



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

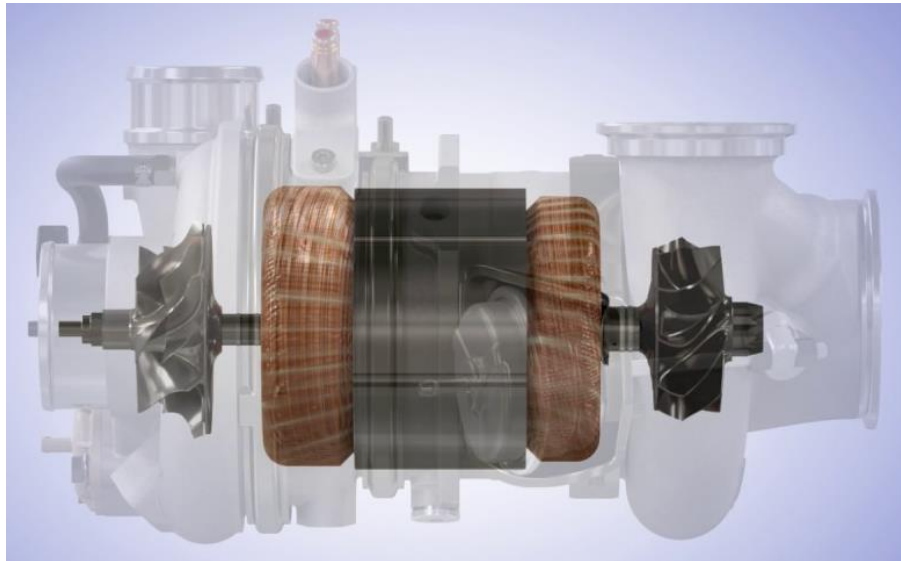
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη επιδόσεων και εκπομπών ρύπων ελαφρού πετρελαιοκίνητου φορτηγού με ηλεκτρικά υποβοηθούμενη στροβιλο-υπερπλήρωση κατά τη διάρκεια του Παγκοσμίου Κύκλου Πόλης WLTC»



Του Προπτυχιακού Φοιτητή

Μπαχτή Χαράλαμπου

Επιβλέπων

Ευάγγελος Γ. Γιακουμής, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 2018

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Ευάγγελο Γιακουμή για την δυνατότητα που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, αλλά κυρίως για την καθοδήγησή του και τον χρόνο που αφιέρωσε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Δ. Χουντάλα καθώς η συνδιδασκαλία του σε όλα τα μαθήματα που αφορούν τις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης, με ώθησε στην περαιτέρω ενασχόληση μου με το συγκεκριμένο αντικείμενο.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και του φίλους μου για την αμέριστη συμπαράσταση και κατανόηση που έδειξαν σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	6
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
ABSTRACT	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Υπερπλήρωση Μ.Ε.Κ.....	13
1.1 Ορισμός υπερπλήρωσης	13
1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της υπερπλήρωσης.....	15
1.3 Μέθοδοι υπερπλήρωσης.....	15
1.3.1 Τρόπος κίνησης του συμπιεστή	16
1.3.2 Σχεδιασμός του συμπιεστή	18
1.3.3 Σύνδεση κινητήρα με την μονάδα υπερπλήρωσης	18
1.4 Βασικές αρχές στροβιλο-υπερπλήρωσης.....	20
1.4.1 Γενικές αρχές.....	20
1.4.2 Ενδιάμεση ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης	21
1.5 Μεταβατική λειτουργία ενός στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα	23
1.6 Ηλεκτρικά υποβοηθούμενη υπερπλήρωση Μ.Ε.Κ.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Σχηματισμός και Εκπομπή Ρύπων από Κινητήρες Diesel	28
2.1 Γενικά	28
2.2 Σχηματισμός των οξειδίων του αζώτου NO _x	29
2.2.1 Γενική περιγραφή	29
2.2.2 Σχηματισμός των NO _x στο θάλαμο καύσης των κινητήρων Diesel	30
2.3 Εκπομπές σωματιδίων.....	32
2.4 Ιδιαιτερότητες εκπομπών καυσαερίων κατά τη μεταβατική λειτουργία υπερπληρωμένων κινητήρων Diesel	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Μεταβατικοί Κύκλοι Πόλης	38
3.1 Εισαγωγή	38
3.2 Συνιστώσες της διαδικασίας δοκιμής.....	40
3.2.1 Δυναμόμετρο.....	40
3.2.2 Γενικά περί μετρήσεων εκπομπών ρύπων κατά τη διάρκεια των μεταβατικών κύκλων	43

3.3 Παγκόσμιος κύκλος πόλης WLTC	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Ανάπτυξη του Μοντέλου Οχήματος μέσω του Υπολογιστικού Πακέτου GT-Power	55
4.1 Γνωριμία με το GT-Suite	55
4.2 Περιβάλλον εργασίας - Γενικά χαρακτηριστικά.....	56
4.3 Δημιουργία του κατάλληλου μοντέλου στο GT-Power.....	57
4.3.1 Γενικές πληροφορίες κινητήρα	57
4.3.2 Μοντέλο οχήματος και συστήματος μετάδοσης κίνησης στο περιβάλλον του GT-Power	59
4.3.3 Μοντέλο ηλεκτρικής υποβοήθησης του στροβιλο-υπερπληρωτή.....	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Επιδόσεις και Εκπομπές Καυσαερίων του Κινητήρα	74
5.1 Εισαγωγή	74
5.2 Επιδόσεις κινητήρα.....	75
5.3 Εκπομπές καυσαερίων κινητήρα.....	95
5.4 Επιδόσεις της ηλεκτρικής υποβοήθησης	104
5.5 Αποτελέσματα παραμετρικών προσομοιώσεων.....	108
5.5.1 Συνολική μάζα οχήματος.....	109
5.5.2 Ισχύς μονάδας μετατροπής ηλεκτρομηχανικής ενέργειας	112
5.6 Συμπεράσματα.....	116
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	118

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Λατινικοί χαρακτήρες

Μέγεθος	Επεξήγηση	Μονάδες
A_f	Μετωπική επιφάνεια οχήματος	m^2
c_d	Συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης οχήματος	-
D	Διάμετρος εμβόλου	m
D_p	Διάμετρος σωματιδίων	m
G_e	Ροπή αδράνειας κινητήρα	$kg \times m^2$
G_v	Ροπή αδράνειας οχήματος	$kg \times m^2$
i_b	Σχέση μετάδοσης διαφορικού	-
i_g	Σχέση μετάδοσης στο κιβώτιο ταχυτήτων	-
L	Μήκος διωστήρα	m
m_v	Μάζα οχήματος	tn
N	Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα	rpm
N_A	Ταχύτητα περιστροφής του τροχού	rpm
N_C	Ταχύτητα περιστροφής στροβιλο-υπερπληρωτή	rpm
N_S	Ταχύτητα περιστροφής του άξονα μετάδοσης κίνησης	rpm
η_{gear}	Συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος μετάδοσης	-

\bar{p}_e	Μέση πραγματική πίεση	bar
r	Ακτίνα στροφάλου	m
r_{wheel}	Ακτίνα τροχού	m
s	Διαδρομή εμβόλου	m
V	Ταχύτητα οχήματος	km/h
V_h	Όγκος εμβολισμού	m ³
z	Αριθμός κυλίνδρων	-

Ελληνικοί χαρακτήρες

Μέγεθος	Επεξήγηση	Μονάδες
ϵ	Βαθμός συμπίεσης	-
λ_a	Λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου	-
φ	Γωνία στροφάλου	°
Φ	Λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα	-

Συντομογραφίες

AFR	Λόγος αέρα-καυσίμου (Air-fuel ratio)
BMEP	Μέση πραγματική πίεση (Brake mean effective pressure)
BSFC	Ειδική κατανάλωση καυσίμου (Brake specific fuel consumption)
CI	Έναυση με Συμπίεση (Compression ignited)

CO	Μονοξείδιο του άνθρακα (Carbon monoxide)
CO₂	Διοξείδιο του άνθρακα (Carbon dioxide)
CVS	Δειγματοληψία σταθερού όγκου (Constant volume sampling)
DI	Άμεσης έγχυσης (Direct injection)
EATC	Ηλεκτρικά Υποβοηθούμενη Στροβιλο-υπερπλήρωση (Electrically Assisted Turbo-Compound)
EGR	Ανακυκλοφορία καυσαερίων (Exhaust gas recirculation)
ETC	Electric Turbo-Compound (Ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης με ηλεκτρική υποβοήθηση)
MGU	Motor/Generator Unit (Μονάδα ηλεκτροκινητήρα/γεννήτριας)
NO	Μονοξείδιο του αζώτου (Nitric oxide)
NO_x	Οξείδια του αζώτου (Oxides of nitrogen)
ORC	Οργανικός Κύκλος Rankine(Organic Rankine Cycle)
SI	Έναυση με Σπινθήρα (Spark Ignited)
TEG	Thermo-Electric Generator (Θερμο-ηλεκτρική γεννήτρια)
WLTC	Παγκόσμιος Κύκλος Πόλης Οχημάτων Ελαφρού Τύπου
MEK (ICE)	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης (Internal Combustion Engine)
4-X	Τετράχρονος

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Λόγω της συνεχούς μείωσης των ορίων εκπομπής CO₂, οι κατασκευαστές επιβατικών αυτοκινήτων και ελαφρών φορτηγών έχουν ωθηθεί τα τελευταία χρόνια σε λύσεις, όπως η μείωση του κυβισμού των κινητήρων σε συνδυασμό με υπερπλήρωση (downsizing), το σύστημα Start /Stop, καθώς και πιο δαπανηρές όπως πλήρεις υβριδικές λύσεις και, πιο πρόσφατα, τεχνολογίες ανάκτησης θερμότητας από τα καυσαέρια. Τέτοιες τεχνολογίες είναι οι θερμο-ηλεκτρική γεννήτρια (TEG), οργανικός κύκλος Rankine (ORC) και ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης με ηλεκτρική υποβοήθηση (ETC) που έχουν εφαρμοστεί σε λίγες εφαρμογές βαρέος τύπου, αλλά δεν έχουν ακόμη αποδειχθεί αποτελεσματικές και οικονομικά προσιτές λύσεις για τα επιβατικά αυτοκίνητα. Από την στιγμή που η μείωση του κυβισμού των κινητήρων δεν μπορεί να είναι απεριόριστη, για να διατηρηθεί ένα λογικό επίπεδο ισχύος σε μικρούς κινητήρες, η υπερπλήρωση είναι υποχρεωτική τόσο για τους κινητήρες Otto όσο και για τους κινητήρες Diesel. Με βάση τα παραπάνω, η δυνατότητα να συνδέεται ένα ηλεκτρομηχανικό σύστημα μετατροπής ενέργειας με το ζεύγος στρόβιλο-συμπίεστη για την ανάκτηση της πλεονάζουσας ενέργειας των καυσαερίων καθίσταται όλο και πιο ελκυστική. Επιπλέον, οι στροβιλο-υπερπληρωτές συχνά δεν έχουν γρήγορη απόκριση λόγω της φύσης της ανταλλαγής ενέργειας με τον κινητήρα, γεγονός που επιδεινώνει την οδηγική συμπεριφορά του οχήματος. Ένας ηλεκτρικά υποβοηθούμενος στροβιλο-υπερπληρωτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της απόκρισης χωρίς οποιεσδήποτε απώλειες στον κινητήρα παρέχοντας ταυτόχρονα ανάκτηση ενέργειας για αύξηση του συνολικού βαθμού απόδοσης του οχήματος.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με το θέμα της ηλεκτρικά υποβοηθούμενης στροβιλο-υπερπλήρωσης ενός εξακύλινδρου κινητήρα Diesel χρησιμοποιούμενου σε επαγγελματικό όχημα ελαφρού τύπου, και την μελέτη αυτού σε μεταβατικές συνθήκες λειτουργίας μέσω του υπολογιστικού πακέτου GT-Power (Gamma Technologies, Inc.). Βασικός στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι η μοντελοποίηση του κινητήρα, του συστήματος υπερπλήρωσης και του οχήματος με

χρήση του υπολογιστικού πακέτου GT-Power, το οποίο είναι ένα εξειδικευμένο λογισμικό μοντελοποίησης με ευρεία χρήση στην βιομηχανία. Η διαδικασία μελέτης της απόκρισης και της εκτίμησης των εκπομπών γίνεται κατά τη διάρκεια του πρόσφατα θεσμοθετημένου στην Ευρώπη παγκόσμιου κύκλου WLTC, ο οποίος έχει από τον Σεπτέμβριο του 2017 αντικαταστήσει τον NEDC στη διαδικασία πιστοποίησης νέων επιβατικών οχημάτων και ελαφρών φορτηγών. Η διερεύνηση του μοντέλου σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας γίνεται με στόχο την κατανόηση και αξιολόγηση των επιδόσεων του κινητήρα και της εκπομπής ρύπων από αυτόν. Η εξέταση στο επίπεδο των ρύπων επικεντρώνεται στους δυο βασικότερους ρύπους των κινητήρων diesel, οι οποίοι είναι τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και η αιθάλη αλλά και στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2).

Τέλος, γίνεται σύγκριση του μοντέλου της ηλεκτρικά υποβοηθούμενης στροβιλο-υπερπλήρωσης με το αντίστοιχο μοντέλο για την απλή υπερπλήρωση σε μεταβατικές συνθήκες λειτουργίας, που είχε ως βάση τον ίδιο κινητήρα και είχε δημιουργηθεί κατά την εκπόνηση παλαιότερης διπλωματικής εργασίας [3], με σκοπό την διερεύνηση του ποσοστού βελτίωσης των εκπομπών ρύπων μέσω της χρήσης ηλεκτρικά υποβοηθούμενης στροβιλο-υπερπλήρωσης.

ABSTRACT

Due to the continuous reduction of the CO₂ emission standards, manufacturers of passenger cars and light-duty trucks have explored solutions that are mainly focused on turbocharging and downsizing of internal combustion engines (ICE). Start/stop systems as well as costlier full hybrid solutions and, more recently, Waste Heat Recovery technologies have also been proposed and realized. The latter include Thermo-Electric Generator (TEG), Organic Rankine Cycle (ORC) and Electric Turbo-Compound (ETC) that have been practically implemented on few heavy-duty applications but have not been proved yet as effective and affordable solutions for passenger cars. Concerning the downsizing concept, to maintain a reasonable power level in small engines, the application of turbocharging is mandatory both for Otto and Diesel engines. Following this aspect, the possibility to couple an electric motor to the turbocharger (electric turbo-compound) to recover the redundant energy of the exhaust gases is becoming more and more attractive. Today's vehicle industry is converging more and more to electrification of vehicles, introducing electrical architectures to cooperate side by side with the combustion engine. Furthermore, turbochargers often lack fast transient response due to the nature of the energy exchange with the engine, which deteriorates the vehicle's drivability. An electrically-assisted turbocharger can also be used for improving the transient response without any parasitic losses to the engine while providing energy recovery for increasing overall system efficiency.

This diploma thesis deals with the issue of electrically assisted turbocharging of a six-cylinder diesel engine used in a light-duty vehicle and the investigation of the engines' performance and emissions during transient operating conditions through the GT-Power computational package (Gamma Technologies, Inc.). The main purpose of this study is to design the engine, the turbocharging system and the vehicle using the GT-Power computational package, which is a specialized software model with wide use in the industry. The process of studying the response and the emission estimation is accomplished for the newly established Worldwide Harmonized Light

Vehicle Test Cycle (WLTC), which has replaced NEDC since September 2017 in the certification of new passenger cars and light-duty trucks. The study of the model under different operating conditions is undertaken to understand and evaluate the performance of the engine and emission of pollutants from it. The emissions studied are the two main pollutants from diesel engines, nitrogen oxides (NO_x) and soot, as well as carbon dioxide (CO_2).

Finally, the model of electrically assisted turbocharged diesel engine is compared to the corresponding model of simple turbocharged diesel engine during transient operating conditions; the latter is based on the same engine and was created during the elaboration of an earlier diplomatic thesis. This comparison aims to investigate the rate of improvement of pollutant emissions through the use of an electrically assisted turbocharger.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Υπερπλήρωση Μ.Ε.Κ.

1.1 Ορισμός υπερπλήρωσης

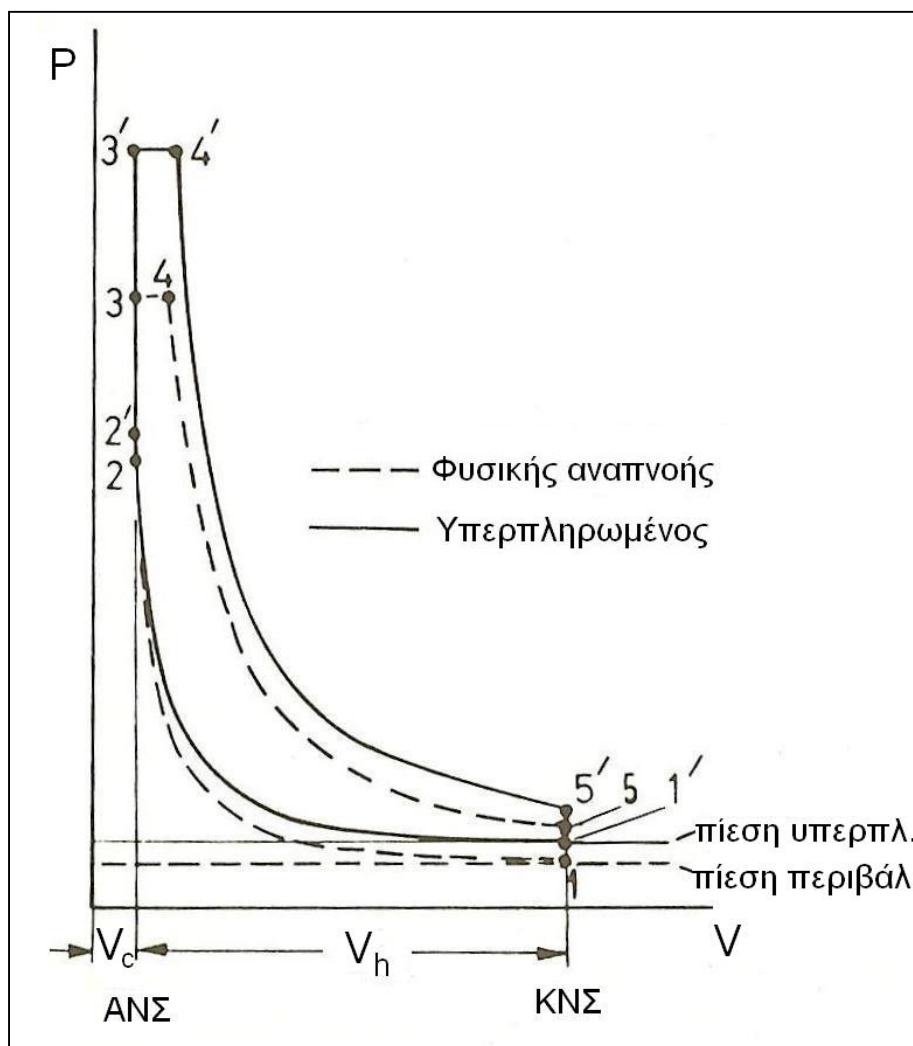
Με τον όρο υπερπλήρωση σε μια Μ.Ε.Κ. ορίζεται η προ-συμπίεση μέρους ή όλης της γόμωσης, εξωτερικά του κυλίνδρου με την χρήση κάποιου μηχανικού μέσου (συμπιεστής). Έτσι το εργαζόμενο μέσο (αέρας) συμπιέζεται τόσο εξωτερικά, όσο και εσωτερικά του κυλίνδρου.

Με αυτόν τον τρόπο αλλά και ταυτοχρόνως με την ενδιάμεση ψύξη (cooling) του αέρα επιτυγχάνεται αρχικά αύξηση της πυκνότητάς του, στην συνέχεια αύξηση της παροχής του αναρροφώμενου αέρα, που οδηγεί σε αύξηση της ποσότητας του καυσίμου που μπορεί να καεί, και συνεπώς σε αύξηση της ισχύος του κινητήρα. Έτσι, ένας υπερπληρωμένος κινητήρας ίδιων διαστάσεων με έναν αντίστοιχο φυσικής αναπνοής μπορεί να επιτύχει σημαντικά υψηλότερη ισχύ.

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται συνοπτικά κάποια τυπικά χαρακτηριστικά κινητήρων Diesel βαρέων φορτηγών κατά τη χρονική περίοδο 1930-1996. Γίνεται εμφανές ότι στο διάστημα 70 χρόνων παρατηρείται ένας τετραπλασιασμός της ισχύος των κινητήρων diesel, χωρίς ουσιαστική μεταβολή του όγκου εμβολισμού τους. Συνεπώς, έχουμε και τετραπλασιασμό της χωρικής ισχύος τους ή τελικά της μέσης πραγματικής πίεσης αυτών \bar{p}_e , με δεδομένο ότι η αντίστοιχη ταχύτητα περιστροφής 'n' αυξήθηκε, το ίδιο χρονικό διάστημα, σε αρκετά μικρότερο βαθμό. Επίσης, στο Σχήμα 1.1 γίνεται σύγκριση του ιδανικού μικτού κύκλου αέρα μεταξύ ενός κινητήρα φυσικής αναπνοής με έναν αντίστοιχο υπερπληρωμένο. Και οι δύο κινητήρες έχουν τον ίδιο βαθμό συμπίεσης ϵ , ενώ αυτό που γίνεται αντιληπτό είναι οι μεγαλύτερες πιέσεις στις οποίες φτάνει ο υπερπληρωμένος κινητήρας καθ' όλη την διάρκεια του θερμοδυναμικού κύκλου [2].

Μέγιστη Ισχύς (kW)	70-110	92-110	110-125	107-132	140-154	283-304	309-441
Μέγιστη Ροπή (Nm)	520-1010	610-660	660-1050	620-1050	680-760	1285-1300	1850-2700
Όγκος Εμβολισμού (L)	16,6	13,5	18,1	11,6	18,7	18,3	18,3
Έτος	1930	1936	1939	1955/6	1960	1985	1996

Πίνακας 1.1: Τυπικά χαρακτηριστικά κινητήρων diesel βαρέων οχημάτων από το 1930-1996 [2].



Σχήμα 1.1: Σύγκριση ιδανικού μικτού κύκλου αέρα φυσικής αναπνοής (123451) και υπερπληρωμένου κινητήρα (1'2'3'4'5'1') με τον ίδιο βαθμό συμπίεσης [2].

1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της υπερπλήρωσης

Τα βασικά πλεονεκτήματα της υπερπλήρωσης, για δεδομένη εξαγόμενη ισχύ από έναν κινητήρα, είναι [2]:

- μικρότερος φυσικός όγκος (μικρότερος αριθμός κυλίνδρων, μικρότερο μέγεθος κινητήρα, 'downsizing').
- χαμηλότερο κόστος ανά μονάδα εξαγόμενης ισχύος, ειδικά για μεγαλύτερων διαστάσεων κινητήρες.
- χαμηλότερες εκπομπές καυσαερίων σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας
- μικρότερο βάρος, μεγαλύτερη ειδική μάζα.
- μικρότερο ποσοστό τριβών λόγω του μικρότερου αριθμού κυλίνδρων.
- μειωμένος θόρυβος στην εξαγωγή λόγω του στροβίλου των καυσαερίων.
- ειδικά σε κινητήρες diesel, μείωση της καθυστέρησης ανάφλεξης λόγω αυξημένων θερμοκρασιών εντός του κυλίνδρου.

Τα μειονεκτήματα της υπερπλήρωσης αντιθέτως είναι τα εξής:

- πιο αργή επιτάχυνση συγκριτικά με αντίστοιχους κινητήρες φυσικής αναπνοής (αναφέρεται κυρίως σε συστήματα στροβιλο-υπερπλήρωσης).
- υψηλότερη θερμική και μηχανική καταπόνηση στα εσωτερικά του κυλίνδρου.
- αυξημένες εκπομπές ρύπων ιδιαίτερα κατά την διάρκεια μεταβατικής λειτουργίας του κινητήρα (κυρίως σε συστήματα στροβιλο-υπερπλήρωσης).

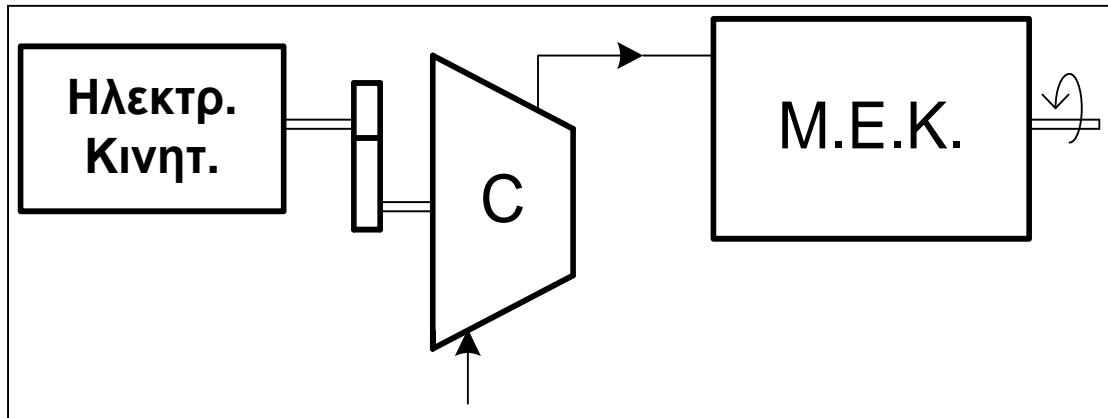
1.3 Μέθοδοι υπερπλήρωσης

Καθ' όλη την διάρκεια της εξέλιξης της υπερπλήρωσης έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι, οι οποίες έχουν βρει έδαφος σε μεγάλο εύρος εφαρμογών. Έτσι, μια πρώτη κατηγοριοποίηση των μεθόδων υπερπλήρωσης μπορεί να γίνει με βάση τα κριτήρια που ακολουθούν ως εξής:

1. Σύμφωνα με τον τρόπο κίνησης του συμπιεστή.
2. Σύμφωνα με τον σχεδιασμό του συμπιεστή.
3. Σύμφωνα με τον τρόπο σύνδεσης της μονάδας υπερπλήρωσης και του κινητήρα.

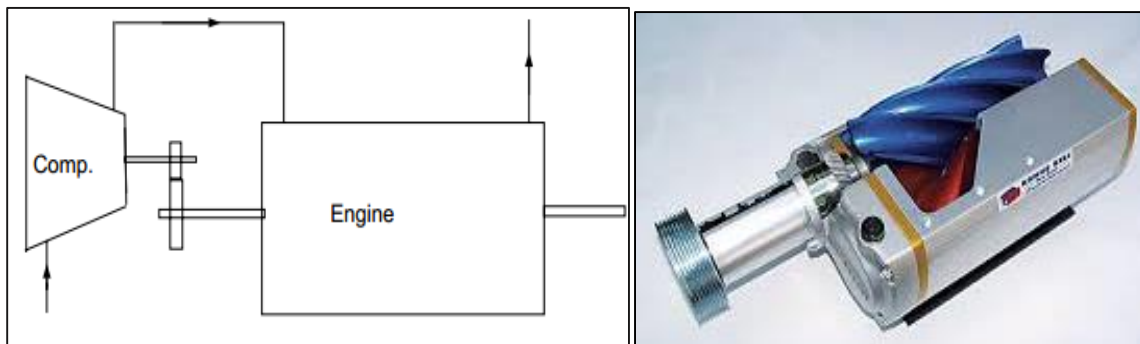
1.3.1 Τρόπος κίνησης του συμπιεστή

A) Εξωτερικά κινούμενος συμπιεστής από κάποιον ηλεκτροκινητήρα ή κάποια βοηθητική διάταξη.



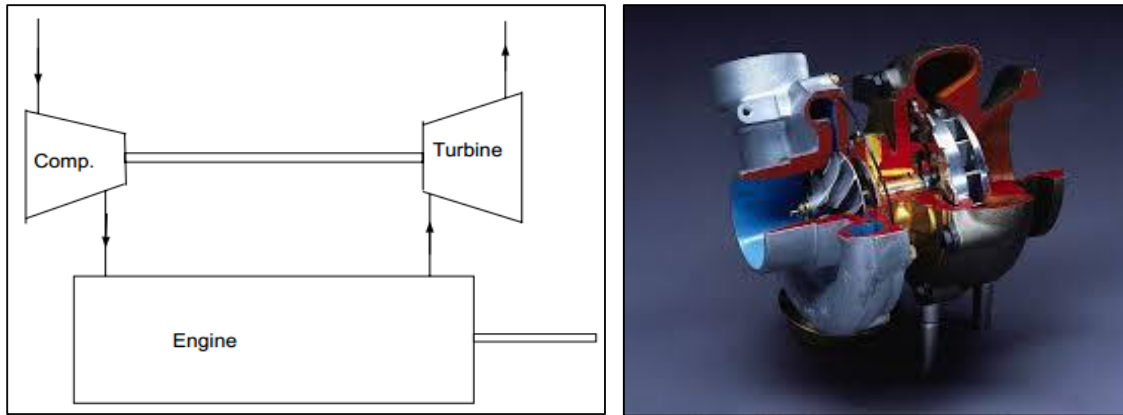
Σχήμα 1.2: Σύστημα υπερπλήρωσης με συμπιεστή κινούμενο από εξωτερικό ηλεκτροκινητήρα [2].

B) Κίνηση από την στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα με απορρόφηση όμως μηχανικού έργου από αυτόν, η οποία ονομάζεται και μηχανική υπερπλήρωση. Κύρια εφαρμογή έχει βρει σε κινητήρες Otto με ή χωρίς ενδιάμεση ψύξη αέρα και με σχέση μετάδοσης που μπορεί να είναι σταθερή ή μεταβλητή.



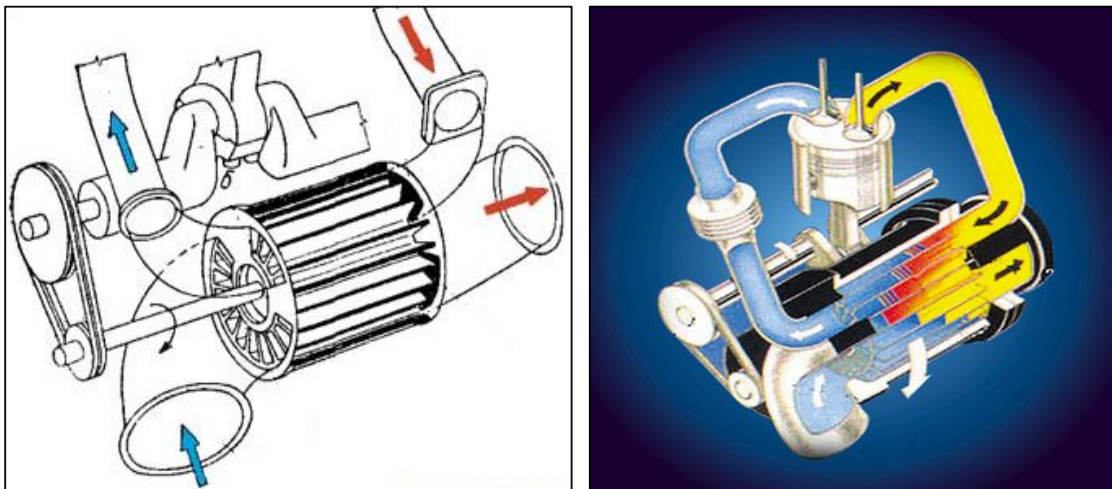
Σχήμα 1.3: Αριστερά: μονογραμμικό σχήμα μηχανικής υπερπλήρωσης, Δεξιά: συμπιεστής κοχλιοειδούς τύπου (Lysholm).

Γ) Κίνηση από στρόβιλο καυσαερίων, η οποία ονομάζεται και στροβιλο-υπερπλήρωση. Αποτελεί τον πλέον διαδεμένο τρόπο υπερπλήρωσης και μπορεί να είναι είτε μονοβάθμια είτε διβάθμια, με ή χωρίς ενδιάμεση ψύξη αέρα.



Σχήμα 1.4: Αριστερά: μονογραμμικό σχήμα στροβιλο-υπερπλήρωσης χωρίς ενδιάμεση ψύξη του αέρα, Δεξιά: τυπικός στροβιλο-υπερπληρωτής.

Δ) Συμπίεση μέσω κύματος πίεσης που προέρχεται από την αποτόνωση του καυσαερίου σε δρομέα με πτερύγια (σύστημα Comprex της εταιρίας Brown Boveri & Co. Ltd).



Σχήμα 1.5: Σύστημα υπερπλήρωσης με την μέθοδο Comprex.

1.3.2 Σχεδιασμός του συμπιεστή

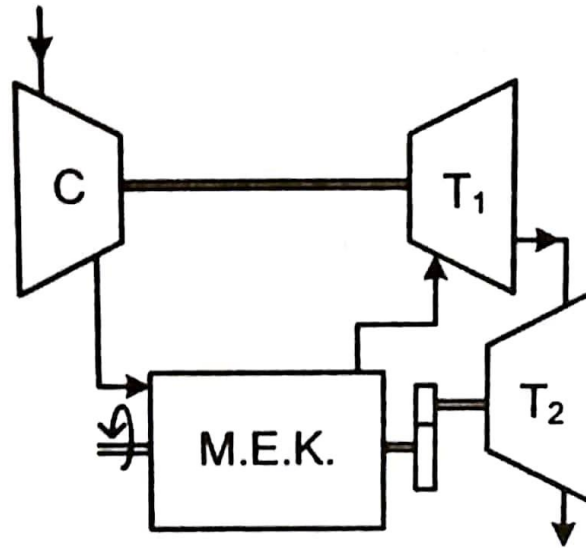
Σε αυτή την κατηγορία διακρίνονται οι συμπιεστές σε δύο ομάδες:

1. Στους συμπιεστές θετικής εκτόπισης με παλινδρομικό ή περιστρεφόμενο έμβολο. Οι συμπιεστές με παλινδρομικό έμβολο χωρίζονται κυρίως στους εμβολοφόρους, στους τύπου στροφαλοθαλάμου και στους τύπου ταλαντούμενων πτερυγίων, ενώ οι συμπιεστές με περιστρεφόμενο έμβολο χωρίζονται στους λοβοειδείς τύπου Roots ή στους κοχλιοειδείς τύπου Lysholm.
2. Στους συμπιεστές δυναμικής ροής. Αυτοί μπορεί να είναι αξονικής, ακτινικής ή μικτής ροής.

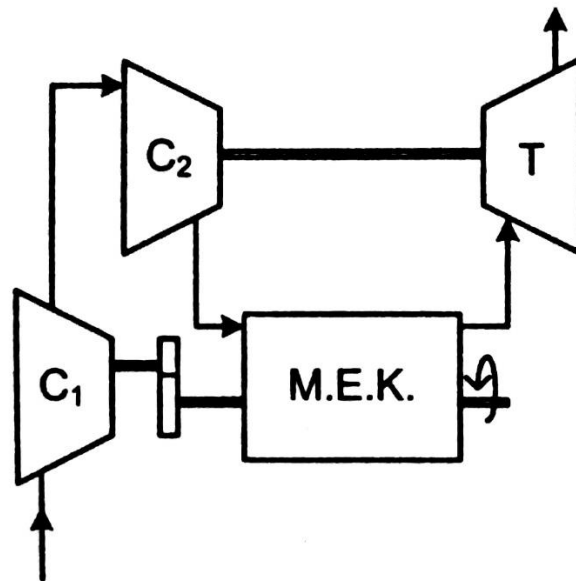
1.3.3 Σύνδεση κινητήρα με την μονάδα υπερπλήρωσης

Όσον αφορά τον τρόπο σύνδεσης του κινητήρα με την μονάδα υπερπλήρωσης και την μεταφορά ισχύος, έχουν αναπτυχθεί οι παρακάτω μέθοδοι:

1. Συμπιεστής συζευγμένος στην στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα (Σχήμα 1.3).
2. Ζεύγος συμπιεστή-στροβίλου χωρίς μηχανική σύνδεση με τον κινητήρα (Σχήμα 1.4).
3. Σύζευξη συμπιεστή-στροβίλου υψηλής πίεσης και στρόβιλος ισχύος χαμηλής πίεσης συνδεδεμένος με την στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα (turbo-compound engines). Κύρια χρήση σε αεροσκάφη (Σχήμα 1.6α).
4. Σύζευξη συμπιεστή-στροβίλου υψηλής πίεσης και συμπιεστή χαμηλής πίεσης στην στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα σε σειρά με το ζεύγος (συνδυασμένη υπερπλήρωση). Κύρια χρήση σε 2-X κινητήρες και σε κινητήρες οχημάτων για την βελτίωση της μεταβατικής τους λειτουργίας (Σχήμα 1.6β).
5. Στρόβιλος ισχύος σε σύνδεση με ζεύγος συμπιεστή και κινητήρα. Η εξαγόμενη ισχύς προέρχεται μόνο από τον στρόβιλο.



(α)



(β)

Σχήμα 1.6: (α) μονογραμμικό σχήμα σύνθετης στροβιλο-υπερπλήρωσης με στρόβιλο ισχύος, (β) μονογραμμικό σχήμα συνδυασμένης υπερπλήρωσης με δύο συμπιεστές σε σειρά [2].

1.4 Βασικές αρχές στροβιλο-υπερπλήρωσης

1.4.1 Γενικές αρχές

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η πιο βασική και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος υπερπλήρωσης είναι η στροβιλο-υπερπλήρωση (turbocharging). Η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει τα περισσότερα πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις υπόλοιπες που αναφέρθηκαν και έχει γνωρίσει την μεγαλύτερη εξέλιξη μέσα από μια πληθώρα εφαρμογών σε κινητήρες Otto ή (κυρίως) Diesel. Σχεδόν πάντα είναι και η υλοποίηση της μεθόδου με τοποθέτηση ενός ψυγείου ώστε να ψύχεται ο αέρας υπερπλήρωσης προτού εισέλθει στους κυλίνδρους, για περαιτέρω αύξηση της πυκνότητάς του (aftercooler). Το ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης αποτελείται συνήθως από έναν φυγοκεντρικό (ακτινικό) συμπιεστή και από έναν ακτινικό (για τις πιο μικρές εφαρμογές) ή έναν αξονικό (για τις μεγαλύτερες εφαρμογές) στρόβιλο ισχύος.

Ο συμπιεστής και ο στρόβιλος είναι μηχανικά συνδεδεμένοι στην ίδια άτρακτο (Σχήμα 1.7) και η ισχύς που απαιτείται για την κίνηση του συμπιεστή παρέχεται από τον στρόβιλο μέσω της αποτόνωσης των καυσαερίων. Το όλο σύστημα αποτελεί μια αρκετά απλή κατασκευή με σημαντικά οφέλη, τα οποία είναι τα εξής: επιτυγχάνεται υψηλή συγκέντρωση ισχύος, μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και δεν υπάρχει απορρόφηση επιπλέον έργου από την Μ.Ε.Κ.

Η αρχή λειτουργίας του ζεύγους έχει ως εξής: ο αέρας περιβάλλοντος αναρροφάται από τον συμπιεστή αυξάνοντας την πυκνότητά του, στη συνέχεια ψύχεται από το ψυγείο που υπάρχει μεταξύ του συμπιεστή και του κινητήρα και οδηγείται στους κυλίνδρους όπου και εξέρχεται ως καυσαέριο πια, οδηγούμενο στον στρόβιλο για να γίνει η εκτόνωσή του και να παραχθεί η απαιτούμενη ισχύς για την κίνηση του συμπιεστή (Σχήμα 1.8).



Σχήμα 1.7: Ζεύγος στροβίλο-υπερπληρωτή (γαλάζιο τμήμα: συμπιεστής, κόκκινο τμήμα: στρόβιλος, κίτρινο τμήμα: λίπανση της ατράκτου).

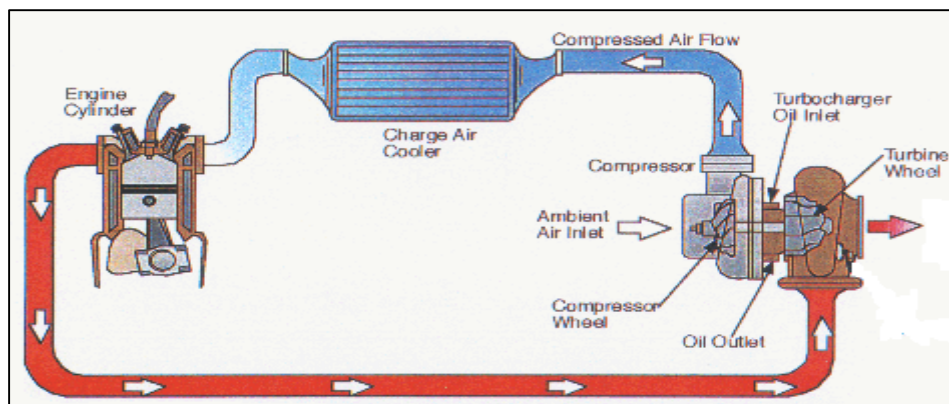
1.4.2 Ενδιάμεση ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης

Πρωταρχικός στόχος της υπερπλήρωσης είναι η αύξηση της πίεσης εισαγωγής στους κυλίνδρους του κινητήρα και άρα η αύξηση της πυκνότητας του αέρα. Ωστόσο είναι αδύνατο να συμπιεστεί ο αέρας χωρίς ταυτόχρονα να αυξηθεί και η θερμοκρασία του, όπως φαίνεται και από την καταστατική εξίσωση των αερίων:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \quad (1.1)$$

Έτσι είναι πιθανό, αν η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα λόγω της συμπίεσής του είναι μεγάλη, να μην επιτυγχάνεται η επιθυμητή αύξηση της πυκνότητάς του. Είναι λοιπόν φανερό, πως η ανύψωση της θερμοκρασίας του αέρα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη και άρα η χρήση ενός ενδιάμεσου ψυγείου κρίνεται στις περισσότερες περιπτώσεις απαραίτητη (Σχήματα 1.8 και 1.9). Επιπλέον, η χρήση του ψυγείου οδηγεί πολλές φορές και στα ακόλουθα ουσιαστικά πλεονεκτήματα:

- Χαμηλότερες θερμοκρασίες στο εσωτερικό των κυλίνδρων και άρα μικρότερη θερμική καταπόνηση του κινητήρα.
- Μειωμένες εκπομπές NO_x, λόγω των μειωμένων θερμοκρασιών.
- Ενίσχυση της έννοιας της υπερπλήρωσης, καθώς με μείωση της θερμοκρασίας του αέρα επιτυγχάνεται περαιτέρω αύξηση της πυκνότητάς του.

