



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

«Μελέτη επιδόσεων και εκπομπών ρύπων
επιβατικού οχήματος με κινητήρα Otto GDI με
ηλεκτρικά υποβοηθούμενη στροβίλο-υπερπλήρωση
κατά τη διάρκεια του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης
WLTC»

Διπλωματική εργασία

ΣΤΑΜΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Επιβλέπων: Ευάγγελος Γ. Γιακουμής, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 2022

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΩΝ.....	4
Εισαγωγή.....	5
Abstract.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	7
Υπερπλήρωση MEK.....	7
1.1 Ορισμός υπερπλήρωσης.....	7
1.2 Downsizing	8
1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της υπερπλήρωσης	8
1.4 Μέθοδοι υπερπλήρωσης.....	9
1.5 Μεταβατική λειτουργία	13
1.6 Ηλεκτρική υποβοήθηση.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	16
Εκπομπές Ρύπων και Νομοθεσία	16
2.1 Μηχανισμός σχηματισμού ρύπων σε κινητήρα Otto άμεσου ψεκασμού	16
2.1.1 Σχηματισμός NO _x	18
2.1.2 Σχηματισμός του μονοξειδίου του άνθρακα CO	21
2.1.3 Σχηματισμός των άκαυστων υδρογονανθράκων HC.....	22
2.1.4 Σχηματισμός αιθάλης	22
2.2 Νομοθεσία και στόχοι της Ευρωπαϊκής Ένωσης.....	23
2.2.1 Εκπομπές ρύπων.....	23
2.2.2 Διάρκεια ζωής.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	26
Μεταβατικοί Κύκλοι Πόλης	26
3.1 Εισαγωγή.....	26
3.2 Μετρήσεις και διαδικασία δοκιμής.....	29
3.2.1 Δυναμόμετρο	29
3.2.2 Διαδικασία δειγματοληψίας εκπομπών.....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	32
Ανάπτυξη Μοντέλου Οχήματος με τη Βοήθεια του Υπολογιστικού Πακέτου GT-POWER	32
4.1 Εισαγωγή στο GT-POWER.....	32

4.2 Μοντελοποίηση του κινητήρα στο GT-Power	33
4.3 Μοντέλο ηλεκτρικά υποβοηθούμενου στρόβιλο-υπερπληρωτή	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	48
Επιδόσεις και Εκπομπές Καυσαερίων του Κινητήρα.....	48
5.1 Εισαγωγή.....	48
5.2 Επιδόσεις κινητήρα.....	50
5.3 Εκπομπές και κατανάλωση κινητήρα	68
5.4 Επαναπρογραμματισμός κινητήρα.....	73
5.5 Αποτελέσματα παραμετρικών προσομοιώσεων.....	80
5.5.1 Στρατηγική πρόσδοσης ισχύος	81
5.5.2 Μεταβολή μάζας οχήματος	84
5.5.3 Μεταβολή της ονομαστικής ισχύος του ηλεκτροκινητήρα	88
5.6 Συμπεράσματα.....	91
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	93

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΩΝ

Συντομογραφία	Επεξήγηση
AFR	Λόγος αέρα-καυσίμου (Air-Fuel Ratio)
BMEP	Μέση πραγματική πίεση (Brake Mean Effective Pressure)
BSFC	Ειδική κατανάλωση καυσίμου (Brake Specific Fuel Consumption)
CO	Μονοξείδιο του άνθρακα
CO₂	Διοξείδιο του άνθρακα
CVS	Δειγματοληψία σταθερού όγκου (Constant Volume Sampling)
EGR	Ανακυκλοφορία καυσαερίου (Exhaust Gas Recirculation)
EATC	Ζεύγος στρόβιλο-υπερπλήρωσης με ηλεκτρική υποβοήθηση (Electrically-Assisted Turbo Compound)
GDI	Άμεσος ψεκασμός καυσίμου (Gasoline Direct Injection)
HC	Υδρογονάνθρακες
NEDC	Νέος Ευρωπαϊκός Κύκλος Οδήγησης
NO	Μονοξείδιο του αζώτου
NO_x	Οξείδια του αζώτου
TDC / ΑΝΣ	Άνω νεκρό σημείο (Top Dead Center)
WLTC	Παγκόσμιος Κύκλος Πόλης Οχημάτων Ελαφρού Τύπου
MEK	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης

Εισαγωγή

Τα επιβατικά οχήματα ευθύνονται για το 12% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην Ευρωπαϊκή Ένωση, με την αυτοκινητοβιομηχανία να κατατάσσεται έτσι στους κύριους συνεισφορείς της κλιματικής αλλαγής. Η κατάσταση αυτή έχει ωθήσει τα κράτη των κύριων παγκόσμιων αγορών στην ένταξη περιβαλλοντικών πολιτικών που καθοδηγούν την παραγωγή προϊόντων με γνώμονα το οικολογικό αντίκτυπό τους. Με την διαρκή αύξηση των πωλήσεων που πραγματοποιούνται στον χώρο της αυτοκίνησης, οριοθετούνται ολοένα και αυστηρότερα μέτρα στις εκπομπές (ρύπων και CO₂) των νέων ταξινομημένων οχημάτων. Ενάντια στην παγκόσμια τάση για χαμηλότερες εκπομπές καυσαερίων, όμως, έρχεται η επιθυμία των καταναλωτών για υψηλότερες επιδόσεις. Οι κατασκευαστές προκειμένου ικανοποιήσουν τις δύο πλευρές εφαρμόζουν λύσεις όπως το σύστημα Start/Stop, η μείωση του όγκου εμβολισμού του κινητήρα (downsizing), η στροβιλο-υπερπλήρωση (turbocharging/turbo) ή και τα πλήρως υβριδικά συστήματα κίνησης των οχημάτων. Τα υβριδικά οχήματα με την ανάκτηση ενέργειας κατά την πέδηση καθώς και το σύστημα υπερπλήρωσης που εκμεταλλεύεται τα θερμά εξερχόμενα καυσαέρια από τον κινητήρα, είναι παραδείγματα της αναζήτησης μεθόδων για πλήρη εκμετάλλευση της παραγόμενης ενέργειας των καυσαερίων. Παράλληλα, οι κατασκευαστές επιδιώκουν την διαρκή βελτίωση των κινητήρων και στον τομέα των επιδόσεων. Ένα σύστημα που έρχεται να συνεισφέρει σε αυτόν τον σκοπό είναι η ηλεκτρική υποβοήθηση του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης (EATC), το οποίο έχει ήδη περιορισμένη εφαρμογή σε βαρέος τύπου κινητήρες. Σε μικρότερου μεγέθους εφαρμογές δεν έχει υπάρξει ακόμα μαζική χρήση ενός τέτοιου συστήματος. Η ηλεκτρική υποβοήθηση του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης έχει σαν βάση την πρόσδοση ενέργειας κατά την επιτάχυνση του ζεύγους και την απορρόφηση ενέργειας όταν η στροβιλο-υπερπλήρωση παράγει περισσότερη από την απαιτούμενη. Η απόκριση ενός κινητήρα turbo σε χαμηλές στροφές συχνά δεν είναι γρήγορη επιβαρύνοντας τις συνθήκες καύσης και την οδηγική εμπειρία. Στην θεωρία, η εξωτερική πρόσδοση ισχύος από έναν ηλεκτροκινητήρα στην άτρακτο του υπερπληρωτή, όταν αυτό είναι απαραίτητο, μπορεί να βελτιώσει τα οδηγικά χαρακτηριστικά του αυτοκινήτου, προσδίδοντας την δυνατότητα για γρηγορότερη επιτάχυνση με ταυτόχρονη βελτίωση των εκπομπών λόγω της καλύτερης ποιότητας της καύσης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ερευνά το θέμα της ηλεκτρικά υποβοηθούμενης υπερπλήρωσης σε έναν τετρακύλινδρο κινητήρα Otto άμεσου ψεκασμού, επιβατικού οχήματος. Με την χρήση ενός εξειδικευμένου λογισμικού από την Gamma Technologies, Inc., το GT-Power, δημιουργούνται τα μοντέλα που προσομοιώνουν τη λειτουργία του κινητήρα με και χωρίς την υποβοήθηση. Η διερεύνηση του μοντέλου σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας χρησιμεύει στην κατανόηση και αξιολόγηση των επιδόσεων του κινητήρα. Πραγματοποιούνται δοκιμές κατά τη διάρκεια του μεταβατικού Κύκλου Πόλης WLTC αλλά και δοκιμές επιτάχυνσης για την σύγκριση των επιδόσεων αλλά και των ελεγχόμενων εκπομπών (οξειδία του αζώτου NO_x, διοξείδιο του άνθρακα CO₂, μονοξείδιο του άνθρακα CO, υδρογονάνθρακες HC και, πλέον με την χρήση κινητήρων άμεσου ψεκασμού, αιθάλη).

Abstract

Passenger vehicles are responsible for 12% of total EU carbon dioxide emissions, thereby making it one of the key drivers of climate change. At the same time, the impacts of climate change are already being observed in a variety of sectors, and there is increasing recognition that these changes are being caused by human activities. This has placed the car industry at the forefront of new regulatory developments that seek to build a more sustainable industrial structure, whilst simultaneously meeting consumer demands for increased performance. This trend is clearly reflected in several recent technological developments that are widely adopted in new automobile models: Start/Stop systems, engine downsizing, turbocharging technology, and fully hybrid vehicles. The logic behind fully hybrid vehicles by regenerating energy from braking, and also behind the use of turbocharging by exploiting the hot gases coming out of the engine, are some examples of the need to take full advantage of the in-cylinder generated energy. At the same time, car manufacturers aim to improve engine performance. In heavy-duty Diesel engines an electrically assisted turbo compound (EATC) has already limited use in order to help achieve what is stated above. There is no use of that configuration in smaller passenger vehicles yet. The idea behind an electrically assisted turbocharger is providing energy during acceleration therefore reducing turbo-lag, and absorbing the excessive energy generated from the turbine when it is needed. In theory a configuration like that could improve driving characteristics and also reduce harmful emissions due to better in-cylinder combustion condition.

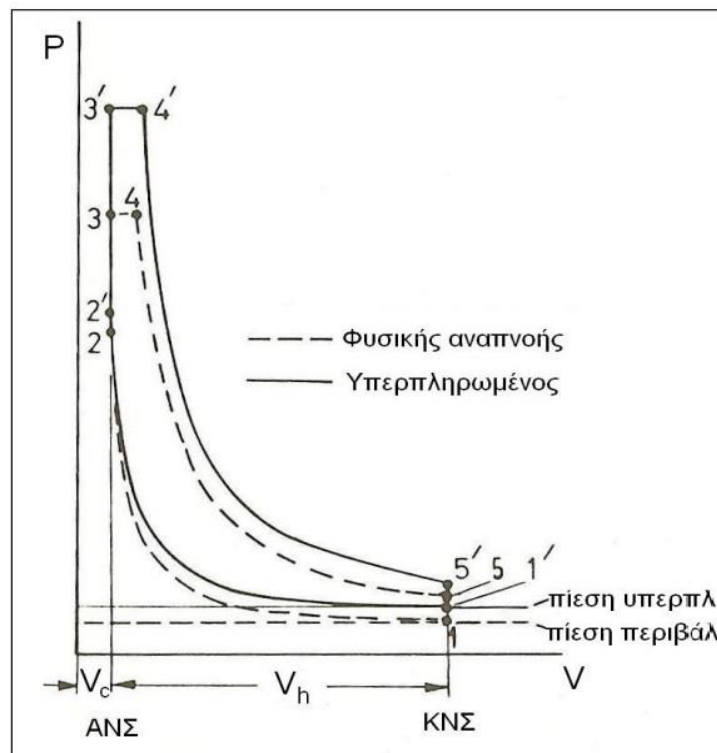
This thesis explores the electrically assisted turbocharging in a four-cylinder gasoline direct injected spark ignition engine of a consumer car. It models and simulates an electrically assisted turbocharged engine using GT-Power, an industry standard software used for engine performance simulation. It details how the engine performs in a variety of environments, thereby leading to an accurate assessment of the use of assisted turbocharging in enhancing performance while mitigating greenhouse gas emissions. To enhance the applicability of the results, tests were conducted during the WLTC driving cycle and also tests under which the engine accelerates to different final speeds at different situations. The results from the conducted simulations are used for comparison of the engine performance and of the emissions such as nitrogen oxide NO_x , carbon dioxide CO_2 , carbon monoxide CO , hydrocarbons HC , and (given the presence of gasoline direct injection) soot.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Υπερπλήρωση ΜΕΚ

1.1 Ορισμός υπερπλήρωσης

Ως υπερπλήρωση ορίζεται η συμπίεση του αέρα που εισέρχεται στον κινητήρα πριν την είσοδό του στον κύλινδρο. Επιτυγχάνεται με την βοήθεια μηχανικού μέσου και αποσκοπεί στην αύξηση της παραγόμενης ισχύος ενός κινητήρα. Η ποσότητα του εργαζόμενου μέσου που θα εισέλθει σε μια ΜΕΚ φυσικής αναπνοής μπορεί να φτάσει σε συγκεκριμένα επίπεδα που περιορίζονται από την πίεση εισαγωγής, στην προκειμένη περίπτωση την ατμοσφαιρική πίεση, και βέβαια τον όγκο του κυλίνδρου.



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

Με την συμπίεση του αέρα εισαγωγής, και στη συνέχεια με την ψύξη του σε ένα ενδιάμεσο ψυγείο, επιτυγχάνεται αύξηση της πυκνότητάς του, με αποτέλεσμα αύξηση της παροχής μάζας

που εγκλωβίζεται στον κύλινδρο και κατά συνέπεια δυνατότητα έγχυσης περισσότερου καυσίμου και άρα παραγωγή μεγαλύτερου έργου. Επομένως, θα προκύψει μεγαλύτερη μέση πραγματική πίεση (BMEP). Στο σχήμα 1.1 μπορεί να παρατηρηθεί η σύγκριση δύο κινητήρων με τον ίδιο βαθμό συμπίεσης, ενός ιδανικού μικτού κύκλου αέρα φυσικής αναπνοής και ενός υπερπληρωμένου. Είναι εμφανείς οι υψηλότερες πιέσεις που κυριαρχούν στον υπερπληρωμένο καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου αλλά και το μεγαλύτερο έργο (εμβαδόν) του υπερπληρωμένου κινητήρα έναντι του φυσικής αναπνοής [2].

1.2 Downsizing

Η αύξηση στην τιμή των καυσίμων με ταυτόχρονη αυστηροποίηση των κανονισμών στις εκπομπές καυσαερίων οδηγεί τους κατασκευαστές στην αναζήτηση μεθόδων μείωσης της κατανάλωσης χωρίς μείωση της ισχύος. Μία από τις πλέον πρόσφορες λύσεις είναι η χρήση συστήματος υπερπλήρωσης στα επιβατικά οχήματα σε συνδυασμό με κινητήρες μικρότερου όγκου εμβολισμού (downsizing). Με αυτόν τον τρόπο διατηρείται υψηλή παροχή εργαζόμενου μέσου, λειτουργώντας σε υψηλότερη μέση πραγματική πίεση άρα και υψηλότερο βαθμό απόδοσης, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις τριβές και την αδράνεια που θα δημιουργούνταν σε μια μεγαλύτερων διαστάσεων ή και με περισσότερους κυλίνδρους MEK.

1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της υπερπλήρωσης

Τα κύρια πλεονεκτήματα της υπερπλήρωσης για κινητήρα με δεδομένη εξαγόμενη ισχύ είναι [2]:

- Μικρότερος φυσικός όγκος, μικρότερος αριθμός κυλίνδρων
- Αύξηση της μέσης ενδεικνύμενης πίεσης με μεγαλύτερο ρυθμό από ότι η αύξηση των μηχανικών απωλειών άρα τελικά αύξηση του βαθμού απόδοσης λόγω βελτίωσης του μηχανικού βαθμού απόδοσης του κινητήρα
- Χαμηλότερο κόστος λειτουργίας ανά μονάδα εξαγόμενης ισχύος
- Μειωμένος θόρυβος στην εξαγωγή λόγω της ύπαρξης του στροβίλου
- Μικρότερη μάζα

Τα κύρια μειονεκτήματα:

- Αυξημένη θερμική καταπόνηση
- Αυξημένη μηχανική καταπόνηση
- Καθυστέρηση επιτάχυνσης σε συνθήκες υπολειτουργίας του υπερπληρωτή (turbo-lag) και κατ' επέκταση,

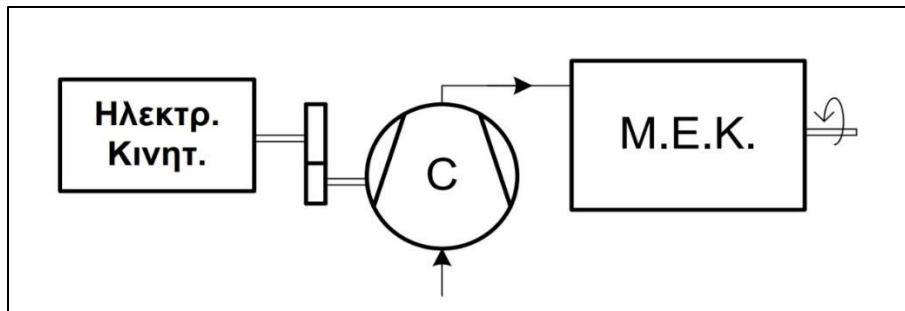
- Αυξημένη εκπομπή (engine-out) ρύπων κατά την μεταβατική λειτουργία σε συνθήκες υπολειτουργίας του υπερπληρωτή

1.4 Μέθοδοι υπερπλήρωσης

Η κατηγοριοποίηση των μεθόδων υπερπλήρωσης γίνεται ανάλογα με [2]:

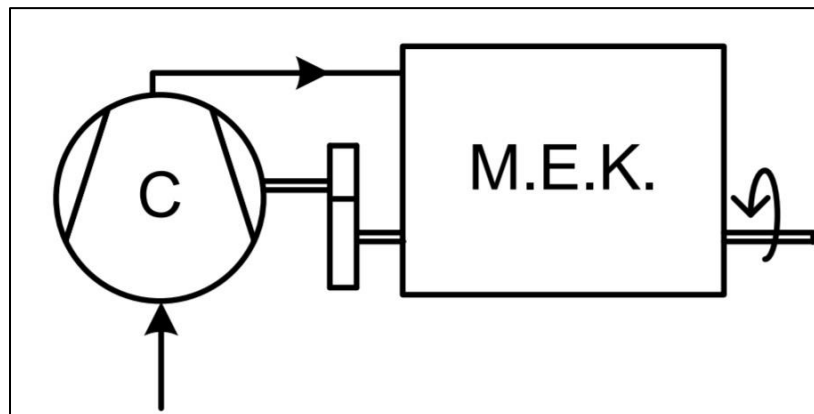
1. Τον τρόπο κίνησης του συμπιεστή υπερπλήρωσης

α) Εξωτερικά κινούμενος από βοηθητικό κινητήρα ή ηλεκτροκινητήρα όπως στο Σχήμα 1.2



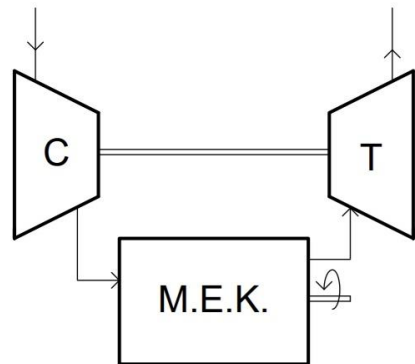
Σχήμα 1.2: Σύστημα υπερπλήρωσης με συμπιεστή κινούμενο από εξωτερικό ηλεκτροκινητήρα [2]

β) Κινούμενος από τη στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα (μηχανική υπερπλήρωση, Σχήμα 1.3). Χρησιμοποιείται κυρίως σε κινητήρες Otto υψηλών επιδόσεων ή και σε διβάθμια συστήματα υπερπλήρωσης για ελαχιστοποίηση της υστέρησης του στροβίλο-υπερπληρωτή.

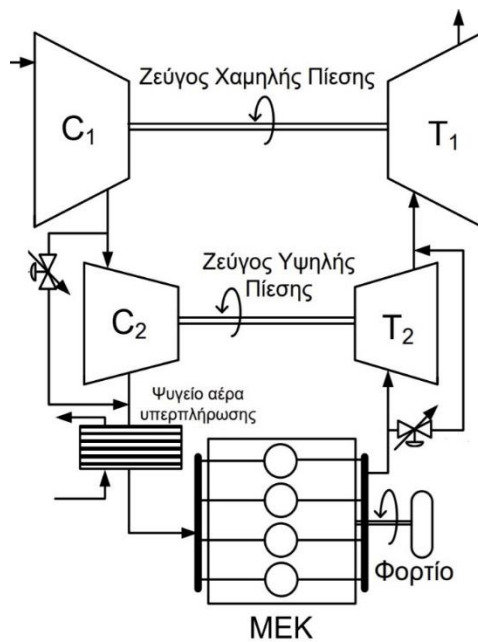


Σχήμα 1.3: Μηχανική υπερπλήρωση [2]

γ) Κινούμενος από στρόβιλο καυσαερίων. Η στροβιλο-υπερπλήρωση μπορεί να είναι μονοβάθμια κατά το Σχήμα 1.4 ή και διβάθμια, χωρίς ενδιάμεσο ψυγείο ψύξης (είτε αέρα είτε νερού) ή με ενδιάμεσο ψυγείο όπως το Σχήμα 1.5.

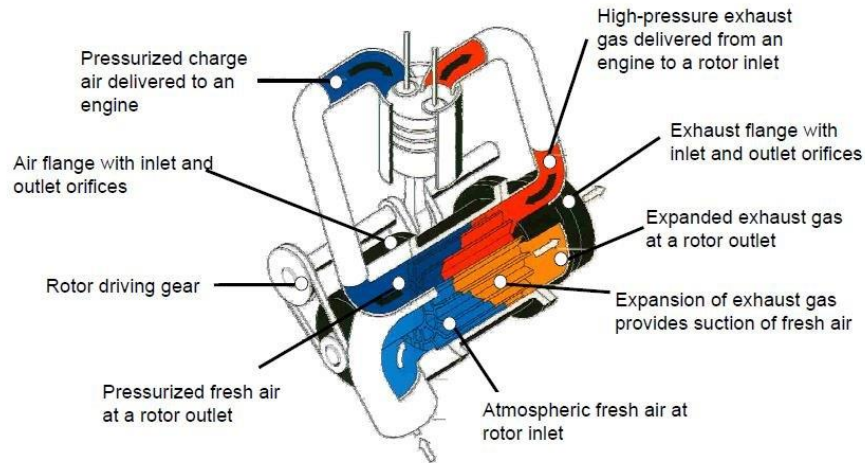


Σχήμα 1.4: Απλή στροβιλο-υπερπλήρωση χωρίς ενδιάμεσο ψυγείο [2]



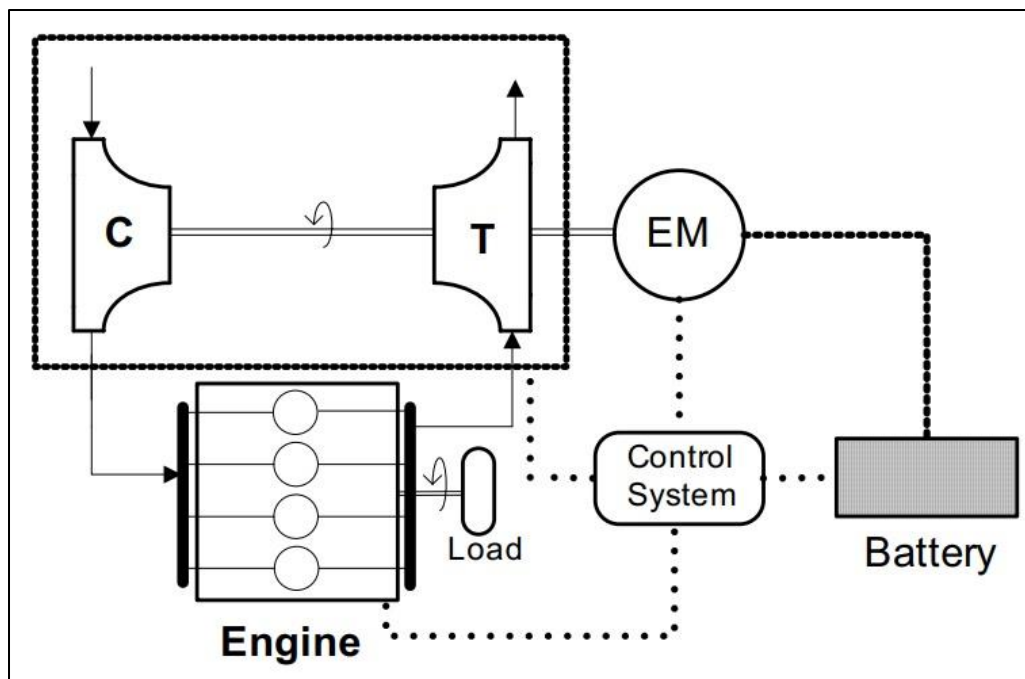
Σχήμα 1.5: Διβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση με ενδιάμεσο ψυγείο αέρα [2]

δ) Συμπύεση μέσω κύματος πίεσης που προέρχεται από την αποτόνωση του καυσαερίου σε δρομέα με πτερόγια όπως μπορεί να φανεί στο Σχήμα 1.6 (σύστημα Compress®).



Σχήμα 1.6: Σύστημα Compress® [24]

ε) Συνδυασμός του (α) και του (γ) με ηλεκτρική υποβοήθηση του ζεύγους στρόβιλο-υπερπλήρωσης με την παρουσία συστήματος ελέγχου (Σχήμα 1.7).

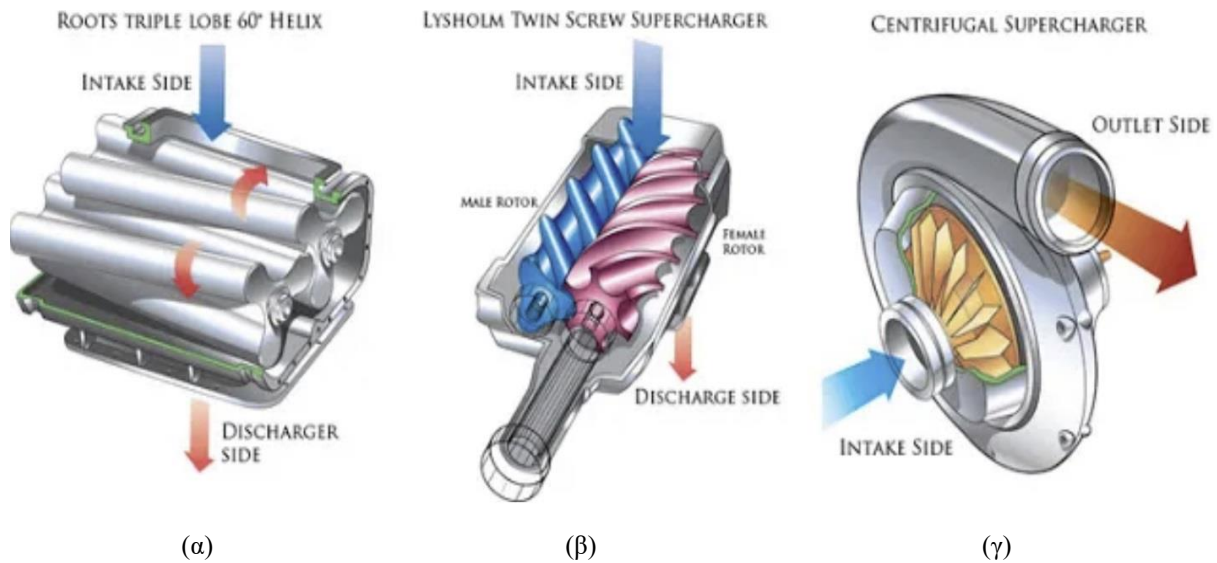


Σχήμα 1.7: Mild hybrid turbocharger [2]

2. Τον σχεδιασμό του συμπιεστή (Σχήμα 1.8)

α) Θετικής εκτόπισης με παλινδρομικό ή περιστρεφόμενο έμβολο, όπως στην περίπτωση του λοβοειδούς ανεμιστήρα (Roots blower) ή του κοχλιοειδούς συμπιεστή (Lysholm)

β) Τύπου δυναμικής ροής - αεροδυναμικός συμπιεστής, κατά βάση σήμερα, ακτινικής ροής.



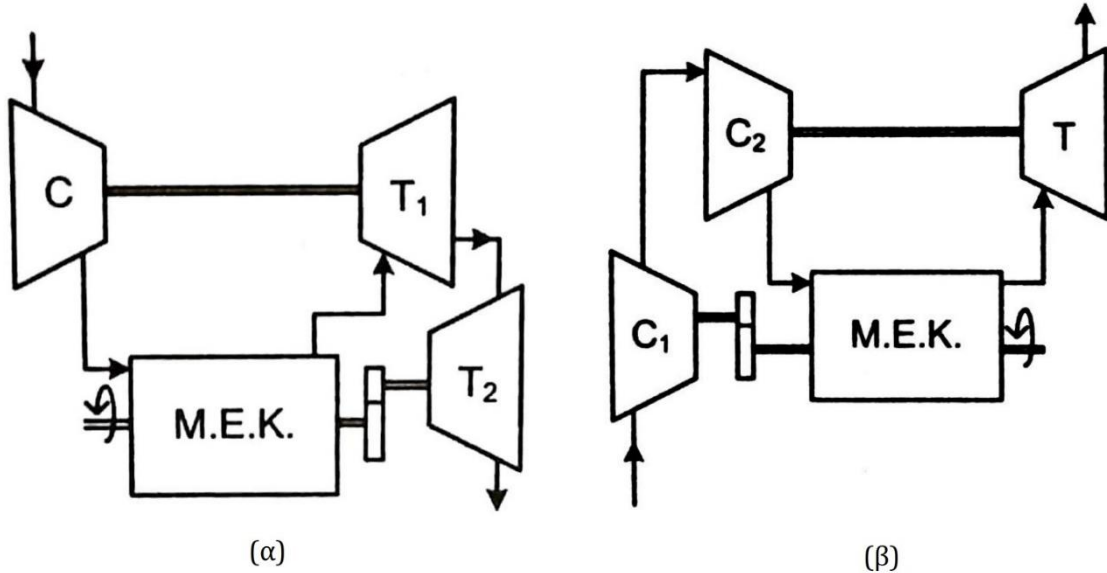
Σχήμα 1.8: α) Roots blower, β) Lynsholm, γ) Ακτινικής ροής [23]

3. Τη σύνδεση της μονάδας υπερπλήρωσης με τον κινητήρα

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

- α) Συμπιεστής συζευγμένος στην στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα (Σχήμα 1.3).
- β) Ζεύγος συμπιεστή-στροβίλου χωρίς μηχανική σύνδεση με τον κινητήρα (Σχήμα 1.4).
- γ) Σύζευξη συμπιεστή-στροβίλου υψηλής πίεσης + στροβίλος ισχύος χαμηλής πίεσης συνδεδεμένος με την στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα (turbo-compound engines)· κύρια χρήση του είναι σε αεροσκάφη (Σχήμα 1.9α).

4. Σύνδεση συμπιεστή-στροβίλου υψηλής πίεσης και συμπιεστή χαμηλής πίεσης συζευγμένου στη στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα σε σειρά με το ζεύγος (συνδυασμένη υπερπλήρωση). Κύρια χρήση σε 2-Χ κινητήρες για απόπλυση σε χαμηλά φορτία αλλά και σε κινητήρες οχημάτων ώστε να βελτιωθεί η μεταβατική τους λειτουργία (Σχήμα 1.9β).



Σχήμα 1.9: α) Σύνθετη στρόβιλο-υπερπλήρωση (turbo-compound) με στρόβιλο ισχύος, β) συνδυασμένη υπερπλήρωση [2]

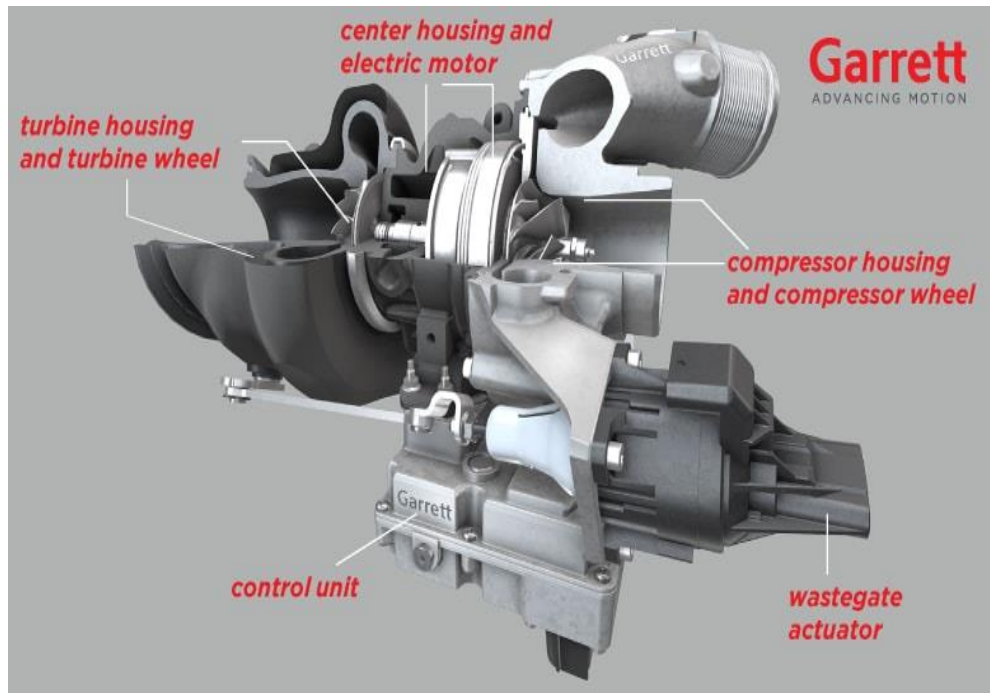
1.5 Μεταβατική λειτουργία

Ως μεταβατική λειτουργία ορίζεται η απότομη μεταβολή των στροφών του κινητήρα ή του φορτίου με το οποίο είναι συνδεδεμένος. Παρά τα πλεονεκτήματα της στρόβιλο-υπερπλήρωσης σε μόνιμη λειτουργία, υπάρχει και ένα βασικό μειονέκτημα, η υστέρηση του υπερπληρωτή. Η χρήση των οχημάτων στους δρόμους στη συντριπτική πλειοψηφία απαιτεί διαρκή μεταβολή των στροφών και φορτίου που οδηγεί στην ανάγκη για καλή συμπεριφορά του κινητήρα σε μεταβατική κατάσταση. Όταν απουσιάζει η μηχανική σύνδεση μεταξύ της στροφαλοφόρου ατράκτου του κινητήρα και της ατράκτου του συμπιεστή, από τη στιγμή που θα ζητήσει ο οδηγός την αύξηση των στροφών πατώντας το πεντάλ επιτάχυνσης («γκαζιού») μέχρι το ζεύγος υπερπλήρωσης να

επιταχυνθεί αρκετά ώστε να αποδώσει την απαιτούμενη πίεση υπερπλήρωσης (boost), περνάει ένα χρονικό διάστημα που ονομάζεται υστέρηση (turbo-lag). Κατά αυτό το χρονικό διάστημα, ο στρόβιλος πρέπει να απορροφήσει αρκετή ενέργεια από τα καυσαέρια ώστε να υπερνικηθεί η αδράνεια του ζεύγους και να φτάσει σε μια αυξημένη ταχύτητα περιστροφής του συμπιεστή που να ικανοποιεί την ζητούμενη παροχή αέρα. Συνεπώς, κατά την υστέρηση, το επιπλέον εγγεόμενο καύσιμο, καίγεται με χαμηλότερη από την επιθυμητή αναλογία αέρα-καυσίμου, με αποτέλεσμα την αυξημένη παραγωγή αιθάλης (σωματιδίων), NOx και CO. Το φαινόμενο είναι εντονότερο όσο χαμηλότερες είναι οι στροφές και το φορτίο του κινητήρα, καθώς το ζεύγος συμπιεστή-στροβίλου λειτουργεί αποδοτικότερα σε υψηλές στροφές.

1.6 Ηλεκτρική υποβοήθηση

Στο ζήτημα της μεταβατικής κατάστασης, μία από τις λύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν είναι η χρήση βοηθητικού μέσου για την επιτάχυνση του συμπιεστή. Η μηχανική σύνδεση ενός δεύτερου συμπιεστή με την στροφαλοφόρο (Σχήμα 1.9β) για χρήση στις χαμηλές στροφές, μπορεί να αντιμετωπίσει μερικώς το πρόβλημα. Η μηχανική σύνδεση αυξάνει την αδράνεια του κινητήρα, ενώ απαιτείται ενέργεια για την κίνηση του συμπιεστή θετικής εκτόπισης, η οποία αφαιρείται από την παραγόμενη από τον κινητήρα ενέργεια. Από την άλλη πλευρά, η χρήση ενός ηλεκτροκινητήρα αντί δεύτερου συμπιεστή έχει περισσότερα οφέλη. Το βασικό πλεονέκτημα ενός ηλεκτροκινητήρα είναι η υψηλή ροπή στις χαμηλές στροφές. Η ενέργεια που αντλεί δεν προέρχεται άμεσα από την μηχανή και κατά συνέπεια δεν επιβαρύνει την επιτάχυνση. Σε συνδυασμό με την δυνατότητα άμεσης σύμπλεξης-αποσύμπλεξης για την χρήση του μόνο τις στιγμές που απαιτείται, σύμφωνα με το σύστημα ελέγχου του κατασκευαστή, την καθιστά ως μια επιλογή που είναι πιθανό να κυριαρχήσει στους μελλοντικούς υπερπληρωμένους κινητήρες. Η κατασκευαστική εταιρία Garret έχει παρουσιάσει μια εικόνα για την πραγματική διάταξη που μπορεί να έχει ένα τέτοιο σύστημα και μπορεί να φανεί στο Σχήμα 1.10. Στην προκειμένη περίπτωση ο ηλεκτροκινητήρας βρίσκεται ανάμεσα στον συμπιεστή και τον στρόβιλο, περιμετρικά του άξονα τους. Ενώ ακριβώς κάτω από το ζεύγος υπερπλήρωσης βρίσκεται η μονάδα ελέγχου της παρούσας διάταξης. Παράλληλα δεν λείπουν και τα υπόλοιπα στοιχεία ενός συμβατικού ζεύγους στροβίλο-υπερπλήρωσης όπως η βαλβίδα εκτόνωσης με τον επενεργητή της και φυσικά ο ακτινικός συμπιεστής και στρόβιλος.



