



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Στοχαστική Ανάλυση Μη Διακοπτόμενης Κυκλοφοριακής Ροής με Έμφαση στη Μακροπρόθεσμη Εμμονή

Πάρις Καστής

**Επιβλέπων: Δημήτρης Κουτσογιάννης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Συνεπιβλέπουσα: Ελένη Βλαχογιάννη, Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.**

Αθήνα, Μάρτιος 2017

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ.Δημήτρη Κουτσογιάννη, Καθηγητή Ε.Μ.Π για τη βοήθεια του. Συγκεκριμένα διέθεσε πολύ χρόνο ανταποκρινόμενος στις απορίες μου καθώς και για τους προβληματισμούς και τα ερωτήματα που μου έθετε. Η ελευθερία που μου έδωσε στην επιλογή του θέματος αλλά και η καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας ήταν καταλυτική. Επίσης, μου έδωσε την ευκαιρία να συμμετέχω στο συνέδριο E.G.U. 2016 στη Βιέννη με την παρουσίαση ερευνητικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τη συνεπιβλέπουσα καθηγήτρια μου κ.Ελένη Βλαχογιάννη, Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. για τη βοήθεια και την κατανόηση που μου έδειξε από την αρχή μέχρι το τέλος με άμεση ανταπόκριση οποιαδήποτε ώρα ή ημέρα σε όποιο πρόβλημα ή απορία είχα, και για την άψογη συνεργασία μαζί της.

Επιπλέον θέλω να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ.Παναγιώτη Δημητριάδη, Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., που χωρίς αυτόν δεν θα ήταν δυνατή η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η συνεργασία μας ήταν καθημερινή . Οι συμβουλές και οι παρατηρήσεις του υπήρξαν ζωτικής σημασίας για την εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Ευχαριστώ επίσης τον κ.Μιλτιάδη Μπούγαλη, Διευθυντή του Τομέα Λειτουργίας και Συντήρησης της Εγνατίας Οδός Α.Ε., για την παροχή των κυκλοφοριακών στοιχείων του σταθμού Διοδίων Πολύμυλου της Εγνατίας Οδού.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Λαμπρινή και Αντώνη, για την υλική και ψυχολογική στήριξη που μου παρείχαν σε όλη τη διάρκεια της φοίτησης μου στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών.

Πάρις Καστής

Αθήνα, 2017

Τίτλος: Στοχαστική Ανάλυση Μη Διακοπτόμενης Κυκλοφοριακής Ροής με έμφαση στη Μακροπρόθεσμη Εμμονή

Όνοματεπώνυμο: Πάρις Καστής

Επιβλέπων: Δημήτρης Κουτσογιάννης

Συνεπιβλέπουσα: Ελένη Βλαχογιάννη

Σύνοψη

Στη διπλωματική εργασία αναλύονται στοχαστικά τα χαρακτηριστικά των χρονοσειρών μέσης ταχύτητας, ποσοστού κατάληψης και όγκου κυκλοφορίας με έμφαση στη μακροπρόθεσμη εμμονή και προσδιορίζεται ένα μοντέλο πρόβλεψης για την ταχύτητα. Τα δεδομένα προήλθαν από ένα σύστημα φορατών σε αυτοκινητόδρομο στο Πορτλάντ των Η.Π.Α. και από τα Διόδια Πολύμυλου στην Εγνατία Οδό. Αναλύοντας τα αποτελέσματα των συναρτήσεων κατανομής, τα κλιμακογράμματα και το γράφημα ποσοστημορίων (Q-Q Plot) επιλέχθηκε το μοντέλο στάσιμων αυτοπαλινδρόμενου κινούμενου μέσου όρου (ARMA) τάξης (1,1). Επίσης, πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή μοντέλου Hurst-Kolmogorov, αλλά από την ανάλυση των πραγματικών δεδομένων δεν τεκμηριώνεται η ακαταλληλότητα του. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος μετασχηματισμός ώστε από την κανονική κατανομή του μοντέλου να προσεγγιστεί η κατανομή της ιστορικής χρονοσειράς της ταχύτητας. Τέλος, έγινε εφαρμογή του μοντέλου ARMA(1,1) με 100 συνθετικές χρονοσειρές με τη μέθοδο Monte Carlo και στη συνέχεια παρουσιάστηκαν συγκριτικά διαγράμματα μεταξύ της συνθετικής και της ιστορικής χρονοσειράς.

Title: Stochastic Analysis of Free Flow Traffic with emphasis on Long-Term Persistence

Name: Paris Kastis

Supervisor: Demetris Koutsoyiannis

Co-Supervisor: Eleni Vlahogianni

Abstract

The scope of this thesis is the stochastic analysis of free flow traffic with emphasis on long-term persistence and the identification of the statistical characteristics of speed, volume and occupancy time series and finally the finding of a prediction model for the speed. The data were derived from the highway I-205 at Portland, U.S.A. and from the Tolls of Polymylos on Egnatia Motorway. By studying the results of distribution functions, climacograms and Q-Q Plot, the first-order autoregressive-first-order moving average was chosen. In addition, the application of the Hurst-Kolmogorov model to the real world data showed that this type of model is not suitable. Moreover, a three-parameter transformation was used in order to approximate the distribution of the historical speed time series by the normal distribution. Finally, for the first-order autoregressive approach, synthetic speed time series were produced with Monte Carlo method and subsequently comparative charts were presented between synthetic and historical speed time series.

Περίληψη

Στη παρούσα έρευνα έγινε στοχαστική ανάλυση με στόχο τον προσδιορισμό ενός μοντέλου διαχείρισης της κυκλοφορίας. Η ανάλυση αφορούσε χρονοσειρές ταχύτητας (speed), ποσοστού κατάληψης (occupancy) και όγκου κυκλοφορίας (volume) από τις 15/9/2011 μέχρι τις 15/11/2011 στο αυτοκινητόδρομο I-205 του Πόρτλαντ των Η.Π.Α. Η στατιστική και στοχαστική ανάλυση οδήγησε στον προσδιορισμό των των περιθώριων κατανομών και των χαρακτηριστικών τους, των κλιμακόγραμμάτων καθώς και έλεγχος κανονικότητας μέσω των γραφημάτων ποσοστημορίων (Q-Q Plot) των παραπάνω χρονοσειρών.

Ο προσδιορισμός του μοντέλου απαιτεί τον προσδιορισμό της κατανομής και τη δομή αυτοσυσχέτισης της ιστορικής χρονοσειράς ώστε να προσδιοριστεί το μοντέλο πρόβλεψης που θα ακολουθηθεί στην εφαρμογή. Αφού προσδιορίστηκαν τα στατιστικά χαρακτηριστικά και οι περιθώριες κατανομές έγινε έλεγχος προσαρμογής αυτών των χρονοσειρών στην κανονική κατανομή με χρήση του γραφήματος ποσοστημορίων. Επιλέχθηκε η κανονική κατανομή γιατί αποτελεί την πιο απλή και εύχρηστη κατανομή ώστε να χτιστεί ένα στοχαστικό μοντέλο. Παρατηρήθηκε ότι η κατανομή της ωριαίας ταχύτητας στην κλίμακα της οποίας θα γίνει η εφαρμογή, παρουσιάζει κάποιες αποκλίσεις από την κανονικότητα κυρίως στις ουρές. Έτσι δοκιμάστηκε ένας μετασχηματισμός κανονικοποίησης τριών παραμέτρων που προσέγγισε την κανονική κατανομή με επιτυχία. Για περαιτέρω προσέγγιση στην κανονική κατανομή επιλέχθηκε κι ένας μετασχηματισμός τεσσάρων παραμέτρων ο οποίος ναι μεν βελτίωσε την κατάσταση αλλά όχι τόσο ώστε να κριθεί αναγκαίος.

Μετά τον προσδιορισμό του τρόπου προσέγγισης της κατανομής ακολούθησε ο προσδιορισμός της δομής αυτοσυσχέτισης. Το βασικό εργαλείο για τον προσδιορισμό της είναι το κλιμακόγραμμα, δηλαδή τη διασπορά του μέσου όρου του χρόνου σε σύγκριση με την μέση κλίμακα του χρόνου. Από την ανάλυση σε πεντάλεπτη αλλά και ωριαία κλίμακα φάνηκε ότι η ανέλιξη αυτοπαλινδρόμησης τάξης 1 προσεγγίζει καλύτερα τη δομή αυτοσυσχέτισης καθώς ικανοποιεί την ισχυρή δομή αυτοσυσχέτισης που φαίνεται στις μικρές και στις μεσαίες κλίμακες με

συντελεστή Hurst κοντά στο 0.90 αλλά και στις μεγάλες κλίμακες όπου καταλήγει στον λευκό θόρυβο ($H = 0.50$).

Έχοντας προσδιορίσει την κατανομή και τη δομή αυτοσυσχέτισης της ιστορικής χρονοσειράς επιλέχθηκε το μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης τάξης 1 για περαιτέρω ανάλυση, με βάση το οποίο παράχθηκαν 100 συνθετικές χρονοσειρές. Από την ανάλυση προέκυψε ότι ένας μετασχηματισμός τριών παραμέτρων αρκεί για να παραχθούν συνθετικές χρονοσειρές ωριαίων κυκλοφοριακών μεγεθών κανονικά κατανεμημένων για τη διαχείριση της κυκλοφορίας. Περαιτέρω ανάλυση έδειξε ότι οι τελικές χρονοσειρές προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κατανομή των πραγματικών χρονοσειρών. Για τη δομή αυτοσυσχέτισης παρατηρήθηκε μικρή απόκλιση, καθώς ο μετασχηματισμός αυξάνει την μεταβλητότητα της χρονοσειράς. Ακόμα για μεγαλύτερη πληρότητα έγινε και εφαρμογή με μοντέλο Hurst-Kolmogorov με τα αποτελέσματα της εφαρμογής να είναι πολύ μακριά από την ιστορική χρονοσειρά, γιατί η μεταβλητότητα του μοντέλου είναι μεγαλύτερη και αυξάνεται ακόμα περισσότερο μετά τον μετασχηματισμό.

Τέλος, από τις αναλύσεις προέκυψε ένδειξη κυκλοστασιμότητας σε ημερήσια κλίμακα με την μορφή διπλής αρμονικής ταλάντωσης και από τα δεδομένα των διελεύσεων στα Διόδια Πολυμύλου στην Εγνατία Οδό φάνηκε να υπάρχει ετήσια περιοδικότητα με αιχμή κίνησης τον Αύγουστο και μείωση κατά τους χειμερινούς μήνες.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Η σημασία της διπλωματικής εργασίας	1
1.2	Σκοπός διπλωματικής εργασίας.....	2
1.3	Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας.....	3
2	Βιβλιογραφική επισκόπηση	6
2.1	Ανάλυση βιβλιογραφίας.....	6
2.1.1	Εργαλεία Στοχαστικής Διερεύνησης	6
2.1.2	Μακροπρόθεσμη Εμμονή και Αυτό-Ομοιότητα	7
2.2	Συμπεράσματα	12
3	Μεθοδολογική προσέγγιση	14
3.1	Περιγραφή της Διαδικασίας	15
3.1.1	Δομή Αυτοσυσχέτισης	16
3.1.2	Κατανομή της Χρονοσειράς.....	17
3.2	Θεωρητικό υπόβαθρο	19
4	Ανάλυση και αποτελέσματα	23
4.1	Βάση δεδομένων	23
4.1.1	Δεδομένα κυκλοφορίας από το Portland,U.S.A.....	23
4.1.2	Δεδομένα Διοδίων Πολυμύλου, Εγνατία Οδός.	27
4.2	Αποτελέσματα.....	28
4.2.1	Περιθώρια Χαρακτηριστικά.....	29
4.2.2	Περιθώριες Κατανομές	32
4.2.3	Κυκλοστασιμότητα.....	59
4.2.4	Κλιμακογράμματα.....	62
4.2.5	Q-Q Plot	71
4.3	Επιλογή του Μοντέλου	84
4.3.1	Δομή Αυτοσυσχέτισης	84
4.3.2	Κατανομή της Χρονοσειράς	87
5	Εφαρμογή	89
5.1	Μοντέλο ARMA(1,1)	90
5.2	Μοντέλο ΗΚ.....	94
6	Συμπεράσματα και προτάσεις	99
6.1	Εισαγωγή.....	99

6.2	Βασικά Συμπεράσματα.....	100
6.3	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	101
7	Βιβλιογραφία.....	103

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 4. 1 Φυσική Διάταξη Ανιχνευτών	24
Σχήμα 4. 2 Θέσεις όλων των Ανιχνευτών στον Αυτοκινητόδρομο.....	25
Σχήμα 4. 3 Θέση του Αυτοκινητόδρομου I-205	26
Σχήμα 4. 4 Διάταξη του Αυτοκινητόδρομου I-205	27
Σχήμα 4. 5 Θέση Διοδίων Πολύμυλου στην Εγνατία Οδό.....	28

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2. 1 Συγκεντρωτική επισκόπηση επιστημονικών εργασιών που αναφέρονται στο φαινόμενο της μακροπρόθεσμης εμμονής	11
Πίνακας 4. 1 Περιθώρια Χαρακτηριστικά Ταχύτητας για δυο μήνες.....	30
Πίνακας 4. 2 Περιθώρια Χαρακτηριστικά Ταχύτητας για κάθε μήνα ξεχωριστά	31
Πίνακας 4. 3 Περιθώρια Χαρακτηριστικά Όγκου Κυκλοφορίας Πενταλέπτων για δυο μήνες	31
Πίνακας 4. 4 Περιθώρια Χαρακτηριστικά Ποσοστού Κατάληψης Πενταλέπτων για δυο μήνες	32
Πίνακας 4. 5 Τα χαρακτηριστικά για τα μοντέλα ΗΚ και Μαρκόφ.....	86
Πίνακας 5. 1 Στατιστικά χαρακτηριστικά και παράμετροι μετασχηματισμού του ανιχνευτή 1345	90

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. 1 Ωριαία Χρονοσειρά Ταχύτητας για δυο μήνες.....	2
Διάγραμμα 2. 1 Κλιμακόγραμμα των Belomestny and Siegel (2003) με $H=0,83$	9
Διάγραμμα 2. 2 Κλιμακόγραμμα των Shang et al. (2007) με $H=0,84$	10
Διάγραμμα 3. 1 Θεωρητικό μοντέλο ΗΚ στο κλιμακόγραμμα	21
Διάγραμμα 3. 2 Θεωρητικό προσομοίωμα GHK με $H=0,5$ στο κλιμακόγραμμα.....	21
Διάγραμμα 4. 1 Κατανομή Πενταλέπτων Ταχύτητας Ανιχνευτή 1345 για δυο μήνες	33
Διάγραμμα 4. 2 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με κλίμακα Πενταλέπτου (1379).....	33
Διάγραμμα 4. 3 Κατανομή Πενταλέπτων Ταχύτητας Ανιχνευτή 1387 για δυο μήνες	34
Διάγραμμα 4. 4 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με κλίμακα Πενταλέπτου (1387).....	34
Διάγραμμα 4. 5 Κατανομή Πενταλέπτων Ταχύτητας Ανιχνευτή 1386 για δυο μήνες	35
Διάγραμμα 4. 6 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με κλίμακα Πενταλέπτου (1386).....	35

Διάγραμμα 4. 7 Κατανομή Πενταλέπτων Ταχύτητας Ανιχνευτή 1379 για δυο μήνες	36
Διάγραμμα 4. 8 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με κλίμακα Πενταλέπτου (1379).....	36
Διάγραμμα 4. 9 Κατανομή Πενταλέπτων Ταχύτητας Ανιχνευτή 1345 για τον 1 ^ο μήνα	37
Διάγραμμα 4. 10 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με κλίμακα Πενταλέπτου για τον 1 ^ο μήνα (1379).....	37
Διάγραμμα 4. 11 Κατανομή Πενταλέπτων Ταχύτητας Ανιχνευτή 1345 για τον 2 ^ο μήνα	38
Διάγραμμα 4. 12 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με κλίμακα Πενταλέπτου για τον 2 ^ο μήνα (1345)	38
Διάγραμμα 4. 13 Κατανομή Πενταλέπτων Ταχύτητας Ανιχνευτή 1387 για τον 1 ^ο μήνα	39
Διάγραμμα 4. 14 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με κλίμακα Πενταλέπτου για τον 1 ^ο μήνα (1387)	39
Διάγραμμα 4. 15 Κατανομή Πενταλέπτων Ταχύτητας Ανιχνευτή 1386 για τον 1 ^ο μήνα	40
Διάγραμμα 4. 16 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με κλίμακα Πενταλέπτου για τον 1 ^ο μήνα (1386)	40
Διάγραμμα 4. 17 Κατανομή Πενταλέπτων Ταχύτητας Ανιχνευτή 1386 για τον 2 ^ο μήνα	41

Διάγραμμα 4. 18 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με κλίμακα Πενταλέπτου για τον 2 ^ο μήνα (1386)	41
Διάγραμμα 4. 19 Κατανομή Πενταλέπτων Ταχύτητας Ανιχνευτή 1379 για τον 1 ^ο μήνα	42
Διάγραμμα 4. 20 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με κλίμακα Πενταλέπτου για τον 1 ^ο μήνα (1379)	42
Διάγραμμα 4. 21 Κατανομή Πενταλέπτων Ταχύτητας Ανιχνευτή 1379 για τον 2 ^ο μήνα	43
Διάγραμμα 4. 22 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με κλίμακα Πενταλέπτου για τον 2 ^ο μήνα (1379)	43
Διάγραμμα 4. 23 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ωριαίας Ταχύτητας (1345).	44
Διάγραμμα 4. 24 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με Ωριαία κλίμακα (1345)	44
Διάγραμμα 4. 25 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ωριαίας Ταχύτητας (1387).	45
Διάγραμμα 4. 26 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με Ωριαία κλίμακα (1387)	45
Διάγραμμα 4. 27 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ωριαίας Ταχύτητας (1386).	46
Διάγραμμα 4. 28 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με Ωριαία κλίμακα (1386)	46
Διάγραμμα 4. 29 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ωριαίας Ταχύτητας (1379).	47
Διάγραμμα 4. 30 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με Ωριαία κλίμακα (1379)	47

Διάγραμμα 4. 31 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ημερήσιας Ταχύτητας (1345)	48
.....	
Διάγραμμα 4. 32 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με Ημερήσια κλίμακα (1345)	48
.....	
Διάγραμμα 4. 33 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ημερήσιας Ταχύτητας (1387)	49
.....	
Διάγραμμα 4. 34 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με Ημερήσια κλίμακα (1387)	49
.....	
Διάγραμμα 4. 35 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ημερήσιας Ταχύτητας (1386)	50
.....	
Διάγραμμα 4. 36 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με Ημερήσια κλίμακα (1386)	50
.....	
Διάγραμμα 4. 37 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ημερήσιας Ταχύτητας (1379)	51
.....	
Διάγραμμα 4. 38 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με Ημερήσια κλίμακα (1379)	51
.....	
Διάγραμμα 4. 39 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ποσοστού Κατάληψης με κλίμακα Πενταλέπτου (1345)	52
.....	
Διάγραμμα 4. 40 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ποσοστού Κατάληψης με κλίμακα Πεντάλεπτου (1345)	52
.....	
Διάγραμμα 4. 41 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ποσοστού Κατάληψης με κλίμακα Πενταλέπτου (1387)	53
.....	