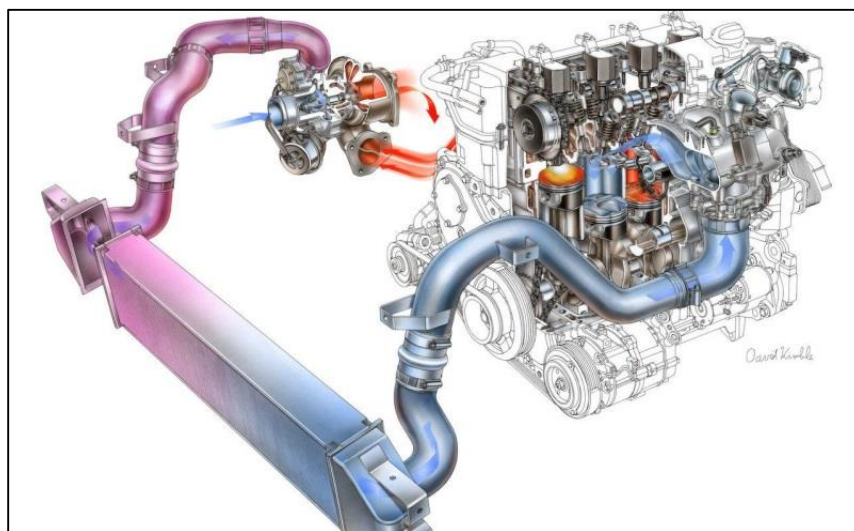


Σχήμα 1.8: Τυπική διάταξη ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης με Μ.Ε.Κ. και ενδιάμεσο ψυγείο.

Παρ' όλα αυτά, αν και η μέθοδος της ψύξης του αέρα εφαρμόζεται συχνά, δεν είναι καθολική σε χρήση και αυτό γιατί παρουσιάζει και κάποια συγκεκριμένα μειονεκτήματα που αναφέρονται στην συνέχεια:

- Απώλειες πίεσης του αέρα καθώς περνά από τις διάφορες επιπλέον σωληνώσεις και μικρή πτώση στην πίεση εισαγωγής του αέρα στους κυλίνδρους.
- Το κόστος της εφαρμογής που όμως τις περισσότερες φορές αντισταθμίζεται από τα οφέλη της ψύξης του αέρα.
- Εύρεση χώρου.

Έτσι, συνήθως η χρησιμοποίηση ή όχι ενός ενδιάμεσου ψυγείου συσχετίζεται κάθε φορά με την εκάστοτε εφαρμογή.



Σχήμα 1.9: Διάταξη στροβιλο-υπερπλήρωσης και Μ.Ε.Κ. με έμφαση στο ενδιάμεσο ψυγείο.

1.5 Μεταβατική λειτουργία ενός στρόβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα

Ως μεταβατική κατάσταση λειτουργίας (transient) ενός κινητήρα diesel ορίζεται το τμήμα εκείνο της λειτουργίας του κατά το οποίο είτε η ταχύτητα περιστροφής του είτε το φορτίο του ή και τα δύο μεταβάλλονται χρονικά μέχρι την επίτευξη μιας κατάστασης ισορροπίας [6]. Η μεταβολή του φορτίου είναι η συνήθης κατάσταση μεταβατικής λειτουργίας για βιομηχανικούς κινητήρες, ενώ η μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής είναι αυτή που χαρακτηρίζει κυρίως την μη μόνιμη λειτουργία για κινητήρες οχημάτων. Όπως είναι φανερό, ένας κινητήρας οχήματος εργάζεται σχεδόν πάντα σε μη μόνιμες συνθήκες λόγω των διαφορετικών συνθηκών που επικρατούν κάθε φορά στο δρόμο. Η μεταβατική λειτουργία ενός κινητήρα χρήζει ιδιαίτερης προσοχής και μελέτης, λόγω του φαινομένου της υστέρησης του υπερπληρωτή.

Η υστέρηση του υπερπληρωτή μπορεί να γίνει κατανοητή αν σκεφτεί κανείς τις λειτουργίες που λαμβάνουν χώρα σ' έναν κινητήρα κατά την φάση μιας μεταβατικής κατάστασης. Το κύριο χαρακτηριστικό είναι η έλλειψη μηχανικής σύνδεσης μεταξύ κινητήρα και ζεύγους υπερπλήρωσης. Κατά την αύξηση στροφών ή φορτίου του κινητήρα, το παραγόμενο από το στρόβιλο έργο, πρέπει πρώτα να υπερνικήσει την αδράνεια του ζεύγους, ώστε στην συνέχεια να μπορέσει να επιταχύνει τον συμπιεστή, που με την σειρά του θα τροφοδοτήσει τον κινητήρα με την αυξημένη παροχή αέρα που απαιτείται για να αντιμετωπιστεί το αυξημένο φορτίο ή για να επιτευχθεί η επιθυμητή αύξηση στροφών. Ουσιαστικά, αυτό που συμβαίνει κατά την περίοδο αύξησης του φορτίου ή της ταχύτητας περιστροφής κινητήρα diesel είναι η έγχυση μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου, χωρίς όμως να είναι διαθέσιμη το ίδιο άμεσα και η απαιτούμενη παροχή αέρα από τον συμπιεστή, αφού ο στρόβιλος που τον κινεί δεν έχει προλάβει να αυξήσει το παραγόμενο έργο αποτόνωσης.

Έτσι, στις πρώτες χρονικές στιγμές μετά από μια απότομη αύξηση στροφών ή φορτίου, παρατηρείται ανακολουθία ανάμεσα στην αυξημένη παροχή καυσίμου και στην χαμηλή ποσότητα του αναρροφώμενου αέρα, με αποτέλεσμα ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου να πέφτει σε χαμηλές τιμές και να επικρατούν τότε

υψηλές εκπομπές καπνού και NO_x, μέχρι να επανέλθει ο κινητήρας σε μια σταθερή κατάσταση λειτουργίας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υστέρηση του υπερπληρωτή ή turbocharger lag, στην διεθνή ορολογία [6].

1.6 Ηλεκτρικά υποβοηθούμενη υπερπλήρωση M.E.K.

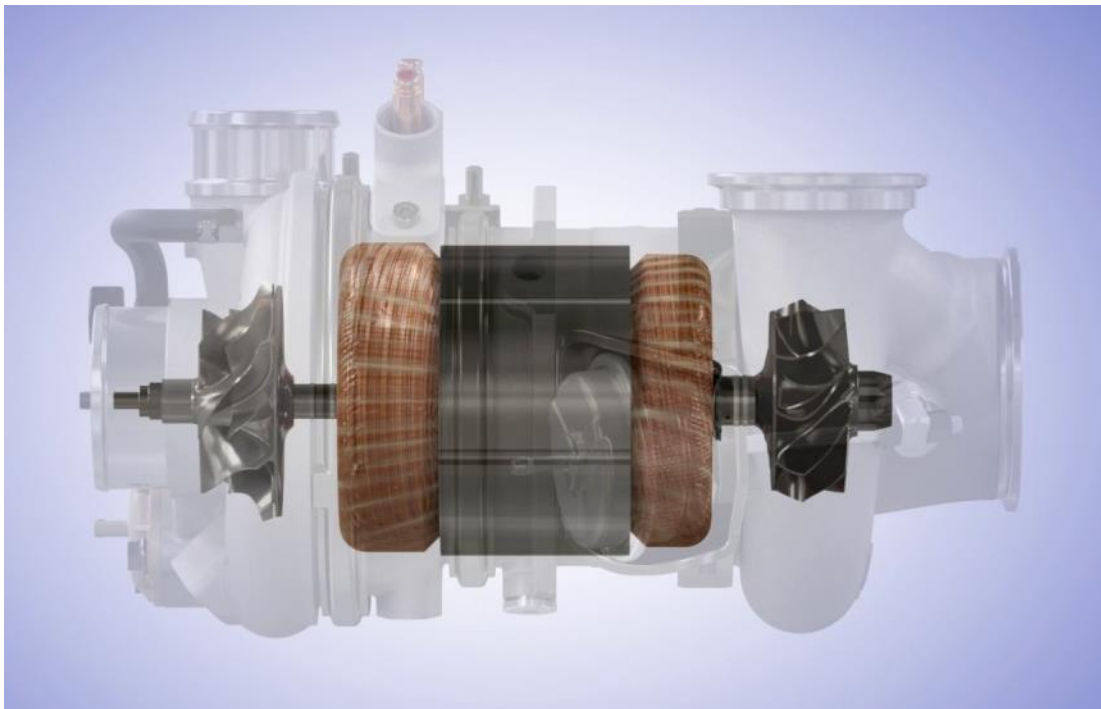
Από τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης των μηχανών εσωτερικής καύσης άρχισαν προσπάθειες για υπερπλήρωση των κινητήρων. Τα πρώτα βήματα για την υλοποίηση αυτής της ιδέας έγιναν στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, ενώ από τη δεκαετία του 1920 γεννήθηκε η ιδέα για την υποβοήθηση του στροβιλο-υπερπληρωτή με ηλεκτροκινητήρα. Η ιδέα εξελίχθηκε με την πάροδο των ετών, αλλά δεν ήταν τεχνικά δυνατόν μέχρι το 1980 να υπάρξει ένας ηλεκτρικά υποβοηθούμενος στροβιλο-υπερπληρωτής.

Ένα τέτοιο σύστημα για να υλοποιηθεί χρειάζεται σαφώς η υπερπλήρωση του κινητήρα να γίνεται με ζεύγος στροβίλου-συμπιεστή που λειτουργούν ανεξάρτητα από τον κινητήρα (δηλαδή χωρίς μηχανική σύνδεση με τον κινητήρα) και επίσης ένα ηλεκτρομηχανικό σύστημα μετατροπής ενέργειας. Τα βασικά τμήματα ενός e-turbo είναι:

- ο στρόβιλος,
- ο συμπιεστής,
- ο ηλεκτροκινητήρας,
- η μπαταρία, και
- ένας αναστροφέας (inverter).

Βεβαίως, ανάλογα με την φύση και τις απαιτήσεις του οχήματος μπορεί να υπάρξουν παραπάνω τμήματα, όπως η βαλβίδα εκτόνωσης καυσαερίων (Waste Gate) και άλλα. Έντονο ενδιαφέρον όμως για την τεχνολογία αυτή εμφανίστηκε μετά από το 2010. Αυτό το ενδιαφέρον αναπτύχθηκε πρωτίστως λόγω των δυνατοτήτων της τεχνολογίας να συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, αφενός μέσω της μείωσης του κυβισμού των κινητήρων (downsizing) και αφετέρου βελτιώνοντας την απόδοση του κινητήρα στα χαμηλά φορτία λειτουργίας (βελτίωση καμπύλης

ροπής) και την απόκρισή του σε μεταβατική λειτουργία. Ο κυριότερος στόχος αυτής της εφαρμογής είναι η μείωση του turbo-lag και επομένως η κύρια λειτουργία του είναι ο ηλεκτροκινητήρας να παρέχει ισχύ στο ζεύγος υπερπλήρωσης κάθε φορά που το όχημα χρειάζεται να επιταχύνει. Ως γνωστόν [2], σε συνθήκες χαμηλού φορτίου και εκκίνησης, η ενέργεια των καυσαερίων είναι πολύ χαμηλή, με αποτέλεσμα να μην επαρκεί για την παροχή της απαιτούμενης ροής αέρα, οπότε απαιτείται κάποια μορφή βοήθειας. Με την ενσωμάτωση ενός ηλεκτροκινητήρα στην άτρακτο του στροβιλο-υπερπληρωτή, είναι δυνατή η χρήση του υπερπληρωτή στα χαμηλά φορτία του κινητήρα. Κάθε φορά που ο οδηγός πατάει το πεντάλ του “γκαζιού” ενώ ο κινητήρας δουλεύει σε χαμηλές στροφές (και επομένως ο στρόβιλος δεν έχει την απαραίτητη ισχύ) μπαίνει σε λειτουργία ο ηλεκτροκινητήρας και προσφέρει την απαραίτητη μηχανική ισχύ στον συμπιεστή ώστε να συμπιέσει μεγαλύτερη ποσότητα αέρα και έτσι να αυξηθεί άμεσα η ροπή, άρα και οι στροφές του κινητήρα και έτσι το όχημα να φτάσει την επιθυμητή ταχύτητα πιο γρήγορα. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος είναι η τοποθέτηση του ηλεκτροκινητήρα, ανάμεσα στο συμπιεστή και το στρόβιλο, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



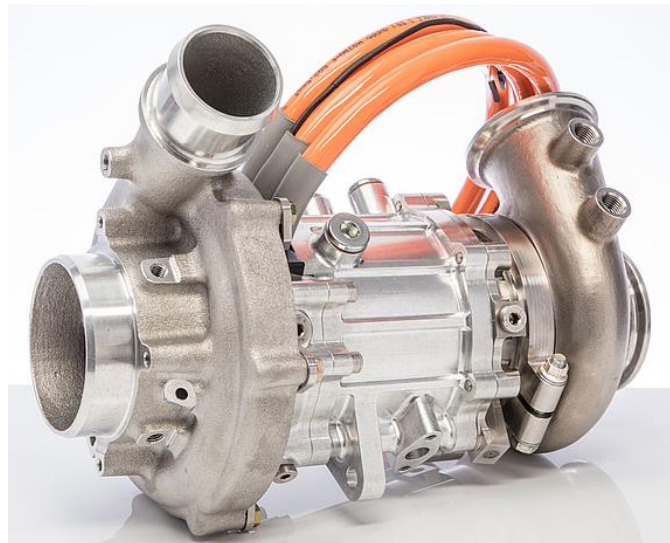
Σχήμα 1.10: Ενσωματωμένος ηλεκτροκινητήρας στο μέσο του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης [16].

Από την άλλη πλευρά, τα τελευταία χρόνια, η απόδοση των στροβιλο-υπερπληρωτών έχει βελτιωθεί σημαντικά και σε συνδυασμό με πολλές νέες τεχνολογίες, όπως στροβιλο-υπερπληρωτές με μειωμένη ροπή αδρανείας, στροβίλους με πτερύγια μεταβλητής γεωμετρίας (VGT), χρήση στροβίλου μικρότερων διαστάσεων με παράλληλη χρήση βαλβίδας εκτόνωσης (waste gate), έχει ως αποτέλεσμα (μεγάλο) μέρος της ενέργειας των καυσαερίων να απορρίπτεται (κυρίως στα υψηλά φορτία) λόγω του ότι δεν υπάρχει κάποιος λόγος αξιοποίησης, καθώς ο κινητήρας τροφοδοτείται με την απαραίτητη ποσότητα αέρα. Επιπλέον με την απόρριψη αυτή, απογεύγονται φαινόμενα υπερτάχυνσης (overspeeding) του ζεύγους υπερπλήρωσης καθώς και υπερβολικών πιέσεων (overboosting) εντός του κυλίνδρου. Γι'αυτό, αντί για την ενσωμάτωση ενός απλού ηλεκτροκινητήρα στο ζεύγος υπερπλήρωσης είναι δυνατή η ενσωμάτωση ενός συνδυασμού ηλεκτροκινητήρα/γεννήτριας μεγάλης ταχύτητας που λειτουργεί ως «βοηθός» του συμπιεστή όταν λειτουργεί σε χαμηλό φορτίο ο κινητήρας ενώ στα υψηλά φορτία χρησιμοποιεί την περίσσεια ενέργεια των καυσαερίων για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Επομένως, η ηλεκτρικά υποβοηθούμενη υπερπλήρωση μπορεί να έχει και μία επιπλέον λειτουργία, η οποία είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η λειτουργία αυτή ενεργοποιείται όταν η ισχύς του στροβίλου είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη από τον συμπιεστή ισχύ, π.χ. όταν ο οδηγός αφήνει το πεντάλ του “γκαζιού”. Σε αυτή την περίπτωση, η επιπλέον ενέργεια που λαμβάνεται μέσω του στροβίλου από τα καυσαέρια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω της γεννήτριας και είτε χρησιμοποιείται από το δίκτυο είτε αποθηκεύεται στην μπαταρία. Σε έναν ηλεκτρικά υποβοηθούμενο στροβιλο-υπερπληρωτή (EATC), η γεννήτρια κινητήρων υψηλής ταχύτητας είναι ενσωματωμένη στο ζεύγος στροβίλου-συμπιεστή που θα κάνει τον EATC τόσο συμπαγή όσο και το απλό σύστημα στροβιλο-υπερπλήρωσης, και επομένως δεν απαιτούνται σημαντικές αλλαγές στον κύριο κινητήρα. Λόγω της συμπαγούς λύσης του EATC, ο ηλεκτροκινητήρας/γεννήτρια μπορεί να τοποθετηθεί στην πλευρά του συμπιεστή, πράγμα που θα διευκολύνει την ψύξη του ηλεκτροκινητήρα/γεννήτριας με τη βοήθεια αέρα, νερού ψύξης ή του λιπαντικού.

Όπως προαναφέρθηκε, ο ηλεκτρικά υποβοηθούμενος στροβιλο-υπερπληρωτής (EATC) είναι ενσωματωμένος στο ζεύγος του υπερπληρωτή, προσφέροντας

μηχανική ισχύ με τον ηλεκτροκινητήρα, και επομένως καθίσταται δυνατόν να αναπτυχθεί ο απαραίτητος λόγος πίεσης από τον συμπιεστή. Με αυτόν τον τρόπο, υπάρχει επαρκής ποσότητα αέρα για μια αποδοτική και καθαρότερη καύση. Επομένως, εκτός από τον βασικό στόχο που είναι η βελτίωση της απόκρισης του οχήματος, με τη βοήθεια του EATC είναι δυνατό να μειωθεί η ειδική κατανάλωση καυσίμου κατά τη διάρκεια υψηλών ταχυτήτων. Το EATC μπορεί να προσφέρει ακόμα περισσότερα στην βελτίωση της κατανάλωσης καυσίμου, στην επίτευξη καλύτερης καμπύλης ροπής από τον κινητήρα και στην μείωση του κινδύνου πάλμωσης του στροβίλο-υπερπληρωτή, λειτουργώντας τον ηλεκτροκινητήρα και σαν γεννήτρια.

Κλείνοντας, ένα παράδειγμα χρήσης της τεχνολογίας αυτής είναι η δοκιμή που διεξήχθη το έτος 2012 από τους Ono, Shiraishi και Yamashita σε θαλάσσια εφαρμογή, όπου ο στόχος ήταν να δουν τι θα μπορούσε να επιτευχθεί με ένα EATC σε σκάφος. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής ήταν η απόδοση του υπερπληρωτή, η ισχύς εξόδου, το φορτίο του κινητήρα και τι θα συμβεί στο ζεύγος όταν εμφανίζονται ξαφνικές αλλαγές φορτίου. Ο κινητήρας που επιλέχθηκε για τη δοκιμή ήταν ένας πετρελαιοκινητήρας χαμηλών στροφών. Η δοκιμή έδειξε ότι το EATC θα μπορούσε να αρχίσει να παραδίδει ισχύ στο σκάφος σε φορτίο κινητήρα 60% και σε φορτίο κινητήρα 75%, το EATC θα μπορούσε να παρέχει επαρκή ισχύ για να υποστηρίξει τις απαιτήσεις ισχύος ολόκληρου του σκάφους. [18,19,25]



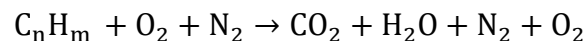
Σχήμα 1.11: Διάταξη ηλεκτρικά υποβοηθούμενης στροβίλο-υπερπλήρωσης [29].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Σχηματισμός και

Εκπομπή Ρύπων από Κινητήρες Diesel¹

2.1 Γενικά

Ο σχηματισμός των ρυπογόνων ουσιών που εκπέμπονται από τους κινητήρες οχημάτων οφείλεται στη χημική διάσταση των προϊόντων της καύσης που προκαλείται από τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στον θάλαμο καύσης, οι οποίες τοπικά φθάνουν ακόμη και τους 3000 Κ. Δεχόμενοι την παραδοχή ότι η καύση είναι τέλεια καθώς και ότι δεν υφίσταται χημική διάσταση, τα προϊόντα της δίνονται από το ακόλουθο γενικό σχήμα χημικής αντίδρασης:



Πρέπει να τονιστεί, πως στην παραπάνω αντίδραση δεν έχουν τοποθετηθεί οι στοιχειομετρικοί συντελεστές και κατά συνέπεια έχει μόνο ποιοτική σημασία.

Στην πραγματικότητα, όμως, τα προϊόντα της τέλει καύσης υφίστανται διάσταση, με συνέπεια την εμφάνιση των ακόλουθων ριζών και ενώσεων σε αυτά: H₂O, H₂, O₂, N₂, N, O, OH, H, CO, CO₂, NO, HC κ.λπ. καθώς και αρκετών άλλων όπως είναι οι αλδεΐδες, κετόνες, O₃ κ.λπ.

Από αυτές τις αέριες ρυπογόνες ουσίες, οι κυριότερες είναι τα NO_x, CO και HC, οι οποίες μαζί με την αιθάλη (καπνό) που εκπέμπεται από τους κινητήρες Diesel αποτελούν τους λεγόμενους ελεγχόμενους ρύπους (regulated emissions), των οποίων τα επίπεδα συγκέντρωσης στα καυσαέρια της εξαγωγής των εμβολοφόρων κινητήρων είναι νομοθετημένα σε αναπτυγμένες χώρες (ΕΕ, Η.Π.Α., Ιαπωνία), ακολουθώντας πρότυπες συσκευές και μεθόδους μέτρησης.

Οι τρεις αυτοί αέριοι ρύποι εμφανίζονται και στις δύο κατηγορίες εμβολοφόρων κινητήρων, δηλαδή Diesel και Otto, παρουσιάζουν όμως αρκετά σημαντικές

¹ Για περισσότερες λεπτομέρειες βλ. Παραπομπές [3,4], από όπου προέρχεται και η συγκεκριμένη ανάλυση.

διαφορές στη συγκέντρωσή τους στο καυσαέριο της εξαγωγής (χωρίς πρόσθετα μέσα περιστολής). Πιο συγκεκριμένα:

- Τα NO_x εμφανίζονται σε σημαντικά ποσοστά της ίδιας τάξης μεγέθους και στις δύο κατηγορίες κινητήρων, παρουσιάζοντας όμως λίγο μεγαλύτερες τιμές στους κινητήρες Otto.
- Το CO είναι δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο στους κινητήρες Otto και κατά συνέπεια δεν αποτελεί σημαντικό ρύπο για τους κινητήρες Diesel.
- Τα επίπεδα εκπομπής των HC στους κινητήρες Diesel είναι μια τάξη μεγέθους χαμηλότερη από τους κινητήρες Otto.

Σημειώνεται, επίσης, ότι εντοπίζονται διαφοροποιήσεις και ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα (π.χ. Diesel άμεσης ή έμμεσης έγχυσης).

Εκτός από τους αέριους ρύπους, παρατηρείται και εκπομπή στερεών σωματιδίων (particulates) από τους εμβολοφόρους κινητήρες. Τα σωματίδια που εκπέμπονται από τους κινητήρες Diesel αποτελούν την αιθάλη (soot) που σχηματίζεται κατά την καύση, ενώ όσον αφορά τους κινητήρες Otto οι εκπομπές αιθάλης είναι σχεδόν μηδαμινές.

Στη συνέχεια ακολουθεί αναφορά στους μηχανισμούς σχηματισμού των κύριων ρύπων που εμφανίζονται σε κινητήρες Diesel, δηλαδή των NO_x και της αιθάλης, καθώς και στην επίδραση των διαφόρων παραμέτρων λειτουργίας του κινητήρα πάνω σε αυτούς τους μηχανισμούς. Όσον αφορά στις εκπομπές HC και CO, οι ποσότητές τους είναι πολύ μικρές, έτσι ώστε να μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.

2.2 Σχηματισμός των οξειδίων του αζώτου NO_x

2.2.1 Γενική περιγραφή

Ο όρος οξείδια του αζώτου NO_x περιλαμβάνει το μονοξείδιο του αζώτου NO, το διοξείδιο του αζώτου NO_2 καθώς και ίχνη άλλων οξειδίων του αζώτου (όπως το N_2O_5) που σχηματίζονται στο θάλαμο καύσης των εμβολοφόρων κινητήρων. Το NO_2 εκπέμπεται, όμως, σε αρκετά μικρότερο ποσοστό από ότι το NO, επομένως όταν

αναφερόμαστε σε σχηματισμό NO_x στον κινητήρα αναφερόμαστε κατά κύριο λόγο στο μονοξείδιο του αζώτου. Εντούτοις, στα χαμηλά φορτία των κινητήρων Diesel κατ' εξαίρεση τα ποσοστά του NO₂ δεν μπορούν να θεωρηθούν αμελητέα, καθώς αποτελούν το 10-25% των συνολικών εκπεμπόμενων οξειδίων του αζώτου.

Το NO σχηματίζεται στις περιοχές υψηλής θερμοκρασίας εντός της καιόμενης ζώνης, με την προϋπόθεση ότι υπάρχει και η απαραίτητη ποσότητα οξυγόνου. Στη συνέχεια κατά τη φάση της αποτόνωσης, καθώς ορισμένες αντιδράσεις που συμμετέχουν στο σχηματισμό του NO «παγώνουν» λόγω της πτώσης της θερμοκρασίας, το καυσαέριο της εξαγωγής περιέχει συγκεντρώσεις NO αρκετά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της χημικής ισορροπίας για την ίδια θερμοκρασία. Συνεπώς, στο σχηματισμό του NO καθοριστικό παράγοντα αποτελεί η χημική κινητική των αντιδράσεων και όχι η χημική ισορροπία.

2.2.2 Σχηματισμός των NO_x στο θάλαμο καύσης των κινητήρων Diesel

2.2.2.1 Γενικά

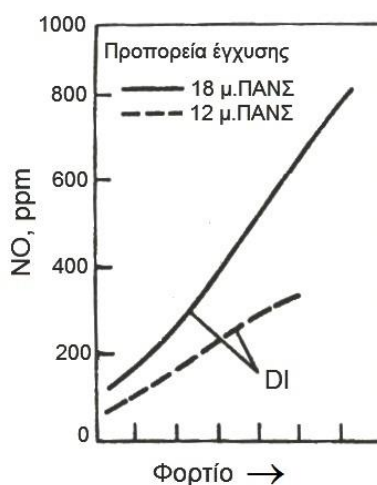
Στους κινητήρες Diesel λόγω του ότι το καύσιμο εγχέεται στο θάλαμο καύσης σε υγρή μορφή και ύστερα πραγματοποιείται η ανάμειξή του με τον αέρα, παρατηρείται μεγάλη στρωμάτωση στην κατανομή της θερμοκρασίας καθώς και στη συγκέντρωση του καυσίμου εντός του κυλίνδρου. Έτσι τα NO_x σχηματίζονται μόνο σε ορισμένες περιοχές, στις οποίες οι συνθήκες που επικρατούν το επιτρέπουν. Το μεγαλύτερο ποσοστό των NO_x σχηματίζεται κατά κύριο λόγο κατά το δεύτερο στάδιο της καύσης, δηλαδή αυτό της ανεξέλεγκτης καύσης, όπου η φλόγα είναι τύπου προανάμειξης, με τιμές του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα κοντά στη μονάδα και θερμοκρασία ιδιαίτερα υψηλή, λόγω του συγκεκριμένου τύπου φλόγας.

Κατά το τρίτο στάδιο της καύσης (ελεγχόμενη καύση), εξαιτίας της συνεχούς εξάπλωσης της δέσμης του καυσίμου, οι ζώνες αντίδρασης έρχονται σε επαφή με τον ψυχρό αέρα που τις περιβάλλει, με αποτέλεσμα την πτώση της θερμοκρασίας τους και το «πάγωμα» των αντιδράσεων διάσπασης του NO σε αρκετά υψηλές τιμές και λίγο πιο νωρίς συγκριτικά με τους κινητήρες Otto.

2.2.2.2 Επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας στην τιμή των NO_x

A) Επίδραση του φορτίου

Αυξανόμενου του φορτίου παρατηρείται εν γένει αύξηση της συγκέντρωσης των NO_x στα καυσαέρια, εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας στη ζώνη αντίδρασης και λόγω της ύπαρξης αρκετών περιοχών με συγκέντρωση αέρα-καυσίμου γύρω από τη στοιχειομετρική τιμή. Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζεται η εξάρτηση αυτή για τους κινητήρες Diesel άμεσης έγχυσης (DI). Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι στους κινητήρες αυτούς η εκπομπή NO αυξάνεται συνεχώς αυξανόμενου του φορτίου.



Σχήμα 2.1: Επίδραση προπορείας έγχυσης και φορτίου στην παραγωγή NO_x σε κινητήρα Diesel άμεσης έγχυσης (DI) [3].

B) Επίδραση της προπορείας έγχυσης του καυσίμου

Με την αύξηση της προπορείας έγχυσης, παρατηρείται αύξηση των παραγόμενων εκπομπών NO_x στους κινητήρες Diesel άμεσης έγχυσης, εξαιτίας της σημαντικής αύξησης της πίεσης και θερμοκρασίας των αερίων εντός του θαλάμου καύσης, όπως επίσης φαίνεται και στο Σχήμα 2.1.

Γ) Επίδραση του ποσοστού του παραμένου καυσαερίου

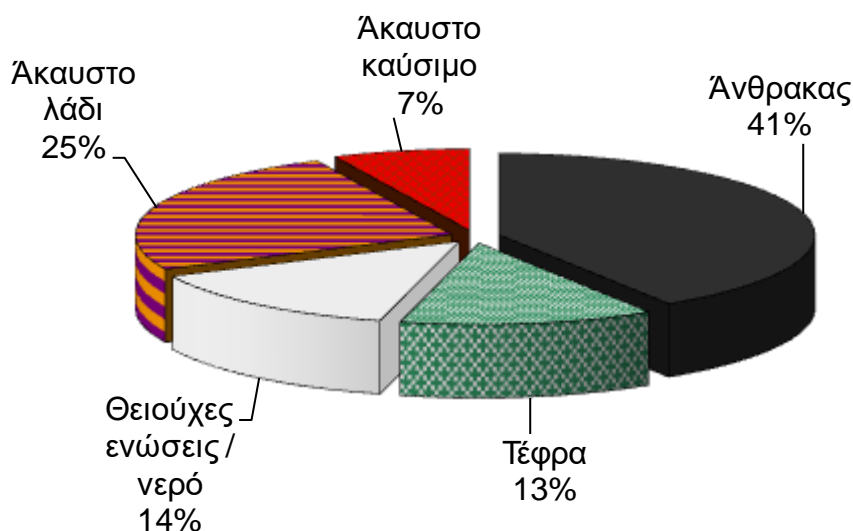
Η αύξηση του ποσοστού του παραμένου καυσαερίου του θαλάμου καύσης οδηγεί σε σημαντική μείωση της συγκέντρωσης των NO_x. Η αιτία του φαινομένου

αυτού είναι η αύξηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας του περιβάλλοντος μέσου με αποτέλεσμα την πτώση της πίεσης και της θερμοκρασίας εντός της ζώνης αντίδρασης. Παρόμοια είναι ουσιαστικά και η επίδραση της ανακυκλοφορίας καυσαερίου (EGR).

2.3 Εκπομπές σωματιδίων

Τα σωματίδια, που προέρχονται από την καύση του πετρελαίου, αποτελούνται κυρίως από ανθρακούχο υλικό (αιθάλη) παραγόμενο κατά τη διάρκεια της καύσης, στο οποίο έχουν απορροφηθεί κάποια οργανικά συστατικά (προερχόμενα κυρίως από άκαυστο καύσιμο και λιπαντικό έλαιο κινητήρα). Τα σωματίδια κατανέμονται σε ένα πλατύ εύρος μεγεθών από 20 nm έως 10 μm, χαρακτηριστικό που τα καθιστά αναπνεύσιμα. Συχνά γίνεται ο διαχωρισμός των σωματιδίων αυτών σε ένα διαλυτό οργανικό μέρος και σε ένα μη διαλυτό, από τα οποία το δεύτερο χρησιμοποιείται συχνά ως μία εκτίμηση του ποσού της αιθάλης.

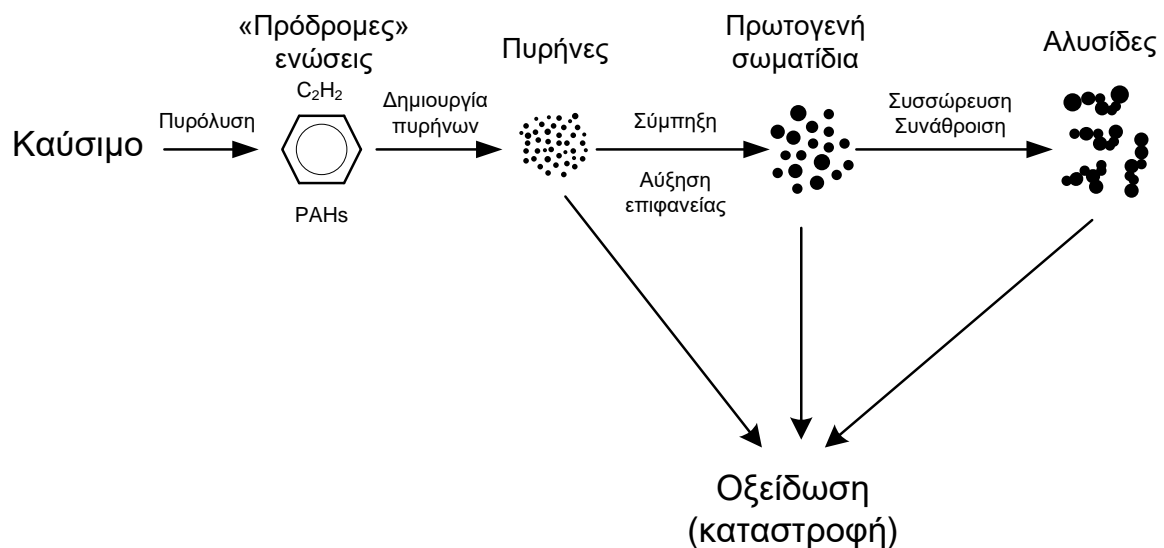
Το ποσοστό της αιθάλης που περιέχεται στα σωματίδια από την εξάτμιση κινητήρα Diesel ποικίλει, αλλά είναι συνήθως υψηλότερο του 40-50%. Επιπρόσθετες ουσίες που περιέχονται στα σωματίδια είναι: άκαυστο καύσιμο ή λιπαντικό έλαιο κινητήρα ή και προερχόμενα από μερική καύση, τρίμματα μετάλλων από φθορά καθώς επίσης και άλατα από τα καύσιμα (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Τυπική σύσταση στην εξάτμιση κινητήρα Diesel βαρέος τύπου (φορτηγού) κατά τη διάρκεια δοκιμής σε Κύκλο Πόλης [4].

Το κλάσμα των θειούχων ενώσεων είναι προσεγγιστικά ανάλογο του κλάσματος σε περιεχόμενο θείου από το καύσιμο, άρα εξαιρετικά μειωμένο τα τελευταία χρόνια. Το κλάσμα που σχετίζεται με το άκαυστο καύσιμο/λάδι κινητήρα (διαλυτό οργανικό κλάσμα) ποικίλει ανάλογα με τη σχεδίαση του κινητήρα και τις συνθήκες λειτουργίας. Έχει εύρος που ξεκινά από τιμές μικρότερες του 10 % έως ποσοστά που ξεπερνούν το 90 %.

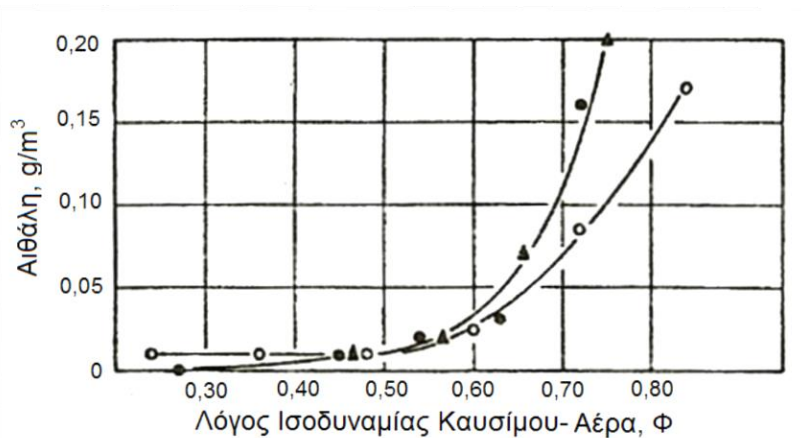
Η αιθάλη δημιουργείται από άκαυστο καύσιμο το οποίο σχηματίζει σωματίδια από την αέρια φάση στη στερεά σε περιοχές πλούσιες σε καύσιμο και με υψηλές θερμοκρασίες. Ανάλογα με τις περιβάλλουσες συνθήκες που επικρατούν, υδρογονάνθρακες ή άλλα διαθέσιμα μόρια συμπυκνώνονται ή απορροφώνται από την αιθάλη. Η εξέλιξη της υγρής - ή αέριας - φάσης των υδρογονανθράκων σε στερεά σωματίδια αιθάλης περιλαμβάνει έξι κοινά αναγνωρισμένες διαδικασίες (Σχήμα 2.3):



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα μηχανισμού σχηματισμού και καταστροφής σωματιδίων εντός θαλάμου καύσης κινητήρα Diesel [4].

- Πυρόλυση (Pyrolysis): ενδόθερμη διαδικασία που μεταβάλλει τη μοριακή δομή του καυσίμου υπό υψηλή θερμοκρασία και παράγει ενώσεις όπως οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), που θεωρούνται πρόδρομοι της αιθάλης.

- Σχηματισμός πυρήνων (Nucleation): δημιουργία πυρήνων ή νανοσωματιδίων από ασταθή υλικά όπως οι υδρογονάνθρακες
- Επιφανειακή αύξηση (Surface growth): διαδικασία προσθήκης μάζας στην επιφάνεια ενός σωματιδίου αιθάλης.
- Σύμπληξη (Coagulation): βίαιες συγκρούσεις των σφαιρικών σωματιδίων που οδηγούν στην ένωσή τους και το σχηματισμό μεγαλύτερων σωματιδίων.
- Συσσώρευση (Agglomeration): Τα σωματίδια παραμένουν ενωμένα για να σχηματίσουν μεγάλες ομάδες σε δομή αλυσίδας.
- Οξείδωση (Oxidation): διαδικασία που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια κάθε σταδίου από τα παραπάνω, κυρίως όταν επικρατούν θερμοκρασίες υψηλότερες των 1300 K, όπου η αιθάλη καίγεται υπό την παρουσία οξειδωτικών στοιχείων και σχηματίζει αέρια προϊόντα όπως CO, CO₂, H₂O.



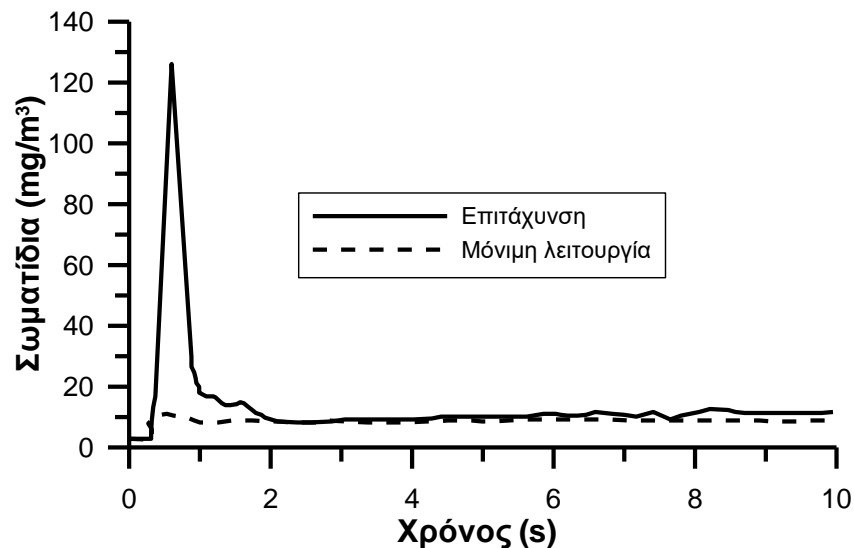
Σχήμα 2.4: Επίδραση του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα (Φ) στις εκπομπές αιθάλης [3].

