



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη υβριδικού-ηλεκτρικού οχήματος βαρέος τύπου κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WTCV - Σύγκριση επιδόσεων και εκπομπών με συμβατικό όχημα»



ΙΩΑΝΝΗΣ ΜΑΝΤΑΣ

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

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2022

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Ευάγγελο Γιακουμή, για την δυνατότητα που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα τόσο επίκαιρο και ενδιαφέρον θέμα, καθώς και για τον χρόνο που αφιέρωσε για την καθοδήγηση μου, καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δημήτριο Χουντάλα, Καθηγητή του Ε.Μ.Π., για το γνωστικό υπόβαθρο που απέκτησα κατά την διάρκεια της συνδιδασκαλίας του στα μαθήματα σχετικά με τις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης, το οποίο με ώθησε στην περαιτέρω ενασχόληση μου με το συγκεκριμένο αντικείμενο.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου και την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση και κατανόηση που μου παρείχαν κατά την διάρκεια των φοιτητικών μου σπουδών.

Περιεχόμενα

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
ABSTRACT	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Υβριδικά Βαρέα Οχήματα	9
1.1 Λειτουργικό προφίλ βαρέων οχημάτων.....	9
1.2 Ορισμός υβριδικού οχήματος	11
1.3 Ιστορική αναδρομή.....	11
1.4 Βαθμός υβριδοποίησης.....	13
1.4.1 Μίκρο-υβριδικά (Micro-HEV)	13
1.4.2 Ήπια υβριδικά (Mild HEV)	14
1.4.3 Πλήρως υβριδικά (Full HEV)	14
1.4.4 Υβριδικά με σύστημα εξωτερικής φόρτισης (Plug-in HEV)	14
1.5 Συστήματα μετάδοσης ισχύος πλήρως υβριδικού οχήματος	15
1.5.1 Σύστημα μετάδοσης ισχύος συμβατικού οχήματος.....	16
1.5.2 Σειριακό σύστημα μετάδοσης ισχύος υβριδικού οχήματος	16
1.5.3 Παράλληλο σύστημα μετάδοσης ισχύος υβριδικού οχήματος	17
1.5.4 Συνδυαστικό σύστημα μετάδοσης ισχύος υβριδικού οχήματος	19
1.6 Ενσωματωμένα υποσυστήματα υβριδικών οχημάτων	20
1.6.1 Σύστημα «Start-Stop».....	20
1.6.2 Σύστημα «Regenerative Braking».....	21
1.7 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις υβριδικών βαρέων οχημάτων	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Σχηματισμός και Εκπομπή Ρύπων από Κινητήρες Diesel	24
2.1 Γενικά.....	24
2.2 Σχηματισμός των οξειδίων του αζώτου NOx.....	25
2.3 Σχηματισμός του μονοξειδίου του αζώτου (NO) εντός του θαλάμου καύσεως κινητήρων Diesel	26
2.3.1 Γενική περιγραφή	26
2.3.2 Επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας του κινητήρα Diesel στην τιμή του NO	26
2.4 Εκπομπή μικροσωματιδίων από κινητήρες Diesel.....	27
2.4.1 Γενικά.....	27
2.4.2 Κατανομή μεγέθους μικροσωματιδίων.....	30

2.5 Συμπεριφορά εκπομπών καυσαερίων κατά την μεταβατική λειτουργία στρόβιλο-υπερπληρωμένων κινητήρων Diesel	32
2.6 Συσχέτιση κατανάλωσης καυσίμου και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα CO ₂	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Μεταβατικοί Κύκλοι Πόλης	37
3.1 Εισαγωγή	37
3.2 Δυναμόμετρα.....	39
3.3 Μεθοδολογία μετρήσεως εκπομπών ρύπων κατά την διάρκεια μεταβατικών κύκλων πόλης	41
3.4 Μεταβατικός κύκλος WTVc βαρέων οχημάτων.....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Μοντελοποίηση Υβριδικού Οχήματος βαρέος τύπου μέσω του Λογισμικού GT-SUITE	47
4.1 Γνωριμία με το λογισμικό GT-Suite	47
4.2 Περιβάλλον εργασίας GT-Power	48
4.3 Κατασκευή μοντέλου ενός υβριδικού οχήματος βαρέος τύπου σε περιβάλλον GT-Power..	50
4.3.1 Δημιουργία μοντέλου κινητήρα Diesel	50
4.3.2 Μοντελοποίηση οχήματος βαρέος τύπου και συστήματος μετάδοσης κίνησης-ισχύος στο περιβάλλον του GT-Power	51
4.3.3 Δημιουργία μοντέλου πλήρως υβριδικού οχήματος βαρέος τύπου	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Επιδόσεις και Εκπομπές Καυσαερίων Υβριδικού Οχήματος Βαρέος Τύπου – Σύγκριση με Συμβατικό Όχημα	68
5.1 Περιγραφή	68
5.2 Επιδόσεις του κινητήρα Diesel	69
5.3 Σχολιασμός επιδόσεων – Σύγκριση κατανάλωσης καυσίμου	82
5.4 Εκπομπές καυσαερίων κινητήρα.....	84
5.5 Σχολιασμός και σύγκριση εκπομπών καυσαερίων	90
5.6 Επιδόσεις των ηλεκτρικών τμημάτων του υβριδικού συστήματος	92
5.7 Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης	95
5.7.1 Μεταβολή της συνολικής μάζας φορτίου-τρέιλερ.....	96
5.7.2 Μεταβολή της (μέγιστης) ισχύος του ηλεκτρικού μοτέρ	99
5.7.3 Μεταβολή της μετωπικής επιφάνειας του οχήματος	102
5.7.4 Επίδραση συνθηκών βρεγμένου οδοστρώματος.....	106
5.8 Συμπεράσματα	108
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	110

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Μέγεθος	Επεξήγηση	Μονάδες
A_f	Μετωπική επιφάνεια οχήματος	m^2
C_d	Συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης οχήματος	-
$C_{emission}$	Συγκέντρωση εκπομπής	ppm
D	Διάμετρος εμβόλου	m
D_p	Διάμετρος σωματιδίων	m
G_v	Ροπή αδράνειας οχήματος	$kg \cdot m^2$
i_b	Σχέση μετάδοσης διαφορικού	-
i_g	Σχέση μετάδοσης κιβωτίου ταχυτήτων	-
L	Μήκος διωστήρα	m
m_c	Μάζα φορτίου και τρέιλερ	t
m_v	Μάζα οχήματος	t
$MW_{exhaustgas}$	Μοριακό βάρος καυσαερίων	kg/kmol
$MW_{emission}$	Μοριακό βάρος εκπομπής	kg/kmol
$\dot{m}_{exhaustgas}$	Παροχή μάζας καυσαερίων	g/h
\dot{m}_{fuel}	Παροχή μάζας καυσίμου	kg/h
$\dot{m}_{emission}$	Παροχή μάζας εκπομπής	g/h
N	Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα	rpm
N_A	Ταχύτητα περιστροφής τροχού	rpm
N_C	Σχετική ταχύτητα περιστροφής συμπλέκτη	rpm
N_s	Ταχύτητα περιστροφής άξονα μετάδοσης κίνησης	rpm
r	Ακτίνα στροφάλου	m
r_{wheel}	Ακτίνα τροχού	m
s	Διαδρομή εμβόλου	m
V	Ταχύτητα οχήματος	km/h
V_h	Όγκος εμβολισμού	cm^3
V_H	Συνολικός Όγκος εμβολισμού	cm^3
z	Αριθμός κυλίνδρων	-
ϵ	Βαθμός συμπίεσης	-
η_{gear}	Συνολικός βαθμός απόδοσης συστήματος μετάδοσης κίνησης	-
λ_α	Λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου	-
ρ	Πυκνότητα	kg/m^3

τ	Ροπή	Nm
ϕ	Γωνία στροφάλου	°
Φ	Λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα	-
AFR	Λόγος αέρα-καυσίμου (Air-fuel ratio)	
BMEP	Μέση πραγματική πίεση (Brake mean effective pressure)	
BSFC	Ειδική κατανάλωση καυσίμου (Brake specific fuel consumption)	
CO₂	Διοξείδιο του άνθρακα (Carbon dioxide)	
CO	Μονοξείδιο του άνθρακα (Carbon monoxide)	
CVS	Δειγματοληψία σταθερού όγκου (Constant volume sampling)	
DI	Άμεση έγχυση (Direct injection)	
EGR	Ανακυκλοφορία καυσαερίων (Exhaust gas recirculation)	
FTP	Ομοσπονδιακή Διαδικασία Δοκιμής – Η.Π.Α. (Federal Test Procedure)	
GRPE	Ομάδα Ειδικών για την Μόλυνση και την Ενέργεια (Group of Rapporteurs on Pollution and Energy)	
HC	Υδρογονάνθρακες (Hydrocarbons)	
HEV	Υβριδικό ηλεκτρικό όχημα (Hybrid Electric Vehicle)	
NEDC	Νέος Ευρωπαϊκός Κύκλος Οχημάτων (New European Driving Cycle)	
NRTC	Μεταβατικός Κύκλος Οχημάτων εκτός Δρόμου (Nonroad Transient Cycle)	
NO_x	Οξειδία του αζώτου (Oxides of nitrogen)	
NO	Μονοξείδιο του αζώτου (Nitric oxide)	
SOC	Στάθμη μπαταρίας (State of charge)	
WHSC	Παγκόσμιος Εναρμονισμένος Κύκλος Μόνιμης Λειτουργίας (Worldwide Harmonized Stationary Cycle)	
WHTC	Παγκόσμιος Εναρμονισμένος Μεταβατικός Κύκλος (Worldwide Harmonized Transient Cycle)	
WHVC	Παγκόσμιος Εναρμονισμένος Κύκλος Οχημάτων (Worldwide Harmonized Vehicle Cycle)	
WTVC	Παγκόσμιος Μεταβατικός Κύκλος Οχημάτων (Worldwide Transient Vehicle Cycle)	
MEK	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης	
4-X	Τετράχρονος	

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα συνεχώς αυστηρότερα επιβαλλόμενα όρια των εκπομπών τόσο στα επιβατικά οχήματα, όσο και σε οχήματα βαρέος τύπου, οδηγούν τους κατασκευαστές στην εξεύρεση νέων μεθόδων και στην περαιτέρω ανάπτυξη των ήδη υπαρχόντων. Μέθοδοι που ήδη χρησιμοποιούνται, όπως η μείωση του κυβισμού με ταυτόχρονη χρήση υπερπλήρωσης (downsizing), η άμεση έγχυση σε βενζινοκινητήρες (GDI) και ανακυκλοφορία των καυσαερίων (EGR), χαρακτηρίζονται πλέον ως οριακά επαρκείς για τα τωρινά όρια εκπεμπόμενων ρύπων και, κυρίως, CO₂, τα οποία πρόκειται να αυστηροποιηθούν περισσότερο τα επόμενα χρόνια. Στις μέρες μας, η υβριδοποίηση των επιβατικών οχημάτων θεωρείται ως ο ακρογωνιαίος λίθος για την καταπολέμηση των εκπεμπόμενων ρύπων και της κατανάλωσης καυσίμου. Μέσω της υβριδοποίησης, γίνεται χρήση ενός ηλεκτρικού μοτέρ με λειτουργία σε χαμηλά φορτία (συχνές επιταχύνσεις-επιβραδύνσεις), σε συνδυασμό ακόμη με υποσυστήματα όπως το σύστημα «start-stop» και το σύστημα της αναγεννητικής πέδησης, επιτυγχάνοντας συνεπώς, κυρίως σε συνθήκες πόλης, την μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών καυσαερίων. Ωστόσο, στα οχήματα βαρέος τύπου η υβριδοποίηση παραμένει ακόμη σε αρχικό στάδιο, με ελάχιστες εφαρμογές, επομένως γίνεται αντιληπτό πως η περαιτέρω μελέτη της φαντάζει αρκετά ενδιαφέρουσα.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την ανάλυση ενός πλήρως υβριδικού οχήματος βαρέος τύπου και την μετέπειτα σύγκρισή του με ένα αντίστοιχο συμβατικό όχημα ως προς τις επιδόσεις και τις εκπομπές τους. Το συμβατικό όχημα διαθέτει έναν στρόβιλο-υπερπληρωμένο εξακύλινδρο κινητήρα Diesel, και αναπτύχθηκε κατά την εκπόνηση παλαιότερης διπλωματικής εργασίας [6]. Με χρήση του υπολογιστικού πακέτου GT-Power (Gamma Technologies, Inc) πραγματοποιείται η μοντελοποίηση του οχήματος, του κινητήρα Diesel, καθώς και όλων των ηλεκτρικών μερών που είναι αναγκαία για την υβριδοποίηση του οχήματος. Η ανάλυση αυτή πραγματοποιείται κατά την διάρκεια του παγκόσμιου μεταβατικού κύκλου πόλης WTVC (κύκλος οχήματος), ο οποίος αποτέλεσε την βάση για την ανάπτυξη των θεσμοθετημένων κύκλων πιστοποίησης κινητήρων βαρέων οχημάτων (WHTC, WHSC). Η μελέτη επικεντρώνεται κυρίως στην κατανάλωση καυσίμου και στην εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), ωστόσο επεκτείνεται και στους δύο βασικότερους ρύπους των κινητήρων Diesel, τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και την αιθάλη (soot).

ABSTRACT

The increasingly stricter inflicted emission limits on both passenger cars and heavy-duty vehicles are leading manufacturers to finding new methods and further developing existing ones. Methods already in use, such as the downsizing of the internal combustion engines, the implementation of direct injection in gasoline engines (GDI) and the engine's exhaust gas recirculation (EGR), are now considered to be marginally sufficient for current emissions limits, which are going to tighten in the upcoming years. Nowadays, passenger car hybridization is considered to be the cornerstone of combating emissions and fuel consumption. Through hybridization, an electric motor is more commonly used in the low-efficiency range of internal combustion engines, which is running at low loads with frequent accelerations-decelerations, in combination with subsystems such as the start-stop system and regenerative braking system, achieving therefore, mainly in city conditions, the reduction of fuel consumption and exhaust emissions. However, in heavy-duty vehicles, hybridization is still in its infancy, with minimal applications, so it is perceivable that its further study seems quite interesting.

The present diploma thesis deals with the analysis of a fully hybrid heavy-duty vehicle and its subsequent comparison with a corresponding conventional heavy-duty vehicle in terms of their performance and emissions. The conventional vehicle has a turbocharged six-cylinder Diesel engine and has been developed during an earlier diploma thesis [6]. Using the GT-Power computational software (Gamma Technologies, Inc), modelling of the vehicle, the Diesel engine, as well as all the electrical parts necessary for the hybridization of the vehicle, is accomplished. This analysis takes place during the worldwide transient driving cycle WTV, which formed the basis for the development of other institutionalized heavy-duty certification engine cycles (WHTC, WHSC). The study focuses mainly on fuel consumption and carbon dioxide (CO₂) emissions, but it also expands to the two main pollutants of Diesel engines, namely nitrogen oxides (NO_x) and soot.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Υβριδικά Βαρέα Οχήματα

1.1 Λειτουργικό προφίλ βαρέων οχημάτων

Τα οχήματα βαρέος τύπου (Heavy-Duty Vehicles) αποτελούν αυτοκινούμενα οχήματα σχεδιασμένα για εφαρμογές όπως η μεταφορά φορτίων-εμπορευμάτων μεγάλου βάρους ή εξειδικευμένων φορτίων/ουσιών, η εκτέλεση πρακτικών εργασιών απαραίτητες στην βιομηχανία και η μετακίνηση μεγάλου πλήθους επιβατών σε συγκεκριμένες διαδρομές. Ανάλογα με την εφαρμογή κάθε οχήματος, αλλάζουν ορισμένες παράμετροι του οχήματος (π.χ. το μέγεθος, η μάζα, η μέση ισχύς και το σχήμα), ωστόσο η συντριπτική πλειοψηφία διαθέτει κατασκευή αμαξώματος πάνω στο πλαίσιο (καμπίνα), ανεξάρτητη από το φορτίο το οποίο μεταφέρει. Ακόμη, σε αρκετά βαρέα οχήματα πλαισιώνεται ειδικός εξοπλισμός για την εκάστοτε λειτουργία, π.χ. στην περίπτωση απορριμματοφόρων, πυροσβεστικών οχημάτων, μπετονιερών και εκσκαφών.

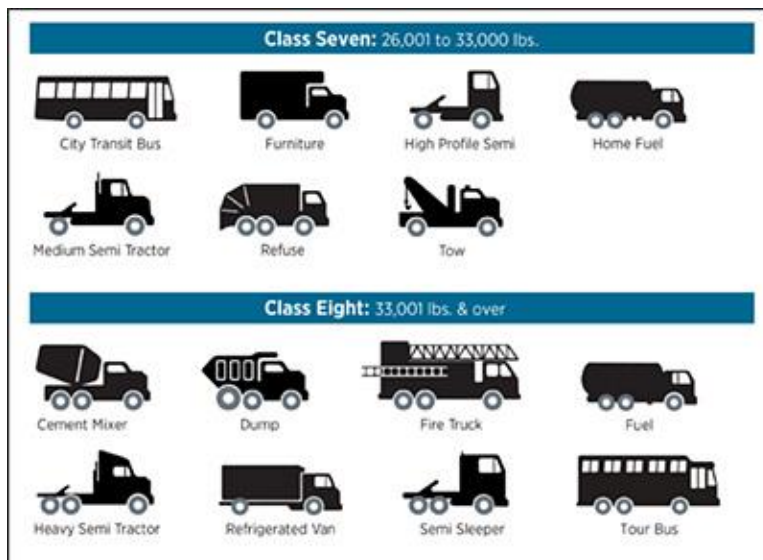
Η κύρια κατηγοριοποίηση των οχημάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση, βασίζεται στην χρήση του κάθε οχήματος καθώς και στο μέγεθος που διαθέτει. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν οι εξής τέσσερις γενικές κατηγορίες οχημάτων που ισχύουν σε κάθε χώρα της Ευρώπης:

- Κατηγορία M, η οποία περιλαμβάνει οχήματα που μεταφέρουν επιβάτες
- Κατηγορία N, η οποία αποτελείται από οχήματα που μεταφέρουν αγαθά
- Κατηγορία L, στην οποία εντάσσονται κυρίως μοτοποδήλατα, τρίκυκλα και δίκυκλα οχήματα
- Κατηγορία T, όπου περιλαμβάνονται γεωργικά και δασοκομικά οχήματα

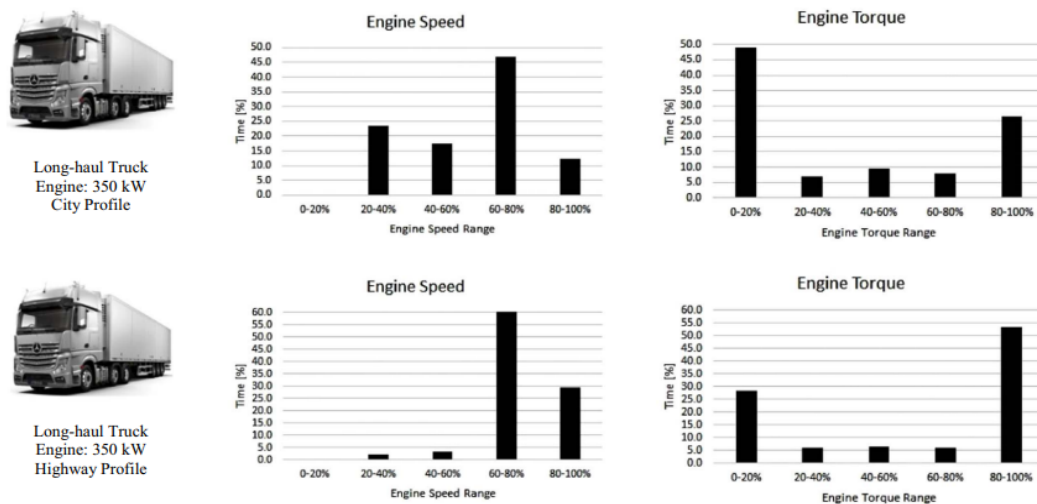
Τα οχήματα των κατηγοριών M και N, ταξινομούνται είτε ως ελαφρού τύπου (π.χ. επιβατικά οχήματα και φορτηγάκια μικρού μεγέθους) είτε ως βαρέος τύπου (π.χ. φορτηγά μεγάλου μεγέθους, λεωφορεία, βιομηχανικά οχήματα κλπ). Κάθε κατηγορία από τις τέσσερις προαναφερθείσες, διαχωρίζεται περαιτέρω ανάλογα είτε με το μεικτό βάρος του οχήματος είτε άλλων επιπρόσθετων χαρακτηριστικών κάθε κατηγορίας (θέσεις επιβατών, μέγιστη ταχύτητα και μέγιστη ισχύς οχήματος). Μερικά τυπικά παραδείγματα οχημάτων βαρέος τύπου (τόσο για τις Η.Π.Α. όσο και για την Ε.Ε.) παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.1.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει στην παρούσα διπλωματική εργασία, το βαρέος τύπου όχημα μεγάλων αποστάσεων (long-haul truck), το οποίο χρησιμοποιείται για μεταφορά αγαθών έχοντας προσαρτημένο στο πλαίσιό του ένα τρέιλερ κατά την διάρκεια των ταξιδιών του, που περιέχει το μεταφερόμενο φορτίο. Όπως γίνεται κατανοητό, το παρόν όχημα κινείται κυρίως σε αυτοκινητοδρόμους και επαρχιακούς δρόμους, ενώ σε

μικρότερο ποσοστό κινείται εντός αστικών συνθηκών κυκλοφορίας. Το εύρος της ταχύτητας στρωφών του κινητήρα και της παραγόμενης ροπής του κινητήρα, κατά την διάρκεια συνθηκών αυτοκινητοδρόμου και αστικών συνθηκών, παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2. Σε συνθήκες αυτοκινητοδρόμου, η Μ.Ε.Κ. ενός οχήματος λειτουργεί με μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης καθώς οι τιμές των ταχυτήτων του οχήματος είναι σχετικά υψηλές και σταθερές, σε αντίθεση με τις αστικές συνθήκες όπου οι συνεχώς μεταβαλλόμενες και χαμηλές τιμές ταχυτήτων οδηγούν σε βαθμό απόδοσης υποδεέστερο.



Σχήμα 1.1: Παραδείγματα οχημάτων βαρέος τύπου



Σχήμα 1.2: Προφίλ λειτουργίας κινητήρα οχήματος βαρέος τύπου κατά την κίνηση σε αυτοκινητόδρομο και εντός πόλης [18]

1.2 Ορισμός υβριδικού οχήματος

Με τον όρο υβριδικό, χαρακτηρίζεται το όχημα το οποίο διαθέτει τουλάχιστον δύο πηγές ισχύος που χρησιμοποιούνται προκειμένου να επιτευχθεί η κίνηση του οχήματος. Βασική αρχή που διέπει τον τρόπο με τον οποίο συνεργάζονται οι πηγές ισχύος για την πρόσδοση της απαραίτητης ενέργειας στο όχημα, είναι πως κάθε πηγή σε συγκεκριμένο εύρος λειτουργίας του οχήματος λειτουργεί αποδοτικότερα, δηλαδή με τον υψηλότερο δυνατό βαθμό απόδοσής της. Συνεπώς, η χρήση κάθε πηγής στο βέλτιστο εύρος λειτουργίας της, βοηθά στην συνολική εξοικονόμηση ενέργειας του οχήματος, καλύπτοντας παράλληλα κάθε ανάγκη ισχύος του. Τα οχήματα στα οποία έχουν εφαρμοστεί υβριδικές τεχνολογίες ποικίλλουν, καθώς εδώ και αρκετά χρόνια ορισμένα τρένα, υποβρύχια (εξ ορισμού) και πλοία χρησιμοποιούν θερμικούς κινητήρες Diesel και ηλεκτροκινητήρες για τις ανάγκες ισχύος τους.

Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων για το κομμάτι της αυτοκίνησης, οι πηγές ισχύος αποτελούνται από μία Μηχανή Εσωτερικής Καύσης (Μ.Ε.Κ.) και μία πιο φιλική τεχνολογία προς το περιβάλλον όπως ένας ηλεκτροκινητήρας, ο οποίος αντλεί την ηλεκτρική ενέργειά του από συστοιχία μπαταριών του οχήματος. Τα οχήματα που συγκαταλέγονται στην κατηγορία αυτή, συνδυασμού Μ.Ε.Κ. και ηλεκτρικής πηγής ισχύος, χαρακτηρίζονται ως υβριδικά-ηλεκτρικά οχήματα (HEV).

1.3 Ιστορική αναδρομή

Το πρώτο υβριδικό όχημα, κατασκευάστηκε στις αρχές του 1900 από τον Ferdinand Porsche και έφερε την ονομασία «**Lohner-Porsche Mixed Hybrid**» (Σχήμα 1.3). Το σύστημα ισχύος του συγκεκριμένου οχήματος αποτελούνταν από έναν βενζινοκινητήρα, μία γεννήτρια και τέσσερις ηλεκτροκινητήρες προσαρμοσμένους από ένας σε κάθε τροχό. Η προαναφερθείσα διάταξη ήταν σειριακής μορφής και έδινε την δυνατότητα κίνησης και στους τέσσερις τροχούς.

Μερικά χρόνια αργότερα (1905), ο Henry Papier κατασκεύασε ένα υβριδικό όχημα το οποίο διέθετε ηλεκτρικό κινητήρα/γεννήτρια, μπαταρίες και έναν μικρό βενζινοκινητήρα. Στο συγκεκριμένο όχημα, ο ηλεκτρικός κινητήρας χρησιμοποιούνταν για την φόρτιση των μπαταριών κατά την διάρκεια της κίνησης υπό κανονικές συνθήκες, ενώ κατά τις επιταχύνσεις και κίνηση υπό μεγάλη κλίση, οι δύο κινητήρες (ΜΕΚ, ηλεκτροκινητήρας) συνεισέφεραν στις απαιτήσεις ισχύος του οχήματος.



Σχήμα 1.3: Το πρώτο υβριδικό όχημα Lohner – Porsche Mixed Hybrid το 1900 [17]

Έως το 1920 ακολούθησαν μερικές προσπάθειες ένταξης υβριδικής τεχνολογίας σε συμβατικά οχήματα, χωρίς ωστόσο να καταλαμβάνουν κάποιο αξιοπρεπές μερίδιο της αγοράς. Έτσι, η υβριδική τεχνολογία άργησε να επανέλθει στο προσκήνιο κάτι που γίνεται εδώ και μερικά χρόνια, όπου προσφέρει μία οικονομική και οικολογική λύση στους καταναλωτές. Πλέον, από τις αρχές του 21^{ου} αιώνα, η υβριδική τεχνολογία δεν περιορίζεται μόνο στα συμβατικά επιβατικά, αλλά αρχίζει και εφαρμόζεται σε οχήματα ελαφρού και βαρέος τύπου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός οχήματος βαρέος τύπου που είναι διαθέσιμο αυτή την περίοδο τους επαγγελματίες, είναι το P360 hybrid της εταιρίας SCANIA (Σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.4: Υπερσύγχρονο υβριδικό όχημα βαρέος τύπου της εταιρίας SCANIA

Το συγκεκριμένο όχημα είναι εξοπλισμένο με κινητήρα Diesel 280 HP, ηλεκτροκινητήρα ισχύος 90 kW και συστοιχία μπαταριών χωρητικότητας 30 kWh, εξυπηρετώντας τις ανάγκες με το μικρότερο δυνατό αποτύπωμα ρύπων στην ατμόσφαιρα. Γίνεται συνεπώς κατανοητό το ευρύ φάσμα εφαρμογών της υβριδικής τεχνολογίας, με τις προβλέψεις των ειδικών να δείχνουν όλο και μεγαλύτερο μερίδιό της στην αγορά.

1.4 Βαθμός υβριδοποίησης

Με τον όρο «βαθμός υβριδοποίησης» (degree of hybridization), ορίζεται το ποσοστό συνεισφοράς στην ισχύ που προσφέρει η εναλλακτική πηγή ισχύος ως προς την συνολική ισχύ που προσφέρεται στο όχημα. Στα υβριδικά οχήματα, συνήθως το ηλεκτρικό μοτέρ αποτελεί την εναλλακτική πηγή ισχύος που χρησιμοποιείται, ενώ μία συμβατική Μ.Ε.Κ. αποτελεί την κύρια πηγή ισχύος. Μέσω της παρακάτω σχέσης, παρουσιάζεται ο υπολογισμός του βαθμού υβριδοποίησης για υβριδικά οχήματα με συμβατικό κινητήρα και ηλεκτρικό μοτέρ.

$$\text{Degree of hybridization} = \frac{\text{Motor Power}}{\text{Motor Power} + \text{Engine Power}} * 100$$

Ανάλογα με το βαθμό (ποσοστό) υβριδοποίησης, μπορούμε να διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες υβριδικών οχημάτων: μικρο-υβριδικά, ήπια υβριδικά, πλήρως υβριδικά και υβριδικά με σύστημα εξωτερικής φόρτισης.

1.4.1 Μικρο-υβριδικά (Micro-HEV)

Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται οχήματα με πολύ μικρό ποσοστό υβριδοποίησης (μικρότερο του 10%), στα οποία γίνεται χρήση αρκετών τεχνολογιών με σκοπό την μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και συνεπώς την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Στα οχήματα αυτά, χρησιμοποιείται το ηλεκτρικό μοτέρ μόνο για την βοηθητική παροχή ισχύος σε περιφερειακά υποσυστήματα και όχι για την τροφοδότηση ισχύος για την κίνηση του οχήματος. Το βασικότερο υποσύστημα που τροφοδοτείται από την συγκεκριμένη δευτερεύουσα πηγή ισχύος, είναι το σύστημα αυτόματου σβησίματος και επανέναρξης της μηχανής εσωτερικής καύσης (σύστημα «start-stop»). Στην παρούσα κατηγορία, το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας κυμαίνεται σε χαμηλά αλλά ικανοποιητικά επίπεδα, της τάξης του 5-15%.

1.4.2 Ήπια υβριδικά (Mild HEV)

Τα υβριδικά οχήματα που εντάσσονται σε αυτήν την κατηγορία, διαθέτουν έναν ηλεκτρικό κινητήρα που υποβοηθά την κίνηση του οχήματος, χωρίς ωστόσο να έχει την δυνατότητα να την αναλάβει πλήρως. Ο βαθμός υβριδοποίησης του οχήματος της συγκεκριμένης περίπτωσης κυμαίνεται μεταξύ 10 και 20 %. Ομοίως με την περίπτωση των μικρο-υβριδικών, ο ηλεκτροκινητήρας μπορεί να τροφοδοτήσει με ηλεκτρική ισχύ περιφερειακά υποσυστήματα του οχήματος, όπως το «start-stop», ενώ την ίδια στιγμή ενσωματώνει και συνεργάζεται με επιπλέον υποσυστήματα για εξοικονόμηση ενέργειας όπως η λειτουργία ανάκτησης ενέργειας κατά την πέδηση του οχήματος («regenerative braking»). Σε αυτή την κατηγορία υβριδικών οχημάτων, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κυμαίνεται σε ποσοστιαία επίπεδα της τάξης 20-30%.

1.4.3 Πλήρως υβριδικά (Full HEV)

Στην συγκεκριμένη κατηγορία, αντίθετα με τις δύο προηγούμενες, το ηλεκτρικό μοτέρ εκτός από την δυνατότητα να λειτουργεί ταυτόχρονα με τον θερμικό κινητήρα παρέχοντας ισχύ για την κίνηση του οχήματος, μπορεί επίσης να τροφοδοτήσει εξ' ολοκλήρου το όχημα με ισχύ για την κίνηση του χωρίς την υποβοήθηση της Μ.Ε.Κ. Συνήθως, το ηλεκτρικό μοτέρ που χρησιμοποιείται σε αυτά τα οχήματα λειτουργεί σε πολύ υψηλή τάση (200-300V) και μπορεί να προσφέρει ισχύ μεγαλύτερη του 40% της μέγιστης ισχύος του θερμικού κινητήρα του οχήματος (καυσίμου diesel ή βενζίνης). Προφανώς, τα πλήρως υβριδικά οχήματα ενσωματώνουν τα βοηθητικά υποσυστήματα των προαναφερθέντων κατηγοριών π.χ. «regenerative braking» και «start-stop». Η εξοικονόμηση ενέργειας που προκύπτει στα πλήρως υβριδικά οχήματα κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα της τάξης του 30-50%.

1.4.4 Υβριδικά με σύστημα εξωτερικής φόρτισης (Plug-in HEV)

Τα υβριδικά οχήματα με σύστημα εξωτερικής φόρτισης (PHEV) παρουσιάζουν ομοιότητες με τα πλήρως υβριδικά, ωστόσο στην παρούσα κατηγορία παρέχεται η επιλογή της εξωτερικής φόρτισης της μπαταρίας μέσω μετασχηματιστή που συνδέεται στο δημόσιο δίκτυο ηλεκτροδότησης. Τα συγκεκριμένα οχήματα μπορούν να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις χρησιμοποιώντας αποκλειστικά την ηλεκτρική ενέργεια της μπαταρίας χωρίς χρήση θερμικού κινητήρα, με αυτονομία που πλέον πλησιάζει τα 150km.

Το ηλεκτρικό μοτέρ τέτοιου είδους οχημάτων είναι σημαντικά μεγαλύτερο σε μέγεθος συγκριτικά με τα μοτέρ των ήπιων και μικρο-υβριδικών, ενώ παράλληλα η μπαταρία τους αποτελείται από συστοιχία μικρότερων μπαταριών, προσδίδοντάς της αρκετά μεγάλο μέγεθος για να ανταποκρίνεται στην απαιτούμενη αυτονομία του οχήματος. Τέλος, το μέγεθος της Μ.Ε.Κ. είναι μικρότερο από τις υπόλοιπες κατηγορίες, χωρίς ωστόσο να υπολείπεται σε ισχύ (downsized engine).

1.5 Συστήματα μετάδοσης ισχύος πλήρως υβριδικού οχήματος

Κατά την λειτουργία ενός πλήρως υβριδικού-ηλεκτρικού οχήματος, η τροφοδότηση ισχύος επιτυγχάνεται μέσω συνδυαστικής χρήσης των δύο πηγών ενέργειας, ώστε ο θερμικός κινητήρας να λειτουργεί με την βέλτιστη δυνατή απόδοση σε ένα περιορισμένο εύρος λειτουργίας, με αποτέλεσμα την χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου, χωρίς παράλληλα να υπάρχει έλλειψη ισχύος στο όχημα. Για να επιτευχθεί αυτό, η Μ.Ε.Κ συνεργάζεται ταυτόχρονα με διάφορα τμήματα του υβριδικού οχήματος, όπως ηλεκτρικό μοτέρ, μετασχηματιστές τάσης, συσσωρευτές και συστήματα ελέγχου.

Σκοπός του συστήματος μετάδοσης ισχύος ενός υβριδικού οχήματος είναι ο συντονισμός της λειτουργίας του κάθε στοιχείου από το οποίο απαρτίζεται, ώστε να υπάρξει πλήρης εκμετάλλευση των δυνατοτήτων και των οφελών ενός τέτοιου οχήματος με τις λιγότερες δυνατές απώλειες. Συνεπώς, καθίσταται αναγκαία η εύρεση της βέλτιστης διάταξης του συστήματος μετάδοσης ισχύος που ταιριάζει στην εκάστοτε εφαρμογή.

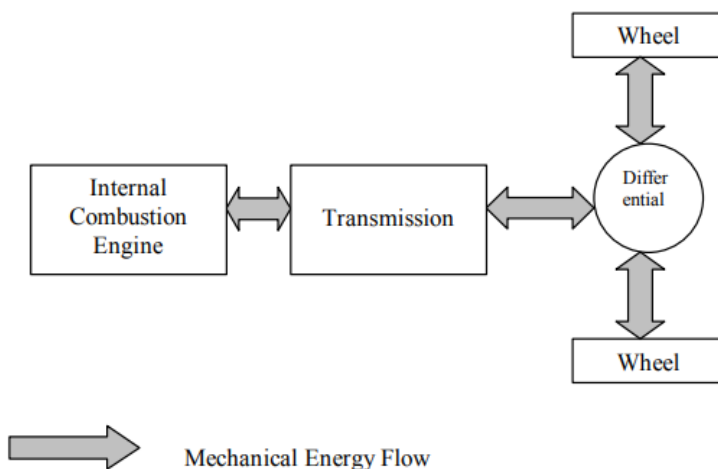
Τα συστήματα μετάδοσης ισχύος των υβριδικών οχημάτων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν, ανάλογα με την συνδεσμολογία τους, στους παρακάτω τύπους:

- Σειριακό
- Παράλληλο
- Συνδυαστικό (μεικτό), το οποίο ουσιαστικά αποτελείται από συνδυασμό σειριακής και παράλληλης συνδεσμολογίας.

Για την καλύτερη κατανόηση και εποπτεία των προαναφερθέντων συστημάτων, αρχικά θα παρουσιαστεί το σύστημα μετάδοσης ισχύος ενός συμβατικού οχήματος και έπειτα οι τρεις περιπτώσεις συστήματος μετάδοσης ισχύος για τα υβριδικά οχήματα.

1.5.1 Σύστημα μετάδοσης ισχύος συμβατικού οχήματος

Στο συμβατικό όχημα, η μηχανή εσωτερικής καύσης τροφοδοτεί μέσω άξονα το κιβώτιο ταχυτήτων με ισχύ, στο οποίο αφού καθοριστεί η σχέση μετάδοσης από τον οδηγό, με τη σειρά του προωθεί την ισχύ στο διαφορικό. Το διαφορικό παραλαμβάνει την ισχύ και είναι υπεύθυνο για την ορθή κατανομή της στους τροχούς για την κίνηση του οχήματος. Στο κιβώτιο ταχυτήτων υπάρχει η δυνατότητα να μην χρειάζεται η συνεισφορά του οδηγού και να αλλάζουν οι σχέσεις μετάδοσης αυτόματα. Το παρόν σύστημα μετάδοσης ισχύος παρουσιάζεται στο ακόλουθο Σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.5: Σύστημα μετάδοσης ισχύος συμβατικού οχήματος

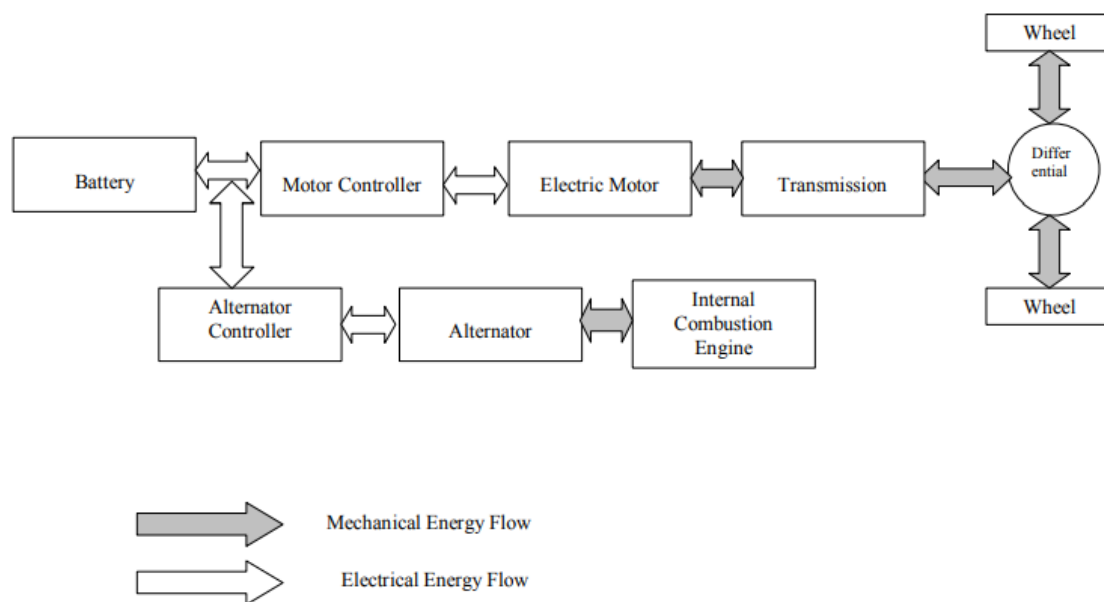
1.5.2 Σειριακό σύστημα μετάδοσης ισχύος υβριδικού οχήματος

Στο σειριακό σύστημα μετάδοσης ενός υβριδικού οχήματος (Σχήμα 1.6), η παροχή ισχύος για την κίνηση του οχήματος προέρχεται αποκλειστικά από τον ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος παραλαμβάνει την αναγκαία ενέργεια του είτε από μηχανή εσωτερικής καύσης μέσω γεννήτριας και μετασχηματιστών είτε από συστοιχία μπαταριών. Ο θερμικός κινητήρας δεν είναι συνδεδεμένος απευθείας με τον άξονα του κιβωτίου ταχυτήτων, συνεπώς μπορεί να λειτουργεί σε περιορισμένες στροφές και φορτίο του εύρους λειτουργίας του. Στην περιοχή λειτουργίας του αυτή, η απόδοση του κινητήρα είναι υψηλή, ενώ παράλληλα υπάρχει η δυνατότητα της παύσης λειτουργίας του σε συνθήκες μη ευνοϊκές όπου δεν γίνεται σε ικανοποιητικό βαθμό εκμετάλλευσης της χρήσης του. Το σύστημα αυτό απαιτεί μεγάλη συστοιχία μπαταριών για την κάλυψη των αναγκών του οχήματος κατά την διάρκεια της κίνησης καθώς και έναν ισχυρό ηλεκτροκινητήρα που θα

είναι ικανός να προσδώσει την απαραίτητη ισχύ καθ' όλη την λειτουργία του οχήματος. Αντίθετα, η Μ.Ε.Κ. που διαθέτει το υβριδικό όχημα του είδους αυτού δεν είναι μεγάλη σε μέγεθος λόγω των περιορισμένων απαιτήσεων ισχύος που έχει να αντιμετωπίσει κατά την κίνηση του οχήματος.