Διάγραμμα 4. 42 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ποσοστού Κατάληψης με κλίμακα Πεντάλεπτου (1387).....	53
Διάγραμμα 4. 43 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ποσοστού Κατάληψης με κλίμακα Πενταλέπτου (1386).....	54
Διάγραμμα 4. 44 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ποσοστού Κατάληψης με κλίμακα Πεντάλεπτου (1386).....	54
Διάγραμμα 4. 45 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ποσοστού Κατάληψης με κλίμακα Πενταλέπτου (1379).....	55
Διάγραμμα 4. 46 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ποσοστού Κατάληψης με κλίμακα Πεντάλεπτου (1379).....	55
Διάγραμμα 4. 47 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Όγκου Κυκλοφορίας με κλίμακα Πενταλέπτου (1345).....	56
Διάγραμμα 4. 48 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Όγκου Κυκλοφορίας με κλίμακα Πεντάλεπτου (1345).....	56
Διάγραμμα 4. 49 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Όγκου Κυκλοφορίας με κλίμακα Πενταλέπτου (1387).....	57
Διάγραμμα 4. 50 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Όγκου Κυκλοφορίας με κλίμακα Πεντάλεπτου (1387).....	57
Διάγραμμα 4. 51 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Όγκου Κυκλοφορίας με κλίμακα Πενταλέπτου (1386).....	58
Διάγραμμα 4. 52 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Όγκου Κυκλοφορίας με κλίμακα Πεντάλεπτου (1386).....	58

Διάγραμμα 4. 53 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Όγκου Κυκλοφορίας με κλίμακα Πενταλέπτου (1379).....	59
Διάγραμμα 4. 54 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Όγκου Κυκλοφορίας με κλίμακα Πεντάλεπτου (1379).....	59
Διάγραμμα 4. 55 Μέση Ημέρα (1345)	60
Διάγραμμα 4. 56 Μέση Ημέρα (1387)	61
Διάγραμμα 4. 57 Μέση Ημέρα (1386)	61
Διάγραμμα 4. 58 Μέση Ημέρα (1379)	61
Διάγραμμα 4. 59 Μέση Ετήσια Διέλευση Οχημάτων Ι.Χ. στα Διόδια Πολυμύλου	62
Διάγραμμα 4. 60 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Ταχύτητας (1345).....	63
Διάγραμμα 4. 61 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Ταχύτητας (1387).....	64
Διάγραμμα 4. 62 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Ταχύτητας (1386).....	64
Διάγραμμα 4. 63 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Ταχύτητας (1379).....	65
Διάγραμμα 4. 64 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Όγκου Κυκλοφορίας (1345) ...	65
Διάγραμμα 4. 65 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Όγκου Κυκλοφορίας (1387) ...	66
Διάγραμμα 4. 66 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Όγκου Κυκλοφορίας (1386) ...	66
Διάγραμμα 4. 67 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Όγκου Κυκλοφορίας (1379) ...	67
Διάγραμμα 4. 68 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Ποσοστού Κατάληψης(1345). 67	

Διάγραμμα 4. 69 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Ποσοστού Κατάληψης(1387).	68
Διάγραμμα 4. 70 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Ποσοστού Κατάληψης(1386).	68
Διάγραμμα 4. 71 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Ποσοστού Κατάληψης(1379).	69
Διάγραμμα 4. 72 Κλιμακόγραμμα των Ωριαίας Ταχύτητας (1345).....	69
Διάγραμμα 4. 73 Κλιμακόγραμμα των Ωριαίας Ταχύτητας (1387).....	70
Διάγραμμα 4. 74 Κλιμακόγραμμα των Ωριαίας Ταχύτητας (1386).....	70
Διάγραμμα 4. 75 Κλιμακόγραμμα των Ωριαίας Ταχύτητας (1379).....	71
Διάγραμμα 4. 76 Q-Q Plot Πενταλέπτων Ταχύτητας για μεταμόρφωση τριών παραμέτρων (1345)	72
Διάγραμμα 4. 77 Q-Q Plot Πενταλέπτων Ταχύτητας για μεταμόρφωση τριών παραμέτρων (1387)	72
Διάγραμμα 4. 78 Q-Q Plot Πενταλέπτων Ταχύτητας για μεταμόρφωση τριών παραμέτρων (1386)	73
Διάγραμμα 4. 79 Q-Q Plot Πενταλέπτων Ταχύτητας για μεταμόρφωση τριών παραμέτρων (1379)	73
Διάγραμμα 4. 80 Q-Q Plot Πενταλέπτων Ταχύτητας για μεταμόρφωση τεσσάρων παραμέτρων (1345)	74
Διάγραμμα 4. 81 Q-Q Plot Πενταλέπτων Ταχύτητας για μεταμόρφωση τεσσάρων παραμέτρων (1386)	74
Διάγραμμα 4. 82 Q-Q Plot Πενταλέπτων Ταχύτητας για μεταμόρφωση τεσσάρων παραμέτρων (1379)	74

Διάγραμμα 4. 83 Q-Q Plot Ωριαίας Ταχύτητας για μεταμόρφωση τριών παραμέτρων (1345)	75
Διάγραμμα 4. 84 Q-Q Plot Ωριαίας Ταχύτητας για μεταμόρφωση τριών παραμέτρων (1387)	75
Διάγραμμα 4. 85 Q-Q Plot Ωριαίας Ταχύτητας για μεταμόρφωση τριών παραμέτρων (1386)	76
Διάγραμμα 4. 86 Q-Q Plot Ωριαίας Ταχύτητας για μεταμόρφωση τριών παραμέτρων (1379)	76
Διάγραμμα 4. 87 Q-Q Plot Ωριαίας Ταχύτητας για μεταμόρφωση τεσσάρων παραμέτρων (1345)	77
Διάγραμμα 4. 88 Q-Q Plot Ωριαίας Ταχύτητας για μεταμόρφωση τεσσάρων παραμέτρων (1387)	77
Διάγραμμα 4. 89 Q-Q Plot Ωριαίας Ταχύτητας για μεταμόρφωση τεσσάρων παραμέτρων (1386)	78
Διάγραμμα 4. 90 Q-Q Plot Ωριαίας Ταχύτητας για μεταμόρφωση τεσσάρων παραμέτρων (1379)	78
Διάγραμμα 4. 91 Q-Q Plot Ημερήσιας Ταχύτητας (1345)	79
Διάγραμμα 4. 92 Q-Q Plot Ημερήσιας Ταχύτητας (1387)	79
Διάγραμμα 4. 93 Q-Q Plot Ημερήσιας Ταχύτητας (1386)	80
Διάγραμμα 4. 94 Q-Q Plot Ημερήσιας Ταχύτητας (1379)	80
Διάγραμμα 4. 95 Q-Q Plot Πενταλέπτων Όγκου Κυκλοφορίας (1345)	81

Διάγραμμα 4. 96 Q-Q Plot Πενταλέπτων Όγκου Κυκλοφορίας (1387)	81
Διάγραμμα 4. 97 Q-Q Plot Πενταλέπτων Όγκου Κυκλοφορίας (1386)	82
Διάγραμμα 4. 98 Q-Q Plot Πενταλέπτων Όγκου Κυκλοφορίας (1379)	82
Διάγραμμα 4. 99 Q-Q Plot Πενταλέπτων Ποσοστού Κατάληψης(1345).....	82
Διάγραμμα 4. 100 Q-Q Plot Πενταλέπτων Ποσοστού Κατάληψης(1387).....	83
Διάγραμμα 4. 101 Q-Q Plot Πενταλέπτων Ποσοστού Κατάληψης(1386).....	83
Διάγραμμα 4. 102 Q-Q Plot Πενταλέπτων Ποσοστού Κατάληψης(1379).....	84
Διάγραμμα 4. 103 Κλιμακόγραμμα Πενταλέπτων Ταχύτητας με Μαρκόφ και ΗΚ με H=0.9	85
Διάγραμμα 4. 104 Κλιμακόγραμμα Ωριαίας Ταχύτητας με Μαρκόφ και ΗΚ με H=0.9	86
Διάγραμμα 5. 1 Μεταβολή της Μέσης Τιμής στις Συνθετικές Χρονοσειρές	92
Διάγραμμα 5. 2 Μεταβολή της Τυπικής Απόκλισης στις Συνθετικές Χρονοσειρές. ..	93
Διάγραμμα 5. 3 Μέση Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Συνθετικής Χρονοσειράς πρίν και μετά τον μετασχηματισμό και Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ιστορικής Χρονοσειράς.	93
Διάγραμμα 5. 4 Συγκριτικό κλιμακόγραμμα μεταξύ Ιστορικής, Συνθετικής και Μετασχηματισμένης Χρονοσειράς	94

1 Εισαγωγή

1.1 Η σημασία της διπλωματικής εργασίας

Η πρόβλεψη των κυκλοφοριακών φόρτων είναι αναγκαία τόσο για το Δημόσιο όσο και την παραχωρησιούχο εταιρία. Έτσι το Δημόσιο εξασφαλίζει μία οικονομικά ωφέλιμη Σύμβαση, ενώ η Εταιρία θα δώσει εταιρία θα δώσει τέτοια προσφορά (οικονομική) που θα την κάνει ανταγωνιστική ενώ θα εξασφαλίσει μια λογική κερδοφορία.

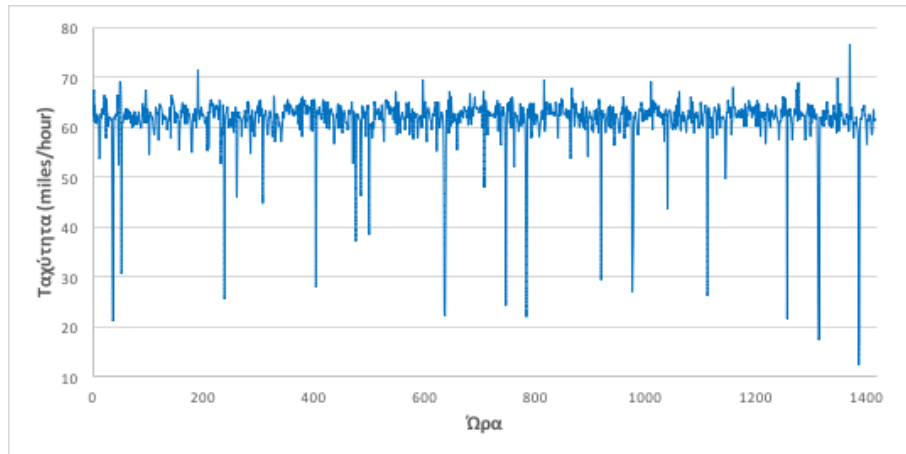
Η διαχείριση της κυκλοφορίας και η πρόβλεψη της είναι πολύ σημαντική στις μέρες για πολλούς λόγους. Αρχικά η κατασκευή των αυτοκινητοδρόμων έχει μεγάλη επίδραση στην εθνική οικονομία αλλά και την τοπική οικονομία της περιοχής όπου κατασκευάζεται. Συνεπώς, έχει μεγάλη σημασία να γνωρίζουμε σε βάθος χρόνου, με βάση τις ταχύτητες και τους φορτούς αν απαιτείται κατασκευή συμπληρωματικών έργων.

Ένας ακόμα τομέας όπου η πρόβλεψη της κυκλοφορίας είναι σημαντική αποτελεί η παραχώρηση της κατασκευής, της συντήρησης και η λειτουργίας ενός αυτοκινητοδρόμου.

Εν συνεχεία η πρόβλεψη είναι ιδιαίτερα σημαντική και στη συντήρηση και λειτουργία αυτή κάθε αυτή. Δηλαδή στα πόσα έτη είναι απαραίτητη η αλλαγή των ασφαλικών (λόγω καταπόνησης), η κάλυψη της χωρητικότητας του αυτοκινητοδρόμου ώστε να παρθούν μέτρα για ανακούφιση ή και αναβολή της κάλυψης.

Επιπλέον, μεγάλη σημασία έχει η διαχείριση της κυκλοφορίας ώστε να αποφεύγονται οι κυκλοφοριακές συμφορήσεις τις ώρες αιχμής, ειδικά σε μεγάλο βαθμό να λαμβάνονται μέτρα ώστε να μην γίνεται υπέρβαση των ορίων ταχύτητας ειδικά σε μεγάλο βαθμό που είναι επικίνδυνες.

Στο διάγραμμα 1.1 παρουσιάζεται ενδεικτικά η ωριαία ταχύτητα στον αυτοκινητόδρομο I-205 στο Πόρτλαντ των Η.Π.Α. Τα δεδομένα πάρθηκαν από το Federal Highway Administration.



Διάγραμμα 1. 1 Ωριαία Χρονοσειρά Ταχύτητας για δυο μήνες

1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η στοχαστική διερεύνηση μη διακοπτόμενης κυκλοφοριακής ροής. Αναλύθηκαν οι χρονοσειρές ταχύτητας (speed miles/hour), ποσοστού κατάληψης (occupancy ποσοστό) και όγκου κυκλοφορίας (volume οχήματα), μελετήθηκαν τα περιθώρια χαρακτηριστικά και οι περιθώριες κατανομές, η δομή αυτοσυσχέτισης με τη χρήση κλιμακογράμματος και έγιναν έλεγχοι κανονικής κατανομής με γράφημα ποσοστημορίων (Q-Q Plot).

Στόχος αυτής της ανάλυσης ήταν να βρεθεί ένα μοντέλο που να ικανοποιεί την κατανομή της χρονοσειράς και τη δομή αυτοσυσχέτισης της, έτσι ώστε να είναι η δυνατή η μελλοντική διαχείριση της κυκλοφορίας, αφού θα έχουν προσδιοριστεί τα χαρακτηριστικά της αρχικής (ιστορικής) χρονοσειράς.

Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί στη βιβλιογραφία να προκύπτουν μοντέλα με ισχυρή μακροπρόθεσμη εμμονή η οποία όμως δεν αναπαριστά σε όλες τις κλίμακες τις ιστορικές χρονοσειρές. Συνεπώς η ανάλυση που γίνεται, δίνει έμφαση στη διερεύνηση του φαινομένου της μακροπρόθεσμης εμμονής στη μη διακοπτόμενη κυκλοφοριακή ροή και αποπειράται να προσδιορίσει ένα μοντέλο που να ικανοποιεί τη δομή αυτοσυσχέτισης σε όλο το εύρος των κλιμάκων της (μικρές, μεσαίες, μεγάλες κλίμακες).

1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

Η διπλωματική εργασία χωρίζεται σε 6 κεφάλαια.

- Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η εισαγωγή στο αντικείμενο κι στο σκοπό της εργασίας. Σχολιάζεται η αναγκαιότητα και η πρακτικότητα της διπλωματικής εργασίας και το πεδίο στο οποίο θα εφαρμοστεί.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση του φαινομένου της μακροπρόθεσμης εμμόνης σε φυσικά φαινόμενα (βροχή, άνεμος, θερμοκρασία), στο διαδίκτυο (Ethernet), στα οικονομικά καταλήγοντας στη διευρεύνηση του φαινομένου σε συνθήκες μη διακοπτόμενης κυκλοφοριακής ροής. Επισημαίνονται συνοπτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και ο συντελεστής Hurst που πρόκευσε. Επιπλέον, εξετάστηκαν επιστημονικές εργασίες που αφορούσαν τον μετασχηματισμό κανονικοποίησης της κατανομής.
- Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε. Αναφέρονται οι στόχοι της έρευνας και το αντικείμενο της. Τα εργαλεία στοχαστικής διερεύνησης που χρησιμοποιήθηκαν και η διαφοροποίηση αυτών σε σχέση με αυτά που χρησιμοποιούνται στις φυσικές διεργασίες. Επιπλέον, αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο όσο αφορά τη μακροπρόθεσμη εμμόνη και τα θεωρητικά μοντέλα Hurst-Kolmogorov και Markov που χρησιμοποιήθηκαν.
- Τέταρτο κεφάλαιο αποτελεί η ανάλυση και τα αποτελέσματα. Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται οι πεντάλεπτες, ωριαίες και ημερήσιες χρονοσειρές ταχύτητας καθώς και οι πεντάλεπτες χρονοσειρές ποσοστού κατάληψης (occupancy) και όγκου κυκλοφορίας (volume). Αρχικά γίνεται αναφορά για τη βάση δεδομένων δηλαδή από που εκλέχθηκαν τα δεδομένα και τι αφορούν. Στη συνέχεια γίνεται η ανάλυση των δεδομένων με παρουσίαση των περιθώριων χαρακτηριστικών και κατανομών. Την ανάλυση της δομής αυτοσυσχέτισης με χρήση των κλιμακογραμμάτων και αντίστοιχα ερευνάται η κατανομή της χρονοσειράς με τον έλεγχο κανονικότητας Q-Q Plot και επιπλέον ελέγχεται και ο μετασχηματισμός κανονικοποίησης των χρονοσειρών. Τέλος, γίνεται επιλογή του μοντέλου στην κατάλληλη κλίμακα και εξετάζεται το θεωρητικό μοντέλο που ανταποκρίνεται καλύτερα στην ιστορική χρονοσειρά.
- Το πέμπτο κεφάλαιο αφορά την εφαρμογή του μοντέλου που επιλέχθηκε στην ωριαία χρονοσειρά ταχύτητας του αυτοκινητόδρομου I-205 στο Πόρτλαντ των Η.Π.Α. Προτάθηκαν δυο μοντέλα κι για αυτό έγιναν δυο εναλλακτικές προσομοιώσεις που παρουσιάζονται και συγκρίνονται.
- Στο έκτο κεφάλαιο αναφέρεται σύντομα ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας και η προσέγγιση της και συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας.

Τέλος γίνονται προτάσεις για περαιτέρω ερεύνα σχετικά με το θέμα της διπλωματικής εργασίας.

2 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Στο πλαίσιο αυτού του κεφαλαίου πραγματοποιείται βιβλιογραφική επισκόπηση των σημαντικότερων επιστημονικών εργασιών που σχετίζονται με το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η στοχαστική ανάλυση έχει εφαρμοστεί σε πολλά πεδία των επιστημών από τα αμιγώς θεωρητικά μαθηματικά μέχρι το χρηματοπιστωτικό τομέα και τις οικονομικές αναλύσεις που τα τελευταία χρόνια η στοχαστική διερεύνηση χρησιμοποιείται κατά κόρον. Σε αυτή τη βάση αποφασίστηκε η στοχαστική ανάλυση σε δεδομένα κυκλοφορίας. Συνεπώς, κύρια πηγή της έρευνας υπήρξαν οι στοχαστικές αναλύσεις σε κυκλοφοριακά με έμφαση στη μακροπρόθεσμη εμμονή. Φυσικά χρησιμοποιήθηκαν και επιστημονικές εργασίες από φυσικές διεργασίες όπως η βροχή, ο άνεμος και η θερμοκρασία, οι οποίες αποτελούν και την κύρια ενασχόληση του τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος. Η αναζήτηση επιστημονικών εργασιών όμως επεκτάθηκε κι σε άλλους επιστημονικούς τομείς όπως τα οικονομικά και τα δίκτυα ώστε να κατανοηθεί καλύτερα και από περισσότερες σκοπιές το αντικείμενο που αντιμετωπίζουμε καθώς τα φαινόμενα αλλάζουν αλλά η στοχαστική διερεύνηση έχει πολλά κοινά χαρακτηριστικά. Επιπλέον με αυτό τον τρόπο εμφανίζεται ανάγλυφα η χρήση της μακροπρόθεσμης εμμονής σε πολλούς και πολύ διαφορετικούς τομείς.

2.1 Ανάλυση βιβλιογραφίας

2.1.1 Εργαλεία Στοχαστικής Διερεύνησης

Η διερεύνηση της ύπαρξης μακροπρόθεσμης εμμονής μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους η συνηθέστεροι εξ' αυτών είναι η αυτοσυνδιασπορά, το φάσμα ισχύος και το κλιμακόγραμμα. Με το τελευταίο να αποτελεί επινόηση και εισαγωγή στη βιβλιογραφία από τον Koutsoyiannis (2000). Οι Dimitriadis and Koutsoyiannis (2015) έκαναν μια εκτεταμένη σύγκριση μεταξύ των τριών στοχαστικών εργαλείων σε Μαρκοβιανές και Hurst-Kolmogorov διαδικασίες. Λόγω της υψηλής μεροληψίας στην εκτίμηση της αυτοσυνδιασποράς καθώς και οι επιδράσεις της διαδικασίας διακριτοποίησης και το πεπερασμένο μέγεθος του δείγματος, η αυτοσυνδιασπορά δεν εμφανίζεται ως το βέλτιστο

εργαλείο διερεύνησης. Το φάσμα ισχύος είναι επίσης επιρρεπές στη μεροληψία και σε σφάλματα διακριτοποίησης, καθώς και υψηλή αβεβαιότητα, η οποία μπορεί να παραποιήσει τη συμπεριφορά της διαδικασίας. Από την άλλη το κλασικό κλιμακόγραμμα φαίνεται να έχει μικρό σφάλμα, εμφανίζει καλή συμπεριφορά για αυτές τις διαδικασίες και είναι κοντά στη πιο πιθανή τιμή του, σε αντίθεση με την αυτοσυνδιασπορά και το φάσμα ισχύος που δεν έχουν τέτοιες ιδιότητες. Επομένως, όταν χτίζεται ένα στοχαστικό μοντέλο φαίνεται πιο ωφέλιμο να δουλέψεις με το κλιμακόγραμμα.

Το κλιμακόγραμμα αφορά στον προσδιορισμό της δομής της αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς για να χτιστεί ένα στοχαστικό μοντέλο είναι απαραίτητος κι ο προσδιορισμός της κατανομής της χρονοσειράς που ερευνάται. Η κανονική κατανομή αποτελεί την πιο απλή κατανομή για να χτίσεις ένα στοχαστικό μοντέλο τόσο για πρόβλεψη όσο για προσομοίωση. Στη δική μας περίπτωση όμως δεν αντικατοπτριζόταν η κατανομή της πραγματικής χρονοσειράς κυρίως λόγω «βαριών» ουρών. Έτσι χρησιμοποιήθηκε ένας μετασχηματισμός τριών παραμέτρων που οδηγούν στην κανονική κατανομή (Koutsoyiannis et al., 1998)

2.1.2 Μακροπρόθεσμη Εμμονή και Αυτό-Ομοιότητα

Η διερεύνηση της μακροπρόθεσμης εμμονής (long-term memory) και η αυτό-ομοιότητα (self-similarity) έγινε στα πλαίσια του συντελεστή Hurst και δευτερευόντως σε όρους Fractal που χρησιμοποιήθηκαν από πολλές επιστημονικές εργασίες. Ο Harold Edwin Hurst, το 1951, εισήγαγε την έννοια της μακροπρόθεσμης εμμονής (μνήμης) της χρονοσειράς μελετώντας τη ροή του ποταμού Νείλου. Οι ιδέες του δεν είχαν κεντρίσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητα μέχρι το 1968 όπου ο Mandelbrot, πατέρας των Fractal, πρότεινε το Γκαουσιανό θόρυβο με βάση την υπόθεση απείρου μνήμης. Από τότε και μετά η μακροπρόθεσμη εμμονή σε όρους Hurst χρησιμοποιήθηκε σε πολλούς επιστημονικούς τομείς όπως οι κλιματικές επιστήμες, τα οικονομικά και τα δίκτυα (O'Connell et al. 2016).

