



Υπολογιστική μελέτη επιδόσεων και εκπομπών πετρελαιοκίνητου οχήματος με ενσωματωμένο φίλτρο σωματιδίων (DPF) κατά τη διάρκεια του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC

Τομέας: Θερμότητας – Εργαστήριο Μηχανών Εσωτερικής Καύσης

Επιβλέπων: Ευάγγελος Γιακουμής, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2023

APOSTOLOS STEFOPOULOS

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

Computational study of performance
and emissions of a diesel vehicle with an
integrated Diesel Particulate Filter (DPF)
during WLTC Driving Cycle

Section: Thermal Engineering – Internal Combustion Engines Lab

Supervisor: Evangelos Giakoumis, Professor NTUA



Athens 2023

--- κενή σελίδα ---

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Απόστολος Στεφόπουλος

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές της Σχολής για τις γνώσεις και τις δεξιότητες που αποκόμισα από τη διδασκαλία τους κατά τη φοίτησή μου.

Ιδιαίτερα, τον Καθηγητή κ. Ευάγγελο Γιακουμή, η διδασκαλία του οποίου με ενέπνευσε να ασχοληθώ με το τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο των Μηχανών Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ) και με καθοδήγησε μεθοδικά στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Παράλληλα, ευχαριστώ και τον Καθηγητή κ. Δημήτριο Χουντάλα, ο οποίος με τη συνδιδασκαλία του στα μαθήματα των ΜΕΚ, με παρότρυνε για την περαιτέρω ενασχόλησή μου με το εν λόγω αντικείμενο.

Τέλος, είμαι ευγνώμων στην οικογένειά μου και στη γυναίκα μου, που με τη στήριξη και τη συμπαράστασή τους ήταν αρωγοί στη συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Περιεχόμενα

Σύνοψη.....	8
Abstract.....	9
Αρκτικόλεξα	10
Κατάλογος συμβόλων.....	11
1. Εισαγωγή.....	12
1.1 Πλαίσιο	12
1.2 Σκοπός και στόχοι.....	12
1.3 Οριοθέτηση	12
1.4 Διάρθρωση της εργασίας.....	12
2. Σχηματισμός και εκπομπή ρύπων από κινητήρες Diesel.....	14
2.1 Γενικά.....	14
2.2 Οξειδία του αζώτου.....	15
2.2.1 Γενική περιγραφή	15
2.2.2 Σχηματισμός των NO _x στο θάλαμο καύσης των κινητήρων Diesel.....	16
2.3 Σωματίδια - Αιθάλη.....	17
2.3.1 Γενική περιγραφή	17
2.3.2 Κατανομή του μεγέθους σωματιδίων	19
2.4 Ιδιαιτερότητες εκπομπών ρύπων κατά τη μεταβατική λειτουργία στροβιλο- υπερπληρωμένων κινητήρων Diesel.....	21
3. Συστήματα μετ(επεξεργασίας) καυσαερίων κινητήρων Diesel.....	24
3.1 Γενικά.....	24
3.2 Οξειδωτικός καταλύτης Diesel (DOC)	25
3.3 Φίλτρο σωματιδίων (DPF).....	26
3.4 Επιλεκτική καταλυτική αναγωγή (SCR).....	29
4. Κύκλοι Πιστοποίησης	33
4.1 Γενικά.....	33
4.2 Διαδικασία μέτρησης εκπομπών κατά τη διάρκεια των Κύκλων Δοκιμής.....	34
4.2.1 Δυναμόμετρο	34
4.2.2 Δειγματοληψία Σταθερού Όγκου (CVS) [10].....	36
4.3 Παγκόσμιος Κύκλος Πόλης WLTC	38
5. Ανάπτυξη του μοντέλου μέσω του υπολογιστικού πακέτου GT-Power	45
5.1 Γενικά για το GT-Suite	45
5.2 Γενική επισκόπηση του περιβάλλοντος εργασίας του GT-Power	46
5.3 Σχεδίαση του μοντέλου στο υπολογιστικό πρόγραμμα GT-Power	47
5.3.1 Μοντελοποίηση του κινητήρα στον χάρτη εργασίας του GT-Power.....	47
5.3.2 Μοντελοποίηση του οχήματος και του συστήματος μετάδοση κίνησης στον χάρτη εργασίας του GT-Power.....	49
5.3.3 Μοντελοποίηση του φίλτρου σωματιδίων DPF (Diesel Particulate Filter) στον χάρτη εργασίας του GT-Power.....	54
6. Επιδόσεις και εκπομπές καυσαερίων με χρήση του συστήματος DPF	57
6.1 Εισαγωγικά	57
6.2 Επιδόσεις του κινητήρα	57
6.3 Εκπομπές του οχήματος.....	70
6.4 Κύρια χαρακτηριστικά του φίλτρου σωματιδίων (DPF)	73

7.	Παραμετρική ανάλυση	77
7.1	Εισαγωγικά	77
7.2	Παραμετροποίηση ως προς τη μάζα του οχήματος, m_v	78
7.3	Παραμετροποίηση ως προς τη μετωπική επιφάνεια του οχήματος, A_f	81
7.4	Παραμετροποίηση ως προς τον συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης, C_d ...	85
7.5	Παραμετροποίηση ως προς τη ροπή αδράνειας του υπερπληρωτή, Θ_{TC}	89
8.	Συμπεράσματα	93
9.	Κατάλογος Πινάκων	94
10.	Κατάλογος Σχημάτων	95
11.	Κατάλογος Αναφορών	99

Σύνοψη

Εδώ και χρόνια, οι προδιαγραφές εκπομπών ρύπων έχουν μειωθεί σημαντικά με βάση τα όρια που επιβάλλει η νομοθεσία. Στο πνεύμα αυτό, οι κατασκευαστές προκειμένου να ακολουθούν πιστά τα όρια έχουν ενσωματώσει εδώ και αρκετά χρόνια συστήματα μετ(επεξεργασίας) των καυσαερίων, λόγω αδυναμίας επίτευξης των ορίων εκπομπών μέσω εσωτερικών μέτρων στον κινητήρα. Ειδικότερα, το σύστημα του φίλτρου σωματιδίων/παγίδας αιθάλης που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία και αντιμετωπίζει τον στερεό ρύπο της αιθάλης, έχει σημαντική επίδραση στις εκπομπές του κινητήρα αλλά και στις επιδόσεις του οχήματος.

Για το σκοπό αυτό και εφόσον αναλύθηκε η θεωρία ως βάση της εργασίας στα πρώτα κεφάλαια, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση ενός στροβιλο-υπερπληρωμένου πετρελαιοκίνητου κινητήρα συμπεριλαμβανομένου του συστήματος μετάδοσης κίνησης, του οχήματος, των συστημάτων ελέγχου καθώς και του συστήματος του φίλτρου σωματιδίων DPF (Diesel Particulate Filter) στο υπολογιστικό πρόγραμμα GT-Power. Η προσομοίωση πραγματοποιείται καθώς το όχημα τρέχει τον Παγκόσμιο Κύκλο ελαφρών οχημάτων WLTC (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle) με εστίαση στα πρώτα του 589 s (τμήμα χαμηλών ταχυτήτων εντός πόλης που είναι, εν προκειμένω, και το πιο ενδιαφέρον από πλευράς εκπομπών). Παράλληλα, εξετάστηκε και η επίδραση διαφόρων παραμέτρων όπως η μάζα του οχήματος, η μετωπική επιφάνεια του οχήματος, ο συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης και η ροπή αδράνειας του υπερπληρωτή, κάθε μία από τις οποίες εξήγαγε ενδιαφέροντα συμπεράσματα που παρουσιάζονται στο τέλος της εργασίας.

Εν κατακλείδι, η χρησιμότητα της εργασίας έγκειται στο γεγονός ότι προκύπτουν διαφορετικές μεταβολές στις επιδόσεις και στις εκπομπές του οχήματος, αναλόγως της παραμετροποίησης που διενεργεί κάποιος σε έναν τέτοιου είδους κινητήρα που έχει ενσωματώσει το σύστημα DPF. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων είναι σε μια λογική βάση, καταδεικνύοντας έτσι την ορθή και ενδεδειγμένη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης των εν λόγω προσομοιώσεων στο πρόγραμμα GT-Power.

Abstract

For years, the emission standards have been significantly reduced based on the new limits imposed by the legislation. In this spirit, manufacturers to faithfully follow the limits have for several years incorporated exhaust gas aftertreatment systems, due to the inability of achieving the emission limits through internal measures in the engine. In particular, the particulate filter/soot trap system studied in this thesis, which deals with the solid soot pollutant, has significant implications in terms of engine emissions performance.

For this purpose, and after the theory was analyzed as the basis of this thesis in the first chapters, the simulation of a turbocharged diesel engine was accomplished including the drive system, the vehicle, the control systems as well as the DPF (Diesel Particulate Filter) system in the GT-Power software environment. The simulation is carried out while the vehicle is running the WLTC (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle) driving cycle with a focus on its first 589 s (low-speed urban section being the most interesting regarding engine emissions). At the same time, simulations were carried out investigation the effect of various parameters such as vehicle mass, vehicle frontal surface, aerodynamic drag coefficient and supercharger moment of inertia, each of which drew important conclusions presented at the end of the thesis.

In conclusion, the usefulness of the thesis lies in the fact that different changes in vehicle performance and emissions occur depending on the configuration one performs on such a DPF-integrated engine. The results of the simulations are on a reasonable basis, thus demonstrating the correct and thorough methodology followed throughout the execution of said simulations at GT-Power program.

Αρκτικόλεξα

Συντομογραφία	Επεξήγηση
BMEP	Μέση πραγματική πίεση (Brake Mean Effective Pressure) (bar)
BSFC	Ειδική κατανάλωση καυσίμου (Brake Specific Fuel Consumption) (g/kWh)
CO	Μονοξείδιο του άνθρακα (Carbon Monoxide)
CO₂	Διοξείδιο του άνθρακα (Carbon Dioxide)
CVS	Δειγματοληψία σταθερού όγκου (Constant Volume Sampling)
DOC	Οξειδωτικός καταλύτης κινητήρα Diesel (Diesel Oxidation Catalyst)
DPF	Φίλτρο σωματιδίων (Diesel Particulate Filter)
EGR	Ανακυκλοφορία καυσαερίου (Exhaust Gas Recirculation)
EUDC	Ευρωπαϊκός κύκλος οδήγησης εκτός πόλης (Extra Urban Driving Cycle)
HC	Υδρογονάνθρακες (Hydrocarbons)
NEDC	Νέος ευρωπαϊκός κύκλος πόλης επιβατικών οχημάτων (New European Driving Cycle)
NO_x	Οξείδια του αζώτου (Nitrogen Oxides)
PAHs	Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons)
PM	Σωματίδια (Particulate Matter)
PN	Πλήθος σωματιδίων (Particle Number)
RDE	Εκπομπές κατά την οδήγηση στο δρόμο (Real Driving Emissions)
SCR	Επιλεκτική καταλυτική αναγωγή (Selective Catalytic Reduction)
UNECE	Οικονομική Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για την Ευρώπη (United Nations Economic Commission for Europe)
WLTC	Τρέχων παγκόσμιος κύκλος πιστοποίησης επιβατικών οχημάτων (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle)
WLTP	Παγκόσμια διαδικασία πιστοποίησης επιβατικών οχημάτων (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure)
ΑΝΣ	Άνω Νεκρό Σημείο
ΚΝΣ	Κάτω Νεκρό Σημείο

Κατάλογος συμβόλων

Σύμβολο	Επεξήγηση	Μονάδα μέτρησης
A_f	Μετωπική επιφάνεια οχήματος	m^2
C_d	Συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης	-
D	Διάμετρος κυλίνδρου	m
Θ_e	Ροπή αδράνειας κινητήρα	$kg \cdot m^2$
L	Μήκος διωστήρα	m
\dot{m}	Παροχή μάζας	kg/s
m_v	Μάζα οχήματος	tn
P	Ισχύς	kW
p	Πίεση	bar
r	Ακτίνα στροφάλου	m
r_{wheel}	Ακτίνα τροχού οχήματος	m
S	Διαδρομή εμβόλου	m
T	Θερμοκρασία	K
V	Ταχύτητα οχήματος	km/h
V_c	Επιζήμιος όγκος κάθε κυλίνδρου	m^3
V_H	Ολικός όγκος εμβολισμού	m^3
z	Αριθμός κυλίνδρων	-
ϵ	Βαθμός συμπίεσης	-
η_{gear}	Βαθμός απόδοσης γραναζιών κιβωτίου ταχυτήτων	-
Θ_{TC}	Ροπή αδράνειας υπερπληρωτή	$kg \cdot m^2$
λ_a	Λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου	-
Φ	Λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα	-
ϕ	Γωνία στροφάλου	$^\circ$

1. Εισαγωγή

1.1 Πλαίσιο

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη μελέτη και ανάλυση των επιπτώσεων διαφόρων παραμέτρων λειτουργίας ενός πετρελαιοκίνητου οχήματος μετά του αντιρρυπαντικού συστήματος φίλτρου σωματιδίων (DPF) αφενός στις επιδόσεις και αφετέρου στις εκπομπές ρύπων, με ιδιαίτερη έμφαση στην αιθάλη. Η μοντελοποίηση και η προσομοίωση του εν λόγω φίλτρου σωματιδίων γίνονται με χρήση του υπολογιστικού πακέτου GT-Power, στο οποίο έχουν εισαχθεί και σχεδιασθεί όλα τα απαραίτητα μέρη που θα χρησιμοποιηθούν για την εκτέλεση κατά τη διάρκεια του κύκλου πιστοποίησης WLTC. Η σπουδαιότητα της ανωτέρω προσομοίωσης έγκειται στο πόσο αποτελεσματικά περιορίζεται ο σημαντικός ρύπος της αιθάλης με χρήση του φίλτρου σωματιδίων και ποια είναι η επίπτωση του φίλτρου στις επιδόσεις ενός κινητήρα Diesel.

1.2 Σκοπός και στόχοι

Βασικός σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης χρήσης αντιρρυπαντικών συσκευών και συγκεκριμένα του φίλτρου σωματιδίων που εγκλωβίζει-παγιδεύει αποδοτικά την αιθάλη, και η εξαγωγή χρήσιμων αποτελεσμάτων συγκρίνοντας τον ίδιο κινητήρα υπό διαφορετικές παραμέτρους λειτουργίας. Βέβαια, η παρουσία του φίλτρου σωματιδίων, όπως αναδεικνύεται και στα αποτελέσματα της προσομοίωσης, έχει επίπτωση στην κατανάλωση του καυσίμου γεγονός που οφείλεται τόσο στην πτώση πίεσης του καυσαερίου στην εξαγωγή του κινητήρα εξαιτίας την παρεμβολής μια αντιρρυπαντικής συσκευής στη ροή του, αλλά και στη διαδικασία της αναγέννησης (άδειασμα) του φίλτρου που απαιτείται ανά κάποια χρονικά διαστήματα είτε ενεργητικά είτε παθητικά. Συνεπώς, ως στόχος τίθεται η ανάπτυξη του φίλτρου σωματιδίων με τέτοιο τρόπο ώστε να λειτουργεί αποδοτικά στην καταπολέμηση της αιθάλης αλλά και να έχει όσο το δυνατόν μικρότερη επίπτωση στις επιδόσεις του οχήματος.

1.3 Οριοθέτηση

Στην παρούσα μελέτη δεν θα συμπεριληφθούν και οι άλλες αντιρρυπαντικές συσκευές που διαθέτουν τα σύγχρονα πετρελαιοκίνητα οχήματα, ήτοι ο οξειδωτικός καταλύτης Diesel (DOC) για αντιμετώπιση του μονοξειδίου του άνθρακα CO και των άκαυστων υδρογονανθράκων HC, και η επιλεκτική καταλυτική αναγωγή (SCR) για αντιμετώπιση των οξειδίων του αζώτου NO_x. Επιπρόσθετα, ήταν αδύνατη η προσομοίωση της επίδρασης των αναγεννήσεων, είτε ενεργητικής είτε παθητικής, εξαιτίας του γεγονότος ότι για να εξαχθούν συμπεράσματα αναφορικά με την αναγέννηση στο φίλτρο σωματιδίων απαιτείται μεγάλο πλήθος κύκλων πιστοποίησης (άρα τεράστιος χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος, της τάξης των εβδομάδων) με βάση τον Παγκόσμιο Κύκλο Πόλης WLTC. Έτσι, η εργασία οριοθετείται στη σύγκριση ενός οχήματος με φίλτρο σωματιδίων (DPF) στη διάταξή του συγκρινόμενο με ένα άλλο όχημα υπό διαφορετικές λειτουργικές παραμέτρους με έμφαση στις χαμηλές ταχύτητες του Κύκλου Πόλης (589 sec του WLTC).

1.4 Διάρθρωση της εργασίας

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από δύο κύρια μέρη, το θεωρητικό κομμάτι και αυτό της προσομοίωσης στο υπολογιστικό πακέτο GT-Power. Αρχικά, παρατίθεται το θεωρητικό μέρος που αφορά το σχηματισμό και την εκπομπή ρύπων από κινητήρες Diesel. Εν συνεχεία, αναφέρονται αναλυτικά οι συσκευές μετ-επεξεργασίας καυσαερίων που υπάρχουν στους σύγχρονους πετρελαιοκίνητους κινητήρες (οχημάτων)

καθώς και οι ρύποι που αντιμετωπίζονται μέσω αυτών των συσκευών. Επίσης, περιγράφονται οι Κύκλοι Πόλης και η διαδικασία των πιστοποιήσεων σε εργαστηριακές συνθήκες.

Στο μέρος της προσομοίωσης, παρουσιάζεται αναλυτικά το «χτίσιμο» των επί μέρους κύριων τμημάτων στο χάρτη εργασίας του προγράμματος, τα μοντέλα/πρότυπα προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν, και παρατίθενται τα συγκριτικά αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν. Τα επισυναπτόμενα διαγράμματα που παρατίθενται στο μεγαλύτερο κεφάλαιο της εργασίας (No. 6) –ανά παραμετροποίηση– συνοδεύονται από σχόλια και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα με την ολοκλήρωση της μελέτης.

2. Σχηματισμός και εκπομπή ρύπων από κινητήρες Diesel¹

2.1 Γενικά

Η μεταβατική λειτουργία ενός κινητήρα Diesel (ιδιαίτερα στα χαμηλά φορτία, π.χ. κίνηση εντός πόλης) είναι άμεσα συνδεδεμένη με τις αυξημένες εκπομπές ρύπων από την εξάτμιση του οχήματος αλλά και με το θόρυβο. Η φιλοσοφία αντιμετώπισης των ρύπων έχει δύο άξονες: λήψη μέτρων για την αποφυγή σχηματισμού των ρυπογόνων ουσιών στην πηγή (**εσωτερικά μέτρα**), και δέσμευση ή καταστροφή τους με τη χρήση μέσων περιστολής (**συστήματα μετ-επεξεργασίας καυσαερίων**).

Ο σχηματισμός των ρυπογόνων ουσιών που εκπέμπονται από τους κινητήρες Diesel οφείλεται στη χημική διάσπαση των προϊόντων της καύσης εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται εντός του θαλάμου καύσης και τοπικά μπορεί να φτάσουν ακόμη και τους 3000 K. Στην περίπτωση όπου η καύση είναι τέλεια και δεν υπάρχει χημική διάσπαση, τα προϊόντα της έχουν όπως στην ακόλουθη αντίδραση καύσης:



Σημειώνεται ότι η παραπάνω χημική αντίδραση καύσης δεν περιλαμβάνει τους στοιχειομετρικούς συντελεστές και η σημασία της είναι καθαρά ποιοτική. Σε μία πραγματική αντίδραση καύσης όμως, υπάρχει το φαινόμενο της χημικής διάσπασης των προϊόντων της και κατά συνέπεια εμφανίζονται σε αυτά οι παρακάτω ενώσεις και ρίζες: **H₂O, H₂, O₂, N₂, N, O, OH, H, CO, CO₂, NO, HC** καθώς και αρκετές άλλες μεταξύ των οποίων οι κετόνες, οι αλδεΐδες, το όζον, η αμμωνία κλπ.

Από τις παραπάνω **αέριες** ρυπογόνες ουσίες, οι βασικότερες είναι τα οξειδία του αζώτου (NO_x), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες (HC) οι οποίες μαζί με τη **στερεή** ρυπογόνο ουσία της αιθάλης υπό μορφή σωματιδίων συνιστούν τους λεγόμενους ελεγχόμενους ρύπους (regulated emissions). Οι συγκεντρώσεις των ανωτέρω ρύπων στα καυσαέρια είναι θεσμοθετημένες σε πάρα πολλές χώρες με προεξάρχουσες τις ΗΠΑ, ΕΕ και Ιαπωνία, ακολουθώντας πρότυπες συσκευές ανάλυσης και μεθόδους μέτρησης.

Οι τρεις προαναφερόμενοι κύριοι αέριοι ρύποι εμφανίζονται τόσο σε κινητήρες Diesel όσο και σε κινητήρες Otto, παρουσιάζουν όμως διαφορές ως προς τη συγκέντρωσή τους στα καυσαέρια στην έξοδο του κινητήρα (engine out). Ειδικότερα, ισχύουν:

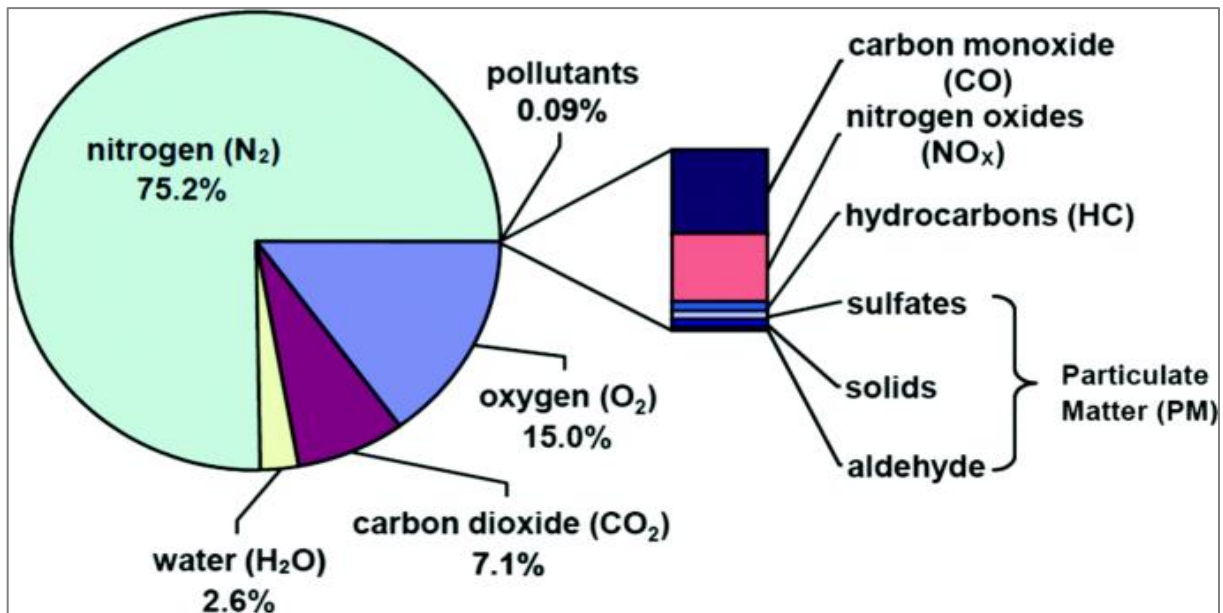
- Τα NO_x εμφανίζονται σε σημαντικά ποσοστά ίδιας τάξης μεγέθους σε κινητήρες Diesel και Otto, με κάπως μεγαλύτερες τιμές για τους Otto.
- Το CO είναι δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο στους κινητήρες Otto, με αποτέλεσμα να μη συνιστά σημαντικό ρύπο για τους Diesel.

¹ Για επιπλέον λεπτομέρειες βλ. Παραπομπές [16] και [3] από τις οποίες προέρχεται η ανάλυση του παρόντος κεφαλαίου

- Τα επίπεδα εκπομπής των HC είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερα στους κινητήρες Diesel από ό,τι στους Otto.

Πέραν των αέριων ρυπογόνων ουσιών, υπάρχουν και οι εκπομπές στερεών σωματιδίων από τους εμβολοφόρους κινητήρες. Τα πιο κοινά στερεά σωματίδια που εκπέμπονται από τους κινητήρες Diesel είναι αυτά της αιθάλης (soot), ενώ αντίθετα στους (κλασικούς/συμβατικής τεχνολογίας) Otto οι εκπομπές σωματιδίων αιθάλης είναι μηδαμινές εξαιτίας της ομοιογένειας του φαινομένου της καύσης. Σημειώνεται ότι η αιθάλη παρατηρείται πλέον στους σύγχρονους κινητήρες Otto άμεσου ψεκασμού.

Εν συνεχεία, θα παρουσιαστούν οι μηχανισμοί σχηματισμού των βασικότερων ρύπων που κυριαρχούν στους κινητήρες Diesel (NO_x και αιθάλη/σωματίδια) καθώς και η επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας του κινητήρα στους εν λόγω μηχανισμούς. Για μια πληρέστερη κατανόηση των εκπομπών ρύπων από κινητήρες Diesel, παρατίθεται παρακάτω το **Σχήμα 2.1** που αναπαριστά υπό μορφή διαγράμματος πίτας τις κατά μάζα εκπομπές στην έξοδο του κινητήρα (engine out) χωρίς την ύπαρξη αντιρρυπαντικών συσκευών.



Σχήμα 2.1: Εκπομπές κατά μάζα στην έξοδο ενός κινητήρα Diesel [1]

2.2 Οξειδία του αζώτου

2.2.1 Γενική περιγραφή

Με τον όρο οξειδία του αζώτου NO_x αναφερόμαστε στο **μονοξείδιο του αζώτου NO**, στο **διοξείδιο του αζώτου NO_2** καθώς και σε **ίχνη** άλλων οξειδίων του αζώτου (όπως το N_2O_5) που εμφανίζονται στον θάλαμο καύσης των εμβολοφόρων κινητήρων. Ιδιαίτερα για τους κινητήρες Diesel στα μεσαία και υψηλά φορτία, το NO_2 αποτελεί ένα ελάχιστο ποσοστό των NO_x , με αποτέλεσμα τα NO να ταυτίζονται με τα NO_x όσον αφορά τον σχηματισμό τους.

Ο σχηματισμός των NO λαμβάνει χώρα σε περιοχές υψηλής θερμοκρασίας εντός της καιγόμενης ζώνης (burned zone) με κύρια προϋπόθεση την ύπαρξη επαρκούς ποσότητας οξυγόνου. Εν συνεχεία, κατά τη φάση

της αποτόνωσης όπου η θερμοκρασία μειώνεται, έχουμε το «πάγωμα» ορισμένων αντιδράσεων που συμμετέχουν στο σχηματισμό του NO με συνέπεια το καυσαέριο της εξαγωγής να περιέχει συγκεντρώσεις NO πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές της χημικής ισορροπίας για την ίδια θερμοκρασία. Έτσι, ο σχηματισμός του NO καθορίζεται περισσότερο από τη χημική κινητική των αντιδράσεων παρά από τη χημική ισορροπία.

2.2.2 Σχηματισμός των NO_x στο θάλαμο καύσης των κινητήρων Diesel

Στους κινητήρες Diesel η έγχυση του καυσίμου γίνεται εντός του θαλάμου καύσης σε υγρή μορφή και, αφού ατμοποιηθεί, ακολουθεί η ανάμιξη με τον εισερχόμενο αέρα με συνέπεια τη μεγάλη στρωμάτωση στην κατανομή της θερμοκρασίας και στη συγκέντρωση του καυσίμου εντός του θαλάμου καύσης. Κατ' επέκταση ο σχηματισμός των οξειδίων του αζώτου πραγματοποιείται μόνο σε περιοχές όπου οι συνθήκες το επιτρέπουν.

Ο σχηματισμός του μεγαλύτερου ποσοστού NO_x λαμβάνει χώρα κατά το **δεύτερο στάδιο** της καύσης (**ανεξέλεγκτη καύση**) όπου η φλόγα είναι προανάμιξης, ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα είναι κοντά στο 1 (περίπου στοιχειομετρική αναλογία) και η θερμοκρασία είναι υψηλή εξαιτίας της προαναμεμιγμένης καύσης. Κατά το **τρίτο στάδιο** της καύσης (**ελεγχόμενη καύση**), οι ζώνες αντίδρασης έρχονται σε επαφή με τον ψυχρό αέρα που τις περιβάλλει λόγω της συνεχούς εξαπλώσεως της δέσμης του καυσίμου, με αποτέλεσμα την πτώση της θερμοκρασίας τους και το «πάγωμα» των αντιδράσεων διάσπασης του NO.

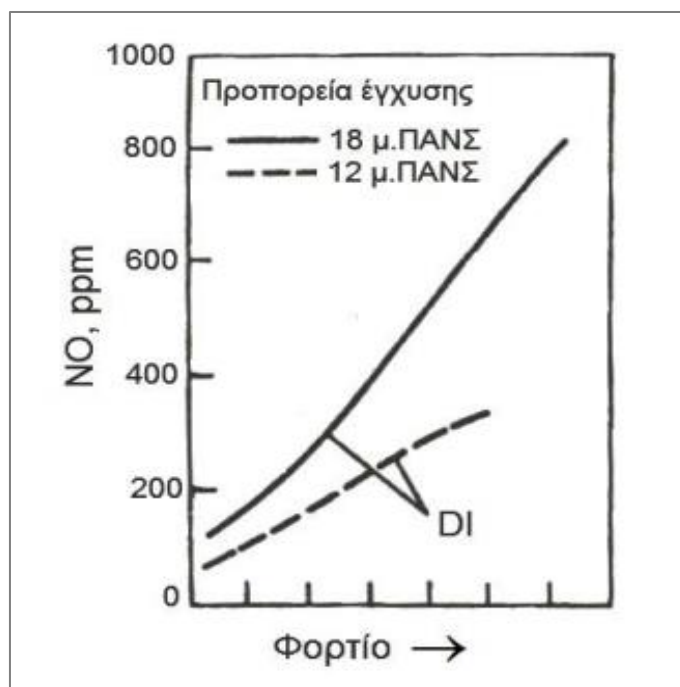
Επιπρόσθετα, κρίνεται σκόπιμο να γίνει αναφορά στις κύριες παραμέτρους λειτουργίας που επιδρούν στη συγκέντρωση των NO_x, δηλαδή στο φορτίο, στην προπορεία έγχυσης του καυσίμου και στο κλάσμα του παραμένου καυσαερίου.

α) Επίδραση του φορτίου

Σε έναν κινητήρα Diesel η ρύθμιση του φορτίου είναι **ποιοτική**. Έτσι, όταν αναφερόμαστε σε αυτό εννοούμε τον λόγο ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου λ_α. Αύξηση του φορτίου σημαίνει αύξηση της συγκέντρωσης των οξειδίων του αζώτου στο καυσαέριο εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας στη ζώνη αντίδρασης και της ύπαρξης περιοχών με συγκέντρωση αέρα-καυσίμου γύρω από τη στοιχειομετρία (λ_α ≈ 1). Στο σχήμα που ακολουθεί (**Σχήμα 2.2**) αναπαρίσταται η συγκέντρωση των NO στο καυσαέριο συναρτήσει του φορτίου, από όπου γίνεται αντιληπτή η συνεχής αύξηση του NO όσο αυξάνει το φορτίο.

β) Επίδραση της προπορείας έγχυσης του καυσίμου

Η αύξηση της προπορείας έγχυσης του καυσίμου στους κινητήρες Diesel έχει ως συνέπεια την αύξηση των παραγόμενων NO_x. Αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η πίεση και η θερμοκρασία των αερίων εντός του θαλάμου καύσης αυξάνουν σημαντικά. Ομοίως στο **Σχήμα 2.2** παρατίθεται η συγκέντρωση των NO στο καυσαέριο συναρτήσει της προπορείας έγχυσης καυσίμου, από όπου γίνεται, ομοίως, αντιληπτή, όπως και στο φορτίο, η συνεχής αύξηση του NO όσο αυξάνει η προπορεία έγχυσης.



Σχήμα 2.2: Επίδραση του φορτίου και της προπορείας έγχυσης καυσίμου στο σχηματισμό NO για κινητήρα Diesel άμεσης έγχυσης (DI) [2]

γ) Επίδραση του κλάσματος του παραμένουτος καυσαερίου

Η αύξηση του ποσοστού του παραμένουτος καυσαερίου στο θάλαμο καύσης έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των οξειδίων του αζώτου. Αιτία αυτού είναι η αύξηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας του περιβάλλοντος μέσου και κατ' επέκταση η μείωση της πίεσης και της θερμοκρασίας εντός της ζώνης αντιδράσεως. Η τεχνολογία της ανακυκλοφορίας καυσαερίου (EGR) βασίζεται στην ίδια αρχή, δηλαδή δεσμεύεται ένα ποσοστό του καυσαερίου και αφού ψυχθεί, εισάγεται ξανά στους κυλίνδρους έτσι ώστε να μειωθεί το θερμοκρασιακό πεδίο και εν τέλει τα παραγόμενα NO_x.

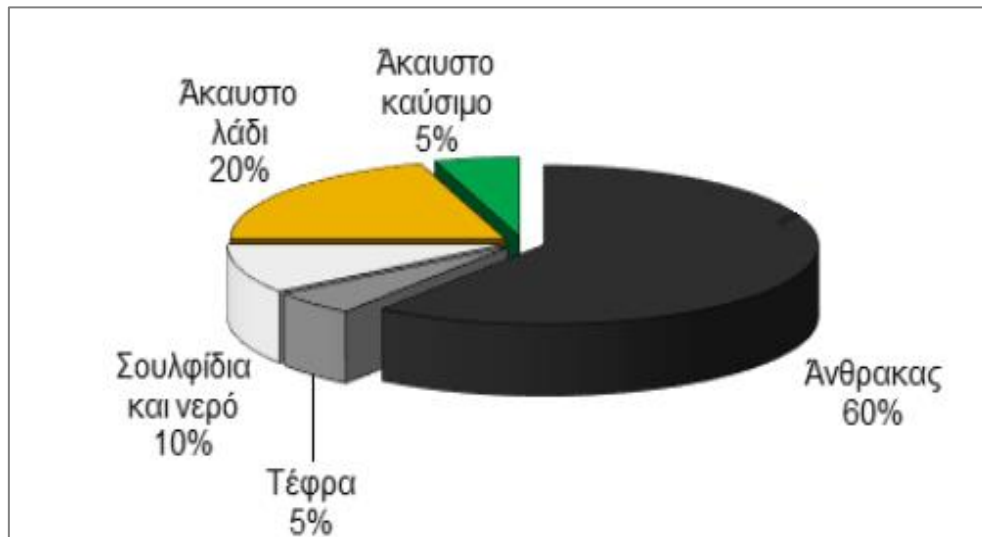
2.3 Σωματίδια - Αιθάλη

2.3.1 Γενική περιγραφή

Οι εκπομπές σωματιδίων ενός κινητήρα Diesel αποτελούνται κατά βάση από ανθρακώδες υλικό το οποίο παράγεται κατά την καύση, ονομαζόμενο **αιθάλη (soot)**. Σε αυτό το ανθρακώδες υλικό έχουν προσροφηθεί πολλές οργανικές αλλά και ανόργανες ενώσεις που προέρχονται είτε από το λιπαντικό έλαιο είτε από το μη καιγόμενο καύσιμο. Τα σωματίδια κατανέμονται σε μεγάλο εύρος μεγέθους από 20 nm έως 10 μm, γεγονός που τα καθιστά αναπνεύσιμα από τον ανθρώπινο οργανισμό.

Η σύσταση των σωματιδίων διαχωρίζεται σε ένα διαλυτό οργανικό κλάσμα και σε ένα μη διαλυτό ή ξηρό κλάσμα, εκ των οποίων στο δεύτερο βασίζεται συχνά η μέθοδος για την εκτίμηση της αιθάλης. Το ποσοστό της αιθάλης στα σωματίδια που εκπέμπονται από την εξάτμιση ενός κινητήρα Diesel είναι περίπου της τάξης του 40-50%. Το υπόλοιπο ποσοστό των σωματιδίων αποτελείται από διάφορα άλλα συστατικά όπως άκαυστο καύσιμο, άκαυστο λάδι καθώς και ορισμένες θεικές ουσίες και μέταλλα που προέρχονται από τα καύσιμα.

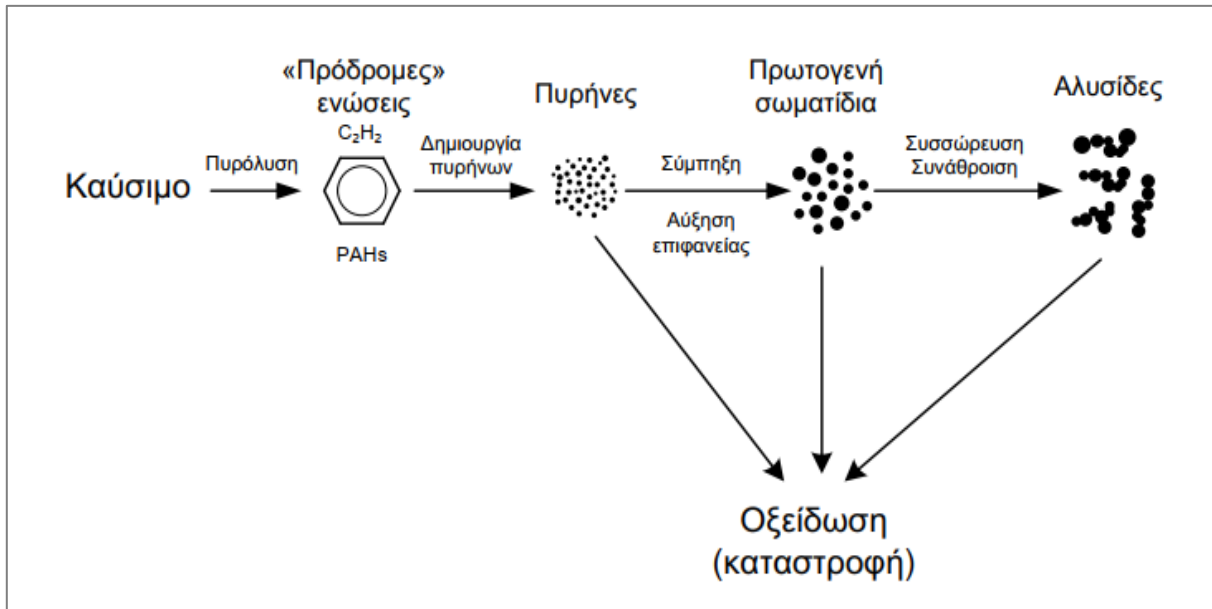
Εν συνεχεία, στο **Σχήμα 2.3** παρουσιάζεται η τυπική σύσταση των σωματιδίων για έναν πετρελαιοκίνητο κινητήρα.



Σχήμα 2.3: Τυπική σύσταση ενός σωματιδίου πετρελαιοκινητήρα [2]

Ο σχηματισμός της αιθάλης πραγματοποιείται από άκαυστο καύσιμο που μετατρέπει τα σωματίδια από την αέρια σε στερεά φάση, σε περιοχές πλούσιες σε καύσιμο και με υψηλές θερμοκρασίες. Παράλληλα, είναι δυνατόν να συμπυκνωθούν ή να απορροφηθούν από την αιθάλη και κάποιοι υδρογονάνθρακες ή άλλα διαθέσιμα μόρια εφόσον οι συνθήκες το επιτρέπουν. Η εξέλιξη των φάσεων (υγρής και αέριας) των υδρογονανθράκων σε στερεά σωματίδια αιθάλης περιλαμβάνει συνολικά έξι διαδικασίες, οι οποίες απεικονίζονται στο **Σχήμα 2.4**, και είναι οι παρακάτω:

- **Πυρόλυση:** ενδόθερμη διαδικασία που μεταβάλλει τη μοριακή δομή του καυσίμου σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και παράγει ενώσεις όπως οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), οι οποίοι θεωρούνται πρόδρομοι της αιθάλης.
- **Πυρηνοποίηση:** σχηματισμός πυρήνων ή νανοσωματιδίων από πτητικά υλικά όπως οι υδρογονάνθρακες.
- **Αύξηση επιφάνειας:** διαδικασία προσθήκης μάζας στην επιφάνεια ενός σωματιδίου αιθάλης που έχει υποστεί πυρηνοποίηση.
- **Σύμπληξη:** σύγκρουση των σφαιρικών σωματιδίων με αποτέλεσμα την ένωσή τους και τον περαιτέρω σχηματισμό μεγαλύτερων σωματιδίων.
- **Συσώρευση:** διαδικασία κατά την οποία τα σωματίδια παραμένουν ενωμένα με σκοπό τη δημιουργία μεγαλύτερων ενώσεων υπό μορφή αλυσίδας.
- **Οξειδωση:** διαδικασία που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια όλων των ανωτέρω σταδίων, κυρίως όταν επικρατούν θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1300 K, όπου η αιθάλη καίγεται υπό την παρουσία οξειδωτικών ενώσεων και σχηματίζει αέρια προϊόντα όπως CO, CO₂, H₂O.

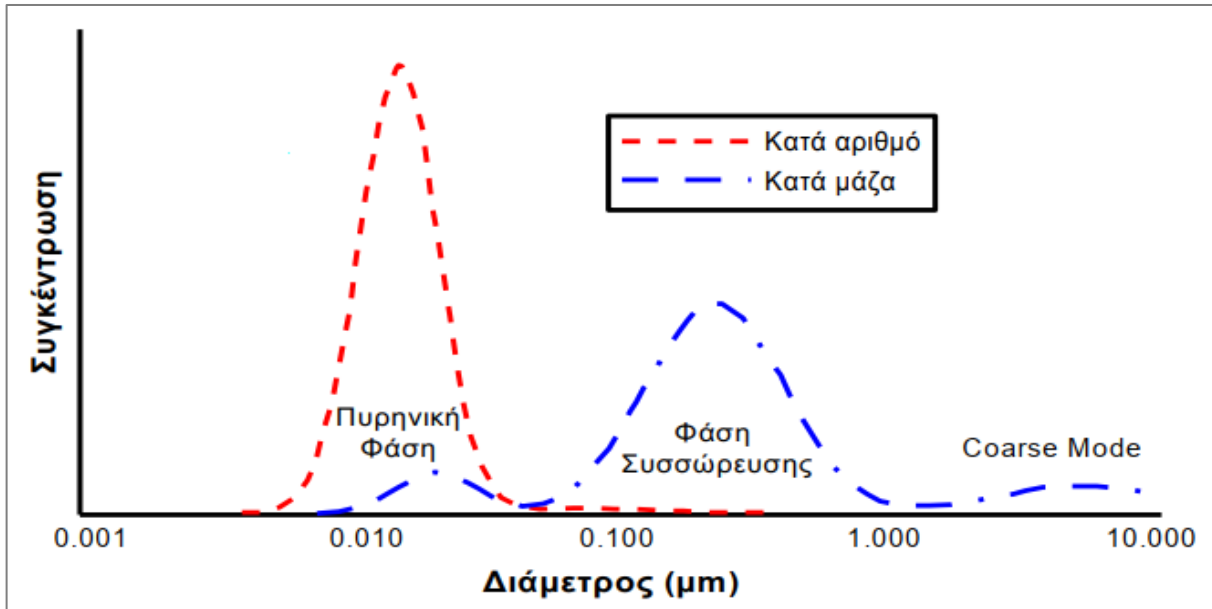


Σχήμα 2.4: Απεικόνιση της δημιουργίας-καταστροφής των σωματιδίων εντός του θαλάμου καύσης [2]

2.3.2 Κατανομή του μεγέθους σωματιδίων

Αρχικά, η νομοθεσία που αφορούσε τα σωματίδια βασιζόταν μόνο στη μάζα των σωματιδίων (PM). Στην Ευρώπη, από τον Σεπτέμβριο του 2011 και με την εφαρμογή του προτύπου Euro 5b ορίστηκε ως επιπλέον προδιαγραφή το πλήθος των σωματιδίων (PN). Παράλληλα με το πλήθος, η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων είναι ιδιαίτερα σημαντική σε θέματα που αφορούν την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, και αυτό διότι τα μικρού μεγέθους σωματίδια έχουν μεγάλη τοξικότητα για τον άνθρωπο.

Ο αριθμός των σωματιδίων, σε αντίθεση με τη μάζα τους, μεταβάλλεται συνεχώς. Στην εξαγωγή ενός κινητήρα Diesel –ιδιαίτερα στη μεταβατική λειτουργία– συμβαίνει η διαδικασία της πυρηνοποίησης, δηλαδή σχηματίζονται νέα σωματίδια με αποτέλεσμα την αύξηση τόσο του αριθμού όσο και της μάζας των νέο-σχηματιζόμενων σωματιδίων. Παράλληλα, πραγματοποιείται η διαδικασία της σύμπτυξης και της συμπύκνωσης, δηλαδή τα σωματίδια συγκρούονται και σχηματίζουν νέα μεγαλύτερα με αποτέλεσμα τη μείωση του αριθμού αλλά την αύξηση της μάζας των νέο-σχηματιζόμενων σωματιδίων. Τα παραπάνω φαινόμενα διαπιστώνονται κατά τις διεργασίες της αραιώσης και της δειγματοληψίας, καθιστώντας έτσι δύσκολο το να προκύψουν σαφή αποτελέσματα, όπως και να σχεδιασθεί ένα πρότυπο αναφοράς.



Σχήμα 2.5: Τυπική κατανομή μεγέθους και πλήθους σωματιδίων από την εξαγωγή ενός κινητήρα Diesel [2]

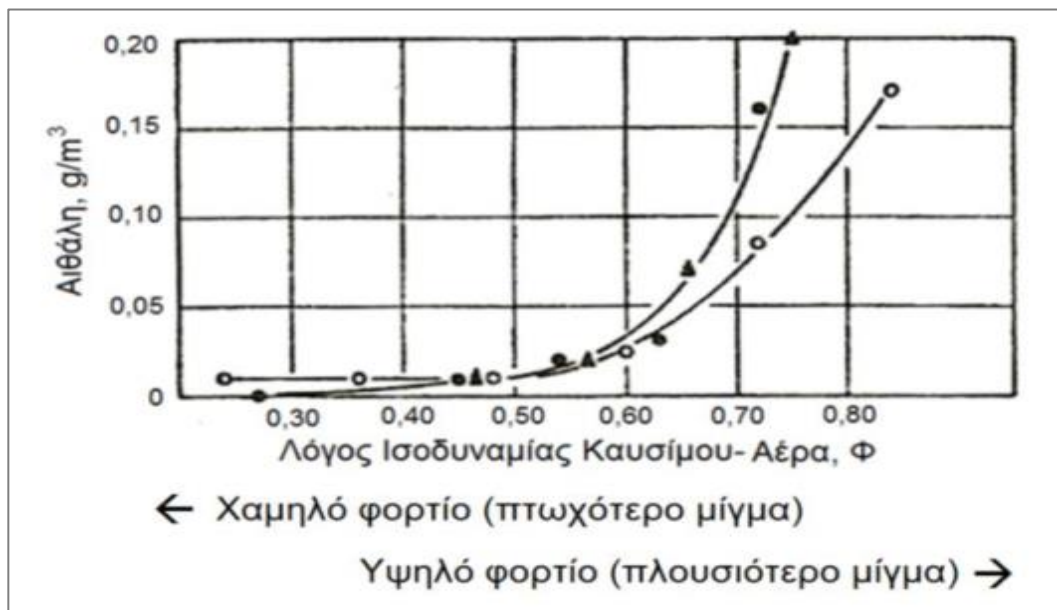
Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται μία εξιδανικευμένη, λογαριθμική (με βάση τη διάμετρο) αναπαράσταση της κατανομής του μεγέθους και του πλήθους των σωματιδίων από την εξαγωγή ενός κινητήρα Diesel. Η συγκέντρωση των σωματιδίων σε οποιοδήποτε εύρος μεγέθους είναι ανάλογη προς την περιοχή κάτω από την αντίστοιχη καμπύλη σε αυτό το εύρος. Το μεγαλύτερο μέρος της μάζας των σωματιδίων παρατηρείται στη **φάση συσσώρευσης** για ένα εύρος διαμέτρου 0,1-0,3 μm, όπου εδώ βρίσκονται τα ανθρακώδη συσσωματώματα και άλλα προσροφημένα υλικά. Επίσης, η **πυρηνική φάση** αποτελείται από σωματίδια με εύρος διαμέτρου 0,005-0,05 μm, όπου εδώ βρίσκονται πτητικές οργανικές ενώσεις υδρογονανθράκων, θείου, ενώσεις στερεού άνθρακα αλλά και διάφορες άλλες μεταλλικές ενώσεις.

Αξίζει σε αυτό το σημείο να επισημανθεί ότι περισσότερο του 90% των εκπεμπόμενων σωματιδίων από ένα κινητήρα Diesel υπεισέρχονται στη φάση συσσώρευσης, που όμως περιέχει μόνο το 1-20% της μάζας των σωματιδίων. Επιπρόσθετα, η «**χονδροειδής**» **φάση (coarse mode)** περιέχει το 5-20% της μάζας των σωματιδίων και αποτελείται από τα συμπαρασυρόμενα σωματίδια της φάσης συσσώρευσης που έχουν επικαθίσει στις επιφάνειες των κυλίνδρων και στις σωληνώσεις της πολλαπλής εξαγωγής.

Βασικός παράγοντας που επιδρά στο περιβάλλον και έχει δυσμενείς επιπτώσεις, όπως προαναφέρθηκε, είναι το μέγεθος των σωματιδίων. Συγκεκριμένα, επηρεάζει τον χρόνο παραμονής των εκπεμπόμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, τις οπτικές ιδιότητες και την επιφάνεια των σωματιδίων, αλλά και τις επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων. Πιο αναλυτικά, ο μεγαλύτερος χρόνος παραμονής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα αφορά εκείνα με εύρος διαμέτρου 0,1-10 μm και συνήθως διαρκεί περίπου μία εβδομάδα. Τα σωματίδια μεγαλύτερης διαμέτρου εξουδετερώνονται από την ατμόσφαιρα αρκετά γρήγορα με καθίζηση ενώ τα μικρότερης διαμέτρου με διάχυση και σύμπληξη. Ένας τυπικός χρόνος παραμονής για σωματίδια μεγέθους 10 nm είναι περίπου 15 λεπτά, όπου ο βασικός μηχανισμός εξουδετέρωσης αυτών των μικρών σωματιδίων είναι η σύμπληξή τους με τα σωματίδια που προέρχονται από τη φάση συσσώρευσης. [3]

Κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας (steady-state) ενός κινητήρα Diesel, σχηματίζονται κατά κύριο λόγο τα σωματίδια της φάσης συσσώρευσης (80-110 nm), ιδιαίτερα όταν γίνεται λόγος για κινητήρες αυτοκινήτων μεσαίων/υψηλών ταχυτήτων και φορτηγών. Αρχικά, στη λειτουργία της καύσης η πλειοψηφία των σωματιδίων είναι μεταξύ των 80-90 nm ενώ αργότερα κατά τη διάρκεια του κύκλου, τα σωματίδια αιθάλης συσσωματώνονται και κατ' επέκταση σχηματίζονται σωματίδια μεγαλύτερης διαμέτρου. Κατά το διάστημα που η αιθάλη οξειδώνεται, ο αριθμός των σωματιδίων μειώνεται δραστικά σε όλο το εύρος μεγέθους.

