ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

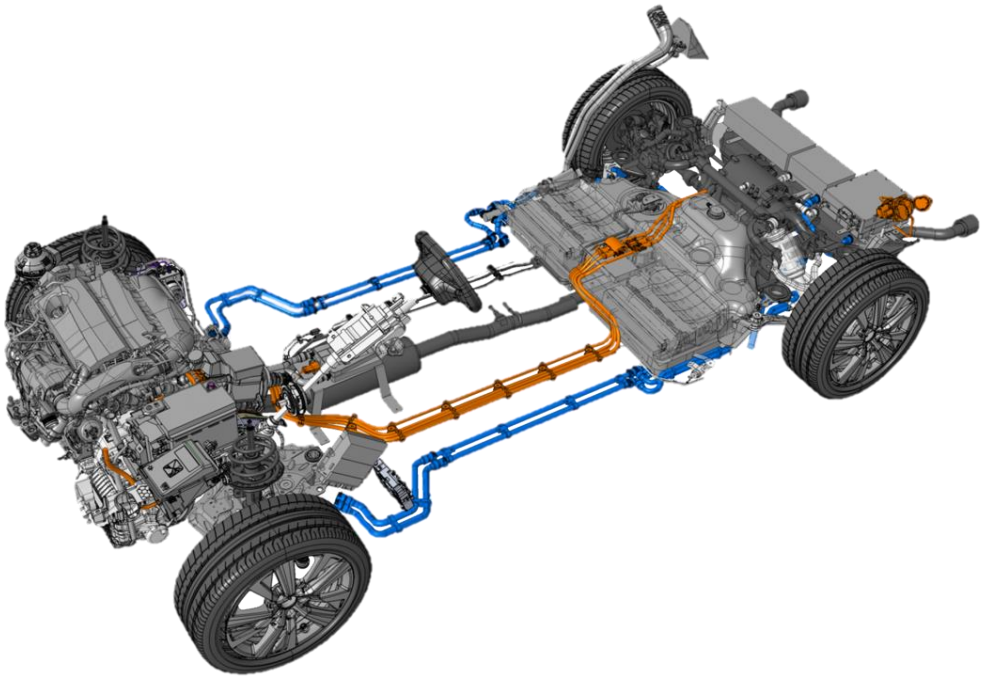
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη υβριδικού-ηλεκτρικού οχήματος (HEV) κατά τη διάρκεια του παγκόσμιου κύκλου πόλης WLTC - Σύγκριση εκπομπών και επιδόσεων με συμβατικό όχημα»



ΙΩΑΝΝΗΣ ΓΟΥΛΟΔΗΜΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Γ. ΓΙΑΚΟΥΜΗΣ – ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2019

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ευάγγελο Γιακουμή, Καθηγητή του Ε.Μ.Π., για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και σύγχρονο θέμα όπως αυτό των υβριδικών οχημάτων, για τις συμβουλές και τη βοήθεια του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, αλλά και για την σημαντική συμβολή του στην ενασχόληση μου με το αντικείμενο των μηχανών εσωτερικής καύσης.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Χουντάλα, Καθηγητή Ε.Μ.Π., για τις γνώσεις που απέκτησα κατά τη διάρκεια συνδιδασκαλίας του στα μαθήματα σχετικά με τις μηχανές εσωτερικής καύσης.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου και τους φίλους μου για τη συμπαράσταση και τη βοήθεια τους κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μου σπουδών.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ 5

ΕΙΣΑΓΩΓΗ 7

ABSTRACT 8

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Υβριδικά Οχήματα 9

1.1 Ορισμός υβριδικού οχήματος 9

1.2 Ιστορική αναδρομή 9

1.3 Βαθμός υβριδοποίησης 11

1.3.1 Μικρο – υβριδικά (Micro hybrid) 11

1.3.2 Ήπια υβριδικά (Mild hybrid) 12

1.3.3 Πλήρως υβριδικά (Full hybrid) 12

1.3.4 Υβριδικά με σύστημα εξωτερικής ηλεκτρικής φόρτισης (Plug – in hybrid) 12

1.4 Ανάλυση πλήρως υβριδικού ηλεκτρικού οχήματος 13

1.4.1 Σειριακό σύστημα 13

1.4.2 Παράλληλο σύστημα 15

1.4.3 Παράλληλο - σειριακό σύστημα 16

1.5 Συστήματα που εφαρμόζονται σε υβριδικά οχήματα 16

1.5.1 Σύστημα «start-stop» 17

1.5.2 Σύστημα αναγεννητικής πέδησης «regenerative braking» 17

1.6 Πλεονεκτήματα υβριδικών οχημάτων 19

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Σχηματισμός και Εκπομπή Ρύπων Συμβατικών Οχημάτων με Κινητήρα Diesel 21

2.1 Γενικά 21

2.2 Σχηματισμός των οξειδίων του αζώτου NO_x 22

2.3 Σχηματισμός του μονοξειδίου του αζώτου (NO) στον θάλαμο καύσης κινητήρων Diesel 22

2.3.1 Περιγραφή σχηματισμού του NO 22

2.3.2 Επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας στην τιμή του NO 23

2.4 Εκπομπές σωματιδίων από κινητήρες Diesel 24

2.4.1 Γενικά 24

2.4.2 Κατανομή μεγέθους σωματιδίων 26
2.5 Ιδιαιτερότητες εκπομπών καυσαερίων κατά τη μεταβατική λειτουργία στροβιλο-υπερπληρωμένων κινητήρων Diesel 29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Κύκλοι Πόλης 33
3.1 Εισαγωγή 33
3.2 Συνιστώσες της διαδικασίας δοκιμής 35
3.2.1 Δυναμόμετρο 35
3.2.2 Γενικά περί μετρήσεων εκπομπών ρύπων κατά τη διάρκεια των μεταβατικών κύκλων 37
3.3 Παγκόσμιος κύκλος πόλης WLTC 40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Μοντελοποίηση Υβριδικού Οχήματος με Χρήση του Λογισμικού GT-SUITE ... 47
4.1 Εισαγωγή στο GT-SUITE 47
4.2 Περιβάλλον εργασίας GT-Power 48
4.3 Δημιουργία του μοντέλου ενός υβριδικού οχήματος στο λογισμικό GT-Power 49
4.3.1 Μοντελοποίηση κινητήρα Diesel (Μ.Ε.Κ.) 49
4.3.2 Μοντέλο οχήματος και συστήματος μετάδοσης κίνησης στο περιβάλλον του GT-Power 51
4.3.3 Μοντελοποίηση πλήρως υβριδικού οχήματος 60
5. Επιδόσεις και Εκπομπές Καυσαερίων Υβριδικού Οχήματος - Σύγκριση με Συμβατικό Όχημα 65
5.1 Περιγραφή 65
5.2 Επιδόσεις κινητήρα Diesel 66
5.3 Εκπομπές καυσαερίων κινητήρα 80
5.4 Επιδόσεις των ηλεκτρικών μερών του υβριδικού συστήματος 88
5.5 Αποτελέσματα παραμετρικής μελέτης 90
5.5.1 Μεταβολή της (μέγιστης) ισχύος του ηλεκτροκινητήρα 91
5.5.2 Μεταβολή της μάζας του οχήματος 94
5.5.3 Μεταβολή της μετωπικής επιφάνειας του οχήματος 97
5.6 Συμπεράσματα 102
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 103

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

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	$kg*m^2$
G_v	Ροπή αδράνειας οχήματος	$kg*m^2$
i_b	Σχέση μετάδοσης διαφορικού	-
i_g	Σχέση μετάδοσης στο κιβώτιο ταχυτήτων	-
L	Μήκος διωστήρα	m
m_v	Μάζα οχήματος	kg
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
n_{gear}	Συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος μετάδοσης	-
$\overline{p_e}$	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	cm^3
z	Αριθμός κυλίνδρων	-
ε	Βαθμός συμπίεσης	-
λ_α	Λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου	-
ϕ	Γωνία στροφάλου	°
Φ	Λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα	-
AFR	Λόγος αέρα-καυσίμου (Air-fuel ratio)	
BMEP	Μέση πραγματική πίεση (Brake mean effective pressure)	
BSFC	Ειδική κατανάλωση καυσίμου (Brake specific fuel consumption)	
CO	Μονοξείδιο του άνθρακα (Carbon monoxide)	
CO_2	Διοξείδιο του άνθρακα (Carbon dioxide)	
CVS	Δειγματοληψία σταθερού όγκου (Constant volume sampling)	
DI	Άμεση έγχυση (Direct injection)	

EGR	Ανακυκλοφορία καυσαερίων (Exhaust gas recirculation)
NO	Μονοξείδιο του αζώτου (Nitric oxide)
NO_X	Οξείδια του αζώτου (Oxides of nitrogen)
SOC	Στάθμη μπαταρίας (State of charge)
WLTC	Παγκόσμιος Κύκλος Πόλης Οχημάτων Ελαφρού Τύπου (Worldwide Harmonized Light-Duty Driving Test Cycle)
Μ.Ε.Κ.	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης
4-Χ	Τετράχρονος

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Καθώς η νομοθεσία που αφορά τις εκπομπές καυσαερίων από οχήματα και κυρίως αυτές του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), γίνεται ολοένα και αυστηρότερη, οι κατασκευαστές προσπαθούν συνεχώς να βρουν τρόπους ώστε ο στόλος των οχημάτων τους να συμβαδίζει με τα επιτρεπτά όρια εκπομπών. Πιο συγκεκριμένα, από το 2015 ισχύει μέγιστο όριο εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για επιβατηγά οχήματα και ελαφρά φορτηγά (κατηγορία M1) 130 g/km (μέσος όρος στόλου κατασκευαστή ετησίως). Το όριο αυτό θα μειωθεί στα 95 g/km από το 2021, ενώ ήδη έχει νομοθετηθεί περαιτέρω μείωση 37,5% από το 2030. Ορισμένοι από τους τρόπους που χρησιμοποιούν οι κατασκευαστές για την επίτευξη των ορίων είναι η μείωση του κυβισμού με ταυτόχρονη χρήση υπερπλήρωσης (downsizing), η άμεση έγχυση σε κινητήρες Otto και η απενεργοποίηση κυλίνδρων σε χαμηλά φορτία. Με τα επερχόμενα όμως όρια να είναι πολύ μειωμένα σε σχέση με τα 130 g/km που ισχύουν σήμερα, φαίνεται ότι η κύρια μέθοδος θα είναι η υβριδοποίηση των οχημάτων ή ακόμα και η χρήση πλήρως ηλεκτρικών οχημάτων. Στόχος είναι η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου (άρα και μείωση στις εκπομπές CO_2), κυρίως εντός πόλης, όπου οι μηχανές εσωτερικής καύσης λειτουργούν σε χαμηλά φορτία και με συχνές επιταχύνσεις, δηλαδή συνολικά με χαμηλή απόδοση, επομένως η χρήση ενός ηλεκτρικού ή υβριδικού κινητήρα φαντάζει πολύ ενδιαφέρουσα.

Αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας αποτελεί η μελέτη ενός πλήρως υβριδικού επαγγελματικού οχήματος ελαφρού τύπου, με στόχο τον υπολογισμό των επιδόσεων και των εκπομπών και τη μετέπειτα σύγκρισή τους με αυτές ενός συμβατικού οχήματος το οποίο χρησιμοποιεί έναν στροβιλο-υπερπληρωμένο εξακύλινδρο κινητήρα Diesel και αναπτύχθηκε σε πρώτη φάση κατά την εκπόνηση παλαιότερης διπλωματικής εργασίας [8]. Η μελέτη αυτή αφορά τη μοντελοποίηση του οχήματος, του κινητήρα Diesel και των ηλεκτρικών μερών που απαιτούνται για το υβριδικό σύστημα, με χρήση του υπολογιστικού πακέτου GT-Power (Gamma Technologies, Inc.), το οποίο είναι ένα εξειδικευμένο λογισμικό μοντελοποίησης με ευρεία χρήση στην βιομηχανία. Η μελέτη αυτή 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 ανάλυση αφορά πρωτίστως τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), αλλά επεκτείνεται και σε επίπεδο ρύπων, συγκεκριμένα στους δύο βασικότερους ρύπους κινητήρων Diesel, τα οξείδια του αζώτου (NO_X) και την αιθάλη.

ABSTRACT

Since the legislation concerning the exhaust emissions which are produced by vehicles and the carbon dioxide (CO_2) emissions in particular, is becoming even sticter, manufacturers are constantly trying to find ways so that their fleet of vehicles complies with the emissions standards that are imposed. More specifically, since 2015, the fleet-average emissions of CO_2 per year, for every manufacturer of passenger cars and light trucks (M1 category), should not exceed 130 g/km, and after 2021, they should be less than 95 g/km. What is more, a further reduction has been enforced for 2030, when the emissions limit will be reduced by 37.5 %. Some examples of the methods that they are putting in practice are the downsizing of the internal combustion engines, the implementation of direct injection in Otto engines and the cylinder deactivation at low loads. As the forthcoming legislation, concerning the emissions standards, will be even stricter than the current one, the main method that is utilized by car manufacturers is the hybridization or even the electrification of vehicles. Their purpose is the reduction of fuel consumption (which leads to a reduction in CO_2 emissions), especially in urban areas where the internal combustion engines are running at low loads with frequent accelerations, which entails low efficiency, so the usage of an electric motor is very interesting.

The subject of this diploma thesis is the study of a hybrid light-duty vehicle, and it's purpose is to investigate the vehicle's performance and emissions and then compare the results to those that have been calculated for a conventional vehicle which has a six-cylinder, turbocharged Diesel engine and has been developed during an earlier diploma thesis. This thesis deals with the design of the vehicle, the Diesel engine and all the electrical parts that are needed for the hybrid system by using the GT-Power computational package (Gamma Technologies, Inc.), which is a specialized modelling software that is used extensively in the industry. The study refers to the simulation of the newly established Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Cycle (WLTC), which has replaced NEDC since September 2017 in the certification for new passenger cars and light-duty trucks. The emissions studied are mainly the carbon dioxide (CO_2) emissions and the two main pollutants from Diesel engines, nitrogen oxides (NO_X) and soot.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Υβριδικά Οχήματα[1]

1.1 Ορισμός υβριδικού οχήματος

Με τον όρο υβριδικό, εννοούμε το όχημα το οποίο συνδυάζει και χρησιμοποιεί τουλάχιστον δύο διαφορετικές πηγές ενέργειας προκειμένου να επιτύχει την κίνησή του. Οι πηγές ενέργειας είναι μια μηχανή εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ.) και μια πιο «φιλική» προς το περιβάλλον τεχνολογία η οποία προσδίδει κίνηση στο όχημα κατά περίπτωση, και αναλόγως των απαιτήσεων της κίνησης, μέσω ηλεκτρικού κινητήρα, πνευματικής ή υδραυλικής κινητήριας διάταξης, θερμικού κινητήρα και άλλων τεχνολογιών. Πηγή ενέργειας για αυτές τις τεχνολογίες μπορεί να θεωρηθεί η ηλιακή, η θερμική η ηλεκτρική ή η ενέργεια από τη βιομάζα όπως είναι το βιοκαύσιμο, το υγρό άζωτο, το φυσικό αέριο, το υδρογόνο κ.α.

Ο εναλλακτικός κινητήρας μπορεί να αναλάβει αποκλειστικά την κίνηση του οχήματος όταν αυτό κινείται με σταθερές συνθήκες και σε χαμηλές ταχύτητες κυρίως αλλά και να υποβοηθά την κίνηση με τον συμβατικό κινητήρα όταν αυτό απαιτείται, όπως για παράδειγμα κατά την απαίτηση μέγιστης ισχύος που μπορεί να παρέχει το όχημα. Επίσης, ο εναλλακτικός κινητήρας πρέπει να παρέχει και τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας. Σε κάθε υβριδικό όχημα ο κατασκευαστής επιλέγει τις συνθήκες με τις οποίες θα λειτουργεί ο εκάστοτε κινητήρας (Μ.Ε.Κ. ή εναλλακτικός κινητήρας) ή ακόμα και αν θα λειτουργούν κατά συνθήκη συνδυαστικά, ανάλογα με το χαρακτήρα του οχήματος.

1.2 Ιστορική αναδρομή

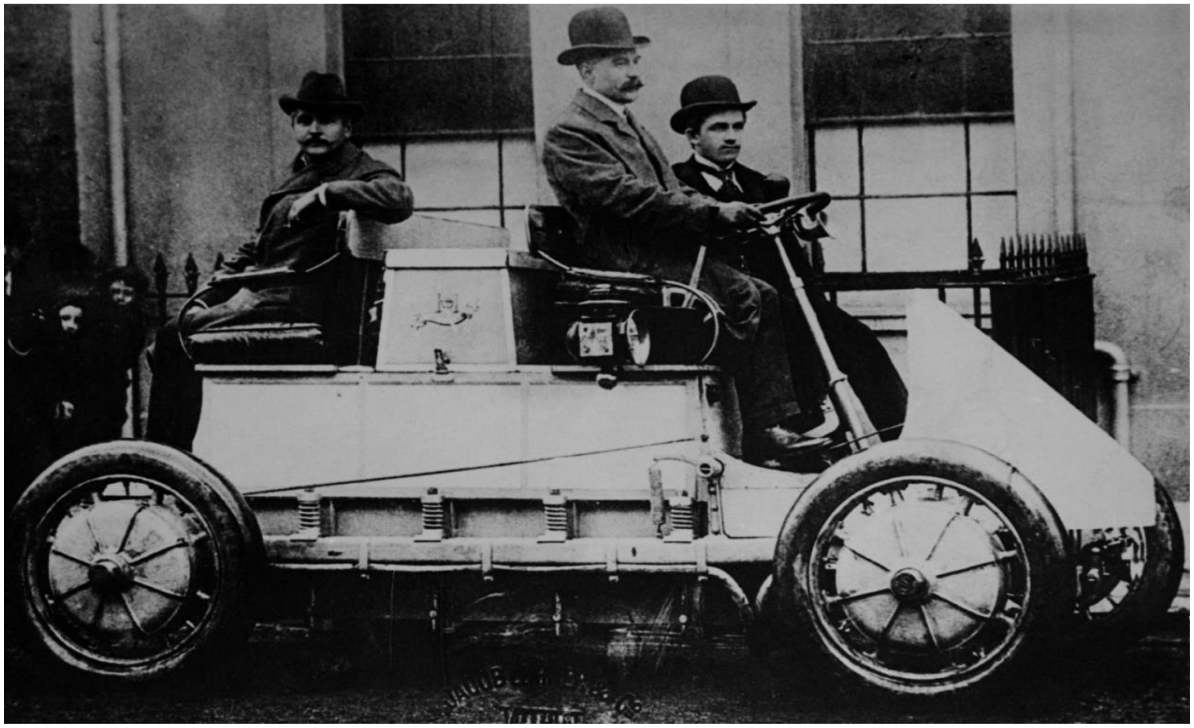
Το πρώτο υβριδικό όχημα κατασκευάστηκε από τον Ferdinard Porsche το 1900 με την ονομασία «Lohner – Porsche Mixte Hybrid», Σχήμα 1.1. Πιο συγκεκριμένα, ήταν ένα υβριδικό ηλεκτρικό όχημα με σειριακή διάταξη και κίνηση και στους τέσσερεις τροχούς. Το κινητήριο

[1] Για περισσότερες πληροφορίες βλ. Παραπομπή [18] της βιβλιογραφίας.

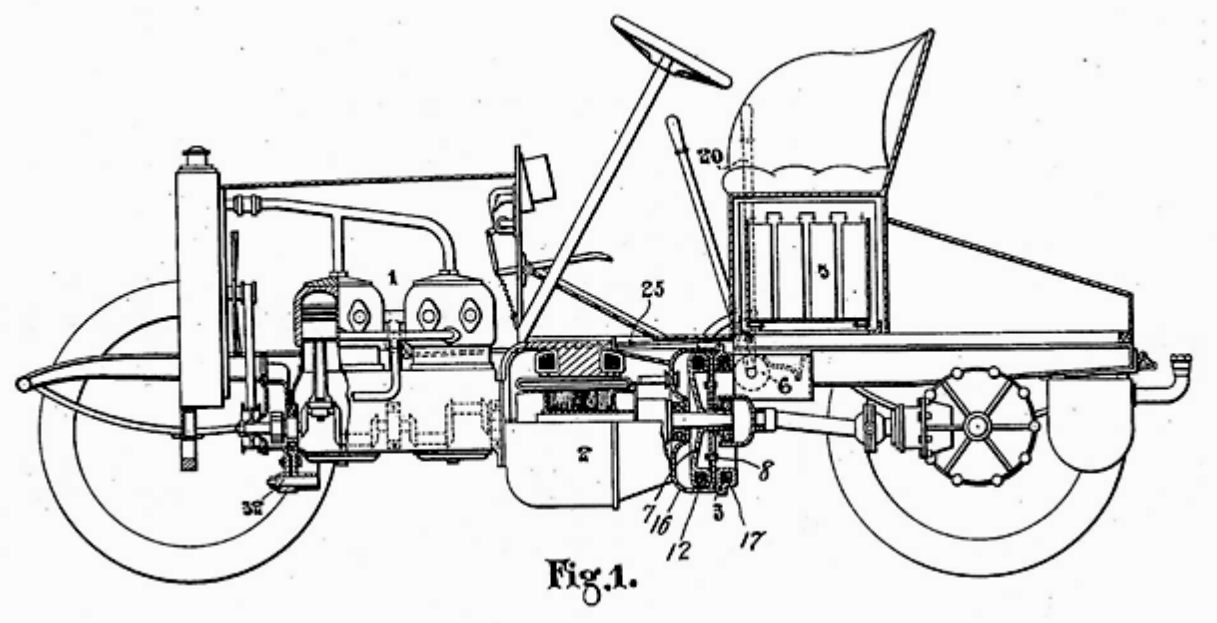
σύστημα του αποτελούσαν ένας βενζινοκινητήρας, μια ηλεκτρική γεννήτρια και τέσσερις ηλεκτρικοί κινητήρες οι οποίοι είχαν προσαρμοστεί επάνω στους τροχούς του οχήματος.

Το 1905 ο Henri Pieper παρουσίασε ένα υβριδικό αυτοκίνητο, Σχήμα 1.2, με έναν ηλεκτρικό κινητήρα/ γεννήτρια, μπαταρίες και μία μικρή μηχανή καυσίμου. Χρησιμοποιούσε τον ηλεκτρικό κινητήρα για να φορτίσει τις μπαταρίες καθώς κινούταν υπό κανονικές συνθήκες ταξιδιού και χρησιμοποιούσε και τους 2 κινητήρες για να επιταχύνει το όχημα ή να ανέβει δρόμο υπό κλίση. Έπειτα, το 1915, δημιουργήθηκε το όχημα «Dual Power» από την εταιρεία κατασκευής ηλεκτρικών οχημάτων Woods Motor Vehicle, το οποίο αποτελούταν από έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης τεσσάρων κυλίνδρων και έναν ηλεκτροκινητήρα. Κάτω από την ταχύτητα των 24 km/h ο ηλεκτροκινητήρας μόνο ήταν υπεύθυνος για την κίνηση του οχήματος αντλώντας την ισχύ του από μπαταρίες και άνω της ταχύτητας αυτής αναλάμβανε ο κύριος κινητήρας εσωτερικής καύσης για να φτάσει το όχημα στη μέγιστη ταχύτητα των 56 km/h. Η κατασκευή του συνεχίστηκε έως το 1918, αλλά η εταιρεία είχε εμπορικές αποτυχίες καθότι το όχημα ήταν πολύ αργό για την τιμή του και πολύ δύσκολο να γίνουν οι απαραίτητες εργασίες συντήρησης.

Ύστερα από αυτές τις απόπειρες των πρώτων υβριδικών οχημάτων πέρασαν αρκετά χρόνια μέχρι το υβριδικό αυτοκίνητο να επανέλθει στη γραμμή παραγωγής και να διεκδικεί μερίδιο στην αγορά, προσφέροντας μια πιο οικολογική αλλά και οικονομική λύση στην τεχνολογία κίνησης.



Σχήμα 1.1: Το πρώτο υβριδικό όχημα Lohner – Porsche Mixte Hybrid το 1900 [18].



Σχήμα 1.2: Το υβριδικό όχημα που κατασκεύασε ο Henri Papier το 1905 [18].

1.3 Βαθμός υβριδοποίησης

Χρησιμοποιώντας τον όρο «βαθμός υβριδοποίησης» ορίζουμε το ποσοστό της ισχύος που προσφέρει η εναλλακτική μονάδα κίνησης στο όχημα ως προς την ισχύ που προσφέρει μια συμβατική Μ.Ε.Κ. Ανάλογα λοιπόν με αυτό το ποσοστό μπορούμε να διακρίνουμε τις ακόλουθες κατηγορίες των μικρο – υβριδικών οχημάτων, των ήπιων υβριδικών και των πλήρως υβριδικών οχημάτων.

1.3.1 Μικρο – υβριδικά (Micro hybrid)

Αυτή η κατηγορία οχημάτων χαρακτηρίζεται από πολύ μικρό ποσοστό υβριδοποίησης και χρησιμοποιεί διάφορες τεχνολογίες για τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και συνεπώς της εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα. Τέτοιου τύπου οχήματα διαθέτουν ηλεκτρικές μηχανές οι οποίες όμως δεν συνεισφέρουν στην κίνηση του οχήματος αλλά χρησιμοποιούνται μονάχα για να παρέχουν βοηθητικά την απαραίτητη ηλεκτρική ισχύ στα περιφερειακά υποσυστήματα. Ένα τέτοιο υποσύστημα που μπορεί να υποβοηθείται από μια ηλεκτρική μηχανή είναι το σύστημα αυτόματου σβησίματος και επανέναρξης της μηχανής εσωτερικής καύσης (το λεγόμενο σύστημα «start-stop») ή ένα άλλο σύστημα είναι η λειτουργία ανάκτησης ενέργειας κατά την

πέδηση του οχήματος για τη φόρτιση των μπαταριών («regenerative braking»). Το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας κυμαίνεται σε χαμηλά αλλά ικανοποιητικά για το βαθμό υβριδοποίησης επίπεδα της τάξης του 5 - 15 %.

1.3.2 Ήπια υβριδικά (Mild hybrid)

Στην περίπτωση των ήπιων υβριδικών οχημάτων, το όχημα περιλαμβάνει έναν ηλεκτρικό κινητήρα που υποβοηθά την κίνηση του οχήματος, χωρίς όμως να μπορεί να αναλάβει αυτή εξ' ολοκλήρου. Ένα τέτοιο όχημα έχει την ικανότητα πέραν της υποβοήθησης της κίνησης ηλεκτρικά, να τροφοδοτήσει με ηλεκτρική ισχύ και τα επιμέρους υποσυστήματά του όπως ακριβώς αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο για τα μικρο – υβριδικά οχήματα. Σε αυτό το επίπεδο υβριδοποίησης μπορούμε να κάνουμε λόγο για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε επίπεδα που κυμαίνονται μεταξύ του 15 - 25 %.

1.3.3 Πλήρως υβριδικά (Full hybrid)

Σε αντίθεση με τα υβριδικά οχήματα που ανήκουν στις 2 προηγούμενες κατηγορίες, για τα πλήρως υβριδικά οχήματα εκτός από την ταυτόχρονη λειτουργία και των δυο πηγών ενέργειας, ο ένας ή οι περισσότεροι ηλεκτροκινητήρες έχουν τη δυνατότητα της εξ'ολοκλήρου κίνησης του οχήματος χωρίς την υποβοήθηση της Μ.Ε.Κ. Σε αυτή την κατηγορία οχημάτων, ο ηλεκτρικός κινητήρας που χρησιμοποιείται μπορεί να προσφέρει ισχύ μεγαλύτερη του 30 % της μέγιστης ισχύος του βενζινοκινητήρα ή κινητήρα Diesel του οχήματος. Προφανώς τα πλήρως υβριδικά οχήματα παρουσιάζουν όλα τα οφέλη των υβριδικών οχημάτων όπως η ανάκτηση ενέργειας κατά την πέδηση και η λειτουργία «start-stop».

1.3.4 Υβριδικά με σύστημα εξωτερικής ηλεκτρικής φόρτισης (Plug – in hybrid)

Τα υβριδικά οχήματα με σύστημα εξωτερικής ηλεκτρικής φόρτισης (Plug – in hybrid, PHEV) μοιάζουν με τα πλήρως υβριδικά οχήματα με τη μόνη διαφορά ότι σε αυτά τα οχήματα παρέχεται η δυνατότητα επαναφόρτισης των μπαταριών μέσω μετασχηματιστή ο οποίος συνδέεται στο δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο. Οχήματα τέτοιου τύπου είναι ικανά να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις χωρίς τη χρήση της Μ.Ε.Κ. (με τη σημερινή τεχνολογία η αυτονομία φτάνει έως και τα 100 χιλιόμετρα) και αυτός είναι και ο λόγος που διαθέτουν μεγαλύτερες συστοιχίες ηλεκτρικών συσσωρευτών.

1.4 Ανάλυση πλήρως υβριδικού ηλεκτρικού οχήματος

Κατά τη λειτουργία ενός πλήρως υβριδικού-ηλεκτρικού οχήματος, μια Μ.Ε.Κ. συνδυάζεται με ηλεκτροκινητήρες, γεννήτριες, μετασχηματιστές τάσης και συσσωρευτές για να αποτελέσουν όλα μαζί μέρος ενός υβριδικού συστήματος μετάδοσης ισχύος σε ένα όχημα. Συνεπώς, με την συνδυαστική χρήση των 2 συστημάτων κίνησης, ο κινητήρας λειτουργεί σε βέλτιστη απόδοση σε μεγαλύτερη έκταση κατά τη διάρκεια της ζωής του σε σχέση με ένα συμβατικό όχημα, και επιτυγχάνεται μεγαλύτερη μείωση στην κατανάλωση κατά ένα ποσοστό 15–20 % συγκριτικά πάλι με ένα συμβατικό όχημα.

Οι προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν όσον αφορά τη χρήση των υβριδικών οχημάτων είναι:

- Το κόστος αγοράς του υβριδικού οχήματος το οποίο είναι περίπου κατά 50 % υψηλότερο από το αντίστοιχο συμβατικό όχημα
- Η βελτιστοποίηση των αποθηκευτικών μέσων σε συνδυασμό με την αύξηση της αυτονομίας κίνησης
- Η ανακύκλωση των ηλεκτρικών μερών (πχ. μπαταρίες), που είναι πιο προβληματική σε σχέση με τους συμβατικούς κινητήρες

Τα διάφορα στοιχεία στο σύστημα μετάδοσης ισχύος πρέπει να συντονιστούν προσεκτικά για τη μεγιστοποίηση των οφελών ενός υβριδικού οχήματος. Η βελτιστοποίηση απαιτείται στο σχεδιασμό και του συνολικού συστήματος ελέγχου.