Μεταξύ των σημαντικότερων παραγόντων που έχουν βρεθεί ότι επηρεάζουν τη συγκέντρωση του αριθμού των σωματιδίων και την κατανομή του μεγέθους τους είναι ο τύπος του καυσίμου που χρησιμοποιείται, με προτιμητέα τα καύσιμα με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο για μειωμένες γενικά εκπομπές σωματιδίων, αν και έχει παρατηρηθεί μια αύξηση στη συγκέντρωση των νανο-σωματιδίων. Όμοια

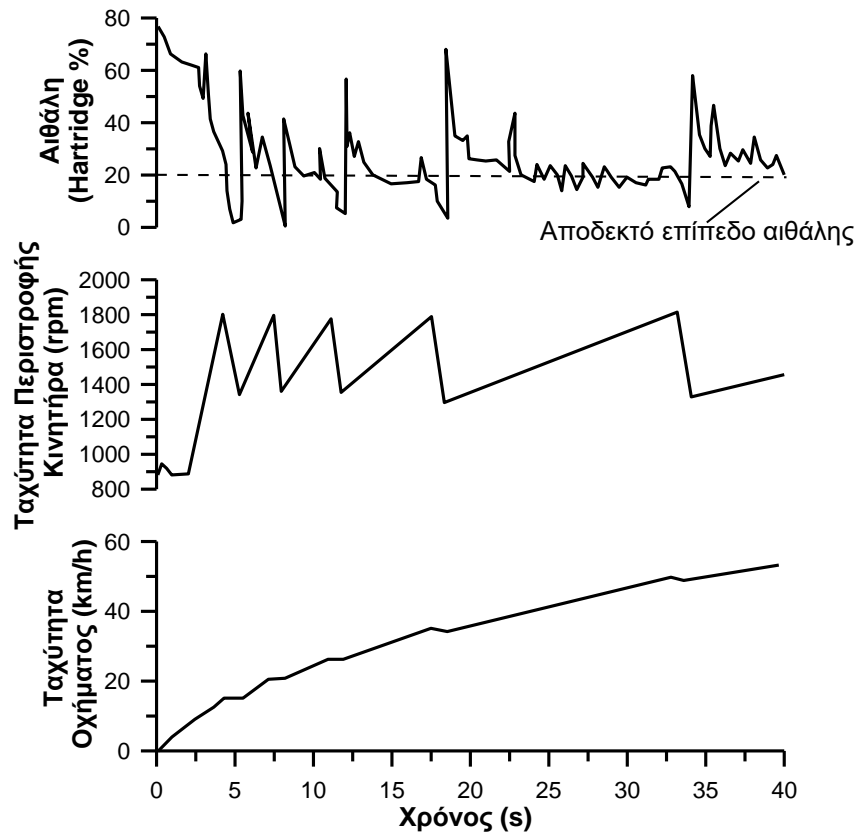
φαινόμενα παρατηρούνται για υψηλότερες πιέσεις έγχυσης του καυσίμου ή για χαμηλότερα ποσοστά EGR.

2.4 Ιδιαιτερότητες εκπομπών καυσαερίων κατά τη μεταβατική λειτουργία υπερπληρωμένων κινητήρων Diesel

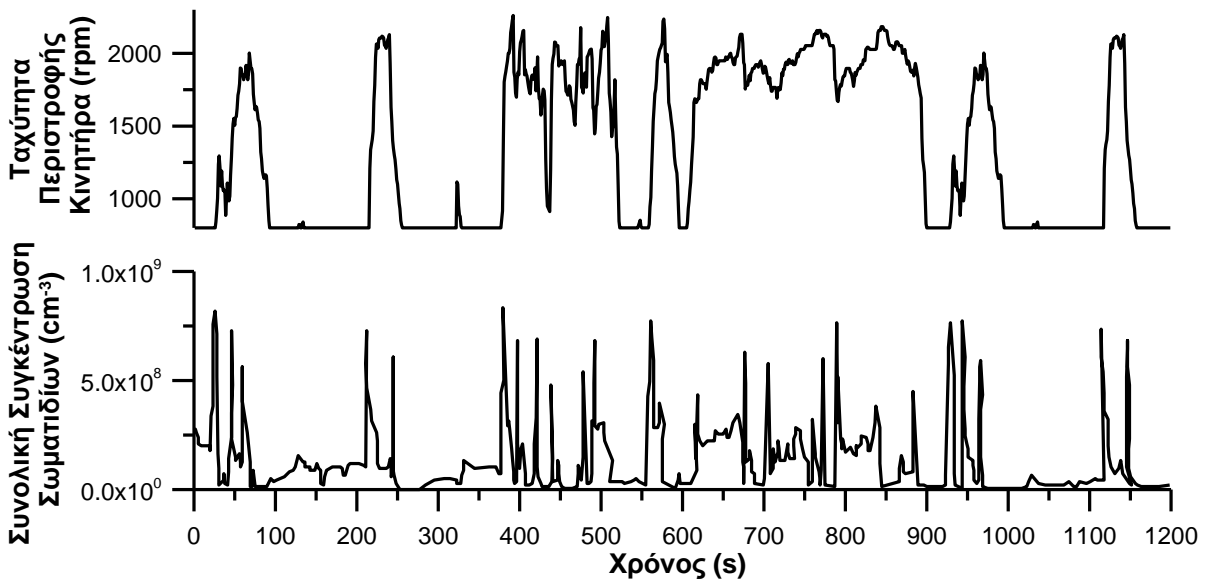
Η χειροτέρευση της καύσης κατά τη διάρκεια της μεταβατικής λειτουργίας υπερπληρωμένων κινητήρων Diesel, λόγω του φαινομένου της υστέρησης του στροβιλο-υπερπληρωτή (turbocharger lag), οδηγεί σε στιγμιαία σημαντική αύξηση των αέριων και σωματιδιακών ρύπων σε σύγκριση με την αντίστοιχη μόνιμη λειτουργία (σταθερή ταχύτητα περιστροφής και φορτίο). Μερικά τυπικά παραδείγματα δίνονται παρακάτω.



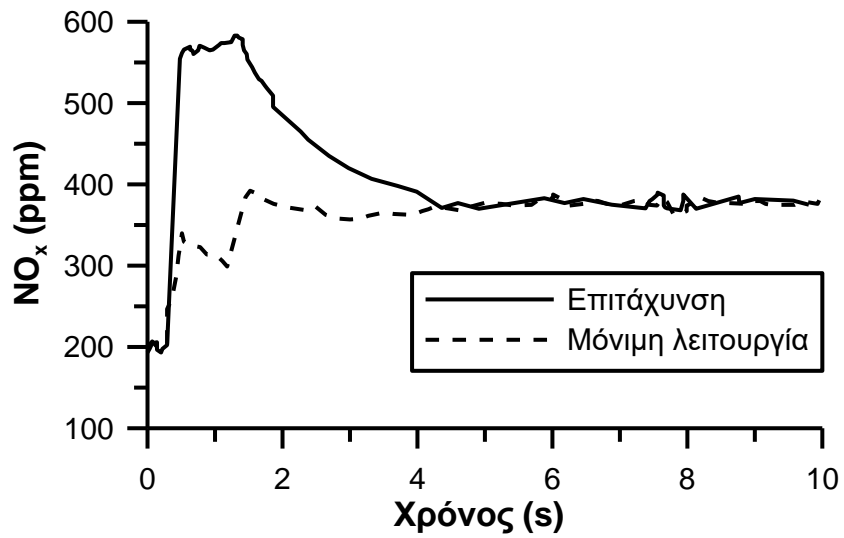
Σχήμα 2.5: Υπερακόντιση εκπομπών αιθάλης κατά τη διάρκεια επιτάχυνσης στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel από την άφορτη λειτουργία ('ρελαντί')· η υπερακόντιση είναι μεγαλύτερη όσο πιο 'χαμηλό' το αρχικό σημείο λειτουργίας, όσο πιο μεγάλη η μεταβολή στροφών ή φορτίου, όσο πιο απότομα αυτή πραγματοποιείται και όσο πιο μεγάλη η μέση πραγματική πίεση (rating) του κινητήρα [4].



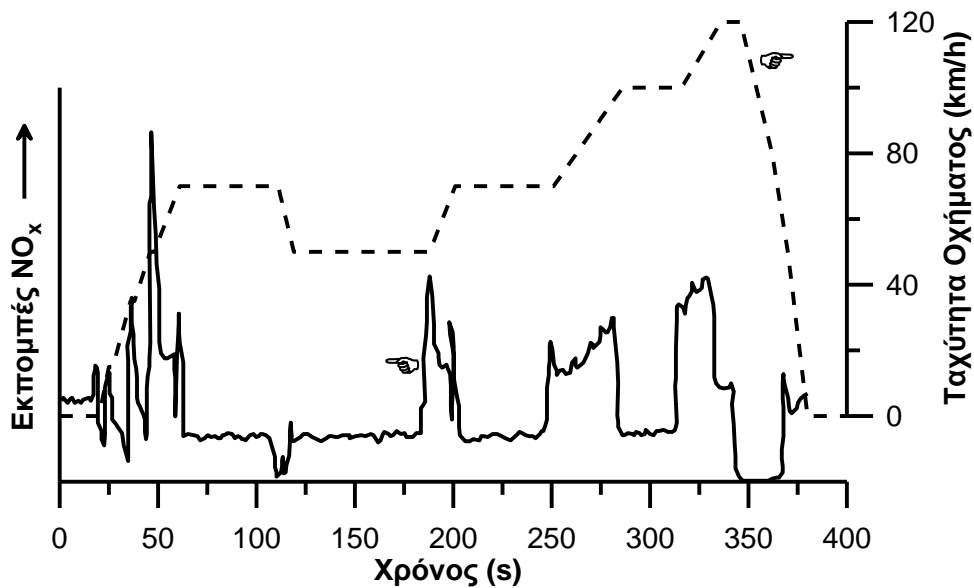
Σχήμα 2.6: Εκπομπές αιθάλης κατά τη διάρκεια συνεχών αλλαγών ταχυτήτων σε υπερπληρωμένο κινητήρα Diesel φορτηγού που εισέρχεται σε αυτοκινητόδρομο [4].



Σχήμα 2.7: Ολική συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων κατά τη διάρκεια του Αμερικανικού Μεταβατικού Κύκλου Πόλης FTP βαρέων οχημάτων [4].



Σχήμα 2.8: Υπερακόντιση εκπομπών οξειδίων του αζώτου κατά τη διάρκεια επιτάχυνσης στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel από την άφορτη λειτουργία ('ρελαντί') [4].



Σχήμα 2.9: Υπερακόντιση εκπομπών οξειδίων του αζώτου κατά τη διάρκεια του εκτός πόλης τμήματος του Ευρωπαϊκού Κύκλου πιστοποίησης οχημάτων (EUDC) στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel· είναι εμφανής η σημαντική αύξηση των εκπομπών σε κάθε επιτάχυνση του οχήματος [4].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Μεταβατικοί Κύκλοι

Πόλης

3.1 Εισαγωγή

Οι Μεταβατικοί Κύκλοι Πόλης (Transient ή Driving Cycles) αποτελούν τυποποιημένες μεταβατικές δοκιμές για τον έλεγχο της εκπομπής ρύπων των οχημάτων. Η εισαγωγή τους προωθήθηκε από την τεράστια σημασία που έχει η λειτουργία των εμβολοφόρων κινητήρων (οχημάτων) σε μεταβατικές συνθήκες (δηλ. σε μεταβλητές συνθήκες στροφών ή φορτίου). Έτσι, οι μεταβατικοί κύκλοι πόλης χαρακτηρίζονται από μεγάλη διάρκεια (έως και 30 λεπτά) και περιλαμβάνουν συχνές αλλαγές ταχύτητας και φορτίου, σε ένα μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας, ώστε να αναπαριστούν, στο μέτρο του δυνατού, τη λειτουργία του οχήματος σε πραγματικές συνθήκες [6].

Ένας μεταβατικός κύκλος πόλης αποτελεί μια ακολουθία σημείων, όπου κάθε σημείο προσδιορίζεται από μια συγκεκριμένη ταχύτητα (για την περίπτωση δοκιμής του οχήματος) ή έναν συγκεκριμένο αριθμό στροφών και φορτίου (για την περίπτωση δοκιμής μόνο του κινητήρα). Τα σημεία δοκιμής είναι διαιρεμένα σε χρονικά βήματα, ανά ένα δευτερόλεπτο, κατά τη διάρκεια των οποίων η επιτάχυνση/μεταβολή του φορτίου θεωρείται γραμμική. Τέτοια τυποποίηση είναι απαραίτητη προκειμένου να καθίσταται δυνατή η σύγκριση διαφορετικών οχημάτων ή κινητήρων που πραγματοποιούν την ίδια λειτουργία. Οι Μεταβατικοί Κύκλοι, χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Τα επιβατικά αυτοκίνητα και τα ελαφρού τύπου φορτηγά υποβάλλονται συνήθως σε Κύκλο δοκιμής, που συσχετίζει την ταχύτητα του οχήματος με το χρόνο (vehicle speed vs time) και τα αποτελέσματα εκφράζονται σε g/km.
- Τα βαρέος τύπου οχήματα, λόγω μεγέθους, βάρους και τεράστιου αριθμού συνδυασμών κινητήρα/αμαξώματος, υποβάλλονται σε Κύκλο Δοκιμής μόνο

του κινητήρα. Ο Κύκλος αυτός πραγματοποιείται σε μια πέδη δοκιμής κινητήρων, όπου ο κινητήρας ακολουθεί μια καθορισμένη αλληλουχία ταχυτήτων περιστροφής και φορτίων σε σχέση με το χρόνο (engine speed/torque vs time). Τα αποτελέσματα της δοκιμής εκφράζονται συνήθως σε g/kWh, δηλαδή ανάγονται στο συνολικό έργο που παράγεται από τον κινητήρα κατά τη διάρκεια του Κύκλου.

Για να είναι οι μετρήσεις αντιπροσωπευτικές της λειτουργίας των κινητήρων, οι μεταβατικοί Κύκλοι Πόλης ενσωματώνουν μερικές ή όλες από τις παρακάτω καθημερινές συνθήκες οδήγησης:

- Ψυχρή και θερμή εκκίνηση
- Συχνές επιταχύνσεις κι επιβραδύνσεις
- Μεταβολές του φορτίου
- Συνθήκες άφορτης λειτουργίας, χαρακτηριστικές του κύκλου οδήγησης
- Οδήγηση σε προάστια ή αγροτικούς δρόμους
- Οδήγηση σε αυτοκινητόδρομο

Με την εφαρμογή ενός Μεταβατικού Κύκλου για τη δοκιμή νέων οχημάτων, δοκιμάζεται-ελέγχεται ολόκληρο το εύρος λειτουργίας του κινητήρα, και όχι μόνον η μέγιστη ισχύς ή ροπή ή απλά κάποια μεμονωμένα (έστω και "αντιπροσωπευτικά") σημεία. Επιπλέον, λαμβάνονται υπόψιν οι σοβαρές ανακολουθίες που προκύπτουν κατά την απότομη επιτάχυνση ή επιβράδυνση που έχουν σαν αποτέλεσμα οι εκπομπές αέριων ρύπων και στερεών σωματιδίων να ξεπερνούν στιγμιαία, κατά πολύ, τα όρια. Το φαινόμενο αυτό είναι αρκετά πιο οξύμενο σε υπερπληρωμένους κινητήρες, λόγω του φαινομένου της υστέρησης του υπερπληρωτή, όπως φάνηκε στα διαγράμματα της Παραγράφου 2.4. Ωστόσο, η χρήση των Μεταβατικών Κύκλων προορίζεται κυρίως για τον προσδιορισμό της συνολικής ποσότητας των εκπομπών ρύπων και όχι για τον προσδιορισμό συγκεκριμένων σημείων όπου οι εκπομπές αυτές μεγιστοποιούνται.

Οι Μεταβατικοί Κύκλοι απαιτούν ιδιαίτερα πολύπλοκες πειραματικές εγκαταστάσεις που πρέπει να είναι πλήρως αυτοματοποιημένες, με ηλεκτρονικά ελεγχόμενο δυναμόμετρο, συσκευές ανάλυσης καυσαερίων γρήγορης απόκρισης,

σήραγγες ανάμιξης και αραίωσης κλπ. Μέχρι στιγμής, πολλές χώρες ή ομάδες χωρών στον κόσμο χρησιμοποιούν Μεταβατικούς Κύκλους για τον έλεγχο εκπομπών των οχημάτων τους, με πρωτοπόρες την Ευρωπαϊκή Ένωση, τις Η.Π.Α. και την Ιαπωνία. Εντούτοις, η χρήση των Μεταβατικών Κύκλων δεν περιορίζεται μόνο στον έλεγχο των εκπομπών, στη βάση της αντίστοιχης νομοθεσίας, αλλά επεκτείνεται και στο χώρο της έρευνας.

Τα τελευταία χρόνια έχει προκύψει η ανάγκη, τόσο από τη σκοπιά των κατασκευαστών όσο και από εκείνη του νομοθέτη, για έναν εναρμονισμένο, σε παγκόσμια κλίμακα, Μεταβατικό Κύκλο, καθώς και των αντίστοιχων διαδικασιών ελέγχου των εκπομπών. Την ανάγκη αυτή ήρθε να καλύψει ο Παγκόσμιος Κύκλος Πόλης Οχημάτων Ελαφρού Φορτίου (WLTC3, Worldwide-Harmonized Light Vehicles Test Cycle), ο οποίος αναλύεται διεξοδικά παρακάτω (Παράγραφος 3.3).

3.2 Συνιστώσες της διαδικασίας δοκιμής

3.2.1 Δυναμόμετρο

Το δυναμόμετρο είναι μια συσκευή που επιτρέπει την εφαρμογή ελεγχόμενης ταχύτητας και συνθηκών φορτίου σε έναν κινητήρα ή όχημα. Τα δυναμόμετρα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Δυναμόμετρα πλαισίων (chassis dynamometer) για τη δοκιμή οχημάτων (επιβατικά αυτοκίνητα και ελαφρού τύπου οχήματα εν γένει)
- Δυναμόμετρα κινητήρων (engine dynamometer) για τη δοκιμή κινητήρων (βαρέος τύπου οχήματα)

Στα δυναμόμετρα πλαισίων, τοποθετείται ολόκληρο το όχημα στους κυλίνδρους έλξης, στους οποίους οδηγούνται οι κινητήριοι τροχοί του οχήματος, και χειρίζεται από έναν οδηγό. Το όχημα δένεται στο πάτωμα και στις δύο πλευρές, ώστε να αποτραπεί η μετακίνησή του. Τα αέρια της εξαγωγής συλλέγονται από το σύστημα δειγματοληψίας, το οποίο αναλύεται στην παράγραφο 3.3.2. Ο οδηγός εκτελεί τον Κύκλο, υποβοηθούμενος από οθόνη υπολογιστή (monitor) στο παρμπρίζ του αυτοκινήτου, στην οποία εμφανίζονται οι πληροφορίες ταχύτητας (ταχύτητα σε κάθε δευτερόλεπτο του Κύκλου).

Ο στόχος του δυναμόμετρου είναι να αναπαράγει το φορτίο κατά την κίνηση του οχήματος στο δρόμο και τη μαζική ροπή αδράνειας του οχήματος. Ένα όχημα στο δρόμο έχει να υπερνικήσει την αντίσταση τριβής κύλισης (F_r), την αεροδυναμική αντίσταση (F_a), την αντίσταση κλίσης οδοστρώματος (F_{gr}) και την αντίσταση επιτάχυνσης (F_b). Όλες αυτές οι αντιστάσεις μπορούν να προσομοιωθούν στο δυναμόμετρο πλαισίων μέσω της επιβολής κατάλληλης τιμής αντίστασης ($F_r + F_a + F_{gr}$) στους κυλίνδρους έλξης του δυναμομέτρου καθώς και της χρήσεως μάζας κατάλληλης μαζικής ροπής αδρανείας (στον άξονα των κυλίνδρων έλξης) για την προσομοίωση της F_b , δηλαδή των επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων του οχήματος.

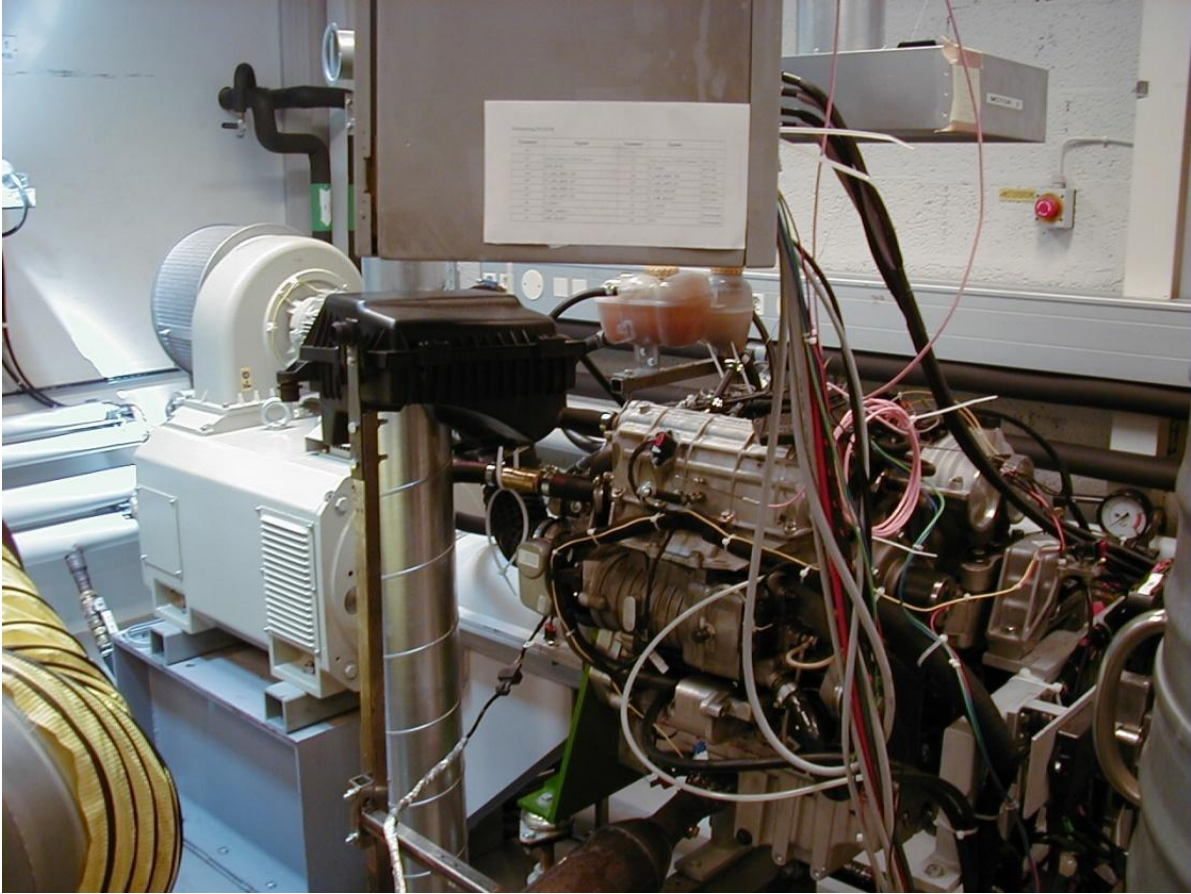


Σχήμα 3.1: Επιβατικό αυτοκίνητο σε δυναμόμετρο πλαισίου.



Σχήμα 3.2: Επιβατικό όχημα σε εγκατάσταση Κύκλου Δοκιμής για έλεγχο εκπομπών.

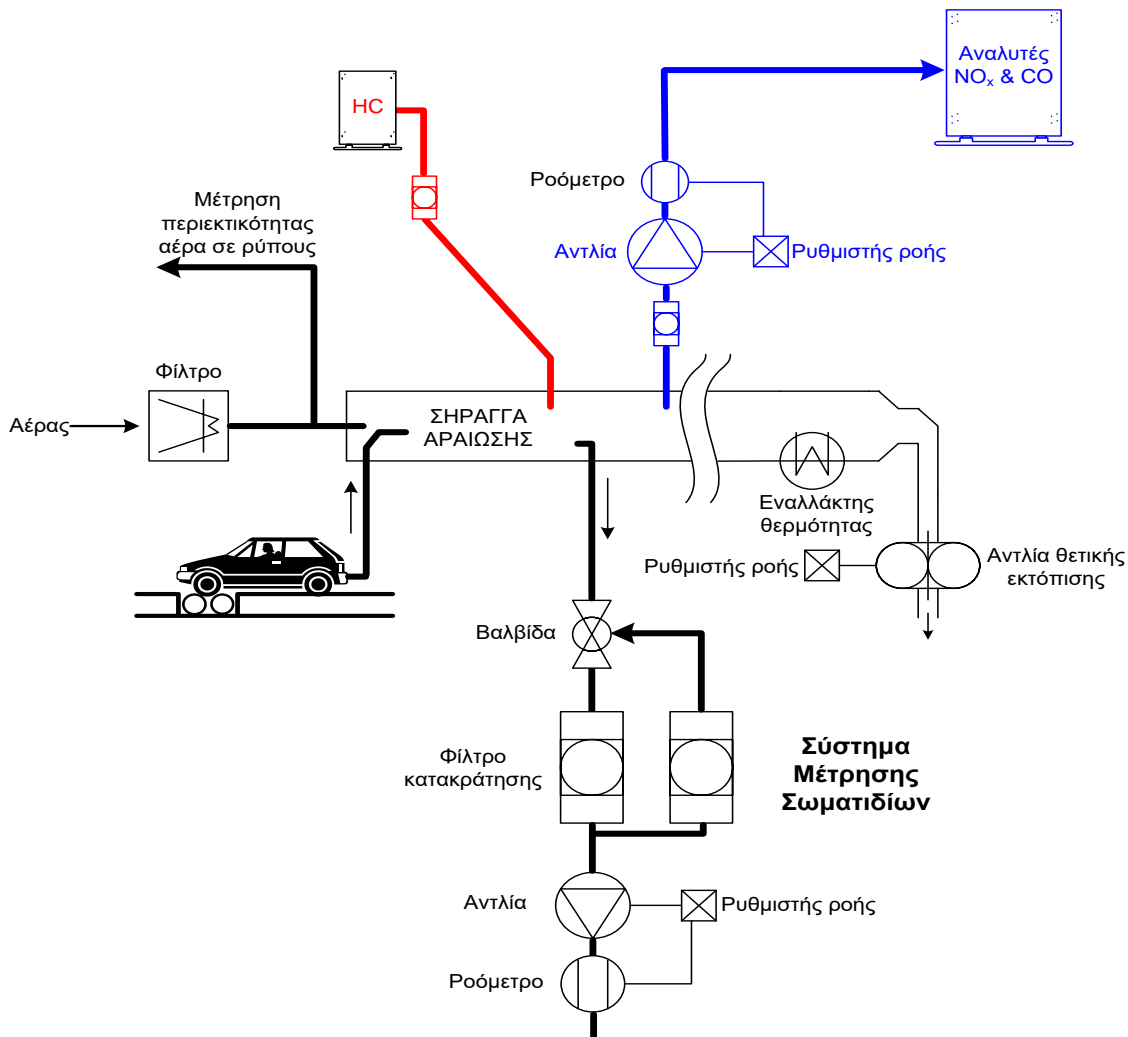
Στο δυναμόμετρο κινητήρων, ο κινητήρας συνδέεται άμεσα σε μια πέδη. Το δυναμόμετρο μιμείται τη συμπεριφορά ολόκληρου του οχήματος και του συστήματος μετάδοσης κίνησης, συμπεριλαμβανομένης της εξαιρετικά γρήγορης απόκρισης ροπής και ταχύτητας, κατά τη διάρκεια της μεταβατικής λειτουργίας. Ηλεκτρικά δυναμόμετρα απαιτούνται για τους Κύκλους δοκιμής που περιλαμβάνουν τμήματα ετεροκίνησης, όπου το δυναμόμετρο «οδηγεί» τον κινητήρα, όπως στον αμερικάνικο κύκλο FTP, στον (παλαιότερο) ευρωπαϊκό ETC ή τον παγκόσμιο WHTC, καθώς και στον NRTC για οχήματα εκτός δρόμου.



Σχήμα 3.3: Κινητήρας βαρέος τύπου στη θέση δυναμόμετρου δοκιμής κινητήρων.

3.2.2 Γενικά περί μετρήσεων εκπομπών ρύπων κατά τη διάρκεια των μεταβατικών κύκλων

Η διαδικασία μέτρησης των καυσαερίων που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια των Μεταβατικών Κύκλων είναι η δειγματοληψία σταθερού όγκου (CVS – constant volume sampling). Πρόκειται για την αποδεκτή από την ισχύουσα νομοθεσία σε πολλές χώρες μέθοδο, τόσο για ελαφριά οχήματα όσο και για βαρέα οχήματα/κινητήρες. Στις δοκιμές των οχημάτων ελαφρού τύπου, η διάταξη της δειγματοληψίας συνδυάζεται με το δυναμόμετρο (πλαϊσίου), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Τυπικό σύστημα δειγματοληψίας σταθερού όγκου CVS με αντλία θετικής εκτόπισης για την πιστοποίηση οχημάτων [4].

Η διαδικασία CVS συνίσταται στην αραιώση της ολικής ποσότητας ανεπεξέργαστου καυσαερίου με καθαρό αέρα περιβάλλοντος σε μία σήραγγα αραιώσης. Η αραιώση γίνεται προκειμένου να αποφευχθεί οποιαδήποτε συμπύκνωση υδρατμών στην εγκατάσταση. Η ανάμειξη αυτή γίνεται χρησιμοποιώντας μία περιστροφική αντλία θετικής εκτόπισης ή αντλία κενού κρίσιμης ροής “venturi” η οποία αναρροφά το ισχυρώς αραιωμένο με αέρα καυσαέριο με μια σταθερή παροχή όγκου, την οποία μετρά. Η σταθερή ροή διευκολύνει τον ακριβή υπολογισμό των εκπομπών με βάση τη μάζα τους. Ένας εναλλάκτης θερμότητας μπορεί προαιρετικά να εγκατασταθεί για αναλογική

δειγματοληψία σωματιδίων και για καθορισμό της ροής. Η (κυρίως) σήραγγα είναι ένας θερμαινόμενος σωλήνας από ανοξείδωτο ατσάλι και πρέπει να έχει κατάλληλο μήκος έτσι ώστε να επιτρέπει πλήρη ανάμιξη του καυσαερίου με τον αέρα. Η διάμετρος της σήραγγας εξαρτάται από τη ροή των καυσαερίων και είναι αρκετά μικρή για να προκαλεί τυρβώδη ροή ($Re > 4000$). Η ποσότητα του αραιωμένου αέρα πρέπει να είναι αρκετή για να ψύχει το μίγμα καυσαερίου-αέρα σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα και σε θερμοκρασία χαμηλότερη από 325K (52°C).

Κατά τη φάση των μετρήσεων αντλούνται δείγματα αερίων από τη σήραγγα αραιώσης στο σημείο όπου το καυσαέριο είναι εντελώς αναμεμιγμένο με το διάλυμα αέρα (τυπικά ≥ 10 διάμετροι σήραγγας από το σημείο όπου και οι δύο ροές εισάγονται στη σήραγγα). Ένα μικρό κλάσμα της ροής CVS (π.χ. 1%) υφίσταται δειγματοληψία σε σάκο από τεφλόν με όγκο ~ 100 lt. Πριν την είσοδο των αερίων στην αντλία για να εξέλθουν στην ατμόσφαιρα, τα αέρια ψύχονται σε εναλλάκτη θερμότητας μέχρι θερμοκρασία περιβάλλοντος $\pm 5^\circ\text{C}$, ώστε η πυκνότητά τους να είναι σταθερή. Έτσι και η παροχή μάζας μέσω της αντλίας είναι σταθερή αφού και η παροχή όγκου διαμέσου αυτής είναι σταθερή. Μετά τη δοκιμή, οι συγκεντρώσεις των αερίων στα δείγματα μετρώνται μέσω ενός αναλυτή καυσαερίων.

Η διαδικασία που αναφέρθηκε προηγουμένως για την μέτρηση των CO, HC και NO_x ισχύει τόσο για κινητήρες Otto όσο και για κινητήρες Diesel, με την εξαίρεση της μέτρησης των HC, όπου στους κινητήρες Diesel λόγω του βαρύτερου καυσίμου που χρησιμοποιείται, τα καυσαέρια περιέχουν HC με σχετικά υψηλό σημείο υγροποίησης. Έτσι εάν γινόταν η συλλογή τους σε σάκους θα υπήρχε σημαντική συμπίκνωση των HC στα τοιχώματα των σάκων με αποτέλεσμα λανθασμένη μέτρηση. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένας θερμαινόμενος σωλήνας δειγματοληψίας όπου αντλείται μικρή ποσότητα δείγματος, η οποία στην συνέχεια οδηγείται στον αντίστοιχο αναλυτή.

Για την μέτρηση των σωματιδίων, ένα δείγμα της συνολικής ροής από τη σήραγγα ανάμιξης εξάγεται και περνάει είτε κατευθείαν ή μέσω δεύτερης ανάμιξης στο σύστημα δειγματοληψίας σωματιδίων, όπου τα σωματίδια συλλέγονται με φίλτρα από fiber-glass (ίνες υάλου) επικαλυμμένα με τεφλόν. Για την εξασφάλιση της δυνατότητας να αναπαραχθεί η μέτρηση ασταθών συστατικών που

απορροφώνται από το φίλτρο, είναι απαραίτητο το φίλτρο να ισορροπεί σε ορισμένη θερμοκρασία και επίπεδο υγρασίας. Η εκπομπή σωματιδίων καθορίζεται από την ολική μάζα που συλλέγεται στα φίλτρα κατά τη διάρκεια του Μεταβατικού Κύκλου. Από τα σωματίδια που έχουν συλλεγεί, μετράται η αιθάλη και το οργανικό κλάσμα το οποίο έχει επικίνδυνα χαρακτηριστικά για την υγεία των ζωντανών οργανισμών. Για σύγκριση με τα όρια των προτύπων, υπολογίζεται μία μέση τιμή κατά τον Μεταβατικό Κύκλο (g/test ή g/km ή g/kWh) και για τις δύο εκπομπές, αέριες και σωματιδίων.

Η χρήση του συστήματος CVS απαιτεί μεγάλο χώρο και κόστος. Είναι φανερό ότι με αυτήν τη μεθοδολογία, ο υπολογισμός της συνολικής ποσότητας των καυσαερίων επιτυγχάνεται χωρίς υπόδειξη ούτε των προσωρινών σημείων μεγιστοποίησης των εκπομπών (overshoots) ούτε και του χρονικού παραθύρου στη δοκιμή, όπου οι εκπομπές κυρίως δημιουργούνται.

3.3 Παγκόσμιος κύκλος πόλης WLTC²

Οι περισσότερες αυτοκινητοβιομηχανίες παράγουν αυτοκίνητα που πωλούν σε παγκόσμια κλίμακα ή τουλάχιστον σε αρκετές περιοχές στον κόσμο. Παρόλα αυτά, δεδομένου ότι οι τύποι οχημάτων και τα μοντέλα τείνουν να εξυπηρετούν τις συνήθειες και τις συνθήκες διαβίωσης της χώρας παραγωγής, τα οχήματα που παράγονται σε παγκόσμια κλίμακα δεν είναι πανομοιότυπα. Η συμμόρφωση με τα διαφορετικά πρότυπα εκπομπών καυσαερίων σε κάθε περιοχή, ωστόσο, οδηγεί σε μεγάλες δυσκολίες στην διαχείριση και στον σχεδιασμό των οχημάτων. Συνεπώς, οι κατασκευαστές στοχεύουν στην, όσο το δυνατόν καλύτερη, εναρμόνιση σε παγκόσμια κλίμακα των απαιτήσεων απόδοσης και των προτύπων εκπομπής καυσαερίων. Οι ρυθμιστικές αρχές ενδιαφέρονται επίσης για την παγκόσμια εναρμόνιση δεδομένου ότι προσφέρουν πιο αποτελεσματική ανάπτυξη και προσαρμογή στην τεχνική πρόοδο και διευκολύνουν την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των αρχών. Με τον όρο εναρμόνιση δεν εννοούμε απαραίτητα την ύπαρξη

² Πληροφορίες προερχόμενες από την παραπομπή [5] της βιβλιογραφίας, όπως και γενικά όλο αυτό το κεφάλαιο.

ίδιων απαιτήσεων / στόχων για τις εκπομπές (όπως ήδη αναφέρθηκε, οι ανάγκες των διαφόρων χωρών ποικίλλουν, συχνά σε μεγάλο βαθμό), αλλά να εξαλειφθούν οι περιττές διαφορές, με σκοπό να έρθουν πιο κοντά τα όρια των διαφόρων κανονισμών. Με αυτό τον τρόπο, που είναι εφικτός και πρακτικός, μπορεί να κατασκευαστεί μία μόνο προδιαγραφή οχήματος για να ικανοποιήσει όλες τις απαιτήσεις, αντί οι προδιαγραφές να είναι προσαρμοσμένες σε μια συγκεκριμένη χώρα. Οι κοινές προδιαγραφές των εξαρτημάτων των οχημάτων μπορούν να μειώσουν το κόστος ανάπτυξης και παραγωγής και την τιμή των οχημάτων. Μπορούν επίσης να διευκολύνουν τις διαδικασίες έγκρισης των οχημάτων, να διευρύνουν την αγορά στην οποία απευθύνεται η κάθε αυτοκινητοβιομηχανία καθώς και να δώσουν στους καταναλωτές ένα ευρύτερο φάσμα επιλογών. Κατά συνέπεια, κατά τη σύνοδο του Νοεμβρίου του 2007, η Παγκόσμια Επιτροπή για την Εναρμόνιση των Κανονισμών Οχημάτων (WP.29) της ΟΕΗΕ (Οικονομική Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών Ευρώπης - UNECE) αποφάσισε τη σύσταση μιας ανεπίσημης ομάδας, στο πλαίσιο της ομάδας εργασίας για τη ρύπανση και την ενέργεια (GRPE), για την ανάπτυξη της Worldwide harmonized Light Vehicle Test Procedure (WLTP), μίας πρότυπης παγκόσμιας διαδρομής, με στόχο την κατά το δυνατό καλύτερη εναρμόνιση των διαδικασιών δοκιμών που σχετίζονται με τις εκπομπές καυσαερίων οχημάτων ελαφρού τύπου. Η υλοποίηση του προγράμματος αυτού έχει τις παρακάτω τρεις φάσεις:

- Φάση 1 (2009-2014): Ανάπτυξη του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης, worldwide harmonized light-duty driving cycle (WLTC), που αντικατοπτρίζει πραγματικές συνθήκες οδήγησης, καθώς και την διαδικασία ελέγχου για την μέτρηση των ρύπων, του διοξειδίου του άνθρακα CO₂ και την κατανάλωση καυσίμου και ενέργειας.
- Φάση 2 (2014-2018): Διαδικασία δοκιμής σε χαμηλές θερμοκρασίες/μεγάλο υψόμετρο, αντοχή, συμμόρφωση με τα πρότυπα κατά τη χρήση, τεχνικές προδιαγραφές για ενσωματωμένο διαγνωστικό σύστημα στο όχημα (on-board diagnostics OBD), ενεργειακή απόδοση κινητού συστήματος

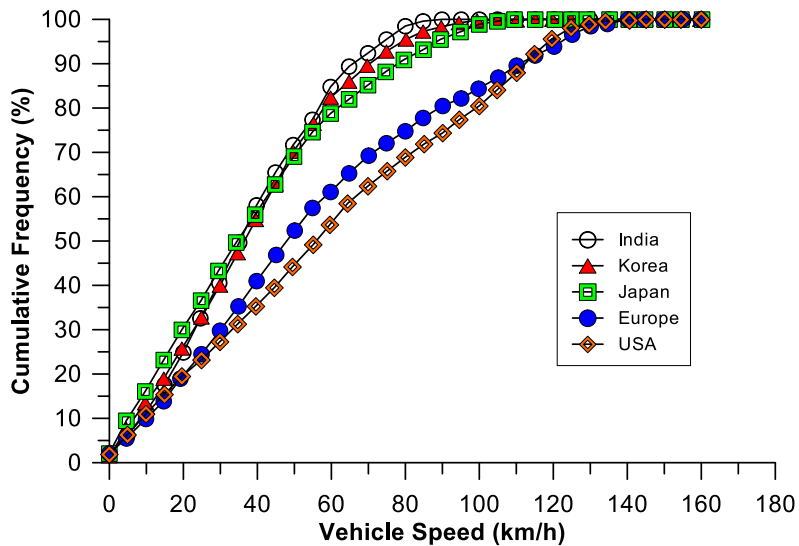
κλιματισμού, εκπομπές ρύπων εκτός δρόμου/σε πραγματικές συνθήκες οδήγησης.

- Φάση 3 (2018-...): Όρια εκπομπών ρύπων και οριακές τιμές των on-board diagnostics, καθορισμός των καυσίμων αναφοράς, σύγκριση με τις απαιτήσεις κάθε περιοχής.

Η ανάπτυξη του νέου κύκλου άρχισε τον Σεπτέμβριο του 2009, η συλλογή δεδομένων οδήγησης ξεκίνησε το 2010, και η πρώτη έκδοση του κύκλου προτάθηκε τα μέσα του 2011. Ο κύκλος αναθεωρήθηκε αρκετές φορές για να ληφθούν υπόψη τεχνικά ζητήματα όπως η οδηγισιμότητα και η καλύτερη αναπαράσταση των συνθηκών οδήγησης μετά από μια πρώτη εκτίμηση του κύκλου. Η ανάπτυξη του WLTP παρακολουθήθηκε στενά από διάφορους ενδιαφερόμενους φορείς (κυβερνήσεις, βιομηχανίες, μη κυβερνητικές οργανώσεις), όπως αποδεικνύεται από τον μεγάλο αριθμό συμμετεχόντων στις συναντήσεις του UN GRPE. Το 2010, η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (U.S. EPA) αποφάσισε να αποσύρει την ενεργό συμμετοχή της στην ανάπτυξη του WLTP, λόγω των πόρων και των έντονων προετοιμασιών για τη θέσπιση των Αμερικανικών προτύπων εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου για τις χρονικές περιόδους 2012-2016 και 2017-2025. Μετά από την αποχώρηση των Ηνωμένων Πολιτειών, το πρόγραμμα συνεχίστηκε από την ΕΕ, τη Νότια Κορέα, την Ινδία και την Ιαπωνία.

