



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επίδραση συστήματος παγίδας NO_x (lean NO_x trap) σε επιδόσεις και εκπομπές πετρελαιοκίνητου ελαφρού φορτηγού κατά τη διάρκεια του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC



Του Προπτυχιακού Φοιτητή
Τάταρη Μάρκου

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

ΑΘΗΝΑ, 2020

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

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

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

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	8
ABSTRACT	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Σχηματισμός και εκπομπή ρύπων από κινητήρες Diesel	12
1.1 Γενικά.....	12
1.2 Σχηματισμός των οξειδίων του αζώτου	13
1.3 Εκπομπές σωματιδίων.....	15
1.4 Ιδιαιτερότητες εκπομπών καυσαερίων κατά την μεταβατική λειτουργία υπερπληρωμένων κινητήρων Diesel	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Συσκευές μείωσης εκπεμπόμενων ρύπων από κινητήρες Diesel	20
2.1 Γενικά.....	20
2.2 DOC - Οξειδωτικός καταλύτης	21
2.3 DPF - Παγίδα σωματιδίων (αιθάλης)	22
2.4 SCR - Επιλεκτική καταλυτική αναγωγή	25
2.5 Παγίδα αποθήκευσης οξειδίων του αζώτου NO _x	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Παγκόσμιος Κύκλος Πόλης - WLTC	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Ανάπτυξη του μοντέλου οχήματος μέσω του υπολογιστικού πακέτου GT-Power	38
4.1 Γνωριμία με το GT-Suite	38
4.2 Περιβάλλον εργασίας - Γενικά χαρακτηριστικά	38
4.3 Δημιουργία του κατάλληλου μοντέλου στο GT-Power.....	39
4.3.1 Γενικές πληροφορίες κινητήρα.....	39
4.3.2 Μοντέλο οχήματος και συστήματος μετάδοσης κίνησης στο περιβάλλον GT - Power	41
4.3.3 Μοντέλο συστήματος παγίδας NO _x (Lean-NO _x trap) στο περιβάλλον του GT - Power	46
4.3.4 Μοντέλο υπολοίπων συστημάτων επεξεργασίας καυσαερίων στο περιβάλλον του GT-Power.....	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Επιδόσεις και εκπομπές καυσαερίων του κινητήρα σχετιζόμενες με τη χρήση του συστήματος παγίδας NO_x	54
5.1 Εισαγωγή.....	54

5.2	Επιδόσεις κινητήρα.....	55
5.3	Εκπομπές καυσαερίων κινητήρα.....	71
5.4	Επιδόσεις της παγίδας NO _x	78
5.5	Αποτελέσματα παραμετρικών προσομοιώσεων.....	81
5.5.1	DOC-LNT-DPF.....	81
5.5.2	DOC-DPF-LNT.....	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - Συμπεράσματα.....		88
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		89

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Λατινικοί Χαρακτήρες

Μέγεθος	Επεξήγηση	Μονάδες
A_f	μετωπική επιφάνεια οχήματος	m^2
c_d	συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης οχήματος	-
D	διάμετρος εμβόλου	m
D_p	διάμετρος σωματιδίων	m
G_e	ροπή αδράνειας κινητήρα	$kg \times m^2$
G_v	ροπή αδράνειας οχήματος	$kg \times m^2$
m_v	μάζα οχήματος	tn
N	ταχύτητα περιστροφής κινητήρα	rpm
\bar{p}_e	μέση πραγματική πίεση	bar
s	διαδρομή εμβόλου	m
V	ταχύτητα οχήματος	km/h
V_h	όγκος εμβολισμού	m^3
z	αριθμός κυλίνδρων	-

Ελληνικοί χαρακτήρες

Μέγεθος	Επεξήγηση	Μονάδες
ε	βαθμός συμπίεσης	-
λ_a	λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου	-
φ	γωνία στροφάλου	$^\circ$
Φ	λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα	-

Συντομογραφίες

AFR	λόγος αέρα-καυσίμου (air-fuel ratio)
BMEP	μέση πραγματική πίεση (brake mean effective pressure)
BSFC	ειδική κατανάλωση καυσίμου (brake specific fuel consumption)
CI	έναυση με συμπίεση (compression ignition)
CO	μονοξείδιο του άνθρακα (carbon monoxide)
CO₂	διοξείδιο του άνθρακα (carbon dioxide)
CVS	δειγματοληψία σταθερού όγκου (constant volume sampling)
DI	άμεση έγχυση (direct injection)
DOC	οξειδωτικός καταλύτης (diesel oxidation catalyst)
DPF	παγίδα αιθάλης (diesel particulate filter)
EGR	ανακυκλοφορία καυσαερίου (exhaust gas recirculation)
HC	άκαυστοι υδρογονάνθρακες (hydrocarbons)
LNT	παγίδα NO _x (lean NO _x trap)
NO	μονοξείδιο του αζώτου (nitric oxide)
NO₂	διοξείδιο του αζώτου (nitric dioxide)
NO_x	οξείδια του αζώτου (nitrogen oxides)
SCR	επιλεκτική καταλυτική αναγωγή (selective catalyst reduction)
SI	έναυση με σπινθήρα (spark ignited)
WLTC	Παγκόσμιος Κύκλος Πόλης οχημάτων ελαφρού τύπου
MEK (ICE)	μηχανή εσωτερικής καύσης (internal combustion engine)
4-X	τετράχρονος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούνται στα οχήματα παρουσιάζουν το βασικό μειονέκτημα της εκπομπής διαφόρων ρύπων λόγω του φαινομένου της καύσης που πραγματοποιείται στο εσωτερικό τους, αλλά και της συνεχούς λειτουργίας τους σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Οι ελεγχόμενοι από τη νομοθεσία αυτοί ρύποι είναι τα NO_x , CO , HC και σωματίδια, ενώ επιπλέον πολύ σημαντική εκπομπή είναι το CO_2 .

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στις εκπομπές NO_x και συγκεκριμένα σε μία μέθοδο αντιμετώπισής τους σε οχήματα. Τα NO_x σχηματίζονται σε υψηλές θερμοκρασίες εντός του θαλάμου καύσης, και είναι βλαβερά για το περιβάλλον και για τον άνθρωπο (π.χ. καταστροφή του στρώματος του όζοντος, όξινη βροχή). Η νομοθεσία έχει ορίσει ανώτατες επιτρεπόμενες τιμές για κάθε είδος κινητήρα και οχήματος, βάσει των οποίων πραγματοποιείται η διαδικασία πιστοποίησης. Όσον αφορά τις εκπομπές NO_x από κινητήρες Diesel, υπάρχει μία συνεχής τάση αυστηροποίησης των ορίων, οπότε εδώ και χρόνια έχουν καταστεί απαραίτητες διάφορες μέθοδοι μείωσής τους.

Οι πρώτες τέτοιες μέθοδοι που εφαρμόστηκαν σε κινητήρες Diesel ήταν η μείωση της προπορείας της έγχυσης του καυσίμου και έπειτα η τεχνολογία της ανακυκλοφορίας καυσαερίου (EGR). Και οι δύο αυτές τεχνολογίες αποτελούν «εσωτερικά» μέτρα μείωσης των NO_x που στοχεύουν στην μείωση των παραγόμενων NO_x κατά την καύση στο εσωτερικό των κυλίνδρων. Όμως, όπως προαναφέρθηκε, λόγω της συνεχούς αύξησης της αυστηρότητας των προδιαγραφών, κρίθηκε απαραίτητη η χρήση και «εξωτερικών» μέτρων αντιμετώπισης των NO_x , όπως είναι οι καταλύτες και οι παγίδες που ανάγουν τα NO_x σε N_2 μέσω κατάλληλης επεξεργασίας των καυσαερίων. Σήμερα υπάρχουν δύο συστήματα (με)επεξεργασίας καυσαερίων για την αντιμετώπιση των NO_x από κινητήρες Diesel: ο καταλύτης SCR (επιλεκτική καταλυτική αναγωγή) και η παγίδα NO_x (LNT).

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με το θέμα της εφαρμογής συστήματος παγίδας NO_x σε εξακύλινδρο κινητήρα Diesel χρησιμοποιούμενο σε επαγγελματικό όχημα ελαφρού τύπου, και την μελέτη αυτού σε μεταβατικές συνθήκες λειτουργίας. Βασικός στόχος της εργασίας είναι η μοντελοποίηση του κινητήρα, των συστημάτων ελέγχου του οχήματος, καθώς και των συστημάτων επεξεργασίας καυσαερίου (με έμφαση στην παγίδα NO_x), με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου GT-Power, το οποίο είναι ένα εξειδικευμένο λογισμικό μοντελοποίησης με ευρεία χρήση στην αυτοκινητοβιομηχανία. Η διαδικασία μελέτης της απόκρισης και της εκτίμησης των εκπομπών γίνεται κατά τη διάρκεια του πρόσφατα θεσμοθετημένου στην Ευρώπη Παγκόσμιου Κύκλου WLTC, ο οποίος από τον Σεπτέμβριο του 2017 έχει αντικαταστήσει τον NEDC στη διαδικασία πιστοποίησης νέων επιβατικών οχημάτων και ελαφρών φορτηγών. Η διερεύνηση του μοντέλου σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας γίνεται με στόχο την κατανόηση και αξιολόγηση των επιδόσεων του κινητήρα και των εκπομπών ρύπων από αυτόν. Η εξέταση στο επίπεδο των ρύπων επικεντρώνεται στα οξείδια του αζώτου (NO_x) και δευτερευόντως στις εκπομπές αιθάλης, αλλά και στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) οι οποίες συμβάλλουν άμεσα στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Τέλος, γίνεται σύγκριση του μοντέλου του οχήματος με χρήση παγίδας NO_x με το αντίστοιχο μοντέλο χωρίς παγίδα NO_x . Επίσης, γίνεται μελέτη της αλληλεπίδρασης της παγίδας NO_x και της θέσης τοποθέτησής της με τα υπόλοιπα συστήματα επεξεργασίας καυσαερίων (οξειδωτικός καταλύτης DOC, φίλτρο σωματιδίων DPF) που χρησιμοποιούνται στα πετρελαιοκίνητα οχήματα. Το μοντέλο του κινητήρα και του οχήματος αποτελεί επέκταση μοντέλου που είχε αναπτυχθεί στα πλαίσια εκπόνησης παλαιότερης διπλωματικής εργασίας [3].

ABSTRACT

Internal combustion engines used in vehicles have the main disadvantage of emitting various pollutants due to the phenomenon of combustion that takes place inside them, but also their continuous operation in changing conditions. These pollutants controlled by law are NO_x , CO, HC and particles, while in addition a very important emission is CO_2 .

The present work focuses on NO_x emissions and in particular on a method of dealing with them in vehicles. NO_x are formed at high temperatures inside the combustion chamber, and are harmful to the environment and to humans (e.g. ozone depletion, acid rain). The legislation has set maximum allowable values for each type of engine and vehicle, based on which the certification process is carried out. With regard to NO_x emissions from Diesel engines, there is a constant trend of tightening the limits, so for years various methods of reducing them have become necessary.

The first such methods applied to Diesel engines were the reduction of the fuel injection lead and then the exhaust gas recirculation (EGR) technology. Both of these technologies are "internal" NO_x reduction measures aimed at reducing the NO_x produced during combustion inside the cylinders. However, as mentioned above, due to the continuous increase of the strictness of the specifications, it was deemed necessary to use "external" measures to deal with NO_x , such as catalysts and traps that reduce NO_x to N_2 through proper exhaust treatment. There are currently two exhaust treatment systems for dealing with NO_x from Diesel engines: the SCR catalyst (selective catalytic reduction) and the NO_x trap (LNT).

The present diploma thesis deals with the application of the NO_x trap system to a six-cylinder Diesel engine used in a light commercial vehicle, and its' study in transient operating conditions. The main objective of the work is the modeling of the engine, vehicle control systems, as well as exhaust aftertreatment systems (with emphasis on the NO_x trap), using the GT-Power computer package, which is a specialized modeling software widely used in the automotive industry. The process of studying the response and estimation of emissions takes place during the recently established in Europe WLTC Global Cycle, which since September 2017 has replaced the NEDC in the process of certification of new passenger cars and light trucks. The model is investigated in various operating conditions in order to understand and evaluate the performance of the engine and the emission of pollutants from it. The examination at the level of pollutants focuses on nitrogen oxides (NO_x) and secondary on the emissions of carbon black and carbon dioxide (CO_2) which directly contribute to the greenhouse effect.

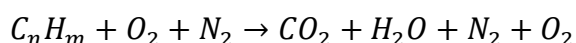
Finally, the model of the vehicle using NO_x trap is compared with the corresponding model without NO_x trap. Also, the interaction of the NO_x trap and its' position with the other exhaust aftertreatment systems (DOC oxidative catalyst, DPF particle filter) used in diesel vehicles is

studied. The engine and vehicle model is an extension of a model developed in the context of a previous diploma thesis [3].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Σχηματισμός και εκπομπή ρύπων από κινητήρες Diesel [3,15]

1.1 Γενικά

Ο σχηματισμός των ρυπογόνων ουσιών που εκπέμπονται από τους κινητήρες οχημάτων οφείλεται στο φαινόμενο της χημικής διάστασης που υφίστανται τα προϊόντα της καύσης λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στον θάλαμο καύσης, οι οποίες τοπικά φτάνουν ακόμη και τους 3000 K [8]. Κάνοντας την παραδοχή ότι η καύση είναι τέλεια, καθώς και ότι δεν εμφανίζεται χημική διάσταση, τα προϊόντα της δίνονται από το ακόλουθο γενικό σχήμα χημικής αντίδρασης:



Η παραπάνω αντίδραση έχει μόνο ποιοτική σημασία, καθώς δεν έχουν τοποθετηθεί οι στοιχειομετρικοί συντελεστές. Στην πραγματικότητα, όμως, τα προϊόντα της τέλει καύσης υφίστανται διάσταση και επομένως εμφανίζονται σε αυτά οι ακόλουθες ρίζες και ενώσεις: H₂O, H₂, O₂, N₂, N, O, OH, H, CO, CO₂, NO, HC κ.λπ. καθώς και αρκετές άλλες όπως είναι οι αλδεΐδες, κετόνες, O₃ κ.λπ.

Από αυτές τις αέριες ρυπογόνες ουσίες, οι κυριότερες είναι τα οξειδία του αζώτου - NO_x, το μονοξείδιο του άνθρακα - CO και οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες- HC, οι οποίες μαζί με τα σωματίδια που εκπέμπονται από τους κινητήρες Diesel αποτελούν τους λεγόμενους ελεγχόμενους ρύπους (regulated emissions), των οποίων τα επίπεδα συγκέντρωσης στα καυσαέρια της εξαγωγής των εμβολοφόρων κινητήρων είναι νομοθετημένα σε πολλές περιοχές του κόσμου (με προεξάρχουσες τις Ε.Ε., Η.Π.Α. και Ιαπωνία), ακολουθώντας πρότυπες συσκευές και μεθόδους μέτρησης.

Οι τρεις κύριοι αέριοι ρύποι (CO, NO_x, HC) εμφανίζονται τόσο σε εμβολοφόρους κινητήρες Diesel όσο και σε Otto, με αρκετά όμως σημαντικές διαφορές στη συγκέντρωσή τους στο καυσαέριο της εξαγωγής (engine out, χωρίς πρόσθετα μέσα περιστολής δηλαδή).

Πιο συγκεκριμένα:

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

Εκτός από τους αέριους ρύπους, παρατηρείται και εκπομπή στερεών σωματιδίων (particulates) από τους εμβολοφόρους κινητήρες. Τα εκπεμπόμενα σωματίδια από τους κινητήρες Diesel αποτελούν την αιθάλη (soot) που σχηματίζεται κατά την καύση, ενώ όσον αφορά τους

(συμβατικούς) κινητήρες Otto οι εκπομπές αιθάλης είναι σχεδόν μηδαμινές, καθώς η καύση στο εσωτερικό των κυλίνδρων είναι κατά κύριο λόγο ομογενής.

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

1.2 Σχηματισμός των οξειδίων του αζώτου NO_x

1.2.1 Γενική περιγραφή

Ο όρος οξείδια του αζώτου NO_x περιλαμβάνει το μονοξείδιο του αζώτου NO, το διοξείδιο του αζώτου NO_2 , καθώς και ίχνη άλλων οξειδίων του αζώτου (όπως το N_2O_5) που σχηματίζονται στο θάλαμο καύσης των εμβολοφόρων κινητήρων. Όμως, η ποσοστιαία περιεκτικότητα των καυσαερίων σε NO_2 είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με αυτή σε NO και επομένως, όταν αναφερόμαστε σε σχηματισμό NO_x στον κινητήρα, επικεντρωνόμαστε κατά κύριο λόγο στο μονοξείδιο του αζώτου. Παρ' όλ' αυτά, στα χαμηλά φορτία των κινητήρων Diesel τα ποσοστά του NO_2 δεν μπορούν να θεωρηθούν αμελητέα, καθώς αποτελούν το 10-25% των συνολικών εκπεμπόμενων οξειδίων του αζώτου.

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

1.2.2 Σχηματισμός των NO_x στο θάλαμο καύσης των κινητήρων Diesel

1.2.2.1 Γενικά

Στους κινητήρες Diesel η έγχυση του καυσίμου στο θάλαμο καύσης σε υγρή μορφή και η μετέπειτα ατμοποίησή του και ανάμειξή του με τον εισαγόμενο αέρα έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγάλης στρωμάτωσης στην κατανομή της θερμοκρασίας καθώς και στη συγκέντρωση του καυσίμου στο εσωτερικό του κυλίνδρου. Έτσι, ο σχηματισμός των NO_x πραγματοποιείται μόνο σε ορισμένες περιοχές όπου οι συνθήκες που επικρατούν το επιτρέπουν. Το μεγαλύτερο ποσοστό των NO_x σχηματίζεται κατά κύριο λόγο κατά το δεύτερο στάδιο της καύσης, δηλαδή αυτό της ανεξέλεγκτης καύσης, όπου η φλόγα είναι τύπου προανάμειξης, με τιμές του λόγου

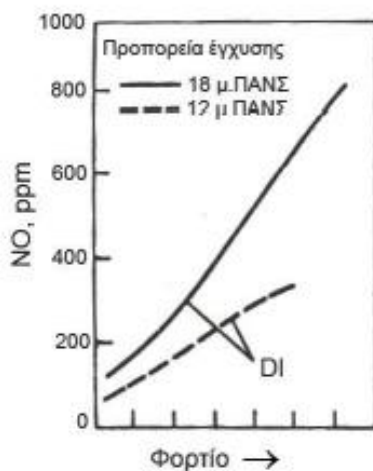
ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα Φ κοντά στη μονάδα και θερμοκρασία ιδιαίτερα υψηλή λόγω της προαναμεμειγμένης καύσης.

Κατά το τρίτο στάδιο της καύσης (ελεγχόμενη καύση), η συνεχής εξάπλωση της δέσμης του καυσίμου συνεπάγεται την επαφή των ζωνών αντίδρασης με τον ψυχρό αέρα που τους περιβάλλει, με αποτέλεσμα την πτώση της θερμοκρασίας τους και το «πάγωμα» των αντιδράσεων διάσπασης του NO σε αρκετά υψηλές τιμές και λίγο πιο νωρίς συγκριτικά με τους κινητήρες Otto.

1.2.2.2 Επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας στην τιμή των NO_x

A) Επίδραση του φορτίου

Λόγω της ποιοτικής ρύθμισης του φορτίου σε ένα κινητήρα Diesel αναφερόμαστε ουσιαστικά στο λόγο ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου $\lambda_a (=1/\Phi)$. Αυξανόμενου του φορτίου παρατηρείται εν γένει αύξηση της συγκέντρωσης των NO_x στα καυσαέρια, γεγονός που οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας στη ζώνη αντίδρασης και στην ύπαρξη αρκετών περιοχών με συγκέντρωση αέρα-καυσίμου γύρω από τη στοιχειομετρική τιμή. Στο Σχήμα 1.1 απεικονίζεται αυτή η συσχέτιση για τους κινητήρες Diesel άμεσης έγχυσης (DI), όπου μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι στους κινητήρες αυτούς η εκπομπή NO αυξάνεται συνεχώς με αύξηση του φορτίου.



Σχήμα 1.1: Επίδραση προπορείας έγχυσης και φορτίου στην παραγωγή NO_x σε κινητήρα Diesel άμεση έγχυσης (DI) [17]

B) Επίδραση της προπορείας έγχυσης του καυσίμου

Με αύξηση της προπορείας έγχυσης στους κινητήρες Diesel άμεσης έγχυσης, παρατηρείται σημαντική αύξηση των παραγόμενων εκπομπών NO_x, καθώς η αυτανάφλεξη του μίγματος πραγματοποιείται πολύ κοντά στο άνω νεκρό σημείο ή ακόμα και πριν από αυτό, με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της πίεσης και θερμοκρασίας των αερίων εντός του θαλάμου καύσης, όπως επίσης φαίνεται και στο Σχήμα 1.1.

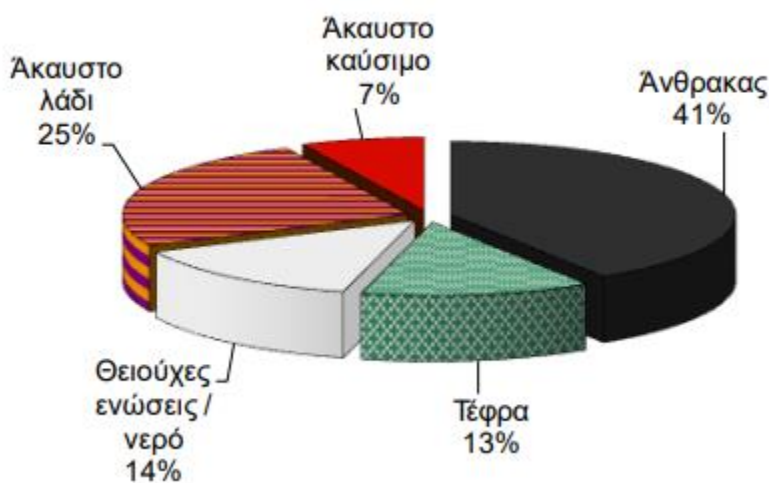
Γ) Επίδραση του ποσοστού του παραμένουτος καυσαερίου

Η αύξηση του ποσοστού του παραμένουτος καυσαερίου στο θαλάμου καύσης επιδρά αρνητικά στο σχηματισμό NO_x , καθώς αυξάνεται η ειδική θερμοχωρητικότητα του περιβάλλοντος μέσου, με αποτέλεσμα την πτώση της πίεσης και της θερμοκρασίας εντός της ζώνης αντίδρασης, οδηγώντας σε σημαντική μείωση της συγκέντρωσης των NO_x . Σε αυτό το φαινόμενο στηρίζεται, ουσιαστικά, και η τεχνολογία της ανακυκλοφορίας καυσαερίου (EGR). Η συγκεκριμένη τεχνολογία απομαστεύει μέρος του εξερχόμενου καυσαερίου και το επανα-εισάγει στους κυλίνδρους προκειμένου να επιτευχθεί η μείωση των εσωτερικών θερμοκρασιών, καθώς το καυσαέριο είναι αδρανές και απορροφά θερμότητα από τον περιβάλλοντα χώρο του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της συγκέντρωσης των παραγόμενων NO_x .

1.3 Εκπομπές σωματιδίων

Τα σωματίδια, που προέρχονται από την καύση σε κινητήρα Diesel, αποτελούνται στο συντριπτικό ποσοστό τους από ανθρακούχο υλικό (αιθάλη) παραγόμενο κατά τη διάρκεια της καύσης, στο οποίο έχουν προσροφηθεί ορισμένες οργανικές αλλά και ανόργανες ενώσεις (προερχόμενα κυρίως από άκαυστο καύσιμο και το λιπαντικό έλαιο κινητήρα). Τα σωματίδια κατανέμονται σε ένα πλατύ εύρος μεγεθών από 20 nm έως 10 μm , χαρακτηριστικό που τα καθιστά αναπνεύσιμα και άρα επικίνδυνα για τον ανθρώπινο οργανισμό. Συχνά γίνεται ο διαχωρισμός των σωματιδίων αυτών σε ένα διαλυτό οργανικό μέρος και σε ένα μη διαλυτό, από τα οποία το δεύτερο χρησιμοποιείται συχνά ως μία εκτίμηση του ποσού της αιθάλης.

Τα σωματίδια από την εξάτμιση ενός κινητήρα Diesel περιέχουν αιθάλη σε ποσοστό συνήθως υψηλότερο του 40-50%. Επιπρόσθετες ουσίες που περιέχονται στα σωματίδια είναι: άκαυστο καύσιμο ή λιπαντικό έλαιο κινητήρα ή και προερχόμενα από μερική καύση, τρίμματα μετάλλων από φθορά, καθώς επίσης και άλατα από τα καύσιμα (Σχήμα 1.2).



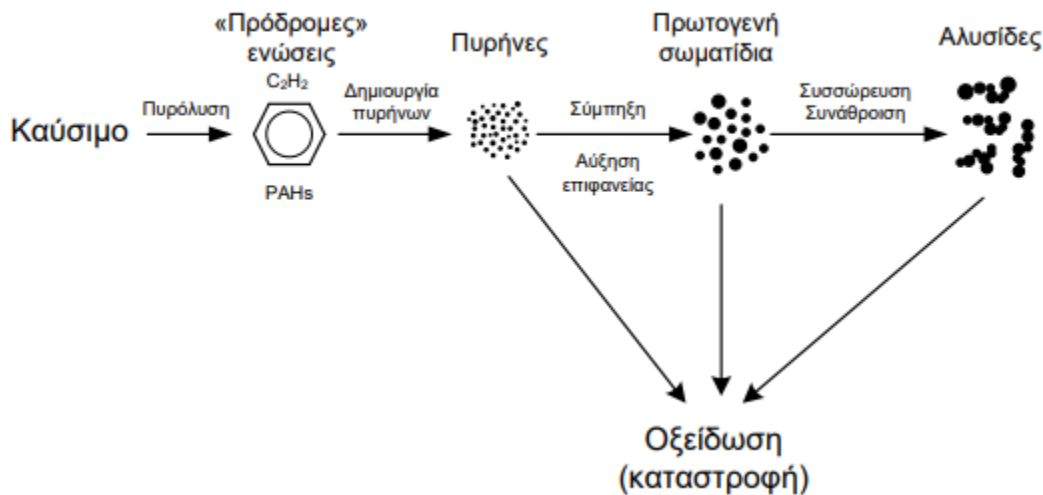
Σχήμα 1.2: Τυπική σύσταση στην εξάτμιση κινητήρα Diesel βαρέος τύπου (φορτηγού) κατά τη διάρκεια δοκιμής σε Κύκλο Πόλης [15]

Ο σχηματισμός αιθάλης πραγματοποιείται όταν άκαυστο καύσιμο σχηματίζει σωματίδια από την αέρια φάση στη στερεά σε περιοχές πλούσιες σε καύσιμο και με υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό είναι εμφανές στο Σχήμα 1.3, όπου όσο αυξάνεται ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα Φ από μηδενικές τιμές σε τιμές κοντά στη στοιχειομετρική τιμή 1, αυξάνεται και η εκπεμπόμενη αιθάλη.



Σχήμα 1.3: Επίδραση του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα (Φ) στις εκπομπές αιθάλης [17]

Επιπλέον, ανάλογα και με τις περιβάλλουσες συνθήκες που επικρατούν, παρατηρείται η συμπύκνωση ή η απορρόφηση υδρογονανθράκων ή άλλων διαθέσιμων μορίων από την αιθάλη. Η εξέλιξη της υγρής – ή αέριας – φάσης των υδρογονανθράκων σε στερεά σωματίδια αιθάλης περιλαμβάνει έξι κοινά αναγνωρισμένες διαδικασίες (Σχήμα 1.4):



Σχήμα 1.4: Διάγραμμα μηχανισμού σχηματισμού και καταστροφής σωματιδίων εντός θαλάμου καύσης κινητήρα Diesel [15]

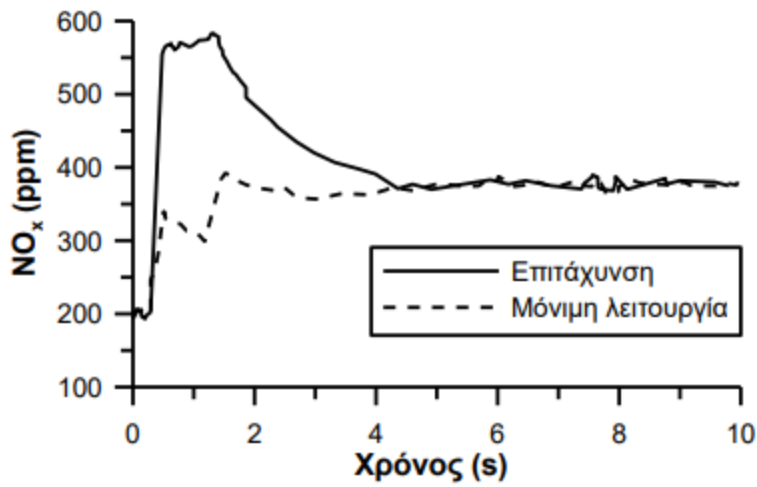
- Πυρόλυση (Pyrolysis): ενδόθερμη διαδικασία που μεταβάλλει τη μοριακή δομή του καυσίμου υπό υψηλή θερμοκρασία και παράγει ενώσεις όπως οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), που θεωρούνται πρόδρομοι της αιθάλης.

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

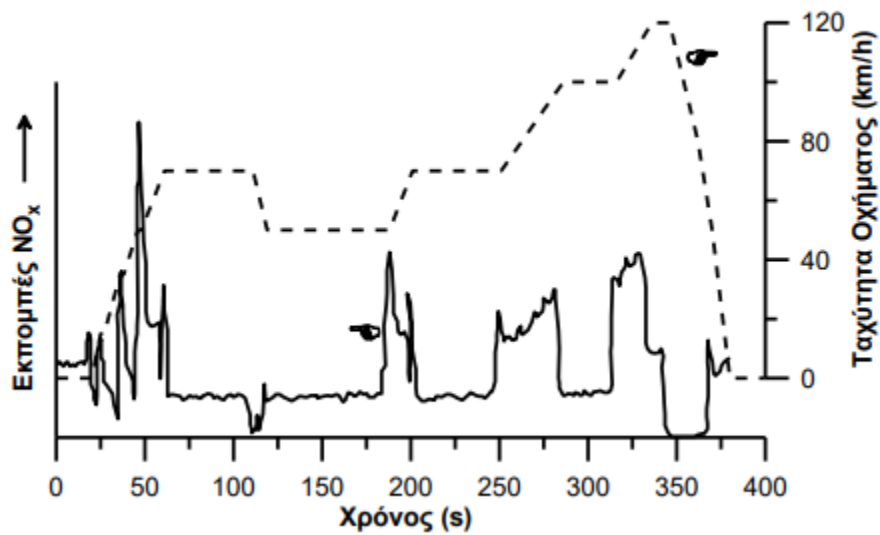
Μεταξύ των σημαντικότερων παραγόντων που έχουν βρεθεί ότι επηρεάζουν τη συγκέντρωση του αριθμού των σωματιδίων και την κατανομή του μεγέθους τους είναι ο τύπος του καυσίμου που χρησιμοποιείται, με προτιμητέα τα καύσιμα με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο για μειωμένες γενικά εκπομπές σωματιδίων, αν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

1.4 Ιδιαιτερότητες εκπομπών καυσαερίων κατά τη μεταβατική λειτουργία υπερπληρωμένων κινητήρων Diesel

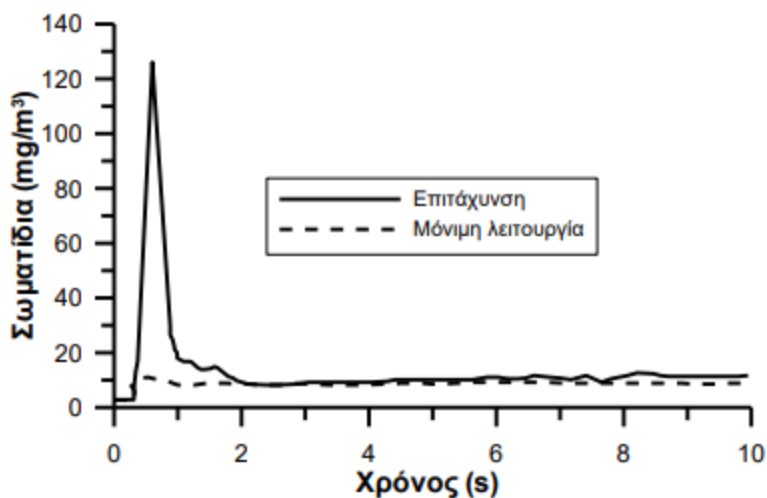
Κατά τη διάρκεια της μεταβατικής λειτουργίας υπερπληρωμένων κινητήρων Diesel εμφανίζεται το φαινόμενο της υστέρησης του στροβιλο-υπερπληρωτή (turbocharger lag) με αποτέλεσμα τη χειροτέρευση της καύσης και κατ' επέκταση τη στιγμιαία σημαντική αύξηση των αέριων και σωματιδιακών ρύπων σε σύγκριση με την αντίστοιχη μόνιμη λειτουργία (σταθερή ταχύτητα περιστροφής και φορτίο). Μερικά τυπικά παραδείγματα δίνονται παρακάτω (Σχήματα 1.5, 1.6, 1.7, 1.8):



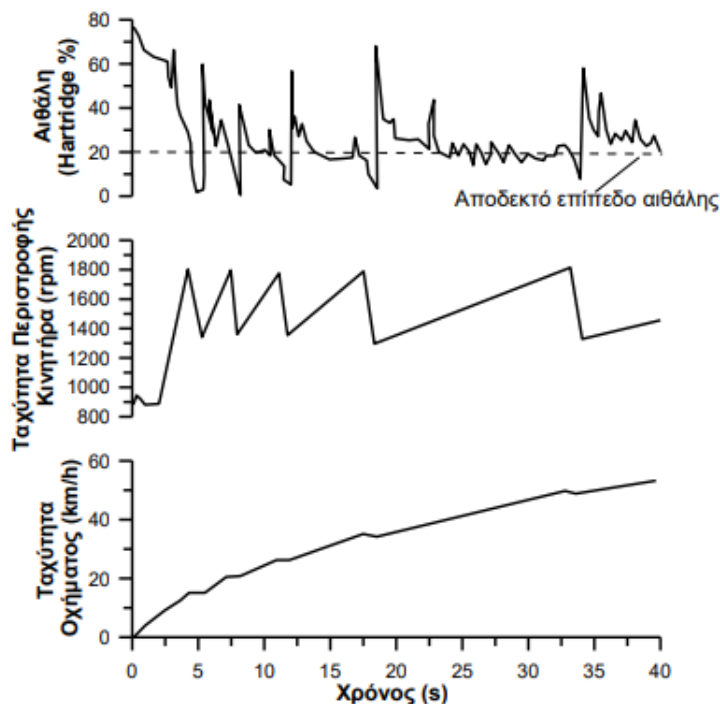
Σχήμα 1.5: Υπερακόντιση εκπομπών οξειδίων του αζώτου κατά τη διάρκεια επιτάχυνσης στροβίλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel από την άφορτη λειτουργία ('ρελαντί') [15]



Σχήμα 1.6: Υπερακόντιση εκπομπών οξειδίων του αζώτου κατά τη διάρκεια του εκτός πόλης τμήματος του Ευρωπαϊκού Κύκλου πιστοποίησης οχημάτων (EUDC) στροβίλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel, είναι εμφανής η σημαντική αύξηση των εκπομπών σε κάθε επιτάχυνση του οχήματος [15]



Σχήμα 1.7: Υπερακόντιση εκπομπών αιθάλης κατά τη διάρκεια επιτάχυνσης στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel από την άφορτη λειτουργία ('ρελαντί')· η υπερακόντιση είναι μεγαλύτερη όσο πιο 'χαμηλό' το αρχικό σημείο λειτουργίας, όσο πιο μεγάλη η μεταβολή στροφών ή φορτίου, όσο πιο απότομα αυτή πραγματοποιείται και όσο πιο μεγάλη η μέση πραγματική πίεση (rating) του κινητήρα [15]



Σχήμα 1.8: Εκπομπές αιθάλης κατά τη διάρκεια συνεχών αλλαγών ταχυτήτων σε υπερπληρωμένο κινητήρα Diesel φορτηγού που εισέρχεται σε αυτοκινητόδρομο [15]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Συσκευές μείωσης εκπεμπόμενων ρύπων από κινητήρες Diesel [2,3]

2.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο υπάρχουν διάφορες παράμετροι λειτουργίας των κινητήρων Diesel (και Otto) που επηρεάζουν την εκπομπή ρύπων. Μετά από μελέτες έχουν προκύψει μέθοδοι, όπως το EGR, που συμβάλλουν στη μείωση της εκπομπής ρυπογόνων ουσιών στην πηγή τους (δηλαδή στο εσωτερικό των κυλίνδρων). Προκειμένου όμως, να επιτευχθεί περαιτέρω μείωσή τους είναι απαραίτητη η χρήση συσκευών επεξεργασίας καυσαερίων εκτός του θαλάμου καύσης (στην εξαγωγή). Η εφαρμογή αυτών των συσκευών έχει, κυρίως, ως σκοπό τη μείωση των λεγόμενων ελεγχόμενων ρύπων, δηλ. των NO_x, CO, HC και (στερεών) σωματιδίων και η διάκρισή τους γίνεται στις εξής δύο κατηγορίες:

- α) τύπου «καταλύτη»
- β) τύπου «παγίδας»