Τα υβριδικά συστήματα μετάδοσης ισχύος μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κύριους τύπους ανάλογα με τη συνδεσμολογία:

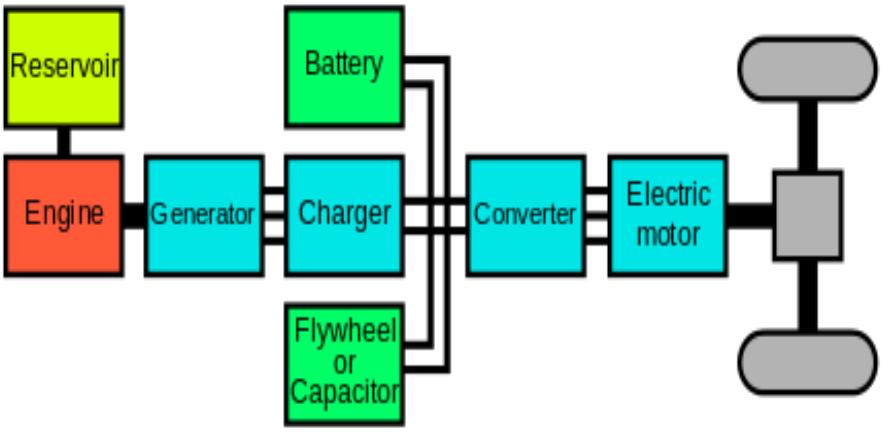
- Σειριακά
- Παράλληλα
- Παράλληλα-σειριακά, που ουσιαστικά είναι ο συνδυασμός σειριακών και παράλληλων συστημάτων

1.4.1 Σειριακό σύστημα

Σε ένα σειριακό υβριδικό σύστημα μετάδοσης ισχύος, Σχήμα 1.3, η κίνηση προέρχεται αποκλειστικά από τον ηλεκτροκινητήρα ο οποίος δέχεται την απαραίτητη ενέργειά του είτε από μια συστοιχία μπαταριών είτε από μια μηχανή εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ.) μέσω γεννήτριας. Ο

κινητήρας είναι συνήθως μικρότερος σε ένα σειριακό σύστημα μετάδοσης ισχύος καθώς έχει να αντιμετωπίσει μέτριες σε ισχύ απαιτήσεις κίνησης. Συνεπώς, εφόσον δεν είναι συνδεδεμένος απευθείας στο κιβώτιο ταχυτήτων, λειτουργεί σε συγκεκριμένες στροφές / φορτίο του εύρους λειτουργίας του όπου η απόδοση είναι υψηλή ή μπορεί αν δεν χρειάζεται προσωρινά να είναι και εκτός λειτουργίας. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να επιτευχθεί ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου για την Μ.Ε.Κ. Το σειριακό σύστημα μετάδοσης απαιτεί μεγάλη συστοιχία μπαταριών καθώς το όχημα κινείται εξ' ολοκλήρου με τον ηλεκτροκινητήρα που πρέπει να είναι ικανός να παρέχει την απαραίτητη ισχύ για τις επιπλέον ανάγκες που μπορούν να προκύψουν κατά τη διάρκεια της κίνησης. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της απαίτησης είναι το επιπλέον βάρος που προστίθεται στο όχημα αλλά και το αυξημένο κόστος παραγωγής και συντήρησης. Επειδή οι επιδόσεις εξαρτώνται άμεσα από την ισχύ του ηλεκτροκινητήρα, επιβάλλεται ο ηλεκτροκινητήρας να διαθέτει μεγάλο μέγεθος, το οποίο με τη σειρά του αυξάνει περαιτέρω το βάρος του οχήματος καθώς και το μέγεθος και το βάρος των συσσωρευτών ώστε να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις σε ισχύ, κυρίως όταν ο οδηγός επιταχύνει – ακόμα και αν υπάρχει δευτερεύουσα γραμμή που μεταφέρει το ρεύμα της γεννήτριας απευθείας στον ηλεκτροκινητήρα παρακάμπτοντας τους συσσωρευτές.

Αυτός ο τύπος συστήματος μετάδοσης ισχύος δεν έχει εφαρμογή σε εμπορικά οχήματα παραγωγής αλλά γίνονται προσπάθειες ενσωμάτωσής του από εταιρείες παραγωγής αυτοκινήτων.

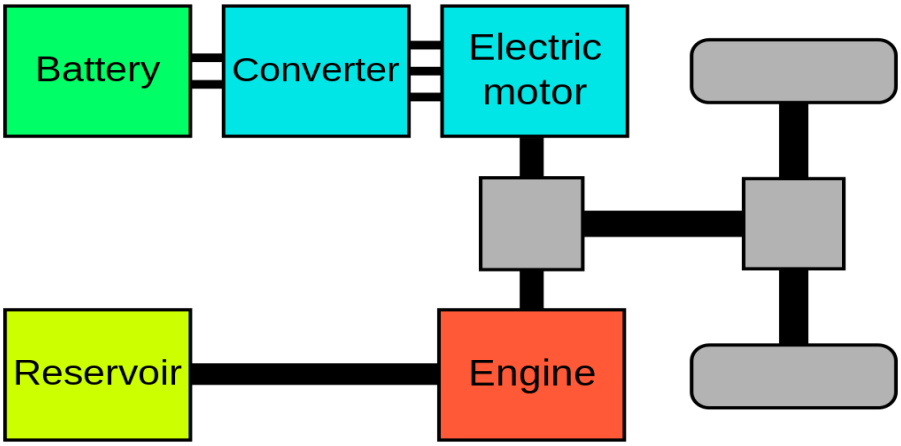


<u>Σχήμα 1.3</u>: Σειριακή συνδεσμολογία σε υβριδικό όχημα με Μ.Ε.Κ.

1.4.2 Παράλληλο σύστημα

Σε ένα παράλληλο υβριδικό σύστημα, Σχήμα 1.4, και ο κινητήρας (Μ.Ε.Κ.) αλλά και ο ηλεκτροκινητήρας παράγουν την απαιτούμενη ισχύ για την κίνηση των τροχών όντας μόνιμα και ανεξάρτητα συνδεδεμένοι στο κιβώτιο ταχυτήτων. Επειδή στο συγκεκριμένο σύστημα μετάδοσης ισχύος ο κινητήρας είναι απευθείας συνδεδεμένος στους τροχούς, εξαλείφονται οι απώλειες κατά τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, κάτι το οποίο συμβαίνει στο σειριακό σύστημα μετάδοσης ισχύος, και συνεπώς ένα όχημα με παράλληλο σύστημα μετάδοσης ισχύος καθίσταται κατάλληλο για οδήγηση σε αυτοκινητόδρομους. Σε έναν τέτοιο σχηματισμό, ο ηλεκτροκινητήρας χρησιμοποιείται κυρίως για την κίνηση του οχήματος με μικρή ταχύτητα μέσα στην πόλη, ενώ η Μ.Ε.Κ. καθιστά το αυτοκίνητο ικανό να μπορεί να κινείται με την επιθυμητή μέγιστη ταχύτητα σε οριζόντιο επίπεδο. Εκτός από την ευθύνη της κίνησης που έχει σε μεγάλες ταχύτητες, η Μ.Ε.Κ είναι επίσης υπεύθυνη να διοχετεύει ένα μικρό μέρος της ισχύος της στη γεννήτρια, με απώτερο σκοπό να επαναφορτιστούν οι μπαταρίες για να παρέχουν την απαραίτητη ισχύ για την ηλεκτροκίνηση σε χαμηλές ταχύτητες.

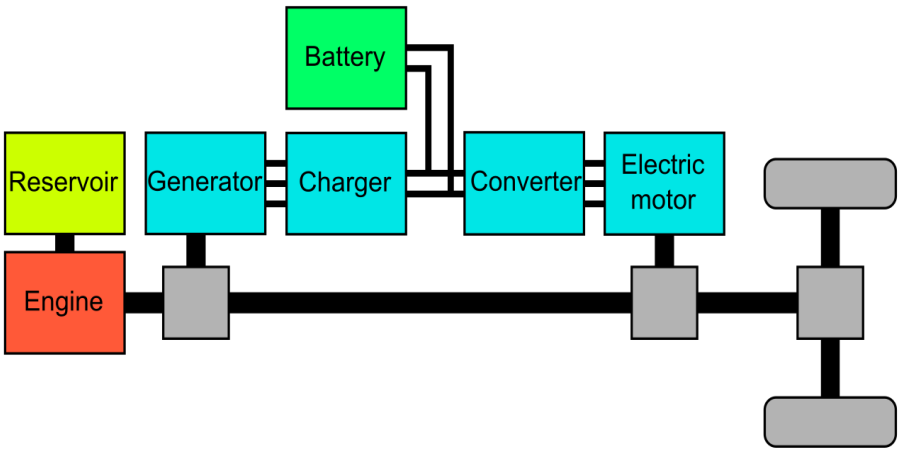
Το πλεονέκτημα της παράλληλης σύνδεσης εμβολοφόρου κινητήρα και ηλεκτροκινητήρα βρίσκεται στη δυνατότητα που υπάρχει να αλληλοϋποστηρίζει ο ένας τύπος κινητήρα τον άλλο τύπο. Έτσι, για παράδειγμα, στην περίπτωση που απαιτηθεί να αποδώσει μεγαλύτερη ισχύ ο κινητήρας κατά την επιτάχυνση ή την κίνηση σε ένα ανηφορικό επίπεδο, η συνεργασία των δύο κινητήρων θα δώσει την απαραίτητη ισχύ, η οποία και θα είναι μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Συνεπώς, και η Μ.Ε.Κ. με αυτό τον τρόπο δεν θα λειτουργήσει σε συνθήκες που θα αυξήσουν την κατανάλωση της και πιθανόν και τις εκπομπές καυσαερίων.



Σχήμα 1.4: Παράλληλη συνδεσμολογία σε υβριδικό όχημα με Μ.Ε.Κ.

1.4.3 Παράλληλο - σειριακό σύστημα

Ένας σειριακός - παράλληλος (ή αλλιώς μικτός) σχηματισμός συστήματος μετάδοσης ισχύος, Σχήμα 1.5, εμφανίζει τόσο τα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα που υπάρχουν στους παράλληλους και τους σειριακούς σχηματισμούς. Σε αυτή την περίπτωση, ο κινητήρας μπορεί να κινήσει απευθείας τους τροχούς αλλά μπορεί να είναι και εντελώς αποσυνδεδεμένος από αυτούς ώστε να κινούνται μόνο με τον ηλεκτροκινητήρα. Έτσι, ο κάθε κινητήρας είναι υπεύθυνος για την κίνηση του οχήματος από 0 % έως 100 % και το τελικό 100 % της ισχύος μπορεί να προέρχεται από οποιονδήποτε συνδυασμό ποσοστών χρήσης του ηλεκτροκινητήρα και της Μ.Ε.Κ. Επίσης, ο κινητήρας εσωτερικής καύσης μπορεί να λειτουργήσει ως γεννήτρια για τις μπαταρίες που τροφοδοτούν τον ηλεκτροκινητήρα. Το σύστημα αυτό απαιτεί γεννήτρια, μεγαλύτερη συστοιχία μπαταριών συγκριτικά με αυτό του παράλληλου συστήματος αλλά και ένα πιο ανεπτυγμένο και σύνθετο σύστημα ελέγχου. Αυτό φυσικά αυξάνει το κόστος παραγωγής του αλλά έχει τη δυνατότητα καλύτερου ελέγχου της απόδοσης από ότι ο κάθε σχηματισμός ξεχωριστά.



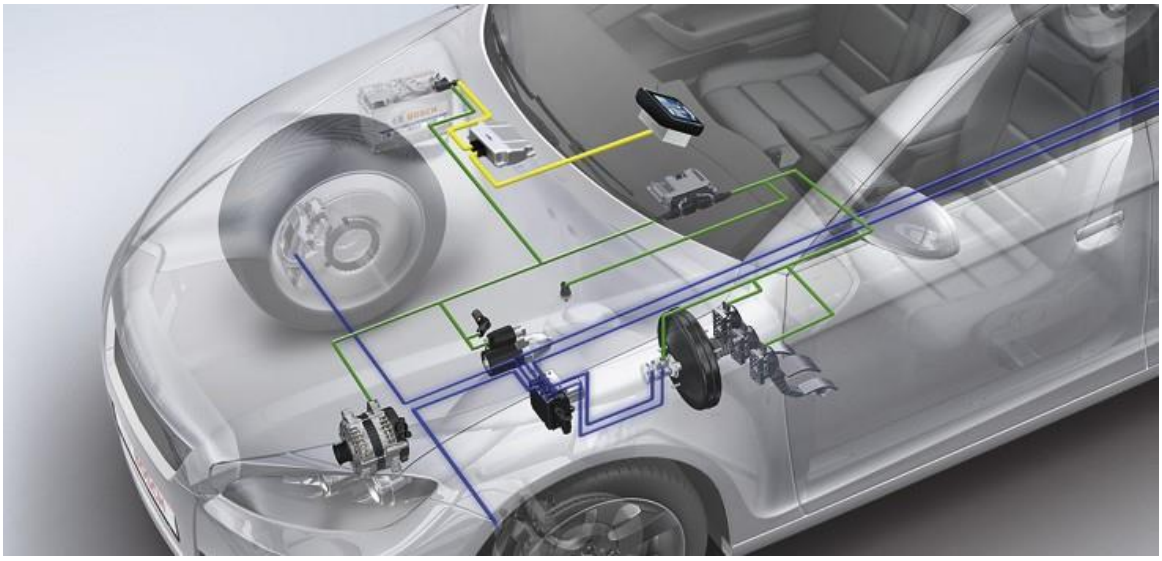
Σχήμα 1.5: Σειριακή - παράλληλη συνδεσμολογία σε υβριδικό όχημα με Μ.Ε.Κ.

1.5 Συστήματα που εφαρμόζονται σε υβριδικά οχήματα

Στην Παράγραφο 1.3 αναφερθήκαμε σε 2 υποσυστήματα που χρησιμοποιούνται στα υβριδικά (και όχι μόνο) οχήματα, και εμφανίζουν κάποια χαρακτηριστικά εξοικονόμησης ενέργειας. Αυτά τα συστήματα είναι το σύστημα «start–stop» και το σύστημα ανάκτησης ενέργειας («regenerative braking») κατά την πέδηση τα οποία περιγράφονται πιο αναλυτικά παρακάτω.

1.5.1 Σύστημα «start-stop»

Το σύστημα αυτόματου σβησίματος του κινητήρα κατά την ακινητοποίηση του οχήματος και επανεκκίνησης του κατά την εκκίνηση του κινητήρα (ή αλλιώς σύστημα «start-stop»), Σχήμα 1.6, εφαρμόζεται σε όλα τα υβριδικά οχήματα. Αποτελείται από έναν ηλεκτροκινητήρα, το σύστημα ελέγχου για την κατάσταση «start-stop» και έναν αισθητήρα του οποίου σκοπός είναι να υπολογίσει την τρέχουσα και τη μελλοντική κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή. Όταν το όχημα είναι ακινητοποιημένο, ο συμβατικός κινητήρας απενεργοποιείται ύστερα από σύντομο χρονικό διάστημα. Με το πάτημα του συμπλέκτη ο κινητήρας επανέρχεται στην κανονική του λειτουργία για να συνεχίσει την πορεία του το όχημα. Αυτό το σύστημα έχει άμεση εφαρμογή κυρίως κατά την κίνηση των οχημάτων μέσα στις πόλεις καθώς τα αυτοκίνητα ακινητοποιούνται ανά τακτά χρονικά διαστήματα είτε λόγω φαναριών είτε λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης. Το αποτέλεσμα είναι περισσότερη οικονομία στο καύσιμο και μηδενικές εκπομπές ρύπων όταν το όχημα είναι ακινητοποιημένο.



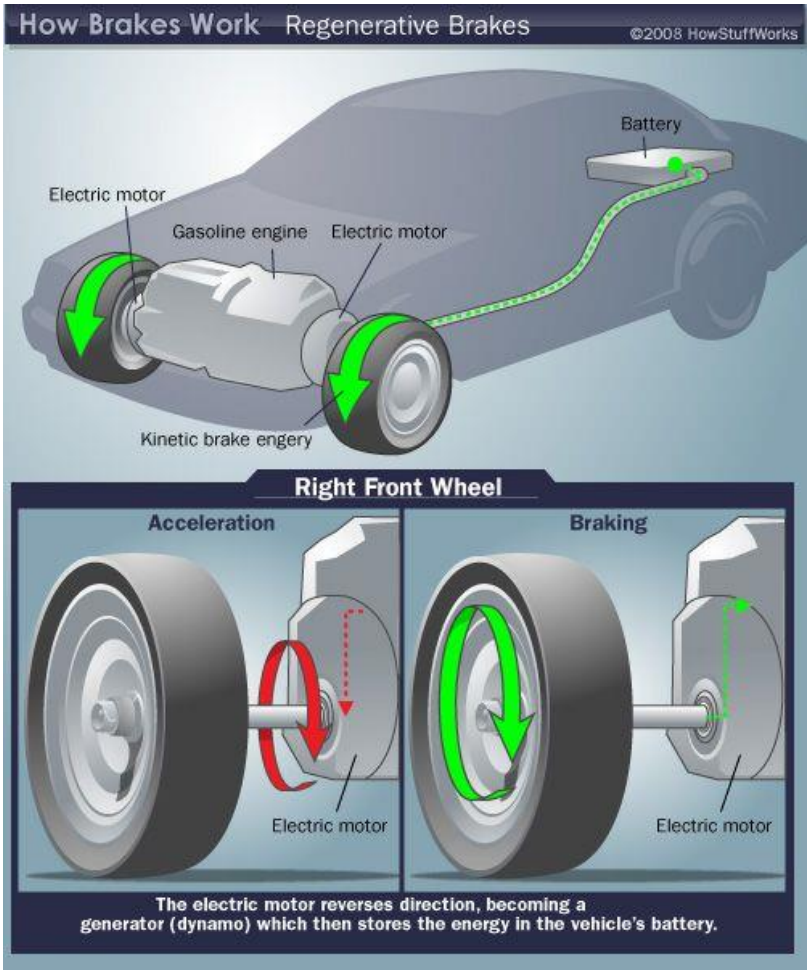
Σχήμα 1.6: Σύστημα «start-stop».

1.5.2 Σύστημα αναγεννητικής πέδησης «regenerative braking»

Μέσω της τεχνολογίας ανάκτησης ενέργειας «regenerative braking», Σχήμα 1.7, παρέχεται η δυνατότητα στο όχημα κατά τη φάση επιβράδυνσής του να ανακτήσει κάποιο ποσοστό της ενέργειας. Η ανάκτηση αυτή γίνεται μέσω της ηλεκτρικής μονάδας ισχύος, η οποία σε αυτή τη

συγκεκριμένη φάση θα λειτουργήσει σαν γεννήτρια και έτσι, θα επιστραφεί ενέργεια στους ηλεκτρικούς συσσωρευτές. Με αυτό τον τρόπο εκμεταλλευόμαστε την κινητική ενέργεια των τροχών, η οποία σε ένα συμβατικό όχημα θα χανόταν με τη μορφή θερμότητας λόγω τριβών στα δισκόφρενα του οχήματος, για να τη χρησιμοποιήσουμε στην αμέσως επόμενη επιτάχυνση του οχήματος. Έτσι, μειώνεται και η καταπόνηση του συστήματος πέδησης.

Το σύστημα αναγεννητικής πέδησης εφαρμόζεται μόνο στους εμπρός τροχούς ενώ υπάρχει συμμετοχή και από το σύστημα της υδραυλικής πέδησης για το φρενάρισμα και στους τέσσερις τροχούς. Η αναλογία συμμετοχής του κάθε συστήματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η ταχύτητα του οχήματος, η ασκούμενη δύναμη στο πεντάλ των φρένων από τον οδηγό κ.α. Το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας από την πέδηση του οχήματος συνήθως λαμβάνεται σε συνθήκες κίνησης του οχήματος μέσα στην πόλη διότι υπάρχουν ομαλές αυξομειώσεις της ταχύτητας, η ταχύτητα είναι σε σχετικά χαμηλά επίπεδα και εμφανίζονται συνεχή φρεναρίσματα.



Σχήμα 1.7: Ανάκτηση ενέργειας κατά την πέδηση του οχήματος.

1.6 Πλεονεκτήματα υβριδικών οχημάτων

Από την παραπάνω ανάλυση των υβριδικών οχημάτων μπορούμε να καταλήξουμε σε κάποια πλεονεκτήματά τους έναντι των συμβατικών οχημάτων με μια Μ.Ε.Κ. Έτσι, ο συνδυασμός δύο διαφορετικών κινητήριων συστημάτων, μιας ηλεκτρικής μηχανής και μιας μηχανής εσωτερικής καύσης, μπορεί να μας προσφέρει τα εξής:

- Εξαιτίας της ύπαρξης 2 διαφορετικών τεχνολογιών σε ένα όχημα, οι ενεργειακές απαιτήσεις του οχήματος μοιράζονται με το βέλτιστο δυνατό τρόπο έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή διαχείριση της ενέργειας κατά την κίνηση του οχήματος. Για παράδειγμα σε ένα υβριδικό ηλεκτρικό όχημα (HEV) ο ηλεκτρικός κινητήρας αναλαμβάνει την εκκίνηση του οχήματος όπου η Μ.Ε.Κ. θα είχε μεγαλύτερη κατανάλωση για να το επιτύχει, καθώς επίσης ο ηλεκτρικός κινητήρας αναλαμβάνει και την κίνηση του οχήματος σε χαμηλές ταχύτητες καθώς παρουσιάζει μέγιστη ροπή σε χαμηλές στροφές αλλά και υποβοηθά τον συμβατικό κινητήρα όπου αυτό απαιτείται όπως η ανάβαση σε ανηφόρα ή η αύξηση των απαιτήσεων της ισχύος κατά την επιτάχυνση. Από την άλλη πλευρά, η Μ.Ε.Κ. αναλαμβάνει την κίνηση του οχήματος σε μεσαίες και υψηλές ταχύτητες διότι εδώ παρουσιάζει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από τον ηλεκτροκινητήρα. Έτσι, στο υβριδικό αυτοκίνητο απαιτείται μικρότερη σε μέγεθος Μ.Ε.Κ. συγκριτικά με ένα συμβατικό όχημα καθώς έχει μικρότερο εύρος ισχύος που πρέπει να αποδώσει. Γενικότερα, η ύπαρξη του ηλεκτρικού κινητήρα βελτιώνει την επιτάχυνση και την εκκίνηση του οχήματος ενώ παράλληλα μειώνονται οι δονήσεις και οι θόρυβοι εξαιτίας της υπό συνθήκης συνδυαστικής λειτουργίας της με τη μηχανή εσωτερικής καύσης.

- Σε ένα υβριδικό ηλεκτρικό όχημα, η απαιτούμενη ισχύς των περιφερειακών συστημάτων του όπως ο κλιματισμός, οι αντλίες νερού, λαδιού και βενζίνης, το ηλεκτρικό υδραυλικό σύστημα διεύθυνσης, οι διάφοροι ανεμιστήρες του ακόμα και το ηχοσύστημα μπορούν να τροφοδοτούνται απευθείας από τους συσσωρευτές. Συνεπώς δεν υπάρχει λόγος να αντλείται μηχανική ισχύς από τον άξονα του βενζινοκινητήρα και να μεταδίδεται μέσω ιμάντων και γραναζιών στα επιμέρους προαναφερθέντα υποσυστήματα όπως γίνεται στα συμβατικά οχήματα.

- Μέσω των διάφορων τεχνολογιών που εφαρμόζονται στα υβριδικά οχήματα, όπως αυτά που αναφέρθηκαν στις υποπαραγράφους 1.5.1 και 1.5.2, μειώνεται ακόμα περισσότερο η σπατάλη ενέργειας και η εκπομπή ρυπογόνων ουσιών στο περιβάλλον εμφανίζοντας έτσι τον πιο «οικολογικό» χαρακτήρα των υβριδικών οχημάτων.

- Αν και το συνολικό κόστος απόκτησης ενός υβριδικού οχήματος είναι αυξημένο λόγω της προηγμένης τεχνολογίας που χρησιμοποιείται, το συνολικό κόστος συντήρησης ενός υβριδικού οχήματος είναι μικρότερο συγκριτικά με ένα συμβατικό όχημα δεδομένου ότι χρησιμοποιούνται

Μ.Ε.Κ. χαμηλότερου κυβισμού και ο ηλεκτροκινητήρας απαιτεί σχεδόν μηδενική συντήρηση εξαιτίας της μη ύπαρξης τριβών κατά τη λειτουργία του και της στιβαρότητας της κατασκευής του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Σχηματισμός και Εκπομπή Ρύπων Συμβατικών Οχημάτων με Κινητήρα Diesel[2]

2.1 Γενικά

Ο σχηματισμός των ρύπων προκαλείται από τη χημική διάσταση των προιόντων της καύσης, η οποία πραγματοποιείται λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται εντός του θαλάμου καύσης, καθώς μπορεί να έχουμε τιμές έως 3000 K. Θεωρώντας ότι έχουμε τέλεια καύση και δεν υφίσταται χημική διάσταση, τα προϊόντα αυτής προκύπτουν από τον εξής τύπο χημικής αντίδρασης:

$$C_nH_m+O_2+N_2 \rightarrow CO_2+H_2O+N_2+O_2$$

η οποία έχει μόνο ποιοτικό χαρακτήρα καθώς απουσιάζουν οι στοιχειομετρικοί συντελεστές. Παρ'όλα αυτά, στην πράξη έχουμε διάσταση των προϊόντων της καύσης, από την οποία θα προκύψουν οι παρακάτω ρίζες και ενώσεις:

H_2O, H_2, O_2, N_2, N, O, OH, H, CO, CO_2, NO, HC, O_3, αλδεΰδες, κετόνες κ.α.

Από αυτούς τους ρύπους σημαντικότεροι είναι τα NO_X,CO και HC, που μαζί με την αιθάλη αποτελούν τους λεγόμενους ελεγχόμενους ρύπους, ως προς τα επίπεδα συγκέντρωσής τους στα καυσαέρια, από την εκάστοτε νομοθεσία κάθε χώρας (ΗΠΑ,Ιαπωνία,ΕΟΚ).

Οι τρεις αυτοί αέριοι ρύποι εμφανίζονται και στους δύο τύπους εμβολοφόρων κινητήρων, δηλαδή Diesel και Otto, παρουσιάζουν όμως βασικές διαφορές στη συγκέντρωση τους στο καυσαέριο της εξαγωγής. Πιο συγκεκριμένα, τα οξείδια του αζώτου (NO_x) εμφανίζονται σε σημαντικά ποσοστά και στις δύο κατηγορίες κινητήρων, παρουσιάζοντας όμως λίγο

[2] Για περισσότερες λεπτομέρειες βλ. Παραπομπή [3] της βιβλιογραφίας, από όπου και προέρχονται οι παράγραφοι 2.1-2.3.

μεγαλύτερες τιμές στους κινητήρες Otto. Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) είναι σημαντικά μεγαλύτερο στους κινητήρες Otto και άρα δεν αποτελεί σημαντικό ρύπο για τους κινητήρες Diesel. Τέλος, τα επίπεδα εκπομπής των υδρογονανθράκων (HC) στους κινητήρες Diesel είναι χαμηλότερα από τους κινητήρες Otto. Επίσης, διαφοροποιήσεις υπάρχουν και ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα,π.χ. μεταξύ Diesel άμεσης ή έμμεσης έγχυσης.

Εκτός από τους αέριους ρύπους, παρατηρείται και εκπομπή στερεών σωματιδίων (particulates) από τους εμβολοφόρους κινητήρες, με τα πλέον σημαντικότερα σωματίδια που εκπέμπονται από τους κινητήρες Diesel να είναι αυτά της αιθάλης (soot) που σχηματίζεται κατά την καύση ενώ, όσον αφορά τους κινητήρες Otto, οι εκπομπές αιθάλης είναι σχεδόν μηδαμινές.

2.2 Σχηματισμός των οξειδίων του αζώτου NO_x

Στα οξείδια του αζώτου, που σχηματίζονται στο θάλαμο καύσης των εμβολοφόρων κινητήρων, περιλαμβάνονται το μονοξείδιο του αζώτου NO, το διοξείδιο του αζώτου NO_2 και ίσως ίχνη άλλων οξειδίων του αζώτου (όπως το N_2O_5). Παρ'όλα αυτά, για τους κινητήρες Diesel, σε μεσαία και υψηλά φορτία το NO_2 είναι αμελητέο, άρα μπορούμε να θεωρήσουμε τα NO_x και NO ως κοινά μεγέθη.

Το NO σχηματίζεται στις περιοχές υψηλής θερμοκρασίας εντός της καμμένης ζώνης θεωρώντας ότι υπάρχει και η απαραίτητη ποσότητα οξυγόνου. Στη συνέχεια, κατά τη φάση της αποτόνωσης, 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 εξαγωγής. Επομένως, στο σχηματισμό του NO καθοριστικό παράγοντα αποτελεί η χημική κινητική των αντιδράσεων και όχι η χημική ισορροπία.

2.3 Σχηματισμός του μονοξειδίου του αζώτου (NO) στον θάλαμο καύσης κινητήρων Diesel

2.3.1 Περιγραφή σχηματισμού του NO

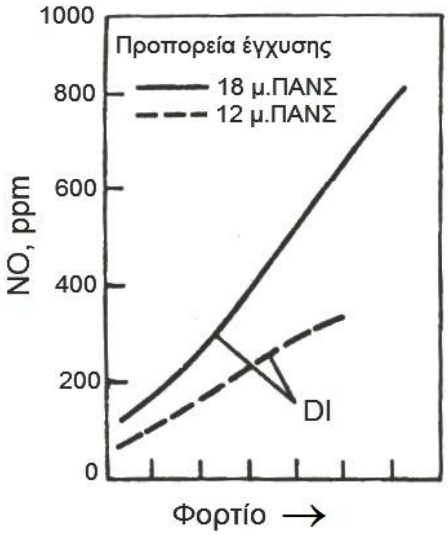
Στους κινητήρες Diesel, το καύσιμο εγχύεται στο θάλαμο καύσης σε υγρή μορφή και ύστερα, αφού ατμοποιηθεί, πραγματοποιείται η ανάμειξή του με τον αέρα. Γενικά, παρατηρείται μεγάλη στρωμάτωση στην κατανομή της θερμοκρασίας καθώς και στη συγκέντρωση του καυσίμου

εντός του κυλίνδρου το οποίο συνεπάγεται σχηματισμό των NOx μόνο σε ορισμένες περιοχές, στις οποίες οι συνθήκες που επικρατούν το επιτρέπουν. Το μεγαλύτερο ποσοστό του μονοξειδίου του αζώτου 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, η καύση γίνεται ελεγχόμενη και υφίσταται συνεχής εξάπλωση της δέσμης του καυσίμου. Έτσι, οι ζώνες αντίδρασης έρχονται σε επαφή με τον ψυχρότερο αέρα με αποτέλεσμα την πτώση της θερμοκρασίας και το 'πάγωμα' των αντιδράσεων διάσπασης του NO.

2.3.2 Επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας στην τιμή του NO

- Επίδραση του φορτίου: Σε έναν κινητήρα Diesel, όπου η ρύθμιση του φορτίου είναι ποιοτική, η μεταβολή του φορτίου μεταφράζεται σε μεταβολή του λόγου ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου. Καθώς το φορτίο αυξάνει, παρατηρείται αύξηση και στη συγκέντρωση του NO στα καυσαέρια, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας στη ζώνη αντίδρασης. Στο σχήμα 2.1 φαίνεται η μεταβολή αυτή για κινητήρες άμεσης έγχυσης.