Γενικά, η τάση είναι ότι με την αύξηση του φορτίου (άρα και της ποσότητας του εγχεόμενου καυσίμου), αυξάνεται η παραγωγή μεγάλων σωματιδίων, ενώ κατά την άφορτη λειτουργία («ρελαντί») ευνοείται ο σχηματισμός νανοσωματιδίων. Επομένως, όσο αυξάνεται το φορτίο, δηλαδή ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα Φ , τόσο αυξάνονται και τα εκπεμπόμενα σωματίδια αιθάλης, με την εν λόγω συσχέτιση να παρατίθεται στο **Σχήμα 2.6**.



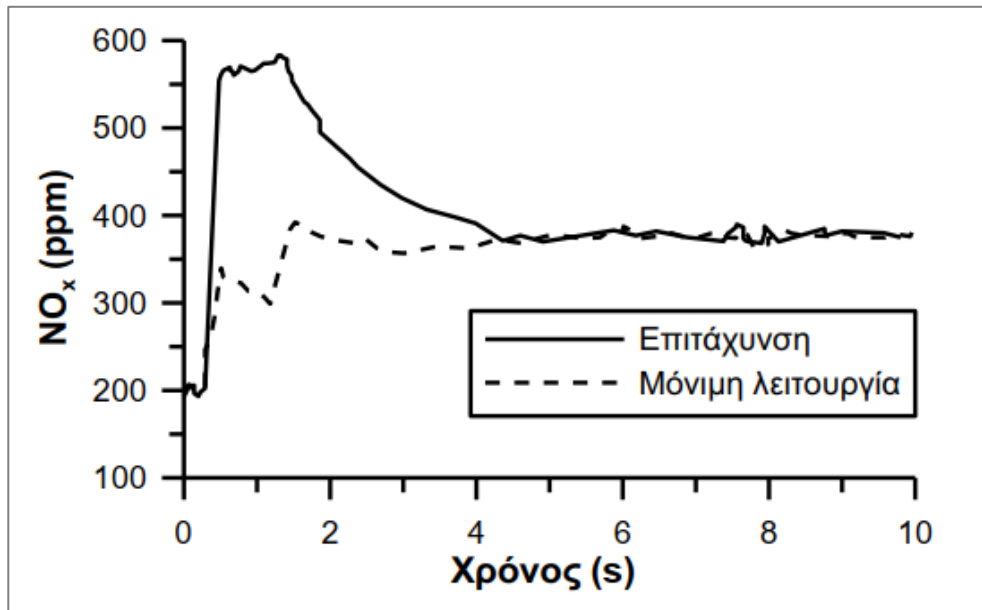
Σχήμα 2.6: Επίδραση του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα στις εκπομπές αιθάλης [2]

Ένας από τους βασικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τόσο τον αριθμό όσο και την κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων είναι ο τύπος του καυσίμου που χρησιμοποιείται (δηλαδή η σύσταση του). Πιο συγκεκριμένα, προτιμώνται καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο για συνολικά μειωμένες εκπομπές σωματιδίων παρόλο που έχει εντοπιστεί αύξηση της συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων. Παρόμοιας συσχέτισης είναι και άλλα δύο φαινόμενα, η υψηλότερη πίεση έγχυσης του καυσίμου καθώς και το χαμηλότερο ποσοστό ανακυκλοφορίας καυσαερίου EGR.

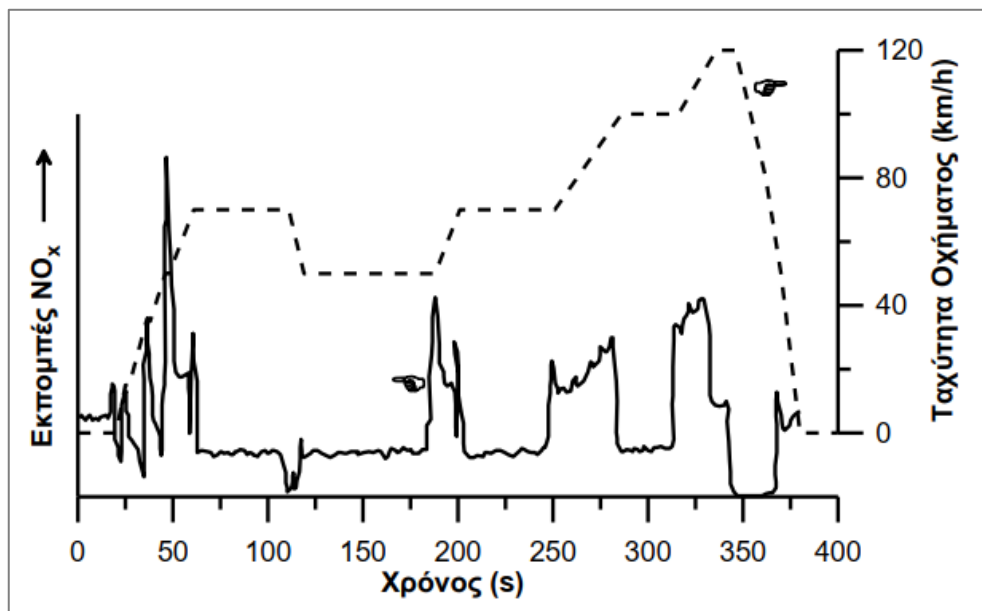
2.4 Ιδιαιτερότητες εκπομπών ρύπων κατά τη μεταβατική λειτουργία στροβιλο-υπερπληρωμένων κινητήρων Diesel

Ένα μεγάλο μειονέκτημα των στροβιλο-υπερπληρωμένων κινητήρων Diesel είναι η υστέρηση του υπερπληρωτή κατά τη μεταβατική λειτουργία. Αποτέλεσμα της υστέρησης είναι αφενός η χειροτέρευση της καύσης και αφετέρου η στιγμιαία υπερακόνηση των ρύπων (αέριων και στερεών) εν συγκρίσει με τη μόνιμη λειτουργία (σταθερές στροφές του κινητήρα ή/και φορτίο). Στη συνέχεια (**Σχήμα 2.7** έως **Σχήμα 2.10**)

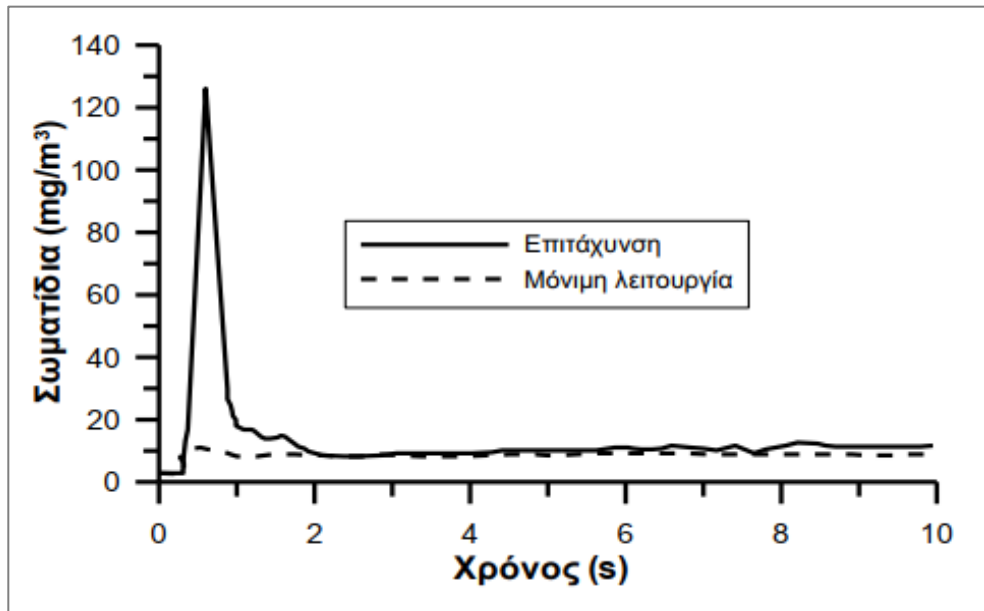
παρουσιάζονται κάποια τυπικά διαγράμματα που αφορούν τις εκπομπές ρύπων κατά τη μεταβατική λειτουργία ενός κινητήρα Diesel.



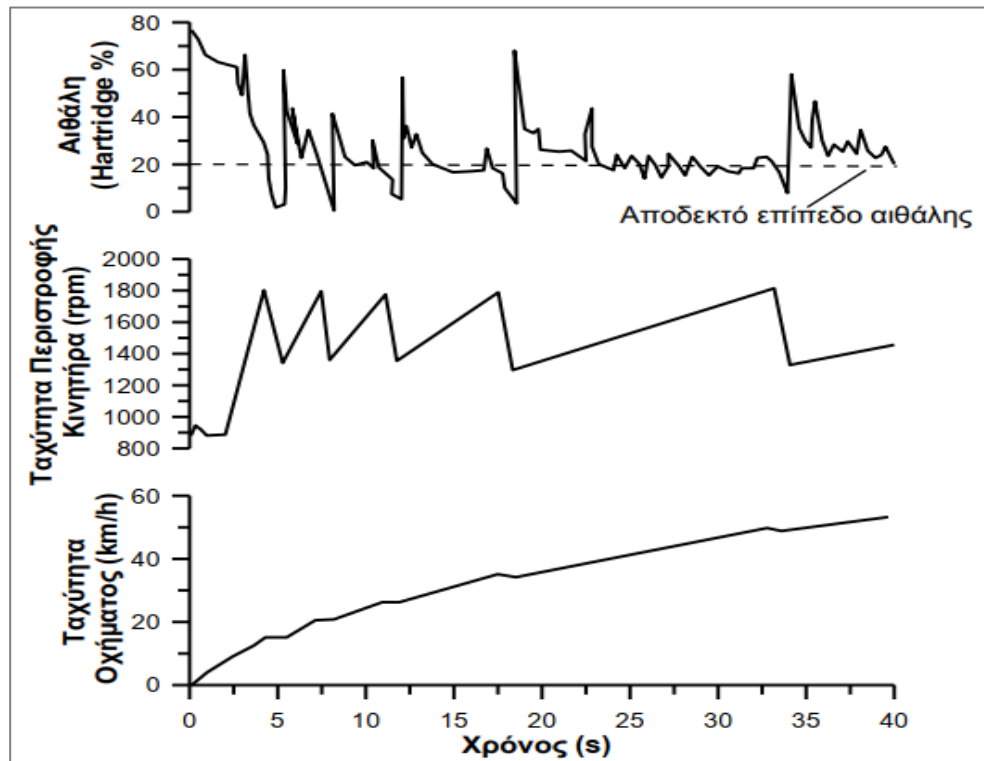
Σχήμα 2.7: Υπερακόνηση οξειδίων του αζώτου ενός στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel κατά τη διάρκεια επιτάχυνσης από την άφορτη λειτουργία [3]



Σχήμα 2.8: Υπερακόνηση οξειδίων του αζώτου ενός στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel κατά τη διάρκεια του εκτός πόλης τμήματος του ευρωπαϊκού κύκλου πιστοποίησης οχημάτων NEDC [3]



Σχήμα 2.9: Υπερακόντιση σωματιδίων ενός στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel κατά τη διάρκεια επιτάχυνσης από την άφορτη λειτουργία [3]



Σχήμα 2.10: Εκπομπές αιθάλης κατά τη διάρκεια συνεχών επιταχύνσεων ενός στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel φορτηγού κατά την είσοδο σε αυτοκινητόδρομο [3]

3. Συστήματα μετ(επεξεργασίας) καυσαερίων κινητήρων Diesel²

3.1 Γενικά

Οι ρύποι που εκπέμπονται από τους κινητήρες Diesel αντιμετωπίζονται μέσω μιας συνολικής θεώρησης αντιρρύπανσης. Αρχικά, **πρωτογενώς** με εφαρμογή κάποιων **εσωτερικών μέτρων** (λ.χ. έλεγχος προπορείας, κατάλληλος σχεδιασμός θαλάμου καύσης, ανακυκλοφορία καυσαερίου EGR, κλπ.) καθώς και με αντιρρυπαντικά **συστήματα μετ(επεξεργασίας) καυσαερίων** όπου η αντιμετώπιση γίνεται πιο αποτελεσματικά. Η μείωση των ρύπων μέσω των πρωτογενών εσωτερικών μέτρων γίνεται μέχρι ενός σημείου. Όμως, με την αυστηροποίηση των προδιαγραφών καυσαερίων είναι αδύνατη η αντιμετώπιση μόνο με τα εσωτερικά μέτρα. Έτσι, είναι απαραίτητη η τοποθέτηση συστημάτων μετ(επεξεργασίας) των καυσαερίων που τοποθετούνται μετά την πολλαπλή εξαγωγής και δρουν ως ένα επιπλέον «εμπόδιο» για τους εκπεμπόμενους ρύπους. Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι οι παραπάνω συσκευές δημιουργούν πτώση πίεσης στη ροή του καυσαερίου στην έξοδο του κινητήρα, με αποτέλεσμα την ελαφρά αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

Τα συστήματα μετ(επεξεργασίας) καυσαερίων που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση των ελεγχόμενων ρύπων (NO_x, CO, HC, αιθάλη-σωματίδια) χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες [2]:

α) Τύπου «καταλύτη»: η αντιμετώπιση των ρύπων γίνεται σε πραγματικό χρόνο με τη χρησιμοποίηση ειδικών επιστρώσεων από καταλυτικά υλικά εντός της αντιρρυπαντικής συσκευής.

β) Τύπου «παγίδας»: ο ρύπος παγιδεύεται εντός της αντιρρυπαντικής συσκευής και η καταστροφή του γίνεται μέσω αναγέννησης/αδειάσματος της παγίδας.

Πιο συγκεκριμένα, αναφορικά με τους κινητήρες Diesel η διάκριση των συσκευών μετ(επεξεργασίας) καυσαερίων έχει ως εξής:

- Οξειδωτικός καταλύτης Diesel (DOC) για την αντιμετώπιση των CO, HC
- Φίλτρο σωματιδίων (DPF) για την αντιμετώπιση των σωματιδίων
- Επιλεκτική καταλυτική αναγωγή (SCR) για την αντιμετώπιση των NO_x

Στη συνέχεια, για λόγους πληρότητας, παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας (**Πίνακας 3.1**) που αφορά τις προδιαγραφές της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις εκπομπές ρύπων επιβατικών αυτοκινήτων (κατηγορίας M1 και M2) σε g/km.

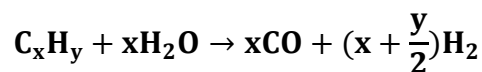
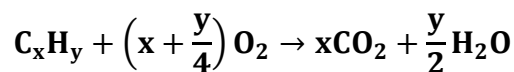
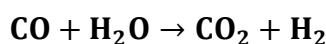
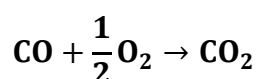
² Για επιπλέον λεπτομέρειες βλ. Παραπομπές [16] και [5] από τις οποίες προέρχεται η ανάλυση του παρόντος κεφαλαίου

Πίνακας 3.1: Προδιαγραφές της Ε.Ε. για τις εκπομπές ρύπων επιβατικών αυτοκινήτων (κατηγορίας M1 και M2) σε g/km [4]

Πρότυπο	Ημερομηνία	CO	HC	HC + NO _x	NO _x	PM	PN
Euro 1	07.1992	2,72	-	0,97	-	0,14	-
Euro 2, IDI	01.1996	1,0	-	0,7	-	0,08	-
Euro 2, DI	01.1996	1,0	-	0,9	-	0,10	-
Euro 3	01.2000	0,64	-	0,56	0,50	0,05	-
Euro 4	01.2005	0,50	-	0,3	0,25	0,025	-
Euro 5a	09.2009	0,50	-	0,23	0,18	0,005	-
Euro 5b	09.2011	0,50	-	0,23	0,18	0,005	6,0x10 ¹¹
Euro 6	09.2014	0,50	-	0,17	0,08	0,005	6,0x10 ¹¹

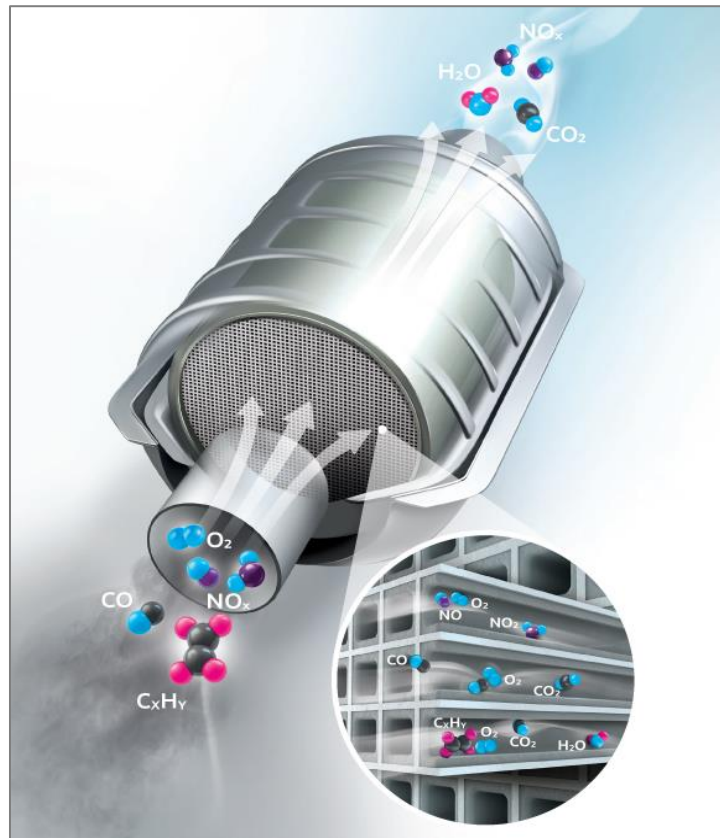
3.2 Οξειδωτικός καταλύτης Diesel (DOC)

Ο οξειδωτικός καταλύτης Diesel (DOC) είναι γνωστός στα επιβατικά αυτοκίνητα από το 1996 και το πρότυπο Euro 2. Στη συνέχεια, εμφανίστηκε στα βαρέα οχήματα από το 2005 με το πρότυπο Euro IV και στα οχήματα εκτός δρόμου με το Στάδιο III/B από το 2011. [5] Ο εν λόγω καταλύτης είναι μια αντιρρυπαντική συσκευή τύπου **κεραμικού μονόλιθου** με διαμήκη κανάλια πυκνότητας περίπου 40-50 cm², με υπόστρωμα οξειδίου του αργιλίου (πυκνότητας 120 g/L), στα οποία εμποτίζεται το καταλυτικό υλικό (λευκόχρυσος Pt ή παλλάδιο Pd) οδηγώντας έτσι στις αντιδράσεις οξείδωσης του μονοξειδίου του άνθρακα CO και των άκαυστων υδρογονανθράκων HC προς τα μη τοξικά CO₂ και H₂O. Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι:



Πέραν του βασικού ρόλου του, ο οξειδωτικός καταλύτης χρησιμοποιείται και για άλλες τέσσερις επεμβάσεις. Πρώτον, αντιμετωπίζει το οργανικό κλάσμα των σωματιδίων σε ποσοστό τουλάχιστον 90%, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τις εκπομπές σωματιδίων κατά 25-50 %. Δεύτερον, λόγω των οξειδώσεων αυξάνεται η θερμοκρασία με αποτέλεσμα την υποβοήθηση της διαδικασίας της αναγέννησης στο φίλτρο σωματιδίων που ακολουθεί. Τρίτον, αντιμετωπίζει κάποιους από τους μη θερμοθετημένους ρύπους όπως π.χ. αλδεΐδες, κετόνες κλπ. οι οποίες είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες για τον άνθρωπο. Τέταρτον, αυξάνει το ποσοστό του NO₂ στο καυσαέριο (οξειδώνει μεγάλο μέρος του NO σε NO₂) κάτι που επίσης δρα καταλυτικά όσον αφορά

τη λειτουργία του φίλτρου σωματιδίων (αναγέννησή του). Μία τυπική εικόνα ενός DOC παρατίθεται στο ακόλουθο **Σχήμα 3.1**.



Σχήμα 3.1: Οξειδωτικός καταλύτης Diesel [6]

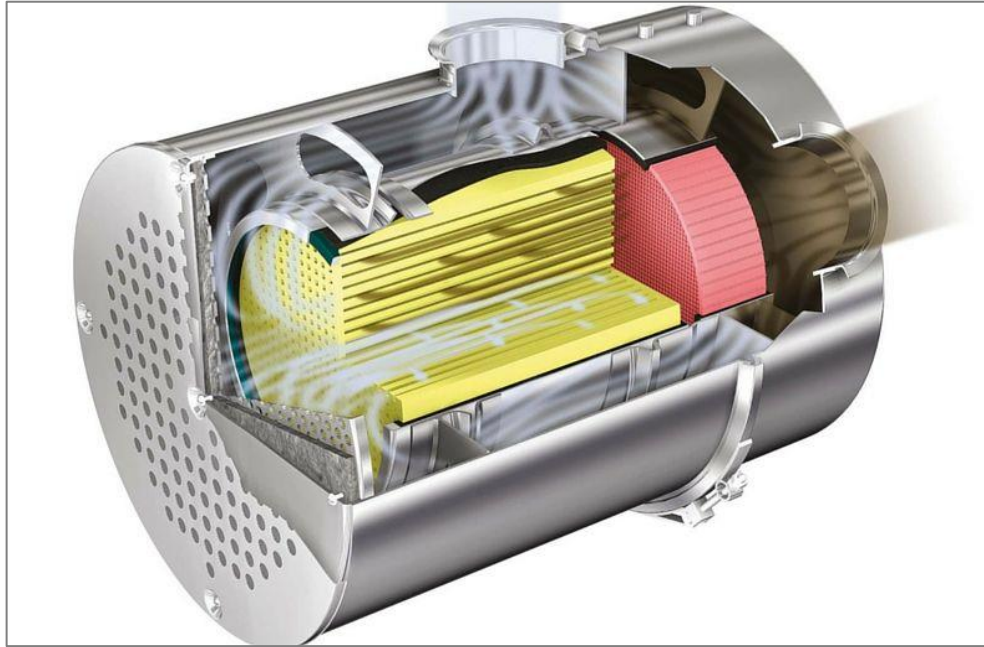
3.3 Φίλτρο σωματιδίων (DPF)

Το φίλτρο σωματιδίων πρωτοεμφανίστηκε στους κινητήρες Diesel επιβατικών αυτοκινήτων το 2000 και είναι υποχρεωτικό από το 2009 και το πρότυπο Euro 5. Εν συνεχεία, εμφανίστηκε στα βαρέα οχήματα από το 2013 με το πρότυπο Euro VI και σταδιακά σε όλα τα οχήματα εκτός δρόμου [5]. Όπως και για την αντιμετώπιση των CO και HC, απαιτείται οξείδωση για την καταστροφή της αιθάλης. Όμως, ο ρυθμός με τον οποίο οξειδώνεται η αιθάλη, όντας στερεός ρύπος, είναι πολύ **πιο αργός** σε σύγκριση με τους αέριους ρύπους, ενώ η εν λόγω διαδικασία απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες (>550°C) οι οποίες δεν συναντώνται εύκολα σε πετρελαιοκίνητους κινητήρες. Έτσι καθίσταται δύσκολη η καταστροφή του ρύπου σε πραγματικό χρόνο οπότε ακολουθείται η φιλοσοφία της **παγίδευσής** του εντός της αντιρρυπαντικής συσκευής [2].

Εν γένει, η αποτελεσματικότητα των φίλτρων σωματιδίων υπερβαίνει το **95% όσον αφορά τη μάζα και το 99% όσον αφορά το πλήθος των σωματιδίων**. Ο βαθμός απόδοσης των φίλτρων σωματιδίων εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες όπως το μέγεθος των πόρων του φίλτρου, το βάθος διήθησης, η ταχύτητα του καυσαερίου, η διάμετρος των σωματιδίων κλπ. με γενική διαπίστωση ότι ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται όσο αυξάνεται η διάμετρος των σωματιδίων αιθάλης.

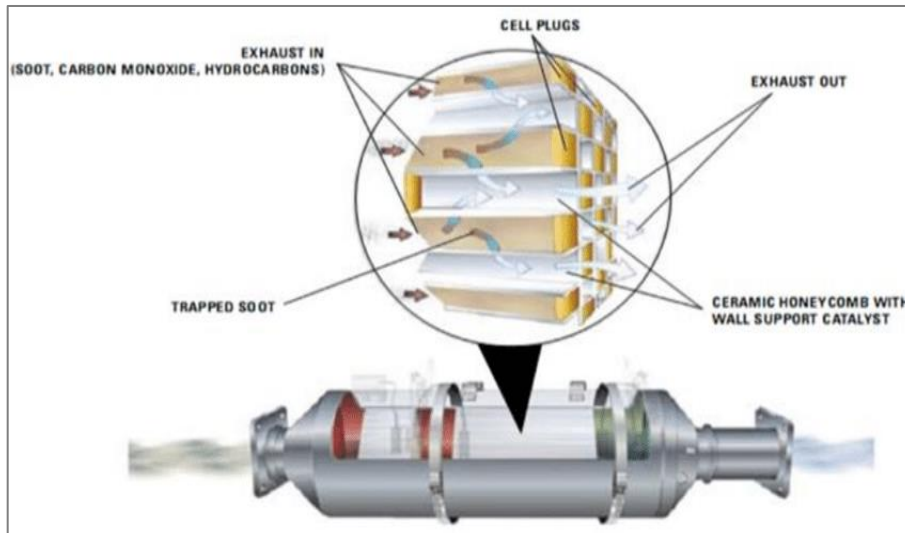
Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, βασική παράμετρος αποτελεί το υλικό κατασκευής του φίλτρου. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες (άνω των 1000°C) και σε απότομες

θερμοκρασιακές μεταβολές. Τα πιο διαδεδομένα υλικά κατασκευής είναι τα κεραμικά υψηλής πυριμαχικότητας και χαμηλής θερμικής διαστολής, όπως ο **κορδιερίτης** ($2\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$), το **καρβίδιο του πυριτίου** (SiC) και το **τιτανικό αλουμίνιο** (Al_2TiO_5). Πέραν της αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες, τα φίλτρα σωματιδίων πρέπει να έχουν καλή μηχανική αντοχή, ανθεκτικότητα στις προσμίξεις που πιθανόν υπάρχουν στο καυσαέριο, χαμηλή πτώση πίεσης, δυνατότητα καταλυτικής επίστρωσης για διευκόλυνση της αναγέννησης, μικρό μέγεθος, μικρό βάρος και χαμηλό κόστος [2].



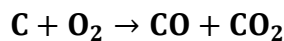
Σχήμα 3.2: Τομή φίλτρου σωματιδίων DPF (κίτρινο χρώμα) κατάντη του οξειδωτικού καταλύτη DOC (κόκκινο χρώμα) μοντέρνου κινητήρα Diesel [5]

Η πιο συνήθης κατασκευή του φίλτρου σωματιδίων είναι ο κεραμικός μονόλιθος όπως και στην περίπτωση του οξειδωτικού καταλύτη. Έχει κυκλική ή ελλειψοειδή μορφή και περιλαμβάνει πολλά ευθύγραμμα κανάλια τετραγωνικής διατομής. Όσον αφορά τη χωροταξία, το φίλτρο σωματιδίων τοποθετείται όσο πιο κοντά γίνεται στην εξαγωγή του κινητήρα και συνήθως μετά τον οξειδωτικό καταλύτη, προκειμένου να εκμεταλλευτούμε την υψηλή θερμοκρασία των καυσαερίων (**Σχήμα 3.2**). Ο σχεδιασμός του φίλτρου σωματιδίων είναι κυψελοειδής με διαμήκη κελιά πυκνότητας περίπου 30 ανά cm^2 , τα μισά εκ των οποίων φράσσονται μόνο στην είσοδο και τα άλλα μισά μόνο στην έξοδο (**Σχήμα 3.3**), ώστε το καυσαέριο να αναγκαστεί να περάσει μέσα από τους πόρους των τοιχωμάτων των κεραμικών υλικών.

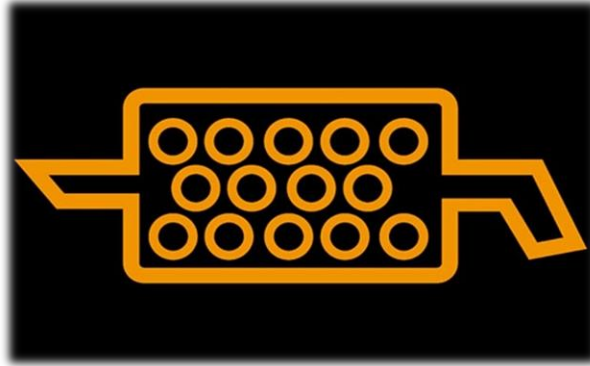


Σχήμα 3.3: Απεικόνιση των φραγμένων κελιών στην είσοδο και την έξοδο του φίλτρου σωματιδίων (wall flow) [7]

Το βασικό μειονέκτημα του φίλτρου σωματιδίων είναι η πτώση πίεσης στη ροή του καυσαερίου στην εξαγωγή του κινητήρα, με αποτέλεσμα την αύξηση του αρνητικού έργου εξώθησης των καυσαερίων και κατ' επέκταση την αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαίο για ένα φίλτρο σωματιδίων να απομακρύνει τα συσσωρευμένα σωματίδια που έχει συλλέξει, ώστε να εξασφαλίσει την ομαλή λειτουργία του. Η εν λόγω διαδικασία της απομάκρυνσης των σωματιδίων ονομάζεται **αναγέννηση**, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την καύση του συσσωρευμένου άνθρακα. Οι βασικές αντιδράσεις οξειδωσης του άνθρακα που παρουσιάζονται στη συνέχεια προϋποθέτουν την ύπαρξη οξυγόνου (περίσσεια αέρα) και διοξειδίου του αζώτου (προκύπτει από την οξείδωση του NO σε NO₂ στον DOC) στα καυσαέρια [2].



Κατά την κίνηση σε αυτοκινητόδρομο (υψηλά φορτία και άρα χαμηλός λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου λ_a), η θερμοκρασία του καυσαερίου είναι αρκετή υψηλή με αποτέλεσμα την επίτευξη της αναγέννησης η οποία ονομάζεται **παθητική**. Αντιθέτως, όταν η κίνηση γίνεται εντός πόλης (χαμηλά φορτία) όπου η θερμοκρασία του καυσαερίου είναι χαμηλή, η αναγέννηση γίνεται εξαναγκασμένα (η διαδικασία ρυθμίζεται από το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου του κινητήρα) και ονομάζεται **ενεργητική**. Η ενεργητική αναγέννηση διαρκεί περίπου 20 με 30 λεπτά, συμβαίνει κάθε 800-1000 km περίπου και γίνεται αντιληπτή κατά την οδήγηση όταν αυξηθούν οι στροφές στο «ρελαντί», λειτουργεί συνεχώς ο ανεμιστήρας ψύξης και απενεργοποιηθεί το σύστημα start-stop. Η εν λόγω διαδικασία της αναγέννησης ενεργοποιεί μία σχετική ένδειξη στον πίνακα ελέγχου του οχήματος, όπως φαίνεται στο ακόλουθο **Σχήμα 3.4** [2].



Σχήμα 3.4: Ένδειξη της αναγέννησης του φίλτρου σωματιδίων στον πίνακα ελέγχου ενός οχήματος

Η αρχή στην οποία βασίζεται η ενεργητική αναγέννηση είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του καυσαερίου με σκοπό την επίτευξη της θερμικής αναγέννησης του φίλτρου (π.χ. με έγχυση καυσίμου στο καυσαέριο). Έτσι, λοιπόν, αυξάνεται η ποσότητα των υδρογονανθράκων στο καυσαέριο και κατά συνέπεια αυξάνεται και η θερμοκρασία του καυσαερίου εξαιτίας της οξειδωσης των HC στον οξειδωτικό καταλύτη (εξώθερμη διεργασία). Βασικό ρόλο επιτελεί η **ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου του οχήματος**, η οποία με τη χρήση αισθητήρων πίεσης και θερμοκρασίας, όταν αντιληφθεί ότι η φόρτιση του φίλτρου υπερβαίνει κάποιο όριο, εξασφαλίζει ότι δεν αυξηθεί πολύ η πίεση αντίθλιψης του φίλτρου.

Γενικά, η υψηλή θερμοκρασία καυσαερίου για την επίτευξη της αναγέννησης επιτυγχάνεται: μέσω αύξησης του εγχόμενου καυσίμου ή μέσω καθυστερημένης έγχυσης, και μέσω ηλεκτρικής αντίστασης που θερμαίνει τα καυσαέρια ή το ίδιο το φίλτρο. Ως απόρροια της επίτευξης υψηλής θερμοκρασίας, υπάρχει αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου και ορισμένων ρύπων όπως HC, NO_x, CO₂. Για το λόγο αυτό, **η νομοθεσία λαμβάνει υπόψη τη διαδικασία της αναγέννησης** σε κινητήρες με ενσωματωμένα φίλτρα σωματιδίων, όπου το όχημα δεν τρέχει μόνο έναν κύκλο δοκιμής κατά την πιστοποίηση αλλά περισσότερους ώστε να προκύψει αναγέννηση του φίλτρου [2].

Τέλος, οι απαιτήσεις που πρέπει να έχει ένα φίλτρο σωματιδίων είναι [5]:

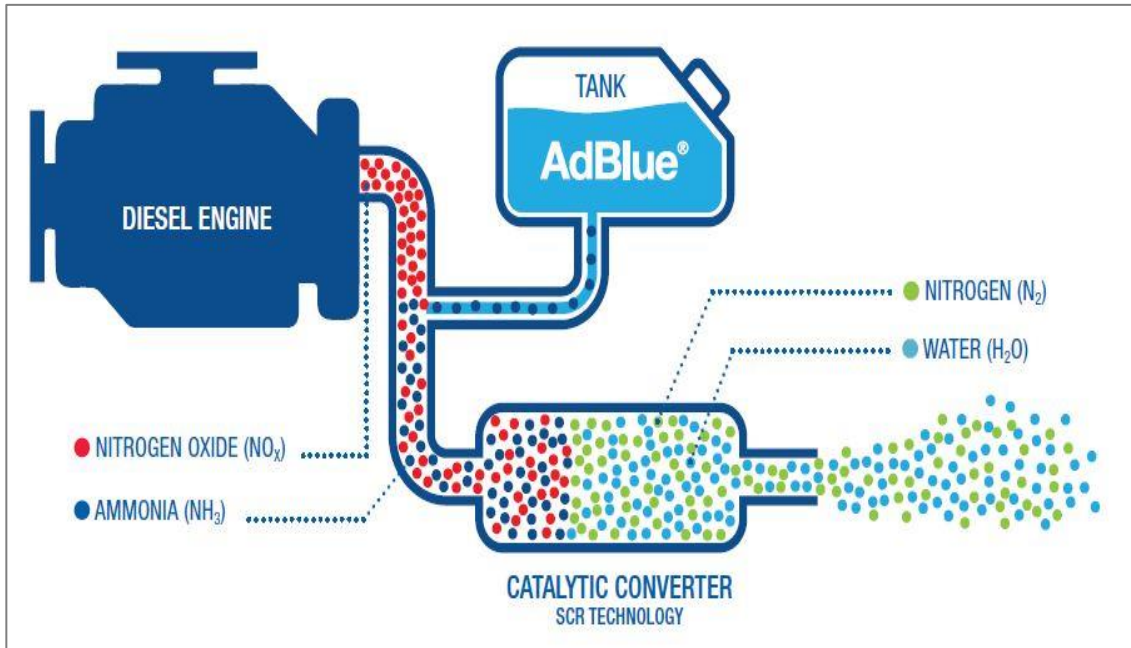
- Υψηλός ρυθμός φιλτραρίσματος ακόμα και για τα πολύ μικρής διαμέτρου σωματίδια (>90%)
- Μικρή πτώση πίεσης κατά μήκος του
- Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες (έως και 1000 °C κατά την αναγέννηση)
- Δομική και αεροδυναμική αντοχή στα συστατικά του σωματιδίου που δεν οξειδώνονται

3.4 Επιλεκτική καταλυτική αναγωγή (SCR)

Αρχικά, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.2, ο σχηματισμός των οξειδίων του αζώτου NO_x ευνοείται από τα υψηλά θερμοκρασιακά πεδία που αναπτύσσονται εντός του θαλάμου καύσης. Όμως, οι υψηλές θερμοκρασίες βελτιώνουν την απόδοση ενός κινητήρα Diesel και κατά συνέπεια αυξάνουν τα NO_x με αποτέλεσμα να υπάρχει **αναντιστοιχία** στη διαδικασία πιστοποίησης και στις πραγματικές συνθήκες στο δρόμο. Η παραπάνω αναντιστοιχία αφορά όλων των μεγεθών πετρελαιοκίνητα οχήματα μέχρι και το πρότυπο Euro 6b (σκάνδαλο «Dieselgate») και αυτό διότι μέχρι και τη θέσπιση του προτύπου Euro 6b, η αντιμετώπιση των NO_x πραγματοποιούνταν μόνο με εσωτερικά μέτρα λειτουργίας (όπως η ρύθμιση προπορείας και η

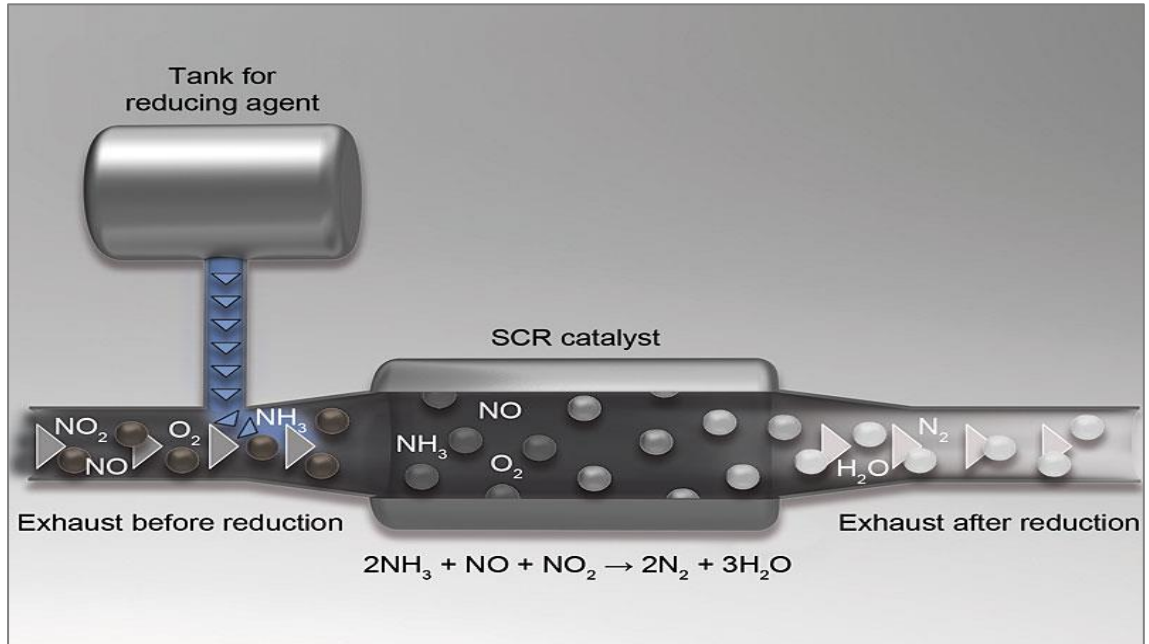
ανακυκλοφορία καυσαερίου EGR) που οι κατασκευαστές είχαν τη δυνατότητα να παρακάμπτουν σε συνθήκες κυκλοφορίας εκτός αυτών που εμπεριέχονται στον εκάστοτε κύκλο πιστοποίησης.

Η διάταξη ενός συστήματος επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής (SCR) παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.5**, όπου διακρίνεται χαρακτηριστικά η δεξαμενή του αναγωγικού μέσου (**διάλυμα ουρίας με νερό** σε ποσοστό 30-35% με την εμπορική ονομασία AdBlue).



Σχήμα 3.5: Σύστημα επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής (SCR) με δεξαμενή AdBlue πετρελαιοκίνητου οχήματος [8]

Η αντιμετώπιση του ανωτέρου φαινομένου προέκυψε με την εφαρμογή του προτύπου Euro 6c/VI, το οποίο έθετε ως υποχρέωση στους κατασκευαστές να υπάρχει εγκατεστημένο σύστημα επεξεργασίας των NO_x. Αφορμή ήταν βεβαίως και η αυστηροποίηση της προδιαγραφής που αφορά τα οξείδια του αζώτου, όπου ενδεικτικά και σύμφωνα με τον **Πίνακα 3.1** το όριο του 0,18 g/km μειώθηκε στα 0,08 g/km. Η εν λόγω αυστηροποίηση ήταν αδύνατο να επιτευχθεί με εσωτερικά μέτρα. Η συσκευή που υποχρεώθηκαν να τοποθετήσουν οι κατασκευαστές είναι η επιλεκτική καταλυτική αναγωγή SCR, και κατά δεύτερο λόγο η παγίδα NO_x.



Σχήμα 3.6: Απεικόνιση λειτουργίας του συστήματος επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής (SCR) [9]

Στο παραπάνω **Σχήμα 3.6** απεικονίζεται η λειτουργία του SCR, ενώ, στη συνέχεια παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα του συστήματος της επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής.

Πλεονεκτήματα:

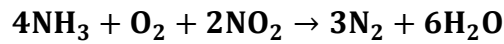
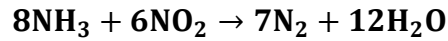
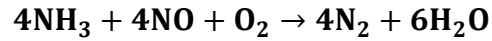
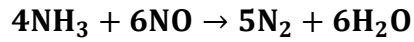
- Υψηλή απόδοση αναγωγής των NO_x σε N₂ έως 95%
- Δυνατότητα εφαρμογής και για καυσαέρια που περιέχουν σωματίδια

Μειονεκτήματα:

- Υψηλό κόστος του καταλύτη
- Τοξικότητα της αμμωνίας που δύναται να διαφύγει στο περιβάλλον

Τα συστήματα SCR με βάση τη δομή του καταλυτικού υλικού διακρίνονται στους καταλύτες **βαναδίου** και στους **ζεολιθικούς** καταλύτες, με κυρίαρχη διαφορά την δραστηριότητα σε διαφορετικά εύρη θερμοκρασιών. Οι πρώτοι, δηλαδή οι καταλύτες βαναδίου, είναι πιο συχνόι σε μεγάλων διαστάσεων κινητήρες, αποτελούμενοι από φορέα τιτανίου (Ti) παρουσία και άλλων οξειδίων μετάλλων όπως το βολφράμιο (W), το μολυβδένιο (Mo), το μαγγάνιο (Mn), το αντιμόνιο (Sb) κλπ. Επίσης, έχουν μεγάλη ειδική επιφάνεια, είναι δραστικοί σε ένα ικανοποιητικό θερμοκρασιακό εύρος και ιδιαίτερως σταθεροί στο χρόνο. Οι δεύτεροι, δηλαδή οι ζεολιθικοί καταλύτες, είναι εξαιρετικά δραστικοί στις υψηλές θερμοκρασίες εξαιτίας του ζεόλιθου, ο οποίος είναι ένα ένυδρο αλουμινο-πυριτικό μέταλλο με αυξημένη θερμική αντοχή, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα έκθεσης σε θερμοκρασίες άνω των 650°C. Συνεπώς, προτιμάται από τους καταλύτες βαναδίου ιδιαίτερα για κινητήρες Diesel με εγκατεστημένο φίλτρο σωματιδίων DPF, όπου εξαιτίας της διαδικασίας της αναγέννησης αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες στο κατάντη σύστημα SCR.

Τέλος, όσον αφορά τον τρόπο δράσης της επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής, οι βασικές χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται είναι οι παρακάτω:



Κλείνοντας, στον **Πίνακα 3.2** παρατίθενται συγκεντρωτικά οι τυπικοί όγκοι όλων των συστημάτων μετ(επεξεργασίας) καυσαερίων που αναλύθηκαν στο παρόν κεφάλαιο.

Πίνακας 3.2: Τυπικοί όγκοι συστημάτων μετ(επεξεργασίας) καυσαερίων πετρελαιοκίνητου οχήματος

Σύστημα	Τυπικός όγκος
DOC	0,4-0,8 V _H
DPF	1,2-2,0 V _H
SCR	1,0-2,5 V _H
* όπου V _H ο όγκος εμβολισμού	

4. Κύκλοι Πιστοποίησης³

4.1 Γενικά

Είναι ευρέως γνωστό ότι η λειτουργία κινητήρων οχημάτων δεν είναι μόνιμη (σταθερές στροφές και φορτίο) όπως π.χ. σε εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής, αλλά διέπεται από έντονα **μεταβατικά** φαινόμενα. Η μεταβατική, αυτή, λειτουργία χαρακτηρίζεται από διαρκείς αλλαγές φορτίου και στροφών ιδίως κατά την κίνηση εντός πόλης, έχοντας ως συνέπεια την έντονη **υπερακόντιση** στις εκπομπές ρύπων.

Οι διεθνείς οργανισμοί, αντιλαμβανόμενοι το πρόβλημα που δημιουργείται από πλευράς εκπομπών ρύπων, εισήγαγαν την έννοια των διαδικασιών δοκιμής οι οποίες θα στηρίζονταν στη μεταβατική λειτουργία μέσω **μεταβατικών Κύκλων Πόλης** (Driving Cycles). Οι κύκλοι αυτοί χαρακτηρίζονται από αρκετά μεγάλη διάρκεια (έως 30 λεπτά) και περιλαμβάνουν συνεχείς αλλαγές ταχυτήτων και φορτίων υπό διάφορες συνθήκες, αντιπροσωπευτικές της πραγματικής κίνησης στο δρόμο. Ως Κύκλος Πόλης ορίζεται μία ακολουθία σημείων δοκιμής, το κάθε ένα σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα οχήματος σε μεταβατικές συνθήκες λειτουργίας. Τα σημεία δοκιμής είναι διαιρεμένα σε χρονικά βήματα, ανά ένα δευτερόλεπτο, κατά τη διάρκεια των οποίων η επιτάχυνση θεωρείται γραμμική. Προκειμένου να υπάρχει αντιπροσωπευτικότητα των μετρήσεων με την πραγματική λειτουργία του κινητήρα στο δρόμο από τον μέσο οδηγό, οι Κύκλοι Πόλης περιλαμβάνουν τις παρακάτω καθημερινές συνθήκες οδήγησης που συναντά ένας οδηγός:

- Ψυχρή και θερμή εκκίνηση
- Επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις
- Αλλαγές (αυξήσεις) φορτίου
- Συνθήκες άφορτης λειτουργίας (ρελαντί) χαρακτηριστικές του αστικού τρόπου οδήγησης κατά την αναμονή (π.χ. στο φανάρι)
- Οδήγηση σε προαστιακούς ή αγροτικούς δρόμους
- Οδήγηση σε αυτοκινητόδρομο

Οι Κύκλοι Δοκιμής διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Τα **επιβατικά αυτοκίνητα** και τα ελαφρού τύπου φορτηγά υποβάλλονται σε δοκιμή Κύκλου Πόλης, σε δυναμόμετρο πλαισίου, που συσχετίζει την ταχύτητα με το χρόνο (vehicle speed vs. time) ενώ τα αποτελέσματα των εκπομπών εκφράζονται σε **g/km**.
- Τα **βαρέος τύπου οχήματα** υποβάλλονται σε Κύκλο Δοκιμής **μόνο του κινητήρα**, σε μία πέδη δοκιμής κινητήρων, καθώς υπάρχουν ιδιαιτερότητες λόγω μεγέθους, βάρους και ποικιλίας εφαρμογών του ίδιου κινητήρα σε διαφορετικά αμαξώματα. Η δοκιμή του κινητήρα συσχετίζει την ταχύτητα περιστροφής και το φορτίο με το χρόνο (engine speed/torque vs. speed) ενώ τα αποτελέσματα των εκπομπών εκφράζονται σε **g/kWh**.

³ Για επιπλέον λεπτομέρειες βλ. Παραπομπές [3] και [10] από τις οποίες προέρχεται η ανάλυση του παρόντος κεφαλαίου

Εν γένει, οι Κύκλοι Δοκιμής προϋποθέτουν πολύπλοκο και πλήρως αυτοματοποιημένο τεχνολογικό εξοπλισμό, με ηλεκτρονικά ελεγχόμενο δυναμόμετρο, συσκευές ανάλυσης καυσαερίων γρήγορης απόκρισης, σήραγγες ανάμιξης, κλπ. Πρωτοπόροι στην ανάλυση των εκπομπών ρύπων μέσω μεταβατικών Κύκλων Δοκιμών ήταν η Ευρώπη, η Ιαπωνία και οι Η.Π.Α., με τις υπόλοιπες χώρες να υιοθετούν σταδιακά την εν λόγω διαδικασία.

4.2 Διαδικασία μέτρησης εκπομπών κατά τη διάρκεια των Κύκλων Δοκιμής

4.2.1 Δυναμόμετρο

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

- **Δυναμόμετρα πλαισίων** (chassis dynamometers) για τη δοκιμή ολόκληρου του οχήματος, που αφορά τα επιβατικά αυτοκίνητα και τα ελαφρού τύπου φορτηγά.
- **Δυναμόμετρα κινητήρων** (engine dynamometers) για τη δοκιμή μόνο του κινητήρα, που αφορά τα οχήματα βαρέος τύπου.

Στα δυναμόμετρα πλαισίων (**Σχήμα 4.1**), ολόκληρο το όχημα τοποθετείται στους κυλίνδρους έλξης, στους οποίους οδηγούνται οι κινητήριοι τροχοί του οχήματος, και ο χειρισμός πραγματοποιείται από έναν οδηγό. Το όχημα δένεται στο πάτωμα και στις δύο πλευρές, έτσι ώστε να αποτραπεί τυχόν μετακίνησή του. Η συλλογή των καυσαερίων γίνεται μέσω του συστήματος δειγματοληψίας ενώ ένας εκπαιδευμένος οδηγός, μέσω μιας οθόνης ευρισκόμενη μπροστά από το παρμπρίζ του οχήματος, ακολουθεί επακριβώς τα σημεία του κύκλου που εμφανίζονται ως πληροφορία ταχύτητας συναρτήσεως του χρόνου (**Σχήμα 4.2**).



