



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Θερμότητας

Μελέτη συστήματος απενεργοποίησης κυλίνδρων επιβατικού οχήματος με κινητήρα Otto GDI κατά τη διάρκεια του παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC

Διπλωματική Εργασία

Ζαβουδάκη Ασπασία

Επιβλέπων: Ευάγγελος Γιακουμής, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2024



National Technical University of Athens
School of Mechanical Engineering
Thermal Engineering Department

**Study of a GDI-engined passenger vehicle cylinder deactivation
system during the WLTC driving cycle**

Diploma Thesis

Zavoudaki Aspasia

Supervisor: Evangelos Giakoumis, Professor NTUA

Athens, July 2024

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, η κλιματική αλλαγή έχει κάνει την παρουσία της πιο αισθητή από ποτέ. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έλαβε από νωρίς μέτρα για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) θεσπίζοντας κανόνες για τα οχήματα, τα οποία τίθενται πλέον σε αυστηρούς ελέγχους για τη διασφάλιση της τήρησης των μέτρων αυτών. Σε αυτό το πλαίσιο, η αυτοκινητοβιομηχανία έχει εστιάσει στην αύξηση της απόδοσής των Μηχανών Εσωτερικής Καύσης, ώστε να μειώσει την κατανάλωση καυσίμου, ελαττώνοντας και τις εκπομπές CO_2 . Ανάμεσα στις διάφορες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί για την επίτευξη αυτού του σκοπού είναι και η απενεργοποίηση κυλίνδρων. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει την προσωρινή διακοπή λειτουργίας ορισμένων κυλίνδρων του κινητήρα κατά τη διάρκεια χαμηλών φορτίων. Αυτή η διαδικασία επιτυγχάνεται μέσω της διακοπής της τροφοδοσίας καυσίμου και της απενεργοποίησης των βαλβίδων στους κυλίνδρους που δεν χρειάζονται. Πολλά σύγχρονα οχήματα υψηλής απόδοσης είναι εξοπλισμένα με αυτήν την τεχνολογία, επιτρέποντας στους οδηγούς να επωφελούνται από τη μειωμένη κατανάλωση καυσίμου χωρίς να θυσιάζουν τις επιδόσεις του κινητήρα όταν αυτές είναι απαραίτητες. Στην παρούσα εργασία, θα πραγματοποιηθεί προσομοίωση στο λογισμικό GT-POWER για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της απενεργοποίησης κυλίνδρων σε κινητήρες Otto GDI κατά τον κύκλο πόλης WLTC. Μέσω αυτής της προσομοίωσης θα αναλυθούν οι επιπτώσεις της τεχνολογίας στην κατανάλωση καυσίμου και στις εκπομπές ρύπων.

Λέξεις-Κλειδιά: Άμεση Έγχυση, Απενεργοποίηση Κυλίνδρων, Εκπομπές, Κύκλος Πόλης WLTC

Abstract

In recent years, the climate change has made its presence felt more than ever before. The European Union took early steps to reduce carbon dioxide (CO₂) emissions by introducing rules for vehicles, which are now subject to strict controls to ensure compliance with these measures. In this context, the automotive industry has focused on increasing the efficiency of Internal Combustion Engines to reduce fuel consumption, thereby also reducing CO₂ emissions. Among the various technologies that have been developed to achieve this goal is cylinder deactivation. This technology allows certain cylinders of the engine to be temporarily shut down during low loads. This is achieved by cutting off the fuel supply and deactivating the valves on the cylinders that are not needed. Many modern high-performance vehicles are equipped with this technology, allowing drivers to benefit from reduced fuel consumption without sacrificing engine performance when it is needed. In this thesis, a simulation will be performed in GT-POWER software to evaluate the effectiveness of cylinder deactivation in Otto GDI engines during the WLTC city cycle. Through this simulation, the effects of the technology on fuel consumption and emissions will be analyzed.

Keywords: GDI Engine, Cylinder Deactivation, Emissions, WLTC driving cycle

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract.....	ii
Κατάλογος Σχημάτων.....	v
Κατάλογος Πινάκων	viii
1. Εισαγωγή στις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης	1
1.1. Εκπομπές κινητήρων Otto.....	2
1.1.1. Εκπομπές Ρύπων	2
1.1.2. Συσκευές Αντιρρύπανσης	5
1.2. Άμεση Έγχυση	6
1.3. Υπερπλήρωση.....	8
1.3.1. Γενική Επισκόπηση Συμπίεσης	8
1.3.2. Στρόβιλο-Υπερπλήρωση	9
1.3.3. Ψύξη του Αέρα Υπερπλήρωσης	10
2. Απενεργοποίηση Κυλίνδρων	12
2.1. Εισαγωγή	12
2.2. Ιστορική Αναδρομή.....	12
2.3. Μέθοδοι Απενεργοποίησης	15
2.4. Οφέλη της Τεχνολογίας στη Μείωση Κατανάλωσης Καυσίμου και Διοξειδίου του Άνθρακα	20
2.5. Περιορισμοί	21
3. Προδιαγραφές Εκπομπών και Κύκλοι Πόλης.....	23
3.1. Παγκόσμια Εναρμονισμένοι Κύκλοι Δοκιμών Ελαφρών Οχημάτων..	23
3.2. Δοκιμή εκπομπών κατά την Πραγματική Οδήγηση	25
3.2.1. Δυναμόμετρο.....	25
3.2.2. Δειγματοληψία Εκπομπών.....	27
4. Μοντελοποίηση του Κινητήρα.....	28
4.1. Εισαγωγή στο GT-POWER.....	28
4.2. Μοντέλο Otto-GDI	29
4.3. Εισαγωγή της Απενεργοποίησης.....	36

5. Προσομοίωση και Ανάλυση	39
5.1. Συγκριτικά Διαγράμματα των Προσομοιώσεων	39
5.2. Γενικός Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	65
5.2.1. Ειδική Κατανάλωση και Εκπομπές	67
6. Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	70
6.1. Συμπεράσματα	70
6.2. Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	71
Κατάλογος Αναφορών	72

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1:Σχηματική Απεικόνιση Καταλύτη SCR[3].....	5
Σχήμα 1.2: Διάταξη Άμεσης Έγχυσης.....	7
Σχήμα 1.3: Διάταξη Στρόβιλο-Υπερπλήρωσης.....	9
Σχήμα 1.4:Διάταξη Στρόβιλο-Υπερπλήρωσης με Ενδιάμεση Ψύξη [6].	10
Σχήμα 2.1:Εναλλασσόμενος Ωστήριος Μοχλός με Τροχίσκο στις δύο καταστάσεις λειτουργίας[15].	15
Σχήμα 2.2:Σύστημα Ελέγχου Βαλβίδας με εναλλασσόμενο ωστήριο [18].	16
Σχήμα 2.3: Σύστημα με Εναλλασσόμενο Οδηγό Στοιχείο [19].	17
Σχήμα 2.4:Σύστημα Ελέγχου Βαλβίδας με Κινούμενα Έκκεντρα[20].	18
Σχήμα 2.5:Uni Air [21].	19
Σχήμα 2.6:UniValve[23].	19
Σχήμα 3.1:Κύκλος WLTC3-2.....	24
Σχήμα 3.2:Διάταξη Δυναμόμετρου Πλαισίου[31].	25
Σχήμα 3.3:Διάταξη Δυναμόμετρου Κινητήρα[31].	26
Σχήμα 3.4:Δειγματοληψία με CVS[32].	27
Σχήμα 4.1:Στρατηγική αναλογίας αέρα-καυσίμου[34].	31
Σχήμα 4.2:Πίνακας αναλογίας αέρα-καυσίμου στο GT-POWER.....	31
Σχήμα 4.3:Βαλβίδα Εισαγωγής.....	32
Σχήμα 4.4:Βαλβίδα Εξαγωγής.....	32
Σχήμα 4.5: Χάρτης Λειτουργίας Garrett GT2056.....	33
Σχήμα 4.6:Διάταξη Οχήματος Χωρίς Απενεργοποίηση.....	35
Σχήμα 4.7:Συνθήκες απενεργοποίησης του κινητήρα Volkswagen[20].	36
Σχήμα 4.8:Διάταξη Οχήματος με Απενεργοποίηση.....	38
Σχήμα 5.1: (a): Σήμα Απενεργοποίησης για 0-510s, (b): Ταχύτητα WLTC3-b για 0-510s, (c): Σήμα Απενεργοποίησης για 510-1022s, (d): Ταχύτητα WLTC3-b για 510-1022s.....	40

Σχήμα 5.2: (a): Σήμα Απενεργοποίησης για 1022-1800s, (b): Ταχύτητα WLTC3-b για 1022-1800s, (c): Σήμα Απενεργοποίησης για 0-1800s, (d): Ταχύτητα WLTC3-b για 0-1800s.....	41
Σχήμα 5.3: Μέγιστη Θερμοκρασία Ανά Κύκλο (a): Κυλίνδρου 1, (b): Κυλίνδρου 2 για όλο τον κύκλο WLTC-3b.....	43
Σχήμα 5.4: Μέγιστη Θερμοκρασία Ανά Κύκλο (a): Κυλίνδρου 1, (b): Κυλίνδρου 2 για 0 – 510s.....	44
Σχήμα 5.5: Μέγιστη Πίεση Ανά Κύκλο (a): Κυλίνδρου 1, (b): Κυλίνδρου 2 για όλο τον κύκλο WLTC-3b.....	45
Σχήμα 5.6: Μέγιστη Πίεση Ανά Κύκλο (a): Κυλίνδρου 1, (b): Κυλίνδρου 2 για 0 – 510s.	46
Σχήμα 5.7: Ποσότητα εγχεόμενου καυσίμου ανά κύκλο (a): Κυλίνδρου 1, (b): Κυλίνδρου 2 για όλο τον κύκλο WLTC3b.	47
Σχήμα 5.8: Ποσότητα εγχεόμενου καυσίμου ανά κύκλο (a): Κυλίνδρου 1, (b): Κυλίνδρου 2 για 0 – 510s.....	48
Σχήμα 5.9:(a): Ταχύτητα Περιστροφής, (b): Λόγος Πιέσεων Συμπιεστή για όλο τον κύκλο WLTC-3b.....	49
Σχήμα 5.10:(a): Ταχύτητα Περιστροφής, (b): Λόγος Πιέσεων Συμπιεστή για 0 – 510s.....	50
Σχήμα 5.11: (a): Ταχύτητα Περιστροφής Κινητήρα, (b): Σχέση Μετάδοσης για όλο τον κύκλο WLTC-3.....	51
Σχήμα 5.12: (a): Ταχύτητα Περιστροφής Κινητήρα, (b): Σχέση Μετάδοσης για 0-510s.....	52
Σχήμα 5.13:(a): Ισχύς, (b): Ροπή για όλο τον κύκλο WLTC-3b.....	53
Σχήμα 5.14: (a): Ισχύς, (b): Ροπή για 0-510s.	54
Σχήμα 5.15: (a)Μέση Πραγματική Πίεση, (b): Απώλειες εναλλαγής αερίων για όλο τον κύκλο WLTC-3b.....	55
Σχήμα 5.16: (a): Μέση Πραγματική Πίεση, (b): Απώλειες εναλλαγής αερίων για 0 – 510s.	56

Σχήμα 5.17: :(a): Ογκομετρικός Βαθμός Απόδοσης, (b): Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου για όλο τον κύκλο WLTC-3.....	57
Σχήμα 5.18:(a): Ογκομετρικός Βαθμός Απόδοσης, (b): Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου για 0 – 510s.	58
Σχήμα 5.19: Ποσοστό πατήματος πεντάλ (a): Επιτάχυνσης, (b): Πέδησης για όλο τον κύκλο WLTC-3b.....	59
Σχήμα 5.20: Ποσοστό πατήματος πεντάλ (a): Επιτάχυνσης, (b): Πέδησης για 0 – 510s.	60
Σχήμα 5.21: Περιεκτικότητα καυσαερίου σε (a): NO _x , (b): CO ₂ για όλο τον κύκλο WLTC-3b.....	61
Σχήμα 5.22: Περιεκτικότητα καυσαερίου σε (a): NO _x , (b): CO ₂ για 0 – 510s.	62
Σχήμα 5.23: Περιεκτικότητα καυσαερίου σε (a): CO και (b): HC για όλο τον κύκλο WLTC-3b.....	63
Σχήμα 5.24: Περιεκτικότητα καυσαερίου σε (a): CO και (b): HC για 0 – 510s.	64
Σχήμα 5.25: (a): Πίεση Κυλίνδρου 1, (b): Πίεση Κυλίνδρου 2, (c): Θερμοκρασία Κυλίνδρου 2, (d):Απώλειες Εναλλαγής Αερίων, (e): Ποσότητα Εγχεόμενου Καυσίμου στον Κύλινδρο 1, (f): Ποσότητα Εγχεόμενου Καυσίμου στον Κύλινδρο 2 κατά τη διάρκεια απενεργοποίησης 30-36.5s.....	66

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Παραδείγματα Τεχνολογίας Απενεργοποίησης Κυλίνδρων.	14
Πίνακας 4.1: Στοιχεία Κινητήρα.....	29
Πίνακας 4.2: Στοιχεία Οχήματος.....	34
Πίνακας 4.3: Σχέσεις Μετάδοσης.....	34
Πίνακας 4.4: Σήματα Απενεργοποίησης.....	37
Πίνακας 5.1: Μέσος Όρος Απωλειών Άντλησης.....	65
Πίνακας 5.2: Ποσοστιαία μεταβολή του BSFC κατά χρονικές περιόδους του κύκλου WLTC.....	67
Πίνακας 5.3: Ποσοστιαία μεταβολή των εκπομπών κατά χρονικές περιόδους του κύκλου WLTC.....	68

1. Εισαγωγή στις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης

Η ιστορία του κινητήρα Otto είναι στενά συνδεδεμένη με το όνομα του Nikolaus Otto, ενός Γερμανού μηχανικού που θεωρείται ο πατέρας του κινητήρα εσωτερικής καύσης. Κατά τη διάρκεια των ταξιδιών του, ο Otto γνώρισε τον πρώτο κινητήρα εσωτερικής καύσης που κατασκεύασε ο Etienne Lenoir, και αυτό που θα ανέπτυξε καθόρισε την πορεία για τις σημερινές μηχανές εσωτερικής καύσης. Το 1876, ο Otto και ο συνεργάτης του, Eugen Langen, κατασκεύασαν έναν από τους πρώτους επιτυχημένους τετράχρονους κινητήρες εσωτερικής καύσης, που έγινε γνωστός ως κινητήρας Otto [1].

Από τότε ως σήμερα έχουν γίνει πολύ σημαντικές καινοτομίες για την βελτίωση της λειτουργίας των κινητήρων Otto. Η εισαγωγή νέων καυσίμων, όπως βενζίνη με υψηλότερο αριθμό οκτανίου, βελτίωσε την απόδοση και την κατανάλωση καυσίμου των κινητήρων. Η εισαγωγή των συστημάτων ηλεκτρονικής διαχείρισης κινητήρα επέτρεψε τον πιο ακριβή έλεγχο της καύσης, του καυσίμου και άλλων παραμέτρων. Ακόμη, έχουν αναπτυχθεί διάφορες εκδοχές του κύκλου Otto, όπως ο κύκλος Atkinson. Τέλος, έχει καθιερωθεί και η χρήση νέων υλικών και η εφαρμογή καινοτόμων κατασκευαστικών τεχνικών, όπως οι κεραμικές επικαλύψεις, που έχουν βελτιώσει την αντοχή των κινητήρων Otto.

Παράλληλα με την εξέλιξη των κινητήρων, αυξανόταν και η ανησυχία για τις επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η κλιματική αλλαγή άρχισε να κάνει αισθητή την παρουσία της με ορατές αλλαγές, προκαλώντας ανησυχία για το μέλλον. Αυτό το γεγονός ενίσχυσε τις ανησυχίες για τις μακροπρόθεσμες συνέπειες της ανθρώπινης δραστηριότητας, καθιστώντας επιτακτική την ανάγκη για περιβαλλοντική συνείδηση και δράση.

1.1. Εκπομπές κινητήρων Otto

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί το πρόβλημα των εκπομπών ρύπων από κινητήρες. Η δημιουργία ανεπιθύμητων ρύπων από την καύση σε κινητήρες είναι μία αναμενόμενη διαδικασία. Κατά τη διάρκεια αυτής, το καύσιμο αναμιγνύεται με τον αέρα και εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, με αποτέλεσμα την παραγωγή διαφόρων ρυπογόνων ουσιών. Οι κινητήρες Otto παράγουν κυρίως διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), οξείδια του αζώτου (NOx), μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και υδρογονάνθρακες (HC). Στη συνέχεια, θα αναλυθούν τα είδη των ρύπων που προκύπτουν από τη λειτουργία των κινητήρων εσωτερικής καύσης και κάποιοι διαδεδομένοι τρόποι αντιμετώπισής τους.

1.1.1. Εκπομπές Ρύπων

- **Μονοξείδιο του Άνθρακα**

Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) σχηματίζεται στους κινητήρες Otto λόγω ατελούς καύσης, όταν δεν υπάρχει αρκετό οξυγόνο για πλήρη οξείδωση του καυσίμου σε διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) ή όταν δεν έχει γίνει πλήρης ανάμιξη του καυσίμου με τον αέρα. Αυτό συμβαίνει συχνά σε συνθήκες πλούσιου μείγματος καύσης, όπου η αναλογία καυσίμου προς αέρα είναι υψηλή. Σε αυτές τις συνθήκες, η καύση δεν ολοκληρώνεται και παράγεται περισσότερο CO . Επιπλέον, οι χαμηλές θερμοκρασίες καύσης συμβάλλουν στον σχηματισμό του CO , καθώς μειώνουν την ταχύτητα των αντιδράσεων οξείδωσης. Οι κινητήρες Otto παρουσιάζουν αυξημένες εκπομπές CO σε χαμηλές ταχύτητες και κατά τη διάρκεια των μεταβατικών φάσεων λειτουργίας, όπως κατά την εκκίνηση και την επιτάχυνση, όπου η καύση είναι λιγότερο αποδοτική[2]. Η αντίδραση οξείδωσης του CO σε CO_2 είναι:



- **Οξειδία του Αζώτου**

Τα οξειδία του αζώτου (NO_x) προκύπτουν κατά την καύση στον κινητήρα ως αποτέλεσμα της υψηλής θερμοκρασίας που επικρατεί στον κύλινδρο. Κατά τη διάρκεια του σταδίου της καύσης, οι υψηλές θερμοκρασίες επιτρέπουν στο ατμοσφαιρικό άζωτο (N_2) και το οξυγόνο (O_2) να αντιδράσουν και να δημιουργήσουν τα οξειδία του αζώτου. Η πολύ υψηλή θερμοκρασία εντός του κυλίνδρου του κινητήρα διευκολύνει τη διάσπαση του ατόμου αζώτου. Έτσι, το μονατομικό άζωτο (N) που παράγεται από αυτή τη διαδικασία, αντιδρά με το οξυγόνο που υπάρχει στον κύλινδρο, δημιουργώντας τα NO_x .



Το NO μπορεί να οξειδωθεί ταχέως σε NO_2 μέσω της αντίδρασης:



και να αποσυντεθεί ξανά σε NO :



Αυτές οι αντιδράσεις επηρεάζονται από τις θερμοκρασίες. Στους κινητήρες Otto οι συνθήκες καύσης και οι θερμοκρασίες λειτουργίας ποικίλουν, με αποτέλεσμα διαφορετικές αναλογίες NO και NO_2 . Στους κινητήρες Otto, το ποσοστό NO_2 είναι γενικά πάρα πολύ μικρό λόγω υψηλών θερμοκρασιών καύσης [2].

- **Υδρογονάνθρακες**

Οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες (HC) στους κινητήρες Otto σχηματίζονται όταν η καύση δεν ολοκληρώνεται πλήρως, κυρίως σε χαμηλές ταχύτητες, κατά την εκκίνηση ή σε χαμηλές θερμοκρασίες. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον σχηματισμό των HC περιλαμβάνουν την αδυναμία της φλόγας να φτάσει σε στενώσεις και περιοχές κοντά στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης, τη χαμηλή θερμοκρασία των τοιχωμάτων που απορροφά θερμότητα, και την κακή ανάμιξη του καυσίμου με τον αέρα. Επίσης, η παρουσία λιπαντικών και επικαθήσεων στα τοιχώματα μπορεί να αυξήσει τις εκπομπές HC. Στους κινητήρες Otto, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις HC παρατηρούνται κατά την εκκίνηση και τις μεταβατικές φάσεις λειτουργίας, καθώς η θερμοκρασία καύσης δεν είναι αρκετά υψηλή για την πλήρη οξείδωση των υδρογονανθράκων. Επιπλέον, οι συνθήκες καύσης που δεν είναι ιδανικές, όπως η πλούσια αναλογία καυσίμου-αέρα και η ανεπαρκής ανάμιξη, συμβάλλουν στον σχηματισμό των HC [2].

- **Σωματίδια**

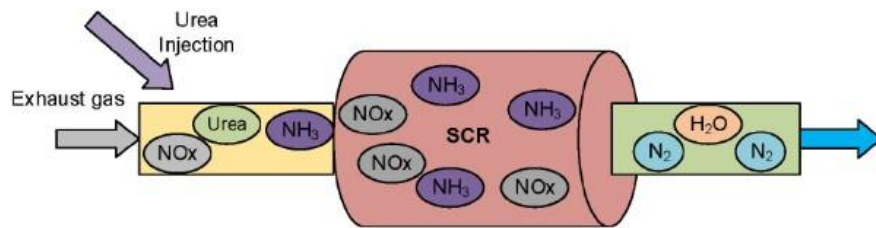
Οι σωματιδιακές εκπομπές (*Particulate Matter*) των κινητήρων Otto περιλαμβάνουν τα σωματίδια αιθάλης (soot). Οι εκπομπές αυτές προκύπτουν κυρίως από τη χρήση πλούσιων μειγμάτων καυσίμου-αέρα και ατελούς καύσης. Η αιθάλη σχηματίζεται από την ατελή καύση υδρογονανθράκων και είναι πιο έντονη σε υπερβολικά πλούσια μείγματα καυσίμου-αέρα[2].

1.1.2. Συσκευές Αντιρρύπανσης

Η αντιμετώπιση των προαναφερθέντων ρύπων, μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι η ρύθμιση των συνθηκών εντός του κυλίνδρου (*Internal Measures*). Αυτές αφορούν τις θερμοκρασίες, τη μέθοδο έγχυσης, το χρονισμό των βαλβίδων και γενικότερα, χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την καύση. Μερικά μέτρα από αυτά είναι:

- Σύστημα ανακυκλοφορίας καυσαερίων (*Exhaust Gas Recirculation - EGR*).
- Σύστημα Start-Stop.
- Μεταβλητός Χρονισμός Βαλβίδων (*Variable Valve Timing*).
- Άμεσος Ψεκάσμος Καυσίμου (*Direct Fuel Injection*).
- Υπερπλήρωση (*Turbocharging*).
- Απενεργοποίηση Κυλίνδρων (*Cylinder Deactivation - CDA*).

Ένας άλλος τρόπος είναι η χρήση αντιρρυπαντικών συσκευών (*After-Treatment Devices*), που αναλαμβάνουν την μετεπεξεργασία των καυσίμων εκτός κυλίνδρου, όπως οι καταλυτικοί μετατροπείς.



Σχήμα 1.1: Σχηματική Απεικόνιση Καταλύτη SCR[3].

Από τους παραπάνω τρόπους, θα αναλυθούν ο άμεσος ψεκάσμος, η υπερπλήρωση και η απενεργοποίηση κυλίνδρων, καθώς το όχημα προσομοίωσης της παρούσας εργασίας, περιλαμβάνει αυτά τα χαρακτηριστικά στη μηχανή του. Ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί στην Απενεργοποίηση Κυλίνδρων, η οποία θα αναλυθεί σε ξεχωριστό κεφάλαιο, εφόσον αποτελεί το κύριο αντικείμενο μελέτης της εργασίας.

1.2. Άμεση Έγχυση

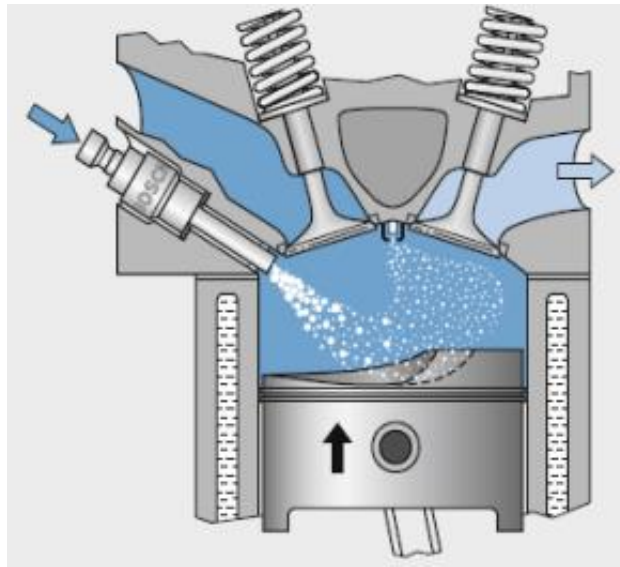
Η έγχυση του καυσίμου αποτελεί έναν καθοριστικό παράγοντα της λειτουργίας ενός κινητήρα Otto . Μέσω αυτής ελέγχεται η ρύθμιση της ισχύος του. Είναι απαραίτητη η προετοιμασία του καυσίμου με την κατάλληλη διαδικασία έγχυσης, ώστε να γίνει και σωστή σταγονοποίηση αλλά και καλή ανάμειξη με τον αέρα. Ανάλογα με την εφαρμογή και την τεχνολογία του κινητήρα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι έγχυσης καυσίμου. Οι πιο κοινές μέθοδοι είναι οι εξής:

- Εξαεριωτής
- Έμμεση Έγχυση (*Port Fuel Injection - PFI*)
- Άμεση Έγχυση Καυσίμου (*Direct Fuel Injection - DFI*)

Πλέον, σε όλες τις παραπάνω μεθόδους, ο έλεγχος της έγχυσης γίνεται με τη χρήση ηλεκτρονικών συστημάτων, τα οποία ελέγχουν την ποσότητα και το χρονισμό της έγχυσης για βέλτιστη απόδοση και εκπομπές. Κάθε μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματά της και η επιλογή της μεθόδου μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση και τις εκπομπές του κινητήρα.

Η Άμεση Έγχυση καυσίμου διαφέρει σημαντικά από τα παραδοσιακά συστήματα έγχυσης, ιδιαίτερα στην ανάμειξη του καυσίμου με τον αέρα. Στα συστήματα πολλαπλού και απλού σημείου, το καύσιμο ψεκάζεται στον αέρα εισαγωγής πριν αυτός εισέλθει στους κυλίνδρους. Αυτό σημαίνει ότι το καύσιμο και ο αέρας αναμειγνύονται στη πολλαπλή εισαγωγής, δημιουργώντας ένα μείγμα πριν φτάσουν στον κύλινδρο. Η ανάμειξη εκεί είναι λιγότερο ακριβής, και η διαχείριση του μείγματος εξαρτάται από τη σχεδίαση της εισαγωγής και τη ροή του αέρα.

Αντίθετα, στην άμεση έγχυση, το καύσιμο εγχέεται απευθείας μέσα στον κύλινδρο μέσω εγχυτήρων υψηλής πίεσης. Αυτό επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της ποσότητας και του χρονισμού του ψεκασμού καυσίμου, προσαρμόζοντάς τον στις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα, όπως το φορτίο και την ταχύτητα περιστροφής[4]. Η δυνατότητα για ακριβή χρονισμό του ψεκασμού καυσίμου έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία στρωματοποιημένου μείγματος, όπου το μείγμα καυσίμου-αέρα είναι πλουσιότερο κοντά στο μπουζί και φτωχότερο μακριά από αυτό. Επίσης, η άμεση έγχυση προσφέρει καλύτερη διαχείριση της θερμοκρασίας του θαλάμου καύσης, καθώς το καύσιμο εξατμίζεται απευθείας μέσα στον κύλινδρο, απορροφώντας θερμότητα και μειώνοντας τη θερμοκρασία του μείγματος.



Σχήμα 1.2: Διάταξη Άμεσης Έγχυσης.

Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει τη λειτουργία σε πολύ υψηλές πιέσεις. Η υψηλή πίεση του καυσίμου, που μπορεί να φτάσει έως και 200 bar ή και περισσότερο σε ορισμένα συστήματα, είναι απαραίτητη για να εξασφαλιστεί η ατμοποίηση του καυσίμου και η αποτελεσματική ανάμειξή του με τον αέρα μέσα στον κύλινδρο. Για να αντέχουν αυτές τις συνθήκες, τα εξαρτήματα του συστήματος άμεσης έγχυσης πρέπει να κατασκευάζονται από ανθεκτικά υλικά που μπορούν να αντέξουν τις υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες. Οι εγχυτήρες, οι αντλίες καυσίμου υψηλής πίεσης και οι ρυθμιστές πίεσης πρέπει να είναι σχεδιασμένοι με υψηλή ακρίβεια και να χρησιμοποιούν υλικά που προσφέρουν εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση και την καταπόνηση.

Ως αποτέλεσμα, το κόστος των συστημάτων άμεσης έγχυσης είναι σημαντικά υψηλότερο σε σύγκριση με άλλα συστήματα έγχυσης. Η πολυπλοκότητα της τεχνολογίας, η ανάγκη για ανθεκτικά και ακριβή εξαρτήματα και η απαίτηση για προηγμένες ηλεκτρονικές μονάδες ελέγχου συνεισφέρουν στο αυξημένο κόστος. Επιπλέον, η εγκατάσταση και η συντήρηση αυτών των συστημάτων απαιτούν εξειδικευμένη τεχνογνωσία και εξοπλισμό, προσθέτοντας περαιτέρω στο συνολικό κόστος ιδιοκτησίας και λειτουργίας [2].

