγηθεί κάποια διαδικασία ταιριάσματος πειραματικών με υπολογιστικά δεδομένα), αλλά σε επίπεδο «συγκριτικό» (μιας μεταβατικής περίπτωσης σε σύγκριση με την άλλη).

Τέλος, επειδή στην παρούσα διπλωματική μελετάται η απόκριση οχήματος κατά την διάρκεια μεταβατικού κύκλου πόλης θα πρέπει να υπολογιστούν οι συνολικά εκπεμπόμενες ποσότητες αιθάλης σε mg/m³.

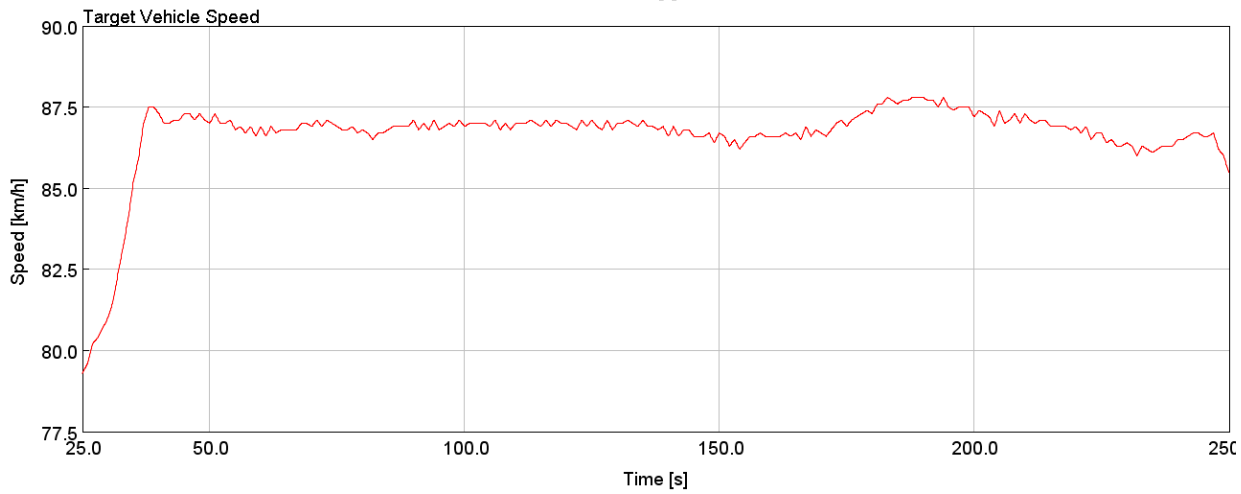
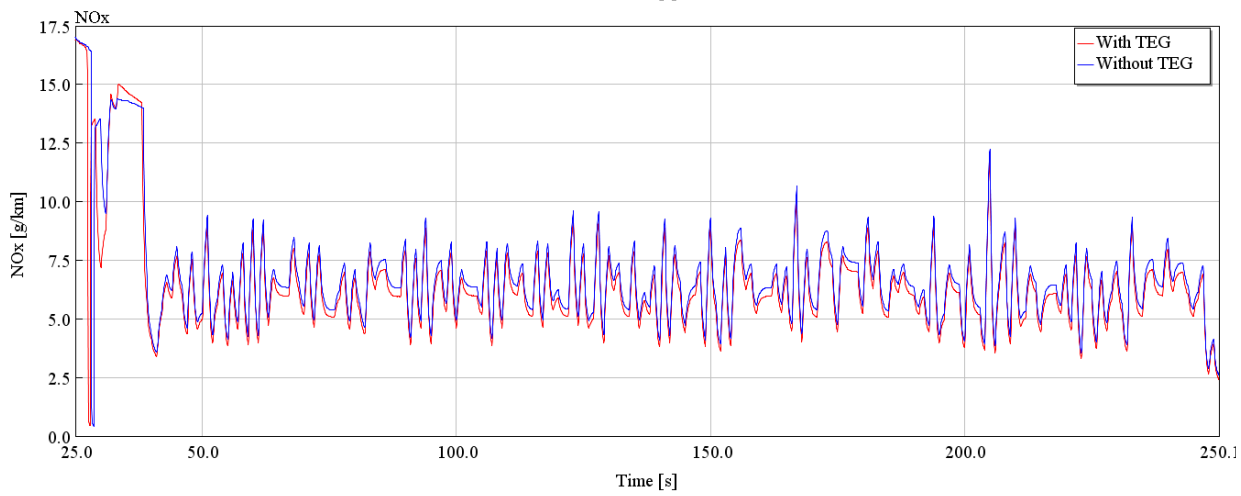
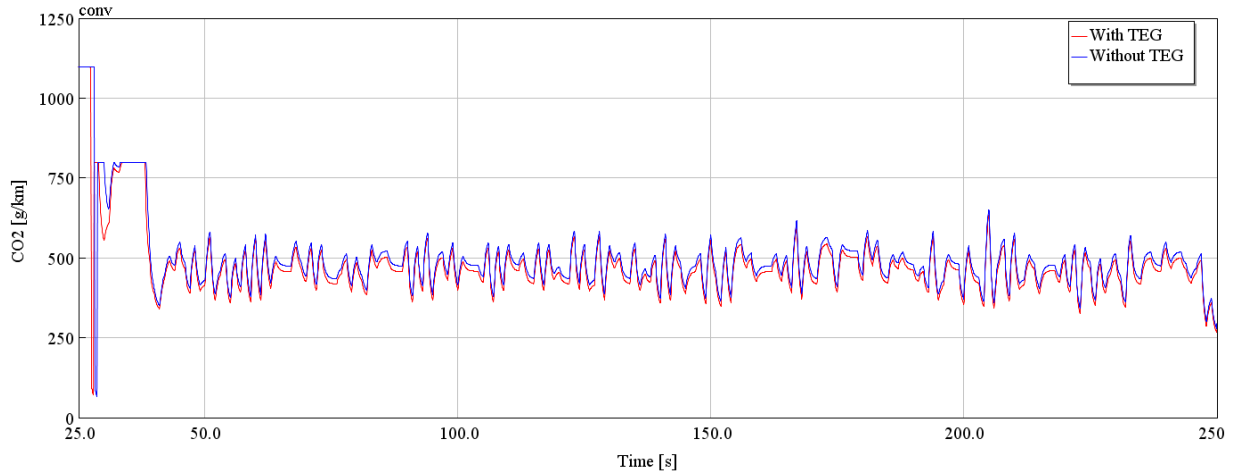
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα εκπομπών CO₂ και NO_x σε g/km, Αιθάλης σε mg/m³ και ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου για τα δύο χρονικά διαστήματα:



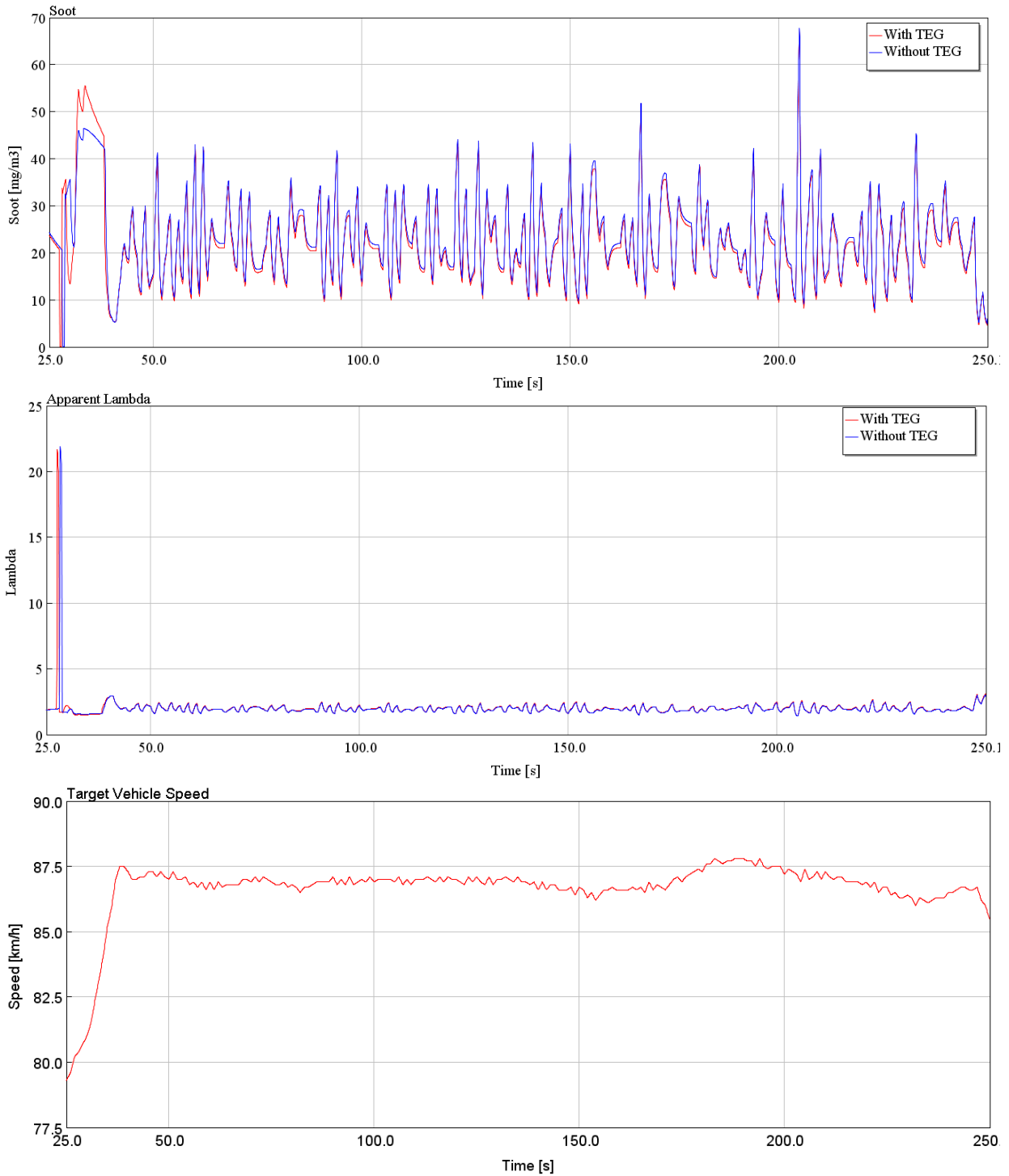
Σχήμα 4.14: Εκπομπές NOx και CO2 συναρτήσεις του χρόνου κατά την διάρκεια συναρτήσεϊ του χρόνου κατά την διάρκεια των 0 - 225s του κύκλου WTVc