Ένα κύριο μειονέκτημα της διάταξης αυτής αποτελεί το αυξημένο βάρος του οχήματος λόγω του μεγέθους της συστοιχίας μπαταριών και του ηλεκτροκινητήρα. Επιπλέον, η χρήση των τμημάτων αυτών προσδίδει μεγάλο κόστος τόσο στην παραγωγή του οχήματος όσο και στην συντήρησή τους. Βασικό μειονέκτημα επίσης του σειριακού συστήματος είναι οι μεγάλες απώλειες κατά την μετατροπή ενέργειας από την μία μορφή στην άλλη (χημική σε ηλεκτρική, μηχανική σε ηλεκτρική, ηλεκτρική σε μηχανική).

Το συγκεκριμένο σύστημα εμφανίζει σημαντικά οφέλη κατά την λειτουργία σε μεταβατικές συνθήκες εντός πόλης, λόγω και του υποσυστήματος της αναγεννητικής πέδησης, ωστόσο γενικότερα δεν έχει εφαρμογή σε εμπορικά οχήματα παραγωγής.



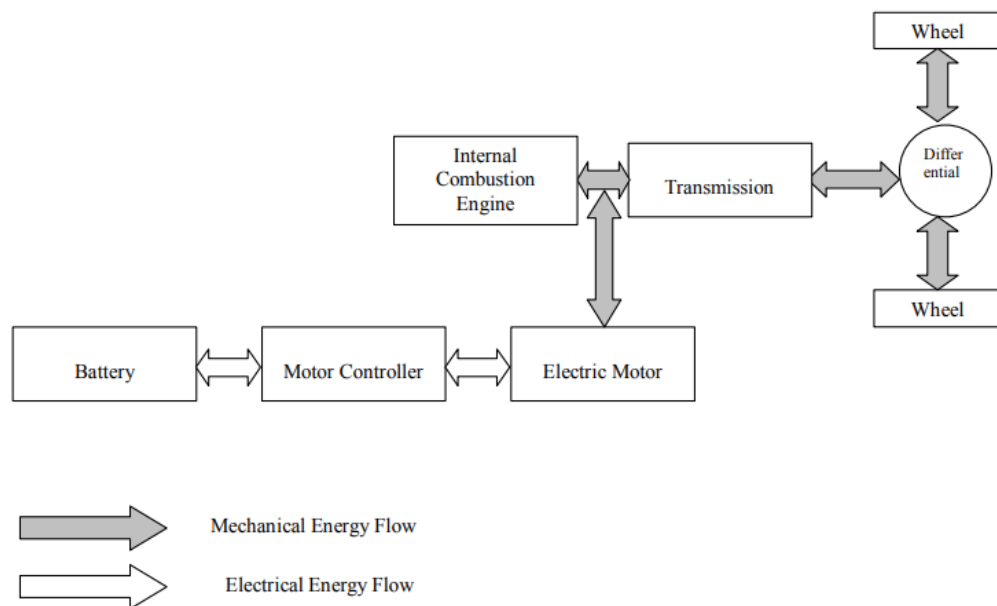
Σχήμα 1.6: Σειριακή συνδεσμολογία υβριδικού οχήματος με Μ.Ε.Κ

1.5.3 Παράλληλο σύστημα μετάδοσης ισχύος υβριδικού οχήματος

Στην παράλληλη συνδεσμολογία μετάδοσης ισχύος ενός υβριδικού οχήματος, ο ηλεκτροκινητήρας και η Μ.Ε.Κ. συνεισφέρουν στην απαιτούμενη ισχύ για την κίνηση του

οχήματος όντας ανεξάρτητα και μόνιμα συνδεδεμένοι στον άξονα του κιβωτίου ταχυτήτων. Με την διάταξη αυτή εξαλείφεται η ανάγκη για μετατροπή της ενέργειας σε πολλές μορφές, το οποίο προφανώς συνεπάγεται λιγότερες απώλειες ενέργειας. Στην παρούσα συνδεσμολογία (Σχήμα 1.7), ο θερμικός κινητήρας χρησιμοποιείται κυρίως για την λειτουργία σε υψηλές ταχύτητες (συνθήκες αυτοκινητοδρόμου) και ο ηλεκτροκινητήρας χρησιμοποιείται για χαμηλές ταχύτητες του οχήματος (συνθήκες εντός πόλης), συνεπώς κάθε πηγή ισχύος λειτουργεί σε συνθήκες στις οποίες έχει βέλτιστο βαθμό απόδοσης. Επιπροσθέτως, οι δύο πηγές ισχύος έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν ταυτόχρονα ώστε να υποβοηθούν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την κίνηση του οχήματος και την ίδια στιγμή να γίνεται μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας. Ακόμη, η Μ.Ε.Κ. μπορεί να διοχετεύσει μέρος της παραγόμενης ενέργειάς της στην συστοιχία μπαταριών του οχήματος, έτσι ώστε να επαναφορτιστούν και να τροφοδοτήσουν τον ηλεκτροκινητήρα με ενέργεια όταν αυτό χρειαστεί. Τα υποσυστήματα «start-stop» και αναγεννητικής πέδησης χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό και σε αυτή την περίπτωση, εξοικονομώντας αρκετό καύσιμο και ενέργεια γενικότερα στο όχημα.

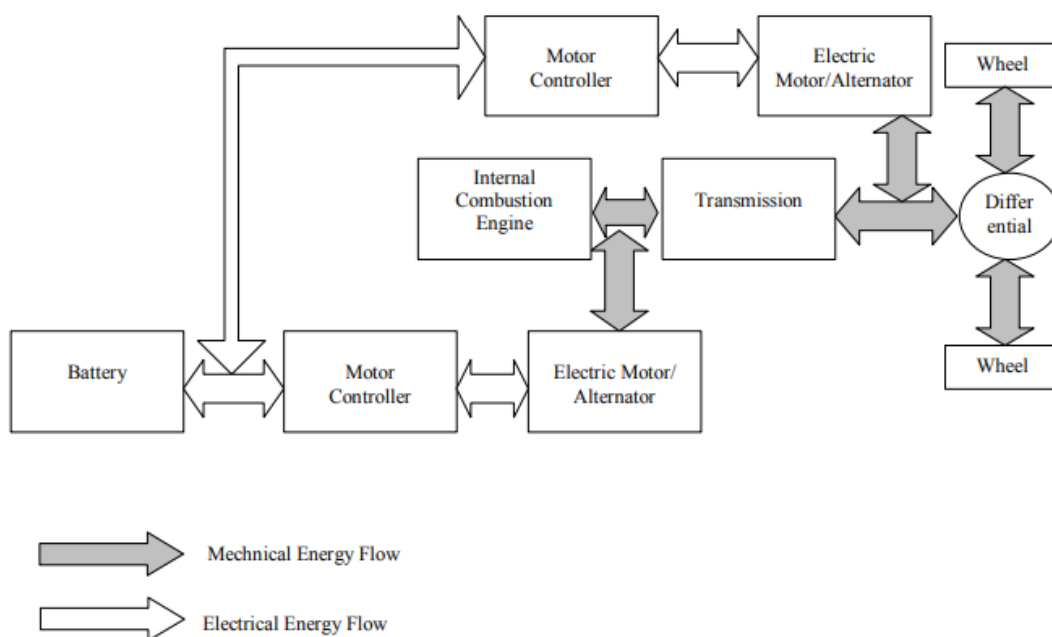
Ως αποτέλεσμα του συνδυασμού των πηγών αυτής της διάταξης, επιτυγχάνεται μεγάλη μείωση στην κατανάλωση του καυσίμου και των εκπομπών ρύπων. Βασικό πλεονέκτημα επίσης της παρούσας συνδεσμολογίας αποτελεί η καλύτερη απόκριση του οχήματος σε μεταβατικές συνθήκες εξαιτίας της άμεσης σύνδεσης Μ.Ε.Κ και ηλεκτροκινητήρα με το σύστημα κίνησης του οχήματος.



Σχήμα 1.7: Παράλληλη συνδεσμολογία υβριδικού οχήματος με Μ.Ε.Κ

1.5.4 Συνδυαστικό σύστημα μετάδοσης ισχύος υβριδικού οχήματος

Το συνδυαστικό (σειριακό-παράλληλο) σύστημα μετάδοσης ισχύος ενσωματώνει τις προαναφερθείσες διατάξεις του υβριδικού οχήματος, εκμεταλλευόμενο ταυτόχρονα τα πλεονεκτήματα της κάθε διάταξης. Σε αυτήν την συνδεσμολογία, η Μ.Ε.Κ. μπορεί είτε να τροφοδοτήσει το όχημα με ισχύ άμεσα, μέσω της σύνδεσής της με τον άξονα του κιβωτίου, είτε να αποσυνδεθεί εντελώς από τον άξονα αυτόν και να λειτουργήσει αποκλειστικά για την φόρτιση της συστοιχίας μπαταριών. Ομοίως, ο ηλεκτροκινητήρας έχει την δυνατότητα είτε να παρέχει σε ποσοστό από 0 έως 100 % την απαιτούμενη ισχύ του οχήματος είτε να λειτουργεί ως γεννήτρια και να φορτίζει την συστοιχία μπαταριών του οχήματος. Η διάταξη αυτή απαιτεί μεγαλύτερη συστοιχία μπαταριών από τις άλλες περιπτώσεις, χρήση επιπλέον ηλεκτρικού μοτέρ, καθώς και πιο προηγμένο σύστημα ελέγχου. Προφανώς αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερο κόστος παραγωγής του οχήματος, ωστόσο παρέχει μεγαλύτερο ποσοστό εποπτείας της απόδοσης και της απόκρισης κάθε τμήματος του υβριδικού οχήματος. Η παρούσα συνδεσμολογία παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 1.8).



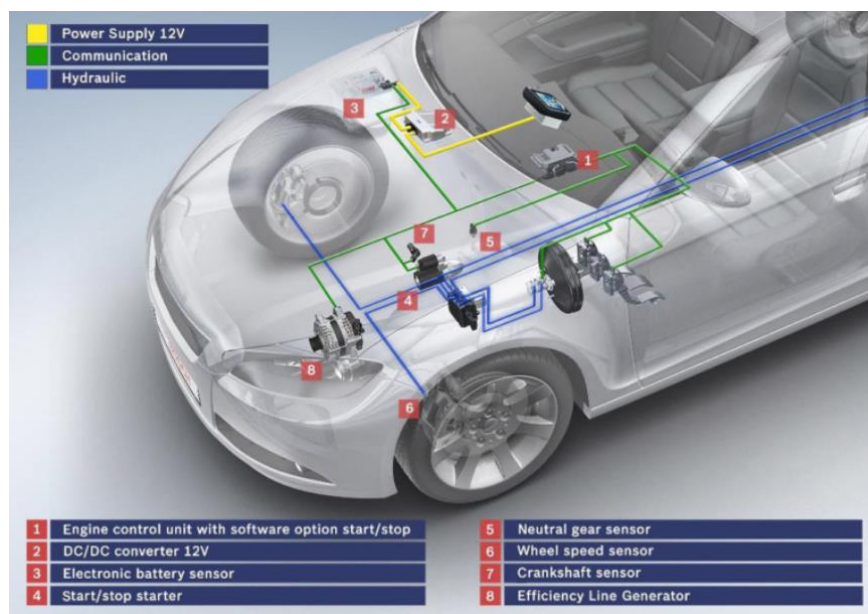
Σχήμα 1.8: Συνδυαστική (σειριακή – παράλληλη) συνδεσμολογία υβριδικού οχήματος με Μ.Ε.Κ

1.6 Ενσωματωμένα υποσυστήματα υβριδικών οχημάτων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα υβριδικά οχήματα (κυρίως) με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας και καυσίμου εφαρμόζουν ορισμένα υποσυστήματα, τα οποία ενεργοποιούνται σε συγκεκριμένες συνθήκες κατά την λειτουργία του οχήματος. Τα συστήματα αυτά είναι το σύστημα «start-stop» και το σύστημα αναγεννητικής πέδησης («regenerative braking»). Παρακάτω πραγματοποιείται αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας των συστημάτων αυτών, καθώς και των πλεονεκτημάτων τους.

1.6.1 Σύστημα «Start-Stop»

Πλέον, όλα τα υβριδικά οχήματα ενσωματώνουν το σύστημα αυτόματου σβησίματος του κινητήρα κατά την αδράνεια του οχήματος και επανεκκίνησής του κατά την επανέναρξη της κίνησης του οχήματος (γνωστό ως σύστημα «start-stop»). Το σύστημα αυτό αποτελείται κυρίως από έναν ηλεκτροκινητήρα, το σύστημα ελέγχου που συντονίζει και καθορίζει τις συνθήκες που επενεργεί το σύστημα, την μίζα (εκκινητή) του οχήματος και ένα πλήθος αισθητήρων, σκοπός των οποίων είναι ο έλεγχος διαφόρων παραμέτρων του οχήματος. Τέτοιου είδους παράμετροι που ελέγχονται είναι η στάθμη της μπαταρίας, η ταχύτητα του οχήματος και η ταχύτητα περιστροφής του εκκεντροφόρου άξονα του κινητήρα. Η σχηματική αναπαράσταση του συστήματος φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 1.9.



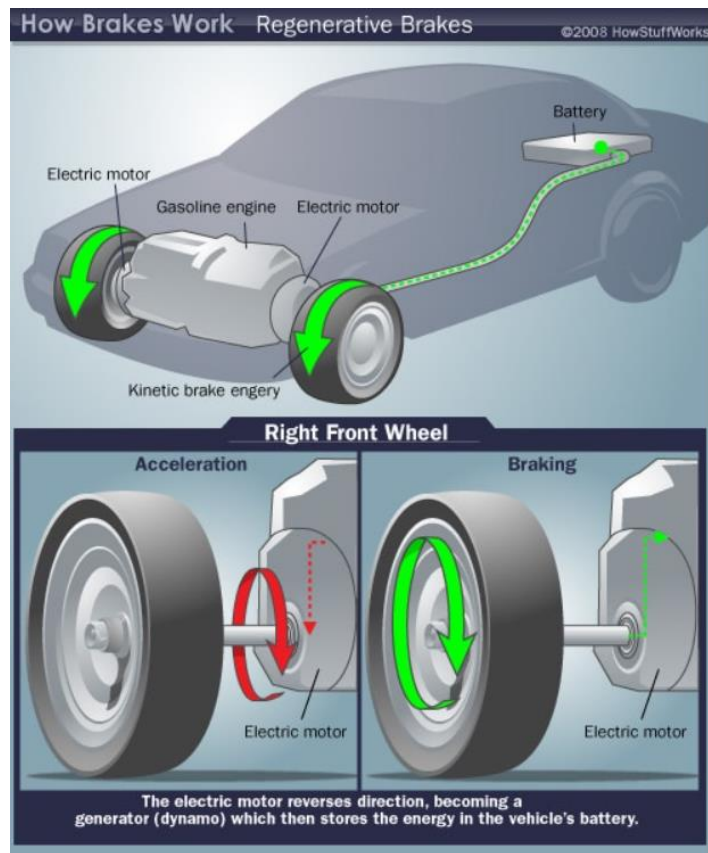
Σχήμα 1.9: Αναπαράσταση του συστήματος Start-Stop

Στην κατάσταση που το όχημα είναι ακινητοποιημένο αλλά ενεργό, μετά από διάστημα λίγων δευτερολέπτων ο θερμικός κινητήρας του απενεργοποιείται. Με το πάτημα του συμπλέκτη από τον οδηγό, ο κινητήρας επαναφέρεται σε λειτουργία ρελαντί (idle) και είναι πάλι έτοιμο το όχημα να συνεχίσει την πορεία του. Όπως γίνεται κατανοητό, σε συνθήκες κυκλοφορίας με χαμηλές ταχύτητες, φανάρια και κυκλοφοριακή συμφόρηση, το σύστημα αποτελεί την ιδανική λύση για τον περιορισμό της κατανάλωσης καυσίμου και της εκπομπής καυσαερίων. Επομένως, κατά την κίνηση ενός οχήματος εντός πόλης, το παρόν υποσύστημα βοηθά σε αρκετά μεγάλο βαθμό στην μείωση της ρύπανσης με ταυτόχρονη εξοικονόμηση ενέργειας.

1.6.2 Σύστημα «Regenerative Braking»

Το σύστημα ανάκτησης ενέργειας μέσω φρεναρίσματος («regenerative braking»), παρέχει στο όχημα την δυνατότητα κατά την φάση της επιβράδυνσης να μετατρέψει κάποιο ποσοστό της κινητικής του ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Μέσω ενός ηλεκτρικού μοτέρ, το οποίο στην συγκεκριμένη φάση λειτουργεί ως γεννήτρια, απορροφά μέρος της κινητικής ενέργειας που είναι επιθυμητό να αποβληθεί και το τροφοδοτεί στους συσσωρευτές του οχήματος, όπου και αποθηκεύεται. Στο υβριδικό όχημα, μετά την αποθήκευση της, η ενέργεια αυτή μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί είτε για την κίνηση του οχήματος είτε για την τροφοδότηση περιφερειακών συστημάτων. Σε ένα αντίστοιχο συμβατικό όχημα, η ενέργεια αυτή που θα ήταν επιθυμητό να αποβληθεί, απορρίπτεται πλήρως με την μορφή θερμότητας μέσω τριβής με τα μηχανικά φρένα του οχήματος. Γίνεται συνεπώς αντιληπτό πως και τα δισκόφρενα του υβριδικού οχήματος δέχονται λιγότερη καταπόνηση σε σχέση με αυτά ενός συμβατικού, με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής τους.

Κατά κύριο λόγο το σύστημα αυτό εφαρμόζεται στους εμπρόσθιους τροχούς, ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις συνδυάζεται με μηχανική πέδηση για την καλύτερη απόκριση του οχήματος σε μεγάλες επιβραδύνσεις ή ακινητοποιήσεις. Η συμμετοχή των δύο αυτών μέσων επιβράδυνσης διαφέρει ανά κατάσταση καθώς την επηρεάζουν πλήθος παραγόντων (π.χ. ταχύτητα οχήματος, πάτημα πεντάλ φρένου, κατάσταση οδοστρώματος). Καθίσταται σαφές λοιπόν, πως και σε αυτό το υποσύστημα του υβριδικού οχήματος συνθήκες με συχνά φρεναρίσματα και σχετικά χαμηλές ταχύτητες αποδεικνύονται ιδανικές. Συνεπώς, κατά την κίνηση του οχήματος εντός πόλης, το παρόν σύστημα εξοικονομεί αρκετή ενέργεια, που ειδάλλως θα αποβαλλόταν μέσω των δισκοφρένων. Στο παρακάτω Σχήμα 1.10, απεικονίζεται συνοπτικά το συγκεκριμένο υποσύστημα των υβριδικών οχημάτων.



Σχήμα 1.10: Αναπαράσταση του συστήματος ανάκτησης ενέργειας κατά το φρενάρισμα («regenerative braking»)

1.7 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις υβριδικών βαρέων οχημάτων

Μέσω της ανωτέρω ανάλυσης των χαρακτηριστικών των υβριδικών οχημάτων και των λειτουργικών απαιτήσεων των τυπικών οχημάτων βαρέος τύπου, προκύπτουν τα εξής βασικά πλεονεκτήματα της εφαρμογής υβριδικής τεχνολογίας στα βαρέα οχήματα:

- Μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων και της κατανάλωσης καυσίμου κατά την λειτουργία των υβριδικών οχημάτων βαρέος τύπου, λόγω της χρήσης ηλεκτρικού μοτέρ και εφαρμογής των υποσυστημάτων του (start stop, regenerative braking) κατά την διάρκεια της κίνησης
- Ικανοποίηση των αναγκών ενέργειας περιφερειακών συστημάτων του οχήματος (π.χ. κλιματισμός καμπίνας, αντλίες νερού, τυχόν ανεμιστήρες, ηχοσύστημα) απευθείας από τους συσσωρευτές. Πρέπει να τονιστεί, πως οι ανάγκες των

οδηγών βαρέων οχημάτων σε κλιματισμό καμπίνας είναι αρκετά υψηλές, καθώς σε αρκετά μεγάλα ταξίδια αναγκάζονται να διανυκτερεύσουν εντός της καμπίνας. Συνεπώς, για μεγάλο χρονικό διάστημα ένα συμβατικό όχημα βαρέος τύπου πρέπει να παραμείνει ρελαντί για τον κλιματισμό, επομένως η μείωση κατανάλωσης μέσω του υβριδικού για τον κλιματισμό είναι σημαντική.

- Λόγω της χρήσης δύο πηγών ισχύος, υπάρχει η δυνατότητα να δουλεύουν είτε ξεχωριστά είτε συνδυαστικά, προσφέροντας παράλληλα καλύτερη απόκριση στις ανάγκες οδήγησης του οχήματος και λειτουργώντας με τον βέλτιστο βαθμό απόδοσης.

Ταυτόχρονα, η χρήση υβριδικών βαρέων οχημάτων παρουσιάζει ορισμένες προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν για να αποτελέσει μία συμφέρουσα επένδυση για κάθε επαγγελματία στον χώρο των μεταφορών. Οι προκλήσεις αυτές εμφανίζονται παρακάτω:

- Η χρήση κάθε οχήματος βαρέος τύπου ποικίλλει, με συνέπεια να έχει πολύ διαφορετικό προφίλ λειτουργίας. Ως συνέπεια, οχήματα που χρησιμοποιούνται για μικρές διαδρομές εντός πόλης (λεωφορεία, χωματουργικά οχήματα) θα καρπώνονται πλήρως τα οφέλη της υβριδικής τεχνολογίας, ενώ οχήματα μεγάλων αποστάσεων (long-haul trucks) με υψηλές ταχύτητες και ελάχιστες στάσεις, θα επηρεάζονται λιγότερο από την υβριδοποίηση τους.
- Το κόστος αγοράς ενός υβριδικού οχήματος βαρέος τύπου είναι αρκετά υψηλό λόγω της προηγμένης τεχνολογίας που απαιτείται, δυσχεραίνοντας το χρόνο απόσβεσης της αρχικής επένδυσης ενός επαγγελματία. Επομένως, οι περισσότεροι επαγγελματίες που προσανατολίζονται για την αγορά ενός οχήματος βαρέος τύπου στην ταχύτερη αποπληρωμή του και στην εμφάνιση γρηγορότερη εμφάνιση κερδών, θα στραφούν σε ένα παραδοσιακό όχημα Diesel βαρέος τύπου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Σχηματισμός και Εκπομπή Ρύπων από Κινητήρες Diesel¹

2.1 Γενικά

Οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται εντός του θαλάμου καύσης, που σε αρκετά σημεία φθάνουν μέχρι και τους 3000 K, έχουν ως αποτέλεσμα την χημική διάσπαση των προϊόντων της καύσης, σχηματίζοντας έτσι τις ρυπογόνες ουσίες που εκπέμπονται από τους κινητήρες οχημάτων. Δεχόμενοι την παραδοχή πως η καύση είναι τέλεια και δεν υφίσταται κάποια περαιτέρω χημική διάσπαση στα προϊόντα, προκύπτει ο εξής τύπος της χημικής αντίδρασης της καύσης:



Στην παραπάνω αντίδραση δεν έχουν τοποθετηθεί οι στοιχειομετρικοί συντελεστές, καθώς δίνεται έμφαση μόνο στην ποιοτική της σημασία. Στην πραγματικότητα ωστόσο, τα προϊόντα της τέλει καύσης υφίσταται χημική διάσπαση, με αποτέλεσμα την εμφάνιση των ακόλουθων ριζών και ενώσεων σε αυτά:

H₂O, H₂, O₂, N₂, N, O, OH, H, CO, CO₂, NO, HC, O₃, αλδεΐδες, κετόνες κλπ.

Οι κυριότεροι ρύποι από τα προαναφερθέντα προϊόντα καύσης, είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), οι υδρογονάνθρακες (HC) και τα σωματίδια (particulate matter), οι οποίοι αποτελούν και τους λεγόμενους ελεγχόμενους ρύπους, ως προς τα επίπεδα συγκέντρωσης τους στα καυσαέρια, από την εκάστοτε νομοθεσία.

Οι τρεις αέριοι ρύποι (CO, HC, NO_x) παρουσιάζονται και στους δύο τύπους εμβολοφόρων κινητήρων, δηλαδή Diesel και Otto, ωστόσο εμφανίζουν σημαντικές διαφορές στη συγκέντρωσή τους στο καυσαέριο εξαγωγής. Ειδικότερα, τα οξείδια του αζώτου (NO_x) εμφανίζονται και στις δύο κατηγορίες κινητήρων σε σημαντικά ποσοστά, με τους κινητήρες Otto να εκπέμπουν λίγο υψηλότερες τιμές. Η εκπομπή μονοξειδίου του άνθρακα (CO) προκύπτει δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη στους κινητήρες Otto, συνεπώς δεν αποτελεί για τους κινητήρες Diesel σημαντικό ρύπο. Όσον αφορά την εκπομπή των άκαυστων υδρογονανθράκων (HC), τα επίπεδά της στους κινητήρες Diesel προκύπτουν χαμηλότερα από τα αντίστοιχα επίπεδα σε κινητήρες Otto.

¹ Για περισσότερες λεπτομέρειες, βλ. Παραπομπές [2] και [5] της βιβλιογραφίας, από όπου προέρχεται η παρούσα ανάλυση.

Πέρα από τους αέριους ρύπους, στους εμβολοφόρους κινητήρες εντοπίζεται και εκπομπή στερεών σωματιδίων (particulates). Τα σωματίδια αυτά σχηματίζονται κατά την καύση και αποτελούν την αιθάλη (soot), η οποία κατά την εκπομπή της στο περιβάλλον έχει την μορφή καπνού. Στους κινητήρες Diesel, η εκπομπή αιθάλης μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα από τα κυριότερα αντικείμενα μελέτης των καυσαερίων, σε αντίθεση με την εκπομπή της από (κλασικούς) κινητήρες Otto, όπου έχει σχεδόν μηδαμινή συγκέντρωση στα καυσαέρια (αντιθέτως, έχει βαρύτητα σε κινητήρες Otto άμεσης έγχυσης – GDI).

Στην συνέχεια, γίνεται αναφορά στους μηχανισμούς σχηματισμού των κύριων ρύπων που εκπέμπονται από τους κινητήρες Diesel, δηλαδή των NOx και της αιθάλης. Επιπροσθέτως, αναλύεται η επίδραση διαφόρων παραμέτρων λειτουργίας του κινητήρα Diesel στην εκπομπή των συγκεκριμένων ρύπων. Σχετικά με τους ρύπους HC και CO, οι εκπεμπόμενες ποσότητες τους είναι αρκετά μικρές, συνεπώς μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες. Τέλος, θα αναφερθεί η επίδραση της κατανάλωσης καυσίμου στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), καθώς η συγκεκριμένη εκπομπή θα μας απασχολήσει σε επόμενο κεφάλαιο κατά την ανάλυση των εκπομπών καυσαερίων ενός οχήματος (Κεφάλαιο 5).

2.2 Σχηματισμός των οξειδίων του αζώτου NOx

Με τον όρο οξείδια του αζώτου, αναφερόμαστε στο μονοξείδιο του αζώτου (NO), το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) και ίχνη άλλων οξειδίων του αζώτου (π.χ. N₂O₅), τα οποία σχηματίζονται στον θάλαμο καύσης των εμβολοφόρων κινητήρων. Για τους κινητήρες Diesel, η ποσότητα εκπομπής του NO₂ σε μεσαία και υψηλά φορτία είναι αμελητέα, συνεπώς τα μεγέθη NOx και NO μπορούν να θεωρηθούν (σχεδόν) ταυτόσημα.

Υπό την προϋπόθεση επάρκειας οξυγόνου, το μονοξείδιο του αζώτου (NO) σχηματίζεται στις περιοχές υψηλής θερμοκρασίας εντός της καιγόμενης ζώνης. Στη συνέχεια, κατά την διαδικασία της αποτόνωσης, λόγω της απότομης πτώσης της θερμοκρασίας ορισμένες αντιδράσεις που συμμετέχουν στο σχηματισμό του NO «παγώνουν», με το καυσαέριο της εξαγωγής να περιέχει συγκεντρώσεις NO αρκετά υψηλότερες από τις αντίστοιχες της χημικής ισορροπίας για την ίδια θερμοκρασία του καυσαερίου. Επομένως, για τον σχηματισμό του NO καθοριστικότερο παράγοντα διαδραματίζει η χημική κινητική και όχι η χημική ισορροπία των αντιδράσεων.

2.3 Σχηματισμός του μονοξειδίου του αζώτου (NO) εντός του θαλάμου καύσεως κινητήρων Diesel

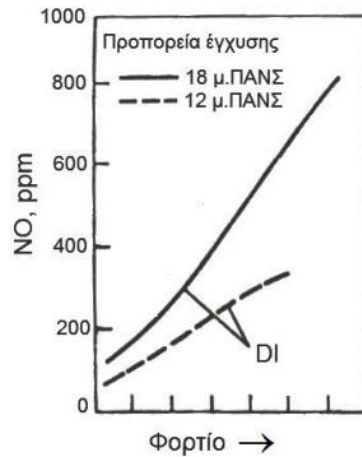
2.3.1 Γενική περιγραφή

Κατά την λειτουργία των κινητήρων Diesel, το καύσιμο τροφοδοτείται στον θάλαμο καύσης σε υγρή μορφή μέσω εγχυτήρων (μπεκ) και έπειτα εντός του θαλάμου πραγματοποιείται η ατμοποίηση και ανάμειξή του με τον διαθέσιμο αέρα. Εντός των κυλίνδρων του κινητήρα, παρατηρείται μεγάλη στρωμάτωση τόσο στην κατανομή της θερμοκρασίας όσο και στην συγκέντρωση του καυσίμου, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για τον σχηματισμό των NOx μόνο σε ορισμένες περιοχές. Το συντριπτικό ποσοστό του μονοξειδίου του αζώτου (NO) σχηματίζεται κατά το δεύτερο στάδιο της καύσης (ανεξέλεγκτη καύση), όπου η φλόγα είναι τύπου προανάμειξης, με τιμές του λόγου ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου (λ_a) κοντά στην μονάδα και θερμοκρασία ιδιαίτερα υψηλή.

Στο τρίτο στάδιο της καύσης (ελεγχόμενη καύση), λόγω της συνεχόμενης εξάπλωσης της δέσμης του καυσίμου, οι ζώνες αντίδρασης έρχονται σε επαφή με τον ψυχρότερο αέρα που τις περιβάλλει, με αποτέλεσμα την πτώση της θερμοκρασίας και το γενικότερο «πάγωμα» των αντιδράσεων διάσπασης του NO σε υψηλές τιμές.

2.3.2 Επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας του κινητήρα Diesel στην τιμή του NO

- **Επίδραση του φορτίου:** Στους κινητήρες Diesel, η μεταβολή του φορτίου συνεπάγεται μεταβολή του λόγου ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου. Συνεπώς, με την αύξηση του φορτίου παρατηρείται αύξηση και στην συγκέντρωση του NO στα καυσαέρια, λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας στην ζώνη αντίδρασης. Στο Σχήμα 2.1 που ακολουθεί, απεικονίζεται η εξάρτηση αυτή μεταξύ NO και φορτίου, για κινητήρες άμεσης έγχυσης (Direct Injection).
- **Επίδραση της προπορείας έγχυσης του καυσίμου:** Η αύξηση της προπορείας έγχυσης του καυσίμου σε κινητήρες Diesel άμεσης έγχυσης, έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγαλύτερων τιμών πίεσης και θερμοκρασίας των αερίων εντός του θαλάμου καύσης, το οποίο οδηγεί με την σειρά του σε αύξηση των παραγόμενων εκπομπών NO στα καυσαέρια. Η προαναφερθείσα συσχέτιση επίσης γίνεται αντιληπτή μέσω του Σχήματος 2.1.



Σχήμα 2.1: Επίδραση του φορτίου και της προπορείας έγχυσης καυσίμου στην συγκέντρωση NO στα καυσαέρια κινητήρων Diesel άμεσης έγχυσης [2]

- **Επίδραση του ποσοστού παραμένου καυσαερίου:** Μέσω της ψύξης και επανακυκλοφορίας του καυσαερίου (EGR) στον θάλαμο καύσης, αυξάνεται η ειδική θερμοχωρητικότητα του περιβάλλοντος μέσου και μειώνεται η συγκέντρωση του οξυγόνου, οδηγώντας συνεπώς σε σημαντική πτώση πίεσης και θερμοκρασίας εντός της ζώνης αντίδρασης. Επομένως, η αύξηση του ποσοστού του παραμένου καυσαερίου εντός του θαλάμου καύσης έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της συγκέντρωσης NO στα καυσαέρια.

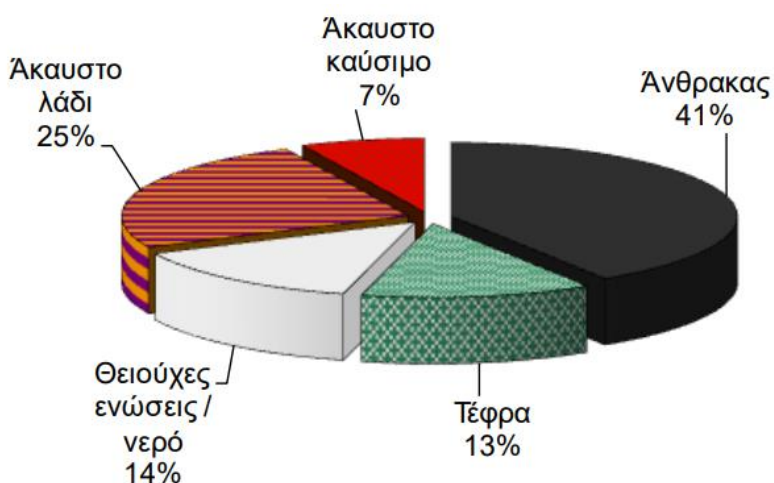
2.4 Εκπομπή μικροσωματιδίων από κινητήρες Diesel

2.4.1 Γενικά

Η εκπομπή σωματιδίων που οφείλεται στην καύση του πετρελαίου, γνωστή ως αιθάλη (soot), αποτελείται κατά κύριο λόγο από ανθρακούχο υλικό παραγόμενο κατά την διάρκεια της καύσης, στο οποίο έχουν απορροφηθεί μερικά οργανικά συστατικά (κυρίως προερχόμενα από άκαυστο καύσιμο και λιπαντικό έλαιο κινητήρα). Το μέγεθος των σωματιδίων αυτών ποικίλλει εντός ενός εύρους έκτασης μεταξύ 20 nm και 10 μm, χαρακτηριστικό το οποίο τα καθιστά αναπνεύσιμα. Συνήθως γίνεται διαχωρισμός των σωματιδίων αυτών ανάλογα του διαλυτού ή του μη διαλυτού οργανικού μέρους τους. Τις

περισσότερες φορές, τα σωματίδια μη διαλυτού οργανικού (στερεού) μέρους χρησιμοποιούνται ως εκτίμηση του ποσοστού την αιθάλης.

Στα σωματίδια που εκπέμπονται από την εξαγωγή του κινητήρα Diesel, το ποσοστό της αιθάλης είναι αρκετά μεταβλητό, ωστόσο κατά γενικό κανόνα είναι υψηλότερο του 40-50%. Επιπλέον, ουσίες που συμπεριλαμβάνονται στα εκπεμπόμενα σωματίδια αποτελούν το άκαυστο καύσιμο ή λιπαντικό έλαιο του κινητήρα, τυχόν τρίμματα μετάλλων από φθορά του χώρου εντός των κυλίνδρων καθώς και άλατα προερχόμενα από το καύσιμο (Σχήμα 2.2).



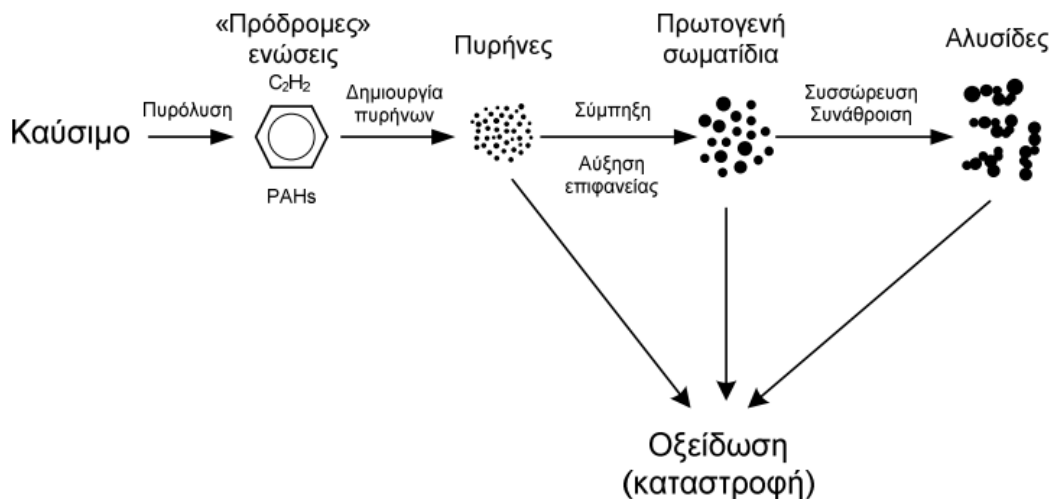
Σχήμα 2.2: Τυπική σύσταση στην εξάτμιση κινητήρα Diesel οχήματος βαρέος τύπου κατά την διάρκεια δοκιμής σε κύκλο πόλης [5]

Εξαιτίας την σταδιακής αποθείωσης των καυσίμων των συμβατικών οχημάτων τα τελευταία χρόνια, το κλάσμα θειούχων ενώσεων, που είναι προσεγγιστικά ανάλογο του κλάσματος περιεχόμενου θείου στο καύσιμο, εμφανίζεται πλέον εξαιρετικά μειωμένο (έως σχεδόν ανύπαρκτο). Ταυτόχρονα, το διαλυτό οργανικό κλάσμα, δηλαδή το κλάσμα το οποίο σχετίζεται με το άκαυστο καύσιμο και λάδι κινητήρα, ποικίλει ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας και την σχεδίαση του κινητήρα. Το εύρος του συγκεκριμένου κλάσματος είναι αρκετά εκτενές, ξεκινώντας από τιμές μικρότερες του 10% και φθάνοντας ποσοστά μεγαλύτερα του 90%.

Ο σχηματισμός της αιθάλης προκαλείται από άκαυστο καύσιμο, το οποίο αναπτύσσει σωματίδια κατά την μετατροπή του από την αέρια φάση στην στερεά, σε περιοχές εντός του θαλάμου καύσης υψηλών θερμοκρασιών και πλούσιες σε καύσιμο. Ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν, υδρογονάνθρακες ή άλλα διαθέσιμα μόρια υφίστανται είτε συμπύκνωση είτε απορρόφηση από την αιθάλη.

Η σταδιακή μεταβολή των υδρογονανθράκων από υγρή ή αέρια φάση σε στερεά σωματίδια περιλαμβάνει έξι κοινά αναγνωρισμένες διαδικασίες (Σχήμα 2.3).

- Πυρόλυση (Pyrolysis): ενδόθερμη διαδικασία, που υπό υψηλή θερμοκρασία μεταβάλλει τη μοριακή δομή του καυσίμου και παράγει ενώσεις όπως οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), οι οποίοι θεωρούνται πρόδρομοι της αιθάλης.
- Πυρηνοποίηση (Nucleation): δημιουργία πυρήνων ή νανοσωματιδίων από ασταθή υλικά όπως οι υδρογονάνθρακες.
- Επιφανειακή αύξηση (Surface growth): διαδικασία προσθήκης μάζας στην επιφάνεια ενός σωματιδίου αιθάλης.
- Σύμπτυξη (Coagulation): βίαιες συγκρούσεις μεταξύ των σφαιρικών σωματιδίων, που οδηγούν στην ένωσή τους και το σχηματισμό μεγαλύτερου μεγέθους σωματιδίων.
- Συσσώρευση (Agglomeration): Συγκέντρωση σωματιδίων, τα οποία παραμένουν ενωμένα για να σχηματίσουν μεγάλες ομάδες σε δομή αλυσίδας.
- Οξειδωση (Oxidation): Κατά τη διάρκεια κάθε σταδίου από τα παραπάνω, λαμβάνει χώρα και οξειδωση, 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, CO₂, H₂O.