1.3. Υπερπλήρωση

Η υπερπλήρωση αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί για τη βελτίωση της απόδοσης των κινητήρων εσωτερικής καύσης. Με τη χρήση συστημάτων υπερπλήρωσης, οι κινητήρες μπορούν να «χωρέσουν» περισσότερη ποσότητα αέρα στους κυλίνδρους τους, γεγονός που επιτρέπει την αποδοτική καύση μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου. Αυτή η διαδικασία αυξάνει την ισχύ και το βαθμό απόδοσης του κινητήρα. Η υπερπλήρωση είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη κινητήρων υψηλής απόδοσης και αποτελεί το κλειδί για την επίτευξη υψηλότερων επιδόσεων χωρίς την ανάγκη αύξησης του μεγέθους των κινητήρων.

Η υπερπλήρωση των κινητήρων εσωτερικής καύσης ξεκινά σχεδόν ταυτόχρονα με την εφεύρεση των ίδιων των κινητήρων. Το 1885, ο Gottlieb Daimler ανέπτυξε την ιδέα της υπερπλήρωσης και κατοχύρωσε σχετική ευρεσιτεχνία. Στη συνέχεια, το 1905, ο Alfred Büchi κατέθεσε πατέντα για έναν κινητήρα που συνδύαζε εξωτερικό σύστημα πλήρωσης και στρόβιλο-υπερπληρωτή. Το 1915, κατασκευάστηκε το πρώτο λειτουργικό σύστημα στρόβιλο-υπερπλήρωσης. Η πρώτη πραγματική εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής έγινε σε αγωνιστικά αυτοκίνητα, τα οποία γνώρισαν μεγάλη επιτυχία τη δεκαετία του 1920. Η επιτυχία αυτή οδήγησε στη γρήγορη εξάπλωση της τεχνολογίας της υπερπλήρωσης. Έκτοτε, η τεχνολογία συνεχώς εξελίσσεται και εφαρμόζεται σε διάφορους τύπους κινητήρων, με συνεχή βελτίωση των συμπεριπτώσεων, των συστημάτων ψύξης και των συστημάτων λίπανσης, αυξάνοντας την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία της [5].

1.3.1. Γενική Επισκόπηση Συμπίεσης

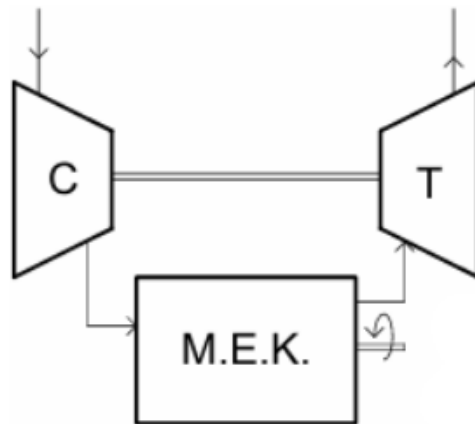
Ο ατμοσφαιρικός αέρας εισέρχεται στον κινητήρα μέσω της εισαγωγής, που συνήθως περιλαμβάνει ένα φίλτρο αέρα για την απομάκρυνση πιθανών ακαθαρσιών. Ο καθαρός αέρας περνά στη συνέχεια σε έναν αγωγό αναρρόφησης, όπου οδηγείται προς τον συμπιεστή (*compressor*). Καθώς ο αέρας περνά μέσα από τον συμπιεστή, αυξάνεται η πίεση, και συνεπώς η πυκνότητά του, αυξάνοντας την γόμωση του κυλίνδρου. Επιτυγχάνεται, έτσι, η καύση μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου ανά κύκλο λειτουργίας. Σχεδόν πάντα, ο συμπιεσμένος αέρας περνά μέσα από έναν ενδιάμεσο ψύκτη (*intercooler*), ο οποίος μειώνει τη θερμοκρασία του αέρα πριν αυτός εισέλθει στους κυλίνδρους.

Αντί της αύξησης του μεγέθους του κινητήρα, η υπερπλήρωση προτείνεται ως μέσο για την επίτευξη υψηλότερης απόδοσης, καθιστώντας την

τεχνολογία ιδανική για τη βελτίωση των επιδόσεων των κινητήρων εσωτερικής καύσης σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών.

1.3.2. Στρόβιλο-Υπερπλήρωση

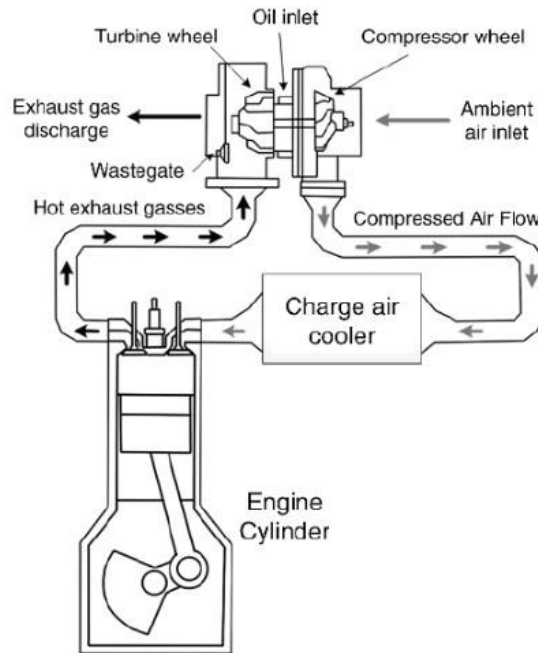
Η στρόβιλο-υπερπλήρωση (*turbocharging*) αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους υπερπλήρωσης κινητήρων. Σε αυτή τη διαμόρφωση, η ενέργεια που παράγεται από τα καυσαέρια του κινητήρα χρησιμοποιείται για να κινήσει έναν στρόβιλο, ο οποίος με τη σειρά του κινεί έναν συμπιεστή αέρα, που συνδέονται με κοινή άτρακτο. Ωστόσο, το *turbocharging* παρουσιάζει κάποιες προκλήσεις, όπως η καθυστέρηση στην απόκριση (*turbo lag*), ιδιαίτερα σε χαμηλές στροφές του κινητήρα, καθώς και η ανάγκη για πιο σύνθετα συστήματα ψύξης και λίπανσης για την αντιμετώπιση των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται. Παρόλα αυτά, η στρόβιλο-υπερπλήρωση παραμένει μια από τις πιο αποδοτικές μεθόδους υπερπλήρωσης [5].



Σχήμα 1.3: Διάταξη Στρόβιλο-Υπερπλήρωσης.

1.3.3. Ψύξη του Αέρα Υπερπλήρωσης

Η διαδικασία ψύξης του αέρα υπερπλήρωσης περιλαμβάνει τη χρήση ενός ψυγείου που τοποθετείται μεταξύ του συμπιεστή και της εισαγωγής του κινητήρα. Όταν ο αέρας συμπιέζεται, η θερμοκρασία του αυξάνεται. Το ψυγείο λαμβάνει αυτόν τον θερμό αέρα και τον ψύχει χρησιμοποιώντας ένα ψυκτικό μέσο, όπως αέρα ή νερό.



Σχήμα 1.4: Διάταξη Στρόβιλο-Υπερπλήρωσης με Ενδιάμεση Ψύξη [6].

Η ψύξη μειώνει τη θερμοκρασία του αέρα πριν αυτός εισέλθει στους κυλίνδρους του κινητήρα, αυξάνοντας περαιτέρω την πυκνότητά του. Ο πιο πυκνός αέρας περιέχει περισσότερο οξυγόνο, επιτρέποντας την καύση ακόμη μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου. Επιπλέον, η μείωση της θερμοκρασίας του αέρα συμβάλλει στην αποφυγή φαινομένων όπως η κρουστική καύση, προστατεύει τον κινητήρα από υπερθέρμανση και βοηθά στην επίτευξη υψηλότερης απόδοσης.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, η ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης συνοδεύεται και από ορισμένα μειονεκτήματα. Αρχικά, η εγκατάσταση ενός ψυγείου αυξάνει την πολυπλοκότητα και το κόστος του συστήματος, καθώς απαιτεί πρόσθετα εξαρτήματα. Επίσης, η χρήση ψυκτικού αέρα μπορεί να οδηγήσει σε απώλειες πίεσης, λόγω των στενών σωλήνων που απαρτίζουν το

ψυγείο, απαιτώντας μεγαλύτερη ισχύ για τη διατήρηση της επιθυμητής πίεσης εισαγωγής. Εάν χρησιμοποιείται ψυκτικό μέσο όπως το νερό, η αποδοτικότητα της ψύξης εξαρτάται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, κάτι που μπορεί να είναι προβληματικό σε ζεστά κλίματα, περιορίζοντας την ικανότητα ψύξης του συστήματος. Η προσθήκη επιπλέον εξαρτημάτων για την ψύξη αυξάνει, επίσης, το βάρος και τον όγκο του κινητήρα, κάτι που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση και την κατανάλωση καυσίμου[5].

2. Απενεργοποίηση Κυλίνδρων

2.1. Εισαγωγή

Η Απενεργοποίηση Κυλίνδρων (*Cylinder Deactivation - CDA*) είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει στους κινητήρες εσωτερικής καύσης να απενεργοποιούν προσωρινά ορισμένους κυλίνδρους όταν δεν απαιτείται πλήρης ισχύς. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιεί υδραυλικά ή ηλεκτρονικά ελεγχόμενους επενεργητές βαλβίδων για να αποσυνδέουν τις βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής στους επιλεγμένους κυλίνδρους, και διακόπτει την έγχυση καυσίμου στους κυλίνδρους αυτούς. Ο κύριος λόγος που ξεκίνησε να χρησιμοποιείται είναι για να βελτιώσει την κατανάλωση καυσίμου και να μειώσει τις εκπομπές CO_2 , χωρίς να επηρεάζει τις επιδόσεις του κινητήρα όταν απαιτείται πλήρης ισχύς.

2.2. Ιστορική Αναδρομή

Η πρώτη φορά που η απενεργοποίηση των κυλίνδρων εμφανίστηκε ήταν το 1905, με τον Sturtevant 38/45hp [7], όπου τρεις από τους κυλίνδρους του μπορούσαν να σταματήσουν. Αυτό δεν δοκιμάστηκε ξανά μέχρι το 1917 στην Enger Twin-Unit Twelve. Αυτή η μηχανή διέθετε ένα σύστημα διακοπής λειτουργίας των κυλίνδρων από τον οδηγό, το οποίο ενεργοποιούνταν από έναν μοχλό στο τιμόνι. Ο μοχλός όχι μόνο έκλεινε τμήματα της πολλαπλής εισαγωγής, αλλά έβγαζε και τις βαλβίδες εξαγωγής από τις έδρες τους στους κυλίνδρους που επηρεάζονταν.

Κατόπιν, στις αρχές της δεκαετίας του 1980, ξεκίνησε η έρευνα της Cadillac για την τεχνολογία απενεργοποίησης κυλίνδρων, γνωστή ως V8-6-4. Το εγχείρημα αυτό ήταν αποτέλεσμα των αυστηρότερων κανονισμών για την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές που επιβλήθηκαν από την κυβέρνηση των ΗΠΑ. Η τεχνολογία αναπτύχθηκε σε συνεργασία με την εταιρεία Eaton, η οποία παρείχε την τεχνολογία των βαλβίδων που επέτρεπε την απενεργοποίηση των κυλίνδρων. Η ιδέα πίσω από το V8-6-4 ήταν να βελτιωθεί η κατανάλωση καυσίμου επιτρέποντας στον κινητήρα να λειτουργεί με 8, 6 ή 4 κυλίνδρους ανάλογα με τις ανάγκες ισχύος. Ο κινητήρας αυτός βασιζόταν στον

υπάρχοντα κινητήρα 368 κυβικών ιντσών (6.0 λίτρων) της Cadillac και είχε σχεδιαστεί να χρησιμοποιεί ένα ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου (*Computer Command Module - CCM*) που παρακολουθούσε και διαχειριζόταν την απενεργοποίηση των κυλίνδρων. Αυτή η τεχνολογία εφαρμόστηκε στα μοντέλα DeVille, Brougham, Eldorado και, προαιρετικά, στο Seville. Παρόλο που η ιδέα ήταν καινοτόμος και υποσχόμενη, το V8-6-4 αντιμετώπισε σοβαρά προβλήματα ασφάλειας και επιδόσεων. Το CCM δεν μπορούσε να επεξεργαστεί τα δεδομένα αρκετά γρήγορα, με αποτέλεσμα καθυστερήσεις στην απενεργοποίηση και επανενεργοποίηση των κυλίνδρων, κάτι που προκάλεσε προβλήματα στην ομαλή λειτουργία του κινητήρα. Οι πελάτες παραπονέθηκαν για τραχύτητα στη λειτουργία και η συνολική εμπειρία οδήγησης δεν ήταν καλή. Παρά τις προσπάθειες της Cadillac να διορθώσει τα προβλήματα με πολλαπλές ενημερώσεις λογισμικού, το σύστημα εγκαταλείφθηκε γρήγορα.

Την ίδια χρονιά, η Alfa Romeo δοκίμασε την απενεργοποίηση κυλίνδρων στο Alfetta CEM, ενώ το 1982 η Mitsubishi παρουσίασε τον κινητήρα Orion-MD [8] 1.4 λίτρων, επιτυγχάνοντας βελτίωση 11% στην κατανάλωση καυσίμου στην πόλη, λειτουργώντας σε κατάσταση CDA το 54% του χρόνου.

Η πρώτη ηλεκτρονικά ελεγχόμενη απενεργοποίηση κυλίνδρων εμφανίστηκε το 1987 από τη Ford, η οποία χρησιμοποίησε τον υδραυλικό βραχίονα από την Eaton [9]. Κατά τη δεκαετία του 1990, η Mercedes-Benz προσέφερε κινητήρες V8 και V12 με σύστημα CDA, το οποίο παρείχε βελτίωση στην κατανάλωση καυσίμου κατά 7% στην πόλη και 20% σε σταθερή ταχύτητα [10]. Το 2002, η Honda παρουσίασε την τεχνολογία CDA στο υβριδικό μοντέλο Accord Hybrid V6. Παρόλο που τα αρχικά συστήματα δεν ήταν αξιόπιστα και είχαν υψηλό κόστος εφαρμογής, η τεχνολογία εξελίχθηκε περαιτέρω [11]. Το 2004, η DaimlerChrysler εισήγαγε το σύστημα CDA στον κινητήρα HEMI V8, που χρησιμοποιήθηκε σε μοντέλα όπως το Chrysler 300C, Dodge Magnum, Jeep Grand Cherokee, Dodge Ram και Jeep Commander. Το σύστημα αυτό επέτυχε βελτίωση κατανάλωσης καυσίμου από 10-20% [12]. Η General Motors ακολούθησε το 2007 με κινητήρες V8 και V6, επιτυγχάνοντας βελτίωση 5-25% στην κατανάλωση καυσίμου. Έπειτα, το 2008, η Honda παρουσίασε τον κινητήρα 3.5 l i-VTEC, ο οποίος μπορούσε να απενεργοποιήσει δύο ή τρεις από τους έξι κυλίνδρους, προσφέροντας βελτίωση 10% στην κατανάλωση καυσίμου σε σχέση με τους συμβατικούς κινητήρες [13].

Πλέον, τεχνολογία απενεργοποίησης κυλίνδρων έχει αναπτυχθεί και υιοθετηθεί από πολλές αυτοκινητοβιομηχανίες με διαφορετικές ονομασίες και τεχνολογίες. Μερικές από αυτές παρατίθενται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Παραδείγματα Τεχνολογίας Απενεργοποίησης Κυλίνδρων.

Παράδειγμα Τεχνολογιών CDA		
Εταιρεία	Τεχνολογία	Σχόλια
Mercedes-Benz	Active Cylinder Control (ACC)	Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται σε διάφορα μοντέλα της μάρκας, κυρίως σε κινητήρες V8 και V12, όπως τα Mercedes-Benz S-Class, E-Class, CLS-Class και GLE-Class.
Honda	Variable Cylinder Management (VCM)	Το VCM χρησιμοποιείται σε μοντέλα όπως το Honda Accord, Odyssey, Pilot και Ridgeline.
Chrysler	Multi-Displacement System (MDS)	-
General Motors	Active Fuel Management (AFM)	Η General Motors παρουσίασε το σύστημα AFM σε κινητήρες V8 και V6, σε μοντέλα όπως τα Chevrolet Silverado 1500 και GMC Sierra 1500 [14]. Το 2018, η GM παρουσίασε και το Dynamic Fuel Management (DFM).
Volkswagen	Active Cylinder Technology (ACT)	Το σύστημα ACT εισήχθη το 2012 και χρησιμοποιεί έναν εκκεντροφόρο για την εναλλαγή μεταξύ δύο διαφορετικών προφίλ. Χρησιμοποιείται σε κινητήρες TSI, όπως στα μοντέλα Golf, Polo, Passat και Tiguan.
Ford	-	Το 2016, η Ford εισήγαγε ένα μικρό τρικύλινδρο κινητήρα EcoBoost με δυνατότητα απενεργοποίησης ενός κυλίνδρου. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται σε μοντέλα όπως το Ford F-150 με τον 3.5L V6 EcoBoost κινητήρα και το Ford Expedition
Mazda	-	Από το 2018, όλα τα μοντέλα Mazda6 και ορισμένα μοντέλα Mazda CX-5 διαθέτουν απενεργοποίηση κυλίνδρων, ενσωματώνοντας την τεχνολογία SkyActiv.

2.3. Μέθοδοι Απενεργοποίησης

Για την επίτευξη της απενεργοποίησης έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες μέθοδοι. Μερικές από αυτές αναλύονται παρακάτω.

- **Εναλλασσόμενος Ωστήριος Μοχλός με Τροχίσκο**

Η απενεργοποίηση κυλίνδρων με τη χρήση Εναλλασσόμενου Ωστηρίου Μοχλού με Τροχίσκο (*Switchable Roller Finger Follower*) είναι η συχνότερη μέθοδος [15]–[17]. Το σύστημα αυτό αποτελείται από δύο μοχλούς που συνδέονται με έναν κυλινδρικό πείρο, επιτρέποντάς τους να κινούνται μαζί ή ξεχωριστά ανάλογα με τη θέση του πείρου. Όταν ο πείρος είναι στη θέση του, οι μοχλοί δεν κινούνται ανεξάρτητα και το σύστημα λειτουργεί κανονικά, σηκώνοντας τη βαλβίδα. Η αλλαγή μεταξύ των λειτουργιών γίνεται μέσω της μετακίνησης του πείρου σύνδεσης έναντι ενός ελατηρίου, το οποίο γίνεται με την εφαρμογή πίεσης λαδιού. Όταν η ηλεκτροβαλβίδα είναι κλειστή, η πίεση του λαδιού είναι χαμηλή, διατηρώντας τον πείρο σύνδεσης στη θέση κλειδώματος. Όταν η ηλεκτροβαλβίδα ανοίγει, η πίεση του λαδιού αυξάνεται και ωθεί τον πείρο σύνδεσης στην ξεκλειδωτή θέση.

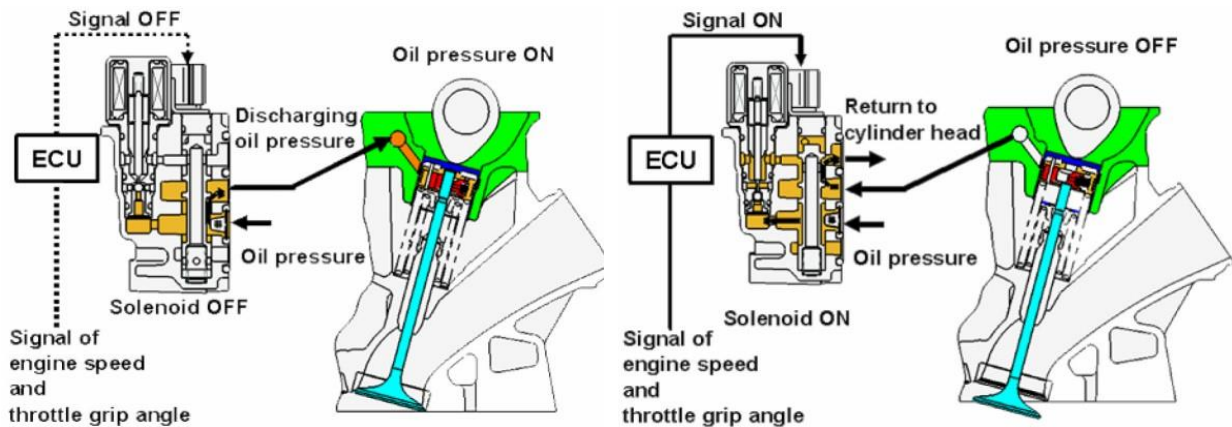
Το σύστημα εναλλασσόμενου ωστηρίου μοχλού με τροχίσκο έχει το πλεονέκτημα των μειωμένων απωλειών λόγω τριβής σε σύγκριση με άλλα συστήματα απενεργοποίησης βαλβίδων, ενώ διατηρεί την αποτελεσματική λειτουργία και στις δύο λειτουργίες χάρη στην επαφή του κυλίνδρου με τον έκκεντρο άξονα και τον μοχλό.



Σχήμα 2.1: Εναλλασσόμενος Ωστήριος Μοχλός με Τροχίσκο στις δύο καταστάσεις λειτουργίας[15].

- **Εναλλασσόμενο Ωστήριο Βαλβίδας**

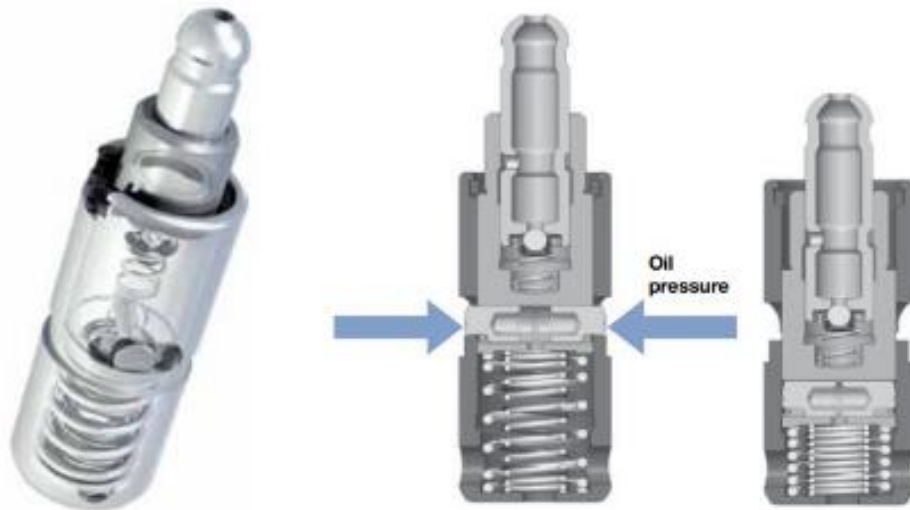
Η χρήση Εναλλασσόμενου Ωστηρίου Βαλβίδας (*Switchable Valve Tappet*) [18] περιλαμβάνει έναν πείρο ολίσθησης και έναν μηχανισμό επιστροφής ελατηρίου. Όταν ενεργοποιείται το σύστημα απενεργοποίησης, η ECU στέλνει ηλεκτρικό σήμα στον ηλεκτρομαγνητικό επενεργητή που βρίσκεται πάνω στον πείρο ολίσθησης. Ο επενεργητής αποσύρει τον πείρο, αποσυνδέοντας τη βαλβίδα από τον μηχανισμό ανύψωσης, με αποτέλεσμα η βαλβίδα να παραμένει σε κλειστή θέση και να μην πραγματοποιείται καύση στον κύλινδρο. Ο μηχανισμός επιστροφής ελατηρίου επαναφέρει τον πείρο στην αρχική του θέση όταν διακοπεί η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, επανασυνδέοντας τη βαλβίδα με τον μηχανισμό ανύψωσης για να επαναλειτουργήσει ο κύλινδρος. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την εναλλαγή μεταξύ ενεργού και μη ενεργού κυλίνδρου.



Σχήμα 2.2: Σύστημα Ελέγχου Βαλβίδας με εναλλασσόμενο ωστήριο [18].

- **Εναλλασσόμενο Οδηγό Στοιχείο**

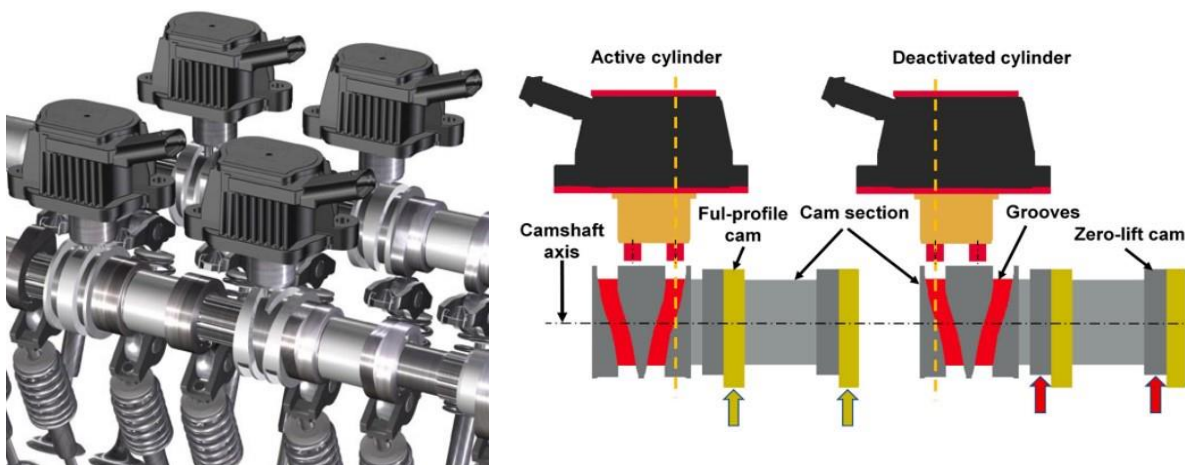
Η απενεργοποίηση με Εναλλασσόμενο Οδηγό Στοιχείο (*Switchable Pivot Element*) περιλαμβάνει έναν μηχανισμό με δύο κύρια μέρη: το εσωτερικό και το εξωτερικό τμήμα, τα οποία κλειδώνονται ή αποδεσμεύονται μέσω ενός υδραυλικού συστήματος και ενός ελατηρίου. Όταν το σύστημα CDA ενεργοποιείται, η ECU στέλνει ένα ηλεκτρικό σήμα που ελέγχει έναν υδραυλικό επενεργητή. Ο επενεργητής αυτός δημιουργεί πίεση, η οποία αποσυνδέει το εσωτερικό τμήμα από το εξωτερικό, αποτρέποντας την ανύψωση της βαλβίδας, αφού πλέον όλη η κίνηση μεταφέρεται στο κατακόρυφο ελατήριο. Ο μηχανισμός αυτός βασίζεται σε ένα ελατήριο που επαναφέρει το εσωτερικό τμήμα στην αρχική του θέση όταν η υδραυλική πίεση διακοπεί, επανασυνδέοντας έτσι τη βαλβίδα με το οδηγό στοιχείο και επιτρέποντας την κανονική της λειτουργία.



Σχήμα 2.3: Σύστημα με Εναλλασσόμενο Οδηγό Στοιχείο [19].

- **Κινούμενα Έκκεντρα**

Το σύστημα με Κινούμενα Έκκεντρα (*Movable Cam Sections*) αναπτύχθηκε από τη Volkswagen [20] για την απενεργοποίηση κυλίνδρων σε κινητήρες. Αυτό το σύστημα περιλαμβάνει κινητά έκκεντρα που τοποθετούνται πάνω σε οδοντωτούς άξονες και μπορούν να μετακινηθούν αξονικά κατά 6.25mm. Όταν το σύστημα θέλει να απενεργοποιήσει έναν κύλινδρο, οι πείροι από τους επενεργητές εισάγονται στις αυλακώσεις των έκκεντρων, μετακινώντας τα στη θέση μηδενικής ανύψωσης, με αποτέλεσμα οι βαλβίδες να μην ανοίγουν και ο κύλινδρος να απενεργοποιείται. Η αλλαγή θέσης των έκκεντρων γίνεται μέσω πίεσης λαδιού που ελέγχεται από ηλεκτροβαλβίδα. Όταν η πίεση του λαδιού είναι χαμηλή, τα έκκεντρα παραμένουν στη θέση πλήρους ανύψωσης. Όταν η πίεση αυξάνεται, μετακινούνται στη θέση μηδενικής ανύψωσης, απενεργοποιώντας τον κύλινδρο.



Σχήμα 2.4: Σύστημα Ελέγχου Βαλβίδας με Κινούμενα Έκκεντρα [20].

- **Uni Air**

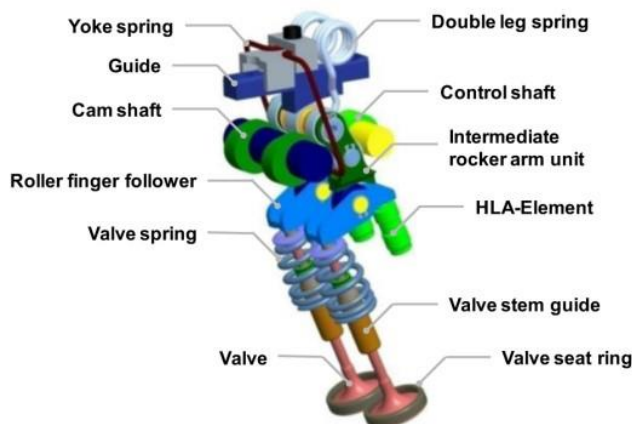
Η τεχνολογία UniAir ή MultiAir λειτουργεί με έναν εκκεντροφόρο άξονα που ενεργοποιεί ένα έμβολο συνδεδεμένο με τη βαλβίδα εισαγωγής μέσω ενός υδραυλικού θαλάμου γεμισμένου με λάδι. Η πίεση στον υδραυλικό θάλαμο ελέγχεται από μια ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα. Όταν η βαλβίδα είναι κλειστή, το λάδι λειτουργεί ως στερεό σώμα και μεταφέρει την κίνηση του εκκεντροφόρου στη βαλβίδα εισαγωγής. Όταν η βαλβίδα είναι ανοιχτή, η πίεση μειώνεται και η βαλβίδα εισαγωγής αποσυνδέεται από τον εκκεντροφόρο, κλείνοντας υπό την επίδραση των δυνάμεων αδράνειας και των ελατηρίων επαναφοράς [21], [22].