Σχήμα 4.15: Εκπομπές αιθάλης και λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια του κύκλου WTVC των 0-225s του κύκλου WTVC



Σχήμα 4.16: Εκπομπές NOx και CO2 συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια των 1525-1750s του κύκλου WTC



Σχήμα 4.17: Εκπομπές αιθάλης και λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια συναρτήσε του χρόνου κατά την διάρκεια των 1525-1750s του κύκλου WTV

4.6 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ

Για την καλύτερη κατανόηση των μεταβολών κατασκευάστηκαν οι πίνακες 4.2, 4.3 και 4.4, οι οποίοι δείχνουν την ποσοστιαία και ποσοτική μείωση του CO₂ που είναι το κύριο μέγεθος της έρευνας αλλά και των λοιπών ρύπων NO_x και αιθάλης. Στους πίνακες γίνεται σύγκριση του οχήματος με και χωρίς την θερμοηλεκτρική γεννήτρια για τα δύο χρονικά διαστήματα.

Πίνακας 4.2: Μεταβολή των εκπομπών CO₂

Εκπομπή CO ₂ [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα χωρίς TEG	1141.4	488.3
Όχημα με TEG	1122	467.8
Ποσοτική μεταβολή	19.4	20.5
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.7 %	-4.2 %

Πίνακας 4.3: Μεταβολή των εκπομπών NO_x

Εκπομπή NO _x [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα χωρίς TEG	13.08	6.65
Όχημα με TEG	12.85	6.29
Ποσοτική μεταβολή	0.23	0.35
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.8 %	-5.3 %

Πίνακας 4.4: Μεταβολή των εκπομπών αιθάλης

Εκπομπή Αιθάλης [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα χωρίς TEG	0.430	0.122
Όχημα με TEG	0.422	0.118
Ποσοτική μεταβολή	0.008	0.004
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.9 %	-3.2 %

Από τους παραπάνω πίνακες 4.2 – 4.4 παρατηρείται ότι με την προσθήκη της γεννήτριας υπάρχει μία μικρή μείωση στην εκπομπή όλων των καυσαερίων και στα δύο χρονικά διαστήματα της

μελέτης. Η μείωση του CO₂ ήταν αναμενόμενη καθώς έχει άμεση συσχέτιση με την κατανάλωση του οχήματος, η οποία όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως έχει μειωθεί με παρόμοιο ποσοστό.

Μια επίσης ευεργετική επίπτωση της προσθήκης της γεννήτριας είναι η μείωση των NO_x, η οποία πιθανότατα οφείλεται στην μείωση της απαιτούμενης ποσότητας του εγχεόμενου καυσίμου στον θάλαμο καύσης. Το μεγαλύτερο μέρος της μεταβολής συμβαίνει κατά την διάρκεια των επιταχύνσεων, καθώς σε αυτά τα σημεία η θερμοκρασία των καυσαερίων είναι πιο υψηλή, γεγονός που αυξάνει την αποδοτικότητα της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας και κατ' επέκταση την μείωση της κατανάλωσης. Παράλληλα, η ελάττωση του καυσίμου προκαλεί και πτώση της ποσότητας της αιθάλης στα καυσαέρια, καθώς ο λόγος αέρα-καυσίμου, ο οποίος έχει άμεση επιρροή στην εκπομπή της αιθάλης, μεγαλώνει. Γενικότερα, τα ποσοστά μείωσης είναι μεγαλύτερα για το κομμάτι του αυτοκινητόδρομου, διότι η γεννήτρια έχει μεγαλύτερη απόδοση εξαιτίας των υψηλότερων θερμοκρασιών, ωστόσο η αύξηση της παροχής των καυσαερίων εισάγει στο σύστημα και περισσότερες απώλειες πίεσης, οι οποίες περιορίζουν την αποδοτικότητα της γεννήτριας στην μείωση της κατανάλωσης και κατ' επέκταση των εκπομπών.

4.7 ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Στη συνέχεια για την εύρεση της αποδοτικότητας της γεννήτριας και της βελτίωσης του βαθμού απόδοσης του συνολικού συστήματος χρησιμοποιήθηκαν οι τύποι (1.23) και (1.25):

$$\eta_{TEG} = \frac{P_{net}}{\dot{Q}_{TEG}} = \frac{P_{el} - P_L}{\dot{Q}_{TEG}} \quad (1.23)$$