Όσον αφορά τους κινητήρες Diesel, οι συσκευές επεξεργασίας καυσαερίων που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- οξειδωτικός καταλύτης για την αντιμετώπιση των CO και HC (DOC)
- φίλτρο σωματιδίων / παγίδα αιθάλης για την αντιμετώπιση των σωματιδίων (DPF)
- αναγωγικός καταλύτης για την αντιμετώπιση των NO_x (SCR)
- παγίδα αποθήκευσης των οξειδίων του αζώτου (lean-NO_x trap-LNT)

Επίσης, στον παρακάτω Πίνακα 2.1 φαίνονται τα όρια των εκπομπών ρύπων για κινητήρες πετρελαίου επιβατικών αυτοκινήτων, όπως καθορίζονται από την σχετική νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης:

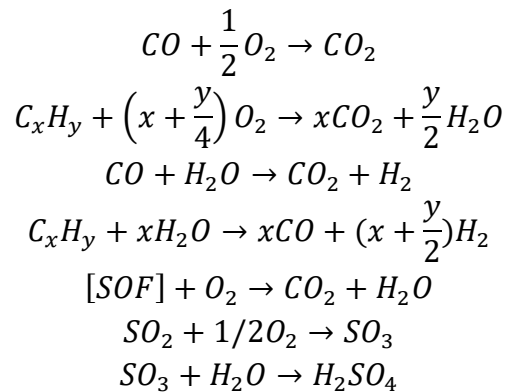
Πίνακας 2.1: Πρότυπα Ευρωπαϊκής Ένωσης για εκπομπές ρύπων κινητήρων πετρελαίου επιβατικών αυτοκινήτων [19]

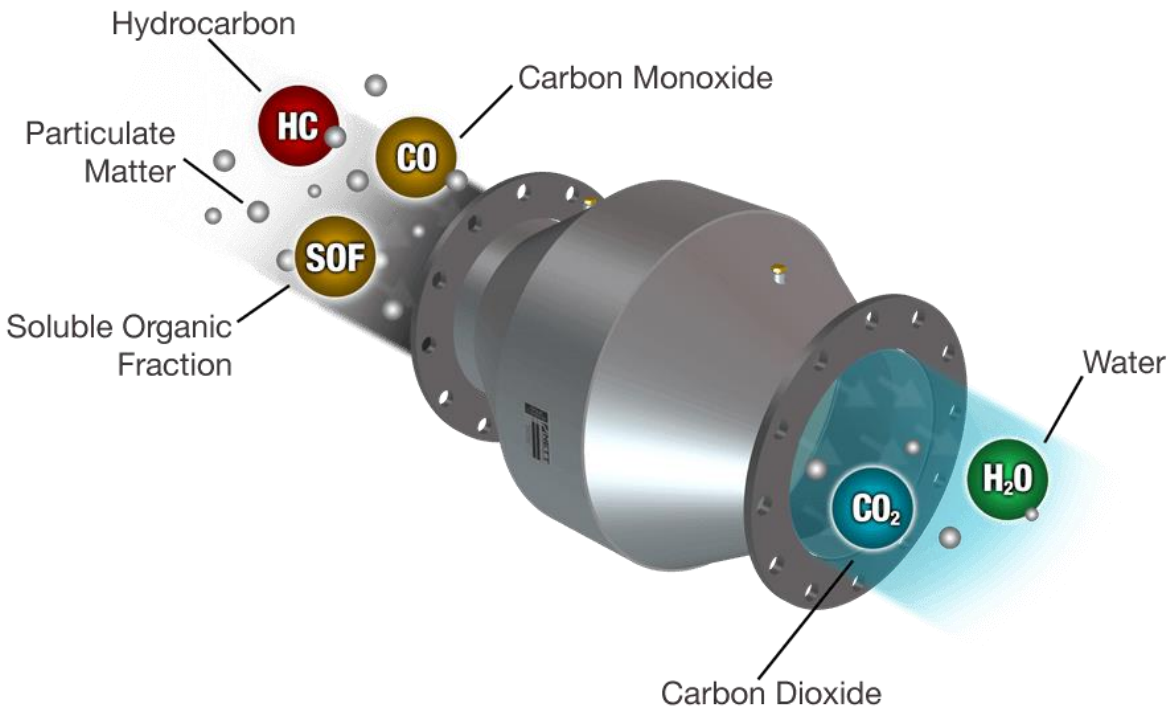
Πρότυπο	Ημερομηνία ισχύος για εγκρίσεις τύπου	Ημερομηνία ισχύος για ταξινομήσεις	Ανώτατα όρια ρύπων (γρ./χλμ.)					
			CO	THC	NMHC	NO _x	HC + NO _x	PM
Κινητήρες Πετρελαίου								
Euro 1	Ιούλιος 1992	Ιούλιος 1992	2,72	-	-	-	0,97	0,14
Euro 2	Ιανουάριος 1996	Ιανουάριος 1996	0,64	-	-	-	0,70	0,08
Euro 3	Ιανουάριος 2000	Ιανουάριος 2000	0,50	-	-	0,50	0,56	0,05
Euro 4	Ιανουάριος 2005	Ιανουάριος 2005	0,50	-	-	0,25	0,30	0,025
Euro 5	Σεπτέμβριος 2009	Ιανουάριος 2011	0,50	-	-	0,18	0,23	0,005
Euro 5b	Σεπτέμβριος 2011	Ιανουάριος 2013	0,50	-	-	0,18	0,23	0,0045
Euro 6b	Σεπτέμβριος 2014	Σεπτέμβριος 2015	0,50	-	-	0,08	0,17	0,0045
Euro 6c	-	Σεπτέμβριος 2018	0,50	-	-	0,08	0,17	0,0045
Euro 6d-TEMP	Σεπτέμβριος 2017	Σεπτέμβριος 2019	0,50	-	-	0,08	0,17	0,0045
Euro 6d	Ιανουάριος 2020	Ιανουάριος 2021	0,50	-	-	0,08	0,17	0,0045

2.2 DOC - Οξειδωτικός καταλύτης [2]

Οι οξειδωτικοί καταλύτες άρχισαν να κάνουν την εμφάνισή τους στα επιβατικά αυτοκίνητα στις αρχές του 1996 και σταδιακά μέχρι και το 2011 είχαν καθιερωθεί σε όλα τα οχήματα με κινητήρες Diesel. Η λειτουργία τους στηρίζεται σε μία συσκευή τύπου κεραμικού μονόλιθου με διαμήκη κανάλια πυκνότητας περίπου 40-50 ανά cm², με υπόστρωμα οξειδίου του αργιλίου (πυκνότητας 120 g/L), στα οποία εμποτίζεται το καταλυτικό υλικό (Pt ή Pd) προωθώντας την οξείδωση των CO και HC προς τα μη τοξικά CO₂ και H₂O (Σχήμα 2.1). Επίσης, αντιμετωπίζουν σε ποσοστό τουλάχιστον 90% το οργανικό κλάσμα των σωματιδίων (SOF) συμβάλλοντας έτσι στην μείωση των σωματιδιακών εκπομπών κατά 25-50%. Παράλληλα, στο εσωτερικό του οξειδωτικού καταλύτη οξειδώνεται το NO προς το πιο τοξικό NO₂, ενώ μέσω των εξώθερμων αντιδράσεων της οξείδωσης αυξάνεται η θερμοκρασία του καυσαερίου, γεγονός που ευνοεί τη διαδικασία αναγέννησης στην παγίδα αιθάλης. Ένα μειονέκτημα του συγκεκριμένου καταλύτη είναι ότι οξειδώνει το SO₂ σε SO₃ και έπειτα παράγει θειικό οξύ H₂SO₄, το οποίο αναμειγνύεται με ατμό παράγοντας θειικά αερολύματα και αυξάνοντας τελικά τις εκπομπές των μη ανθρακούχων σωματιδίων. Βέβαια, αυτό το πρόβλημα σήμερα είναι πρακτικά ανύπαρκτο λόγω του πολύ μεγάλου βαθμού αποθείωσης των καυσίμων.

Οι βασικές τυπικές αντιδράσεις ενός συστήματος DOC είναι οι εξής:





Σχήμα 2.1: Απεικόνιση συστήματος DOC [18]

2.3 DPF - Παγίδα σωματιδίων (αιθάλης) [2]

Η αντιμετώπιση της αιθάλης απαιτεί, όπως και με άλλους ρύπους, την οξείδωσή της, η οποία όμως απαιτεί πολύ υψηλές θερμοκρασίες και ο ρυθμός της είναι αρκετά πιο αργός. Γι' αυτό το λόγο δεν είναι εφικτή η οξείδωσή της σε πραγματικό χρόνο, αλλά πρέπει πρώτα να δεσμευτεί στις λεγόμενες παγίδες αιθάλης (DPF).

Οι παγίδες αιθάλης είναι φίλτρα σωματιδίων που παγιδεύουν με φυσικό τρόπο το στερεό μέρος των σωματιδίων του καυσαερίου, και ανά διαστήματα το οξειδώνουν μέσω της διαδικασίας αναγέννησης, αποτρέποντας την απελευθέρωσή του στην ατμόσφαιρα. Η πρώτη εμφάνισή τους σε πετρελαιοκίνητα επιβατικά οχήματα έγινε το 2000 και από το 2009 η χρήση τους έγινε υποχρεωτική σύμφωνα με το πρότυπο Euro 5/V.

Η αποτελεσματικότητά τους είναι μεγαλύτερη από 95%, όσον αφορά τη μάζα και 99%, όσον αφορά το πλήθος των σωματιδίων. Ο βαθμός απόδοσής τους εξαρτάται από παράγοντες, όπως το μέγεθος των πόρων του φίλτρου, το βάθος διήθησης, τη ταχύτητα του καυσαερίου, τη διάμετρο των σωματιδίων κλπ. και γενικά η απόδοσή τους αυξάνεται όσο αυξάνεται η διάμετρος των σωματιδίων αιθάλης.

Το υλικό των παγίδων αιθάλης απαιτείται να έχει υψηλή αντοχή σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (πάνω από 1000 °C), αλλά και σε απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας (θερμικό σοκ). Με βάση αυτή την ιδιότητα, τα πιο διαδεδομένα υλικά 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

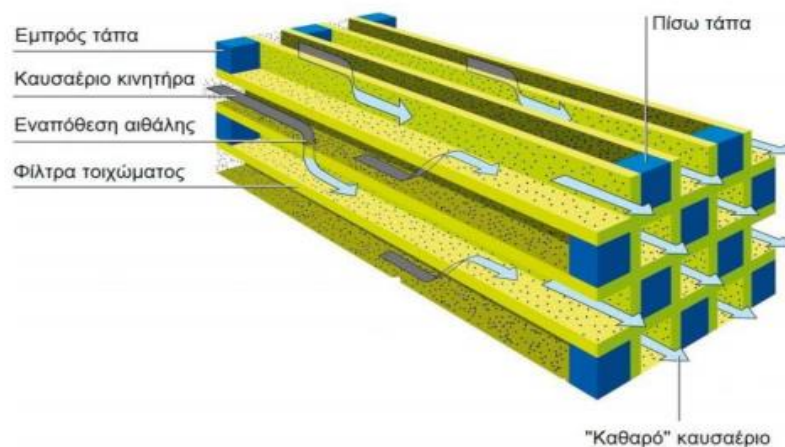
(SiC) και το τιτανικό αλουμίνιο (Al_2TiO_5). Επίσης, τα φίλτρα σωματιδίων πρέπει να χαρακτηρίζονται από:

- καλή μηχανική αντοχή
- αντοχή στις προσμίξεις του καυσαερίου
- χαμηλή πτώση πίεσης
- δυνατότητα καταλυτικής επίστρωσης για διευκόλυνση της διαδικασίας αναγέννησης
- μικρό μέγεθος, βάρος, κόστος

Όπως και με τον οξειδωτικό καταλύτη, το πιο κοινό φίλτρο σωματιδίων είναι αυτό του κεραμικού μονόλιθου με κυκλική ή ελλειψοειδή μορφή που διατρέχεται από ευθύγραμμα κανάλια τετραγωνικής, συνήθως, διατομής (Σχήμα 2.2). Ο σχεδιασμός της παγίδας αιθάλης είναι κυψελοειδής με διαμήκη κελιά πυκνότητας περίπου 30 ανά cm^2 , όπου τα μισά φράσσονται στην είσοδο και τα μισά στην έξοδο, ώστε το καυσαέριο να αναγκαστεί να περάσει μέσα από τους πόρους των τοιχωμάτων των κεραμικών κελιών (Σχήμα 2.3). Επίσης, το εξωτερικό περίβλημα είναι μονωμένο προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες θερμότητας.

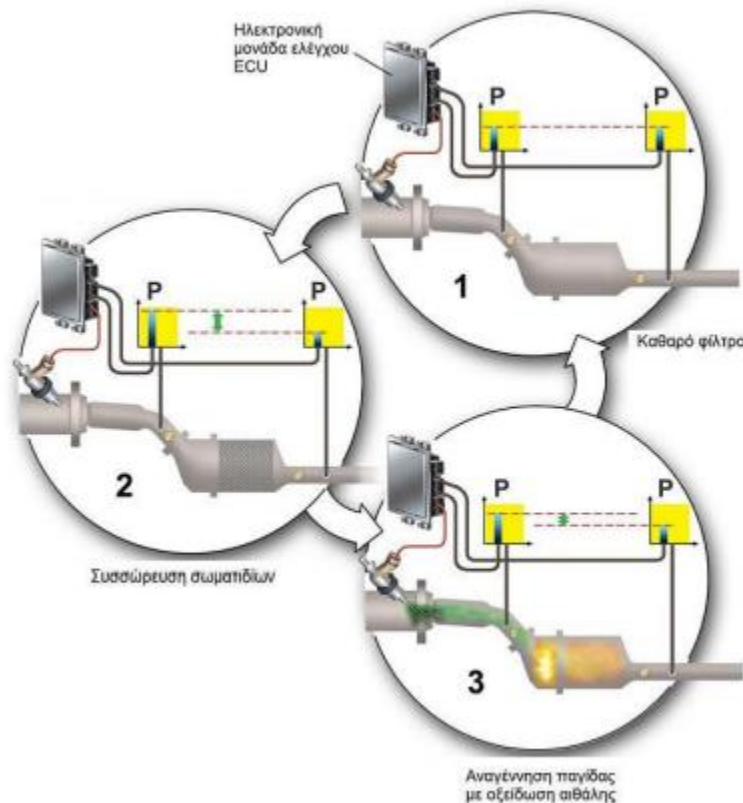
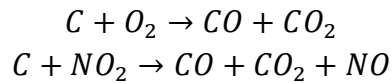


Σχήμα 2.2: Τομή παγίδας αιθάλης (κίτρινο χρώμα) κατάντι του οξειδωτικού καταλύτη (κόκκινο χρώμα) μοντέρνου κινητήρα Diesel [2]

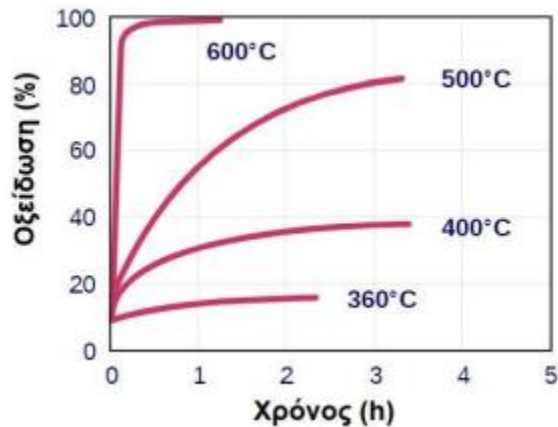


Σχήμα 2.3: Λειτουργία του κεραμικού φίλτρου ροής τοιχώματος (wall-flow filter) [2]

Επιπλέον, η συσσώρευση σωματιδίων στην παγίδα οδηγεί στην πτώση πίεσης στην εξαγωγή του κινητήρα και κατ' επέκταση σε αύξηση του αρνητικού έργου εξώθησης και της κατανάλωσης καυσίμου (Σχήμα 2.4). Επομένως, είναι αναγκαία η κατά διαστήματα απομάκρυνση των σωματιδίων από την παγίδα μέσω της διαδικασίας αναγέννησης, δηλαδή της καύσης του συσσωρευμένου άνθρακα C. Στα υψηλά φορτία που οι θερμοκρασίες καυσαερίου είναι υψηλές, η διαδικασία αναγέννησης ονομάζεται παθητική (γίνεται από μόνη της), ενώ όταν οι θερμοκρασίες είναι χαμηλές (π.χ. κατά την κίνηση εντός πόλης) γίνεται εξαναγκασμένα, π.χ. μέσω έγχυσης επιπλέον ποσότητας καυσίμου (Σχήμα 2.5). Οι τυπικές αντιδράσεις κατά τη διαδικασία αυτή είναι:



Σχήμα 2.4: Σταδιακή αύξηση πίεσης αντίθλιψης στην παγίδα αιθάλης κινητήρα Diesel Renault λόγω συσσώρευσης σωματιδίων, που οδηγεί στην αναγέννησή της άρα και στη μείωση της διαφοράς πίεσης πριν και μετά την παγίδα [2]



Σχήμα 2.5: Ποσοστό οξείδωσης συναρτήσει του χρόνου για διάφορες θερμοκρασίες παγίδας αιθάλης (Dieselnet) [2]

2.4 SCR - Επιλεκτική καταλυτική αναγωγή

Στο εσωτερικό των κυλίνδρων οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι αρκετά υψηλές, οι οποίες παρ' ότι είναι επιθυμητές για τη βελτίωση της απόδοσης του κινητήρα, έχουν ως αποτέλεσμα την διάσπαση του διατομικού αζώτου σε μονατομικό και στη συνέχεια το σχηματισμό οξειδίων του αζώτου (NO_x). Τα NO_x αποτελούν τον κατεξοχήν ρύπο που οι εκπομπές του σε πραγματικές συνθήκες στο δρόμο είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από τα θεσμοθετημένα όρια από την νομοθεσία. Αυτή η αναντιστοιχία είναι πολύ πιο έντονη σε πετρελαιοκίνητα οχήματα, διότι μέχρι και το Euro 5/V οι εκπομπές NO_x αντιμετώπιζονταν με εσωτερικά μέτρα, όπως το EGR, τα οποία οι κατασκευαστές προσπαθούσαν με κάθε τρόπο να παρακάμψουν προκειμένου να πετύχουν μειωμένη κατανάλωση καυσίμου. Αυτό άλλαξε με το πρότυπο Euro 6/VI (Πίνακας 2.1) σύμφωνα με το οποίο (πρακτικά) υποχρεώθηκαν όλοι οι κατασκευαστές να τοποθετήσουν ειδική συσκευή επεξεργασίας των NO_x . Αυτή η συσκευή είναι κυρίως η επιλεκτική καταλυτική αναγωγή ή SCR και δευτερευόντως η παγίδα NO_x ή Lean- NO_x trap, στην οποία επικεντρώνεται και η παρούσα διπλωματική εργασία.

Η τεχνολογία του SCR έκανε την εμφάνισή της στα τέλη της δεκαετίας του 1970 στην Ιαπωνία, με εφαρμογή και στην Ευρώπη στα μέσα της δεκαετίας του 1980. Ως αναγωγικά μέσα έχουν προταθεί η αμμωνία, το μονοξείδιο του άνθρακα, το υδρογόνο, το μεθάνιο και οι υδρογονάνθρακες, όμως η αντίδραση των υπολοίπων ενώσεων με το οξυγόνο που είναι παρόν στα καυσαέρια, καθιστά μόνο την αμμωνία επιλεκτική. Τα βασικά πλεονεκτήματά της είναι:

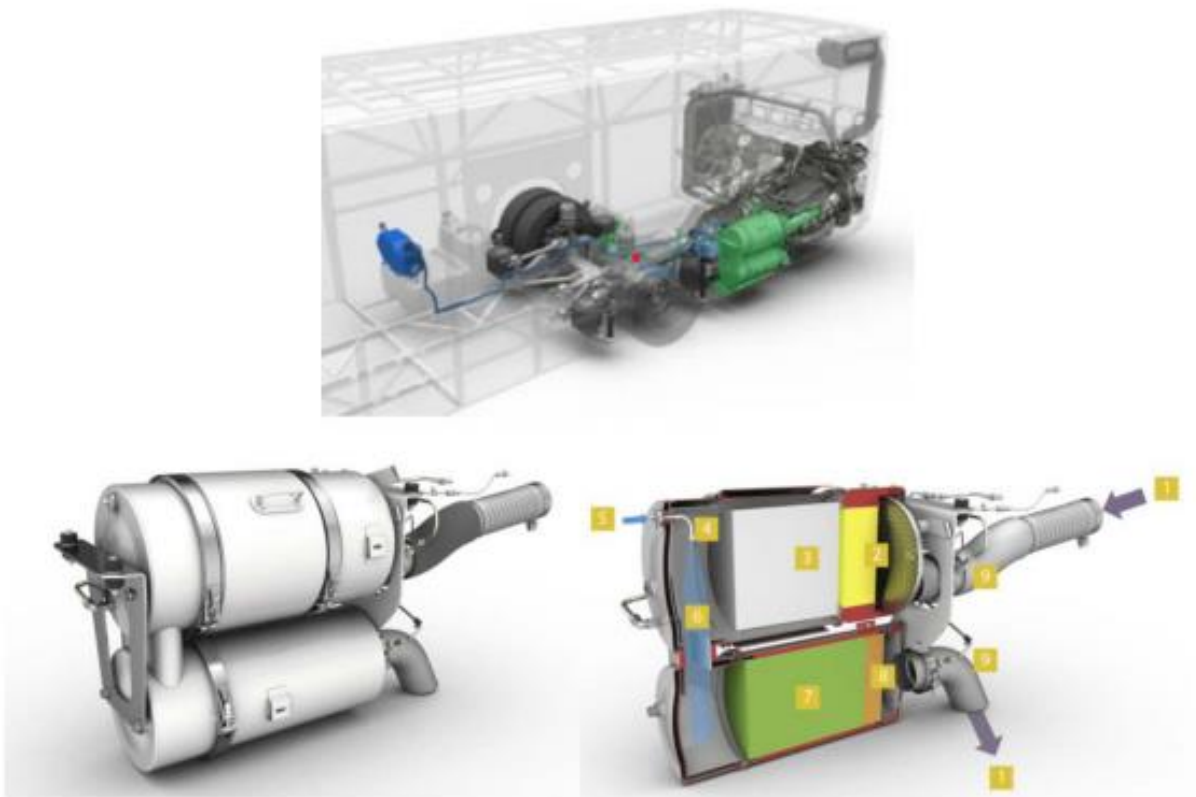
- η υψηλή απόδοση αναγωγής των NO_x σε N_2 που μπορεί να φτάσει και το 95%
- η δυνατότητα χρήσης της και σε καυσαέρια που περιέχουν σωματίδια
- δεν απενεργοποιείται από το SO_2 και το H_2O που (ενδεχομένως όσον αφορά το SO_2) υπάρχουν στα καυσαέρια στις συνήθεις θερμοκρασίες λειτουργίας

Η μέθοδος SCR έχει τα παρακάτω μειονεκτήματα:

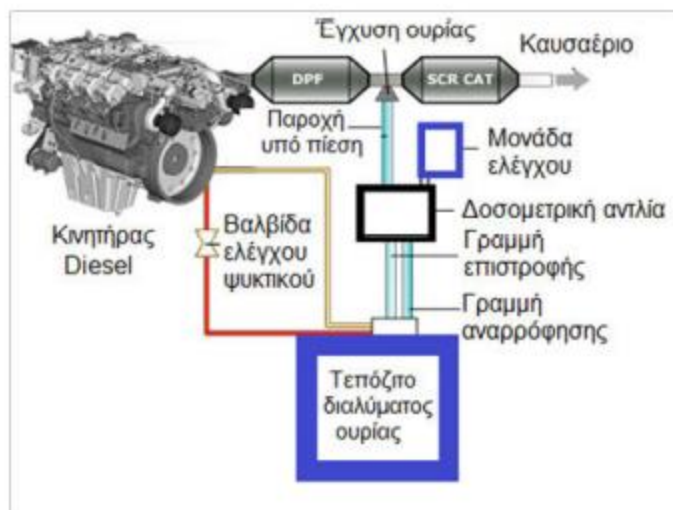
- κόστος του καταλύτη
- κόστος του αναγωγικού μέσου
- τοξικότητα της αμμωνίας σε περίπτωση διαφυγής της στο περιβάλλον

Η διάταξη του SCR, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 2.6 και 2.7, αποτελείται από [2]:

- 1) τον αντιδραστήρα με το καταλυτικό υλικό σε κεραμικές πλάκες κυψελοειδούς διαμόρφωσης προκειμένου να μεγιστοποιείται η επιφάνεια επαφής καυσαερίου και καταλύτη και κατ' επέκταση η αναγωγή των NO_x
- 2) το σύστημα τροφοδοσίας αμμωνίας (ή διαλύματος ουρίας)
- 3) την αντλία με δοσομετρική μονάδα
- 4) το σύστημα ελέγχου



Σχήμα 2.6: Απεικόνιση συστήματος επεξεργασίας καυσαερίου με SCR σε βαρέος τύπου όχημα MAN ({1} Καυσαέριο από ΜΕΚ, {2} Οξειδωτικός καταλύτης(DOC), {3} Παγίδα αιθάλης, {4} Έγχυση ουρίας, {5} Γραμμή παροχής ουρίας, {6} Μετατροπή ουρίας σε αμμωνία, {7} SCR, {8} Απορρόφηση επιπλέον αμμωνίας) [2]



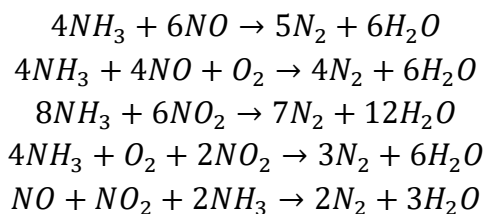
Σχήμα 2.7: Απεικόνιση διάταξης συστήματος SCR με δοχείο ουρίας [2]

Τα συστήματα SCR διακρίνονται σε δύο κατηγορίες με βάση τη δομή του καταλυτικού υλικού:

- σε καταλύτες βαναδίου (V)
- σε ζεολιθικούς καταλύτες (Zeolite)

Οι καταλύτες βαναδίου είναι πιο συχνόι σε μεγάλων διαστάσεων κινητήρες και αποτελούνται από έναν φορέα τιτανίου (Ti) παρουσία και άλλων οξειδίων μετάλλων όπως βολφράμιο (W), μολυβδένιο (Mo), μαγγάνιο (Mn), αντιμόνιο (Sb). Επίσης, έχουν μεγάλη ειδική επιφάνεια, είναι δραστικοί σε ικανοποιητικό εύρος θερμοκρασιών και ιδιαίτερα σταθεροί στο χρόνο. Οι ζεολιθικοί καταλύτες, από την άλλη πλευρά, έχουν ως βασικό πλεονέκτημα την υψηλότερη δραστηριότητά τους σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό συμβαίνει διότι ο ζεόλιθος είναι ένα ένυδρο αλουμινοπυριτικό μέταλλο με αυξημένη θερμική αντοχή, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα έκθεσής του σε θερμοκρασίες άνω των 650 °C. Επομένως, αυτή η κατηγορία καταλύτη υπερτερεί σε κινητήρες οχημάτων με φίλτρα σωματιδίων DPF, όπου συχνά εμφανίζονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες καυσαερίου εντός του SCR λόγω της διαδικασίας αναγέννησης [2].

Οι τυπικές αντιδράσεις ενός συστήματος SCR είναι οι εξής:



2.5 LNT - Παγίδα αποθήκευσης οξειδίων του αζώτου NO_x

Όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 2.4, μία εναλλακτική μέθοδος περιορισμού NO_x είναι η παγίδα αποθήκευσης οξειδίων του αζώτου, γνωστή και ως lean-NO_x trap (LNT) ή NO_x adsorber catalyst (NAC) ή NO_x storage catalyst (NSC). Στην παρούσα διπλωματική εργασία η οποία επικεντρώνεται σε αυτό το είδος καταλύτη θα χρησιμοποιηθούν ως συντομογραφία τα αρχικά LNT. Η τεχνολογία αυτή εμφανίστηκε πρώτη φορά περίπου το 2000 και εφαρμόζεται κυρίως σε κινητήρες Otto άμεσου ψεκασμού (GDI) και σε κινητήρες Diesel ελαφρών οχημάτων, όπως είναι και ο κινητήρας που θα μοντελοποιήσουμε.

Η λειτουργία της παγίδας NO_x (Σχήμα 2.8 και 2.9) περιλαμβάνει δύο στάδια:

- A. Παγίδευση
- B. Αναγέννηση

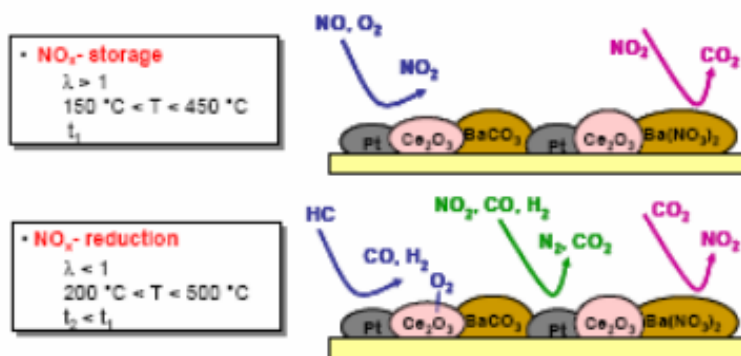
Η διαδικασία της παγίδευσης περιλαμβάνει δύο φάσεις:

1. Οξείδωση του NO του καυσαερίου με τη βοήθεια του λευκόχρυσου εντός της παγίδας σε NO₂
2. Αποθήκευση του διοξειδίου του αζώτου στην επιφάνεια επίστρωσης βαρίου της παγίδας σχηματίζοντας αζωτούχες ενώσεις (προσρόφηση). Εν συνεχεία, πραγματοποιείται οξείδωση του βαρίου σε BaO και σχηματισμός Ba(NO₃)₂ υπό την παρουσία NO₂, καθώς και παραγωγή CO₂

Όσον αφορά τη διαδικασία της αναγέννησης, αυτή υλοποιείται όταν μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (που ορίζεται για την εκάστοτε εφαρμογή) ο κινητήρας λειτουργεί σε πλούσιο μίγμα προκειμένου οι αποθηκευμένες αζωτούχες ενώσεις να αναχθούν σε CO₂ και NO₂ παρουσία πλέον και του μονοξειδίου του άνθρακα CO στα καυσαέρια και με τη βοήθεια των ευγενών μετάλλων Pt (λευκόχρυσος)/Rh (ρόδιο) να μετατραπεί το NO₂ σε N₂ (Σχήματα 2.8 και 2.9). Γίνεται αντιληπτό ότι κατά τη φάση αυτή η κατανάλωση καυσίμου είναι ελαφρώς αυξημένη.



Σχήμα 2.8: Εικονική αναπαράσταση των χημικών αντιδράσεων σε έναν καταλύτη LNT [7]



Σχήμα 2.9: Εικονική αναπαράσταση των χημικών αντιδράσεων σε έναν καταλύτη LNT κατά τη φάση της αποθήκευσης και της αναγέννησης [16]

Οι τυπικές χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε ένα καταλύτη LNT φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 2.2:

Πίνακας 2.2: Χημικές αντιδράσεις στο εσωτερικό της παγίδας NO_x (LNT) και οι σταθερές του ρυθμού εξέλιξής τους [13]

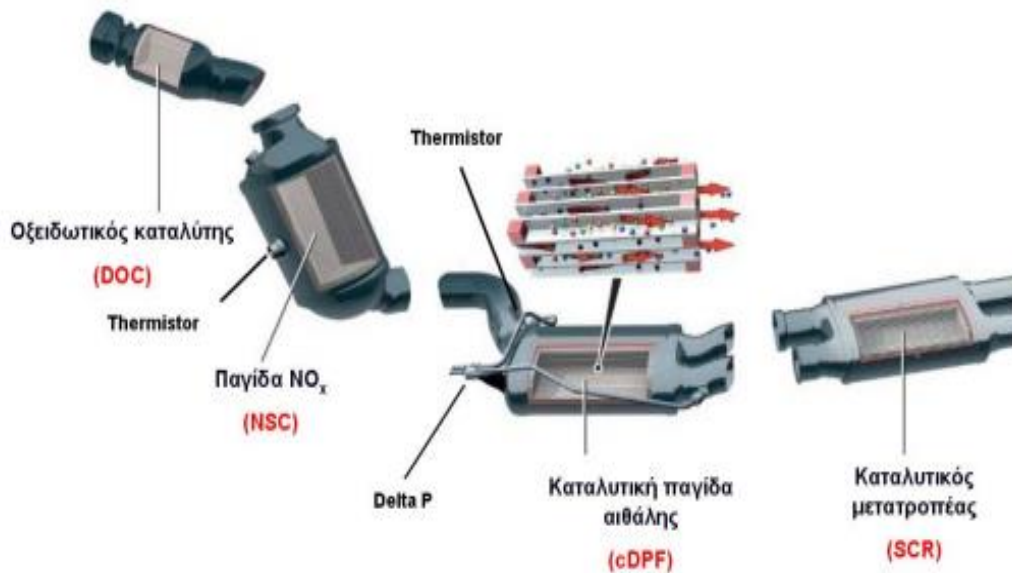
Table 1. Chemical reaction rate constants.

Rate constant (unit)	A	E (J/mol)	React heat (J/mol)	Chemical reaction
k_{NO-O_2} (mol/m ² ·s)	920	39200 ^[8]	---	$NO + 1/2 O_2 \rightleftharpoons NO_2$
k_{CO-O_2} (mol/m ² ·s)	7.70e9	90000	2.625e5	$CO + 1/2 O_2 \rightleftharpoons CO_2 + \Delta H^{CO-O_2}$
$k_{C_3H_6-O_2}$ (mol/m ² ·s)	1.70e9	105000 ^[8]	1.926e6	$C_3H_6 + 9/2 O_2 \rightleftharpoons 3CO_2 + 3H_2O + \Delta H^{C_3H_6-O_2}$
$k_{NO_2-Ba,f}$ (mol/m ³ ·s)	6.54e13	82500	---	$1/2 BaCO_3 + NO_2 + 1/4 O_2 \rightleftharpoons 1/2 Ba(NO_3)_2 + 1/2 CO_2$
$k_{NO_2-Ba,b}$ (mol/m ³ ·s)	$k_{NQ-Ba,f} / K_{eq,NQ-Ba}$	---	---	$1/2 Ba(NO_3)_2 + 1/2 CO_2 \rightleftharpoons 1/2 BaCO_3 + NO_2 + 1/4 O_2$
$k_{NO-Ba,f}$ (mol/m ³ ·s)	1.644e7	20000	---	$1/2 BaCO_3 + NO + 1/4 O_2 \rightleftharpoons 1/2 Ba(NO_2)_2 + 1/2 CO_2$
$k_{NO-Ba,b}$ (mol/m ³ ·s)	$k_{NQ-Ba,f} / K_{eq,NO-Ba}$	---	---	$1/2 BaCO_3 + NO + 1/4 O_2 \rightleftharpoons 1/2 Ba(NO_2)_2 + 1/2 CO_2$
$k_{nitrate-CO}$ (mol/m ³ ·s)	1.82e10	70100	---	$1/2 BaCO_3 + CO_2 + NO \rightleftharpoons 1/2 Ba(NO_3)_2 + 3/2 CO$
$k_{nitrite-CO}$ (mol/m ³ ·s)	1.82e10	70100	---	$1/2 Ba(NO_2)_2 + 1/2 CO \rightleftharpoons 1/2 BaCO_3 + NO$
$k_{nitrate-C_3H_6}$ (mol/m ³ ·s)	2.09e11 ^[8]	100300 ^[8]	---	$1/2 Ba(NO_3)_2 + 1/6 C_3H_6 \rightleftharpoons 1/2 BaCO_3 + NO + 1/2 H_2O$
$k_{nitrite-C_3H_6}$ (mol/m ³ ·s)	3.74e8 ^[8]	60300 ^[8]	---	$1/2 Ba(NO_2)_2 + 1/18 C_3H_6 + 1/3 CO_2 \rightleftharpoons 1/2 BaCO_3 + NO + 1/6 H_2O$
k_{NO-CO} (mol/m ² ·s)	9.76e8	68300	1.800e5	$NO + CO \rightleftharpoons 1/2 N_2 + CO_2 + \Delta H^{NO-CO}$
$k_{NO-C_3H_6}$ (mol/m ² ·s)	15.40e3	60000 ^[8]	2.100e5	$NO + 1/9 C_3H_6 \rightleftharpoons 1/2 N_2 + 1/3 CO_2 + 1/3 H_2O + \Delta H^{NO-C_3H_6}$
$k_{Ce_2O_3-O_2}$ (mol/m ² ·s)	5.60e10	70000	---	$Ce_2O_3 + 1/2 O_2 \rightleftharpoons 2CeO_2$
$k_{Ce_2O_3-CO}$ (mol/m ² ·s)	1.61e9	63000	2.625e5	$2CeO_2 + CO \rightleftharpoons Ce_2O_3 + CO_2 + \Delta H^{CeO_2-CO}$
$k_{Ce_2O_3-C_3H_6}$ (mol/m ² ·s)	5.60e10	71500	2.100e5	$2CeO_2 + 1/9 C_3H_6 \rightleftharpoons Ce_2O_3 + 1/3 CO_2 + 1/3 H_2O + \Delta H^{CeO_2-C_3H_6}$

Ειδικότερα για τους πετρελαιοκινητήρες, λόγω της πιο απλής κατασκευής και της απουσίας ανάγκης γεμίματος αναγωγικού μέσου, η παγίδα NO_x παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα σε οχήματα ελαφρού τύπου (light duty - επιβατικά και ελαφρά φορτηγά). Σε γενικές γραμμές, όμως, η επιλεκτική καταλυτική αναγωγή (SCR) είναι πιο αποτελεσματική και είναι προτιμητέα στην

Ευρώπη προκειμένου να ικανοποιούνται τα θεσμοθετημένα όρια εκπομπών ρύπων του Euro 6/VI για πετρελαιοκίνητα οχήματα. Βέβαια, τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει προσπάθειες συνδυασμού των δύο καταλυτών (LNT και SCR), έτσι ώστε να επιτευχθεί ακόμα πιο αποτελεσματική μείωση των εκπομπών NO_x, καθώς κατά την εκκίνηση, το σύστημα SCR δεν μπορεί να αποδώσει ακόμα, ενώ η παγίδα μπορεί να δεσμεύσει σημαντική ποσότητα NO_x.

