**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**
**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ**
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ ΕΜΠ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

# ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΚΠΟΜΠΗ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

**ΔΡΑΪΝΑΚΗΣ ΑΝΔΡΕΑΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΧΡΙΣΤΙΝΑ ΠΛΑΤΗ, Επικ. Καθηγήτρια ΕΜΠ**

**ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2016**

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν στην εκπόνησή της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κ. Χριστίνα Πλατή, Επικ. Καθηγήτρια ΕΜΠ, για την ανάθεση, την επίβλεψη, την καθοδήγηση και την εξαιρετική συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερα, ευχαριστίες οφείλω και στην κ. Μαρία Πομόνη, Υποψήφια Διδάκτορα ΕΜΠ για την πάντα πρόθυμη βοήθεια και την επίλυση απορριών, όποτε της ζητήθηκε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την έμπρακτη και ουσιαστική υποστήριξη που μου προσφέρανε σε όλη μου την προσπάθεια αυτή.

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η περιβαλλοντική ρύπανση αποτελεί ένα από τα βασικότερα ζητήματα της παγκόσμιας κοινότητας. Τα αέρια του θερμοκηπίου συμβάλλουν δραστικά στο περιβαλλοντικό ζήτημα, αφού είναι υπεύθυνα για την υπερθέρμανση του πλανήτη. Οι οδικές μεταφορές είναι κύριες πηγές εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου τόσο στην Ελλάδα όσο και σε παγκόσμια κλίμακα. Για το λόγο αυτό, κύριος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση της επίδρασης της ομαλότητας της επιφάνειας των ασφαλτικών οδοστρωμάτων στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου των οχημάτων. Στην προκειμένη έρευνα τα αέρια του θερμοκηπίου εκφράσθηκαν ως προς το ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα (eqCO2), που αποτελεί διεθνή μονάδα μέτρησης των αέριων ρύπων του θερμοκηπίου, ενώ η ομαλότητα εκφράζεται μέσω του Διεθνούς Δείκτη Ομαλότητας (International Roughness Index: IRI). Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε σε τρία στάδια. Αρχικά, εξετάσθηκε η επίδραση της υποβαθμισμένης κατάστασης ομαλότητας κόμβων αυτοκινητοδρόμων σε σχέση με παρακείμενα τμήματα του κυρίου άξονα, τα οποία παρουσιάζουν υψηλό επίπεδο ποιότητας κύλισης, στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου. Επιπλέον, διερευνήθηκε η επίδραση των ενεργειών συντήρησης ασφαλτικού οδοστρώματος στην εκπομπή ισοδυνάμου του διοξειδίου του άνθρακα. Τέλος, πραγματοποιήθηκε η εκτίμηση πέντε μοντέλων πρόβλεψης του ισοδυνάμου του διοξειδίου του άνθρακα συναρτήσει της ομαλότητας της επιφάνειας του οδοστρώματος για συγκεκριμένες κατηγορίες οχημάτων-καυσίμου. Τα αναλυτικά αποτελέσματα και τα σχετικά συμπεράσματα περιλαμβάνονται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

**Λέξεις Κλειδιά:** Ρύπανση, Περιβάλλον, Ομαλότητα Οδοστρώματος, Διεθνής Δείκτης Ομαλότητας, Αέρια του Θερμοκηπίου, Ισοδύναμο Διοξειδίου του Άνθρακα, Αυτοκινητόδρομος, Συντήρηση οδοστρώματος, Μοντέλα Πρόβλεψης

# ABSTRACT

Environmental pollution is one of the key issues of the global community. Greenhouse gases contribute drastically to the environmental issue, since it is responsible for global warming. Road transport is a major source of greenhouse gas emissions both in Greece and worldwide. For this reason, the major aim of this thesis was the investigation of the effect of the pavement of the surface of the asphalt pavement in the greenhouse gas emissions of vehicles. In this research greenhouse gases expressed as to the equivalent of carbon dioxide (eqCO2), which is an international unit of gaseous pollutant emissions, while the smoothness is expressed through the International Roughness Index (IRI). The investigation was carried out in three stages. Initially, the effect of the degraded state of highway junctions' pavement roughness compared with adjacent sections of the main shaft, which have a high rolling resistance quality level, on the emission of greenhouse gases was investigated. Furthermore, the effect of the asphalt pavement maintenance actions in the broadcast equivalent of carbon dioxide was examined. Finally, five models were developed for the prediction of equivalent of carbon dioxide based on road roughness data with respect to different categories of fuel and vehicle types. The analysis results and the conclusions contained in this thesis.

**Keywords:** Pollution, Environment, Pavement Roughness, International Roughness Index, Greenhouse Gases, Equivalent Carbon Dioxide, Highway, Pavement Maintenance, Prediction Model

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ..... 1
1.1 Αντικείμενο έρευνας και προσδιορισμός του προβλήματος ..... 1
1.2 Στόχος της έρευνας ..... 2
1.3 Δομή της εργασίας ..... 2
2. ΟΔΙΚΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΕΡΙΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ..... 5
2.1 Περιβάλλον και ρύπανση ..... 5
2.2 Βασικοί τύποι περιβαλλοντικών ρύπων ..... 7
2.3 Βασικά αίτια περιβαλλοντικής ρύπανσης ..... 8
2.4 Αέριοι περιβαλλοντικοί ρύποι ..... 11
2.4.1 Βασικοί αέριοι ρύποι ..... 11
2.4.2 Αέρια του Θερμοκηπίου ..... 14
2.4.2.1 Γενικά ..... 14
2.4.2.2 Μεθάνιο ..... 16
2.4.2.3 Υποξείδιο του αζώτου ..... 18
2.4.2.4 Φθοριούχα αέρια ..... 20
2.4.2.5 Διοξείδιο του άνθρακα ..... 21
3. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΚΠΟΜΠΗ ΑΕΡΙΩΝ ..... 25
3.1 Γενικά ..... 25
3.2 Τύπος καυσίμου ..... 25
3.3 Τύπος οχήματος ..... 26
3.4 Συνολικά οχηματοχιλιόμετρα ..... 27
3.5 Θερμοκρασία ..... 27
3.6 Ταχύτητα, επιτάχυνση και επιβράδυνση οχήματος ..... 28
3.7 Κυκλοφοριακός φόρτος ..... 31
3.8 Κατά μήκος κλίση ..... 31
3.9 Τύπος και κατάσταση οδοστρώματος ..... 35
4. ΟΜΑΛΟΤΗΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ..... 39
4.1 Γενικά ..... 39
4.2 Τρόποι μέτρησης ομαλότητας ..... 41
4.2.1 Συστήματα καταγραφής μηχανικής απόκρισης ..... 42

4.2.1.1 Bureau of Public Roads (BPR) Roughometer ..... 42
4.2.1.2 Maysmeter ..... 43
4.2.2 Υψηλής ταχύτητας προφιλόμετρα ..... 44
4.2.3 Προφιλογράφοι ..... 46
4.2.4 Ελαφρά προφιλόμετρα ..... 48
4.2.5 Χειροκίνητες συσκευές ..... 48
4.3 Δείκτης IRI ..... 50
4.4 Ομαλότητα και εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ..... 55
5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ..... 61
5.1 Πειραματική διαδικασία ..... 61
5.2 Περιγραφή δεδομένων ..... 62
5.3 Διαδικασία διαχωρισμού σε ομογενή υποτμήματα ..... 63
5.4 Προσαρμογή κατανομών στα δεδομένα ..... 64
5.5 Υπολογισμός εκπομπών ρύπων ..... 69
5.6 Σύγκριση δεδομένων ..... 76
5.6.1 Βασικές έννοιες στατιστικής ..... 76
5.6.2 Γραμμική παλινδρόμηση ..... 77
5.6.3 Διαδικασία ελέγχου γραμμικών συσχετίσεων ..... 79
6. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΜΕΝΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΕΚΠΟΜΠΗ ΑΕΡΙΩΝ ..... 83
6.1 Διαχωρισμός ομογενών τμημάτων ..... 83
6.1.1 Κόμβοι αυτοκινητοδρόμου ..... 83
6.1.2 Τμήματα κύριου άξονα αυτοκινητοδρόμου ..... 85
6.2 Κατανομές δεδομένων ..... 87
6.3 Υπολογισμός ρύπων ..... 90
6.3.1 Κόμβοι αυτοκινητοδρόμου ..... 90
6.3.2 Τμήματα κύριου άξονα αυτοκινητοδρόμου ..... 91
6.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων ..... 91
7. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΚΠΟΜΠΗ ΑΕΡΙΩΝ ..... 95
7.1 Γενικά στοιχεία ..... 95
7.2 Διαχωρισμός ομοιογενών τμημάτων ..... 96
7.3 Κατανομές δεδομένων ..... 96
7.4 Υπολογισμός ρύπων ..... 99

7.5 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων ..... 100
8. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ..... 103
8.1 Βασικές αρχές ..... 103
8.2 Μοντέλο επιβατικών βενζινοκίνητων ..... 103
8.3 Μοντέλο επιβατικών ντιζελοκίνητων ..... 107
8.4 Μοντέλο φορτηγών βενζινοκίνητων ..... 110
8.5 Μοντέλο φορτηγών ντιζελοκίνητων ..... 113
8.6 Ανάπτυξη γενικού μοντέλου ..... 116
8.7 Επαλήθευση αποτελεσμάτων πρόβλεψης ..... 120
8.7.1 Επιλογή πεδίου επαλήθευσης ..... 120
8.7.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων πρόβλεψης ..... 121
9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ..... 125
10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ..... 129
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ..... 136

# Κατάλογος Πινάκων

*3.6 Μέση κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει του τύπου οδοστρώματος* 36
*3.8 Εκπομπές CO2 συναρτήσει τριών τύπων οδοστρωμάτων* 37
*4.15 Καθορισμός κατάστασης οδοστρώματος συναρτήσει του IRI* 54
*5.2 Απόσπασμα μετρήσεων ομαλότητας* 62
*5.9 Τιμές ARVMAX και είδος οχήματος* 69
*5.10 Ταχύτητα ομαλότητας* 69
*5.12 Τύποι οχήματος και καυσίμου λογισμικού MOVES2014a* 71
*5.14 100-έτη ποσότητας θέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά ρύπο* 73
*5.16 Μετεωρολογικά δεδομένα λογισμικού MOVES2014a* 74
*5.17 Μήκος και κατά μήκος κλίση οδού λογισμικού MOVES2014a* 74
*5.18 Μέση ταχύτητα οδού λογισμικού MOVES2014a* 75
*5.19 Ηλικία οχημάτων λογισμικού MOVES2014a* 75
*5.20 Κυκλοφοριακός φόρτος λογισμικού MOVES2014a* 75
*6.10 Κατανομές και χαρακτηριστικές τιμές IRI* 89
*6.11 Αποτελέσματα ρύπων κόμβων αυτοκινητοδρόμου* 90
*6.12 Αποτελέσματα ρύπων τμημάτων κύριου άξονα αυτοκινητοδρόμου* 91
*7.5 Κατανομές και χαρακτηριστικές τιμές IRI* 98
*7.7 Αποτελέσματα ρύπων πριν και μετά τις εργασίες συντήρησης* 100
*8.1 Συσχέτιση μεταβλητών – επιβατικά βενζινοκίνητα* 103
*8.2 Στατιστικά αποτελέσματα παλινδρόμησης - επιβατικά βενζινοκίνητα* 104
*8.6 Συσχέτιση μεταβλητών – επιβατικά ντιζελοκίνητα* 107
*8.7 Στατιστικά αποτελέσματα παλινδρόμησης - επιβατικά ντιζελοκίνητα* 108
*8.11 Συσχέτιση μεταβλητών – φορτηγά βενζινοκίνητα* 110
*8.12 Στατιστικά αποτελέσματα παλινδρόμησης – φορτηγά βενζινοκίνητα* 111
*8.16 Συσχέτιση μεταβλητών – φορτηγά ντιζελοκίνητα* 113
*8.17 Στατιστικά αποτελέσματα παλινδρόμησης – φορτηγά ντιζελοκίνητα* 114
*8.21 Συσχέτιση μεταβλητών* 116
*8.22 Στατιστικά αποτελέσματα παλινδρόμησης - γενικό μοντέλο* 117
*8.27 Κατανομές και χαρακτηριστικές τιμές IRI* 121
*8.28 Αποτελέσματα ρύπων αυτοκινητοδρόμου 4* 121

# Κατάλογος Σχημάτων

*2.1 Καμπύλη αύξησης του πληθυσμού της Γης* 9

*2.2 Καμπύλη αύξησης των παγκοσμίων εκπομπών του άνθρακα από καύση ορυκτών την περίοδο 1900-2010* 10

*2.3 Ποιοτικά αίτια της περιβαλλοντικής ρύπανσης* 10

*2.4 Ποσοστό συμμετοχής των αερίων του θερμοκηπίου σε παγκόσμια κλίμακα* 15

*2.5 Πηγές αερίων του θερμοκηπίου σε διάφορους τομείς της οικονομίας της Ελλάδας* 16

*2.6 Φυσικές πηγές παραγωγής μεθανίου* 17

*2.7 Ανθρώπινες πηγές παραγωγής μεθανίου* 18

*2.8 Φυσικές πηγές παραγωγής υποξειδίου του αζώτου* 19

*2.9 Ανθρώπινες πηγές παραγωγής υποξειδίου του αζώτου* 20

*2.10 Ανθρώπινες πηγές παραγωγής φθοριούχων αερίων* 21

*2.11 Φυσικές πηγές παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα* 22

*2.12 Ανθρώπινες πηγές διοξειδίου του άνθρακα* 23

*2.13 Πηγές διοξειδίου του άνθρακα σε διάφορους τομείς της οικονομίας* 24

*3.1 Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα συναρτήσει της μέσης ταχύτητας* 29

*3.2 Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και κυκλοφοριακός φόρτος εκφρασμένος ως προς τη μέση ταχύτητα* 31

*3.3 Κατανάλωση καυσίμου και κατά μήκος κλίση για τρεις διαδρομές με σταθερή ταχύτητα 60 mph (96 km/h)* 34

*3.4 Οικονομία καυσίμου και κλίση* 34

*3.5 Κατανάλωση καυσίμου και ταχύτητα για διάφορες τιμές κλίσεων* 35

*3.7 Ισοδύναμο CO2 συναρτήσει τριών τύπων οδοστρωμάτων* 37

*4.1 Επιφάνεια οδοστρώματος και κατατομές (προφίλ)* 39

*4.2 Διάταξη του BPR Roughometer* 43

*4.3 Διάταξη του Maysmeter* 43

*4.4 Διάταξη του υψηλής ταχύτητας προφιλόμετρου* 44

*4.5 Σύστημα όχημα - Laser Profiler του ΕΜΠ* 45

*4.6 California Profilograph* 47

*4.7 Διάταξη Profilograph Rainhart* 47

*4.8 Lightweight profiler* 48

*4.9 Συσκευή Dipstick* 49

*4.10 Συσκευή Walking Profiler* 49

*4.11 Ερωτηματολόγιο PSR* 50

*4.12 Εύρος τιμών IRI συναρτήσει διάφορων τύπων οδοστρωμάτων και των ταχυτήτων προσπέλασής τους* 51

*4.13 Προσομοίωμα του ενός τετάρτου αυτοκινήτου (Quarter – car model)* 52

*4.14 Προσομοίωμα του ενός τετάρτου αυτοκινήτου (Quarter – car model) (α) Απεικόνιση αυτοκινήτου (β) Απεικόνιση απλοποιημένου μοντέλου* 54

*4.16 Καμπύλη IRI σε συνάρτηση με το χρόνο για τρία είδη οδοστρωμάτων* 56

*4.17 Διάγραμμα ομαλότητας και κατανάλωσης καυσίμων* 57

*5.1 Ελληνικό δίκτυο αυτοκινητοδρόμων* 61

*5.3 CumSum Κόμβου 1* 63

*5.4 Διαχωρισμός ομογενοποιημένων τμημάτων – Κόμβος 1* 64

*5.5 Δεδομένα ανάλυσης (IRI) – Κόμβος 1* 65

*5.6 Επιλογή κατανομής - Κόμβος 1 (0.00 – 0.54 km)* 66

*5.7 Έλεγχος κατανομής - Κόμβος 1 (0.00 – 0.54 km)* 67

*5.8 Επιλογή χαρακτηριστικής τιμής – Κόμβος 1 (0.00 – 0.54 km)* 68

*5.11 Χρονικά όρια λογισμικού MOVES2014a* 71

*5.13 Τύπος οδού λογισμικού MOVES2014a* 72

*5.15 Είδος ρύπων λογισμικού MOVES2014a* 73

*5.21 Ευθεία Ελαχίστων Τετραγώνων* 79

*6.1 Διαχωρισμός ομογενοποιημένων τμημάτων – Κόμβος 1* 83

*6.2 Διαχωρισμός ομογενοποιημένων τμημάτων – Κόμβος 2* 84

*6.3 Διαχωρισμός ομογενοποιημένων τμημάτων – Κόμβος 3* 84

*6.4 Διαχωρισμός ομογενοποιημένων τμημάτων – Κόμβος 4* 85

*6.5 Διαχωρισμός ομογενοποιημένων τμημάτων – Αυτοκινητόδρομος 1* 86

*6.6 Διαχωρισμός ομογενοποιημένων τμημάτων–Αυτοκινητόδρομος 2_Λωρίδα 1* 86

*6.7 Διαχωρισμός ομογενοποιημένων τμημάτων–Αυτοκινητόδρομος 2_Λωρίδα 2* 87

*6.8 Προσαρμογή κατανομής – Κόμβος 3 (Τμήμα 0.00 – 0.46 km)* 88

*6.9 Προσαρμογή κατανομής – Κόμβος 3 (Τμήμα 0.47 – 1.10 km)* 88

*6.13 Μέσες εκπομπές ισοδύναμου CO2 σε κόμβους αυτοκινητοδρόμου ανά μήκος* 92

*6.14 Μέσες εκπομπές ισοδύναμου CO2 ανά μήκος* 93

*6.15 Εκπομπές ισοδύναμου CO2 σε αυτοκινητόδρομο* 94

*7.1 Κατά μήκος ομαλότητα κλάδου αυτοκινητοδρόμου 3 - πριν και μετά τις ενέργειες συντήρησης* 95

*7.2 Ομογενοποίηση κλάδου αυτοκινητοδρόμου 3* 96

*7.3 Προσαρμογή κατανομής– πριν τις εργασίες συντήρησης (Τμήμα 67.59– 68.59 km)* 97

*7.4 Προσαρμογή κατανομής–μετά τις εργασίες συντήρησης (Τμήμα 67.59 – 68.59 km)* 98

*7.6 Χαρακτηριστικές τιμές ομαλότητας πριν και μετά τις ενέργειες συντήρησης* *99*

*7.8 Εκπομπές ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα ανά τύπο οχήματος* *100*

*7.9 Συνολικές εκπομπές ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα πριν και μετά τις ενέργειες συντήρησης* *101*

*8.3 Q-Q plot - επιβατικά βενζινοκίνητα* *105*

*8.4 Κανονική κατανομή σφαλμάτων – επιβατικά βενζινοκίνητα* *106*

*8.5 Τυχαιότητα σφαλμάτων – επιβατικά βενζινοκίνητα* *106*

*8.8 Q-Q plot - επιβατικά ντιζελοκίνητα* *109*

*8.9 Κανονική κατανομή σφαλμάτων - επιβατικά ντιζελοκίνητα* *109*

*8.10 Τυχαιότητα σφαλμάτων - επιβατικά ντιζελοκίνητα* *110*

*8.13 Q-Q plot – φορτηγά βενζινοκίνητα* *112*

*8.14 Κανονική κατανομή σφαλμάτων – φορτηγά βενζινοκίνητα* *112*

*8.15 Τυχαιότητα σφαλμάτων – φορτηγά βενζινοκίνητα* *113*

*8.18 Q-Q plot – φορτηγά ντιζελοκίνητα* *115*

*8.19 Κανονική κατανομή σφαλμάτων – φορτηγά ντιζελοκίνητα* *115*

*8.20 Τυχαιότητα σφαλμάτων – φορτηγά ντιζελοκίνητα* *116*

*8.23 Q-Q plot – γενικό μοντέλο* *118*

*8.24 Κανονική κατανομή σφαλμάτων – γενικό μοντέλο* *119*

*8.25 Τυχαιότητα σφαλμάτων – γενικό μοντέλο* *119*

*8.26 Διαχωρισμός ομογενοποιημένων τμημάτων – Αυτοκινητόδρομος 4* *120*

*8.29 Σύγκριση αποτελεσμάτων πρόβλεψης – Τμήμα 16.25 – 17.24 km* *122*

*8.30 Σύγκριση αποτελεσμάτων πρόβλεψης – Τμήμα 17.25 – 18.81 km* *122*

*8.31 Σύγκριση αποτελεσμάτων πρόβλεψης – Τμήμα 18.82 – 19.52 km* *123*

# 1

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Αντικείμενο έρευνας και προσδιορισμός του προβλήματος

Το περιβάλλον αποτελεί ένα μείζον ζήτημα για την παγκόσμια κοινότητα. Τα τελευταία χρόνια θέματα που αφορούν τα αέρια του θερμοκηπίου ελκύουν το ενδιαφέρον, καθώς τα υπό εξέταση αυτά αέρια είναι υπεύθυνα για την υπερθέρμανση του πλανήτη και την κλιματική αλλαγή ευρύτερα. Οι αέριοι αυτοί ρύποι λοιπόν προέρχονται από διαφορετικές πηγές, είτε από φυσικές είτε από ανθρώπινες. Εστιάζοντας στις δεύτερες, υπάρχουν τέσσερα βασικά αέρια του θερμοκηπίου που εκπέμπονται λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων: το διοξείδιο του άνθρακα (CO2), το μεθάνιο (CH4), το υποξείδιο του αζώτου (N2O) και τα φθοριούχα αέρια. Μεταξύ των τεσσάρων αυτών, το διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο παράγεται και από τα οχήματα, είναι το πιο διαδεδομένο αέριο του θερμοκηπίου, σύμφωνα με την Υπηρεσία Περιβαλλοντικής Προστασίας EPA (Enviromental Protection Agency). Το δε σύνολο των αερίων του θερμοκηπίου αναφέρεται διεθνώς ως αποτύπωμα του άνθρακα στο περιβάλλον.

Οι πέντε κύριοι τομείς κατανάλωσης καυσίμου, που συμβάλλουν στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα λόγω της καύσης ορυκτών καυσίμων, είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι μεταφορές, η βιομηχανία, το εμπόριο και οι αστικές χρήσεις. Ειδικά η συμβολή του τομέα των μεταφορών στην υπερθέρμανση του πλανήτη μέσω των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα αγγίζει το 22 % (Energy Institute, 2012), γεγονός που καθιστά το πρόβλημα ιδιαίτερα σημαντικό.

Οι κύριοι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν την ποσότητα των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και σχετίζονται με τον τομέα των μεταφορών περιλαμβάνουν τον τύπο του οχήματος, το μέγεθος του κινητήρα, τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, την κυκλοφοριακή συμφόρηση, τη ροή της κυκλοφορίας, την ηλικία του οχήματος, το είδος καυσίμου, τις συχνές εναλλαγές επιβράδυνσης και επιτάχυνσης, την εκάστοτε διανυθείσα απόσταση και την ταχύτητα του οχήματος. Η ταχύτητα αναφέρεται από πληθώρα ερευνών ως ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει άμεσα την εκπομπή των αερίων αυτών, καθώς σε γενικές γραμμές όσο βραδύτερα κινείται το όχημα, τόσο μεγαλύτερη είναι η κατανάλωση καυσίμων και συνεπώς τόσο μεγαλύτερα τα ποσοστά εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Shepherd and Ways, 2009).

Κατά συνέπεια, αν οι αστικοί και υπεραστικοί οδοί είναι σε κακή κατάσταση με υποβαθμισμένο το προσφερόμενο προς τους χρήστες επίπεδο ποιότητας κύλισης, η πλειονότητα των οδηγών θα χρησιμοποιεί τα φρένα της περισσότερο από το συνηθισμένο, σε αντίθεση με το αν κινείτο σε ομαλότερο οδόστρωμα. Αυτές οι συχνές συνθήκες πέδησης του οχήματος σε συνδυασμό με την συχνή εναλλαγή της ταχύτητας θεωρείται ότι έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην κατανάλωση καυσίμων και κατ' επέκταση συνεισφέρουν στην αύξηση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Η ομαλότητα λοιπόν έχει επίδραση στην κατανάλωση καυσίμου του οχήματος, αλλά και στην επαφή των ελαστικών με το οδόστρωμα, στην άνεση των επιβατών του οχήματος, λόγω της υψηλής συχνότητας δονήσεων καθώς και στα επίπεδα θορύβου. Συνεπώς, η συμβολή της στο περιβαλλοντικό ζήτημα κρίνεται σημαντική και άξια παρατήρησης και περαιτέρω μελέτης, ώστε να ληφθούν αποτελεσματικά μέτρα προς αυτή την κατεύθυνση τόσο σε εθνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο.

## 1.2 Στόχος της έρευνας

Κύριος στόχος της παρούσας εργασίας αποτελεί η αξιολόγηση και η εκτίμηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου των οχημάτων σε συνάρτηση με την ομαλότητα της επιφάνειας ασφαλτικών οδοστρωμάτων. Στην προκειμένη εργασία τα αέρια του θερμοκηπίου εξετάζονται ως προς το ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα (eqCO2), που αποτελεί διεθνή μονάδα μέτρησης των αέριων ρύπων του θερμοκηπίου, ενώ η ομαλότητα εκφράζεται μέσω του Διεθνούς Δείκτη Ομαλότητας (International Roughness Index: IRI). Για την υλοποίηση δε του υπόψη στόχου προβλέπονται μια σειρά διερευνήσεων. Αρχικά, διερευνάται η επίδραση της υποβαθμισμένης κατάστασης ομαλότητας κόμβων αυτοκινητοδρόμων σε σχέση με παρακείμενα τμήματα του κυρίου άξονα, τα οποία παρουσιάζουν υψηλό επίπεδο ποιότητας κύλισης, στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου. Επιπλέον, εξετάζεται η επίδραση της συντήρησης του οδοστρώματος στην εκπομπή ισοδυνάμου του διοξειδίου του άνθρακα. Τέλος, πραγματοποιείται εκτίμηση γραμμικών συσχετίσεων διοξειδίου του άνθρακα συναρτήσει της ομαλότητας της επιφάνειας του οδοστρώματος, προκειμένου να γίνει εφικτή η πρόβλεψη του διοξειδίου του άνθρακα βάσει του χαρακτηριστικού της ομαλότητας.

## 1.3 Δομή της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος, αποτελείται από δέκα κεφάλαια. Συνοπτικά:

Στο κεφάλαιο 2 αναφέρονται γενικά στοιχεία για την περιβαλλοντική ρύπανση, τους αέριους ρύπους και δίνεται έμφαση στα αέρια του θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα περιγράφονται αναλυτικά οι μηχανισμοί παραγωγής των ρύπων από τις εκάστοτε πηγές και αναφέρονται οι συνέπειες τους στο περιβάλλον και στον άνθρωπο.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται μια ανασκόπηση στα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας και του οδοστρώματος που επιδρούν με τη σειρά τους στην παραγωγή των ρύπων αυτών.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται η ομαλότητα ως βασικό επιφανειακό χαρακτηριστικό του οδοστρώματος, οι τρόποι μέτρησής της, ο δείκτης IRI και αναλύεται, βάσει προηγούμενων ερευνών, η σχέση μεταξύ της ομαλότητας και της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου.

Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται λεπτομερώς η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε καθώς και το θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε, μέσω εξειδικευμένου λογισμικού, για τον υπολογισμό του ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα υπολογισμού ενός οδοστρώματος του διοξειδίου του άνθρακα σε τμήματα κύριου άξονα αλλά και σε κόμβους αυτοκινητοδρόμου.

Στο κεφάλαιο 7 διερευνάται και αναλύεται η επίδραση των εργασιών συντήρησης στην εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα.

Στο κεφάλαιο 8 αναπτύσσονται οι γραμμικές συσχετίσεις για την πρόβλεψη του ισοδυνάμου διοξειδίου του άνθρακα συναρτήσει της ομαλότητας της επιφάνειας του οδοστρώματος.

Στο κεφάλαιο 9 περιλαμβάνονται τα συμπεράσματα της έρευνας και προτείνονται τα βήματα μελλοντικής έρευνας πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

Στο κεφάλαιο 10 περιλαμβάνεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της έρευνας.

Τέλος συμπεριλαμβάνεται Παράρτημα με την αναλυτική επεξεργασία όλων των δεδομένων της εργασίας.

# 2

# ΟΔΙΚΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΕΡΙΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

## 2.1 Περιβάλλον και ρύπανση

Στις μέρες μας θέματα που αφορούν το περιβάλλον και σχετίζονται με αυτό αποτελούν κύριο αντικείμενο μελέτης και ενδιαφέροντος παγκοσμίως. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες σε όλα τα επίπεδα και κυρίως σε αυτά που αφορούν τις κατασκευές παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην περιβαλλοντική ρύπανση, επιδεινώνοντας όλο και περισσότερο την υπάρχουσα κατάσταση. Επικίνδυνες ουσίες και απόβλητα που προέρχονται από βιομηχανικές δραστηριότητες για την παραγωγή αγαθών αλλά και από την καθημερινότητα των ανθρώπων, όπως οι μεταφορές και οι κατοικίες, αποτελούν τις κύριες αιτίες μόλυνσης και της κλιματικής αλλαγής, δημιουργώντας άμεσες συνέπειες για το παρόν και πολύ σοβαρότερες για το μέλλον.

Οι μεταφορές είναι μια σημαντική πηγή ατμοσφαιρικών ρύπων. Επίγεια, ναυτική και εναέρια μεταφορά χρησιμοποιούν ένα τεράστιο ποσό ενέργειας και κατά τη διάρκεια των διαδικασιών καύσης διάφορα συστατικά εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα. Κατά τη διάρκεια της επίγειας μεταφοράς και ειδικά των οδικών μεταφορών, οι πιο σημαντικοί ρύποι που εκπέμπουν τα οχήματα είναι πρόδρομες ενώσεις του όζοντος. αερίων του θερμοκηπίου, όξινων ουσιών, σωματιδίων αερολυμάτων και άλλες τοξικές ουσίες.

Αναλυτικότερα, λοιπόν, με τον όρο *«ρύπανση του περιβάλλοντος ορίζεται η μόλυνση των φυσικών και βιολογικών συστατικών του συστήματος της γης και της ατμόσφαιρας σε τέτοιο βαθμό ώστε οι κανονικές περιβαλλοντικές διεργασίες να επηρεάζονται αρνητικά»* (Kemp, 1998). Ουσιαστικά αποτελεί την προσθήκη οποιασδήποτε ουσίας ή μορφής ενέργειας (π.χ. θερμότητα, ήχος, ραδιενέργεια) στο περιβάλλον με ρυθμό ταχύτερο από ό,τι το ίδιο το περιβάλλον μπορεί να τη «φιλοξενήσει» μέσω διασποράς, κατανομής, ανακύκλωσής ή αποθήκευσή της σε κάποια αβλαβή μορφή (Encyclopedia Britannica, 2011).

Φαίνεται λοιπόν ξεκάθαρα ότι η ρύπανση του περιβάλλοντος λαμβάνει χώρα όταν αυτό δεν μπορεί να επεξεργαστεί και να εξουδετερώσει τα βλαβερά υποπροϊόντα των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων (π.χ. δηλητηριώδη εκπομπές αερίων) σε πεπερασμένο χρόνο. Στην πραγματικότητα όμως, ο χρόνος αυτός είναι σχετικός και μπορεί να έχει μεγάλη διάρκεια, κατά την οποία η φύση θα προσπαθήσει να αποσυνθέσει τους ρύπους. Φυσικά σε μία από τις χειρότερες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα αυτή των

ραδιενεργών ρύπων, κάτι τέτοιο μπορεί να διαρκέσει για διάστημα χιλιάδων χρόνων, ώστε να ολοκληρωθεί με επιτυχία η αποσύνθεσή τους.

Το πρόβλημα έχει την αφετηρία του στην καύση του άνθρακα και του ξύλου στο συμπυκνωμένο περιβάλλον των αστικών πόλεων, μετατρέποντας αυτές σε πόλους ρύπανσης. Η βιομηχανική επανάσταση επίσης έφερε την έγχυση των μη επεξεργασμένων χημικών ουσιών και αποβλήτων σε τοπικά ρέματα που εξυπηρετούσαν απαιτήσεις ύδρευσης και άρδευσης και ήταν η πρώτη επίσημα που γέννησε τη ρύπανση του περιβάλλοντος, όπως τη γνωρίζουμε σήμερα.

Η εμφάνιση των μεγάλων εργοστασίων και η κατανάλωση τεράστιων ποσοτήτων άνθρακα οδήγησε σε άνευ προηγουμένου ρύπανση του αέρα καθώς και ο μεγάλος όγκος των βιομηχανικών χημικών λυμάτων ήρθε να προστεθεί στο αυξανόμενο φορτίο των ανεπεξέργαστων ανθρώπινων αποβλήτων. Η μόλυνση του περιβάλλοντος αποτέλεσε ένα σημαντικό ζήτημα στις Ηνωμένες Πολιτείες στις αρχές του εικοστού αιώνα, θεσπίζοντας για αυτό νόμους και προοδευτικές μεταρρυθμίσεις σχετικά με την ατμοσφαιρική ρύπανση που προκαλείται από την καύση του άνθρακα, τη ρύπανση των υδάτων που προκαλείται από κακή υγιεινή και τη ρύπανση των οδών, όπου πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά στο Λος Άντζελες η αντικατάσταση των αλόγων από αυτοκίνητα (Diefendorf, 2009). Όμως ακραία φαινόμενα νέφους εμφανίσθηκαν στις πόλεις του Λος Άντζελες, της Ντονόρα και της Πενσυλβάνια στα τέλη της δεκαετίας του 1940 λόγω της χρήσης των οχημάτων στις οδούς (Diefendorf, 2009).

Η ρύπανση του αέρα αποτέλεσε βασικό πρόβλημα στην Αγγλία, ειδικά κατά τη διάρκεια της βιομηχανικής επανάστασης και εκτείνεται στο πρόσφατο παρελθόν με τη μεγάλη αιθαλομίχλη του 1952. Η συνειδητοποίηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης παγκοσμίως διαδόθηκε ευρέως μετά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, με το φόβο που προκλήθηκε από τις εκθέσεις του ραδιενεργού νέφους (Allitt, 2014). Επίσης η μεγάλη αιθαλομίχλη του 1952 στο Λονδίνο, αποτέλεσε μεγάλο κίνδυνο για τη χώρα και αυτό ώθησε στην ανάπτυξη μερικών από τα πρώτων μεγάλων σχέδιων της σύγχρονης περιβαλλοντικής νομοθεσίας, «The Clean Air Act» του 1956 (The Met Office, 2013).

Ενδιαφέρον προς αυτή την κατεύθυνση έδειξαν και οι Ηνωμένες Πολιτείες από τα μέσα της δεκαετίας του 1950 και στις αρχές της δεκαετίας του 1970, όταν το Κογκρέσο ψήφισε το νόμο περί Ελέγχου του Θορύβου, θέσπισε το «The Clean Air Act», το «The Clean Water Act» αλλά και το νόμο περί Εθνικής Περιβαλλοντικής Πολιτικής (Tarantino, 2011). Παρόμοια μεγάλα γεγονότα μόλυνσης που αφύπνισαν την παγκόσμια κοινή γνώμη γύρω από το ζήτημα του περιβάλλοντος αποτελούν το πυρηνικό ατύχημα στο εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας (The Three Mile Island) στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής το 1979 και το πυρηνικό ατύχημα του Τσερνόμπιλ που έλαβε χώρα στις 26 Απριλίου του 1986 στον αντιδραστήρα του πυρηνικού σταθμού παραγωγής ενέργειας του Τσερνόμπιλ της Σοβιετικής Ένωσης.

Στις μέρες μας, έχει θεσπισθεί το Πρωτόκολλο του Κιότο, που υπογράφτηκε το 1997 ενώ τέθηκε σε ισχύ το 2005, το οποίο αποτελεί έναν «οδικό χάρτη», στον οποίο περιλαμβάνονται τα απαραίτητα βήματα για τη μακροπρόθεσμη αντιμετώπιση της αλλαγής του κλίματος που προκαλείται λόγω της αύξησης των ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με αυτό, τα κράτη που το έχουν συνυπογράψει, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας, δεσμεύονται να ελαττώσουν

τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου με τον πιο οικονομικά αποδοτικό τρόπο, ώστε να μην επιβαρυνθεί η παγκόσμια οικονομία.

Παρά το γεγονός ότι η ρύπανση ήταν γνωστό να υπάρχει για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, η ανάπτυξη των παγκοσμίων διαστάσεών της έχει γίνει γνωστή μόνο από την έναρξη της βιομηχανικής επανάστασης κατά τη διάρκεια του 19ου αιώνα. Η βιομηχανική επανάσταση έφερε μαζί της την τεχνολογική πρόοδο, όπως η ανακάλυψη του πετρελαίου και σχεδόν την καθολική χρήση της σε διαφορετικές βιομηχανίες. Η τεχνολογική πρόοδος συνοδεύεται από την εμφάνιση νέων επιχειρηματικών πρακτικών, όπως ο καταμερισμός της εργασίας, η μείωση του κόστους παραγωγής, η υπερπαραγωγή που είναι συνυφασμένη με την υπερκατανάλωση, που έχουν σαν αποτέλεσμα τη σοβαρή επιδείνωση των φυσικών πόρων. Επιπρόσθετοι παράγοντες όπως η αύξηση του πληθυσμού και η αστικοποίηση εντείνουν το πρόβλημα καθώς απαιτούν τη χρήση των φυσικών πόρων στο μέγιστο. Συνεπώς έχει υποστηριχθεί ότι η φέρουσα ικανότητα της Γης είναι σημαντικά μικρότερη από τις απαιτήσεις που υπάρχουν πια και για αυτό η υπερεκμετάλλευση των φυσικών πόρων οδηγεί σε υποβάθμιση της φύσης.

Οι πραγματικοί υπαίτιοι της μόλυνσης του περιβάλλοντος είναι οι περιβαλλοντικοί ρύποι, δηλαδή τα συστατικά μέρη της διαδικασίας της ρύπανσης. Εμφανίζονται τόσο σε στερεή όσο και σε υγρή καθώς και αέρια μορφή και σύμφωνα με την επιστημονική μελέτη του Santos (Santos, 1990) :

- οι ρύποι δεν αναγνωρίζουν όρια, είναι δηλαδή διασυνοριακοί
- πολλοί από αυτούς δεν μπορούν να υποβαθμιστούν από τους ζωντανούς οργανισμούς και ως εκ τούτου παραμένουν στην βιόσφαιρα για πολλά χρόνια
- μπορούν να καταστρέψουν οργανισμούς και οικότοπους

Προκειμένου λοιπόν να αναπτυχθεί και να εφαρμοσθεί μια αποτελεσματική πολιτική διαχείρισης ρύπων, είναι σημαντική, μεταξύ άλλων παραγόντων, η κατανόηση των μηχανισμών αποσύνθεση τους. Η βασική ιδέα είναι ότι η διάσπαση των ρύπων μπορεί να συμβεί είτε *βιολογικά* είτε *φυσικοχημικά* , οπότε υπάρχουν και οι δυο αντίστοιχες μεγάλες κατηγορίες ρύπων οι *βιοδιασπώμενοι* και οι *μη βιοδιασπώμενοι* (Santos, 1990). Επειδή όμως η συγκεκριμένη εργασία ασχολείται με τους παράγοντες του οδοστρώματος, με ιδιαίτερη ανάλυση στην ομαλότητα, και πώς αυτοί επιδρούν στην εκπομπή αέριων ρύπων δε θα γίνει περαιτέρω ανάλυση για όλους τους τρόπους διάσπασης των ρύπων.

## 2.2 Βασικοί τύποι περιβαλλοντικών ρύπων

Σε γενικές γραμμές υπάρχουν πολλές μορφές περιβαλλοντικής ρύπανσης αλλά οι τρεις σημαντικότερες είναι η ρύπανση του νερού, του εδάφους και του αέρα. Οι βασικοί ρύποι του νερού είναι τα εντομοκτόνα, τα απόβλητα επεξεργασίας τροφίμων, οι ρύποι από τις εργασίες κτηνοτροφίας, οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), τα βαρέα μέταλλα και τα χημικά απόβλητα. Οι ρύποι του εδάφους περιλαμβάνουν υδρογονάνθρακες, διαλύτες και βαρέα μέταλλα. Μερικοί από τους πιο αξιοσημείωτους ατμοσφαιρικούς ρύπους είναι το διοξείδιο του θείου, το διοξείδιο του αζώτου, το

μονοξείδιο του άνθρακα, το όζον, οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) και τα αιωρούμενα σωματίδια, με τους ραδιενεργούς ρύπους να θεωρούνται ως οι πιο καταστροφικοί, ειδικά όταν παράγονται από πυρηνικές εκρήξεις. Επειδή η συγκεκριμένη εργασία έχει σαν κύριο αντικείμενο τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου θα γίνει εμβάθυνση ως προς αυτή την κατηγορία.

## 2.3 Βασικά αίτια περιβαλλοντικής ρύπανσης

Οι δυο βασικές κατηγορίες πηγών της ρύπανσης είναι τα ορυκτά καύσιμα και τα μη ορυκτά καύσιμα. Στις σύγχρονες βιομηχανικές κοινωνίες, τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, άνθρακας) έχουν καθιερωθεί στην καθημερινή μας ζωή πλήρως. Όχι μόνο δεν χρησιμοποιούμε ορυκτά καύσιμα για τις προφανείς καθημερινές ανάγκες μας, όπως η πλήρωση ενός αυτοκινήτου, αλλά χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στη βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και στη βιομηχανία του πετρελαίου, ειδικά σε προϊόντα όπως όλα τα είδη των πλαστικών, διαλυτών και απορρυπαντικών, η άσφαλτος, τα λιπαντικά έλαια και ένα ευρύ φάσμα χημικών προϊόντων για βιομηχανική χρήση.

Η καύση ορυκτών καυσίμων παράγει εξαιρετικά υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης μέσω εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα CO2 και αναγνωρίζεται ευρέως ως ένας από τους σημαντικότερους τομείς - "στόχους" για τη μείωση και τον έλεγχο της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Τα ορυκτά καύσιμα συμβάλλουν επίσης στη ρύπανση του εδάφους και των υδάτων. Για παράδειγμα, όταν το πετρέλαιο μεταφέρεται από το σημείο της παραγωγής του σε άλλους προορισμούς μέσω αγωγών, μπορεί μια διαρροή πετρελαίου από τον αγωγό να συμβεί και να μολυνθεί το έδαφος και εν συνέχεια τα υπόγεια ύδατα. Όταν το πετρέλαιο μεταφέρεται με βυτιοφόρα από τον ωκεανό, μια πετρελαιοκηλίδα μπορεί να συμβεί και να μολυνθεί το νερό των ωκεανών. Φυσικά, υπάρχουν και άλλοι φυσικοί πόροι των οποίων η εκμετάλλευση είναι αιτία της ρύπανσης, όπως για παράδειγμα η χρήση του ουρανίου για την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας. Τέλος οι εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και οι μεταφορές είναι πιθανώς οι μεγαλύτερες πηγές ρύπανσης μέσω ορυκτών καυσίμων. Πιο συγκεκριμένα:

Βιομηχανία

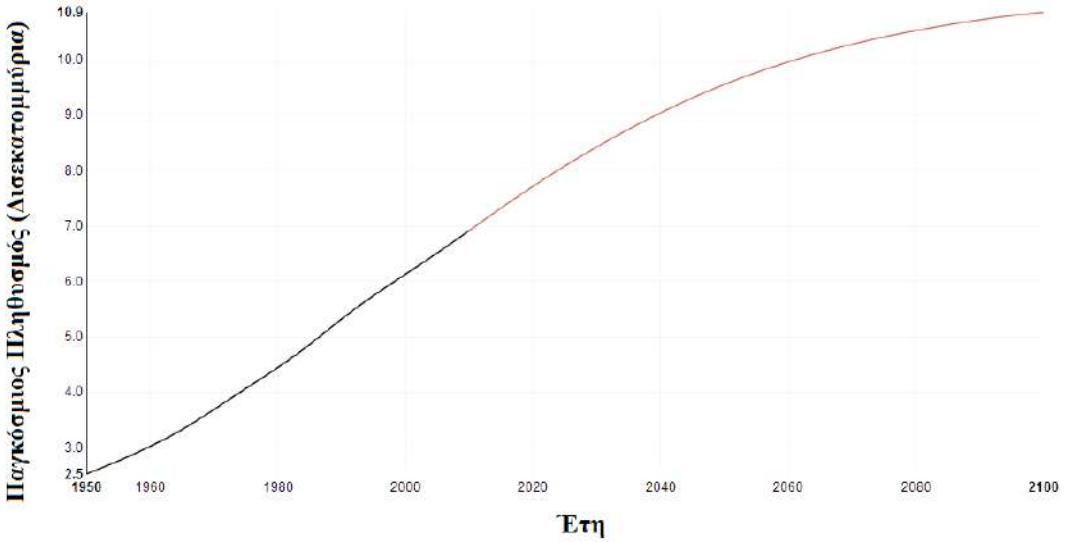
- Εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Διυλιστήρια πετρελαίου
- Πετροχημικές εγκαταστάσεις
- Παραγωγή και διανομή των ορυκτών καυσίμων

Μεταφορές

- Οδικές μεταφορές (οχήματα με κινητήρα)
- Ναυτιλιακή βιομηχανία
- Αεροσκάφη

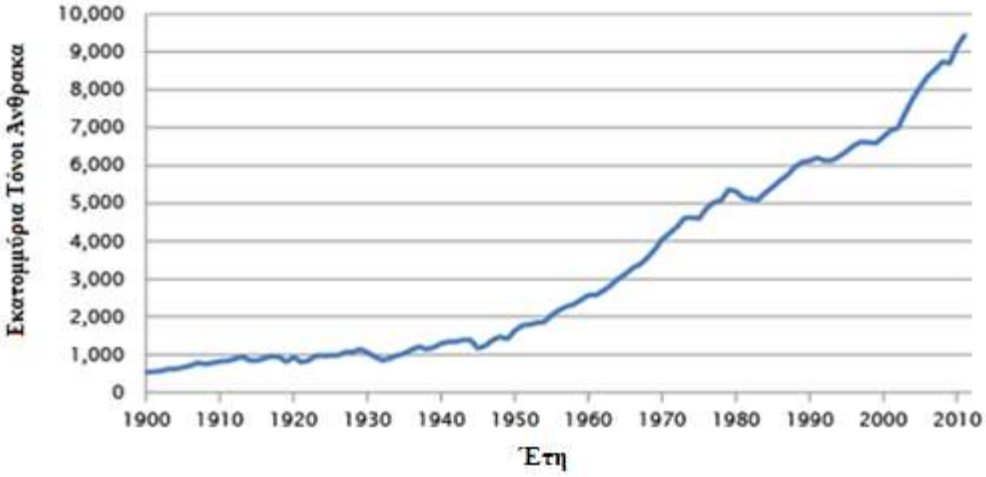
Όσο αναφορά τα μη ορυκτά καύσιμα, η γεωργία και η κτηνοτροφία αποτελούν τους κύριους παραγωγούς εκπομπών αμμωνίας με αποτέλεσμα τη ρύπανση του αέρα. Χημικές ουσίες όπως τα φυτοφάρμακα και τα λιπάσματα χρησιμοποιούνται επίσης ευρέως στη γεωργία, η οποία μπορεί να οδηγήσει στη ρύπανση των υδάτων και στη μόλυνση του εδάφους. Ο οικιακός τομέας είναι μια άλλη σημαντική πηγή δημιουργίας ρύπανσης στερεών αστικών αποβλήτων που μπορεί να καταλήξουν σε χώρους υγειονομικής ταφής ή σε αποτεφρωτήρες που οδηγούν σε μόλυνση του εδάφους και ρύπανσης του αέρα.

Σε συνδυασμό με τους ρύπους που παράγονται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες, η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού έχει οδηγήσει στη συνεχώς αυξανόμενη ενεργειακή κατανάλωση. Σύμφωνα με την επίσημη παγκόσμια βάση δεδομένων πληθυσμού όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.1 ο συνολικός πληθυσμός της γης προβλέπεται μέχρι το 2100 να ξεπερνάει τα δέκα δισεκατομμύρια, γεγονός που θα έχει άμεσο αντίκτυπο στην κατανάλωση ενέργειας άρα και στη μόλυνση του περιβάλλοντος. Παρατηρείται λοιπόν ότι παρόλο που ο ρυθμός αύξησης μειώνεται υπάρχει μια σταθερή πορεία αύξησης του πληθυσμού σε συνάρτηση με το χρόνο.



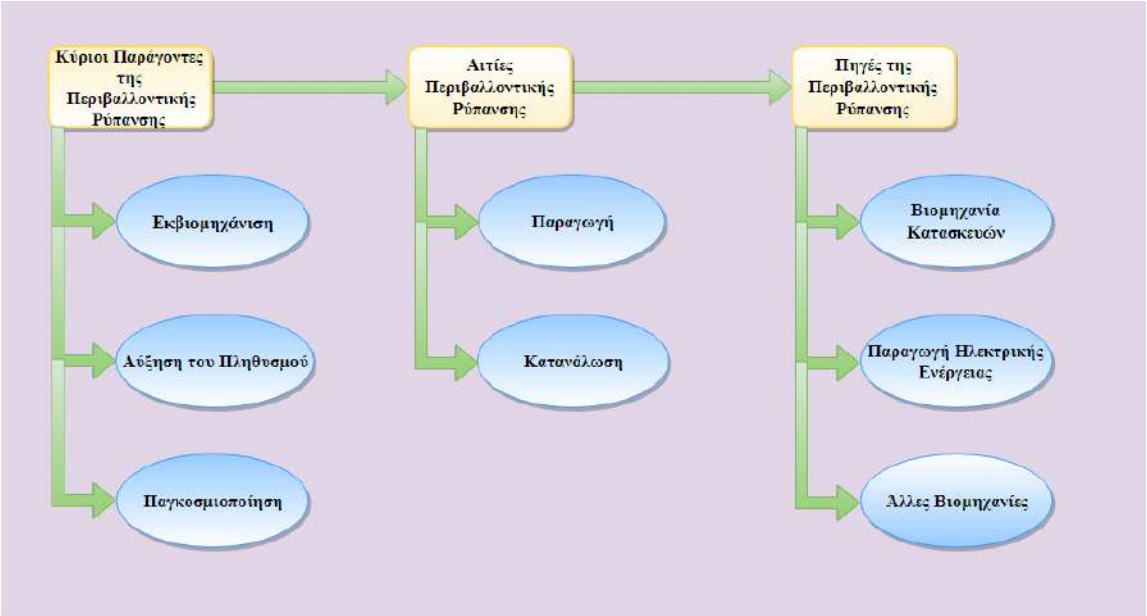

*Σχήμα 2.1 Καμπύλη αύξησης του πληθυσμού της Γης*
*Πηγή : ourworldindata.org/world-population-growth*

Έχει αποδειχθεί επίσης ότι κάθε άνθρωπος καταναλώνει κατά μέσο όρο 2 kW ενέργεια, αν και υπάρχει μεγάλο εύρος ως προς την προκύπτουσα τιμή. Για παράδειγμα, στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής υπολογίζεται ότι καταναλώνεται κατά μέσο όρο 10 kW, στη δυτική Ευρώπη 5 kW και στις αναπτυσσόμενες και υποανάπτυκτες εκτιμώνται πολύ μικρότερες τιμές (Colls, 2002). Παρουσιάζεται λοιπόν στο Σχήμα 2.2. ένα γενικό γράφημα συνολικών τόνων εκπομπών του άνθρακα παγκοσμίως για την περίοδο 1900-2010.




*Σχήμα 2.2 Καμπύλη αύξησης των παγκοσμίων εκπομπών του άνθρακα από καύση ορυκτών την περίοδο 1900-2010*
*Πηγή : Boden et al., 2015*

Συνοψίζοντας και επιστρέφοντας στον βασικό ορισμό ότι η ρύπανση του περιβάλλοντος οφείλεται στην υπερπαραγωγή ποσότητας ρύπων (στερεών, υγρών και αερίων), με ρυθμό τέτοιο ώστε το περιβάλλον να μην μπορεί να τους απορροφήσει, σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες απαιτήσεις παγκόσμια λόγω της ραγδαίας αύξησης του πληθυσμού, καταλήγουμε στο Σχήμα 2.3 που απεικονίζει ποιοτικά τα αίτια του προβλήματος.




*Σχήμα 2.3 Ποιοτικά αίτια της περιβαλλοντικής ρύπανσης*
*Πηγή: Grey, 2011*

## 2.4 Αέριοι περιβαλλοντικοί ρύποι

### 2.4.1 Βασικοί αέριοι ρύποι

Η παρούσα έρευνα στρέφεται προς τους αέριους περιβαλλοντικούς ρύπους και πιο συγκεκριμένα στα αέρια του θερμοκηπίου. Όλοι οι αέριοι ρύποι αλλά κυρίως τα αέρια του θερμοκηπίου συνδέονται άμεσα με τον τομέα των μεταφορών και ειδικά των οδικών δικτύων. Οι πηγές αυτής της κατηγορίας ρύπων όπως προαναφέρθηκε είναι τα ορυκτά καύσιμα, τα οποία χρησιμοποιούνται σε τεράστιο βαθμό στην καθημερινότητα. Για το λόγο αυτό η ατμοσφαιρική ρύπανση θεωρείται κατά κύριο λόγο αποτέλεσμα ανθρώπινης δραστηριότητας.

Οι αέριοι ρύποι χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες τους πρωτογενείς και τους δευτερογενείς ρύπους. Ως πρωτογενείς ρύποι ορίζονται αυτοί που εκπέμπονται κατευθείαν στην ατμόσφαιρα από πρωτογενείς ή δευτερογενείς πηγές, όπως για παράδειγμα οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Δευτερογενείς είναι αυτοί που σχηματίζονται ως αποτέλεσμα των αντιδράσεων μεταξύ πρωτογενών ρύπων και άλλων στοιχείων στην ατμόσφαιρα, όπως το όζον. Ενδεχομένως ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των ατμοσφαιρικών ρύπων είναι η διασυνοριακή φύσης τους, η ικανότητα δηλαδή να ταξιδέψουν εύκολα και να επηρεάζουν τις περιοχές μακριά από τα σημεία εκκίνησης. Αναφέρονται λοιπόν συνοπτικά οι βασικοί αέριοι ρύποι, οι πηγές τους, οι κύριες επιπτώσεις τους στον άνθρωπο και στο περιβάλλον και στη συνέχεια γίνεται μια εκτενέστερη αναφορά στα τέσσερα βασικά αέρια του θερμοκηπίου, δίνοντας έμφαση στο διοξείδιο του άνθρακα, ως βασικός υπό εξέταση ρύπος της παρούσας μελέτης.

<u>Όζον</u>

Το όζον είναι ένα άχρωμο, δηλητηριώδες αέριο με μια δυνατή, κρύα και ερεθιστική οσμή και συμβολίζεται ως O3. Μπορεί να βρεθεί τόσο στη στρατόσφαιρα (ανώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας), όπου εμφανίζεται φυσικά, όσο και στην τροπόσφαιρα (χαμηλότερο στρώμα της ατμόσφαιρας), όπου εμφανίζεται τόσο φυσικά όσο και ως προϊόν των ανθρωπογενών εκπομπών και αποτελεί σημαντικό μέρος της αιθαλομίχλης (Encyclopedia Britannica, 2008). Το όζον δεν δημιουργείται άμεσα, αλλά σχηματίζεται όταν τα οξείδια του αζώτου και πτητικών οργανικών ενώσεων αναμιγνύονται στο φως του ήλιου. Αυτός είναι ο λόγος που το όζον βρίσκεται κυρίως το καλοκαίρι.

Τα οξείδια του αζώτου προέρχονται από την καύση της βενζίνης, του άνθρακα, ή άλλα ορυκτά καύσιμα. Υπάρχουν πολλοί τύποι πτητικών οργανικών ενώσεων και προέρχονται από πηγές που κυμαίνονται από τα εργοστάσια μέχρι τα δέντρα (Encyclopedia Britannica, 2008). Το στρατοσφαιρικό όζον προστατεύει τη Γη, εμποδίζοντας την επιβλαβή υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία να φθάσει στην επιφάνεια του πλανήτη. Αντίθετα αυτό που βρίσκεται στην τροπόσφαιρα μπορεί να προκαλέσει μια σειρά από προβλήματα υγείας. Για παράδειγμα μπορεί να οδηγήσει σε πιο συχνές κρίσεις άσθματος σε άτομα που πάσχουν από άσθμα και μπορεί να προκαλέσει πονόλαιμο, βήχα και δυσκολία στην αναπνοή.

Μονοξείδιο του άνθρακα

Ένα αέριο που προέρχεται από την καύση των ορυκτών καυσίμων, κυρίως σε αυτοκίνητα, ενώ δεν είναι ορατό ούτε μπορεί να ανιχνευθεί με την όσφρηση και συμβολίζεται ως CO. Το μονοξείδιο του άνθρακα απελευθερώνεται όταν οι μηχανές καίνε ορυκτά καύσιμα, όπως είναι η βενζίνη, και συγκεκριμένα οι εκπομπές είναι υψηλότερες όταν οι μηχανές δεν ρυθμίζονται σωστά και όταν το καύσιμο δεν έχει εντελώς καεί (University of Liverpool, 2016). Τα αυτοκίνητα εκπέμπουν μεγαλύτερες ποσότητες μονοξειδίου του άνθρακα όταν βρίσκονται σε εξωτερικούς χώρους.

Το μονοξείδιο του άνθρακα καθιστά δύσκολο στα τα μέρη του σώματος να πάρουν την κατάλληλη ποσότητα οξυγόνου που χρειάζονται για να λειτουργήσουν σωστά, με αποτέλεσμα η έκθεση σε αυτό να κάνει τους ανθρώπους να αισθάνονται ζαλάδα και κόπωση ενώ συχνά προκαλεί και πονοκεφάλους (Cruickshank, 1801). Σε υψηλές συγκεντρώσεις η έκθεση σε αυτό το αέριο μπορεί να αποβεί μοιραία. Επιρρεπείς στην έκθεση μονοξείδιου του άνθρακα είναι ηλικιωμένοι άνθρωποι με καρδιακή νόσο (Penney, 2000). Η βασική αντίδραση παραγωγής μονοξειδίου του άνθρακα σύμφωνα με τον Higman και van der Burgt (2003) είναι:

Πάνω από 800 ° C, το CO είναι το κυρίαρχο προϊόν :

$$CO2 + C \rightarrow 2\,CO \;\; (\Delta H = 170\,kJ\,/\,mol)\;(\beta\iota o\mu\eta\chi\alpha\nu\iota\kappa\acute{\eta}\;\pi\eta\gamma\acute{\eta}) \qquad (2.1)$$

Οξείδια του αζώτου

Το μονοξείδιο του αζώτου είναι ένα άχρωμο αέριο και συμβολίζεται ως NO. Οι οδικές μεταφορές (οχήματα με κινητήρα) είναι μακράν η μεγαλύτερη πηγή εκπομπών αζώτου. Για παράδειγμα, με βάση τα στοιχεία του 1998 του Ηνωμένου Βασιλείου, οι οδικές μεταφορές συνέβαλαν σχεδόν στο ήμισυ του συνόλου των εκπομπών αζώτου, ακολουθούμενη από τις συνεισφορές των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες συνεισέφεραν μόνο στο 20% περίπου των συνολικών εκπομπών αζώτου (Colls, 2002). Το μονοξείδιο του αζώτου εκπέμπεται και με φυσικές διαδικασίες από το έδαφος. Ορισμένες εκτιμήσεις δείχνουν ότι η παραγωγή του μονοξειδίου του αζώτου από το έδαφος στο Ηνωμένο Βασίλειο μπορεί να είναι περίπου 2-5% της παραγωγής του από την καύση ορυκτών καυσίμων (Colls, 2002).

Το διοξείδιο του αζώτου είναι ένα κόκκινο-καφέ αέριο που προέρχεται από την καύση των ορυκτών καυσίμων και έχει μια ισχυρή μυρωδιά σε υψηλά επίπεδα και συμβολίζεται ως NO2. Προέρχεται κυρίως από σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και από τα αυτοκίνητα (Farmer, 1997). Το διοξείδιο του αζώτου σχηματίζεται με δύο τρόπους είτε όταν το άζωτο που υπάρχει στα καύσιμα καίγεται, κάτι που αποτελεί το 0.5-1.5 % του διοξειδίου του αζώτου (Colls, 2002), είτε όταν το άζωτο στον αέρα αντιδρά με το οξυγόνο σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (Farmer, 1997). Το διοξείδιο του αζώτου μπορεί επίσης να αντιδράσει στην ατμόσφαιρα για να σχηματιστούν το όζον, η όξινη βροχή και τα σωματίδια. Τα υψηλά επίπεδα έκθεσης σε διοξειδίου του αζώτου μπορούν να προκαλέσουν στους ανθρώπους από βήχα μέχρι δυσκολία στην αναπνοή (Encyclopedia Britannica, 2008). Οι αντιδράσεις από τις οποίες παράγεται το μονοξείδιο και το διοξείδιο του αζώτου εμφανίζονται παρακάτω (Holleman and Wiberg, 2001):

Οξείδωση του μονοξειδίου του αζώτου από οξυγόνο στον αέρα

$$C2\,NO + O2 \rightarrow 2\,NO2 \qquad (2.2)$$

Το διοξείδιο του αζώτου σχηματίζεται στις περισσότερες διεργασίες καύσης που χρησιμοποιούν τον αέρα ως οξειδωτικό. Σε υψηλές θερμοκρασίες το άζωτο ενώνεται με το οξυγόνο για να σχηματίσει μονοξείδιο του αζώτου:

$$O2 + N2 \rightarrow 2\,NO \qquad (2.3)$$

Διοξείδιο του θείου

Είναι ένα άχρωμο αέριο με έντονη, αποπνικτική οσμή και συμβολίζεται ως SO2. Επίσης είναι διαβρωτικό στα οργανικά υλικά και ερεθίζει τα μάτια, τη μύτη και τους πνεύμονες και ως εκ τούτου είναι ένας αρκετά επικίνδυνος ατμοσφαιρικός ρύπος (Columbia Encyclopedia, 2007). Το διοξείδιο του θείου προέρχεται κυρίως από την καύση του άνθρακα ή του πετρελαίου σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης προέρχεται από τα εργοστάσια που παράγουν χημικές ουσίες, χαρτί, ή και καύσιμα. Στις μεταφορές, τα δίκυκλα οχήματα εκπέμπουν κατά κύριο λόγο διοξείδιο του θείου μέσω της καύσης των καυσίμων που περιέχουν θείο, όπως είναι το ντίζελ. Όπως και το διοξείδιο του αζώτου, το διοξείδιο του θείου αντιδρά στην ατμόσφαιρα για να σχηματίσει την όξινη βροχή και τα σωματίδια (Encyclopedia Britannica, 2008). Η έκθεση σε διοξείδιο του θείου μπορεί να επηρεάσει τους ανθρώπους που πάσχουν από άσθμα ή εμφύσημα, καθιστώντας πιο δύσκολο για αυτούς να αναπνεύσουν ενώ παράλληλα μπορεί να ερεθίσει τα μάτια, τη μύτη και λαιμό (Encyclopedia Britannica, 2008). Το διοξείδιο του θείου μπορεί να βλάψει τα δέντρα και τις καλλιέργειες αλλά και να προκαλέσει βλάβες σε κτίρια (Encyclopedia Britannica, 2008).

Το διοξείδιο του θείου είναι το προϊόν της καύσης του θείου ή υλικών που περιέχουν θείο:

$$S + O2 \rightarrow SO2 \ (\Delta H = -297\ kJ / mol) \qquad (2.4)$$

Αμμωνία

Η αμμωνία είναι ένα άχρωμο, επικίνδυνα καυστικό αέριο που αποτελείται από άζωτο και υδρογόνο. Οι εκπομπές αμμωνίας ομαδοποιούνται ως NHy, οι οποίες είναι το άθροισμα της NH3 και NH4 (Colls, 2002). Οι κύριες πηγές των εκπομπών αυτών προέρχονται από τη χρήση λιπάνσεων στη γεωργία αλλά και από χρήσεις στην κτηνοτροφία. Η έκθεση σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις αερίου αμμωνίας στον αέρα μπορεί να προκαλέσει βλάβη στους πνεύμονες και ακόμα και θάνατο (Encyclopedia Britannica, 2008). Αν και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο, για διάφορους λόγους δεν ήταν ποτέ ευρέως διαδεδομένοι οι κινητήρες με αμμωνία. Λόγω των πολλών χρήσεων της, η αμμωνία είναι από τις ανόργανες χημικές ουσίες, που παράγεται τόσο μαζικά. Δεκάδες χημικά εργοστάσια σε όλο τον κόσμο παράγουν αμμωνία ενώ καταναλώνουν περισσότερο από το 1% του συνόλου της τεχνητής δύναμης, κάνοντας την παραγωγή αμμωνίας μια σημαντική συνιστώσα του προϋπολογισμού της παγκόσμιας ενέργειας (Appl, 2006).

Σύγχρονες εγκαταστάσεις παραγωγής αμμωνίας βασίζονται στην παραγωγή βιομηχανικού υδρογόνου για να αντιδράσει με το ατμοσφαιρικό άζωτο, χρησιμοποιώντας έναν καταλύτη μαγνητίτη, ή πάνω από ένα προωθούμενο καταλύτη Fe υπό υψηλή πίεση της τάξης 10000 kPa και θερμοκρασία (450 ° C) για να σχηματίσει άνυδρη υγρή αμμωνία. Αυτό το στάδιο είναι γνωστό ως βρόχος σύνθεσης αμμωνίας (που αναφέρεται επίσης ως η διαδικασία Haber-Bosch) (Shriver and Atkins, 2010):

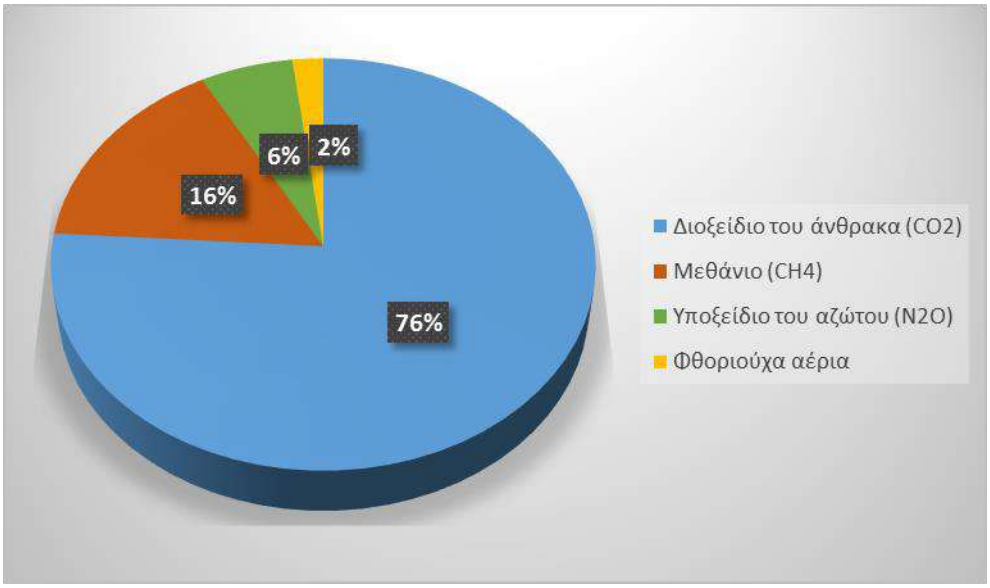
$$3\,H2 + N2 \rightarrow 2\,NH3 \qquad (2.5)$$

### 2.4.2 Αέρια του Θερμοκηπίου

2.4.2.1 Γενικά

Τα αέρια του θερμοκηπίου είναι μια ομάδα ενώσεων που είναι σε θέση να παγιδεύουν τη θερμότητα (μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας) στην ατμόσφαιρα, διατηρώντας την επιφάνεια της Γης θερμότερη από ότι θα ήταν αν δεν ήταν παρούσες (Allison, 2010). Αυτά τα αέρια είναι η βασική αιτία του φαινομένου του θερμοκηπίου και συνεπώς αύξηση του ποσού των αερίων αυτών στην ατμόσφαιρα ενισχύει το φαινόμενο του θερμοκηπίου, γεγονός που συμβάλλει στην υπερθέρμανση του πλανήτη, που σχετίζεται άμεσα με την κλιματική αλλαγή. Τα αέρια του θερμοκηπίου επιτρέπουν στο ηλιακό φως (βραχέων κυμάτων ακτινοβολίας) να περάσει μέσα από την ατμόσφαιρα ελεύθερα, όπου στη συνέχεια απορροφάται μερικώς από την επιφάνεια της Γης (U.S. Energy Information Administration, 2014). Όμως μέρος αυτής της ενέργειας αντανακλάται πίσω, έξω προς το διάστημα ως θερμότητα. Ένα ποσοστό της θερμότητας που εκπέμπεται πίσω στο διάστημα απορροφάται από τα αέρια του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ενώσεις αυτές αποτελούνται από τρία ή περισσότερα άτομα. Η συγκεκριμένη μοριακή δομή τους επιτρέπει να απορροφήσουν ένα μέρος της θερμότητας που διαφεύγει και στη συνέχεια εκ νέου να την εκπέμπουν προς τη Γη, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο τις παγκόσμιες θερμοκρασίες (U.S. Energy Information Administration, 2014).

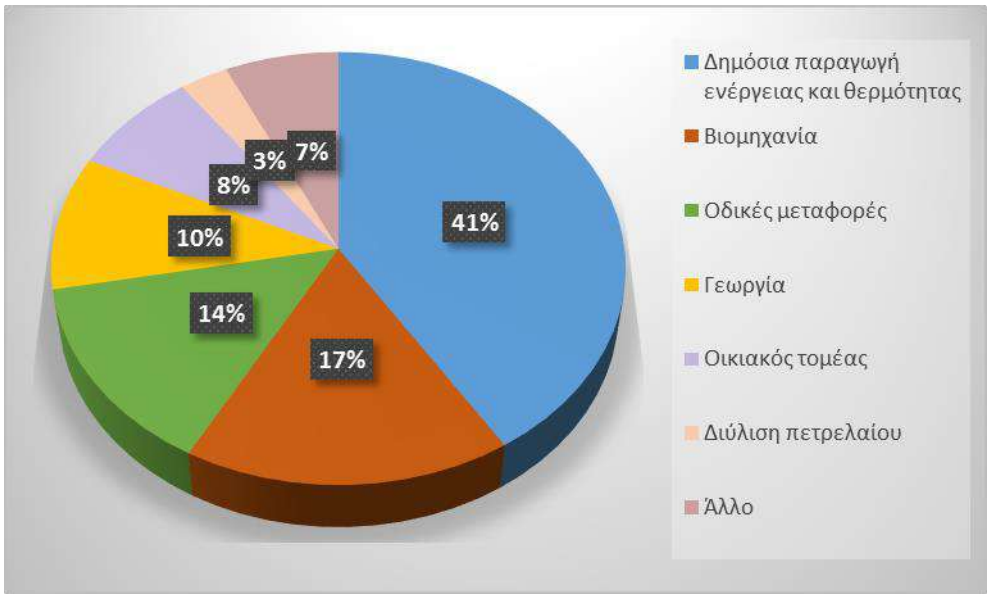
Η ικανότητα αυτών των αερίων να παγιδεύουν θερμότητα είναι αυτό που προκαλεί το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Έτσι, όσο περισσότερα τέτοια αέρια υπάρχουν στην ατμόσφαιρα, τόσο περισσότερη θερμότητα παραμένει στη Γη. Αυτή η διαδικασία, η οποία είναι πολύ παρόμοια με τον τρόπο λειτουργίας ενός θερμοκηπίου, έχει δώσει το όνομά της σε αυτά τα αέρια που μπορούν να παράγουν αυτό το αποτέλεσμα και είναι γνωστά ως αέρια του θερμοκηπίου (U.S. Energy Information Administration, 2014). Τα βασικότερα αέρια του θερμοκηπίου που εκπέμπονται είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO2), το μεθάνιο (CH4), το υποξείδιο του αζώτου (N2O) και τα φθοριούχα αέρια. Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται ένα γράφημα που δείχνει τα ποσοστά των τεσσάρων αυτών αερίων στην ατμόσφαιρα.