Σχήμα 4.1: Επιβατικό αυτοκίνητο τοποθετημένο σε δυναμόμετρο πλαισίου

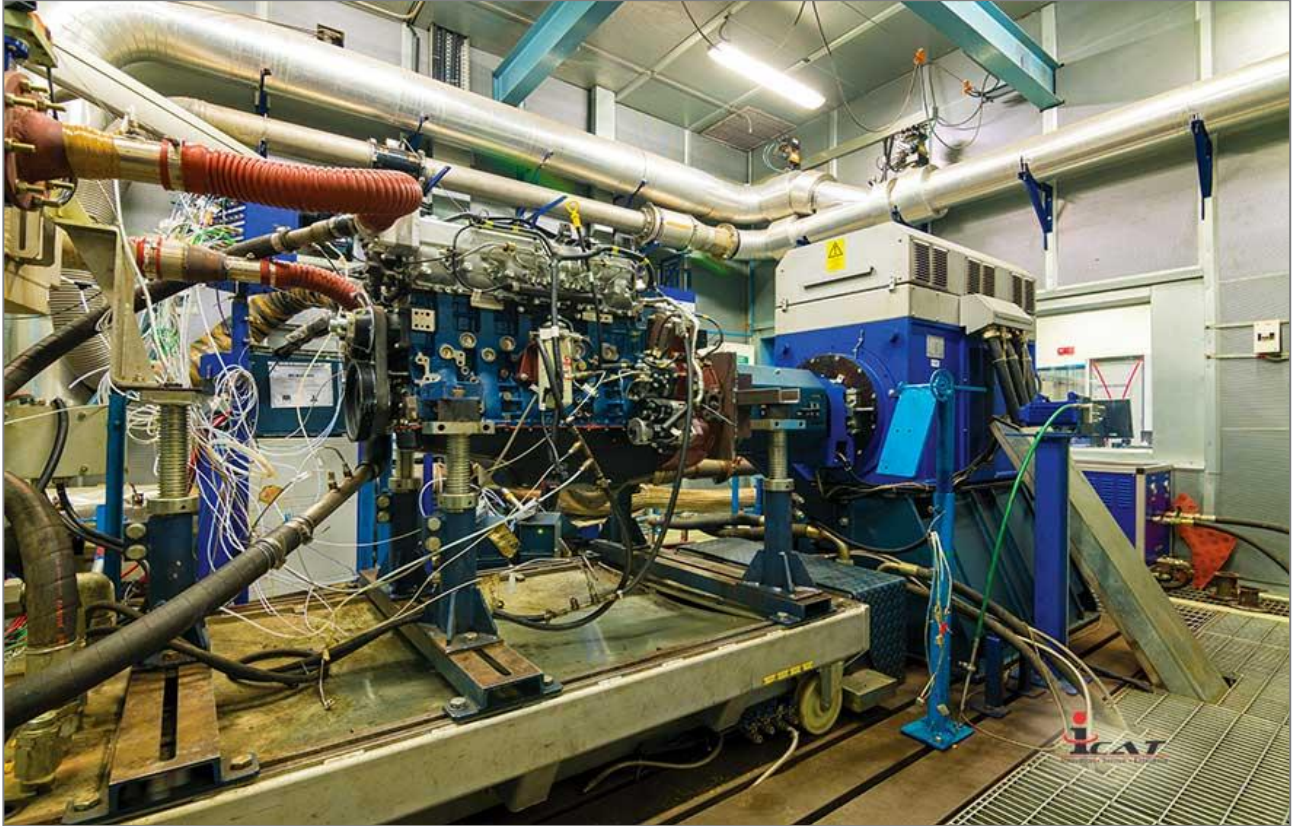


Σχήμα 4.2: Οδηγός επιβατικού οχήματος με οθόνη για πληροφορία ταχύτητας με το χρόνο

Στόχος του δυναμόμετρου είναι να αναπαράγει τις αντιστάσεις κατά την κίνηση του οχήματος στο δρόμο και την αδράνεια του οχήματος εξαιτίας των επιταχύνσεων. Ένα όχημα στο δρόμο καλείται να υπερνικήσει τις κάτωθι αντιστάσεις:

- Αντίσταση επιτάχυνσης
- Αντίσταση κατά την κίνηση του οχήματος (αεροδυναμική και κύλισης)
- Αντίσταση κλίσης του οδοστρώματος (δεν λαμβάνεται υπόψη κατά τους Κύκλους Δοκιμής)

Στα δυναμόμετρα κινητήρων (**Σχήμα 4.3**), ο κινητήρας συνδέεται απευθείας σε μια πέδη. Πιο συγκεκριμένα, το εν λόγω ηλεκτρονικό δυναμόμετρο προσομοιάζει τη συμπεριφορά ολόκληρου του οχήματος και του συστήματος μετάδοσης κίνησης, συμπεριλαμβανομένης της εξαιρετικά γρήγορης απόκρισης ροπής και ταχύτητας, κατά τη διάρκεια της μεταβατικής λειτουργίας. Τα δυναμόμετρα που χρησιμοποιούνται για τους κινητήρες είναι ηλεκτρονικά ελεγχόμενα με δυνατότητα ετεροκίνησης, όπου ουσιαστικά το δυναμόμετρο κινεί τον κινητήρα.



Σχήμα 4.3: Κινητήρας βαρέος τύπου τοποθετημένος σε δυναμόμετρο δοκιμής κινητήρων

4.2.2 Δειγματοληψία Σταθερού Όγκου (CVS) [10]

Η διαδικασία μέτρησης και ανάλυσης των καυσαερίων που εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια των κύκλων πιστοποίησης είναι η **δειγματοληψία σταθερού όγκου CVS** (constant volume sampling). Η εν λόγω διαδικασία χρησιμοποιείται σε όλους σχεδόν τους σύγχρονους Κύκλους Δοκιμής αφενός για επιβατικά οχήματα και αφετέρου για κινητήρες βαρέος τύπου.

Η διαδικασία CVS βασίζεται στην αραιώση της ολικής ποσότητας ανεπεξέργαστου καυσαερίου με καθαρό αέρα περιβάλλοντος σε μία **σήραγγα αραιώσης** αποσκοπώντας στην αποφυγή συμπύκνωσης υδρατμών στη διάταξη της δειγματοληψίας. Η ανάμιξη αυτή γίνεται κρατώντας τη ροή σταθερή, χρησιμοποιώντας μία περιστροφική αντλία θετικής εκτόπισης ή αντλία κενού κρίσιμης ροής τύπου «venturi». Η σταθερή ροή διευκολύνει τον ακριβή υπολογισμό των εκπομπών με βάση τη μάζα τους. Ένας εναλλάκτης θερμότητας μπορεί να εγκατασταθεί προαιρετικά για αναλογική δειγματοληψία σωματιδίων καθώς και για καθορισμό της ροής. Η κυρίως σήραγγα είναι ένας θερμαινόμενος ανοξείδωτος σωλήνας από ασάλι και απαιτείται να έχει επαρκές μήκος ώστε να επιτρέπει την πλήρη ανάμιξη του ανεπεξέργαστου καυσαερίου με τον αέρα περιβάλλοντος. Η διάμετρος της σήραγγας εξαρτάται από τη ροή των καυσαερίων και είναι αρκετά μικρή για να δημιουργείται εντός αυτής τυρβώδης ροή που θα διευκολύνει τη διαδικασία της ανάμιξης. Η ποσότητα του αραιωμένου αέρα πρέπει να είναι αρκετή για να ψύχει το μίγμα καυσαερίου-αέρα σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα και σε θερμοκρασία μικρότερη των 325 K.

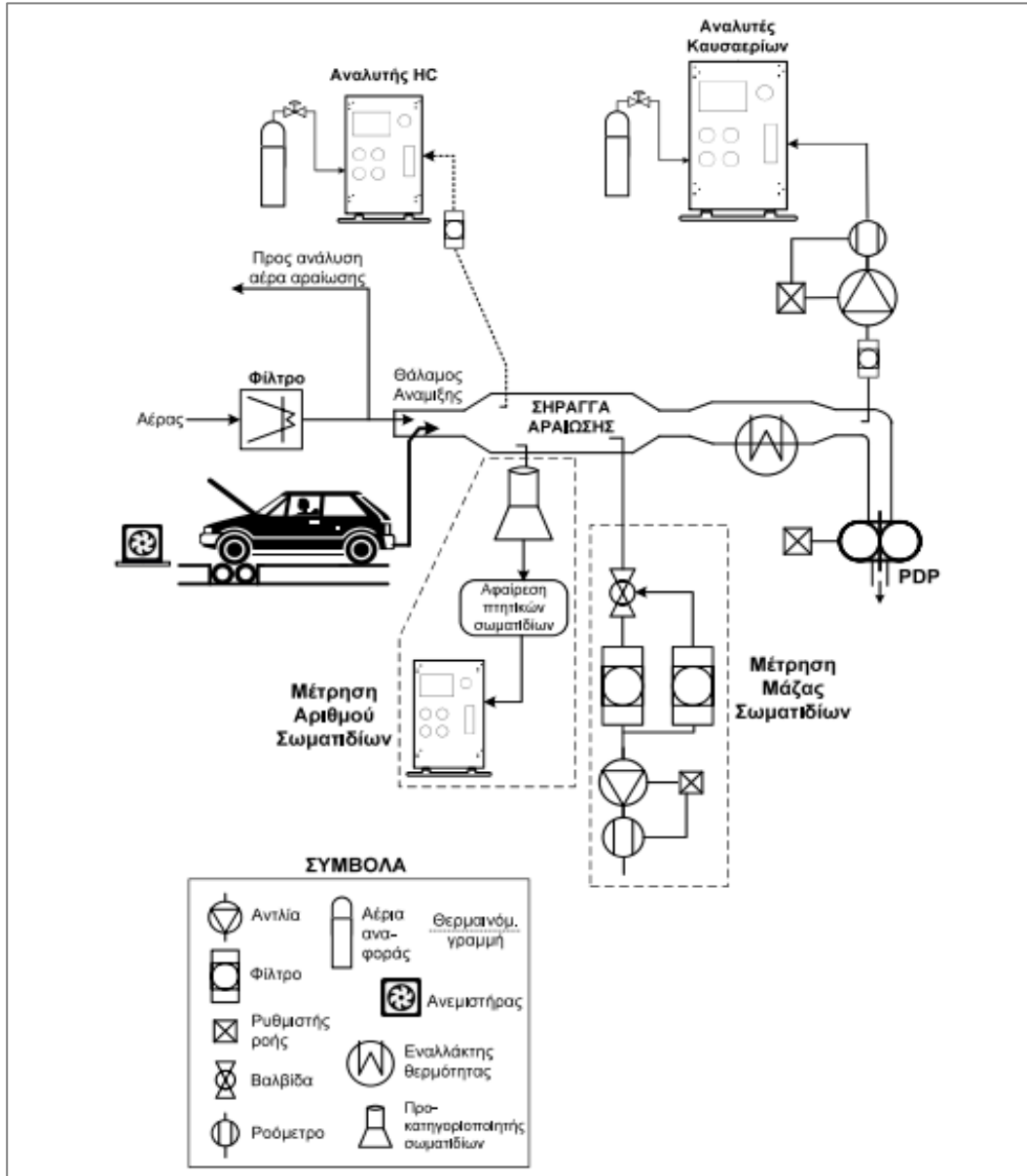
Κατά τη φάση των μετρήσεων, αντλούνται δείγματα αερίων από τη σήραγγα αραιώσης στο σημείο όπου το καυσαέριο είναι πλήρως αναμεμιγμένο με το διάλυμα αέρα (τυπικά ≥ 10 διάμετροι σήραγγας από το σημείο όπου και οι δύο ροές εισάγονται στη σήραγγα). Ένα μικρό κλάσμα της ροής (π.χ. 0,1%) υφίσταται

δειγματοληψία σε σάκο από τεφλόν. Πριν την είσοδο των αερίων στην αντλία για να εξέλθουν στην ατμόσφαιρα, τα αέρια ψύχονται σε εναλλάκτη θερμότητας μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος $\pm 5^{\circ}\text{C}$, ώστε να διατηρείται σταθερή η πυκνότητά τους. Αφού η παροχή όγκου διαμέσου της αντλίας είναι σταθερή, τότε και η παροχή μάζας θα είναι σταθερή. Μετά τη δοκιμή, οι συγκεντρώσεις των αερίων στα δείγματα μετρούνται μέσω **αναλυτή καυσαερίων**.

Η διαδικασία CVS που περιγράφηκε παραπάνω για την μέτρηση των ρύπων CO, HC και NO_x ισχύει τόσο για κινητήρες Otto όσο και για κινητήρες Diesel, με την εξαίρεση της μέτρησης των HC, όπου στους κινητήρες Diesel λόγω του βαρύτερου καυσίμου που χρησιμοποιείται, τα καυσαέρια περιέχουν HC με σχετικά υψηλό σημείο υγροποίησης. Για το λόγο αυτό, αν γινόταν η συλλογή τους σε σάκους, θα υπήρχε σημαντική συμπύκνωση των HC στα τοιχώματα των σάκων με αποτέλεσμα τη λανθασμένη ένδειξη μέτρησης. Έτσι, χρησιμοποιείται ένας θερμαινόμενος σωλήνας δειγματοληψίας, όπου αντλείται μία μικρή ποσότητα δείγματος, προκειμένου να οδηγηθεί στον αντίστοιχο αναλυτή.

Για την μέτρηση των σωματιδίων, ένα δείγμα της συνολικής ροής από τη σήραγγα ανάμιξης εξάγεται και περνάει κατευθείαν, ή μέσω δεύτερης ανάμιξης, στο σύστημα δειγματοληψίας σωματιδίων, όπου τα σωματίδια συλλέγονται σε φίλτρα από fiber-glass επικαλυμμένα με τεφλόν. Για την εξασφάλιση της δυνατότητας να αναπαραχθεί η μέτρηση ασταθών συστατικών που απορροφώνται από το φίλτρο, είναι απαραίτητο το φίλτρο να ισορροπεί σε ορισμένη θερμοκρασία και επίπεδο υγρασίας. Η εκπομπή σωματιδίων καθορίζεται από την ολική μάζα που συλλέγεται στα φίλτρα κατά τη διάρκεια του μεταβατικού κύκλου (**ζύγιση των φίλτρων πριν και μετά τη δειγματοληψία με εξαιρετική ακρίβεια συμπεριλαμβανομένων ακόμα και των φαινομένων άνωσης**). Για τη σύγκριση με τα όρια των προτύπων εκπομπών, υπολογίζεται μία **μέση τιμή** κατά τον μεταβατικό κύκλο (g/km ή g/kWh αναλόγως για τι όχημα και δυναμόμετρο πρόκειται) που αφορά και τις αέριες αλλά και τις στερεές σωματιδιακές εκπομπές.

Στο **Σχήμα 4.4** που ακολουθεί, αναπαρίσταται η διαδικασία της δειγματοληψίας σταθερού όγκου CVS με αντλία θετικής εκτόπισης που χρησιμοποιείται κατά την πιστοποίηση πετρελαιοκίνητων οχημάτων στην Ε.Ε.



Σχήμα 4.4: Δειγματοληψία σταθερού όγκου CVS με αντλία θετικής εκτόπισης για πιστοποίηση πετρελαιοκίνητων οχημάτων στην Ε.Ε. [10]

4.3 Παγκόσμιος Κύκλος Πόλης WLTC⁴

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η οποία ήταν μεταξύ των περιοχών που πρωτοστάτησε ως προς τις προδιαγραφές και τα πρότυπα εκπομπών, οι ρύποι ελεγχόταν αρχικά από το 1970 έως το 1992 με βάση τον Κύκλο Δοκιμής ECE (εντός πόλης τμήμα). Στη συνέχεια, οι δοκιμές πραγματοποιούνταν με βάση τον κύκλο ECE+EUDC (εντός και εκτός πόλης τμήματα) ενώ από το 2000 (πρότυπο Euro 3) μέχρι τον 8/2017 ίσχυσε ο

⁴ Για επιπλέον λεπτομέρειες βλ. Παραπομπή [11] από την οποία προέρχεται η ανάλυση του παρόντος κεφαλαίου

κύκλος **NEDC**, ο οποίος ήταν ίδιος με τον κύκλο ECE+EUDC με τη διαφορά της έναρξης δειγματοληψίας που άρχιζε αμέσως μετά την ψυχρή εκκίνηση του κινητήρα.

Όμως, ο **Ευρωπαϊκός Κύκλος Πόλης NEDC** δέχθηκε έντονη κριτική εξαιτίας της απλοϊκής σχεδίασής του, των μη έντονων επιταχύνσεων, των μεγάλων τμημάτων με σταθερή ταχύτητα του οχήματος και των χαμηλών ταχυτήτων στο εκτός πόλης τμήμα. Προέκυψε, λοιπόν, η ανάγκη ενός πιο αντιπροσωπευτικού και ρεαλιστικού Κύκλου Πόλης ο οποίος ήταν ο **Παγκόσμιος Κύκλος Πόλης WLTC** που ξεκίνησε να ισχύει από τον 9/2017 μαζί με την αντίστοιχη διαδικασία πιστοποίησης WLTP. [10]

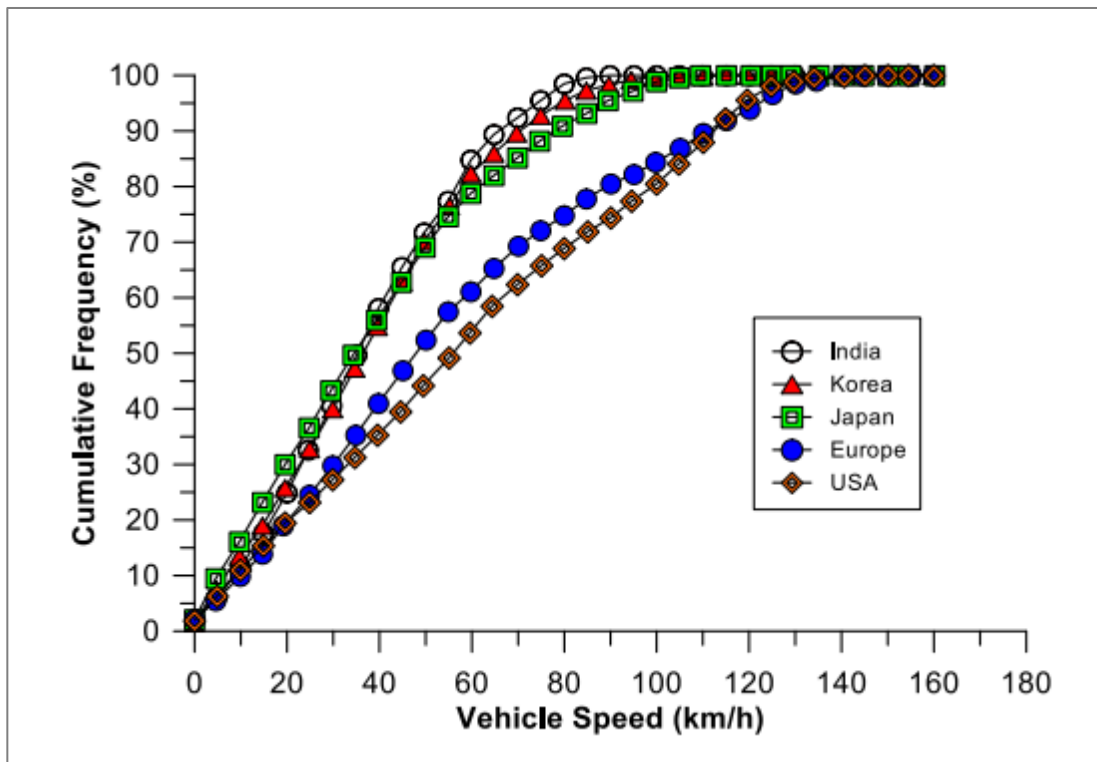
Αρχικά, κατά τη σύνοδο του 11/2007, η Παγκόσμια Επιτροπή για την Εναρμόνιση των Κανονισμών Οχημάτων (WP.29) της ΟΕΗΕ (Οικονομική Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για την Ευρώπη-UNECE) αποφάσισε, στο πλαίσιο της ομάδας εργασίας για τη ρύπανση και την ενέργεια (GRPE), τη σύσταση μιας ανεπίσημης ομάδας για την ανάπτυξη μιας πρότυπης παγκόσμιας **διαδικασίας πιστοποίησης (Worldwide harmonized light-duty vehicles test procedure-WLTP), και του αντίστοιχου Κύκλου WLTC**, ώστε να επιτευχθεί η κατά το δυνατό καλύτερη εναρμόνιση των διαδικασιών δοκιμών που σχετίζονται με τις εκπομπές καυσαερίων οχημάτων ελαφρού τύπου. Η υλοποίηση του εν λόγω προγράμματος περιείχε τις τρεις παρακάτω φάσεις:

- **Φάση 1 (2009-2014):** Ανάπτυξη του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης (Worldwide harmonized light-duty driving test cycle-WLTC) που αντικατοπτρίζει πραγματικές συνθήκες οδήγησης, καθώς και τη διαδικασία ελέγχου για τη μέτρηση των ρύπων, του διοξειδίου του άνθρακα CO₂ και της κατανάλωσης καυσίμου και ενέργειας.
- **Φάση 2 (2014-2018):** Διαδικασία δοκιμής σε χαμηλές θερμοκρασίες/μεγάλο υψόμετρο, αντοχή, συμμόρφωση με τα πρότυπα κατά τη χρήση, τεχνικές προδιαγραφές για ενσωματωμένο διαγνωστικό σύστημα στο όχημα (onboard diagnostics-OBD), ενεργειακή απόδοση κινητού συστήματος κλιματισμού, εκπομπές ρύπων εκτός δρόμου/σε πραγματικές συνθήκες οδήγησης.
- **Φάση 3 (από το 2018):** Όρια εκπομπών ρύπων και οριακές τιμές των διαγνωστικών συστημάτων, καθορισμός των καυσίμων αναφοράς, σύγκριση με τις απαιτήσεις κάθε περιοχής.

Η ανάπτυξη του νέου Κύκλου άρχισε τον 9/2009, η συλλογή δεδομένων οδήγησης ξεκίνησε το 2010 και η πρόταση για την πρώτη έκδοση του Κύκλου έγινε στα μέσα του 2011. Ο Κύκλος υπέστη αρκετές αναθεωρήσεις ώστε να ληφθούν υπόψη τεχνικά ζητήματα όπως η οδηγησιμότητα και η καλύτερη αναπαράσταση των συνθηκών οδήγησης μετά από μια πρώτη εκτίμηση του Κύκλου. Η ανάπτυξη της διαδικασίας WLTP παρακολούθηθηκε στενά από διάφορες ενδιαφερόμενες αρχές (κυβερνήσεις, βιομηχανίες, μη κυβερνητικές οργανώσεις). Στη συνέχεια, το έτος 2010 η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (U.S. EPA) αποφάσισε να αποσυρθεί από την ενεργό συμμετοχή της στην ανάπτυξη της διαδικασίας WLTP, εξαιτίας των δραστικών προετοιμασιών για τη θέσπιση των Αμερικανικών προτύπων εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου για τις χρονικές περιόδους 2012-2016 και 2017-2025. Μολονότι οι ΗΠΑ αποχώρησαν, το πρόγραμμα συνεχίστηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση, τη Νότια Κορέα, την Ινδία και την Ιαπωνία.

Για την ανάπτυξη του Παγκόσμιου Κύκλου WLTC, συλλέχθηκαν δεδομένα οδήγησης από όλες τις συμμετέχουσες χώρες και σταθμίστηκαν σύμφωνα με τη σχετική συμβολή των περιοχών στις παγκόσμιες χλιομετρικές αποστάσεις και στα δεδομένα που συλλέχθηκαν για τη διαδικασία WLTP. Τα δεδομένα οδήγησης που συλλέχθηκαν αφορούσαν συνολικά 766.000 km και αποτελούνταν επιμέρους από:

- 462.000 km από την Ευρώπη (συμμετέχουσες χώρες ήταν το Βέλγιο, η Γαλλία, η Γερμανία, η Ιταλία, η Πολωνία, η Σλοβενία, η Ισπανία, η Σουηδία, η Ελβετία και το Ηνωμένο Βασίλειο)
- 56.000 km από την Ινδία
- 53.000 km από την Ιαπωνία
- 34.000 km από τη Νότια Κορέα
- 160.000 km από τις ΗΠΑ



Σχήμα 4.5: Συχνότητα εμφάνισης ταχύτητας οχήματος για τις διάφορες περιοχές από όπου συλλέχθηκαν τα δεδομένα οδήγησης για τον Κύκλο WLTC [11]

Πιο αναλυτικά, χρησιμοποιήθηκαν 394 οχήματα από διάφορους κατασκευαστές, κινητήρων διαφόρων κατηγοριών κυβισμού και με αναλογία ισχύος προς μάζα από 9 έως 120 kW/t. Το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών των δεδομένων αφορούσε επιβατικά αυτοκίνητα, όμως, στη βάση δεδομένων εισήχθησαν και φορτηγά ελαφρού τύπου αλλά και μικρά λεωφορεία. Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε από έναν συνδυασμό οχημάτων τα οποία ήταν κατάλληλα εξοπλισμένα με όργανα (Ευρώπη, Ινδία και ΗΠΑ), οδηγούς με συγκεκριμένες οδηγίες (Ιαπωνία, Νότια Κορέα, Ινδία και ΗΠΑ) και απλά οχήματα (μόνο για τις ΗΠΑ).

Ο διαχωρισμός των δεδομένων (έπειτα από κατάλληλη «αραίωση» και ομαλοποίηση) σε μικρό-διαδρομές και φάσεις ρελαντί πραγματοποιήθηκε με βάση τις πρακτικές κατασκευής των κοινών κύκλων. Εν αντιθέσει με τις προηγούμενες προσεγγίσεις ανάπτυξης Κύκλων Πόλης, οι οποίες είχαν ως κριτήριο την κατηγοριοποίηση των δρόμων, δηλαδή σε αστική (urban), σε αγροτική (rural) και σε αυτοκινητόδρομο (motorway), ακολουθήθηκε διαφορετική προσέγγιση κατά την ανάπτυξη του WLTC αφού οι οδικές κατηγοριοποιήσεις και τα όρια ταχύτητας παρουσιάζουν τεράστιες διαφοροποιήσεις ανά περιοχή. Αυτό παρατηρείται κυρίως όταν συγκρίνεται η Ευρωπαϊκή (ή η Αμερικανική) με την Ασιατική βάση δεδομένων (βλ. **Σχήμα 4.5**). Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε σύγκλιση στον τύπο των αστικών οδών, όπου διαπιστώθηκε

μεγάλος βαθμός συσχέτισης ανά τον κόσμο. Για την κατασκευή του WLTC, οι μικρό-διαδρομές κατηγοριοποιήθηκαν με βάση την ταχύτητά τους, αρχικά σε τρεις φάσεις, δηλαδή χαμηλή, μέση και υψηλή. Εν συνεχεία, η φάση της υψηλής ταχύτητας χωρίστηκε σε δύο επιμέρους τμήματα: μία φάση υψηλής ταχύτητας με μέγιστη ταχύτητα αντιπροσωπευτική της οδήγησης στην Ασία και μία φάση εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας, χαρακτηριστική της οδήγησης αυτοκινητοδρόμου στην Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Οι εν λόγω τέσσερις φάσεις κατηγοριοποιούνται με βάση την ταχύτητα και έχουν ως εξής:

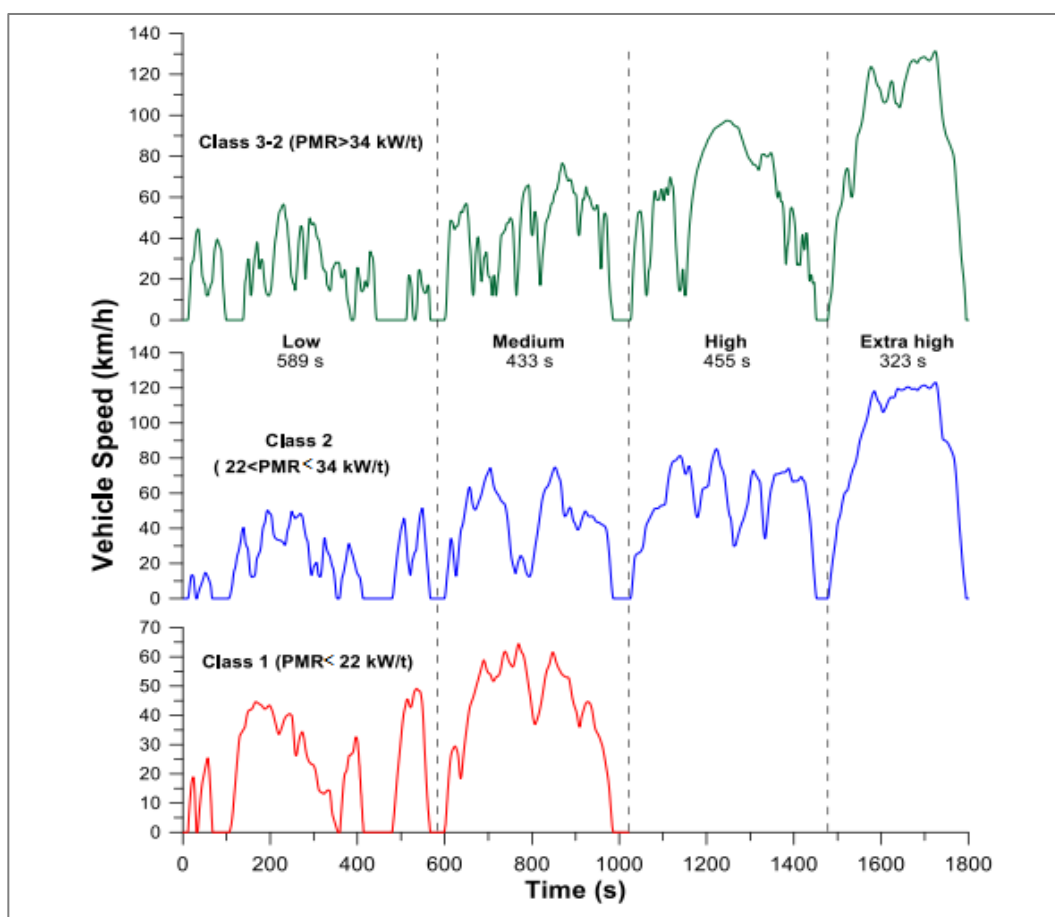
- **Χαμηλή** (έως 60 km/h), αποτελούμενη κατά 97,1% από αστικές διαδρομές
- **Μεσαία** (60-80 km/h), αποτελούμενη κατά 80,7% από αστικές διαδρομές και κατά 19,2% από επαρχιακές
- **Υψηλή** (80-110 km/h), αποτελούμενη κατά 28,3% από αστικές διαδρομές και κατά 71,5% από επαρχιακές
- **Υπερ-υψηλή** (άνω των 110 km/h), αποτελούμενη κατά 12% από αστικές διαδρομές, κατά 55% από επαρχιακές και κατά 32,9% από διαδρομές σε αυτοκινητόδρομο

Στον παρακάτω **Πίνακα 4.1** παρουσιάζονται κάποιες τεχνικές προδιαγραφές του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC για διάφορες περιοχές αναλόγως των κατηγοριών ταχύτητας που προαναφέρθηκαν. Ο Παγκόσμιος Κύκλος Πόλης WLTC αναπτύχθηκε σε τρεις κλάσεις σε σχέση με την **αναλογία ισχύος-μάζας (Power to Mass Ratio-PMR)** ενός οχήματος (η διάρκεια κάθε ενδιάμεσου τμήματος είναι μεταξύ των τάξεων), οι οποίες έχουν όπως παρακάτω:

- **Κλάση WLTC 3 (PMR > 34 kW/t)**, στην οποία εντάσσονται δύο εκδοχές του Κύκλου: η εκδοχή 3-1 (ή 3a) για οχήματα με μέγιστη ταχύτητα μικρότερη από 120 km/h και η εκδοχή 3-2 (ή 3b) για οχήματα με μέγιστη ταχύτητα άνω των 120 km/h. Κατ' επιλογή της χώρας, η εξαιρετικά υψηλή φάση μπορεί να αποκλειστεί, π.χ. στην Ινδία ή στην Κίνα. Η κλάση 3-1 αναπτύχθηκε για να εξυπηρετήσει την ειδική κατηγορία οχημάτων k-cars στην Ιαπωνία.
- **Κλάση WLTC 2 (22 kW/t < PMR < 34 kW/t)**, η οποία είναι σχεδιασμένη για χαμηλότερης ισχύος οχήματα, έχει τέσσερις φάσεις ταχύτητας όπως η WLTC Class 3 αλλά με μικρότερες επιταχύνσεις και μέγιστες ταχύτητες σε κάθε φάση. Κατ' επιλογή της χώρας, η εξαιρετικά υψηλή φάση μπορεί να αποκλειστεί και στην κατηγορία αυτή.
- **Κλάση WLTC 1 (PMR < 22 kW/t)**, η οποία εφαρμόζεται σε οχήματα με το χαμηλότερο λόγο ισχύος-μάζας και έχει σχεδιαστεί για να έχει μόνο τις φάσεις χαμηλής και μεσαίας ταχύτητας. Ο πλήρης κύκλος δοκιμής για την έγκριση συμμόρφωσης του οχήματος με τις προδιαγραφές της εκάστοτε χώρας περιλαμβάνει τη χαμηλή, τη μεσαία και ξανά τη χαμηλή φάση.

Πίνακας 4.1: Τεχνικές προδιαγραφές των δεδομένων του Κύκλου WLTC για διάφορες περιοχές [11]

	Japan	Europe	USA	S. Korea	India	Unified
Relative Positive Acceleration (m/s²)						
Low	0,177	0,200	0,245	0,192	0,134	0,192
Medium	0,142	0,176	0,225	0,174	0,142	0,188
High	0,117	0,144	0,164	0,139	0,162	0,156
Extra high	0,086	0,114	0,103	0,155	-	0,108
Average Speed (km/h)						
Low	19,8	20,0	18,8	17,2	21,1	19,8
Medium	40,1	39,9	37,0	34,1	39,5	38,4
High	62,9	55,6	59,7	53,9	56,1	58,0
Extra high	86,2	83,1	90,1	67,6	-	86,8
Average Idle Duration (s)						
Low	26,5	15,6	24,9	29,2	23,1	21,9
Medium	25,6	16,6	22,3	39,8	24,6	22,4
High	21,5	18,4	20,1	34,2	46,2	22,8
Extra high	15,5	17,1	12,2	22,1	-	14,5
Average Short-trip Duration (s)						
Low	66	68	63	64	148	84
Medium	161	221	125	201	642	238
High	458	473	284	691	1157	446
Extra high	1158	1082	601	1621	-	824



Σχήμα 4.6: Ταχύτητα οχήματος συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια του Κύκλου Πόλης WLTC [11]

Όπως διαφαίνεται και από το Σχήμα 4.6, η μέγιστη διάρκεια του κύκλου είναι 1800 δευτερόλεπτα, παρόμοια με τους προγενέστερους κύκλους βαρέων οχημάτων (Worldwide Test Cycle for Heavy-Duty Vehicles-WTVC) και μοτοσυκλετών (Worldwide Motorcycle Test Cycle-WMTC). Η εν λόγω διάρκεια του κύκλου θεωρήθηκε ως ένας αποδεκτός συμβιβασμός μεταξύ της στατιστικής αντιπροσωπευτικότητας και της εφικτής δοκιμής στο εργαστήριο.

Όσον αφορά τη χρονική διάρκεια κάθε τμήματος του Κύκλου, πραγματοποιήθηκε με τέτοιο τρόπο που να αντιπροσωπεύει την κατανομή των διανυθέντων χιλιομέτρων μεταξύ των φάσεων, με αποτέλεσμα να μην απαιτούνται συντελεστές στάθμισης για το τελικό αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα, το **χαμηλό** τμήμα διαρκεί 589 δευτερόλεπτα (5 μικρό-διαδρομές και 6 στάσεις), το **μέσο** 433 sec (1 μικρό- διαδρομή, 2 στάσεις), το **υψηλό** 455 sec (1 μικρό-διαδρομή, 2 στάσεις) και το **υπερ-υψηλό** 323 sec (1 μικρό-διαδρομή, 2 στάσεις).

Στη συνέχεια, και στον Πίνακα 4.2, συνοψίζονται οι κύριες τεχνικές προδιαγραφές όλων των κλάσεων του Παγκόσμιου Κύκλου WLTC, ενώ στον Πίνακα 4.3 γίνεται μια περαιτέρω ανάλυση της Κλάσης 3-2, η οποία χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία και είναι αντιπροσωπευτική της κίνησης σε μία Ευρωπαϊκή χώρα παρέχοντας δεδομένα και για τις τέσσερις φάσεις ταχυτήτων.

Πίνακας 4.2: Σύνοψη κύριων τεχνικών προδιαγραφών των κλάσεων του Κύκλου Πόλης WLTC [11]

Class	Duration (s)	Distance (m)	Max. Speed (km/h)	Average Speed (km/h)	Max. Accel. (m/s ²)	Idling Time (%)	RPA (m/s ²)
1	1022	8.098	64,4	28,5	0,81	18,8	0,083
2	1800	22.649	123,1	45,3	0,97	12,8	0,119
3-1	1800	23.194	131,3	46,4	1,67	12,6	0,154
3-2	1800	23.266	131,3	46,5	1,67	12,6	0,159

Πίνακας 4.3: Σύνοψη κύριων τεχνικών προδιαγραφών της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC [11]

Segment	Duration (s)	Distance (m)	Max. Speed (km/h)	Average Speed (km/h)	Max. Accel. (m/s ²)	Idling Time (%)	RPA (m/s ²)
Low	589	3.094	56,5	18,9	1,61	24,4	0,219
Medium	433	4.756	76,6	39,5	1,61	10,9	0,206
High	455	7.162	97,4	56,7	1,67	6,4	0,138
Extra high	323	8.254	131,3	92,0	1,06	1,9	0,127

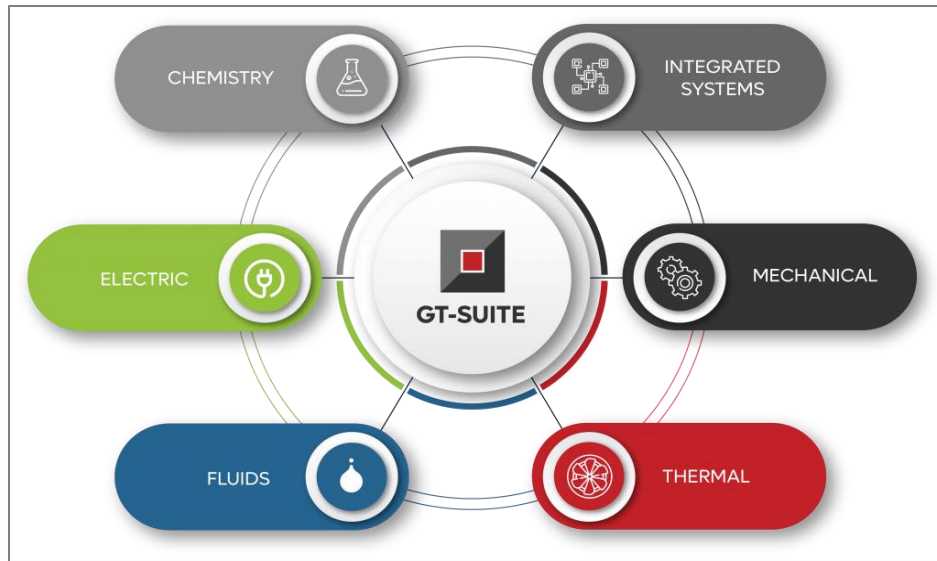
5. Ανάπτυξη του μοντέλου μέσω του υπολογιστικού πακέτου GT-Power

5.1 Γενικά για το GT-Suite

Το υπολογιστικό πρόγραμμα GT-Suite είναι εκ των κορυφαίων εργαλείων προσομοίωσης στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας. Προσφέρει στους μηχανικούς λειτουργίες που κυμαίνονται από γρήγορη σχεδίαση μιας ιδέας έως λεπτομερείς αναλύσεις συστημάτων ή υποσυστημάτων/εξαρτημάτων, βελτιστοποίηση σχεδίασης και διερεύνηση βασικών αιτιών. Αποτελεί ένα προϊόν της εταιρείας παραγωγής εξειδικευμένου λογισμικού Gamma Technologies με έδρα τις ΗΠΑ, η οποία απευθύνεται στη βιομηχανία κινητήρων και οχημάτων. Διαθέτει ένα περιβάλλον το οποίο είναι κατάλληλο για την εικονική αναπαράσταση των κινητήρων, των συστημάτων μετάδοσης κίνησης και των συστημάτων (μετ)επεξεργασίας καυσαερίων. [12] Το εν λόγω λογισμικό πέραν των πολλών επιστημονικών κλάδων που σχετίζεται (μηχανική ρευστών, μηχανολογία, ηλεκτρολογία, χημεία, θερμοδυναμική, κλπ.), περιλαμβάνει μία μεγάλη ποικιλία εφαρμογών, μερικές εκ των οποίων παρατίθενται στη συνέχεια (βλ. και **Σχήμα 5.1**):

- Επιδόσεις και ακουστική κινητήρων
- Συστήματα μετ(επεξεργασίας) καυσαερίων
- Συστήματα ψύξης και ενεργειακή διαχείριση οχήματος
- Κλιματισμός / Ανάκτηση θερμότητας καυσαερίων
- Εγχυτήρες καυσίμου
- Υδραυλικά και πνευματικά συστήματα
- Κυκλώματα λίπανσης
- Απόδοση και εξοικονόμηση καυσίμου με υβριδικά-ηλεκτρικά οχήματα
- Κιβώτια ταχυτήτων και συστήματα μετάδοσης κίνησης
- Δυναμική στροφαλοφόρων και εκκεντροφόρων
- Κινηματική και δυναμική των βαλβίδων
- Συστήματα χρονισμού και συστήματα ιμαντοκίνησης

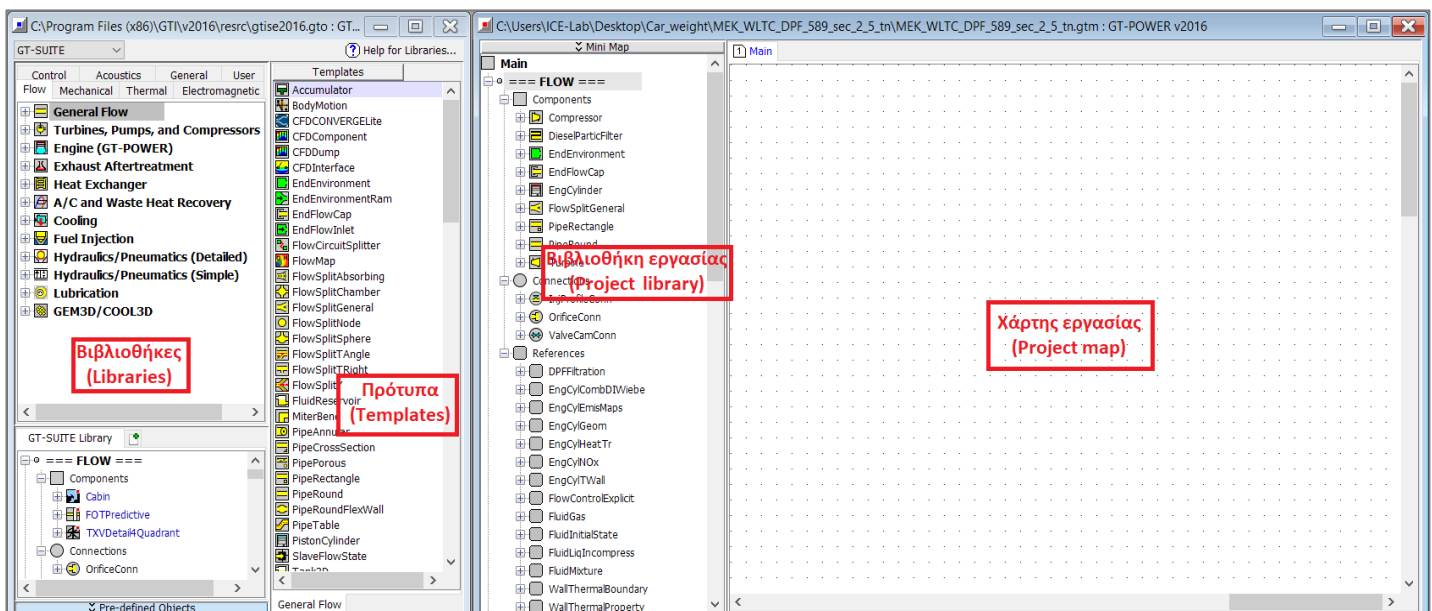
Η συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας βασίστηκε σε ένα εκ των υπο-προγραμμάτων του GT-Suite που αφορά τη μοντελοποίηση του κινητήρα, που ονομάζεται GT-Power.



Σχήμα 5.1: Πεδία εφαρμογών του υπολογιστικού προγράμματος GT-Suite [13]

5.2 Γενική επισκόπηση του περιβάλλοντος εργασίας του GT-Power

Το περιβάλλον εργασίας του GT-Power αποτελείται από τις **βιβλιοθήκες (libraries)**, οι οποίες αναλόγως τον τομέα μελέτης του χρήστη (π.χ. ροϊκά, θερμικά, μηχανικά, ηλεκτρομαγνητικά, ακουστικά φαινόμενα), περιλαμβάνουν και τα αντίστοιχα **πρότυπα (templates)**. Το κάθε πρότυπο μόλις επιλεγεί από τον χρήστη έχει τα δικά του **χαρακτηριστικά (attributes)** που συμπληρώνονται σύμφωνα με την εφαρμογή που μελετάται. Εν συνεχεία, το πρότυπο μεταφέρεται από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος σε αυτή της εργασίας (project library), όπου πλέον γίνεται **αντικείμενο (object)**. Έτσι, τα αντικείμενα μπορούν να μεταφερθούν στον χάρτη εργασίας (project map) και εφόσον συνδεθούν μεταξύ τους κατάλληλα, να αποτελούν τα **μέρη (parts)** του συστήματος που σχεδιάζει ο χρήστης. Μία απεικόνιση του περιβάλλοντος εργασίας του GT-Power δίνεται στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Περιβάλλον εργασίας του υπολογιστικού προγράμματος GT-Power

Με τη σύνδεση των μερών στον χάρτη εργασίας δημιουργείται μία μονοδιάστατη απεικόνιση του κινητήρα, των συστημάτων πολλαπλής εισαγωγής-εξαγωγής, του συστήματος στροβιλο-υπερπλήρωσης, των αντIRRυπαντικών συσκευών, του οχήματος, του Κύκλου Πόλης αλλά και των συστημάτων ελέγχου. Ακολουθεί η έναρξη της προσομοίωσης, όπου ο χρήστης με την επιλογή του Case Setup έχει τη δυνατότητα να τρέξει διάφορα σενάρια μόνιμης ή μεταβατικής κατάστασης. Τα αποτελέσματα που δύναται να επεξεργαστούν από τον χρήστη δίνονται μέσω του προγράμματος **GT-Post**, όπου παρέχεται η δυνατότητα αξιοποίησης και ανάλυσης αυτών είτε με διαγράμματα είτε με πίνακες.

5.3 Σχεδίαση του μοντέλου στο υπολογιστικό πρόγραμμα GT-Power

5.3.1 Μοντελοποίηση του κινητήρα στον χάρτη εργασίας του GT-Power

Ο κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε για προσομοίωση στην παρούσα διπλωματική εργασία βασίζεται στον **Mercedes-Benz OM3366LA**, ο οποίος είναι εγκατεστημένος στο Εργαστήριο MEK της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Ο εν λόγω κινητήρας είναι ένας 4-Χ στροβιλο-υπερπληρωμένος Diesel άμεσης έγχυσης με ενδιάμεσο ψυγείο του αέρα υπερπλήρωσης, με τα χαρακτηριστικά του να έχουν όπως στον παρακάτω Πίνακα 5.1.

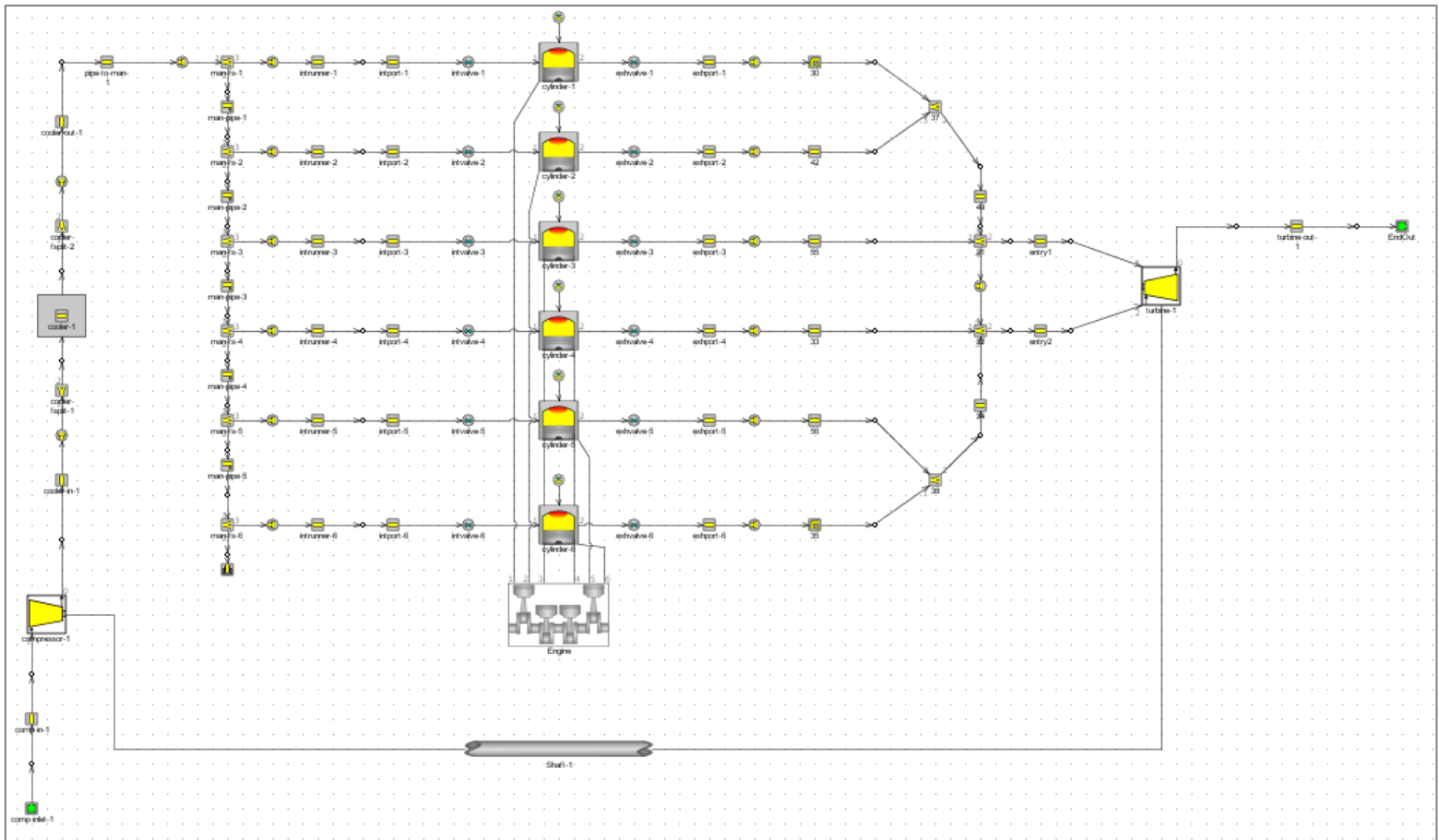
Πίνακας 5.1: Κύρια χαρακτηριστικά του κινητήρα Mercedes-Benz OM3366LA

Περιγραφή μεγέθους	Τιμή
Διάμετρος εμβόλου	$D = 97,5 \text{ mm}$
Διαδρομή εμβόλου	$S = 133 \text{ mm}$
Ακτίνα στροφάλου	$r = 66,5 \text{ mm}$
Μήκος διωστήρα	$L = 230 \text{ mm}$
Γωνία στροφάλου κατά τη στιγμή ανοίγματος της βαλβίδας εξαγωγής	$\phi = 112^\circ$ μετά το ΑΝΣ
Βαθμός συμπίεσης	$\epsilon = 18$
Αριθμός κυλίνδρων	$z = 6$ εν σειρά
Επιζήμιος όγκος κάθε κυλίνδρου	$V_c = 58,4 \text{ cm}^3$
Μέγιστη ισχύς	$P_{\max} = 177 \text{ kW} = 237 \text{ HP}$
Ροπή αδράνειας κινητήρα	$\Theta_e = 0,87 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

Όσον αφορά τον ολικό όγκο εμβολισμού του κινητήρα, υπολογίζεται εύκολα από την παρακάτω σχέση:

$$V_H = z \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot S \rightarrow V_H = 5958 \text{ cm}^3$$

Η σειρά αναφλέξεως των κυλίνδρων είναι **1-5-3-6-2-4** με δύο πολλαπλές εξαγωγής και τρεις, κατάλληλους από πλευράς διεργασίας εξαγωγής, κυλίνδρους συνδεδεμένους σε κάθε μία. Η επίλυση των θερμοδυναμικών διεργασιών εντός του κυλίνδρου πραγματοποιείται **ανά γωνία στροφάλου** ενώ η επίλυση των εξισώσεων στις πολλαπλές εξαγωγής γίνεται με τη **μέθοδο των χαρακτηριστικών**. Η καύση μοντελοποιείται με τις σχέσεις του **Wiebe** ενώ η μεταφορά θερμότητας με τις σχέσεις του **Woschni**. Μια ολοκληρωμένη αναπαράσταση του κινητήρα στο χάρτη εργασίας του προγράμματος GT-Power παρουσιάζεται στο ακόλουθο **Σχήμα 5.3**.