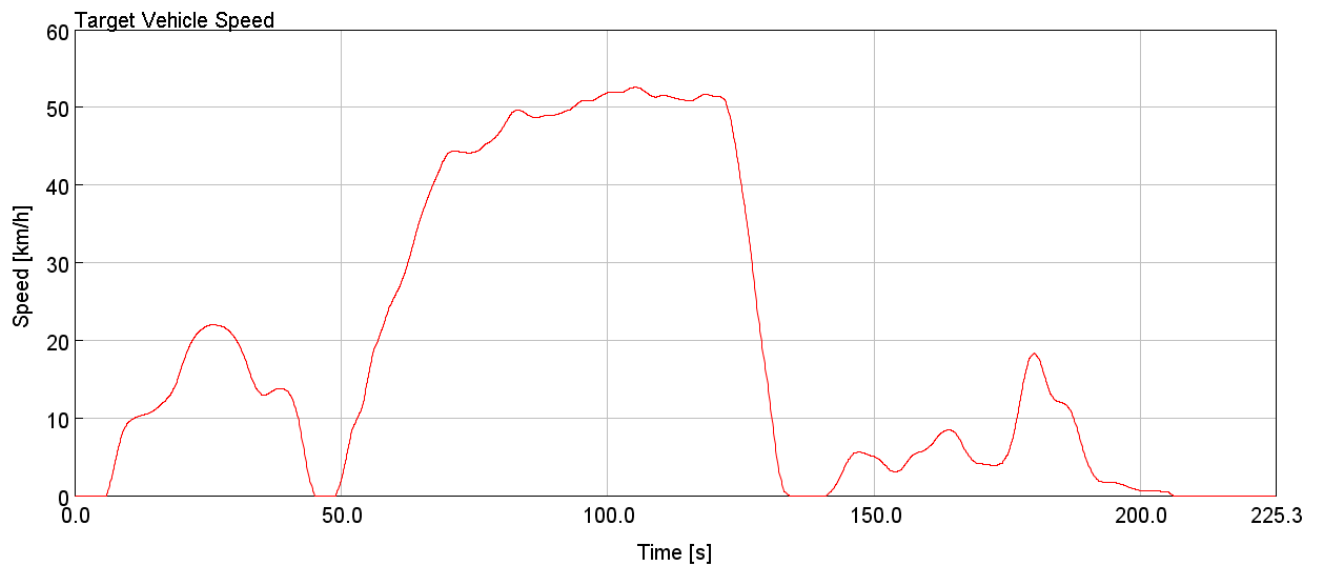
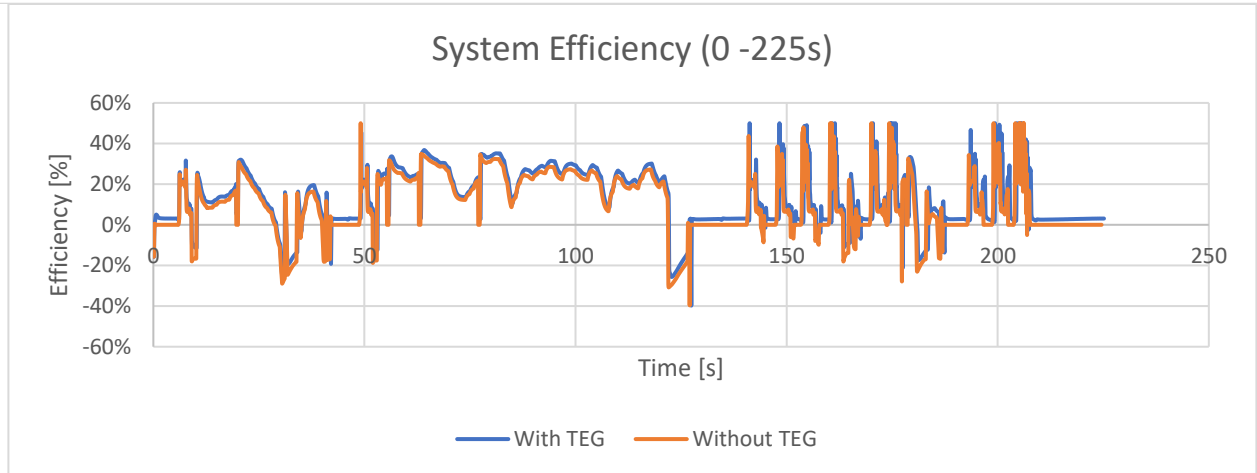
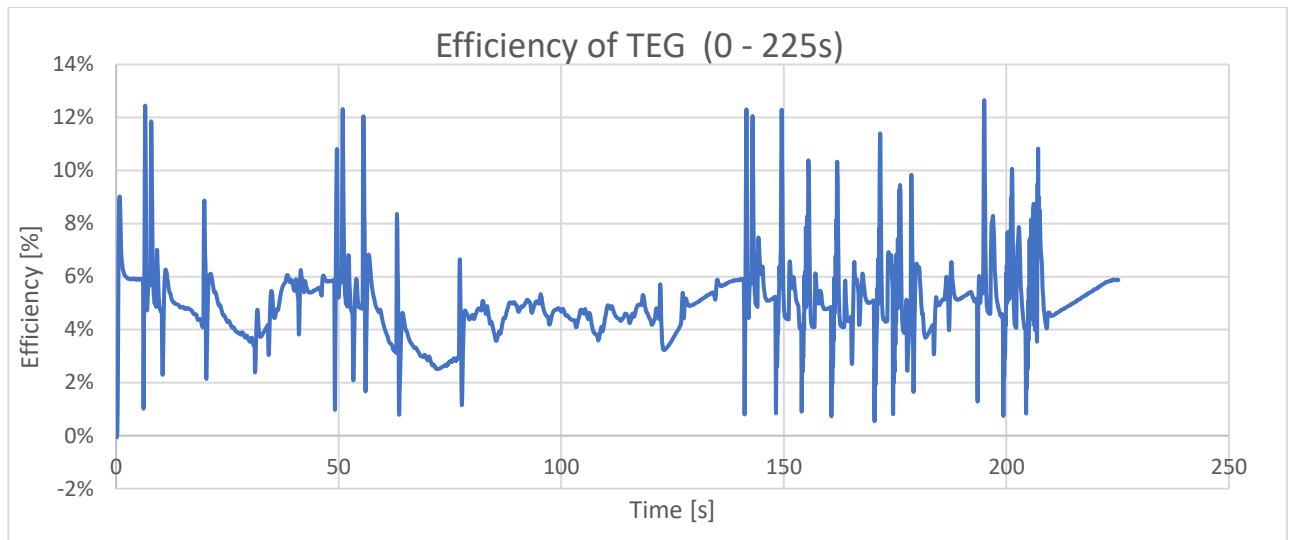
$$\eta_{system} = \frac{P_{el} + P_{out}}{P_{in}} \quad (1.25)$$

Όπου P_{el} , P_{out} , P_{in} είναι η ισχύς που παράγει η γεννήτρια, η ισχύς του κινητήρα και η ισχύς του καυσίμου σε [kW], T_{exh} , T_{amb} είναι η θερμοκρασία εισόδου του καυσαερίου στην γεννήτρια και η θερμοκρασία περιβάλλοντος σε [K], Δp είναι οι απώλειες πίεσης σε [Pa], \dot{V} είναι η ογκομετρική παροχή του καυσαερίου σε [m³/s] και \dot{m} η παροχή μάζας καυσαερίου σε [kg/s].

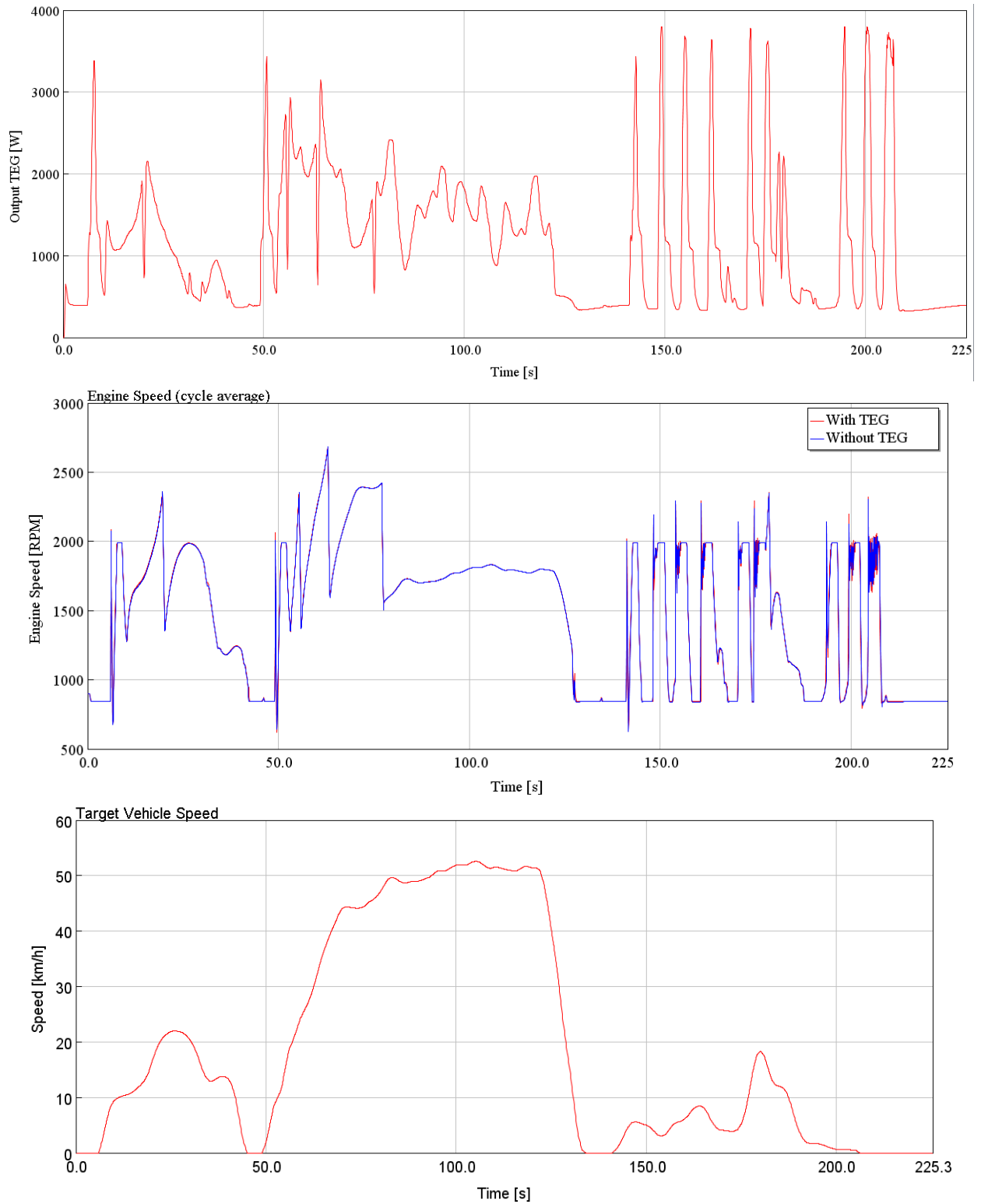
Με βάση τα αποτελέσματα των παρακάτω διαγραμμάτων 4.18 και 4.20 παρατηρείται μια αύξηση του βαθμού απόδοσης του συστήματος και για τα δύο χρονικά διαστήματα του κύκλου WTVC. Για το αστικό κομμάτι ο βαθμός απόδοσης βελτιώθηκε από 13% σε 15% , ενώ για το κομμάτι του αυτοκινητόδρομου βελτιώθηκε από 34% σε 37%. Ο λόγος που η απόδοση του συστήματος έχει μεγαλύτερη αύξηση στο κομμάτι εκτός πόλης είναι διότι ο κινητήρας λειτουργεί σταθερά σε υψηλές στροφές με αποτέλεσμα η γεννήτρια να τροφοδοτείται συνεχώς με παροχή καυσαερίων υψηλής θερμοκρασίας.