*Σχήμα 2.4 Ποσοστό συμμετοχής των αερίων του θερμοκηπίου σε παγκόσμια κλίμακα*
*Πηγή : International Energy Agency, 2012*

Τα αέρια του θερμοκηπίου χρειάζονται πολλά χρόνια για να εγκαταλείψουν την ατμόσφαιρα. CO2, CH4, N2O και τα φθοριούχα αέρια είναι όλα καλώς αναμιγμένα αέρια στην ατμόσφαιρα και δεν αντιδρούν στις αλλαγές είτε της θερμοκρασία είτε της πίεσης του αέρα και ως εκ τούτου δεν αφαιρούνται εύκολα, όπως το νερό που συμπυκνώνεται για να γίνει βροχή ή χιόνι. Η μεγάλη λοιπόν ατμοσφαιρική τους ζωή τους επιτρέπει να έχουν μια μόνιμη επίδραση στην υπερθέρμανση του πλανήτη και την κλιματική αλλαγή (Ramaswamy et al., 2001). Οι υδρατμοί από την άλλη πλευρά έχουν ένα χρόνο παραμονής λίγων ημερών (U.S. EPA, 2010). Είναι ένα πολύ δραστικό συστατικό του κλιματικού συστήματος που ανταποκρίνεται ταχέως στις αλλαγές των συνθηκών είτε με συμπύκνωση σε βροχή ή χιόνι, είτε με εξάτμιση για να επιστρέψει στην ατμόσφαιρα. Έτσι, η επίδραση του φαινομένου του θερμοκηπίου κυρίως κυκλοφορεί μέσα από τους υδρατμούς και λειτουργεί ως μια γρήγορη ανάδραση, συνεισφέροντας στην αύξηση της θερμοκρασίας, που οφείλεται στα αέρια του θερμοκηπίου. CO2, CH4 και N2O εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα μέσα από φυσικές διαδικασίες, καθώς και μέσα από τις ανθρώπινες δραστηριότητες (χρήση των ορυκτών καυσίμων, βιομηχανική παραγωγή, κλπ). Τα φθοριούχα αέρια από την άλλη πλευρά δημιουργούνται και εκπέμπονται σχεδόν αποκλειστικά από τις ανθρώπινες δραστηριότητες (U.S. EPA, 2010).

Στην Ελλάδα οι ποσότητες του εκάστοτε από τα βασικά αέρια του θερμοκηπίου είναι παρόμοιες με αυτές που εμφανίζονται σε παγκόσμια κλίμακα. Ενδιαφέρον αποτελεί η συμβολή των βασικών τομέων της οικονομίας της χώρας μας στο σύνολο των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5.




*Σχήμα 2.5 Πηγές αερίων του θερμοκηπίου σε διάφορους τομείς της οικονομίας της Ελλάδας*
*Πηγή : WWF Ελλάς, 2008*

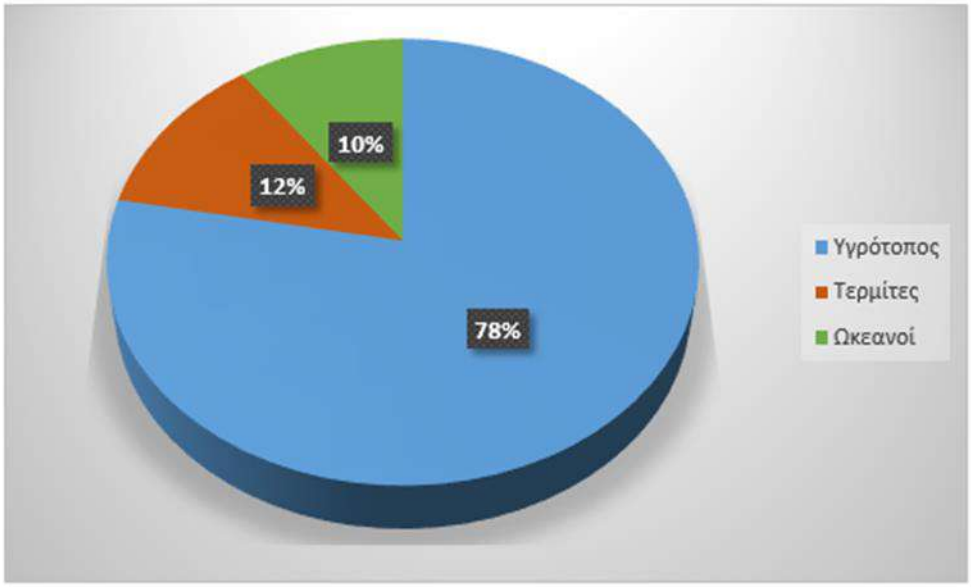
Παρατηρείται ότι ο τομέας των οδικών μεταφορών επηρεάζει κατά 14% του συνόλου των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου στη χώρα μας. Αναμένεται έως το 2020 ότι από τον τομέα των μεταφορών θα παραχθούν 32000 κιλοτόνοι (kt) αερίων του θερμοκηπίου (Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, 2002). Συνεπώς η περαιτέρω ανάλυση της επίδρασης των οδικών δικτύων στο αποτύπωμα του άνθρακα φαίνεται ιδιαίτερα σημαντική. Στη συνέχεια αναφέρονται συνοπτικά τα τέσσερα βασικά αέρια του θερμοκηπίου, τα οποία συνδέονται με τις οδικές μεταφορές.

2.4.2.2 Μεθάνιο

Το μεθάνιο είναι άχρωμο αέριο που δημιουργείται κοντά στην επιφάνεια της Γης, κυρίως από μικροοργανισμούς με τη διαδικασία της μεθανογένεσης, μια μορφή αναερόβιας αναπνοής και συμβολίζεται ως CH4. Λαμβάνει χώρα στη στρατόσφαιρα από τον ανερχόμενο αέρα της τροπόσφαιρας. Ανεξέλεγκτη συσσώρευση μεθανίου στην ατμόσφαιρα είναι φυσικά ελεγχόμενη - αν και η ανθρώπινη επίδραση μπορεί να διαταράξει αυτή τη φυσική ρύθμιση - με την αντίδραση του μεθανίου με ρίζες υδροξυλίου που σχηματίζεται από μονά άτομα οξυγόνου και υδρατμών. Έχει μια καθαρή διάρκεια ζωής περίπου 10 ετών (Boucher et al., 2009) και κατά κύριο λόγο απομακρύνεται με μετατροπή του σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Η διαδικασία της μεθανογένεσης έχεις ως εξής (Thauer, 1998) :

$$CO2 + 8\,H + +8\,e- \rightarrow CH4 + 2\,H2O \qquad (2.6)$$

Σε χαμηλές συγκεντρώσεις είναι άοσμο, ενώ αντίθετα έχει μια γλυκιά μυρωδιά σε υψηλές συγκεντρώσεις. Σε μίγματα περισσότερο από περίπου 5-15 % σε αέρα, γίνεται εκρηκτικό. Το μεθάνιο εκπέμπεται τόσο από φυσικές (βλ. Σχήμα 2.6) όσο και από ανθρωπογενείς πηγές.




*Σχήμα 2.6 Φυσικές πηγές παραγωγής μεθανίου*
*Πηγή : Bousquet et al., 2006*

Όσο αναφορά τις φυσικές πηγές, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.5, οι υγρότοποι αποτελούν τη μεγαλύτερη πηγή, που εκπέμπουν μεθάνιο από βακτήρια τα οποία αποσυνθέτουν τα οργανικά υλικά απουσία οξυγόνου. Μικρότερες φυσικές πηγές αποτελούν οι τερμίτες, οι ωκεανοί, τα ιζήματα, τα ηφαίστεια και οι πυρκαγιές (U.S. EPA, 2010). Φυσικές διεργασίες στο έδαφος και χημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα συμβάλουν στην άρση μεθανίου από την ατμόσφαιρα. Παγκοσμίως, πάνω από το 60% των συνολικών εκπομπών μεθανίου προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες (U.S. EPA, 2010).

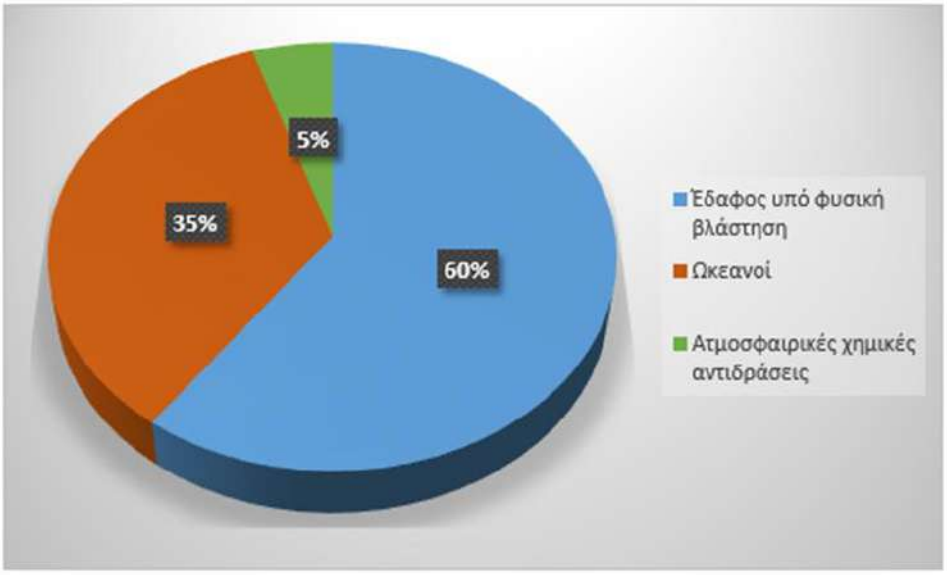
Το μεθάνιο από ανθρώπινες δραστηριότητες εκπέμπεται από τη βιομηχανία, τη γεωργία και τις δραστηριότητες διαχείρισης αποβλήτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Αναλυτικότερα, τα συστήματα φυσικού αερίου και πετρελαίου είναι η μεγαλύτερη πηγή εκπομπών CH4 από τη βιομηχανία (U.S. EPA, 2010). Το μεθάνιο είναι το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου. Ένα ποσοστό μεθανίου εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα κατά την παραγωγή, επεξεργασία, αποθήκευση, μετάδοση και διανομή του φυσικού αερίου. Τέλος επειδή το φυσικό αέριο βρίσκεται συχνά μαζί με το πετρέλαιο καθώς και την παραγωγή, διύλιση, μεταφορά και αποθήκευση του αργού πετρελαίου είναι επίσης μια πηγή εκπομπών μεθανίου.

*Σχήμα 2.7 Ανθρώπινες πηγές παραγωγής μεθανίου*
*Πηγή : Bousquet et al., 2006*

Όσο αναφορά την κτηνοτροφία, τα οικόσιτα ζώα παράγουν μεγάλες ποσότητες μεθανίου ως μέρος της κανονικής διαδικασία της πέψης τους (U.S. EPA, 2010). Επίσης, όταν τα φυσικά απόβλητα των ζώων αποθηκεύονται ή διαχειρίζονται σε λιμνοθάλασσες ή δεξαμενές, παράγεται μεθάνιο (U.S. EPA, 2010). Τέλος, το μεθάνιο παράγεται και σε χώρους υγειονομικής ταφής καθώς εκεί αποσυντίθεται τα απόβλητα και επεξεργάζονται τα λύματα.

2.4.2.3 Υποξείδιο του αζώτου

Υποξείδιο του αζώτου,γνωστό και ως νιτρικό οξείδιο, είναι μια χημική ένωση με τον τύπο N2O. Ουσιαστικά αποτελεί και αυτό ένα οξείδιο του αζώτου. Σε θερμοκρασία δωματίου, είναι άχρωμο, μη εύφλεκτο αέριο, με μια ελαφρώς γλυκιά οσμή και γεύση. Σε αυξημένες θερμοκρασίες, το υποξείδιο του αζώτου είναι ένα ισχυρό οξειδωτικό παρόμοιο με μοριακό οξυγόνο. Το υποξείδιο του αζώτου είναι ένα αέριο του θερμοκηπίου και παράγεται φυσιολογικά στο έδαφος κατά τη διάρκεια των μικροβιολογικών διαδικασιών της νιτροποίησης και της απονιτροποίησης (Sloss, 1992).

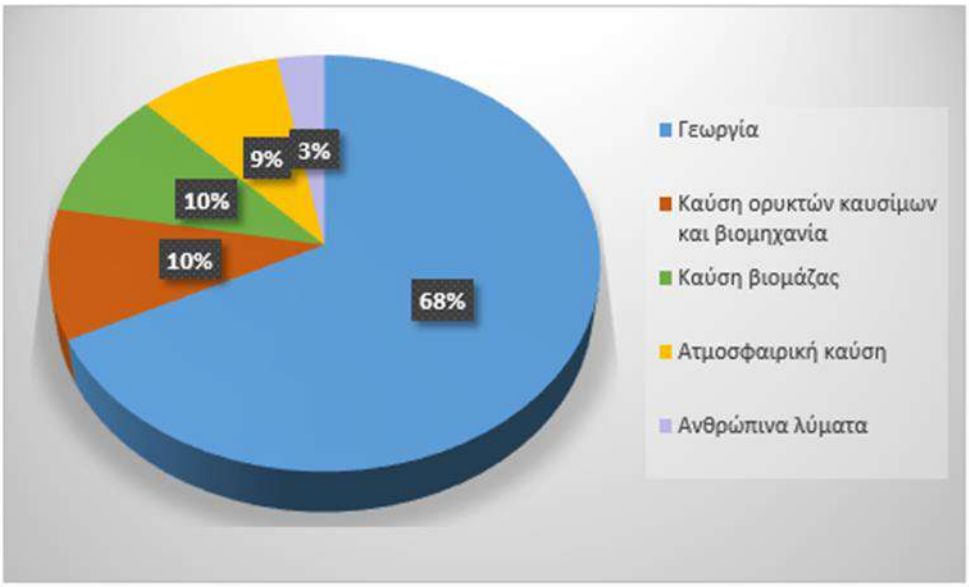



*Σχήμα 2.8 Φυσικές πηγές παραγωγής υποξειδίου του αζώτου*
*Πηγή : Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007*

Το πρωτοξείδιο του αζώτου παρασκευάζεται με προσεκτική θέρμανση του νιτρικού αμμωνίου, το οποίο αποσυντίθεται σε υποξείδιο του αζώτου και νερό (Holleman and Wiberg, 2001)

$$NH4NO3\ (s)\ \rightarrow\ 2\,H2O\ (g)\ +\ N2O\ (g) \qquad (2.7)$$

Το υποξείδιο του αζώτου είναι φυσικά παρόν στην ατμόσφαιρα, ως μέρος του κύκλου του αζώτου της Γης, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω και έχει μια ποικιλία από φυσικές πηγές. Ωστόσο, οι ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως η γεωργία, η καύση ορυκτών καυσίμων, η διαχείριση των λυμάτων και βιομηχανικών διαδικασιών, αυξάνουν την ποσότητα του N2O στην ατμόσφαιρα (βλ. Σχήμα 2.9). Τα μόρια του υποξειδίου του αζώτου παραμένουν στην ατμόσφαιρα κατά μέσο όρο 114 χρόνια πριν να αφαιρεθεί ή καταστραφεί μέσω χημικών αντιδράσεων (U.S. EPA, 2010).

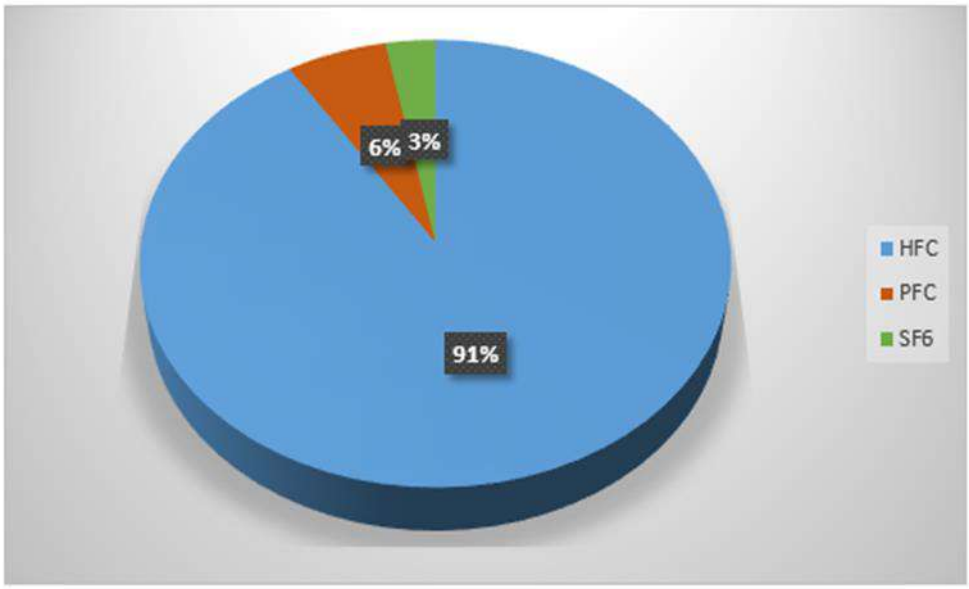



*Σχήμα 2.9 Ανθρώπινες πηγές παραγωγής υποξειδίου του αζώτου*
*Πηγή : Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007*

Σε παγκόσμιο επίπεδο, περίπου το 40% των συνολικών εκπομπών N2O προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως στη γεωργία από χρήση συνθετικών λιπασμάτων, στις μεταφορές από μηχανοκίνητα οχήματα ανάλογα το είδος του οχήματος, του καυσίμου και της συντήρησής τους αλλά και στις δραστηριότητες της βιομηχανίας από παραγωγή του αδιπικού οξέος, το οποίο χρησιμοποιείται για κατασκευή ινών και άλλων συνθετικών προϊόντων (U.S. EPA, 2010).

2.4.2.4 Φθοριούχα αέρια

Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα αέρια του θερμοκηπίου, τα φθοριούχα αέρια δεν έχουν φυσικές πηγές και προέρχονται μόνο από ανθρώπινες δραστηριότητες. Εκπέμπονται μέσα από μια ποικιλία βιομηχανικών διαδικασιών, όπως το αλουμίνιο και την κατασκευή ημιαγωγών. Επίσης έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής στην ατμόσφαιρα που σε ορισμένες περιπτώσεις αγγίζει τα χιλιάδες χρόνια (U.S. EPA, 2010). Όπως και άλλα μακρόβια αέρια του θερμοκηπίου, τα φθοριούχα αέρια είναι καλά αναμεμειγμένα στην ατμόσφαιρα, εξαπλώνονται σε όλο τον κόσμο ανεξαρτήτως από που εκπέμπονται. Τα φθοριούχα αέρια απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα μόνο όταν καταστρέφονται από το φως του ήλιου στην πολύ ανώτερη ατμόσφαιρα (U.S. EPA, 2010). Σε γενικές γραμμές είναι τα πιο ισχυρά και με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής αέρια του θερμοκηπίου που εκπέμπονται από ανθρώπινες δραστηριότητες. Υπάρχουν τέσσερις κύριες κατηγορίες των φθοριούχων αερίων: οι υδροφθοράνθρακες (HFC), οι υπερφθοράνθρακες (PFC), το εξαφθοριούχο θείο (SF6) και τριφθοριούχο άζωτο (NF3) (U.S. EPA, 2010). Στο Σχήμα 2.10 απεικονίζονται οι ανθρώπινες πηγές παραγωγής φθοριούχων αερίων.

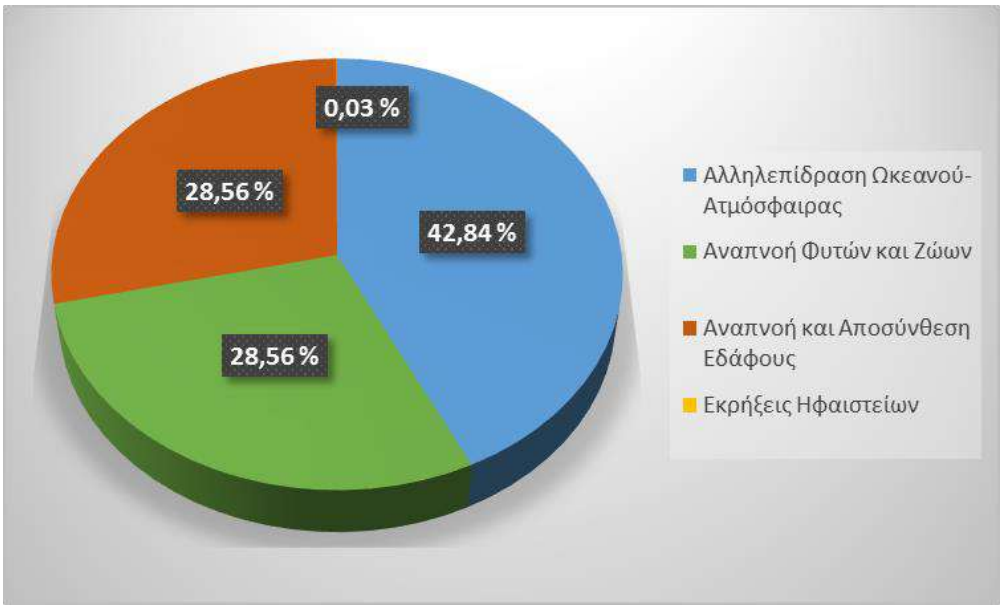



*Σχήμα 2.10 Ανθρώπινες πηγές παραγωγής φθοριούχων αερίων*
*Πηγή : UNEP, 2010*

Οι υδροφθοράνθρακες χρησιμοποιούνται ως ψυκτικά μέσα, προωθητικά αερολυμάτων, διαλύτες, και επιβραδυντικά φωτιάς. Η πηγή σημαντικών εκπομπών αυτών των ενώσεων είναι η χρήση τους ως ψυκτικά μέσα κυρίως σε συστήματα κλιματισμού, τόσο σε οχήματα όσο και κτίρια. Αυτές οι χημικές ουσίες αναπτύχθηκαν ως αντικατάσταση των χλωροφθορανθράκων (CFC) και υδροχλωροφθορανθράκων (HCFC), διότι δεν καταστρέφουν το στρατοσφαιρικό όζον. Στη βιομηχανία χρησιμοποιούνται οι υπερφθοράνθρακες ως ενώσεις που παράγονται ως παραπροϊόν διαφόρων βιομηχανικών διαδικασιών που σχετίζονται με την παραγωγή αλουμινίου και την κατασκευή ημιαγωγών. Το εξαφθοριούχο θείο χρησιμοποιείται στην επεξεργασία μαγνησίου και στην κατασκευή ημιαγωγών, αλλά και ως αέριο για την ανίχνευση διαρροής. Τέλος, όσο αναφορά στη μεταφορά και τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας, το εξαφθοριούχο θείο χρησιμοποιείται σε εξοπλισμό ηλεκτρικών συσκευών μεταφοράς, συμπεριλαμβανομένων και των διακοπτών ισχύος (U.S. EPA, 2010).

2.4.2.5 Διοξείδιο του άνθρακα

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι ένα άχρωμο και άοσμο αέριο ζωτικής σημασίας για τη ζωή στη Γη και συμβολίζεται ως CO2. Αυτή η φυσική χημική ένωση αποτελείται από ένα άτομο άνθρακα ομοιοπολικά συνδεδεμένο με διπλό δεσμό προς δύο άτομα οξυγόνου. Το διοξείδιο του άνθρακα υπάρχει στην ατμόσφαιρα της Γης ως αέριο σε συγκέντρωση περίπου 0.04 τοις εκατό (400 ppm) κατά όγκο (National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) – Earth System Research Laboratory (ESRL), 2005). Φυσικές πηγές διοξειδίου του άνθρακα αποτελούν ηφαίστεια και θερμές πηγές, όπου απελευθερώνεται από ανθρακικά πετρώματα με διάλυση στο νερό και τα οξέα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.11. Επειδή το διοξείδιο του άνθρακα είναι διαλυτό στο νερό, εμφανίζεται φυσικά στα υπόγεια ύδατα, στα ποτάμια και τις λίμνες, στα παγόβουνα αλλά και σε θαλασσινό νερό. Επιπλέον βρίσκεται και σε κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου (Energy Institute, 2012).

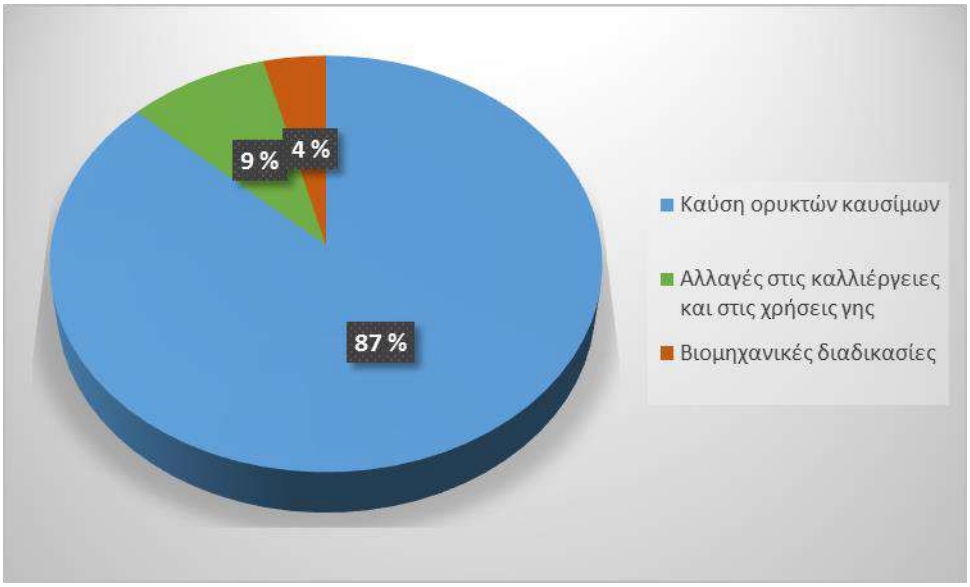



*Σχήμα 2.11 Φυσικές πηγές παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα*
*Πηγή: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007*

Το ατμοσφαιρικό διοξείδιο του άνθρακα είναι η κύρια πηγή του διοξειδίου του άνθρακα στη ζωή στη Γης, ενώ η συγκέντρωσή του σε προ-βιομηχανική εποχή της Γης ρυθμιζόταν από φωτοσυνθετικούς οργανισμούς και γεωλογικά φαινόμενα. Ως μέρος του κύκλου του άνθρακα, τα φυτά, τα φύκια και τα κυανοβακτήρια κάνουν χρήση της φωτεινής ενέργειας ώστε να φωτοσυνθέσουν υδατάνθρακα από διοξείδιο του άνθρακα και νερό, με το οξυγόνο να παράγεται ως απόβλητο προϊόν (Kaufman and Franz, 1996).

Το διοξείδιο του άνθρακα παράγεται από όλους τους αερόβιους οργανισμούς όταν μεταβολίζουν υδατάνθρακες και λιπίδια για την παραγωγή ενέργειας μέσω της διαδικασίας της αναπνοής (Kaufman and Franz, 1996). Αυτό λοιπόν επιστρέφει στο νερό μέσω των βραγχίων των ψαριών και στον αέρα μέσω των πνευμόνων των χερσαίων ζώων, συμπεριλαμβανομένων και των ανθρώπων. Το διοξείδιο του άνθρακα παράγεται κατά τη διάρκεια των διαδικασιών της αποσύνθεσης των οργανικών υλικών και της ζύμωσης των σακχάρων. Παράγεται επίσης από την καύση του ξύλου, των υδατανθράκων και των ορυκτών καυσίμων όπως ο άνθρακας, η τύρφη, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.12, 87% του συνόλου των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από ανθρώπινες πηγές προέρχεται από την καύση των ορυκτών καυσίμων, όπως ο άνθρακας, το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως και στον τομέα των οδικών μεταφορών (International Energy Agency, 2012). Τα υπόλοιπα αποτελέσματα οφείλονται στη μαζική αποψίλωση των δασών και σε άλλες αλλαγές των χρήσεων γης (9%), καθώς και ορισμένες βιομηχανικές διαδικασίες, όπως η παραγωγή του τσιμέντου (4%) (International Energy Agency, 2012).

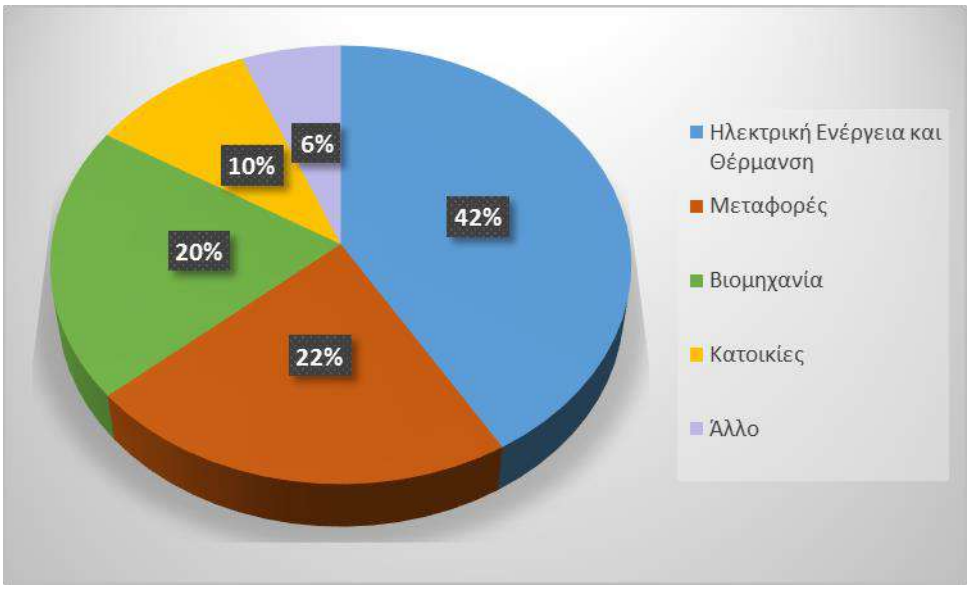



*Σχήμα 2.12 Ανθρώπινες πηγές διοξειδίου του άνθρακα*
*Πηγή: Le Quéré et al., 2013*

Ο τομέας των μεταφορών είναι η δεύτερη μεγαλύτερη πηγή ανθρωπογενών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, κάτι που απεικονίζεται και στο Σχήμα 2.12. Μεταφορά εμπορευμάτων και ανθρώπων σε όλο τον κόσμο παράγει το 22% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που σχετίζονται με τα ορυκτά καύσιμα το 2010 (International Energy Agency, 2012). Ο τομέας αυτός είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρος και χρησιμοποιεί τα καύσιμα με βάση το πετρέλαιο (βενζίνη, ντίζελ, κηροζίνη) σχεδόν αποκλειστικά για την κάλυψη των αναγκών αυτών. Από τη δεκαετία του 1990, οι εκπομπές που σχετίζονται με τις μεταφορές έχουν αυξηθεί ραγδαία, και μάλιστα η αύξηση αυτή αγγίζει το 45% μέσα σε λιγότερο από δυο δεκαετίες (International Energy Agency, 2012).

Οι οδικές μεταφορές αντιπροσωπεύουν το 72% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα αυτού του τομέα. Αυτοκίνητα, βαρέα και ελαφρά φορτηγά είναι οι κύριες πηγές εκπομπών για τον τομέα των μεταφορών και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα έχουν αυξηθεί σταθερά από το 1990. Εκτός από τα οδικά οχήματα, οι άλλες σημαντικές πηγές εκπομπών για το συγκεκριμένο τομέα είναι η ναυσιπλοΐα και η παγκόσμια αεροπλοΐα (International Energy Agency, 2012), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13.

Παράλληλα στο Σχήμα 2.13 υπογραμμίζεται μια από τις πιο ανησυχητικές τάσεις στη σύγχρονη οικονομία. Οι εκπομπές που προκαλούνται από τη μεταφορά ανθρώπων και εμπορευμάτων έχουν αυξηθεί τόσο γρήγορα ώστε να έχουν ξεπεράσει τις εκπομπές από τον βιομηχανικό τομέα, ο οποίος έχει τεράστιο αντίκτυπο στην κλιματική αλλαγή. Η τάση αυτή ξεκίνησε στη δεκαετία του 1990 και συνεχίζεται έκτοτε προκαλώντας αύξηση των έμμεσων εκπομπών.




*Σχήμα 2.13 Πηγές διοξειδίου του άνθρακα σε διάφορους τομείς της οικονομίας*
*Πηγή: International Energy Agency, 2012*

Οι εκπομπές που προκαλούνται από τη μεταφορά των εμπορευμάτων είναι παραδείγματα των έμμεσων εκπομπών δεδομένου ότι ο καταναλωτής δεν έχει άμεσο έλεγχο της απόστασης μεταξύ του εργοστασίου και του καταστήματος. Οι εκπομπές που προκαλούνται από τους ανθρώπους που ταξιδεύουν με αυτοκίνητο, με αεροπλάνο, με τρένο είτε με οποιοδήποτε άλλο μέσο είναι παραδείγματα των άμεσων εκπομπών, δεδομένου ότι οι άνθρωποι μπορούν να επιλέξουν που πηγαίνουν και με τι τρόπο. Το σοβαρότερο ζήτημα είναι ότι το 99% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που προκαλούνται από τη μεταφορά ανθρώπων και αγαθών σε όλο τον κόσμο προέρχεται από την καύση των ορυκτών καυσίμων (International Energy Agency, 2012).

Το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί το βασικό αέριο ρύπο που σχετίζεται με τον τομέα των οδικών μεταφορών, αλλά και των μεταφορών ευρύτερα. Συνεπώς θα δοθεί έμφαση σε αυτόν κατά την παρούσα μελέτη και θα χρησιμοποιηθεί ως βασικό αντικείμενο εξέτασης σε συνδυασμό με την ομαλότητα του οδοστρώματος.

# 3

# ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΚΠΟΜΠΗ ΑΕΡΙΩΝ

## 3.1 Γενικά

Όπως παρουσιάστηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, οι μεταφορές και ειδικά τα οδικά δίκτυα είναι ένα πολύ σημαντικό τμήμα των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Το 2005 ήταν η δεύτερη μεγαλύτερη πηγή εκπομπών που σχετίζονται με την ενέργεια ή περίπου 14% των συνολικών εκπομπών. Οι οδικές μεταφορές συνεισφέρουν περίπου το 90 έως 95% του τομέα των μεταφορών στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (The World Bank, 2010). Φυσικά εκπομπές τέτοιων αερίων δεν εμφανίζονται μόνο κατά τη λειτουργία των οδικών δικτύων αλλά και κατά τη διάρκεια της κατασκευής αλλά και της συντήρησής τους. Όμως σύμφωνα με αντίστοιχες έρευνες μόνο το 2 με 5 % των συνολικών αυτών εκπομπών αφορά το κομμάτι της κατασκευής και της συντήρησης του οδικού δικτύου, ενώ το υπόλοιπο αφορά καθαρά τη λειτουργία του δικτύου (EAPA, 2004).

Αναφορικά, οι εκπομπές των οχημάτων διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες : εκπομπές εξάτμισης, εκπομπές αναθυμιάσεων και εκπομπές ζωής (Mursched, 2010). Οι πρώτες ουσιαστικά αφορούν τις εκπομπές αερίων κατά τη διάρκεια λειτουργίας της μηχανής του οχήματος και τα αντίστοιχα αέρια που παράγονται είναι υδρογονάνθρακες, νιτρικά οξείδια, μονοξείδιο του άνθρακα και διοξείδιο του άνθρακα. Υπάρχει ένα πλήθος παραγόντων που επηρεάζει τις εκπομπές αυτών των αερίων. Οι κυκλοφοριακές συνθήκες, ο τύπος της οδού, το είδος του οχήματος και τα βασικά χαρακτηριστικά του, το είδος του καυσίμου, η ταχύτητα, οι καιρικές συνθήκες αλλά και η κατάσταση του οδοστρώματος συμβάλλουν με τη σειρά τους στην παραγωγή τέτοιων αερίων. Παρόλο που το κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η ομαλότητα, το ζήτημα αυτό είναι αρκετά περίπλοκο και σχετίζεται με πολλές μεταβλητές. Για αυτό λοιπόν παρουσιάζονται συνοπτικά οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

## 3.2 Τύπος καυσίμου

Ο τύπος καυσίμου μπορεί να αλλάξει το ρυθμό εκπομπής αερίων θερμοκηπίου από την εξάτμιση, ανεξάρτητα από τα χαρακτηριστικά του οχήματος και του δρόμου, αφού

βασίζεται στα χημικά συστατικά του. Η περιεκτικότητα του καυσίμου επηρεάζει άμεσα τη σύνθεση των αερίων που προέρχονται από την εξάτμιση. Η βενζίνη είναι το πιο κοινό χρησιμοποιούμενο καύσιμο ενώ το ντίζελ κατέχει τη δεύτερη θέση. Οι ντιζελοκινητήρες είναι πιο αποτελεσματικοί από πλευράς θερμοδυναμικής σε σύγκριση με τους βενζινοκινητήρες. Συνήθως η ισχύς των κινητήρων ντίζελ είναι 1.5 έως 3 φορές μεγαλύτερη από τους κινητήρες βενζίνης (Atkins, 2009). Στις σχέσεις 3.1 και 3.2 παρουσιάζεται η ποσοτικοποίηση μεταξύ του CO2 και της κατανάλωσης καυσίμου των δυο ειδών κινητήρων (Sullivan et al., 2004).

$$CO2g = 23.6 * FCg \text{ για βενζινοκινητήρα} \quad (3.1)$$

$$CO2d = 26.5 * FCd \quad \textit{για ντιζελοκινητήρα} \quad (3.2)$$

Οι εκπομπές από τα αυτοκίνητα βενζίνης έχουν μειωθεί δραματικά από την εισαγωγή των καταλυτικών μετατροπέων, τα οποία οξειδώνουν τους ρύπους, όπως το CO σε λιγότερο επιβλαβή αέρια, όπως το CO2. Σε σύγκριση με τα βενζινοκίνητα χωρίς καταλύτες, αυτά με καταλύτες έχουν πολύ χαμηλότερες εκπομπές CO, HC και NOx, σε βάρος των εκπομπών CO2, οι οποίες αυξάνουν λόγω της οξείδωσης του μονοξειδίου του άνθρακα σε CO2 (Atkins, 2009). Ως συνέπεια αυτού, ένα βενζινοκίνητο με καταλύτη θα χρησιμοποιήσει επίσης ελαφρώς περισσότερο καύσιμο οπότε είναι λιγότερο αποτελεσματικό. Ωστόσο, παρά τις βελτιώσεις αυτές, τα βενζινοκίνητα αυτοκίνητα με καταλύτες εξακολουθούν να παράγουν περισσότερο CO και HC από πετρελαιοκίνητα αυτοκίνητα, αν και τα επίπεδα εκπομπών σε NOx και σωματιδίων είναι πολύ χαμηλότερα από τα πετρελαιοκίνητα αυτοκίνητα. Στην πραγματικότητα, οι εκπομπές σωματιδίων από τα αυτοκίνητα βενζίνης είναι τόσο χαμηλές ώστε να θεωρούνται αμελητέες (Atkins, 2009).

Αυτοκίνητα με καύσιμο ντίζελ παράγουν περισσότερη ενέργεια ανά λίτρο από τα βενζινοκίνητα και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι κινητήρες ντίζελ είναι πιο αποτελεσματικοί από τους κινητήρες βενζίνης, τα οχήματα ντίζελ είναι και πιο αποτελεσματικά ώστε να αναπτύξουν υψηλότερες ταχύτητες. Το πετρέλαιο ντίζελ δεν περιέχει μόλυβδο και οι εκπομπές των υπό εξέταση ρύπων (μονοξείδιο του άνθρακα, υδρογονάνθρακες και οξείδια του αζώτου) είναι χαμηλότερες από εκείνες των βενζινοκίνητων χωρίς καταλύτη. Ωστόσο, σε σύγκριση με τα βενζινοκίνητα με καταλύτη, τα πετρελαιοκίνητα οχήματα έχουν υψηλότερες εκπομπές NOx, κάτι που επηρεάζει σημαντικά το ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα που εκπέμπεται (Atkins, 2009).

## 3.3 Τύπος οχήματος

Υπάρχουν διάφορα ήδη επιβατικών αυτοκινήτων και φορτηγών και κατασκευάζονται συνεχώς και πιο εξελιγμένα μοντέλα με την πάροδο του χρόνου. Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι οι διαφορετικοί τύποι των οχημάτων παρουσιάζουν διαφορετικές σχέσεις μεταξύ των εκπομπών εξάτμισης CO2 (μια συνάρτηση της κατανάλωσης καυσίμου) και της ομαλότητας του οδοστρώματος λόγω των διαφορετικών τεχνολογιών κινητήρων και βάρους οχημάτων. Οι βασικές κατηγορίες οχημάτων είναι οι εξής : επιβατικά, 2-άξονα φορτηγά, 3-άξονα φορτηγά, 4-άξονα

φορτηγά, και με 5 ή περισσότερους άξονες φορτηγά. Οι προδιαγραφές λοιπόν του οχήματος μπορούν να έχουν σημαντική επιρροή στην κατανάλωση καυσίμου και κατά συνέπεια των εκπομπών CO2. Οι προδιαγραφές αυτές αφορούν φυσικά χαρακτηριστικά όπως η μάζα, το σχήμα και το μέγεθος του οχήματος, η τεχνολογία καύσης, το μέγεθος και η ροπή του κινητήρα. Οποιαδήποτε αλλαγή σε κάθε ένα από αυτά τα χαρακτηριστικά μπορεί να επηρεάσει τις εκπομπές των οχημάτων σημαντικά. Γενικά, οχήματα με μικρότερο μέγεθος του κινητήρα μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις εκπομπές (Ardekani and Sumitsawan, 2010). Αντίθετα μεγαλύτερα και βαρύτερα οχήματα, οχήματα με αυτόματο κιβώτιο ταχυτήτων και οχήματα με εξαρτήματα που απαιτούν υψηλότερη ισχύ (θερμαινόμενα καθίσματα, αυτόματα παράθυρα και κλιματισμός) απαιτούν περισσότερα καύσιμα από εκείνα που στερούνται αυτών των συστημάτων (Murrell, 1980).

## 3.4 Συνολικά οχηματοχιλιόμετρα

Υπάρχουν μόνο λίγες μελέτες σχετικά με την επίδραση των συσσωρευμένων χιλιομέτρων, που έχουν διανυθεί, στις εκπομπές των οχημάτων και κυρίως έχουν επικεντρωθεί σε ρύπους, όπως HC και CO. Ο αντίκτυπος των συσσωρευμένων χιλιομέτρων συζητείται συνήθως μαζί με το πρόγραμμα επιθεώρησης και συντήρησης του οχήματος. Αναμένεται ότι όσο μικρότερη είναι η μέση διάρκεια ζωής του οχήματος τόσο χαμηλότερη θα είναι η κατανάλωση ενέργειας και εκπομπών. Αυτό σημαίνει ότι τα παλαιότερα οχήματα παράγουν υψηλότερες εκπομπές, λόγω της υποβάθμισης των συστημάτων ελέγχου των εκπομπών τους. Αλλά την ίδια στιγμή, όταν τα οχήματα «μεγαλώνουν», τείνουν να οδηγούνται λιγότερο. Τέλος αναφέρεται πολύ συνοπτικά ότι οι εκπομπές CO2, που αποτελούν και το επίκεντρο της μελέτης μας, δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στις διαφοροποιήσεις των οχημάτων σχετικά με τα οχηματοχιλιόμετρα (Ntziachristos and Samaras, 2000).

## 3.5 Θερμοκρασία

Ο πιο σημαντικός περιβαλλοντικός παράγοντας που επηρεάζει τις εκπομπές ρύπων είναι η θερμοκρασία. Η επίδραση της θερμοκρασίας στις εκπομπές μπορεί να συζητηθεί σε δύο καταστάσεις του οχήματος: ζεστός κινητήρα σε λειτουργία και ψυχρή εκκίνηση. Η θερμοκρασία μπορεί επίσης να έχει επιπτώσεις στις εκπομπές μέσω της χρήσης του κλιματισμού του αυτοκινήτου. Για το ζεστό κινητήρα σε λειτουργία, η θερμοκρασία μπορεί να έχει διαφορετικά αποτελέσματα για τα διάφορα αέρια. Οι Choi και Beardsley (Choi, 2011) απεικονίζουν την επίδραση της θερμοκρασίας στα THC, CO, NOx και στα συνολικά επίπεδα $PM_{2.5}$ , ωστόσο όμως το CO2 δεν έχει συζητηθεί στη βιβλιογραφία. Από την άλλη πλευρά, η επίδραση της θερμοκρασίας στην κατανάλωση καυσίμου κατά την ψυχρή εκκίνηση έχει συζητηθεί ευρέως στη βιβλιογραφία. Η απόδοση των συστημάτων ελέγχου των εκπομπών επιδεινώνεται κάτω από ένα φάσμα θερμοκρασιών, δεδομένου ότι σε ψυχρότερες θερμοκρασίες και υψηλότερη πυκνότητα του αέρα, απαιτείται περισσότερο καύσιμο άρα παράγονται και περισσότερα αέρια (Bielaczyc and Merkisz, 1998). Η σχέση 3.3 απεικονίζει σ τις

εκπομπές αερίων σε μονάδες γραμμαρίων ως προς τους διάφορους παράγοντες θερμοκρασίας και απόστασης (André and Joumard, 2005):

$$EE(T,V,\delta,t) = \omega(20°\ C,(20\ km)/h) * f(T,V) * \frac{1-e^{a*\delta}}{1-e^{a}} * g(t) \qquad (3.3)$$

όπου

| | |
|---|---|
| EE | εκπομπές αερίων για ένα ταξίδι (g) |
| V | ταχύτητα (km/h) |
| T | θερμοκρασία περιβάλλοντος (° C) |
| t | χρόνος στάθμευσης οχήματος (hours) |
| $\delta = d/d_c(T,V)$ | αδιάστατη απόσταση ταξιδιού |
| d | απόσταση ταξιδιού (km) |
| $d_c(T,V)$ | απόσταση με κρύο κινητήρα (km) |
| ω(20° C,20 km/h) | συνάρτηση εκπομπών στους 20° C και σε ταχύτητα 20 km/h |

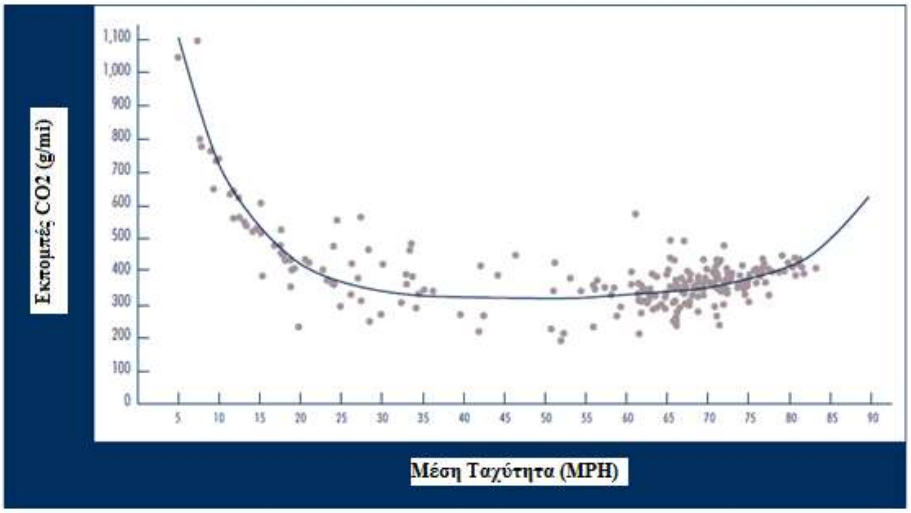
Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι λοιπόν μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει τις εκπομπές καυσαερίων και αναθυμιάσεων. Τα συστήματα κινητήρα και ελέγχου των εκπομπών χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να ζεσταθούν σε χαμηλή θερμοκρασία, γεγονός που αυξάνει τις εκπομπές της ψυχρής εκκίνησης. Επιπλέον, καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, αυξάνονται με τη σειρά τους και οι εκπομπές καυσαερίων από τα οχήματα με υψηλότερα ποσοστά εκπομπών αερίων. Τέλος, η επίδραση των καιρικών συνθηκών παίζει καθοριστικό ρόλο στην οικονομία καυσίμων. Τα ποσοστά κατανάλωσης καυσίμων επιδεινώνονται σε χαμηλές θερμοκρασίες και σε συνδυασμό με ισχυρούς ανέμους (Murrell, 1980). Αυτό συμβαίνει για τους εξής λόγους:

- Ο ψυχρός αέρας είναι πυκνότερος σε σχέση με το θερμό, αυξάνοντας την αεροδυναμική αντίσταση του οχήματος, ειδικά σε μεγάλες ταχύτητες.
- Η πίεση των ελαστικών μειώνεται σε ψυχρότερες θερμοκρασίες, αυξάνοντας την αντίσταση κύλισης.
- Χρειάζεται περισσότερος χρόνος για τον κινητήρα ώστε να λειτουργεί στην πιο αποδοτική θερμοκρασία του. Αυτό επηρεάζει τις μικρότερες αποστάσεις περισσότερο, αφού το όχημα καταναλώνει περισσότερα κατά το «ταξίδι» σε λιγότερο από βέλτιστες θερμοκρασίες.
- Η απόδοση της μπαταρίας μειώνεται στο κρύο, καθιστώντας πιο δύσκολο για το δυναμό να κρατήσει φορτισμένη τη μπαταρία. Αυτό επηρεάζει επίσης την απόδοση του αναγεννητικού συστήματος πέδησης για τα υβριδικά οχήματα.

## 3.6 Ταχύτητα, επιτάχυνση και επιβράδυνση οχήματος

Οι συντελεστές εκπομπών αέριων ρύπων συνδέονται κατά κύριο λόγο με τη μέση ταχύτητα και οι ερευνητές συχνά χρησιμοποιούν τη μέση ταχύτητα ως μέτρο απόδοσης της κυκλοφορίας. Υπό αυτό το πρίσμα, δημιουργήθηκαν κατάλληλες βάσεις

δεδομένων ταχυτήτων με συντελεστές εκπομπών (σε γραμμάρια ανά μίλι) και σχεδιάστηκε, έναντι διαφορετικών μέσων όρων ταχυτήτων, το διάγραμμα CO2-ταχύτητας σχήματος "U", όπως φαίνεται στο γράφημα 3.1 (Boriboonsomsin and Barth, 2009). Στη συνέχεια, προσαρμόστηκε μια γραμμή σε αυτό το σύνολο τιμών, ώστε να προκύψει μια τυπική καμπύλη εκπομπών-ταχύτητας. Η έννοια της καμπύλης των εκπομπών ταχύτητας μπορεί να χρησιμεύσει ως βάση για ανάλογες εκπομπές συναρτήσει των δραστηριοτήτων των οχημάτων. Στην πραγματικότητα, μια μεγάλη οικογένεια καμπυλών μπορεί πλέον να καθιερωθεί για διάφορους τύπους οδοστρώματος, και ακόμη και για διαφορετικά επίπεδα συμφόρησης, δεδομένου ότι αυτοί οι παράγοντες μπορούν να προσδιοριστούν και να συμπεριληφθούν στην αρχική βάση δεδομένων.




*Σχήμα 3.1 Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα συναρτήσει της μέσης ταχύτητας*
*Πηγή : Boriboonsomsin and Barth, 2009*

Είναι δυνατόν να δημιουργηθεί ακόμη και μια καμπύλη εκπομπών ταχύτητας για τη σύνθεση του στόλου των οχημάτων που βρίσκονται συνήθως στο δρόμο. Αυτή η οικογένεια των καμπυλών των εκπομπών ταχύτητας παρουσιάζει πολλές βασικές ιδέες. Πολύ χαμηλές μέσες ταχύτητες αντιπροσωπεύουν γενικά οδήγηση με σταμάτημα-ξεκίνημα καθώς και οχήματα που δεν ταξιδεύουν πολύ. Ως εκ τούτου, οι τιμές εκπομπής ανά μίλι είναι αρκετά υψηλές. Όταν ο κινητήρας του αυτοκινήτου είναι σε λειτουργία, αλλά δεν κινείται, το ποσοστό των εκπομπών ανά μίλι φτάνει το άπειρο. Αντίθετα, όταν τα οχήματα ταξιδεύουν σε πολύ υψηλότερες ταχύτητες, απαιτούν πολύ υψηλά φορτία του κινητήρα, τα οποία απαιτούν περισσότερα καύσιμα και επομένως μπορούν να οδηγήσουν σε υψηλά ποσοστά εκπομπών CO2. Ως αποτέλεσμα, αυτή η καμπύλη των εκπομπών ταχύτητας έχει ένα παραβολικό σχήμα, με υψηλά ποσοστά εκπομπής στα δύο άκρα και τα χαμηλότερα βέλτιστα ποσοστά εκπομπής σε μέτριες ταχύτητες της τάξης των 40 έως 60 mph ή αλλιώς 64 έως 96 km/h (Boriboonsomsin and Barth, 2009).

Η ταχύτητα και η επιτάχυνση είναι οι πιο πολυσυζητημένοι μεταβλητές των εκπομπών των οχημάτων, λόγω της δυναμικής φύσης του προφίλ της ταχύτητας και της σημαντικής επιρροής του στις εκπομπές. Η ακρίβεια των μοντέλων εκτίμησης των εκπομπών βασίζονται συνήθως στο προφίλ της ταχύτητάς τους. Η απλούστερη μέθοδος

είναι η μέση κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει της απόστασης , κάτι όμως που παρέχει μια πολύ απλή προσέγγιση που είναι πολύ περιοριστική αφού σε αυτή τη μέθοδο η κατανάλωση καυσίμου δεν είναι ευαίσθητη ως προς την ταχύτητα. Η επόμενη μέθοδος βασίζεται στην μέση ταχύτητα σε μια συνάρτηση η οποία είναι μία βελτίωση έναντι της μεθόδου με βάση την απόσταση αλλά εξακολουθεί να είναι περιοριστική. Η μέθοδος αυτή δεν είναι πολύ αξιόπιστη δεδομένου ότι διαφορετικές ταχύτητες μπορούν να δώσουν ίδια μέση ταχύτητα, αλλά διαφορετικές καταναλώσεις καυσίμων. Ένα ακριβές μοντέλο, όπως παρουσιάζεται από τη σχέση 3.4, δίνει τη σχέση της στιγμιαίας ταχύτητας και της απόστασης συναρτήσει της κατανάλωσης καυσίμου (Cobian, 2009):

$$FC = X * (0.284977 - 0.003738 * v + 0.00002201 * v^2) - 2.774 * D + S * 0.0000089756 * v^2 \quad (3.4)$$

όπου

FC: κατανάλωση καυσίμου (litres)
X: απόσταση που διανύθηκε (km)
v: μέση ταχύτητα (km/h)
D: συνολική καθυστέρηση λόγω σήμανσης (hours)
S: συνολικές στάσεις (vehicle/hour)

Όπως μπορούμε να δούμε, οι βασικές μεταβλητές είναι η μέση ταχύτητα στο σύνδεσμο και η απόσταση. Το μοντέλο αυτό παρέχει τη μέση κατανάλωση καυσίμου για ένα κοινό πλήρους μεγέθους όχημα. Το πιο λεπτομερές μοντέλο, το βασισμένο στη δύναμη μοντέλο, αναπτύχθηκε αρχικά από τον Post Kent (Post, 1984). Αυτή η ιδέα έχει μελετηθεί και βελτιωθεί από άλλους ερευνητές από τότε που αυτό το μοντέλο υπολογίζει την κατανάλωση καυσίμων με βάση την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια ώστε να λειτουργήσει το όχημα. Η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια υπολογίζεται με βάση την ενέργεια που απαιτείται για να ξεπεραστούν πέντε είδη δυνάμεων: η δύναμη του κινητήρα (Zd), η αντίσταση κύλισης των ελαστικών (Zr), η αεροδυναμική αντίστασης (Za), η αδρανειακή και η βαρυτική αντοχή (Ze) και η δύναμη των εξαρτημάτων (Zm) (Biggs and Akcelik, 1986) :

$$Zt = Zd + Zr + Za + Ze + Zm \quad (3.5)$$

$$Zd = 2.36 * 10^{-7} * v^2 * M \quad (3.6)$$
$$Zr = (3.72 * 10^{-5} * v + 3.09 * 10^{-8} * v^2) * M \quad (3.7)$$
$$Za = 1.29 * 10^{-5} * C_d * A * v^3 \quad (3.8)$$
$$Ze = 2.78 * 10^{-4} * (\alpha + g * \sin\Theta) * M * v \quad (3.9)$$

όπου

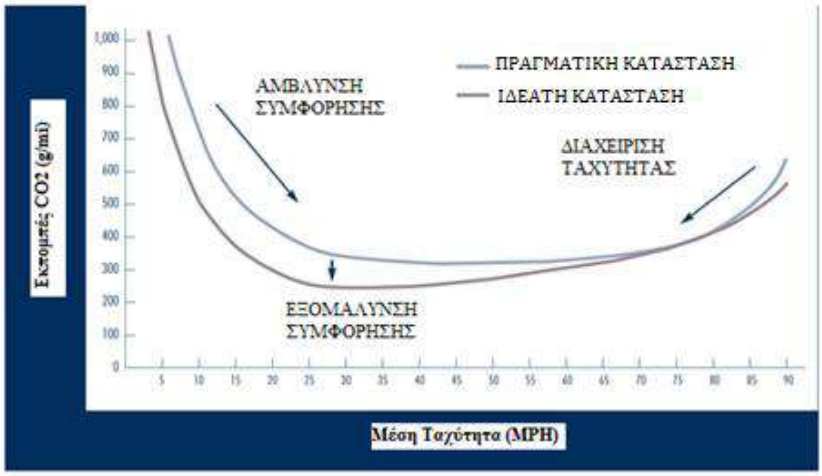
v: ταχύτητα (km/h)
α: επιτάχυνση ($m/s^2$)
M: μάζα οχήματος (kg)
$C_d$: συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης
A: μετωπική επιφάνεια οχήματος ($m^2$)

$$FC = a + \beta * Zt \quad (3.10)$$

όπου
a: ρελαντί ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου
β: θερμοδυναμική αποδοτικότητα κινητήρα (litres)

## 3.7 Κυκλοφοριακός φόρτος

Ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι άμεσα συνδεδεμένος με τις εκπομπές CO2, αφού συσχετίζεται άμεσα ο ίδιος με την ταχύτητα. Στο Σχήμα 3.2 ταχύτητας-εκπομπών CO2 εξηγείται λοιπόν έμμεσα την επίδραση του κυκλοφοριακού φόρτου στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται η πραγματική κατάσταση φόρτισης και η ιδεατή - σταθερή με στόχο τη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα.




*Σχήμα 3.2 Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και κυκλοφοριακός φόρτος εκφρασμένος ως προς τη μέση ταχύτητα*
*Πηγή : Boriboonsomsin and Barth, 2009*

Υψηλός κυκλοφοριακός φόρτος και καταστάσεις συμφόρησης εμφανίζονται όταν οι ταχύτητες είναι πολύ χαμηλές, όπου παρατηρούνται και αυξημένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Αντίθετα, σε καταστάσεις ελεύθερης ροής, όπου οι ταχύτητες είναι πολύ υψηλές, εμφανίζονται μικρότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, αλλά εξίσου υψηλές. Το αντίστοιχο βέλτιστο εύρος ταχυτήτων κυμαίνεται όπως και πριν μεταξύ 40 και 60 mph ή αλλιώς 64 και 96 km/h.

## 3.8 Κατά μήκος κλίση

Είναι γνωστό ότι η ταχύτητα και η επιτάχυνση έχουν μεγάλο αντίκτυπο στην οικονομία του καυσίμου και στις εκπομπές από το σωλήνα εξάτμισης του οχήματος, οι οποίες αποτελούν τις κύριες μεταβλητές που καθορίζουν τις απαιτήσεις ισχύος, που είναι

απαραίτητη για συγκεκριμένη οδική συμπεριφορά. Επιπλέον, οι απαιτήσεις ισχύος για ένα όχημα επηρεάζονται από το βάρος του, την κατά μήκος κλίση της οδού στην οποία κινείται το όχημα, άλλα και από ένα άλλο πλήθος παραγόντων, όπως η αεροδυναμική αντίσταση και η αντίσταση κύλισης. Η συνολική απαιτούμενη ελκτική δύναμη ($P_{tractive}$, σε μονάδες kWh) που ασκείται στους τροχούς ενός οχήματος δίνεται από την σχέση 3.11 (Barth et al., 1996) :

$$P_{tractive} = m/1000 * v * (a + g * sin\theta) + (m * g * C_r + \rho/2 * v^2 * A * C_a) * v/1000 \quad (3.11)$$

όπου

m: μάζα οχήματος (kg)
v: ταχύτητα οχήματος (m/s)
α: επιτάχυνση οχήματος ($m/s^2$)
g: επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 $m/s^2$)
θ: γωνία κλίσης της οδού
$C_r$: σταθερά αντίστασης κύλισης
ρ: πυκνότητα μάζας του αέρα (1.225 $kg/m^3$, εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το υψόμετρο)
A: διατομή περιοχής ($m^2$)
$C_\alpha$: σταθερά αεροδυναμικής αντίστασης

Για να μεταφρασθεί η ελκτική δύναμη σε απαιτούμενη δύναμη του κινητήρα ($P_{engine}$) χρησιμοποιείται η σχέση 3.12 :

$$P_{engine} = \left(\frac{P_{tractive}}{\eta_{tf}}\right) + P_{accessories} \quad (3.12)$$

στην οποία ο όρος $\eta_{tf}$ συμβολίζει το συνδυασμό της αποδοτικότητας της μετάδοσης ενέργειας και της τελικής κίνησης, ενώ ο όρος $P_{accessories}$ εκφράζει την απαιτούμενη ενέργεια του κινητήρα, η οποία συνδέεται με τη λειτουργία άλλων εξαρτημάτων, όπως για παράδειγμα του κλιματισμού, του υδραυλικού τιμονιού, των φρένων αλλά και των ηλεκτρικών συσκευών. Στο τελικό μοντέλο ο όρος $P_{accessories}$ μοντελοποιείται ως συνάρτηση της ταχύτητας του κινητήρα και ο όρος $\eta_{tf}$ ως συνάρτηση της ταχύτητας αλλά και της ελκτικής δύναμης του κινητήρα ($P_{tractive}$). Η συνολική δύναμη του κινητήρα συνδέεται με την κατανάλωση καυσίμου με βάση την μαθηματική σχέση 3.13:

$$\frac{dF}{dt} = \lambda * \left(k * N * D + \frac{P_{engine}}{\eta_{engine}}\right) \quad (3.13)$$

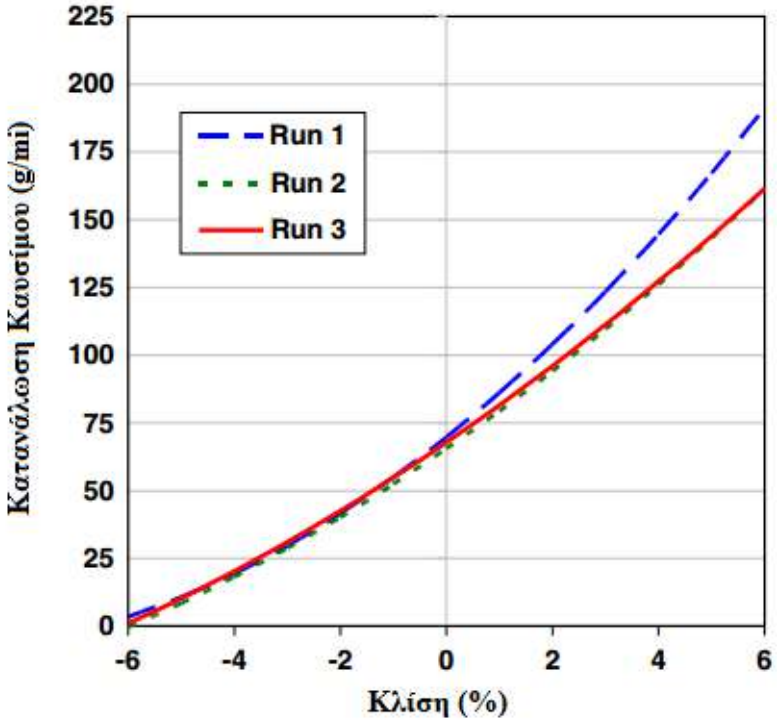
όπου

F: κατανάλωση καυσίμου (kW)
t: χρόνος
λ: ισοδύναμος ρυθμός καυσίμου-αέρα
k: συντελεστής τριβής του κινητήρα, που αντιπροσωπεύει την ενέργεια του καυσίμου που χρησιμοποιείται σε μηδενική παραγωγική δύναμη ώστε να ξεπεραστεί η τριβή του κινητήρα ανά περιστροφή και ανά μονάδα μετατόπισής του
N: ταχύτητα κινητήρα
D: μετατόπιση λόγω κίνησης
$\eta_{engine}$: αποδοτικότητα κινητήρα

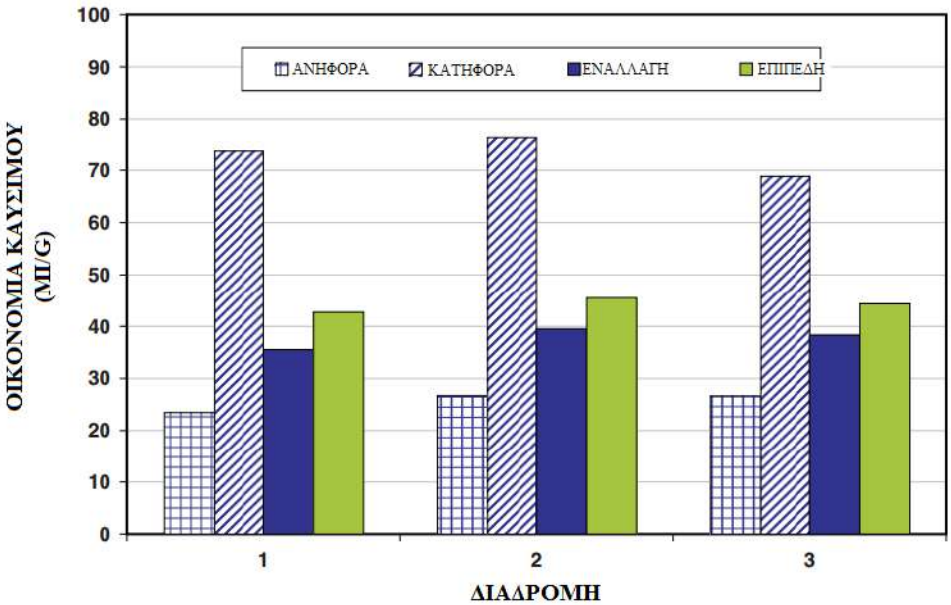
Διάφορες έρευνες έχουν διεξαχθεί σύμφωνα με την παραπάνω βιβλιογραφική ανασκόπηση, ώστε να εκτιμήσουν τη σχέση μεταξύ της κατανάλωσης καυσίμους και της κατά μήκος κλίσης μιας οδού. Μέσω λοιπόν των σχέσεων αυτών είναι δυνατόν να υπολογιστεί η στιγμιαία κατανάλωση καυσίμων για οδούς με διαφορετικές κλίσεις.

Υψηλότερα επίπεδα κατανάλωσης καυσίμου και κατ' επέκταση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου θα εμφανίζονται με θετικό πρόσημο στην κλίση της οδού, δηλαδή για ανηφορικό δρόμο, ενώ χαμηλότερα επίπεδα κατανάλωσης καυσίμου θα εμφανίζονται σε οδούς με αρνητικό πρόσημο στην κλίση, δηλαδή κατηφορικό δρόμο. Εάν η διαδρομή περιέχει τόσο ανηφορικά όσο και κατηφορικά τμήματα, τότε συνήθως οι αυξομειώσεις στην κατανάλωση καυσίμου οδηγούν σε μια εξισορροπημένη βέλτιστη κατάσταση. Ωστόσο, εάν απαιτείται από τον οδηγό, λόγω των διαφοροποιήσεων στην κλίση της οδού, να αλλάζει συνεχώς ταχύτητες ή να μειώνει ταχύτητα σε περιπτώσεις πολύ ανηφορικών δρόμων, τότε η υψηλή κατανάλωση καυσίμων θα τείνει να κυριαρχήσει έναντι της εξισορροπημένης κατάστασης, με αποτέλεσμα τη συνολική αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών αερίων.

Στο Σχήμα 3.3 και Σχήμα 3.4 παρουσιάζονται δυο γραφήματα της κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει της κλίσης της οδού σύμφωνα με το πείραμα των Boriboonsomsin και Barth (2009), οι οποίοι πραγματοποίησαν τρεις φορές μια διαδρομή που περιλάμβανε όλους τους δυνατούς συνδυασμούς κλίσεων που μπορεί κανείς να συναντήσει σε ένα ταξίδι με ελαφρύ επιβατικό όχημα και σταθερή ταχύτητα 60 mph (96 km/h) (Boriboonsomsin and Barth, 2009).



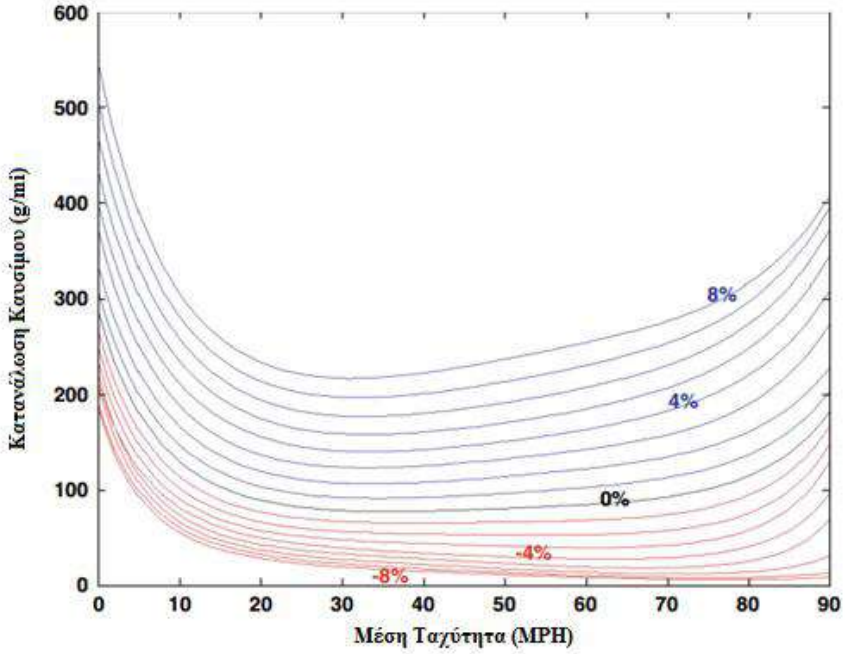

*Σχήμα 3.3 Κατανάλωση καυσίμου και κατά μήκος κλίση για τρεις διαδρομές με σταθερή ταχύτητα 60 mph (96 km/h)*
*Πηγή : Boriboonsomsin and Barth, 2009*




*Σχήμα 3.4 Οικονομία καυσίμου και κλίση*
*Πηγή : Boriboonsomsin and Barth, 2009*

Οι Boriboonsomsin και Barth (2009) πραγματοποίησαν επίσης μια σημαντική μελέτη για την κατά μήκος κλίση και την κατανάλωση καυσίμου για διαφορετικές τιμές ταχυτήτων. Έχοντας σα γνώμονα το γενικό διάγραμμα ταχύτητας-εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα, που παρουσιάστηκε νωρίτερα, ανέπτυξαν ένα μοντέλο που υπολογίζει

την κατανάλωση για διάφορες ταχύτητες και κλίσεις, του οποίου τα αποτελέσματα φαίνονται στον Σχήμα 3.5 (Boriboonsomsin and Barth, 2009).