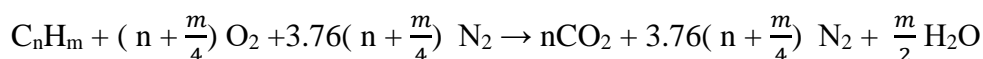
Σχήμα 1.10: Ηλεκτρικά υποβοηθούμενο (48V) ζεύγος συμπιεστή-στροβίλου της Garrett [25]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Εκπομπές Ρύπων και Νομοθεσία

2.1 Μηχανισμός σχηματισμού ρύπων σε κινητήρα Otto άμεσου ψεκασμού

Οι ρυπογόνες ουσίες σχηματίζονται λόγω της χημικής διάστασης των προϊόντων της καύσης παρουσία πολύ υψηλών θερμοκρασιών στο εσωτερικό του κυλίνδρου που μπορεί να φτάσουν και της 3000 K. Σε μια τέλεια στοιχειομετρική καύση τα προϊόντα της αντίδρασης ακολουθούν το παρακάτω γενικό σχήμα [3],

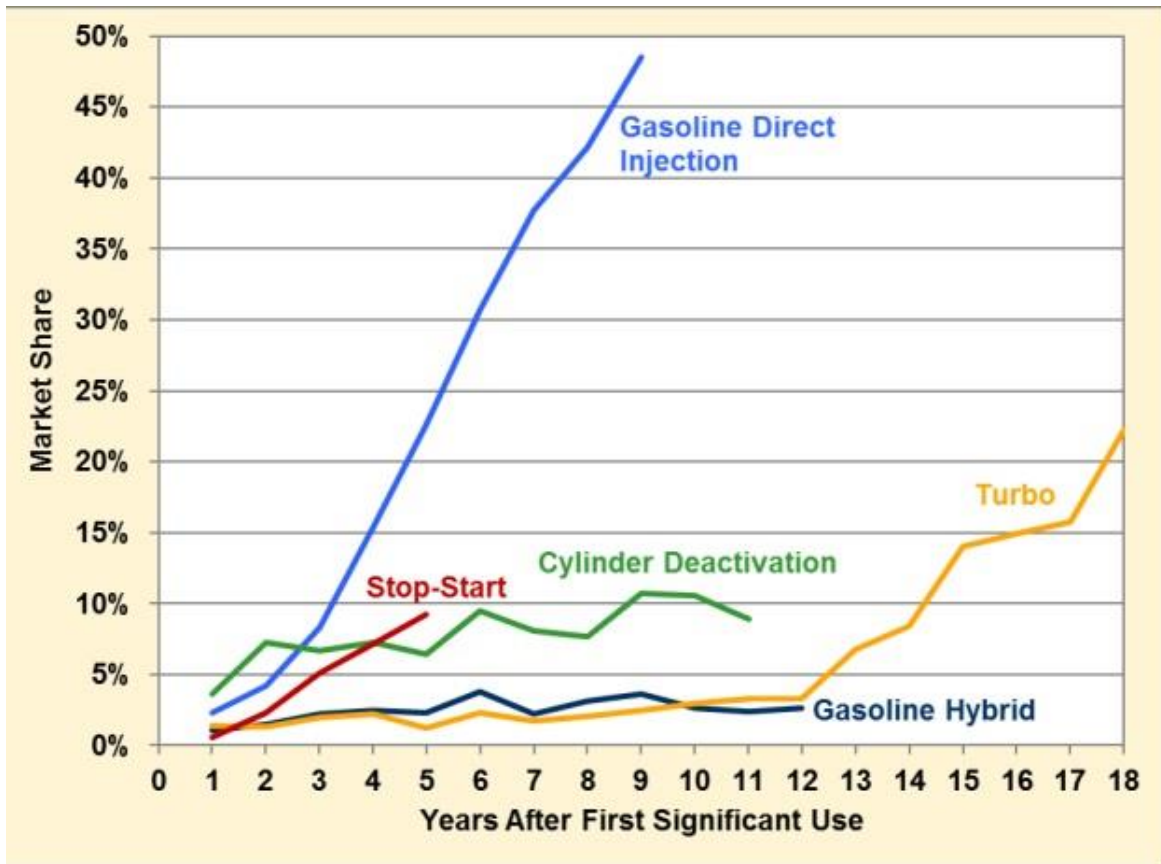


όπου στην πραγματικότητα τα προϊόντα δίστανται και η ποσότητα του οξυγόνου είναι μεγαλύτερη της στοιχειομετρικής. Αποτέλεσμα αυτού είναι η εμφάνιση των ακόλουθων ενώσεων στα προϊόντα,



καθώς και αρκετών άλλων της αλδεϋδες, κετόνες, βενζόλιο, όζον.

Οι βασικές ρυπογόνες ουσίες που της απασχολούσαν τα προηγούμενα χρόνια της κλασικούς κινητήρες Otto ήταν τα NO_x, CO και HC. Από τη θέσπιση των προδιαγραφών Euro 5 το 2009, λόγω της διαρκούς αυξημένης χρήσης κινητήρων Otto άμεσου ψεκασμού, τέθηκε υπό περιορισμό και η εκπομπή σωματιδίων (αιθάλης) που μέχρι πρότινος ίσχυε μόνο για κινητήρες Diesel. Μάλιστα στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η εξέλιξη χρήσης οχημάτων με τις νέες τεχνολογίες στις Η.Π.Α. από την πρώτη χρονιά κύριας χρήσης της έως το 2016. Για την τεχνολογία άμεσου ψεκασμού ως χρονολογία κύριας χρήσης 0, θεωρείται το 2007 [6]. Σε διάστημα εννέα χρόνων, η τεχνολογία άμεσου ψεκασμού στους κινητήρες βενζίνης, εφαρμόστηκε ήδη στο 49% των οχημάτων στις Η.Π.Α.



Σχήμα 2.1: Εφαρμογή νέων τεχνολογιών στα οχήματα της αγοράς [6]

Πίνακας 2.1: Ελεγχόμενοι ρύποι που ισχύουν στην Ευρωπαϊκή Ένωση [26]

Euro standard	Introduction dates		Petrol		Diesel		Petrol & Diesel
	New approvals	All new registrations	NOx (g/km)	Mass of particles (g/km)	NOx (g/km)	Mass of particles (g/km)	Number of ultra-fine particles per km
Euro 1	1 July 1992	31 December 1992	0.97 ⁽¹⁾	-	0.97 ⁽¹⁾	0.14	-
Euro 2	1 January 1996	1 January 1997	0.5 ⁽¹⁾	-	0.9 ⁽²⁾	0.1	-
Euro 3	1 January 2000	1 January 2001	0.15	-	0.5	0.05	-
Euro 4	1 January 2005	1 January 2006	0.08	-	0.25	0.025	-
Euro 5	1 September 2009	1 January 2011	0.06	0.0045 ⁽²⁾	0.18	0.0045	6 × 10 ¹¹ (3)
Euro 6	1 September 2014	1 September 2015	0.06	0.0045 ⁽²⁾	0.08	0.0045	6 × 10 ¹¹ (4) (5)

(1) Expressed as HC+NOx.

(2) Applicable to direct injection petrol engines.

(3) Applicable to diesel engines only.

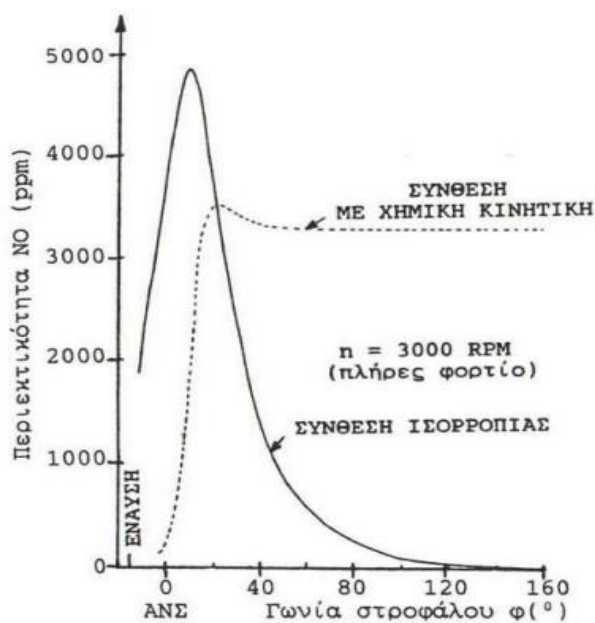
(4) Limit of 6 × 10¹¹ in the case of direct injection petrol engines.

(5) Common limit of 6 × 10¹¹ for direct injection petrol engines and diesel engines from September 2017/September 2018.

2.1.1 Σχηματισμός NO_x

2.1.1.1 Γενικά

Στο θάλαμο καύσης εμβολοφόρων κινητήρων παράγονται κατά βάση τα παρακάτω οξειδία του αζώτου: το μονοξείδιο του αζώτου NO και το διοξείδιο του αζώτου NO₂, αναφερόμενα ως NO_x. Από τα NO_x, το 98% αποτελείται από NO και μόλις 1-2% από NO₂ το οποίο έχει σημαντικότερο ποσοστό στα χαμηλά φορτία. Το NO σχηματίζεται σε περιοχές υψηλής θερμοκρασίας στην καμένη ζώνη με την προϋπόθεση ότι υπάρχει περίσσεια οξυγόνου. Παράλληλα, ενώ σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία η χημική ισορροπία υποδεικνύει της ανάλογες τιμές συγκέντρωσης NO, κατά την διάρκεια της αποτόνωσης οι χημικές αντιδράσεις σταματάνε («παγώνουν»), με αποτέλεσμα να διατηρείται αρκετά υψηλότερη συγκέντρωση NO από την αντίστοιχη στην χημική ισορροπία (Σχήμα 2.2). Συνεπώς, ο σχηματισμός του NO υπολογίζεται μέσω της χημικής κινητικής και όχι της χημικής ισορροπίας. Το εκπεμπόμενο από τον κινητήρα NO εξακολουθεί να οξειδώνεται στην ατμόσφαιρα της NO₂ λόγω της σημαντικής περίσσειας O₂ και της ανάμειξής του με ψυχρότερο ρευστό, κάτι το οποίο εξηγεί και την υψηλότερη περιεκτικότητα σε NO₂ στα χαμηλά φορτία αφού υπάρχει περίσσεια ψυχρού αέρα και στρωματοποίηση της ανάμειξης στο εσωτερικό του θαλάμου.

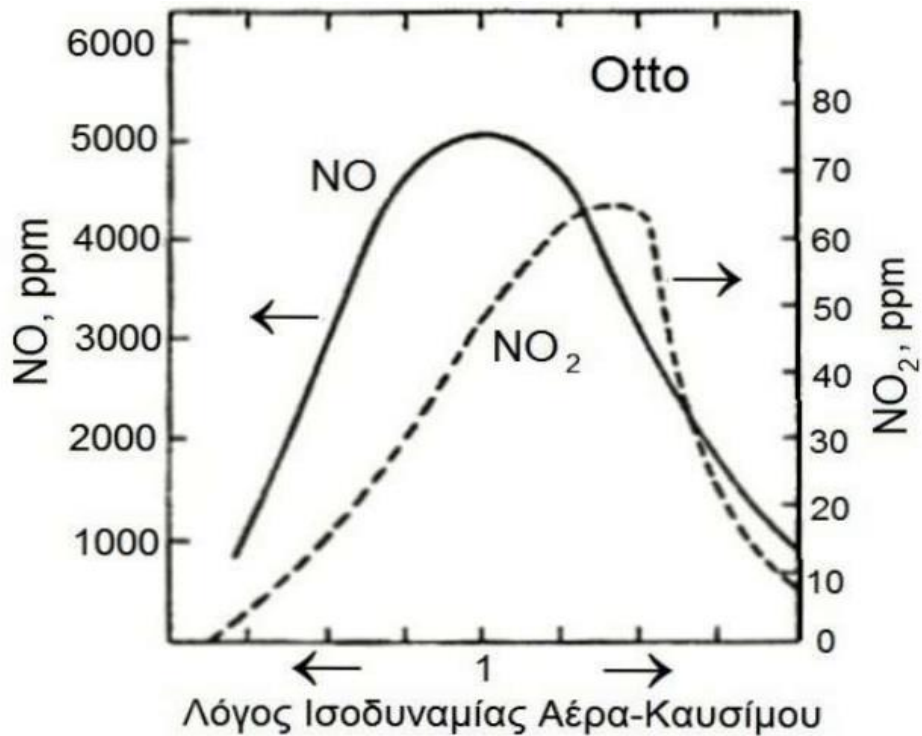


Σχήμα 2.2: Εξέλιξης της συγκέντρωσης NO_x κατά τη διάρκεια της καύσης και της αποτόνωσης [3]

2.1.1.2 Επίδραση παραμέτρων λειτουργίας στην τιμή του NO

A) Επίδραση του Λόγου Ισοδυναμίας Καυσίμου (λ_a)

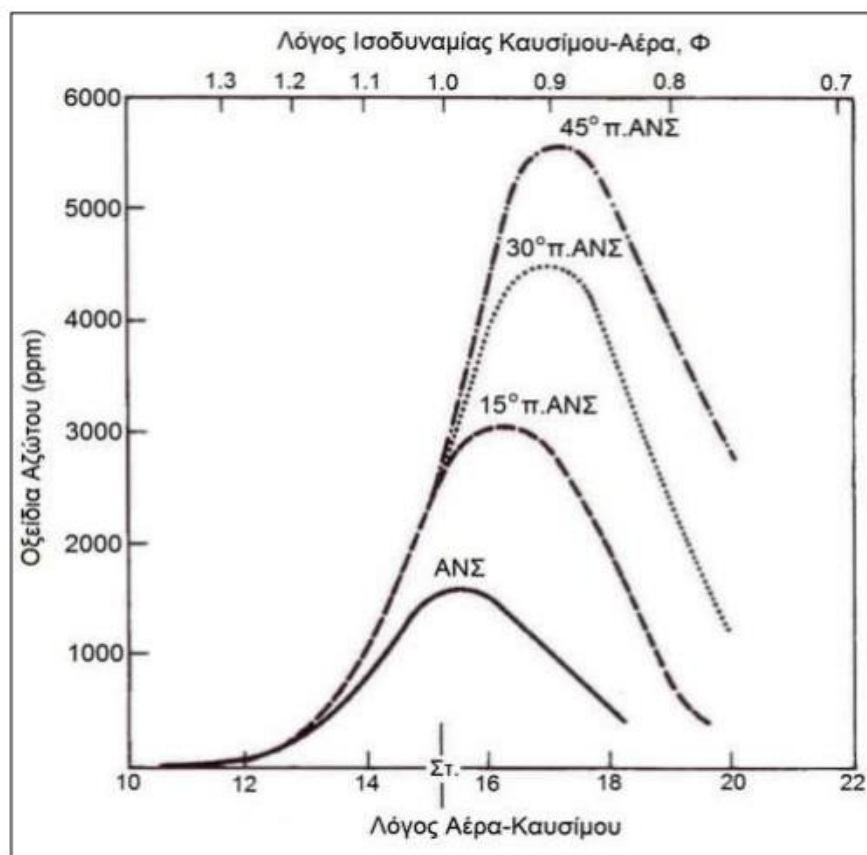
Παρατηρείται στο Σχήμα 2.3 ότι η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης NO εντοπίζεται για $\lambda_a = 1.1$. Σε μεγαλύτερο λόγο αέρα-καυσίμου, η περίσσεια αέρα μειώνει την θερμοκρασία στον κύλινδρο ενώ η έλλειψη του ($\lambda_a < 1$) δεν είναι ευνοϊκή στην οξείδωση του N_2 . Στην περίπτωση ομογενούς μείγματος εντός του κυλίνδρου, οι περιοχές με υψηλότερη θερμοκρασία όπως κοντά στον σπινθηριστή, ευνοούν επίσης την παραγωγή NO.



Σχήμα 2.3: Επίδραση του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου στην τιμή του NO [5]

B) Επίδραση της Προπορείας Έναυσης

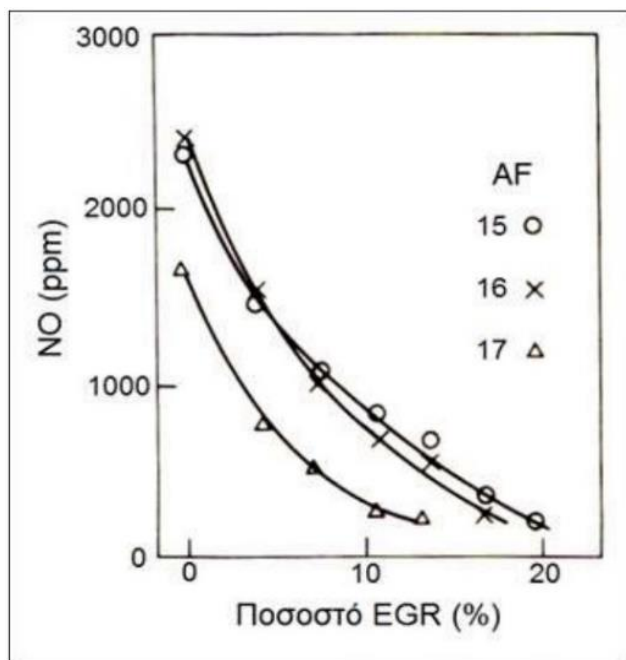
Η προπορεία έναυσης έχει σημαντικό ρόλο στην παραγόμενη ποσότητα NO. Η αύξηση της προπορείας οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης στον κύλινδρο, και κατά συνέπεια στην παραγωγή μεγαλύτερων συγκεντρώσεων NO. Στο Σχήμα 2.4 μπορεί να φανεί η μεταβολή των NO_x συναρτήσει της προπορείας και του λόγου αέρα-καυσίμου. Όσο πλησιάζει η έναυση στο ANΣ, μειώνεται η παραγόμενη ισχύς του κινητήρα, επομένως απαιτείται να βρεθεί μια μέση λύση που να ικανοποιεί τις δύο αυτές τιμές



Σχήμα 2.4: Παραγωγή NO_x συναρτήσει προπορείας έναυσης και λόγου αέρα-καυσίμου [5]

Γ) Επίδραση του κλάσματος παραμένουτος καυσαερίου

Το παραμένον καυσαέριο στον θάλαμο καύσης αυξάνει την θερμοχωρητικότητα του μείγματος στον κύλινδρο, με αποτέλεσμα την ελάττωση της πίεσης και της θερμοκρασίας. Ως ακόλουθο είναι η μείωση των παραγόμενων NO_x. Με αυτή την παρατήρηση χρησιμοποιείται από το 2000 (Euro 3) ένα σύστημα ανακυκλοφορίας καυσαερίου γνωστό ως EGR (Exhaust Gas Recirculation). Ανάλογα λοιπόν με το πόσο έντονα γίνεται η χρήση του, ακολουθεί και η ανάλογη μείωση στην συγκέντρωση των NO_x. Πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 2.5 φαίνεται η επίδραση του στη συγκέντρωση του NO. Στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα μοντελοποιηθεί ένα τέτοιο σύστημα.



Σχήμα 2.5: Μεταβολή παραγόμενων NOx συναρτήσει του ποσοστού EGR [5]

2.1.2 Σχηματισμός του μονοξειδίου του άνθρακα CO

Ο σχηματισμός του CO είναι αποτέλεσμα της έλλειψης οξυγόνου στον κύλινδρο αφού δεν υπάρχει αρκετή διαθέσιμη ποσότητα για να ολοκληρωθεί η στοιχειομετρική καύση του μείγματος. Σημαντικό ρόλο παίζει λοιπόν ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου λ_a . Όταν το μείγμα τείνει προς την πλούσια πλευρά, τότε υπάρχει αύξηση παραγόμενου μονοξειδίου του άνθρακα. Αυτό συμβαίνει για τον λόγο ότι ακόμα και για $\lambda_a = 1$, η ανάμειξη του καυσίμου με τον αέρα στο εσωτερικό του κυλίνδρου δεν είναι τέλεια και έτσι υπάρχουν περιοχές με χαμηλότερη αναλογία αέρα-καυσίμου από την στοιχειομετρική, που οδηγούν σε τοπικά πλούσιο μείγμα άρα αδυναμία πραγματοποίησης στοιχειομετρικής καύσης και άρα αυξημένη εκπομπή CO, το οποίο είναι ιδιαίτερα τοξικό και αποτελεί έναν από τους σοβαρότερους ρύπους. Να σημειωθεί ότι το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο στους κινητήρες Otto καθώς λειτουργούν με τιμές λ_a πλησιέστερες στην μονάδα σε σύγκριση με τους Diesel κινητήρες.

Εντός του θαλάμου καύσης, για τιμές θερμοκρασίας μεγαλύτερες των 1800 K, οι συγκεντρώσεις του CO πλησιάζουν εκείνες της χημικής ισορροπίας ανεξαρτήτως του λ_a . Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, ο σχηματισμός του CO αρχίζει να ελέγχεται από την χημική κινητική και η συγκέντρωση του «παγώνει» πριν τελειώσει η φάση της αποτόνωσης.

2.1.3 Σχηματισμός των άκαυστων υδρογονανθράκων HC

Η παραγωγή άκαυστων υδρογονανθράκων είναι συνέπεια της ατελούς καύσης. Στους κινητήρες Otto εντοπίζονται κατά κύριο λόγο παραφίνες, ολεφίνες και αρωματικοί υδρογονάνθρακες. Η ποσότητα των εκπεμπόμενων HC εξαρτάται από το λ_a του μείγματος. Ένα πολύ πλούσιο μείγμα θα οδηγήσει σε ατελή καύση αλλά και η λειτουργία με ένα πολύ φτωχό θα οδηγήσει σε σβήσιμο της φλόγας, αφήνοντας άκαυστα υπολείμματα στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης, ή ακόμα και αστοχία έναυσης για ορισμένους κύκλους λειτουργίας.

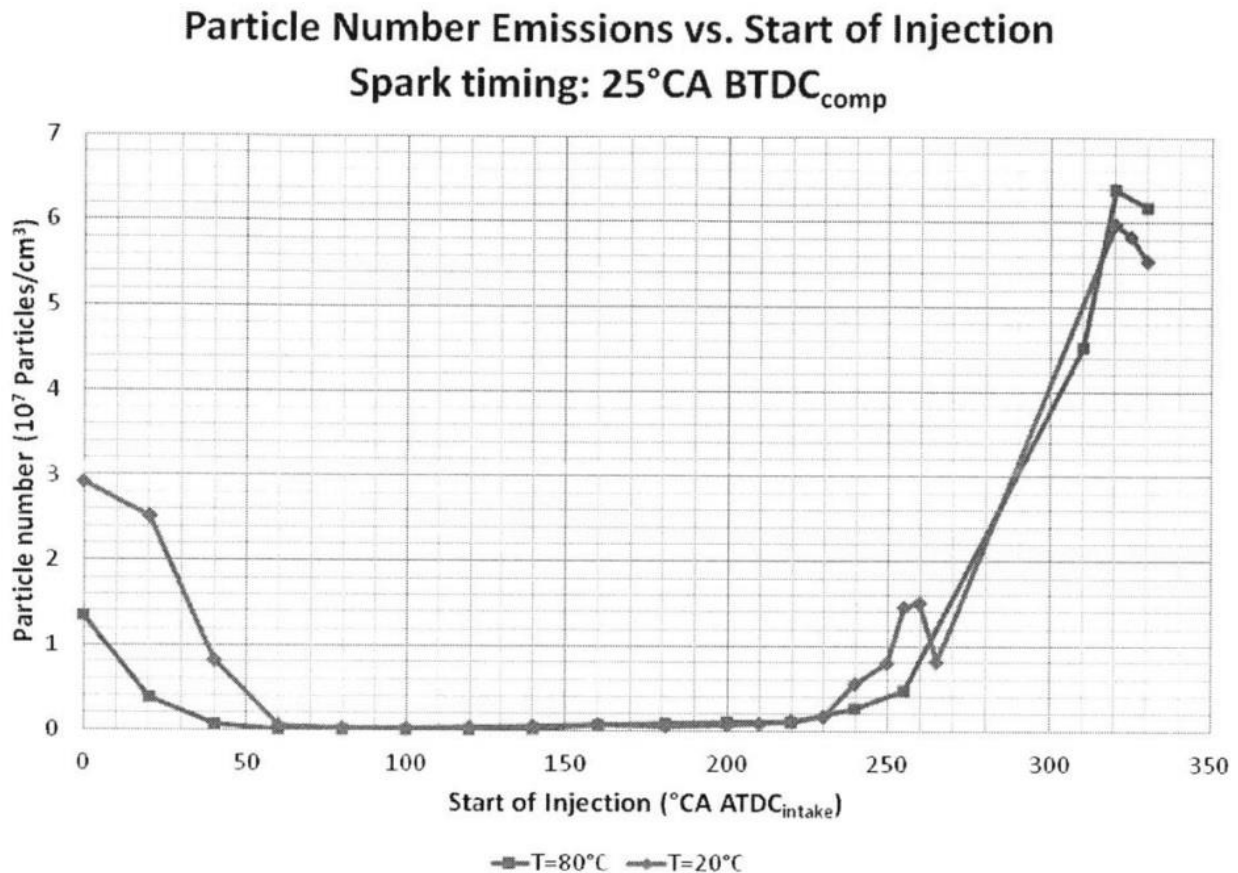
Οι κυριότεροι μηχανισμοί σχηματισμού των άκαυστων HC σε κινητήρες σπινθηρισμού είναι οι εξής:

- Σβέση φλόγας από πρόσπτωση στα χαμηλότερης θερμοκρασίας τοιχώματα του κυλίνδρου. Μπορεί να συμβεί και πριν την πρόσπτωση, προσεγγίζοντας την ψυχρή περιοχή πλησίον των τοιχωμάτων.
- Αδυναμία εισόδου της φλόγας σε διάκενα όπως τα ελατήρια ή ιδιαίτερες γεωμετρίες του κυλίνδρου, με αποτέλεσμα το καύσιμο στις περιοχές αυτές να μην καίγεται.
- Απορρόφηση καυσίμου από το λιπαντικό το οποίο στη συνέχεια αποβάλλεται.
- Ατελής καύση λόγω ανομοιομορφίας του μείγματος επειδή σχηματίζονται τοπικά πολύ πλούσιες και πολύ φτωχές περιοχές, λόγω κακού χρονισμού έναυσης ή μεγάλου ποσοστού παραμένοντος καυσαερίου.
- Παρουσία επικαθήσεων στα τοιχώματα του κυλίνδρου, οι οποίες απορροφούν το καύσιμο και στη συνέχεια αποβάλλονται.

2.1.4 Σχηματισμός αιθάλης

Η εκπομπή σωματιδίων, τα οποία αποτελούνται κυρίως από αιθάλη, ήταν ένας ρύπος που απασχολούσε μόνον τους κινητήρες Diesel καθώς έχει σταματήσει η χρήση της μολυβδωμένης βενζίνης στην Ευρωπαϊκή Ένωση από το 1992. Με την ανάπτυξη των κινητήρων άμεσου ψεκασμού (GDI), η παραγωγή σωματιδίων άρχισε να ελέγχεται και στους κινητήρες Otto ξεκινώντας από την θέσπιση των προδιαγραφών Euro 5. Στους κινητήρες φυσικής αναπνοής, η έγχυση του καυσίμου γίνεται στην εισαγωγή του κυλίνδρου, με τα σταγονίδια του καυσίμου να προσκρούουν πάνω στην θερμή βαλβίδα εισαγωγής και να ατμοποιούνται. Περαιτέρω ατμοποίηση ακολουθούσε κατά το άνοιγμα της βαλβίδας, κατά την επαφή του μείγματος με τα ζεστά καυσαέρια εντός του κυλίνδρου. Στους κινητήρες άμεσου ψεκασμού, τα σταγονίδια του καυσίμου κατά την έγχυσή του δεν αναμειγνύονται και δεν ατμοποιούνται πλήρως. Επομένως, η αυξημένη παραγωγή αιθάλης οφείλεται στην ύπαρξη υγρών περιοχών («κλιμών» καυσίμου κατά την έναυση του μείγματος εντός του κυλίνδρου. Στις περιοχές αυτές δημιουργείται φλόγα διάχυσης με αποτέλεσμα την αυξημένη δημιουργία αιθάλης. Στην ατελή καύση των υγρών περιοχών αυτών συμβάλλει και η θερμοκρασία των τοιχωμάτων του κινητήρα. Για αυτό και παρατηρείται αυξημένη εκπομπή αιθάλης κατά την διάρκεια ψυχρής εκκίνησης [8]. Στο Σχήμα

2.6 απεικονίζεται η παραγωγή σωματιδίων συναρτήσει του χρονισμού έγχυσης και της θερμοκρασίας του ψυκτικού υγρού για σταθερό χρονισμό έναυσης. Φαίνεται λοιπόν ότι αν πραγματοποιηθεί ο ψεκασμός του καυσίμου πολύ νωρίς, και αυτό προσκρούει στα τοιχώματα του κυλίνδρου, τότε υπάρχει σημαντική αύξηση στην παραγωγή σωματιδίων στον κύλινδρο του οποίου τα τοιχώματα διαρρέονται με το ψυχρό ψυκτικό υγρό (που αντιπροσωπεύει την ψυχρή εκκίνηση και λειτουργία), σε σύγκριση με εκείνον όπου τα τοιχώματα διαρρέονται με το θερμότερο ψυκτικό υγρό.



Σχήμα 2.6: Η επίδραση στον σχηματισμό σωματιδίων του χρονισμού έγχυσης καυσίμου και της θερμοκρασίας του ψυκτικού υγρού συναρτήσει σταθερού χρονισμού ανάφλεξης [8]

2.2 Νομοθεσία και στόχοι της Ευρωπαϊκής Ένωσης

2.2.1 Εκπομπές ρύπων

Η Ευρωπαϊκή νομοθεσία η αναφερόμενη στις εκπομπές καυσαερίων είναι διαφορετική για τα οχήματα ελαφρού από τα βαρέος τύπου. Στα ελαφρού τύπου, που θα μας απασχολήσουν, στον Πίνακα 2.2 κατατάσσονται οχήματα (κατηγορία M) που προορίζονται για την μεταφορά επιβατών και δεν υπερβαίνουν τα εννέα καθίσματα καθώς και δεν ξεπερνούν το συνολικό βάρος των 5000 kg, καθώς και τα οχήματα που προορίζονται για την μεταφορά αγαθών και δεν ξεπερνούν το βάρος

των 1305 kg (κατηγορία N1, κλάση 1). Οι προδιαγραφές Euro αφορούν επιβλαβείς ρύπους και ανανεώνονται κάθε 4 με 6 χρόνια με την έλευση του Euro 7 όμως να αναμένεται το 2025.

Πίνακας 2.2: Περιορισμοί Euro κινητήρων βενζίνης επιβαλλόμενη ανάφλεξης

<i>Επιβαλλόμενη ανάφλεξης (βενζίνη)</i>							
Stage	Date	CO (g/km)	HC (g/km)	HC+NO_x (g/km)	NO_x (g/km)	PM	PN #/km
Euro 1	Jul 1992	2.72	-	0.97	-	-	-
Euro 2	Jan 1996	2.2	-	0.5	-	-	-
Euro 3	Jan 2000	2.30	0.20	-	0.15	-	-
Euro 4	Jan 2005	1.0	0.10	-	0.08	-	-
Euro 5	Sep 2009	1.0	0.10	-	0.06	0.005	-
Euro 6	Sep 2014	1.0	0.10	-	0.06	0.005	6.0x10 ¹¹

Οι περιορισμοί για σωματίδια (PM – particulate mass) ισχύουν μόνο για τους κινητήρες άμεσου ψεκασμού, όπως και το πλήθος σωματιδίων (PN – particle number), το οποίο στην τιμή 6.0x10¹¹/km είναι κοινό πλέον για κινητήρες βενζίνης (GDI) και Diesel.

Σε αντίθεση με το πλαίσιο περιορισμών Euro που εφαρμόζεται σε κάθε όχημα ξεχωριστά, για τον έλεγχο του διοξειδίου του άνθρακα επιβάλλεται περιορισμός στην μέση εκπομπή CO₂ του στόλου (fleet average) κάθε κατασκευαστή που ταξινομείται. Από την 1^η Ιανουαρίου του 2020, η μέση εκπομπή CO₂ για τα επιβατικά οχήματα είναι στα 95 g/km όπου μπορούν να εξαιρεθούν οι εταιρείες με παραγωγή λιγότερη των 10.000 οχημάτων. Για το 2030 έχει τεθεί στόχος για περαιτέρω μείωση κατά 37.5%, δηλαδή 59 g/km, με απώτερο σκοπό την εκμηδένιση των εκπομπών CO₂ έως το 2035. Επόμενο είναι οι κατασκευαστές να στραφούν σε λύσεις μείωσης των ρύπων με την χρήση υβριδικών συστημάτων ή ακόμα και πλήρως ηλεκτρικών οχημάτων.

2.2.2 Διάρκεια ζωής

Οι επιτρεπόμενες εκπομπές που έχουν θεσμοθετηθεί και αναφέρθηκαν παραπάνω, πρέπει να παραμείνουν σε αυτά τα νούμερα όχι μόνον κατά τη διάρκεια των μετρήσεων για την πιστοποίηση, αλλά και για τουλάχιστον ένα προκαθορισμένο χρονικό ή χιλιομετρικό διάστημα (ότι επέλθει πρώτο). Συνεπώς, ο κατασκευαστής οφείλει να εξασφαλίσει την εύρυθμη λειτουργία των αντιρρυπαντικών συστημάτων για τις εκάστοτε διάρκειες ζωής που φαίνονται στον Πίνακα 2.5. Στην πράξη χρησιμοποιούνται συντελεστές φθοράς με βάση την αναμενόμενη φθορά που υφίστανται με την πάροδο του χρόνου και τη χρήση οι αντιρρυπαντικές συσκευές. Για τα πρότυπα Euro 1, 2, 3 και 4 με κινητήρες Otto, οι συντελεστές φθοράς ήταν όπως στον Πίνακα 2.3. Για κινητήρες Otto στα πρότυπα Euro 5 και 6, ισχύουν οι συντελεστές του Πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.3: Συντελεστές φθοράς αντιρρυπαντικών συστημάτων για τα Euro 1, 2, 3, και 4 [4]

<i>Πρότυπα Euro 1, 2, 3, και 4</i>			
<i>Ρύποι</i>	CO	HC	NO _x
<i>Συντελεστές</i>	1.2	1.2	1.2

Πίνακας 2.4: Συντελεστές φθοράς αντιρρυπαντικών συστημάτων για τα Euro 5 και 6 [4]

<i>Πρότυπα Euro 5 και 6</i>					
<i>Ρύποι</i>	CO	HC	NO _x	PM	PN
<i>Συντελεστές</i>	1.5	1.3	1.6	1.0	1.0

Πίνακας 2.5: Διάρκεια ζωής αντιρρυπαντικών συστημάτων [4]

<i>Διάρκεια Ζωής</i>	
<i>Euro 1</i>	80,000 km ή 5 έτη
<i>Euro 2</i>	80,000 km ή 5 έτη
<i>Euro 3</i>	80,000 km ή 5 έτη
<i>Euro 4</i>	100,000 km ή 5 έτη
<i>Euro 5</i>	160,000 km ή 5 έτη
<i>Euro 6</i>	160,000 km ή 5 έτη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Μεταβατικοί Κύκλοι Πόλης [4]

3.1 Εισαγωγή

Η ανάγκη για την πιστοποίηση των εκπομπών των οχημάτων οδήγησε στην θέσπιση μεταβατικών Κύκλων Πόλης. Οι πραγματικές συνθήκες οδήγησης χαρακτηρίζονται από διαρκώς μεταβαλλόμενη ταχύτητα και φορτίο. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό λοιπόν να οριστούν μέθοδοι πιστοποίησης που να αναπαριστούν όσο καλύτερα γίνεται τις συνθήκες αυτές αφού η λειτουργία των εμβολοφόρων κινητήρων οχημάτων διαφέρει σε μόνιμη και μεταβατική κατάσταση. Κατά την επιτάχυνση των κινητήρων Otto σημειώνεται υπερακόντιση στην εκπομπή (engine out) αέριων και στερεών ρύπων, με ακραίες τιμές στις απότομες αυξήσεις φορτίου (παρόμοια ισχύουν και για τους κινητήρες Diesel). Σημαντικό είναι δε και το αντίκτυπο στις εκπομπές από την ψυχρή εκκίνηση λόγω του εμπλουτισμού του μείγματος που συμβαίνει στους κινητήρες Otto, αυξάνοντας έτσι επιπρόσθετα τις εκπομπές CO και HC. Οι μεταβατικοί Κύκλοι χαρακτηρίζονται από μεγάλη διάρκεια που κυμαίνεται από 10 έως 30 λεπτά.

Οι μεταβατικοί κύκλοι, ή αλλιώς Κύκλοι Πόλης (driving cycles) αποτελούνται από μια ακολουθία σημείων, όπου το καθένα προσδιορίζει μια διαφορετική ταχύτητα, για την περίπτωση δοκιμής οχήματός, ή καθορισμένο συνδυασμό στροφών και ροπής, για την περίπτωση δοκιμής μόνο του κινητήρα. Τα σημεία αυτά έχουν μεταξύ τους χρονική απόσταση ενός δευτερολέπτου, και η μεταβολή του φορτίου ανάμεσα σε αυτά τα βήματα θεωρείται γραμμική. Οι δύο μεγάλες κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι μεταβατικοί Κύκλοι είναι:

- Τα επιβατικά αυτοκίνητα και τα ελαφρού τύπου φορτηγά υποβάλλονται σε Κύκλο δοκιμής με βάση την προκαθορισμένη ταχύτητα του οχήματος σε συγκεκριμένα χρονικά σημεία.
- Τα βαρέος τύπου οχήματα, λόγω πληθώρας συνδυασμών κινητήρα και αμαξώματος καθώς και λόγω μεγέθους και βάρους, υποβάλλονται σε Κύκλο δοκιμής μόνο του κινητήρα, ο οποίος και συνδέεται σε πέδη δοκιμής κινητήρων. Η δοκιμή πραγματοποιείται σε μια καθορισμένη αλληλουχία ταχυτήτων περιστροφής και φορτίου σε σχέση με τον χρόνο.

Προκειμένου οι Κύκλοι Πόλης να προσομοιώνουν κατά το δυνατόν τις πραγματικές συνθήκες οδήγησης ελέγχοντας ολόκληρο το εύρος λειτουργίας του κινητήρα και όχι μόνο αντιπροσωπευτικά σημεία, τα οποία μπορούν εύκολα κιόλας να παραποιηθούν για χάρη ευνοϊκών αποτελεσμάτων από τους κατασκευαστές, περιλαμβάνουν τις παρακάτω συνθήκες λειτουργίας:

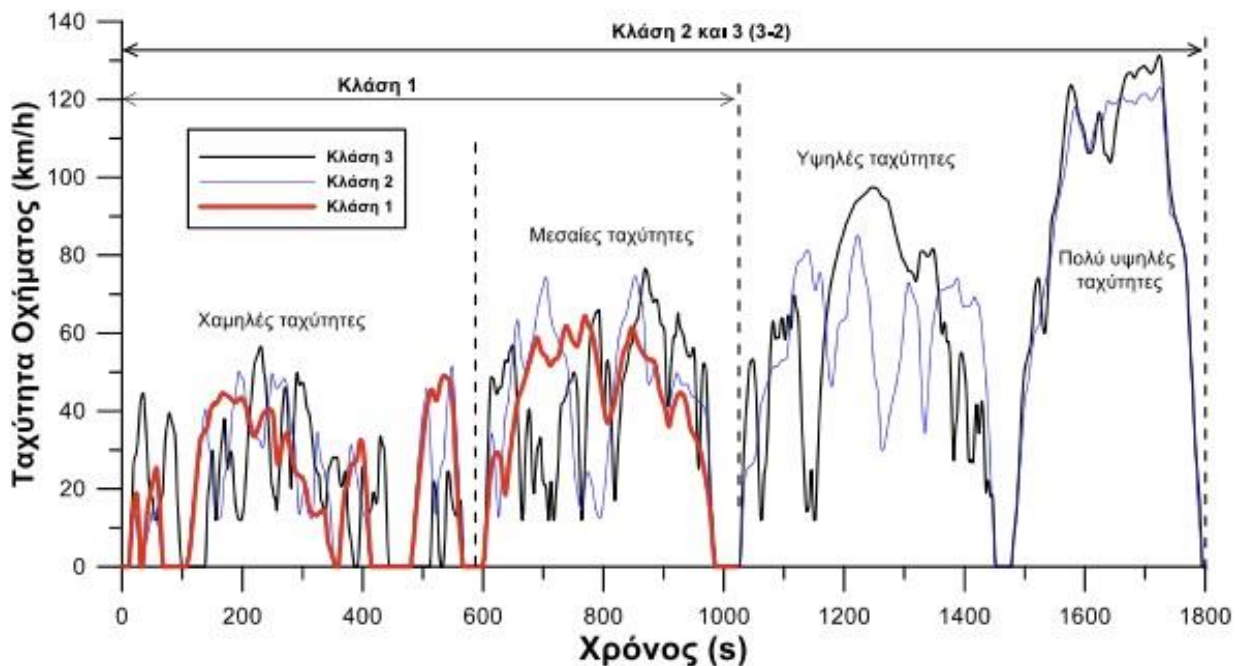
- ψυχρή ή και θερμή εκκίνηση
- συχνές επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις

- αυξομειώσεις φορτίου
- συνθήκες άφορτης λειτουργίας
- οδήγηση σε προαστιακούς δρόμους
- οδήγηση σε αυτοκινητόδρομο.