Σχήμα 2.1: Συγκέντρωση NO συναρτήσει του φορτίου και της προπορείας έγχυσης σε κινητήρες Diesel άμεσης έγχυσης [3].

- Επίδραση της προπορείας έγχυσης του καυσίμου: Καθώς αυξάνεται η προπορεία έγχυσης του καυσίμου, παρατηρείται σημαντική αύξηση του παραγόμενου μονοξειδίου του αζώτου λόγω μεγάλης αύξησης των πιέσεων και θερμοκρασιών εντός του θαλάμου καύσης. Η παραπάνω συσχέτιση φαίνεται και στο σχήμα 2.1.

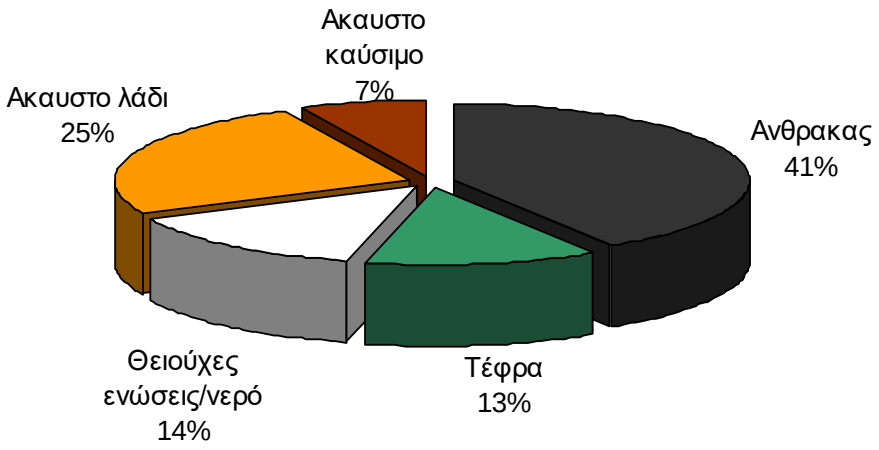
- Επίδραση του ποσοστού του παραμένοντος καυσαερίου: Η αύξηση του ποσοστού του παραμένοντος καυσαερίου εντός του θαλάμου καύσης συνεπάγεται σημαντική μείωση της συγκέντρωσης του NO. Η αιτία του φαινομένου αυτού είναι η αύξηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας του περιβάλλοντος μέσου με αποτέλεσμα την πτώση της πίεσης και της θερμοκρασίας εντός της ζώνης αντίδρασης. Παρόμοια είναι ουσιαστικά και η επίδραση της ανακυκλοφορίας καυσαερίου (EGR).

2.4 Εκπομπές σωματιδίων από κινητήρες Diesel

2.4.1 Γενικά

Οι σωματιδιακές εκπομπές των κινητήρων Diesel αποτελούνται κατά κύριο λόγο από ένα ανθρακώδες υλικό που παράγεται κατά τη διάρκεια της καύσης, γνωστό και ως αιθάλη (soot), 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).



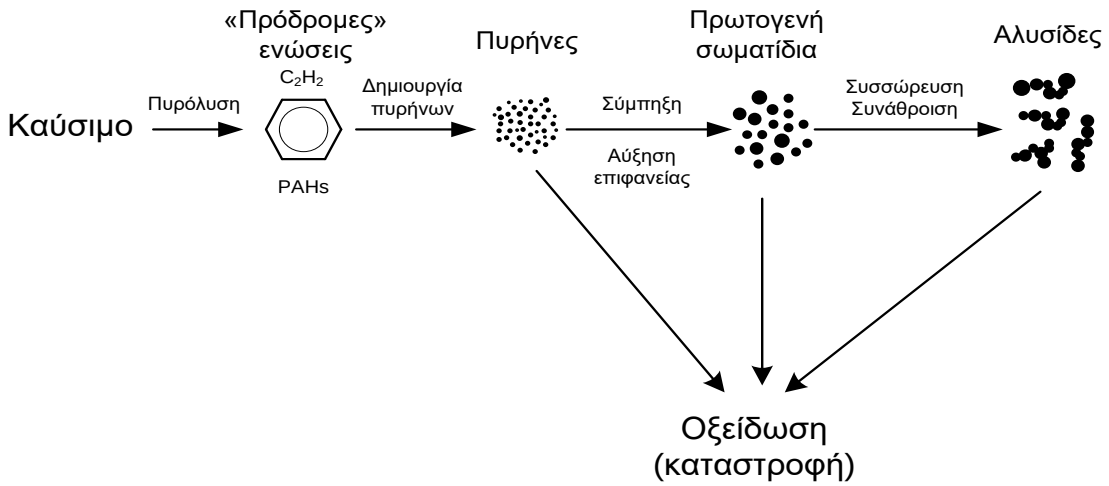
<u>Σχήμα 2.2</u>: Τυπική σύσταση στην εξάτμιση κινητήρα Diesel βαρέος τύπου (φορτηγού) κατά τη διάρκεια δοκιμής σε κύκλο πόλης [4].

Το κλάσμα των θειούχων ενώσεων είναι προσεγγιστικά ανάλογο του κλάσματος σε περιεχόμενο θείου από το καύσιμο, άρα εξαιρετικά μειωμένο τα τελευταία χρόνια λόγω της σταδιακής αποθείωσης των καυσίμων (οχημάτων). 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 και 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):

- 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 νανο- σωματιδίων από ασταθή υλικά όπως οι υδρογονάνθρακες
- Επιφανειακή αύξηση (Surface growth): διαδικασία προσθήκης μάζας στην επιφάνεια ενός σωματιδίου αιθάλης.
- Σύμπηξη (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 (κυρίως OH) και σχηματίζει αέρια προϊόντα όπως CO, CO_2, H_2O.



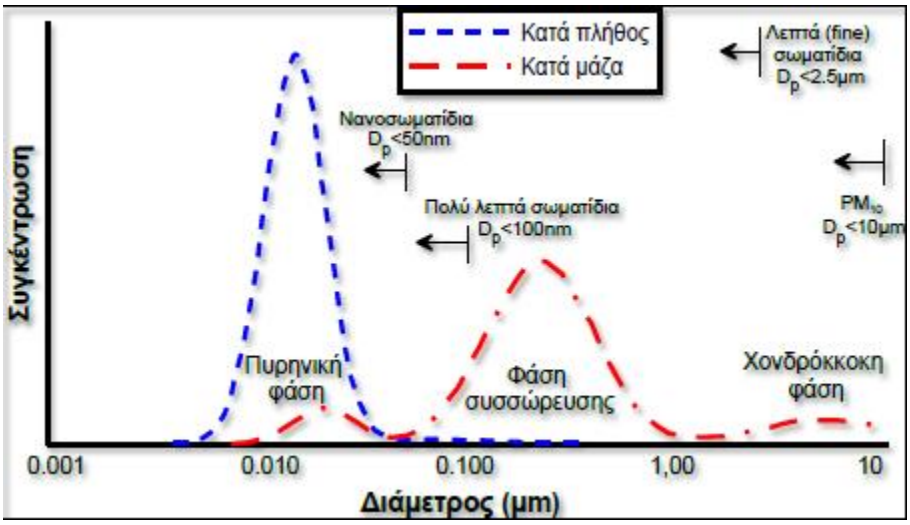
<u>Σχήμα 2.3</u>: Διάγραμμα μηχανισμού σχηματισμού και καταστροφής σωματιδίων εντός θαλάμου καύσης κινητήρα Diesel [4].

2.4.2 Κατανομή μεγέθους σωματιδίων

Οι υπό εφαρμογή κανονισμοί για τις εκπομπές σωματιδίων στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στις Η.Π.Α. βασίζονται στην εκπεμπόμενη μάζα σωματιδίων. Εντούτοις, η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων είναι ιδιαίτερα σημαντική σε ζητήματα σχετικά με την ποιότητα του αέρα, καθώς θεωρείται ότι η τοξικότητα των σωματιδίων αυξάνεται μειουμένου του μεγέθους τους. Τα σωματίδια αιθάλης, της τάξης των 100 nm, είναι επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία, καθώς το μέγεθος τους είναι αρκετά μικρό ώστε να απορροφώνται από τη μύτη αλλά και αρκετά μεγάλο ώστε να επικάθονται στους πνεύμονες.

Σε αντίθεση με τη μάζα, ο αριθμός των εκπεμπόμενων σωματιδίων δεν διατηρείται σταθερός. Μέσα στη σωλήνωση της εξαγωγής ενός κινητήρα Diesel, οι συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες μπορούν να οδηγήσουν στο σχηματισμό σωματιδίων (με αποτέλεσμα την αύξηση και του αριθμού των σωματιδίων και της συγκέντρωσης της μάζας), στη συμπύκνωση και στη σύμπηξη (με αποτέλεσμα τη μείωση της συγκέντρωσης και την αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων). Τα παραπάνω φαινόμενα

παρατηρούνται επίσης και κατά τη διάρκεια της αραίωσης και της δειγματοληψίας, καθιστώντας πολύ δύσκολη αφ' ενός την εξαγωγή σαφών συμπερασμάτων και αφ' ετέρου το σχεδιασμό ενός κατάλληλου προτύπου αναφοράς.



<u>Σχήμα 2.4</u>: Τυπική κατανομή μεγέθους-πλήθους σωματιδίων από την εξαγωγή κινητήρων Diesel [4]

Στο Σχήμα 2.4 η κατανομή του αριθμού και της μάζας των σωματιδίων από την εξαγωγή κινητήρα Diesel παρουσιάζεται εξιδανικευμένη, σε λογαριθμική κλίμακα όσον αφορά τη διάμετρο. Η συγκέντρωση των σωματιδίων σε οποιοδήποτε εύρος μεγέθους είναι ανάλογη προς την περιοχή κάτω από την αντίστοιχη καμπύλη σε αυτό το εύρος. Το μεγαλύτερο μέρος της μάζας σωματιδίων συναντάται στην αποκαλούμενη κατάσταση συσσώρευσης (accumulation mode) για εύρος διαμέτρων 0,1-0,3 μm. Στην περιοχή αυτή βρίσκονται τα συσσωματώματα και τα σχετικά προσροφημένα υλικά. Η κατάσταση νανοσωματιδίων (nuclei mode) αποτελείται από σωματίδια με εύρος διαμέτρου 0,005-0,05 μm. Απαρτίζεται συνήθως από τις πτητικές οργανικές ενώσεις υδρογονανθράκων και θείου, και μπορεί επίσης να περιέχει και στερεές ενώσεις άνθρακα και μετάλλων. Ένα ποσοστό μεγαλύτερο από 90% των εκπεμπόμενων σωματιδίων από ένα κινητήρα ποσοστό μεγαλύτερο από 90% των εκπεμπόμενων σωματιδίων από ένα κινητήρα Diesel εμπίπτει στην κατάσταση νανοσωματιδίων (nuclei mode), το οποίο, όμως αντιστοιχεί μόνο στο 1-20 % της συνολικής μάζας των σωματιδίων. Η «χονδρόκοκκη» κατάσταση (coarse mode) περιέχει το 5-20 % της μάζας των σωματιδίων και αποτελείται από τα σωματίδια της φάσης συσσώρευσης, που έχουν επικαθίσει στην επιφάνεια των κυλίνδρων και της πολλαπλής εξαγωγής και στη συνέχεια συμπαρασύρονται.

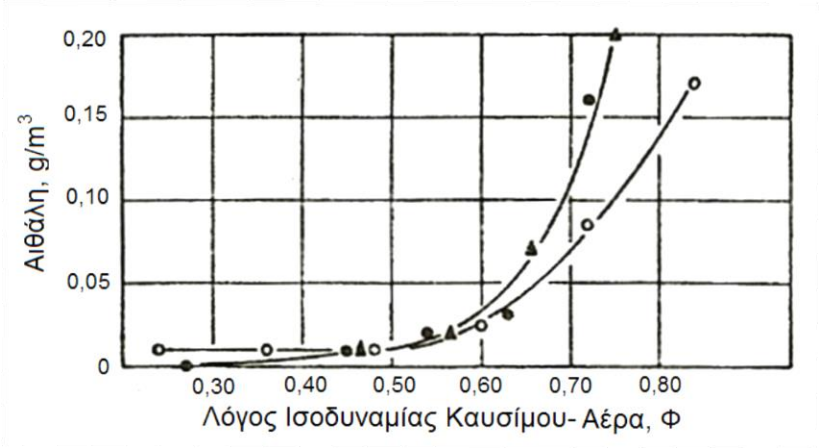
Στο Σχήμα 2.4 απεικονίζονται επίσης μερικές κατηγορίες του μεγέθους για τα ατμοσφαιρικά σωματίδια που είναι:

- τα PM10 με D_p (διάμετρο) < 10 μm
- τα λεπτά σωματίδια (ultrafine particles) με D_p < 2,5 μm
- τα πολύ λεπτά σωματίδια (ultrafine particles) με D_p < 0,1 μm
- τα νανοσωματίδια (nanoparticles) με D_p < 0,05 μm.

Το μέγεθος των σωματιδίων αποτελεί παράγοντα της επίδρασης των εκπομπών των κινητήρων στο φυσικό περιβάλλον ως εξής: επηρεάζει το χρόνο παραμονής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, τις οπτικές ιδιότητες και την επιφάνεια των σωματιδίων, και τις επιπτώσεις στην υγεία. Πιο συγκεκριμένα ο χρόνος παραμονής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα είναι μεγαλύτερος για τα σωματίδια με διάμετρο 0,1-10 μm και είναι περίπου μια εβδομάδα. Τα μεγαλύτερα μόρια απομακρύνονται αρκετά γρήγορα από την ατμόσφαιρα με επικάθηση ενώ τα μικρότερα με τη διάχυση και τη σύμπηξη. Ένας χαρακτηριστικός χρόνος παραμονής για τα σωματίδια με διάμετρο 10nm είναι μόνο 15 λεπτά. Ο κύριος μηχανισμός για την απομάκρυνση αυτών των μικροσκοπικών σωματιδίων είναι η σύμπηξη με αυτά της φάσης συσσώρευσης.

Κατά τη διάρκεια της μόνιμης λειτουργίας κινητήρα Diesel, σχηματίζονται συνήθως τα σωματίδια της φάσης συσσώρευσης (80-110 nm). Στην αρχή της φάσης της καύσης, η πλειοψηφία των σωματιδίων είναι μεταξύ των 80-90 nm ενώ στη συνέχεια τα σωματίδια της αιθάλης συσσωματώνονται και σχηματίζουν έτσι σωματίδια μεγαλύτερης διαμέτρου. Κατά τη διάρκεια της οξείδωσης της αιθάλης, ο αριθμός των σωματιδίων μειώνεται δραστικά σε ολόκληρο το φάσμα μεγεθών. Αυξανομένου του φορτίου, αυξάνεται αντίστοιχα η ποσότητα του εγχυόμενου καυσίμου, γεγονός που ευνοεί το σχηματισμό μεγαλύτερων σωματιδίων. Αντίθετα, κατά την άφορτη λειτουργία («ρελαντί») ευνοείται ο σχηματισμός νανοσωματιδίων. Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η μεταβολή των εκπεμπόμενων σωματιδίων σε συνάρτηση με το λόγο ισοδυναμίας καυσίμου αέρα (δηλαδή του φορτίου).

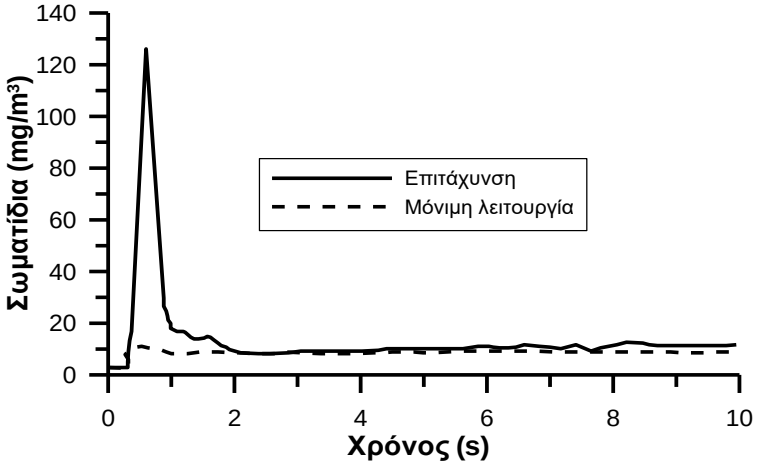
Μεταξύ των σημαντικότερων παραγόντων που έχουν βρεθεί ότι επηρεάζουν τη συγκέντρωση του αριθμού των σωματιδίων και την κατανομή του μεγέθους τους είναι ο τύπος του καυσίμου που χρησιμοποιείται, με προτιμητέα τα καύσιμα με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο για μειωμένες γενικά εκπομπές σωματιδίων, αν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



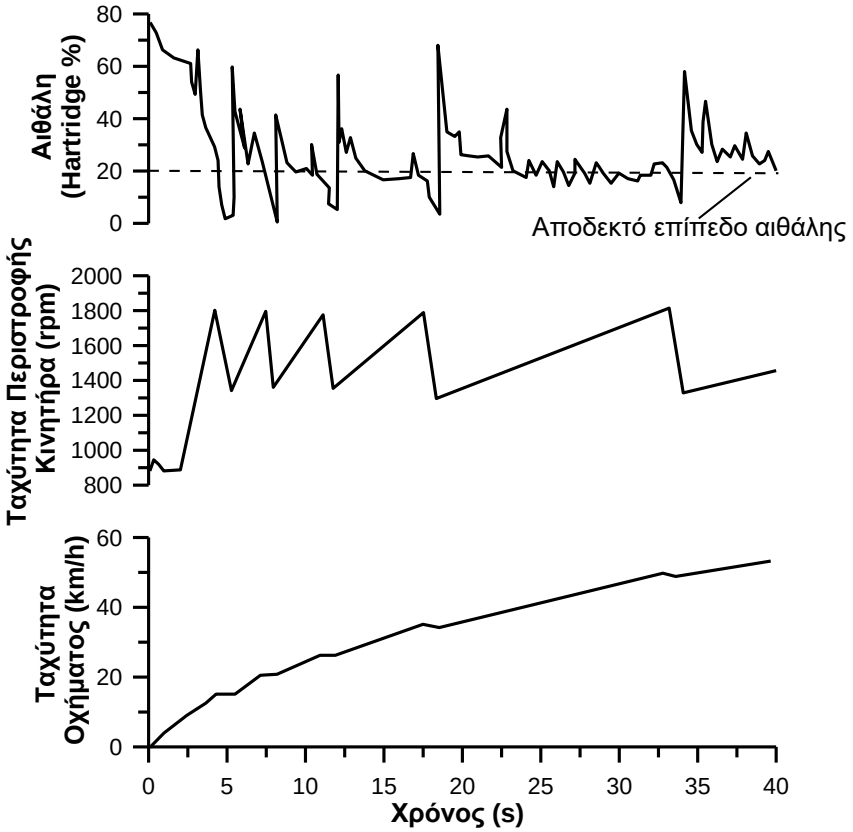
<u>Σχήμα 2.5</u>: Επίδραση του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα (Φ) στις εκπομπές αιθάλης [3].

2.5 <u>Ιδιαιτερότητες εκπομπών καυσαερίων κατά τη μεταβατική λειτουργία στροβιλο-υπερπληρωμένων κινητήρων Diesel</u>

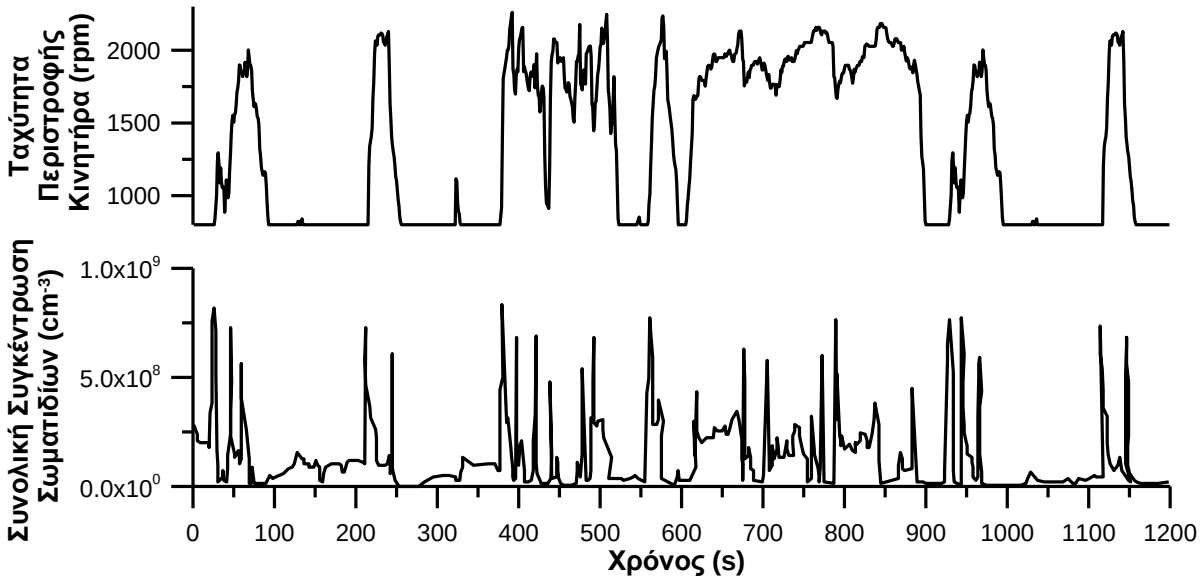
Η χειροτέρευση της καύσης κατά τη διάρκεια της μεταβατικής λειτουργίας υπερπληρωμένων κινητήρων Diesel, λόγω του φαινομένου της υστέρησης του στροβιλο-υπερπληρωτή (turbocharger lag), οδηγεί σε στιγμιαία σημαντική αύξηση των αέριων και σωματιδιακών ρύπων σε σύγκριση με την αντίστοιχη μόνιμη λειτουργία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



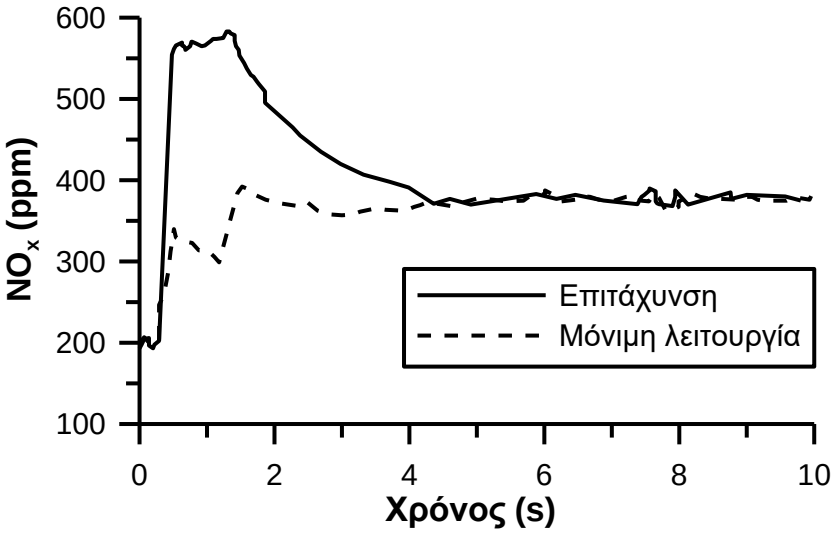
Σχήμα 2.6: Υπερακόντιση εκπομπών αιθάλης κατά τη διάρκεια επιτάχυνσης στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel από την άφορτη λειτουργία («ρελαντί»). Η υπερακόντιση είναι μεγαλύτερη όσο πιο «χαμηλό» το αρχικό σημείο λειτουργίας, όσο πιο μεγάλη η μεταβολή στροφών ή φορτίου, όσο πιο απότομα αυτή πραγματοποιείται και όσο πιο μεγάλη η μέση πραγματική πίεση (rating) του κινητήρα [4].



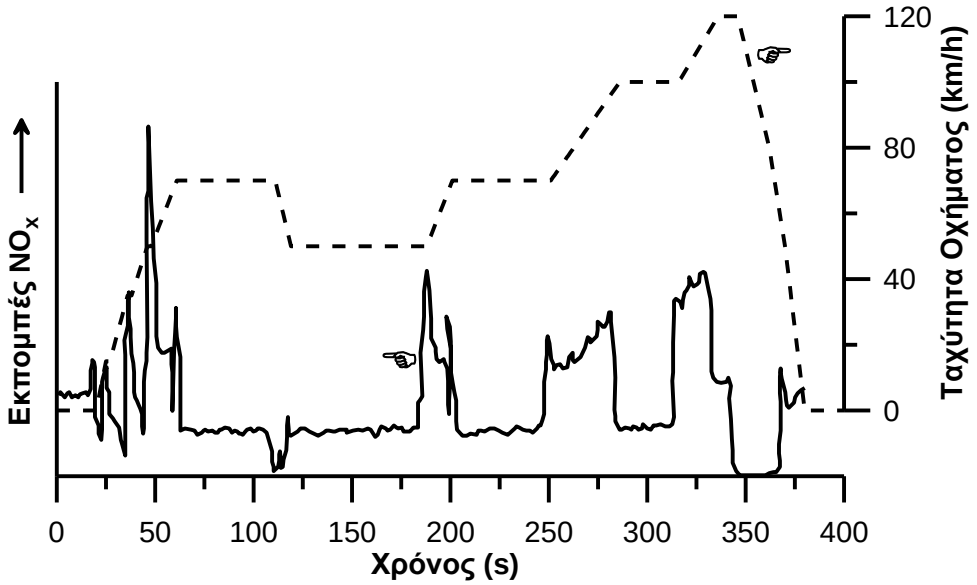
Σχήμα 2.7: Εκπομπές αιθάλης κατά τη διάρκεια συνεχών αλλαγών ταχυτήτων σε υπερπληρωμένο κινητήρα Diesel φορτηγού που εισέρχεται σε αυτοκινητόδρομο [4].



Σχήμα 2.8: Ολική συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων κατά τη διάρκεια του αμερικανικού μεταβατικού κύκλου πόλης FTP βαρέων οχημάτων [4].



Σχήμα 2.9: Υπερακόντιση εκπομπών οξειδίων του αζώτου κατά τη διάρκεια επιτάχυνσης στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel από την άφορτη λειτουργία («ρελαντί») [4].



<u>Σχήμα 2.10</u>: Υπερακόντιση εκπομπών οξειδίων του αζώτου κατά τη διάρκεια του εκτός πόλης (EUDC) τμήματος του ευρωπαϊκού κύκλου πιστοποίησης οχημάτων NEDC στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel· είναι εμφανής η σημαντική αύξηση των εκπομπών σε κάθε επιτάχυνση του οχήματος [4].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - 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 λόγω της τεράστιας σημασίας 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 κινητήρια, 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 οξυμένο σε υπερπληρωμένους κινητήρες, λόγω του φαινομένου της υστέρησης του υπερπληρωτή, όπως φάνηκε στα διαγράμματα της Παραγράφου 2.5. 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.

Τις προηγούμενες δεκαετίες, προέκυψε 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 (WLTC, Worldwide-Harmonized Light Vehicles Test Cycle), ο οποίος αναλύεται διεξοδικά παρακάτω (Παράγραφος 3.3), και θα χρησιμοποιηθεί στην υπολογιστική ανάλυση στο Κεφάλαιο 5.

3.2 Συνιστώσες της διαδικασίας δοκιμής

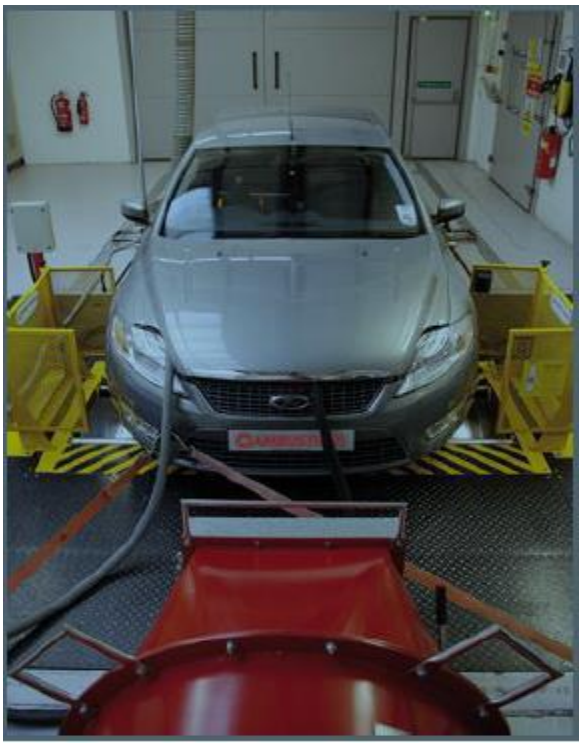
3.2.1 Δυναμόμετρο

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, Σχήμα 3.1, 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), Σχήμα 3.2.

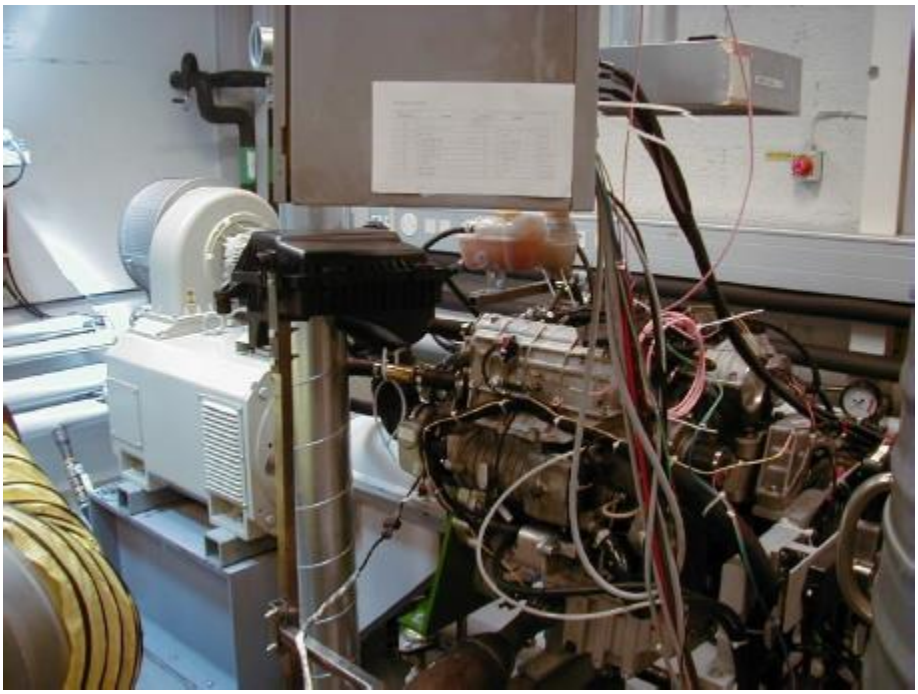
Ο στόχος του δυναμόμετρου είναι να αναπαράγει το φορτίο κατά την κίνηση του οχήματος στο δρόμο και τη μαζική ροπή αδράνειας του οχήματος. Ένα όχημα στο δρόμο έχει να υπερνικήσει την αντίσταση τριβής κύλισης (F_r), την αεροδυναμική αντίσταση (F_a), την αντίσταση κλίσης οδοστρώματος (F_{gr}) και την αντίσταση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



<u>Σχήμα 3.1</u>: Επιβατικό αυτοκίνητο σε δυναμόμετρο πλαισίου.