*Σχήμα 3.5 Κατανάλωση καυσίμου και ταχύτητα για διάφορες τιμές κλίσεων*
*Πηγή :Boriboonsomsin and Barth, 2009*

Σύμφωνα λοιπόν με τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης, όσο πιο απότομος είναι ο δρόμος, τόσο περισσότερο καύσιμο θα καταναλώνει το όχημα, ελεγχόμενο πάντα από την ταχύτητα του. Το βέλτιστο εύρος ταχυτήτων για τη λιγότερη δυνατή κατανάλωση εμφανίζεται στα 30 – 35 mph (48 – 56 km/h) στον πιο απότομο δρόμο κλίσης 8 %. Το βέλτιστο αυτό εύρος αυξάνεται μονοτονικά όσο μειώνεται η κλίση της οδού, αγγίζοντας τα 80 – 85 mph (128 – 138 km/h) για κλίση -8 %. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, όταν ένα όχημα κινείται σε ανηφόρα, η αυξημένη ισχύς που απαιτείται για να ανέβει την ανηφορική κλίση πρέπει να αντισταθμιστεί συνεισφέροντας λιγότερη ενέργεια στην ταχύτητα του οχήματος, ώστε να διατηρήσει την ίδια συνολική απαιτούμενη ισχύ στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας του κινητήρα (Boriboonsomsin and Barth, 2009).

## 3.9 Τύπος και κατάσταση οδοστρώματος

Ο τύπος του οδοστρώματος είναι ένας από τους παράγοντες που συμβάλλει σημαντικά στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Διαφορετικός τύπους οδοστρώματος θα μπορούσε να έχει διαφορετικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Σε μια μελέτη, Ardekani και Sumitsawan (2010) συγκρίνονται δυο τύποι οδοστρωμάτων (εύκαμπτο ασφαλτικό και δύσκαμπτο από τσιμέντο Portland) σε στεγνή και υγρή κατάσταση με τις αντίστοιχες μέσες τιμές κατανάλωσης καυσίμου. Στον Πίνακα 3.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης (Ardekani and Sumitsawan, 2010).

Πίνακας 3.6 Μέση κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει του τύπου οδοστρώματος

| Τύπος οχήματος και είδος κίνησης | Μέση Κατανάλωση Καυσίμου ($10^{-3}$ gals/mile) | |
|---|---|---|
| | Στεγνή επιφάνεια | Υγρή επιφάνεια |
| PCC, σταθερή ταχύτητα | 42.2 | 45.6 |
| AC, σταθερή ταχύτητα | 51.3 | 55.3 |
| PCC, σταθερή επιτάχυνση | 240.2 | 226.1 |
| AC, σταθερή επιτάχυνση | 257.7 | 259.9 |

Παρατηρείται λοιπόν ότι για σταθερές ταχύτητες η κατανάλωση καυσίμου και σε υγρό και σε στεγνό ασφαλτικό οδόστρωμα είναι μεγαλύτερη από ότι σε δύσκαμπτο τσιμεντένιο τύπο οδοστρώματος. Φυσικά αυτό συμβαίνει για ταχύτητες μικρότερες των 48 km/h, αφού η έρευνα διεξήχθη για σταθερή ταχύτητα 48 km/h και για εύρος ταχυτήτων κατά την επιτάχυνση από 0 έως 48 km/h. Όπως ήταν αναμενόμενο σε κατάσταση επιτάχυνσης η κατανάλωση καυσίμου ήταν δυσανάλογα μεγαλύτερη σε σχέση με την κατάσταση σταθερής ταχύτητας και στους δυο τύπους οδοστρωμάτων. Σε υψηλότερες ταχύτητες παρόλο που δεν υπάρχουν ανάλογες έρευνες θεωρείται αποδεκτό η χρήση του διαγράμματος ταχυτήτων-εκπομπών CO2, όπως έχει αναλυθεί παραπάνω.

Προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση του τύπου του οδοστρώματος στο περιβάλλον καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του, έχουν αναπτυχθεί τα μοντέλα LCA (Life Cost Analysis) τα τελευταία χρόνια. Η βελτίωση της βιωσιμότητας στο σχεδιασμό του οδοστρώματος είναι υψίστης σημασίας για τα επιστημονικά και τεχνολογικά πεδία. Τις τελευταίες δεκαετίες, οι τάσεις είναι προς το σχεδιασμό πιο βιώσιμων οδοστρωμάτων τα οποία έχουν μικρότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση του τύπου του οδοστρώματος στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, τέθηκαν υπό σύγκριση οι επιπτώσεις των διαφόρων συστημάτων επικάλυψης του οδοστρώματος. Σε μια μελέτη συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των συστημάτων επικάλυψης τριών τύπων οδοστρωμάτων: του συμβατικού σκυροδέματος (Concrete), του ασφαλτικού (HMA) και του όλκιμου σκυροδέματος (Engineered Cementitious Composites) στις εκπομπές αέριων ρύπων μιας διάρκειας ζωής 40 ετών (Zhang et al., 2010). Αποδείχθηκε, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.7, ότι το σύστημα επικάλυψης ECC μειώνει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στον κύκλο ζωής κατά 32% και 37% σε σύγκριση με τα συστήματα PCC και HMA επικάλυψης αντίστοιχα.

Ο τύπος οδοστρώματος ECC είναι ένα ενισχυμένο με ίνες υλικό τσιμέντου, που χαρακτηρίζεται από υψηλή ολκιμότητα σε εφελκυσμό μέσω πολλαπλών μικρορωγμών που εμφανίζει όταν ασκείται σε αυτό τάση. Είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι υπό μακροχρόνιες συνθήκες φόρτισης, ο συγκεκριμένος τύπος οδοστρώματος αναπτύσσει κατά την κόπωση μικρές πολλαπλές ρωγμές, σε αντίθεση με τις μεγάλες ενιαίες ρωγμές του συμβατικού σκυροδέματος (Matsumoto et al., 2002). Αυτό συμβαίνει λόγω της αυξημένης πλαστιμότητας σε αντίθεση με την ψαθυρή συμπεριφορά που εμφανίζει το συμβατικό δύσκαμπτο οδόστρωμα. Τέλος, έπειτα από διεθνή μελέτη μέσω πειραμάτων κοπώσεως, αποδείχθηκε ότι το ECC σκυρόδεμα έχει τη δυνατότητα να αναπτύξει την ίδια αντοχή με αυτή του συμβατικού σκυροδέματος έχοντας μόλις το μισό πάχος πλάκας σκυροδέματος, γεγονός που ενισχύει το

ενδιαφέρον σε θέματα βιωσιμότητας και οικονομίας του οδοστρώματος (Qian and Li, 2008).

*Σχήμα 3.7 Ισοδύναμο CO2 συναρτήσει τριών τύπων οδοστρωμάτων*
*Πηγή : Zhang et al. ,2010*

Σε μια πιο πρόσφατη μελέτη, ένα μοντέλο LCA εφαρμόζεται από τους Yu και Lu για να διερευνήσει τρία συστήματα επικάλυψης συμπεριλαμβανομένου του σκυροδέματος Portland (PCC), της ασφάλτου (HMA) και του Crack Seal Overlay (CSOL), σε σύγκριση με ένα παλιό οδόστρωμα PCC (Yu and Lu, 2012). Ισοδύναμο CO2 χρησιμοποιείται για να εκφράσει τις παγκόσμιες επιπτώσεις του θερμοκηπίου για κάθε σύστημα επικάλυψης. Σύμφωνα με αυτή την έρευνα, το αποτύπωμα του άνθρακα επηρεάζεται κυρίως από το υλικό κατασκευής του οδοστρώματος, την κυκλοφοριακή συμφόρηση και τον τρόπο χρήσης του κάθε τύπου οδοστρώματος. Αποδείχθηκε λοιπόν όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.8 ότι τα συστήματα επικάλυψης PCC συμβάλλουν στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 43% και 31% λιγότερο από τα HMA και CSOL αντίστοιχα κατά τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος (Yu, 2012).

Πίνακας 3.8 Εκπομπές CO2 συναρτήσει τριών τύπων οδοστρωμάτων

| Τύπος Οδοστρώματος | Εκπομπές CO2 (τόνοι) |
|---|---|
| PCC | 3872 |
| HMA | 6733 |
| CSOL | 5598 |

Η κατάσταση του οδοστρώματος (υφή και ομαλότητα) μπορεί να επηρεάσει την κατανάλωση καυσίμου με δύο τρόπους. Πρώτον, η υφή του οδοστρώματος (τραχύτητα) μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει τη δύναμη τριβής που επηρεάζει την απαιτούμενη ενέργεια και συνεπώς την κατανάλωση καυσίμου. Δεύτερον, η ομαλότητα μπορεί να επηρεάσει τη συμπεριφορά οδήγησης, όπως για παράδειγμα η αναπόφευκτη απότομη επιβράδυνση και ακολουθούμενη μετά από αυτή επιτάχυνση. Στη σχέση 3.14 παρουσιάζεται ένα μοντέλο υπολογισμού των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σε μονάδες τόνων ανά χίλια μίλια (tones per 1000 miles) συναρτήσει της ομαλότητας (που εκφράζεται με το δείκτη IRI) και της υφής (που εκφράζεται από το μέσο βάθος προφίλ MPD) του οδοστρώματος (Wang et al., 2014).

$$Tailpipe\ C02\ emission\ factor\ (metric\ tones\ per\ 1000\ miles) = a_0 + a_1 * MPD\ (mm) + a_2 * IRI\ (m/km) \quad (3.14)$$

Ο σταθερός όρος $a_0$ καθώς και οι συντελεστές $a_1$ και $a_2$της υφής και της ομαλότητας του οδοστρώματος αντίστοιχα εξαρτώνται από τον τύπο του οδοστρώματος, το είδος της οδού και τον τύπο του οχήματος. Για τον τελικό υπολογισμό των ρύπων το αποτέλεσμα από την παραπάνω σχέση πολλαπλασιάζεται με την απόσταση σε μίλια που διανύθηκαν (Wang et al., 2014).

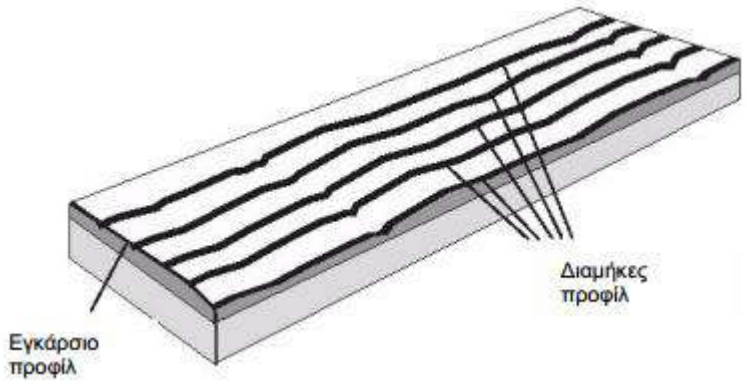
# 4

# ΟΜΑΛΟΤΗΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

## 4.1 Γενικά

Η ομαλότητα του οδοστρώματος ορίζεται γενικά ως η έκφραση των ανωμαλιών στην επιφάνεια του οδοστρώματος που επηρεάζουν δυσμενώς την ποιότητα κύλισης του οχήματος και κατ' επέκταση το χρήστη. Η ομαλότητα λοιπόν είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του οδοστρώματος επειδή επηρεάζει όχι μόνο την ποιότητα της κίνησης, αλλά και το κόστος καθυστέρησης, την κατανάλωση καυσίμου και το κόστος συντήρησης του οχήματος. Η Παγκόσμια Τράπεζα διαπίστωσε ότι η ομαλότητα του οδοστρώματος είναι ένας πρωταρχικός παράγοντας στις αναλύσεις και στις ισορροπίες που αφορούν την οδική ποιότητα και το κόστος του χρήστη (UMTRI, 1998).

Η ομαλότητα είναι συνυφασμένη με την κατατομή της επιφάνειας του οδοστρώματος (προφίλ). Η έννοια του «προφίλ» της επιφάνειας του οδοστρώματος κατά τη διαμήκη και εγκάρσια κατεύθυνση παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.




*Σχήμα 4.1 Επιφάνεια οδοστρώματος και κατατομές (προφίλ)*
*Πηγή : Ευαγγελίδης, 2004*

Με τον όρο ομαλότητα αναφερόμαστε κυρίως στην κατά μήκος επιπεδότητα. Η διαμήκης ή κατά μήκος ομαλότητα περιγράφεται από τους κυματισμούς της επιφάνειας του οδοστρώματος μήκους κυρίως μεταξύ 0.5 – 50 μέτρα (PIARC, 2002).

Σύμφωνα με τη μελέτη των Elbheiry et al. (2011) υπάρχουν κάποιοι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ομαλότητα του οδοστρώματος, όπως το πάχος των στρώσεων του οδοστρώματος, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των στρώσεων, ο αριθμός

κατασκευής, που προσδιορίζει τις αλλαγές στη δομή του οδοστρώματος που προκαλούνται από θεραπείες αποκατάστασης ή από την εφαρμογή της θεραπείας συντήρησης, ο κυκλοφοριακός φόρτος και η διάρκεια ζωής του οδοστρώματος.

Έλλειψη ομαλότητας ορίζεται ως το σύνολο των κατά μήκος αποκλίσεων του οδοστρώματος από την πραγματική επίπεδη επιφάνεια με χαρακτηριστικές διαστάσεις που επηρεάζουν τη δυναμική συμπεριφορά των οχημάτων, τη δυναμική των φορτίσεων του οδοστρώματος αλλά και την ποιότητα κύλισης (AASHO, 1962). Οι απώλειες στην επιπεδότητα του οδοστρώματος οφείλεται σε πληθώρα λόγων. Για παράδειγμα οι μικροί κυματισμοί μήκους μικρότερου των 3 μέτρων οφείλονται στις ατέλειες της επιφανειακής στρώσης, ενώ μεγαλύτερου μήκους των 10 μέτρων έχουν τις ρίζες τους στις υποκείμενες στρώσης βάσης και υπόβασης (Λοΐζος και Πλατή, 2015). Πιο συγκεκριμένα, κατασκευαστικά λάθη κατά τη διάστρωση των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος, ανεπάρκεια ποιότητας υλικού, θέματα ηλικίας του οδοστρώματος, συνθηκών και τα φορτίων κυκλοφορίας καθώς επίσης και οι γενικότερες συνθήκες περιβάλλοντος επιδρούν άμεσα στην κατάσταση ομαλότητας του οδοστρώματος.

Άμεσες συνέπειες που αφορούν στην έλλειψη ομαλότητας σε ένα υφιστάμενο οδόστρωμα είναι οι εξής. Αρχικά, όπως έχει ήδη αναφερθεί, υποβάθμιση της κατάστασης της ομαλότητας συνεπάγεται μείωση ελέγχου του οχήματος, εφόσον αυξάνονται το πλήθος και το εύρος των μεταβολών των κατακόρυφων δυνάμεων αλλά και οι πλευρικές δυνάμεις μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος (Λοΐζος και Πλατή, 2015). Σε περιπτώσεις όπου οι υψηλές πλευρικές δυνάμεις είναι αναγκαίες ή όταν ένα όχημα απαιτεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο πλευρικής τριβής για να κάνει έναν ελιγμό, αυτή η απώλεια της δύναμης θα μπορούσε να οδηγήσει σε απώλεια του ελέγχου του οχήματος. Ακόμη, μειωμένες τιμές ομαλότητας έχουν άμεσο αντίκτυπο στην τριβή, μειώνοντάς την, αφού είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη συχνότητα που υποβαθμίζεται η ομαλότητα (Λοΐζος και Πλατή, 2015).

Επιπλέον, η μείωση του επιπέδου ομαλότητας έχει άμεσο αντίκτυπο στην κατανάλωση καυσίμου, άρα και στο λειτουργικό κόστος του οχήματος, όπως αναφέρουν και οι Barnes και Langworthy *«αύξηση 5,5% στο κόστος λειτουργίας του οχήματος ανά μίλι λόγω της επιδείνωσης της ομαλότητας του οδοστρώματος»* (Barnes and Langworthy, 2003). Επίσης, ελάχιστα έχουν αναφερθεί σχετικά με τον τρόπο που η έλλειψη ομαλότητας επηρεάζει το χρόνο ταξιδιού. Οι οδηγοί των οχημάτων μπορούν να επιλέξουν να οδηγούν πιο αργά πάνω από μια επιφάνεια που έχει επιδεινωθεί από ότι να κινούνταν πάνω από μια πιο ομοιόμορφη επιφάνεια. Ωστόσο, έχει υποτεθεί ότι με σύγχρονα οχήματα τα αποτελέσματα μειώνονται και οι ταχύτητες του οχήματος δύναται να διατηρηθούν, αλλά με υψηλότερο κόστος λειτουργίας.

Όσο αναφορά το όχημα και κατ' επέκταση το χρήστη, μείωση ομαλότητας συνεπάγεται αναπήδηση των τροχών, πιθανή εμφάνιση φθορών στην ανάρτηση και στα ελαστικά, γεγονός που θέτει σε κίνδυνο την άνεση και την ασφάλεια του χρήστη. Η ανάρτηση του οχήματος διαδραματίζει επίσης σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα της ομαλότητας στην ασφάλεια. Πέρα από τα συμβατικά ζητήματα, η συχνότητα μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις για όλα τα είδη οχημάτων που μπορούν να συμμετέχουν σε σοβαρά ατυχήματα. Όταν η έλλειψη ομαλότητας είναι σε ένα επαναλαμβανόμενο εύρος, μπορεί να συμβούν τα δύο εξής αποτελέσματα. Αρχικά, αν η συχνότητα είναι

σε ισορροπία με το όχημα, ένας τραχύς δρόμος μπορεί να φαίνεται ομαλός. Αν όμως η τραχύτητα δεν είναι σε ισορροπία με τη φυσική συχνότητα, η τραχύτητα μπορεί να μεγεθυνθεί. Αυτό το φαινόμενο προκαλεί ένα πρόβλημα, κατά το οποίο οι επαναλαμβανόμενες ανοδικές δυνάμεις ενισχύουν συνεχώς τις ήδη υπάρχουσες προς τα πάνω δυνάμεις του οχήματος. Όταν συμβεί αυτό, το όχημα αρχίζει να κινείται πάνω και κάτω ως προς το οδόστρωμα σε συνεχώς αυξανόμενες κινήσεις μέχρι τα ελαστικά αυτοκινήτων ή φορτηγών να «αφήσουν» πραγματικά το οδόστρωμα και να γίνουν αερομεταφερόμενα. Μια τέτοια κατάσταση μπορεί να προκαλέσει πολλά προβλήματα που σχετίζονται με στροφές, πέδηση και απώλεια του υλικού από την κλίνη του οχήματος. Τα μεγάλα φορτηγά που είναι ελαφρώς φορτισμένα πλήττονται περισσότερο από αυτή την κατάσταση και θεωρούνται άκρως επικίνδυνα, αφού είναι επιρρεπή στην εμφάνιση του φαινομένου του «απολεσθέντος φορτίου κατά την οδήγηση» (Burns, 1981). Ωστόσο και τα επιβατικά αυτοκίνητα μπορούν επίσης να εμφανίσουν παρόμοια προβλήματα.

Έλλειψη ομαλότητας λόγων λακκούβων στο οδόστρωμα αποτελεί ένα βασικό παράγοντα οδικών ατυχημάτων. Σύμφωνα με τον Baker (Baker, 1975) οι λακκούβες στο οδόστρωμα «*πρέπει να είναι ένα πόδι (1 feet) ή περισσότερο σε μήκος και σε πλάτος από ό,τι ένα ελαστικό ώστε να είναι επικίνδυνες*». Σε μια μελέτη από τους Ivey και Griffin (Ivey and Griffen, 1976) κατατάχθηκαν οι λακκούβες δέκατες όγδοες από είκοσι διαταραχές του οδοστρώματος. Οι οδηγοί, ωστόσο, κατέταξαν τις λακκούβες τρίτες από δεκατρείς οδικές διαταραχές (Klein, 1976). Για να διευκρινιστεί αυτή η εμφανής διαφορά στις απόψεις, πραγματοποιήθηκε μια σειρά ελεγχόμενων πειραμάτων αλληλεπίδρασης οχημάτων-λακκούβας με οπές διαμέτρου 3 ποδιών και 7 ιντσών βάθους (Zimmer and Ivey, 1983). Ως προς το βάθος, η σταθερότητα των οχημάτων δεν επηρεάστηκε, δηλαδή η τροχιά του οχήματος δεν άλλαξε. Ο μόνος κίνδυνος που σχετιζόταν με την επιρροή των οπών ήταν η ζημιά στα ελαστικά και στις ζάντες, με τη σχετική δυνατότητα για μια παρακέντηση. Η μεγαλύτερη όμως επιρροή των οπών στην ασφάλεια αποτελεί ο κίνδυνος που προκαλείται από τους οδηγούς που προσπαθούν να τις αποφύγουν.

## 4.2 Τρόποι μέτρησης ομαλότητας

Ένα εύρος εξοπλισμού έχει εξελιχθεί με την πάροδο του χρόνου για τη μέτρηση της ομαλότητας των οδοστρωμάτων. Οι μετρήσεις αυτές εκτελούνται για να παρακολουθείται η κατάσταση του οδικού δικτύου, που χρησιμοποιείται κατ' επέκταση σε ένα σύστημα διαχείρισης οδοστρωμάτων (ΣΔΟ) και στην αξιολόγηση της ποιότητα κύλισης των νέων ή υφιστάμενων οδοστρωμάτων. Δεδομένα προφίλ που λαμβάνονται από προφιλόμετρα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη διάγνωση της κατάστασης συγκεκριμένων χώρων, να καθοριστούν τα κατάλληλα διορθωτικά μέτρα και να μελετηθεί η γενικότερη κατάστασή τους σε επίπεδο έρευνας. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται διεθνώς για την καταγραφή της ομαλότητας διακρίνεται στις ακόλουθες πέντε βασικές κατηγορίες (NCHRP, 2002) :

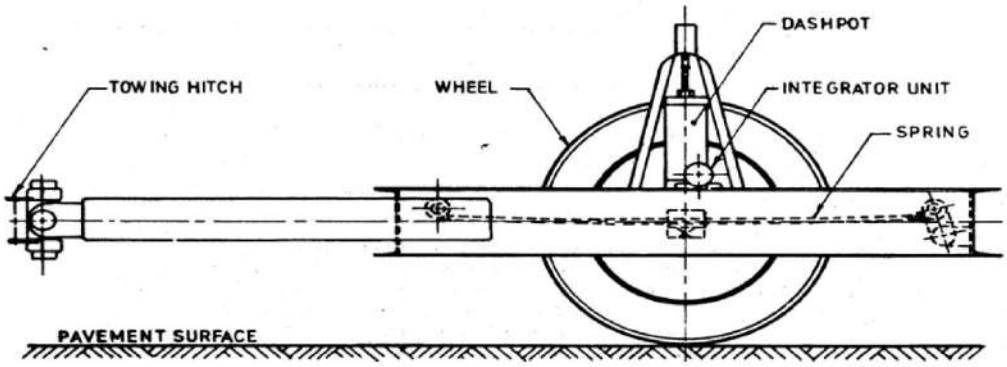
- Συστήματα καταγραφής της μηχανικής απόκρισης (Response Type Road Roughness Measuring Systems : RTRRMS)
- Υψηλής ταχύτητας προφιλόμετρα (High speed inertial profilers)
- Προφιλογράφοι (Profilers)
- «Ελαφρά» προφιλόμετρα (Lightweight profilers)
- Χειροκίνητες συσκευές (Manual devices)

### 4.2.1 Συστήματα καταγραφής μηχανικής απόκρισης

Τα συστήματα καταγραφής της μηχανικής απόκρισης μετρούν την απόκριση του δρόμου στο όχημα ή σε ένα ειδικό τρέιλερ χρησιμοποιώντας ένα μετατροπέα. Αυτοκινούμενα οχήματα ή τυπικά τρέιλερ έχουν χρησιμοποιηθεί για να στηρίξουν τις συσκευές τύπου απόκρισης. Τα συστήματα οχημάτων συσσωρεύουν την κάθετη κίνηση του πίσω άξονα του αυτοκινήτου σε σχέση με το πλαίσιο, ενώ τα συστήματα τρέιλερ συσσωρεύουν την κίνηση του ρυμουλκούμενου τρέιλερ σε σχέση με το πλαίσιο. Μια από τις πρώτες συσκευές τύπου απόκρισης ήταν το *Bureau of Public Roads (BPR) Roughometer*. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκαν μια ποικιλία συσκευών τύπου απόκρισης όπως το Cox Roadmeter, το PCA Roadmeter και το Maysmeter. Οι συσκευές αυτές μετρούν δρόμους σε ταχύτητες έως και 80 km/h (50 mph). Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν προβλήματα που αφορούν την ικανότητα αναπαραγωγής και φόρτωσης των δεδομένων που λαμβάνονται με τα συστήματα τύπου απόκρισης, ένας λόγος που ήταν τόσο δημοφιλής στο παρελθόν είναι ότι παρέχουν έναν οικονομικό τρόπο απόκτησης της ομαλότητας των οδικών τμημάτων. Τα μέτρα που παράγουν ταιριάζουν με την εμπειρία των μηχανικών για τον προσδιορισμό της ποιότητας του οδοστρώματος με ουσιαστικό τρόπο. Παρακάτω παρουσιάζονται οι δυο βασικές συσκευές μέτρησης ομαλότητας τύπου απόκρισης.

#### 4.2.1.1 Bureau of Public Roads (BPR) Roughometer

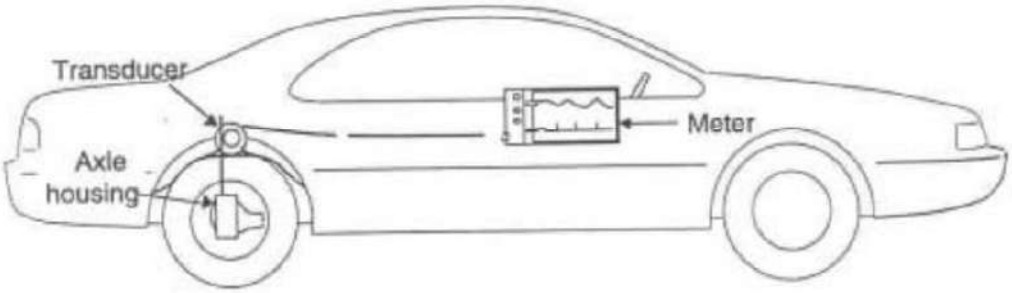
Το BPR Roughometer εισήχθη για πρώτη φορά το 1925 και αναγνωρίζεται ως η καλύτερη συσκευή τραχύτητας υψηλής ταχύτητας διαθέσιμη εκείνη τη στιγμή. Το BPR Roughometer αποτελείται από ένα ενιαίο ρυμουλκούμενο τροχό που ρυμουλκείται από ένα αυτοκίνητο ή ένα ελαφρύ φορτηγό. Ο τροχός που τοποθετείται στο ρυμουλκούμενο υποστηρίζεται από φυλλωτά ελατήρια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Διαφοροποιήσεις στην επιφάνεια του οδοστρώματος αναγκάζουν τον τροχό να κινείται σε σχέση με το πλαίσιο του οχήματος. Αυτές οι συσσωρευμένες κατακόρυφες κινήσεις και η ομαλότητα του οδοστρώματος δίδεται σε όρους ίντσες ανά μίλι. Αυτή η συσκευή λειτουργεί με ταχύτητα δοκιμής 32 km/h για να συλλέξει μετρήσεις. Τα δεδομένα που λαμβάνονται με αυτή τη συσκευή είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία, στην κατάσταση των εδράνων και στα μηχανικά εξαρτήματα. Επίσης έχει μια ηχηρή επίδραση συχνότητας που παράγει λανθασμένα αποτελέσματα. Λόγω της αργής ταχύτητας λειτουργίας του εξοπλισμού αυτού, έγιναν πολλές τροποποιήσεις εξοπλισμού ώστε να αυξηθεί η ταχύτητα λειτουργίας του. Ωστόσο, τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά τροποποιήθηκαν στις υψηλές ταχύτητες και η χρήση της συσκευής σταδιακά μειώθηκε (NCHRP, 2002).




*Σχήμα 4.2 Διάταξη του BPR Roughometer*
*Πηγή : Bhagavan et al., 2012*

4.2.1.2 Maysmeter

Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούνταν ευρέως για τη μέτρηση ομαλότητας του οδοστρώματος από 1960 μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1980. Αυτή η συσκευή τοποθετήθηκε σε ένα συνηθισμένο επιβατικό αυτοκίνητο ή ελαφρύ φορτηγό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Η Maysmeter μετρά τις κινήσεις ανάρτησης του οχήματος καταγράφοντας τη σχετική κίνηση μεταξύ του άξονα και του σώματος. Το μέτρο της ομαλότητας που λαμβάνεται με αυτή τη συσκευή είναι ίντσες των συνολικών κραδασμών της ανάρτησης, διαιρούμενο με τη διανυόμενη απόσταση και αναφέρεται σε μονάδες ίντσες ανά μίλι. Το μέτρο της απόκρισης του οχήματος που μετράται με την Maysmeter είναι πολύ παρόμοιο με το περιεχόμενο συχνότητάς του στις επιταχύνσεις στο αμάξωμα του οχήματος, έτσι ώστε να συσχετίζεται ιδιαίτερα για να οδηγήσει τους κραδασμούς (NCHRP, 2002).




*Σχήμα 4.3 Διάταξη του Maysmeter*
*Πηγή : NCHRP, 2002*

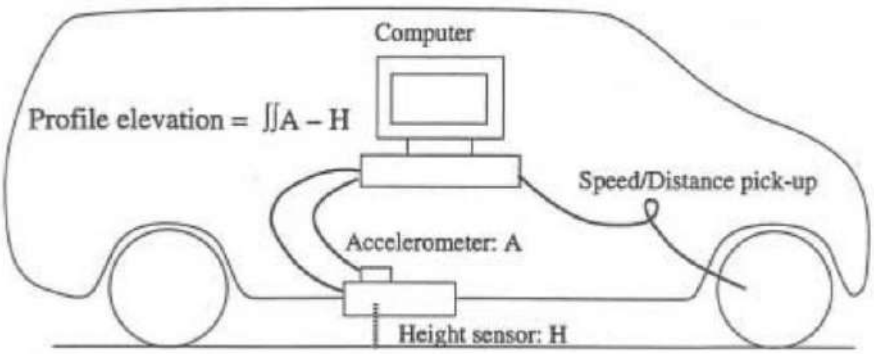
Το μειονέκτημα ενός RTRRM συστήματος είναι ότι μετρημένη κίνηση του σώματος του άξονά του έναντι του χρόνου εξαρτάται από τη δυναμική του συγκεκριμένου οχήματος μέτρησης, η οποία οδηγεί σε δύο ανεπιθύμητα αποτελέσματα (UMTRI, 1998):

- οι μέθοδοι μέτρησης ομαλότητας δεν είναι σταθεροί με το χρόνο. Μετρήσεις που γίνονται σήμερα με οδικά μέτρα δεν μπορούν να συγκριθούν με ασφάλεια με αυτές που έγιναν πριν από αρκετά χρόνια.
- οι μετρήσεις ομαλότητας δεν είναι μεταφερόμενες. Μετρήσεις οδικών μέτρων που γίνονται από το ένα σύστημα σπάνια μπορούν να αναπαραχθούν από ένα άλλο.

### 4.2.2 Υψηλής ταχύτητας προφιλόμετρα

Υψηλής ταχύτητας προφιλόμετρα καταγράφουν το πραγματικό προφίλ της επιφάνειας του οδοστρώματος. Αυτά τα μηχανήματα συλλέγουν δεδομένα προφίλ σχετικά με τα οδοστρώματα σε ταχύτητες αυτοκινητόδρομου. Το πρώτο υψηλής ταχύτητας αδρανειακό profiler αναπτύχθηκε από τους Elson Spangler και William Kelley στην General Motors Research Corporation (NCHRP, 2002). Πρόωρα προφιλόμετρα ανίχνευαν το ύψος του οχήματος σε σχέση με το έδαφος χρησιμοποιώντας έναν εφοδιασμένο με όργανα τροχό που διέσχιζε κατά μήκος μια διαδρομή. Οι τροχοί αυτοί ήταν εύθραυστοι και απαιτούνταν δοκιμές σε χαμηλές ταχύτητες για να αποφευχθεί η αναπήδηση. Όλα τα προφιλόμετρα που πωλούνται σήμερα χρησιμοποιούν αισθητήρες που βρίσκονται επί του οχήματος αντί των τροχών-ακολούθων (NCHRP, 2002). Μια διάταξη του υψηλής ταχύτητας προφιλομέτρου φαίνεται στο Σχήμα 4.4.

.




*Σχήμα 4.4 Διάταξη του υψηλής ταχύτητας προφιλόμετρου*
*Πηγή : NCHRP, 2002*

Τα κύρια συστατικά ενός υψηλής ταχύτητας προφιλομέτρου είναι οι αισθητήρες ύψους, τα επιταχυνσιόμετρα, το σύστημα μέτρησης απόστασης, ο εξοπλισμός (hardware) του και το λογισμικό (software) του υπολογιστή για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών της οδού (NCHRP, 2002). Οι αισθητήρες ύψος καταγράφουν το ύψος με την επιφάνεια οδοστρώματος από το όχημα. Τα επιταχυνσιόμετρα που βρίσκονται στην κορυφή των αισθητήρων ύψος καταγράφουν την κατακόρυφη επιτάχυνση του οχήματος. Τα δεδομένα από τα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του ύψους του οχήματος σε σχέση με ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Το σύστημα μέτρησης απόστασης παρακολουθεί την απόσταση σε σχέση

με ένα σημείο εκκίνησης αναφοράς. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που καταγράφονται από το σύστημα μέτρησης απόστασης, τον αισθητήρα ύψους και το επιταχυνσιόμετρο, ένα πρόγραμμα υπολογιστή υπολογίζει το προφίλ της επιφάνειας του οδοστρώματος. Οι τύποι αισθητήρα ύψους μη επαφής που χρησιμοποιούνται σε προφιλόμετρα σήμερα είναι είτε με λέιζερ, είτε με υπερήχους, είτε οπτικοί ή υπέρυθροι (NCHRP, 2002).

Αισθητήρες υπερήχων ήταν ο πιο κοινός τύπος των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στη δεκαετία του 1980. Ωστόσο, λόγω των προβλημάτων του συγκεκριμένου τύπου αισθητήρων, μειώθηκε η χρήση τους σημαντικά κατά τα τελευταία χρόνια. Προς το παρόν οι αισθητήρες λέιζερ είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες ύψους στα προφιλόμετρα. Οι συσκευές αυτές μπορούν επίσης να εξοπλιστούν με ένα φωτοκύτταρο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αυτόματη συλλογή δεδομένων. Δύο τύποι φωτοκύτταρων είναι διαθέσιμοι, οι κάθετοι και οι οριζόντιοι. Τα κάθετα φωτοκύτταρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ξεκινήσει αυτόματα η συλλογή δεδομένων, όταν το φωτοκύτταρο ανιχνεύει μια λευκή αντανακλαστική ταινία που τοποθετείται στο κέντρο της λωρίδας της διαδρομής. Τα οριζόντια φωτοκύτταρα χρησιμοποιούνται με έναν κώνο κυκλοφορίας που έχει ανακλαστικές σημάνσεις για να ξεκινήσει η συλλογή δεδομένων. Ο κώνος της κυκλοφορίας τοποθετείται «στον ώμο» της θέσης όπου η συλλογή δεδομένων πρέπει να ξεκινήσει και όταν το οριζόντιο φωτοκύτταρο ανιχνεύει τον κώνο, η συλλογή δεδομένων ξεκινά (NCHRP, 2002).

Επί του παρόντος, μια ποικιλία από υψηλής ταχύτητας προφιλόμετρα είναι διαθέσιμα. Οι κατασκευαστές που κατασκευάζουν σήμερα τέτοια προφιλόμετρα είναι οι εξής : Dynatest, International Cybernetics Corporation (ICC), Infrastructure Management Services (IMS), K.J. Law, Pathway και Roadware (NCHRP, 2002). Πολλά από αυτά τα συστήματα προφίλ περιλαμβάνουν έναν κεντρικό αισθητήρα, του οποίου η ανύψωση χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τις αυξήσεις που μετρώνται κατά μήκος των διαδρομών των τροχών για να υπολογίσει ένα βάθος αυλάκωσης. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει και το σύστημα Road Surface Profiler (RSP) του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5 (Λοΐζος και Πλατή, 2015).

*Σχήμα 4.5 Σύστημα όχημα - Laser Profiler του ΕΜΠ*
*Πηγή : Λοΐζος και Πλατή., 2015*

Μερικοί από τους κατασκευαστές εξοπλισμού προσφέρουν σύστημα προφίλ με πέντε αισθητήρες για τον υπολογισμό του βάθους αυλάκωσης. Σε αυτά τα συστήματα, οι δύο επιπλέον αισθητήρες που τοποθετούνται έξω από το αριστερό και το δεξί τροχό (NCHRP, 2002). Οι περισσότεροι από τους κατασκευαστές εξοπλισμού προφίλ μπορούν να δημιουργήσουν προσαρμοσμένα συστήματα που θα συλλέξουν μια ποικιλία των δεδομένων εκτός από το προφίλ δεδομένων. Μερικά από αυτά τα συστήματα προφίλ είναι εξοπλισμένα με βιντεοκάμερες που μπορούν να καταγράψει αρκετές προοπτικές του δρόμου, και αυτά τα βίντεο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκτιμηθεί η κατάσταση του δρόμου, καθώς και άλλα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος.

### 4.2.3 Προφιλογράφοι

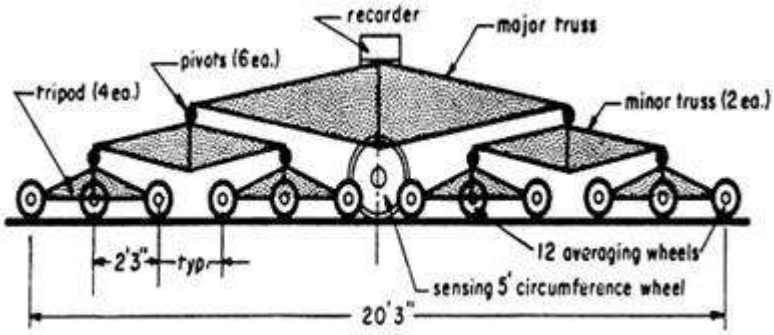
Πολυάριθμα μοντέλα προφιλογράφου έχουν χρησιμοποιηθεί από το 1900. Μια τέτοια συσκευή αποτελείται από μια άκαμπτο δοκό ή πλαίσιο με ένα σύστημα τροχών υποστήριξης σε κάθε άκρο και ένα κεντρικό τροχό. Οι τροχοί στήριξης στα άκρα δημιουργούν ένα σύνολο δεδομένων από το οποίο μπορούν να αξιολογηθούν οι αποκλίσεις από το κέντρο του τροχού. Το κέντρο του τροχού συνδέεται με ένα καταγραφέα ταινίας ή με έναν υπολογιστή που καταγράφει την κίνηση του κέντρου του τροχού από το σύνολο των δεδομένων. Ο προφιλογράφος ωθείται ή ρυμουλκείται κατά μήκος του οδοστρώματος όπου μπορούν να μετρηθούν 3.2 έως 4.8 χιλιόμετρα (2 έως 3 μίλια) σε μια ώρα (NCHRP, 2002).

Μηχανικοί προφιλογράφοι καταγράφουν τα δεδομένα σε έναν καταγραφέα ταινίας. Το αποτέλεσμα από τον καταγραφέα ταινίας πρέπει να αναλυθεί, προκειμένου να ληφθούν τα αποτελέσματα ομαλότητας. Η αξιολόγηση του αποτελέσματος από τον καταγραφέα ταινίας μπορεί να γίνει είτε χειροκίνητα είτε ηλεκτρονικά (NCHRP, 2002). Στη χειροκίνητη μέθοδο, ένας τεχνικός αξιολογεί το αποτέλεσμα για να καθορίσει τα αποτελέσματα ομαλότητας και τα σημεία κραδασμών και χτυπημάτων. Στην ηλεκτρονική μέθοδο, το αποτέλεσμα σαρώνεται και η αναγωγή των δεδομένων εκτελείται από ένα πρόγραμμα υπολογιστή και έπειτα τα αποτελέσματα μπορούν να εκτυπωθούν.

Στα μέσα της δεκαετίας του 1980, ο James Cox and Sons εισήγαγε ένα μηχανογραφημένο προφιλογράφο που καταγράφονται οι μετρήσεις σε έναν υπολογιστή (NCHRP, 2002). Αυτά τα μηχανογραφημένα συστήματα μπορούν να αναλύσουν τα δεδομένα με τη χρήση προγραμμάτων ηλεκτρονικού υπολογιστή, να δημιουργήσουν το δείκτη Προφίλ του τμήματος της οδού και να αναφέρουν τα «υψηλά σημεία» στο προφίλ. Ο μηχανογραφημένος προφιλόγραφος εξάλειψε την ανάγκη για την ανάλυση του προφίλ στο γραφείο μετά τη δοκιμή που διεξήχθη στην οδό. Ήταν πια σε θέση να εκτελέσει τη μείωση του ίχνους στην οδό αμέσως μετά τη δοκιμή. Αυτό αύξησε σημαντικά την παραγωγικότητα και μείωσε τη μεταβλητότητα σημαντικά.

Οι προφιλογράφοι που είναι σήμερα σε χρήση μπορούν να ταξινομηθούν σε δυο κατηγορίες με βάση τη διαμόρφωση του τροχού υποστήριξης: California profilographs και profilographs Rainhart (NCHRP, 2002). Στα σχήματα 4.6 και 4.7 απεικονίζονται οι δυο κατηγορίες προφιλογράφων.

*Σχήμα 4.6 California Profilograph*
*Πηγή : arkansashighways.com*




*Σχήμα 4.7 Διάταξη Profilograph Rainhart*
*Πηγή : pavemaintenance.wikispaces.com*

### 4.2.4 Ελαφρά προφιλόμετρα

Ελαφρά προφιλόμετρα αναπτύχθηκαν κατά κύριο λόγο για να καταγράψουν το προφίλ των νέων τοποθετημένων δύσκαμπτων τσιμέντου Portland οδοστρωμάτων (NCHRP, 2002). Ο όρος ελαφρύ προφιλόμετρο χρησιμοποιείται για συσκευές στις οποίες ένα σύστημα προφίλ έχει εγκατασταθεί σε ένα ελαφρύ όχημα, όπως ένα όχημα του γκολφ ή όχημα παντός εδάφους. Το σύστημα προφίλ σε ένα ελαφρύ προφιλόμετρο είναι παρόμοιο με το σύστημα προφίλ ενός προφιλομέτρου υψηλής ταχύτητας και αποτελείται από αισθητήρα ύψους, επιταχυνσιόμετρο, και σύστημα μέτρησης απόστασης (NCHRP, 2002), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8.

*Σχήμα 4.8 Lightweight profiler*
*Πηγή : instrotek.com*

Το ελαφρύ βάρος αυτών των συσκευών καθιστά δυνατή την απεικόνιση του προφίλ προσφάτως τοποθετημένων δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Τα προφίλ που καταγράφονται από αυτές τις συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ενός δείκτη ομαλότητας, όπως IRI, ή να χρησιμοποιήσουν τα δεδομένα για την προσομοίωση ενός προφίλ και να πάρει το δείκτη Προφίλ (PI).

### 4.2.5 Χειροκίνητες συσκευές

Τα χειροκίνητα συστήματα της αποτύπωσης της ομαλότητας των οδοστρωμάτων συνοψίζονται σε τρεις κατηγορίες : στην τοπογραφική αποτύπωση της επιφάνειας των οδοστρωμάτων Road and Level Method, στην συσκευή Dipstick (βλ. Σχήμα 4.9) και στη συσκευή Walking Profiler (βλ. Σχήμα 4.10) (NCHRP, 2002). Η τοπογραφική μέθοδος σε συνδυασμό με υψηλή πυκνότητα απαιτούμενων σημείων αποτύπωσης είναι αναμφίβολα η πιο ακριβή μέθοδος καταγραφής της γεωμετρικής κατατομής της επιφάνειας του οδοστρώματος. Όμως το μεγάλο πλήθος των απαιτούμενων σημείων καθιστά αυτή τη διαδικασία αρκετά χρονοβόρα και δαπανηρή.

*Σχήμα 4.9 Συσκευή Dipstick*
*Πηγή : CSIR, Central Road Research Institute*

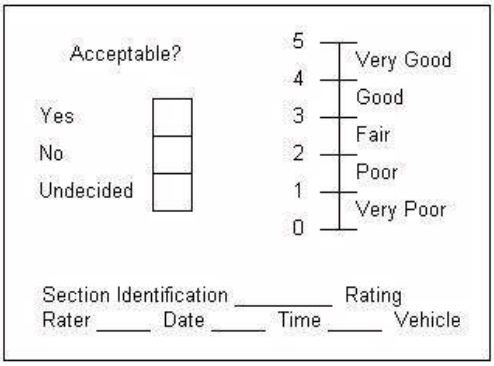
*Σχήμα 4.10 Συσκευή Walking Profiler*
*Πηγή : arrb group*

Ανάλογα είναι και τα μειονεκτήματα και της συσκευής Dipstick ενώ η Walking Profiler έχει το θετικό ότι απαιτεί έναν μόνο χειριστή σε ταχύτητα βαδίσματος. Τέλος η τρίτη αυτή συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη βαθμονόμηση των προφιλομέτρων υψηλής ταχύτητας (Λοΐζος και Πλατή, 2015).

## 4.3 Δείκτης IRI

Η ομαλότητα του οδοστρώματος επηρεάζει άμεσα το κόστος χρήσης του οδικού δικτύου και είναι μία από τις κύριες παραμέτρους της αξιολόγησης της κατάστασης του οδοστρώματος. Αυτή η παράμετρος βοηθά στην αξιολόγηση των δαπανών που προκαλούνται από την κατάσταση του οδικού δικτύου και τα οικονομικά οφέλη των έργων ανοικοδόμησης. Σήμερα, η ομαλότητα είναι συνήθως ποσοτικά ορισμένη χρησιμοποιώντας το Διεθνή Δείκτη Ομαλότητας (International Roughness Index),διότι είναι ο πιο διαδεδομένος, παρόλα αυτά αναφέρονται ιστορικά δυο άλλοι δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στο παρελθόν.

Το οδικό πείραμα AASHO (National Cooperative Highway Research, 1972) ανέπτυξε ένα ορισμό του οδοστρώματος συντήρησης, τη βαθμολογία παρούσας εξυπηρετικότητας (Present Serviceability Rating), που βασίζεται στην ατομική παρατήρηση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11. Ο δείκτης PSR ορίζεται ως «η απόφαση του παρατηρητή ως προς την τρέχουσα ικανότητα του οδοστρώματος για να εξυπηρετήσει την κίνηση που έχει σκοπό να εξυπηρετήσει» (National Cooperative Highway Research, 1972). Για να ληφθούν οι βαθμολογίες της δοκιμής AASHO, παρατηρητές οδήγησαν γύρω από τις πίστες δοκιμών και βαθμολόγησαν τη διαδρομή με τη χρήση της ποσοτικής κλίμακας που παρουσιάζεται και στο παρακάτω σχήμα. Αυτή η υποκειμενική κλίμακα κυμαινόταν από 5 (άριστα) έως 0 (ουσιαστικά αδιάβατο οδόστρωμα). Επειδή ο δείκτης PSR βασίζεται σε ερμηνείες επιβατών ως προς την ποιότητα κύλισης, εκφράζει κατά μια έννοια την ομαλότητα επειδή αυτή καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα της κίνησης.

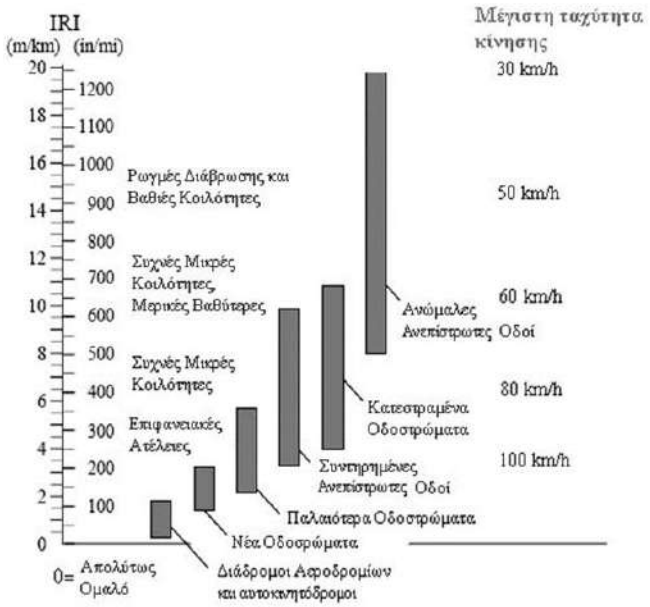



*Σχήμα 4.11 Ερωτηματολόγιο PSR*
*Πηγή : National Cooperative Highway Research, 1972*

Όμως ο προσδιορισμός της επιφανειακής κατάστασης του οδοστρώματος συναρτήσει του PSR εμπεριείχε σε μεγάλο βαθμό υποκειμενικότητα, δε θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την ποσοτικοποίηση της ομαλότητας. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε ο Δείκτης Παρούσας Εξυπηρετικότητας (Present Serviceability Index). Ο δείκτης αυτός προέκυψε χρησιμοποιώντας τα ίδια οδοστρώματα σε συνδυασμό με αντικειμενικές μετρήσεις ορισμένων φυσικών παραμέτρων της επιφάνειάς τους, όπως διακυμάνσεις εγκάρσιας κλίσης, ρηγματώσεις, βάθος αυλάκωσης και ποσοστό επιφάνειας που έχει επισκευαστεί με μπαλώματα (Λοΐζος και Πλατή, 2015). Ο δείκτης αυτός λαμβάνει τιμές από 0 έως 5. Συνήθως η τιμή PSI = 2.5 θεωρείται ως επίπεδο

προειδοποίησης για μελλοντική αποκατάσταση ενώ όταν ο δείκτης λάβει τιμές κάτω του 2.0 τότε απαιτείται άμεση αποκατάσταση (Λοΐζος και Πλατή, 2015). Παρόλα που ο δείκτης PSI παρέχει μια συνολική πληροφορία στο διαχειριστή για την κατάσταση του δικτύου, δεν είναι κατάλληλος για τον ακριβή προσδιορισμό της κατάστασης της ομαλότητας σε ένα οδόστρωμα, οπότε δεν προτιμάται για την αξιολόγηση της ομαλότητας ειδικά σε επίπεδο έργου.

Η ομαλότητα λοιπόν χαρακτηρίζεται από το Διεθνή Δείκτη Ομαλότητας (International Roughness Index: IRI). Αυτός εκφράζει μια διεθνώς εγκεκριμένη τιμή που χαρακτηρίζει την οδική άνεση και υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το άθροισμα των κάθετων ταλαντώσεων του σκελετού του οχήματος ανά οδικό τμήμα (συνήθως 100 m) και η μονάδα μέτρησής του είναι χιλιοστά ανά μέτρο (mm/m), αλλά στην πράξη εμφανίζεται σε διάφορες άλλες μονάδες όπως μέτρα ανά χιλιόμετρο ή ίντσες ανά χιλιόμετρο. Προσδιορίζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος ενός δρόμου και γι' αυτό μπορεί να μετρηθεί με κάθε ισχύον μηχάνημα καταγραφής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας των οδοστρωμάτων (Gillespie, 1992). Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζεται μια κλίμακα των τιμών του δείκτη IRI.

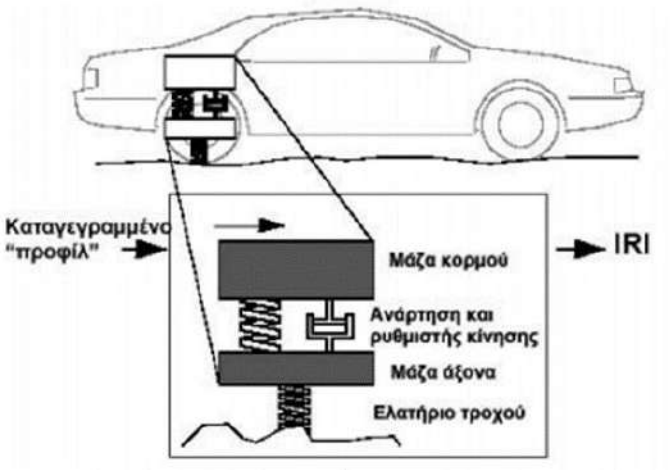



*Σχήμα 4.12 Εύρος τιμών IRI συναρτήσει διάφορων τύπων οδοστρωμάτων και των ταχυτήτων προσπέλασής τους*
*Πηγή : Λοΐζος και Πλατή, 2015*

Μία τιμή IRI 0 m/km σε συγκεκριμένο διάστημα δείγματος σημαίνει ότι η επιφάνεια του οδοστρώματος είναι εντελώς επίπεδη. Θεωρητικά δεν υπάρχει άνω όριο τιμών IRI, αν και πρακτικά τιμές που ξεπερνούν τα 8 m/km αφορούν οδόστρωμα το οποίο είναι αδιάβατο, εκτός βέβαια των περιπτώσεων όπου η ταχύτητα κίνησης είναι πολύ μικρή (Λοΐζος κ.α., 2002).

Το προσομοίωμα του «ενός τετάρτου αυτοκίνητου» (Quarter Car Model) που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του δείκτη IRI αναφέρεται στη μια γωνία (ένα τέταρτο) ενός οχήματος. Αποτελείται από ένα τροχό με ένα κατακόρυφο ελατήριο, τη

μάζα του άξονα που υποστηρίζει ο τροχός, μία ανάρτηση και ένα διάφραγμα ρύθμισης της κίνησης, καθώς και από τη μάζα του τμήματος του κορμού του οχήματος που υποστηρίζεται από την ανάρτηση για τον συγκεκριμένο τροχό. Το προσομοίωμα αυτό αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια του διεθνούς οδικού πειράματος στην Βραζιλία (Sayers et al., 1986) και φέρει τις ιδιότητες ενός τυπικού οχήματος που επονομάστηκε «χρυσό όχημα» (Golden Car), το οποίο είναι έτσι σταθμισμένο ώστε να επιτυγχάνεται ο καλύτερος συσχετισμός μεταξύ των δεδομένων ομαλότητας που εξάγονται μέσω αυτού (τιμές IRI) και των στοιχείων που εισάγονται σε αυτό κατά την καταγραφή της ομαλότητας της επιφάνειας των οδοστρωμάτων (Sayers and Karamihas, 1997).




*Σχήμα 4.13 Προσομοίωμα του ενός τετάρτου αυτοκινήτου (Quarter – car model)*
*Πηγή: Λοΐζος κ.α., 2002*

Οι αναλυτικές εξισώσεις υπολογισμού (αλγόριθμος) του IRI αναπτύχθηκαν και ελέγχθηκαν με σκοπό να ελαχιστοποιήσουν την επιρροή μερικών παραμέτρων που μετρούνται από το μηχάνημα καταγραφής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας των οδοστρωμάτων, όπως είναι για παράδειγμα το διάστημα δείγματος. Το μοντέλο χρησιμοποιεί τα εξής μεγέθη για τον υπολογισμό του δείκτη IRI (Λοΐζος και Πλατή, 2015) :

- τη μάζα του οχήματος (Sprung mass) ($m_s$), η οποία είναι ουσιαστικά η μάζα του τμήματος του οχήματος που επιβαρύνει την ανάρτηση και συμπεριλαμβάνει ποσοστά του βάρους των τμημάτων της ιδίας της ανάρτησης
- τη μάζα του άξονα (Unsprung mass) ($m_u$) , η οποία αφορά τη μάζα που αντιστοιχεί στο βάρος που δεν επιβαρύνει το σύστημα της ανάρτησης αλλά υποστηρίζεται από τον τροχό ή το ελαστικό και ακολουθεί τις μετακινήσεις του
- το ελατήριο της ανάρτησης με σταθερά $k_s$
- την απόσβεση ($c_s$)
- το ελαστικό, το οποίο θεωρείται ότι συμπεριφέρεται κι αυτό σαν ελατήριο με σταθερά $k_t$

Το μοντέλο είναι δισδιάστατο, επειδή λαμβάνεται υπόψη μόνο κίνηση προς την Z κατεύθυνση, ενώ Y συμβολίζεται το δεδομένο εισόδου. Με την κατασκευή του διαγράμματος του ελευθέρου σώματος και την εφαρμογή του Δεύτερου Νόμου του Νεύτωνα, παίρνουμε τις ακόλουθες διαφορικές εξισώσεις (Du et al., 2014)

$$m_s\ddot{Z}_s + C_s\left(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u\right) + K_s\left(Z_s - Z_u\right) = 0, \tag{4.1}$$

$$m_u\ddot{Z}_u + C_s\left(\dot{Z}_u - \dot{Z}_s\right) + K_s\left(Z_u - Z_s\right) + K_t\left(Z_u - Y\right) = 0. \tag{4.2}$$

Με την απαλοιφή των μαζών οι παραπάνω εξισώσεις καταλήγουν στην εξής μορφή :

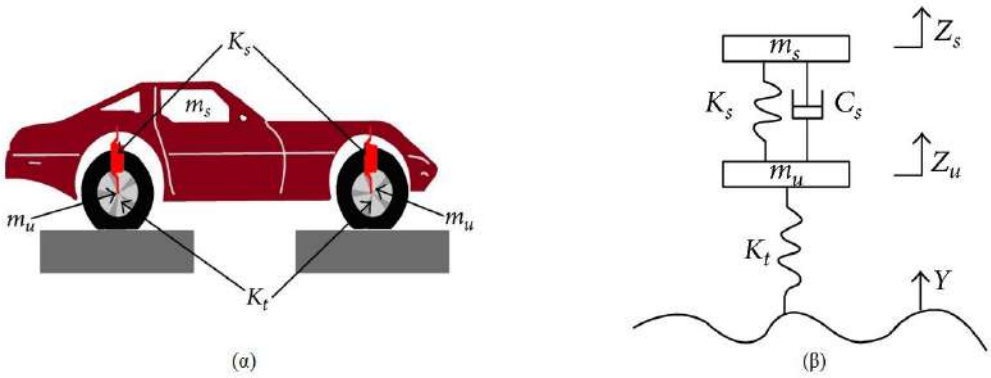
$$\ddot{Z}_s + C_s\left(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u\right) + K_1\left(Z_s - Z_u\right) = 0, \tag{4.3}$$

$$u\ddot{Z}_u + C\left(\dot{Z}_u - \dot{Z}_s\right) + K_2\left(Z_u - Z_s\right) + K_1 Z_u = K_1 Y. \tag{4.4}$$

Χρησιμοποιώντας την απόκριση του μοντέλου «ενός τετάρτου αυτοκινήτου» με ταχύτητα 80 χλμ /ώρα, υπολογισμένο για κάθε σημείο κατά μήκος της απόστασης του ταξιδιού, ο IRI μπορεί να οριστεί ως εξής

$$\mathrm{IRI} = \frac{1}{L}\int_0^L \left|Z_s - Z_u\right| dx, \tag{4.5}$$

όπου είναι L είναι η απόσταση κατά μήκος του οδικού δικτύου στο οποίο πραγματοποιείται η μέτρηση, $Z_s$ και $Z_u$ οι κατακόρυφες μετατοπίσεις της μάζας του οχήματος και του άξονα αντίστοιχα.




*Σχήμα 4.14 Προσομοίωμα του ενός τετάρτου αυτοκινήτου (Quarter – car model)*
*(α) Απεικόνιση αυτοκινήτου (β) Απεικόνιση απλοποιημένου μοντέλου*
*Πηγή : Du et al., 2014*

Συνοψίζοντας τα πλεονεκτήματα του δείκτη IRI σε σχέση με άλλους δείκτες ομαλότητας παρουσιάζονται παρακάτω (Λοΐζος και Πλατή, 2015) :

- Είναι συσχετισμένος με την ταλάντωση των οχημάτων, και κατ' επέκταση με την συμπεριφορά τους.
- Η κλίμακα του είναι συσχετισμένη με την κατατομή της επιφάνειας του οδοστρώματος και είναι σταθερή στο χρόνο.
- Είναι μετρήσιμος από την πλειοψηφία των μηχανημάτων καταγραφής της ομαλότητας που καταγράφονται διεθνώς.
- Έχει μονάδες κλίσης (m/km, in/km κλπ).

Ο καθορισμός της ποιότητας του οδοστρώματος βάσει του δείκτη IRI θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις συνθήκες οδήγησης, την ταχύτητα που μπορεί να αναπτύξει το όχημα, την άνεση και την ασφάλεια κατά τη μετακίνηση αλλά και το επίπεδο στο οποίο επιθυμεί ο εκάστοτε Κύριος του Έργου να διατηρεί το οδόστρωμά του, κάτι που έχει άμεσο αντίκτυπο στον κύκλο ζωής του οδοστρώματος αλλά και στα κόστη συντήρησής του. Στον Πίνακα 4.15 προτείνεται μια κατηγοριοποίηση της κατάστασης του οδοστρώματος βάσει συγκεκριμένων ορίων του δείκτη ομαλότητας IRI σύμφωνα με Tehrani et al. (2015):

Πίνακας 4.15 Καθορισμός κατάστασης οδοστρώματος συναρτήσει του IRI

| **Κατάσταση οδοστρώματος** | **Τιμές IRI (m/km)** |
|---|---|
| Πολύ καλή | < 1.02 |
| Καλή | < 1.35 |
| Μέτρια | < 1.60 |
| Κακή | < 1.85 |
| Πολύ κακή | > 1.85 |

Σε γενικές γραμμές πολύ καλή κατάσταση οδοστρώματος σημαίνει ομαλό οδόστρωμα, καλές συνθήκες οδήγησης και το όριο ταχύτητας τείνει να ξεπεραστεί. Καλή κατάσταση οδοστρώματος συνεπάγεται λεία επιφάνεια, μερικές διαμήκεις ανωμαλίες, μεμονωμένες περιπτώσεις κάθετων ανωμαλιών που γενικά δεν έχουν καμία επίδραση στην άνεση και στην ασφάλεια του οδηγού και είναι αρκετά εύκολο να υπερβεί κανείς το όριο ταχύτητας. Όσο αναφορά τη μέτρια κατάσταση, το οδόστρωμα παρουσιάζει αρκετές ανωμαλίες, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται λίγα μικρά τινάγματα κατά την οδήγηση. Η ταχύτητα οδήγησης σε αυτή την περίπτωση είναι κατά κύριο λόγο κοντά στο όριο και σε γενικές γραμμές πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην επιφάνεια του δρόμου κατά την οδήγηση. Στην τέταρτη κατηγορία, η κατάσταση του οδοστρώματος είναι πλέον ανώμαλη και εμφανίζεται πληθώρα χτυπημάτων και προσκρούσεων. Η ταχύτητα οδήγησης μεταβάλλεται κατά μήκος ενός τέτοιου δρόμου, για αυτό η οδήγηση απαιτεί συγκέντρωση αφού ο οδηγός πρέπει να ελέγχει για την εκάστοτε καλύτερη δυνατή τροχιά ώστε να προστατέψει το όχημα και τους επιβαίνοντες. Τέλος όταν η κατάσταση είναι πολύ κακή το οδόστρωμα εμφανίζει πολλές ανωμαλίες. Η οδήγηση γίνεται άβολη, ενώ η ταχύτητα οδήγησης σε γενικές γραμμές παραμένει κάτω από το όριο ταχύτητας και για αυτό απαιτείται από τον οδηγό υψηλή συγκέντρωση.

## 4.4 Ομαλότητα και εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου

Η ομαλότητα του οδοστρώματος αποτελεί μια βασική παράμετρο τόσο για τη βιωσιμότητα του οδοστρώματος, αφού επηρεάζει τον κύκλο ζωής του, όσο και για το περιβάλλον με την ευρύτερη έννοια, αφού σχετίζεται με τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου από τα καύσιμα των οχημάτων που εκπέμπονται, είτε όταν αυτά κινούνται σε ένα οδόστρωμα είτε όταν χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ή και τη συντήρησή του.

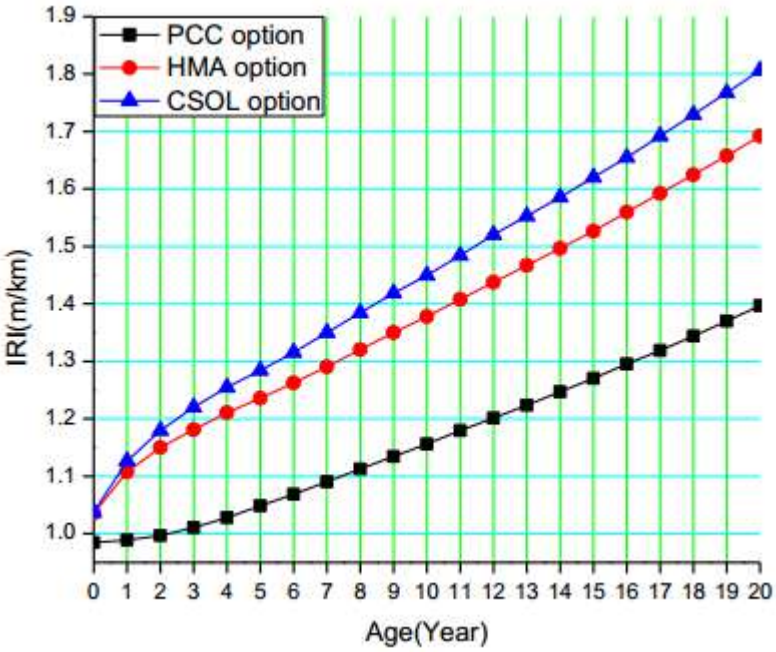
Μια σειρά από μελέτες έχουν επιβεβαιώσει ότι υπάρχει σχέση μεταξύ των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και της ομαλότητας του οδοστρώματος. Η ομαλότητα είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την ταχύτητα ενός οχήματος και κατ' επέκταση η ταχύτητα θα μπορούσε με τη σειρά της να επηρεάσει την ποσότητα των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Kalembo et al., 2012). Συνεπώς η ομαλότητα ενός οδοστρώματος έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει έμμεσα τις εκπομπές CO2.

Οι Kalembo C. , M. Jeihani και A. Saka συλλέγοντας στοιχεία ομαλότητας IRI για την κατάσταση στις οδούς και δεδομένα ταχυτήτων σε επιλεγμένα τμήματα οδών υπολόγισαν τις ποσότητες των εκπομπών CO2 με τη χρήση του λογισμικού MOVES2010a (Kalembo et al., 2012). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής, οι οδοί με χαμηλότερες τιμές δείκτη IRI είχαν σχετικά υψηλότερη μέση ταχύτητα, με αποτέλεσμα να έχουν λιγότερες εκπομπές CO2. Αυτή η σχέση ανιχνεύθηκε για ταχύτητες χαμηλότερες από 55 mph (ή 88.5 km/h), ενώ για χαμηλότερες ταχύτητες οι εκπομπές CO2 αυξάνονταν (Kalembo et al., 2012).

Όταν το καύσιμο καίγεται σε μια μηχανή αυτοκινήτου, αντιδρά με το οξυγόνο για να σχηματίσει διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Κάποιες άλλες ενώσεις όπως το υποξείδιο του αζώτου και κάποια θειϊκά οξείδια επίσης σχηματίζονται κατά την καύση. Έτσι

λοιπόν σύμφωνα με το Bureau of Transport and Communications Economics (BTCE) η ομαλότητα του οδοστρώματος σχετίζεται και με την κατανάλωση καυσίμων των οχημάτων, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα η έρευνα αυτή έδειξε ότι η βελτίωση της ομαλότητας στους αυτοκινητοδρόμους έχει τη δυνατότητα να μειώσει το ποσό της κατανάλωσης καυσίμου και συνεπώς να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Bureau of Transport and Communications Economics, 1997). Παρακάτω παρουσιάζονται ποσοτικοποιημένες σχέσεις του δείκτη ομαλότητας IRI και της κατανάλωσης καυσίμου, που έχει άμεσο αντίκτυπο στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

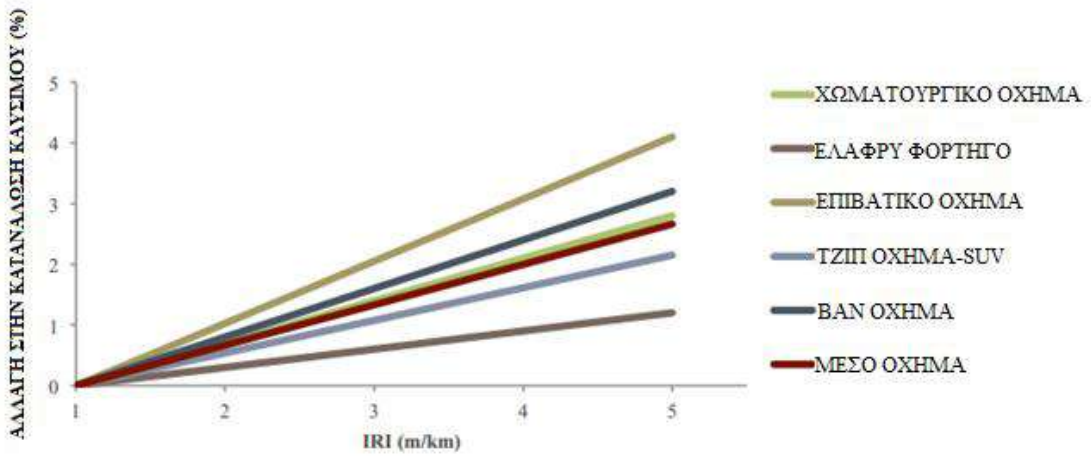
Η μείωση της ομαλότητας του οδοστρώματος προκαλεί περισσότερους κραδασμούς στο όχημα, μειώνει την ταχύτητα του αυτοκινήτου και συνεπώς αυξάνει την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων των οχημάτων. Στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζονται οι τάσεις επιδείνωσης της ομαλότητας του οδοστρώματος εκφρασμένες με το δείκτη IRI σε συνάρτηση με το χρόνο, για τρεις τύπους οδοστρώματος, σύμφωνα με το λογισμικό MEPDG (Yu, 2013). Οι τρεις αυτοί τύποι που παρουσιάζονται είναι η επιφάνεια στρώσης από σκυρόδεμα Portland (PCC) , η επιφάνεια στρώσης από άσφαλτο (HMA) και η απομάκρυνση της δύσκαμπτης στρώσης σκυροδέματος και αντικατάστασή της από ασφαλτική εύκαμπτη στρώση (CSOL).




*Σχήμα 4.16 Καμπύλη IRI σε συνάρτηση με το χρόνο για τρία είδη οδοστρωμάτων*
*Πηγή : Yu, 2013*

Οι δρόμοι με υποβαθμισμένη ποιότητα ομαλότητας αυξάνουν το ποσό της αντίστασης κύλισης του οχήματος με τρόπο παρόμοιο σαν να κινείτο σε οδό με ισχυρό αντίθετο προς την κατεύθυνση κίνησης άνεμο. Αυξημένη αντίσταση κύλισης συνεπάγεται αύξηση στην κατανάλωση καυσίμου, αφού απαιτούνται επιπλέον καύσιμα για να διατηρήσει το όχημα μια ορισμένη ταχύτητα. Το επίπεδο στο οποίο επηρεάζεται η απόδοση καυσίμου συνδέεται σε μεγάλο βαθμό με την κατάσταση του οδοστρώματος,

δηλαδή την αλληλεπίδραση οδοστρώματος-οχήματος. Η ομαλότητα συνεπώς του οδοστρώματος είναι μια βασική παράμετρος που επηρεάζει το δείκτη της αποδοτικότητας των καυσίμων. Στο Σχήμα 4.17 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα διαφοράς στην κατανάλωση καυσίμου σε συνάρτηση με τον δείκτη ομαλότητας IRI για πέντε διαφορετικές κατηγορίες οχημάτων (χωματουργικό όχημα, ελαφρύ φορτηγό, επιβατικό αυτοκίνητο, όχημα τζιπ-SUV, βαν) καθώς και για τον μέσο όρο όλων αυτών των οχημάτων (Zaabar and Chatti, 2010).