Η πιστοποίηση απαιτεί ειδικές πειραματικές εγκαταστάσεις πλήρως αυτοματοποιημένες, όπως με ηλεκτρονικά ελεγχόμενο δυναμόμετρο, άμεσης απόκρισης συσκευές ανάλυσης καυσαερίων και σήραγγες ανάμειξης.

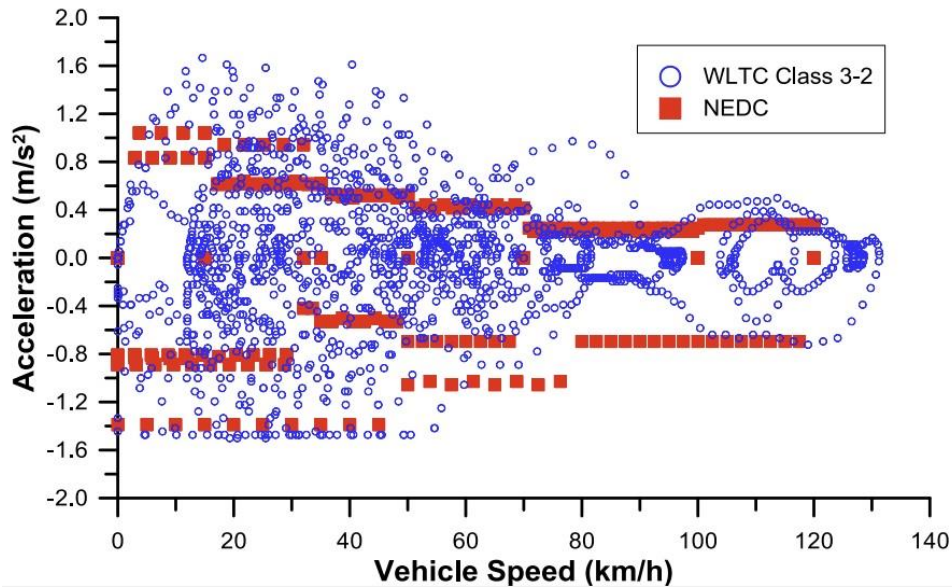
Σημειώνεται ότι δεν ακολουθούνται από όλες τις χώρες ενιαίοι Κύκλοι Πόλης. Όμως, τα τελευταία χρόνια έχει προκύψει η ανάγκη και το ενδιαφέρον από κοινού κατασκευαστών και νομοθετών για την δημιουργία ενός παγκόσμιου εναρμονισμένου Κύκλου πιστοποίησης και για αυτό το λόγο δημιουργήθηκε ο WLTC (Worldwide Light-duty vehicles Test Cycle). Ο Κύκλος διαχωρίζεται σε τρεις κλάσεις:

- Η κλάση 1 έχει διάρκεια 1022 δευτερολέπτων και απόσταση 8.09 km με μέση ταχύτητα 28.5 km/h.
- Η κλάση 2 έχει διάρκεια 1800 s με απόσταση 22.65 km και μέση ταχύτητα 45.3 km/h .
- Τέλος, η κλάση 3-2 (που αναφέρεται σε οχήματα με λόγο ισχύος προς βάρος (άνευ φορτίου) $> 34 \text{ kW/tn}$, όπου ανήκει η συντριπτική πλειοψηφία των οχημάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση) έχει διάρκεια 1800 s, απόσταση 23.26 km, με μέγιστη ταχύτητα 46.5 km/h.

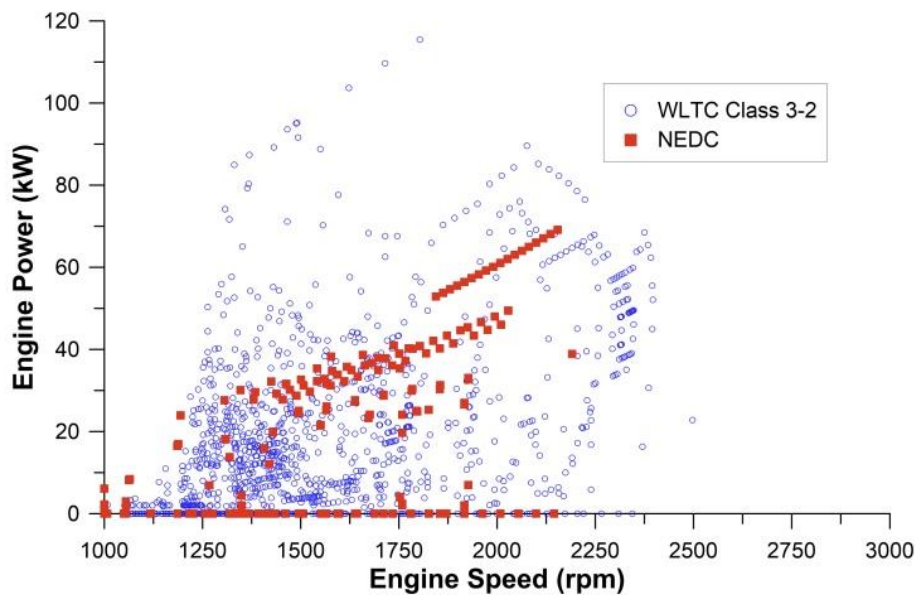


Σχήμα 3.1: Διαγραμματική απεικόνιση των κλάσεων του Κύκλου WLTC [4]

Η εφαρμογή του Κύκλου WLTC για την πιστοποίηση των προς ταξινόμηση οχημάτων εντός της Ε.Ε. ξεκίνησε το Σεπτέμβριο του 2017. Η αυξημένη διάρκειά του και η διαρκώς μεταβαλλόμενη ταχύτητα και επιτάχυνσή του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, καθώς και η υψηλότερη μέγιστη ταχύτητα (έναντι του παλαιότερου, απλοϊκού κύκλου NEDC) έχει ως αποτέλεσμα ο ελεγχόμενος κινητήρας να λειτουργεί σε πολύ περισσότερα σημεία (Σχήμα 3.3 και 3.4) σε σχέση με τον παλαιότερο Κύκλο NEDC, και άρα να είναι πολύ πιο αντιπροσωπευτικός των πραγματικών συνθηκών οδήγησης στο δρόμο.



Σχήμα 3.3: Σύγκριση διασποράς των σημείων λειτουργίας που αφορούν την επιτάχυνση και την ταχύτητα του οχήματος με κινητήρα Diesel μεταξύ των κύκλων NEDC και WLTC κλάσης 3-2 [17]



Σχήμα 3.4: Σύγκριση διασποράς των σημείων λειτουργίας μεταξύ της παραγόμενης ισχύος και των στροφών του οχήματος με κινητήρα Diesel μεταξύ του Κύκλου NEDC και WLTC κλάσης 3-2 [17]

3.2 Μετρήσεις και διαδικασία δοκιμής

Προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις των οχημάτων για τον παγκόσμιο κύκλο πιστοποίησης, είναι αναγκαίο να γίνονται με τυποποιημένες τεχνικές ώστε τα αποτελέσματα να μην διαφέρουν σε διαφορετικά εργαστήρια δοκιμών. Οι μετρήσεις λοιπόν κατά την διάρκεια των Κύκλων Δοκιμής πραγματοποιούνται με τη βοήθεια κατάλληλων δυναμόμετρων με την ανάλυσή τους να ακολουθεί στην Ενότητα 3.2.1 και με συγκεκριμένη διαδικασία δειγματοληψίας όπου θα αναλυθεί στην Ενότητα 3.2.2.

3.2.1 Δυναμόμετρο

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

- Δυναμόμετρα πλαισίου για την δοκιμή οχημάτων (οχήματα ελαφρού τύπου)
- Δυναμόμετρα κινητήρα για την δοκιμή κινητήρων (οχήματα βαρέος τύπου)

Στο δυναμόμετρο πλαισίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5, χρησιμοποιείται ολόκληρο το όχημα και τοποθετούνται οι κινητήριοι τροχοί στους κυλίνδρους έλξης. Ύστερα από την ασφαλής πρόσδεσή του με ιμάντες προκειμένου να αποτραπεί οποιαδήποτε μετακίνηση του, το όχημα το χειρίζεται οδηγός. Ο οδηγός εκτελεί τον προκαθορισμένο Κύκλο με την βοήθεια οθόνης υπολογιστή που του παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες (ταχύτητα σε κάθε δευτερόλεπτο του Κύκλου). Τα αέρια εξαγωγής από την διαδικασία συλλέγονται από το σύστημα δειγματοληψίας (Ενότητα 3.2.2). Στόχος του δυναμόμετρου είναι να αναπαράγει τις αντιστάσεις που αντιμετωπίζει ένα όχημα σε πραγματικές συνθήκες. Δηλαδή οι αντιστάσεις αυτές αναλύονται σε, αεροδυναμική αντίσταση, αντίσταση κύλισης και κλίση του οδοστρώματος. Για την εκτέλεση του Κύκλου WLTC (όπως και κάθε Κύκλου πιστοποίησης), θεωρείται ότι το όχημα κινείται σε δρόμο με μηδενική κλίση.

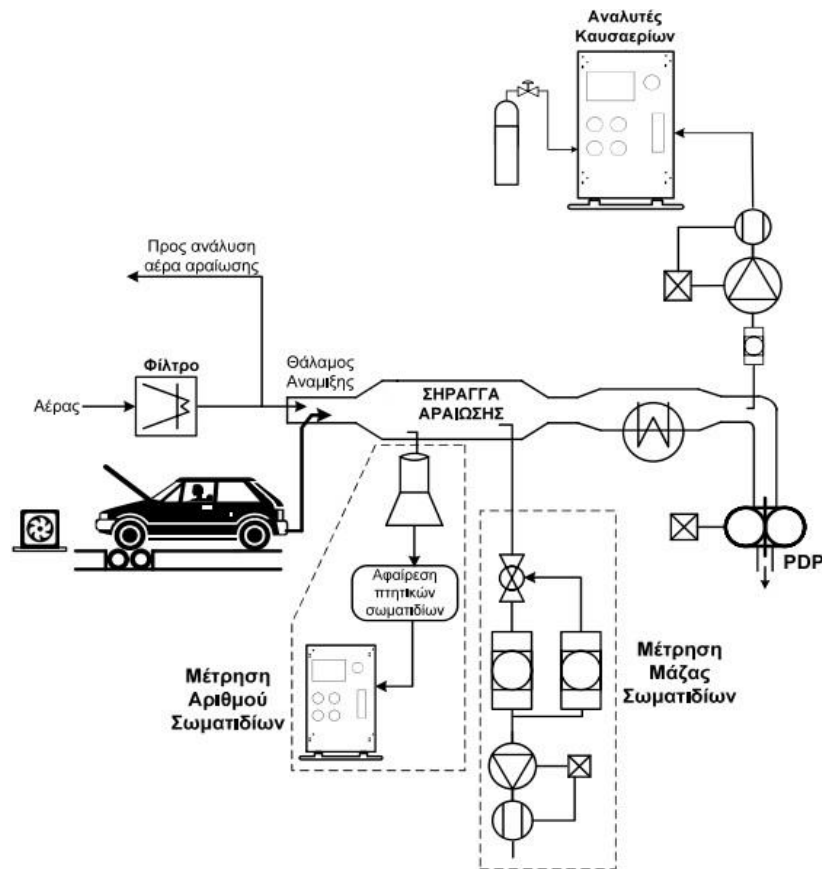


Σχήμα 3.5: Δυναμόμετρο πλαισίου και σύστημα μέτρησης καυσαερίων από την HORIBA Automotive [11]

3.2.2 Διαδικασία δειγματοληψίας εκπομπών

Η εφαρμοζόμενη διαδικασία μέτρησης των εκπομπών καυσαερίων, κατά τη διάρκεια των Κύκλων δοκιμής, είναι η τεχνική δειγματοληψίας σταθερού όγκου CVS (constant volume sampling). Με την διαδικασία CVS, αραιώνεται το καυσαέριο με καθαρό αέρα περιβάλλοντος σε μια σήραγγα αραιώσης, κρατώντας σταθερή την παροχή του φρέσκου αέρα με τη βοήθεια αντλίας θετικής εκτόπισης. Έτσι, η σταθερή ροή διευκολύνει τον ακριβή υπολογισμό των καυσαερίων με βάση τη μάζα τους.

Η διαδικασία της μέτρησης και επεξεργασίας καυσαερίων ξεκινάει με την κύρια θερμαινόμενη σήραγγα από ανοξείδωτο ατσάλι με μήκος κατάλληλο που να επιτρέπει την πλήρη ανάμειξη του καυσαερίου με τον αέρα περιβάλλοντος (μήκος μεγαλύτερο των 10 διαμέτρων). Η διάμετρος της σήραγγας είναι αρκετά μικρή και εξαρτάται από την ποσότητα των καυσαερίων με στόχο τη δημιουργία τυρβώδους ροής ($Re > 4000$). Η ποσότητα του εισερχόμενου αέρα πρέπει να είναι αρκετή ώστε το μείγμα αέρα-καυσαερίων να έχει θερμοκρασία χαμηλότερη των 325 K. Σε σημεία μετά το μήκος ανάμειξης, λαμβάνεται δείγμα από μικρό κλάσμα της ροής CVS (π.χ. 0.1%) σε σάκο από τεφλόν. Πριν την έξοδο του καυσαερίου στην ατμόσφαιρα, τα αέρια ψύχονται σε εναλλάκτη θερμότητας στη θερμοκρασία περιβάλλοντος $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Αυτό γίνεται ώστε η πυκνότητά τους να είναι σταθερή, έτσι και η παροχή μέσω της αντλίας να παραμένει σταθερή. Με την ολοκλήρωση του Κύκλου γίνεται η μέτρηση των συγκεντρώσεων των καυσαερίων σε αναλυτές καυσαερίου.



Σχήμα 3.6: Σήραγγα μέτρησης και ανάλυσης καυσαερίων για κινητήρα Otto με αντλία θετικής εκτόπισης PDP [4]

Παράλληλα με την μέτρηση των αέριων ρύπων, για την μέτρηση των σωματιδίων λαμβάνεται δείγμα από τη συνολική ροή της σήραγγας ανάμειξης και οδηγείται στο σύστημα δειγματοληψίας σωματιδίων που αποτελείται από φίλτρα από ίνες υάλου (fiberglass) επικαλυμμένα με τεφλόν. Τα φίλτρα αυτά πρέπει να διατηρούνται σε σταθερή θερμοκρασία και υγρασία. Η μέτρηση για την εκπομπή σωματιδίων γίνεται ζυγίζοντας το φίλτρο πριν και μετά την διεξαγωγή του μεταβατικού Κύκλου. Η μέτρηση περιλαμβάνει τα σωματίδια αιθάλης και το οργανικό κλάσμα το οποίο και έχει επικίνδυνα χαρακτηριστικά για την υγεία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Ανάπτυξη Μοντέλου Οχήματος με τη Βοήθεια του Υπολογιστικού Πακέτου GT- POWER

4.1 Εισαγωγή στο GT-POWER

Το GT-POWER είναι ένα υπολογιστικό εργαλείο που ανήκει στην ευρύτερη σουίτα εξειδικευμένου λογισμικού GT-SUITE. Έχει αναπτυχθεί από την Gamma Technologies με σκοπό την μοντελοποίηση κινητήρων εσωτερικής καύσης καθώς και λοιπών υποσυστημάτων ενός οχήματος, και βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία. Η χρήση του στην παρούσα διπλωματική έγινε με την άδεια που υπάρχει στο εργαστήριο Μ.Ε.Κ. του Ε.Μ.Π.

Για την μοντελοποίηση ενός κινητήρα, το GT-Power παρέχει βιβλιοθήκη με τα απαραίτητα πρότυπα στοιχεία (templates). Κάθε στοιχείο περιλαμβάνει χαρακτηριστικά τα οποία και τροποποιούνται ανάλογα με τα δεδομένα της εκάστοτε εφαρμογής. Τα στοιχεία μπορούν να μεταφερθούν στον «χάρτη» εργασίας και να συμπληρωθούν. Με την συμπλήρωσή τους και την τοποθέτησή τους στον χάρτη εργασίας μετατρέπονται σε κομμάτια (parts) με δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν απεριόριστες φορές. Αφού τοποθετηθούν στον χάρτη εργασίας όλα τα απαραίτητα κομμάτια που χρειάζονται για το μοντέλο, πρέπει να γίνει η σύνδεσή τους με τρόπο που να αναπαριστά σωστά τον τρόπο λειτουργίας στον κινητήρα/όχημα. Ο χάρτης εργασίας είναι ένα μονογραμμικό σχέδιο, και η σύνδεση μεταξύ των κομματιών γίνεται με γραμμές-συνδέσμους που μεταφέρουν πληροφορία από το ένα «κομμάτι» στο επόμενο. Τα χαρακτηριστικά κάθε ξεχωριστού κομματιού επιτρέπουν τον πλήρη έλεγχο στον σχεδιασμό του μοντέλου ενώ επιτρέπεται τροποποίηση των χαρακτηριστικών μεμονωμένου κομματιού ή και ομάδας κομματιών, όπως ενδεικτικά ο χρονισμός έγχυσης του καυσίμου στους τέσσερις εγχυτήρες ενός τετρακύλινδρου κινητήρα. Όταν πλέον ο χρήστης έχει ορίσει όλα τα κομμάτια του μοντέλου, μπορεί να τρέξει την προσομοίωση στις συνθήκες που έχει επιλέξει. Η προσομοίωση μπορεί να περιλαμβάνει την λειτουργία του κινητήρα σε σταθερή κατάσταση με προκαθορισμένες εισόδους επιλεγμένων μεταβλητών ή, με την μοντελοποίηση εικονικού οδηγού αλλά και του υπόλοιπου

οχήματος, μπορεί να περιλαμβάνει πολυπλοκότερες συνθήκες, όπως την δοκιμή σε μεταβατικό Κύκλο Πόλης. Μετά την ολοκλήρωση κάθε σεναρίου ή ολόκληρης της προσομοίωσης, ο χρήστης μπορεί να δει τα αποτελέσματα σε ένα παράλληλο εργαλείο, το GT-Post. Από εκεί, με απευθείας χρήση των πινάκων του GT-Post ή με επεξεργασία των αποτελεσμάτων για κάθε βήμα λύσης του μοντέλου, ο χρήστης μπορεί να λάβει τα αποτελέσματα που χρειάζεται.

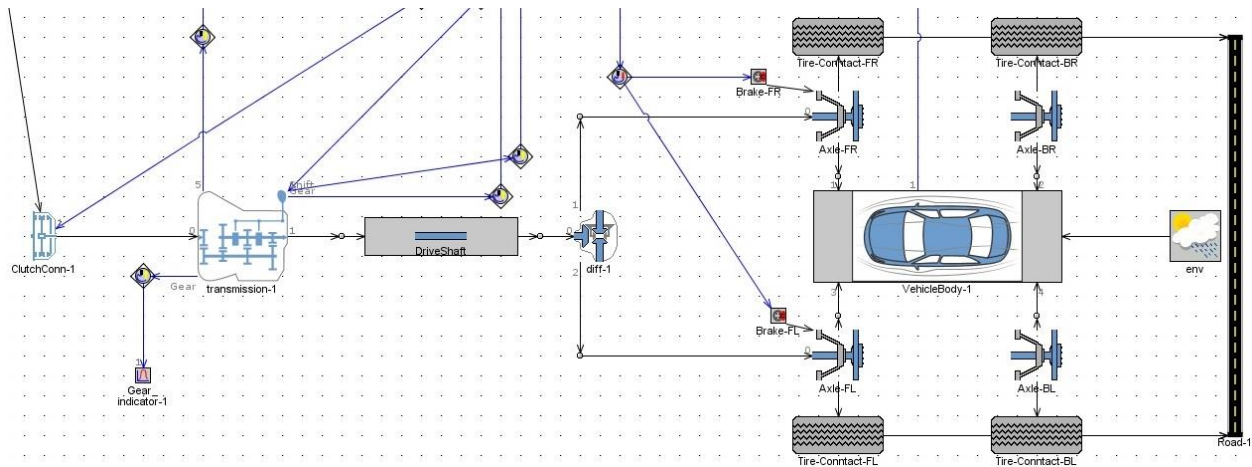
4.2 Μοντελοποίηση του κινητήρα στο GT-Power

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου του κινητήρα της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχουν ληφθεί από προηγούμενη διπλωματική εργασία που είχε ως θέμα την σύγκριση ενός κινητήρα Otto φυσικής αναπνοής και του ίδιου κινητήρα με υπερπλήρωση και άμεσο ψεκασμό σε σταθερές συνθήκες [20]. Στη συνέχεια, ακολούθησε εξέλιξη και μετατροπή του μοντέλου για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Οι διαστάσεις του κινητήρα είναι βασισμένες σε Μ.Ε.Κ. όγκου εμβολισμού 2 L της Audi. Αντίστοιχα, και για τα περιφερειακά συστήματα του κινητήρα όπως το κιβώτιο, το διαφορικό και οι τροχοί, τα δεδομένα έχουν ληφθεί από ένα Audi A3 με κινητήρα 2 L. Πρόκειται για τετρακύλινδρο 4-X κινητήρα με άμεσο ψεκασμό βενζίνης, υπερπλήρωση και ενδιάμεσο ψυγείο ψύξης αέρα μετά τον συμπιεστή (Πίνακας 4.1)

Πίνακας 4.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντελοποιημένου κινητήρα [27]

Διάμετρος Εμβόλου	82.5 mm
Διαδρομή Εμβόλου	92.8 mm
Μήκος Διωστήρα	144 mm
Σχέση Συμπίεσης	10
Όγκος Εμβολισμού	1984.3 cm ³
Σειρά Ανάφλεξης	1-3-4-2



Σχήμα 4.1: Μοντελοποιημένο όχημα στον χάρτη εργασίας (χωρίς τον κινητήρα)

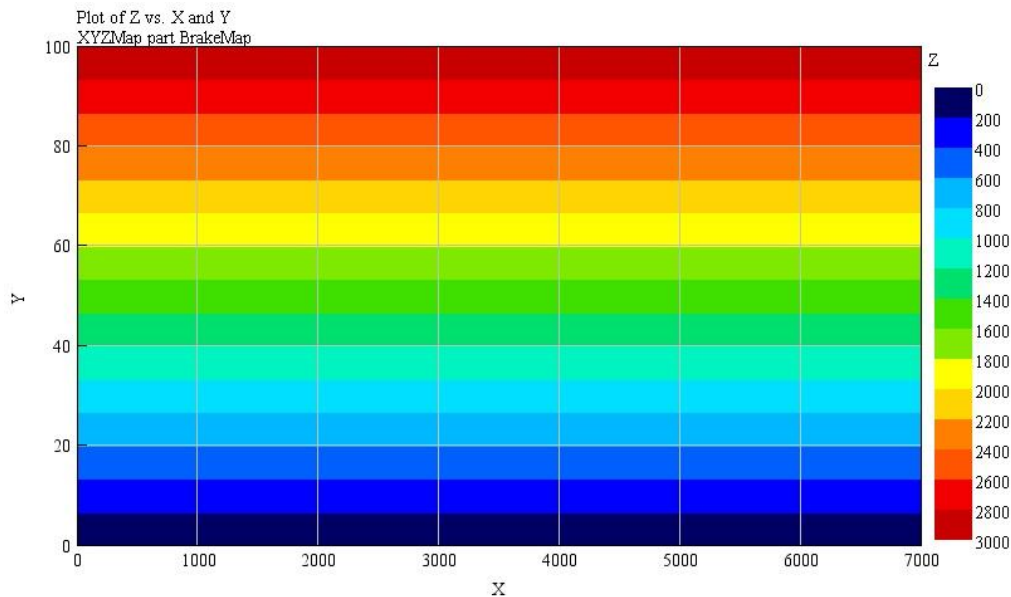
Το παρόν μοντέλο ξεκίνησε από την μοντελοποίηση του κινητήρα, όμως πρώτα θα αναφερθεί η τοποθέτηση και εισαγωγή των κομματιών που αφορούν το σύνολο του αυτοκινήτου, και στη συνέχεια θα ακολουθήσουν τα επιμέρους στοιχεία. Για την μοντελοποίηση του οχήματος θα γίνει πρώτα από όλα ο καθορισμός της επιφάνειας που θα κινηθεί, δηλαδή η ασφαλτός, το κομμάτι με ονομασία «Road». Έπειτα καθορίζονται οι συνθήκες περιβάλλοντος. Στην προκειμένη περίπτωση έχει ορισθεί η θερμοκρασία διεξαγωγής του κύκλου WLTC, που είναι 23°C, και η ατμοσφαιρική πίεση στο 1 bar. Από το Σχήμα 4.1 φαίνεται η τοποθέτηση του σώματος του οχήματος (vehiclebody) και η σύνδεσή του με τους τροχούς, οι οποίοι με την σειρά τους επικοινωνούν με το οδόστρωμα. Η κίνηση στους τροχούς διανέμεται από ένα διαφορικό (diff). Το διαφορικό συνδέεται μέσω ενός άξονα με το κιβώτιο ταχυτήτων (transmission) και ακολουθεί η σύνδεση του τελευταίου με τον κινητήρα μέσω του συμπλέκτη τριβής (ClutchConn). Για τον καθορισμό κάθε κομματιού, ο χρήστης πρέπει να εισάγει τα απαραίτητα στοιχεία που απαιτούνται από το GT-Power στο αναδυόμενο παράθυρο του επιλεγμένου στοιχείου. Στο σώμα του οχήματος ζητούνται γεωμετρικά στοιχεία όπως το μεταξόνιο και το μετατρόχιο, η μετωπική επιφάνειά του αλλά και στοιχεία όπως η μάζα του, η μάζα του οδηγού καθώς και ο συντελεστής αντίστασης c_d .

Μετά την περιγραφή του οχήματος εισάγονται από τον χρήστη στοιχεία των επιμέρους κομματιών. Από τον κατασκευαστή λαμβάνονται πληροφορίες για τον λόγο μετάδοσης του διαφορικού αλλά και του κιβωτίου ταχυτήτων όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Σχέσεις μετάδοσης κιβωτίου ταχυτήτων και σχέση μετάδοσης εμπρόσθιου διαφορικού [27]

Σχέση κιβωτίου ταχυτήτων	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η	6 ^η
Σχέση μετάδοσης	3.78	2.12	1.36	1.03	0.86	0.73
Σχέση μετάδοσης διαφορικού	3.65					

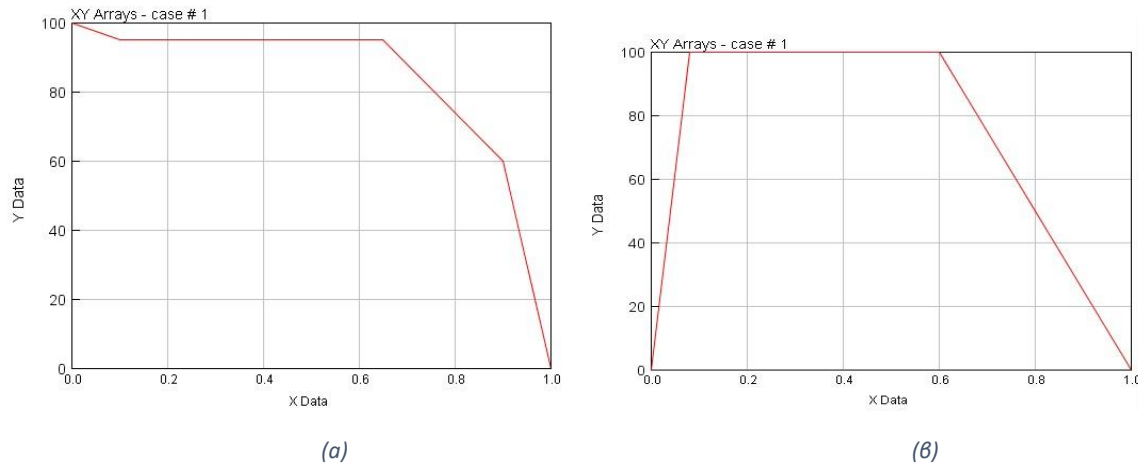
Στην συνέχεια εισάγεται ένα μοντέλο πέδησης (Σχήμα 4.2) συναρτήσει των στροφών του οχήματος, του ποσοστού πατήματος του πεντάλ του φρένου και της ασκούμενης ροπής από το σύστημα (σε Nm).



Σχήμα 4.2: Χάρτης πέδησης οχήματος. Στον άξονα x είναι οι στροφές του άξονα του τροχού σε RPM, στον άξονα y είναι το ποσοστό πατήματος του πεντάλ του φρένου και στον άξονα z είναι η διαβάθμιση της ροπής του συστήματος πέδησης σε Nm

Στόχος της μοντελοποίησης είναι η δοκιμή του οχήματος σε μεταβατικό Κύκλο Πόλης. Προκειμένου να γίνει αυτό, είναι απαραίτητος ένας εικονικός οδηγός που θα χειρίζεται το αυτοκίνητο. Απαραίτητα στοιχεία είναι λοιπόν τα εξής κομμάτια (parts):

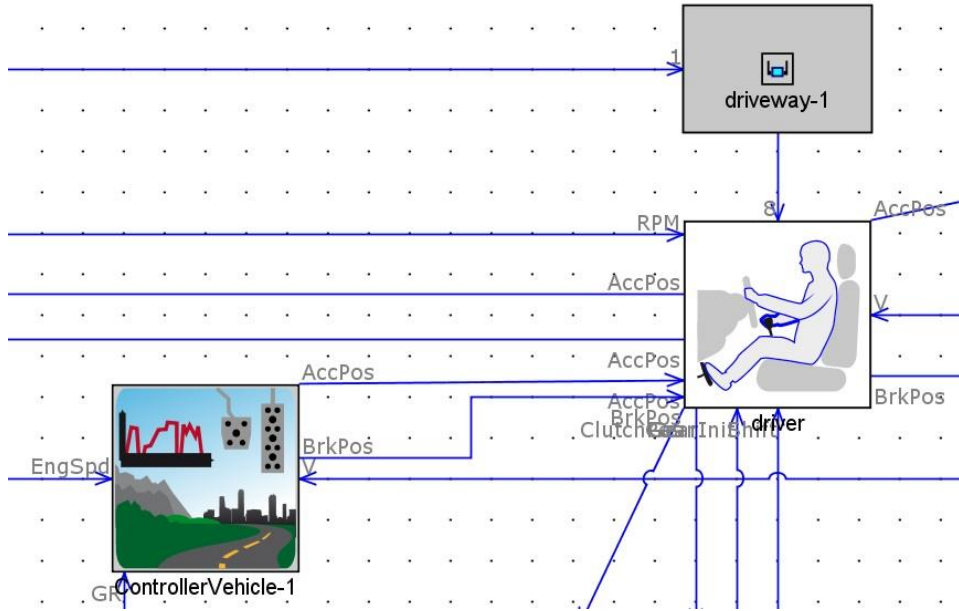
- Εικονικός οδηγός μέσω του οποίου καθορίζεται η στρατηγική αλλαγής ταχυτήτων και εξάγονται από αυτόν εντολές χειρισμού, όπως και στην πραγματικότητα, δηλαδή μέσω των πεντάλ της επιτάχυνσης, του φρένου, του συμπλέκτη και μέσω του επιλογέα ταχυτήτων (δεν απαιτούνται οι εντολές προς το σύστημα διεύθυνσης). Για το πεντάλ επιτάχυνσης εισάγεται η αρχική του θέση και στην συνέχεια ελέγχεται από τον Vehicle Controller που θα αναφερθεί παρακάτω. Το ίδιο ακριβώς ισχύει και για το φρένο. Για τον συμπλέκτη καθορίζονται δύο χάρτες πατήματος που διαχωρίζονται, ο ένας για την εκκίνηση (DrivewayClutch) και ο δεύτερος για την αλλαγή ταχυτήτων σε πορεία (ShiftClutch) και μπορούν να φανούν στα Σχήματα 4.3α και 4.3β. Να σημειωθεί ότι με το πάτημα του πεντάλ του επιταχυντή, η εντολή από τον εικονικό οδηγό οδηγείται σε έναν ελεγκτή στην «πεταλούδα», ο οποίος την ανοίγει και την κλείνει ανάλογα με το πόσο πατιέται το πεντάλ, καθώς το μοντέλο αναφέρεται σε κινητήρα βενζίνης, δηλαδή με στραγγαλισμό στην εισαγωγή.



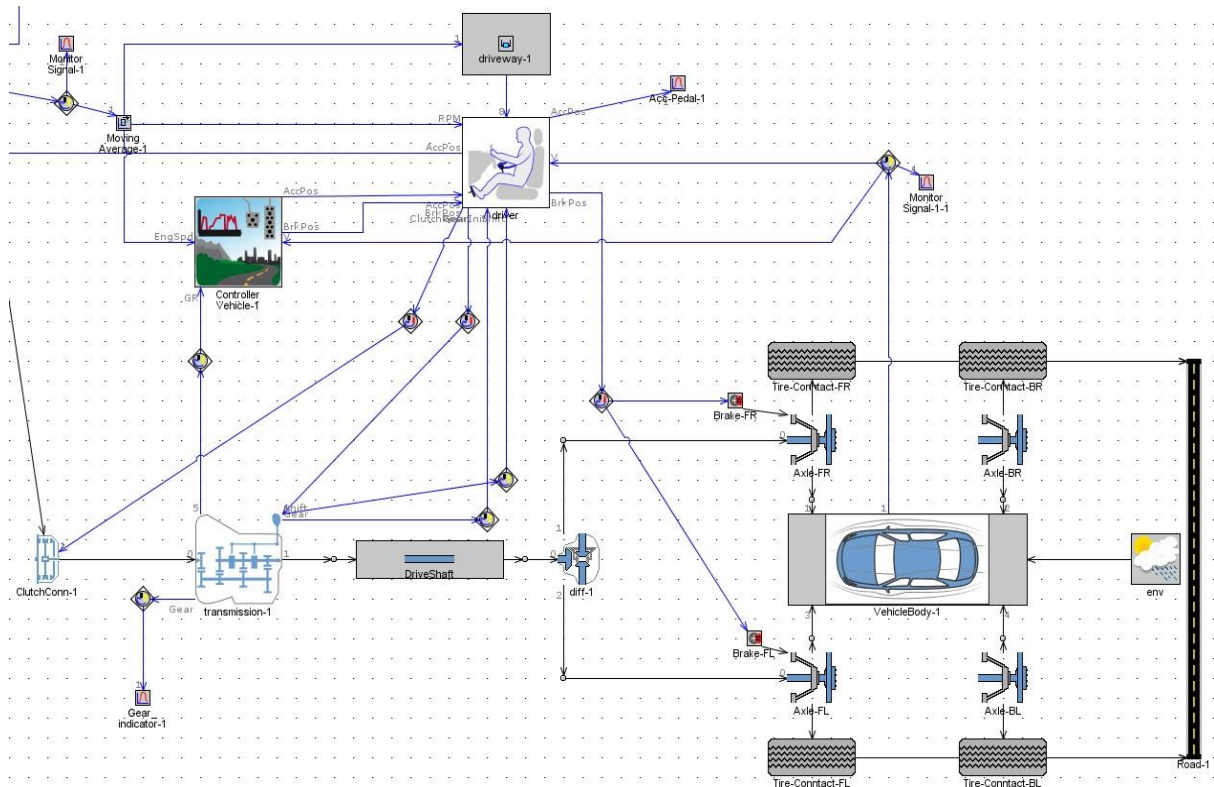
Σχήμα 4.3: (α) DrivewayClutch, (β) ShiftClutch - στον άξονα y είναι το ποσοστό πατήματος του πεντάλ του συμπλέκτη ενώ στον άξονα x η διάρκεια του φαινομένου ανηγμένη στο διάστημα 0 έως 1

- Ένας ελεγκτής (driveway) που είναι υπεύθυνος για την εκκίνηση του οχήματος - πρακτικά επικοινωνεί μόνο τότε με τον εικονικό οδηγό και εξάγει πληροφορία για το πάτημα του πεντάλ επιτάχυνσης κατά την συνθήκη εκκίνησης.
- Ένας ελεγκτής οχήματος (Controller Vehicle) στον οποίο ο χρήστης εισάγει τους στόχους που πρέπει να καλύψει το αυτοκίνητο κατά την προσομοίωση. Πιο συγκεκριμένα, εισάγεται είτε η ταχύτητα που πρέπει να έχει σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές (Speed targeting), όπως συμβαίνει σε έναν Κύκλο Πόλης, είτε εισάγεται η θέση των πεντάλ (Imposed pedal position). Στον ελεγκτή αυτόν εισάγεται ένας χάρτης μέσης πραγματικής πίεσης (BMEPMAP) που έχει δημιουργηθεί δοκιμάζοντας τον κινητήρα στα φορτία 0%,25%,50% και 100% σε σταθερές συνθήκες προκειμένου να υπολογίζει καλύτερα το απαιτούμενο φορτίο που θα χρειαστεί για την διόρθωση της ταχύτητας κατά την διεξαγωγή του κύκλου.

Στο Σχήμα 4.4 μπορούν να φανούν οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στοιχείων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ο εικονικός οδηγός δέχεται «ερεθίσματα» όπως στην πραγματικότητα (μπλε βέλη που δείχνουν προς αυτόν) αλλά και τις εντολές από τον ελεγκτή για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης. Στο συγκεκριμένο σημείο πρέπει να γίνει η εξής παρατήρηση. Ο εικονικός οδηγός του Σχήματος 4.4 και 4.5 φαίνεται να έχει διαφορετικό αριθμό συνδέσεων με τα περιβάλλοντα στοιχεία. Αυτό συμβαίνει καθώς στο Σχήμα 4.4 μεταφέρονται πληροφορίες του οδηγού στο σύστημα ελέγχου της ηλεκτρικής υποβοήθησης (αναλυτικότερα Σχήμα 4.11) ενώ στο Σχήμα 4.5 ο οδηγός είναι μέρος του μοντέλου με τον συμβατικό κινητήρα.



