

Προσομοίωση επίδρασης της
θερμοκρασίας περιβάλλοντος στις
επιδόσεις και στις εκπομπές ρύπων
πετρελαιοκίνητου ελαφρού
φορτηγού κατά τη διάρκεια του
παγκόσμιου κύκλου WLTC

Τομέας: Θερμότητας

Επιβλέπων: Ευάγγελος Γιακουμής, Καθηγητής ΕΜΠ



PANAGIOTIS KOUTRAS

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

Simulating the effect of ambient temperature on the performance and emissions of a diesel light truck during the global WLTC cycle

Section: Thermal engineering

Supervisor: Evangelos Giakoumis, Professor NTUA



Athens 2023

--- κενή σελίδα ---

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

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

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

Κούτρας Παναγιώτης

Πρόλογος

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Ευάγγελο Γιακουμή για τις γνώσεις που αποκόμισα κατά την διδασκαλία των μαθημάτων του, αλλά και για την καθοδήγηση και το χρόνο που αφιέρωσε προκειμένου να εκπονηθεί η παρούσα εργασία.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την στήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου στο Πολυτεχνείο.

Περιεχόμενα

Πίνακας συμβόλων	8
Εισαγωγή	9
Abstract	10
1. Υπερπλήρωση Μ.Ε.Κ.	11
1.1 Ορισμός και επιδίωξη της υπερπλήρωσης ΜΕΚ.....	11
1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της υπερπλήρωσης ΜΕΚ.....	13
1.3 Μέθοδοι υπερπλήρωσης ΜΕΚ.....	14
1.3.1 Με βάση τον τρόπο κίνησης του συμπιεστή	14
1.3.2 Με βάση τον σχεδιασμό του συμπιεστή	15
1.3.3 Με βάση τον τρόπο σύνδεσης.....	16
2. Στροβιλο-υπερπλήρωση.....	19
2.1 Βασικές αρχές στροβιλο-υπερπλήρωσης	19
2.1.1 Γενικά	19
2.1.2 Διάταξη στροβίλου – συμπιεστή	19
2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της στροβιλο-υπερπλήρωσης.....	22
2.3 Επίδραση ψύξης του αέρα υπερπλήρωσης.....	24
3. Σχηματισμός και εκπομπή ρύπων από κινητήρες Diesel	27
3.1 Σχηματισμός οξειδίων του αζώτου NOx.....	27
3.1.1 Γενικά στοιχεία.....	27
3.1.2 Μηχανισμός σχηματισμού μονοξειδίου του αζώτου NO.....	28
3.1.3 Μηχανισμός σχηματισμού μονοξειδίου του αζώτου NO ₂	29
3.1.4 Επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας στις εκπομπές NOx.....	30
3.2 Εκπομπές σωματιδίων αιθάλης.....	31
3.2.1 Γενικά στοιχεία.....	31
3.2.2 Μηχανισμός σχηματισμού σωματιδίων αιθάλης.....	31
3.2.3 Σωματίδια αιθάλης σε κινητήρες Diesel.....	32
3.3 Εκπομπές καυσαερίων κατά τη μεταβατική λειτουργία	33
4. Επίδραση της εξωτερικής θερμοκρασίας.....	34
5. Μεταβατικοί κύκλοι πόλης.....	35
5.1 Γενικά	35
5.2 Δυναμόμετρα	36
Δυναμόμετρα πλαισίου	36
5.3 Μετρήσεις εκπομπών	38
5.4 Μεταβατικός κύκλος WLTC.....	39
6. Μοντελοποίηση οχήματος στο υπολογιστικό πακέτο GT-Power	42
6.1 Εισαγωγή στο λογισμικό GT-Suite	42
6.2 Εισαγωγή στο υποπρόγραμμα GT – Power	43
6.3 Μοντελοποίηση κινητήρα προσομοίωσης.....	45
6.3.1 Χαρακτηριστικά κινητήρα.....	45

6.3.2	Μοντελοποίηση επιμέρους τμημάτων	46
6.4	Μοντελοποίηση οχήματος και διάταξης δοκιμών	53
6.4.1	Κυρίως όχημα (αμάξωμα, σύστημα διεύθυνσης, σύστημα πέδησης).....	53
6.4.2	Σύστημα μετάδοσης κίνησης	54
6.4.3	Στοιχεία ελέγχου λειτουργίας.....	55
7.	Αποτελέσματα δοκιμών σε μεταβατικό κύκλο πόλης WLTC.....	58
7.1	Περιγραφή διαδικασίας δοκιμών και παραμέτρων	58
7.2	Υλοποίηση μεταβατικού κύκλου πόλης WLTC	60
	Σχολιασμός και συγκρίσεις αποτελεσμάτων.....	66
7.3	Αποδόσεις ζεύγους στροβίλο-υπερπλήρωσης και κινητήρα	67
7.3.1	Σχολιασμός και συγκρίσεις αποτελεσμάτων	75
7.3.2	Πίνακες συγκρίσεων διαγραμμάτων επίδοσεων	77
7.4	Εκπομπές.....	82
7.4.1	Σχολιασμός και συγκρίσεις αποτελεσμάτων	86
7.4.2	Πίνακες συγκρίσεων διαγραμμάτων επίδοσης	88
8.	Αξιολόγηση δεδομένων και εξαγωγή συμπερασμάτων	90
	Βιβλιογραφία	91

Πίνακας συμβόλων

Μέγεθος	Περιγραφή	Μονάδες
D_p	Διάμετρος σωματιδίων	m
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας	m/s^2
L	Μήκος διωστήρα	m
n	Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα	rpm
P_e	Πραγματική ισχύς	W
n_{TC}	Ταχύτητα περιστροφής ζεύγους συμπιεστή-στροβίλου	rpm
A_E	Επιφάνεια εμβόλου κυλίνδρου	m^2
c_e	Μέση ταχύτητα εμβόλου	m/s
\bar{p}_e	Μέση πραγματική πίεση	bar
p_1	Πίεση στην είσοδο του συμπιεστή	bar
p_2	Πίεση στην έξοδο του συμπιεστή	bar
r	Ακτίνα στροφάλου	m
R	Παγκόσμια σταθερά αερίων	$KJ/(kgK)$
s	Διαδρομή εμβόλου	m
V_h	Όγκος εμβολισμού	K
z	Αριθμός κυλίνδρων	-
γ	Ισεντροπικός εκθέτης	-
η_{is}	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης	%
T_1	Θερμοκρασία στην είσοδο του συμπιεστή	K
T_2	Θερμοκρασία στην έξοδο του συμπιεστή	K
T_{in}	Θερμοκρασία αέρα υπερπλήρωσης στην έξοδο του ψυγείου	K
T_w	Θερμοκρασία ψυκτικού υγρού στην έξοδο του ψυγείου	K
λ_α	Λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου	-
AFR	Λόγος αέρα-καυσίμου	kg_{air}/kg_{fuel}

Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την επίδραση των εξωτερικών συνθηκών περιβάλλοντος στις επιδόσεις και στις εκπομπές ρύπων ελαφρού φορτηγού οχήματος που φέρει τετράχρονο στροβίλο-υπερπληρωμένο κινητήρα Diesel. Η επίδραση των εξωτερικών συνθηκών περιβάλλοντος έγκειται στη μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Η προσομοίωση του κινητήρα, του οχήματος και της διάταξης των δοκιμών πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου GT POWER (Gamma Technologies Inc) που χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία μηχανών εσωτερικής καύσης με αξιόπιστα αποτελέσματα.

Στις ενότητες που ακολουθούν γίνεται καταγραφή των επιδόσεων και των ρύπων τού υπό μελέτη οχήματος κατά τη διάρκεια του μεταβατικού κύκλου πόλης WLTC για εύρος διαφόρων θερμοκρασιών περιβάλλοντος από ακραίο ψύχος (-15°C) έως ακραία ζέστη (+45°C)

Με την ολοκλήρωση των παραπάνω δοκιμών γίνεται σύγκριση και αξιολόγηση των δεδομένων για να εξαχθούν συμπεράσματα που συνάδουν με την υπάρχουσα θεωρητική γνώση ως προς τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός κινητήρα και τους μηχανισμούς σχηματισμού ρύπων στο εσωτερικό των κυλίνδρων των μηχανών εσωτερικής καύσης.

Abstract

This study deals with the effect of external environmental conditions on the performance and emissions of a light truck powered by a four-stroke turbocharged Diesel engine. The effect of external environmental conditions lies in the change of ambient temperature.

The simulation of the engine, vehicle and test set-up was carried out using the GT POWER (Gamma Technologies Inc) software which is widely used in the internal combustion engine industry with reliable results.

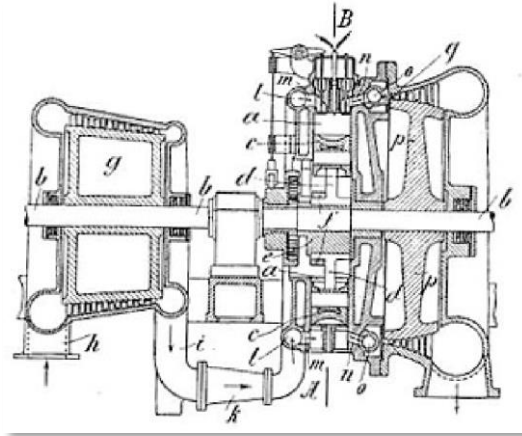
The following sections record the performance and emissions of the vehicle under study during the WLTC transient city cycle for ambient temperatures ranging from extreme cold (-15°C) to extreme heat (+45°C).

Upon completion of the above tests, the data is compared and evaluated to draw conclusions that are consistent with the existing theoretical knowledge regarding the factors that affect the performance of an engine and the mechanisms of pollutant formation inside the cylinders of internal combustion engines.

1. Υπερπλήρωση Μ.Ε.Κ.

1.1 Ορισμός και επιδίωξη της υπερπλήρωσης ΜΕΚ

Η υπερπλήρωση είναι μια «τεχνική» για την αύξηση της ισχύος των μηχανών εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ.), η οποία στην πλέον διαδεδομένη μορφή της, τη στροβίλο-υπερπλήρωση, επιπλέον βελτιώνει και το βαθμό απόδοσης των κινητήρων (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1 : Το πρώτο κατοχυρωμένο σχέδιο ευρεσιτεχνίας στροβίλοσυμπιεστή από τον Ελβετό μηχανολόγο μηχανικό Alfred Buchi το έτος 1896

Ως υπερπλήρωση ορίζεται η προ-συμπίεση μέρους ή όλης της γόμωσης εξωτερικά του κυλίνδρου με τη χρήση μηχανολογικού εξοπλισμού (συνήθως συμπιεστή).

Η αύξηση της πίεσης του αέρα με την εφαρμογή των μεθόδων υπερπλήρωσης επιτυγχάνει:

- Αύξηση της πυκνότητας του αναρροφώμενου αέρα
- Αύξηση της παροχής μάζας αέρα στον κύλινδρο
- Αύξηση της παροχής μάζας καυσίμου που δύναται να καεί εντός του κυλίνδρου που συντελεί στην βασική επιδίωξη της υπερπλήρωσης, την
- Αύξηση της ισχύος ενός δεδομένου κινητήρα, χωρίς αύξηση της ταχύτητας περιστροφής

Η παραπάνω επιδίωξη καθίσταται ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα εάν ληφθούν υπόψη τα τεχνολογικά όρια που υπάρχουν ως προς την περαιτέρω αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος, η οποία δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P_e = z V_h \bar{p}_e \frac{n}{30 K} = z A_\varepsilon s \bar{p}_e \frac{n}{30 K} = z A_\varepsilon \bar{p}_e \frac{c_e}{30 K} \quad (1.1)$$

όπου $K=2$ για 2-Χ κινητήρα και $K=4$ για 4-Χ κινητήρα, d η διάμετρος του εμβόλου και s η διαδρομή αυτού.

Από τον παραπάνω τύπο γίνεται αντιληπτό ότι για δεδομένο κινητήρα, με συγκεκριμένο αριθμό κυλίνδρων z και επιφάνεια εμβόλου $A_e = \pi D^2/4$, η αύξηση της ισχύος μπορεί να επιτευχθεί με:

- Αύξηση της ταχύτητας περιστροφής (ή ισοδύναμα της μέσης ταχύτητας του εμβόλου c_e)
- Αύξηση της μέσης πραγματικής πίεσης \bar{p}_e

Ωστόσο, οι δύο αυτές πρακτικές παρέμβασης παρουσιάζουν περιορισμούς σε θέματα που άπτονται της αντοχής υλικών και των μηχανικών απωλειών ενός κινητήρα. Ειδικότερα:

- Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής έχει ως συνέπεια την αύξηση των δυναμικών φορτίσεων και των μηχανικών απωλειών του κινητήρα. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι δυναμικές φορτίσεις αναπτύσσονται με ιδιαίτερα μεγάλο ρυθμό όντας ανάλογες με το τετράγωνο της ταχύτητας περιστροφής.
- Η αύξηση της μέσης πραγματικής πίεσης που επιτυγχάνεται με την εφαρμογή των μεθόδων υπερπλήρωσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των δυνάμεων εξ αερίων και σε μικρότερο βαθμό την αύξηση των μηχανικών απωλειών, όπου όμως τελικά οδηγεί σε αύξηση του βαθμού απόδοσης του κινητήρα λόγω μεγαλύτερης, αναλογικά προς την αύξηση της μέσης πίεσης μηχανικών απωλειών, αύξηση της μέσης ενδεικνύμενης πίεσης.

Συνεπώς, από τα παραπάνω, η υπερπλήρωση αναδεικνύεται ως προτιμότερη μέθοδος για την αύξηση της ισχύος για το λόγο ότι οι αυξημένες δυνάμεις εξ αερίων μπορούν να αντιμετωπιστούν ευκολότερα από τις αυξημένες δυναμικές φορτίσεις. Ωστόσο, η υπερπλήρωση δημιουργεί την απαίτηση στιβαρών και κατά συνέπεια βαρέων κατασκευών, ικανών να ανταποκριθούν στις καταπονήσεις. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε μέσω της προόδου που συντελέστηκε στον τομέα αντοχής των υλικών κι έχει οδηγήσει στην κατασκευή κινητήρων υψηλής ισχύος και ταυτόχρονα χαμηλού ειδικού βάρους [3].

1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της υπερπλήρωσης ΜΕΚ

Τα πλεονεκτήματα της υπερπλήρωσης, για δεδομένη εξαγόμενη ισχύ από έναν κινητήρα, είναι [3]:

- Μικρότερος φυσικός όγκος (μικρότερος αριθμός κυλίνδρων, μικρότερο μέγεθος κινητήρα, 'downsizing')
- Χαμηλότερο κόστος ανά μονάδα εξαγόμενης ισχύος, ειδικά για μεγαλύτερων διαστάσεων κινητήρες
- Χαμηλότερες εκπομπές καυσαερίων (σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας)
- Μικρότερο βάρος, μεγαλύτερη ειδική μάζα
- Μικρότερο ποσοστό τριβών λόγω του μικρότερου αριθμού κυλίνδρων
- Μειωμένος θόρυβος στην εξαγωγή λόγω του στροβίλου των καυσαερίων
- Ειδικά σε κινητήρες Diesel, μείωση της καθυστέρησης ανάφλεξης λόγω αυξημένων θερμοκρασιών εντός του κυλίνδρου.

Τα μειονεκτήματα της υπερπλήρωσης, από την άλλη πλευρά, είναι τα εξής:

- Πιο αργή επιτάχυνση συγκριτικά με αντίστοιχους κινητήρες φυσικής αναπνοής (αναφέρεται κυρίως σε συστήματα στροβιλο-υπερπλήρωσης).
- Υψηλότερη θερμική και μηχανική καταπόνηση στο εσωτερικό του κυλίνδρου.
- Αυξημένες εκπομπές ρύπων ιδιαίτερα κατά την διάρκεια μεταβατικής λειτουργίας του κινητήρα (κυρίως σε συστήματα στροβιλο-υπερπλήρωσης).

1.3 Μέθοδοι υπερπλήρωσης ΜΕΚ

Τα συστήματα υπερπλήρωσης κατηγοριοποιούνται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες λαμβάνοντας ως κριτήριο τα κάτωθι χαρακτηριστικά [3]:

- Τον τρόπο κίνησης του συμπιεστή
- Τον σχεδιασμό του συμπιεστή
- Τον τρόπο σύνδεσης κινητήρα και του συστήματος υπερπλήρωσης

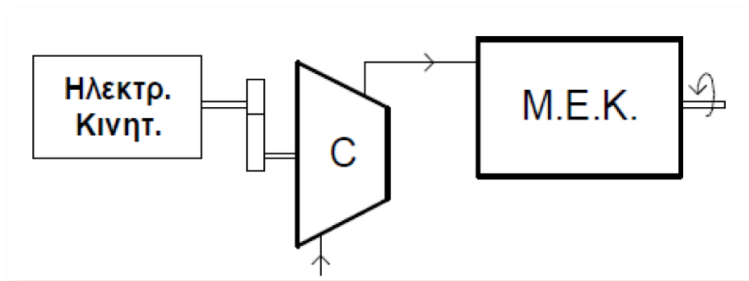
Στη συνέχεια παρατίθενται περισσότερες πληροφορίες για την κάθε κατηγορία [3].

1.3.1 Με βάση τον τρόπο κίνησης του συμπιεστή

Με κριτήριο τον τρόπο κίνησης του συμπιεστή στα συστήματα υπερπλήρωσης, διακρίνονται τρεις υποκατηγορίες [3]:

- **Εξωτερικά κινούμενος συμπιεστής**

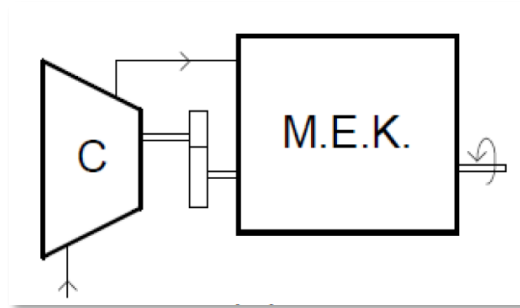
Η κίνηση του συμπιεστή πραγματοποιείται από βοηθητικό κινητήρα ή ηλεκτροκινητήρα (Σχήμα 1.2). Η χρήση αυτής της μεθόδου βρήκε εφαρμογή σε αεροπορικούς κινητήρες, σε ορισμένους κινητήρες Diesel και για την σάρωση 2-Χ κινητήρων φυσικής αναπνοής



Σχήμα 1.2: Σχηματική απεικόνιση εξωτερικά κινούμενου συμπιεστή [3]

- **Συμπιεστής κινούμενος από την στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα**

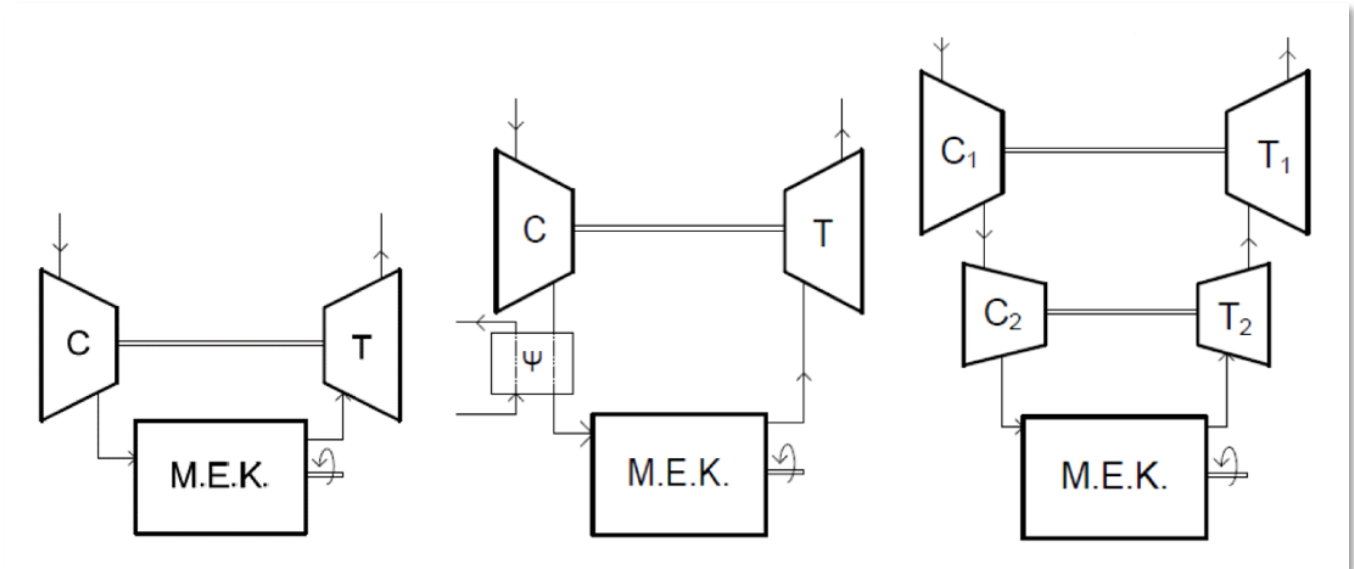
Η κίνηση του συμπιεστή πραγματοποιείται με την απορρόφηση μηχανικού έργου (μηχανική υπερπλήρωση, Σχήμα 1.3). Υλοποίηση αυτής της μεθόδου γίνεται σε κινητήρες Otto με ή χωρίς ενδιάμεσο ψυγείο αέρα, με σταθερή ή μεταβλητή σχέση μετάδοσης κίνησης.



Σχήμα 1.3: Σχηματική απεικόνιση μηχανικής υπερπλήρωσης [3]

- **Συμπιεστής κινούμενος από στρόβιλο καυσαερίου**

Η κίνηση του συμπιεστή πραγματοποιείται με την αξιοποίηση της ενέργειας του καυσαερίου μέσω στρόβιλου (στροβιλο-υπερπλήρωση, Σχήμα 1.4). Αποτελεί την πλέον ενδεδειγμένη μέθοδο που εφαρμόζεται σε βιομηχανικούς και ναυτικούς κινητήρες. Η υπερπλήρωση γίνεται με (ή, πολύ σπάνια πλέον, χωρίς) ψυγείο αέρα και μπορεί να είναι μονοβάθμια ή διβάθμια όπως περιγράφεται και στα ακόλουθα σχήματα.



Σχήμα 1.4: Σχηματική απεικόνιση συμπιεστή κινούμενου από στρόβιλο καυσαερίου [3]

1.3.2 Με βάση τον σχεδιασμό του συμπιεστή

Με κριτήριο τον σχεδιασμό του συμπιεστή διακρίνονται οι ακόλουθες δύο υποκατηγορίες [3]:

- **Θετικής εκτόπισης**

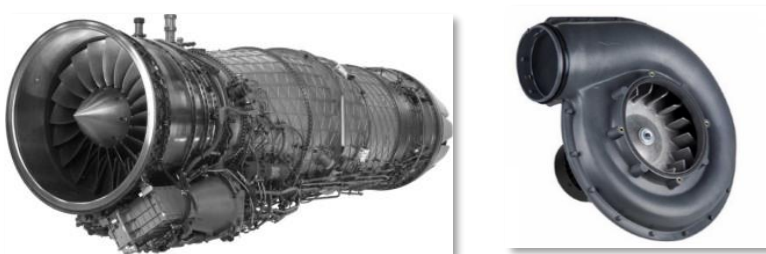
Η υπερπλήρωση πραγματοποιείται με παλινδρομικό έμβολο (τύπου στροφαλοθαλάμου ή ταλαντευόμενων περυγιών) ή περιστρεφόμενο έμβολο (τύπου λοβοειδούς ανεμιστήρα Roots ή κοχλιοειδούς συμπιεστή Lysholm (Σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5: Κοχλιοειδής συμπιεστής Lysholm και λοβοειδής ανεμιστήρας Roots

- **Δυναμικής ροής**

Η υπερπλήρωση επιτυγχάνεται με εφαρμογή αεροδυναμικού συμπιεστή αξονικής, ακτινικής ή μικτής ροής (Σχήμα 1.6).



Σχήμα 1.6: Παραδείγματα αξονικού και ακτινικού συμπιεστή

1.3.3 Με βάση τον τρόπο σύνδεσης μονάδας υπερπλήρωσης και κινητήρα και μεταφορά ισχύος

Με κριτήριο τον τρόπο σύνδεσης μονάδας υπερπλήρωσης και κινητήρα και μεταφοράς ισχύος, διακρίνονται οι ακόλουθες πέντε υποκατηγορίες [3]:

- **Μηχανική Υπερπλήρωση**

Ο συμπιεστής είναι συζευγμένος με την στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα και η ισχύς εξάγεται από τον κινητήρα προς τον συμπιεστή χωρίς την παρεμβολή κάποιου στροβίλου για απόδοση ισχύος. Η σύνδεση γίνεται είτε με την χρήση ιμάντα (Σχήμα 1.7), είτε με σύστημα γραναζιών και η ωφέλιμη ισχύς υπολογίζεται ως το ποσό ισχύος που παράγει ο κινητήρας μειωμένο κατά το ποσό της ισχύος που απορροφά ο συμπιεστής



Σχήμα 1.7: Παράδειγμα μηχανικού υπερπληρωτή με μαντοκίνηση

- **Στροβιλο-υπερπλήρωση**

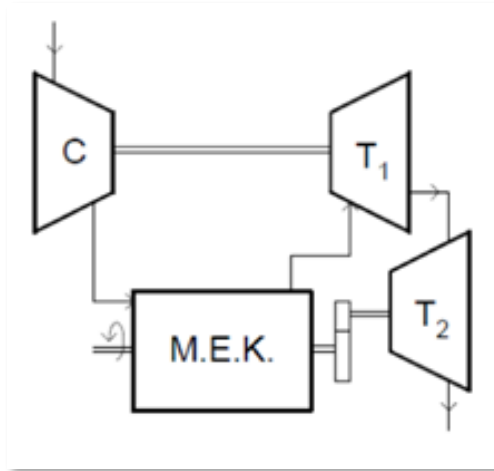
Ο συμπιεστής είναι συζευγμένος με το στρόβιλο αποτόνωσης καυσαερίου (Σχήμα 1.8). Η ωφέλιμη ισχύς αποδίδεται από την άτρακτο του κινητήρα. Η στροβιλο-υπερπλήρωση αποτελεί την επικρατέστερη μέθοδο υπερπλήρωσης ιδιαίτερα στον τομέα της αυτοκίνησης.



Σχήμα 1.8: Παράδειγμα στροβιλο-υπερπληρωτή

- **Σύνθετη στροβιλο-υπερπλήρωση (turbo-compound)**

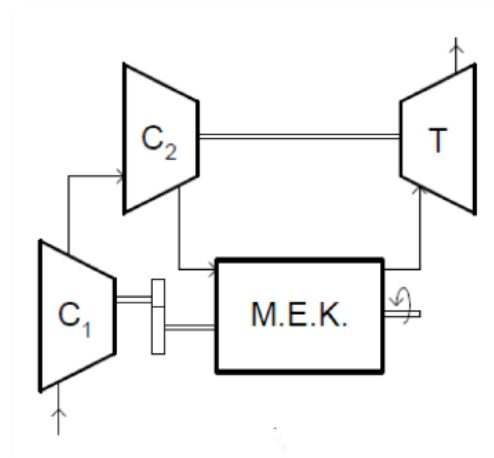
Ο συμπιεστής και ο στρόβιλος είναι μηχανικά συζευγμένοι και η άτρακτος του κινητήρα είναι μηχανικά συζευγμένη με το στρόβιλο ισχύος (Σχήμα 1.9). Η μέθοδος αυτή βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε αεροπορικούς και ναυτικούς κινητήρες αλλά και σε μεγάλους κινητήρες φορτηγών οχημάτων, όπου έχουμε λειτουργία σε υψηλά φορτία για μεγάλο χρονικό διάστημα με αυξημένη αποδοτικότητα του στρόβιλου.



Σχήμα 1.9: Σχηματική απεικόνιση σύνθετης στροβιλο-υπερπλήρωσης [3]

- **Συνδυασμένη υπερπλήρωση (combined supercharging)**

Ο συμπιεστής και η άτρακτος του κινητήρα είναι μηχανικά συζευγμένοι μεταξύ τους με επιπλέον ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης (Σχήμα 1.10). Οι δύο συμπιεστές είναι συνδεδεμένοι σε σειρά και η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζοταν κυρίως σε επιβατικά οχήματα για βελτίωση της μεταβατικής λειτουργίας και σε 2-Χ ναυτικούς στροβιλο-υπερπληρωμένους κινητήρες για καλύτερη απόπλυση του καυσαερίου στα χαμηλά φορτία.



Σχήμα 1.10: Σχηματική απεικόνιση συνδυασμένης υπερπλήρωσης [3]

2. Στροβιλο-υπερπλήρωση

2.1 Βασικές αρχές στροβιλο-υπερπλήρωσης

2.1.1 Γενικά

Από τις μεθόδους που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, η έρευνα και η ανάπτυξη της τεχνολογίας ανέδειξαν την στροβιλο-υπερπλήρωση ως την πλέον ενδεικνυόμενη μέθοδο προς υλοποίηση ιδιαίτερα σε εφαρμογές μαζικής παραγωγής.

Ο συνδυασμός εμβολοφόρου κινητήρα Diesel ή Otto με ζεύγος στροβιλο-υπερπληρωτή που συνήθως ολοκληρώνεται με την προσθήκη ενδιάμεσου ψυγείου για την ψύξη του εισερχόμενου αέρα (intercooler), αποτελεί την πιο συνήθη εφαρμογή ιδιαίτερα στον τομέα της αυτοκίνησης και γενικότερα στα επίγεια μέσα μεταφοράς.

Το ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης αποτελείται συνήθως από φυγοκεντρικό (ακτινικό) συμπιεστή και ακτινικό (εφαρμογή σε μικρών διαστάσεων μηχανές όπως στα αυτοκίνητα) ή αξονικό στρόβιλο (εφαρμογή σε μηχανές μεγάλου όγκου εμβολισμού όπως μηχανές τρένων, πλοίων και ηλεκτροπαραγωγής).

2.1.2 Διάταξη στρόβιλου – συμπιεστή

Ο συμπιεστής και ο στρόβιλος είναι μηχανικά συνδεδεμένοι στην ίδια άτρακτο, με συνέπεια το έργο για την κίνηση του συμπιεστή να παρέχεται αποκλειστικά από το στρόβιλο, χωρίς την απώλεια ωφέλιμης ισχύος από τον κινητήρα.

Τα επιμέρους τμήματα του συστήματος απεικονίζονται και αναλύονται παρακάτω (Σχήμα 2.1):



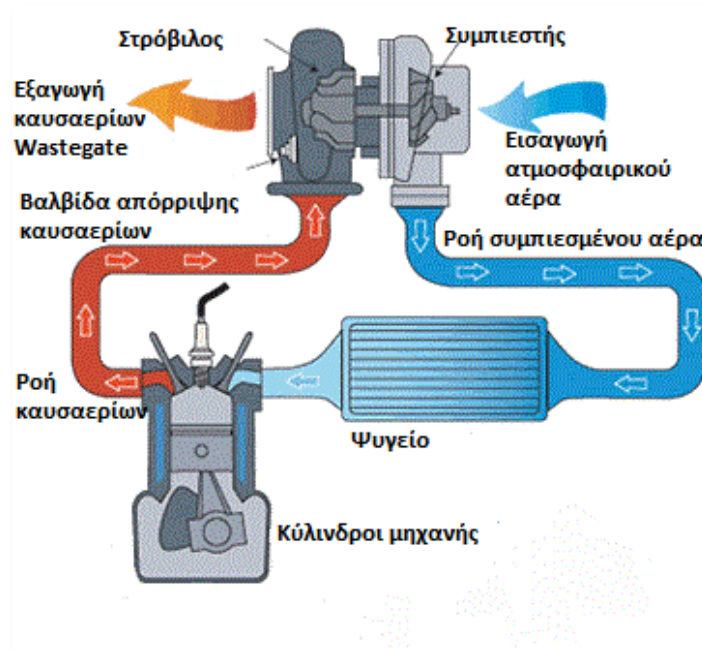
Σχήμα 2.1: Στροβιλο-υπερπληρωτής σε τομή

- **Συμπιεστής**

Αποτελείται από την κινητή πτερύγωση/στεφάνη ή πτερωτή και το κέλυφος/σταθερή πτερύγωση (σε αξονικούς συμπιεστές) ή το διαχύτη ή το δακτυλιοειδή επιβραδυντή (σε ακτινικούς συμπιεστές). Η κινητή πτερύγωση είναι μηχανικά συζευγμένη με το στρόβιλο μέσω της ατράκτου και το κέλυφος φέρει συχνά ρυθμιστικά πτερύγια. Με την περιστροφή της πτερωτής αναρροφάται αέρας του οποίου η κινητική ενέργεια αυξάνεται καθώς η στεφάνη περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα ενώ, απώτερος σκοπός του κελύφους είναι να μετατρέψει το ρεύμα αέρα χαμηλής πίεσης και υψηλής ταχύτητας σε ρεύμα αέρα υψηλής πίεσης και χαμηλής ταχύτητας προτού οδηγηθεί στο εσωτερικό των κυλίνδρων.

- **Στρόβιλος**

Αποτελείται κι αυτός από την κινητή πτερύγωση ή πτερωτή, και το κέλυφος. Τα καυσαέρια οδηγούνται μέσω του κελύφους στην κινητή πτερύγωση μετατρέποντας την κινητική τους ενέργεια σε μηχανική της ατράκτου. Οι εισοδοί του στροβίλου μπορεί να είναι μία ή δύο ανάλογα με τον αριθμό των κυλίνδρων και τη διαμόρφωση της πολλαπλής εξαγωγής. Οι ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου είναι υψηλή και σε μικρού μεγέθους στροβίλους μπορεί να φτάσει και τις 200 000 rpm.



Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση ροής σε στροβιλο-υπερπληρωτή

- **Άτρακτος**

Είναι η μηχανική σύνδεση μεταξύ συμπιεστή και στροβίλου μέσω την οποίας γίνεται η μεταφορά της κινητικής ενέργειας και της ισχύος. Υπόκειται σε μεγάλες τριβές και καταπονήσεις λόγω των υψηλών ταχυτήτων περιστροφής και των μεταβατικών λειτουργιών για αυτό και απαιτείται και εδώ αποτελεσματική λίπανση μέσω οπών π.χ. από το λιπαντικό έλαιο του κινητήρα.

- **Βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίου (waste gate)**

Η βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίου (waste gate) (Σχήμα 2.3) λειτουργεί ως μια εναλλακτική, άμεση διέξοδο των καυσαερίων προς την εξάτμιση, παρακάμπτοντας το στρόβιλο, όταν η πίεση στην εισαγωγή ανέβει πολύ, προστατεύοντάς τον από ενδεχόμενη υπερφόρτιση. Με τον τρόπο αυτό οι στροφές του στροβίλου μειώνονται και κατ' επέκταση μειώνονται οι στροφές του συμπιεστή και η πίεση που αναπτύσσεται στην πολλαπλή εισαγωγή.