Σχήμα 2.5: Uni Air [21].

- **Uni Valve**

Η τεχνολογία UniValve[23] είναι ένα σύστημα πλήρως μεταβλητού χρονισμού βαλβίδων (*fully variable valve timing*) που χρησιμοποιεί έναν εκκεντροφόρο άξονα και έναν έκκεντρο άξονα ελέγχου (*control shaft*) για τη ρύθμιση της ανύψωσης των βαλβίδων. Ο άξονας ελέγχου περιστρέφεται, μεταβάλλοντας το σημείο επαφής του μοχλού με την βαλβίδα και επιτρέποντας τη ρύθμιση της ανύψωσης από πλήρη σε μηδενική μέσα σε μισή περιστροφή. Δύο επενεργητές, τοποθετημένοι στο πίσω μέρος της κυλινδροκεφαλής, ελέγχουν την ανύψωση των βαλβίδων μέσω ξεχωριστών κοχλιωτών γραναζιών, επιτρέποντας την ελεύθερη επιλογή των σημείων ανοίγματος και κλεισίματος των βαλβίδων εισαγωγής σε ευρύ φάσμα.



Σχήμα 2.6: UniValve[23].

2.4. Οφέλη της Τεχνολογίας στη Μείωση Κατανάλωσης Καυσίμου και Διοξειδίου του Άνθρακα

Μέσω της απενεργοποίησης κυλίνδρων επιτυγχάνεται η εξοικονόμηση καυσίμου. Όταν ο κινητήρας δεν απαιτεί πλήρη ισχύ, το σύστημα απενεργοποίησης κυλίνδρων διακόπτει τη λειτουργία ενός ή περισσότερων κυλίνδρων, σταματώντας την παροχή καυσίμου σε αυτούς, λειτουργώντας μόνο με τους κυλίνδρους που είναι απαραίτητοι για τη διατήρηση της τρέχουσας ταχύτητας και ισχύος. Οι ενεργοί κύλινδροι δουλεύουν πιο αποδοτικά σε υψηλότερο φορτίο, κάτι που μπορεί να αυξήσει το βαθμό απόδοσης, δεδομένου ότι οι κινητήρες είναι πιο αποδοτικοί όταν λειτουργούν σε φορτία που βρίσκονται κοντά στο βέλτιστο σημείο απόδοσης τους [24]-[27].

Επίσης, όταν η απενεργοποίηση των κυλίνδρων συνδυάζεται με απενεργοποίηση των βαλβίδων των σχετικών κυλίνδρων, έχουμε επιπλέον μείωση των απωλειών άντλησης (εναλλαγής αερίων) κάτι που επίσης βελτιώνει την κατανάλωση. Όταν οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής παραμένουν κλειστές, παγιδεύεται αέρας μέσα στους κυλίνδρους, λειτουργώντας σαν πνευματικό ελατήριο. Αυτός ο αέρας συμπιέζεται και αποσυμπιέζεται περιοδικά χωρίς να απαιτείται έργο άντλησης, με αποτέλεσμα τη μείωση των παρασιτικών απωλειών. Στην απενεργοποίηση κυλίνδρων, οι απώλειες άντλησης μπορούν να μειωθούν έως και 10-15%, επιτρέποντας στον κινητήρα να λειτουργεί πιο αποδοτικά, ειδικά σε συνθήκες χαμηλού φορτίου [28].

Λόγω της ένα προς ένα σχέσης κατανάλωσης με διοξείδιο του άνθρακα, η μείωση της κατανάλωσης οδηγεί και σε μειωμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

2.5. Περιορισμοί

- **Κόστος και Πολυπλοκότητα**

Η απενεργοποίηση κυλίνδρων προσθέτει σημαντικό κόστος και πολυπλοκότητα στους κινητήρες λόγω της ανάγκης για επιπλέον εξαρτήματα, όπως ηλεκτρονικές βαλβίδες και αισθητήρες, καθώς και προηγμένα συστήματα ελέγχου που διαχειρίζονται τη λειτουργία των κυλίνδρων σε πραγματικό χρόνο. Αυτά τα συστήματα απαιτούν εκτενή έρευνα και ανάπτυξη, αυξάνοντας το αρχικό κόστος παραγωγής. Επίσης, οι επιπλέον μηχανισμοί και ο συντονισμός τους με τα υπόλοιπα συστήματα του κινητήρα, όπως το σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου και ανάφλεξης, προσθέτουν στην πολυπλοκότητα της συντήρησης και των επισκευών, απαιτώντας και εξειδικευμένες γνώσεις. Το λογισμικό της ECU πρέπει να είναι αρκετά εξελιγμένο για να ανιχνεύει και να προσαρμόζεται σε διαφορετικές συνθήκες οδήγησης, προσθέτοντας ακόμα ένα επίπεδο στη δυσκολία ρύθμισης του κινητήρα. Πρέπει να είναι σε θέση να διαχειρίζεται την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των κυλίνδρων σε πραγματικό χρόνο, με ακρίβεια και ταχύτητα.

Επιπλέον, η τεχνολογία απενεργοποίησης κυλίνδρων απαιτεί τη χρήση πολλαπλών αισθητήρων υψηλής ακρίβειας που παρακολουθούν τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα, όπως η ταχύτητα του οχήματος, το φορτίο του κινητήρα, η θερμοκρασία και η πίεση, καθώς και την αναγνώριση των κατάλληλων στιγμών για την αλλαγή της κατάστασης των κυλίνδρων. Αυτοί οι αισθητήρες πρέπει να είναι ανθεκτικοί και αξιόπιστοι, καθώς οποιαδήποτε δυσλειτουργία μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση και την ασφάλεια του οχήματος.

- **Φθορά και Ασφάλεια**

Λόγω της συνεχούς ενεργοποίησης και απενεργοποίησης των κυλίνδρων, αυξάνεται η πιθανότητα να αυξηθεί η φθορά του κινητήρα. Η διαδικασία της απενεργοποίησης ασκεί επιπλέον πίεση σε συγκεκριμένα εξαρτήματα, όπως οι βαλβίδες, τα έκκεντρα και οι μηχανισμοί ελέγχου των βαλβίδων, αυξάνοντας τη φθορά τους. Οι συνεχείς αλλαγές στη λειτουργία των κυλίνδρων μπορεί να οδηγήσουν σε αυξημένη θερμική καταπόνηση, καθώς οι κύλινδροι που απενεργοποιούνται και ενεργοποιούνται ξανά υποβάλλονται σε συχνές αλλαγές θερμοκρασίας. Αυτό μπορεί να προκαλέσει θερμική κόπωση στα υλικά και να μειώσει τη διάρκεια ζωής τους. Επίπλέον, η φθορά μπορεί να επηρεάσει την ακριβή λειτουργία των συστημάτων ελέγχου, με αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται η ιδανική απόδοση του κινητήρα. Η αξιοπιστία του συστήματος

μπορεί επίσης να επηρεαστεί από τη πολυπλοκότητά του, καθώς περισσότερα εξαρτήματα και συστήματα σημαίνουν περισσότερες πιθανότητες για βλάβες. Επιπλέον, απαιτούνται συχνότεροι έλεγχοι και συντηρήσεις για να διατηρηθεί η αξιοπιστία του κινητήρα. Συνολικά, ενώ η απενεργοποίηση κυλίνδρων μπορεί να βελτιώσει την κατανάλωση, μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη φθορά και να επηρεάσει την αξιοπιστία του κινητήρα, απαιτώντας προσεκτική σχεδίαση και συντήρηση για να εξασφαλιστεί η μακροχρόνια αποδοτική λειτουργία του.

- **Μηχανικές Απώλειες**

Ένα σημαντικό περιοριστικό στοιχείο του συστήματος απενεργοποίησης κυλίνδρων είναι οι αυξημένες τριβές και οι μηχανικές απώλειες που προκύπτουν από αυτή τη λειτουργία, οι οποίες μειώνουν την αποδοτικότητα του κινητήρα και αυξάνουν την κατανάλωση καυσίμου. Για παράδειγμα, σε σχετική έρευνα, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, οι τριβές στο ελατήριο (δαχτυλίδι) συμπίεσης και την άνω κεφαλή του διωστήρα αντιπροσωπεύουν το 1.37% και το 2.35% της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου, αντίστοιχα. Με την απενεργοποίηση των κυλίνδρων, αυτές οι τιμές αυξάνονται στο 1.65% και 2.61%, αντίστοιχα[29]. Συνεπώς, για την αποτελεσματική χρήση του CDA απαιτείται η ανάπτυξη προηγμένων λύσεων λίπανσης και σχεδιασμού, όπως η επιλογή κατάλληλων υλικών που βελτιώνουν τη μετάδοση θερμότητας και μειώνουν τις τριβές, ώστε να μετριαστούν οι επιπτώσεις αυτών των απωλειών.

3. Προδιαγραφές Εκπομπών και Κύκλοι Πόλης

Οι κύκλοι πόλης είναι μια κρίσιμη πτυχή των δοκιμών και της αξιολόγησης των ελαφρών οχημάτων, καθώς αντικατοπτρίζουν τις πραγματικές συνθήκες οδήγησης. Αυτές οι δοκιμές επικεντρώνονται στην προσομοίωση του τρόπου με τον οποίο τα οχήματα λειτουργούν σε περιβάλλοντα με συχνές στάσεις και ξεκινήματα, χαμηλές και υψηλές ταχύτητες, και ποικίλα επίπεδα επιτάχυνσης και επιβράδυνσης. Έτσι, είναι δυνατή η αξιολόγηση των εκπομπών ρύπων, της κατανάλωσης καυσίμου και των επιδόσεων των οχημάτων [30].

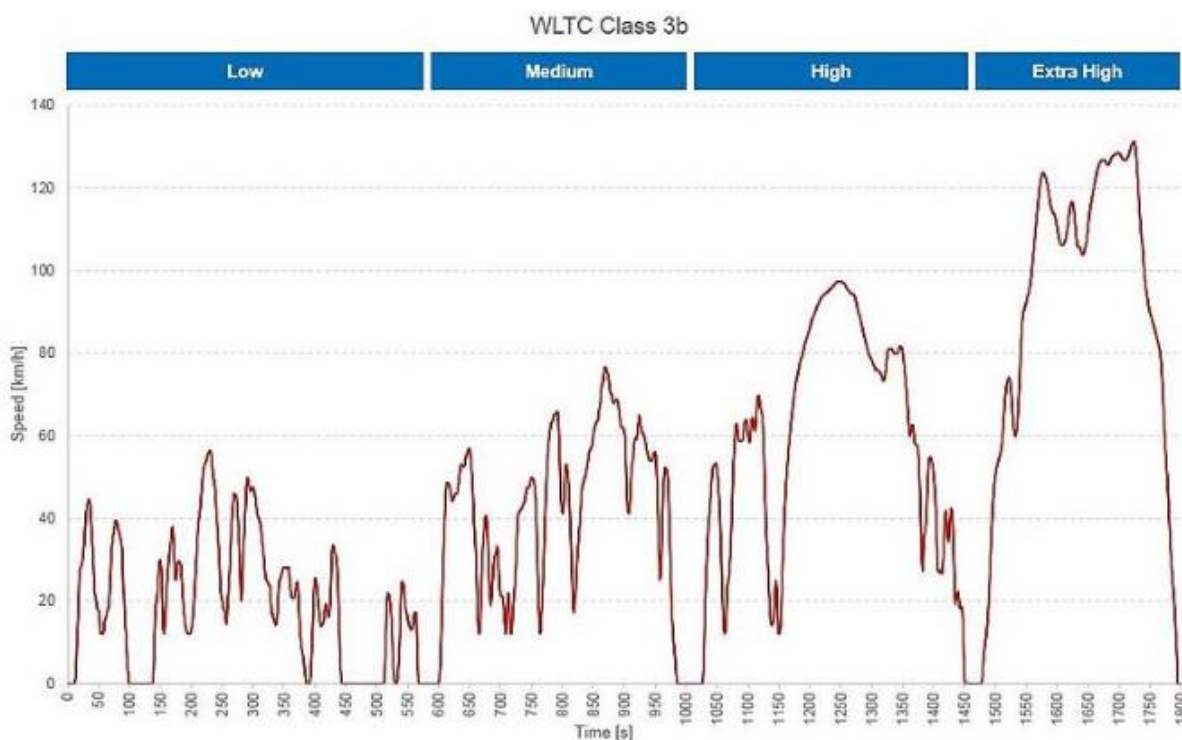
3.1. Παγκόσμια Εναρμονισμένοι Κύκλοι Δοκιμών Ελαφρών Οχημάτων

Η ανάπτυξη της διαδικασίας WLTP (*World harmonized Light-Duty vehicles Test Procedure*) ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2009 και εγκρίθηκε για εφαρμογή από το 2010. Η πρώτη φάση της νέας διαδικασίας ολοκληρώθηκε το 2011 και ακολουθήθηκε από αρκετές τροποποιήσεις και βελτιώσεις μέχρι την τελική έγκριση. Η ανάπτυξη παρακολούθηθηκε στενά από διάφορους φορείς, όπως κυβερνήσεις, βιομηχανία και μη κυβερνητικές οργανώσεις, με την αύξηση της συμμετοχής στις συνεδριάσεις της UN GRPE (*Working Party on Pollution and Energy*) να το αποδεικνύει.

Ο κύκλος δοκιμών WLTC (*Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle*) συλλέγει δεδομένα οδήγησης από διάφορες χώρες και κατηγοριοποιεί τα οχήματα ανάλογα με την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές. Χρησιμοποιεί τέσσερις βασικές φάσεις οδήγησης (*Low, Medium, High, Extra High*) για να προσομοιώσει ρεαλιστικές συνθήκες οδήγησης και να παρέχει ακριβέστερες μετρήσεις των εκπομπών και της κατανάλωσης καυσίμου σε πραγματικές συνθήκες.

Η οδήγηση στον WLTC δοκιμάστηκε εκτενώς κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης, με ειδικές εκδόσεις του κύκλου για οχήματα με περιορισμένες δυνατότητες οδήγησης λόγω χαμηλής σχέσης ισχύος προς μάζα ή περιορισμένης μέγιστης ταχύτητας. Ως αποτέλεσμα, δημιουργήθηκαν τρεις τάξεις του κύκλου, καθεμία με διαφορετικά χαρακτηριστικά διάρκειας και ταχύτητας. Η τάξη 3 που έχει ενδιαφέρον στην παρούσα εργασία είναι:

- **Τάξη 3** ($PMR > 34kW/t$): Αυτή η κατηγορία χωρίζεται περαιτέρω σε δύο υποκατηγορίες: η 3-1 για οχήματα με μέγιστη ταχύτητα κάτω των 120 χλμ/ώρα και η 3-2 για οχήματα με μέγιστη ταχύτητα πάνω από 120 χλμ/ώρα. Σε κάποιες χώρες, η φάση της πολύ υψηλής ταχύτητας μπορεί να εξαιρεθεί.



Σχήμα 3.1: Κύκλος WLTC3-2.

Η συνολική διάρκεια του κύκλου είναι 1800 δευτερόλεπτα, επιδιώκοντας να διασφαλίσει ότι οι δοκιμές αντανakλούν στατιστικά τις πραγματικές συνθήκες οδήγησης. Η ΕΕ υιοθέτησε τον κύκλο WLTC από τον Σεπτέμβριο του 2017 μαζί με το πρότυπο Euro 6c [30].

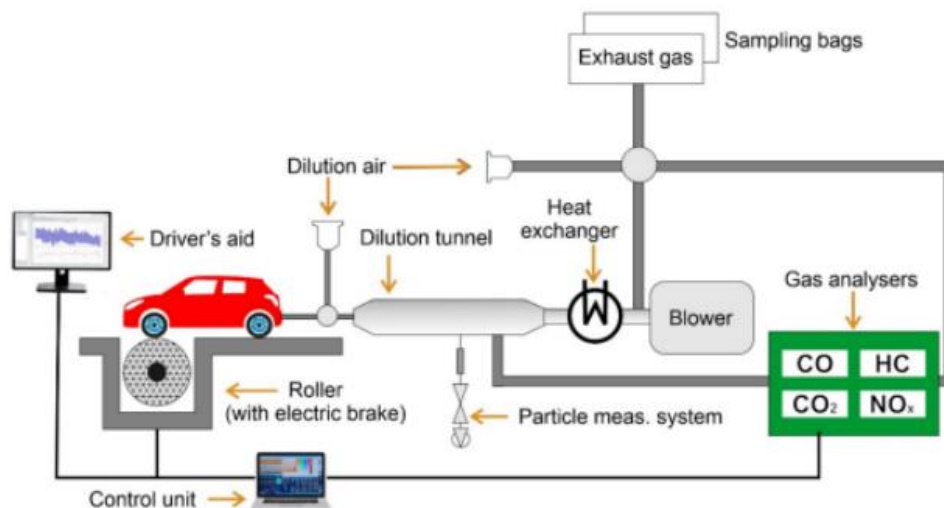
3.2. Δοκιμή εκπομπών κατά την Πραγματική Οδήγηση

3.2.1. Δυναμόμετρο

Για την διεξαγωγή ελέγχων λειτουργίας στον μεταβατικό κύκλο (*Real Driving Emissions - RDE Test*), χρησιμοποιούνται πειραματικές διατάξεις που ονομάζονται δυναμόμετρα. Αυτές οι διατάξεις χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ταχύτητας και των συνθηκών φορτίου σε κινητήρα ή όχημα. Τα δυναμόμετρα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: αυτά που προσομοιώνουν τη λειτουργία ολόκληρου του οχήματος και αυτά που επικεντρώνονται μόνο στον κινητήρα[30].

- **Δυναμόμετρο Πλαισίου**

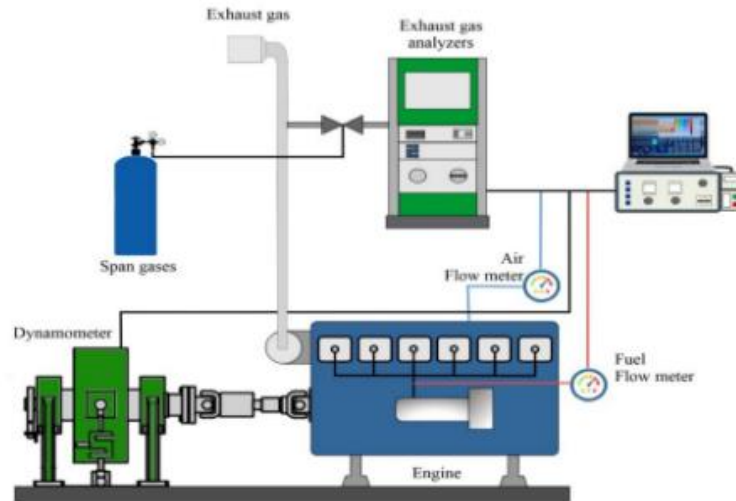
Οι κύκλοι με δυναμόμετρο πλαισίου περιλαμβάνουν την οδήγηση ενός οχήματος πάνω σε έναν δυναμόμετρο που προσομοιώνει την οδήγηση στον δρόμο και χρησιμοποιούνται κυρίως για ελαφρά οχήματα όπως επιβατικά αυτοκίνητα και ελαφρά φορτηγά.



Σχήμα 3.2: Διάταξη Δυναμόμετρου Πλαισίου[31].

- **Δυναμόμετρο Κινητήρα**

Από την άλλη πλευρά, οι κύκλοι δοκιμών με δυναμόμετρο κινητήρα περιλαμβάνουν τη δοκιμή μόνο του κινητήρα, απομονώνοντάς τον από το υπόλοιπο όχημα, και χρησιμοποιούνται κυρίως για βαρέα οχήματα όπως φορτηγά, τρακτέρ και άλλα.



Σχήμα 3.3: Διάταξη Δυναμόμετρου Κινητήρα[31].

3.2.2. Δειγματοληψία Εκπομπών

Το σύστημα δειγματοληψίας καυσαερίων πρέπει να μετρά με ακρίβεια τους ρύπους που παράγονται. Υπάρχουν δύο τρόποι: συνεχής μέτρηση των καυσαερίων ή συλλογή δειγμάτων σε σακούλες για μεταγενέστερη ανάλυση. Το σύστημα που χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα είναι το CVS (*Constant volume sampling*), το οποίο αναμειγνύει τα καυσαέρια με φιλτραρισμένο αέρα για να αποτρέψει τη συμπύκνωση των υδρατμών και να μιμηθεί τις συνθήκες του αέρα στην ατμόσφαιρα.

Η διαδικασία ξεκινά με τη θέρμανση μιας σήραγγας ανάμειξης, όπου τα καυσαέρια αναμειγνύονται με αέρα περιβάλλοντος, δημιουργώντας ένα σταθερό μείγμα για ανάλυση. Από τη ροή αυτή λαμβάνεται συνεχώς ένα μικρό δείγμα, το οποίο αναλύεται για να καθοριστούν οι συγκεντρώσεις των αέριων ρύπων. Παράλληλα, για τη μέτρηση των σωματιδίων, ένα δείγμα λαμβάνεται από τη συνολική ροή και διέρχεται μέσα από φίλτρα, τα οποία ζυγίζονται πριν και μετά τη δοκιμή για να προσδιοριστεί η ποσότητα των σωματιδίων. Τα φίλτρα διατηρούνται σε σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας για ακρίβεια στη μέτρηση, περιλαμβάνοντας σωματίδια αιθάλης και οργανικά κλάσματα που είναι επικίνδυνα για την υγεία [30].



Σχήμα 3.4: Δειγματοληψία με CVS [32].

4. Μοντελοποίηση του Κινητήρα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα πραγματοποιηθεί συγκριτική ανάλυση δύο επιβατικών αυτοκινήτων. Αμφότερα τα οχήματα είναι τύπου Otto GDI (*Gasoline Direct Injection*) και με υπερπληρωμένους κινητήρες, με τη μοναδική διαφορά να έγκειται στην ύπαρξη ή μη του συστήματος απενεργοποίησης. Η απενεργοποίηση πραγματοποιήθηκε με περιορισμούς που καθορίστηκαν από τη σχετική βιβλιογραφία, διασφαλίζοντας την ακρίβεια και αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Η σύγκριση θα διεξαχθεί βάσει του κύκλου πόλης *WLTC-3b*. Για την παρούσα ανάλυση θα γίνει προσομοίωση σε ολόκληρη τη διάρκειά του, επιτρέποντας μια λεπτομερή εκτίμηση των επιδόσεων των δύο οχημάτων. Η ανάλυση θα περιλαμβάνει παραμέτρους όπως η κατανάλωση καυσίμου, οι εκπομπές ρύπων, η απόδοση του κινητήρα και άλλα συναφή χαρακτηριστικά. Μέσω αυτής της έρευνας, επιδιώκεται να παρασχεθούν χρήσιμες πληροφορίες για την καλύτερη κατανόηση της τεχνολογίας.

4.1. Εισαγωγή στο GT-POWER

Η μοντελοποίηση του κινητήρα και του αυτοκίνητου πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα GT-POWER. Αναπτύχθηκε από τη Gamma Technologies και χρησιμοποιείται για προσομοιώσεις οχημάτων και κινητήρων εσωτερικής καύσης τόσο σε ερευνητικό επίπεδο όσο και στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Η εισαγωγή δεδομένων είναι το πρώτο βήμα για τη δημιουργία ενός μοντέλου κινητήρα στο GT-POWER. Ο χρήστης χρησιμοποιεί γραφική διεπαφή (*Graphical User Interface - GUI*) για να καθορίσει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα και των εξαρτημάτων του. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν κυλίνδρους, σωληνώσεις, βαλβίδες, έμβολα, εισαγωγές και εξαγωγές. Επιπλέον, εκτός από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ο χρήστης εισάγει και λειτουργικά δεδομένα όπως συνθήκες λειτουργίας, θερμοκρασίες, πιέσεις και ροές καθώς και τους χρονισμούς των βαλβίδων, της έγχυσης καυσίμου και της έναυσης.

Μόλις ολοκληρωθεί η εισαγωγή των δεδομένων, το πρόγραμμα ξεκινά την προσομοίωση. Η προσομοίωση περιλαμβάνει διάφορες διαδικασίες που

αναλύουν τη λειτουργία του κινητήρα: την προσομοίωση της ροής του αέρα μέσω των σωληνώσεων, των βαλβίδων και των κυλίνδρων, την ανάλυση της καύσης του καυσίμου στον κύλινδρο, τον υπολογισμό των εκπομπών ρύπων και την ανάλυση της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς του κινητήρα, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής και των απωλειών θερμότητας.

Το πρόγραμμα προσφέρει ακρίβεια και λεπτομέρεια, χρησιμοποιώντας σύνθετα μαθηματικά μοντέλα και αριθμητικές μεθόδους για να παρέχει ακριβείς προσομοιώσεις της λειτουργίας του κινητήρα. Είναι ευέλικτο και μπορεί να προσομοιώσει διάφορους τύπους κινητήρων και συστημάτων, από απλούς ατμοσφαιρικούς κινητήρες μέχρι πολύπλοκα υπερπληρωμένα συστήματα. Επιπλέον, μπορεί να ενσωματωθεί με άλλα εργαλεία και λογισμικά για πιο ολοκληρωμένες αναλύσεις συστημάτων.

4.2. Μοντέλο Otto-GDI

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία προέρχονται από μια προηγούμενη διπλωματική εργασία που ερευνά το θέμα της ηλεκτρικά υποβοηθούμενης υπερπλήρωσης σε έναν τετρακύλινδρο κινητήρα Otto άμεσου ψεκασμού, επιβατικού οχήματος [33]. Οι διαστάσεις του κινητήρα βασίζονται σε κινητήρα 2L της Audi και για τη μοντελοποίηση του οχήματος χρησιμοποιήθηκαν μεγέθη από το Audi A3. Ο κινητήρας είναι τετρακύλινδρος, με άμεσο ψεκασμό βενζίνης, υπερπλήρωση και ενδιάμεσο ψυγείο αέρα μετά τον συμπιεστή. Παρακάτω, θα αναφερθούν συνοπτικά τα χαρακτηριστικά του οχήματος.

- **Κινητήρας**

Τα χαρακτηριστικά του κινητήρα παρατίθενται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Στοιχεία Κινητήρα.

Στοιχεία Κινητήρα	
Μέγεθος	Τιμή
Διάμετρος Εμβόλου	82.5 mm
Διαδρομή Εμβόλου	92.8 mm
Μήκος Διωστήρα	144 mm
Διάκενο ΑΝΣ	10.511 mm
Αριθμός Κυλίνδρων	4
Όγκος Εμβολισμού	1984.3 cm ³
Σχέση Συμπίεσης	9.6
Σειρά Ανάφλεξης	1-3-4-2
Ροπή Αδράνειας	0.2 kg/m ²

- **Σωλήνες Εισαγωγής και Εξαγωγής**

Η σωλήνωση εισαγωγής είναι το τμήμα της μηχανής μέσω του οποίου ο αέρας εισέρχεται στους κυλίνδρους, αποτελούμενη από σωλήνες και διακλαδώσεις για την ομαλή ροή του αέρα. Ο αρχικός σωλήνας έχει διάμετρο 80 mm και μήκος 100 mm. Ακολουθούν οι σωλήνες οι οποίοι συνδέουν την πολλαπλή εισαγωγής με τη θύρα εισαγωγής των κυλίνδρων, με διάμετρο 40mm και μήκος 80mm. Οι σωλήνες είναι κατασκευασμένοι από χυτοσίδηρο, βοηθώντας στην καλύτερη προσομοίωση των απωλειών εισερχόμενης ροής. Η επιφάνειά τους θερμαίνεται στους 450K. Από την άλλη πλευρά του κυλίνδρου, οι αυλοί εξαγωγής των κυλίνδρων έχουν διάμετρο 30mm και μήκος 60mm, και είναι κατασκευασμένοι από χυτοσίδηρο, όπως και οι αυλοί εισαγωγής. Η θερμοκρασία των τοιχωμάτων των αυλών εξαγωγής είναι μεγαλύτερη από αυτήν της πολλαπλής εισαγωγής στους 550K λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας των αερίων εξαγωγής.

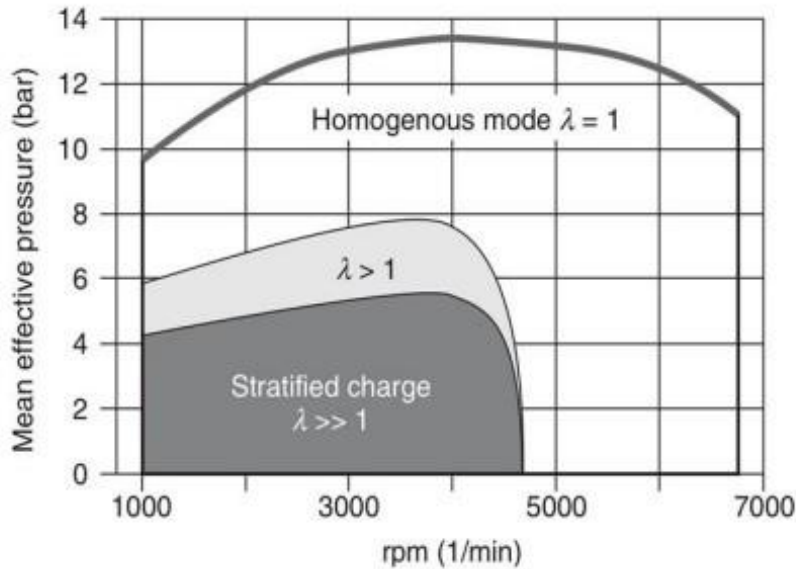
- **Κύλινδροι**

Στους κυλίνδρους ορίζονται τα χαρακτηριστικά της καύσης. Ορίζεται, αρχικά, η προπορεία έναυσης του σπινθηριστή, συναρτήσει των στροφών και της μέσης πραγματικής πίεσης (*BMEP-Brake Mean Efficiency Pressure*) του κινητήρα.