Σχήμα 4.4: Εικονικός οδηγός και οι ανταλλαγές πληροφοριών με τους ελεγκτές driveway, Controller Vehicle αλλά και οι εξοδοι από τον οδηγό προς τα υπό έλεγχο συστήματα μέσω των links (μπλε γραμμές)



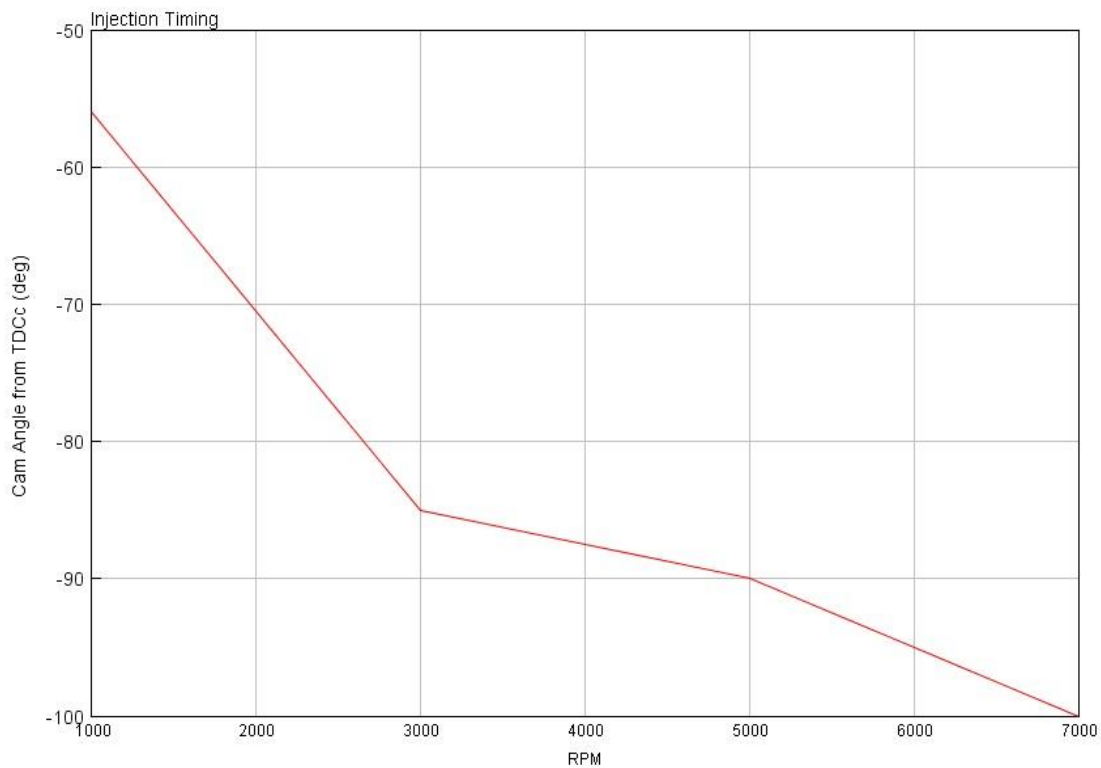
Σχήμα 4.5: Ο χάρτης του οχήματος μαζί με τον εικονικό οδηγό

Για την μοντελοποίηση του κινητήρα ήταν απαραίτητη η ρύθμιση του χρονισμού έγχυσης του καυσίμου αλλά και ένα προφίλ της αναλογίας αέρα-καυσίμου συναρτήσει των στροφών και της μέσης πραγματικής πίεσης (BMEP). Ταυτόχρονα έπρεπε να ρυθμιστεί και ο χρονισμός έναυσης

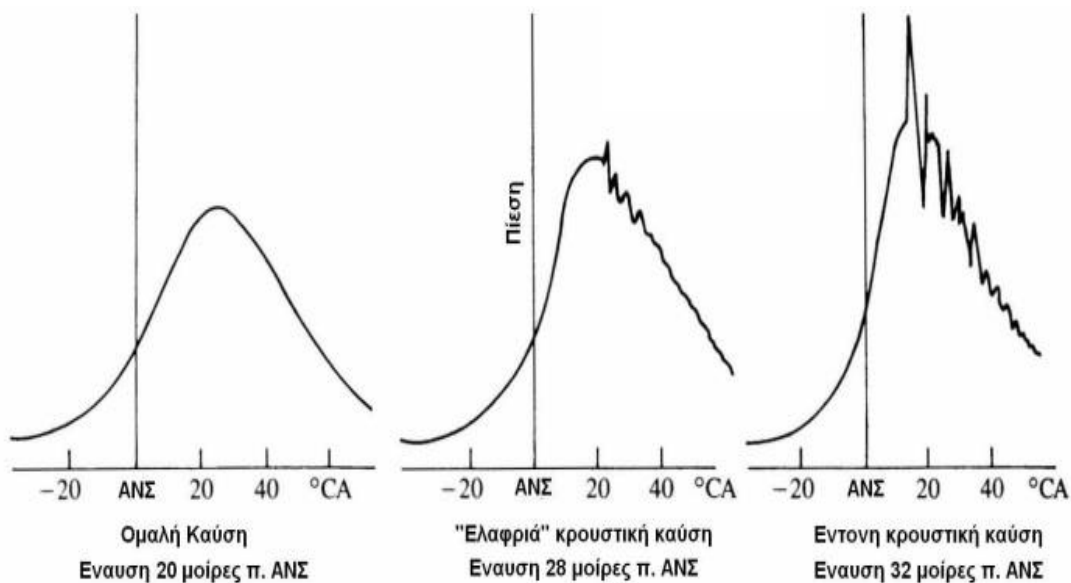
του. Σημαντική είναι η ρύθμιση της ταχύτητας της φλόγας εντός του κυλίνδρου μεταβάλλοντας το μέγεθος της τύρβης, καθώς και η ρύθμιση πλήρους καύσης. Για την ρύθμιση πλήρους καύσης στο GT-Power, στους κινητήρες GDI χρειάζεται η μοντελοποίηση της στρωμάτωσης του μείγματος καυσίμου-αέρα αλλά και η επιλογή «εξαναγκασμένη πλήρης καύσης» που χρησιμεύει στην ολοκλήρωση της καύσης σε όλα τα στρώματα που έχουν δημιουργηθεί στον θάλαμο καύσης στη μεταβατική λειτουργία, καθώς χωρίς αυτή παρατηρούνται μεγάλα ποσοστά παραμένουτος άκαυστου καυσίμου.

Βασικός στόχος των παραπάνω ρυθμίσεων ήταν να αποφευχθεί η κρουστική καύση. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε κυρίως σε υψηλά φορτία και σε χαμηλές στροφές, χωρίς να υπάρχουν υπολείμματα άκαυστου καυσίμου και με τιμές επιδόσεων του κινητήρα σε λογικά επίπεδα. Παράλληλα, τα σημεία λειτουργίας του υπερπληρωτή πρέπει να βρίσκονται εντός του χάρτη λειτουργίας ώστε το ταίριασμα με τον κινητήρα να είναι επιτυχημένο. Η κλιμάκωση του χάρτη λειτουργίας του υπερπληρωτή έγινε αρχικά σε σταθερές συνθήκες με τον κινητήρα αποσυνδεδεμένο από τον οδηγό και το όχημα. Ύστερα βαθμονομήθηκε σε μεταβατικές συνθήκες λειτουργίας με τον κινητήρα συνδεδεμένο πλέον στο όχημα.

Ο έλεγχος για κρουστική καύση πραγματοποιήθηκε σε σταθερές συνθήκες λειτουργίας σε εύρος στροφών από 1000 rpm έως 7000 rpm σε πλήρες και μερικό φορτίο από 10% έως 100%, παρακολουθώντας τη μορφή της καμπύλης πίεσης εντός του κυλίνδρου σε μια περιστροφή για κάθε περίπτωση. Αν η καμπύλη έχει ομαλή μορφή, τότε δεν εμφανίζεται κρουστική καύση (Σχήμα 4.7), αντιθέτως, η εμφάνιση ανομοιομορφιών υποδηλώνει ύπαρξη αυτανάφλεξης. Επιπλέον το GT-Power παρέχει εργαλεία πρόβλεψης του φαινομένου αυτού. Απαιτείται η εισαγωγή πληροφοριών όσον αφορά το καύσιμο και τον αριθμό οκτανίου, όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε τυπική βενζίνη 95 RON. Στη συνέχεια ακολούθησε η χρήση του μοντέλου Kinetic-fit που παρέχεται μεταξύ άλλων. Κατά την δοκιμή του κινητήρα, η υπόδειξη του μοντέλου για ύπαρξη αυτανάφλεξης (Knock probability = 100%) δεν υποδηλώνει πράγματι την λειτουργία με κρουστική καύση [14]. Η παρακολούθηση του δείκτη Knock Index και του Knock Induction time integral είναι απαραίτητη για την συνεκτίμηση των αποτελεσμάτων παράλληλα με την ανάλυση της καμπύλης πίεσης (Σχήμα 4.8) όπως προαναφέρθηκε. Για αποφυγή κρουστικής καύσης, από την παρατήρηση των αποτελεσμάτων και την μελέτη της πηγής [14], ο δείκτης «Knock Induction time integral» που παρέχεται από το GT-Post δεν πρέπει να ξεπερνά τη μονάδα. Ταυτόχρονα ο δείκτης «Knock index» που επίσης παρέχεται από το λογισμικό, δεν θα πρέπει να ξεπερνά την τιμή 180.



Σχήμα 4.6: Χρονισμός έγχυσης του καυσίμου στον κύλινδρο



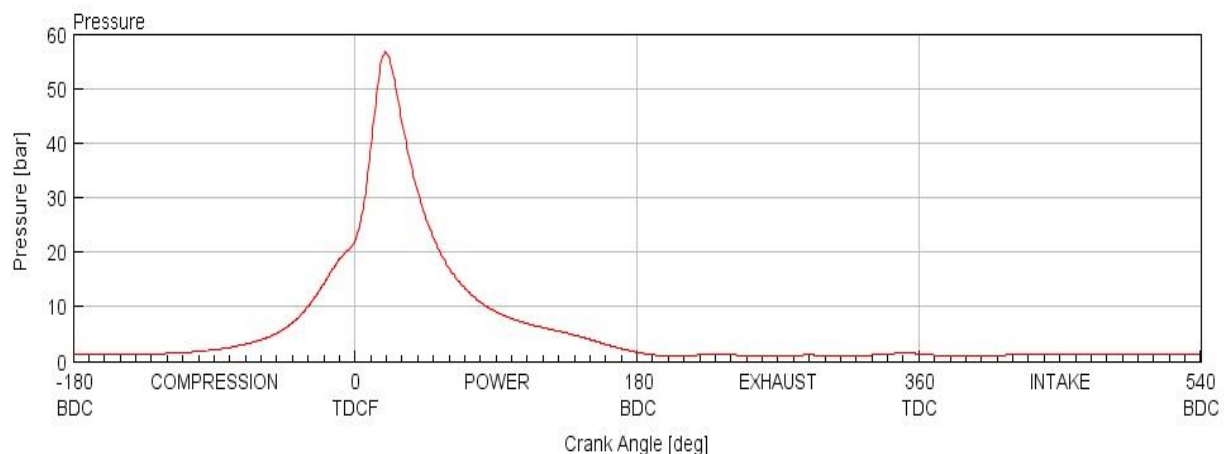
Σχήμα 4.7: Απεικόνιση καμπύλης πίεσης εντός του κυλίνδρου κατά την καύση σε κινητήρα Otto σε συνθήκες μη εμφάνισης κρουστικής καύσης και σε συνθήκες αυτανάφλεξης [28]

Αφού ολοκληρώθηκαν οι δοκιμές σε σταθερές συνθήκες, υπήρξε περαιτέρω ρύθμιση στις μεταβατικές συνθήκες του Κύκλου Πόλης WLTC Κλάσης 3-2. Μετά το πέρας και αυτών των

ρυθμίσεων, ακολουθεί δοκιμή σε τέσσερις αυτοσχέδιους «Κύκλους» που θα αναλυθούν στο κεφάλαιο 5, καθώς και η δοκιμή επιτάχυνσης 0-100 km/h. Εκεί, εκ νέου πραγματοποιείται βαθμονόμηση του συστήματος έναυσης μετά από κάθε δοκιμή. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία, πραγματοποιούνται τα τρεξίματα του μοντέλου από την αρχή, με τις τελευταίες πλέον αλλαγές που έχουν εφαρμοστεί στο σύστημα έναυσης.

Στην ρύθμιση των εκάστοτε χρονισμών υπάρχουν ακόμα πολλά περιθώρια βελτίωσης όσον αφορά τις επιδόσεις του κινητήρα. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι όμως η σύγκριση των αποτελεσμάτων δύο μοντέλων και η ποσοστιαία μεταβολή αυτών και όχι (τόσο) τα απόλυτα μεγέθη. Στο Σχήμα 4.6 είναι εμφανής η έγχυση του καυσίμου πριν το ΑΝΣ (συμπιέσης) σε μεταβλητό χρόνο ανάλογα με τις στροφές του κινητήρα. Όσον αφορά την έναυση του καυσίμου, κατασκευάστηκε χάρτης λειτουργίας. Ο χάρτης αυτός καθορίζει τη στιγμή της έναυσης συναρτήσει των στροφών λειτουργίας αλλά και της μέσης πραγματικής πίεσης (BMEP). Η ρύθμιση αυτού του χάρτη έγινε με γνώμονα την αποφυγή κρουστικής καύσης αλλά και την καύση ολόκληρου του μείγματος εντός του κυλίνδρου, όπως μπορεί να φανεί στο Σχήμα 4.9.

Η ανάμειξη του αέρα με το καύσιμο ορίζεται στο πρόγραμμα ανάλογα με την αναλογία αέρα-καυσίμου. Για AF έως και 18, το μείγμα είναι ομογενές (Σχήμα 4.10α) ενώ για φτωχότερο μείγμα υπάρχει στρωμάτωση εντός του κυλίνδρου όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10β. Η στρωμάτωση αυτή καθορίζεται με την θέσπιση τιμών του φ συναρτήσει της ανηγμένης απόστασης από τον εγχυτήρα. Επιπλέον, για κινητήρες βενζίνης χρησιμοποιούνται διαφορετικά πρότυπα στοιχεία ως προς τους εγχυτήρες σε σχέση με τους Diesel. Στα στοιχεία που αναφέρονται στους Otto, ορισμένα προορίζονται για φυσικής αναπνοής και άλλα για άμεσου ψεκασμού. Από το GT-Power για την παρούσα μοντελοποίηση, δηλαδή κινητήρα GDI, προτείνεται η χρήση του εγχυτήρα InjProfileConn στον οποίο ορίζεται η μέγιστη παροχή, το προφίλ της έγχυσης και, το σημαντικότερο, τα όρια αέρα-καυσίμου συναρτήσει των στροφών και της μέσης πραγματικής πίεσης, καθώς είναι απαραίτητα για την ρύθμιση της παροχής του καυσίμου σε συνεργασία με την «πεταλούδα» η οποία είναι άμεσα συνδεδεμένη με το πεντάλ επιτάχυνσης.



Σχήμα 4.8: Η πίεση εντός του κυλίνδρου κατά τις δοκιμές του κινητήρα σε πλήρες φορτίο στις 2000 rpm

Z Data	Y Data ↓	1	2	3	4	5	6	7
XDat ⇒	...	1000 ...	2000 ...	3000 ...	4000 ...	5000 ...	6000 ...	7000 ...
1	0 ...	-26 ...	-31 ...	-33.5 ...	-36 ...	-37 ...	-38 ...	-70 ...
2	1 ...	-22 ...	-24 ...	-29 ...	-29 ...	-30 ...	-31 ...	-39 ...
3	6 ...	-3 ...	-18 ...	-20 ...	-25 ...	-30 ...	-31 ...	-36 ...
4	7 ...	-2.5 ...	-18 ...	-20 ...	-22 ...	-30 ...	-31 ...	-36 ...
5	7.1 ...	-2 ...	-18 ...	-20 ...	-21 ...	-21 ...	-31 ...	-35 ...
6	7.9 ...	-2 ...	-14.5 ...	-19.5 ...	-19.8 ...	-21 ...	-28 ...	-33 ...
7	9 ...	1 ...	-14.5 ...	-19.5 ...	-19.8 ...	-21 ...	-22 ...	-33 ...
8	10 ...	1 ...	-14.5 ...	-19.5 ...	-19.8 ...	-20.2 ...	-22 ...	-28 ...
9	11 ...	1 ...	-13 ...	-19.5 ...	-19.8 ...	-20.2 ...	-19 ...	-28 ...
10	11.7 ...	1 ...	-13 ...	-19.5 ...	-19.8 ...	-20.2 ...	-19 ...	-28 ...
11	12 ...	1 ...	-13 ...	-13.7 ...	-14.2 ...	-16.2 ...	-16 ...	-28 ...
12	13 ...	1 ...	-13 ...	-13.7 ...	-14.2 ...	-16.2 ...	-16 ...	-28 ...
13	14 ...	1 ...	-13 ...	-13.7 ...	-14.2 ...	-15.3 ...	-16 ...	-28 ...
14	15 ...	1 ...	-13 ...	-13.7 ...	-14.2 ...	-15.3 ...	-16 ...	-28 ...
15	16 ...	1 ...	-13 ...	-13.7 ...	-14.2 ...	-15.3 ...	-16 ...	-28 ...
16	17 ...	1 ...	-13 ...	-13.7 ...	-14.2 ...	-15.3 ...	-16 ...	-28 ...

Σχήμα 4.9: Χρονισμός έναυσης του καυσίμου συναρτήσει των στροφών (άξονας x) και της μέσης πραγματικής πίεσης (άξονας y)

Για την ολοκλήρωση του βασικού μοντέλου πρέπει να αναφερθεί ότι ο αέρας που εξέρχεται από τον υπερπληρωτή εισέρχεται σε ένα ενδιάμεσο ψυγείο αέρα-αέρα. Ο βαθμός απόδοσης του ψυγείου εξαρτάται από την παροχή· για χαμηλή παροχή, έως 0.01 kg/s, η αποδοτικότητά του βρίσκεται στο 70% ενώ για τις υψηλές τιμές παροχής αέρα φτάνει γραμμικά στο 65%. Τέλος, το αρχικό μοντέλο συμπληρώνεται με μια βαλβίδα εκτόνωσης στον συμπιεστή, η οποία ενεργοποιείται από έναν ελεγκτή. Ο ελεγκτής λειτουργεί με βάση έναν χάρτη που καθορίζει το άνοιγμα της βαλβίδας συναρτήσει των στροφών και της διαμέτρου της «πεταλούδας». Σε αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι η «πεταλούδα» έχει μοντελοποιηθεί ως ένα εξάρτημα που μεταβάλλεται η διάμετρος του, με την μέγιστη τιμή που υποδηλώνει ότι είναι τελείως ανοιχτή, στα 57 mm, και την ελάχιστη στα 5.9 mm για μηδενικό φορτίο. Ο χάρτης αυτός ελήφθη από τη βιβλιοθήκη του GT-Power για κινητήρα βενζίνης 2L, και στη συνέχεια τροποποιήθηκε όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11. Η διάμετρος της βαλβίδας είναι 30 mm. Παράλληλα με την βαλβίδα εκτόνωσης θα λειτουργεί και το σύστημα υποβοήθησης με αντίστοιχο τρόπο, προκειμένου η περισσευούμενη ενέργεια του στροβίλου να ανακτάται στην μπαταρία. Η ρύθμιση του προφίλ της αναλογίας αέρα-καυσίμου θα αναλυθεί παρακάτω με την προσθήκη του ηλεκτρικά υποβοηθούμενου υπερπληρωτή.

X Data	XYTable Object Names
0.0 ...	homogenous ...
18.0 ...	homogenous ...
19.0 ...	XYΦmap ...
40.0 ...	XYΦmap ...

(α)

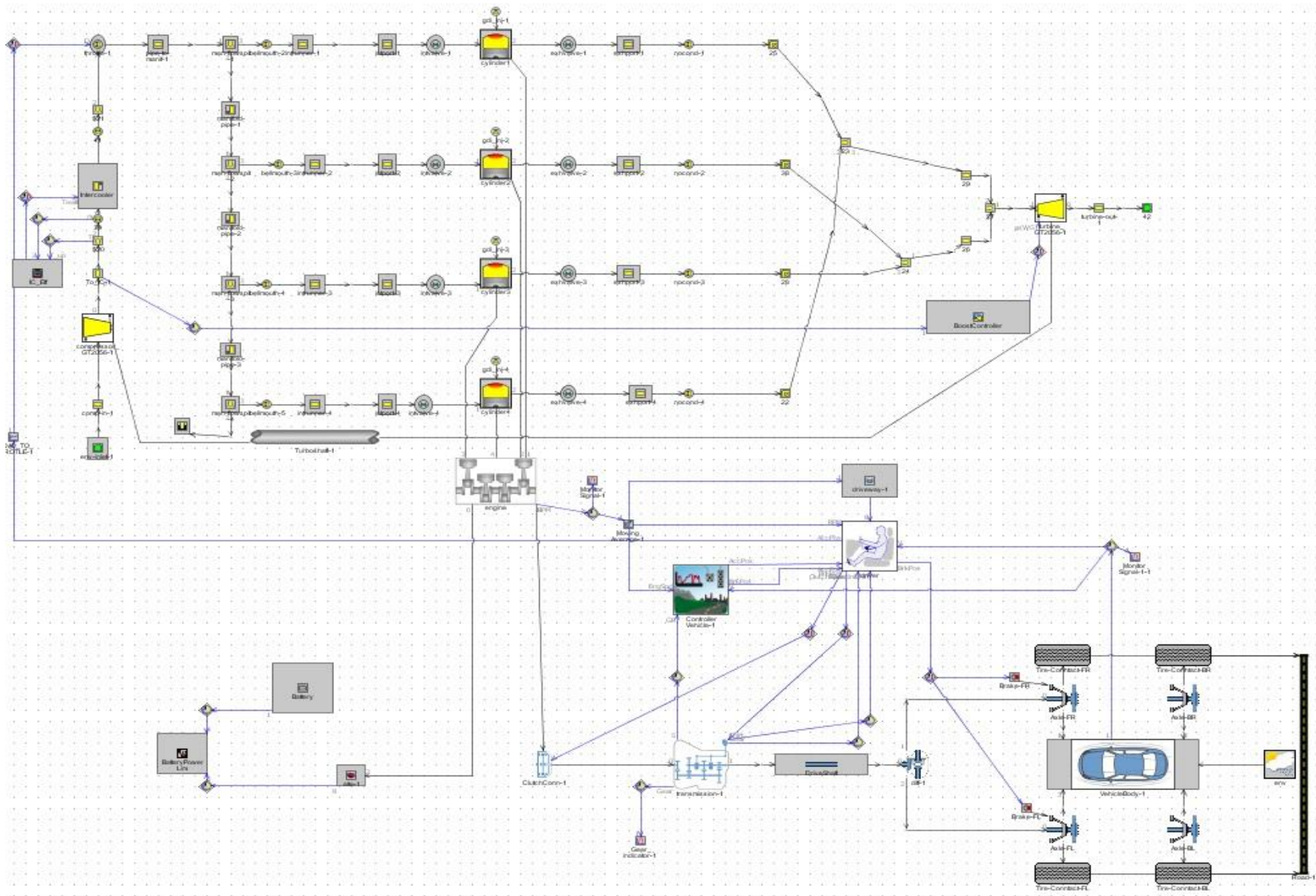
X Data	Y Data
0.0 ...	1.052631579 ...
0.2 ...	0.8 ...
0.4 ...	0.588235294 ...
0.6 ...	0.588235294 ...
0.8 ...	0.555555556 ...
1.0 ...	0.555555556 ...

(β)

Σχήμα 4.10: α) Ανάμειξη αέρα-καυσίμου (άξονας y) σύμφωνα με την αναλογία αέρα καυσίμου (άξονας x). β) Στρωμάτωση του φ (άξονας y) συναρτήσει της ανηγμένης απόστασης από τον εγχυτήρα (άξονας x)

Z Data	Y Data #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
XDat ⇒	...	1000 ...	1500 ...	2000 ...	2500 ...	3000 ...	3500 ...	4000 ...	4500 ...	5000 ...	5500 ...	6000 ...	7000 ...
1	6 ...	1.01 ...	1.04 ...	1.05 ...	1.08 ...	1.08 ...	1.08 ...	1.11 ...	1.13 ...	1.16 ...	1.19 ...	1.22 ...	1.25 ...
2	11.1 ...	1.01 ...	1.04 ...	1.2 ...	1.25 ...	1.25 ...	1.3 ...	1.3 ...	1.32 ...	1.32 ...	1.32 ...	1.32 ...	1.25 ...
3	16.2 ...	1.01 ...	1.04 ...	1.25 ...	1.27 ...	1.27 ...	1.33 ...	1.33 ...	1.33 ...	1.33 ...	1.33 ...	1.33 ...	1.32 ...
4	21.3 ...	1.01 ...	1.05 ...	1.3 ...	1.3 ...	1.3 ...	1.37 ...	1.37 ...	1.37 ...	1.37 ...	1.37 ...	1.37 ...	1.37 ...
5	26.4 ...	1.02 ...	1.07 ...	1.32 ...	1.32 ...	1.32 ...	1.38 ...	1.38 ...	1.38 ...	1.38 ...	1.37 ...	1.37 ...	1.37 ...
6	31.5 ...	1.03 ...	1.1 ...	1.35 ...	1.35 ...	1.35 ...	1.41 ...	1.41 ...	1.41 ...	1.38 ...	1.38 ...	1.39 ...	1.38 ...
7	36.6 ...	1.03 ...	1.13 ...	1.4 ...	1.4 ...	1.4 ...	1.45 ...	1.45 ...	1.42 ...	1.4 ...	1.4 ...	1.41 ...	1.39 ...
8	41.7 ...	1.03 ...	1.16 ...	1.44 ...	1.44 ...	1.47 ...	1.55 ...	1.55 ...	1.44 ...	1.41 ...	1.41 ...	1.42 ...	1.4 ...
9	46.8 ...	1.03 ...	1.29 ...	1.55 ...	1.55 ...	1.55 ...	1.59 ...	1.59 ...	1.46 ...	1.42 ...	1.41 ...	1.41 ...	1.4 ...
10	51.9 ...	1.04 ...	1.5 ...	1.67 ...	1.65 ...	1.65 ...	1.65 ...	1.65 ...	1.59 ...	1.51 ...	1.48 ...	1.42 ...	1.4 ...
11	57 ...	1.05 ...	1.61 ...	1.7 ...	1.69 ...	1.67 ...	1.67 ...	1.68 ...	1.65 ...	1.55 ...	1.52 ...	1.48 ...	1.4 ...

Σχήμα 4.11: Ο χάρτης λειτουργίας της βαλβίδας εκτόνωσης. Στον άξονα x είναι οι στροφές λειτουργίας σε rpm και στον άξονα y η διάμετρος της «πεταλούδας» σε mm.



Σχήμα 4.12: Ολόκληρο το βασικό μοντέλο (χωρίς ηλεκτρική υποβοήθηση) του κινητήρα Otto GDI με εικονικό οδηγό και όχημα, στο περιβάλλον του GT-Power

4.3 Μοντέλο ηλεκτρικά υποβοηθούμενου στρόβιλο-υπερπληρωτή

Η λογική πίσω από την μελέτη του ηλεκτρικά υποβοηθούμενου υπερπληρωτή είναι η μείωση της καθυστέρησης του συστήματος υπερπλήρωσης. Το αποτέλεσμα της μείωσης αυτής χωρίζεται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη αφορά την καθυστέρηση στην επιτάχυνση (turbo-lag) του ζεύγους που οφείλεται στα χαμηλής ενέργειας καυσαέρια όταν ο κινητήρας λειτουργεί σε χαμηλές στροφές. Αντιμετωπίζεται με την βοήθεια ενός ηλεκτροκινητήρα που έχει ως στόχο την παροχή της επιπλέον απαιτούμενης ροπής για την περιστροφή του ζεύγους υπερπλήρωσης όταν αυτό απαιτείται. Κατά συνέπεια, η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης αυτής ωφελεί την συνολική επιτάχυνση του οχήματος. Εκτός από τον τομέα των επιδόσεων, η ηλεκτρική υποβοήθηση επιδρά και στην ποιότητα της καύσης εντός του κυλίνδρου, άρα και στην παραγωγή των ρύπων. Η απαίτηση του οδηγού για επιτάχυνση του οχήματος στις χαμηλές στροφές δεν συνοδεύεται από την απαιτούμενη παροχή αέρα λόγω της προαναφερθείσας υστέρησης. Επομένως, η αναλογία αέρα-καυσίμου εντός του κυλίνδρου δεν είναι η ιδανική για τις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας, οπότε και οι ρύποι παρουσιάζονται αυξημένοι.

Για την μοντελοποίηση ενός τέτοιου συστήματος χρησιμοποιούνται πρότυπα στοιχεία (templates) που σχετίζονται με ηλεκτρικά συστήματα αλλά και ηλεκτρονικά που συνεισφέρουν στον έλεγχο της διάταξης:

α) Ηλεκτροκινητήρας¹

Το κύριο κομμάτι της υποβοήθησης είναι ο ηλεκτροκινητήρας, καθώς αυτός είναι που παρέχει την επιπλέον ισχύ. Η σύνδεσή του με το ζεύγος υπερπλήρωσης γίνεται μηχανικά. Έχει γίνει χρήση ενός ηλεκτροκινητήρα με ονομαστική ισχύς 2.5 kW και ονομαστικές στροφές 30.000 rpm.

β) Μπαταρία

Η μπαταρία που χρησιμοποιείται είναι διαφορετική από την κύρια που βρίσκεται σε ένα όχημα. Είναι μικρότερη και η συνολική της χωρητικότητα είναι 1 Ah.

γ) Περιοριστής Ισχύος Μπαταρίας

Ο περιοριστής ισχύος μπαταρίας χρησιμεύει στην εξασφάλιση της μέγιστης τάσης και ισχύος ρεύματος που θα διαπεράσει την μπαταρία. Τα όρια που έχουν οριστεί είναι στα 48 V και στα 300 A.

¹ Η διαστασιολόγηση του ηλεκτροκινητήρα και της μπαταρίας προήλθε από την παραπομπή [19].

δ) Εναλλάκτης (Δυναμό)

Η ανάκτηση της ενεργείας από το σύστημα είναι μικρότερη από εκείνη που δαπανάται για την λειτουργία του. Επομένως, η αναπόφευκτη ολική αποφόρτιση της μπαταρίας, αποτρέπεται από την χρήση του εναλλάκτη. Αφού τα οχήματα έχουν ήδη ένα δυναμό για την φόρτιση της κύριας μπαταρίας, δεν χρειάζεται προσθήκη δευτέρου αλλά η σύνδεση του ήδη υπάρχοντος με την μπαταρία του συστήματος ηλεκτρικής υποβοήθησης και η χρήση του όποτε οριστεί στο σύστημα ελέγχου.

ε) Σύστημα ελέγχου

Το σύστημα ελέγχου είναι από τα σημαντικότερα στοιχεία που προστίθενται. Η μέγιστη απόδοση της υποβοήθησης και η βέλτιστη ανάκτηση ενέργειας από αυτήν καθορίζονται από την ρύθμιση του συστήματος ελέγχου. Στην παρούσα διπλωματική έχει κατασκευαστεί ένα απλό μοντέλο ελέγχου με την χρήση ενός δικτύου υποθετικών προτάσεων (if-then) πάνω σε συγκεκριμένα μεγέθη του κινητήρα, και έχει ρυθμιστεί ώστε να υλοποιείται, έστω και σε μικρό βαθμό, η σκέψη πίσω από την μελέτη ενός τέτοιου συστήματος ηλεκτρικής υποβοήθησης. Τα στοιχεία που λαμβάνονται υπόψιν στο σύστημα ελέγχου είναι τα εξής.

- Ισχύς συμπιεστή
- Ισχύς στροβίλου
- Ταχύτητα περιστροφής ζεύγους
- Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα
- Ποσοστό πατήματος πεντάλ επιτάχυνσης
- Ποσοστό πατήματος πεντάλ πέδης
- Μέση πραγματική πίεση κυλίνδρου
- Επίπεδο φόρτισης μπαταρίας
- Επιτάχυνση του οχήματος

1. Διαχείριση Ηλεκτροκινητήρα

Ο ηλεκτροκινητήρας δεν τίθεται σε λειτουργία όταν:

- Το πεντάλ επιτάχυνσης είναι πατημένο έως και 5%
- Το όχημα δεν επιταχύνει
- Η βαλβίδα εκτόνωσης είναι ανοιχτή
- Η μπαταρία βρίσκεται κάτω από το 10% της χωρητικότητάς της
- Χρησιμοποιείται η γεννήτρια

Ο ηλεκτροκινητήρας τίθεται σε λειτουργία όταν

- Ο στρόβιλος παράγει παραπάνω ενέργεια από αυτή που καταναλώνει ο συμπιεστής (κατάσταση επιτάχυνσης)
- Οι στροφές του οχήματος είναι έως και 2400 rpm ανεξαρτήτως πατήματος πεντάλ επιτάχυνσης (αρκεί μεγαλύτερο του 5%)

- Το πάτημα του πεντάλ επιτάχυνσης είναι μεγαλύτερο του 80% για το πρώτο στάδιο πρόσδοσης ενέργειας και άνω του 95% για το δεύτερο στάδιο, με χρήση της μέγιστης ισχύος του ηλεκτροκινητήρα.

Είναι φανερό ότι ορισμένες συνθήκες επικαλύπτονται και έχει ορισθεί η σειρά ενεργοποίησης τους στον κόμβο “IfThenElse” ανάλογα με την σημαντικότητα τους. Για παράδειγμα, αν ο οδηγός επιθυμεί να πατήσει το πεντάλ επιτάχυνσης στο 100% τότε το όχημα πρέπει να ανταπεξέλθει στο αίτημα για μέγιστη ισχύ στον καλύτερο δυνατό χρόνο ανεξαρτήτως των στροφών του κινητήρα, και δεν θα παρέχει ο ηλεκτροκινητήρας την περιορισμένη ισχύ που έχει προκαθοριστεί για την συνθήκη λειτουργίας έως και 2400 rpm. Οι συνθήκες αυτές όμως δεν μπορούν να παραβλέψουν τους όρους για την μη ενεργοποίηση του ηλεκτροκινητήρα.

2. Διαχείριση Γεννήτριας

Η γεννήτρια δεν τίθεται σε λειτουργία όταν το πεντάλ επιτάχυνσης είναι πατημένο και ταυτόχρονα η βαλβίδα εκτόνωσης δεν είναι ανοικτή.

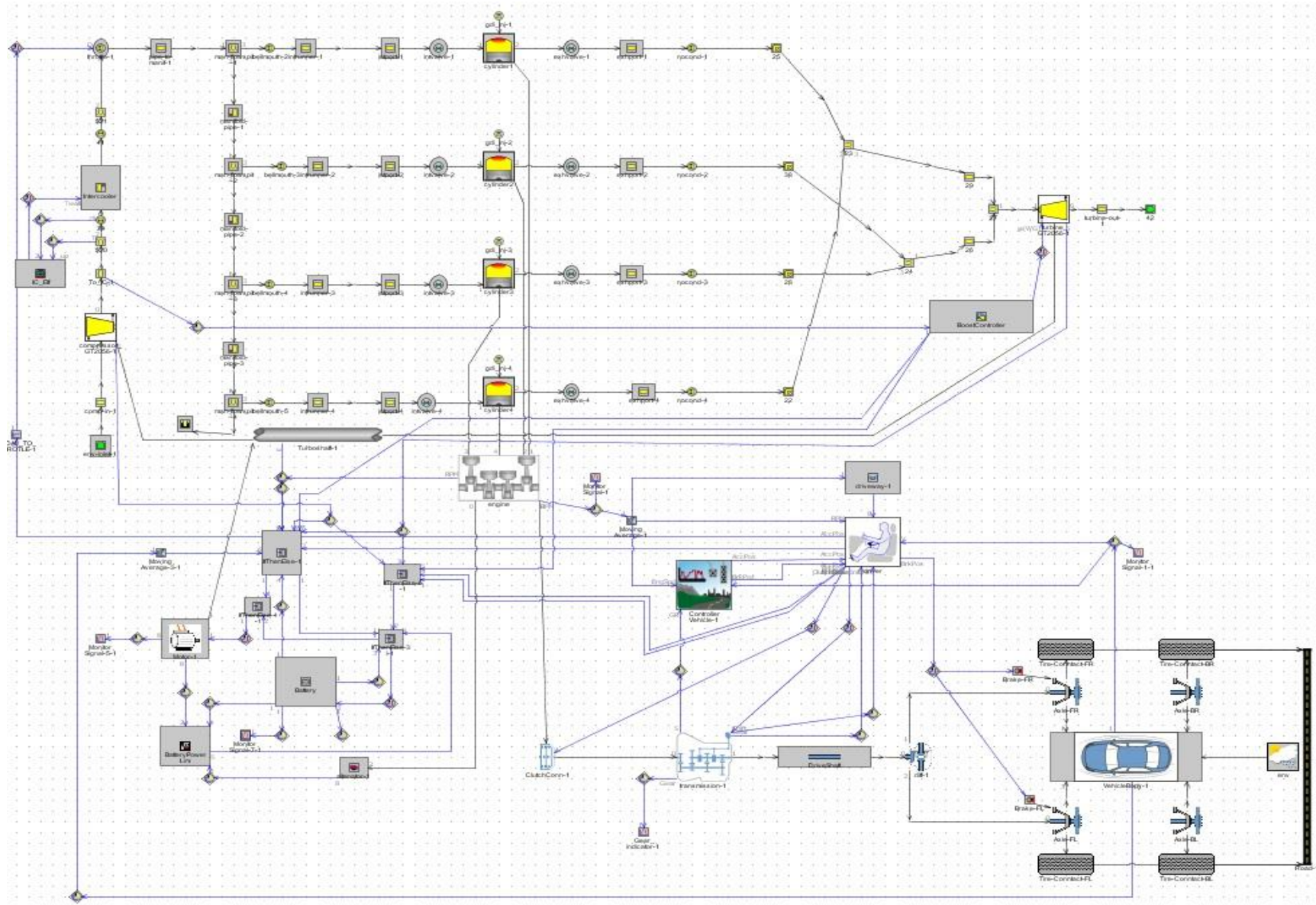
Η γεννήτρια τίθεται σε λειτουργία όταν:

- Ο οδηγός πατάει το φρένο και το ζεύγος υπερπλήρωσης τείνει να επιβραδυνθεί
- Η βαλβίδα εκτόνωσης είναι ανοικτή

Συνεπώς, η γεννήτρια παίρνει την θέση της βαλβίδας εκτόνωσης και αντί να ανοίγει και να διαφεύγουν τα ζεστά καυσαέρια χωρίς να χρησιμοποιούνται, γίνεται εκμετάλλευσή τους για την φόρτιση της μπαταρίας. Επίσης, το σύστημα ελέγχου εκμεταλλεύεται την αδράνεια του ζεύγους υπερπλήρωσης κατά την επιβράδυνση του οχήματος όταν πατιέται το πεντάλ του φρένου για την απορρόφηση ενέργειας.

3. Διαχείριση Δυναμό

Κατά την διάρκεια που ο ηλεκτροκινητήρας καταναλώνει ενέργεια από την μπαταρία τη στιγμή μιας επιτάχυνσης ή ο ηλεκτροκινητήρας φορτίζει την μπαταρία με την απορρόφηση της περίσσειας ενέργειας του στροβίλου, το δυναμό δεν αλληλοεπιδρά με το σύστημα. Όταν όμως παύσει η αλληλεπίδραση του ηλεκτροκινητήρα με την μπαταρία, το δυναμό ξεκινά την φόρτισή της μέχρι το 100%, ανεξαρτήτως της στάθμης στην οποία βρίσκεται η μπαταρία τη στιγμή αυτή.