Όσο αφορά στις κλιματικές επιστήμες εκτεταμένες αναλύσεις έχουν γίνει στα πλαίσια του μαθήματος «Στοχαστικές Μέθοδοι στους Υδατικούς Πόρους», όπου και παρουσιάστηκαν στο συνέδριο E.G.U. τον Απρίλιο του 2016. Στο επίπεδο της βροχής λήφθηκαν μετρήσεις από σταθμούς παγκοσμίως και παρατηρήθηκαν έντονοι συντελεστές Hurst από 0.60-0.83

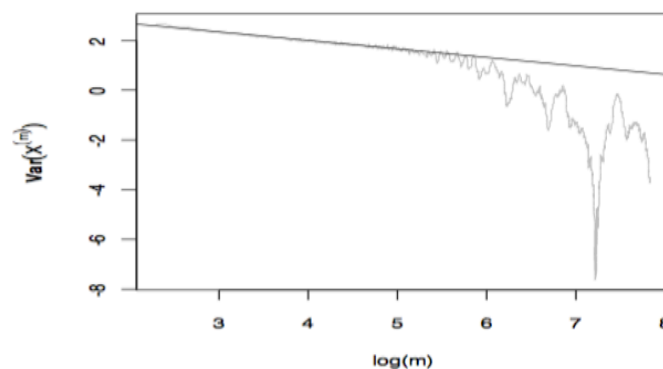
(Sotiriadou et al. 2016). Αντίστοιχες έρευνες έχουν υπάρξει και σε θερμοκρασία και άνεμο. Στη θερμοκρασία ο συντελεστής Hurst κυμαίνεται μεταξύ 0.60 και 0.85 ενώ στον άνεμο μεταξύ 0.70 και 0.90 (Lerias et al. 2016) (Deligiannis et al. 2016).

Στα οικονομικά υπήρξε η μεγαλύτερη ενασχόληση με τη μακροπρόθεσμη εμμονή σε όρους Hurst. Η χρήση του συντελεστή και της μνήμης της χρονοσειράς έχει γίνει με αρκετούς και διαφορετικούς τρόπους. Οι Qian and Rasheed (2014) υπολόγισαν ότι τις περιόδους που ο συντελεστής Hurst ήταν υψηλός τα μοντέλα τους προέβλεπαν καλύτερα σε αντίθεση με τις περιόδους που ο συντελεστής Hurst ήταν χαμηλός (μικρότερος του 0.5) όπου τα μοντέλα αστοχούσαν με μεγαλύτερη συχνότητα λόγω αντί-εμμονής. Το οποίο επιβεβαιώνει αντίστοιχο συμπέρασμα του Mitra (2012) δυο χρόνια νωρίτερα, παρατηρώντας ότι η τεχνική ανάλυση αποδίδει καλύτερα όταν υπάρχει υψηλότερος συντελεστής Hurst. Στον οικονομικό τομέα υπήρξαν και πιο φιλόδοξα συμπεράσματα. Μελετώντας τους δείκτες του Dow Jones, οι Grech and Mazur (2004) παρατήρησαν ότι λίγες εβδομάδες πριν τα οικονομικά «ατυχήματα» ο συντελεστής Hurst πλησίαζε την τιμή 0.5 ενώ είχε εκκινήσει κοντά στο 0.8 μήνες νωρίτερα κάτι που αποτελεί σχετικά τοπική χρήση του συντελεστή. Υπολογίζοντας το συντελεστή Hurst σε τοπικό επίπεδο κάτι που δεν τεκμηριώνεται από τον ορισμό της μακροπρόθεσμης εμμονής.

Στα δίκτυα, επίσης, έχει γίνει πολύ μεγάλος αριθμός επιστημονικών εργασιών καθώς είναι από τους τομείς που εμφανίζουν ισχυρή μακροπρόθεσμη εμμονή. Αυτό φαίνεται πολύ καθαρά στο δίκτυο υπολογιστών ενσύρματης τοπικής δικτύωσης υπολογιστών (Ethernet) όπου μετά από μετρήσεις τριών ετών (1989-1992) στην παροχή που υπάρχει στα δίκτυα βρέθηκε συντελεστής Hurst ίσος με 0.90 κάτι που δείχνει ότι η χρονοσειρά παροχής του δικτύου έχει έντονη «μνήμη» οι ανοδικές τιμές ακολουθούν ανοδικές τιμές και αντίστροφα. Δηλαδή η τάση της χρονοσειράς είναι ισχυρή (Leland et al. 2002).

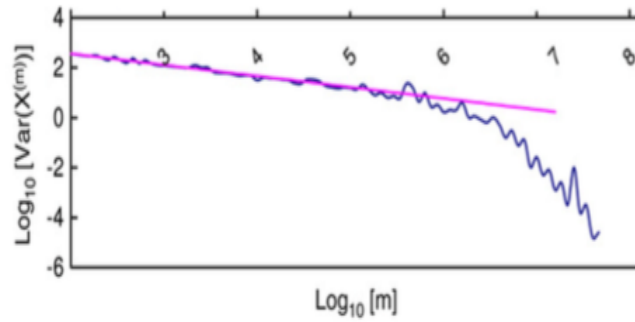
Στη συνέχεια ερευνήθηκαν εργασίες που σχετίζονται με τη στοχαστική ανάλυση στην κυκλοφοριακή ροή. Οι Belomestny and Siegel (2003) ερεύνησαν την ύπαρξη αυτοομοιότητας σε συνθήκες μη διακοπτόμενης ροής σε αυτοκινητόδρομους στη Γερμανία. Αφού απέκλεισαν το 30% των συνολικών δεδομένων που εξέλεξαν (εκεί που μπορεί να θεωρηθεί η στασιμότητα) ανέλυσαν τα δεδομένα. Από τις αναλύσεις τους κατέληξαν ότι η κατανομή

προσεγγίζει την κανονική αλλά με «βαριές» ουρές. Επίσης, υπολόγισαν το συντελεστή Hurst ο οποίος ισούται με 0.83 υπολογιζόμενος από την κλίση που υπολογίζεται στην αρχή του κλιμακογράμματος (βλέπε κεφάλαιο 3.2) γιατί μετά παρατηρείται ένα έντονο «σπάσιμο» που δικαιολογείται από τους συγγραφείς στην μεροληψία που έχει το μοντέλο αγνοώντας έτσι τις πολύ μικρές και τις πολύ μεγάλες τιμές του κλιμακογράμματος. Κατέληξαν, εν τέλει, στα συμπεράσμα ότι η χρονοσειρά εμφανίζει αυτό-ομοιότητα η οποία μετρείται σε όρους συντελεστή Hurst και ότι η χρονοσειρά έχει στοχαστική φύση.



Διάγραμμα 2. 1 Κλιμακόγραμμα των Belomestny and Siegel (2003) με $H=0.83$

Παρόμοια ανάλυση με αυτή των Belomestny and Siegel (2003) έκαναν τέσσερα χρόνια οι Shang et al. (2007) υπολογίζοντας το συντελεστή Hurst που προέκυψε ίσος με 0.84 σχεδόν ίδιος με το συντελεστή των Belomestny and Siegel (2003) η αιτιολογία που δίνεται είναι ίδια με αυτή της προηγούμενης επιστημονικής εργασίας. Η εργασία εντοπίζει ισχυρή ένδειξη μακροπρόθεσμης εμμονής καθώς ο συντελεστής Hurst εμφανίζεται μεγάλος, προτείνοντας τη χρησιμοποίηση αντίστοιχων μοντέλων για τη διαχείριση της κυκλοφορίας. Καταλήγουν ότι χρειάζεται περαιτέρω έρευνα σχετικά με την ύπαρξη Fractal συμπεριφορών και αυτό-ομοιότητας στην κυκλοφορία γιατί τα δεδομένα εμφανίζουν θετικά στοιχεία για την ύπαρξη αυτό-ομοιότητας.



Διάγραμμα 2. 2 Κλιμακόγραμμα των Shang et al. (2007) με $H=0.84$

Διερεύνηση της μακροπρόθεσμης εμμονής σε κυκλοφοριακή ροή έκαναν και οι Skagerstam and Hansen (2006) μελετώντας τον ήχο που παράγουν τα οχήματα στους αυτοκινητόδρομους. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο wavelet υπολόγισαν το συντελεστή Hurst στις μεγάλες κλίμακες, σε αντίθεση με τις δυο προηγούμενες επιστημονικές εργασίες που υπολόγισαν σε μεσαίες κλίμακες αποκλείοντας τις πολύ μικρές και τις μεγάλες κλίμακες, κι βρήκαν ότι ισούται με 0.5. Αυτή τιμή υποδηλώνει λευκό θόρυβο στις μεγάλες κλίμακες.

Πίνακας 2. 1 Συγκεντρωτική επισκόπηση επιστημονικών εργασιών που αναφέρονται στο φαινόμενο της μακροπρόθεσμης εμμονής.

Αναφορά	Μεταβλητή	Χρονικό Βήμα	Μήκος(Ετη)	Μέθοδος Υπολογισμού Εμμονής	Πάραμετρος Εμμονής
Sotiriadou et al. (2016)	Ύψος Βροχής	Ημερήσιο	>60	Κλιμακόγραμμα	Συντελεστής Η: 0.59-0.83
Lerías et al. (2016)	Θερμοκρασία	Ημερήσιο	>30	Κλιμακόγραμμα	Συντελεστής Η: 0.60-0.85
Deligiannis et al. (2016)	Ταχύτητα Ανέμου	Ημερήσιο	40-70	Κλιμακόγραμμα	Συντελεστής Η: 0.70-0.90
Qian and Rasheed (2014)	Δείκτης Dow Jones	Ετήσιο	70	R/S Analysis	Συντελεστής Η: 0.65
Leland et al.(2002)	Ethernet Traffic	Δευτερόλεπτο	4	Κλιμακόγραμμα	Συντελεστής Η: 0.90
Belomestny & Siegel(2003)	Ταχύτητα σε Αυτοκινητόδρομο	Λεπτό	1	Κλιμακόγραμμα	Συντελεστής Η: 0.83
Shang et al.(2006)	Ταχύτητα σε Αυτοκινητόδρομο	Λεπτό	3.5	Κλιμακόγραμμα	Συντελεστής Η: 0.84
Skagerstam & Hansen(2006)	Ήχο από τα οχήματα	Λεπτό	3.5	Wavelet Method	Συντελεστής Η: 0.50 στις μεγάλες κλίμακες

Στο πλαίσιο της αναζήτησης μας για τα κυκλοφοριακά δόθηκε σημασία και σε επιστημονικές εργασίες για βραχυπρόθεσμες χρονοσειρές της κυκλοφορίας. Οι Vlahogianni et al. (2006) μελέτησαν βραχυπρόθεσμες χρονοσειρές με στόχο την αναζήτηση των στατιστικών χαρακτηριστικών τους. Παρατηρείται μεγαλύτερη δυσκολία στην μοντελοποίηση των χρονοσειρών καθώς οι βραχυπρόθεσμες χρονοσειρές έχουν πιο έντονες διακυμάνσεις και έχουν πολλές ακραίες τιμές που είναι δύσκολο να προβλεφθούν. Κατέληξαν ότι είναι ιδιαίτερα δύσκολο να προσομοιωθούν οι συμπεριφορές ταλάντωσης της κυκλοφορίας και οι απότομες μεταβάσεις στις ακραίες τιμές. Έτσι φαίνονται πιο καθαρά οι διαφορές μεταξύ προσομοίωσης βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων χρονοσειρών που καθιστούν την προσομοίωση βραχυπρόθεσμων χρονοσειρών αισθητά δυσκολότερη από αυτήν των μακροπρόθεσμων.

2.2 Συμπεράσματα

Δεν έχουν γίνει πολλές επιστημονικές εργασίες στη στοχαστική ανάλυση με έμφαση στη μακροπρόθεσμη εμμονή στα κυκλοφοριακά συγκριτικά με τα άλλα πεδία επιστημών. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο άνω όριο χωρητικότητας του δρόμου που δεν επιτρέπει την μια ανοδική τάση π.χ. ταχυτήτων για μεγάλο διάστημα. Αντίστοιχα έχει και κάτω όριο που είναι η συμφόρηση και η μηδενική ταχύτητα κάτι βέβαια που εμφανίζεται και στη βροχή (μηδενικές τιμές όταν δεν βρέχει). Τα παραπάνω καθιστούν δύσκολη και απρόβλεπτη την διαχείριση της κυκλοφορίας. Για αυτό στη βιβλιογραφία παρουσιάζονται απόπειρες εύρεσης του μοντέλου που να ικανοποιεί τη δομή αυτοσυσχέτισης αλλά χωρίς να ικανοποιούν όλες τις κλίμακες. Πιο συγκεκριμένα, βρίσκεται ένας υψηλός συντελεστής Hurst ίσος με 0.83 που αγνοεί τις πολύ μικρές και τις μεγάλες κλίμακες (Belomestny and Siegel 2003) κάτι που κάνει το μοντέλο να εμφανίζεται ισχυρά μεροληπτικό. Στην άλλη περίπτωση εμφανίζεται πληροφορία για τις μεγάλες κλίμακες όπου ο συντελεστής προκύπτει ίσος με 0.5 δηλαδή λευκός θόρυβος που δεν ικανοποιεί τις μικρότερες κλίμακες. Συνεπώς παρατηρείται κενό στη βιβλιογραφία όσο αφορά την μελέτη όλης της δομής αυτοσυσχέτισης της αλλά και εύρεσης ενός συγκεκριμένου μοντέλου για τη διαχείριση της κυκλοφορίας, δηλαδή ολιστική θεώρηση του φαινομένου με διερεύνηση της δομής αυτοσυσχέτισης αλλά και της κατανομής της χρονοσειράς.

3 Μεθοδολογική προσέγγιση

Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται το πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας βασίζεται στη θεωρία των στοχαστικών ανελίξεων και επικεντρώνεται στη διερεύνηση της στασιμότητας των χρονοσειρών κυκλοφορίας σε συνθήκες μη διακοπτόμενης ροής. Πιο συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της έρευνας διερευνώνται τα ακόλουθα:

1. Οι στοχαστικές αναλύσεις που χρησιμοποιούνται στα φυσικά φαινόμενα μπορούν να εφαρμοστούν και στα κυκλοφοριακά δίκτυα;

2. Ποιές είναι οι ομοιότητες και διαφορές που εμφανίζουν οι χρονοσειρές των κυκλοφοριακών (πενταλέπτων, ωριαίες, ημερήσιες) μεταξύ τους αλλά και σε σύγκριση με αυτές των φυσικών φαινομένων;

3. Μπορεί να προκύψει ένα αποτελεσματικό μοντέλο, που περιγράφει τις ιδιότητες της χρονοσειράς ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε πραγματικές συνθήκες για τη διαχείριση της κυκλοφορίας;

Μια προσέγγιση που διερευνά τα στατιστικά χαρακτηριστικά της μακροχρόνιας μνήμης χρονοσειρών είναι αρκετά διαδεδομένη στην ανάλυση κλιματικών χρονοσειρών (Βροχή, Αέρας, Θερμοκρασία) κι αφορά στη μακροπρόθεσμη ανάλυση των δεδομένων αυτών (άνω των 20 ετών). Έχει εξαιρετικό ενδιαφέρον η διερεύνηση της δυνατότητας εφαρμογής τα ανάλυσης αυτής σε κυκλοφοριακά δεδομένα. Καθώς παρατηρήθηκαν σημαντικές ομοιότητες μεταξύ των χρονοσειρών κυκλοφορίας με αυτές της βροχής-κυρίως- και του ανέμου- δευτερευόντως-. Κάποιες από αυτές τις ομοιότητες, που παρατηρήθηκαν πριν ακόμα να έχει προχωρήσει η ανάλυση, είναι:

Οι χρονοσειρές της κυκλοφορίας (ταχύτητα, ποσοστό κατάληψης και ένταση της κυκλοφορίας) εμφανίζουν αρκετές μηδενικές τιμές σε περίπτωση κυκλοφοριακής συμφόρησης κάτι που συμβαίνει και στις χρονοσειρές της βροχής για τις ώρες και μέρες που δεν βρέχει. Αντίστοιχα και ο άνεμος εμφανίζει παρόμοιες κι έντονες αυξομειώσεις.

Οι χρονοσειρές και των δυο φαινομένων εμφανίζουν παράλληλα διαλείπουσα και μακροπρόθεσμη συμπεριφορά δηλαδή συμπεριφορά Fractal και Hurst συμπεριφορά αντίστοιχα (Koutsoyiannis 2016). Αυτή η ισχυρή αυτό-ομοιότητα που εμφανίζεται στα κυκλοφοριακά είναι ένα ακόμη κοινό χαρακτηριστικό με τις χρονοσειρές της βροχής και του ανέμου.

Συνεπώς, ως αντικείμενο μελέτης προέκυψε ανάλυση μακροπρόθεσμων (long-term) χρονοσειρών ταχύτητας (speed), έντασης της κυκλοφορίας (volume), ποσοστού κατάληψης (occupancy). Στον όρο «μακροπρόθεσμη χρονοσειρά» παρατηρείται η πρώτη διαφοροποίηση στη προσέγγιση μεταξύ της στοχαστικής ανάλυσης στα φυσικά φαινόμενα και τα κυκλοφοριακά. Στην πρώτη ανάλυση μακροπρόθεσμο θεωρείται μια ανάλυση άνω των 20 ετών. Σε αντίθεση με την κίνηση στους δρόμους όπου ένα εικοσιτετράωρο θεωρείται ένας ολοκληρωμένος κύκλος με υψηλή και χαμηλή ζήτηση.

Έτσι η ανάλυση που θα γίνει αποτελεί συνδυασμό των δυο αυτών προσεγγίσεων. Οι χρονοσειρές που θα μελετηθούν θα είναι για 2 μήνες (15-9 μέχρι 15-11) στο Portland των Ηνωμένων Πολιτειών όπου βρέθηκαν τα πιο πλήρη στοιχεία για κίνηση σε αυτοκινητόδρομο και μια δεύτερη μικρότερη σε έκταση ανάλυση για το σταθμό Πολυμύλου στην Εγνατία Οδό για 5 έτη όπου δίνονται ο αριθμός των οχημάτων που πέρασαν σε κάθε μήνα.

3.1 Περιγραφή της Διαδικασίας

Σκοπός της ανάλυσης είναι να περιγραφεί με ένα μοντέλο η μακροχρόνια εξέλιξη της κυκλοφορίας σε μη διακοπτόμενες συνθήκες ροής, ώστε να γίνει μια μελλοντική διαχείριση της κυκλοφορίας. Τα βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει το μοντέλο είναι τα ακόλουθα:

- Να ικανοποιεί τη δομή αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς
- Να αντιπροσωπεύει την κατανομή της χρονοσειράς

3.1.1 Δομή Αυτοσυσχέτισης

Η δομή αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς μελετήθηκε με το κλιμακόγραμμα (climacogram) που εισήγαγε ο Koutsoyiannis (2000). Δηλαδή τη διασπορά του μέσου όρου του χρόνου σε σύγκριση με τη μέση κλίμακα του χρόνου. Και αυτό γιατί το κλασικό κλιμακόγραμμα φαίνεται να έχει μικρό σφάλμα καθώς αποδίδει πάντα θετική αναμενόμενη τιμή, εμφανίζει καλή συμπεριφορά και είναι κοντά στην πιο πιθανή πραγματική τιμή του. Τα παραπάνω είναι σημαντικά πλεονεκτήματα στο χτίσιμο ενός στοχαστικού μοντέλου. Σε αντίθεση με την αυτοσυνδιασπορά (autocovariance) και το φάσμα-ισχύος (power spectrum) που δεν έχουν τέτοιες ιδιότητες. Συνεπώς, όταν χτίζεται ένα στοχαστικό μοντέλο είναι ωφέλιμο να ξεκινήσει η ανάλυση από το κλιμακόγραμμα παρά π.χ από την αυτοσυνδιασπορά και το φάσμα-ισχύος (Dimitriadis and Koutsoyiannis 2015). Επιπλέον είναι χρήσιμο να απαντήσουμε στο ερώτημα του τί είναι το κλιμακόγραμμα καθώς είναι μια νέα εκτιμήτρια. Αποτελεί τη διασπορά του μέσου όρου του χρόνου σε σύγκριση με τη μέση κλίμακα του χρόνου.

Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκαν τα κλιμακογράμματα των πενταλέπτων ταχύτητας, ένταση της κυκλοφορίας και ποσοστού κατάληψης για τέσσερις μετρητές κυκλοφορίας και παρατηρήθηκε ότι και τα τρία παρουσιάζουν ίδια συμπεριφορά. Δηλαδή κοντά στη συμπεριφορά Μαρκόφ. Που σημαίνει ότι μέχρι την κλίμακα του 24ώρου περίπου εμφανίζουν μια ισχυρή αυτοσυσχέτιση η οποία μετά εμφανίζεται να πέφτει απότομα κι να χάνεται. Έτσι επιλέχθηκε το μοντέλο GHK (Generalized Hurst Kolmogorov) (Koutsoyiannis 2016) με τα παρακάτω βασικά κριτήρια:

Αυτού του είδους η μεγιστοποίηση της εντροπίας σε μικρές κλίμακες στις φυσικές διεργασίες (κυρίως) δείχνουν Μαρκοβιανή συμπεριφορά

Το μοντέλο GHK αποτελεί ένα απλό κι εύχρηστο μοντέλο δυο παραμέτρων.

Το τρίτο και βασικότερο κριτήριο είναι η μορφή που εμφανίζει το κλιμακόγραμμα και δείχνει το μοντέλο που θα ακολουθηθεί (βλέπε εικόνα με το διάγραμμα)

Αφού προσδιορίσουμε τις δύο παραμέτρους η και λ βάση του αρχικού κλιμακογράμματος κι μετά από κατάλληλες δοκιμές έχουμε το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί.

Τα κλιμακογράμματα δημιουργήθηκαν και για τις χρονοσειρές με ωριαία και ημερήσια κλίμακα αλλά δεν παρατηρήθηκαν διαφορές όπως είναι λογικό καθώς από τη φύση του το κλιμακόγραμμα υπολογίζει τις διασπορές της χρονοσειράς με αυξανόμενο βήμα κλίμακας.