Επίσης, ορίζονται οι θερμοκρασίες των επιφανειών στον θάλαμο καύσης. Η θερμοκρασία της κεφαλής ορίζεται στους 550 K, του εμβόλου στους 590 K και του κυλίνδρου στους 450 K, βάσει τυπικών τιμών που προτείνονται από το πρόγραμμα. Επίσης, ορίζονται οι συντελεστές, *head/bore area ratio* και *piston/bore area ratio*, που προσδίδουν ακριβέστερα αποτελέσματα διότι λαμβάνουν υπόψη τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας του θαλάμου καύσης.

• **Ορισμός Αναλογίας Αέρα-Καυσίμου**

Στη συνέχεια, ορίστηκε ο λόγος αέρα-καυσίμου του κινητήρα ξανά συναρτήσει των στροφών και της μέσης πραγματικής πίεσης, κατά τη λογική που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. Επομένως, η αναλογία στο πρόγραμμα εισάγεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2.



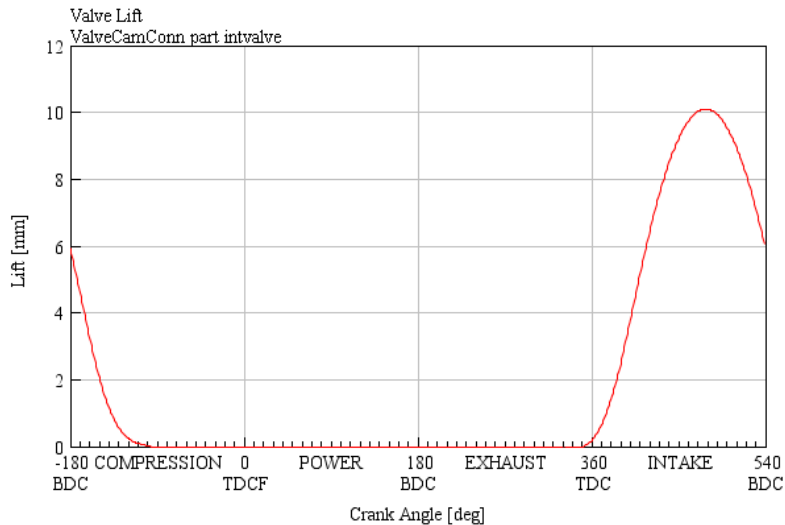
Σχήμα 4.1:Στρατηγική αναλογίας αέρα-καυσίμου[34].

Z Data	Y Data ↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
XDat...	...	1000 ...	1500 ...	2000 ...	2500 ...	3000 ...	3500 ...	4000 ...	4500 ...	5000 ...	6000 ...	7000 ...
1	2 ...	21.7 ...	21.7 ...	21.7 ...	21.7 ...	21.7 ...	21.7 ...	21.7 ...	21.7 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...
2	4 ...	21.7 ...	21.7 ...	21.7 ...	21.7 ...	21.7 ...	21.7 ...	21.7 ...	21.7 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...
3	5 ...	17.2 ...	17.2 ...	17.2 ...	21.7 ...	21.7 ...	21.7 ...	21.7 ...	17.2 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...
4	6 ...	17.2 ...	17.2 ...	17.2 ...	17.2 ...	17.2 ...	17.2 ...	17.2 ...	17.2 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...
5	6.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	17.2 ...	17.2 ...	17.2 ...	17.2 ...	17.2 ...	17.2 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...
6	7 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	17.2 ...	17.2 ...	17.2 ...	17.2 ...	17.2 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...
7	8 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	17.2 ...	17.2 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...
8	9 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...
9	10 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...
10	11 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...
11	12 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...
12	13 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...
13	14 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...
14	15 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...	14.5 ...

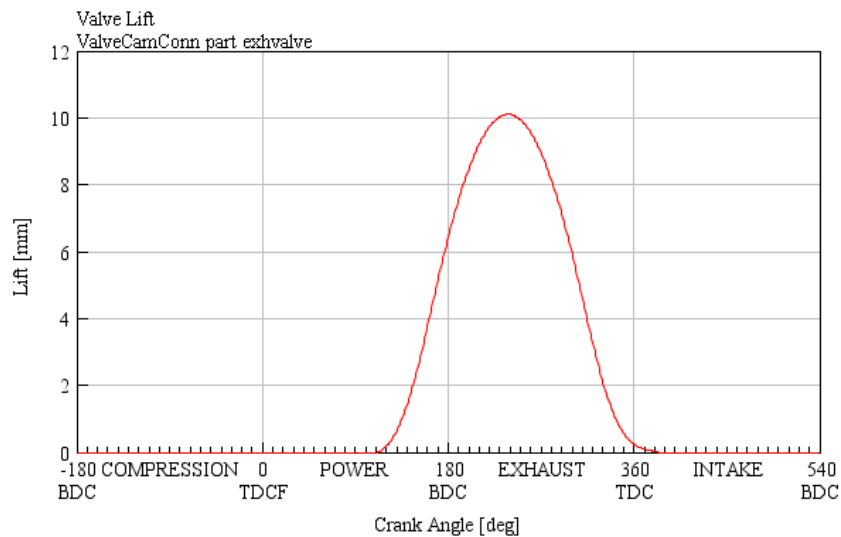
Σχήμα 4.2:Πίνακας αναλογίας αέρα-καυσίμου στο GT-POWER.

- **Βαλβίδες Εισαγωγής/ Εξαγωγής**

Για τις βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής ορίζονται ο χρονισμός τους, η διάμετρος τους και το προφίλ ανύψωσης. Η διάμετρος της βαλβίδας εισαγωγής είναι 45.5mm και της βαλβίδας εξαγωγής είναι 37.5mm, ενώ η μέγιστη βύθιση και για τις δύο είναι 10mm.



Σχήμα 4.3: Βαλβίδα Εισαγωγής.

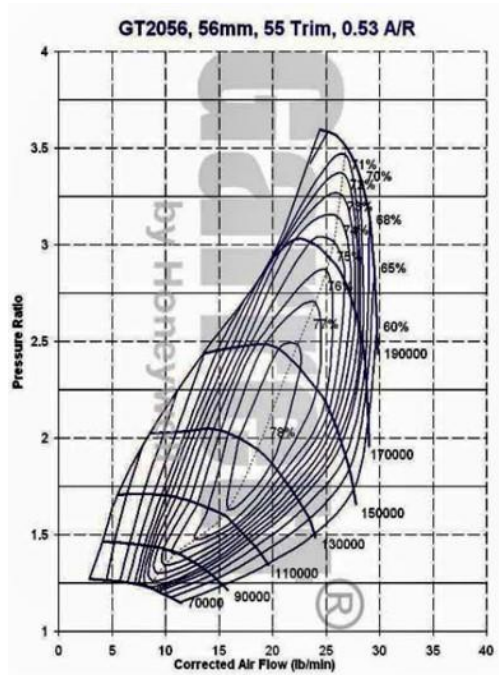


Σχήμα 4.4: Βαλβίδα Εξαγωγής.

Τα προφίλ ανύψωσης των βαλβίδων φαίνονται στο Σχήματα 4.3 και 4.4. Παρατηρείται ότι η εισαγωγή ξεκινάει στο ΑΝΣ και η εξαγωγή ανοίγει λίγο πριν το ΚΝΣ.

- **Υπερπλήρωση**

Για την υπερπλήρωση του κινητήρα χρησιμοποιήθηκε ο στρόβιλο-υπερπληρωτής Garrett GT2056, του οποίου ο χάρτης λειτουργίας φαίνεται στο Σχήμα 4.5. Η διαδικασία του ταιριάσματος κινητήρα και συστήματος υπερπλήρωσης δεν θα αναλυθεί, καθώς δεν αποτελεί αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας αλλά της προηγούμενης [33].



Σχήμα 4.5: Χάρτης Λειτουργίας Garrett GT2056.

Μετά την εισαγωγή της υπερπλήρωσης στον κινητήρα, τοποθετείται και ψυγείο στην έξοδο του συμπιεστή. Ανάλογα με την παροχή αέρα, επηρεάζεται και η απόδοση του. Συγκεκριμένα, 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%.

- **Όχημα**

Τα βασικά μεγέθη του οχήματος της προσομοίωσης φαίνονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Στοιχεία Οχήματος.

Στοιχεία Οχήματος	
Μέγεθος	Τιμή
Κινητήριοι Τροχοί	Εμπρός
Μάζα	1255 kg
Μετωπική Επιφάνεια	2.2 mm ²
Συντελεστής Αεροδυναμικής Αντίστασης	0.32
Αριθμός Τροχών	4
Μεταξόνιο	2636 mm ²

- **Σχέσεις Μετάδοσης**

Σημαντικό ρόλο στην λειτουργία του οχήματος παίζουν οι σχέσεις μετάδοσης, οι οποίες στο όχημα της προσομοίωσης είναι έξι και αναφέρονται στον Πίνακα 4.3.

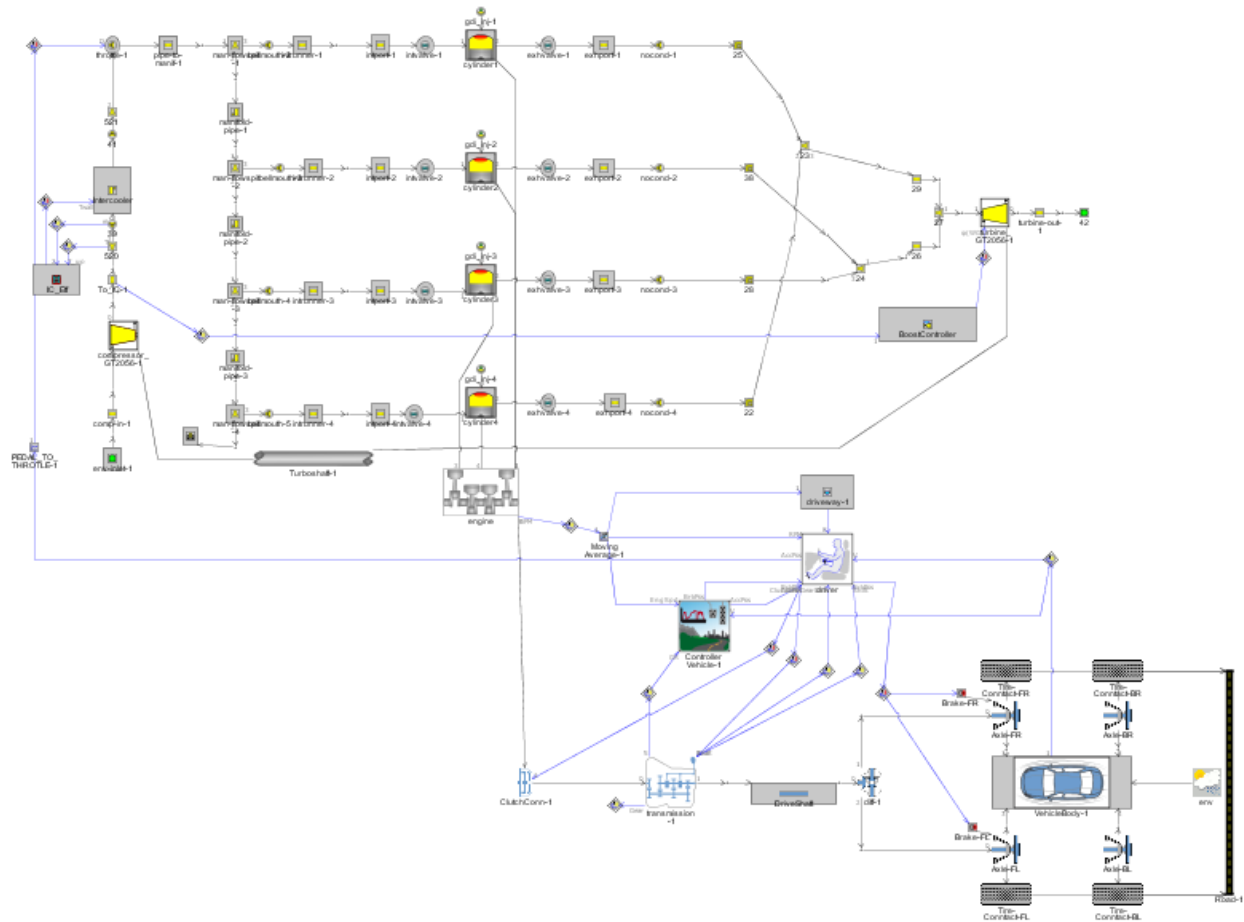
Πίνακας 4.3: Σχέσεις Μετάδοσης.

Σχέσεις Μετάδοσης	
1 ^η	3.78
2 ^η	2.12
3 ^η	1.36
4 ^η	1.03
5 ^η	0.86
6 ^η	0.73
Διαφορικό	3.65

- **Εικονικός Οδηγός (Driveway/ Controller Vehicle)**

Ο εικονικός οδηγός αναπαρίσταται μέσω δυο γραφικών. Το πρώτο είναι το driveway, που πρόκειται για ένα ελεγκτή υπεύθυνο μόνο για την εκκίνηση του οχήματος. Το δεύτερο είναι το Controller Vehicle, που είναι υπεύθυνο για αλλαγές ταχυτήτων και διαχείριση των τριών πεντάλ του οχήματος. Μέσω αυτού, το όχημα ακολουθεί το στόχο που έχει ορίσει ο χρήστης (*target speed/ imposed pedal position*).

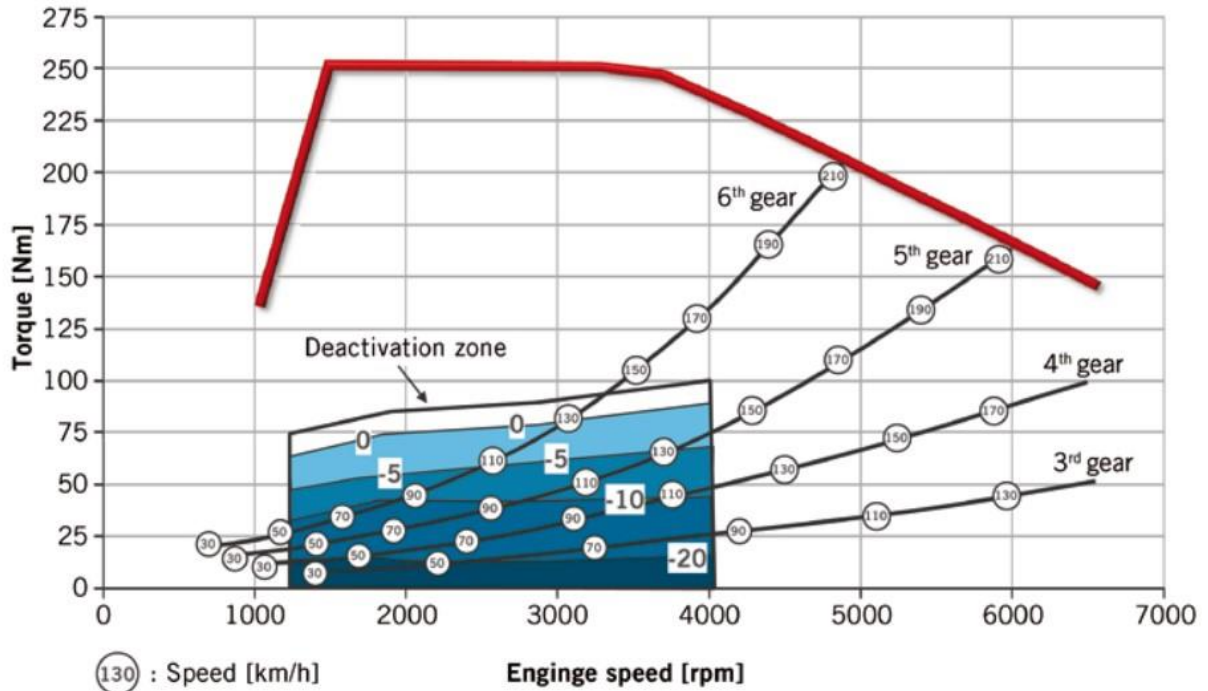
Στη συνέχεια, στο Σχήμα 4.6 παρατίθεται η διάταξη του οχήματος στο GT-POWER.



Σχήμα 4.6: Διάταξη Οχήματος Χωρίς Απενεργοποίηση.

4.3. Εισαγωγή της Απενεργοποίησης

Το μοντέλο απενεργοποίησης στηρίχτηκε σε ένα άρθρο της Volkswagen [20], που αφορά έναν 4-κύλινδρο υπερπληρωμένο κινητήρα Otto GDI.



Σχήμα 4.7: Συνθήκες απενεργοποίησης του κινητήρα Volkswagen [20].

Σύμφωνα με αυτό, το κατώτερο όριο στροφών του κινητήρα ορίστηκε στις 1250 rpm. Κάτω από αυτό το σημείο, η απενεργοποίηση των κυλίνδρων θα προκαλούσε υπερβολική κυκλική διασπορά. Οι διακυμάνσεις αυτές μπορούν να επηρεάσουν την ομαλή λειτουργία του κινητήρα, προκαλώντας δονήσεις και θόρυβο, και μπορούν επίσης να μειώσουν την απόδοσή του.

Το ανώτατο όριο προσδιορίστηκε στις 4000 rpm προκειμένου να διατηρηθούν μέτριες δυνάμεις μετατόπισης του ενεργοποιητή. Αυτές οι δυνάμεις είναι υπεύθυνες για τη μετακίνηση ή την ενεργοποίηση των εξαρτημάτων που ελέγχουν την απενεργοποίηση ή την ενεργοποίηση των κυλίνδρων στον κινητήρα, όπως πείρους, έκκεντρα ή βραχίονες.

Η ζώνη απενεργοποίησης κυλίνδρων ξεκινά στην τρίτη ταχύτητα και τερματίζει στα 130 km/h. Επίσης, το μέγιστο επιτρεπόμενο ροπής σε λειτουργία απενεργοποίησης κυλίνδρων είναι 75-100 Nm, ανάλογα με τις στροφές του κινητήρα. Όταν η ροπή υπερβαίνει αυτά τα όρια, η κατανάλωση

καυσίμου δεν είναι πλέον βέλτιστη λόγω της πρόκλησης προανάφλεξης, οδηγώντας στην ενεργοποίηση και των τεσσάρων κυλίνδρων.

Για να επιτευχθεί η μέγιστη εξοικονόμηση καυσίμου, η απενεργοποίηση κυλίνδρων εφαρμόζεται όχι μόνο υπό μερικό φορτίο, αλλά και κατά την επιβράδυνση χωρίς φρένο. Μόλις ο οδηγός πατήσει το φρένο, η λειτουργία απενεργοποίησης κυλίνδρων ακυρώνεται ώστε και οι τέσσερις κύλινδροι να υποστηρίξουν την πέδηση.

Στη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για διάφορους περιορισμούς, στις στροφές του κινητήρα, τη ροπή, το πάτημα του πεντάλ επιτάχυνσης («γκαζιού»), καθώς ο κινητήρας της προσομοίωσης είναι πιο χαμηλών στροφών. Έτσι τελικά, οι στροφές του κινητήρα θα είναι από 1250 ως 1900 rpm, θα ξεκινάει από την τρίτη σχέση μετάδοσης, με μέγιστη ταχύτητα οχήματος τα 130 km/h, θα τερματίζει με πάτημα του πεντάλ πέδησης, καθώς και με ροπή άνω των 100 Nm.

Πίνακας 4.4: Σήματα Απενεργοποίησης.

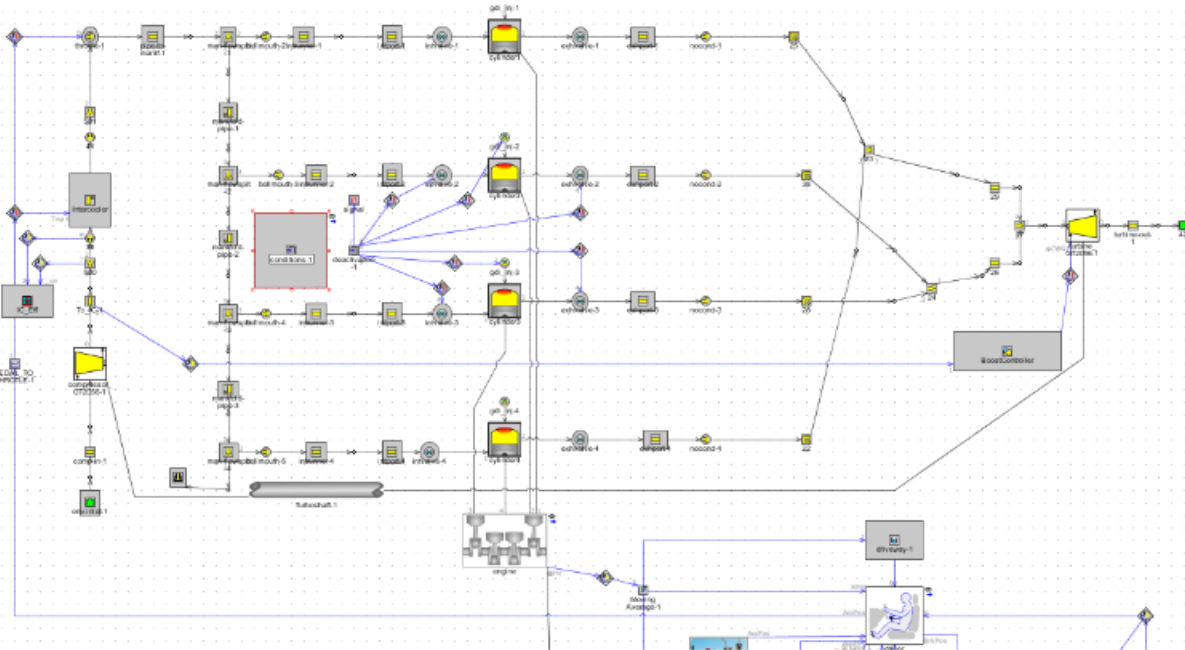
Σήματα Απενεργοποίησης	
Ελεγχόμενη Τιμή	Part on Map
Torque	Engine Crank Train
Engine RPM	Engine Crank Train
Brake Pedal Position	Vehicle Driver
Actual Gear Number	Transmission
Vehicle Speed	Vehicle Body

Η επίτευξη των προαναφερθέντων συνθήκων γίνεται από το πρόγραμμα μέσω του "IfThenElse". Εκεί, στέλνεται ασύρματο σήμα (*Wireless Signal*) για τις τιμές του Πίνακα 4.4. Κατόπιν του ελέγχου όλων των τιμών, το σήμα πηγαίνει σε έναν ελεγκτή που στέλνει σήμα στις βαλβίδες και τους εγχυτήρες των 2 κυλίνδρων προς απενεργοποίηση, οι οποίοι είναι ο 2 και ο 3.

Όπως προαναφέρθηκε, εάν οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής παραμένουν κλειστές, οι απώλειες των απενεργοποιημένων κυλίνδρων μειώνονται. Έτσι θα γίνει και στην προσομοίωση αυτή. Με το σήμα της απενεργοποίησης, οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής κλείνουν εγκλωβίζοντας το μείγμα καυσαερίων στον κύλινδρο. Αυτό επιτυγχάνεται με το *Lift Array Multiplier*, το οποίο τίθεται ίσο με μηδέν. Όλες οι τιμές του προφίλ ανύψωσης πολλαπλασιάζονται με τον πολλαπλασιαστή, δηλαδή μηδενίζονται. Όταν δεν υπάρχει απενεργοποίηση, ο πολλαπλασιαστής είναι ίσος με 1.

Ταυτόχρονα, σταματάει και η έγχυση καυσίμου. Συγκεκριμένα, ορίζεται η ποσότητα εγχέομένου καυσίμου ίση με μηδέν. Για πλήρη λειτουργία του κινητήρα, η ποσότητα ορίζεται ως η παράμετρος που χρησιμοποιείται και στον απλό Otto GDI.

Παρακάτω, παρατίθεται η διάταξη του οχήματος με προσθήκη της απενεργοποίησης στο Σχήμα 4.8.



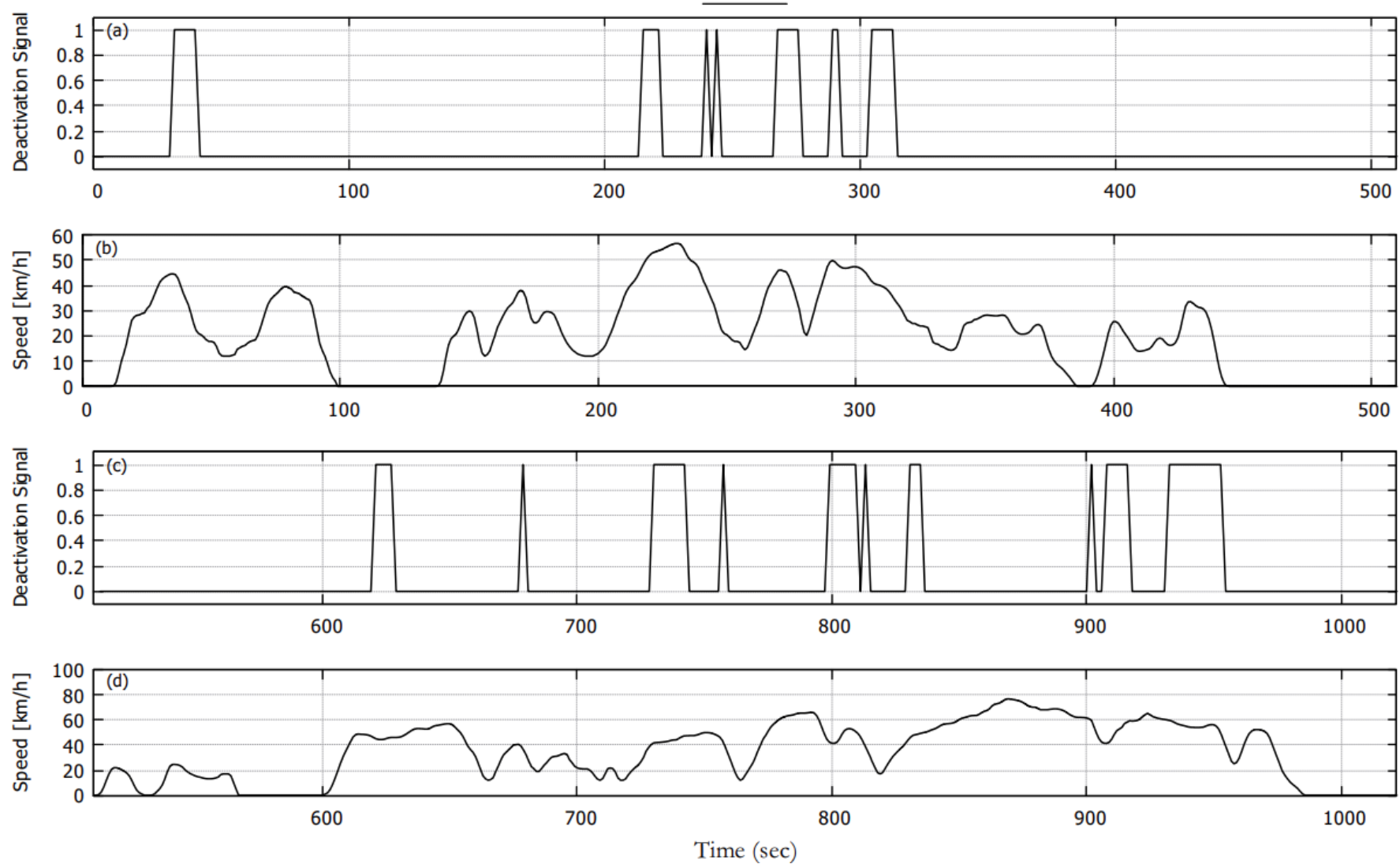
Σχήμα 4.8: Διάταξη Οχήματος με Απενεργοποίηση.