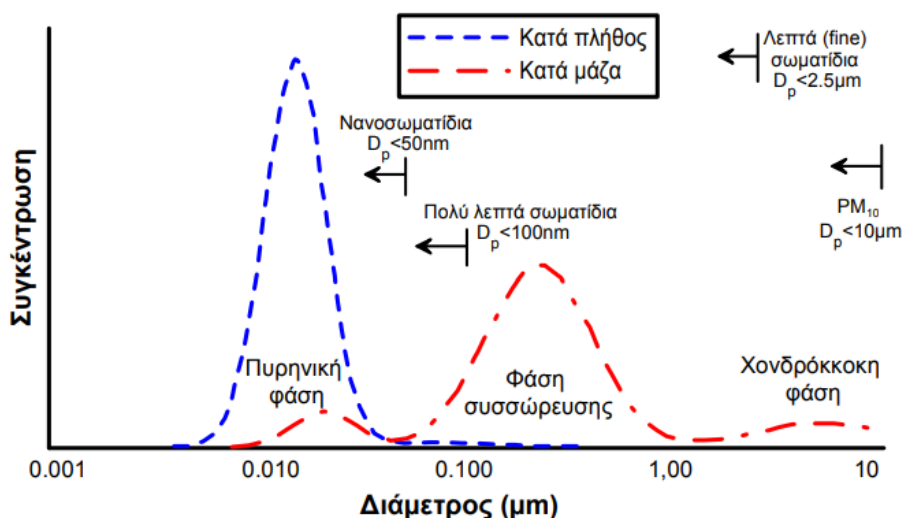


Σχήμα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση μηχανισμού δημιουργίας και καταστροφής σωματιδίων εντός θαλάμου καύσης κινητήρα Diesel [5]

2.4.2 Κατανομή μεγέθους μικροσωματιδίων

Οι κανονισμοί που έχουν εφαρμοστεί για τον περιορισμό της εκπομπής σωματιδίων στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στις Η.Π.Α., βασίζονται στην εκπεμπόμενη μάζα των σωματιδίων. Συνεπώς, η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων είναι εξαιρετικά σημαντική σε ζητήματα που σχετίζονται με την ποιότητα του αέρα, καθώς θεωρείται πως η μείωση του μεγέθους των σωματιδίων έχει ως συνέπεια την αύξηση της τοξικότητάς τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα σωματίδια αιθάλης της τάξης των 100 nm, των οποίων το μικρό μέγεθος επιτρέπει την απορρόφησή τους από την μύτη, ωστόσο τα συγκεκριμένα σωματίδια είναι αρκετά μεγάλα ώστε να επικάθονται στους πνεύμονες. Επομένως, γίνεται κατανοητό πως τέτοιου είδους σωματίδια είναι επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία.

Αντίθετα με την μάζα, ο αριθμός των εκπεμπόμενων σωματιδίων αιθάλης δεν διατηρείται σταθερός. Εντός της σωλήνωσης εξαγωγής ενός κινητήρα Diesel, οι συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες μπορούν να προκαλέσουν τον σχηματισμό σωματιδίων (αύξηση συνεπώς και του αριθμού σωματιδίων και της συγκέντρωσης της μάζας τους), την συσσώρευση και την σύμπτυξη (μείωση δηλαδή της συγκέντρωσης και αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων). Κατά την διάρκεια της αραιώσης και της δειγματοληψίας, τα ανωτέρω φαινόμενα επίσης παρουσιάζονται, καθιστώντας την εξαγωγή σαφών συμπερασμάτων και τον σχεδιασμό ενός κατάλληλου προτύπου αναφοράς αρκετά δύσκολα.



Σχήμα 2.4: Τυπική κατανομή μεγέθους-πλήθος σωματιδίων από την εξαγωγή κινητήρα Diesel [5]

Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η κατανομή του πλήθους και της μάζας των σωματιδίων από την εξαγωγή κινητήρα Diesel, σε σχέση με την διάμετρό τους, η οποία βρίσκεται στον οριζόντιο άξονα σε λογαριθμική κλίμακα. Το μεγαλύτερο μέρος της μάζας σωματιδίων συναντάται στην «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 και απαρτίζεται συνήθως από τις πτητικές οργανικές ενώσεις υδρογονανθράκων (και θείου παλαιότερα), ενώ μπορεί επίσης να περιλαμβάνει και στερεές ενώσεις άνθρακα και μετάλλων. Σε ποσοστό μεγαλύτερο από 90%, τα εκπεμπόμενα σωματίδια από ένα κινητήρα Diesel εμπίπτουν στην κατάσταση νανοσωματιδίων, το οποίο όμως αντιστοιχεί μόνο στο 1-20% της συνολικής μάζας των σωματιδίων. Τέλος, η «χονδροκόκη κατάσταση» (coarse mode) περιλαμβάνει το 5-20% της μάζας των σωματιδίων και αποτελείται από τα σωματίδια της φάσης συσσώρευσης, που έχουν επικαθήσει στην επιφάνεια των κυλίνδρων και της πολλαπλής εξαγωγής και στη συνέχεια συμπαρασύρονται.

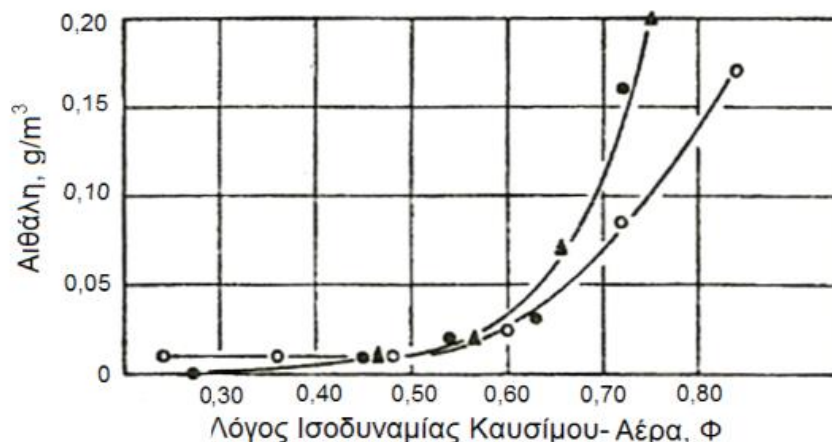
Επιπλέον, μέσω του Σχήματος 2.4 φαίνονται οι εξής κατηγορίες μεγέθους των ατμοσφαιρικών σωματιδίων:

- Σωματίδια PM₁₀ με D_p (particle diameter) < 10μm
- Λεπτά σωματίδια (fine particles) με D_p < 2,5μm
- Πολύ λεπτά σωματίδια (ultrafine particles) με D_p < 100nm
- Νανοσωματίδια (nanoparticles) με D_p < 50nm

Το μέγεθος των σωματιδίων αποτελεί χαρακτηριστικό παράγοντα της επίδρασης των εκπεμπόμενων σωματιδίων κινητήρων Diesel στο φυσικό περιβάλλον. Ειδικότερα, το μέγεθος επηρεάζει το χρόνο παραμονής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, τις οπτικές ιδιότητες και την επιφάνειά τους, και τις γενικότερες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Για παράδειγμα ο χρόνος παραμονής για τα σωματίδια με διάμετρο 0,1-10 μm είναι περίπου μία εβδομάδα, διάρκεια η οποία αποτελεί την μεγαλύτερη σχετικά με άλλες κατηγορίες μικροσωματιδίων. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα διότι μεγαλύτερα σωματίδια από αυτά απομακρύνονται αρκετά γρήγορα από την ατμόσφαιρα μέσω καθίζησης, ενώ τα μικρότερα απομακρύνονται μέσω διάχυσης και σύμπτυξης (π.χ. ο μέσος χρόνος παραμονής στην ατμόσφαιρα ενός σωματιδίου διαμέτρου 10 nm, είναι τα 15 λεπτά).

Κατά την διάρκεια της μόνιμης λειτουργίας του κινητήρα Diesel, δημιουργούνται συνήθως τα σωματίδια της φάσης συσσώρευσης (80-110nm). Στο αρχικό στάδιο της καύσης ευνοείται ο σχηματισμός σωματιδίων μεγέθους 80-90 nm, ωστόσο στην συνέχεια μέσω συσσωμάτωσης τα σωματίδια αιθάλης αποκτούν μεγαλύτερο μέγεθος. Με την αύξηση του φορτίου, άρα και της ποσότητας του εγχεόμενου καυσίμου, διευκολύνεται ο

σχηματισμός μεγαλύτερων σωματιδίων. Αντίστοιχα, κατά την άφορτη λειτουργία «ρελαντί» του κινητήρα, ευνοείται περισσότερο ο σχηματισμός σωματιδίων αιθάλης μικρότερου μεγέθους. Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η μεταβολή των εκπεμπόμενων σωματιδίων αιθάλης σε συνάρτηση με το λόγο ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα Φ (δηλαδή του φορτίου). Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως κατά την οξείδωση της αιθάλης, μειώνεται δραστικά ο αριθμός των σωματιδίων σε ολόκληρο το φάσμα των μεγεθών.



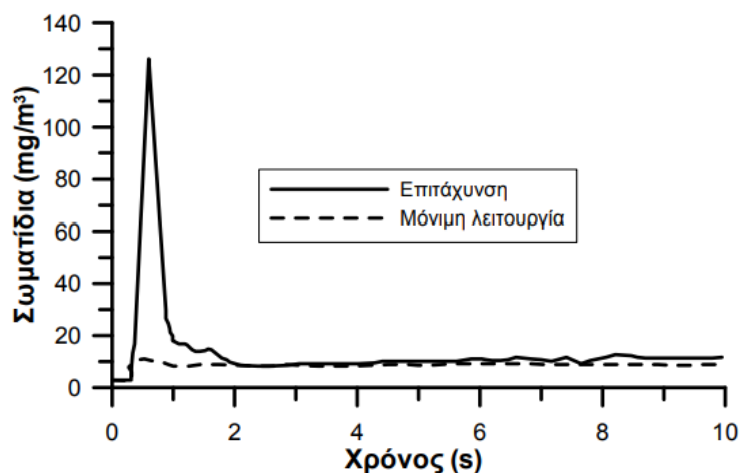
Σχήμα 2.5: Επίδραση λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα (Φ) στις εκπομπές αιθάλης [2]

Στους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη συγκέντρωση του αριθμού των σωματιδίων και την κατανομή του μεγέθους τους, συγκαταλέγεται ο τύπος του καυσίμου που χρησιμοποιείται, καθώς καύσιμα με πολύ μικρή περιεκτικότητα σε θείο είναι προτιμητέα για μείωση της γενικότερης εκπομπής σωματιδίων. Ακόμη, παρόμοια φαινόμενα έχουν παρατηρηθεί για υψηλότερες πιέσεις έγχυσης του καυσίμου στους κυλίνδρους και για χαμηλότερα ποσοστά ανακυκλοφορίας καυσαερίου εντός του θαλάμου καύσης (EGR).

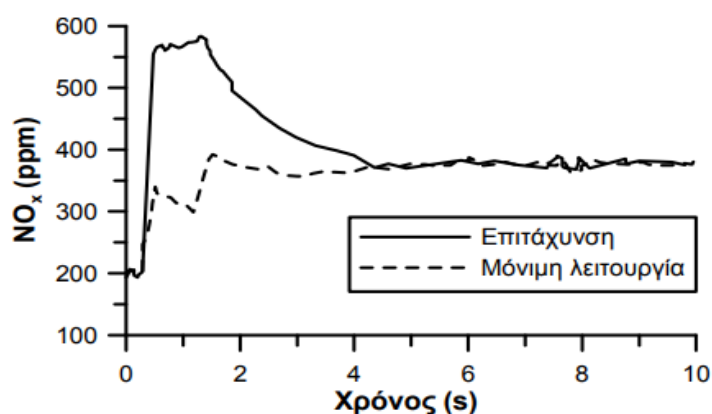
2.5 Συμπεριφορά εκπομπών καυσαερίων κατά την μεταβατική λειτουργία στρόβιλο-υπερπληρωμένων κινητήρων Diesel

Κατά την διάρκεια της μεταβατικής λειτουργίας στρόβιλο-υπερπληρωμένων κινητήρων Diesel, το φαινόμενο της υστέρησης του στρόβιλο-υπερπληρωτή οδηγεί σε συνθήκες καύσης στις οποίες υπάρχει σημαντική αύξηση (υπερακόντιση) των αέριων και σωματιδιακών ρύπων σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές της μόνιμης λειτουργίας

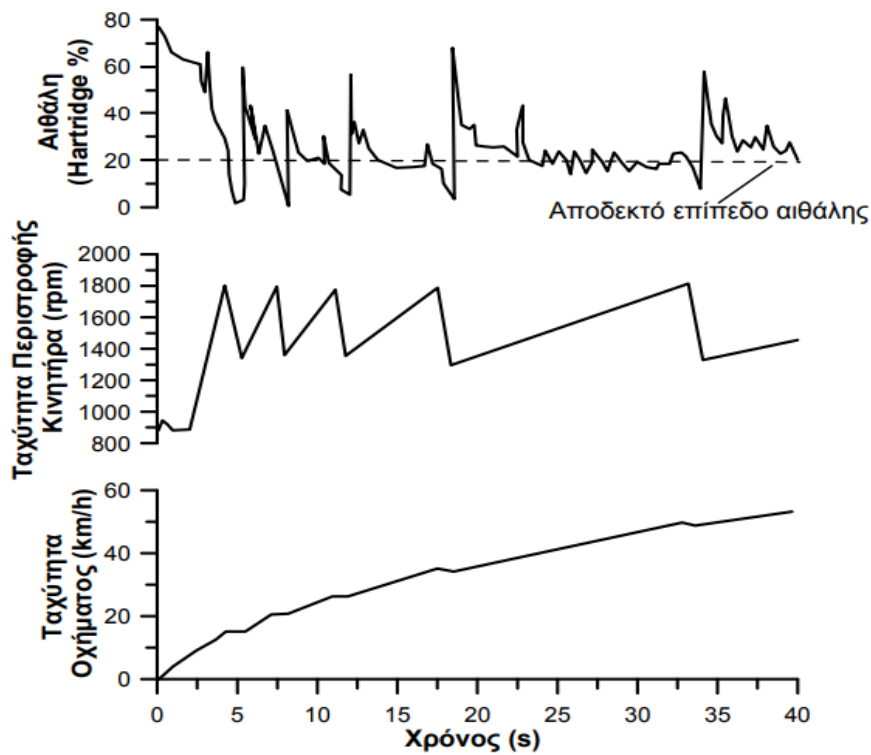
(δηλαδή σταθερή ταχύτητα περιστροφής κινητήρα και φορτίο). Παρακάτω στα Σχήματα 2.6 έως και 2.10, παρατίθενται μερικά τυπικά παραδείγματα της επίδρασης διακριτών μεταβολών στροφών ή φορτίου στους εκπεμπόμενους ρύπους, σε συνάρτηση πάντα με τον χρόνο είτε για μεμονωμένα χρονικά διαστήματα είτε για ολόκληρο κύκλο πόλης.



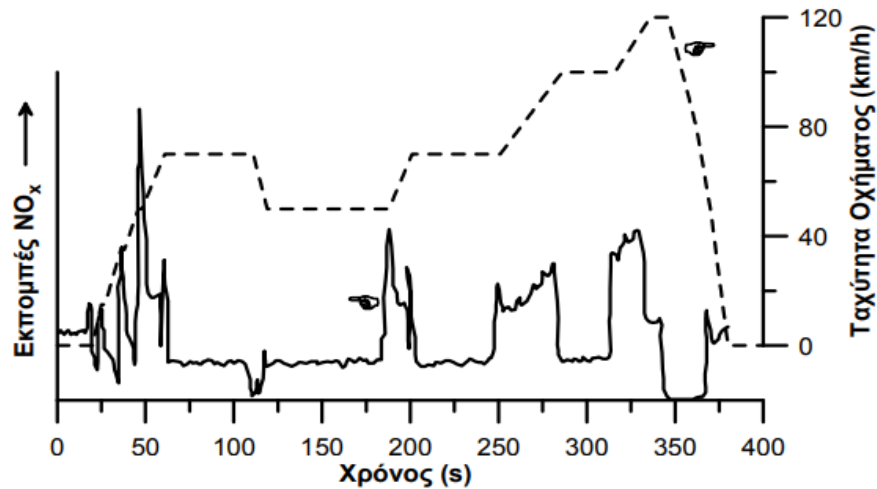
Σχήμα 2.6: Υπερακόντιση εκπομπών αιθάλης κατά τη διάρκεια επιτάχυνσης στρόβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel από την άφορτη λειτουργία («ρελαντί»). Η υπερακόντιση είναι μεγαλύτερη όσο πιο «χαμηλό» το αρχικό σημείο λειτουργίας, όσο πιο μεγάλη η μεταβολή στροφών ή φορτίου, όσο πιο απότομα αυτή πραγματοποιείται και όσο πιο μεγάλη η μέση πραγματική πίεση (rating) του κινητήρα [5]



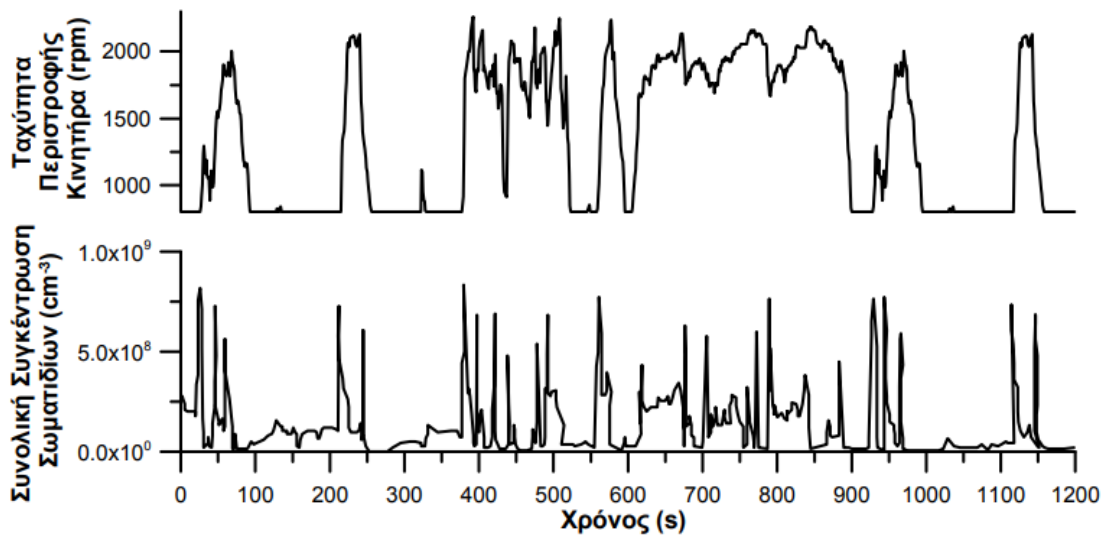
Σχήμα 2.7: Υπερακόντιση εκπομπών οξειδίων του αζώτου κατά τη διάρκεια επιτάχυνσης στρόβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel από την άφορτη λειτουργία («ρελαντί») [5]



Σχήμα 2.8: Εκπομπές αιθάλης κατά τη διάρκεια συνεχών αλλαγών ταχυτήτων σε υπερπληρωμένο κινητήρα Diesel οχήματος βαρέος τύπου, εισερχόμενο σε αυτοκινητόδρομο [5]



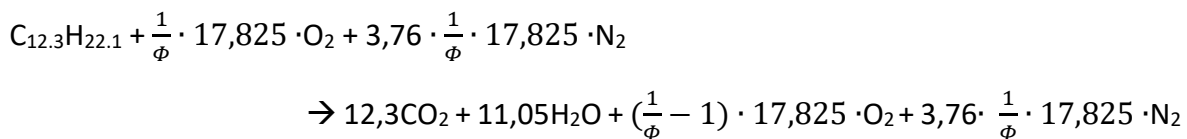
Σχήμα 2.9: Υπερακόντιση εκπομπών NO_x κατά τη διάρκεια του εκτός πόλης (EUDC) τμήματος του ευρωπαϊκού κύκλου πιστοποίησης οχημάτων NEDC στρόβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel [5]



Σχήμα 2.10: Ολική συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων κατά τη διάρκεια του αμερικανικού μεταβατικού κύκλου πόλης FTP βαρέων οχημάτων [5]

2.6 Συσχέτιση κατανάλωσης καυσίμου και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα CO₂

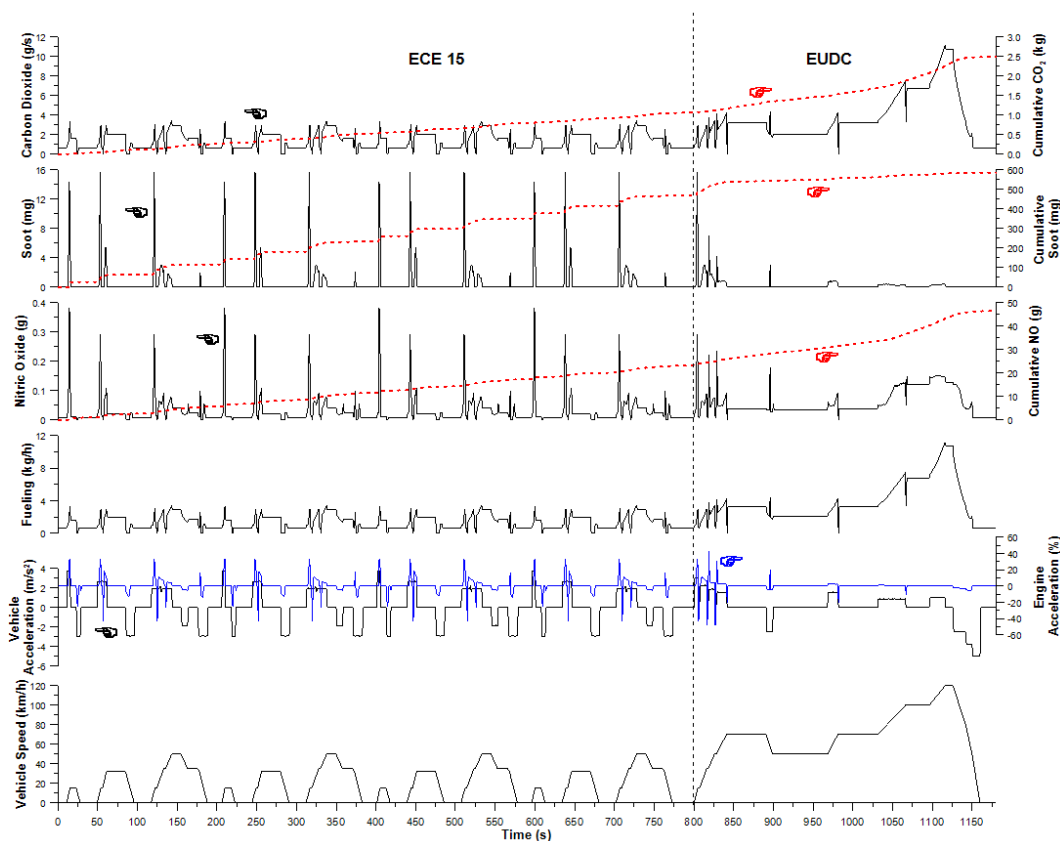
Το καύσιμο ενός κινητήρα Diesel ποικίλλει σε μικρό βαθμό από εφαρμογή σε εφαρμογή, με το συνηθέστερο χημικό τύπο Diesel που χρησιμοποιείται στα οχήματα να είναι ο $C_{12.3}H_{22.1}$. Θεωρώντας λοιπόν ότι η καύση του συγκεκριμένου καυσίμου εντός των κυλίνδρων είναι πλήρης (δηλαδή υπάρχει περίσσεια οξυγόνου και το καύσιμο δεν εμφανίζεται ως προϊόν) με λόγο καυσίμου-αέρα $\Phi < 1$ και αμελώντας την διάσταση των προϊόντων καύσης, μπορούμε να καταλήξουμε στην παρακάτω χημική εξίσωση της καύσης diesel με ατμοσφαιρικό αέρα:



Υποθέτοντας πως το diesel $C_{12.3}H_{22.1}$ έχει μοριακό βάρος περίπου ίσο με 169,7 kg/kmol και το διοξείδιο του άνθρακα CO₂ έχει αντίστοιχα μοριακό βάρος ίσο με 44 kg/kmol, καταλήγουμε μέσω της ανωτέρω αντίδρασης στο ακόλουθο συμπέρασμα.

Για παροχή καυσίμου Diesel $\dot{m}_{fuel}=1$ kg/h, η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα υπολογίζεται: $12,3 \cdot \frac{1}{169,7} \frac{kmol}{h} \cdot 44 \frac{kg}{kmol} = 3,189 \frac{kg_{CO_2}}{h}$

Επομένως, υπάρχει άμεση αναλογία μεταξύ του καταναλισκόμενου καυσίμου ενός οχήματος και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα CO₂ (περίπου 1 προς 3), άρα και μεγάλη εξάρτηση της παρούσας εκπομπής από το εγχεόμενο καύσιμο. Ωστόσο, η παρούσα περίπτωση περίσσειας οξυγόνου κατά την καύση πολλές φορές δεν ισχύει στην πραγματικότητα ($\Phi > 1$), καθώς στους πρώτους κύκλους λειτουργίας του κινητήρα μετά από κάθε επιτάχυνση ή αύξηση φορτίου παρατηρείται έλλειψη του απαιτούμενου οξυγόνου για την πλήρη καύση της αυξημένης ποσότητας καυσίμου. Συνεπώς, στις συνθήκες αυτές παρατηρείται αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου και υπερακόντιση των εκπομπών του CO₂. Στο ακόλουθο Σχήμα 2.11, γίνεται εμφανής η ομοιότητα των καμπυλών κατανάλωσης καυσίμου και εκπομπής CO₂, κατά την διάρκεια των μεταβολών ταχύτητας και φορτίου ενός κύκλου πόλης.



Σχήμα 2.11: Αποτελέσματα εκπομπών καυσαερίων και κατανάλωσης καυσίμου οχήματος στροβίλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel κατά την διάρκεια του κύκλου NEDC [14]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Μεταβατικοί Κύκλοι Πόλης

3.1 Εισαγωγή

Εδώ και αρκετά χρόνια, βασική προϋπόθεση για να πάρουν έγκριση και να κυκλοφορήσουν τα οχήματα στο δρόμο αποτελεί ο έλεγχος των εκπομπών καυσαερίων τους. Για την εξέταση της εκπομπής ρύπων των οχημάτων είναι απαραίτητη η χρήση μεταβατικών κύκλων πόλης (transient ή driving cycles), οι οποίοι είναι τυποποιημένες δοκιμές μεταβατικών συνθηκών. Οι κύκλοι πόλης χαρακτηρίζονται από μεγάλη διάρκεια (έως και 30 λεπτά) και ενσωματώνουν συχνές αλλαγές ταχύτητας και φορτίου, σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας, ώστε να προσομοιώνουν όσο το δυνατόν καλύτερα την λειτουργία του οχήματος σε πραγματικές συνθήκες. Ένας μεταβατικός κύκλος πόλης συνίσταται από μία ακολουθία σημείων, καθένα από τα οποία ορίζει είτε μία συγκεκριμένη ταχύτητα οχήματος (περίπτωση δοκιμής του *οχήματος*) είτε ένα συγκεκριμένο ζεύγος αριθμού στροφών και φορτίου (περίπτωση δοκιμής μόνον του *κινητήρα*). Τα δοκιμαστικά σημεία είναι διαιρεμένα σε χρονικά βήματα, ανά ένα δευτερόλεπτο, κατά την διάρκεια των οποίων η επιτάχυνση και η επιβράδυνση θεωρούνται σταθερές. Συνεπώς, η μεταβολή μεταξύ δύο διαδοχικών δοκιμαστικών σημείων θεωρείται πως γίνεται με γραμμικό τρόπο. Τέτοιου είδους τυποποίηση είναι αναγκαία προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα της σύγκρισης διαφορετικών οχημάτων ή κινητήρων, που πραγματοποιούν την ίδια λειτουργία.

Με σκοπό την λήψη μετρήσεων εκπεμπόμενων ρύπων, αντιπροσωπευτικών της πραγματικής λειτουργίας των κινητήρων, οι μεταβατικοί κύκλοι πόλης ενσωματώνουν όλες ή μερικές από τις παρακάτω καθημερινές συνθήκες οδήγησης:

- Ψυχρή (ή και θερμή) εκκίνηση
- Συχνές επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις
- Μεταβολή του φορτίου
- Συνθήκες άφορτης λειτουργίας του κινητήρα (idle), χαρακτηριστικές της οδήγησης σε αστικό περιβάλλον
- Οδήγηση σε προάστια ή αγροτικούς δρόμους
- Οδήγηση σε αυτοκινητόδρομο

Μέσω της εφαρμογής ενός μεταβατικού κύκλου πόλης για την δοκιμή νέων οχημάτων, ελέγχεται πλήρως ολόκληρο το εύρος λειτουργίας του κινητήρα και όχι μόνο σημεία μέγιστης ισχύος ή ροπής, ή μεμονωμένα σημεία (έστω και αν είναι «αντιπροσωπευτικά»). Επιπροσθέτως, οι σοβαρές ανακολουθίες των εκπεμπόμενων ρύπων που προκύπτουν

κατά την απότομη επιτάχυνση ή επιβράδυνση του οχήματος (προηγούμενο κεφάλαιο) λαμβάνονται υπόψιν, καθώς στις συνθήκες αυτές οι εκπομπές αέριων ρύπων και στερεών μικροσωματιδίων ξεπερνούν στιγμιαία κατά πολύ τα προβλεπόμενα όρια. Το γεγονός αυτό παρατηρείται κυρίως σε στροβιλο-υπερπληρωμένους κινητήρες, λόγω του φαινομένου της υστέρησης του στροβιλο-υπερπληρωτή (γνωστό ως turbocharger lag), κάτι το οποίο φάνηκε και στα διαγράμματα των εκπομπών καυσαερίων της Παραγράφου 2.5. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί πως πρωταρχικός στόχος των μεταβατικών κύκλων πόλης είναι ο υπολογισμός της συνολικής ποσότητας εκπεμπόμενων ρύπων και όχι ο προσδιορισμός συγκεκριμένων σημείων μεγιστοποίησης των εκπομπών αυτών.

Οι μεταβατικοί κύκλοι πόλης απαιτούν αρκετά περίπλοκες και πλήρως αυτοματοποιημένες πειραματικές εγκαταστάσεις, με ηλεκτρονικά ελεγχόμενο δυναμόμετρο, συσκευές ανάλυσης καυσαερίων γρήγορης απόκρισης, σήραγγες ανάμιξης και αραίωσης κλπ. Μέσω των απαιτητικών αυτών εγκαταστάσεων και των σύνθετων υπολογιστικών μοντέλων προσομοίωσης οχημάτων ή κινητήρων, επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός των εκπεμπόμενων ρύπων, σε συνθήκες όπου μπορούν να ελεγχθούν σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν την λειτουργία του οχήματος (π.χ. εξωτερική θερμοκρασία ή ταχύτητα του αέρα) γεγονός το οποίο εξασφαλίζει την επαναληψιμότητα και την συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων.

Ανάλογα με το εάν ελέγχεται ολόκληρο το όχημα ή μόνον ο κινητήρας του, προκύπτει η κύρια κατηγοριοποίηση των μεταβατικών κύκλων πόλης ως εξής:

- Κύκλος δυναμόμετρου πλαισίου
- Κύκλος δυναμόμετρου κινητήρα

Στους μεταβατικούς κύκλους της πρώτης κατηγορίας (chassis dynamometer cycle), υποβάλλονται συνήθως τα επιβατικά οχήματα και φορτηγά ελαφρού τύπου, όπου κατά την διάρκεια του κύκλου δοκιμής η ταχύτητα συσχετίζεται με τον χρόνο (speed vs time) και τα αποτελέσματα λαμβάνονται σε μορφή g/km.

Στην δεύτερη κατηγορία μεταβατικών κύκλων δοκιμής υποβάλλονται συνήθως οι κινητήρες βαρέων οχημάτων, λόγω μεγέθους, βάρους και τεράστιου αριθμού συνδυασμών κινητήρα-αμαξώματος των συγκεκριμένων οχημάτων. Ο κύκλος αυτός διεξάγεται σε μια πέδη δοκιμής κινητήρων, στην οποία ο κινητήρας ακολουθεί μια καθορισμένη αλληλουχία ζεύγους ταχύτητας περιστροφής και φορτίου σε σχέση με το χρόνο (engine speed/torque vs time). Τα αποτελέσματα της δοκιμής λαμβάνονται συνήθως σε μορφή g/kWh, δηλαδή ανάγονται στο έργο που παράγεται από τον κινητήρα συνολικά κατά τη διάρκεια του κύκλου [4].

3.2 Δυναμόμετρα

Το δυναμόμετρο (dynamometer) αποτελεί μια συσκευή που επιτρέπει την εφαρμογή ελεγχόμενης ταχύτητας και συνθηκών φορτίου σε ένα κινητήρα ή όχημα. Τα δυναμόμετρα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Δυναμόμετρα πλαισίων (chassis dynamometer) για την δοκιμή κυρίως επιβατικών αυτοκινήτων και οχημάτων ελαφρού τύπου
- Δυναμόμετρα κινητήρων (engine dynamometer) για την δοκιμή κινητήρων (κυρίως οχημάτων βαρέος τύπου)

Στα δυναμόμετρα πλαισίων, ολόκληρο το όχημα τοποθετείται στους κυλίνδρους έλξης, στους οποίους οδηγούνται οι κινητήριοι τροχοί του οχήματος, και χειρίζεται από έναν οδηγό. Παράλληλα, το όχημα δένεται στο πάτωμα και στις δύο πλευρές, ώστε να αποφευχθεί η μετακίνησή του κατά την διάρκεια της δοκιμής. Τα καυσαέρια της εξαγωγής συλλέγονται μέσω του συστήματος δειγματοληψίας, το οποίο θα αναλυθεί στην Παράγραφο 3.3. Σε μία οθόνη υπολογιστή, ορατή από το παρμπρίζ του αυτοκινήτου, παρέχονται όλες οι πληροφορίες ταχύτητας στον οδηγό (ταχύτητα ανά δευτερόλεπτο του κύκλου), ο οποίος καλείται να ακολουθήσει τον καθορισμένο κύκλο πόλης με όσο το δυνατόν υψηλότερη ακρίβεια. Ένα επιβατικό αυτοκίνητο εντός μίας εγκατάστασης δυναμόμετρου πλαισίου παρουσιάζεται παρακάτω στο Σχήμα 3.1.

Στόχος του δυναμόμετρου είναι να προσομοιώσει τόσο το φορτίο κατά την κίνηση του οχήματος στο δρόμο, όσο και την μαζική ροπή αδράνειας του οχήματος. Για την προσομοίωση της αεροδυναμικής αντίστασης, της αντίστασης τριβής κύλισης και της αντίστασης των επιταχύνσεων-επιβραδύνσεων του οχήματος, υπάρχει η δυνατότητα της επιβολής ανάλογης τιμής αντίστασης στους κυλίνδρους έλξης του δυναμόμετρου και της χρήσης μάζας κατάλληλης μαζικής ροπής αδράνειας (πάλι στον άξονα των κυλίνδρων έλξης). Σημαντικό είναι επίσης να τονιστεί πως η κλίση του οδοστρώματος δεν λαμβάνεται καθόλου υπόψιν σε μετρήσεις κύκλου πόλης.

Όπως προαναφέρθηκε, τα δυναμόμετρα πλαισίων χρησιμοποιούνται συνήθως για τη δοκιμή των επιβατικών αυτοκινήτων και άλλων ελαφρού τύπου οχημάτων. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις γίνεται δοκιμή στα συγκεκριμένα δυναμόμετρα και για οχήματα βαρέος τύπου (heavy duty vehicles), όπως στην περίπτωση που αναλύεται στην παρούσα διπλωματική εργασία (Κεφάλαιο 5).



Σχήμα 3.1: Επιβατικό αυτοκίνητο σε δυναμόμετρο πλαισίου [4]

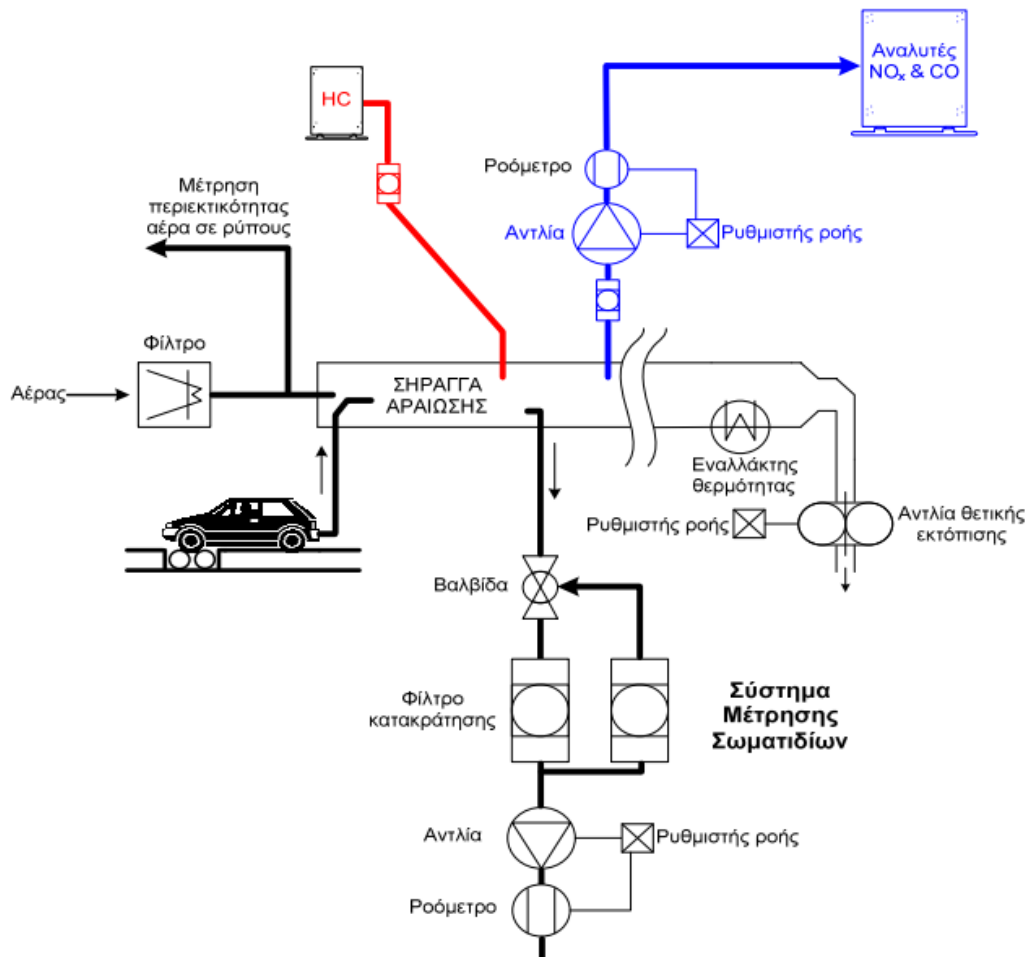
Στα δυναμόμετρα κινητήρων, ο εξεταζόμενος κινητήρας συνδέεται άμεσα σε μία πέδη. Μέσω αυτής της διάταξης (Σχήμα 3.2), το δυναμόμετρο πρέπει να αναπαράγει την συμπεριφορά ολόκληρου του οχήματος και του συστήματος μετάδοσης κίνησης, ενώ ειδικότερα, κατά την διάρκεια της μεταβατικής λειτουργίας πρέπει να ανταπεξέλθει σε καταστάσεις ανάγκης εξαιρετικά γρήγορης απόκρισης σε ροπή και ταχύτητα. Ηλεκτρικά δυναμόμετρα (συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος) είναι απαραίτητα για τους κύκλους δοκιμής που ενσωματώνουν τμήματα ετεροκίνησης, όπου το δυναμόμετρο οδηγεί τον κινητήρα (π.χ. στον αμερικανικό μεταβατικό κύκλο FTP, στον παγκόσμιο κύκλο WHTC καθώς και στον NRTC για οχήματα εκτός δρόμου) [4].



Σχήμα 3.2: Κινητήρας βαρέος τύπου συνδεδεμένος με δυναμόμετρο δοκιμής κινητήρων

3.3 Μεθοδολογία μετρήσεως εκπομπών ρύπων κατά την διάρκεια μεταβατικών κύκλων πόλης

Η διαδικασία μέτρησης των καυσαερίων που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια των μεταβατικών κύκλων πόλης είναι η δειγματοληψία σταθερού όγκου (CVS – constant volume sampling). Η παρούσα μέθοδος είναι αποδεκτή από την ισχύουσα νομοθεσία αρκετών χωρών τόσο για την πιστοποίηση ελαφρών όσο και βαρέων οχημάτων/κινητήρων. Αξίζει να σημειωθεί πως κατά την πιστοποίηση επιβατικών και ελαφρού τύπου οχημάτων, η διάταξη της δειγματοληψίας CVS συνδυάζεται με το δυναμόμετρο πλαισίου (Σχήμα 3.3) [4].