Η ασφάλεια που παρέχει η βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίου επιτρέπει και την εφαρμογή στροβιλο-υπερπληρωτών μικρότερων διαστάσεων, γεγονός που επιδρά ευνοϊκά στην μείωση της υστέρησης απόκρισης.

Στους στρόβιλους μικρού και μεσαίου μεγέθους, υπάρχει μια τέτοια θυρίδα εσωτερικά που ελέγχεται από ένα εξωτερικό επενεργητή (wastegate actuator). Στους μεγάλους στρόβιλους, λόγω του μεγάλου μεγέθους του στροβίλου και της έλλειψης χώρου που αυτό δημιουργεί, τοποθετείται εξωτερική βαλβίδα επάνω στην πολλαπλή εξαγωγής που συνδέεται με ξεχωριστό σωλήνα με την εξάτμιση.

Η λειτουργία της wastegate βασίζεται στον έλεγχο της ροής καυσαερίων μέσω της πίεσης που αναπτύσσεται στο διάφραγμά της. Το ελατήριο προέντασης κρατάει την βαλβίδα κλειστή, όσο δεν υπάρχει πίεση στο κάτω μέρος του διαφράγματος. Υπάρχουν ελατήρια με διαφορετικές σκληρότητες, ανάλογα με την πίεση που είναι επιθυμητό να δουλεύει ο στρόβιλος. Όσο σκληρότερο το ελατήριο, τόσο δυσκολότερα ανοίγει η βαλβίδα, οπότε τόσο υψηλότερη θα είναι η πίεση λειτουργίας



Σχήμα 2.3: Βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίου

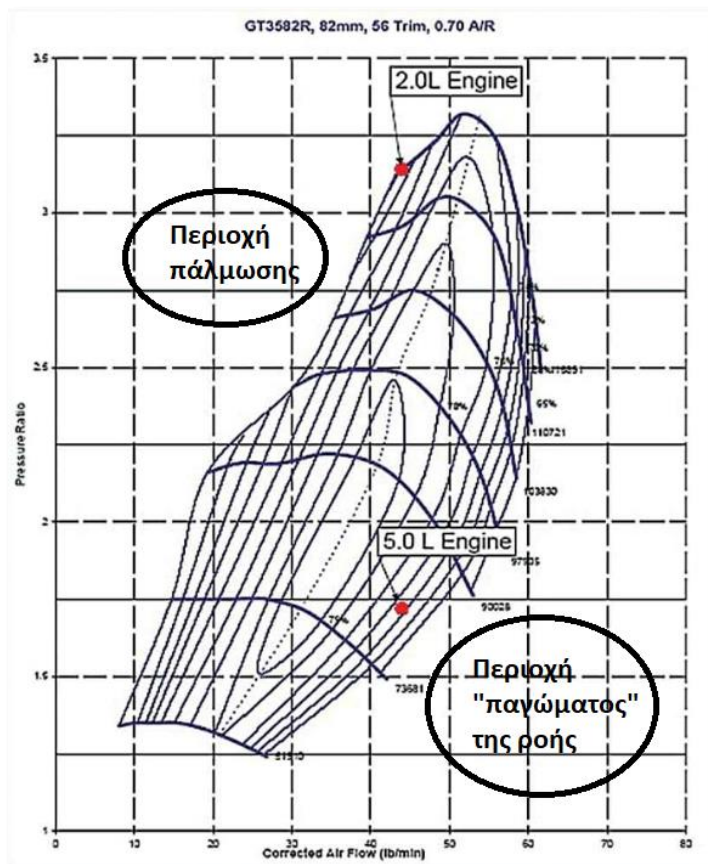
2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της στροβιλο-υπερπλήρωσης

Πέραν των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει η υπερπλήρωση των κινητήρων σε σχέση με τους αντίστοιχους κινητήρες φυσικής αναπνοής, τα επιπλέον πλεονεκτήματα που αναδεικνύει η στροβιλο-υπερπλήρωση σε σχέση με τις άλλες μεθόδους υπερπλήρωσης είναι τα εξής:

- Μικρές απώλειες έργου του στροβίλου διότι ο συμπιεστής και ο στρόβιλος συνδέονται με την ίδια άτρακτο και επομένως ο συμπιεστής λαμβάνει, με κάποιες μηχανικές απώλειες, σχεδόν ολόκληρη την ισχύ που παράγει ο στρόβιλος.
- Απλή κατασκευή καθώς ο συμπιεστής και κινητήρας δεν συνδέονται μηχανικά.
- Υψηλή συγκέντρωση ισχύος του κινητήρα λόγω των πολύ υψηλών ταχυτήτων περιστροφής του στροβιλο-υπερπληρωτή.
- Χαμηλή ειδική κατανάλωσης καυσίμου.

Ωστόσο, παρουσιάζονται και κάποια σημαντικά μειονεκτήματα που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ανάλογα με την εφαρμογή. Αυτά είναι τα εξής [3]:

- Αυξημένες εκπομπές ρύπων και καθυστέρηση απόκρισης κατά τη μεταβατική λειτουργία. Πιο συγκεκριμένα, στη μεταβατική λειτουργία και ειδικότερα στα χαμηλά φορτία, η ποσότητα του καυσαερίου από τον κινητήρα είναι μικρή και μη ικανή να αποδώσει στροφορμή τέτοια ώστε να προκαλέσει άμεση κίνηση στο αδρανειακό σύστημα της άτρακτου του στροβιλο-συμπιεστή, με αποτέλεσμα να υπάρχει υστέρηση (turbo-lag). Το φαινόμενο αυτό αντιμετωπίζεται συνήθως με την εφαρμογή τεχνικών, όπως στρόβιλος μικρότερης διαμέτρου σε συνδυασμό με βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίου (wastegate), βοηθητικός ηλεκτροκινητήρας στην άτρακτο του στροβιλοσυμπιεστή, κατασκευή πτερωτής στροβίλου από προηγμένα υλικά μικρότερης πυκνότητας και άρα βάρους και ροπή αδράνειας, και χρήση στροβίλου μεταβλητής γεωμετρίας.
- Ύπαρξη περιοχών ασταθούς λειτουργίας στον χάρτη του συμπιεστή. Ο σχεδιασμός του στροβιλο-συμπιεστή είναι απαραίτητο να γίνει με τρόπο τέτοιο ώστε να μην οδηγείται το σύστημα σε σημεία λειτουργίας εντός των περιοχών πάλμωσης και παγώματος ροής (Σχήμα 2.5), όπως αυτές ορίζονται από τους χάρτες λειτουργίας συμπιεστή και στροβίλου.



Σχήμα 2.5 : Χάρτης συμπίεση με επισήμανση των προβληματικών περιοχών λειτουργίας

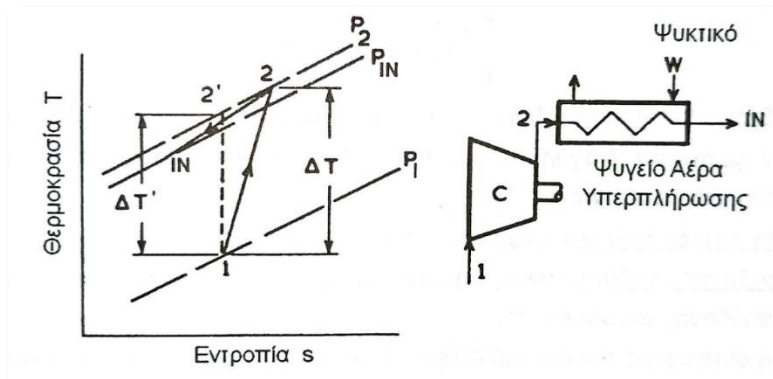
2.3 Επίδραση ψύξης του αέρα υπερπλήρωσης

Όπως προαναφέρθηκε, σκοπός της υπερπλήρωσης είναι η αύξηση της συγκέντρωσης ισχύος μέσω της αύξησης της πίεσης στο θάλαμο καύσης. Αυτό συμβαίνει διότι η αύξηση της πίεσης μεταβάλλει την πυκνότητα της γόμωσης δίνοντας την δυνατότητα να καεί στον ίδιο χρόνο και χώρο περισσότερο καύσιμο.

Ωστόσο, η συμπίεση του αέρα επιφέρει και ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας, και εφόσον απώτερος σκοπός είναι η αύξηση της πυκνότητας του αέρα, η θερμοκρασιακή ανύψωση αντισταθμίζει, εν μέρει, το όφελος από την αύξηση της πίεσης. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό από την καταστατική εξίσωση :

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T} \quad (2.1)$$

Συνεπώς αυτό που τίθεται ως επιθυμητό αποτέλεσμα είναι η ανύψωση της πίεσης με την ελάχιστη δυνατή αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό, αρχικά, συνεπάγεται ισεντροπική συμπίεση κατά την οποία η αύξηση της θερμοκρασίας είναι (Σχήμα 2.6) :



Σχήμα 2.6 : Διάγραμμα λόγου πυκνοτήτων συναρτήσει του λόγου πιέσεων

$$\Delta T_{is} = T_{2'} - T_1 = T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (2.2)$$

Όμως, λόγω των ατελειών που παρουσιάζουν οι συμπιεστές, η αύξηση της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί στην ισεντροπική μεταβολή και δίνεται από την ακόλουθη σχέση ($\gamma = \gamma_\alpha$) :

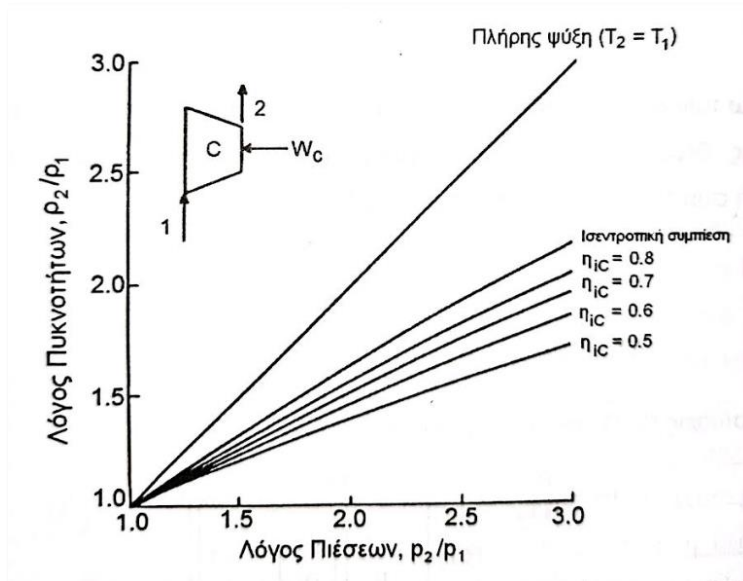
$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{T_{2'} - T_1}{\eta_{is}} = \frac{T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}{\eta_{is}} \quad (2.3)$$

Από τις σχέσεις (2.1) και (2.3) προκύπτει :

Εάν υποθέσουμε ότι η γόμωση που συμπιέζεται στον κύλινδρο αποτελεί τέλειο αέριο και ότι στο συμπιεστή πραγματοποιείται ισεντροπική συμπίεση με ισεντροπικό βαθμό απόδοσης η_{is} τότε προκύπτει ότι:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{\frac{p_2}{p_1}}{\left\{ 1 + \frac{1}{\eta_{is}} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \right\}} \quad (2.4)$$

Στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 2.7) παρουσιάζεται ο λόγος πυκνοτήτων ρ_2/ρ_1 , συναρτήσει του λόγου πιέσεων p_2/p_1 για διάφορες τιμές του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του συμπιεστή :



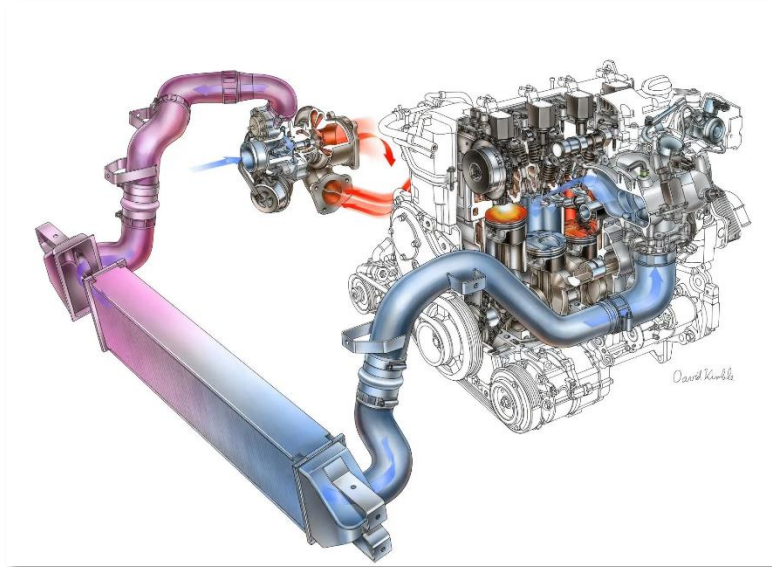
Σχήμα 2.7 : Διάγραμμα λόγου πυκνοτήτων συναρτήσει του λόγου πιέσεων

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι από την ψύξη του συμπιεσμένου αέρα σε μια θερμοκρασία κοντά στην θερμοκρασία περιβάλλοντος υπάρχει σημαντικό όφελος το οποίο αυξάνεται με την αύξηση του λόγου πιέσεων του συμπιεστή. Συνεπώς, η εφαρμογή ενδιάμεσης ψύξης του αέρα (από την έξοδο του συμπιεστή έως την είσοδο στους κυλίνδρους, Σχήμα 2.8) είναι επωφελής.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της ενδιάμεσης ψύξης είναι τα ακόλουθα [3]:

- Ενίσχυση της υπερπλήρωσης καθώς η μείωση της θερμοκρασίας επιφέρει επιπλέον αύξηση της πυκνότητας της γόμωσης βάσει της καταστατικής εξίσωσης (Σχέση 2.1)
- Χαμηλότερες θερμοκρασίες του κύκλου λειτουργίας για δεδομένη μέση πραγματική πίεση, λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας του αέρα εισόδου.

- Μειωμένη θερμική φόρτιση λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών του κύκλου λειτουργίας. Το γεγονός αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία σε κινητήρες Otto όπου υπάρχει έντονος ο κίνδυνος της κρουστικής καύσης.
- Μικρότερες εκπομπές οξειδίων του αζώτου λόγω των μικρότερων θερμοκρασιών που επικρατούν στον κύλινδρο κατά την έναρξη της καύσης.



Σχήμα 2.8 : Σχηματική απεικόνιση συστήματος ψύξης σε κινητήρα Diesel

3. Σχηματισμός και εκπομπή ρύπων από κινητήρες Diesel

Εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν εντός των κυλίνδρων των μηχανών εσωτερικής καύσης, κι οι οποίες μπορούν να ξεπεράσουν τα 3000 K, συντελείται χημική διάσπαση των προϊόντων της καύσης με αποτέλεσμα την εμφάνιση ριζών και μερικών ασταθών ενώσεων στα εξερχόμενα καυσαέρια. Τέτοιες ενώσεις μπορεί να είναι οι ακόλουθες: H_2O , H_2 , O_2 , N_2 , N , O , OH , H , CO , CO_2 , NO , HC , O_3 , αλδεΐδες, κετόνες και άλλες.

Από αυτές τις ενώσεις ρυπογόνες θεωρούνται τα οξειδία του αζώτου (NO_x), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και οι υδρογονάνθρακες (HC) για τους κινητήρες Otto, ενώ στους Κινητήρες Diesel εκτός από τους παραπάνω αέριους ρύπους συγκαταλέγονται και τα σωματίδια αιθάλης.

Οι ουσίες αυτές αποτελούν τους λεγόμενους «ελεγχόμενους ρύπους» (regulated emissions). Είναι βλαπτικές για τον άνθρωπο και για το περιβάλλον, και για το λόγο αυτό υπαγορεύονται συγκεκριμένα επίπεδα συγκέντρωσης από την νομοθεσία.

Η μέτρηση των ανωτέρω ρύπων γίνεται ενδελεχώς με πρότυπες, ακριβείς μεθόδους και ειδικές συσκευές πριν την κυκλοφορία των νέων μοντέλων αυτοκίνησης ώστε να λάβουν την απαραίτητη πιστοποίηση («έγκριση τύπου»), ενώ κάποιες τυπικές μετρήσεις ρύπων επαναλαμβάνονται και στους υποχρεωτικούς περιοδικούς τεχνικούς ελέγχους οχημάτων που επιβάλλει κάθε χώρα.

3.1 Σχηματισμός οξειδίων του αζώτου NO_x

3.1.1 Γενικά στοιχεία

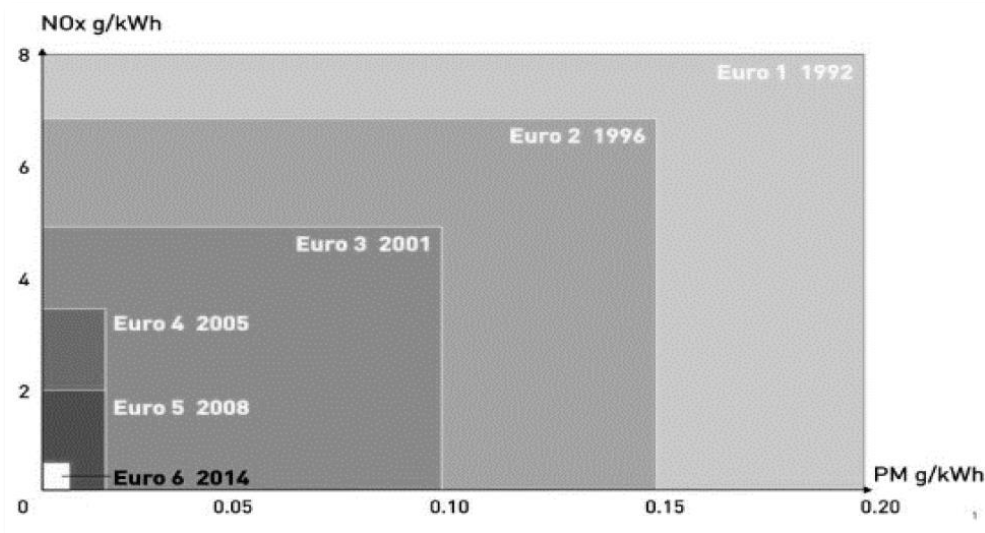
Το άζωτο που αποτελεί κύριο συστατικό του ατμοσφαιρικού αέρα, αν και αποτελεί αδρανές αέριο σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, όταν βρεθεί στο κύλινδρο τον μηχανών εσωτερικής καύσης και σε θερμοκρασίες που φτάνουν τους 2500-3000 K κατά τη στιγμή της καύσης αντιδρά με το οξυγόνο και παράγει οξειδία. Οι αντιδράσεις που περιλαμβάνουν οξειδία του αζώτου εξελίσσονται πιο αργά από τις αντιδράσεις οξειδωσης των καυσίμων. Αυτός είναι και ο λόγος που ο σχηματισμός των οξειδίων αυτών πραγματοποιείται κυρίως σε υψηλές θερμοκρασίες κατά την καύση, όταν έχει αρχίσει και οξειδώνεται το καύσιμο και εκλύει θερμότητα εντός του κυλίνδρου.

Με τον όρο οξειδία του αζώτου αναφερόμαστε κυρίως στο μονοξείδιο του αζώτου (NO) και στο διοξείδιο του αζώτου (NO_2) που σχηματίζονται σε μετρήσιμες ποσότητες στο θάλαμο καύσης των εμβολοφόρων κινητήρων Otto και Diesel, και τα οποία εμφανίζονται σε ίδια τάξη μεγέθους στα δύο είδη κινητήρα με συγκριτικά μεγαλύτερες τιμές στους κινητήρες Otto.

Η διερεύνηση της συγκέντρωσης των ανωτέρω οξειδίων στα καυσαέρια των κινητήρων αποτελεί σημαντικό αντικείμενο λόγω των επιβαρυντικών επιπτώσεων που προκαλούν στο περιβάλλον και στον άνθρωπο. Πιο συγκεκριμένα:

- Το μονοξείδιο του αζώτου (NO) είναι υπεύθυνο για το φαινόμενο της όξινης βροχής που μεταβάλλει το pH του εδάφους και επηρεάζει άμεσα την χλωρίδα και την πανίδα στο έδαφος αλλά και σε υγρά περιβάλλοντα όπως λίμνες και ποτάμια. Επίσης, η σύντομη έκθεση του ανθρώπου στο NO προκαλεί ερεθισμούς των ματιών και αναπνευστικά προβλήματα, ενώ μακροχρόνια έκθεση σε υψηλές συγκέντρωσης μπορεί να οδηγήσει και σε πρόωρο θάνατο. Τέλος, είναι υπεύθυνο για την διάβρωση και σε βάθος χρόνου καταστροφή πολιτισμικών μνημείων κατασκευασμένων από μάρμαρο, όπως αγάλματα, ναοί κλπ.
- Το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) συντελεί στην καταστροφή του στρώματος όζοντος που είναι απαραίτητο για την προστασία της χλωρίδας και της πανίδας (συνεπώς και του ανθρώπου) από την υπεριώδη ακτινοβολία και τις βλαβερές συνέπειες που επιφέρει η έκθεσή τους σε αυτή.

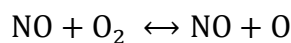
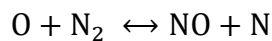
Για την αντιμετώπιση των παραπάνω αρνητικών επιπτώσεων, που έχουν γίνει αντιληπτές από τις πολιτικές ηγεσίες των κρατών και για τις οποίες έχουν θεσπιστεί αυστηρά όρια περιορισμού, σημαντικό ρόλο έχει συντελέσει η ανάπτυξη της τεχνολογίας και η αύξηση της ακρίβειας των σύγχρονων οργάνων μέτρησης. Στη συνέχεια παρατίθεται διάγραμμα στο οποίο αποτυπώνεται η αυστηροποίηση των επιτρεπτών ορίων στο διάβα του χρόνου (Σχήμα 3.1).

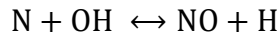


Σχήμα 3.1: Όρια εκπομπών ανά κατηγορία Euro

3.1.2 Μηχανισμός σχηματισμού μονοξειδίου του αζώτου NO

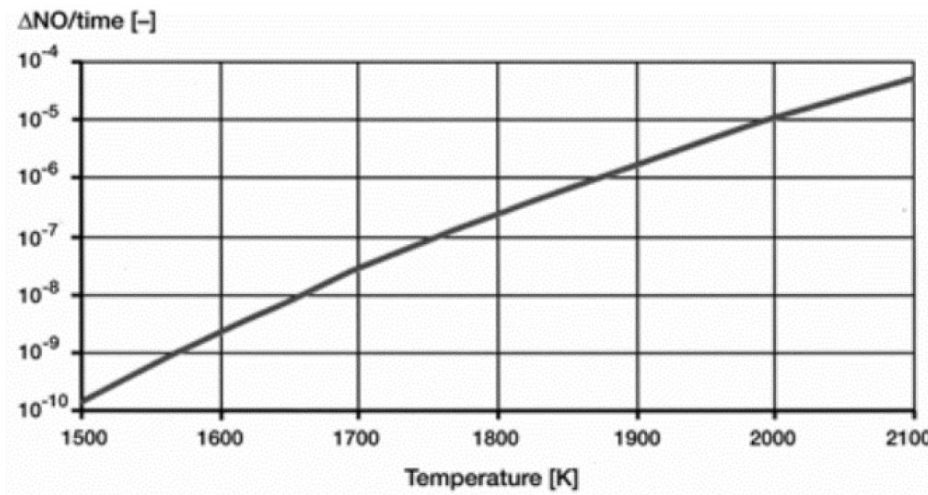
Ο σχηματισμός του μονοξειδίου του αζώτου NO πραγματοποιείται για μείγματα καυσίμου-αέρα που βρίσκονται κοντά στη στοιχειομετρική αναλογία (λ_α πολύ κοντά στη μονάδα) από τις ακόλουθες αντιδράσεις:





Αποτελεί προϊόν της οξειδωσης του αζώτου του ατμοσφαιρικού αέρα λόγω της επίδρασης της υψηλής θερμοκρασίας που επικρατεί εντός του κυλίνδρου κατά τη στιγμή της καύσης. Ωστόσο, η παραγωγή NO μπορεί να προέλθει και από οξειδώσεις του αζώτου που περιέχεται στο καύσιμο, όμως οι ποσότητες αυτές είναι εξαιρετικά μικρές και θεωρούνται αμελητέες.

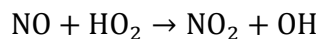
Κατά τη φάση της αποτόνωσης, όπου η βαλβίδα εξαγωγής είναι ανοιχτή, γίνεται απότομη πτώση της πίεσης και της θερμοκρασίας με αποτέλεσμα κάποιες αντιδράσεις όπως οι οξειδώσεις του αζώτου, που ενεργοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες, να διακόπτονται ακαριαία. Ως αποτέλεσμα, διακόπτεται η παραγωγή NO και η περαιτέρω οξείδωση αυτού σε NO₂. Συνεπώς, ο ρυθμός σχηματισμού του NO εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.2).



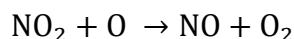
Σχήμα 3.2: Διάγραμμα συσχέτισης ρυθμού παραγωγής NO και θερμοκρασίας

3.1.3 Μηχανισμός σχηματισμού μονοξειδίου του αζώτου NO₂

Ο σχηματισμός του διοξειδίου του αζώτου πραγματοποιείται με οξείδωση του μονοξειδίου του αζώτου που έχει ήδη παραχθεί εντός του θαλάμου καύσης, με την παρακάτω αντίδραση:



Επίσης, το NO₂ μπορεί να μετατραπεί αντιστρόφως σε NO, σύμφωνα με την ακόλουθη αντίδραση:



Η παραγωγή NO₂ είναι σαφώς μικρότερη από την παραγωγή NO και σε αυτό συντελεί και η δεύτερη αντίδραση. Ωστόσο, σε κινητήρες Diesel στα χαμηλά φορτία, το ποσοστό NO₂ επί των NO_x κυμαίνεται σε ποσοστό 10-25% λόγω των «ψυχρών» περιοχών που δημιουργούνται στα χαμηλά φορτία και ωθούν τη δεύτερη αντίδραση προς τα αριστερά

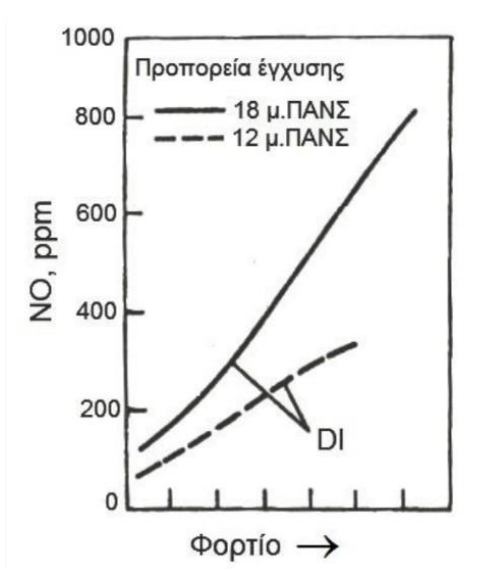
3.1.4 Επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας στις εκπομπές NOx

- **Επίδραση φορτίου**

Όσο το φορτίο αυξάνεται τόσο εντείνεται και η παραγωγή NOx εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας στην περιοχή των αντιδράσεων. Ιδιαίτερα στους κινητήρες Diesel όπου το φορτίο ρυθμίζεται ποιοτικά, με το εύρος του λόγου ισοδυναμίας κυμαίνεται από 8-9 (κενό φορτίο) έως περίπου 1,5 (πλήρες φορτίο), γίνεται αντιληπτό ότι στα υψηλά φορτία, όπου η καύση προσεγγίζει την στοιχειομετρική, οι θερμοκρασίες θα είναι υψηλότερες και οι εκπομπές NOx αυξημένες, ενώ ανάλογα αποτελέσματα παρατηρούνται και στους κινητήρες Otto άμεσου ψεκασμού.

- **Επίδραση προπορείας έγχυσης**

Όσο αυξάνεται η προπορεία της έγχυσης του καυσίμου παρατηρείται αύξηση των εκπομπών NOx ιδιαίτερα σε κινητήρες Diesel άμεσης έγχυσης. Αυτό συμβαίνει διότι ο αυξημένος χρόνος παραμονής του καυσίμου στον θάλαμο καύσης κατά την φάση της συμπίεσης προκαλεί αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας του (Σχήμα 3.3.)



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα συσχέτισης εκπομπής NOx και προπορείας έγχυσης

- **Επίδραση ποσοστού παραμένουτος καυσαερίου**

Όσο αυξάνεται το ποσοστό του παραμένουτος καυσαερίου στο θάλαμο καύσης παρατηρείται σημαντική μείωση της συγκέντρωσης των NOx. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη μείωση της θερμοκρασίας εξαιτίας της αύξησης της ειδικής θερμοχωρητικότητας (λόγω επιπρόσθετης ποσότητας CO₂, N₂, H₂O στο θάλαμο καύσης). Στο φαινόμενο αυτό βασίζεται και η εφαρμοζόμενη τεχνολογία ανακυκλοφορίας καυσαερίου (EGR) με αρνητικές επιπτώσεις, ωστόσο, στην αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και την μείωση της συγκέντρωσης ισχύος.

3.2 Εκπομπές σωματιδίων αιθάλης

3.2.1 Γενικά στοιχεία

Οι εκπομπές σωματιδίων από κινητήρες εσωτερικής καύσης είναι μια κατάσταση που αφορά ~~τους~~ κινητήρες Diesel και Otto άμεσης έγχυσης που συχνά γίνονται ορατά από το ανθρώπινο μάτι ως μαύρος καπνός.

Το κύριο συστατικό που συνθέτει τα σωματίδια είναι ο ατομικός άνθρακας (ανθρακικό υλικό/αιθάλη από την καύση του πετρελαίου) και πτητικές ενώσεις υδρογονανθράκων (άκαυστο καύσιμο, λιπαντικό κινητήρα κ.ά.). Στη διεθνή τεχνική βιβλιογραφία η αναφορά στα σωματίδια αυτά γίνεται με τη χρήση του όρου PM (Particular Matter).

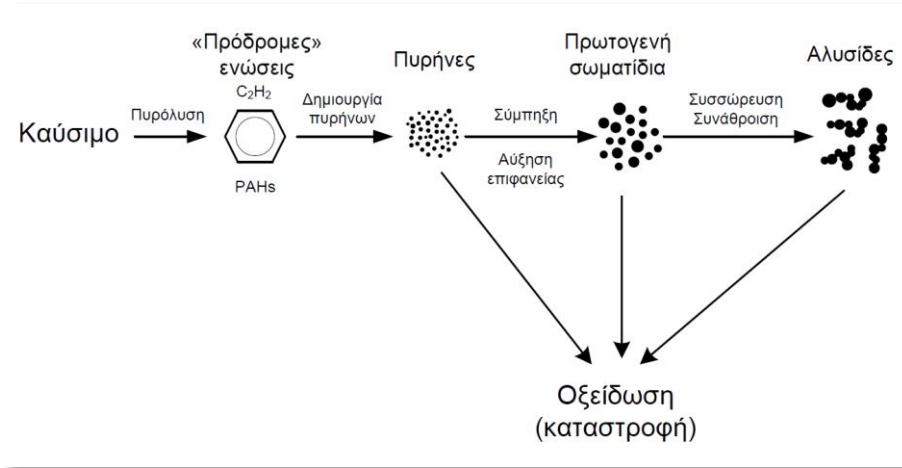
Τα σωματίδια διακρίνονται ανάλογα με το μέγεθός τους, και το εύρος τους ποικίλει με συνήθεις τιμές από 20 nm έως 10 μm, γεγονός που τα καθιστά αναπνεύσιμα από τον άνθρωπο. Ο διαχωρισμός τους γίνεται σε ένα διαλυτό και σε ένα μη διαλυτό οργανικό μέρος, εκ των οποίων το μη διαλυτό χρησιμοποιείται συχνά για την εκτίμηση του ποσού αιθάλης. Το ποσοστό αιθάλης που περιέχεται στα σωματίδια, που εξέρχονται από τις εξατμίσεις των κινητήρων diesel, δεν είναι σταθερό, αλλά συνήθως κυμαίνεται μεταξύ του 40-50%. Ενδεικτικές τιμές τέτοιων εκπομπών είναι 0,2-0,6 g/kWh για ελαφρού τύπου κινητήρες Diesel και 0,5 -1,5 g/kWh για βαρέως τύπου κινητήρες.

3.2.2 Μηχανισμός σχηματισμού σωματιδίων αιθάλης

Η αιθάλη (χρησιμοποιείται από εδώ και στο εξής ως ενδεικτική της ποσότητας των εκπεμπόμενων σωματιδίων) προκύπτει από άκαυστο καύσιμο το οποίο δημιουργεί σωματίδια σε περιοχές υψηλής συγκέντρωσης καυσίμου (δηλαδή απουσία αέρα) και υψηλών θερμοκρασιών. Υδρογονάνθρακες και άλλα διαθέσιμα μόρια συμπυκνώνονται ή απορροφώνται από την αιθάλη σχηματίζοντας προσμίξεις. Η εξέλιξη της υγρής ή αέριας φάσης των υδρογονανθράκων σε στερεά σωματίδια αιθάλης πραγματοποιείται με τα εξής διαδοχικά στάδια (βλ. Σχήμα 3.4) [1,4]:

- Πυρόλυση (Pyrolysis): Ενδόθερμη διαδικασία, η οποία μεταβάλλει τη μοριακή δομή του καυσίμου υπό υψηλή θερμοκρασία και παράγει ενώσεις, όπως οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), που θεωρούνται πρόδρομοι της αιθάλης.
- Δημιουργία Πυρήνων (Nucleation): Σχηματισμός πυρήνων ή νανοσωματιδίων από ασταθή υλικά, όπως οι υδρογονάνθρακες.
- Επιφανειακή αύξηση (Surface growth): Διαδικασία προσθήκης μάζας στην επιφάνεια ενός σωματιδίου αιθάλης.
- Σύμπτυξη (Coagulation): Χαρακτηρίζει τις βίαιες συγκρούσεις των σφαιρικών σωματιδίων που οδηγούν στην ένωσή τους και το σχηματισμό μεγαλύτερων σωματιδίων.