5. Προσομοίωση και Ανάλυση

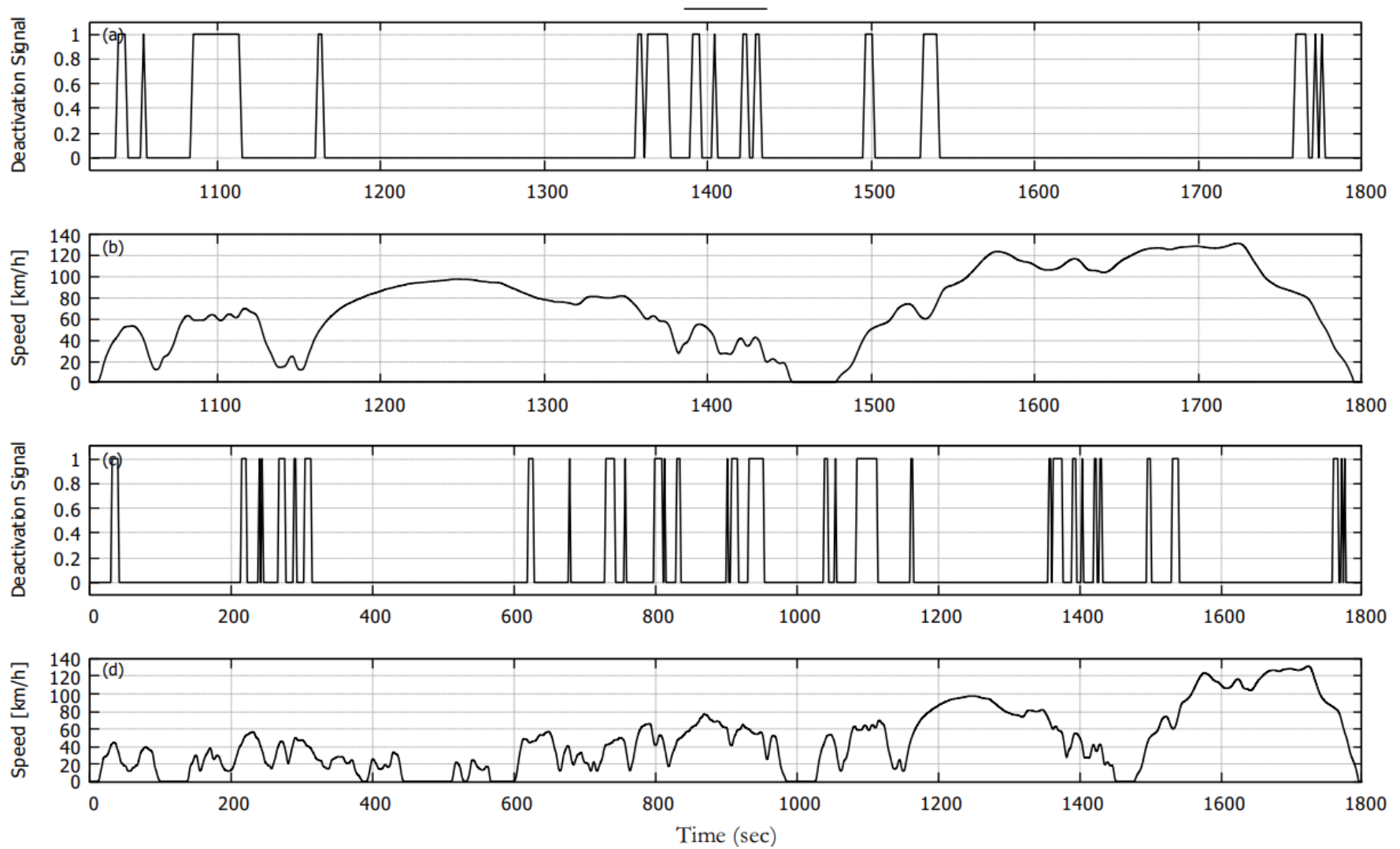
5.1. Συγκριτικά Διαγράμματα των Προσομοιώσεων

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο πρόγραμμα GT-POWER. Η λήψη των αποτελεσμάτων γίνεται στο περιβάλλον του GT-POST. Εκεί, παρατίθεται ο χάρτης του οχήματος που δημιουργήθηκε στο GT-POWER και για κάθε ένα εξάρτημα αποθηκεύονται διάφορα μεγέθη, που μπορεί να αφορούν β. απόδοσης, πίεση, θερμοκρασία, ροή, εκπομπές και άλλα, αναλόγως με την κατηγορία του εξαρτήματος που μελετάται. Θα παρατεθούν αποτελέσματα για όλο τον κύκλο WLTC-3b από 0-1800 δευτερόλεπτα και για το κομμάτι εντός πόλης, 0-510 δευτερόλεπτα. Για καλύτερη σύγκριση, τα αποτελέσματα των 2 οχημάτων, με απενεργοποίηση και χωρίς, θα βρίσκονται στο ίδιο διάγραμμα.

Αρχικά, είναι σημαντικό να φανεί το σήμα απενεργοποίησης κατά τη διάρκεια του κύκλου, το οποίο είναι στο Σχήμα 5.1 και Σχήμα 5.2, ώστε να είναι ορατό το πού θα παρατηρηθεί διαφορά στα αποτελέσματα. Αναμένεται η απενεργοποίηση να πραγματοποιείται σε χαμηλές επιταχύνσεις, επιβραδύνσεις χωρίς τη χρήση του πεντάλ πέδησης και περιόδους διατήρησης σταθερής ταχύτητας. Φυσικά, λόγω της φύσης του κύκλου πόλης, οι περίοδοι χωρίς υψηλές απαιτήσεις δεν είναι μεγάλης διάρκειας.



Σχήμα 5.1: (a): Σήμα Απενεργοποίησης για 0-510s, (b): Ταχύτητα WLTC3-b για 0-510s, (c): Σήμα Απενεργοποίησης για 510-1022s, (d): Ταχύτητα WLTC3-b για 510-1022s.

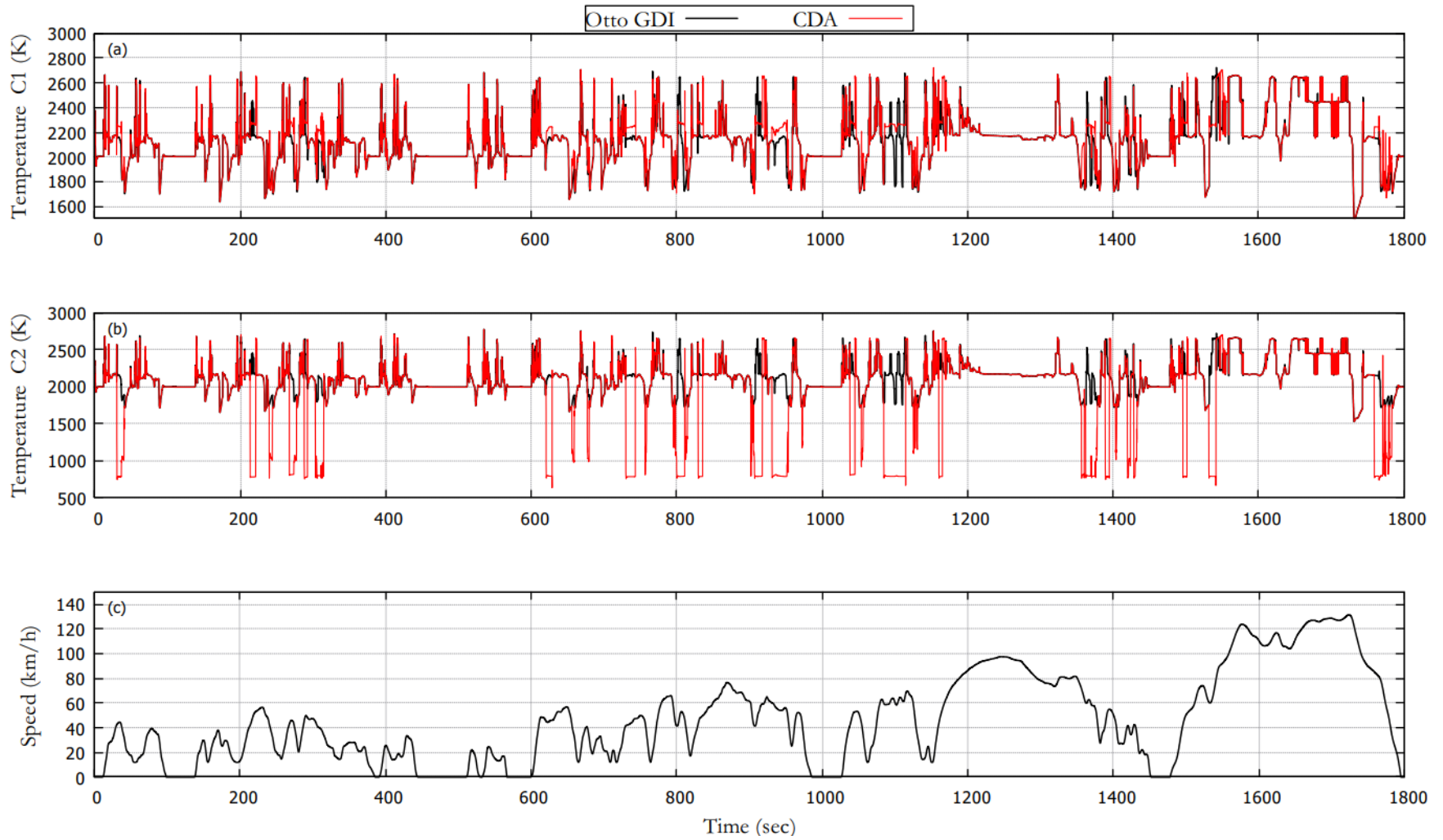


Σχήμα 5.2: (a): Σήμα Απενεργοποίησης για 1022-1800s, (b): Ταχύτητα WLTC3-b για 1022-1800s, (c): Σήμα Απενεργοποίησης για 0-1800s, (d): Ταχύτητα WLTC3-b για 0-1800s.

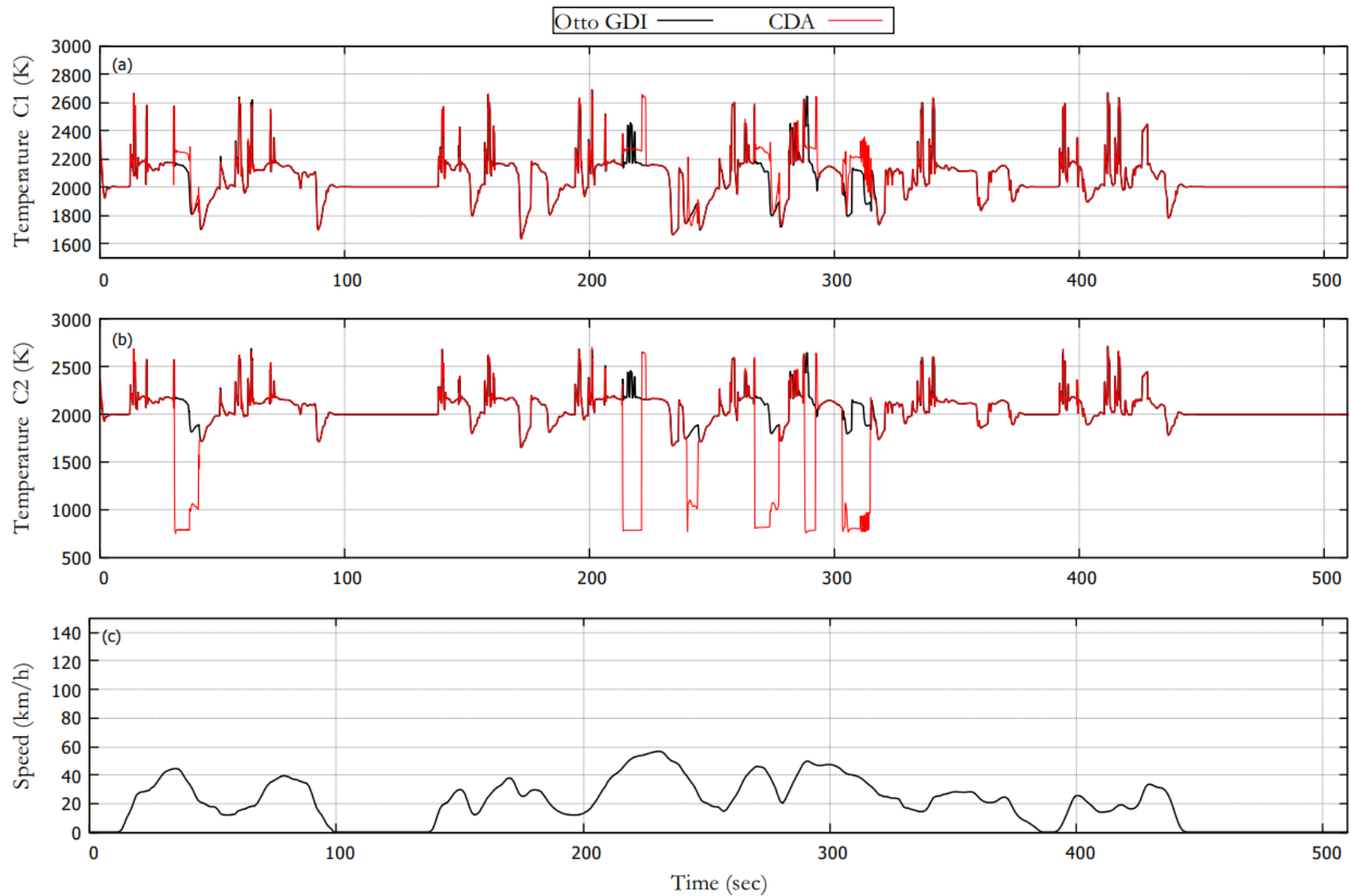
Συγκεκριμένα, στην πρώτη φάση του κύκλου (0-510 δευτερόλεπτα/ *Low phase*), επικρατούν συνθήκες κίνησης με αρκετές επιβραδύνσεις, επιταχύνσεις και αρκετές περιόδους στάσης, προσομοιώνοντας αστικό περιβάλλον με πολλά φανάρια ή διασταυρώσεις. Δεδομένου ότι σε μικρές ταχύτητες δεν υπάρχει απενεργοποίηση λόγω μικρής σχέσης μετάδοσης, οι απενεργοποιήσεις κυλίνδρου συμβαίνουν σε περιόδους όπου το όχημα κινείται με μέτρια ταχύτητα. Στην περιοχή αυτή παρατηρούνται οι λιγότερες απενεργοποιήσεις, μέτριας διάρκειας.

Στη δεύτερη φάση (510-1022 δευτερόλεπτα / *Medium phase*), η ταχύτητα του οχήματος παραμένει γενικά χαμηλή, με περισσότερες διακυμάνσεις, σε συνθήκες μέτριας κυκλοφορίας, με ομαλή ροή κίνησης και περιοδικές επιβραδύνσεις, χωρίς έντονες διακοπές ή στάσεις. Οι απενεργοποιήσεις του κυλίνδρου συμβαίνουν κατά τη διάρκεια περιόδων σταθερής μέτριας ταχύτητας και όχι κατά τη διάρκεια μεγάλων επιταχύνσεων. Οι απενεργοποιήσεις εδώ είναι συχνές και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια από όλες τις φάσεις.

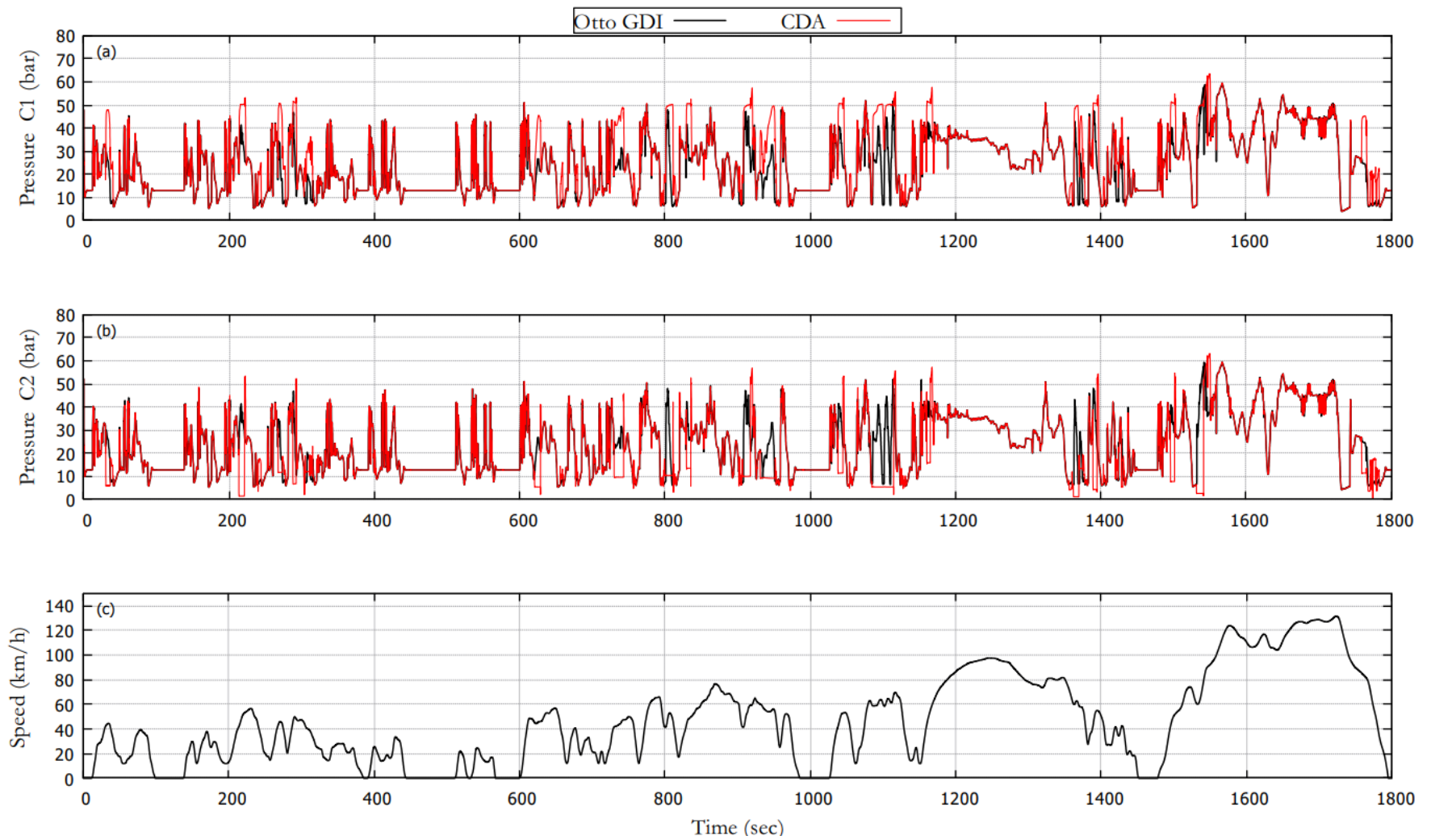
Στην τρίτη και τέταρτη φάση (1022-1800 δευτερόλεπτα / *High phase, Extra High phase*), το όχημα προσομοιώνει συνθήκες κυκλοφορίας σε πιο μεγάλο δρόμο ή εθνική οδό, όπου η ταχύτητα είναι υψηλότερη και σταθερότερη. Η επιτάχυνση του οχήματος φτάνει σε πολύ υψηλά επίπεδα. Δεδομένου ότι οι απενεργοποιήσεις δεν συμβαίνουν σε μεγάλες επιταχύνσεις, παρατηρούνται κατά τη διάρκεια κίνησης με σταθερή ταχύτητα και μικρή επιτάχυνση. Οι απενεργοποιήσεις εδώ έχουν μέτρια έως μεγάλη διάρκεια.



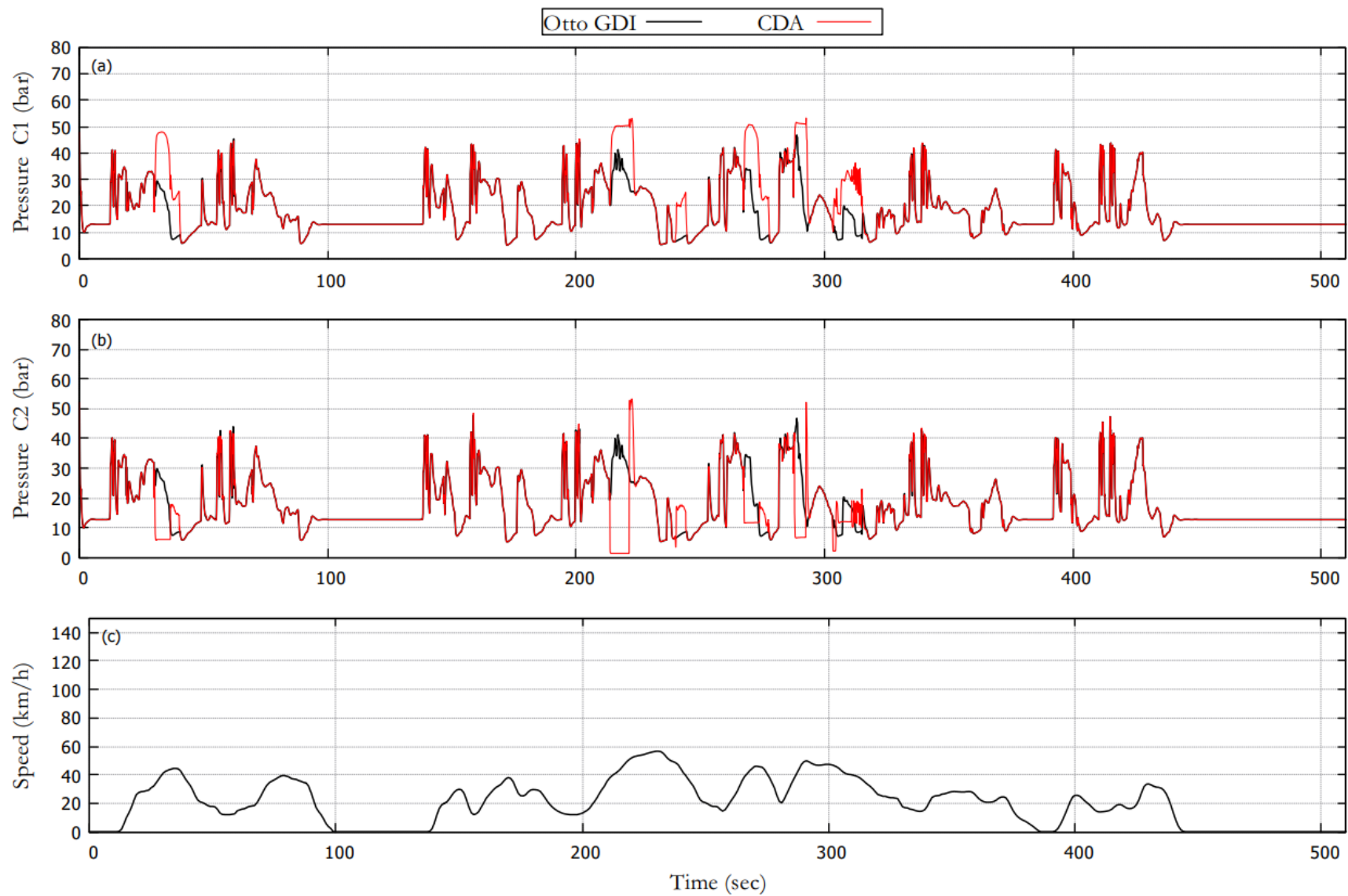
Σχήμα 5.3: Μέγιστη Θερμοκρασία Ανά Κύκλο (a): Κυλίνδρου 1, (b): Κυλίνδρου 2 για όλο τον κύκλο WLTC-3b.



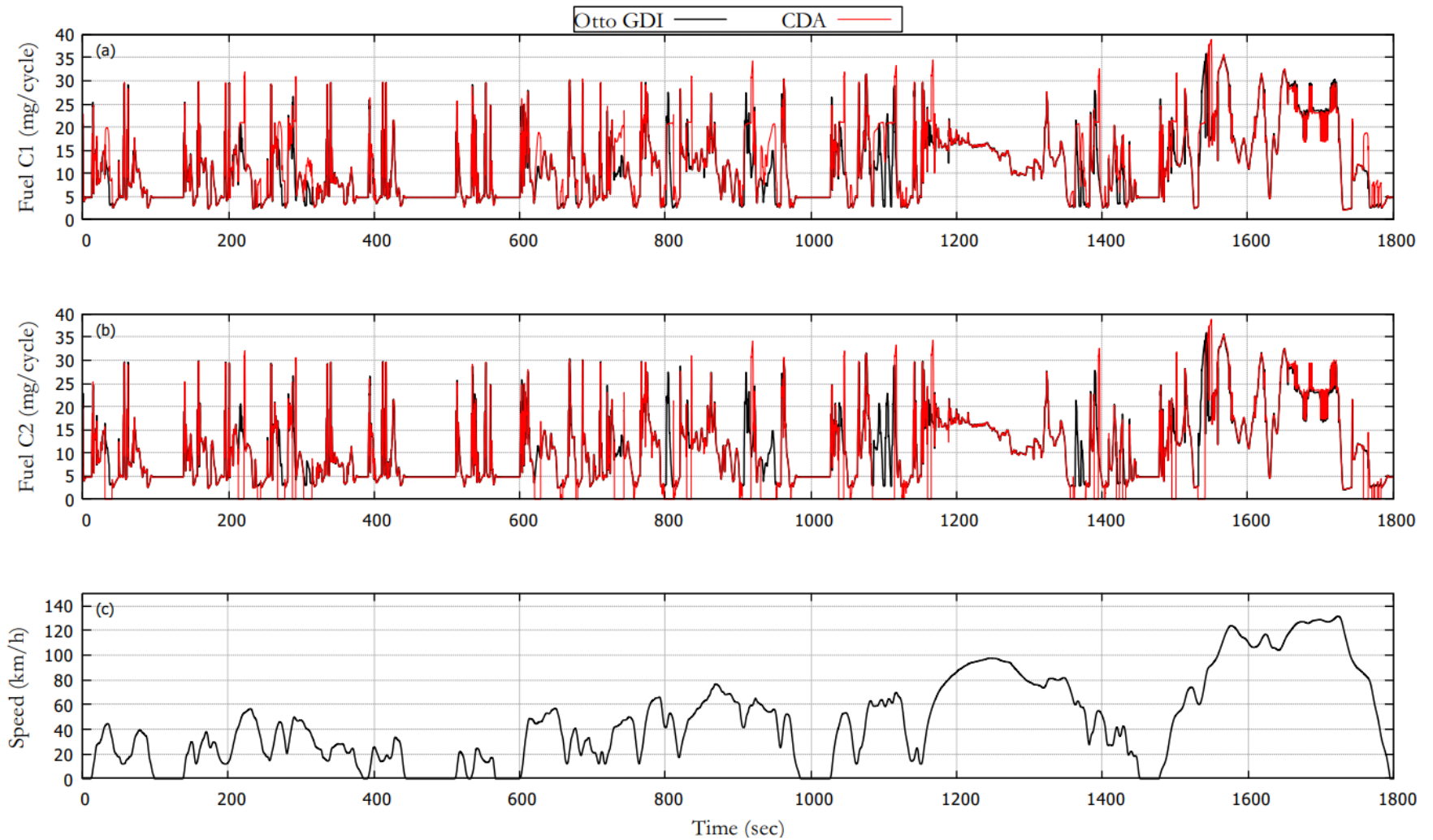
Σχήμα 5.4: Μέγιστη Θερμοκρασία Ανά Κύκλο (a): Κυλίνδρου 1, (b): Κυλίνδρου 2 για 0 - 510s.



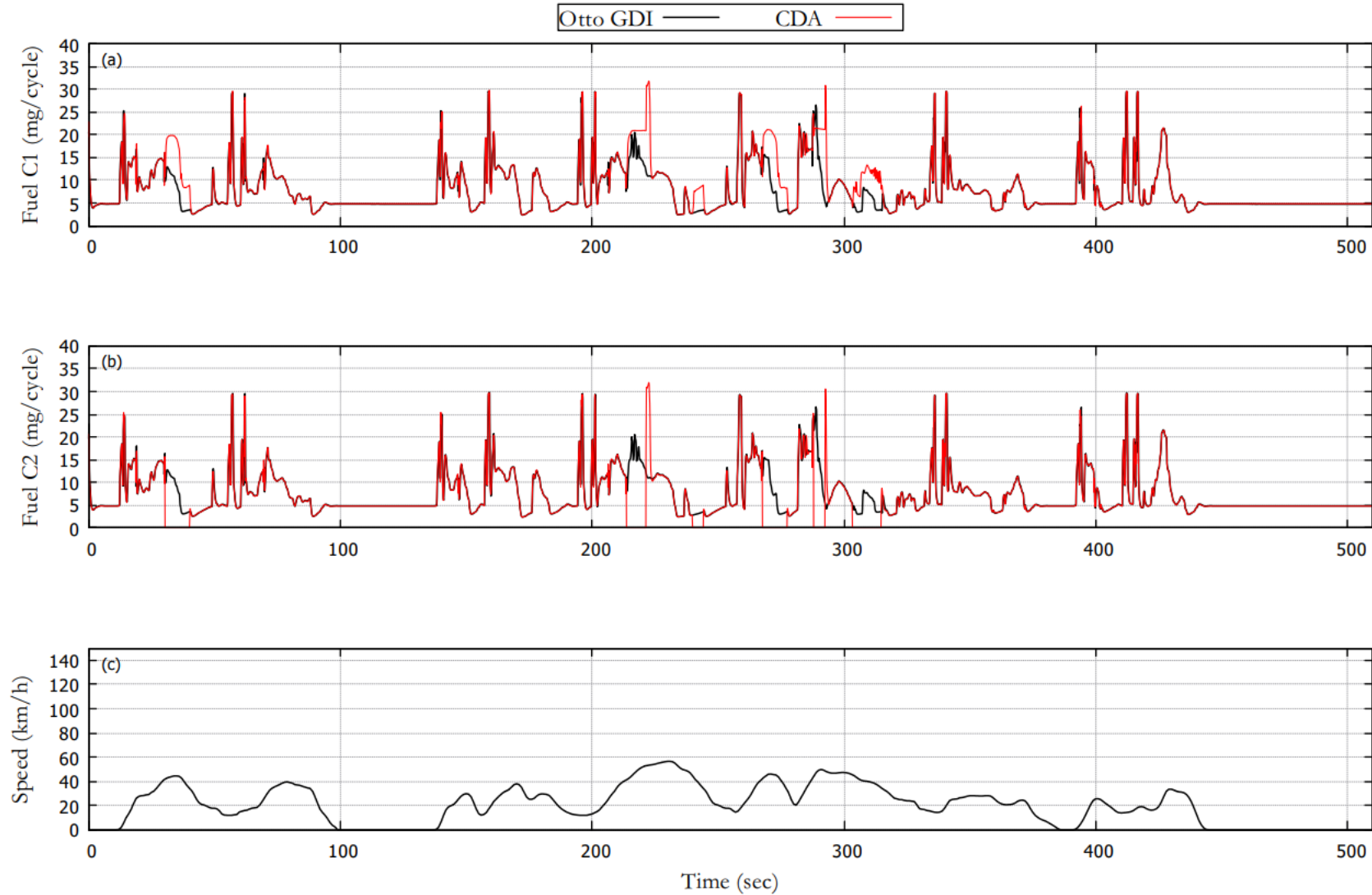
Σχήμα 5.5: Μέγιστη Πίεση Ανά Κύκλο (a): Κυλίνδρου 1, (b): Κυλίνδρου 2 για όλο τον κύκλο WLTC-3b.