Σχήμα 4.13: Ολόκληρο το μοντέλο του βενζινοκινητήρα με την ηλεκτρικά υποβοηθούμενη στροβιλο-υπερπλήρωση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Επιδόσεις και Εκπομπές Καυσαερίων του Κινητήρα

5.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιήθηκε δοκιμή και σύγκριση δύο μοντέλων. Το πρώτο μοντέλο αναπαριστά την λειτουργία ενός συμβατικού κινητήρα Otto GDI. Το δεύτερο μοντέλο αφορά την λειτουργία του ίδιου συμβατικού κινητήρα αλλά με την προσθήκη ηλεκτρικής υποβοήθησης στο σύστημα υπερπλήρωσης. Οι διαφορετικές συνθήκες και μεταβλητές των συστημάτων για τις οποίες εκτελέστηκαν οι δοκιμές των δύο κινητήρων που προαναφέρθηκαν είναι οι εξής.

- Οχήματα διαφορετικού βάρους
- Διαφορετικό σύστημα ελέγχου της ηλεκτρικής υποβοήθησης
- Διαφορετική ισχύς του ηλεκτροκινητήρα

Επιπλέον, γίνεται συζήτηση και μελέτη για την ανάγκη χρήσης διαφορετικού προφίλ αέρα-καυσίμου μεταξύ των δύο μοντέλων.

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε δύο διαφορετικές ομάδες οδηγικών συνθηκών. Η πρώτη αποτελείται από τον κλασικό Κύκλο Πόλης WLTC κλάσης 3-2 που ισχύει στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Από εκεί εξάγονται συμπεράσματα που σχετίζονται με τις εκπομπές των καυσαερίων και την ειδική κατανάλωση καυσίμου. Μελετώνται τα αποτελέσματα που εξάγονται από το λογισμικό σχετικά με τα NO_x, CO₂, CO και HC. Όμως, το GT-Post δεν διαχωρίζει την αιθάλη από τους υδρογονάνθρακες. Συνεπώς, τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τους HC εμπεριέχουν και την αιθάλη.

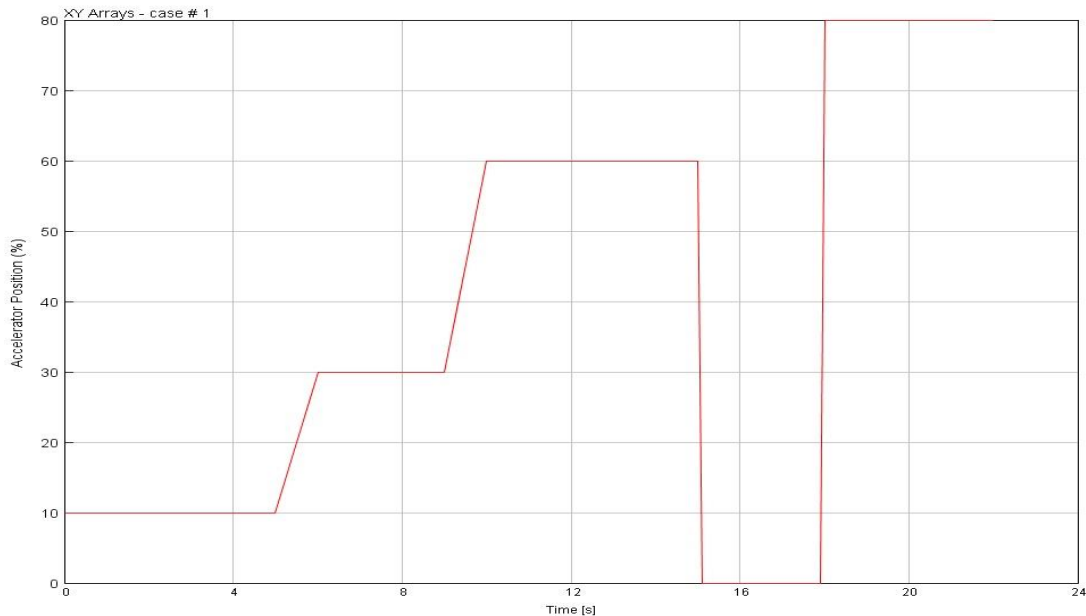
Η δεύτερη ομάδα οδηγικών συνθηκών επικεντρώνεται στην εκτίμηση της επιτάχυνσης και της απόκρισης του οχήματος:

- η δοκιμή 1 είναι επιτάχυνση από 0-100 km/h χρησιμοποιώντας όλο το εύρος των στροφών του κινητήρα.
- Η δοκιμή 2 ελέγχει την απόκριση στο διάστημα 30-80 km/h ξεκινώντας με 2^η ταχύτητα στο κιβώτιο και αλλάζοντας τις ταχύτητες έως και τις 4000 rpm, προσομοιώνοντας περισσότερο μια κατάσταση εσπευσμένης επιτάχυνσης στην καθημερινή οδήγηση παρά την χρήση όλου του εύρους των στροφών.

- Η δοκιμή 3 εξετάζει την επιτάχυνση του οχήματος από 50 km/h έως 90 km/h έχοντας την 3^η και 4^η σχέση στο κιβώτιο.
- Η δοκιμή 4 εκτελείται αντίστοιχα στο διάστημα 60 km/h με 130 km/h έχοντας την 4^η και 5^η σχέση στο κιβώτιο.

Για τους παραπάνω «κύκλους», όπου η δοκιμή δεν ξεκινά από τα 0 km/h, το όχημα ξεκινάει από στάση και στη συνέχεια αφού «πιάσει» την αρχική ταχύτητα της εκάστοτε δοκιμής, παραμένει σε αυτή ώστε να βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση κατά την έναρξή της και οι μεταβλητές του οχήματος να είναι ίδιες. Για αυτόν τον λόγο, το σύστημα υποβοήθησης είναι απενεργοποιημένο σε εκείνο το διάστημα ώστε να μην επηρεάζει τις αρχικές στροφές του υπερπληρωτή και ότι εξαρτάται από αυτήν την μεταβλητή.

Τέλος, ακολουθεί η δοκιμή 5 που προκαθορίζει το ποσοστό πατήματος του πεντάλ επιτάχυνσης, εν αντιθέσει με την ταχύτητα που συνέβαινε στις προηγούμενες περιπτώσεις. Έχει διάρκεια 22 s και ακολουθεί εύρος «πατήματος» από 10% έως και 80% όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Εκτός από τον Παγκόσμιο Κύκλο Πόλης, λοιπόν, γίνονται δοκιμές σε συνθήκες που αντιπροσωπεύουν την καθημερινότητα, δηλαδή όταν η διαχείριση των σχέσεων του κιβωτίου δεν είναι άρτια και ο οδηγός θελήσει ο κινητήρας να αποδώσει, αλλά και σε πιθανά εύρη πατήματος του επιταχυντή που δεν καλύπτονται από τον Κύκλο.



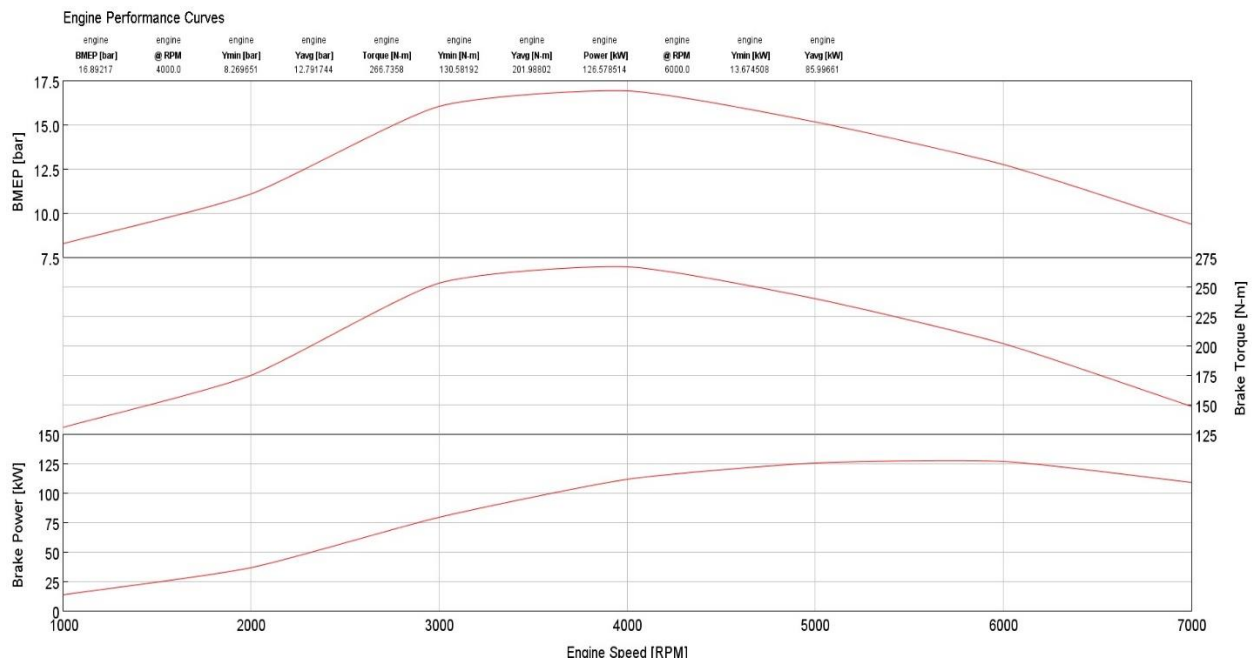
Σχήμα 5.1: Χάρτης πατήματος του πεντάλ επιτάχυνσης συναρτήσει του χρόνου για την δοκιμή 5

Η χρήση των επιπλέον αυτών δοκιμών έχει και ένα δεύτερο στόχο, συγκεκριμένα την εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του συστήματος υποβοήθησης. Όπως είναι αναμενόμενο, η περαιτέρω προσφορά ενέργειας του ηλεκτροκινητήρα βοηθά στην αμεσότερη απόκριση του

κινητήρα, κάτι το οποίο θα φανεί στα αποτελέσματα παρακάτω (Σχήμα 5.3 έως 5.8). Κατά συνέπεια, δίνεται στον εκάστοτε κατασκευαστή η δυνατότητα να ρυθμίσει το προφίλ της αναλογίας αέρα-καυσίμου, το χρονισμό έναυσης και της ανακυκλοφορίας καυσαερίων (EGR) έτσι ώστε η απόκριση του κινητήρα με την ηλεκτρικά υποβοηθούμενη υπερπλήρωση να είναι αντίστοιχη με εκείνη του απλού υπερπληρωμένου κινητήρα. Το όφελος από αυτήν την ρύθμιση είναι η λειτουργία σε μεγαλύτερη αναλογία αέρα-καυσίμου ή αντίστοιχα με εντονότερη χρήση του EGR, με άμεσο αντίκτυπο στις εκπομπές ρύπων χωρίς να επιβαρύνεται η οδηγική συμπεριφορά του κινητήρα. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, πάντως, δεν έχει μοντελοποιηθεί σύστημα ανακυκλοφορίας καυσαερίων και κατά συνέπεια στο μοντέλο που μελετάται η απόκριση έχει γίνει βαθμονόμηση του κινητήρα μόνο με βάση την αναλογία αέρα-καυσίμου. Οπότε, συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα αφορούν σύγκριση κινητήρων με και χωρίς υποβοήθηση, έχοντας όλα τα λειτουργικά χαρακτηριστικά ίδια, αλλά και σύγκριση με τον κινητήρα βαθμονομημένο ως προς την απόκριση και την αναλογία του μίγματος αέρα-καυσίμου. Στη συνέχεια θα ακολουθήσουν παραμετρικές αναλύσεις.

5.2 Επιδόσεις κινητήρα

Σε μόνιμη κατάσταση, οι επιδόσεις του «πρότυπου» συμβατικού κινητήρα χωρίς να είναι συνδεδεμένος στο όχημα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.2.

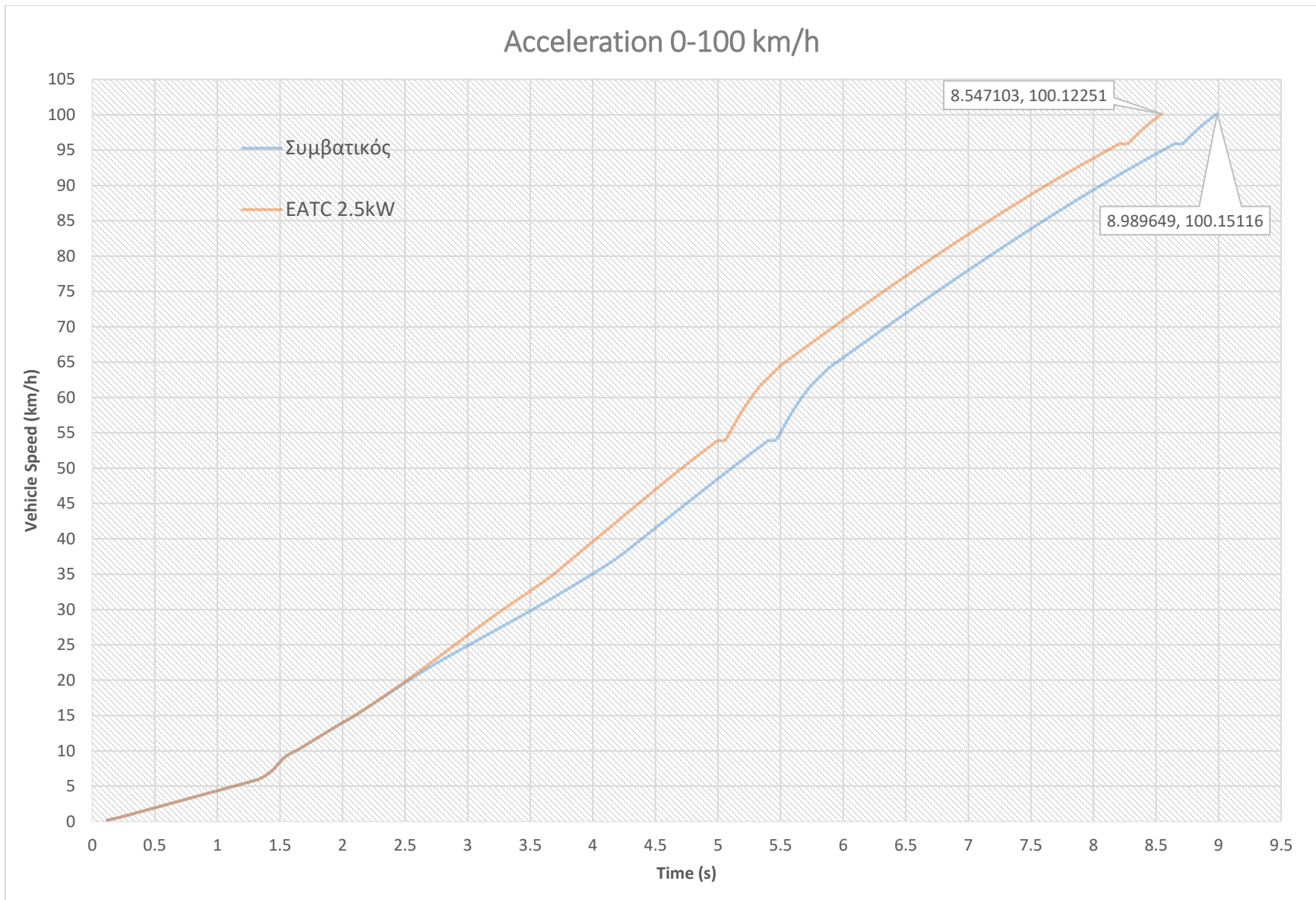


Σχήμα 5.2: Επιδόσεις μοντελοποιημένου κινητήρα σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

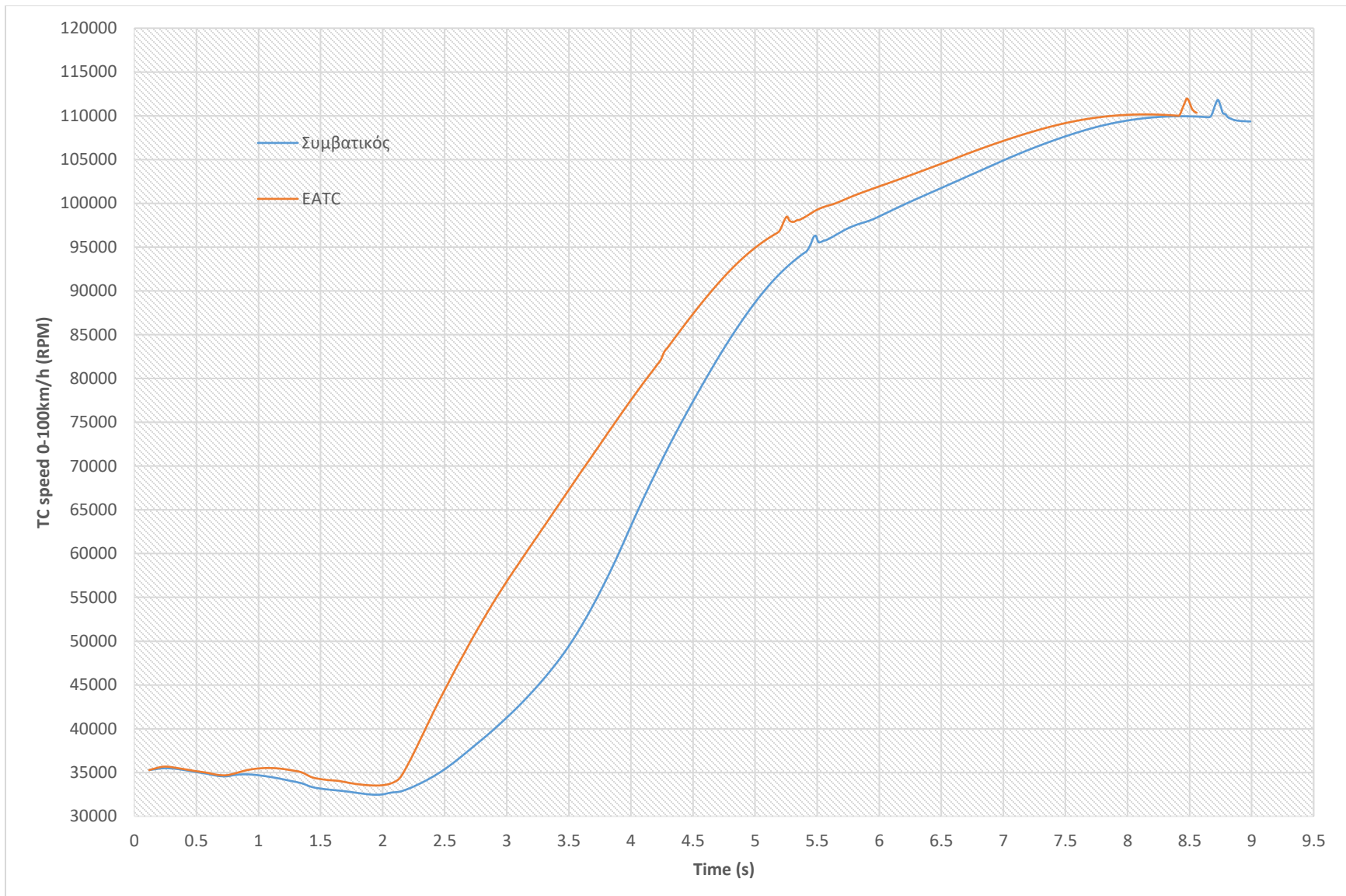
Πριν παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από τον Κύκλο Πόλης WLTC Κλάσης 3-2, θα αναφερθούν πρώτα εκείνα από τις αυτοσχέδιες δοκιμές. Από τα διαγράμματα αυτά θα γίνει φανερό ότι το όχημα με την ηλεκτρική υποβοήθηση έχει σημαντική διαφορά στις επιδόσεις επιτάχυνσης. Το Σχήμα 5.4 μάλιστα δείχνει την μείωση της υστέρησης (turbo-lag) που δικαιολογεί και την αμεσότερη απόκριση του οχήματος και κατά συνέπεια την καλύτερη επιτάχυνση.

Τέλος επειδή στην συνέχεια του κειμένου θα παρουσιαστούν περαιτέρω παραλλαγές του κινητήρα, πρέπει να ορισθούν χαρακτηριστικά ονόματα για τον καθένα. Ο κινητήρας χωρίς την ηλεκτρική υποβοήθηση από τον οποίο ξεκινάνε και βασίζονται όλα τα μοντέλα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι ο συμβατικός κινητήρας ή συμβατικό όχημα.

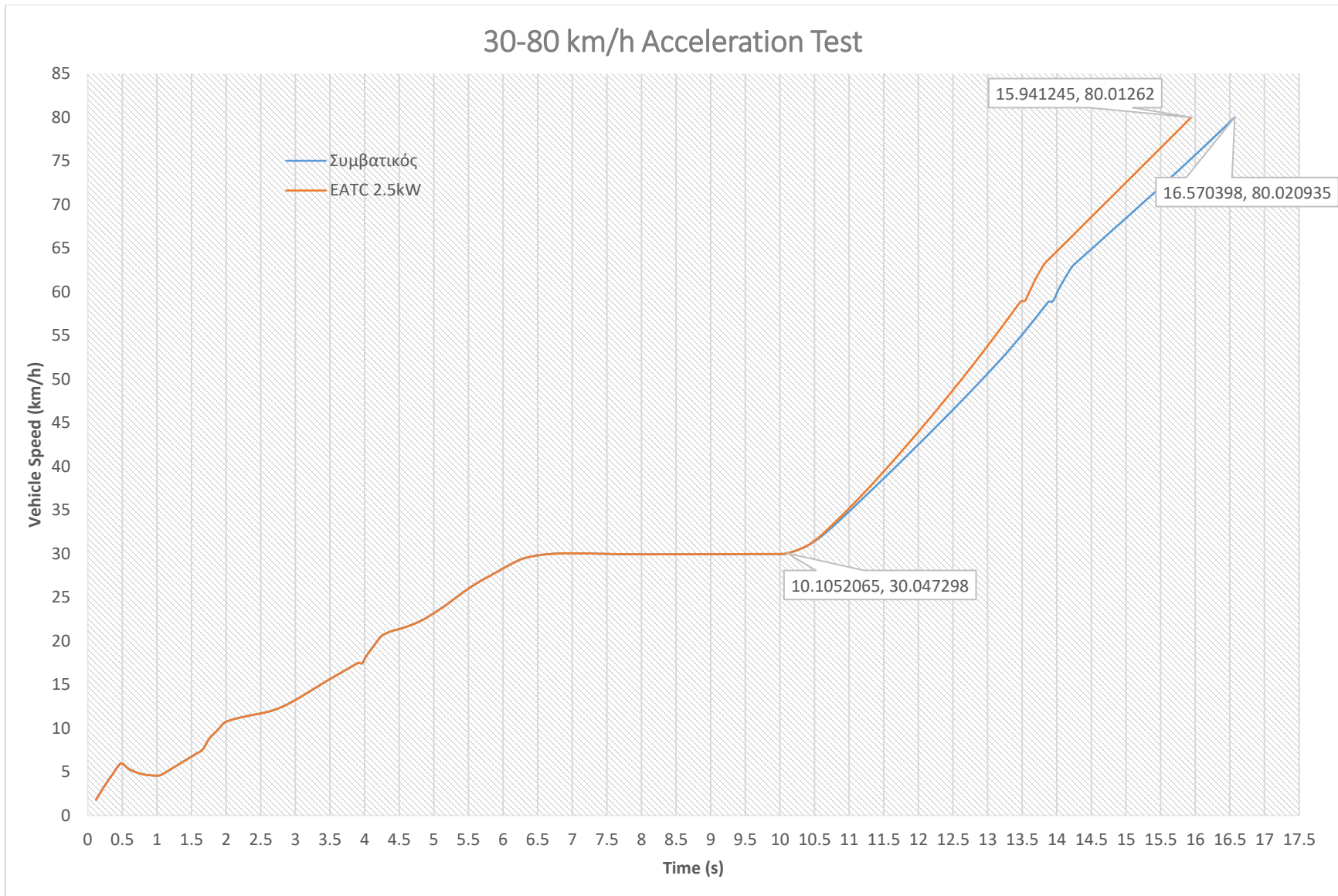
- Ο πρώτος κινητήρας με ηλεκτρική υποβοήθηση που θα συγκριθεί σε αυτήν την ενότητα με τον συμβατικό και έχουν όλα τα υπόλοιπα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά ίδια, είναι ο κινητήρας 1.
- Ο δεύτερος κινητήρας με ηλεκτρική υποβοήθηση που θα συγκριθεί με τον συμβατικό αλλά έχει διαφορετικό προφίλ λόγου αέρα-καυσίμου (AF) και θα αναλυθεί παρακάτω (Ενότητα 5.4), είναι ο κινητήρας 2.



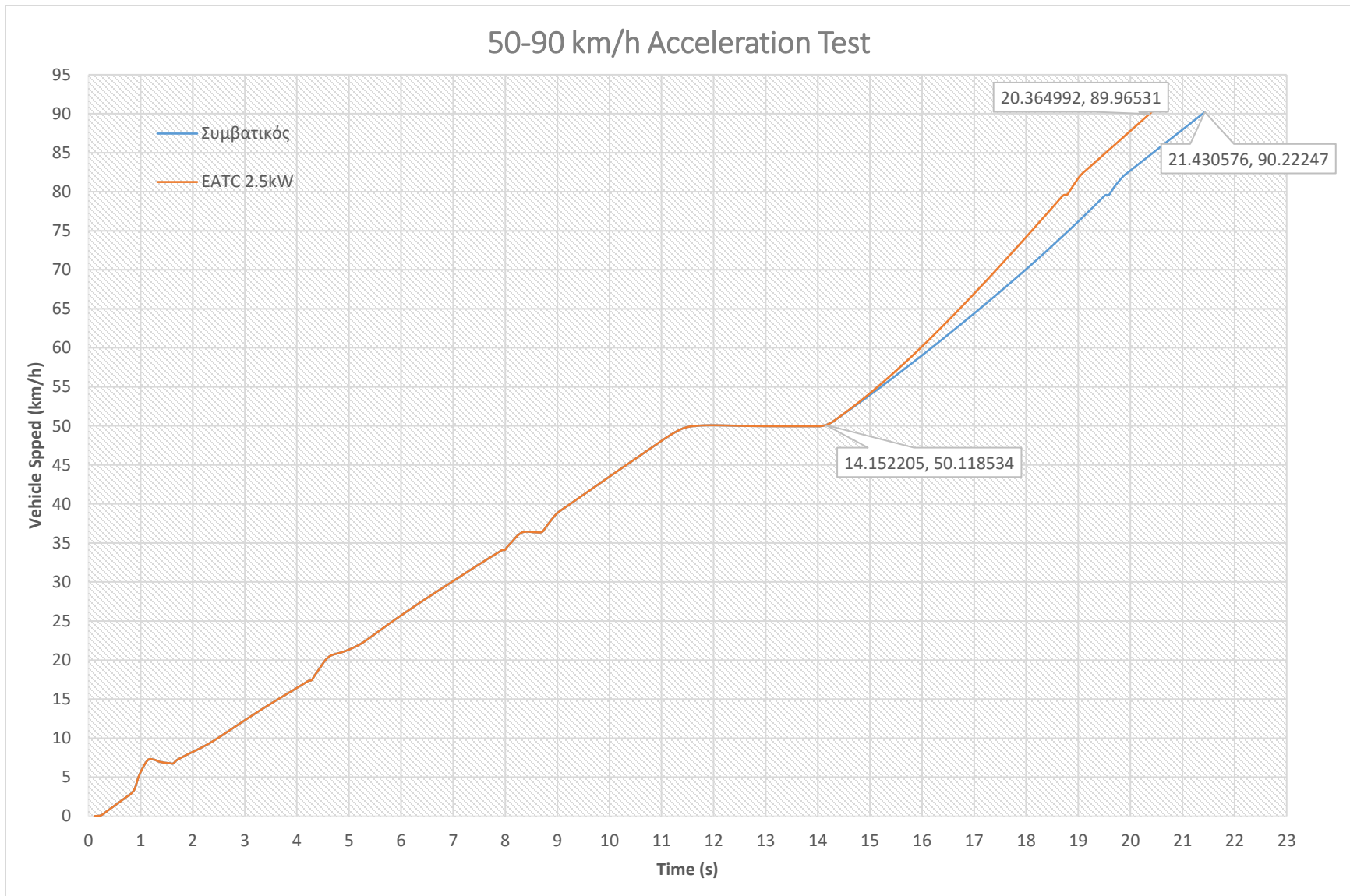
Σχήμα 5.3: Επιτάχυνση οχήματος από στάση στα 100 km/h



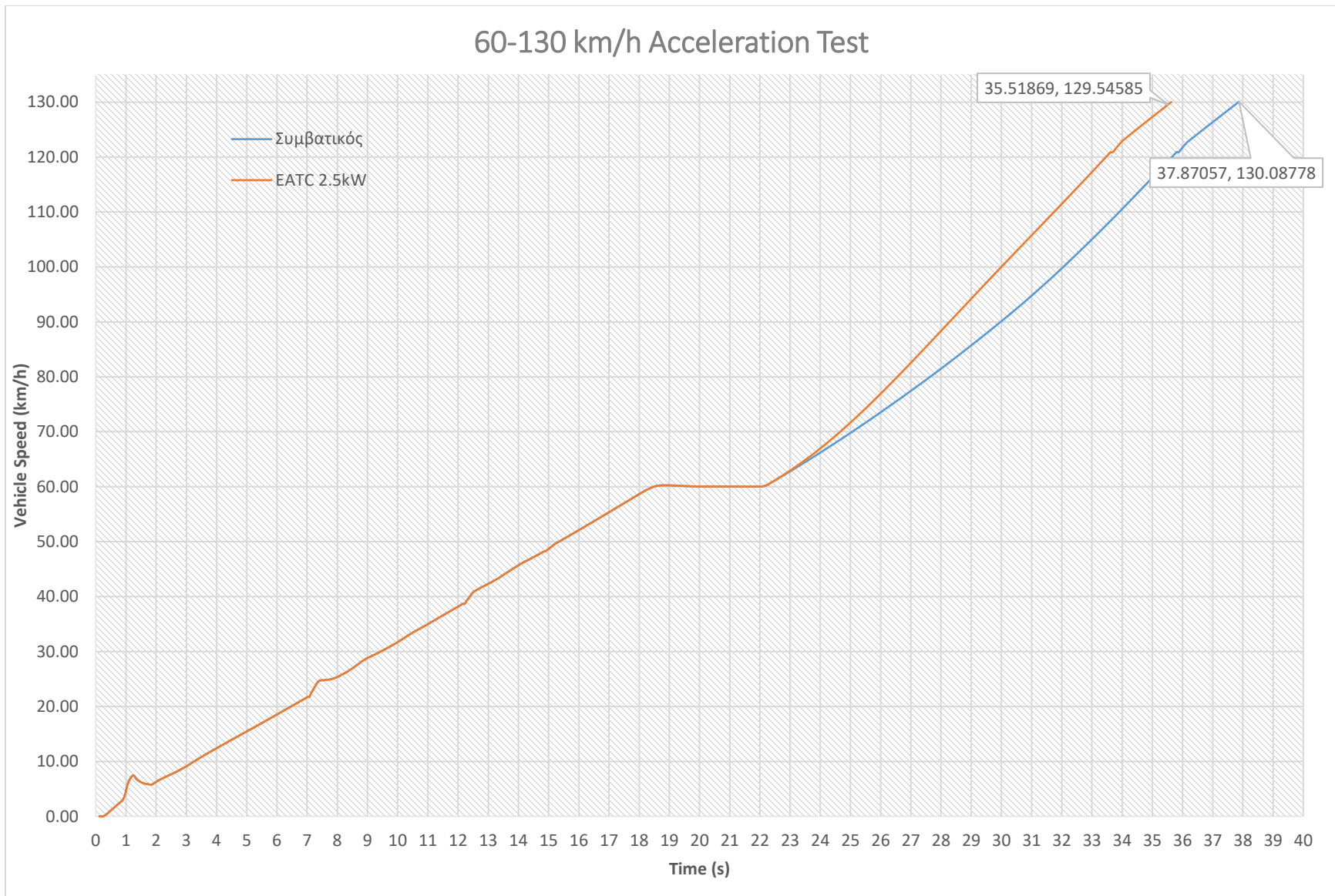
Σχήμα 5.4: Επιτάχυνση του ζεύγους υπερπλήρωσης κατά την δοκιμή 0-100 km/h, με και χωρίς την ηλεκτρική υποβοήθηση. Στα σημεία που υπάρχει το τοπικό μέγιστο γίνεται αλλαγή της σχέσης στο κιβώτιο



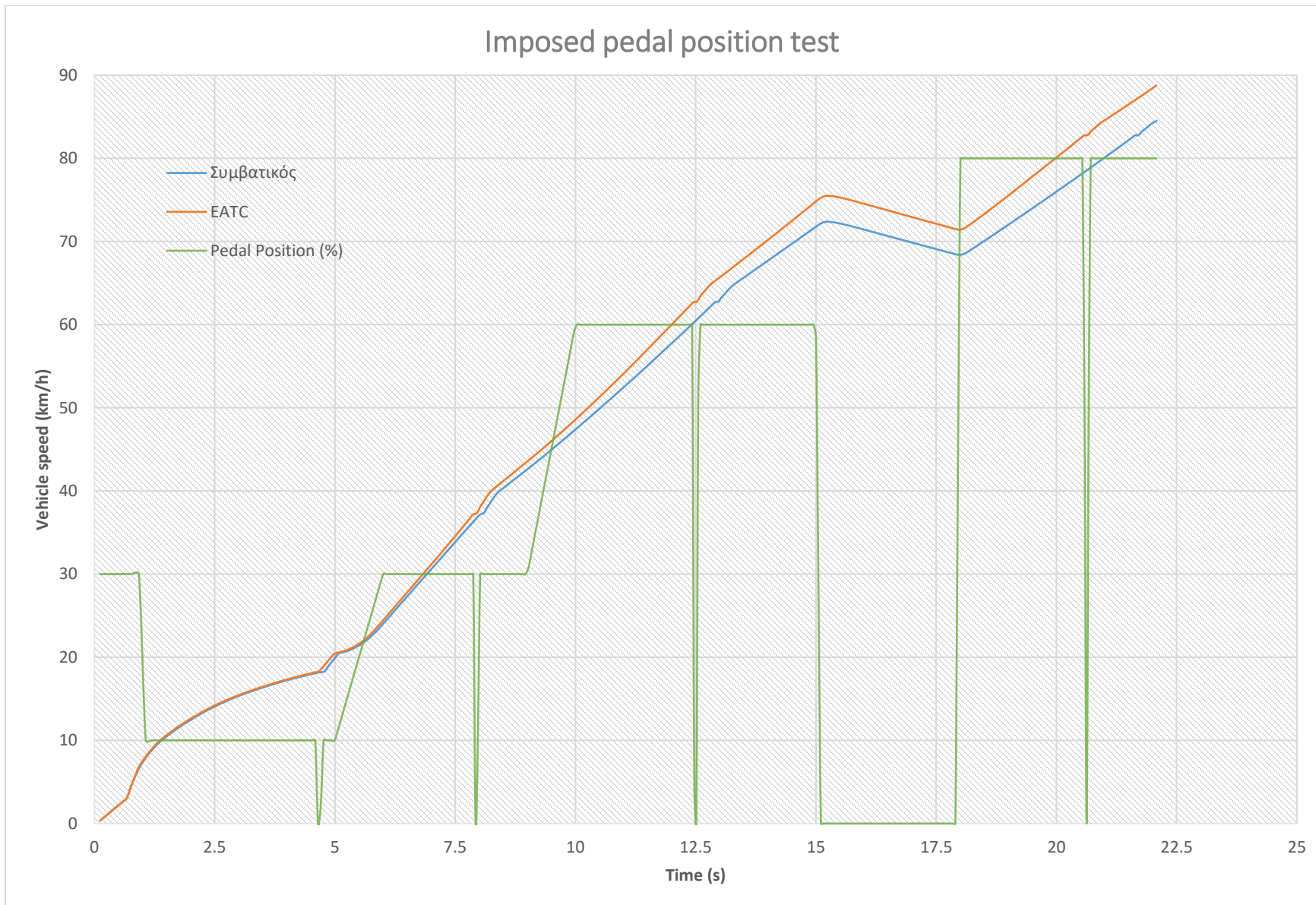
Σχήμα 5.5: Δοκιμή απόκρισης οχήματος από τα 30km/h έως τα 80 km/h ξεκινώντας από την 2^η σχέση στο κιβώτιο ταχυτήτων. Η δοκιμή επιτάχυνσης ξεκινά στα 10 s



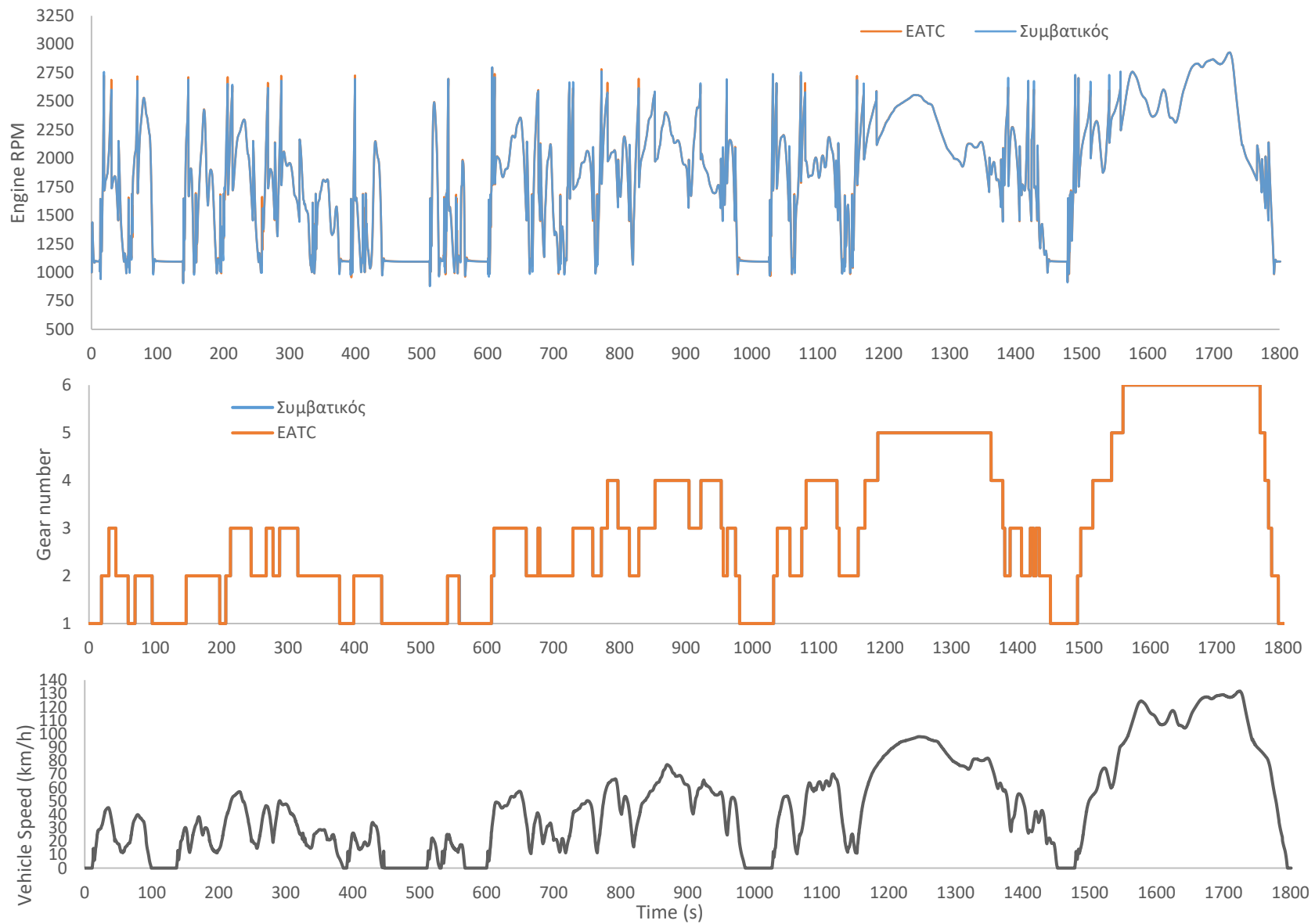
Σχήμα 5.6: Δοκιμή απόκρισης οχήματος από τα 50 km/h έως τα 90 km/h χρησιμοποιώντας μόνο την 3^η σχέση στο κιβώτιο ταχυτήτων. Η δοκιμή επιτάχυνσης ξεκινά στο 14^ο s