*Σχήμα 4.17 Διάγραμμα ομαλότητας και κατανάλωσης καυσίμων*
*Πηγή : Zaabar and Chatti, 2010*

Αύξηση της τιμής του δείκτη IRI μειώνει την οικονομία καυσίμου. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, μια μαθηματική σχέση της κατανάλωσης καυσίμου (FCF) έχει αναπτυχθεί για να περιγράψει τις πραγματικές καταναλώσεις καυσίμων των οχημάτων που κινούνται συναρτήσει των οδοστρωμάτων με διαφορετικές τιμές IRI, η οποία υπολογίζεται ως εξής (Yu, 2013) :

$$FCF = 7.377 * e^{-3\,IRI} + 0.993 \;\; \textit{για επιβατικά οχήματα} \qquad (4.6)$$

$$FCF = 2.163 * e^{-2\,IRI} + 0.952 \;\; \textit{για φορτηγά οχήματα} \qquad (4.7)$$

Άλλες έρευνες έπειτα από κατάλληλες μετρήσεις έχουν ποσοτικοποιήσει και αυτές τη σχέση μεταξύ διαφορετικών τιμών του δείκτη IRI και κατανάλωσης καυσίμου. Συγκεκριμένα οι H. Zhang, G.A. Keoleian και M.D. Lepech (2008) τόνισαν ότι τα λειτουργικά κόστη του οχήματος αντιπροσωπεύουν υψηλότερη κατανάλωση καυσίμου και κατά συνέπεια υψηλότερο κόστος των καυσίμων όταν το όχημα διέρχεται είτε από μήκος δρόμου με κακή ποιότητα ομαλότητας είτε από περιοχή εκτέλεσης εργασιών συντήρησης ή ανακατασκευής (Zhang et al., 2008). Εάν οι οδηγοί τότε επιλέξουν να παρακάμψουν για να αποφύγουν τη συμφόρηση, θα ταξιδέψουν μεγαλύτερη απόσταση

η οποία επίσης αυξάνει την κατανάλωση καυσίμου. Λόγω της επιδείνωσης της επιφάνειας του οδοστρώματος, η ομαλότητα μειώνεται συνεχώς με την πάροδο του χρόνου, η οποία με τη σειρά της εκτιμάται ότι θα μειώσει την οικονομία καυσίμου εν κινήσει. Η επίδραση της ομαλότητας στην κατανάλωση καυσίμων παρουσιάζεται στην παρακάτω εξίσωση (WesTrack, 1999), όπου FCF είναι ο συντελεστής κατανάλωσης καυσίμου, ο οποίος είναι πάντα μεγαλύτερος από τη μονάδα.

$$FCF = 0.00667 * IRI + 0.8667 \tag{4.8}$$

Επιπλέον σε μια άλλη μελέτη, η μέση κατανάλωση καυσίμου του οχήματος υπολογίζεται για κάθε τμήμα του οδικού δικτύου, ανάλογα με την ταχύτητα ελεύθερης ροής, τον τύπο των οχημάτων και τις συνθήκες της επιφάνειας του οδοστρώματος του τμήματος αυτού. Παράλληλα υπεισέρχεται και το έτος προγράμματος συντήρησης, σε περίπτωση που κάτι τέτοιο υλοποιηθεί με στόχο να βελτιωθεί η τιμή του IRI. Σε αυτή τη μελέτη, η εξίσωση που αναπτύχθηκε για τα επιβατικά αυτοκίνητα βασίζεται στο HDM-4 μοντέλο (Limsawasd et al., 2015) :

Εάν $SF_p \leq 40mph$ (ή 18 m/s)

$$FRN^y_p = -0.018 * (SF_p)^3 + 1.551 * (SF_p)^2 - 43.881 * (SF_p) + 1.617 * IRI^y_p + 479 \tag{4.9}$$

Εάν $SF_p > 40mph$ (ή 18 m/s)

$$FRN^y_p = 0.024 * (SF_p)^2 - 1.688 * (SF_p) + 1.933 * IRI^y_p + 96.4 \tag{4.10}$$

όπου

$FRN^y_p$: η μέση κατανάλωση καυσίμου του οχήματος στο μήκος δρόμου (p) τη χρονιά (y) των προγραμμάτων συντήρησης σε μονάδες milliliter/vehicle-kilometer
$SF_p$: η ταχύτητα ελεύθερης ροής στο μήκος δρόμου (p) σε μονάδες miles/hour
$IRI^y_p$: ο δείκτης ομαλότητας στο μήκος δρόμου (p) τη χρονιά (y) μετά τη συντήρηση

Όμως όπως είναι γνωστό, οι συνθήκες της επιφάνειας του οδοστρώματος χειροτερεύουν με το πέρασμα του χρόνου, το οποίο με τη σειρά του επηρεάζει σημαντικά την κατανάλωση καυσίμου. Ως εκ τούτου, η μέση κατανάλωση καυσίμου του οχήματος για κάθε τμήμα του οδικού δικτύου εκτιμάται σε ετήσια βάση. Η συνολική κατανάλωση καυσίμου του δικτύου μεταφοράς εκτιμάται χρησιμοποιώντας την τελική παρακάτω εξίσωση (Limsawasd et al., 2015) :

$$TF = \sum_{y=1}^{Y} \sum_{p=1}^{P} (Vp * Lp * 365 * FRN^y_p * 10^{-3}) \tag{4.11}$$

όπου

TF: η συνολική κατανάλωση καυσίμου του δικτύου μεταφοράς σε λίτρα
Y: ο αριθμός των ετών της αποκατάστασης του οδοστρώματος
P: ο αριθμός μηκών δρόμου που υφίστανται αποκατάσταση
$V_p$: ένταση της κυκλοφορίας στο μήκος δρόμου (p) σε ΕΜΗΚ
$L_p$ : μήκος του δρόμου (p) σε χιλιόμετρα

Συνοψίζοντας, είναι εμφανές ότι το ζήτημα της ομαλότητας σχετικά με την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου βρίσκεται υπό έρευνα, καθώς το ενδιαφέρον ως προς την περιβαλλοντική ρύπανση αποτελεί βασικό αντικείμενο μελέτης των τελευταίων δεκαετιών. Συνολικά, σύμφωνα με τις παρούσες έρευνες, αύξηση της τιμής του δείκτη ομαλότητας IRI αυξάνει την κατανάλωση καυσίμου, άρα και τις εκπομπές ρύπων στο περιβάλλον.

# 5

# ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

## 5.1 Πειραματική διαδικασία

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, όπως αυτά εκφράζονται με το διοξείδιο του άνθρακα, σε σχέση με την ομαλότητα της επιφάνειας ασφαλτικών οδοστρωμάτων. Υπό αυτό το πρίσμα αναζητήθηκαν στοιχεία ομαλότητας από το ελληνικό δίκτυο αυτοκινητόδρομων μέσα από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ, τα οποία να παρουσιάζουν ένα σημαντικό εύρος τιμών, ώστε να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της ομαλότητας στην εκπομπή αέριων ρύπων του διοξειδίου του άνθρακα σε οδούς με διαφορετική ποιότητα κύλισης.

*Σχήμα 5.1 Ελληνικό δίκτυο αυτοκινητοδρόμων*

Αρχικά, αναζητήθηκαν στοιχεία που αφορούσαν υποβαθμισμένη ομαλότητα, τα οποία εντοπίστηκαν σε κόμβους υπεραστικού αυτοκινητοδρόμου δυο λωρίδων κυκλοφορίας

ανά κατεύθυνση, συγκριτικά με στοιχεία που αφορούσαν τμήματα του κυρίου άξονα του αυτοκινητοδρόμου. Με αυτό τον τρόπο, αναμένεται να αναδειχθούν οι διαφορές επίδρασης "καλής" και "κακής" ομαλότητας στην εκπομπή αέριων ρύπων.

Στη συνέχεια, αναζητήθηκαν στοιχεία ομαλότητας πριν και μετά από εργασίες συντήρησης για τη διερεύνηση της επίδρασης της συντήρησης ενός οδοστρώματος και της αποκατάστασης της ομαλότητάς του, στη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων του διοξειδίου του άνθρακα. Τα στοιχεία αυτά εντοπίστηκαν σε τμήμα αυτοκινητοδρόμου τριών λωρίδων ανά κατεύθυνση.

## 5.2 Περιγραφή δεδομένων

Τα πρώτα λοιπόν στοιχεία από τη βάση δεδομένων του Εργαστήριου Οδοποιίας ΕΜΠ αφορούσαν σε τέσσερις κόμβους αυτοκινητοδρόμου και παρακείμενα οδικά τμήματα επί του κυρίου άξονα. Οι μετρήσεις αυτές διεξήχθησαν σε δυο φάσεις. Οι μεν που αφορούσαν τους τέσσερις υπό εξέταση κόμβους πραγματοποιήθηκαν στις 04/07/2016 και ώρα 14.00, ενώ εκείνες των κυρίων τμημάτων της οδού στις 29/07/2016 και ίδια ώρα. Οι μετρήσεις ομαλότητας είχαν πραγματοποιηθεί με το σύστημα προφιλομέτρησης του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ. Τέλος οι μετρήσεις ομαλότητας πραγματοποιήθηκαν ανά 10 m μήκους οδού και στις δυο περιπτώσεις, εκφρασμένες ως προς το διεθνή δείκτη ομαλότητας IRI. Όπως απεικονίζεται και στον Πίνακα 5.2, η χιλιομέτρηση ξεκινάει από το μηδέν και αυξάνεται κατά 0.01 χιλιόμετρα, δηλαδή 10 μέτρα. Η τελική τιμή που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην τέταρτη στήλη του Πίνακα 5.2 και απεικονίζει το μέσο όρο του δείκτη ομαλότητας IRI για κάθε 10 μέτρα μετρήσεων.

Πίνακας 5.2 Απόσπασμα μετρήσεων ομαλότητας

| 1 | km | MB '15 - IRI R[Λ1] | MB '15 - IRI L[Λ1] | MB '15 - IRI A[Λ1] |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 0 | 2,14 | 2,67 | 2,41 |
| 3 | 0,01 | 1,48 | 1,56 | 1,52 |
| 4 | 0,02 | 1,37 | 1,65 | 1,51 |
| 5 | 0,03 | 1,34 | 1,25 | 1,3 |
| 6 | 0,04 | 1,36 | 2,03 | 1,69 |
| 7 | 0,05 | 2,34 | 1,09 | 1,71 |
| 8 | 0,06 | 1,23 | 1,03 | 1,13 |
| 9 | 0,07 | 1,54 | 0,88 | 1,21 |
| 10 | 0,08 | 1,4 | 1,33 | 1,37 |
| 11 | 0,09 | 0,91 | 0,98 | 0,95 |
| 12 | 0,1 | 1,21 | 1,96 | 1,59 |

Εν συνεχεία, εξετάσθηκε μήκος τμήματος οδού αυτοκινητοδρόμου πριν και μετά τις εργασίες αποκατάστασης του οδοστρώματος με την ίδια λογική. Συγκεκριμένα τα στοιχεία πριν τις εργασίες συλλέχθηκαν στις 25/06/2001 ενώ τα στοιχεία μετά τις

ενέργειες συντήρησης στις 11/07/2002, σχεδόν δηλαδή ένα χρόνο μετά. Μέσω της ανάλυσης των στοιχείων γίνεται ακολούθως η διερεύνηση της επίδρασης της αποκατάστασης της ομαλότητας στην εκπομπή των αέριων ρύπων του διοξειδίου του άνθρακα.

## 5.3 Διαδικασία διαχωρισμού σε ομογενή υποτμήματα

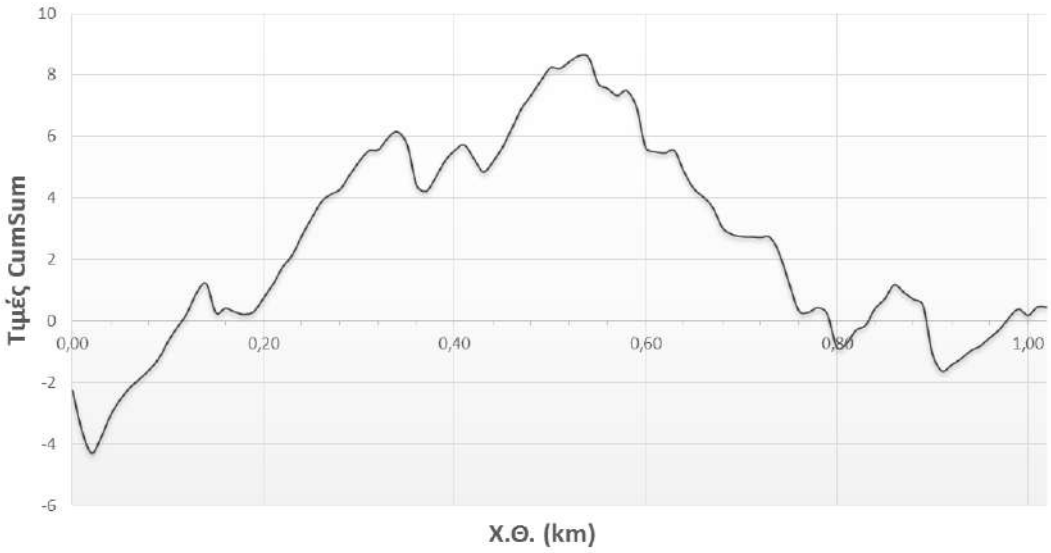
Για την ορθή ανάλυση των στοιχείων πραγματοποιήθηκε ο διαχωρισμός σε ομογενή υποτμήματα της οδού με βάση το διεθνή δείκτη ομαλότητας IRI με τη μέθοδο μερικών αθροισμάτων CumSum. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκε ο μέσος όρος του δείκτη ομαλότητας για κάθε οδικό τμήμα και εν συνεχεία με χρήση της σχέσης 5.1 των μερικών αθροισμάτων, πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της τιμής $S_i$ για κάθε τιμή μετρήσεων των υπό εξέταση οδικών τμημάτων.

$$S_i = IRI_m + IRI_i - S_{i-1} \tag{5.1}$$

όπου

$IRI_m$: ο συνολικός μέσος όρος του δείκτη IRI για κάθε τμήμα δρόμου
$IRI_i$: η τιμή του δείκτη IRI για το i υποτμήμα μετρήσεων
$S_{i-1}$: η προηγούμενη τιμή CumSum του εκάστοτε υποτμήματος

Με αυτό τον τρόπο υπολογίστηκε για κάθε υποτμήμα μετρήσεων η τιμή $S_i$ και σχεδιάστηκε το διάγραμμα μερικών αθροισμάτων για κάθε τμήμα που είχαν συλλεχθεί στοιχεία ομαλότητας, όπως φαίνεται στο παράδειγμα του Σχήματος 5.3 για τον κόμβο 1 και με την ίδια λογική σχεδιάστηκαν και για τα υπόλοιπα τμήματα.

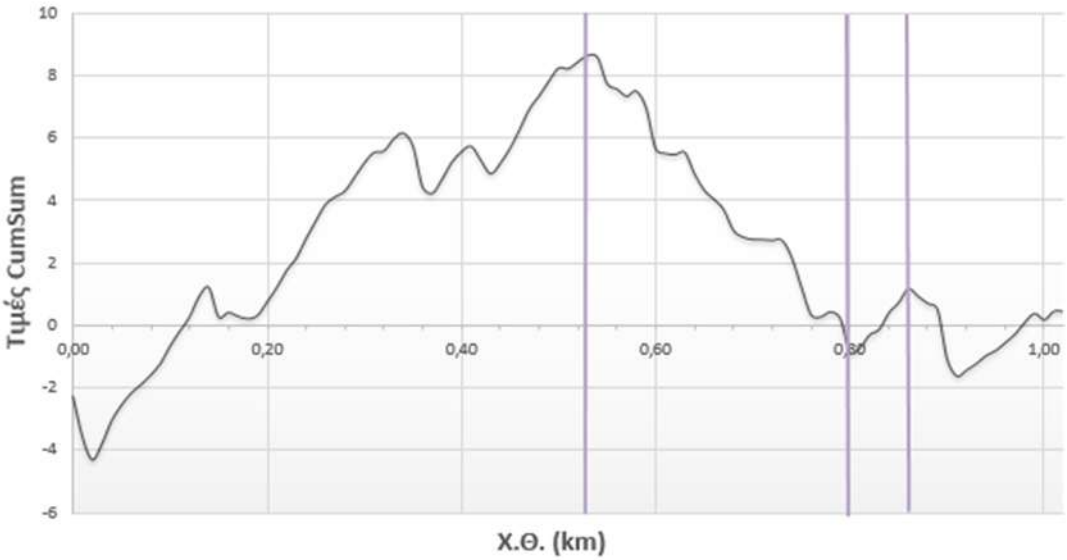



*Σχήμα 5.3 CumSum Κόμβου 1*

Έπειτα πραγματοποιήθηκε η ομογενοποίηση των υποτμημάτων, αρχικά ποιοτικά, όπου άλλαζε η κλίση του διαγράμματος των μερικών αθροισμάτων και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε έλεγχος t δυο δειγμάτων με υποτιθέμενες άνισες διακυμάνσεις. Στον έλεγχο αυτό ελέγχθηκε η μηδενική υπόθεση ότι «τα διαχωρισμένα

ομογενοποιημένα υποτμήματα δεν διαφέρουν ως προς τη μέση τιμή». Εάν η τιμή $t_{test}$ ήταν κατά απόλυτη τιμή μικρότερη από την $t_{κρίσιμη}$, δηλαδή $|t_{test}| < t_{κρίσιμο}$, τότε ίσχυε η μηδενική υπόθεση $H_0$, άρα τα υποτμήματα δεν έπρεπε να διαχωρισθούν. Σε περίπτωση αντίθετου αποτελέσματος, τα υποτμήματα παρέμεναν διαχωρισμένα ως είχε.

Τα αποτελέσματα της τελικής ομογενοποίησης για το παράδειγμα του κόμβου 1 παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.4. Τα όρια του κάθε ομογενοποιημένου υποτμήματος οδού παρουσιάζονται με κάθετες γραμμές ως προς τον οριζόντιο άξονα, ο οποίος απεικονίζει τις χιλιομετρικές θέσεις, όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις ομαλότητας σε κάθε τμήμα.

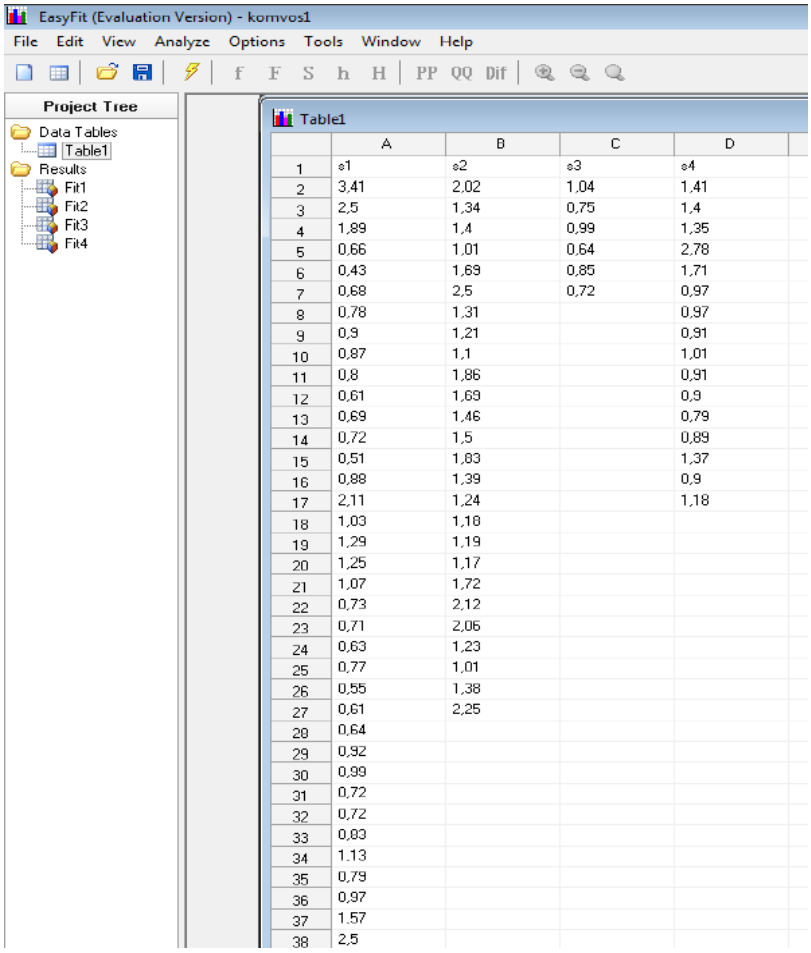



*Σχήμα 5.4 Διαχωρισμός ομογενοποιημένων τμημάτων – Κόμβος 1*

Με τον ίδιο τρόπο πραγματοποιήθηκε και η ομογενοποίηση σε όλα τα υπόλοιπα τμήματα για τα οποία έγινε επεξεργασία των στοιχείων ομαλότητας.

## 5.4 Προσαρμογή κατανομών στα δεδομένα

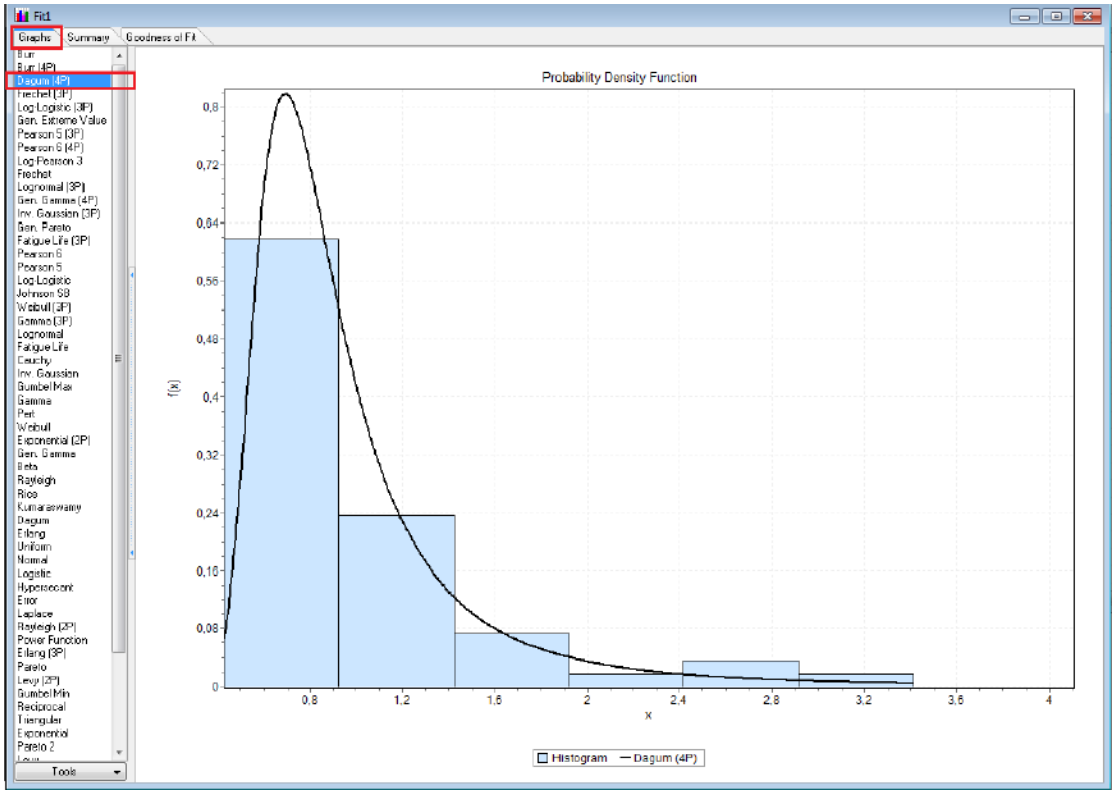
Αφού ολοκληρώθηκε η υλοποίηση της ομογενοποίησης, επιλέχθηκε μια χαρακτηριστική τιμή ομαλότητας IRI για κάθε ομογενοποιημένο υποτμήμα. Αρχικά εξετάσθηκε η επιλογή του μέσου όρου ως χαρακτηριστική τιμή ομαλότητας. Όμως, από μια προκαταρκτική επεξεργασία των στοιχείων, κρίθηκε ότι ο μέσος όρος δεν είναι αντιπροσωπευτικός του δείγματος, για το εκάστοτε δείγμα μετρήσεων. Συνεπώς, η χαρακτηριστική τιμή επιλέχθηκε, έπειτα από προσαρμογή του κάθε υποτμήματος στην πιο κατάλληλη για αυτό κατανομή, με τη βοήθεια του κατάλληλου λογισμικού. Αρχικά εισήχθησαν τα δεδομένα κάθε ομογενοποιημένου υπομτήματος, όπως φαίνεται στο παράδειγμα του Σχήματος 5.5 για τον κόμβο 1.




| | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|
| 1 | s1 | s2 | s3 | s4 |
| 2 | 3,41 | 2,02 | 1,04 | 1,41 |
| 3 | 2,5 | 1,34 | 0,75 | 1,4 |
| 4 | 1,89 | 1,4 | 0,99 | 1,35 |
| 5 | 0,66 | 1,01 | 0,64 | 2,78 |
| 6 | 0,43 | 1,69 | 0,85 | 1,71 |
| 7 | 0,68 | 2,5 | 0,72 | 0,97 |
| 8 | 0,78 | 1,31 | | 0,97 |
| 9 | 0,9 | 1,21 | | 0,91 |
| 10 | 0,87 | 1,1 | | 1,01 |
| 11 | 0,8 | 1,86 | | 0,91 |
| 12 | 0,61 | 1,69 | | 0,9 |
| 13 | 0,69 | 1,46 | | 0,79 |
| 14 | 0,72 | 1,5 | | 0,89 |
| 15 | 0,51 | 1,83 | | 1,37 |
| 16 | 0,88 | 1,39 | | 0,9 |
| 17 | 2,11 | 1,24 | | 1,18 |
| 18 | 1,03 | 1,18 | | |
| 19 | 1,29 | 1,19 | | |
| 20 | 1,25 | 1,17 | | |
| 21 | 1,07 | 1,72 | | |
| 22 | 0,73 | 2,12 | | |
| 23 | 0,71 | 2,06 | | |
| 24 | 0,63 | 1,23 | | |
| 25 | 0,77 | 1,01 | | |
| 26 | 0,55 | 1,38 | | |
| 27 | 0,61 | 2,25 | | |
| 28 | 0,64 | | | |
| 29 | 0,92 | | | |
| 30 | 0,99 | | | |
| 31 | 0,72 | | | |
| 32 | 0,72 | | | |
| 33 | 0,83 | | | |
| 34 | 1,13 | | | |
| 35 | 0,79 | | | |
| 36 | 0,97 | | | |
| 37 | 1,57 | | | |
| 38 | 2,5 | | | |

*Σχήμα 5.5 Δεδομένα ανάλυσης (IRI) – Κόμβος 1*

Στη συνέχεια δημιουργώντας το ιστόγραμμα συχνοτήτων για κάθε υποτμήμα διερευνήθηκαν διάφορες κατανομές για την προσαρμογή των στοιχείων έτσι ώστε να επιλεγεί η καλύτερη δυνατή για το εκάστοτε υποτμήμα. Συνολικά οι δυο κατανομές που χρησιμοποιήθηκαν καθ' όλη τη διεξαγωγή της έρευνας ήταν οι Dagum και Dagum(4P), ώστε να υπάρχει μια καθολική ομοιογένεια τόσο μεταξύ μετρήσεων της ίδιας οδού όσο και συνολικά στην έρευνα. Στο παράδειγμα του Σχήματος 5.6 δίνεται το ιστόγραμμα και η κατανομή που προσαρμόζεται στις μετρήσεις για το πρώτο ομογενοποιημένο τμήμα του κόμβου 1.




*Σχήμα 5.6 Επιλογή κατανομής - Κόμβος 1 (0.00 – 0.54 km)*

Οι δυο κατανομές που χρησιμοποιήθηκαν, όπως αναφέρθηκε και πρωτύτερα, είναι οι Dagum και Dagum(4P). Η κατανομή Dagum είναι μια συνεχής κατανομή πιθανότητας που ορίζεται πάνω σε θετικούς πραγματικούς αριθμούς. Οι μαθηματικές σχέσεις της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας και της αθροιστικής πυκνότητας πιθανότητας είναι αντίστοιχα για την περίπτωση της Dagum (4P):

$$f(x) = \frac{ak(\frac{\chi-\gamma}{\beta})^{\alpha k-1}}{\beta(1+\left(\frac{\chi-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha})^{k+1}} \tag{5.2}$$

$$F(x) = (1+(\frac{\chi-\gamma}{\beta})^{-\alpha})^{-k} \tag{5.3}$$

όπου k,α,β και γ είναι θετικοί παράμετροι της κατανομής. Στην περίπτωση της απλής Dagum ισχύουν τα ίδια, απαλείφοντας απλώς την παράμετρο γ, όπως φαίνεται στις σχέσεις 5.4 και 5.5 αντίστοιχα:

$$f(x) = \frac{ak(\frac{\chi}{\beta})^{\alpha k}}{\beta(1+\left(\frac{\chi}{\beta}\right)^{\alpha})^{k+1}} \tag{5.4}$$

$$F(x) = (1 + (\frac{\chi}{\beta})^{-\alpha})^{-k} \tag{5.5}$$

Εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος προσαρμογής της κατανομής βάσει του κριτηρίου Kolmogorov-Smirnov σε κάθε οδικό υποτμήμα. Το κριτήριο Kolmogorov-Smirnov θεωρεί μηδενική υπόθεση $H_0$ ότι η υπό εξέταση κατανομή δε διαφέρει από μια δεδομένη κατανομή, στην συγκεκριμένη μελέτη δεδομένες θεωρήθηκαν οι Dagum και Dagum(4P). Εφόσον το αποτέλεσμα έδινε ότι δεν απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση, σε επίπεδο σημαντικότητας 95% και άνω, οι δυο αυτές κατανομές χρησιμοποιήθηκαν για όλη την έρευνα στα στοιχεία ομαλότητας των οδικών υποτμημάτων.

Fit1

Graphs | Summary | Goodness of Fit

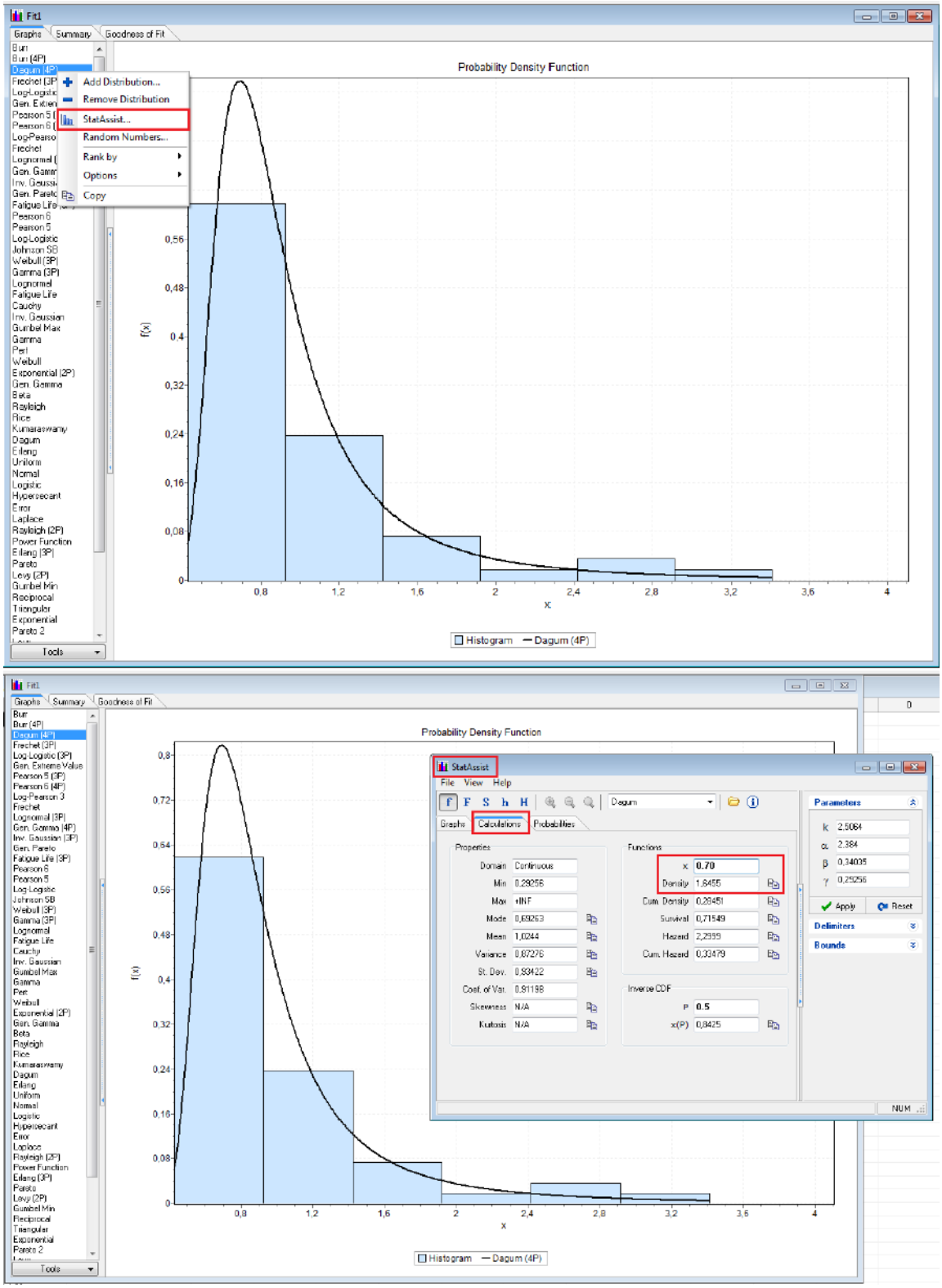
| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 55 | Weibull | 0,17261 | 29 | 3,8945 | 32 | 15,981 | 32 |
| 56 | Weibull (3P) | 0,12144 | 20 | 1,2832 | 19 | 8,714 | 21 |
| 57 | Chi-Squared (2P) | No fit | | | | | |
| 58 | Johnson SU | No fit | | | | | |
| 59 | Log-Gamma | No fit | | | | | |
| 60 | Nakagami | No fit | | | | | |
| 61 | Student's t | No fit | | | | | |

**Goodness of Fit - Details** [hide]

| **Dagum (4P)** [#7] | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Kolmogorov-Smirnov | | | | | |
| Sample Size | 55 | | | | |
| Statistic | 0,05269 | | | | |
| P-Value | 0,99598 | | | | |
| Rank | 3 | | | | |
| α | 0,2 | 0,1 | 0,05 | 0,02 | 0,01 |
| Critical Value | 0,14164 | 0,16186 | 0,17981 | 0,20107 | 0,21574 |
| Reject? | No | No | No | No | No |

*Σχήμα 5.7 Έλεγχος κατανομής - Κόμβος 1 (0.00 – 0.54 km)*

Τέλος υπολογίστηκε η χαρακτηριστική τιμή για κάθε υποτμήμα, όπως φαίνεται στο παράδειγμα του Σχήματος 5.8 για το πρώτο ομογενοποιημένο υποτμήμα του κόμβου 1.




*Σχήμα 5.8 Επιλογή χαρακτηριστικής τιμής – Κόμβος 1 (0.00 – 0.54 km)*

## 5.5 Υπολογισμός εκπομπών ρύπων

Για τον υπολογισμό της ποσότητας του διοξειδίου του άνθρακα με βάση την επίδραση της ομαλότητας εκτιμήθηκε αρχικά μια ταχύτητα κίνησης τόσο για επιβατικά όσο και για φορτηγά οχήματα. Η εκτίμηση της ταχύτητας λόγω επίδρασης της ομαλότητας ανά τύπο οχήματος στηρίζεται στο μοντέλο HDM – III (Watanatada et al., 1987), το οποίο συνδέει την ταχύτητα με τη μέγιστη μέση διορθωμένη ταχύτητα ARVMAX (maximum Average Rectified Velocity) και το δείκτη ομαλότητας IRI για κάθε τύπο οχήματος και ανάλογα τον τύπο οδοστρώματος στο οποίο κινείται το όχημα. Ο απλοποιημένος τύπος για ασφαλτικό εύκαμπτο οδόστρωμα, το οποίο εμφανίζεται και στα ελληνικά τμήματα οδοστρώματος που μελετήθηκαν, δίνεται από τον παρακάτω τύπο (Watanatada et al., 1987):

$$Velocity\ Roughness\ \left[\frac{km}{h}\right] = \frac{ARVMAX\ \left[\frac{km}{h}\right]}{1.15 * IRI\ \left[\frac{m}{km}\right]} \tag{5.6}$$

Οι τιμές της ARVMAX ανάλογα τον τύπο οχήματος δίνονται από τον παρακάτω πίνακα (Watanatada et al., 1987):

Πίνακας 5.9 Τιμές ARVMAX και είδος οχήματος

| Είδος οχήματος | Μέγιστη Μέση Διορθωμένη Ταχύτητα ARVMAX (km/h) |
|---|---|
| Επιβατικό Όχημα | 94 |
| Φορτηγό | 72 |

Για να ολοκληρωθεί η ανάλυση των στοιχείων, υπολογίστηκαν δυο χαρακτηριστικές τιμές ταχύτητας βάσει της χαρακτηριστικής τιμής ομαλότητας, μια για επιβατικό όχημα και μια για φορτηγό, για κάθε ομογενοποιημένο υποτμήμα, ώστε να εκτιμηθούν οι ποσότητες εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σε κάθε υποτμήμα οδού. Ο υπολογισμός της ταχύτητας πραγματοποιήθηκε με τη μαθηματική σχέση που αναφέρθηκε παραπάνω και στον Πίνακα 5.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τον πρώτο κόμβο. Με την ίδια λογική εκτιμήθηκαν και οι ταχύτητες στα άλλα τμήματα οδού.

Πίνακας 5.10 Ταχύτητα ομαλότητας

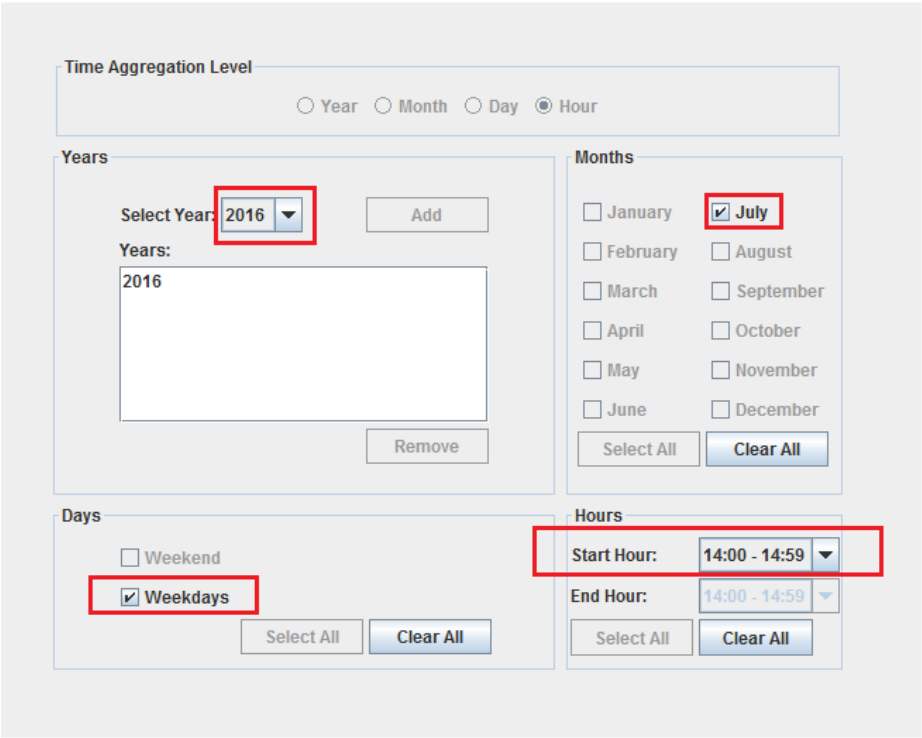
| **Τμήμα (km)** | **$IRI_C$ (m/km)** | **V(km/h)** | |
|---|---|---|---|
| | | Vεπιβ | Vφορτ |
| 0.00 – 0.54 | 0.70 | 116.77 | 89.44 |
| 0.55 - 0.80 | 1.10 | 74.31 | 56.92 |
| 0.81 - 0.86 | 0.81 | 100.91 | 77.29 |
| 0.87 - 1.02 | 0.90 | 90.82 | 69.57 |

Με αυτόν τον τρόπο κάθε ομογενοποιημένο υποτμήμα διαθέτει μια χαρακτηριστική τιμή ταχύτητας τόσο για επιβατικά όσο για φορτηγά οχήματα, ώστε να υπολογιστούν οι ρύποι του διοξειδίου του άνθρακα. Για τον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MOVES2014a, το οποίο αναπτύχθηκε πρόσφατα από την EPA(Enviromental Protection Agency). Με το υπόψη λογισμικό εκτιμώνται τιμές εκπομπών και αποθεμάτων των διαφόρων ρύπων που παράγονται από αυτοκίνητα, φορτηγά, λεωφορεία και δίκυκλα οχήματα, για διάφορους τύπου καυσίμου και κινητήρα των οχημάτων αυτών.

Το λογισμικό αυτό παρέχει τρεις κλίμακες ανάλυσης: εθνικές, επαρχιακές και έργου. Όλες οι αναλύσεις σε αυτή τη μελέτη έγιναν σε κλίμακα έργου (project level), καθώς είναι η πλέον κατάλληλη για τα στοιχεία των μεμονωμένων τμημάτων του οδικού δικτύου που εξετάσθηκαν. Τα βασικά δεδομένα που απαιτούνται για την εκτέλεση του λογισμικού σε επίπεδο έργου είναι ο τύπος οδικού συνδέσμου, τα χρονικά όρια (έτος, μήνας και η ώρα που επιθυμούμε να εξαχθεί το αποτέλεσμα), το είδος των οχημάτων και των καυσίμων τους, το είδος των ρύπων που επιθυμούμε να υπολογίσουμε, το μήκος του συνδέσμου, ο κυκλοφοριακός φόρτος στο εξεταζόμενο τμήμα, η ηλικία των οχημάτων, η μέση ταχύτητα συνδέσμου, η κατά μήκος κλίση του συνδέσμου, η κατανομή της κυκλοφορίας, τα στοιχεία μετεωρολογίας (θερμοκρασία και υγρασία), η προμήθεια και η διαμόρφωση των καυσίμων. Τα δυο τελευταία δεδομένα που αφορούσαν στα καύσιμα ήταν προεπιλογές του λογισμικού. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα δεδομένα που επιλέχθηκαν να εισαχθούν στο λογισμικό ώστε να εκτελεστεί.

Χρονικά όρια (Time Spans)

Τα χρονικά όρια ήταν αυτά στα οποία είχαν συλλεχθεί οι μετρήσεις ομαλότητας. Αναλυτικά, για το τμήμα οδού που συλλέχθηκαν μετρήσεις πριν και μετά την αποκατάσταση, οι ημερομηνίες ήταν 25/06/2001 και 11/07/2002 αντίστοιχα και ώρα 14.00. Για τα τμήματα των κόμβων τα χρονικά όρια ήταν 04/07/2016 στις 14.00 και για τα τμήματα του αυτοκινητοδρόμου στις 29/07/2016 στις 14.00. Επειδή το λογισμικό απαιτεί τη χρονολογία, το μήνα, το είδος της ημέρας (καθημερινές ή σαββατοκύριακο) και την ώρα επιλέχθηκε το 2016, ο Ιούλιος, οι καθημερινές και 14.00 – 14.59 αντίστοιχα, ενώ για τα τμήματα πριν και μετά αρκούσαν τα στοιχεία 2001, Ιούνιος, καθημερινές και 2002, Ιούλιος και καθημερινές αντίστοιχα, ενώ η ώρα παραμένει 14.00-14.59.




*Σχήμα 5.11 Χρονικά όρια λογισμικού MOVES2014a*

Τύποι οχήματος και καυσίμου (Vehicles/Equipment)

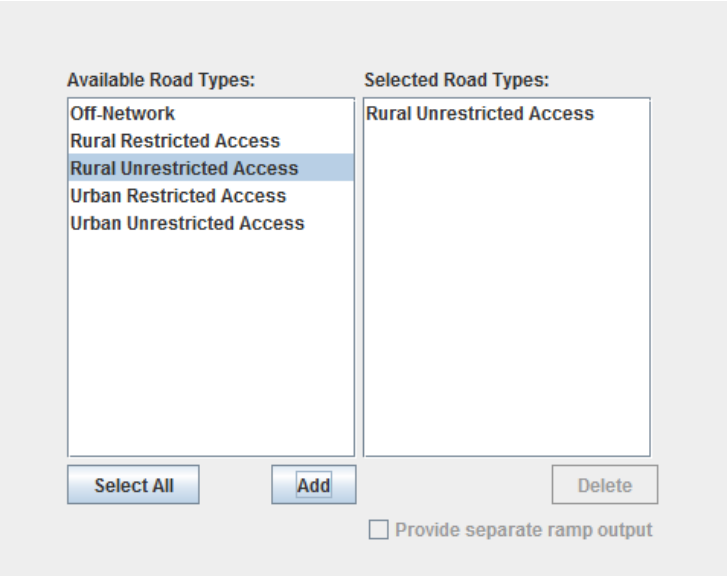
Για τη συγκεκριμένη έρευνα επιλέχθηκαν τα επιβατικά και τα φορτηγά οχήματα για δυο κατηγορίες κινητήρων, βενζινοκινητήρα και ντιζελοκινητήρα, διότι απεικονίζουν όλους τους δυνατούς συνδυασμούς οχήματος-καυσίμου που μπορούν να βρεθούν στις ελληνικές οδούς (βλ. Πίνακας 5.12).

Πίνακας 5.12 Τύποι οχήματος και καυσίμου λογισμικού MOVES2014a

| Selections: |
| --- |
| Diesel Fuel - Combination Short-haul Truck |
| Diesel Fuel - Passenger Car |
| Gasoline - Passenger Car |
| Gasoline - Combination Short-haul Truck |

Τύπος οδού (Road Type)

Εφόσον τα στοιχεία αφορούσαν κύρια τμήματα και κόμβους υπεραστικού αυτοκινητοδρόμου ελεύθερης πρόσβασης επιλέχθηκε στο πρόγραμμα η αντίστοιχη κατηγορία (rural unrestricted access) ανάμεσα σε πέντε διαθέσιμες: οδός εκτός δικτύου (αφορά στάθμευση), υπεραστική οδός ελεύθερης ή περιορισμένης πρόσβασης και αστική οδός ελεύθερης ή περιορισμένης πρόσβασης (βλ. Σχήμα 5.13).




*Σχήμα 5.13 Τύπος οδού λογισμικού MOVES2014a*

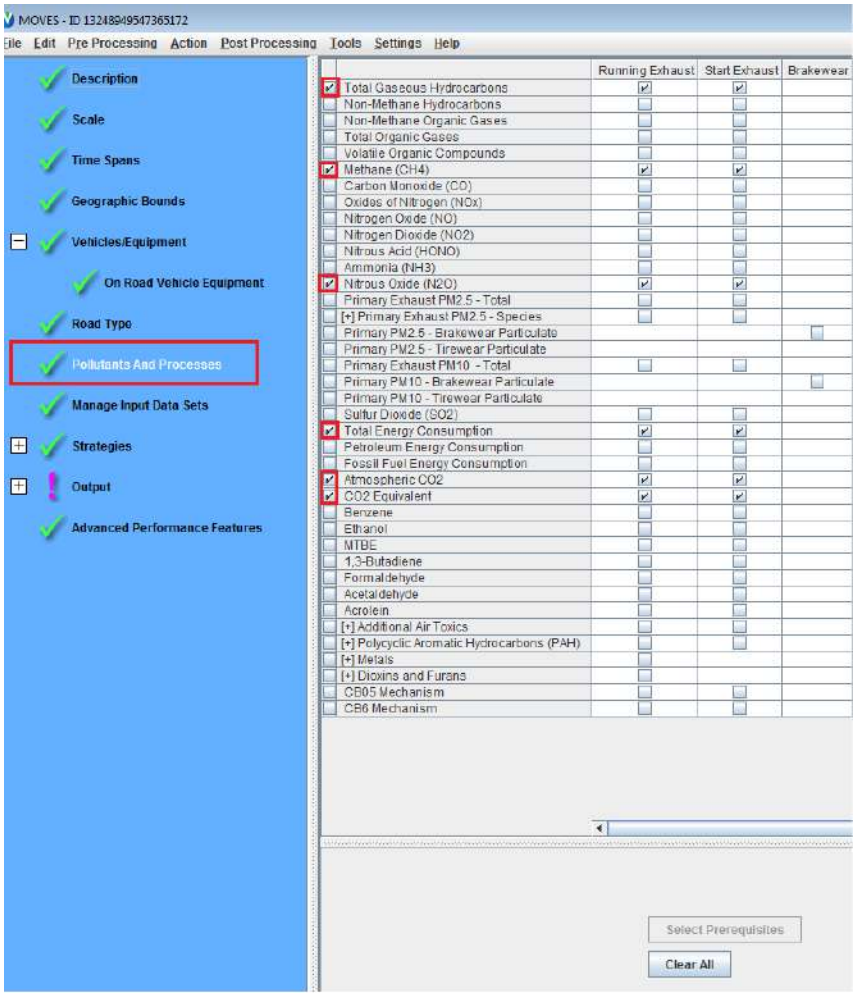
Είδος ρύπου (Pollutants/Processes)

Ως εξάγων ρύπος ανάλυσης επιλέχθηκε το ισοδύναμο CO2 (CO2 equivalent). Το ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα είναι μια πρότυπη μονάδα για τη μέτρηση του αποτυπώματος του άνθρακα. Η ιδέα είναι να εκφράσει την επίδραση του κάθε διαφορετικού αερίου του θερμοκηπίου συναρτήσει της ποσότητας του CO2, που θα δημιουργήσει την ίδια ποσότητα θέρμανσης του πλανήτη (Global Warming Potential). Με αυτόν τον τρόπο, ένα αποτύπωμα άνθρακα ενός οχήματος, που αποτελείται από πολλά διαφορετικά αέρια θερμοκηπίου, μπορεί να εκφραστεί ως ένας ενιαίος αριθμός, όπως φαίνεται στη σχέση 5.7. Η επιρροή των βασικών αέριων ρύπων στο ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα απεικονίζεται στον Πίνακα 5.14. Απαιτούμενα στοιχεία για τον υπολογισμό αυτής της ποσότητας από το λογισμικό MOVES2014a είναι το συνολικό ατμοσφαιρικό διοξειδίο του άνθρακα, η κατανάλωση καυσίμου των οχημάτων καθώς και άλλοι αέριοι ρύποι (βλ. Σχήμα 5.15), τα οποία όμως δεν παρουσιάζονται στα τελικά αποτελέσματα λόγω της μικρής επιρροής τους.

$$eqCO_2 = CO_2 * GWP_{CO_2} + CH_4 * GWP_{CH_4} + N_2O * GWP_{N_2O} \quad (5.7)$$

Πίνακας 5.14 100-έτη ποσότητας θέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά ρύπο

| Αέριος Ρύπος | Global Warming Potential (GWP) |
|---|---|
| Μεθάνιο ($CH_4$) | 25 |
| Νιτρικό οξείδιο ($N_2O$) | 298 |
| Διοξείδιο του άνθρακα ($CO_2$) | 1 |




*Σχήμα 5.15 Είδος ρύπων λογισμικού MOVES2014a*

<u>Μετεωρολογικά Δεδομένα (Meteorology Data)</u>

Έχοντας την τοποθεσία και την ημερομηνία εκτέλεσης των μετρήσεων επιλέχθηκαν για τις δυο ημέρες μετρήσεων, από τα στοιχεία της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, η θερμοκρασία και η υγρασία του περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα στις 25/06/2001 η θερμοκρασία ήταν στους 28° C (82.4 ° F) και η υγρασία 30%, στις 11/07/2002 ήταν στους 32 ° C (89.6 ° F) και η υγρασία στο 40%, στις 04/07/2016 η θερμοκρασία ήταν στους 31 ° C (87.8 ° F) και η υγρασία στο 46%, ενώ στις 29/07/2016 η θερμοκρασία ήταν στους 33 ° C (91.4 ° F) και η υγρασία στο 41%. Στον Πίνακα 5.16 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα για τις μετρήσεις στις 25/06/2001. Το λογισμικό αναγνωρίζει τη θερμοκρασία σε βαθμούς Fahrenheit, για αυτό έγινε και η αντίστοιχη μετατροπή με βάση τη σχέση 5.8.

$$T_{(°F)} = T_{(°C)} * 1.8 + 32 \quad (5.8)$$

Ένα παράδειγμα δεδομένων εισόδου των μετεωρολογικών δεδομένων για το λογισμικό υπολογισμού των ρύπων MOVES2014a εμφανίζεται στον Πίνακα 5.16.

Πίνακας 5.16 Μετεωρολογικά δεδομένα λογισμικού MOVES2014a

| | A | B | C | D | E |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | monthID | zoneID | hourID | temperature | relHumidity |
| 2 | 4 | 61130 | 1 | 82,4 | 30 |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |

Μήκος και κατά μήκος κλίση οδού (Link Length & Link Grade)

Το μήκος του συνδέσμου ήταν κάθε φορά το ομογενοποιημένο μήκος που είχε προκύψει μετά την ανάλυση των στοιχείων από τα τμήματα των οδών, ενώ επιλέχθηκε μια προσεγγιστική τιμή της κατά μήκους κλίσης μέσω μέτρησης υψομετρικών διαφορών από το Google Earth. Η τιμή αυτή εκτιμήθηκε για όλα τα τμήματα στο 2.5%, όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 5.17.

Πίνακας 5.17 Μήκος και κατά μήκος κλίση οδού λογισμικού MOVES2014a

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | linkID | countyID | zoneID | roadTypeID | linkLength | linkVolume | linkAvgSpeed | linkDescription | linkAvgGrade |
| 2 | 2 | 6011 | 60110 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 2 | 6011 | 60110 | 3 | 0,33 | 1 | 45 | 0 | 2,5 |

Μέση ταχύτητα οδού (Link Average Speed)

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκε ο τρόπος υπολογισμού της ταχύτητας για κάθε είδος οχήματος και ανάλογα την ομαλότητα. Συνεπώς το πρόγραμμα εκτελέσθηκε για κάθε ομογενοποιημένο τμήμα δυο φορές, λόγω των δυο ταχυτήτων και στο τέλος επιλέχθηκαν οι ρύποι για κάθε όχημα με την αντίστοιχη ταχύτητα τους (βλ. Πίνακα 5.18). Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι το λογισμικό αναγνωρίζει την ταχύτητα σε μονάδες μίλια ανά ώρα (mph) οπότε έπρεπε να γίνει η μετατροπή από την υπολογισμένη ταχύτητα χιλιόμετρα ανά ώρα (km/h).

$$1\ km/h = 0.6137\ mph \quad (5.9)$$

Πίνακας 5.18 Μέση ταχύτητα οδού λογισμικού MOVES2014a

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | linkID | countyID | zoneID | roadTypeID | linkLength | linkVolume | linkAvgSpeed | linkDescription | linkAvgGrade |
| 2 | 2 | 6011 | 60110 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 2 | 6011 | 60110 | 3 | 0,33 | 1 | 45 | 0 | 2,5 |

Ηλικία των οχημάτων (Age Distribution)

Τόσο για φορτηγά όσο και για επιβατικά οχήματα, επιλέχθηκε μια μέση τιμή ηλικίας έξι ετών, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.19.

Πίνακας 5.19 Ηλικία οχημάτων λογισμικού MOVES2014a

| | A | B | C | D | E |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | sourceTyp | yearID | ageID | ageFraction | |
| 2 | 21 | 2016 | 0 | 0 | |
| 3 | 21 | 2016 | 1 | 0 | |
| 4 | 21 | 2016 | 2 | 0 | |
| 5 | 21 | 2016 | 3 | 0 | |
| 6 | 21 | 2016 | 4 | 0 | |
| 7 | 21 | 2016 | 5 | 1 | |
| 8 | 21 | 2016 | 6 | 0 | |
| 9 | 21 | 2016 | 7 | 0 | |
| 10 | 21 | 2016 | 8 | 0 | |
| 11 | 21 | 2016 | 9 | 0 | |
| 12 | 21 | 2016 | 10 | 0 | |
| 13 | 21 | 2016 | 11 | 0 | |

Κυκλοφοριακός φόρτος και κατανομή οχημάτων (Link Volume & Link Source Type)

Επειδή το κύριο αντικείμενο της μελέτης είναι η επίδραση της ομαλότητας στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου, κινήθηκαν προς αυτή την κατεύθυνση οι παραδοχές σχετικά με τον κυκλοφοριακό φόρτο και την κατανομή οχημάτων. Όπως αναφέρθηκε και πρωτύτερα, το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει το ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα για ένα όχημα ανά μονάδες μήκους. Συνεπώς το λογισμικό εκτελέσθηκε αρχικά για ένα επιβατικό όχημα και στη συνέχεια ξεχωριστά για ένα φορτηγό όχημα με τις αντίστοιχες ταχύτητες. Οπότε σαν δεδομένα εισόδου στον κυκλοφοριακό φόρτο ήταν ένα όχημα ανά ώρα και στην κατανομή οχημάτων 100 % (δηλαδή δεδομένο εισόδου η τιμή 1) στο αντίστοιχο όχημα κάθε φορά, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.20.

Πίνακας 5.20 Κυκλοφοριακός φόρτος λογισμικού MOVES2014a

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | linkID | countyID | zoneID | roadTypeID | linkLength | linkVolume | linkAvgSpeed | linkDescription | linkAvgGrade |
| 2 | 2 | 6113 | 61130 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 2 | 6113 | 61130 | 5 | 0,33 | 1 | 45 | 0 | 0,025 |

## 5.6 Σύγκριση δεδομένων

### 5.6.1 Βασικές έννοιες στατιστικής

Ακολούθως αναφέρονται βασικές έννοιες της στατιστικής οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα για την επεξεργασία των δεδομένων.

Μέτρα κεντρικής τάσης (measures of central tendency): Σε περίπτωση ανάλυσης ενός δείγματος $x_1, x_2, \ldots, x_v$ η μέση τιμή υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση

$$\overline{\chi} = \frac{1}{\nu}\sum_{i=1}^{\nu}(\chi_i) = \frac{\chi_1 + \chi_2 + \cdots + \chi_\nu}{\nu} \tag{5.10}$$

Μέτρα διασποράς και μεταβλητότητας (measures of variability): Στην περίπτωση όπου τα δεδομένα αποτελούν ένα δείγμα, η διακύμανση συμβολίζεται με $s^2$ και ορίζεται ως

$$s^2 = \frac{1}{\nu - 1}\sum_{i=1}^{\nu}(\chi_i - \overline{\chi})^2 \tag{5.11}$$

Η μαθηματική σχέση που δίνει την τυπική απόκλιση του δείγματος είναι

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{\nu - 1}\sum_{i=1}^{\nu}(\chi_i - \overline{\chi})^2} \tag{5.12}$$

Η συνδιακύμανση (covariance of the two variables) αποτελεί ένα μέτρο της σχέσης μεταξύ δύο περιοχών δεδομένων κι δίνεται από τη σχέση

$$COV\ (X,Y) = \frac{1}{\nu - 1}\sum_{i=1}^{\nu}(\chi_i - \overline{\chi}) * (y_i - \overline{y}) \tag{5.13}$$

Έστω X,Y δύο τυχαίες και συνεχείς μεταβλητές. Ο βαθμός της γραμμικής συσχέτισης των δύο μεταβλητών X και Y, οι οποίες έχουν διασπορά $\sigma_\chi^2$ και $\sigma_y^2$ αντίστοιχα και συνδιασπορά $\sigma XY = cov\ [X,Y]$ καθορίζεται με τον συντελεστή συσχέτισης (correlation coefficient), ο οποίος συμβολίζεται με ρ και ορίζεται ως:

$$\rho = \frac{\sigma xy}{\sigma\chi * \sigma y} \tag{5.14}$$

Ο συντελεστής συσχέτισης ρ εκφράζει το βαθμό και τον τρόπο που οι δύο μεταβλητές συσχετίζονται. Δεν εξαρτάται από τη μονάδα μέτρησης των X και Y και λαμβάνει τιμές στο διάστημα [-1, +1]. Τιμές κοντά στο +1 δηλώνουν ισχυρή θετική συσχέτιση, τιμές κοντά στο -1 δηλώνουν ισχυρή αρνητική συσχέτιση και τιμές κοντά στο 0 δηλώνουν γραμμική ανεξαρτησία των X και Y. Η εκτίμηση του συντελεστή συσχέτισης ρ γίνεται με την αντικατάσταση στην παραπάνω εξίσωση της συνδιασποράς $\sigma_{XY}$ και των διασπορών $\sigma_x$ και $\sigma_y$, από όπου προκύπτει τελικά η έκφραση της εκτιμήτριας r:

$$r(X,Y) = \frac{\sum_{i=1}^{\nu}(\chi_i - \overline{\chi}) * (y_i - \overline{y})}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^{\nu}(\chi_i - \overline{\chi})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^{\nu}(y_i - \overline{y})^2}\right]} \tag{5.15}$$

### 5.6.2 Γραμμική παλινδρόμηση

Για τη συσχέτιση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης, η οποία εξετάζει τη σχέση μεταξύ δύο ή περισσότερων μεταβλητών ώστε να είναι δυνατή η πρόβλεψή της μίας από τις υπόλοιπες.

Με τον όρο εξαρτημένη μεταβλητή εννοείται η μεταβλητή της οποίας η τιμή πρόκειται να προβλεφθεί, ενώ ο όρος ανεξάρτητη μεταβλητή αναφέρεται σε εκείνη την μεταβλητή, η οποία χρησιμοποιείται για την πρόβλεψή της εξαρτημένης μεταβλητής. Η ανεξάρτητη μεταβλητή δε θεωρείται τυχαία αλλά παίρνει καθορισμένες τιμές. Η εξαρτημένη μεταβλητή αντίθετα, θεωρείται τυχαία και «καθοδηγείται» από την ανεξάρτητη μεταβλητή. Προκειμένου να προσδιοριστεί αν μια ανεξάρτητη μεταβλητή ή ένας συνδυασμός ανεξάρτητων μεταβλητών προκαλεί τη μεταβολή της εξαρτημένης μεταβλητής, κρίνεται απαραίτητη η ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων. Η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου αποτελεί μία στατιστική διαδικασία που συμβάλει στην ανάπτυξη εξισώσεων που περιγράφουν τη σχέση μεταξύ των ανεξαρτήτων μεταβλητών και της εξαρτημένης. Επισημαίνεται ότι η επιλογή της μεθόδου ανάπτυξης του μοντέλου βασίζεται στο αν η εξαρτημένη μεταβλητή λαμβάνει συνεχείς η διακριτές τιμές.

Στη περίπτωση που η εξαρτημένη μεταβλητή είναι συνεχές μέγεθος και ακολουθεί κανονική κατανομή χρησιμοποιείται η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης, της οποίας η πιο απλή περίπτωση είναι η απλή γραμμική παλινδρόμηση (simple linear regression). Στην απλή γραμμική παλινδρόμηση υπάρχει μόνο μία ανεξάρτητη μεταβλητή X και μία εξαρτημένη μεταβλητή Y, η οποία προσεγγίζεται ως μία γραμμική συνάρτηση του X. Η τιμή $y_i$ της μεταβλητής Y, για κάθε τιμή $\chi_i$ της μεταβλητής X, δίνεται από τη σχέση:

$$y_i = a + \beta * \chi_i + \varepsilon_i \tag{5.16}$$

Το πρόβλημα της παλινδρόμησης είναι η εύρεση των παραμέτρων α και β που εκφράζουν όσο το δυνατόν καλύτερα τη γραμμική εξάρτηση της εξαρτημένης μεταβλητής Y από την ανεξάρτητη μεταβλητή X. Κάθε ζεύγος τιμών (α, β) καθορίζει

και μία διαφορετική γραμμική σχέση που εκφράζεται γεωμετρικά από μια ευθεία γραμμή και οι δύο παράμετροι ορίζονται ως εξής:

- Ο σταθερός όρος α είναι η τιμή του y για $\chi = 0$
- Ο συντελεστής β του χ είναι η κλίση (slope) της ευθείας ή αλλιώς ο συντελεστής παλινδρόμησης (regression coefficient). Εκφράζει τη μεταβολή της μεταβλητής Y όταν η μεταβλητή X μεταβληθεί κατά μία μονάδα.

Η τυχαία μεταβλητή $\varepsilon_i$ ονομάζεται σφάλμα της παλινδρόμησης (regression error) και ορίζεται ως η διαφορά της $y_i$ από τη δεσμευμένη μέση τιμή $E(Y \mid X = \chi_i)$ όπου $E(Y \mid X = \chi_i) = \alpha + \beta\chi_i$. Για την ανάλυση της γραμμικής παλινδρόμησης γίνονται οι παρακάτω υποθέσεις:

- Η μεταβλητή X είναι ελεγχόμενη για το πρόβλημα υπό μελέτη, δηλαδή είναι γνωστές οι τιμές της χωρίς καμία αμφιβολία.
- Η εξάρτηση της Y από τη X είναι γραμμική.
- Το σφάλμα παλινδρόμησης έχει μέση τιμή μηδέν για κάθε τιμή της X και η διασπορά του είναι σταθερή και δεν εξαρτάται από τη X.

Οι παραπάνω υποθέσεις, που αφορούν τη γραμμικότητα και τη σταθερή διασπορά, αποτελούν χαρακτηριστικά πληθυσμών με κανονική κατανομή. Με αυτόν τον τρόπο συνήθως σε προβλήματα γραμμικής παλινδρόμησης γίνεται η υπόθεση ότι η δεσμευμένη κατανομή της Y είναι κανονική.

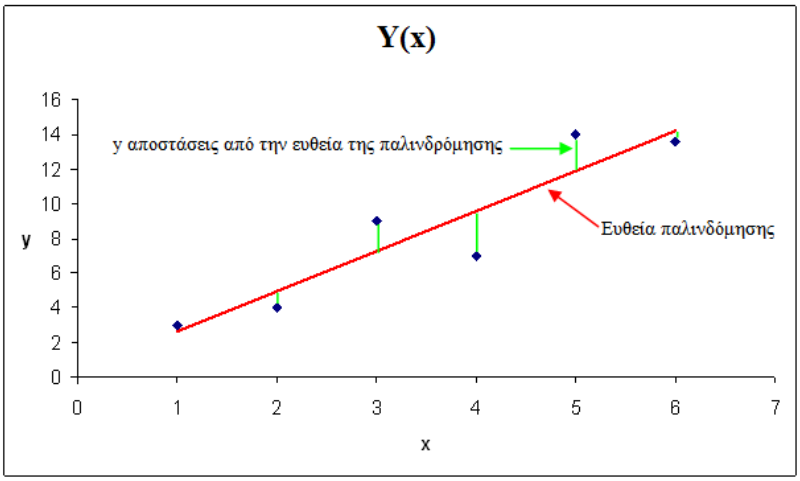
Σε περίπτωση που η εξαρτημένη μεταβλητή Y εξαρτάται γραμμικά από περισσότερες από μία ανεξάρτητες μεταβλητές X ($X_1$, $X_2$,, $X_3$,…, $X_\nu$,) τότε εφαρμόζεται η πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση (multiple linear regression). Η εξίσωση η οποία αποτυπώνει τη σχέση ανάμεσα στην εξαρτημένη και τις ανεξάρτητες μεταβλητές έχει την παρακάτω γενική μορφή:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 * \chi_{1_i} + \beta_2 * \chi_{2_i} + \cdots + \beta_\nu * \chi_{\nu_i} + \varepsilon_i \qquad (5.17)$$

Οι υποθέσεις της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης είναι ίδιες με εκείνες της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, δηλαδή υποθέτει κανείς ότι τα σφάλματα $\varepsilon_i$ της παλινδρόμησης (όπως και η τυχαία μεταβλητή Y για κάθε τιμή της X) ακολουθούν κανονική κατανομή με σταθερή διασπορά. Γενικά το πρόβλημα και η εκτίμηση της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης δε διαφέρει ουσιαστικά από εκείνο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης. Ένα καινούργιο στοιχείο στην πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση είναι ότι πριν προχωρήσει κανείς στην εκτίμηση των παραμέτρων πρέπει να ελέγξει αν πράγματι πρέπει να συμπεριληφθούν όλες οι ανεξάρτητές μεταβλητές στο μοντέλο. Εκείνο που απαιτείται να εξασφαλιστεί είναι η μηδενική συσχέτιση των ανεξαρτήτων μεταβλητών, δηλαδή θα πρέπει να ισχύει

$$\rho(Xi, Xj) i \neq j \rightarrow 0 \qquad (5.18)$$

Η εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης γίνεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (least squares method) (βλ. Σχήμα 5.21).




*Σχήμα 5.21 Ευθεία Ελαχίστων Τετραγώνων*

Σύμφωνα με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, ο προσδιορισμός των συντελεστών βi δίνει μία προσεγγιστική ευθεία παλινδρόμησης της Y πάνω στη X. Σκοπός είναι το άθροισμα των τετραγώνων των κατακόρυφων αποστάσεων των σημείων (X,Y) από την ευθεία να είναι το ελάχιστο.

### 5.6.3 Διαδικασία ελέγχου γραμμικών συσχετίσεων

Κάθε σχέση που αναπτύσσεται, για να θεωρηθεί αποδεκτή πρέπει να πληροί κάποιες βασικές προϋποθέσεις. Αρχικά πρέπει να ισχύει η κανονικότητα και βάσει της προϋπόθεσης αυτής, απαιτείται οι τιμές της μεταβλητής να ακολουθούν κανονική κατανομή.

- Μη συσχέτιση των ανεξάρτητων μεταβλητών

Βασική προϋπόθεση είναι η μη συσχέτιση των ανεξαρτήτων μεταβλητών. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές πρέπει να είναι γραμμικώς ανεξάρτητες μεταξύ τους, δηλαδή να ισχύει $\rho(Xi, Xj)i \neq j \rightarrow 0$, διότι διαφορετικά δεν είναι δυνατή η εξακρίβωση της επιρροής της κάθε μεταβλητής στο αποτέλεσμα. Αν δηλαδή σε ένα μοντέλο εισάγονται δύο μεταβλητές που σχετίζονται αρκετά μεταξύ τους, εμφανίζονται προβλήματα μεροληψίας και επάρκειας.

- Λογική ερμηνεία των προσήμων

Σημαντικό κριτήριο για τη αποδοχή ενός μοντέλου μετά τη διαμόρφωσή του είναι οι τιμές και τα πρόσημα των συντελεστών παλινδρόμησης βi. Πρέπει αρχικά να υπάρχει λογική ερμηνεία των πρόσημων τους. Το θετικό πρόσημο του συντελεστή δηλώνει αύξηση της εξαρτημένης μεταβλητής με την αύξηση της ανεξάρτητης. Αντίθετα, αρνητικό πρόσημο επιφέρει μείωση της εξαρτημένης μεταβλητής με την αύξηση της ανεξάρτητης.

- Συντελεστής προσαρμογής $R^2$

Μετά τον έλεγχο στατιστικής εμπιστοσύνης εξετάζεται η ποιότητα του μοντέλου. Η ποιότητα του μοντέλου καθορίζεται με βάση το συντελεστή προσαρμογής. Ο συντελεστής $R^2$ χρησιμοποιείται ως κριτήριο καλής προσαρμογής των δεδομένων στο γραμμικό μοντέλο και ορίζεται από τη σχέση :

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \tag{5.19}$$

όπου

$$SSR = \sum_{i=1}^{\nu} \left(y_i - \tilde{y}\right)^2 = \beta^2 \sum_{i=1}^{\nu} \left(\chi_i - \tilde{\chi}\right)^2 \tag{5.20}$$

$$SST = \sum_{i=1}^{\nu} \left(y_i - \tilde{y}\right)^2 \tag{5.21}$$

Τα αρχικά SSR και SST έχουν προέλθει από τις εκφράσεις «υπόλοιπο άθροισμα τετραγώνων» (Residual Sum of Squares) και «συνολικό άθροισμα τετραγώνων (Total Sum of Squares) αντίστοιχα. Με $\tilde{y}$ συμβολίζεται η προβλεπόμενη τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής από την ανεξάρτητη.