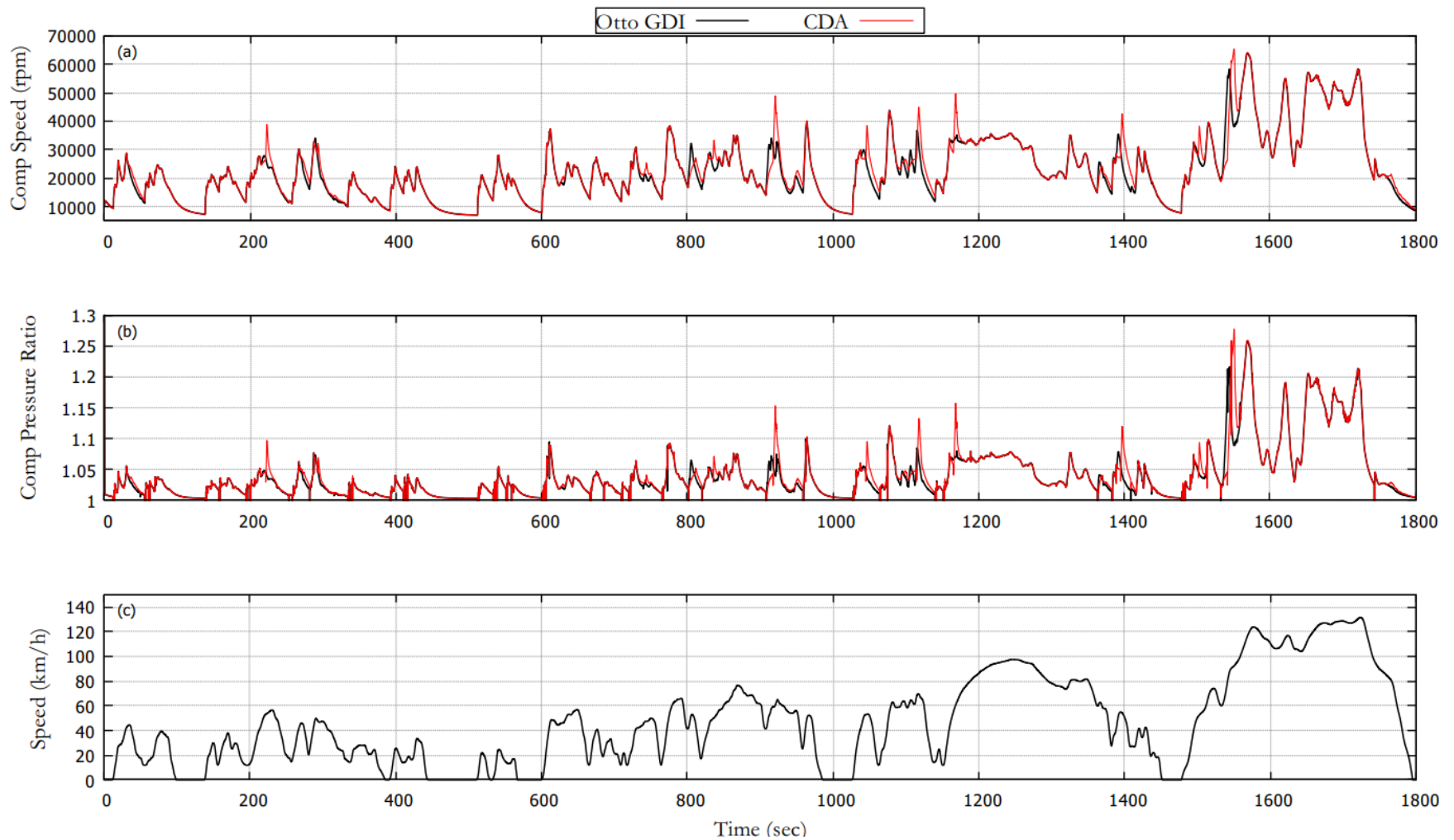
Σχήμα 5.6: Μέγιστη Πίεση Ανά Κύκλο (a): Κυλίνδρου 1, (b): Κυλίνδρου 2 για 0 - 510s.



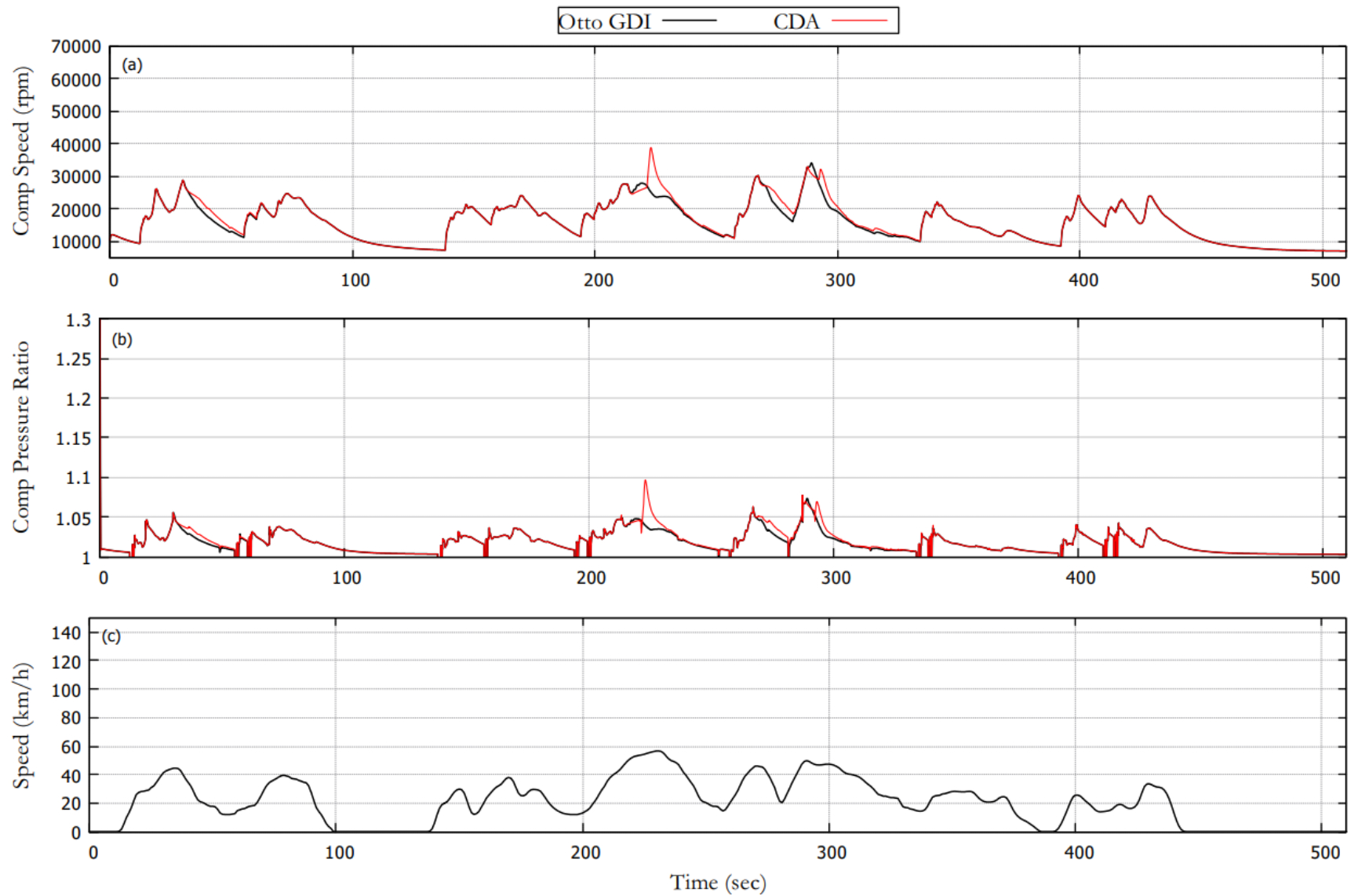
Σχήμα 5.7: Ποσότητα εγχεόμενου καυσίμου ανά κύκλο (a): Κυλίνδρου 1, (b): Κυλίνδρου 2 για όλο τον κύκλο WLTC3b.



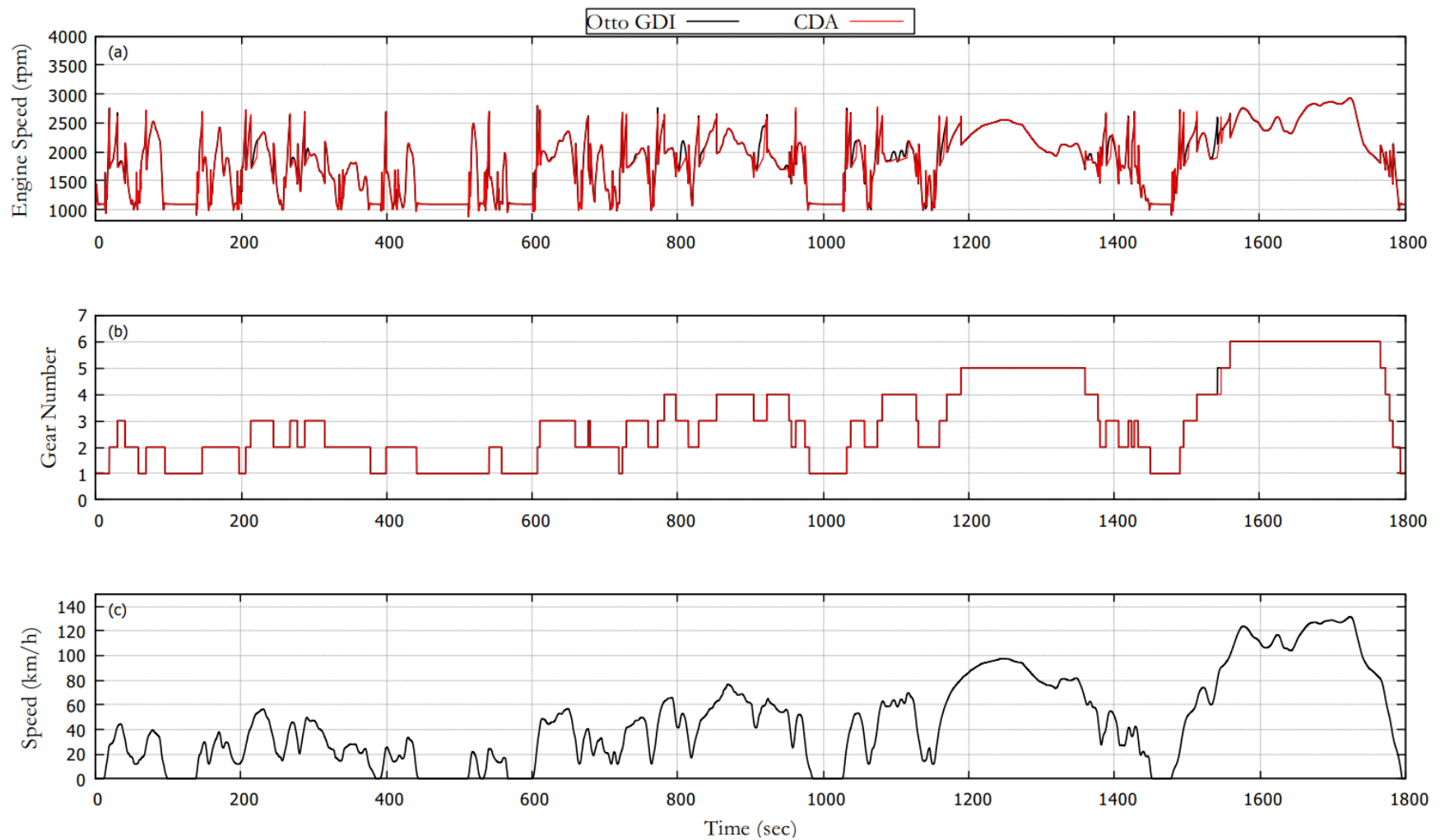
Σχήμα 5.8: Ποσότητα εγχέομενου καυσίμου ανά κύκλο (a): Κυλίνδρου 1, (b): Κυλίνδρου 2 για 0 - 510s.



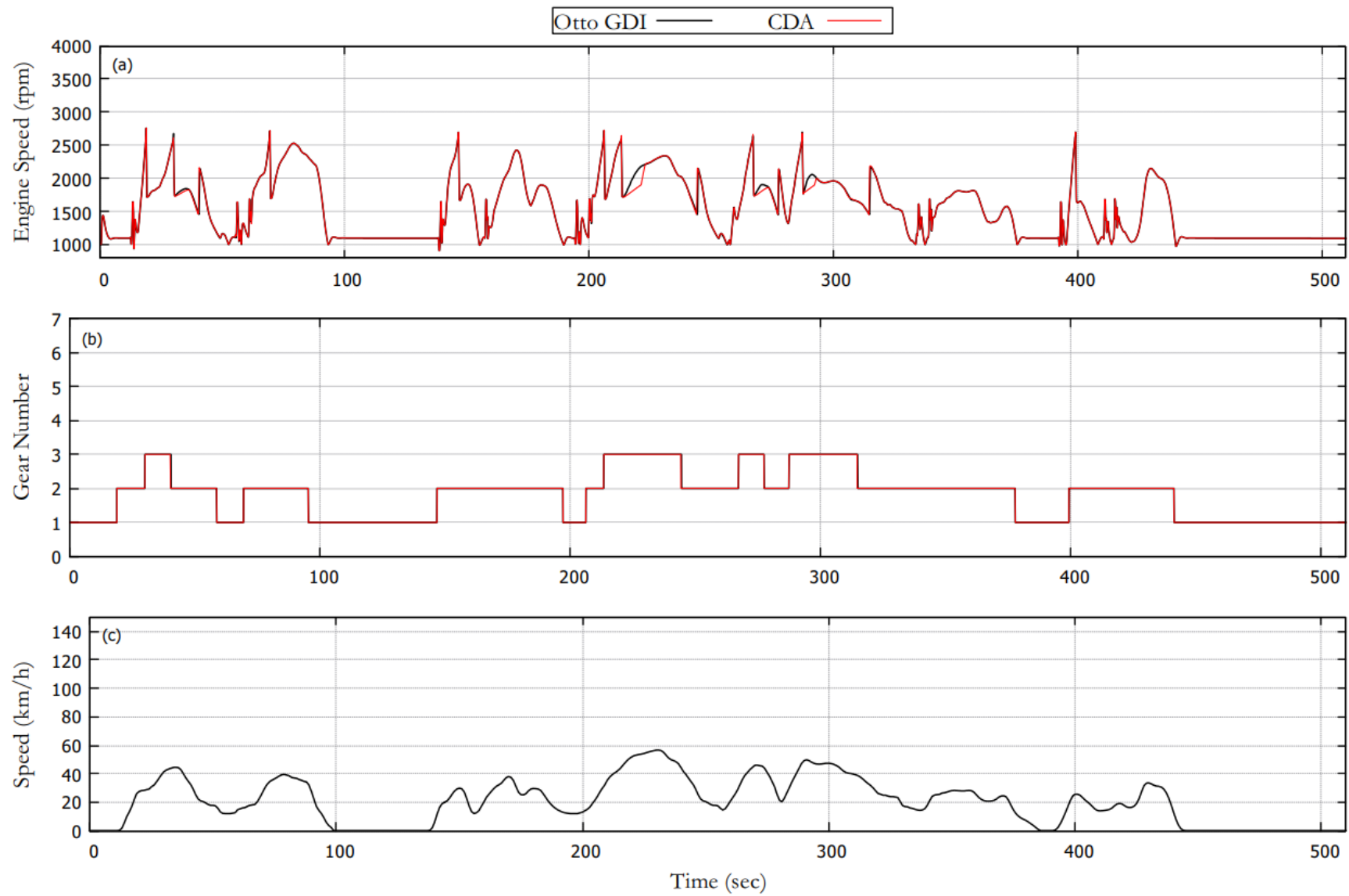
Σχήμα 5.9:(a): Ταχύτητα Περιστροφής, (b): Λόγος Πιέσεων Συμπιεστή για όλο τον κύκλο WLTC-3b.



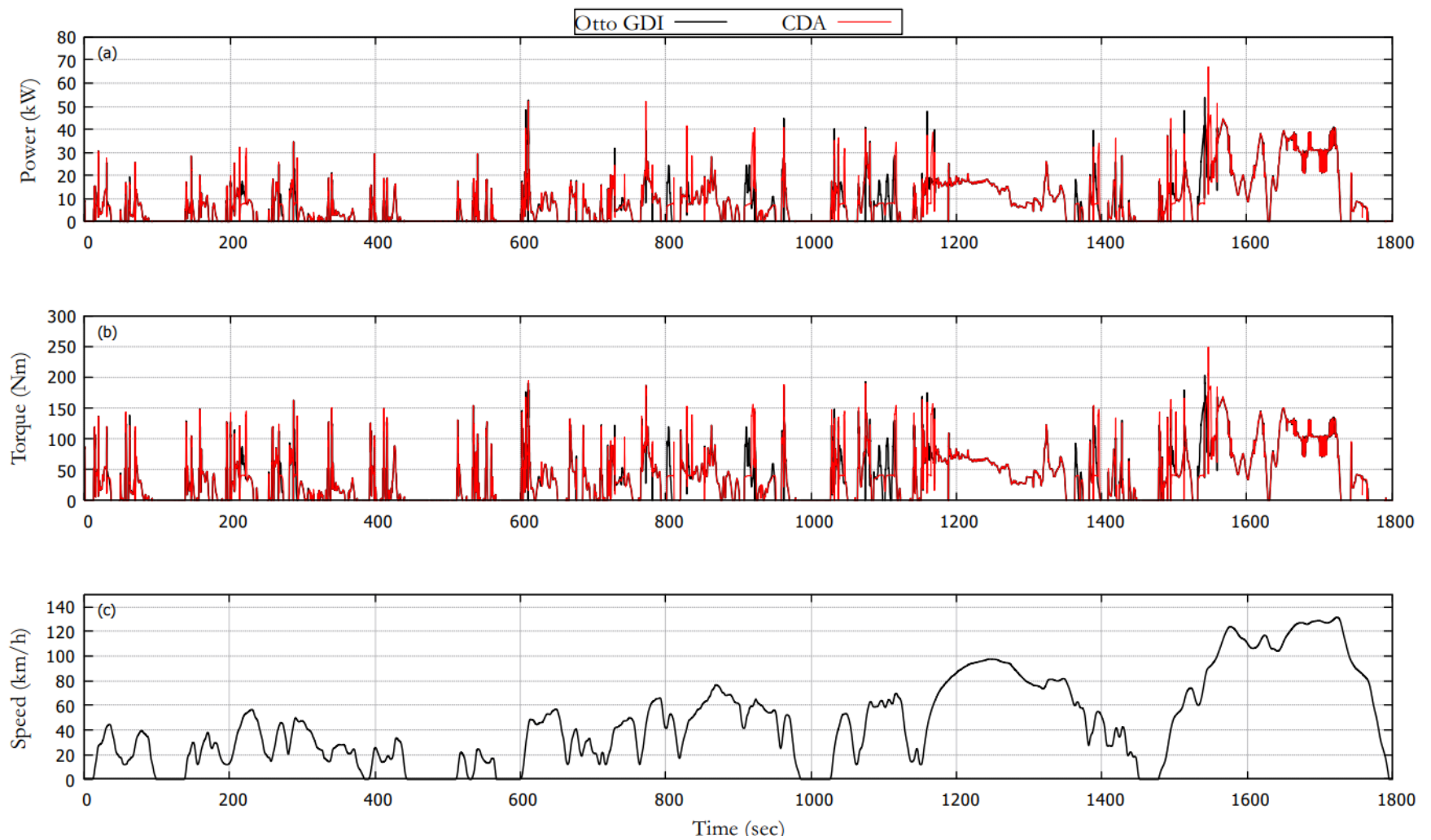
Σχήμα 5.10:(a): Ταχύτητα Περιστροφής, (b): Λόγος Πιέσεων Συμπιεστή για 0 - 510s.



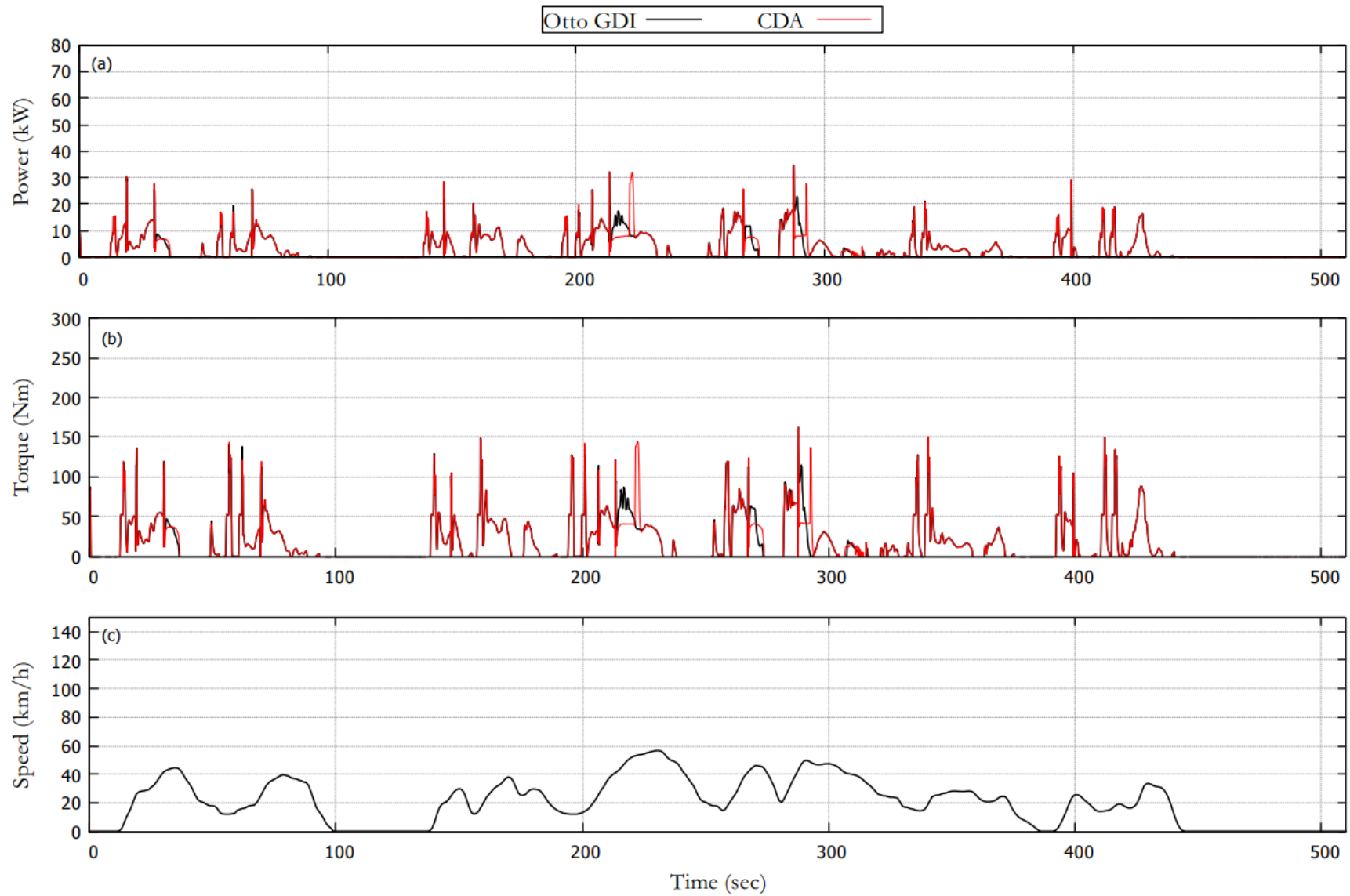
Σχήμα 5.11: (a): Ταχύτητα Περιστροφής Κινητήρα, (b): Σχέση Μετάδοσης για όλο τον κύκλο WLTC-3.



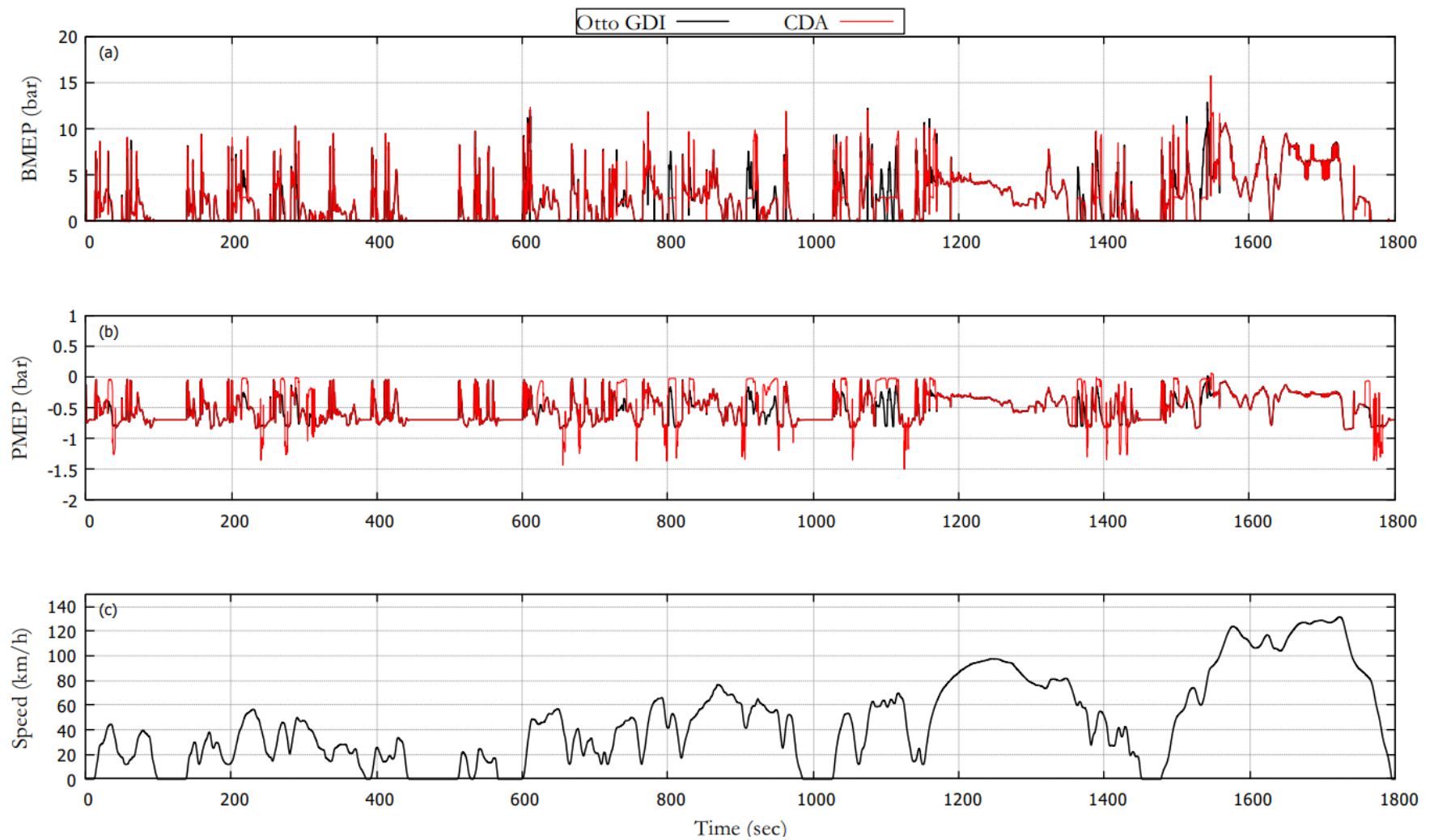
Σχήμα 5.12: (a): Ταχύτητα Περιστροφής Κινητήρα, (b): Σχέση Μετάδοσης για 0-510s.



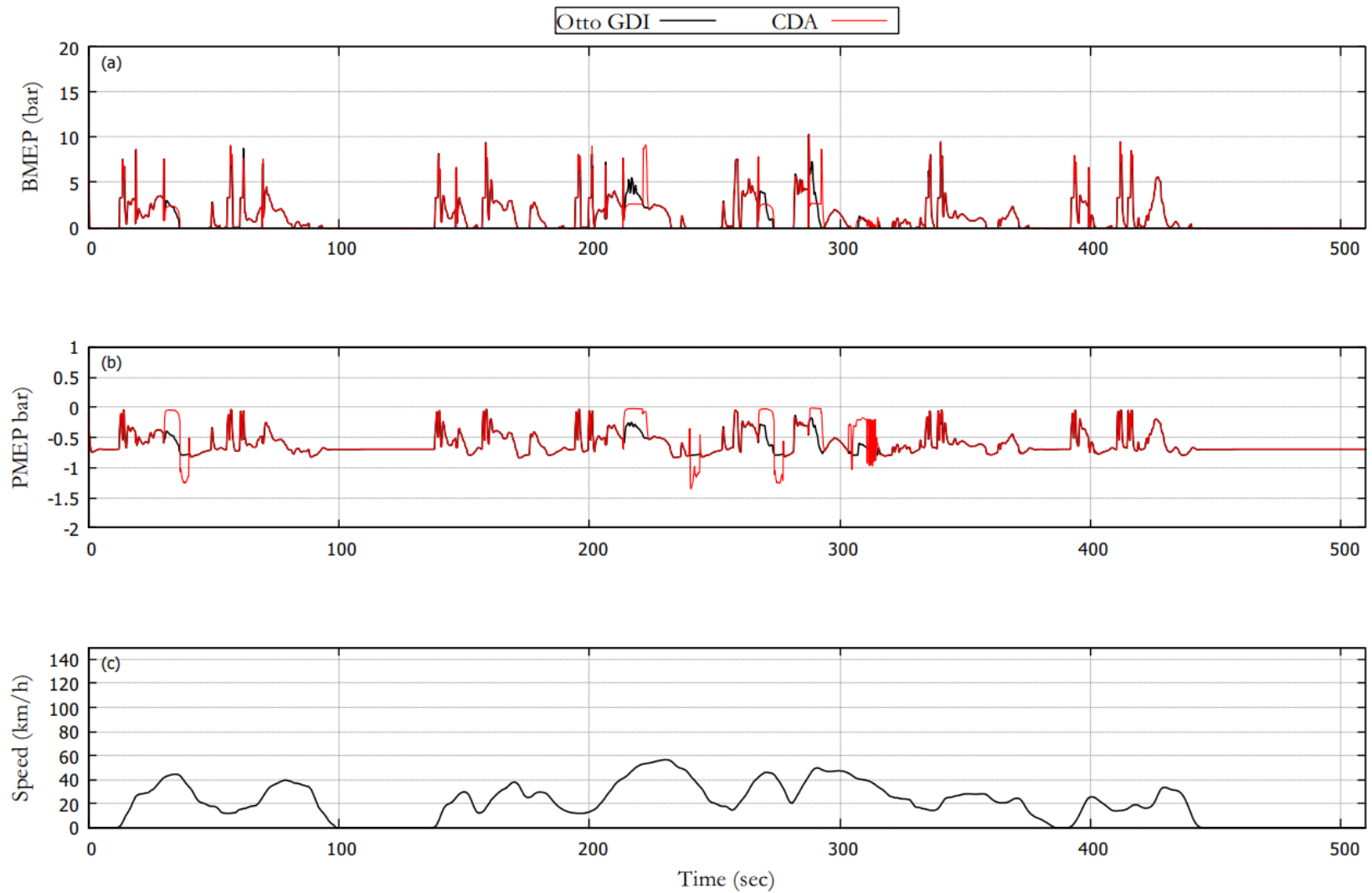
Σχήμα 5.13:(a): Ισχύς, (b): Ροπή για όλο τον κύκλο WLTC-3b.