Σχετικά με τα μειονεκτήματα της τεχνολογίας LNT, ένα από αυτά είναι η μεγάλη ευαισθησία στο θείο γεγονός που πλέον, όμως, δεν αποτελεί σημαντικό πρόβλημα λόγω της χρήσης εδώ και χρόνια καυσίμου Diesel με ελάχιστη περιεκτικότητα σε θείο (< 10 ppm). Το πιο βασικό, όμως, αρνητικό της παγίδας NO_x είναι το φαινόμενο της θερμικής γήρανσης, κατά το οποίο η δυνατότητα αναγωγής των οξειδίων του αζώτου μειώνεται ραγδαία σε θερμοκρασίες άνω των 400°C. Αυτό εμφανίζεται συχνά σε κινητήρες Diesel βαρέων οχημάτων, διότι αυτοί κινούνται κατά τη μεγαλύτερη χρονική διάρκεια σε αυτοκινητοδρόμους, άρα σε υψηλά φορτία (υψηλές θερμοκρασίες καυσαερίου). Ακόμα, μείζον θέμα αποτελεί η αύξηση της κατανάλωσης (και επομένως και των εκπομπών CO₂) κατά την συχνή αναγέννηση της παγίδας, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με την προσπάθεια των κατασκευαστών για μείωση των εκπομπών CO₂, λόγω των αυστηρών ορίων της σχετικής νομοθεσίας [2].



Σχήμα 2.10: Συνδυασμός του καταλύτη LNT(NSC) με τις υπόλοιπες συσκευές αντιρρύπανσης κινητήρα Diesel Mercedes E320 Bluetec I [14]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Παγκόσμιος Κύκλος Πόλης WLTC [4]

Οι Μεταβατικοί Κύκλοι Πόλης (Transient ή Driving Cycles) αποτελούν τυποποιημένες μεταβατικές δοκιμές για τον έλεγχο της εκπομπής ρύπων των οχημάτων. Η διάρκεια των Μεταβατικών Κύκλων Πόλης είναι αρκετά μεγάλη (έως και 30 λεπτά) και παρουσιάζουν συχνές αλλαγές ταχύτητας και φορτίου, σε ένα μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας, ώστε να αναπαριστούν, όσο είναι εφικτό, τη λειτουργία του οχήματος σε πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας στο δρόμο [4].

Ένας Μεταβατικός Κύκλος Πόλης αποτελείται από μια ακολουθία σημείων, όπου κάθε σημείο αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα (για την περίπτωση δοκιμής του οχήματος) ή σε έναν συγκεκριμένο αριθμό στροφών και φορτίου (για την περίπτωση δοκιμής μόνο του κινητήρα). Το σημείο δοκιμής μεταβάλλεται με χρονικό βήμα ενός δευτερολέπτου και η επιτάχυνση/μεταβολή του φορτίου κατά τη διάρκεια του Κύκλου θεωρείται γραμμική. Τέτοια τυποποίηση είναι απαραίτητη προκειμένου να είναι εφικτή η σύγκριση διαφορετικών οχημάτων ή κινητήρων στις ίδιες συνθήκες λειτουργίας. Οι Μεταβατικοί Κύκλοι, χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Τα επιβατικά αυτοκίνητα και τα ελαφρού τύπου φορτηγά υποβάλλονται συνήθως σε Κύκλο δοκιμής, που συσχετίζει την ταχύτητα του οχήματος με το χρόνο (vehicle speed vs time) και τα αποτελέσματα των εκπομπών ρύπων εκφράζονται σε g/km.
- Τα βαρέως τύπου οχήματα, λόγω μεγέθους, βάρους και τεράστιου αριθμού συνδυασμών κινητήρα/αμαξώματος, υποβάλλονται σε Κύκλο Δοκιμής μόνο του κινητήρα. Για την πραγματοποίηση αυτού του Κύκλου ο κινητήρας τοποθετείται σε μία πέδη δοκιμής κινητήρων και ακολουθεί μια καθορισμένη αλληλουχία ταχυτήτων περιστροφής και φορτίων σε σχέση με το χρόνο (engine speed/torque vs time). Τα αποτελέσματα της δοκιμής εκφράζονται συνήθως σε g/kWh, δηλαδή ανάγονται στο παραγόμενο συνολικό έργο από τον κινητήρα κατά τη διάρκεια του Κύκλου [4].

Προκειμένου οι μετρήσεις να είναι αντιπροσωπευτικές της λειτουργίας των κινητήρων, έχουν ενσωματωθεί στους Μεταβατικούς Κύκλους Πόλης οι παρακάτω καθημερινές συνθήκες οδήγησης ή κατά περίπτωση μερικές από αυτές:

- ψυχρή και θερμή εκκίνηση
- συχνές επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις
- μεταβολές του φορτίου
- συνθήκες άφορτης λειτουργίας, χαρακτηριστικές του Κύκλου οδήγησης
- οδήγηση σε προάστια ή αγροτικούς δρόμους
- οδήγηση σε αυτοκινητόδρομο

Στη Ευρώπη, ο ισχύων Κύκλος πιστοποίησης νέων επιβατικών οχημάτων ήταν αρχικά (1970-1991) ο ECE-15 (αστική οδήγηση μόνο), στη συνέχεια ο ECE+EUDC (προστέθηκε, δηλαδή και κομμάτι εκτός δρόμου, το EUDC – extra urban driving cycle), και από το 2000 (πρότυπο εκπομπών Euro 3) μέχρι και τον 8/2017 ο Κύκλος NEDC, ο οποίος πρακτικά ταυτιζόταν με τον

ECE+EUDC, με μόνη διαφορά την έναρξη δειγματοληψίας με την εκκίνηση του κινητήρα (χωρίς δηλαδή τη διάρκεια προθέρμανσης των 40 s που ίσχυε αρχικά). Ο Κύκλος NEDC, όμως, ήταν εξαιρετικά απλοϊκός, με “μαλακές” επιταχύνσεις και μεγάλα διαστήματα σταθερής ταχύτητας, σαφώς μη αντιπροσωπευτικά των πραγματικών συνθηκών οδήγησης στο δρόμο. Κατά συνέπεια, ξεκίνησε (έστω και με μεγάλη καθυστέρηση) η διαδικασία αντικατάστασής του που οδήγησε στην εξέλιξη του Κύκλου οδήγησης WLTC και της αντίστοιχης διαδικασίας πιστοποίησης WLTP [4].

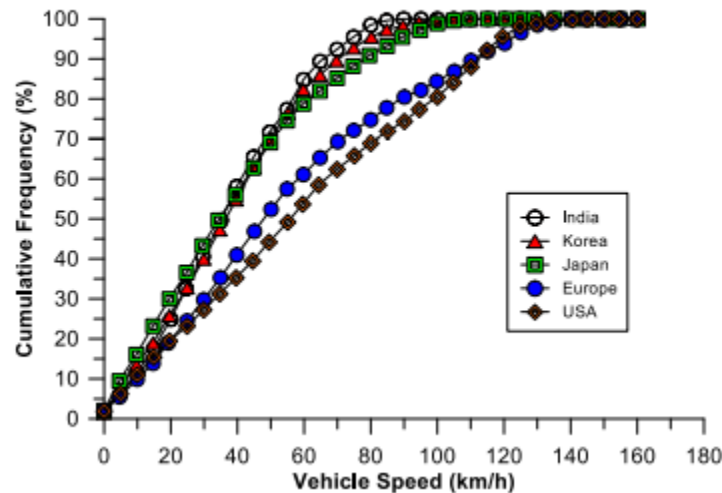
Κατά τη σύνοδο του Νοεμβρίου του 2007, η Παγκόσμια Επιτροπή για την Εναρμόνιση των Κανονισμών Οχημάτων (WP.29) της ΟΕΗΕΕ (Οικονομική Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών Ευρώπης - UNECE) αποφάσισε, στο πλαίσιο της ομάδας εργασίας για τη ρύπανση και την ενέργεια (GRPE), τη σύσταση μιας ανεπίσημης ομάδας για την ανάπτυξη της Worldwide harmonized Light Vehicle Test Procedure (WLTP), μιας πρότυπης παγκόσμιας διαδικασίας πιστοποίησης 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 προγράμματος αυτού είχε τις παρακάτω τρεις φάσεις:

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

Η ανάπτυξη του νέου Κύκλου ξεκίνησε τον Σεπτέμβριο του 2009, η συλλογή δεδομένων οδήγησης ξεκίνησε το 2010, και στα μέσα του 2011 προτάθηκε η πρώτη έκδοση του Κύκλου. Ο Κύκλος υπέστη αρκετές αναθεωρήσεις προκειμένου να ληφθούν υπόψη τεχνικά ζητήματα όπως η οδηγισιμότητα και η καλύτερη αναπαράσταση των συνθηκών οδήγησης μετά από μια πρώτη εκτίμηση του Κύκλου. Διάφοροι ενδιαφερόμενοι φορείς (κυβερνήσεις, βιομηχανίες, μη κυβερνητικές οργανώσεις) παρακολουθούσαν στενά την ανάπτυξη της WLTP. Το 2010, όμως, η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (U.S. EPA) αποφάσισε την απόσυρση της ενεργού συμμετοχής της στην ανάπτυξη της WLTP, εξαιτίας των έντονων διεργασιών για τη θέσπιση των Αμερικανικών προτύπων εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου για τις χρονικές περιόδους 2012-2016 και 2017-2025. Παρά την αποχώρηση των Ηνωμένων Πολιτειών, το πρόγραμμα συνεχίστηκε από την ΕΕ, τη Νότια Κορέα, την Ινδία και την Ιαπωνία.

Για την δημιουργία του Κύκλου WLTC, έγινε συλλογή των δεδομένων οδήγησης από όλες τις συμμετέχουσες χώρες και η στάθμισή τους έγινε σύμφωνα με τη σχετική συμβολή των περιοχών στις παγκόσμιες χιλιομετρικές αποστάσεις και στα δεδομένα που συλλέχθηκαν για την WLTP. Συνολικά, συλλέχθηκαν 766.000 km δεδομένα οδήγησης (Σχήμα 3.1) για την ανάπτυξη του Κύκλου και αποτελούνταν από:

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



Σχήμα 3.1: Συχνότητα εμφάνισης ταχύτητας οχήματος για τις διάφορες περιοχές απ' όπου συλλέχθηκαν τα δεδομένα για τον κύκλο WLTC [4]

Χρησιμοποιήθηκαν 394 οχήματα από διάφορους κατασκευαστές, με ποικίλου κυβισμού κινητήρες και με αναλογία ισχύος προς μάζα από 9 έως 120 kW/tn. Τα στοιχεία αυτά, στην πλειονότητά τους, αντιστοιχούσαν σε δεδομένα για τα επιβατικά αυτοκίνητα, όμως υπήρξε επαρκής εκπροσώπηση και των φορτηγών ελαφρού τύπου και των μικρών λεωφορείων στη βάση δεδομένων. Η συλλογή των δεδομένων έγινε από συνδυασμό οχημάτων εξοπλισμένων με όργανα (Ευρώπη, Ινδία και ΗΠΑ), οδηγούς με συγκεκριμένες οδηγίες (Ιαπωνία, Κορέα, Ινδία και Η.Π.Α.) και απλά οχήματα (μόνο για τις ΗΠΑ).

Βασιζόμενοι στις πρακτικές κατασκευής των κοινών κύκλων, έγινε διαχωρισμός των δεδομένων (μετά από κατάλληλη «αραίωση» και ομαλοποίηση) σε μικρο-διαδρομές και φάσεις ρελαντί. Αντίθετα με τις προηγούμενες προσεγγίσεις ανάπτυξης Κύκλων Πόλης, οι οποίες είχαν ως βάση την κατηγοριοποίηση των δρόμων, δηλαδή την αστική (urban), την αγροτική (rural) και

τον αυτοκινητόδρομο (motorway), ακολουθήθηκε διαφορετική προσέγγιση κατά την ανάπτυξη του WLTC, διότι οι οδικές κατηγοριοποιήσεις και τα όρια ταχύτητας ανά τον κόσμο παρουσιάζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις. Αυτό παρατηρείται κυρίως όταν γίνεται σύγκριση της Ευρωπαϊκής (ή των Η.Π.Α.) και της Ασιατικής βάσης δεδομένων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Εξαιρέση αποτελεί ο τύπος αστικών οδών, όπου διαπιστώθηκε ότι ο βαθμός συσχέτισης παγκοσμίως είναι αρκετά ικανοποιητικός. Για την κατασκευή του WLTC, η κατηγοριοποίηση των μικρο-διαδρομών έγινε σύμφωνα με τη μέγιστη ταχύτητά τους, αρχικά σε τρεις φάσεις, δηλαδή χαμηλή, μέση και υψηλή. Έπειτα, η φάση υψηλής ταχύτητας χωρίστηκε σε δύο τμήματα: μία, αντιπροσωπευτική της οδήγησης στην Ασία, φάση υψηλής ταχύτητας με μέγιστη ταχύτητα και μία εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα, χαρακτηριστικό της οδήγησης αυτοκινητοδρόμου στην Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Αυτές οι τέσσερις φάσεις που κατηγοριοποιούνται με βάση την ταχύτητα είναι:

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

Πίνακας 3.1: Τεχνικές προδιαγραφές των δεδομένων του WLTC για διάφορες περιοχές [4]

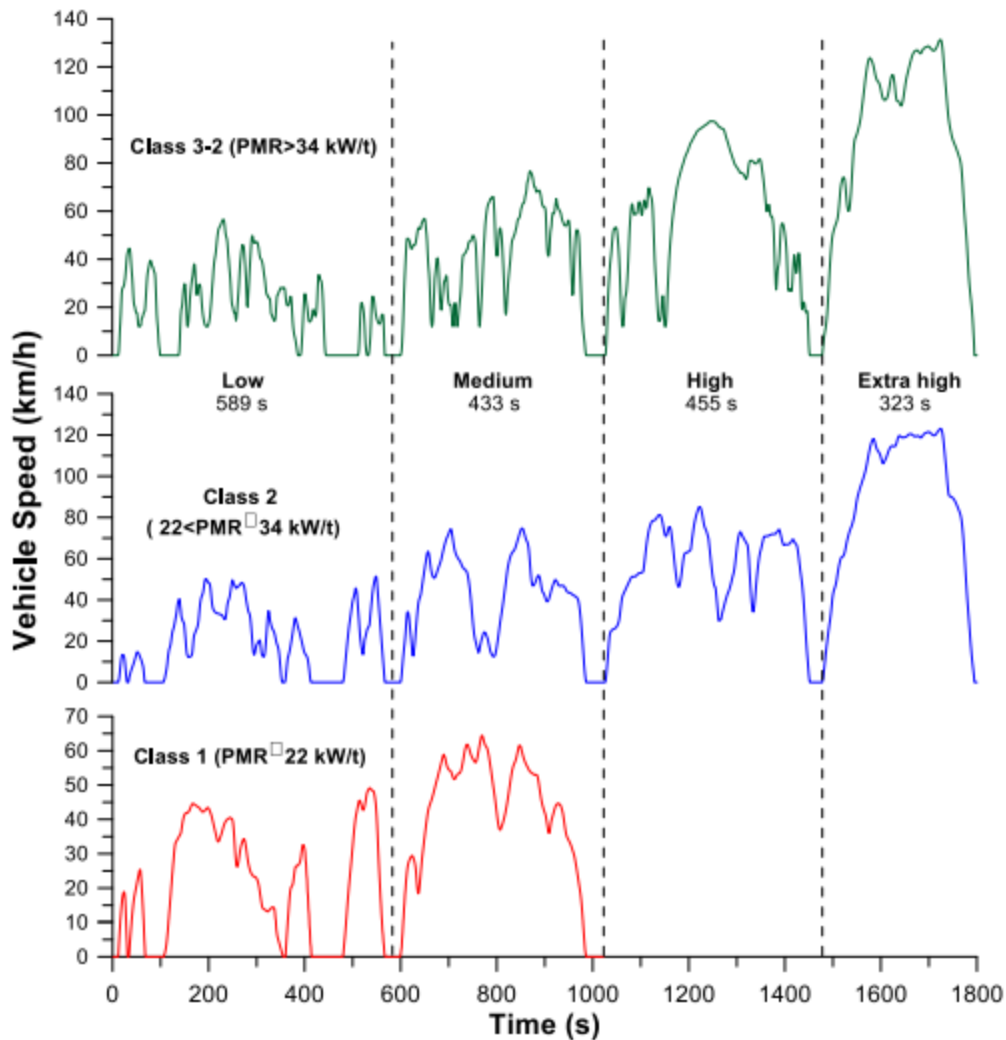
	Japan	Europe	USA	S. Korea	India	Unified
<i>Relative Positive Acceleration (m/s²)</i>						
Low	0.177	0.200	0.245	0.192	0.134	0.192
Medium	0.142	0.176	0.225	0.174	0.142	0.188
High	0.117	0.144	0.164	0.139	0.162	0.156
Extra high	0.086	0.114	0.103	0.155	-	0.108
<i>Average Speed (km/h)</i>						
Low	19.8	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
<i>Average Idle Duration (s)</i>						
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
<i>Average Short-trip Duration (s)</i>						
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

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται δεδομένα από τις βάσεις δεδομένων κάθε περιοχής και από την ενιαία βάση δεδομένων, σχετικά με ορισμένες σημαντικές τεχνικές προδιαγραφές, για κάθε εξεταζόμενη κατηγορία ταχύτητας.

Τελικά, και για να καλυφθούν οι διαφορετικές απαιτήσεις ανάλογα με την εκάστοτε χώρα, αναπτύχθηκαν τρεις κλάσεις του Κύκλου σε σχέση με την αναλογία μάζας-ισχύος (χωρίς φορτίο) του οχήματος, ως εξής (η διάρκεια κάθε ενδιάμεσου τμήματος είναι μεταξύ των τάξεων):

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

Η μέγιστη διάρκεια του Κύκλου είναι 1800 δευτερόλεπτα, παρόμοια με τους προγενέστερους Κύκλους βαρέων οχημάτων WTVC και μοτοσυκλετών WMTC. Αυτή η διάρκεια του Κύκλου θεωρήθηκε ως ένας αποδεκτός συμβιβασμός μεταξύ της στατιστικής αντιπροσωπευτικότητας και της εφικτής δοκιμής στο εργαστήριο.



Σχήμα 3.2: Ταχύτητα οχήματος συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια του Κύκλου Πόλης WLTC [4]

Ο καθορισμός της χρονικής διάρκειας κάθε τμήματος του Κύκλου έγινε με τέτοιο τρόπο που να αντικατοπτρίζει την, μεταξύ των φάσεων, κατανομή των διανυθέντων χιλιομέτρων και επομένως δεν απαιτούνταν συντελεστές στάθμισης για το τελικό αποτέλεσμα. Πιο συγκεκριμένα, το χαμηλό τμήμα διαρκεί 589 δευτερόλεπτα (5 μικρο-διαδρομές και 6 στάσεις), το μέσο 433 sec (1 μικρο-διαδρομή, 2 στάσεις), το υψηλό 455 sec (1 μικρο-διαδρομή, 2 στάσεις) και το υπερυψηλό 323 sec (1 μικρο-διαδρομή, 2 στάσεις). Η τελική έκδοση (2015) της οικογένειας κύκλων WLTC απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2.

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

Πίνακας 3.2: Σύνοψη τεχνικών προδιαγραφών των κλάσεων του WLTC [4]

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

Πίνακας 3.3: Σύνοψη τεχνικών προδιαγραφών της Κλάσης 3-2 του WLTC [4]

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Ανάπτυξη του μοντέλου οχήματος μέσω του υπολογιστικού πακέτου GT-Power [12]

4.1 Γνωριμία με το GT-Suite

Το πρόγραμμα GT-Suite αποτελεί ένα προϊόν της εταιρείας παραγωγής εξειδικευμένου λογισμικού Gamma Technologies με έδρα τις ΗΠΑ, η οποία απευθύνεται στην βιομηχανία κινητήρων και οχημάτων. Διαθέτει ένα περιβάλλον το οποίο είναι κατάλληλο για την εικονική αναπαράσταση των κινητήρων, των συστημάτων μετάδοσης κίνησης και των συστημάτων επεξεργασίας καυσαερίων και δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης μίας μεγάλης ποικιλίας εφαρμογών σχετικών με την αυτοκινητοβιομηχανία. Ορισμένες από αυτές είναι:

- μοντελοποίηση κινητήρων (GT-Power)
- επεξεργασία δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων
- ακουστική συστήματος εισαγωγής και εξαγωγής
- επεξεργασία καυσαερίων
- δυναμική οχήματος
- υβριδικά συστήματα, ηλεκτροκίνητα οχήματα και κυψέλες καυσίμου
- συστήματα ψύξης κινητήρων
- συστήματα λίπανσης
- συστήματα έγχυσης καυσίμου
- υδραυλικά και πνευματικά συστήματα
- κινηματική και δυναμική εκκεντροφόρου και συστήματος βαλβίδων
- κινηματική και δυναμική στροφαλοφόρου
- συστήματα μετάδοσης, κιβώτια ταχυτήτων και μαντοκίνηση

Για την εκπόνηση της παρούσα διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα από τα υποπρογράμματα του GT-Suite, και συγκεκριμένα το GT-Power, που ειδικεύεται στη μοντελοποίηση μηχανών εσωτερικής καύσης, για το οποίο και υπάρχει άδεια (license) στο Εργαστήριο Μ.Ε.Κ. του Ε.Μ.Π. Η πλατφόρμα του GT-Power δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να σχεδιάσει όλων των ειδών τις εφαρμογές, συνδυάζοντας εργαλεία (tools) και στοιχεία (components) που είναι διαθέσιμα στις βιβλιοθήκες του [12].

4.2 Περιβάλλον εργασίας - Γενικά χαρακτηριστικά

Οι βιβλιοθήκες (libraries) που διαθέτει το GT-Power (library) είναι εμπλουτισμένες με τα απαραίτητα πρότυπα στοιχεία και εργαλεία (templates) για τη σχεδίαση και προσομοίωση ενός κινητήρα. Κάθε ένα από τα πρότυπα που παρέχεται αποτελείται από κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά (attributes) που εξαρτώνται από τα δεδομένα της εκάστοτε εφαρμογής, όπως

φαίνεται ενδεικτικά στον Πίνακα 4.1 για την περίπτωση ενός οχήματος (π.χ. η μάζα του οχήματος, η μετωπική του επιφάνεια, ο συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης κ.λπ.)

Με τη συμπλήρωση των χαρακτηριστικών κάθε προτύπου, αυτό μεταφέρεται από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος στη βιβλιοθήκη της συγκεκριμένης εργασίας (project library) και μετατρέπεται σε αντικείμενο (object) του οποίου μπορεί να γίνει διαμόρφωση και χρήση στην εργασία όσες φορές επιθυμεί ο χρήστης (π.χ. ο κύλινδρος σε έναν πολυκύλινδρο κινητήρα, οι αντίστοιχοι εγχυτήρες ανά κύλινδρο, κοκ.).

Έπειτα, όταν τα απαραίτητα αντικείμενα (objects) είναι πλέον διαμορφωμένα κατάλληλα, πρέπει ο χρήστης να τα μεταφέρει ένα-ένα στο χάρτη εργασίας (project map), όπου θα συνδεθούν μεταξύ τους έτσι ώστε να προσομοιώνεται σωστά η διάταξη και η λειτουργία του οχήματος και του κινητήρα. Με αυτό τον τρόπο, ο χαρακτηρισμός των objects αλλάζει πλέον σε μέρη ή κομμάτια (parts) μοντέλου του οχήματος. Με την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας, ουσιαστικά δημιουργείται ένα μονογραμμικό σχέδιο στο οποίο διακρίνονται τα επιμέρους κομμάτια του μοντέλου, αλλά και οι μεταξύ τους συνδέσεις, διευκολύνοντας τον χρήστη στο να έχει καλύτερη εποπτεία του μοντέλου και να κάνει οτιδήποτε αλλαγές επιθυμεί σε συγκεκριμένα μέρη του κινητήρα.

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

Μετά την συμπλήρωση των διαφόρων σεναρίων ο χρήστης λαμβάνει αποτελέσματα της προσομοίωσής του μέσω του εργαλείου GT-Post, σε μορφή πινάκων ή διαγραμμάτων, τα οποία είναι περαιτέρω επεξεργάσιμα [12].

4.3 Δημιουργία του κατάλληλου μοντέλου στο GT-Power

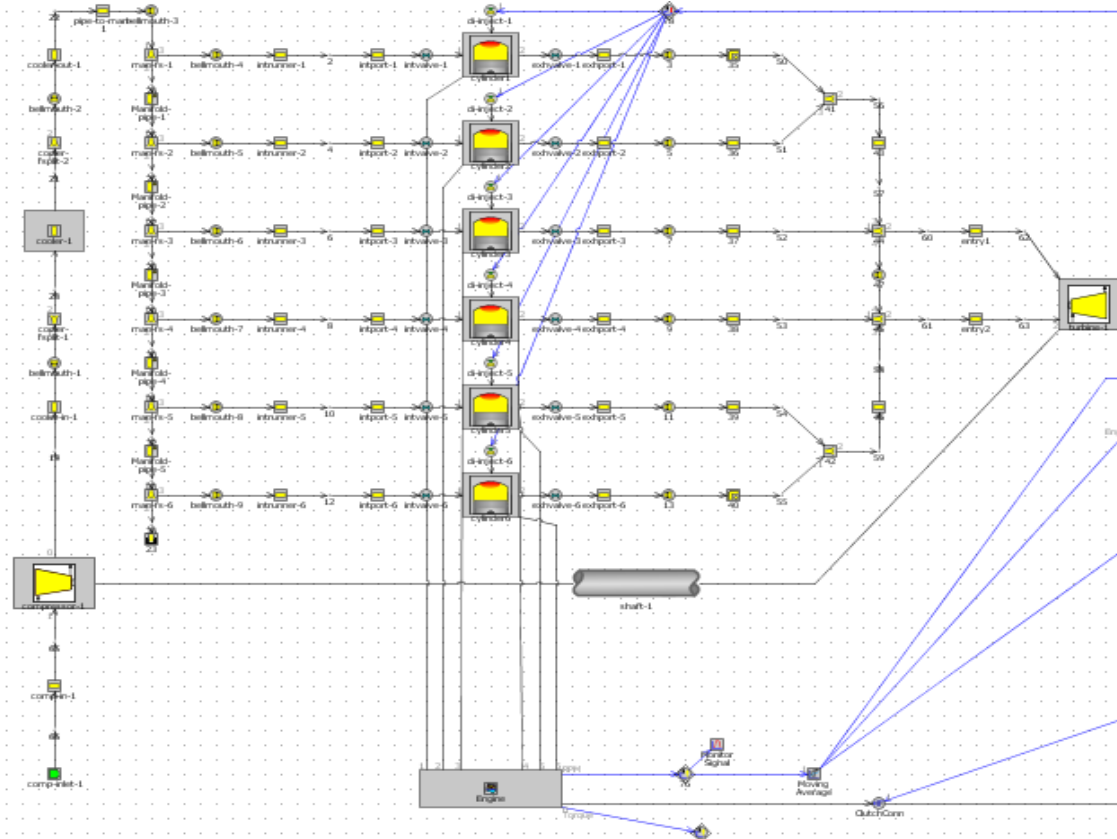
4.3.1 Γενικές πληροφορίες κινητήρα

Η παρούσα διπλωματική εργασία βασίζεται σε μία ήδη περατωθείσα διπλωματική εργασία [3] και επομένως η κατασκευή του μοντέλου μέσω του GT-Power στα πλαίσια της παρούσας εργασίας είναι ο εμπλουτισμός, του ήδη υπάρχοντος μοντέλου που αφορούσε στην εφαρμογή στροβίλο-υπερπλήρωσης σε 4-X κινητήρα Diesel με ενδιάμεσο ψυγείο και χωρίς περιοριστή καυσίμου, με το σύστημα της παγίδας NO_x, και σε μετέπειτα στάδιο με τα υπόλοιπα συστήματα επεξεργασίας των καυσαερίων. Η τελική του διάταξη στο χάρτη εργασίας του υπολογιστικού πακέτου GT-Power φαίνεται στο Σχήμα 4.1.

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

- διάμετρος εμβόλου: $D = 97.5 \text{ mm}$
- διαδρομή εμβόλου: $s = 133 \text{ mm}$
- ακτίνα στροφάλου: $r = 66.5 \text{ mm}$
- μήκος διωστήρα: $L = 230 \text{ mm}$
- γωνία στροφάλου κατά τη στιγμή ανοίγματος της βαλβίδας εξαγωγής: $\varphi_{\text{evo}} = 112^\circ$ μετά το ANΣ
- βαθμός συμπίεσης: $CR = 18$
- κύλινδροι: $z = 6$ σε σειρά
- ολικός όγκος εμβολισμού: $V_h = 5958 \text{ cm}^3$
- επιζήμιος όγκος κυλίνδρου: $V_c = 58.4 \text{ cm}^3$
- όγκος κοιλότητας εμβόλου: $V_{\text{bowl}} = 48.5 \text{ cm}^3$
- μέγιστη ισχύς: $P_{\text{max}} = 177 \text{ kW} = 237 \text{ HP}$
- ροπή αδράνειας κινητήρα: $G_e = 0.87 \text{ kg/m}^2$

Η σειρά ανάφλεξης των κυλίνδρων του είναι η 1-5-3-6-2-4 προκειμένου να εξασφαλιστεί η αναγκαία ζυγοστάθμιση αλλά και η ευκολότερη σύνδεση των κυλίνδρων στην πολλαπλή εξαγωγής του κινητήρα από χωροταξικής άποψης, καθώς είναι ανά τρεις συνδεδεμένοι στην ίδια πολλαπλή εξαγωγής (1-2-3 και 4-5-6) [17].



Σχήμα 4.1: Ολοκληρωμένο μοντέλο κινητήρα Diesel με απλή στροβίλο -υπερπλήρωση στο περιβάλλον εργασίας του GT-Power [3]

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

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

Όπως προαναφέρθηκε, ως βάση χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό μοντέλο από μια παλαιότερη διπλωματική [3], τα τμήματα του οποίου παρουσιάζονται παρακάτω.

Η μελέτη της απόκρισης του εν λόγω κινητήρα στα πλαίσια Κύκλων Πόλης καθιστά αναγκαία την παράλληλη μοντελοποίηση του κατάλληλου οχήματος και του συστήματος μετάδοσης κίνησης μέσω του υπολογιστικού πακέτου GT-Power. Στην συγκεκριμένη ενότητα θα γίνει αναφορά και ανάλυση των επιμέρους τμημάτων του μοντέλου αυτού, καθώς και των διαφόρων χαρακτηριστικών τους και των σταδίων κατασκευής τους στο περιβάλλον του υπολογιστικού πακέτου GT-Power.

A) Το όχημα (vehicle)

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

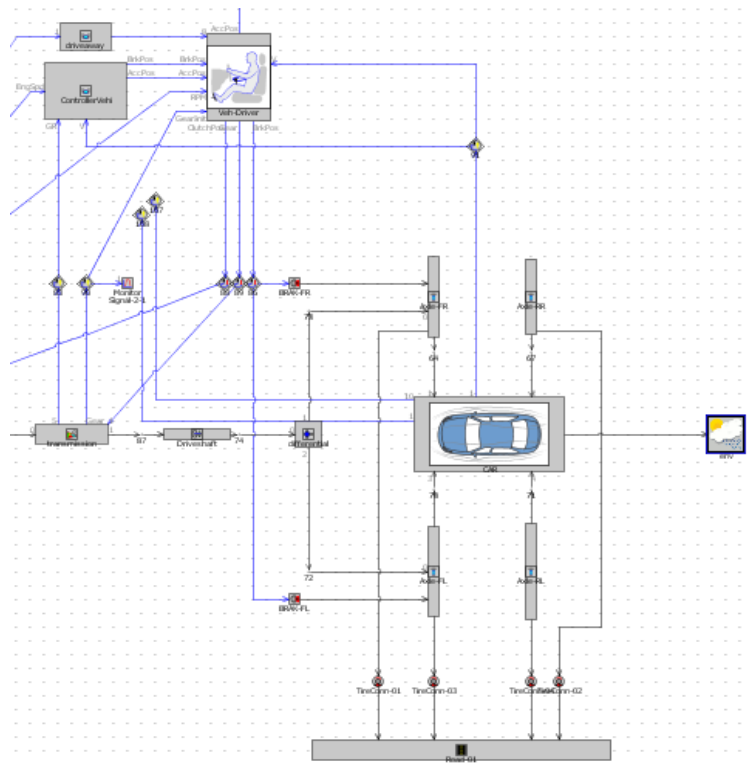
Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά Ονομαστικού Οχήματος

Ονομαστικό Όχημα	
Μάζα (m_v)	3.5 tn
Μετωπική Επιφάνεια (A_f)	3 m²
Συντελεστής Αεροδυναμικής Αντίστασης (c_d)	0.38
Σχέσεις Μετάδοσης Κιβωτίου Ταχυτήτων (i_g)	1 ⁿ - 5.78:1 2 ⁿ - 2.7:1 3 ⁿ - 1.9:1 4 ⁿ - 1.25:1 5 ⁿ - 1.0:1 6 ⁿ - 0.9:1
Ακτίνα Τροχού (r_{wheel})	0.35 m
η_{gear}	0.96



Σχήμα 4.2: Παράδειγμα οχήματος παραπλήσιου του χρησιμοποιούμενου στην προσομοίωση [18]

Ένα παράδειγμα ενός παρόμοιου οχήματος με αυτό που μοντελοποιήθηκε στο GT-Power φαίνεται στην Σχήμα 4.2. Στο Σχήμα 4.3 γίνεται απεικόνιση της τελικής μορφής που αποκτά το όχημα στο περιβάλλον του προγράμματος.



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

Σε πρώτο στάδιο, ο σχεδιασμός του οχήματος απαιτεί από τον χρήστη την εισαγωγή, μέσω διαφόρων παραμέτρων του προγράμματος, των βασικών χαρακτηριστικών του οχήματος. Πιο

συγκεκριμένα, αρχικά εισάγεται η μάζα του οχήματος, καθώς και η πυκνότητα του εγγεόμενου καυσίμου. Έπειτα, εισάγονται τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του οχήματος, όπως ο συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης c_d και η μετωπική του επιφάνεια (frontal area), τα οποία είναι μείζονος σημασίας για τον τελικό καθορισμό της απόκρισής του. Στη συνέχεια, είναι απαραίτητη η κατάλληλη ρύθμιση αρκετών παραμέτρων, όπως τα μήκη του μεταξονίου και των ημιαξονίων, των ελαστικών, των φρένων, αλλά και του οδοστρώματος.

B) Σύστημα μετάδοσης κίνησης και ισχύος στους τροχούς

Με την ολοκλήρωση του σχεδιασμού των μερών του οχήματος, ακολουθεί ο σχεδιασμός των επιμέρους τμημάτων του συστήματος μετάδοσης κίνησης. Η προσομοίωσή τους υλοποιήθηκε μέσω του υπολογιστικού πακέτου GT-Power όπως αναλύεται παρακάτω.

Συμπλέκτης τριβής (clutch)

Ο συμπλέκτης τριβής παρεμβάλλεται μεταξύ του κινητήρα (engine) και του συστήματος μετάδοσης κίνησης (transmission). Αποτελείται από δύο πλάκες και υλικό τριβής ανάμεσά τους και η βασική αρχή λειτουργίας του είναι η εξής: Αφήνοντας σιγά σιγά το πεντάλ του συμπλέκτη που είχε πατηθεί προκειμένου να γίνει η αποσύμπλεξη, οι πλάκες πλησιάζουν μεταξύ τους και με τη βοήθεια του υλικού τριβής η μία παρασύρει την άλλη και επιτυγχάνεται η μεταφορά ενέργειας.

Σύστημα μετάδοσης κίνησης (Transmission)

Στο μοντέλο προσομοίωσης γίνεται εισαγωγή των σχέσεων μετάδοσης (gear ratios) μέσω του συστήματος μετάδοσης της κίνησης (transmission) και η επιλογή του πλήθους των σχέσεων μετάδοσης του κιβωτίου κίνησης γίνεται με βάση τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε οχήματος, με στόχο την ικανοποιητική του απόκριση. Παρατηρούμε ότι το εν λόγω τμήμα (transmission) αποτελεί συνδυασμό πολλών μερών του μοντέλου. Το συγκεκριμένο τμήμα (transmission) του μοντέλου συνδέεται μέσω του άξονα (driveshaft) με το διαφορικό (differential) αλλά και με το συμπλέκτη τριβής (clutch). Επίσης, δίνει την δυνατότητα αλλαγής ταχύτητας στο κιβώτιο ταχυτήτων μέσω επικοινωνίας με τον εικονικό οδηγό, αλλά και με τα διάφορα συστήματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται (controller vehicle, driveaway).

Διαφορικό (Differential)

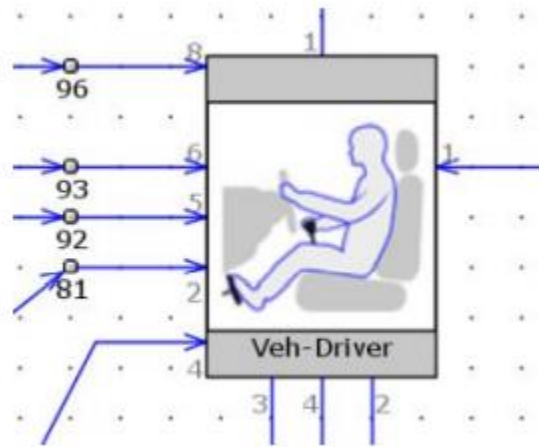
Το διαφορικό μπορεί να οριστεί ως ο μηχανισμός που λαμβάνει δεδομένα σχετικά με την επαφή καθενός κινητήριου τροχού με το οδόστρωμα και αναλαμβάνει το διαμοιρασμό της ισχύος ή της ροπής του κινητήρα στους άξονες των τροχών.