3.1.2 Κατανομή της Χρονοσειράς

Το δεύτερο στοιχείο πέραν της δομής αυτοσυσχέτισης είναι να διατηρηθεί η κατανομή της χρονοσειράς. Η κανονική κατανομή είναι πολύ βολική για να χτιστεί ένα στοχαστικό μοντέλο είτε για πρόβλεψη είτε για προσομοίωση. Για αυτό και ελέγξαμε με το Q-Q plot πόσο η χρονοσειρά μας προσεγγίζει την κανονική κατανομή. Παρατηρήθηκε μια ικανοποιητική σύγκλιση στο κύριο σώμα της κατανομής αλλά ισχυρή απόκλιση στις ουρές. Έτσι εφαρμόστηκε μια «κανονική» μεταμόρφωση $Z=g(x)$ στην μεταβλητή x που ενδιαφέρει αντί να χρησιμοποιηθεί μια μη-κανονική κατανομή (Koutsoyiannis et al. 2016).

Σε αυτή την περίπτωση το Z θα έχει κατανομή που είναι περίπου σαν

$$f(x)=\exp(-\lambda_0-\lambda_1 x-\lambda_2 x^2) \quad (1)$$

(μεγιστοποίηση της εντροπίας), ενώ το X έχει κατανομή που μπορεί να προσεγγίσει από:

$$f(x)=[1+k(\lambda_0+\lambda_1 x+\lambda_2 x^2)]^{-1-1/k} \quad (2)$$

Έτσι έχουμε τον παρακάτω μετασχηματισμό κανονικοποίησης:

$$Z = g(X) - g(0); g(x) = c + \operatorname{sgn}(x - c) \lambda \sqrt{\left(1 + \frac{1}{k}\right) \ln \left[1 + k \left(\frac{x-c}{\lambda}\right)^2\right]} \quad (3)$$

Αυτή η σχέση περιέχει μια αδιάστατη παράμετρο καθορισμού της ουράς k , περιέχει μια παράμετρο κλίμακας λ στις ίδιες διαστάσεις με το x η οποία επιτρέπει τη φυσική συνοχή της μεταμόρφωσης κι μια παράμετρο μετάφρασης c πάλι με τις ίδιες διαστάσεις με το x .

Με τη βοήθεια αυτού του μετασχηματισμού είναι δυνατό να παραχθεί μια συνθετική χρονοσειρά πρόβλεψης με κανονική κατανομή και βάση αυτών των τριών παραμέτρων να προκύψει η πραγματική συνθετική χρονοσειρά πρόβλεψης που ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

Όπως είναι κατανοήτο με το Q-Q plot ελέγχεται η εφαρμογή της πραγματικής χρονοσειράς στην κανονική κατανομή. Αυτό σημαίνει ότι διατηρούνται τα βασικά περιθώρια χαρακτηριστικά της κατανομής δηλαδή μέση τιμή, τυπική απόκλιση, ασυμμετρία και κύρτωση. Καθώς στην αρχική πρώτη προσέγγιση μπορεί να διατηρήθηκε ικανοποιητικά μόνο η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση όμως με τον μετασχηματισμό των τριών παραμέτρων διατηρήθηκαν και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον από την άποψη προσέγγισης της κατανομής παρουσιάζει η αλλαγή της κλίμακας δηλαδή τα 5λέπτα συγκριτικά με τις ωριαίες και ημερήσιες χρονοσειρές (time revolution). Πιο συγκεκριμένα, στα ωριαία δεδομένα η προσέγγιση της πραγματικής χρονοσειράς στην κατανομή ήταν πολύ καλύτερη χωρίς να είναι κι πάλι ικανοποιητική κάτι που βελτιωνόταν και προσέγγιζε πάρα πολύ την «κανονικότητα» με τη χρήση του μετασχηματισμού των 3 παραμέτρων. Επίσης, στα ημερήσια δεδομένα η χρονοσειρά ήταν πολύ κοντά στην κανονική κατανομή εξ αρχής κι δεν χρειαζόταν και δεν βελτιωνόταν με τη χρήση του μετασχηματισμού. Συνεπώς βλέπουμε ότι όσο ομαδοποιούνται τα δεδομένα, από πεντάλεπτα σε ωριαία και από ωριαία σε ημερήσια, παρατηρείται να κανονικοποιείται η μορφή της κατανομής. Κάτι που είναι εύλογο καθώς όπως διατυπώνεται και στο Κεντρικό Οριακό Θεώρημα, το άθροισμα ενός μεγάλου αριθμού ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών ακολουθεί μία κατανομή η οποία προσεγγίζει την κανονική κατανομή, έτσι και στη δική μας περίπτωση η ώρα αποτελεί άθροισμα του πενταλέπτου κι αντίστοιχα η ημέρα άθροισμα της ώρας.

Σε αυτό το σημείο δημιουργήθηκε η ανάγκη περαιτέρω προσέγγισης στην κανονική κατανομή για τη χρονοσειρά του 5λέπτου καθώς τα ωριαία δεδομένα προσέγγιζαν ακόμα καλύτερα την κανονική κατανομή. Έτσι αποφασίστηκε να εισαχθεί μια τέταρτη παράμετρος στον αρχικό μετασχηματισμό κι έτσι έχουμε την παρακάτω βελτιωμένη κανονικοποιημένη μεταμόρφωση:

$$Z = g(X) - g(0); g(x) = c + \text{sgn}(x - c) \lambda \sqrt{\left(1 + \frac{1}{\kappa}\right) \ln \left[1 + k \left(\frac{x-c}{\lambda}\right)^\mu\right]} \quad (4)$$

Με την τέταρτη παράμετρο μ που εισήγαμε φαίνεται να προσεγγίζεται ακόμα περισσότερο η κανονική κατανομή κι να μικραίνει ακόμα περισσότερο η απόκλιση μεταξύ αναμενόμενης κανονικής κατανομής και μεταμορφωμένης πραγματικής χρονοσειράς.

Οι έλεγχοι και η προσέγγιση αυτή έγινε σε περιβάλλον excel και με τη χρήση solver. Προσπαθώντας να μειωθεί η απόκλιση μεταξύ αναμενόμενης και μεταμορφωμένης χρονοσειράς. Για αυτό έγινε προσπάθεια να ποσοτικοποιηθεί αυτή η απόκλιση με τη χρήση της παρακάτω σχέσης:

$$\Sigma |E - T| \Sigma \left|1 - \frac{E}{T}\right| \Sigma \left|1 - \frac{T}{E}\right| \quad (5)$$

όπου T=True και E=Expected

Η σχέση αυτή παρατηρήθηκε ότι δίνει καλή εποπτεία του σφάλματος καθώς περιλαμβάνει την απόκλιση και στο κύριο σώμα της κατανομής αλλά και στις ουρές.

3.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

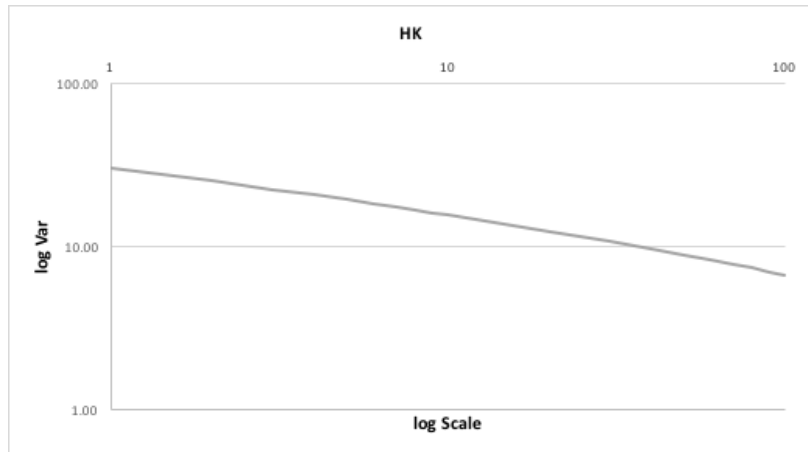
Στο κεφάλαιο της Βιβλιογραφικής ανασκόπησης αλλά και το τρέχον κεφάλαιο χρησιμοποιείται η έννοια της μακροπρόθεσμης εμμονής μέσω της εκτίμησης της παραμέτρου Hurst. Αυτός ο συντελεστής αποτελεί μια κλίμακα μέτρησης της μακροπρόθεσμης εμμονής. Οι διάφορες τιμές του συντελεστή υποδεικνύουν και μια άλλη συμπεριφορά της δομής αυτοσυσχέτισης. Πιο συγκεκριμένα:

- $0 \leq H \leq 0.5$: Το εύρος αυτών των τιμών δείχνουν αντι-εμμογή. Το ακριβώς αντίθετο της μακροπρόθεσμης εμμογής. Δηλαδή είναι σαν να καλύπτεται μικρότερη απόσταση από τον τυχαίο περίπατο (random walk). Αυτό σημαίνει ότι μια διαδικασία πτώσης είναι πιο πιθανό να δημιουργήσει μια διαδικασία με αυξητική τάση. Η αντι-εμμογή εμφανίζεται δύσκολα στις φυσικές διεργασίες
- $0.5 < H \leq 1$: Σε αυτή την περίπτωση έχουμε εμμογή. Δηλαδή σαν να καλύπτεται μεγαλύτερη απόσταση από τον τυχαίο περίπατο. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει πιο ισχυρή δομή αυτοσυσχέτισης. Ειδικότερα, οι πτωτικές διαδικασίες θα ακολουθούνται από πτωτικές διαδικασίες και αντίστοιχα οι αυξητικές. Βεβαίως όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή του συντελεστή Hurst τόσο πιο έντονη είναι η εμμογή της χρονοσειράς.
- $H = 0.5$: Σε αυτή την περίπτωση έχουμε ανέλιξη λευκού θόρυβου.

Στις επιστημονικές εργασίες που μελετήθηκαν στα πλαίσια της έρευνας αναφέρονται υψηλές τιμές του συντελεστή Hurst που οδηγούν σε μοντέλα Hurst-Kolmogorov με μακροπρόθεσμη εμμογή. Αυτά τα μοντέλα φαίνεται να ικανοποιούν τις μεσαίες και σχετικά μικρές κλίμακες, στις μεγάλες κλίμακες όμως φαίνεται τα μοντέλα να αποκλείουν πολύ από το ΗΚ. Αυτό δικαιολογείται λόγω της μεροληψίας του μοντέλου αν και η απόκλιση εμφανίζεται μεγάλη. Συνεπώς προτείνεται και μια δεύτερη ανέλιξη Generalized Hurst-Kolmogorov για συντελεστή Hurst ίσο με 0.5 που οδηγεί σε ένα μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης τάξης 1.

Η επιλογή του μοντέλου που θα ικανοποιεί τη δομή αυτοσυσχέτισης έγινε μέσω του κλιμακογράμματος. Η αναμενόμενη τιμή της εκτιμήτριας για το ΗΚ παρουσιάζεται παρακάτω (Κουτσογιάννης 2013):

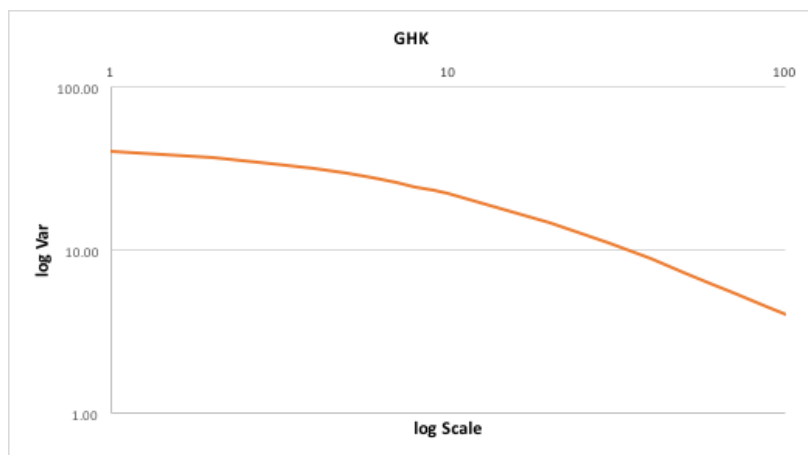
$$E \left[\hat{\gamma}(k) \right] = \frac{1 - \frac{\gamma(n)}{\gamma(k)}}{1 - \frac{k}{n}} \gamma(k) \text{ όπου } \gamma(k) = \frac{\lambda}{k^{2-2H}}, \gamma(n) = \frac{\lambda}{n^{2-2H}} \quad (6)$$



Διάγραμμα 3. 1 Θεωρητικό μοντέλο HK στο κλιμακόγραμμα

Στην περίπτωση αυτή φαίνεται ότι το μοντέλο αποτελείται από την παράμετρο λ και τον συντελεστή Hurst. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαφοροποίηση που υπάρχει χρησιμοποιώντας το μοντέλο GHK (Κουτσογιάννης 2013) :

$$E \left[\hat{\gamma}(\kappa) \right] = \frac{1 - \gamma(n)}{1 - \frac{\kappa}{n}} \gamma(\kappa) \text{ όπου } \gamma(\kappa) = \frac{\lambda}{\left(1 + \frac{\kappa}{q}\right)^{2-2H}}, \gamma(n) = \frac{\lambda}{\left(1 + \frac{n}{q}\right)^{2-2H}} \quad (7)$$



Διάγραμμα 3. 2 Θεωρητικό προσομοίωμα GHK με $H=0.5$ στο κλιμακόγραμμα

Η περίπτωση του μοντέλου GHK με συντελεστή Hurst ίσο με 0.5 οδηγεί σε Μαρκοβιανή διαδικασία που φαίνεται στο διάγραμμα 3.2. Οι παράμετροι που υπάρχουν στο μοντέλο είναι το q και το λ . Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζεται πολύ καθαρά η συμπεριφορά του μοντέλου Μαρκόφ. Στην αρχή φαίνεται να έχει ισχυρή δομή αυτοσυσχέτισης και υψηλό συντελεστή Hurst που στις μεγάλες κλίμακες μετατρέπεται σιγά σιγά σε 0.5 δηλαδή λευκό θόρυβο.

Το μοντέλο HK ικανοποιεί τη μακροπρόθεσμη εμμονή που χαρακτηρίζει τη χρονοσειρά. Από την άλλη το μοντέλο GHK με συντελεστή Hurst ίσο με 0.5 είναι ένα μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης τάξης 1 το οποίο δείχνει μια εμμονή στις αρχικές κλίμακες και στις μεγάλες οδηγεί σε Γκαουσιανό θόρυβο. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια πλεονεκτήματα του μοντέλου αυτοπαλινδρόμησης τάξης 1 σε σχέση με το Hurst-Kolmogorov:

- Τα Μαρκοβιανά μοντέλα έχουν φυσική σημασία σε αντίθεση με τα HK που έχουν άπειρη διασπορά.
- Το μοντέλο HK πάει στο άπειρο που αυτό δεν έχει ανταπόκριση στην πραγματική ζωή.
- Μπορεί να προσεγγίσει τη συσχέτιση στις μικρές κλίμακες. Λόγω του ότι όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.2 καμπυλώνεται έτσι την ισχυρή αυτοσυσχέτιση των μικρών κλιμάκων την περιλαμβάνει. Αντίθετα, το HK αντικατοπτρίζεται στο κλιμακόγραμμα με ευθεία γραμμή που δεν είναι δυνατό να συμπεριλάβει την ισχυρή αυτοσυσχέτιση των μικρών κλιμάκων.
- Το μοντέλο Μαρκόφ μπορεί και προκύπτει από τη μεγιστοποίηση της εντροπίας (Koutsoyiannis 2015).

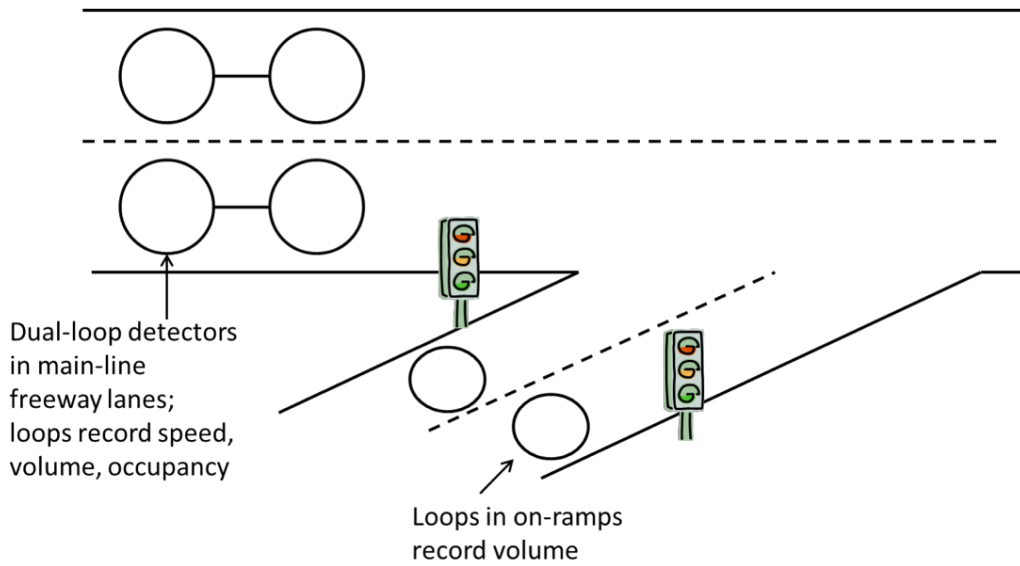
4 Ανάλυση και αποτελέσματα

4.1 Βάση δεδομένων

Για τη διερεύνηση μακροπρόθεσμης εμμονής χρειάζονται δεδομένα με όσο δυνατόν μεγαλύτερο μήκος. Οι πρώτες απόπειρες εξεύρεσης δεδομένων έγιναν για την Ελλάδα αλλά οι χρονοσειρές ήταν είτε είχαν πολύ μικρό μήκος είτε ήταν για συνθήκες μη-διακοπτόμενης ροής που είναι πολύ δύσκολο να αναλυθούν. Η βάση δεδομένων με ελεύθερη πρόσβαση και ικανοποιητικά στοιχεία ήταν αυτή του Υπουργείου Μεταφορών των Η.Π.Α. και το Τμήμα Ομοσπονδιακής Διοίκησης Αυτοκινητοδρόμων (U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration). Επίσης, κάποια στοιχεία ελήφθησαν από την Ελλάδα και ήταν από τα διόδια Πολυμύλου στην Εγνατία Οδό.

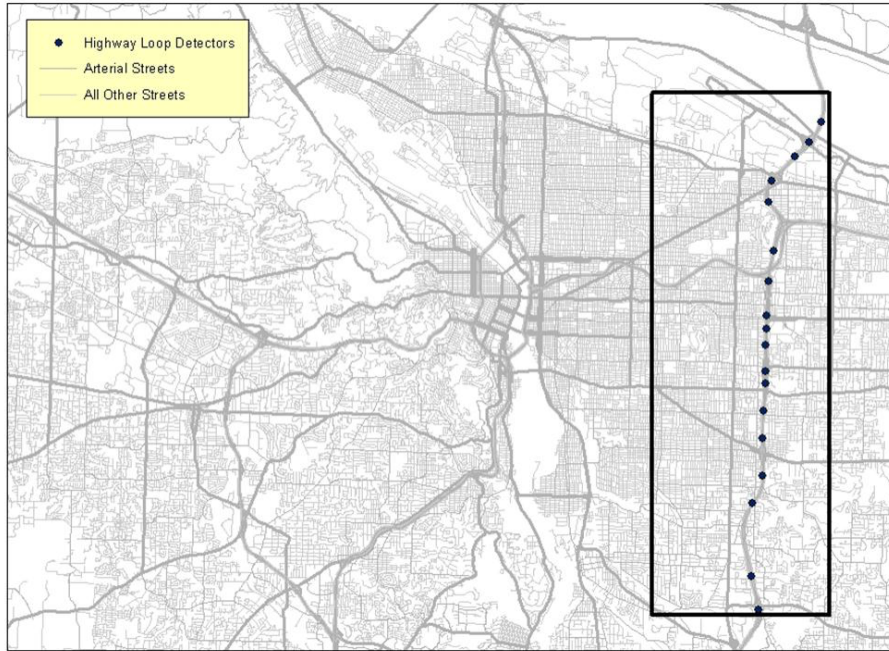
4.1.1 Δεδομένα κυκλοφορίας από το Portland, U.S.A.

Τα δεδομένα κυκλοφορίας συλλέχθηκαν από το τον αυτοκινητόδρομο I-205 στο Πόρτλαντ των Η.Π.Α. χρησιμοποιώντας ειδικούς ανιχνευτές βρόχων (loop detectors). Τα δεδομένα από τους ανιχνευτές βρόχων αποτελούνται από δεδομένα ταχύτητας 20 δευτερολέπτων, τον όγκο (volume) και το ποσοστό κατάληψης (occupancy) που συλλέγονται από ανιχνευτές διπλών βρόχων που έχουν εγκατασταθεί στις κύριες λωρίδες και πάνω στις ράμπες για τους αυτοκινητόδρομους στην περιοχή του Πόρτλαντ. Το Σχήμα 1 απεικονίζει τη φυσική διάταξη των εγκαταστάσεων του ανιχνευτή. Οι περισσότεροι ανιχνευτές τοποθετούνται κοντά σε ράμπες. Οι ανιχνευτές έδιναν την ταχύτητα, το όγκο και το ποσοστό κατάληψης του δρόμου σε πεντάλεπτα για δύο μήνες από 15 Σεπτεμβρίου 2011 μέχρι 15 Νοεμβρίου 2011.