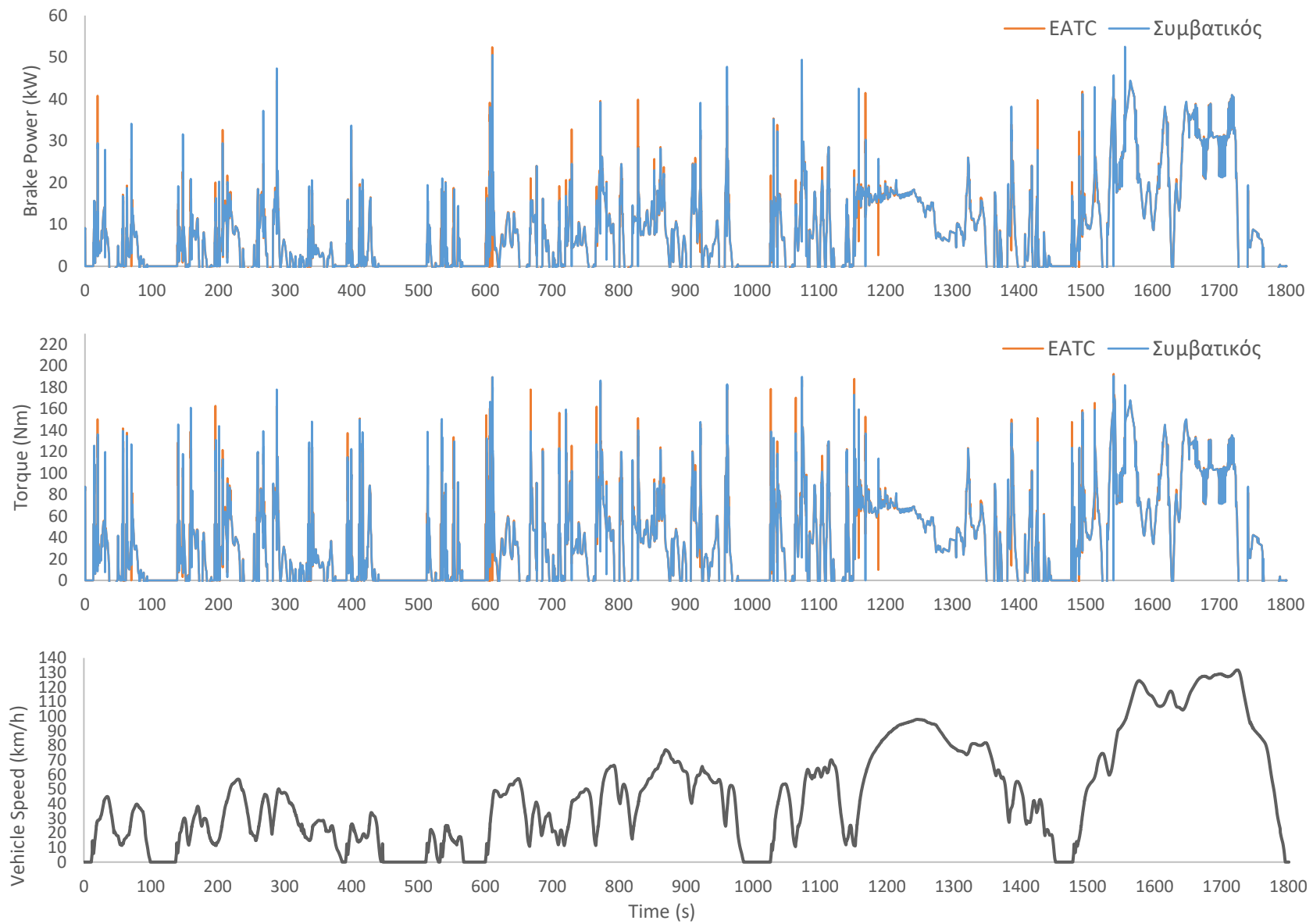
Σχήμα 5.7: Δοκιμή απόκρισης οχήματος από τα 60 km/h έως τα 130 km/h χρησιμοποιώντας την 4^η και 5^η σχέση στο κιβώτιο ταχυτήτων. Η δοκιμή ξεκινά στο 22^ο s



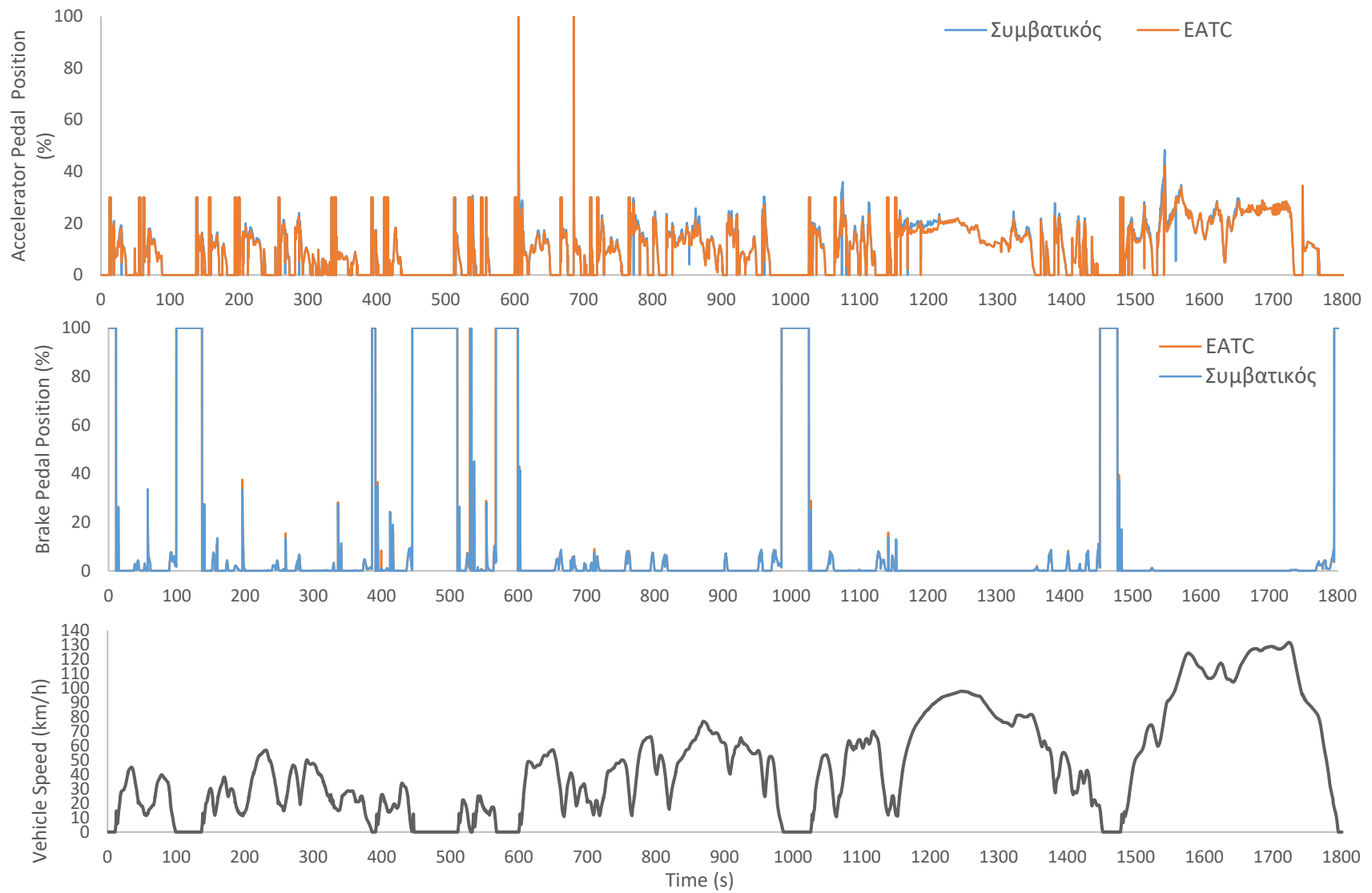
Σχήμα 5.8: Η δοκιμή 5 κατά την οποία προκαθορίζεται το πάτημα του πεντάλ επιτάχυνσης συναρτήσει του χρόνου



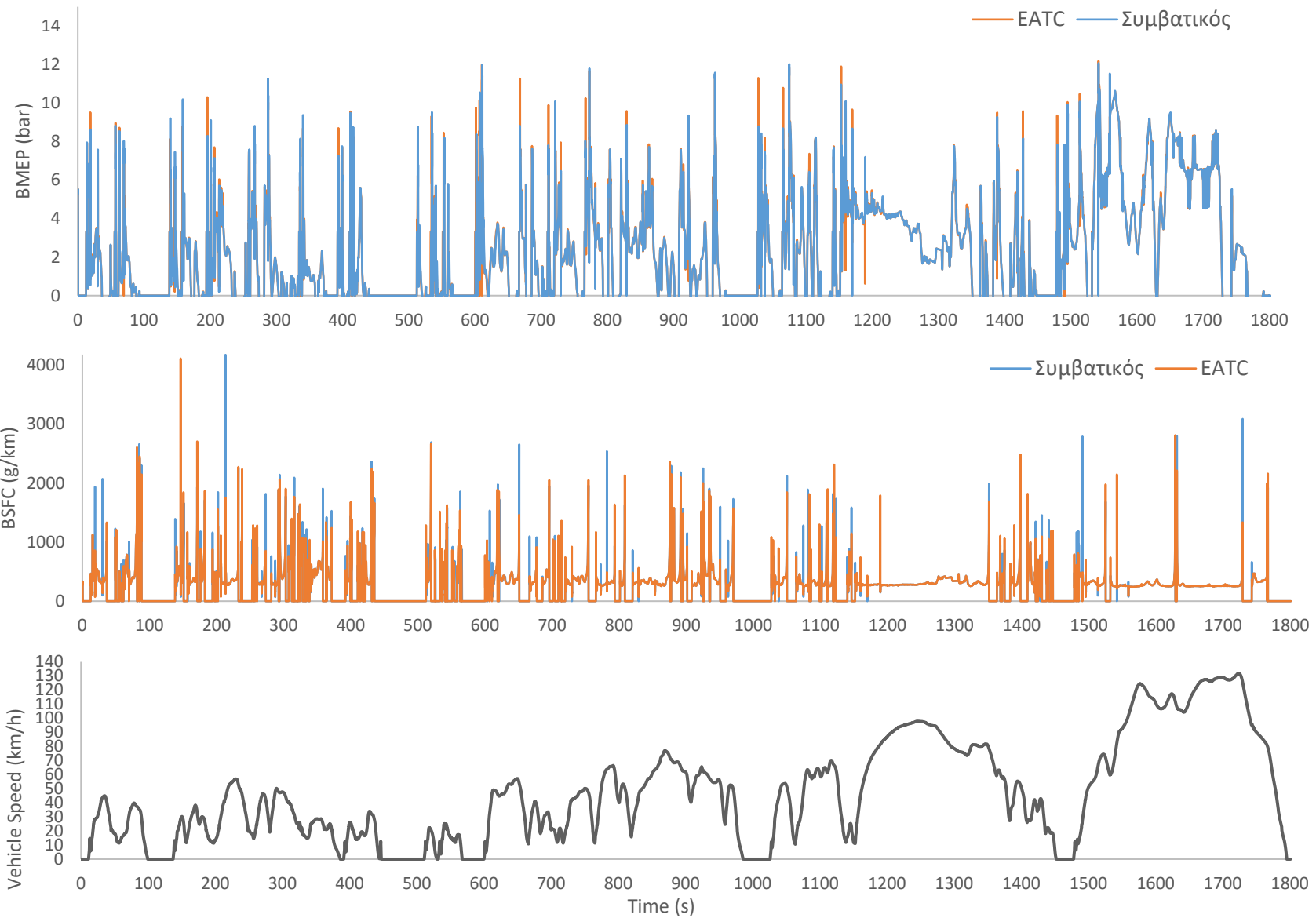
Σχήμα 5.9: Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα και σχέση του κιβωτίου συναρτήσει του χρόνου κατά την διεξαγωγή του Κύκλου Πόλης WLTC κλάσης 3-2



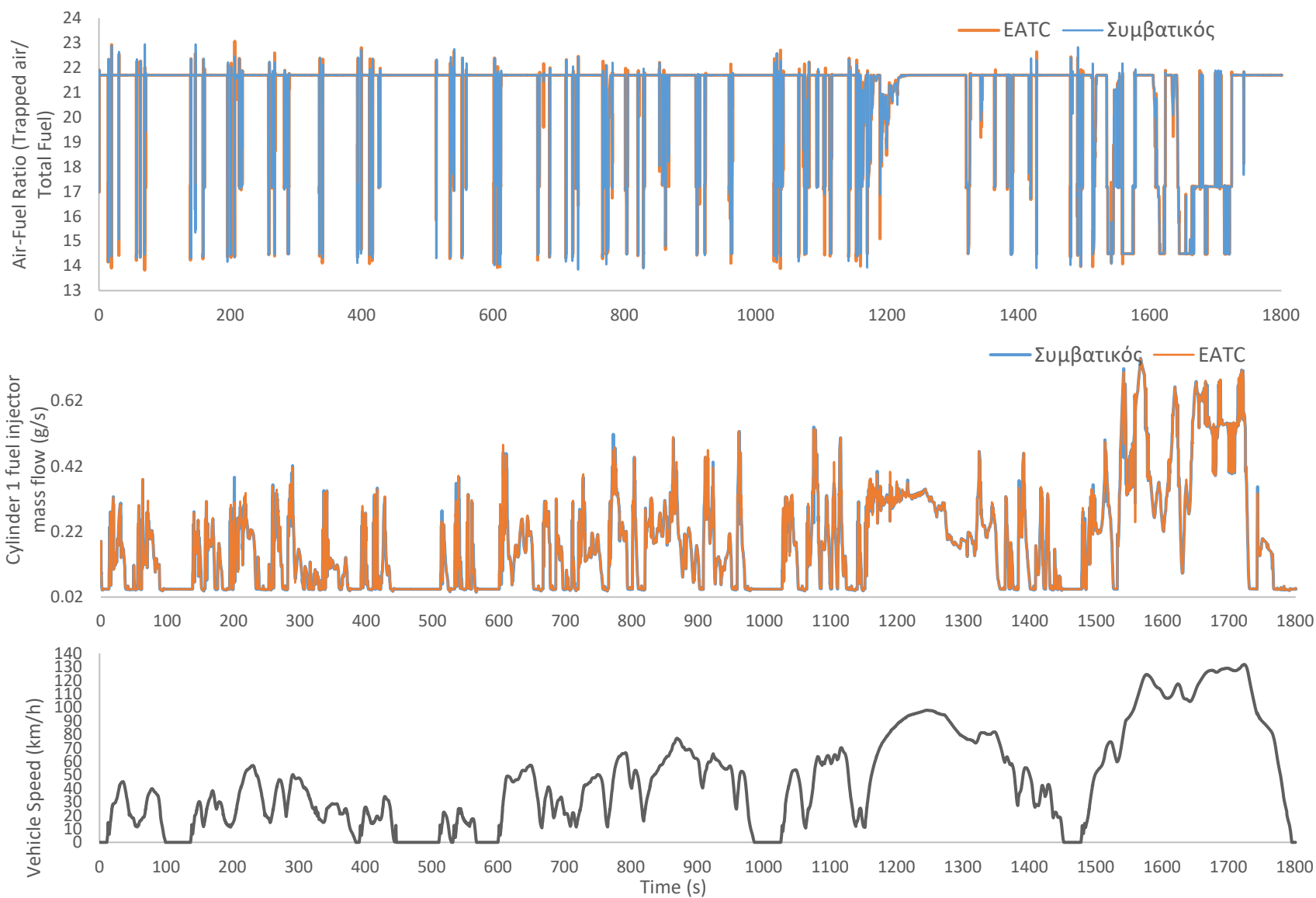
Σχήμα 5.10: Παραγόμενη ισχύς και ροπή συναρτήσει του χρόνου κατά την διεξαγωγή του Κύκλου Πόλης WLTC κλάσης 3-2



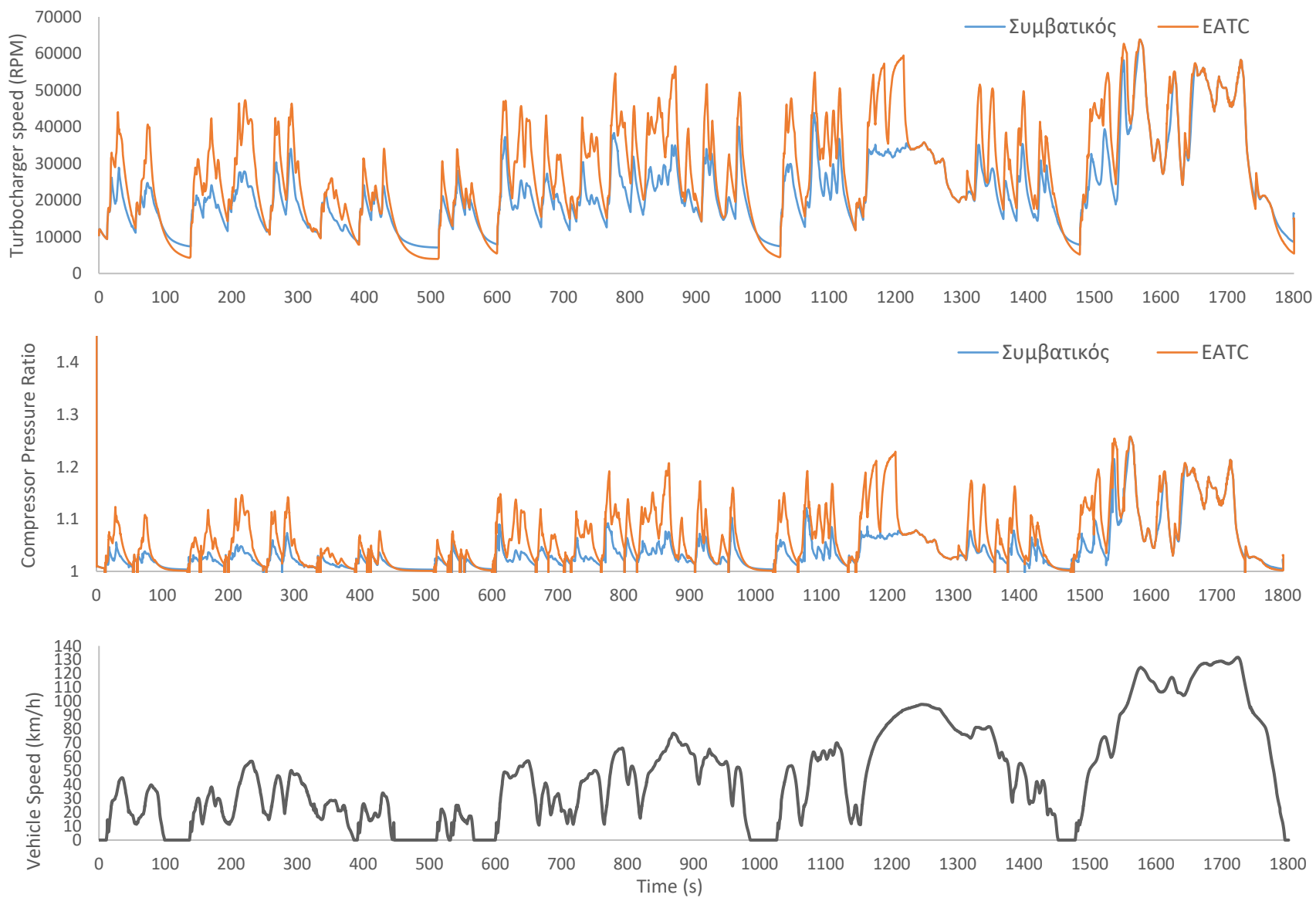
Σχήμα 5.11: Πάτημα των πεντάλ επιτάχυνσης και φρένου συναρτήσει του χρόνου κατά την διεξαγωγή του Κύκλου Πόλης WLTC κλάσης 3-2



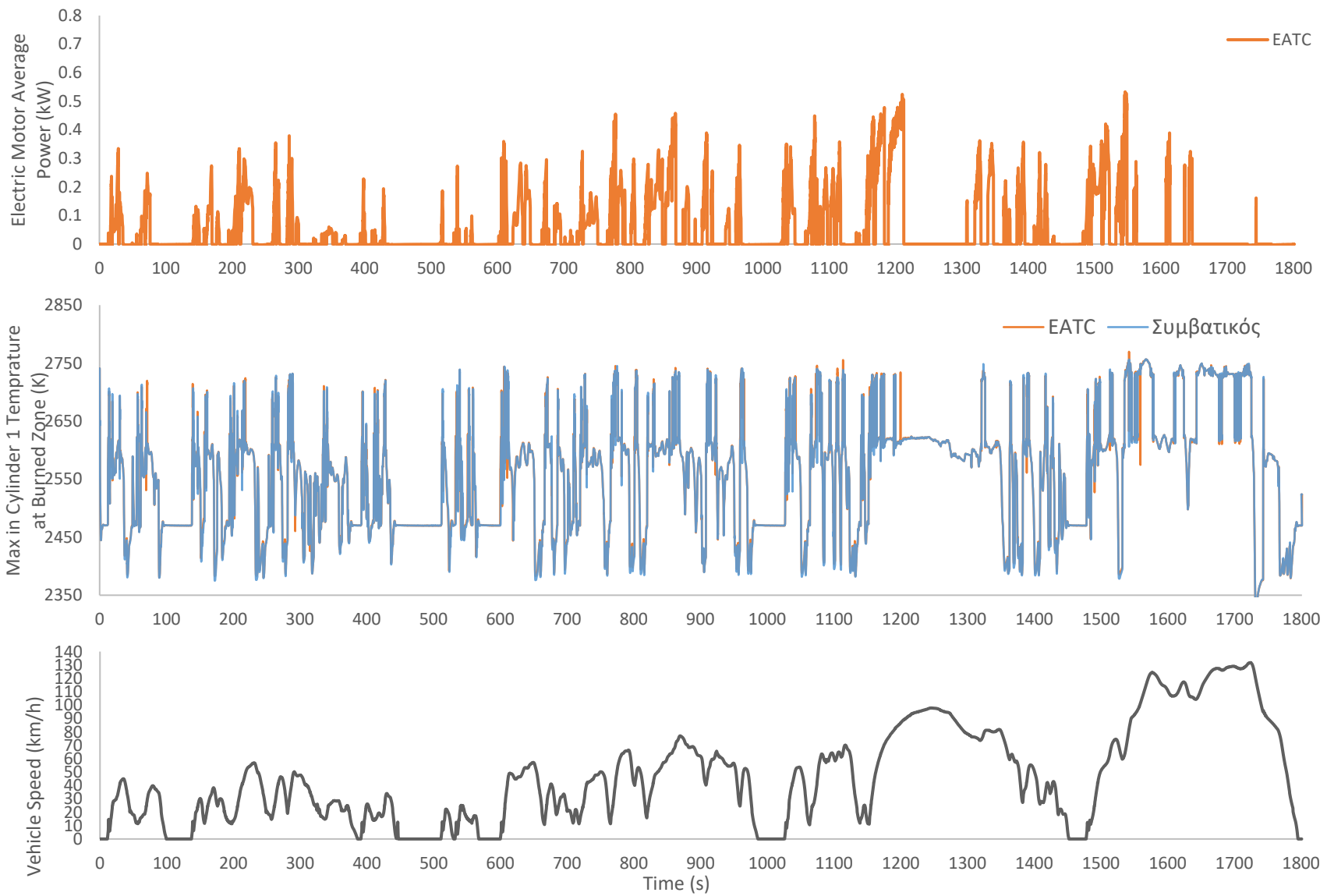
Σχήμα 5.12: Μέση πραγματική πίεση BMEP και ειδική κατανάλωση BSFC συναρτήσει του χρόνου κατά την διεξαγωγή του Κύκλου Πόλης WLTC κλάσης 3-2



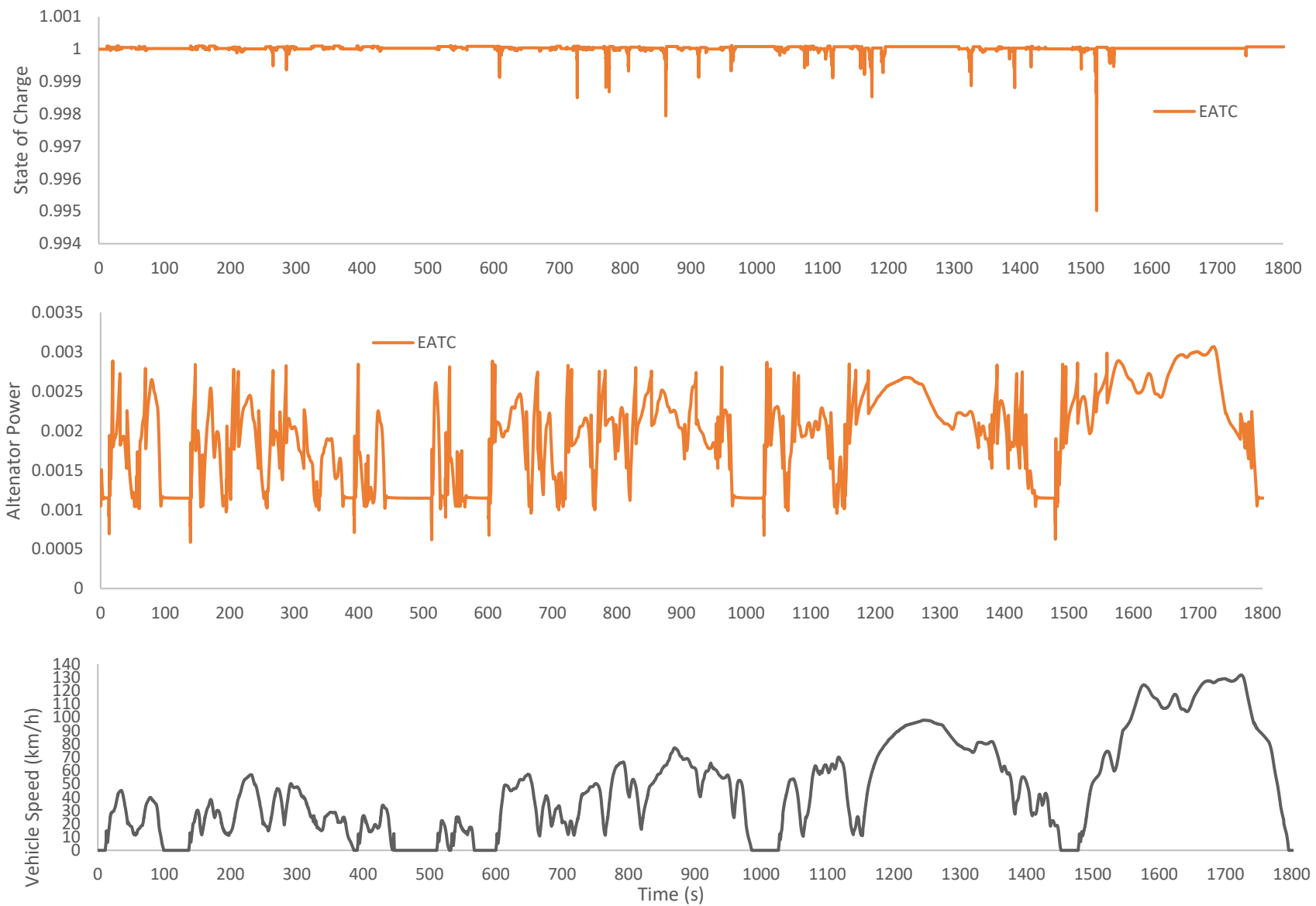
Σχήμα 5.13: Αναλογία αέρα-καυσίμου, παροχή εγχεόμενου καυσίμου ανά κύλινδρο και μέγιστη θερμοκρασία εντός κυλίνδρου στην καμένη ζώνη συναρτήσει του χρόνου κατά την διεξαγωγή του Κύκλου Πόλης WLTC κλάσης 3-2



Σχήμα 5.14: Ταχύτητα περιστροφής του ζεύγους υπερπλήρωσης και λόγος πιέσεων συμπιεστή συναρτήσει του χρόνου κατά την διεξαγωγή του Κύκλου Πόλης WLTC κλάσης 3-2



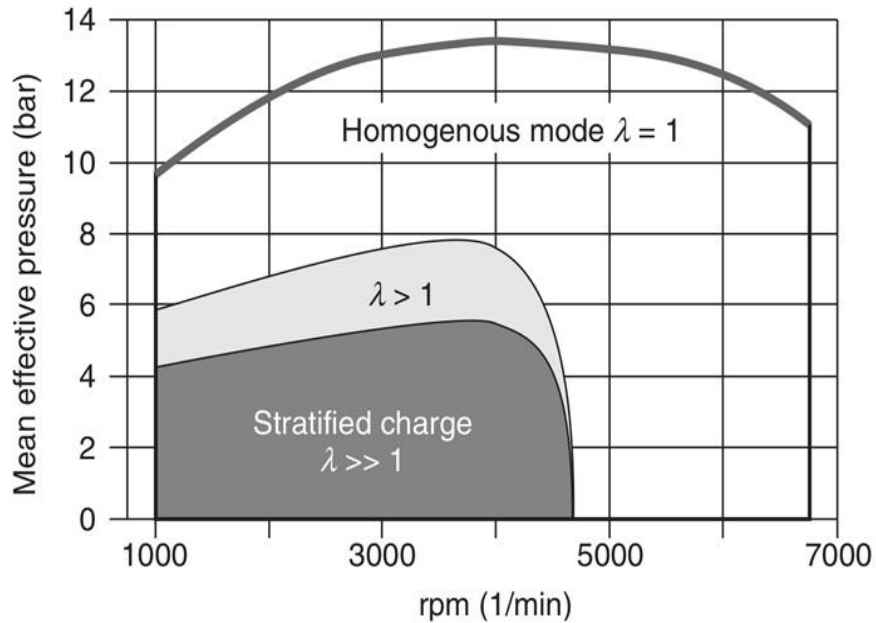
Σχήμα 5.15: Ενέργεια του συστήματος υποβοήθησης και μέγιστη θερμοκρασία καμένης ζώνης συναρτήσει του χρόνου κατά την διεξαγωγή του Κύκλου Πόλης WLTC κλάσης 3-2



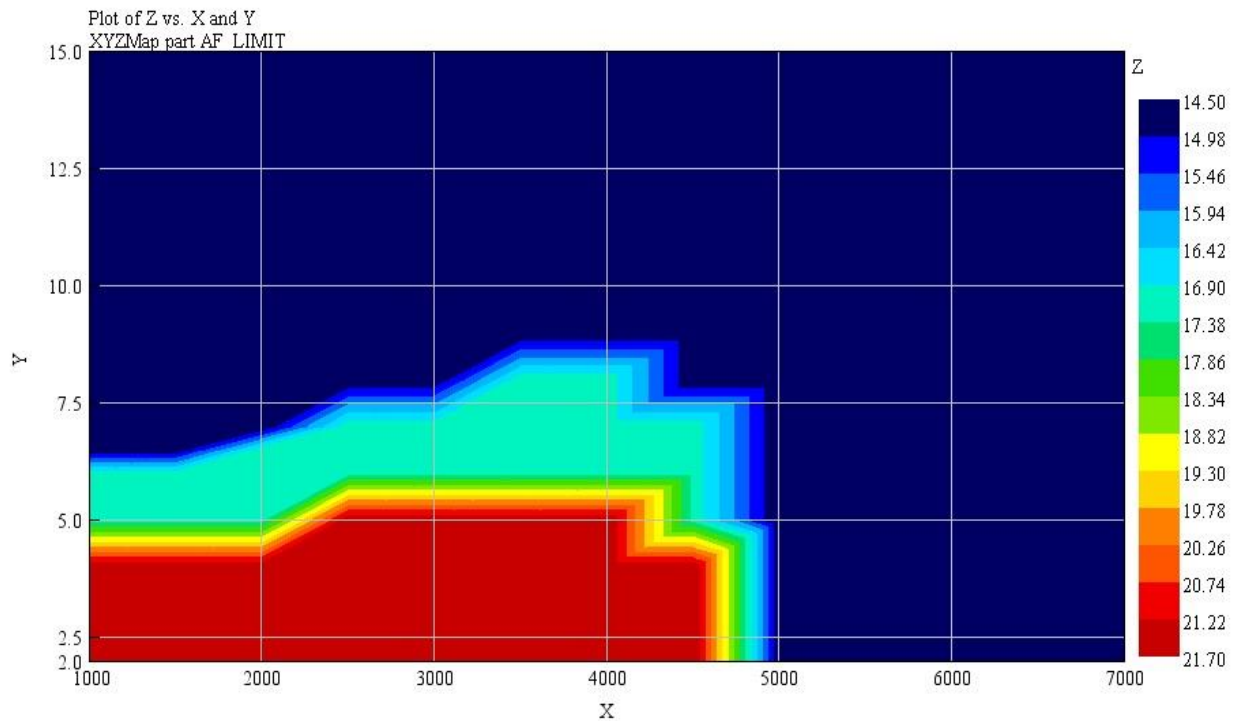
Σχήμα 5.16: Ενέργεια του συστήματος υποβοήθησης και μέγιστη θερμοκρασία καμένης ζώνης συναρτήσει του χρόνου κατά την διεξαγωγή του Κύκλου Πόλης WLTC κλάσης 3-2

Λόγος αέρα-καυσίμου

Ο κινητήρας 1 που παρουσιάστηκε στα παραπάνω σχήματα, ακολούθησε την στρατηγική του λόγου αέρα-καυσίμου του Σχήματος 5.17 [17] και απεικονίζεται στο Σχήμα 5.18.



Σχήμα 5.17: Στρατηγική αναλογίας αέρα-καυσίμου συναρτήσει των στροφών και της μέσης πραγματικής πίεσης [17]



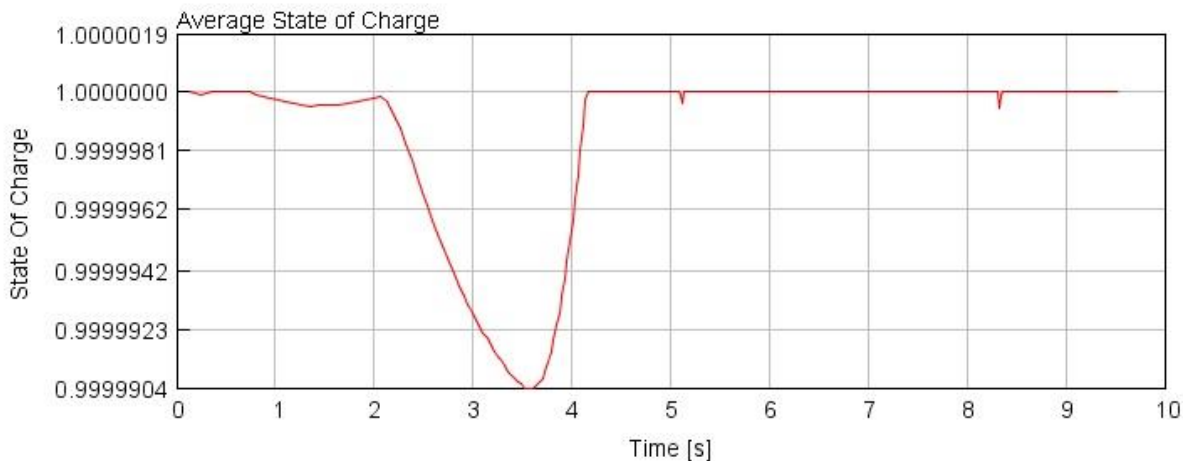
Σχήμα 5.18: Στρατηγική αναλογίας αέρα-καυσίμου (άξονας z) συναρτήσει των στροφών (RPM) (άξονας x) και της μέσης πραγματικής πίεσης (bar) (άξονας y)

Από τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν (5.3.-5.8), είναι εμφανής η διαφορά των δύο οχημάτων (συμβατικού και με ηλεκτρική υποβοήθηση) όσον αφορά την επιτάχυνσή τους. Το ζεύγος υπερπλήρωσης με την ηλεκτρική υποβοήθηση πετυχαίνει υψηλότερους λόγους πίεσης και σε μικρότερο χρόνο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4 για τους αυτοσχέδιους «κύκλους», και στο Σχήμα 5.14 για τον Κύκλο Πόλης, κάτι που είναι αναμενόμενο αφού η άμεσα διαθέσιμη ροπή του ηλεκτροκινητήρα προσδίδει την απαραίτητη ενέργεια που λείπει από τα καυσαέρια προκειμένου να επιτευχθεί η απαραίτητη επιτάχυνση. Τα παραπάνω αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.1 όσον αφορά τους χρόνους επιτάχυνσης του οχήματος για τις εξετασθείσες δοκιμές. Να σημειωθεί ότι υπάρχει ένας χρόνος 2 s κατά την εκκίνηση της επιτάχυνσης 0-100 km/h που περιλαμβάνει την «κατάσταση εκκίνησης» με το όχημα να καθυστερεί να ολοκληρώσει την πρώτη σύμπλεξη. Επιπλέον, η αρχική τιμή στις στροφές του υπερπληρωτή είναι στις 35000 rpm, δηλαδή βρίσκεται σε σχετική ηρεμία και δεν προηγείται μεγάλη προ-αύξηση των στροφών του κινητήρα και του ζεύγους υπερπλήρωσης («μαρσάρισμα»), το οποίο και έχει επίπτωση στις αναφερόμενες τιμές των χρόνων.