Σχήμα 3.3: Τυπικό σύστημα δειγματοληψίας σταθερού όγκου CVS με αντλία θετικής εκτόπισης για την πιστοποίηση των οχημάτων [4]

Η μέθοδος CVS συνίσταται στην αραίωση της ολικής ποσότητας ανεπεξέργαστου καυσαερίου με καθαρό αέρα περιβάλλοντος σε μία σήραγγα αραίωσης, ώστε να αποφευχθεί οποιαδήποτε τυχόν συμπύκνωση υδρατμών στην εγκατάσταση. Η συγκεκριμένη ανάμιξη επιτυγχάνεται μέσω μίας περιστροφικής αντλίας θετικής εκτόπισης ή αντλίας κενού κρίσιμης ροής «venturi», που αναρροφά το ισχυρώς αραιωμένο με αέρα καυσαέριο με σταθερή μετρήσιμη παροχή όγκου. Η σταθερή ροή όγκου διευκολύνει τον ακριβή υπολογισμό των εκπομπών με βάση την μάζα τους. Προαιρετικά, ένας εναλλάκτης θερμότητας μπορεί να εγκατασταθεί για αναλογική δειγματοληψία σωματιδίων και καθορισμό της ροής. Η κύρια σήραγγα αραίωσης είναι ουσιαστικά ένας θερμαινόμενος σωλήνας από ανοξείδωτο ατσάλι, κατάλληλου μήκους έτσι ώστε να επιτρέπει την πλήρη ανάμιξη καυσαερίου και αέρα. Η διάμετρος της σήραγγας καθορίζεται ανάλογα με την ροή των καυσαερίων, ωστόσο γενικότερα είναι αρκετά μικρή για να προκαλεί τυρβώδη ροή ($Re > 4000$). Όσον αφορά την ποσότητα του αραιωμένου αέρα, αυτή πρέπει να είναι αρκετή ώστε να υπάρχει δυνατότητα ψύξης του μίγματος καυσαερίου-αέρα σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα και σε θερμοκρασία μικρότερη από 325K.

Κατά το στάδιο των μετρήσεων, αντλούνται δείγματα αερίων από τη σήραγγα αραίωσης στο σημείο όπου το καυσαέριο είναι πλήρως αναμεμιγμένο με το διάλυμα αέρα (συνήθως ≥ 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 περίπου 100 λίτρων. Πρώτου εξέλθουν τα αέρια στην ατμόσφαιρα μέσω της αντλίας, ψύχονται σε εναλλάκτη θερμότητας μέχρι την θερμοκρασία περιβάλλοντος ($\pm 5^\circ\text{C}$), με σκοπό να διατηρήσουν σταθερή πυκνότητα. Επομένως, και η παροχή μάζας της αντλίας είναι σταθερή, καθώς η παροχή όγκου μέσω αυτής είναι επίσης σταθερή. Έπειτα από την δοκιμή, οι συγκεντρώσεις των αερίων στα δείγματα μετρούνται μέσω ενός αναλυτή καυσαερίων.

Η μεθοδολογία που προαναφέρθηκε για την μέτρηση των αερίων CO, HC και NOx, ισχύει για κινητήρες Otto και Diesel, ωστόσο για την μέτρηση των HC σε κινητήρες Diesel υπάρχει η ιδιαιτερότητα του σχετικά υψηλού σημείου υγροποίησης των καυσαερίων που περιλαμβάνουν HC, λόγω του βαρύτερου καυσίμου που χρησιμοποιείται. Για τον λόγο αυτό, γίνεται χρήση ενός θερμαινόμενου σωλήνα δειγματοληψίας, μέσω του οποίου αντλείται μικρή ποσότητα δείγματος και οδηγείται στον αντίστοιχο αναλυτή. Σε περίπτωση που γινόταν η συλλογή των καυσαερίων με σάκους, θα λάμβανε χώρα σημαντική συμπύκνωση των HC στα τοιχώματά τους, με συνέπεια λανθασμένη μέτρηση.

Σχετικά με την μέτρηση των σωματιδίων (PM), ένα δείγμα της συνολικής ροής από την σήραγγα ανάμιξης αποσπάται και οδηγείται στο σύστημα δειγματοληψίας σωματιδίων, στο οποίο τα σωματίδια συλλέγονται με φίλτρα από ίνες υάλου (fiber glass) επικαλυμμένα

με τεφλόν. Για την εξασφάλιση της επαναληψιμότητας της μέτρησης των ασταθών συστατικών που απορροφώνται από το φίλτρο, είναι αναγκαίο να επιτευχθεί ισορροπία του φίλτρου σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και επίπεδο υγρασίας. Η ολική μάζα που συλλέγεται στα φίλτρα κατά την διάρκεια του μεταβατικού κύκλου καθορίζει την εκπομπή σωματιδίων, η οποία κυρίως επικεντρώνεται στην εκπομπή αιθάλης και οργανικού κλάσματος με επικίνδυνα χαρακτηριστικά για την υγεία των ζωντανών οργανισμών. Τέλος, γίνεται υπολογισμός μίας μέσης τιμής κατά τον μεταβατικό κύκλο (σε g/test, g/km ή g/KWh) των αερίων και σωματιδιακών εκπομπών, με σκοπό την σύγκριση με τα επιβαλλόμενα από την νομοθεσία όρια.

Το σύστημα CVS που περιγράφηκε στην παρούσα παράγραφο, έχει μεγάλες χωρικές απαιτήσεις και αρκετό κόστος. Ακόμη, η συγκεκριμένη μέθοδος έχει το μειονέκτημα πως ο υπολογισμός της συνολικής ποσότητας καυσαερίων επιτυγχάνεται χωρίς να γίνεται υπόδειξη ούτε των στιγμιαίων σημείων μεγιστοποίησης των εκπομπών ούτε του χρονικού διαστήματος της δοκιμής που οι εκπομπές κυρίως δημιουργούνται.

3.4 Μεταβατικός κύκλος WTVC βαρέων οχημάτων

Υπεύθυνη για την ανάπτυξη του τεχνικού πλαισίου για τους κανονισμούς εκπομπών που επιβάλλονται από την νομοθεσία, είναι η ομάδα ειδικών για την μόλυνση και την ενέργεια (GRPE) της οικονομικής επιτροπής των Ηνωμένων Εθνών (UNECE). Στο 34^ο συνέδριο της GRPE, εξουσιοδοτήθηκε η ομάδα WHDC για την ανάπτυξη μίας παγκόσμιας εναρμονισμένης διαδικασίας πιστοποίησης βαρέος τύπου οχημάτων. Ο βασικός στόχος του ερευνητικού προγράμματος ήταν να αναπτύξει έναν παγκόσμιο εναρμονισμένο κύκλο δοκιμής κινητήρων, για την πιστοποίηση εκπομπών ρύπων σε κινητήρες οχημάτων βαρέος τύπου [4,15]. Τα χαρακτηριστικά που έπρεπε να διαθέτει ο συγκεκριμένος κύκλος, είναι τα εξής:

- Να είναι αντιπροσωπευτικός, σε παγκόσμια κλίμακα, της λειτουργίας των κινητήρων βαρέων οχημάτων υπό πραγματικές συνθήκες
- Να δίνει όσο το δυνατόν καλύτερη δυνατότητα ελέγχου των εκπεμπόμενων ρύπων σε πραγματικές συνθήκες
- Να μπορεί να εφαρμοστεί σε προηγμένες τεχνολογίες οχημάτων της εποχής, καθώς και σε μελλοντικές
- Να συσχετίζει εκπομπές διαφορετικών κινητήρων/τεχνολογιών, με σκοπό την ακριβή ταξινόμηση τους
- Να αποτελέσει γενικότερα μία βάση για την πιστοποίηση εκπομπών καυσαερίων, με δυνατότητα μελλοντικής περαιτέρω εξέλιξης του

Το πρώτο βήμα για την υλοποίηση του παγκόσμιου εναρμονισμένου κύκλου δοκιμής κινητήρων ήταν η συλλογή και η ανάλυση δεδομένων της οδηγικής συμπεριφοράς σε όλες τις περιπτώσεις πραγματικών συνθηκών, ο καθορισμός των σημαντικότερων παραμέτρων που επηρεάζουν την λειτουργία ενός κινητήρα οχήματος βαρέος τύπου, καθώς και ο υπολογισμός του συντελεστή βαρύτητας κάθε εφαρμογής οχήματος βαρέος τύπου για την δημιουργία του κύκλου. Όλα τα ανωτέρω στατιστικά έπρεπε να ληφθούν από διαφορετικές περιοχές του κόσμου ώστε να εξασφαλίζεται η παγκόσμια εναρμόνιση του κύκλου.

Οι σημαντικότερες παράμετροι που θεωρήθηκαν πως επηρεάζουν την οδηγική συμπεριφορά ενός οχήματος βαρέος τύπου, παρουσιάζονται παρακάτω:

- Κατηγορία δρόμου (εύρος ταχυτήτων οχήματος στον δρόμο)
- Κλάση οχήματος
- Λόγος φορτίου και ισχύος προς την μάζα του οχήματος
- Κλίση του δρόμου
- Κυκλοφοριακή συμφόρηση και έλεγχος οδικής κυκλοφορίας

Ωστόσο, η κλίση του δρόμου και η κυκλοφοριακή συμφόρηση σε κάθε χώρα δεν ήταν δυνατόν να ληφθούν σε δεδομένα καθώς υπάρχουν ποικίλες περιπτώσεις ανά διαδρομή.

Για την συλλογή δεδομένων οδηγικής συμπεριφοράς, ήταν υπεύθυνες οι εταιρίες ΤΥΝ και ΤΝΟ, οι οποίες μέχρι το τέλος του Φεβρουαρίου του 1999 είχαν συνθέσει μία βάση δεδομένων αποτελούμενη από δεδομένα 65 διαφορετικών οχημάτων από Αυστραλία, Ευρώπη, Ιαπωνία και Η.Π.Α. Πιο συγκεκριμένα, η βάση δεδομένων περιελάμβανε [4]:

- ❖ 9 ελαφρού τύπου φορτηγά (μέγιστη μάζα < 7,5 tn) με συνολική διανυθείσα απόσταση 2213 km
- ❖ 20 φορτηγά (μέγιστη μάζα $\geq 7,5$ tn) και ένα πούλμαν με συνολική διανυθείσα απόσταση 13428 km
- ❖ 23 φορτηγά με τρέιλερ (trailer) με συνολική διανυθείσα απόσταση 56324 km
- ❖ 11 λεωφορεία δημόσιας μεταφοράς με συνολική διανυθείσα απόσταση 2473 km

Στα δεδομένα συμπεριλαμβάνεται οδήγηση υπό ποικίλες κατηγορίες δρόμων (υπαίθριους, αστικούς και αυτοκινητόδρομους), ποικίλες κλάσεις οχημάτων, αρκετές κυκλοφοριακές συνθήκες ανά χώρα, διαφορετικά φορτία, και λόγους ισχύος προς μάζας οχημάτων.

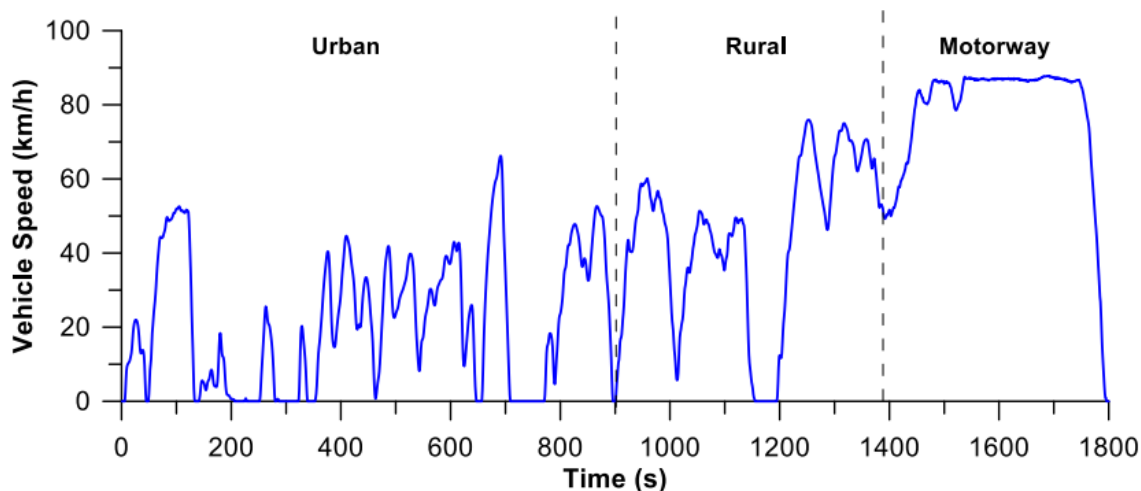
Όσον αφορά τον συντελεστή βαρύτητας ανά κλάση οχήματος βαρέος τύπου, κρίθηκε μέσω στατιστικής ανάλυσης αρκετών δεδομένων, να διαχωριστεί ανάλογα με την κατηγορία του οχήματος, με τον λόγο ισχύος προς την μάζα του οχήματος κάθε κατηγορίας και με την χώρα προέλευσης των δεδομένων (Πίνακας 3.1). Ο κύριος

παράγοντας που επηρέασε σε μεγάλο βαθμό τον συντελεστή βαρύτητας, ήταν η συνολική χρήση κάθε κατηγορίας οχήματος βαρέος τύπου παγκοσμίως κατά την διάρκεια της λειτουργικής ζωής του οχήματος.

Πίνακας 3.1: Κατηγοριοποίηση συντελεστή βαρύτητας ανάλογα με τα χαρακτηριστικά οχήματος βαρέος τύπου και της προέλευσης του [15]

vehicle cat.	power to mass ratio class	Europe			Japan			USA			Sum
		urban	rural	motor way	urban	rural	motor way	urban	rural	motor way	
rigid trucks	1	5.2%	1.8%	2.0%	3.4%	1.2%	0.9%	3.3%	1.8%	0.6%	20.2%
rigid trucks	2	3.1%	1.7%	2.3%	6.0%	2.1%	1.6%	4.4%	2.4%	0.8%	24.3%
rigid trucks	3	3.2%	2.0%	2.5%	4.0%	1.4%	1.1%	2.6%	1.4%	0.5%	18.7%
trailer trucks	1	0.8%	1.0%	2.2%	0.3%	0.1%	0.1%	1.1%	0.8%	0.8%	7.1%
trailer trucks	2	0.8%	1.0%	2.3%	0.4%	0.2%	0.1%	2.1%	1.6%	1.5%	10.0%
trailer trucks	3	1.0%	1.3%	2.8%	0.2%	0.1%	0.1%	2.9%	2.2%	2.1%	12.6%
buses	1	2.8%	1.2%	0.0%	1.4%	0.4%	0.0%	0.7%	0.5%	0.1%	7.1%
	Sum	16.9%	9.9%	14.1%	15.7%	5.4%	3.9%	17.0%	10.7%	6.3%	100.0%

Μέσω της μεθοδολογίας που προαναφέρθηκε, δημιουργήθηκε ο **παγκόσμιος μεταβατικός κύκλος οχημάτων (WTVC)** ή **παγκόσμιος εναρμονισμένος κύκλος οχημάτων (WHVC)**. Ο κύκλος πόλης WTVC αποτελεί έναν κύκλο δυναμόμετρου **πλαισίου**, διάρκειας 1800 δευτερολέπτων, που συνίσταται από τρία μέρη, την προσομοίωση οδήγησης σε αστική περιοχή (900 s, urban), σε υπαίθρια περιοχή (480 s, rural) και σε αυτοκινητόδρομο (420 s, motorway). Το προφίλ ταχύτητας του κύκλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Προφίλ ταχύτητας κύκλου WTVC [4]

Ακόμη, τα χαρακτηριστικά κίνησης ενός οχήματος ανά τομέα κατά την διάρκεια του WTVС, φαίνονται στον ακόλουθο Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά κίνησης για κάθε περιοχή οδήγησης και για ολόκληρο τον κύκλο WTVС [4]

Κύκλος	Διάρκεια (s)	Απόσταση (m)	Μέγιστη Ταχύτητα (km/h)	Μέση Ταχύτητα (km/h)	Ταχύτητα Οδήγησης (km/h)	Μέγιστη Επιτάχυνση (m/s ²)	Χρόνος αδράνειας (%)	Μέση τιμή Επιτάχυνσης (m/s ²)
Urban	900	5320	66,2	21,3	27,0	1,59	20,9	0,181
Rural	480	5810	75,9	43,6	47,7	1,17	8,5	0,134
Motorway	420	8940	87,8	76,6	77,4	0,41	1,0	0,070
WTVС	1800	20072	87,8	40,1	46,1	1,59	12,9	0,107

Τέλος, πρέπει να τονιστεί πως ο κύκλος WTVС δεν είναι θεσμοθετημένος, ωστόσο αποτέλεσε θεμέλιο για την ανάπτυξη των δύο θεσμοθετημένων κύκλων πιστοποίησης κινητήρων οχημάτων βαρέος τύπου WHTC και WHSC, μεταβατικής και μόνιμης λειτουργίας αντίστοιχα [15]. Οι κύκλοι WHTC και WHSC έχουν εφαρμοστεί στην Ευρωπαϊκή Ένωση από το Πρότυπο εκπομπών ρύπων Euro VI (2014), καθώς και σε άλλες χώρες (π.χ. Κίνα, Ν. Κορέα κλπ).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Μοντελοποίηση Υβριδικού Οχήματος βαρέος τύπου μέσω του Λογισμικού GT-SUITE

4.1 Γνωριμία με το λογισμικό GT-Suite

Το λογισμικό GT-Suite αποτελεί προϊόν της εταιρίας Gamma Technologies, η οποία εδρεύει στις ΗΠΑ και παρέχει εξειδικευμένο λογισμικό σε εταιρίες που δραστηριοποιούνται κυρίως στην βιομηχανία κινητήρων και οχημάτων. Μέσω του προγράμματος GT-Suite δίνεται στους χρήστες η δυνατότητα της εικονικής αναπαράστασης κινητήρων, συστημάτων μετάδοσης καθώς και της προσομοίωσης μεγάλου εύρους εφαρμογών που σχετίζονται άμεσα με την αυτοκινητοβιομηχανία.

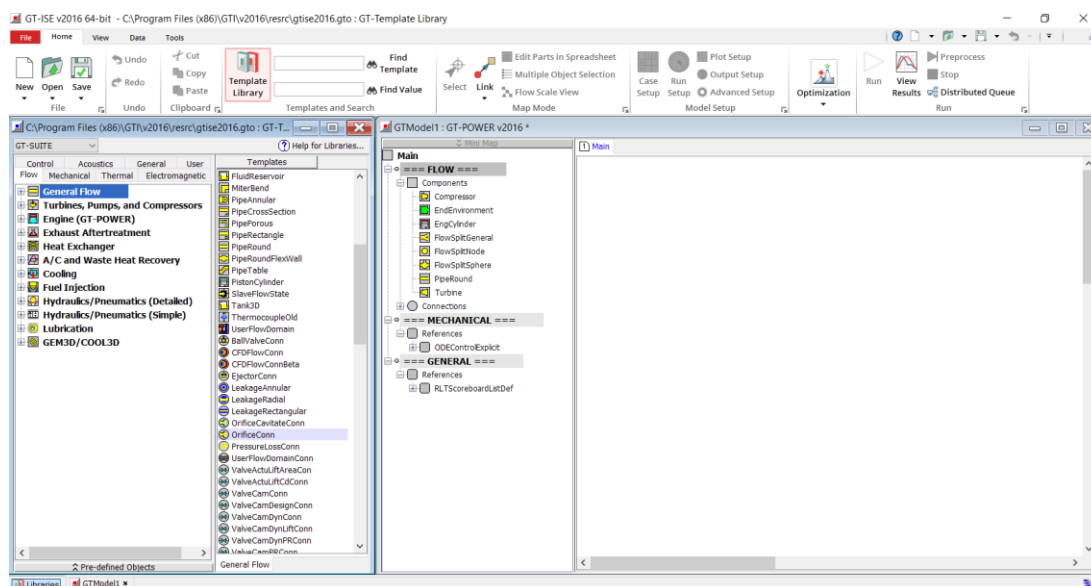
Ενδεικτικά, κάποιες από τις εφαρμογές που επικεντρώνεται το πακέτο GT-Suite είναι οι εξής:

- Μοντελοποίηση κινητήρων (GT-Power)
- Ανάλυση δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων
- Επεξεργασία καυσαερίων και ρύπων
- Ακουστική συστήματος εισαγωγής και εξαγωγής
- Δυναμική οχήματος
- Προσομοίωση μοντέλων πραγματικού χρόνου
- Μοντελοποίηση ηλεκτρικών και υβριδικών συστημάτων
- Συστήματα ψύξης κινητήρων
- Συστήματα κλιματισμού και θέρμανσης
- Θερμική μελέτη οχήματος
- Συστήματα έγχυσης καυσίμου
- Λίπανση συστημάτων
- Κιβώτια ταχυτήτων και ιμαντοκίνηση
- Υδραυλικά συστήματα
- Δυναμική και κινηματική ανάλυση βαλβίδων, στροφαλοφόρου και εκκεντροφόρου
- Ενεργειακή διαχείριση οχήματος
- Μοντελοποίηση συστημάτων μετάδοσης
- Κυψέλες καυσίμου

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το υπο-πρόγραμμα του λογισμικού GT-Suite, **GT-Power**, το οποίο εξειδικεύεται όπως προαναφέρθηκε και παραπάνω στην μοντελοποίηση κινητήρων. Η χρήση του GT-Power πραγματοποιήθηκε μέσω της άδειας (license) που υπάρχει στο εργαστήριο Μηχανών Εσωτερικής Καύσης του Ε.Μ.Π.

4.2 Περιβάλλον εργασίας GT-Power

Κατά την δημιουργία ενός νέου μοντέλου προσομοίωσης, το GT-Power παρέχει μία βιβλιοθήκη (library) με όλα τα πρότυπα εργαλεία-στοιχεία (templates) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εικονική σχεδίαση και προσομοίωση ενός κινητήρα. Σε κάθε εφαρμογή που είναι επιθυμητό να προσομοιωθεί, ο χρήστης επιλέγει και εισάγει τα απαραίτητα στοιχεία (π.χ. σωλήνες εισαγωγής, εγχυτήρες, συμπιεστής, κύλινδροι κλπ), στα οποία, αφού ορίσει τα αναγκαία χαρακτηριστικά (attributes) που απαιτούνται από το πρόγραμμα, όπως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των σωλήνων της πολλαπλής εισαγωγής κλπ, αυτά προστίθενται στην βιβλιοθήκη της συγκεκριμένης εφαρμογής (project library). Τέλος, αφού συμπληρωθεί η βιβλιοθήκη της εφαρμογής με όλα τα απαραίτητα στοιχεία για την υλοποίησή της, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να μεταφέρει τα στοιχεία στο χάρτη εργασίας (project map) και να τα συνδέσει κατάλληλα μεταξύ τους, ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Το παρακάτω Σχήμα 4.1 απεικονίζει το περιβάλλον εργασίας GT-Power που προαναφέρθηκε.

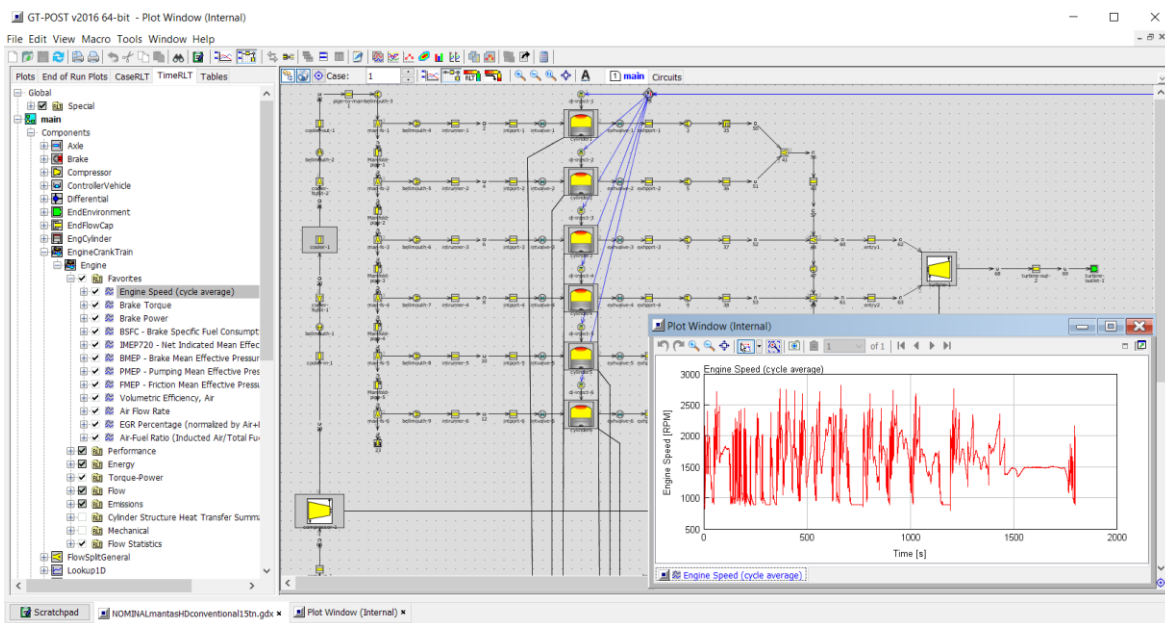


Σχήμα 4.1: Περιβάλλον εργασίας GT-Power

Μετά την ολοκλήρωση της κατάλληλης σύνδεσης κάθε επιμέρους στοιχείου, ο χάρτης εργασίας θα έχει λάβει την μορφή ενός μονογραμμικού διαγράμματος, ενώ κάθε στοιχείο του χάρτη πλέον θα αποτελεί ένα κομμάτι (part) του μοντέλου. Στην μορφή αυτή, ο χρήστης έχει πολύ καλή εποπτεία κάθε κομματιού του μοντέλου και των μεταξύ τους συνδέσεων, με αποτέλεσμα να μπορεί να μεταβάλλει τυχόν παραμέτρους με σχετική ευκολία.

Εάν το συγκεκριμένο μοντέλο στο τελικό του στάδιο είναι λειτουργικό, το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα να προσομοιωθούν διάφορα σενάρια (cases) σταθερής ή μεταβατικής λειτουργίας, καθώς και σενάρια Κύκλου Πόλης (Driving Cycle), σε συνθήκες που επιλέγει ο χρήστης.

Κατά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης των επιθυμητών σεναρίων, τα αποτελέσματα λαμβάνονται μέσω του εργαλείου GT-Post σε μορφή διαγραμμάτων και πινάκων, όπου ο χρήστης μπορεί να τα επεξεργασθεί περαιτέρω (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου μέσω GT-Post

4.3 Κατασκευή μοντέλου ενός υβριδικού οχήματος βαρέος τύπου σε περιβάλλον GT-Power

4.3.1 Δημιουργία μοντέλου κινητήρα Diesel

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει βασιστεί σε μία ήδη περατωθείσα διπλωματική εργασία [6]. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, το μοντέλο που κατασκευάστηκε είναι συνέχεια του ήδη υπάρχοντος μοντέλου. Η τελική διάταξη του μοντέλου στο χάρτη εργασίας του προγράμματος GT-Power απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3.

Ο κινητήρας Diesel που χρησιμοποιήθηκε ως βάση στην παρούσα μελέτη βασίστηκε στον κινητήρα **Mercedes-Benz OM366LA**, ο οποίος είναι εγκατεστημένος στο εργαστήριο Μ.Ε.Κ. της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Πρόκειται για κινητήρα 4-Χ Diesel, στροβιλο-υπερπληρωμένο με ενδιάμεση ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης και άμεσης έγχυσης καυσίμου (Direct Injection). Πιο συγκεκριμένα, ο κινητήρας διαθέτει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

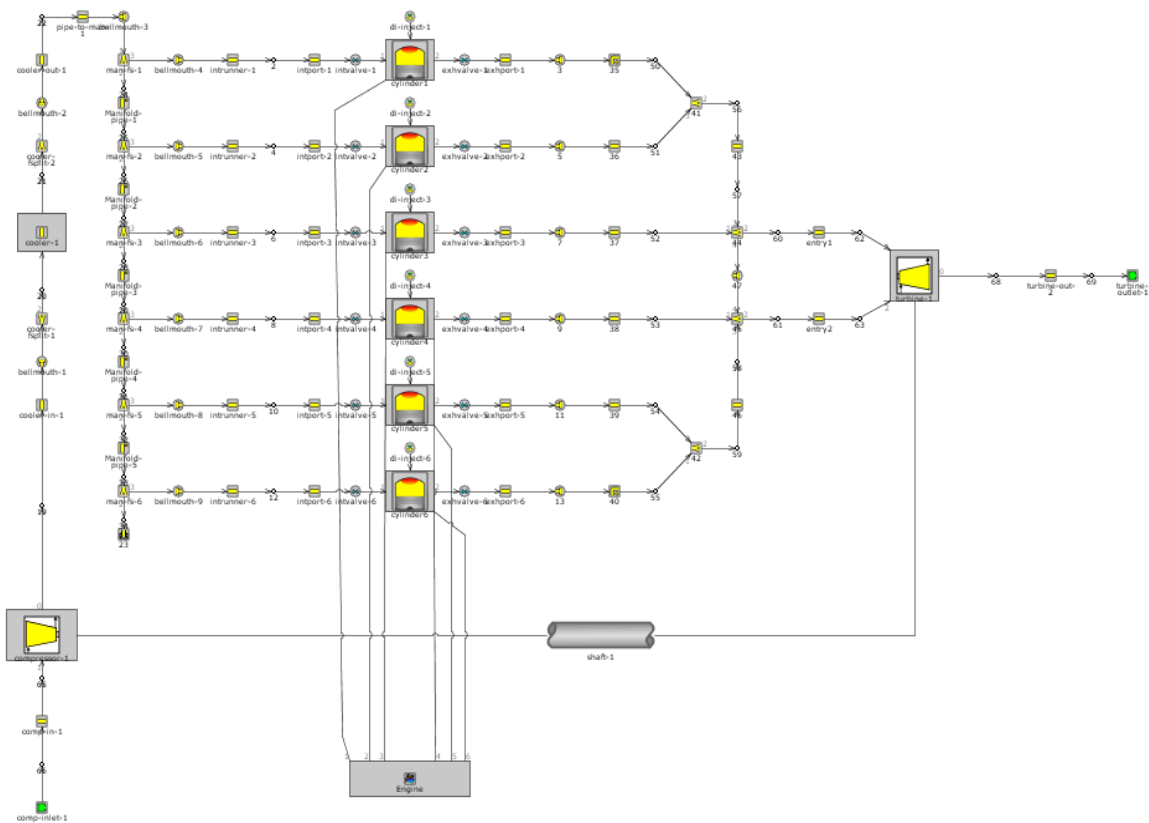
- Αριθμός κυλίνδρων: $z = 6$ σε σειρά
- Διάμετρος εμβόλου: $D = 97,5 \text{ mm}$
- Ακτίνα στροφάλου: $r = 66,5 \text{ mm}$
- Διαδρομή εμβόλου: $s = 2r = 133 \text{ mm}$
- Μήκος διωστήρα: $L = 230 \text{ mm}$
- Βαθμός συμπίεσης: $\varepsilon = 18$

Επομένως, ο όγκος εμβολισμού κάθε κυλίνδρου είναι: $V_h = \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4}\right) \cdot s = 993,003 \text{ cm}^3$.
Εύκολα υπολογίζεται και ο συνολικός όγκος εμβολισμού του κινητήρα:

$$V_H = z \cdot V_h = 5958,018 \text{ cm}^3$$

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

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



Σχήμα 4.3: Μοντέλο κινητήρα Diesel με απλή στροβίλο-υπερπλήρωση στο χάρτη εργασίας του GT-Power

4.3.2 Μοντελοποίηση οχήματος βαρέος τύπου και συστήματος μετάδοσης κίνησης-ισχύος στο περιβάλλον του GT-Power

Για την μελέτη της απόκρισης του συγκεκριμένου κινητήρα κατά την διάρκεια ενός κύκλου πόλης, ήταν απαραίτητη η μοντελοποίηση του οχήματος βαρέος τύπου και του συστήματος μετάδοσης κίνησης. Ως βάση για την μοντελοποίηση αυτή χρησιμοποιήθηκε η περατωθείσα διπλωματική που αναφέρθηκε προηγουμένως [6], ωστόσο στην παρούσα διπλωματική σε αρκετά τμήματα της μοντελοποίησης κρίθηκε απαραίτητη η χρήση δεδομένων που πλησίαζαν περισσότερο τις πραγματικές συνθήκες. Στην συγκεκριμένη ενότητα, θα αναλυθούν τα χαρακτηριστικά των διαφόρων επί μέρους κομματιών της μοντελοποίησης αυτής, καθώς και τα στάδια κατασκευής τους μέσω του προγράμματος GT-Power.

ΟΧΗΜΑ ΒΑΡΕΟΣ ΤΥΠΟΥ (HEAVY-DUTY VEHICLE)

Ένα παράδειγμα οχήματος βαρέος τύπου, το οποίο είναι παραπλήσιο με το όχημα που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.

Τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη οχήματος βαρέος τύπου παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 4.1.



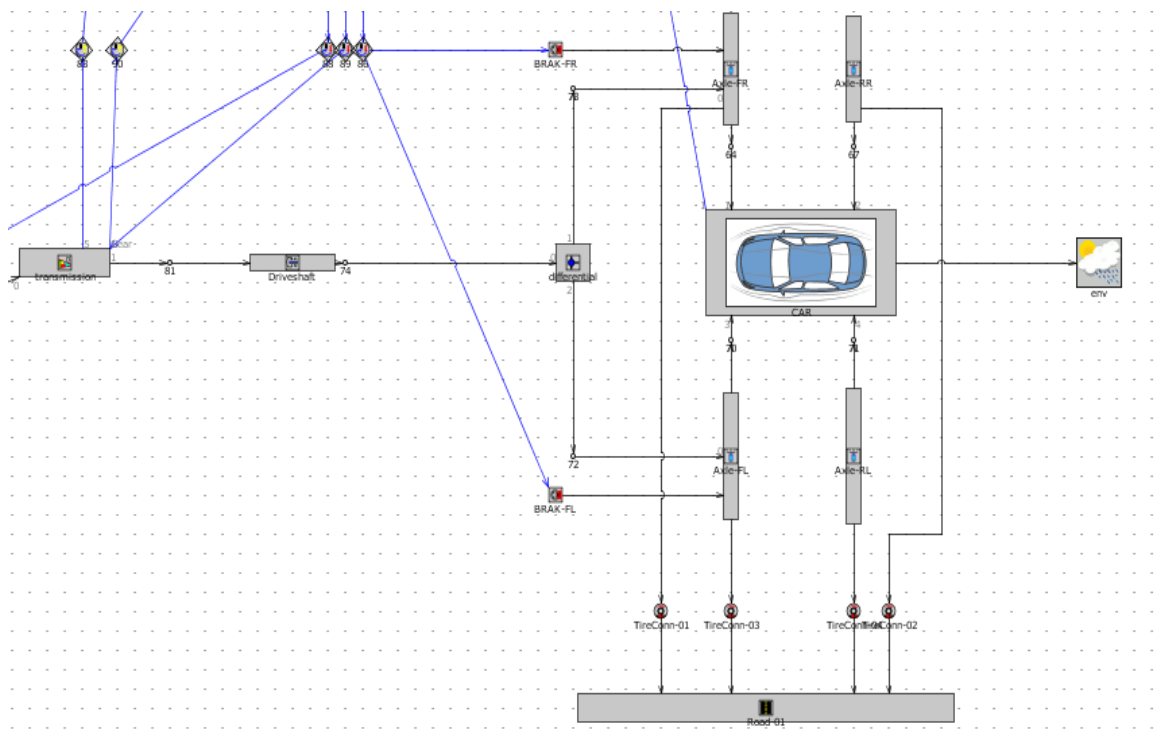
Σχήμα 4.4: Παράδειγμα παραπλήσιου με το υπό μελέτη οχήματος βαρέος τύπου

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά ονομαστικού (nominal) οχήματος

Μάζα Οχήματος (m_v)	8,2 t
Μάζα Φορτίου-Τρέιλερ (m_c)	7 t
Μετωπική Επιφάνεια (A_f)	6 m²
Μεταξόνιο (wheelbase)	3,8 m
Συντελεστής Αεροδυναμικής Αντίστασης (C_d)	0,6
Ακτίνα Τροχού (r_{wheel})	0,4131 m

Στο ξεκίνημα της μοντελοποίησης, ο χρήστης καταχωρεί μέσω παραθύρων εισαγωγής παραμέτρων του GT-Power τα βασικά χαρακτηριστικά του οχήματος. Συγκεκριμένα, εισάγεται η μάζα οχήματος και φορτίου-τρέιλερ, η πυκνότητα του εγγεόμενου καυσίμου (Diesel) καθώς και τα αεροδυναμικά του χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά αυτά αποτελούνται κυρίως από το συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης και την μετωπική επιφάνεια, παράμετροι που διαδραματίζουν βασικό ρόλο στην απόκριση ολόκληρου του μοντέλου. Αφού καταχωρηθούν και συμπληρωματικές παράμετροι στο όχημα, π.χ. το μεταξόνιο, ο χρήστης μπορεί να εισάγει περαιτέρω κομμάτια του μοντέλου όπως ελαστικά, ημιαξόνια, φρένα και οδόστρωμα, στα οποία είναι επίσης αναγκαίο να δηλωθούν οι απαραίτητες παράμετροι. Έπειτα από κατάλληλη σύνδεση των κομματιών, το μοντέλο λαμβάνει την μορφή του παρακάτω σχήματος (Σχήμα 4.5).

Τέλος, πρέπει να τονιστεί πως ανάμεσα σε ελαστικά και οδόστρωμα, ο συντελεστής αντίστασης κύλισης του ελαστικού, που συνδέεται άμεσα με την τραχύτητα του οδοστρώματος, έλαβε την τιμή **0,0115**. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε οδόστρωμα φυσιολογικών χαρακτηριστικών και συνθηκών.

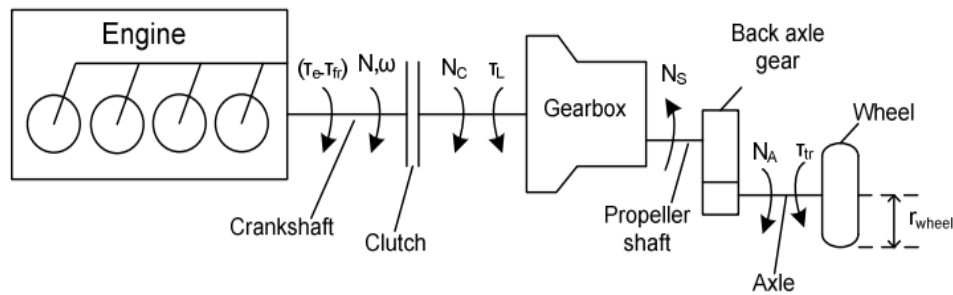


Σχήμα 4.5: Απεικόνιση του οχήματος βαρέος τύπου στο χάρτη εργασίας του GT-Power

ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΙΣΧΥΟΣ

Έπειτα από τον σχεδιασμό των διαφόρων τμημάτων του οχήματος βαρέος τύπου, ακολουθεί ο σχεδιασμός των διαφόρων επιμέρους τμημάτων από τα οποία αποτελείται το σύστημα μετάδοσης κίνησης. Σε αυτό το σημείο κρίθηκε αναγκαίο να αναφερθεί το αντίστοιχο θεωρητικό υπόβαθρο του συστήματος μετάδοσης κίνησης και ισχύος στους τροχούς, γνωστό και ως **Drivetrain Analysis**.

Η απλουστευμένη θεώρηση του συστήματος μετάδοσης κίνησης και ισχύος στους τροχούς κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της απόκρισης ενός οχήματος που κινείται μέσω συγκεκριμένου κινητήρα. Γίνεται χρήση της εν λόγω ανάλυσης στην μετατροπή των δεδομένων του εξεταζόμενου μεταβατικού κύκλου πόλης WTVC από ταχύτητα οχήματος συναρτήσεως του χρόνου, σε ροπή και ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα συναρτήσεως του χρόνου. Ένα τέτοιο απλουστευμένο μοντέλο συστήματος μετάδοσης, που αποτελείται από τον κινητήρα, το χειροκίνητο κιβώτιο ταχυτήτων, το τελικό σύστημα μετάδοσης στον άξονα των τροχών και τους τροχούς του οχήματος, παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 4.6) [4].



Σχήμα 4.6: Απλοποιημένο σύστημα κινητήρα-κιβωτίου ταχυτήτων-αξόνων-τροχών [4,5]

Ανάλυση απλοποιημένου συστήματος μετάδοσης κίνησης και ισχύος

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 4.6), ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα στην στροφαλοφόρο άτρακτο μπορεί να γραφτεί ως εξής:

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

Η παραπάνω σχέση (Σχέση 4.1) ισχύει μόνο κατά την περίπτωση που ο συμπλέκτης είναι δεσμευμένος, επομένως η ταχύτητά του N_c είναι ίση με την ταχύτητα περιστροφής N του κινητήρα.