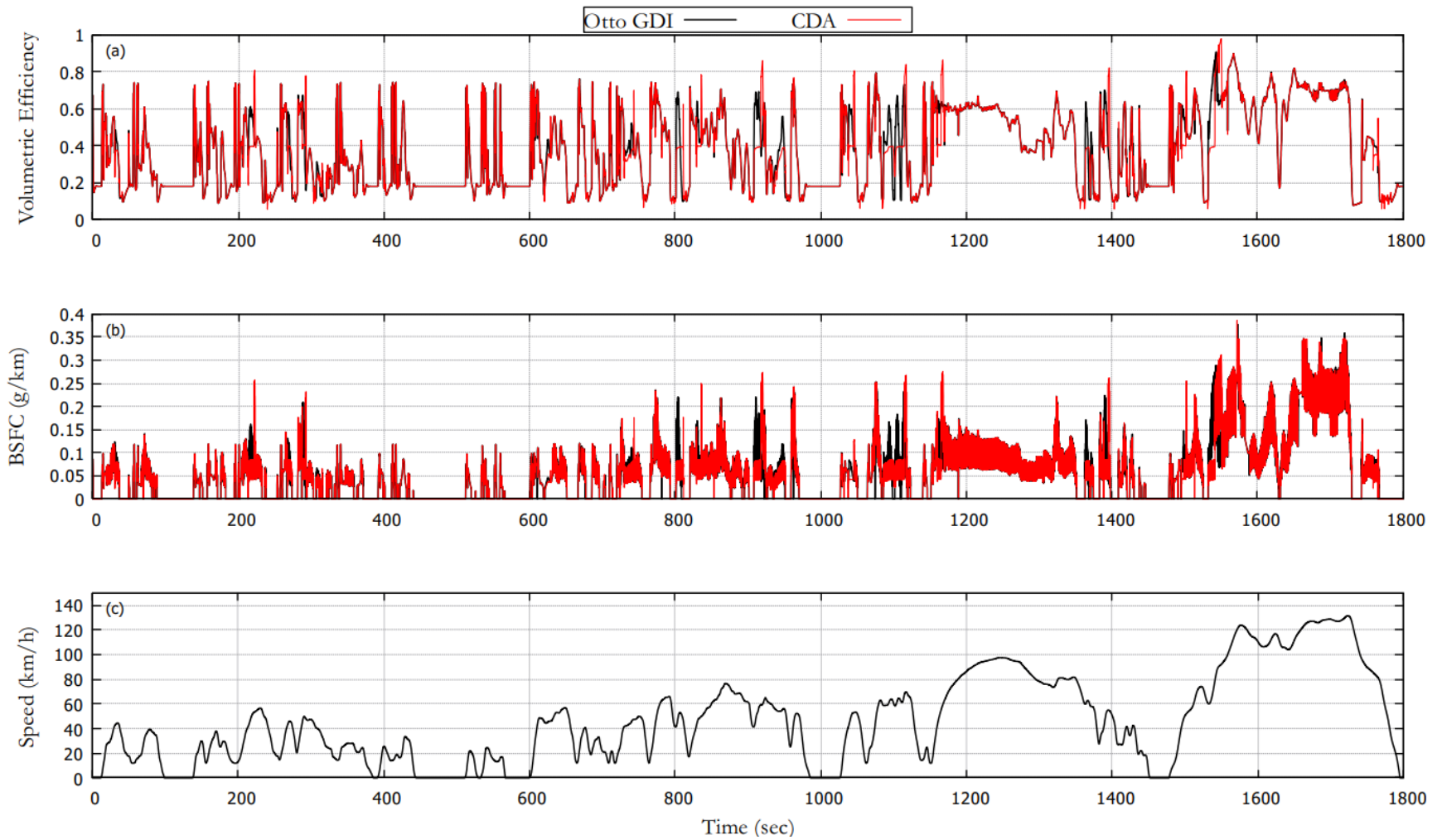
Σχήμα 5.14: (a): Ισχύς, (b): Ροπή για 0-510s.



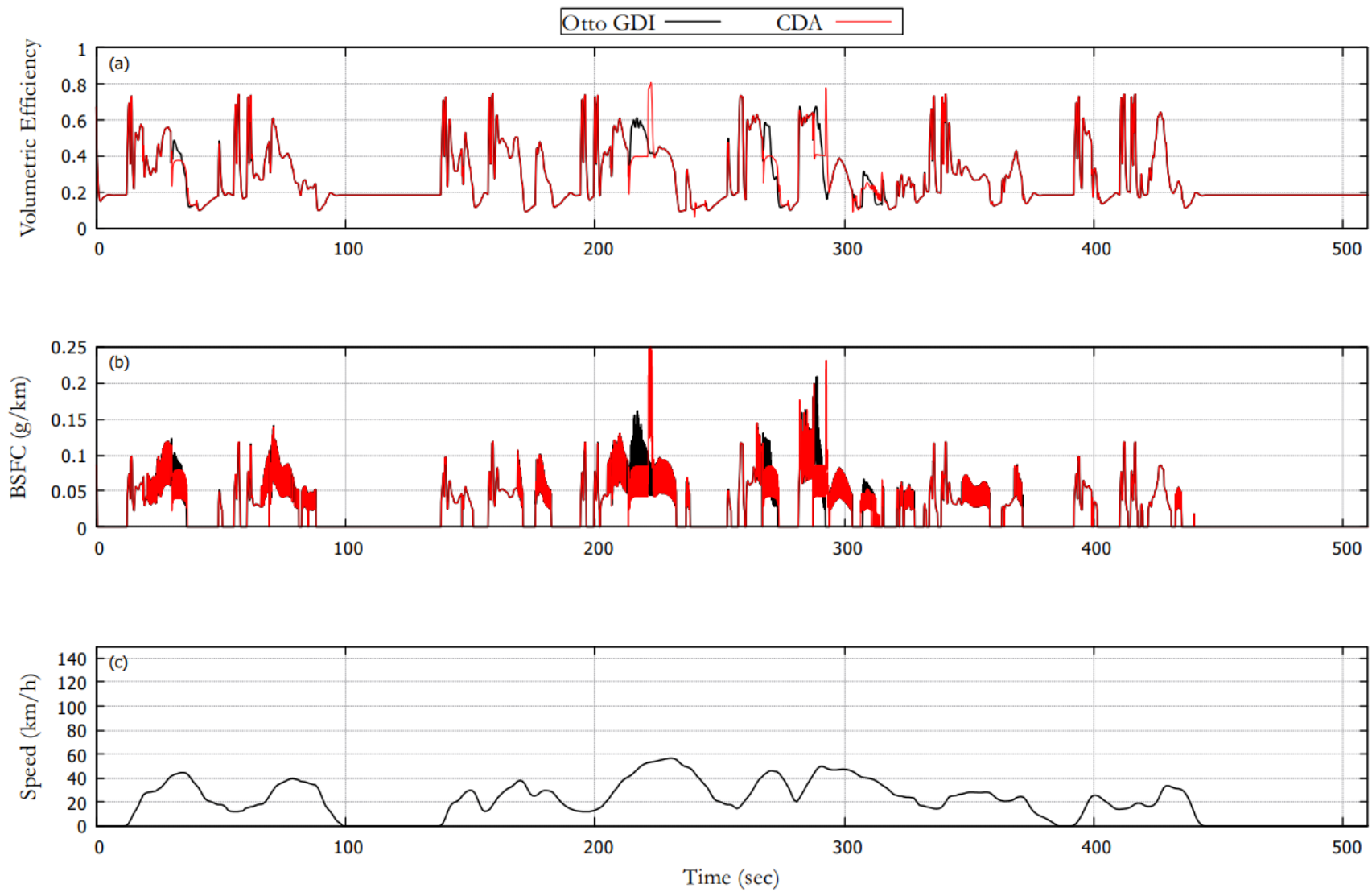
Σχήμα 5.15: (a) Μέση Πραγματική Πίεση, (b): Απώλειες εναλλαγής αερίων για όλο τον κύκλο WLTC-3b.



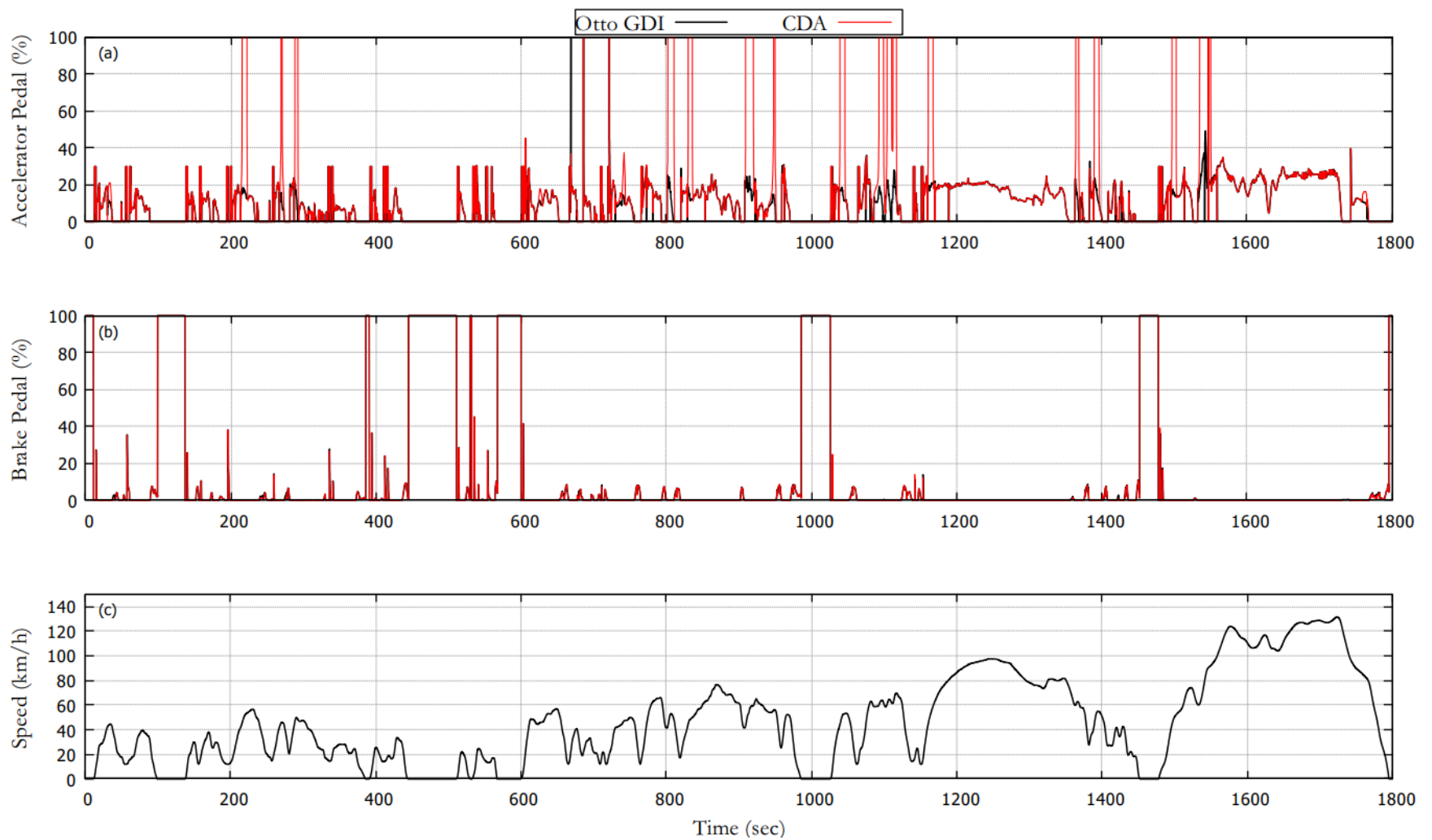
Σχήμα 5.16: (a): Μέση Πραγματική Πίεση, (b): Απώλειες εναλλαγής αερίων για 0 - 510s.



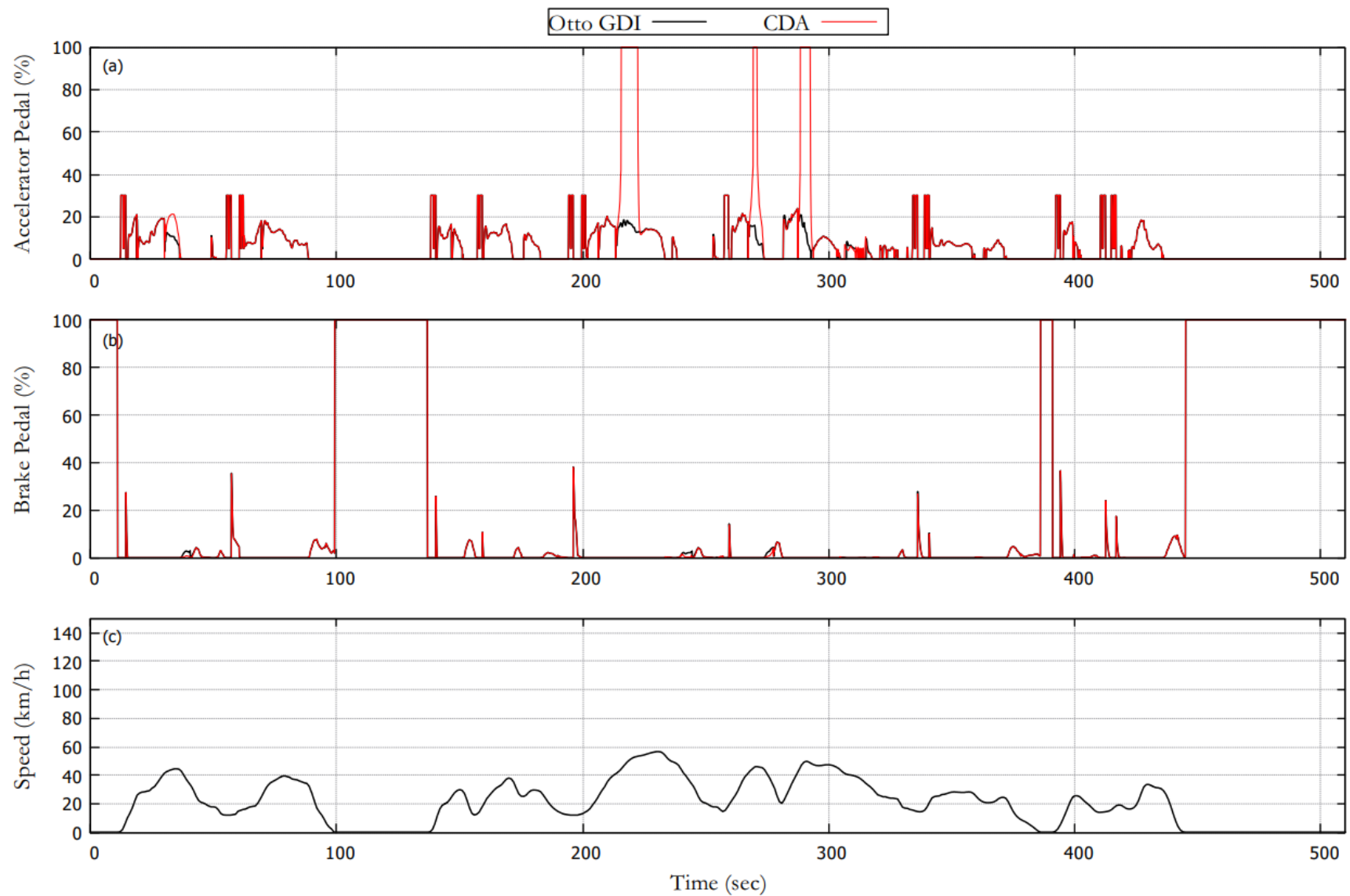
Σχήμα 5.17: (a): Ογκομετρικός Βαθμός Απόδοσης, (b): Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου για όλο τον κύκλο WLTC-3.



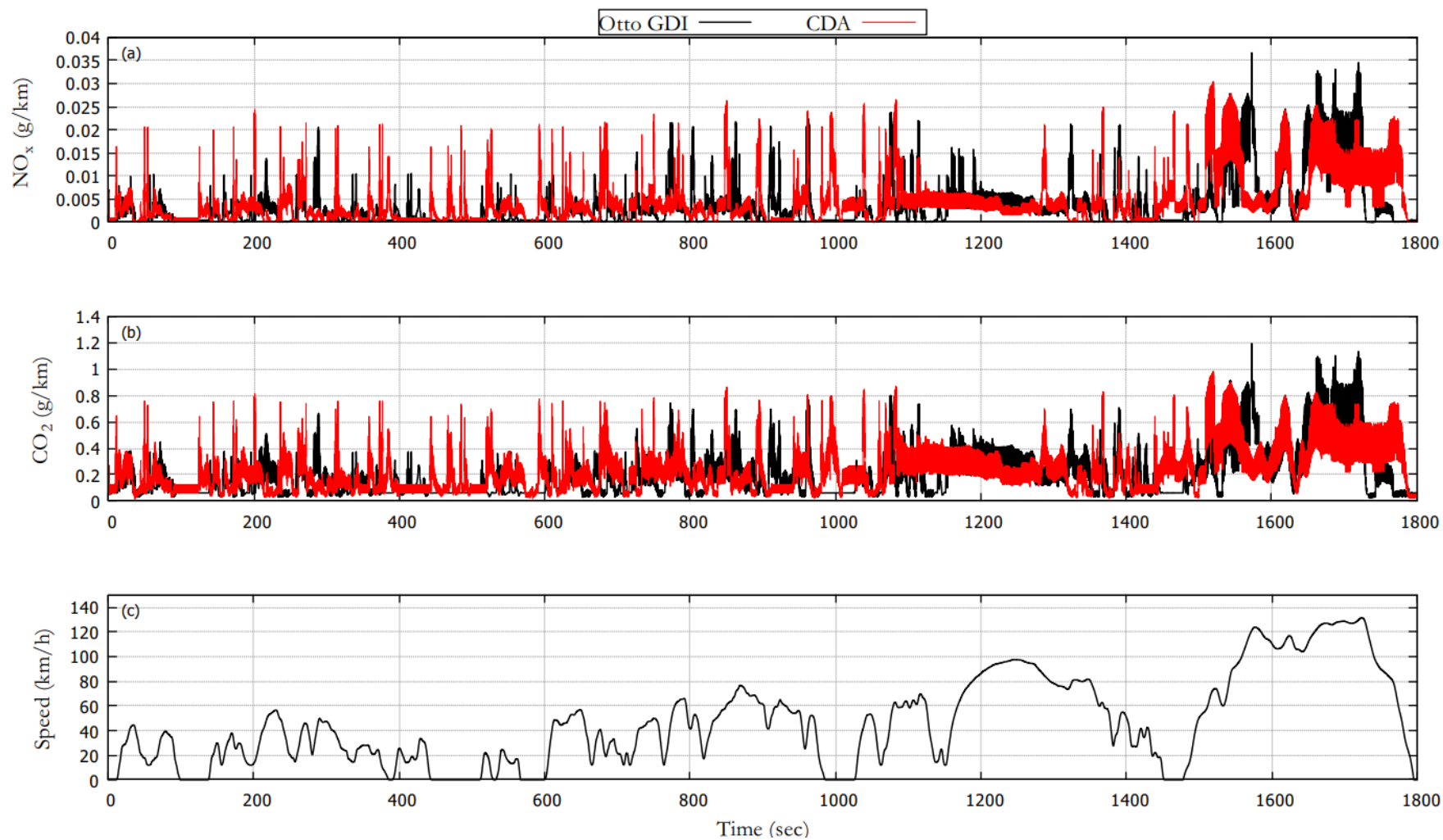
Σχήμα 5.18:(a): Ογκομετρικός Βαθμός Απόδοσης, (b): Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου για 0 - 510s.



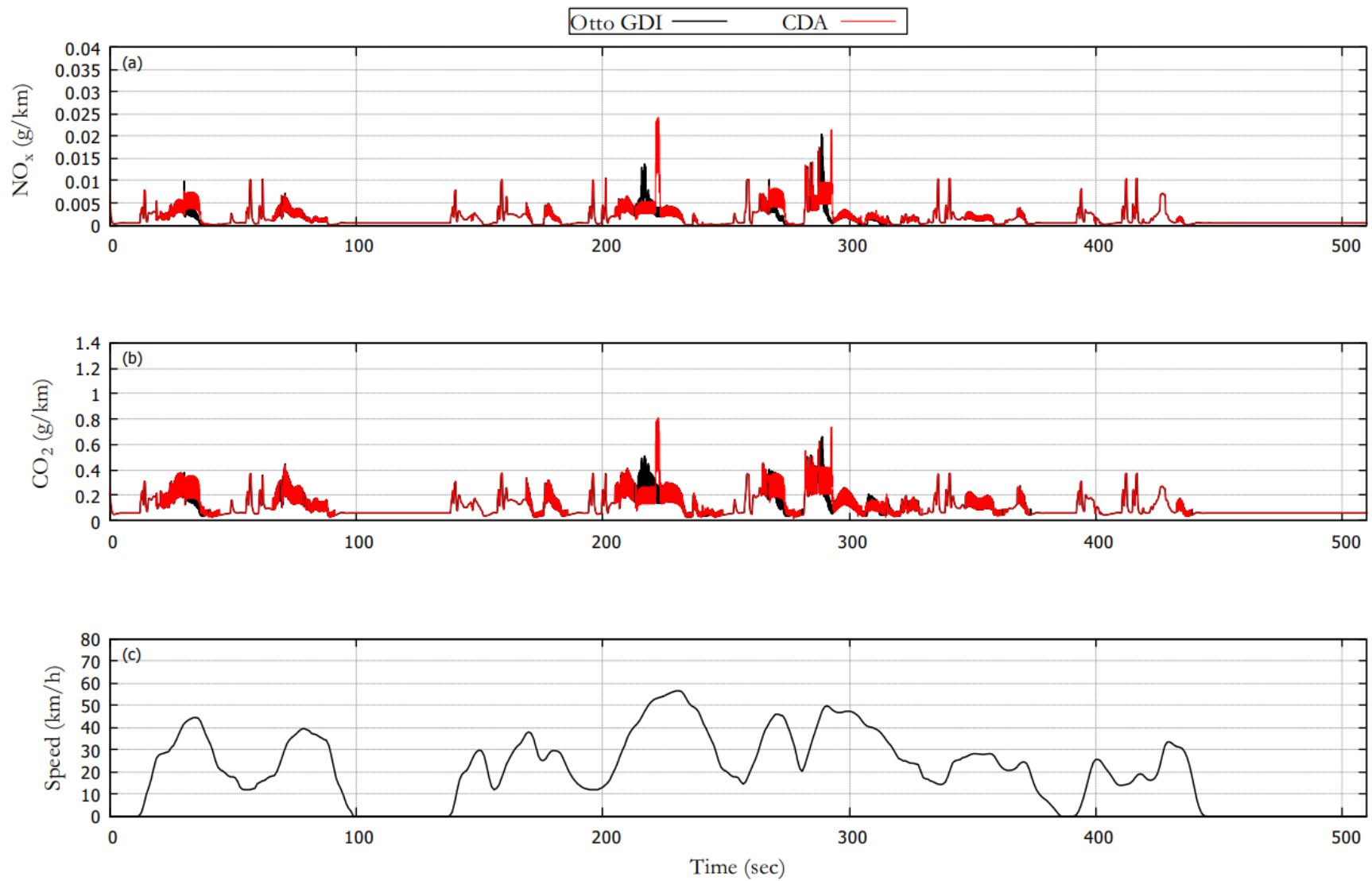
Σχήμα 5.19: Ποσοστό πατήματος πεντάλ (a): Επιτάχυνσης, (b): Πέδησης για όλο τον κύκλο WLTC-3b.



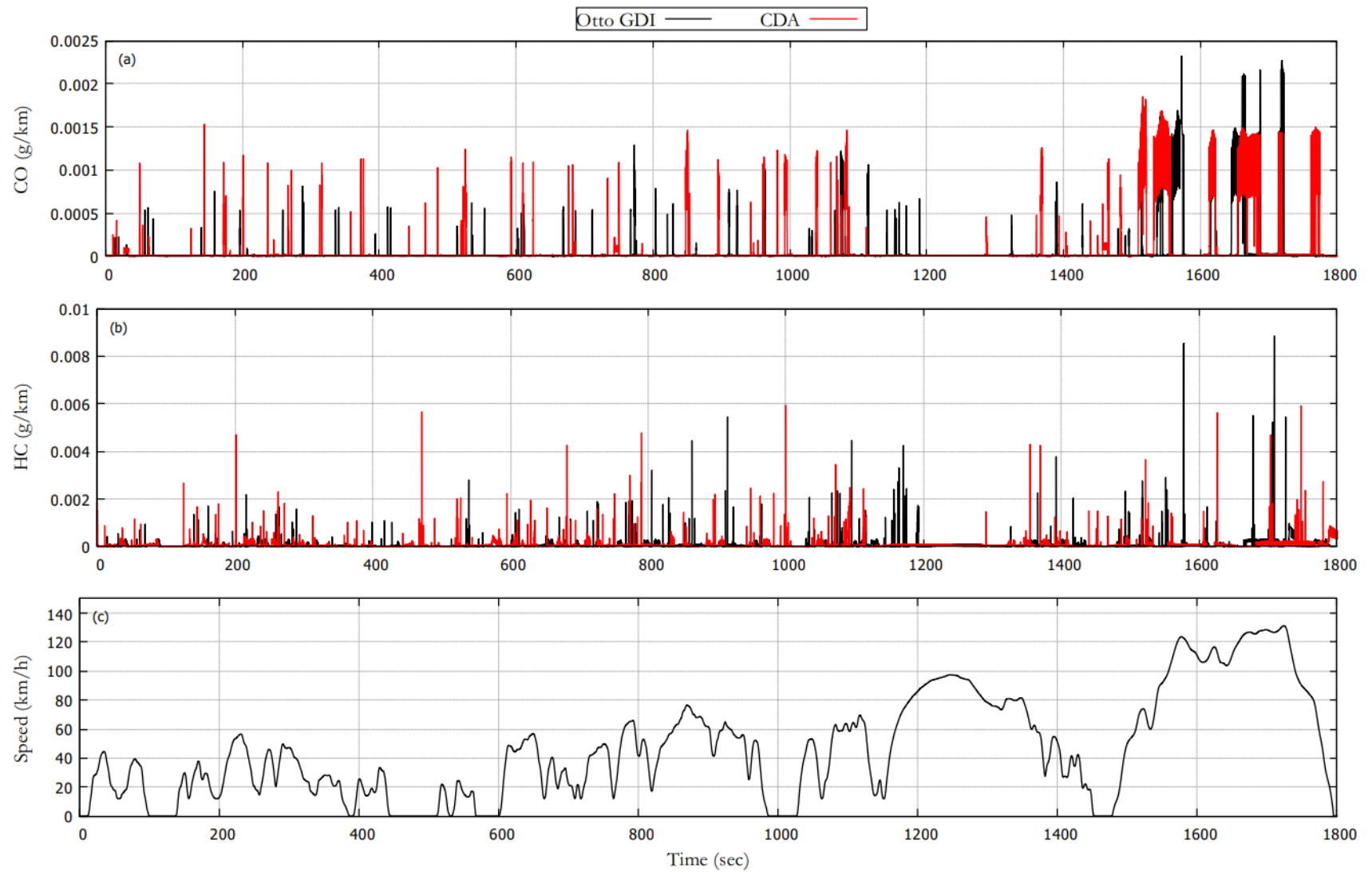
Σχήμα 5.20: Ποσοστό πατήματος πεντάλ (a): Επιτάχυνσης, (b): Πέδησης για 0 - 510s.