Πίνακας 5.1: Χρόνοι επιτάχυνσης σε 4 διαφορετικές δοκιμές συγκρίνοντας τον υποβοηθούμενο κινητήρα με EATC σε σχέση με τον πρότυπο κινητήρα χωρίς ηλεκτρική υποβοήθηση

km/h	0-100	30-80	50-90	60-130
Συμβατικός κινητήρας (s)	8.989	6.57	7.43	15.87
Με υποβοήθηση (s)	8.547	5.94	6.36	13.51
Απόλυτη Διαφορά (s)	-0.442	-0.63	-1.07	-2.36
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	-5	-9.6	-14.4	-14.8

Παρατηρείται ότι στις δοκιμές 30-80, 50-90 και 60-130 km/h, η ποσοστιαία διαφορά είναι σημαντικότερη, καθώς η αλλαγή των ταχυτήτων είναι τέτοια που ο κινητήρας δεν λειτουργεί μέχρι τις μέγιστες στροφές, και συνεπώς η συνεισφορά του ηλεκτροκινητήρα στις χαμηλότερες στροφές, άρα και με χαμηλότερης ενέργειας καυσαέρια, είναι μεγαλύτερη. Βέβαια, και η δοκιμή 0-100 km/h παρουσιάζει αισθητά βελτιωμένο χρόνο. Αν μάλιστα συνυπολογισθεί ότι 2 s διαρκεί η «κατάσταση εκκίνησης», όπως προαναφέρθηκε, ο καθαρός χρόνος επιτάχυνσης που λειτουργεί η υποβοήθηση, μειώνεται κατά 2 s. Άρα, η σύγκριση πλέον αποδίδει μείωση κατά 9.36% στον καθαρό χρόνο λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα που περιλαμβάνει την διάρκεια που το πεντάλ επιτάχυνσης είναι πατημένο στο 100%. Υπενθυμίζεται ότι ο ηλεκτροκινητήρας προσφέρει ενέργεια για το διάστημα που η βαλβίδα εκτόνωσης είναι κλειστή αλλά όταν αυτή ανοίξει, απορροφάει την επιπλέον παραγόμενη ενέργεια. Στο Σχήμα 5.19 μπορεί να φανεί χαρακτηριστικά η φόρτιση της μπαταρίας κατά την διεξαγωγή της επιτάχυνσης 0-100 km/h λόγω της απορρόφησης της περίσσειας ενέργειας του συμπιεστή. Για την πραγματοποίηση του Κύκλου Πόλης WLTC, λόγω των αυξημένων πιέσεων στην εισαγωγή του κινητήρα με ηλεκτρικά υποβοηθούμενο υπερπληρωτή όταν αυτός τίθεται σε λειτουργία, μπορεί να διακριθεί από τα διαγράμματα πως το πεντάλ επιτάχυνσης σε αρκετά σημεία είναι λιγότερο πατημένο.

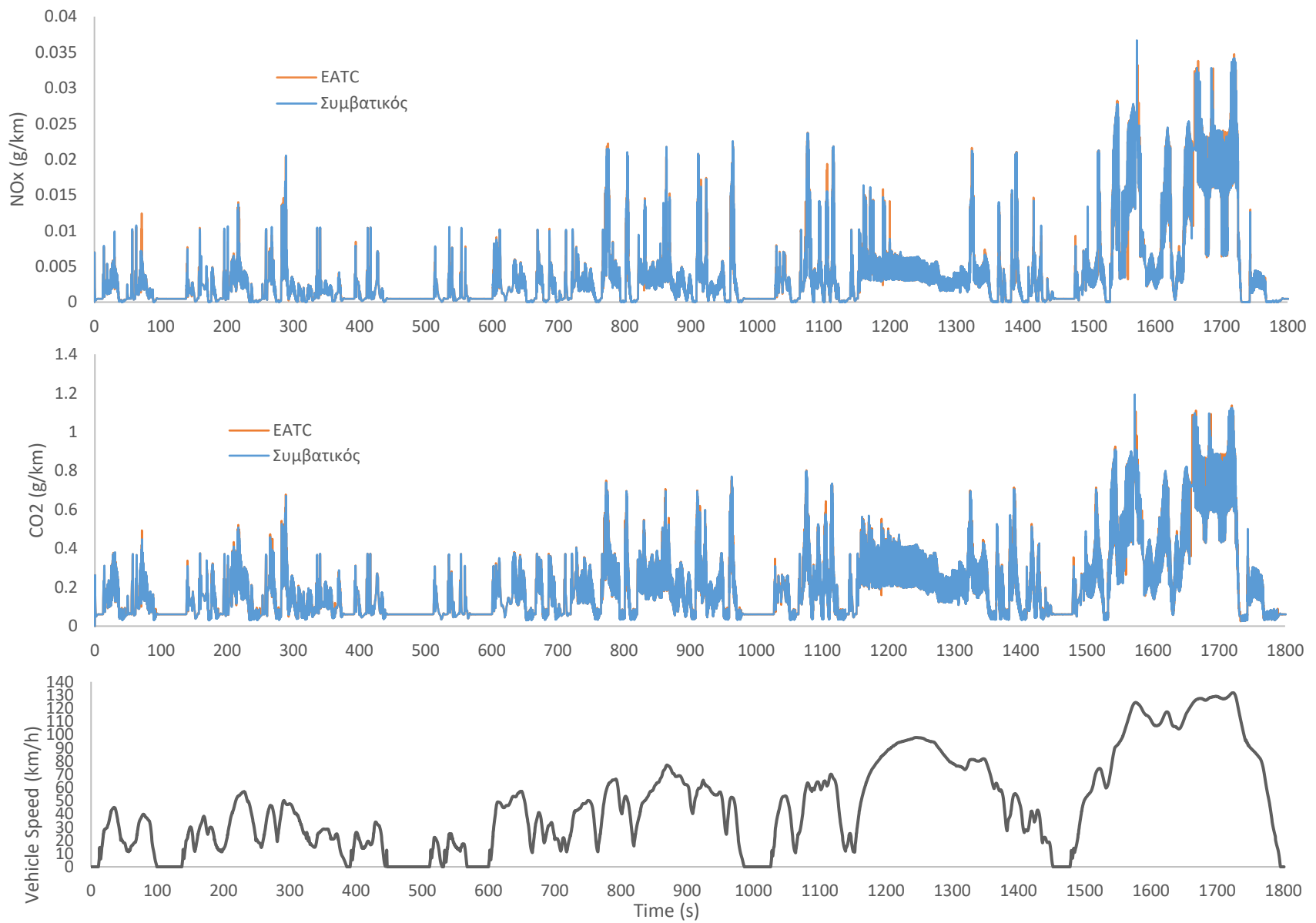


Σχήμα 5.19: Αποφόρτιση και φόρτιση της μπαταρίας κατά την δοκιμή επιτάχυνσης 0-100 km/h χρησιμοποιώντας τον ηλεκτροκινητήρα για να απορροφήσει την περιττή ενέργεια του στροβίλου κατά το άνοιγμα της βαλβίδας εκτόνωσης.

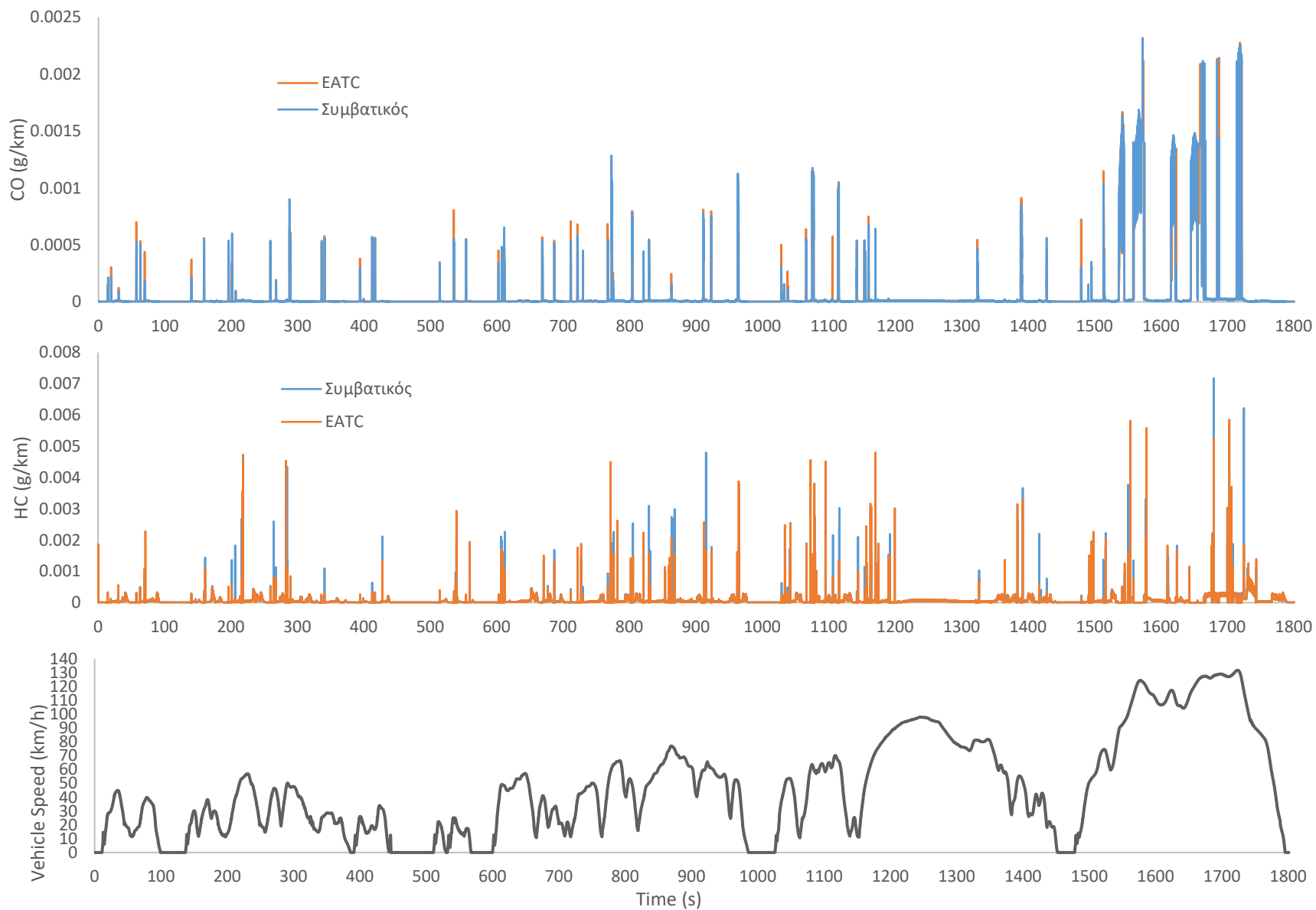
5.3 Εκπομπές και κατανάλωση κινητήρα

Πολύ σημαντικό για αυτήν την εργασία ήταν να αποτυπωθεί η επίδραση του συστήματος υποβοήθησης στις εκπομπές του κινητήρα και στην κατανάλωση. Η νομοθεσία αναγκάζει τους κατασκευαστές να οδηγηθούν σε μεθόδους μείωσης των εκπομπών αλλά και της κατανάλωσης (μέσω των εκπομπών CO₂) και πρέπει να δούμε αν τελικά το σύστημα της ηλεκτρικά υποβοηθούμενης στροβίλο-υπερπλήρωση είναι ωφέλιμο για αυτούς τους σκοπούς ή πως μπορεί να γίνει ωφέλιμο.

Από το GT-Power λαμβάνονται δεδομένα για τις εκπομπές καυσαερίων και ειδικής κατανάλωσης σε g/kWh, τα οποία και πρέπει να επεξεργασθούμε ώστε να εξαλειφθούν υπολογιστικά ακραίες τιμές, και ειδικά όσον αφορά τις εκπομπές, να μετατραπούν σε g/km. Τα νούμερα που προκύπτουν αφορούν τον κινητήρα χωρίς σύστημα επεξεργασίας καυσαερίων και χωρίς σύστημα ανακυκλοφορίας EGR. Επιπλέον, έχουν κυρίως νόημα ως προς τη σύγκριση μεταξύ των μελετώμενων μοντέλων και όχι για σύγκριση στα απόλυτα νούμερα με τα οχήματα που κυκλοφορούν στο δρόμο. Τα αποτελέσματα έχουν χωριστεί σε τέσσερις κατηγορίες. Από 0 έως 510 s για το κομμάτι εντός πόλης, από 510 έως 1022 s για το κομμάτι που αντιστοιχεί σε κίνηση στα προάστια πόλης, από 1022 έως 1800 s για τις υψηλές ταχύτητες (αυτοκινητόδρομος) και για το σύνολο της δοκιμής από 0 έως 1800 s.



Σχήμα 5.20: Εκπομπές NOx και CO₂ συναρτήσεϊ του χρόνου κατά την διεξαγωγή του Κύκλου Πόλης WLTC κλάσεϊ 3-2



Σχήμα 5.21: Εκπομπές CO και HC συναρτήσεϊ του χρόνου κατά την διεξαγωγή του Κύκλου Πόλης WLTC κλάσης 3-2

Πίνακας 5.2: Εκπομπές NO_x κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

	NO _x g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	3.175846	2.931303	3.439333	3.297398
Με υποβοήθηση	3.198377	2.957417	3.448887	3.312126
Απόλυτη Διαφορά	0.02253	0.026114	0.009554	0.014727
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	0.704434	0.882997	0.277031	0.444649

Πίνακας 5.3: Εκπομπές CO₂ κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

	CO ₂ g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	235.0689	186.4137	167.9111	180.3013
Με υποβοήθηση	236.0107	186.9013	167.9774	180.5677
Απόλυτη Διαφορά	0.941824	0.487694	0.066264	0.266447
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	0.39906	0.260937	0.039448	0.147561

Πίνακας 5.4: Εκπομπές CO κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

	CO g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	0.022576	0.020741	0.062056	0.048256
Με υποβοήθηση	0.022395	0.021228	0.062021	0.048314
Απόλυτη Διαφορά	-0.00018	0.000487	-3.5E-05	5.84E-05
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	-0.80708	2.292652	-0.05607	0.1209

Πίνακας 5.5: Εκπομπές HC κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

	HC g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	0.080409	0.066177	0.052039	0.058629
Με υποβοήθηση	0.080865	0.06557	0.052555	0.058897
Απόλυτη Διαφορά	0.003991	-0.00061	0.000516	0.001476
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	0.564634	-0.92591	0.981764	0.455518

Πίνακας 5.6: Ειδική κατανάλωση BSFC κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

	BSFC g/kWh			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	496.6504	248.3958	249.5541	383.8396
Με υποβοήθηση	493.4074	248.46	250.4919	384.0919
Απόλυτη Διαφορά	-3.24297	0.064135	0.937871	0.252314
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	-0.65726	0.025813	0.374412	0.065691

Από τους παραπάνω πίνακες μπορεί να φανεί ότι δεν υπάρχει ξεκάθαρο όφελος του ηλεκτρικά υποβοηθούμενου ζεύγους υπερπλήρωσης ως προς τις εκπομπές. Τα αποτελέσματα είναι πανομοιότυπα, με την πλειοψηφία των μεταβολών να είναι αρκετά μικρότερες του 1%. Οι διαφορές που προκύπτουν ενδέχεται να συμπεριλαμβάνουν και διαφορές που προκαλούνται από τον ελεγκτή οχήματος. Τα δύο μοντέλα μπορεί να είναι ίδια, όμως λόγω των διαφορετικών επιδόσεων που έχουν οι δύο κινητήρες στην μεταβατική κατάσταση, κατά τις απότομες μεταβολές της ταχύτητας ο υπολογισμός που γίνεται για το πάτημα του πεντάλ επιτάχυνσης από τον εικονικό οδηγό ενδέχεται να διαφέρει. Αυτό είναι πιθανό, καθώς για την καλύτερη χρήση του οχήματος από τον ελεγκτή, συνιστάται η κατασκευή και εισαγωγή ενός χάρτη μέσης πραγματικής πίεσης BMEP συναρτήσει της θέσης του πεντάλ επιτάχυνσης. Ο χάρτης αυτός κατασκευάζεται με τον κινητήρα σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, συνεπώς δεν μπορεί να συμπεριληφθεί η μονάδα υποβοήθησης κατά την κατασκευή του.

Παρόλες τις μικρές διαφορές που υπάρχουν, από τις οποίες δεν μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα για την ακριβή επίπτωση της υποβοήθησης, υπάρχει μια τάση στα αποτελέσματα προς συγκεκριμένη κατεύθυνση.

- Για τις εκπομπές NO_x παρατηρείται ότι υπάρχει αυξητική τάση, κάτι το οποίο και μπορεί να δικαιολογηθεί για δύο λόγους. Η αυξημένη πίεση εισαγωγής οδηγεί και σε μεγαλύτερες πιέσεις εντός του κυλίνδρου άρα και μεγαλύτερες θερμοκρασίες, από τις οποίες ευνοείται η δημιουργία NO_x. Η δεύτερη αιτία έχει να κάνει με τον τρόπο που είναι προγραμματισμένος ο κινητήρας να καθορίζει την αναλογία αέρα-καυσίμου και τον χρονισμό έναυσης του μείγματος. Συνδυαστικά με το ζήτημα του ελεγκτή οχήματος που προαναφέρθηκε, αλλά και με τις συνθήκες οδήγησης, συμβαίνει το εξής: στις απότομες μεταβολές φορτίου και ταχύτητας υπάρχει αυξημένη πίεση εισαγωγής, με επίδραση στην μέση πραγματική πίεση BMEP, άρα υπό συνθήκες υπάρχει και επίδραση στην αναλογία αέρα-καυσίμου (Σχήμα 5.13 και 5.18), όπου επίσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10α, από AF=18 και σε πλουσιότερα μείγματα, η ανάμειξη έχει ορισθεί ως ομογενής αντί της στρωματικής, αλλά και στον χρονισμό έναυσης που και αυτός εξαρτάται από την BMEP (Σχήμα 4.9).

- Όσον αφορά τις εκπομπές CO₂, η μεγαλύτερη διαφορά που παρουσιάζεται είναι της τάξης του 0.4%. Πρακτικά είναι πολύ μικρές οι διαφορές, κάτι το οποίο φαίνεται και στην κατανάλωση των δύο κινητήρων, η οποία έχει άμεση σχέση με την ποσότητα του εκπεμπόμενου CO₂.
- Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που αφορούν το CO, το οποίο εξαρτάται από την αναλογία αέρα-καυσίμου αλλά και από την ποιότητα της καύσης, στο διάστημα της κίνησης σε χαμηλές ταχύτητες με έντονες μεταβολές (0-510 s) εμφανίζεται μείωση των ρύπων κατά 0.8%, κάτι που οφείλεται κυρίως στην καλύτερη καύση που επικρατεί, με τις υψηλότερες πιέσεις κατά την έντονη μεταβολή της ταχύτητας να διευκολύνουν την ανάμειξη του καυσίμου εντός του κυλίνδρου και να μην παραμένουν πολύ πλούσιες περιοχές που ευνοούν την παραγωγή CO. Αντίστοιχα στα υπόλοιπα τμήματα, η κίνηση με μικρότερο AF σε ορισμένες μεταβατικές περιοχές οδηγεί συνολικά σε μια πολύ μικρή αύξηση των εκπομπών CO.

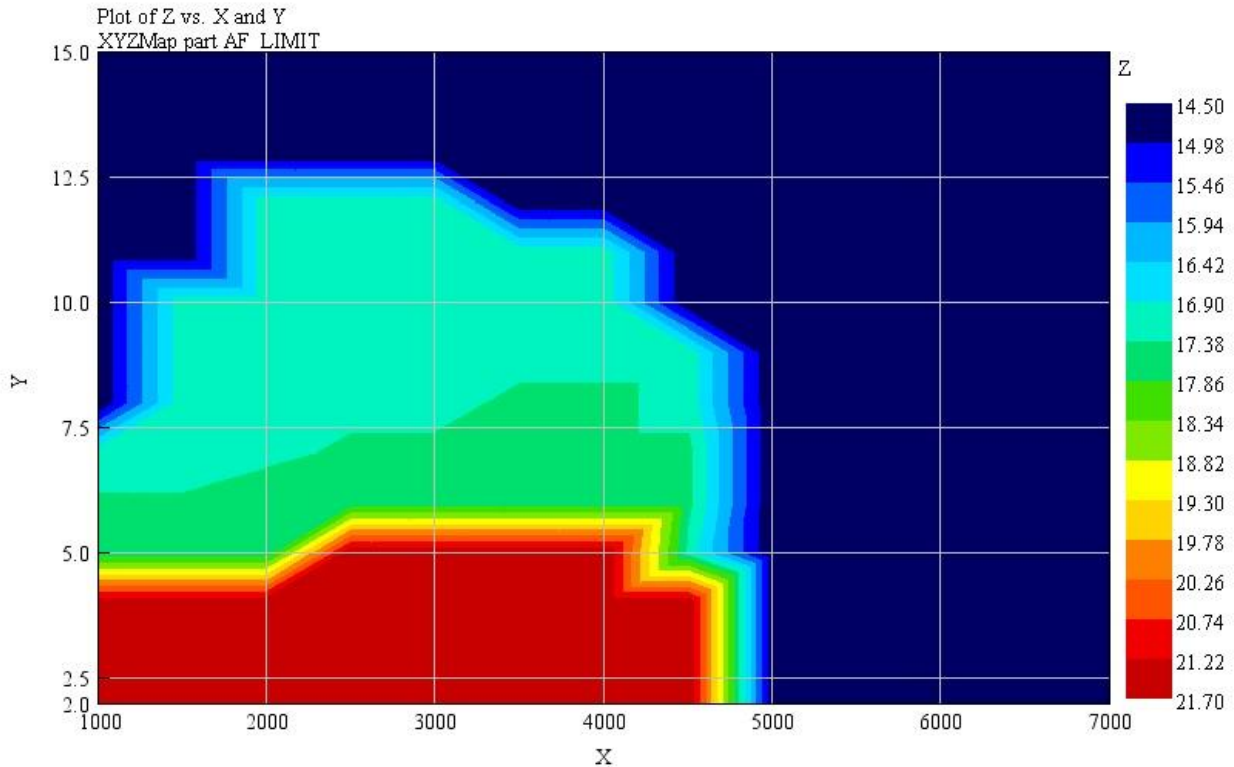
Η συμπεριφορά που ακολουθούν οι εκπομπές HC είναι ιδιαίτερη. Στο Σχήμα 5.21 φαίνεται ότι υπάρχουν περιοχές με υπερακοντίσεις της τιμής των εκπεμπόμενων υδρογονανθράκων. Οι υπερακοντίσεις αυτές έχουν σημαντική επίπτωση στον μέσο όρο, παρόλη την πολύ σύντομη διάρκειά τους (τάξης 0.15 s). Η κύρια αιτία βρίσκεται στην ύπαρξη άκαυστου μείγματος. Κατά την λειτουργία του κινητήρα όπου το φορτίο και οι στροφές του μεταβάλλονται έντονα, δηλαδή σε μεγάλη επιτάχυνση, επιβράδυνση ή και κατά την αλλαγή σχέσεων στο κιβώτιο ταχυτήτων, ο κινητήρας «περνάει» από έντονα μεταβατικά σημεία λειτουργίας. Σε ορισμένα από τα σημεία αυτά, λόγω μη επαρκούς προσαρμογής των παραμέτρων λειτουργίας του κινητήρα, προκύπτει στιγμιαία (διάστημα τάξης 0.15 s) άκαυστο μείγμα. Συνεπώς, η μεταβολή των HC είναι ευαίσθητη σε τέτοιες καταστάσεις και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν η γενική τάση ανάμεσα στις προσομοιώσεις. Στην προκείμενη περίπτωση, πάντως, παρουσιάζεται ελαφριά αύξηση στο τμήμα 0-510 s (εντός πόλης – συχνές επιταχύνσεις) ακολουθώντας μείωση στο 510-1022 s (μεγαλύτερες ταχύτητες – λιγότερες επιταχύνσεις).

Ενώ έχει παρατηρηθεί σε περιπτώσεις κινητήρων Diesel μεγαλύτερων διαστάσεων, όπως της διπλωματικής εργασίας [19], ότι η ειδική κατανάλωση μειώνεται αισθητά με την χρήση υποβοηθούμενης στροβιλο-υπερπλήρωσης, στην περίπτωση του συγκεκριμένου κινητήρα φαίνεται να υπάρχει μια αμελητέα συνολική μείωση 0.65%

5.4 Επαναπρογραμματισμός κινητήρα

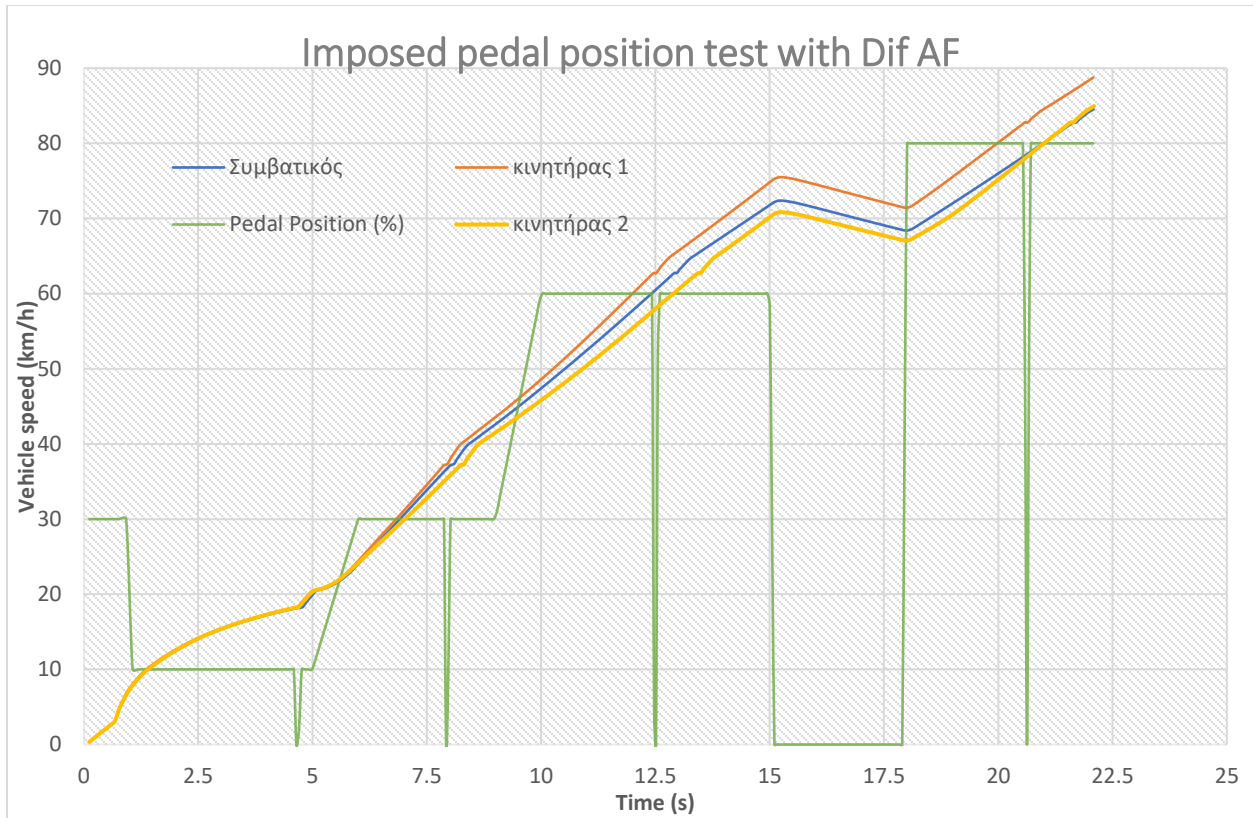
Επομένως προκύπτει η αίσθηση ότι η προσθήκη υποβοηθούμενης στροβιλο-υπερπλήρωσης δεν έχει ουσιαστικό όφελος στους ρύπους και στην κατανάλωση του οχήματος. Όμως η πολύπλοκη αλληλουχία των μεταβλητών λειτουργίας ενός βενζινοκινητήρα άμεσου ψεκασμού απαιτεί τον

βέλτιστο επαναπρογραμματισμό της για την προσθήκη και αξιοποίηση μιας τέτοιας μονάδας υποβοήθησης. Όπως προαναφέρθηκε, το όχημα στο οποίο είναι εγκατεστημένη, παρουσιάζει σημαντική βελτίωση στην απόκρισή του σύμφωνα με τις δοκιμές 1 έως 5. Οπότε, αν για παράδειγμα προσπαθήσουμε να εξισώσουμε την απόκριση των δύο μοντέλων για την δοκιμή 5 μεταβάλλοντας στην προκειμένη περίπτωση το προφίλ αναλογίας αέρα-καυσίμου συναρτήσει της BMEP όπως στο Σχήμα 5.22, φτωχαίνοντας το μείγμα και σε υψηλότερες τιμές μέσης πραγματικής πίεσης, προκύπτει πλέον απόκριση όπως στο Σχήμα 5.23 (με το νέο μοντέλο να φέρει την χαρακτηριστική ονομασία, κινητήρας 2).



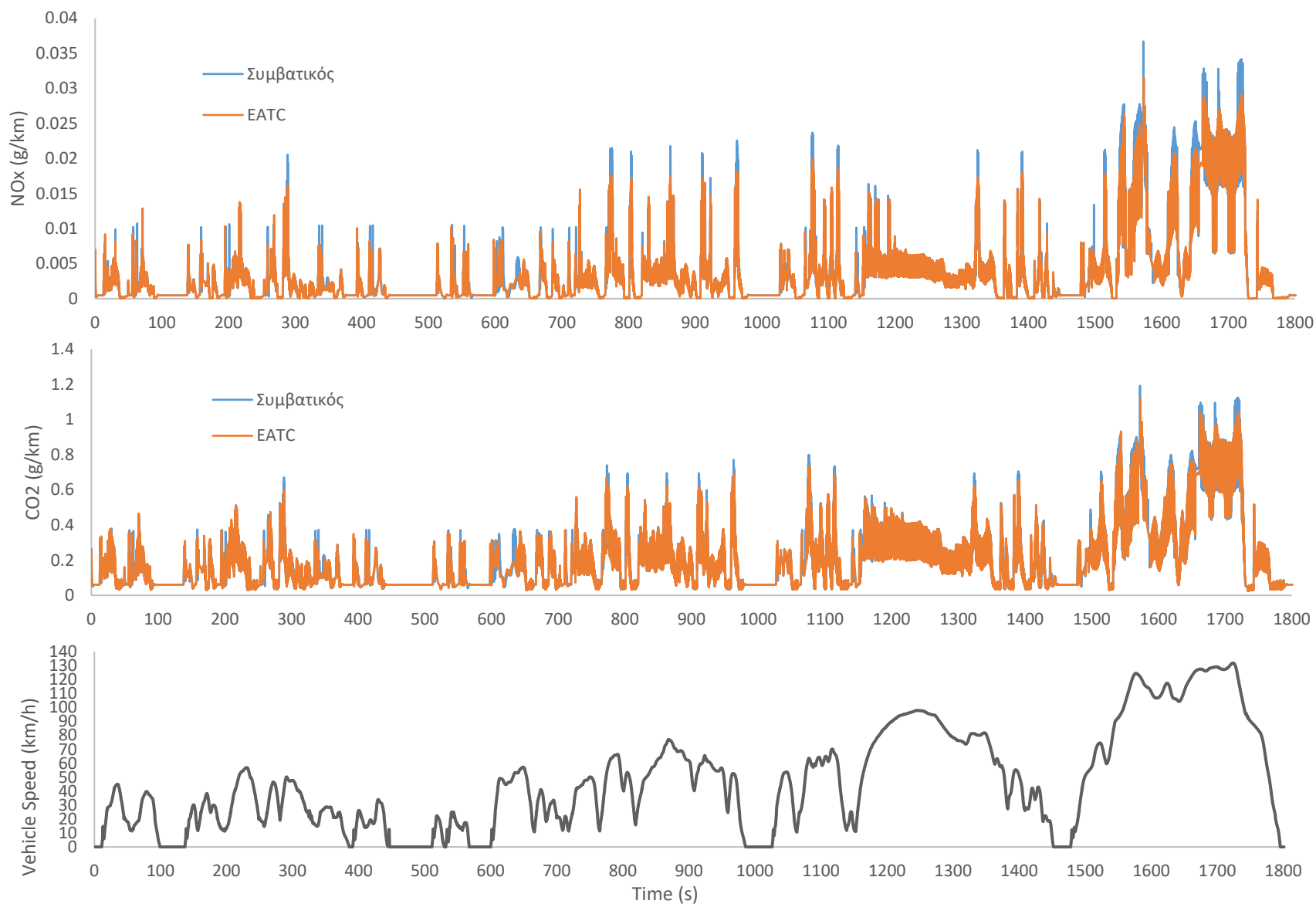
Σχήμα 5.22: Επαναπροσδιορισμένο προφίλ αναλογίας αέρα-καυσίμου

Στα διάφορα στάδια της δοκιμής, οι ταχύτητες του συμβατικού οχήματος και εκείνου με το επαναπροσδιορισμένο προφίλ αναλογίας AF (κινητήρας 2) βρίσκονται πολύ πιο κοντά σε σχέση με τον κινητήρα με την απλή προσθήκη υποβοήθησης (κινητήρας 1), όπως διακρίνεται στο Σχήμα 5.23.

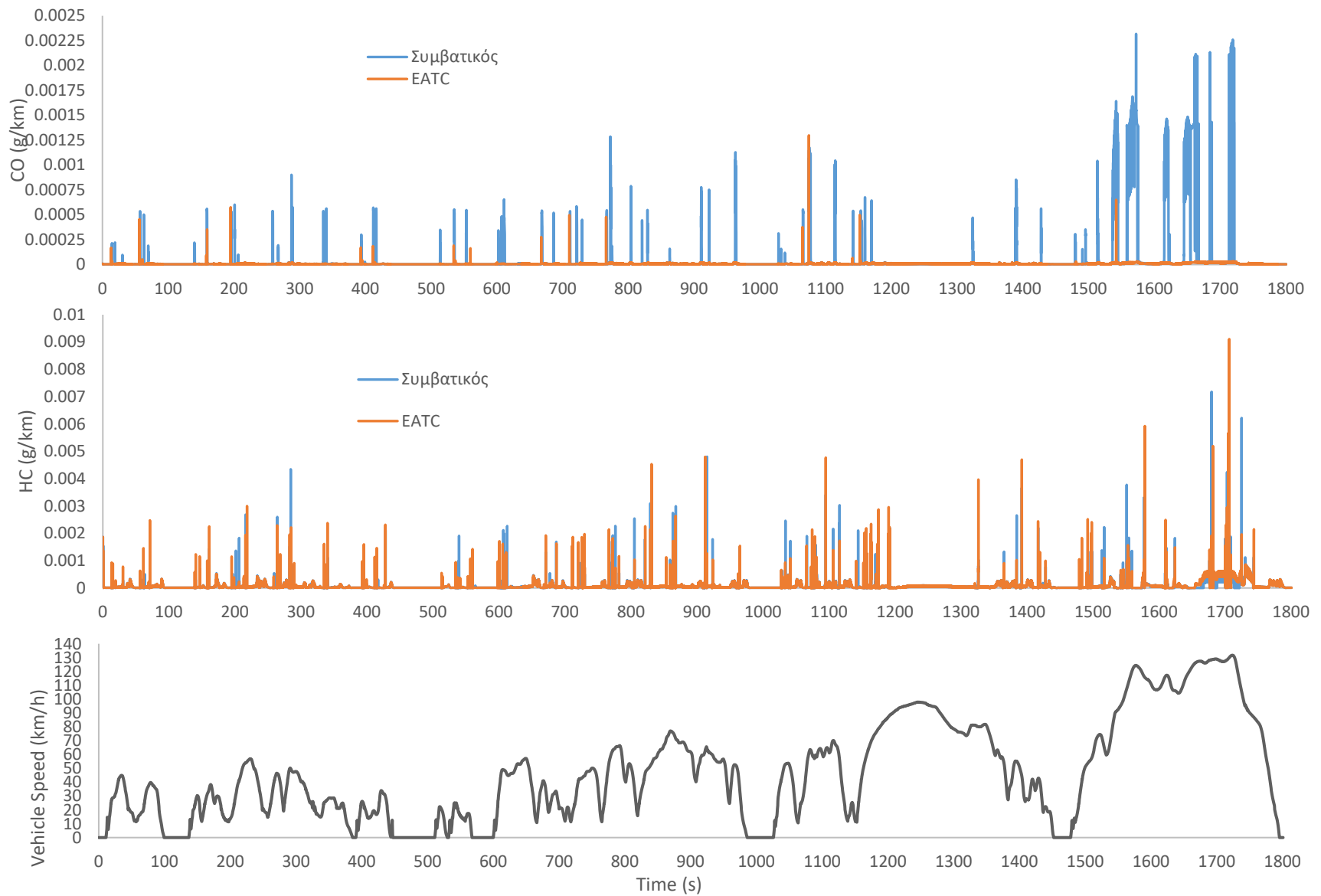


Σχήμα 5.23: Απόκριση οχήματος με επαναπροσδιορισμένο προφίλ AF σε αυτοσχέδια δοκιμασία σε σύγκριση με το πρότυπο όχημα, και του οχήματος με υποβοήθηση αλλά ίδιο προφίλ AF

Δοκιμάζοντας λοιπόν στον Κύκλο WLTC Κλάσης 3-2 το νέο μοντέλο, προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα συγκριτικά με τον συμβατικό κινητήρα.



Σχήμα 5.24: Εκπομπές NOx και CO₂ συναρτήσεσι του χρόνου κατά την διεξαγωγή του Κύκλου Πόλης WLTC κλάσης 3-2 του μοντέλου “κινητήρας 2” σε σύγκριση με το πρότυπο κινητήρα



Σχήμα 5.25: Εκπομπές CO και HC συναρτήσει του χρόνου κατά την διεξαγωγή του Κύκλου Πόλης WLTC κλάσης 3-2 του μοντέλου “κινητήρας 2” σε σύγκριση με τον πρότυπο κινητήρα

Πίνακας 5.7: Εκπομπές NO_x κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

	NO _x g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	3.175846	2.931303	3.439333	3.297398
Με υποβοήθηση	3.062982	2.89075	3.3037	3.18497
Απόλυτη Διαφορά	-0.11286	-0.04055	-0.13563	-0.11243
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	-3.68479	-1.40286	-4.10549	-3.52998

Πίνακας 5.8: Εκπομπές CO₂ κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

	CO ₂ g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	235.0689	186.4137	167.9111	180.3013
Με υποβοήθηση	230.346	184.9952	166.0102	178.1493
Απόλυτη Διαφορά	-4.72291	-1.41847	-1.90094	-2.15199
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	-2.05035	-0.76676	-1.14508	-1.20797

Πίνακας 5.9: Εκπομπές CO κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

	CO g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	0.022576	0.020741	0.062056	0.048256
Με υποβοήθηση	0.00996	0.007009	0.005408	0.006323
Απόλυτη Διαφορά	-0.01262	-0.01373	-0.05665	-0.04193
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	-126.658	-195.899	-1047.41	-663.208

Πίνακας 5.10: Εκπομπές HC κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

	HC g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	0.080409	0.066177	0.052039	0.058629
Με υποβοήθηση	0.094577	0.066645	0.063204	0.067883
Απόλυτη Διαφορά	-0.0205	0.000468	0.011165	-0.01208
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	14.98045	0.702136	17.66466	13.63271

Πίνακας 5.11: Ειδική κατανάλωση BSFC κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

	BSFC g/kWh			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	496.6504	248.3958	249.5541	383.8396
Με υποβοήθηση	503.0695	242.3735	248.0219	382.0542
Απόλυτη Διαφορά	6.419187	-6.02235	-1.53215	-1.78542
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	1.276004	-2.48474	-0.61775	-0.46732

Μελετώντας τα νέα αποτελέσματα, παρατηρείται πλέον μείωση στην πλειοψηφία των εκπομπών.