Παράλληλα, ο βαθμός απόδοσης της ίδιας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας έχει μέση τιμή κοντά στο 4.7% και πιάνει μέγιστο στο 13% για το διάστημα των 0-225 s, ενώ αντίστοιχα για το

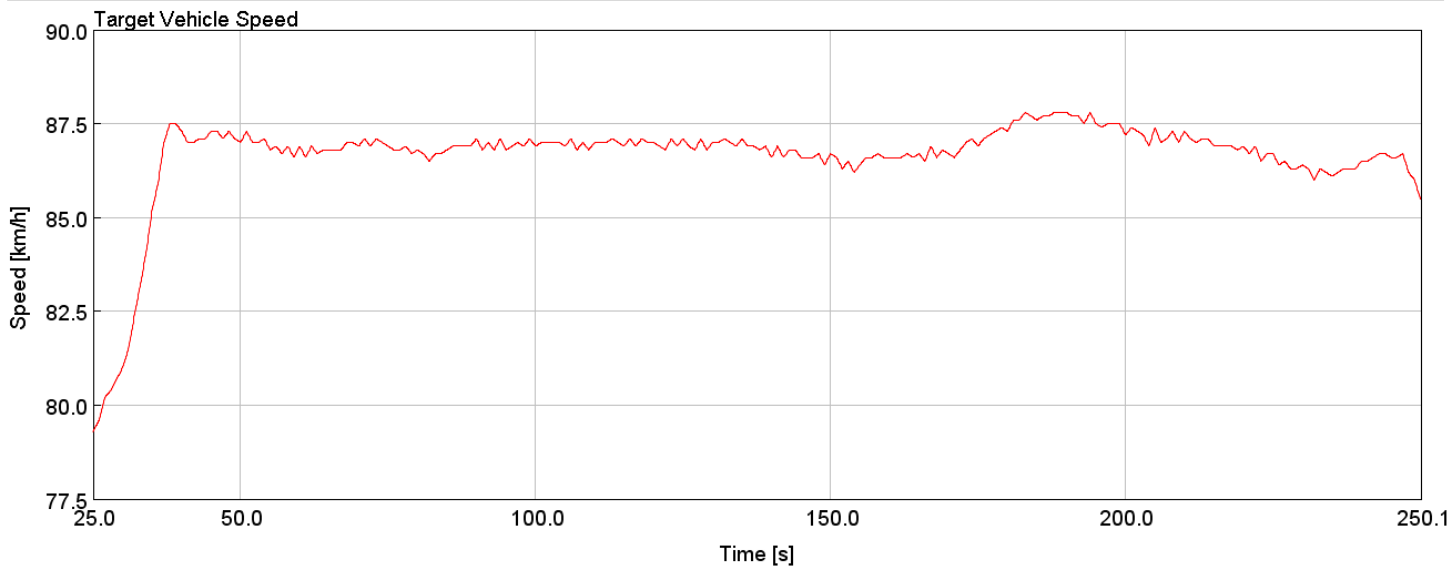
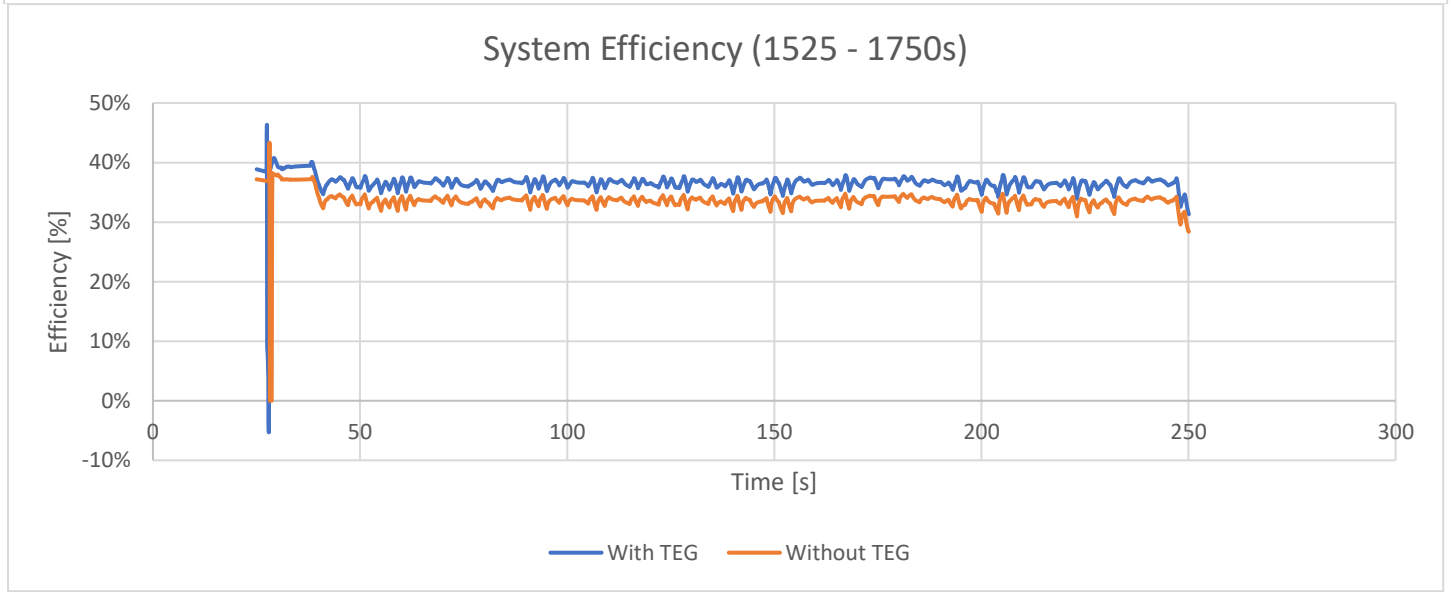
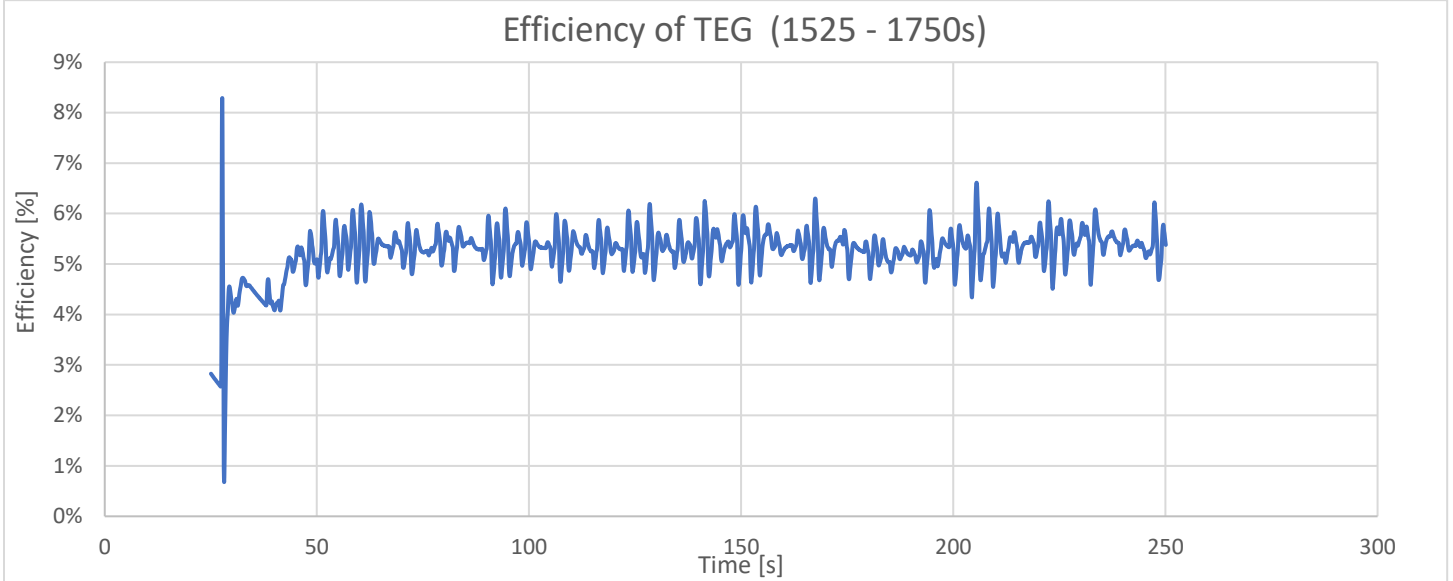
διάστημα των 1525-1750 s είναι 5.2% και 8%. Συγκρίνοντας το διάγραμμα της απόδοσης (4.18 και 4.20) με αυτό της ταχύτητας, προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι μέγιστοι βαθμοί απόδοσης ταυτίζονται με τα σημεία όπου η ταχύτητα έχει πιο απότομη κλίση, το οποίο εξηγεί γιατί ο μέγιστος στιγμιαίος βαθμός απόδοσης της γεννήτριας επιτυγχάνεται στο αστικό κομμάτι, όπου υπάρχουν πιο απότομες μεταβολές ταχύτητας. Επίσης, το ίδιο μπορεί να φανεί και από τα διαγράμματα της ισχύος (4.19 και 4.21), όπου η ισχύς εκτινάσσεται σε κάθε επιτάχυνση όπου οι στροφές του κινητήρα αυξάνουν απότομα, ενώ η τιμή της ισχύος πέφτει κατακόρυφα στα σημεία που γίνονται οι αλλαγές ταχυτήτων από τον οδηγό. Τέλος, όταν ο κινητήρας βρίσκεται σε άφορτη λειτουργία ('ρελαντί'), η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς σταθεροποιείται κοντά στα 360 W.