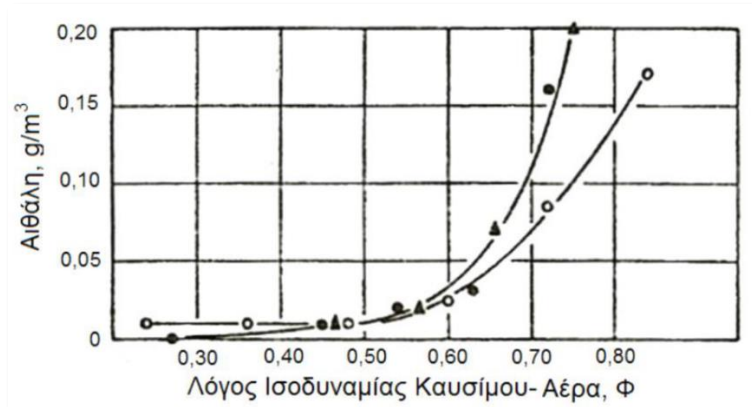
- Συσσώρευση (Agglomeration): Τα σωματίδια παραμένουν ενωμένα για να σχηματίσουν μεγάλες ομάδες σε δομή αλυσίδας.
- Οξείδωση (Oxidation): Διαδικασία που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια κάθε σταδίου από τα παραπάνω, κυρίως όταν επικρατούν θερμοκρασίες υψηλότερες των 1300K, όπου η αιθάλη καίγεται υπό την παρουσία οξειδωτικών στοιχείων (κυρίως ρίζας υδροξυλίου) και σχηματίζει αέρια προϊόντα όπως CO, CO₂, H₂O.



Σχήμα 3.4: Μηχανισμός σχηματισμού σωματιδίων αιθάλης [2]

3.2.3 Σωματίδια αιθάλης σε κινητήρες Diesel

Σε κινητήρες Diesel, σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, σχηματίζονται σωματίδια διαμέτρου της τάξης των 80-110 nm. Όσο το φορτίο αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και το εγχεόμενο καύσιμο, ευνοώντας την εκπομπή σωματιδίων μεγαλύτερης διαμέτρου. Αντιθέτως, κατά την άφορτη λειτουργία («ρελαντί») παρατηρείται παραγωγή νανοσωματιδίων. Συνεπώς, το μέγεθος των σωματιδίων συνδέεται στενά με τον λόγο ισοδυναμίας αέρα καυσίμου λ_α κατά τη λειτουργία ενός κινητήρα Diesel (βλ. Σχήμα 3.5).

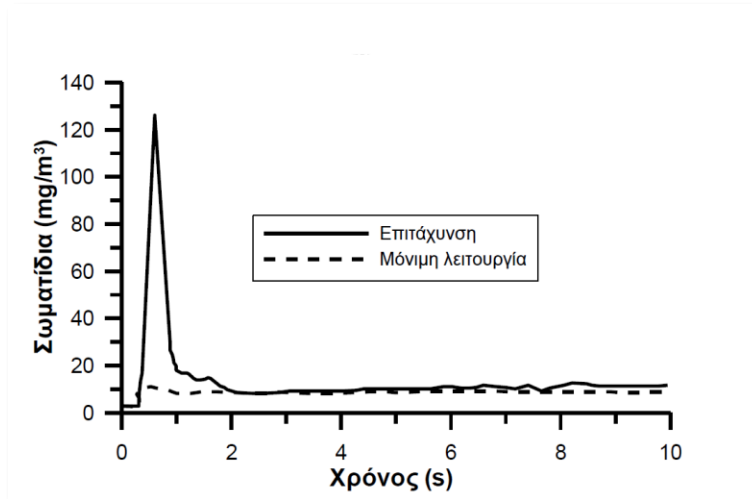


Σχήμα 3.5: Διάγραμμα συσχέτισης εκπομπών αιθάλης και λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα [4]

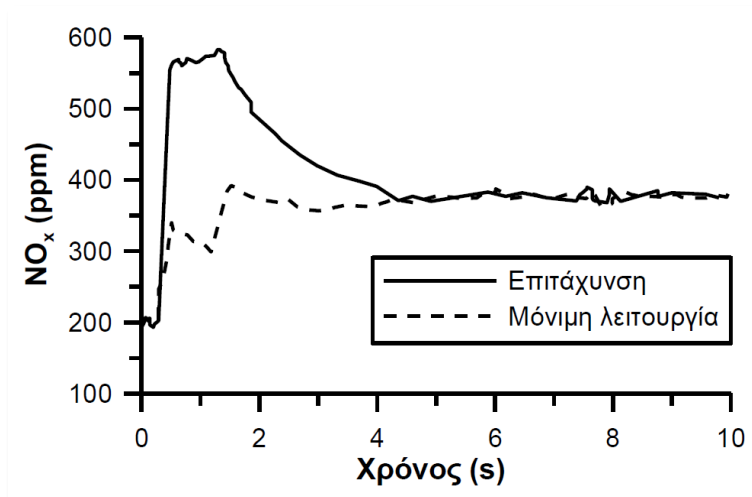
3.3 Εκπομπές καυσαερίων κατά τη μεταβατική λειτουργία στροβιλο-υπερπληρωμένων κινητήρων Diesel

Σε σύγκριση με την μόνιμη λειτουργία, κατά την μεταβατική λειτουργία παρατηρείται «χειροτέρευση» της καύσης (λόγω απότομης μείωσης της τιμής του λ_a σε τιμές ακόμα και κάτω από τη μονάδα) και κατά συνέπεια στιγμιαία ραγδαία αύξηση της εκπομπής των αέριων αλλά και των σωματιδιακών ρύπων. Το φαινόμενο οφείλεται κατά βάση στην υστέρηση του υπερπληρωτή (turbo lag).

Ακολουθούν αντιπροσωπευτικά διαγράμματα που αποτυπώνουν την υπερακόντιση των εκπομπών NO_x και σωματιδίων κατά την φάση της απότομης επιτάχυνσης κινητήρων Diesel (Σχήμα 3.6 και 3.7).



Σχήμα 3.6: Διάγραμμα απεικόνισης της υπερακόντισης των εκπομπών σωματιδίων κατά τη φάση επιτάχυνσης [2]



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα απεικόνισης της υπερακόντισης των εκπομπών NO_x κατά τη φάση επιτάχυνσης [2]

4. Επίδραση της εξωτερικής θερμοκρασίας

Στην παρούσα μελέτη θα παρουσιαστεί η επίδραση των εξωτερικών συνθηκών περιβάλλοντος στην λειτουργία ενός τετράχρονου κινητήρα Diesel σε επιδόσεις και εκπομπές ρύπων.

Γενικότερα, ως παράμετροι για την περιγραφή των εξωτερικών συνθηκών περιβάλλοντος χρησιμοποιούνται η θερμοκρασία, η πίεση και η υγρασία. Έχοντας ως δεδομένο ότι οι υψομετρικές διαφορές στην επιφάνεια της γης επιφέρουν μικρές διαφοροποιήσεις στην ατμοσφαιρική πίεση και την πυκνότητα του αέρα και λαμβάνοντας υπόψη ότι το μεγαλύτερο μέρος της ανθρώπινης δραστηριότητας αναπτύσσεται σε υψόμετρα μικρότερα των 1000m, στην παρούσα εργασία θα αγνοηθεί σκοπίμως η επίδραση του υψομέτρου και θα παρουσιαστούν αποτελέσματα για την επίδραση που επιφέρει η κύρια παράμετρος των συνθηκών περιβάλλοντος που είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας για τυπικές τιμές υγρασίας.

Από τη καταστατική εξίσωση διαπιστώνεται ότι για δεδομένη ατμοσφαιρική πίεση, η μεταβολή της θερμοκρασίας προκαλεί μεταβολή στην πυκνότητα του ρευστού με σχέση αναλογίας. Οι μεταβολές αυτές, σε πραγματικές συνθήκες περιβάλλοντος, είναι σημαντικές. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε χώρες όπως η Ελλάδα, η διαφορά μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης στιγμιαίας θερμοκρασίας που παρουσιάζεται στη διάρκεια ενός έτους μπορεί να ξεπεράσει και τους 45°C.

Πέρα από τη θερμοκρασία της γόμωσης που εισέρχεται εντός των κυλίνδρων, η θερμοκρασία περιβάλλοντος παίζει καθοριστικό ρόλο και στο ρυθμό απαγωγής θερμότητας από τις διάφορες σωληνώσεις του κινητήρα, στις διατάξεις εισαγωγής και εξαγωγής. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ σωληνώσεων και του περιβάλλοντος τόσο εντονότερη γίνεται και η αποβολή θερμότητας μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας.

Τέλος, η θερμοκρασία περιβάλλοντος έχει επίδραση και στην λειτουργία του κινητήρα και κατά την φάση της ψυχρής εκκίνησης, όπου όλα τα συστήματα βρίσκονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η επίδραση αυτή γίνεται εντονότερη για χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος που αποκλίνουν σε μεγάλο βαθμό από την θερμοκρασία κανονικής λειτουργίας.

5. Μεταβατικοί κύκλοι πόλης

5.1 Γενικά

Εξαιτίας των εκπομπών ρύπων και των αρνητικών συνεπειών, για τον άνθρωπο και το περιβάλλον, που παρατηρήθηκαν από τα μέσα του προηγούμενου αιώνα, επιβλήθηκε, από την νομοθεσία η συμμόρφωση των οχημάτων σε επιτρεπτά όρια εκπομπών, τα οποία ελέγχονταν μέσω της υποβολής των οχημάτων σε τυποποιημένες δοκιμές. Στις δοκιμές αυτές, οι οποίες ονομάζονται (μεταβατικοί) κύκλοι πόλης (driving cycles), υποβάλλεται σε δοκιμή ολόκληρο το όχημα (όπου αυτό είναι εφικτό) ώστε να εξαχθούν ρεαλιστικά αποτελέσματα. Με την βοήθεια εξειδικευμένου προσωπικού και εξοπλισμού, το όχημα εξετάζεται, σε ένα μεγάλο εύρος σημείων λειτουργίας, για διάφορες τιμές στροφών και φορτίου, για μεταβατικές περιόδους (π.χ. επιταχύνσεις) και για διάρκεια μιας τυπικής μέσης καθημερινής διαδρομής, ώστε να εξαχθούν μετρήσεις που αντιπροσωπεύουν το ποσό ρύπων που το όχημα εκπέμπει σε μια, κατά το δυνατόν, τυποποιημένη διαδρομή πόλης.

Η καθιέρωση μια τυποποιημένης πρακτικής δοκιμών, όπως η μεταβατικός κύκλος πόλης, στον οποίο υπόκεινται όλα τα οχήματα παραγωγής αποτελεί ένα χρήσιμο μέτρο σύγκρισης μεταξύ των οχημάτων και δίνει τη δυνατότητα στις κατασκευάστριες εταιρείες να ελέγχουν με αξιόπιστο τρόπο την αποδοτικότητα των αντιρρυπαντικών συστημάτων.

Προκειμένου η δοκιμή να δίνει αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα πραγματικών συνθηκών λειτουργίας και παράλληλα να ελαχιστοποιεί την πιθανότητα ύπαρξης τεχνικών διαστρέβλωσης των αποτελεσμάτων από τις κατασκευάστριες εταιρείες, ο μεταβατικός κύκλος πόλης θα πρέπει ιδανικά να εμπεριέχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ψυχρή εκκίνηση
- Θερμή εκκίνηση (επανεκκίνηση του κινητήρα μετά από σύντομη διακοπή της λειτουργίας του)
- Περιόδους μείωσης και αύξησης της ταχύτητας και του φορτίου με μεταβαλλόμενους ρυθμούς
- Λειτουργία σε άφορτη κατάσταση («ρελαντί») για την προσομοίωση οδήγησης σε αστικό δίκτυο
- Φάσεις λειτουργίας χαμηλών ταχυτήτων για την προσομοίωση οδήγησης σε επαρχιακό δίκτυο
- Φάσεις λειτουργίας υψηλών ταχυτήτων για την προσομοίωση οδήγησης σε αυτοκινητόδρομο

Το τελευταίο χαρακτηριστικό, οι αυστηρές εργαστηριακές συνθήκες, βοηθούν στη λήψη αξιόπιστων μετρήσεων και στον έλεγχο επίδρασης εξωτερικών παραγόντων όπως είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και η υγρασία, Προκειμένου να επιτευχθούν αυτές οι διατάξεις απαιτούνται πολύπλοκοι τεχνολογικοί εξοπλισμοί όπως αυτοματοποιημένες κλίνες, δυναμόμετρα, συστήματα ανάλυσης καυσαερίων κ.ά.

5.2 Δυναμόμετρα

Οι τυποποιημένες δοκιμές μεταβατικών κύκλων πόλης διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες όπως παρακάτω:

- **Μεταβατικοί κύκλοι σε δυναμόμετρο πλαισίου**

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι δοκιμές στις οποίες υποβάλλονται φορτηγά οχήματα ελαφρού τύπου, επιβατικά οχήματα και μοτοσυκλέτες, οχήματα δηλαδή που είναι εφικτό να τοποθετηθούν αυτούσια στην δοκιμαστική κλίνη.

- **Μεταβατικοί κύκλοι σε δυναμόμετρα κινητήρα**

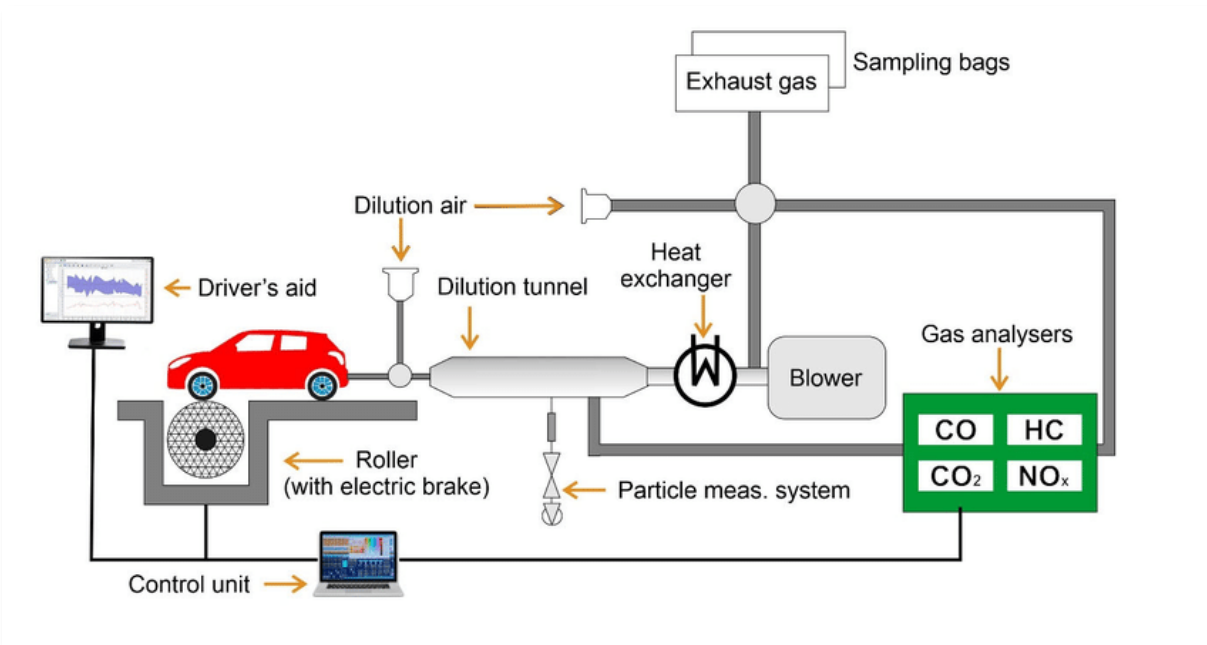
Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι δοκιμές στις οποίες υποβάλλονται κινητήρες βαρέως τύπου οχημάτων (αγροτικά μηχανήματα, μηχανήματα δομικών έργων, φορτηγά οχήματα, λεωφορεία κ.ά.), των οποίων οι φορείς είναι δύσκολο να τοποθετηθούν σε δοκιμαστικές κλίνες λόγω μεγέθους ή χαρακτηρίζονται από μεγάλη ποικιλία κινητήρων-αμαξωμάτων, καθιστώντας τον έλεγχό τους ιδιαίτερα χρονοβόρο και κοστοβόρο.

Δυναμόμετρα πλαισίου

Για την πραγματοποίηση του ελέγχου οχήματος σε δυναμόμετρο πλαισίου, απαιτείται εξειδικευμένος οδηγός χειριστής ώστε να ακολουθηθεί επακριβώς τον μεταβατικό κύκλο πόλης με όλες τις προδιαγεγραμμένες ενέργειες (επιταχύνσεις, επιβραδύνσεις, αλλαγές ταχυτήτων κ.λπ.) στον κατάλληλο χρόνο.

Το όχημα παραμένει σταθερό και οι κινητήριοι τροχοί περιστρέφονται στους κυλίνδρους του δυναμόμετρου οι οποίοι προσομοιώνουν τις δυνάμεις που ασκούνται στο όχημα (αδράνεια οχήματος, αντίσταση ανέμου, τριβή κύλισης) υπό κανονικές συνθήκες οδήγησης ενώ η απαγωγή θερμότητας από τον κινητήρα διευκολύνεται με τη χρήση ανεμιστήρα στο εμπρός τμήμα της κλίνης που προσομοιώνει το ρεύμα αέρος που προσκρούει στο όχημα εξαιτίας της κίνησής του. Η διαδρομή του οχήματος θεωρείται ευθεία και το επίπεδο οριζόντιο για αυτό και αγνοείται η οριζόντια συνιστώσα της βαρύτητας λόγω κλίσης εδάφους.

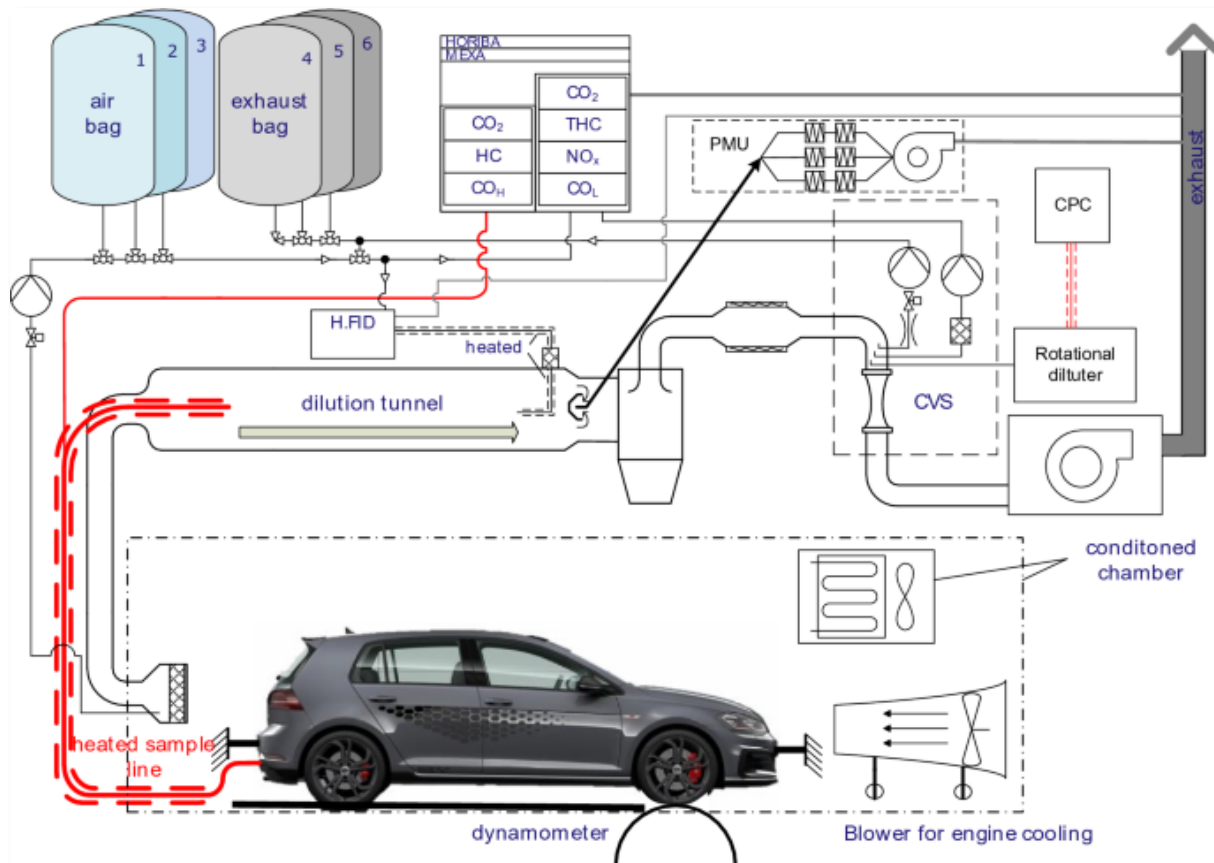
Τα καυσαέρια συλλέγονται μέσω αγωγού που τοποθετείται στην εξάτμιση του οχήματος και αναλύονται ηλεκτρονικά με ακριβή μεθοδολογία που περιλαμβάνει τις ειδικές παραμέτρους του κύκλου (ψυχρή/θερμή εκκίνηση, φορτίο, περιβαλλοντικές συνθήκες) ώστε να εξαχθούν αποτελέσματα για τα επίπεδα εκπομπών, το ποσοστό εκπομπής ανά ρύπο και την κατανάλωση καυσίμου (Σχήμα 5.1).



Σχήμα 5.1: Διάταξη ελέγχου οχήματος σε δυναμόμετρο πλαισίου

5.3 Μετρήσεις εκπομπών

Η μέθοδος με την οποία γίνεται η δειγματοληψία των καυσαερίων κατά τη δοκιμή του μεταβατικού κύκλου πόλης ονομάζεται δειγματοληψία σταθερού όγκου CVS (Constant Volume Sampling). Κατά την υλοποίηση αυτής της μεθόδου εφαρμόζεται αρχικά φίλτρο άνθρακα στην εισαγωγή του αέρα ώστε να διασφαλιστεί η απουσία ύπαρξης υδρογονανθράκων που δεν προέρχονται από την καύση εντός του κυλίνδρου που μπορεί να επηρεάσουν τις μετρήσεις. Στην συνέχεια, αυτό το ρεύμα αέρα αναμιγνύεται με τα καυσαέρια που εξέρχονται του κινητήρα και διοχετεύονται στο θάλαμο ανάμιξης. Από τον θάλαμο αυτό το ρευστό μίγμα οδηγείται σε σωλήνα αραιώσης και στη συνέχεια περνά από αντλία θετικής εκτόπισης για την διατήρηση σταθερής παροχής όγκου και από εναλλάκτη θερμότητας για την διατήρηση θερμοκρασίας εντός των προκαθορισμένων τιμών. Τελικά, το ρευστό περνά από αγωγούς δειγματοληψίας καθένας από τους οποίους οδηγεί σε ψηφιακό αναλυτή που εξαγει μετρήσεις για τη συγκέντρωση συγκεκριμένου εκπεμπόμενου ρύπου. Στην παραπάνω διάταξη (Σχήμα 5.2) προστίθενται φυσικά και επιμέρους εξαρτήματα όπως σάκοι συλλογής των αραιωμένων δειγμάτων καθώς και αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, πίεσης και παροχής για την εξακρίβωση της ομαλής διεξαγωγής του ελέγχου σε όλες τις φάσεις λειτουργίας.



Σχήμα 5.2: Τυπική διάταξη δειγματοληψίας σταθερού όγκου CVS

5.4 Μεταβατικός κύκλος WLTC

Ο πρώτος κύκλος πιστοποίησης που εφαρμόστηκε στην Ευρώπη (1970-1991) ήταν ο ECE-15 (Economic Commission for Europe) που περιλάμβανε μόνο αστική οδήγηση. Στη συνέχεια προστέθηκε ένα επιπλέον τμήμα ECE+EUDC (extra urban driving cycle) και από το 2000 έως τον 8/2017 καθιερώθηκε η πιστοποίηση με βάση τον «νέο» μεταβατικό κύκλο NEDC (New European Driving Cycle), ο οποίος είναι ουσιαστικά ίδιος με τον ECE+EUDC, με τη διαφορά ότι η έναρξη της δειγματοληψίας ξεκινά με την έναυση του κινητήρα χωρίς να προηγείται προθέρμανση 40 s όπως ίσχυε στον προηγούμενο.

Παρόλα αυτά, ο κύκλος NEDC παρέμενε ένα απλοϊκό πρότυπο δοκιμών με μικρό εύρος σημείων λειτουργίας, ήπιες μεταβολές ταχύτητας και μεγάλα τμήματα σταθερής λειτουργίας με αποτέλεσμα να μην δίνει αντιπροσωπευτικές μετρήσεις των πραγματικών συνθηκών οδήγησης. Έτσι, το Νοέμβριο του 2007 η Παγκόσμια Επιτροπή για την Εναρμόνιση των Κανονισμών Οχημάτων (WP.29) προχώρησε στη σύσταση ομάδας για την ανάπτυξη μιας νέας πρότυπης παγκόσμιας διαδικασίας πιστοποίησης WLTP Worldwide harmonized Light Vehicle Test Procedure) και του αντίστοιχου μεταβατικού κύκλου δοκιμών WLTC (Worldwide Light-duty Driving Cycle)

Το νέο αυτό πρόγραμμα κατά την ανάπτυξή του περιέλαβε τρεις φάσεις:

- Φάση 1 (2009-2014)

Κατά την φάση αυτή καθιερώνεται η εφαρμογή του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης (WLTC), που προσομοιώνει ρεαλιστικές συνθήκες οδήγησης, υλοποίηση της διαδικασίας καταμέτρησης και ελέγχου των ρύπων, μέτρηση του διοξειδίου του άνθρακα CO₂ και της κατανάλωσης του καυσίμου και κατά συνέπεια της μέτρησης της αποδιδόμενης ενέργειας.

- Φάση 2 (2014-2018)

Κατά τη φάση αυτή προστίθεται δοκιμή σε χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος και μεγάλο υψόμετρο, γίνεται αυστηρός έλεγχος για την τήρηση των προτύπων, δίνονται τεχνικές προδιαγραφές για την ενσωμάτωση διαγνωστικού συστήματος στα οχήματα (on-board diagnostics OBD), γίνεται αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης του κινητού συστήματος κλιματισμού και τέλος γίνεται μέτρηση των εκπομπών ρύπων με συστήματα που εφαρμόζονται εκτός δρόμου σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

- Φάση 3 (2018-σήμερα)

Κατά την φάση αυτή επιβάλλονται πιο αυστηρά όρια στις εκπομπές ρύπων και νέες οριακές τιμές των συστημάτων OBD, γίνεται καθορισμός των καυσίμων αναφοράς και σύγκριση με τις απαιτήσεις κάθε περιοχής.

Η ανάπτυξη του εν λόγω προγράμματος ξεκίνησε το 2009 και από τότε έχει υποστεί αρκετές αναθεωρήσεις ώπου να αποδώσει ικανοποιητικά τις πραγματικές συνθήκες οδήγησης.

Για την λήψη των δεδομένων συμμετείχαν αρκετές χώρες της Ευρώπης, η Ινδία, η Ιαπωνία, η Νότια Κορέα και οι ΗΠΑ, ενώ συνολικά συλλέχθηκαν 766.000 km οδικών δεδομένων από διάφορα μοντέλα οχημάτων, κυρίως επιβατικά αυτοκίνητα αλλά και ελαφρού τύπου φορτηγά και λεωφορεία. με τη χρήση ενσωματωμένων οργάνων στα οχήματα και με τη βοήθεια επαγγελματιών οδηγών που είχαν λάβει συγκεκριμένες οδηγίες οδικής συμπεριφοράς.

Σε παλαιότερους κύκλους πόλης η κατηγοριοποίηση γινόταν με βάση τα χαρακτηριστικά των δρόμων, δηλαδή αστικό δίκτυο (urban), αγροτικό δίκτυο (rural) και αυτοκινητόδρομος (motorway) γεγονός που δεν έδινε συνολικά αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα καθώς η κατάσταση των δρόμων και τα όρια ταχύτητας στα δίκτυα αυτά διαφέρουν σημαντικά από χώρα σε χώρα.

Σε αντίθεση με την παλαιότερη πρακτική, για την υλοποίηση του WLTC η κατηγοριοποίηση των διαδρομών έγινε με βάση την μέγιστη ταχύτητα που επιβάλλεται σε αυτές. Κατά συνέπεια, με κριτήριο την ταχύτητα, προέκυψαν τέσσερις φάσεις διαδρομών που διαμορφώνονται ως εξής:

- Χαμηλή (μέχρι 60 km/h), αποτελούμενη από 97.1% αστικό δίκτυο,
- Μεσαία (από 60 km/h έως 80 km/h), αποτελούμενη από 80.7% αστικό δίκτυο και 19.2% επαρχιακό δίκτυο,
- Υψηλή (από 80 km/h έως 110 km/h), αποτελούμενη από 28.3% αστικό δίκτυο και κατά 71.5% επαρχιακό δίκτυο,
- Υπερ-υψηλή (μεγαλύτερη των 110 km/h), αποτελούμενη από 12% αστικό δίκτυο, 55% επαρχιακό δίκτυο και 32.9% από διαδρομές σε αυτοκινητόδρομο.

Τελικά, με βάση αυτή την κατηγοριοποίηση διαδρομών, που δίνει μια μέση προσέγγιση για το οδικό δίκτυο παγκοσμίως, αναπτύχθηκαν τρεις κλάσεις αξιολόγησης των οχημάτων με κριτήριο την αναλογία ισχύος-μάζας PMR (Power to Mass Ratio) απουσία πρόσθετου φορτίου, ως εξής:

- **Κλάση WLTC 1 (PMR < 22 kW/t)**

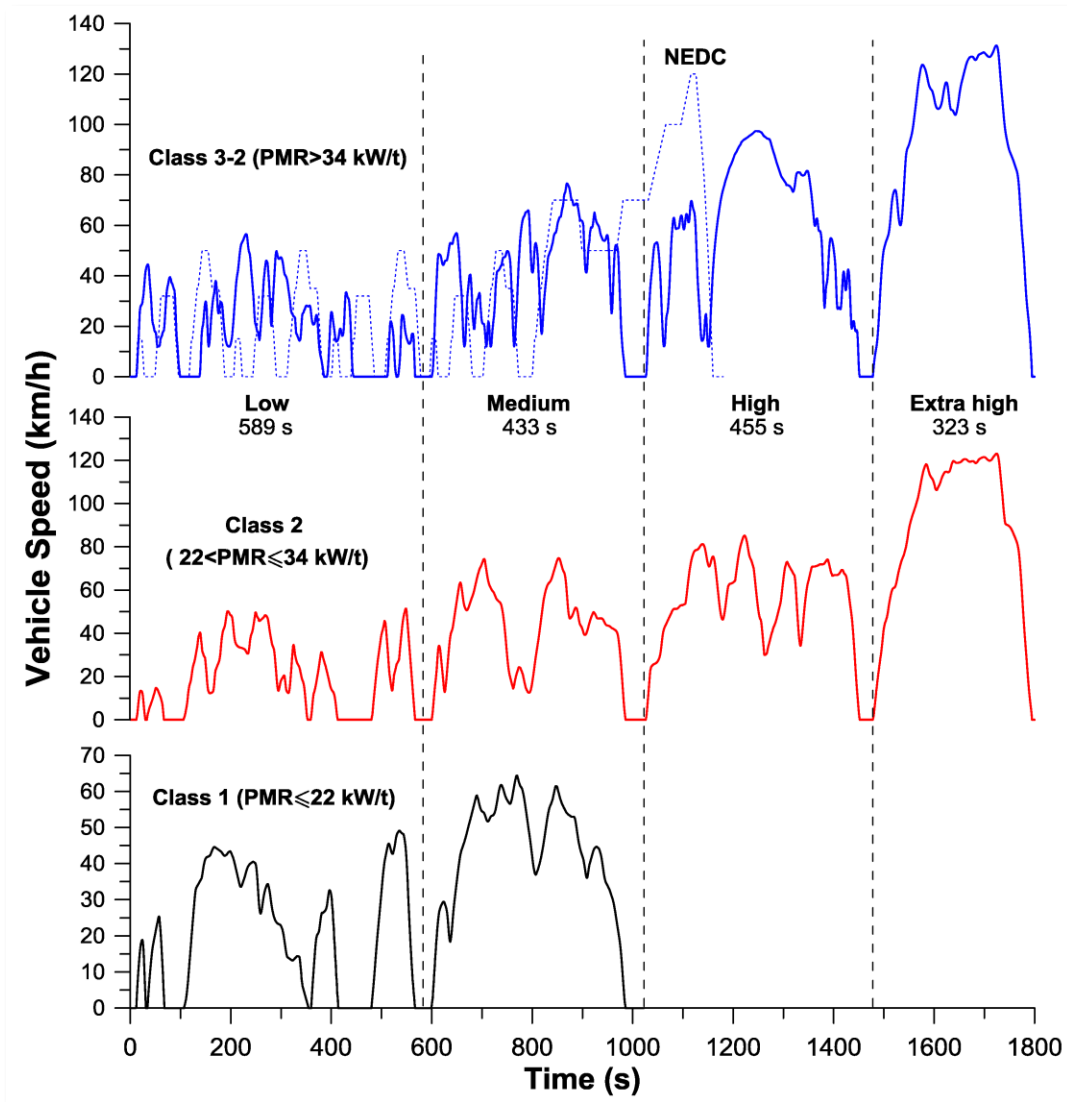
Σε αυτή αξιολογούνται για την πλήρωση των προδιαγραφών εκπομπής ρύπων που επιβάλλει κάθε χώρα, οχήματα με χαμηλή αναλογία ισχύος-μάζας και περιλαμβάνει εύρος ταχυτήτων μόνον από την χαμηλή και μεσαία φάση.

- **Κλάση WLTC 2 (22 kW/t < PMR < 34 kW/t)**

Σε αυτή αξιολογούνται οχήματα μέσης αναλογία ισχύος-μάζας και περιλαμβάνει και της τέσσερις φάσης διαδρομών αλλά με σχετικά ήπιες επιταχύνσεις. Με επιλογή της εκάστοτε χώρας (όπως η Κίνα, η Ινδία κ.λπ.), η υπερυψηλή φάση μπορεί να αποκλειστεί εάν θεωρηθεί ότι δεν αντιπροσωπεύει τα δεδομένα των εγχώριων συνθηκών οδήγησης.