- Ξεκινώντας από τα NO_x, παρατηρείται μείωση 3.68% και 4.10% στα τμήματα 0-510 s και 1022-1800 s αντίστοιχα. Αυτό συμβαίνει για τους εξής λόγους: το φτωχότερο μείγμα οδηγεί και σε χαμηλότερη παραγόμενη ισχύ αλλά και μείωση της θερμοκρασίας λόγω περισσότερου φρέσκου «ψυχρού» αέρα αλλά και σε χαμηλότερη ένταση καύσης, με αποτέλεσμα τις χαμηλότερες θερμοκρασίες που επηρεάζουν τα NO_x. Στις συχνές επιταχύνσεις που υπάρχουν στο τμήμα εντός πόλης, παρουσιάζεται στιγμιαία πτώση του λ_α και αυξημένη παραγωγή ρύπων, όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.24 και 5.25 παρακάτω. Ενώ αυτό το φαινόμενο είναι σπανιότερο στο χρονικό διάστημα 1022-1800 s, υπάρχει αυξημένο χρονικό διάστημα με λειτουργία σε υψηλά φορτία και άρα πλουσιότερο μείγμα αέρα-καυσίμου. Συνεπώς, διατηρώντας μεγαλύτερο λ_α στα υψηλά φορτία για τον κινητήρα 2 επιτυγχάνεται μείωση στον συγκεκριμένο ρύπο.
- Για τον ίδιο λόγο, δηλαδή για τις συνθήκες λειτουργίας με μειωμένο λ_α που περιγράφηκαν, παρατηρείται και μεγάλη μείωση του CO, ειδικά στο τελευταίο κομμάτι του Κύκλου. Το CO παραμένει σε χαμηλά επίπεδα στην διάρκεια της δοκιμής αλλά στιγμιαία σε απότομες επιταχύνσεις δημιουργείται υπερακόνηση (overshoot), που παίζει σημαντικό ρόλο στην μέση τιμή παραγωγής CO.
- Αντίθετη τάση με τις υπόλοιπες εκπομπές έχουν οι τιμές των HC. Αυτό είναι πολύ πιθανόν να συμβαίνει καθώς σε συγκεκριμένες στιγμές του Κύκλου, η αυξημένη αναλογία αέρα-καυσίμου οδηγεί σε σβέση της φλόγας, με αποτέλεσμα την δημιουργία υδρογονανθράκων. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί πως η περιοχή πάνω από τα ελατήρια του εμβόλου όπου σε πραγματικό κινητήρα μπορεί να εγκλωβιστεί ποσότητα καυσίμου και να μην καεί, έχει ορισθεί ως μηδενική, οπότε και δεν επιδρά στα αποτελέσματα.
- Επιπλέον, παρατηρείται μια μικρή μείωση στις εκπομπές CO₂, η οποία είναι πολύ πιθανό να οφείλεται στην μειωμένη παραγωγή ισχύος κατά τις απότομες μεταβολές λόγω του φτωχότερου μείγματος, και αντίστοιχα να ακολουθούν και οι τιμές της ειδικής κατανάλωσης.

Η ρύθμιση και η βαθμονόμηση του κινητήρα μπορεί να αξιοποιηθεί σε πολλές κατευθύνσεις. Εκτός από την βέλτιστη προσαρμογή του προφίλ αέρα-καυσίμου, η περίσσεια αέρα δίνει την δυνατότητα για αλλαγή του χρονισμού έναυσης με μεγαλύτερο περιθώριο αποφυγής της κρουστικής καύσης. Επιπλέον, δίνεται περιθώριο αλλαγής του χρονισμού έναυσης εις βάρος των επιδόσεων, έχοντας ως στόχο τη μείωση των ρύπων όπως παρουσιάστηκε στον συγκεκριμένο κινητήρα. Επομένως, φαίνεται ότι υπάρχει πολύς χώρος για μελέτη και περαιτέρω βελτίωση του ταιριάσματος του συστήματος υποβοήθησης με τον κινητήρα.

5.5 Αποτελέσματα παραμετρικών προσομοιώσεων

Μετά τις παραπάνω δοκιμές, ακολουθεί παραμετρική ανάλυση του αρχικού μοντέλου. Οι παράμετροι που διαφοροποιήθηκαν είναι η μάζα του οχήματος, η τιμή της ονομαστικής ισχύος του ηλεκτροκινητήρα και η στρατηγική πρόσδοσης ενέργειας από τον ηλεκτροκινητήρα. Οι ονομαστικές τιμές που θα τροποποιηθούν αναφέρονται παρακάτω:

- I. Όσον αφορά την στρατηγική πρόσδοσης ενέργειας στις προσομοιώσεις που έχουν προηγηθεί, όταν ο ηλεκτροκινητήρας ενεργοποιείται (και δε βρίσκεται σε κατάσταση μέγιστης επιτάχυνσης), προσδίδει 1.5 φορές την ενέργεια που καταναλώνει ο συμπιεστής στο ακριβώς προηγούμενο βήμα της προσομοίωσης.
- II. Το βάρος του ονομαστικού οχήματος χωρίς τον οδηγό ανέρχεται στα 1255 kg
- III. Η ισχύς του ηλεκτροκινητήρα στο ονομαστικό όχημα (κινητήρας 1 και κινητήρας 2) είναι 2.5 kW.

Οι τροποποιημένες τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.14:

Πίνακας 5.12: Τιμές παραμετροποίησης προσομοιώσεων

Πρόσδοση ενέργειας	$1 \cdot P_{\text{compressor}}$	$2 \cdot P_{\text{compressor}}$
Μάζα οχήματος (kg)	1700	2300
Ισχύς ηλ/τήρα (kW)	0.5	5

5.5.1 Στρατηγική πρόσδοσης ισχύος

Στην συγκεκριμένη ενότητα θα παρουσιαστούν συγκεντρωτικά σε μορφή πινάκων (και όχι διαγραμμάτων) τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης. Αρχικά θα μελετήσουμε την περίπτωση η πρόσδοση ισχύος να είναι αντίστοιχη με αυτήν που καταναλώνει ο συμπιεστής.

Πίνακας 5.13: Εκπομπές NO_x κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

	NO _x g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	3.175846	2.931303	3.439333	3.297398
Με υποβοήθηση	3.195046	2.948218	3.449066	3.309856
Απόλυτη Διαφορά	0.0192	0.016914	0.009733	0.012457
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	0.600917	0.573719	0.282197	0.376373

Πίνακας 5.14: Εκπομπές CO₂ κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

	CO ₂ g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	235.0689	186.4137	167.9111	180.3013
Με υποβοήθηση	235.6836	186.6765	167.943	180.4558
Απόλυτη Διαφορά	0.614734	0.262806	0.031918	0.154493
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	0.26083	0.140781	0.019006	0.085613

Πίνακας 5.15: Εκπομπές CO κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

	CO g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	0.022576	0.020741	0.062056	0.048256
Με υποβοήθηση	0.022101	0.021273	0.062181	0.048392
Απόλυτη Διαφορά	-0.00047	0.000532	0.000125	0.000137
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	-2.14884	2.50171	0.200831	0.28229

Πίνακας 5.16: Εκπομπές HC κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

	HC g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	0.080409	0.066177	0.052039	0.058629
Με υποβοήθηση	0.082958	0.065596	0.053098	0.059524
Απόλυτη Διαφορά	0.002608	-0.00058	0.001058	0.000856
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	3.072723	-0.88532	1.993393	1.503974

Πίνακας 5.17: Ειδική κατανάλωση BSFC κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

	BSFC g/kWh			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	496.6504	248.3958	249.5541	383.8396
Με υποβοήθηση	497.3606	247.3298	249.7935	384.0725
Απόλυτη Διαφορά	0.710286	-1.06598	0.239432	0.232945
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	0.142811	-0.431	0.095852	0.060651

Στη συνέχεια ακολουθούν αποτελέσματα όπου στο σύστημα ελέγχου ο ηλεκτροκινητήρας δέχεται εντολή για πρόσδοση ισχύος ίση με την διπλάσια ισχύ που κατανάλωσε ο συμπιεστής στο αμέσως προηγούμενο βήμα της προσομοίωσης.

Πίνακας 5.18: Εκπομπές NO_x κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

	NO _x g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	3.175846	2.931303	3.439332819	3.297398
Με υποβοήθηση	3.208208	2.959596	3.448989962	3.313895
Απόλυτη Διαφορά	0.032361	0.028293	0.009657143	0.016497
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	1.008698	0.955984	0.279999149	0.497808

Πίνακας 5.19: Εκπομπές CO₂ κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

	CO ₂ g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	235.0689	186.4137	167.9111155	180.3013
Με υποβοήθηση	236.0873	186.9522	167.9938617	180.5991
Απόλυτη Διαφορά	1.018405	0.538507	0.082746244	0.297815
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	0.431368	0.288046	0.049255516	0.164904

Πίνακας 5.20: Εκπομπές CO κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

	CO g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	0.022576	0.020741	0.062056132	0.048256
Με υποβοήθηση	0.022102	0.021443	0.061917643	0.048255
Απόλυτη Διαφορά	-0.00047	0.000702	-0.00013849	-8.6E-07
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	-2.144	3.273927	-0.22366641	-0.00178

Πίνακας 5.21: Εκπομπές HC κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

	HC g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	0.080409	0.066177	0.052039336	0.058629
Με υποβοήθηση	0.083627	0.064884	0.050791257	0.057933
Απόλυτη Διαφορά	0.004314	-0.00129	-0.00124808	0.001649
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	3.848238	-1.99168	-2.45726995	-1.2016

Πίνακας 5.22: Ειδική κατανάλωση BSFC κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

	BSFC g/kWh			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	496.6504	248.3958	249.5540659	383.8396
Με υποβοήθηση	494.889	248.8408	249.6265771	384.1998
Απόλυτη Διαφορά	-1.76135	0.444981	0.072511187	0.360207
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	-0.35591	0.178821	0.029047863	0.093755

Μεταβάλλοντας την «επιθετικότητα» του συστήματος υποβοήθησης, παρατηρούνται οι παρακάτω μεταβολές: όπως ήταν αναμενόμενο, η αύξηση των NO_x είναι μεγαλύτερη στον κινητήρα με την μεγαλύτερη/αμεσότερη πρόσδοση ισχύος, και παράλληλα ακολουθεί και αύξηση των εκπομπών CO₂, καθώς οι αυξημένοι λόγοι πίεσης οδηγούν και σε αυξημένη αναρρόφηση αέρα άρα και παροχή καυσίμου για τις στιγμές που το μοντέλο του απλού κινητήρα και εκείνου με την υποβοηθούμενη στροβίλο-υπερπλήρωση εν λειτουργία, έχουν πατημένο το πεντάλ επιτάχυνσης κατά το ίδιο ποσοστό. Όπως και στην προσομοίωση με τον κινητήρα 1, έτσι και εδώ υπάρχει μείωση στις εκπομπές CO, η τιμή του οποίου φαίνεται να βρίσκει κάποιο τοπικό ανώτατο ανάμεσα στις δύο παραμετρικές προσομοιώσεις, αφού ο κινητήρας 1 είχε μικρότερη μείωση από τις άλλες. Ανάλογα με το πως είναι χωρισμένα τα διαστήματα, υπάρχουν ίδιες τάσεις στα αποτελέσματα κατά τη σύγκριση του συμβατικού οχήματος και του υποβοηθούμενου, με τα ακριβή νούμερα να μεταβάλλονται ελαφρώς. Τέλος, η ειδική κατανάλωση στο πρώτο τμήμα 0-510 s έχει πτωτική τάση στις πιο «επιθετικές» στρατηγικές προσφοράς ισχύος σε αντίθεση με την «1*P_{compressor}».

5.5.2 Μεταβολή μάζας οχήματος

Εκτός από την μελέτη της επίδρασης της ηλεκτρικά υποβοηθούμενης υπερπλήρωσης σε ένα όχημα 1255 kg, πρέπει να δούμε τι επιπτώσεις έχει η προσθήκη ενός τέτοιου συστήματος σε ένα βαρύτερο όχημα με μεγαλύτερη αδράνεια. Η υποβοήθηση που θα χρησιμοποιηθεί εδώ είναι αυτή του κινητήρα 1.

Πίνακας 5.23: Εκπομπές NO_x κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

Μάζα οχήματος: 1700 kg	NO _x g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	3.908019	3.843947	4.349331	4.185446
Με υποβοήθηση	3.926111	3.861143	4.353014	4.193824
Απόλυτη Διαφορά	0.018092	0.017196	0.003683	0.008378
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	0.9621	1.1194	0.3459	0.5687

Πίνακας 5.24: Εκπομπές CO₂ κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

Μάζα οχήματος: 1700 kg	CO ₂ g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	255.2497	211.8085	189.5637	202.567
Με υποβοήθηση	236.087	186.952	167.994	180.599
Απόλυτη Διαφορά	0.693928	0.408801	0.106658	0.244911
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	0.271125	0.192633	0.056233	0.120758

Πίνακας 5.25: Εκπομπές CO κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

Μάζα οχήματος: 1700 kg	CO g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	0.03249	0.063658	0.121744	0.098099
Με υποβοήθηση	0.032255	0.06397	0.121301	0.097844
Απόλυτη Διαφορά	-0.00023	0.000313	-0.00044	-0.00026
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	-0.72786	0.488761	-0.36497	-0.26062

Πίνακας 5.26: Εκπομπές HC κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2.

Μάζα οχήματος: 1700 kg	HC g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	0.099556	0.068345	0.057351	0.065007
Με υποβοήθηση	0.096274	0.070572	0.0563	0.064377
Απόλυτη Διαφορά	0.002711	0.002227	-0.00105	0.001208
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	-3.40916	3.155986	-1.86552	-0.97828

Πίνακας 5.27: Ειδική κατανάλωση BSFC κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

Μάζα οχήματος: 1700 kg	BSFC g/kWh			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	442.226	213.4279	232.1856	349.3225
Με υποβοήθηση	440.6265	215.4436	231.4727	349.7406
Απόλυτη Διαφορά	-1.59948	2.015782	-0.7129	0.418124
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	-0.363	0.935642	-0.30798	0.119553

Αν αυξηθεί περαιτέρω η μάζα του οχήματος από τα 1700 kg στα 2300 kg, θα έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα.

Πίνακας 5.28: Εκπομπές **NO_x** κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

Μάζα οχήματος: 2300 kg	NO_x g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	5.23669	5.274355	5.606972	5.488894
Με υποβοήθηση	5.25184	5.263114	5.633488	5.505967
Απόλυτη Διαφορά	0.015149	-0.01124	0.026516	0.017073
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	0.288461	-0.21359	0.470679	0.310075

Πίνακας 5.29: Εκπομπές **CO₂** κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

Μάζα οχήματος: 2300 kg	CO₂ g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	292.1365	248.5014	219.7113	234.959
Με υποβοήθηση	292.1586	248.582	219.7845	235.0296
Απόλυτη Διαφορά	0.022135	0.08066	0.07319	0.069896
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	0.007576	0.032448	0.033301	0.029739

Πίνακας 5.30: Εκπομπές **CO** κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

Μάζα οχήματος: 2300 kg	CO g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	0.086115	0.147105	0.224287	0.1904
Με υποβοήθηση	0.087679	0.143281	0.216578	0.184696
Απόλυτη Διαφορά	0.001563	-0.00382	-0.00771	-0.00571
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	1.782817	-2.66907	-3.55972	-3.09297

Πίνακας 5.31: Εκπομπές **HC** κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

Μάζα οχήματος: 2300 kg	HC g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	0.101871	0.073106	0.051218	0.062267
Με υποβοήθηση	0.106177	0.073252	0.051662	0.063132
Απόλυτη Διαφορά	7.58E-05	0.000146	0.000444	0.000297
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	4.055847	0.19873	0.859144	1.371101

Πίνακας 5.32: Ειδική κατανάλωση BSFC κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

Μάζα οχήματος: 2300 kg	BSFC g/kWh			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	392.3402	193.242	217.0898	322.6126
Με υποβοήθηση	393.7075	192.9058	218.7645	324.0515
Απόλυτη Διαφορά	1.367313	-0.33623	1.674694	1.438972
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	0.347292	-0.1743	0.765524	0.444056

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παραπάνω ανάλυση με τα οχήματα 1700 kg και 2300 kg δείχνουν αύξηση στην απόλυτη τιμή των εκπομπών, κάτι το οποίο είναι λογικό καθώς ο κινητήρας πρέπει να ανταπεξέλθει στον Κύκλο με μεγαλύτερο φορτίο από το ονομαστικό όχημα. Ταυτόχρονα, όμως, υπάρχει μείωση στην ειδική κατανάλωση όσο αυξάνεται η μάζα. Αυτό οφείλεται στην λειτουργία του κινητήρα σε υψηλότερα φορτία, όπου και έχει υψηλότερο βαθμό απόδοσης αλλά και σε λειτουργία με «πλουσιότερο» μείγμα για περισσότερες χρονικές στιγμές λόγω αύξησης της BMEP. Παρατηρώντας συγκριτικά τα νούμερα, φαίνονται τα οφέλη ή και οι αρνητικές επιπτώσεις που έχει η υποβοηθούμενη υπερπλήρωση στις εκπομπές, να είναι καλύτερα στο όχημα των 2300 kg.

- Συγκριτικά με τον πρότυπο κινητήρα, οι συνολικές εκπομπές NO_x ποσοστιαία έχουν μικρότερη αύξηση στο βαρύτερο όχημα, και μάλιστα στο διάστημα 510-1022 s υπάρχει μια μικρή μείωση σε αντίθεση με το σχετικά ελαφρύτερο 1700 kg όχημα το οποίο και παρουσιάζει (οριακή) αύξηση 1.12% στις τιμές των NO_x στο συγκεκριμένο διάστημα.
- Ενδιαφέρον έχει η τιμή του CO στο διάστημα 0-510 s, όπου παρουσιάζει αύξηση κατά 1.78%. Μια αύξηση η οποία αντιτίθεται με ότι έχουμε δει μέχρι τώρα στις προσομοιώσεις, όπου υπάρχει πάντοτε τάση για μείωση του συγκεκριμένου ρύπου στο πρώτο κομμάτι του Κύκλου. Μέρος της αιτίας για αυτό είναι η λειτουργία σε περισσότερα σημεία με λ_a κοντά στην μονάδα (ομογενής λειτουργία) λόγω της αυξημένης BMEP, ειδικά όταν λειτουργεί ο ηλεκτροκινητήρας, αφού γίνεται χρήση προφίλ αέρα-καυσίμου εξαρτώμενο της τιμής BMEP.
- Το δεύτερο κομμάτι της αιτίας έχει σημαντικό αντίκτυπο και στην παραγωγή HC, όπου παρουσιάζεται αύξηση 4% στο ίδιο διάστημα (0-510sec). Ο δεύτερος λόγος, λοιπόν, αφορά την καύση στον κύλινδρο. Μελετώντας αναλυτικά τα δεδομένα που προέκυψαν από την προσομοίωση, παρουσιάζονται αυξημένος αριθμός μεταβατικών σημείων που δεν ολοκληρώνεται η καύση στο 100%. Υπενθυμίζεται πως ως μεταβατικά σημεία λειτουργίας περιγράφονται εκείνα στα οποία το φορτίο μεταβάλλεται σημαντικά με αποτέλεσμα είτε την επιτάχυνση του οχήματος είτε την επιβράδυνση αλλά και εκείνα που προκύπτουν από απότομη μεταβολή των στροφών του κινητήρα (αλλαγή σχέσης στο κιβώτιο). Η σβέση της φλόγας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των υδρογονανθράκων και του CO. Τα μεμονωμένα σημεία που δημιουργούν αυτές τις υπερακοντίσεις HC με την παραμονή άκαυστου μείγματος, χαρακτηρίζονται από έναν συνδυασμό στροφών κινητήρα, μέσης πραγματικής πίεσης, θέση

πεντάλ επιτάχυνσης και αναλογίας αέρα-καυσίμου που δεν έχουν ρυθμιστεί επαρκώς, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω.

5.5.3 Μεταβολή της ονομαστικής ισχύος του ηλεκτροκινητήρα

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.14, κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2, ο ηλεκτροκινητήρας προσφέρει κατά βάση λιγότερο από 0.5 kW. Συνεπώς και οι δοκιμές με κινητήρες των 0.5 kW και 5 kW δεν αναμένουμε να έχουν σημαντικές διαφορές. Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για ισχύ 0.5 kW.

Πίνακας 5.33: Εκπομπές NO_x κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

Ισχύς Η/Κ: 0.5 kW	NO _x g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	3.175846	2.931303	3.439333	3.297398
Με υποβοήθηση	3.18875	2.950241	3.443761	3.305996
Απόλυτη Διαφορά	0.012903	0.018938	0.004428	0.008597
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	0.404652	0.641915	0.128581	0.260051

Πίνακας 5.34: Εκπομπές CO₂ κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

Ισχύς Η/Κ: 0.5 kW	CO ₂ g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	235.0689	186.4137	167.9111	180.3013
Με υποβοήθηση	234.8436	186.4785	167.8674	180.2581
Απόλυτη Διαφορά	-0.22526	0.064811	-0.04372	-0.04321
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	-0.09592	0.034755	-0.02604	-0.02397

Πίνακας 5.35: Εκπομπές CO κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

Ισχύς Η/Κ: 0.5 kW	CO g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	0.022576	0.020741	0.062056	0.048256
Με υποβοήθηση	0.022052	0.02112	0.061966	0.048212
Απόλυτη Διαφορά	-0.00052	0.000379	-9E-05	-4.4E-05
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	-2.37596	1.794918	-0.14555	-0.09196

Πίνακας 5.36: Εκπομπές HC κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

Ισχύς Η/Κ: 0.5 kW	HC g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	0.080409	0.066177	0.052039	0.058629
Με υποβοήθηση	0.087337	0.064256	0.050846	0.058301
Απόλυτη Διαφορά	-0.00096	-0.00192	-0.00119	-0.00024
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	7.932767	-2.98976	-2.34603	-0.56234

Πίνακας 5.37: Ειδική κατανάλωση BSFC κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

Ισχύς Η/Κ: 0.5 kW	BSFC g/kWh			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	496.6504	248.3958	249.5541	383.8396
Με υποβοήθηση	500.8109	242.9606	251.687	383.2542
Απόλυτη Διαφορά	4.160521	-5.43526	2.132914	-0.58536
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	0.830757	-2.2371	0.847447	-0.15273

Πριν σχολιαστούν τα αποτελέσματα, παρατίθενται και τα αποτελέσματα για ισχύ στα 5kW.

Πίνακας 5.38: Εκπομπές NO_x κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

Ισχύς Η/Κ: 5 kW	NO _x g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	3.175846	2.931303	3.439333	3.297398
Με υποβοήθηση	3.196384	2.949521	3.448187	3.309723
Απόλυτη Διαφορά	0.020538	0.018218	0.008854	0.012324
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	0.642528	0.617647	0.256769	0.37236

Πίνακας 5.39: Εκπομπές CO₂ κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

Ισχύς Η/Κ: 5 kW	CO ₂ g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	235.0689	186.4137	167.9111	180.3013
Με υποβοήθηση	235.8123	186.809	167.9914	180.5323
Απόλυτη Διαφορά	0.743404	0.395351	0.080303	0.230993
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	0.315253	0.211634	0.047802	0.127951

Πίνακας 5.40: Εκπομπές CO κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

Ισχύς Η/Κ: 5 kW	CO g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	0.022576	0.020741	0.062056	0.048256
Με υποβοήθηση	0.02192	0.020696	0.062106	0.048197
Απόλυτη Διαφορά	-0.00066	-4.5E-05	4.96E-05	-5.9E-05
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	-2.99281	-0.21804	0.079828	-0.12319

Πίνακας 5.41: Εκπομπές HC κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

Ισχύς Η/Κ: 5 kW	HC g/km			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	0.080409	0.066177	0.052039	0.058629
Με υποβοήθηση	0.085483	0.065833	0.052514	0.059506
Απόλυτη Διαφορά	0.003153	-0.00034	0.000474	0.00128
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	5.93608	-0.52146	0.903151	1.474874

Πίνακας 5.42: Ειδική κατανάλωση BSFC κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2

Ισχύς Η/Κ: 5 kW	BSFC g/kWh			
	0-510 (s)	510-1022 (s)	1022-1800 (s)	0-1800 (s)
Συμβατικός κινητήρας	496.6504	248.3958	249.5541	383.8396
Με υποβοήθηση	496.594	246.7809	249.6615	383.6753
Απόλυτη Διαφορά	-0.0564	-1.61494	0.107456	-0.16433
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	-0.01136	-0.6544	0.043041	-0.04283

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει πως η επίδραση της ηλεκτρικά υποβοηθούμενης στροβίλο-υπερπλήρωσης δεν είναι εύκολο να αξιολογηθεί. Η κάθε παράμετρος που μεταβάλλεται ωφελεί τα μετρούμενα μεγέθη σε διαφορετικά σημεία. Ο ηλεκτροκινητήρας, όταν λειτουργεί, προσφέρει στο σύστημα, μειώνει την υστέρηση, αυξάνει την παροχή αέρα και κατά συνέπεια μπορεί να αυξηθεί και η παροχή καυσίμου. Ταυτόχρονα, δημιουργεί διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας για τον κινητήρα επηρεάζοντας και άλλα υποσυστήματά του που επιδρούν στην κατανάλωση και στις εκπομπές. Τα 5 kW δεν φαίνεται να έχουν κάποιο πλεονέκτημα σε σχέση με τα 0.5 kW ως προς τις παρούσες τιμές που προέκυψαν κατά την δοκιμή του Κύκλου. Όμως η μελέτη τους δεν πρέπει να σταματήσει εκεί καθώς δημιουργούν περισσότερες δυνατότητες για βαθμονόμηση της απόκρισης του οχήματος όπως έγινε με την μελέτη του κινητήρα 2.

5.6 Συμπεράσματα

Η μελέτη και η παραμετροποίηση που προηγήθηκε ώθησε στη δημιουργία διαφορετικών μοντέλων προσομοίωσης για την ανάλυση της επίπτωσης της προσθήκης ηλεκτρικά υποβοηθούμενης στροβίλο-υπερπλήρωσης. Στη συνέχεια ακολούθησαν δοκιμές των παραπάνω κινητήρων-μοντέλων σε οχήματα διαφορετικού βάρους. Το συμβατικό όχημα έχει βάρος 1255kg ενώ ακολούθησαν δοκιμές με οχήματα 1700 kg και 2300 kg. Έπειτα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με διαφορετική λογική προσφοράς ενέργειας από τον ηλεκτροκινητήρα αλλά και με διαφορετική ονομαστική ισχύ. Επιπλέον, έγινε ανάλυση για τη σύγκριση του συμβατικού κινητήρα με έναν ηλεκτρικά υποβοηθούμενης υπερπλήρωσης, στον οποίο έχει μεταβληθεί όμως το προφίλ λειτουργίας του λόγου αέρα-καυσίμου. Αυτή η αλλαγή του λόγου αέρα-καυσίμου έγινε με σκοπό να εξισώσει σε έναν βαθμό την απόκριση του κινητήρα έχοντας την υποβοήθηση με την απόκριση του συμβατικού. Στα αποτελέσματα από τη σύγκριση των προαναφερθέντων προσομοιώσεων παρατηρείται πανομοιότυπη συμπεριφορά στη μεταβολή των (engine-out) εκπομπών και της κατανάλωσης μεταξύ συμβατικού κινητήρα και υποβοηθούμενου. Εξαιρέση αποτελούν τα αποτελέσματα του μοντέλου με το τροποποιημένο προφίλ του λόγου αέρα-καυσίμου. Πιο αναλυτικά για το κάθε μέγεθος ξεχωριστά γίνεται αναφορά παρακάτω.

- Ο στόχος για μείωση της υστέρησης του υπερπληρωτή έχει επιτευχθεί, όπως μπορεί να φανεί καθαρά στα Σχήματα 5.3 έως και 5.8. Η άμεσα διαθέσιμη ροπή του ηλεκτροκινητήρα επιταχύνει το ζεύγος υπερπλήρωσης όταν αυτό απαιτείται και τα καυσαέρια δεν έχουν αρκετή ενέργεια, οπότε βελτιώνονται σημαντικά οι χρόνοι που ολοκληρώνονται οι δοκιμές. Επιπλέον, υπάρχει μείωση στο πάτημα του πεντάλ επιτάχυνσης λόγω της αυξημένης πίεσης εισαγωγής κατά την διεξαγωγή του Κύκλου WLTC κλάσης 3-2, όπως μπορεί να φανεί στο Σχήμα 5.14. Στον τομέα που αφορά, όμως, την ειδική κατανάλωση και τις εκπομπές ρύπων, τα αποτελέσματα είναι πιο περίπλοκα.
- Κατά την διεξαγωγή των παραπάνω προσομοιώσεων, υπάρχει η τάση για αυξημένα NO_x από τον κινητήρα με την ηλεκτρικά υποβοηθούμενη στροβίλο-υπερπλήρωση. Η αυξημένη πίεση εισαγωγής (Σχήμα 5.14) οδηγεί και σε υψηλότερες θερμοκρασίες εντός του κυλίνδρου, με αποτέλεσμα την αύξηση των εκπομπών NO_x . Εκτός από τις υψηλές θερμοκρασίες, σημαντικό ρόλο παίζει και η μέση πραγματική πίεση (BMEP) στην τιμή των NO_x . Η αναλογία αέρα-καυσίμου εντός του κυλίνδρου καθορίζεται από το σύστημα ελέγχου μέσω των στροφών λειτουργίας και μέσω της BMEP. Κατά τις απότομες επιταχύνσεις, η αυξημένη πίεση εισαγωγής, αυξάνει την μέση πραγματική πίεση, οπότε μειώνεται και ο λόγος αέρα-καυσίμου AF (Σχήμα 5.18). Αποτέλεσμα της μείωσης του AF είναι η περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας εντός του κυλίνδρου με αρνητική επίπτωση στις εκπομπές NO_x . Αντίθετα αποτελέσματα προκύπτουν από τον υποβοηθούμενο κινητήρα με το τροποποιημένο προφίλ αέρα-καυσίμου, με την περίσσεια αέρα να μειώνει τη θερμοκρασία εντός του κυλίνδρου.
- Στην πλειονότητα των δοκιμών εμφανίζεται μείωση του εκπεμπόμενου CO στο τμήμα που προσομοιώνει αστική κυκλοφορία, κάτι που μπορεί να δικαιολογήσει η καλύτερη ανάμειξη εντός του κυλίνδρου με τον υψηλότερης πίεσης εισερχόμενο αέρα που περιορίζει την δημιουργία πολύ πλούσιων σε καύσιμο περιοχών εντός του κυλίνδρου. Στον συγκεκριμένο ρύπο υπάρχει σημαντική μείωση στο μοντέλο όπου έχει αλλάξει ο AF λόγω της λειτουργίας

με μεγαλύτερο λόγο αέρα-καυσίμου, άρα και λιγότερες περιπτώσεις υπερακόντισης στην τιμή του ρύπου κατά της μεγάλης επιταχύνσεις. Εξαιρεση αποτέλεσε η δοκιμή με το βαρύτερο όχημα (2300 kg) στο οποίο όμως έχουν παρατηρηθεί αυξημένα σημεία λειτουργίας που δεν ολοκληρώθηκε η καύση.

- Όσον αφορά τις εκπομπές υδρογονανθράκων HC, όπου επίσης η μέση τιμή επηρεάζεται σημαντικά από τις υπερακοντίσεις του ρύπου κατά τα έντονα μεταβατικά σημεία λειτουργίας, υπάρχει η τάση για μια μικρή αύξηση σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, με τη μεγαλύτερη αύξηση να υπάρχει στον κινητήρα με το τροποποιημένο προφίλ αναλογίας αέρα-καυσίμου. Όμως, επειδή όπως ειπώθηκε η μέση τιμή του ρύπου μεταβάλλεται εύκολα, με τα υπάρχοντα αποτελέσματα δεν είναι ασφαλές να εξαχθούν συμπεράσματα.
- Οι μεταβολές της ειδικής κατανάλωσης είναι αρκετά μικρές, συνήθως σε τιμές μικρότερες της μονάδας, ανάλογα με τις παραμέτρους της προσομοίωσης και το κομμάτι του διεξαγόμενου Κύκλου. Είναι δύσκολο λοιπόν να αξιολογηθεί επ' ακριβώς η συμβολή της ηλεκτρικά υποβοηθούμενης στροβιλο-υπερπλήρωσης.
- Η παραγωγή του CO₂ δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές μεταξύ των συγκρινόμενων μοντέλων. Μια μικρή αύξηση παρουσιάζεται κυρίως σε εκείνα που έχουν υποβοήθηση, με εξαίρεση πάλι την περίπτωση του κινητήρα με τον τροποποιημένο λόγο αέρα-καυσίμου. Η αιτία αφορά πάλι την αυξημένη παροχή αέρα που δημιουργείται και κατά συνέπεια την αυξημένη παροχή καυσίμου. Η συνθήκη αυτή δεν είναι κάτι που διαρκεί σε όλη την διεξαγωγή του Κύκλου. Σε έντονα μεταβατικά σημεία, όμως, παρουσιάζονται μικρές κορυφές στις εκπομπές ή στην ισχύ του κινητήρα, οι οποίες αντιμετωπίζονται μεν από το σύστημα ελέγχου που καθοδηγεί τις εντολές εισόδου του εικονικού οδηγού, αλλά όχι στο 100%. Η δεύτερη αιτία έγκειται στην απαιτούμενη ισχύ του κινητήρα για την φόρτιση της μπαταρίας. Όπως φάνηκε από το Σχήμα 5.15, η κατανάλωση του ηλεκτροκινητήρα είναι πολύ μικρή συγκριτικά με την παραγόμενη ισχύ του κινητήρα (Σχήμα 5.10). Η ενέργεια της μπαταρίας που απορροφάται από τον ηλεκτροκινητήρα πρέπει φυσικά να αναπληρωθεί μέσω της ΜΕΚ. Συνεπώς, αναμένεται μια μικρή αύξηση κατανάλωσης/CO₂, δύο μεγέθη που είναι άμεσα συνδεδεμένα μεταξύ τους. Αντίθετη τάση στα αποτελέσματα υπάρχει πάλι και εδώ στην περίπτωση του υποβοηθούμενου κινητήρα. Η μικρότερη παραγόμενη ισχύς του κατά τις επιταχύνσεις έχει και αποτέλεσμα την μικρή μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Συμπερασματικά, η ηλεκτρική υποβοήθηση του συστήματος στροβιλο-υπερπλήρωσης ενός κινητήρα άμεσου ψεκασμού βενζίνης βελτιώνει, όπως ήταν αναμενόμενο, την απόκριση του κινητήρα στις επιταχύνσεις εντός πόλης, αλλά δεν μπορούμε να πούμε ότι επηρεάζει θετικά ρύπους, κατανάλωση και εκπομπές CO₂, με πολύ καίριο θέμα περαιτέρω μελέτης, το σύστημα ελέγχου (του συστήματος υποβοήθησης) αλλά και της γενικότερης βαθμονόμησης του κινητήρα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ.Δ. Ρακόπουλος (2013) «Μηχανές Εσωτερικής Καύσης Ι», Εκδόσεις «Γρ. Φούντας», Αθήνα.
- [2] Κ.Δ. Ρακόπουλος, Ε.Γ. Γιακουμής (2011) «Εναλλαγή αερίων και Υπερπλήρωση Μ.Ε.Κ.», Εκδόσεις «Γρ. Φούντας», Αθήνα.
- [3] Κ.Δ. Ρακόπουλος, Δ.Θ. Χουντάλας (1998) «Καύση Ρύπανση Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.» Εκδόσεις «Γρ. Φούντας», Αθήνα.
- [4] Ε.Γ. Γιακουμής (2015) «Προδιαγραφές Καυσαερίων και Κύκλοι Δοκιμής Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.», Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- [5] Ε.Γ. Γιακουμής, Σημειώσεις παρουσιάσεων ΚΡΕΜΕΚ, Αθήνα, 2019.
- [6] Stacy C. Davis, Susan E. Williams, Robert G. Boundy, Sheila Moore (2016), «2016 Vehicles Technologies Market Report», Oak Ridge National Laboratory.
- [7] Henning Bockhorn (1994), «Soot Formation in Combustion: Mechanisms and Models», Springer-Verlag, Berlin.
- [8] Justin Edward Ketterer (2013), «Soot Formation in Direct Injection Spark Ignition Engines Under Cold-Idle Operating Conditions», PhD Thesis, M.I.T., Massachusetts
- [9] E.G. Giakoumis, A.T. Zachiotis (2017), «Investigation of a Diesel-Engined Vehicle's Performance and Emissions during the WLTC Driving Cycle-Comparison with the NEDC», Energies, 2017.
- [10] <https://x-engineer.org/wp-content/uploads/2019/06/Pollutant-emission-levels-function-of-air-fuel-ratio-petrol-gasoline.png>
- [11] <https://www.horiba.com/int/automotive/applications/emissions-performance-and-durability/exhaust-emissions/light-duty-chassis-testing/>
- [12] Κανονισμός (ΕΕ) 2019/631, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/HTML/?uri=CELEXQ02019R0631-20210301&from=EN#tocId3>
- [13] Vehicle categories, https://ec.europa.eu/growth/sectors/automotive-industry/vehicle-categories_el

- [14] Argese Marco (2018), «Experimental and numerical analysis of ringing and detonation on a SI engine: cycle-to-cycle variability and knock prediction», Master Degree Thesis, Politecnico Di Torino.
- [15] Fang-kun Zou, Hong Zeng, Huai-yu Wang, Xin-xin Wang, Zhao-xin Xu (2021), «Implementation and Parameter Analysis of the Knock Phenomenon of a Marine Dual-Fuel Engine Based on a Two-Zone Combustion Model», Article, Dalian Maritime University, China.
- [16] Bronislaw Sendyka, Mariusz Cygnar (2012), «Stratified Charge Combustion in a Spark-Ignition Engine With Direct Injection System», DOI: 10.5572/53871.
- [17] U. Spicher, T. Heidenreich (2010), «Stratified-charge combustion in direct injection gasoline engines», Woodhead Publishing.
- [18] Nicola Terdich (2015), «Impact of Electrically Assisted Turbocharging on the Transient Response of an Off-Highway Diesel Engine», PhD Thesis, Imperial College, London.
- [19] Μπαχτής Χαράλαμπος (2018), «Μελέτη επιδόσεων και εκπομπών ρύπων ελαφρού πετρελαιοκίνητου φορτηγού με ηλεκτρικά υποβοηθούμενη στροβιλο-υπερπλήρωση κατά τη διάρκεια του Παγκοσμίου Κύκλου Πόλης WLTC», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π. (επιβλέπων Ε.Γ. Γιακουμής).
- [20] Κακουλίδης Στυλιανός (2020), «Προσομοίωση λειτουργίας στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Otto άμεσου ψεκασμού-Σύγκριση επιδόσεων και εκπομπών με συμβατικό κινητήρα Otto», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π. (επιβλέπων Ε.Γ. Γιακουμής).
- [21] E.U. CO₂ emissions, https://ec.europa.eu/clima/eu-action/transport-emissions/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/co2-emission-performance-standards-cars-and-vans_en
- [22] E.U. NO_x emissions, <https://theicct.org/the-ongoing-battle-for-strict-vehicle-emission-limits-in-europe/>
- [23] <https://automotivesdictionary.com/supercharger/>
- [24] <https://www.semanticscholar.org/paper/Internal-combustion-engine-supercharging%3A-vs.-wave-George-Chiru/15c0d13631c8eec38f453ed5be2a01208aae1c46/figure/2>
- [25] <https://www.garrettmotion.com/news/media/press-release/garrett-motion-wins-2021-automotive-news-pace-award-for-industry-first-electric-turbo/>

- [26] <https://www.acea.auto/fact/euro-standards/>
- [27] <https://www.audi.com/>
- [28] J. B. Heywood (1988), «Internal Combustion Engine Fundamentals», McGraw-Hill Education.
- [29] Gamma Technologies, GT-SUITE Engine Performance Application Manual, 2016.
- [30] Gamma Technologies, GT-SUITE Engine Performance Tutorials.
- [31] https://en.wikipedia.org/wiki/New_European_Driving_Cycle