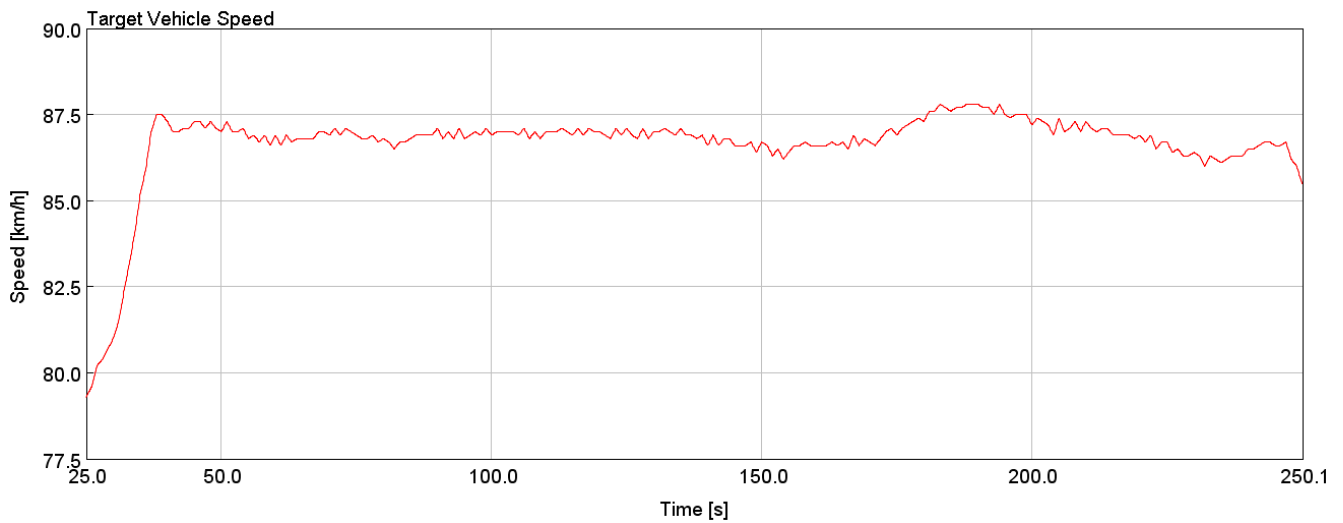
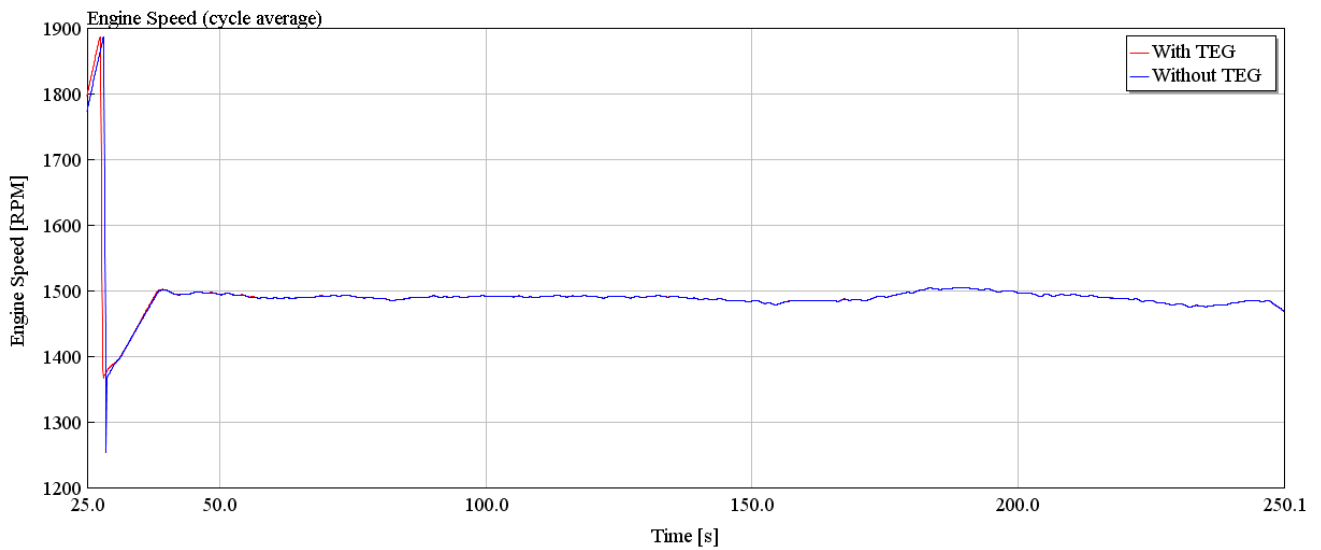
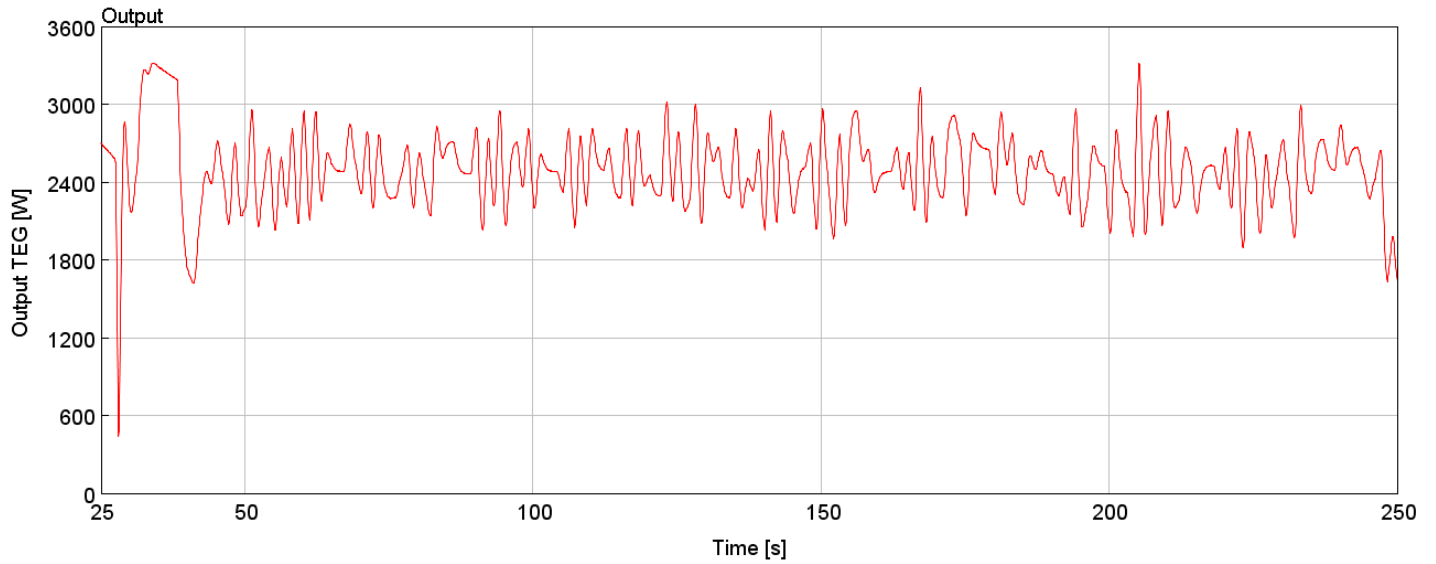
Σχήμα 4.18: Βαθμός απόδοσης TEG και βαθμός απόδοσης συστήματος συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια των 0 - 225s του κύκλου WTV



Σχήμα 4.19: Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από την θερμοηλεκτρική γεννήτρια (TEG) συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια των 0-225s του κύκλου WTVC



Σχήμα 4.20: Βαθμός απόδοσης TEG και βαθμός απόδοσης συστήματος συναρτήσεσι του χρόνου κατά την διάρκεια των 1525 - 1750s του κύκλου WTVC



Σχήμα 4.21: Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από την θερμοηλεκτρική γεννήτρια (TEG) συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια των 1525 - 1750s του κύκλου WTC