<u>Σχήμα 3.2</u>: Επιβατικό όχημα σε εγκατάσταση κύκλου δοκιμής για έλεγχο εκπομπών.

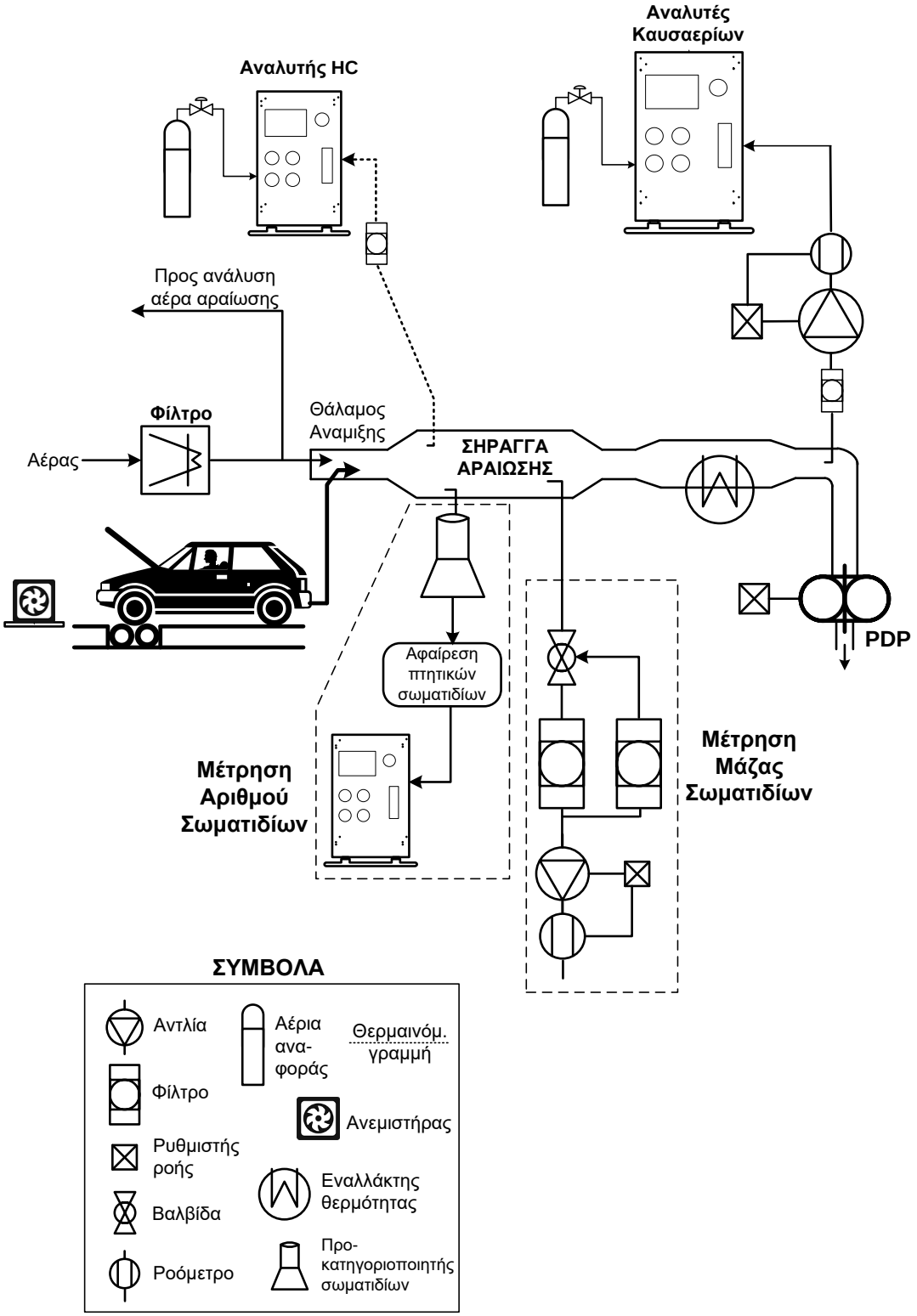
Στο δυναμόμετρο κινητήρων, ο κινητήρας συνδέεται άμεσα σε μια πέδη. Το δυναμόμετρο μιμείται τη συμπεριφορά ολόκληρου του οχήματος και του συστήματος μετάδοσης κίνησης, συμπεριλαμβανομένης της εξαιρετικά γρήγορης απόκρισης ροπής και ταχύτητας, κατά τη διάρκεια της μεταβατικής λειτουργίας. Ηλεκτρικά δυναμόμετρα 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 (πλαισίου), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4.



<u>Σχήμα 3.4</u>: Τυπικό σύστημα δειγματοληψίας σταθερού όγκου CVS με αντλία θετικής εκτόπισης για την πιστοποίηση οχημάτων [6].

Η διαδικασία CVS συνίσταται στην αραίωση της ολικής ποσότητας ανεπεξέργαστου καυσαερίου με καθαρό αέρα περιβάλλοντος σε μία σήραγγα αραίωσης. Η αραίωση 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 αραίωσης 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 ~100lt. Πριν την είσοδο των αερίων στην αντλία για να εξέλθουν στην ατμόσφαιρα, τα αέρια ψύχονται σε εναλλάκτη θερμότητας μέχρι θερμοκρασία περιβάλλοντος ±5oC, 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 συμπύκνωση 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 WLTC[3]

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 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

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

Οχημάτων (WP.29) της ΟΕΗΕΕ (Οικονομική Επιτροπή για την Ευρώπη των Ηνωμένων Εθνών - 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 διαδικασίας (procedure), 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 είχε 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 CO_2 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 σύστημα αυτοδιάγνωσης (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 συστημάτων αυτοδιάγνωσης, 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 στα μέσα του 2011. Ο κύκλος αναθεωρήθηκε αρκετές φορές για να ληφθούν υπόψη τεχνικά ζητήματα όπως η οδηγησιμότητα 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:

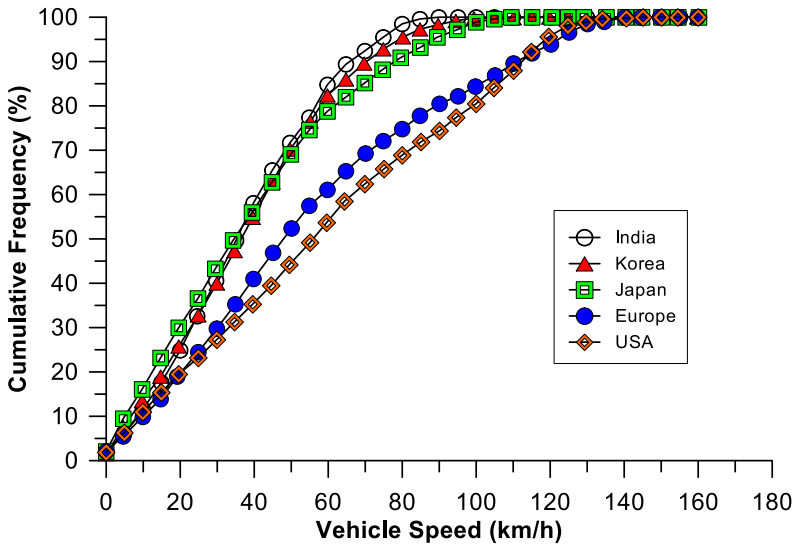
– 462,000 km από την Ευρώπη (οι συμμετέχουσες χώρες ήταν το Βέλγιο, η Γαλλία, η Γερμανία, η Ιταλία, η Πολωνία, η Σλοβενία, η Ισπανία, η Σουηδία, η Ελβετία και το Ηνωμένο Βασίλειο)

– 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



<u>Σχήμα 3.5</u>: Συχνότητα εμφάνισης ταχύτητας οχήματος για τις διάφορες περιοχές απ' όπου συλλέχθηκαν τα δεδομένα για τον κύκλο WLTC [5].

Χρησιμοποιήθηκαν 394 οχήματα από διάφορους κατασκευαστές, με κινητήρες με ποικιλία κυβισμού, και με αναλογία ισχύος προς μάζα από 9 έως 120 kW/t. 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 (micro-trips) 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 [5].

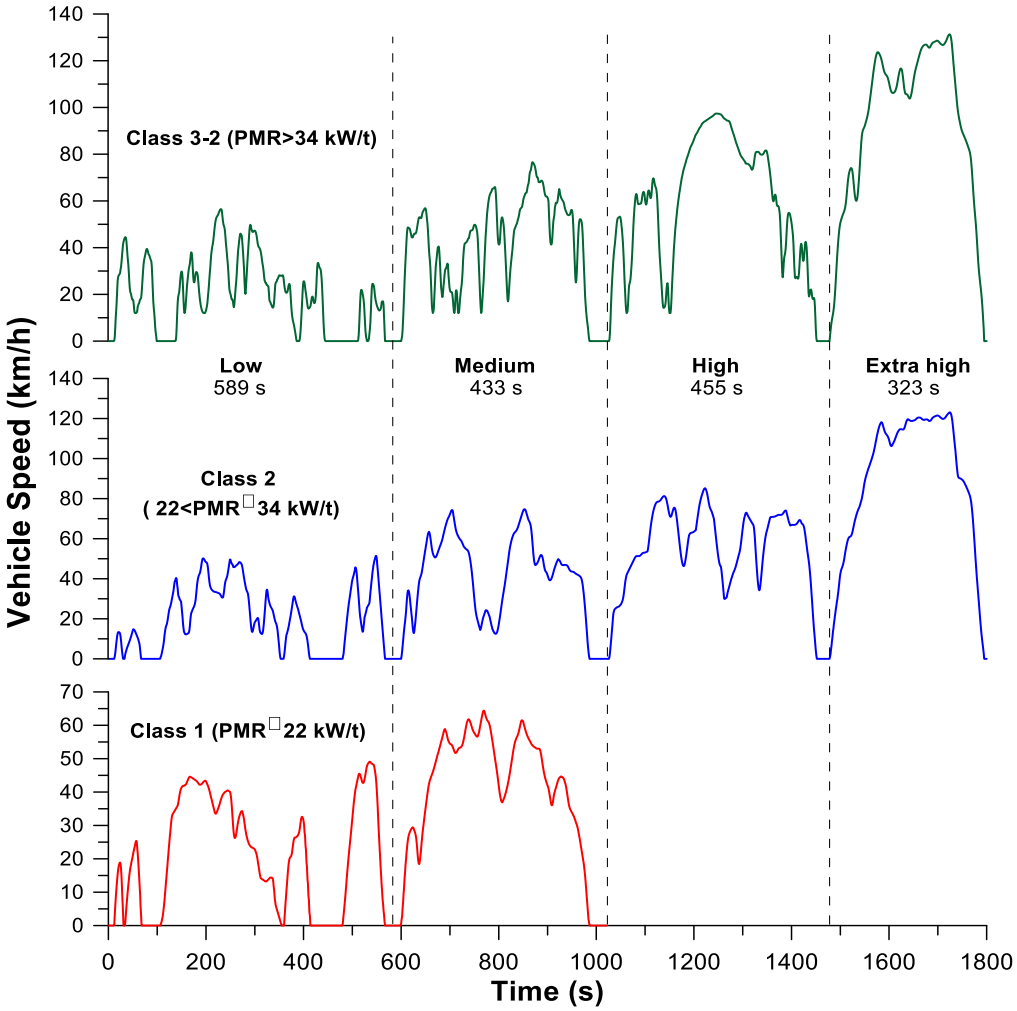
Το μειονέκτημα αυτής της διαδικασίας (δηλαδή ότι τα τμήματα σχετίζονται με την ταχύτητα και όχι με τα οδικά τμήματα) είναι ότι οι φάσεις αποτελούνται από διαφορετικές κατηγορίες οδού, όπως περιγράφηκε λεπτομερώς παραπάνω. Οι οριακές τιμές της ταχύτητας οχήματος των διαφόρων φάσεων επιλέχθηκαν μετά από 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 οδηγησιμότητα 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 (Power to Mass Ratio, PMR) 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 3α) 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 kW/t < PMR < 34 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 (PMR < 22 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.



<u>Σχήμα 3.6</u>: Ταχύτητα οχήματος συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC3 [5].

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.

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 - Μοντελοποίηση Υβριδικού Οχήματος με Χρήση του Λογισμικού GT-SUITE

4.1 Εισαγωγή στο GT-SUITE

Το πρόγραμμα GT-Suite είναι προϊόν της εταιρίας Gamma Technologies και χρησιμοποιείται κατά κόρον από εταιρίες που ανήκουν στη βιομηχανία κινητήρων και οχημάτων. Το GT-Suite δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες του για εικονική αναπαράσταση κινητήρων, συστημάτων μετάδοσης καθώς και προσομοίωση πληθώρας εφαρμογών που έχουν άμεση σχέση με την αυτοκινητοβιομηχανία.

Το λογισμικό GT-Suite χειρίζεται, σε ένα μόνο πακέτο, μία ευρεία ποικιλία εφαρμογών όπως:

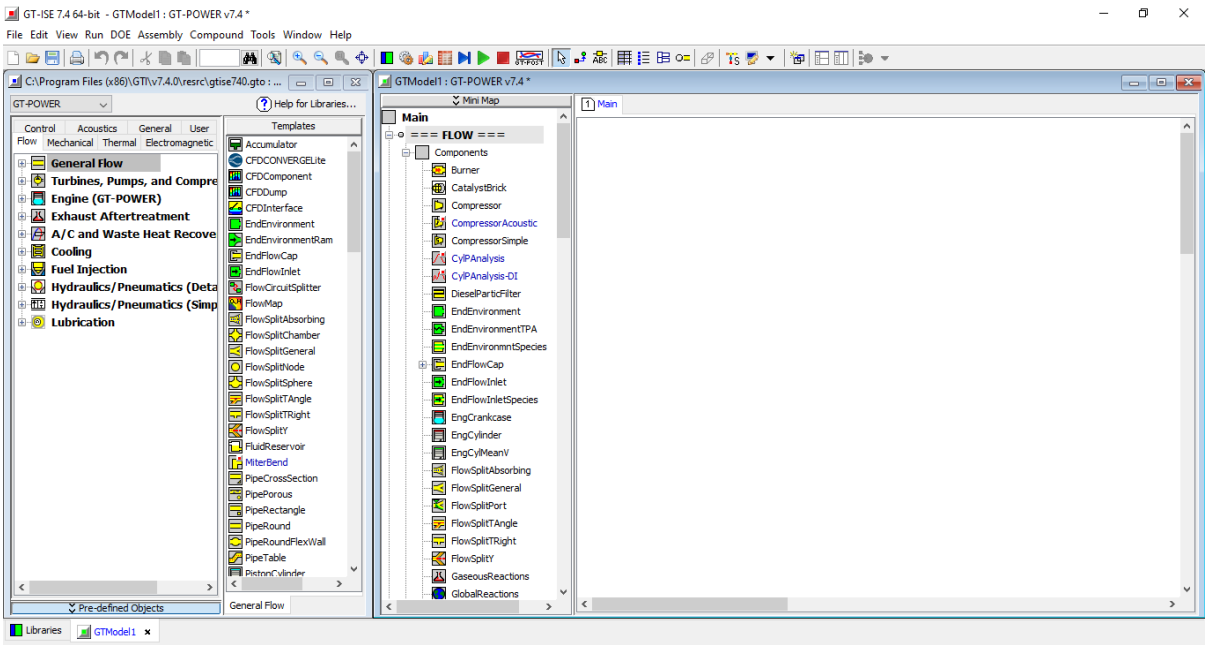
- Μοντελοποίηση κινητήρων (GT-Power)
- Ανάλυση δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων
- Ακουστική της εισαγωγής και της εξαγωγής
- Επεξεργασία των καυσαερίων
- Προσομοίωση μοντέλων πραγματικού χρόνου (Real-time simulation)
- Δυναμική οχήματος
- Μοντελοποίηση μετάδοσης
- Υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα, κυψέλες καυσίμου
- Συστήματα ψύξης κινητήρα
- Θερμική διαχείριση οχήματος
- Ενεργειακή διαχείριση οχήματος
- Συστήματα κλιματισμού (air-conditioning)
- Ανακόμιση θερμότητας καυσαερίων

- Συστήματα λίπανσης και ρουλεμάν
- Συστήματα έγχυσης καυσίμου
- Υδραυλικά και πνευματικά συστήματα
- Κινηματική και δυναμική εκκεντροφόρου και βαλβίδων
- Κινηματική και δυναμική στροφαλοφόρου
- Κιβώτια ταχυτήτων, ιμαντοκίνηση και κίνηση με αλυσίδα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία έγινε χρήση του υποπρογράμματος του λογισμικού GT-Suite, GT-Power (έκδοση 7.4), το οποίο όπως αναφέρθηκε και παραπάνω αφορά τη μοντελοποίηση κινητήρων.

4.2 Περιβάλλον εργασίας GT-Power

Το GT-Power περιέχει μία βιβλιοθήκη (library) με όλα τα πρότυπα εργαλεία (templates) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εικονική αναπαράσταση και προσομοίωση ενός κινητήρα. Ο χρήστης επιλέγει τα στοιχεία τα οποία είναι απαραίτητα για την εφαρμογή την οποία θέλει κάθε φορά να «τρέξει», όπως π.χ. συμπιεστής, βαλβίδες, πολλαπλή εισαγωγής κλπ, και αφού συμπληρώσει κάποια χαρακτηριστικά που απαιτεί το πρόγραμμα για καθένα από αυτά, όπως το υλικό των σωλήνων της πολλαπλής εισαγωγής κλπ, αυτά μεταφέρονται στη βιβλιοθήκη της συγκεκριμένης εφαρμογής (project library). Στη συνέχεια, αφού επιλεγούν όλα τα αντικείμενα που χρειάζεται η εκάστοτε εφαρμογή για να υλοποιηθεί από τη βιβλιοθήκη, μπορούν να τοποθετηθούν στο χάρτη εργασίας (project map), όπου συνδέονται κατάλληλα μεταξύ τους. Ακολουθεί το Σχήμα 4.1 στο οποίο φαίνονται οι παραπάνω λειτουργίες.



Σχήμα 4.1: Περιβάλλον εργασίας GT-Power

Όταν όλα τα επιμέρους στοιχεία συνδεθούν κατάλληλα μεταξύ τους, ο χάρτης εργασίας θα έχει τη μορφή ενός μονογραμμικού διαγράμματος. Αν το τελικό αυτό μοντέλο είναι λειτουργικό, το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα να γίνει η προσομοίωση διαφόρων σεναρίων, τόσο μόνιμης όσο και μεταβατικής λειτουργίας, αρκεί ο χρήστης να ορίσει κάποιες αρχικές συνθήκες, όπως ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, ροπή αδράνειας του ζεύγους υπερπλήρωσης κλπ. Αφού ολοκληρωθεί η προσομοίωση αυτή τα αποτελέσματα είναι διαθέσιμα μέσω του εργαλείου GT-Post σε μορφή διαγραμμάτων και πινάκων.

4.3 Δημιουργία του μοντέλου ενός υβριδικού οχήματος στο λογισμικό GT-Power

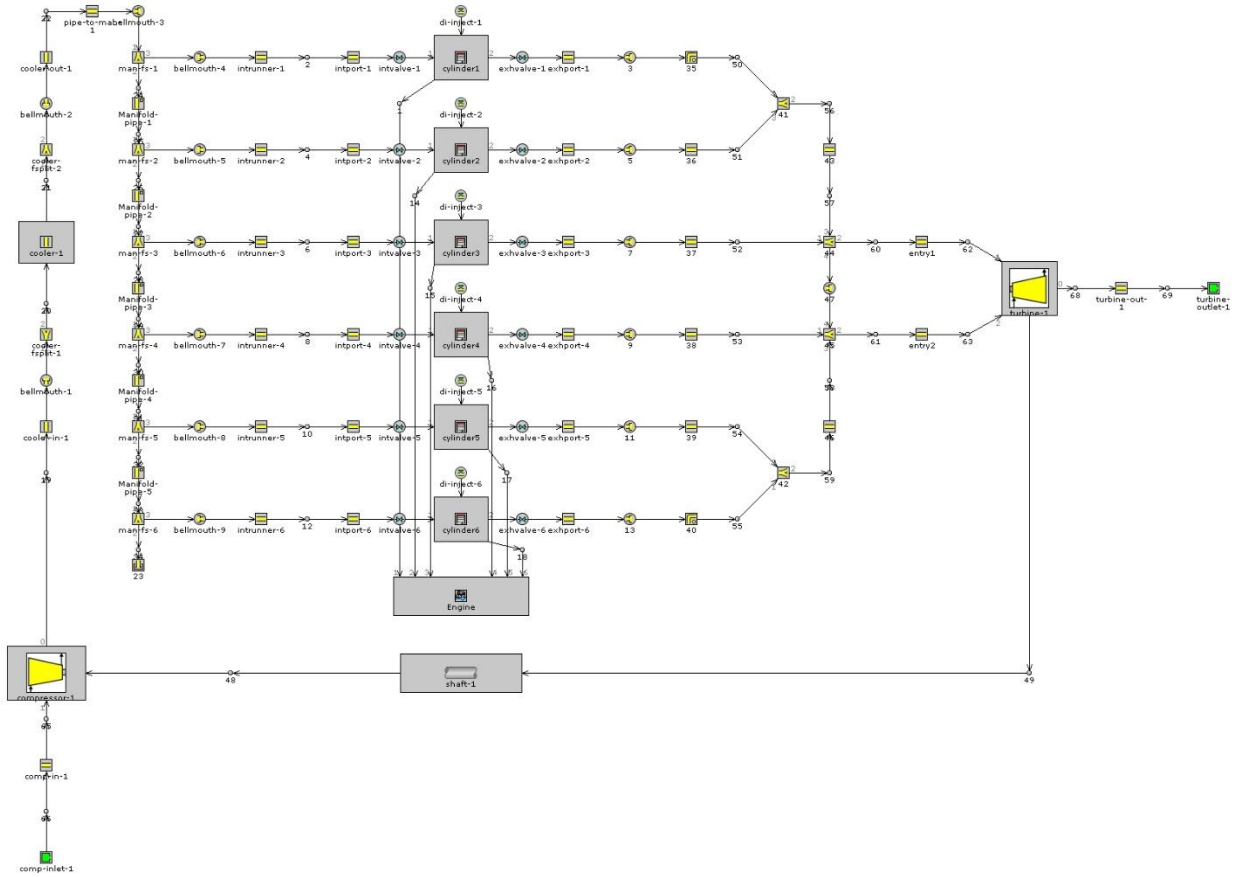
4.3.1 Μοντελοποίηση κινητήρα Diesel (Μ.Ε.Κ.)

Η παρούσα διπλωματική εργασία βασίζεται σε μία ήδη περατωθείσα διπλωματική εργασία [9]. 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-Χ 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 4.2.

Ο κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε ως βάση, είναι ο Mercedes Benz OM3366LA. Πρόκειται για 4-Χ 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 mm
- Διαδρομή εμβόλου: s = 133 mm
- Ακτίνα στροφάλου: r = 66.5 mm
- Μήκος διωστήρα: L = 230 mm
- Γωνία στροφάλου κατά τη στιγμή ανοίγματος της βαλβίδας εξαγωγής: ϕ_{evo}=112˚ μετά το ΑΝΣ
- Βαθμός συμπίεσης: CR = 18
- Κύλινδροι: z = 6 σε σειρά
- Όγκος εμβολισμού: V_h = 5958 cm^3
- Επιζήμιος όγκος κυλίνδρου: V_c = 58.4 cm^3
- Όγκος κοιλότητας εμβόλου: V_{bowl} = 48.5 cm^3
- Ροπή αδράνειας κινητήρα: G_e = 0.87 kg/m^2

Η σειρά ανάφλεξής 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].



<u>Σχήμα 4.2</u>: Ολοκληρωμένο μοντέλο κινητήρα Diesel με απλή στροβιλο-υπερπλήρωση στο χάρτη εργασίας του GT-Power.

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 εξαγωγής, χρησιμοποιείται η μέθοδος των χαρακτηριστικών (pressure wave action simulation).

<u>4.3.2 Μοντέλο οχήματος και συστήματος μετάδοσης κίνησης στο περιβάλλον του GT-Power</u>

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.

Α) Το όχημα (vehicle)

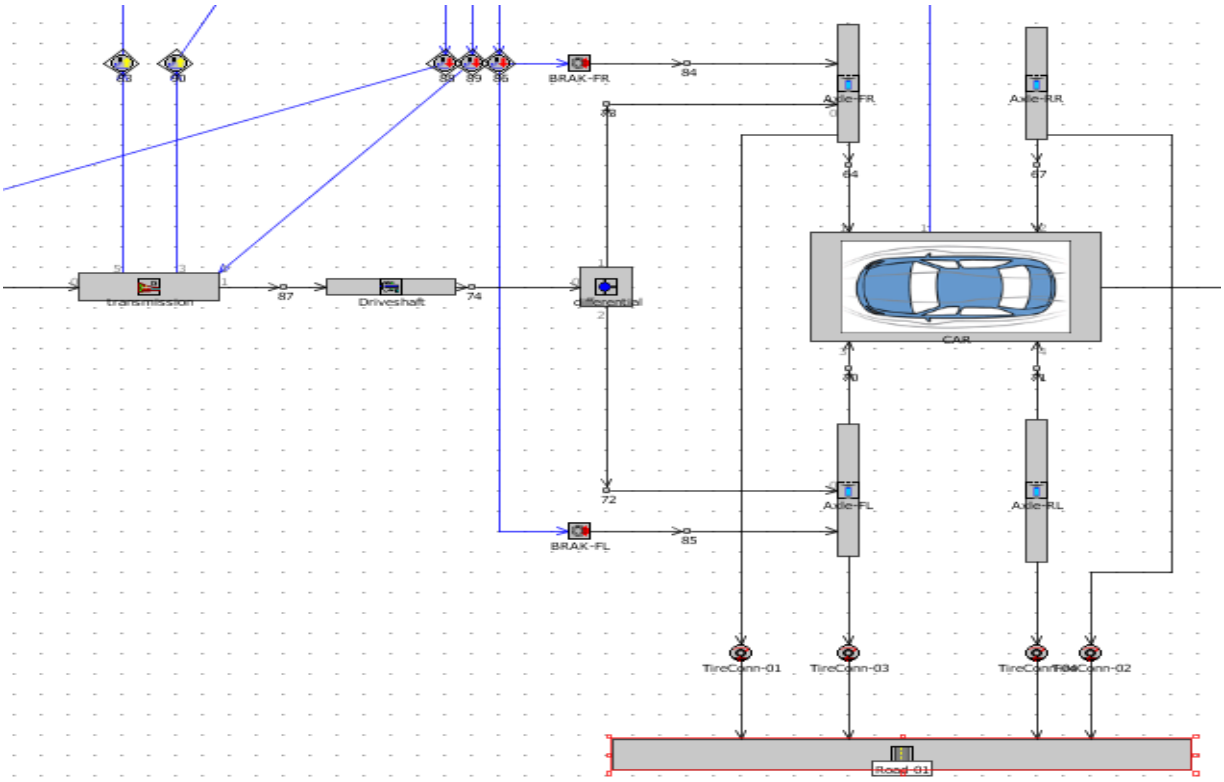
Τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη οχήματος (φορτηγό ελαφρού τύπου) συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1:

Μάζα (m_v)	3500 kg
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 4.3: Παράδειγμα οχήματος παραπλήσιου του χρησιμοποιούμενου στην προσομοίωση. [19]

Ένα παράδειγμα τέτοιου οχήματος είναι αυτό που φαίνεται στην Σχήμα 4.3. 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 4.4.



<u>Σχήμα 4.4</u>: Απεικόνιση του οχήματος (vehicle) στο χάρτη εργασίας του υπολογιστικού πακέτου GT-Power.

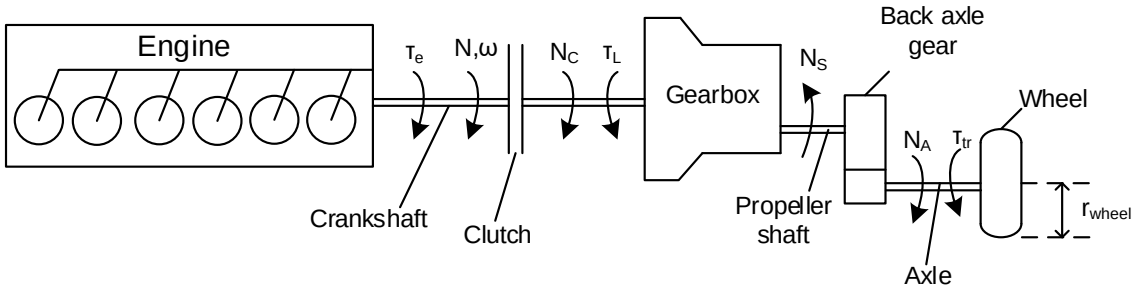
Αρχικά, κατά τον σχεδιασμό του οχήματος ο χρήστης εισάγει μέσω των παραθύρων εισαγωγής παραμέτρων του προγράμματος τα βασικά χαρακτηριστικά του οχήματος. Πιο συγκεκριμένα, εισάγεται η μάζα του οχήματος καθώς και η πυκνότητα του εγχεόμενου καυσίμου. Στη συνέχεια εισάγονται τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά 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.

Β) 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 4.5 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.



<u>Σχήμα 4.5</u>: Απλοποιημένο σύστημα κινητήρα – κιβωτίου ταχυτήτων – τροχών [4,13].

Ανάλυση συστήματος μετάδοσης κίνησης και ισχύος

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.5, ο δεύτερος νόμος του Νεύτονα στη στροφαλοφόρο άτρακτο μπορεί να γραφεί ως εξής:

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

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

Στην αντίθετη περίπτωση που ο συμπλέκτης δεν είναι δεσμευμένος (Nc ≠N), η Σχέση 4.1 μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\frac{\tau_L}{\eta_{gear}}+G_V\frac{d\omega}{dt}=0 \tag{4.1α}$$

Στη Σχέση 4.1, η ροπή του κινητήρα $[\tau_e(\phi)-\tau_{fr}(\phi)]$ 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 4.5 καθώς επίσης και τις επεξηγήσεις καταλήγουμε στα εξής [6,9].

$$i_b = N_s N_A \tag{4.2α}$$

$$i_g = N_c N_s \tag{4.2β}$$

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

$$V(km/h)=2\cdot \pi\cdot r_{wheel}\cdot N_c(rpm)\, i_b\, i_g\cdot 60\cdot 10^{-3} \tag{4.3}$$

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 συνδετικό κρίκο 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)

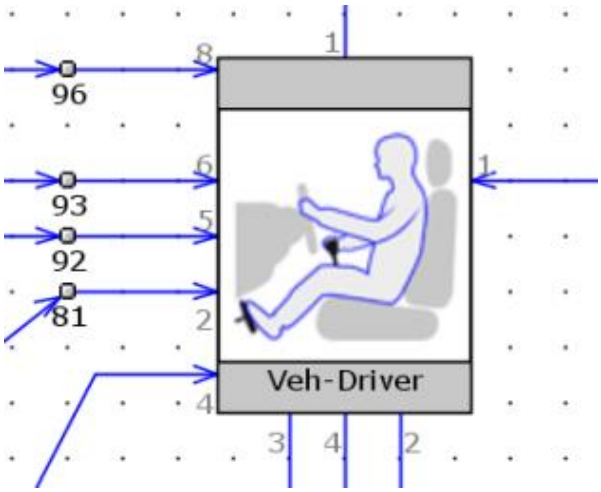
Το διαφορικό μπορεί να ορισθεί ως ο μηχανισμός που λαμβάνει πληροφορίες ανάλογα με την επαφή καθενός κινητήριου τροχού με το οδόστρωμα και διαμοιράζει αντίστοιχα την ισχύ ή την ροπή του κινητήρα στους άξονες των τροχών.