Ελεγκτής εκκίνησης (driveaway)

Αποτελεί ένα παρόμοιο σύστημα με αυτό του ελεγκτή οχήματος, αλλά αφορά αποκλειστικά και μόνο την περίπτωση της εκκίνησης, οπότε και ενεργοποιείται και επικοινωνεί με τον εικονικό οδηγό.

Οδηγός οχήματος (vehicle driver)

Προκειμένου να επιτύχουμε καλύτερο συντονισμό και πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα, κρίθηκε απαραίτητη η δημιουργία ενός εικονικού οδηγού για την αλλαγή σχέσης μετάδοσης, αλλά και τον έλεγχο της αρχής και του τέλους του Κύκλου Πόλης, ο οποίος συμπεριφέρεται σαν πραγματικός οδηγός (Σχήμα 4.4). Αυτός είναι ουσιαστικά υπεύθυνος για το συντονισμό του κιβωτίου ταχυτήτων, του συμπλέκτη και του πεντάλ επιτάχυνσης («γκάζι»). Έτσι, μέσω του υπολογιστικού πακέτου GT-Power μπορεί να γίνει εισαγωγή της στρατηγική αλλαγής ταχυτήτων που δίνει στον οδηγό τη δυνατότητα ελέγχου των σχέσεων μετάδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων, και κατ' επέκταση το καθορισμό της γραμμικής ταχύτητας του οχήματος στην οποία θα γίνεται η κάθε αλλαγή σχέσης.



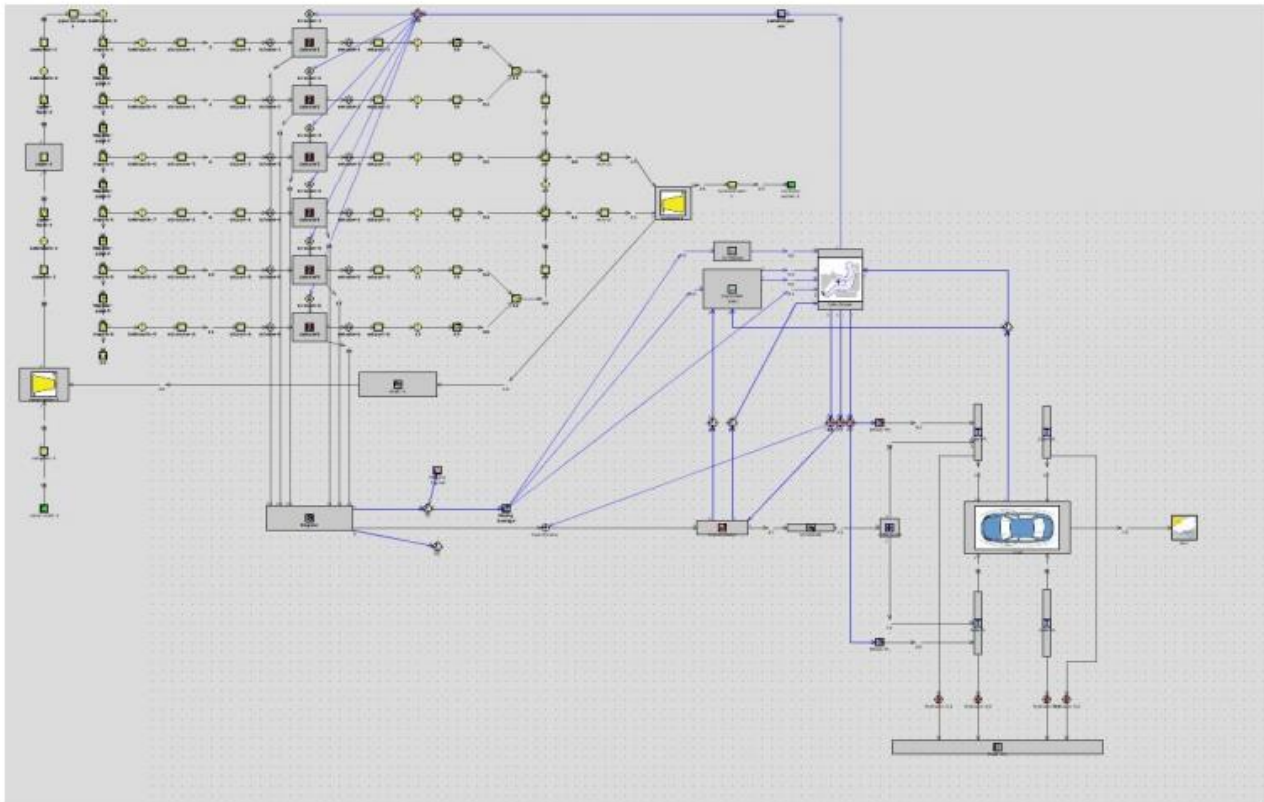
Σχήμα 4.4: Απεικόνιση εικονικού οδηγού στο περιβάλλον του GT-Power [3]

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.4, ο οδηγός συνδέεται στο GT-Power, όπως και ένας πραγματικός, μόνο με το πεντάλ επιτάχυνσης (accelerator pedal), το φρένο (brake pedal), το συμπλέκτη τριβής (clutch pedal) και το κιβώτιο ταχυτήτων. Έτσι, μέσω των παραθύρων εισαγωγής των χαρακτηριστικών του εικονικού οδηγού στο GT-Power συμπληρώθηκαν διαφορετικοί χάρτες που προσομοιώνουν έναν πραγματικό οδηγό. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά το πεντάλ επιτάχυνσης, εισάγεται ένας χάρτης της συμπεριφοράς του κατά τη διάρκεια των αλλαγών σχέσης (shiftaccel). Αντίστοιχα, για τον συμπλέκτη τριβής, εισάγονται δύο χάρτες που απεικονίζουν την συμπεριφορά του στις περιπτώσεις αλλαγής ταχύτητας (shiftclutch) και εκκίνησης (driveclutch), και τέλος εισάγονται κάποια στοιχεία σχετικά με τη χρονική διάρκεια των φαινομένων της εκκίνησης και της αλλαγής ταχύτητας. Επιπλέον, μεγάλης σημασίας είναι και η δημιουργία του χάρτη απεικόνισης της εγχυόμενης ποσότητας καυσίμου ανάλογα με το φορτίο σε ποσοστό % (δηλαδή ανάλογα με το «πάτημα» του πεντάλ επιτάχυνσης). Ο χάρτης αυτός βασίστηκε σε ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας και σε εμπειρικά στοιχεία, και τοποθετήθηκε στον οριζόντιο άξονα X το φορτίο (%), ενώ στον κατακόρυφο άξονα Y η εγχυόμενη ποσότητα καυσίμου σε mg/cycle. Επίσης, ο συγκεκριμένος χάρτης συνδέεται μέσω κατάλληλου ενεργοποιητή στους εγχυτήρες των έξι κυλίνδρων του κινητήρα, αλλά και στον εικονικό οδηγό,

και η συμπλήρωσή του γίνεται έτσι ώστε στην άφορτη λειτουργία να διατηρούνται οι στροφές περίπου στις 900 rpm. Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει ανάλυση των διαφόρων τμημάτων, που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και για την εύρυθμη λειτουργία του υπό μελέτη μοντέλου, έτσι ώστε το όχημα να ακολουθεί με ικανοποιητική ακρίβεια και ρεαλιστικά τους επιλεγμένους Κύκλους Πόλης.

Ελεγκτής οχήματος (controller vehicle)

Ο ελεγκτής του οχήματος είναι μείζονος σημασίας για τη σωστή λειτουργία του μοντέλου, καθώς αποτελεί έναν απλουστευμένο «εγκέφαλο» (ECU) που λαμβάνει δεδομένα από την κατάσταση του οχήματος και χειρίζεται κατάλληλα το πεντάλ επιτάχυνσης ή το φρένο αντίστοιχα, ώστε το όχημα να ακολουθεί ένα συγκεκριμένο προφίλ ταχύτητας, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ένας Μεταβατικός Κύκλος Πόλης. Επιπρόσθετα, βασικό χαρακτηριστικό του είναι ο χάρτης της μέσης πραγματικής πίεσης (BMEP) του κινητήρα, ο οποίος για να συμπληρωθεί απαιτείται το «τρέξιμο» του κινητήρα αποσυνδεδεμένο από το όχημα σε διάφορα σενάρια στροφών και φορτίου με τιμές από 500-3000 rpm και 0-100% αντίστοιχα. Προκύπτουν έτσι πολλά διαφορετικά σενάρια με όλους τους συνδυασμούς στροφών και φορτίου, και από την ολοκλήρωσή τους κατασκευάζεται ο παραπάνω χάρτης. Η τελική ολοκληρωμένη διάταξη του μοντέλου οχήματος που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5: Ολοκληρωμένη εικόνα του μοντέλου οχήματος και του συστήματος μετάδοσης κίνησης, καθώς και η σύνδεση του με τον κινητήρα Diesel στο περιβάλλον του GT-Power [3]

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

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

Συνοψίζοντας, μετά την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης του οχήματος και της κατάλληλης σύνδεσής του με τον κινητήρα Diesel και τα συστήματα επεξεργασίας των καυσαερίων, το μοντέλο «έτρεξε» στα πλαίσια της Κλάσης 3-2 του Παγκοσμίου Κύκλου Πόλης WLTC. Στη συνέχεια ακολούθησε κατάλληλη επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το υπολογιστικό πακέτο GT-Power, με σκοπό την μελέτη της απόκρισης του οχήματος, καθώς και την επίδραση της παγίδας NO_x στις εκπομπές ρύπων (NO_x και αιθάλης) και στις εκπομπές CO_2 . Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για το “τρέξιμο” του Κύκλου Πόλης WLTC για τον υπό μελέτη 6-κύλινδρο κινητήρα απαιτείται χρονικό διάστημα περίπου 12 ωρών (επεξεργαστής Intel Xeon CPU E3-1245 v3 3.4 GHz και μνήμη RAM 16 GB).

4.3.3 Μοντέλο συστήματος παγίδας NO_x (Lean- NO_x trap) στο περιβάλλον του GT-Power

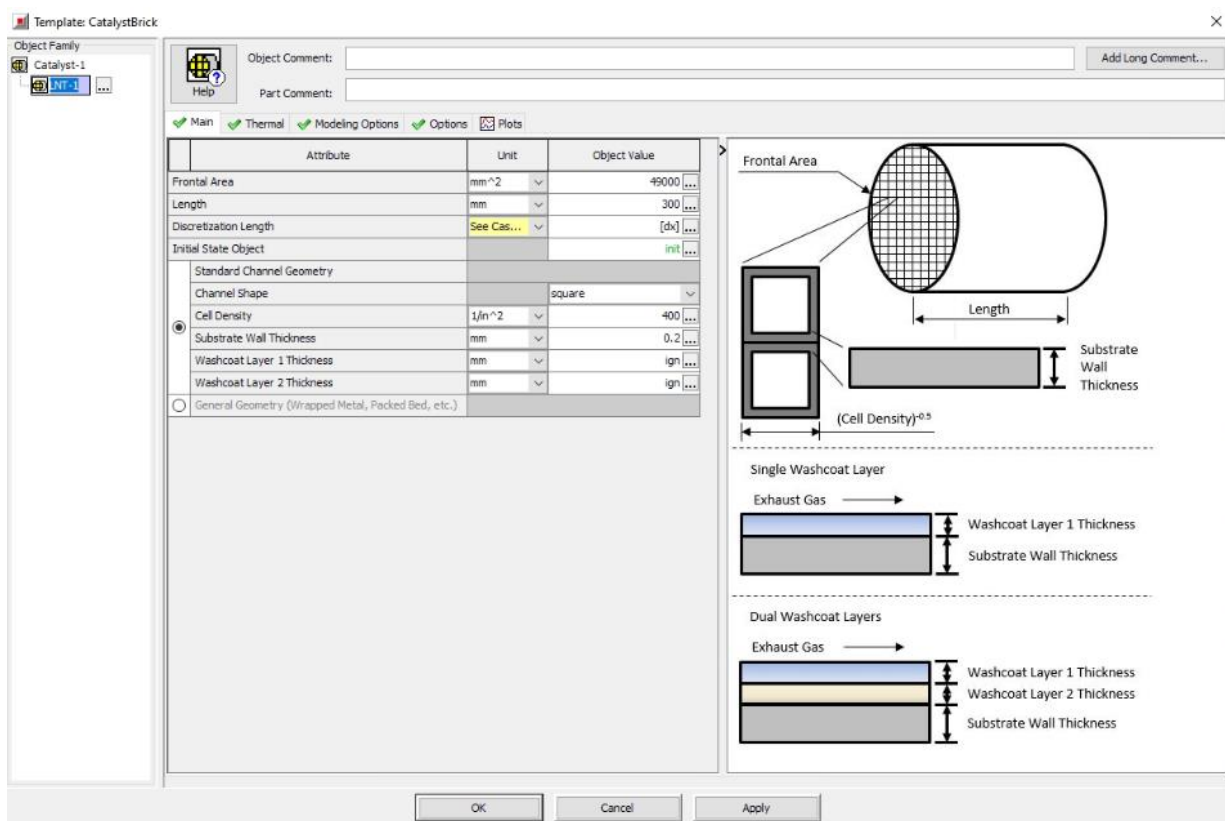
Η μοντελοποίηση της παγίδας NO_x στη οποία και εστιάζεται η παρούσα διπλωματική περιλαμβάνει τρία στάδια:

α) Την μοντελοποίηση του κυρίου σώματος του καταλύτη ορίζοντας τις απαραίτητες διαστάσεις του, καθώς και το υλικό κατασκευής του μέσω του template “CatalystBrick”.

β) Την μοντελοποίηση των χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του καταλύτη, κατά την επαφή του καυσαερίου με τα τοιχώματά του, μέσω του template “SurfaceReactions”.

γ) Την εισαγωγή αισθητήρων (Sensors) στην είσοδο και στην έξοδο του καταλύτη προκειμένου να μετρήσουμε την αλλαγή της συγκέντρωσης των προς μελέτη εκπεμπόμενων ρύπων.

Παρακάτω γίνεται απεικόνιση των προαναφερθέντων σταδίων κατά τη διάρκεια της μοντελοποίησης στο GT-Power στα Σχήματα 4.6, 4.7, 4.8:



Σχήμα 4.6: Απεικόνιση των παραμέτρων του κυρίου σώματος του καταλύτη LNT στο περιβάλλον του GT-Power

Template: SurfaceReactions

Object Family: LNT_Kinetics

Object Comment:

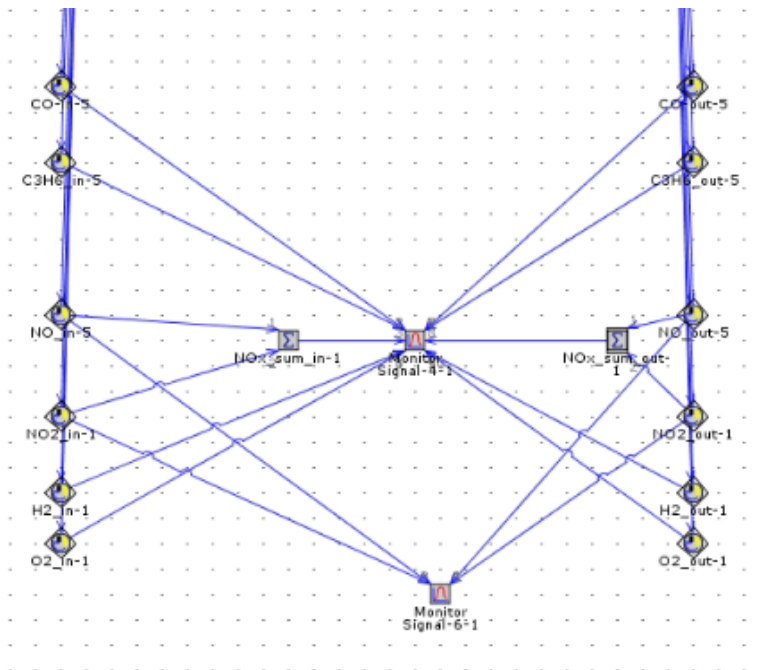
Part Comment:

Main
 Solver Options
 Site Elements
 Coverages A()
 Reactions
 General and Inhibition Functions G()

Attri...	Include Reaction	Associated Site Element	Reactants	Products	Pre-exponent Multiplier	Temperature Exponent	Activation Temperature or Energy	Concentration Expressions	Coverage Expressions	Stoichiometric Reversible
0							K			
1	<input checked="" type="checkbox"/>	PGM ...	CO + 0.5O2 ...	CO2 ...	1.2E14 ...	0.0 ...	9782.0 ...	(CO)*G(3)/G(1)/G(2) ...	1 ...	<input type="checkbox"/>
2	<input checked="" type="checkbox"/>	PGM ...	H2 + 0.5O2 ...	H2O ...	1.08E8 ...	0.0 ...	2446.0 ...	(H2)*(O2)/G(1)/G(2) ...	1 ...	<input type="checkbox"/>
3	<input checked="" type="checkbox"/>	PGM ...	C3H6 + 4.5O2 ...	3CO2 + 3H2O ...	2.1E23 ...	0.0 ...	19171.0 ...	(C3H6)*(O2)/G(1)/G(2) ...	1 ...	<input type="checkbox"/>
4	<input checked="" type="checkbox"/>	PGM ...	H2O + CO ...	CO2 + H2 ...	1.0E8 ...	0.0 ...	12000.0 ...	(CO)*(H2O)-(H2)*(CO) ...	1 ...	<input type="checkbox"/>
5	<input checked="" type="checkbox"/>	PGM ...	C3H6 + 3H2O ...	3CO + 6H2 ...	12180.0 ...	0.0 ...	9850.0 ...	(C3H6)*(H2O) ...	1 ...	<input type="checkbox"/>
6	<input checked="" type="checkbox"/>	PGM ...	CO + NO ...	CO2 + 0.5N2 ...	15000.0 ...	0.0 ...	2348.0 ...	(CO)*(NO) ...	1 ...	<input type="checkbox"/>
7	<input checked="" type="checkbox"/>	PGM ...	H2 + NO ...	H2O + 0.5N2 ...	3000.0 ...	0.0 ...	594.0 ...	(H2)*(NO) ...	1 ...	<input type="checkbox"/>
8	<input checked="" type="checkbox"/>	PGM ...	C3H6 + 9NO ...	3H2O + 3CO2 ...	2.0E8 ...	0.0 ...	8096.0 ...	(C3H6)*(NO) ...	1 ...	<input type="checkbox"/>
9	<input checked="" type="checkbox"/>	PGM ...	NO + 0.5O2 ...	NO2 ...	500000.0 ...	0.0 ...	808.0 ...	(NO)*G(4)-(NO2)*G(6) ...	1 ...	<input type="checkbox"/>
10	<input checked="" type="checkbox"/>	cerium ...	Ce2O3 + 0.5O2 ...	Ce2O4 ...	0.2233 ...	0.0 ...	1930.0 ...	{O2} ...	A(Ce2...	<input type="checkbox"/>
11	<input checked="" type="checkbox"/>	cerium ...	Ce2O4 + CO ...	Ce2O3 + CO2 ...	0.06 ...	0.0 ...	1060.0 ...	{CO} ...	A(Ce2...	<input type="checkbox"/>
12	<input checked="" type="checkbox"/>	cerium ...	Ce2O4 + H2 ...	Ce2O3 + H2O ...	30.0 ...	0.0 ...	1060.0 ...	{H2} ...	A(Ce2...	<input type="checkbox"/>
13	<input checked="" type="checkbox"/>	cerium ...	Ce2O4 + 0.1111... ...	Ce2O3 + 0.333... ...	0.06 ...	0.0 ...	1060.0 ...	{C3H6} ...	A(Ce2...	<input type="checkbox"/>
14	<input checked="" type="checkbox"/>	barium ...	BaCO3 + 2NO2 ...	Ba(NO3)2 + CO2 ...	6.0E7 ...	0.0 ...	9875.0 ...	(NO2)*(O2)*G(7)*abs(G...	1 ...	<input type="checkbox"/>
15	<input checked="" type="checkbox"/>	barium ...	BaCO3 + 2NO ...	Ba(NO3)2 + CO2 ...	6.0E7 ...	0.0 ...	9875.0 ...	(NO)*(O2)*G(7)*abs(G...	1 ...	<input type="checkbox"/>
16	<input checked="" type="checkbox"/>	barium ...	Ba(NO3)2 + 3CO ...	BaCO3 + 2CO2 ...	60.0 ...	0.0 ...	3386.0 ...	(CO)/G(9) ...	A(Ba(...	<input type="checkbox"/>
17	<input checked="" type="checkbox"/>	barium ...	Ba(NO3)2 + 3H... ...	BaCO3 + 3H2O ...	1.5 ...	0.0 ...	311.0 ...	(H2)/G(9) ...	A(Ba(...	<input type="checkbox"/>
18	<input checked="" type="checkbox"/>	barium ...	Ba(NO3)2 + 0.3... ...	BaCO3 + H2O ...	1200000.0 ...	0.0 ...	7887.0 ...	(C3H6)/G(9) ...	A(Ba(...	<input type="checkbox"/>
19	<input checked="" type="checkbox"/>	barium_j... ...	BaCO3_Low + 2... ...	Ba(NO3)2_Low... ...	33860.0 ...	0.0 ...	4240.0 ...	(NO2)*(O2)*G(8)*abs(G...	1 ...	<input type="checkbox"/>
20	<input checked="" type="checkbox"/>	barium_j... ...	BaCO3_Low + 2... ...	Ba(NO3)2_Low... ...	33860.0 ...	0.0 ...	4240.0 ...	(NO2)*(O2)*G(8)*abs(G...	1 ...	<input type="checkbox"/>
21	<input checked="" type="checkbox"/>	barium_j... ...	Ba(NO3)2_Low ...	BaCO3_Low + 2... ...	60.0 ...	0.0 ...	3386.0 ...	(CO)/G(9) ...	A(Ba(...	<input type="checkbox"/>
22	<input checked="" type="checkbox"/>	barium_j... ...	Ba(NO3)2_Low ...	BaCO3_Low + 3... ...	1.5 ...	0.0 ...	311.0 ...	(H2)/G(9) ...	A(Ba(...	<input type="checkbox"/>
23	<input checked="" type="checkbox"/>	barium_j... ...	Ba(NO3)2_Low ...	BaCO3_Low + ...	1200000.0 ...	0.0 ...	7887.0 ...	(C3H6)/G(9) ...	A(Ba(...	<input type="checkbox"/>
24	<input type="checkbox"/>									<input type="checkbox"/>
25	<input type="checkbox"/>									<input type="checkbox"/>

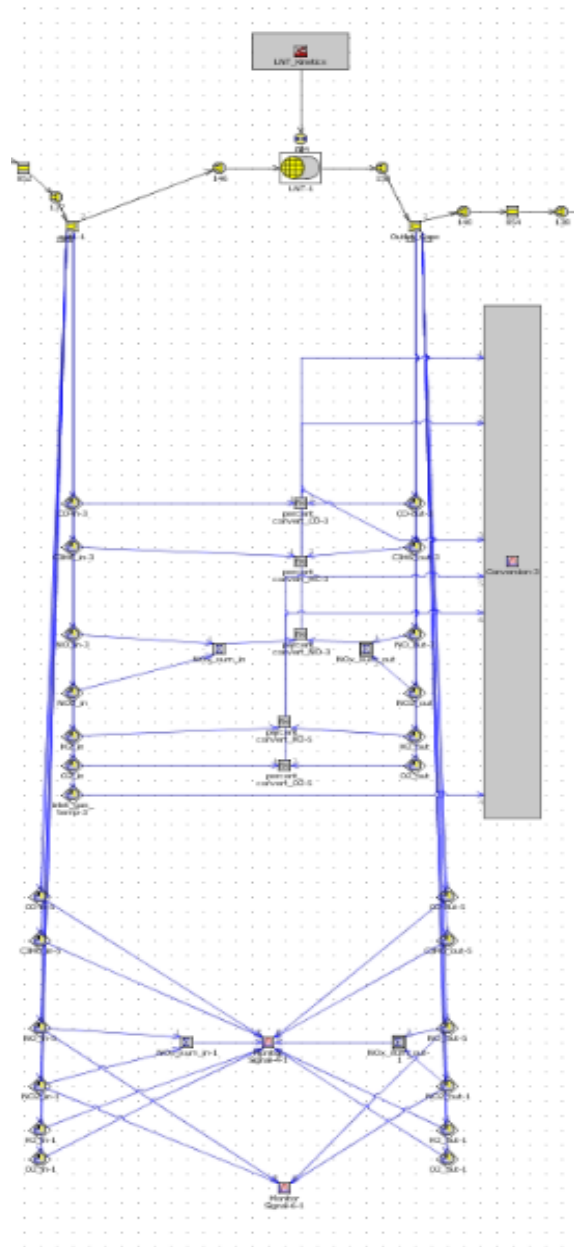
OK Cancel Apply

Σχήμα 4.7: Απεικόνιση της διαδικασίας ορισμού των χημικών αντιδράσεων του καταλύτη LNT στο περιβάλλον του GT-Power



Σχήμα 4.8: Απεικόνιση των αισθητήρων μέτρησης της συγκέντρωσης των εκπεμπόμενων ρύπων από τον καταλύτη LNT στο περιβάλλον του GT-Power

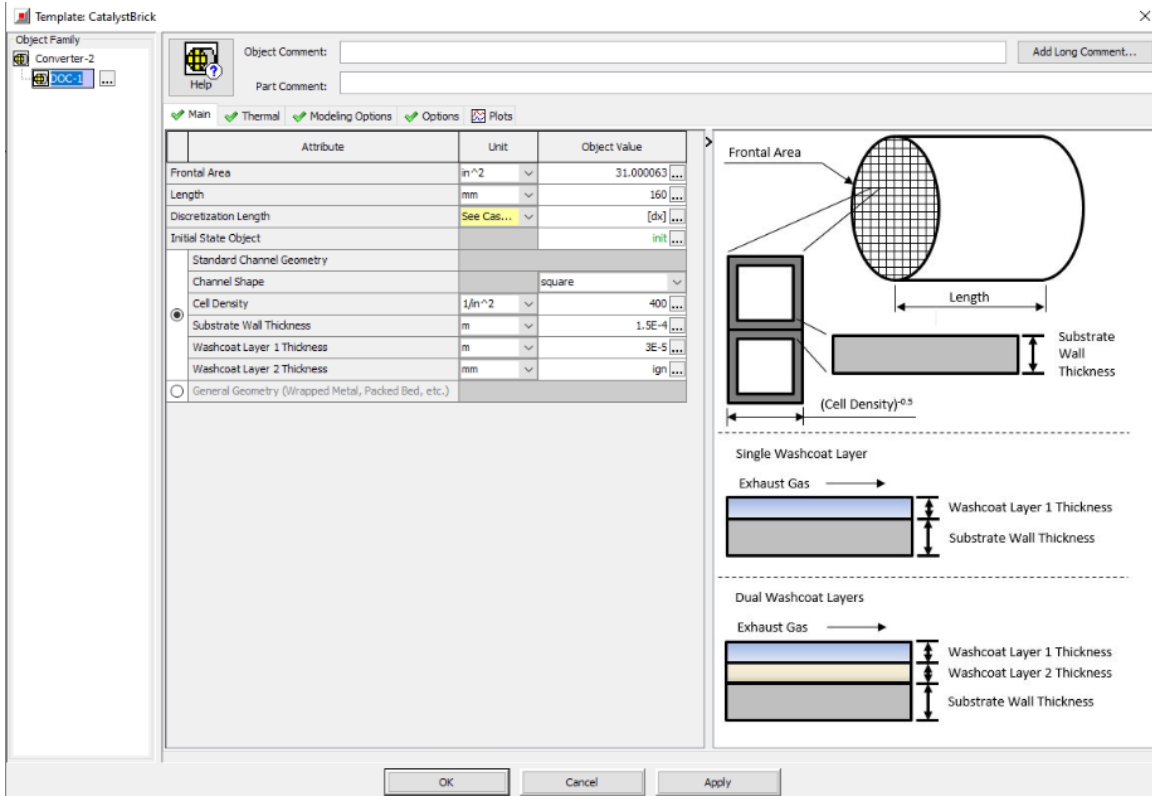
Η τελική μορφή του μοντέλου της παγίδας NO_x φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 4.9:



Σχήμα 4.9: Τελική μορφή του καταλύτη LNT στο περιβάλλον του GT-Power

4.3.4 Μοντέλα υπολοίπων συστημάτων επεξεργασίας καυσαερίων στο περιβάλλον του GT-Power

Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία μοντελοποίησης της παγίδας NO_x δημιουργήθηκαν και τα μοντέλα των λοιπών καταλυτών/παγίδων ενός κινητήρα Diesel, δηλαδή του DOC, του DPF και του SCR, των οποίων τα στάδια απεικονίζονται στα παρακάτω Σχήματα 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 και 4.16:



Σχήμα 4.10: Απεικόνιση των παραμέτρων του κυρίου σώματος του καταλύτη DOC στο περιβάλλον του GT-Power

Template: SurfaceReactions

Object Comment: 1d Chmielewski 2008, and Sempara, Bissett, and Assanis 2008 - Use with Advanced Adaptive Solver

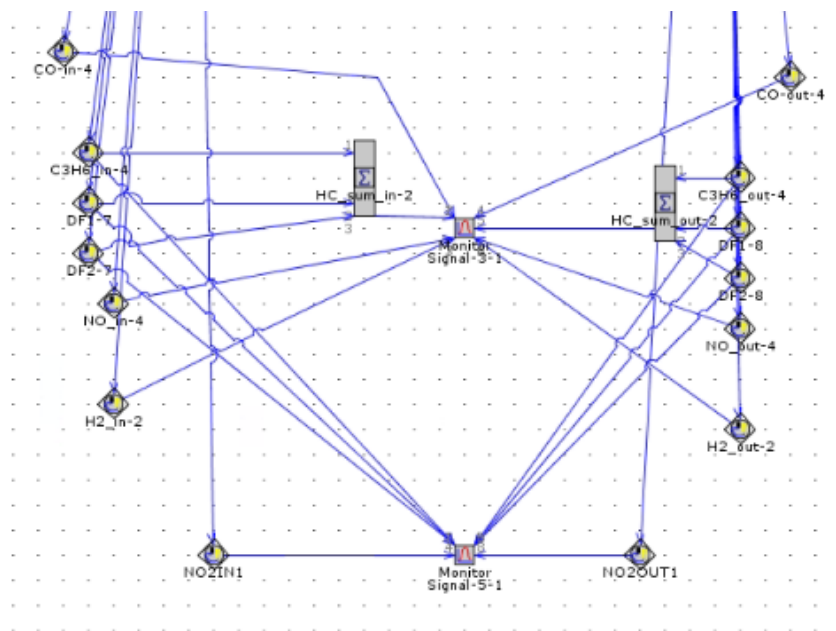
Part Comment:

Main Solver Options Site Elements Coverages A(i) Reactions General and Inhibition Functions G(i)

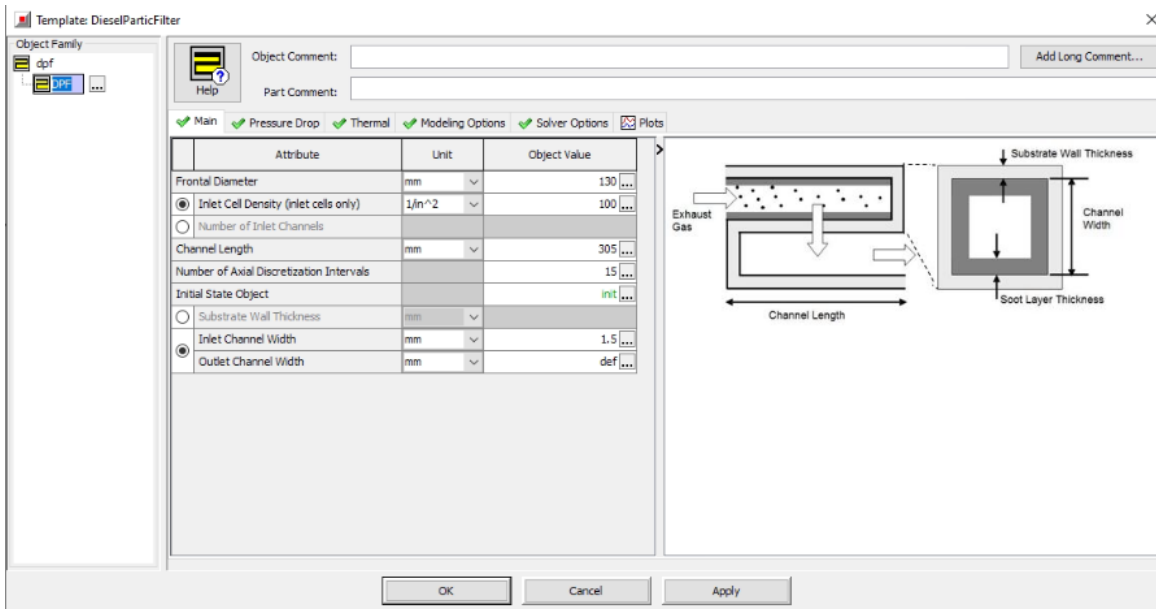
Attri...	Include Reaction	Associated Site Element	Reactants	Products	Pre-exponent Multiplier	Temperature Exponent	Activation Temperature or Energy	Concentration Expression
0							J/mol	
1	<input checked="" type="checkbox"/>	PGM ...	CO+0.5O2 ...	CO2 ...	1.183E12 ...	0.0 ...	81330.0 ...	{CO}*(O2)/(G(1)*G(2))
2	<input checked="" type="checkbox"/>	PGM ...	C3H6+4.5O2 ...	3CO2+3H2O ...	1.566E19 ...	0.0 ...	159400.0 ...	(C3H6)*(O2)/(G(1)*G(2))
3	<input checked="" type="checkbox"/>	PGM ...	DF1+19.4O2 ...	13.5CO2+11.8... ...	291800.0 ...	0.0 ...	24200.0 ...	{DF1}*(O2)/(G(1)*G(2))
4	<input checked="" type="checkbox"/>	PGM ...	DF2+19.4O2 ...	13.5CO2+11.8... ...	291800.0 ...	0.0 ...	24200.0 ...	{DF2}*(O2)/(G(1)*G(2))
5	<input checked="" type="checkbox"/>	PGM ...	H2+0.5O2 ...	H2O ...	98300.0 ...	0.0 ...	15310.0 ...	{H2}*(O2)/(G(1)*G(2))
6	<input checked="" type="checkbox"/>	PGM ...	NO+0.5O2 ...	NO2 ...	1327.0 ...	0.0 ...	6721.0 ...	1*{(NO)*sqrt((O2))}-{N...
7	<input checked="" type="checkbox"/>	Zeolite ...	Z+DF1 ...	ZDF1 ...	13.48 ...	0.0 ...	0.0 ...	{DF1}
8	<input checked="" type="checkbox"/>	Zeolite ...	ZDF1 ...	Z+DF1 ...	33060.0 ...	0.0 ...	45660.0 ...	1
9	<input type="checkbox"/>
10	<input type="checkbox"/>
11	<input type="checkbox"/>
12	<input type="checkbox"/>
13	<input type="checkbox"/>
14	<input type="checkbox"/>
15	<input type="checkbox"/>
16	<input type="checkbox"/>
17	<input type="checkbox"/>
18	<input type="checkbox"/>
19	<input type="checkbox"/>

OK Cancel Apply

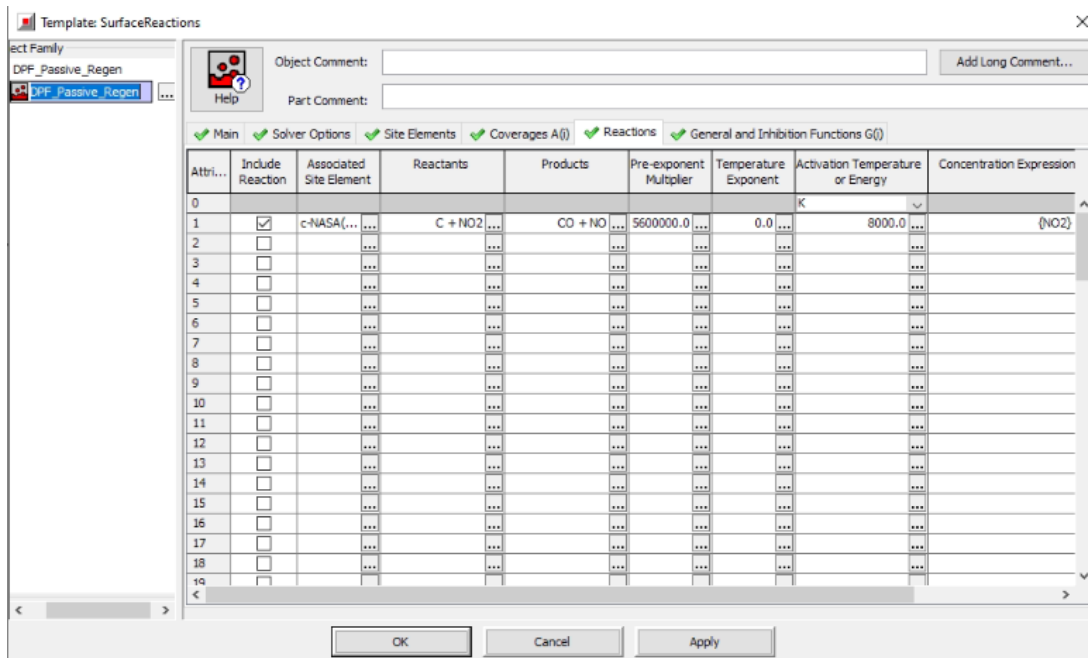
Σχήμα 4.11: Απεικόνιση της διαδικασίας ορισμού των χημικών αντιδράσεων του καταλύτη DOC στο περιβάλλον του GT-Power



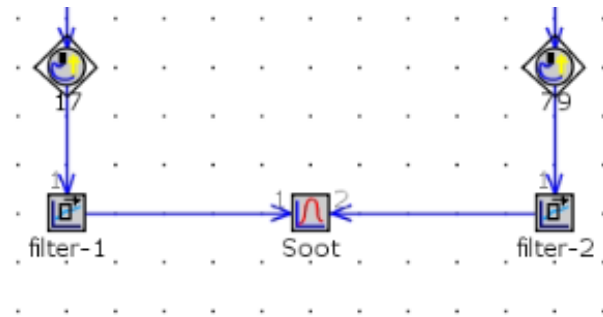
Σχήμα 4.12: Απεικόνιση των αισθητήρων μέτρησης της συγκέντρωσης των εκπεμπόμενων ρύπων από τον καταλύτη DOC στο περιβάλλον του GT-Power



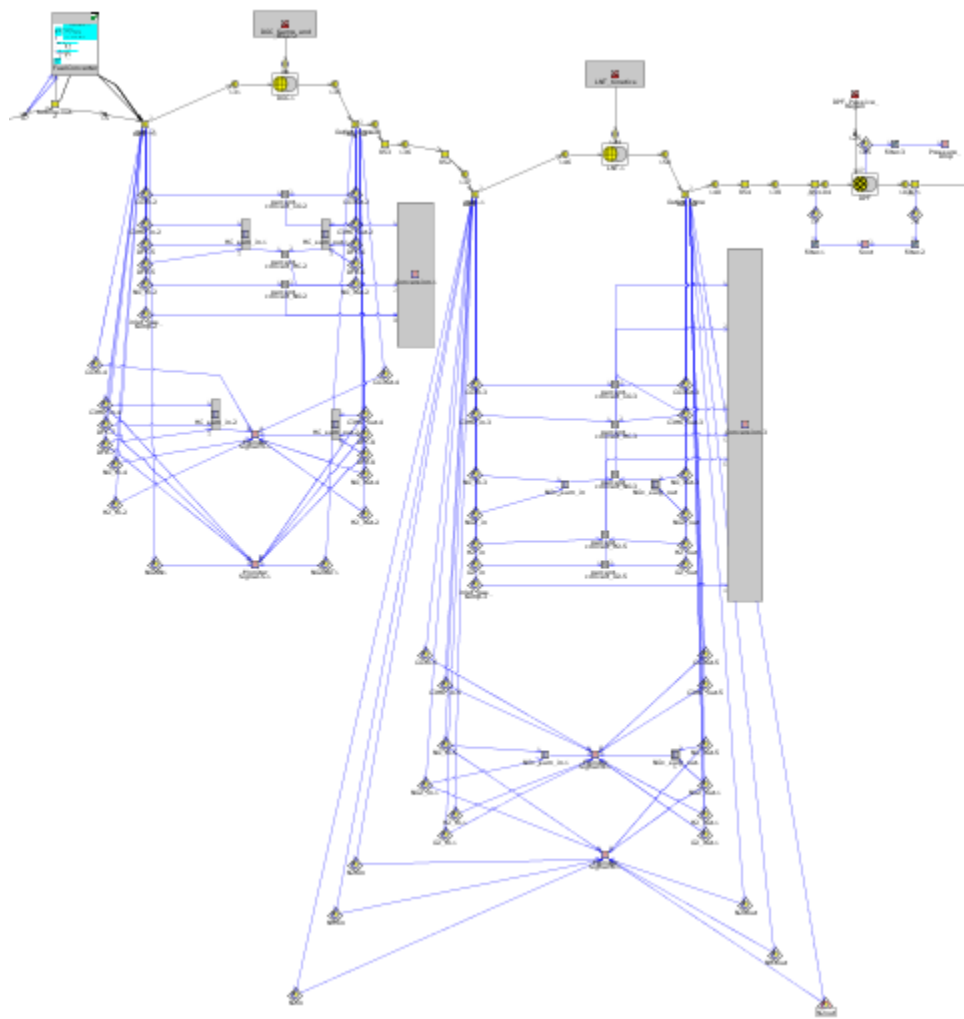
Σχήμα 4.13: Απεικόνιση των παραμέτρων του κυρίου σώματος του καταλύτη DPF στο περιβάλλον του GT-Power



Σχήμα 4.14: Απεικόνιση της διαδικασίας ορισμού των χημικών αντιδράσεων της παθητικής αναγέννησης του καταλύτη DPF στο περιβάλλον του GT-Power



Σχήμα 4.15: Απεικόνιση των αισθητήρων μέτρησης της συγκέντρωσης της εκπεμπόμενης αιθάλης από τον καταλύτη DPF στο περιβάλλον του GT-Power



Σχήμα 4.16: Συνολικό μοντέλο συστημάτων επεξεργασίας καυσαερίων στο περιβάλλον του GT-Power

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Επιδόσεις και εκπομπές καυσαερίων του κινητήρα με χρήση του συστήματος παγίδας NO_x

5.1 Εισαγωγή

Όπως έχει προαναφερθεί, ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των επιδόσεων και των εκπομπών καυσαερίων ενός κινητήρα Diesel με χρήση της παγίδας NO_x και η σύγκριση τους με τα αντίστοιχα μεγέθη του ίδιου κινητήρα Diesel αλλά χωρίς την παγίδα LNT.