Σχήμα 4. 1 Φυσική Διάταξη Ανιχνευτών (Πηγή: Federal Highway Administration)

Αυτό το σύνολο μετρητών καλύπτει ένα τμήμα 10.09 μιλίων (16.25 χιλιόμετρα) αυτοκινητοδρόμου I-205 και πιο συγκεκριμένα από τον κόμβο του Sunnyside Road στη μιλιομετρική θέση 14.32 μέχρι την 24.41.



Σχήμα 4. 2 Θέσεις όλων των Ανιχνευτών στον Αυτοκινητόδρομο (Πηγή: *Federal Highway Administration*)



Σχήμα 4. 3 Θέση του Αυτοκινητόδρομου I-205 (Πηγή: Google Maps).

Οι λωρίδες κυκλοφορίας είναι τέσσερις (βλέπε εικόνα)



Σχήμα 4. 4 Διάταξη του Αυτοκινητόδρομου I-205 (Πηγή: Google Maps).

4.1.2 Δεδομένα Διοδίων Πολυμύλου, Εγνατία Οδός.

Τα στοιχεία που συλλέχθηκαν από την Ελλάδα και ταυτόχρονα ήταν κι χρήσιμα για τη διερεύνηση της μακροπρόθεσμης εμμονής ήταν στα Διόδια Πολυμύλου στην Εγνατία Οδό (βλέπε σχήμα 4.5).



Σχήμα 4. 5 Θέση Διοδίων Πολύμυλου στην Εγνατία Οδό (Πηγή: Google Maps).

Τα στοιχεία των διοδίων ήταν μηνιαίες διελεύσεις για 5.5 χρόνια και συγκεκριμένα από τη λειτουργία των διοδίων τον Ιανουάριο του 2011 μέχρι τον Ιούνιο του 2016.

4.2 Αποτελέσματα

Με βάση τη χρονοσειρά των πενταλέπτων ταχύτητας, όγκου και ποσοστού κατάληψης αναλύθηκαν οι εξής χρονοσειρές :

- *Πεντάλεπτα ταχύτητας για δυο μήνες*
- *Πεντάλεπτα ταχύτητας για κάθε μήνα ξεχωριστά*
- *Πεντάλεπτα όγκου κυκλοφορίας για δυο μήνες*
- *Πεντάλεπτα ποσοστού κατάληψης για δυο μήνες*
- *Ωριαία ταχύτητα για δυο μήνες*

- Ωριαία ταχύτητα για κάθε μήνα ξεχωριστά
- Ημερήσια ταχύτητα για δυο μήνες
- Ημερήσια ταχύτητα για κάθε μήνα ξεχωριστά

4.2.1 Περιθώρια Χαρακτηριστικά

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν τα ευρήματα που προέκυψαν από την υπολογισμό των περιθωρίων χαρακτηριστικών της χρονοσειράς. Στον πρώτο πίνακα εμφανίζονται τα περιθώρια χαρακτηριστικά της χρονοσειράς των πενταλέπτων, ώρας και ημέρας ταχύτητας για 2 μήνες κι για τους τέσσερεις ανιχνευτές. Παρατηρείται η μέση τιμή να κυμαίνεται μεταξύ 56 και 62 μιλίων/ώρα δηλαδή από 90 μέχρι 100 χλμ/ώρα. Η μέση τιμή είναι εύλογη καθώς μιλάμε για έναν αυτοκινητόδρομο τεσσάρων λωρίδων μη διακοπτόμενης ροής και μικτή κυκλοφορία. Οι ταχύτητες βέβαια δεν θα μπορούσαν να είναι και πολύ μεγαλύτερες γιατί ο αυτοκινητόδρομος ναι μεν βρίσκεται εκτός του πυκνού αστικού ιστού αλλά είναι σε κατοικημένες περιοχές που με κίνηση. Η τυπική απόκλιση εμφανίζεται στα 6-7 μίλια/ώρα για τα πεντάλεπτα και μειώνεται καθώς αυξάνεται η κλίμακα. Πιο συγκεκριμένα, στην ημερήσια κλίμακα φτάνει στα 1-2 μίλια/ώρα. Αυτό είναι ένα αναμενόμενο συμπέρασμα καθώς όσο αυξάνουμε την κλίμακα παίρνουμε κατ' ουσίαν μέσους όρους των προηγούμενων κλιμάκων κάτι που κρατάει σταθερή τη μέση τιμή αλλά μειώνει τις αποκλίσεις μεταξύ των τιμών άρα την τυπική απόκλιση.

Η ασυμμετρία εμφανίζεται αρνητική. Αρνητική συμμετρία σημαίνει ότι οι περισσότερες παρατηρήσεις, όπως η διάμεσος και η μέση τιμή, βρίσκονται αριστερά της κορυφή. Η αρνητική συμμετρία αυξάνεται (τείνει προς το μηδέν) καθώς αυξάνονται οι κλίμακες. Τούτο εξηγείται αφού με την αύξηση της κλίμακας τα πιο ακραία χαρακτηριστικά αμβλύνονται. Συνεπώς η ασυμμετρία μειώνεται.

Όσο αφορά την κύρτωση δεν εμφανίζει την ίδια συμπεριφορά με τα άλλα τρία χαρακτηριστικά. Η κανονική κατανομή εμφανίζει κύρτωση ίση με 3 άρα οι κατανομές με συντελεστή κύρτωσης μεγαλύτερο του 3 έχουν θετική κυρτότητα και λέγονται λεπτόκυρτες

ενώ οι κατανομές με συντελεστή κύρτωσης μικρότερο του 3 έχουν αρνητική κύρτωση και λέγονται πλατύκυρτες. Μια κατανομή η οποία έχει σχετικά μεγάλη μέγιστη συχνότητα (κορυφή) και επομένως μεγάλη συγκέντρωση τιμών γύρω από το μέσο λέγεται λεπτόκυρτη (leptokurtic), ενώ αν η μέγιστη συχνότητα της είναι σχετικά μικρή λέγεται πλατύκυρτη (platykurtic). Κατανομές που προσεγγίζονται από την κανονική κατανομή λέγονται μεσόκυρτες (mesokurtic).

Πίνακας 4. 1 Περιθώρια Χαρακτηριστικά Ταχύτητας για δυο μήνες

Χρονική Κλίμακα	Ανιχνευτής	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Ασυμμετρία	Κύρτωση
Πεντάλεπτη	1345	61,43	7,29	-3,02	19,52
	1387	56,53	7,05	-4,85	26,02
	1386	58,93	6,61	-5,28	31,47
	1379	57,78	6,73	-5,27	32,70
Ωριαία	1345	61,44	5,24	-5,52	37,60
	1387	56,53	6,11	-4,95	28,03
	1386	58,96	5,55	-5,80	38,22
	1379	57,78	5,62	-5,52	35,07
Ημερήσια	1345	61,44	1,52	-1,53	2,30
	1387	56,53	1,71	-0,80	1,43
	1386	58,96	1,53	-1,20	2,42
	1379	57,78	1,56	-1,33	2,31

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι ταχύτητες των πενταλέπτων ταχύτητας κι για τις τρεις κλίμακες για κάθε μήνα ξεχωριστά αυτή τη φορά.

Πίνακας 4. 2 Περιθώρια Χαρακτηριστικά Ταχύτητας για κάθε μήνα ξεχωριστά

Χρονική Κλίμακα	Ανιχνευτής	Μήνας	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Ασυμμετρία	Κύρτωση
Πεντάλεπτη	1345	1ος	61.46	7.03	-2.92	19.91
		2ος	61.40	7.52	-3.08	19.09
	1387	1ος	56.33	7.15	-4.67	23.96
	1386	1ος	58.85	6.47	-5.06	28.40
		2ος	58.98	6.70	-5.48	33.49
	1379	1ος	57.78	6.43	-5.25	32.71
2ος		57.75	7.05	-5.22	31.19	
Ωριαία	1345	1ος	61.45	4.77	-5.17	34.80
		2ος	61.41	5.55	-5.46	35.41
	1387	1ος	56.45	6.43	-4.59	23.73
	1386	1ος	58.84	5.79	-5.30	30.61
		2ος	58.99	5.78	-5.74	36.97
	1379	1ος	57.83	5.29	-5.57	35.50
2ος		57.78	5.85	-5.63	36.27	
Ημερήσια	1345	1ος	61.45	1.28	-1.34	2.53
		2ος	61.41	1.63	-1.34	1.53
	1387	1ος	56.22	1.87	-0.81	0.79
	1386	1ος	58.75	1.70	-1.09	1.05
		2ος	58.99	1.84	-1.36	2.00
	1379	1ος	57.67	1.66	-1.46	2.54
2ος		57.78	1.73	-1.67	3.48	

Παρακάτω παρουσιάζονται τα περιθώρια χαρακτηριστικά του όγκου κυκλοφορίας (volume) δηλαδή ο αριθμός των οχημάτων που περνάνε από τη διατομή του ανιχνευτή. Έτσι η μέση τιμή κυμαίνεται μεταξύ 50 και 70 οχημάτων και η τυπική απόκλιση είναι από 37 μέχρι 45 αμάξια. Σε επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και η αθροιστική κατανομή του όγκου κυκλοφορίας. Η κατανομή του όγκου κυκλοφορίας εμφανίζεται συμμετρική καθώς ο συντελεστής ασυμμετρίας είναι κοντά στο μηδέν. Η κύρτωση είναι αρνητική κι μικρότερη του 3 (κανονικής κατανομής) αυτό δείχνει ότι είναι πλατύκυρτη όπως φαίνεται πολύ καθαρά στη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας.

Πίνακας 4. 3 Περιθώρια Χαρακτηριστικά Όγκου Κυκλοφορίας Πενταλέπτων για δυο μήνες

Ανιχνευτής	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Ασυμμετρία	Κύρτωση
1345	52.38	40.73	0.28	-1.07
1387	75.55	45.29	0.08	-1.10
1386	72.03	43.71	-0.16	-1.33
1379	63.25	37.77	0.10	-0.97

Αντίστοιχα παρουσιάζονται και τα περιθώρια χαρακτηριστικά του ποσοστού κατάληψης της κυκλοφορίας (occupancy). Ομοίως στο επόμενο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται οι περιθώριες κατανομές των χρονοσειρών του ποσοστού κατάληψης σε κλίμακα πενταλέπτου.

Τα περιθώρια χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω θα εξεταστούν σε συνδυασμό με το επόμενο υποκεφάλαιο των περιθώριων κατανομών ώστε να ελεγχθεί ποια κατανομή προσεγγίζει καλύτερα τις χρονοσειρές που αναλύθηκαν. Η μέση τιμή κυμαίνεται μεταξύ 3.5 και 7.5 και η τυπική απόκλιση είναι μεγάλη αντίστοιχα με τον όγκο κυκλοφορίας. Επίσης, η κατανομή είναι θετικά ασύμμετρη κι αυτό δείχνει ότι η κατανομή «γέρνει» προς τα αριστερά. Η κύρτωση είναι αισθητά μεγαλύτερη του 3 που σημαίνει ότι η κατανομή είναι λεπτόκυρτη

Πίνακας 4. 4 Περιθώρια Χαρακτηριστικά Ποσοστού Κατάληψης Πενταλέπτων για δυο μήνες

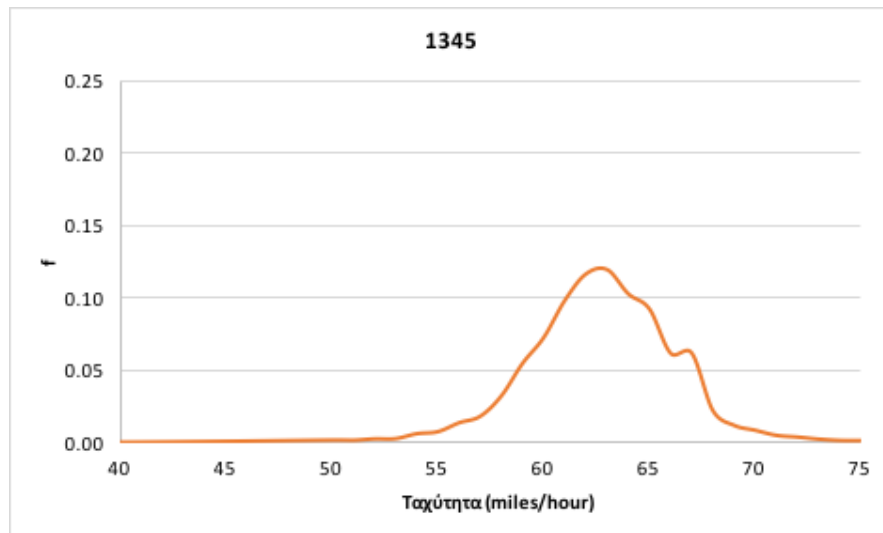
Ανίχνευτης	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Ασυμμετρία	Κύρτωση
1345	3.44	3.74	3.22	22.00
1387	7.68	6.29	2.21	8.97
1386	6.32	5.40	2.81	18.12
1379	5.94	5.62	4.08	27.96

4.2.2 Περιθώριες Κατανομές

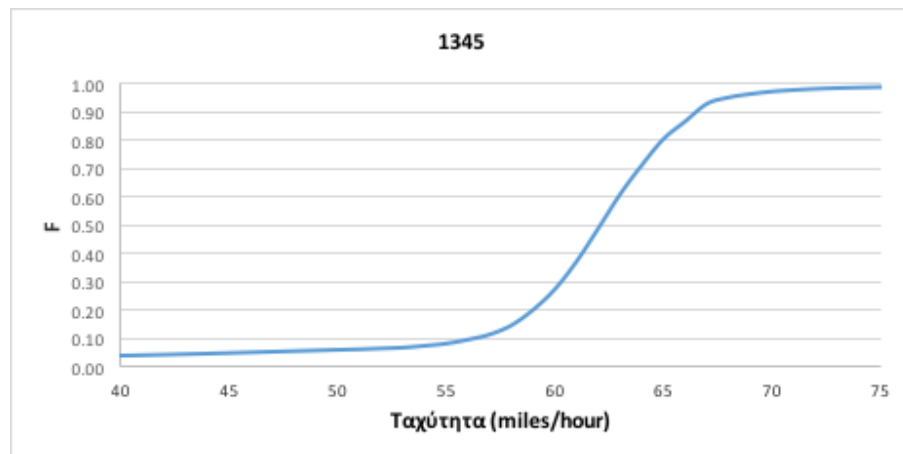
Στη συνέχεια του προηγούμενου υποκεφαλαίου, όπου εμφανίζονται τα περιθώρια χαρακτηριστικά σε μορφή πίνακα, σε αυτό το υποκεφάλαιο εμφανίζονται οι περιθώριες κατανομές των χρονοσειρών που έχουν αναλυθεί. Δηλαδή οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας και οι αθροιστικές κατανομές των χρονοσειρών. Τα διαγράμματα αυτά έρχονται να επιβεβαιώσουν αυτό που δείχνουν τα περιθώρια χαρακτηριστικά αλλά και να δώσουν μια καλύτερη εποπτεία στις εξεταζόμενες χρονοσειρές. Συνεπώς, το 1^ο και το 2^ο κεφάλαιο αλληλοσυμπληρώνονται και σχολιάζονται συνδυαστικά.

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και οι αθροιστικές κατανομές για τα πεντάλεπτα ταχυτήτων για κάθε μήνα ξεχωριστά αλλά και για το συνολικό δίμηνο για καθένα από τους τέσσερις ανιχνευτές.

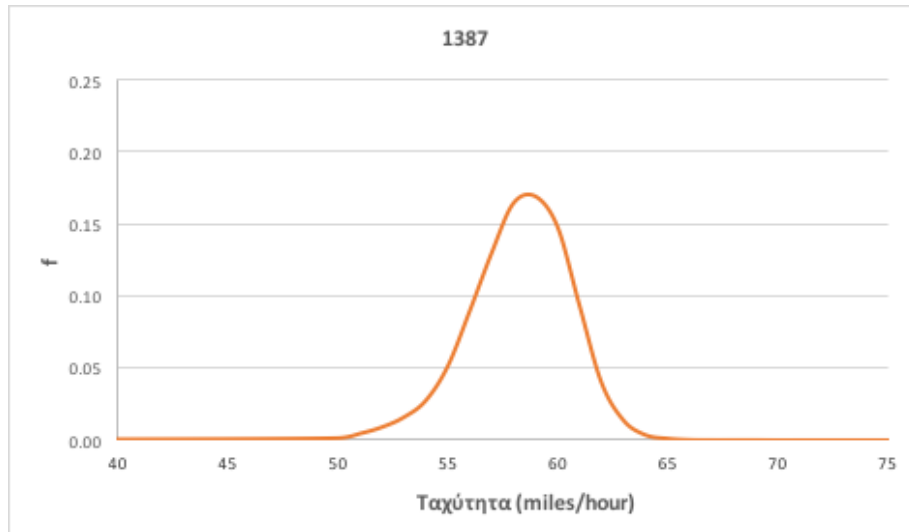
Παρατηρείται μια κάποια ομοιότητα με την κανονική κατανομή η οποία θα ελεγχθεί σε επόμενο κεφάλαιο με τον έλεγχο των Q-Q Plot. Η ανάλυση των χρονοσειρών του κάθε μήνα με το σύνολο του διμήνου δεν εμφανίζουν μεγάλη διαφορά κάτι που φαίνεται και στα περιθώρια χαρακτηριστικά αλλά και στη μορφή των διαγραμμάτων πυκνότητας πιθανότητας (f).



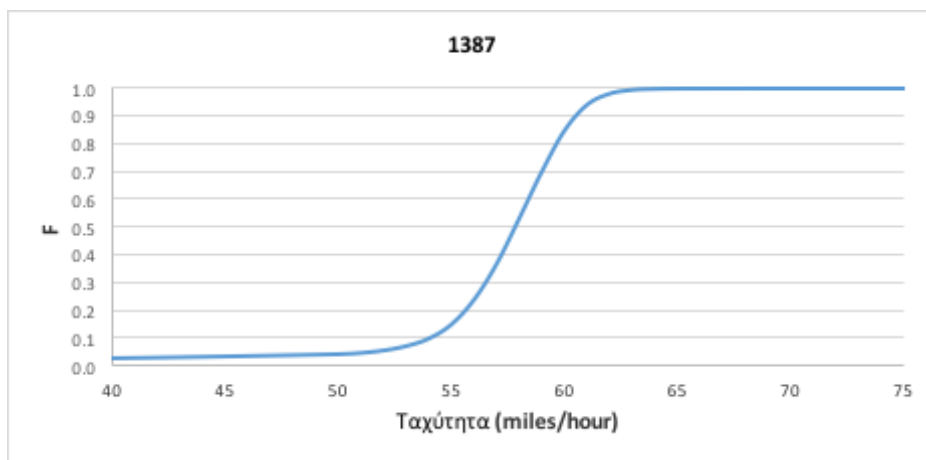
Διάγραμμα 4. 1 Κατανομή Πενταλέπτων Ταχύτητας Ανιχνευτή 1345 για δυο μήνες



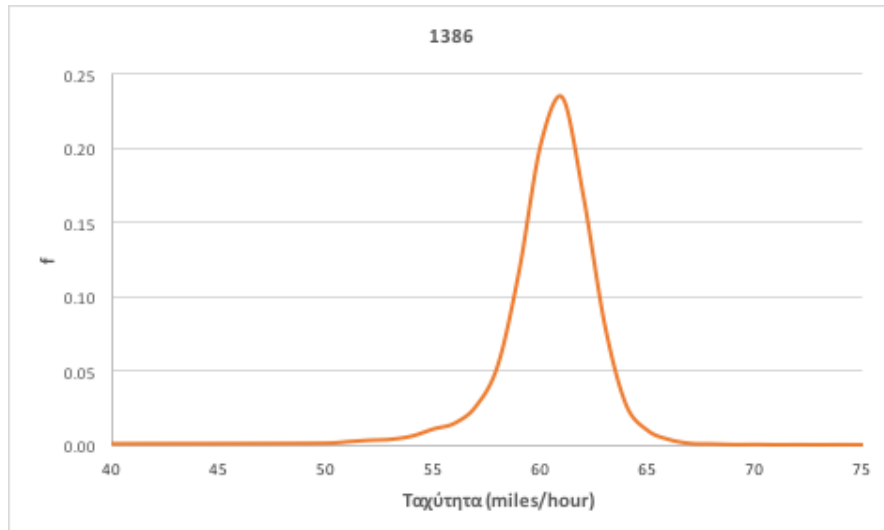
Διάγραμμα 4. 2 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με κλίμακα Πενταλέπτου (1379)



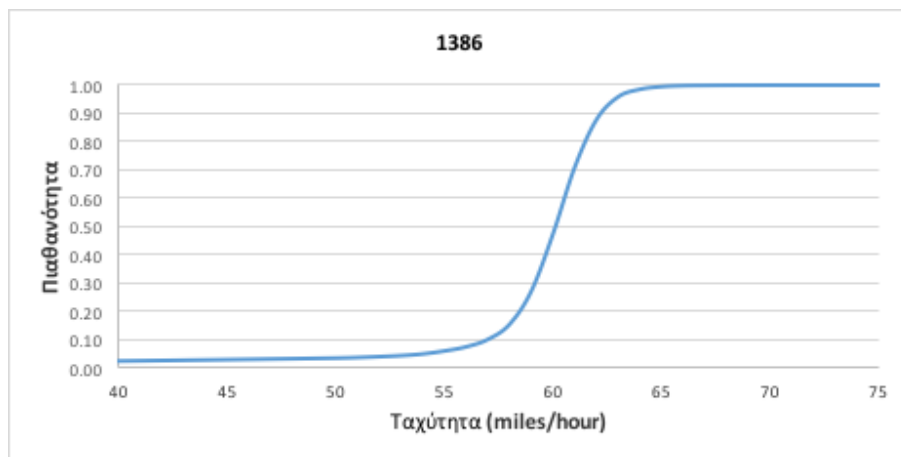
Διάγραμμα 4. 3 Κατανομή Πενταλέπτων Ταχύτητας Ανιχνευτή 1387 για δυο μήνες