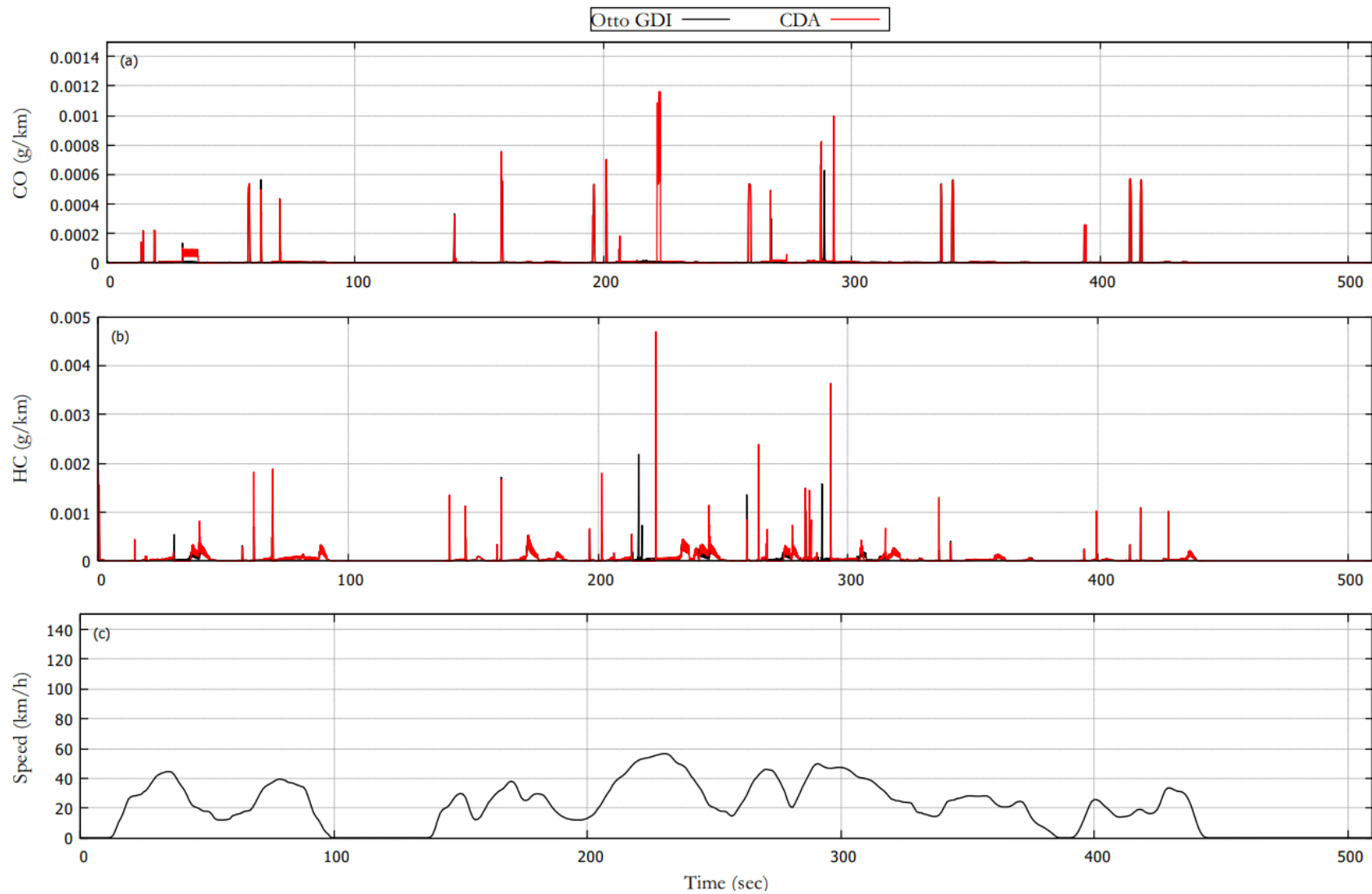
Σχήμα 5.21: Περιεκτικότητα καυσαερίου σε (a): NO_x, (b): CO₂ για όλο τον κύκλο WLTC-3b.



Σχήμα 5.22: Περιεκτικότητα καυσαερίου σε (a): NO_x, (b): CO₂ για 0 - 510s.



Σχήμα 5.23: Περιεκτικότητα καυσαερίου σε (a): CO και (b): HC για όλο τον κύκλο WLTC-3b.



Σχήμα 5.24: Περιεκτικότητα καυσαερίου σε (a): CO και (b): HC για 0 - 510s.

5.2. Γενικός Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Από τα διαγράμματα των δύο προσομοιώσεων παρατηρούνται διαφορές σε αρκετά μεγέθη των οχημάτων. Αρχικά, οι κύλινδροι που υπόκεινται σε απενεργοποίηση, παρουσιάζουν απότομη πτώση της θερμοκρασίας και της πίεσής τους, γεγονός που οφείλεται στην απουσία καύσης εντός τους. Από την άλλη, στους εν ενεργεία κυλίνδρους αυξάνονται και τα δυο μεγέθη για να παράξουν την απαιτούμενη ενέργεια για το όχημα. Μάλιστα, οι θερμοκρασίες έχουν άνοδο τάξης μεγέθους 100 K.

Επίσης, η απαίτηση μεγαλύτερης ισχύος από τους ενεργούς κυλίνδρους, δεν θα μπορούσε να μην επηρεάσει την υπερπλήρωση του κινητήρα. Έτσι, παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του ζεύγους στρόβιλος – συμπιεστή και του λόγου πίεσης του συμπιεστή. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις φαίνονται όταν ο κινητήρας είναι σε κατάσταση CDA και υπάρχει ένα τοπικό μέγιστο της ταχύτητας του οχήματος.

Σημαντική μείωση κατά την απενεργοποίηση παρατηρείται και στις απώλειες λόγω άντλησης (*PMEP-Pumping Mean Efficiency Pressure*). Αυτό οφείλεται στην απουσία ανάγκης για άντληση από τους μίσους κυλίνδρους.

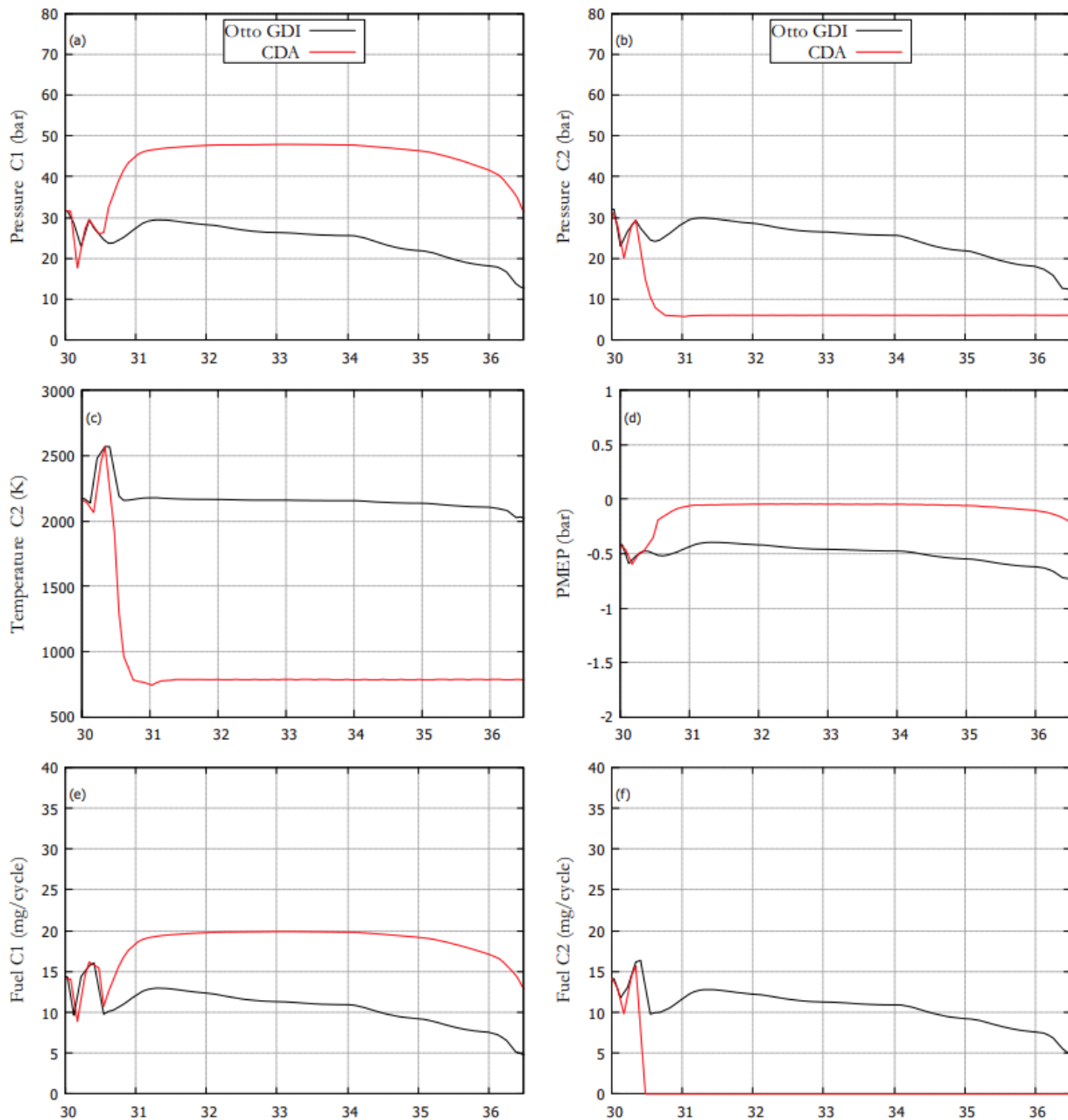
Πίνακας 5.1: Μέσος Όρος Απωλειών Αντλησης.

Μέσος Όρος PMEP	
Όχημα	Τιμή Μέσου Όρου
Otto GDI	-0.52487
CDA	-0.46625
Ποσοστό Μεταβολής	-11.17 %

Ταυτόχρονα, παρατηρείται μείωση στον Ογκομετρικό Βαθμό Απόδοσης σε CDA, ο οποίος εκφράζει τον πραγματικό όγκο αέρα προς τον θεωρητικό μέγιστο όγκο αέρα που μπορεί να χωρέσει εντός του κυλίνδρου. Αυτό είναι λογικό, καθώς ο συνολικός όγκος αέρα που εισέρχεται στον κινητήρα μειώνεται, με λιγότερους κυλίνδρους να είναι ενεργοί και να αναρροφούν αέρα.

Τέλος, στους απενεργοποιημένους κυλίνδρους, προφανώς η έγχυση μηδενίζεται στην κατάσταση CDA, διότι αυτή είναι η εντολή που δίνει το σύστημα ελέγχου. Στους υπολοίπους κυλίνδρους, όπως αναμενόταν, παρουσιάζεται αύξηση της ποσότητας, για την επίτευξη της απαιτούμενης ισχύος από τον κινητήρα.

Στο Σχήμα 5.25 φαίνονται οι διαφορές σε μεγέθη για μία ενδεικτική περίοδο απενεργοποίησης στο τμήμα εντός πόλης και συγκεκριμένα στα 30 ως 36.5 δευτερόλεπτα του κύκλου πόλης.



Σχήμα 5.25: (a): Πίεση Κυλίνδρου 1, (b): Πίεση Κυλίνδρου 2, (c): Θερμοκρασία Κυλίνδρου 2, (d): Απώλειες Εναλλαγής Αερίων, (e): Ποσότητα Εγγεόμενου Καυσίμου στον Κύλινδρο 1, (f): Ποσότητα Εγγεόμενου Καυσίμου στον Κύλινδρο 2 κατά τη διάρκεια απενεργοποίησης 30-36.5s.

5.2.1. Ειδική Κατανάλωση και Εκπομπές

Για την καλύτερη σύγκριση της ειδικής κατανάλωσης και των εκπομπών, πραγματοποιήθηκε μετατροπή των μεγεθών από g/kWh, που δίνει το πρόγραμμα, σε g/km. Στη συνέχεια, αμελήθηκαν οι ακραίες τιμές, καθώς πρόκειται για στιγμιαία υπολογιστικά σφάλματα. Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας σύγκρισης της Ειδικής Κατανάλωσης Καυσίμου (*BSFC – Brake Specific Fuel Consumption*) κατά χρονικές περιόδους του κύκλου WLTC.

Πίνακας 5.2: Ποσοστιαία μεταβολή του BSFC κατά χρονικές περιόδους του κύκλου WLTC.

Χρονική Περίοδος	BSFC			
	0 – 510 s	510 – 1022 s	1022 – 1800 s	0 – 1800 s
Ποσοστιαία Μεταβολή	-0.91%	-2.41%	-1.01%	-1.30%

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που διεξήχθη, παρατηρήθηκε μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου στο όχημα με CDA. Μάλιστα, σε όλον τον κύκλο είναι ίση με 1.30%. Αυτό αποδίδεται στην μείωση τόσο του εγγεόμενου καυσίμου, όσο και των απωλειών στους 2 ανενεργούς κυλίνδρους. Στην περίοδο 500-1022 εμφανίζεται το μεγαλύτερο όφελος, καθώς υπάρχουν αρκετά συχνές απενεργοποιήσεις. Τα διαγράμματα δείχνουν, επίσης, ότι η μείωση του BSFC είναι πιο έντονη σε σταθερές ταχύτητες και ελαφρά επιτάχυνση, όπου η κατανάλωση καυσίμου μειώνεται αισθητά λόγω της λειτουργίας του κινητήρα σε πιο αποδοτικές συνθήκες. Αυτό επιβεβαιώνει ότι η CDA είναι αποτελεσματική στη βελτίωση της κατανάλωσης καυσίμου, ιδιαίτερα σε συνθήκες οδήγησης που δεν απαιτούν μέγιστη ισχύ από τον κινητήρα.

Συνολικά, η ειδική κατανάλωση παρουσιάζει μείωση. Ωστόσο, με τις κατάλληλες αλλαγές στο μοντέλο της καύσης, όπως ρύθμιση του χρόνου ανάφλεξης, νέος προγραμματισμός του συστήματος ελέγχου του μείγματος καυσίμου-αέρα, μπορεί να οδηγήσει σε ακόμα πιο αποδοτική καύση.

Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας 5.3, όπου γίνεται η σύγκριση των NO_x, CO₂, CO, HC κατά χρονικές περιόδους του κύκλου WLTC-3b.

Πίνακας 5.3: Ποσοστιαία μεταβολή των εκπομπών κατά χρονικές περιόδους του κύκλου WLTC.

Χρονική Περίοδος	Ποσοστιαία Μεταβολή			
	0 – 510 s	510 – 1022 s	1022 – 1800 s	0 – 1800 s
CO₂	1.40%	-1.21%	-0.43%	-0.31%
NO_x	7.14%	2.97%	1.66%	2.57%
CO	22.92%	24.53%	12.48%	14.29%
HC	6.70%	-4.60%	32.88%	20.96%

Φαίνεται ότι η λειτουργία με απενεργοποίηση έχει επηρεάσει αρκετά τις εκπομπές του οχήματος. Αρχικά, παρατηρείται συνολική μείωση εκπομπών του CO₂, όπως ήταν αναμενόμενο, εφόσον η παραγωγή του συνδέεται άμεσα με τη μείωση της κατανάλωσης. Ωστόσο, στο τμήμα εντός πόλης (0-510s) παρουσιάζει αύξηση σε σύγκριση με το απλό όχημα, το οποίο πιθανόν να οφείλεται σε κάποιες ακραίες τιμές κατανάλωσης, καθώς τότε εμφανίζονται και οι μεγάλες τιμές του στο διάγραμμα του Σχήματος 5.22.

Έπειτα, οι εκπομπές των NO_x έχουν σε όλη τη διάρκεια του κύκλου θετική ποσοστιαία μεταβολή. Όπως αναφέρθηκε, η υψηλή θερμοκρασία και πίεση καύσης προέκυψε από την απαίτηση προς τους ενεργούς κυλίνδρους να δώσουν την απαιτούμενη ισχύ για το όχημα. Όμως οι υψηλές θερμοκρασίες καύσης αποτελούν τον βασικό παράγοντα που ευνοεί την οξειδωση του αζώτου. Για αυτόν το λόγο, σε όλη την προσομοίωση η ποσοστιαία μεταβολή είναι θετική.

Τα CO φαίνεται να έχουν και αυτά μεγαλύτερες τιμές. Κατά τη διάρκεια της απενεργοποίησης το μείγμα γίνεται πλουσιότερο. Αυτό σημαίνει ότι η καύση δεν μπορεί να είναι πλήρης, καθώς δεν υπάρχει αρκετό οξυγόνο για να μετατρέψει όλο τον άνθρακα του καυσίμου σε διοξείδιο του άνθρακα. Αντίθετα, παράγεται μονοξείδιο του άνθρακα, το οποίο είναι το προϊόν της ατελούς καύσης. Οι υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να αυξήσουν την ταχύτητα της καύσης, αλλά δεν μπορούν να αντισταθμίσουν την έλλειψη οξυγόνου που είναι απαραίτητο για την πλήρη καύση του καυσίμου σε CO₂. Το αποτέλεσμα είναι ότι οι εκπομπές CO παραμένουν υψηλές. Στο δεύτερο τμήμα του κύκλου πόλης παρατηρείται η μεγαλύτερη αύξηση, καθώς συμβαίνουν αρκετές απενεργοποιήσεις σημαντικής διάρκειας.

Τέλος, σημαντική άνοδο έχουν τα HC. Ιδιαίτερα στο τελευταίο κομμάτι του κύκλου (1022-1800s) όπου παρατηρούνται και κάποιες ακραίες τιμές. Η πτώση θερμοκρασίας του κυλίνδρου παίζει και εδώ σημαντικό ρόλο, καθώς από την εκ νέου ενεργοποίηση του κυλίνδρου και μέχρι να φτάσει ξανά την επιθυμητή θερμοκρασία λειτουργίας, είναι πιθανό αρκετό από το καύσιμο να βγει στα

καυσαέρια ως *HC*. Από την άλλη, όμως, αυτή η ποσότητα φαίνεται να μην είναι σημαντική στο δεύτερο τμήμα, όπου υπάρχουν αρκετές απενεργοποιήσεις. Από τα διαγράμματα, διαπιστώνεται ότι στις φάσεις απενεργοποίησης τα *HC* παρουσιάζουν πτωτική τάση. Επομένως, για το αν θα παρουσιαστεί αύξηση ή μείωση του ρύπου συνολικά, θα εξαρτηθεί από την ισορροπία ανάμεσα στα δύο αυτά δεδομένα.

6. Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

6.1. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε και αξιολογήθηκε η αξιοποίηση της τεχνολογίας απενεργοποίησης κυλίνδρων, με σκοπό την πρόβλεψη στην επίδραση στις εκπομπές και την κατανάλωση καυσίμου σε υπερπληρωμένο κινητήρα Otto GDI. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό GT-POWER, πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση του κινητήρα και εξετάστηκαν σενάρια λειτουργίας με και χωρίς απενεργοποίηση κυλίνδρων. Στη φάση CDA απενεργοποιούνται 2 κύλινδροι, κλείνοντας τις βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής και διακόπτοντας την παροχή καυσίμου. Οι συνθήκες απενεργοποίησης αντλούνται από αντίστοιχη βιβλιογραφία και προσαρμόζονται στο όχημα της προσομοίωσης.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η απενεργοποίηση κυλίνδρων μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών CO₂. Ωστόσο, παρατηρήθηκε και αύξηση σε εκπομπές, δηλαδή τα NO_x, CO₂, HC έδειξαν αυξητική τάση, που όμως αιτιολογείται από την σχετική θεωρία παραγωγής ρύπων. Τα αποτελέσματα αυτά είναι λογικό να προκύπτουν, καθώς η προσομοίωση της εργασίας έχει ως σκοπό να αναδείξει την επίδραση του συστήματος στον απλό κινητήρα, χωρίς περαιτέρω προσαρμογή στα επιμέρους συστήματά του. Με βελτιστοποίηση του μηχανισμού καύσης και αλλαγές σε διαστάσεις του κινητήρα, όπως στις σωληνώσεις, μπορεί να επιτευχθεί αποδοτικότερη καύση και λιγότερες εκπομπές ρύπων.

Παρακάτω, προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα, με στόχο την περαιτέρω βελτιστοποίηση και εφαρμογή της τεχνολογίας στους κινητήρες εσωτερικής καύσης.

6.2. Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Στην ενότητα αυτή αναφέρονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα με στόχο την εξέλιξη και την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση της τεχνολογίας CDA. Αναγνωρίζοντας τις δυνατότητές της, είναι σημαντικό να μελετηθούν νέες εφαρμογές που θα οδηγήσουν σε αποδοτικότερη λειτουργία του κινητήρα, συμβάλλοντας έτσι στην επίλυση σημαντικών περιβαλλοντικών και ενεργειακών προκλήσεων.

- Αρχικά, προτείνεται η διερεύνηση ενσωμάτωσης της τεχνολογίας CDA σε υβριδικά συστήματα κίνησης. Η συνδυασμένη ανάλυση θα μπορούσε να αποκαλύψει νέες δυνατότητες για τους υβριδικούς κινητήρες.
- Άλλο ένα πεδίο έρευνας για την τεχνολογία, είναι η χρήση εναλλακτικών καυσίμων, όπως βιοκαύσιμα ή συνθετικά καύσιμα, για να εξεταστεί πώς επηρεάζεται η αποδοτικότητα της απενεργοποίησης κυλίνδρων με τη χρήση αυτών των καυσίμων. Η έρευνα θα μπορούσε να εστιάσει στη συμπεριφορά της καύσης, την επίδραση στη θερμοκρασία του θαλάμου καύσης, και τις πιθανές μεταβολές στην απόδοση και την ανθεκτικότητα των εξαρτημάτων του κινητήρα.
- Ενδιαφέρουσα είναι και η μελέτη αλληλεπίδρασης της τεχνολογίας CDA με τα συστήματα EGR. Θα ήταν χρήσιμο να διερευνηθεί ο τρόπος με τον οποίο το σύστημα EGR συνεργάζεται με την απενεργοποίηση κυλίνδρων για τη βελτίωση της θερμικής κατανομής και της καύσης. Επιπλέον, προτείνεται να εξεταστεί η αλληλεπίδραση της τεχνολογίας με το σύστημα Start-Stop. Έπειτα, προτείνεται να διερευνηθεί η συνδυαστική εφαρμογή των συστημάτων EGR και Start-Stop με την απενεργοποίηση κυλίνδρων.
- Τέλος, κρίνεται σημαντικό να εξεταστεί η δυναμική αλλαγή των ενεργών κυλίνδρων σε πραγματικό χρόνο, με τη βοήθεια αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης (*AI - Artificial Intelligence*) και μηχανικής μάθησης (*ML - Machine Learning*). Η εφαρμογή αυτών των αλγορίθμων μπορεί να επιτρέψει την προσαρμογή της λειτουργίας των κυλίνδρων ανάλογα με τις απαιτήσεις του οδηγού και τις συνθήκες οδήγησης, παρέχοντας βέλτιστη ισχύ και αποδοτικότητα.

Κατάλογος Αναφορών

- [1] J. M. Ortiz-Villajos, «Patents, what for? the case of crossley brothers and the introduction of the gas engine into Spain, c. 1870–1914», *Business History*, vol.56, no.4, pp.650–676, 2014. doi:10.1080/00076791.2013.837890.
- [2] Κ.Δ. Ρακόπουλος, Δ.Θ. Χουντάλας, Καύση-Ρύπανση Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ. Greek. Εκδόσεις Φούντας.
- [3] X. Y. Kangfeng Sun Fenzhu Ji, K. Jiang, and S. Yang, «A particle filter for ammonia coverage ratio and input simultaneous estimations in diesel-engine scr system», *PLOS ONE*, vol. 13, 2018. doi: 10.1371/journal.pone.0192217.
- [4] A. K. Roman Gogola, «Electronic control of fuel mixture preparation and injection in internal combustion engines», *American Journal of Mechanical Engineering*, vol. 2, pp. 231–238, 2014. doi: 10.12691/ajme-2-7-12.
- [5] Κ.Δ. Ρακόπουλος, Ε.Γ. Γιακουμής, Εναλλαγή αερίων και υπερπλήρωση ΜΕΚ, Greek. Εκδόσεις Φούντας, 2011.
- [6] S. Fallah, *Electric and Hybrid Vehicles - Technologies, Modeling and Control: A Mechatronic Approach*. 2014
- [7] G. Peters, *Cylinder deactivation on 4 cylinder engines: a torsional vibration analysis (DCT rapporten)*, English. Technische Universiteit Eindhoven, 2007, DCT 2007.011.
- [8] F. T., N. T., E. H., and K. T. et al., «Mitsubishi orion-md - a new variable displacement engine 831007», English, p. 12, 1983, issn: 0148-7191. doi: 10.4271/831007.
- [9] M. R. and U. M., «Valve selector hardware», p. 16, 1978, issn: 0148-7191. doi: 10.4271/780146.
- [10] B. A. and S. J., «Piston and valve deactivation for improved part load performances of internal combustion engines», 2011. doi: 10.4271/2011-01-0368.

- [11] I. Friedrich, «Zylinderabschaltung für alle hubkolbenmotoren?», MTZ - Motortechnische Zeitschrift, vol. 72, pp. 712–715, 2011, issn: 2192-8843. doi: 10.1365/s35146-011-0163-7.
- [12] Wilcutts, Mark, Switkes, Joshua, Shost, Mark, and Tripathi, Adya, «Design and benefits of dynamic skip fire strategies for cylinder deactivated engines», SAE International Journal of Engines, vol. 6, no. 1, pp. 278–288, 2013, issn: 1946-3936. doi: 10.4271/2013-01-0359.
- [13] M. Fujiwara, K. Kumagai, and M. S. et al., «Development of a 6-cylinder gasoline engine with new variable cylinder management technology», p. 10, 2008, issn: 0148-7191. doi: 10.4271/2008-01-0610.
- [14] M. Stabinsky, W. Albertson, J. Tuttle, and e. a. David Kehr, «Hardware development on a 2007 gm 3.9l v-6 ohv si engine», p. 16, 2007, issn: 0148- 7191. doi: 10.4271/2007-01-1292.
- [15] W. R. Hoffmann Hermann Loch Adam, K. Gerhard, M. Daniel, and R. Martin, «Cylinder deactivation for valve trains with roller finger follower», MTZ worldwide, vol. 70, pp. 26–30, 2009, issn: 2192-9114. doi: 10.1007/BF03226942.
- [16] E. Y. Andrei Radulescu Leighton Roberts, «Durability and reliability demonstration for switching roller finger follower in cylinder deactivation systems», SAE Technical Paper, 2015, issn: 0148-7191. doi: 10.4271/2015-01-2816.
- [17] C. P. Radulescu Andrei Krishnasamy Venkateswaran, Switching Response Optimization for Cylinder Deactivation with Type II Passenger Car Applications. 2014. doi: 10.4271/2014-01-1704.
- [18] T. A. Hayato Maehara Shunsuke Kitawaki, S. Saito, and T. Tsukui, Development of variable cylinder management system for large motorcycles- an effective way of reducing output change at switching of the number of working cylinders, 2010. doi: 10.4271/2010-32-0117.
- [19] A. Ihlemann and N. Nitz, «Cylinder deactivation a technology with a future or a niche application?», Schaeffler Symp, pp. 173–187, 2014.
- [20] L. L. Middendorf H. Theobald J. and H. K., «The 1.4l tsi gasoline engine with cylinder deactivation.», MTZ worldwide, vol. 73, pp. 4–9, 2012. doi: 10.1365/s38313-012-0147-0.

-
- [21] S. M. Faust Hartmut, «Potentials and constraints of cylinder deactivation in the powertrain», MTZ worldwide, vol. 77, pp. 72–77, 2016, issn: 2192-9114. doi: 10.1007/s38313-016-0046-x.
- [22] F. Millo, M. Mirzaeian, S. Luisi, V. Doria, and A. Stroppiana, «Engine displacement modularity for enhancing automotive s.i. engines efficiency at part load», Fuel, vol. 180, pp. 645–652, 2016, issn: 0016-2361. doi: 10.1016/j.fuel.2016.04.049.
- [23] B. M. Flierl Rudolf Lauer Frederic and H. Wilhelm, «Cylinder deactivation with mechanically fully variable valve train», SAE International Journal of Engines, vol. 5, pp. 207–215, 2012. doi: 10.4271/2012-01-0160.
- [24] M. C. Joshi, D. B. Gosala, C. M. Allen, et al., «Reducing diesel engine drive cycle fuel consumption through use of cylinder deactivation to maintain aftertreatment component temperature during idle and low load operating conditions», Frontiers in Mechanical Engineering, vol. 3, p. 8, 2017. doi: 10.3389/fmech.2017.00008.
- [25] R. A. e. a. Gosala DB Allen CM, «Cylinder deactivation during dynamic diesel engine operation.», International Journal of Engine Research., vol. 18, 2017. doi: 10.1177/1468087417694000.
- [26] J. Zammit, M. McGhee, P. Shayler, and I. Pegg, «Benefits of cylinder deactivation on a diesel engine and restrictions due to low boost», in Internal Combustion Engines: Performance, Fuel Economy and Emissions, Woodhead Publishing, 2013, pp. 95–108, isbn: 978-1-78242-183-2. doi: 10.1533/9781782421849.3.95.
- [27] F. D. e. a. Ding C Roberts L, «Fuel efficient exhaust thermal management for compression ignition engines during idle via cylinder deactivation and flexible valve actuation.», International Journal of Engine Research., vol. 6, pp. 619–630, 2016. doi: 10.1177/1468087415597413.
- [28] M. B. Rudolf Flierl Frederic Lauer and W. Hannibal, «Cylinder deactivation with mechanically fully variable valve train», SAE International Journal of Engines, vol. 5, pp. 207–215, 2012. doi: 10.4271/2012-01-0160.

- [29] N. Morris, M. Mohammadpour, R. Rahmani, P. Johns-Rahnejat, H. Rahnejat, and D. Dowson, «Effect of cylinder deactivation on tribological performance of piston compression ring and connecting rod bearing», *Tribology International*, vol. 120, pp. 243–254, 2018, issn: 0301-679X. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.12.045>.
- [30] E. Giakoumis, *Driving and Engine Cycles*. Springer, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-49034-2.
- [31] S. M. A. Rahman, I. M. R. Fattah, H. C. Ong, et al., «State-of-the-art of establishing test procedures for real driving gaseous emissions from light- and heavy-duty vehicles», *Energies*, vol. 14, no. 14, 2021, issn: 1996-1073. doi: 10.3390/en14144195.
- [32] F. R. Pierre-Louis Ragon, *Avoiding a gap between certified and real-world co 2 emissions: Technical considerations for on-board fuel consumption measurements in trucks*, 2021
- [33] Στάμος Ιωάννης, *Μελέτη επιδόσεων και εκπομπών ρύπων επιβατικού οχήματος με κινητήρα Otto GDI με ηλεκτρικά υποβοηθούμενη στροβιλο-υπερπλήρωση κατά τη διάρκεια του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC*, 2022.
- [34] U. Spicher and T. Heidenreich, «Stratified-charge combustion in direct injection gasoline engines», in *Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development*, H. Zhao, Ed., vol. 1, Woodhead Publishing, 2010, pp.20–44, isbn:978-1-84569-389-3, doi:10.1533/9781845697327.20.