Σχήμα 5.3: Ολοκληρωμένη αναπαράσταση 6κύλινδρου στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel στον χάρτη εργασίας του GT-Power

5.3.2 Μοντελοποίηση του οχήματος και του συστήματος μετάδοσης κίνησης στον χάρτη εργασίας του GT-Power

Ο κινητήρας που μοντελοποιήθηκε παραπάνω απαιτείται να συμπληρωθεί από το όχημα, τον οδηγό, τα επιμέρους συστήματα ελέγχου, το περιβάλλον καθώς και το σύστημα μετάδοσης κίνησης προκειμένου να προσομοιωθούν τα διάφορα σενάρια όπως θα δούμε και στη συνέχεια. Για να συμβεί αυτό, υπάρχει συγκεκριμένη διαδικασία ώστε να γίνει η ένωση όλων των κύριων συγκροτημάτων βήμα-βήμα. Παρακάτω θα αναλυθεί μεθοδικά η μοντελοποίηση όλων των προαναφερόμενων μερών.

α) Όχημα (Vehicle)

Το όχημα που μοντελοποιείται και χρησιμοποιείται ως όχημα αναφοράς (ονομαστικό) έχει τα κύρια χαρακτηριστικά που παρατίθενται στον παρακάτω **Πίνακα 5.2**:

Πίνακας 5.2: Κύρια χαρακτηριστικά του οχήματος αναφοράς

Περιγραφή μεγέθους	Τιμή
Μάζα οχήματος	$m_v = 3,5 \text{ tn}$
Μετωπική επιφάνεια οχήματος	$A_f = 3 \text{ m}^2$
Συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης	$C_d = 0,38$
Σχέσεις μετάδοσης κιβωτίου ταχυτήτων	$1^{\text{n}}-5,78:1$ $2^{\text{n}}-2,7:1$ $3^{\text{n}}-1,9:1$ $4^{\text{n}}-1,25:1$ $5^{\text{n}}-1,0:1$ $6^{\text{n}}-0,9:1$
Ακτίνα τροχού οχήματος	$r_{\text{wheel}} = 0,35 \text{ m}$
Βαθμός απόδοσης γρاناζιών κιβωτίου ταχυτήτων	$\eta_{\text{gear}} = 0,96$

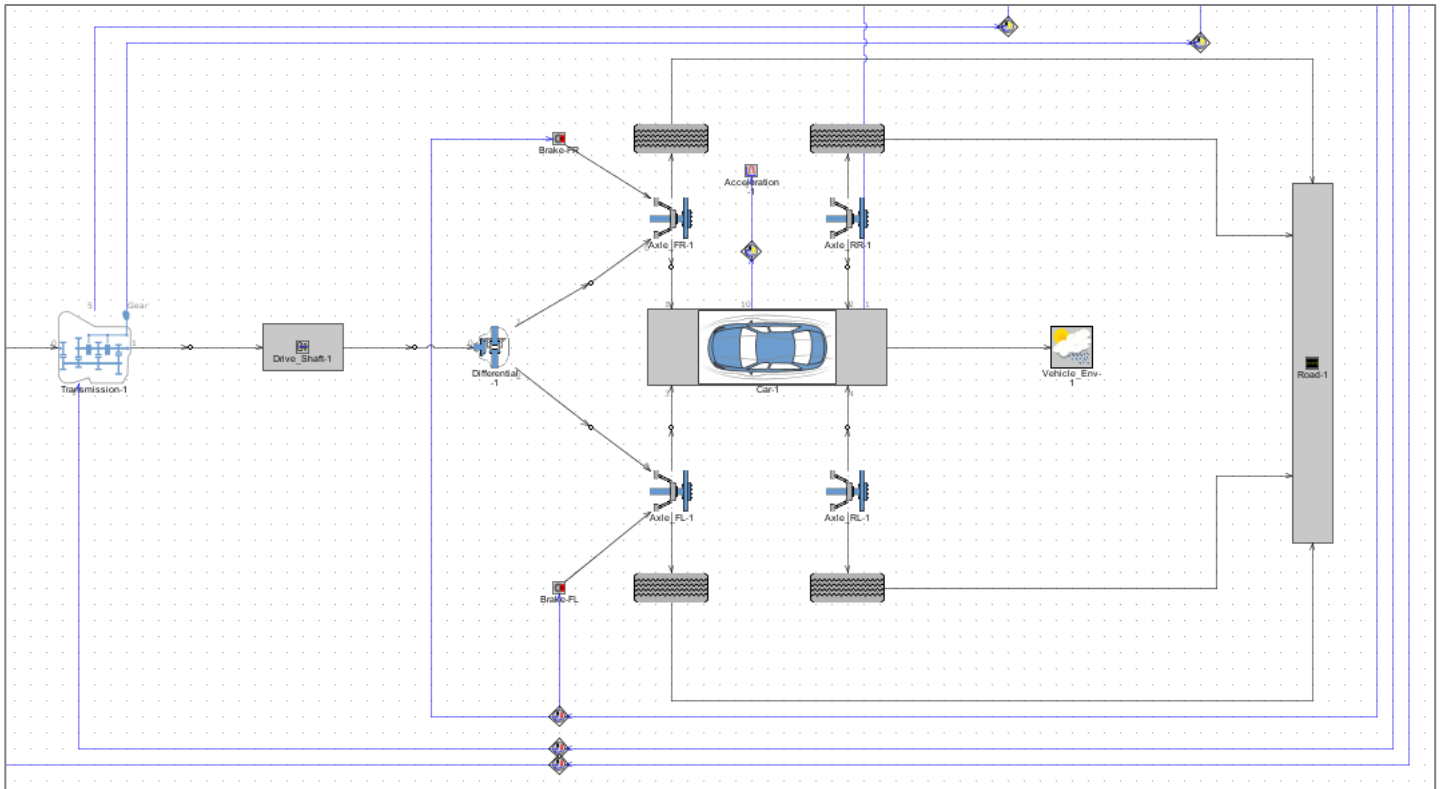
Ένα απλό παράδειγμα οχήματος με τα ανωτέρω χαρακτηριστικά έχει όπως στο **Σχήμα 5.4** που ακολουθεί, δηλαδή πρόκειται για ένα van.



Σχήμα 5.4: Παράδειγμα οχήματος με χαρακτηριστικά όπως εκείνου που χρησιμοποιείται κατά την προσομοίωση

Για τη σχεδίαση του οχήματος, ο χρήστης καλείται να εισαγάγει τα χαρακτηριστικά (attributes) του οχήματος. Στην αρχή, πραγματοποιείται ο προσδιορισμός της μάζας του οχήματος (αν υπάρχουν ή όχι φορτίο/επιβάτες) και της πυκνότητας του καυσίμου (ενδεικτικά 830 kg/m^3 για πετρέλαιο diesel). Επιπρόσθετα, προσδιορίζονται τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του οχήματος όπως ο συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης C_d και η μετωπική επιφάνεια του οχήματος A_f , που όπως θα διαπιστωθεί και από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι βασικές παράμετροι. Τέλος, σειρά έχει ο προσδιορισμός των ελαστικών (συντελεστής κύλισης, γεωμετρία), των φρένων (συνδεδεμένα με σύστημα ελέγχου), των μεταξονίων (ροπή αδράνειας και αρχικές συνθήκες), του περιβάλλοντος (πίεση και θερμοκρασία, άνεμος) καθώς και του οδοστρώματος (κλίση και αντίσταση).

Στο επόμενο **Σχήμα 5.5** παρουσιάζεται η τελική μορφή που έχει το όχημα (με τα επιμέρους συστήματα) στον χάρτη εργασίας του υπολογιστικού προγράμματος GT-Power συμπεριλαμβανομένου του περιβάλλοντος και του οδοστρώματος.



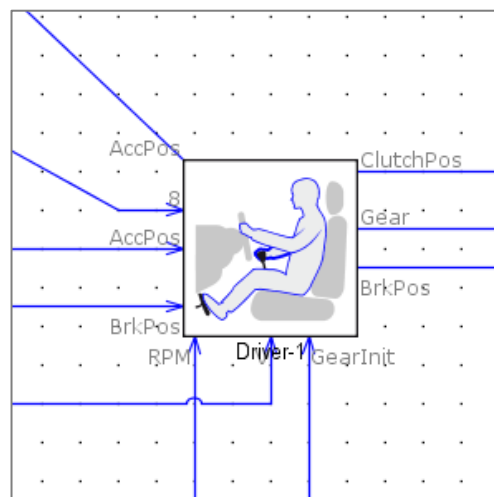
Σχήμα 5.5: Αναπαράσταση του οχήματος στον χάρτη εργασίας του GT-Power

β) Σύστημα μετάδοσης κίνησης (Drive-train system)

Το σύστημα μετάδοσης κίνησης καθώς και τα βασικά υποσυστήματά του σχεδιάστηκαν και συνδέθηκαν στο όχημα όπως περιγράφεται παρακάτω:

- **Διαφορικό (Differential)**: Αποτελεί τον μηχανισμό που αναλόγως της πληροφορίας που δέχεται σχετικά με την επαφή κάθε κινητήριου τροχού με το οδόστρωμα, διαμοιράζει τη ροπή της μηχανής στους άλλους τροχούς του οχήματος.
- **Κιβώτιο ταχυτήτων (Transmission)**: Είναι το συγκρότημα που συνδέεται τόσο με τον συμπλέκτη όσο και με το διαφορικό του οχήματος. Λειτουργεί με σχέσεις μετάδοσης, έτσι ώστε να κατανέμεται ομαλά η ισχύς του κινητήρα. Παράλληλα, το κιβώτιο ταχυτήτων συνδέεται με τον εικονικό οδηγό καθώς και τον ελεγκτή οχήματος αποσκοπώντας στην ακριβή εναλλαγή των σχέσεων μετάδοσης ανάλογα με τη διαδρομή του Κύκλου Πόλης.
- **Συμπλέκτης (Clutch)**: Είναι το στοιχείο εκείνο που ενώνει τη μηχανή εσωτερικής καύσης με το κιβώτιο ταχυτήτων, όπου με την κατάλληλη σύμπλεξη/αποσύμπλεξη –των δίσκων από τους οποίους αποτελείται– μεταφέρεται η αντίστοιχη ροπή/ισχύς.

- Ελεγκτής εκκίνησης (Driveaway): Είναι ένα σύστημα ελέγχου που σχετίζεται με την εκκίνηση της μηχανής του οχήματος και συνδέεται μεταξύ του κινητήρα και του εικονικού οδηγού.
- Ελεγκτής οχήματος (Controller vehicle): Αποτελεί το πλέον σημαντικό σύστημα ελέγχου, το οποίο ουσιαστικά πρόκειται για τον «εγκέφαλο» (ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου-ECU) ενός οχήματος. Ως σήμα εισόδου δέχεται την γενικότερη κατάσταση του οχήματος (ταχύτητα περιστροφής κινητήρα, αντίσταση ελαστικών στο οδόστρωμα, θέση σχέσης μετάδοσης στο κιβώτιο ταχυτήτων) και ως σήμα εξόδου δίνει πληροφορίες στον εικονικό οδηγό αναφορικά με το πεντάλ του πεντάλ επιτάχυνσης, φρένου ή συμπλέκτη προκειμένου να ακολουθηθεί το μοτίβο των σημείων λειτουργίας του Κύκλου Πόλης.
- Οδηγός (Driver): Ο εικονικός οδηγός είναι μια προσομοίωση ενός μέσου οδηγού που οδηγεί το όχημα με βάση τον Κύκλο Πόλης και τις πραγματικές συνθήκες του κινητήρα, ρυθμίζοντας κατάλληλα τον συμπλέκτη, τις αλλαγές στις σχέσεις μετάδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων αλλά και το πεντάλ επιτάχυνσης και φρένου. Με βάση το παρακάτω **Σχήμα 5.6**, γίνεται αντιληπτό το πόσο ρεαλιστικά έγινε η μοντελοποίηση, δηλαδή ο εικονικός οδηγός αλληλεπιδρά με τα υπόλοιπα συστήματα έχοντας μπροστά του τα τρία βασικά πεντάλ (επιτάχυνσης, φρένου, συμπλέκτη) και τον μηχανισμό αλλαγής σχέσεων μετάδοσης στο κιβώτιο ταχυτήτων όπως και ένας πραγματικός οδηγός. Για την υλοποίηση, όμως, έγινε η απαραίτητη εισαγωγή κάποιων χαρτών με σημεία λειτουργίας που προσφέρει το υπολογιστικό πρόγραμμα GT-Power. Πιο συγκεκριμένα, για το πεντάλ επιτάχυνσης εισήχθη ο χάρτης *ShiftAccel* που προσομοιάζει το πως ο οδηγός θα πιέζει το πεντάλ μετά τις αλλαγές ταχυτήτων. Επιπροσθέτως, για τον συμπλέκτη τριβής, προστέθηκαν οι χάρτες *ShiftClutch* και *DriveClutch* που προσομοιάζουν τη θέση του πεντάλ του συμπλέκτη κατά τις αλλαγές ταχυτήτων και κατά την οδήγηση στο δρόμο. Τέλος, εισάγονται από τον χρήστη κάποια χρονικά χαρακτηριστικά που αφορούν τη διάρκεια (σε χρόνο) των φαινομένων της εκκίνησης και της αλλαγής σχέσεως μετάδοσης στο κιβώτιο.

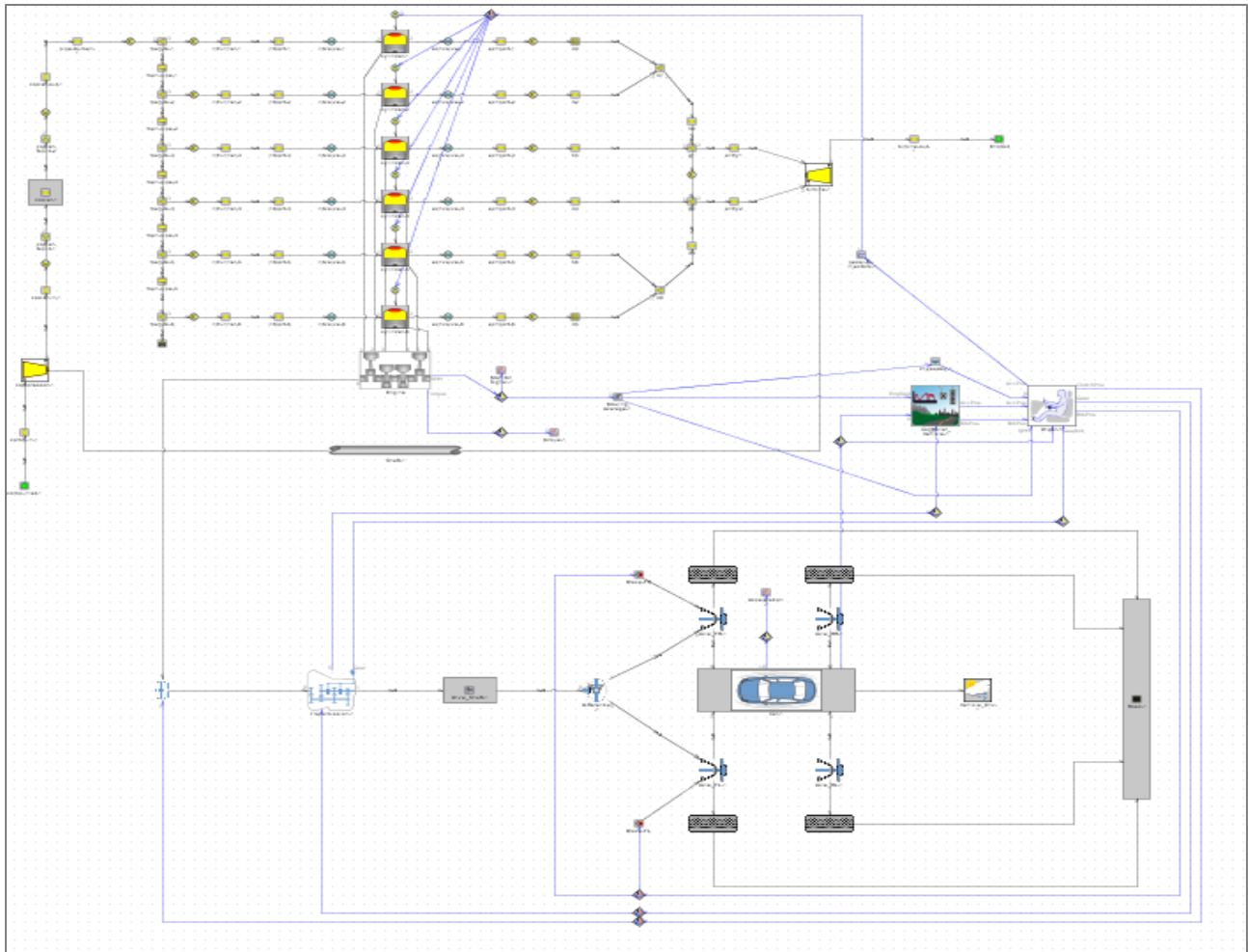


Σχήμα 5.6: Αναπαράσταση εικονικού οδηγού στον χάρτη εργασία του GT-Power

Στο σημείο αυτό, πρέπει να υπογραμμιστεί η σημαντικότητα του χάρτη της εγχεόμενης ποσότητας καυσίμου συναρτήσει του φορτίου (δηλαδή το πόσο πατάει ο οδηγός το πεντάλ της επιτάχυνσης). Συνδέει τον εικονικό οδηγό και έναν αισθητήρα (ενεργοποιητή) που δίνει εντολή στους εγχυτήρες καυσίμου των έξι κυλίνδρων για τον ψεκασμό της απαραίτητης ποσότητας καυσίμου.

Ο εικονικός οδηγός συνίσταται από **τρεις καταστάσεις**, ήτοι την **εκκίνηση**, την **αλλαγή ταχύτητας** και την **κανονική οδήγηση**. Πρακτικά, ο οδηγός λαμβάνει ως σήματα εισόδου τα ήδη διεγερμένα πεντάλ επιτάχυνσης *AccPos* και φρένου *BrkPos* από τον ελεγκτή οχήματος, και με κατάλληλη προσαρμογή προκύπτουν τα σήματα εξόδου που αφορούν τη θέση των πεντάλ επιτάχυνσης *AccPos*, φρένου *BrkPos*, συμπλέκτη *ClutchPos* και τη σχέση μετάδοσης στο κιβώτιο ταχυτήτων *Gear*. Σε περίπτωση που η κατάσταση αφορά την εκκίνηση, ο εικονικός οδηγός δέχεται σήμα μόνο από τον ελεγκτή εκκίνησης παραβλέποντας τον ελεγκτή οχήματος. Για την αλλαγή ταχύτητας, ο οδηγός παραβλέπει τα σήματα από τους ελεγκτές εκκίνησης και οχήματος, λειτουργώντας σύμφωνα με τους χάρτες που προαναφέρθηκαν για τον συμπλέκτη και το πεντάλ επιτάχυνσης. Κλείνοντας, αν απαιτείται η κανονική οδήγηση, τότε ο οδηγός συμπεριφέρεται με βάση τα σήματα εισόδου που λαμβάνει από τον ελεγκτή οχήματος.

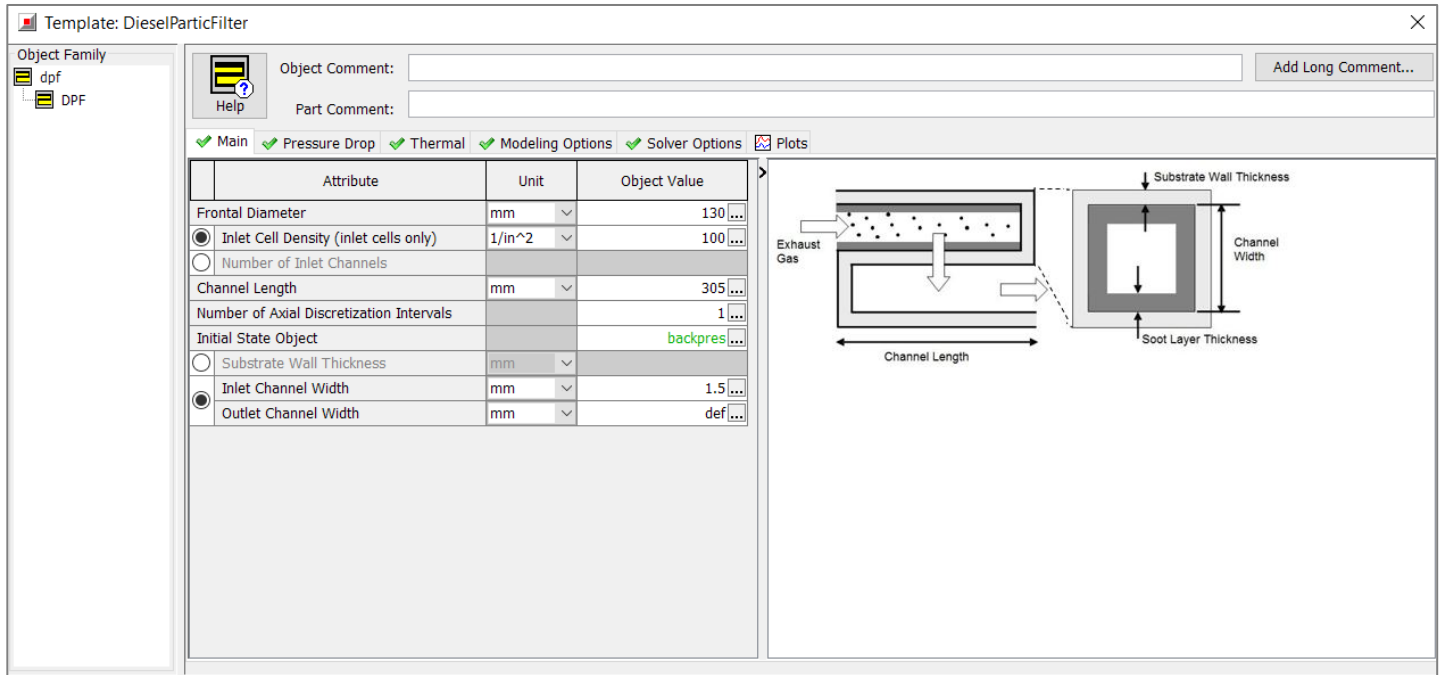
Εν κατακλείδι, με την μοντελοποίηση του οχήματος, του συστήματος μετάδοσης κίνησης και όλων των απαραίτητων υποσυστημάτων κατάλληλα συνδεδεμένα με τον κινητήρα Diesel, σειρά έχει η προσομοίωση με βάση τον Παγκόσμιο Κύκλο Πόλης WLTC (κλάση 3-2). Στην εν λόγω προσομοίωση προστίθεται το φίλτρο σωματιδίων αποσκοπώντας στην μελέτη της επίδρασής του στις επιδόσεις και τις εκπομπές του οχήματος. Η ανάλυση της μοντελοποίησης του φίλτρου θα πραγματοποιηθεί στην επόμενη υπο-ενότητα. Αξίζει να αναφερθεί ότι για την κάθε προσομοίωση για το χαμηλής ταχύτητας τμήμα εντός του Κύκλου Πόλης (διάρκειας 589 sec) απαιτήθηκε χρονικό διάστημα περίπου 38 ωρών (επεξεργαστής Intel Core i3 2.13 GHz και μνήμη RAM 4 GB). Μια ολοκληρωμένη αναπαράσταση του οχήματος, του συστήματος μετάδοσης κίνησης και του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC παρουσιάζεται στο ακόλουθο **Σχήμα 5.7**.



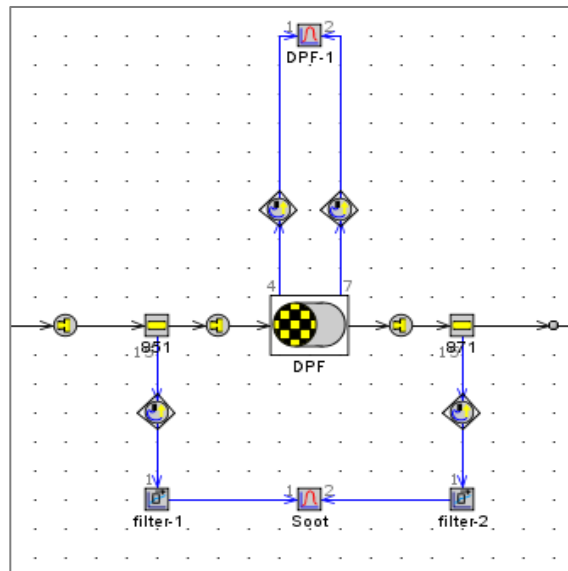
Σχήμα 5.7: Ολοκληρωμένη αναπαράσταση του οχήματος, του συστήματος μετάδοσης κίνησης και του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC στον χάρτη εργασίας του GT-Power

5.3.3 Μοντελοποίηση του φίλτρου σωματιδίων DPF (Diesel Particulate Filter) στον χάρτη εργασίας του GT-Power

Για την μοντελοποίηση του φίλτρου σωματιδίων είναι απαραίτητη από τον χρήστη η εισαγωγή των κύριων διαστάσεων του αντιρρυπαντικού συστήματος όπως η διάμετρος, η πυκνότητα των καναλιών του φίλτρου, το μήκος των καναλιών, η αδιαφάνεια όταν το φίλτρο είναι καθαρό κλπ. Παράλληλα, ορίστηκε το υλικό και η μέθοδος φιλτραρίσματος της αιθάλης. Επίσης, τοποθετήθηκαν αισθητήρες τόσο στην είσοδο/έξοδο του φίλτρου για τον υπολογισμό των σωματιδίων που κατακρατήθηκαν από το φίλτρο, όσο και εντός του φίλτρου για την παρακολούθηση της πτώσης πίεσης κατά μήκος του φίλτρου. Εν συνεχεία, παρατίθενται δύο σχήματα που δείχνουν αφενός την εισαγωγή των χαρακτηριστικών του φίλτρου (Σχήμα 5.8) και αφετέρου όλο το σύστημα του DPF με τους αισθητήρες στον χάρτη εργασίας του GT-Power (Σχήμα 5.9).

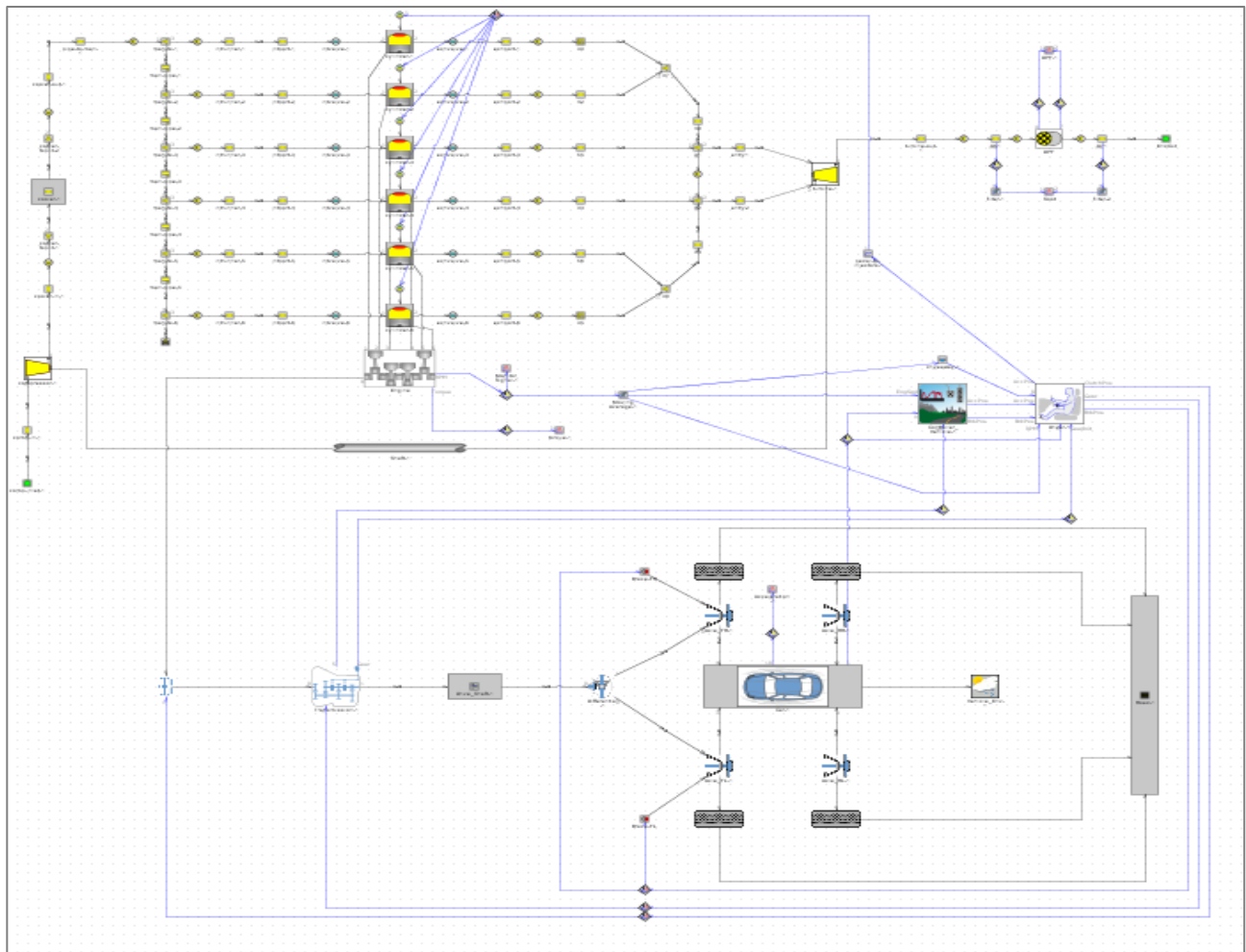


Σχήμα 5.8: Παρουσίαση των κύριων χαρακτηριστικών του φίλτρου σωματιδίων DPF που εισάγει ο χρήστης στο περιβάλλον του GT-Power



Σχήμα 5.9: Αναπαράσταση του φίλτρου σωματιδίων DPF και των αισθητήρων στον χάρτη εργασίας του GT-Power

Φτάνοντας στο τέλος του κεφαλαίου και από άποψη πληρότητας, στο επόμενο Σχήμα 5.10 παρουσιάζεται η ολοκληρωμένη μοντελοποίηση όλων των συστημάτων που περιγράφηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της διπλωματικής εργασίας.



Σχήμα 5.10: Ολοκληρωμένη αναπαράσταση του οχήματος, του συστήματος μετάδοσης κίνησης, του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC και του φίλτρου σωματιδίων DPF στον χάρτη εργασίας του GT-Power

6. Επιδόσεις και εκπομπές καυσαερίων με χρήση του συστήματος DPF

6.1 Εισαγωγικά

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που προέκυψαν μέσω του υπολογιστικού προγράμματος GT-Power. Υπενθυμίζεται ότι ο 6κύλινδρος υπερπληρωμένος κινητήρας Diesel πέραν του γεγονότος ότι «τρέχει» τον Παγκόσμιο Κύκλο Πόλης WLTC, διαθέτει το αντιρρυπαντικό σύστημα του φίλτρου σωματιδίων DPF. Αρχικά, παρατίθενται τα αποτελέσματα που αφορούν τις **επιδόσεις του κινητήρα και τις εκπομπές του οχήματος αναφοράς χωρίς DPF**, σε σύγκριση με ένα **ίδιο όχημα που διαθέτει DPF**. Ακολούθως, παρουσιάζονται κάποια **βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη του φίλτρου σωματιδίων** ώστε να σχηματιστεί μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα στο πως επιδρά εν γένει το συγκεκριμένο αντιρρυπαντικό σύστημα στη συμπεριφορά του οχήματος.

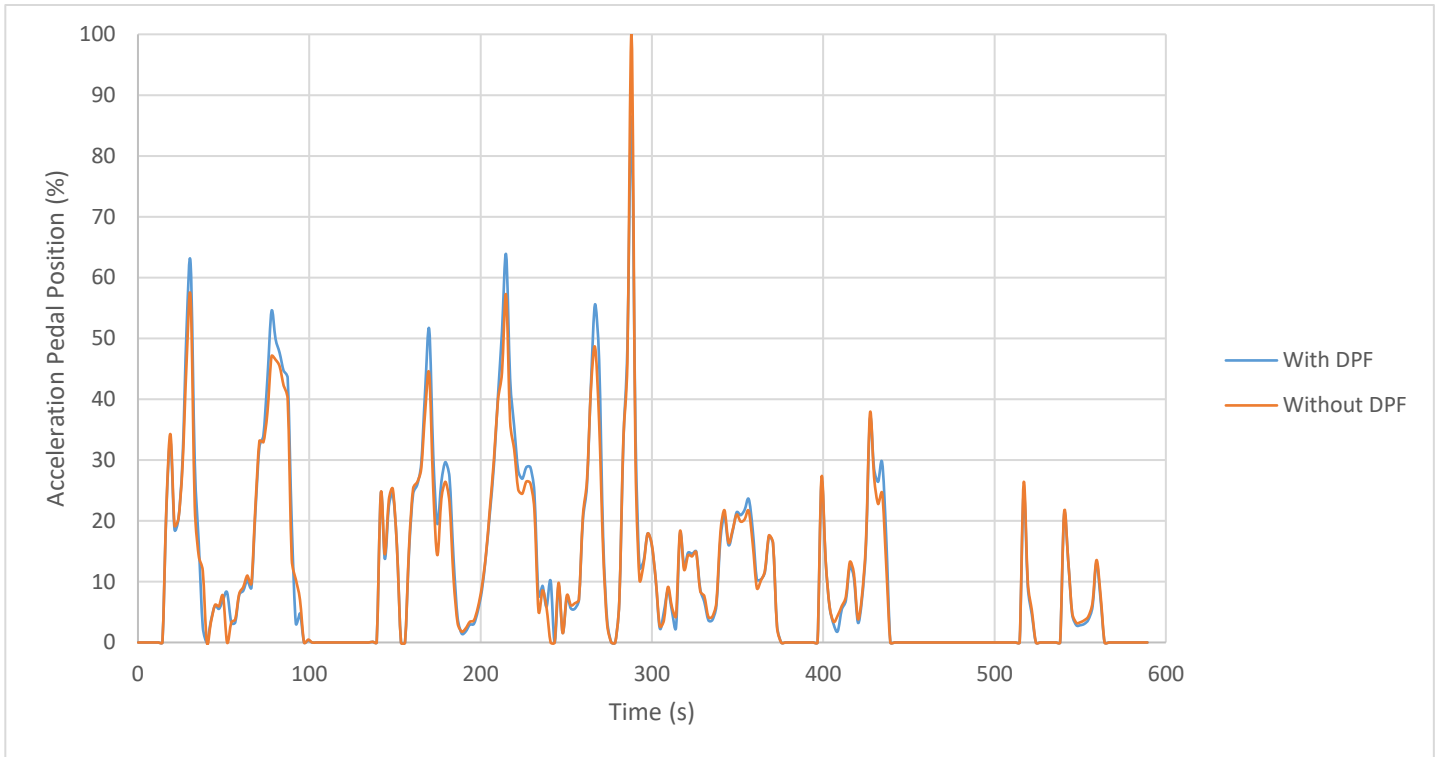
Τονίζεται ότι η προσομοίωση αφορά τα πρώτα **589 sec** του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC (εντός πόλης τμήμα), όπου όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, έχουμε τις μεγαλύτερες υπερακοντίσεις ρύπων (και ιδίως της αιθάλης) με αποτέλεσμα οι συγκρίσεις να είναι πιο χρήσιμες ως προς την κατανόησή τους.

6.2 Επιδόσεις του κινητήρα

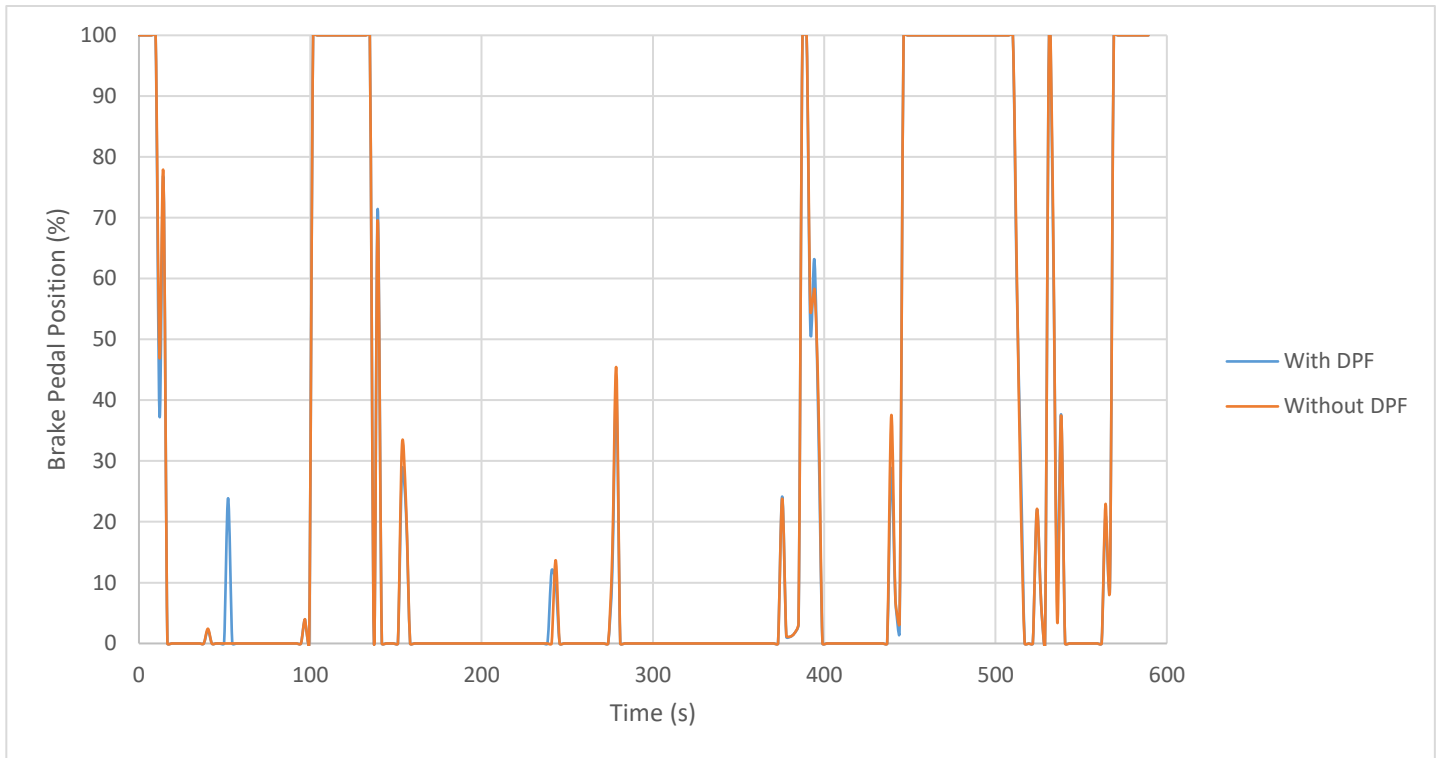
Στο σημείο αυτό, θα γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για το όχημα αναφοράς με και χωρίς τη χρήση φίλτρου σωματιδίων DPF, προκειμένου να γίνει κατανοητή η επίδραση του φίλτρου στις επιδόσεις του κινητήρα. Πιο συγκεκριμένα, τα διαγράμματα που θα παρατεθούν είναι:

- ❖ Πάτημα του πεντάλ επιτάχυνσης (%)
- ❖ Πάτημα του πεντάλ φρένου (%)
- ❖ Πάτημα του πεντάλ συμπλέκτη (%)
- ❖ Σχέση ταχύτητας στο κιβώτιο ταχυτήτων (-)
- ❖ Συνολικά διανυθείσα απόσταση του οχήματος (m)
- ❖ Ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα (RPM)
- ❖ Πραγματική ταχύτητα του οχήματος (km/h)
- ❖ Ροπή του κινητήρα (Nm)
- ❖ Ισχύς του κινητήρα (kW)
- ❖ Μέση πραγματική πίεση (bar)
- ❖ Ειδική κατανάλωση καυσίμου (g/kWh)
- ❖ Μέγιστη πίεση καύσης (bar)
- ❖ Βαθμός πλήρωσης (-)
- ❖ Παροχή μάζας καυσίμου (g/s)
- ❖ Λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου (-)

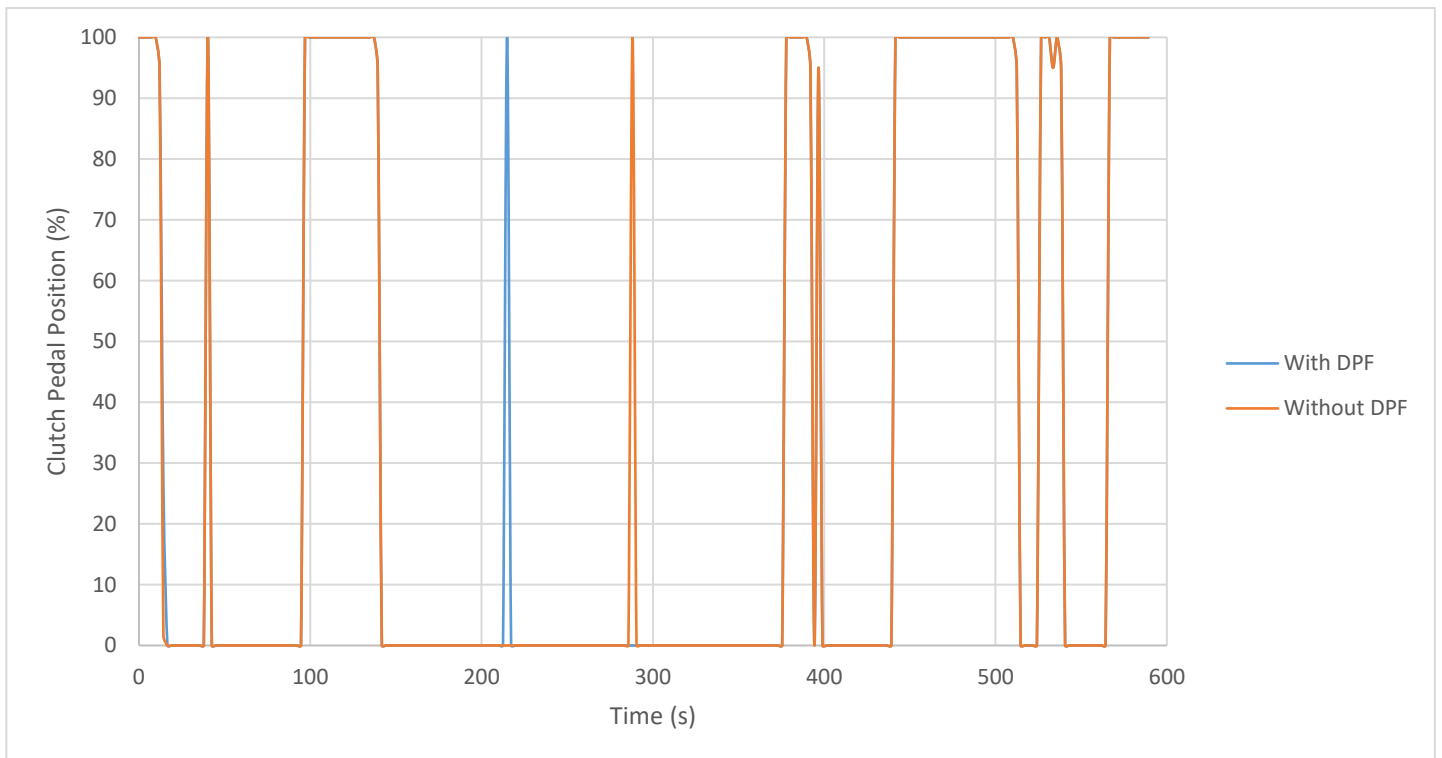
- ❖ Πραγματικός βαθμός απόδοσης (%)
- ❖ Λόγος πιέσεων του συμπιεστή (-)
- ❖ Λόγος πιέσεων του στροβίλου (-)
- ❖ Ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή (RPM)



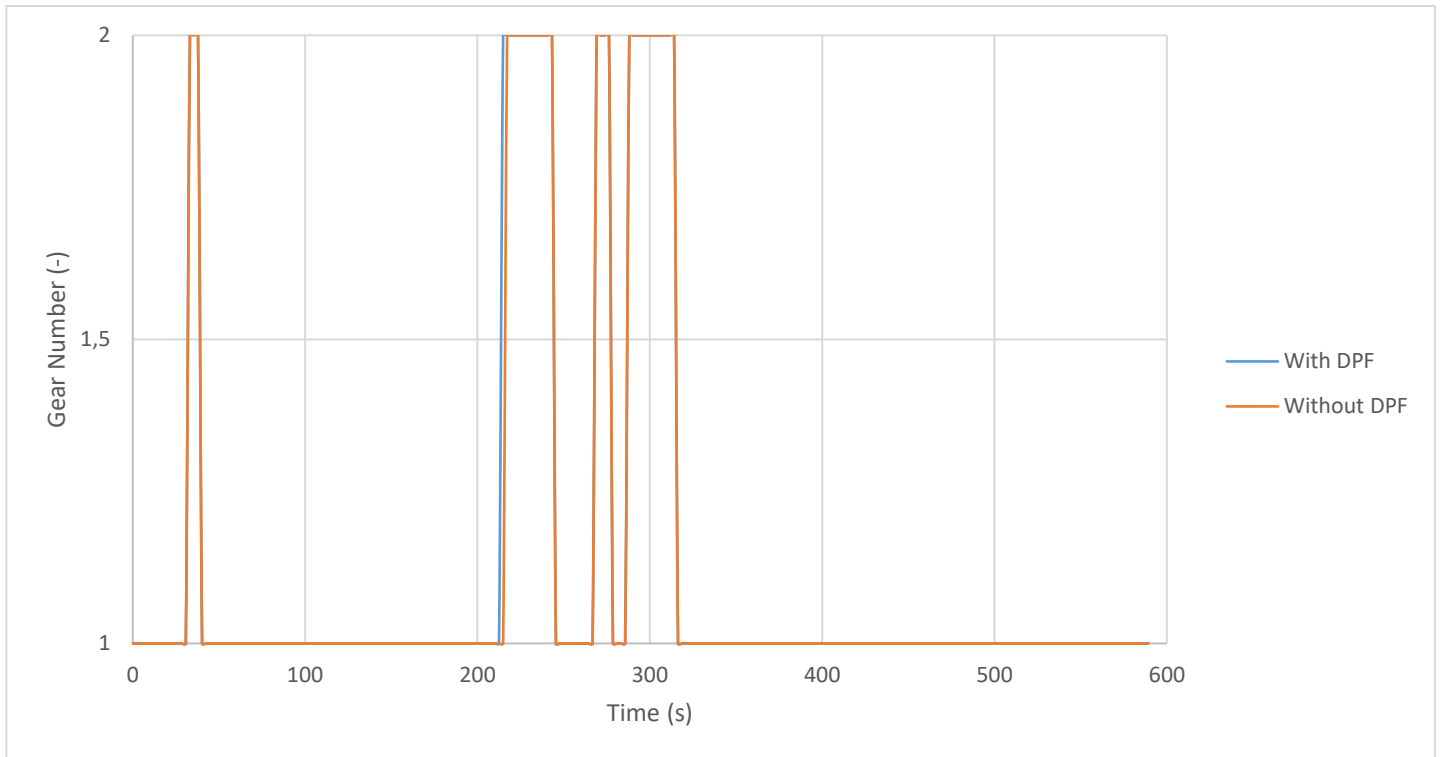
Σχήμα 6.1: Πάτημα του πεντάλ επιτάχυνσης συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