Για την δημιουργία του WLTC, τα δεδομένα οδήγησης από όλες τις συμμετέχουσες χώρες συλλέχθηκαν και σταθμίστηκαν σύμφωνα με τη σχετική συμβολή των περιοχών στις παγκόσμιες χιλιομετρικές αποστάσεις και στα δεδομένα που συλλέχθηκαν για τον WLTP. Τα δεδομένα οδήγησης που συλλέχθηκαν για την ανάπτυξη του κύκλου ήταν συνολικά 766,000 km και αποτελούνταν από:

- 462,000 km από την Ευρώπη (οι συμμετέχουσες χώρες ήταν το Βέλγιο, η Γαλλία, η Γερμανία, η Ιταλία, η Πολωνία, η Σλοβενία, η Ισπανία, η Σουηδία, η Ελβετία και το Ηνωμένο Βασίλειο)
- 56,000 km από την Ινδία
- 53,000 km από την Ιαπωνία
- 34.000 km από την Νότιο Κορέα και
- 160.000 km από τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής



Σχήμα 3.5: Συχνότητα εμφάνισης ταχύτητας οχήματος για τις διάφορες περιοχές απ' όπου συλλέχθηκαν τα δεδομένα για τον κύκλο WLTC [26].

Χρησιμοποιήθηκαν 394 οχήματα από διάφορους κατασκευαστές, με κινητήρες με ποικιλία κυβισμού, και με αναλογία ισχύος προς μάζα από 9 έως 120 kW/tn. Το μεγαλύτερο μέρος αυτών των στοιχείων αντιστοιχούσε σε δεδομένα για τα επιβατικά αυτοκίνητα, παρόλα αυτά και τα φορτηγά ελαφρού τύπου και τα μικρά λεωφορεία εκπροσωπήθηκαν επαρκώς στη βάση δεδομένων. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από έναν συνδυασμό οχημάτων εξοπλισμένων με όργανα (Ευρώπη, Ινδία και ΗΠΑ), οδηγούς με συγκεκριμένες οδηγίες (Ιαπωνία, Κορέα, Ινδία και Η.Π.Α.) και απλά οχήματα (μόνο για τις ΗΠΑ).

Σύμφωνα με τις πρακτικές κατασκευής των κοινών κύκλων, τα δεδομένα (μετά από κατάλληλη «αραίωση» και ομαλοποίηση) χωρίστηκαν σε μικρο-διαδρομές και φάσεις ρελαντί. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες προσεγγίσεις ανάπτυξης κύκλων πόλης, οι οποίες βασίστηκαν σε κατηγοριοποίηση των δρόμων, δηλαδή σε αστική (urban), αγροτική (rural) και αυτοκινητόδρομο (motorway), ακολουθήθηκε διαφορετική προσέγγιση κατά την ανάπτυξη του WLTC λόγω των πολύ διαφορετικών οδικών κατηγοριοποιήσεων και ορίων ταχύτητας ανά τον κόσμο. Το τελευταίο παρατηρείται ιδιαίτερα όταν συγκρίνεται η Ευρωπαϊκή (ή των Η.Π.Α.) και

η Ασιατική βάση δεδομένων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Η μόνη εξαίρεση είναι ο τύπος αστικών οδών, όπου διαπιστώθηκε ότι υπάρχει αρκετά καλός βαθμός συσχέτισης παγκοσμίως. Για την κατασκευή του WLTC, οι μικρο-διαδρομές κατηγοριοποιήθηκαν σύμφωνα με τη μέγιστη ταχύτητά τους, αρχικά σε τρεις φάσεις, δηλαδή χαμηλή, μέση και υψηλή. Στη συνέχεια, η φάση υψηλής ταχύτητας χωρίστηκε σε δύο τμήματα: μία φάση υψηλής ταχύτητας με μέγιστη ταχύτητα αντιπροσωπευτική της οδήγησης στην Ασία και μία εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα, χαρακτηριστικό της οδήγησης αυτοκινητοδρόμου στην Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Αυτές οι τέσσερις φάσεις που κατηγοριοποιούνται με βάση την ταχύτητα είναι:

- Χαμηλή (μέχρι 60 km/h), που αποτελείται κατά 97.1% από αστικές διαδρομές
- Μεσαία (60-80 km/h), αποτελούμενη κατά 80.7% από αστικές διαδρομές και κατά 19.2% από επαρχιακές
- Υψηλή (80-110 km/h), αποτελούμενη κατά 28.3% από αστικές διαδρομές και κατά 71.5% από επαρχιακές, και
- Υπερυψηλή (>110 km/h), αποτελούμενη κατά 55% από επαρχιακές διαδρομές, κατά 32.9% από διαδρομές σε αυτοκινητόδρομο και κατά 12% από αστικές.

	Japan	Europe	USA	S. Korea	India	Unified
Relative Positive Acceleration (m/s²)						
Low	0.177	0.200	0.245	0.192	0.134	0.192
Medium	0.142	0.176	0.225	0.174	0.142	0.188
High	0.117	0.144	0.164	0.139	0.162	0.156
Extra high	0.086	0.114	0.103	0.155	-	0.108
Average Speed (km/h)						
Low	19.8	20.0	18.8	17.2	21.1	19.8
Medium	40.1	39.9	37.0	34.1	39.5	38.4
High	62.9	55.6	59.7	53.9	56.1	58.0
Extra high	86.2	83.1	90.1	67.6	-	86.8
Average Idle Duration (s)						
Low	26.5	15.6	24.9	29.2	23.1	21.9
Medium	25.6	16.6	22.3	39.8	24.6	22.4
High	21.5	18.4	20.1	34.2	46.2	22.8
Extra high	15.5	17.1	12.2	22.1	-	14.5
Average Short-trip Duration (s)						
Low	66	68	63	64	148	84
Medium	161	221	125	201	642	238
High	458	473	284	691	1157	446
Extra high	1158	1082	601	1621	-	824

Πίνακας 3.1: Τεχνικές προδιαγραφές των δεδομένων του WLTC για διάφορες περιοχές [27].

Το μειονέκτημα αυτής της διαδικασίας (δηλαδή ότι τα τμήματα σχετίζονται με την ταχύτητα και όχι με τα οδικά τμήματα) είναι ότι οι φάσεις αποτελούνται από διαφορετικές κατηγορίες οδού, όπως περιγράφηκε λεπτομερώς παραπάνω. Οι οριακές τιμές της ταχύτητας οχήματος των διαφόρων φάσεων επιλέχθηκαν μετά από συγκριτική μελέτη διαφορετικών πιθανών οριακών τιμών. Ο Πίνακας 3.1 παρουσιάζει δεδομένα από τις βάσεις δεδομένων κάθε περιοχής και από την ενιαία, σχετικά με ορισμένες σημαντικές τεχνικές προδιαγραφές, για κάθε εξεταζόμενη κατηγορία ταχύτητας.

Οι μικρο-διαδρομές για τον WLTC έπρεπε να επιλεγούν από την ενιαία βάση δεδομένων. Τα κριτήρια επιλογής βασίστηκαν στην ιδέα ότι οι επιλεγμένες μικρο-διαδρομές πρέπει να παρέχουν παρόμοιες κατανομές ταχύτητας, επιτάχυνσης κ.λπ. με εκείνες της ενιαίας βάσης δεδομένων. Λόγω του μεγάλου αριθμού διαφορετικών/πιθανών συνδυασμών μικρο-διαδρομών, εφαρμόστηκαν διάφορα κριτήρια επιλογής (μέση ταχύτητα οχήματος, λόγος διάρκειας επιτάχυνσης προς την συνολική, λόγος διάρκειας επιβράδυνσης προς την συνολική). Αυτή η επιλογή ήταν απαραίτητη για να μειωθεί ο αριθμός των πιθανών συνδυασμών και να διατηρηθεί ο χρόνος υπολογισμού σε ένα λογικό όριο. Ο συνδυασμός των μικρο-διαδρομών με την μικρότερη τιμή στο στατιστικό τεστ τύπου χ^2 , επιλέχθηκε για την κατασκευή του κύκλου WLTC.

Η οδηγισιμότητα του WLTC αξιολογήθηκε εκτενώς κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανάπτυξης. Συγκεκριμένα, εισήχθησαν συγκεκριμένες εκδόσεις του κύκλου για ορισμένα οχήματα με περιορισμένες δυνατότητες οδήγησης λόγω του χαμηλού λόγου ισχύος προς μάζα ή της περιορισμένης μέγιστης ταχύτητας του οχήματος. Ως αποτέλεσμα, αναπτύχθηκαν τρεις κλάσεις του κύκλου σε σχέση με την αναλογία μάζας-ισχύος (χωρίς φορτίο) του οχήματος ως εξής (η διάρκεια κάθε ενδιάμεσου τμήματος είναι μεταξύ των τάξεων) :

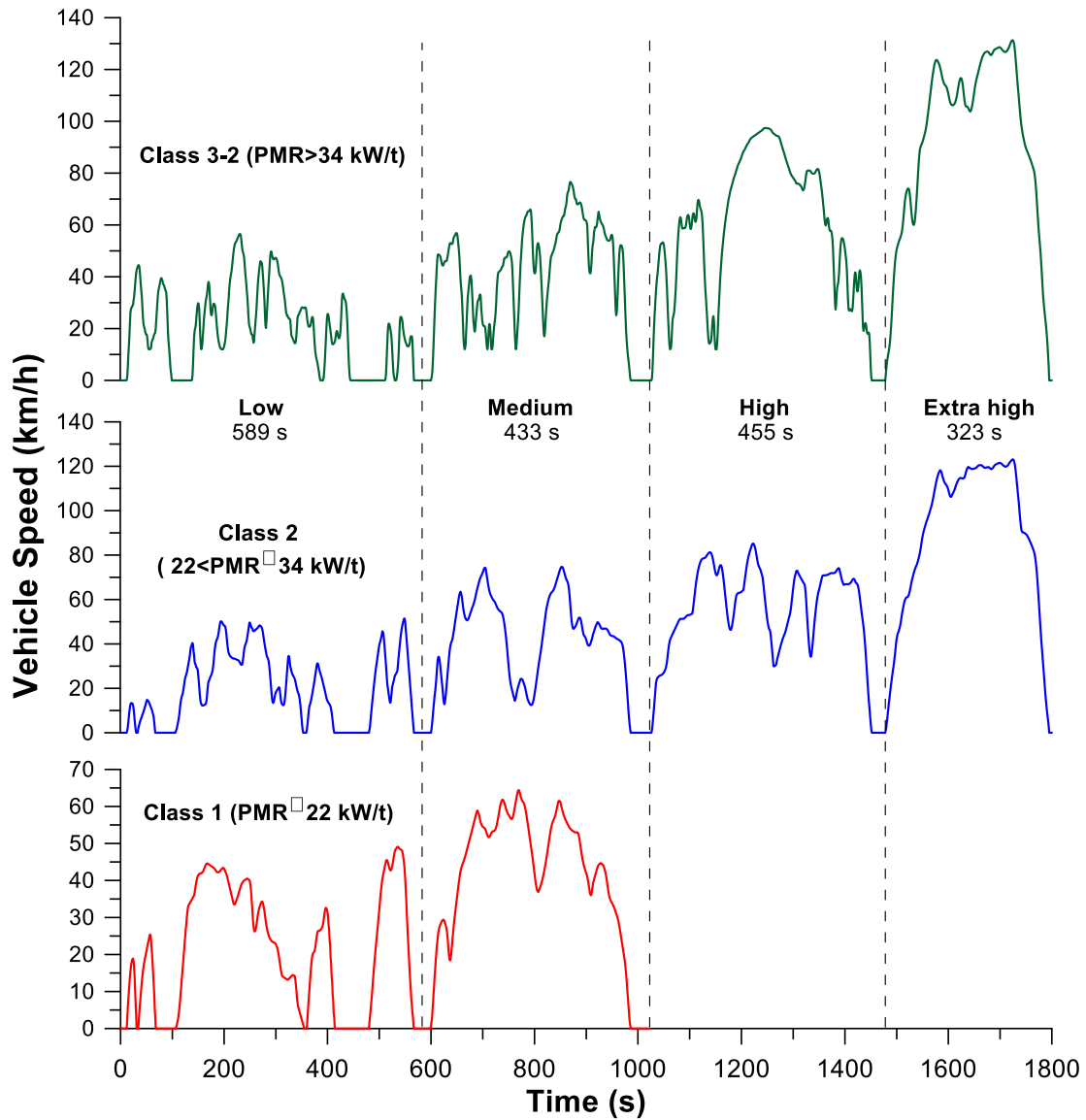
- Η κλάση WLTC 3 (PMR>34 kW/t), στην οποία εντάσσονται δύο εκδοχές του κύκλου: η εκδοχή 3-1 (ή 3a) για οχήματα με μέγιστη ταχύτητα μικρότερη από 120 km/h και η εκδοχή 3-2 (ή 3b) για οχήματα με μέγιστη ταχύτητα άνω των 120 km/h. Κατ' επιλογή της χώρας, η εξαιρετικά υψηλή φάση μπορεί να

αποκλειστεί, π.χ. στην Ινδία ή την Κίνα. Η κλάση 3-1 αναπτύχθηκε για να εξυπηρετήσει την ειδική κατηγορία οχημάτων k-cars στην Ιαπωνία.

- Η κλάση WLTC 2 ($22 \text{ kW/t} < \text{PMR} < 34 \text{ kW/t}$) είναι σχεδιασμένη για χαμηλότερης ισχύος οχήματα, έχει τέσσερις φάσεις ταχύτητας όπως η WLTC Class 3 αλλά με μικρότερες επιταχύνσεις και μέγιστες ταχύτητες σε κάθε φάση. Κατ' επιλογή της χώρας, η εξαιρετικά υψηλή φάση μπορεί να αποκλειστεί και στην περίπτωση αυτή.
- Η κλάση WLTC 1 ($\text{PMR} < 22 \text{ kW/t}$) εφαρμόζεται σε οχήματα με το χαμηλότερο λόγο ισχύος-μάζας και έχει σχεδιαστεί για να έχει μόνο τις φάσεις χαμηλής και μεσαίας ταχύτητας. Ο πλήρης κύκλος δοκιμής για την έγκριση συμμόρφωσης του οχήματος με τις προδιαγραφές της εκάστοτε χώρας περιλαμβάνει την χαμηλή, την μεσαία και ξανά την χαμηλή φάση.

Για τα υβριδικά οχήματα (HEVs), με εκτός οχήματος φόρτιση (off-vehicle charging) και τα πλήρως ηλεκτρικά οχήματα (PEVs), ο εφαρμοστέος κύκλος περιλαμβάνει τις φάσεις χαμηλής και μεσαίας της κλάσης 3 ("το εντός πόλης τμήμα" του WLTC).

Η μέγιστη διάρκεια του κύκλου είναι 1800 δευτερόλεπτα, παρόμοια με τους προγενέστερους κύκλους βαρέων οχημάτων WTVC (worldwide test cycle for heavy-duty vehicles) και μοτοσυκλετών WMTC (worldwide motorcycle test cycle). Αυτή η διάρκεια του κύκλου θεωρήθηκε σαν ένας αποδεκτός συμβιβασμός μεταξύ της στατιστικής αντιπροσωπευτικότητας και της εφικτής δοκιμής στο εργαστήριο.



Σχήμα 3.6: Ταχύτητα οχήματος συναρτήσεως του χρόνου κατά τη διάρκεια του Κύκλου Πόλης WLTC3 [28].

Η διάρκεια κάθε τμήματος κύκλου καθορίστηκε με τρόπο που να αντικατοπτρίζει την κατανομή των διανυθέντων χιλιομέτρων μεταξύ των φάσεων, επομένως δεν απαιτούνταν συντελεστές στάθμισης για το τελικό αποτέλεσμα. Πιο συγκεκριμένα, το χαμηλό τμήμα διαρκεί 589 δευτερόλεπτα (5 μικρο-διαδρομές και 6 στάσεις), το μέσο 433 sec (1 μικρο-διαδρομή, 2 στάσεις), το υψηλό 455 sec (1 μικρο-διαδρομή, 2 στάσεις) και το υπερυψηλό 323 sec (1 μικρο-διαδρομή, 2 στάσεις). Η τελική έκδοση (2015) της οικογένειας κύκλων WLTC απεικονίζεται στο Σχήμα 3.6.

Ο Πίνακας 3.2 συνοψίζει τις κύριες τεχνικές προδιαγραφές όλων των κλάσεων WLTC, με τον Πίνακα 3.3 επικεντρωμένο στην κλάση 3-2, που ενδιαφέρει στην παρούσα εργασία ως αντιπροσωπευτικός της κίνησης σε μία Ευρωπαϊκή χώρα παρέχοντας δεδομένα και για τα τέσσερα τμήματα.

Class	Duration (s)	Distance (m)	Max. Speed (km/h)	Average Speed (km/h)	Max. Accel. (m/s ²)	Idling Time (%)	RPA (m/s ²)
1	1022	8,098	64.4	28.5	0.81	18.8	0.083
2	1800	22,649	123.1	45.3	0.97	12.8	0.119
3-1	1800	23,194	131.3	46.4	1.67	12.6	0.154
3-2	1800	23,266	131.3	46.5	1.67	12.6	0.159

Πίνακας 3.2: Σύνοψη τεχνικών προδιαγραφών των κλάσεων του WLTC [5].

Segment	Duration (s)	Distance (m)	Max. Speed (km/h)	Average Speed (km/h)	Max. Accel. (m/s ²)	Idling Time (%)	RPA (m/s ²)
Low	589	3,094	56.5	18.9	1.61	24.4	0.219
Medium	433	4,756	76.6	39.5	1.61	10.9	0.206
High	455	7,162	97.4	56.7	1.67	6.4	0.138
Extra high	323	8,254	131.3	92.0	1.06	1.9	0.127

Πίνακας 3.3: Σύνοψη τεχνικών προδιαγραφών της Κλάσης 3-2 του WLTC [5].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Ανάπτυξη του

Μοντέλου Οχήματος μέσω του

Υπολογιστικού Πακέτου GT-Power

4.1 Γνωριμία με το GT-Suite

Το πρόγραμμα GT-Suite αποτελεί ένα προϊόν της εταιρείας παραγωγής εξειδικευμένου λογισμικού Gamma Technologies με έδρα τις ΗΠΑ, η οποία απευθύνεται στην βιομηχανία κινητήρων και οχημάτων. Το GT-Suite παρέχει ένα περιβάλλον στο οποίο μπορεί να γίνει εικονική αναπαράσταση κινητήρων και συστημάτων μετάδοσης καθώς και προσομοίωση μίας μεγάλης ποικιλίας εφαρμογών που σχετίζονται με την αυτοκινητοβιομηχανία. Μερικές από αυτές είναι:

- Μοντελοποίηση κινητήρων (GT-Power)
- Επεξεργασία δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων
- Ακουστική συστήματος εισαγωγής και εξαγωγής
- Επεξεργασία καυσαερίων
- Δυναμική οχήματος
- Υβριδικά συστήματα, ηλεκτροκίνητα οχήματα και κυψέλες καυσίμου
- Συστήματα ψύξης κινητήρων
- Συστήματα λίπανσης
- Συστήματα έγχυσης καυσίμου
- Υδραυλικά και πνευματικά συστήματα
- Κινηματική και δυναμική εκκεντροφόρου και συστήματος βαλβίδων
- Κινηματική και δυναμική στροφαλοφόρου
- Συστήματα μετάδοσης, κιβώτια ταχυτήτων και μαντοκίνηση

Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση του επιμέρους προγράμματος του GT-Suite, του GT-Power που εξειδικεύεται στη μοντελοποίηση κινητήρων, άδεια (license) του οποίου υπάρχει στο Εργαστήριο Μ.Ε.Κ. του Ε.Μ.Π. εδώ και αρκετά χρόνια.

Το GT-Power διαθέτει μια πλατφόρμα στην οποία μπορεί κανείς να σχεδιάσει όλων των ειδών τις εφαρμογές, συνδυάζοντας εργαλεία (tools) και στοιχεία (components) από τις βιβλιοθήκες που το ίδιο το πρόγραμμα διαθέτει [7].

4.2 Περιβάλλον εργασίας - Γενικά χαρακτηριστικά

Το GT-Power διαθέτει μία βιβλιοθήκη (library) με τα απαραίτητα πρότυπα στοιχεία και εργαλεία (templates) που χρησιμοποιούνται για τη σχεδίαση και προσομοίωση ενός κινητήρα. Κάθε πρότυπο που παρέχεται από το πρόγραμμα απαρτίζεται επιπλέον με κάποια χαρακτηριστικά (attributes) που εξαρτώνται από τα δεδομένα της εκάστοτε εφαρμογής, όπως φαίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 4.2 για την περίπτωση ενός οχήματος (π.χ. η μάζα του οχήματος, η μετωπική του επιφάνεια, ο συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης κ.λπ.)

Αφού συμπληρωθούν τα χαρακτηριστικά κάθε προτύπου σύμφωνα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής, αυτό μεταφέρεται από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος στη βιβλιοθήκη της συγκεκριμένης εργασίας (project library) και μετατρέπεται σε αντικείμενο (object) που μπορεί να διαμορφωθεί και να χρησιμοποιηθεί στην εργασία όσες φορές επιθυμεί ο χρήστης (π.χ. ο κύλινδρος σε έναν πολυκύλινδρο κινητήρα, οι αντίστοιχοι εγχυτήρες ανά κύλινδρο κοκ.).

Στη συνέχεια, όταν τα απαραίτητα αντικείμενα (objects) είναι έτοιμα, πρέπει να μεταφερθούν ένα-ένα στο χάρτη εργασίας (project map), όπου θα γίνει η σύνδεσή τους με τρόπο τέτοιο ώστε να προσομοιώνεται σωστά η διάταξη και η λειτουργία του οχήματος και του κινητήρα. Πλέον, στο χάρτη εργασίας, τα αντικείμενα χαρακτηρίζονται ως μέρη ή κομμάτια (parts) μοντέλου του οχήματος. Η τελική εικόνα που προκύπτει μοιάζει με ένα μονογραμμικό σχέδιο, στο οποίο διακρίνονται τα επιμέρους κομμάτια του μοντέλου, καθώς επίσης και οι μεταξύ τους συνδέσεις, επιτρέποντας έτσι στον χρήστη να μπορεί να κάνει μεμονωμένες αλλαγές σε

συγκεκριμένα μέρη του κινητήρα όταν αυτές κρίνονται απαραίτητες, καθώς και να επιβλέπει το μοντέλο του με καλύτερη εποπτεία.

Όταν το μοντέλο του κινητήρα (μαζί με τα περιφερειακά του συστήματα) είναι πλήρως λειτουργικό, το GT-Power δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να «τρέξει» διάφορα σενάρια (cases) σταθερής ή μεταβατικής λειτουργίας, καθώς και να εντάξει το μοντέλο του σε διάφορους Κύκλους Πόλης (Driving Cycles), σε συνθήκες που ο ίδιος ορίζει.

Μετά την ολοκλήρωση των διαφόρων σεναρίων ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να λάβει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μέσω του εργαλείου GT-Post. Τα εν λόγω αποτελέσματα έχουν τη μορφή πινάκων ή τη μορφή διαγραμμμάτων, που ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί περαιτέρω [7].

4.3 Δημιουργία του κατάλληλου μοντέλου στο GT-Power

4.3.1 Γενικές πληροφορίες κινητήρα

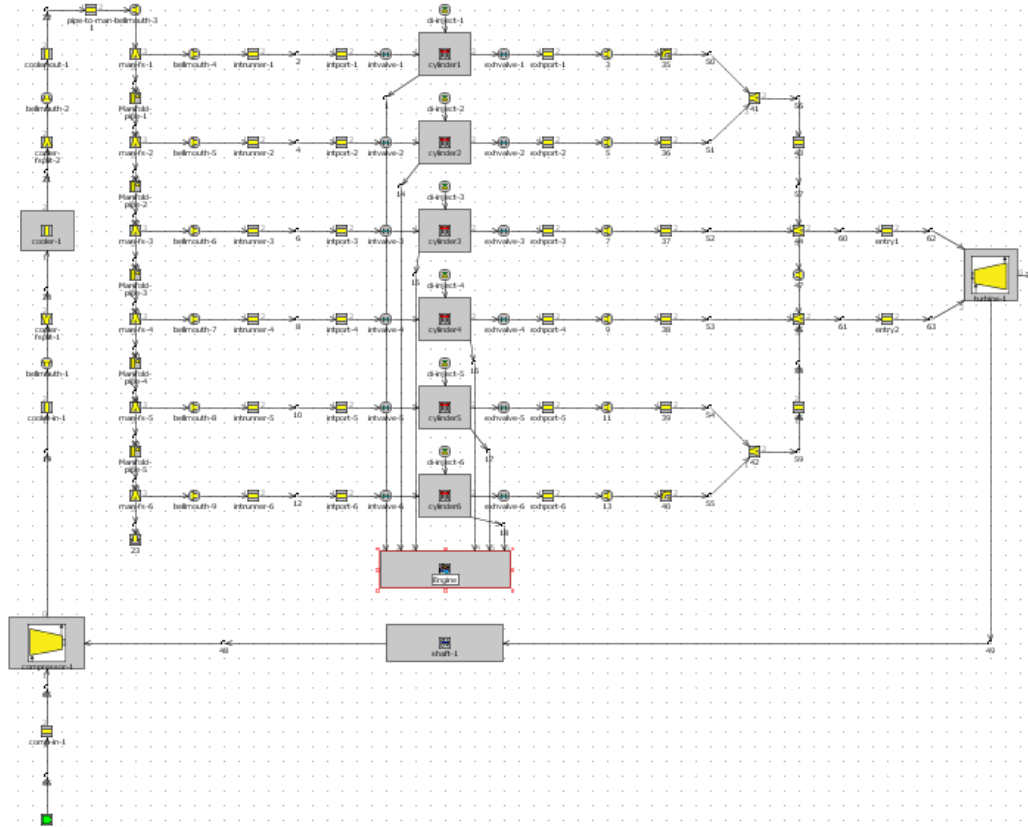
Η παρούσα διπλωματική εργασία βασίζεται σε μία ήδη περατωθείσα διπλωματική εργασία [11]. Για το λόγο αυτό και το μοντέλο που κατασκευάστηκε μέσω του GT-Power στα πλαίσια της παρούσας εργασίας είναι με τη σειρά του και αυτό συνέχεια του ήδη υπάρχοντος μοντέλου που αφορούσε στην εφαρμογή στροβιλο-υπερπλήρωσης σε 4-X κινητήρα Diesel με ενδιάμεσο ψυγείο και χωρίς περιοριστή καυσίμου, και η τελική του διάταξη στο χάρτη εργασίας του υπολογιστικού πακέτου GT-Power απεικονίζεται στην Σχήμα 4.1.

Ο κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε ως βάση, είναι ο Mercedes Benz OM3366LA. Πρόκειται για 4-X κινητήρα Diesel, άμεσης έγχυσης (DI), στροβιλο-υπερπληρωμένο με ενδιάμεση ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης (aftercooling). Ο κινητήρας είναι εγκατεστημένος στο εργαστήριο Μ.Ε.Κ. της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. Τα στοιχεία του κινητήρα είναι τα εξής:

- Διάμετρος εμβόλου: $D = 97.5 \text{ mm}$
- Διαδρομή εμβόλου: $s = 133 \text{ mm}$
- Ακτίνα στροφάλου: $r = 66.5 \text{ mm}$

- Μήκος διωστήρα: $L = 230 \text{ mm}$
- Γωνία στροφάλου κατά τη στιγμή ανοίγματος της βαλβίδας εξαγωγής:
 $\varphi_{\text{ενο}} = 112^\circ$ μετά το ΑΝΣ
- Βαθμός συμπίεσης: $CR = 18$
- Κύλινδροι: $z = 6$ σε σειρά
- Όγκος εμβολισμού: $V_h = 5958 \text{ cm}^3$
- Επιζήμιος όγκος κυλίνδρου: $V_c = 58.4 \text{ cm}^3$
- Όγκος κοιλάτητας εμβόλου: $V_{\text{bowl}} = 48.5 \text{ cm}^3$
- Μέγιστη Ισχύς: $P_{\text{max}} = 177 \text{ kW} = 237 \text{ HP}$
- Ροπή αδράνειας κινητήρα: $G_e = 0.87 \text{ kg/m}^2$

Η σειρά ανάφλεξης του είναι η 1-5-3-6-2-4 που εξασφαλίζει τέλεια ζυγοστάθμιση, καθώς και «βολική» σύνδεση των κυλίνδρων στην πολλαπλή εξαγωγής του κινητήρα από χωροταξική άποψη. Δηλαδή, η διάταξη των κυλίνδρων είναι ανά τρεις συνδεδεμένοι στην ίδια πολλαπλή εξαγωγής (1-2-3 και 4-5-6) [3].



Σχήμα 4.1: Ολοκληρωμένο μοντέλο κινητήρα Diesel με απλή στροβίλο -υπερπλήρωση στο χάρτη εργασίας του GT-Power [8].

Στο πρόγραμμα προσομοιώνονται όλες οι διεργασίες εντός του κυλίνδρου σε επίπεδο γωνίας στροφάλου (filling and emptying method). Ενδεικτικά, για την μοντελοποίηση της καύσης χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις του Wiebe και για τις απώλειες θερμότητας η σχέση του Woschni. Τέλος, όσον αφορά τις πολλαπλές εξαγωγές, χρησιμοποιείται η μέθοδος των χαρακτηριστικών (pressure wave action simulation).

4.3.2 Μοντέλο οχήματος και συστήματος μετάδοσης κίνησης στο περιβάλλον του GT-Power

Στην παρούσα διπλωματική, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, χρησιμοποιήθηκε και εμπλουτίστηκε το μοντέλο από μια παλαιότερη διπλωματική. Παρακάτω λοιπόν παρουσιάζονται τα τμήματα του υπολογιστικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε ως βάση.

Για τη μελέτη της απόκρισης του εν λόγω κινητήρα στα πλαίσια Κύκλων Πόλης ήταν απαραίτητη η μοντελοποίηση του κατάλληλου οχήματος και του συστήματος μετάδοσης κίνησης μέσω του υπολογιστικού πακέτου GT-Power. Το μοντέλο αυτό απαρτίζεται από πολλά διαφορετικά επιμέρους τμήματα, των οποίων τα χαρακτηριστικά και τα στάδια κατασκευής τους στο περιβάλλον του υπολογιστικού πακέτου GT-Power θα αναλυθούν στην παρούσα ενότητα.

A) Το όχημα (vehicle)

Τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη οχήματος (φορτηγό ελαφρού τύπου) συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1:

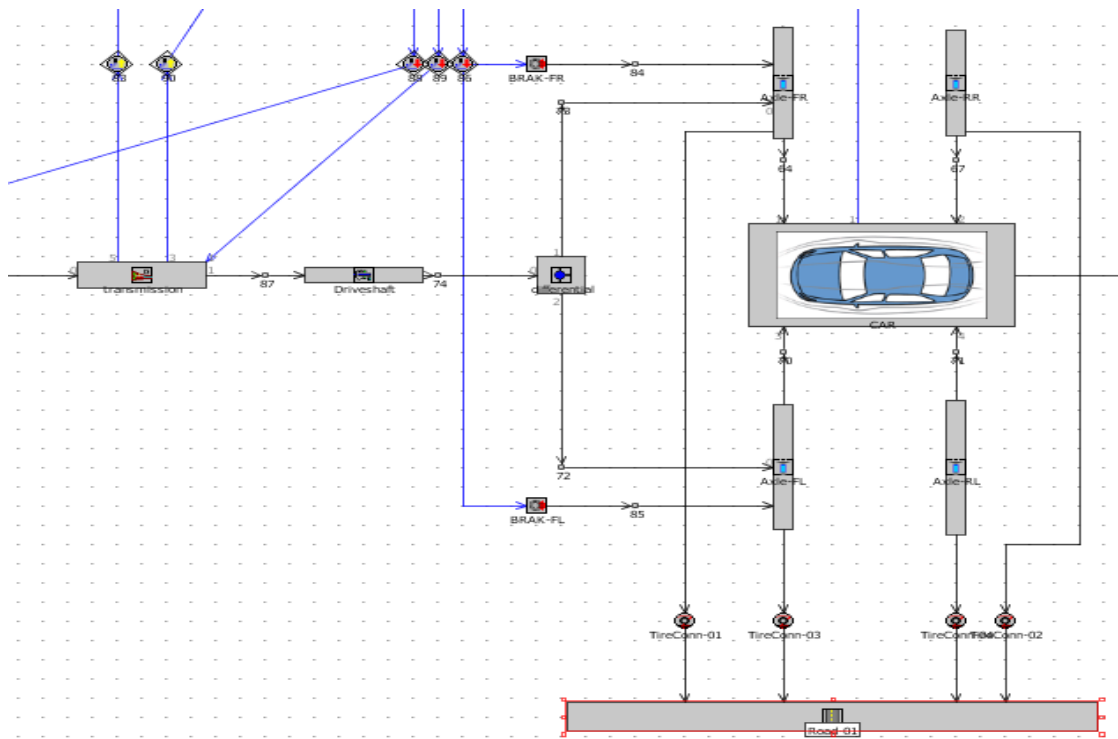
Ονομαστικό Όχημα	
Μάζα (m _v)	3.5 tn
Μετωπική Επιφάνεια (A _f)	3 m ²
Συντελεστής Αεροδυναμικής Αντίστασης (c _d)	0.38
Σχέσεις Μετάδοσης Κιβωτίου Ταχυτήτων (i _g)	1 ^η - 5.78:1 2 ^η - 2.7:1 3 ^η - 1.9:1 4 ^η - 1.25:1 5 ^η - 1.0:1 6 ^η - 0.9:1
Ακτίνα Τροχού (r _{wheel})	0.35 m
η_{gear}	0.96

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά Ονομαστικού Οχήματος.



Σχήμα 4.2: Παράδειγμα οχήματος παραπλήσιου του χρησιμοποιούμενου στην προσομοίωση. [17]

Ένα παράδειγμα τέτοιου οχήματος είναι αυτό που φαίνεται στην Σχήμα 4.2. Μέσω του υπολογιστικού πακέτου GT-Power μοντελοποιήθηκε το κατάλληλο όχημα για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, το οποίο απαρτίζεται από πολλά επιμέρους στοιχεία. Η μορφή που αποκτά το όχημα στο περιβάλλον του προγράμματος απεικονίζεται στην Σχήμα 4.3.



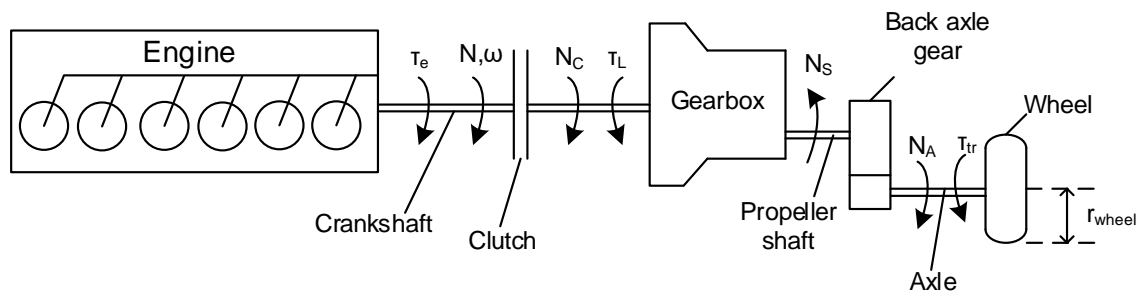
Σχήμα 4.3: Απεικόνιση του οχήματος (vehicle) στο χάρτη εργασίας του υπολογιστικού πακέτου GT-Power.

Αρχικά, κατά τον σχεδιασμό του οχήματος ο χρήστης εισάγει μέσω των παραθύρων εισαγωγής παραμέτρων του προγράμματος τα βασικά χαρακτηριστικά του οχήματος. Πιο συγκεκριμένα, εισάγεται η μάζα του οχήματος καθώς και η πυκνότητα του εγχεόμενου καυσίμου. Στη συνέχεια εισάγονται τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του οχήματος που διαμορφώνουν σε μεγάλο βαθμό την τελική απόκρισή του. Πιο συγκεκριμένα, συμπληρώνονται ο συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης c_d καθώς επίσης και η μετωπική του επιφάνεια (frontal area). Έπειτα πρέπει να ρυθμιστούν κατάλληλα αρκετές παράμετροι όπως τα μήκη του μεταξονίου και των ημιαξονίων, των ελαστικών, των φρένων και ακόμα και του οδοστρώματος.

B) Σύστημα μετάδοσης κίνησης και ισχύος στους τροχούς

Μετά την ολοκλήρωση του σχεδιασμού των στοιχείων του οχήματος, προχωρούμε στο σχεδιασμό του συστήματος μετάδοσης κίνησης που αποτελείται από διάφορα επιμέρους τμήματα. Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητη η αναφορά του αντίστοιχου θεωρητικού υπόβαθρου του συστήματος μετάδοσης της κίνησης και της ισχύος στους τροχούς που είναι γνωστή ως Drivetrain Analysis.

Για τον καθορισμό της απόκρισης ενός οχήματος που κινείται μέσω συγκεκριμένου κινητήρα, κρίνεται απαραίτητη η απλουστευμένη θεώρηση του συστήματος μετάδοσης κίνησης και ισχύος από τον κινητήρα στους τροχούς. Η εν λόγω ανάλυση χρησιμοποιείται στη μετατροπή των δεδομένων της Κλάσης 3-2 του εξεταζόμενου μεταβατικού κύκλου WLTC από ταχύτητα οχήματος συναρτήσει του χρόνου σε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα και ροπή συναρτήσει του χρόνου. Στο Σχήμα 4.4 απεικονίζεται ένα τέτοιο απλουστευμένο μοντέλο συστήματος μετάδοσης που απαρτίζεται από τον κινητήρα, το χειροκίνητο κιβώτιο ταχυτήτων, το τελικό σύστημα μετάδοσης στον άξονα των τροχών και τους τροχούς του οχήματος.



Σχήμα 4.4: Απλοποιημένο σύστημα κινητήρα - κιβωτίου ταχυτήτων - τροχών [4,13].

Ανάλυση συστήματος μετάδοσης κίνησης και ισχύος

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.4, ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα στη στροφαλοφόρο άτρακτο μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$[\tau_e(\varphi) - \tau_{fr}(\varphi)] - \frac{\tau_L}{\eta_{gear}} = \tau_A = G_V \frac{d\omega}{dt} \quad (4.1)$$

Η Σχέση 4.1 ισχύει στην περίπτωση που ο συμπλέκτης είναι δεσμευμένος και κατά συνέπεια η ταχύτητα του N_c είναι ίση με την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα N .

Στην αντίθετη περίπτωση που ο συμπλέκτης δεν είναι δεσμευμένος ($N_c \neq N$), η Σχέση 4.1 μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\frac{\tau_L}{\eta_{gear}} + G_V \frac{d\omega}{dt} = 0 \quad (4.1\alpha)$$

Στη Σχέση 4.1, η ροπή του κινητήρα $[\tau_e(\varphi) - \tau_{fr}(\varphi)]$ απορροφάται από τις αντιστάσεις στην κίνηση του οχήματος τ_L ή από την επιτάχυνση του οχήματος τ_A . Επιπρόσθετα, τα διάφορα συστήματα μετάδοσης (συμπλέκτης, κιβώτιο ταχυτήτων, διαφορικό) θεωρείται πως απορροφούν μέρος της ροπής του κινητήρα λόγω των μηχανικών απωλειών και απωλειών τριβής. Οι μηχανικές απώλειες εκφράζονται μέσω του συνολικού βαθμού απόδοσης του συστήματος μετάδοσης κίνησης η_{gear} . Επίσης, η N_s αποτελεί την ταχύτητα μετάδοσης κίνησης (υφίσταται μόνο σε οχήματα με κίνηση στους πίσω τροχούς) και η N_A είναι η ταχύτητα περιστροφής του τροχού. Σχετικά με τις σχέσεις μετάδοσης, η i_b είναι αυτή του διαφορικού ενώ η i_g η σχέση μετάδοσης της εκάστοτε ταχύτητας στο κιβώτιο ταχυτήτων (Πίνακας 4,1). Λαμβάνοντας υπ' όψιν το Σχήμα 4,4 καθώς επίσης και τις επεξηγήσεις καταλήγουμε στα εξής [6,9].

$$i_b = \frac{N_s}{N_A} \quad (4.2\alpha)$$

$$i_g = \frac{N_c}{N_s} \quad (4.2\beta)$$

Η στιγμιαία ταχύτητα του οχήματος (σε km/h) δίνεται από τη σχέση:

$$V \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right) = 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{wheel}} \cdot \frac{N_c(\text{rpm})}{i_b i_g} \cdot 60 \times 10^{-3} \quad (4.3)$$

Ως αποτέλεσμα της παραπάνω ανάλυσης προκύπτει πως όσο χαμηλότερη σχέση είναι δεσμευμένη στο κιβώτιο ταχυτήτων (αυτό σημαίνει υψηλή σχέση μετάδοσης i_g) τόσο μικρότερη είναι η συνολική ροπή αδράνειας του οχήματος και κατ' επέκταση παρουσιάζεται ταχύτερη επιτάχυνση. Αντίθετα, όσο υψηλότερη σχέση είναι δεσμευμένη στο κιβώτιο ταχυτήτων, τόσο πιο αργή είναι η επιτάχυνση, όμως επιτυγχάνεται υψηλότερη ταχύτητα οχήματος όπως φαίνεται από τη Σχέση 4.3.

Τα επιμέρους τμήματα του συστήματος μετάδοσης κίνησης της παραπάνω ανάλυσης προσομοιώθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας μέσω του υπολογιστικού πακέτου GT-Power όπως αναλύεται παρακάτω.