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια παραμετρική μελέτη διάφορων μεγεθών που επηρεάζουν την λειτουργία του κινητήρα και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με σκοπό να βρεθεί η επίδρασή τους στην κατανάλωση και στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Επιπρόσθετα θα παρουσιαστούν και τυχόν αλλαγές στις εκπομπές NO_x και αιθάλης, μεγέθη που ενδιαφέρουν επίσης. Αναλυτικότερα, οι παράμετροι που μελετήθηκαν είναι οι εξής:

- Η μάζα του τρέιλερ που είναι φορτωμένο στο όχημα
- Η θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας
- Η απόσταση της γεννήτριας από την έξοδο των καυσαερίων
- Η μετωπική επιφάνεια του οχήματος

Τα μεγέθη μεταβάλλονται ως εξής:

Πίνακας 5.1: Μεταβαλλόμενα μεγέθη παραμετρικής ανάλυσης

Μάζα τρέιλερ (tones)	0	4	7
Θερμοκρασία Ψυκτικού (C)	40	60	80
Μετατόπιση TEG (mm)	150	-	350
Μετωπική Επιφάνεια (m ²)	4	-	6

Επίσης, έχει γίνει και μια μελέτη στην οποία αλλάζει η αντίσταση του εξωτερικού φορτίου, έτσι ώστε να φανεί και η σημασία αυτού του μεγέθους στην λειτουργία της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Το μέγεθος αυτό κανονικά θα ελεγχόταν αυτόματα από το σύστημα MMPT, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, ώστε να επιτυγχάνεται πάντα η μέγιστη μεταφορά ενέργειας.

5.1 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΑΖΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΤΡΕΙΛΕΡ

Η επιλογή των τιμών μάζας του τρέιλερ έγινε έτσι ώστε να προσομοιωθούν όλες οι καταστάσεις φόρτωσης του οχήματος. Συνοπτικά, οι καταστάσεις είναι τρεις: το τρέιλερ είναι άδειο και ζυγίζει 0 t, το οποίο έχει επιλεγεί ως η ονομαστική κατάσταση, το τρέιλερ είναι γεμάτο μέχρι την μέση και ζυγίζει 4 t και τέλος το τρέιλερ είναι γεμάτο και ζυγίζει 7 t. Με αυτόν τον τρόπο θα φανεί η

σημασία της μάζας του οχήματος στην επίδραση της γεννήτριας και κατ' επέκταση στην κατανάλωση και στις εκπομπές CO₂. Παράλληλα θα δειχθεί και η μεταβολή των NO_x και της αιθάλης.

Πίνακας 5.2: Μεταβολή της κατανάλωσης καυσίμου

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα 4 t χωρίς TEG	50.3	20.78
Όχημα 4 t με TEG	49.5	19.98
Ποσοτική μεταβολή	0.8	0.8
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.5 %	-3.9 %

Πίνακας 5.3: Μεταβολή των εκπομπών CO₂

Εκπομπή CO ₂ [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα 4 t χωρίς TEG	1348.9	557
Όχημα 4 t με TEG	1328	535.6
Ποσοτική μεταβολή	20.9	21.4
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.5 %	-3.9 %

Πίνακας 5.4: Μεταβολή των εκπομπών NO_x

Εκπομπή NO _x [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα 4 t χωρίς TEG	18.25	8.25
Όχημα 4 t με TEG	18.24	7.79
Ποσοτική μεταβολή	0.01	0.46
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-0.05 %	-5.6 %

Πίνακας 5.5: Μεταβολή των εκπομπών αιθάλης

Εκπομπή Αιθάλης [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα 4 t χωρίς TEG	0.627	0.124
Όχημα 4 t με TEG	0.624	0.120
Ποσοτική μεταβολή	0.003	0.004
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-0.5 %	-3.3 %

Πίνακας 5.6: Μεταβολή της κατανάλωσης καυσίμου

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα 7 t χωρίς TEG	55	23
Όχημα 7 t με TEG	54.4	22.1
Ποσοτική μεταβολή	0.6	0.9
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.1 %	-3.9 %

Πίνακας 5.7: Μεταβολή των εκπομπών CO₂

Εκπομπή CO ₂ [g/km]	Urban 0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα 7 t χωρίς TEG	1475	617.3
Όχημα 7 t με TEG	1458.5	593.5
Ποσοτική μεταβολή	16.5	23.8
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.1 %	-3.9 %

Πίνακας 5.8: Μεταβολή των εκπομπών NO_x

Εκπομπή NO _x [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα 7 t χωρίς TEG	21.9	11.05
Όχημα 7 t με TEG	21.8	10.76
Ποσοτική μεταβολή	0.1	0.29
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-0.5 %	-2.6 %

Πίνακας 5.9: Μεταβολή των εκπομπών αιθάλης

Εκπομπή Αιθάλης [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα 7 t χωρίς TEG	0.785	0.188
Όχημα 7 t με TEG	0.769	0.185
Ποσοτική μεταβολή	0.016	0.003
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-2.1 %	-1.6 %

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι η μάζα του φορτίου κατέχει σημαντικό ρόλο στην κατανάλωση και τις εκπομπές του οχήματος, καθώς τα μεγέθη αυξάνουν αρκετά με την

παράλληλη αύξηση της μάζας. Όσον αφορά την γεννήτρια, η ποσοτική μείωση που προκαλεί στην κατανάλωση και στις εκπομπές CO₂ στα οχήματα των 4-7 τόνων είναι κοντά στα 0,6-1 L/100km και 16,5-24 g/km αντίστοιχα, το οποίο αποδίδεται στην αύξηση της μέσης θερμοκρασίας των καυσαερίων. Ωστόσο, η ποσοστιαία μείωση ελαττώνεται καθώς η κατανάλωση αυξάνει και πλέον το ποσοστό της μείωσης είναι μικρότερο.

5.2 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΨΥΚΤΙΚΟΥ

Η επιλογή των τιμών της θερμοκρασίας έγινε έτσι ώστε να υπάρχει μια καλή εικόνα της συμπεριφοράς της γεννήτριας όταν το ψυκτικό δεν είναι σε χαμηλή θερμοκρασία. Αυτό είναι ένα συχνό φαινόμενο το οποίο εμφανίζεται σε εφαρμογές οχημάτων, όπου οι θερμοκρασίες του κινητήρα και το υδραυλικό κύκλωμα δεν βοηθούν στην διατήρηση χαμηλών θερμοκρασιών. Συνοπτικά, οι θερμοκρασίες είναι τρεις: το ψυκτικό εισέρχεται στους 40° C, το οποίο είναι και στην κύρια έρευνα, έπειτα στους 60° C και τέλος στους 80° C, το οποίο είναι υψηλή θερμοκρασία για το επιλεγμένο ψυκτικό egl-5050. Με αυτόν τον τρόπο θα φανεί η σημασία του ψυκτικού υγρού στην επίδραση της γεννήτριας και κατ' επέκταση στην κατανάλωση και στις εκπομπές CO₂. Παράλληλα θα δειχθεί και η μεταβολή των NO_x και της αιθάλης.

Πίνακας 4.14: Μεταβολή της κατανάλωσης καυσίμου

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα χωρίς TEG	42.58	18.22
Όχημα με TEG (60°C)	41.93	17.53
Ποσοτική μεταβολή	0.65	0.69
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.5 %	-3.3 %

Πίνακας 4.15: Μεταβολή των εκπομπών CO₂

Εκπομπή CO ₂ [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα χωρίς TEG	1141.4	488.3
Όχημα με TEG (60°C)	1123.7	469.87
Ποσοτική μεταβολή	17.7	17.53
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.5 %	-3.3 %

Πίνακας 4.16: Μεταβολή των εκπομπών NOx

Εκπομπή NO _x [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα χωρίς TEG	13.08	6.65
Όχημα με TEG (60 °C)	12.86	6.34
Ποσοτική μεταβολή	0.23	0.31
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.7 %	-4.7 %

Πίνακας 4.17: Μεταβολή των εκπομπών αιθάλης

Εκπομπή Αιθάλης [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα χωρίς TEG	0.430	0.122
Όχημα με TEG (60 °C)	0.428	0.119
Ποσοτική μεταβολή	0.002	0.003
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-0.5 %	-2.7 %

Πίνακας 4.18: Μεταβολή της κατανάλωσης καυσίμου

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα χωρίς TEG	42.58	18.22
Όχημα με TEG (80 °C)	42	17.6
Ποσοτική μεταβολή	0.58	0.62
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.4 %	-2.9 %

Πίνακας 4.19: Μεταβολή των εκπομπών CO₂

Εκπομπή CO ₂ [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα χωρίς TEG	1141.4	488.3
Όχημα με TEG (80 °C)	1125.5	472.4
Ποσοτική μεταβολή	15.9	15.9
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.4 %	-3.1 %

Πίνακας 4.20: Μεταβολή των εκπομπών NO_x

Εκπομπή NO _x [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα χωρίς TEG	13.08	6.65
Όχημα με TEG (80 °C)	12.84	6.38
Ποσοτική μεταβολή	0.24	0.27
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.8 %	-4.1 %

Πίνακας 4.21: Μεταβολή των εκπομπών αιθάλης

Εκπομπή Αιθάλης [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα χωρίς TEG	0.430	0.122
Όχημα με TEG (80 °C)	0.430	0.120
Ποσοτική μεταβολή	0.0	0.003
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	0 %	-2.2 %

Όπως ήταν αναμενόμενο, η αποτελεσματικότητα της γεννήτριας μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του ψυκτικού. Το ποσοστό μείωσης της κατανάλωσης μικραίνει για τα δύο χρονικά διαστήματα από 1.7% σε 1.4% (0-225 s) και από 4.2% σε 3.1% (1525-1750 s), το οποίο αποτελεί ένα σημαντικό ποσοστό. Επίσης, μεγάλο ποσοστό της παραγόμενης ισχύς χάνεται καθώς, στους 80°C η γεννήτρια παράγει 960 W μέση ισχύ για το 1^ο διάστημα και 1960 W για το 2^ο. Ανάλογη μείωση παρατηρείται και για τους ρύπους NO_x και Soot.