Ο συντελεστής αυτός εκφράζει το ποσοστό της μεταβλητότητας της μεταβλητής Y που εξηγείται από τη μεταβλητή X. Λαμβάνει τιμές από 0 έως 1. Όσο πιο κοντά βρίσκεται η τιμή του $R^2$ στη μονάδα, τόσο πιο ισχυρή γίνεται η γραμμική σχέση εξάρτησης των μεταβλητών Y και X. Ο συντελεστής $R^2$ έχει συγκριτική αξία, κάτι το οποίο σημαίνει ότι δεν υπάρχει συγκεκριμένη τιμή του $R^2$ που είναι αποδεκτή ή απορριπτέα, αλλά μεταξύ δύο ή περισσότερων μοντέλων επιλέγεται ως καταλληλότερο εκείνο με τη μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή $R^2$. Ο συντελεστής $R^2$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο ισχυρότητας της γραμμικής σχέσης ανεξάρτητα από το αν το X παίρνει καθορισμένες τιμές ή αν είναι τυχαία μεταβλητή.

- Στατιστική αξιολόγηση παραμέτρων

Η στατιστική αξιολόγηση των παραμέτρων πραγματοποιείται μέσω του ελέγχου t-test (κριτήριο της κατανομής Student). Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό να διαπιστωθεί αν οι παράμετροι που υπολογίστηκαν διαφέρουν σημαντικά από το 0, να προσδιοριστεί η στατιστική σημαντικότητά των ανεξαρτήτων μεταβλητών και να καθοριστεί ποιες μεταβλητές τελικά θα συμπεριληφθούν στο τελικό μοντέλο. Ο συντελεστής t εκφράζεται από τη σχέση:

$$tstat = \frac{\beta i}{s.e} \tag{5.22}$$

Όπου s.e το τυπικό σφάλμα των σταθερών παραμέτρων (standard error). Βάσει της παραπάνω σχέσης, όσο μειώνεται το τυπικό σφάλμα τόσο αυξάνεται η τιμή του $t_{stat}$ και συνεπώς αυξάνεται η επάρκεια (efficiency). Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του $t_{stat}$ τόσο μεγαλύτερη είναι η επιρροή της συγκεκριμένης μεταβλητής στο τελικό αποτέλεσμα. Ανάλογα το επίπεδο εμπιστοσύνης, τους βαθμούς ελευθερίας και το μέγεθος του δείγματος εκλέγεται μια τιμή $t_{stat}$, η οποία αν είναι μικρότερη από την εκάστοτε προκύπτουσα $t_{stat}$ μιας ανεξάρτητης μεταβλητής, τότε η μεταβλητή θεωρείτε αποδεκτή και στατιστικά σημαντική.

- Αξιολόγηση - Έλεγχος F-test

$$F = \frac{mean\ SSR}{mean\ SSE} \tag{5.23}$$

όπου SSR είναι το άθροισμα των τετραγώνων της παλινδρόμησης και το SSE το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων. Για ένα καλό μοντέλο σε ένα επίπεδο σημαντικότητας 95% πρέπει το meanSSR να είναι μεγάλο και το meanSSE μικρό, δηλαδή συνολικά το F να είναι μεγάλο. Μια προσεγγιστική τιμή μεγαλύτερη του τέσσερα δείχνει ότι οι βi όροι του μοντέλου δεν είναι μηδενικοί.

- Σφάλμα εξίσωσης του μοντέλου

Το σφάλμα εξίσωσης του μοντέλου θα πρέπει και αυτό με τη σειρά του να πληροί τις εξής βασικές προϋποθέσεις. Πρώτον θα πρέπει να ακολουθεί κανονική κατανομή, δεύτερον να έχει σταθερή διασπορά και μηδενική συσχέτιση, δηλαδή να είναι τυχαίο. Η διασπορά του σφάλματος εξαρτάται από τον συντελεστή $R^2$. Όσο μεγαλύτερο είναι το $R^2$ τόσο μικρότερη είναι η διασπορά ου σφάλματος, δηλαδή τόσο καλύτερη είναι η πρόβλεψη που βασίζεται στην ευθεία παλινδρόμηση. Ο έλεγχος της μηδενικής συσχέτισης εξετάζεται τόσο με το διάγραμμα υπολοίπων (σφαλμάτων)–προβλεπόμενων τιμών όσο και με τον έλεγχο Durbin-Watson. Σύμφωνα με τον έλεγχο Durbin-Watson, εκτιμάται η μηδενική υπόθεση $H_0$ ότι τα σφάλματα δεν έχουν αυτοσυσχέτιση και στη συνέχεια υπολογίζεται η τιμή της παραμέτρου d σύμφωνα με τη σχέση 5.24 (Lind et.al, 2014).

$$d = \frac{\sum_{t=2}^{T}(e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^{T} {e_t}^2} \tag{5.24}$$

Σε περίπτωση που βρεθεί μεγαλύτερη από την κρίσιμη τιμή $d_u$, η οποία προκύπτει από κατάλληλους πίνακες ανάλογα το επίπεδο σημαντικότητας, το μέγεθος του δείγματος και τον αριθμό των ανεξάρτητων μεταβλητών, τότε η μηδενική υπόθεση γίνεται αποδεκτή.

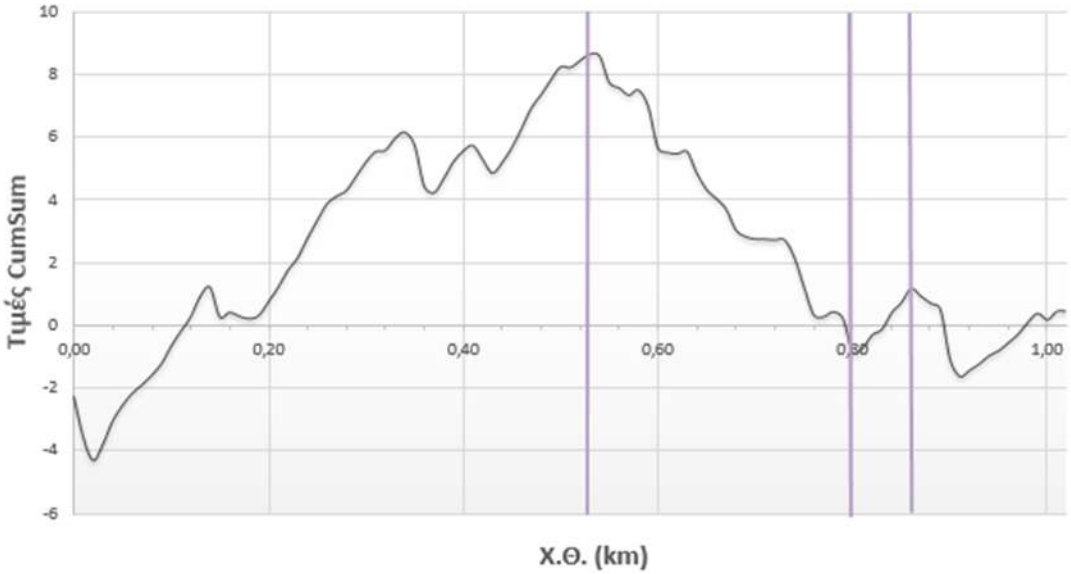
# 6

# ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΜΕΝΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΕΚΠΟΜΠΗ ΑΕΡΙΩΝ

## 6.1 Διαχωρισμός ομογενών τμημάτων

### 6.1.1 Κόμβοι αυτοκινητοδρόμου

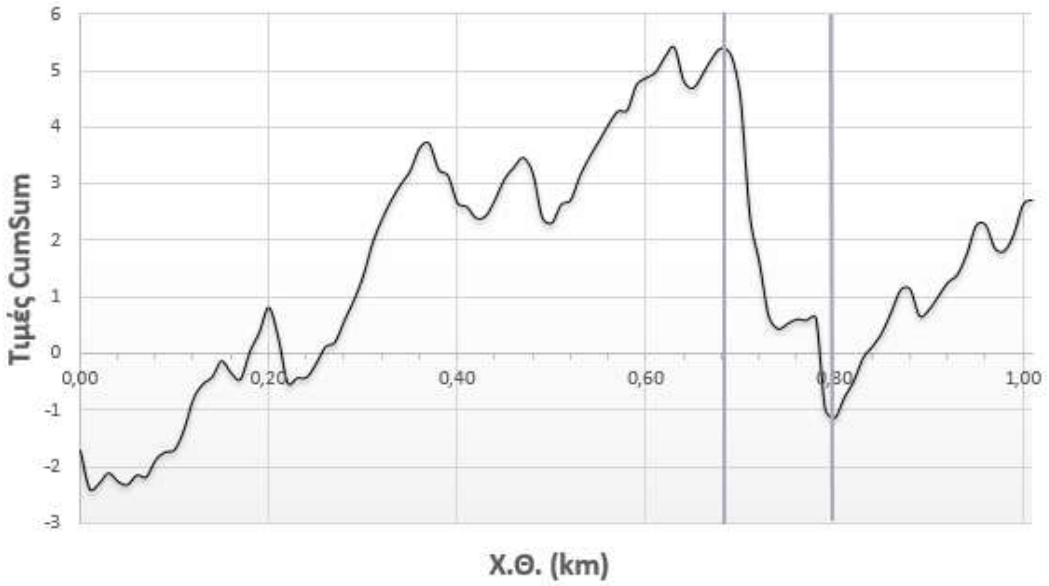
Τα πρώτα αποτελέσματα που εξήχθησαν, έπειτα από την εφαρμογή της CumSum μεθόδου αλλά και των t-test ελέγχων, αφορούσαν στην ομογενοποίηση σε τμήματα των τεσσάρων κόμβων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1, ο κόμβος 1 χωρίζεται σε τέσσερα επιμέρους υποτμήματα, στα οποία θα υπολογιστούν στη συνέχεια χαρακτηριστικές τιμές του δείκτη IRI. Τα ομογενοποιημένα τμήματα που προέκυψαν είναι 0.00 – 0.54 km, 0.55 - 0.80 km, 0.81 - 0.86 km καθώς και 0.87 - 1.02 km.




*Σχήμα 6.1 Διαχωρισμός ομογενοποιημένων τμημάτων – Κόμβος 1*

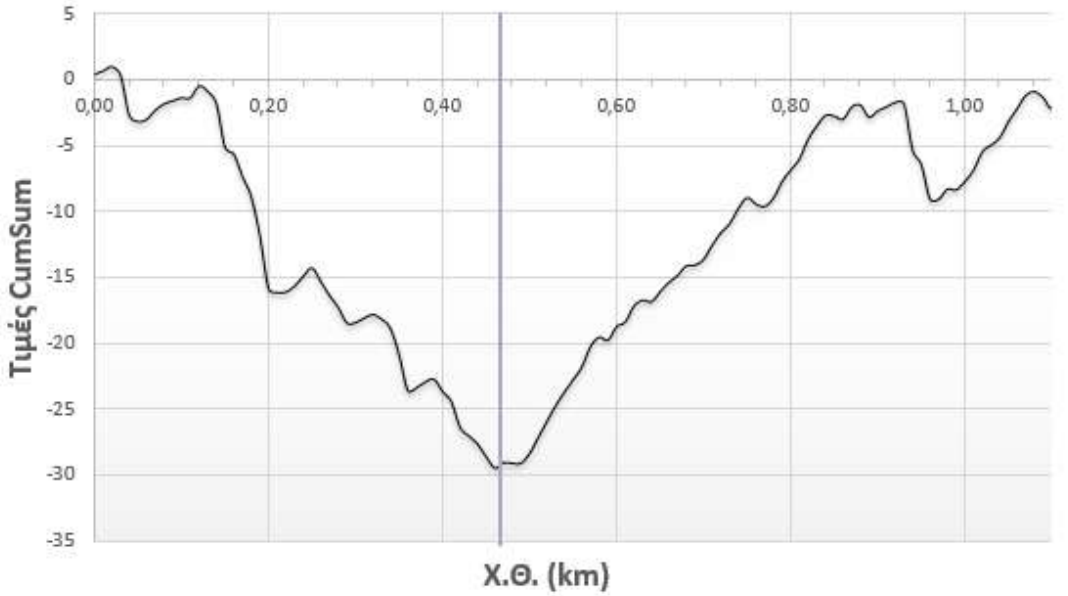
Οι t-test έλεγχοι της ομογενοποίησης όλων των τμημάτων που μελετήθηκαν εμφανίζονται στο Παράρτημα της παρούσας εργασίας

Ο κόμβος 2 αναλύθηκε σε τρία επιμέρους ομογενοποιημένα υποτμήμα, όπως φανερώνει το Σχήμα 6.2. Οι χιλιομετρικές θέσεις των τμημάτων αυτών είναι αντίστοιχα 0.00 – 0.68 km, 0.69 – 0.80 km και 0.81 - 1.01 km.



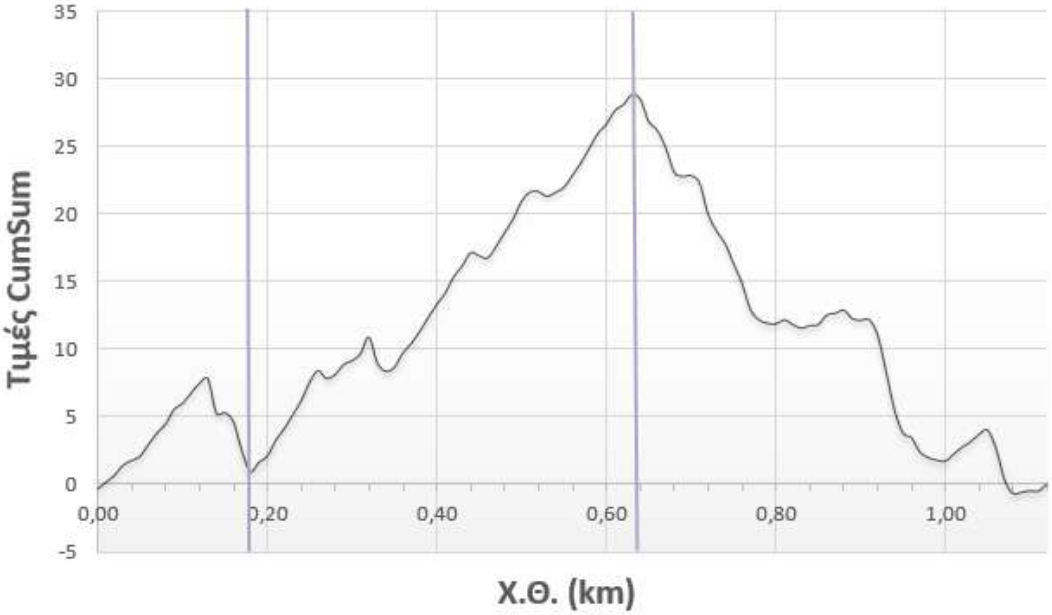

*Σχήμα 6.2 Διαχωρισμός ομογενοποιημένων τμημάτων – Κόμβος 2*

Αρκετά πιο ομογενής από πλευράς ομαλότητας είναι ο κόμβος 3 που μελετήθηκε, όπως διακρίνεται στο Σχήμα 6.3. Χωρίστηκε σε δυο ομογενοποιημένα υποτμήμα σχετικά ίσα μεταξύ τους από άποψη μήκους, που έχουν χιλιομετρικές θέσεις αντίστοιχα 0.00 – 0.46 km και 0.47 – 1.10 km.




*Σχήμα 6.3 Διαχωρισμός ομογενοποιημένων τμημάτων – Κόμβος 3*

Τέλος ο κόμβος 4 διακρίνεται σε δυο τρία ομογενή υποτμήματα (βλ. Σχήμα 6.4).




*Σχήμα 6.4 Διαχωρισμός ομογενοποιημένων τμημάτων – Κόμβος 4*

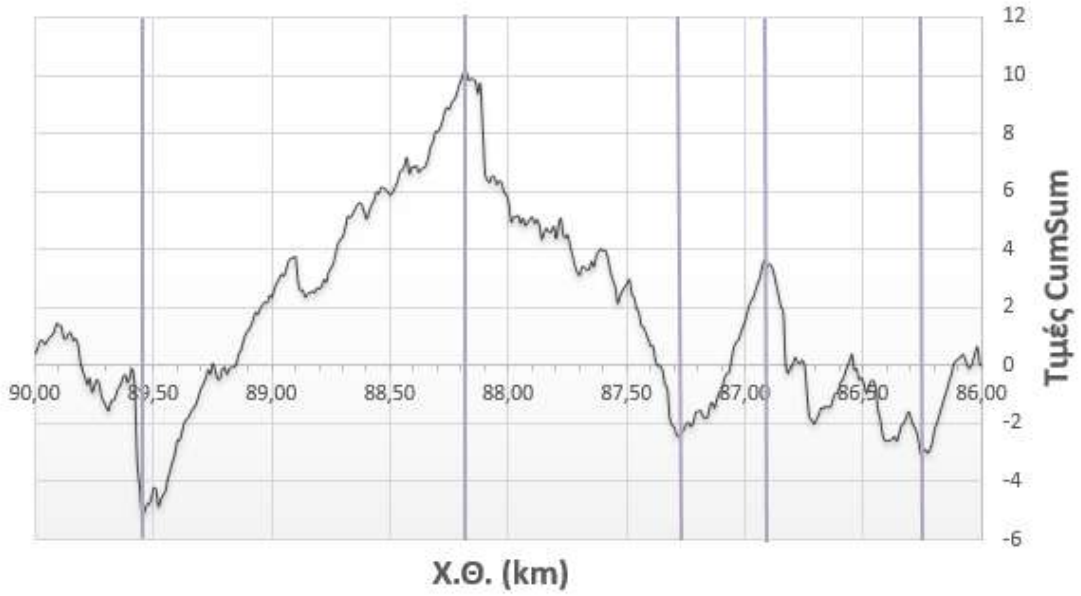
Οι χιλιομετρικές τους θέσεις ξεκινώντας από την αφετηρία είναι 0.00 – 0.18 km, 0.19 – 0.64 km και 0.65 – 1.12 km.

### 6.1.2 Τμήματα κύριου άξονα αυτοκινητοδρόμου

Μετά την ανάλυση των κόμβων, μελετήθηκε η ομογενοποίηση τριών παρακείμενων κύριων τμημάτων του ίδιου αυτοκινητοδρόμου δυο λωρίδων ανά κατεύθυνση. Το πρώτο τμήμα του αυτοκινητοδρόμου που εξετάσθηκε, αφορά μετρήσεις μόνο από τη δεξιά λωρίδα στις χιλιομετρικές θέσεις από 86.00 έως 90.00 km, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.5. Το τμήμα αυτό διαχωρίστηκε σε τέσσερις ομογενοποιημένες υποπεριοχές με αντίστοιχες χιλιομετρικές θέσεις 86.00 – 86.88 km, 86.89 – 88.20 km, 88.21 – 89.75 km καθώς και 89.76 – 90.00 km.

*Σχήμα 6.5 Διαχωρισμός ομογενοποιημένων τμημάτων – Αυτοκινητόδρομος 1*

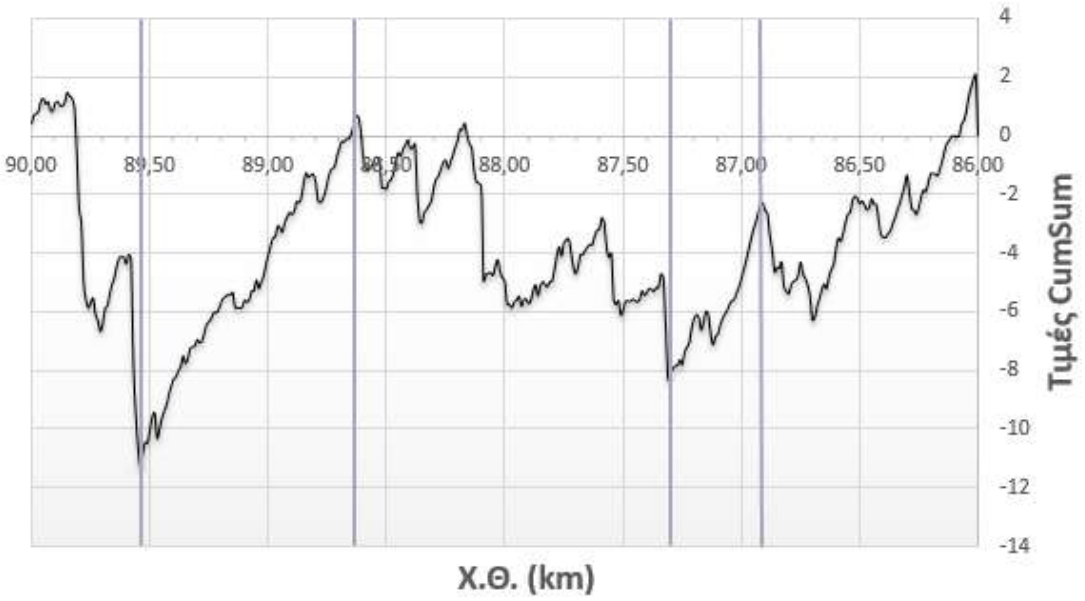
Στη συνέχεια είχαν συλλεχθεί στοιχεία και για τις δυο λωρίδες ενός δεύτερου κύριου τμήματος του αυτοκινητοδρόμου από την αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή για χιλιομέτρηση από 90.00 έως 86.00 km. Παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6 η ομογενοποίηση της δεξιάς λωρίδας (Λωρίδα 1).




*Σχήμα 6.6 Διαχωρισμός ομογενοποιημένων τμημάτων–Αυτοκινητόδρομος 2_Λωρίδα 1*

Το τμήμα έχει διαχωριστεί σε έξι υποτμήματα με αντίστοιχες χιλιομετρικές θέσεις 90.00 – 89.55 km, 89.54 – 88.18 km, 88.17 – 87.29 km, 87.28 – 86.92 km, 86.91 – 86.26 km και 86.25 – 86.00 km.

Τέλος η αριστερή λωρίδα (Λωρίδα 2) του δεύτερου κύριου τμήματος αυτοκινητοδρόμου έχει χωριστεί σε πέντε ομογενοποιημένες υποπεριοχές, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.7.



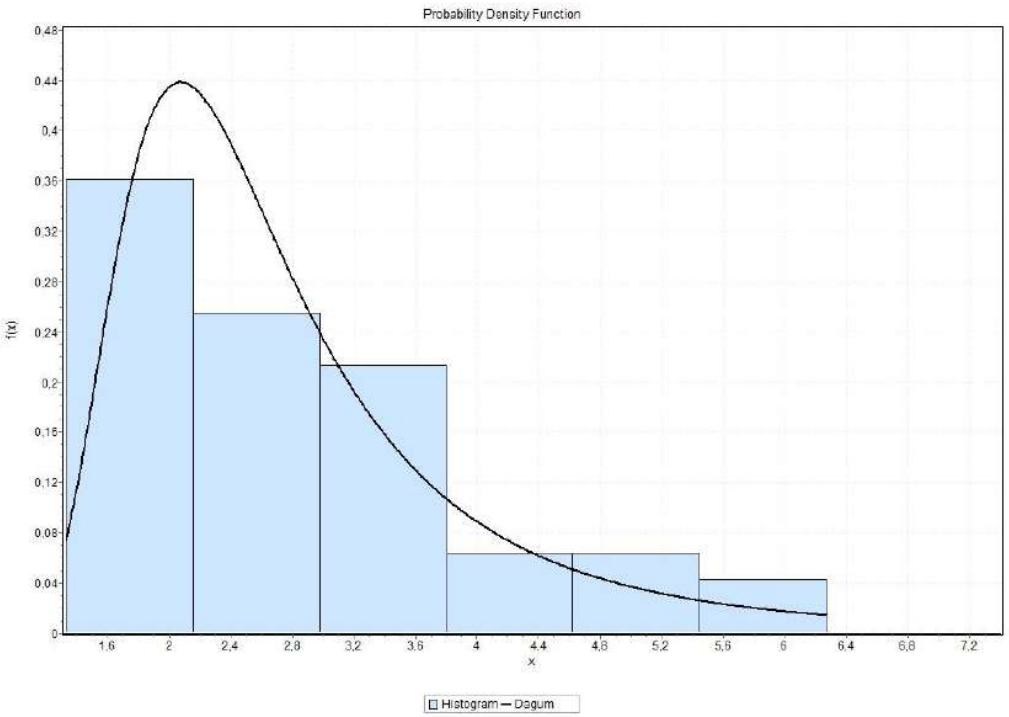

*Σχήμα 6.7 Διαχωρισμός ομογενοποιημένων τμημάτων–Αυτοκινητόδρομος 2_Λωρίδα 2*

Οι χιλιομετρικές θέσεις των ομογενών υποτμημάτων είναι αντίστοιχα 90.00 – 89.54 km, 89.83 – 88.63 km, 88.62 – 87.31 km, 87.30 – 86.91 km και 86.90 – 86.00 km.

## 6.2 Κατανομές δεδομένων

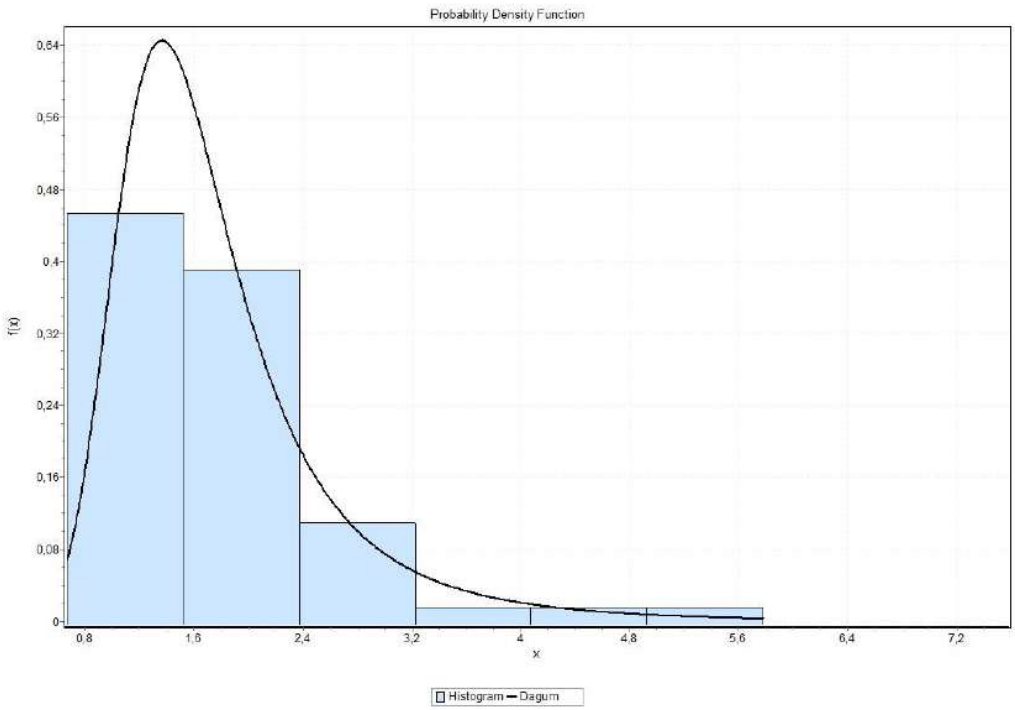
Το επόμενο βήμα μετά την ομογενοποίηση αποτελεί η εύρεση της χαρακτηριστικής τιμής του δείκτη ομαλότητας IRI για το κάθε υποτμήμα, η οποία συμβολίζεται ως IRIc. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, χρησιμοποιήθηκαν οι κατανομές Dagum και Dagum(4P) για την προσαρμογή των στοιχείων ομαλότητας του εκάστοτε δείγματος δεδομένων. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν ως παράδειγμα τα αποτελέσματα της προσαρμογής κατανομών για τον κόμβο 3. Οι κατανομές για όλα τα υπό εξέταση τμήματα παρουσιάζονται στο Παράρτημα της παρούσας μελέτης.

Στο Σχήμα 6.8 διακρίνεται το ιστόγραμμα συχνοτήτων για τις διάφορες τιμές ομαλότητας που μετρήθηκαν στο υπό εξέταση τμήμα καθώς και η καμπύλη συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Dagum. Παρατηρείται λοιπόν ότι η καμπύλη εμφανίζει μέγιστο στην τιμή ομαλότητας περίπου στο 2.10. Αφού γίνει και ο έλεγχος με την πυκνότητα με τη χρήση του λογισμικού, επιλέγεται η χαρακτηριστική τιμή ομαλότητας 2.10 m/km για το πρώτο ομογενοποιημένο τμήμα του κόμβου 3.




*Σχήμα 6.8 Προσαρμογή κατανομής – Κόμβος 3 (Τμήμα 0.00 – 0.46 km)*

Με την ίδια λογική επιλέγεται η χαρακτηριστική τιμή 1.46 m/km για το δεύτερο ομογενοποιημένο υποτμήμα του κόμβου 3, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.9.




*Σχήμα 6.9 Προσαρμογή κατανομής – Κόμβος 3 (Τμήμα 0.47 – 1.10 km)*

Έπειτα από την εφαρμογή των κατανομών σε κάθε υποτμήμα κόμβων και παρακείμενων κύριων τμημάτων αυτοκινητοδρόμου καταλήγουμε στον συγκεντρωτικό πίνακα, που απεικονίζεται με τον Πίνακα 6.10, ο οποίος περιλαμβάνει το μήκος κάθε ομογενοποιημένου υποτμήματος σε μονάδες χιλιομέτρων (km), την χαρακτηριστική τιμή IRIc σε μονάδες μέτρα ανά χιλιόμετρα (m/km), η οποία θα χρησιμοποιηθεί εν συνεχεία για τον υπολογισμό των ρύπων και την αντίστοιχη κατανομή που προσαρμοζόταν καλύτερα στα δεδομένα.

Πίνακας 6.10 Κατανομές και χαρακτηριστικές τιμές IRI

| ΜΗΚΟΣ (km) | IRIc (m/km) | ΚΑΤΑΝΟΜΗ | ΟΔΙΚΟ ΤΜΗΜΑ |
|---|---|---|---|
| 0.55 | 0.70 | DAGUM(4P) | ΚΟΜΒΟΣ 1 |
| 0.26 | 1.10 | DAGUM(4P) | ΚΟΜΒΟΣ 1 |
| 0.06 | 0.81 | DAGUM(4P) | ΚΟΜΒΟΣ 1 |
| 0.16 | 0.90 | DAGUM(4P) | ΚΟΜΒΟΣ 1 |
| 0.69 | 0.80 | DAGUM(4P) | ΚΟΜΒΟΣ 2 |
| 0.12 | 1.00 | DAGUM(4P) | ΚΟΜΒΟΣ 2 |
| 0.21 | 0.71 | DAGUM | ΚΟΜΒΟΣ 2 |
| 0.47 | 2.10 | DAGUM | ΚΟΜΒΟΣ 3 |
| 0.64 | 1.46 | DAGUM | ΚΟΜΒΟΣ 3 |
| 0.19 | 1.11 | DAGUM(4P) | ΚΟΜΒΟΣ 4 |
| 0.46 | 1.10 | DAGUM | ΚΟΜΒΟΣ 4 |
| 0.48 | 2.20 | DAGUM | ΚΟΜΒΟΣ 4 |
| 0.89 | 0.80 | DAGUM(4P) | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 1 |
| 1.33 | 0.79 | DAGUM | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 1 |
| 1.55 | 0.67 | DAGUM(4P) | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 1 |
| 0.25 | 0.90 | DAGUM(4P) | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 1 |
| 0.46 | 0.80 | DAGUM | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 2_Λ1 |
| 0.67 | 0.78 | DAGUM(4P) | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 2_Λ1 |
| 0.89 | 0.99 | DAGUM(4P) | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 2_Λ1 |
| 0.37 | 0.74 | DAGUM | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 2_Λ1 |
| 0.66 | 0.80 | DAGUM(4P) | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 2_Λ1 |
| 0.26 | 0.71 | DAGUM | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 2_Λ1 |
| 0.45 | 0.82 | DAGUM(4P) | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 2_Λ2 |
| 0.91 | 0.85 | DAGUM(4P) | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 2_Λ2 |
| 1.32 | 0.90 | DAGUM(4P) | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 2_Λ2 |
| 0.40 | 0.80 | DAGUM(4P) | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 2_Λ2 |
| 0.91 | 0.81 | DAGUM(4P) | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 2_Λ2 |

Παρατηρείται ότι υπάρχει ένα ιδιαίτερο εύρος τιμών IRI στους κόμβους αυτοκινητοδρόμου σε αντίθεση με τις σταθερά χαμηλές τιμές στα παρακείμενα κύρια τμήματα. Συγκεκριμένα, φαίνεται η υποβαθμισμένη κατάσταση ομαλότητας οδοστρώματος στους κόμβους σε σχέση με τα κύρια τμήματα οδού, γεγονός που πρόκειται να επηρεάσει άμεσα τους ρύπους που εκπέμπονται.

## 6.3 Υπολογισμός ρύπων

Στο τελικό λοιπόν στάδιο της επεξεργασίας των στοιχείων υπολογίστηκαν οι αέριοι ρύποι που εκπέμπονται ως ισοδύναμο διοξείδιο του άνθρακα (CO2 equivalent) σε κάθε ομοιογενές υποτμήμα για ένα όχημα, χρησιμοποιώντας το λογισμικό MOVES2014a, όπως αναλύθηκε στο 5$^{o}$ κεφάλαιο της έρευνας.

### 6.3.1 Κόμβοι αυτοκινητοδρόμου

Αρχικά υπολογίστηκε για κάθε μια κατηγορία οχήματος το ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα σε μονάδες γραμμαρίων για κάθε ομογενοποιημένο υποτμήμα κόμβου αυτοκινητοδρόμου. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.11.

Πίνακας 6.11 Αποτελέσματα ρύπων κόμβων αυτοκινητοδρόμου

| **Κόμβος** | **Τμήμα (km)** | **$IRI_C$ (m/km)** | **V(km/h)** | | **ισοδύναμο CO2 (grams)** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Επιβατικό | | Φορτηγό | |
| | | | Vεπιβ | Vφορτ | Diesel | Gasoline | Diesel | Gasoline |
| 1 | 0.00 – 0.54 | 0.70 | 116.77 | 89.44 | 70.95 | 48.25 | 273.68 | 272.58 |
| | 0.55 – 0.80 | 1.10 | 74.31 | 56.92 | 48.33 | 41.94 | 230.86 | 212.86 |
| | 0.81 – 0.86 | 0.81 | 100.91 | 77.29 | 6.45 | 2.75 | 24.88 | 24.27 |
| | 0.87 – 1.02 | 0.90 | 90.82 | 69.57 | 23.62 | 20.57 | 147.75 | 144.65 |
| 2 | 0.00 – 0.68 | 0.80 | 102.17 | 78.26 | 89.01 | 37.95 | 343.34 | 330.90 |
| | 0.69 – 0.80 | 1.00 | 81.74 | 62.61 | 19.68 | 17.14 | 123.13 | 120.54 |
| | 0.81 – 1.01 | 0.71 | 115.13 | 88.18 | 26.96 | 18.33 | 106.20 | 103.58 |
| 3 | 0.00 – 0.46 | 2.10 | 38.92 | 29.81 | 162.44 | 141.71 | 816.71 | 792.53 |
| | 0.47 – 1.10 | 1.46 | 55.99 | 42.88 | 176.11 | 111.66 | 954.21 | 915.87 |
| 4 | 0.00 – 0.18 | 1.11 | 73.64 | 56.40 | 35.07 | 30.47 | 167.53 | 154.47 |
| | 0.19 – 0.64 | 1.10 | 74.31 | 56.92 | 85.54 | 74.32 | 408.62 | 376.76 |
| | 0.65 – 1.12 | 2.20 | 37.15 | 28.46 | 169.51 | 145.62 | 822.33 | 798.06 |

Υψηλές τιμές IRI συνεπάγονται και χαμηλές ταχύτητες, ιδίως στα φορτηγά οχήματα, γεγονός που προκαλεί υψηλότερη εκπομπή ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα. Αυτό συμβαίνει κυρίως στους κόμβους 3 και 4, όπου οι τιμές ομαλότητες αντιστοιχούν σε μέτρια έως πολύ κακή κατάσταση ομαλότητας, όπως έχει αναφερθεί και τα όρια των τιμών του δείκτη IRI από τη διεθνή βιβλιογραφία (Tehrani et al., 2015). Σε γενικές γραμμές η τελική τιμή του ισοδύναμου CO2 επηρεάζεται και από το μήκος των ομογενοποιημένων υποτμημάτων, αφού τμήματα με ίδια τιμή IRI αλλά διαφορετικό μήκος εμφανίζουν εντελώς διαφορετικά αποτελέσματα.

### 6.3.2 Τμήματα κύριου άξονα αυτοκινητοδρόμου

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι ρύποι ως ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα και για τα ελεύθερα τμήματα του αυτοκινητοδρόμου. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.12.

Πίνακας 6.12 Αποτελέσματα ρύπων τμημάτων κύριου άξονα αυτοκινητοδρόμου

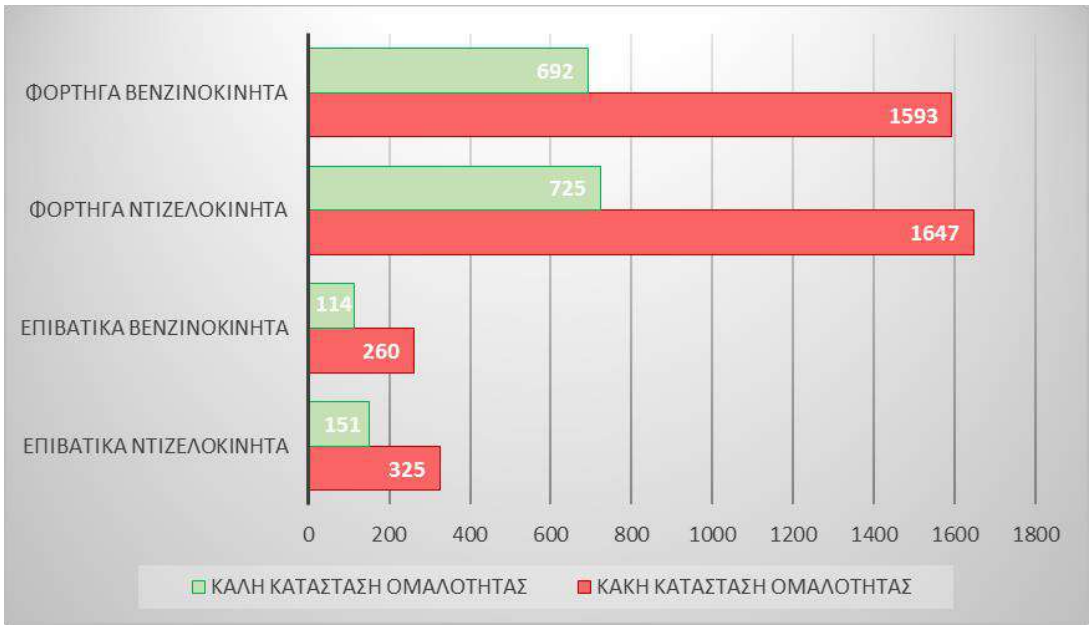
| **Οδικό τμήμα** | **Τμήμα (km)** | **$IRI_C$ (m/km)** | **V(km/h)** | | **ισοδύναμο CO2 (grams)** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Επιβατικό | | Φορτηγό | |
| | | | Vεπιβ | Vφορτ | Diesel | Gasoline | Diesel | Gasoline |
| AUTO1 | 86.00 – 86.88 | 0.80 | 102.17 | 78.26 | 114.81 | 48.95 | 442.86 | 432.01 |
| | 86.89 – 88.20 | 0.79 | 103.47 | 79.25 | 169.92 | 72.45 | 655.43 | 639.37 |
| | 88.21 – 89.75 | 0.67 | 122.00 | 93.45 | 209.30 | 135.73 | 793.67 | 782.30 |
| | 89.76 – 90.00 | 0.90 | 90.82 | 69.57 | 36.85 | 32.08 | 230.49 | 225.51 |
| AUTO2_Λ1 | 90.00 – 89.55 | 0.80 | 102.17 | 78.26 | 58.70 | 25.03 | 226.41 | 220.86 |
| | 89.54 – 88.18 | 0.78 | 104.79 | 80.27 | 86.11 | 36.71 | 332.15 | 324.11 |
| | 88.17 – 87.29 | 0.99 | 82.56 | 63.24 | 155.50 | 135.44 | 972.70 | 952.28 |
| | 87.28 – 86.92 | 0.74 | 110.46 | 84.61 | 47.69 | 31.76 | 183.94 | 179.97 |
| | 86.91 – 86.26 | 0.80 | 102.17 | 78.26 | 85.19 | 39.32 | 328.61 | 320.55 |
| | 86.25 – 86.00 | 0.71 | 115.13 | 88.18 | 33.35 | 22.21 | 128.63 | 126.11 |
| AUTO2_Λ2 | 90.00 – 89.54 | 0.82 | 99.68 | 76.35 | 58.70 | 25.03 | 226.41 | 220.86 |
| | 89.83 – 88.63 | 0.85 | 96.16 | 73.66 | 117.39 | 50.05 | 452.82 | 441.71 |
| | 88.62 – 87.31 | 0.90 | 90.82 | 69.57 | 194.87 | 169.71 | 1218.94 | 1193.36 |
| | 87.30 – 86.91 | 0.80 | 102.17 | 78.26 | 51.60 | 22.00 | 199.04 | 192.12 |
| | 86.90 – 86.00 | 0.81 | 100.91 | 77.29 | 116.93 | 49.96 | 450.33 | 439.29 |

Παρατηρείται ότι στα κύρια τμήματα αυτοκινητοδρόμου οι χαρακτηριστικές τιμές ομαλότητας είναι αρκετά χαμηλές και αντιστοιχούν σε πολύ καλή κατάσταση ομαλότητας. Χαμηλές τιμές ομαλότητας συνεπάγονται και υψηλές ταχύτητες οχημάτων, τόσο επιβατικών όσο και φορτηγών. Οι αέριοι ρύποι που εκπέμπονται επηρεάζονται και από το μήκος των υποτμημάτων. Παρόλα αυτά είναι σε αρκετά χαμηλά επίπεδα, αν αναλογιστεί κανείς το μήκος που διανύει ένα όχημα σε σχέση με την ποσότητα των ρύπων που εκπέμπει. Τέλος, είναι εμφανείς οι μεγαλύτερες ποσότητες ισοδυνάμου CO2 που εκπέμπονται από τα φορτηγά οχήματα και στην περίπτωση των κύριων τμημάτων άξονα αυτοκινητοδρόμου.

## 6.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

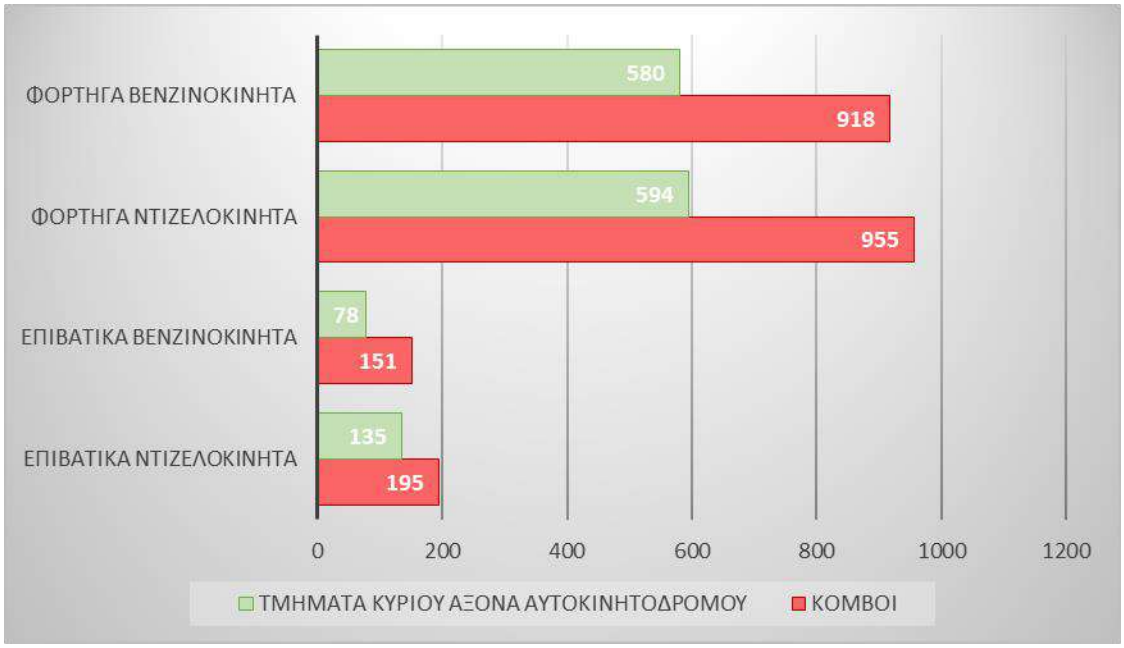
Μετά την ανάλυση των στοιχείων και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων τόσο σε κόμβους όσο και σε παρακείμενα τμήματα κύριου άξονα αυτοκινητοδρόμου εξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα.

Για την καλύτερη σύγκριση των δεδομένων, υλοποιήθηκε αναγωγή της ποσότητας των αέριων ρύπων του ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα στο μήκος για κάθε οδικό υποτμήμα. Παράλληλα ο χαρακτηρισμός της κατάστασης της ομαλότητας του οδοστρώματος πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα όρια της τιμής του δείκτη ομαλότητας IRI, όπως ήδη αναφέρθηκε στην αρχή της παρούσας έρευνας. Αρχικά από πλευράς κατάστασης ομαλότητας παρατηρείται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.13, ότι η κακή κατάσταση ομαλότητας αυξάνει την εκπομπή των ρύπων στο περιβάλλον στο διπλάσιο σε σχέση με την καλή κατάσταση της επιφάνειας του οδοστρώματος. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα απεικονίζεται σε όλες τις κατηγορίες οχημάτων, ενώ η δυσμενέστερη περίπτωση εκπομπής ρύπων εμφανίζεται στην κατηγορία των φορτηγών ντιζελοκίνητων, κάτι που αποδεικνύεται και από τη διεθνή βιβλιογραφία.



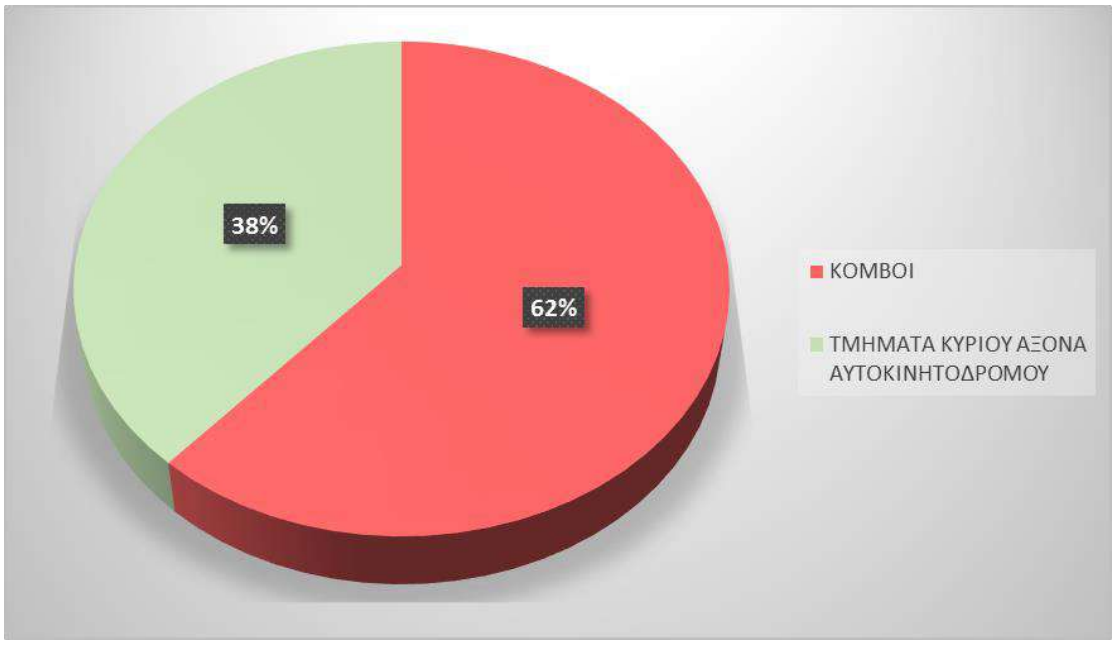

*Σχήμα 6.13 Μέσες εκπομπές ισοδύναμου CO2 σε κόμβους αυτοκινητοδρόμου ανά μήκος*

Από πλευράς οδικού τμήματος, υπολογίζοντας τη μέση τιμή του ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα ανά μήκος οδού τόσο στους κόμβους όσο και στα παρακείμενα τμήματα κύριου άξονα του αυτοκινητοδρόμου για όλες τις κατηγορίες οχημάτων, φαίνεται ότι στην περίπτωση των κόμβων οι εκπομπές αέριων ρύπων είναι σημαντικά υψηλότερες σε σχέση με τα κύρια τμήματα του αυτοκινητοδρόμου (βλ. Σχήμα 6.14). Πιο συγκεκριμένα, η υποβαθμισμένη κατάσταση της ομαλότητας στους κόμβους συγκριτικά με τα κύρια τμήματα του αυτοκινητοδρόμου είναι υπεύθυνη για την σημαντική διαφοροποίηση στην ποσότητα εκπομπής των αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.14, οι κόμβοι εμφανίζουν έως και 60% αύξηση της ποσότητας εκπομπής ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα σε σχέση με τα παρακείμενα κύρια τμήματα της οδού για την κατηγορία των φορτηγών ντιζελοκίνητων οχημάτων.




*Σχήμα 6.14 Μέσες εκπομπές ισοδύναμου CO2 ανά μήκος*

Η υπόθεση που εξετάσθηκε στη συγκεκριμένη έρευνα ήταν η διαφοροποίηση ανάμεσα στα συγκεκριμένα οδικά τμήματα υπό κοινές περιβαλλοντικές συνθήκες, λόγω της διαφοροποίησης της ομαλότητας που εμφανίζουν. Αθροίζοντας το σύνολο των εκπομπών αερίων του ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα για όλες τις κατηγορίες οχημάτων-καυσίμου τόσο στους κόμβους όσο και στα κύρια τμήματα αυτοκινητοδρόμου, πραγματοποιήθηκε η τελική σύγκριση στο σύνολο των ρύπων που εκπέμπονται στον αυτοκινητόδρομο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.15.




*Σχήμα 6.15 Εκπομπές ισοδύναμου CO2 σε αυτοκινητόδρομο*

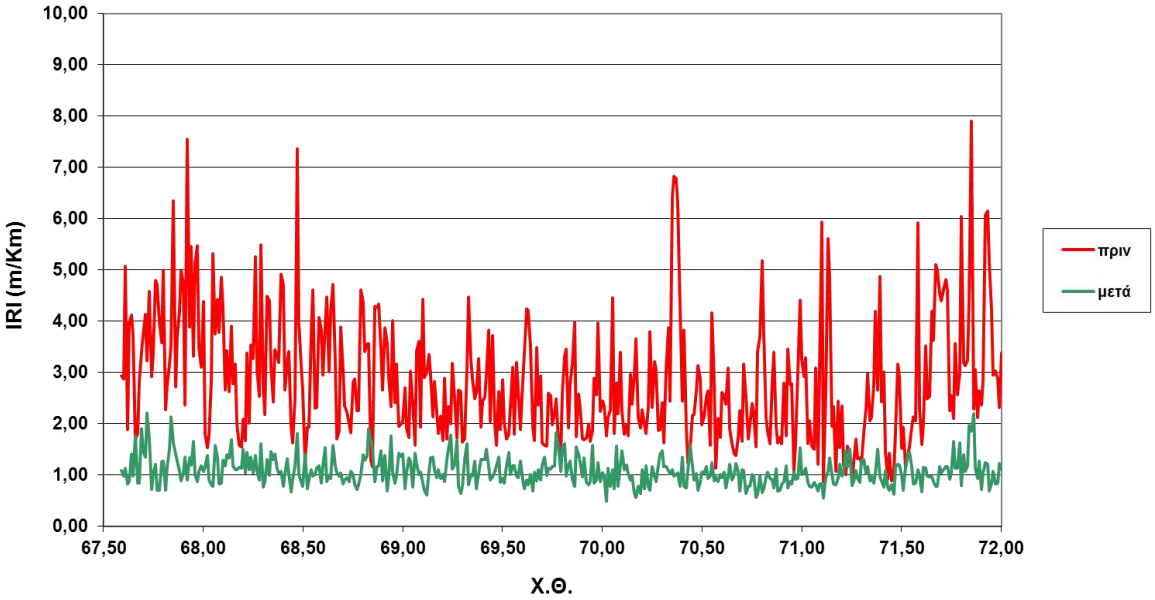
Είναι εμφανές ότι οι κόμβοι αυτοκινητοδρόμου συνεισφέρουν κατά 62% του συνολικού τμήματος της οδού στην εκπομπή αέριων ρύπων στο περιβάλλον. Αυτό οφείλεται στην υποβαθμισμένη κατάσταση της ομαλότητας καθώς και στις χαμηλότερες ταχύτητες που αναπτύσσουν τα οχήματα στους κόμβους σε σύγκριση με τα τμήματα του κύριου άξονα του αυτοκινητοδρόμου. Συνεπώς, η καλή κατάσταση ομαλότητας σε όλο τον αυτοκινητόδρομο, συμπεριλαμβανομένων και των κόμβων, οδηγεί σε σημαντική μείωση των εκπομπών των αέριων ρύπων του θερμοκηπίου στο περιβάλλον.

# 7

# ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΚΠΟΜΠΗ ΑΕΡΙΩΝ

## 7.1 Γενικά στοιχεία

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναλύθηκε η σημασία της συντήρησης ενός οδοστρώματος υπεραστικού αυτοκινητοδρόμου τριών λωρίδων ανά κατεύθυνση στο περιβαλλοντικό ζήτημα του αποτυπώματος του άνθρακα. Αρχικά παρατηρούμε την καταγραφή της ομαλότητας σε τμήμα αυτοκινητοδρόμου 4.42 χιλιομέτρων (67.59 - 72.00 km) της δεξιάς λωρίδας πριν και μετά τις εργασίες αποκατάστασης της δομικής και λειτουργικής κατάστασης του οδοστρώματος στο Σχήμα 7.1.



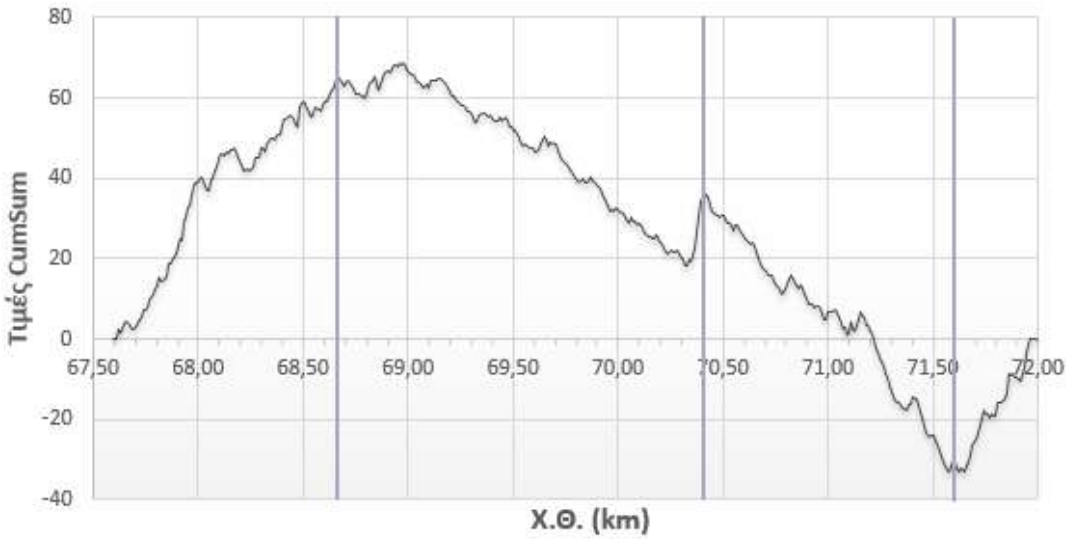

*Σχήμα 7.1 Κατά μήκος ομαλότητα κλάδου αυτοκινητοδρόμου 3 - πριν και μετά τις ενέργειες συντήρησης*

Όπως φαίνεται και από Σχήμα 7.1 των απλών παρατηρήσεων, τα επίπεδα της ομαλότητας πριν τις εργασίες συντήρησης και βελτίωσης της κατάστασης της επιφάνειας του οδοστρώματος παρουσιάζουν πολύ υψηλές τιμές στο μεγαλύτερο ποσοστό κατά μήκος του οδικού τμήματος και μάλιστα πάνω από τα αποδεκτά όρια, σύμφωνα και με την αρχική βιβλιογραφική ανασκόπηση. Αντίθετα μετά τις εργασίες

αποκατάστασης της ασφαλτικής στρώσης τα επίπεδα τιμών της ομαλότητας δεν ξεπερνούν την τιμή 2.0 m/km στο συνολικό υπό εξέταση τμήμα.

## 7.2 Διαχωρισμός ομοιογενών τμημάτων

Με την εφαρμογή της μεθοδολογίας που αναλύθηκε στο 5ο κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε η ομογενοποίηση στο υπό εξέταση τμήμα της οδού για την κατάσταση πριν τις εργασίες συντήρησης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.2. Το τμήμα χωρίστηκε σε τέσσερις ομοιογενείς υποπεριοχές με χιλιομετρικές θέσεις αντίστοιχα 67.59 – 68.59 km, 68.60 – 70.45 km, 70.46 – 71.57 km καθώς και 71.58 – 72.00 km.

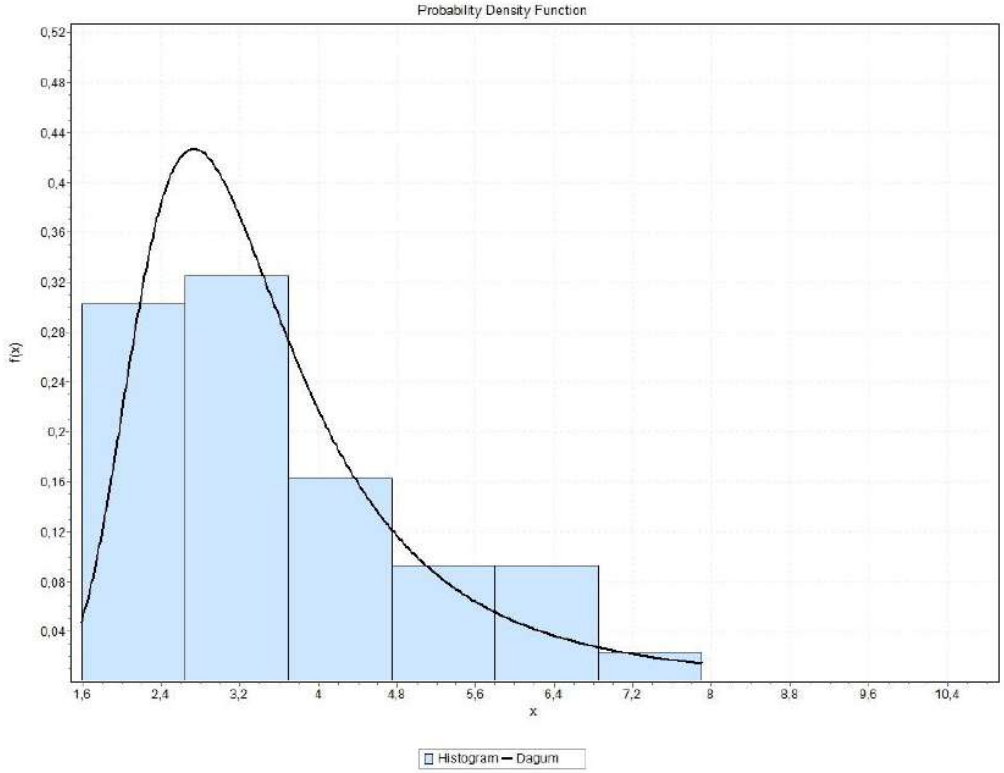



*Σχήμα 7.2 Ομογενοποίηση κλάδου αυτοκινητοδρόμου 3*

Οι έλεγχοι της ομογενοποίησης βρίσκονται στο τέλος της παρούσας έρευνας στο τμήμα του Παραρτήματος.

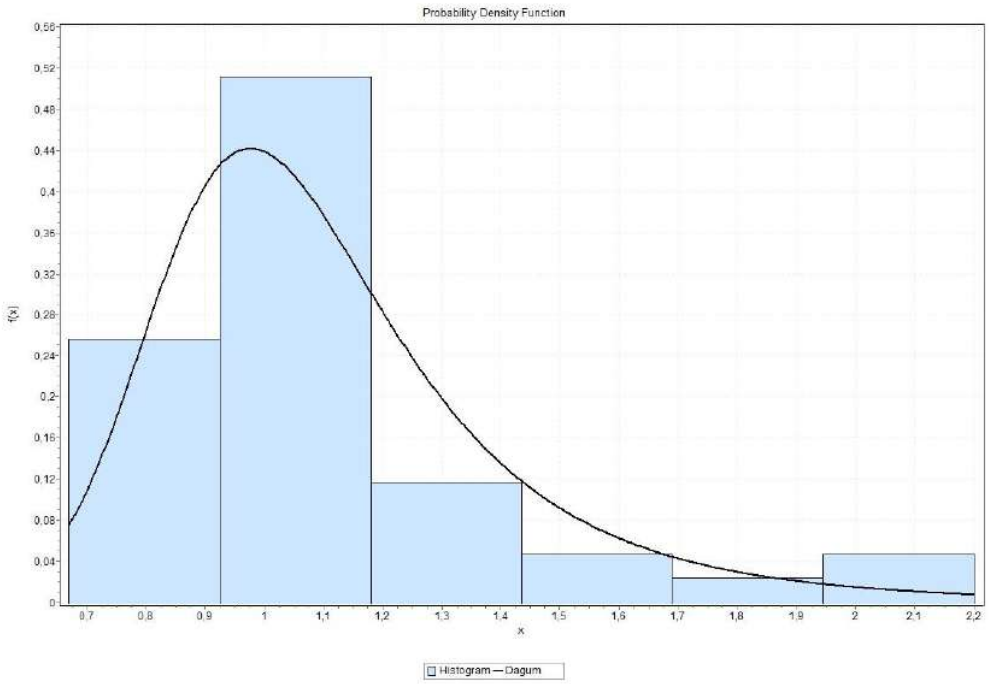
## 7.3 Κατανομές δεδομένων

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η εύρεση της χαρακτηριστικής τιμής του δείκτη ομαλότητας IRI, αναφερόμενη ακολούθως ως IRIc, με τη προσαρμογή κατάλληλων κατανομών στα δεδομένα. Στο Σχήμα 7.3 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα συχνοτήτων για τις διάφορες τιμές ομαλότητας που μετρήθηκαν στο πρώτο ομογενοποιημένο τμήμα καθώς και η καμπύλη συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Dagum. Παρατηρείται λοιπόν ότι η καμπύλη εμφανίζει μέγιστο στην τιμή ομαλότητας περίπου στο 2.75




*Σχήμα 7.3 Προσαρμογή κατανομής – πριν τις εργασίες συντήρησης (Τμήμα 67.59–68.59 km)*

Με την ίδια λογική υπολογίζουμε και τη χαρακτηριστική τιμή του δείκτη IRI για την κατάσταση μετά τις εργασίες συντήρησης στο ίδιο ομογενοποιημένο υποτμήμα περίπου στο 0.97, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.4.



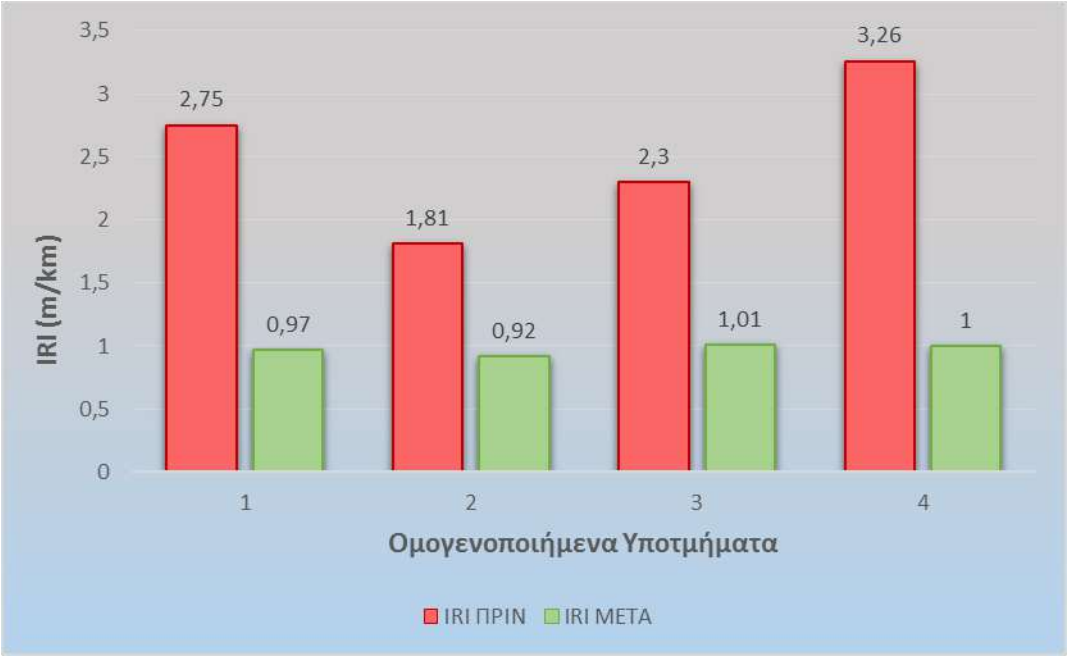

*Σχήμα 7.4 Προσαρμογή κατανομής – μετά τις εργασίες συντήρησης (Τμήμα 67.59 – 68.59 km)*

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία εφαρμογής των κατανομών σε κάθε υποτμήμα καταλήγουμε στον συγκεντρωτικό πίνακα που απεικονίζεται στον Πίνακα 7.5, ο οποίος περιλαμβάνει το μήκος κάθε ομογενοποιημένου υποτμήματος σε μονάδες χιλιομέτρων (km), την χαρακτηριστική τιμή IRIc σε μονάδες μέτρα ανά χιλιόμετρα (m/km), η οποία θα χρησιμοποιηθεί εν συνεχεία για τον υπολογισμό των ρύπων και την αντίστοιχη κατανομή που προσαρμοζόταν καλύτερα στα δεδομένα.

Πίνακας 7.5 Κατανομές και χαρακτηριστικές τιμές IRI

| ΜΗΚΟΣ (km) | IRIc (m/km) | ΚΑΤΑΝΟΜΗ | ΟΔΙΚΟ ΤΜΗΜΑ |
|---|---|---|---|
| 0.43 | 2.75 | DAGUM | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 3_ΠΡΙΝ |
| 1.14 | 1.81 | DAGUM | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 3_ΠΡΙΝ |
| 1.86 | 2.30 | DAGUM(4P) | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 3_ΠΡΙΝ |
| 1.01 | 3.26 | DAGUM | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 3_ΠΡΙΝ |
| 0.43 | 0.97 | DAGUM | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 3_ΜΕΤΑ |
| 1.14 | 0.92 | DAGUM | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 3_ΜΕΤΑ |
| 1.86 | 1.01 | DAGUM | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 3_ΜΕΤΑ |
| 1.01 | 1.00 | DAGUM | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 3_ΜΕΤΑ |

Όπως ήταν αναμενόμενο η μείωση της ομαλότητας ήταν αρκετά σημαντική και κυμαίνεται από 50 έως και 70 % βελτίωση της αρχικής κατάστασης, κάτι που απεικονίζεται στο Σχήμα 7.6.




*Σχήμα 7.6 Χαρακτηριστικές τιμές ομαλότητας πριν και μετά τις ενέργειες συντήρησης*

## 7.4 Υπολογισμός ρύπων

Στο τελικό λοιπόν στάδιο της επεξεργασίας των στοιχείων υπολογίστηκαν οι αέριοι ρύποι που εκπέμπονται ως ισοδύναμο διοξείδιο του άνθρακα (CO2 equivalent) για ένα όχημα, με χρήση του λογισμικού MOVES2014a. Αρχικά υπολογίστηκαν οι ρύποι πριν τις εργασίες συντήρησης και στη συνέχεια υπολογίστηκαν για την κατάσταση μετά την αποκατάσταση του οδοστρώματος. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 7.7.

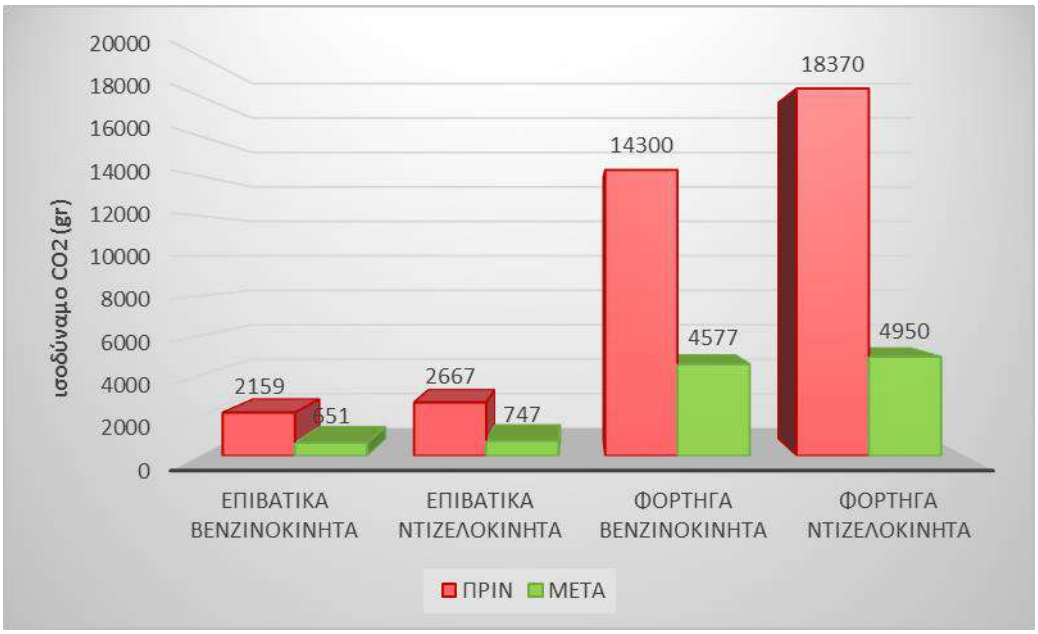
Πίνακας 7.7 Αποτελέσματα ρύπων πριν και μετά τις εργασίες συντήρησης

| | Τμήμα (km) | $IRI_C$ (m/km) | V(km/h) | | ισοδύναμο CO2 (grams) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Επιβατικό | | Φορτηγό | |
| | | | Vεπιβ | Vφορτ | Diesel | Gasoline | Diesel | Gasoline |
| ΠΡΙΝ | 67.59 – 68.59 | 2.75 | 25.54 | 19.57 | 782.93 | 453.37 | 4611.59 | 4510.64 |
| | 68.60 – 70.45 | 1.81 | 17.03 | 13.04 | 508.73 | 461.99 | 3512.91 | 3036.39 |
| | 70.46 – 71.57 | 2.30 | 24.40 | 18.69 | 801.18 | 690.83 | 8442.89 | 7698.15 |
| | 71.58 – 72.00 | 3.26 | 15.78 | 12.09 | 574.07 | 552.88 | 1802.15 | 1748.21 |
| ΜΕΤΑ | 67.59 – 68.59 | 0.97 | 71.08 | 54.44 | 74.80 | 65.15 | 467.88 | 458.06 |
| | 68.60 – 70.45 | 0.92 | 74.99 | 57.44 | 168.41 | 146.66 | 1053.48 | 1032.89 |
| | 70.46 – 71.57 | 1.01 | 80.14 | 61.38 | 326.75 | 284.59 | 2043.91 | 2000.97 |
| | 71.58 – 72.00 | 1.00 | 83.41 | 63.89 | 177.16 | 154.29 | 1108.13 | 1084.88 |

Ήδη από την εξαγωγή των αποτελεσμάτων είναι εμφανής η διαφοροποίηση στην εκπομπή των ρύπων εκφρασμένοι σε ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα, μιας και συγκρίνονται τμήματα ίδιου μήκους αλλά διαφορετικής τιμής ομαλότητας. Συνολικά τα επιβατικά έχουν καλύτερη συμπεριφορά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου έναντι των φορτηγών, κάτι που συμβαίνει και μεταξύ βενζινοκίνητων και ντιζελοκίνητων αντίστοιχα.