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 4.6: 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 εγχυόμενη 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 Χ τοποθετείται το φορτίο (%) ενώ στον κατακόρυφο άξονα Υ 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.

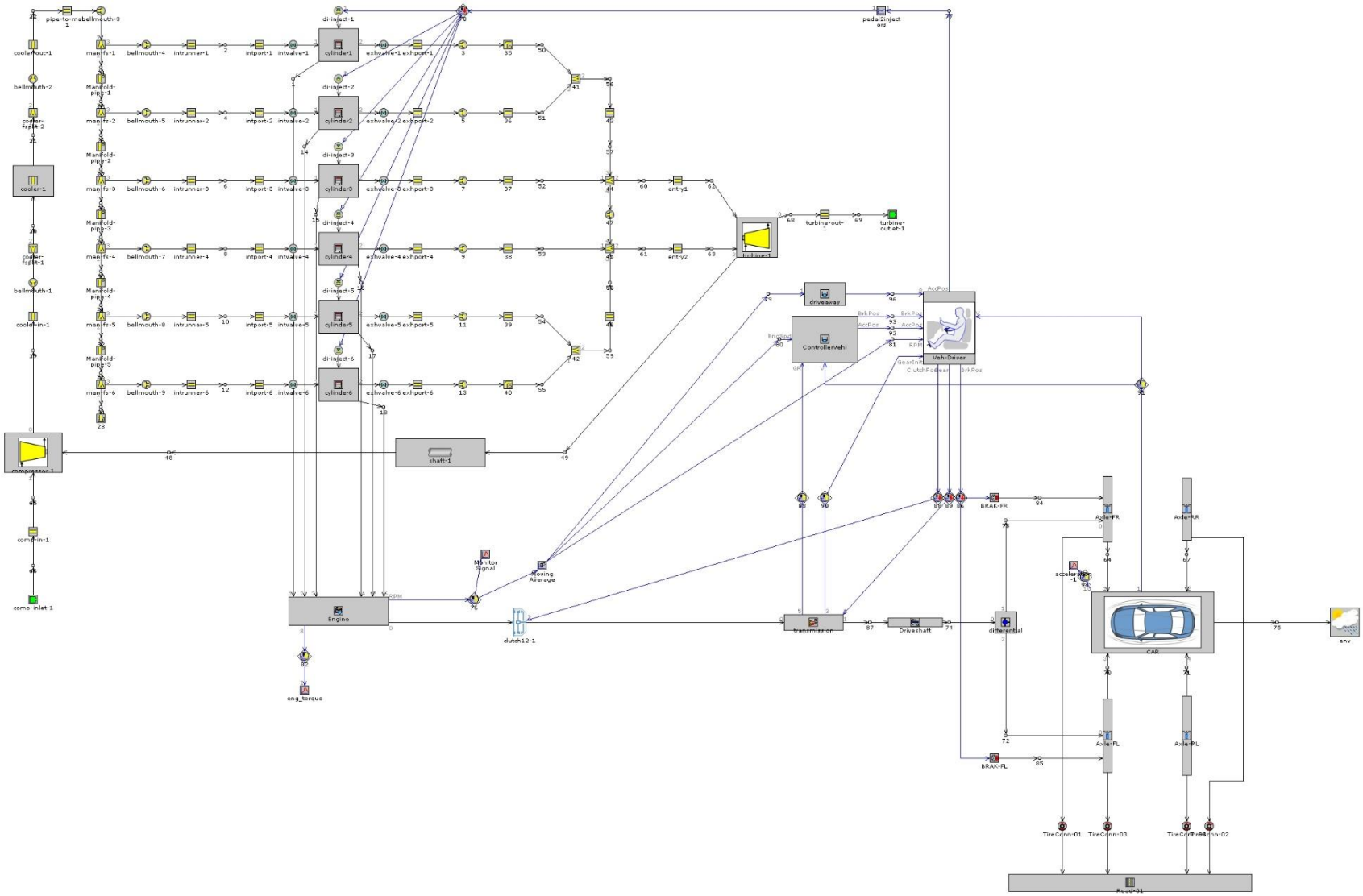
Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει ανάλυση των διαφόρων τμημάτων, που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και για την εύρυθμη λειτουργία του υπό μελέτη μοντέλου, έτσι ώστε να το όχημα να ακολουθεί με ικανοποιητική ακρίβεια και ρεαλιστικά τους επιλεγμένους κύκλους πόλης.

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 (bmep-$\overline{p_e}$) 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 του απλού συμβατικού οχήματος που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.7.



<u>Σχήμα 4.7</u>: Ολοκληρωμένη εικόνα του μοντέλου οχήματος και του συστήματος μετάδοσης κίνησης, και η σύνδεση του με τον κινητήρα Diesel στο περιβάλλον του GT-Power [8].

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).

4.3.3 Μοντελοποίηση πλήρως υβριδικού οχήματος

Έχοντας ήδη δημιουργήσει το μοντέλο ενός συμβατικού οχήματος με κινητήρα Diesel, μπορούμε πλέον, προσθέτοντας τα απαραίτητα κομμάτια, να δημιουργήσουμε το μοντέλο ενός πλήρως υβριδικού οχήματος. Σημειώνεται ότι για τη μετάδοση της ισχύος επιλέχθηκε το παράλληλο σύστημα, όπου, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1, η θερμική και η ηλεκτρική πηγή μπορούν να λειτουργούν είτε ανεξάρτητα είτε συνδυαστικά για την κίνηση του οχήματος, ενώ η μοντελοποίηση αυτού στο λογισμικό, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8. Επίσης, στο μοντέλο γίνεται χρήση των χαρακτηριστικών υποσυστημάτων των υβριδικών οχημάτων, του συστήματος «start-stop» του κινητήρα, καθώς και αυτό της αναγεννητικής πέδησης («regenerative braking») τα οποία επίσης αναφέρθηκαν εκτενώς στο Κεφάλαιο 1.

Για τον σκοπό αυτό, γίνεται χρήση συστημάτων ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας, συστημάτων ελέγχου, και ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών μερών, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

A. Ηλεκτρικό μοτέρ (Motor-Generator)

Αποτελεί βασικό κομμάτι κάθε υβριδικού οχήματος καθώς συνεισφέρει στην κίνηση αυτού, προσφέροντας την απαραίτητη ισχύ όταν αυτό καθίσταται αναγκαίο. Συνδέεται μηχανικά στον άξονα μεταξύ κιβωτίου και διαφορικού με σχέση μετάδοσης 4:1, ενώ αποδίδει μέγιστη ισχύ 100 kW με ταχύτητα βάσης 3000 rpm. Ταυτόχρονα, κατά τη διάρκεια της πέδησης λειτουργεί σαν γεννήτρια, απορροφώντας ενέργεια η οποία στη συνέχεια φορτίζει τη μπαταρία.

B. Μπαταρία (Battery)

Στο μοντέλο που δημιουργήθηκε η μπαταρία αφορά μονάχα την τροφοδότηση του ηλεκτροκινητήρα και δεν συσχετίζεται με άλλες λειτουργίες των μπαταριών συμβατικών οχημάτων. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε μπαταρία χωρητικότητας 30 Ah ενώ η στάθμη αυτής (State of Charge - SOC) κυμαίνεται μεταξύ 0.4 και 0.7 καθώς οι τιμές αυτές βοηθούν στην καλύτερη χρήση και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης η στάθμη ορίζεται στα 0.7.

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. Πιο αναλυτικά τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Μέγιστο ρεύμα φόρτισης	300 A
Μέγιστο ρεύμα αποφόρτισης	100 A
Μέγιστη τάση	400 V
Ελάχιστη τάση	200 V

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά λειτουργίας αναστροφέα (Inverter).

D. Σύστημα ελέγχου

Προκειμένου να ελεγχθεί το όχημα σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας του χρησιμοποιήθηκε ένα απλό σύστημα ελέγχου το οποίο δίνει τις κατάλληλες εντολές ανάλογα με την τιμή ορισμένων παραμέτρων, όπως για παράδειγμα η ταχύτητα του οχήματος ή η στάθμη της μπαταρίας. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα αυτό θα μπορούσε να διαχωριστεί σε 2 βασικές κατηγορίες λειτουργίας, την κίνηση του οχήματος προς τα εμπρός και τη διαδικασία φρεναρίσματος.

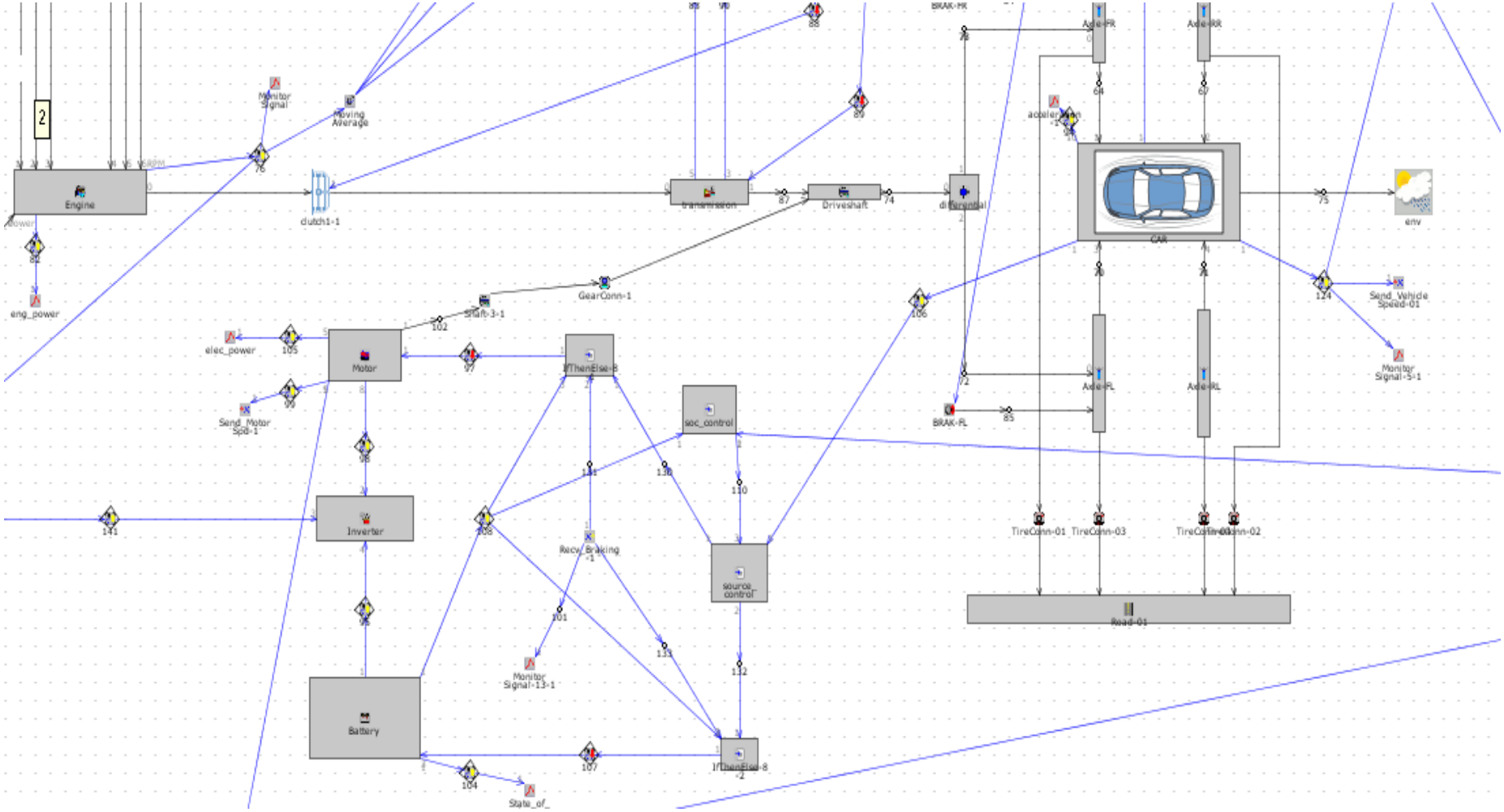
Κατά την κίνηση του οχήματος, αρχικά ελέγχεται εάν η στάθμη της μπαταρίας είναι μεγαλύτερη από το ελάχιστο όριο που έχει τεθεί, δηλαδη 0.4. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να τεθεί σε λειτουργία το ηλεκτρικό μοτέρ, εάν αυτό κρίνεται αναγκαίο, ενώ στην αντίθετη περίπτωση ο θερμικός κινητήρας θα πρέπει να αναλάβει εξ'ολοκλήρου την κίνηση του οχήματος σε οποιαδήποτε συνθήκη.

Έπειτα, το βασικότερο κομμάτι του συστήματος ελέγχου, είναι να καθοριστεί ο τρόπος με τον οποίο οι δύο πηγές ενέργειας (ηλεκτρική και θερμική) θα συνδυαστούν ώστε να δώσουν την απαραίτητη ισχύ για την κίνηση του οχήματος. Κύρια παράμετρο σε αυτή την περίπτωση αποτελεί η ταχύτητα του οχήματος. Αναλυτικότερα, μπορούμε να διαχωρίσουμε τις εξής 3 περιπτώσεις:

I. Η ταχύτητα του οχήματος είναι μικρότερη από 30 km/h. Τότε, ο ηλεκτροκινητήρας αναλαμβάνει αποκλειστικά την κίνηση του οχήματος, με τον θερμικό κινητήρα να λειτουργεί στο «ρελαντί», έτοιμος να προσφέρει ισχύ όταν αυτό χρειαστεί.
II. Η ταχύτητα του οχήματος είναι μεταξύ 30 και 80 km/h. Σε αυτήν την περίπτωση και οι δύο πηγές ενέργειας λειτουργούν ταυτόχρονα και συμβάλλουν στην κίνηση του οχήματος, με τη χρήση του ηλεκτρικού κινητήρα να μειώνεται καθώς η ταχύτητα αυξάνει.
III. Η ταχύτητα του οχήματος είναι μεγαλύτερη απο 80 km/h. Τότε, η Μ.Ε.Κ αποτελεί τη μοναδική πηγή παροχής ισχύος, με τον ηλεκτροκινητήρα να παρέχει μηδενική ενέργεια.

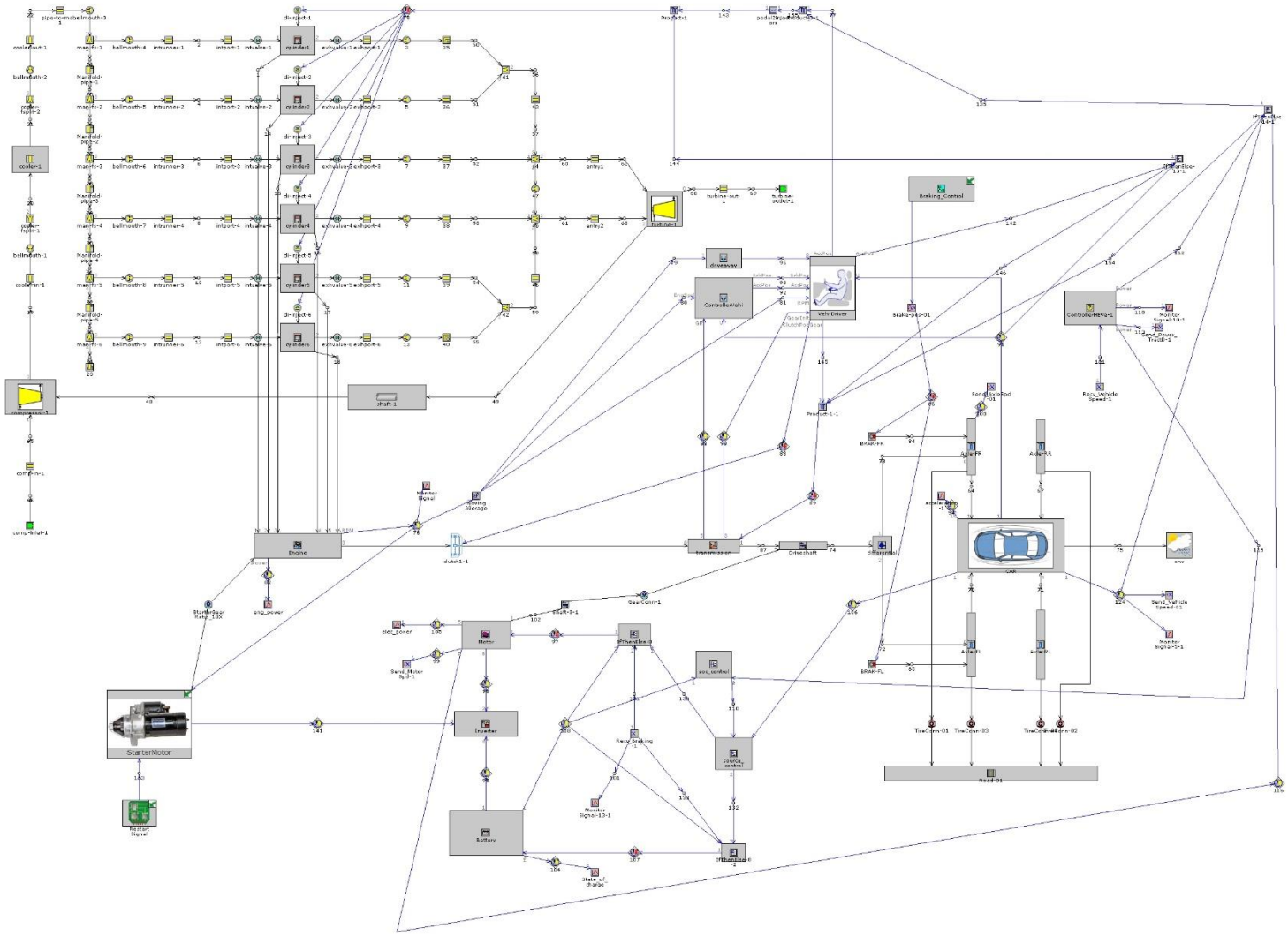
Έτσι, επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή αξιοποίηση κάθε πηγής αφού και οι δύο λειτουργούν στις αποδοτικότερες συνθήκες, μειώνοντας έτσι αισθητά την κατανάλωση καυσίμου, το οποίο είναι και ο πρωταρχικός στόχος.

Από την άλλη, κατά τη διάρκεια του <u>φρεναρίσματος</u> σε αντίθεση με τα συμβατικά οχήματα όπου χρησιμοποιούνται μόνο μηχανικά φρένα, το υβριδικό όχημα επωφελείται της διαδικασίας της αναγεννητικής πέδησης (βλ. Κεφάλαιο 1). Έτσι, στο μοντέλο που δημιουργήθηκε, εάν η ταχύτητα του οχήματος είναι μεγαλύτερη των 5 km/h και η ισχύς του ηλεκτροκινητήρα επαρκεί για την απαιτούμενη επιβράδυνση του οχήματος, τότε εφαρμόζεται η αναγεννητική πέδηση και ο κινητήρας, λειτουργώντας πλέον ως γεννήτρια, ανακτά όλη την ενέργεια. Σε αντίθετη περίπτωση, τίθενται σε λειτουργία και τα μηχανικά φρένα και το όχημα επιβραδύνεται με τη βοήθεια και της τριβής.



<u>Σχήμα 4.8</u>: Μοντελοποίηση παράλληλου συστήματος μετάδοσης ισχύος στο GT-Power.

Τέλος, εφόσον όλα τα μέρη του οχήματος έχουν τοποθετηθεί και συνδεθεί κατάλληλα μπορεί πλέον να εξαχθεί το ολοκληρωμένο μοντέλο που απεικονίζεται στο σχήμα 4.9.



<u>Σχήμα 4.9</u>: Ολοκληρωμένο μοντέλο πλήρως υβριδικού οχήματος σε περιβάλλον GT-Power.

5. Επιδόσεις και Εκπομπές Καυσαερίων Υβριδικού Οχήματος - Σύγκριση με Συμβατικό Όχημα

5.1 Περιγραφή

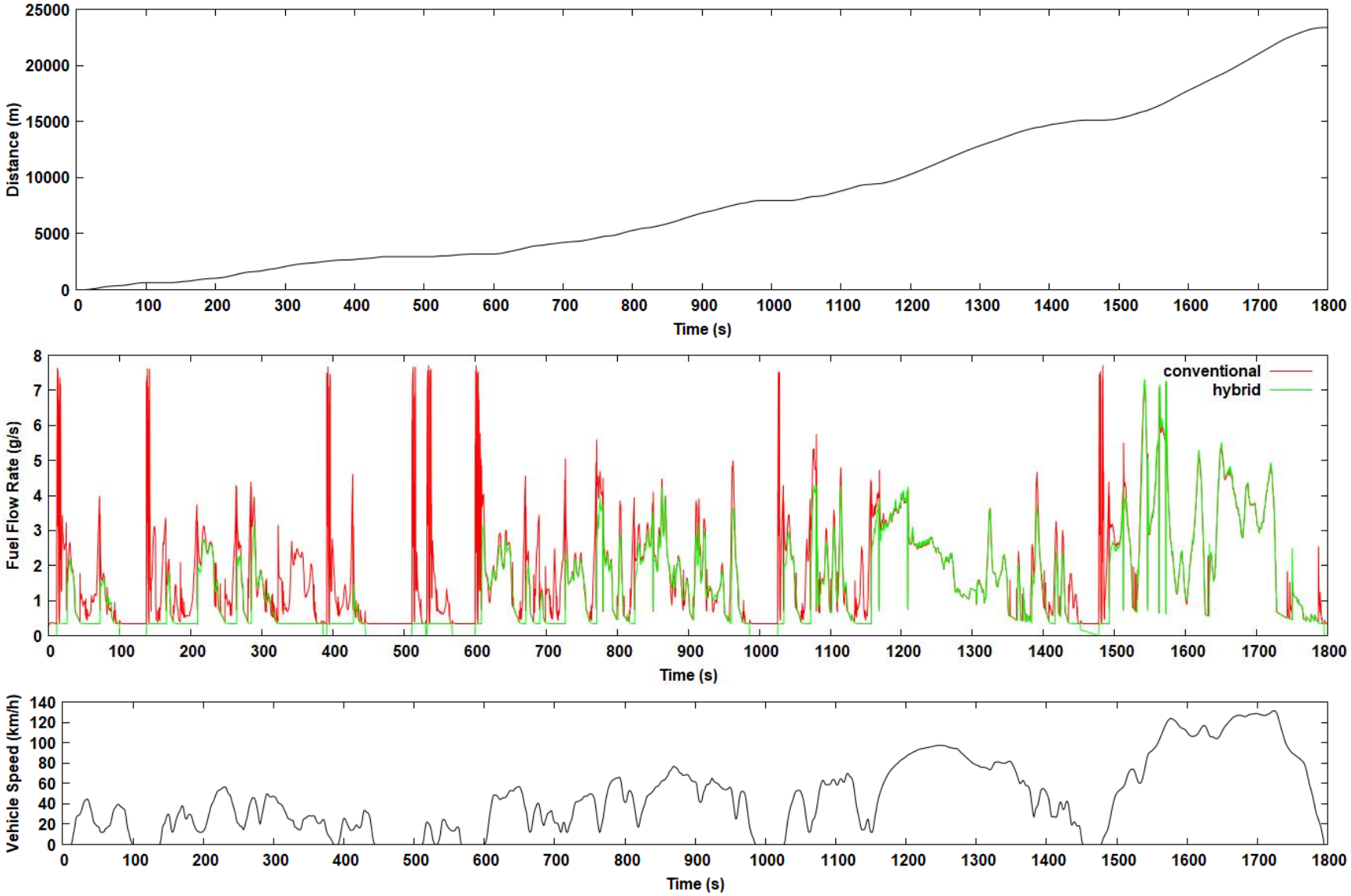
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη ενός υβριδικού οχήματος κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC, και πιο συγκεκριμένα την Κλάση 3-2 του WLTC που ισχύει για την Ευρωπαϊκή Ένωση. Σκοπός είναι η σύγκριση των εκπομπών και επιδόσεων ενός τέτοιου οχήματος με ένα συμβατικό όχημα κινητήρα Diesel με μονοβάθμια στροβιλοϋπερπλήρωση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κίνησης του οχήματος στον κύκλο αυτό, ο οποίος διαρκεί μισή ωρα (1800 sec), τα οποία αφορούν τις επιδόσεις τόσο του κινητήρα Diesel όσο και του ηλεκτροκινητήρα. Επίσης, όσον αφορά τους ρύπους που μελετόνται, αυτοί είναι τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και η αιθάλη (soot) ενώ ιδιαίτερης σημασίας είναι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2).

Παράλληλα, για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων και κυρίως της ωφελιμότητας χρήσης ενός υβριδικού οχήματος κατά τη διάρκεια κίνησης εντός πόλης, όλα τα μεγέθη παρουσιάζονται επίσης κατά τη διάρκεια των πρώτων 589 δευτερολέπτων, τα οποία αφορούν και το τμήμα των χαμηλών ταχυτήτων του κύκλου (κίνηση εντός πόλης), όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 3.3. Σημειώνεται ότι σε όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν, η πράσινη καμπύλη αντιπροσωπεύει το υβριδικό όχημα («hybrid») ενώ η κόκκινη το συμβατικό όχημα («conventional»).

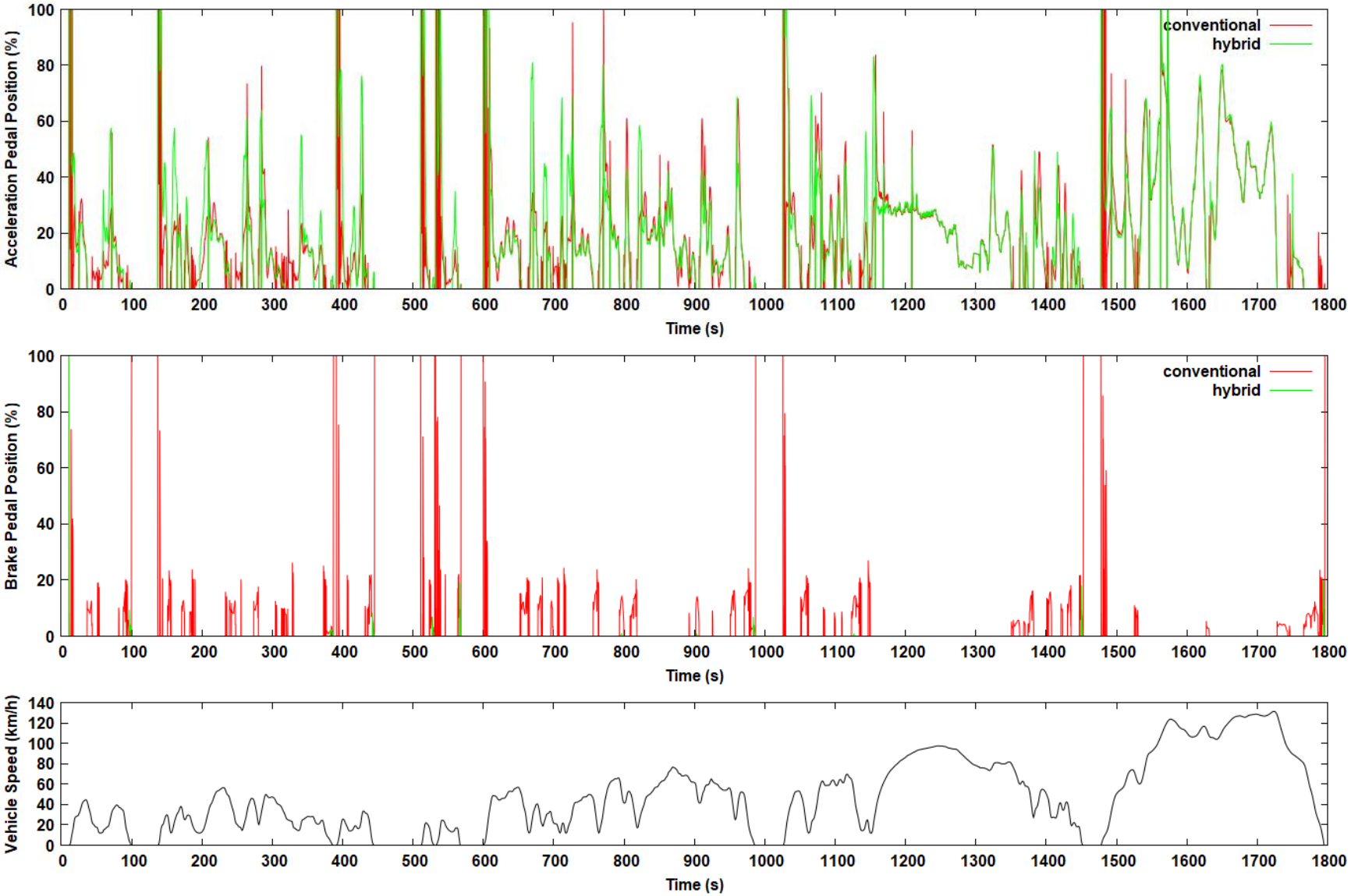
5.2 Επιδόσεις κινητήρα Diesel

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα βασικά μεγέθη λειτουργίας του κινητήρα Diesel τόσο στην περίπτωση εφαρμογής του σε ενα συμβατικό όχημα όσο και σε αυτή ενός υβριδικού οχήματος. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται κατά σειρά τα εξής μεγέθη (σε αντιστοιχία με το διάγραμμα ταχύτητας του οχήματος):