5.3 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΞΟΔΟ ΤΩΝ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ

Η τοποθέτηση της γεννήτριας στο όχημα είναι μια σημαντική απόφαση, η οποία εξαρτάται από τον διαθέσιμο χώρο και από την θερμοκρασία των καυσαερίων. Στη συγκεκριμένη μελέτη έχουν επιλεγεί 2 διαφορετικές αποστάσεις της γεννήτριας από την έξοδο των καυσαερίων στον στρόβιλο. Η πρώτη ήταν 150 mm, η οποία έγινε στην ονομαστική μελέτη και η δεύτερη είναι 350 mm.

Πίνακας 4.22: Μεταβολή της κατανάλωσης καυσίμου

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα χωρίς TEG	42.58	18.22
Όχημα με TEG (350 mm)	41.9	17.56
Ποσοτική μεταβολή	0.68	0.66
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.5 %	-3.6 %

Πίνακας 4.23: Μεταβολή των εκπομπών CO₂

Εκπομπή CO ₂ [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα χωρίς TEG	1141.4	488.3
Όχημα με TEG (350 mm)	1123.8	470
Ποσοτική μεταβολή	17.6	18.3
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.5 %	-3.6 %

Πίνακας 4.24: Μεταβολή των εκπομπών NO_x

Εκπομπή NO _x [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα χωρίς TEG	13.08	6.65
Όχημα με TEG (350 mm)	12.8	6.31
Ποσοτική μεταβολή	0.2	0.34
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.5 %	-5.1 %

Πίνακας 4.25: Μεταβολή των εκπομπών αιθάλης

Εκπομπή Αιθάλης [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα χωρίς TEG	0.430	0.122
Όχημα με TEG (350 mm)	0.422	0.119
Ποσοτική μεταβολή	0.008	0.003
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.8 %	-2.5 %

Η αύξηση της απόστασης προκαλεί μία μείωση στην θερμοκρασία των καυσαερίων κατά 5°C και με την αύξηση του μήκους του σωλήνα προστίθενται στο σύστημα και κάποιες επιπλέον απώλειες

πίεσης. Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα να μειωθεί η ποσοστιαία μεταβολή από 1.7% σε 1.5% για το αστικό κομμάτι και από 4.2% σε 3.6% για τον αυτοκινητόδρομο, όπου οι απώλειες πίεσης λόγω της αυξημένης ταχύτητας των καυσαερίων είναι μεγαλύτερες. Επομένως, φαίνεται η σημασία μιας προμελέτης για το σημείο τοποθέτησης της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας.

5.4 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕΤΩΠΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Στην παρούσα έρευνα το μέγεθος που μεταβλήθηκε είναι η μετωπική επιφάνεια του οχήματος, η οποία από 6 m² μειώθηκε στα 4 m². Στους Πίνακες 4.26-4.29 θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα του οχήματος με την επιφάνεια των 4 m² με και χωρίς την θερμοηλεκτρική γεννήτρια, ώστε να φανεί η επίδραση στην κατανάλωση και στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Πίνακας 4.26: Μεταβολή της κατανάλωσης καυσίμου

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα 4 m ² χωρίς TEG	42.2	16.7
Όχημα 4 m ² με TEG	41.6	14.9
Ποσοτική μεταβολή	0.6	1.8
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.4 %	-4 %

Πίνακας 4.27: Μεταβολή των εκπομπών CO₂

Εκπομπή CO ₂ [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα 4 m ² χωρίς TEG	1131.6	415.9
Όχημα 4 m ² με TEG	1116	399.2
Ποσοτική μεταβολή	15.6	16.7
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.4 %	-4 %

Πίνακας 4.28: Μεταβολή των εκπομπών NO_x

Εκπομπή NO _x [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα 4 m ² χωρίς TEG	12.92	5.22
Όχημα 4 m ² με TEG	12.89	4.89
Ποσοτική μεταβολή	0.03	0.32
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-0.3 %	-6.2 %

Πίνακας 4.29: Μεταβολή των εκπομπών αιθάλης

Εκπομπή Αιθάλης [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα 4 m ² χωρίς TEG	0.429	0.098
Όχημα 4 m ² με TEG	0.428	0.093
Ποσοτική μεταβολή	0.001	0.005
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-0.3 %	-5.6 %

Η μείωση της μετωπικής επιφάνειας του οχήματος προκαλεί και μείωση στην κατανάλωση. Για το πρώτο χρονικό διάστημα που οι ταχύτητες είναι πιο χαμηλές, η μείωση είναι πολύ μικρή, ενώ για το δεύτερο διάστημα η κατανάλωση πέφτει από τα 18.5 L/100km στα 16.5 L/100km. Αυτό το αποτέλεσμα οφείλεται στην αεροδυναμική αντίσταση του οχήματος, η οποία κατέχει σημαντικό ρόλο όταν αναπτύσσονται υψηλές ταχύτητες. Με βάση τους πίνακες 4.26 και 4.27, η αποδοτικότητα της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας δεν επηρεάζεται σημαντικά από την μείωση της μετωπικής επιφάνειας, ωστόσο παρατηρείται μια μικρή ελάττωση της ποσοστιαίας μείωσης της κατανάλωσης και των εκπομπών CO₂, εφόσον το όχημα δεν εργάζεται το ίδιο ‘σκληρά’ για να υπερκεράσει την αντίσταση λόγω του αέρα, με αποτέλεσμα οι στροφές και η θερμοκρασία του καυσαερίου να μειώνονται.

5.5 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Με την μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης του φορτίου που εισάγει η μπαταρία, μπορεί να φανεί η σημασία του συστήματος MPPT. Στην πραγματικότητα έχουν αναπτυχθεί συγκεκριμένοι αλγόριθμοι οι οποίοι μετράνε την τάση που παράγει η εκάστοτε γεννήτρια και μεταβάλουν την αντίσταση φορτίου έτσι ώστε να μεταδίδεται το μέγιστο ποσό ενέργειας. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα ωστόσο, το ηλεκτρικό κύκλωμα δεν είναι ενιαίο και δεν είναι δυνατή η ανάπτυξη ενός τέτοιου αλγόριθμου. Επομένως, έχουν επιλεγεί δύο τιμές της αντίστασης, όπου η πρώτη είναι 1 Ohm και είναι η ονομαστική κατάσταση, και η δεύτερη, η οποία παρουσιάζεται στους παρακάτω Πίνακες 4.30-4.33, είναι για 2 Ohm.

Πίνακας 4.30: Μεταβολή της κατανάλωσης καυσίμου

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα χωρίς TEG	42.58	18.22
Όχημα με TEG (2 Ohm)	42	17.7
Ποσοτική μεταβολή	0.58	0.52
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.4 %	-2.8 %

Πίνακας 4.31: Μεταβολή των εκπομπών CO₂

Εκπομπή CO ₂ [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα χωρίς TEG	1141.4	488.3
Όχημα με TEG (2 Ohm)	1125	475.7
Ποσοτική μεταβολή	16.4	12.6
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.4 %	-2.8 %

Πίνακας 4.32: Μεταβολή των εκπομπών NO_x

Εκπομπή NO _x [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα χωρίς TEG	13.08	6.65
Όχημα με TEG (2 Ohm)	12.79	6.46
Ποσοτική μεταβολή	0.29	0.19
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-2.2 %	-2.9 %

Πίνακας 4.33: Μεταβολή των εκπομπών αιθάλης

Εκπομπή Αιθάλης [g/km]	Urban (0 - 225 s)	Motorway (1525 - 1750 s)
Όχημα χωρίς TEG	0.430	0.122
Όχημα με TEG (2 Ohm)	0.429	0.121
Ποσοτική μεταβολή	0.001	0.001
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-0.25 %	-1.2 %