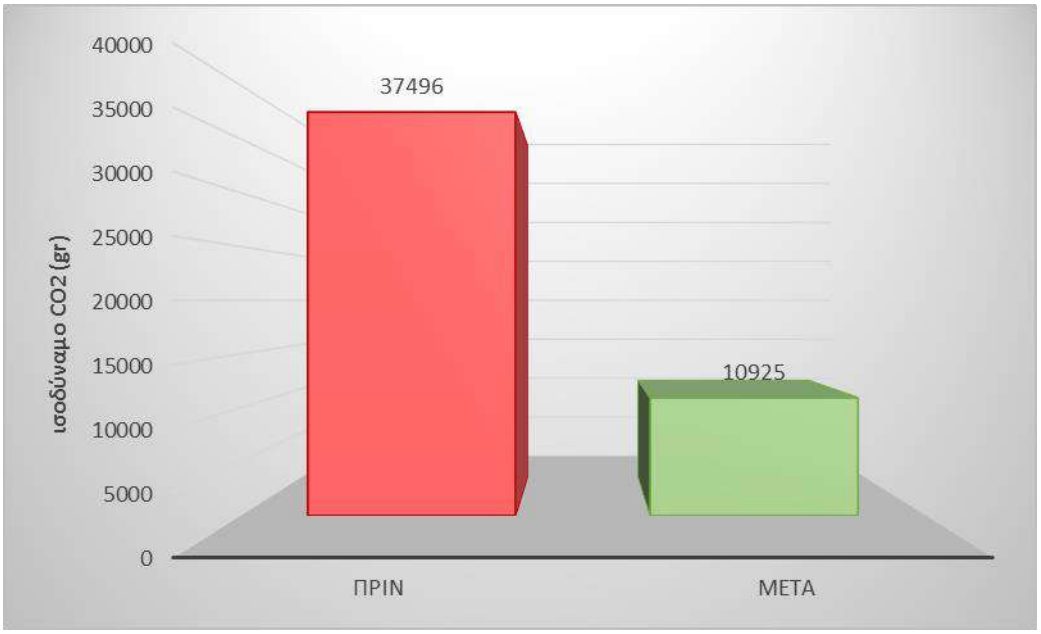
## 7.5 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η επίδραση της κατάσταση του οδοστρώματος στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου για τις τέσσερις κατηγορίες οχημάτων που εξετάσθηκαν στην παρούσα έρευνα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.8.




*Σχήμα 7.8 Εκπομπές ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα ανά τύπο οχήματος*

Αθροίζοντας το σύνολο των εκπομπών ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα για κάθε κατηγορία οχήματος σε όλο το εξεταζόμενο οδικό τμήμα πριν και μετά τις ενέργειες συντήρησης, εξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα. Κακή κατάσταση της ομαλότητας του οδοστρώματος συνεπάγεται πολύ αυξημένη κατανάλωση καυσίμου, άρα και υψηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Η κατάσταση αυτή φαίνεται να επηρεάζει περισσότερο τα φορτηγά οχήματα και ιδίως τα ντιζελοκίνητα, κάτι που αποδεικνύει την υψηλή επιρροή τους στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, όπως αναλύθηκε και στα πρώτα εδάφια της παρούσας εργασίας. Από την άλλη πλευρά, η βελτίωση της κατάστασης της ομαλότητας οδηγεί σε μια μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα της τάξης του 70% ακόμη και του 75%, ιδίως στα επιβατικά ντιζελοκίνητα. Συνολικά, οι ενέργειες συντήρησης οδηγούν σε μείωση 70% του συνόλου των εκπομπών ισοδυνάμου του διοξειδίου του άνθρακα για όλες τις κατηγορίες οχημάτων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.9.




*Σχήμα 7.9 Συνολικές εκπομπές ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα πριν και μετά τις ενέργειες συντήρησης*

Η μείωση των εκπομπών των ρύπων οφείλεται στη δυνατότητα κίνησης των χρηστών με υψηλότερες ταχύτητες, λόγω της βελτιωμένης κατάστασης της ομαλότητας του οδοστρώματος έπειτα από ενέργειες συντήρησης. Φυσικά όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι βέλτιστες ταχύτητες κίνησης ως προς την εκπομπή ρύπων κυμαίνονται από 60 έως 100 περίπου km/h (Boriboonsomsin and Barth, 2009). Συνεπώς παρόλο που η καλή κατάσταση ομαλότητας δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα κίνησης σε τεράστιο εύρος ταχυτήτων, η διατήρηση μιας ταχύτητας εντός των ορίων συνεισφέρει επιπλέον στη μείωση του διοξειδίου του άνθρακα. Σε γενικές γραμμές, ακόμη και να χρησιμοποιούνται υψηλότερες ταχύτητες, σίγουρα έχουν χαμηλότερη επιρροή στην εκπομπή των αέριων ρύπων σε σύγκριση με το να κινούνταν σε πολύ χαμηλές λόγω της κακής ποιότητας κύλισης της επιφάνειας του οδοστρώματος.

# 8

# ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ

## 8.1 Βασικές αρχές

Μετά τη συνολική επεξεργασία όλων των στοιχείων των τμημάτων των οδών ακολούθησε η ανάπτυξη των μοντέλων υπολογισμού εκπομπών αερίων βάσει της ομαλότητας του οδοστρώματος, εκφρασμένη με το δείκτη IRI. Σε πρώτη φάση, με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης θα αναπτυχθούν τέσσερα μοντέλα που αφορούν σε επιβατικά βενζινοκίνητα, επιβατικά ντιζελοκίνητα, φορτηγά βενζινοκίνητα και επιβατικά ντιζελοκίνητα. Σε δεύτερη φάση, θα εκτιμηθεί ένα γενικό μοντέλο υπολογισμού ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα για όλες τις κατηγορίες οχημάτων και καυσίμου.

Επισημαίνεται ότι, λόγω της επιρροής του μήκους του κάθε υποτμήματος, όπου υπολογίστηκε το ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα με βάση το πρόγραμμα MOVES2014a, εξετάσθηκε η συσχέτιση των δυο ανεξάρτητων μεταβλητών του μήκους και της ομαλότητας ως προς την εξαρτημένη μεταβλητή, δηλαδή το ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα. Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν τα μοντέλα εκτίμησης των εκπομπών αερίων και πραγματοποιήθηκαν οι αντίστοιχοι έλεγχοι, ώστε να παρουσιαστεί το βέλτιστο μοντέλο σε κάθε περίπτωση.

## 8.2 Μοντέλο επιβατικών βενζινοκίνητων

Το πρώτο μοντέλο που εξετάζεται είναι αυτό των επιβατικών βενζινοκίνητων οχημάτων και τα αποτελέσματα συσχέτισης των μεταβλητών φαίνονται στον Πίνακα 8.1.

Πίνακας 8.1 Συσχέτιση μεταβλητών – επιβατικά βενζινοκίνητα

| | *μήκος* | *IRI* | *CO2(ep_gas)* |
|---|---|---|---|
| μήκος | 1 | | |
| IRI | 0.158 | 1 | |
| CO2(ep_gas) | 0.708 | 0.685 | 1 |

Παρατηρείται ότι το μήκος και ο δείκτης IRI δεν σχετίζονται μεταξύ τους, οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ανεξάρτητες μεταβλητές. Συντελεστής συσχέτισης κοντά στο 0.70 υποδηλώνει πως υπάρχει ικανοποιητική σχέση μεταξύ διοξειδίου του άνθρακα και ομαλότητας, αλλά επειδή η τιμή είναι μικρότερη του 0.9 πιθανώς να απαιτούνται περισσότερες μεταβλητές για την ανάπτυξη καλύτερου μοντέλου. Συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μήκος ως επιπλέον μεταβλητή εφόσον και αυτό έχει κάποια εξάρτηση (0.708 συντελεστής συσχέτισης) με το διοξείδιο του άνθρακα. Το τελικό βέλτιστο μοντέλο που προκύπτει ως προς το λογάριθμο του ισοδύναμου του διοξειδίου του άνθρακα και δίνεται από τη σχέση:

$$eqCO_2 = e^{1.86 + 1.51 * d + 1.09 * IRI} \tag{8.1}$$

όπου

$eqCO_2$ : ισοδύναμο $CO_2$ για ένα επιβατικό βενζινοκίνητο όχημα (grams)
d: μήκος οδικού τμήματος σε km
IRI: διεθνής δείκτης ομαλότητας σε m/km

Επιπροσθέτως πραγματοποιήθηκαν και οι στατιστικοί έλεγχοι του μοντέλου, των οποίων τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον Πίνακα 8.2.

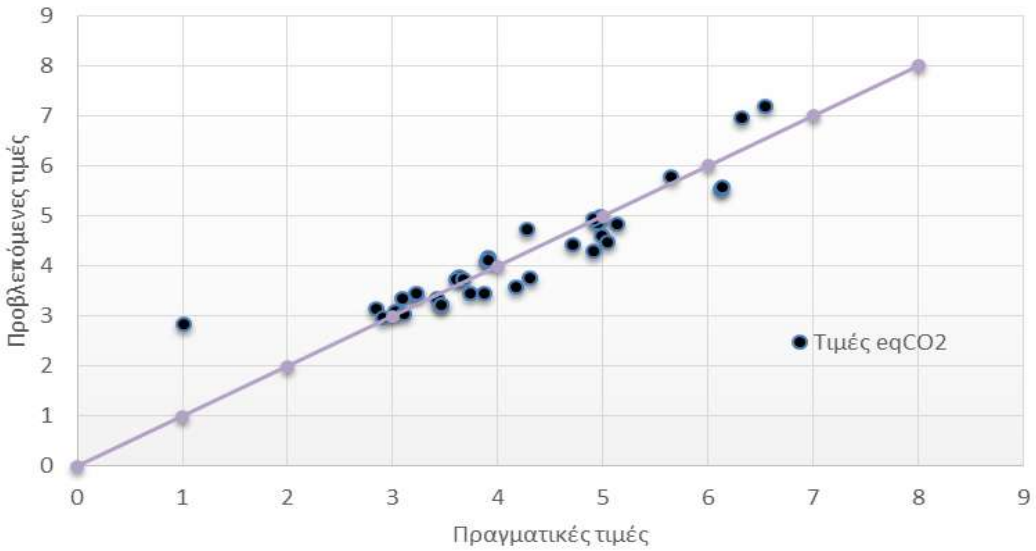
Πίνακας 8.2 Στατιστικά αποτελέσματα παλινδρόμησης - επιβατικά βενζινοκίνητα

| Στατιστικά παλινδρόμησης | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Πολλαπλό R | | | 0.915 | | | |
| R Τετράγωνο | | | 0.838 | | | |
| Προσαρμοσμένο R Τετράγωνο | | | 0.828 | | | |
| Τυπικό σφάλμα | | | 0.486 | | | |
| Μέγεθος δείγματος | | | 35 | | | |
| Ανάλυση Διακύμανσης | | | | | | |
| Βαθμοί ελευθερίας | | SS | MS | F | Σημαντικότητα - F | |
| Παλινδρόμηση | 2 | 39.195 | 19.598 | 82.817 | 0 | |
| Υπόλοιπο | 32 | 7.572 | 0.237 | | | |
| Σύνολο | 34 | 46.767 | | | | |
| | | | | | | |
| | Συντελεστές | Τυπικό σφάλμα | t | Τιμή-P | Κατώτερο 95% | Υψηλότερο 95% |
| Τεταγμένη επί την αρχή | 1.862 | 0.200 | 9.340 | 0 | 1.456 | 2.268 |
| Μεταβλητή d | 1.514 | 0.177 | 8.540 | 0 | 1.154 | 1.876 |
| Μεταβλητή IRI | 1.092 | 0.134 | 8.160 | 0 | 0.819 | 1.365 |

Το προσαρμοσμένο $R^2$ για το συγκεκριμένο μοντέλο είναι 0.828, γεγονός που αποδεικνύει ότι υπάρχει πολύ ικανοποιητική συσχέτιση. Το F-stat είναι 82.817, οπότε οι βi όροι του μοντέλου δεν είναι μηδενικοί. Οι t - όροι για κάθε συντελεστή είναι αντίστοιχα 8.540, 8.160 και 9.340 για το σταθερό όρο. Το t-stat για μέγεθος δείγματος 35, 2 βαθμούς ελευθερίας και 95% επίπεδο σημαντικότητας είναι προσεγγιστικά 2.033. Άρα κατά απόλυτη τιμή όλοι οι t όροι είναι μεγαλύτεροι του t-stat, οπότε όλες οι

ανεξάρτητες μεταβλητές θεωρούνται αποδεκτές και στατιστικά σημαντικές. Η σημαντικότητα F της παλινδρόμησης τείνει στο μηδέν, δηλαδή μικρότερη του 0.05 επιπέδου σημαντικότητας, άρα το μοντέλο κρίνεται επαρκές. Οι συντελεστές των δυο ανεξάρτητων μεταβλητών είναι θετικοί, δηλαδή αύξηση του μήκους και αύξηση της τιμής IRI αυξάνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

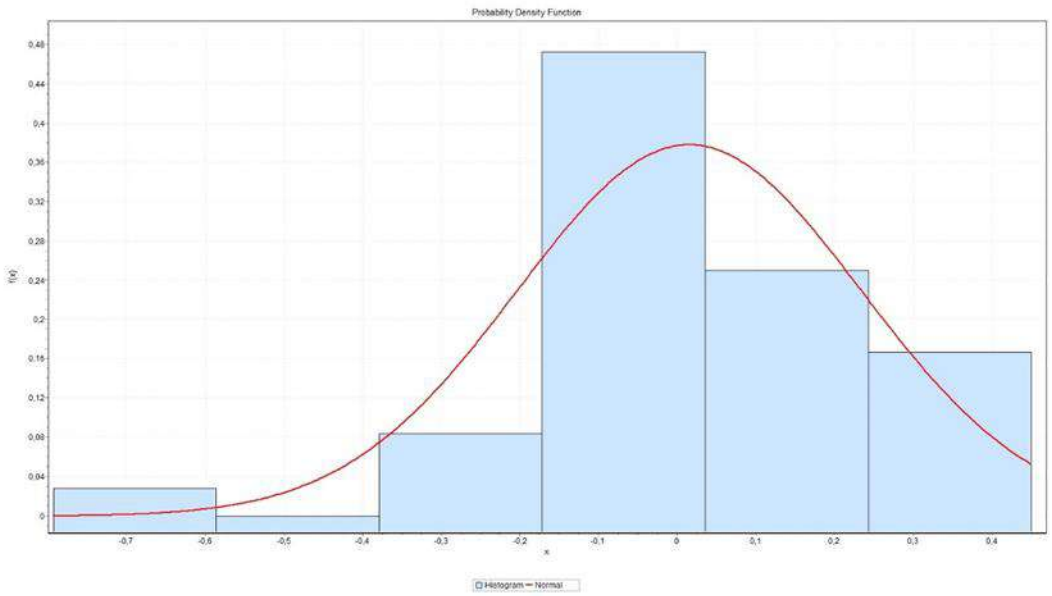
Στο Σχήμα 8.3 παρουσιάζεται το Q-Q plot, το οποίο παρέχει μια οπτική σύγκριση των πραγματικών τιμών του δείγματος με τις αντίστοιχες θεωρητικές προβλεπόμενες τιμές, που δίνει το μοντέλο.




*Σχήμα 8.3 Q-Q plot - επιβατικά βενζινοκίνητα*

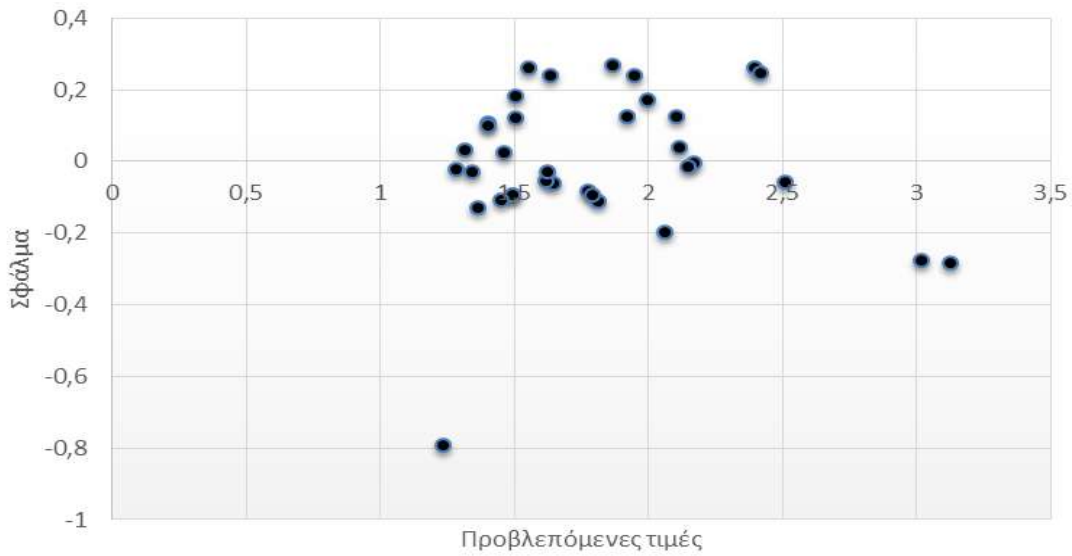
Σε γενικές γραμμές, αν τα σημεία του Q-Q plot αποκλίνουν από μια ευθεία γραμμή, τότε η υποτιθέμενη κατανομή τίθεται υπό αμφισβήτηση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα δεδομένα εμφανίζουν καλή συσχέτιση, κάτι που αποδεικνύεται από την υψηλή τιμή του $R^2$.

Στο Σχήμα 8.4 ελέγχθηκε το είδος της κατανομής των σφαλμάτων για το μοντέλο εκτίμησης ρύπων των επιβατικών βενζινοκίνητων οχημάτων. Παρατηρείται ότι τα σφάλματα ακολουθούν κανονική κατανομή με μέση τιμή μηδέν, δηλαδή $N(0,\sigma^2)$, γεγονός που αποδεικνύει την κανονικότητα του μοντέλου.




*Σχήμα 8.4 Κανονική κατανομή σφαλμάτων – επιβατικά βενζινοκίνητα*

Ο τελευταίος έλεγχος του μοντέλου της γραμμικής παλινδόμησης αφορούσε στην ανεξαρτησία των σφαλμάτων. Ο συγκεκριμένος έλεγχος πραγματοποιήθηκε τόσο με την κατασκευή του διαγράμματος σφαλμάτων-προβλεπόμενων τιμών όσο και με τον έλεγχο Durbin-Watson. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.5, τα σφάλματα δεν ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη καμπύλη γύρω από την ευθεία x=0, ενώ παράλληλα εμφανίζεται και σχετική ομοιομορφία στην κατανομή των θετικών και των αρνητικών σφαλμάτων γύρω από τη x=0.




*Σχήμα 8.5 Τυχαιότητα σφαλμάτων – επιβατικά βενζινοκίνητα*

Παράλληλα, ο έλεγχος Durbin-Watson θεωρεί μηδενική υπόθεση $H_0$ ότι τα κατάλοιπα (σφάλματα) δεν συσχετίζονται μεταξύ τους. Αρχικά, υπολογίζεται η στατιστική παράμετρος d του ελέγχου και στη συνέχεια συγκρίνεται με το την κρίσιμη τιμή $d_u$, όπως αυτή προκύπτει από κατάλληλους πίνακες Durbin-Watson. Για επίπεδο

σημαντικότητας 95%, αριθμός παρατηρήσεων 35 και 2 ανεξάρτητων μεταβλητών εκλέχθηκε η κρίσιμη τιμή της παραμέτρου $d_u$ ίση με 1.58. Εν συνεχεία υπολογίστηκε η τιμή d ίση με 1.95, για τα δεδομένα του συγκεκριμένου μοντέλου. Αφού η τιμή d του μοντέλου είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη $d_u$, επαλληθεύεται η μηδενική υπόθεση. Συνεπώς καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των σφαλάτων για το συγκεκριμένο μοντέλο. Από όλους τους παραπάνω ελέγχους κρίνεται ότι το προτεινόμενο μοντέλο των επιβατικών βενζινοκίνητων δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

## 8.3 Μοντέλο επιβατικών ντιζελοκίνητων

Στη συνέχεια αναπτύχθηκε ομοίως το μοντέλο των επιβατικών ντιζελοκίνητων οχημάτων. Τα αποτελέσματα συσχέτισης παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.6.

Πίνακας 8.6 Συσχέτιση μεταβλητών – επιβατικά ντιζελοκίνητα

| | *d* | *IRI* | *eqCO₂(ep_diesel)* |
|---|---|---|---|
| d | 1 | | |
| IRI | 0.158 | 1 | |
| $eqCO_2$(ep_diesel) | 0.755 | 0.638 | 1 |

Παρατηρείται ότι το μήκος, που συμβολίζεται ως d και ο δείκτης IRI δεν σχετίζονται μεταξύ τους αλλά παράλληλα υπάρχει ικανοποιητική συσχέτιση μεταξύ αυτών των ανεξάρτητων μεταβλητών και της εξαρτημένης μεταβλητής των ρύπων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μοντέλου εκτίμησης ρύπων. Το μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης που προκύπτει είναι:

$$eqCO_2 = e^{2.52 + 1.49 * d + 0.89 * IRI} \tag{8.2}$$

όπου

$eqCO_2$ : ισοδύναμο $CO_2$ για ένα επιβατικό βενζινοκίνητο ντιζελοκίνητο (grams)
d: μήκος οδικού τμήματος σε km
IRI: διεθνής δείκτης ομαλότητας σε m/km

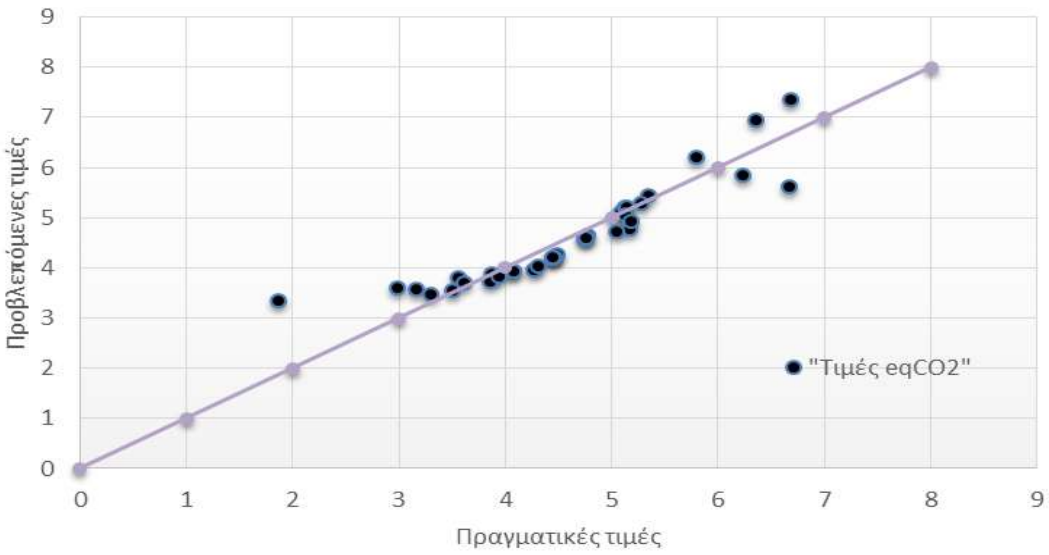
Οι στατιστικοί έλεγχοι του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή αυτής της κατηγορίας οχημάτων εμφανίζονται στον Πίνακα 8.7.

Πίνακας 8.7 Στατιστικά αποτελέσματα παλινδρόμησης - επιβατικά ντιζελοκίνητα

| Στατιστικά παλινδρόμησης | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Πολλαπλό R | | | 0.920 | | | |
| R Τετράγωνο | | | 0.846 | | | |
| Προσαρμοσμένο R Τετράγωνο | | | 0.837 | | | |
| Τυπικό σφάλμα | | | 0.429 | | | |
| Μέγεθος δείγματος | | | 35 | | | |
| Ανάλυση Διακύμανσης | | | | | | |
| Βαθμοί ελευθερίας | | SS | MS | F | Σημαντικότητα - F | |
| Παλινδρόμηση | 2 | 32.380 | 16.190 | 88.149 | 0 | |
| Υπόλοιπο | 32 | 5.877 | 0.184 | | | |
| Σύνολο | 34 | 38.257 | | | | |
| | | | | | | |
| | Συντελεστές | Τυπικό σφάλμα | t | Τιμή-P | Κατώτερο 95% | Υψηλότερο 95% |
| Τεταγμένη επί την αρχή | 2.519 | 0.176 | 14.343 | 0 | 2.162 | 2.877 |
| Μεταβλητή d | 1.494 | 0.156 | 9.566 | 0 | 1.176 | 1.813 |
| Μεταβλητή IRI | 0.894 | 0.118 | 7.582 | 0 | 0.654 | 1.135 |

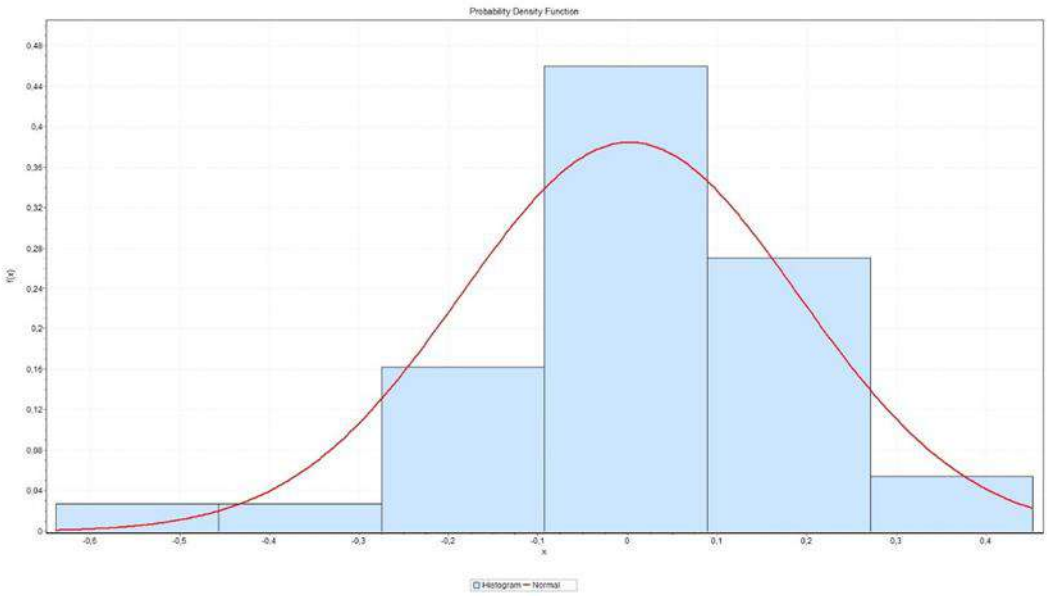
Το προσαρμοσμένο $R^2$ για το συγκεκριμένο μοντέλο είναι 0.837, γεγονός που αποδεικνύει ότι υπάρχει πολύ ικανοποιητική συσχέτιση. Το F-stat είναι 88.149, οπότε οι βi όροι του μοντέλου δεν είναι μηδενικοί. Οι t - όροι για κάθε συντελεστή είναι αντίστοιχα 9.566, 7.582 και 14.343 για το σταθερό όρο. Το t-stat για μέγεθος δείγματος 35, 2 βαθμούς ελευθερίας και 95% επίπεδο σημαντικότητας είναι προσεγγιστικά 2.033. Άρα κατά απόλυτη τιμή όλοι οι t όροι είναι μεγαλύτεροι του t-stat, οπότε όλες οι ανεξάρτητες μεταβλητές θεωρούνται αποδεκτές και στατιστικά σημαντικές. Η σημαντικότητα F της παλινδρόμησης τείνει στο μηδέν, δηλαδή μικρότερη του 0.05 επιπέδου σημαντικότητας, άρα το μοντέλο κρίνεται επαρκές. Οι συντελεστές των δυο ανεξάρτητων μεταβλητών είναι θετικοί, δηλαδή αύξηση του μήκους και αύξηση της τιμής IRI αυξάνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Στη συνέχεια στο Σχήμα 8.8 παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει ιδιαίτερη απόκλιση μεταξύ των προβλεπόμενων και των πραγματικών τιμών των εκπομπών του ισοδυνάμου του διοξειδίου του άνθρακα, άρα το μοντέλο είναι αποδεκτό.



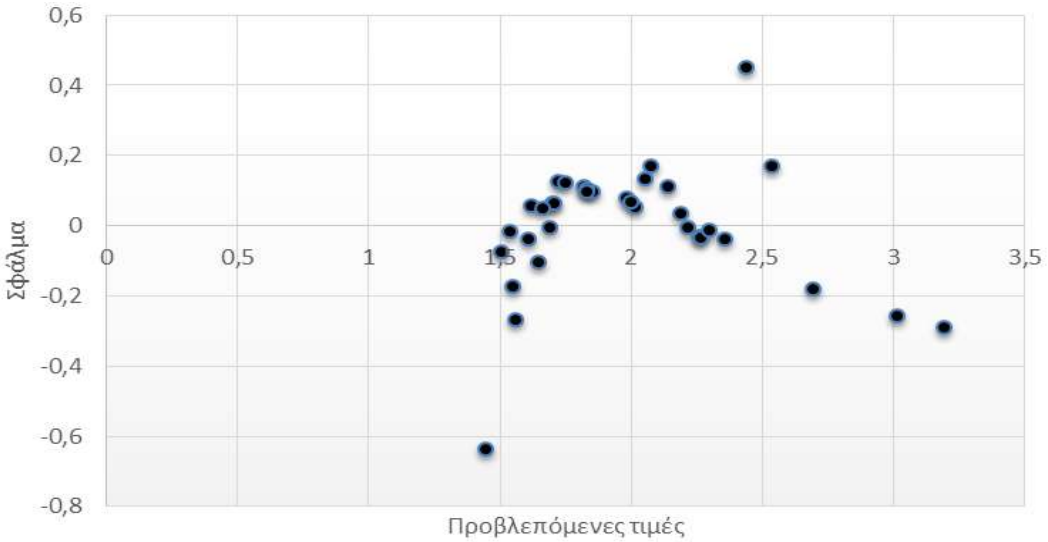

*Σχήμα 8.8 Q-Q plot - επιβατικά ντιζελοκίνητα*

Επιπλέον στο Σχήμα 8.9 φαίνεται ότι τα σφάλματα ακολουθούν κανονική κατανομή με μηδενική μέση τιμή, γεγονός που αποδεικνύει την κανονικότητα του μοντέλου.




*Σχήμα 8.9 Κανονική κατανομή σφαλμάτων - επιβατικά ντιζελοκίνητα*

Ο τελευταίος έλεγχος του μοντέλου της γραμμικής παλινδόμησης αφορούσε στην αυτοσυσχέτιση των σφαλμάτων. Κατασκευάτηκε το διάγραμμα σφαλμάτων-προβλεπόμενων τιμών για τον συγκεκριμένο έλεγχο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.10.




*Σχήμα 8.10 Τυχαιότητα σφαλμάτων - επιβατικά ντιζελοκίνητα*

Παράλληλα η τιμή d του Durbin-Watson ελέγχου του μοντέλου των επιβατικών ντιζελοκίνητων υπολογίστηκε ίση με 1.72, δηλαδή μεγαλύτερη από την κρίσιμη τιμή 1.58 της $d_u$. Συνεπώς, το σφάλματα του μοντέλου των επιβατικών ντιζελοκίνητων εμφανίζονται με τυχαίο τρόπο. Από όλους τους παραπάνω ελέγχους κρίνεται ότι το προτεινόμενο μοντέλο των επιβατικών ντιζελοκίνητων δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

## 8.4 Μοντέλο φορτηγών βενζινοκίνητων

Η επόμενη κατηγορία οχημάτων που εξετάστηκε είναι τα φορτηγά βενζινοκίνητα και στον Πίνακα 8.11 παρουσιάζεται η συσχέτιση των μεταβλητών.

Πίνακας 8.11 Συσχέτιση μεταβλητών – φορτηγά βενζινοκίνητα

| | *d* | *IRI* | *eqCO₂(fort_gas)* |
|---|---|---|---|
| d | 1 | | |
| IRI | 0.158 | 1 | |
| $eqCO_2$(fort_gas) | 0.792 | 0.597 | 1 |

Όπως παρατηρείται, οι ανεξάρτητες μεταβλητές μήκος (d) και IRI θεωρούνται κατάλληλες για την περιγραφή του μοντέλου, από άποψη συσχέτισης. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε για αυτή την κατηγορία παρουσιάζεται στη σχέση 8.3.

$$eqCO_2 = e^{3.86 + 1.63 * d + 0.98 * IRI} \tag{8.3}$$

όπου

$eqCO_2$ : ισοδύναμο $CO_2$ για ένα φορτηγό βενζινοκίνητο όχημα (grams)
d: μήκος οδικού τμήματος σε km
IRI: διεθνής δείκτης ομαλότητας σε m/km

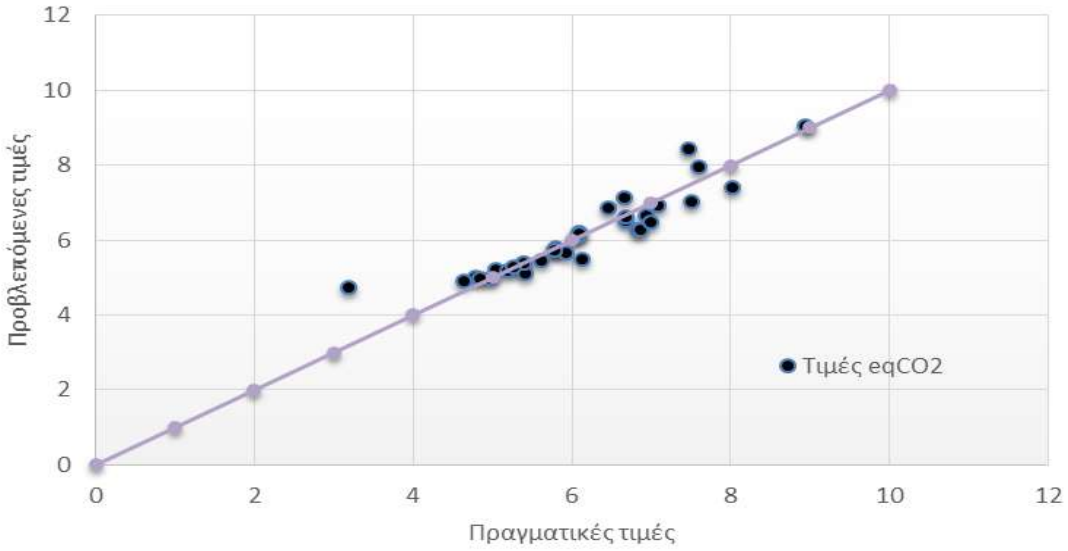
Τα στατιστικά αποτελέσματα του μοντέλου παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 8.12.

Πίνακας 8.12 Στατιστικά αποτελέσματα παλινδρόμησης – φορτηγά βενζινοκίνητα

| Στατιστικά παλινδρόμησης | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Πολλαπλό R | | | 0.913 | | | |
| R Τετράγωνο | | | 0.833 | | | |
| Προσαρμοσμένο R Τετράγωνο | | | 0.823 | | | |
| Τυπικό σφάλμα | | | 0.490 | | | |
| Μέγεθος δείγματος | | | 35 | | | |
| Ανάλυση Διακύμανσης | | | | | | |
| Βαθμοί ελευθερίας | | SS | MS | F | Σημαντικότητα - F | |
| Παλινδρόμηση | 2 | 38.775 | 18.389 | 82.004 | 0 | |
| Υπόλοιπο | 32 | 7.194 | 0.194 | | | |
| Σύνολο | 34 | 46.969 | | | | |
| | | | | | | |
| | Συντελεστές | Τυπικό σφάλμα | t | Τιμή-P | Κατώτερο 95% | Υψηλότερο 95% |
| Τεταγμένη επί την αρχή | 3.862 | 0.200 | 19.220 | 0 | 3.561 | 4.295 |
| Μεταβλητή d | 1.634 | 0.178 | 9.140 | 0 | 1.363 | 2.016 |
| Μεταβλητή IRI | 0.976 | 0.131 | 7.230 | 0 | 0.615 | 1.108 |

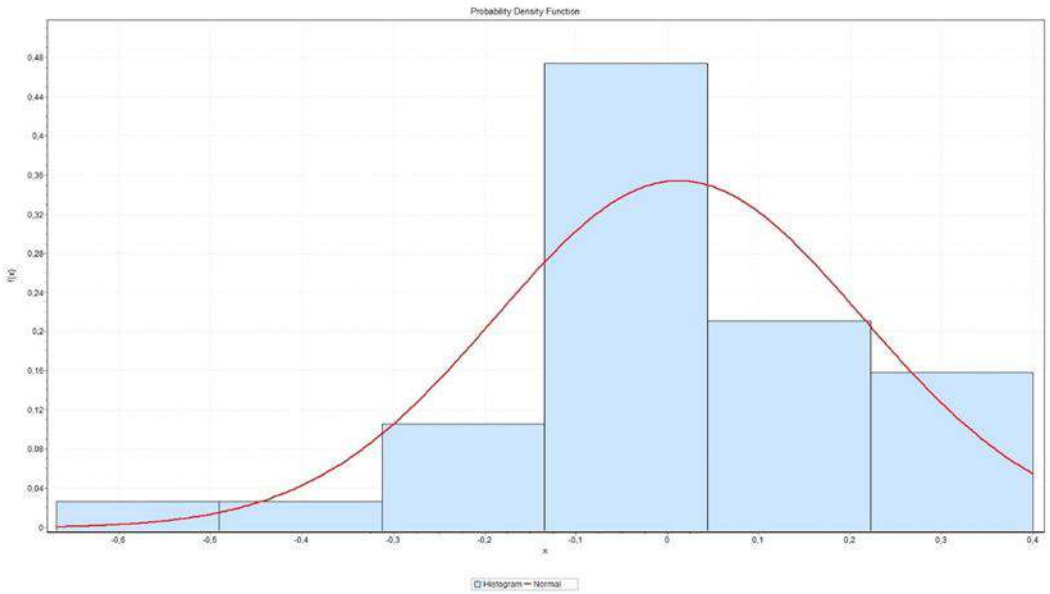
Το προσαρμοσμένο $R^2$ για το συγκεκριμένο μοντέλο είναι 0.823, γεγονός που αποδεικνύει ότι υπάρχει πολύ ικανοποιητική συσχέτιση. Το F-stat είναι 82.044, οπότε οι βi όροι του μοντέλου δεν είναι μηδενικοί. Οι t - όροι για κάθε συντελεστή είναι αντίστοιχα 9.140, 7.230 και 19.220 για το σταθερό όρο. Το t-stat για μέγεθος δείγματος 35, 2 βαθμούς ελευθερίας και 95% επίπεδο σημαντικότητας είναι προσεγγιστικά 2.033. Άρα κατά απόλυτη τιμή όλοι οι t όροι είναι μεγαλύτεροι του t-stat, οπότε όλες οι ανεξάρτητες μεταβλητές θεωρούνται αποδεκτές και στατιστικά σημαντικές. Η σημαντικότητα F της παλινδρόμησης τείνει στο μηδέν, δηλαδή μικρότερη του 0.05 επιπέδου σημαντικότητας, άρα το μοντέλο κρίνεται επαρκές. Οι συντελεστές των δυο ανεξάρτητων μεταβλητών είναι και σε αυτό το μοντέλο θετικοί, όπως ήταν και αναμενόμενο, δηλαδή αύξηση του μήκους και αύξηση της τιμής IRI αυξάνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Το Q-Q plot του μοντέλου των φορτηγών βενζινοκίνητων δείχνει ότι δεν υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ των πραγματικών και των προβλεπόμενων τιμών, γεγονός που αποδεικνύει την σημαντικότητα του μοντέλου (βλ. Σχήμα 8.13).



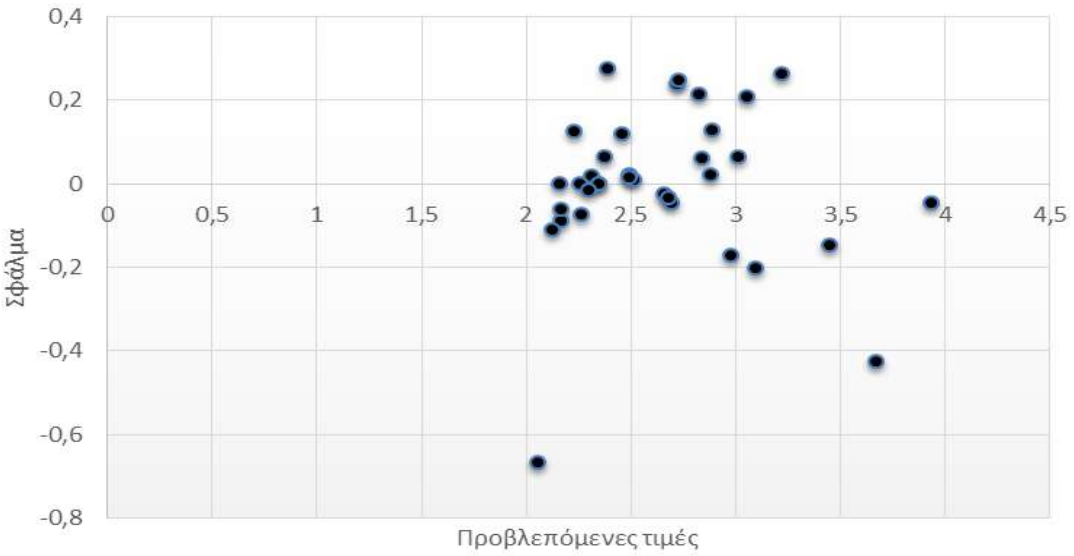

*Σχήμα 8.13 Q-Q plot – φορτηγά βενζινοκίνητα*

Όσο αναφορά την κανονικότητα του μοντέλου, στο Σχήμα 8.14 φαίνεται ότι τα σφάλματα ακολουθούν κανονική κατανομή με μέση τιμή μηδέν.




*Σχήμα 8.14 Κανονική κατανομή σφαλμάτων – φορτηγά βενζινοκίνητα*

Τέλος ελέγχθηκε η τυχαιότητα των σφαλάματων με την κατσκευή του αντίστοιχου διαγράμματος σφαλμάτων-προβλεπόμενων τιμών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.15.




*Σχήμα 8.15 Τυχαιότητα σφαλμάτων – φορτηγά βενζινοκίνητα*

Επίσης ικανοποιείται ο έλεγχος Durbin-Watson, αφού η τιμή d της παραμέτρου του μοντέλου φορτηγών βενζινοκίνητων βρέθηκε ίση με 1.95, δηλαδή μεγαλύτερη από την κρίσιμη τιμή 1.58 της $d_u$ και συνεπώς δεν υπάρχει αυτοσυσχέτιση των σφαλμάτων. Σύμφωνα με όλους τους παραπάνω ελέγχους το μοντέλο των φορτηγών βενζινοκίνητων δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

## 8.5 Μοντέλο φορτηγών ντιζελοκίνητων

Τελευταία κατηγορία οχημάτων αποτελούν τα φορτηγά ντιζελοκίνητα. Στον Πίνακα 8.16 εξετάσθηκε η συσχέτιση μεταξύ ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών.

Πίνακας 8.16 Συσχέτιση μεταβλητών – φορτηγά ντιζελοκίνητα

| | *d* | *IRI* | *eqCO₂(fort_diesel)* |
|---|---|---|---|
| d | 1 | | |
| IRI | 0.158 | 1 | |
| $eqCO_2$(fort_diesel) | 0.748 | 0.636 | 1 |

Δείκτης ομαλότητας IRI και μήκος (d) συσχετίζονται επαρκώς με τη ζητούμενη ανεξάρτητη μεταβλητή των ρύπων και επειδή δε συσχετίζονται μεταξύ τους θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης των ντιζελοκίνητων φορτηγών οχημάτων. Το μοντέλο που προκύπτει ως προς το λογάριθμο του ισοδυνάμου του διοξειδίου του άνθρακα δίνεται από τη σχέση:

$$eqCO_2 = e^{3.88 + 1.64 * d + 0.99 * IRI} \tag{8.4}$$

όπου

$eqCO_2$ : ισοδύναμο $CO_2$ για ένα φορτηγό ντιζελοκίνητο όχημα (grams)
d: μήκος οδικού τμήματος σε km
IRI: διεθνής δείκτης ομαλότητας σε m/km

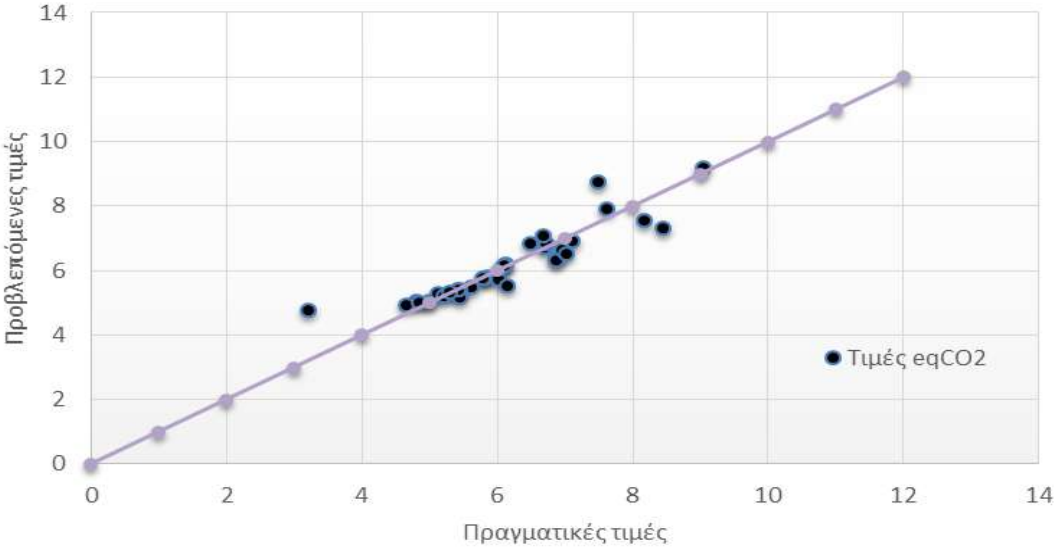
Μετά την κατασκευή του μοντέλου, εξετάσθηκαν και οι στατιστικοί του έλεγχοι, των οποίων τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον Πίνακα 8.17.

Πίνακας 8.17 Στατιστικά αποτελέσματα παλινδρόμησης – φορτηγά ντιζελοκίνητα

| Στατιστικά παλινδρόμησης | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Πολλαπλό R | | | 0.913 | | | |
| R Τετράγωνο | | | 0.834 | | | |
| Προσαρμοσμένο R Τετράγωνο | | | 0.824 | | | |
| Τυπικό σφάλμα | | | 0.214 | | | |
| Μέγεθος δείγματος | | | 35 | | | |
| Ανάλυση Διακύμανσης | | | | | | |
| Βαθμοί ελευθερίας | | SS | MS | F | Σημαντικότητα - F | |
| Παλινδρόμηση | 2 | 39.185 | 19.592 | 80.359 | 0 | |
| Υπόλοιπο | 32 | 7.802 | 0.245 | | | |
| Σύνολο | 34 | 49.987 | | | | |
| | | | | | | |
| | Συντελεστές | Τυπικό σφάλμα | t | Τιμή-P | Κατώτερο 95% | Υψηλότερο 95% |
| Τεταγμένη επί την αρχή | 3.878 | 0.202 | 19.162 | 0 | 3.466 | 4.290 |
| Μεταβλητή d | 1.638 | 0.180 | 9.099 | 0 | 1.271 | 2.005 |
| Μεταβλητή IRI | 0.990 | 0.136 | 7.279 | 0 | 0.712 | 1.266 |

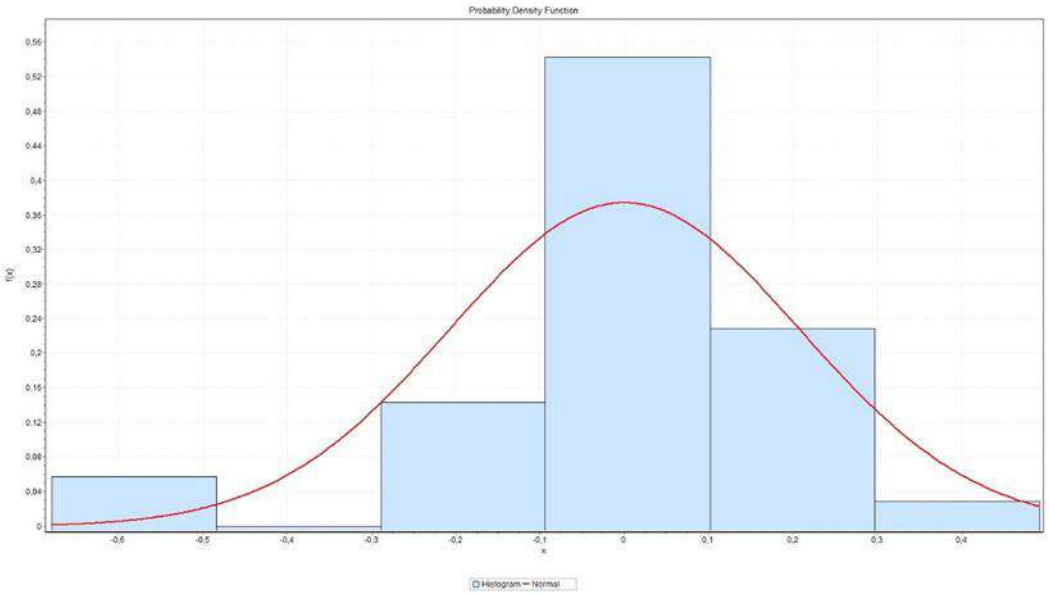
Το προσαρμοσμένο $R^2$ για το συγκεκριμένο μοντέλο είναι 0.824, γεγονός που αποδεικνύει ότι υπάρχει πολύ ικανοποιητική συσχέτιση. Το F-stat είναι 95.044, οπότε οι βi όροι του μοντέλου δεν είναι μηδενικοί. Οι t - όροι για κάθε συντελεστή είναι αντίστοιχα 9.099, 7.279 και 19.162 για το σταθερό όρο. Το t-stat για μέγεθος δείγματος 35, 2 βαθμούς ελευθερίας και 95% επίπεδο σημαντικότητας είναι προσεγγιστικά 2.033. Άρα κατά απόλυτη τιμή όλοι οι t όροι είναι μεγαλύτεροι του t-stat, οπότε όλες οι ανεξάρτητες μεταβλητές θεωρούνται αποδεκτές και στατιστικά σημαντικές. Η σημαντικότητα F της παλινδρόμησης τείνει στο μηδέν, δηλαδή μικρότερη του 0.05 επιπέδου σημαντικότητας, άρα το μοντέλο κρίνεται επαρκές. Οι συντελεστές των δυο ανεξάρτητων μεταβλητών είναι και σε αυτό το μοντέλο θετικοί, όπως ήταν και αναμενόμενο, δηλαδή αύξηση του μήκους και αύξηση της τιμής IRI αυξάνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Στο σχήμα 8.18 παρουσιάζεται το Q-Q plot, όπου παρατηρείται η μικρή απόκλιση μεταξύ προβλεπόμενων τιμών από το μοντέλο που κατασκευάστηκε και των πραγματικών τιμών, που προέκυψαν από την ανάλυση του λογισμικού MOVES2014a στα πρώτα στάδια της επεξεργασίας.



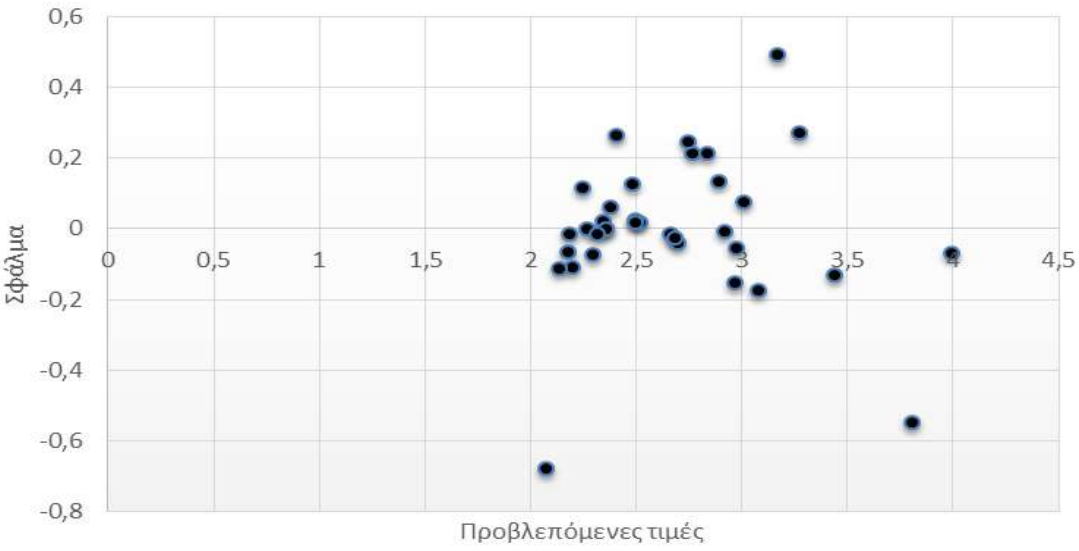

*Σχήμα 8.18 Q-Q plot – φορτηγά ντιζελοκίνητα*

Τα σφάλματα του μοντέλου των φορτηγών ντιζελοκίνητων οχημάτων παρουσιάζουν κανονική κατανομή με μέση τιμή ίση με το μηδέν, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8.19.




*Σχήμα 8.19 Κανονική κατανομή σφαλμάτων – φορτηγά ντιζελοκίνητα*

Τέλος ελέχθηκε η αυτοσυσχέτιση των σφαλμάτων αρχικά μέσω του διαγράμματος σφαλμάτων-προβλεπόμενων τιμών (βλ. Σχήμα 8.20).




*Σχήμα 8.20 Τυχαιότητα σφαλμάτων – φορτηγά ντιζελοκίνητα*

Παράλληλα η τιμή d του Durbin-Watson ελέγχου του μοντέλου των φορτηγών ντιζελοκίνητων υπολογίστηκε ίση με 1.85, δηλαδή μεγαλύτερη από την κρίσιμη τιμή 1.58 της $d_u$ και άρα δεν υπάρχει αυτοσυσχέτιση των σφαλμάτων. Εφόσον πληρούνται όλοι οι παραπάνω έλεγχοι, κρίνεται ότι το μοντέλο των φορτηγών ντιζελοκίνητων δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

## 8.6 Ανάπτυξη γενικού μοντέλου

Σε συνέχεια της ανάπτυξης των μοντέλων πρόβλεψης του ισοδυνάμου CO2 ανά τύπο οχήματος, γίνεται ενοποίηση των στοιχείων επεξεργασίας και ανάλυσης, προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα ανάπτυξης ενός ενιαίου μοντέλου. Υπό αυτό το πρίσμα δημιουργήθηκαν οι κατηγορικές ανεξάρτητες μεταβλητές v και f. Η v παίρνει την τιμή «μηδέν» εάν το όχημα είναι επιβατικό και την τιμή «ένα» εάν είναι φορτηγό. Η f δέχεται σα τιμή εισόδου το «μηδέν» εάν πρόκειται για βενζινοκίνητο όχημα και το «ένα» εάν το όχημα είναι ντιζελοκίνητο. Στον Πίνακα 8.21 παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ τεσσάρων ανεξάρτητων μεταβλητών και του ισοδύναμου του διοξειδίου του άνθρακα.

Πίνακας 8.21 Συσχέτιση μεταβλητών

| | *d* | *IRI* | *v* | *f* | *eqCO₂* |
|---|---|---|---|---|---|
| d | 1 | | | | |
| IRI | 0.158 | 1 | | | |
| v | 0 | 0 | 1 | | |
| f | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| $eqCO_2$ | 0.588 | 0.501 | 0.612 | 0.387 | 1 |

Παρατηρείται ότι το μήκος (d) και ο δείκτης IRI δεν σχετίζονται μεταξύ τους, οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ανεξάρτητες μεταβλητές. Συντελεστής συσχέτισης κοντά στο 0.5 υποδηλώνει πως υπάρχει καλή σχέση μεταξύ διοξειδίου του άνθρακα και ομαλότητας, αλλά επειδή η τιμή είναι σημαντικά μικρότερη του 0.9 πιθανόν να απαιτούνται περισσότερες μεταβλητές για τη δημιουργία καλύτερου μοντέλου. Συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μήκος ως επιπλέον μεταβλητή εφόσον και αυτό έχει κάποια εξάρτηση (0.588 συντελεστής συσχέτισης) με το διοξείδιο του άνθρακα. Η μεταβλητή v εμφανίζει την καλύτερη συσχέτιση σε σύγκριση με τις υπόλοιπες ανεξάρτητες και παράλληλα δε σχετίζεται καθόλου με τις υπόλοιπες. Η μεταβλητή f παρόλο που εμφανίζει μικρή συσχέτιση με το διοξείδιο του άνθρακα, επιλέγεται να εισαχθεί στο μοντέλο, διότι ο τύπος του καυσίμου αποτελεί βασικό παράγοντα επίδρασης εκπομπής των αέριων ρύπων. Το τελικό βέλτιστο μοντέλο που προκύπτει παίρνοντας το λογάριθμο του ισοδύναμου του διοξειδίου του άνθρακα και δίνεται από τη σχέση:

$$eqCO_2 = e^{2.04 + 1.57 * d + 0.99 * IRI + 1.76 * v + 0.23 * f} \quad (8.5)$$

όπου

$eqCO_2$ : ισοδύναμο $CO_2$ για ένα όχημα (grams)
d: μήκος οδικού τμήματος σε km
IRI: διεθνής δείκτης ομαλότητας σε m/km
v: παίρνει την τιμή 1 εάν εξετάζεται φορτηγό όχημα (0 για επιβατικό όχημα)
f: παίρνει την τιμή 1 εάν εξετάζεται ντιζελοκίνητο όχημα (0 για βενζινοκίνητο όχημα)

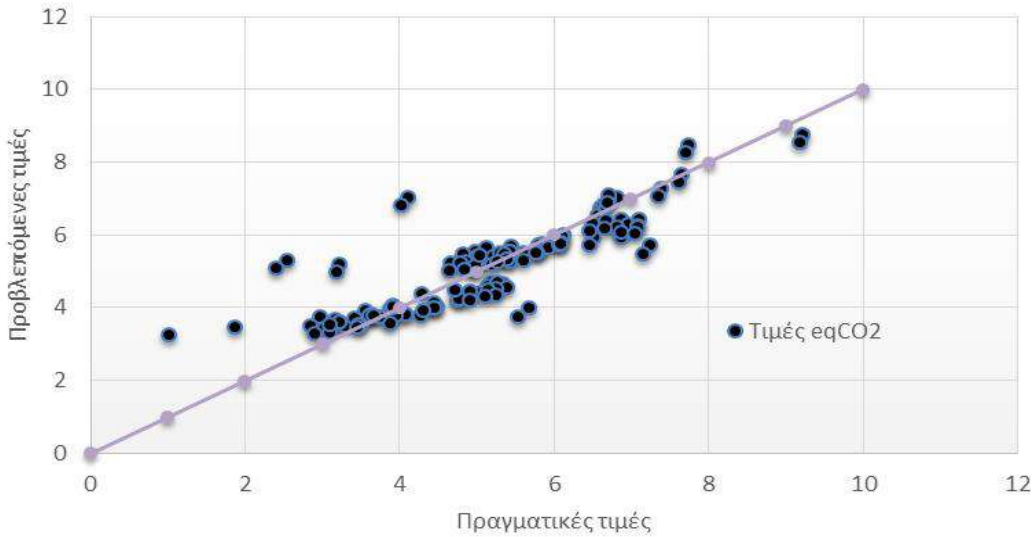
Στον Πίνακα 8.22 εμφανίζονται οι στατιστικοί έλεγχοι του μοντέλου.

Πίνακας 8.22 Στατιστικά αποτελέσματα παλινδρόμησης - γενικό μοντέλο

| Στατιστικά παλινδρόμησης | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Πολλαπλό R | | | 0.946 | | | |
| R Τετράγωνο | | | 0.894 | | | |
| Προσαρμοσμένο R Τετράγωνο | | | 0.891 | | | |
| Τυπικό σφάλμα | | | 0.476 | | | |
| Μέγεθος δείγματος | | | 140 | | | |
| Ανάλυση Διακύμανσης | | | | | | |
| Βαθμοί ελευθερίας | | SS | MS | F | Σημαντικότητα - F | |
| Παλινδρόμηση | 4 | 259.206 | 64.456 | 285.256 | 0 | |
| Υπόλοιπο | 135 | 30.240 | 0.227 | | | |
| Σύνολο | 139 | 289.005 | | | | |
| | | | | | | |
| | Συντελεστές | Τυπικό σφάλμα | t | Τιμή-P | Κατώτερο 95% | Υψηλότερο 95% |
| Τεταγμένη επί την αρχή | 2.038 | 0.113 | 18.042 | 0 | 1.837 | 2.273 |
| Μεταβλητή d | 1.570 | 0.087 | 18.088 | 0 | 1.417 | 1.752 |
| Μεταβλητή IRI | 0.988 | 0.067 | 15.073 | 0 | 0.833 | 1.086 |
| Μεταβλητή v | 1.759 | 0.081 | 21.848 | 0 | 1.590 | 1.901 |
| Μεταβλητή f | 0.225 | 0.081 | 2.797 | 0.01 | 0.082 | 0.391 |

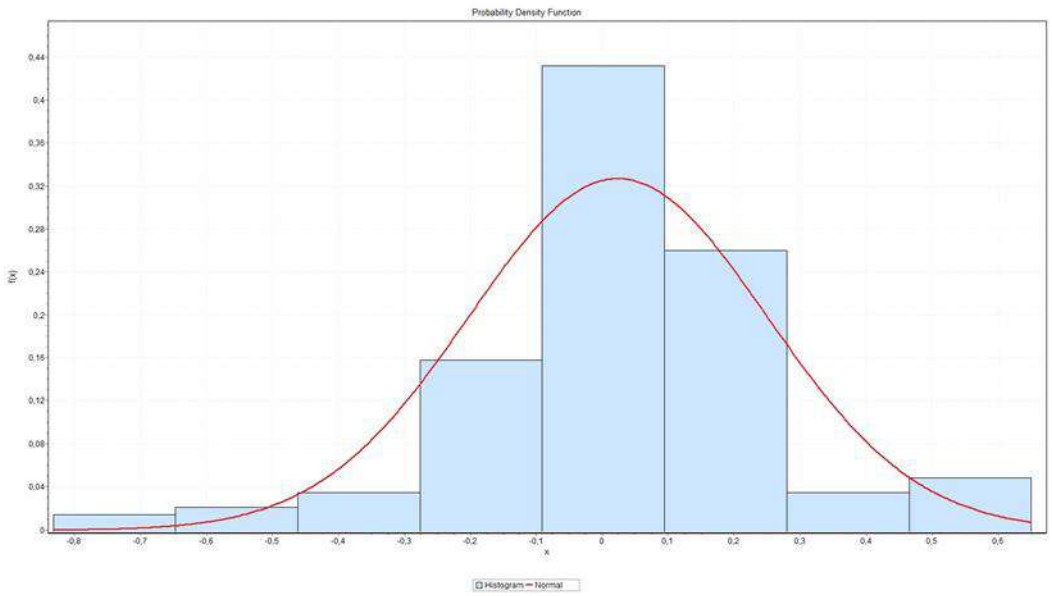
Το προσαρμοσμένο $R^2$ για το συγκεκριμένο μοντέλο είναι 0.891, γεγονός που αποδεικνύει ότι υπάρχει πολύ ικανοποιητική συσχέτιση. Το F-stat είναι 285.256, οπότε οι βi όροι του μοντέλου δεν είναι μηδενικοί. Οι t - όροι για κάθε συντελεστή είναι αντίστοιχα 18.088, 15.073, 21.848, 2.797 και 18.042 για το σταθερό όρο. Το t-stat για μέγεθος δείγματος 140, 4 βαθμούς ελευθερίας και 95% επίπεδο σημαντικότητας είναι προσεγγιστικά 1.290. Άρα κατά απόλυτη τιμή όλοι οι t όροι είναι μεγαλύτεροι του t-stat, οπότε όλες οι ανεξάρτητες μεταβλητές θεωρούνται αποδεκτές και στατιστικά σημαντικές. Η σημαντικότητα F της παλινδρόμησης τείνει στο μηδέν, δηλαδή μικρότερη του 0.05 επιπέδου σημαντικότητας, άρα το μοντέλο κρίνεται επαρκές. Οι συντελεστές των δυο ανεξάρτητων μεταβλητών είναι και σε αυτό το μοντέλο θετικοί, όπως ήταν και αναμενόμενο, δηλαδή αύξηση του μήκους και αύξηση της τιμής IRI αυξάνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι συντελεστές των κατηγορικών μεταβλητών v και f, διότι σε περίπτωση που λάβουν την τιμή ένα, προκαλούν αύξηση στην τιμή των εκπομπών των ρύπων. Το αποτέλεσμα αυτό φαίνεται πολύ λογικό, αφού τα φορτηγά ντιζελοκίνητα (τιμές «ένα» των κατηγορικών μεταβλητών) εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές εκπομπών αέριων ρύπων.

Στο σχήμα 8.23 παρουσιάζεται το Q-Q plot, όπου παρατηρείται η μικρή απόκλιση μεταξύ προβλεπόμενων τιμών από το μοντέλο που κατασκευάστηκε και πραγματικών τιμών που υπολογίστηκαν κατά την επεξεργασία των στοιχείων ομαλότητας.



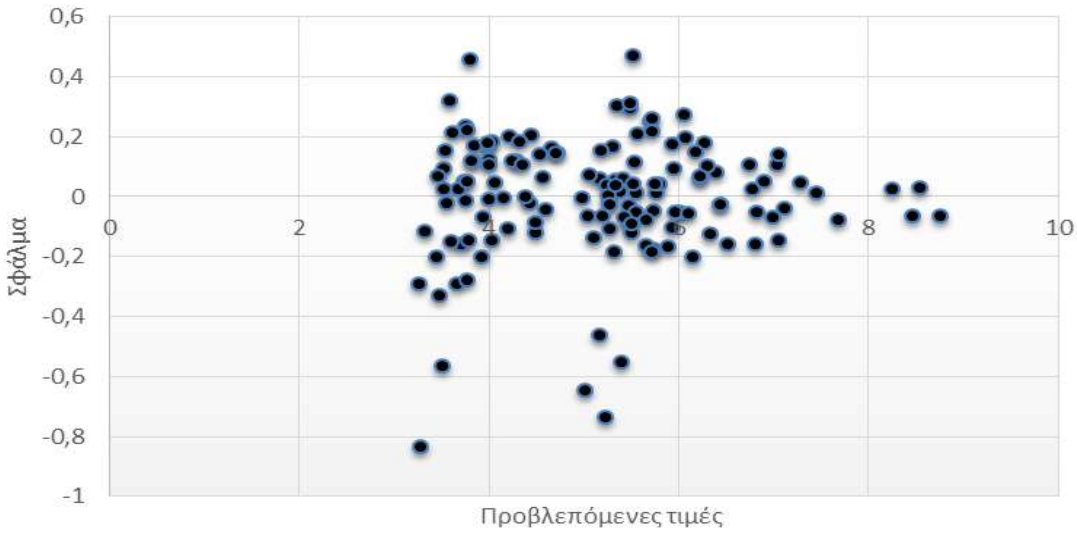

*Σχήμα 8.23 Q-Q plot – γενικό μοντέλο*

Στο Σχήμα 8.24 ελέγχθηκε το είδος της κατανομής των σφαλμάτων για το γενικό μοντέλο εκτίμησης ρύπων. Παρατηρείται ότι τα σφάλματα ακολουθούν κανονική κατανομή με μέση τιμή μηδέν, δηλαδή $N(0,\sigma^2)$, γεγονός που αποδεικνύει την κανονικότητα του μοντέλου.




*Σχήμα 8.24 Κανονική κατανομή σφαλμάτων – γενικό μοντέλο*

Τέλος πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος ανεξαρτησίας των σφαλμάτων μέσω του διαγράμματος σφαλμάτων-προβλεπόμενων τιμών (βλ. Σχήμα 8.25).




*Σχήμα 8.25 Τυχαιότητα σφαλμάτων – γενικό μοντέλο*

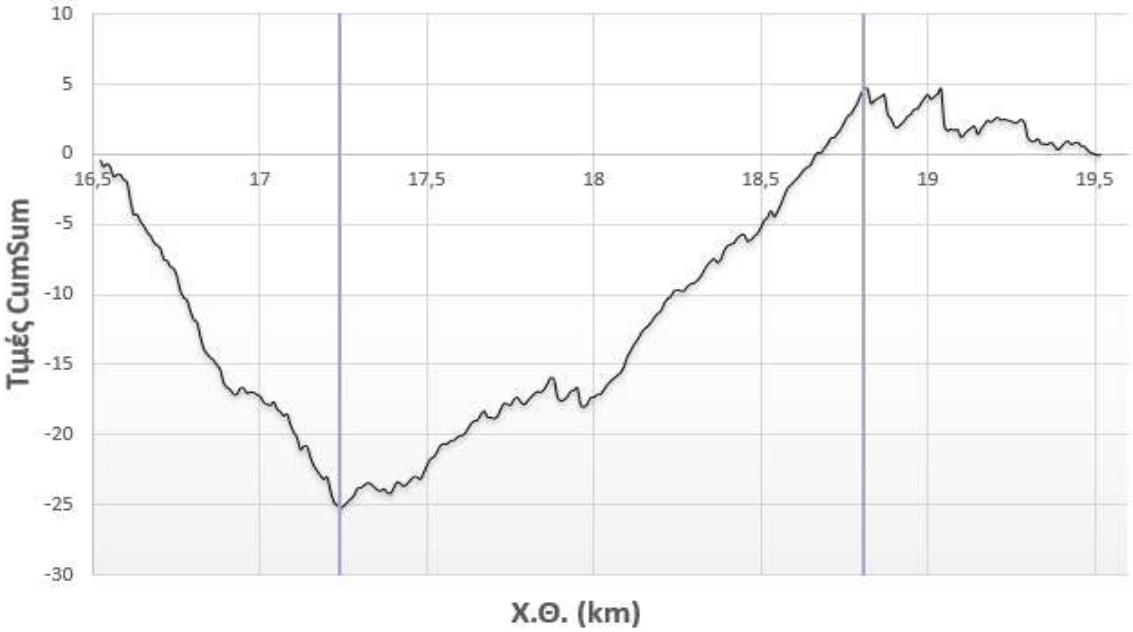
Παράλληλα, υπολογίζεται η στατιστική παράμετρος d του ελέγχου Durbin-Watson. Για επίπεδο σημαντικότητας 95%, αριθμός παρατηρήσεων 140 και 4 ανεξάρτητων μεταβλητών εκλέχθηκε η κρίσιμη τιμή της παραμέτρου $d_u$ ίση με 1.76. Εν συνεχεία υπολογίστηκε η τιμή d του γενικού μοντέλου ίση με 1.77 και αφού είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη $d_u$, επαλληθεύεται η μηδενική υπόθεση. Συνεπώς τα σφάλματα δεν παρουσιάζουν αυτοσυσχέτιση. Αφού πληρούνται όλοι οι παραπάνω έλεγχοι, κρίνεται ότι το γενικό μοντέλο δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

## 8.7 Επαλήθευση αποτελεσμάτων πρόβλεψης

### 8.7.1 Επιλογή πεδίου επαλήθευσης

Για την αξιολόγηση των γραμμικών μοντέλων πρόβλεψης των εκπομπών αερίων βάσει της ομαλότητας, που προέκυψαν από τη συνολική ανάλυση των στοιχείων, εφαρμόσθηκαν σε ένα διαφορετικό τμήμα αυτοκινητοδρόμου τριών λωρίδων κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση, ώστε να εκτιμηθεί η ορθότητά τους.