- **Κλάση WLTC 3 (PMR > 34 kW/t)**

Σε αυτή εμπεριέχονται δύο εκδοχές: α) Η εκδοχή 3-1 ή 3a στην οποία αξιολογούνται οχήματα με μέγιστη ταχύτητα μικρότερη από 120 km/h και β) Η εκδοχή 3-2 ή 3b στην οποία αξιολογούνται οχήματα με μέγιστη ταχύτητα μεγαλύτερη των 120 km/h. Ομοίως με την προηγούμενη κλάση, περιλαμβάνονται και οι τέσσερις φάσεις διαδρομών με εντονότερους ρυθμούς επιτάχυνσης και υψηλότερες μέγιστες ταχύτητες ενώ είναι στην ευχέρεια της κάθε χώρας ο αποκλεισμός της υπερυψηλής φάσης εάν δεν είναι αντιπροσωπευτική για τις μέγιστες τιμές ταχυτήτων κυκλοφορίας των οχημάτων σε αυτή (βλ. Σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3: Μεταβατικοί κύκλοι πόλης NEDC και WLTC 1, 2 και 3 [1]

Προκειμένου να παραχθούν αξιόλογες και ακριβείς μετρήσεις αλλά ταυτόχρονα να είναι εφικτή η εργαστηριακή δοκιμή χωρίς μεγάλες δαπάνες κόστους και χρόνου, η μέγιστη διάρκεια που καθιερώθηκε για την διεξαγωγή του κύκλου WLTC είναι τα 1800s, εύλογη διάρκεια που είχε ήδη καθιερωθεί στους προγενέστερους κύκλους WTVC (βαρέων οχημάτων) και WMTC (μοτοσυκλετών).

6. Μοντελοποίηση οχήματος στο υπολογιστικό πακέτο GT-Power

6.1 Εισαγωγή στο λογισμικό GT-Suite

Το GT-SUITE, αποτελεί προϊόν της αμερικανικής εταιρείας Gamma Technologies και είναι εργαλείο προσομοίωσης εφαρμογών κινητήρων/αυτοκίνησης με παγκόσμια απήχηση. Το λογισμικό αυτό περιέχει βιβλιοθήκες που επιτρέπει σε μηχανικούς τον γρήγορο σχεδιασμό μοντέλων την μελέτη παραμετρικής απόκρισης συστημάτων με μεγάλη ακρίβεια και την εξαγωγή ρεαλιστικών αποτελεσμάτων που μπορούν να αποτελέσουν δεδομένα έρευνας σε μικρό χρόνο και με μηδενικό κόστος. Το GT-SUITE χρησιμοποιείται ευρέως στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας, επιτρέποντας στους χρήστες την προσομοίωση κινητήρων, συστημάτων μετάδοσης κίνησης, την μελέτη αντιρρυπαντικών συστημάτων κλπ.

Πιο συγκεκριμένα, το GT-SUITE δίνει τη δυνατότητα προσομοίωση σε εφαρμογές όπως:

- Μοντελοποίηση κινητήρων (GT-Power)
- Επεξεργασία δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων
- Ακουστική συστήματος εισαγωγής και εξαγωγής
- Επεξεργασία καυσαερίων
- Δυναμική οχήματος
- Υβριδικά συστήματα, ηλεκτροκίνητα οχήματα και κυψέλες καυσίμου
- Συστήματα ψύξης κινητήρων
- Συστήματα λίπανσης
- Συστήματα έγχυσης καυσίμου
- Υδραυλικά και πνευματικά συστήματα
- Κινηματική και δυναμική εκκεντροφόρου και συστήματος βαλβίδων
- Κινηματική και δυναμική στροφαλοφόρου
- Συστήματα μετάδοσης κίνησης (κιβώτια ταχυτήτων και μαντοκίνηση)

Στην παρούσα εργασία, ο κινητήρας και η διάταξη δοκιμών προσομοιώθηκαν με τη βοήθεια του υποπρογράμματος GT-POWER, άδεια χρήσης για το οποίο παρέχεται μέσω του εργαστηρίου MEK του ΕΜΠ.

6.2 Εισαγωγή στο υποπρόγραμμα GT – Power

Το GT-POWER είναι ένα από τα υποπρόγραμμα του GT-SUITE που αφορά στην μοντελοποίηση κινητήρων με θέματα όπως οι επιδόσεις κινητήρων (engine performance) και η μετεπεξεργασία καυσαερίων (exhaust aftertreatment). Το περιβάλλον εργασίας το προγράμματος είναι ιδιαίτερα προσιτό στο χρήστη (βλ. Σχήμα 6.1) με αντικειμενοστραφή δομή που επιτρέπει την γρήγορη εξοικείωση και την ανάπτυξη μοντέλων με την χρήση προτύπων που είναι εύκολα αντιληπτά και προσαρμόσιμα.

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου γίνεται ουσιαστικά με την υλοποίηση τριών βασικών βημάτων όπως παρακάτω:

- Δημιουργία βιβλιοθήκης εργασίας (project library)

Το GT-POWER περιέχει αποθηκευμένες βιβλιοθήκες με πρότυπα στοιχεία – εργαλεία (templates) για την ανάπτυξη και προσομοίωση μοντέλων όπως κινητήρες, οχήματα κ.λπ. Τα πρότυπα αυτά εργαλεία διαθέτουν χαρακτηριστικά (attributes) τα οποία μεταβάλλονται ώστε να αντιστοιχούν στην εκάστοτε εφαρμογή. Ο χρήστης αφού μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά των στοιχείων, τα μεταφέρει στην βιβλιοθήκη του έργου (project library) και με τον τρόπο αυτό τα πρότυπα στοιχεία μετατρέπονται σε αντικείμενα (objects) τα οποία μπορούν να διαμορφωθούν και να χρησιμοποιηθούν όσες φορές απαιτεί η ανάπτυξη του μοντέλου (π.χ. κύλινδροι, εγχυτήρες, σωληνώσεις πολλαπλής εισαγωγής).

- Μεταφορά αντικειμένων στο χάρτη εργασίας (project map)

Αφού ολοκληρωθεί η βιβλιοθήκη εργασίας (project library), ο χρήστης θα πρέπει να μεταφέρει στο χάρτη εργασίας (project map) τα διαμορφωμένα αντικείμενα (objects) και να τα τοποθετήσει με τρόπο τέτοιο ώστε να προσομοιώνουν το υπό ανάπτυξη μοντέλο (κινητήρας, όχημα, κ.λπ.) και να διευκολύνεται χωροταξικά το επόμενο βήμα που είναι οι συνδέσεις.

- Υλοποίηση επιμέρους συνδέσεων

Εφόσον τα αντικείμενα (objects) είναι πλέον διαμορφωμένα και κατάλληλα τοποθετημένα στο χάρτη εργασίας (project map), ο χρήστης θα πρέπει να υλοποιήσει τις συνδέσεις μεταξύ των αντικειμένων (objects) μετατρέποντάς τα σε μέρη (parts) του μοντέλου που προσομοιώνεται.

Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα μονογραμμικό σχέδιο στο οποίο όλα τα επιμέρους κομμάτια συνδέονται και αποκτούν εξάρτηση μεταξύ τους, όπως συμβαίνει και στην πραγματικότητα μεταξύ των μερών ενός συστήματος.

Με την ολοκλήρωση του μοντέλου δίνεται η δυνατότητα προσομοίωσης της λειτουργίας του κινητήρα όπου ο χρήστης μπορεί να «τρέξει» σενάρια (cases) σε μόνιμη ή μεταβατική λειτουργία με συνθήκες που ορίζει ο ίδιος ή χρησιμοποιώντας τυποποιημένους μεταβατικούς κύκλους (driving cycles).

6.3 Μοντελοποίηση κινητήρα προσομοίωσης

6.3.1 Χαρακτηριστικά κινητήρα

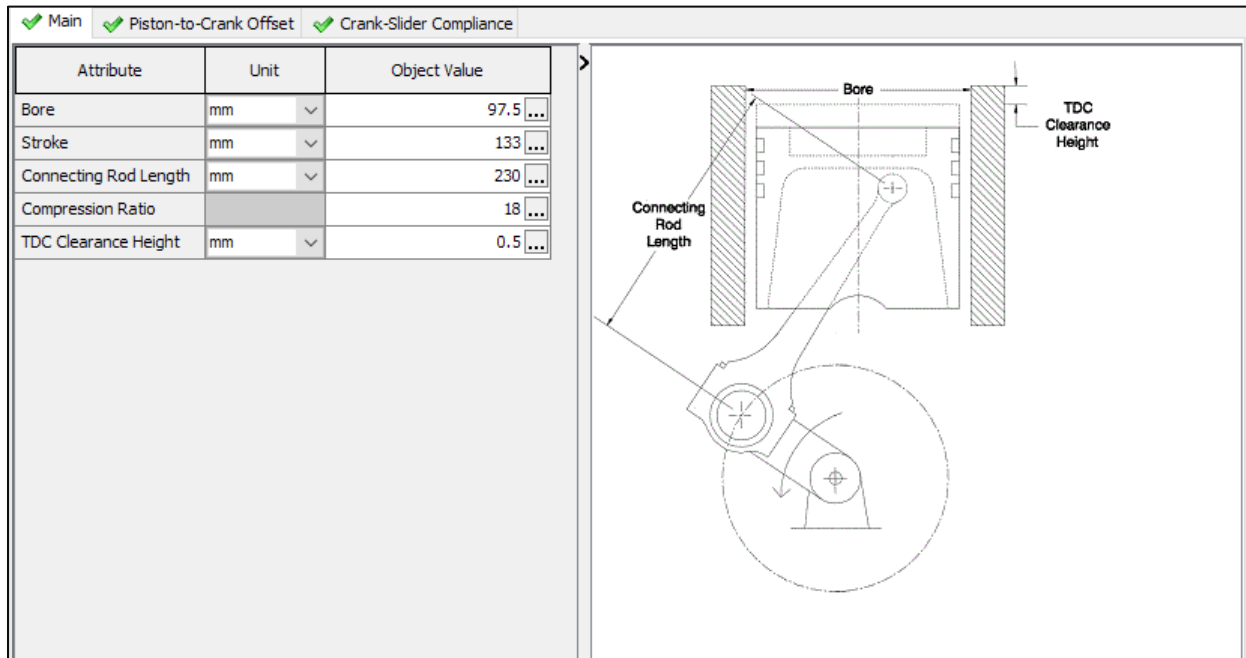
Στην παρούσα εργασία θα γίνει προσομοίωση ενός στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel άμεσης έγχυσης με ενδιάμεσο ψυγείο του αέρα υπερπλήρωσης (aftercooling). Τα χαρακτηριστικά του κινητήρα αντλήθηκαν από το μοντέλο OM366LA της Mercedes-Benz το οποίο είναι εγκατεστημένο στο εργαστήριο Μηχανών Εσωτερικής Καύσης της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Τα χαρακτηριστικά του κινητήρα είναι τα παρακάτω:

- Διάμετρος εμβόλου: $D = 97.5 \text{ mm}$
- Διαδρομή εμβόλου: $s = 133 \text{ mm}$
- Ακτίνα στροφάλου: $r = 66.5 \text{ mm}$
- Μήκος διωστήρα: $L = 230 \text{ mm}$
- Γωνία στροφάλου κατά τη στιγμή ανοίγματος της βαλβίδας εξαγωγής: $\phi_{\text{ενο}} = 112^\circ \mu. \text{ ANS}$
- Βαθμός συμπίεσης: $CR = 18$
- Κύλινδροι: $z = 6$ σε σειρά
- Ολικός όγκος εμβολισμού: $V_h = 5958 \text{ cm}^3$
- Επιζήμιος όγκος κυλίνδρου: $V_c = 58.4 \text{ cm}^3$
- Όγκος κοιλότητας εμβόλου: $V_{\text{bowl}} = 48.5 \text{ cm}^3$
- Μέγιστη ισχύς: $P_{\text{max}} = 177 \text{ kW} = 237 \text{ HP}$
- Ροπή αδράνειας κινητήρα: $G_e = 0.87 \text{ kg/m}^2$

Η σειρά ανάφλεξης των κυλίνδρων είναι 1-5-3-6-2-4, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται τέλεια εγγενής ζυγοστάθμιση και χωροταξικά ευνοϊκή έξοδος των καυσαερίων σε δύο αυλούς πολλαπλής εξαγωγής (3 κύλινδροι ανά αυλό, οι 1-2-3 και οι 4-5-6).

Η μεταφορά των στοιχείων αυτών στο πρόγραμμα γίνεται μέσω παραθύρων εισαγωγής δεδομένων με οδηγίες και απεικονίσεις προσιτές στο χρήστη. (βλ. Σχήμα 6.2)



Σχήμα 6.2: Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων γεωμετρικών διαστάσεων του κυλίνδρου

Όλες οι διεργασίες εντός των κυλίνδρων πραγματοποιούνται ανά γωνία στροφάλου (filling and emptying method), ενώ για την καύση γίνεται χρήση των εξισώσεων του Wiebe. Τέλος, όσον αφορά τις απώλειες θερμότητας γίνεται χρήση της σχέσης του Woschni, ενώ για τους αυλούς της πολλαπλής εξαγωγής γίνεται χρήση της μεθόδου προσομοίωσης δράσης των κυμάτων πίεσης (pressure wave action simulation)

6.3.2 Μοντελοποίηση επιμέρους τμημάτων

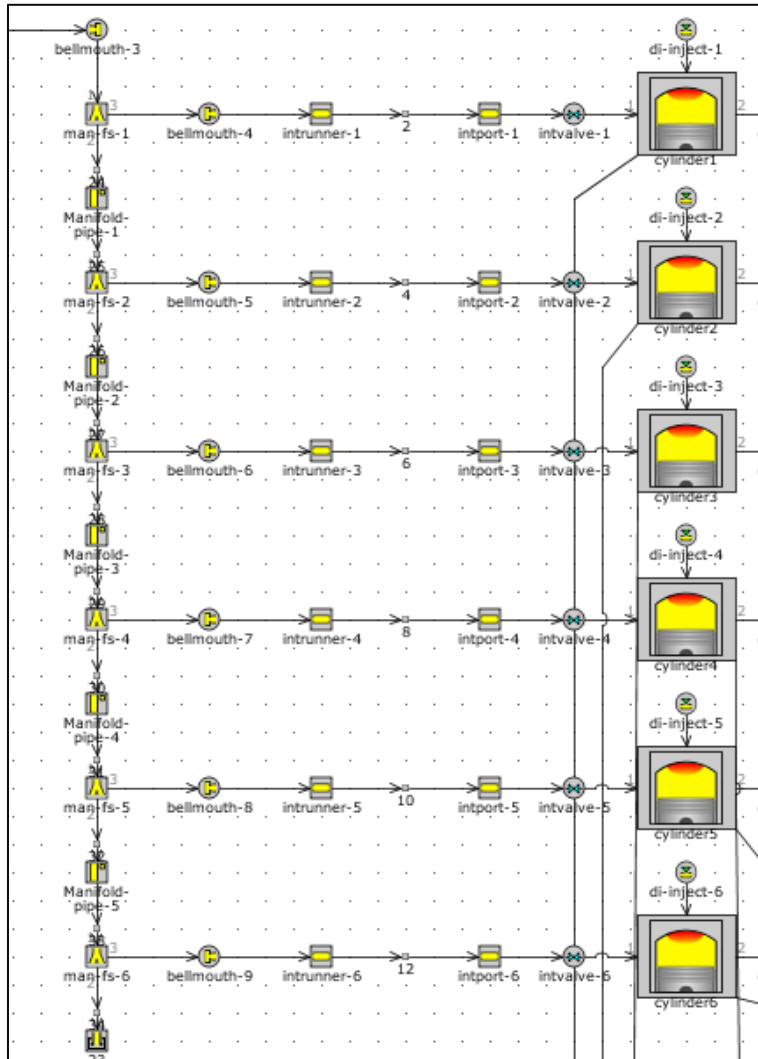
- **Πολλαπλή εισαγωγής**

Η πολλαπλή εισαγωγής απαρτίζεται από ένα σύστημα σωλήνων (pipes) διακλαδώσεων (flow splits), θυρίδων (inports) και βαλβίδων (intvalves) εισαγωγής που προσομοιώνουν ρεαλιστικά το δίκτυο που ακολουθεί το ρεύμα αέρα από την έξοδο του ψυγείου έως την είσοδο στους κυλίνδρους (Σχήμα 6.3).

Για την απλούστευση του σχεδιασμού, οι σωλήνες εισαγωγής επιλέχθηκαν να είναι κάθετοι στον σωλήνα εισόδου της πολλαπλής εισαγωγής όπως αποτυπώνεται και στο παρακάτω σχήμα.

Οι σωλήνες εισαγωγής, που συνδέουν της θυρίδες εισαγωγής με τον κοινό αυλό της πολλαπλής εισαγωγής που διοχετεύει αέρα από το ψυγείο, διαμορφώθηκαν με διάμετρο 50 mm, μήκος 120 mm και υλικό κατασκευής χυτοσίδηρο του οποίου η τραχύτητα προσομοιώνει ρεαλιστικά τις υπάρχουσες θερμικές απώλειες.

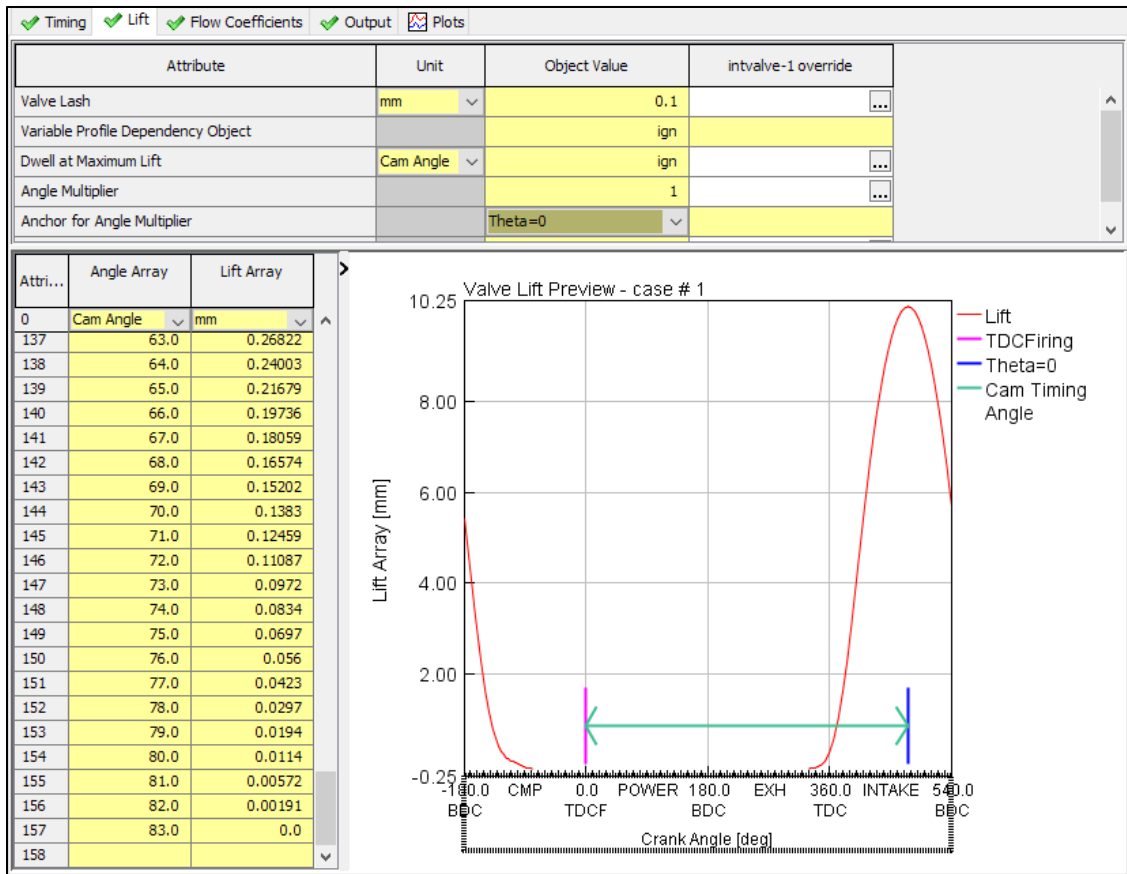
Οι αυλοί εισαγωγής επιλέχθηκε να έχουν διάμετρο 40 mm (ώστε να αποφευχθούν οι απώλειες ροής λόγω απότομης αλλαγής της διαμέτρου), μήκος 80 mm και ως υλικό κατασκευής ο χυτοσίδηρος, ενώ για την αγωγή θερμότητας από τις θερμότερες βαλβίδες προς τις θυρίδες επιλέχθηκε πολλαπλασιαστής μεταφοράς θερμότητας με τιμή 1,5.



Σχήμα 6.3: Πολλαπλή εισαγωγής στο χάρτη εργασίας του GT-Power

- **Βαλβίδες εισαγωγής**

Οι βαλβίδες εισαγωγής διαμορφώθηκαν με διάμετρο 42 mm, ανοίγουν στις 15° από το ΑΝΣ και κλείνουν στις 82° μετά το ΚΝΣ, ενώ η μέγιστη βύθιση είναι 10,204 mm όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.4).



Σχήμα 6.4: Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων των βαλβίδων εισαγωγής

• **Κύλινδροι**

Οι διαστάσεις των κυλίνδρων αναφέρονται στην προηγούμενη παράγραφο. Το υπολογιστικό μοντέλο του προγράμματος απαιτεί τον ορισμό θερμοκρασίας στις εσωτερικές επιφάνειες του κυλίνδρου για τις οποίες δόθηκαν τυπικές τιμές ως εξής: α) Θερμοκρασία κυλινδροκεφαλής (cylinder head) ίση με 550 K, β) Θερμοκρασία εμβόλων (pistons) ίση με 590 K, και γ) Θερμοκρασία τοιχωμάτων ίση με 450 K.

The figure shows a software interface with a table of combustion data. The table has columns for 'Attribute', 'Unit', and 'Object Value'. The data includes Ignition Delay, Premixed Fraction, Tail Fraction, Premixed Duration, Main Duration, Tail Duration, Premixed Exponent, Main Exponent, and Tail Exponent.

Attribute	Unit	Object Value
Ignition Delay		3
Premixed Fraction		0.02
Tail Fraction		0.05
Premixed Duration		2
Main Duration		35
Tail Duration		40
Premixed Exponent		def (=0.7)
Main Exponent		def (=0.9)
Tail Exponent		def (=1.5)

Σχήμα 6.5: Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων καύσης στον κύλινδρο

Για τους υπολογισμούς μεταφοράς θερμότητας ορίζονται οι εξής αναλογίες: α) Λόγος κεφαλής προς διάμετρο κυλίνδρου (head-bore ratio) και β) Λόγος εμβόλου προς διάμετρο κυλίνδρου (piston-bore area ratio) για τους οποίους δόθηκαν οι τιμές 1 και 1,2 αντίστοιχα και με τους οποίους προσδιορίζονται τα ποσά μεταφοράς θερμότητας προς την κεφαλή του κυλίνδρου και προς το έμβολο (Σχήμα 6.5).

- **Εγχυτήρες καυσίμου**

Οι εγχυτήρες καυσίμου επιλέχθηκε να έχουν 6 οπές με διάμετρο 0,3 mm (Σχήμα 6.6). Το καύσιμο που εγχέουν είναι diesel σε θερμοκρασία 300 K με χρονισμό έγχυσης 5° πριν το ΑΝΣ, ενώ η ποσότητα του εγχεόμενου καυσίμου μεταβάλλεται με παράμετρο το πεντάλ γκαζιού οπότε και ρυθμίζεται βάσει του πρότυπου μεταβατικού κύκλου πόλης WLTC class 3 που εφαρμόστηκε για την πραγματοποίηση των δοκιμών.

Attribute	Unit	Object Value	di-inject-1 override
Nozzle Hole Diameter	mm	0.3	
Number of Holes per Nozzle		6	
Nozzle Discharge Coefficient		def	
Injector Location (for Injection into Pipes)		ign	

Σχήμα 6.6: Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων εγχυτήρων καυσίμου

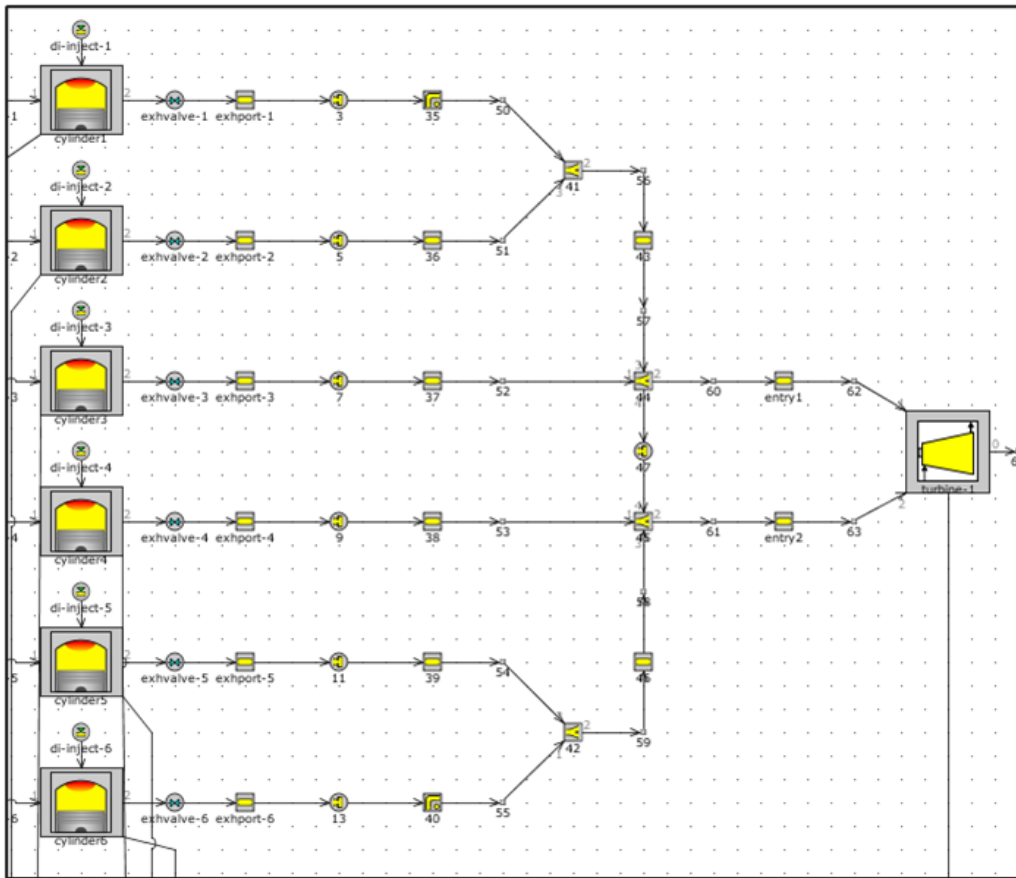
- **Βαλβίδες εξαγωγής**

Οι βαλβίδες εξαγωγής διαμορφώθηκαν με διάμετρο 36 mm, ανοίγουν στις 112° και κλείνουν στις 24° στον κύλινδρο, ενώ η μέγιστη βύθιση είναι 10,204 mm, όπως ακριβώς και με τις βαλβίδες εισαγωγής.

- **Πολλαπλή εξαγωγής**

Οι αυλοί εισαγωγής επιλέχθηκε να έχουν διάμετρο 30 mm (10 mm μικρότεροι από τους αυλούς εισαγωγής), μήκος 80 mm και ως υλικό κατασκευής ο χυτοσίδηρος, ενώ για την αγωγή θερμότητας από τις θερμότερες βαλβίδες προς τις θυρίδες επιλέχθηκε πολλαπλασιαστής μεταφοράς θερμότητας με τιμή 1,5.

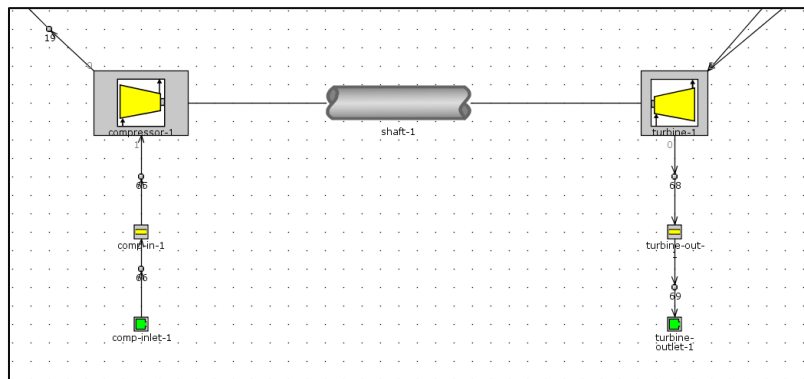
Οι σωλήνες εισαγωγής διαμορφώνονται με παρόμοιο τρόπο με αυτούς τις εισαγωγής. Ωστόσο, ιδιαίτερα σε στροβίλο-υπερπληρωμένους κινητήρες, όπως αυτός που μελετάται στην παρούσα εργασία, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε η έξοδος των καυσαερίων προς το στρόβιλο να γίνεται με την μορφή κυμάτων πίεσης που δεν αλληλοκαλύπτονται. Αυτό εξαρτάται από τον αριθμό των κυλίνδρων του κινητήρα και από τη σειρά ανάφλεξης του. Στην προκειμένη περίπτωση, υπάρχουν δύο οχετοί εξαγωγής στους οποίους οδηγούνται τα καυσαέρια των κατά αριθμηση 1-2-3 και 4-5-6 κυλίνδρων αντίστοιχα (βλ. Σχήμα 6.7). Ως θερμοκρασία στα τοιχώματα των σωληνώσεων ορίστηκε η τιμή 900K, η οποία προσομοιώνει μια τυπική τιμή καυσαερίων, ενώ στον πολλαπλασιαστή μεταφοράς θερμότητας δόθηκε η τιμή 1,5.



Σχήμα 6.7: Πολλαπλή εξαγωγή στο χάρτη εργασίας του GT-Power

- Ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης

Ο συμπιεστής που επιλέχθηκε είναι ακτινικός, δυναμικής ροής με χάρτη λειτουργίας οποίος αντλήθηκε από την βιβλιοθήκη του προγράμματος με συντελεστή παροχής μάζας 0,65 (κατόπιν δοκιμών ταιριάσματος). Η είσοδος του αέρα στο συμπιεστή γίνεται σε ατμοσφαιρική πίεση και σε θερμοκρασία που επιβάλλεται για την εκάστοτε δοκιμή, ενώ στην έξοδο συνδέεται με το ψυγείο ενδιάμεσης ψύξης του αέρα (Σχήμα 6.8).

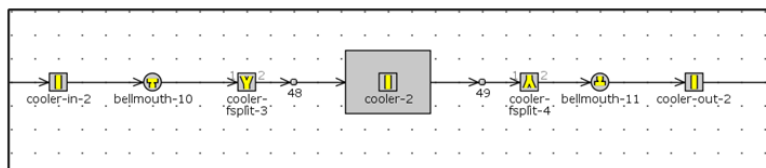


Σχήμα 6.8: Ζεύγος στροβιλο-υπερπληρωτή στον χάρτη εργασίας του GT-Power

Ο στρόβιλος είναι επίσης ακτινικός με χάρτη λειτουργίας που αντλήθηκε από την βιβλιοθήκη του προγράμματος, συντελεστή παροχής ίσο με 0,7 (κατόπιν δοκιμών ταιριάσματος), και η έξοδος του οδηγεί σε περιβάλλον με ατμοσφαιρικές συνθήκες πίεσης 1,01325 bar και θερμοκρασία σύμφωνη με αυτή που επιβλήθηκε για την εκάστοτε δοκιμή.

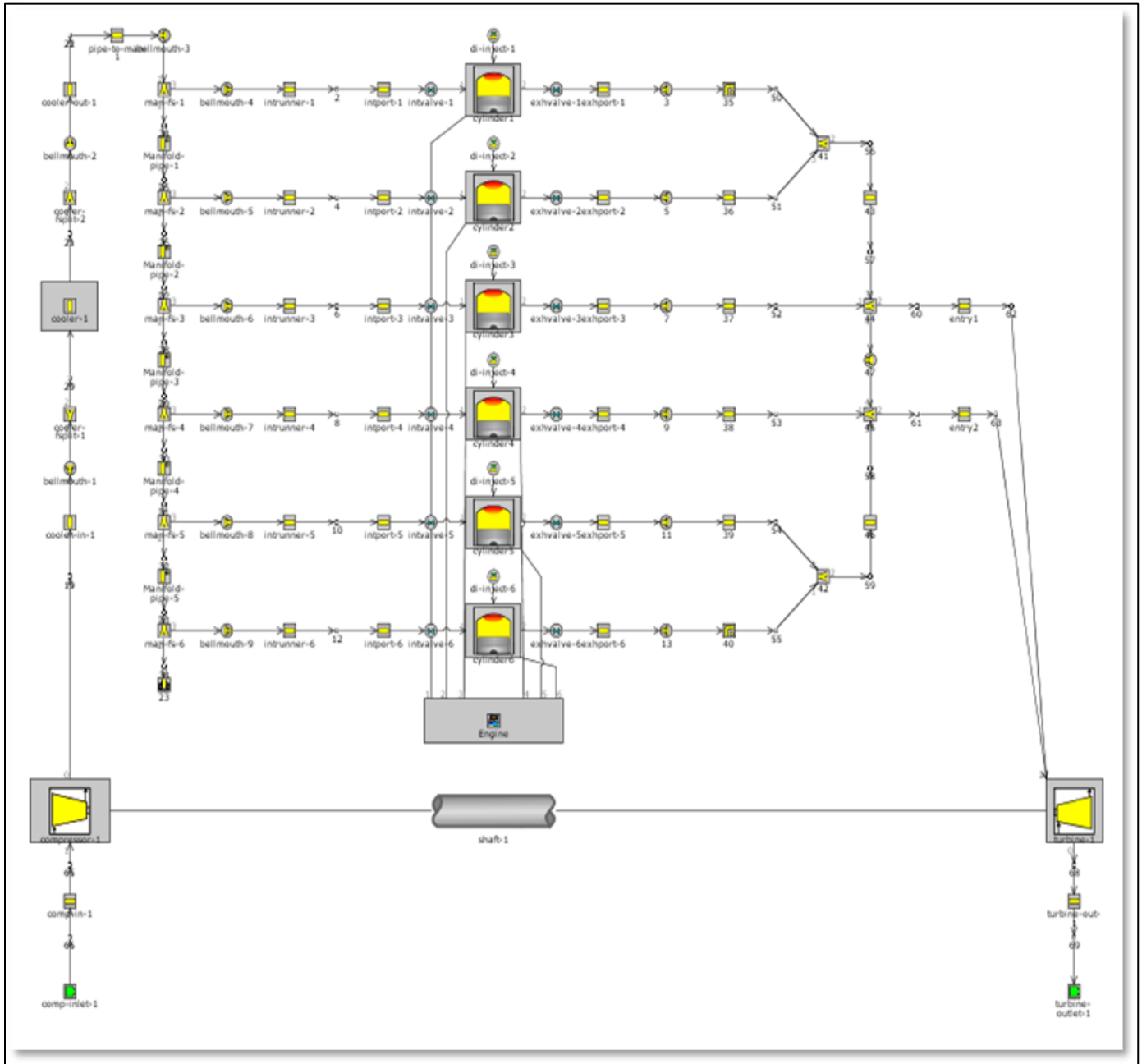
- **Ψυγείο ενδιάμεσης ψύξης του αέρα υπερπλήρωσης (intercooler)**

Μέσα στο ψυγείο ενδιάμεσης ψύξης του αέρα συντελείται ταυτόχρονη πτώση της πίεσης και της θερμοκρασίας. Στην είσοδο και στην έξοδο διαμορφώνεται με ένα στοιχείο διακλάδωσης σωλήνων το οποίο αποτελείται από 700 μικρούς σωλήνες διαμέτρου 2,6 mm και μήκους 300 mm αντιπροσωπεύοντας τη ροή που ακολουθεί το ρεύμα του ψυκτικού ρευστού διαμέσου του εναλλάκτη θερμότητας (ψυγείου). Για πολλαπλασιαστική μεταφοράς θερμότητας (heat transfer) ορίστηκε η τιμή 8, για πολλαπλασιαστική τριβής η τιμή 1, ενώ η θερμοκρασία των τοιχωμάτων υπό φυσιολογικές συνθήκες ρυθμίζεται περίπου στους 310K με μικρές μεταβολές ανάλογα με την επιλεχθείσα θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τις δοκιμές (Σχήμα 6.9).