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

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

Στην Σχέση 4.1, η ροπή του κινητήρα $[\tau_e(\phi) - \tau_{fr}(\phi)]$ απορροφάται είτε από τις αντιστάσεις στην κίνηση του οχήματος τ_L είτε από την επιτάχυνση του οχήματος τ_A . Επιπροσθέτως, τα μεμονωμένα συστήματα μετάδοσης (συμπλέκτης, διαφορικό, κιβώτιο ταχυτήτων) θεωρείται πως απορροφούν ένα μικρό μέρος της ροπής του κινητήρα εξαιτίας μηχανικών απωλειών και απωλειών τριβής. Μέσω του συνολικού βαθμού απόδοσης του συστήματος μετάδοσης κίνησης η_{gear} εκφράζονται οι μηχανικές αυτές απώλειες. Παράλληλα, η N_A αποτελεί την ταχύτητα περιστροφής του τροχού και η N_s την ταχύτητα μετάδοσης κίνησης (που είναι υπαρκτή αποκλειστικά σε οχήματα με κίνηση στους πίσω τροχούς). Όσον αφορά τις σχέσεις μετάδοσης, η i_b αντιστοιχεί στην σχέση μετάδοσης του διαφορικού ενώ η i_g στην σχέση μετάδοσης της εκάστοτε ταχύτητας στο κιβώτιο ταχυτήτων. Μέσω του ανωτέρου σχήματος (Σχήμα 4.6) καθώς και των προαναφερθέντων επεξηγήσεων, καταλήγουμε στα παρακάτω.

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

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

Εύκολα πλέον συμπεραίνουμε πως η ταχύτητα του οχήματος V (km/h) δίνεται από την σχέση:

$$V = 2 \cdot \pi \cdot r_{wheel} \cdot \frac{N_c}{i_b \cdot i_g} \cdot 60 \cdot 10^{-3} \quad (4.3)$$

όπου N_c σε rpm

Μέσω της ανωτέρω ανάλυσης προκύπτει πως όσο υψηλότερη σχέση μετάδοσης i_g έχει το κιβώτιο ταχυτήτων (δηλαδή όσο χαμηλότερη σχέση είναι δεσμευμένη), τόσο μικρότερη είναι η συνολική ροπή αδράνειας του οχήματος, εμφανίζοντας ως συνέπεια την ταχύτερη επιτάχυνσή του. Επιπροσθέτως, άμεσα γίνεται αντιληπτό από την παραπάνω σχέση (Σχέση 4.3), πως όσο χαμηλότερη σχέση μετάδοσης i_g έχει το κιβώτιο ταχυτήτων (δηλαδή όσο υψηλότερη σχέση είναι δεσμευμένη), το οποίο συνεπάγεται αργή επιτάχυνση, τόσο μεγαλύτερη ταχύτητα οχήματος μπορεί να επιτευχθεί [4].

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με την χρήση του υπολογιστικού πακέτου GT-Power προσομοιώθηκαν τα επιμέρους τμήματα του συστήματος μετάδοσης

κίνησης και ισχύος που αναλύθηκαν παραπάνω. Ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της προσομοίωσης των τμημάτων αυτών στο περιβάλλον GT-Power.

Συμπλέκτης τριβής (clutch)

Ο συμπλέκτης τριβής αποτελείται από δύο πλάκες και υλικό τριβής ανάμεσα τους. Σκοπός του συμπλέκτη είναι να συνδέει και να αποσυνδέει τον στροφαλοφόρο άξονα και τον πρωτεύοντα άξονα του κιβωτίου ταχυτήτων. Η βασική αρχή λειτουργίας του είναι η εξής: Καθώς οι πλάκες πλησιάζουν, εξαιτίας του υλικού τριβής η μία παρασύρει την άλλη και έτσι επιτυγχάνεται η μεταφορά ενέργειας. Όπως είναι αναμενόμενο, ο συμπλέκτης παρεμβάλλεται μεταξύ του κινητήρα (engine) και του συστήματος μετάδοσης κίνησης (transmission).

Σύστημα μετάδοσης κίνησης (transmission)

Μέσω του συστήματος μετάδοσης κίνησης (transmission) εισάγονται στο μοντέλο οι σχέσεις μετάδοσης (gear ratios). Στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 4.2), παρουσιάζονται οι σχέσεις μετάδοσης που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση του οχήματος βαρέος τύπου. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε οχήματος, επιλέγεται το πλήθος των σχέσεων μετάδοσης του κιβωτίου κίνησης, με σκοπό την απόκριση του σε ικανοποιητικό επίπεδο. Στο περιβάλλον GT-Power, παρατηρείται πως το συγκεκριμένο σύστημα (transmission) συνδέεται με πολλά τμήματα του μοντέλου. Ειδικότερα, είναι συνδεδεμένο με τον συμπλέκτη τριβής (clutch), ενώ ταυτόχρονα μέσω του άξονα κίνησης (driveshaft) συνδέεται με το διαφορικό (differential). Επιπροσθέτως, υπάρχει επικοινωνία με τον εικονικό οδηγό (Vehicle-Driver), καθώς του δίνεται η δυνατότητα αλλαγής ταχύτητας στο κιβώτιο ταχυτήτων, άλλα και με διάφορα συστήματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται (controllervehicle, driveaway). Περαιτέρω ανάλυση για τον ρόλο και τα χαρακτηριστικά του εικονικού οδηγού και των συγκεκριμένων συστημάτων ελέγχου θα γίνει στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου.

***Πίνακας 4.2:** Σχέσεις μετάδοσης κιβωτίου ταχυτήτων ονομαστικού οχήματος (i_g)*

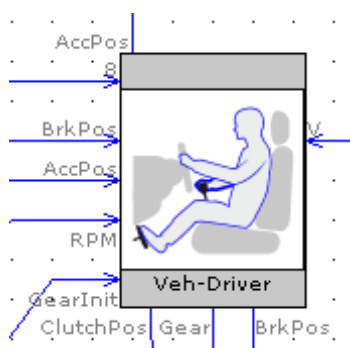
1ⁿ	9,201:1
2ⁿ	5,2301:1
3ⁿ	3,145:1
4ⁿ	2,034:1
5ⁿ	1,374:1
6ⁿ	1,000:1

Διαφορικό (Differential)

Το διαφορικό μπορεί να οριστεί ως ο μηχανισμός που συλλέγει 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. Η σχέση μετάδοσης του διαφορικού (Final Drive Ratio) i_b που επιλέχθηκε για την συγκεκριμένη μοντελοποίηση και καταχωρήθηκε στα χαρακτηριστικά (attributes) του συγκεκριμένου τμήματος στο περιβάλλον GT-Power είναι η **2,666:1**.

Οδηγός οχήματος (Vehicle Driver)

Για την επίτευξη καλύτερου συντονισμού και πιο ρεαλιστικών αποτελεσμάτων, κρίθηκε αναγκαία η εισαγωγή ενός εικονικού οδηγού κυρίως για τις αλλαγές σχέσης αλλά και στην αρχή και το τέλος του κύκλου πόλης, ο οποίος συμπεριφέρεται σαν πραγματικός οδηγός. Ουσιαστικά, ο εικονικός αυτός οδηγός είναι υπεύθυνος για τον συντονισμό του κιβωτίου ταχυτήτων, του συμπλέκτη και του πεντάλ επιτάχυνσης. Κύριο χαρακτηριστικό του είναι πως μέσω του προγράμματος GT-Power μπορεί να εισαχθεί στρατηγική αλλαγής ταχυτήτων, κάτι το οποίο δίνει την δυνατότητα στον οδηγό να ελέγχει τις σχέσεις μετάδοσης στο κιβώτιο ταχυτήτων και κατ' επέκταση να καθορίζει την γραμμική ταχύτητα του οχήματος στην οποία θα πραγματοποιείται η κάθε αλλαγή σχέσης.



Σχήμα 4.7: Απεικόνιση του εικονικού οδηγού (Vehicle Driver) στο περιβάλλον εργασίας του GT-Power

Όπως είναι εμφανές από την μορφή του μοντέλου στο Σχήμα 4.7, ο οδηγός «βλέπει» και κατά συνέπεια συνδέεται στο GT-Power, όπως και ένας πραγματικός, μόνο μέσω του πεντάλ επιτάχυνσης (accelerator pedal), του συμπλέκτη τριβής (clutch pedal), του πεντάλ φρένου (brake pedal) και του κιβωτίου ταχυτήτων. Στο χάρτη εργασίας του GT-Power, μέσω διαφόρων παραθύρων εισαγωγής των χαρακτηριστικών του εικονικού οδηγού, συμπληρώθηκαν ορισμένοι χάρτες που προσομοιώνουν έναν πραγματικό οδηγό.

Πιο συγκεκριμένα, στο πεντάλ επιτάχυνσης εισάγεται ένας χάρτης της συμπεριφοράς του κατά την διάρκεια των αλλαγών σχέσης (ShiftAccel). Αντίστοιχα στον συμπλέκτη τριβής, καταχωρούνται δύο χάρτες που απεικονίζουν την συμπεριφορά του στις περιπτώσεις αλλαγής ταχύτητας (ShiftClutch) και εκκίνησης (DriveClutch). Τέλος, εισάγονται ορισμένα στοιχεία σχετικά με την χρονική διάρκεια των φαινομένων της εκκίνησης και της αλλαγής ταχύτητας.

Επιπροσθέτως, είναι απαραίτητο να αναφερθεί και η δημιουργία ενός χάρτη που απεικονίζει την εγχεόμενη ποσότητα καυσίμου ανάλογα με το φορτίο %, δηλαδή ουσιαστικά ανάλογα με το «πάτημα» του πεντάλ επιτάχυνσης. Λαμβάνοντας υπόψη εμπειρικά στοιχεία καθώς και ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας, κατασκευάστηκε το διάγραμμα ποσότητας εγχεόμενου καυσίμου, στο οποίο ο οριζόντιος άξονας X απεικονίζει το φορτίο (%) ενώ ο κατακόρυφος άξονας Y την εγχεόμενη ποσότητα καυσίμου σε mg/cycle. Στο περιβάλλον εργασίας του GT-Power, ο εικονικός οδηγός συνδέεται άμεσα με τον παρόντα χάρτη, ενώ μέσω κατάλληλου ενεργοποιητή (actuator) ο συγκεκριμένος χάρτης συνδέεται και με τους εγχυτήρες (μπεκ) των έξι κυλίνδρων. Η συμπλήρωση του χάρτη αυτού πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε στην άφορτη λειτουργία οι στροφές του κινητήρα να διατηρούνται περίπου στις 1000 rpm.

Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να γίνει ανάλυση των διαφόρων τμημάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την εύρυθμη λειτουργία του υπό μελέτη μοντέλου, έτσι ώστε το όχημα να συμβαδίζει με τους επιλεγμένους κύκλους πόλης σε ικανοποιητικό βαθμό ακρίβειας.

Ελεγκτής οχήματος (controller vehicle)

Ο ελεγκτής οχήματος μπορεί να χαρακτηριστεί ως αναπόσπαστο τμήμα για την λειτουργία του μοντέλου, καθώς αποτελεί έναν απλοποιημένο «εγκέφαλο» που λαμβάνει πληροφορίες από την κατάσταση του οχήματος και επενεργεί στον επιθυμητό βαθμό στο πεντάλ επιτάχυνσης ή στο πεντάλ φρένου αντίστοιχα, έτσι ώστε το όχημα να είναι ικανό να ακολουθήσει ένα συγκεκριμένο προφίλ ταχύτητας. Στην παρούσα περίπτωση, το επιθυμητό προφίλ ταχύτητας του μοντέλου είναι ο μεταβατικός κύκλος πόλης WTVC.

Βασικό χαρακτηριστικό του ελεγκτή οχήματος αποτελεί ο χάρτης μέσης πραγματικής πίεσης (bmer) του κινητήρα, του οποίου η συμπλήρωση απαιτεί «τρέξιμο» του κινητήρα αποσυνδεδεμένου από το όχημα σε διάφορα σενάρια στροφών και φορτίου με τιμές 500-3000 rpm και 0-100% αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο, προσομοιώνονται πολλά διαφορετικά σενάρια με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς στροφών και φορτίου, που μετά την ολοκλήρωσή τους χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του παραπάνω χάρτη.

Ελεγκτής εκκίνησης (Driveaway)

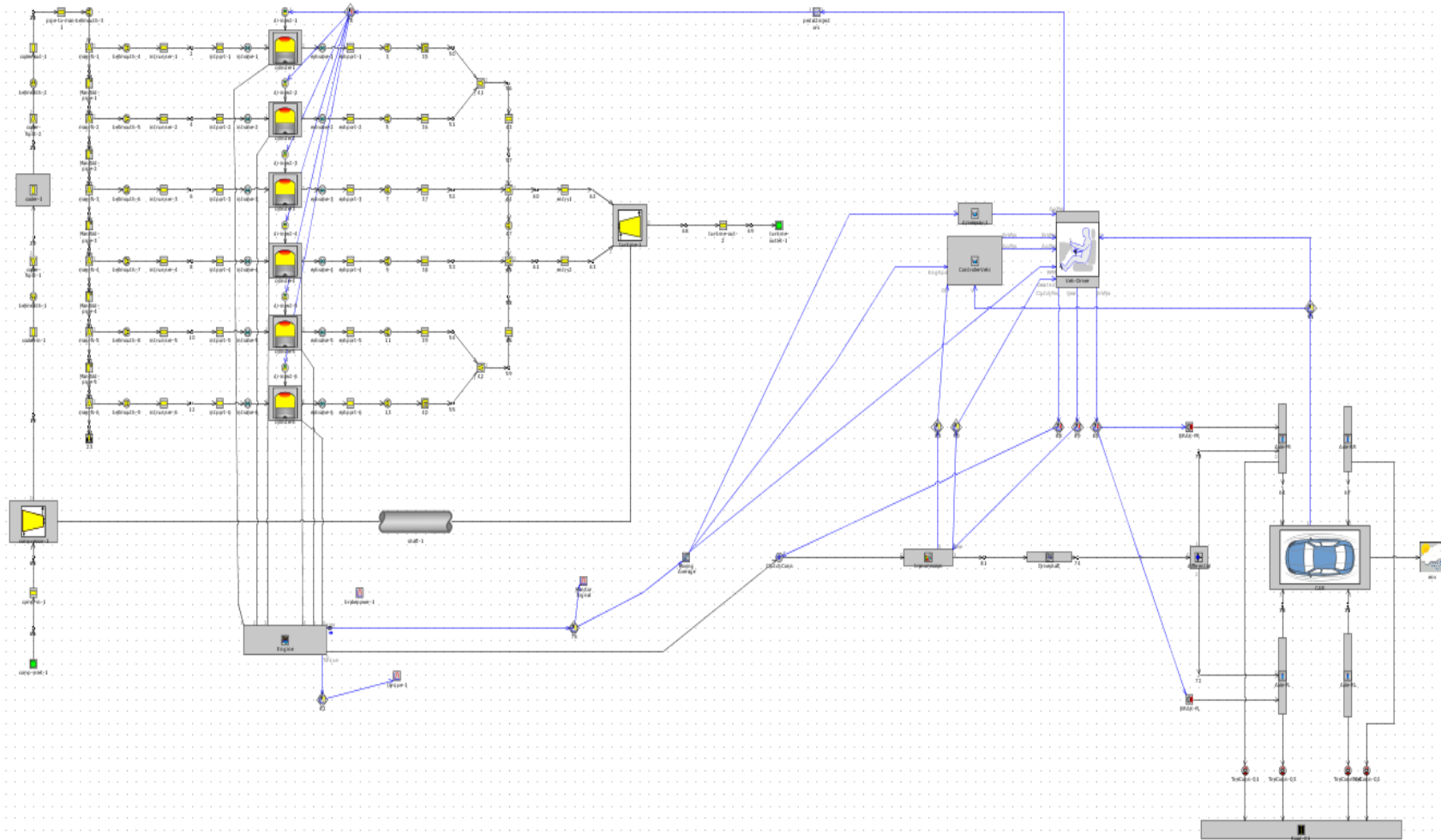
Ο ελεγκτής εκκίνησης αποτελεί κάτι παρόμοιο με τον ελεγκτή οχήματος, ωστόσο αφορά μόνο την περίπτωση της εκκίνησης. Αποκλειστικά σε αυτήν την περίπτωση, ενεργοποιείται και επικοινωνεί με τον εικονικό οδηγό.

Έχοντας υλοποιήσει και συνδέσει κατάλληλα όλα τα παραπάνω τμήματα του μοντέλου στο περιβάλλον εργασίας του GT-Power, προκύπτει τελικά η ολοκληρωμένη διάταξη του μοντέλου προσομοίωσης του συμβατικού οχήματος βαρέος τύπου (Σχήμα 4.8).

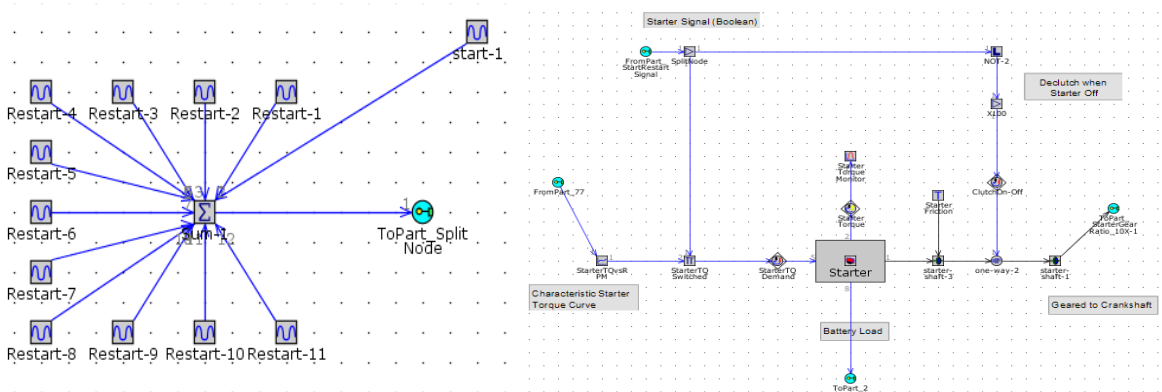
Συνοψίζοντας, για την καλύτερη εποπτεία του μοντέλου που αναλύθηκε εκτενώς στο παρόν κεφάλαιο, κρίνεται απαραίτητη η ακόλουθη παρουσίαση της κεντρικής ιδέας της λειτουργίας του.

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

- Ο εικονικός οδηγός (vehicle driver) 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.
- Εάν 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).
- Ομοίως, 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).



Σχήμα 4.8: Ολοκληρωμένη απεικόνιση του μοντέλου οχήματος βαρέος τύπου και του συστήματος μετάδοσης κίνησης, με ταυτόχρονη σύνδεσή τους με τον κινητήρα Diesel στο περιβάλλον του GT-Power



Σχήμα 4.10: Υπο-συγκροτήματα StartRestartSignal και StarterMotor αντίστοιχα στο περιβάλλον του GT-Power

Για την κατασκευή του μοντέλου υβριδικού οχήματος βαρέος τύπου χρησιμοποιήθηκαν συστήματα ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας, ηλεκτρονικά-ηλεκτρικά κομμάτια καθώς και συστήματα ελέγχου λειτουργίας. Ακολουθεί εκτενής ανάλυση των κύριων κομματιών και συστημάτων που προαναφέρθηκαν.

I. Ηλεκτρικό μοτέρ (Motor-Generator)

Το ηλεκτρικό μοτέρ αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι κάθε υβριδικού οχήματος, διότι παρέχει την αναγκαία ισχύ όταν αυτό καθίσταται απαραίτητο για τις ανάγκες κίνησης του οχήματος. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, είναι συνδεδεμένο μηχανικά στον άξονα μεταξύ του κιβωτίου ταχυτήτων και του διαφορικού, με σχέση μετάδοσης 4:1. Για τις ανάγκες του οχήματος βαρέος τύπου έχει επιλεγεί ηλεκτρικό μοτέρ με ταχύτητα βάσης 3000 rpm, που αποδίδει μέγιστη ισχύ 200 kW. Επιπροσθέτως, πρέπει να αναφερθεί πως κατά την διάρκεια της αναγεννητικής πέδησης λειτουργεί ως γεννήτρια, απορροφώντας ενέργεια και εν συνεχεία τροφοδοτώντας την στην μπαταρία.

II. Μπαταρία (Battery)

Η συγκεκριμένη μπαταρία δεν σχετίζεται με συνήθεις λειτουργίες των μπαταριών συμβατικών βαρέων οχημάτων. Ο ρόλος που έχει η μπαταρία αυτή είναι η τροφοδότηση του ηλεκτρικού μοτέρ με ενέργεια όταν αυτό συμπεριφέρεται ως ηλεκτροκινητήρας και η φόρτισή της από το ηλεκτρικό μοτέρ όταν αυτό συμπεριφέρεται ως γεννήτρια (δηλαδή κατά την διάρκεια της αναγεννητικής πέδησης). Στην παρούσα μοντελοποίηση που κατασκευάστηκε, επιλέχθηκε μπαταρία χωρητικότητας 100 Ah, με στάθμη φόρτισης (State of Charge – SOC) να κυμαίνεται μεταξύ 0,45 και 0,75. Τα επιλεγμένα όρια στάθμης φόρτισης

της μπαταρίας συνδράμουν στην καλύτερη χρήση της και στην μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της. Κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης η στάθμη φόρτισης ορίζεται στο μέγιστο της βέλτιστης λειτουργίας της (0,75).

III. Αναστροφέας (Inverter)

Ο αναστροφέας ως κομμάτι του μοντέλου είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο του επιπέδου της τάσης (V-Volt) και του ρεύματος (A-Ampere) από και προς την μπαταρία. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του, τα οποία καταχωρήθηκαν και στο περιβάλλον εργασίας του GT-Power, παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα [7].

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά λειτουργίας αναστροφέα

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

IV. Ελεγκτής υβριδικού οχήματος (ControllerHEVehicle)

Ο συγκεκριμένος ελεγκτής είναι απαραίτητος σε περιπτώσεις υβριδικών οχημάτων που ακολουθούν μεταβατικά προφίλ ταχύτητας όπως οι κύκλοι πόλης. Παρατηρούνται αρκετές ομοιότητες με τον απλό ελεγκτή οχήματος (Controller Vehicle), καθώς μοιράζονται παρόμοια χαρακτηριστικά, ωστόσο η λειτουργία του παρόντος ελεγκτή είναι να υπολογίζει την απαιτούμενη ισχύ ολόκληρου του μοντέλου ανεξαρτήτως πηγής ενέργειας. Η απαιτούμενη ισχύς μπορεί να λάβει είτε θετικές τιμές, δηλαδή ανάγκη ενέργειας για την κίνηση του οχήματος (Μ.Ε.Κ, ηλεκτροκινητήρας), είτε αρνητικές τιμές, δηλαδή ανάγκη για πέδηση του οχήματος (μηχανικά φρένα, αναγεννητική πέδηση). Τέλος, μέσω κατάλληλης σύνδεσής του με το σύστημα ελέγχου και συντονισμού που θα αναλυθεί παρακάτω, επιτυγχάνεται η επιθυμητή απόκριση του υβριδικού οχήματος

V. Σύστημα ελέγχου και συντονισμού

Το σύστημα ελέγχου και συντονισμού που κατασκευάστηκε, αποτελεί το θεμελιώδες τμήμα ελέγχου των λειτουργικών συστημάτων του οχήματος, σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας που ενδέχεται να προκύψουν. Το συγκεκριμένο σύστημα λαμβάνοντας δεδομένα πραγματικού χρόνου, επιβάλλει τις κατάλληλες ενέργειες σε διάφορα τμήματα του μοντέλου, οι οποίες έχουν καθοριστεί από ορισμένες λειτουργικές παραμέτρους (π.χ. ταχύτητα του οχήματος, στάθμη φόρτισης μπαταρίας κλπ). Η μεθοδολογία που ακολουθεί το παρόν σύστημα για τον γενικότερο έλεγχο και συντονισμό του οχήματος αναλύεται παρακάτω.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Αρχικά, το σύστημα ελέγχου και συντονισμού λαμβάνει πληροφορίες σχετικά με την απαιτούμενη ισχύ (Power Demand) του οχήματος από τον ελεγκτή υβριδικού οχήματος (controllerHEVehicle), που όπως προαναφέρθηκε είναι άμεσα συνδεδεμένος.

Έπειτα το σύστημα ελέγχου μπορεί να διαχωριστεί σε δύο κύριες συνθήκες λειτουργίας, την ανάγκη ενέργειας για κίνηση (Power Demand >0) και την αποβολή ενέργειας για φρενάρισμα (Power Demand <0).

Κατά την **ανάγκη ενέργειας για κίνηση**, το πρώτο βήμα είναι να ελεγχθεί εάν η στάθμη φόρτισης της μπαταρίας είναι μεγαλύτερη από το κατώτατο όριο που έχει τεθεί (0,45). Στην περίπτωση που επαληθεύεται η παραπάνω συνθήκη, το ηλεκτρικό μοτέρ μπορεί να τεθεί σε λειτουργία, εάν αυτό καθίσταται αναγκαίο, ενώ σε αντίθετη περίπτωση ο κινητήρας Diesel θα είναι εξ' ολοκλήρου υπεύθυνος για την παροχή ισχύος στο όχημα ανεξάρτητα των συνθηκών.

Το επόμενο βήμα που αποτελεί και το βασικότερο κομμάτι του συστήματος ελέγχου και συντονισμού, είναι ο καθορισμός της μεθόδου με την οποία οι δύο πηγές ενέργειας (θερμική και ηλεκτρική) θα συνδυαστούν ώστε να δώσουν την απαραίτητη ισχύ για την κίνηση του οχήματος βαρέος τύπου. Σκοπός της μεθόδου είναι η βέλτιστη αξιοποίηση κάθε πηγής, με λειτουργία τους στις αποδοτικότερες συνθήκες, το οποίο μεταφράζεται σε αισθητή μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των γενικότερων ρύπων του οχήματος. Βασική παράμετρος της συγκεκριμένης μεθοδολογίας αποτελεί η ταχύτητα του οχήματος, μέσω της οποίας καθορίζονται οι εξής περιπτώσεις:

- A. Η ταχύτητα του οχήματος είναι μικρότερη από 20 km/h. Σε αυτήν την περίπτωση, ο ηλεκτροκινητήρας αναλαμβάνει πλήρως την τροφοδότηση του οχήματος με ισχύ για την κίνηση του, ενώ ο θερμικός κινητήρας Diesel παραμένει σε κατάσταση «ρελαντί», έτοιμος να προσφέρει ισχύ όταν αυτό χρειαστεί.
- B. Η ταχύτητα του οχήματος είναι μεταξύ 20 και 70 km/h. Εδώ οι δύο πηγές ενέργειας λειτουργούν ταυτόχρονα και συμβάλλουν στην παροχή ισχύος για την κίνηση του οχήματος. Παράλληλα, η χρήση του ηλεκτροκινητήρα μειώνεται καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του οχήματος, το οποίο συνεπάγεται και αντίστοιχη αύξηση της χρήσης του θερμικού κινητήρα.
- C. Η ταχύτητα του οχήματος είναι μεγαλύτερη από 70 km/h. Τότε, ο κινητήρας Diesel αποτελεί την αποκλειστική πηγή ισχύος για την κίνηση του οχήματος, με τον ηλεκτροκινητήρα να μην παρέχει καθόλου ενέργεια.

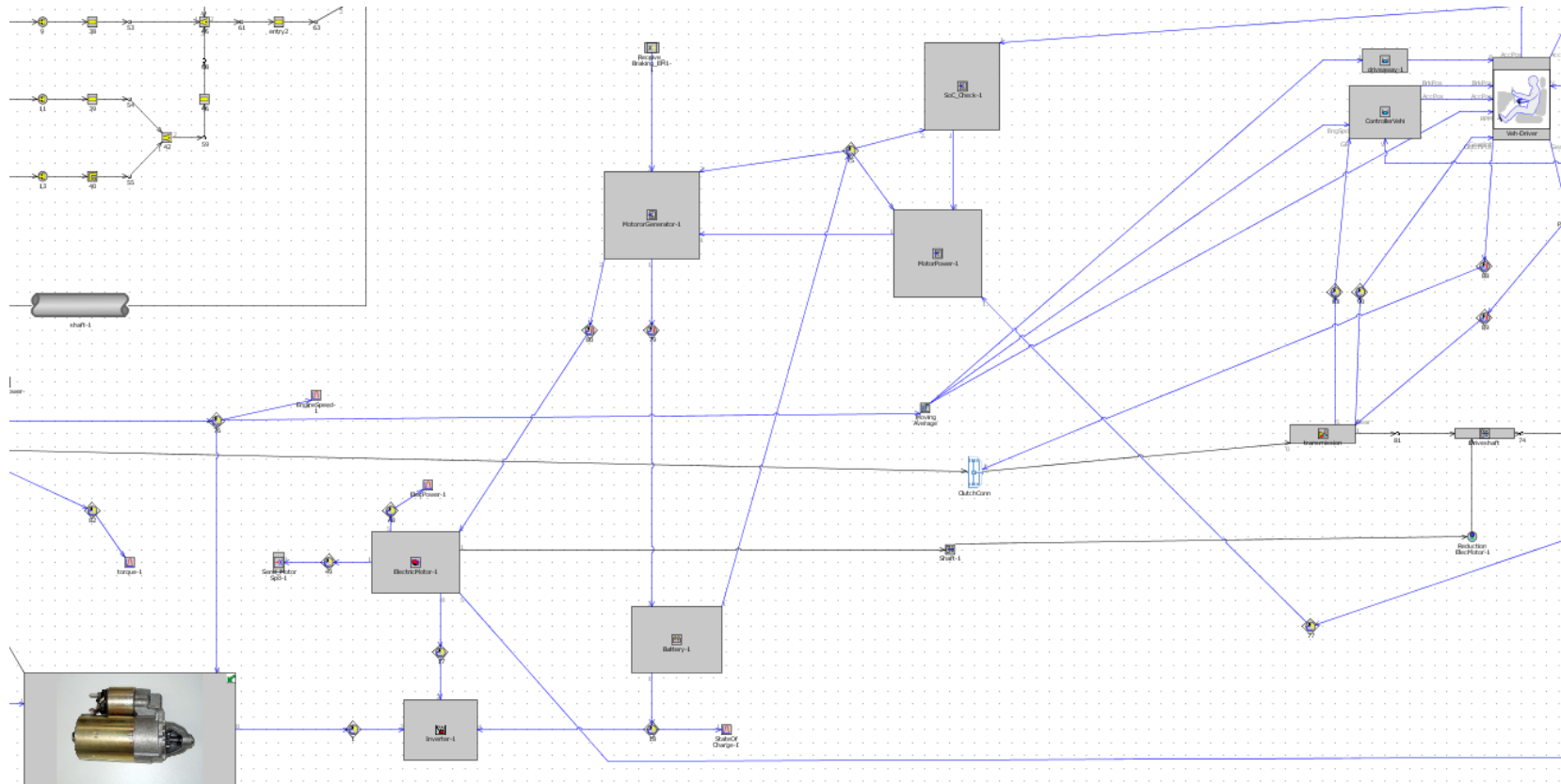
Κατά την άλλη συνθήκη λειτουργίας, την **αποβολή ενέργειας για φρενάρισμα**, το υβριδικό όχημα χρησιμοποιεί είτε την διαδικασία την αναγεννητικής πέδησης είτε τα μηχανικά φρένα που διαθέτει. Ουσιαστικά το παρόν σύστημα υποβοηθά την λειτουργία

ελέγχου του υπο-συγκροτήματος BrakingControl. Έτσι, ο έλεγχος μέσω του συστήματος αυτού που εφαρμόζεται για την επιλογή του τρόπου αποβολής ενέργειας συνοψίζεται ως εξής:

Σε πρώτο στάδιο, ελέγχεται εάν η ταχύτητα του οχήματος είναι μεγαλύτερη από 5km/h, η ισχύς του ηλεκτροκινητήρα επαρκεί για την απαιτούμενη επιβράδυνση του οχήματος και η στάθμη της μπαταρίας είναι μικρότερη από το ανώτατο όριο (0,75). Στην περίπτωση που όλες οι παραπάνω απαιτήσεις ικανοποιούνται ταυτόχρονα, εφαρμόζεται η αναγεννητική πέδηση και ο ηλεκτροκινητήρας, που πλέον λειτουργεί ως γεννήτρια, ανακτά όλη την ενέργεια που το όχημα αποβάλλει. Στην αντίθετη περίπτωση που δεν ικανοποιείται κάποια από τις παραπάνω απαιτήσεις, τίθενται σε λειτουργία και τα μηχανικά φρένα του οχήματος, όπου με την βοήθεια της τριβής επιτυγχάνεται η επιθυμητή επιβράδυνση.

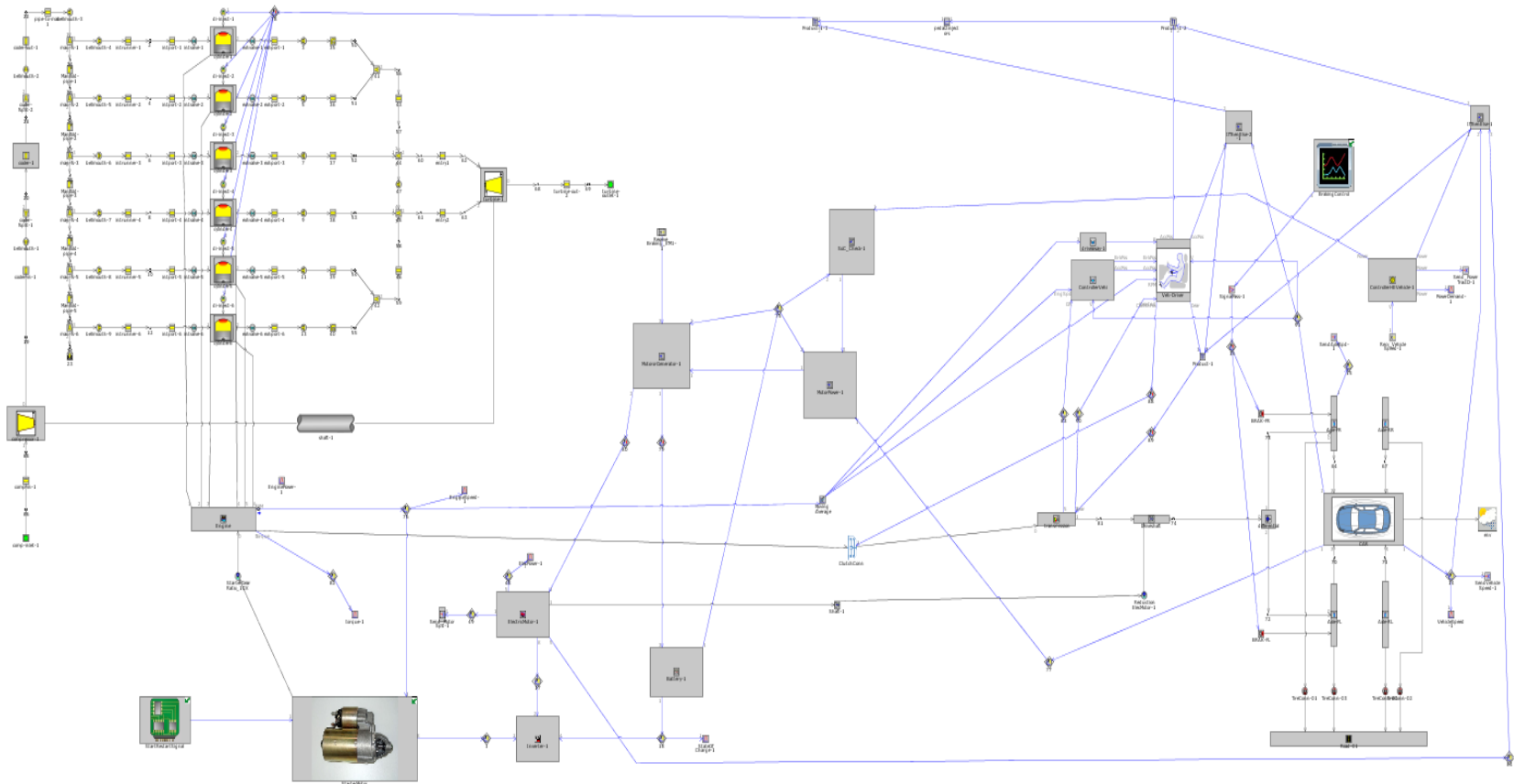
Ακόμη, αξίζει να αναφερθεί η συνεισφορά του παρόντος συστήματος στον έλεγχο του υποσυστήματος «start-stop» του κινητήρα, όπου επικοινωνώντας με τα αντίστοιχα sub-assemblies επιτυγχάνεται η συνολική διακοπή έγχυσης καυσίμου στους κυλίνδρους του κινητήρα.

Με σκοπό την καλύτερη εποπτεία του μοντέλου προσομοίωσης, στο ακόλουθο Σχήμα 4.11 απεικονίζεται το παράλληλο σύστημα μετάδοσης ισχύος, μαζί με πλήθος κύριων τμημάτων και συστημάτων που συντέλεσαν στην υβριδική μετατροπή του οχήματος βαρέος τύπου στο περιβάλλον του GT-Power.



Σχήμα 4.11: Μοντελοποίηση παράλληλου συστήματος μετάδοσης ισχύος στο περιβάλλον εργασίας του GT-Power

Τέλος, έχοντας τοποθετήσει και συνδέσει κατάλληλα στο περιβάλλον εργασίας του GT-Power όλα τα τμήματα και συστήματα του υβριδικού οχήματος βαρέος τύπου που αναφέρθηκαν, μπορεί πλέον να εξαχθεί το ολοκληρωμένο μοντέλο του (Σχήμα 4.12).



Σχήμα 4.12: Παρουσίαση ολοκληρωμένου μοντέλου πλήρως υβριδικού οχήματος βαρέος τύπου στο περιβάλλον του προγράμματος GT-Power

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Επιδόσεις και Εκπομπές Καυσαερίων Υβριδικού Οχήματος Βαρέος Τύπου – Σύγκριση με Συμβατικό Όχημα

5.1 Περιγραφή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη ενός υβριδικού οχήματος βαρέος τύπου κατά την διάρκεια του Παγκόσμιου Μεταβατικού Κύκλου Οχημάτων WTVС. Πιο συγκεκριμένα, επιδιώκεται η έρευνα της απόκρισης και των εκπομπών καυσαερίων ενός τέτοιου οχήματος, ενώ ταυτόχρονα γίνεται σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα ενός συμβατικού οχήματος βαρέος τύπου, το οποίο διαθέτει τον ίδιο κινητήρα Diesel με απλή μονοβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του υβριδικού καθώς και του συμβατικού οχήματος ελήφθησαν και επεξεργάστηκαν μέσω του εργαλείου GT-Post, που αποτελεί υπο-πρόγραμμα του υπολογιστικού πακέτου GT-Power.

Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της κίνησης του οχήματος κατά την διάρκεια του WTVС, τα οποία αφορούν τις επιδόσεις του κινητήρα Diesel και των βασικών ηλεκτρικών μερών του μοντέλου. Όσον αφορά τις εκπομπές καυσαερίων του κινητήρα, η συγκεκριμένη μελέτη επικεντρώνεται στην εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και στην εκπομπή των εξής ρύπων: οξειδία του αζώτου (NO_x) και αιθάλη (soot) (η τελευταία ως αντιπροσωπευτική των σωματιδίων PM). Το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε κατά την προσομοίωση του μοντέλου είναι τυπικό diesel κίνησης πυκνότητας $\rho = 830 \frac{kg}{m^3}$.

Ο κύκλος WTVС που έχει εφαρμοστεί στο μοντέλο έχει διάρκεια 1800 δευτερόλεπτα, εκ των οποίων τα πρώτα 900 αφορούν το urban (αστικό) τμήμα χαμηλών ταχυτήτων κίνησης εντός πόλης (Παράγραφος 3.4). Για την καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων και κυρίως της τυχόν χρησιμότητας ενός υβριδικού οχήματος βαρέος τύπου εντός πόλης, όλα τα εξεταζόμενα μεγέθη παρουσιάζονται επίσης κατά την διάρκεια των πρώτων 900 δευτερολέπτων.