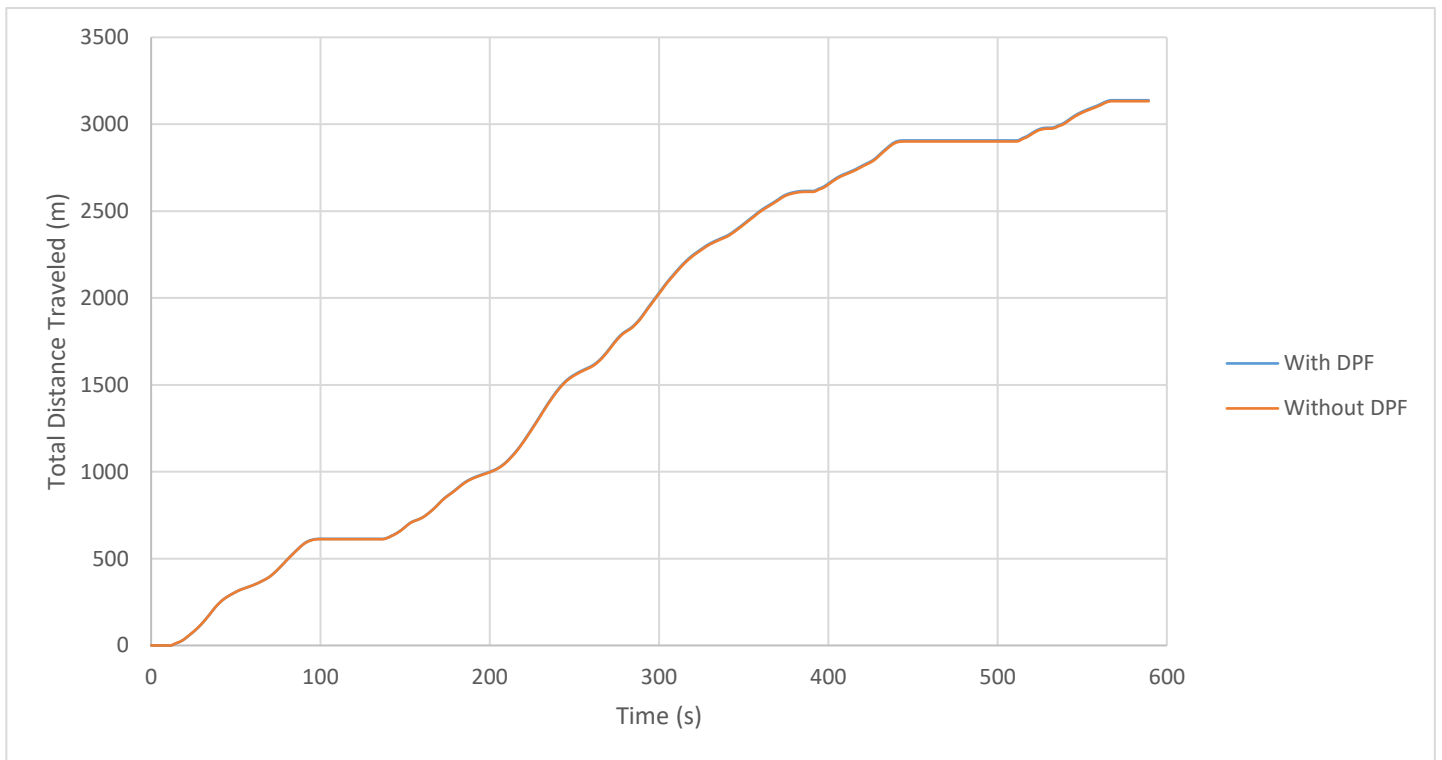
Σχήμα 6.2: Πάτημα του πεντάλ φρένου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



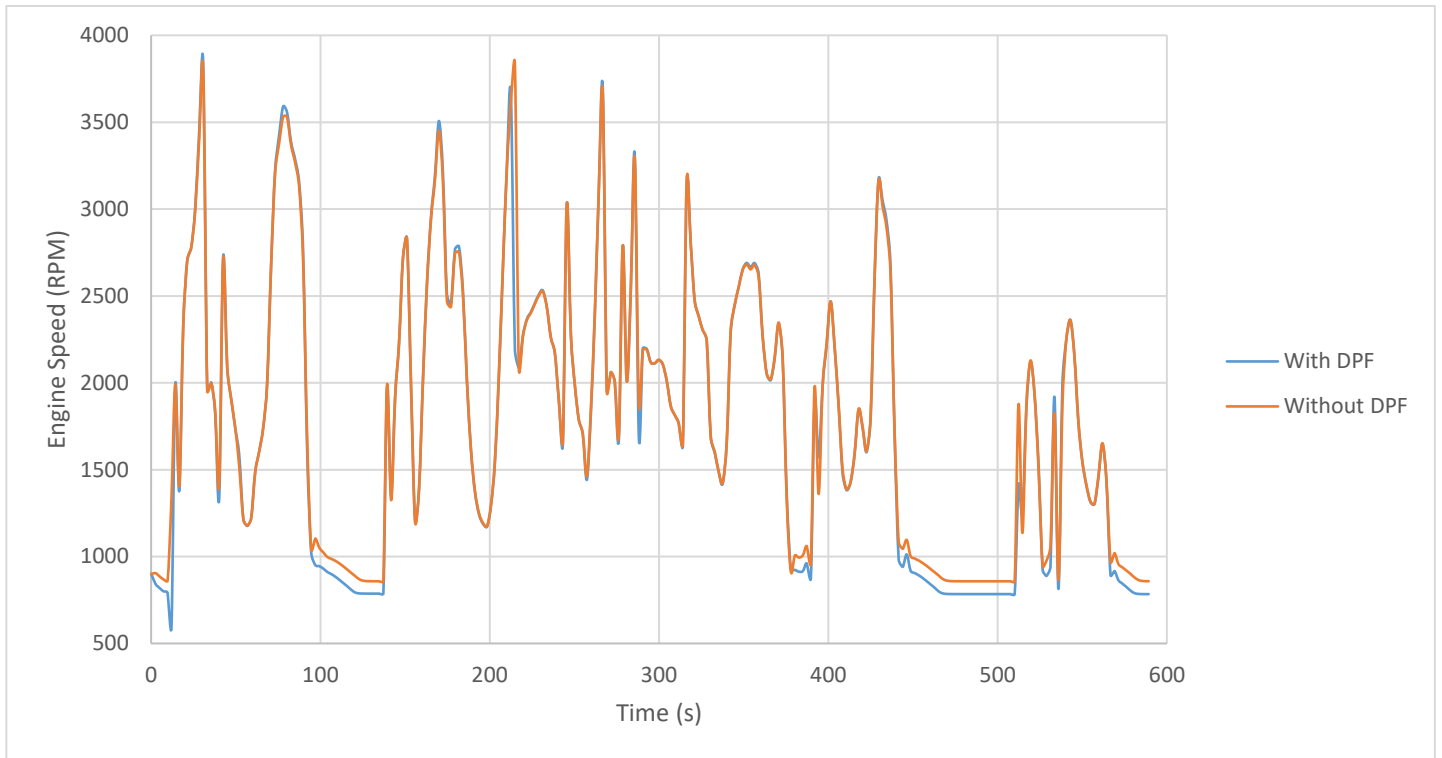
Σχήμα 6.3: Πάτημα του πεντάλ συμπλέκτη συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



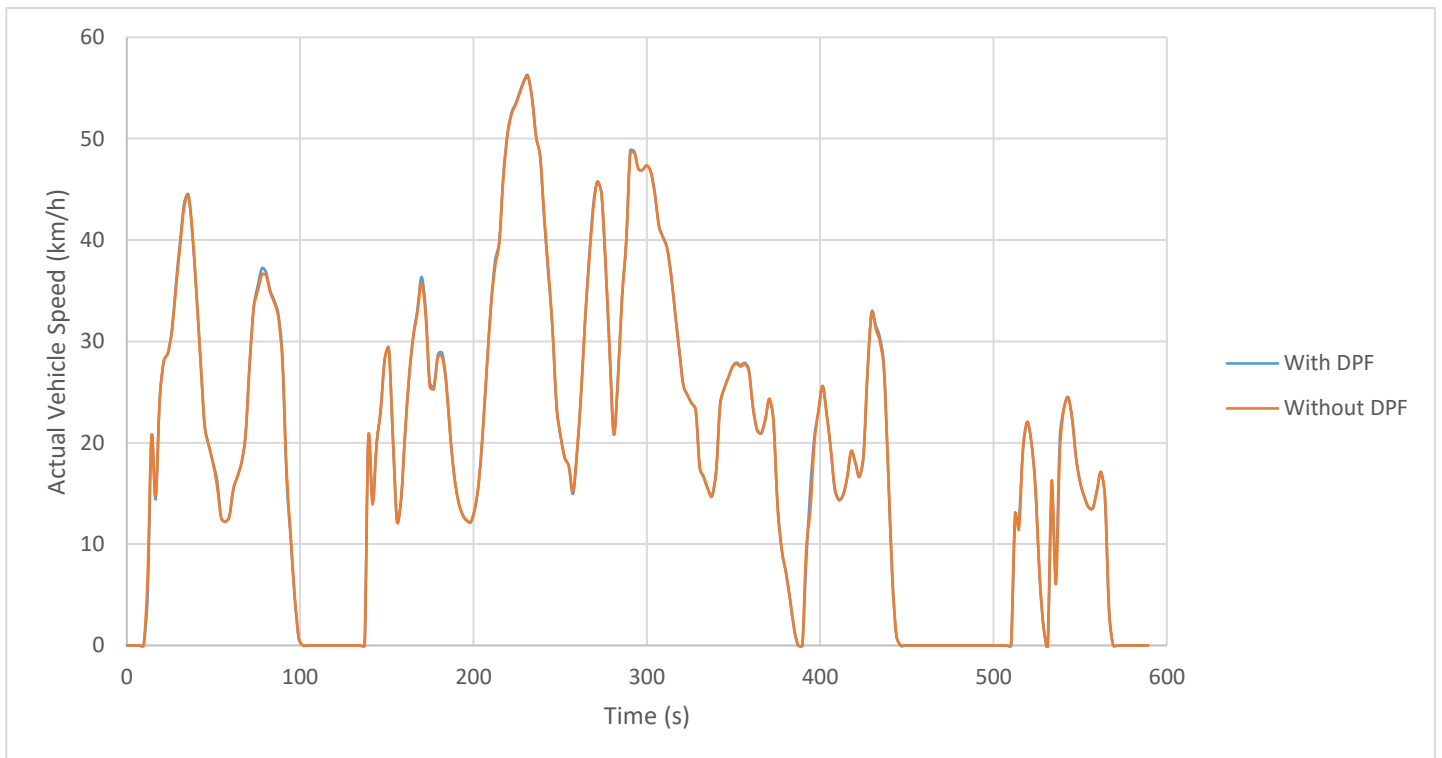
Σχήμα 6.4: Σχέση ταχύτητας στο κιβώτιο ταχυτήτων συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



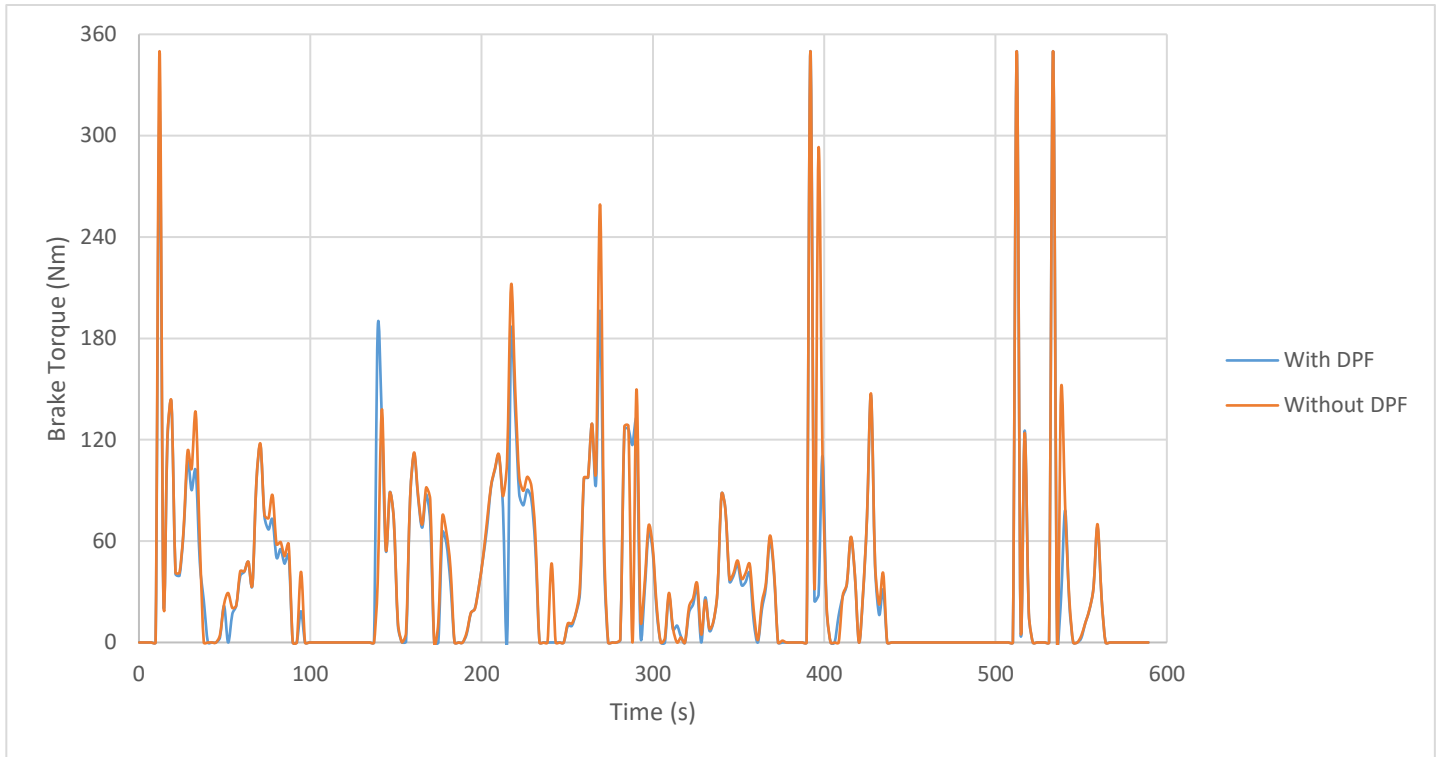
Σχήμα 6.5: Συνολικά διανυθείσα απόσταση του οχήματος συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



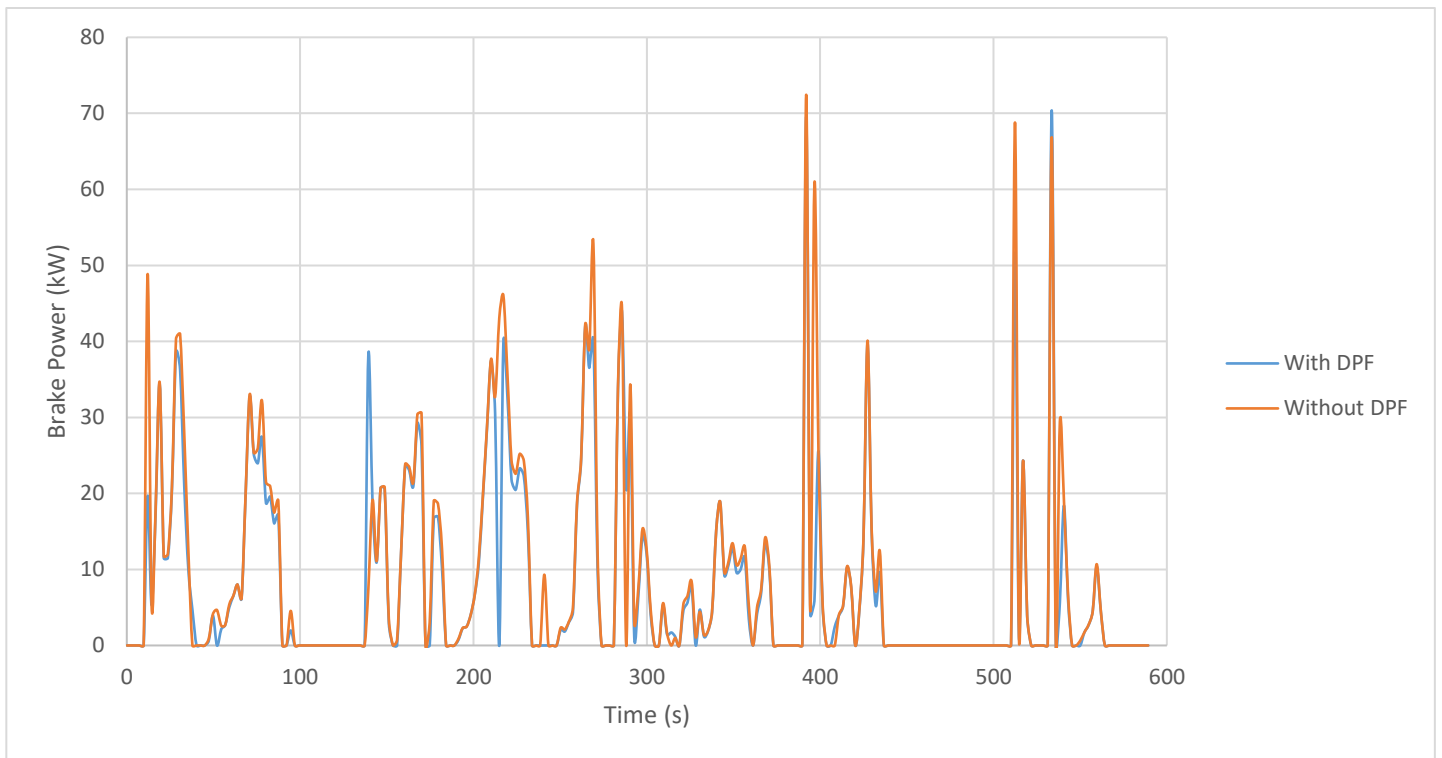
Σχήμα 6.6: Ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



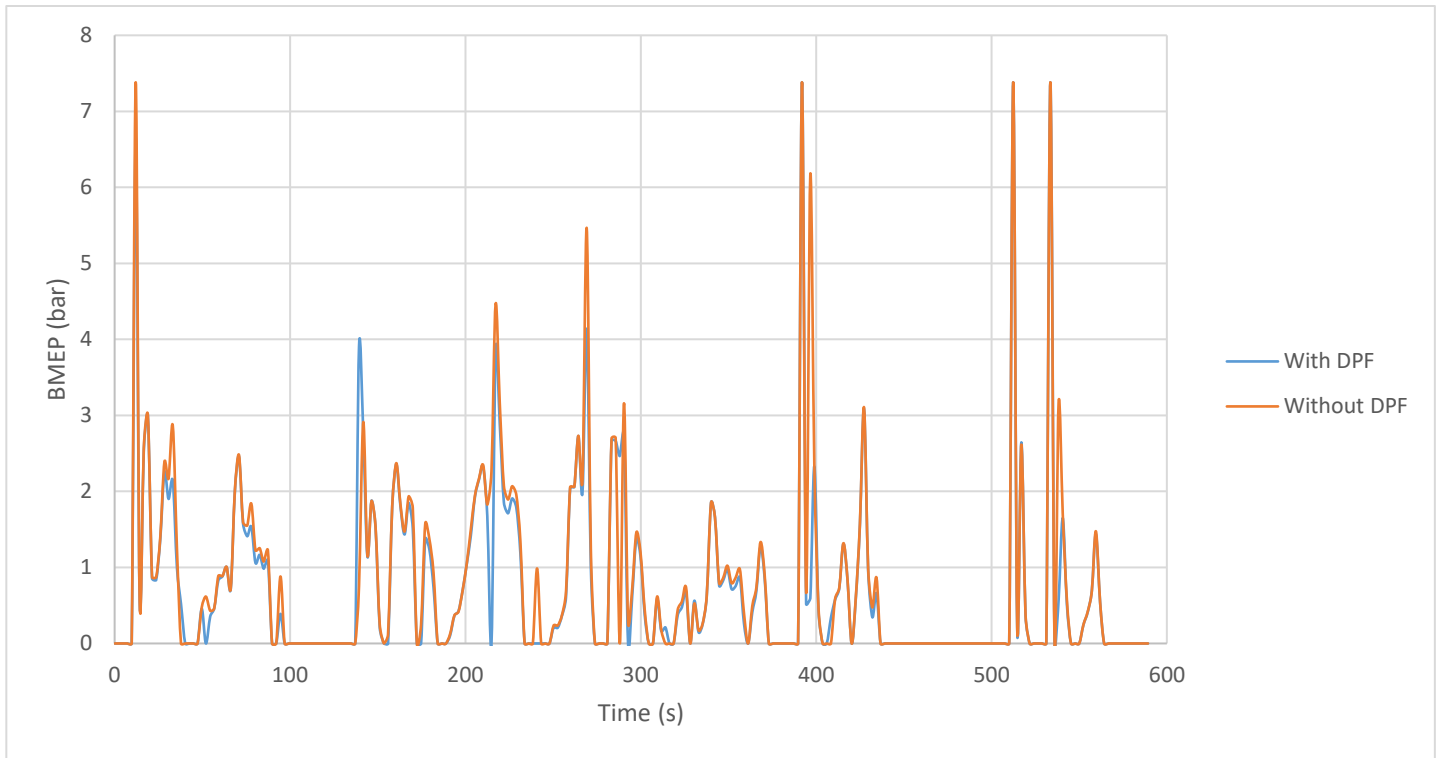
Σχήμα 6.7: Πραγματική ταχύτητα του οχήματος συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



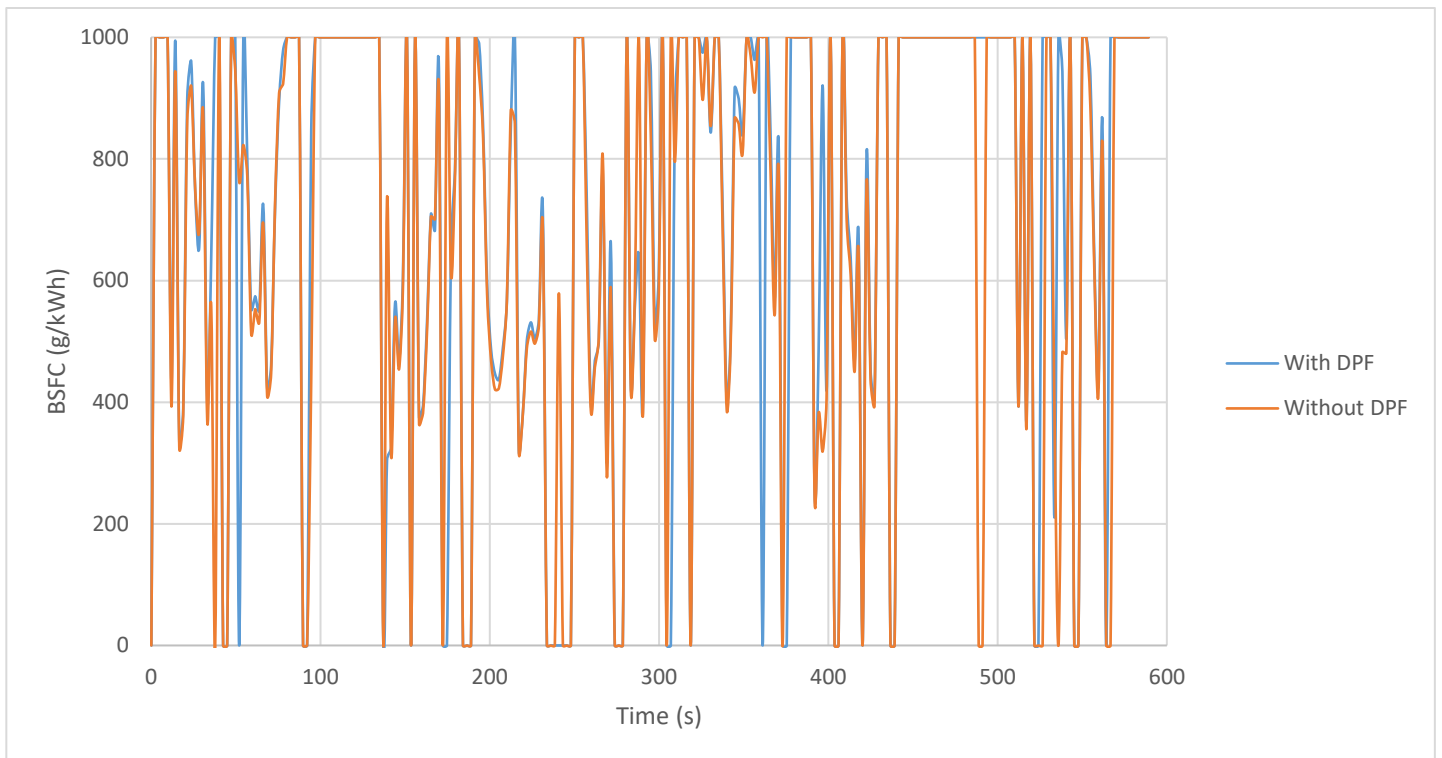
Σχήμα 6.8: Ροπή του κινητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



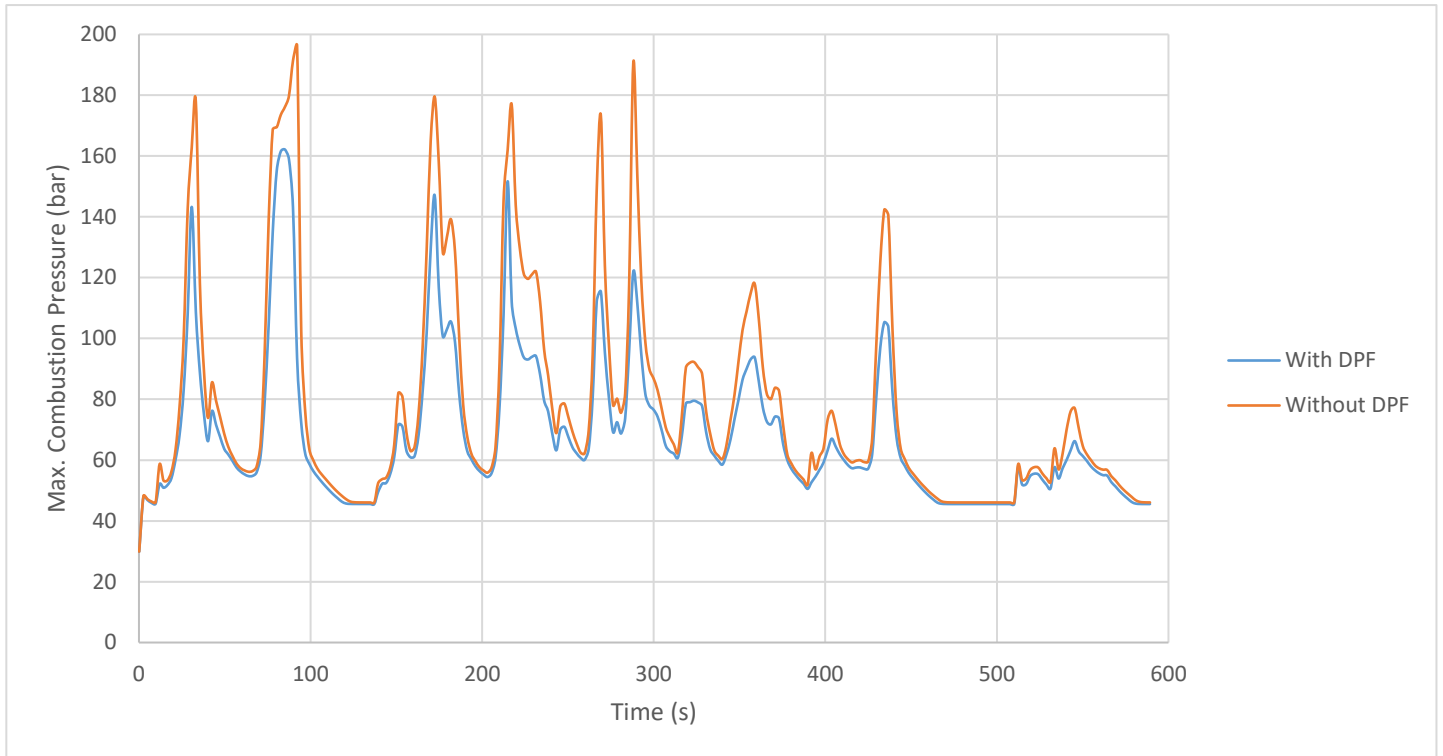
Σχήμα 6.9: Ισχύς του κινητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



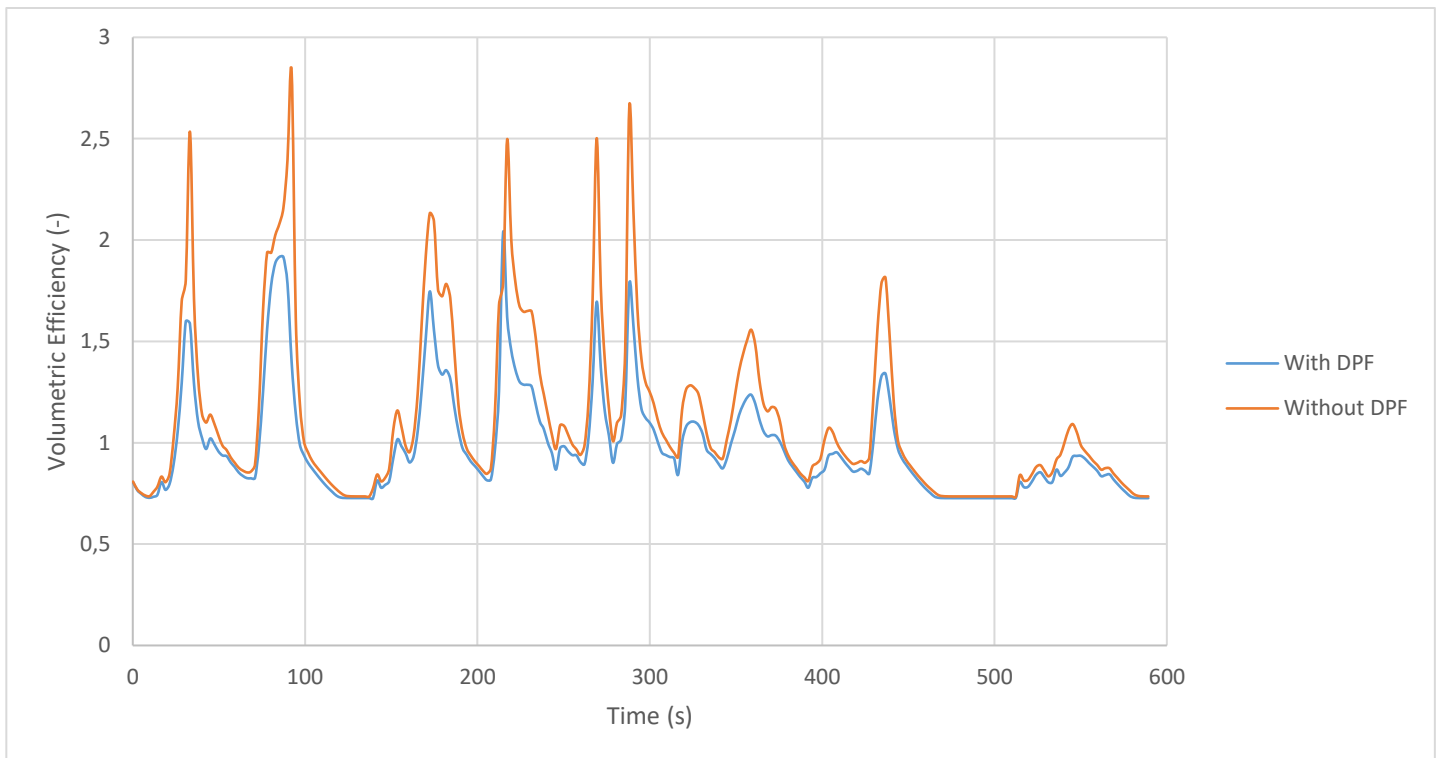
Σχήμα 6.10: Μέση πραγματική πίεση συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



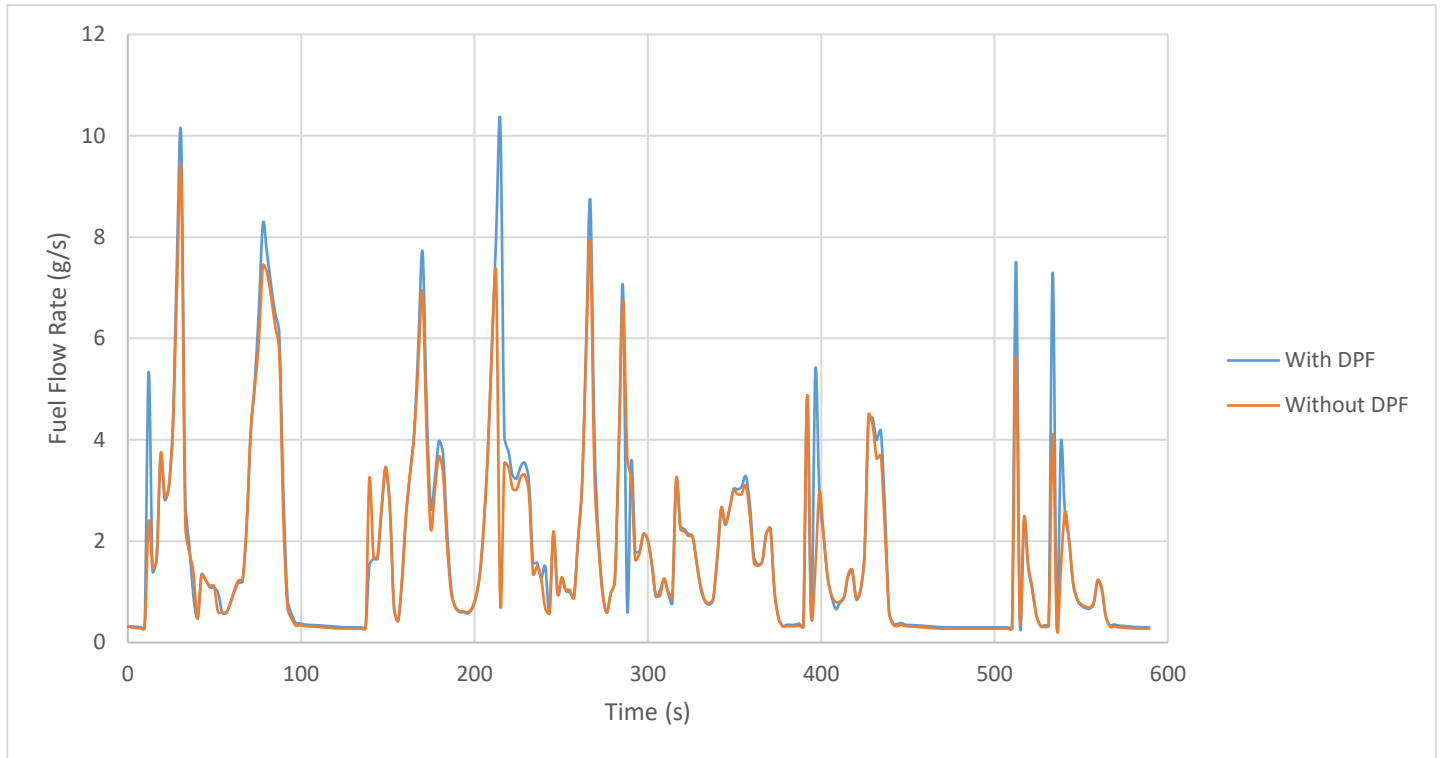
Σχήμα 6.11: Ειδική κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



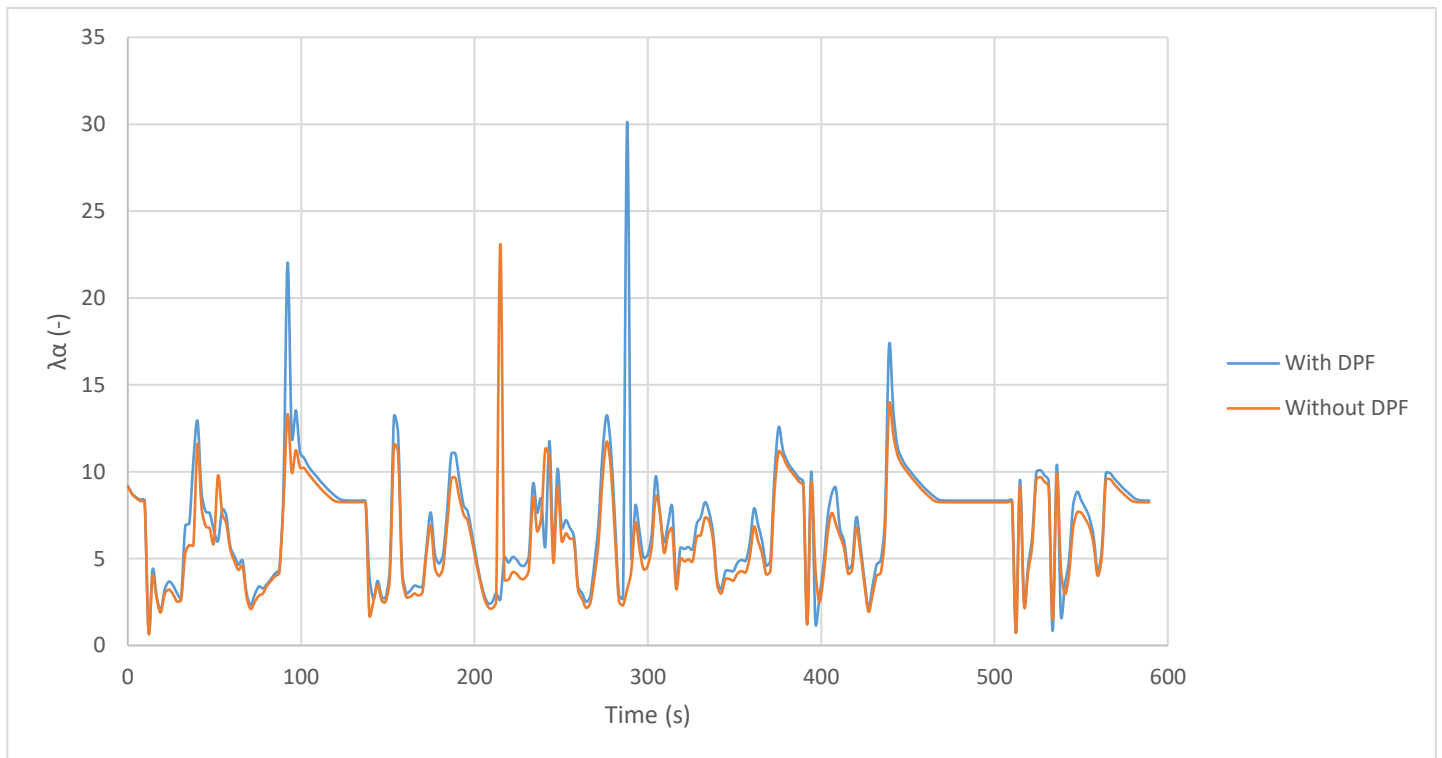
Σχήμα 6.12: Μέγιστη πίεση καύσης συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



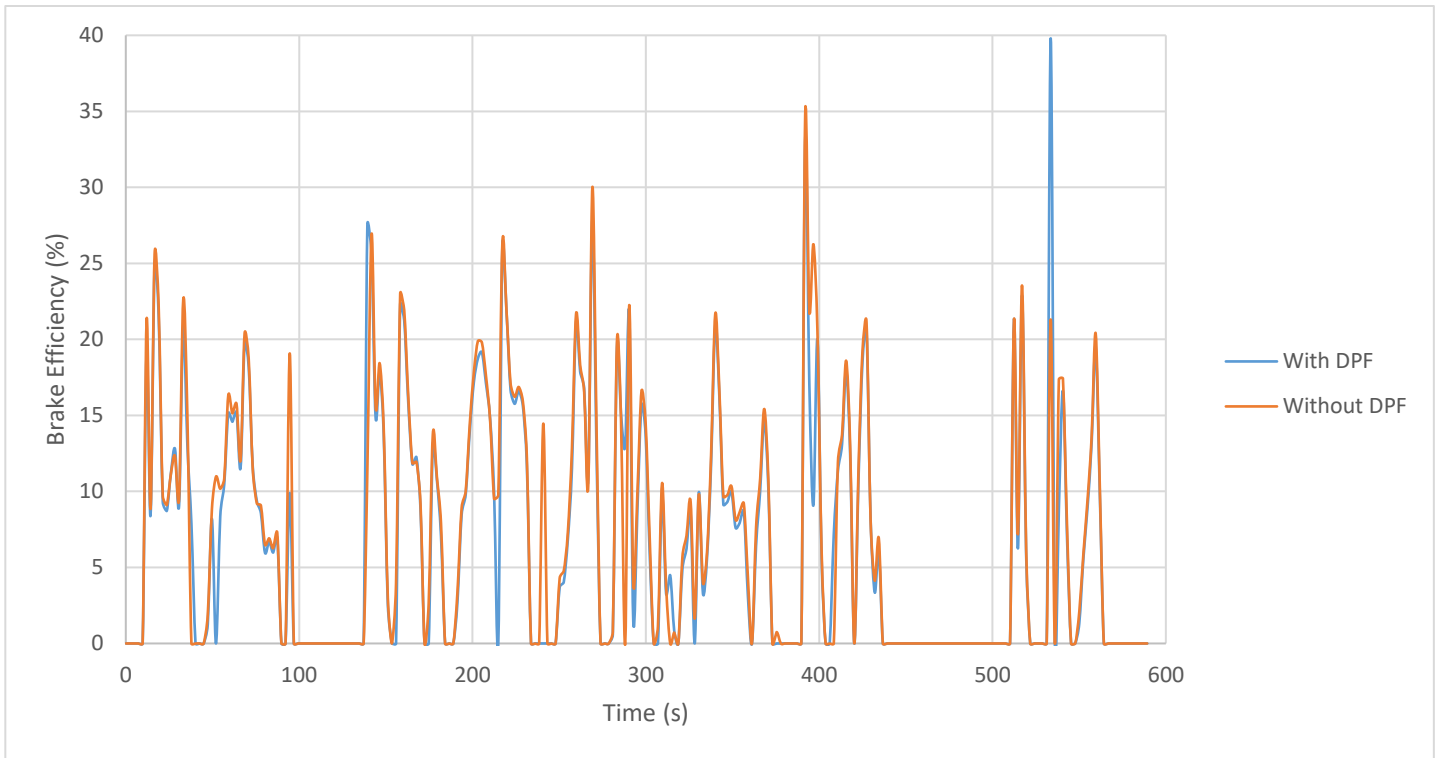
Σχήμα 6.13: Βαθμός πλήρωσης συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



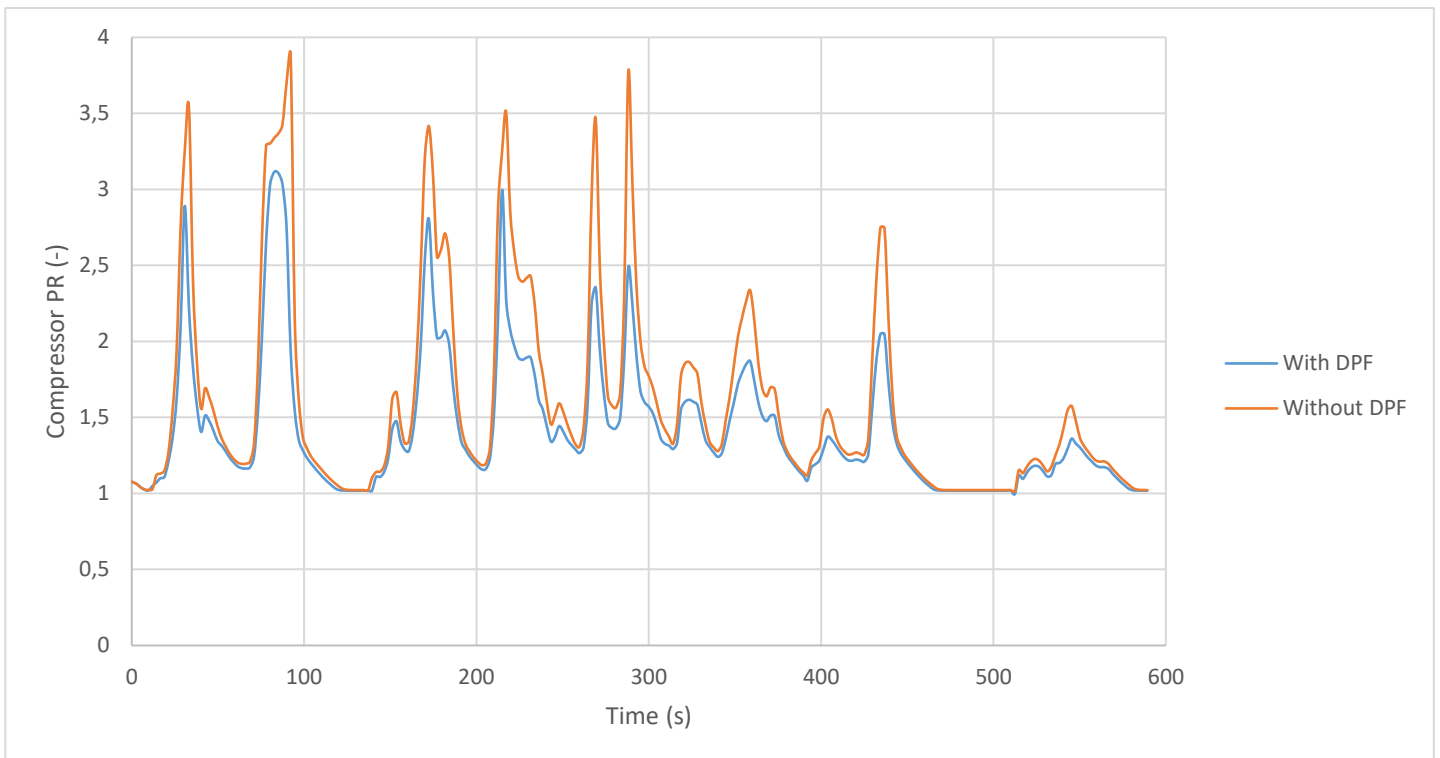
Σχήμα 6.14: Παροχή μάζας καυσίμου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



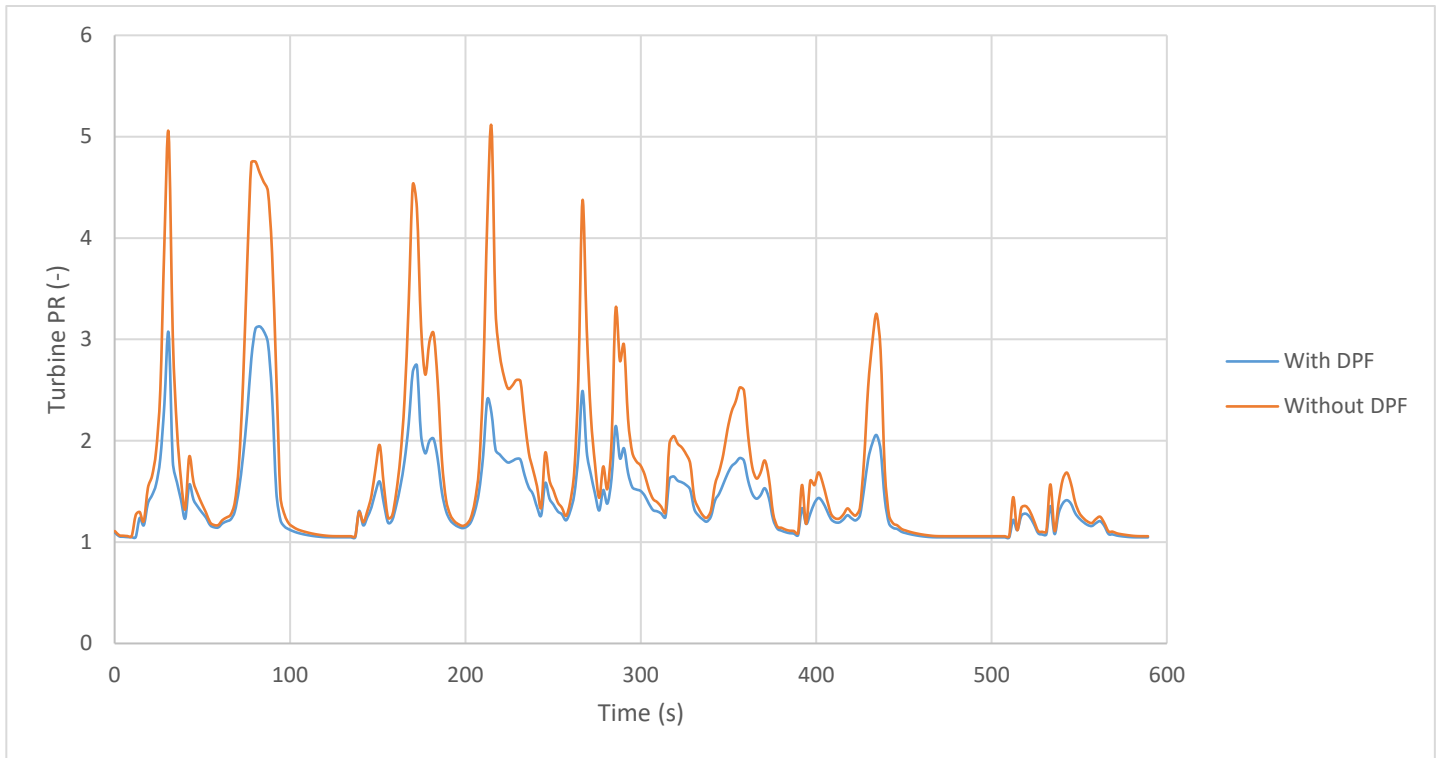
Σχήμα 6.15: Λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



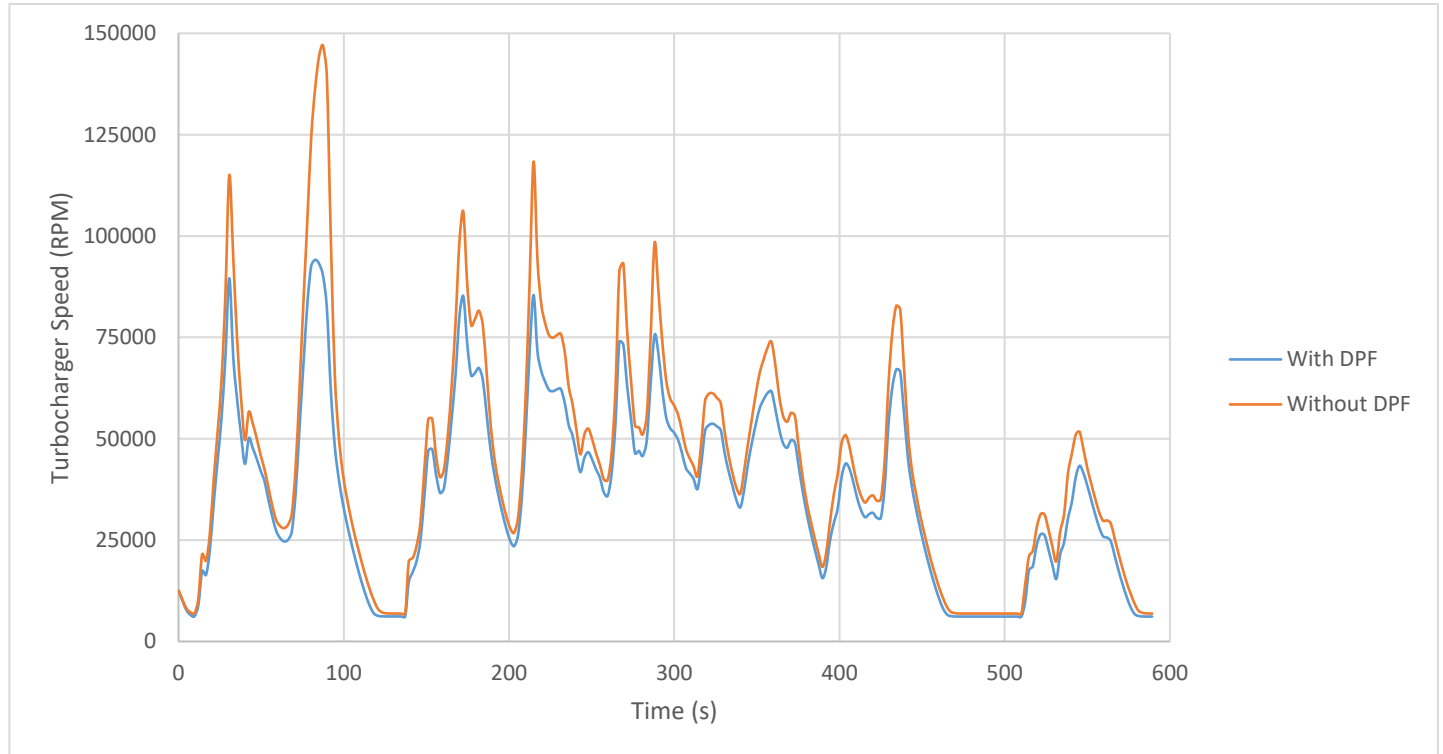
Σχήμα 6.16: Πραγματικός βαθμός απόδοσης συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 6.17: Λόγος πιέσεων του συμπιεστή συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 6.18: Λόγος πιέσεων του στροβίλου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 6.19: Ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC

Στα ανωτέρω συγκριτικά διαγράμματα παρουσιάζονται όλα τα βασικά μεγέθη που αφορούν τις επιδόσεις του κινητήρα. Αρχικά, στα **Σχήματα 6.1, 6.2 και 6.3** παρουσιάζεται το πάτημα των πεντάλ επιτάχυνσης, φρένου και συμπλέκτη από τον εικονικό οδηγό αντίστοιχα. Σημαντική διαφορά υπάρχει μόνο στο **Σχήμα 6.1**, όπου με την ύπαρξη του DPF διακρίνεται το πάτημα του πεντάλ της επιτάχυνσης να είναι πιο έντονο, εξαιτίας της υψηλότερης κατανάλωσης που επιβάλλει το φίλτρο στο όχημα. Στα υπόλοιπα δύο δεν παρατηρούνται ουσιαστικές διαφορές, δεδομένου ότι ο εικονικός οδηγός «τρέχει» μία συγκεκριμένη ακολουθία σημείων δοκιμής του Κύκλου Πόλης WLTC, και επομένως δεν εξαρτάται από την ύπαρξη του φίλτρου σωματιδίων.