Σχήμα 6.9: Ψυγείο ενδιάμεσης ψύξης στον χάρτη εργασίας του GT-Power

Η συνολική εικόνα του κινητήρα στο χάρτη εργασίας του GT- Power παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 6.10)



Σχήμα 6.10: Συνολική αποτύπωση στοιχείων κινητήρα στο χάρτη εργασίας (project map) του GT-Power

6.4 Μοντελοποίηση οχήματος και διάταξης δοκιμών

Τα χαρακτηριστικά του οχήματος που μοντελοποιήθηκε με την βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου GT-Power παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

Χαρακτηριστικά Οχήματος	
Μάζα (m_v)	3,5 tn
Μετωπική επιφάνεια (A_f)	3 m ²
Συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης (C_d)	0,38
Σχέσεις μετάδοσης κιβωτίου ταχυτήτων (i_g)	1 ^η – 5,78:1 2 ^η – 2,70:1 3 ^η – 1,90:1 4 ^η – 1,25:1 5 ^η – 1,00:1 6 ^η – 0,90:1
Ακτίνα τροχού (r_{wheel})	0,35 m
Μηχανικός βαθμός απόδοσης (η_{gear})	0,96



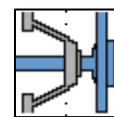
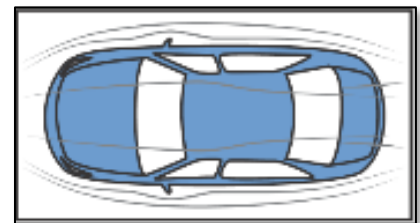
Σχήμα 6.11: Ενδεικτικό όχημα με τα χαρακτηριστικά του μοντέλου

Για την μοντελοποίηση του οχήματος (Σχήμα 6.11), των συστημάτων μετάδοσης κίνησης και των συστημάτων ελέγχου για την υλοποίηση των δοκιμών σε μεταβατικό κύκλο πόλης απαιτείται η εισαγωγή, στο χάρτη εργασίας, των στοιχείων που ακολουθούν στις παρακάτω υπο-ενότητες.

6.4.1 Κυρίως όχημα (αμάξωμα, σύστημα διεύθυνσης, σύστημα πέδησης)

Για την προσομοίωση του αμαξώματος του οχήματος απαιτείται η εισαγωγή του στοιχείου οχήματος (vehicle) όπου στα παράθυρα εισαγωγής δεδομένων δόθηκαν τιμές για χαρακτηριστικά μεγέθη του οχήματος (μάζα, πρόσθετο φορτίο κ.ά.), στοιχεία αεροδυναμικής (συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης, μετωπική επιφάνεια κ.ά.) και γεωμετρικές αμαξώματος (απόσταση μεταξονίων και άλλα)

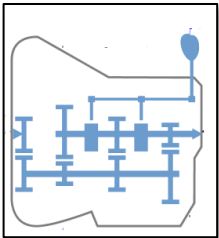
Στο στοιχείο του οχήματος προσαρτώνται τα επιμέρους στοιχεία των ημιαξονίων, των τροχών και των φρένων για τα οποία δίνονται τιμές σε χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την αδράνεια, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και παράγοντες ελέγχου λειτουργίας.



6.4.2 Σύστημα μετάδοσης κίνησης

Το σύστημα μετάδοσης κίνησης απαρτίζεται από τα παρακάτω επιμέρους στοιχεία:

- **Κιβώτιο ταχυτήτων (transmission)**

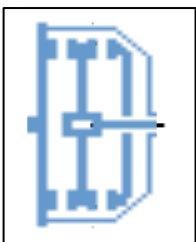


Το κιβώτιο ταχυτήτων (transmission) είναι ένα στοιχείο με πολλές συνδέσεις καθώς αντιπαραβάλλεται μεταξύ του συμπλέκτη και του άξονα μετάδοσης κίνησης, ενώ συνδέεται επίσης με το στοιχείο του εικονικού οδηγού (driver) που ελέγχει το πάτημα του συμπλέκτη και την επιλογή των σχέσεων των ταχυτήτων, τα οποία υποδεικνύονται από το επίσης συνδεδεμένο στοιχείο ελέγχου της διαδρομής (controller vehicle) που υλοποιεί τον μεταβατικό κύκλο πόλης. Η κύρια διαμόρφωση στην οποία υπόκειται είναι η επιλογή των σχέσεων μετάδοσης (gear ratio) που ανταποκρίνονται στα χαρακτηριστικά του οχήματος (Σχήμα 6.12).

<input checked="" type="checkbox"/> Forward Gears <input checked="" type="checkbox"/> Neutral Gear <input checked="" type="checkbox"/> Reverse Gear							
Attribute	Unit	Gear #1	Gear #2	Gear #3	Gear #4	Gear #5	
Main							
Gear Ratio		5.78 ...	2.7 ...	1.9 ...	1.25 ...	1 ...	
In-Gear Efficiency		0.96 ...	0.96 ...	0.96 ...	0.96 ...	0.96 ...	
Friction Torque	N-m	ign ...	ign ...	ign ...	ign ...	ign ...	
Inertias							
Input Moment of Inertia	kg-m ²	0.01 ...	0.01 ...	0.01 ...	0.01 ...	0.01 ...	
Output Moment of Inertia	kg-m ²	0.01 ...	0.01 ...	0.01 ...	0.01 ...	0.01 ...	
Gear Transitions							
Gear Ratio Transition Time	s	0.5 ...	0.5 ...	0.5 ...	0.5 ...	0.5 ...	
Gear Ratio Transition Up		def ...	def ...	def ...	def ...	def ...	
Gear Ratio Transition Down		def ...	def ...	def ...	def ...	def ...	

Σχήμα 6.12: Παράθυρο εισαγωγής σχέσεων μετάδοσης κίνησης του κιβωτίου ταχυτήτων (transmission)

- **Συμπλέκτης τριβής (clutch)**



Το στοιχείο του συμπλέκτη τριβής (clutch) που συνδέει τον κινητήρα με το κιβώτιο των ταχυτήτων και επιτρέπει την ομαλή σύμπλεξη και αποσύμπλεξη κατά την αλλαγή ταχυτήτων διαμορφώθηκε με μέγιστη στατική ροπή σύμπλεξης τα 2000 Nm και μέση ακτίνα σύμπλεξης τα 500 mm, ενώ ως μοντέλο τριβής εφαρμόστηκε από την βιβλιοθήκη του προγράμματος το μοντέλο LuGre το οποίο βασίζεται στην ιδέα της τριχοειδούς σύμπλεξης (intermeshing bristles) που προσομοιώνει το φορτίο τριβής μεταξύ των σωμάτων που έρχονται σε επαφή και αποτυπώνει την μικρο-ολίσθηση και την μείωση της τριβής καθώς αυξάνεται η ταχύτητα ολίσθησης. Ο

συμπλέκτης είναι επίσης συνδεδεμένος με το στοιχείο του εικονικού οδηγού από τον οποίο ελέγχεται και συμμορφώνεται με το μεταβατικό κύκλο πόλης που υλοποιείται κατά την δοκιμή.

- **Διαφορικό (Differential)**

Το υπό μελέτη όχημα έχει κίνηση 2x4, με κινητήριους τους εμπρός τροχούς για αυτό και το στοιχείο του διαφορικού (differential) που επιλέχθηκε συνδέει τον άξονα από το κιβώτιο ταχυτήτων με τα εμπρός ημιαξόνια των τροχών για να καταμερίσει ανάλογα την μεταφερόμενη από τον κινητήρα ισχύ. Διαμορφώθηκε με τιμές αδράνειας εισόδου και εξόδου ίσες με $0,001 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ και τελική αναλογία μετάδοσης κίνησης ίση με 2,2.



6.4.3 Στοιχεία ελέγχου λειτουργίας

Τα στοιχεία αυτό εισάγονται προκειμένου τα μηχανικά μέρη του οχήματος να συντονίζονται, και ακολουθούν με τη λειτουργία τους την πρότυπη διαδρομή του μεταβατικού κύκλου πόλης στην οποία υποβάλλεται το υπό μελέτη όχημα. Τα στοιχεία αυτά που ρυθμίζουν το μοτίβο λειτουργία του οχήματος είναι τα ακόλουθα:

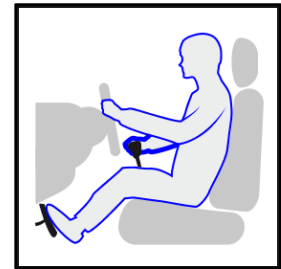
- **Ελεγκτής εκκίνησης (driveaway)**

Ο ελεγκτής εκκίνησης (driveaway) αποτελεί ένα στοιχείο ελέγχου που συνδέει το στοιχείο του κινητήρα (engine) με το στοιχείο του εικονικού οδηγού (driver) και ελέγχει τη διαδικασία της εκκίνησης.



- **Οδηγός οχήματος (vehicle driver)**

Η προσομοίωση του δοκιμαστή γίνεται με την εισαγωγή ενός εικονικού οδηγού (driver) με τον οποίο συνδέονται τα στοιχεία εκείνα που σε πραγματικές συνθήκες απαιτούν χειροκίνητους χειρισμούς για την πορεία του οχήματος. Εφόσον η διεύθυνση του οχήματος θεωρείται ευθεία και σταθερή, τα στοιχεία αυτά που συνδέονται και συντονίζονται από το στοιχείο του οδηγού (driver) είναι το κιβώτιο ταχυτήτων (transmission), το πεντάλ συμπλέκτη τριβής (clutch pedal), το πεντάλ φρένων (brake pedal), το πεντάλ επιτάχυνσης (accelerator pedal) και το κιβώτιο ταχυτήτων (transmission).



Προκειμένου το στοιχείο του οδηγού να υλοποιεί ρεαλιστικά σενάρια χειρισμού, μέσω των παραθύρων εισαγωγής δεδομένων του προγράμματος έχουν εισαχθεί χάρτες λειτουργίας των επιμέρους στοιχείων (Σχήμα 6.13). Πια συγκεκριμένα, για τον χειρισμό του πεντάλ επιτάχυνσης έχει εισαχθεί ο χάρτης ρύθμισης shiftaccel, ενώ για τον χειρισμό του συμπλέκτη τριβής έχουν εισαχθεί δύο χάρτες που απεικονίζουν τη ρύθμισή του στην φάση αλλαγής ταχύτητας shiftclutch και στην φάση της εκκίνησης driveclutch. Παράλληλα, εισάγονται στοιχεία σχετικά με τη χρονική διάρκεια των μεταβατικών φαινομένων της εκκίνησης και της αλλαγής ταχύτητας, ενώ για την ποσότητα του εγχεόμενου καυσίμου εισάγεται ένας χάρτης που συνδέει την ποσότητα αυτή με το ποσοστό του φορτίου (ανάλογο του «ανοίγματος» του πεντάλ επιτάχυνσης). Ο χάρτης αυτός συνδέεται με στοιχείο

ενεργοποιητή στους εγχυτήρες των κυλίνδρων, αλλά και με το στοιχείο του οδηγού, και ρυθμίζεται ώστε κατά την άφορτη λειτουργία («ρελαντί»), η στροφές να διατηρούνται σταθερές στις 900 rpm.

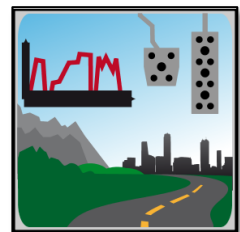
Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει ανάλυση των διαφόρων τμημάτων, που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και για την εύρυθμη λειτουργία του υπό μελέτη μοντέλου, έτσι ώστε το όχημα να ακολουθεί με ικανοποιητική ακρίβεια και ρεαλιστικά τους επιλεγμένους κύκλους πόλης.

Attribute	Unit	Object Value
Accelerator Pedal Position	%	0
Accelerator Pedal Multiplier during Gear Shifts	%	ShiftAccel
Accelerator Pedal Position during Driveaway	%	0

Σχήμα 6.13: Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για το στοιχείο του οδηγού (driver)

• **Ελεγκτής οχήματος (controller vehicle)**

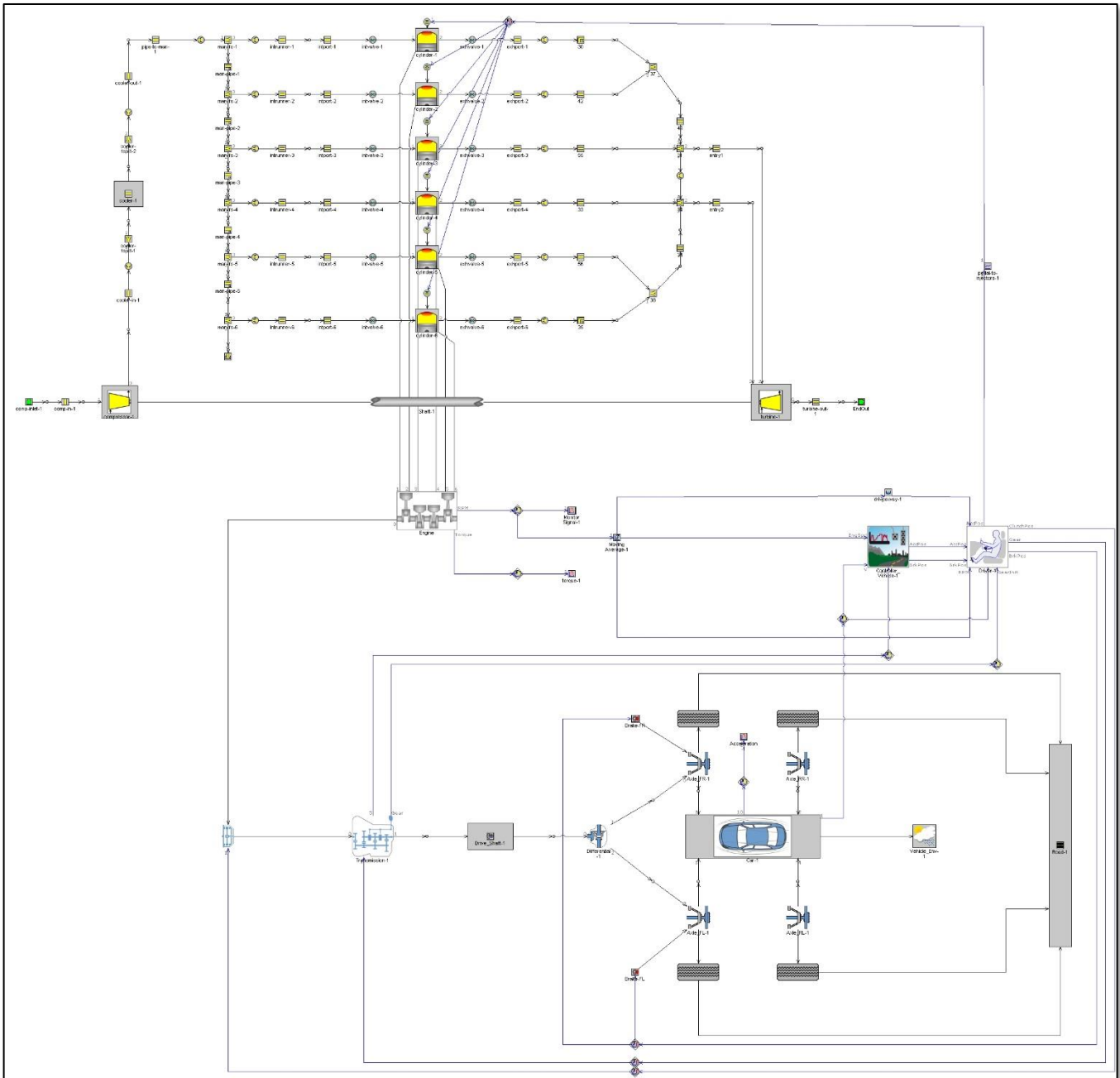
Ο ελεγκτής του οχήματος είναι ένα στοιχείο που ρυθμίζει της συνθήκες λειτουργίας των επιμέρους στοιχείων ως ένας προγραμματισμένος ηλεκτρονικός εγκέφαλος ECU (Electronic Control Unit) ακολουθώντας ένα αποθηκευμένο αλγόριθμο εντολών που στην προκειμένη περίπτωση υλοποιεί τον πρότυπο μεταβατικό κύκλο πόλης WLTC 3. Βασική ενέργεια για τη λειτουργία του είναι η εισαγωγή ενός χάρτη μέσης πραγματικής πίεσης \bar{p}_e , (Σχήμα 6.14) που προκύπτει από το «τρέξιμο» του κινητήρα αποσυνδεδεμένου από το όχημα σε ένα εύρος στροφών (εν προκειμένω από 1000 έως 3500 rpm για εύρος φορτίου από 0 έως 100 % αντίστοιχα. Ο συγκεκριμένος ελεγκτής λαμβάνει πληροφορίες και συνδέεται με πλήθος στοιχείων όπως με τον κινητήρα, το όχημα, και τον οδηγό προκειμένου να ακολουθείται το πρότυπο διάγραμμα του μεταβατικού κύκλου πόλης.



Attribute	Unit	Object Value
Engine BMEP Map	bar	BMEP_map
Engine Displacement	cm ³	5958
Vehicle Mass	kg	3500
Vehicle Frontal Area	m ²	3
Vehicle Drag Coefficient		0.38
Vehicle Braking Torque Map	N-m	def
Vehicle Final Drive Gear Ratio		def (=3.5)
Tire Rolling Radius	m	0.35
Tire Rolling Resistance Factor		def (=0.01)

Σχήμα 6.14: Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για τον ελεγκτή οχήματος (controller vehicle)

Η συνολική εικόνα του κινητήρα και του οχήματος στο χάρτη εργασίας του GT-Power παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 6.13).



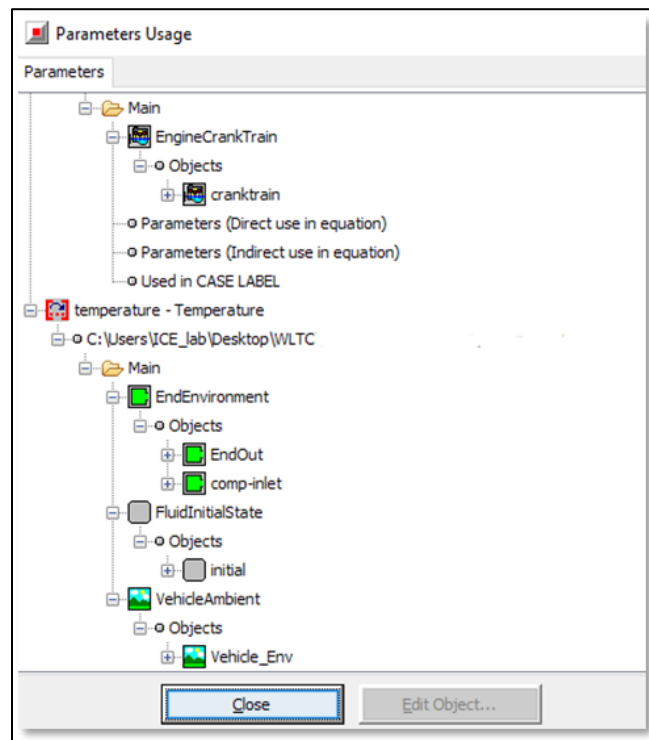
Σχήμα 6.13: Προσομοίωση κινητήρα και οχήματος στον χάρτη εργασίας (project map) του GT-POWER

7. Αποτελέσματα δοκιμών σε μεταβατικό κύκλο πόλης WLTC

7.1 Περιγραφή διαδικασίας δοκιμών και παραμέτρων

Στην παρούσα εργασία, όπως προαναφέρθηκε, έγινε μελέτη της επίδρασης της εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος στις επιδόσεις και στις εκπομπές ενός ελαφρού φορτηγού με στροβιλο-υπερπληρωμένο κινητήρα Diesel.

Για να πραγματοποιηθεί αυτή η μελέτη, τίθεται ως μεταβλητή παράμετρος η θερμοκρασία περιβάλλοντος και ενσωματώνεται σε όλα τα στοιχεία του προσομοιωμένου μοντέλου που εμπεριέχουν συνθήκες περιβάλλοντος (Σχήμα 7.1). Τέτοια στοιχεία είναι οι συνθήκες αέρα στην είσοδο της πολλαπλής εισαγωγής, το περιβάλλον εξαγωγής των καυσαερίων, το περιβάλλον πραγματοποίησης δοκιμών της διάταξης, η θερμοκρασία στο εξωτερικό όριο των σωληνώσεων κ.ά.



Σχήμα 7.1: Παράθυρο θέσης παραμέτρων στο GT-Power

Αφού εφαρμοστούν η παράμετροι στα στοιχεία, επιλέγεται για αυτές η τιμή με την οποία ο χρήστης επιθυμεί να εκτελέσει το πρόγραμμα. Στο τέλος του «τρεξίματος» τα δεδομένα αποθηκεύονται στο υποπρόγραμμα GT-Post από το οποίο μπορεί να γίνει προβολή ή εξαγωγή των δεδομένων για περαιτέρω αξιοποίηση.

Προκειμένου να υπάρξουν ευκρινείς διαφοροποιήσεις από τις δοκιμές, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί έλεγχος σε τρεις τιμές θερμοκρασιών που αντιπροσωπεύουν ρεαλιστικές τιμές και ταυτόχρονα έχουν μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους. Οι τιμές αυτές είναι οι -15°C (ψυχρές συνθήκες

περιβάλλοντος), +20°C (κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος) και +45°C (θερμές συνθήκες περιβάλλοντος).

Τα αποτελέσματα που αποθηκεύτηκαν στο υποπρόγραμμα GT-POST, ομαδοποιήθηκαν και προβάλλονται σε κοινά διαγράμματα στις επόμενες ενότητες ώστε να είναι εύκολα αντιληπτές οι διαφοροποιήσεις για να την εξαγωγή ανάλογων συμπερασμάτων.

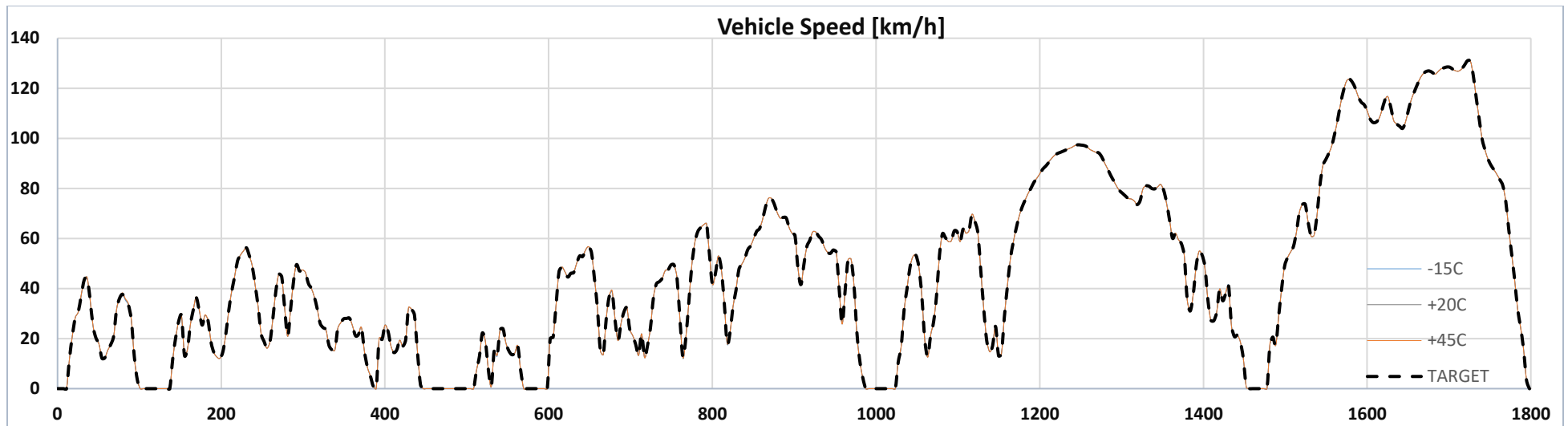
Στα διαγράμματα που ακολουθούν, ο οριζόντιος άξονας είναι κοινός και αριθμεί το χρόνο σε δευτερόλεπτα το μεταβατικού κύκλου WLTC με συνολική διάρκεια 1800 sec, ενώ ο κατακόρυφος άξονας αριθμεί την τιμή του εκάστοτε μεγέθους σε μονάδες που αναγράφονται στον τίτλο του γραφήματος. Με μπλε χρώμα αποτυπώνονται δεδομένα που αφορούν θερμοκρασία περιβάλλοντος με τιμή -15°C, με γκρι χρώμα δεδομένα που αντιστοιχούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος +20°C ενώ τα δεδομένα που αντιστοιχούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος με τιμή +45°C αποτυπώνονται με πορτοκαλί χρώμα.

Για την αποτύπωση λεπτομερειών, το διάγραμμα κάθε μεγέθους χωρίστηκε σε δύο μέρη όπου το πρώτο μέρος καλύπτει σε χρόνο το διάστημα 0–1022 sec από τον συνολικό κύκλο πόλης WLTC και προσομοιώνει συνθήκες οδήγησης σε αστικό περιβάλλον και το δεύτερο μέρος καλύπτει σε χρόνο το διάστημα 1022-1800 sec από τον συνολικό κύκλο πόλης WLTC και προσομοιώνει συνθήκες οδήγησης σε αυτοκινητόδρομο.

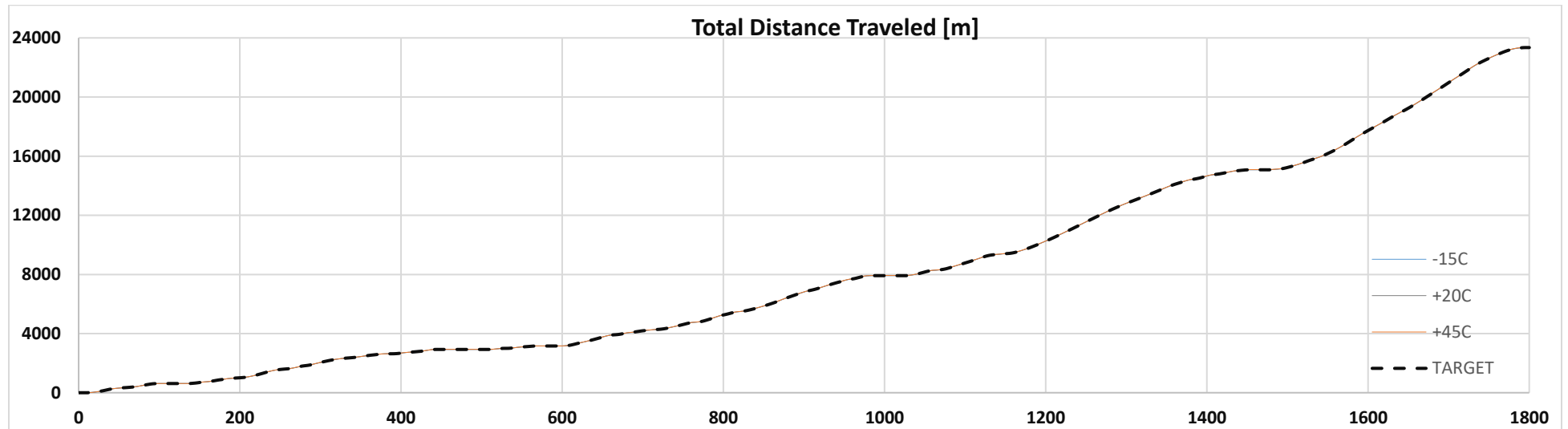
Έπειτα από την παράθεση των διαγραμμάτων, παρατίθενται, επίσης, συνοπτικοί πίνακες ανάλυσης των δεδομένων στους οποίους εντοπίζονται μέσες και μέγιστες τιμές των τριών δοκιμών για τα διάφορα χρονικά κομμάτια του κύκλου WLTC, καθώς και οι μέσες ποσοστιαίες αποκλίσεις των αποτελεσμάτων με αναφορά σε ακραίες θερμοκρασίες περιβάλλοντος (-15°C και +45°C) ως προς τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε κανονική θερμοκρασία περιβάλλοντος (+20°C).

Ακολουθούν τα διαγράμματα θέσης, επιδόσεων και ρύπων του οχήματος με τις αντίστοιχες συγκρίσεις επεξηγήσεις και συμπεράσματα.