Συμπλέκτης τριβής (clutch)

Ο συμπλέκτης τριβής αποτελείται από δύο πλάκες και υλικό τριβής ανάμεσά τους. Η βασική αρχή λειτουργίας του είναι η εξής: Καθώς οι πλάκες πλησιάζουν, λόγω του υλικού τριβής η μία παρασύρει την άλλη και επιτυγχάνεται η μεταφορά ενέργειας. Παρατηρούμε πως, όπως είναι άλλωστε αναμενόμενο, ο συμπλέκτης παρεμβάλλεται μεταξύ του κινητήρα (engine) και του συστήματος μετάδοσης κίνησης (transmission).

Σύστημα μετάδοσης κίνησης (Transmission)

Μέσω του συστήματος μετάδοσης της κίνησης (transmission) εισάγονται στο μοντέλο οι σχέσεις μετάδοσης (gear ratios). Το πλήθος των σχέσεων μετάδοσης του κιβωτίου κίνησης επιλέγεται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε οχήματος, έτσι ώστε η απόκριση του να είναι ικανοποιητική. Παρατηρούμε ότι το εν λόγω τμήμα (transmission) αποτελεί συνδυαστικό κρικό πολλών μερών του μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, συνδέεται μέσω του άξονα (driveshaft) με το διαφορικό (differential) αλλά και με το συμπλέκτη τριβής (clutch). Επιπρόσθετα, επικοινωνεί με τον εικονικό οδηγό, καθώς του δίνει την δυνατότητα αλλαγής ταχύτητας στο κιβώτιο ταχυτήτων αλλά και με τα διάφορα συστήματα ελέγχου που

χρησιμοποιούνται (controllervehicle, driveaway). Περαιτέρω ανάλυση για τα χαρακτηριστικά και τον ρόλο του εικονικού οδηγού θα γίνει στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου.

Διαφορικό (Differential)

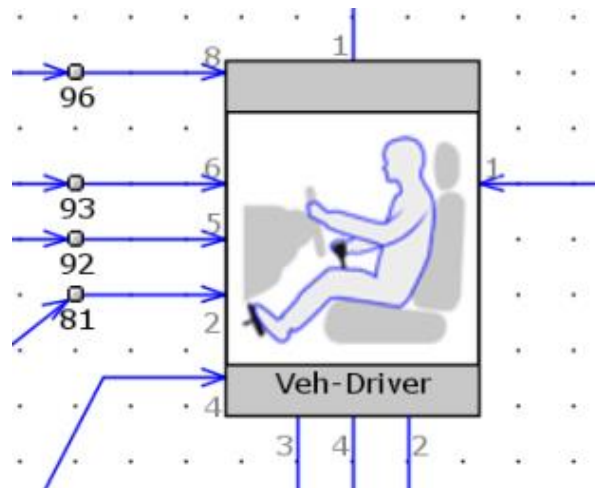
Το διαφορικό μπορεί να ορισθεί ως ο μηχανισμός που λαμβάνει πληροφορίες ανάλογα με την επαφή καθενός κινητήριου τροχού με το οδόστρωμα και διαμοιράζει αντίστοιχα την ισχύ ή την ροπή του κινητήρα στους άξονες των τροχών.

Ελεγκτής Εκκίνησης (driveaway)

Είναι κάτι αντίστοιχο με τον ελεγκτή οχήματος αλλά αφορά μόνο την περίπτωση της εκκίνησης και μόνο τότε ενεργοποιείται και επικοινωνεί με τον εικονικό οδηγό.

Οδηγός οχήματος (vehicle driver)

Για την επίτευξη καλύτερου συντονισμού και πιο ρεαλιστικών αποτελεσμάτων, κρίθηκε απαραίτητη η προσθήκη ενός εικονικού οδηγού κυρίως για τις αλλαγές σχέσης αλλά και στην αρχή και το τέλος του Κύκλου Πόλης, ο οποίος συμπεριφέρεται σαν πραγματικός οδηγός. Αυτός είναι ουσιαστικά υπεύθυνος για το συντονισμό του κιβωτίου ταχυτήτων, του συμπλέκτη και του πεντάλ επιτάχυνσης (“γκάζι”). Βασικό χαρακτηριστικό του είναι ότι μέσω του GT-Power μπορεί να εισαχθεί η στρατηγική αλλαγής ταχυτήτων που δίνει τη δυνατότητα στον οδηγό να ελέγχει τις σχέσεις μετάδοσης στο κιβώτιο ταχυτήτων, και κατ’ επέκταση καθορίζει τη γραμμική ταχύτητα του οχήματος στην οποία θα γίνεται η κάθε αλλαγή σχέσης.



Σχήμα 4.5: Απεικόνιση εικονικού οδηγού στο περιβάλλον του GT-Power.

Όπως θα φανεί και από την μορφή του μοντέλου στο Σχήμα 4.6, ο οδηγός “βλέπει” και κατά συνέπεια συνδέεται στο GT-Power, όπως και ένας πραγματικός μόνο με το πεντάλ επιτάχυνσης (accelerator pedal), φρένο (brake pedal), συμπλέκτη τριβής (clutch pedal) και κιβώτιο ταχυτήτων. Για το λόγο, αυτό μέσω των παραθύρων εισαγωγής των χαρακτηριστικών του εικονικού οδηγού στο GT-Power συμπληρώθηκαν διαφορετικοί χάρτες που προσομοιώνουν έναν πραγματικό οδηγό. Αναλυτικά, όσον αφορά το «γκάζι» εισάγεται ένας χάρτης της συμπεριφοράς του κατά τη διάρκεια των αλλαγών σχέσης (shiftaccel).

Αντίστοιχα, στο συμπλέκτη τριβής εισάγονται δύο χάρτες που απεικονίζουν την συμπεριφορά του στις περιπτώσεις αλλαγής ταχύτητας (shiftclutch) και εκκίνησης (driveclutch).

Τέλος, εισάγονται κάποια στοιχεία σχετικά με τη χρονική διάρκεια των φαινομένων της εκκίνησης και της αλλαγής ταχύτητας.

Πρέπει επίσης να αναφερθεί και η δημιουργία του χάρτη που απεικονίζει την εγχεόμενη ποσότητα καυσίμου ανάλογα με το φορτίο σε ποσοστό %, δηλαδή ουσιαστικά ανάλογα με το “πάτημα” του πεντάλ επιτάχυνσης. Λαμβάνοντας υπόψιν ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας καθώς επίσης και εμπειρικά στοιχεία, προέκυψε το διάγραμμα ποσότητας εγχεόμενου καυσίμου, στο οποίο στον οριζόντιο άξονα X τοποθετείται το φορτίο (%) ενώ στον κατακόρυφο άξονα Y τοποθετείται η

εγχεόμενη ποσότητα καυσίμου σε mg/cycle. Είναι χαρακτηριστικό ότι ο συγκεκριμένος χάρτης συνδέεται μέσω κατάλληλου ενεργοποιητή στους εγχυτήρες των έξι κυλίνδρων του κινητήρα αλλά και στον εικονικό οδηγό. Η συμπλήρωση του χάρτη αυτού γίνεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε στην άφορτη λειτουργία οι στροφές να διατηρούνται περίπου στις 1000 rpm.

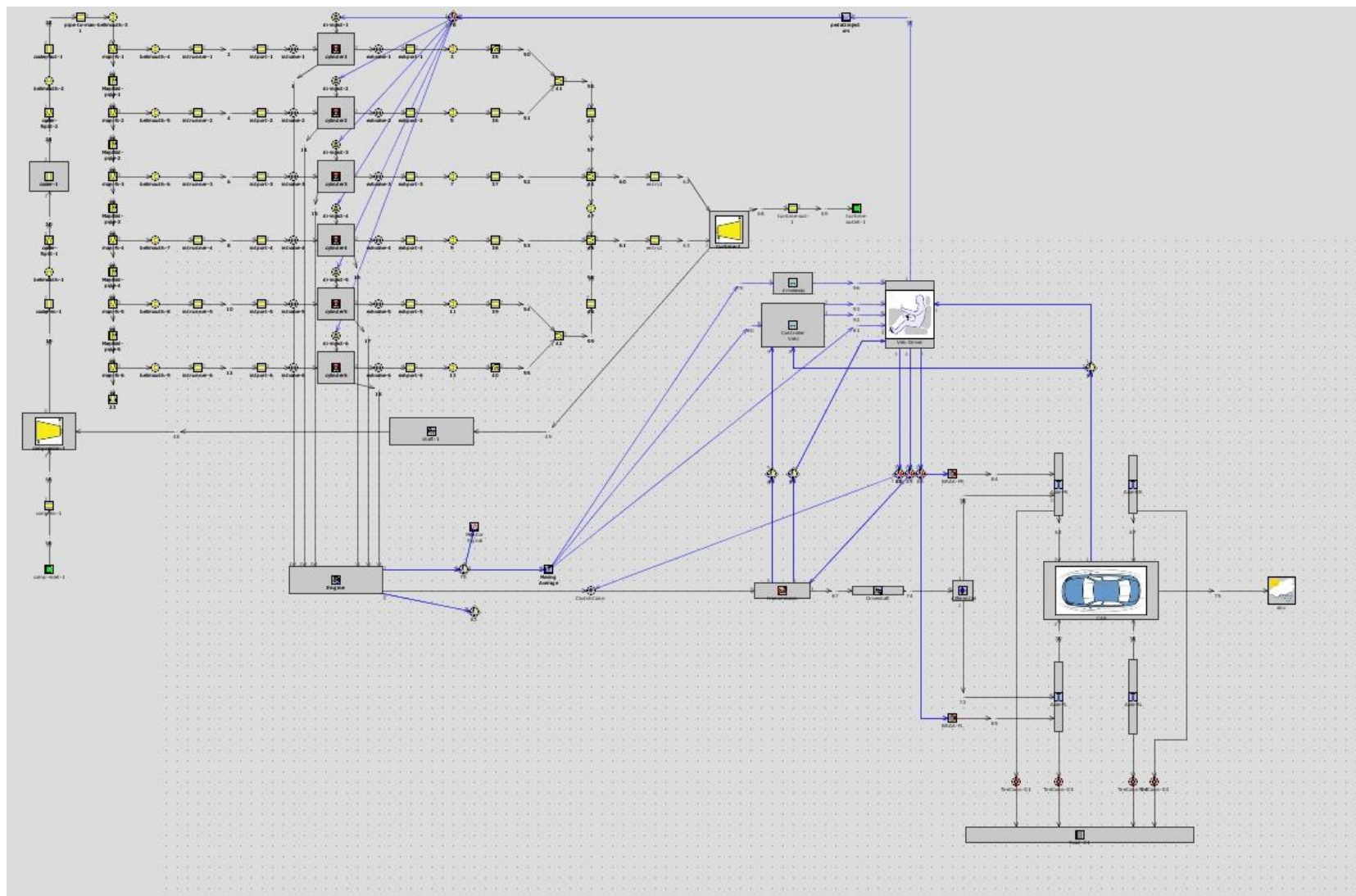
Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει ανάλυση των διαφόρων τμημάτων, που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και για την εύρυθμη λειτουργία του υπό μελέτη μοντέλου, έτσι ώστε να το όχημα να ακολουθεί με ικανοποιητική ακρίβεια και ρεαλιστικά τους επιλεγμένους Κύκλους Πόλης.

Ελεγκτής οχήματος (controller vehicle)

Ο ελεγκτής του οχήματος είναι καθοριστικής σημασίας για τη λειτουργία του μοντέλου, καθώς αποτελεί έναν απλοποιημένο “εγκέφαλο” που λαμβάνει δεδομένα από την κατάσταση του οχήματος και “πατά” στον επιθυμητό βαθμό το πεντάλ επιτάχυνσης ή το φρένο αντίστοιχα, ώστε το όχημα να μπορεί να ακολουθήσει ένα συγκεκριμένο προφίλ ταχύτητας, που στη παρούσα περίπτωση είναι ένας μεταβατικός Κύκλος Πόλης.

Επίσης, βασικό χαρακτηριστικό του αποτελεί ο χάρτης της μέσης πραγματικής πίεσης (bmer) του κινητήρα που για τη συμπλήρωσή του απαιτείται το “τρέξιμο” του κινητήρα αποσυνδεδεμένο από το όχημα σε διάφορα σενάρια στροφών και φορτίου με τιμές από 500-3000 rpm και 0-100% αντίστοιχα. Προκύπτουν έτσι πολλά διαφορετικά σενάρια με όλους τους συνδυασμούς στροφών και φορτίου και από την ολοκλήρωσή τους κατασκευάζεται ο παραπάνω χάρτης.

Υλοποιώντας όλα τα παραπάνω βήματα, προέκυψε τελικά η ολοκληρωμένη διάταξη του μοντέλου οχήματος που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Ολοκληρωμένη εικόνα του μοντέλου οχήματος και του συστήματος μετάδοσης κίνησης και η σύνδεση του με τον κινητήρα Diesel στο περιβάλλον του GT-Power [7].

Κλείνοντας, κρίνεται απαραίτητη η παρουσίαση της κεντρικής ιδέας της λειτουργίας του σχεδιασμένου μοντέλου που αναλύθηκε εκτενώς παραπάνω, για καλύτερη εποπτεία του. Έτσι η λειτουργία του μοντέλου οχήματος συνοψίζεται στα εξής:

Ο εικονικός οδηγός διαθέτει τρεις διαφορετικές καταστάσεις εκκίνηση, αλλαγή ταχύτητας και κανονική οδήγηση.

- Ο εικονικός οδηγός λαμβάνει το σήμα από το διεγερμένο πεντάλ επιτάχυνσης (accelerator pedal) και φρένου (brake pedal) από τον ελεγκτή οχήματος (controller vehicle) και επενεργεί αυτός στο πεντάλ επιτάχυνσης, φρένου και κιβώτιο ταχυτήτων ανάλογα με τις ανάγκες και την κατάσταση στην οποία βρίσκεται.
- Αν βρίσκεται σε κατάσταση **εκκίνησης**, ο οδηγός αγνοεί την είσοδο σήματος από τον ελεγκτή οχήματος και ακολουθεί την είσοδο του σήματος από τον ελεγκτή εκκίνησης (driveaway).
- Αντίστοιχα, αν βρίσκεται σε κατάσταση **αλλαγής ταχύτητας** ο οδηγός αγνοεί τις εισόδους των δύο προαναφερόμενων ελεγκτών οχήματος και εκκίνησης αντίστοιχα και επενεργεί στο πεντάλ επιτάχυνσης και το συμπλέκτη τριβής σύμφωνα με τους χάρτες που διαθέτει.
- Τέλος, στην περίπτωση της **κανονικής οδήγησης**, ο οδηγός ακολουθεί την είσοδο σήματος από τον ελεγκτή οχήματος (controller vehicle).

Όσον αφορά στη γενική πορεία εργασίας, μετά την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης του οχήματος και της κατάλληλης σύνδεσής του με τον κινητήρα Diesel, το μοντέλο “έτρεξε” στα πλαίσια της Κλάσης 3-2 του Παγκοσμίου Κύκλου Πόλης WLTC. Στη συνέχεια ακολούθησε κατάλληλη επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το υπολογιστικό πακέτο GT-Power, με σκοπό την μελέτη της απόκρισης του οχήματος καθώς και την εκτίμηση των εκπεμπόμενων ρύπων (NO_x και αιθάλης) και των εκπομπών CO₂, που παρουσιάζονται εκτενώς στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας εργασίας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για το “τρέξιμο” του Κύκλου Πόλης WLTC για τον υπό μελέτη 6-κύλινδρο κινητήρα απαιτείται χρονικό διάστημα περίπου 7 ωρών (επεξεργαστής Intel Core i5 2.3GHz και μνήμη RAM 2GB).

4.3.3 Μοντέλο ηλεκτρικής υποβοήθησης του στροβιλο-υπερπληρωτή³

Για την ακριβή μοντελοποίηση του συστήματος της ηλεκτρικά υποβοηθούμενης στροβιλο-υπερπλήρωσης κρίθηκε απαραίτητη η χρήση διαφόρων ειδών κομματιών-προτύπων (templates). Χρησιμοποιήθηκαν συστήματα ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας, ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά κομμάτια καθώς και συστήματα ελέγχου. Τα χαρακτηριστικά τους καθώς και η διάταξη και η συνδεσμολογία τους παρουσιάζονται παρακάτω εκτενώς.

A) Ηλεκτροκινητήρας

Το πιο σημαντικό κομμάτι της υποβοήθησης είναι ο ηλεκτροκινητήρας ο οποίος συνδέεται μηχανικά στην άτρακτο του στροβιλο-υπερπληρωτή και προσφέρει την απαραίτητη ισχύ στο ζεύγος υπερπλήρωσης με σκοπό την ελαχιστοποίηση της υστέρησής του. Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε σε αυτήν την διπλωματική εργασία ο ηλεκτροκινητήρας έχει ονομαστική ισχύ 5kW και ονομαστικές στροφές 30,000 rpm.

B) Μπαταρία

Η μπαταρία που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο είναι για ξεχωριστή μπαταρία από αυτή του κεντρικού δικτύου του αυτοκινήτου, και είναι υπεύθυνη για την παροχή ισχύος μόνο στον ηλεκτροκινητήρα. Η μπαταρία αυτή είναι συνολικής χωρητικότητας 1 A-h και ξεκινάει πλήρως φορτισμένη στην αρχή της προσομοίωσης.

C) Αναστροφέας (Inverter)

Ο αναστροφέας είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο του επιπέδου της τάσης (V-Volt) και του ρεύματος (A-Ampere) από και προς την μπαταρία. Τα επίπεδα αυτά είναι ρυθμισμένα για την τάση στα 48 V και το ρεύμα στα 300 A.

D) Δυναμό (alternator)

Το δυναμό είναι απαραίτητο στη συγκεκριμένη μοντελοποίηση καθώς η επιπλέον ενέργεια των καυσαερίων που δεσμεύεται από την γεννήτρια και μετατρέπεται σε ηλεκτρική δεν επαρκεί ώστε να φορτίζει την μπαταρία με τον ίδιο ρυθμό με τον οποίο αποφορτίζεται. Το δυναμό είναι μία γεννήτρια ρεύματος με ονομαστικές στροφές λειτουργίας 2,000 rpm και ονομαστική ισχύ 2W. Η ισχύς αυτή είναι αρκετά μικρή,

³ Για την δημιουργία και την διαστασιολόγηση των συγκεκριμένων τμημάτων του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν πληροφορίες από τις παραπομπές [20-24].

αλλά επαρκεί για την φόρτιση της μπαταρίας διότι και η μπαταρία έχει μικρή χωρητικότητα.

E) Σύστημα ελέγχου

Το σύστημα ελέγχου που επιλέχθηκε είναι ένα απλό σύστημα που ελέγχει συνεχώς τις τιμές συγκεκριμένων μεγεθών, και με βάση αυτές επιλέγεται η λειτουργία των παραπάνω εξαρτημάτων. Για την λήψη αποφάσεων, χρησιμοποιούνται και συγκρίνονται οι τιμές των εξής μεγεθών:

- Ισχύς συμπιεστή
- Ισχύς στροβίλου
- Πεντάλ του “γκαζιού”
- Επιτάχυνση του οχήματος
- Ταχύτητα του οχήματος
- Επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας
- Στροφές του κινητήρα
- Στροφές του υπερπληρωτή

Ανάλογα με τις τιμές των παραπάνω μεγεθών διαμορφώνονται τέσσερις καταστάσεις λειτουργίας οι οποίες ελέγχονται διαδοχικά με την σειρά με την οποία παρουσιάζονται:

1. Ενεργοποίηση ηλεκτροκινητήρα

Ο ηλεκτροκινητήρας προσφέρει μηχανική ισχύ στο ζεύγος στροβίλου-συμπιεστή όταν:

- Το πεντάλ του γκαζιού είναι πατημένο πάνω από 10 %
- Η επιτάχυνση του οχήματος είναι μεγαλύτερη από 1.65 m/s^2
- Η ταχύτητα του οχήματος είναι μικρότερη των 80 km/h
- Οι στροφές του κινητήρα είναι λιγότερες από 2250 rpm

Η ισχύς η οποία αποδίδεται στο ζεύγος είναι ίση με την ισχύ του συμπιεστή. Επομένως η ισχύς του συμπιεστή διπλασιάζεται και έτσι αυξάνεται η ποσότητα αέρα, οπότε η απόκριση του οχήματος βελτιώνεται.

2. Κατάσταση αναμονής

Η κατάσταση αναμονής αναφέρεται στην περίπτωση, όπου δεν κρίνεται απαραίτητη η συμβολή του ηλεκτροκινητήρα, και το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας είναι 100 %. Στην κατάσταση αυτή, το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας είναι αρκετά υψηλό και δεν χρειάζεται φόρτιση, επομένως ούτε το δυναμό προσφέρει ενέργεια στην μπαταρία ούτε απορροφάται η τυχόν περίσσεια ενέργεια των καυσαερίων.

3. Ενεργοποίηση γεννήτριας

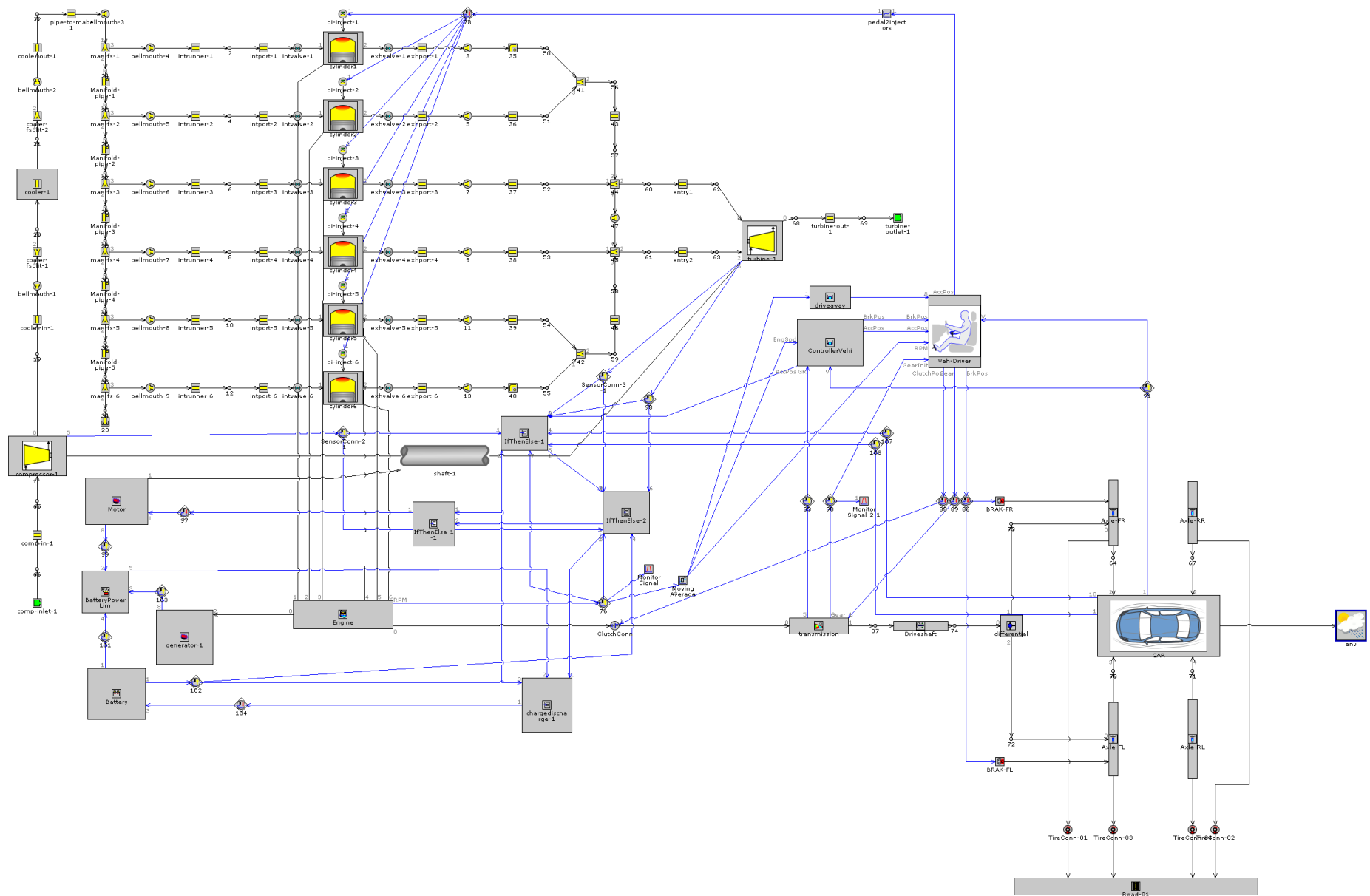
Για την ενεργοποίηση της γεννήτριας και την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από την περίσσεια ενέργειας των καυσαερίων, κρίνεται απαραίτητος ο αυστηρός έλεγχος αρκετών τιμών, διότι η απορρόφηση της περίσσειας ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη μείωση των στροφών του ζεύγους υπερπλήρωσης με αποτέλεσμα την ελαττωματική λειτουργία του ζεύγους και του κινητήρα ή ακόμα χειρότερα μέχρι και στο σβήσιμο του κινητήρα. Λαμβάνοντας υπ'όψιν τα παραπάνω, η ενέργεια που απορροφάται είναι ίση με το μισό της περίσσειας των καυσαερίων και τα κριτήρια που τίθενται είναι:

- Η ισχύς του στροβίλου να είναι μεγαλύτερη από αυτή του συμπιεστή
- Το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας να είναι μικρότερο του 100 %
- Οι στροφές του κινητήρα να είναι άνω των 2000 rpm
- Οι στροφές του ζεύγους υπερπλήρωσης να είναι άνω των 35000 rpm

4. Φόρτιση μπαταρίας από το δυναμό

Η τελευταία, αλλά και πολύ σημαντική κατάσταση είναι αυτή κατά την οποία το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας είναι μικρότερο του 50 %, και καμία από τις παραπάνω καταστάσεις δεν πληροί τις συνθήκες της. Επομένως η μπαταρία φορτίζεται από το δυναμό για να διατηρηθεί το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας υψηλό σε περίπτωση που χρειαστεί ο ηλεκτροκινητήρας αρκετή ενέργεια.

Με την τοποθέτηση όλων των απαραίτητων κομματιών στο περιβάλλον του GT-Power προκύπτει ο χάρτης που φαίνεται στο Σχήμα 4.7.



Εικόνα 4.7: Ολοκληρωμένη εικόνα του μοντέλου οχήματος και του συστήματος μετάδοσης κίνησης και η σύνδεση του με τον κινητήρα Diesel με ηλεκτρικά υποβοηθούμενη στροβιλο-υπερπλήρωση στο περιβάλλον του GT-Power.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Επιδόσεις και

Εκπομπές Καυσαερίων του Κινητήρα

5.1 Εισαγωγή

Όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω, ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των επιδόσεων και των εκπομπών καυσαερίων ενός κινητήρα Diesel με ηλεκτρικά υποβοηθούμενη στροβιλο-υπερπλήρωση και η σύγκριση τους με τα αντίστοιχα μεγέθη του ίδιου κινητήρα Diesel αλλά με απλή, μονοβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση.

Για την σύγκριση, αυτή χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα από την προσομοίωση της λειτουργίας του κινητήρα σε δύο διαφορετικούς κύκλους. Ο πρώτος είναι ο Κύκλος Πόλης WLTC, που παρουσιάστηκε παραπάνω, και συγκεκριμένα, η Κλάση 3-2 του WLTC που ισχύει στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Ο δεύτερος είναι ένας αυτοσχέδιος «κύκλος» flat-out (πλήρους φορτίου) που εφαρμόστηκε έτσι ώστε να γίνει πιο εμφανής η συμβολή της ηλεκτρικής υποβοήθησης στην απόκριση του κινητήρα. Ο συγκεκριμένος «κύκλος» δεν είναι τίποτε παραπάνω από την επιτάχυνση του οχήματος από στάση στα 100 km/h στο συντομότερο χρονικό διάστημα. Στην συνέχεια το όχημα επιβραδύνει μέχρι τα 35 km/h και επιταχύνει εκ νέου έως τα 100 km/h και τέλος επιβραδύνει και πάλι, στα 65 km/h αυτή τη φορά, για να επιταχύνει και πάλι έως τα 100 km/h. Οι δύο τελευταίες «διαδρομές» προστέθηκαν για να διερευνηθεί η διαφορά στην απόκριση του οχήματος όταν αυτό χρειαστεί να επιταχύνει, τη στιγμή που στο κιβώτιο ταχυτήτων είναι δεσμευμένη η δεύτερη και η τέταρτη σχέση αντίστοιχα.

Για τον έλεγχο των επιδόσεων του οχήματος ελέγχθηκε η ικανότητα του οχήματος να ακολουθήσει τον Κύκλο Πόλης WLTC και επίσης οι χρόνοι στους οποίους πραγματοποιεί τις επιταχύνσεις 0-100 km/h, 35-100 km/h και 65-100

km/h. Όσον αφορά τη σύγκριση των εκπομπών ρύπων με και χωρίς την υποβοήθηση, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μόνο αυτά από την προσομοίωση των κινητήρων στον κύκλο WLTC. Οι ρύποι στους οποίους δόθηκε έμφαση είναι τα οξείδια του αζώτου NO_x και η αιθάλη και επίσης συγκρίθηκαν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂).

Με σκοπό την καλύτερη κατανόηση και απεικόνιση των αποτελεσμάτων παρατίθενται και διαγράμματα όλων των μεγεθών που παρουσιάζονται, για τα πρώτα 400 δευτερόλεπτα διάρκειας του Κύκλου (δηλαδή στο κομμάτι λειτουργίας εντός πόλης, όπου και αναμένεται μεγαλύτερη χρήση της ηλεκτρικής υποβοήθησης), ώστε να φανούν ορισμένες λεπτομέρειες, που δεν φαίνονται στο διαγράμματα ολόκληρου του Κύκλου. Αξίζει να σημειωθεί πως σε όλα τα διαγράμματα η πράσινη καμπύλη αναπαριστά τα δεδομένα για τον κινητήρα (και το όχημα) με την απλή στροβιλο-υπερπλήρωση ενώ η κόκκινη τα δεδομένα για τον κινητήρα (και το όχημα) με την ηλεκτρικά υποβοηθούμενη στροβιλο-υπερπλήρωση.

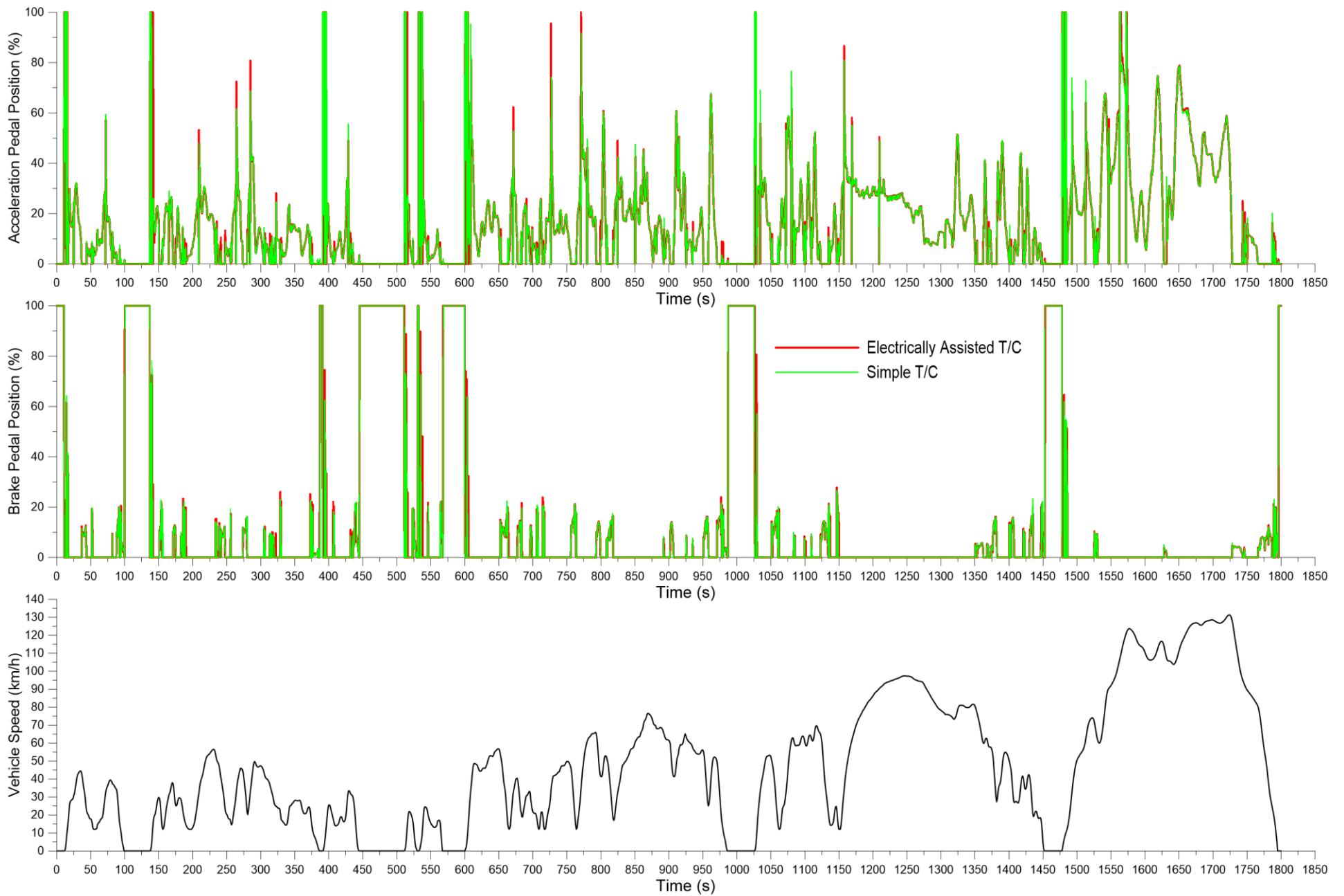
5.2 Επιδόσεις κινητήρα

Παρακάτω παρουσιάζονται δεκατέσσερα συνδυαστικά διαγράμματα που αφορούν τις επιδόσεις του οχήματος και του κινητήρα με και χωρίς ηλεκτρική υποβοήθηση. Στα διαγράμματα αυτά παρουσιάζονται τα εξής μεγέθη:

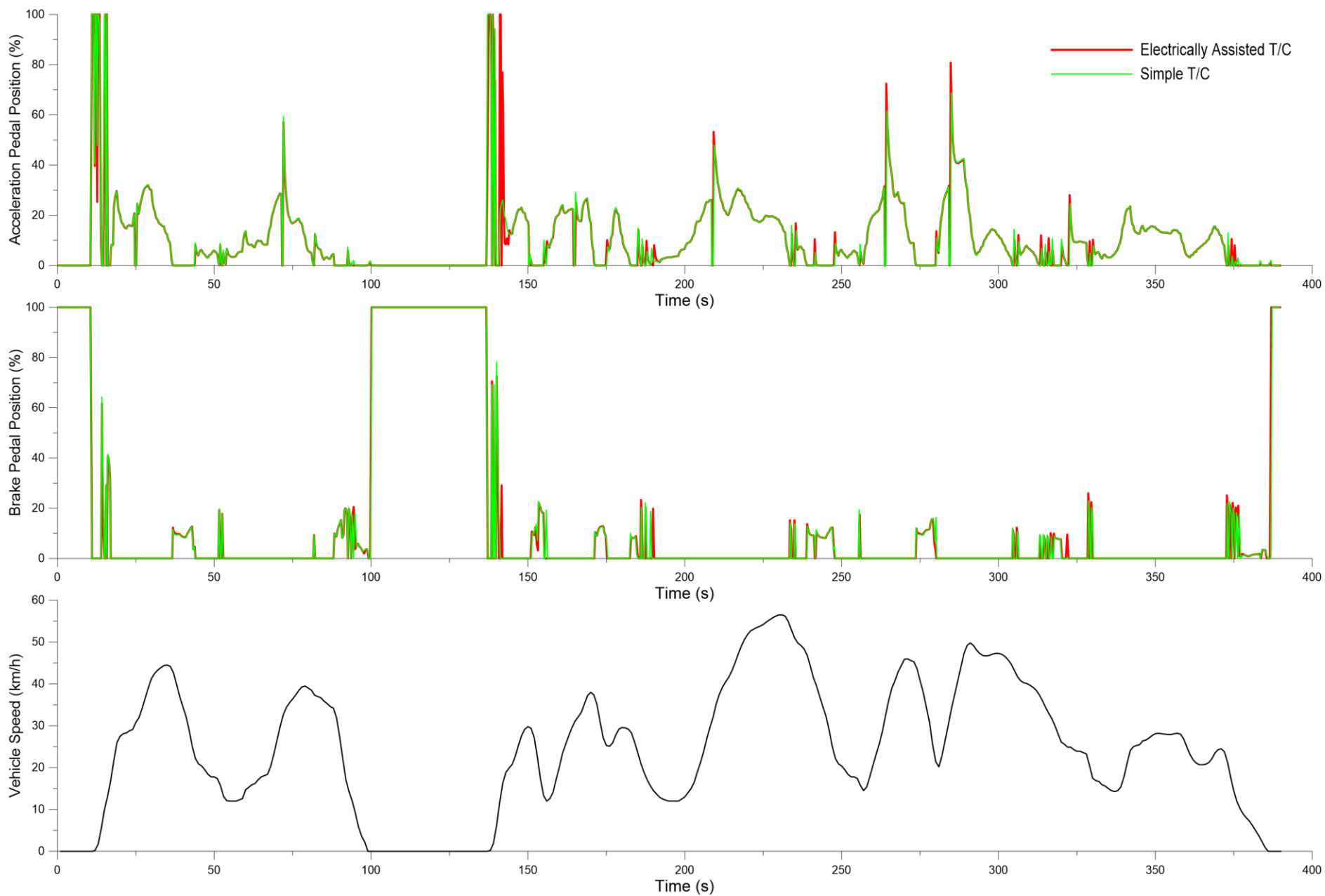
- Πάτημα του πεντάλ του “γκαζιού” %
- Πάτημα του πεντάλ του φρένου %
- Πάτημα του πεντάλ του συμπλέκτη %
- Η σχέση που είναι δεσμευμένη στο κιβώτιο ταχυτήτων
- Η πραγματική ταχύτητα του οχήματος
- Η στροφές του κινητήρα σε rpm
- Η ισχύς του κινητήρα σε kW
- Η ροπή του κινητήρα του κινητήρα σε Nm
- Η στιγμιαία παροχή μάζας καυσίμου σε g/s
- Η ειδική κατανάλωση καυσίμου σε g/kWh
- Η μέση πραγματική πίεση σε bar

- Η απόσταση που έχει διανύσει το όχημα σε m
- Οι στροφές του ζεύγους υπερπλήρωσης σε rpm
- Και τέλος ο λόγος πίεσης του συμπιεστή

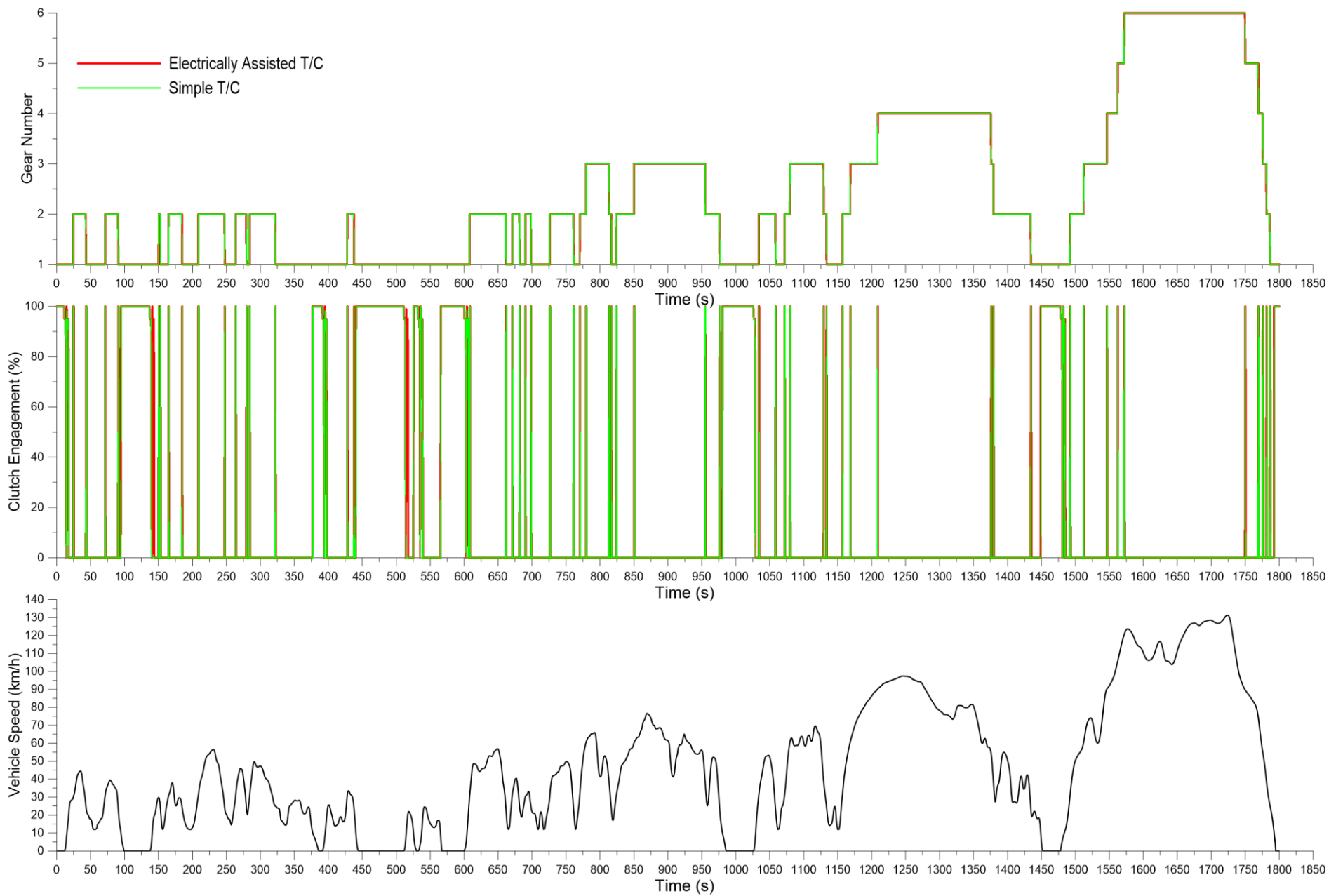
Όλα τα παραπάνω μεγέθη παρουσιάζονται μαζί με το διάγραμμα της ταχύτητας του οχήματος. Τέλος υπάρχει και το Διάγραμμα 5.15, αυτό της απόκρισης του οχήματος στο δεύτερο, αυτοσχέδιο κύκλο.