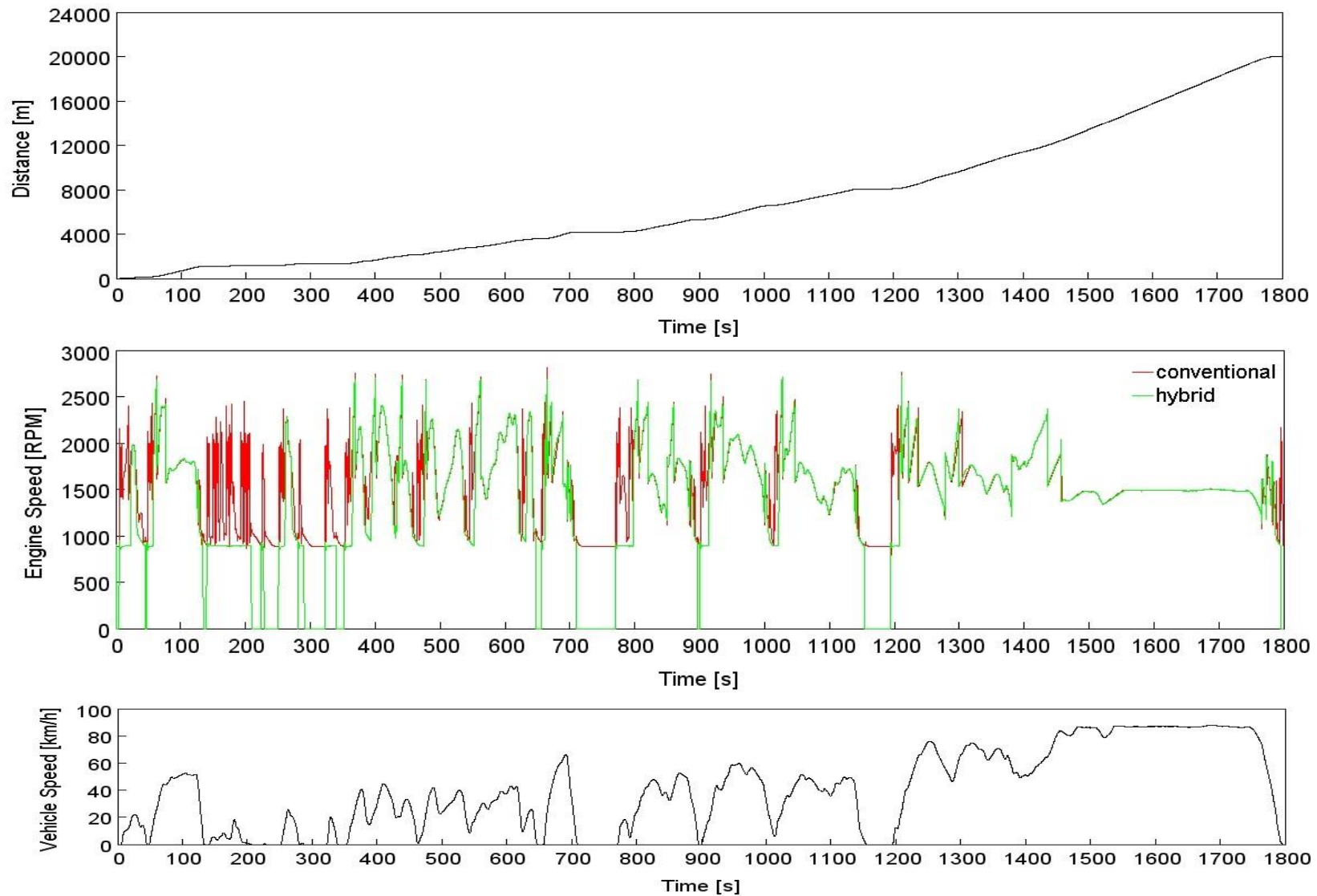
Παράλληλα, σε όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν υπάρχει άμεση σύγκριση συμβατικού και υβριδικού οχήματος, όπου η **πράσινη καμπύλη αντιπροσωπεύει το υβριδικό όχημα («hybrid»)** και η **κόκκινη το συμβατικό όχημα («conventional»)**.

5.2 Επιδόσεις του κινητήρα Diesel

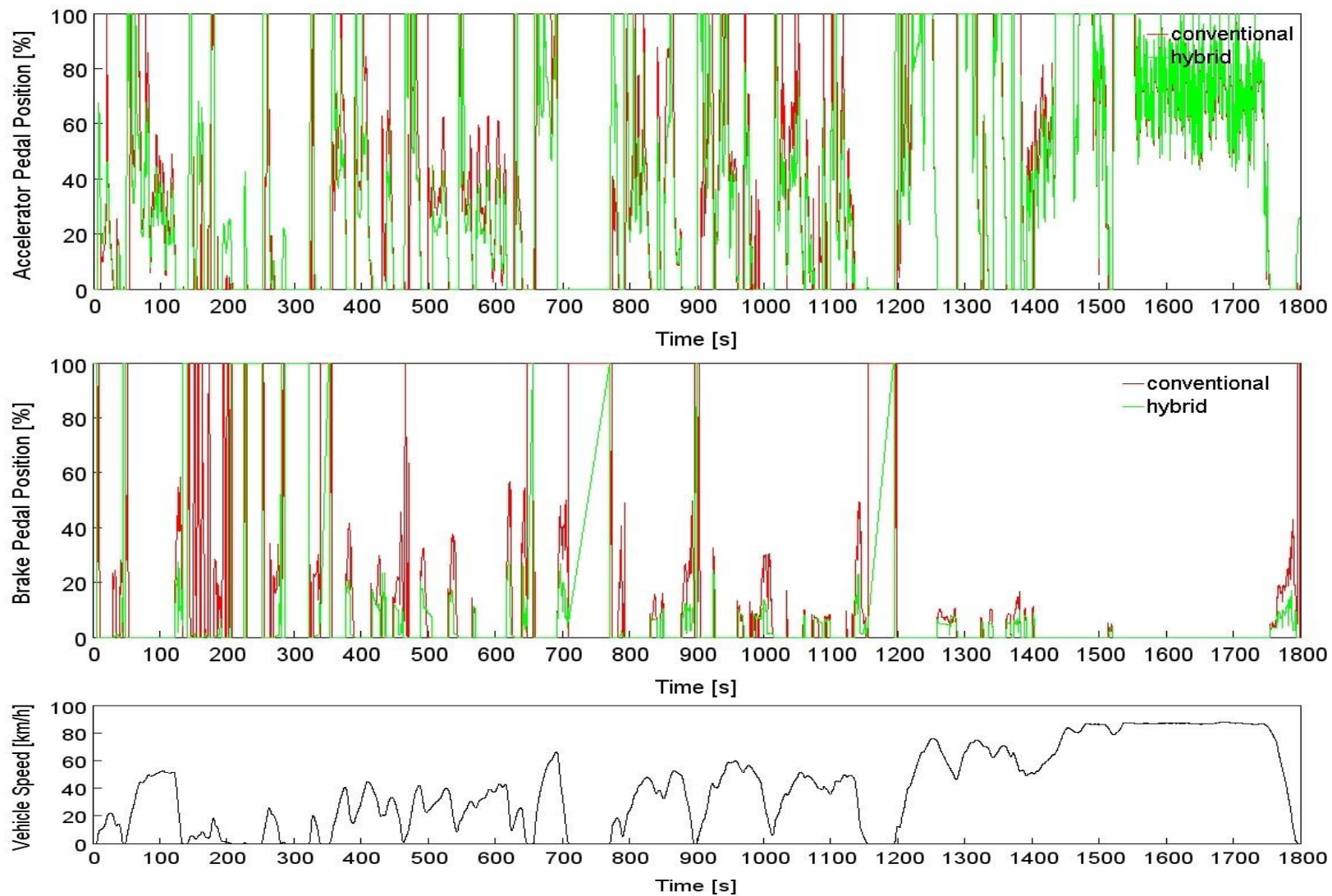
Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης και την κατάλληλη επεξεργασία των αποτελεσμάτων, δημιουργήθηκαν τα παρακάτω διαγράμματα (Σχήματα 5.1 έως και 5.12) που απεικονίζουν βασικά μεγέθη λειτουργίας του κινητήρα Diesel τόσο στην περίπτωση υβριδικού οχήματος βαρέος τύπου όσο και στην περίπτωση συμβατικού οχήματος βαρέος τύπου. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται κατά σειρά, συναρτήσει του χρόνου, τα κάτωθι μεγέθη:

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

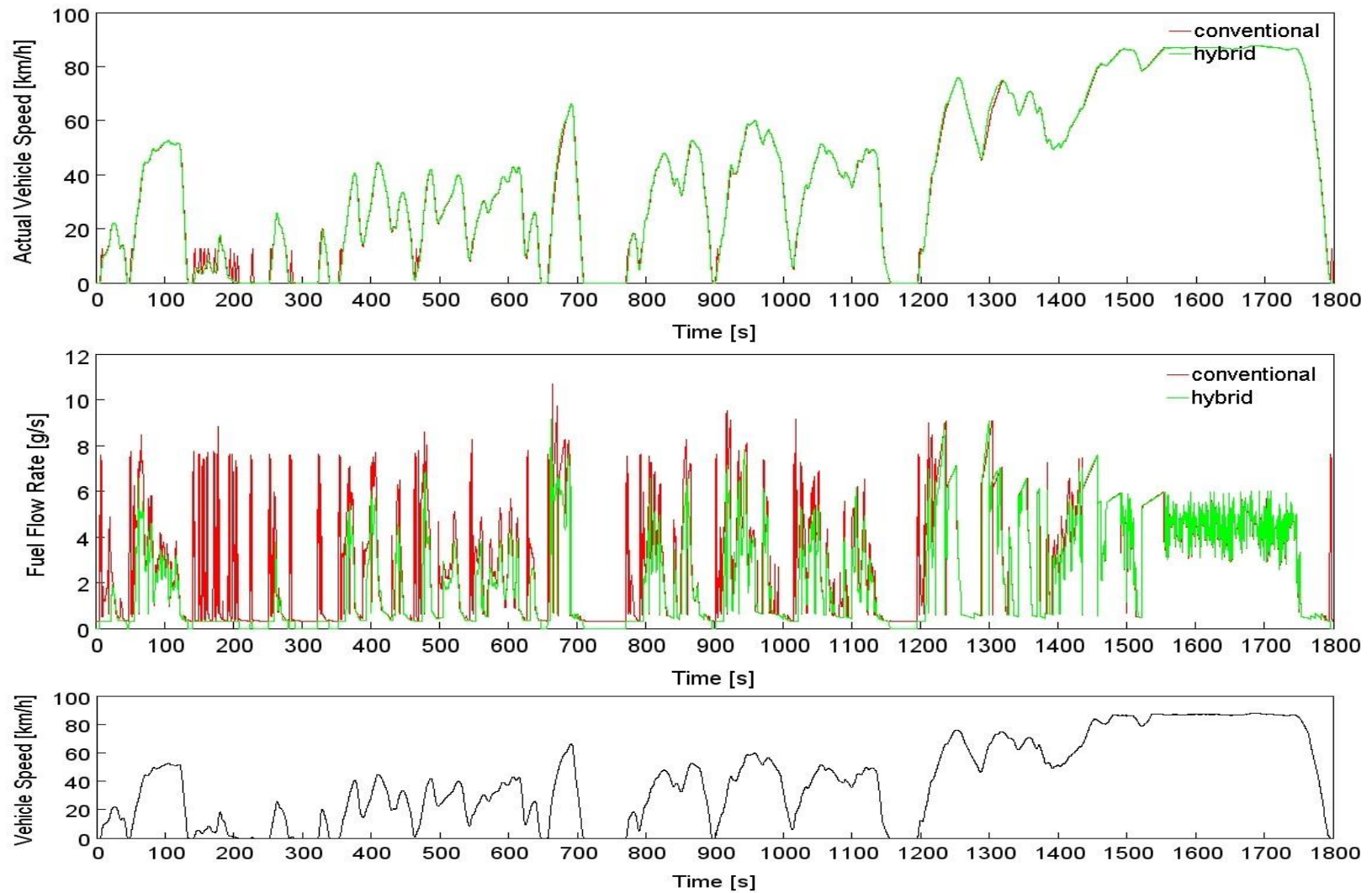
Κάθε διάγραμμα των παραπάνω μεγεθών συνοδεύεται από το διάγραμμα ταχύτητας του οχήματος, ώστε να υπάρχει καλύτερη συσχέτιση και εποπτεία των μεταβολών τους.



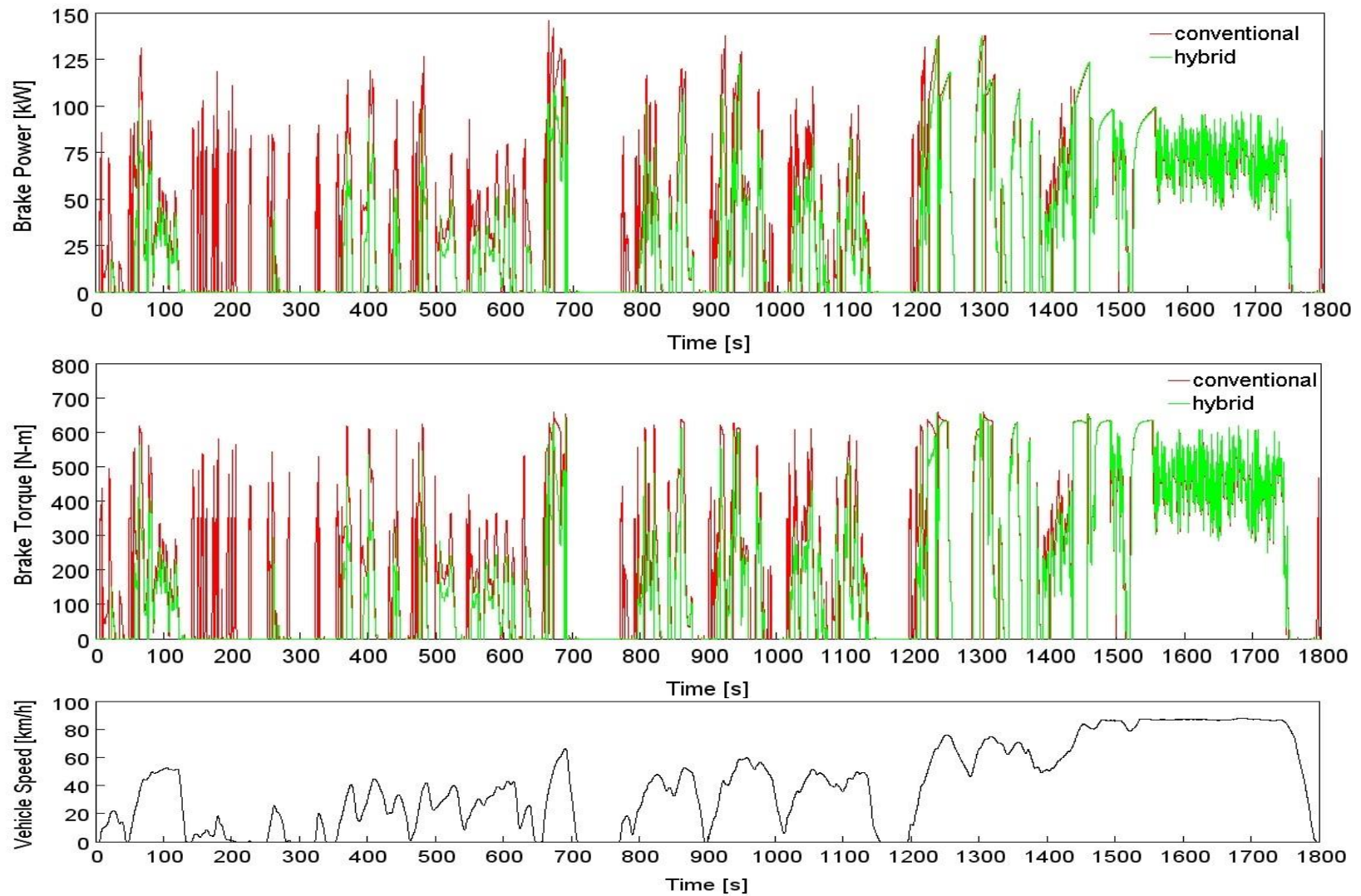
Σχήμα 5.1: Διανυόμενη απόσταση από το όχημα και ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια του κύκλου πόλης WTVc



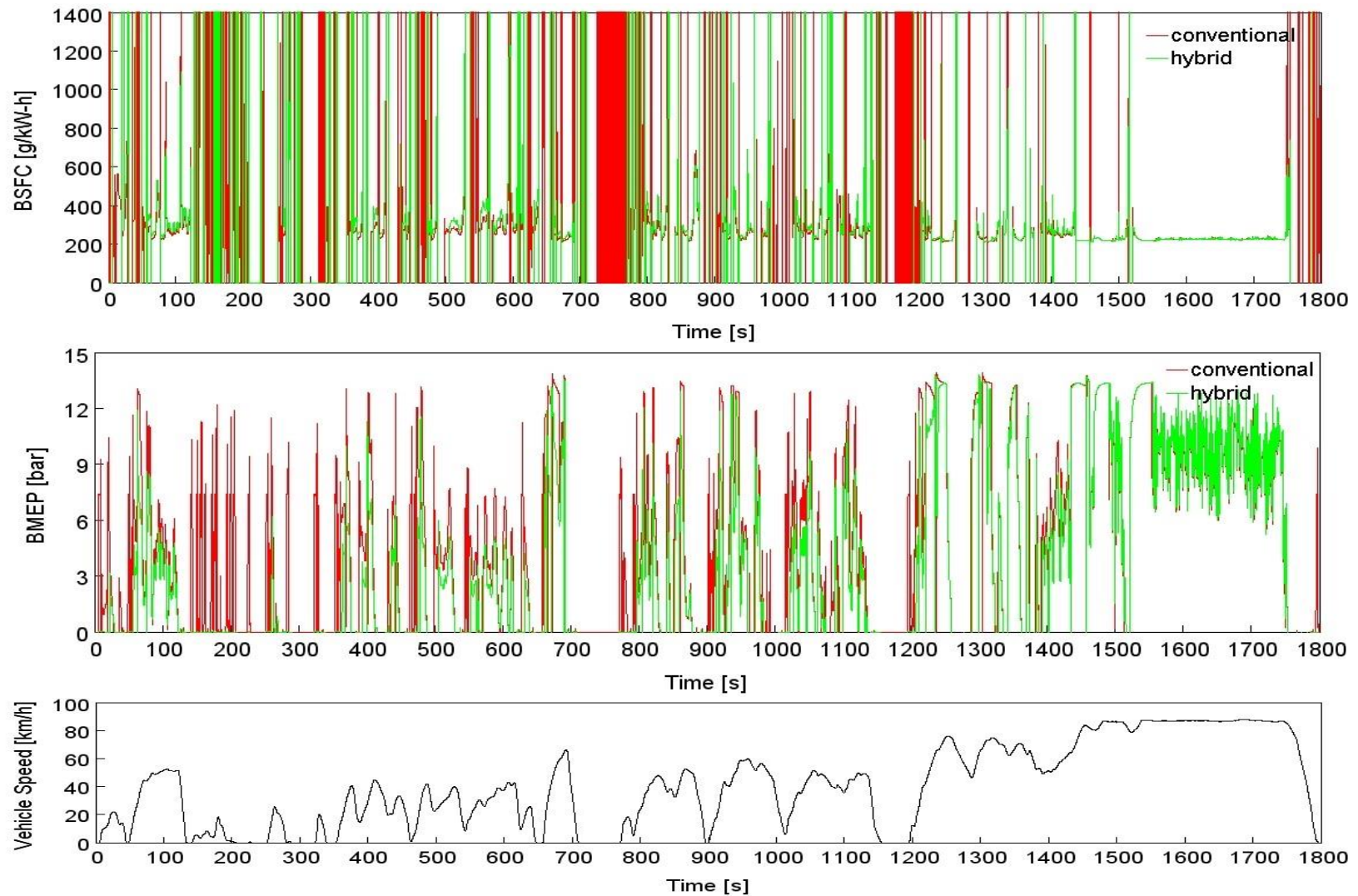
Σχήμα 5.2: Πάτημα πεντάλ επιτάχυνσης και φρένου συναρτήσεσι του χρόνου κατά την διάρκεια του κύκλου πόλης WTVC



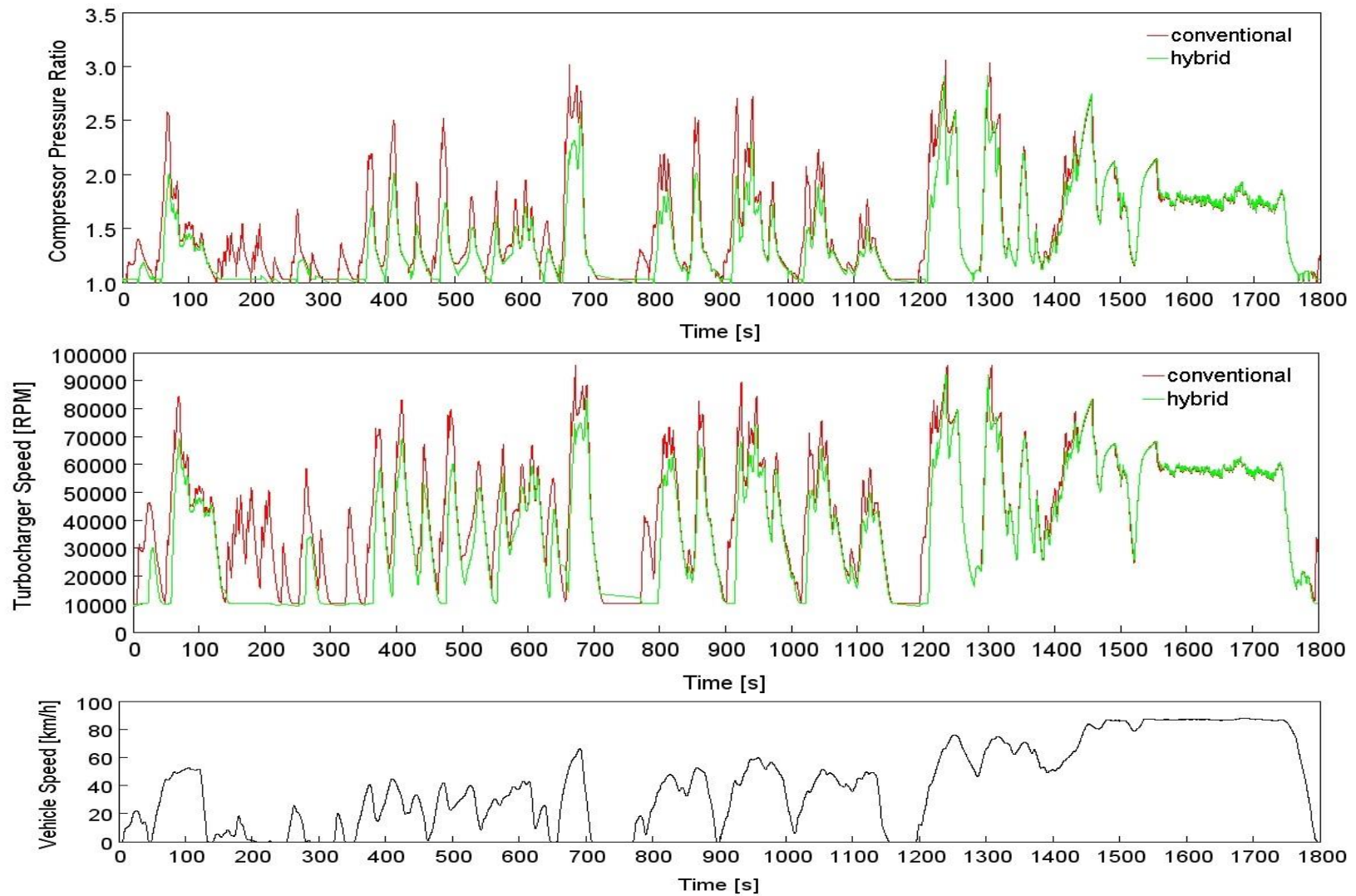
Σχήμα 5.3: Πραγματική ταχύτητα οχήματος και παροχή μάζας καυσίμου συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια του κύκλου πόλης WTVC



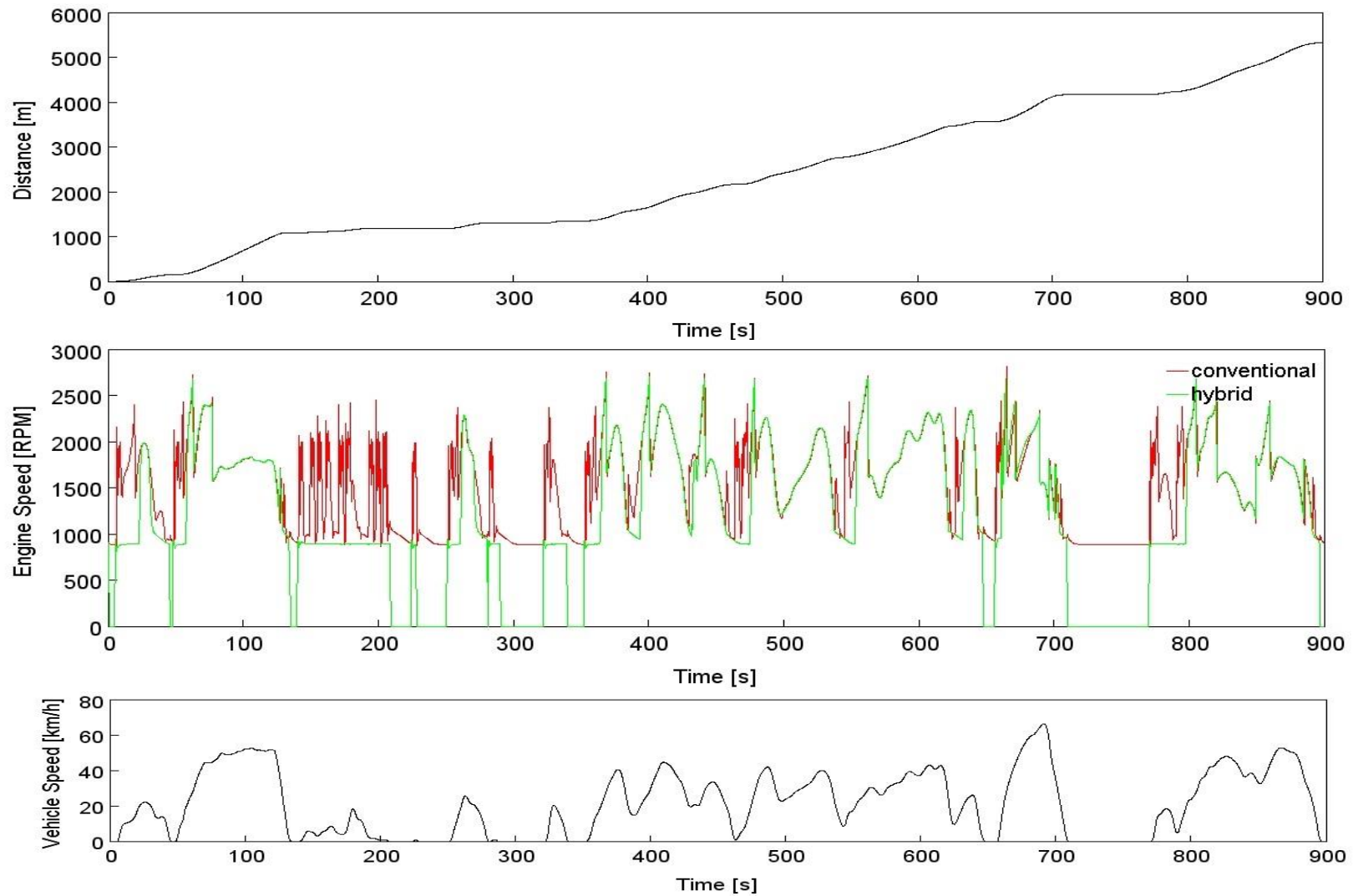
Σχήμα 5.4: Ισχύς και ροπή του κινητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια του κύκλου πόλης WTCV



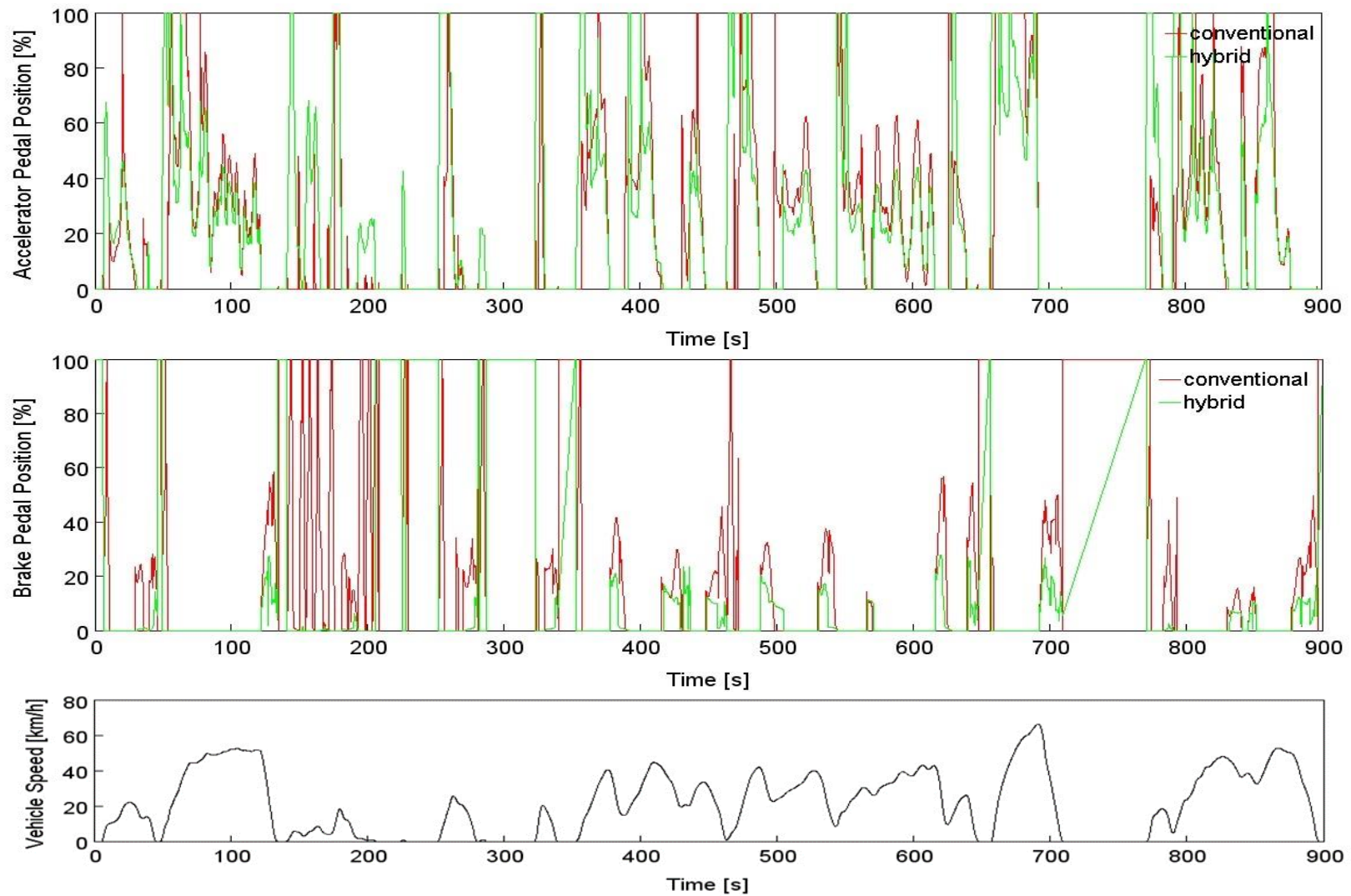
Σχήμα 5.5: Ειδική κατανάλωση καυσίμου και μέση πραγματική πίεση κινητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια του κύκλου πόλης WTC



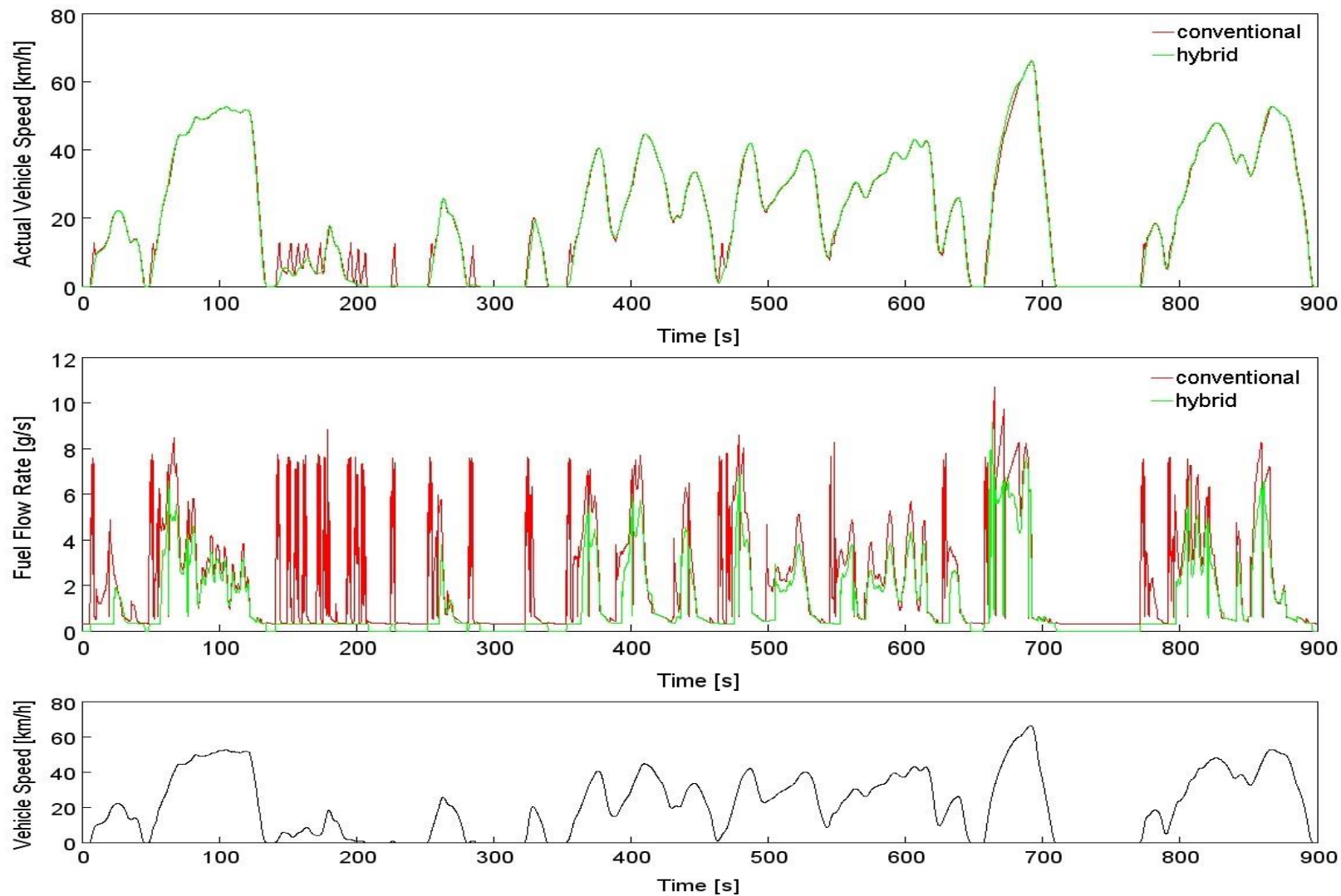
Σχήμα 5.6: Λόγος πίεσης συμπιεστή και ταχύτητα περιστροφής ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια του κύκλου πόλης WTVC



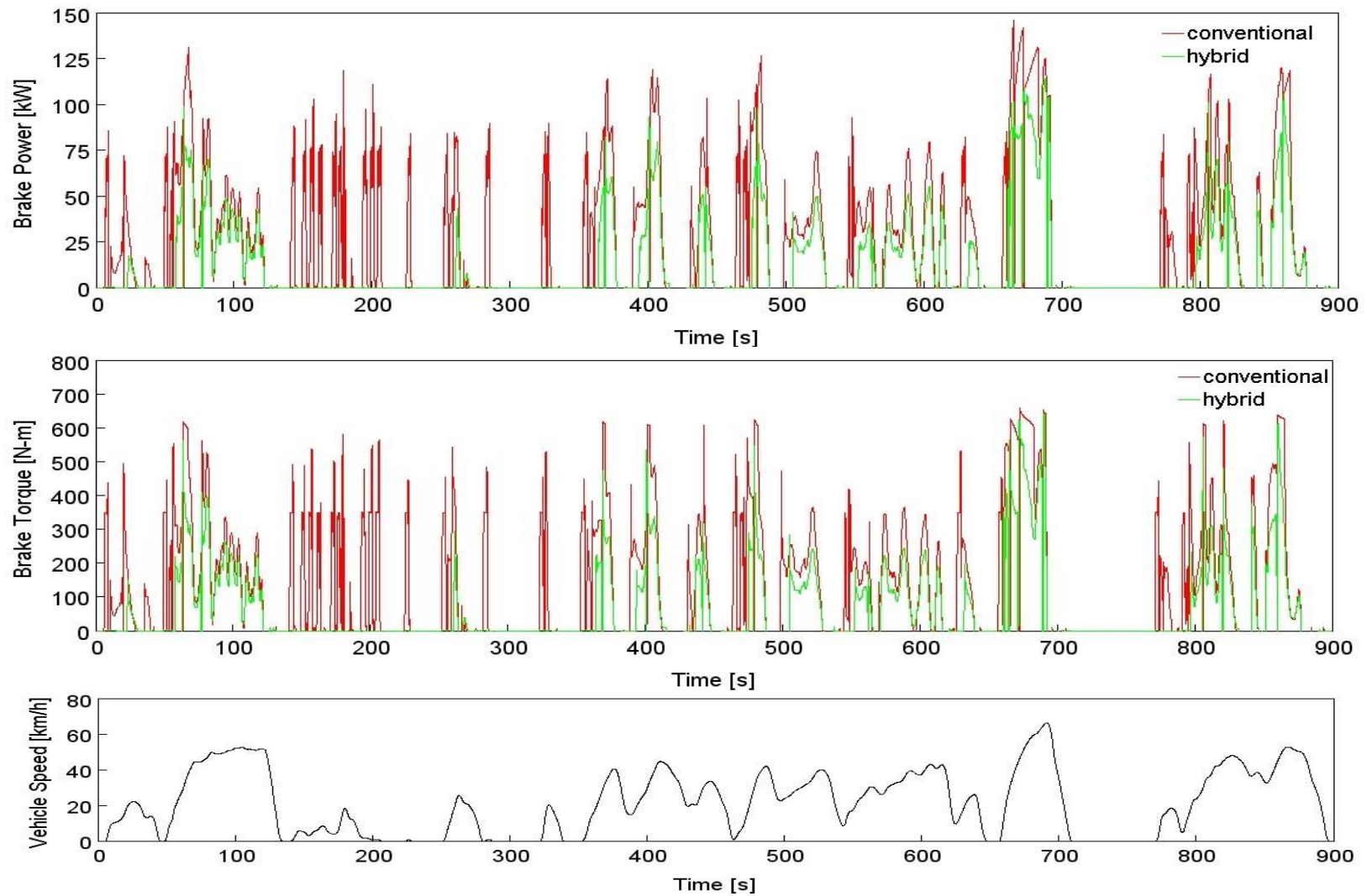
Σχήμα 5.7: Διανυόμενη απόσταση από το όχημα και ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια των πρώτων 900 δευτερολέπτων του κύκλου πόλης WTV



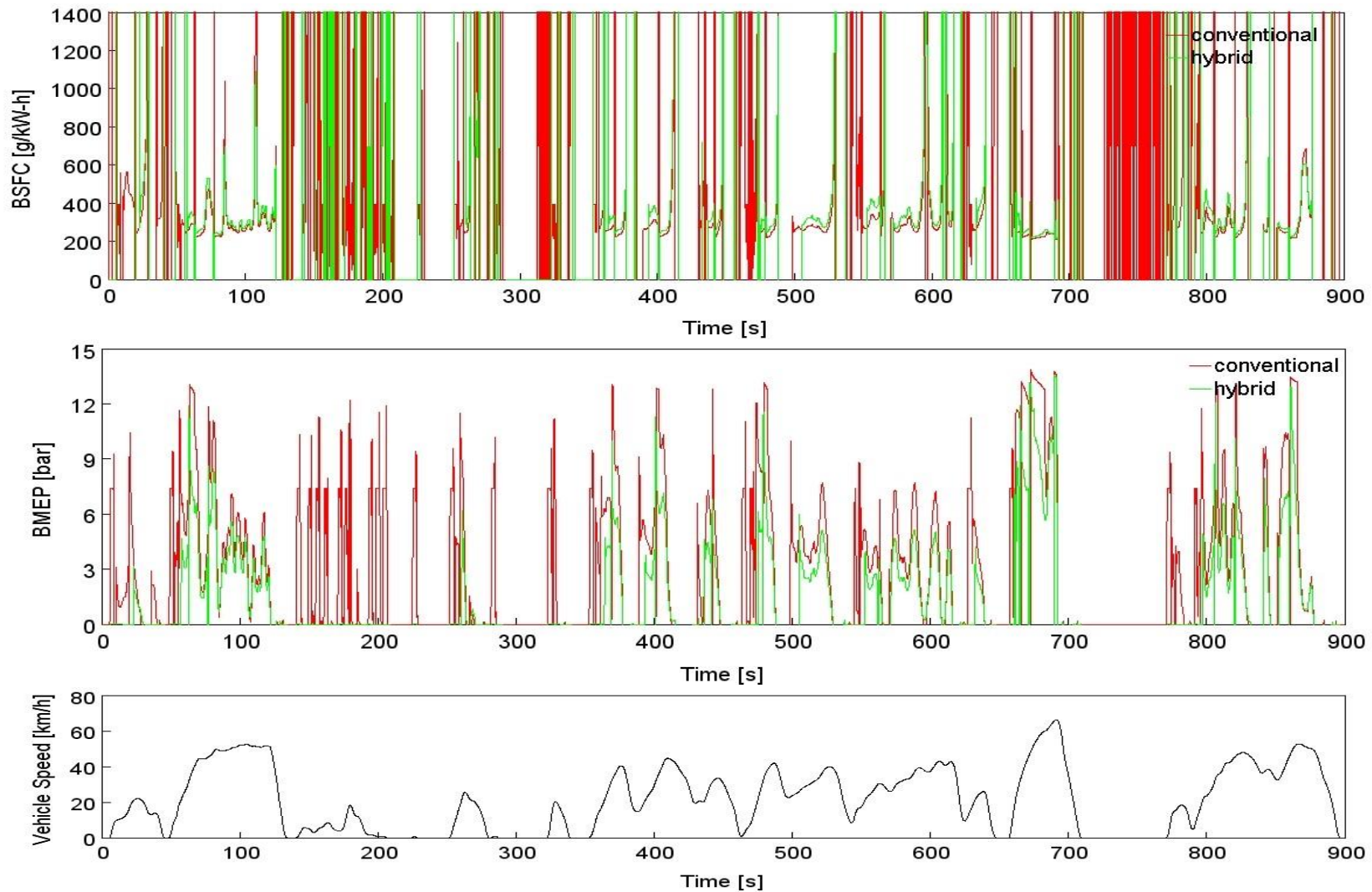
Σχήμα 5.8: Πάτημα πεντάλ επιτάχυνσης και φρένου συναρτήσεσι του χρόνου κατά την διάρκεια των πρώτων 900 δευτερολέπτων του κύκλου πόλης WTVC