Παρόμοιας συσχέτισης είναι και τα επόμενα **Σχήματα 6.4 και 6.5** όπου παρατίθενται η σχέση μετάδοσης στο κιβώτιο ταχυτήτων (1^η και 2^η σχέση χαρακτηριστικές της κίνησης στο εντός πόλης τμήμα του Κύκλου) και η συνολικά διανυθείσα απόσταση του οχήματος σε μέτρα, δηλαδή πόση απόσταση θα κάλυπτε το όχημα αν κινούνταν σε συνθήκες δρόμου. Στο **Σχήμα 6.6** φαίνεται η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, όπου διακρίνονται οι αυξομειώσεις αναλόγως του πατήματος του πεντάλ επιτάχυνσης, η έναρξη της λειτουργίας από το «ρελαντί» των 900 RPM καθώς επίσης και το εύρος των στροφών (έως 4000 RPM) που αντιπροσωπεύει έναν κινητήρα Diesel. Στο **Σχήμα 6.7** παρουσιάζεται η πραγματική ταχύτητα του οχήματος, που όπως είναι λογικό για κίνηση εντός πόλης, φτάνει περίπου έως τα 50 km/h.

Ενδιαφέροντα στοιχεία προκύπτουν από τα **Σχήματα 6.8, 6.9 και 6.10**, όπου η ροπή, η ισχύς του κινητήρα και η μέση πραγματική πίεση δείχνουν με ξεκάθαρο τρόπο την επίδραση του φίλτρου στις επιδόσεις του οχήματος. Πιο συγκεκριμένα, η παρεμβολή ενός συστήματος (μετ)επεξεργασίας καυσαερίων, όπως είναι το DPF, στη ροή του καυσαερίου αυξάνει τις απώλειες ροής και τις απώλειες εξώθησης των καυσαερίων, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ροπή και ισχύς του κινητήρα, και κατ' επέκταση η μέση πραγματική πίεση. Αντιθέτως, στο **Σχήμα 6.11**, παρατηρείται αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου γεγονός που είναι λογικό καθώς αφού η συσχέτιση είναι αντίστροφη με την ισχύ του κινητήρα. Η αύξηση της κατανάλωσης μπορεί να διαπιστωθεί και από το **Σχήμα 6.14** όπου φαίνεται ξεκάθαρα η αύξηση της παροχής μάζας καυσίμου με την ενσωμάτωση του φίλτρου, που αυτή με τη σειρά της οφείλεται στο πεντάλ της επιτάχυνσης όπως προαναφέρθηκε.

Απόρροια της μείωσης της ισχύος με την ενσωμάτωση του φίλτρου DPF στον κινητήρα, είναι η μείωση και όλων των υπόλοιπων κύριων μεγεθών που παρουσιάστηκαν στα παραπάνω **Σχήματα 6.12 έως 6.19 πλην του Σχήματος 6.14**, ήτοι μέγιστης πίεσης καύσης, βαθμού πλήρωσης, λόγου ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου, πραγματικού βαθμού απόδοσης, λόγων πιέσεων συμπίεστη και στροβίλου, και ταχύτητας περιστροφής του υπερπληρωτή. Πιο αναλυτικά, οι τιμές του βαθμού πλήρωσης είναι λογικές για έναν στροβιλο-υπερπληρωμένο κινητήρα ($\gg 1$), η ποσότητα μάζας καυσίμου που εγχέεται ακολουθεί τις αυξομειώσεις αναλόγως του πατήματος του πεντάλ επιτάχυνσης, ενώ ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου λ_a έχει μία μέση τιμή γύρω στο 6-7, χαρακτηριστική των χαμηλών φορτίων και της μεγάλης άφορτης λειτουργίας ενός κινητήρα Diesel στο εντός πόλης τμήμα του Κύκλου. Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα είναι ασφαλώς μειωμένος σύμφωνα με τις τυπικές τιμές για έναν Diesel, δεδομένου ότι στη διαδρομή εντός πόλης χαρακτηρίζεται από υψηλή κατανάλωση. Τέλος, στα διαγράμματα που αφορούν το σύστημα στροβιλο-υπερπλήρωσης γίνεται αντιληπτή η μείωση του επιπέδου πιέσεων στο συμπίεστη και στο στρόβιλο, καθώς και η μείωση της ταχύτητας περιστροφής του υπερπληρωτή λόγω αύξησης των απωλειών πίεσης κατά την εξαγωγή του καυσαερίων.

Για περαιτέρω κατανόηση της επίδρασης του DPF στις επιδόσεις του οχήματος, παρατίθεται ο παρακάτω **Πίνακας 6.1** που αφορά ποσοστιαίες μεταβολές για κάποια από τα βασικά μεγέθη του κινητήρα, τα οποία καταδεικνύουν τη χειροτέρευση των επιδόσεων και την αύξηση της κατανάλωσης.

Πίνακας 6.1: Ποσοστιαία μεταβολή (%) βασικών μεγεθών του κινητήρα λόγω της ύπαρξης του φίλτρου σωματιδίων DPF

Μέγεθος	Με DPF	Χωρίς DPF	Ποσοστιαία μεταβολή
Πάτημα του πεντάλ επιτάχυνσης (%)	11,79	11,29	4,42%
Ροπή του κινητήρα (Nm)	35,29	38,66	-8,72%
Ισχύς του κινητήρα (kW)	8,11	9,12	-11,07%
Ειδική κατανάλωση καυσίμου (g/kWh)	697,46	682,37	2,21%
Μέγιστη πίεση καύσης (bar)	68,37	78,16	-12,52%
Λόγος πιέσεων συμπίεσής (-)	1,42	1,61	-11,55%
Λόγος πιέσεων στροβίλου (-)	1,41	1,71	-17,68%
Ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή (RPM)	36833,23	44069,15	-16,42%

6.3 Εκπομπές του οχήματος

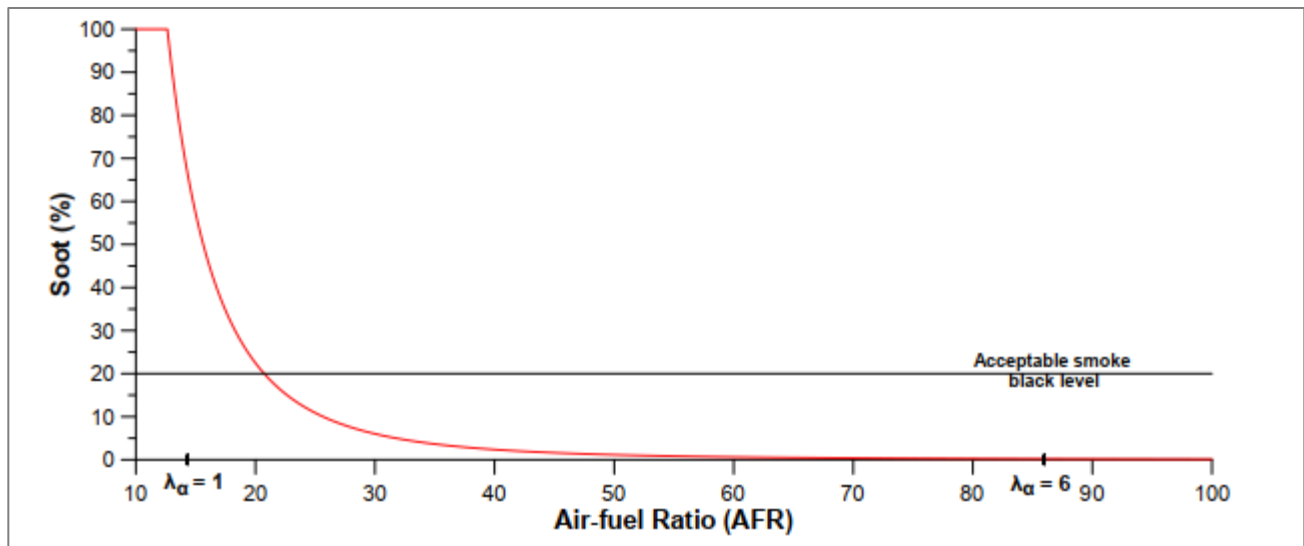
Η επόμενη βασική κατηγορία αφορά τις εκπομπές του οχήματος. Συγκεκριμένα, τα διαγράμματα που παρουσιάζονται συγκρίνοντας το όχημα αναφοράς με φίλτρο σωματιδίων, με ένα άλλο χωρίς φίλτρο είναι τα παρακάτω:

- ❖ Εκπομπές οξειδίων του αζώτου, NO_x (g/km)
- ❖ Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, CO_2 (g/km)
- ❖ Εκπομπές σωματιδίων αιθάλης (mg/m^3)

Το υπολογιστικό πρόγραμμα GT-Power εξάγει τις εκπομπές ρύπων των NO_x και CO_2 σε g/kWh. Με πολύ απλό τρόπο πραγματοποιήθηκε η μετατροπή τους σε g/km ώστε να είναι συγκρίσιμα με τις τρέχουσες τιμές της νομοθεσίας. Σχετικά με την αιθάλη, εξαιτίας της πολυπλοκότητας στον σχηματισμό της εντός του κινητήρα αλλά και του αντίστοιχου μοντέλου προσομοίωσής της, χρησιμοποιήθηκε μία προσεγγιστική εμπειρική σχέση μιας παλαιότερης διπλωματικής εργασίας [14], η οποία έχει ως εξής:

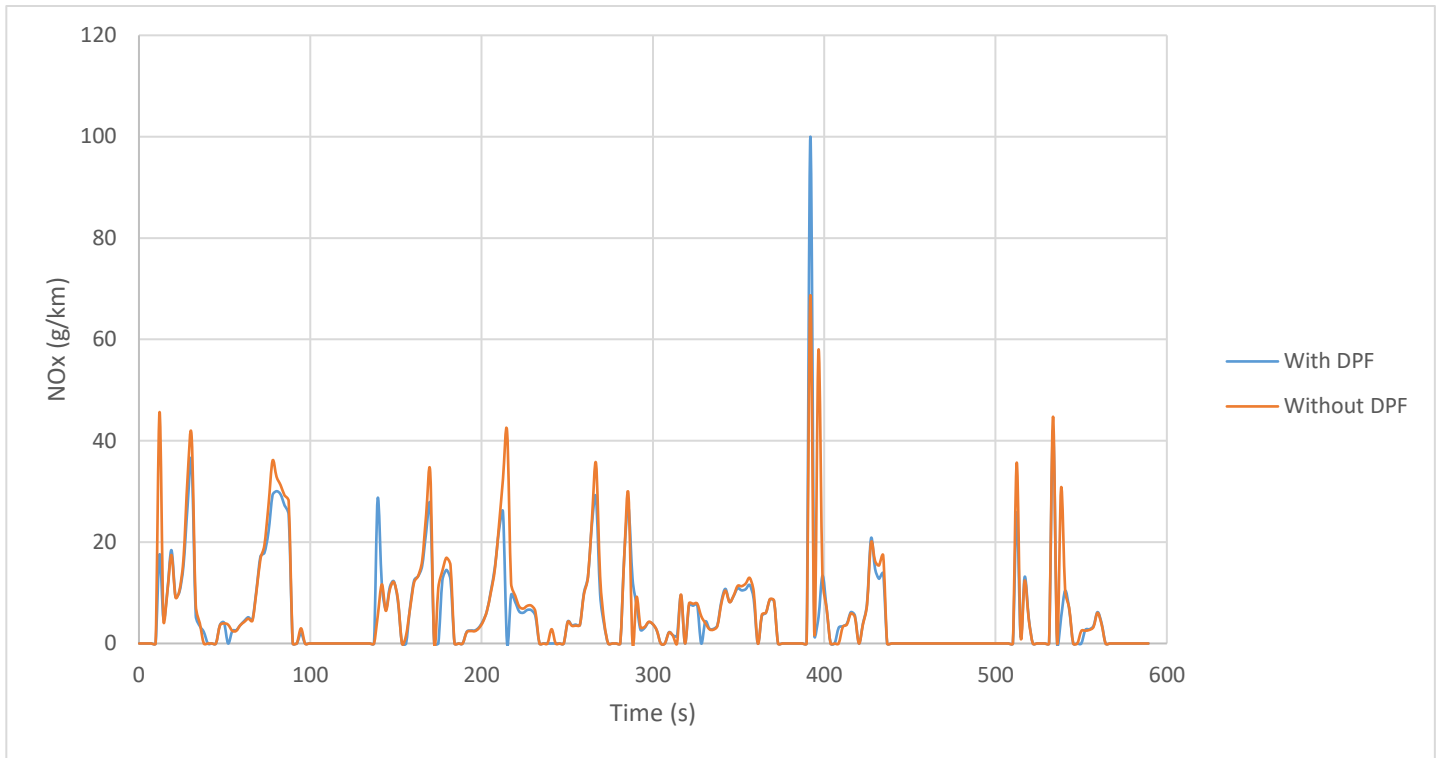
$$\text{Soot (\%)} = 380190 \cdot \text{AFR}^{-3,25}$$

Η ανωτέρω σχέση έχει αναπτυχθεί σε κινητήρα όμοιο με αυτόν του οχήματος αναφοράς και συσχετίζει την αδιαφάνεια της αιθάλης με τον λόγο αέρα-καυσίμου. Η εν λόγω συσχέτιση παρουσιάζεται υπό μορφή διαγράμματος στο ακόλουθο σχήμα:

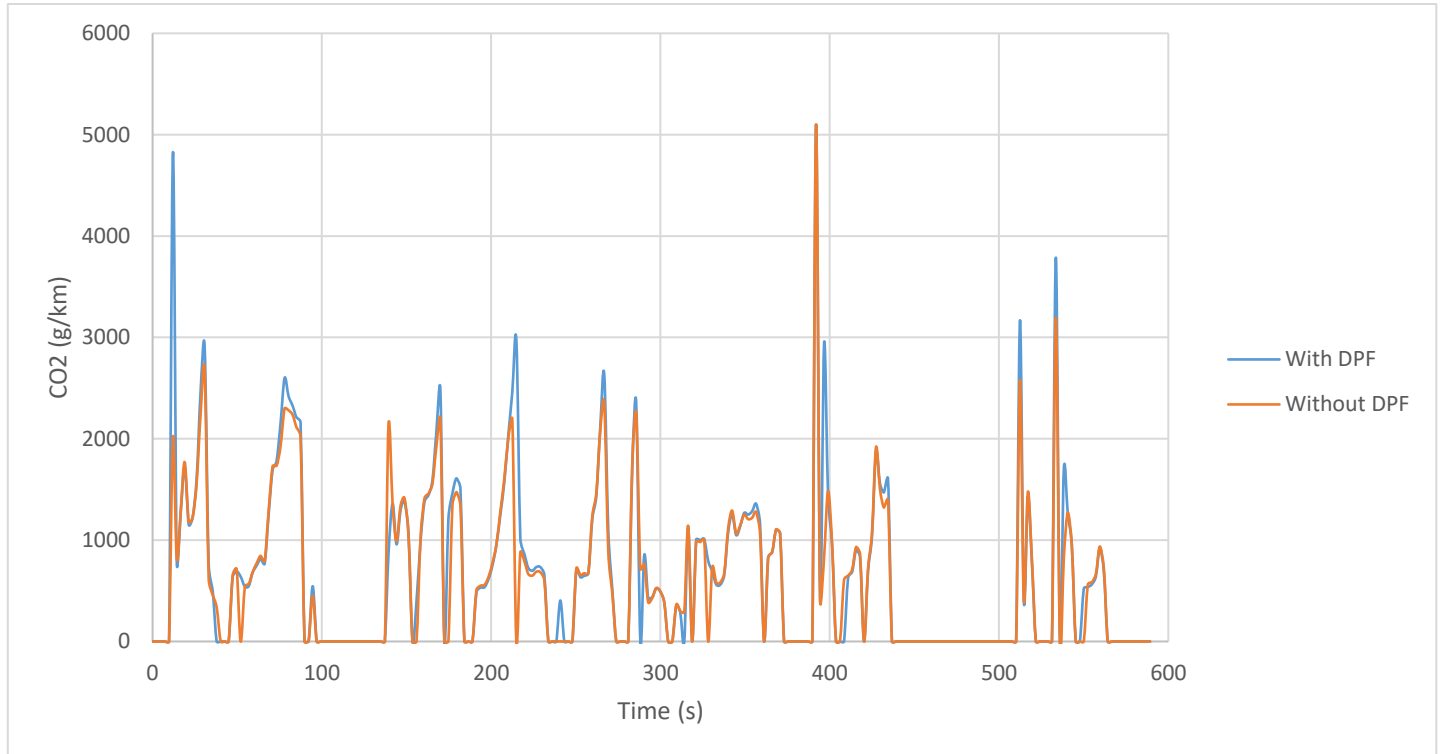


Σχήμα 6.20: Συσχέτιση αδιαφάνειας της αιθάλης με τον λόγο αέρα-καυσίμου

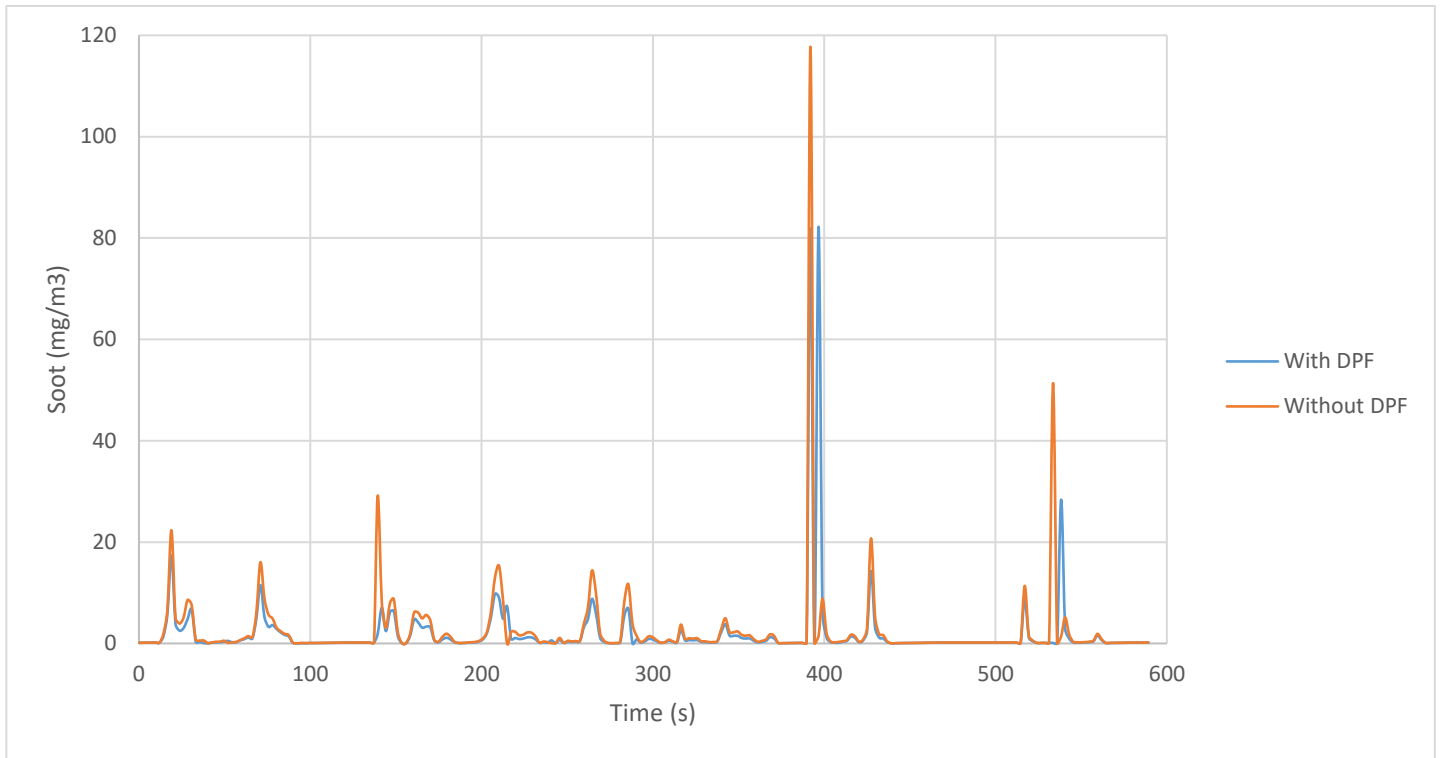
Ουσιαστικά στο Σχήμα 6.20 φαίνεται η αδιαφάνεια της αιθάλης για τη στοιχειομετρική αναλογία ($\lambda_a = 1$) όπως και για την υπερ-στοιχειομετρική αναλογία ($\lambda_a = 6$) ενώ το αποδεκτό όριο καθορίζεται για $\lambda_a > 1,6$. Το κύριο πλεονέκτημα της ανωτέρω σχέσης είναι ότι καλύπτει τα μεταβατικά φαινόμενα ενός κινητήρα Diesel (επιταχύνσεις, αλλαγές φορτίου, κλπ.) που εμφανίζονται συχνά στο εντός πόλης τμήμα που μελετάται εν γένει στην παρούσα εργασία [14]. Η μετατροπή σε mg/m^3 , που εν προκειμένω έχει και νόημα, έγινε με βάση πειραματικά δεδομένα μιας παλαιότερης διδακτορικής διατριβής. [15]



Σχήμα 6.21: Εκπομπές οξειδίων του αζώτου, NO_x συναρτήσεϊ του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 6.22: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, CO₂ συναρτήσεϊ του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 6.23: Εκπομπές σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC

Όπως παρατηρείται από τα παραπάνω διαγράμματα, η παρουσία του φίλτρου σωματιδίων μειώνει σε γενικές γραμμές τις εκπομπές του κινητήρα για τα πρώτα 589 sec του εντός πόλης τμήματος του Κύκλου Πόλης WLTC. Συγκεκριμένα, ο ρυθμός της αιθάλης που αντιμετωπίζεται μέσω του συστήματος DPF (Σχήμα 6.23) μειώνεται σε μεγάλο βαθμό εξαιτίας της τοποθέτησης του φίλτρου. Αυτό αιτιολογείται ως εξής: κυριαρχία των χαμηλών φορτίων εντός πόλης, επομένως φτωχότερο μείγμα και αυξημένος λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου (όπως άλλωστε φαίνεται και στο Σχήμα 6.15) με αποτέλεσμα τις χαμηλότερες εκπομπές σωματιδίων αιθάλης, οι οποίες ήδη μειώνονται και από το φίλτρο κατά τη ροή του καυσαερίου. Συμπληρωματικά, μπορεί κάποιος να ανατρέξει στο Σχήμα 2.6, το οποίο δικαιολογεί το πιο πάνω συμπέρασμα.

Όσον αφορά τα NO_x , και το Σχήμα 6.21, διαπιστώνεται επίσης μείωση των εκπομπών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αύξηση του λόγου ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου (βλ. Σχήμα 6.15) εξαιτίας των χαμηλών φορτίων στα πρώτα 589 sec, που οδηγεί σε μείωση της θερμοκρασίας εντός του θαλάμου καύσης και κατ'επέκταση στη μείωση των εκπομπών NO_x . Για περαιτέρω κατανόηση, μπορεί ο αναγνώστης να ανατρέξει στο Σχήμα 2.2 του 2^{ου} Κεφαλαίου. Για το CO_2 , που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.22, έχουμε αύξηση των εκπομπών εξαιτίας γεγονόσ που οφείλεται στην αυξημένη κατανάλωση καυσίμου λόγω της ύπαρξης του φίλτρου DPF (βλ. Σχήμα 6.11).

Όλες οι υπερακοντίσεις των τριών ρύπων που παρουσιάστηκαν οφείλονται στο πάτημα του πεντάλ επιτάχυνσης, όπου σε μεγάλο βαθμό επιδρά στην αύξηση των εκπομπών από ένα όχημα. Επίσης, οφείλονται στην υστέρηση του υπερπληρωτή, η οποία συμβαίνει έντονα σε κίνηση εντός πόλης, όπου το καυσαέριο δεν έχει το απαραίτητο δυναμικό ώστε να κινήσει τον στρόβιλο και εκείνος με τη σειρά του τον συμπιεστή για να υπάρξει γρήγορη απόκριση.

Στη συνέχεια, στον **Πίνακα 6.2** θα παρουσιαστούν συγκριτικά οι εκπομπές των ρύπων από το όχημα αναφοράς.

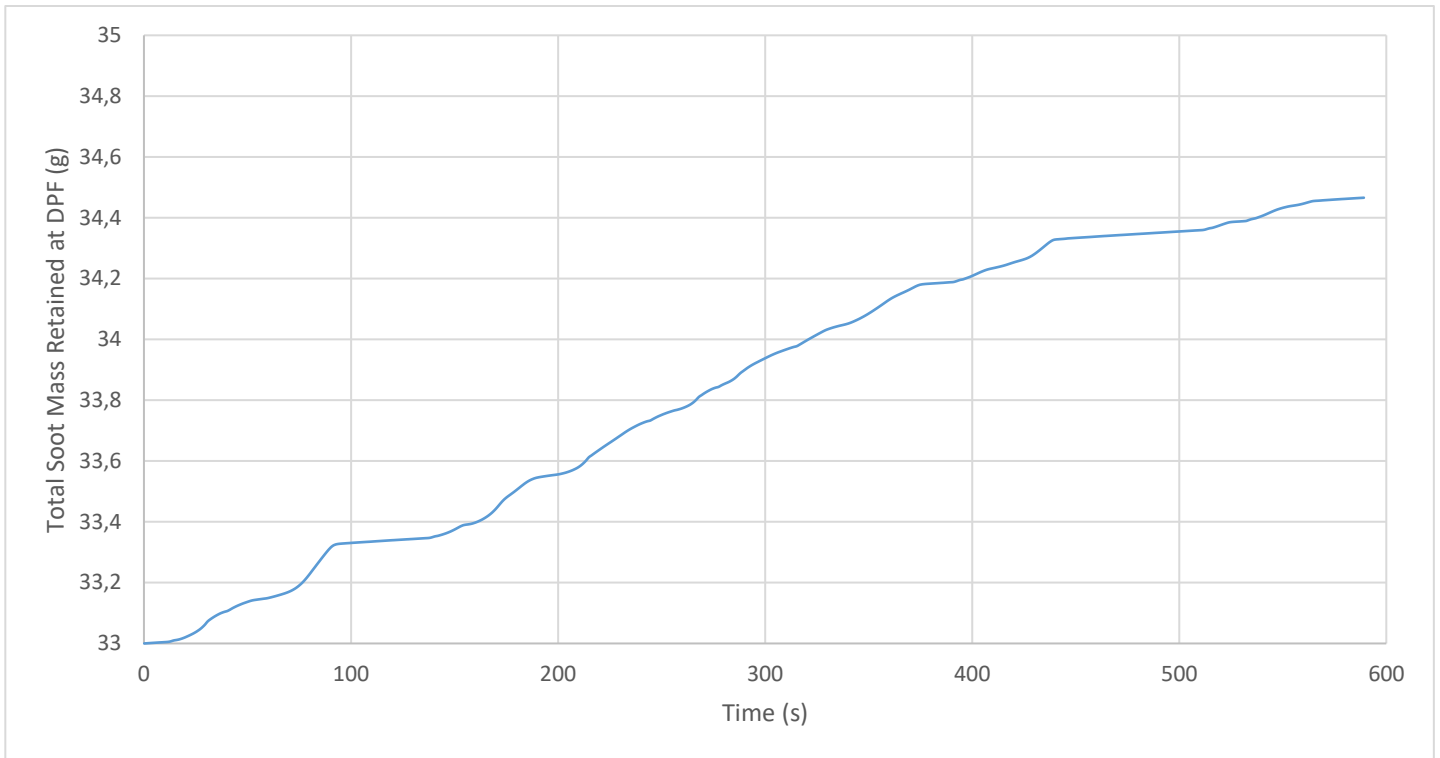
Πίνακας 6.2: Ποσοστιαία μεταβολή (%) εκπομπών ρύπων του οχήματος λόγω της ύπαρξης του φίλτρου σωματιδίων DPF

Μέγεθος	Με DPF	Χωρίς DPF	Ποσοστιαία μεταβολή
Εκπομπές NO _x (g/km)	5,85	6,67	-12,27%
Εκπομπές CO ₂ (g/km)	671,86	615,11	9,23%
Εκπομπές σωματιδίων αιθάλης (mg/m ³)	2,03	2,57	-20,81%

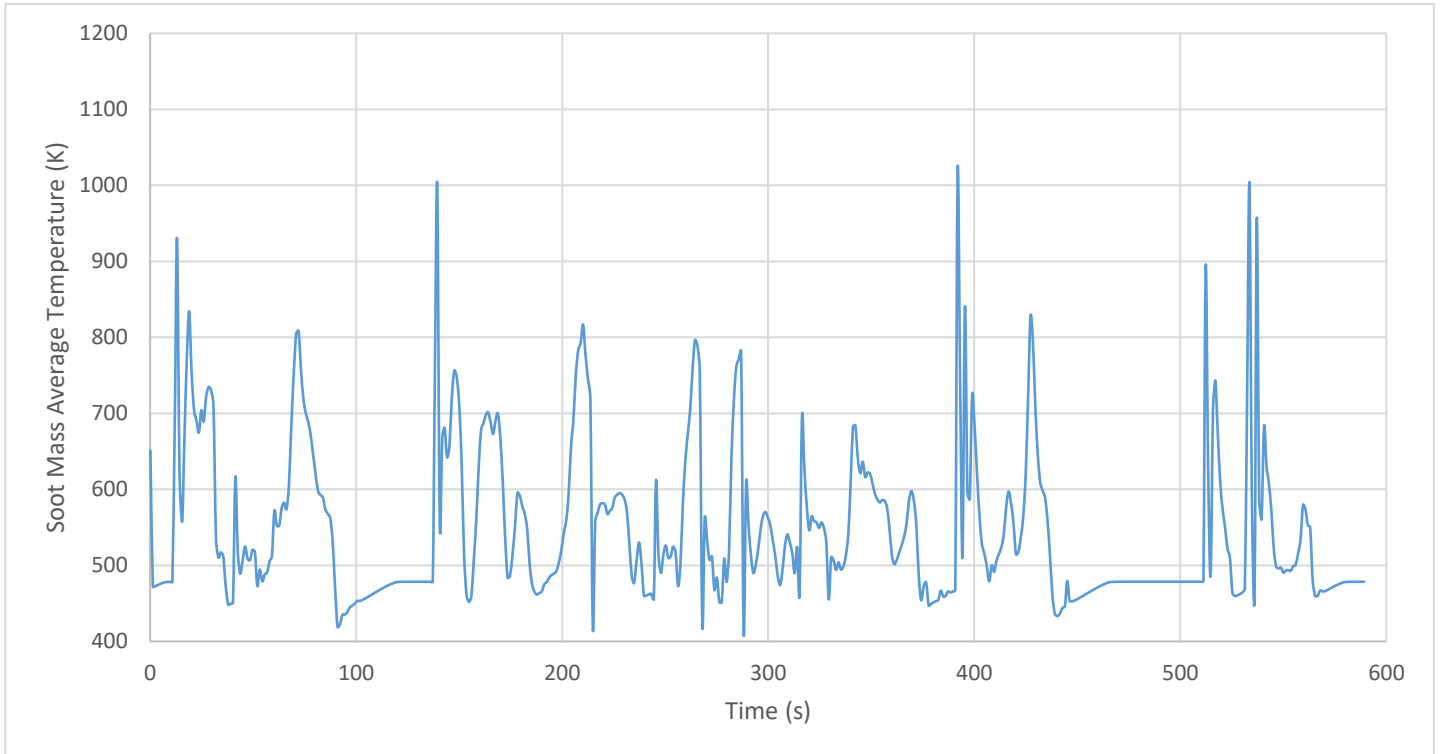
6.4 Κύρια χαρακτηριστικά του φίλτρου σωματιδίων (DPF)

Η τελευταία κατηγορία αφορά τα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη του φίλτρου σωματιδίων DPF. Συγκεκριμένα, τα διαγράμματα που παρουσιάζονται για το όχημα αναφοράς είναι τα παρακάτω:

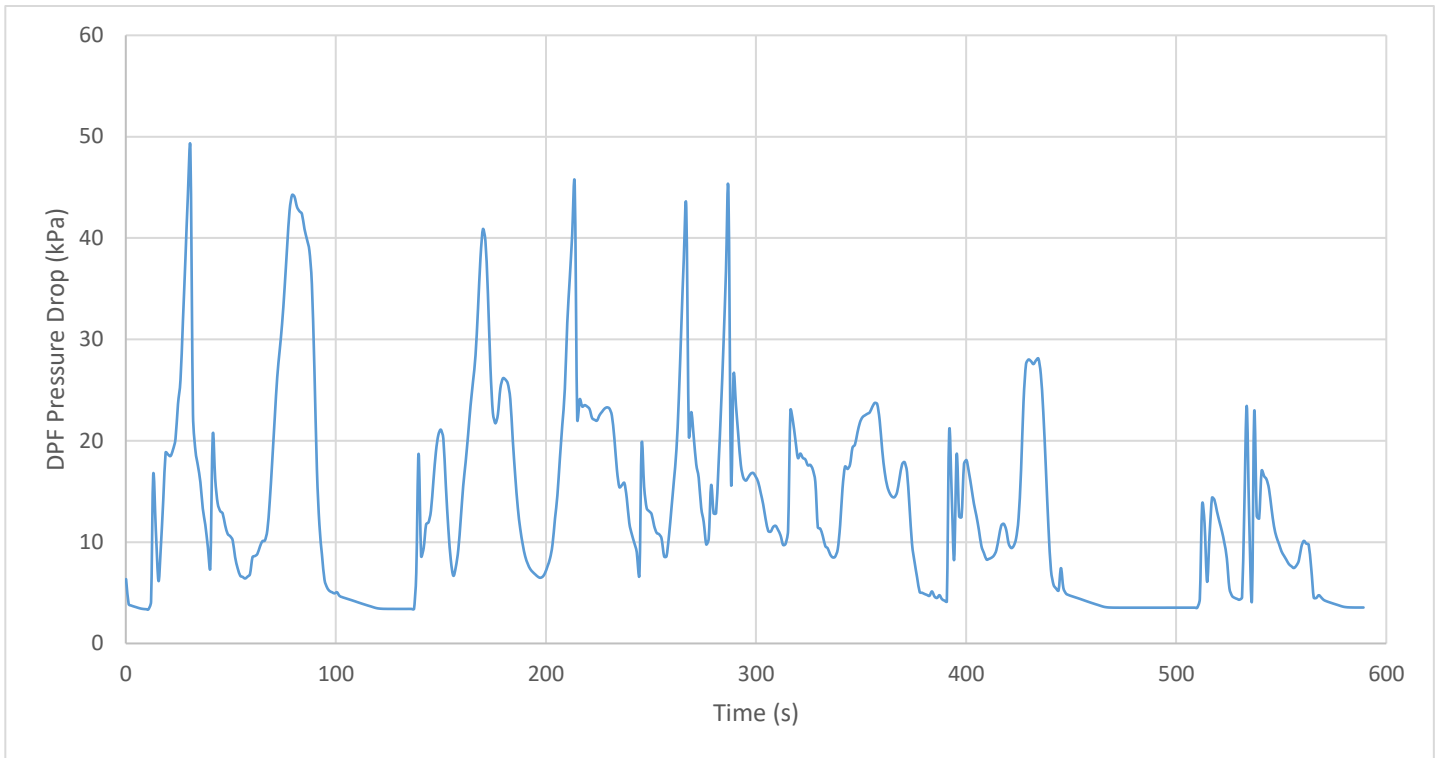
- ❖ Συνολικά κατακρατούμενη μάζα αιθάλης στο φίλτρο (g)
- ❖ Μέση θερμοκρασία σωματιδίων αιθάλης (K)
- ❖ Πτώση πίεσης στο φίλτρο (kPa)
- ❖ Αποδοτικότητα του φίλτρου (-)
- ❖ Διαπερατότητα τοιχωμάτων του φίλτρου (mm²)



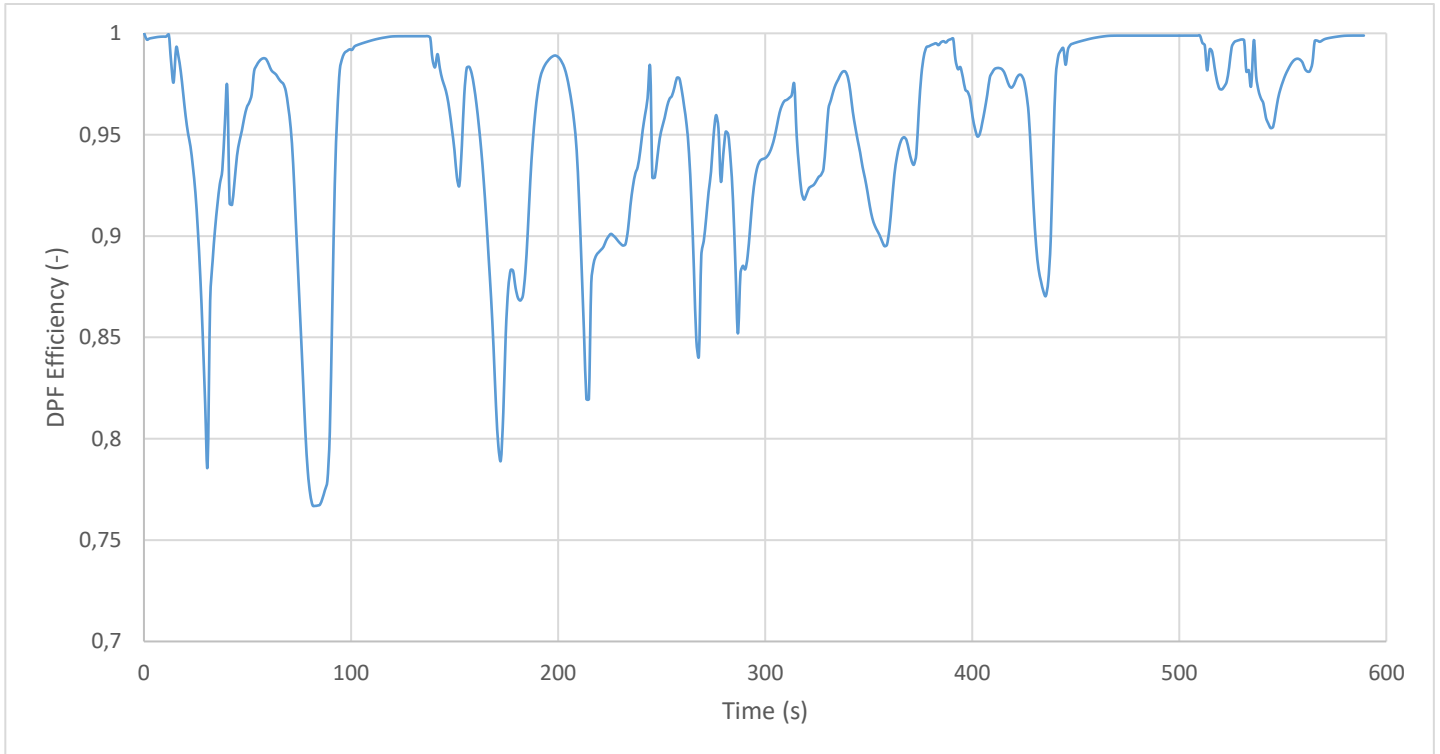
Σχήμα 6.24: Συνολικά κατακρατούμενη μάζα αιθάλης στο φίλτρο συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



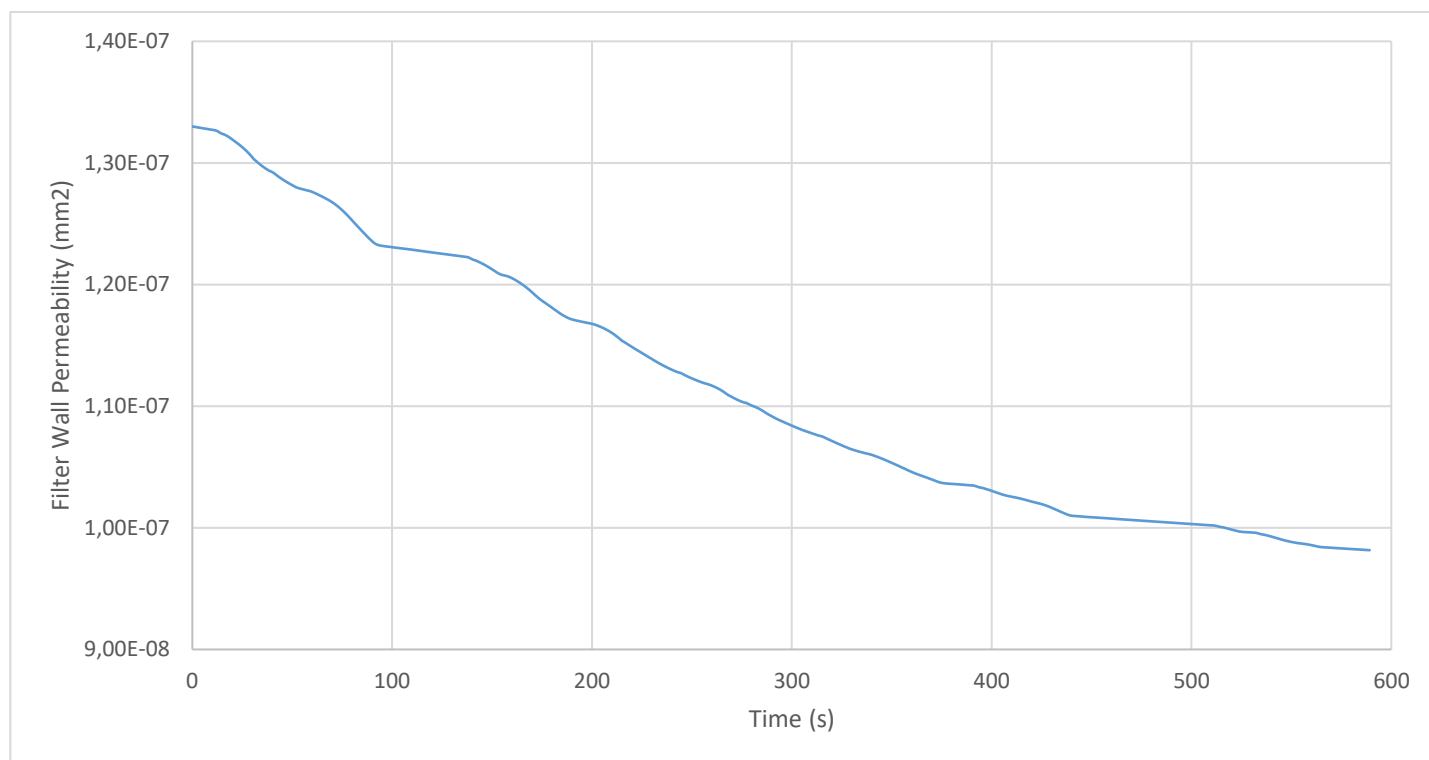
Σχήμα 6.25: Μέση θερμοκρασία σωματιδίων αιθάλης στο φίλτρο συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 6.26: Πτώση πίεσης στο φίλτρο συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 6.27: Αποδοτικότητα του φίλτρου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 6.28: Διαπερατότητα τοιχωμάτων του φίλτρου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC

Το πρόγραμμα GT-Power ορίζει μια **αρχική τιμή για τη μάζα της αιθάλης που υπάρχει στο φίλτρο στα 33 g** καθώς επίσης και μια **αρχική τιμή για τη διαπερατότητα των τοιχωμάτων του φίλτρου στα $1,33 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^2$** . Αρχικά, στο **Σχήμα 6.24** αναπαρίσταται η συνολική μάζα των σωματιδίων που κατακρατείται στο DPF, που όπως είναι λογικό αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου καθώς γεμίζει το φίλτρο. Στο επόμενο **Σχήμα 6.25** έχουμε τη μέση θερμοκρασία της αιθάλης με τις αυξομειώσεις της εξαιτίας των συνεχών επιβραδύνσεων και επιταχύνσεων στο εντός πόλης τμήμα που μελετάται, ενώ οι θερμοκρασίες είναι τυπικές για τις σωληνώσεις εξαγωγής ενός πετρελαιοκίνητου οχήματος που υπάρχει το DPF. Ακολουθεί το **Σχήμα 6.26** και η πτώση πίεσης που επιβάλλει το φίλτρο στη ροή των καυσαερίων. Έτσι και εδώ, υπάρχουν οι αυξομειώσεις αναλόγως του δυναμικού των καυσαερίων, ενώ οι τιμές από 0,1 έως 0,4 bar για τις απώλειες πίεσης είναι λογικές για μια αντιρρυπαντική συσκευή.

Στο **Σχήμα 6.27** παρατίθεται η αποδοτικότητα του φίλτρου, όπου διακρίνεται πως κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα άνω του 80-85%, δίνοντας έτσι μία εικόνα ότι κατακρατά μεγάλο ποσοστό των σωματιδίων αιθάλης πριν αυτά εξέλθουν από την εξάτμιση του οχήματος. Οι απότομες μειώσεις της αποδοτικότητας οφείλονται στην υστέρηση του υπερπληρωτή εξαιτίας των ξαφνικών επιταχύνσεων. Παρόλα αυτά, διαπιστώνεται η αύξηση της αποδοτικότητας του φίλτρου με την παρέλευση των αρχικών 500 sec γεγονός που οφείλεται στην επίτευξη ιδανικών θερμοκρασιών για τη λειτουργία του DPF. Τέλος, στο **Σχήμα 6.28** βλέπουμε τη διαπερατότητα των τοιχωμάτων του φίλτρου, που όπως είναι λογικό μειώνεται με την πάροδο του χρόνου καθώς τα κανάλια του φίλτρου γεμίζουν με τα σωματίδια αιθάλης που κατακρατούνται.

7. Παραμετρική ανάλυση

7.1 Εισαγωγικά

Θα ακολουθήσει η παραμετρική ανάλυση των σωματιδίων αιθάλης και του CO₂ που παρουσιάζουν το πιο έντονο ενδιαφέρον από πλευράς εκπομπών για τα πετρελαιοκίνητα οχήματα. Επιπλέον, θα παρουσιαστούν και κάποια από τα βασικά μεγέθη του φίλτρου σωματιδίων ανά παράμετρο.

Σχετικά με την παραμετροποίηση, έχουμε τις εξής διακρίσεις ως προς:

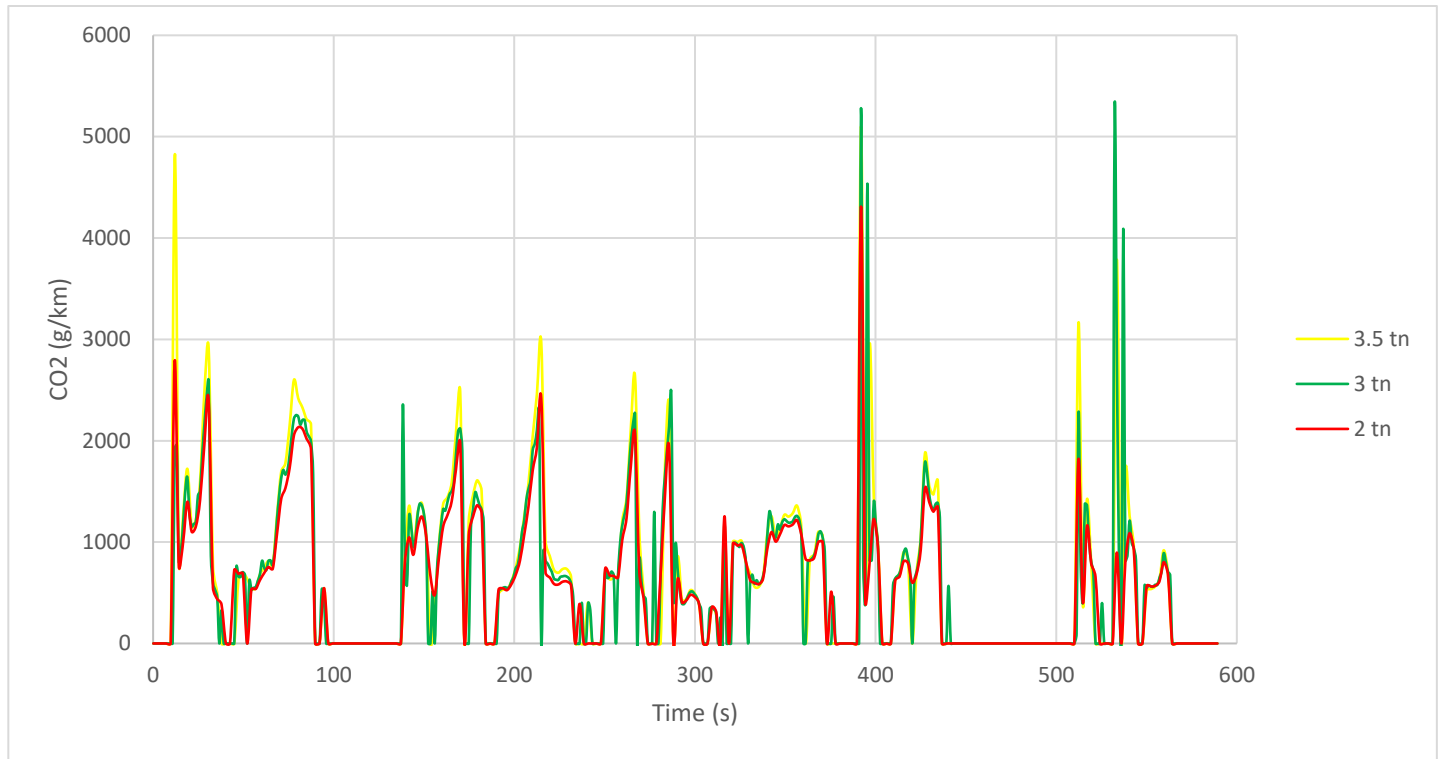
- Τη μάζα οχήματος, m_v
- Τη μετωπική επιφάνεια του οχήματος, A_f
- Τον συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης, C_d
- Τη ροπή αδράνειας του υπερπληρωτή, Θ_{TC}

Παρακάτω στον **Πίνακα 7.1** συνοψίζονται οι διάφορες τιμές που επιλέχθηκαν για την παραμετρική ανάλυση που προσομοιώθηκε στην παρούσα ενότητα της εργασίας.