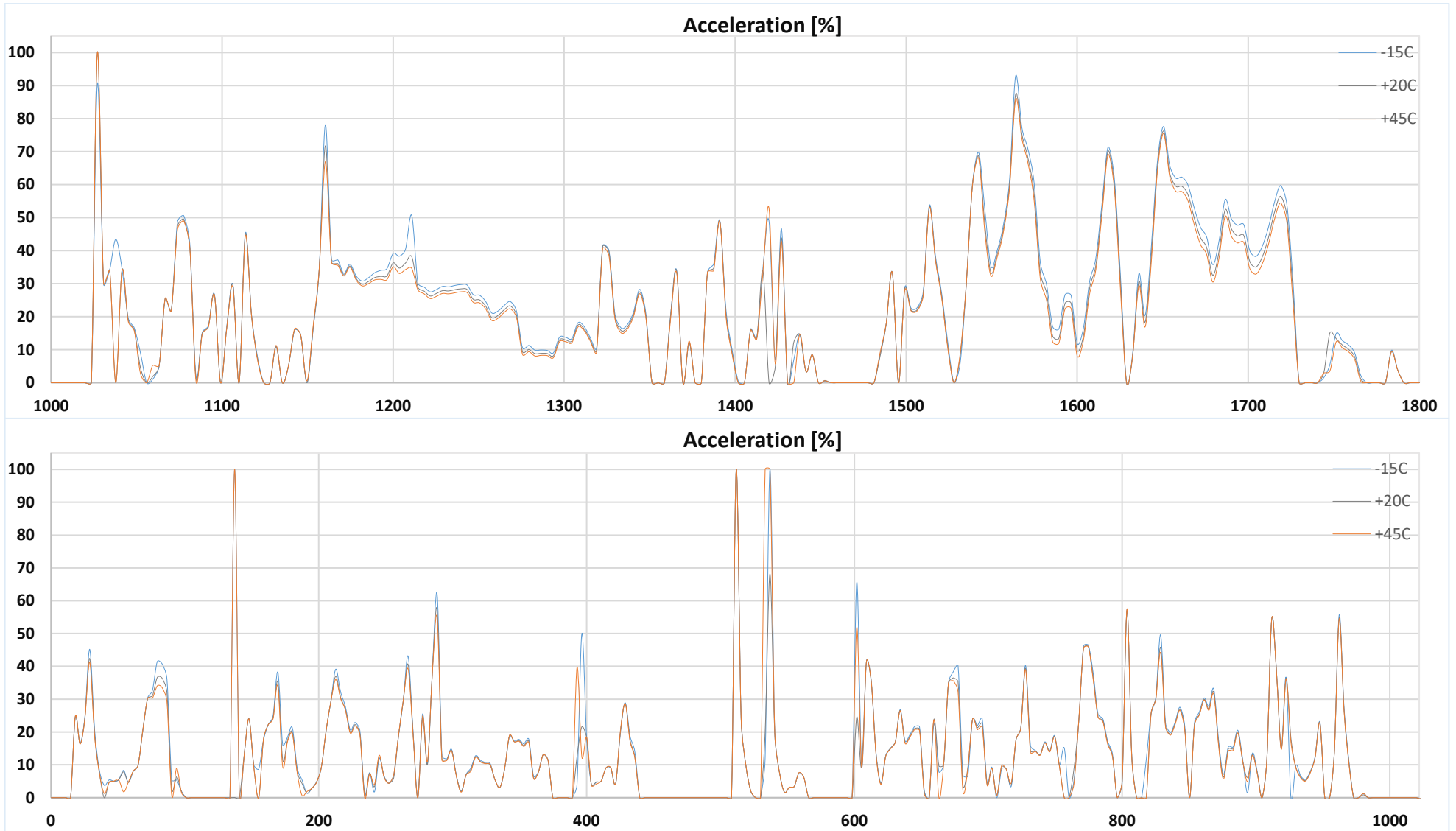
7.2 Υλοποίηση μεταβατικού κύκλου πόλης WLTC



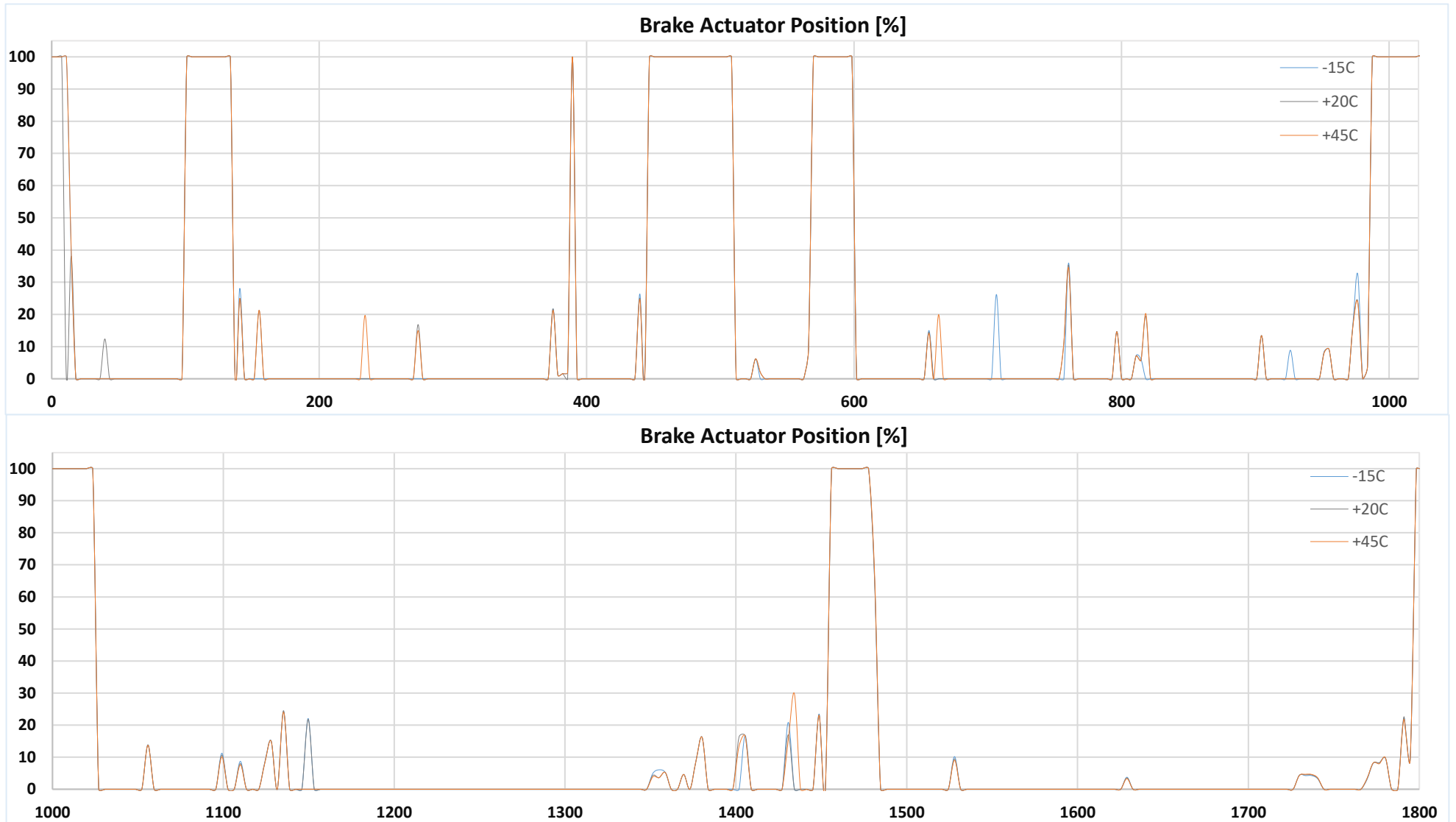
Σχήμα 7.2: Διάγραμμα ταχύτητας οχήματος κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC



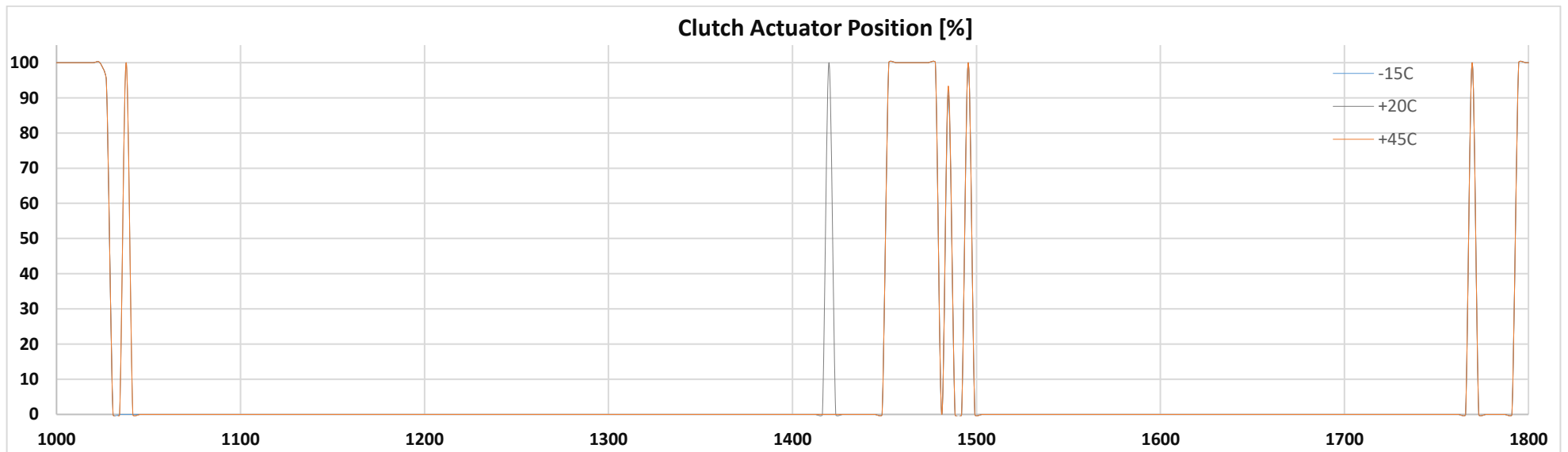
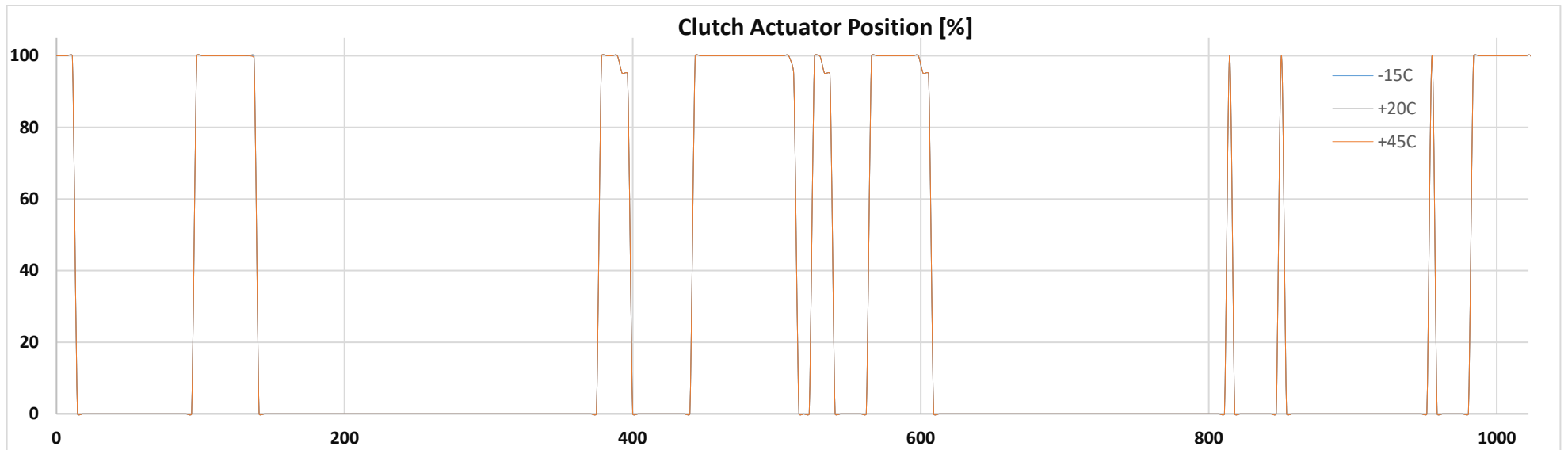
Σχήμα 7.3: Διάγραμμα συνολικής διανυθείσας απόστασης οχήματος κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC



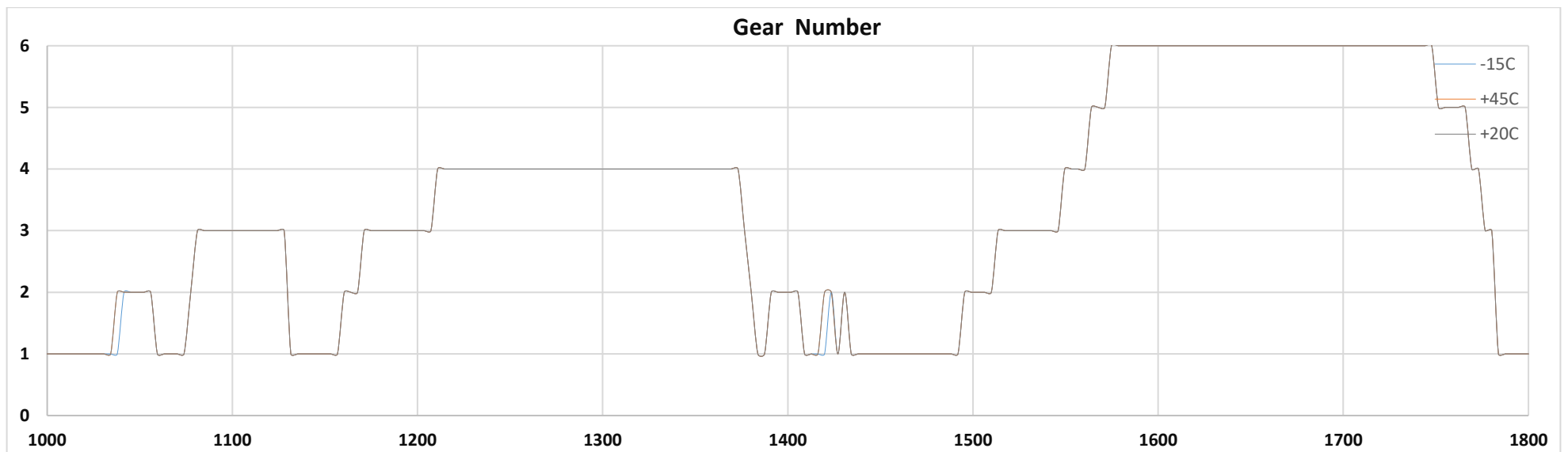
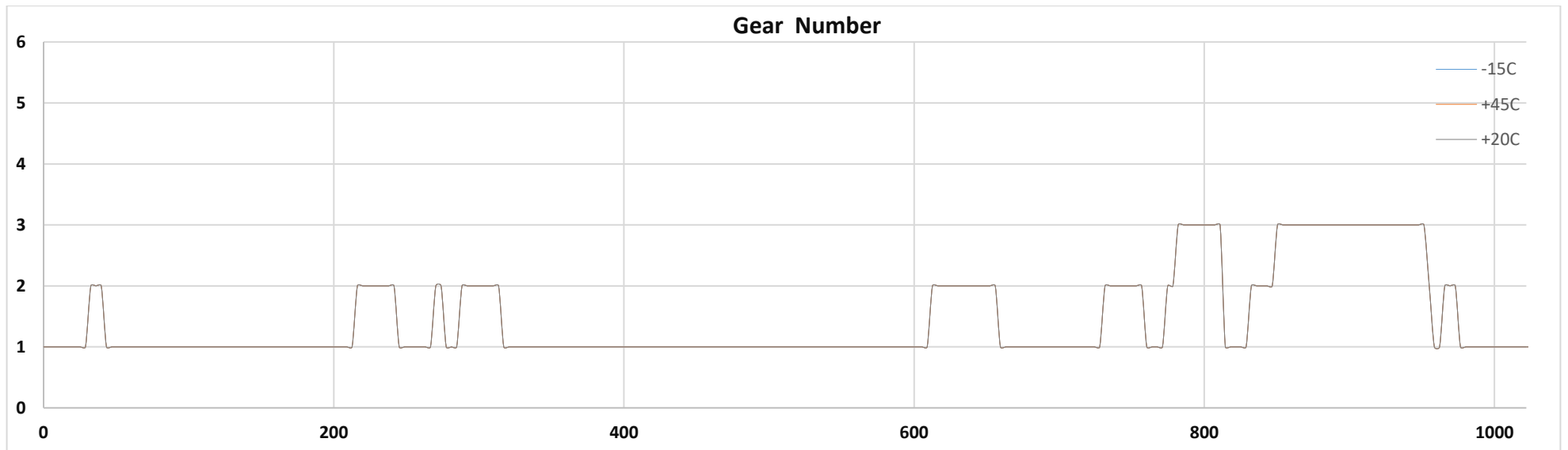
Σχήμα 7.4: Διάγραμμα θέσης πεντάλ επιτάχυνσης κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC



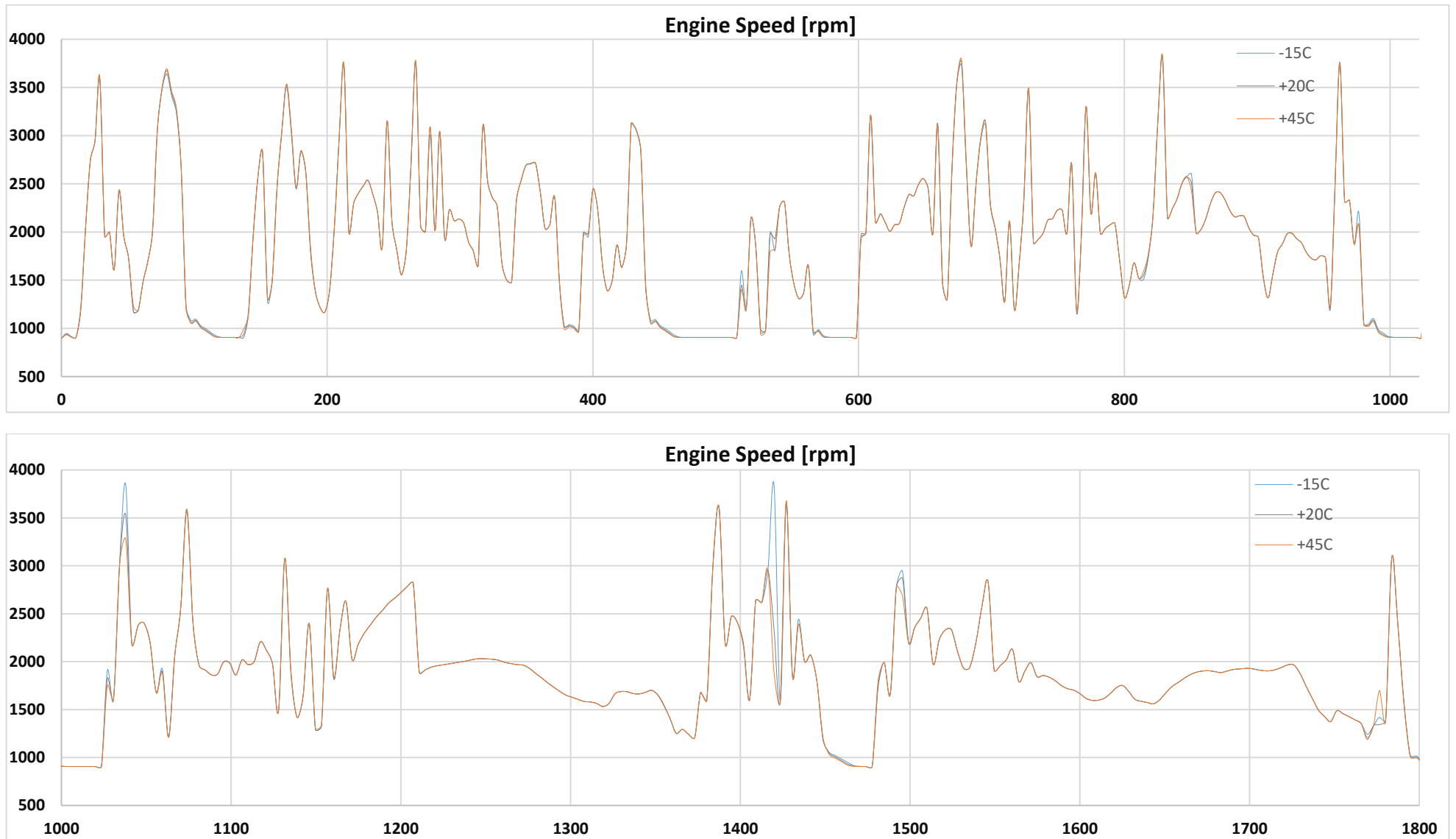
Σχήμα 7.5: Διάγραμμα θέσης πεντάλ φρένου κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC



Σχήμα 7.6: Διάγραμμα θέσης πεντάλ συμπλέκτη κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC



Σχήμα 7.7: Διάγραμμα επιλογής σχέσης ταχύτητας κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC



Σχήμα 7.8: Διάγραμμα ταχύτητας περιστροφής κινητήρα κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC

Σχολιασμός και συγκρίσεις αποτελεσμάτων

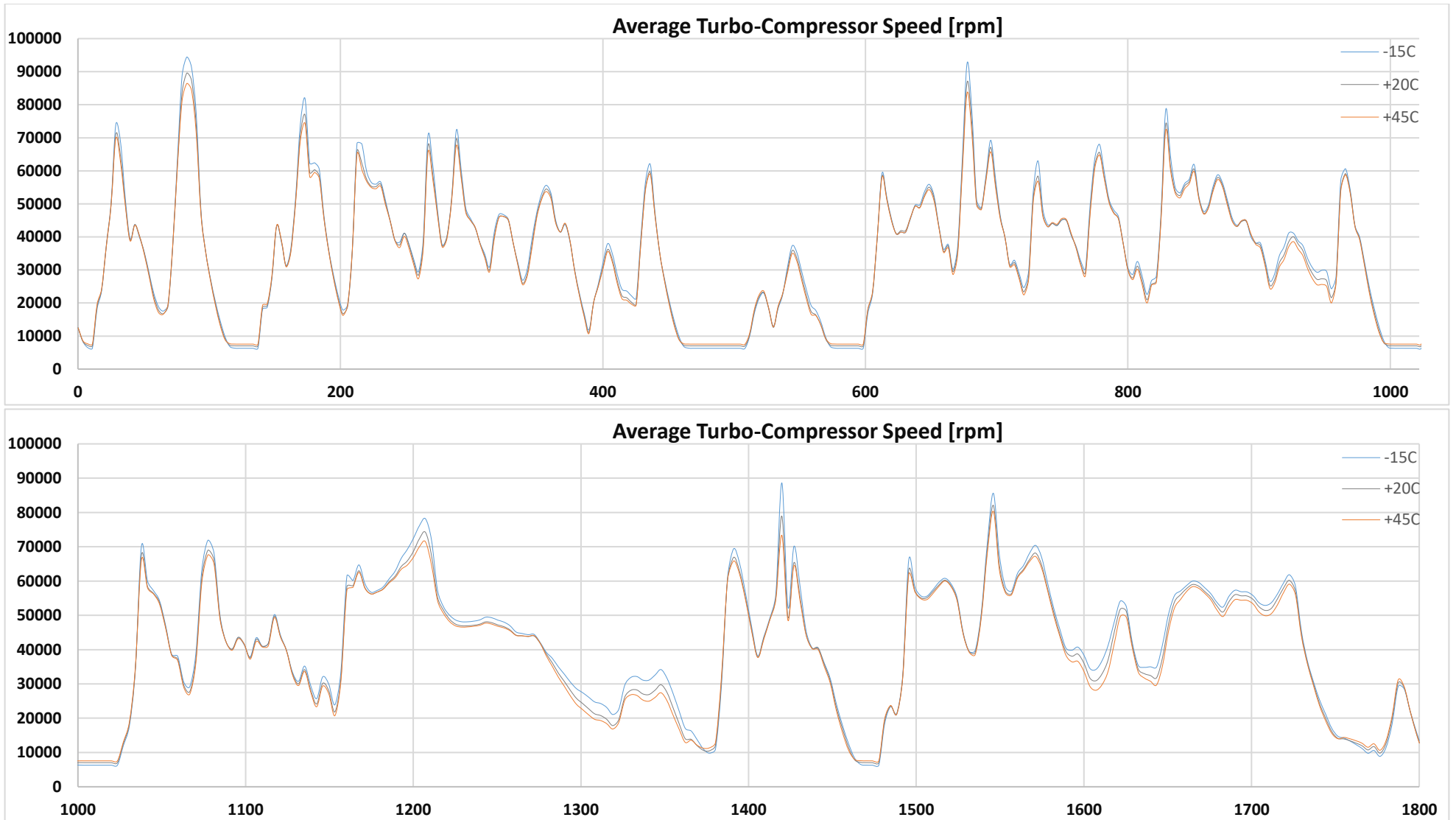
Ο μεταβατικός κύκλος πόλης WLTC υλοποιείται από τον χειριστή-οδηγό του οχήματος με χειρισμούς όπως η επιτάχυνση, η επιβράδυνση και η αλλαγή των σχέσεων ταχύτητας σε κατάλληλο χρόνο ώστε τελικά το όχημα να ακολουθήσει επακριβώς το πρότυπο διάγραμμα που ορίζει ο κύκλος.

Με τον ίδιο τρόπο, ο εικονικός οδηγός του προγράμματος προγραμματίζει της εντολές χειρισμού ώστε το όχημα να ακολουθεί το προκαθορισμένο διάγραμμα ως επιβαλλόμενο στόχο (target) με μεγάλη ακρίβεια και χωρίς αποκλίσεις.

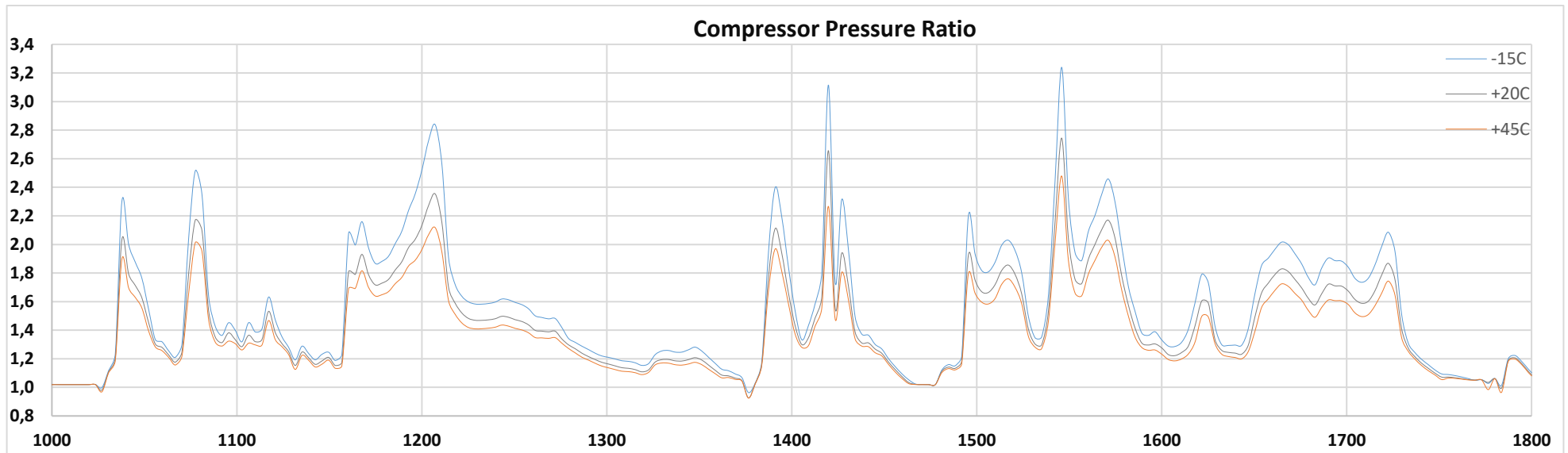
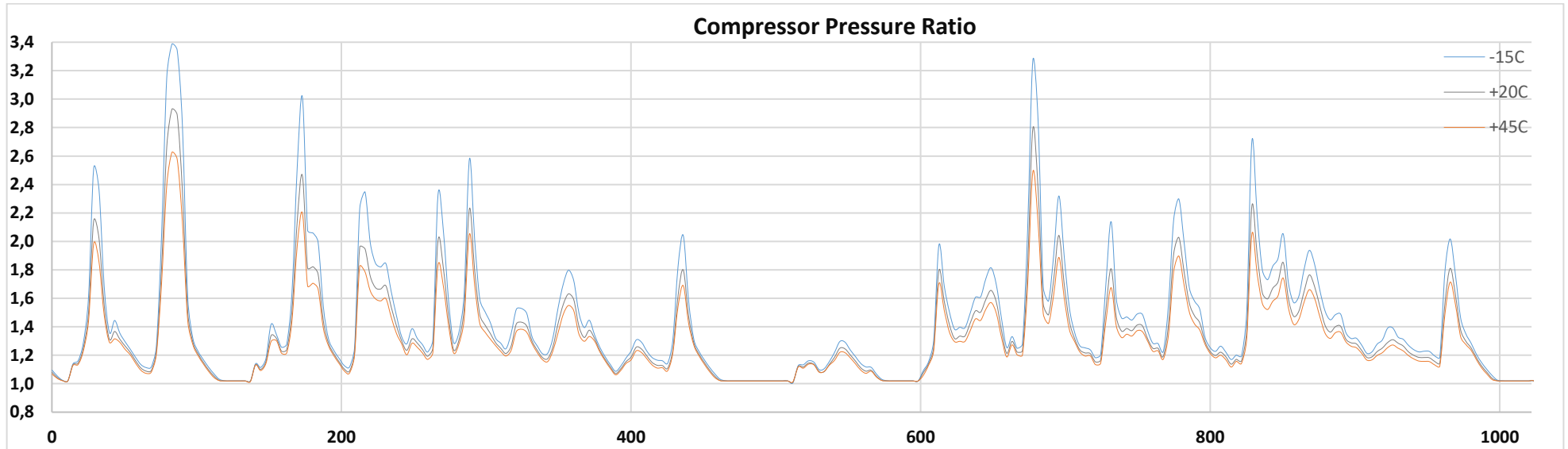
Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, για τα διαγράμματα που προηγούνται παρατηρούνται τα εξής:

- Σχεδόν απόλυτη ταύτιση στα διαγράμματα ταχύτητας και διανυθείσας απόστασης (Σχήμα 7.2 και 7.3) για τις τρεις δοκιμές με τον επιβαλλόμενο στόχο (target) για το λόγο που προαναφέρθηκε.
- Διαφοροποιήσεις στον χειρισμό του πεντάλ επιτάχυνσης (Σχήμα 7.4), καθώς το όχημα αποκρίνεται με διαφορετικό τρόπο στις συνθήκες λειτουργίας που επιβάλλονται κατά τις τρεις δοκιμές, ενώ ο εικονικός οδηγός ακολουθεί επακριβώς το πρότυπο διάγραμμα ταχύτητας.
- Μικρότερες διαφοροποιήσεις στον χειρισμό του πεντάλ επιβράδυνσης (φρένου) (Σχήμα 7.5), οι οποίες προκύπτουν, επίσης, κατά την επιδίωξη του εικονικού οδηγού να ακολουθήσει το πρότυπο διάγραμμα ταχύτητας σε διαφορετικές αποκρίσεις του οχήματος κατά τις τρεις δοκιμές.
- Τα διαγράμματα θέσης συμπλέκτη και αριθμού σχέσης μετάδοσης κίνησης του κιβωτίου ταχυτήτων (Σχήμα 7.6 και 7.7) είναι σχεδόν ταυτόσημα για τις τρεις δοκιμές καθώς ο χρόνος αλλαγής των ταχυτήτων και η ταχύτητα στην οποία πραγματοποιούνται είναι προκαθορισμένη για την υλοποίηση του μεταβατικού κύκλου.
- Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα (Σχήμα 7.8) που εξαρτάται από την το χειρισμό του πεντάλ επιτάχυνσης και την απόκριση του οχήματος στις διαφορετικές δοκιμές, παρουσιάζει αποκλίσεις μικρής κλίμακας και κυρίως σε περιοχές έντονης μετάβασης.

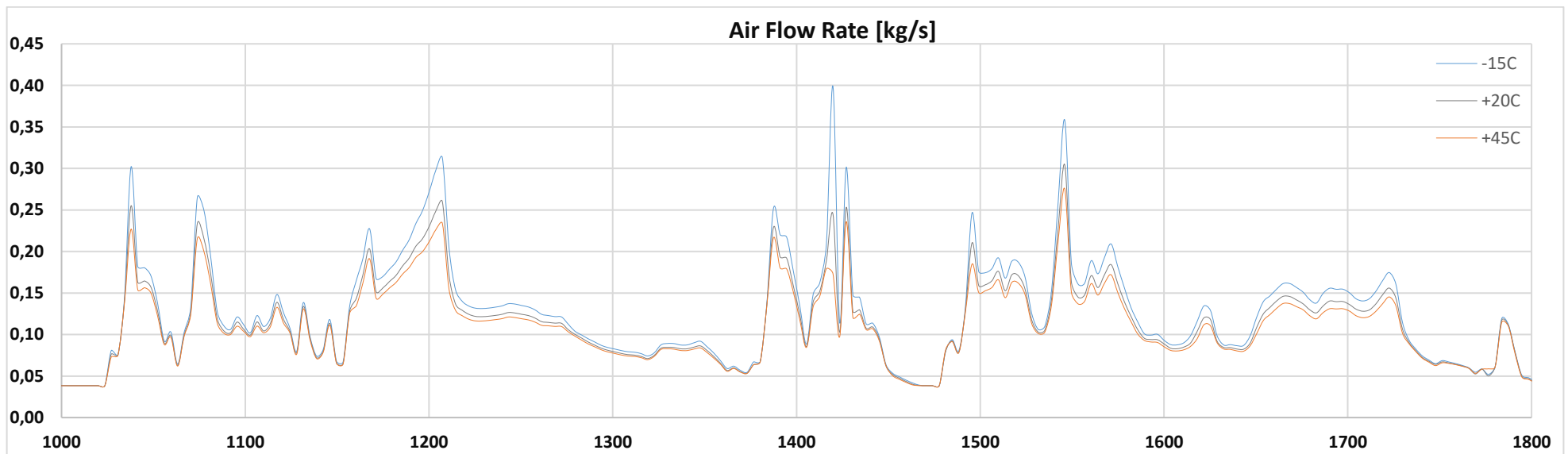
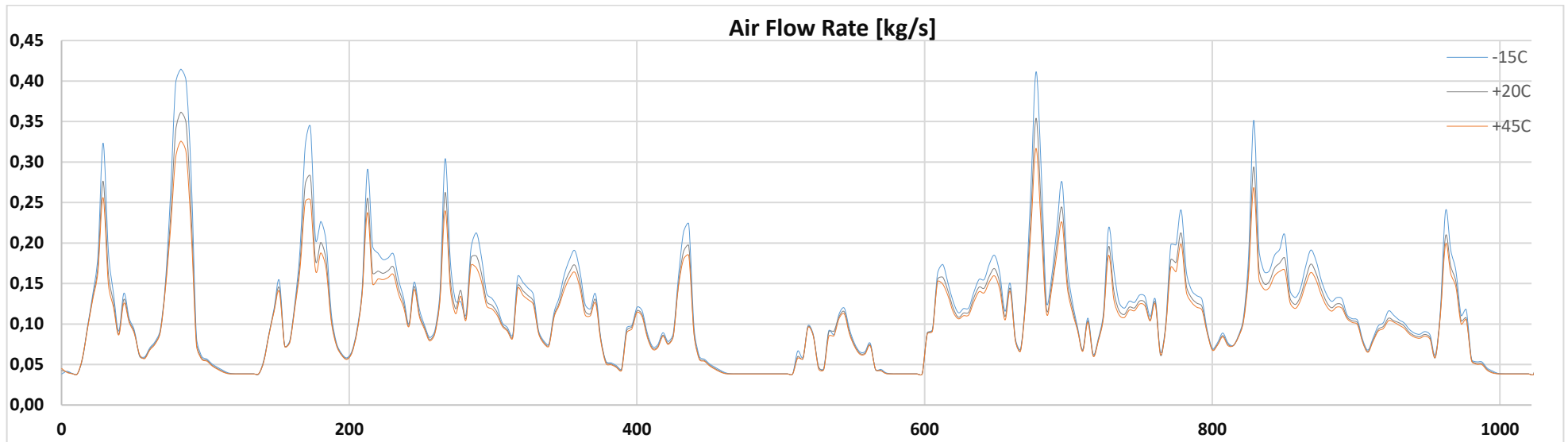
7.3 Αποδόσεις ζεύγους στροβίλο-υπερπλήρωσης και κινητήρα



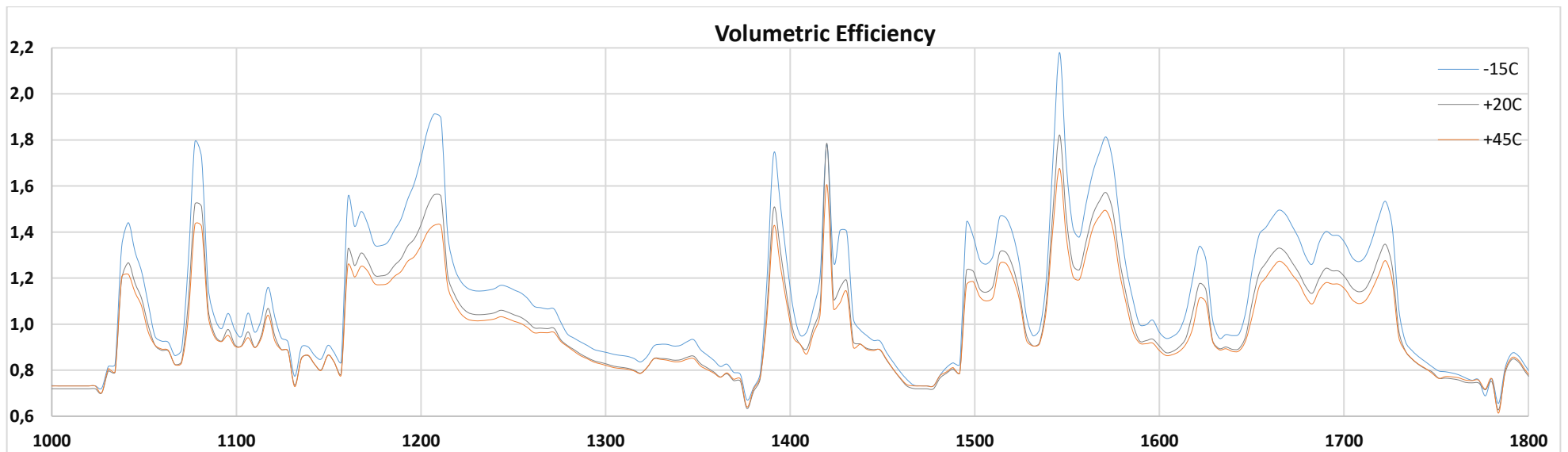
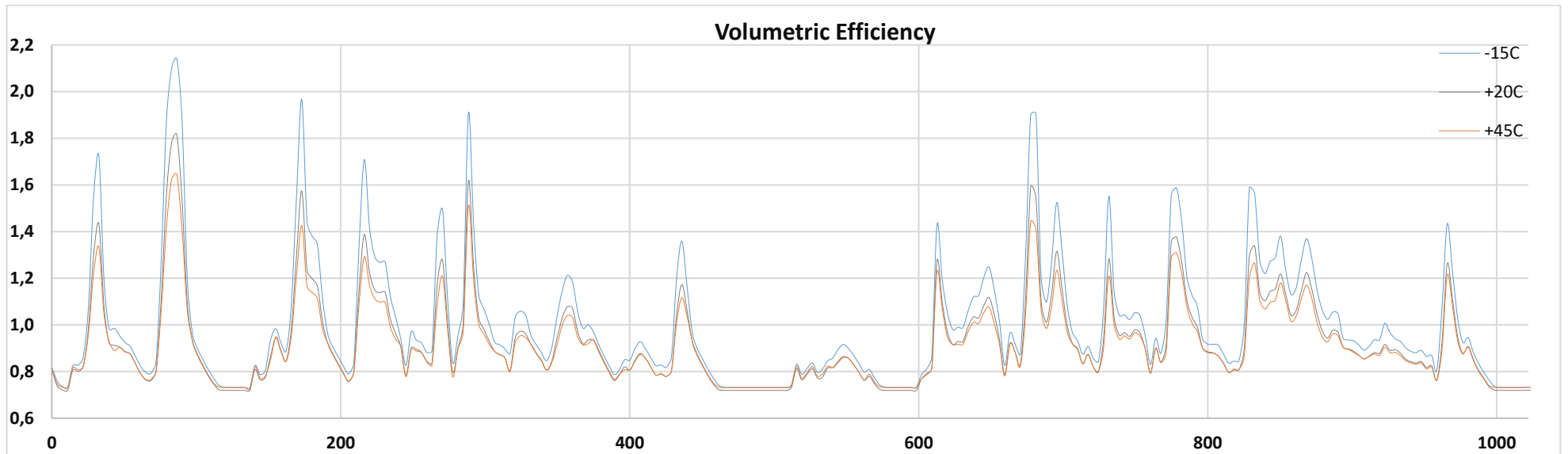
Σχήμα 7.9: Διάγραμμα ταχύτητας περιστροφής στροβίλου και υπερπληρωτή κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC



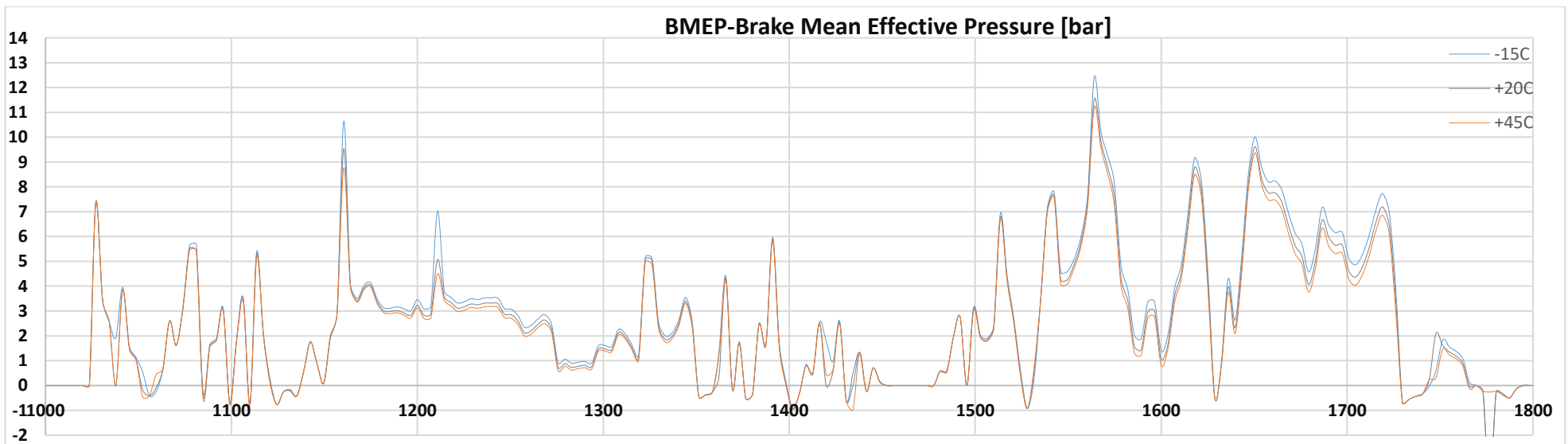
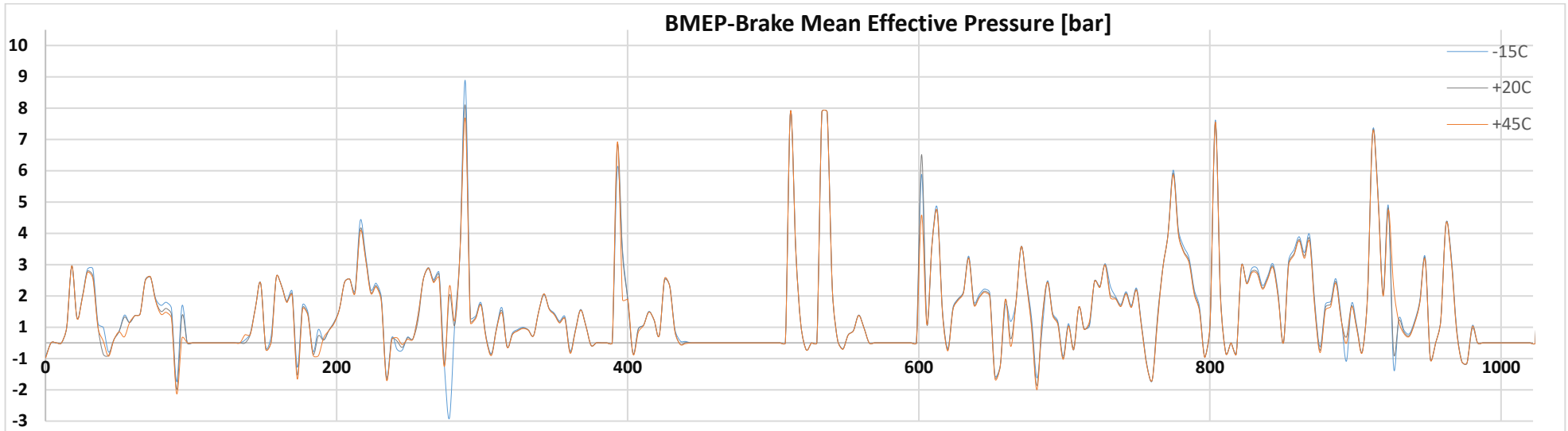
Σχήμα 7.10: Διάγραμμα σχέσης συμπίεσης του συμπιεστή κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC



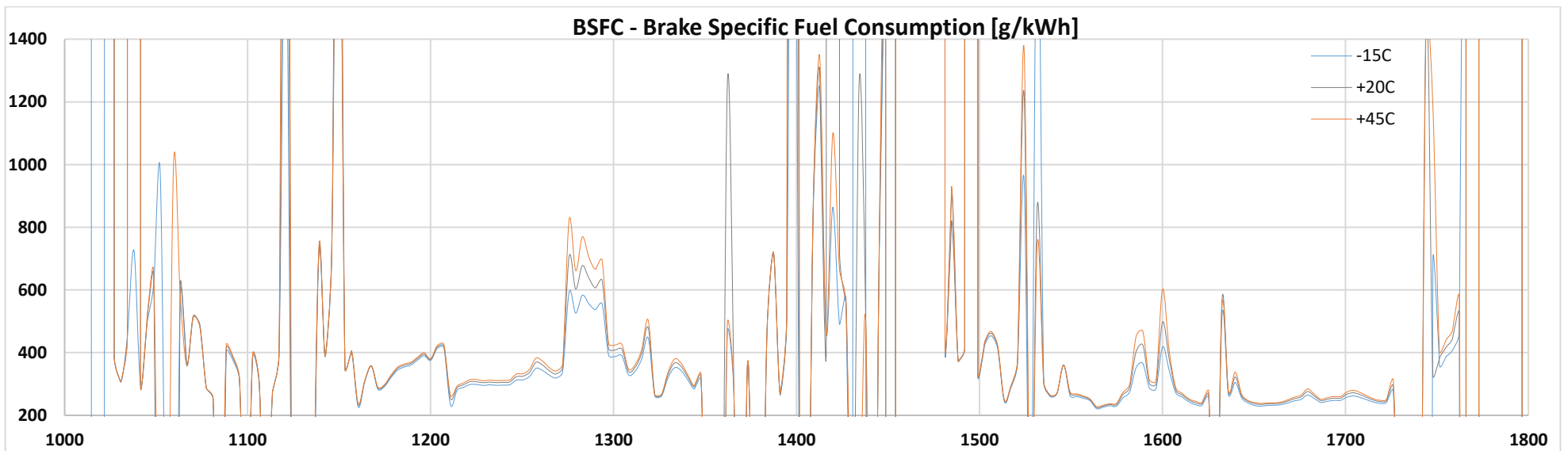
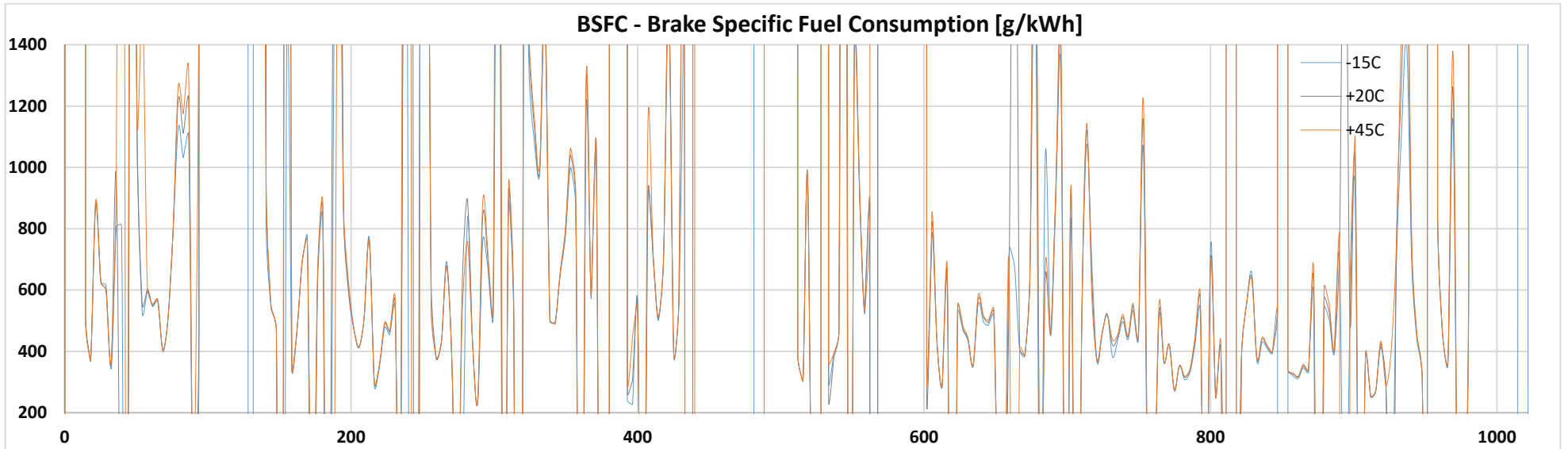
Σχήμα 7.11: Διάγραμμα παροχής αέρα συμπιεστή κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC



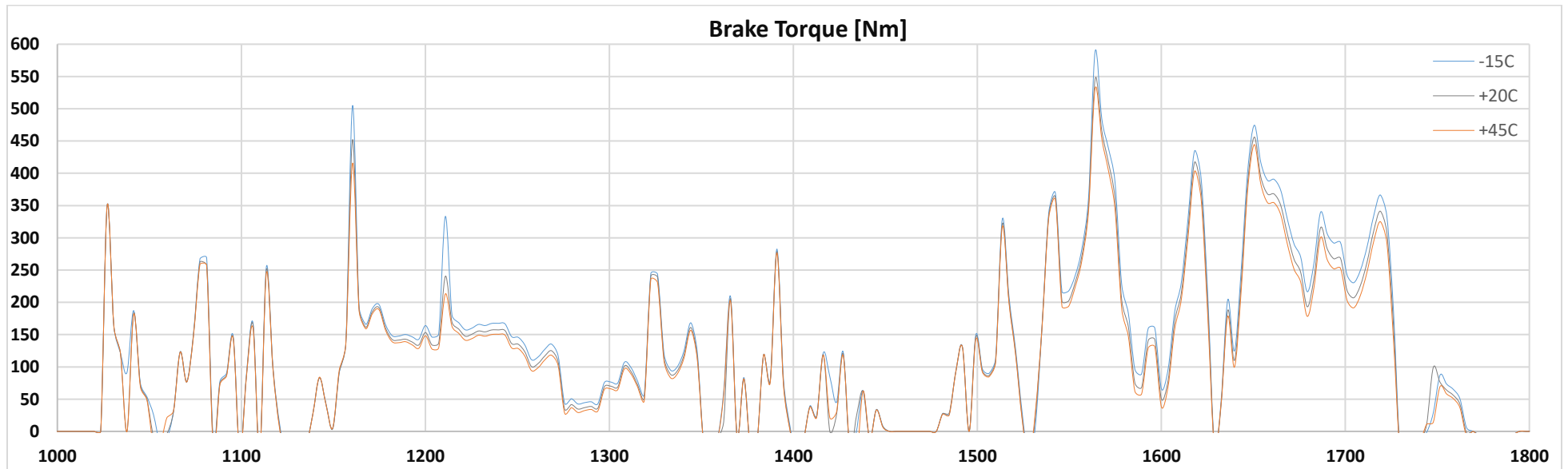
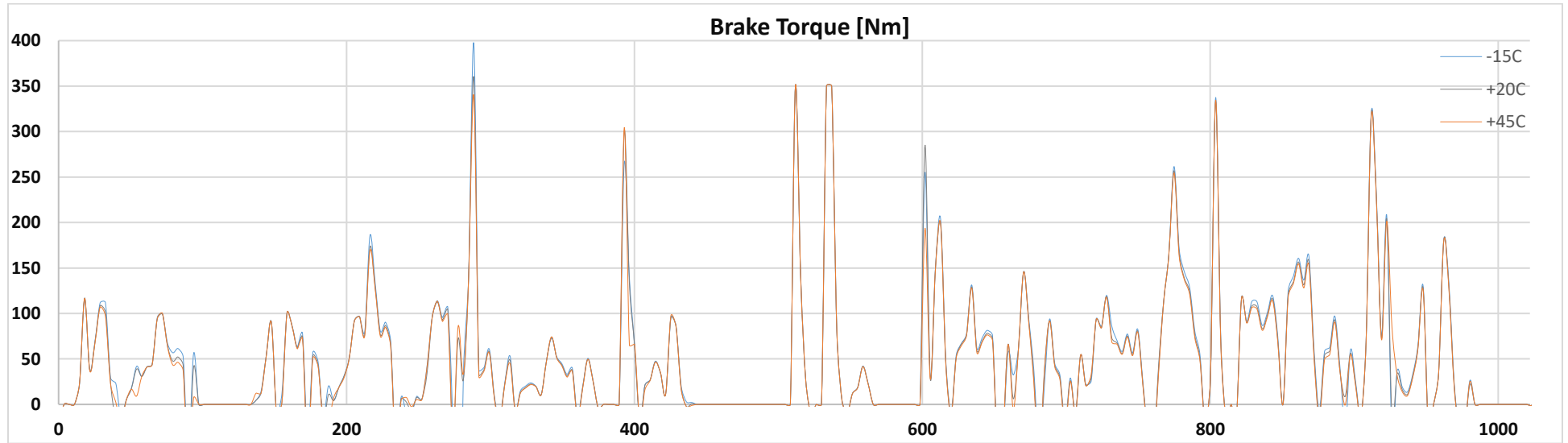
Σχήμα 7.12 : Διάγραμμα ογκομετρικού βαθμού απόδοσης κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC



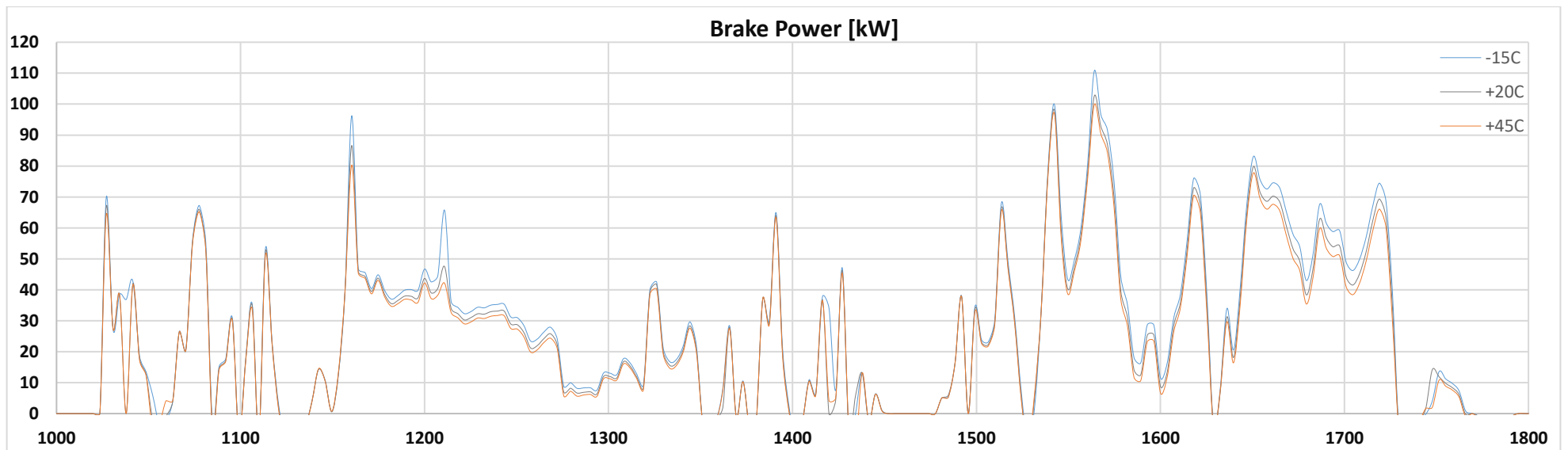
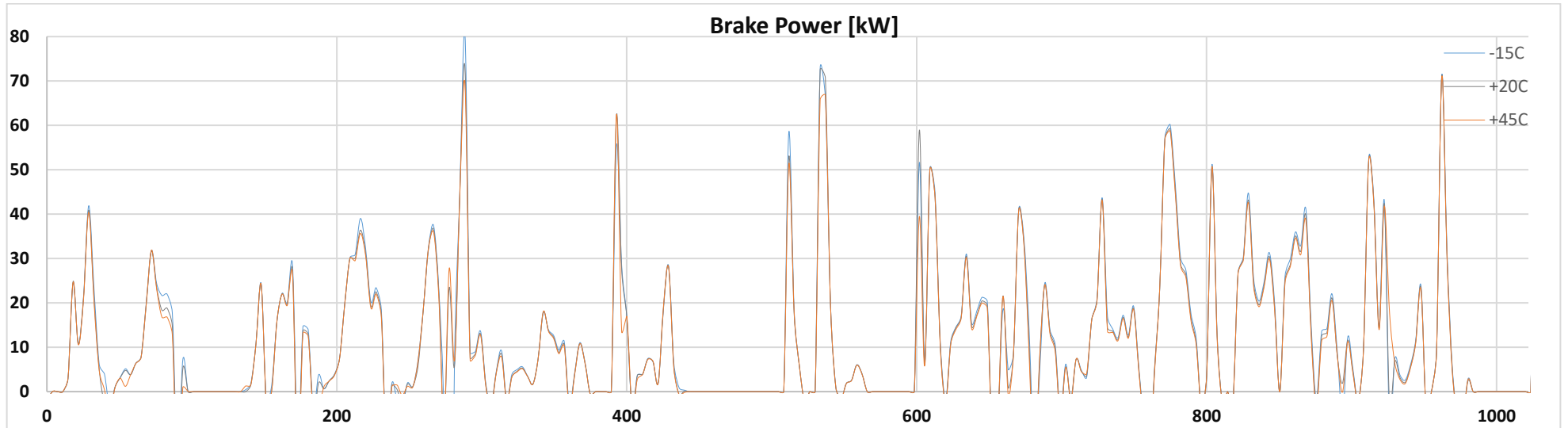
Σχήμα 7.13: Διάγραμμα μέσης πραγματικής πίεσης κυλίνδρου κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC



Σχήμα 7.14: Διάγραμμα ειδικής κατανάλωσης καυσίμου κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC



Σχήμα 7.15: Διάγραμμα ροπής κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC



Σχήμα 7.16: Διάγραμμα ισχύος κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC

7.3.1 Σχολιασμός και συγκρίσεις αποτελεσμάτων

Σχετικά με τα διαγράμματα επιδόσεων που προηγήθηκαν, παρατηρούνται με τη σειρά παράθεσής τους τα εξής:

- Το διάγραμμα ταχύτητας περιστροφής του στροβιλο-υπερπληρωτή (Σχήμα 7.9) παρουσιάζει αποκλίσεις σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια του μεταβατικού κύκλου με τις τιμές των δεδομένων που αναφέρονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος -15°C να είναι συγκριτικά μεγαλύτερες. Μεσολαμβάνουν οι τιμές της δοκιμής που αναφέρεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος $+20^{\circ}\text{C}$ και χαμηλότερες παρουσιάζονται αυτές που αντιστοιχούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος $+45^{\circ}\text{C}$. Επισημαίνεται, ότι η ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή είναι το μέγεθος που καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο λειτουργίας του συμπιεστή και για το λόγο αυτό αναμένεται, και διαπιστώνεται στα επόμενα διαγράμματα που αφορούν τη λειτουργία του συμπιεστή, να ακολουθείται από τις καμπύλες παρόμοιο μοτίβο διακυμάνσεων με ανάλογες αποκλίσεις ανάμεσα στις τρεις δοκιμές. Τα διαγράμματα που αφορά η συγκεκριμένη επισήμανση είναι η σχέση συμπίεσης του υπερπληρωτή (Σχήμα 7.10), η παροχή αέρα του συμπιεστή (Σχήμα 7.11) και ο ογκομετρικός βαθμός απόδοσης (Σχήμα 7.12). Συγκρίσεις αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στον σχετικό πίνακα (Πίνακα 7.1).
- Το διάγραμμα σχέσης συμπίεσης του συμπιεστή (Σχήμα 7.10) παρουσιάζει διαφοροποιήσεις, ευκρινείς σε όλη τη διάρκεια του κύκλου για τις τρεις δοκιμές και σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων που αναφέρονται σε ακραίες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, σε σχέση με τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν στην τυπική θερμοκρασία των $+20^{\circ}\text{C}$. Τιμές των αποκλίσεων παρουσιάζονται στον σχετικό πίνακα (Πίνακα 7.2).
- Το διάγραμμα παροχής αέρα του συμπιεστή (Σχήμα 7.11), ακολουθώντας το ίδιο μοτίβο καμπύλης με το διάγραμμα της σχέσης συμπίεσης, όπως αναμενόταν, παρουσιάζει ανάλογες αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων των τριών δοκιμών (βλ. Πίνακα 7.3), με τις τιμές της παροχής που αναφέρονται σε ψυχρότερες συνθήκες περιβάλλοντος να είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές που αντιστοιχούν σε θερμότερες συνθήκες.
- Ο ογκομετρικός βαθμός απόδοσης (Σχήμα 7.12) παρατηρείται κι αυτός να παρουσιάζει μεγαλύτερες συγκριτικά τιμές σε χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος, με το διάγραμμα να ακολουθεί για τις τρεις περιπτώσεις το ίδιο μοτίβο καμπύλης και ανάλογες αποκλίσεις (βλ. Πίνακα 7.4) με αυτό τον προηγούμενων διαγραμμάτων, που έχουν άμεση σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο βάσει της σχέσης 2.1, δηλαδή για χαμηλότερη θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι υψηλότερη η πυκνότητα του αέρα άρα και η μάζα που εγκλωβίζεται εντός του κυλίνδρου, δηλαδή ο ογκομετρικός βαθμός απόδοσης (βαθμός πλήρωσης).
- Στο διάγραμμα της μέσης πραγματικής πίεσης (Σχήμα 7.13) παρατηρείται αυξημένη συγκριτικά, ως προς τις τιμές της, η καμπύλη της πίεσης που αναφέρεται σε ψυχρές συνθήκες περιβάλλοντος σε σχέση με την αντίστοιχη που αφορά θερμές συνθήκες. Η διαφορά παρουσιάζει σταθερότητα και μεγαλύτερη διάρκεια στο τμήμα των υψηλών ταχυτήτων του

οχήματος. Οι ποσοστιαίες αποκλίσεις των αποτελεσμάτων που αντιστοιχούν στις ακραίες θερμοκρασίες περιβάλλοντος (-15 °C και +45 °C) σε σχέση με αυτά που αντιστοιχούν σε κανονική θερμοκρασία +20 °C, είναι κατά μέσο όρο της τάξης του 5% (βλ. Πίνακα 7.5).

- Το διάγραμμα ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (Σχήμα 7.14) είναι δυσδιάκριτο με πολλές τιμές που το μέγεθος του παραπέμπει σε σφάλμα, αλλά από την εστίαση που έχει γίνει σε περιοχή λογικών ορίων διαπιστώνεται ότι οι ψυχρές συνθήκες περιβάλλοντος αποδίδουν χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα ενέργειας, γεγονός που γίνεται καλύτερα αντιληπτό σε περιοχές ομαλών μεταβολών του φορτίου.
- Στο διάγραμμα ροπής των τριών περιπτώσεων (Σχήμα 7.15), φαίνονται οι τιμές που αφορούν ψυχρές συνθήκες περιβάλλοντος να είναι αυξημένες, συγκριτικά με αυτές που αφορούν θερμές συνθήκες περιβάλλοντος. Οι αποκλίσεις των δοκιμών που αφορούν ακραίες θερμοκρασίες, σε σχέση με τα δεδομένα που αφορούν κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος, κυμαίνονται κατά μέσο όρο μεταξύ 5 έως 7 % (βλ. Πίνακα 7.7).
- Το διάγραμμα ισχύος (Σχήμα 7.16) παρουσιάζει αποκλίσεις ανάμεσα στις τρεις δοκιμές. Πιο συγκεκριμένα, η καμπύλη μετρήσεων που αναφέρεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος -15°C παρουσιάζει αυξημένες τιμές σε σχέση με την καμπύλη που αναφέρεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με +45°C. Οι αποκλίσεις γίνονται περισσότερο ορατές σε έντονα μεταβατικές φάσεις και στην πορεία του οχήματος με μεγάλη ταχύτητα (μεγάλα φορτία). Ωστόσο, κατά μέσο όρο, οι αποκλίσεις από τα δεδομένα που αφορούν θερμοκρασία περιβάλλοντος +20 °C είναι και στα δύο κομμάτια του κύκλου (Προσομοίωση πόλη και αυτοκινητοδρόμου) παρόμοιες και κυμαίνονται κατά μέσο όρο μεταξύ 5 έως 7% (βλ. Πίνακα 7.7) όπως συμβαίνει και με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της ροπής.

7.3.2 Πίνακες συγκρίσεων διαγραμμάτων επιδόσεων

Πίνακας 7.1: Σύγκριση στροφών περιστροφής κινητήρα

ΣΤΡΟΦΕΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ [rpm] (Σχήμα 7.8)	WLTC (0-1800) sec			Προσομοίωση πόλης (0-1022) sec			Προσομοίωση αυτοκινητοδρόμου (1022-1800) sec		
	Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος		
	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C
Μέση τιμή	1907,72	1903,56	1902,17	1898,99	1899,38	1899,05	1919,15	1909,03	1906,26
Μέγιστη τιμή	3844,73	3805,09	3819,19	3775,14	3805,09	3819,19	3844,73	3664,23	3678,06
Μέση απόκλιση συγκριτικά με τα δεδομένα θερμοκρασίας περιβάλλοντος +20°C	0,26%	-	-0,05%	0,10%	-	-0,04%	0,47%	-	-0,06%

Πίνακας 7.2: Σύγκριση στροφών περιστροφής του υπερπληρωτή

ΣΤΡΟΦΕΣ ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ [rpm] (Σχήμα 7.9)	WLTC (0-1800) sec			Προσομοίωση πόλης (0-1022) sec			Προσομοίωση αυτοκινητοδρόμου (1022-1800) sec		
	Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος		
	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C
Μέση τιμή	38629	37567	37017	35917	35097	34697	42178	40800	40055
Μέγιστη τιμή	94425	89563	86427	94425	89563	86427	88631	82088	80347
Μέση απόκλιση συγκριτικά με τα δεδομένα θερμοκρασίας περιβάλλοντος +20°C	2,09%	-	-0,77%	1,08%	-	-0,17%	3,40%	-	-1,56%

Πίνακας 7.3: Σύγκριση αποτελεσμάτων σχέσης συμπίεσης

ΣΧΕΣΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ (Σχήμα 7.10)	WLTC (0-1800) sec			Προσομοίωση πόλης (0-1022) sec			Προσομοίωση αυτοκινητοδρόμου (1022-1800) sec		
	Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος		
	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C
Μέση τιμή	1,49	1,40	1,34	1,44	1,35	1,31	1,56	1,45	1,39
Μέγιστη τιμή	3,39	2,93	2,63	3,39	2,93	2,63	3,24	2,74	2,48
Μέση απόκλιση συγκριτικά με τα δεδομένα θερμοκρασίας περιβάλλοντος +20°C	5,85%	-	-3,10%	5,11%	-	-2,70%	6,81%	-	-3,62%

Πίνακας 7.4: Σύγκριση αποτελεσμάτων ογκομετρικού β.α

ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΟΣ Β.Α [%] (Σχήμα 7.11)	WLTC (0-1800) sec			Προσομοίωση πόλης (0-1022) sec			Προσομοίωση αυτοκινητοδρόμου (1022-1800) sec		
	Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος		
	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C
Μέση τιμή	1,05	0,97	0,95	1,00	0,93	0,91	1,11	1,02	0,99
Μέγιστη τιμή	2,18	1,82	1,68	2,14	1,81	1,65	2,18	1,82	1,68
Μέση απόκλιση συγκριτικά με τα δεδομένα θερμοκρασίας περιβάλλοντος +20°C	7,81%	-	-1,55%	7,10%	-	-1,16%	8,75%	-	-2,06%

Πίνακας 7.5: Σύγκριση αποτελεσμάτων παροχής αέρα συμπιεστή

ΜΕΣΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΕΡΑ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ [kg/s] (Σχήμα 7.12)	WLTC (0-1800) sec			Προσομοίωση πόλης (0-1022) sec			Προσομοίωση αυτοκινητοδρόμου (1022-1800) sec		
	Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος		
	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C
Μέση τιμή	0,12	0,11	0,11	0,12	0,11	0,10	0,13	0,12	0,11
Μέγιστη τιμή	0,41	0,36	0,33	0,41	0,36	0,33	0,40	0,30	0,28
Μέση απόκλιση συγκριτικά με τα δεδομένα θερμοκρασίας περιβάλλοντος +20°C	6,22%	-	-3,26%	5,31%	-	-2,85%	7,40%	-	-3,79%

Πίνακας 7.6: Σύγκριση αποτελεσμάτων μέσης πραγματικής πίεσης

ΜΕΣΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ [bar] (Σχήμα 7.13)	WLTC (0-1800) sec			Προσομοίωση πόλης (0-1022) sec			Προσομοίωση αυτοκινητοδρόμου (1022-1800) sec		
	Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος		
	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C
Μέση τιμή	1,92	1,82	1,75	1,15	1,11	1,07	2,88	2,70	2,60
Μέγιστη τιμή	12,42	11,51	11,20	8,37	7,58	7,38	12,42	11,51	11,20
Μέση απόκλιση συγκριτικά με τα δεδομένα θερμοκρασίας περιβάλλοντος +20°C	4,63%	-	-4,79%	4,79%	-	-4,38%	4,43%	-	-5,30%

Πίνακας 7.7: Σύγκριση αποτελεσμάτων ειδικής κατανάλωσης καυσίμου

ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ [g/kWh] (Σχήμα 7.14)	WLTC (0-1800) sec			Προσομοίωση πόλης (0-1022) sec			Προσομοίωση αυτοκινητοδρόμου (1022-1800) sec		
	Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος		
	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C
Μέση τιμή	470,54	488,64	498,35	575,93	591,83	605,04	362,52	382,88	388,99
Μέγιστη τιμή	1370,64	1406,88	1457,53	1370,64	1406,88	1457,53	1247,42	1307,11	1372,35
Μέση απόκλιση συγκριτικά με τα δεδομένα θερμοκρασίας περιβάλλοντος +20°C	-2,60%	-	2,04%	-1,46%	-	2,04%	-3,76%	-	2,05%