Το τμήμα του αυτοκινητοδρόμου που εξετάσθηκε αφορά τη μεσαία λωρίδα στις χιλιομετρικές θέσεις 16.25 έως 19.52 km. Οι μετρήσεις ομαλότητας του συγκεκριμένου τμήματος αυτοκινητοδρόμου πραγματοποιήθηκαν στις 02/09/2016, ώρα 16:00, με το σύστημα προφιλομέτρησης του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ, εκφρασμένες ως προς το διεθνή δείκτη ομαλότητας IRI ανά 10 m μήκος οδού. Ο διαχωρισμός σε επιμέρους ομογενοποιημένα υποτμήματα υλοποιήθηκε βάσει της μεθοδολογίας που έχει ήδη αναφερθεί και το αποτελέσμα του παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.26. Οι t-έλεγχοι του διαχωρισμού εμφανίζονται στο Παράρτημα της παρούσας έρευνας.




*Σχήμα 8.26 Διαχωρισμός ομογενοποιημένων τμημάτων – Αυτοκινητόδρομος 4*

Το οδικό τμήμα χωρίστηκε σε τρεις ομοιογενείς υποπεριοχές με χιλιομετρικές θέσεις αντίστοιχα 16.25 – 17.24 km, 17.25 – 18.81 km καθώς και 18.82 – 19.52 km. Εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε η προσαρμογή της κατάλληλης κατανομής στα δεδομένα του κάθε υποτμήματος για τον υπολογισμό της χαρακτηριστικής τιμής του δείκτη IRI. Η κατανομή που επιλέχθηκε ήταν η Dagum(4P) για όλα τα ομογενοποιημένα υποτμήματα του υπό εξέταση οδικού τμήματος και τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον Πίνακα 8.27. Τα διαγράμματα των κατανομών των ομογενοποιημένων υποτμημάτων παρουσιάζονται στο Παράρτημα της παρούσας μελέτης.

Πίνακας 8.27 Κατανομές και χαρακτηριστικές τιμές IRI

| ΜΗΚΟΣ (km) | IRIc (m/km) | ΚΑΤΑΝΟΜΗ | ΟΔΙΚΟ ΤΜΗΜΑ |
|---|---|---|---|
| 0.73 | 1.29 | DAGUM(4P) | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 4 |
| 1.57 | 0.80 | DAGUM(4P) | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 4 |
| 0.71 | 0.92 | DAGUM(4P) | ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 4 |

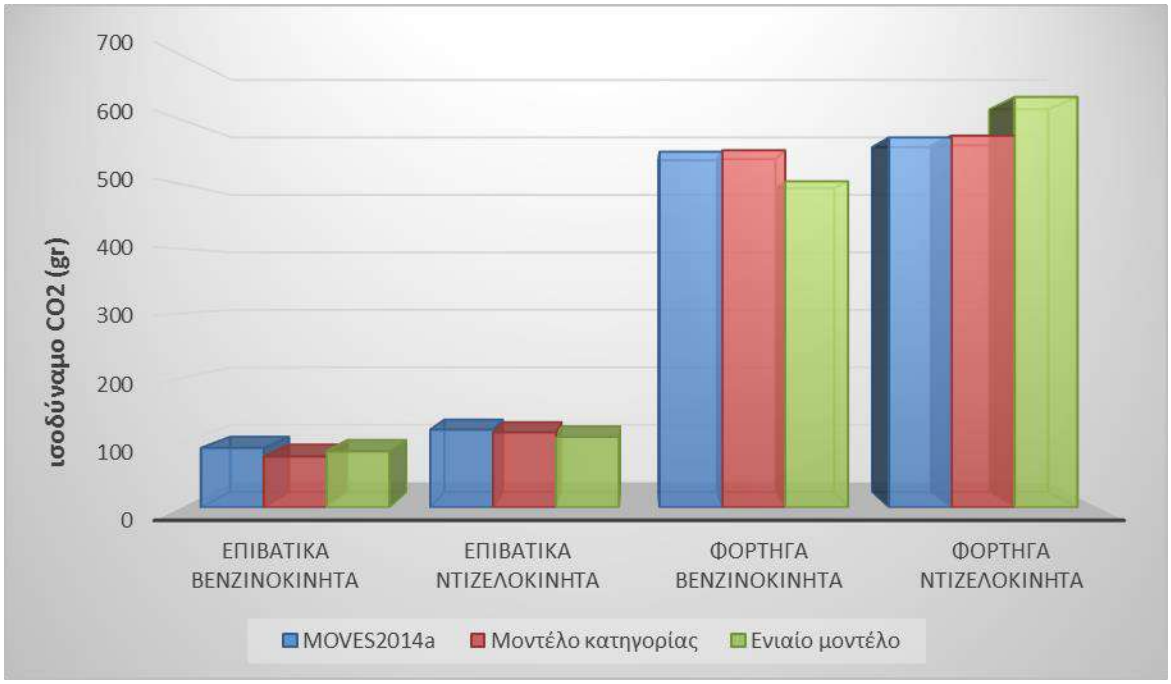
Τέλος υπολογίστηκαν οι αέριοι ρύποι του θερμοκηπίου, εκφρασμένοι σε ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα, για κάθε τύπο οχήματος-καυσίμου, με χρήση του λογισμικού MOVES2014a. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής ήταν από πλευράς θερμοκρασίας 28° C (82.4 ° F) και από πλευράς υγρασίας 45%, ενώ παράλληλα η κλίση της οδού ήταν σε όλο το υπό εξέταση τμήμα 2%. Τα αποτελέσματα των ρύπων παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.28.

Πίνακας 8.28 Αποτελέσματα ρύπων αυτοκινητοδρόμου 4

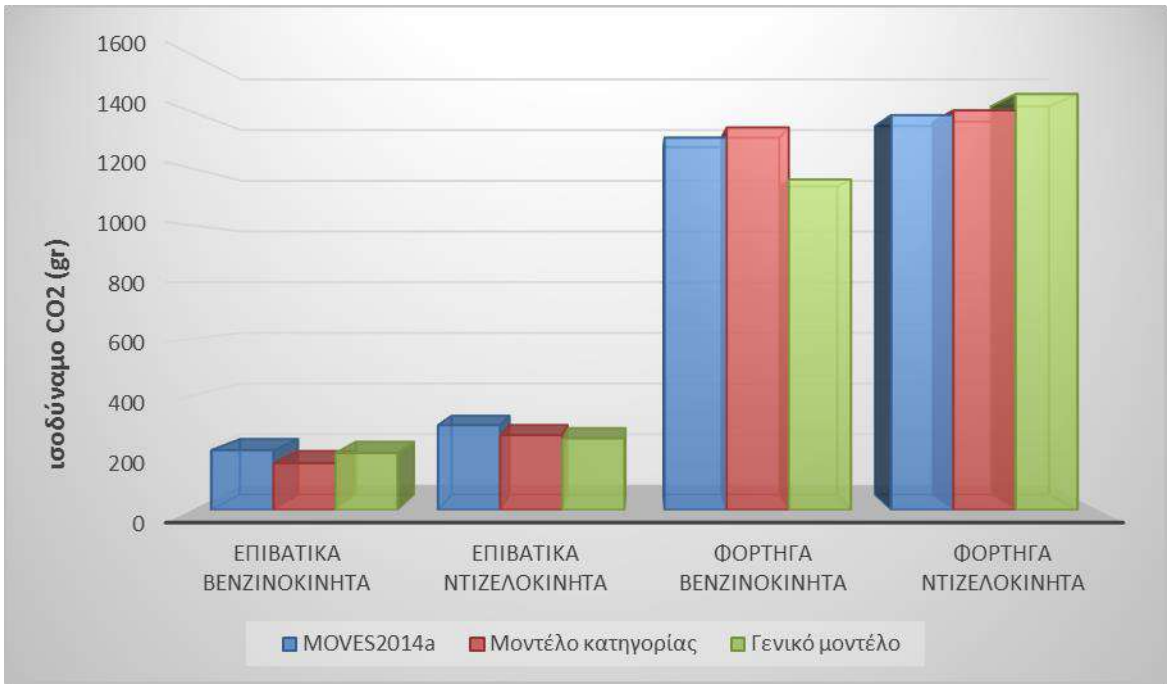
| **Τμήμα (km)** | **$IRI_C$ (m/km)** | **V(km/h)** | | **ισοδύναμο CO2 (grams)** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Επιβατικό | | Φορτηγό | |
| | | Vεπιβ | Vφορτ | Diesel | Gasoline | Diesel | Gasoline |
| 16.25 – 17.24 | 1.29 | 63.36 | 48.53 | 120.33 | 92.12 | 572.15 | 550.06 |
| 17.25 – 18.81 | 0.80 | 102.17 | 78.26 | 297.51 | 209.77 | 1387.09 | 1307.88 |
| 18.82 – 19.52 | 0.92 | 88.85 | 68.05 | 86.33 | 67.31 | 374.14 | 355.02 |

### 8.7.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων πρόβλεψης

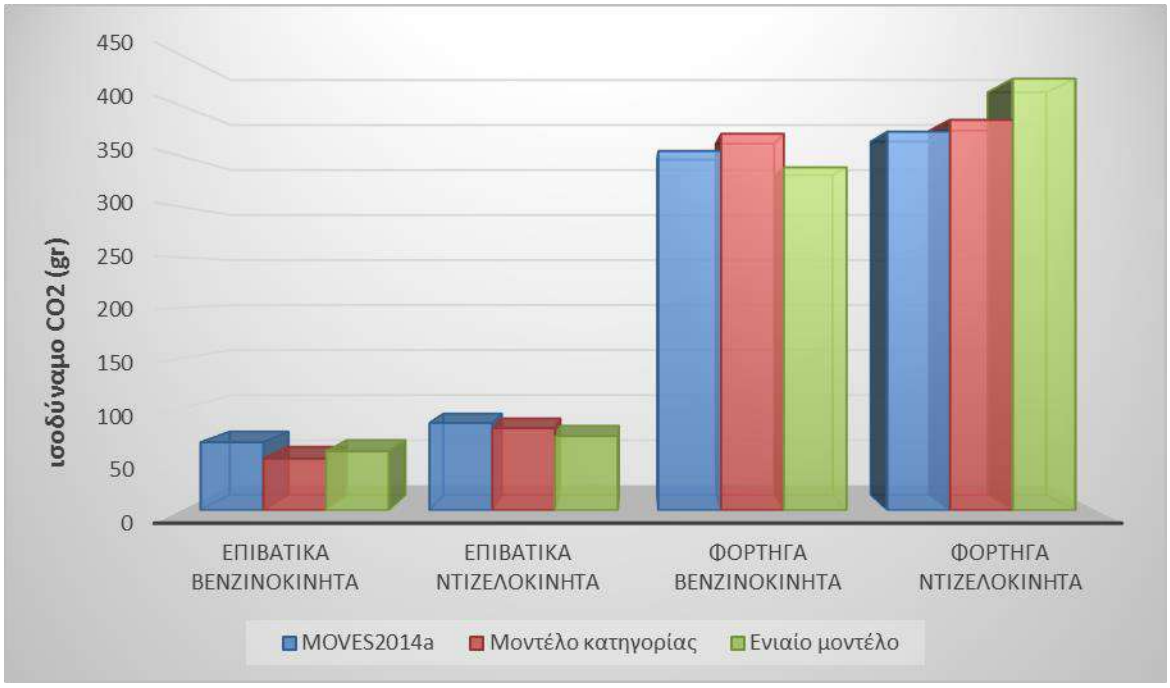
Μετά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων από το λογισμικό MOVES2014a, υπολογίστηκαν οι αέριοι ρύποι σε ισοδύναμο διοξείδιο του άνθρακα με τη χρήση των μαθηματικών μοντέλων, που διαμορφώθηκαν στο παρόν κεφάλαιο. Εφόσον κάθε μοντέλο απεικονίζει το ισοδύναμο διοξειδίου του άνθρακα για ένα όχημα της κάθε μιας από τις τέσσερις κατηγορίες οχήματος-καυσίμου, πραγματοποιήθηκε η σύγκριση της τιμής μεταξύ του αποτελέσματος του μαθηματικού μοντέλου και της ποσότητας ρύπων, όπως προέκυψε από το λογισμικό υπολογισμού εκπομπών. Παράλληλα, σε κάθε ένα από τα ζεύγη πραγματικών και εκτιμώμενων τιμών συμπεριλαμβάνεται και η τιμή που δίνει το γενικό μοντέλο, αφού αυτό δύναται να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις κατηγορίες οχημάτων. Τα αποτελέσματα της συνολικής σύγκρισης εμφανίζονται για κάθε ομογενοποιημένο υποτμήμα του πεδίου επαλήθευσης στα σχήματα 8.29, 8.30 και 8.31 αντίστοιχα.




*Σχήμα 8.29 Σύγκριση αποτελεσμάτων πρόβλεψης – Τμήμα 16.25 – 17.24 km*




*Σχήμα 8.30 Σύγκριση αποτελεσμάτων πρόβλεψης – Τμήμα 17.25 – 18.81 km*




*Σχήμα 8.31 Σύγκριση αποτελεσμάτων πρόβλεψης – Τμήμα 18.82 – 19.52 km*

Η απόκλιση μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών από τα μαθηματικά μοντέλα και των τιμών, όπως προέκυψαν από το λογισμικό MOVES2014a, φαίνεται να είναι σε λογικά επίπεδα της τάξης του 5 έως 10%. Αναλυτικότερα, στην περίπτωση των επιβατικών οχημάτων παρατηρείται ότι και τα δυο μοντέλα δίνουν λογικά αποτελέσματα και προσεγγίζουν ικανοποιητικά τα αποτελέσματα των εκπομπών του λογισμικού MOVES2014a. Στην περίπτωση των φορτηγών οχημάτων, το ενιαίο μοντέλο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη απόκλιση από τις προκύπτουσες τιμές του λογισμικού της τάξης του 10 έως και 14%. Συνεπώς, τα επιμέρους μοντέλα της κάθε κατηγορίας φαίνεται να πραγματοποιούν καλύτερη εφαρμογή και στις τέσσερις κατηγορίες οχημάτων. Αντίθετα, είναι εμφανές ότι ένα γενικό μοντέλο πρόβλεψης εκπομπών ρύπων απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση για την εξαγωγή μιας ακριβέστερης μαθηματικής σχέσης.

# 9

# ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η ρύπανση του περιβάλλοντος αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα, το οποίο σχετίζεται με ένα πλήθος παραγόντων. Οι μεταφορές και ιδίως τα οδικά δίκτυα κατέχουν ένα σημαντικό ποσοστό επίδρασης στη περιβαλλοντική ρύπανση μέσω των εκπομπών των αέριων ρύπων. Ένα πλήθος παραγόντων υπεισέρχονται στην κατηγορία αυτή και η ομαλότητα φαίνεται να παίζει ένα σπουδαίο ρόλο στο ζήτημα αυτό. Η συγκεκριμένη έρευνα λοιπόν ανέδειξε τη σημασία της ομαλότητας του οδοστρώματος στο αποτύπωμα του άνθρακα και παρακάτω παρατίθενται τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν.

- Από την επισταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση προέκυψε ότι η κακή κατάσταση της ομαλότητας της επιφάνειας του οδοστρώματος έχει άμεσο αντίκτυπο στη ρύπανση του περιβάλλοντος, αφού αυξάνει τα ποσοστά εκπομπών των αέριων ρύπων του θερμοκηπίου και κυρίως του διοξειδίου του άνθρακα. Επισημαίνεται ότι υποβαθμισμένη κατάσταση ομαλότητας εμφανίζεται τόσο σε αστικές οδούς, όσο και σε υπεραστικές καθώς και σε αυτοκινητοδρόμους. Επομένως, η εκπομπή ρύπων του θερμοκηπίου επηρεάζεται από τη συνολική υποβαθμισμένη κατάσταση ομαλότητας του συνολικού εθνικού οδικού δικτύου.

- Τα ντιζελοκίνητα οχήματα εκπέμπουν υψηλότερες ποσότητες ρύπων του θερμοκηπίου, εκφρασμένες σε ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα, σε σύγκριση με τα βενζινοκίνητα, γεγονός που αποδεικνύεται και από τη διεθνή βιβλιογραφία. Οι νέες τεχνολογίες των πετρελαιοκίνητων οχημάτων τείνουν να εξισορροπήσουν τη διαφοροποίηση των εκπομπών αέριων ρύπων, με αποτέλεσμα να γίνονται πιο φιλικά στο περιβάλλον σε σχέση με το παρελθόν, που σε συνδυασμό με το χαμηλότερο κόστος καυσίμου κάνει τη χρήση τους πλέον πιο δελεαστική. Αναμφίβολα όμως η χρήση νέων καυσίμων και ειδικότερα η επέκταση της χρήσης βιοκαυσίμων και η προώθηση εναλλακτικών, καθαρών τεχνολογιών με έμφαση στην ηλεκτρική ενέργεια θα συμβάλει στη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου από την κίνηση των οχημάτων.

- Από τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας που έγινε για αυτοκινητοδρόμους προέκυψε ότι τα επιβατικά οχήματα καταναλώνουν λιγότερα καύσιμα σε σχέση με τα φορτηγά, με αποτέλεσμα να εκπέμπουν λιγότερες ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου. Επιπλέον, υποβαθμισμένη κατάσταση ομαλότητας σε συνδυασμό με την κίνηση φορτηγών οχημάτων οδηγεί πέραν της εμφάνισης δυσμενέστερων φθορών στο οδόστρωμα, σε υψηλές τιμές αέριων ρύπων. Συνεπώς, η διατήρηση ενός ικανοποιητικού επιπέδου ομαλότητας του οδοστρώματος κρίνεται απαραίτητη.

- Στα τμήματα του κύριου άξονα των αυτοκινητοδρόμων, λόγω της καλύτερης κατάστασης της ομαλότητάς τους αλλά και της δυνατότητας ανάπτυξης εντός αυτών υψηλότερων ταχυτήτων, εκπέμπονται έως και 50% λιγότεροι αέριοι ρύποι σε σχέση με τους παρακείμενους κόμβους, που παρουσιάζουν υποβαθμισμένη ομαλότητα. Συνεπώς, η διατήρηση ενός ικανοποιητικού επιπέδου ομαλότητας και στους κόμβους αυτοκινητοδρόμου είναι μείζονος σημασίας από πλευράς εκπομπής ρύπων, αφού τα οχήματα κινούνται εντός των κόμβων τόσο για την είσοδο όσο και για την έξοδό τους από τον αυτοκινητόδρομο.

- Η συντήρηση ενός οδοστρώματος δεν συντελεί μόνο στη βελτίωση της δομικής και λειτουργικής κατάστασής του, αλλά και στην μείωση των περιβαλλοντικών ρύπων, που όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας μπορεί να οδηγήσει σε μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα έως και 70%. Άρα η σύγχρονη τάση είναι το κόστος που σχετίζεται με τα οδικά έργα να μετατοπίζεται κυρίως στη συντήρηση των οδοστρωμάτων και λιγότερο στην κατασκευή, αφού συμβάλλει στη μείωση των ρύπων αλλά και στο λειτουργικό κόστος του χρήστη. Υπό το πρίσμα αυτό, ενδιαφέρον αποτελεί η εξισορρόπηση μεταξύ κόστους του χρήστη και κόστους της εθνικής οικονομίας συναρτήσει της κατάστασης του οδοστρώματος.

- Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προέκυψε ικανοποιητική γραμμική συσχέτιση μεταξύ ομαλότητας και ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα για τις επιμέρους κατηγορίες τύπος οχήματος-τύπος καυσίμου αλλά και συνολικά. Η επιλογή της κατάλληλης μαθηματικής σχέσης εξαρτάται από το εκάστοτε ενδιαφέρον του μελετητή.

- Οι γραμμικές συσχετίσεις που διαμορφώθηκαν μεταξύ ομαλότητας και ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό αέριων ρύπων σε ασφαλτικά οδοστρώματα του ελληνικού δίκτυο αυτοκινητοδρόμων σε παρόμοιες συνθήκες περιβάλλοντος, όπως προέκυψε από την επαλήθευση των αποτελεσμάτων πρόβλεψης. Κρίνεται όμως ότι η ανάπτυξη ενός ακριβέστερου ενιαίου μοντέλου πρόβλεψης εκπομπών ρύπων συναρτήσει της ομαλότητας απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση.

Για μελλοντική έρευνα προτείνεται η συλλογή και η επεξεργασία στοιχείων σε διαφορετικές καιρικές αλλά και οδικές συνθήκες, όπου αναμένονται διαφορετικά αποτελέσματα ως προς τις τελικές ποσότητες, τόσο των ρύπων όσο και των πιθανών μαθηματικών μοντέλων. Η ανάλυση επιπρόσθετων στοιχείων ενδεχομένως να οδηγήσει στην ανάπτυξη αναλυτικότερων και ακριβέστερων γραμμικών σχέσεων μεταξύ ομαλότητας και αέριων ρύπων του θερμοκηπίου. Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης ενέργειας, κρίνεται απαραίτητη και η συλλογή στοιχείων με κατάλληλο εξοπλισμό των αέριων ρύπων που εκπέμπονται κατά την κίνηση των οχημάτων.

Επιπροσθέτως, αντικείμενο μελλοντικής έρευνας αποτελεί τόσο η επιρροή της ομαλότητας άλλων τύπων οδοστρωμάτων, όσο και η επίδραση άλλων επιφανειακών χαρακτηριστικών των οδοστρωμάτων στην εκπομπή αέριων ρύπων του θερμοκηπίου. Όπως αναφέρθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο τύπος του οδοστρώματος αποτελεί βασικό παράγοντα επιρροής στο αποτύπωμα του άνθρακα, συνεπώς η περαιτέρω ανάλυση του ζητήματος ειδικά στα ελληνικά οδοστρώματα φαίνεται ιδιαίτερα σημαντική.

Τέλος, η προσπάθεια συσχέτισης όλων των βασικών αέριων ρύπων που σχετίζονται με τις οδικές μεταφορές (CO, HC, NH4, και NOx) τόσο με την ομαλότητα όσο και με άλλα λειτουργικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος θα παρουσίαζε ιδιαίτερο ενδιαφέρον στο πλαίσιο μιας μελλοντικής έρευνας.

# 10

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ


AASHO, «The ASSHO Road Test, Report 5, Pavement Research» Highway Reasearch Board, Special Report 61E, 1962

Allison I., «The science of climate change: questions and answers», Australian Academy of Science, Canberra, 2010

Allitt P., «A climate of crisis: America in the age of environmentalism», Penguin Group USA, 2014

André J and R. Joumard, «Modelling of cold start excess emissions for passenger cars», Institut National de Recherche sur les Transports et leur Secunte (INRETS), INRETS Report LTE 0509, 2005

Appl M., «Ammonia», Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Weinheim: Wiley-VCH, 2006

Ardekani S.A. and P.Sumitsawan, «Effect of pavement type on fuel consumption and emissions in city driving», Final Research Report, The Ready Mixed Concrete Research & Education Foundation, 2010

Atkins R.D., «An Introduction to Engine Testing and Developement», SAE International, 2009

Baker J.S., «Traffic accident investigator's manual», 4th edition, North Western University, Evanston, 1975

Barnes G. and P. Langworthy, «The per-mile costs of operating automobiles and trucks», State and Local Policy Program Humphrey Institute of Public Affairs, University of Minnesota, Final Report Published by the Minnesota Department of Transportation, 2003

Barth M., An F., Norbeck J. and M. Ross, «Modal emissions modeling: A physical approach», National Research Council, Washington, D.C., Transportation Research Record, Vol. 1520, 81-88, 1996

Barth M. and K. Boriboonsomsin, «Traffic congestion and greenhouse gases», Access, No 35, 5-7, 2009

Bhagavan R., Dr. Kumar M.A., Dr. G.V.R Prsasada, «Performance study of flexible pavements on non-expansive soils», Journal of traffic and logistics engineering, Vol. 2, No 4, 1-13, 2012

Bielaczyc P. and J. Merkisz, «Cold start emission from passenger cars during engine cold-start and warm-up», Technical Paper 980401, SAE, 320-325, 1998

Biggs D.C. and R. Akcelik, «An energy-related model of instantaneous fuel consumption», Traffic Engineering and Control, Vol. 2, No 6, 320-325, 1986

Boden T.A., Marland G. and R.J Andres, «Global, regional, and national fossil-fuel CO2 emissions», Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, 2015

Boriboonsomsin K. and M. Barth, «Impacts of road grade on fuel consumption and carbon dioxide emissions evidenced by use of advanced navigation systems», Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No 2139, 21-30, 2009

Boucher O., Friedlingstein P., Collins B. and P. Shine Keith , «The indirect global warming potential and global temperature change potential due to methane oxidation», IOP science, Environmental Research Letter 4, 1-5, 2009

Bousquet P., Ciais P., Miller J.B., Dlugokencky E.J., Hauglustainel D.A., Prigents C., Van der Werf G.R., Peylin P., Brunke E.G., Carougel C., Langenfelds R.L., Lathiérel J., Papa F., Ramonet M., Schmidt M., Steele L.P., Tyler S.C. and J. White, «Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability», Letter 443, 439-443, 2006

Bureau of Transport and Communications Economics, «Roads, vehicle performance and greenhouse: costs and emission benefits of smoother highways», Paper 32, 1997

Burns J.C., «Roughness and road safety», Transportation Research Record 836, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1981

Choi D., Beardsley M., Brzezinski D., Koupal J. and J. Warila, «MOVES sensitivity analysis: The impacts of temperature and humidity on emissions», Office of Transportation & Air Quality, USEPA, 1-10, 2011

Cobian R., Henderson T., Mitra S., Nuworsoo C. and E. Sullivan «Vehicle emissions and level of service standards: exploratory analysis of the effects of traffic flow on vehicle greenhouse gas emissions», Journal-Institute of Transportation Engineers, 1-19, 2009

Colls J., «Air pollution», Spon Press, New York, 61, 2002

Columbia Encyclopedia, «Sulfur dioxide», Columbia University Press, New York, 2007

Cruickshank W., «Some additional observations on hydrocarbonates, and the gaseous oxide of carbon», Journal of Natural Philosophy, Chemistry and the Arts, 1st series, 201-211, 1801

Diefendorf J.M. and D. Kurkpatrick, «City, country, empire: Landscapes in environmental history», University of Pittsburgh Press, 44-49, 2009

Du Y., Chenglong L., Wu D. and J. Shengchuan, «Measurement of international roughness index by using - axis accelerometers and GPS», 26th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 325-331, 2014

EAPA, «Environmental impacts and fuel Efficiency of road pavements», Industry Report, 2004

Elbheiry M.R., Khaled A. K. and A. S. Kotb, «Investigation of factors affecting pavement roughness», Journal of Transportation Safety and Security, 164-176, 2011

Encyclopedia Britannica, «Environmental works», from library.eb.co.uk/eb/article-214274, 2008

Encyclopedia Britannica, «Pollution», from britannica.com/EBchecked/topic/468070/pollution, 2011

Energy Institute, «General properties and uses of carbon dioxide, good plant design and operation for onshore carbon capture installations and onshore pipelines», 2012

Farmer A., «Managing environmental pollution», Routledge, London, 2008

Gillespie T.D., «Everything you always wanted to know about IRI, but you afraid to ask!», Road Profile Users Group Meeting, Lincoln, Nebraska, 1992

Grey I., «Causes of pollution», from tropical-rainforest-animals.com/causes-of-pollution, 2011

Higman, C. and M. van der Burgt, «Gasification», Gulf Professional, 2003

Holleman A.F. and E. Wiberg, «Inorganic chemistry», Academic Press, San Diego, 2001

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), «PCC fourth assessment report: Climate change», 2007

International Energy Agency, «CO2 emissions from fuel combustion 2012», Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 2012

International Energy Agency, «Global greenhouse gas emissions», 2012

Ivey D.L. and L Griffen, «Driver/vehicle reaction to road surface discontinuities and failures - The hidden trigger to accidents», 16th International Congress of SAE, Tokyo, 1976

Kalembo C., Jeihani M. and A. Saka, «Evaluation of the impact of pavement roughness on vehicle gas emissions in Baltimore County», Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2012

Kaufman D.G. and C.M. Franz, «Biosphere 2000: protecting our global environment», Kendall/Hunt Pub. Co., 2011

Kemp D.D., «The Environment Dictionary», Routledge, London, from Quistea.com, 2011

Klein R.H., Johnson W.A. and H.T. Szostak, «Influence of roadway disturbances on vehicle handling», Systems Technology Inc., Hawthorne, California, 1-31, 1976

Le Quéré C., Andres R.J., Boden T., Conway T., Houghton R.A., House J.I., Marland G., Doney S.C., Enright C., Friedlingstein P., Huntingford C., Jaini A.K., C. Jourdain, Kato E., Keeling R.F., Klein Goldewijk K., Levis S., Levy P., Lomas M., Poulter B., Raupach M.R., Schwinger J., Sitch S. , Stocker B.D., Viovy N., ZaehIe S. and N. Zeng, «The global carbon budget 1959-2011», Earth Syst. Sci., No 5, 165–185, 2013

Limsawasd C., Wallied O. and P. Sitthapon, «Estimating fuel fonsumption from highway-rehabilitation program implementation on transportation networks», Computing in Civil Engineering 2015, 403-410, 2015

Lind D., Marchal W. and S.Wathen, «Statistical techniques in business and economics», McGraw-Hill International Edition, 16th edition, 2014

Matsumoto T., Suthiwarapirak P. and T. Kanda, «Mechanisms of multiple cracking and fracture of DFRCCs under fatigue flexure», Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC) – Application and Evaluation, Takayama, Japan, 259-268, 2002

Murrell D., «Passenger car fuel economy: EPA and Road», U.S. Environmental Protection Agency, 1980

Mursched D., «Estimating greenhouse gases from roadway transportation-methodology overview», Kumming, China, ASCE, 2010

National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway, «Skid resistance», Highway Research Board, National Academy of Sciences, Washington, D.C, 1972

National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) – Earth System Research Laboratory (ESRL), «Trends in carbon dioxide», 2005

NCHRP, «Issues in pavement smoothness: A Summary Report», National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, 2002

Ntziachristos L. and Z Samaras, «Speed-dependent representative emission factors for catalyst passenger cars and Influencing parameters», Atmospheric Environment, 4611-4619, 2000

Penney D.G., «Carbon monoxide toxicity», CRC Press, Taylor and Francis group, 2000

PIARC, «International experiment to harmonize longitudinal and transverse profile measurement and reporting procedure», PIARC Technical Committee on Surface Characteristics (C1), Technical Report, PIARC – World Road Association, France, 2002

Post K., Kent J.H, Tomlin J. and N. Carrutheres, «Fuel consumption and emission modelling by power demand and a comparison with other models», Transportation Research Part A: General, 191-213, 1984

Qian S. and V.C. Li, «Durable Pavement with ECC», 1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites, Nanjing, China, 535-543, 2008

Ramaswamy V., Boucher O., Haigh J., Hauglustaine D., Haywood J., Myhre G., Nakajima T., Shi G.Y. and S. Solomon, «Radiative forcing of climate change», Climate Change 2001: The Scientific Basis, Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 2001

Santos M. A., «Managing planet earth: perspectives on population, ecology, and the law», Bergin & Garvey, Westport, 1990

Sayers M.W. and S.M Karamihas, «The little book of profiling», UMTRI, Michigan, USA, 1997

Sayers M.W., Gillespie T.D. and C.A.V. Queiroz, «The international road roughness experiment: A basis for establishing a standard scale for road roughness measurements», Paper No 45, 76-85, 1986

Shepherd T. and M. Ways, «Vehicle miles travelled and air pollution in Maryland», MDE, 2009

Shriver and Atkins, «Inorganic chemistry», Fifth Edition, W.H. Freeman and Company, New York, 2010

Sloss L.L., «Nitrogen oxides control technology fact book», William Andrew, 1992

Sullivan J.L., Baker R.E, Boyer B.A., Hammerle R.H., Kenney T.E., Muniz L. and T.J. Wallington, «CO2 Emission Benefit of Diesel (versus Gasoline) Powered Vehicles», Environmental Science & Technology, 38 (3217-3223), 2004

Tarantino J., «Environmental issues», The Environmental Blog, 587-610, 2011

Tehrani S.S., Falls L.C. and D. Mesher, «Road users perception of roughness and the corresponding IRI threshold values», Canadian Journal of Civil Engineering, No 42, 233-240, 2015

Thauer R. K., «Biochemistry of methanogenesis: a tribute to Marjory Stephenson», Microbiology, No 144, 2377-2406, 1998

The Met Office, «The Great Smog of 1952», from metoffice.gov.uk, 2013

The World Bank, «Greenhouse gas emissions mitigation in road construction and rehabilitation», Asia Sustainable and Alternative Energy Program, 2010

U.S. Energy Information Administration, «Greenhouse gases - energy explained, your guide to understanding energy», 2014

U.S. EPA, «Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks 1990-2008», Washington, D.C., 2010

UNEP, «The 2010 assessment of the scientific assessment panel», World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No 52, 2010

University of Liverpool, «Molecular orbitals in carbon Monoxide CO», 2016

University of Michigan Transportation Research Institute, «International Roughness Index», 1998

Wang T., Harvey J. and A. Kendall, «Reducing greenhouse gas emissions through strategic management of highway pavement roughness», Environmental Research Letter 9, 1-10, 2014

Watanatada, T., Dhareshwar, A., and Rezende-Lima, «P.R.S.: vehicle speeds and operating costs: models for road planning and management», The World Bank, John Hopkins University Press, Baltimore, USA, 1987

WesTrack, «The road to performance-related specifications», WesTrack Interim Reports, Carson City, 1999

WWF Ελλάς, «Λύσεις για την κλιματική αλλαγή. Όραμα βιωσιμότητας για την Ελλάδα του 2050. Πολιτική σύνοψη WWF Ελλάς», 2008

Yu B. and Q. Lu, «Life cycle assessment of pavement: Methodology and case study», Transportation Research Part D, Vol. 17, 380-388, 2012

Yu B., «Environmental implications of pavements: a life cycle view», University of South Florida, Graduate Theses and Dissertations, 2013

Zaabar I. and K. Chatti, «Calibration of HDM-4 models for estimating the effect of pavement roughness on fuel consumption for U.S. conditions», Journal of the Transportation Research Board, 105-116, 2010

Zhang H., Keoleian G.A. and M.D. Lepech, «An integrated life cycle assessment and life cycle analysis model for pavement overlay systems», International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, 907-915, 2008

Zhang H., Lepech M.D., Keoleian G.A., Qian S. and V.C. Li, «Dynamic life cycle modeling of pavement overlay systems: capturing the impacts of users, construction, and roadway deterioration», Journal of Infrastructural Systems, Volume 16, No 4, 229-309, 2010

Zimmer R.A. and D.L. Ivey, «The influence of roadway surface holes and the potential for vehicle loss of control», Report 328-2F, TTI, Texas A&M University, College Station, 1983

Ευαγγελίδης Δ., «Εγνατία Οδός Α.Ε. Τομέας Λειτουργίας και Συντήρησης, Οδηγίες Συντήρησης Αυτοκινητοδρόμων - Κύρια Συντήρηση Οδοστρωμάτων», 2004

Λοΐζος Α. και Χ. Πλατή, «Σημειώσεις για το μάθημα Οδοστρώματα Οδών και Αεροδρομίων, Τεύχος Β: Συστήματα Παρακολούθησης και Διαχείρισης Οδοστρωμάτων», ΕΜΠ, 2015

Λοΐζος Α., Πλατή Χ. και Γ. Κανελλαΐδης , «Ο Διεθνής Δείκτης Ομαλότητας IRI σε σχέση με τους κυματισμούς της επιφάνειας των οδών», 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας Βόλος, 2002

Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, «Κλιματική αλλαγή: Εθνικό πρόγραμμα μείωσης εκπομπών αερίων φαινομένου θερμοκηπίου», 2002

www.arkansashighways.com

www.instrotek.com

www.ourworldindata.org/world-population-growth

www.pavemaintenance.wikispaces.com

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΙΝΑΚΕΣ t – ΕΛΕΓΧΩΝ ΟΔΙΚΩΝ ΥΠΟΤΜΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΥΠΟΤΙΘΕΜΕΝΕΣ ΑΝΙΣΕΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ

| *ΚΟΜΒΟΣ 1* | *0,00 - 0,54* | *0,55 - 0,80* |
|---|---|---|
| Μέσος | 1,013818182 | 1,533076923 |
| Διακύμανση | 0,31662404 | 0,165342154 |
| Μέγεθος δείγματος | 55 | 26 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 66 | |
| t | -4,717393829 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 6,41416E-06 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,668270514 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 1,28283E-05 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 1,996564419 | |

| *ΚΟΜΒΟΣ 1* | *0,55 - 0,80* | *0,81 - 0,86* |
|---|---|---|
| Μέσος | 1,533076923 | 0,831666667 |
| Διακύμανση | 0,165342154 | 0,024936667 |
| Μέγεθος δείγματος | 26 | 6 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 22 | |
| t | 6,840040966 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 3,58456E-07 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,717144374 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 7,16913E-07 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 2,073873068 | |

| *ΚΟΜΒΟΣ 1* | *0,87 -1,02* | *0,81 - 0,86* |
|---|---|---|
| Μέσος | 1,215625 | 0,831666667 |
| Διακύμανση | 0,242852917 | 0,024936667 |
| Μέγεθος δείγματος | 16 | 6 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 20 | |
| t | 2,761331464 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 0,006021084 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,724718243 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 0,012042167 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 2,085963447 | |

| *ΚΟΜΒΟΣ 2* | *0,00 - 0,68* | *0,69 - 0,80* |
|---|---|---|
| Μέσος | 0,941594203 | 1,565833333 |
| Διακύμανση | 0,14486948 | 0,518335606 |
| Μέγεθος δείγματος | 69 | 12 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 12 | |
| t | -2,933119336 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 0,006265574 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,782287556 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 0,012531149 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 2,17881283 | |

| *ΚΟΜΒΟΣ 2* | *0,81 - 1,01* | *0,69 - 0,80* |
|---|---|---|
| Μέσος | 0,836190476 | 1,565833333 |
| Διακύμανση | 0,068724762 | 0,518335606 |
| Μέγεθος δείγματος | 21 | 12 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 13 | |
| t | -3,384830216 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 0,002441299 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,770933396 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 0,004882597 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 2,160368656 | |

| *ΚΟΜΒΟΣ 3* | *0,00 - 0,46* | *0,47 - 1,10* |
|---|---|---|
| Μέσος | 2,857021277 | 1,8025 |
| Διακύμανση | 1,351586586 | 0,761514286 |
| Μέγεθος δείγματος | 47 | 64 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 82 | |
| t | 5,229907081 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 6,36419E-07 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,663649184 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 1,27284E-06 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 1,989318557 | |

| *ΚΟΜΒΟΣ 4* | *0,00 - 0,18* | *0,19 - 0,64* |
|---|---|---|
| Μέσος | 1,982631579 | 1,430652174 |
| Διακύμανση | 1,09694269 | 0,397112899 |
| Μέγεθος δείγματος | 19 | 46 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 24 | |
| t | 2,142632626 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 0,021246004 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,71088208 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 0,042492007 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 2,063898562 | |

| *ΚΟΜΒΟΣ 4* | *0,65 -1,12* | *0,19 - 0,64* |
|---|---|---|
| Μέσος | 2,612916667 | 1,430652174 |
| Διακύμανση | 0,881135993 | 0,397112899 |
| Μέγεθος δείγματος | 48 | 46 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 83 | |
| t | 7,196380162 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 1,2623E-10 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,663420175 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 2,52459E-10 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 1,98895978 | |

| *ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 1* | *86,00 - 86,88* | *86,89 - 88,20* |
|---|---|---|
| Μέσος | 1,079550562 | 0,871145038 |
| Διακύμανση | 0,695013432 | 0,166020986 |
| Μέγεθος δείγματος | 89 | 131 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 117 | |
| t | 2,187512818 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 0,015346849 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,657981659 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 0,030693697 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 1,980447599 | |

| *ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 1* | *88,21 -89,75* | *86,89 - 88,20* |
|---|---|---|
| Μέσος | 0,745649351 | 0,871145038 |
| Διακύμανση | 0,045525393 | 0,166020986 |
| Μέγεθος δείγματος | 154 | 131 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 189 | |
| t | -3,17435531 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 0,00087671 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,652955802 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 0,00175342 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 1,972595079 | |

| *ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 1* | *88,21 - 89,75* | *89,76 - 90,00* |
|---|---|---|
| Μέσος | 0,745649351 | 1,5888 |
| Διακύμανση | 0,045525393 | 0,744877667 |
| Μέγεθος δείγματος | 154 | 25 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 24 | |
| t | -4,860588388 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 2,96029E-05 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,71088208 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 5,92058E-05 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 2,063898562 | |

| *ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ2_Λ1* | *90,00 - 89,55* | *89,54 - 88,18* |
|---|---|---|
| Μέσος | 1,060652174 | 0,838686131 |
| Διακύμανση | 0,227175121 | 0,039664438 |
| Μέγεθος δείγματος | 46 | 137 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 50 | |
| t | 3,069828673 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 0,001728587 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,675905025 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 0,003457173 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 2,008559112 | |

| *ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 2_ Λ1* | *88,17 - 87,29* | *89,54 - 88,18* |
|---|---|---|
| Μέσος | 1,092727273 | 0,838686131 |
| Διακύμανση | 0,169054545 | 0,039664438 |
| Μέγεθος δείγματος | 88 | 137 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 114 | |
| t | 5,403179341 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 1,81572E-07 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,658329969 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 3,63143E-07 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 1,980992298 | |

| *ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 2_ Λ1* | *88,17 - 87,29* | *87,28 - 86,92* |
|---|---|---|
| Μέσος | 1,092727273 | 0,786216216 |
| Διακύμανση | 0,169054545 | 0,026740841 |
| Μέγεθος δείγματος | 88 | 37 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 123 | |
| t | 5,961174866 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 1,2299E-08 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,657336397 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 2,45981E-08 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 1,979438685 | |

| *ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 2_ Λ1* | *86,91 - 86,26* | *87,28 - 86,92* |
|---|---|---|
| Μέσος | 1,050909091 | 0,786216216 |
| Διακύμανση | 0,127651469 | 0,026740841 |
| Μέγεθος δείγματος | 66 | 37 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 98 | |
| t | 5,135227229 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 7,16178E-07 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,660551217 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 1,43236E-06 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 1,984467455 | |

| *ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 2_ Λ1* | *86,91 - 86,26* | *86,25 - 86,00* |
|---|---|---|
| Μέσος | 1,050909091 | 0,8352 |
| Διακύμανση | 0,127651469 | 0,055067667 |
| Μέγεθος δείγματος | 66 | 25 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 66 | |
| t | 3,35378444 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 0,000662018 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,668270514 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 0,001324036 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 1,996564419 | |

| *ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 2_ Λ2* | *90,00-89,54* | *89,53-88,63* |
|---|---|---|
| Μέσος | 1,261276596 | 0,888131868 |
| Διακύμανση | 0,615963552 | 0,051888694 |
| Μέγεθος δείγματος | 47 | 91 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 50 | |
| t | 3,190808454 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 0,001225961 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,675905025 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 0,002451922 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 2,008559112 | |

| *ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 2_ Λ2* | *88,62-87,31* | *89,53-88,63* |
|---|---|---|
| Μέσος | 1,088625954 | 0,888131868 |
| Διακύμανση | 0,248541174 | 0,051888694 |
| Μέγεθος δείγματος | 131 | 91 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 195 | |
| t | 4,036230429 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 3,89927E-05 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,65270531 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 7,79854E-05 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 1,972204051 | |

| *ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 2_ Λ2* | *88,62-87,31* | *87,30-86,91* |
|---|---|---|
| Μέσος | 1,088625954 | 0,950891089 |
| Διακύμανση | 0,248541174 | 0,090212198 |
| Μέγεθος δείγματος | 131 | 101 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 218 | |
| t | 2,607394177 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 0,004876804 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,651873373 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 0,009753608 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 1,970905601 | |

| *ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 2_ Λ2* | *88,62-87,31* | *86,90-86,00* |
|---|---|---|
| Μέσος | 1,088625954 | 0,869 |
| Διακύμανση | 0,248541174 | 0,054132308 |
| Μέγεθος δείγματος | 131 | 40 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 98 | |
| t | 2,117923572 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 0,018355852 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,660551217 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 0,036711704 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 1,984467455 | |

| *ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 3* | *68,60 -70,45* | *67,59 - 68,59* |
|---|---|---|
| Μέσος | 2,721615591 | 3,453044554 |
| Διακύμανση | 1,014386461 | 1,569745915 |
| Μέγεθος δείγματος | 186 | 101 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 171 | |
| t | -5,04785266 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 5,6774E-07 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,653813324 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 1,13548E-06 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 1,973933954 | |

| *ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 3* | *70,46 - 70,57* | *68,60 - 70,45* |
|---|---|---|
| Μέσος | 2,2943125 | 2,721615591 |
| Διακύμανση | 1,037015681 | 1,014386461 |
| Μέγεθος δείγματος | 112 | 186 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 232 | |
| t | -3,522807975 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 0,000257063 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,651448062 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 0,000514126 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 1,970241936 | |

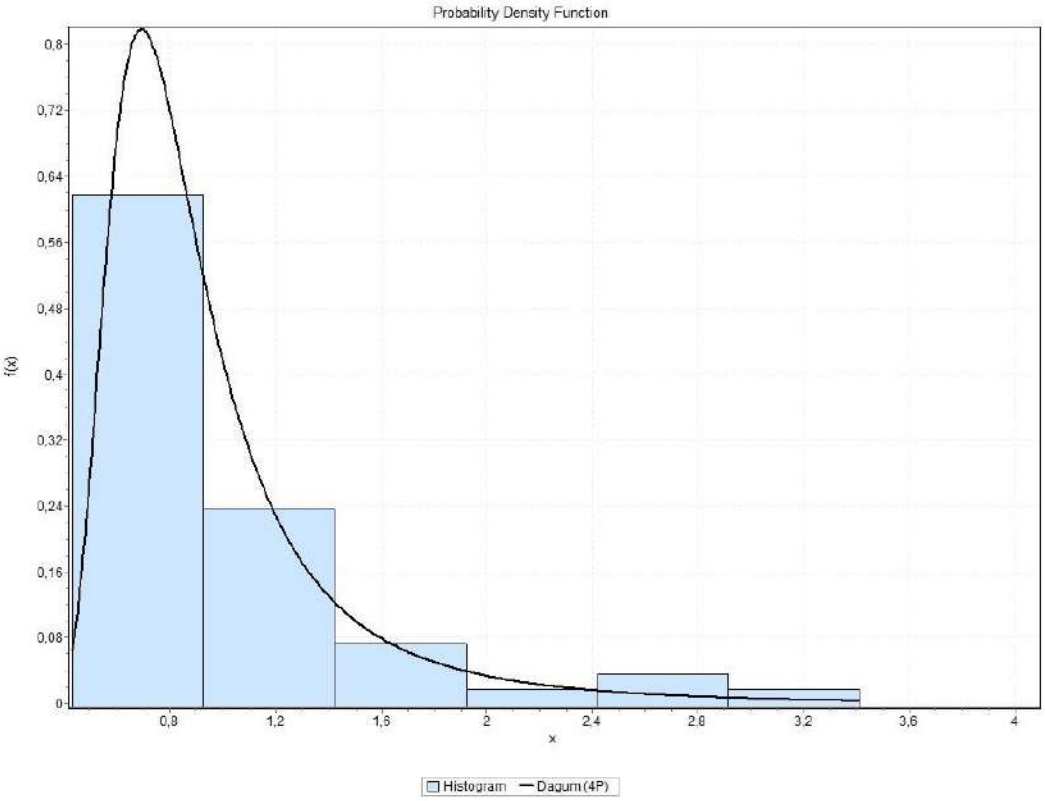
| *ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 3* | *70,46 - 70,57* | *70,58 - 72,00* |
|---|---|---|
| Μέσος | 2,2943125 | 3,64422093 |
| Διακύμανση | 1,037015681 | 1,982521111 |
| Μέγεθος δείγματος | 112 | 43 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 60 | |
| t | -5,737064773 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 1,68082E-07 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,670648865 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 3,36164E-07 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 2,000297822 | |

| *ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 4* | *16,25 - 17,24* | *17,25 - 18,81* |
|---|---|---|
| Μέσος | 1,399863014 | 0,863248408 |
| Διακύμανση | 0,119698592 | 0,075632329 |
| Μέγεθος δείγματος | 73 | 157 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 116 | |
| t | 11,65056475 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 1,52247E-21 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,658095744 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 3,04493E-21 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 1,980626002 | |

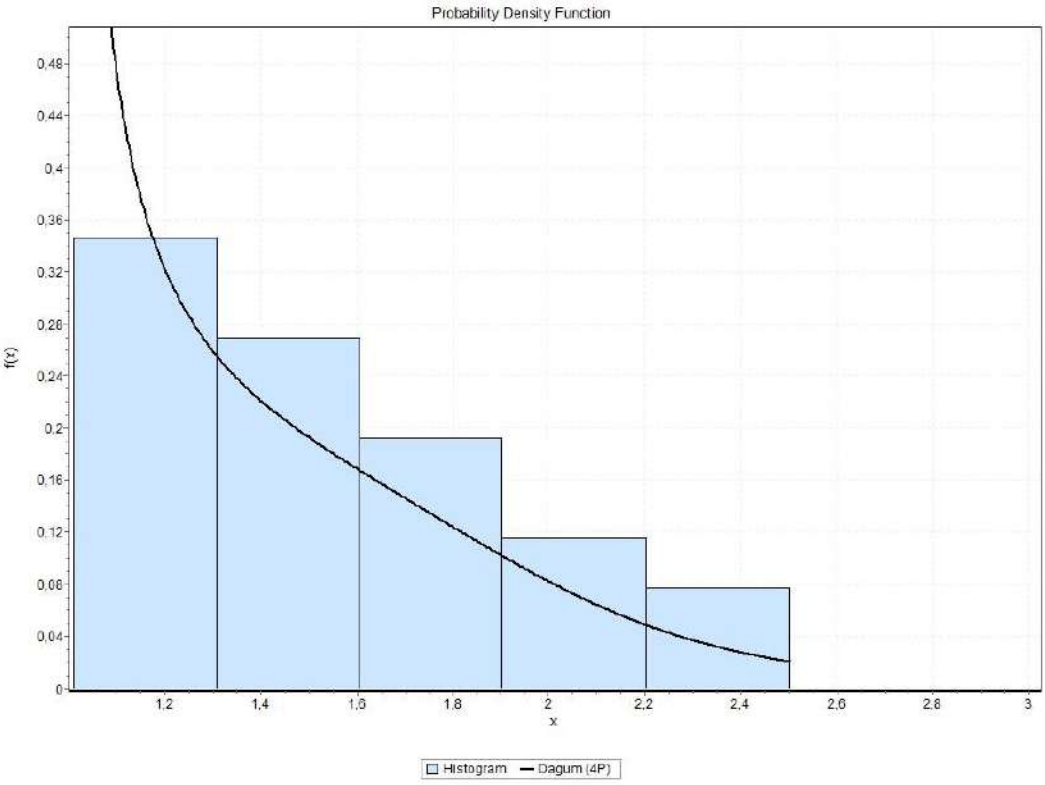
| *ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 4* | *18,82 - 19,52* | *17,25 - 18,81* |
|---|---|---|
| Μέσος | 1,12084507 | 0,863248408 |
| Διακύμανση | 0,207467847 | 0,075632329 |
| Μέγεθος δείγματος | 71 | 157 |
| Υποτιθέμενη διαφορά μέσων | 0 | |
| βαθμοί ελευθερίας | 94 | |
| t | 4,415268665 | |
| P(T<=t) μονόπλευρη | 1,34671E-05 | |
| t κρίσιμο, μονόπλευρο | 1,661225855 | |
| P(T<=t) δίπλευρη | 2,69342E-05 | |
| t κρίσιμο, δίπλευρο | 1,985523442 | |