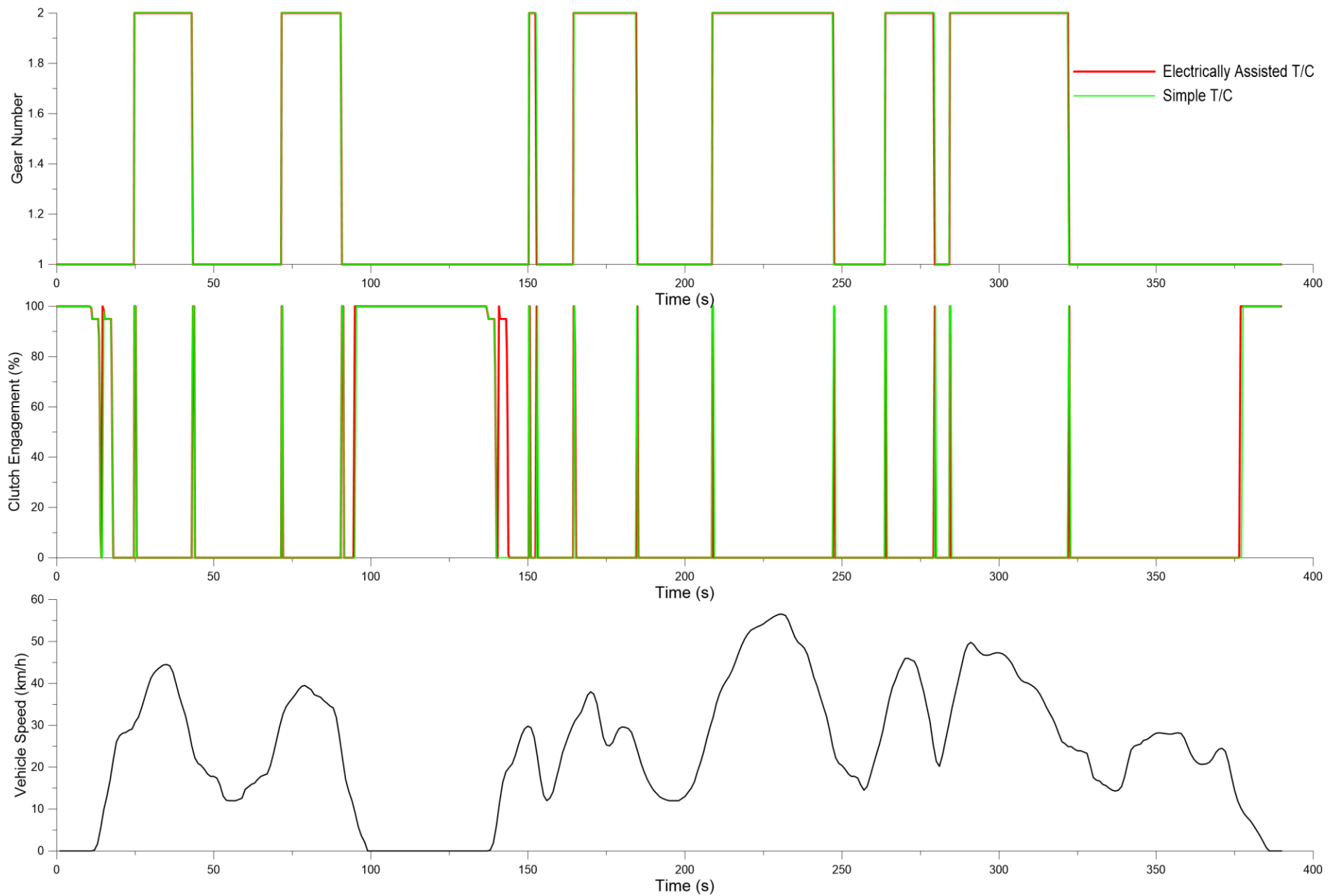
Σχήμα 5.1: Πάτημα του πεντάλ του γκαζιού και του φρένου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.



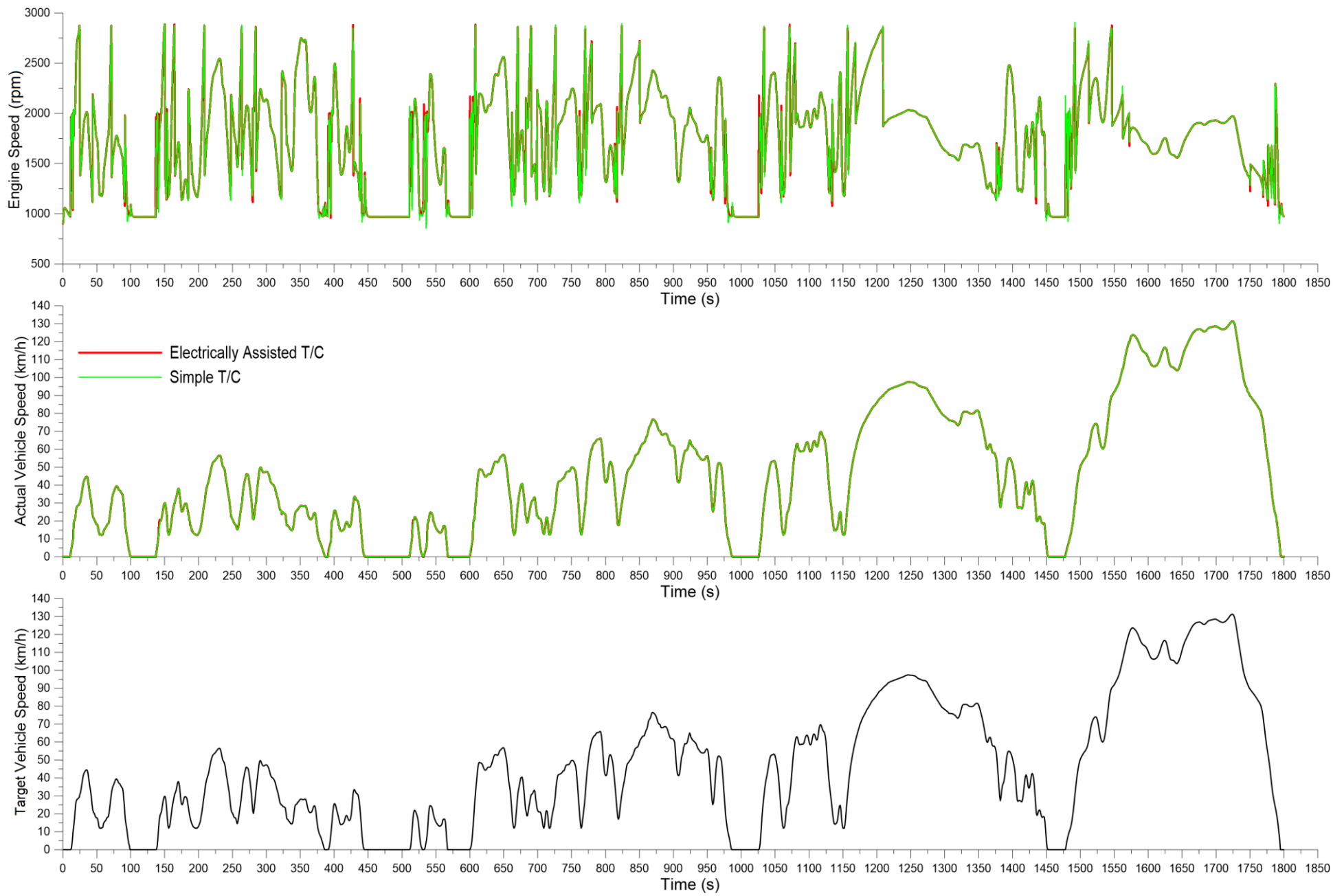
Σχήμα 5.2: Πάτημα του πεντάλ του γκαζιού και του φρένου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 400 δευτερολέπτων της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.



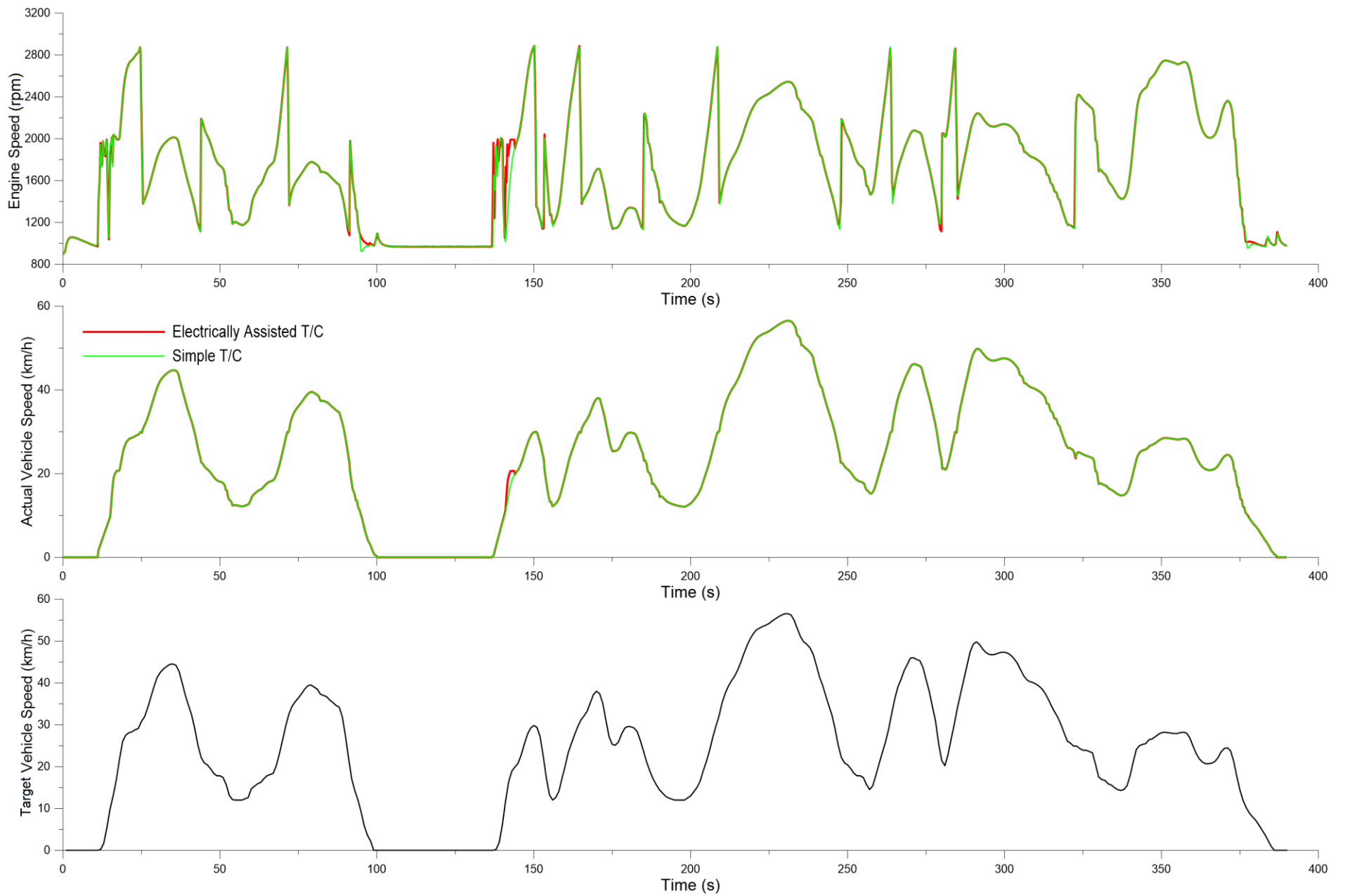
Σχήμα 5.3: Πάτημα του πεντάλ του συμπλέκτη και ο αριθμός της σχέσης στο κιβώτιο ταχυτήτων συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.



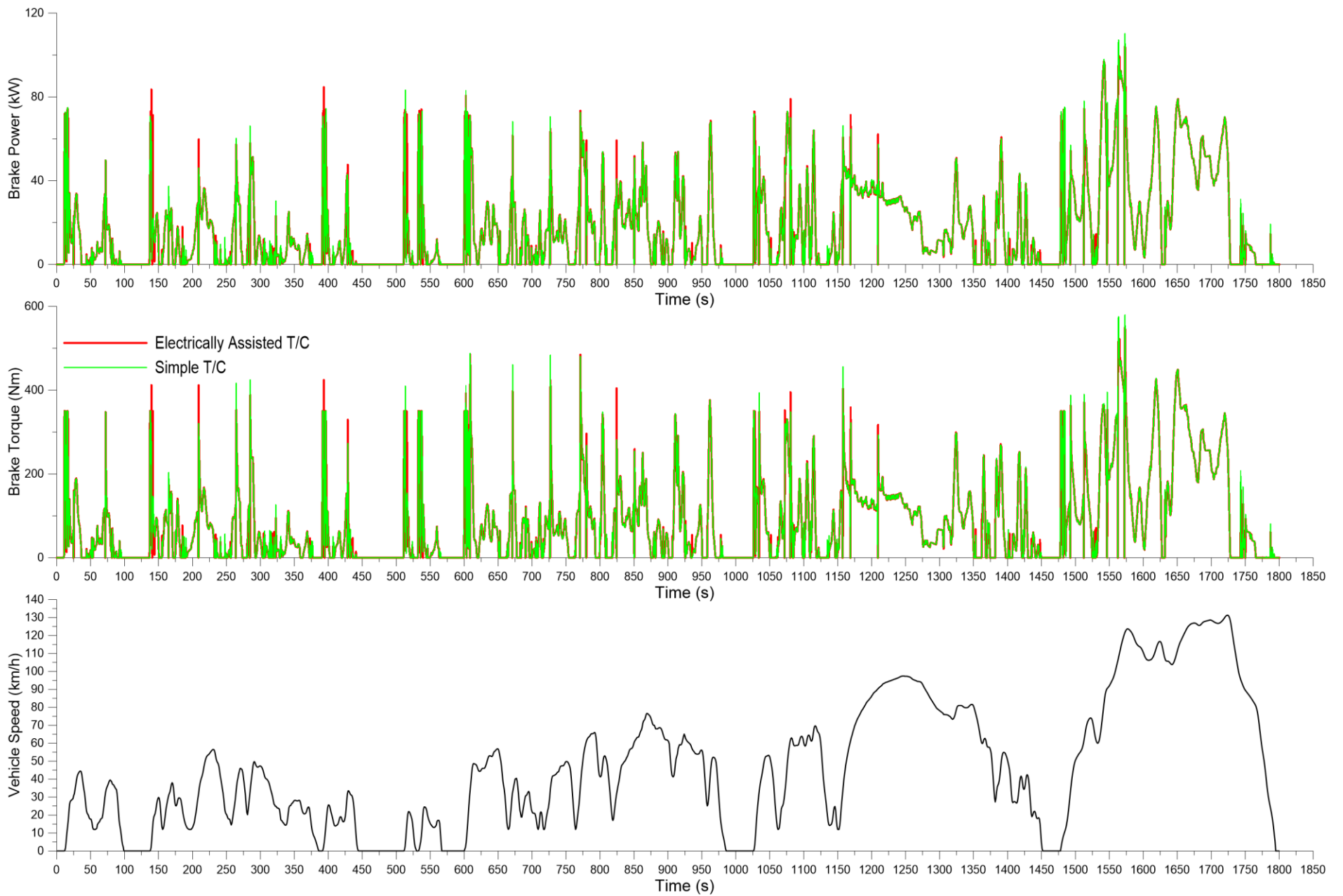
Σχήμα 5.4: Πάτημα του πεντάλ του συμπλέκτη και ο αριθμός της σχέσης στο κιβώτιο ταχυτήτων συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 400 δευτερολέπτων της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.



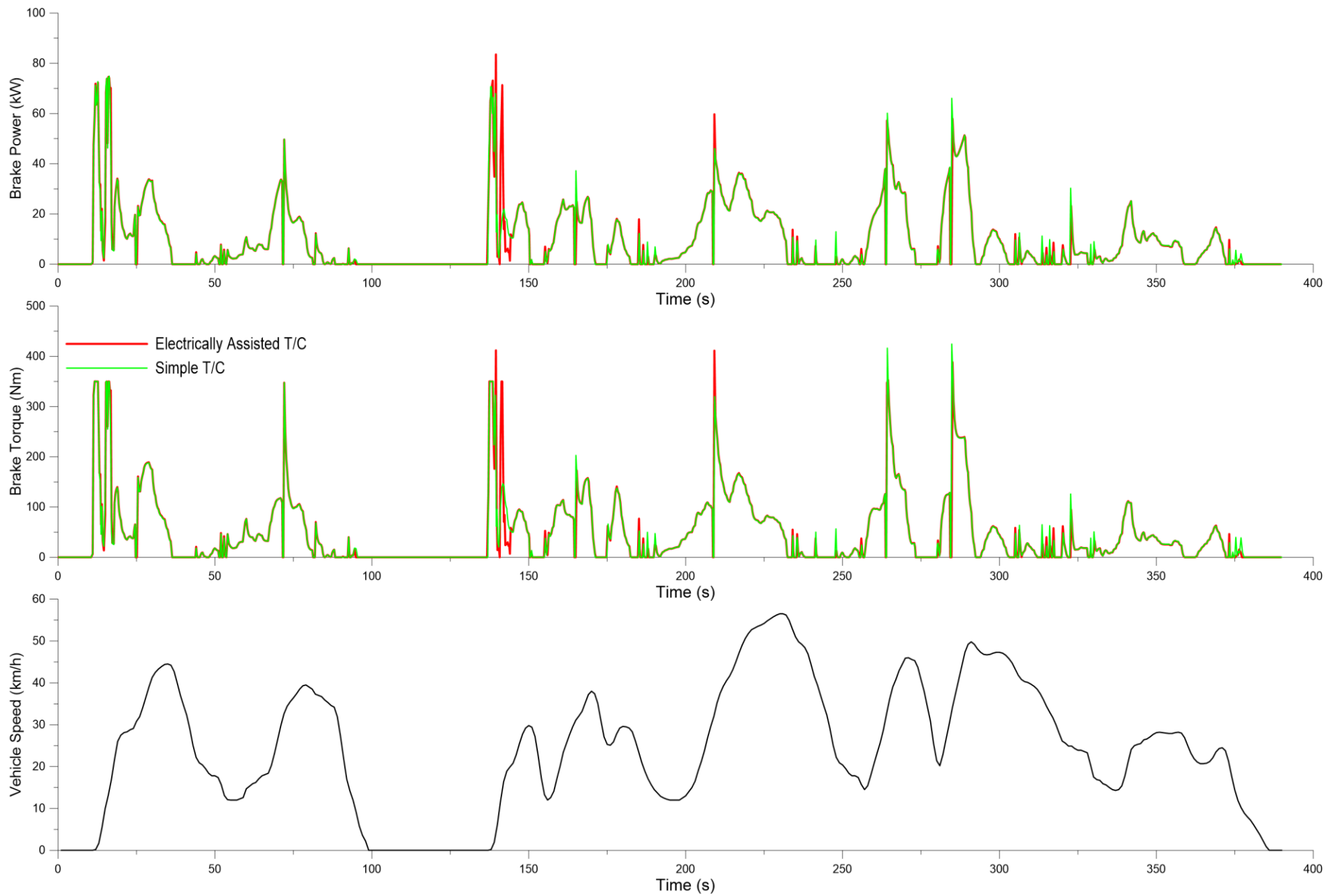
Σχήμα 5.5: Στροφές του κινητήρα και ταχύτητα οχήματος συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.



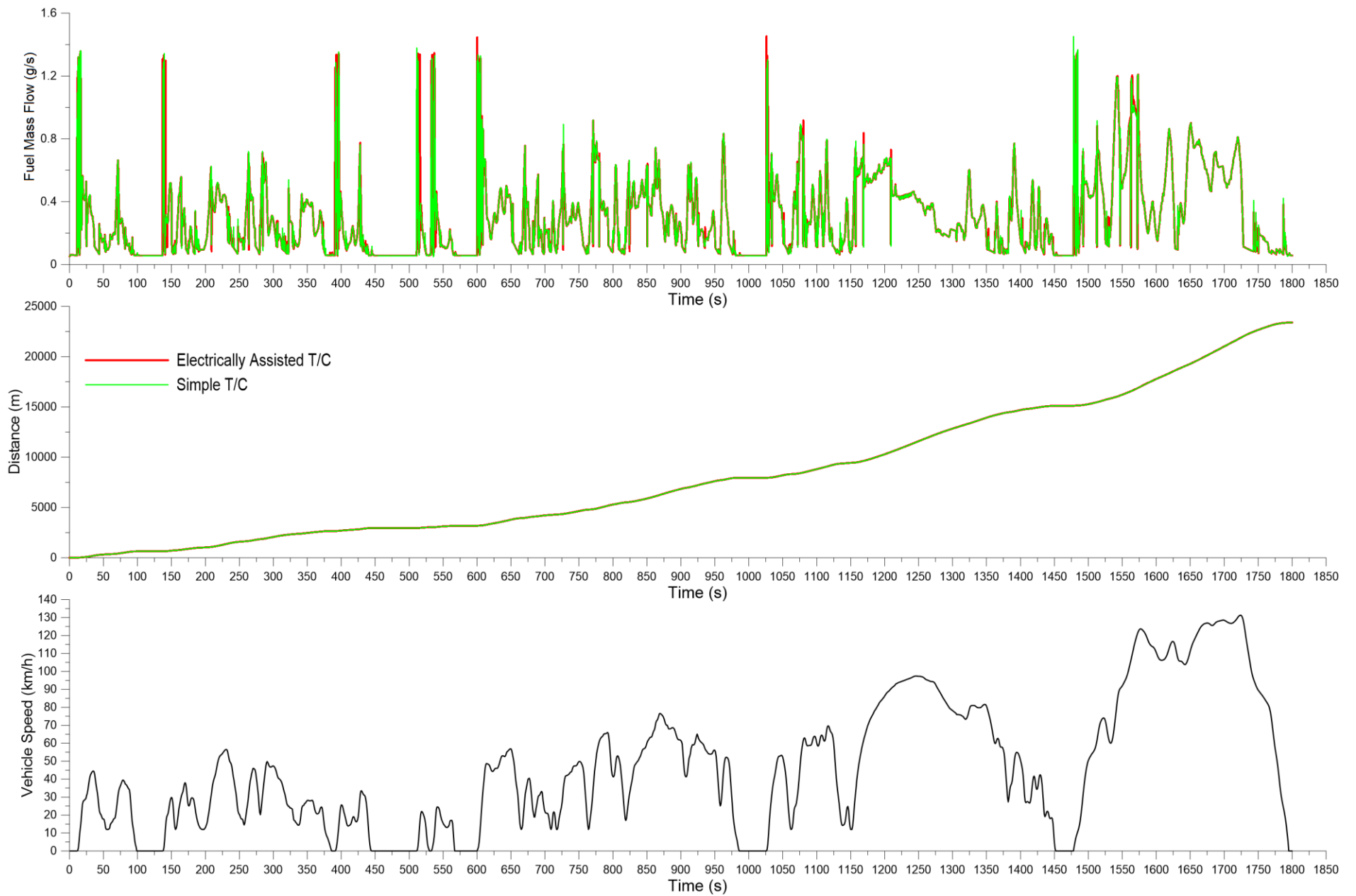
Σχήμα 5.6: Στροφές του κινητήρα και ταχύτητα οχήματος συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 400 δευτερολέπτων της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.



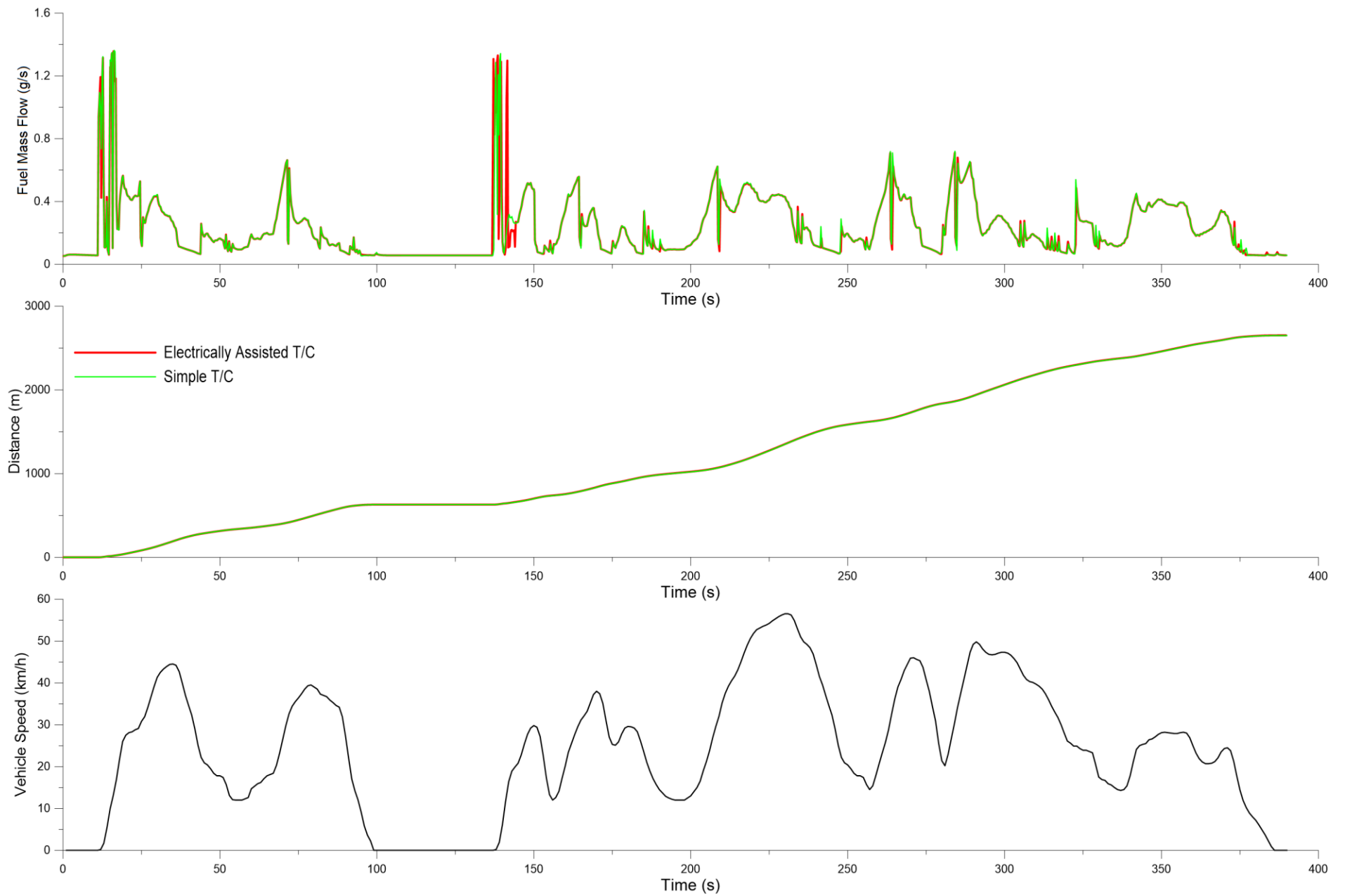
Σχήμα 5.7: Ισχύς και ροπή του κινητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.



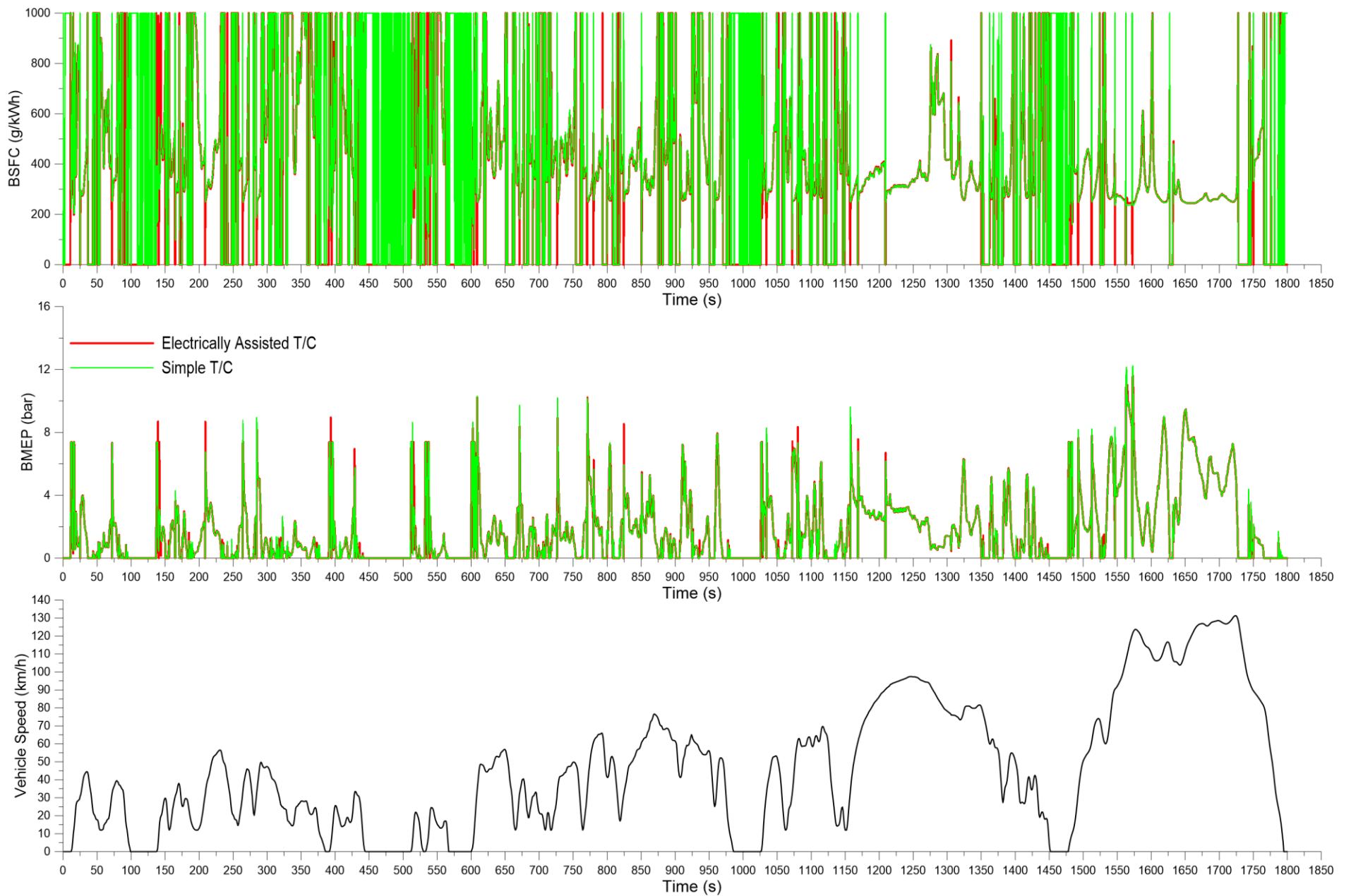
Σχήμα 5.8: Ισχύς και ροπή του κινητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 400 δευτερολέπτων της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.



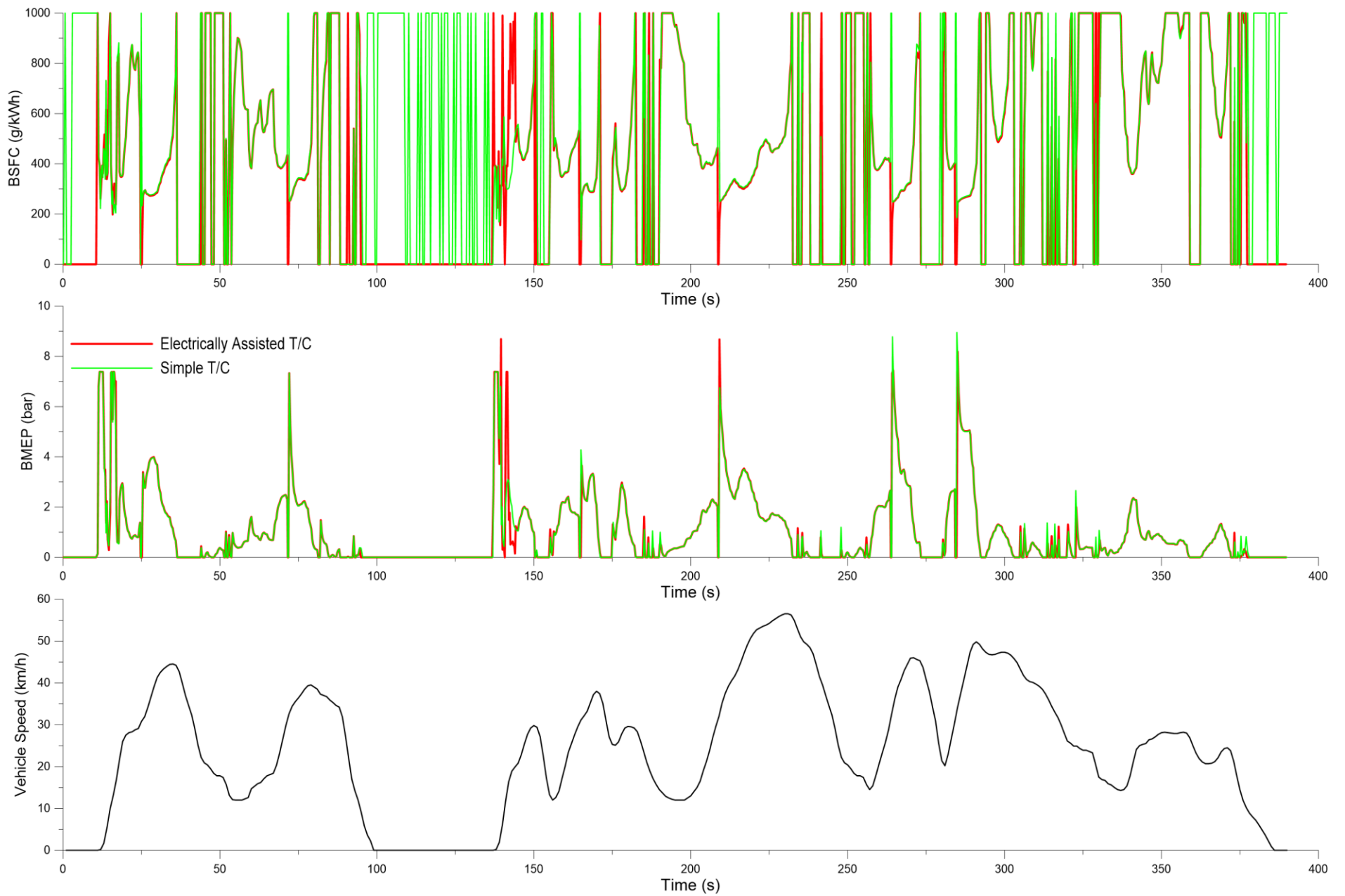
Σχήμα 5.9: Παροχή μάζας καυσίμου και διανυόμενη απόσταση συναρτήσεις του χρόνου κατά τη διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.



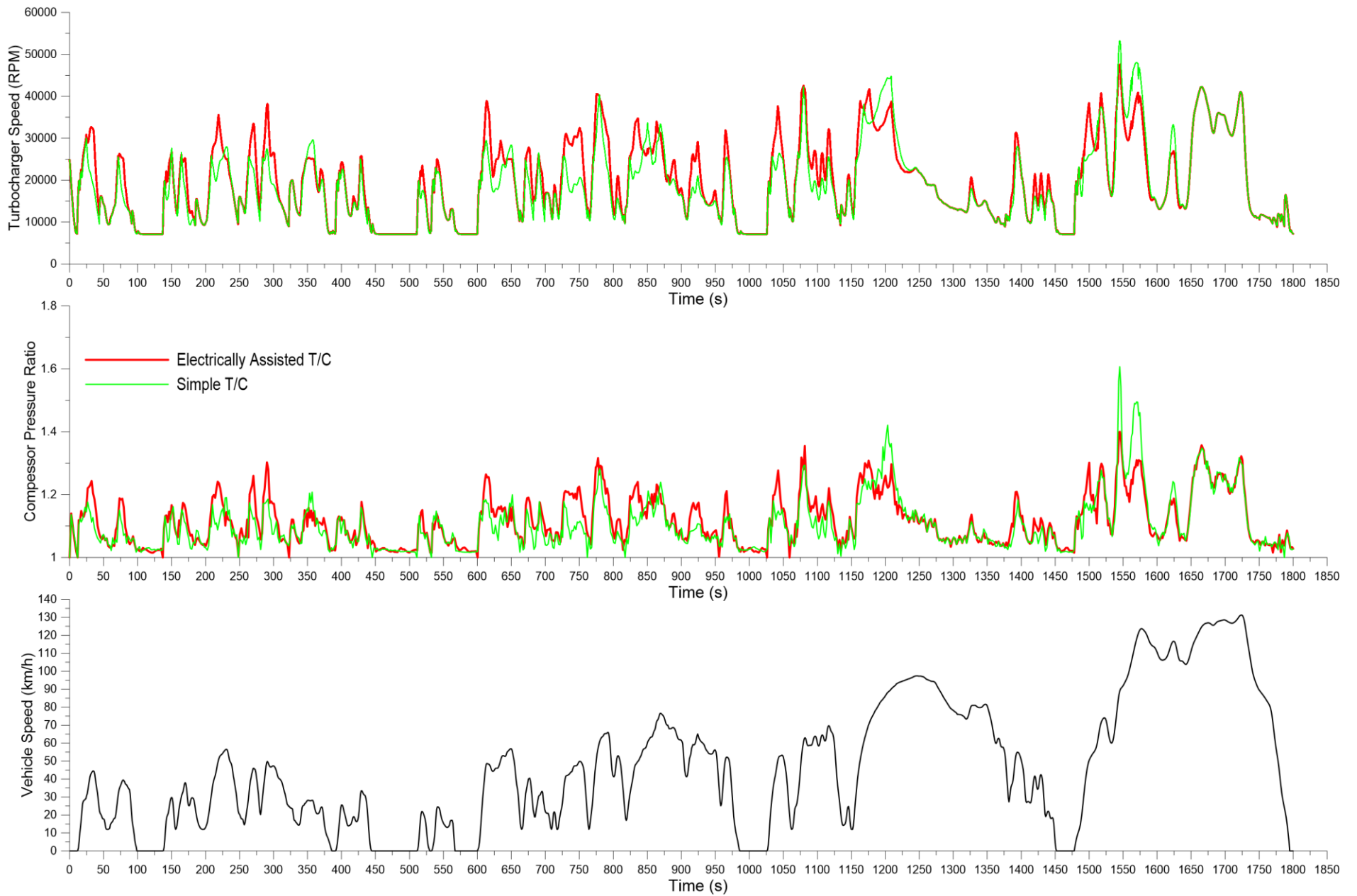
Σχήμα 5.10: Παροχή μάζας καυσίμου και διανυόμενη απόσταση συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 400 δευτερολέπτων της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.



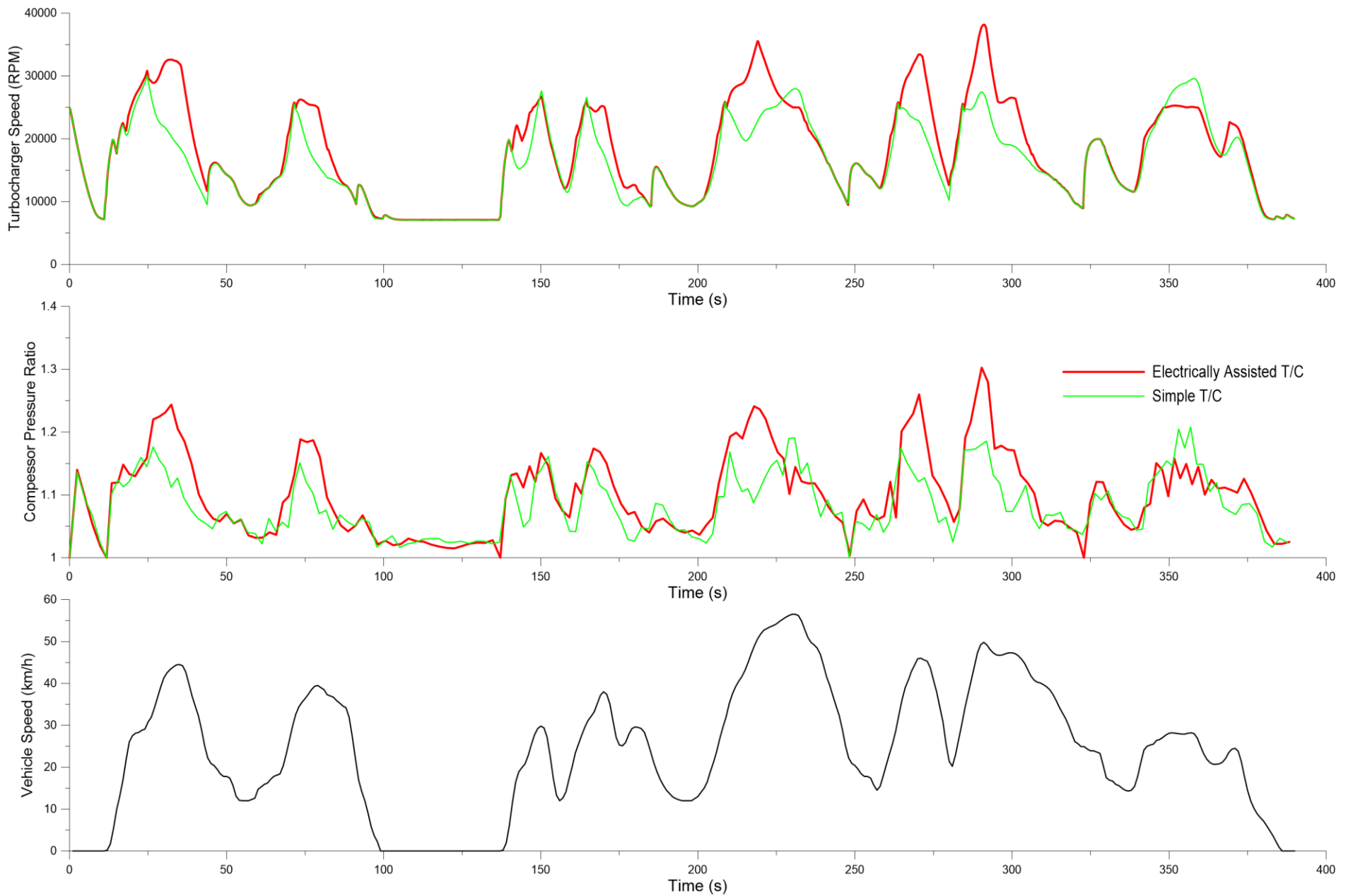
Σχήμα 5.11: Ειδική κατανάλωση καυσίμου BSFC και μέση πραγματική πίεση BMEP συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.