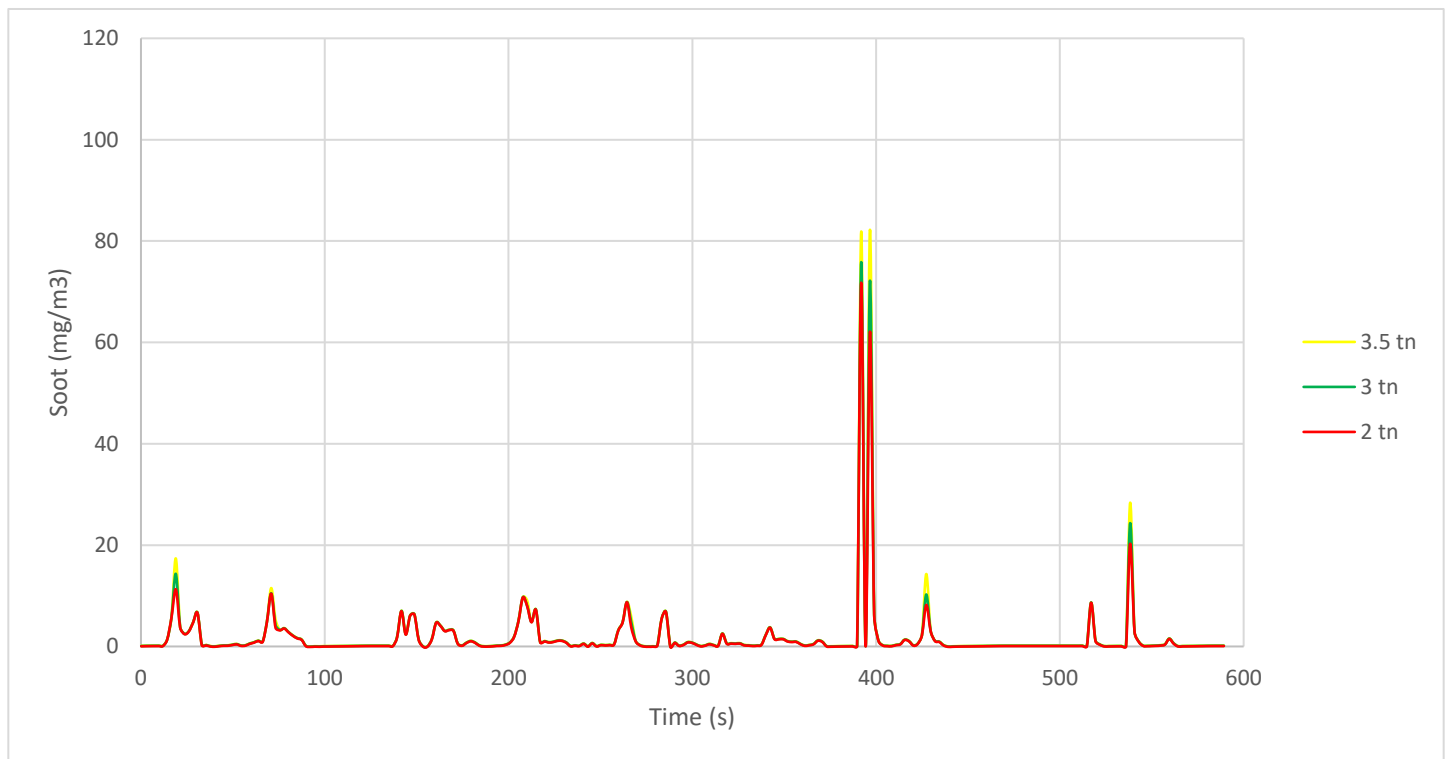
Πίνακας 7.1: Παραμετρικές τιμές μεγεθών των προσομοιώσεων που διενεργήθηκαν

Μέγεθος	Τιμή οχήματος αναφοράς	Παραμετρικές τιμές	
		3	2
Μάζα οχήματος, m_v	3,5 tn	3 tn	2 tn
Μετωπική επιφάνεια του οχήματος, A_f	3 m ²	2,5 m ²	3,5 m ²
Συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης, C_d	0,38	0,28	0,48
Ροπή αδράνειας του υπερπληρωτή, Θ_{TC}	0,0015 kg·m ²	0,0008 kg·m ²	0,0002 kg·m ²

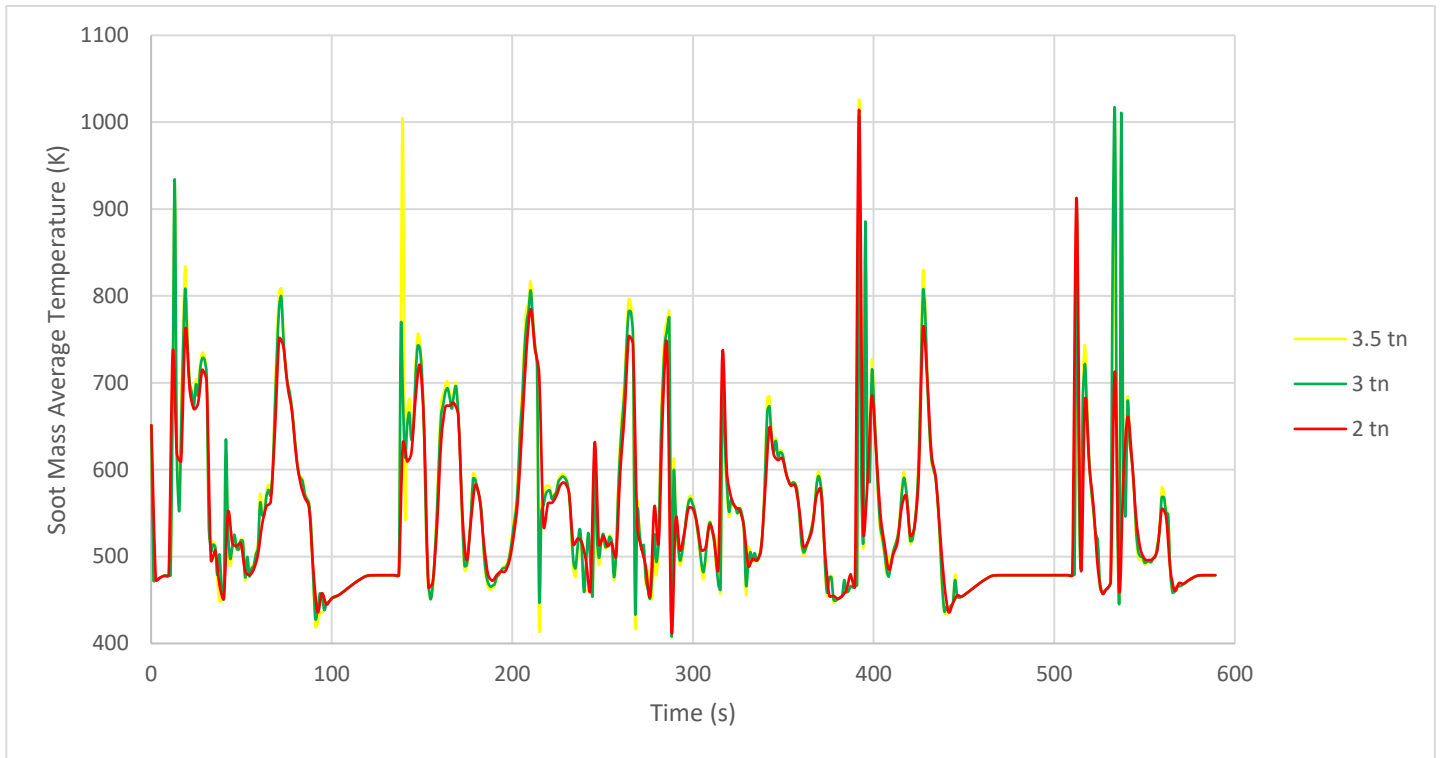
7.2 Παραμετροποίηση ως προς τη μάζα του οχήματος, m_v



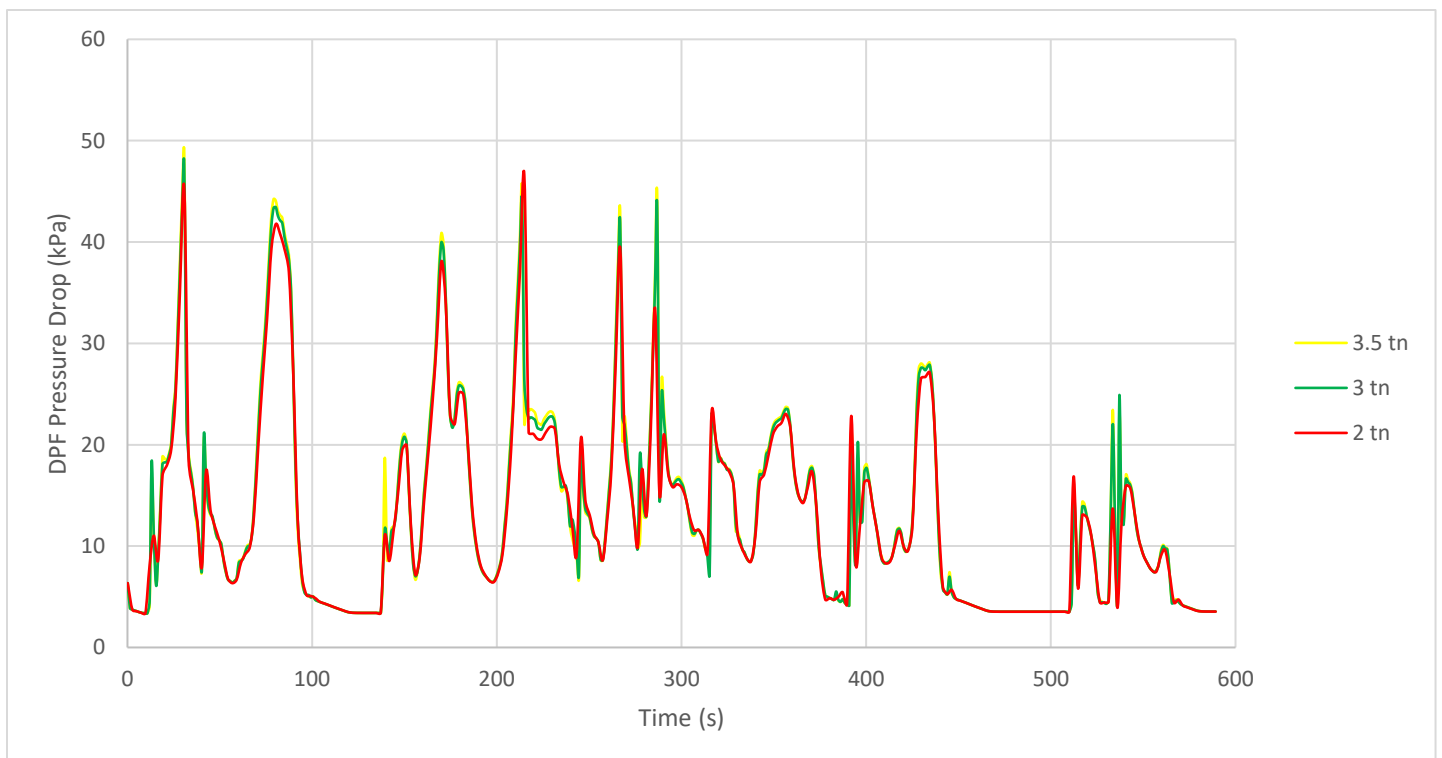
Σχήμα 7.1: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, CO₂ συναρτήσεϊ του χρόνου με παράμετρο τη μάζα του οχήματος κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



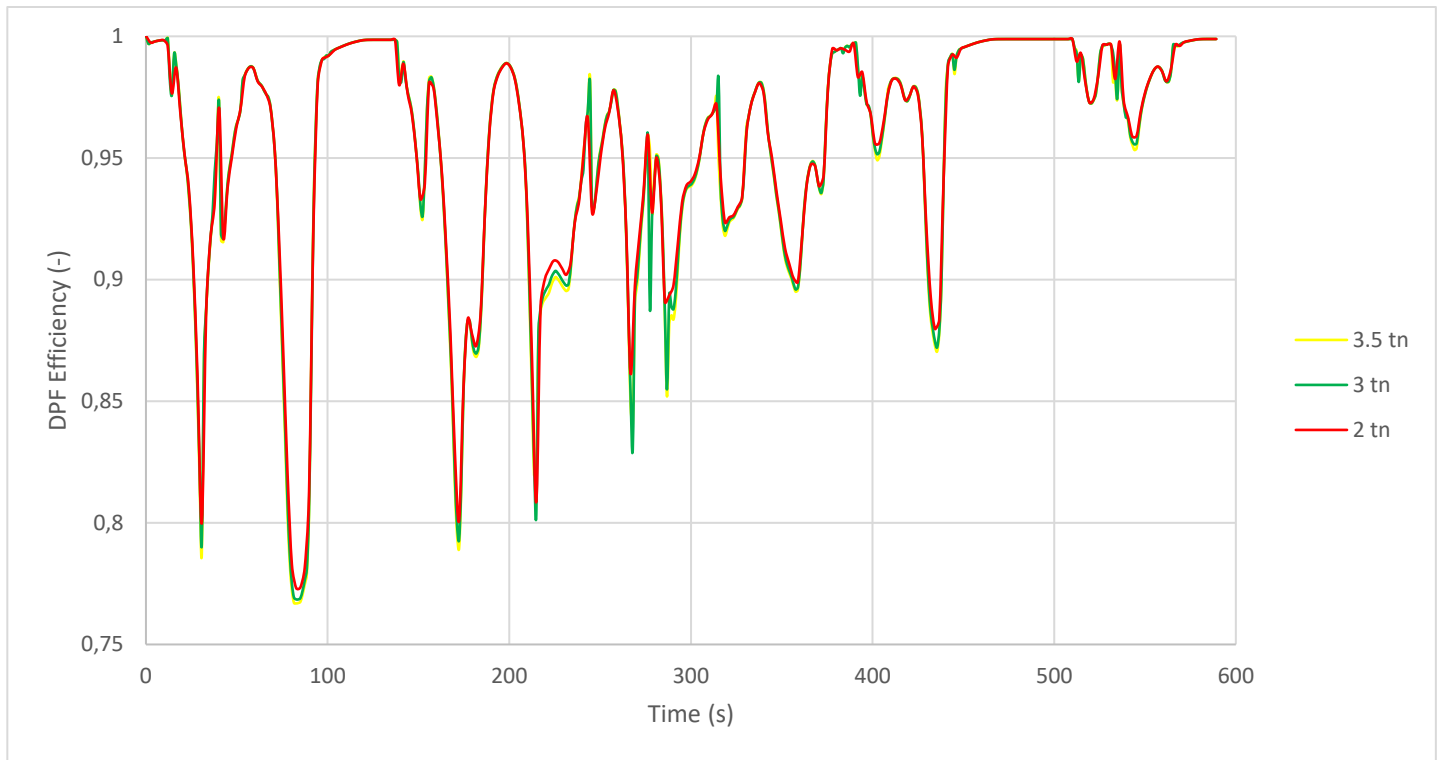
Σχήμα 7.2: Εκπομπές σωματιδίων αιθάλης συναρτήσεϊ του χρόνου με παράμετρο τη μάζα του οχήματος κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 7.3: Μέση θερμοκρασία σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη μάζα του οχήματος κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 7.4: Πτώση πίεσης στο φίλτρο συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη μάζα του οχήματος κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 7.5: Αποδοτικότητα του φίλτρου συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη μάζα του οχήματος κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC

Στην πρώτη κατηγορία των παραμετροποιήσεων, μελετήθηκε η διαφοροποίηση της μάζας του οχήματος. Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάστηκαν οι εκπομπές CO₂ και σωματιδίων, καθώς και τρία κύρια χαρακτηριστικά του φίλτρου DPF. Από τα **Σχήματα 7.1 και 7.2**, γίνεται αντιληπτό ότι μειώνοντας τη μάζα του οχήματος, μειώνονται και οι εκπομπές ρύπων εξαιτίας των αυξημένων γενικά τιμών λα για την επίτευξη της απαιτούμενης ροπής. Επίσης, στα **Σχήματα 7.3 και 7.5** που παρουσιάζονται η μέση θερμοκρασία των σωματιδίων αιθάλης και η αποδοτικότητα του φίλτρου δεν παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές. Στο **Σχήμα 7.4** που έχουμε την πτώση πίεσης στο DPF, διαπιστώνεται μία ελαφρά μείωσή της καθώς μειώνεται η μάζα του οχήματος, απόρροια της γενικότερης μείωσης των πιέσεων στην εξαγωγή του κινητήρα. Στους **Πίνακες 7.2 και 7.3** που ακολουθούν δίνονται οι ποσοστιαίες μεταβολές αναλόγως της διαφοροποίησης της μάζας για τα μεγέθη που παρατέθηκαν στα ανωτέρω σχήματα.

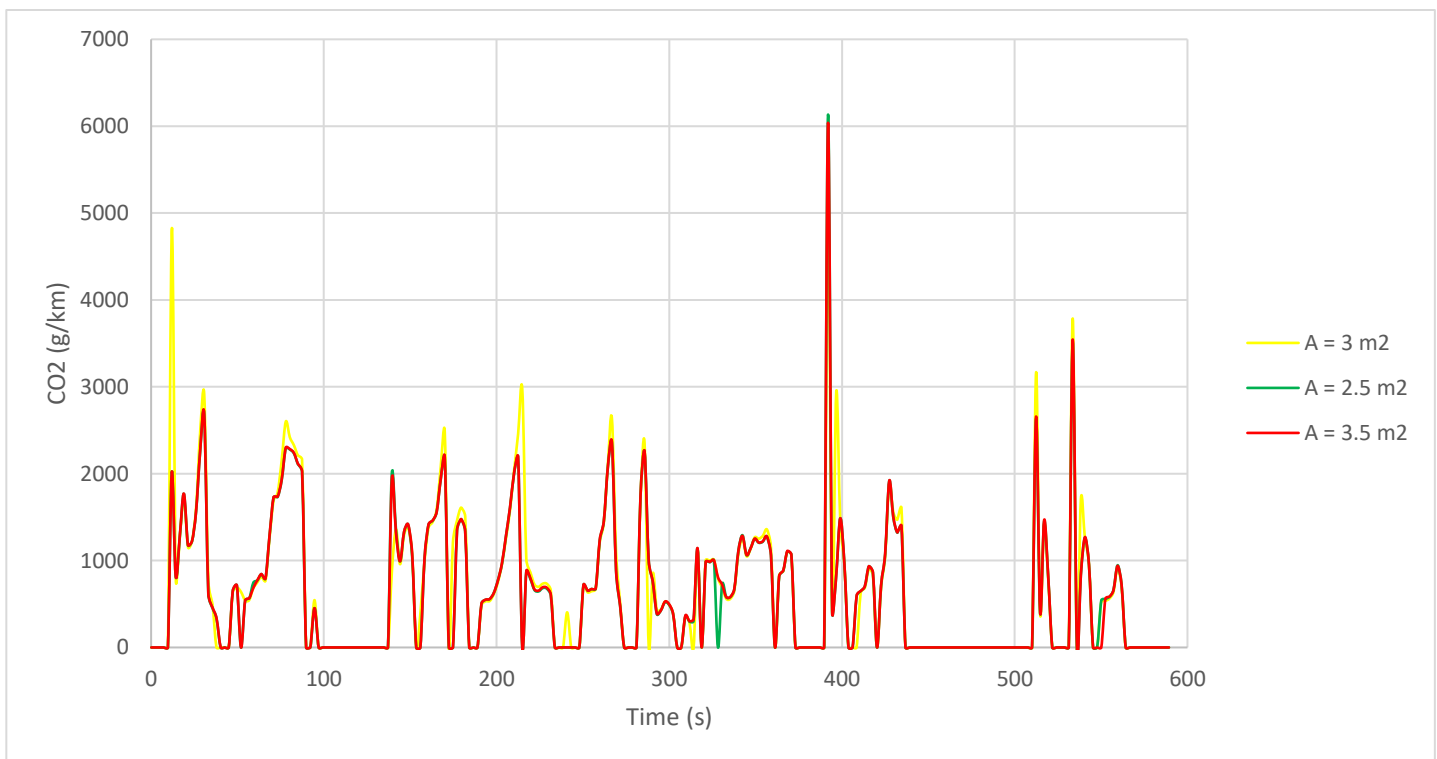
Πίνακας 7.2: Ποσοστιαία μεταβολή (%) βασικών μεγεθών αναλόγως της μάζας του οχήματος m_v

	Εκπομπές CO ₂ (g/km)	Εκπομπές σωματιδίων αιθάλης (mg/m ³)	Μέση θερμοκρασία σωματιδίων αιθάλης (K)	Πτώση πίεσης στο φίλτρο (kPa)	Αποδοτικότητα του φίλτρου (-)
m_v = 3,5 tn (αναφοράς)	671,86	2,03	549,39	13,32	0,95
m_v = 3 tn	623,92	1,87	548,29	13,22	0,95
Ποσοστιαία μεταβολή	-7,13%	-8,04%	-0,20%	-0,76%	0,04%

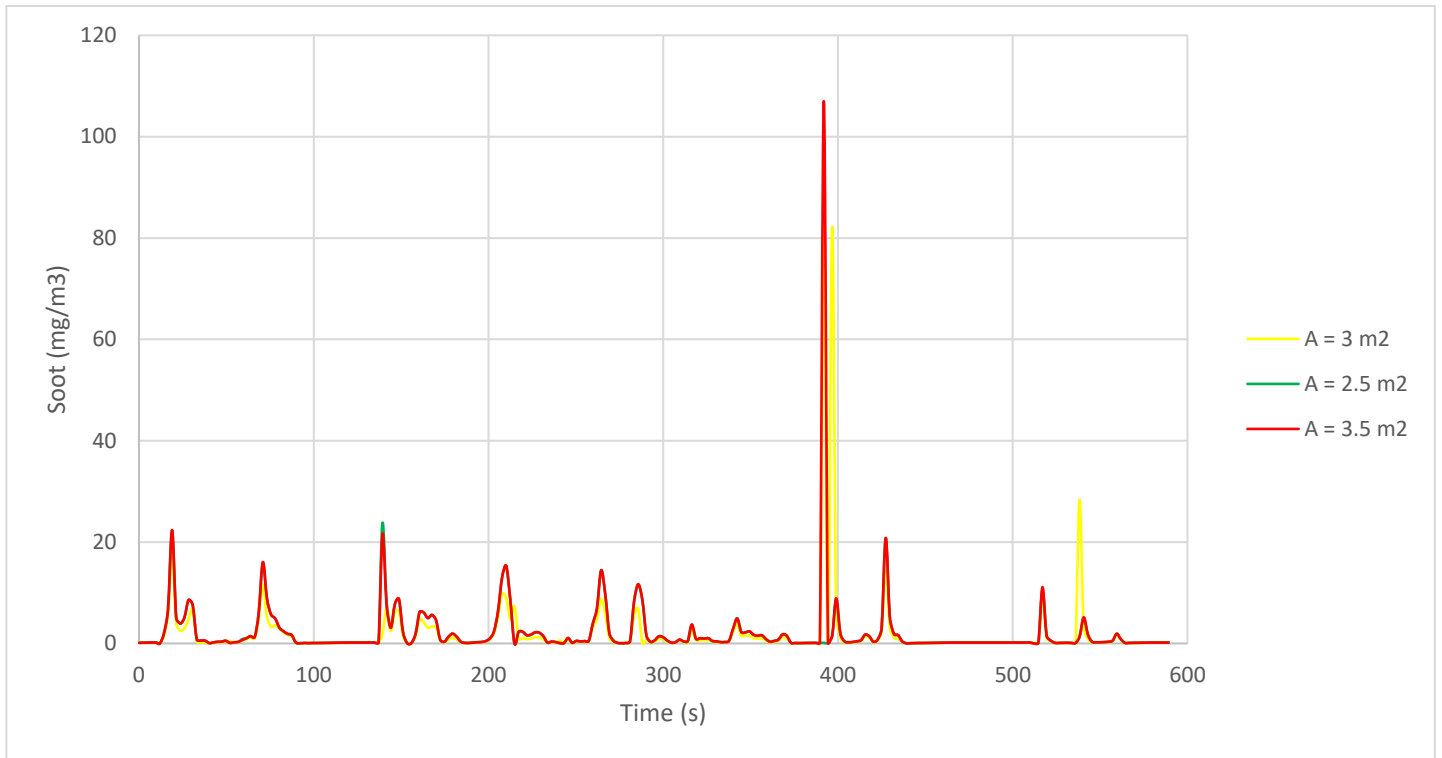
Πίνακας 7.3: Ποσοστιαία μεταβολή (%) βασικών μεγεθών αναλόγως της μάζας του οχήματος m_v

	Εκπομπές CO ₂ (g/km)	Εκπομπές σωματιδίων αιθάλης (mg/m ³)	Μέση θερμοκρασία σωματιδίων αιθάλης (K)	Πτώση πίεσης στο φίλτρο (kPa)	Αποδοτικότητα του φίλτρου (-)
$m_v = 3,5$ tn (αναφοράς)	671,86	2,03	549,39	13,32	0,95
$m_v = 2$ tn	581,25	1,71	544,42	12,96	0,96
Ποσοστιαία μεταβολή	-13,49%	-15,80%	-0,90%	-2,74%	0,15%

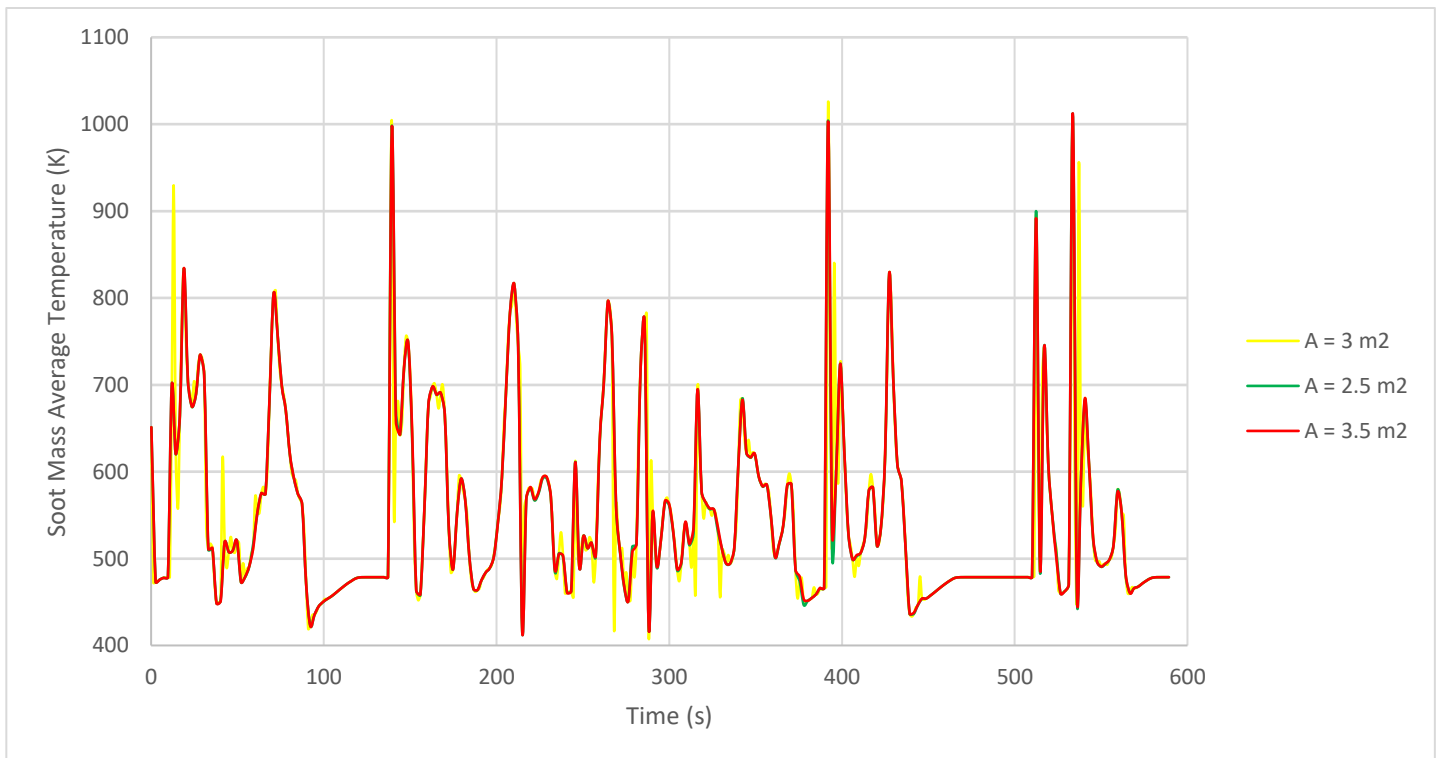
7.3 Παραμετροποίηση ως προς τη μετωπική επιφάνεια του οχήματος, A_f



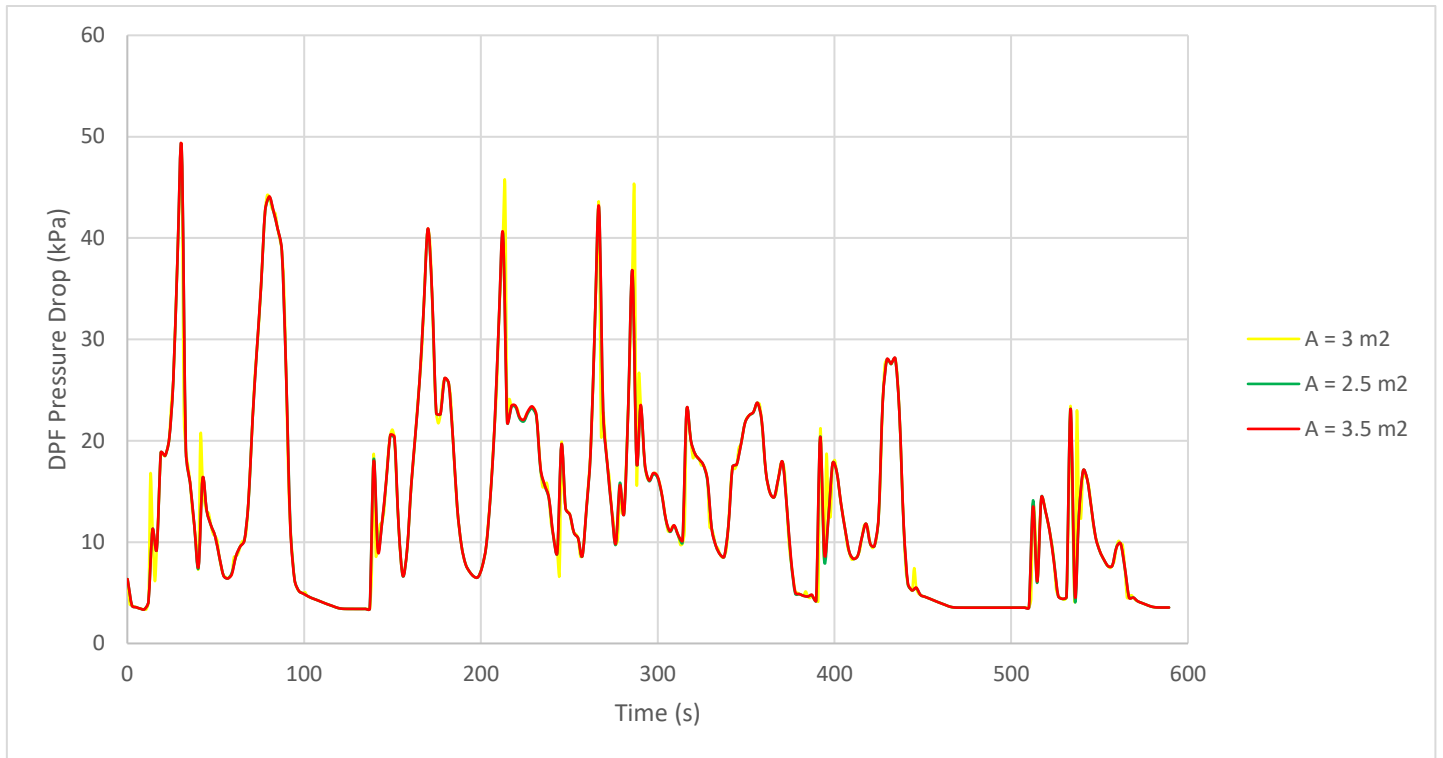
Σχήμα 7.6: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, CO₂ συναρτήσεως του χρόνου με παράμετρο τη μετωπική επιφάνεια του οχήματος κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



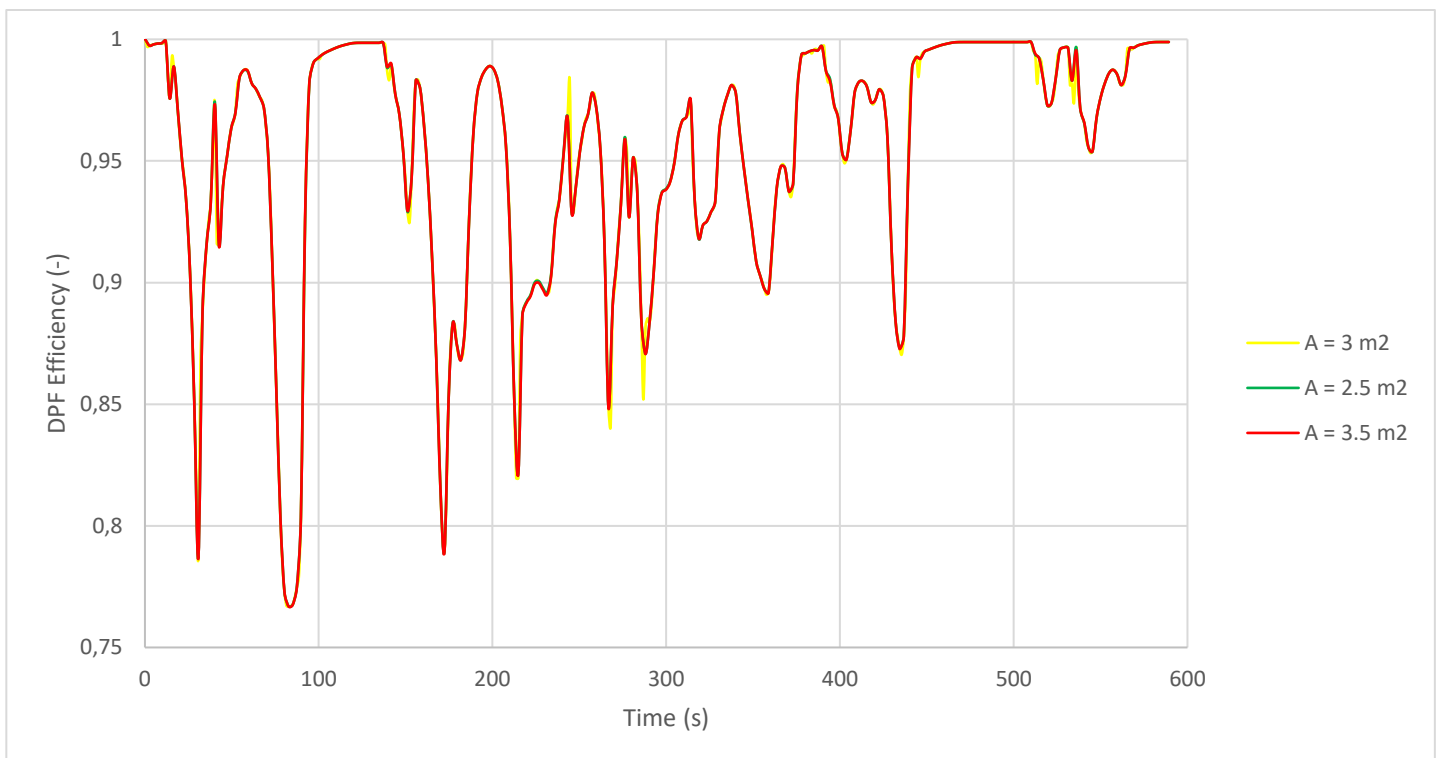
Σχήμα 7.7: Εκπομπές σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη μετωπική επιφάνεια του οχήματος κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 7.8: Μέση θερμοκρασία σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη μετωπική επιφάνεια του οχήματος κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 7.9: Πτώση πίεσης στο φίλτρο συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη μετωπική επιφάνεια του οχήματος κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 7.10: Αποδοτικότητα του φίλτρου συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη μετωπική επιφάνεια του οχήματος κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC

Η επόμενη παραμετρική μελέτη που έγινε αφορά τη μετωπική επιφάνεια του οχήματος. Από τα **Σχήματα 7.7 και 7.8** καταλήγουμε στο γενικό συμπέρασμα ότι με αύξηση της μετωπικής επιφάνειας (άρα και αύξηση της κατανάλωσης λόγω δυσχερέστερης αεροδυναμικής αντίστασης) θα αυξηθούν οι εκπομπές CO₂ και σωματιδίων, ενώ με μείωση της μετωπικής επιφάνειας του οχήματος θα μειωθούν και οι εκπομπές για τον ίδιο λόγο. Στα **Σχήματα 7.8, 7.9 και 7.10** δεν παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές των βασικών χαρακτηριστικών μεγεθών του φίλτρου, με αποτέλεσμα τη μη επίδραση της μετωπικής επιφάνειας στη συμπεριφορά του φίλτρου εν γένει. Παρακάτω στους **Πίνακες 7.4 και 7.5** παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες μεταβολές των μεγεθών που παρατέθηκαν στα σχήματα της παραμετροποίησης με βάση τη μετωπική επιφάνεια του οχήματος.

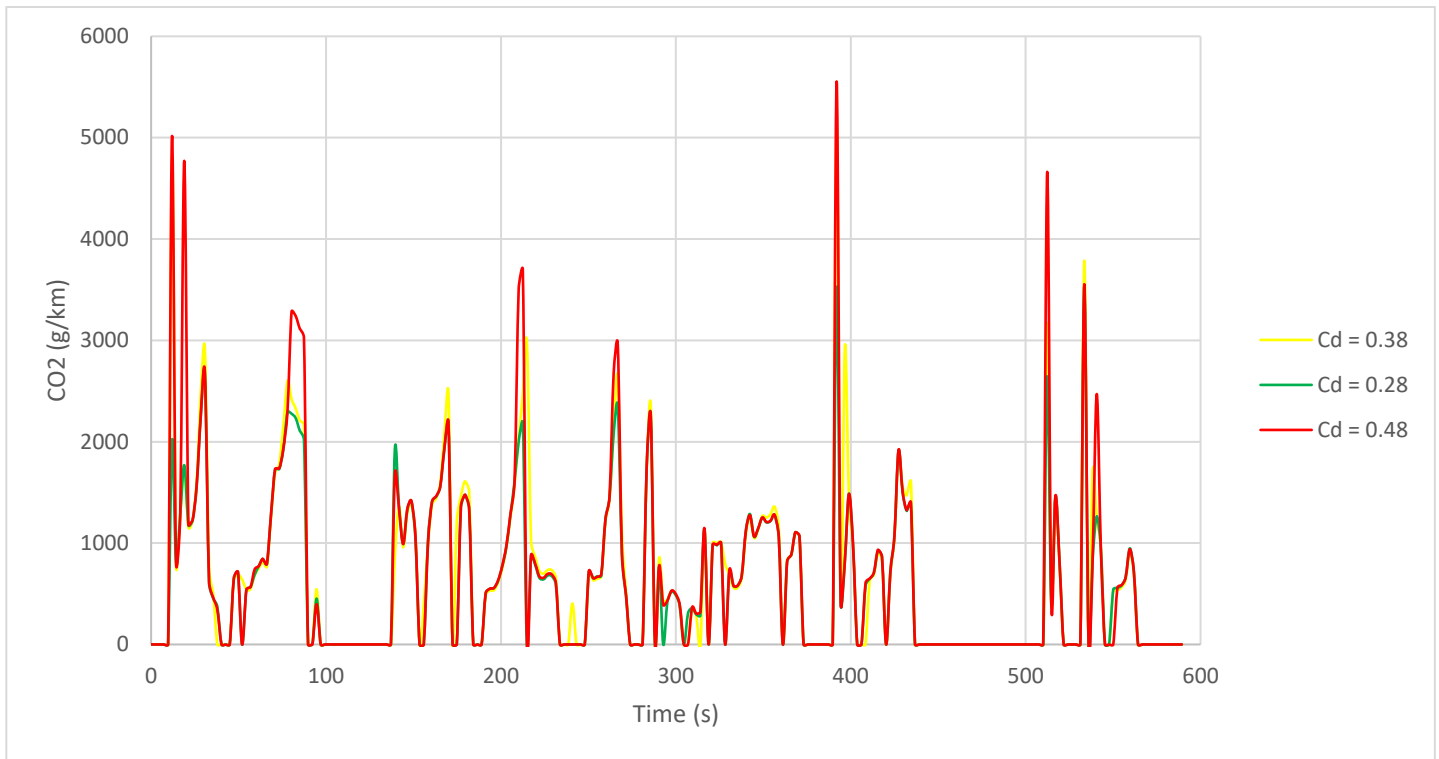
Πίνακας 7.4: Ποσοστιαία μεταβολή (%) βασικών μεγεθών αναλόγως της μετωπικής επιφάνειας του οχήματος A_f

	Εκπομπές CO ₂ (g/km)	Εκπομπές σωματιδίων αιθάλης (mg/m ³)	Μέση θερμοκρασία σωματιδίων αιθάλης (K)	Πτώση πίεσης στο φίλτρο (kPa)	Αποδοτικότητα του φίλτρου (-)
A_f = 3 m² (αναφοράς)	671,86	2,03	549,39	13,32	0,95
A_f = 2,5 m²	622,94	1,88	549,64	13,27	0,95
Ποσοστιαία μεταβολή	-7,28%	-7,32%	0,05%	-0,39%	0,02%

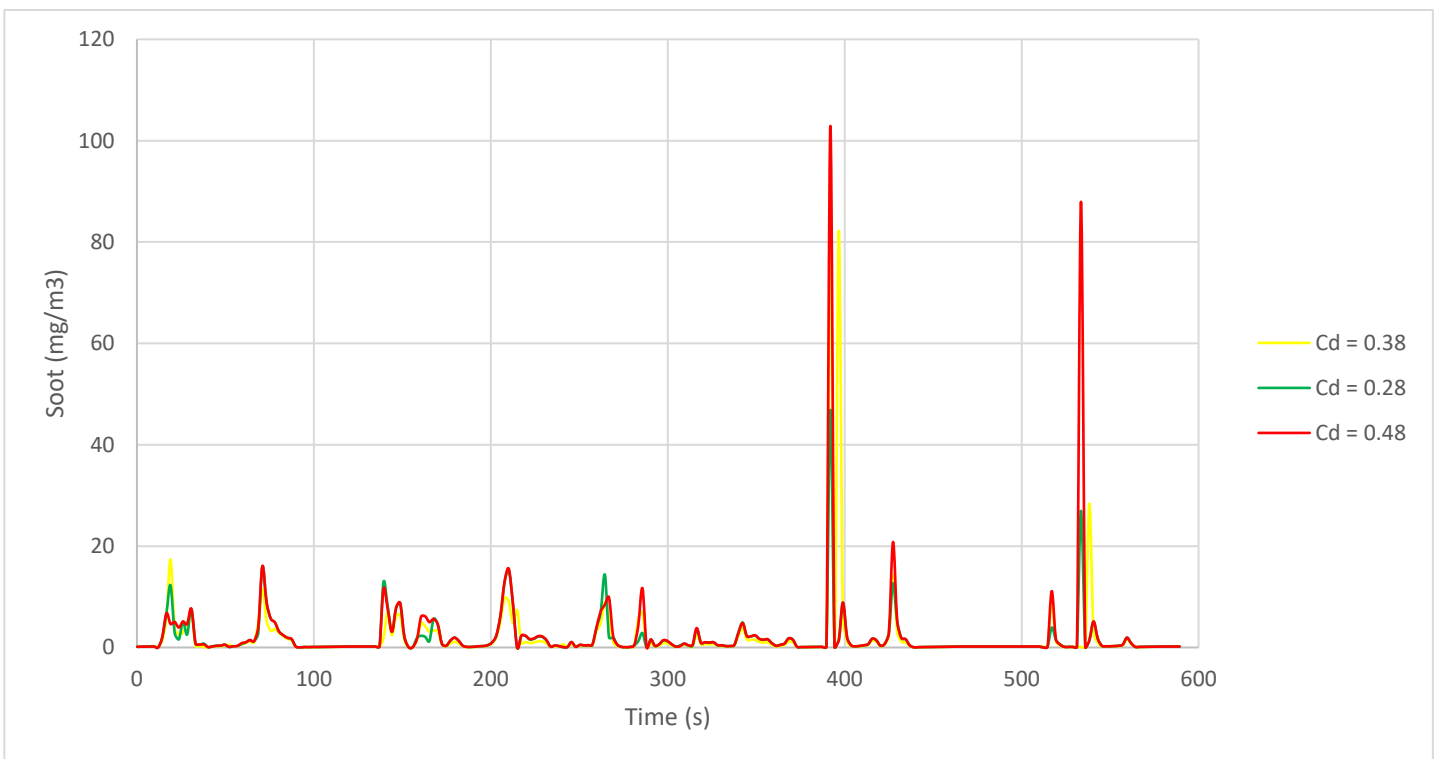
Πίνακας 7.5: Ποσοστιαία μεταβολή (%) βασικών μεγεθών αναλόγως της μετωπικής επιφάνειας του οχήματος A_f

	Εκπομπές CO ₂ (g/km)	Εκπομπές σωματιδίων αιθάλης (mg/m ³)	Μέση θερμοκρασία σωματιδίων αιθάλης (K)	Πτώση πίεσης στο φίλτρο (kPa)	Αποδοτικότητα του φίλτρου (-)
A_f = 3 m² (αναφοράς)	671,86	2,03	549,39	13,32	0,95
A_f = 3,5 m²	718,82	2,31	549,93	13,29	0,95
Ποσοστιαία μεταβολή	6,99%	13,63%	0,10%	-0,22%	0,01%

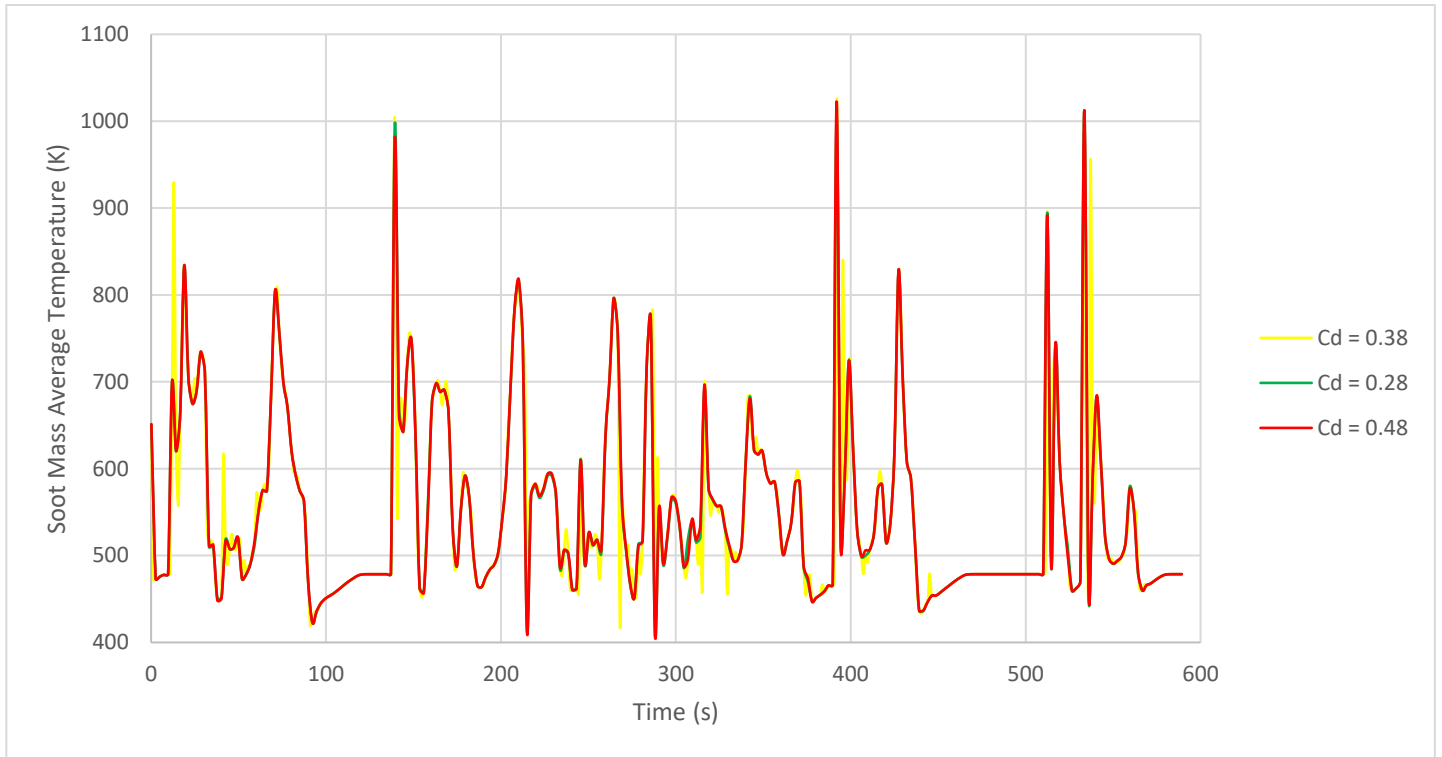
7.4 Παραμετροποίηση ως προς τον συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης, C_d