Για τον έλεγχο των επιδόσεων του οχήματος ελέγχθηκε η ειδική κατανάλωση καυσίμου του οχήματος και η αποδιδόμενη ροπή του κινητήρα. Όσον αφορά, τη σύγκριση των εκπομπών ρύπων με και χωρίς την παγίδα NO_x, έγινε χρήση μόνο των δεδομένων που προέκυψαν από την προσομοίωση των κινητήρων στον κύκλο WLTC. Οι ρύποι στους οποίους εστίασαμε είναι τα οξείδια του αζώτου NO_x και η αιθάλη ενώ επίσης συγκρίθηκαν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), λόγω της μεγάλης σπουδαιότητάς τους και της συνεχούς προσπάθειας μείωσης των ορίων στη σχετική νομοθεσία.

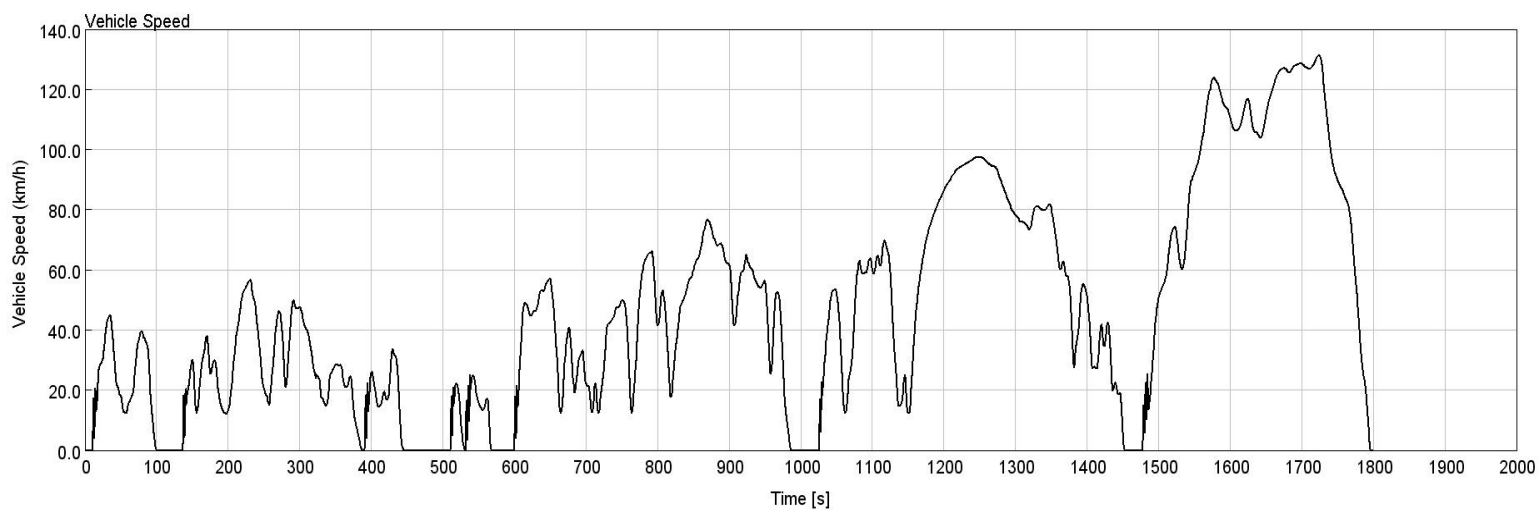
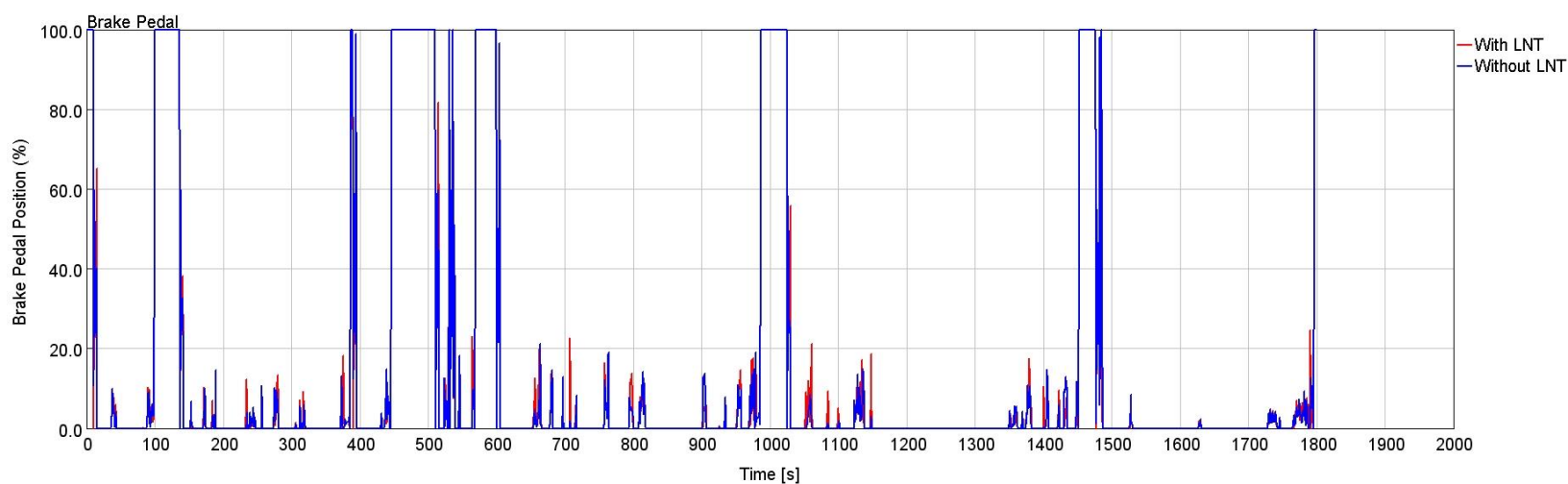
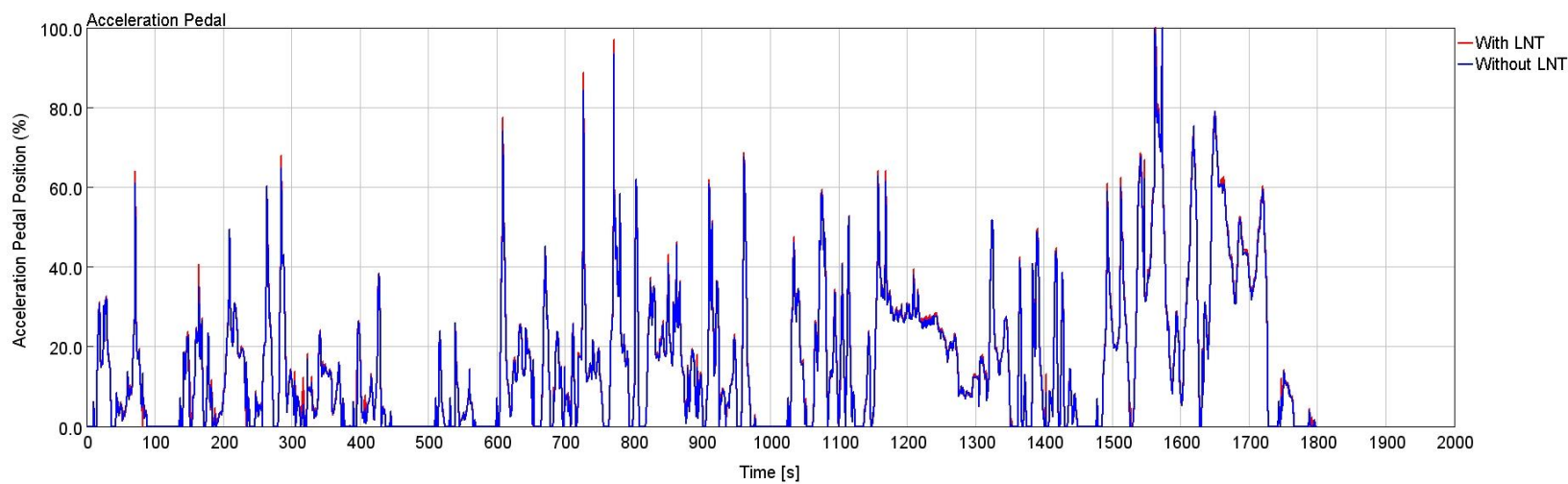
Για την καλύτερη κατανόηση και απεικόνιση των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται διαγράμματα όλων των μεγεθών, ξεχωριστά για τα πρώτα 400 δευτερόλεπτα διάρκειας του Κύκλου (δηλαδή στο κομμάτι λειτουργίας εντός πόλης, όπου και αναμένεται μεγαλύτερη εκπομπή αιθάλης, αλλά και μεγαλύτερη συνεισφορά του συστήματος LNT), και ξεχωριστά στα υπόλοιπα 1400 δευτερόλεπτα (δηλαδή στο κομμάτι λειτουργίας εκτός πόλης, όπου και αναμένεται μεγαλύτερη εκπομπή NO_x λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών), προκειμένου να είναι πιο εμφανείς ορισμένες λεπτομέρειες, που δεν είναι ευδιάκριτες στο διάγραμμα ολόκληρου του Κύκλου. Σε όλα τα διαγράμματα, η μπλε καμπύλη αναπαριστά τα δεδομένα για τον κινητήρα (και το όχημα) χωρίς παγίδα NO_x, ενώ η κόκκινη τα δεδομένα για τον κινητήρα (και το όχημα) με την παγίδα NO_x.

5.2 Επιδόσεις κινητήρα

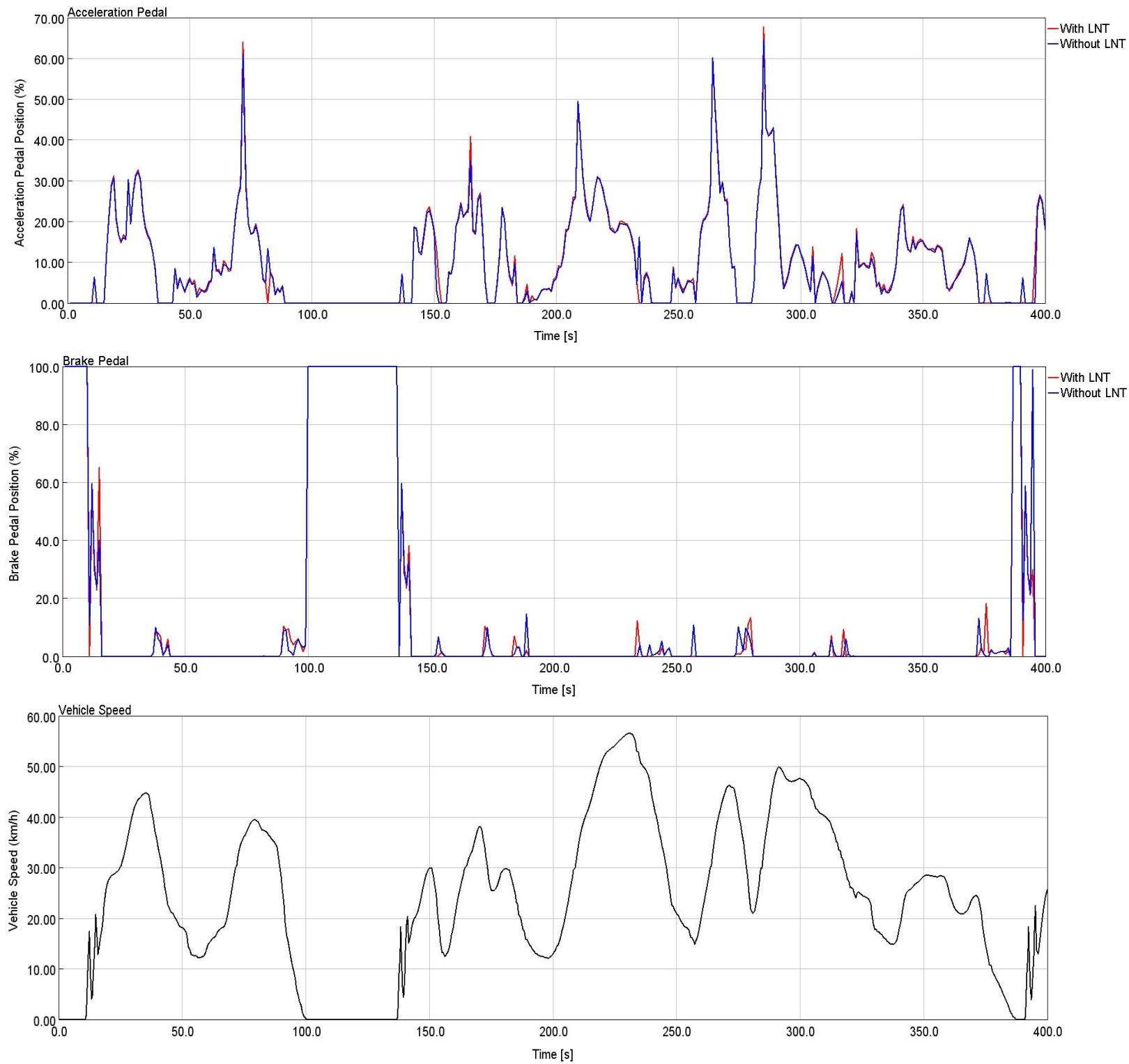
Παρακάτω παρουσιάζονται δεκατέσσερα συνδυαστικά διαγράμματα που αφορούν τις επιδόσεις του οχήματος και του κινητήρα με και χωρίς παγίδα NO_x. Στα διαγράμματα αυτά παρουσιάζονται τα εξής μεγέθη:

- πάτημα του πεντάλ της επιτάχυνσης %
- πάτημα του πεντάλ του φρένου %
- πάτημα του πεντάλ του συμπλέκτη %
- η σχέση που είναι δεσμευμένη στο κιβώτιο ταχυτήτων
- η πραγματική ταχύτητα του οχήματος σε km/h
- οι στροφές του κινητήρα σε rpm
- η ισχύς του κινητήρα σε kW
- η ροπή του κινητήρα σε Nm
- η στιγμιαία παροχή μάζας καυσίμου σε kg/s
- η ειδική κατανάλωση καυσίμου σε g/kWh
- η μέση πραγματική πίεση σε bar
- η απόσταση που έχει διανύσει το όχημα σε m
- οι στροφές του ζεύγους υπερπλήρωσης σε rpm και
- ο λόγος πιέσεων του συμπιεστή

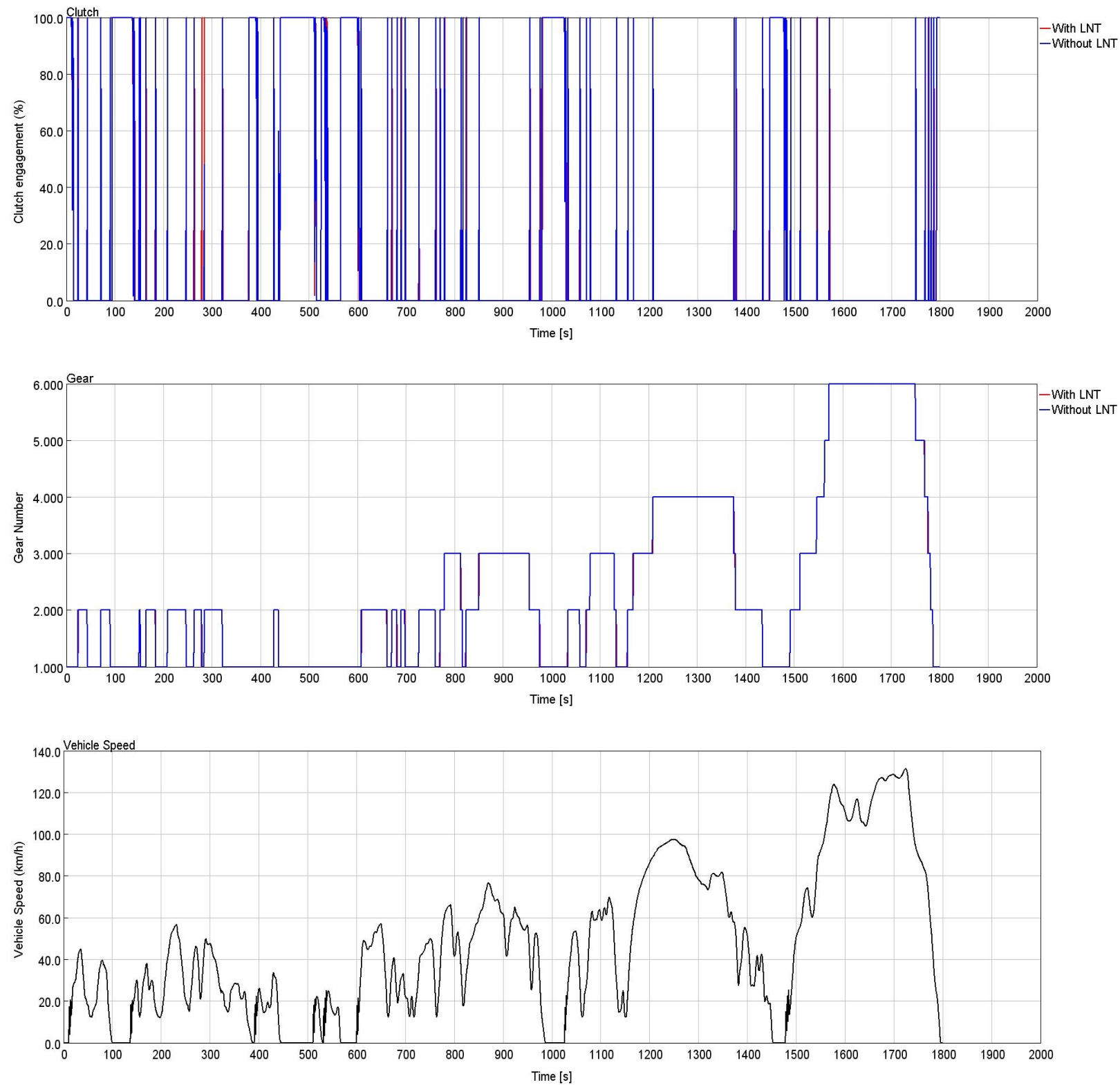
Όλα τα παραπάνω μεγέθη παρουσιάζονται στα ακόλουθα Σχήματα, μαζί με το διάγραμμα της ταχύτητας του οχήματος για άμεση συσχέτιση:



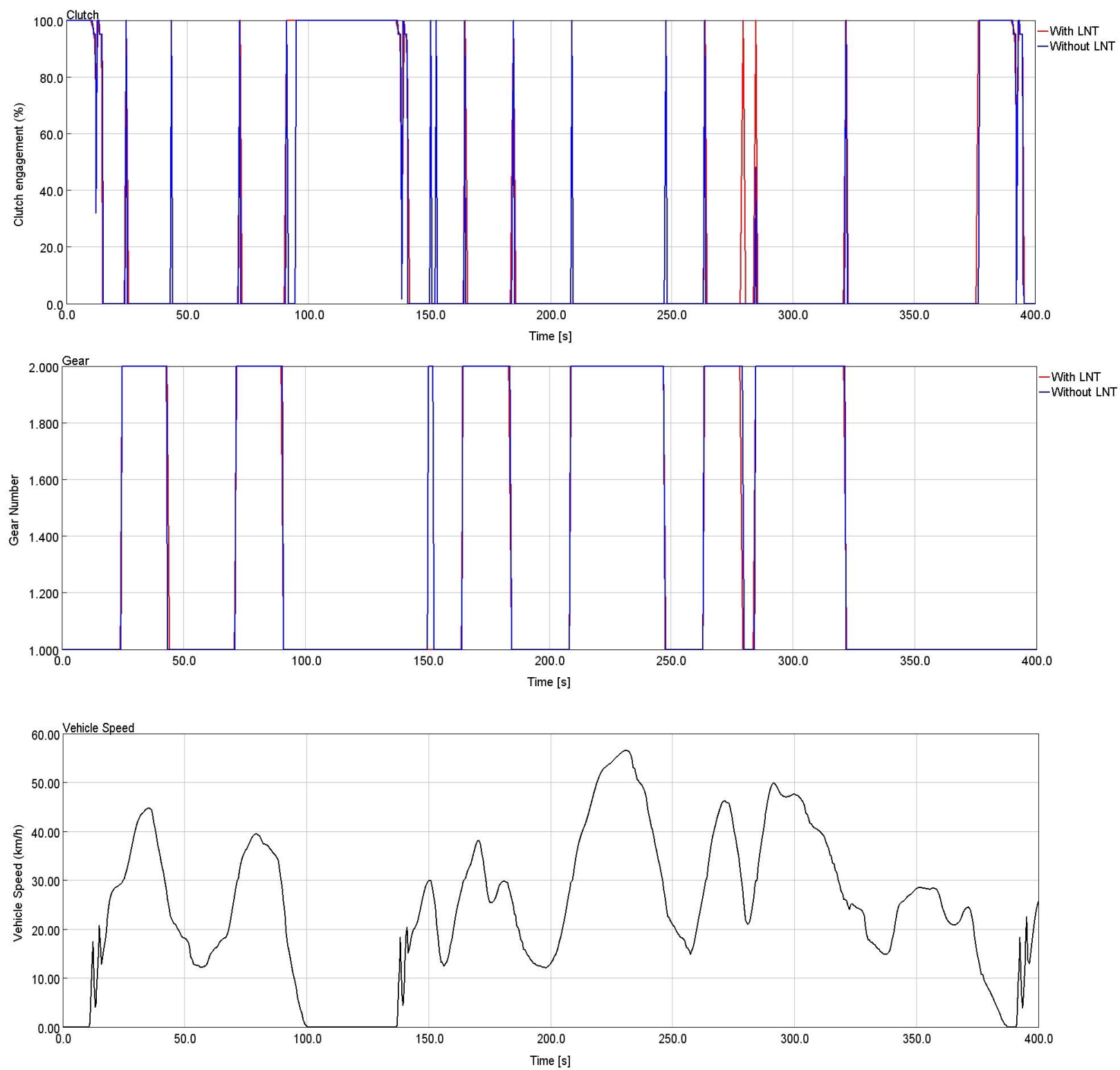
Σχήμα 5.1: Πάτημα του πεντάλι της επιτάχυνσης και του φρένου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC



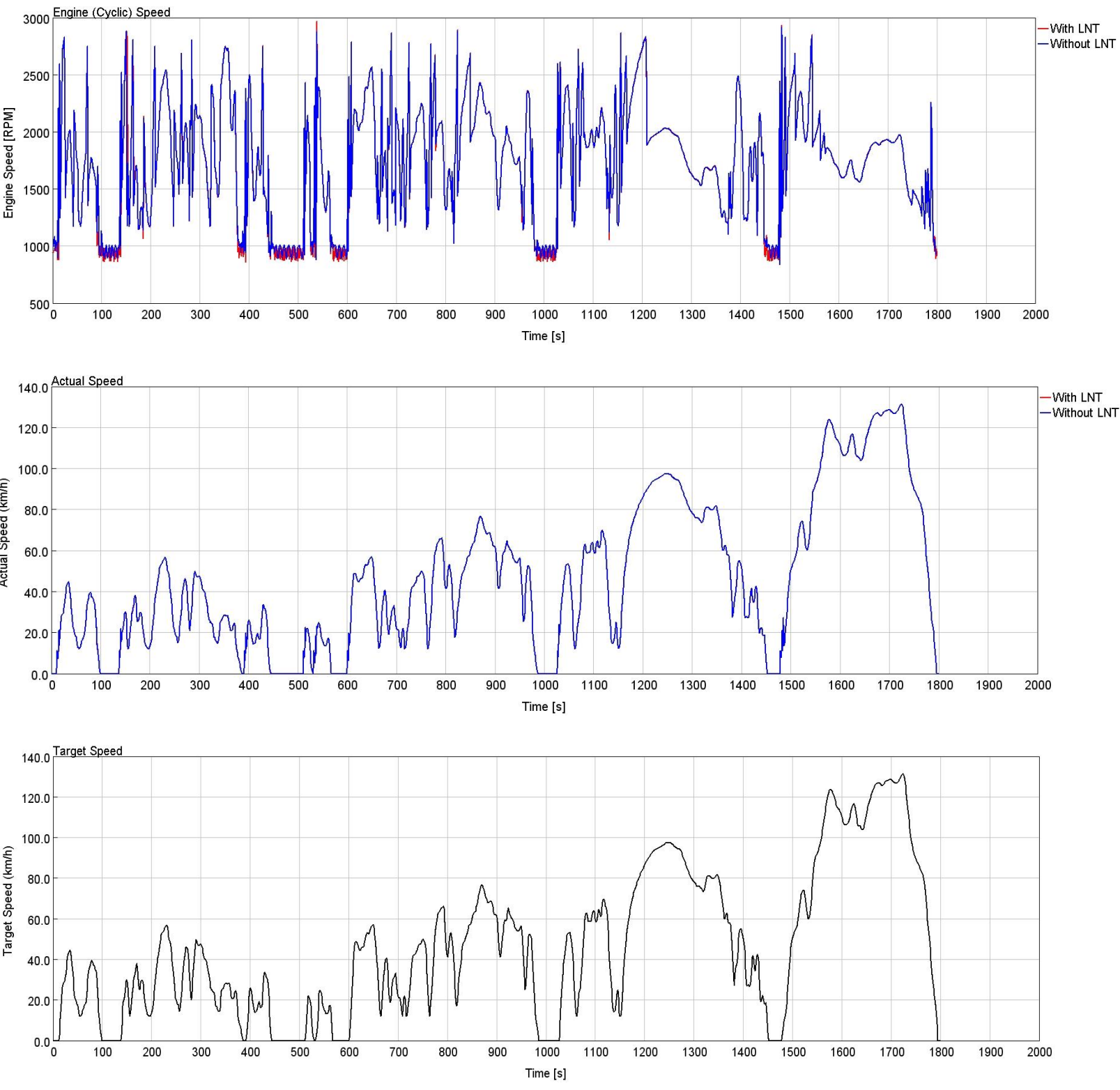
Σχήμα 5.2: Πάτημα του πεντάλι της επιτάχυνσης και του φρένου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 400 δευτερολέπτων της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC



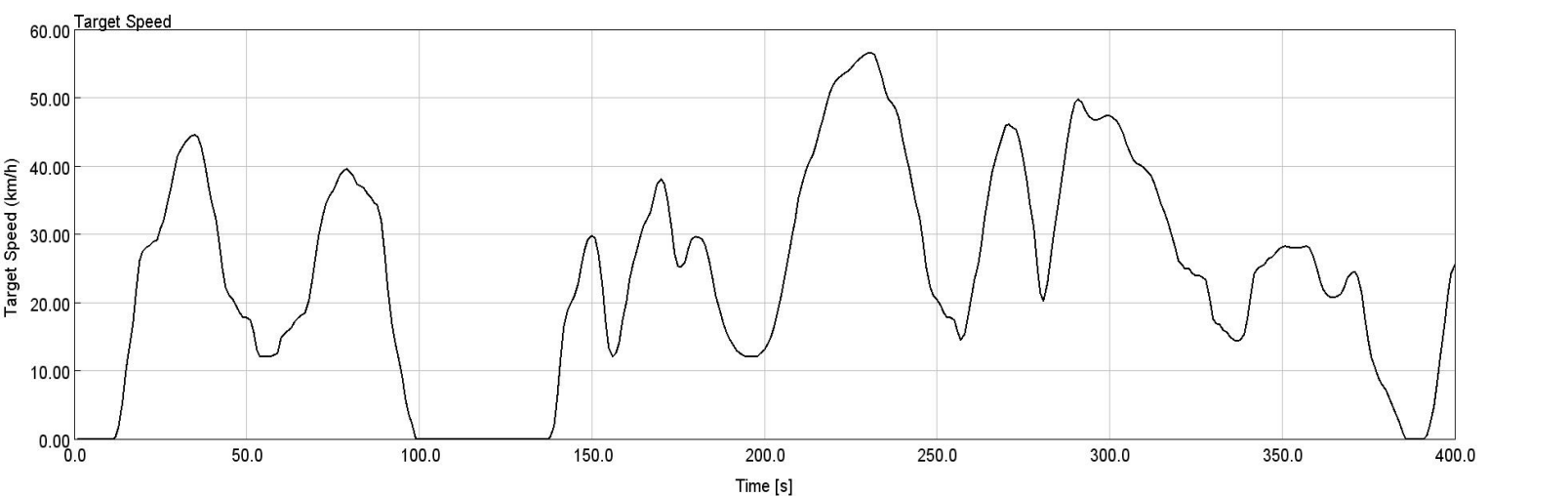
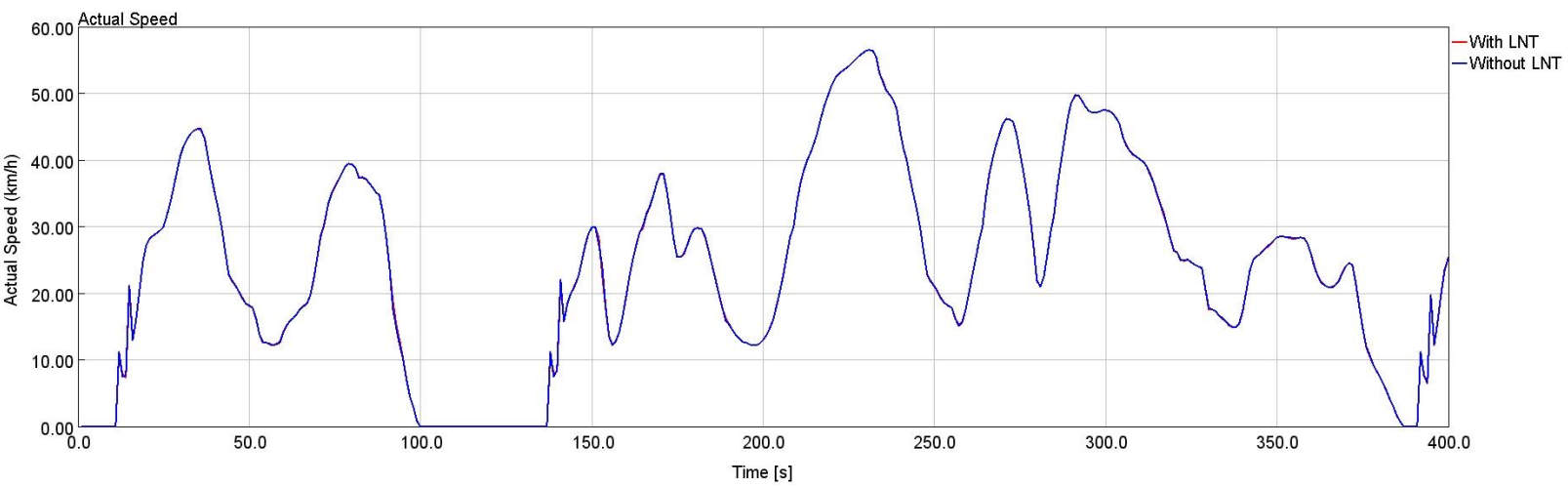
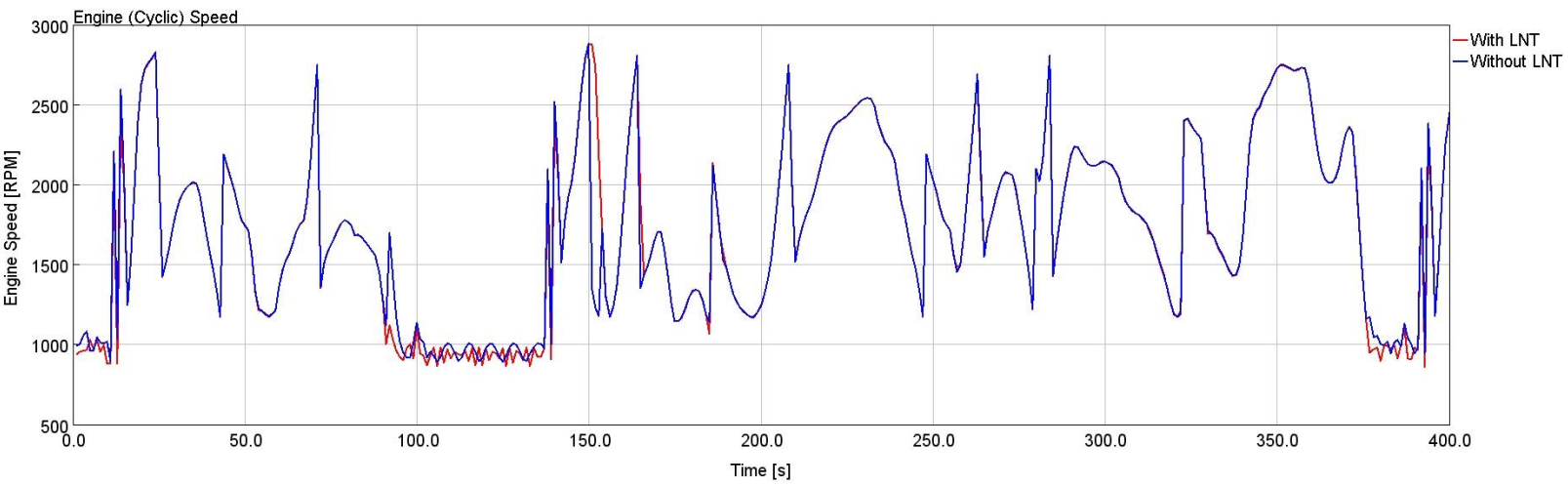
Σχήμα 5.3: Πάτημα του πεντάλ του συμπλέκτη και αριθμός σχέσης στο κιβώτιο ταχυτήτων συναρτήσεσι του χρόνου κατά τη διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC



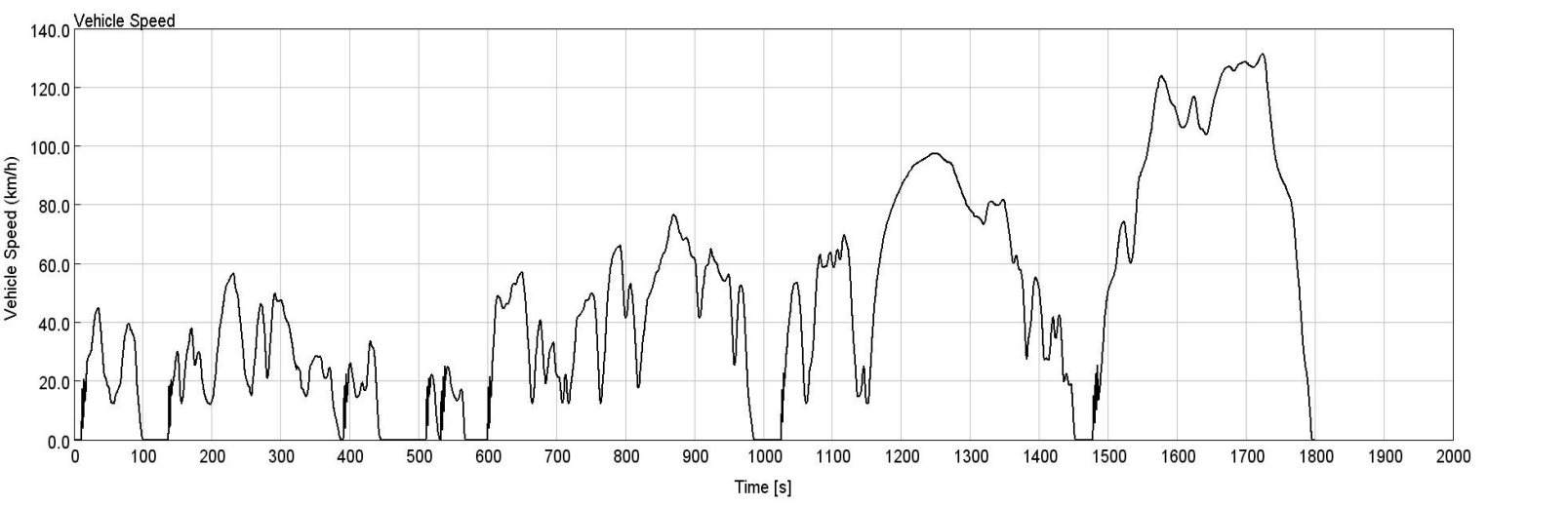
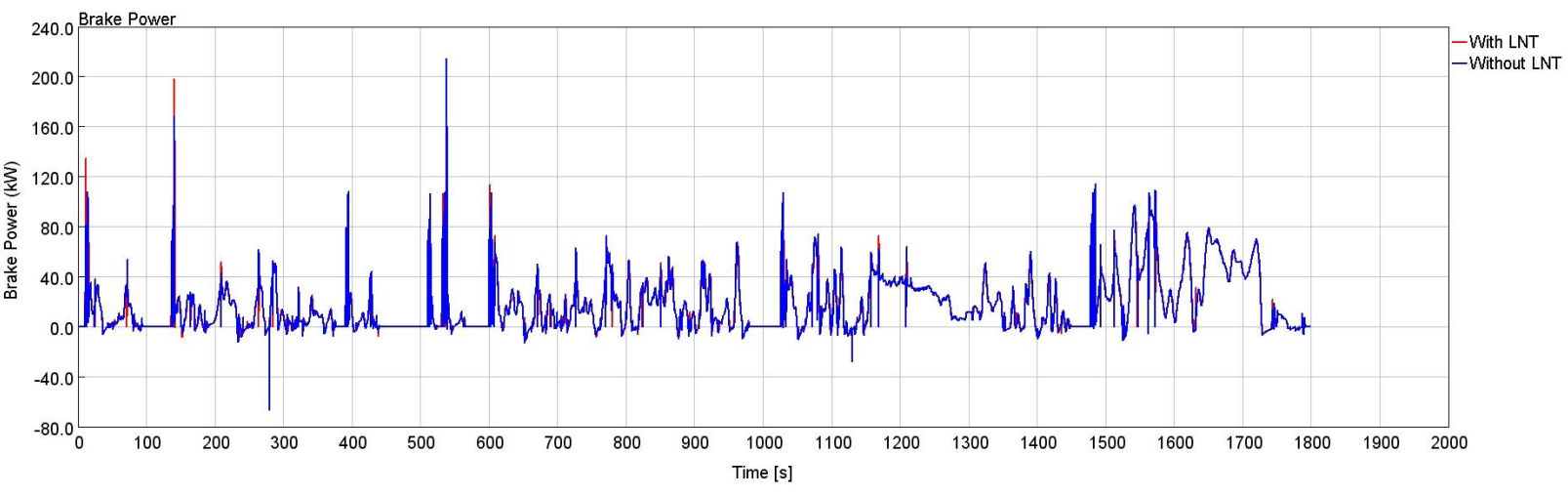
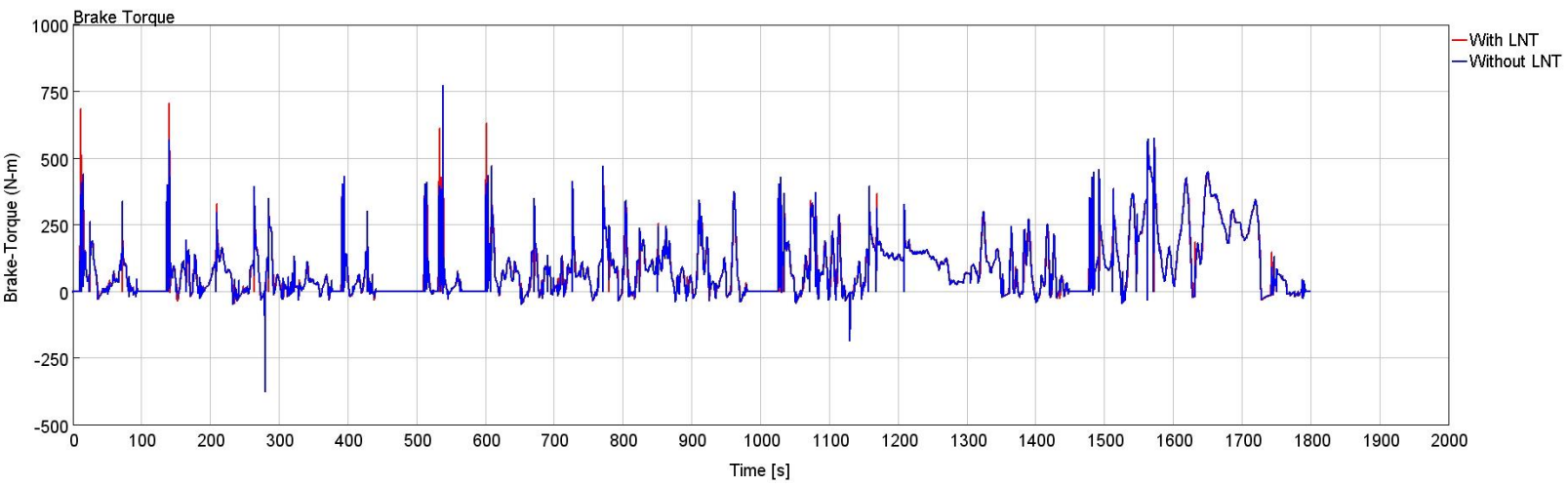
Σχήμα 5.4: Πάτημα του πεντάλ του συμπλέκτη και αριθμός της σχέσης στο κιβώτιο ταχυτήτων συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 400 δευτερολέπτων της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC



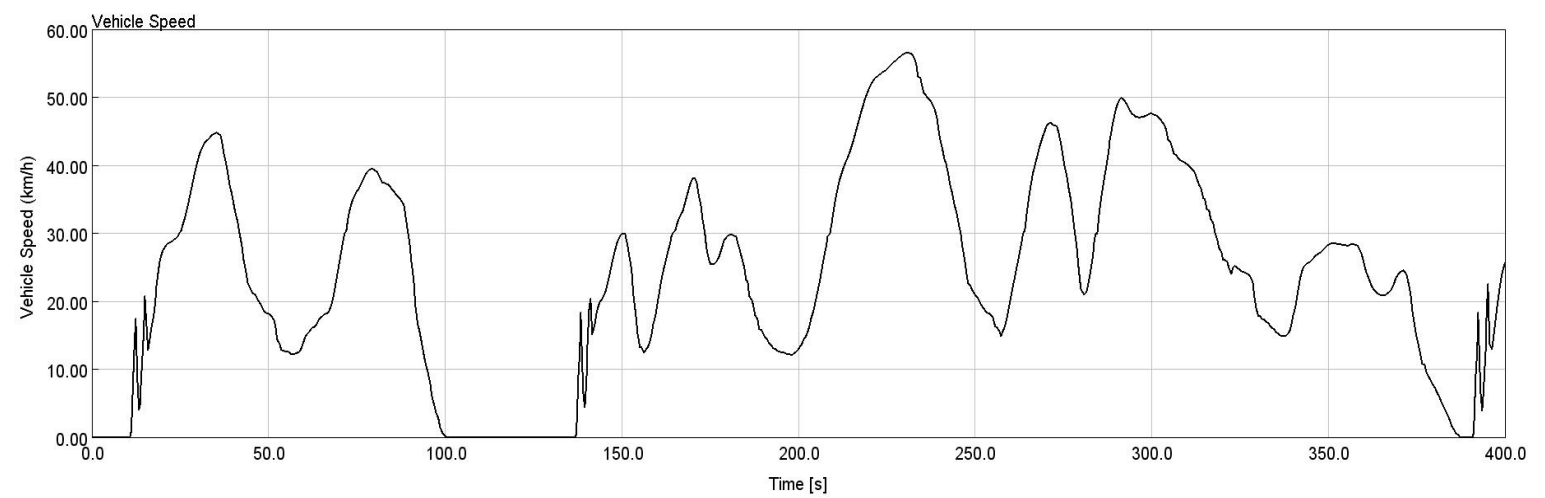
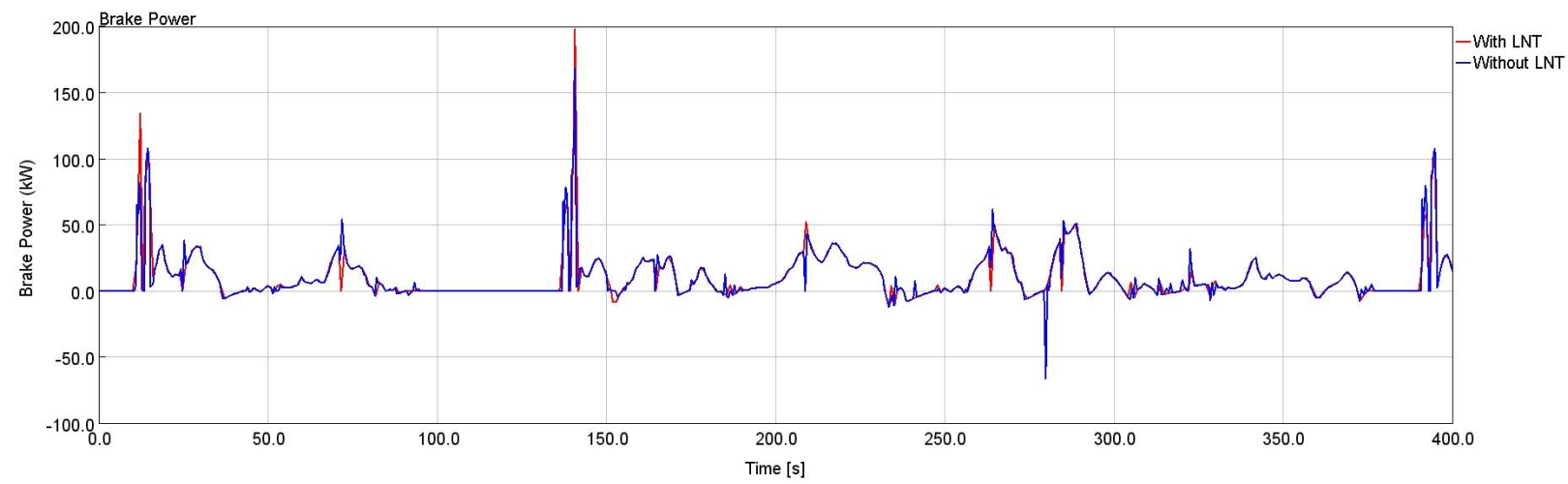
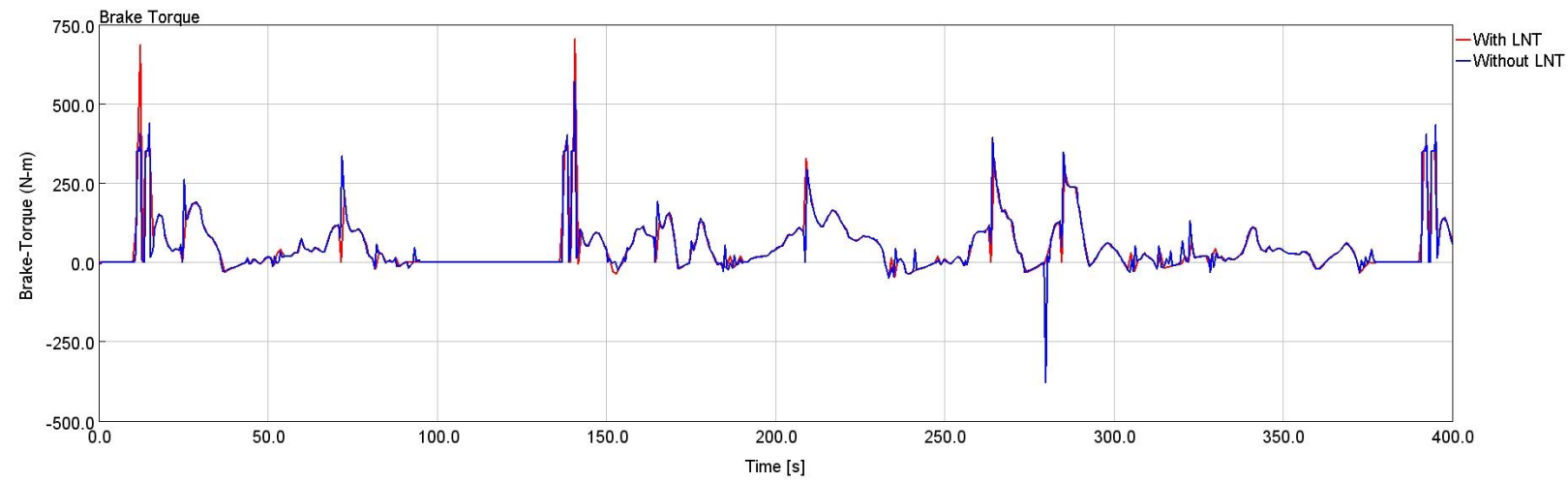
Σχήμα 5.5: Στροφές του κινητήρα και πραγματική ταχύτητα οχήματος συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC



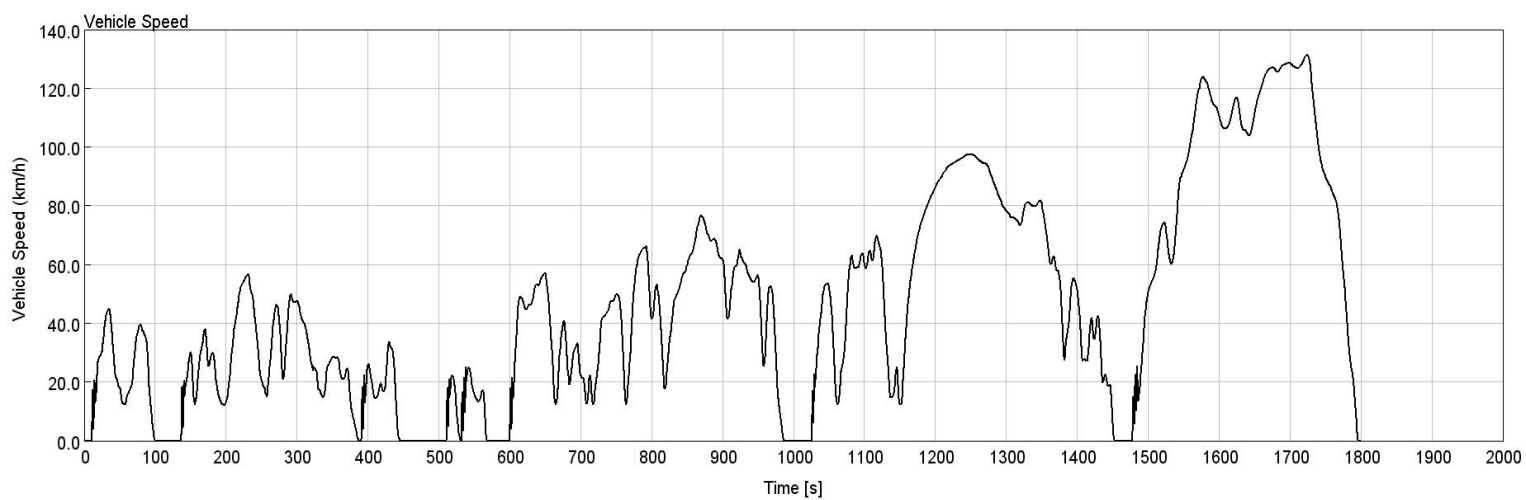
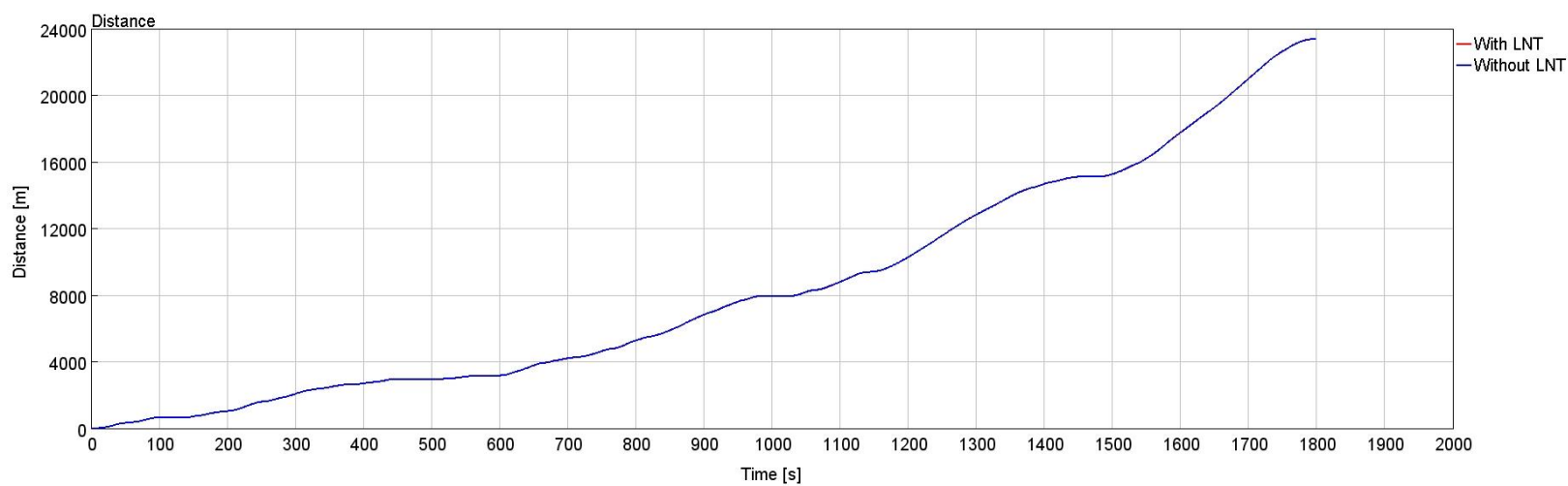
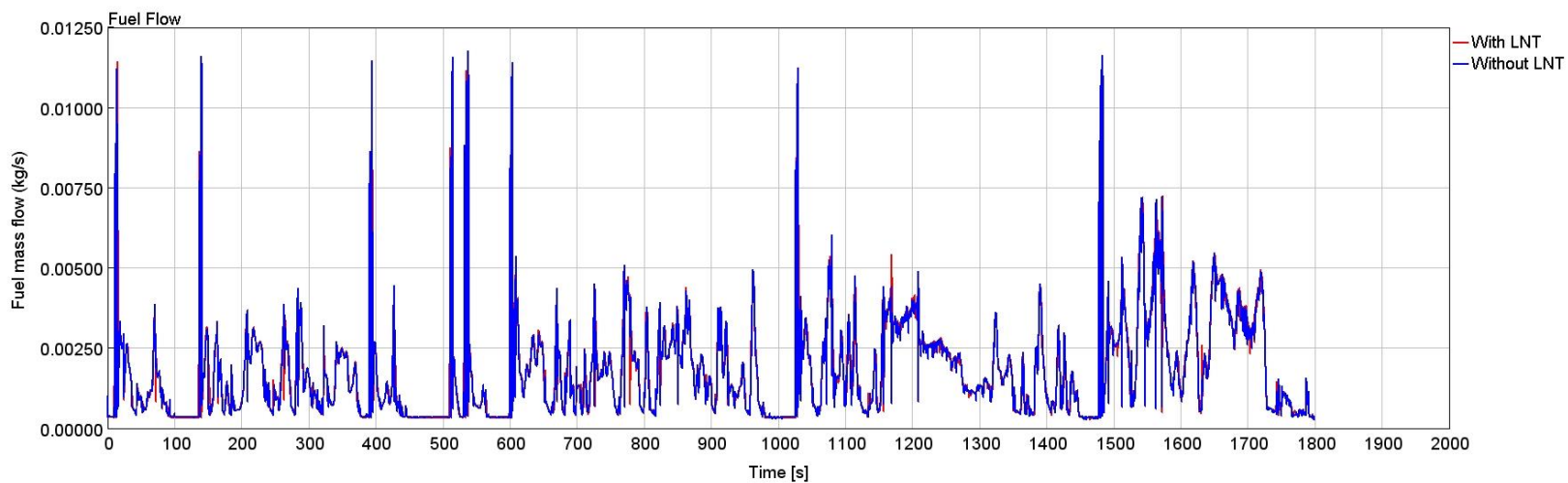
Σχήμα 5.6: Στροφές του κινητήρα και πραγματική ταχύτητα οχήματος συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 400 δευτερολέπτων της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC



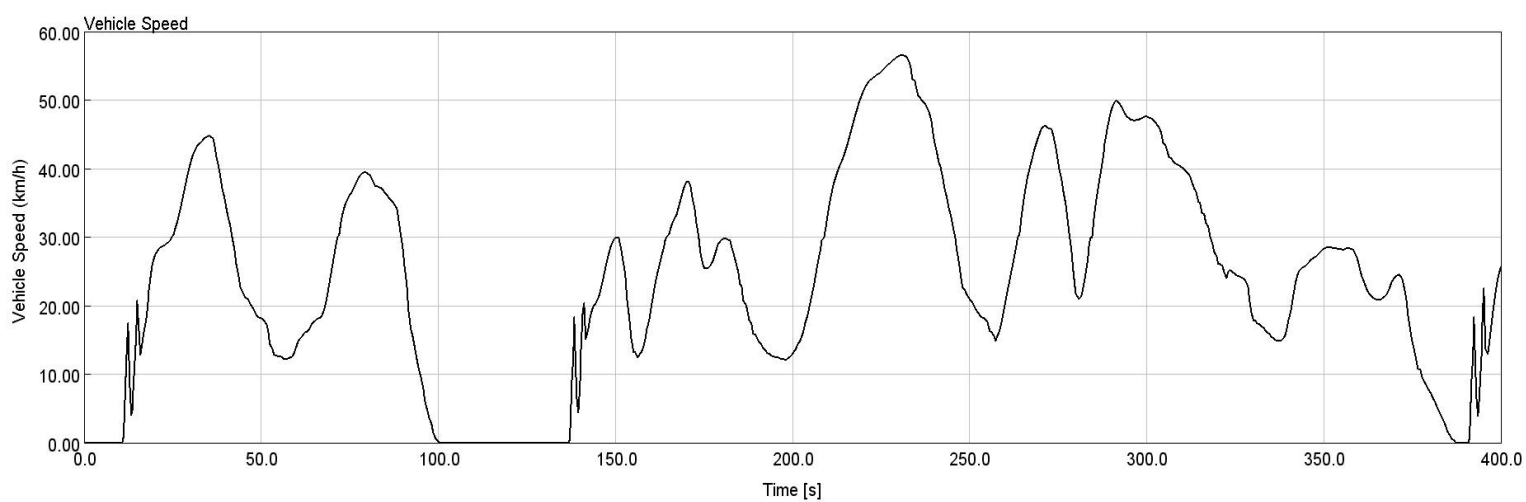
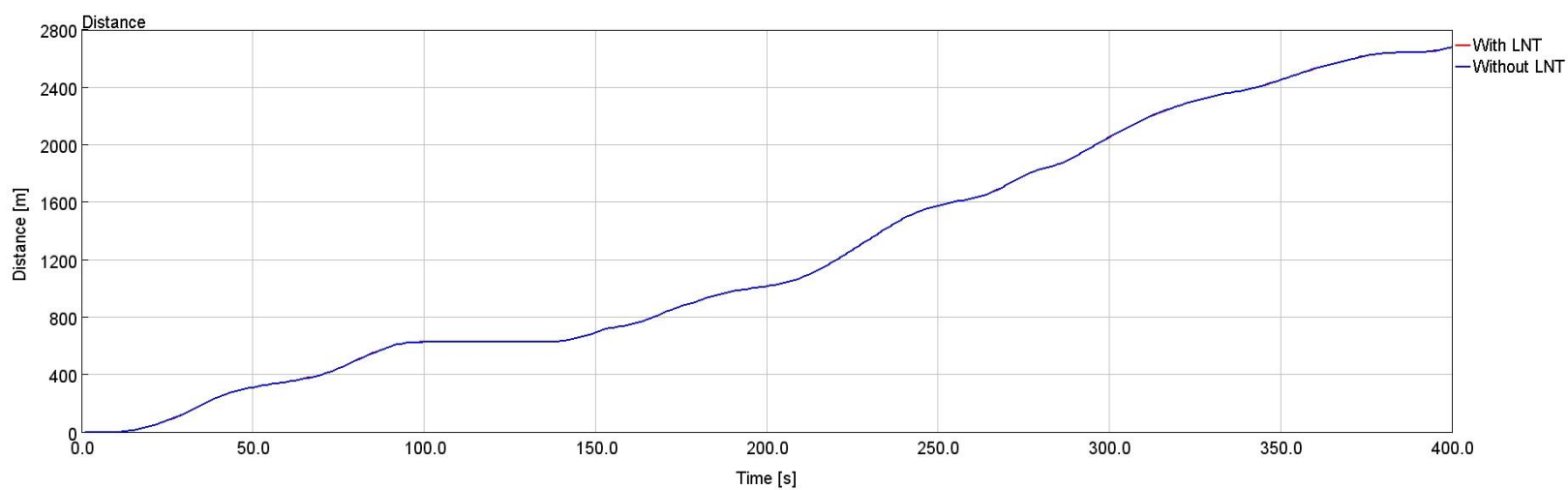
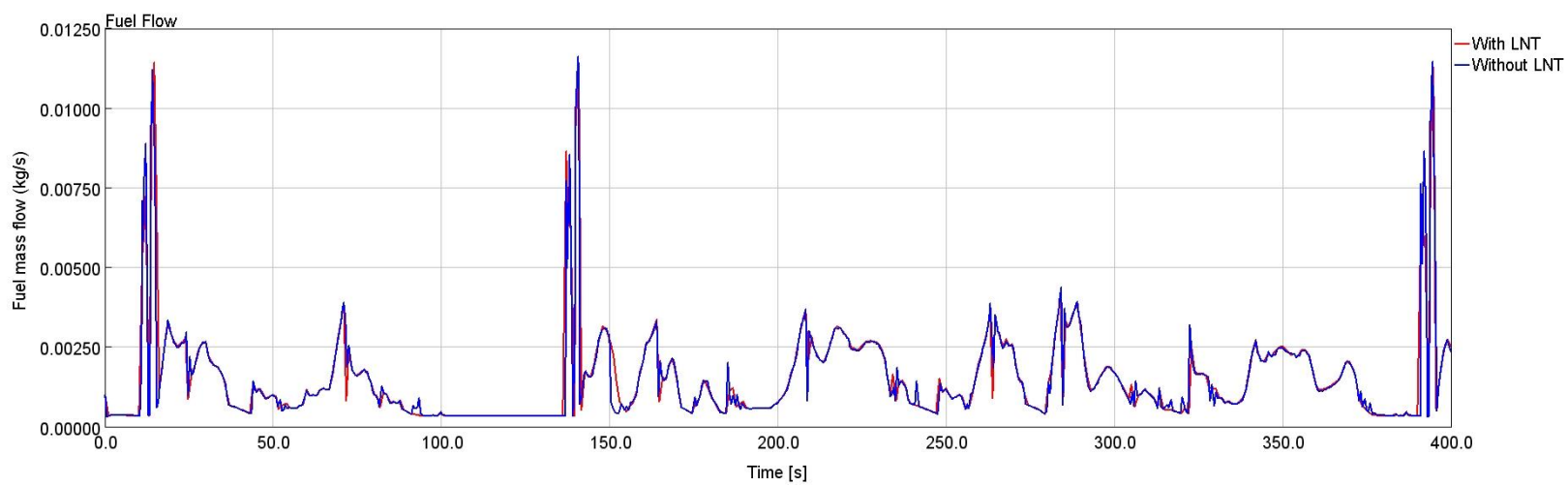
Σχήμα 5.7: Ροπή και ισχύς του κινητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC



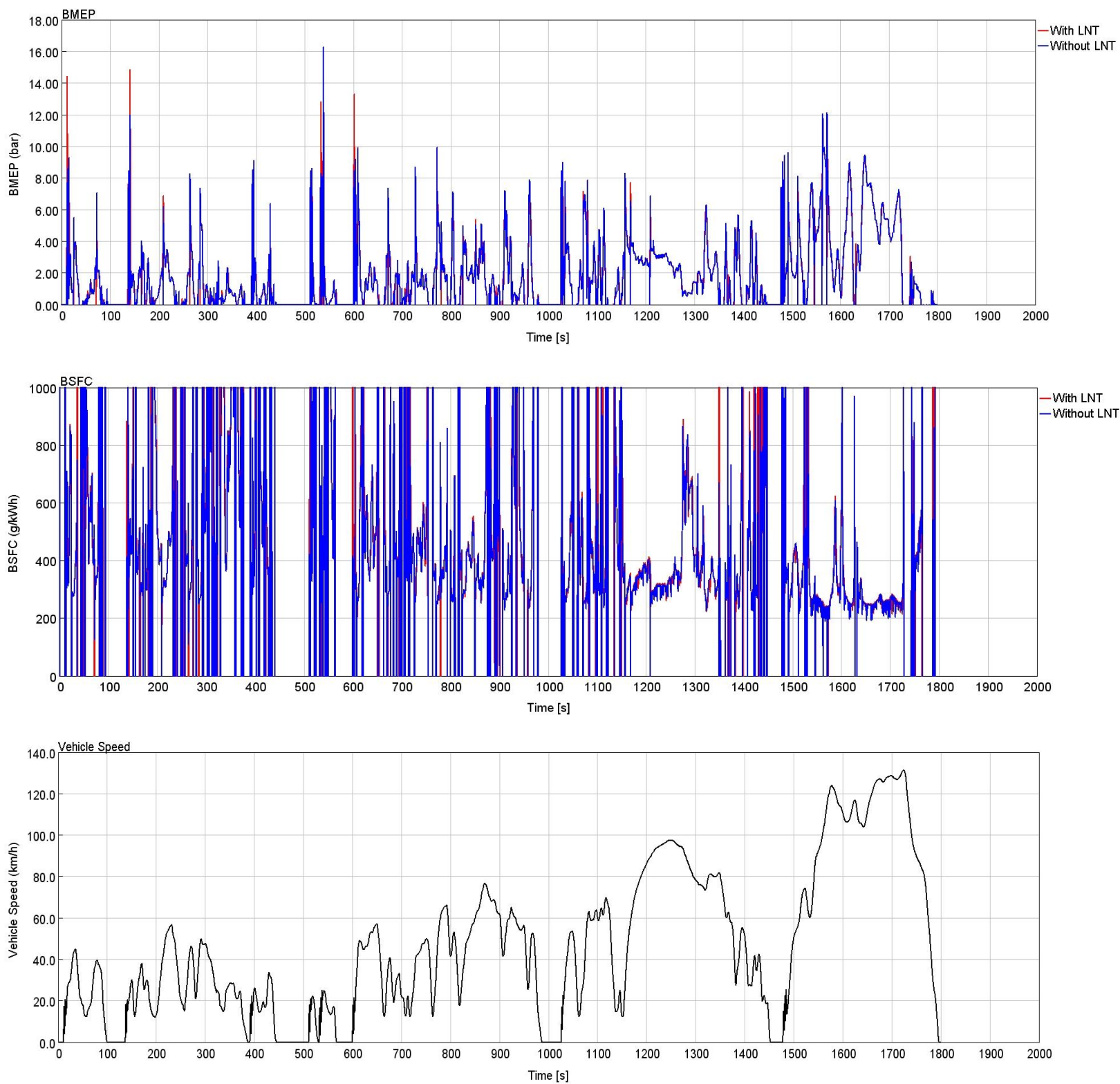
Σχήμα 5.8: Ροπή και ισχύς του κινητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 400 δευτερολέπτων της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC



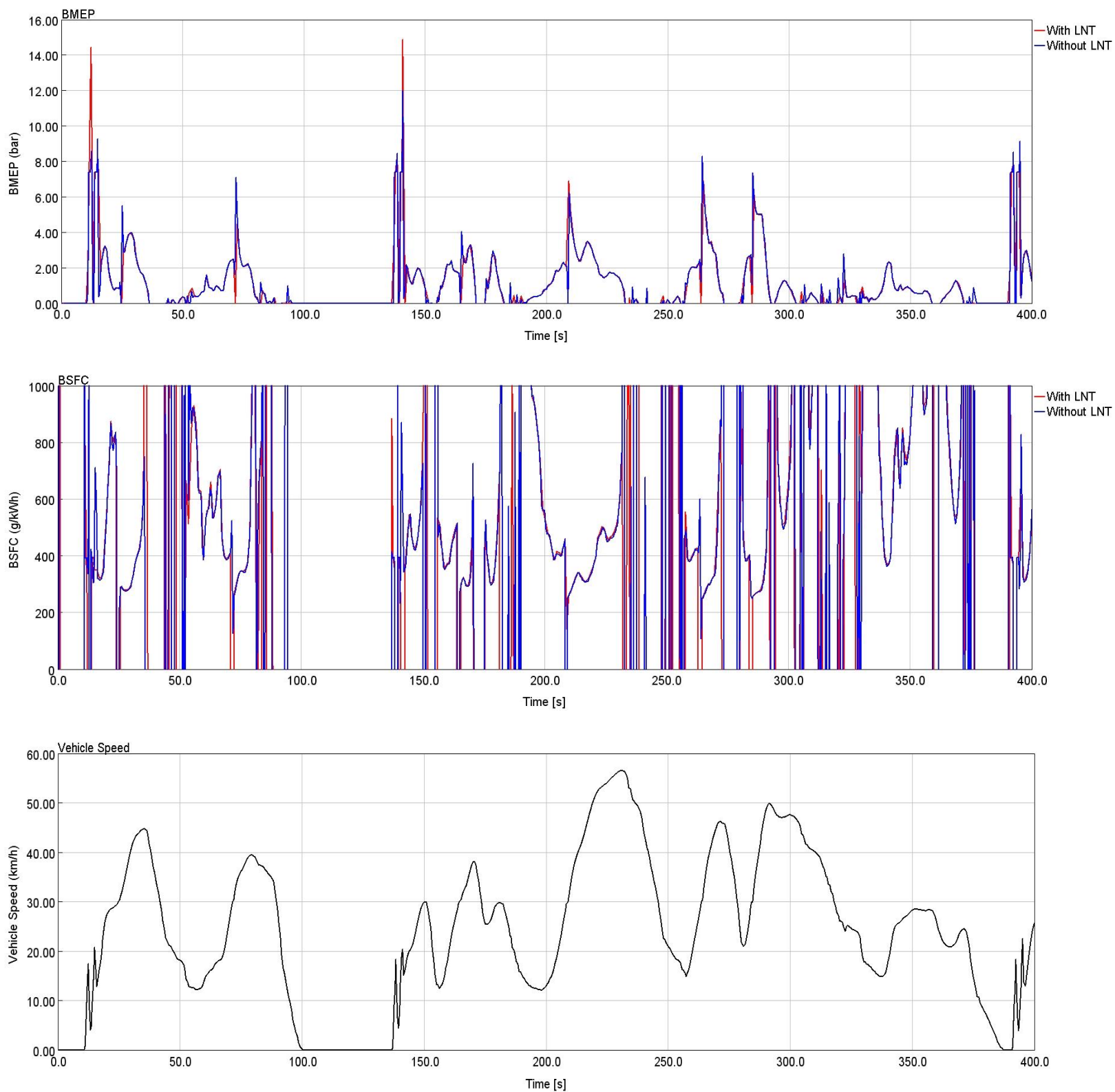
Σχήμα 5.9: Παροχή μάζας καυσίμου και διανυόμενη απόσταση συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC



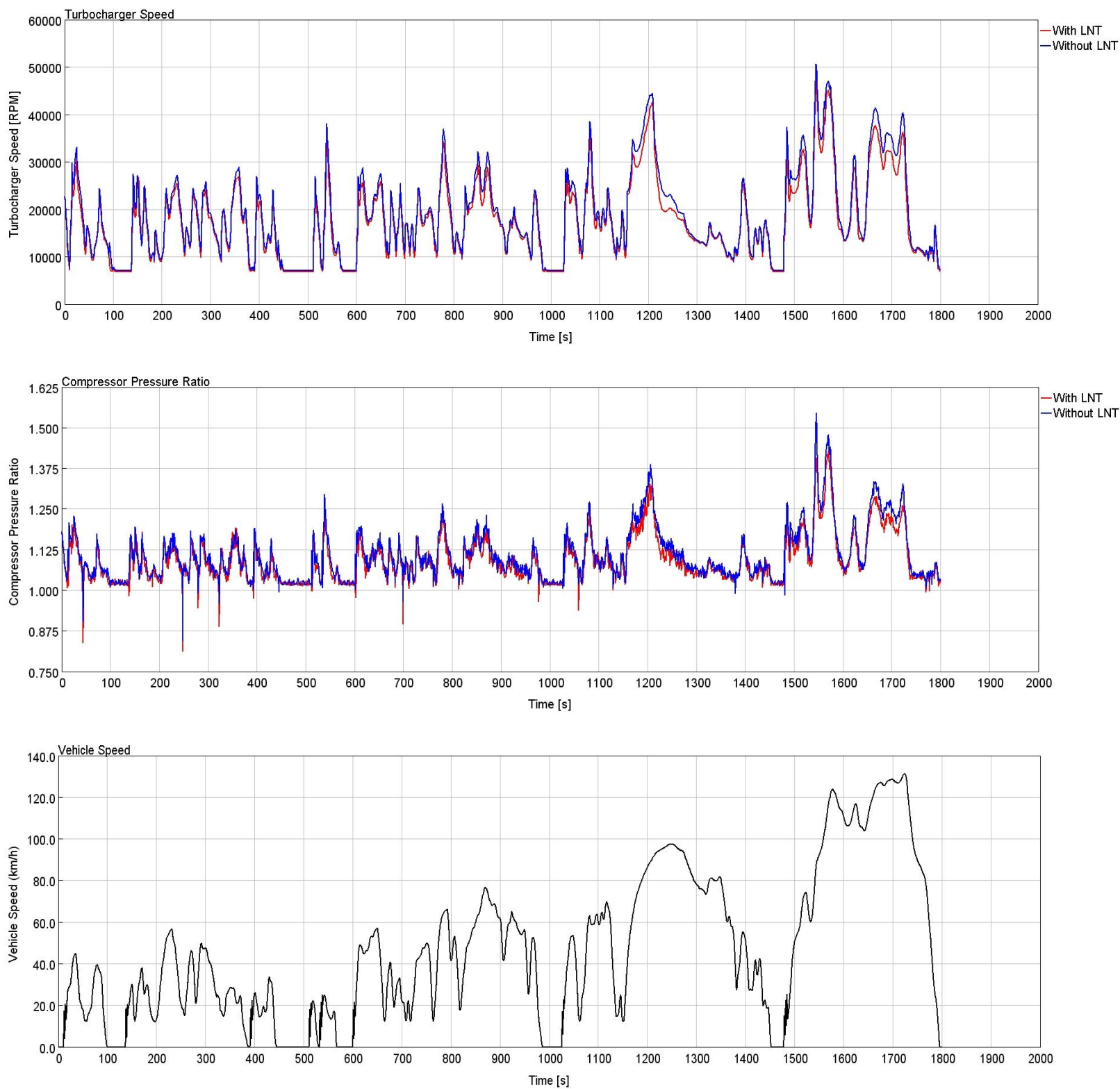
Σχήμα 5.10: Παροχή μάζας καυσίμου και διανύμενη απόσταση συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 400 δευτερολέπτων της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC



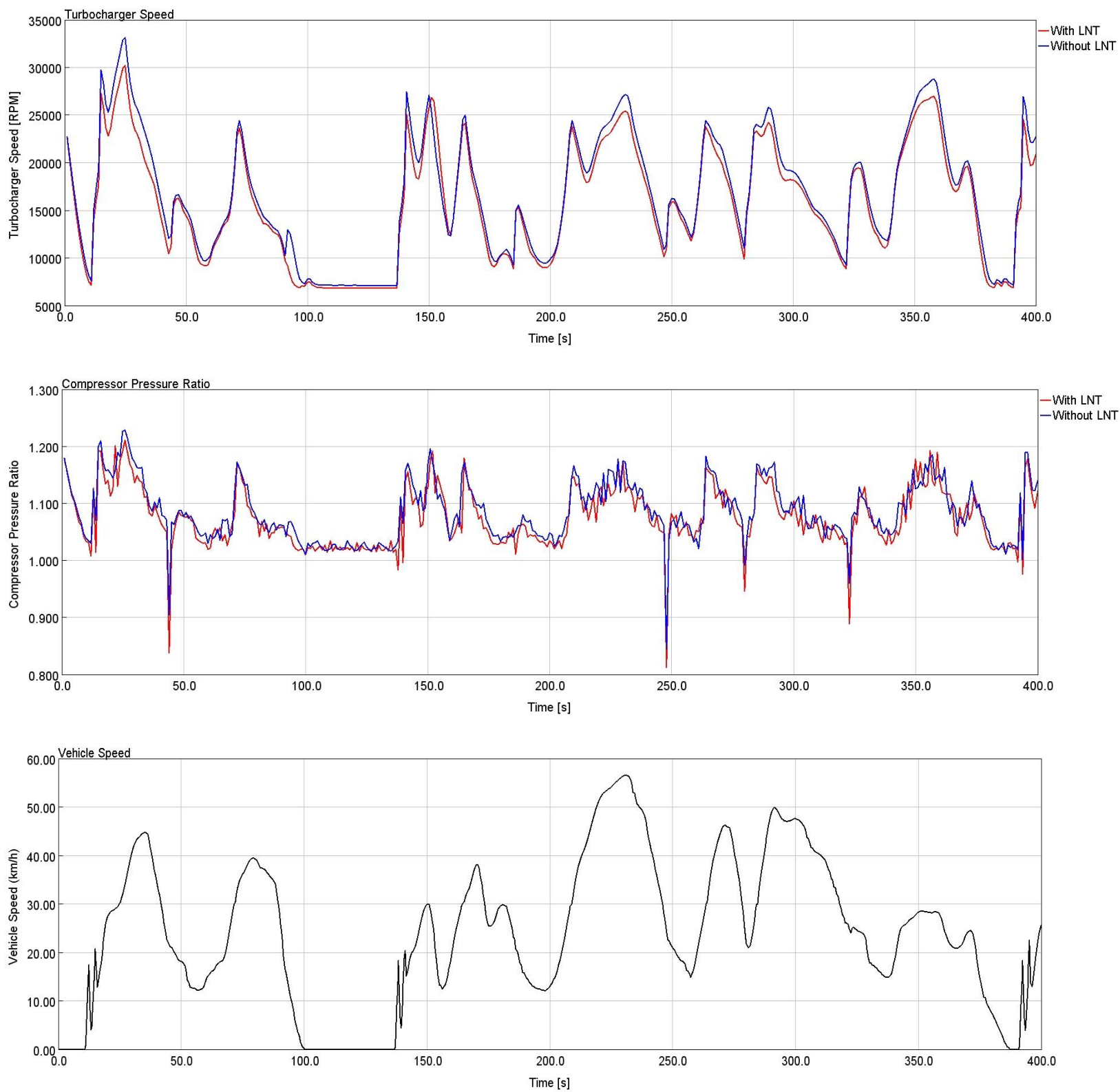
Σχήμα 5.11: Μέση πραγματική πίεση BMEP και ειδική κατανάλωση καυσίμου BSFC συναρτήσεσι του χρόνου κατά τη διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 5.12: Μέση πραγματική πίεση BMEP και ειδική κατανάλωση καυσίμου BSFC κατά τη διάρκεια των πρώτων 400 δευτερολέπτων της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC



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



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

Στα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω είναι εμφανές πως οι διαφορές είναι αρκετά μικρές και μάλιστα για τα περισσότερα μεγέθη, μη διακριτές λόγω του πολύ μεγάλου μεγέθους του οριζώντιου άξονα. Τα διαγράμματα στα οποία φαίνεται η συμβολή του συστήματος της παγίδας NO_x στις επιδόσεις του κινητήρα είναι τα Σχήματα 5.7 και 5.13. Στα συγκεκριμένα διαγράμματα βλέπουμε πως με την παρουσία της παγίδας NO_x, η ισχύς του κινητήρα σε γενικές γραμμές είναι λίγο μειωμένη λόγω των απωλειών πίεσης στην έξοδο των καυσαερίων που εισάγει ο επιπλέον καταλύτης.

Ιδιαίτερη σημασία στην παρούσα μελέτη έχει και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (BSFC), για την οποία δεν είναι δυνατόν να εξαχθούν συμπεράσματα από το αντίστοιχο διάγραμμα, γι' αυτό και χρειάστηκε ο υπολογισμός της ποσοστιαίας διαφοράς του μεγέθους με υπολογιστικό τρόπο. Η ποσοστιαία μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και της αποδιδόμενης ισχύος φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
BSFC	3%	4%	2%
Brake Torque	-5%	-4.2%	-4.6%

Όπως παρατηρούμε, υπάρχει μία μικρή αύξηση στην ειδική κατανάλωση καυσίμου με την παρουσία της παγίδας NO_x, η οποία είναι πιο έντονη στο εντός πόλης τμήμα του Κύκλου, καθώς εκεί είναι πιο συχνή η λειτουργία της, και απαιτεί την έγχυση παλμού πλούσιου μίγματος για την διάσπαση του νιτρικού βαρίου (Ba(NO₃)₂), που έχει αποθηκευτεί στο καταλύτη LNT, σε άζωτο (N₂). Επίσης, βλέπουμε ότι και η αποδιδόμενη ροπή του κινητήρα παρουσιάζει μία μείωση της τάξης του 5%,.

Ακόμα, από το διάγραμμα που αποτυπώνει το πάτημα του πεντάλ της επιτάχυνσης μπορούμε να παρατηρήσουμε μία αξιοσημείωτη λεπτομέρεια. Στο εν λόγω Σχήμα 5.1, παρατηρούμε πως σε αρκετά σημεία το πεντάλ της επιτάχυνσης στην προσομοίωση με την παγίδα NO_x είναι λίγο περισσότερο πατημένο σε σχέση με το πόσο είναι πατημένο στην προσομοίωση χωρίς την παγίδα. Η διαφορά έχει ως αποτέλεσμα η ειδική κατανάλωση καυσίμου να αυξάνεται με την LNT. Επίσης, στα διαγράμματα του υπερπληρωτή παρατηρούμε ότι και η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου του υπερπληρωτή και ο λόγος πιέσεων συμπίεστη είναι μειωμένα λόγω των απωλειών πίεσης που εισάγει στη ροή η παγίδα NO_x. Όσον αφορά τα υπόλοιπα μεγέθη που παρουσιάζονται, δεν κρίθηκε αναγκαία κάποια περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων καθώς τα αποτελέσματα είναι παραπλήσια.

5.3 Εκπομπές καυσαερίων κινητήρα

Τα αποτελέσματα εκπομπών που προκύπτουν από το πρόγραμμα δεν βρίσκονται στην κατάλληλη μορφή και επομένως απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία για την κατάλληλη παρουσίαση των εκπομπών ρύπων και την πιο εύκολη εξαγωγή συμπερασμάτων. Το πρόγραμμα εξάγει τα αποτελέσματα σε κλάσμα μάζας για το CO₂ και τα NO_x από τον καταλύτη LNT και σε ppm για την αιθάλη, οπότε η μετατροπή τους σε g/km είναι αρκετά εύκολη σύμφωνα με τους ακόλουθους τύπους:

$$CO_2 (g/km) = Y_{CO_2} \cdot \frac{m_G (g/s)}{U (km/h)} \cdot 3600$$

$$NO_{xLNT} (g/km) = Y_{NO_{xLNT}} \cdot \frac{m_G (g/s)}{U (km/h)} \cdot 3600$$

$$soot (g/km) = x_{soot}(vppm) \cdot 10^{-6} \cdot \frac{12}{28.96} \cdot \frac{m_G (g/s)}{U (km/h)} \cdot 3600$$

,όπου Y_{CO_2} : το κλάσμα μάζας του CO₂

$Y_{NO_{xLNT}}$: το κλάσμα μάζας των NO_x στην έξοδο του LNT

m_G : η στιγμιαία παροχή μάζας καυσαερίου σε g/s

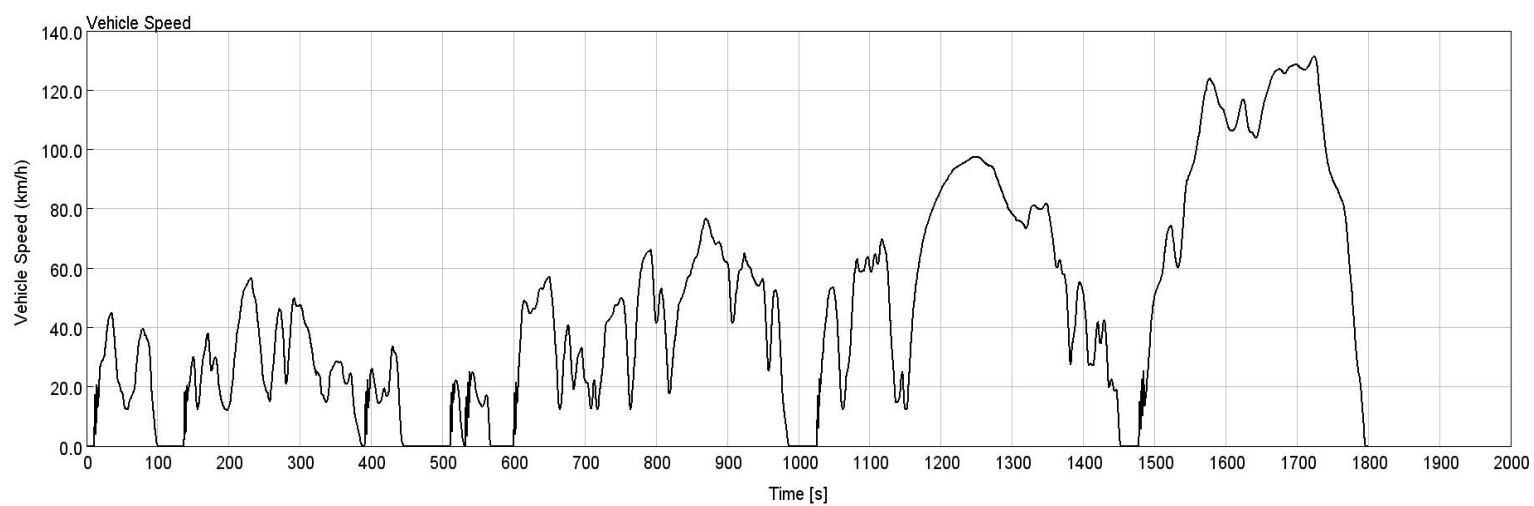
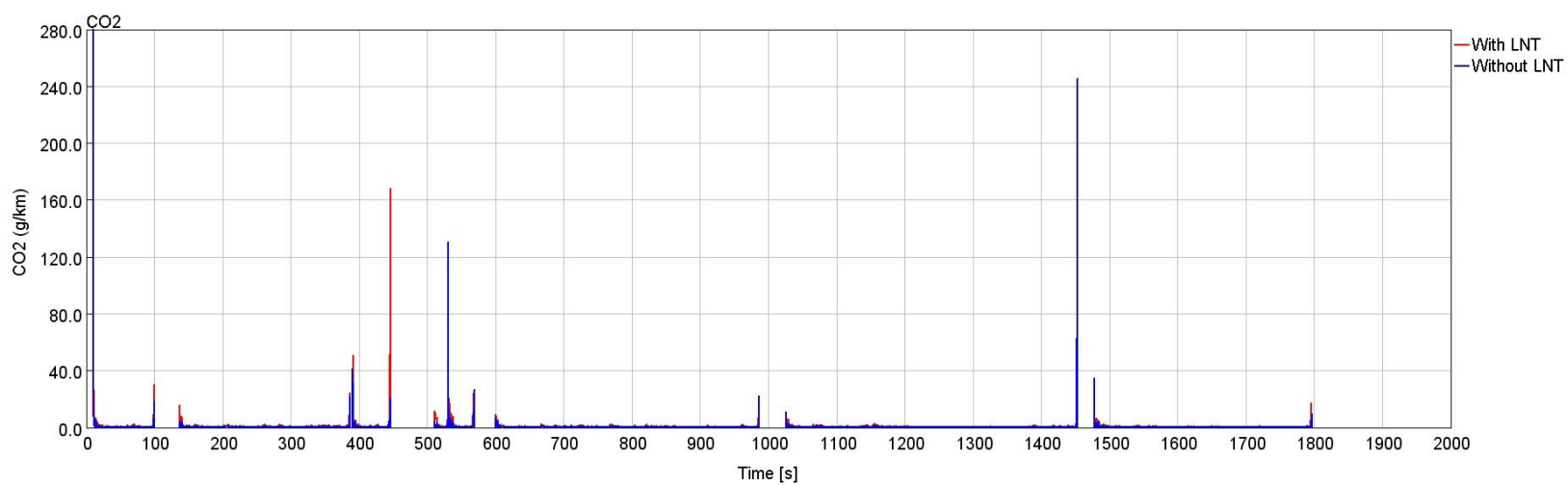
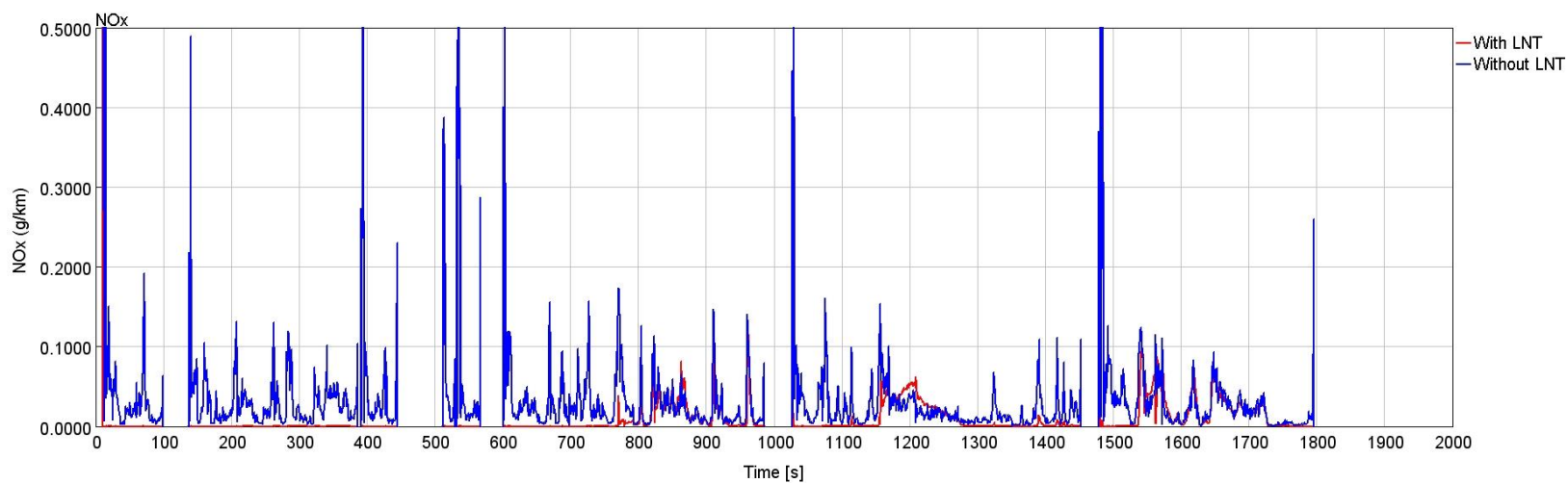
U : η στιγμιαία ταχύτητα του οχήματος σε km/h

$x_{soot}(vppm)$: η συγκέντρωση της αιθάλης σε κατ'όγκο ppm

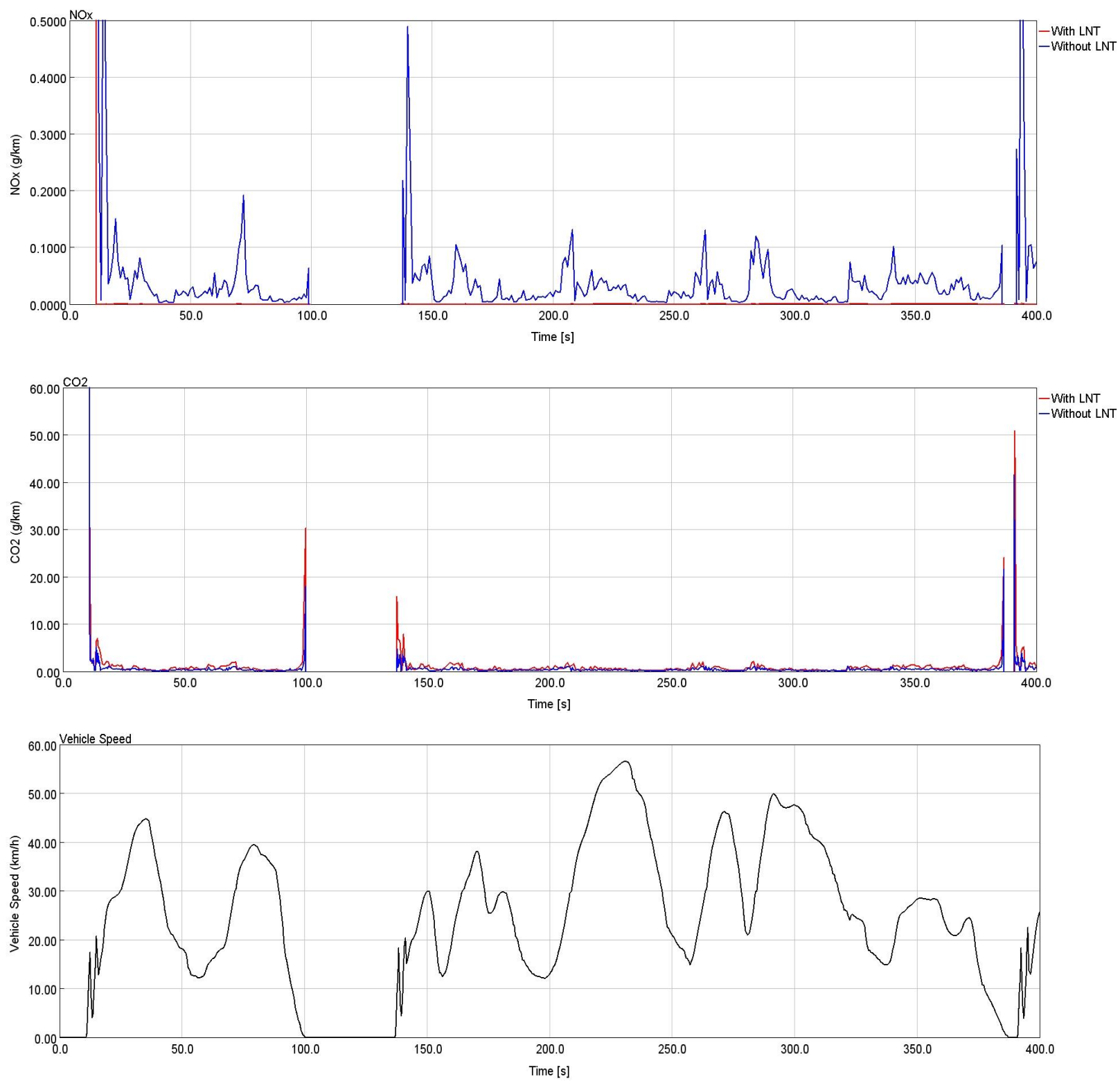
Όπως ισχύει και για τις εκπομπές των οξειδίων του αζώτου (NO_x), η αντιμετώπιση των αποτελεσμάτων της αιθάλης γίνεται όχι σε επίπεδο απόλυτων τιμών (αφού δεν έχει προηγηθεί κάποια διαδικασία ταιριάσματος πειραματικών με υπολογιστικά δεδομένα), αλλά σε επίπεδο «συγκριτικό» (μιας μεταβατικής περίπτωσης σε σύγκριση με την άλλη).

Επειδή το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής είναι η απόκριση του οχήματος κατά τη διάρκεια ενός Μεταβατικού Κύκλου Πόλης, γίνεται τελικά χρήση των συνολικών (σωρευτικών) εκπεμπόμενων ποσοτήτων των ρύπων.

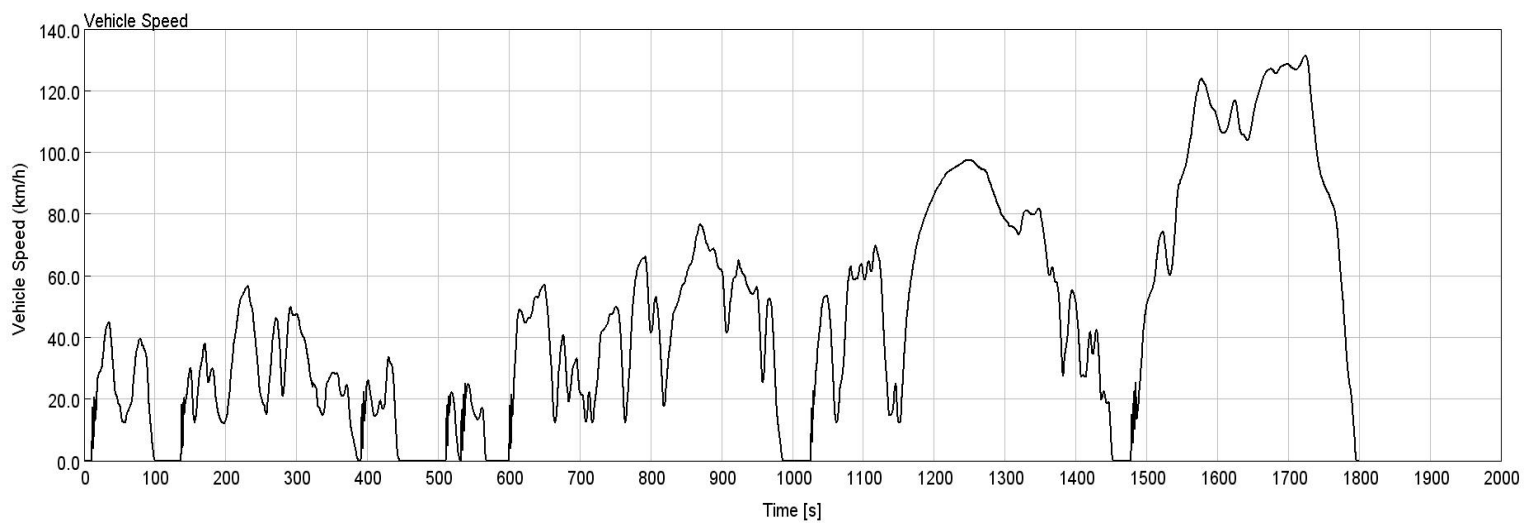
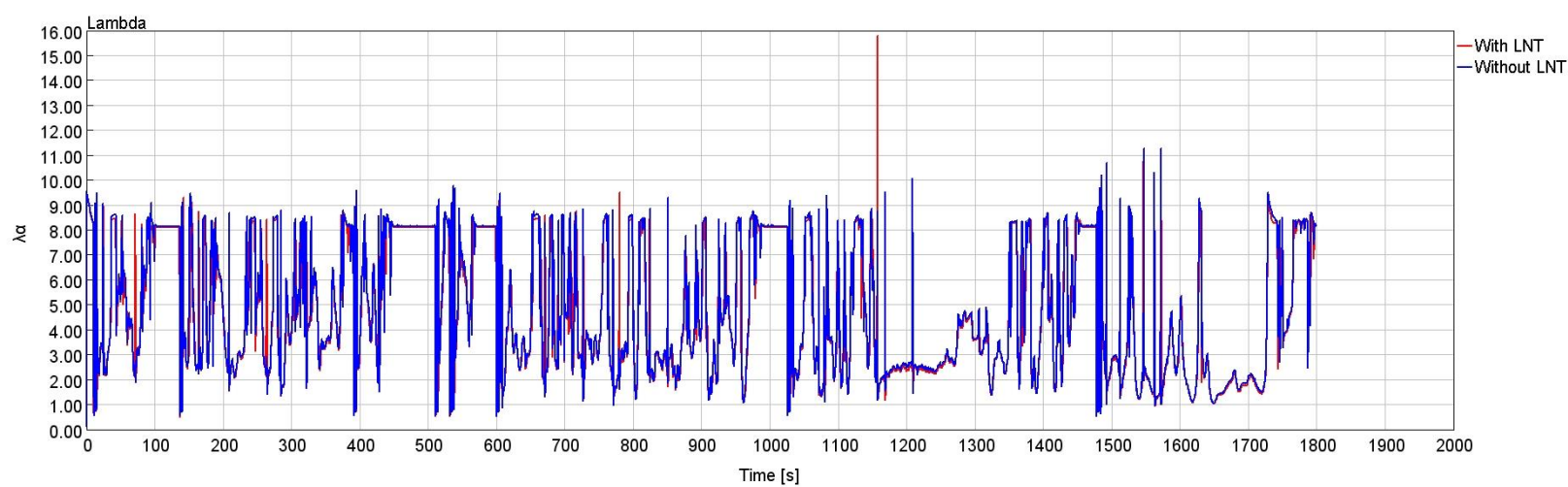
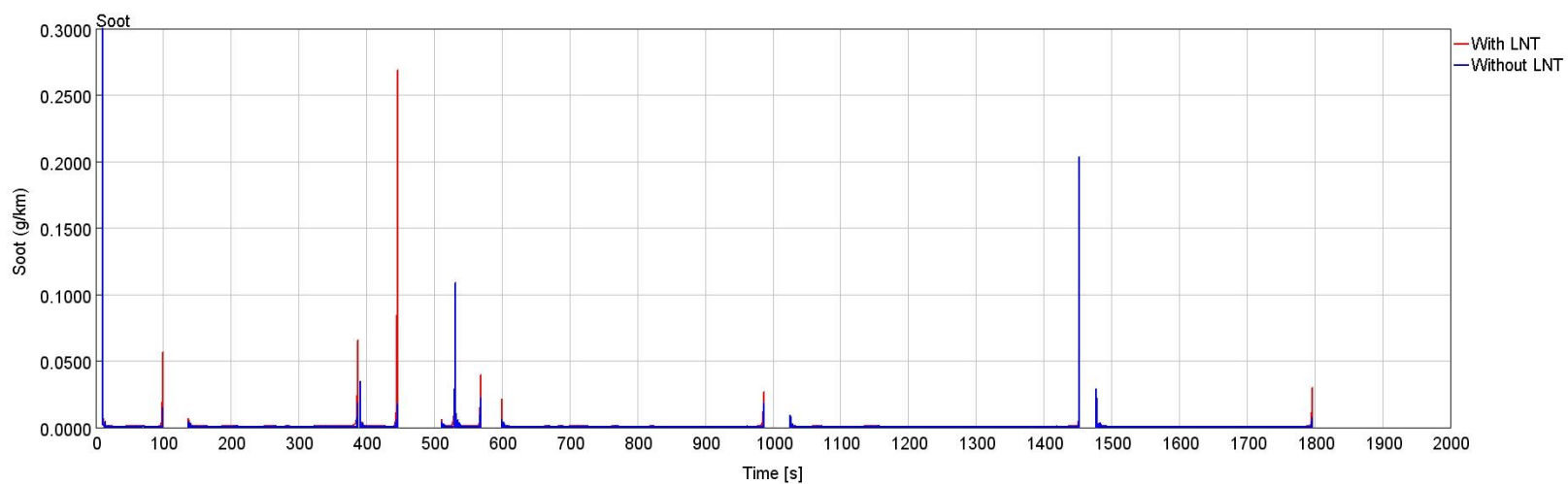
Παρακάτω, παρατίθενται τα διαγράμματα για τις εκπομπές CO₂, NO_x και αιθάλης σε g/km καθώς και ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου:



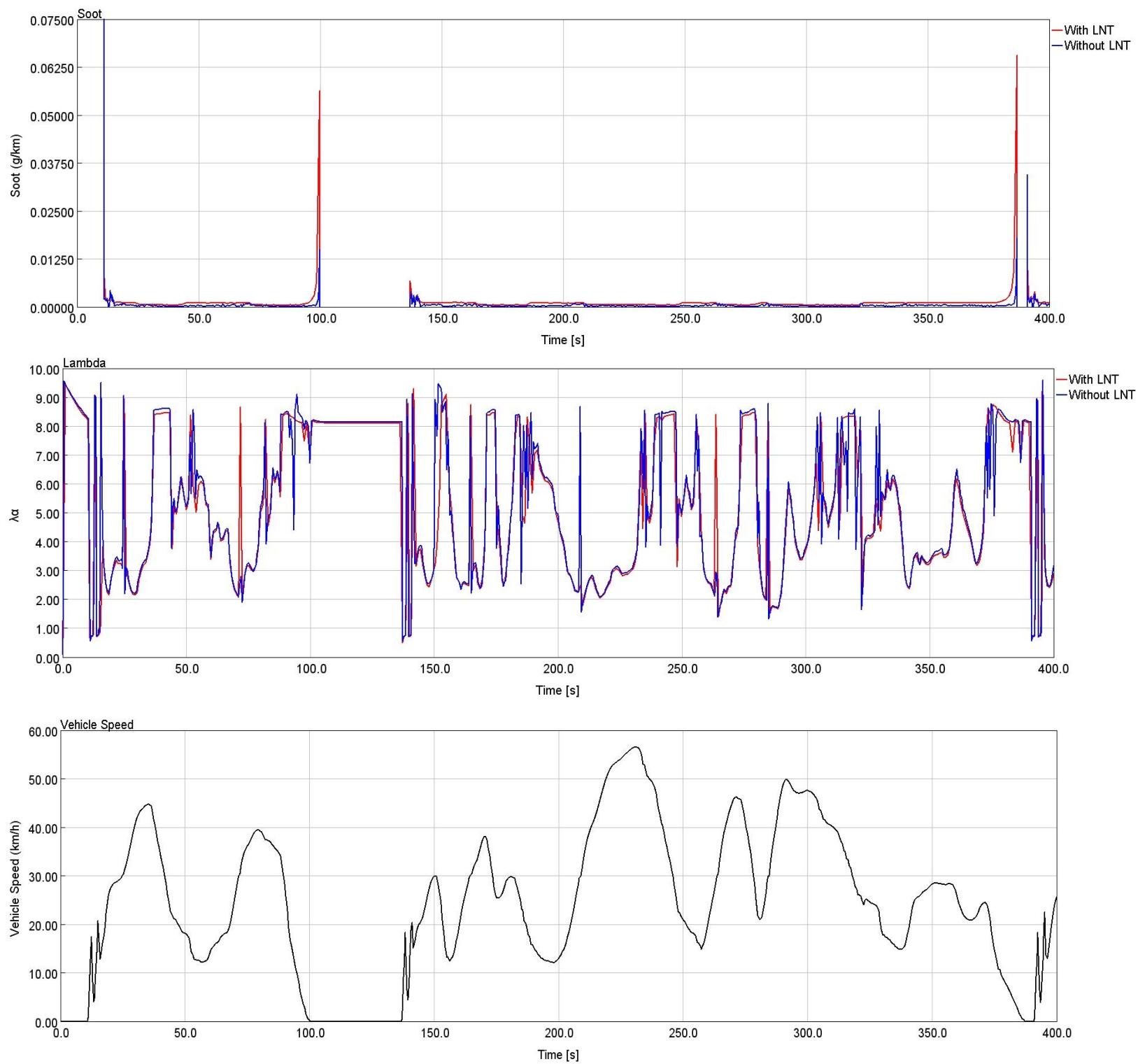
Σχήμα 5.15: Εκπομπές NO_x και CO₂ σε g/km συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 5.16: Εκπομπές NO_x και CO₂ σε g/km συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πρώτων 400 δευτερολέπτων της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 5.17: Εκπομπές αιθάλης σε g/km και λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 5.18: Εκπομπές αιθάλης σε g/km και λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου κατά τη διάρκεια των πρώτων 400 δευτερολέπτων της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC

Μπορούμε να διαπιστώσουμε πως οι διαφορές στις εκπομπές ρύπων είναι δυσδιάκριτες με «γυμνό» μάτι και άρα είναι αδύνατον να εντοπιστούν λόγω της μεγάλης διάρκειας του Κύκλου. Γι' αυτό και ακολουθήθηκε υπολογιστική σύγκριση των τιμών εκπομπών καυσαερίων με σκοπό τον ακριβή προσδιορισμό των διαφορών.