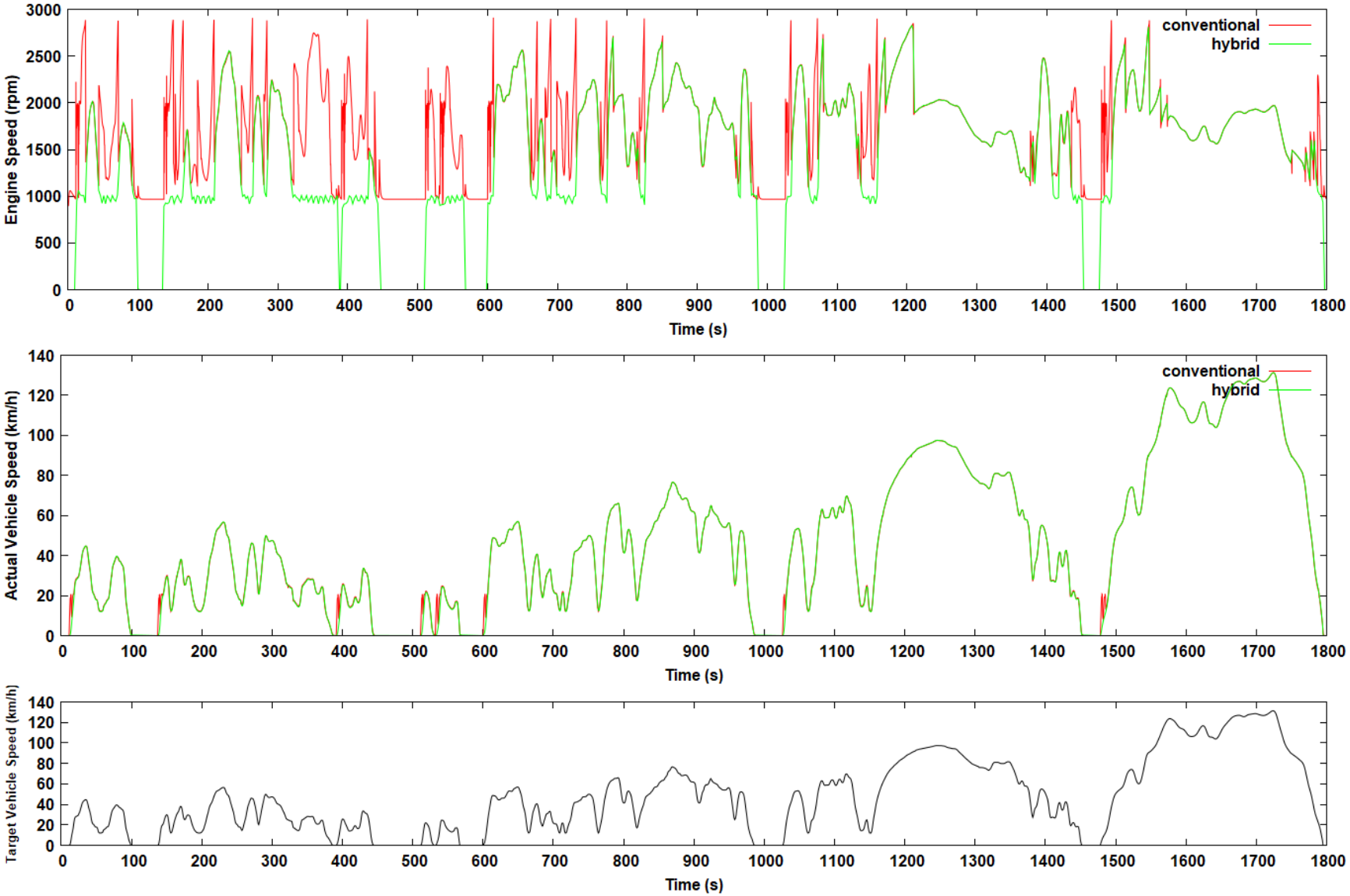
- Διανυόμενη απόσταση από το όχημα (m)
- Παροχή μάζας καυσίμου (g/s)
- Πάτημα πεντάλ επιτάχυνσης (%)
- Πάτημα πεντάλ φρένου (%)
- Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα (rpm)
- Πραγματική ταχύτητα οχήματος (km/h)
- Ισχύς του κινητήρα (kW)
- Ροπή του κινητήρα (Nm)
- Ειδική κατανάλωση καυσίμου (g/kWh)
- Μέση πραγματική πίεση (bar)
- Λόγος πίεσης συμπιεστή
- Ταχύτητα περιστροφής του ζεύγους στροβιλοϋπερπλήρωσης (rpm)



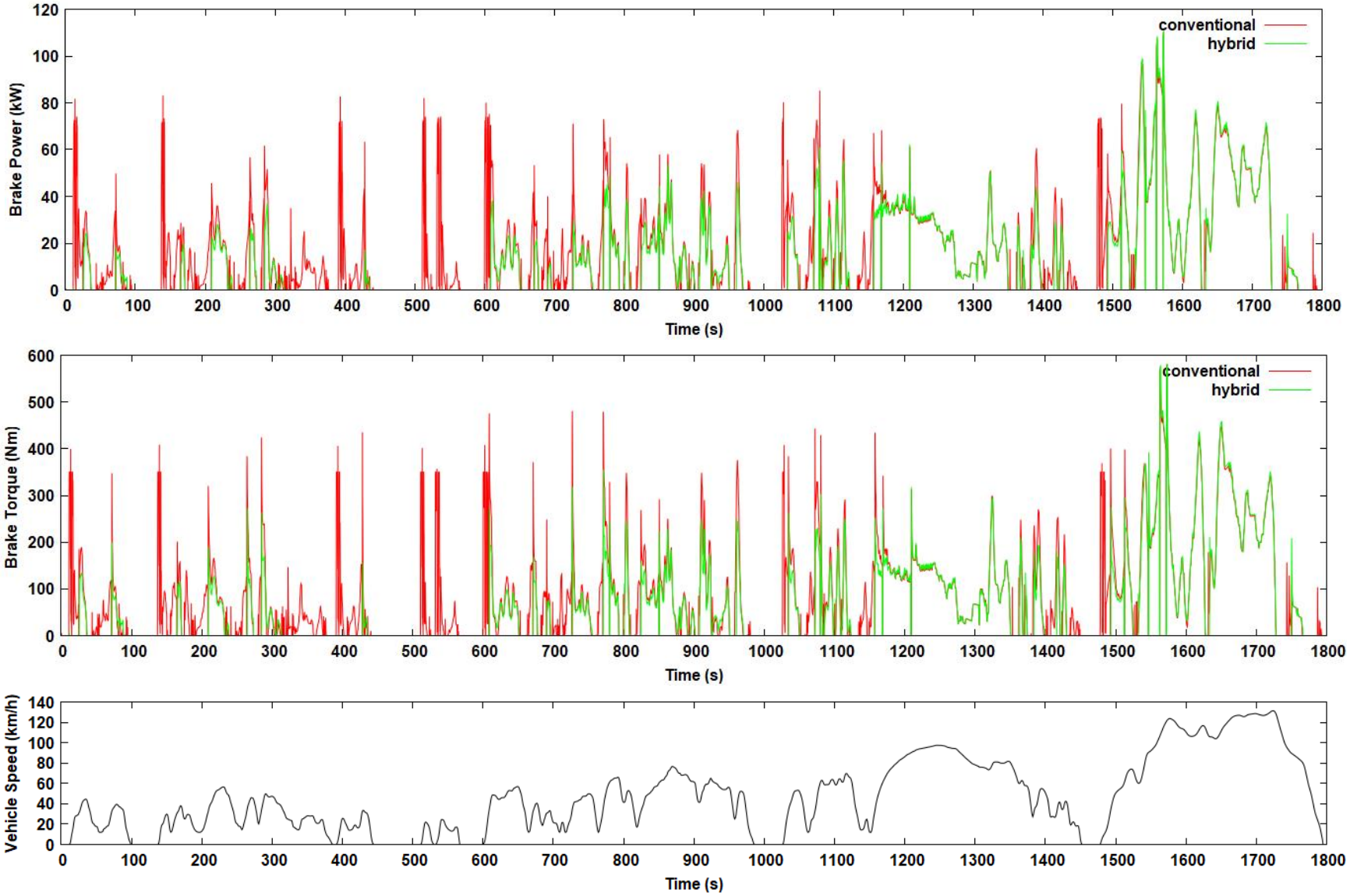
<u>Σχήμα 5.1</u>: Διανυόμενη απόσταση από το όχημα και παροχή μάζας καυσίμου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC.



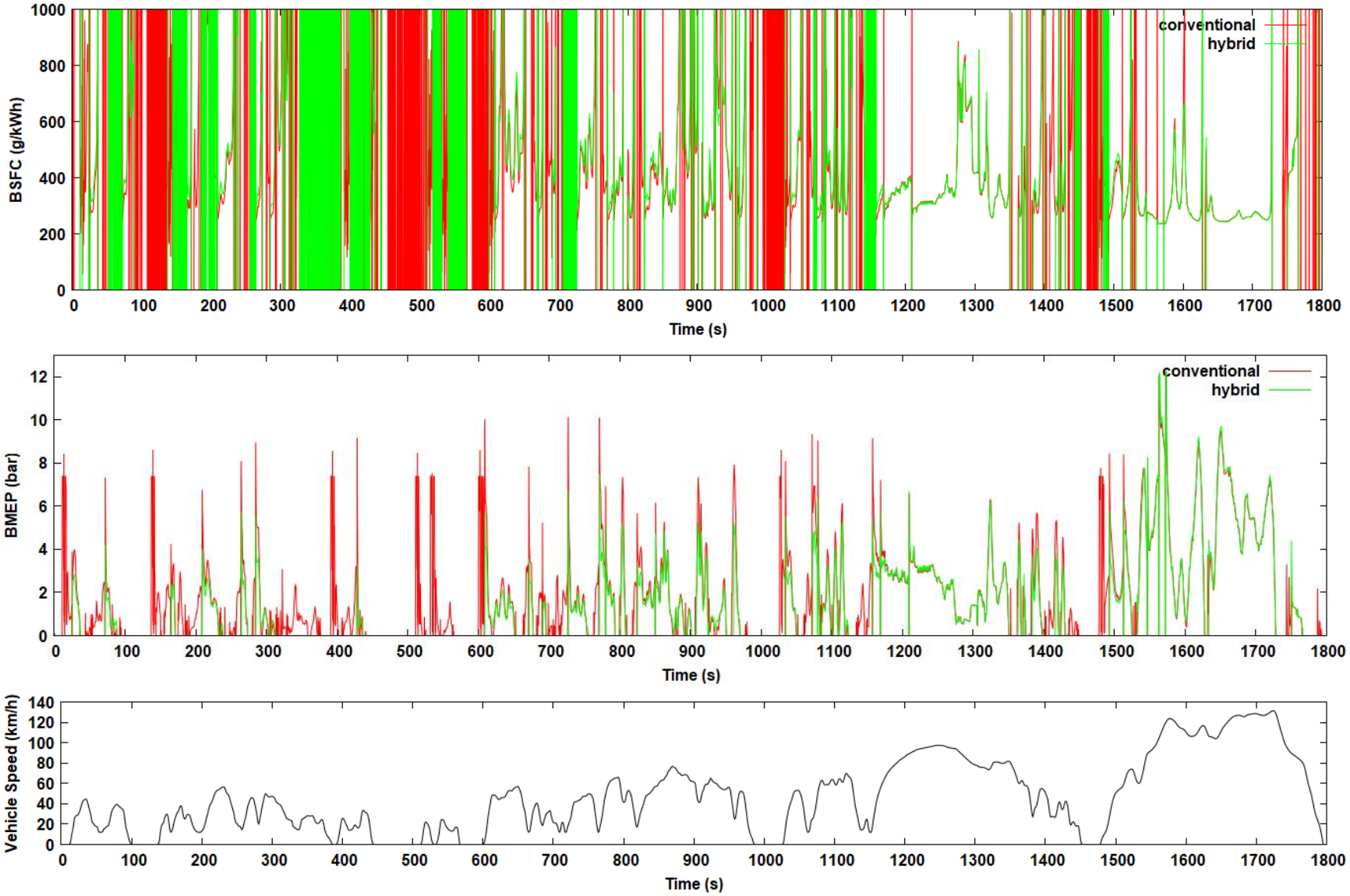
<u>Σχήμα 5.2</u>: Πάτημα του πεντάλ επιτάχυνσης και του φρένου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC.



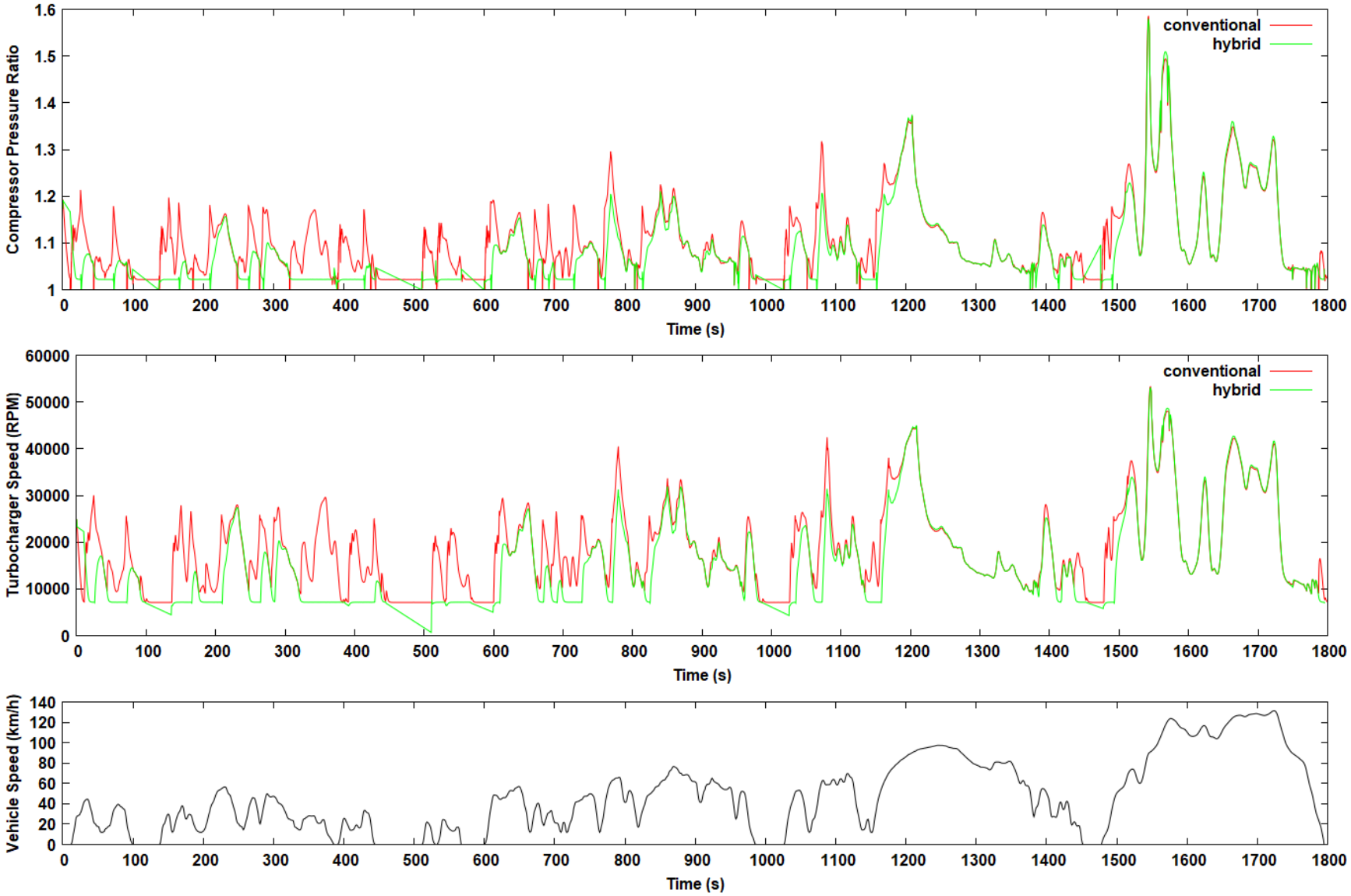
<u>Σχήμα 5.3</u>: Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα και πραγματική ταχύτητα οχήματος συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC.



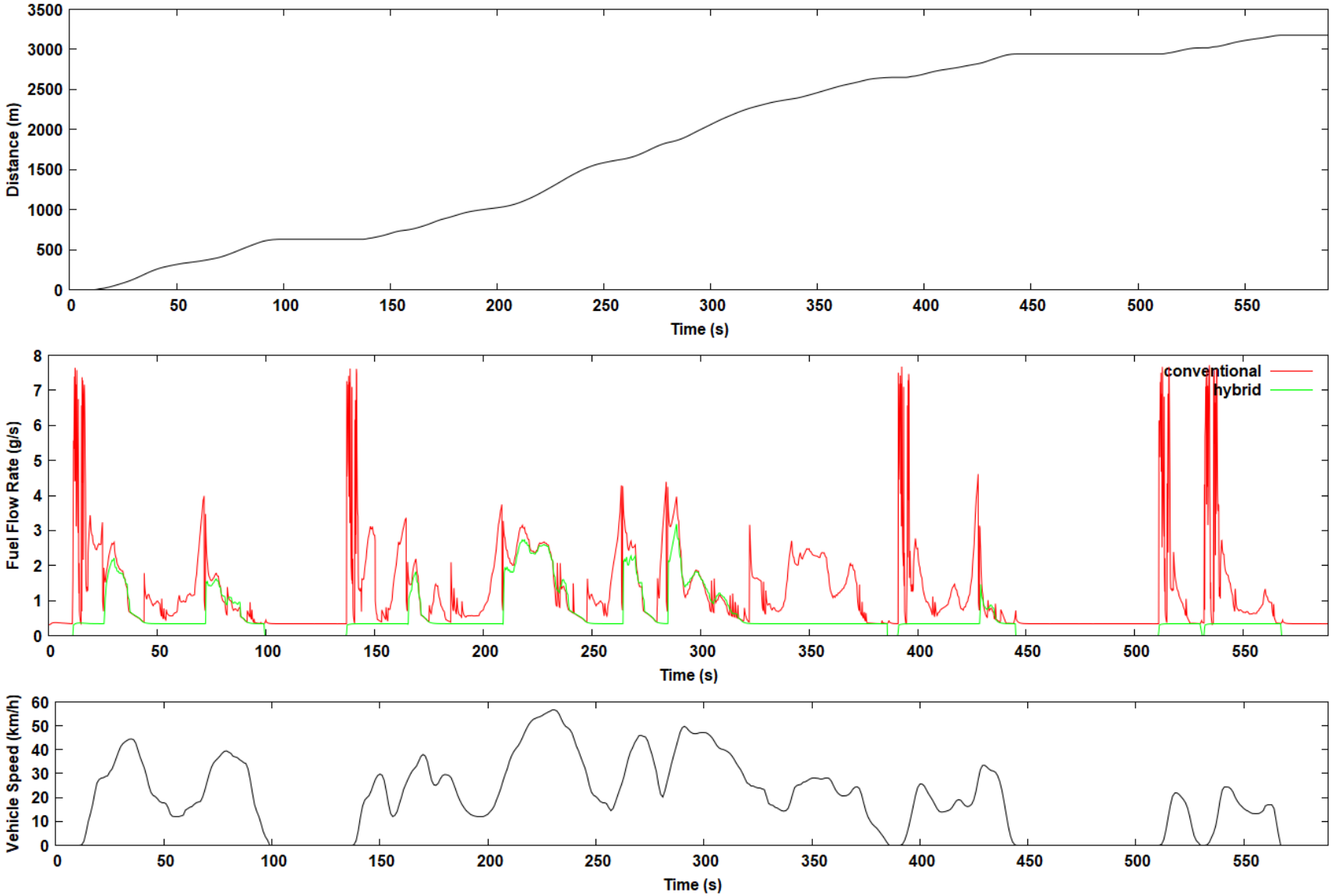
<u>Σχήμα 5.4</u>: Ισχύς και ροπή κινητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC.



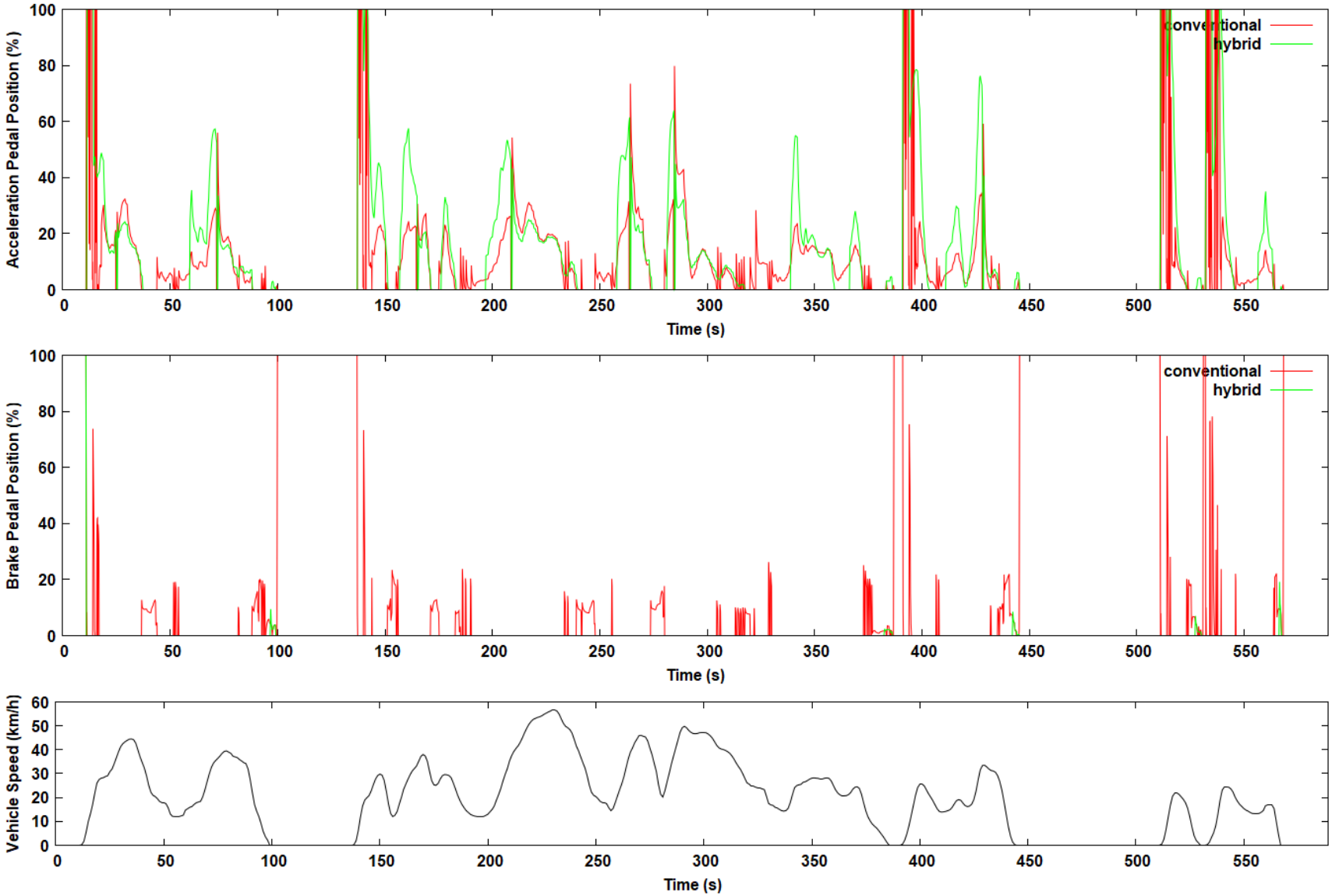
<u>Σχήμα 5.5</u>: Ειδική κατανάλωση καυσίμου και μέση πραγματική πίεση κινητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC.



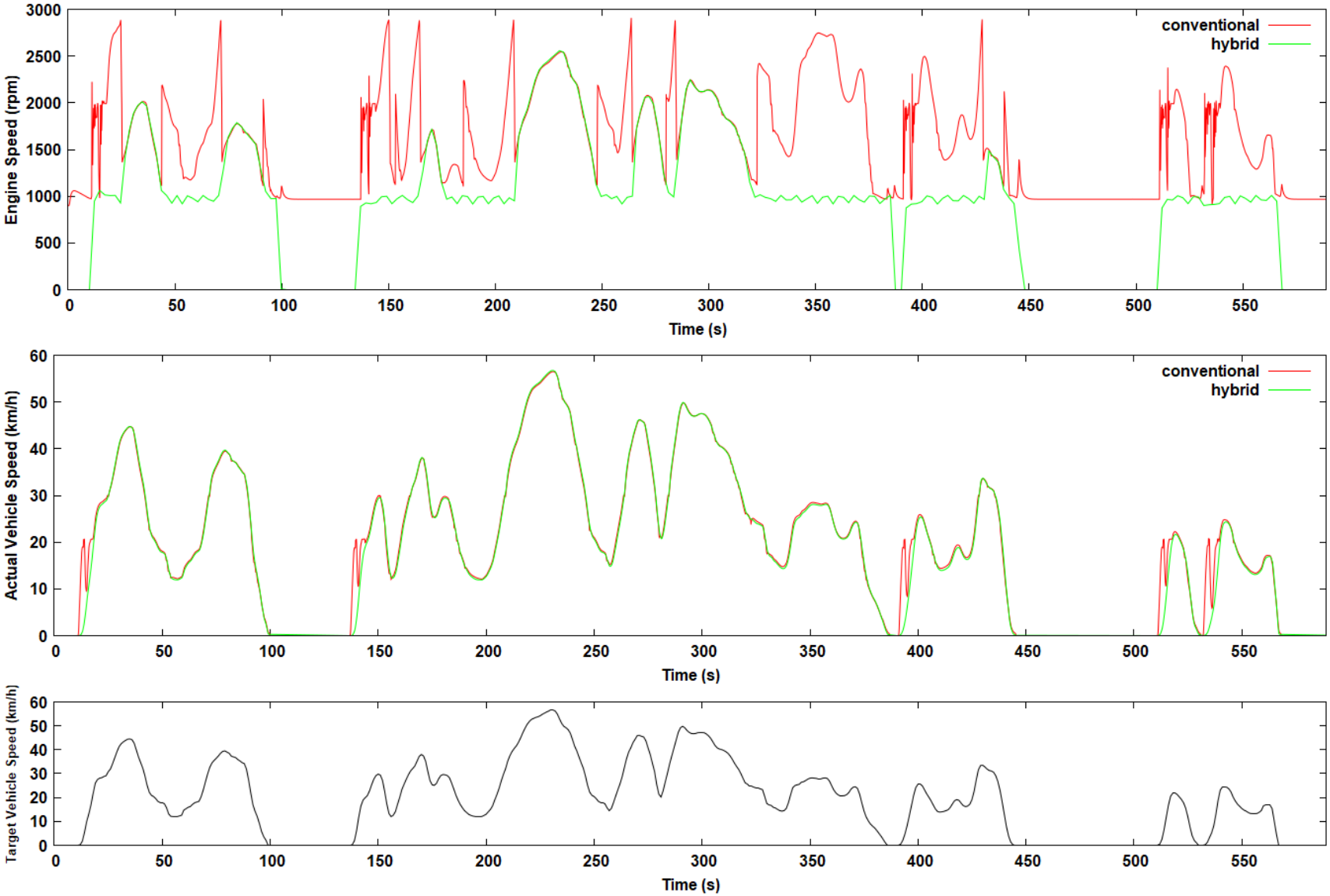
<u>Σχήμα 5.6</u>: Λόγος πίεσης συμπιεστή και ταχύτητα περιστροφής ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC.



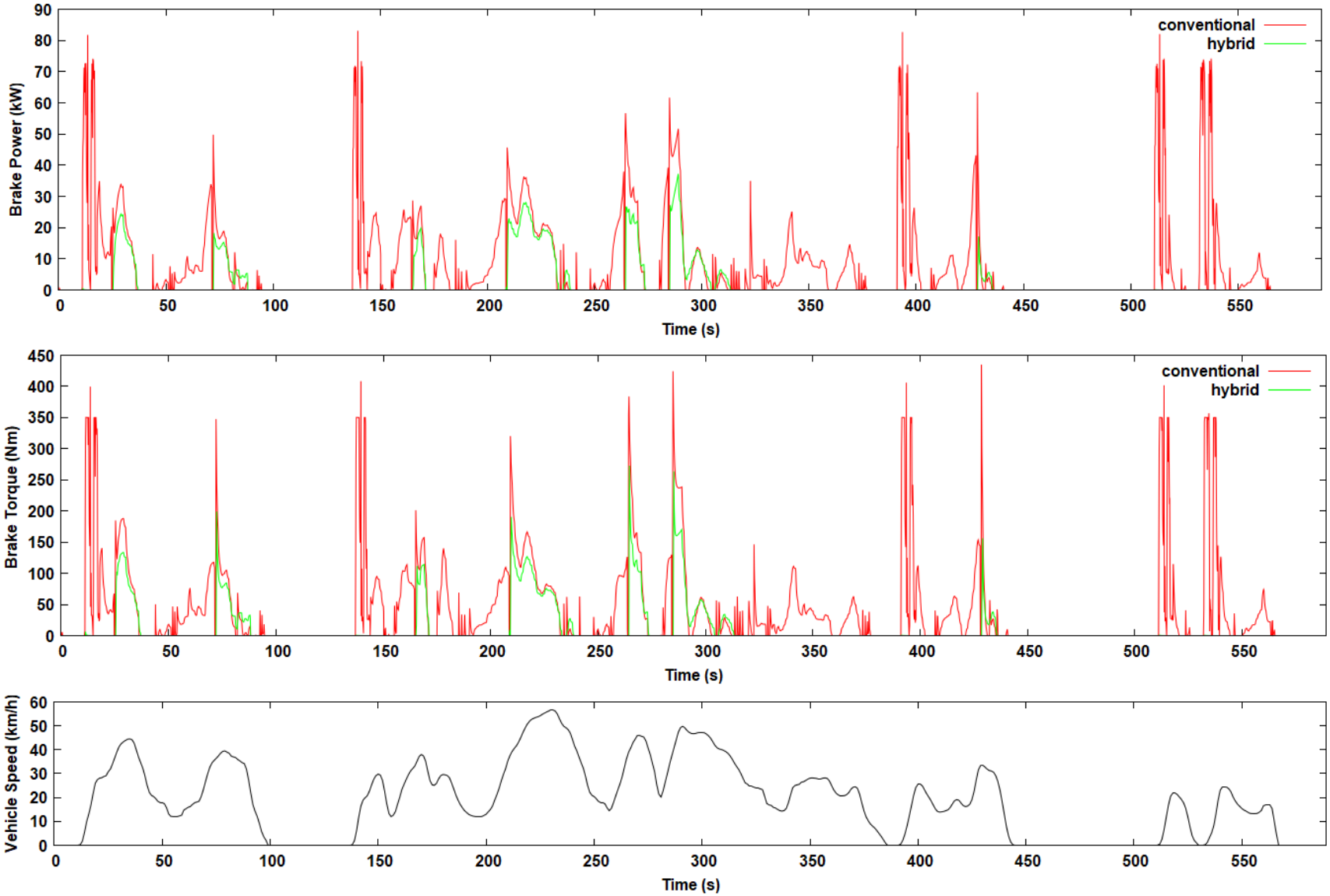
<u>Σχήμα 5.7</u>: Διανυόμενη απόσταση από το όχημα και παροχή μάζας καυσίμου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 589 δευτερολέπτων του κύκλου πόλης WLTC.