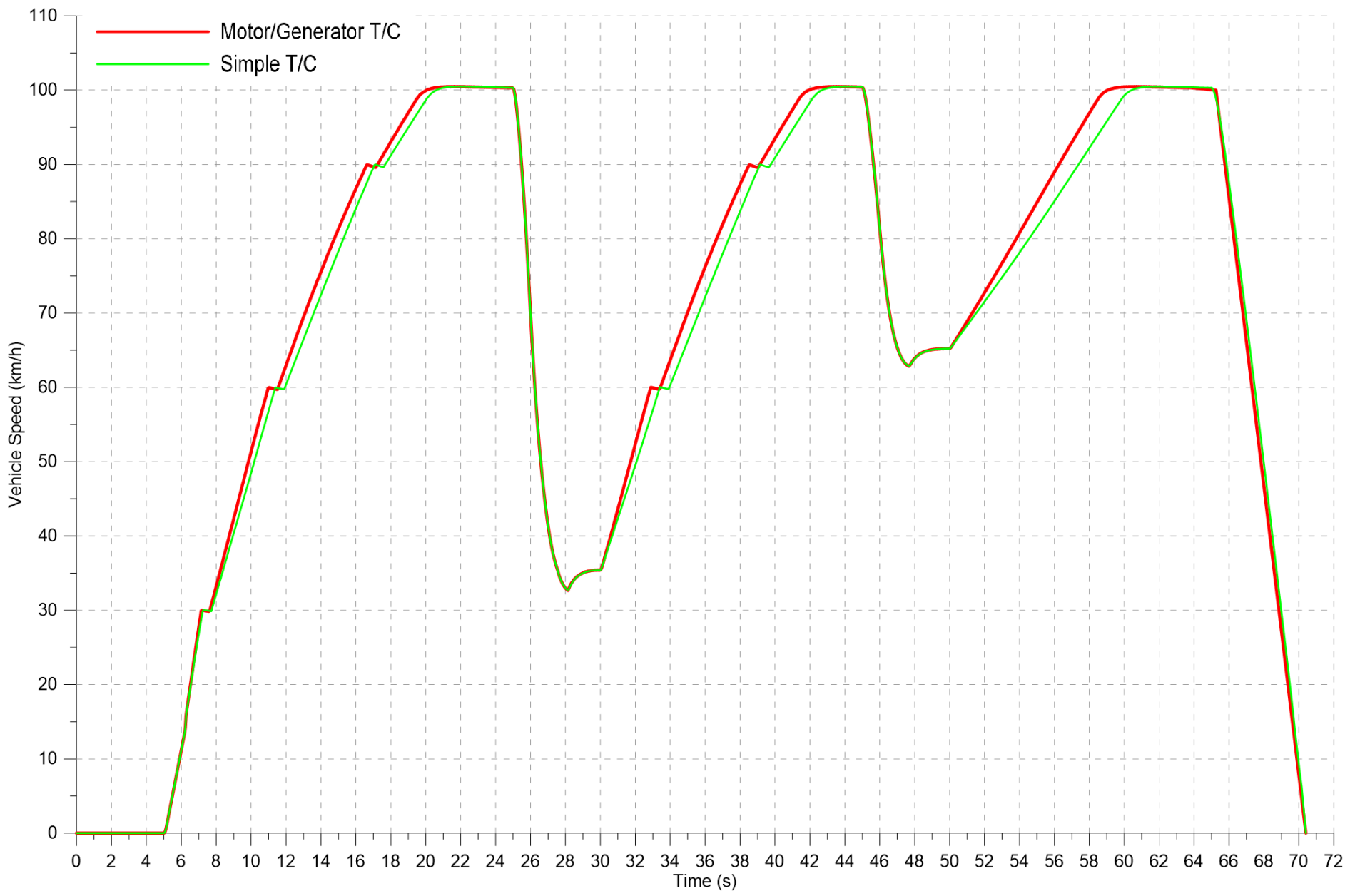
Σχήμα 5.12: Ειδική κατανάλωση καυσίμου BSFC και μέση πραγματική πίεση BMEP συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 400 δευτερολέπτων της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.



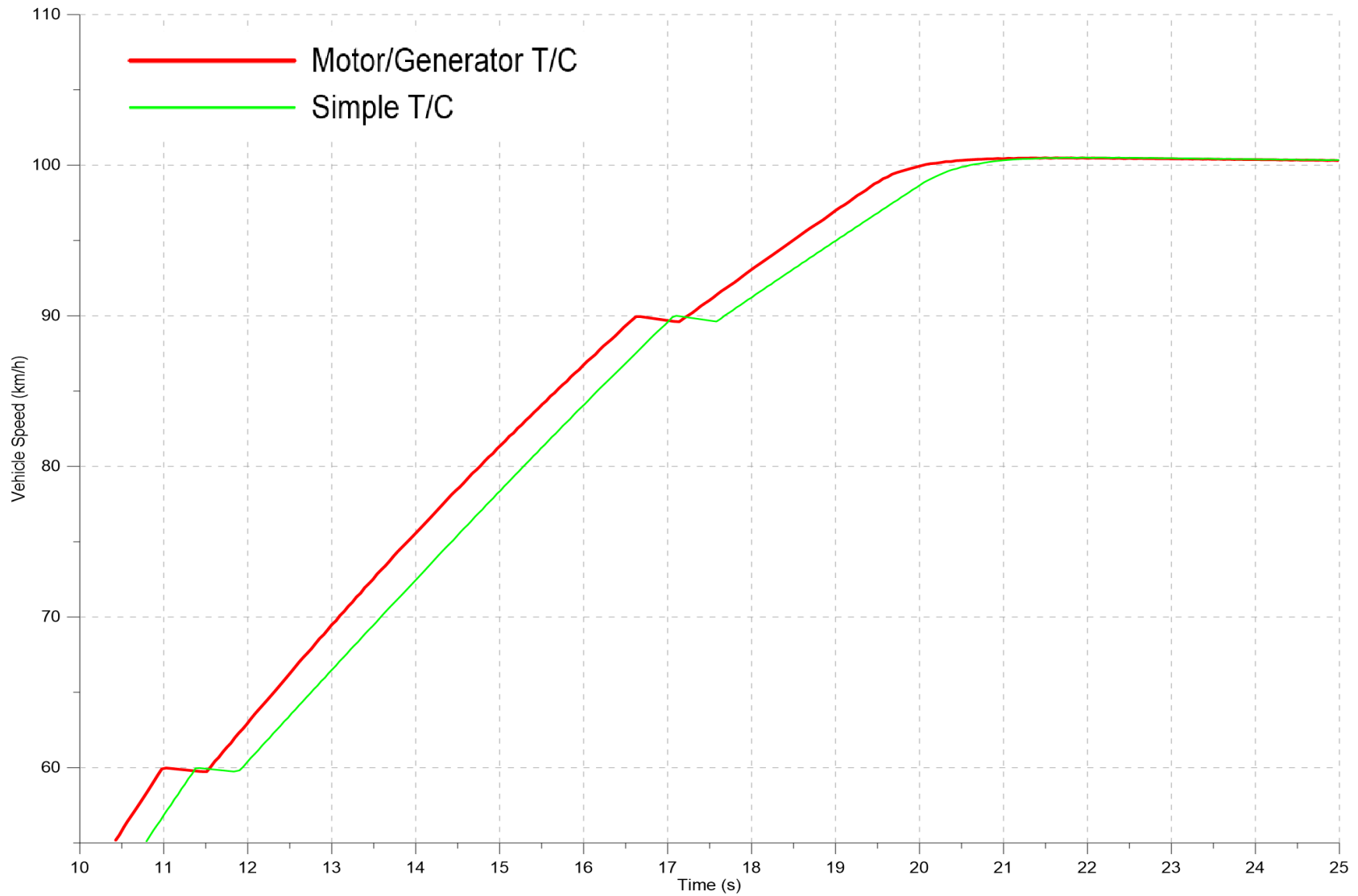
Σχήμα 5.13: Στροφές ζεύγους υπερπληρωτή και λόγος πίεσης συμπιεστή συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.



Σχήμα 5.14: Στροφές ζεύγους υπερπληρωτή και λόγος πίεσης συμπιεστή συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 400 δευτερολέπτων της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.



Σχήμα 5.15: Έλεγχος απόκρισης του οχήματος στον αυτοσχέδιο κύκλο.



Σχήμα 5.16: Μεγεθυμένη εικόνα για τον έλεγχο της απόκρισης του οχήματος στο τελικό κομμάτι της πρώτης διαδρομής του αυτοσχέδιου κύκλου.

Στα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω είναι εμφανές πως οι διαφορές είναι αρκετά μικρές και μάλιστα για τα περισσότερα μεγέθη, μη διακριτές. Τα διαγράμματα στα οποία φαίνεται η συμβολή του ηλεκτροκινητήρα στις επιδόσεις του κινητήρα είναι τα Σχήματα 5.7 και 5.8. Στα συγκεκριμένα διαγράμματα βλέπουμε πως με τον ηλεκτροκινητήρα, ο συμπιεστής επιτυγχάνει μεγαλύτερους λόγους πίεσης καθώς και μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής όπως είναι λογικό. Επίσης, φαίνεται πως με την ηλεκτρική υποβοήθηση του ζεύγους υπερπλήρωσης το όχημα μπορεί να φτάσει στην επιθυμητή ταχύτητα πιο γρήγορα (Σχήμα 5.15) σε σχέση με τον κινητήρα με απλή στροβιλο-υπερπλήρωση. Αυτό γίνεται πιο ξεκάθαρο αν δει κανείς τους χρόνους στους οποίους πραγματοποιείται η κάθε επιτάχυνση και την ποσοστιαία τους διαφορά, βλ. Πίνακα 5.1.

	0-100km/h (s)	35-100km/h (s)	65-100km/h (s)
Simple T/C	15.60	12.67	10.38
Electrically ass. T/C	15.07	11.93	9.09
Απόλυτη διαφορά (s)	0.53	0.74	1.29
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	3.39	5.85	12.41

Πίνακας 5.1: Ποσοστιαία μεταβολή του χρόνου ολοκλήρωσης κάθε επιτάχυνσης.

Παρατηρούμε πως στην πρώτη επιτάχυνση η απόλυτη διαφορά σε δευτερόλεπτα των δύο χρόνων είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή των δύο επόμενων επιταχύνσεων, στις οποίες η διαφορά στους χρόνους επιτάχυνσης που παρατηρήθηκε είναι σχεδόν ίση. Μία πιθανή εξήγηση για το γεγονός αυτό είναι πως στην πρώτη επιτάχυνση το όχημα πρέπει να εκκινήσει από στάση και επειδή πρόκειται για ένα μεγάλο και βαρύ όχημα, δηλαδή ένα όχημα με μεγάλη αδράνεια, δεν είναι τόσο γρήγορη η απόκριση όσο σε ένα επιβατικό αυτοκίνητο. Γι'αυτό και στο Σχήμα 5.8 οι δύο καμπύλες «ανοίγουν» αισθητά από την στιγμή που αλλάζει σχέση και επιλέγεται η δεύτερη σχέση στο κιβώτιο ταχυτήτων. Κάτι το οποίο δεν φαίνεται στο αντίστοιχο διάγραμμα είναι πως το όχημα με τον κινητήρα με την ηλεκτρικά υποβοηθούμενη υπερπλήρωση καλύπτει ελαφρώς μεγαλύτερη απόσταση, με την εν λόγω διαφορά να είναι 4.123 μέτρα. Η διαφορά αυτή είναι πιθανό να οφείλεται στο γεγονός της πιο γρήγορης επιτάχυνσης του οχήματος αυτού. Το μέγεθος που δεν

διακρίνεται καλά στο Σχήμα 5.12 και έχει ιδιαίτερη σημασία στην παρούσα μελέτη είναι η ειδική κατανάλωση καυσίμου (BSFC), για την οποία δεν είναι δυνατόν να εξαχθούν συμπεράσματα από το αντίστοιχο διάγραμμα, γι' αυτό και χρειάστηκε ο υπολογισμός της ποσοστιαίας διαφοράς του μεγέθους με υπολογιστικό τρόπο. Η ποσοστιαία μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου φαίνεται στον Πίνακα 5.2.

BSFC (g/kWh)	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-5.71	-7.93	-2.99

Πίνακας 5.2: Ποσοστιαία μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

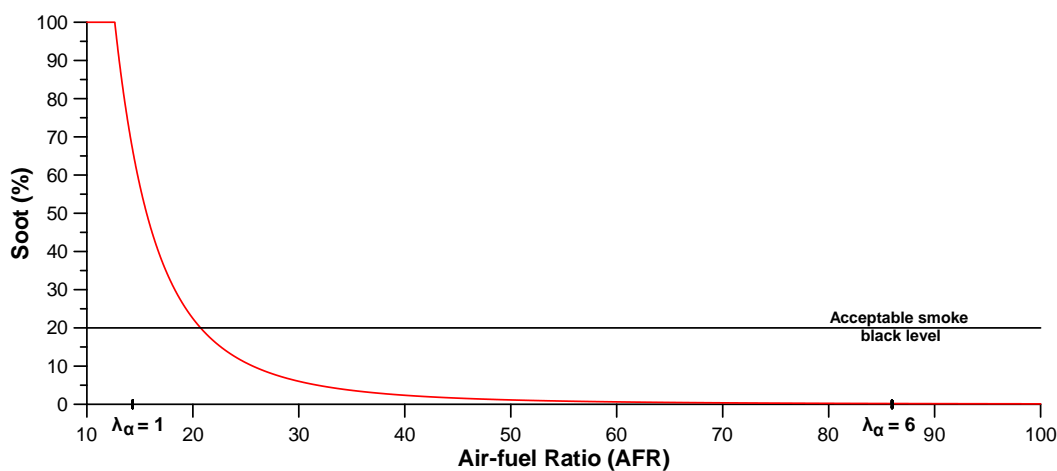
Όπως παρατηρούμε, η ειδική κατανάλωση καυσίμου μειώνεται αρκετά με την ηλεκτρική υποβοήθηση. Πιο συγκεκριμένα στο εντός πόλης τμήμα του κύκλου παρατηρούμε πως η μείωσή της είναι μεγαλύτερη, γεγονός απόλυτα λογικό, καθώς ο στόχος αυτής της εφαρμογής είναι να βελτιώσει την συμπεριφορά του κινητήρα μέσα στην πόλη. Μία λεπτομέρεια στις διαφορές μεταξύ των προσομοιώσεων που μπορεί να εντοπίσει κάποιος είναι στο διάγραμμα που αποτυπώνει το πάτημα του πεντάλ του γκαζιού. Στο εν λόγω Σχήμα 5.1, παρατηρούμε πως σε αρκετά σημεία το πεντάλ του γκαζιού στην προσομοίωση με την ηλεκτρική υποβοήθηση είναι λιγότερο πατημένο, κυρίως στις εκκινήσεις, σε σχέση με το πόσο είναι πατημένο στην προσομοίωση με την απλή στροβιλο-υπερπλήρωση. Η διαφορά αυτή είναι ο λόγος για τον οποίο η ειδική κατανάλωση καυσίμου μειώνεται με την ηλεκτρική υποβοήθηση. Όσον αφορά τα υπόλοιπα μεγέθη που παρουσιάζονται, δεν κρίθηκε αναγκαία κάποια περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων καθώς τα αποτελέσματα είναι παραπλήσια.

5.3 Εκπομπές καυσαερίων κινητήρα

Για την κατάλληλη παρουσίαση των εκπομπών καυσαερίων ακολουθήθηκε μια διαδικασία υπολογισμού των εκπομπών ρύπων, διότι τα αποτελέσματα που βγάζει το πρόγραμμα GT-Power μετά την προσομοίωση δεν είναι στην κατάλληλη μορφή. Για τον υπολογισμό των εκπομπών CO₂ και NO_x το πρόγραμμα αποδίδει τα αποτελέσματα σε g/kWh οπότε η μετατροπή τους σε g/km είναι αρκετά εύκολη. Για την αιθάλη, λόγω αδυναμίας ενσωμάτωσης των σχετικών υποσυστημάτων του προγράμματος GT-Power που αφορούν στον υπολογισμό της αιθάλης, αυτή υπολογίστηκε βάσει της παρακάτω προσεγγιστικής σχέσης [9]:

$$\text{Soot (\%)} = 380,190 * \text{AFR}^{(-3.25)} \quad (5.1)$$

Η σχέση αυτή που αναπτύχθηκε σε παρόμοιο κινητήρα με αυτόν της παρούσας εργασίας και συσχετίζει τις εκπομπές της αιθάλης με το κυρίαρχο μέγεθος που τις επηρεάζει δηλαδή την αναλογία αέρα καυσίμου (AFR). Η συσχέτιση των δύο μεγεθών όπως προκύπτει από τη Σχέση 5.1 απεικονίζεται στο Σχήμα 5.17, στο οποίο επισημαίνονται οι τιμές της αιθάλης στις περιπτώσεις στοιχειομετρικού λόγου αέρα-καυσίμου ($\lambda_a=1$) και υπερ-στοιχειομετρικού λόγου αέρα-καυσίμου ($\lambda_a=6$), καθώς και το αποδεκτό όριο της αιθάλης, που ορίζεται για λόγο αέρα-καυσίμου μεγαλύτερο του 1.6.



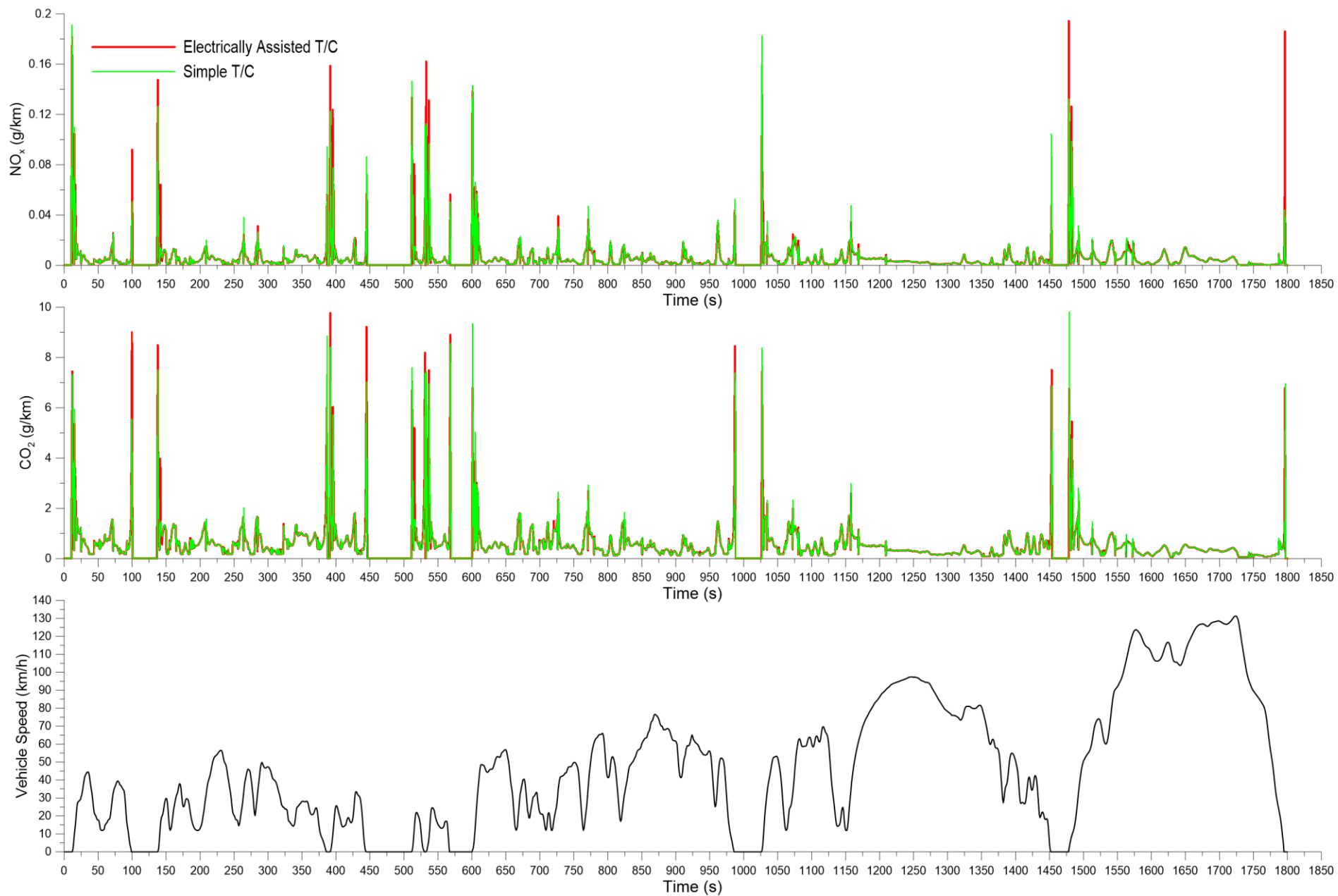
Σχήμα 5.17: Συσχέτιση εκπομπών αιθάλης (%) με την αναλογία αέρα καυσίμου (AFR).

Το μεγάλο πλεονέκτημα της Σχέσης 5.1 είναι ότι ακριβώς επειδή έχει αναπτυχθεί για να καλύπτει και περιπτώσεις μεταβατικής λειτουργίας, δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα και στο πεδίο κοντά ή και κάτω ακόμα από την τιμή $\lambda_a=1$ (AFR=14.33), το οποίο λόγω του φαινομένου της υστέρησης του στροβιλο-υπερπληρωτή είναι πολύ συχνά εμφανιζόμενο κατά τη μεταβατική λειτουργία κινητήρων Diesel.

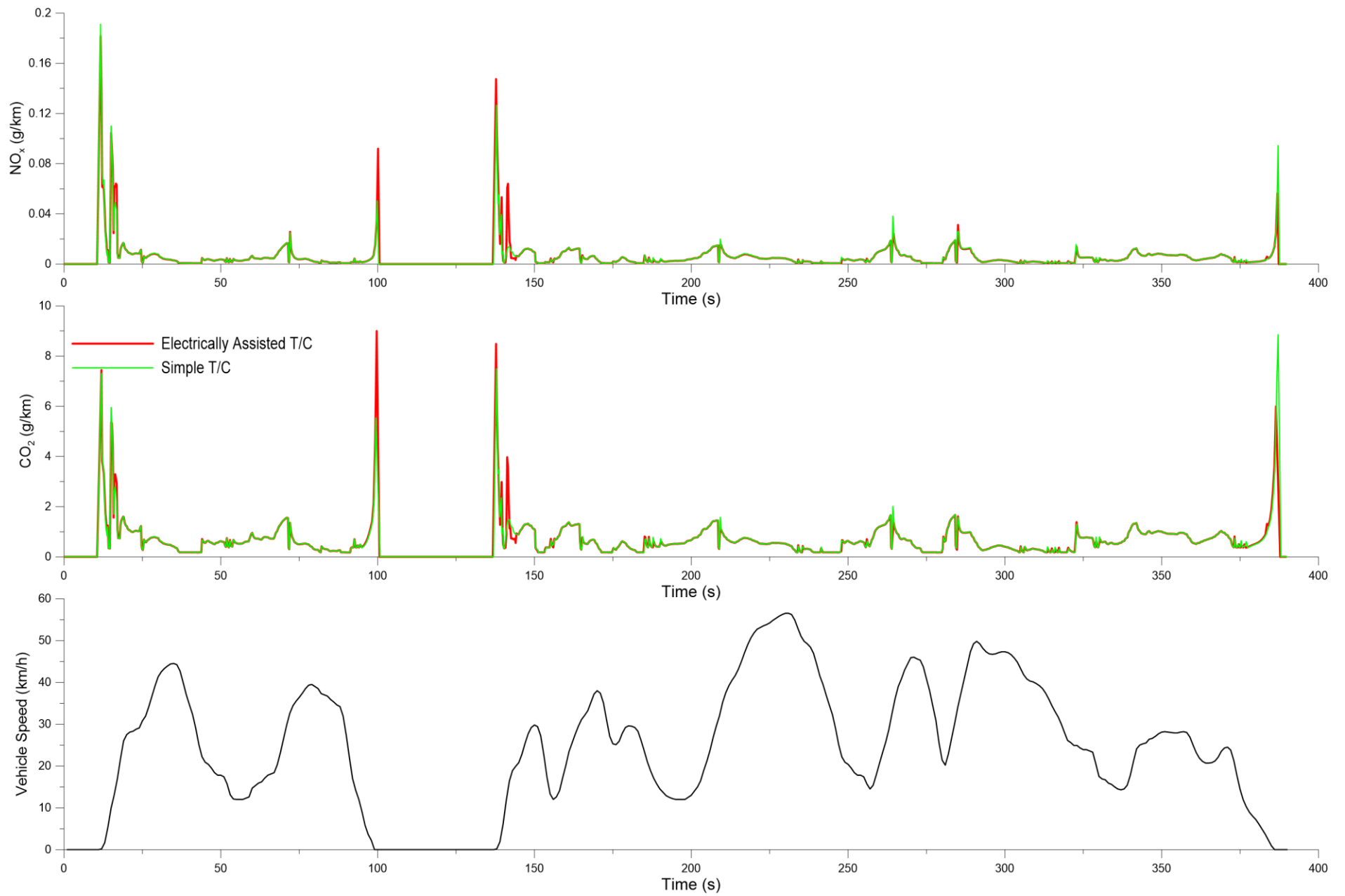
Είναι προφανές, όπως ισχύει άλλωστε και για τις εκπομπές των οξειδίων του αζώτου (NO_x), ότι τα αποτελέσματα της αιθάλης πρέπει να αντιμετωπιστούν όχι σε επίπεδο απόλυτων τιμών (αφού δεν έχει προηγηθεί κάποια διαδικασία ταιριάσματος πειραματικών με υπολογιστικά δεδομένα) αλλά σε επίπεδο «συγκριτικό» (μιας μεταβατικής περίπτωσης σε σχέση με άλλη), και γενικότερα όσον αφορά στις συνολικές τάσεις (trends) που παρατηρούνται.

Στη παρούσα εργασία, καθώς μελετάται η απόκριση οχήματος κατά τη διάρκεια ενός Μεταβατικού Κύκλου Πόλης, άρα χρειαζόμαστε τις συνολικά εκπεμπόμενες ποσότητες των ρύπων, κρίθηκε απαραίτητη η μετατροπή των τιμών που προκύπτουν από τη Σχέση 5.1 από % σε mg/m^3 με τη χρήση πειραματικών δεδομένων από διδακτορική διατριβή [12].

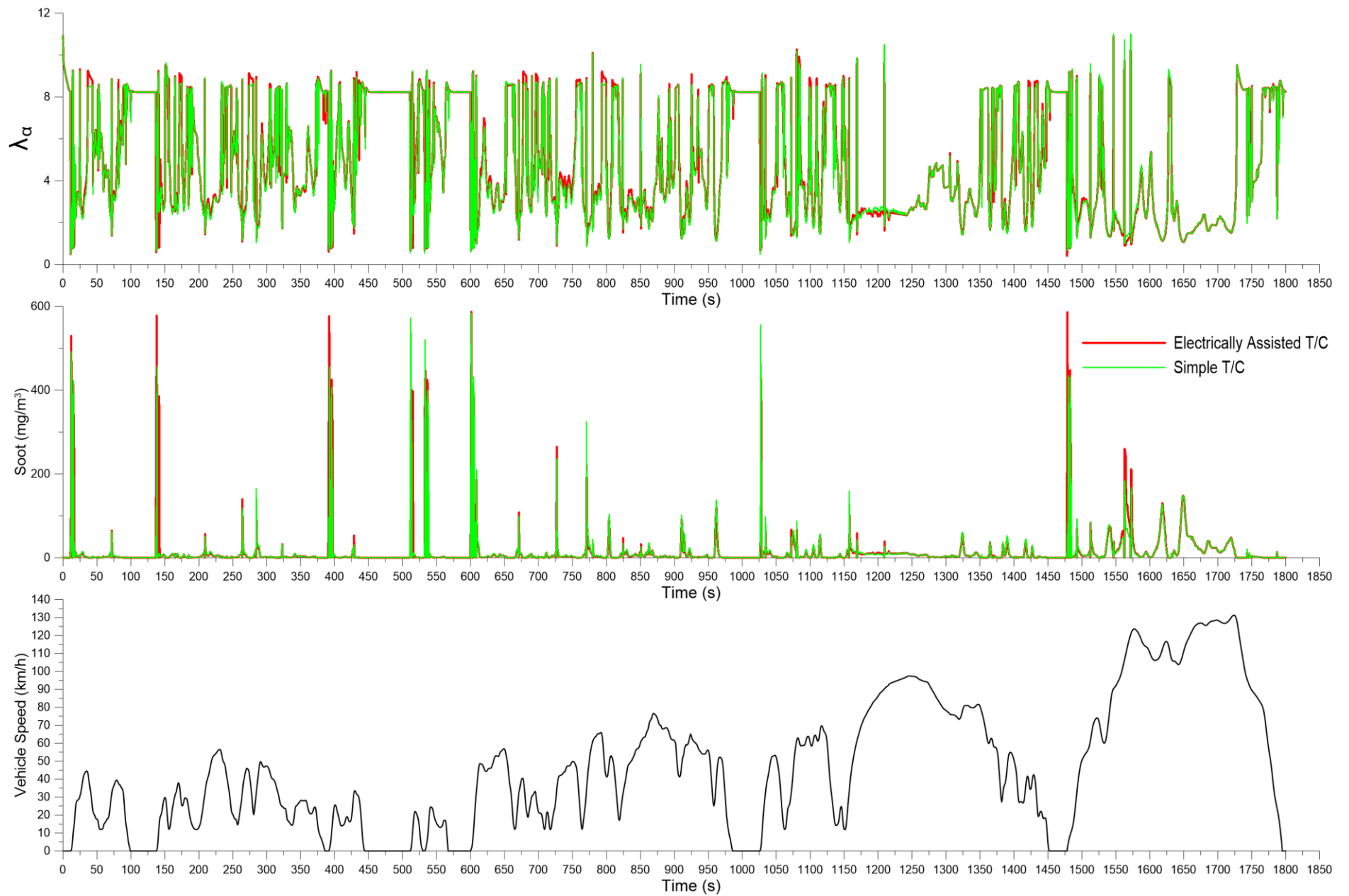
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τις εκπομπές CO_2 και NO_x σε g/km , αιθάλης σε mg/m^3 , και ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου. Στα παρακάτω διαγράμματα διαπιστώνουμε πως οι διαφορές στις εκπομπές ρύπων είναι πολύ μικρές και αδύνατον να εντοπιστούν. Γι'αυτό και ακολούθησε υπολογιστική σύγκριση των τιμών εκπομπής καυσαερίων με σκοπό τον ακριβή προσδιορισμό των διαφορών.



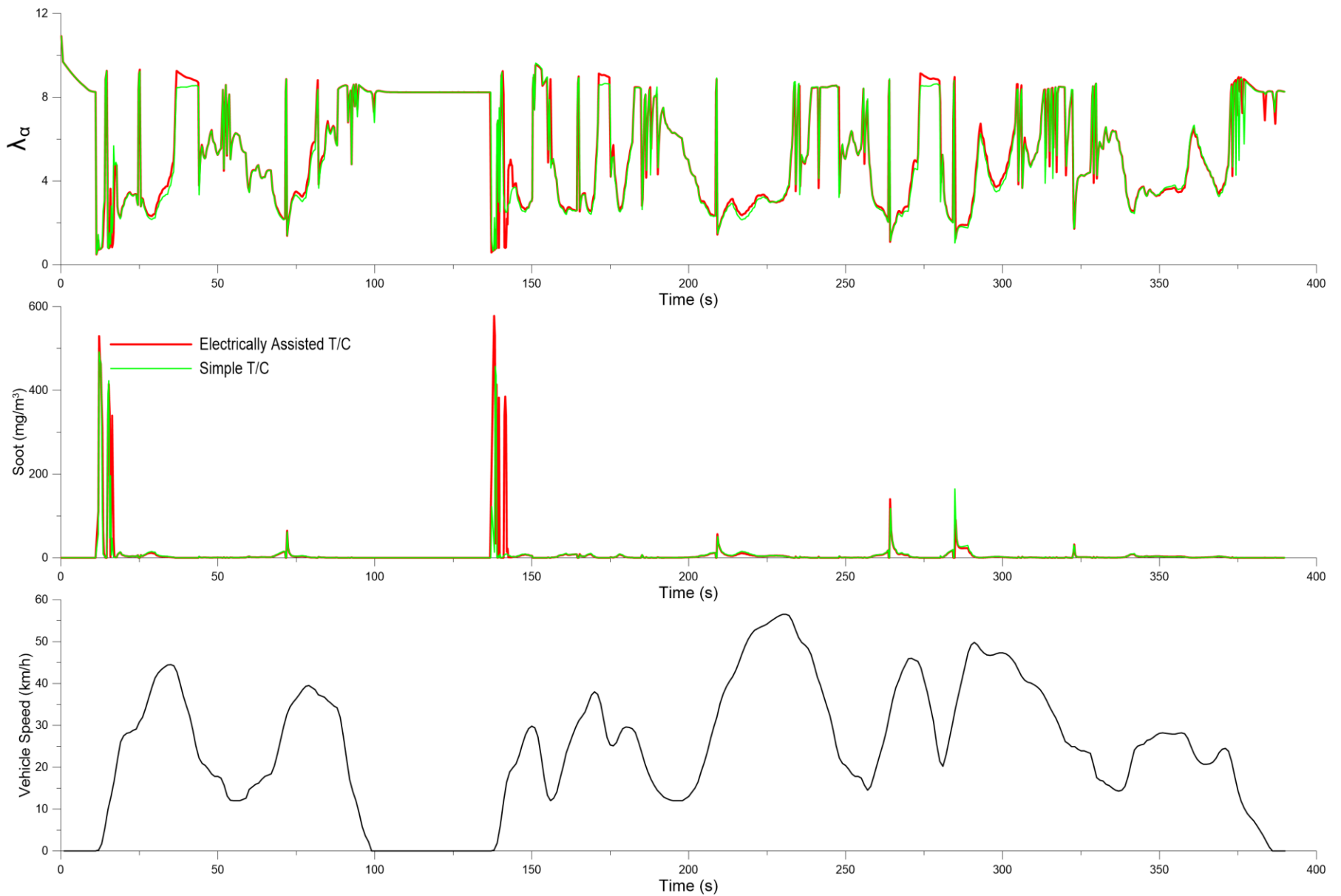
Σχήμα 5.18: Εκπομπές CO₂ και NO_x σε g/km συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.



Σχήμα 5.19: Εκπομπές CO₂ και NO_x σε g/km συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 400 δευτερολέπτων της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.



Σχήμα 5.20: Εκπομπές αιθάλης σε g/km και λόγος ισodynamίας αέρα-καυσίμου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.



Σχήμα 5.21: Εκπομπές αιθάλης σε g/km και λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 400 δευτερολέπτων της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

Οι εκπομπές καυσαερίων είναι το πιο σημαντικό σε μελέτες σαν και την παρούσα. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία προέκυψαν τα αποτελέσματα που συνοψίζονται στους Πίνακες 5.3 έως 5.6.

	CO₂ (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Simple T/C	429.97	570.45	357.70
Electrically ass. T/C	431.45	572.25	358.96
Απόλυτη διαφορά	1.48	1.80	1.26
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	0.34	0.32	0.35

Πίνακας 5.3: Διαφορά εκπομπών CO₂ κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

	NO_x (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Simple T/C	4.508	5.14	4.18
Electrically ass. T/C	4.510	5.16	4.17
Απόλυτη διαφορά	0.002	0.03	-0.01
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	0.04	0.51	-0.26

Πίνακας 5.4: Διαφορά εκπομπών NO_x κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

	Soot (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Simple T/C	0.0217	0.0313	0.0168
Electrically ass. T/C	0.0221	0.0311	0.0175
Απόλυτη διαφορά	0.0004	-0.0002	0.0008
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	2.05	-0.60	4.58

Πίνακας 5.5: Διαφορά εκπομπών αιθάλης κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

	Fuel (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Simple T/C	180.54	222.80	158.80
Electrically ass. T/C	181.19	224.00	159.15
Απόλυτη διαφορά	0.65	1.20	0.35
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	0.36	0.54	0.22

Πίνακας 5.6: Διαφορά μέσης κατανάλωσης καυσίμου κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

Από τα παραπάνω δεδομένα γίνεται φανερό πως η συμπεριφορά των κινητήρων ως προς τις εκπομπές καυσαερίων είναι σχεδόν πανομοιότυπες. Οι διαφορές στην εκπομπή CO₂, NO_x και στην κατανάλωση καυσίμου είναι μικρότερες του 0,5%. Αυτό συνεπάγεται πως οι διαφορές αυτές είναι ίσως λίγο αναξιόπιστες ως προς την αξιολόγησή τους καθώς είναι πολύ πιθανό να οφείλεται σε μικρο-διαφορές ανάμεσα στα αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων. Μία τέτοια διαφορά είναι η τμηματοποίηση της διάρκειας του χρόνου του κύκλου πόλης. Στην περίπτωση της προσομοίωσης με την απλή στροβιλο-υπερπλήρωση ο χρόνος είναι χωρισμένος σε 6525 ίσα τμήματα, ενώ στην περίπτωση της προσομοίωσης με την ηλεκτρικά υποβοηθούμενη στροβιλο-υπερπλήρωση είναι χωρισμένος σε 6533 ίσα διαστήματα. Το πιο σημαντικό είναι πως η απόλυτη κατανάλωση καυσίμου αυξάνεται ελαφρώς. Μία ενδεχόμενη εξήγηση σε αυτό είναι πως λόγω της αύξησης του λόγου πίεσης του συμπιεστή, επομένως και της παροχής αέρα στον κινητήρα, οδηγούμαστε σε αύξηση της κατανάλωσης. Συνεπώς, είναι λογικό πως και η ποσότητα του CO₂ που εκπέμπεται θα αυξηθεί. Ωστόσο αυτή η αύξηση είναι σχεδόν αμελητέα καθώς αντικρούονται δύο επιδράσεις του EATC στην λειτουργία του κινητήρα. Από την μία ο αυξημένος λόγος πίεσης συνεισφέρει στην αύξηση της πίεσης, επομένως και της ροής του κινητήρα και τελικά στην αύξηση του βαθμού απόδοσης του κινητήρα, η οποία οδηγεί εξ'ορισμού σε μειωμένη κατανάλωση καυσίμου, και από την άλλη η αυξημένη παροχή αέρα και καυσίμου συμβάλει στην αύξηση της τιμής της συνολικής ποσότητας εγχεόμενου καυσίμου.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι τιμές εκπομπών NO_x, οι οποίες φαίνονται να αυξάνονται συνολικά, στο εκτός πόλης τμήμα του κύκλου όμως δείχνουν να μειώνονται. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.18, στο 1475^ο περίπου δευτερόλεπτο εντοπίζονται μειωμένες εκπομπές NO_x σε σχέση με τις εκπομπές NO_x του κινητήρα χωρίς EATC, με εξαίρεση κάποιες κορυφές που δημιουργούνται λόγω στιγμιαίας λειτουργίας κινητήρα με πολύ μικρό λόγο αέρα-καυσίμου. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό φαίνεται στο Σχήμα 5.20 στο ίδιο σημείο, στο οποίο φαίνεται να λειτουργεί ο κινητήρας με μεγαλύτερο λόγο ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου. Επομένως η θερμοκρασία λειτουργίας είναι ελαφρώς μειωμένη, και έτσι ο σχηματισμός NO_x περιορίζεται. Τέλος, οι εκπομπές αιθάλης του κινητήρα με την ηλεκτρική

υποβοήθηση δείχνουν μία συνολική αύξηση περίπου 2%. Αν κοιτάξουμε ξεχωριστά το εντός πόλης τμήμα και το εκτός, παρατηρούμε πως η αιθάλη μειώνεται στο εντός πόλης λόγω μείωσης του φαινομένου της υστέρησης του υπερπληρωτή, γεγονός που αποτελεί πολύ σημαντικό στοιχείο, αφού η βελτίωση της συμπεριφοράς του κινητήρα στις εντός πόλης διαδρομές είναι ο κύριος στόχος της ηλεκτρικά υποβοηθούμενης στροβιλο-υπερπλήρωσης.