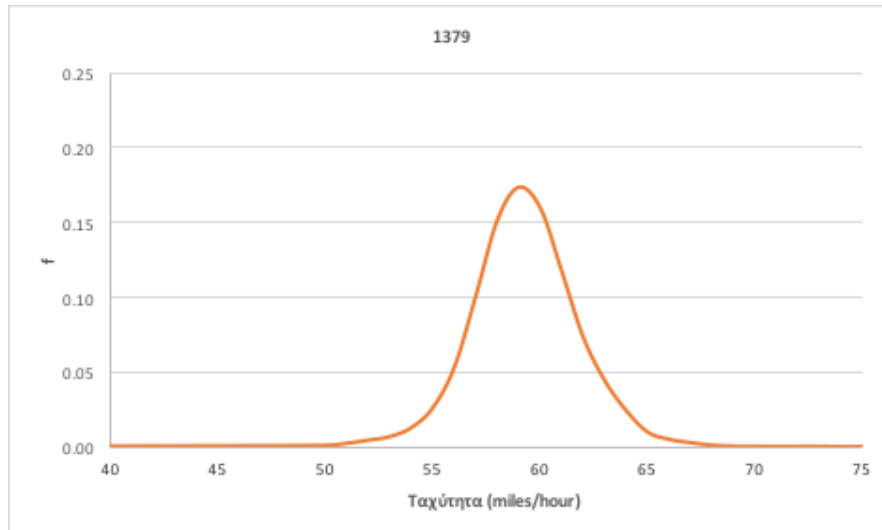
Διάγραμμα 4. 4 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με κλίμακα Πενταλέπτου (1387)



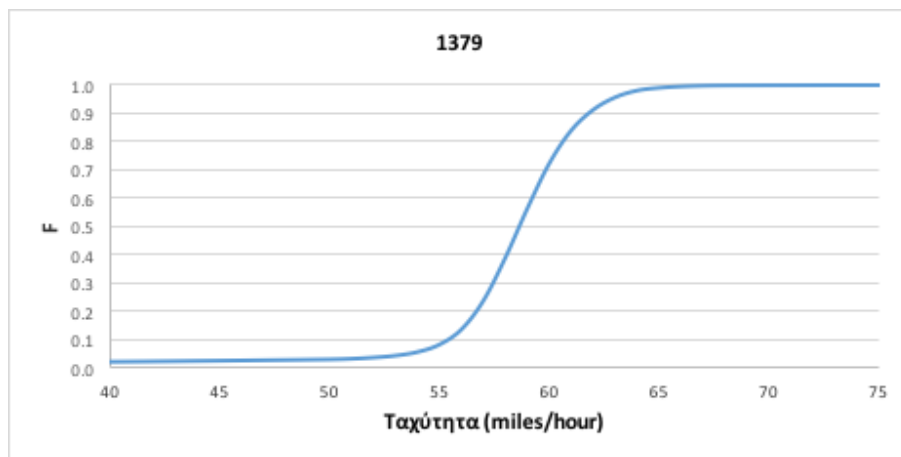
Διάγραμμα 4. 5 Κατανομή Πενταλέπτων Ταχύτητας Ανιχνευτή 1386 για δυο μήνες



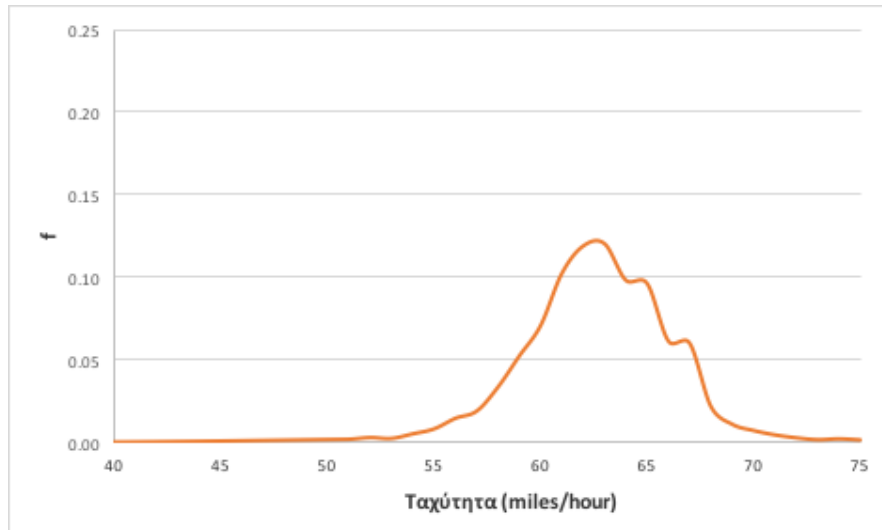
Διάγραμμα 4. 6 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με κλίμακα Πενταλέπτου (1386)



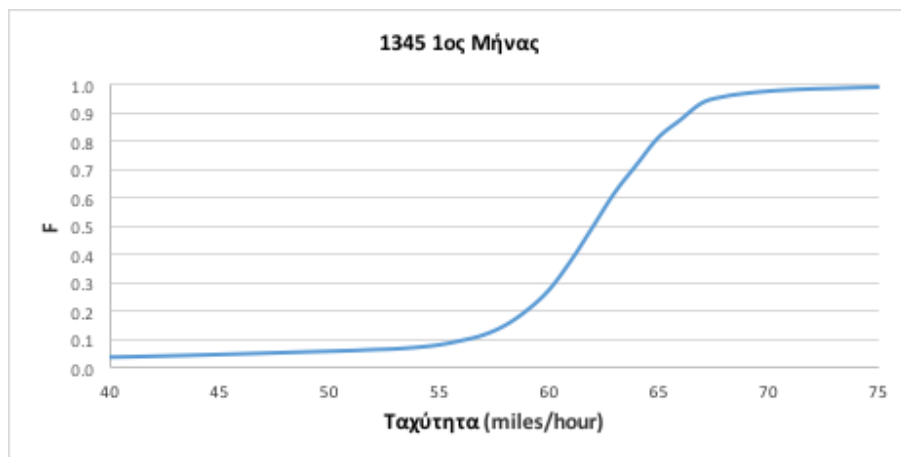
Διάγραμμα 4. 7 Κατανομή Πενταλέπτων Ταχύτητας Ανιχνευτή 1379 για δυο μήνες



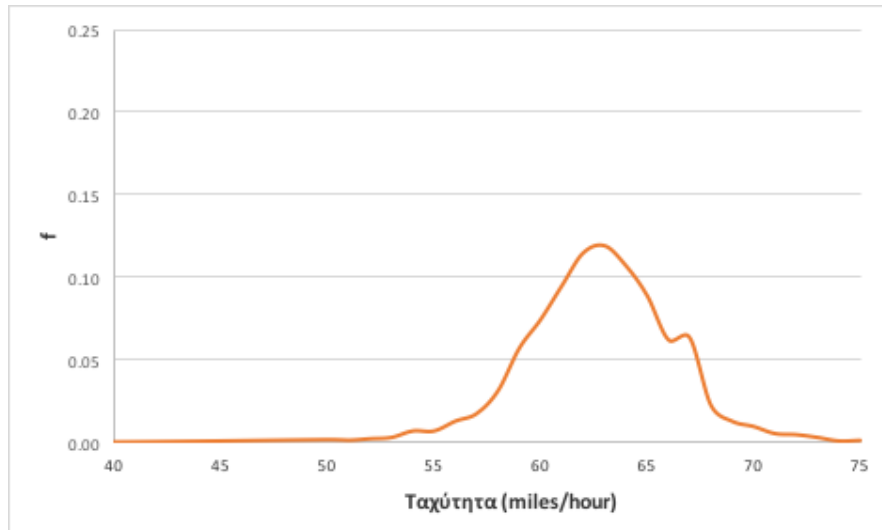
Διάγραμμα 4. 8 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με κλίμακα Πενταλέπτου (1379)



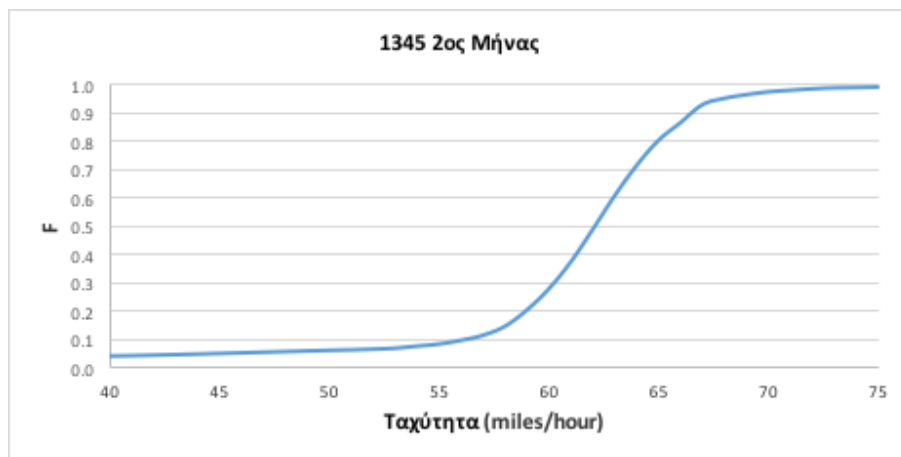
Διάγραμμα 4. 9 Κατανομή Πενταλέπτων Ταχύτητας Ανιχνευτή 1345 για το 1^ο μήνα



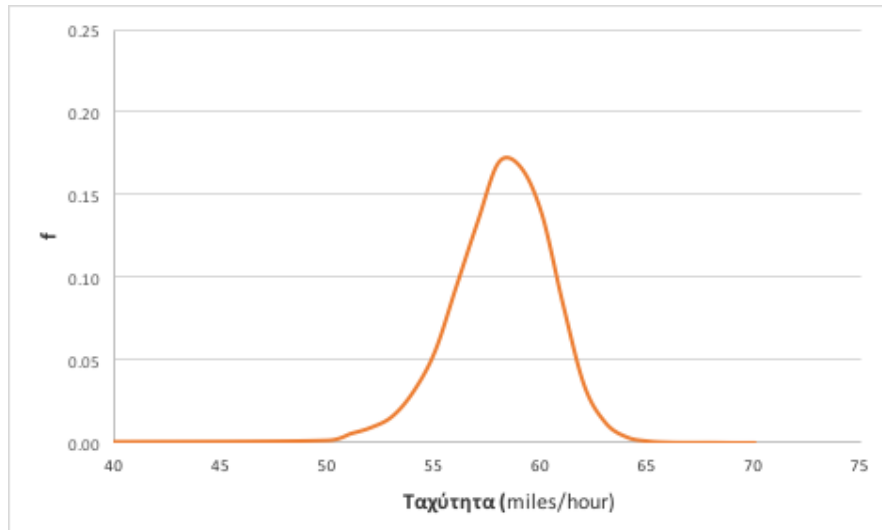
Διάγραμμα 4. 10 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με κλίμακα Πενταλέπτου για το 1^ο μήνα (1379)



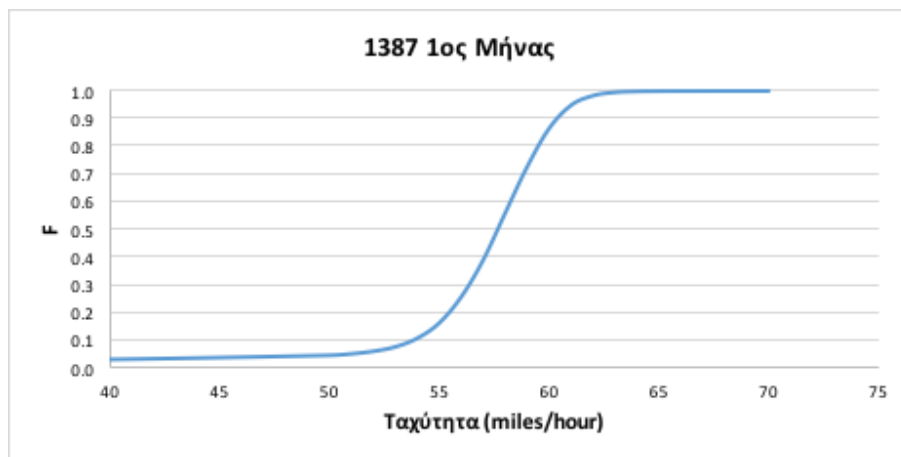
Διάγραμμα 4. 11 Κατανομή Πενταλέπτων Ταχύτητας Ανιχνευτή 1345 για το 2^ο μήνα



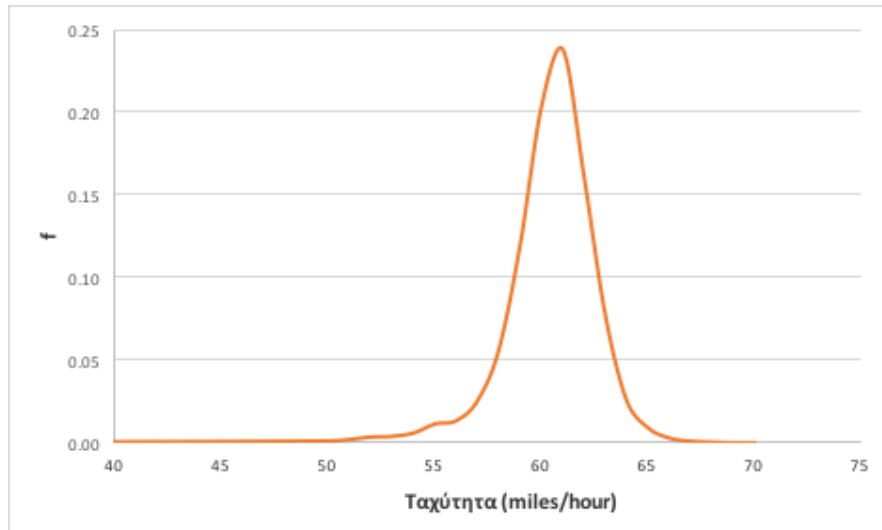
Διάγραμμα 4. 12 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με κλίμακα Πενταλέπτου για το 2^ο μήνα (1345)



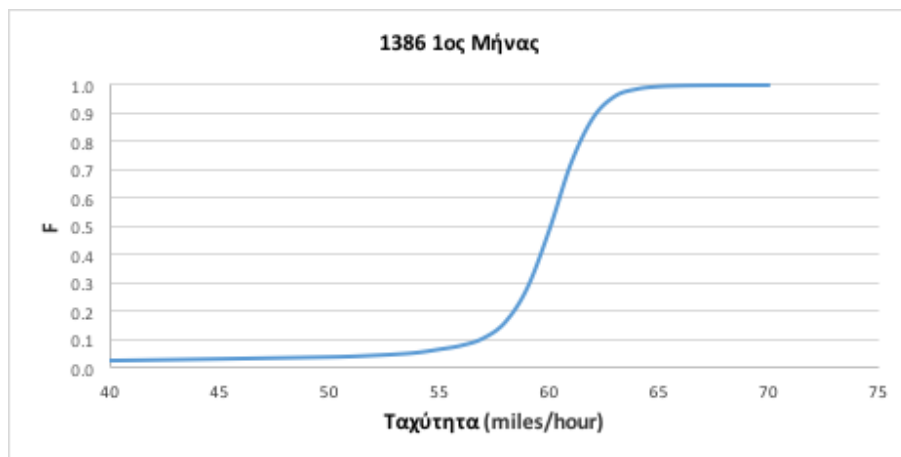
Διάγραμμα 4. 13 Κατανομή Πενταλέπτων Ταχύτητας Ανιχνευτή 1387 για το 1^ο μήνα



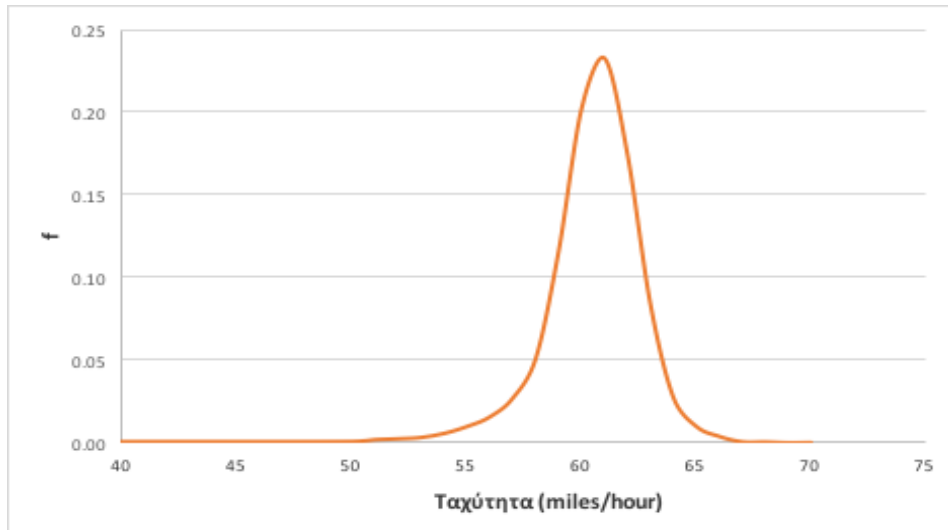
Διάγραμμα 4. 14 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με κλίμακα Πενταλέπτου για το 1^ο μήνα (1387)



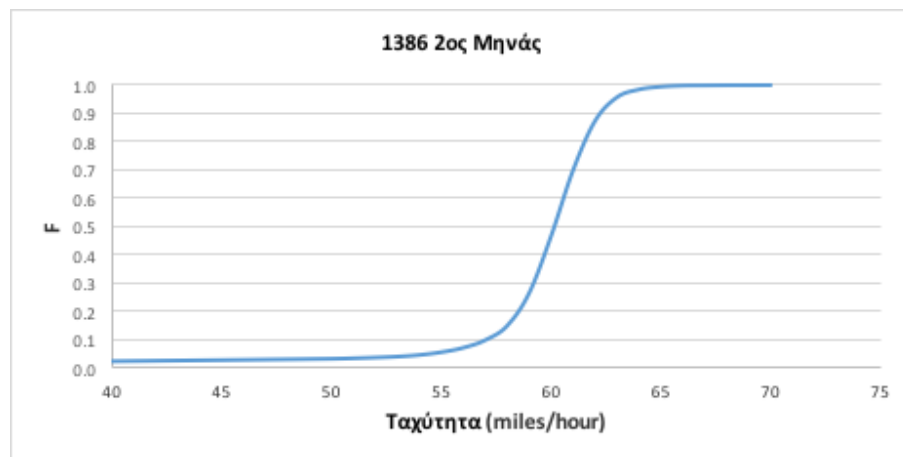
Διάγραμμα 4. 15 Κατανομή Πενταλέπτων Ταχύτητας Ανιχνευτή 1386 για το 1^ο μήνα



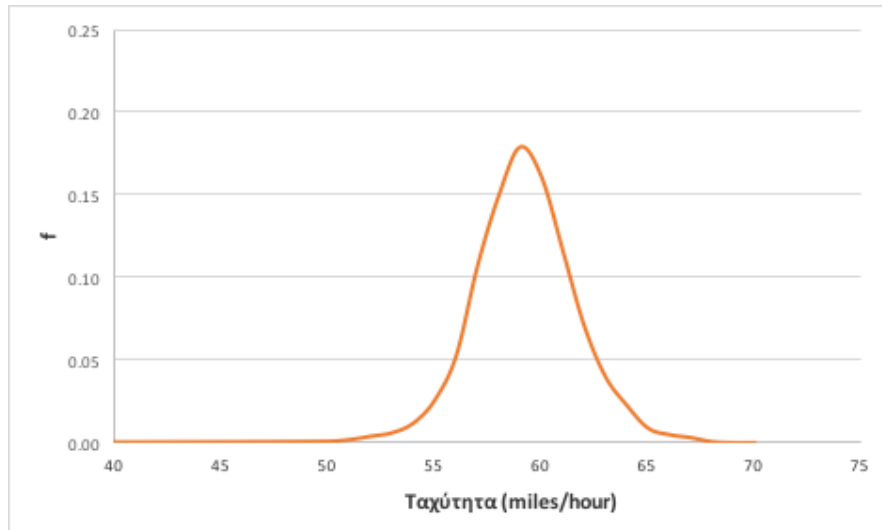
Διάγραμμα 4. 16 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με κλίμακα Πενταλέπτου για το 1^ο μήνα (1386)



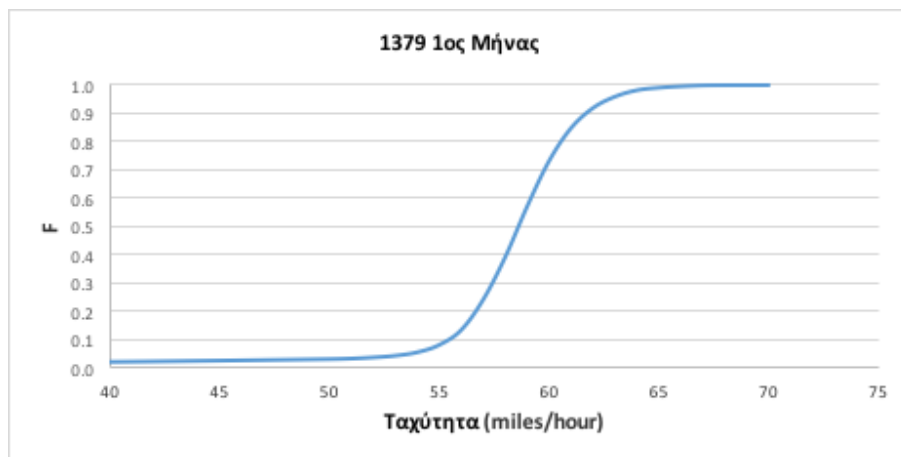
Διάγραμμα 4. 17 Κατανομή Πενταλέπτων Ταχύτητας Ανιχνευτή 1386 για το 2^ο μήνα