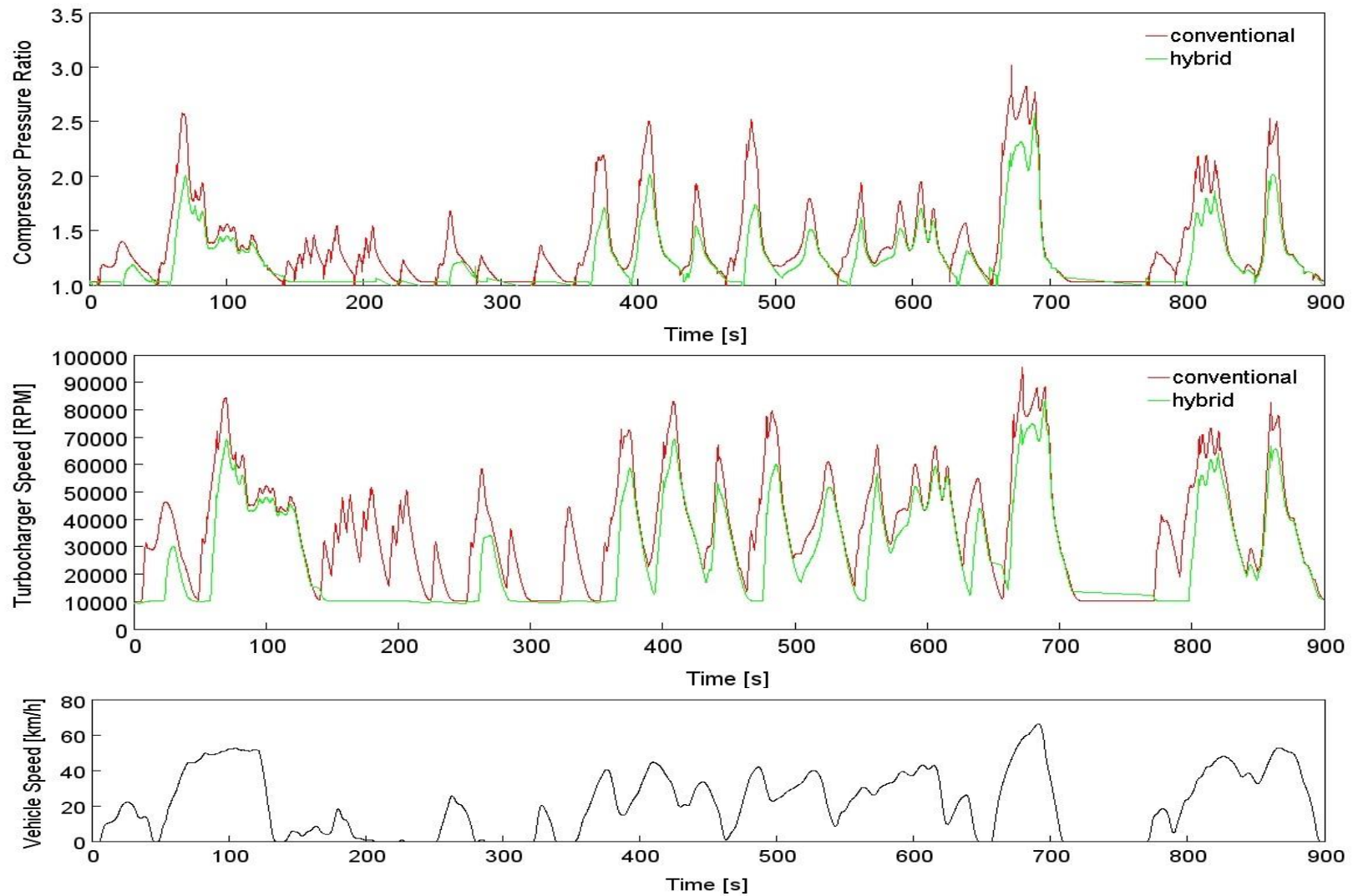
Σχήμα 5.9: Πραγματική ταχύτητα οχήματος και παροχή μάζας καυσίμου συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια των πρώτων 900 δευτερολέπτων του κύκλου πόλης WTVC



Σχήμα 5.10: Ισχύς και ροπή του κινητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια των πρώτων 900 δευτερολέπτων του κύκλου πόλης WTV



Σχήμα 5.11: Ειδική κατανάλωση καυσίμου και μέση πραγματική πίεση κινητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια των πρώτων 900 δευτερολέπτων του κύκλου πόλης WTVC



Σχήμα 5.12: Λόγος πίεσης συμπιεστή και ταχύτητα περιστροφής ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια των πρώτων 900 δευτερολέπτων του κύκλου πόλης WTVC

5.3 Σχολιασμός επιδόσεων – Σύγκριση κατανάλωσης καυσίμου

Μέσω των παραπάνω διαγραμμάτων καθίσταται σαφές πως μεταξύ των καμπυλών υβριδικού και συμβατικού οχήματος βαρέος τύπου παρουσιάζεται πλήθος διαφορών. Γενικότερα, κατά τα πρώτα 1380 δευτερόλεπτα, δηλαδή κατά την κίνηση εντός πόλης (0-900 sec) και κατά την κίνηση σε αγροτικούς δρόμους (900-1380 sec), οι διαφορές μεταξύ των καμπυλών εμφανίζονται εντονότερες, πράγμα το οποίο είναι απολύτως αναμενόμενο καθώς την περίοδο αυτή οι ταχύτητες είναι σχετικά χαμηλές, με αποτέλεσμα να γίνεται χρήση του ηλεκτροκινητήρα σε μεγάλο βαθμό. Κατά την υπόλοιπη διάρκεια του κύκλου πόλης, δηλαδή κατά την κίνηση σε συνθήκες αυτοκινητοδρόμου (1380-1800 sec), οι καμπύλες φαίνεται να ταυτίζονται σε πολλές περιπτώσεις και γενικότερα να βρίσκονται σε κοντινή απόσταση, το οποίο εξηγείται από τις παύσεις λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα λόγω υψηλών ταχυτήτων και επομένως την λειτουργία του υβριδικού ως συμβατικό όχημα.

Ακόμη, πρέπει να αναφερθεί πως σε σημεία αρκετά υψηλών ταχυτήτων (περιοχή motorway) όπου ο θερμικός κινητήρας Diesel αναλαμβάνει πλήρως την τροφοδότηση του οχήματος με ισχύ, το υβριδικό όχημα φαίνεται να λειτουργεί σε υψηλότερα φορτία από το συμβατικό. Εξήγηση στο φαινόμενο αυτό αποτελεί η κατά 300 κιλά μεγαλύτερη μάζα του υβριδικού σε σχέση με το συμβατικό όχημα, που οφείλεται στην προσθήκη του ισχυρού ηλεκτρικού μοτέρ και της μπαταρίας.

Επιπροσθέτως, στα σημεία του κύκλου πόλης όπου η ταχύτητα του οχήματος γίνεται μηδενική, είναι εμφανές ότι το σύστημα start-stop του κινητήρα λαμβάνει δράση και διακόπτει την λειτουργία του έως ότου ζητηθεί μέσω του συμπλέκτη η επανεκκίνηση του. Μέσω του διαγράμματος πεντάλ φρένου γίνεται επίσης κατανοητό πως το σύστημα αναγεννητικής πέδησης αναλαμβάνει σε πολλές περιπτώσεις την επιβράδυνση σε κάποιο ποσοστό του υβριδικού οχήματος, με τα μηχανικά φρένα να διαδραματίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο κυρίως κατά την διάρκεια της ακινητοποίησης του.

Τέλος, η απόκριση του υβριδικού οχήματος στις απαιτήσεις του κύκλου πόλης είναι σε μεγάλο βαθμό πιο ικανοποιητική από την απόκριση του συμβατικού (ακολουθεί δηλαδή με μεγαλύτερη ακρίβεια το επιβαλλόμενο προφίλ ταχύτητας), γεγονός αρκετά σημαντικό διότι έχει προσομοιωθεί η δυσμενέστερη περίπτωση των βαρέων οχημάτων, όπου είναι πλήρως φορτωμένα.

Από τα διαγράμματα παροχής μάζας εγχεόμενου καυσίμου, τόσο κατά την διάρκεια της κίνησης εντός πόλης όσο και της κίνησης σε όλο τον κύκλο, γίνεται κατανοητή η μειωμένη κατανάλωση καυσίμου του υβριδικού σε σχέση με το αντίστοιχο συμβατικό όχημα. Ωστόσο, για την καλύτερη εποπτεία της μεταξύ τους διαφοράς στην κατανάλωση

καυσίμου, κατασκευάστηκε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ο Πίνακας 5.1, όπου απεικονίζει την κατανάλωση καυσίμου (L/100km) κάθε οχήματος κατά την κίνηση εντός πόλης, σε επαρχιακούς δρόμους και εκτός πόλης (urban, rural και motorway αντίστοιχα). Στον Πίνακα 5.1 γίνεται επίσης σύγκριση της κατανάλωσης καυσίμου τόσο σε ποσοτικό όσο και σε ποσοστιαίο επίπεδο.

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

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVC (0 – 1800 s)
Συμβατικό όχημα	45.86	35.53	24.54	38.13
Υβριδικό όχημα	29.13	26.21	23.00	26.67
Ποσοτική μεταβολή	-16.74	-9.32	-1.53	-11.46
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-36.50	-26.23	-6.25	-30.06

Λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα του ανωτέρω πίνακα, γίνεται αντιληπτό πως υπάρχει σημαντική μείωση στην κατανάλωση καυσίμου κυρίως κατά την κίνηση εντός πόλης και σε επαρχιακούς δρόμους, χωρίς ωστόσο να είναι αμελητέα η μείωση σε συνθήκες αυτοκινητοδρόμου. Το παρόν όχημα βαρέος τύπου, το οποίο έχει προσομοιωθεί όντας πλήρως φορτωμένο, χρησιμοποιείται κατά βάση σε μεγάλες διαδρομές εκτός πόλης, με αποτέλεσμα να μην εκμεταλλεύεται πλήρως το υβριδικό σύστημα που διαθέτει. Παρ' όλα αυτά, σε εφαρμογές όπου απαιτείται κυρίως μεταφορά αγαθών σε συνθήκες χαμηλών ταχυτήτων, δηλαδή εντός πόλης και στην ύπαιθρο, το παρόν υβριδικό όχημα αποτελεί την ιδανική λύση.

Τέλος, σημαντικό είναι να αναφερθεί πως κατά την ολοκλήρωση του τρεξίματος του κύκλου, η στάθμη της μπαταρίας είναι χαμηλότερη από την αρχική της κατάσταση. Το παρόν μοντέλο έχει κατασκευαστεί ώστε η μπαταρία να φορτίζει μόνο κατά την λειτουργία της αναγεννητικής πέδησης, έτσι εάν ήταν επιθυμητή η πλήρης φόρτιση της μπαταρίας στο τέλος του κύκλου, θα χρειαζόταν κατανάλωση επιπλέον ενέργειας από τον θερμικό κινητήρα, το οποίο συνεπάγεται ελαφρώς αυξημένη κατανάλωση στην περίπτωση του υβριδικού οχήματος. Επομένως, οι προαναφερθείσες διαφορές κατανάλωσης καυσίμου μεταξύ συμβατικού και υβριδικού οχήματος θα ήταν μειωμένες.

5.4 Εκπομπές καυσαερίων κινητήρα

Για την βέλτιστη απεικόνιση των εκπομπών καυσαερίων του κινητήρα, ακολουθήθηκε διαδικασία υπολογισμού των εκπομπών NO_x, αιθάλης και CO₂, καθώς τα αποτελέσματα του προγράμματος GT-Power μετά το πέρας της προσομοίωσης δεν βρίσκονται στην κατάλληλη μορφή. Πιο συγκεκριμένα, το πρόγραμμα αποδίδει τα αποτελέσματα των εκπομπών NO_x και CO₂ στις μορφές g/KWh ή ppm. Για την μετατροπή των εκπομπών αυτών σε μορφή g/km (που είναι πιο προσφιλές σε εφαρμογές οχημάτων και κατά την χρήση κύκλων πόλης οχήματος), χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση που αξιοποιεί την μορφή συγκέντρωσης τους σε ppm και την μετατρέπει σε g/h [13].

$$\dot{m}_{emission} = C_{emission} \cdot \frac{MW_{emission}}{MW_{exhaustgas}} \cdot \dot{m}_{exhaustgas} \quad (5.1)$$

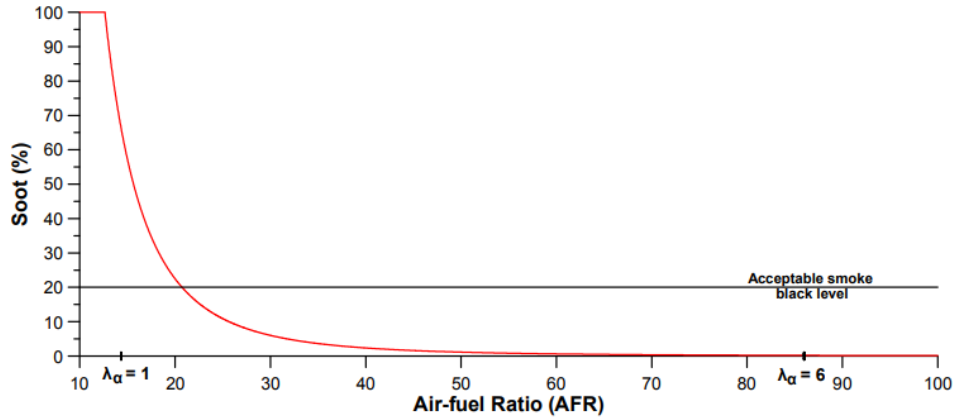
Όπου $C_{emission}$ σε ppm, $\dot{m}_{exhaustgas}$ σε g/h, ενώ θεωρήθηκε προσεγγιστικά πως $MW_{CO_2} = 44,01$ kg/kmol, $MW_{NO_x} = 46,01$ kg/kmol, $MW_{exhaustgas} = 28,98$ kg/kmol.

Η παροχή μάζας καυσαερίων που χρησιμοποιεί η Σχέση 5.1, λαμβάνεται ίση με το άθροισμα της παροχής αέρα και καυσίμου. Στη συνέχεια, γνωρίζοντας την ταχύτητα του οχήματος, εύκολα προκύπτει η μορφή των NO_x, CO₂ σε g/km. Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων, έγινε και η εύκολη μετατροπή των εκπομπών αυτών από g/KWh σε g/km, όπου διαπιστώθηκε πως οι διαφορές μεταξύ των δύο μεθοδολογιών ήταν αμελητέες (~1%).

Όσον αφορά των υπολογισμό της αιθάλης (soot), λόγω αδυναμίας ενσωμάτωσης των σχετικών υποσυστημάτων του GT-Power, αυτή εκτιμήθηκε βάσει της παρακάτω προσεγγιστικής σχέσης [12]:

$$Soot (\%) = 380190 \cdot AFR^{(-3,25)} \quad (5.2)$$

Η σχέση 5.2 αναπτύχθηκε σε παρόμοιο κινητήρα με αυτόν της παρούσας διπλωματικής εργασίας και συσχετίζει τις εκπομπές της αιθάλης (ως ποσοστό αδιαφάνειας) με το κυρίαρχο μέγεθος που τις επηρεάζει, δηλαδή την αναλογία αέρα-καυσίμου (AFR). Η συσχέτιση των μεγεθών που προκύπτει από την Σχέση 5.2, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.13, στο οποίο επισημαίνονται οι τιμές της αιθάλης στις περιπτώσεις στοιχειομετρικού λόγου αέρα-καυσίμου ($\lambda_\alpha = 1$) και λειτουργίας με φτωχό μείγμα ($\lambda_\alpha = 6$). Ακόμη, στο συγκεκριμένο σχήμα (Σχήμα 5.13) τονίζεται το αποδεκτό όριο της αιθάλης, που ορίζεται για λόγο αέρα-καυσίμου λ_α μεγαλύτερο του 1,6.



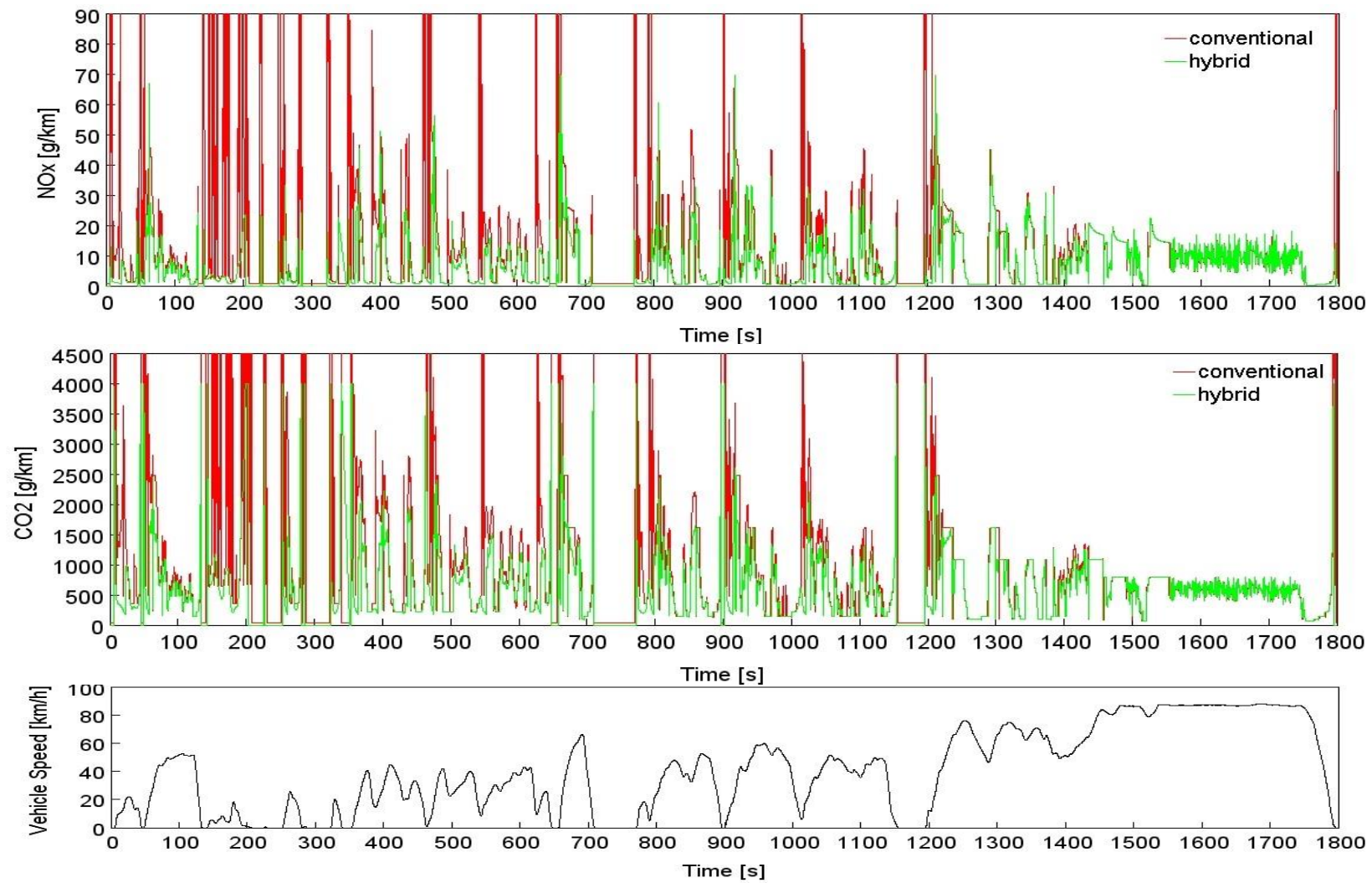
Σχήμα 5.13: Συσχέτιση εκπομπών αιθάλης (%) με την αναλογία αέρα-καυσίμου (AFR)

Επιπροσθέτως, η Σχέση 5.2 έχει αναπτυχθεί για να καλύπτει και περιπτώσεις μεταβατικής λειτουργίας, οπότε δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα και στο πεδίο κοντά ή και κάτω ακόμα από την τιμή $\lambda_{\alpha} = 1$ (AFR = 14,33), το οποίο είναι συχνά εμφανιζόμενο κατά την μεταβατική λειτουργία κινητήρων Diesel λόγω του φαινομένου της υστέρησης του στροβιλο-υπερπληρωτή (turbocharger lag).

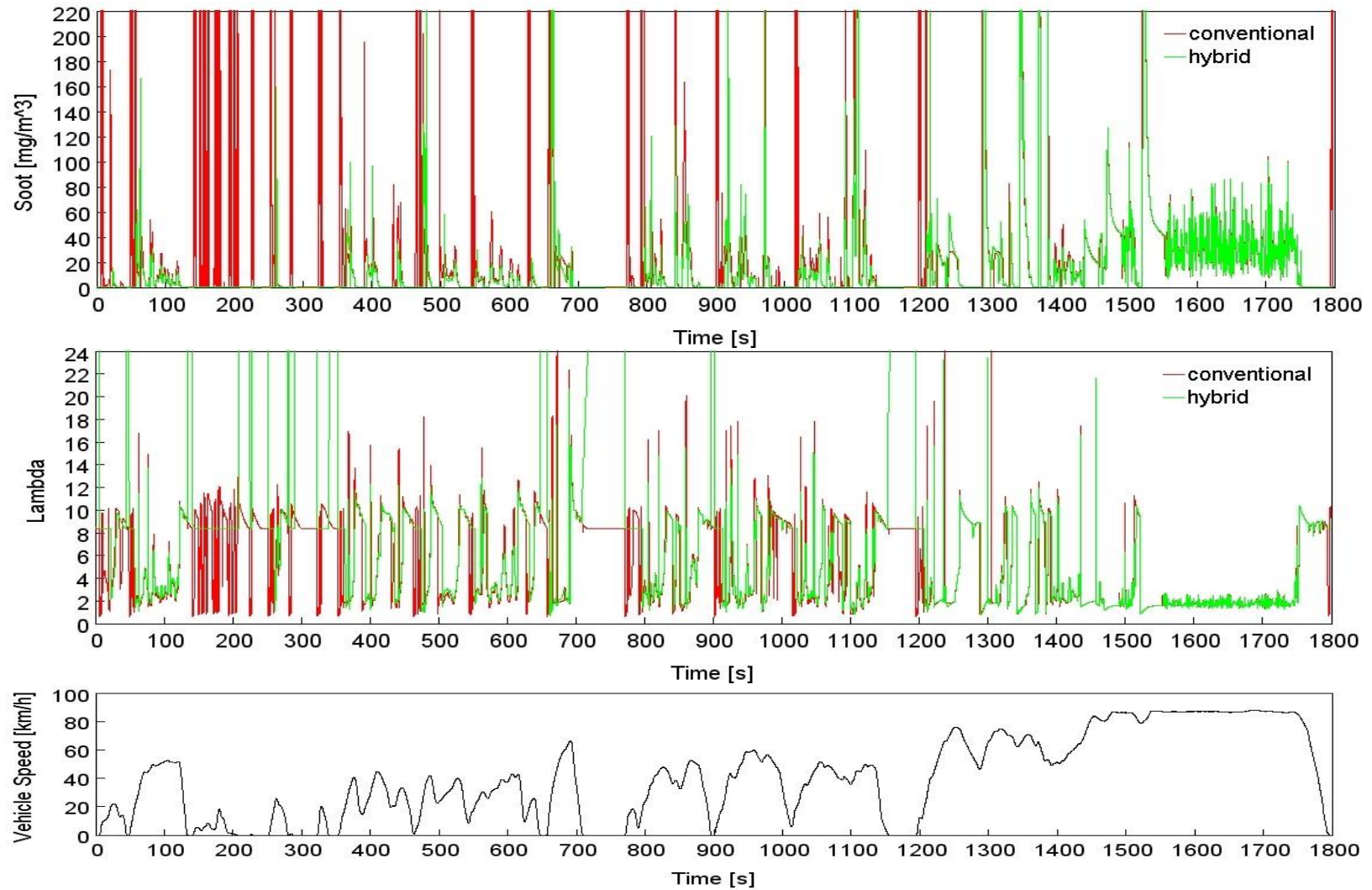
Όπως ισχύει και για τις εκπομπές των οξειδίων του αζώτου (NO_x), τα αποτελέσματα της αιθάλης πρέπει να αντιμετωπιστούν όχι σε επίπεδο απόλυτων τιμών (αφού δεν έχει προηγηθεί κάποια διαδικασία ταιριάσματος πειραματικών με υπολογιστικά δεδομένα) αλλά σε επίπεδο συγκριτικό (μιας μεταβατικής περίπτωσης σε σχέση με άλλη), παρατηρώντας γενικότερα τις συνολικές τάσεις (trends) που εμφανίζονται.

Στη παρούσα εργασία, καθώς μελετάται η απόκριση οχήματος κατά τη διάρκεια ενός μεταβατικού κύκλου πόλης (WTVC), άρα χρειαζόμαστε τις συνολικά εκπεμπόμενες ποσότητες των ρύπων, κρίθηκε αναγκαία η μετατροπή των τιμών που προκύπτουν από τη Σχέση (5.2) από % σε mg/m³ με τη χρήση πειραματικών δεδομένων από διδακτορική διατριβή [13].

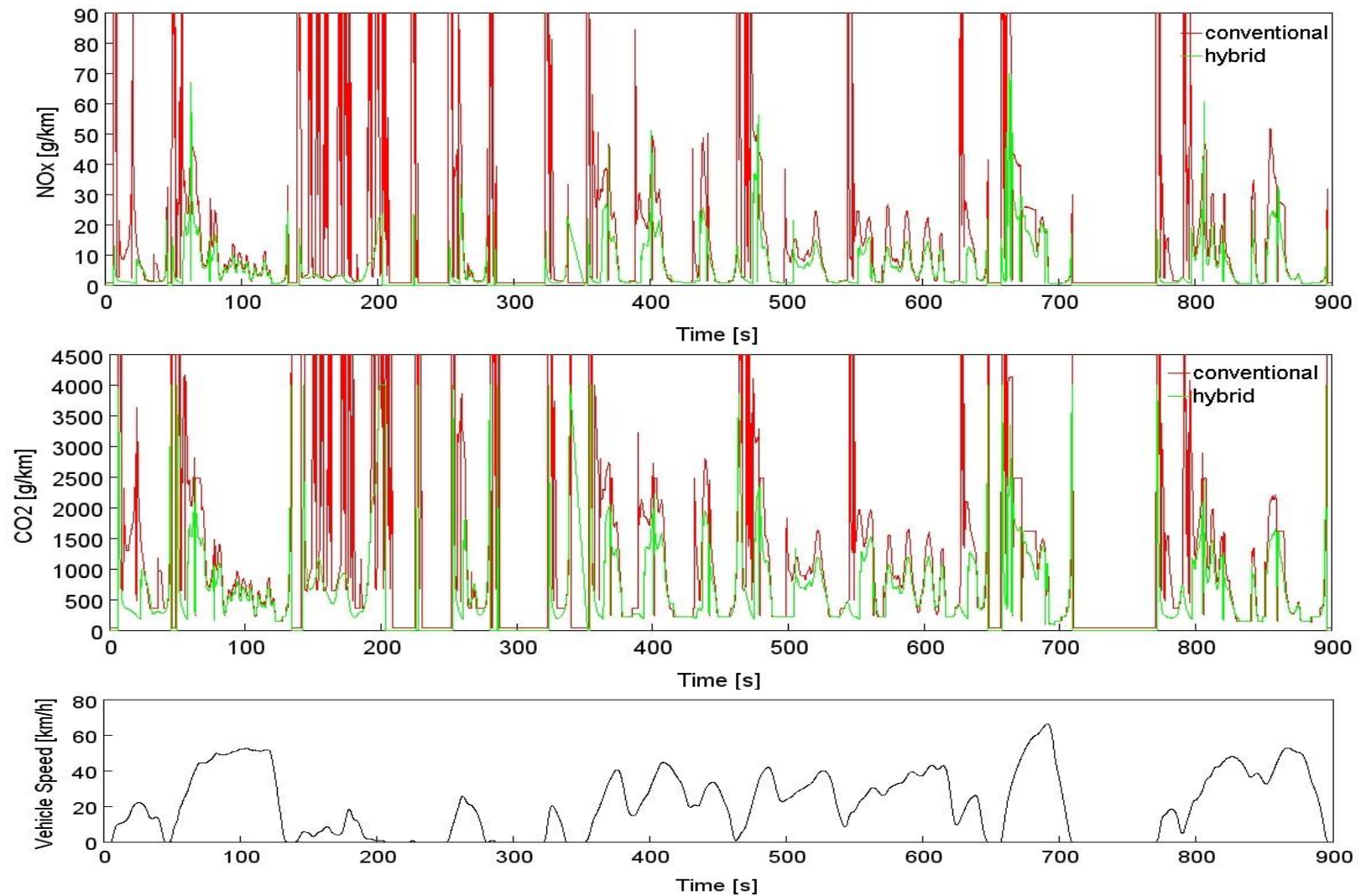
Παρακάτω παρουσιάζονται συναρτήσεις του χρόνου τα διαγράμματα εκπομπών NO_x και CO₂ σε g/km, αιθάλης σε mg/m³ και λόγου ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου λ_{α} (Lambda) κατά την διάρκεια του WTVC (Σχήματα 5.14 έως και 5.17), συνοδευόμενα από το διάγραμμα ταχύτητας του οχήματος.



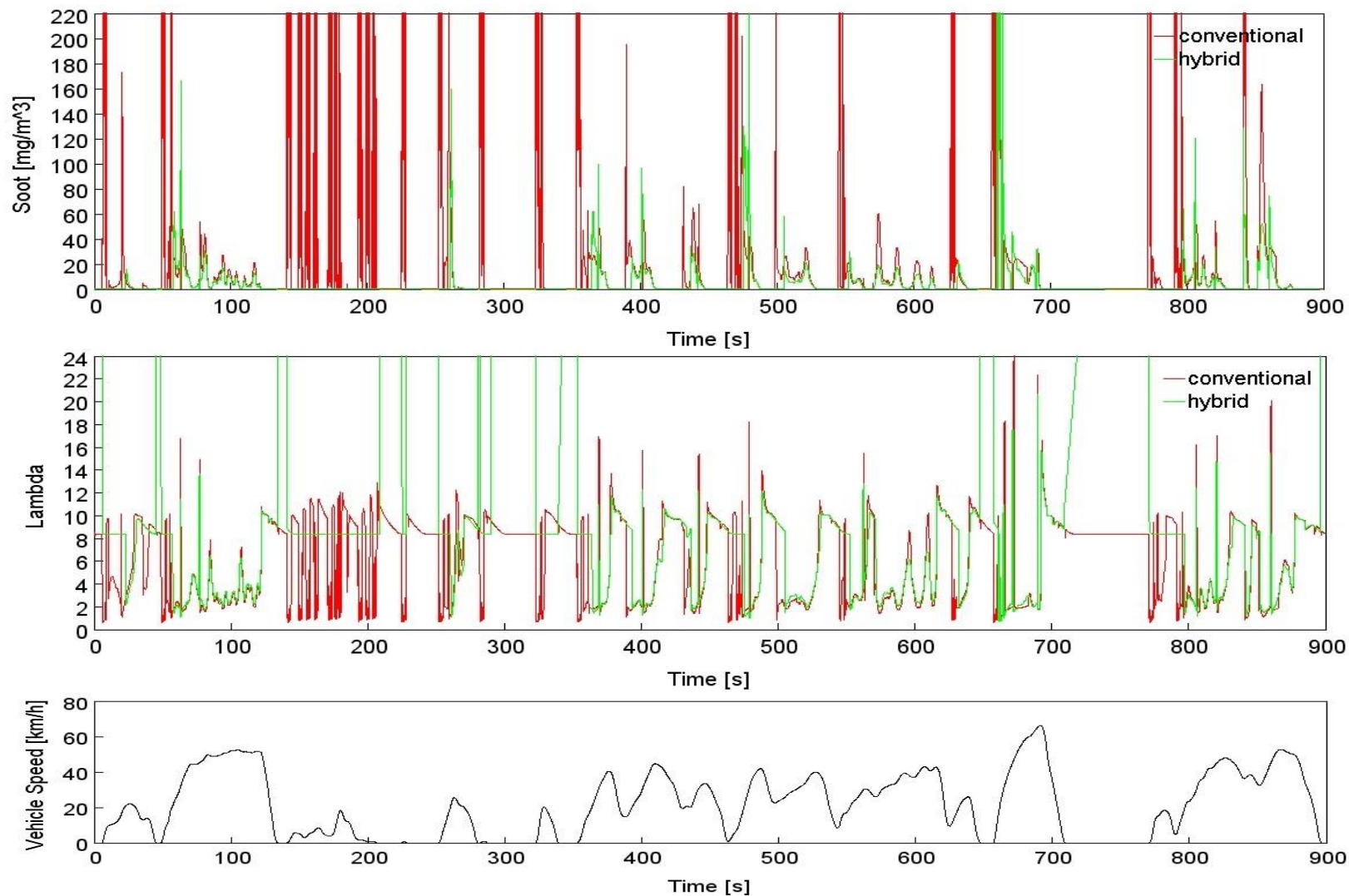
Σχήμα 5.14: Εκπομπές NOx και CO₂ συναρτήσεσι του χρόνου κατά την διάρκεια του κύκλου πόλης WTVC



Σχήμα 5.15: Εκπομπές αιθάλης (soot) και λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια του κύκλου πόλης WTV C



Σχήμα 5.16: Εκπομπές NOx και CO₂ συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια των πρώτων 900 δευτερολέπτων του κύκλου πόλης WTV



Σχήμα 5.17: Εκπομπές αιθάλης (soot) και λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια των πρώτων 900 δευτερολέπτων του κύκλου πόλης WTV C

5.5 Σχολιασμός και σύγκριση εκπομπών καυσαερίων

Για καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων και των διαφορών μεταξύ υβριδικής και συμβατικής περίπτωσης, κατασκευάστηκαν οι Πίνακες 5.2 έως 5.4, στους οποίους παρουσιάζονται αντίστοιχα οι εκπομπές των NO_x, CO₂ και αιθάλης ανά τμήμα του κύκλου WTVС (urban, rural, motorway). Παράλληλα, σε κάθε πίνακα που προαναφέρθηκε περιλαμβάνεται άμεση σύγκριση των αντίστοιχων ρύπων σε ποσοτικό και ποσοστιαίο επίπεδο.

Πίνακας 5.2: Μεταβολή των εκπομπών NO_x κατά την διάρκεια του κύκλου WTVС.

Εκπομπή NO_x (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVС (0 – 1800 s)
Συμβατικό όχημα	17.52	13.57	10.16	14.75
Υβριδικό όχημα	7.38	9.12	9.30	8.39
Ποσοτική μεταβολή	-10.14	-4.45	-0.86	-6.35
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-57.86	-32.81	-8.47	-43.08

Πίνακας 5.3: Μεταβολή των εκπομπών CO₂ κατά την διάρκεια του κύκλου WTVС.

Εκπομπή CO₂ (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVС (0 – 1800 s)
Συμβατικό όχημα	1229.17	952.22	657.58	1022.01
Υβριδικό όχημα	780.55	702.47	616.46	714.80
Ποσοτική μεταβολή	-448.62	-249.76	-41.12	-307.21
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-36.50	-26.23	-6.25	-30.06

Πίνακας 5.4: Μεταβολή των εκπομπών αιθάλης κατά την διάρκεια του κύκλου WTVc.

Εκπομπή αιθάλης (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVc (0 – 1800 s)
Συμβατικό όχημα	0.147	0.086	0.056	0.089
Υβριδικό όχημα	0.040	0.060	0.052	0.051
Ποσοτική μεταβολή	-0.107	-0.025	-0.004	-0.038
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-72.88	-29.76	-6.53	-42.44

Μέσω των διαγραμμάτων και των πινάκων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, καθίσταται προφανές το όφελος χρήσης υβριδικού οχήματος έναντι συμβατικού όσον αφορά την εκπομπή καυσαερίων. Κατά την διάρκεια της επιτάχυνσης, κυρίως στο εντός πόλης τμήμα (urban), στο συμβατικό όχημα εμφανίζονται σημαντικές υπερακοντίσεις στις τιμές των ρύπων, οι οποίες συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στην αύξηση της μέσης τιμής τους. Αντίθετα, το υβριδικό όχημα στο τμήμα αυτό χρησιμοποιεί σε μεγάλο βαθμό τον ηλεκτρικό κινητήρα, με αποτέλεσμα να απουσιάζουν φαινόμενα υπερακόντισης, οδηγώντας σε μειωμένες εκπομπές ρύπων.

Σχετικά με τις εκπομπές NO_x, ένας ακόμη παράγοντας του υβριδικού οχήματος που υποβοηθά την μείωσή τους αποτελεί η χαμηλότερη θερμοκρασία σε αρκετές περιπτώσεις εντός του θαλάμου καύσης. Γενικότερα, οι αυξημένες εκπομπές NO_x στο τμήμα εντός πόλης, οφείλονται κυρίως στην ανακολουθία κατά την επιτάχυνση ανάμεσα στο αυξημένο εγχεόμενο καύσιμο και την ανεπαρκή ποσότητα αέρα λόγω της υστέρησης του στρόβιλο-υπερπληρωτή, φαινόμενο το οποίο παρατηρείται σε αρκετά μεγαλύτερο βαθμό στην περίπτωση του συμβατικού οχήματος (εξαιτίας της υποβοήθησης της επιτάχυνσης από τον ηλεκτροκινητήρα στο υβριδικό).

Στις εκπομπές CO₂ ήταν αναμενόμενη η μείωση, διότι το CO₂ έχει άμεση (1 προς 1) σχέση με την κατανάλωση του καυσίμου, που όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως (Πίνακας 5.1) επίσης μειώθηκε σε παρόμοιο ποσοστό.

Σχετικά με τις εκπομπές αιθάλης (soot), εμφανίστηκε αξιοσημείωτη μείωση (~73%) κατά την κίνηση στο εντός πόλης τμήμα ενώ δεν ήταν αμελητέα και η μείωση στον υπόλοιπο κύκλο πόλης (~42% συνολική μείωση). Το γεγονός αυτό οφείλεται στις χαμηλότερες ποσότητες εγχεόμενου καυσίμου του υβριδικού οχήματος στον θάλαμο καύσης, που συνεπάγεται υψηλότερους λόγους αέρα-καυσίμου. Σε αυτό το σημείο πρέπει

να τονιστεί, η επιρροή της υστέρησης του στροβιλο-υπερπληρωτή στις υψηλές τιμές της αιθάλης, καθώς κατά το φαινόμενο αυτό προκύπτουν ιδανικές συνθήκες για το σχηματισμό της (λ_a κοντά στην περιοχή του 1).