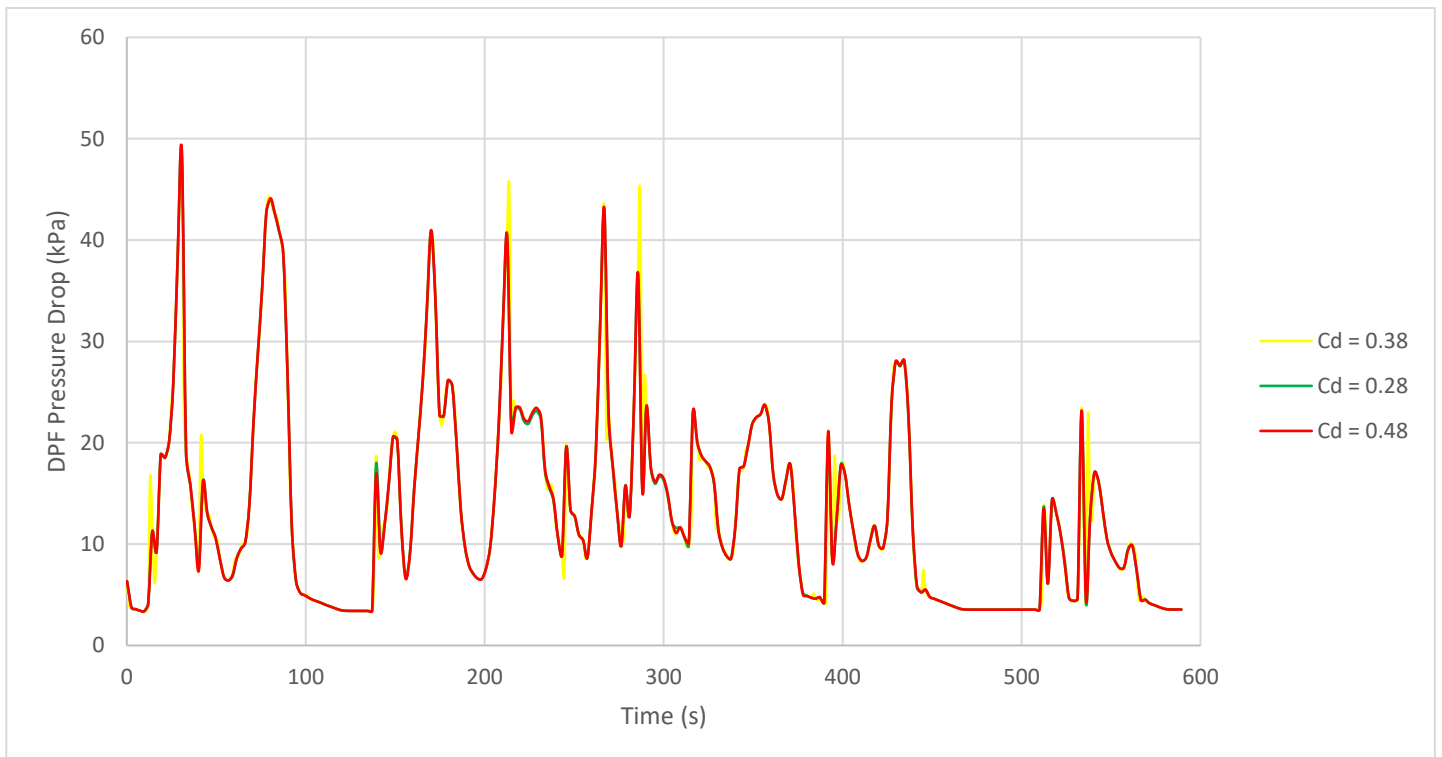
Σχήμα 7.11: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, CO_2 συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τον συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



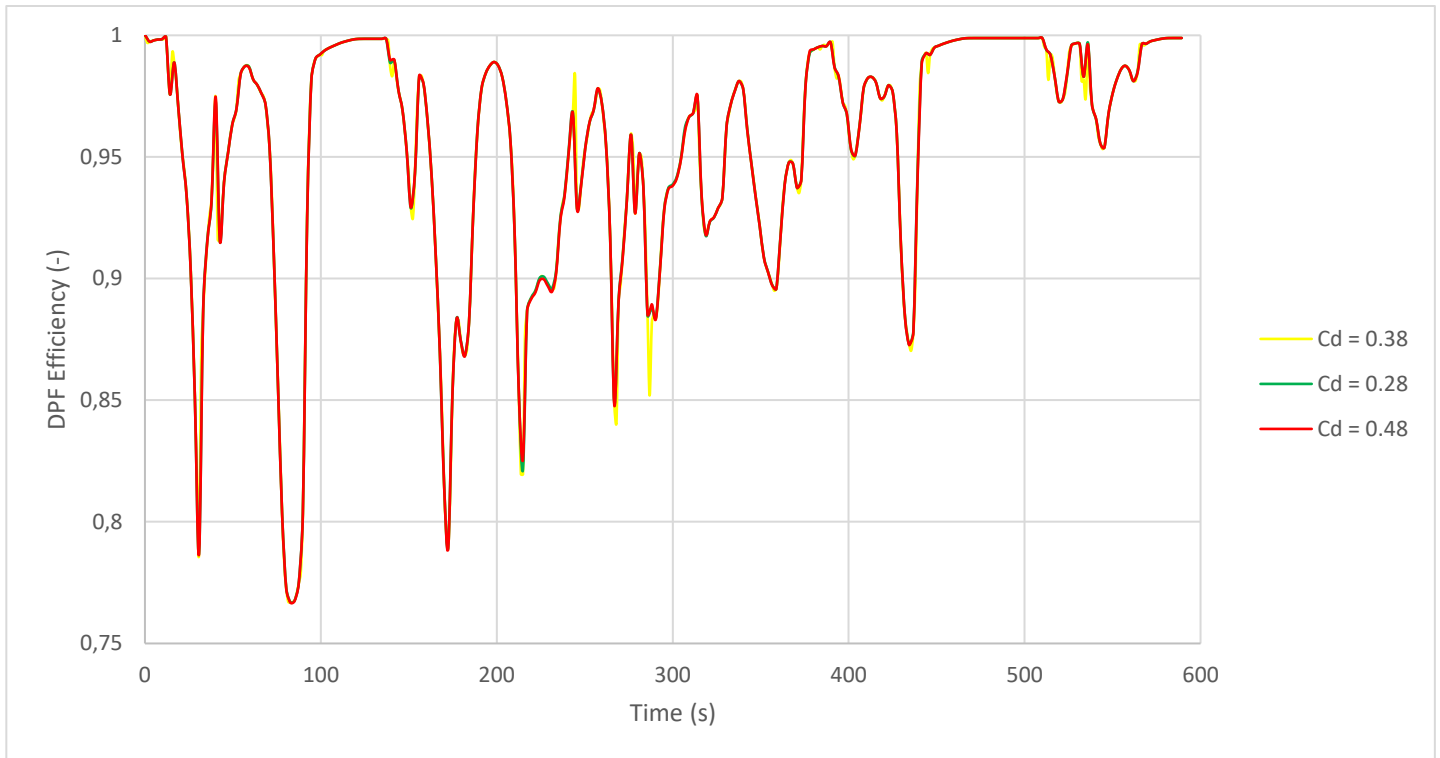
Σχήμα 7.12: Εκπομπές σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τον συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 7.13: Μέση θερμοκρασία σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τον συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 7.14: Πτώση πίεσης στο φίλτρο συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τον συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 7.15: Αποδοτικότητα του φίλτρου συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τον συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC

Στην παρούσα παραμετρική μελέτη διαφοροποιήθηκε ο συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης, όπου παρατηρείται μία ανάλογη συσχέτιση με την παραμετροποίηση ως προς τη μετωπική επιφάνεια του οχήματος. Έτσι, στα **Σχήματα 7.11 και 7.12**, το CO₂ και η αιθάλη αυξάνονται με την αύξηση της αεροδυναμικής αντίστασης (άρα και της κατανάλωσης του καυσίμου από τον κινητήρα) ενώ μειώνονται με τη μείωση του C_d αντίστοιχα. Στα **Σχήματα 7.13 και 7.15** δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς τη μέση θερμοκρασία των σωματιδίων αιθάλης και την αποδοτικότητα του φίλτρου. Όμως, στο **Σχήμα 7.14**, διαπιστώνεται μία ελαφρά μείωση της πτώσης πίεσης στο φίλτρο, είτε αυξάνοντας είτε μειώνοντας τον συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης, γεγονός που σημαίνει ότι ο C_d «παίζει» γύρω από την τιμή 0,38 ώστε να είναι ο βέλτιστος. Στους **Πίνακες 7.6 και 7.7** που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες μεταβολές των μεγεθών που αναπαραστάθηκαν στα σχήματα της παραμετροποίησης με βάση τον συντελεστή C_d.

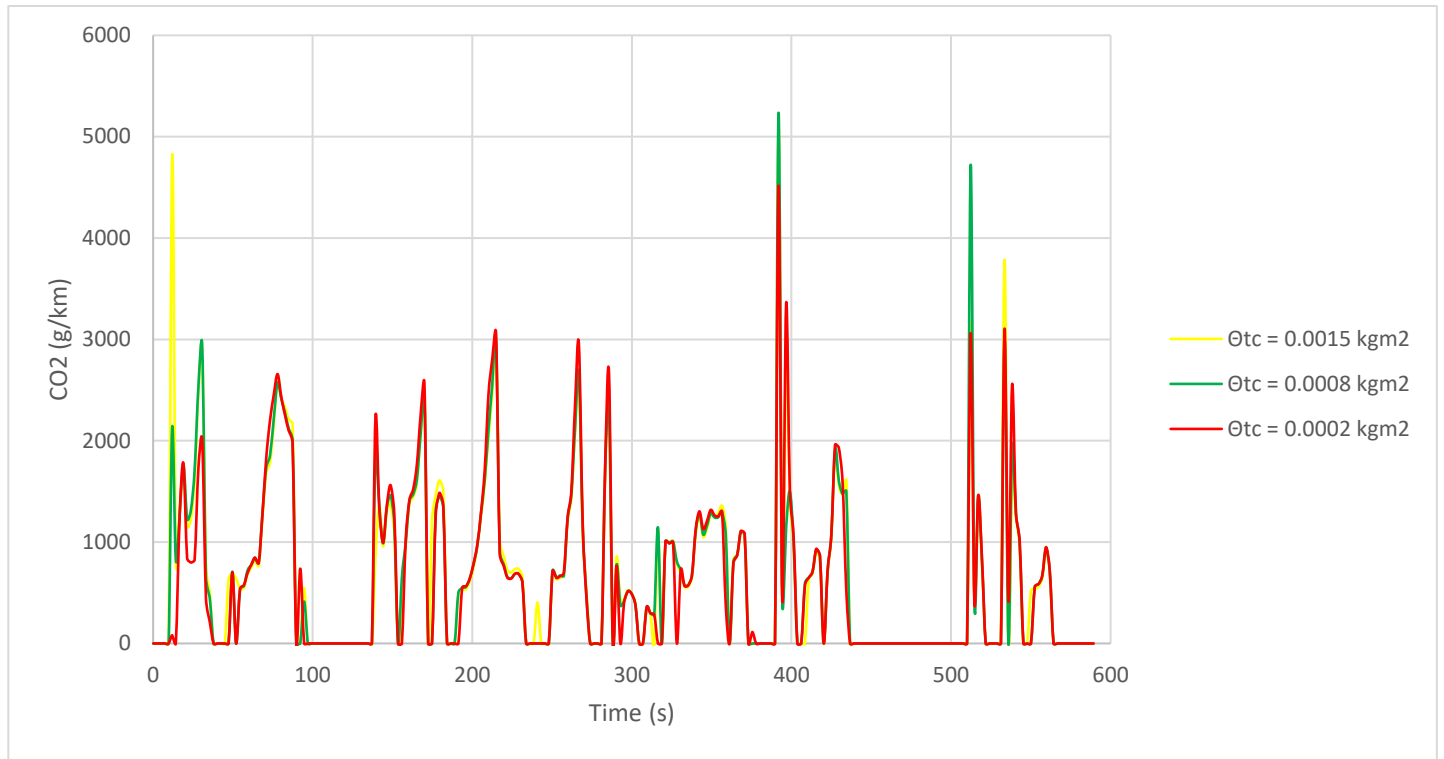
Πίνακας 7.6: Ποσοστιαία μεταβολή (%) βασικών μεγεθών αναλόγως του συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης C_d

	Εκπομπές CO_2 (g/km)	Εκπομπές σωματιδίων αιθάλης (mg/m^3)	Μέση θερμοκρασία σωματιδίων αιθάλης (K)	Πτώση πίεσης στο φίλτρο (kPa)	Αποδοτικότητα του φίλτρου (-)
$C_d = 0,38$ (αναφοράς)	671,86	2,03	549,39	13,32	0,95
$C_d = 0,28$	607,52	1,80	549,52	13,25	0,95
Ποσοστιαία μεταβολή	-9,58%	-11,30%	0,02%	-0,51%	0,03%

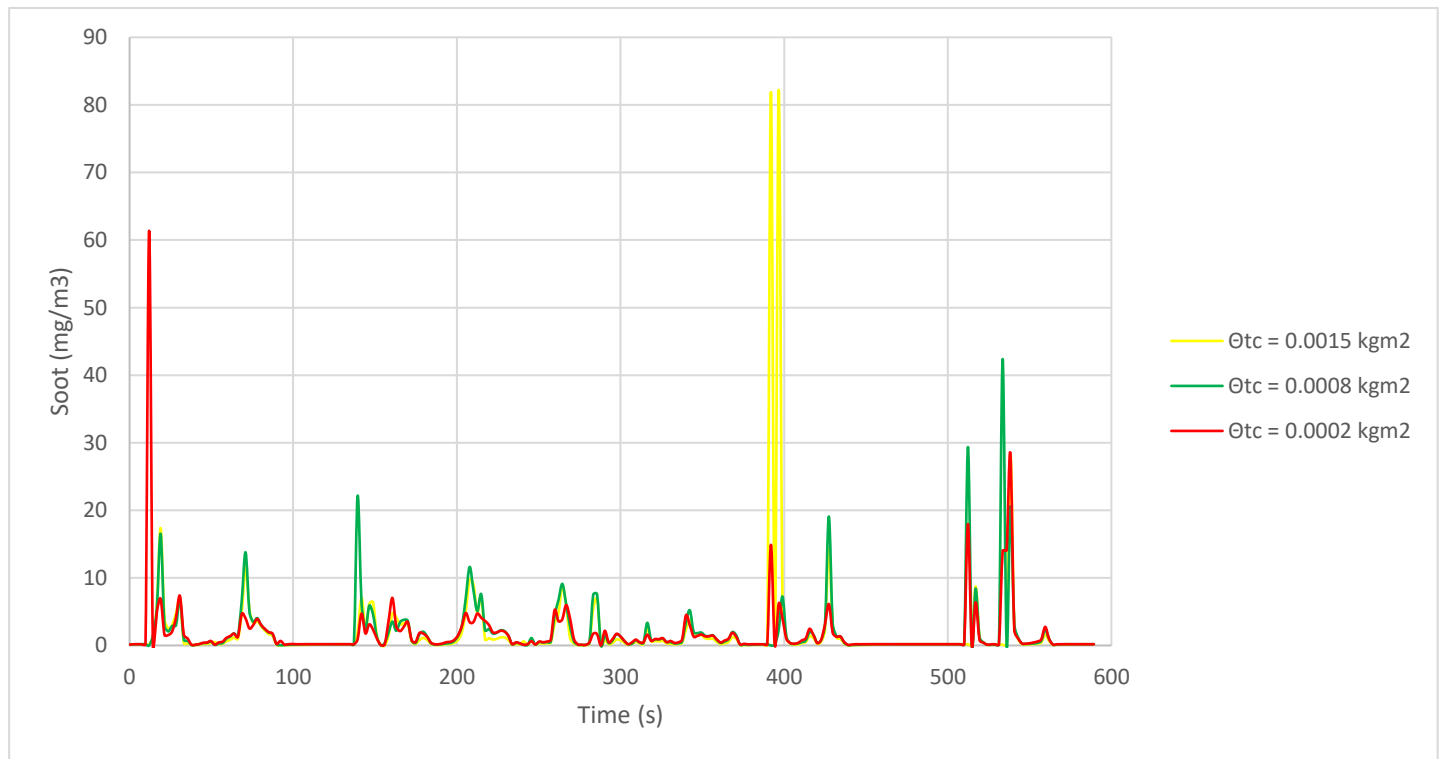
Πίνακας 7.7: Ποσοστιαία μεταβολή (%) βασικών μεγεθών αναλόγως του συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης C_d

	Εκπομπές CO_2 (g/km)	Εκπομπές σωματιδίων αιθάλης (mg/m^3)	Μέση θερμοκρασία σωματιδίων αιθάλης (K)	Πτώση πίεσης στο φίλτρο (kPa)	Αποδοτικότητα του φίλτρου (-)
$C_d = 0,38$ (αναφοράς)	671,86	2,03	549,39	13,32	0,95
$C_d = 0,48$	684,62	2,44	549,82	13,28	0,95
Ποσοστιαία μεταβολή	1,90%	19,97%	0,08%	-0,32%	0,02%

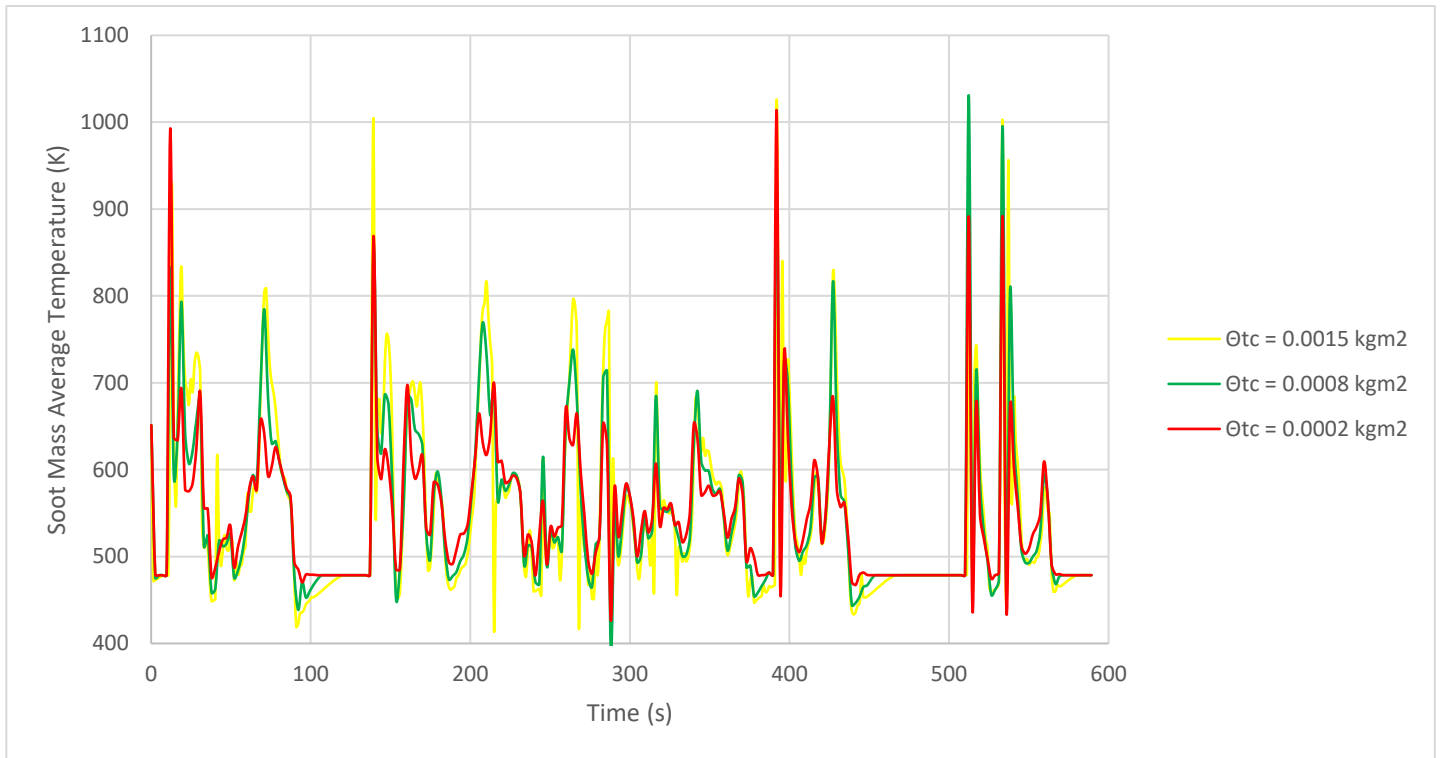
7.5 Παραμετροποίηση ως προς τη ροπή αδράνειας του υπερπληρωτή, Θ_{TC}



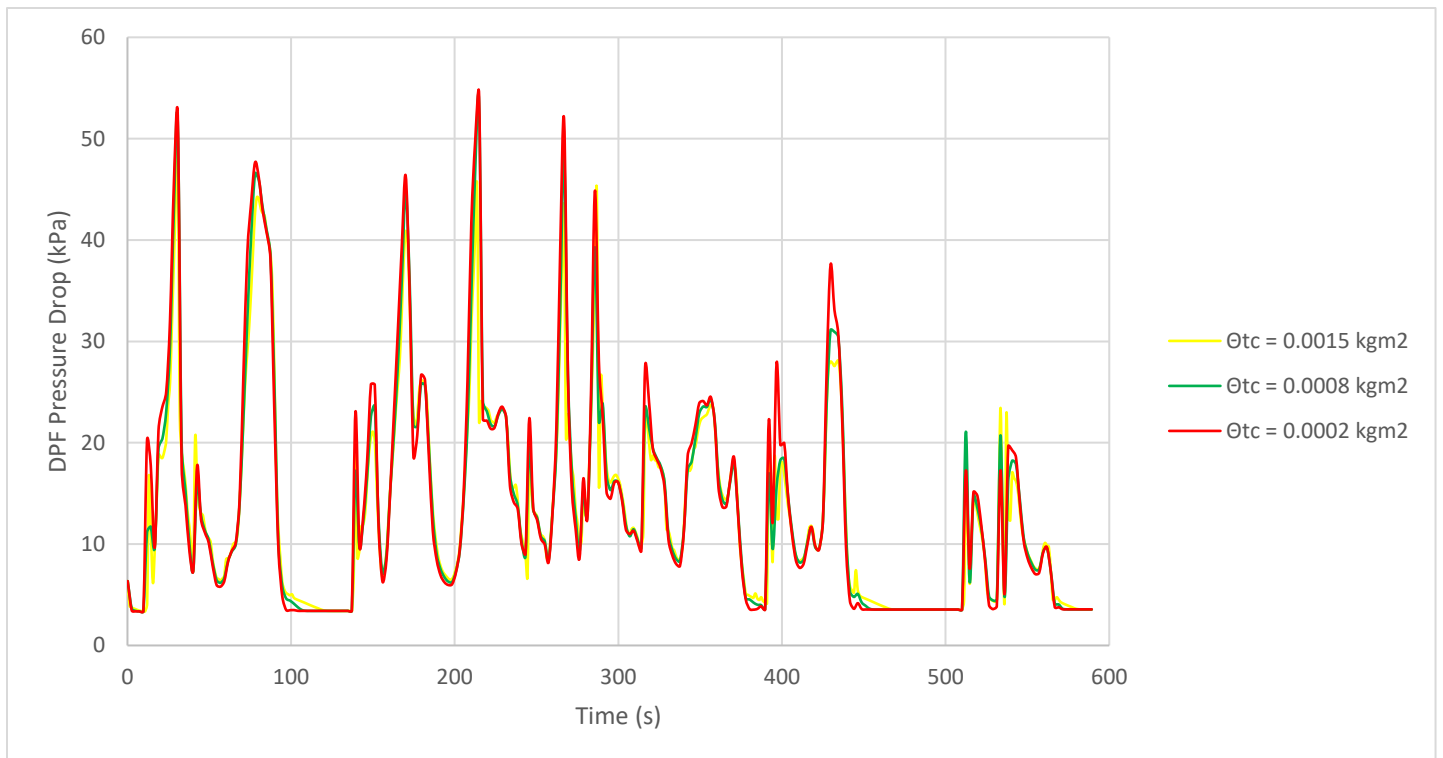
Σχήμα 7.16: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, CO_2 συναρτήσεως του χρόνου με παράμετρο τη ροπή αδράνειας του υπερπληρωτή κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



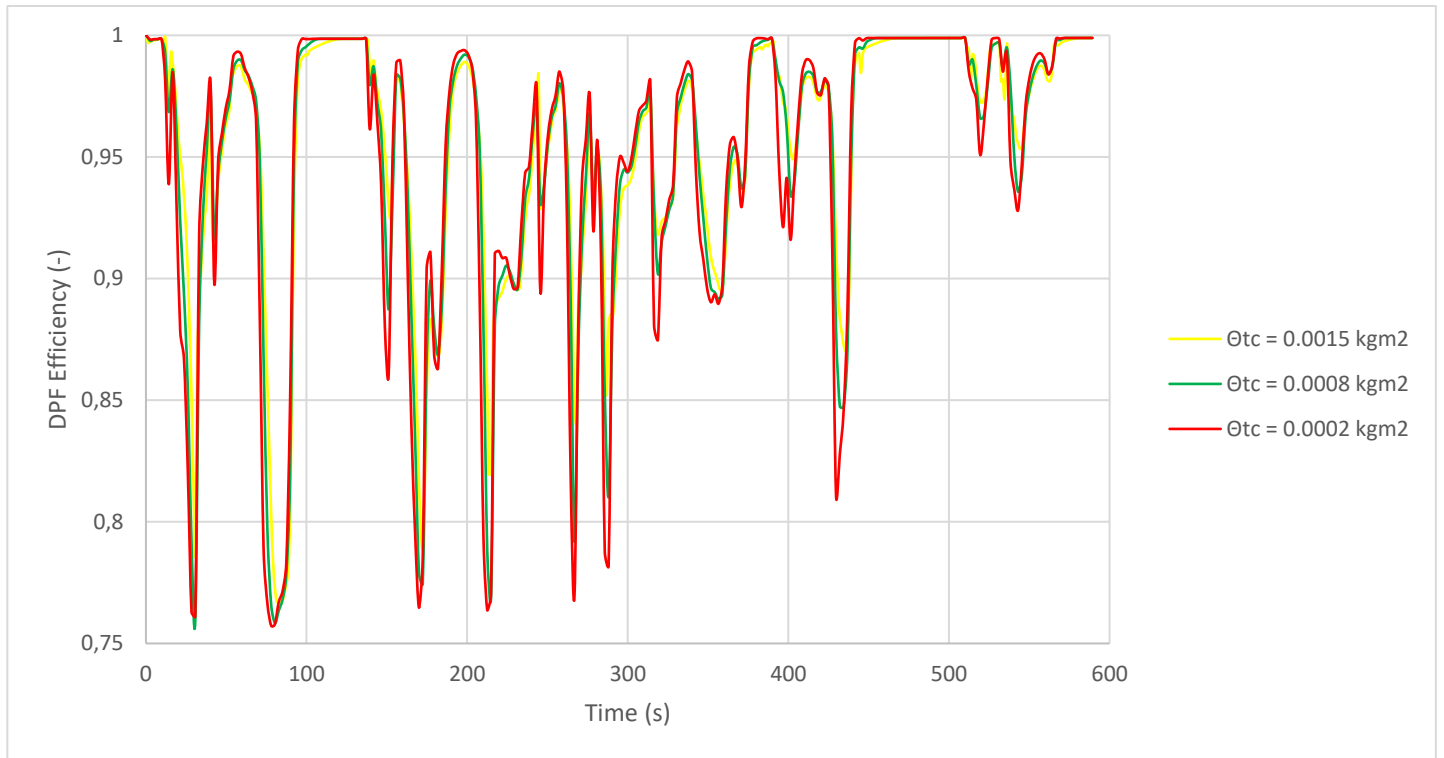
Σχήμα 7.17: Εκπομπές σωματιδίων αιθάλης συναρτήσεως του χρόνου με παράμετρο τη ροπή αδράνειας του υπερπληρωτή κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 7.18: Μέση θερμοκρασία σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη ροπή αδράνειας του υπερπληρωτή κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 7.19: Πτώση πίεσης στο φίλτρο συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη ροπή αδράνειας του υπερπληρωτή κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 7.20: Αποδοτικότητα του φίλτρου συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη ροπή αδράνειας του υπερπληρωτή κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC

Η τελευταία παραμετρική ανάλυση αφορά τη διαφοροποίηση ως προς τη ροπή αδράνειας του υπερπληρωτή, η οποία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις εκπομπές CO₂ και σωματιδίων αιθάλης εξαιτίας της μεταβατικής λειτουργίας. Μικρότερη ροπή αδράνειας που μελετάται εν προκειμένω, σημαίνει μείωση της υστέρησης του υπερπληρωτή (turbolag). Κατ' επέκταση και όπως διαπιστώνεται από τα **Σχήματα 7.16 και 7.17**, οι εκπομπές CO₂ και σωματιδίων μειώνονται με τη μείωση της ροπής αδράνειας του υπερπληρωτή. Επομένως, βελτιώνεται γενικότερα η απόκριση του συστήματος στροβιλο-υπερπλήρωσης μειώνοντας τη χρονική καθυστέρηση όπου το δυναμικό των καυσαερίων δεν ήταν επαρκές για να κινήσει το σύστημα. Αντίθετα, όπως παρατηρούμε στο **Σχήμα 7.19**, η πτώση πίεσης στο φίλτρο αυξάνεται αφού με τη μείωση της Θ_{tc} γεμίζει πιο γρήγορα με σωματίδια το φίλτρο, με συνέπεια να δυσκολεύει τα καυσαέρια να διαπεράσουν τα κανάλια του. Αφού αυξάνεται η πτώση πίεσης λόγω γρηγορότερης πλήρωσης του φίλτρου με σωματίδια, θα μειώνεται ελαφρώς και η αποδοτικότητα του φίλτρου (βλ. **Σχήμα 7.20**). Τέλος, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 7.18**, παρατηρείται πολύ μικρή μείωση και στη θερμοκρασία των σωματιδίων αιθάλης. Παρακάτω, δίνονται υπό μορφή πίνακα (Πίνακες 7.8 και 7.9) τα μεγέθη που αναπαραστάθηκαν στα διαγράμματα και υπολογίζονται οι ποσοστιαίες μεταβολές με βάση το όχημα αναφοράς.

Πίνακας 7.8: Ποσοστιαία μεταβολή (%) βασικών μεγεθών αναλόγως της ροπής αδράνειας του υπερπληρωτή Θ_{TC}

	Εκπομπές CO ₂ (g/km)	Εκπομπές σωματιδίων αιθάλης (mg/m ³)	Μέση θερμοκρασία σωματιδίων αιθάλης (K)	Πτώση πίεσης στο φίλτρο (kPa)	Αποδοτικότητα του φίλτρου (-)
$\Theta_{TC} = 0,0015 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (αναφοράς)	671,86	2,03	549,39	13,32	0,95
$\Theta_{TC} = 0,0008 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	655,53	1,93	549,60	13,71	0,95
Ποσοστιαία μεταβολή	-2,43%	-5,01%	0,04%	2,93%	-0,31%

Πίνακας 7.9: Ποσοστιαία μεταβολή (%) βασικών μεγεθών αναλόγως της ροπής αδράνειας του υπερπληρωτή Θ_{TC}

	Εκπομπές CO ₂ (g/km)	Εκπομπές σωματιδίων αιθάλης (mg/m ³)	Μέση θερμοκρασία σωματιδίων αιθάλης (K)	Πτώση πίεσης στο φίλτρο (kPa)	Αποδοτικότητα του φίλτρου (-)
$\Theta_{TC} = 0,0015 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (αναφοράς)	671,86	2,03	549,39	13,32	0,95
$\Theta_{TC} = 0,0002 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	630,20	1,76	546,55	14,12	0,95
Ποσοστιαία μεταβολή	-6,20%	-13,24%	-0,52%	5,95%	-0,69%

8. Συμπεράσματα

Βασιζόμενοι στην πληθώρα των προσομοιώσεων που διενεργήθηκαν, είναι δόκιμο να παρατεθούν συνοπτικά τα συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις που ανέκυψαν κατά τη συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Εν γένει, ο στόχος ήταν η μελέτη της επίδρασης του φίλτρου σωματιδίων DPF αφενός στις επιδόσεις του κινητήρα και αφετέρου στις εκπομπές του οχήματος με παράλληλη παρουσίαση των κύριων χαρακτηριστικών μεγεθών του φίλτρου.

Αρχικά, ο σκοπός για τον οποίο τοποθετείται το φίλτρο είναι η μείωση των σωματιδίων αιθάλης που εξέρχονται από την εξάτμιση του οχήματος. Κατά την προσομοίωση, αυτό επετεύχθη κατά **-20,81%** και επομένως κρίνεται επιτυχές το ταίριασμα του φίλτρου με τον κινητήρα του οχήματος αναφοράς. Επιπλέον, το DPF φάνηκε ότι μειώνει και τις εκπομπές NO_x κατά **-12,27%**. Όμως, εξαιτίας του γεγονότος ότι το DPF αποτελεί ένα αντιρρυπαντικό σύστημα που παρεμβαίνει στη ροή των καυσαερίων και δημιουργεί πτώση πίεσης, και απώλειες ροής, έχουμε μείωση των επιδόσεων του κινητήρα όπως η ροπή και ισχύς του. Άρα, αυξάνεται η ειδική κατανάλωση καυσίμου και ως συνέπεια αυξάνονται και οι εκπομπές CO₂ κατά **9,23%**.

Κατά την παραμετρική ανάλυση, η μείωση της μάζας του οχήματος m_V είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών CO₂ και αιθάλης εξαιτίας της χαμηλότερης κατανάλωσης καυσίμου. Επίσης, όσον αφορά τη μετωπική επιφάνεια του οχήματος και τον συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης που καθορίζουν τις αεροδυναμικές συνθήκες εν γένει, παρατηρείται όμοια συσχέτιση, δηλαδή: αύξηση της A_f ή του C_d που δυσχεραίνουν την κίνηση του οχήματος συνεπάγονται και αυξήσεις των ρύπων CO₂ και αιθάλης, ενώ ενδεχόμενη μείωση της A_f ή του C_d που διευκολύνουν την κίνηση του οχήματος (μειωμένη αντίσταση του αέρα) έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών.

Ως ιδέα για μελλοντική μελέτη/έρευνα θα μπορούσε να προταθεί μια προσομοίωση που αφορά την αναγέννηση του φίλτρου ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα ως προς τη συμπεριφορά του οχήματος κατά το άδειασμα του φίλτρου και την επίδραση στις επιδόσεις του.

Σε τελική ανάλυση, το φίλτρο σωματιδίων παρόλα τα μειονεκτήματα ως προς τις επιδόσεις του κινητήρα (όπως και κάθε σύστημα (μετ)επεξεργασίας καυσαερίων άλλωστε), μειώνει σημαντικά τις εκπομπές σωματιδίων αιθάλης και είναι προαπαιτούμενο για τους κατασκευαστές ώστε να συμβαδίζουν με την ολοένα και πιο αυστηρότερη νομοθεσία περί των ορίων εκπομπών. Η χρυσή τομή είναι να βρεθεί το σωστό ταίριασμα του φίλτρου με τον κινητήρα προκειμένου να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση εκπομπών σωματιδίων αιθάλης με ταυτόχρονη μικρότερη επίδραση στις επιδόσεις του οχήματος.

9. Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Προδιαγραφές της Ε.Ε. για τις εκπομπές ρύπων επιβατικών αυτοκινήτων (κατηγορίας M1 και M2) σε g/km [4].....	25
Πίνακας 3.2: Τυπικοί όγκοι συστημάτων μετ(επεξεργασίας) καυσαερίων πετρελαιοκίνητου οχήματος.....	32
Πίνακας 4.1: Τεχνικές προδιαγραφές των δεδομένων του Κύκλου WLTC για διάφορες περιοχές [11].....	42
Πίνακας 4.2: Σύνοψη κύριων τεχνικών προδιαγραφών των κλάσεων του Κύκλου Πόλης WLTC [11]	44
Πίνακας 4.3: Σύνοψη κύριων τεχνικών προδιαγραφών της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC [11]	44
Πίνακας 5.1: Κύρια χαρακτηριστικά του κινητήρα Mercedes-Benz OM3366LA	47
Πίνακας 5.2: Κύρια χαρακτηριστικά του οχήματος αναφοράς	49
Πίνακας 6.1: Ποσοστιαία μεταβολή (%) βασικών μεγεθών του κινητήρα λόγω της ύπαρξης του φίλτρου σωματιδίων DPF	69
Πίνακας 6.2: Ποσοστιαία μεταβολή (%) εκπομπών ρύπων του οχήματος λόγω της ύπαρξης του φίλτρου σωματιδίων DPF	73
Πίνακας 7.1: Παραμετρικές τιμές μεγεθών των προσομοιώσεων που διενεργήθηκαν	77
Πίνακας 7.2: Ποσοστιαία μεταβολή (%) βασικών μεγεθών αναλόγως της μάζας του οχήματος m_v	80
Πίνακας 7.3: Ποσοστιαία μεταβολή (%) βασικών μεγεθών αναλόγως της μάζας του οχήματος m_v	81
Πίνακας 7.4: Ποσοστιαία μεταβολή (%) βασικών μεγεθών αναλόγως της μετωπικής επιφάνειας του οχήματος A_f	84
Πίνακας 7.5: Ποσοστιαία μεταβολή (%) βασικών μεγεθών αναλόγως της μετωπικής επιφάνειας του οχήματος A_f	84
Πίνακας 7.6: Ποσοστιαία μεταβολή (%) βασικών μεγεθών αναλόγως του συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης C_d	88
Πίνακας 7.7: Ποσοστιαία μεταβολή (%) βασικών μεγεθών αναλόγως του συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης C_d	88
Πίνακας 7.8: Ποσοστιαία μεταβολή (%) βασικών μεγεθών αναλόγως της ροπής αδράνειας του υπερπληρωτή Θ_{TC}	92
Πίνακας 7.9: Ποσοστιαία μεταβολή (%) βασικών μεγεθών αναλόγως της ροπής αδράνειας του υπερπληρωτή Θ_{TC}	92

10. Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Εκπομπές κατά μάζα στην έξοδο ενός κινητήρα Diesel [1]	15
Σχήμα 2.2: Επίδραση του φορτίου και της προπορείας έγχυσης καυσίμου στο σχηματισμό NO για κινητήρα Diesel άμεσης έγχυσης (DI) [2]	17
Σχήμα 2.3: Τυπική σύσταση ενός σωματιδίου πετρελαιοκινητήρα [2]	18
Σχήμα 2.4: Απεικόνιση της δημιουργίας-καταστροφής των σωματιδίων εντός του θαλάμου καύσης [2]	19
Σχήμα 2.5: Τυπική κατανομή μεγέθους και πλήθους σωματιδίων από την εξαγωγή ενός κινητήρα Diesel [2]	20
Σχήμα 2.6: Επίδραση του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα στις εκπομπές αιθάλης [2]	21
Σχήμα 2.7: Υπερακόντιση οξειδίων του αζώτου ενός στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel κατά τη διάρκεια επιτάχυνσης από την άφορτη λειτουργία [3]	22
Σχήμα 2.8: Υπερακόντιση οξειδίων του αζώτου ενός στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel κατά τη διάρκεια του εκτός πόλης τμήματος του ευρωπαϊκού κύκλου πιστοποίησης οχημάτων NEDC [3]	22
Σχήμα 2.9: Υπερακόντιση σωματιδίων ενός στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel κατά τη διάρκεια επιτάχυνσης από την άφορτη λειτουργία [3]	23
Σχήμα 2.10: Εκπομπές αιθάλης κατά τη διάρκεια συνεχών επιταχύνσεων ενός στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel φορτηγού κατά την είσοδο σε αυτοκινητόδρομο [3]	23
Σχήμα 3.1: Οξειδωτικός καταλύτης Diesel [6]	26
Σχήμα 3.2: Τομή φίλτρου σωματιδίων DPF (κίτρινο χρώμα) κατάντη του οξειδωτικού καταλύτη DOC (κόκκινο χρώμα) μοντέρνου κινητήρα Diesel [5]	27
Σχήμα 3.3: Απεικόνιση των φραγμένων κελιών στην είσοδο και την έξοδο του φίλτρου σωματιδίων (wall flow) [7]	28
Σχήμα 3.4: Ένδειξη της αναγέννησης του φίλτρου σωματιδίων στον πίνακα ελέγχου ενός οχήματος	29
Σχήμα 3.5: Σύστημα επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής (SCR) με δεξαμενή AdBlue πετρελαιοκίνητου οχήματος [8]	30
Σχήμα 3.6: Απεικόνιση λειτουργίας του συστήματος επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής (SCR) [9]	31
Σχήμα 4.1: Επιβατικό αυτοκίνητο τοποθετημένο σε δυναμόμετρο πλαισίου	34
Σχήμα 4.2: Οδηγός επιβατικού οχήματος με οθόνη για πληροφορία ταχύτητας με το χρόνο	35
Σχήμα 4.3: Κινητήρας βαρέος τύπου τοποθετημένος σε δυναμόμετρο δοκιμής κινητήρων	36
Σχήμα 4.4: Δειγματοληψία σταθερού όγκου CVS με αντλία θετικής εκτόπισης για πιστοποίηση πετρελαιοκίνητων οχημάτων στην E.E. [10]	38
Σχήμα 4.5: Συχνότητα εμφάνισης ταχύτητας οχήματος για τις διάφορες περιοχές από όπου συλλέχθηκαν τα δεδομένα οδήγησης για τον Κύκλο WLTC [11]	40
Σχήμα 4.6: Ταχύτητα οχήματος συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια του Κύκλου Πόλης WLTC [11]	43
Σχήμα 5.1: Πεδία εφαρμογών του υπολογιστικού προγράμματος GT-Suite [13]	46
Σχήμα 5.2: Περιβάλλον εργασίας του υπολογιστικού προγράμματος GT-Power	46
Σχήμα 5.3: Ολοκληρωμένη αναπαράσταση 6κύλινδρου στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel στον χάρτη εργασίας του GT-Power	48
Σχήμα 5.4: Παράδειγμα οχήματος με χαρακτηριστικά όπως εκείνου που χρησιμοποιείται κατά την προσομοίωση	50
Σχήμα 5.5: Αναπαράσταση του οχήματος στον χάρτη εργασίας του GT-Power	51
Σχήμα 5.6: Αναπαράσταση εικονικού οδηγού στον χάρτη εργασίας του GT-Power	52

Σχήμα 5.7: Ολοκληρωμένη αναπαράσταση του οχήματος, του συστήματος μετάδοσης κίνησης και του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC στον χάρτη εργασίας του GT-Power.....	54
Σχήμα 5.8: Παρουσίαση των κύριων χαρακτηριστικών του φίλτρου σωματιδίων DPF που εισάγει ο χρήστης στο περιβάλλον του GT-Power.....	55
Σχήμα 5.9: Αναπαράσταση του φίλτρου σωματιδίων DPF και των αισθητήρων στον χάρτη εργασίας του GT-Power.....	55
Σχήμα 5.10: Ολοκληρωμένη αναπαράσταση του οχήματος, του συστήματος μετάδοσης κίνησης, του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC και του φίλτρου σωματιδίων DPF στον χάρτη εργασίας του GT-Power.....	56
Σχήμα 6.1: Πάτημα του πεντάλ επιτάχυνσης συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	58
Σχήμα 6.2: Πάτημα του πεντάλ φρένου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	59
Σχήμα 6.3: Πάτημα του πεντάλ συμπλέκτη συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	59
Σχήμα 6.4: Σχέση ταχύτητας στο κιβώτιο ταχυτήτων συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	60
Σχήμα 6.5: Συνολικά διανυθείσα απόσταση του οχήματος συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	60
Σχήμα 6.6: Ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	61
Σχήμα 6.7: Πραγματική ταχύτητα του οχήματος συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	61
Σχήμα 6.8: Ροπή του κινητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	62
Σχήμα 6.9: Ισχύς του κινητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	62
Σχήμα 6.10: Μέση πραγματική πίεση συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	63
Σχήμα 6.11: Ειδική κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	63
Σχήμα 6.12: Μέγιστη πίεση καύσης συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	64
Σχήμα 6.13: Βαθμός πλήρωσης συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	64
Σχήμα 6.14: Παροχή μάζας καυσίμου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	65
Σχήμα 6.15: Λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	65
Σχήμα 6.16: Πραγματικός βαθμός απόδοσης συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	66
Σχήμα 6.17: Λόγος πιέσεων του συμπιεστή συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	66
Σχήμα 6.18: Λόγος πιέσεων του στροβίλου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	67

Σχήμα 6.19: Ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	67
Σχήμα 6.20: Συσχέτιση αδιαφάνειας της αιθάλης με τον λόγο αέρα-καυσίμου	70
Σχήμα 6.21: Εκπομπές οξειδίων του αζώτου, NO _x συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	71
Σχήμα 6.22: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, CO ₂ συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	71
Σχήμα 6.23: Εκπομπές σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	72
Σχήμα 6.24: Συνολικά κατακρατούμενη μάζα αιθάλης στο φίλτρο συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	74
Σχήμα 6.25: Μέση θερμοκρασία σωματιδίων αιθάλης στο φίλτρο συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	74
Σχήμα 6.26: Πτώση πίεσης στο φίλτρο συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	75
Σχήμα 6.27: Αποδοτικότητα του φίλτρου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	75
Σχήμα 6.28: Διαπερατότητα τοιχωμάτων του φίλτρου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	76

Σχήμα 7.1: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, CO ₂ συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη μάζα του οχήματος κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC	78
Σχήμα 7.2: Εκπομπές σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη μάζα του οχήματος κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	78
Σχήμα 7.3: Μέση θερμοκρασία σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη μάζα του οχήματος κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC	79
Σχήμα 7.4: Πτώση πίεσης στο φίλτρο συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη μάζα του οχήματος κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC	79
Σχήμα 7.5: Αποδοτικότητα του φίλτρου συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη μάζα του οχήματος κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC	80
Σχήμα 7.6: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, CO ₂ συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη μετωπική επιφάνεια του οχήματος κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	81
Σχήμα 7.7: Εκπομπές σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη μετωπική επιφάνεια του οχήματος κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC	82
Σχήμα 7.8: Μέση θερμοκρασία σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη μετωπική επιφάνεια του οχήματος κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC.....	82
Σχήμα 7.9: Πτώση πίεσης στο φίλτρο συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη μετωπική επιφάνεια του οχήματος κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC	83
Σχήμα 7.10: Αποδοτικότητα του φίλτρου συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη μετωπική επιφάνεια του οχήματος κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC	83
Σχήμα 7.11: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, CO ₂ συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τον συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC	85
Σχήμα 7.12: Εκπομπές σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τον συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC	85
Σχήμα 7.13: Μέση θερμοκρασία σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τον συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC	86

Σχήμα 7.14: Πτώση πίεσης στο φίλτρο συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τον συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC 86

Σχήμα 7.15: Αποδοτικότητα του φίλτρου συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τον συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC 87

Σχήμα 7.16: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, CO₂ συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη ροπή αδράνειας του υπερπληρωτή κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC 89

Σχήμα 7.17: Εκπομπές σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη ροπή αδράνειας του υπερπληρωτή κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC 89

Σχήμα 7.18: Μέση θερμοκρασία σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη ροπή αδράνειας του υπερπληρωτή κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC 90

Σχήμα 7.19: Πτώση πίεσης στο φίλτρο συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη ροπή αδράνειας του υπερπληρωτή κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC 90

Σχήμα 7.20: Αποδοτικότητα του φίλτρου συναρτήσει του χρόνου με παράμετρο τη ροπή αδράνειας του υπερπληρωτή κατά τη διάρκεια των 589 sec του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC 91

11. Κατάλογος Αναφορών

- [1] J. Zambari και M. Mohd Najib Ali, *Intelligent Manufacturing and Mechatronics*, Melaka: Springer, 2019.
- [2] Ε. Γιακουμής, Παρουσιάσεις μαθήματος "Κάυση - Ρύπανση Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.", Αθήνα, 2022.
- [3] C. D. Rakopoulos and E. G. Giakoumis, *Diesel Engine Transient Operation*, Athens: Springer, 2009.
- [4] «DieselNet,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://dieselnet.com/standards/eu>.
- [5] Ε. Γ. Γιακουμής, Ρύπανση και συστήματα αντιρύπανσης εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ., Αθήνα, 2021.
- [6] «Johnson Matthey,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://matthey.com/products-and-markets/transport/mobile-emissions-control/diesel-applications/diesel-oxidation-catalyst>.
- [7] E. M. & V. Palma, *Most Recent Advances in Diesel Engine Catalytic Soot Abatement: Structured Catalysts and Alternative Approaches*, Fisciano, 2020.
- [8] «ILPEA GALVARPLAST,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ilpeagalvarplast.com/products/scr-fillers>.
- [9] «MTU Solutions,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.mtu-solutions.com/na/en/stories/technology/research-development/how-does-selective-catalytic-reduction-work>.
- [10] Ε. Γ. Γιακουμής, Προδιαγραφές καυσαερίων και κύκλοι δοκιμής εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ., Αθήνα, 2019.
- [11] E. G. Giakoumis, *Driving and Engine Cycles*, Cham: Springer, 2017.
- [12] Gamma Technologies, *GT-SUITE Engine Performance Tutorials Version 7.5*, Westmont, IL: Gamma Technologies, Inc., 2015.
- [13] «Gamma Technologies,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.gtisoft.com/gt-suite/>. [Πρόσβαση 29 May 2023].
- [14] Χ. Μπαχτής, Μελέτη επιδόσεων και εκπομπών ρύπων ελαφρού πετρελαιοκίνητου φορτηγού με ηλεκτρικά υποβοηθούμενη στροβιλο-υπερπλήρωση κατά τη διάρκεια του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC, Αθήνα: Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, 2018.
- [15] Α. Δημάρατος, Διερεύνηση των εκπομπών ρύπων κατά τη μεταβατική λειτουργία κινητήρων Diesel, Αθήνα: Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, 2011.
- [16] Κ. Δ. Ρακόπουλος και Δ. Θ. Χουντάλας, *Καύση - Ρύπανση Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.*, Αθήνα: Φούντας, 1998.
- [17] Μ. Τάταρης, Επίδραση συστήματος παγίδας NO_x (lean NO_x trap) σε επιδόσεις και εκπομπές πετρελαιοκίνητου ελαφρού φορτηγού κατά τη διάρκεια του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC, Αθήνα: Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, 2020.

[18] Κ. Δ. Ρακόπουλος, Μηχανές Εσωτερικής Καύσης Ι, Αθήνα: Φούντας, 2013.

[19] Κ. Δ. Ρακόπουλος και Ε. Γ. Γιακουμής, Εναλλαγή Αερίων και Υπερπλήρωση Μ.Ε.Κ., Αθήνα: Φούντας, 2011.