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΟΔΙΚΩΝ ΥΠΟΤΜΗΜΑΤΩΝ

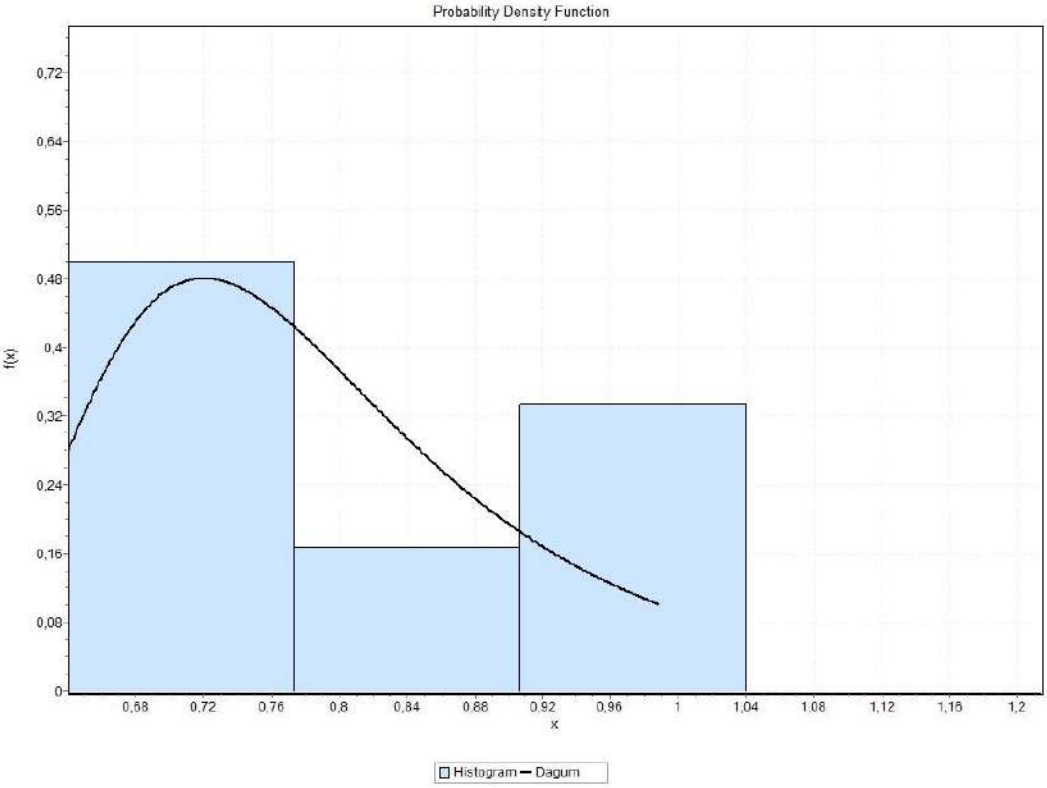
**ΚΟΜΒΟΣ 1**



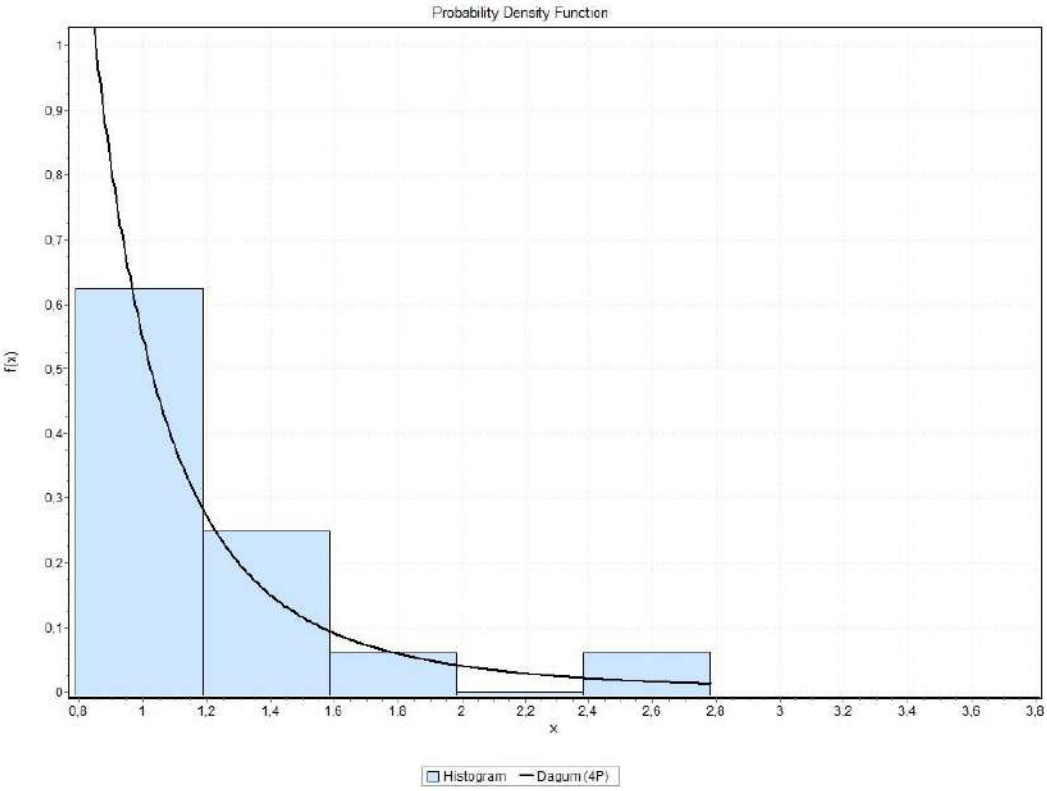

Τμήμα 0.00 - 0.54 km




Τμήμα 0.55 – 0.80 km

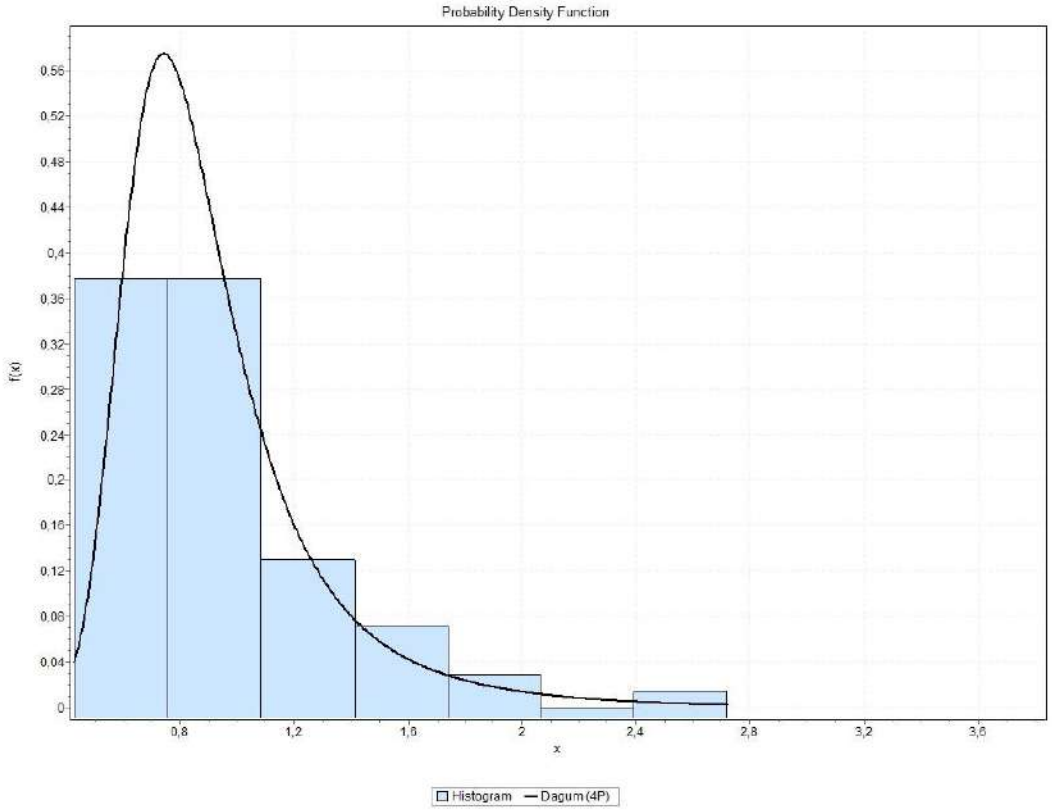



Τμήμα 0.81 – 0.86 km

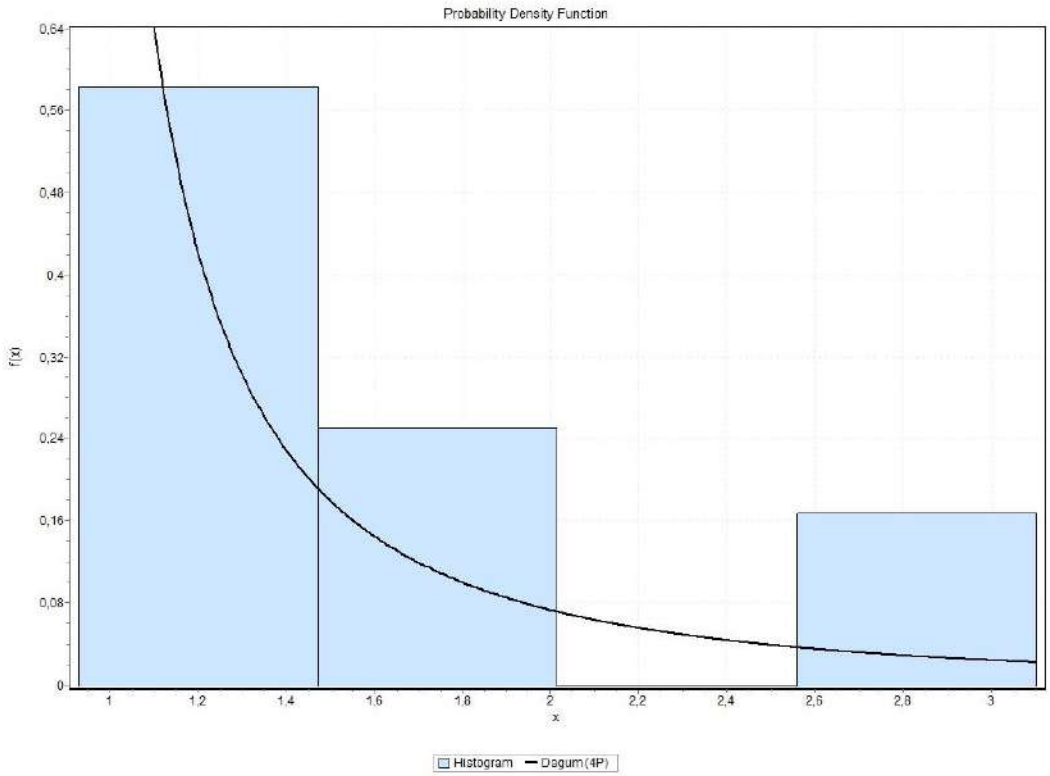



Τμήμα 0.87 – 1.02 km

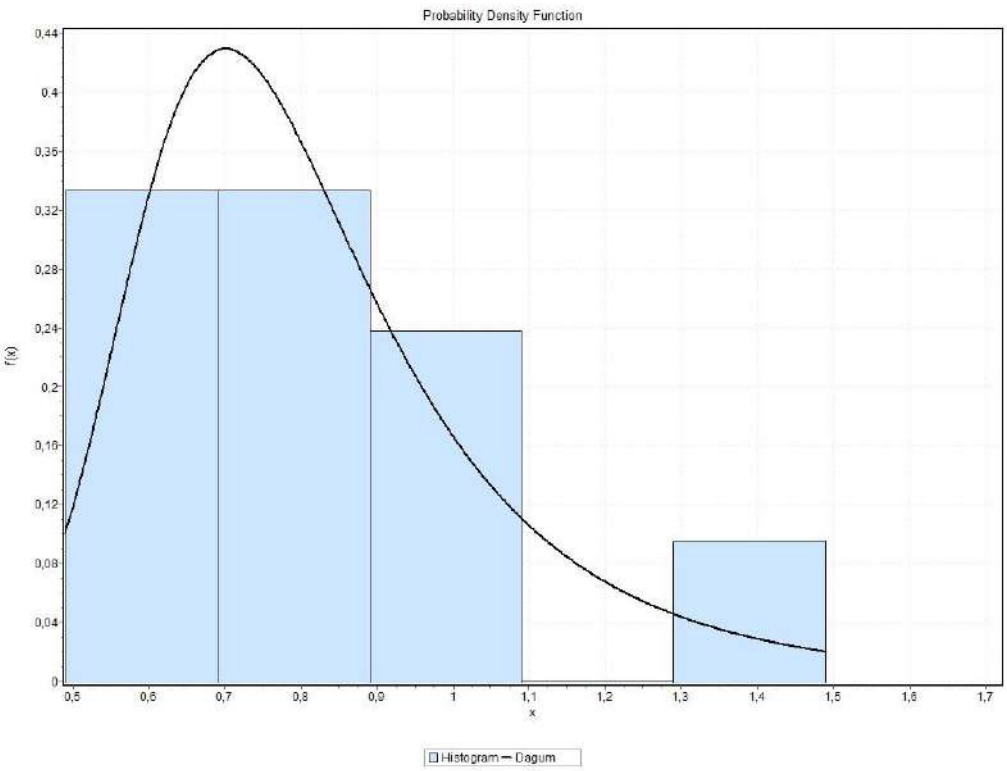
## ΚΟΜΒΟΣ 2




Τμήμα 0.00 – 0.68 km

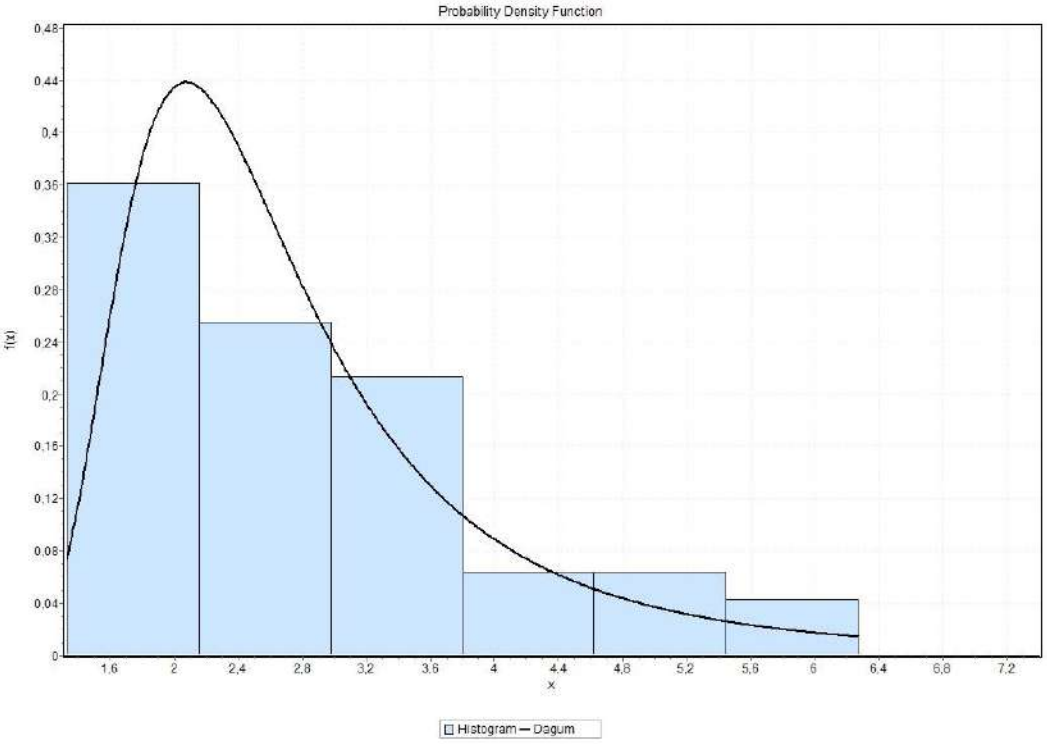



Τμήμα 0.69 – 0.80 km

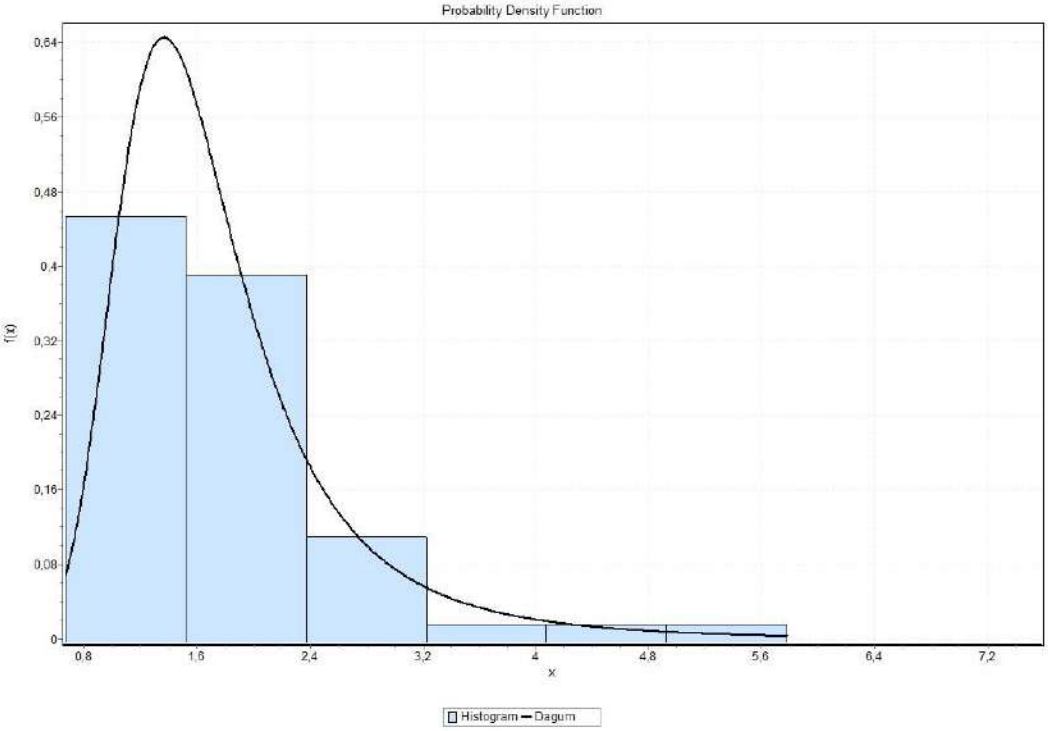



Τμήμα 0.81 – 1.01 km

**ΚΟΜΒΟΣ 3**

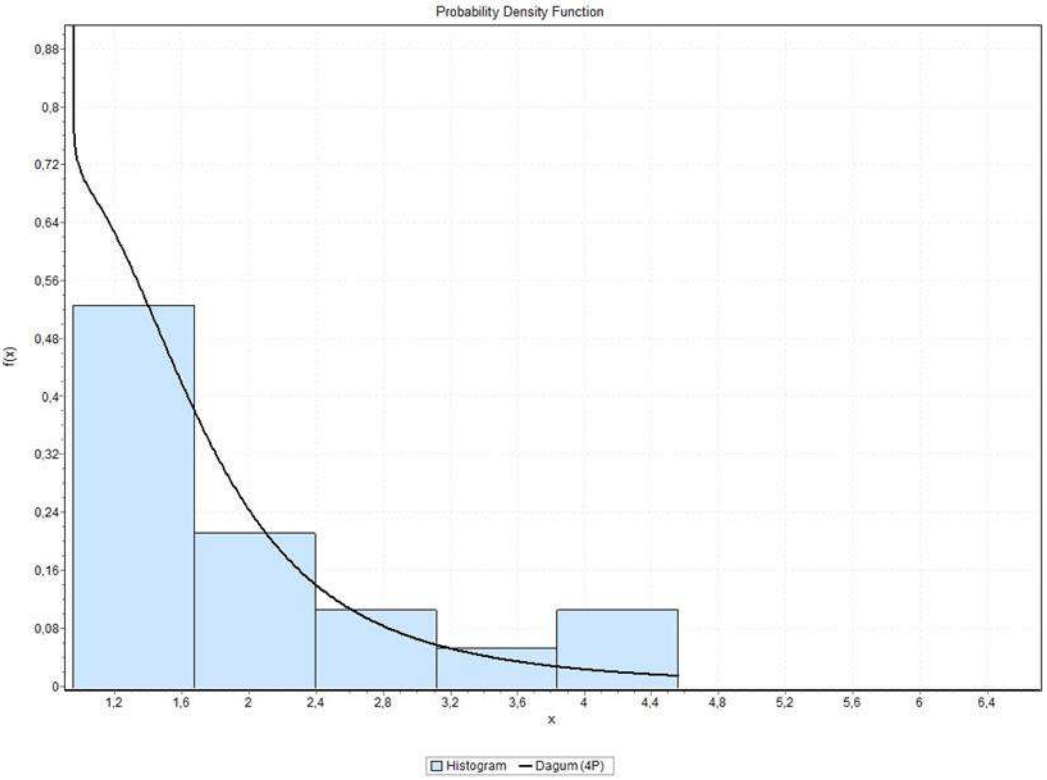



Τμήμα 0.00 – 0.46 km

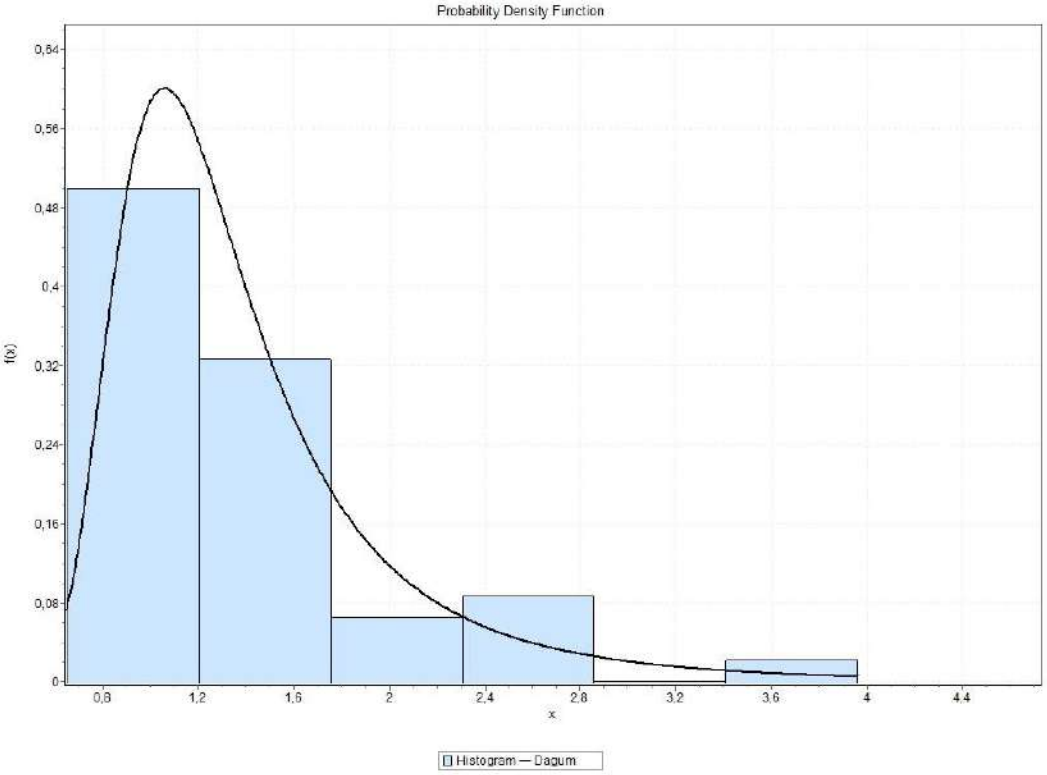



Τμήμα 0.47 – 1.10 km

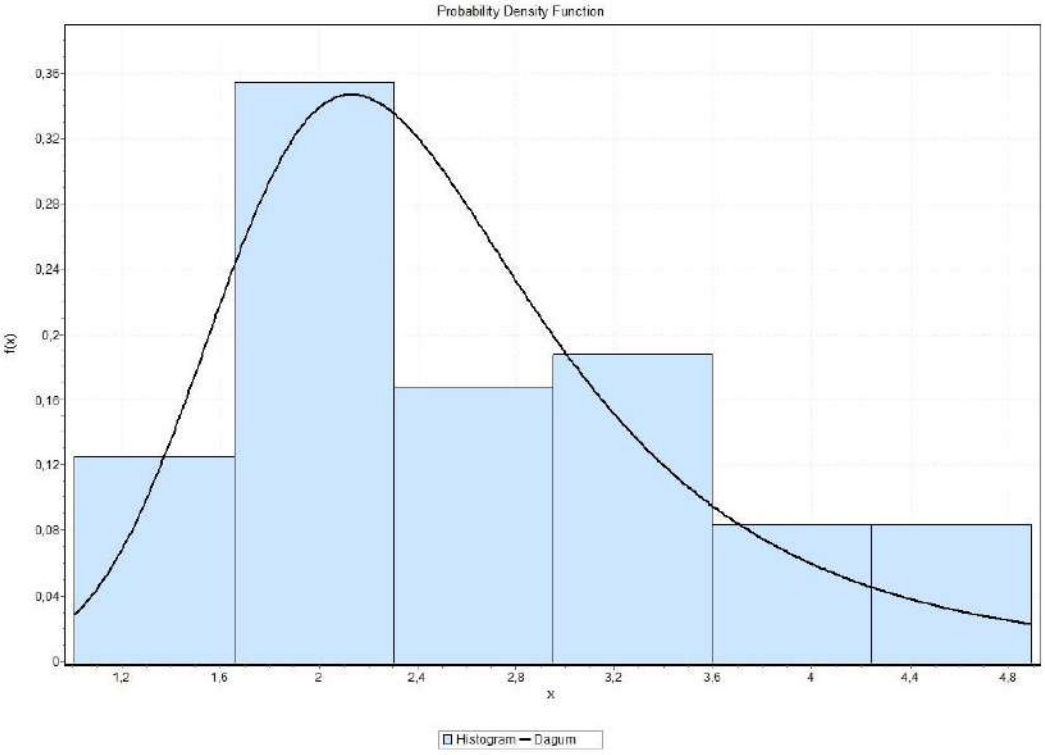
**ΚΟΜΒΟΣ 4**




Τμήμα 0.00 – 0.18km

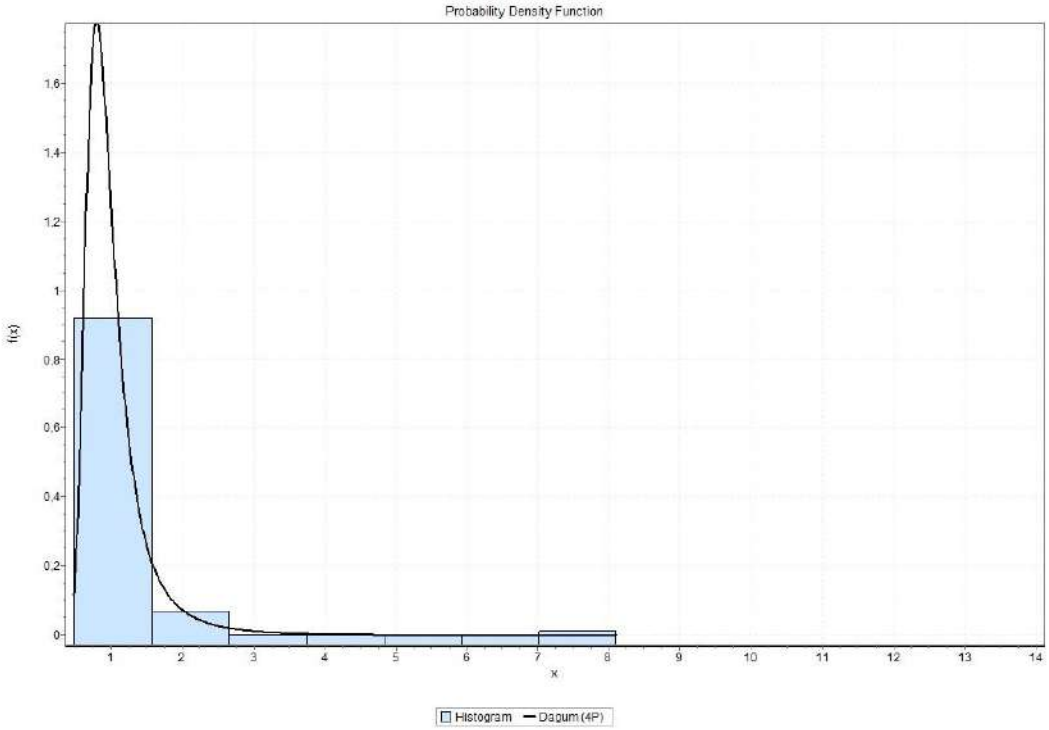



Τμήμα 0.19 – 0.64 km

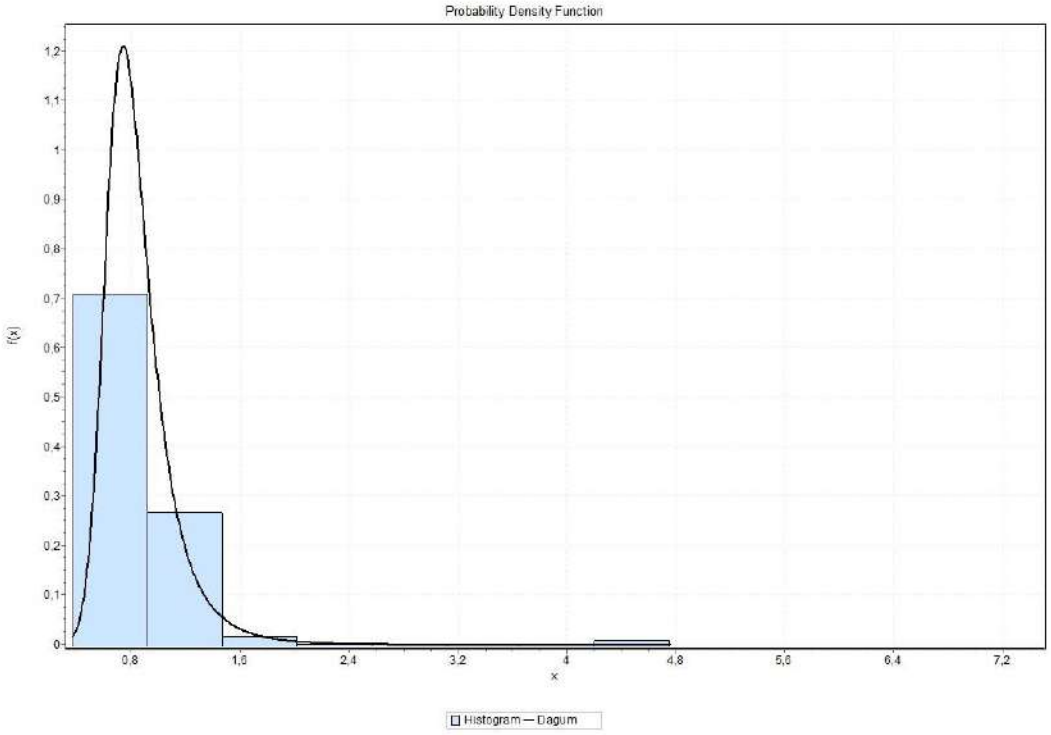



Τμήμα 0.65 – 1.12 km

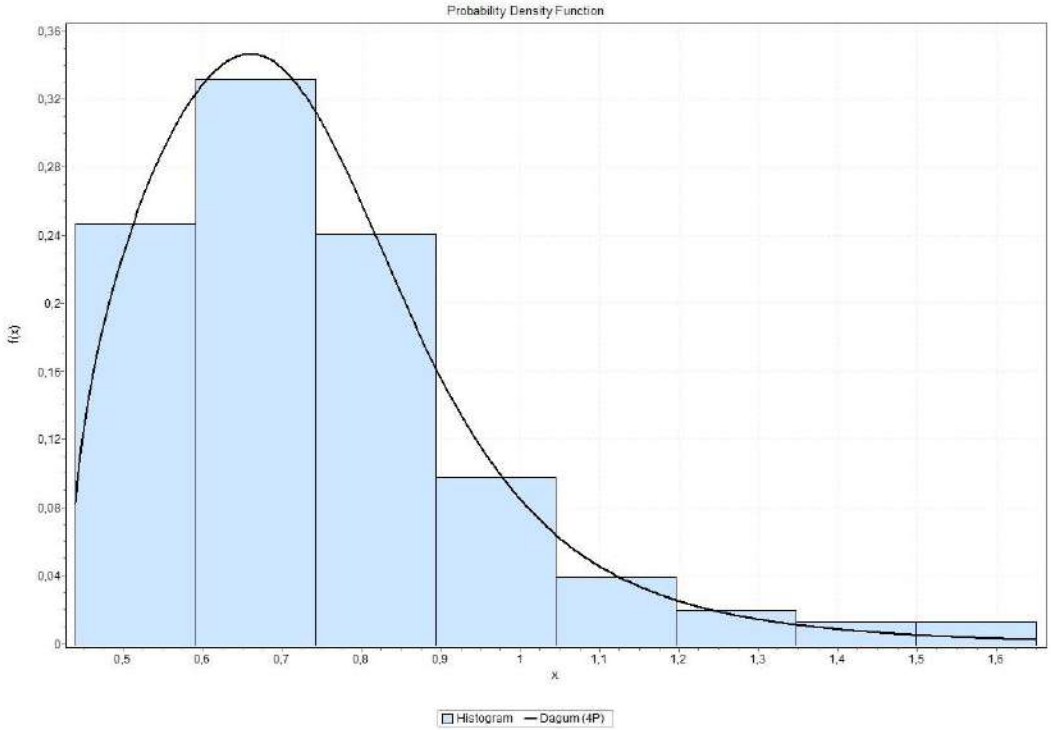
## ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 1



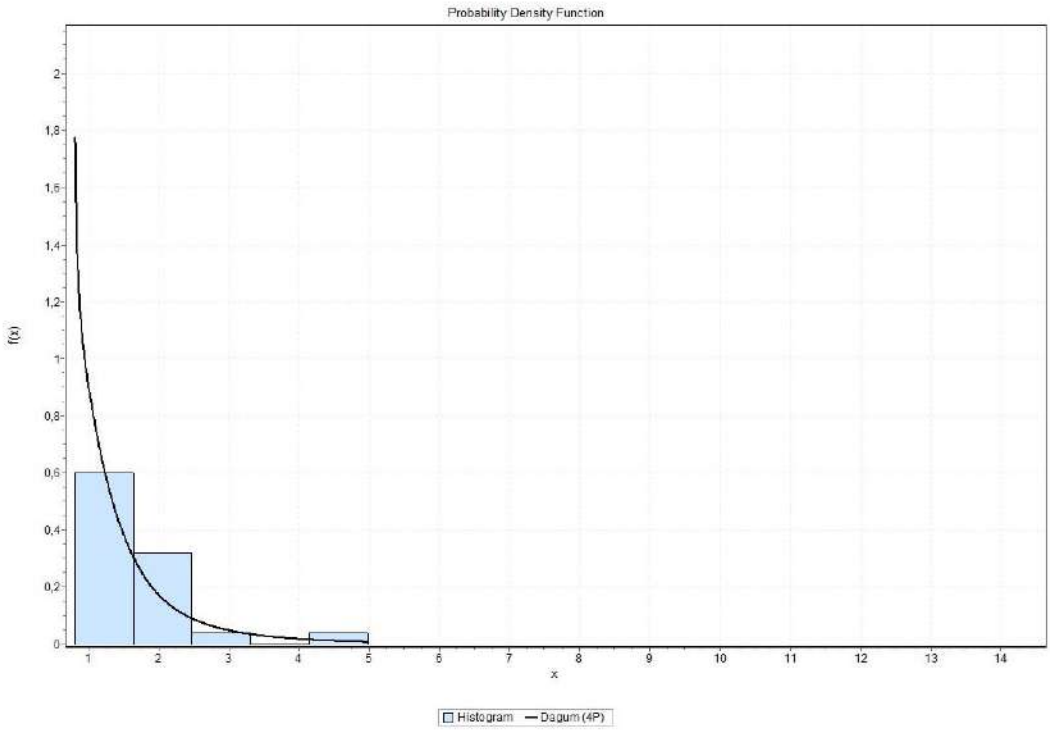

Τμήμα 86.00 – 86.88 km




Τμήμα 86.89 – 88.20 km

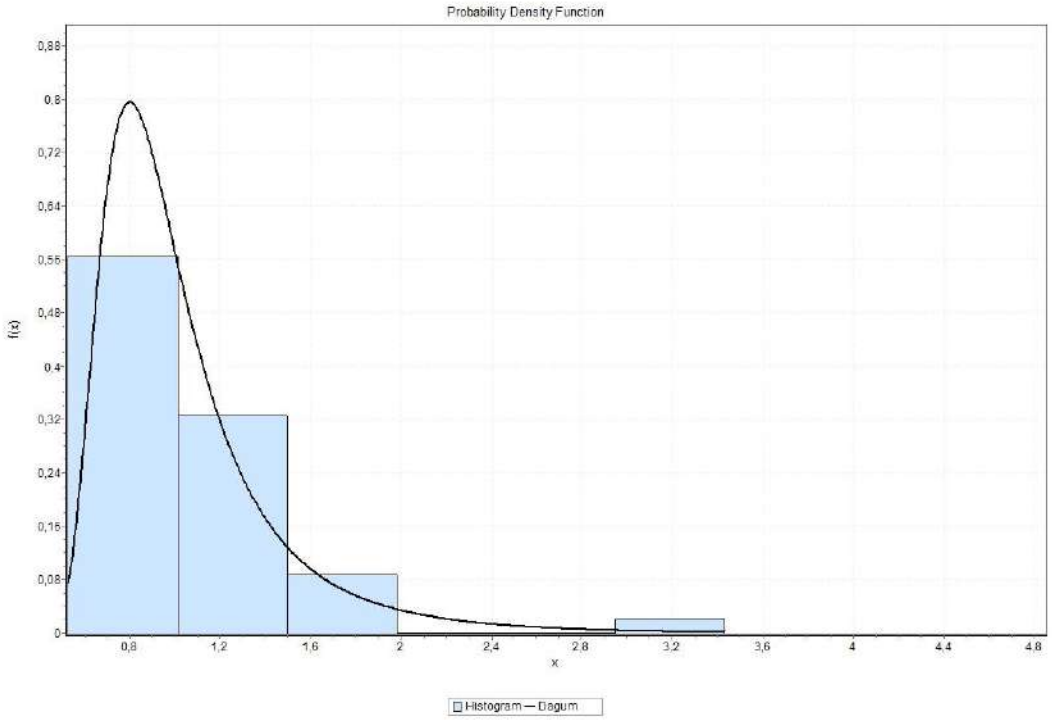



Τμήμα 88.21 – 89.75 km

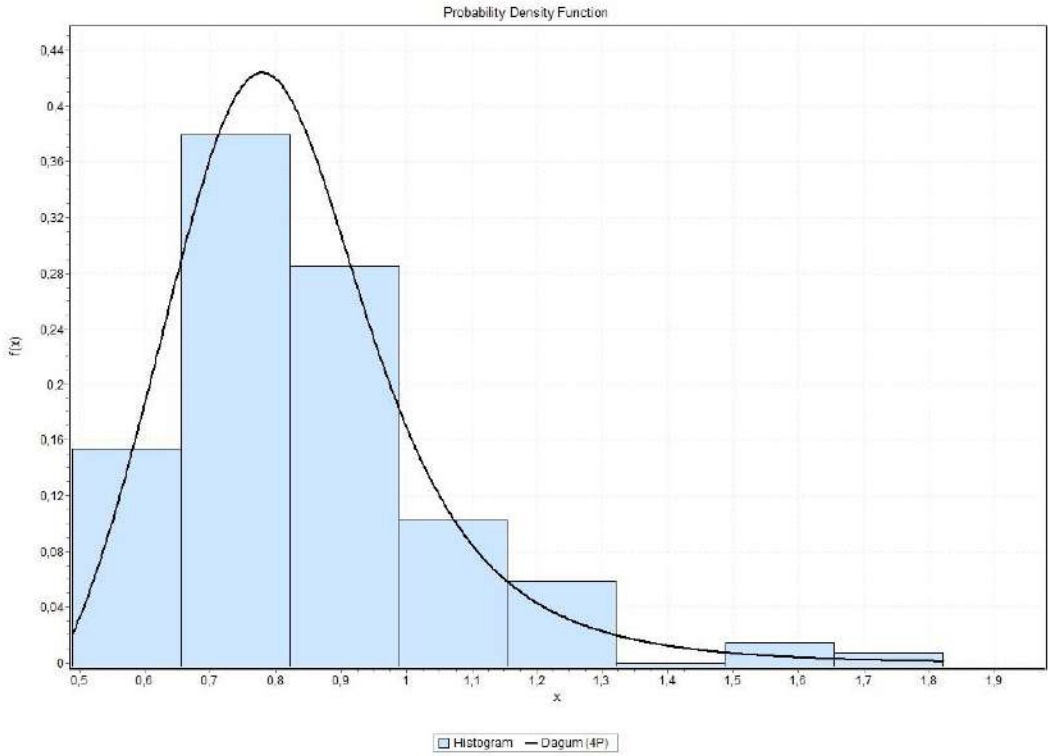



Τμήμα 89.76 – 90.00 km

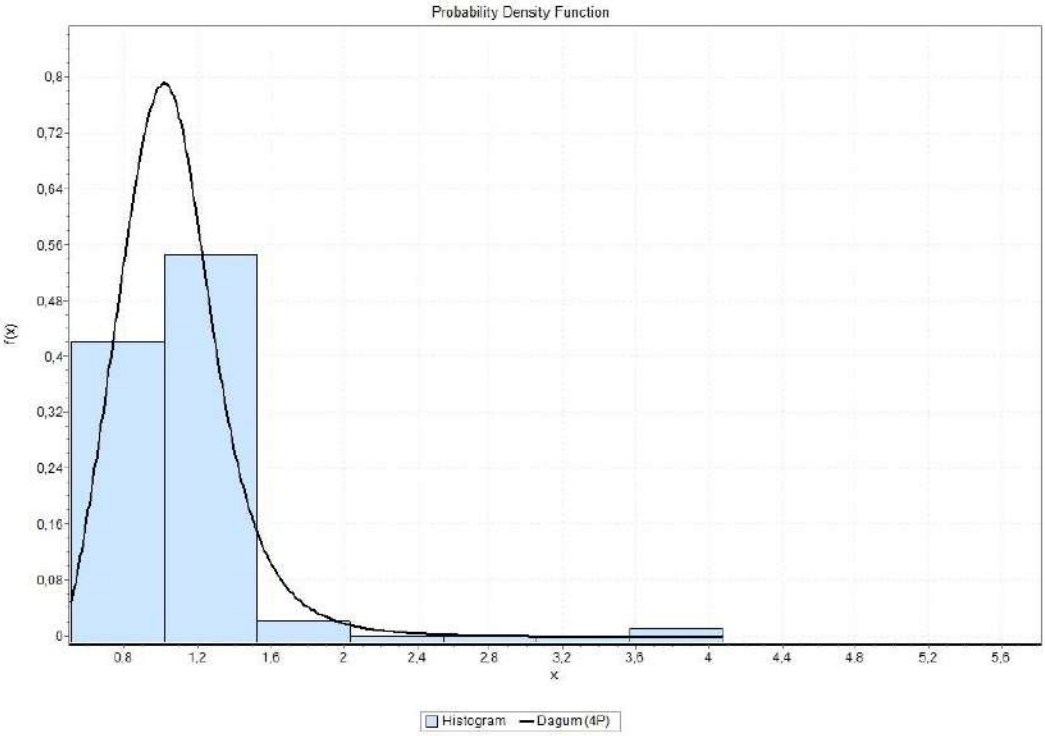
## ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 2_Λ1



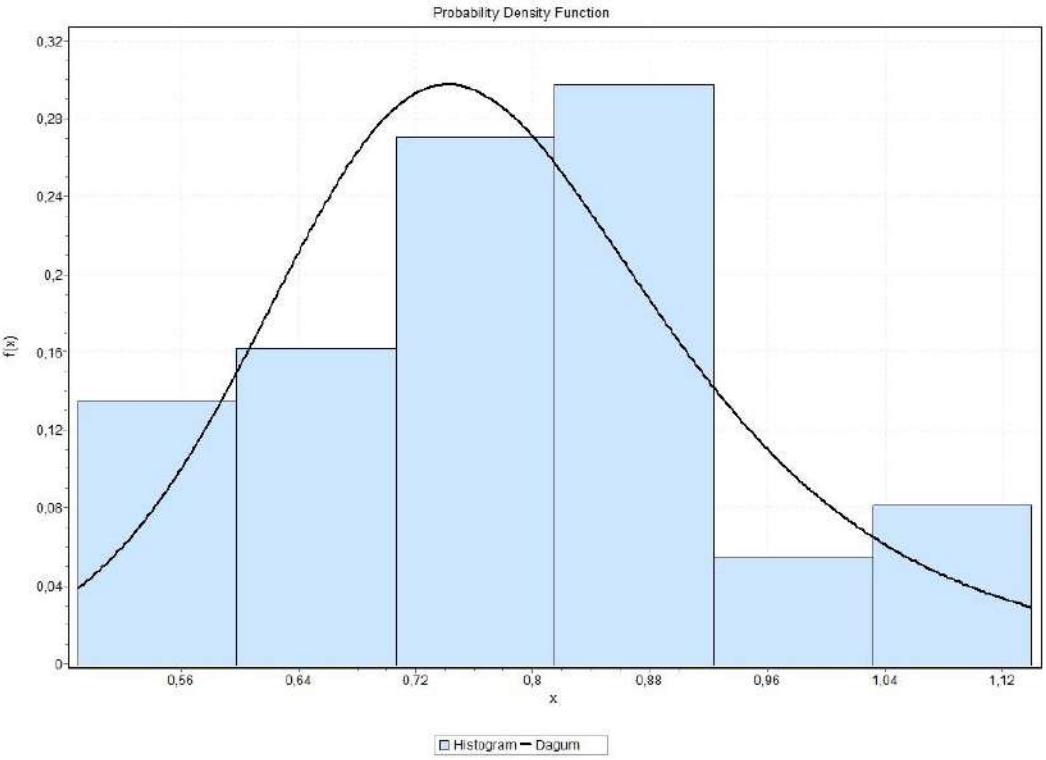

Τμήμα 90.00 – 89.55 km



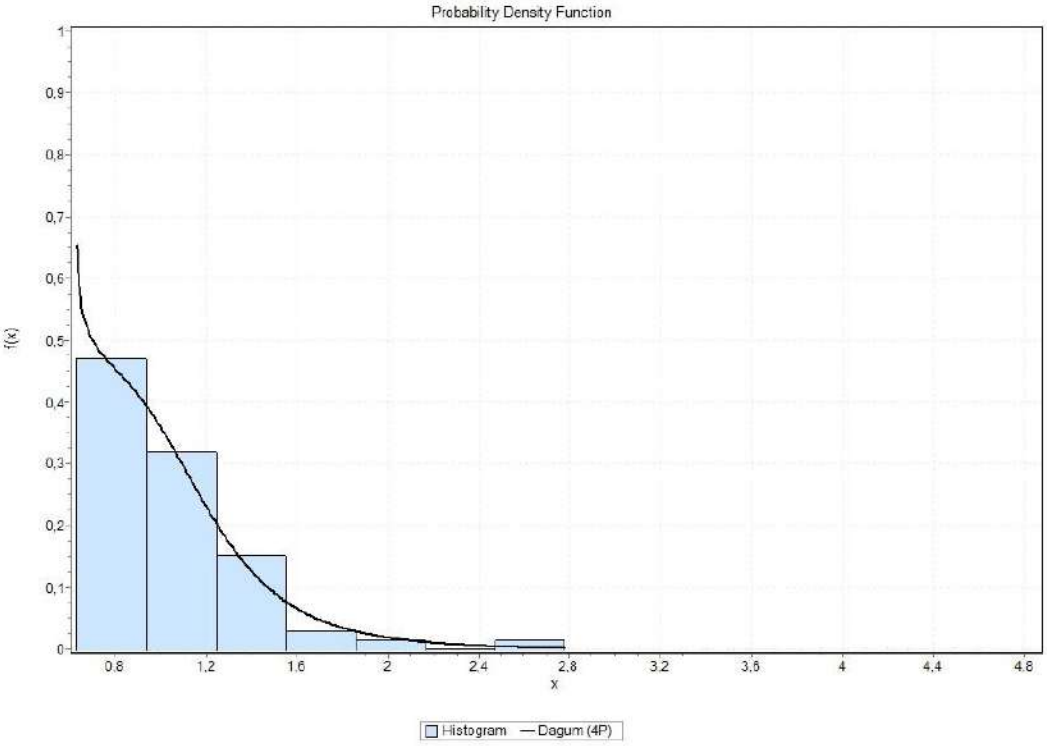

Τμήμα 89.54 – 88.18 km



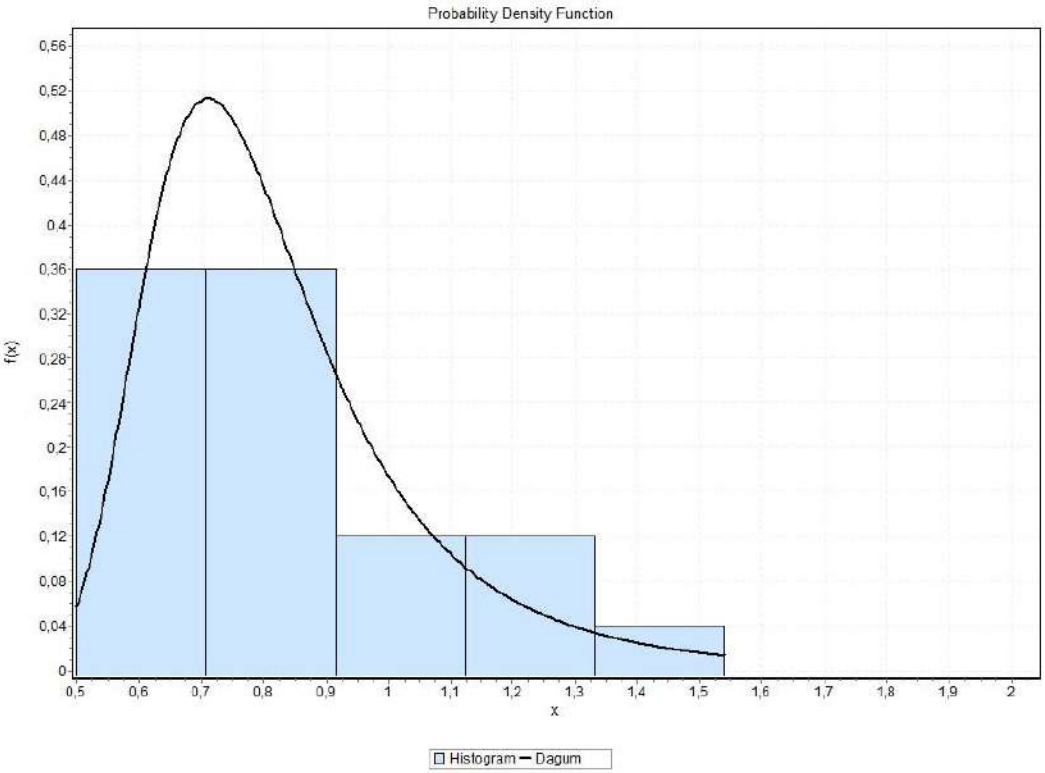

Τμήμα 88.17 – 87.29 km




Τμήμα 87.28 – 86.92 km

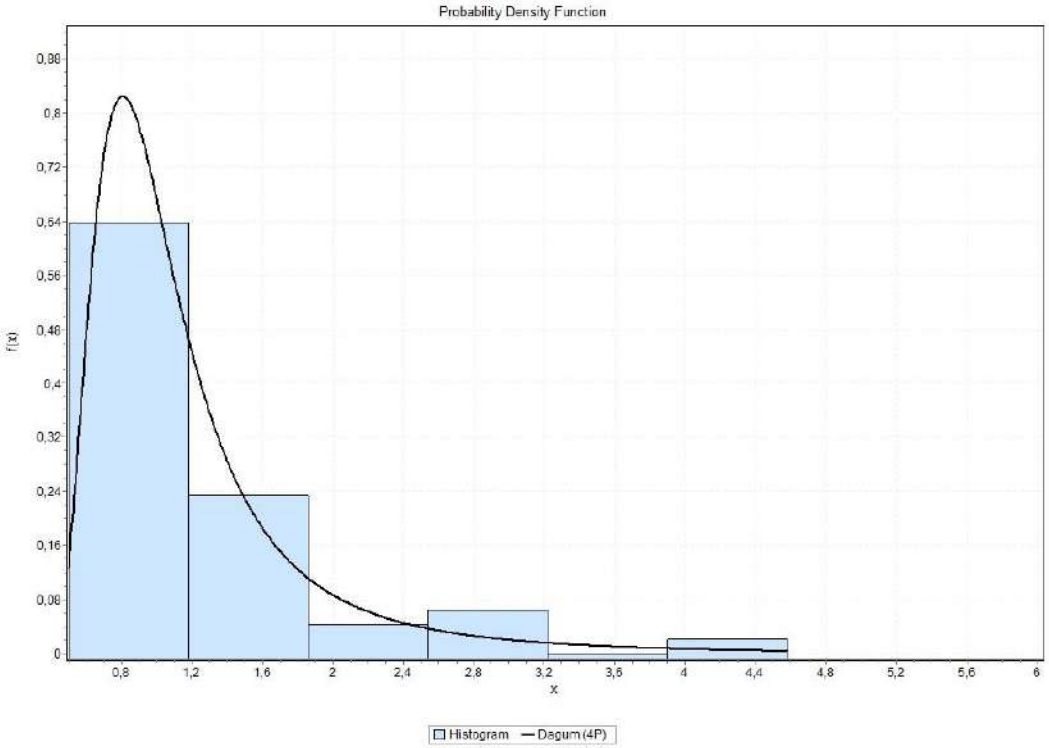



Τμήμα 86.91 – 86.86.26 km

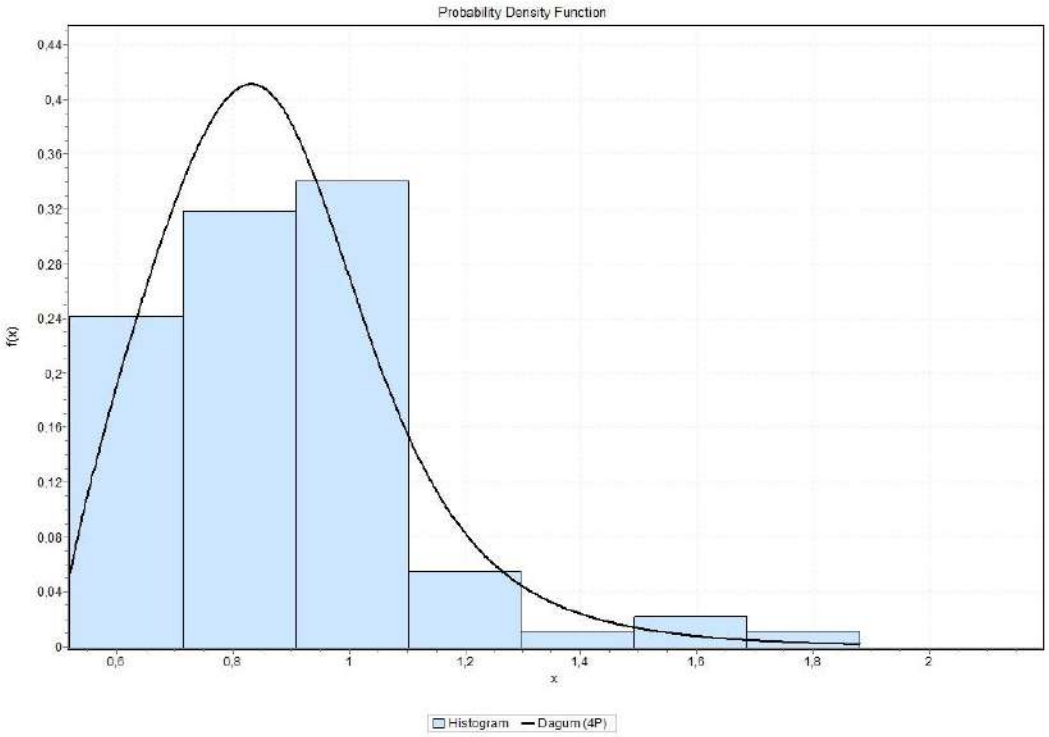



Τμήμα 86.25 – 86.00 km

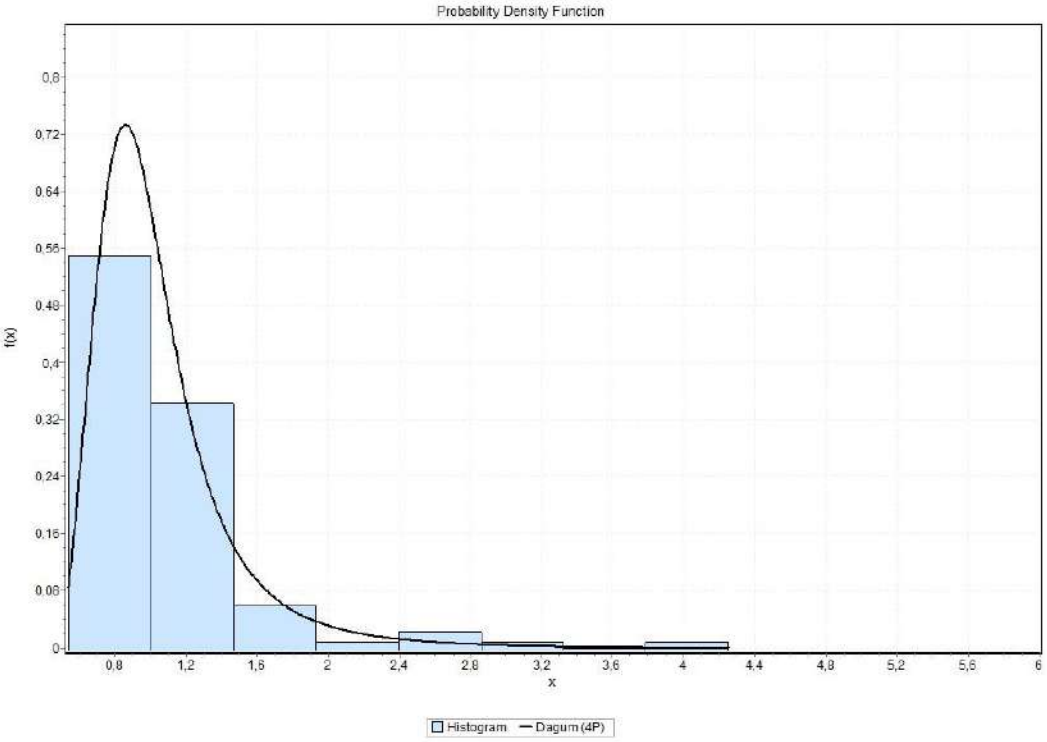
## ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 2_Λ2



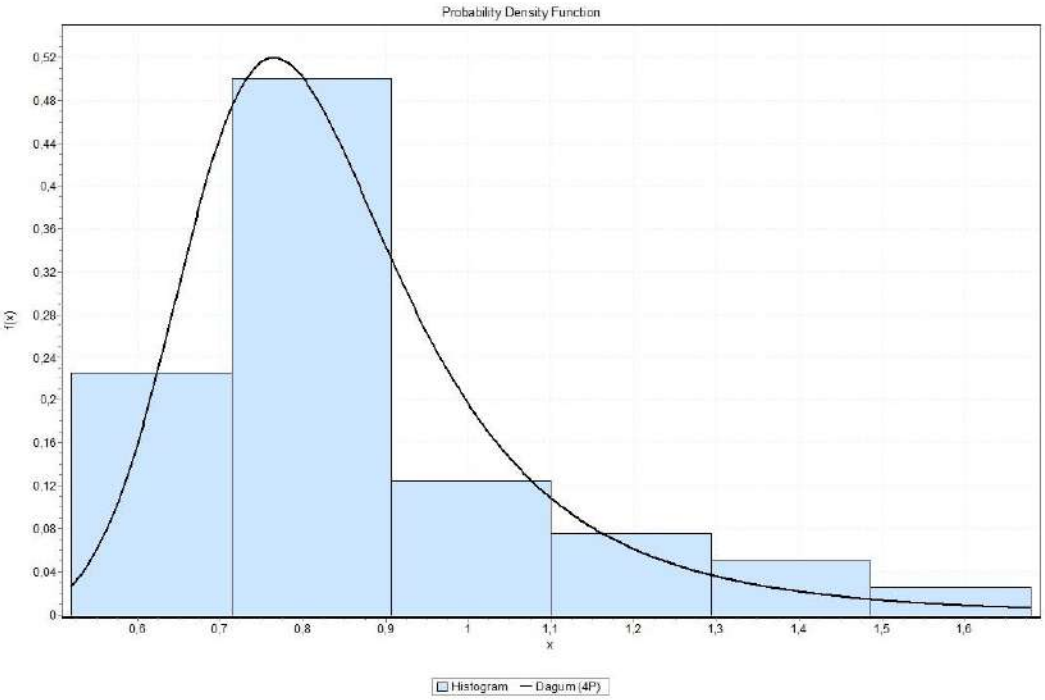

Τμήμα 90.00 – 89.54 km



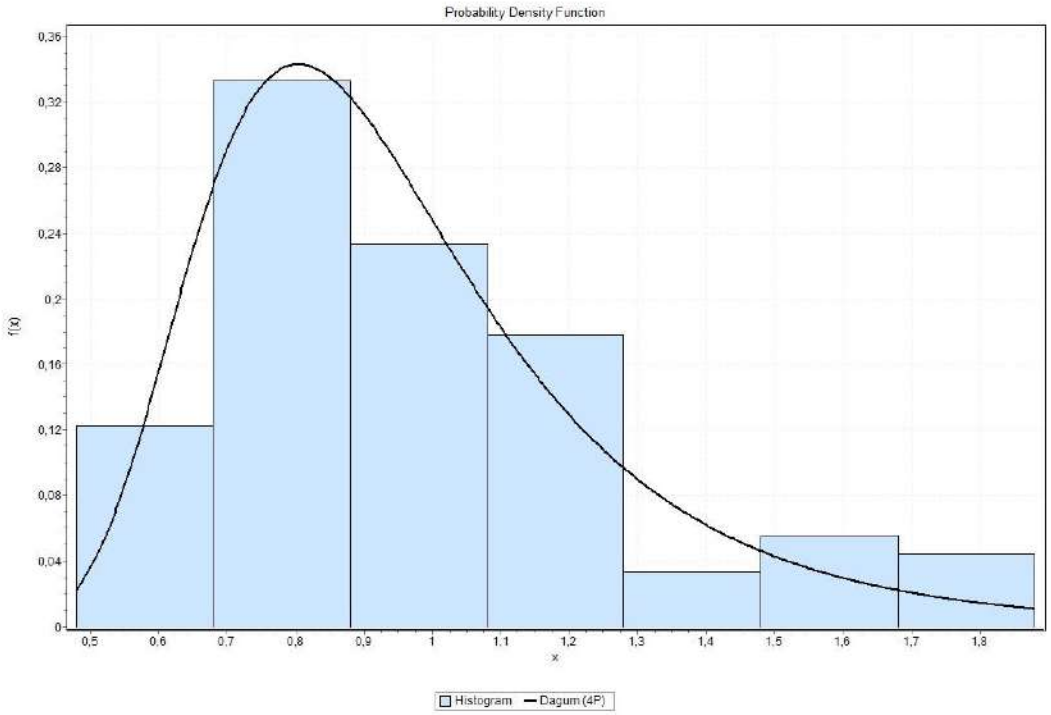

Τμήμα 89.53 – 88.63 km




Τμήμα 88.62 – 87.31 km

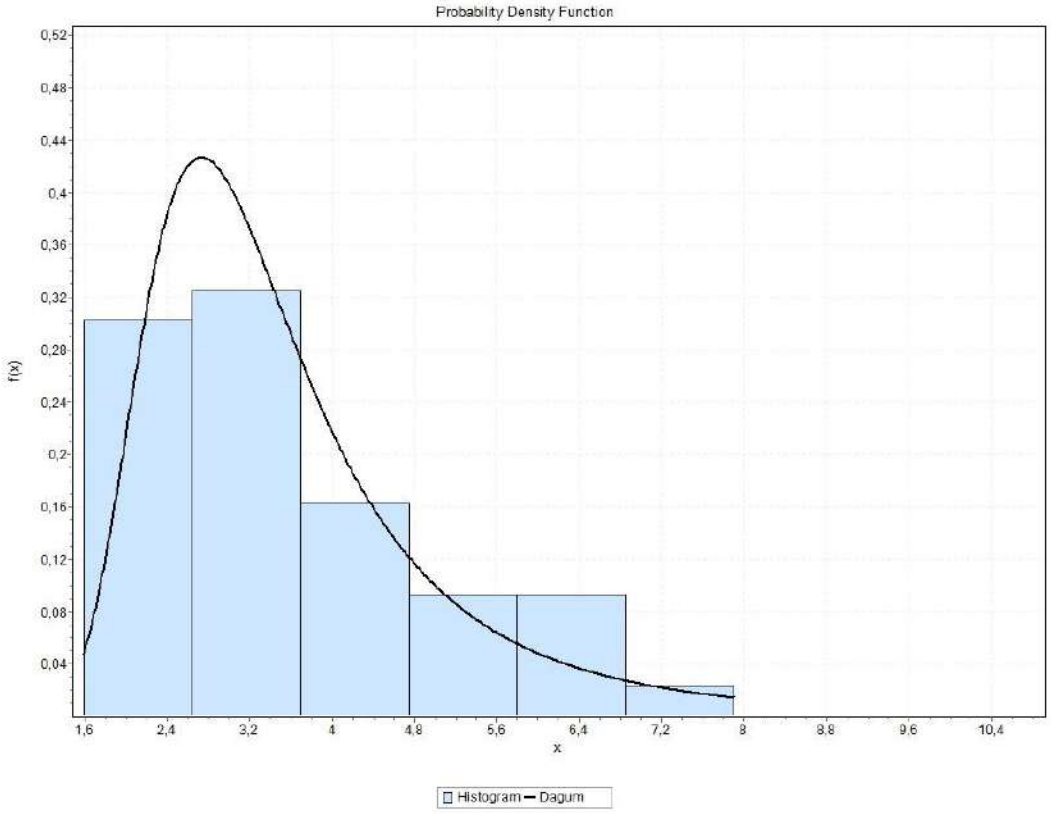



Τμήμα 87.30 – 86.91 km

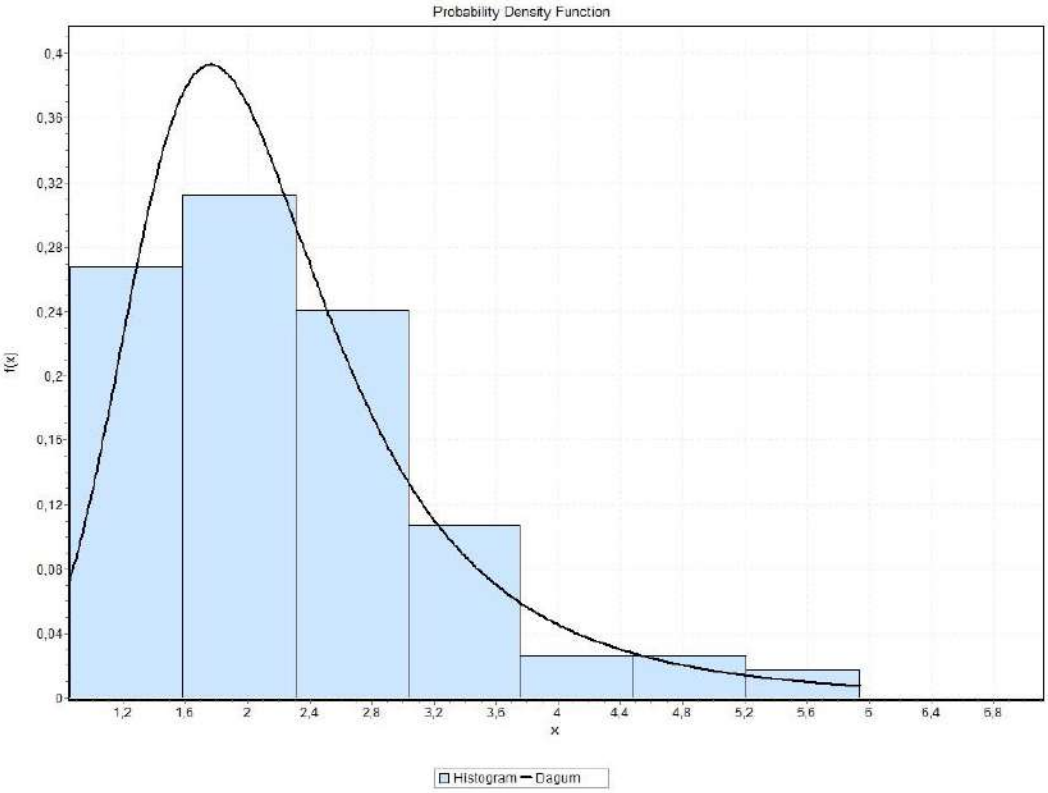



Τμήμα 86.90 – 86.00 km

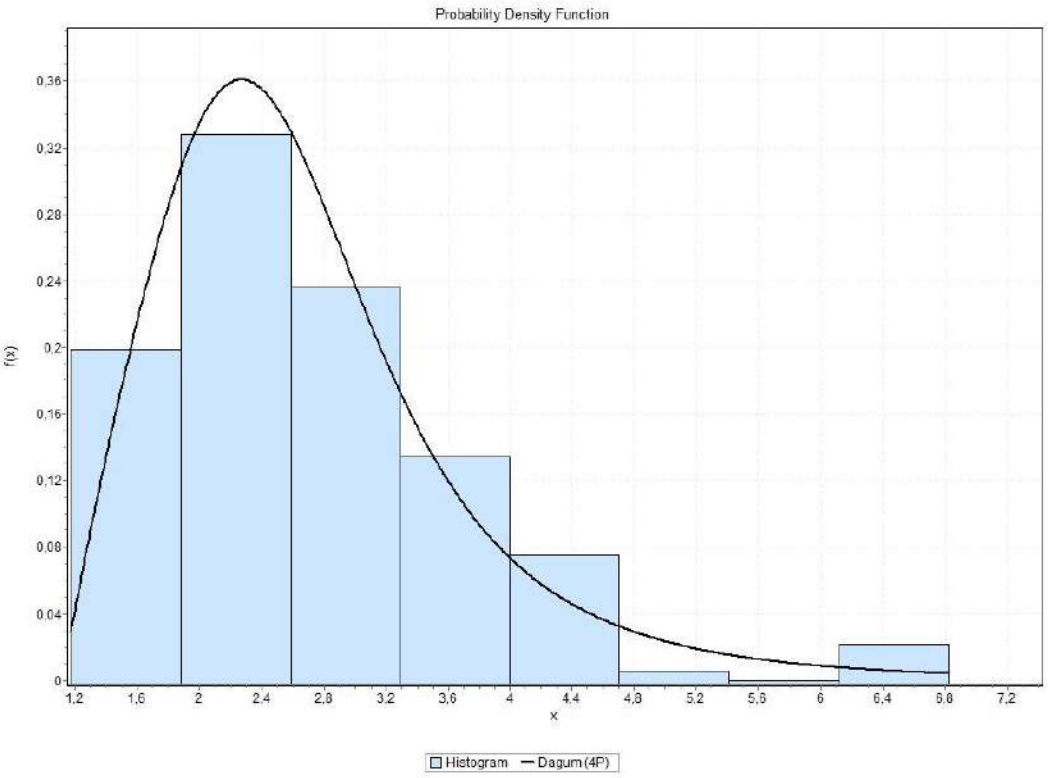
**ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 3_ΠΡΙΝ**



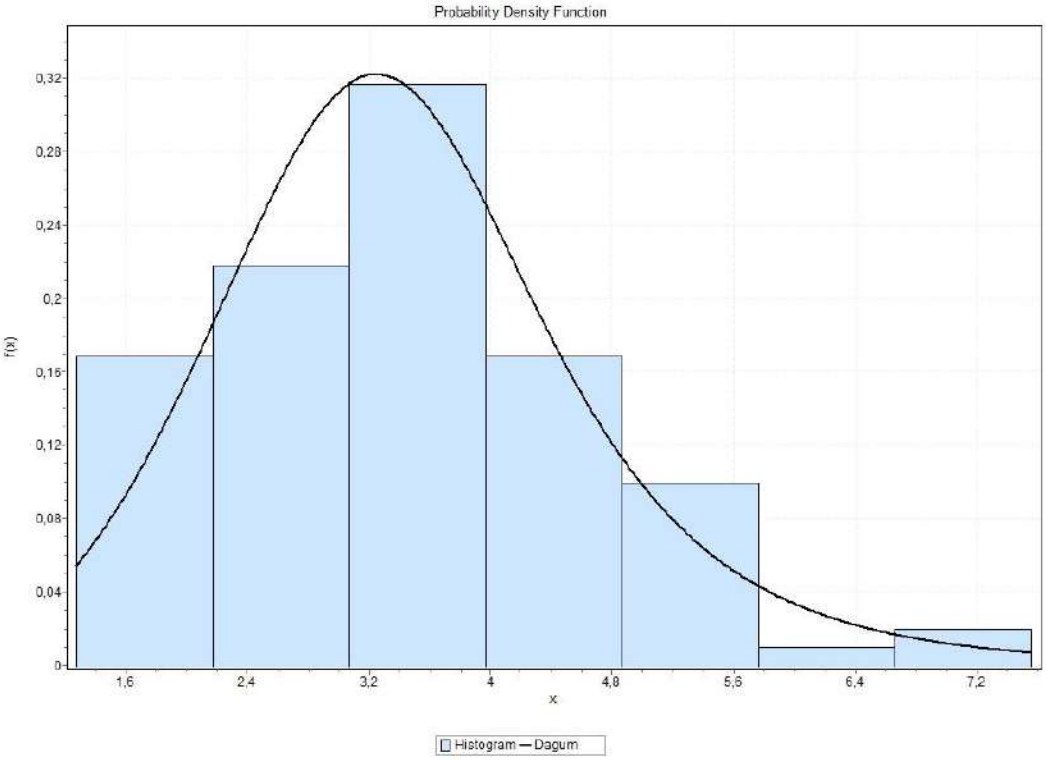

Τμήμα 67.59 - 68.59 km




Τμήμα 68.60 – 70.45 km

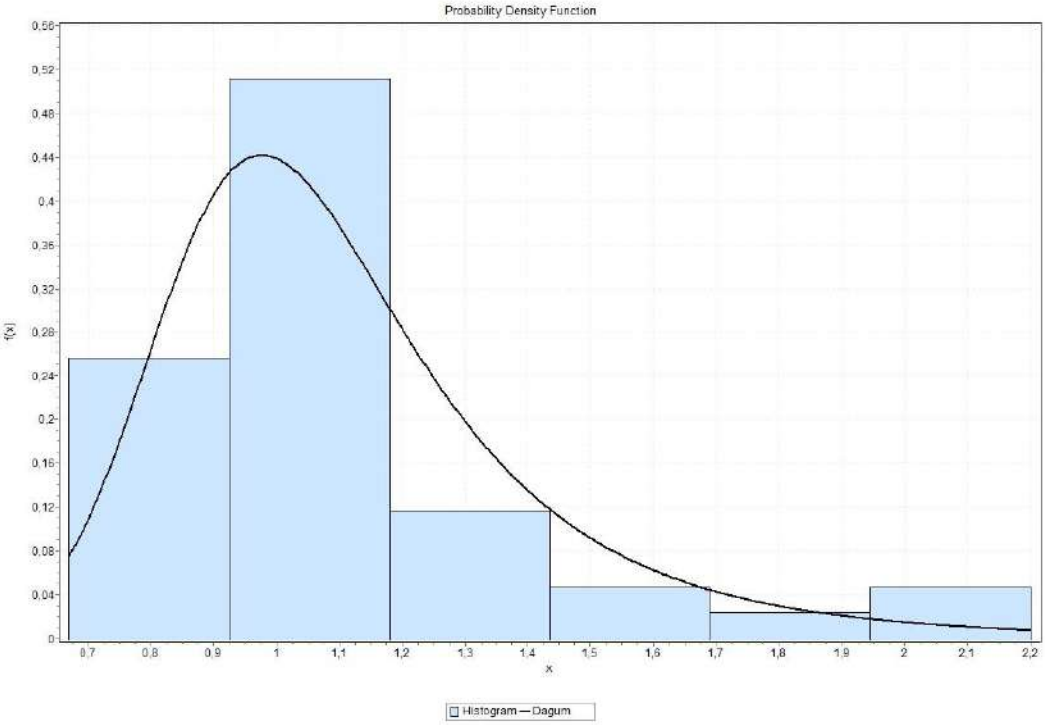



Τμήμα 70.46 – 70.57 km

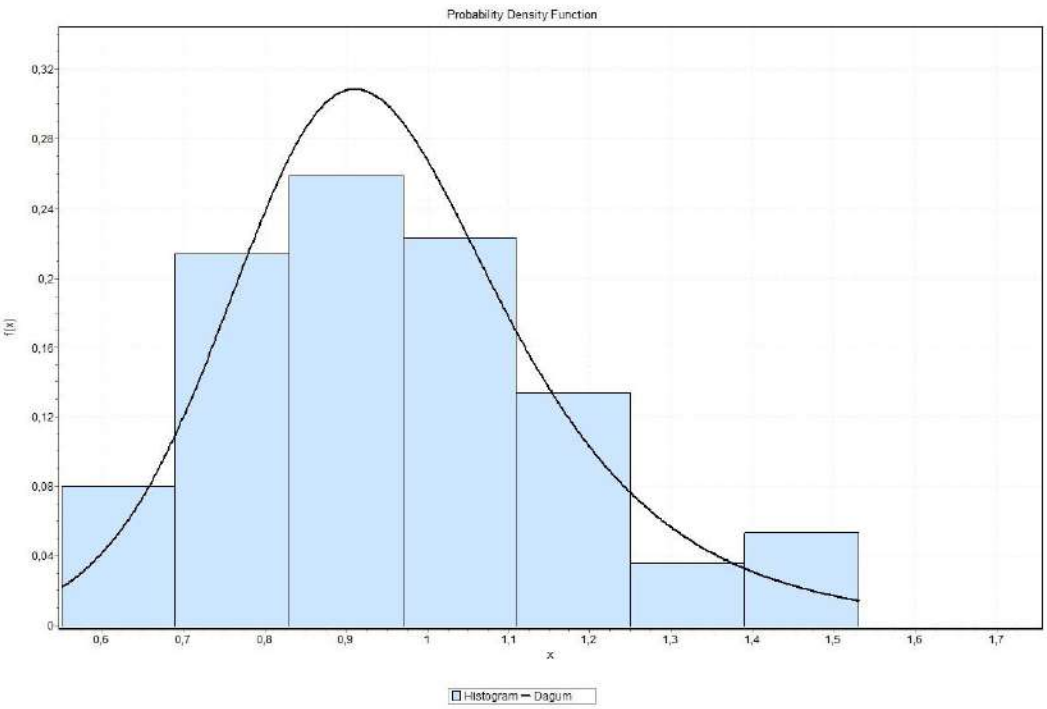



Τμήμα 70.58 – 72.00 km

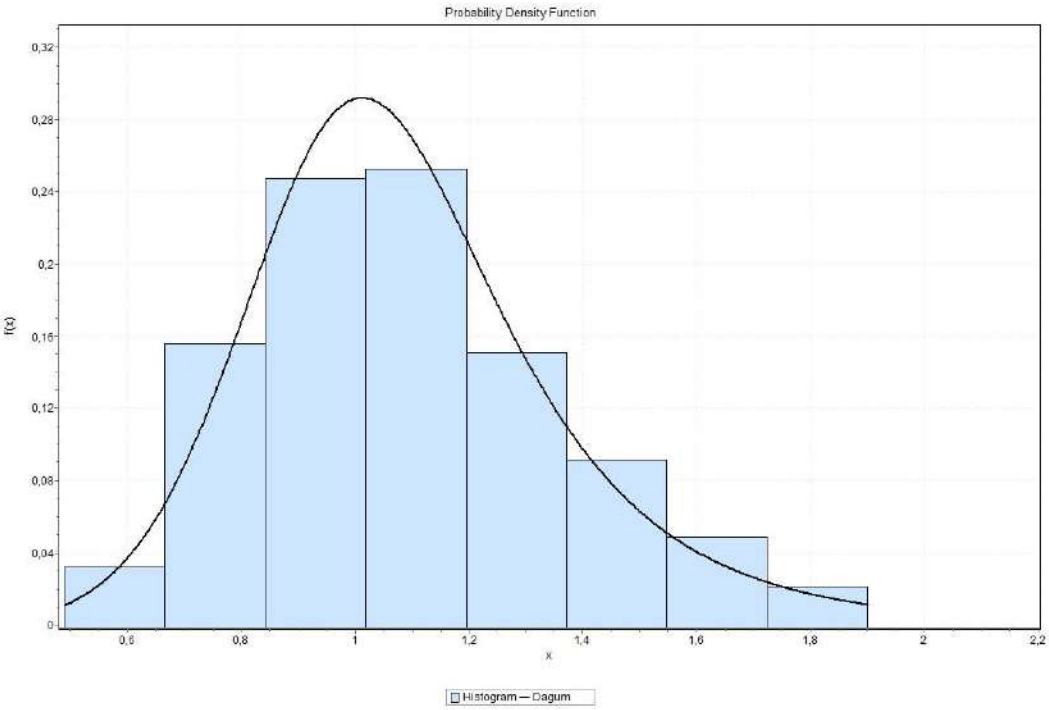
**ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 3_ΜΕΤΑ**



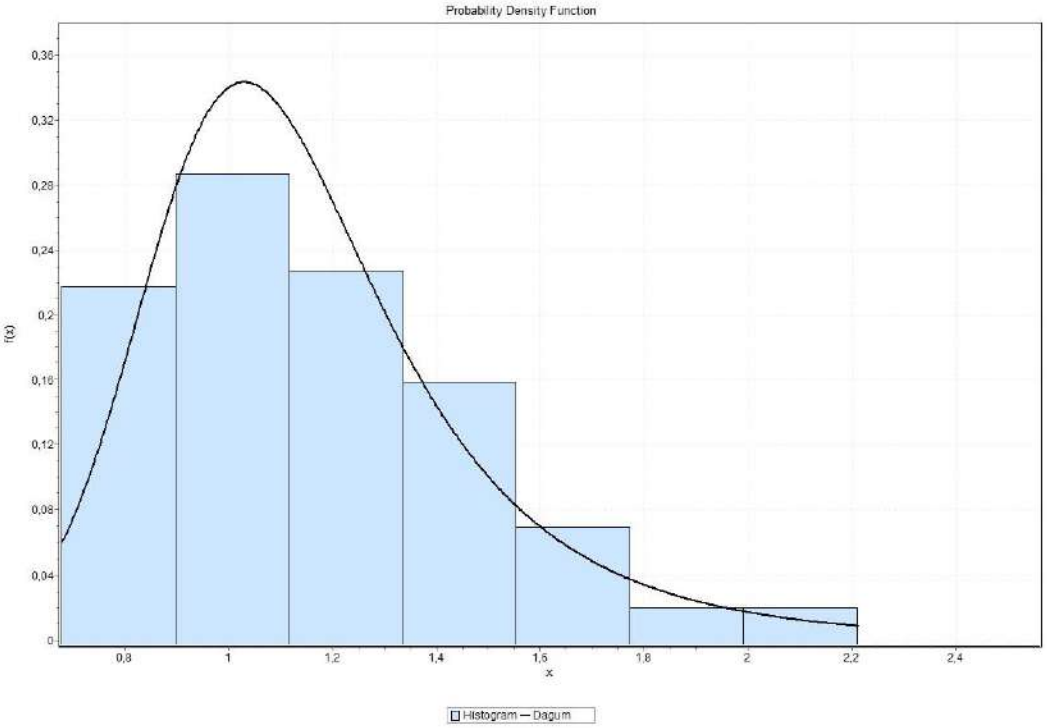

Τμήμα 67.59 - 68.59 km




Τμήμα 68.60 – 70.45 km

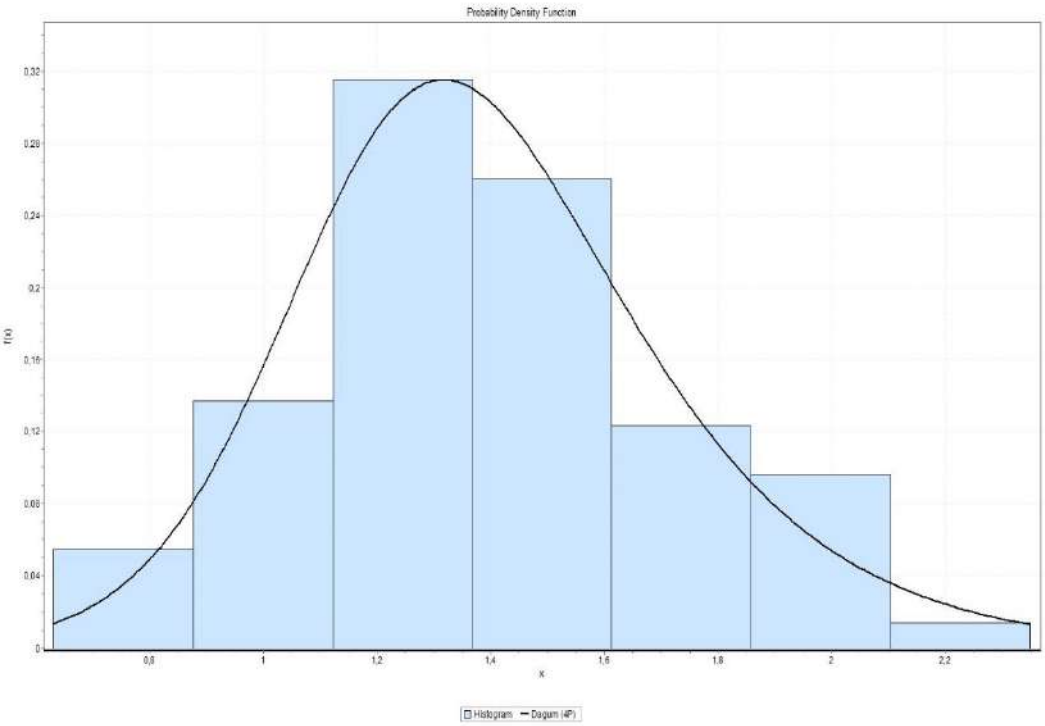



Τμήμα 70.46 – 70.57 km

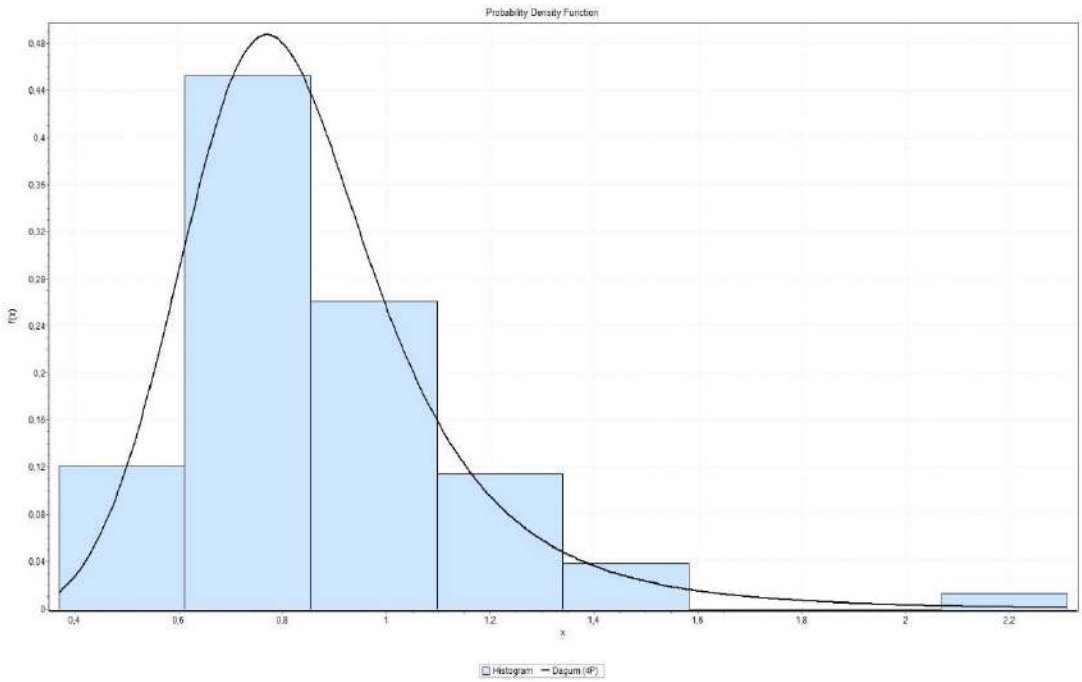



Τμήμα 70.58 – 72.00 km

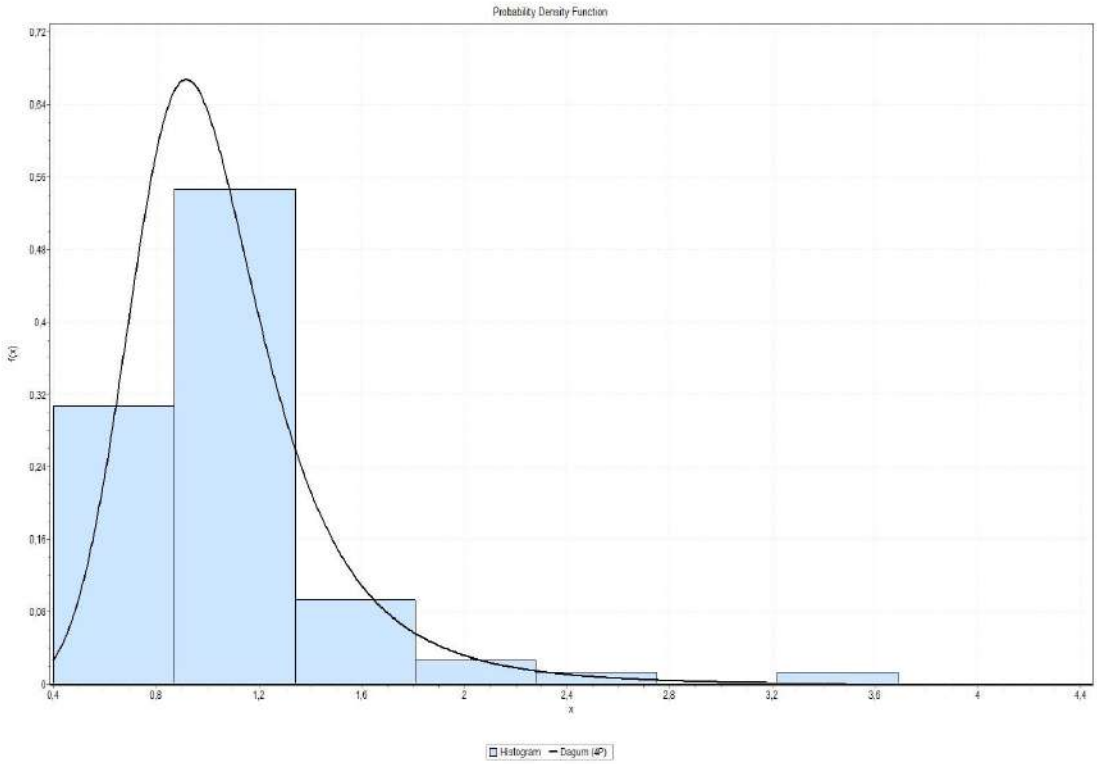
**ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ 4**




Τμήμα 16.25 – 17.24 km




Τμήμα 17.25 – 18.81 km




Τμήμα 18.82 – 19.52 km