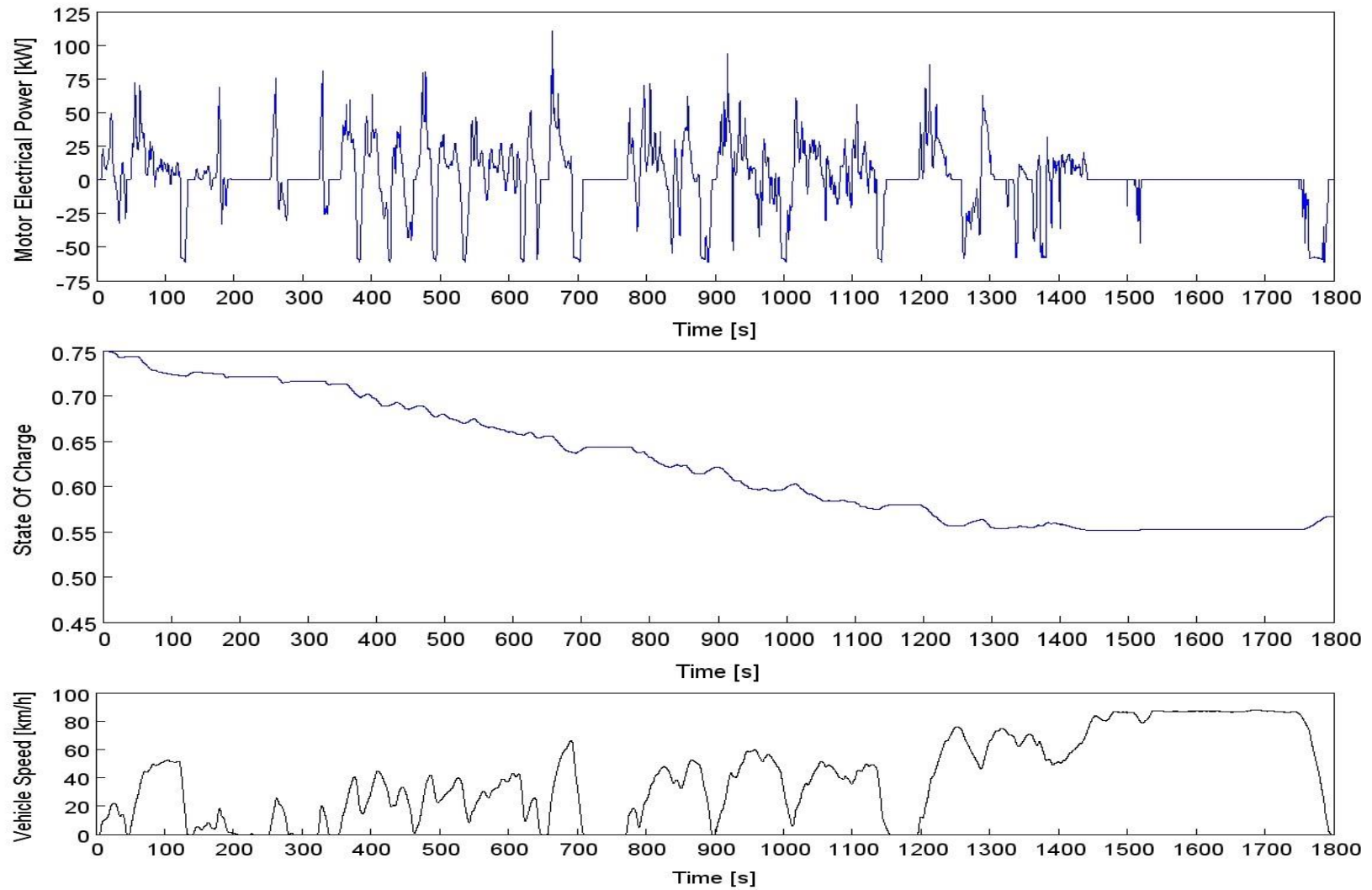
Τέλος, παρόλο που εμφανίζονται στο τμήμα συνθηκών αυτοκινητοδρόμου των διαγραμμάτων αρκετά κοντά οι καμπύλες των περιπτώσεων, μέσω των πινάκων γίνεται κατανοητό πως ακόμη και εκεί υπάρχουν μη αμελητέες διαφορές στην εκπομπή ρύπων.

5.6 Επιδόσεις των ηλεκτρικών τμημάτων του υβριδικού συστήματος

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, το ηλεκτρικό μοτέρ και η μπαταρία του υβριδικού οχήματος βαρέος τύπου αποτελούν κύρια τμήματα του υβριδικού του συστήματος. Για το λόγο αυτό, η μελέτη της συμπεριφοράς τους κατά την διάρκεια της προσομοίωσης είναι απαραίτητη για την καλύτερη εποπτεία του μοντέλου. Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα ισχύος του ηλεκτρικού μοτέρ και στάθμης φόρτισης της μπαταρίας. Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 5.18) απεικονίζονται τα διαγράμματα αυτά κατά την διάρκεια του κύκλου πόλης WTVTC, συνοδευόμενα πάντα από το διάγραμμα της ταχύτητας του οχήματος. Για το διάγραμμα της στάθμης φόρτισης της μπαταρίας (SoC) τα όρια που επιβλήθηκαν στον άξονα Υ, ταυτίζονται με τα επιβαλλόμενα όρια χρήσης της μπαταρίας για την βέλτιστη λειτουργία της (0,45-0,75).

Παρατηρώντας το διάγραμμα ισχύος μοτέρ, γίνεται αντιληπτό πως το ηλεκτρικό μοτέρ κατά την διάρκεια του κύκλου πόλης λειτουργεί και ως ηλεκτροκινητήρας (θετικές τιμές ισχύος) και ως γεννήτρια (αρνητικές τιμές ισχύος), δηλαδή είτε προσδίδει ισχύ στο όχημα μέσω της μπαταρίας είτε απορροφά ισχύ μέσω της αναγεννητικής πέδησης αντίστοιχα. Επιπροσθέτως, είναι εμφανές ότι γίνεται αρκετά μεγάλη χρήση του ηλεκτρικού μοτέρ στο τμήμα εντός πόλης και στο τμήμα επαρχιακών/αγροτικών δρόμων (0-1380s), που είναι αρκετά λογικό καθώς εκεί υπάρχουν οι χαμηλότερες ταχύτητες του κύκλου, με αποτέλεσμα να αναλαμβάνει το μοτέρ είτε εξ ολοκλήρου την κίνηση του οχήματος είτε συνδυαστικά με την Μ.Ε.Κ. Αντίθετα, στο τμήμα συνθηκών αυτοκινητοδρόμου το ηλεκτρικό μοτέρ φαίνεται να μην τίθεται σχεδόν καθόλου σε λειτουργία, παρά μόνο σε περιπτώσεις που το όχημα χρειάζεται επιβράδυνση και λειτουργεί ως γεννήτρια. Όσον αφορά την μπαταρία, μέσω του διαγράμματος της στάθμης της είναι προφανές πως υπάρχει μία σταδιακή εξάντληση της, χωρίς ωστόσο να πλησιάζει επικίνδυνα στα όρια λειτουργίας της. Ως αποτέλεσμα, δεν υπάρχει ανάγκη για φόρτισή της από την Μ.Ε.Κ. στην παρούσα προσομοίωση, γεγονός που συμβαίνει κατά κόρον σε αρκετά υβριδικά οχήματα

οδηγώντας σε ακόμη μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου. Τέλος, κατά την διάρκεια του κύκλου σε περιόδους επιβράδυνσης τίθεται σε λειτουργία το υποσύστημα αναγεννητικής πέδησης και έτσι η μπαταρία όπως απεικονίζεται και στο διάγραμμα φορτίζεται μερικώς από το ηλεκτρικό μοτέρ.



Σχήμα 5.18: Ισχύς του ηλεκτρικού μοτέρ και στάθμη φόρτισης της μπαταρίας συναρτήσει του χρόνου κατά την διάρκεια του κύκλου πόλης WTCV

5.7 Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης

Ύστερα από την ανάλυση που προηγήθηκε για τις ονομαστικές συνθήκες προσομοίωσης, πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση της επίδρασης των βασικών χαρακτηριστικών του οχήματος, με σκοπό την μελέτη της τυχόν επίδρασής τους στην κατανάλωση, στις εκπομπές CO₂ και στις εκπομπές ρύπων (NO_x, αιθάλη) του οχήματος. Στην ανάλυση που ακολουθεί, κάθε φορά θα αλλάζει κάποιο βασικό μέγεθος του υβριδικού οχήματος βαρέος τύπου, και έπειτα θα συγκρίνεται με το ονομαστικό υβριδικό όχημα. Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι που διαφοροποιήθηκαν είναι οι εξής:

- Η συνολική μάζα του φορτίου και του τρέιλερ
- Η μέγιστη ισχύς του ηλεκτρικού μοτέρ
- Η μετωπική επιφάνεια του οχήματος

Οι τιμές των παραπάνω μεγεθών που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5., με τις τιμές έντονης γραμματοσειρές να αποτελούν τις ονομαστικές.

Πίνακας 5.5: Τιμές των εξεταζόμενων μεγεθών στην παραμετρική ανάλυση.

Συνολική μάζα φορτίου-τρέιλερ (t)	0	4	7
Μέγιστη ισχύς ηλεκτρικού μοτέρ (kW)	100	200	300
Μετωπική επιφάνεια (m ²)	4	5	6

Πέρα από την μεταβολή βασικών μεγεθών του υβριδικού οχήματος, πραγματοποιήθηκε επιπλέον και μία παραμετρική μελέτη της επίδρασης των εξωτερικών συνθηκών που επικρατούν στο οδόστρωμα. Στο περιβάλλον GT-Power, προσομοιώθηκαν συνθήκες βρεγμένου οδοστρώματος (πάχος φιλμ νερού 0,8 χιλιοστών) του μοντέλου κατά την διάρκεια του κύκλου πόλης WTVc και έπειτα έγινε σύγκριση ρύπων και κατανάλωσης με το μοντέλο ονομαστικών συνθηκών, στο οποίο έχει θεωρηθεί στεγνό οδόστρωμα. Οι κύριες παράμετροι που αλλάζουν στο βρεγμένο οδόστρωμα είναι ο συντελεστής αντίστασης κύλισης του ελαστικού και ο συντελεστής τριβής.

Για τον συντελεστή αντίστασης κύλισης του ελαστικού, λήφθηκε η τιμή 0,014 έναντι της ονομαστικής 0,0115, καθώς όσο αυξάνεται το πάχος του φιλμ νερού στο οδόστρωμα τόσο αυξάνεται και η ανάγκη ενέργειας του ελαστικού για την απομάκρυνση του νερού από την πορεία του οχήματος. Στο μοντέλο του βρεγμένου οδοστρώματος ενσωματώθηκε η επιλογή της ολίσθησης του ελαστικού, η οποία δίνει την δυνατότητα να μεταβάλλουμε τον συντελεστή τριβής μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος στην τιμή 0,5.

5.7.1 Μεταβολή της συνολικής μάζας φορτίου-τρέιλερ

Οι τιμές που επιλέχθηκαν για την μεταβολή της συνολικής μάζας ουσιαστικά αντιπροσωπεύουν τρεις καταστάσεις: όχημα χωρίς τρέιλερ (0 t), όχημα με μισοφορτωμένο τρέιλερ (4 t) και όχημα πλήρως φορτωμένο (ονομαστικό όχημα). Με τον τρόπο αυτό μελετάται η επίδραση της μάζας, που καλείται κάθε φορά να μεταφέρει το υβριδικό όχημα, τόσο στην κατανάλωση καυσίμου όσο και στις εκπομπές των NOx, CO₂ και αιθάλης. Στους ακόλουθους Πίνακες 5.6 έως 5.9 και 5.10 έως 5.13, παρουσιάζονται οι διαφορές σε ποσοτικό και ποσοστιαίο επίπεδο των περιπτώσεων μάζας φορτίου-τρέιλερ 4 τόνων και 0 τόνων αντίστοιχα, σε σχέση με το ονομαστικό όχημα (μάζα 7 τόνων φορτίου-τρέιλερ).

Πίνακας 5.6: Μεταβολή κατανάλωσης καυσίμου κατά την διάρκεια του κύκλου WTVc.

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVc (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	29.13	26.21	23.00	26.67
Υβριδικό όχημα με συνολική μάζα φορτίου-τρέιλερ 4 τόνων	26.61	23.40	20.62	24.10
Ποσοτική μεταβολή	-2.51	-2.81	-2.38	-2.57
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-8.63	-10.73	-10.34	-9.63

Πίνακας 5.7: Μεταβολή των εκπομπών NOx κατά την διάρκεια του κύκλου WTVc.

Εκπομπή NOx (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVc (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	7.38	9.12	9.30	8.39
Υβριδικό όχημα με συνολική μάζα φορτίου-τρέιλερ 4 τόνων	6.14	7.53	7.94	7.02
Ποσοτική μεταβολή	-1.25	-1.59	-1.36	-1.38
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-16.87	-17.45	-14.66	-16.41

Πίνακας 5.8: Μεταβολή των εκπομπών CO₂ κατά την διάρκεια του κύκλου WTVC.

Εκπομπή CO ₂ (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVC (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	780.55	702.47	616.46	714.80
Υβριδικό όχημα με συνολική μάζα φορτίου- τρέιλερ 4 τόνων	713.18	627.08	552.71	645.99
Ποσοτική μεταβολή	-67.37	-75.39	-63.76	-68.81
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-8.63	-10.73	-10.34	-9.63

Πίνακας 5.9: Μεταβολή των εκπομπών αιθάλης κατά την διάρκεια του κύκλου WTVC.

Εκπομπή αιθάλης (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVC (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	0.040	0.060	0.052	0.051
Υβριδικό όχημα με συνολική μάζα φορτίου- τρέιλερ 4 τόνων	0.029	0.046	0.046	0.041
Ποσοτική μεταβολή	-0.011	-0.014	-0.006	-0.010
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-26.55	-23.49	-12.34	-19.07

Πίνακας 5.10: Μεταβολή κατανάλωσης καυσίμου κατά την διάρκεια του κύκλου WTVC.

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVC (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	29.13	26.21	23.00	26.67
Υβριδικό όχημα με συνολική μάζα φορτίου- τρέιλερ 0 τόνων	23.70	19.55	17.45	20.85
Ποσοτική μεταβολή	-5.42	-6.66	-5.55	-5.82
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-18.61	-25.41	-24.13	-21.82

Πίνακας 5.11: Μεταβολή των εκπομπών NOx κατά την διάρκεια του κύκλου WTVc.

Εκπομπή NOx (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVc (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	7.38	9.12	9.30	8.39
Υβριδικό όχημα με συνολική μάζα φορτίου-τρέιλερ 0 τόνων	4.73	5.26	6.08	5.24
Ποσοτική μεταβολή	-2.65	-3.85	-3.22	-3.16
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-35.95	-42.27	-34.64	-37.59

Πίνακας 5.12: Μεταβολή των εκπομπών CO₂ κατά την διάρκεια του κύκλου WTVc.

Εκπομπή CO ₂ (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVc (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	780.55	702.47	616.46	714.80
Υβριδικό όχημα με συνολική μάζα φορτίου-τρέιλερ 0 τόνων	635.27	523.95	467.69	558.83
Ποσοτική μεταβολή	-145.28	-178.51	-148.78	-155.97
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-18.61	-25.41	-24.13	-21.82

Πίνακας 5.13: Μεταβολή των εκπομπών αιθάλης κατά την διάρκεια του κύκλου WTVc.

Εκπομπή αιθάλης (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVc (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	0.040	0.060	0.052	0.051
Υβριδικό όχημα με συνολική μάζα φορτίου-τρέιλερ 0 τόνων	0.017	0.025	0.036	0.028
Ποσοτική μεταβολή	-0.023	-0.035	-0.016	-0.023
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-57.56	-57.64	-31.67	-45.84

Μέσω της συγκεκριμένης παραμετρικής ανάλυσης της επίδρασης του μεγέθους *συνολική μάζα φορτίου-τρέιλερ του οχήματος*, καταλήγουμε στο λογικό συμπέρασμα ότι όσο χαμηλότερο φορτίο χρειάζεται το όχημα να μετακινήσει, τόσο μειωμένες θα είναι οι εκπομπές των ρύπων και η κατανάλωσή του. Στη μελέτη της παρούσας διπλωματικής, το ονομαστικό υβριδικό όχημα επιλέχθηκε να είναι το πλήρως φορτωμένο, καθώς γίνεται αντιληπτό πως αυτή είναι και η δυσμενέστερη περίπτωση όσον αφορά την απόκριση, τις εκπομπές ρύπων και την κατανάλωση.

5.7.2 Μεταβολή της (μέγιστης) ισχύος του ηλεκτρικού μοτέρ

Η μεταβολή της μέγιστης ισχύος του ηλεκτρικού μοτέρ σχετίζεται άμεσα με το ποσοστό χρήσης του κατά την διάρκεια του κύκλου. Για να προσδιοριστεί η επίδραση μεταβολής του μεγέθους αυτού στην κατανάλωση και στις εκπομπές καυσαερίων του οχήματος, ελήφθησαν τιμές που καλύπτουν σε μεγάλο βαθμό το εύρος της επιτρεπόμενης τιμής. Στο ονομαστικό όχημα επιλέχθηκε ηλεκτρικό μοτέρ ισχύος 200 kW, ενώ εξετάστηκαν και κατόπιν συγκρίθηκαν με αυτό (σχετικά με την κατανάλωση και τις εκπομπές καυσαερίων) οι περιπτώσεις μέγιστης ισχύος του ηλεκτρικού μοτέρ 100 kW (Πίνακες 5.14 έως 5.17) και 300 kW (Πίνακες 5.18 έως 5.21).

Πίνακας 5.14: Μεταβολή κατανάλωσης καυσίμου κατά την διάρκεια του κύκλου WTVC.

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVC (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	29.13	26.21	23.00	26.67
Υβριδικό όχημα με ηλεκτρικό μοτέρ μέγιστης ισχύς 300 kW	28.87	26.27	23.03	26.58
Ποσοτική μεταβολή	-0.26	0.06	0.03	-0.09
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-0.88	0.22	0.13	-0.34

Πίνακας 5.15: Μεταβολή των εκπομπών NOx κατά την διάρκεια του κύκλου WTVc.

Εκπομπή NOx (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVc (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	7.38	9.12	9.30	8.39
Υβριδικό όχημα με ηλεκτρικό μοτέρ μέγιστης ισχύς 300 kW	7.36	9.13	9.31	8.38
Ποσοτική μεταβολή	-0.02	0.01	0.01	-0.01
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-0.32	0.13	0.03	-0.07

Πίνακας 5.16: Μεταβολή των εκπομπών CO₂ κατά την διάρκεια του κύκλου WTVc.

Εκπομπή CO ₂ (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVc (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	780.55	702.47	616.46	714.80
Υβριδικό όχημα με ηλεκτρικό μοτέρ μέγιστης ισχύς 300 kW	773.69	704.04	617.24	712.38
Ποσοτική μεταβολή	-6.86	1.58	0.78	-2.42
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-0.88	0.22	0.13	-0.34

Πίνακας 5.17: Μεταβολή των εκπομπών αιθάλης κατά την διάρκεια του κύκλου WTVc.

Εκπομπή αιθάλης (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVc (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	0.040	0.060	0.052	0.051
Υβριδικό όχημα με ηλεκτρικό μοτέρ μέγιστης ισχύς 300 kW	0.039	0.060	0.052	0.051
Ποσοτική μεταβολή	-0.001	0.000	0.000	0.000
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-2.50	0.36	0.14	-0.34

Πίνακας 5.18: Μεταβολή κατανάλωσης καυσίμου κατά την διάρκεια του κύκλου WTVc.

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVc (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	29.13	26.21	23.00	26.67
Υβριδικό όχημα με ηλεκτρικό μοτέρ μέγιστης ισχύς 100 kW	38.87	28.12	23.02	31.77
Ποσοτική μεταβολή	9.75	1.91	0.02	5.10
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	33.46	7.29	0.08	19.12

Πίνακας 5.19: Μεταβολή των εκπομπών NOx κατά την διάρκεια του κύκλου WTVc.

Εκπομπή NOx (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVc (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	7.38	9.12	9.30	8.39
Υβριδικό όχημα με ηλεκτρικό μοτέρ μέγιστης ισχύς 100 kW	11.64	9.70	9.31	10.49
Ποσοτική μεταβολή	4.26	0.59	0.01	2.10
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	57.67	6.44	0.04	25.02

Πίνακας 5.20: Μεταβολή των εκπομπών CO₂ κατά την διάρκεια του κύκλου WTVc.

Εκπομπή CO ₂ (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVc (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	780.55	702.47	616.46	714.80
Υβριδικό όχημα με ηλεκτρικό μοτέρ μέγιστης ισχύς 100 kW	1041.75	753.70	616.96	851.48
Ποσοτική μεταβολή	261.20	51.24	0.50	136.68
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	33.46	7.29	0.08	19.12

Πίνακας 5.21: Μεταβολή των εκπομπών αιθάλης κατά την διάρκεια του κύκλου WTVc.

Εκπομπή αιθάλης (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVc (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	0.040	0.060	0.052	0.051
Υβριδικό όχημα με ηλεκτρικό μοτέρ μέγιστης ισχύς 100 kW	0.114	0.066	0.052	0.073
Ποσοτική μεταβολή	0.074	0.006	0.000	0.021
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	186.48	10.15	0.00	41.91

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της μελέτης μέσω των ανωτέρω πινάκων, καθίσταται σαφές πως η περίπτωση ηλεκτρικού μοτέρ 300 kW έχει πρακτικά μηδενικό όφελος (~0.3%) σε σχέση με το ήδη υπάρχον ηλεκτρικό μοτέρ 200 kW του ονομαστικού οχήματος, φαινόμενο που οφείλεται στην ήδη επαρκή κάλυψη των αναγκών ισχύος του μοντέλου από τα 200 kW. Παράλληλα, το υβριδικό όχημα με μοτέρ μέγιστης ισχύος 100 kW φαίνεται να έχει σημαντική διαφορά με το ονομαστικό όχημα, με τους ρύπους και την κατανάλωσή του εντός πόλης να έχουν αυξηθεί σημαντικά. Κύρια αιτία αυτών των αυξημένων τιμών, αποτελεί η ανεπάρκεια του ηλεκτροκινητήρα να προσδώσει μεγάλο ποσοστό της απαιτούμενης ισχύος, με αποτέλεσμα ο θερμικός κινητήρας να λειτουργεί σε αρκετά μεγαλύτερο βαθμό από ότι στο ονομαστικό όχημα. Ως γενικό συμπέρασμα, μπορούμε να καταλήξουμε πως η αύξηση της μέγιστης ισχύος του ηλεκτρικού μοτέρ οδηγεί σε μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων και της κατανάλωσης, μέχρι τουλάχιστον την τιμή της μέγιστης ισχύος που ικανοποιεί πλήρως τις απαιτήσεις ενέργειας της εκάστοτε εφαρμογής.

5.7.3 Μεταβολή της μετωπικής επιφάνειας του οχήματος

Στην παρούσα ανάλυση, το μέγεθος του οχήματος που μεταβλήθηκε είναι η μετωπική του επιφάνεια (frontal area), εξετάζοντας διαδοχικά τις τιμές 5 m² και 4 m². Μέσω των ακόλουθων Πινάκων 5.22 έως 5.25 και 5.26 έως 5.29, γίνεται σύγκριση των περιπτώσεων μετωπικής επιφάνειας οχήματος 5 m² και 4 m² αντίστοιχα, με το ονομαστικό υβριδικό, το οποίο διαθέτει μετωπική επιφάνεια 6 m².

Πίνακας 5.22: Μεταβολή κατανάλωσης καυσίμου κατά την διάρκεια του κύκλου WTVC.

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVC (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	29.13	26.21	23.00	26.67
Υβριδικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 5m ²	29.14	25.99	22.03	26.36
Ποσοτική μεταβολή	0.02	-0.22	-0.98	-0.31
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	0.06	-0.85	-4.25	-1.18

Πίνακας 5.23: Μεταβολή των εκπομπών NOx κατά την διάρκεια του κύκλου WTVC.

Εκπομπή NOx (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVC (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	7.38	9.12	9.30	8.39
Υβριδικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 5m ²	7.37	8.99	8.75	8.21
Ποσοτική μεταβολή	-0.01	-0.12	-0.55	-0.19
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-0.17	-1.36	-5.95	-2.22

Πίνακας 5.24: Μεταβολή των εκπομπών CO₂ κατά την διάρκεια του κύκλου WTVC.

Εκπομπή CO ₂ (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVC (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	780.55	702.47	616.46	714.80
Υβριδικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 5m ²	781.00	696.47	590.27	706.40
Ποσοτική μεταβολή	0.44	-5.99	-26.19	-8.41
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	0.06	-0.85	-4.25	-1.18

Πίνακας 5.25: Μεταβολή των εκπομπών αιθάλης κατά την διάρκεια του κύκλου WTVc.

Εκπομπή αιθάλης (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVc (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	0.040	0.060	0.052	0.051
Υβριδικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 5m ²	0.040	0.059	0.050	0.050
Ποσοτική μεταβολή	0.000	-0.001	-0.002	-0.001
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	0.45	-1.10	-3.79	-1.99

Πίνακας 5.26: Μεταβολή κατανάλωσης καυσίμου κατά την διάρκεια του κύκλου WTVc.

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVc (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	29.13	26.21	23.00	26.67
Υβριδικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 4m ²	28.87	25.69	21.07	25.90
Ποσοτική μεταβολή	-0.26	-0.52	-1.93	-0.77
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-0.89	-1.99	-8.41	-2.90

Πίνακας 5.27: Μεταβολή των εκπομπών NOx κατά την διάρκεια του κύκλου WTVc.

Εκπομπή NOx (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVc (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	7.38	9.12	9.30	8.39
Υβριδικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 4m ²	7.29	8.86	8.20	7.99
Ποσοτική μεταβολή	-0.09	-0.26	-1.10	-0.40
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-1.22	-2.80	-11.86	-4.80

Πίνακας 5.28: Μεταβολή των εκπομπών CO₂ κατά την διάρκεια του κύκλου WTVc.

Εκπομπή CO ₂ (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVc (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	780.55	702.47	616.46	714.80
Υβριδικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 4m ²	773.64	688.49	564.62	694.07
Ποσοτική μεταβολή	-6.92	-13.98	-51.85	-20.73
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-0.89	-1.99	-8.41	-2.90

Πίνακας 5.29: Μεταβολή των εκπομπών αιθάλης κατά την διάρκεια του κύκλου WTVc.

Εκπομπή αιθάλης (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVc (0 – 1800 s)
Ονομαστικό υβριδικό όχημα	0.040	0.060	0.052	0.051
Υβριδικό όχημα με μετωπική επιφάνεια 4m ²	0.040	0.059	0.048	0.049
Ποσοτική μεταβολή	0.000	-0.001	-0.004	-0.002
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	-0.79	-2.32	-8.04	-4.59

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν, δεν παρατηρείται γενικότερα κάποια σημαντική διαφορά στην κατανάλωση και στις εκπομπές ρύπων μεταξύ του ονομαστικού υβριδικού και των άλλων περιπτώσεων μετωπικής επιφάνειας. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί πως κατά την διάρκεια της κίνησης σε συνθήκες αυτοκινητοδρόμου εμφανίζεται ένα μη αμελητέο όφελος στα οχήματα με μικρότερη μετωπική επιφάνεια. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στις υψηλές ταχύτητες του συγκεκριμένου τμήματος του κύκλου πόλης σε συνδυασμό με την χαμηλότερη αεροδυναμική αντίσταση.

Τέλος, μπορεί να εξαχθεί το γενικότερο (αναμενόμενο) συμπέρασμα πως η μικρότερη μετωπική επιφάνεια του οχήματος συνεπάγεται χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου και εκπομπή καυσαερίων.

5.7.4 Επίδραση συνθηκών βρεγμένου οδοστρώματος

Για την συγκεκριμένη παραμετρική μελέτη, διατηρήθηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά του ονομαστικού υβριδικού οχήματος βαρέος τύπου, ενώ την ίδια στιγμή, όπως προαναφέρθηκε, μεταβλήθηκαν τα χαρακτηριστικά κύλισης και τριβής μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος για την περίπτωση του βρεγμένου οδοστρώματος. Στις ονομαστικές συνθήκες, θεωρήθηκε πως η κίνηση του οχήματος γίνεται σε στεγνό οδόστρωμα με τυπικές τιμές των χαρακτηριστικών κύλισης και τριβής μεταξύ οδοστρώματος και ελαστικού. Στους παρακάτω πίνακες έγινε σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα κατανάλωσης καυσίμου και εκπομπής καυσαερίων των προσομοιώσεων των δύο αυτών καταστάσεων (κίνηση οχήματος σε ονομαστικές συνθήκες και κίνηση οχήματος σε συνθήκες βρεγμένου οδοστρώματος) σε ποσοτικό και ποσοστιαίο επίπεδο.

Πίνακας 5.30: Επίδραση συνθηκών οδοστρώματος στην κατανάλωση καυσίμου κατά την διάρκεια του κύκλου πόλης WTVC.

Κατανάλωση καυσίμου (L/100km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVC (0 – 1800 s)
Ονομαστικές συνθήκες οδοστρώματος	29.13	26.21	23.00	26.67
Συνθήκες βρεγμένου οδοστρώματος	29.96	27.45	25.08	27.95
Ποσοτική μεταβολή	0.83	1.24	2.07	1.28
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	2.85	4.72	9.02	4.79

Πίνακας 5.31: Επίδραση συνθηκών οδοστρώματος στην εκπομπή NOx κατά την διάρκεια του κύκλου πόλης WTVC.

Εκπομπή NOx (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVC (0 – 1800 s)
Ονομαστικές συνθήκες οδοστρώματος	7.38	9.12	9.30	8.39
Συνθήκες βρεγμένου οδοστρώματος	7.81	9.69	10.61	9.09
Ποσοτική μεταβολή	0.42	0.57	1.31	0.70
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	5.71	6.28	14.06	8.28

Πίνακας 5.32: Επίδραση συνθηκών οδοστρώματος στην εκπομπή CO₂ κατά την διάρκεια του κύκλου πόλης WTVC.

Εκπομπή CO ₂ (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVC (0 – 1800 s)
Ονομαστικές συνθήκες οδοστρώματος	780.55	702.47	616.46	714.80
Συνθήκες βρεγμένου οδοστρώματος	802.80	735.64	672.05	749.04
Ποσοτική μεταβολή	22.24	33.17	55.58	34.24
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	2.85	4.72	9.02	4.79

Πίνακας 5.33: Επίδραση συνθηκών οδοστρώματος στην εκπομπή αιθάλης κατά την διάρκεια του κύκλου πόλης WTVC.

Εκπομπή αιθάλης (g/km)	Urban (0 – 900 s)	Rural (900 – 1380 s)	Motorway (1380 – 1800 s)	WTVC (0 – 1800 s)
Ονομαστικές συνθήκες οδοστρώματος	0.040	0.060	0.052	0.051
Συνθήκες βρεγμένου οδοστρώματος	0.044	0.063	0.055	0.054
Ποσοτική μεταβολή	0.004	0.003	0.003	0.003
Ποσοστιαία μεταβολή (%)	10.71	4.30	5.93	6.36

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των ανωτέρων πινάκων, γίνεται άμεσα σαφές πως υπάρχει μία μικρή επιβάρυνση σε κατανάλωση καυσίμου και εκπομπές καυσαερίων σε συνθήκες βρεγμένου οδοστρώματος. Αξίζει να τονιστεί πως το όχημα κατά την κίνηση με υψηλές ταχύτητες (motorway) και βρεγμένο οδόστρωμα, καταναλώνει 9% περισσότερο καύσιμο σε σχέση με αντίστοιχη κίνηση σε στεγνό οδόστρωμα. Τέλος, η παραμετρική αυτή ανάλυση επικεντρώθηκε και σε θέματα κατανάλωσης και ρύπων· αναμενόμενα, σε συνθήκες βρεγμένου οδοστρώματος κατά τον επιβαλλόμενο κύκλο WTVC προέκυψε χειρότερη απόκριση του οχήματος σε σχέση με την απόκριση του στις ονομαστικές συνθήκες, κάτι το οποίο οφείλεται στον μειωμένο συντελεστή τριβής μεταξύ οδοστρώματος και ελαστικού.

5.8 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική, διερευνήθηκαν τα πλεονεκτήματα της χρήσης ενός υβριδικού οχήματος βαρέος τύπου σε σχέση με ένα αντίστοιχο συμβατικό όχημα, επικεντρώνοντας την μελέτη στις διαφορές κατανάλωσης καυσίμου και εκπομπών καυσαερίων (NOx, CO₂, αιθάλη) μεταξύ των δύο. Τα οχήματα αυτά μελετήθηκαν κατά την δυσμενέστερη περίπτωση τους, δηλαδή να είναι πλήρως φορτωμένα στο τρέιλερ που διαθέτουν.

Μέσω της μελέτης που προηγήθηκε και των αποτελεσμάτων που ελήφθησαν, καθίσταται προφανές το όφελος χρήσης ενός ηλεκτρικού μοτέρ κατάλληλης ισχύος για την τροφοδότηση στο όχημα είτε αποκλειστικά είτε σε συνδυασμό με τον θερμικό κινητήρα. Ο θερμικός κινητήρας Diesel, δεν λειτουργεί με το βέλτιστο βαθμό απόδοσης σε περιοχές που απαιτούνται χαμηλές ταχύτητες, με αποτέλεσμα η χρήση του ηλεκτρικού μοτέρ στις περιοχές αυτές να αποδεικνύεται ιδιαίτερα ωφέλιμη. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μείωση περίπου 35% στην κατανάλωση καυσίμου στο εντός πόλης τμήμα, ενώ η γενικότερη μείωσή της κατά την διάρκεια του κύκλου πόλης είναι 30%. Στο τμήμα υψηλών ταχυτήτων του κύκλου (motorway), το οποίο είναι και η συνηθέστερη εφαρμογή των οχημάτων του συγκεκριμένου τύπου, εμφανίζεται μικρότερη μείωση στην κατανάλωση, ωστόσο σε καμία περίπτωση αμελητέα.

Όσον αφορά τις εκπομπές (engine out) καυσαερίων, οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου καθώς και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα εμφάνισαν σημαντική μείωση στην περίπτωση του υβριδικού οχήματος, της τάξης του 43% και 30% αντίστοιχα, συνολικά κατά την διάρκεια του κύκλου WTV. Επιπροσθέτως, οι εκπομπές της αιθάλης εμφάνισαν αξιοσημείωτη διαφορά (περίπου 75%) στο εντός πόλης τμήμα, ενώ συνολικά στον κύκλο είχαν επίσης μείωση κατά περίπου 43%. Το φαινόμενο αυτό της τεράστιας μείωσης της αιθάλης στο τμήμα χαμηλών ταχυτήτων, οφείλεται στην λειτουργία του κινητήρα Diesel με υψηλότερο λόγο αέρα-καυσίμου σε συνδυασμό με την λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα για τις περισσότερες επιταχύνσεις του οχήματος, αποφεύγοντας έτσι τις αντίστοιχες υπερακοντίσεις (overshoots) του συμβατικού οχήματος (που εμφανίζονται λόγω υστέρησης του στρόβιλο-υπερπληρωτή). Οι μειώσεις των εκπεμπόμενων ρύπων από το υβριδικό όχημα σε σχέση με το συμβατικό, το καθιστά αρκετά ελκυστικό διότι συνεχώς τίθενται αυστηρότερα μέτρα από την νομοθεσία για τον περιορισμό των ρύπων, με αποτέλεσμα να υπάρχει άμεση ανάγκη εύρεσης λύσεων για την διατήρηση των εκπεμπόμενων καυσαερίων κάτω από τα επιβαλλόμενα όρια. *Εδώ βέβαια τονίζεται ότι η παρούσα μελέτη αναφέρεται αποκλειστικά σε εκπομπές από τον κινητήρα, μη λαμβάνοντας υπόψιν συσκευές μετεπεξεργασίας καυσαερίων, οι οποίες χρησιμοποιούνται πλέον κατά κόρον στα οχήματα όλων των κατηγοριών.*

Επιπλέον, τα υποσυστήματα της αναγεννητικής πέδησης και του αυτόματου σβησίματος (start-stop) του κινητήρα Diesel που εφαρμόστηκαν κατά την περίπτωση του υβριδικού οχήματος, συντέλεσαν σε αρκετά μεγάλο βαθμό στην εξοικονόμηση καυσίμου και στους μειωμένους ρύπους. **Κατά την διάρκεια της ανάλυσης, έγινε εμφανής η λειτουργία του ηλεκτρικού μοτέρ και ως κινητήρα για την πρόσδοση ισχύος αλλά και ως γεννήτρια κατά την αναγεννητική πέδηση.** Λειτουργώντας ως γεννήτρια, το μοτέρ απορροφά ενέργεια φορτίζοντας την μπαταρία του οχήματος, επιβραδύνει το όχημα για την καλύτερη απόκρισή του και παράλληλα παρατείνει την διάρκεια ζωής των μηχανικών φρένων λόγω μικρότερης χρήσης τους. Συνεπώς, τα συγκεκριμένα υβριδικά συστήματα αποτελούν αρκετά αποδοτική λύση στην «μάχη» ενάντια στην κατανάλωση καυσίμου και στην διατήρηση των εκπομπών σε χαμηλά επίπεδα.

Τέλος, η παραμετρική ανάλυση που εφαρμόστηκε τόσο στα κύρια χαρακτηριστικά του οχήματος όσο και στις εξωτερικές συνθήκες του οδοστρώματος, κατέδειξε την υψηλή εξάρτηση του οχήματος (σχετικά με τα επίπεδα κατανάλωσης και ρύπων) από την **συνολική μάζα του φορτίου-τρέιλερ και την επάρκεια ισχύος του ηλεκτρικού μοτέρ.** Παράλληλα, μέσω της παρούσας ανάλυσης προέκυψε ελάχιστη επιρροή της μετωπικής επιφάνειας στις επιδόσεις και εκπομπές του οχήματος. Με σκοπό την πλήρη κάλυψη των περιπτώσεων κίνησης, θεωρήθηκε απαραίτητη η εξέταση εξωτερικών συνθηκών διαφορετικών από τις ονομαστικές, στις θεωρήθηκε στεγνό οδόστρωμα κίνησης. Η επίδραση συνθηκών **βρεγμένου οδοστρώματος** στο ονομαστικό υβριδικό όχημα, έχει ως αποτέλεσμα μικρή επιβάρυνση στην κατανάλωση και στις εκπομπές καυσαερίων του οχήματος, που οφείλεται στην επιπλέον ανάγκη ενέργειας για απομάκρυνση του νερού από το ελαστικό.

Κλείνοντας, μπορεί να εξαχθεί ως γενικό συμπέρασμα πως το υβριδικό όχημα παρουσιάζει πλήθος πλεονεκτημάτων σε σχέση με το συμβατικό κυρίως για χρήση εντός πόλης και σε επαρχιακούς/αγροτικούς δρόμους, ενώ σε συνθήκες αυτοκινητοδρόμου δεν αξιοποιεί πλήρως τα υβριδικά του πλεονεκτήματα. Επομένως, σε περίπτωση που η επιθυμητή χρήση του οχήματος είναι η μεταφορά αγαθών σε περιοχές χαμηλών ταχυτήτων και αρκετών επιταχύνσεων-επιβραδύνσεων, το υβριδικό όχημα αποτελεί την ιδανική λύση για κάθε επαγγελματία (προφανώς πρέπει να ληφθούν επιπλέον υπόψιν και θέματα κόστους/συντήρησης/αξιοπιστίας).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Κ.Δ. Ρακόπουλος (2013) «Μηχανές Εσωτερικής Καύσης Ι», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 2) Κ.Δ. Ρακόπουλος, Δ.Θ. Χουντάλας (1998) «Καύση ρύπανση εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 3) Κ.Δ. Ρακόπουλος, Ε.Γ. Γιακουμής (2011) «Εναλλαγή αερίων και υπερπλήρωση ΜΕΚ», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 4) E.G. Giakoumis (2016), «Driving and Engine Cycles», Springer, Cham, Switzerland.
- 5) C.D. Rakopoulos, E.G. Giakoumis (2009) «Diesel engine transient operation», Springer, London.
- 6) A.Z. Δουλγεράκης (2018) «Διερεύνηση δυνατότητας αύξησης βαθμού απόδοσης κινητήρα Diesel κατά τη διάρκεια κύκλου πόλης μέσω του οργανικού κύκλου Rankine με χρήση του προγράμματος GT-Power», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π. (επιβλέπων: Ε.Γ. Γιακουμής).
- 7) Ι. Γουλοδήμος (2020) «Μελέτη υβριδικού-ηλεκτρικού οχήματος (HEV) κατά τη διάρκεια του παγκόσμιου κύκλου πόλης WLTC - Σύγκριση εκπομπών και επιδόσεων με συμβατικό όχημα», 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) Gamma Technologies, Inc., «GT-Suite Engine Performance Tutorials, Version 2016».
- 10) A. D. Nennelli (2001) «*Simulation of heavy-duty hybrid electric vehicles*», Graduate Thesis, West Virginia University.
- 11) <https://dieselnet.com/standards/cycles/whvc.php>

- 12) Α. Ζαχιώτης (2015) «Πρόβλεψη εκπομπών αιθάλης και μονοξειδίου του αζώτου επιβατικού οχήματος κατά την διάρκεια του παγκόσμιου κύκλου πόλης (WLTP) – Συγκριτική ανάλυση με άλλους κύκλους πόλης», Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π. (επιβλέπων: Ε.Γ. Γιακουμής).
- 13) Α.Μ. Δημάρατος (2011) «Διερεύνηση των εκπομπών ρύπων κατά τη μεταβατική λειτουργία κινητήρων Diesel», Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π. (επιβλέπων: Κ.Δ. Ρακόπουλος).
- 14) Ε.Γ. Γιακουμής & Σ.Κ. Λιούτας (2010) «Diesel-engined vehicle nitric oxide and soot emissions during the European light-duty driving cycle using a transient mapping approach», *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 15(3), 134-143.
- 15) Η. Steven (2001) «Development of a worldwide harmonised heavy-duty engine emissions test cycle», *Final Report*.
- 16) Ejsmont, J., Sjögren, L., Świeczko-Żurek, B., & Ronowski, G. (2015) «Influence of road wetness on tire-pavement rolling resistance», *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 9(11), 1302-1310.
- 17) https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page
- 18) S. Lion, C.N. Michos, I. Vlaskos, C. Rouaud and R. Taccani (2017) «A review of waste heat recovery and Organic Rankine Cycles (ORC) in on-off highway vehicle Heavy Duty Diesel Engine applications», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 691-708.
- 19) <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Mechanics/frictire.html>
- 20) Govardhan, O. M. (2017) «Fundamentals and classification of hybrid electric vehicles. *International Journal of Engineering and Techniques*», 3(5), 194-198.
- 21) Δ. Κουλοχέρης (2016) «Σημειώσεις για το μάθημα 'Υβριδικά - Ηλεκτρικά Οχήματα', Ε.Μ.Π., Αθήνα.