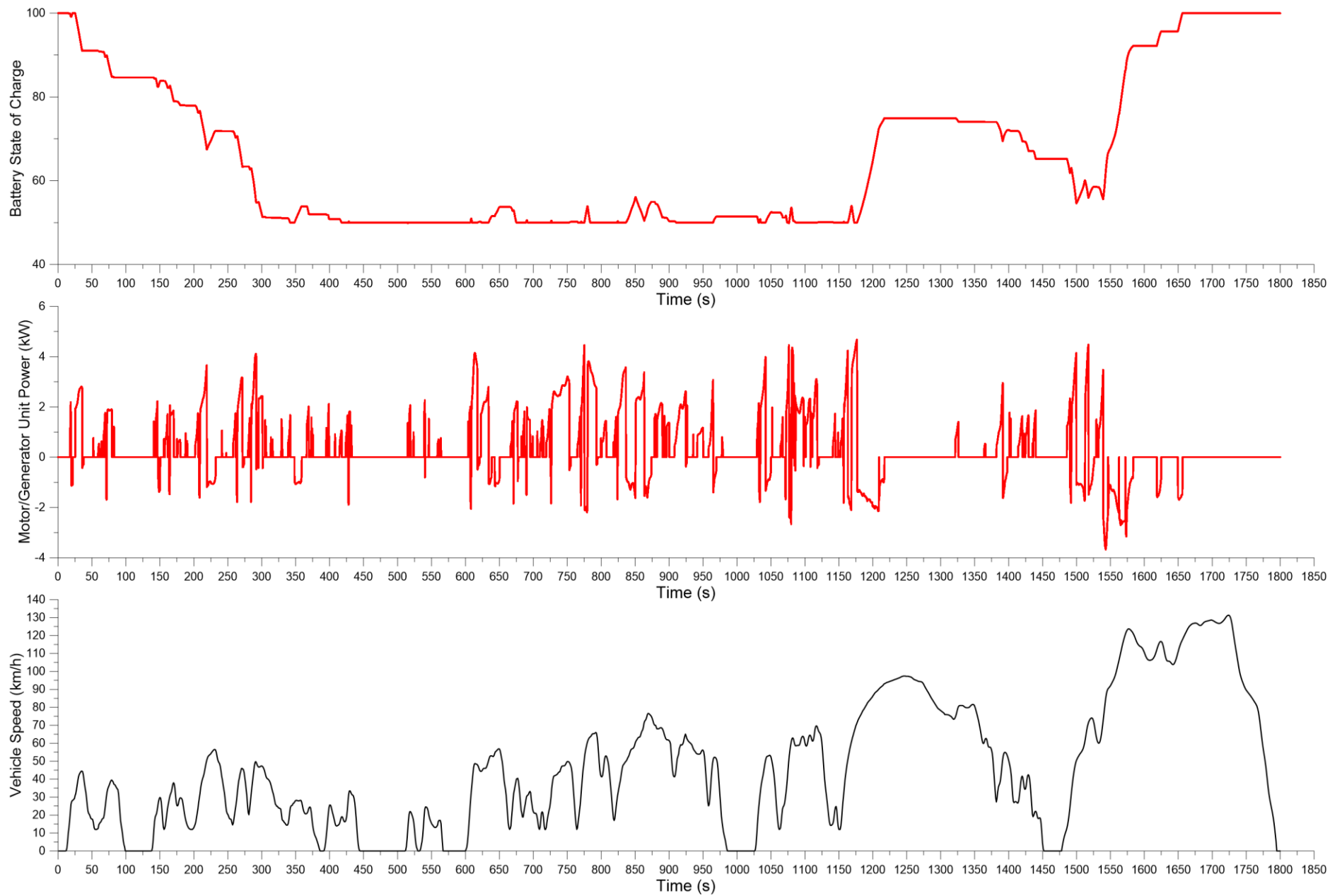
Σχετικά με τα θέματα των εκπομπών και της κατανάλωσης καυσίμου, χαρακτηριστικό είναι το γεγονός, ότι στα σημεία απότομων επιταχύνσεων του οχήματος παρατηρείται αυξημένη κατανάλωση καυσίμου. Η δημιουργία αιθάλης (καθώς επίσης και η κατανάλωση καυσίμου, επομένως και οι εκπομπές CO₂) εξαρτάται κυρίως από το φορτίο του κινητήρα. Αυξανόμενου του φορτίου, εγγέεται περισσότερο καύσιμο εντός των κυλίνδρων, οδηγώντας έτσι σε αύξηση των θερμοκρασιών στις πλούσιες (σε καύσιμο) ζώνες. Επιπρόσθετα, η διάρκεια της καύσης διάχυσης αυξάνεται, ευνοώντας το σχηματισμό αιθάλης ενώ τόσο ο χρόνος που απομένει μετά την καύση (μέχρι το άνοιγμα της βαλβίδας εξαγωγής) όσο και το διαθέσιμο οξυγόνο μειώνονται με αποτέλεσμα η οξείδωση της αιθάλης να μην είναι η επιθυμητή. Το φαινόμενο αυτό, σε χρονικές περιόδους έντονων επιταχύνσεων, ενισχύεται σημαντικά εξαιτίας και των πολύ χαμηλών τιμών του λόγου αέρα-καυσίμου που δημιουργούνται τοπικά στον κύλινδρο εξαιτίας της υστέρησης του στροβιλο-υπερπληρωτή, ακόμη και χαμηλότερων του στοιχειομετρικού ($\lambda_a < 1$). Κατά συνέπεια, η υπερακόντιση στις τιμές της αιθάλης που παρατηρείται μετά από κάθε επιτάχυνση του οχήματος (δηλαδή αύξηση του φορτίου του κινητήρα) οφείλεται κατά κύριο λόγο στην προσωρινή έλλειψη αέρα εξαιτίας της υστέρησης του στροβιλο-υπερπληρωτή αλλά και πιθανότατα στην απότομη αύξηση της καθυστέρησης ανάφλεξης που εμφανίζεται στους πρώτους κύκλους λειτουργίας του κινητήρα κατά τη διάρκεια μιας μεταβατικής λειτουργίας αυτού.

Η καμπύλη εκπομπών CO₂ (Σχήμα 5.18) έχει την ίδια μορφή με την καμπύλη της κατανάλωσης καυσίμου (Σχήμα 5.9) αφού προκύπτει άμεσα από αυτή. Και πάλι παρατηρούμε αυξημένες εκπομπές CO₂ και κατανάλωση καυσίμου σε περιόδους απότομων επιταχύνσεων του οχήματος κατά τη διάρκεια του Κύκλου.

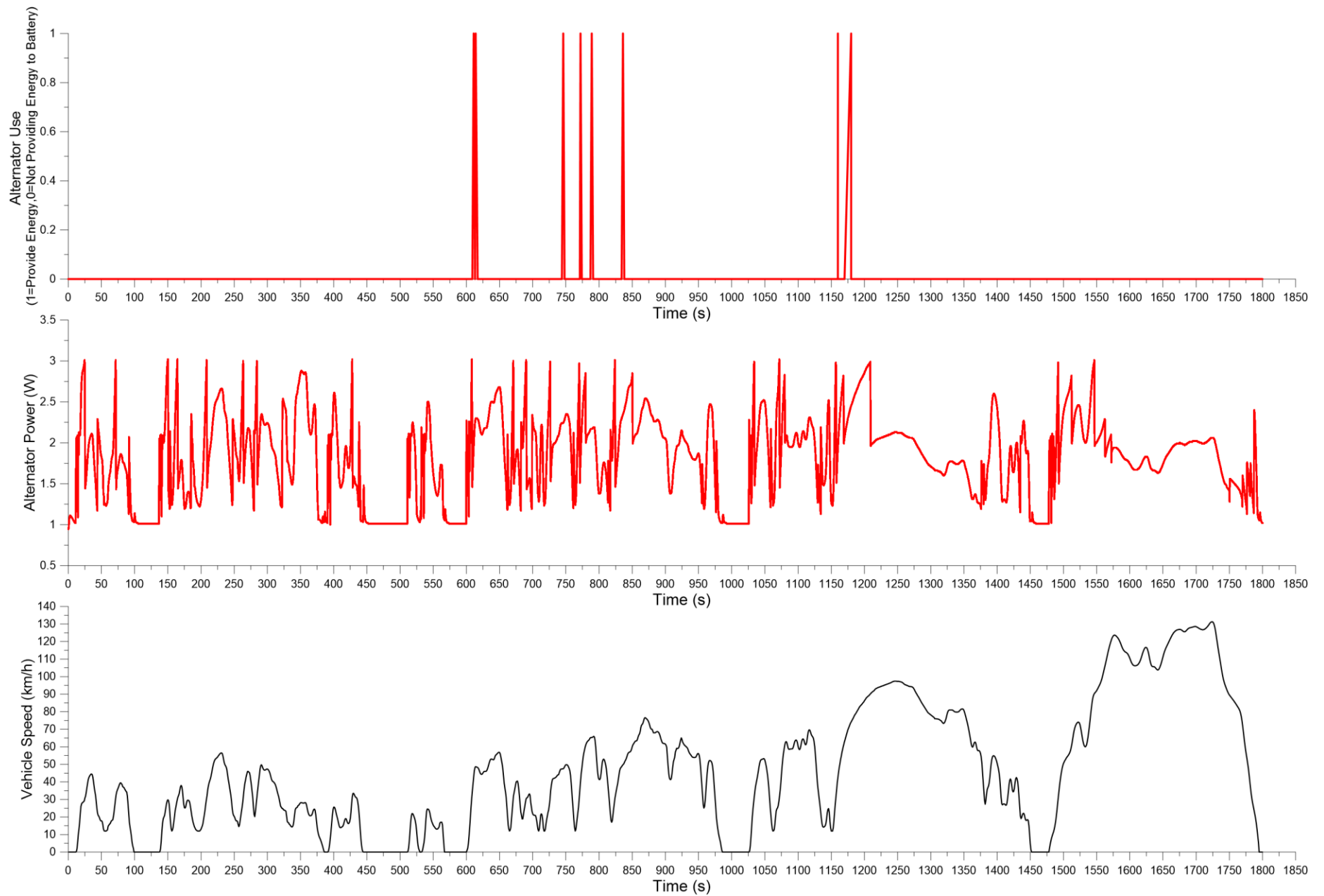
Όσον αφορά στις αυξημένες εκπομπές NO_x τις ίδιες χρονικές στιγμές (δηλαδή κατά τη διάρκεια απότομων επιταχύνσεων του οχήματος), αυτές οφείλονται ξανά στο φαινόμενο της υστέρησης του στροβιλο-υπερπληρωτή, δηλαδή την ανακολουθία ανάμεσα στην αυξημένη ποσότητα καυσίμου που εγχέεται εντός του κυλίνδρου και την ανεπαρκή ποσότητα αέρα λόγω της καθυστερημένης απόκρισης του συμπιεστή του ζεύγους υπερπλήρωσης. Οι υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν τοπικά εξαιτίας της ύπαρξης μείγματος με σχεδόν στοιχειομετρική αναλογία αέρα-καυσίμου είναι αυτές που οδηγούν σε αυξημένες εκπομπές οξειδίων του αζώτου στους κύκλους λειτουργίας που επηρεάζονται από την υστέρηση του στροβιλο-υπερπληρωτή. Ανάλογη ερμηνεία μπορεί να δοθεί και στις μεταβολές της μέσης πραγματικής πίεσης, όπως αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 5.11, καθώς αύξηση του μεγέθους αυτού υποδηλώνει και αύξηση του φορτίου του κινητήρα με ό,τι αυτό συνεπάγεται (αύξηση εκπομπών ρύπων, κατανάλωσης καυσίμου κ.λπ.).

5.4 Επιδόσεις της ηλεκτρικής υποβοήθησης

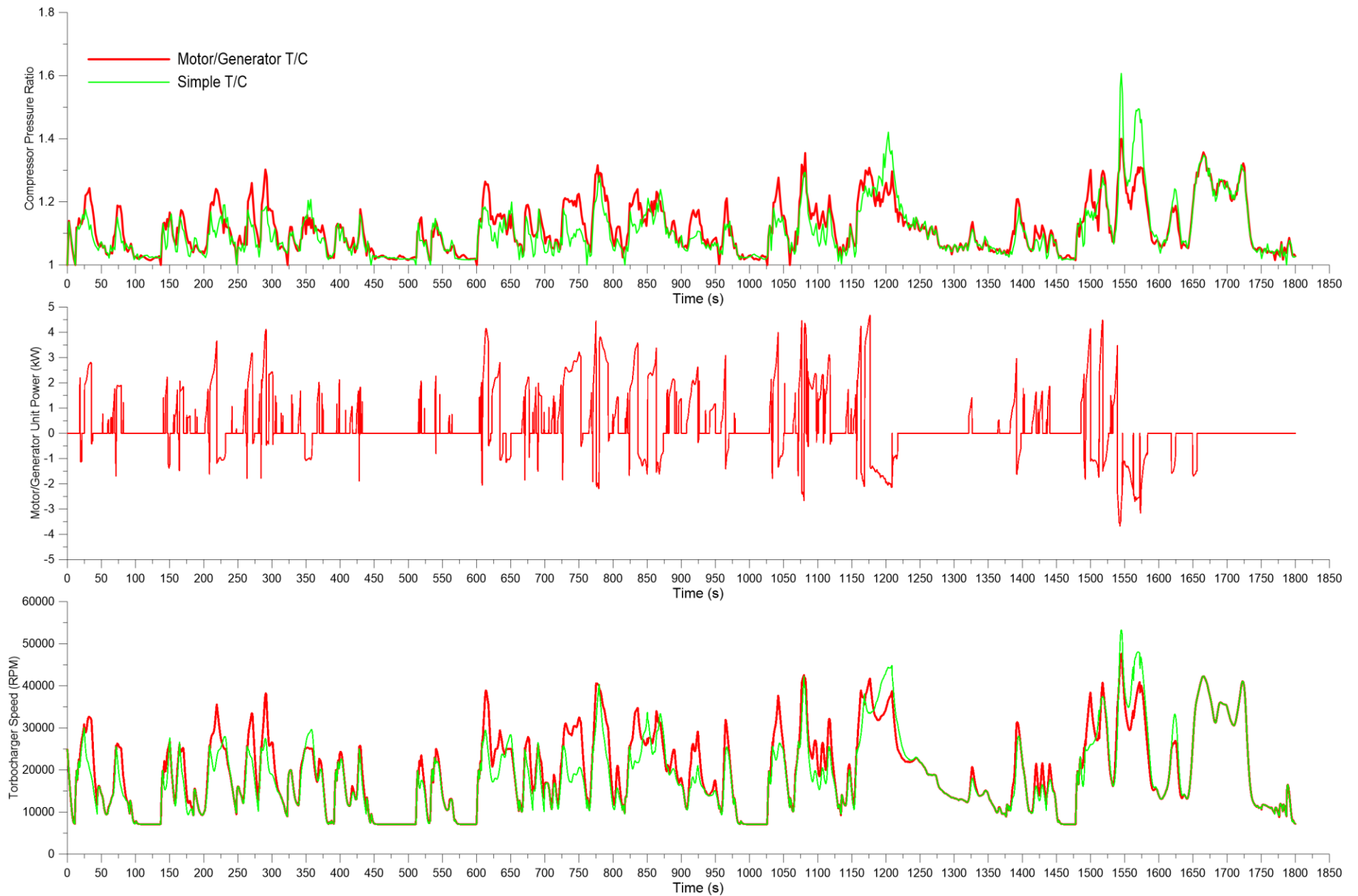
Στο τελευταίο μέρος του κεφαλαίου αυτού παρατίθενται τα διαγράμματα που αφορούν το σύστημα υπερπλήρωσης. Συγκρίνεται η ταχύτητα περιστροφής και ο λόγος πίεσης του συμπιεστή με και χωρίς την ηλεκτρική υποβοήθηση, αλλά και η συμπεριφορά των ηλεκτρικών συστημάτων όπως το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας, η ισχύς του ηλεκτροκινητήρα, η ισχύς του δυναμό και τέλος οι χρονικές περίοδοι στις οποίες η μπαταρία προσφέρει ενέργεια στον ηλεκτροκινητήρα, φορτίζεται από την γεννήτρια της υπερπλήρωσης και τέλος όταν φορτίζεται από το δυναμό. Αυτά τα διαγράμματα είναι από τα πιο σημαντικά και τα πιο ενδιαφέροντα στην παρούσα μελέτη. Αρχικά πρέπει να προσέξουμε πως το δυναμό δεν συμβάλει στην φόρτιση της μπαταρίας σχεδόν καθόλου (Σχήμα 5.23), γεγονός που σημαίνει πως η ενέργεια των καυσαερίων επαρκεί ώστε να φορτίζει η μπαταρία πλήρως. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει το διάγραμμα που δείχνει την ισχύ του ηλεκτροκινητήρα (Σχήμα 5.22). Όταν αυτή είναι θετική αυτό σημαίνει πως ο ηλεκτροκινητήρας προσφέρει ενέργεια στο ζεύγος υπερπλήρωσης, ενώ όταν είναι αρνητική λειτουργεί σαν γεννήτρια, εκμεταλλεύοντας την περίσσεια ενέργεια των καυσαερίων και μετατρέποντάς την σε ηλεκτρική.



Σχήμα 5.22: Επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας και ισχύς της μονάδας μετατροπής ηλεκτρομηχανικής ενέργειας συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.



Σχήμα 5.23: Χρονικές στιγμές προσφοράς ενέργειας από το δυναμό στην μπαταρία και ισχύς του δυναμό συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.



Σχήμα 5.24: Στροφές του ζεύγους υπερπλήρωσης, ισχύς της μονάδας μετατροπής ηλεκτρομηχανικής ενέργειας και λόγος πίεσης συμπιεστή συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

Βλέπουμε πως η μπαταρία αρχικά εκφορτίζεται μέχρι το όριο που έχουμε θέσει (50%). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η χρήση του ηλεκτροκινητήρα είναι πολύ συχνή στο εντός πόλης του κύκλου, διότι σε αυτά τα σημεία χρειάζεται βελτίωση η απόκριση του οχήματος. Επομένως, οι χρονικές στιγμές που η ηλεκτρομηχανική μονάδα λειτουργεί σαν γεννήτρια είναι λιγοστές. Στο εκτός πόλης κομμάτι (μετά τα 1050 δευτερόλεπτα) βλέπουμε πως η λειτουργία της μονάδας σαν ηλεκτροκινητήρας περιορίζεται και ότι λειτουργεί περισσότερο χρόνο (σε σχέση με το εντός πόλης τμήμα του κύκλου) σαν γεννήτρια, καταφέροντας έτσι να φορτίσει πλήρως την μπαταρία. Τέλος, στο Σχήμα 5.24 γίνεται ξεκάθαρο πως τις στιγμές που η μονάδα μετατροπής ηλεκτρομηχανικής ενέργειας λειτουργεί ως κινητήρας ο λόγος πίεσης του συμπιεστή και οι στροφές του ζεύγους υπερπλήρωσης αυξάνονται, ενώ όταν λειτουργεί ως γεννήτρια μειώνονται σε σχέση με αυτές της απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης και τις στιγμές που δεν λειτουργεί ούτε ως κινητήρας ούτε ως γεννήτρια οι τιμές αυτές συμπίπτουν.

5.5 Αποτελέσματα παραμετρικών προσομοιώσεων

Μετά από την ολοκλήρωση της προσομοίωσης του οχήματος σε ονομαστικές συνθήκες ακολούθησαν προσομοιώσεις με ορισμένες διαφοροποιημένες παραμέτρους. Οι παράμετροι που διαφοροποιήθηκαν ήταν τρεις και είναι οι εξής:

- Η τιμή της ονομαστικής (μέγιστης) ισχύος που μπορεί να αποδώσει ο ηλεκτροκινητήρας στο ζεύγος υπερπλήρωσης
- Το κατώτερο επίπεδο φόρτισης μπαταρίας που επιτρέπεται να παρουσιαστεί
- Η συνολική μάζα του οχήματος

Οι επιλεγμένες τιμές των παραπάνω μεγεθών φαίνονται στον Πίνακα 5.7, με τις τονισμένες τιμές να είναι οι ονομαστικές.

Ισχύς MGU (kW)	2.5	5	10
Επίπεδο Φόρτισης Μπαταρίας	30%	40%	50%
Συνολική Μάζα Οχήματος (kg)	2500	3000	3500

Πίνακας 5.7: Τιμές παραμετροποίησης των προσομοιώσεων.

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των εκπομπών ρύπων του κινητήρα, και της κατανάλωσης καυσίμου (απόλυτης και ειδικής) για τις περιπτώσεις της αλλαγής της συνολικής μάζας σώματος και της αλλαγής της ονομαστικής ισχύος της MGU. Αξιοσημείωτο είναι πως η αλλαγή της τιμής του κατώτατου επιπέδου φόρτισης που επιτρέπεται, δεν είχε καμία επίπτωση στις τιμές των εκπομπών ρύπων και της κατανάλωσης καυσίμου. Επομένως μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα ότι η λειτουργία του κινητήρα δεν επηρεάστηκε καθόλου, γι'αυτό και δεν θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από τις συγκεκριμένες προσομοιώσεις. Στην συγκεκριμένη ενότητα δεν θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα υπό μορφή διαγραμμάτων, αλλά θα παρουσιαστεί μόνο η ποσοστιαία μεταβολή μεταξύ του ονομαστικού οχήματος και του εκάστοτε οχήματος.

5.5.1 Συνολική μάζα οχήματος

Αρχικά θα μελετήσουμε την επίδραση της συνολικής μάζας του οχήματος στις εκπομπές και στην κατανάλωση καυσίμου του κινητήρα καθώς αποδείχθηκε πως αυτή έχει την μεγαλύτερη επίδραση. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η ονομαστική μάζα του οχήματος είναι 3.5 τόνοι. Πρώτα, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με συνολική μάζα οχήματος 2.5 τόνους, και αυτά θα είναι οι εκπομπές CO₂, NO_x, αιθάλης, μέσης κατανάλωσης καυσίμου και ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

	CO₂ (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Ονομαστικό όχημα	431.45	572.25	358.96
Συνολική μάζα οχήματος 2.5tn	389.73	522.11	321.12
Απόλυτη διαφορά	-41.72	-50.14	-37.85
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-9.67	-8.76	-10.54

Πίνακας 5.8: Διαφορά εκπομπών CO₂ κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

	NO_x (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Ονομαστικό όχημα	4.51	5.16	4.17
Συνολική μάζα οχήματος 2.5tn	3.63	4.23	3.33
Απόλυτη διαφορά	-0.87	-0.93	-0.85
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-19.40	-18.07	-20.27

Πίνακας 5.9: Διαφορά εκπομπών NO_x κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

	Soot (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Ονομαστικό όχημα	0.022	0.031	0.018
Συνολική μάζα οχήματος 2.5tn	0.017	0.024	0.013
Απόλυτη διαφορά	-0.006	-0.008	-0.005
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-25.22	-24.27	-26.15

Πίνακας 5.10: Διαφορά εκπομπών αιθάλης κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

	Fuel (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Ονομαστικό όχημα	181.19	224.00	159.15
Συνολική μάζα οχήματος 2.5tn	162.90	201.43	143.02
Απόλυτη διαφορά	-18.29	-22.56	-16.13
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-10.09	-10.07	-10.14

Πίνακας 5.11: Διαφορά μέσης κατανάλωσης καυσίμου κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

BSFC (g/kWh)	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	8.94	10.15	7.47

Πίνακας 5.12: Διαφορά ειδικής κατανάλωσης καυσίμου κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

Με βάση τα παραπάνω, γίνεται ξεκάθαρο πως η μείωση της συνολικής μάζας του οχήματος οδηγεί στην μείωση της ποσότητας καυσίμου που καταναλώνεται, οπότε

και στην μείωση εκπομπής όλων των ρύπων. Σημαντική παρατήρηση είναι πως η ειδική κατανάλωση καυσίμου αυξάνεται με την μείωση της μάζας του οχήματος. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι πως ο κινητήρας λειτουργεί σε χαμηλότερα φορτία (από τα ήδη χαμηλά φορτία στα οποία δουλεύει με το ονομαστικό όχημα), με αποτέλεσμα να λειτουργεί με μικρότερο βαθμό απόδοσης, αφού υψηλοί βαθμοί απόδοσης συναντώνται στα υψηλά φορτία του κινητήρα. Αντίστοιχα αποτελέσματα βγήκαν και από την προσομοίωση με μάζα οχήματος 3.0 τόνους.

	CO₂ (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Ονομαστικό όχημα	431.45	572.25	358.96
Συνολική μάζα οχήματος 3.0 tn	410.08	545.79	339.96
Απόλυτη διαφορά	-21.37	-26.46	-19.01
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-4.95	-4.62	-5.29

Πίνακας 5.13: Διαφορά εκπομπών CO₂ κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

	NO_x (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Ονομαστικό όχημα	4.51	5.16	4.17
Συνολική μάζα οχήματος 3.0 tn	4.07	4.65	3.77
Απόλυτη διαφορά	-0.44	-0.52	-0.40
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-9.74	-9.98	-9.59

Πίνακας 5.14: Διαφορά εκπομπών NO_x κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

	Soot (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Ονομαστικό όχημα	0.022	0.0311	0.0175
Συνολική μάζα οχήματος 3.0 tn	0.020	0.0275	0.0165
Απόλυτη διαφορά	-0.002	-0.0036	-0.0010
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-8.64	-11.67	-5.89

Πίνακας 5.15: Διαφορά εκπομπών αιθάλης κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

	Fuel (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Ονομαστικό όχημα	181.19	224.00	159.15
Συνολική μάζα οχήματος 3.0 tn	173.00	214.16	151.79
Απόλυτη διαφορά	-8.19	-9.84	-7.36
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-4.52	-4.39	-4.62

Πίνακας 5.16: Διαφορά μέσης κατανάλωσης καυσίμου κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

BSFC (g/kWh)	Total	0-1022	1022-1800
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	3.80	4.69	2.72

Πίνακας 5.17: Διαφορά ειδικής κατανάλωσης καυσίμου κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

Όπως αναφέρθηκε, τα αποτελέσματα είναι αντίστοιχα με αυτά της προσομοίωσης με μάζα οχήματος 2.5 τόνους. Οι εκπομπές καυσαερίων και η μέση κατανάλωση καυσίμου είναι μειωμένες σε σχέση με το ονομαστικό όχημα, αλλά σε μικρότερο βαθμό απ' ότι στην προσομοίωση με όχημα μάζας 2.5 τόνους. Τέλος, η ειδική κατανάλωση καυσίμου αυξάνεται και σε αυτήν την περίπτωση, σε μικρότερο βαθμό βέβαια, με τον λόγο για τον οποίο συμβαίνει αυτό να είναι ο ίδιος με την προηγούμενη περίπτωση.

5.5.2 Ισχύς μονάδας μετατροπής ηλεκτρομηχανικής ενέργειας

Το πιο ενδιαφέρον τμήμα της παραμετρικής ανάλυσης είναι το συγκεκριμένο, όπου φαίνεται πόσο σημαντική είναι η συμβολή του ηλεκτροκινητήρα στην συνολική λειτουργία του οχήματος. Πρώτα θα δούμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με κανονική ισχύ της MGU 2.5 kW.

	CO₂ (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Ονομαστικό όχημα	431.45	572.25	358.96
Ισχύς MGU 2.5kW	432.31	573.72	359.45
Απόλυτη διαφορά	0.86	1.47	0.48
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	0.20	0.26	0.14

Πίνακας 5.18: Διαφορά εκπομπών CO₂ κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

	NO_x (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Ονομαστικό όχημα	4.51	5.16	4.17
Ισχύς MGU 2.5kW	4.55	5.19	4.22
Απόλυτη διαφορά	0.04	0.02	0.04
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	0.82	0.46	1.04

Πίνακας 5.19: Διαφορά εκπομπών NO_x κατά την διάρκεια της Κλάσης 3 του Κύκλου Πόλης WLTC.

	Soot (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Ονομαστικό όχημα	0.0221	0.0311	0.0175
Ισχύς MGU 2.5kW	0.0227	0.0321	0.0179
Απόλυτη διαφορά	0.0006	0.0010	0.0004
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	2.69	3.35	2.09

Πίνακας 5.20: Διαφορά εκπομπών αιθάλης κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

	Fuel (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Ονομαστικό όχημα	181.19	224.00	159.15
Ισχύς MGU 2.5kW	181.20	223.99	159.17
Απόλυτη διαφορά	0.01	0.00	0.02
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	0.01	0.00	0.01

Πίνακας 5.21: Διαφορά μέσης κατανάλωσης καυσίμου κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

BSFC (g/kWh)	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	0.46	0.48	0.44

Πίνακας 5.22: Διαφορά ειδικής κατανάλωσης καυσίμου κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

Πριν τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων αυτών κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση και των αποτελεσμάτων για κανονική ισχύ της MGU 10kW στους Πίνακες 5.22 έως 5.26, με σκοπό το συγκριτικό σχολιασμό τους.

	CO₂ (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Ονομαστικό όχημα	431.45	572.25	358.96
Ισχύς MGU 10kW	429.88	570.13	357.64
Απόλυτη διαφορά	-1.57	-2.12	-1.32
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-0.36	-0.37	-0.37

Πίνακας 5.23: Διαφορά εκπομπών CO₂ κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

	NO_x (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Ονομαστικό όχημα	4.51	5.16	4.17
Ισχύς MGU 10kW	4.48	5.10	4.16
Απόλυτη διαφορά	-0.03	-0.06	-0.01
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-0.63	-1.21	-0.33

Πίνακας 5.24: Διαφορά εκπομπών NO_x κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

	Soot (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Ονομαστικό όχημα	0.0221	0.0311	0.0175
Ισχύς MGU 10kW	0.0201	0.0272	0.0165
Απόλυτη διαφορά	-0.0020	-0.0039	-0.0010
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-9.03	-12.57	-5.80

Πίνακας 5.25: Διαφορά εκπομπών αιθάλης κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

	Fuel (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Ονομαστικό όχημα	181.19	224.00	159.15
Ισχύς MGU 10kW	180.91	223.76	158.86
Απόλυτη διαφορά	-0.28	-0.24	-0.30
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-0.15	-0.11	-0.19

Πίνακας 5.26: Διαφορά μέσης κατανάλωσης καυσίμου κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

BSFC (g/kWh)	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-0.40	-0.24	-0.59

Πίνακας 5.27: Διαφορά ειδικής κατανάλωσης καυσίμου κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC.

Μελετώντας τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει το συμπέρασμα πως η επίδραση της ηλεκτρικά υποβοηθούμενης στροβιλο-υπερπλήρωσης στην λειτουργία ενός κινητήρα δεν είναι εύκολο να αξιολογηθεί. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, τις χρονικές στιγμές στις οποίες ο ηλεκτροκινητήρας προσφέρει μηχανική ισχύ στο ζεύγος υπερπλήρωσης συμβάλει στην επίτευξη υψηλότερου βαθμού συμπίεσης. Επομένως, αφενός μεν η πίεση μέσα στον κύλινδρο αυξάνεται και έτσι επιτυγχάνεται μεγαλύτερη έξοδος στρεπτικής ροπής, άρα και μεγαλύτερου βαθμού απόδοσης, αφετέρου όμως αναρροφάται μεγαλύτερη ποσότητα αέρα από τους κυλίνδρους, άρα καταναλώνεται και μεγαλύτερη ποσότητα

καυσίμου και επίσης για τη λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα χρειάζεται ορισμένη ενέργεια η οποία αναγκαστικά πρέπει να προκύψει από την κατανάλωση παραπάνω καυσίμου. Έτσι, έχουμε δύο αντικρουόμενες επιδράσεις της MGU στις εκπομπές καυσαερίων και στην κατανάλωση καυσίμου. Με βάση τους Πίνακες 5.18 έως 5.27 συμπεραίνουμε πως ένας ηλεκτροκινητήρας με μικρή ονομαστική ισχύ δεν έχει πολλά να προσφέρει στον κινητήρα παρά μόνο ένα επιπλέον φορτίο, καθώς οι αρνητικές επιπτώσεις της λειτουργίας του υπερκαλύπτουν τις θετικές. Ωστόσο, η χρήση μίας MGU με την κατάλληλη ονομαστική ισχύ (για τον συγκριμένο κινητήρα και όχημα φαίνεται να είναι 10kW) μπορεί να συμβάλει στην βελτίωση της λειτουργίας του κινητήρα και του οχήματος σε όλους τους τομείς.

5.6 Συμπεράσματα

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα και αναλύοντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προέκυψαν τα παρακάτω πολύ ενδιαφέροντα στοιχεία που αφορούν τις εκπομπές CO₂ , NO_x , αιθάλης, την κατανάλωση καυσίμου, και την απόκριση του οχήματος σε μεγάλες και απότομες επιταχύνσεις.

Ο βασικός στόχος της ηλεκτρικά υποβοηθούμενης στροβιλο-υπερπλήρωσης, που είναι η βελτίωση της απόκρισης των οχημάτων σε απότομες αλλαγές ταχύτητας, φαίνεται να επιτυγχάνεται σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό. Το συμπέρασμα αυτό εξάγεται με βάση το Σχήμα 5.15, στο οποίο διακρίνεται η σαφώς καλύτερη απόκριση του οχήματος σε απότομες επιταχύνσεις, καθώς και από τον πίνακα 5.2, στον οποίο φαίνεται (σε μεγαλύτερο βαθμό στο εντός πόλης τμήμα του κύκλου) πως ο κινητήρας απαιτεί λιγότερο καύσιμο για την υλοποίηση των ίδιων επιταχύνσεων. Πολύ σημαντικά διαγράμματα είναι τα Σχήματα 5.22 έως 5.24 που δείχνουν την λειτουργία των ηλεκτρικών τμημάτων της ηλεκτρικά υποβοηθούμενης στροβιλο-υπερπλήρωσης. Ειδικά το Σχήμα 5.24 αποτελεί διάγραμμα ιδιαίτερης σημασίας καθώς αποτυπώνει την τα κύρια σημεία λειτουργίας του συστήματος υποβοήθησης. Σε αυτό το σχήμα γίνεται ξεκάθαρη η συμβολή και υποβοήθηση του ηλεκτροκινητήρα στο ζεύγος υπερπλήρωσης, δίνοντας την δυνατότητα στον συμπιεστή να βγάξει μεγαλύτερο λόγο πίεσης. Στον αντίποδα, όταν η μονάδα

υποβοήθησης λειτουργεί ως γεννήτρια οι στροφές του ζεύγους και ο λόγος πίεσης του συμπιεστή μειώνονται, συμπεριφορά πλήρως αναμενόμενη διότι η γεννήτρια απορροφά μέρος της ενέργειας των καυσαερίων, που στην περίπτωση της απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης παρέχεται στο ζεύγος χωρίς αυτό να την έχει ανάγκη.

Κλείνοντας, από την παρούσα μελέτη συμπεραίνουμε πως η ηλεκτρικά υποβοηθούμενη στροβιλο-υπερπλήρωση έχει ιδιαίτερα θετικά αποτελέσματα στην απόκριση του οχήματος, και με πολύ ιδιαίτερη επίδραση στις εκπομπές καυσαερίων. Με ικανοποιημένο λοιπόν τον βασικό σκοπό της εφαρμογής αυτής πρέπει να πραγματοποιείται κατάλληλη διαστασιολόγηση της MGU με σκοπό οι αλλαγές που επιφέρει στις εκπομπές καυσαερίων να είναι σίγουρα θετικές, καθώς στις μέρες μας είναι ο καθοριστικός παράγοντας αξιολόγησης ενός οχήματος. Στις εκπομπές καυσαερίων όπως έγινε ξεκάθαρο πόσο σημαντική είναι η επιλογή μίας MGU με την κατάλληλη ονομαστική ισχύ. Η εκπεμπόμενη αιθάλη με την χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι αισθητά μειωμένη στην εντός πόλης λειτουργία του κινητήρα, που είναι το μείζον θέμα στις ρυθμιστικές διατάξεις εκπομπών ρύπων. Επομένως, η ηλεκτρικά υποβοηθούμενη στροβιλο-υπερπλήρωση είναι μία τεχνολογία που μπορεί να συμβάλει θετικά στην λειτουργία των οχημάτων και στον έλεγχο των εκπεμπόμενων ρύπων, αν ενταχθεί στα αυτοκίνητα τα επόμενα χρόνια.

Τέλος πρέπει να τονιστεί ότι πολλά από τα παραπάνω αποτελέσματα και συμπεράσματα εξαρτώνται σημαντικά από το επιλεγέν σύστημα ελέγχου, όπως αυτό περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Διαφοροποίηση του συγκεκριμένου συστήματος ελέγχου μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα και διαφοροποίηση στα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Κ.Δ. Ρακόπουλος (2013) «Μηχανές Εσωτερικής Κυσης Ι», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 2) Κ.Δ. Ρακόπουλος, Ε.Γ. Γιακουμής (2011) «Εναλλαγή αερίων και υπερπλήρωση ΜΕΚ», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 3) Κ.Δ. Ρακόπουλος, Δ.Θ. Χουντάλας (1998) «Καύση ρύπανση εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 4) C.D. Rakopoulos, E.G. Giakoumis (2009) «Diesel engine transient operation», Springer, London.
- 5) E.G. Giakoumis (2016), «Driving and Engine Cycles», Springer, Cham.
- 6) Ε.Γ. Γιακουμής, (2015) «Προδιαγραφές Καυσαερίων και Κύκλοι Δοκιμής Εμβολοφόρων ΜΕΚ», Ε.Μ.Π., Αθήνα .
- 7) Α.Γ. Αλυσανδράτου (2013) «Απόκριση και εκπομπές ρύπων βαρέων οχημάτων κατά τη διάρκεια του Κύκλου Πόλης UDDS με χρήση του υπολογιστικού πακέτου GT-Power», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., (επιβλέπων: Ε.Γ. Γιακουμής).
- 8) Γ.Π. Καλορίτης (2014) «Προσομοίωση διβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης σε μόνιμη και μεταβατική λειτουργία με χρήση του υπολογιστικού πακέτου GT-Power», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., (επιβλέπων: Ε.Γ. Γιακουμής).
- 9) 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», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., (επιβλέπων: Ε.Γ. Γιακουμής).

10) Gamma Technologies, Inc. (2010), «GT-Suite Engine Performance Tutorials, Version 7.3».

11) Κ.Δ. Μάντζος (2012) «Μελέτη προσομοίωσης συνδυασμένης υπερπλήρωσης κινητήρα Diesel με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου GT-Power», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π. (επιβλέπων: Ε.Γ. Γιακουμής).

12) Α.Μ. Δημάρατος (2011) «Διερεύνηση των εκπομπών ρύπων κατά τη μεταβατική λειτουργία κινητήρων Diesel», Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π. (επιβλέπων: Κ.Δ. Ρακόπουλος).

13) D.E. Winterbone, R.S. Benson, A.G. Mortimer, P. Kenyon, A. Stotter, (1977). “Transient response of turbocharged diesel engines”, SAE Paper 770122.

14) <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/index.php>

15) https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page

16) <https://www.pankl-turbosystems.com/product-portfolio/prototypes>

17) <https://www.commercialfleet.org/news/truck-news/2016/03/21/creative-technology-adds-15-tonne-mercedes-benz-atego>

18) https://www.dieselnet.com/tech/air_turbo_assist.php

19) Simon Ahl, Alexander Gimdal, (2016), «Benefits of using an electrically assisted turbocharger to increase marine engine efficiency», Diploma thesis, Sweden.

- 20) Jinsha Rajeevana, Hans M H, Antonio Joseph, Kiran T S, Gireesh Kumaran Thampi, (2015), «Hybrid turbocharged SI engine with cooled exhaust gas recirculation for improved performance» , ICETEST.
- 21) Kristoffer Ekberg, Lars Eriksson, (2017), «Improving Fuel Economy and Acceleration by Electric Turbocharger Control for Heavy Duty Long Haulage», IFAC Paper 50-1.
- 22) Pavlos Dimitriou, Richard Burke, Qingning Zhang, Colin Copeland and Harald Stoffels, (2017), «Electric Turbocharging for Energy Regeneration and Increased Efficiency at Real Driving Conditions», MDPI.
- 23) Gianluca Pasini, Giovanni Lutzemberger, Stefano Frigo, Silvia Marelli, Massimo Ceraolo, Roberto Gentili, Massimo Capobianco, (2016), «Evaluation of an electric turbo compound system for SI engines: A numerical approach», Applied Energy 162.
- 24) Ivan Arsie, Andrea Cricchio, Cesare Pianese, Vincenzo Ricciardi, Matteo De Cesare, (2015), «Evaluation of CO2 reduction in SI engines with Electric Turbo-Compound by dynamic powertrain modelling», IFAC Paper 48-15.
- 25) Gregor Tavcar, Francisek Bizjan, Tomaz Katrasnik, (2011), «METHODS FOR IMPROVING TRANSIENT RESPONSE OF DIESEL ENGINES - INFLUENCES OF DIFFERENT ELECTRICALLY ASSISTED TURBOCHARGING TOPOLOGIES», Slovenia.
- 26) Steven H. Homologation test cycles worldwide—status of the WLTP. Green global NCAP labelling/green scoring Workshop, Apr, 2013.

27) Tutuianu M, Marotta A, Steven H, Ericsson E, Haniu T, Ichikawa N, et al. Development of the worldwide harmonized light-duty driving test cycle (WLTC). Technical report, UNECE/WP.29/GRPE/WLTP-IG DHC subgroup, Dec 2013.

28) Global Technical Regulation No. 15, Worldwide harmonized light vehicles test procedure. Established in the Global Registry on 12 Mar 2014.

29) <https://www.pankl.com/products/engine/>