Πίνακας 7.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων ροπής

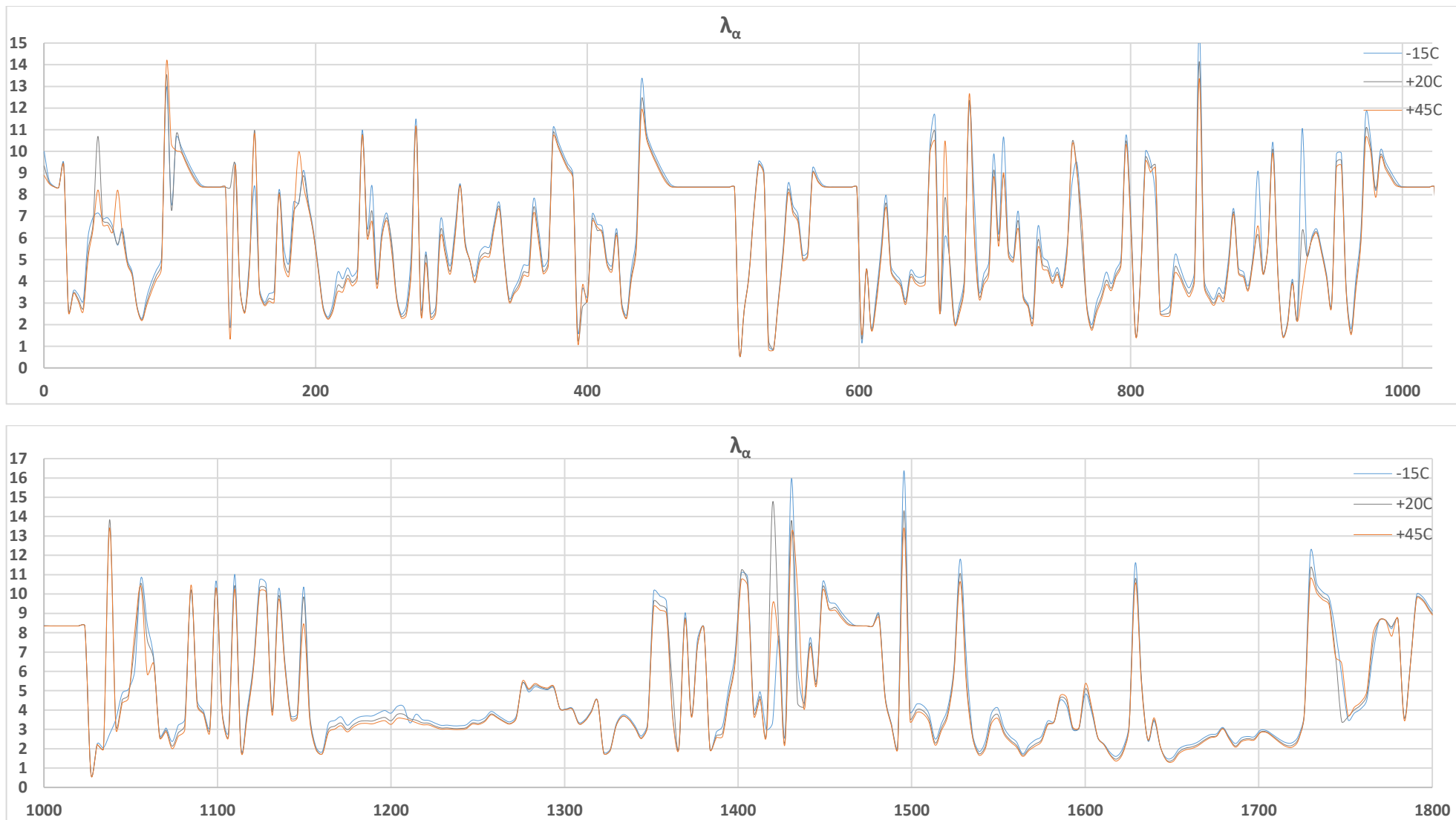
ΡΟΠΗ [Nm] (Σχήμα 7.15)	WLTC (0-1800) sec			Προσομοίωση πόλης (0-1022) sec			Προσομοίωση αυτοκινητοδρόμου (1022-1800) sec		
	Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος		
	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C
Μέση τιμή	108,45	103,30	99,33	64,95	63,30	61,38	164,45	154,79	148,19
Μέγιστη τιμή	588,73	545,75	531,00	396,97	359,45	350,00	588,73	545,75	531,00
Μέση απόκλιση συγκριτικά με τα δεδομένα θερμοκρασίας περιβάλλοντος +20°C	6,50%	-	-5,42%	6,95%	-	-5,13%	5,93%	-	-5,78%

Πίνακας 7.9: Σύγκριση αποτελεσμάτων ισχύος

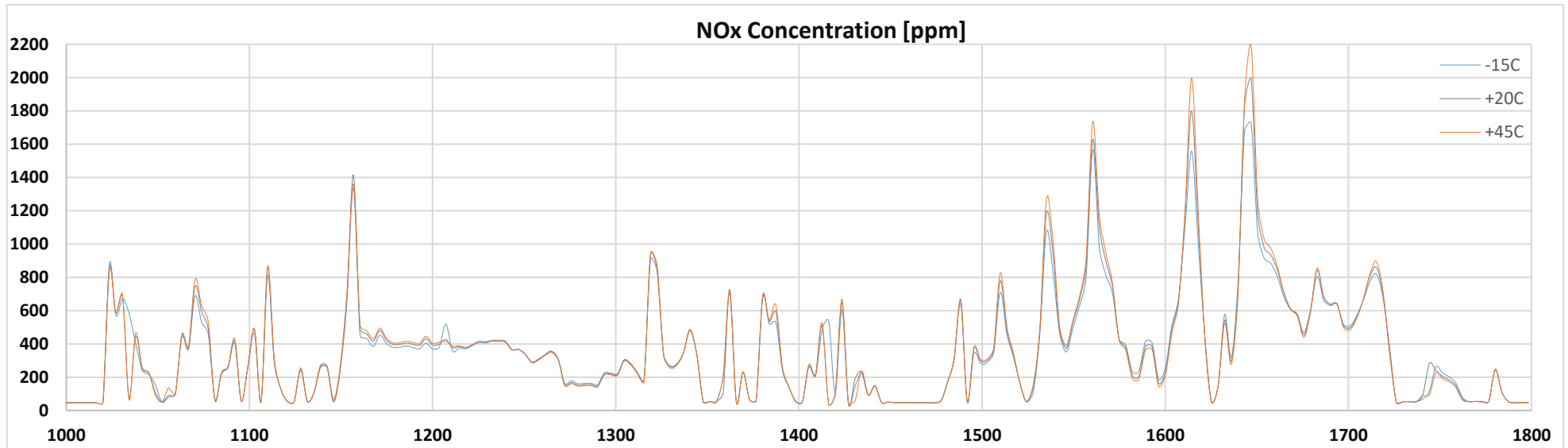
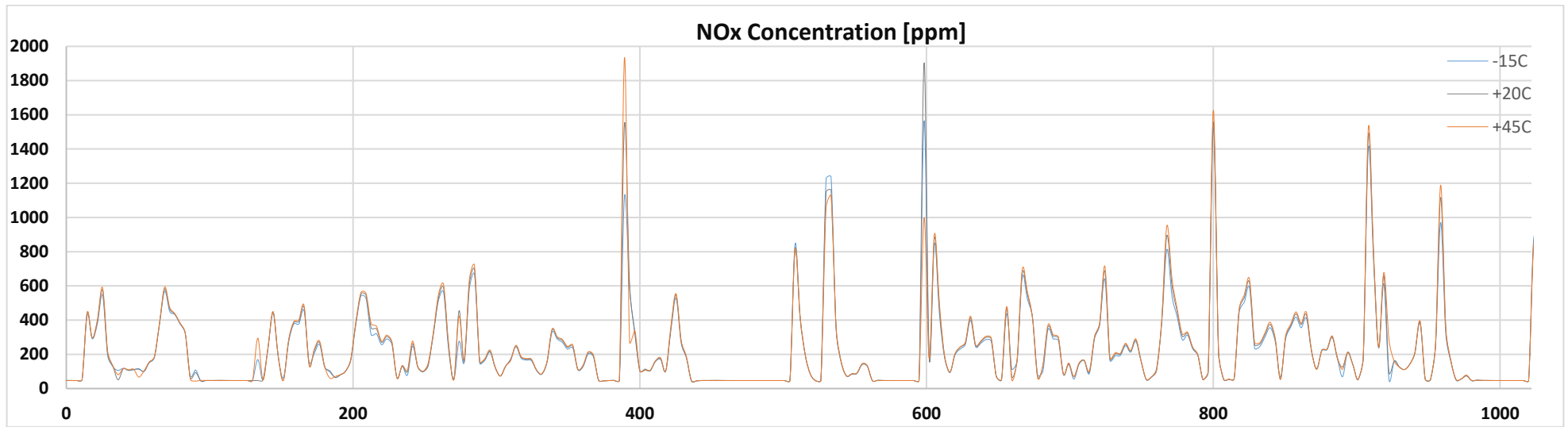
ΙΣΧΥΣ [kW] (Σχήμα 7.16)	WLTC (0-1800) sec			Προσομοίωση πόλης (0-1022) sec			Προσομοίωση αυτοκινητοδρόμου (1022-1800) sec		
	Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος		
	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C
Μέση τιμή	23,42	22,33	21,50	15,14	14,75	14,28	34,02	32,06	30,76
Μέγιστη τιμή	110,64	102,56	99,72	80,49	73,03	70,83	110,64	102,56	99,72
Μέση απόκλιση συγκριτικά με τα δεδομένα θερμοκρασίας περιβάλλοντος +20°C	6,22%	-	-5,35%	6,39%	-	-4,99%	6,00%	-	-5,82%

Επισημαίνεται ότι κατά την ανάλυση των δεδομένων, απορρίφθηκαν ακραίες τιμές ορισμένων μεγεθών (π.χ. ειδικής κατανάλωσης καυσίμου) που εξήγαγε το πρόγραμμα GT-Post, προκειμένου να μην επηρεαστούν οι μέσες τιμές και να αποδοθεί σωστά η γενικότερη εικόνα των μεγεθών που αναλύθηκαν κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC.

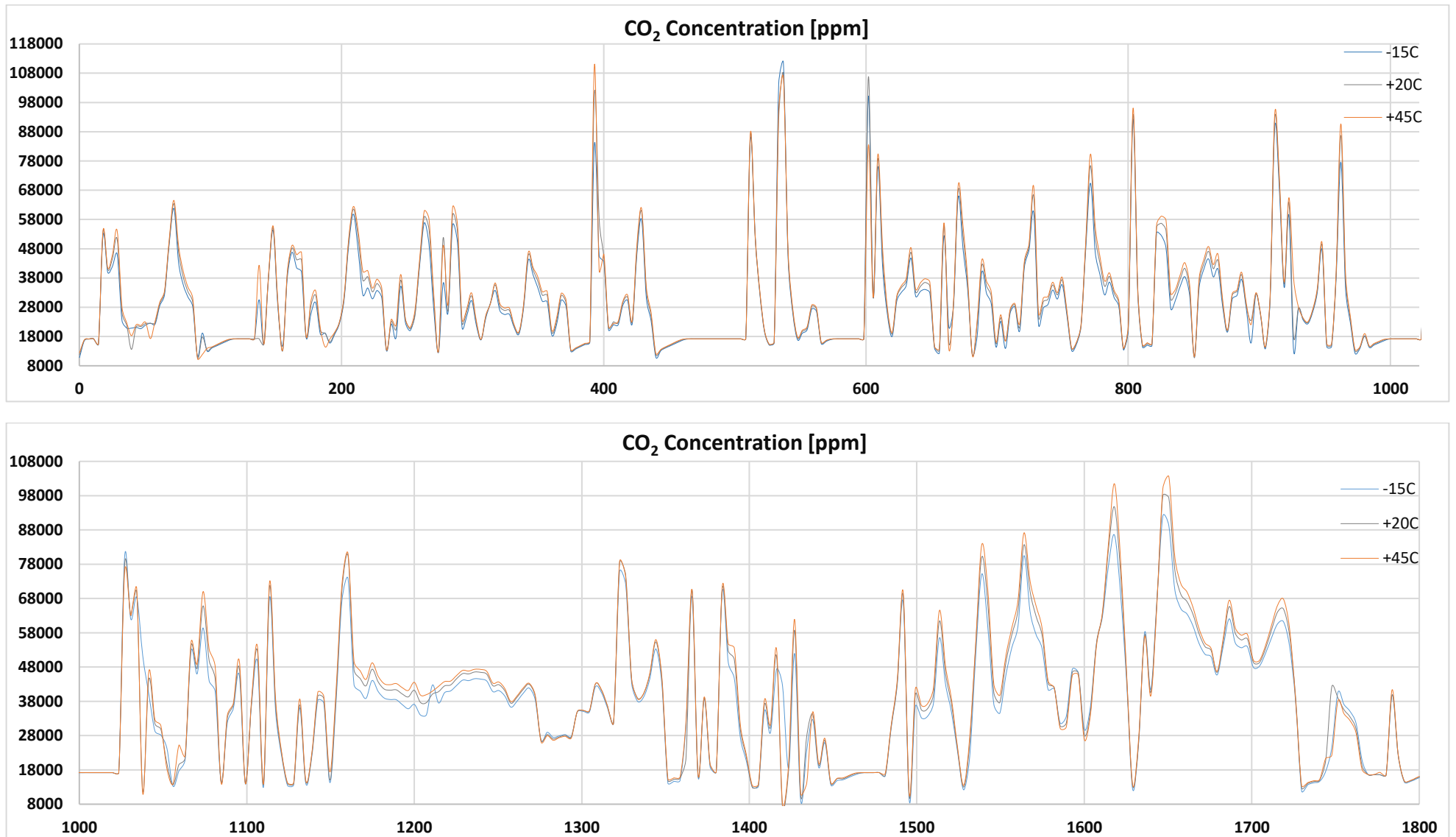
7.4 Εκπομπές



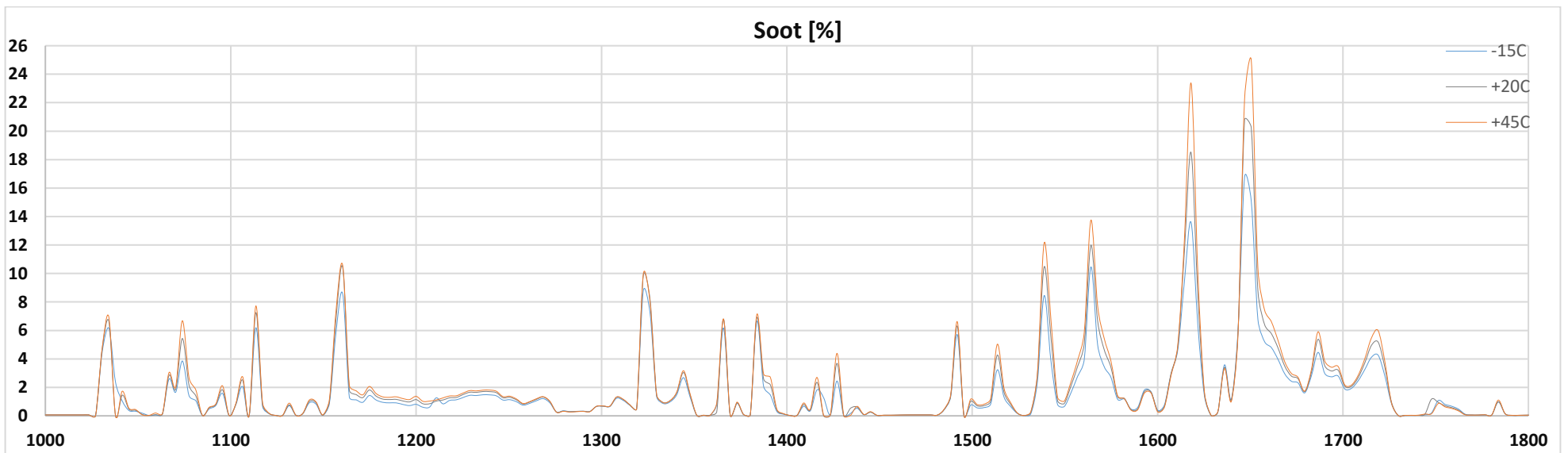
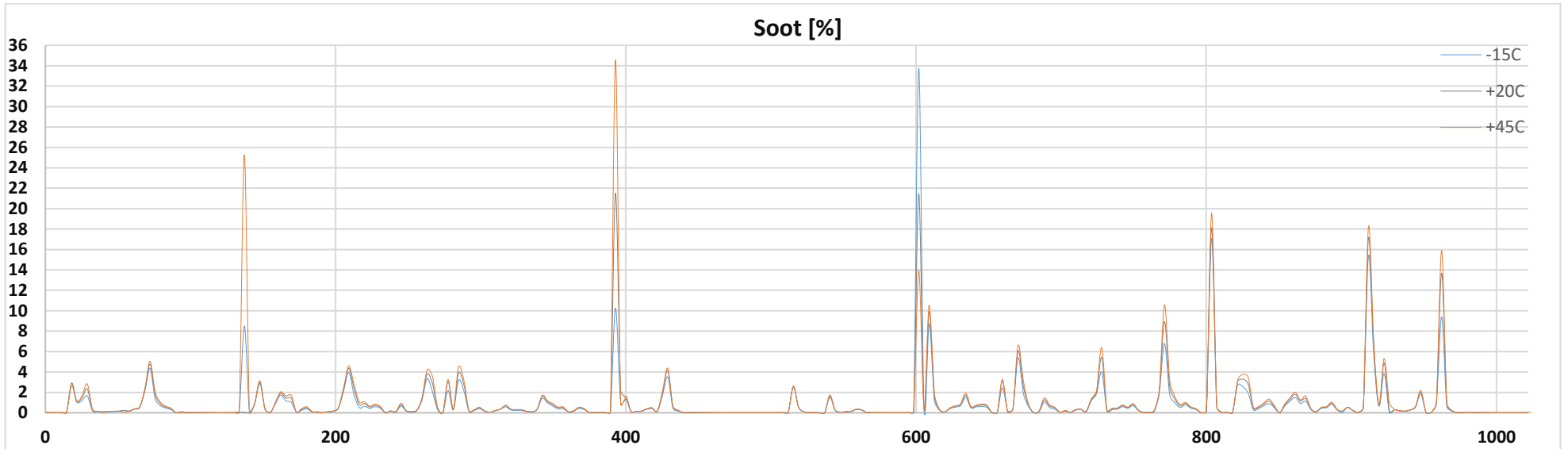
Σχήμα 7.17: Διάγραμμα λόγου ισοδυναμίας αέρα καύσης κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC



Σχήμα 7.18: Διάγραμμα συγκέντρωσης οξειδίων του αζώτου κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC



Σχήμα 7.19: Διάγραμμα συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC



Σχήμα 7.20: Διάγραμμα συγκέντρωσης σωματιδίων αιθάλης κατά τη διάρκεια του κύκλου πόλης WLTC

7.4.1 Σχολιασμός και συγκρίσεις αποτελεσμάτων

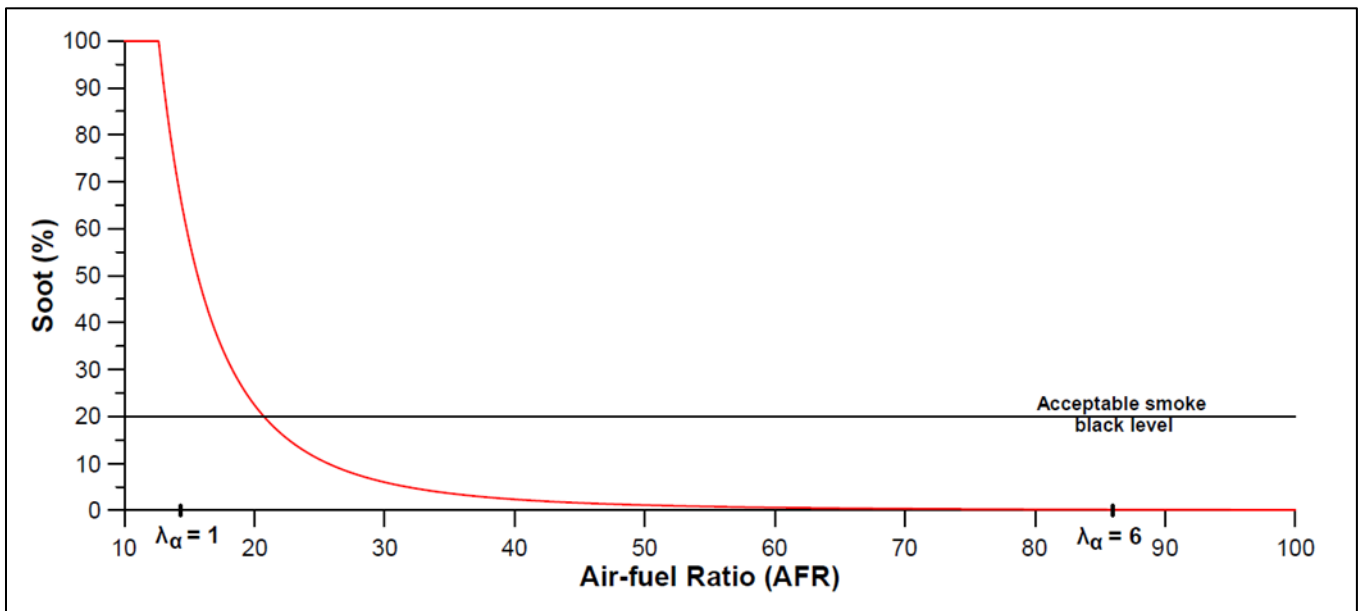
Για την υπολογισμό των εκπομπών αιθάλης χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω προσεγγιστική σχέση:

$$\text{Soot (\%)} = 380190 \cdot \text{AFR}^{-3,25} \quad (7.1)$$

Η σχέση αυτή αναπτύχθηκε σε κινητήρα παρόμοιο με αυτόν της παρούσας εργασίας και συνδέει τις εκπομπές αιθάλης με την αναλογία αέρα-καυσίμου (AFR) (βλ. Σχήμα 7.22) που αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τον σχηματισμό της. Η σύνδεση των δύο αυτών μεγεθών αποτυπώνεται στο ακόλουθο Σχήμα 7.22 στο οποίο απεικονίζονται τιμές τις αιθάλης (πρακτικά της αμαυρότητας του καυσαερίου, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί προσεγγιστικά για την εκτίμηση των σωματιδίων) για τις περιοχές στοιχειομετρικού λόγου αέρα-καυσίμου ($\lambda_a=1$) και υπερ-στοιχειομετρικού λόγου αέρα-καυσίμου ($\lambda_a=6$) με «αποδεκτό» όριο μεταξύ των οποίων να είναι η τιμή λόγου αέρα καυσίμου στο 1,6.

Η χρησιμότητα αυτής της σχέσης έγκειται στο γεγονός πως έχει αναπτυχθεί για να δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα σε φάσεις μεταβατικής λειτουργίας, ενώ αντιπροσωπευτικά είναι και τα αποτελέσματα και στο περιοχή τιμών λ_a κοντά ή και κάτω ακόμα από την τιμή 1 (AFR=14.33), το οποίο παρατηρείται συχνά στη μεταβατική λειτουργία των κινητήρων Diesel λόγω του φαινομένου της υστέρησης του στροβιλο-υπερπληρωτή.

Σημειώνεται ότι όλες οι τιμές ρύπων (NOx, αιθάλης) αναφέρονται στην έξοδο από τους κυλίνδρους (χωρίς κανένα σύστημα αντιρρύπανσης).



Σχήμα 7.22: Συσχέτιση εκπομπών αιθάλης (%) με την αναλογία αέρα καυσίμου (AFR)

Σχετικά με τα παραπάνω διαγράμματα εκπομπών, παρατηρούνται με τη σειρά παράθεσης τους τα εξής:

- Το διάγραμμα του λόγου ισοδυναμίας αέρα καυσίμου (Σχήμα 7.17) παρουσιάζει διαφοροποιήσεις ανάμεσα στις δύο δοκιμές. Ειδικότερα, η καμπύλη αποτελεσμάτων που αναφέρεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος -15°C παρουσιάζει τις πιο αυξημένες τιμές, ακολουθεί η καμπύλη αποτελεσμάτων που αναφέρεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος $+20^{\circ}\text{C}$ και έπεται η καμπύλη αποτελεσμάτων που αναφέρεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με $+45^{\circ}\text{C}$. Οι αποκλίσεις είναι γενικά μικρές και εντονότερες κυρίως σε έντονα μεταβατικές περιοχές αλλά κατά μέσο όρο κυμαίνονται κοντά στο 3,5% και -2% αντίστοιχα για τις συγκρίσεις των ψυχρών και θερμών συνθηκών περιβάλλοντος (-15°C και $+45^{\circ}\text{C}$) με την αντίστοιχη κανονική θερμοκρασία των $+45^{\circ}\text{C}$ (βλ. Πίνακα 7.10)
- Στο διάγραμμα συγκέντρωσης NO_x (Σχήμα 7.18) παρατηρούνται αποκλίσεις που είναι σχετικά μικρές στη διάρκεια του κύκλου με τις τιμές των δεδομένων που αφορούν θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με $+45^{\circ}\text{C}$ να είναι συγκριτικά μεγαλύτερες σε σχέση με τα δεδομένα που αφορούν τις ψυχρές συνθήκες περιβάλλοντος. Η μικρή αύξηση του λόγου ισοδυναμίας αέρα – καυσίμου και η μεγαλύτερη πτώση της θερμοκρασία εντός του κυλίνδρου πριν την έναρξη της συμπίεσης, από την είσοδο αέρα σε ψυχρές συνθήκες περιβάλλοντος, συντελούν στη μείωση των NO_x . Ωστόσο, οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων μεταξύ ακραίων και κανονικών συνθηκών είναι σχετικά μικρές και παρουσιάζονται στο σχετικό πίνακα (Πίνακας 7.11).
- Μεγαλύτερες και πιο ευκρινείς σε όλη τη διάρκεια του κύκλου παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις των αποτελεσμάτων στο διάγραμμα συγκέντρωσης CO_2 (Σχήμα 7.19) στο οποίο εκπομπές που αντιστοιχούν σε θερμές συνθήκες περιβάλλοντος ($+45^{\circ}\text{C}$) είναι σαφώς αυξημένες συγκριτικά με αυτές που αντιστοιχούν σε ψυχρές συνθήκες περιβάλλοντος ($+15^{\circ}\text{C}$). Στην προκειμένη περίπτωση, η ελαφρώς αυξημένη κατανάλωση καυσίμου που προκύπτει κατά τις δοκιμές σε θερμότερες συνθήκες περιβάλλοντος, είναι και ο κυριότερος παράγοντας που επιφέρει τις ανάλογες αποκλίσεις όπως αυτές παρουσιάζονται στο σχετικό πίνακα (Πίνακας 7.12).
- Το διάγραμμα ποσοστού αιθάλης (Σχήμα 7.20) παρουσιάζει αξιόλογες αποκλίσεις για τις τρεις δοκιμές με τις τιμές που αναφέρονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ($+45^{\circ}\text{C}$) να είναι αυξημένες συγκριτικά με τα αποτελέσματα της καμπύλης των -15°C . Οι μεγαλύτερες καταναλώσεις καυσίμου και ο μειωμένος λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου είναι καθοριστικοί παράγοντες για την παραγωγή σωματιδίων και είναι και ο λόγος που παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις που κατά μέσο όρο ξεπερνούν και το 10% στην περίπτωση σύγκρισης αποτελεσμάτων μεταξύ ψυχρών (-15°C) και κανονικών ($+20^{\circ}\text{C}$) συνθηκών περιβάλλοντος. Συγκριτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχετικό Πίνακα 7.13.

7.4.2 Πίνακες συγκρίσεων διαγραμμάτων επίδοσης

Πίνακας 7.10: Σύγκριση αποτελεσμάτων λόγου ισοδυναμίας αέρα – καυσίμου

ΛΟΓΟΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑΣ ΑΕΡΑ - ΚΑΥΣΙΜΟΥ (Σχήμα 7.17)	WLTC (0-1800) sec			Προσομοίωση πόλης (0-1022) sec			Προσομοίωση αυτοκινητοδρόμου (1022-1800) sec		
	Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος		
	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C
Μέση τιμή	5,59	5,46	5,36	6,13	5,96	5,85	4,88	4,81	4,72
Μέγιστη τιμή	16,37	14,70	14,07	15,67	14,14	14,07	16,37	14,70	13,42
Μέση απόκλιση συγκριτικά με τα δεδομένα θερμοκρασίας περιβάλλοντος +20°C	3,62%	-	-2,04%	3,81%	-	-2,07%	3,37%	-	-2,00%

Πίνακας 7.11: Σύγκριση αποτελεσμάτων συγκέντρωσης NO_x

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ NO _x [ppm] (Σχήμα 7.18)	WLTC (0-1800) sec			Προσομοίωση πόλης (0-1022) sec			Προσομοίωση αυτοκινητοδρόμου (1022-1800) sec		
	Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος		
	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C
Μέση τιμή	289,08	298,21	301,94	223,99	233,41	235,45	374,66	383,41	389,37
Μέγιστη τιμή	1727,42	1988,28	2189,77	1565,27	1904,04	1934,12	1727,42	1988,28	2189,77
Μέση απόκλιση συγκριτικά με τα δεδομένα θερμοκρασίας περιβάλλοντος +20°C	-1,80%	-	0,35%	-2,07%	-	0,34%	-1,44%	-	0,37%

Πίνακας 7.12: Σύγκριση αποτελεσμάτων συγκέντρωσης CO₂

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ CO ₂ [ppm] (Σχήμα 7.19)	WLTC (0-1800) sec			Προσομοίωση πόλης (0-1022) sec			Προσομοίωση αυτοκινητοδρόμου (1022-1800) sec		
	Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος		
	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C
Μέση τιμή	33288,80	34593,23	35370,07	29404,67	30703,36	31447,61	38372,17	39684,11	40503,60
Μέγιστη τιμή	111647,96	107522,06	110955,96	111647,96	107522,06	110955,96	92039,41	98032,79	103542,40
Μέση απόκλιση συγκριτικά με τα δεδομένα θερμοκρασίας περιβάλλοντος +20°C	-3,51%	-	1,85%	-3,50%	-	1,78%	-3,54%	-	1,93%

Πίνακας 7.13: Σύγκριση αποτελεσμάτων σωματιδίων αιθάλης

ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΑΙΘΑΛΗΣ [%] (Σχήμα 7.20)	WLTC (0-1800) sec			Προσομοίωση πόλης (0-1022) sec			Προσομοίωση αυτοκινητοδρόμου (1022-1800) sec		
	Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος			Θερμοκρασία περιβάλλοντος		
	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C	-15°C	+20°C	+45°C
Μέση τιμή	1,27	1,47	1,67	0,93	1,04	1,24	1,72	2,02	2,22
Μέγιστη τιμή	33,77	21,52	34,55	33,77	21,52	34,55	16,76	20,79	24,97
Μέση απόκλιση συγκριτικά με τα δεδομένα θερμοκρασίας περιβάλλοντος +20°C	-11,30%	-	6,66%	-11,32%	-	6,76%	-11,27%	-	6,53%

8. Αξιολόγηση δεδομένων και εξαγωγή συμπερασμάτων

Έχοντας υπόψη το αντικείμενο της μελέτης και παρατηρώντας τα εξαγόμενα από το πρόγραμμα δεδομένα για τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, μπορούμε να οδηγηθούμε στις εξής διαπιστώσεις και συμπεράσματα:

- Η εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος επιδρά στην συμπεριφορά συμπιεστή μεγέθους παρόμοιου με αυτού της παρούσας μελέτης, προσφέροντας καλύτερες αποδόσεις σε ψυχρές συνθήκες. Το γεγονός αυτό μπορεί να θεωρηθεί αναμενόμενο λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της θερμοκρασίας στην πυκνότητα του αέρα και κατ' επέκταση στην παροχή μάζας και την πίεση του αέρα που διοχετεύεται εντός του κυλίνδρου από τον συμπιεστή. Αρκεί η απλή εφαρμογή της καταστατικής εξίσωσης για να διαπιστωθεί η ευεργετική για την απόδοση επίδραση της χαμηλής θερμοκρασίας αέρα στην είσοδο του συμπιεστή.
- Η μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος επιδρά επίσης στην απόδοση του κινητήρα, καθώς αυτή είναι άμεσα συνδεδεμένη με την απόδοση του συμπιεστή και του παράγοντες που συντελούν στην λειτουργία του. Εν προκειμένω, οι ψυχρές συνθήκες περιβάλλοντος επέφεραν αυξήσεις στις τιμές της ισχύος και της ροπής, αλλά και μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου προσφέροντας συνολικά καλύτερη απόδοση κινητήρα και απόκριση του οχήματος.
- Η θερμοκρασία περιβάλλοντος επιφέρει μεταβολές στις συγκεντρώσεις των ρύπων, με τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος να οδηγούν σε αύξηση των εκπεμπόμενων ρύπων. Οι διαφοροποιήσεις παρουσιάζονται, κατά μέσο όρο, σχετικά μικρές ως προς τα NOx και το CO₂ και λίγο μεγαλύτερες ως προς τα σωματίδια, όμως είναι αξιόλογες αν ληφθεί υπόψη και το μέγεθος της ποσοτικής διαφοράς που δημιουργείται από την λειτουργία ενός κινητήρα για μεγάλα χρονικά διαστήματα ή από πληθώρα κινητήρων όπως συμβαίνει και στην πραγματικότητα. Σημειώνεται ότι στη συγκεκριμένη ανάλυση, οι εκπομπές υπολογίστηκαν σε ppm – ανάλυση σε g/km ή g/kWh μπορεί να δώσει άλλα αποτελέσματα.

Συμπερασματικά καταλήγουμε στο γεγονός ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος επιφέρει μικρές αλλά όχι αμελητέες μεταβολές στη λειτουργία ενός ελαφρού φορτηγού με στροβιλο-υπερπληρωμένο Diesel κινητήρα, με τις ψυχρές συνθήκες να επιδρούν θετικά τόσο στις επιδόσεις του κινητήρα όσο και στον περιορισμό των εκπεμπόμενων ρύπων προς το περιβάλλον, επιβεβαιώνοντας τα εξαγόμενα από το πρόγραμμα δεδομένα συγκριτικά με τις αρχικές εκτιμήσεις που βασίζονται στην θεωρητική γνώση.

Βιβλιογραφία

1. Ε.Γ. Γιακουμής, «Προδιαγραφές Καυσαερίων και Κύκλοι Δοκιμής Εμβολοφόρων ΜΕΚ», , Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2015.
2. Ε.Γ. Γιακουμής, “Ρύπανση και συστήματα αντιρρύπανσης εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.”, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2019
3. Κ.Δ. Ρακόπουλος, Ε.Γ. Γιακουμής, «Εναλλαγή αερίων και υπερπλήρωση ΜΕΚ», Αθήνα, Εκδόσεις Φούντας, Αθήνα, 2011
4. Κ.Δ. Ρακόπουλος, Δ. Θ. Χουντάλας, «Καύση-Ρύπανση Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.», Εκδόσεις Φούντας, Αθήνα, 1998.
5. Μ. Τάταρης «Επίδραση συστήματος παγίδας NOx (lean NOx trap) σε επιδόσεις και εκπομπές πετρελαιοκίνητου ελαφρού φορτηγού κατά τη διάρκεια του Παγκόσμιου Κύκλου Πόλης WLTC», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. (επιβλέπων: Ε.Γ. Γιακουμής), Αθήνα, 2020
6. Χ. Μπαχτής, «Μελέτη επιδόσεων και εκπομπών ρύπων ελαφρού πετρελαιοκίνητου φορτηγού με ηλεκτρικά υποβοηθούμενη στροβίλο-υπερπλήρωση κατά τη διάρκεια του Παγκοσμίου Κύκλου Πόλης WLTC», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. (επιβλέπων: Ε.Γ. Γιακουμής), Αθήνα, 2018
7. E.G. Giakoumis, «Driving and Engine Cycles», Springer, Cham, 2016.
8. G. Technologies, GT-SUITE Engine Performance Application Manual, 2016.
9. G. Technologies, GT-SUITE Engine Performance Tutorials.
10. N. Watson, M.S. Janota, Turbocharging the Internal Combustion Engine, Macmillan Press, London, 1982
11. R. Stone, Introduction to Internal Combustion Engines, 4th edition, Palgrave Macmillan, 2012.
12. <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/11/3839>
13. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-014-0793->
14. <https://Dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php>

-- Τέλος εγγράφου ---