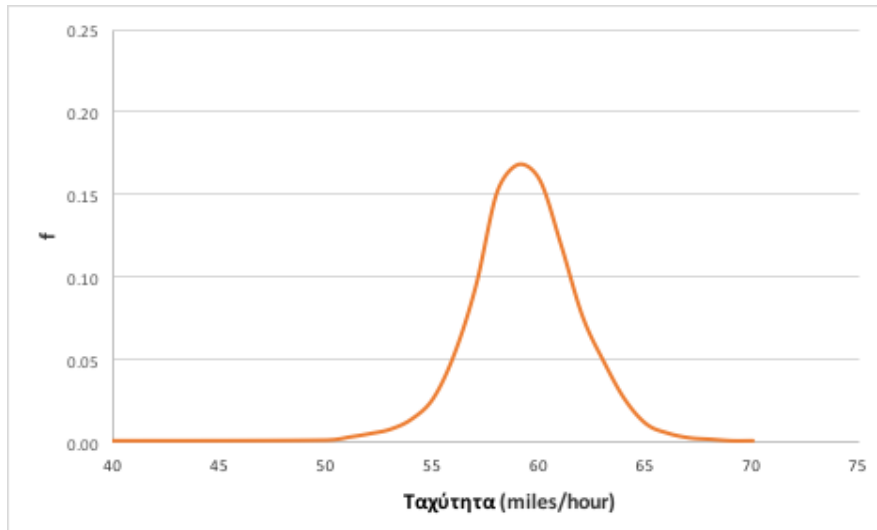
Διάγραμμα 4. 18 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με κλίμακα Πενταλέπτου για το 2^ο μήνα (1386)



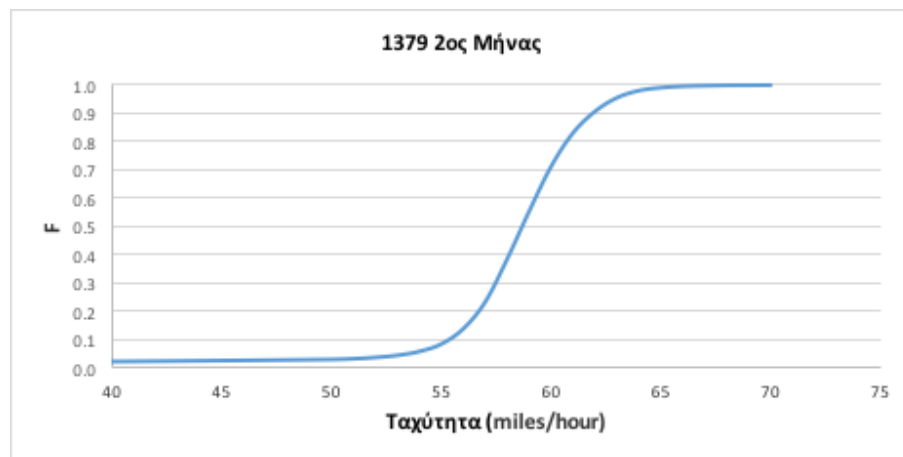
Διάγραμμα 4. 19 Κατανομή Πενταλέπτων Ταχύτητας Ανιχνευτή 1379 για το 1^ο μήνα



Διάγραμμα 4. 20 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με κλίμακα Πενταλέπτου για το 1^ο μήνα (1379)

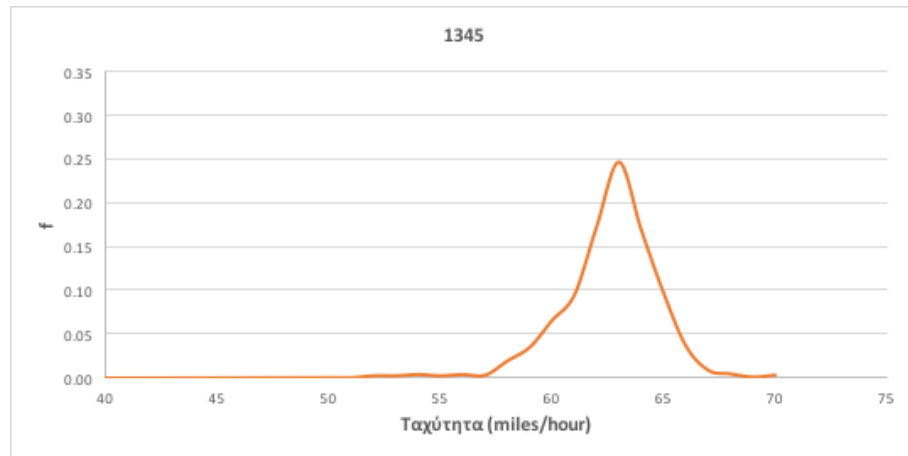


Διάγραμμα 4. 21 Κατανομή Πενταλέπτων Ταχύτητας Ανιχνευτή 1379 για το 2ο^ο μήνα

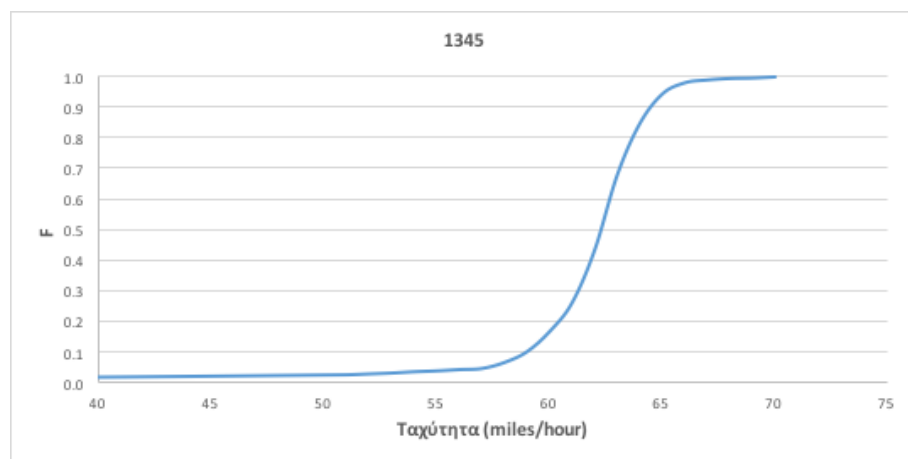


Διάγραμμα 4. 22 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με κλίμακα Πενταλέπτου για το 2^ο μήνα (1379)

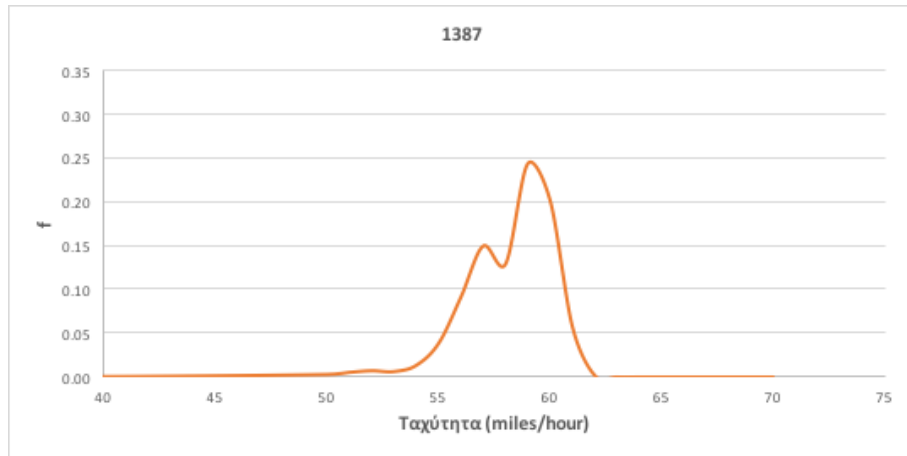
Στα διαγράμματα παρουσιάζονται οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας ωριαίας ταχύτητας για τους τέσσερις ανιχνευτές. Όσο μεγαλώνει η κλίμακα η κατανομή τείνει να γίνει κανονική. Κάτι που είναι εύλογο γιατί αποτελεί ουσιαστικά άθροισμα της πεντάλεπτης κλίμακας. Η κανονικότητα των κατανομών θα ελεγχθεί πιο ειδικά σε επόμενο υποκεφάλαιο.



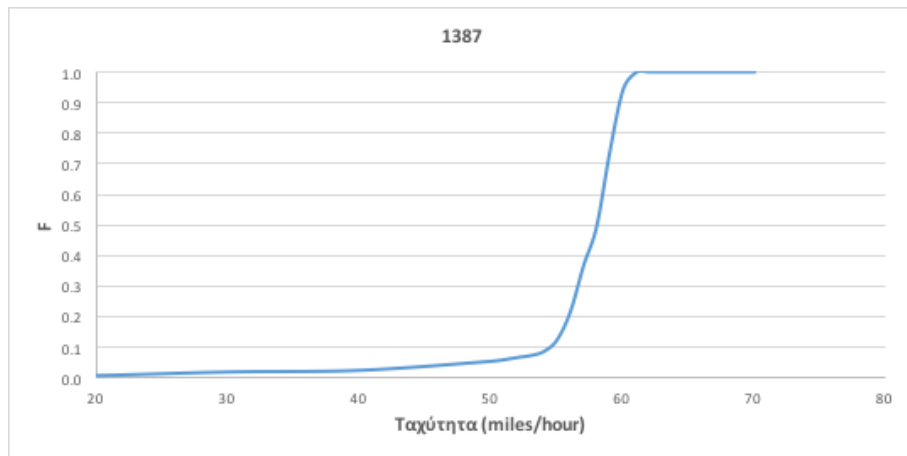
Διάγραμμα 4. 23 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ωριαίας Ταχύτητας (1345)



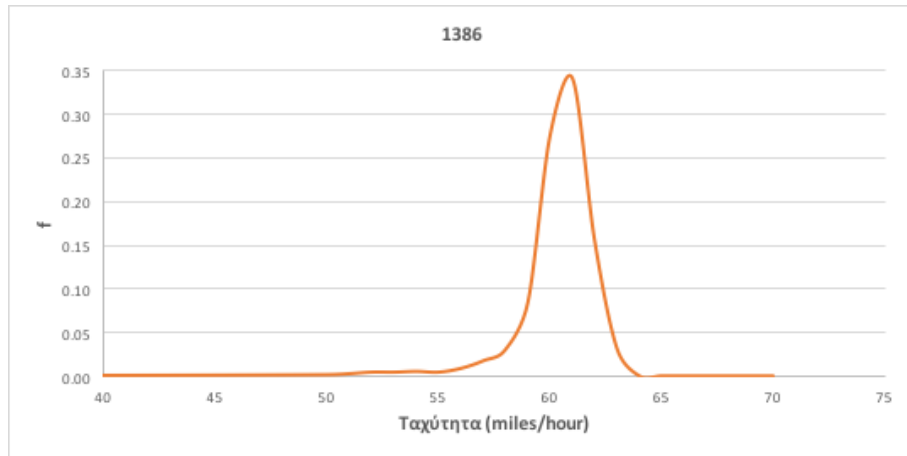
Διάγραμμα 4. 24 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με Ωριαία κλίμακα (1345)



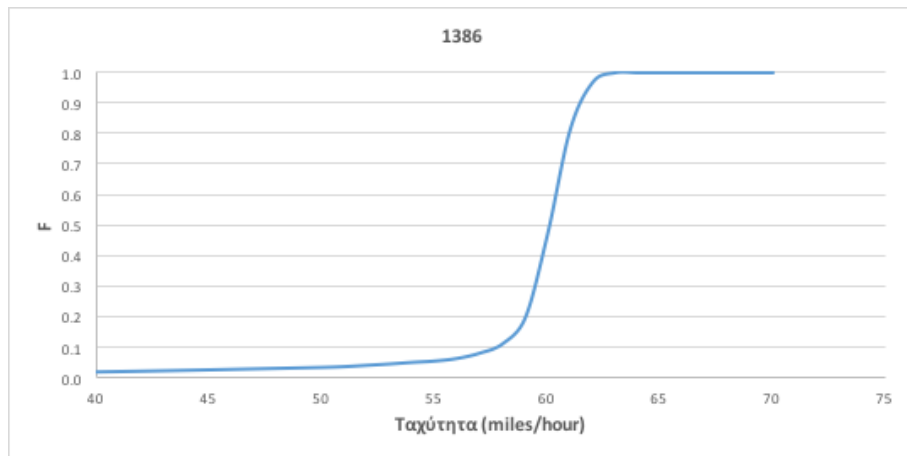
Διάγραμμα 4. 25 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ωριαίας Ταχύτητας (1387)



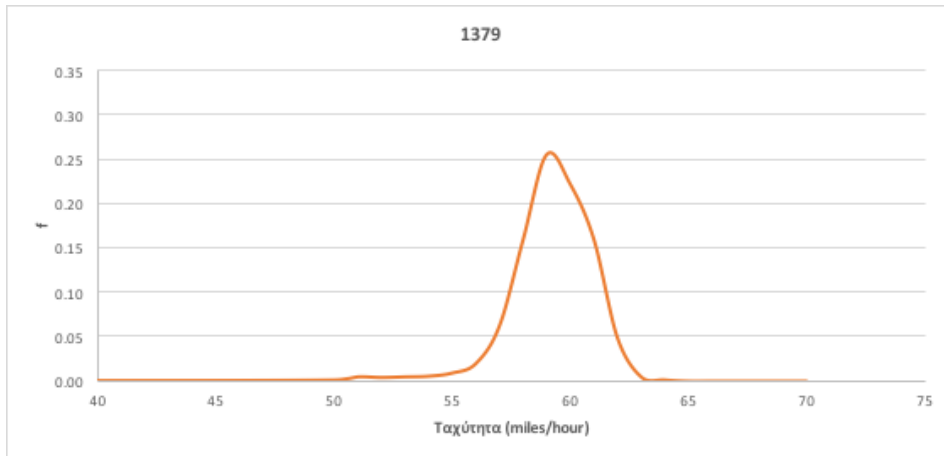
Διάγραμμα 4. 26 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με Ωριαία κλίμακα (1387)



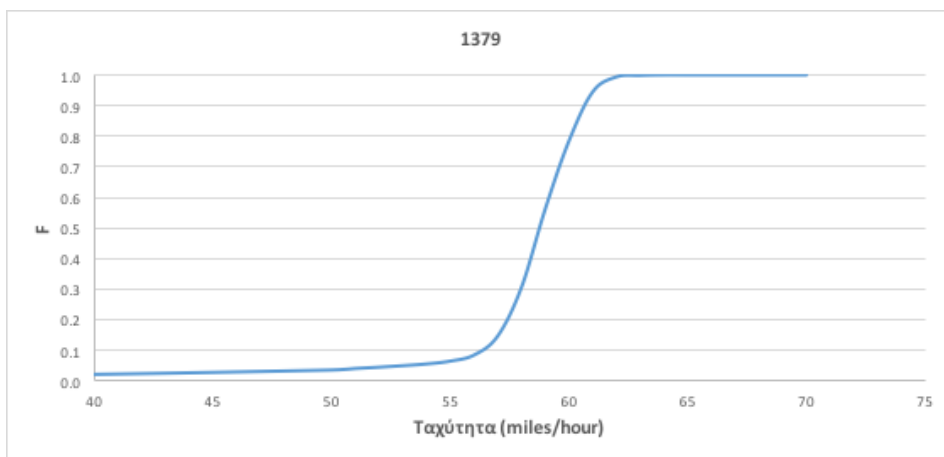
Διάγραμμα 4. 27 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ωριαίας Ταχύτητας (1386)



Διάγραμμα 4. 28 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με Ωριαία κλίμακα (1386)

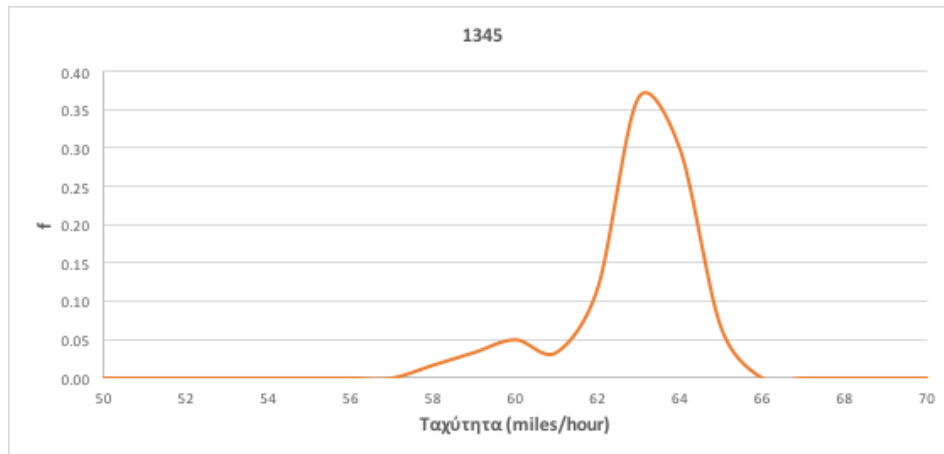


Διάγραμμα 4. 29 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ωριαίας Ταχύτητας (1379)

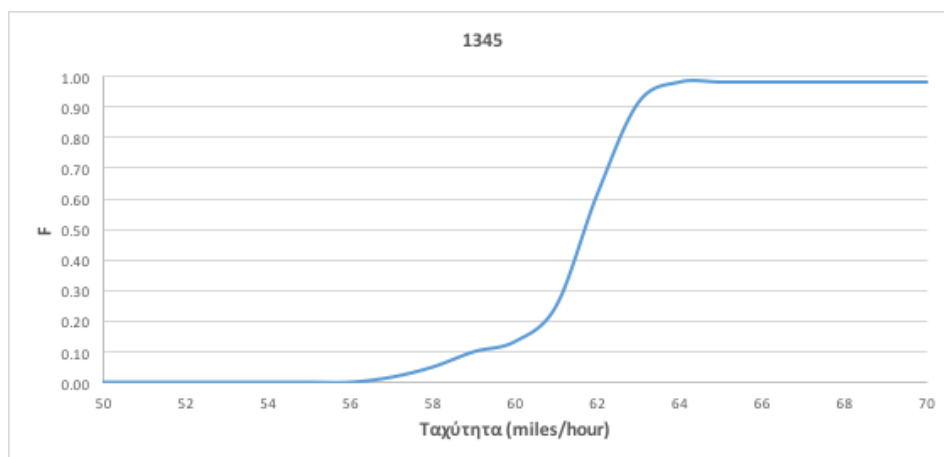


Διάγραμμα 4. 30 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με Ωριαία κλίμακα (1379)

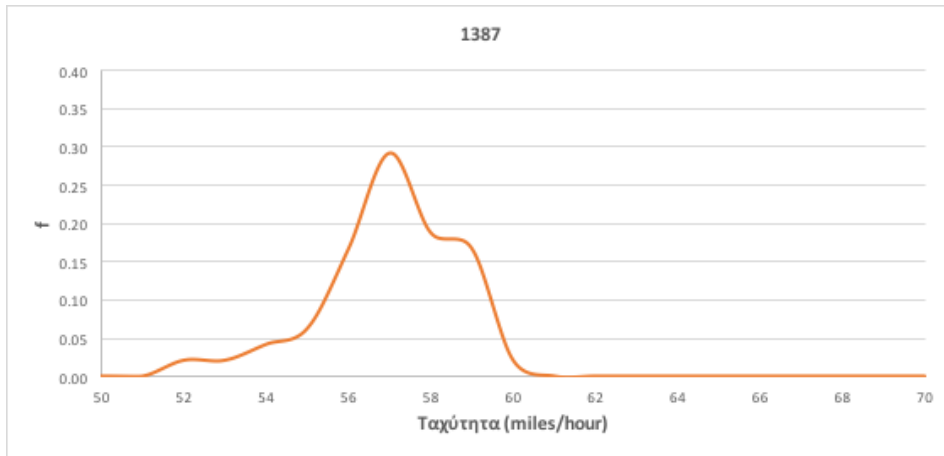
Στα διαγράμματα παρουσιάζονται οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας ημερήσιας ταχύτητας για τους τέσσερις ανιχνευτές. Η μορφή της κατανομής κανονικοποιείται ακόμα περισσότερο με τα δεδομένα βέβαια να μειώνονται καθώς η κλίμακα είναι ημερήσια για δυο μήνες.