Μετά από άθροιση των τιμών των αντίστοιχων διαγραμμάτων προέκυψαν τα αποτελέσματα που συνοψίζονται στους Πίνακες 5.1 έως 5.4:

Πίνακας 5.1: Διαφορά εκπομπών CO₂ κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC

	CO ₂ (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
With LNT	474.67	647.95	382.73
Without LNT	471.57	639.87	381.95
Απόλυτη διαφορά	3.1	8.08	14.28
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	0.65	1.2	0.2

Πίνακας 5.2: Διαφορά εκπομπών NO_x κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC

	NO _x (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
With LNT	1.25	0.59	2.07
Without LNT	4.01	4.72	3.66
Απόλυτη διαφορά	2.76	3.51	1.59
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	-68.8	-87.5	-43.4

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

	Soot (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
With LNT	0.136	0.212	0.098
Without LNT	0.126	0.196	0.0916
Απόλυτη διαφορά	0.01	0.016	0.0064
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	7.9	8.2	6.9

Πίνακας 5.4: Διαφορά μέσης κατανάλωσης καυσίμου κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC

	Fuel (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
With LNT	158.43	211.94	133.01
Without LNT	153.52	183.39	129.33
Απόλυτη διαφορά	4.91	28.55	3.68
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	3.2	15.6	2.8

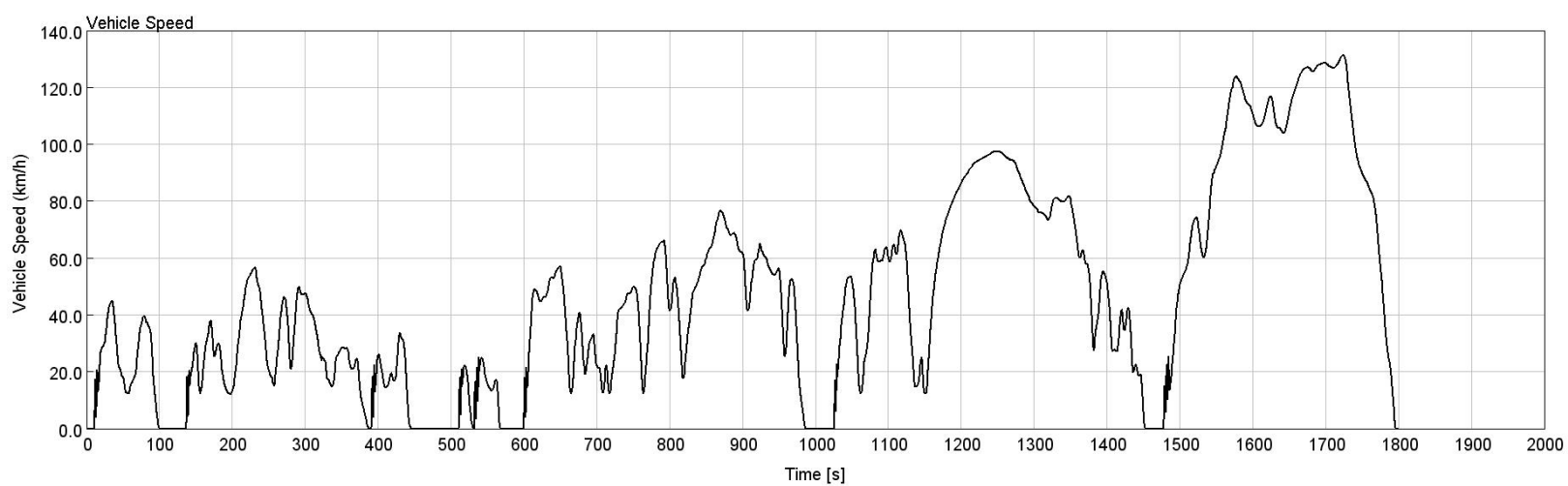
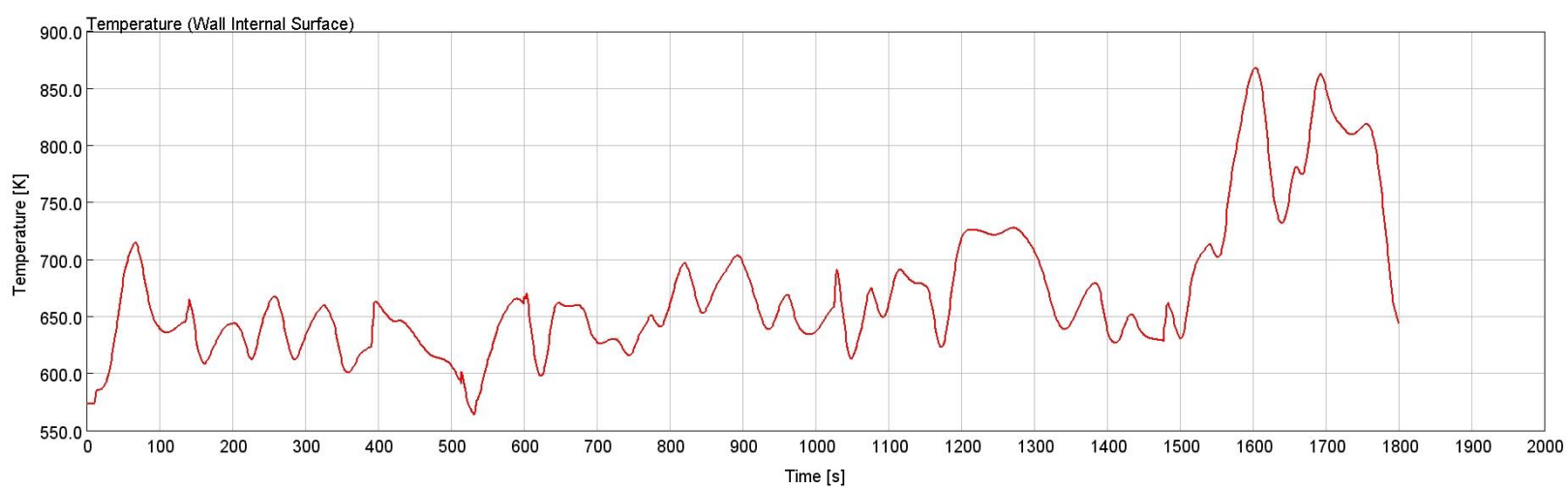
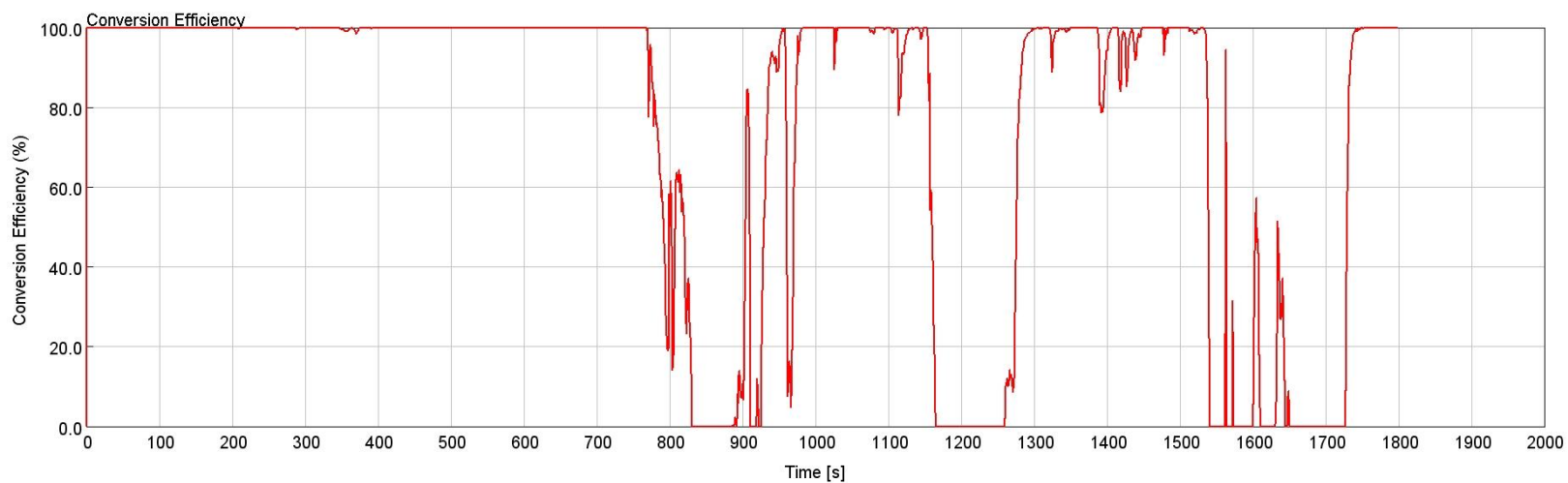
Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η συμπεριφορά των κινητήρων ως προς τις εκπομπές καυσαερίων διαφέρει σημαντικά με και χωρίς τη χρήση του συστήματος παγίδας NO_x, εξαρτώμενη άμεσα από τον τρόπο κίνησης του οχήματος. Πιο συγκεκριμένα, σχετικά με τις εκπομπές CO₂ παρατηρούμε ότι με την παρουσία του LNT υπάρχει μία μικρή αύξηση, γεγονός που οφείλεται στο γεγονός ότι η παγίδα NO_x απαιτεί πλούσιο μείγμα κατά διαστήματα για να μετατρέψει τα αποθηκευμένα στην επιφάνειά του NO_x σε N₂, με αποτέλεσμα την έγχυση επιπλέον καυσίμου. Όσον αφορά τις εκπομπές NO_x βλέπουμε ότι είναι λογικό να μειώνονται με την εφαρμογή της παγίδας NO_x. Το πιο σημαντικό είναι ότι στην περιοχή 0-1022 s του WLTC, που αντιστοιχεί σε κίνηση εντός πόλης, οι εκπομπές NO_x είναι πάρα πολύ μικρές σε σχέση με αυτές στην περιοχή των υψηλών φορτίων. Ακόμα, λόγω της επιπλέον έγχυσης καυσίμου στην περίπτωση του LNT, παρατηρούμε μία αύξηση και στην κατανάλωση καυσίμου. Συνεπώς, είναι λογικό πως και η ποσότητα του CO₂ που εκπέμπεται θα αυξηθεί. Βέβαια, σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα έχει και η τμηματοποίηση της διάρκειας του χρόνου του Κύκλου Πόλης μέσω του προγράμματος. Στην περίπτωση της προσομοίωσης με την παγίδα NO_x, ο χρόνος είναι χωρισμένος σε 5976 ίσα τμήματα, ενώ στην αντίθετη περίπτωση είναι χωρισμένος σε 6018 ίσα διαστήματα (από το πρόγραμμα). Ακόμα, βλέπουμε ότι οι εκπομπές της αιθάλης αυξάνονται σε ένα ποσοστό 8% λόγω της επιπλέον έγχυσης καυσίμου.

Επίσης, στις εκπομπές αιθάλης και διοξειδίου του άνθρακα έχουμε κάποιες κορυφές που δημιουργούνται λόγω στιγμιαίας λειτουργίας του κινητήρα με πολύ μικρό λόγο αέρα-καυσίμου. Σχετικά με τα θέματα των εκπομπών και της κατανάλωσης καυσίμου, χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι στα σημεία απότομων επιταχύνσεων του οχήματος παρατηρείται αυξημένη κατανάλωση καυσίμου. Η δημιουργία αιθάλης (καθώς και η κατανάλωση καυσίμου, επομένως και οι εκπομπές CO₂) εξαρτάται κυρίως από το φορτίο του κινητήρα. Όσο αυξάνεται το φορτίο, εγχύεται περισσότερο καύσιμο εντός των κυλίνδρων, οδηγώντας έτσι σε αύξηση των θερμοκρασιών στις πλούσιες (σε καύσιμο) ζώνες. Επιπρόσθετα, στα υψηλά φορτία μειώνεται ο διαθέσιμος χρόνος καύσης, με αποτέλεσμα την αύξηση της διάρκειας της καύσης διάχυσης, ευνοώντας το σχηματισμό αιθάλης, ενώ τόσο ο χρόνος που απομένει μετά την καύση (μέχρι το άνοιγμα της βαλβίδας εξαγωγής) όσο και το διαθέσιμο οξυγόνο μειώνονται, με αποτέλεσμα η οξείδωση της αιθάλης να μην είναι η επιθυμητή. Το φαινόμενο αυτό ενισχύεται σημαντικά σε

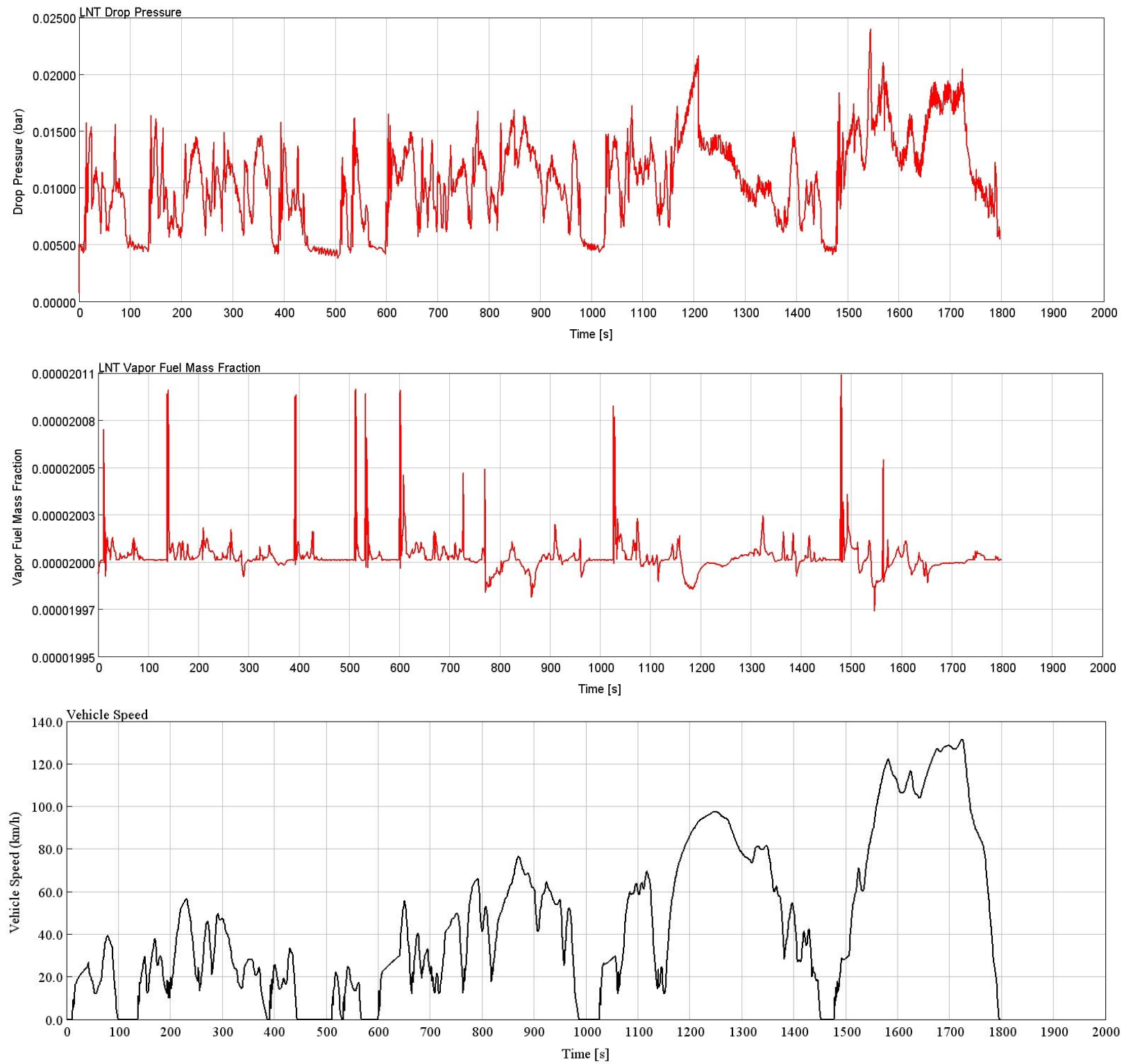
χρονικές περιόδους έντονων επιταχύνσεων εξαιτίας των πολύ χαμηλών τιμών του λόγου αέρα-καυσίμου, ακόμη και χαμηλότερων του στοιχειομετρικού ($\lambda_a < 1$), που δημιουργούνται τοπικά στον κύλινδρο ως συνέπεια της υστέρησης του στροβιλο-υπερπληρωτή [11], δηλαδή της ανακολουθίας ανάμεσα στην αυξημένη ποσότητα καυσίμου που εγχύεται εντός του κυλίνδρου και της ανεπαρκούς ποσότητας αέρα λόγω της καθυστερημένης απόκρισης του συμπιεστή του ζεύγους υπερπλήρωσης. Το φαινόμενο της υστέρησης του υπερπληρωτή επιδρά σημαντικά στην αύξηση των εκπομπών NO_x κατά τη διάρκεια απότομων επιταχύνσεων του οχήματος. Πιο συγκεκριμένα, η ανακολουθία ποσότητας εγχυόμενου καυσίμου και ποσότητας εισαγόμενου αέρα οδηγεί σε μείγμα με τοπικά σχεδόν στοιχειομετρική αναλογία αέρα-καυσίμου και άρα τοπικά υψηλότερες θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα σε αυτό το διάστημα να εμφανίζονται αυξημένες εκπομπές NO_x .

5.4 Επιδόσεις της παγίδας NO_x

Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου παρατίθενται τα διαγράμματα που αφορούν το σύστημα της παγίδας NO_x . Συγκρίνεται η απόδοση της παγίδας συναρτήσει της θερμοκρασίας, καθώς και η πτώση πίεσης που εισάγεται στη ροή με την παρουσία της:



Σχήμα 5.19: Αποδοτικότητα και θερμοκρασία εσωτερικού τοιχώματος του συστήματος παγίδας NO_x κατά τη διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC



Σχήμα 5.20: Πτώση στατικής πίεσης και κλάσμα μάζας καυσίμου στο διερχόμενο καυσαέριο από την παγίδα NO_x συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC

Στα διαγράμματα του Σχήματος 5.19 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι από τα 800 δευτερόλεπτα του Κύκλου Πόλης WLTC, όπου η θερμοκρασία του καυσαερίου παραμένει σταθερά πάνω από τους 650 K, η απόδοση της παγίδας NO_x πέφτει ραγδαία στο 20%. Αυτό αποτελεί και έναν από τους βασικούς λόγους που η χρήση της ενδείκνυται κυρίως στα χαμηλά φορτία. Επίσης, από τα διαγράμματα του Σχήματος 5.20 βλέπουμε ότι η κατά μάζα περιεκτικότητα του διερχόμενου καυσαερίου από την παγίδα NO_x σε αέριο καύσιμο παρουσιάζει κορυφές, οι οποίες οφείλονται στη στιγμιαία έγχυση καυσίμου προκειμένου να γίνει η αναγωγή των αποθηκευμένων NO_x στην παγίδα.

5.5 Αποτελέσματα παραμετρικών προσομοιώσεων

Σε αυτή την ενότητα μελετήθηκε η αλληλεπίδραση της παγίδας NO_x με τα υπόλοιπα συστήματα (μετ)επεξεργασίας καυσαερίων που χρησιμοποιούνται σε πετρελαιοκίνητα οχήματα, δηλαδή του οξειδωτικού καταλύτη DOC (για την αντιμετώπιση του μονοξειδίου του άνθρακα και των άκαυστων υδρογονανθράκων) και του φίλτρου σωματιδίων DPF (για την αντιμετώπιση των εκπομπών αιθάλης). Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για δύο διαφορετικές τοποθετήσεις της παγίδας NO_x στην έξοδο των καυσαερίων, οι οποίες είναι κατά σειρά:

α) DOC-LNT-DPF

β) DOC-DPF-LNT

5.5.1 DOC-LNT-DPF

Αρχικά θα μελετήσουμε την τοποθέτηση του συστήματος της παγίδας NO_x μεταξύ του οξειδωτικού καταλύτη (DOC) και της παγίδας αιθάλης (DPF), διάταξη που συναντάται πιο συχνά ως εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία. Στους παρακάτω Πίνακες 5.5 έως 5.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης και πιο συγκεκριμένα οι εκπομπές CO₂, οι εκπομπές NO_x, οι εκπομπές αιθάλης και η μέση κατανάλωση καυσίμου:

Πίνακας 5.5: Διαφοροποίηση εκπομπών CO₂ κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC για τοποθέτηση DOC-LNT-DPF

	CO ₂ (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
DOC-LNT-DPF	479.56	659.94	387.81
LNT	474.67	647.95	382.73
Without LNT	471.57	639.87	381.95
Ποσοστιαία Μεταβολή DOC-LNT-DPF με LNT	1.4%	1.8%	1.3%
Ποσοστιαία Μεταβολή DOC-LNT-DPF με Without LNT	1.6%	3.1%	1.5%

Πίνακας 5.6: Διαφοροποίηση εκπομπών NO_x κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC για τοποθέτηση DOC-LNT-DPF

	NO _x (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
DOC-LNT-DPF	0.75	0.1	1.57
LNT	1.25	0.59	2.07
Without LNT	4.01	4.72	3.66
Ποσοστιαία Μεταβολή DOC-LNT-DPF με LNT	-40%	-83%	-24%
Ποσοστιαία Μεταβολή DOC-LNT-DPF με Without LNT	-81%	-97%	-57%

Πίνακας 5.7: Διαφοροποίηση εκπομπών αιθάλης κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC για τοποθέτηση DOC-LNT-DPF

	Soot (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
DOC-LNT-DPF	0.000205	0.000475	0.0000747
LNT	0.136	0.212	0.098
Without LNT	0.126	0.196	0.0916
Ποσοστιαία Μεταβολή DOC-LNT-DPF με LNT	-99.8%	-99.7%	-97.2%
Ποσοστιαία Μεταβολή DOC-LNT-DPF με Without LNT	-99.8%	-99.7%	-98%

Πίνακας 5.8: Διαφοροποίηση μέσης κατανάλωσης καυσίμου κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC για τοποθέτηση DOC-LNT-DPF

	Fuel (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
DOC-LNT-DPF	160.10	229.04	124.12
LNT	158.43	211.94	133.01
Without LNT	153.52	183.39	129.33
Ποσοστιαία Μεταβολή DOC-LNT-DPF με LNT	1.1%	8.1%	-6.7%
Ποσοστιαία Μεταβολή DOC-LNT-DPF με Without LNT	4.2%	25%	-4%

5.5.2 DOC-DPF-LNT

Ένας άλλος τρόπος τοποθέτησης της παγίδας NO_x είναι μετά την παγίδα αιθάλης, ως το τελευταίο σύστημα επεξεργασίας του καυσαερίου στην εξαγωγή. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα με την παράγραφο 5.5.1 παρουσιάζονται στους παρακάτω Πίνακες 5.9 έως 5.12:

Πίνακας 5.9: Διαφοροποίηση εκπομπών CO₂ κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC για τοποθέτηση DOC-DPF-LNT

	CO ₂ (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
DOC-DPF-LNT	507.85	676.87	417.90
DOC-LNT-DPF	479.56	659.94	387.81
LNT	474.67	647.95	382.73
Without LNT	471.57	639.87	381.95
Ποσοστιαία Μεταβολή DOC-DPF-LNT με DOC-LNT-DPF	5.9%	2.6%	7.8%
Ποσοστιαία Μεταβολή DOC-DPF-LNT με LNT	7%	4.5%	9.2%
Ποσοστιαία Μεταβολή DOC-DPF-LNT με Without LNT	7.7%	5.8%	9.4%

Πίνακας 5.10: Διαφοροποίηση εκπομπών NO_x κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC για τοποθέτηση DOC-DPF-LNT

	NO _x (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
DOC-DPF-LNT	0.89	0.27	1.17
DOC-LNT-DPF	0.75	0.1	1.57
LNT	1.25	0.59	2.07
Without LNT	4.01	4.72	3.66
Ποσοστιαία Μεταβολή DOC-DPF-LNT με DOC-LNT-DPF	18.7%	170%	-25.5%

Ποσοστιαία Μεταβολή DOC-DPF-LNT με LNT	-28.8%	-54.2%	-43.5%
Ποσοστιαία Μεταβολή DOC-DPF-LNT με Without LNT	-77.8%	-94.3%	-67.2%

Πίνακας 5.11: Διαφοροποίηση εκπομπών αιθάλης κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC για τοποθέτηση DOC-DPF-LNT

	Soot (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
DOC-DPF-LNT	0.000207	0.000471	0.0000786
DOC-LNT-DPF	0.000205	0.000475	0.0000747
LNT	0.136	0.212	0.098
Without LNT	0.126	0.196	0.0916
Ποσοστιαία Μεταβολή DOC-DPF-LNT με DOC-LNT-DPF	0.98%	-0.84%	5.2%
Ποσοστιαία Μεταβολή DOC-DPF-LNT με LNT	-97.6%	-99.8%	-99.9%
Ποσοστιαία Μεταβολή DOC-DPF-LNT με Without LNT	-99.8%	-99.8%	-99.9%

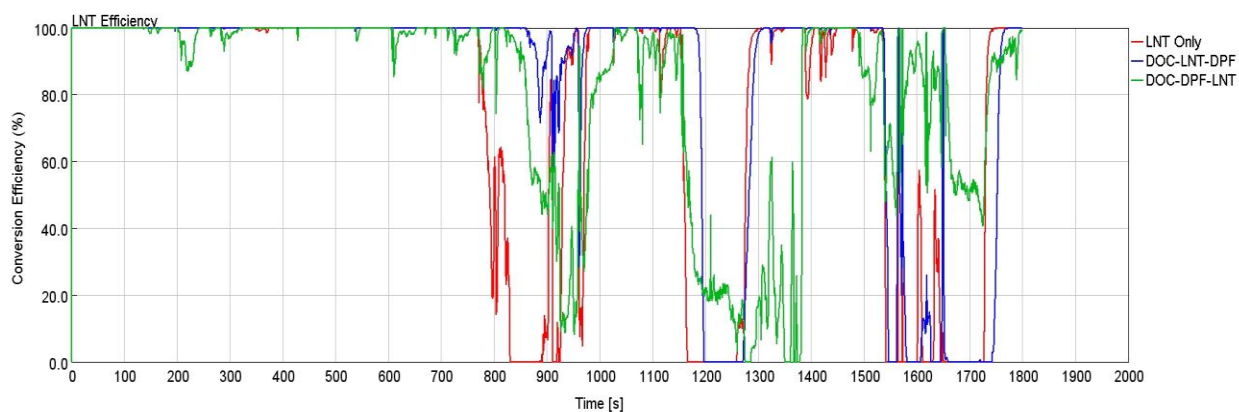
Πίνακας 5.12: Διαφοροποίηση μέσης κατανάλωσης καυσίμου κατά την διάρκεια της Κλάσης 3-2 του Κύκλου Πόλης WLTC για τοποθέτηση DOC-DPF-LNT

	Fuel (g/km)		
	Total	0-1022 (s)	1022-1800 (s)
DOC-DPF-LNT	166.95	237.56	130.28
DOC-LNT-DPF	160.10	229.04	124.12
LNT	158.43	211.94	133.01
Without LNT	153.52	183.39	129.33

Ποσοστιαία Μεταβολή DOC-DPF-LNT με DOC-LNT-DPF	4.3%	3.7%	4.9%
Ποσοστιαία Μεταβολή DOC-DPF-LNT με LNT	5.4%	12.1%	-2.1%
Ποσοστιαία Μεταβολή DOC-DPF-LNT με Without LNT	8.7%	29.5%	0.73%

Με βάση τα αποτελέσματα της παραμετρικής προσομοίωσης, αρχικά, όπως είναι φυσικό, η χρήση της παγίδας αιθάλης-DPF οδηγεί στην μείωση των εκπομπών αιθάλης σε πολύ μικρές τιμές. Επίσης, προκύπτει ότι η τοποθέτηση της παγίδας NO_x μετά την παγίδα αιθάλης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών CO₂. Επίσης, βλέπουμε ότι ο συνδυασμός της παγίδας NO_x με την παγίδα αιθάλης και τον οξειδωτικό καταλύτη αυξάνει την συνολική αποδοτικότητα του LNT. Η προφανής εξήγηση είναι ότι η αντίδραση της οξείδωσης του NO σε NO₂, που είναι απαραίτητη καθώς αποτελεί το πρώτο στάδιο για την αποθήκευση των NO_x στην παγίδα NO_x, πραγματοποιείται κατά τη ροή του καυσαερίου διαμέσου του καταλύτη DOC, υποβοηθώντας έτσι τη λειτουργία της παγίδας.

Παρατηρώντας, επίσης, τις τιμές του Πίνακα 5.10 διαπιστώνουμε ότι στην περίπτωση της τοποθέτησης της παγίδας NO_x ανάμεσα στον καταλύτη DOC και στην παγίδα αιθάλης, η συνολική εκπομπή NO_x είναι μικρότερη σε σχέση με την τοποθέτηση της παγίδας NO_x μετά την παγίδα αιθάλης. Αυτό οφείλεται πιθανώς στην παρουσία, πριν από το καταλύτη LNT, της παγίδας αιθάλης στην οποία πραγματοποιείται η εξώθερμη αντίδραση οξείδωσης της αιθάλης με αποτέλεσμα να συμβάλλει σημαντικά στη θερμική γήρανση της παγίδας NO_x. Αυτή η διαφορά στην αποδοτικότητα (%) μπορεί να γίνει πιο κατανοητή στο ακόλουθο Σχήμα 5.21:



Σχήμα 5.21: Αποδοτικότητα αναγωγής των εκπεμπόμενων NO_x στην παγίδα NO_x στις υπό μελέτη εφαρμογές

Παρ' όλ' αυτά, αξίζει να σημειωθεί ότι η τοποθέτηση DOC-DPF-LNT έχει θετικότερη επίδραση στη μείωση των εκπομπών NO_x σε υψηλά φορτία από τις άλλες εφαρμογές. Επίσης, παρατηρούμε ότι οι εκπομπές αιθάλης παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες ανεξάρτητα από τη θέση της παγίδας NO_x, γεγονός που μας δείχνει ότι δεν επηρεάζεται η αποδοτικότητα της παγίδας αιθάλης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – Συμπεράσματα

Αναλύοντας τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω διαγραμμάτων που προέκυψαν από τις διάφορες προσομοιώσεις, μπορούμε να εξάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα.

Η χρήση της παγίδας NO_x έχει ως στόχο τη μείωση των εκπομπών NO_x , κάτι το οποίο βλέπουμε ότι επιτυγχάνεται σε ποσοστό έως 70%. Παρατηρούμε, όμως, από τον Πίνακα 5.4, ότι η μείωση των συγκεκριμένων εκπομπών είναι αρκετά πιο έντονη στο εντός πόλης τμήμα του Κύκλου WLTC (μέχρι τα 1022 s), γεγονός που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η εφαρμογή της παγίδας NO_x έχει νόημα κυρίως για την αντιμετώπιση τους σε χαμηλά φορτία. Ακόμα βλέπουμε από τους Πίνακες 5.3, 5.5 και 5.6, ότι όσον αφορά τις εκπομπές CO_2 και αιθάλης, η χρήση της παγίδας NO_x επιδρά αρνητικά και έχει ως αποτέλεσμα την αύξησή τους.

Επίσης, με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις σχετικά με τη θέση τοποθέτησης της παγίδας NO_x , αλλά και το συνδυασμό της με τις υπόλοιπες συσκευές επεξεργασίας καυσαερίων (DOC, DPF) για κινητήρες Diesel καταλήγουμε στα παρακάτω συμπεράσματα. Παρατηρούμε ότι στη διάταξη DOC-LNT-DPF (α) η αύξηση της αποδοτικότητας αναγωγής των NO_x από την παγίδα είναι πιο έντονη στο εντός πόλης τμήμα του Κύκλου, ενώ στη διάταξη DOC-DPF-LNT (β) είναι πιο έντονη στο εκτός πόλης τμήμα του Κύκλου. Επομένως, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι η τοποθέτηση (α) ενδείκνυται κυρίως για μικρά οχήματα πόλης, ενώ η τοποθέτηση (β) για οχήματα που κινούνται για μεγάλο διάστημα σε υψηλά φορτία σε αυτοκινητόδρομους.

Από την παρούσα μελέτη συμπεραίνουμε ότι η χρήση του συστήματος παγίδας NO_x έχει θετική επίδραση στη μείωση των εκπομπών NO_x και κυρίως αντιμετωπίζει σε ικανοποιητικό βαθμό τις εκπομπές σε χαμηλά φορτία, κατά την κίνηση του οχήματος στο εσωτερικό μίας πόλης. Βέβαια, λόγω της συνεχούς μείωσης, από τη νομοθεσία, των ορίων των εκπομπών NO_x για κινητήρες Diesel, είναι απαραίτητη η αύξηση της αποδοτικότητας των συστημάτων επεξεργασίας καυσαερίων. Έτσι, προκειμένου η παγίδα NO_x να συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών NO_x τα επόμενα χρόνια, κρίνεται αναγκαία η βελτιστοποίηση των υλικών κατασκευής της, αλλά και ο συνδυασμός της με άλλες τεχνολογίες αντιμετώπισης των NO_x , όπως η επιλεκτική καταλυτική αναγωγή - SCR, για την επίτευξη ακόμα καλύτερων αποτελεσμάτων.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις παραπάνω προσομοιώσεις εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το μοντελοποιημένο σύστημα ελέγχου, όπως αυτό περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Η επιλογή ενός διαφορετικού συστήματος ελέγχου ενδέχεται να έχει επίδραση στα τελικά αποτελέσματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Έντυπη

- 1) Ε.Γ. Γιακουμής (2019), “Προδιαγραφές Καυσαερίων και Κύκλοι Δοκιμής Εμβολοφόρων ΜΕΚ”, Αθήνα: Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.
- 2) Ε.Γ. Γιακουμής (2019), “Ρύπανση και συστήματα αντιρρύπανσης εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.”, Αθήνα: Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.
- 3) Χ. Μπαχτής (2018), “Μελέτη επιδόσεων και εκπομπών ρύπων ελαφρού πετρελαιοκίνητου φορτηγού με ηλεκτρικά υποβοηθούμενη στροβιλο-υπερπλήρωση κατά τη διάρκεια του Παγκοσμίου Κύκλου Πόλης WLTC”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. (επιβλέπων: Ε.Γ. Γιακουμής)
- 4) E.G. Giakoumis (2016), “Driving and Engine Cycles”, Cham. (Switzerland): Springer
- 5) Α. Ζαχιώτης (2015), “Πρόβλεψη εκπομπών αιθάλης και μονοξειδίου του αζώτου επιβατικού οχήματος κατά την διάρκεια του παγκόσμιου κύκλου πόλης (WLTP) 119 – Συγκριτική ανάλυση με άλλους κύκλους πόλης”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., (επιβλέπων: Ε.Γ. Γιακουμής).
- 6) Global Registry (2014), “Global Technical Regulation No. 15 on Worldwide harmonized light vehicles test procedure”, ECE: United Nations
- 7) Christopher D.DiGiulio (2013), “NH₃ formation over a lean NOXtrap (LNT) system: Effects of lean/rich cycle timing and temperature” in In-Sik Nam (ed.) *Applied Catalysis B: Environmental*, USA: ScienceDirect
- 8) Κ.Δ. Ρακόπουλος (2013), “Μηχανές Εσωτερικής Καύσης Ι”, Αθήνα: Εκδόσεις Φούντας
- 9) Steven H. (2013), Homologation test cycles worldwide—status of the WLTP. Green global NCAP labelling/green scoring Workshop
- 10) Tutuiianu M, Marotta A, Steven H, Ericsson E, Haniu T, Ichikawa N, et al. (2013), “Development of the worldwide harmonized light-duty driving test cycle (WLTC)”, Technical report, UNECE/WP.29/GRPE/WLTP-IG DHC subgroup
- 11) Κ.Δ. Ρακόπουλος, Ε.Γ. Γιακουμής (2011), “Εναλλαγή αερίων και υπερπλήρωση ΜΕΚ”, Αθήνα: Εκδόσεις Φούντας

12) Gamma Technologies, Inc. (2010), “GT-Suite Engine Performance Tutorials, Version 2016”

13) Zhiming Gao, Kalyana Chakravarthy, Charles Daw and James Conklin (2010), “Lean NOx Trap Modeling for Vehicle Systems Simulations”, USA: SAE Paper 2010-01-0882

14) Ν.Κ. Μαργαρίτης (2009) “Θεωρητική και πειραματική διερεύνηση της λειτουργίας παγίδων οξειδίων του αζώτου για κινητήρες φτωχής καύσης”, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Α.Π.Θ. (επιβλέπων: Ζ. Σαμαράς)

15) C.D. Rakopoulos, E.G. Giakoumis (2009) “Diesel engine transient operation”, London: Springer.

16) Jürgen Schnitzler (2007), “Particulate Matter and NOx Exhaust Aftertreatment Systems”, Germany: FEV Motorentechnik GmbH

17) Κ.Δ. Ρακόπουλος, Δ.Θ. Χουντάλας (1998), “Καύση ρύπανση εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης”, Αθήνα: Εκδόσεις Φούντας

Ηλεκτρονική

18) NETT Technologies, Inc. (2020), <https://www.nettinc.com/information/emissions-faq/what-is-a-diesel-oxidation-catalyst> “What Is a Diesel Oxidation Catalyst?”, (πρόσβαση 22/06/2020)

19) Κ. Φούζας (2019), <https://www.newsauto.gr/news/kykloforo-me-paranomo-diesel-ti-euro-ine-to-aftokinito-mou/> “Κυκλοφορώ με παράνομο diesel; Τι EURO είναι το αυτοκίνητό μου;”, Αθήνα: NewsAuto.gr, (πρόσβαση 25/06/2020)