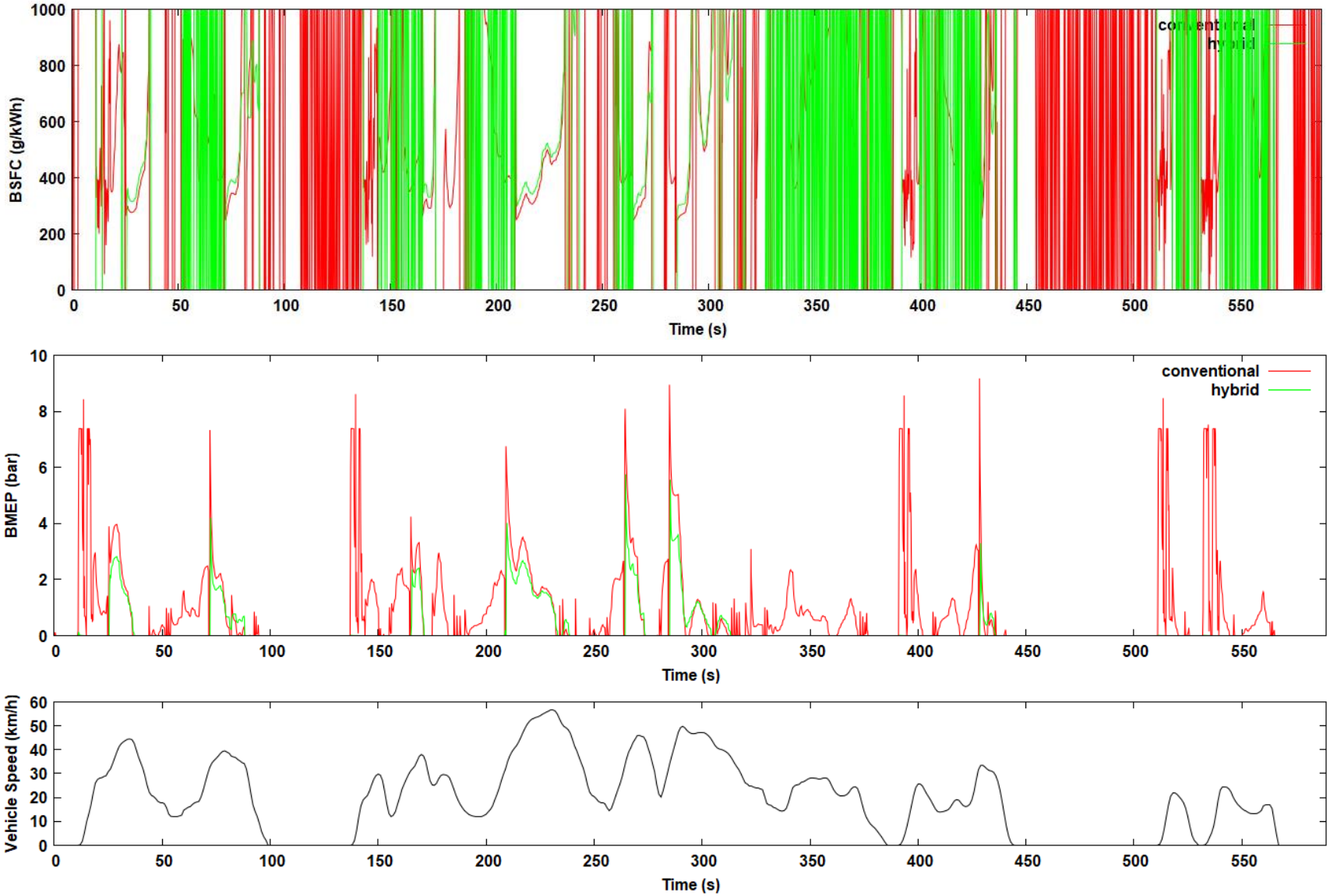
<u>Σχήμα 5.8</u>: Πάτημα του πεντάλ του γκαζιού και του φρένου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 589 δευτερολέπτων του κύκλου πόλης WLTC.



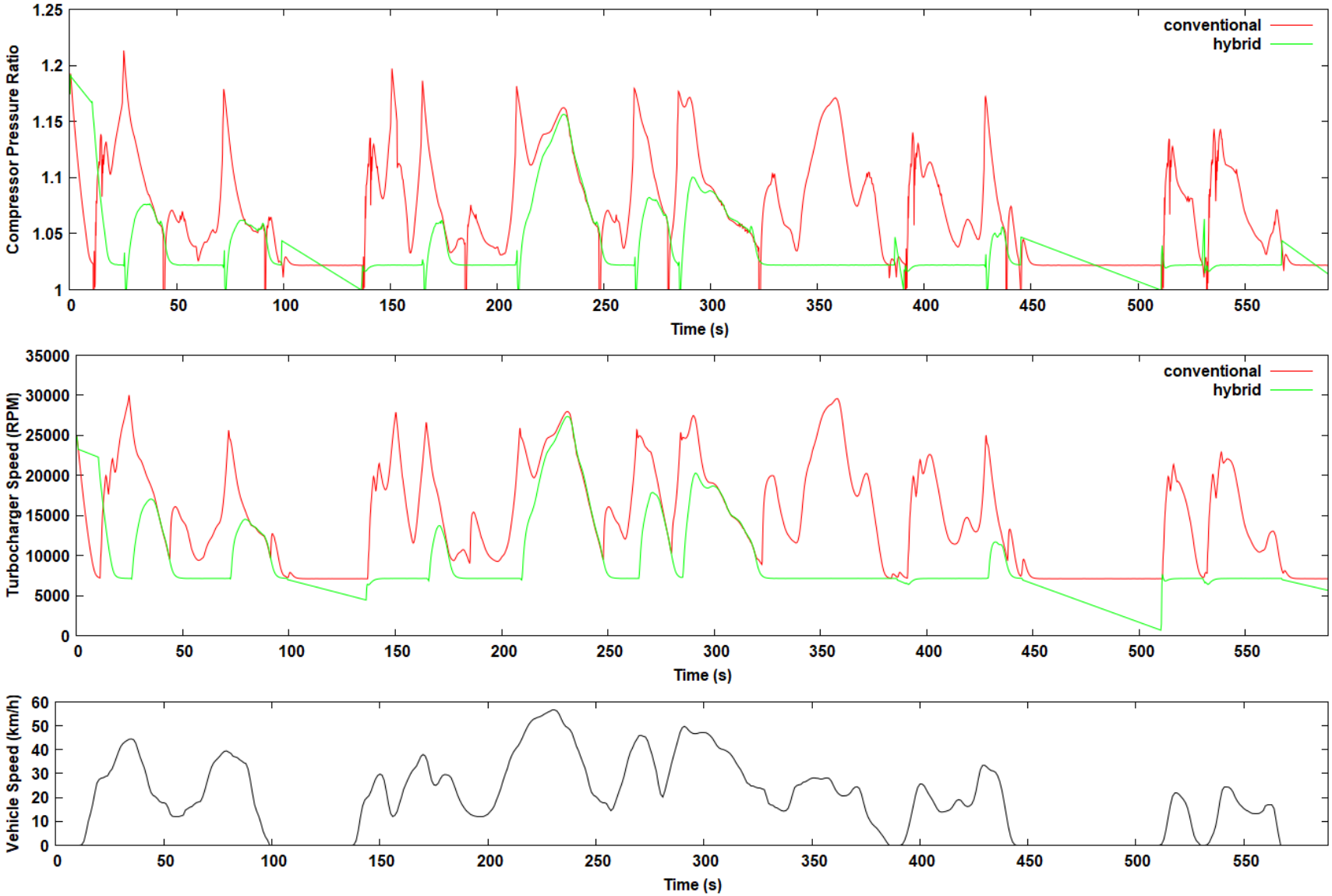
<u>Σχήμα 5.9</u>: Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα και πραγματική ταχύτητα οχήματος συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 589 δευτερολέπτων του κύκλου πόλης WLTC.



<u>Σχήμα 5.10</u>: Ισχύς και ροπή του κινητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 589 δευτερολέπτων του κύκλου πόλης WLTC.



<u>Σχήμα 5.11</u>: Ειδική κατανάλωση καυσίμου και μέση πραγματική πίεση κινητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 589 δευτερολέπτων του κύκλου πόλης WLTC.



<u>Σχήμα 5.12</u>: Λόγος πίεσης συμπιεστή και ταχύτητα περιστροφής ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 589 δευτερολέπτων του κύκλου πόλης WLTC.

Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορεί να εξαχθεί ένα πρώτο συμπέρασμα ότι παρουσιάζονται εμφανείς διαφορές, είτε μικρότερες είτε μεγαλύτερες, μεταξύ των καμπυλών για το συμβατικό και το υβριδικό όχημα. Η διαφορά αυτή γίνεται πιο έντονη στο πρώτο κομμάτι που αφορά την κίνηση μέσα στην πόλη (0-1022 s), γεγονός το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς τα υβριδικά οχήματα παρουσιάζουν διαφορά στον τρόπο μετάδοσης της κίνησης όταν αυτά κινούνται με χαμηλές ταχύτητες όπου και γίνεται μεγαλύτερη χρήση του ηλεκτροκινητήρα. Αντιθέτως, στο κομμάτι εκτός πόλης (1022-1800 s) βλέπουμε τις καμπύλες να είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους ή ακόμα και να ταυτίζονται στα σημεία όπου το ηλεκτρικό μοτέρ τίθεται εκτός λειτουργίας, και άρα το όχημα λειτουργεί σαν ένα συμβατικό.

Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι στο κομμάτι εκτός πόλης, σε ορισμένα σημεία, όπου ο θερμικός κινητήρας κινεί εξ'ολοκλήρου το όχημα, παρατηρείται ότι αυτός λειτουργεί σε υψηλότερα φορτία στην περίπτωση του υβριδικού σε σχέση με το συμβατικό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το υβριδικό όχημα ζυγίζει 100 κιλά περισσότερα σε σχέση με το αντίστοιχο συμβατικό λόγω της προσθήκης της μπαταρίας (3600 kg έναντι 3500 kg).

Κάτι ακόμα το οποίο αξίζει προσοχής είναι το γεγονός ότι λόγω της εφαρμογής της αναγεννητικής πέδησης, κατά τη διάρκεια του φρεναρίσματος σχεδόν ολόκληρη η κινητική ενέργεια απορροφάται από την ηλεκτρική γεννήτρια με αποτέλεσμα τα μηχανικά φρένα να χρησιμοποιούνται μόνο στις περιπτώσεις όπου το όχημα πρέπει να ακινητοποιηθεί. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι απο τα διαγράμματα προκύπτει ότι ο κινητήρας λειτουργεί κατά κύριο λόγο σε μέσα η χαμηλά φορτία, γεγονός το οποίο αποδίδεται στον μεγάλο κυβισμό του, εξ'ου και οι αρκετά χαμηλές πιέσεις (συμπιεστή, κυλίνδρου).

Πολύ σημαντικό μέρος της μελέτης αυτής αποτελεί ο υπολογισμός και η σύγκριση της κατανάλωσης καυσίμου των δύο αυτών τύπων οχήματος. Από τα Σχήματα 5.1 και 5.7 είναι εμφανής η μείωση στην παροχή του καυσίμου με τη χρήση του υβριδικού οχήματος, ιδιαίτερα σε περιοχές χαμηλών ταχυτήτων. Για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων, στον Πίνακα 5.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατανάλωση καυσίμου για κάθε όχημα (σε L/100 km) κατά την κίνηση εντός πόλης, εκτός πόλης καθώς και στον συνολικό «μικτό» κύκλο.

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα	22.16	13.57	16.48
Υβριδικό όχημα	13.13	12.15	12.48
Απόλυτη μεταβολή	-9.03	-1.42	-4
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-40.75**	**-10.44**	**-24.29**

Πίνακας 5.1: Μεταβολή της κατανάλωσης καυσίμου κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

Είναι λοιπόν προφανές ότι με τη χρήση ενός υβριδικού οχήματος μπορεί να επιτευχθεί πολύ σημαντική ελάττωση στην κατανάλωση καυσίμου, η οποία κατά την κίνηση εντός πόλης μπορεί να μειωθεί περίπου κατά το ήμισυ, γεγονός που καθιστά τέτοιου είδους οχήματα πολύ ελκυστικά και οικονομικά. Στην περίπτωση που το όχημα κινείται εκτός πόλης, η μείωση αυτή, αν και σημαντικά μικρότερη, δεν παύει να είναι ικανοποιητική.

Παρ'όλα αυτά, για την αποφυγή παρερμηνείας του αποτελέσματος πρέπει να σημειωθεί πως, λόγω του ότι επιλέχθηκε η μπαταρία να φορτίζεται μόνο κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της αναγεννητικής πέδησης, και όχι από τη Μ.Ε.Κ., μετά το πέρας της προσομοίωσης η στάθμη της μπαταρίας δεν επανήλθε στην αρχική της κατάσταση. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε και μία δεύτερη προσομοίωση, με αρχική στάθμη μπαταρίας την τελική της πρώτης προσομοίωσης, με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης αυτής της κατάστασης στην κατανάλωση καυσίμου και κατ'επέκταση στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, παρατηρήθηκε μια απόκλιση μεταξύ των δύο προσομοιώσεων της τάξης του 1%, επομένως δεν υπήρξε κάποια ιδιαίτερη μεταβολή. **Βέβαια, εάν επιθυμούσαμε η τελική στάθμη της μπαταρίας να επανερχόταν στο αρχικό της επίπεδο, ώστε να υπήρχε ταύτιση των αποτελεσμάτων σε κάθε προσομοίωση, θα προέκυπτε μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου στην περίπτωση του υβριδικού οχήματος.** Επομένως, οι διαφορές που αναφέρθηκαν προηγουμένως θα ήταν μειωμένες.

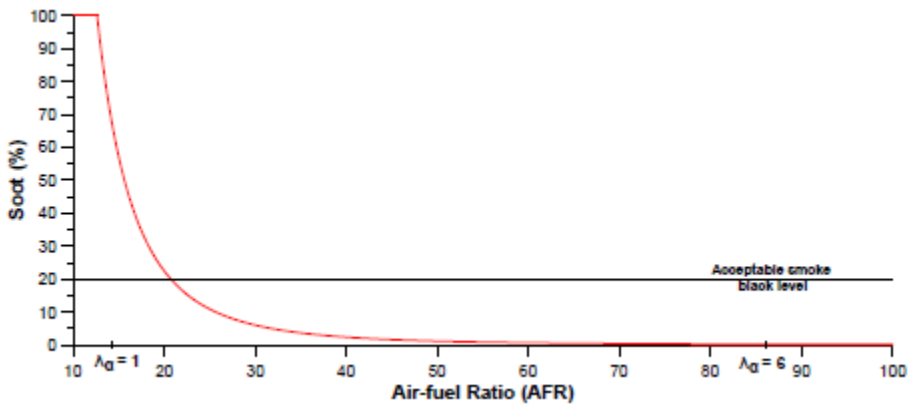
5.3 Εκπομπές καυσαερίων κινητήρα

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 CO_2 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 [10]:

$$\text{Soot (\%)} = 380190 * \text{AFR}^{(-3.25)} \tag{5.1}$$

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 5.15, στο οποίο επισημαίνονται οι τιμές της αιθάλης στις περιπτώσεις στοιχειομετρικού λόγου αέρα-καυσίμου (λ_α=1) και λειτουργίας με πτωχό μείγμα (λα=6), καθώς και το αποδεκτό όριο της αιθάλης, που ορίζεται για λόγο αέρα-καυσίμου μεγαλύτερο του 1.6.



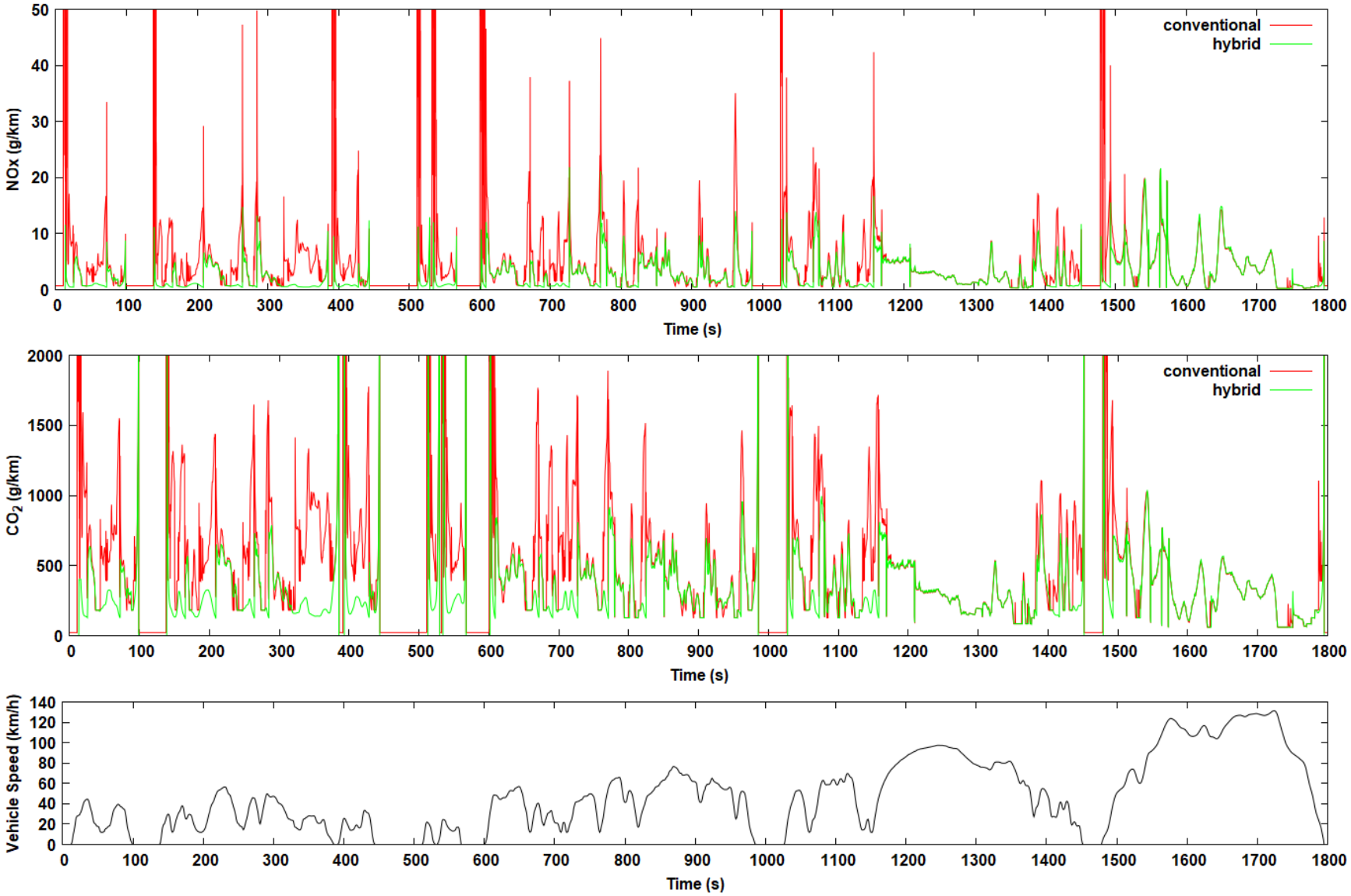
<u>Σχήμα 5.13</u>: Συσχέτιση εκπομπών αιθάλης (%) με την αναλογία αέρα καυσίμου (AFR).

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 λ_α=1 (AFR=14.33), το οποίο λόγω του φαινομένου της υστέρησης του στροβιλο-υπερπληρωτή είναι πολύ συχνά εμφανιζόμενο κατά τη μεταβατική λειτουργία κινητήρων Diesel.

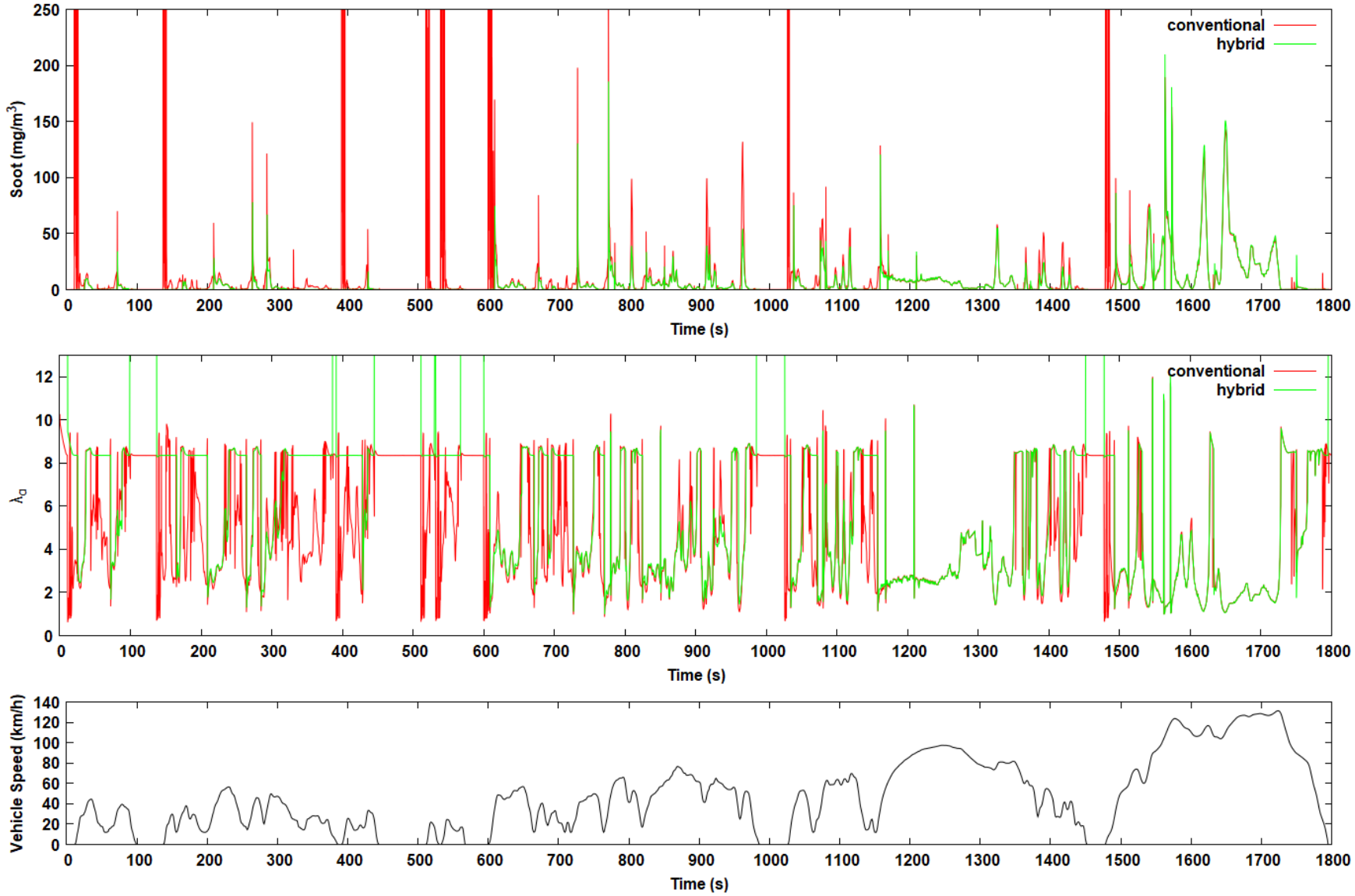
Είναι προφανές, όπως ισχύει άλλωστε και για τις εκπομπές των οξειδίων του αζώτου (NO_X), ότι τα αποτελέσματα της αιθάλης πρέπει να αντιμετωπιστούν όχι σε επίπεδο απόλυτων τιμών (αφού δεν έχει προηγηθεί κάποια διαδικασία ταιριάσματος πειραματικών με υπολογιστικά δεδομένα) αλλά σε επίπεδο «συγκριτικό» (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].

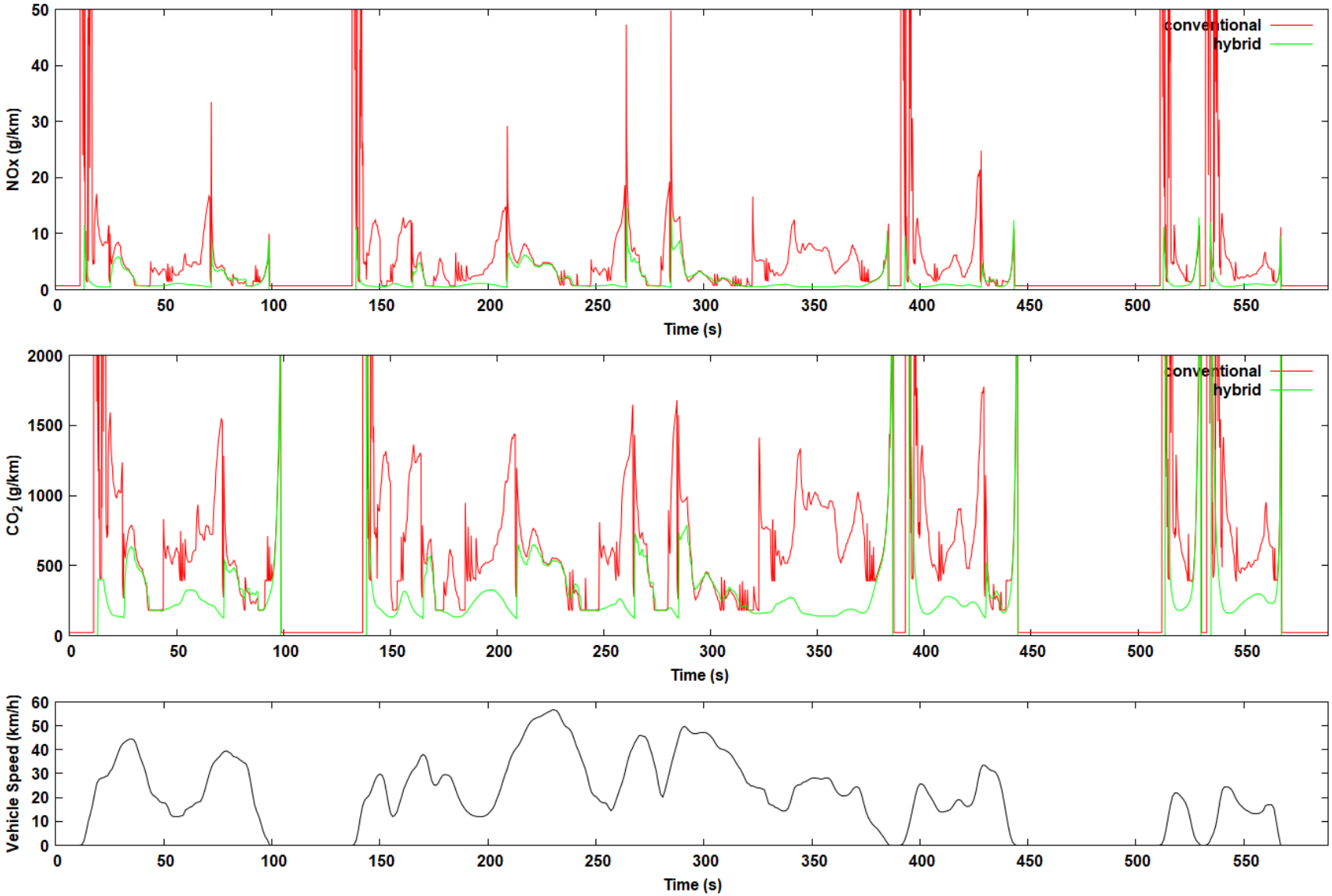
Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τις εκπομπές CO_2 και NO_X σε g/km, αιθάλης σε mg/m^3, και ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου, συνοδευόμενα πάντα από το αντίστοιχο διάγραμμα της ταχύτητας του οχήματος.



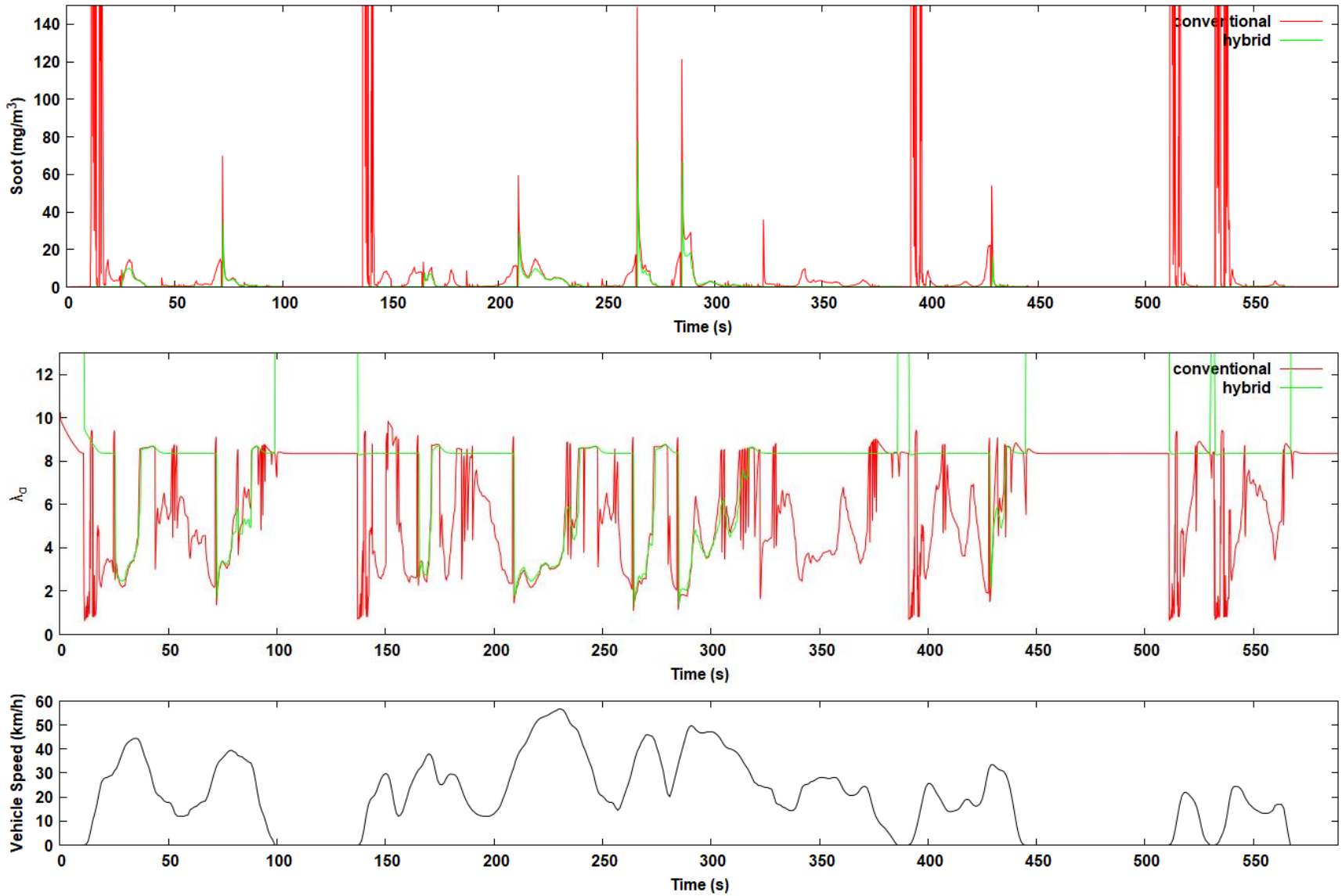
<u>Σχήμα 5.14</u>: Εκπομπές NO_X και CO_2 συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC.