Με βάση τα αποτελέσματα φαίνεται ότι υπάρχει μείωση της αποτελεσματικότητας της γεννήτριας, καθώς επίσης η παραγόμενη ισχύς μειώνεται στα 780 W για το διάστημα 0 - 225 s και στα 1400 W για το διάστημα 900-1050 s. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι η τιμή της εσωτερικής αντίστασης της γεννήτριας είναι μικρότερη από 2 Ohm και ότι η απομάκρυνση από αυτήν την τιμή προκαλεί σημαντική μείωση στην απόδοση της.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια προσπάθεια προσομοίωσης ενός οχήματος βαρέος τύπου εξοπλισμένο με θερμοηλεκτρική γεννήτρια ώστε να μελετηθούν διάφορες παράμετροι που επηρεάζουν την λειτουργία της και την επίδραση της πάνω στην κατανάλωση και τις εκπομπές CO₂. Με βάση την ανάλυση που έγινε, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Με την προσθήκη της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα αυξάνεται κατά 2-3%, το οποίο οφείλεται στην αποδέσμευση από την ισχύ του εναλλάκτη (alternator), καθώς πλέον αξιοποιείται η ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας για την μερική φόρτιση της μπαταρίας και την κάλυψη κάποιων ηλεκτρικών αναγκών του οχήματος. Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς έχει άμεση συσχέτιση με τις στροφές του κινητήρα και για αυτό είναι πιο αποδοτική στις υψηλές ταχύτητες και κατά την διάρκεια των επιταχύνσεων. Αυτό μπορεί να φανεί και με βάση τους Πίνακες 4.17 και 4.19 όπου η μέγιστη ισχύς, η οποία είναι κοντά στα 3800 W, εμφανίζεται στις πιο απότομες αλλαγές στροφών αλλά και στις μέγιστες τιμές στροφών, φαινόμενα που αξιοποιούνται εξίσου και στις αστικές περιοχές, όπου υπάρχουν πολλές επιταχύνσεις αλλά και στις εκτός πόλης όπου το όχημα έχει μεγάλες ταχύτητες. Επιπλέον, βρέθηκε ότι ο βαθμός απόδοσης της TEG είναι κοντά στο 5 % και η μείωση που προκαλεί στην κατανάλωση του κινητήρα είναι 1.7-4.2%. Επιπλέον, η μείωση της εγχεόμενης ποσότητας καυσίμου προκαλεί μία ανάλογη πτώση στις εκπομπές CO₂ (αλλά και NO_x και αιθάλης).
- Μέσω της παραμετρικής μελέτης διεφάνη ποια μεγέθη είναι περισσότερο σημαντικά για την αποδοτικότητα της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Με βάση τις ποσοτικές μεταβολές και όχι τόσο τις ποσοστιαίες, βγήκε το συμπέρασμα ότι η αλλαγή της μάζας, η μεταβολή της θερμοκρασίας του ψυκτικού, η απόσταση της γεννήτριας από το έξοδο του στροβίλου αλλά και η σωστή λειτουργία του MPPT έχουν σημαντικό ρόλο στην απόδοση της γεννήτριας. Αναλυτικότερα, με την αύξηση της μάζας του τρέιλερ, ο κινητήρας καταναλώνει περισσότερο καύσιμο για να μεταφέρει το φορτίο, με αποτέλεσμα η μέση θερμοκρασία των καυσαερίων να αυξάνει και η γεννήτρια να παράγει παραπάνω ισχύ. Η ποσοτική μείωση της κατανάλωσης για το κομμάτι του αυτοκινητόδρομου σε αυτήν την περίπτωση πηγαίνει από το -0.77 L/100km, το οποίο είναι για το όχημα των 0 τόνων, στο -0.9 L/100km, για το όχημα των 7 τόνων.
- Επίσης, η αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του ψυκτικού έχει ιδιαίτερη σημασία για την απόδοση των θερμοηλεκτρικών μονάδων που βρίσκονται προς το τέλος της ροής των καυσαερίων, καθώς η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην ψυχρή και την θερμή πλευρά μπορεί να μειωθεί μέχρι και 45°C. Στην περίπτωση των 80°C, η ποσοτική μείωση της κατανάλωσης μειώνεται στο -0.62 L/100km από 0.77 L/100km.
- Όσον αφορά την σημασία της σωστής λειτουργίας του συστήματος ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος, αυτή είναι αρκετά μεγάλη, καθώς στην ανάλυση όπου η εξωτερική αντίσταση φορτίου έγινε 2 Ohm, οι τιμές της παραγόμενης ισχύος ήταν οι μικρότερες. Με αυτό το αποτέλεσμα φαίνεται ότι στο συγκεκριμένο παράδειγμα η γεννήτρια είναι πιο αποδοτική όταν η αντίσταση φορτίου είναι χαμηλή, καθώς οι

θερμοηλεκτρικές μονάδες που βρίσκονται προς το τέλος του εναλλάκτη θερμότητας παράγουν μικρότερη τάση στα άκρα τους, με αποτέλεσμα το κλάσμα V/I , το οποίο ορίζει και την ηλεκτρική τους αντίσταση να είναι είτε κοντά στην μονάδα είτε μικρότερο.

- Τέλος, η μείωση της μετωπικής επιφάνειας του οχήματος δεν επηρεάζει σημαντικά την λειτουργία της γεννήτριας, καθώς τα ποσοστά μείωσης παραμένουν τα ίδια ακόμα και όταν το όχημα έχει 2 m^2 μικρότερο εμβαδόν (από 6 σε 4 m^2). Το ίδιο ισχύει και για την απόσταση της TEG από την έξοδο του στροβίλου, καθώς η ροή δεν υπόκειται σε σημαντικές αλλαγές. Ωστόσο, σε περιπτώσεις που η γεννήτρια δεν χωράει να μπει πριν τις αντιρρυπαντικές συσκευές, χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση, διότι τα χαρακτηριστικά της ροής μεταβάλλονται σημαντικά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Ana Sofia Moita, Jorge Martins, Óscar Carvalho, Miguel Coelho. (2022) Assessment of an Exhaust Thermoelectric Generator Incorporating Thermal Control Applied to a Heavy Duty Vehicle
- 2) G. Jeffrey Snyder and Eric S. Toberer. (2008) Complex Thermoelectric Materials. Nature Materials
- 3) Daniel Champier. (2017) Thermoelectric generators: A review of applications. Energy Conversion and Management
- 4) P. Fernández-Yáñez, V. Romero, O. Armas G. Cerretti. (2021) Thermal management of thermoelectric generators for waste energy recovery. Applied Thermal Engineering
- 5) Davide Beretta, Neophytos Neophytou, James M.Hodges. (2019) Thermoelectrics: From history, a window to the future. Materials Science and Engineering: R: Reports
- 6) H. Julian Goldsmid. (2016) The Thermoelectric and Related Effects
- 7) H. J. Goldsmid. Introduction to Thermoelectricity. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2009.
- 8) G. Chen, M S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, J.-P. Fleurial , T. Caillat. (2013) Recent developments in thermoelectric materials. International Materials Reviews
- 9) Simon Lineykin, Shmuel Ben-Yaakov. (2007) Modeling and Analysis of Thermoelectric Modules. IEEE Transactions on Industry Applications
- 10) P. Fernández-Yáñez, V. Romero, O. Armas, G. Cerretti. (2021) Thermal management of thermoelectric generators for waste energy recovery. Applied Thermal Engineering
- 11) Eid S. Mohamed. (2019) Development and performance analysis of a TEG system using exhaust recovery for a light diesel vehicle with assessment of fuel economy and emissions. Applied Thermal Engineering

- 12) C.D. Rakopoulos, E.G. Giakoumis (2009) «Diesel engine transient operation», Springer, London.
- 13) Κ.Δ. Ρακόπουλος, Δ.Θ. Χουντάλας (1998) «Καύση ρύπανση εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 14) E.G. Giakoumis (2016), «Driving and Engine Cycles», Springer, Cham, Switzerland.
- 15) [Καύσιμο ντίζελ - Βικιπαίδεια \(wikipedia.org\)](https://el.wikipedia.org)
- 16) Ε.Γ. Γιακουμής (2019), “Προδιαγραφές Καυσαερίων και Κύκλοι Δοκιμής Εμβολοφόρων ΜΕΚ”, Αθήνα: Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π (ηλεκτρονική έκδοση)
- 17) Α.Μ. Δημάρατος (2011) «Διερεύνηση των εκπομπών ρύπων κατά τη μεταβατική λειτουργία κινητήρων Diesel», Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π. (επιβλέπων: Κ.Δ. Ρακόπουλος).
- 18) Α. Ζαχιώτης (2015) «Πρόβλεψη εκπομπών αιθάλης και μονοξειδίου του αζώτου επιβατικού οχήματος κατά την διάρκεια του παγκόσμιου κύκλου πόλης (WLTP)- Συγκριτική ανάλυση με άλλους κύκλους πόλης», Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π. (επιβλέπων: Ε.Γ. Γιακουμής).
- 19) Ι. Μαντάς (2022) «Μελέτη υβριδικού-ηλεκτρικού οχήματος βαρέος τύπου κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WTVC-Σύγκριση επιδόσεων και εκπομπών με συμβατικό όχημα» Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π. (επιβλέπων: Ε.Γ. Γιακουμής).