<u>Σχήμα 5.15</u>: Εκπομπές αιθάλης και λόγος ισοδυναμίας αέρα καυσίμου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC.



<u>Σχήμα 5.16</u>: Εκπομπές NO_X και CO_2 συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 589 δευτερολέπτων του κύκλου πόλης WLTC.



<u>Σχήμα 5.17</u>: Εκπομπές αιθάλης και λόγος ισοδυναμίας αέρα καυσίμου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 589 δευτερολέπτων του κύκλου πόλης WLTC.

Για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων, στους Πίνακες 5.2 εως 5.4 που ακολουθούν παρουσιάζεται αναλυτικά η σύγκριση στις εκπομπές των καυσαερίων μεταξύ υβριδικού και συμβατικού οχήματος.

NO_X (g/km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα	5.44	4.83	5.17
Υβριδικό όχημα	2.52	3.69	3.12
Απόλυτη μεταβολή	-2.92	-1.14	-2.05
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-53.77**	**-23.67**	**-39.65**

Πίνακας 5.2: Μεταβολή των εκπομπών NO_X κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

CO_2 (g/km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα	595.12	364.46	442.79
Υβριδικό όχημα	352.60	326.41	335.22
Απόλυτη μεταβολή	-242.52	-38.05	-107.57
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-40.75**	**-10.44**	**-24.29**

Πίνακας 5.3: Μεταβολή των εκπομπών CO_2 κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

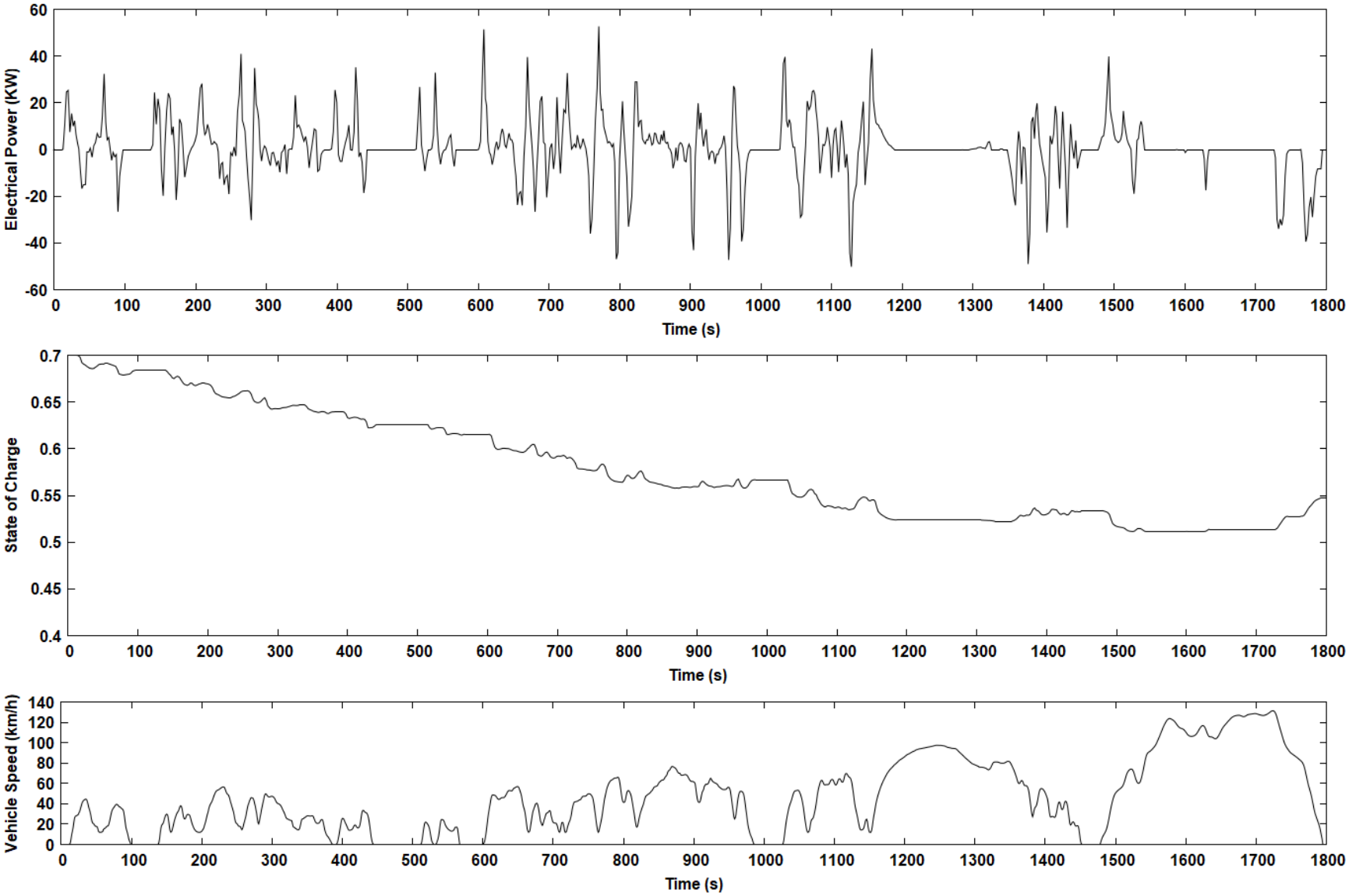
Αιθάλη (g/km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα	0.0517	0.0304	0.0377
Υβριδικό όχημα	0.0101	0.0234	0.0192
Απόλυτη μεταβολή	-0.0416	-0.0070	-0.0185
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-78.83**	**-23.12**	**-49.09**

Πίνακας 5.4: Μεταβολή των εκπομπών αιθάλης κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

Σύμφωνα με τα διαγράμματα αλλά και τους πίνακες που προηγήθηκαν είναι σαφές το πλεονέκτημα των υβριδικών οχημάτων έναντι των συμβατικών όσον αφορά τις εκπομπές καυσαερίων. Πιο συγκεκριμένα, από το διάγραμμα και των τριών εκπομπών παρατηρούμε ότι στο συμβατικό όχημα κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης, κυρίως στο εντός πόλης τμήμα, υπάρχουν σημαντικές υπερακοντίσεις στις τιμές αυτών, οι οποίες συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στην αύξηση της συνολικής μέσης τιμής. Αντίθετα, στην περίπτωση του υβριδικού, καθώς στις χαμηλές ταχύτητες λειτουργεί ο ηλεκτρικός κινητήρας απουσιάζουν τέτοιου είδους φαινόμενα, οδηγώντας έτσι σε χαμηλές εκπομπές. Παράλληλα, σχετικά με τα NO_X, παρατηρείται συνολική μείωση τους σε όλον τον κύκλο και λόγω του ότι σε ορισμένες περιπτώσεις αναπτύσσονται και μικρότερες θερμοκρασίες εντός του θαλάμου καύσης. Σχετικά με το CO_2, η σημαντική μείωση ήταν αναμενόμενη αφού, όπως παρουσιάστηκε και προηγουμένως, έχουμε μεγάλη μείωση στην κατανάλωση καυσίμου. Για τις εκπομπές αιθάλης παρατηρούμε ότι στο κομμάτι εντός πόλης παρατηρείται αξιοσημείωτη μείωση, η οποία φτάνει περίπου μέχρι το 80%, ενώ σε όλον το κύκλο οι εκπομπές μειώνονται κατά το ήμισυ, γεγονός που οφείλεται στις μικρότερες ποσότητες καυσίμου που εγχύονται μέσα στο θάλαμο καύσης, άρα και μεγαλύτερους λόγους αέρα-καυσίμου. Όσον αφορά και τις τρεις εκπομπές, στο τμήμα εκτός πόλης, αν και με μια αρχική επισκόπηση των διαγραμμάτων οι καμπύλες υβριδικού και συμβατικού οχήματος φαίνονται να είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πινάκων οι διαφορές είναι ιδιαίτερα σημαντικές και σε αυτό το κομμάτι εν τέλει.

5.4 Επιδόσεις των ηλεκτρικών μερών του υβριδικού συστήματος

Όπως αναφέρθηκε, ο ηλεκτροκινητήρας και η μπαταρία αποτελούν αναπόσπαστα κομμάτια ενός υβριδικού οχήματος οπότε είναι πολύ σημαντική η μελέτη της συμπεριφοράς τους. Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται η ισχύς που αποδίδει ή απορροφά η ηλεκτρική μηχανή, αναλόγως εάν λειτουργεί ως κινητήρας ή ως γεννήτρια αντίστοιχα, καθώς και η στάθμη της μπαταρίας. Υπενθυμίζεται ότι έχουν επιβληθεί όρια στη λειτουργία της μπαταρίας, με τη στάθμη να πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0.4-0.7. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι στο διάγραμμα τις ισχύος οι θετικές τιμές αφορούν τη λειτουργία της μηχανής ως κινητήρα ενώ οι αρνητικές τη λειτουργία ως γεννήτρια.



<u>Σχήμα 5.18</u>: Ισχύς της ηλεκτρικής μηχανής και στάθμη της μπαταρίας συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC.

Και από τα δύο διαγράμματα είναι εμφανής η μεγάλη χρήση του ηλεκτροκινητήρα στο τμήμα εντός πόλης όπου επικρατούν χαμηλές σχετικά ταχύτητες και άρα αναλαμβάνει είτε εξ'ολοκλήρου την κίνηση του οχήματος είτε σε ένα μεγάλο βαθμό. Παράλληλα, παρατηρείται και μια σταδιακή εξάντληση της μπαταρίας, η οποία όμως καθώς φορτίζεται μερικώς κατά τη διάρκεια της επιβράδυνσης καταφέρνει να βρίσκεται εντός των ζητούμενων ορίων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην υπάρχει ανάγκη φόρτισης της μπαταρίας από τη Μ.Ε.Κ., όπως συμβαίνει σε αρκετά υβριδικά οχήματα, γεγονός που οδηγεί σε ακόμα μικρότερη κατανάλωση καυσίμου. Από την άλλη, στο τμήμα εκτός πόλης, το οποίο χαρακτηρίζεται απο υψηλές ταχύτητες, ο ηλεκτροκινητήρας χρησιμοποιείται σπάνια, ειδικά μετά τα 1200 δευτερόλεπτα, αφού σε αυτήν την περίπτωση την κίνηση έχει αναλάβει κυρίως ο κινητήρας Diesel, με αποτέλεσμα και η μπαταρία να παραμένει σε σχετικά σταθερά επίπεδα.

5.5 Αποτελέσματα παραμετρικής μελέτης

Έπειτα από τη μελέτη που προηγήθηκε για τις ονομαστικές συνθήκες προσομοίωσης, ακολουθεί μια παραμετρική μελέτη όπου μεταβάλλεται κάθε φορά κάποιο βασικό μέγεθος, με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης αυτού κατά τη σύγκριση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών καυσαερίων (NO_X, CO_2, αιθάλης) μεταξύ υβριδικού και συμβατικού οχήματος. Πιο συγκεκριμένα, τα μεγέθη που μεταβάλλονται είναι:

- Η μέγιστη ισχύς του ηλεκτροκινητήρα
- Η μάζα του οχήματος, όπου όπως έχει αναφερθεί, στην περίπτωση του υβριδικού οχήματος υπάρχει μια επιπλέον αύξηση κατά 100 kg λόγω της χρήσης μπαταριών.
- Η μετωπική επιφάνεια του οχήματος

Αναλυτικά οι τιμές που επιλέχθηκαν για την παραμετρική μελέτη παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5 που ακολουθεί. Οι τιμές με έντονο χρώμα αποτελούν και τις ονομαστικές.

Ισχύς ηλεκτροκινητήρα (kW)	60	**100**	120
Μάζα οχήματος (Συμβατικό/Υβριδικό) (kg)	2500/2600	3000/3100	**3500/3600**
Μετωπική επιφάνεια (m^2)	2	2.5	**3**

Πίνακας 5.5: Επιλεγμένες τιμές των μεγεθών της παραμετρικής μελέτης.

5.5.1 Μεταβολή της (μέγιστης) ισχύος του ηλεκτροκινητήρα

Αρχικά, μελετάται η διαφορά στις εκπομπές καυσαερίων αλλά και στην κατανάλωση καυσίμου μεταξύ του συμβατικού και του υβριδικού οχήματος με μεταβολή στην τιμή της μέγιστης ισχύος του ηλεκτρικού μοτέρ. Στους Πίνακες 5.6 εως 5.9 και 5.10 εως 5.13 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι απόλυτες και οι ποσοστιαίες διαφορές σε περίπτωση που επιλεγεί ως μέγιστη ισχύς τα 60 kW και 120 kW αντίστοιχα. Παράλληλα, πρέπει να σημειωθεί ότι η μεταβολή στην ισχύ οδηγεί και σε αντίστοιχη μεταβολή της χρήσης του ηλεκτροκινητήρα κατά τη διάρκεια του κύκλου.

CO_2 (g/km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα	595.12	364.46	442.79
Υβριδικό όχημα με μέγιστη ηλεκτρική ισχύ 60 kW	365.96	329.72	341.73
Απόλυτη μεταβολή	-229.16	-34.74	-101.06
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-38.51**	**-9.53**	**-22.82**

Πίνακας 5.6: Μεταβολή των εκπομπών CO_2 κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

NO_X (g/km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα	5.44	4.83	5.17
Υβριδικό όχημα με μέγιστη ηλεκτρική ισχύ 60 kW	2.84	3.81	3.34
Απόλυτη μεταβολή	-2.60	-1.02	-1.83
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-47.75**	**-20.99**	**-35.31**

Πίνακας 5.7: Μεταβολή των εκπομπών NO_X κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

Αιθάλη (g/km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα	0.0517	0.0304	0.0377
Υβριδικό όχημα με μέγιστη ηλεκτρική ισχύ 60 kW	0.0429	0.0299	0.0344
Απόλυτη μεταβολή	-0.0088	-0.0005	-0.0033
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-17.05**	**-1.56**	**-8.78**

Πίνακας 5.8: Μεταβολή των εκπομπών αιθάλης κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα	22.16	13.57	16.48
Υβριδικό όχημα με μέγιστη ηλεκτρική ισχύ 60 kW	13.62	12.28	12.72
Απόλυτη μεταβολή	-8.54	-1.29	-3.76
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-38.51**	**-9.53**	**-22.82**

Πίνακας 5.9: Μεταβολή της κατανάλωσης καυσίμου κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

CO_2 (g/km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα	595.12	364.46	442.79
Υβριδικό όχημα με μέγιστη ηλεκτρική ισχύ 120 kW	313.45	315.71	314.93
Απόλυτη μεταβολή	-281.67	-48.75	-127.86
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-47.33**	**-13.38**	**-28.88**

Πίνακας 5.10: Μεταβολή των εκπομπών CO_2 κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

NO_X (g/km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα	5.44	4.83	5.17
Υβριδικό όχημα με μέγιστη ηλεκτρική ισχύ 120 kW	2.20	3.51	2.88
Απόλυτη μεταβολή	-2.24	-1.32	-2.29
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-59.61**	**-27.32**	**-44.19**

Πίνακας 5.11: Μεταβολή των εκπομπών NO_X κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

Αιθάλη (g/km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα	0.0517	0.0304	0.0377
Υβριδικό όχημα με μέγιστη ηλεκτρική ισχύ 120 kW	0.0110	0.0226	0.0186
Απόλυτη μεταβολή	-0.0417	-0.0078	-0.0191
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-78.79**	**-25.90**	**-50.56**

Πίνακας 5.12: Μεταβολή των εκπομπών αιθάλης κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα	22.16	13.57	16.48
Υβριδικό όχημα με μέγιστη ηλεκτρική ισχύ 120 kW	11.67	11.75	11.72
Απόλυτη μεταβολή	-10.49	-1.82	-4.76
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-47.33**	**-13.38**	**-28.88**

Πίνακας 5.13: Μεταβολή της κατανάλωσης καυσίμου κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

Συγκρίνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα με αυτά που προέκυψαν για τις ονομαστικές συνθήκες (μέγιστη ισχύς 100 kW), όπως αυτά παρουσιάστηκαν στους Πίνακες 5.1 εως 5.4, παρατηρείται οτι η μεταβολή στη μέγιστη ισχύ του ηλεκτροκινητήρα δεν προκαλεί σημαντικές μεταβολές στην κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές, αφού σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις οι μεταβολές ήταν μικρότερες του 5%. Παρ΄όλα αυτά, όπως αναμενόταν, καθώς αυξάνεται η ισχύς, άρα και η χρήση του ηλεκτροκινητήρα μέσα στον κύκλο, προκύπτει μια μείωση σε όλα τα παραπάνω εξεταζόμενα μεγέθη. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως στην περίπτωση των 60 KW, και όσον αφορά τις εκπομπές αιθάλης μόνο, δεν σημειώθηκε σημαντική μείωση μεταξύ υβριδικού και συμβατικού οχήματος.

5.5.2 Μεταβολή της μάζας του οχήματος

Στη συνέχεια, γίνεται διερεύνηση της επίδρασης της μεταβολής στη μάζα του οχήματος στη μείωση της κατανάλωσης (και άρα των εκπομπών CO_2) και των ρύπων. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, σε κάθε περίπτωση το υβριδικό όχημα είναι κατα 100 kg βαρύτερο του συμβατικού λόγω της προσθήκης των μπαταριών. Στους Πίνακες 5.14 έως 5.17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την περίπτωση που το όχημα έχει μάζα 2500 kg (2600 kg για το υβριδικό), ενώ στους Πίνακες 5.18 έως 5.21 για μάζα 3000 kg (3100 kg για το υβριδικό).

CO_2 (g/km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα μάζας 2500 kg	536.51	327.85	398.31
Υβριδικό όχημα μάζας 2600 kg	334.16	298.29	310.37
Απόλυτη μεταβολή	-202.35	-29.56	-87.94
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-37.72**	**-9.02**	**-22.08**

Πίνακας 5.14: Μεταβολή των εκπομπών CO_2 κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

NO_X (g/km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα μάζας 2500 kg	4.36	3.74	4.08
Υβριδικό όχημα μάζας 2600 kg	2.23	3.01	2.63
Απόλυτη μεταβολή	-2.13	-0.73	-1.45
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-48.78**	**-19.63**	**-35.56**

Πίνακας 5.15: Μεταβολή των εκπομπών NO_X κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

Αιθάλη (g/km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα μάζας 2500 kg	0.0350	0.0210	0.0258
Υβριδικό όχημα μάζας 2600 kg	0.0079	0.0171	0.0140
Απόλυτη μεταβολή	-0.0271	-0.0039	-0.0118
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-77.45**	**-18.70**	**-45.82**

Πίνακας 5.16: Μεταβολή των εκπομπών αιθάλης κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα μάζας 2500 kg	19.97	12.21	14.83
Υβριδικό όχημα μάζας 2600 kg	12.44	11.11	11.56
Απόλυτη μεταβολή	-7.53	-1.10	-3.27
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-37.72**	**-9.02**	**-22.08**

Πίνακας 5.17: Μεταβολή της κατανάλωσης καυσίμου κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

CO_2 (g/km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα μάζας 3000 kg	570.03	346.69	422.38
Υβριδικό όχημα μάζας 3100 kg	343.41	312.48	322.89
Απόλυτη μεταβολή	-226.62	-34.21	-99.49
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-39.76**	**-9.87**	**-23.55**

Πίνακας 5.18: Μεταβολή των εκπομπών CO_2 κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

NO_X (g/km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα μάζας 3000 kg	4.97	4.31	4.67
Υβριδικό όχημα μάζας 3100 kg	2.37	3.33	2.86
Απόλυτη μεταβολή	-2.60	-0.98	-1.81
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-52.35**	**-22.63**	**-38.71**

Πίνακας 5.19: Μεταβολή των εκπομπών NO_X κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

Αιθάλη (g/km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα μάζας 3000 kg	0.0432	0.0260	0.0318
Υβριδικό όχημα μάζας 3100 kg	0.0093	0.0202	0.0165
Απόλυτη μεταβολή	0.0339	0.0058	0.0153
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**78.43**	**22.45**	**48.25**

Πίνακας 5.20: Μεταβολή των εκπομπών αιθάλης κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα μάζας 3000 kg	21.22	12.91	15.73
Υβριδικό όχημα μάζας 3100 kg	12.79	11.63	12.02
Απόλυτη μεταβολή	-8.43	-1.28	-3.71
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-39.76**	**-9.87**	**-23.55**

Πίνακας 5.21: Μεταβολή της κατανάλωσης καυσίμου κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

Από τις δύο αυτές παραμετρικές μελέτες παρατηρούνται παρόμοια οφέλη στη χρήση του υβριδικού οχήματος, όσον αφορά την κατανάλωση και τις εκπομπές, με τα οφέλη που προέκυψαν από την μελέτη στις ονομαστικές συνθήκες (Πίνακες 5.1-5.4) για όχημα 3500 kg. Πιο συγκεκριμένα, οι διαφορές μεταξύ οχημάτων με μάζα 2500 kg και 3500 kg είναι κάτω του 5 %, ενώ μεταξύ 3000 kg και 3500 kg οι διαφορές κυμαίνονται γύρω από το 1%. Ωστόσο, το γενικό συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί, είναι ότι όσο βαρύτερο είναι το όχημα, τόσο μεγαλύτερα είναι και τα οφέλη της υβριδοποίησης.

5.5.3 Μεταβολή της μετωπικής επιφάνειας του οχήματος

Η τελευταία παραμετρική μελέτη αφορά τη μεταβολή στη μετωπική επιφάνεια του οχήματος. Οι περιπτώσεις που εξετάζονται είναι για μετωπική επιφάνεια οχήματος ίση με 2 m^2 και 2.5 m^2, με τα αποτελέσματα να απεικονίζονται στους Πίνακες 5.22-5.25 και 5.26-5.29 αντίστοιχα.

CO_2 (g/km)	0 – 1022 s (εντός πόλης)	1022 s – 1800 s (εκτός πόλης)	0 – 1800 s (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 2 m^2	590.13	339.25	424.44
Υβριδικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 2 m^2	349.23	302.68	318.36
Απόλυτη μεταβολή	-240.90	-36.57	-106.08
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-40.82**	**-10.78**	**-24.99**

Πίνακας 5.22: Μεταβολή των εκπομπών CO_2 κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

NO_X (g/km)	0 – 1022 s (εντός πόλης)	1022 s – 1800 s (εκτός πόλης)	0 – 1800 s (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 2m^2	5.36	4.41	4.93
Υβριδικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 2 m^2	2.48	3.31	2.91
Απόλυτη μεταβολή	-2.88	-1.10	-2.02
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-53.72**	**-24.86**	**-41.04**

Πίνακας 5.23: Μεταβολή των εκπομπών NO_X κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

Αιθάλη (g/km)	0 – 1022 s (εντός πόλης)	1022 s – 1800 s (εκτός πόλης)	0 – 1800 s (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 2 m^2	0.0501	0.0263	0.0344
Υβριδικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 2 m^2	0.0106	0.0195	0.0165
Απόλυτη μεταβολή	0.0395	0.0067	0.0179
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**78.80**	**25.69**	**51.99**

Πίνακας 5.24: Μεταβολή των εκπομπών αιθάλης κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 2 m^2	21.97	12.63	15.80
Υβριδικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 2 m^2	13.00	11.27	11.85
Απόλυτη μεταβολή	-8.97	-1.36	-3.95
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-40.82**	**-10.78**	**-24.99**

Πίνακας 5.25: Μεταβολή της κατανάλωσης καυσίμου κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

CO_2 (g/km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 2.5 m^2	592.94	351.76	433.65
Υβριδικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 2.5 m^2	350.91	314.39	326.70
Απόλυτη μεταβολή	-242.03	-37.37	-106.95
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-40.82**	**-10.62**	**-24.66**

Πίνακας 5.26: Μεταβολή των εκπομπών CO_2 κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

NO_X (g/km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 2.5 m^2	5.42	4.63	5.07
Υβριδικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 2.5 m^2	2.50	3.50	3.01
Απόλυτη μεταβολή	-2.92	-1.13	-2.06
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-53.98**	**-24.51**	**-40.61**

Πίνακας 5.27: Μεταβολή των εκπομπών NO_X κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

Αιθάλη (g/km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 2.5 m^2	0.0507	0.0283	0.0360
Υβριδικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 2.5 m^2	0.0107	0.0214	0.0177
Απόλυτη μεταβολή	0.0400	0.0069	0.0183
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**78.94**	**24.43**	**50.59**

Πίνακας 5.28: Μεταβολή των εκπομπών αιθάλης κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	**0 – 1022 s** (εντός πόλης)	**1022 s – 1800 s** (εκτός πόλης)	**0 – 1800 s** (μικτός κύκλος)
Συμβατικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 2.5 m^2	22.08	13.01	16.14
Υβριδικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 2.5 m^2	13.06	11.70	12.16
Απόλυτη μεταβολή	-9.01	-1.39	-3.98
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	**-40.82**	**-10.62**	**-24.66**

Πίνακας 5.29: Μεταβολή της κατανάλωσης καυσίμου κατά τη διάρκεια του κύκλου WLTC.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν, και συγκρίνοντας τα με αυτά των ονομαστικών συνθηκών (Πίνακες 5.1-5.3), δεν παρατηρείται κάποια ουσιαστική επίδραση της μετωπικής επιφάνειας του οχήματος στα οφέλη του υβριδικού οχήματος έναντι του συμβατικού, αφού οι διαφορές που υπολογίστηκαν είναι της τάξεως του 1%. Παρ’ όλα αυτά, το γενικό συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι ότι όσο μειώνεται η επιφάνεια, τόσο μεγαλώνουν οι διαφορές μεταξύ αυτών.

5.6 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εξετάστηκαν τα οφέλη της χρήσης ενός πλήρως υβριδικού οχήματος έναντι ενός συμβατικού οχήματος με κινητήρα Diesel, μέσω της σύγκρισης τόσο των επιδόσεων όσο και των εκπομπών (CO_2, NO_X, αιθάλη) του εκάστοτε οχήματος.

Από την ανάλυση που προηγήθηκε αλλά και τα αποτελέσματα που προέκυψαν, είναι φανερή η θετική επίδραση της χρησιμοποίησης ενός ηλεκτρικού κινητήρα είτε για την κατ'αποκλειστικότητα κίνηση του οχήματος, είτε για την υποβοήθηση αυτής. Πιο συγκεκριμένα, στις περιοχές χαμηλών ταχυτήτων, ο θερμικός κινητήρας δε λειτουργεί στον υψηλότερο δυνατό βαθμό απόδοσης, συνεπώς η κίνηση μόνο μέσω του ηλεκτροκινητήρα στα σημεία αυτά αποδείχθηκε ιδιαίτερα ωφέλιμη. Ως αποτέλεσμα, εντός πόλης η μείωση στην κατανάλωση καυσίμου προέκυψε ίση με 40 %, ενώ σε ολόκληρο τον κύκλο ίση με 25 % (χωρίς επαναφορά της μπαταρίας στο αρχικό επίπεδο φόρτισης), νούμερα που καθιστούν ένα υβριδικό όχημα ιδιαίτερα ελκυστικό για τον καταναλωτή και ταυτόχρονα πιο φιλικό για το περιβάλλον.

Παράλληλα, μπορεί να επιτευχθεί και μείωση στις εκπομπές καυσαερίων, λόγω και των αυστηρότερων μέτρων που τίθενται συνεχώς από τη νομοθεσία. Τόσο για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα όσο και για τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου, παρατηρήθηκε μία πολύ σημαντική μείωση, ειδικά στο κομμάτι εντός πόλης. Η πιο αξιοσημείωτη διαφορά ωστόσο αφορά τις εκπομπές αιθάλης, οι οποίες μειώθηκαν κατά το ήμισυ σε όλον τον κύκλο, και 80 % εντός πόλης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη λειτουργία του κινητήρα με μεγαλύτερο λόγο αέρα καυσίμου καθώς και στην αποφυγή υπερακοντίσεων των εκπομπών αιθάλης κατά την επιτάχυνση του οχήματος.

Επιπλέον, έγινε περισσότερο κατανοητό άλλο ένα πολύ σημαντικό όφελος των υβριδικών οχημάτων, το οποίο είναι η τεχνολογία της αναγεννητικής πέδησης. Ειδικότερα, είδαμε την ηλεκτρική μονάδα ισχύος, λειτουργώντας ως γεννήτρια κατά τη διάρκεια του φρεναρίσματος, να απορροφά την ενέργεια και να επιβραδύνει το όχημα, ενώ ταυτόχρονα φορτίζει και τη μπαταρία. Από την άλλη πλευρά, τα μηχανικά φρένα χρησιμοποιούνται μόνο όταν το όχημα πρέπει να ακινητοποιηθεί, και έτσι επιτυγχάνεται αισθητή μείωση στην καταπόνηση του συστήματος πέδησης.

Τέλος, από την παραμετρική μελέτη που προηγήθηκε μπορεί να εξαχθεί ένα γενικό συμπέρασμα ότι η υβριδοποίηση των οχημάτων παρουσιάζει πολύ σημαντικά οφέλη ανεξάρτητα από τον τύπο και το μέγεθος του οχήματος. Επομένως, μοιάζει αρκετά συμφέρουσα η εφαρμογή των υβριδικών συστημάτων και σε μεγαλύτερα οχήματα, εκτός από τα επιβατηγά, όπου συναντάται κατά κύριο λόγο σήμερα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1) Κ.Δ. Ρακόπουλος (2013) «Μηχανές Εσωτερικής Καύσης 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, Switzerland.

6) Ε.Γ. Γιακουμής, (2015) «Προδιαγραφές Καυσαερίων και Κύκλοι Δοκιμής Εμβολοφόρων ΜΕΚ», Ε.Μ.Π., Αθήνα.

7) Χ. Μπαχτής (2018) «Μελέτη επιδόσεων και εκπομπών ρύπων ελαφρού πετρελαιοκίνητου φορτηγού με ηλεκτρικά υποβοηθούμενη στροβιλο-υπερπλήρωση κατά τη διάρκεια του Παγκοσμίου Κύκλου Πόλης WLTC», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., (επιβλέπων: Ε.Γ. Γιακουμής).

8) 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).

9) 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).

10) 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).

11) Gamma Technologies, Inc., «GT-Suite Engine Performance Tutorials, Version 7.4».

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

14) Steven H. Homologation test cycles worldwide—status of the WLTP. Green global NCAP labelling/green scoring Workshop, Apr, 2013.

15) 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.

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

17) M. Sh. Asfoor, A. M. Sharaf, and S. Beyerlein, USE OF GT-SUITE TO STUDY PERFORMANCE DIFFERENCES BETWEEN INTERNAL COMBUSTION ENGINE (ICE) AND HYBRID ELECTRIC VEHICLE (HEV) POWERTRAINS, 16th International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering, Cairo,Egypt (2014)

18) Δ. Κουλοχέρης (2016) «Σημειώσεις για το μάθημα 'Θεωρία τροχοφόρων οχημάτων', Μέρος Β: Ηλεκτροκίνητα Οχήματα», Ε.Μ.Π., Αθήνα

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