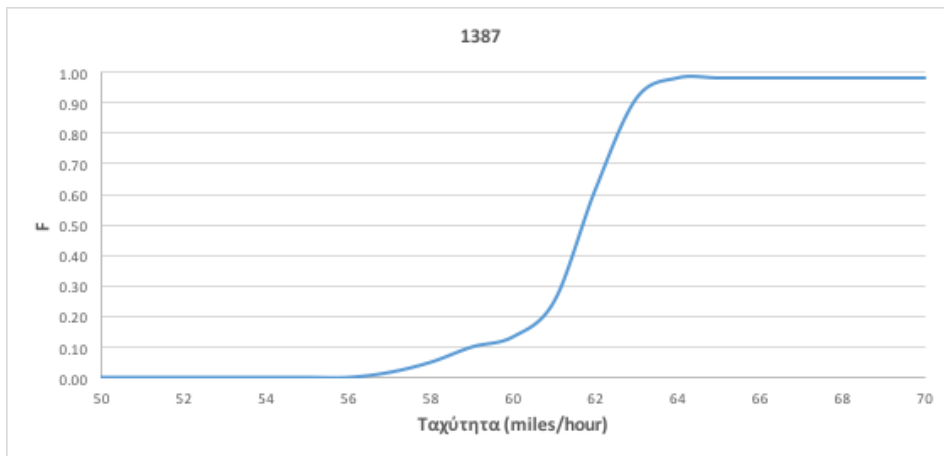
Διάγραμμα 4. 31 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ημερήσιας Ταχύτητας (1345)



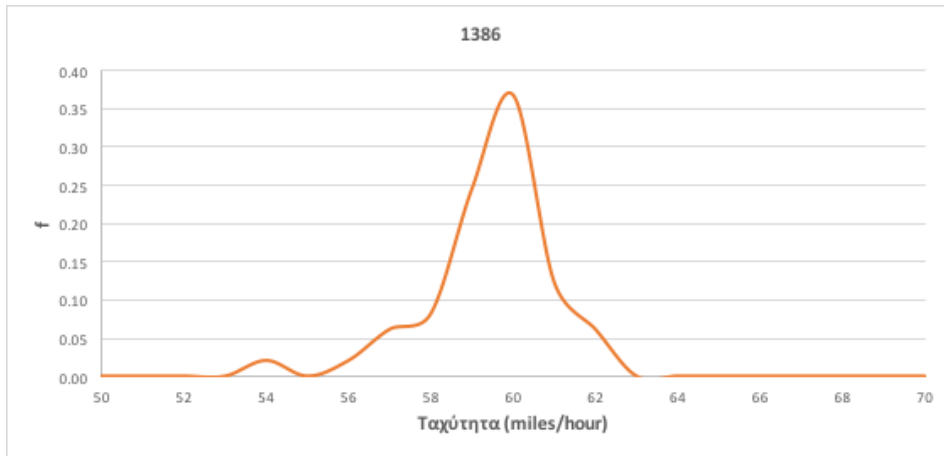
Διάγραμμα 4. 32 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με Ημερήσια κλίμακα (1345)



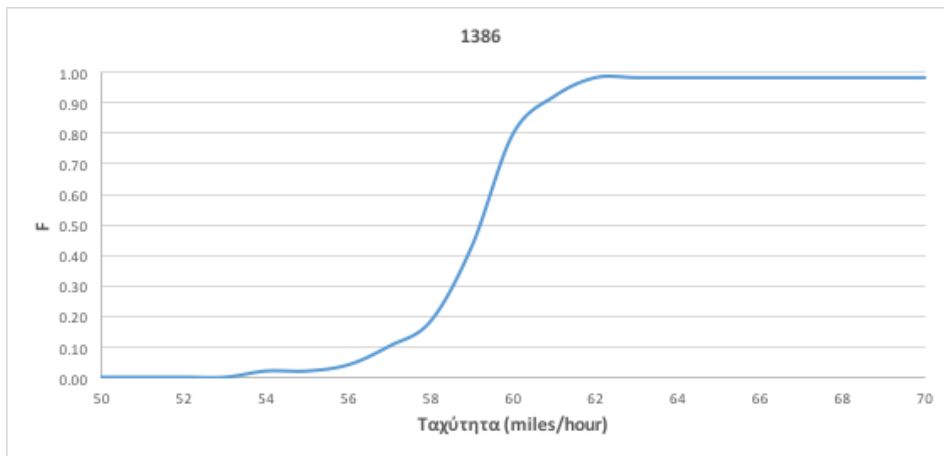
Διάγραμμα 4. 33 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ημερήσιας Ταχύτητας (1387)



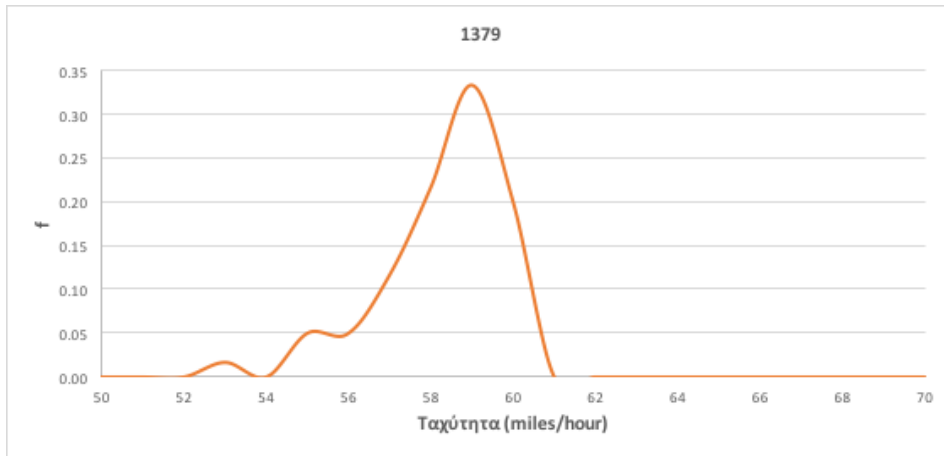
Διάγραμμα 4. 34 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με Ημερήσια κλίμακα (1387)



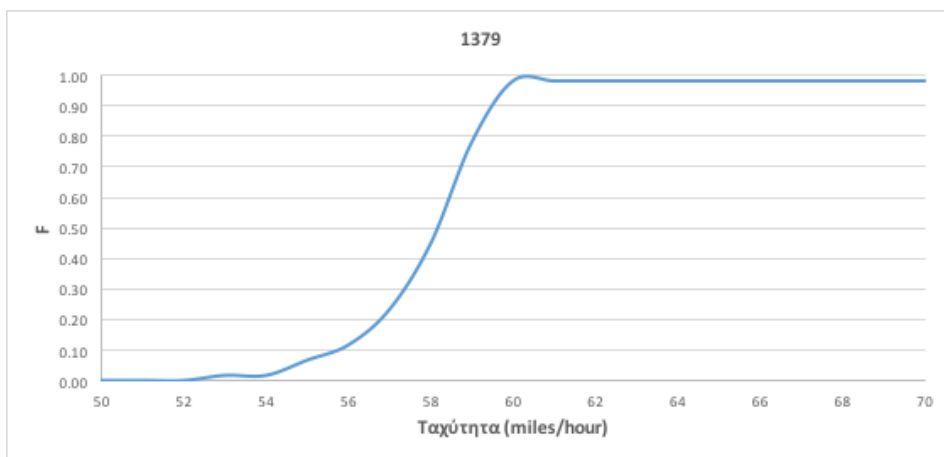
Διάγραμμα 4. 35 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ημερήσιας Ταχύτητας (1386)



Διάγραμμα 4. 36Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με Ημερήσια κλίμακα (1386)



Διάγραμμα 4. 37 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ημερήσιας Ταχύτητας (1379)



Διάγραμμα 4. 38 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ταχύτητας με Ημερήσια κλίμακα (1379)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας του ποσοστού κατάληψης (occupancy) και του όγκου κυκλοφορίας που παρουσιάζουν πιο ασυνήθιστες κατανομές πράγμα που φαίνεται κι από τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους. Η ανάλυση βασίστηκε στις χρονοσειρές ταχύτητας. Οι χρονοσειρές αυτές αναλύθηκαν για να φανούν τυχόν ομοιότητες αλλά και γιατί υπάρχει σύνδεση των δεικτών αυτών με την ταχύτητα. Π.χ.

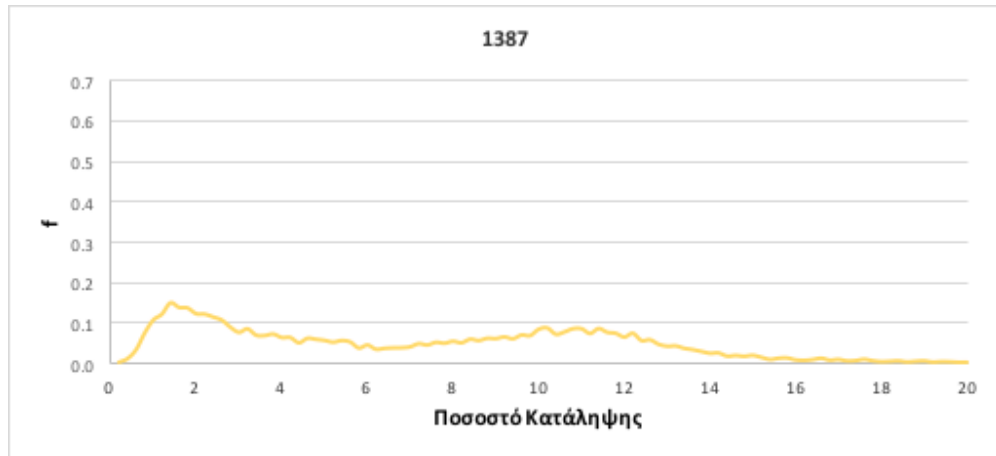
όσο το ποσοστό κατάληψης και η ένταση της κυκλοφορίας αυξάνεται, μέχρι κάποιο σημείο, τόσο μειώνεται η ταχύτητα καθώς περισσότερα οχήματα βρίσκονται στον αυτοκινητόδρομο. Έτσι μας δίνεται καλύτερη εποπτεία του φαινομένου.



Διάγραμμα 4. 39 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ποσοστού Κατάληψης με κλίμακα Πενταλέπτου (1345)



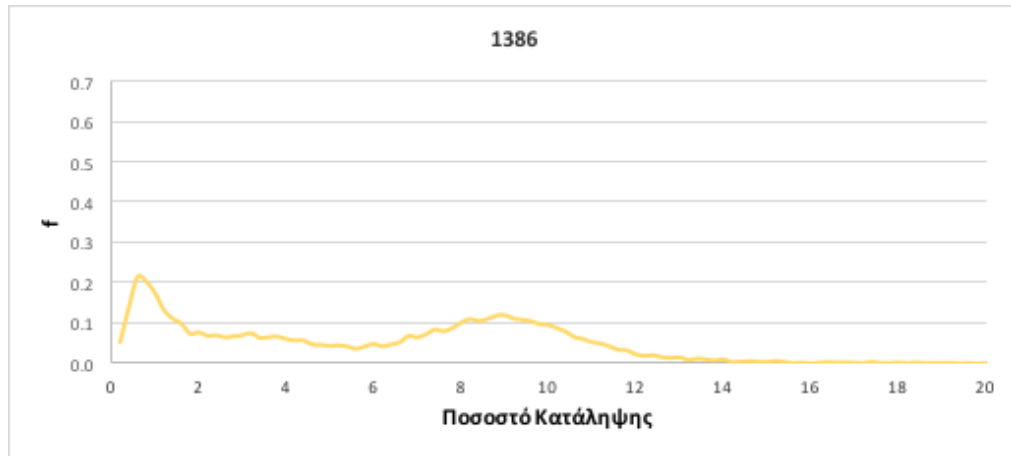
Διάγραμμα 4. 40 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ποσοστού Κατάληψης με κλίμακα Πεντάλεπτου (1345)



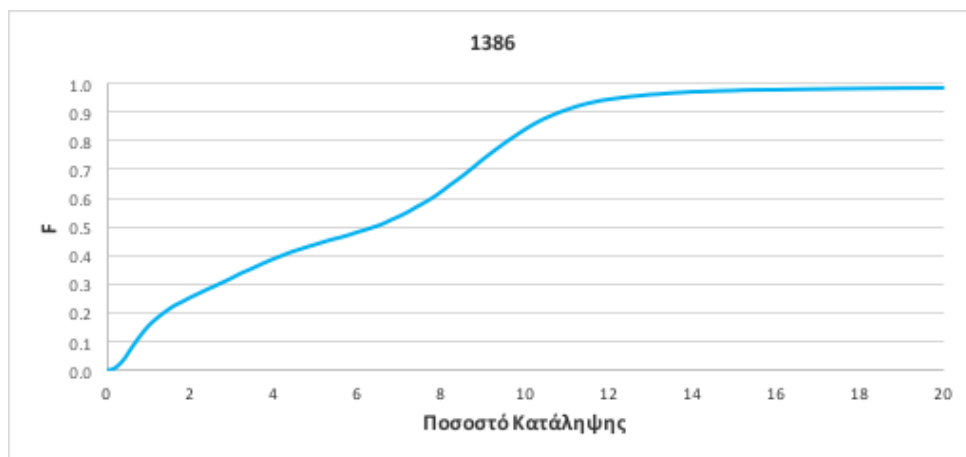
Διάγραμμα 4. 41 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ποσοστού Κατάληψης με κλίμακα Πεντάλεπτου (1387)



Διάγραμμα 4. 42 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ποσοστού Κατάληψης με κλίμακα Πεντάλεπτου (1387)



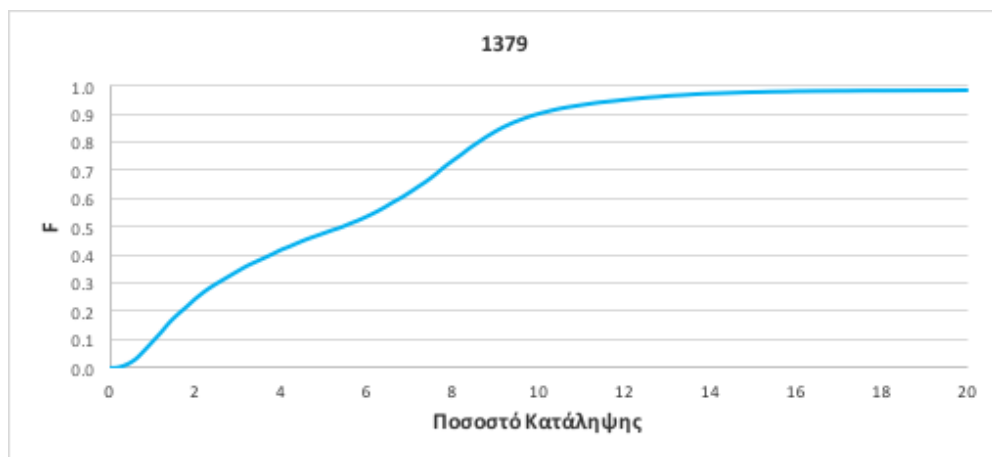
Διάγραμμα 4. 43 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ποσοστού Κατάληψης με κλίμακα Πεντάλεπτου (1386)



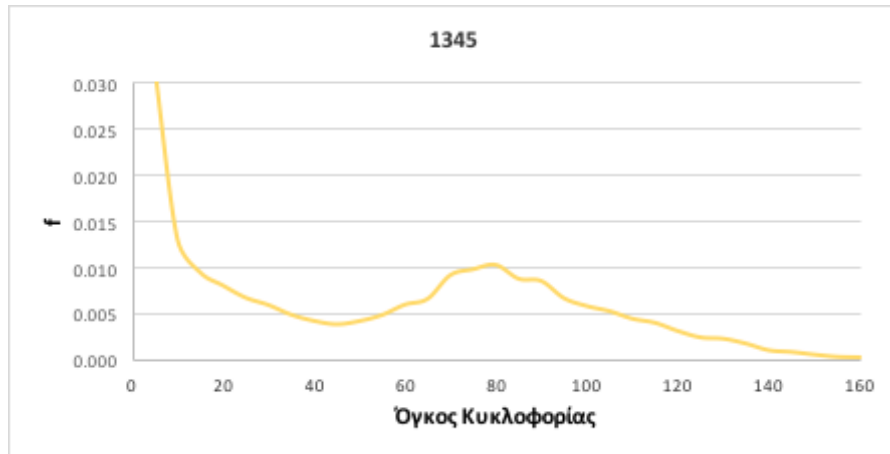
Διάγραμμα 4. 44 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ποσοστού Κατάληψης με κλίμακα Πεντάλεπτου (1386)



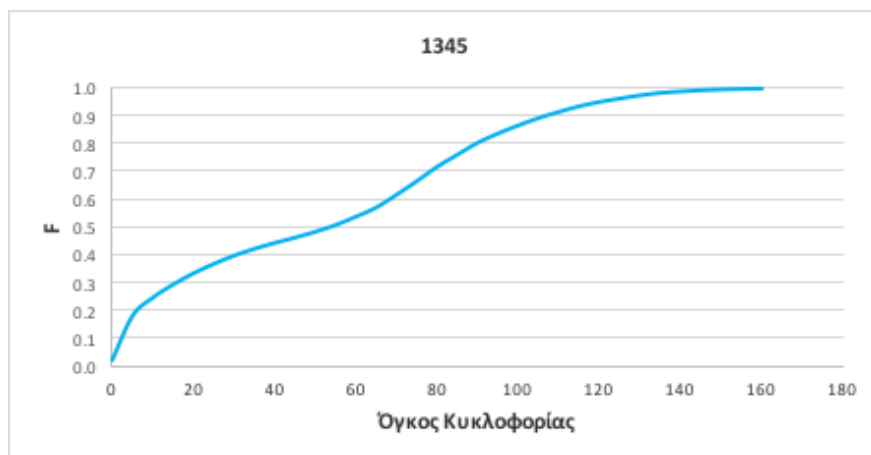
Διάγραμμα 4. 45 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ποσοστού Κατάληψης με κλίμακα Πεντάλεπτου (1379)



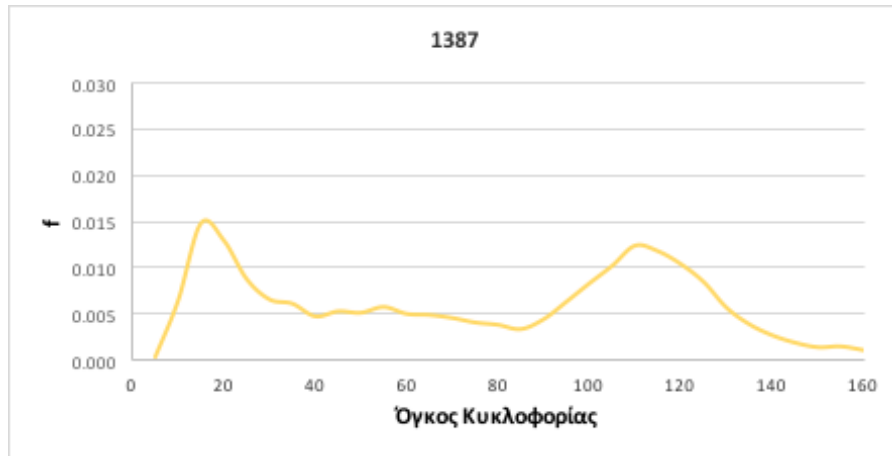
Διάγραμμα 4. 46 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Ποσοστού Κατάληψης με κλίμακα Πεντάλεπτου (1379)



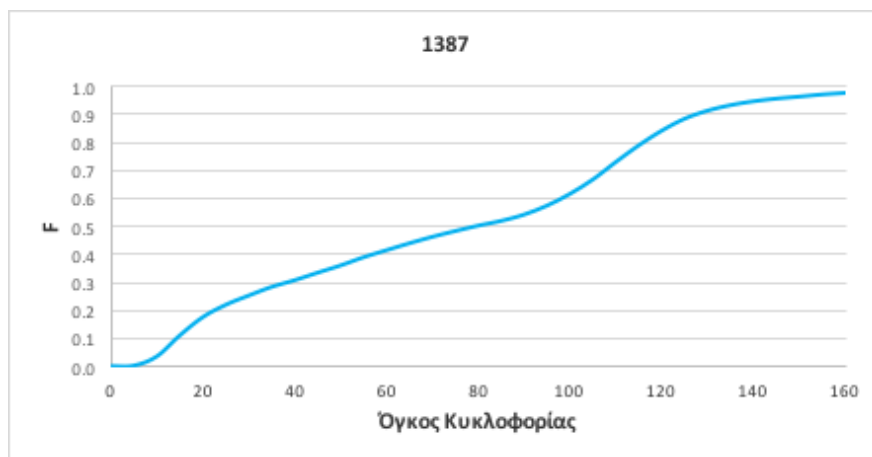
Διάγραμμα 4. 47 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Όγκου Κυκλοφορίας με κλίμακα Πεντάλεπτου (1345)



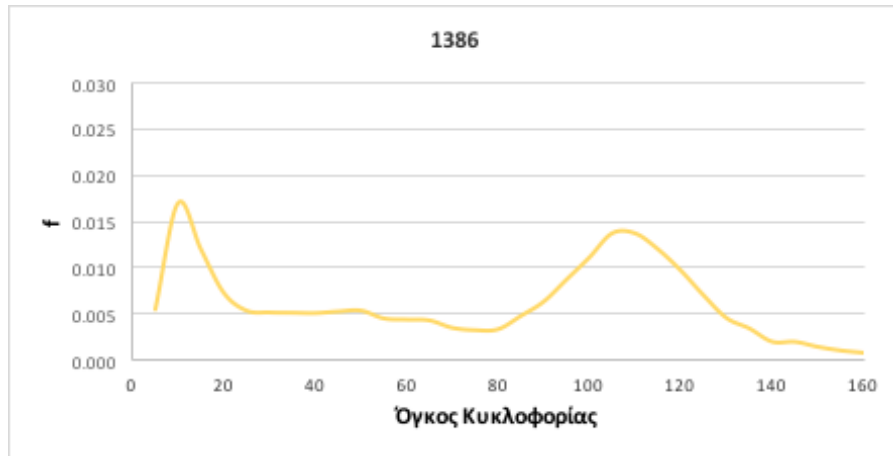
Διάγραμμα 4. 48 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Όγκου Κυκλοφορίας με κλίμακα Πεντάλεπτου (1345)



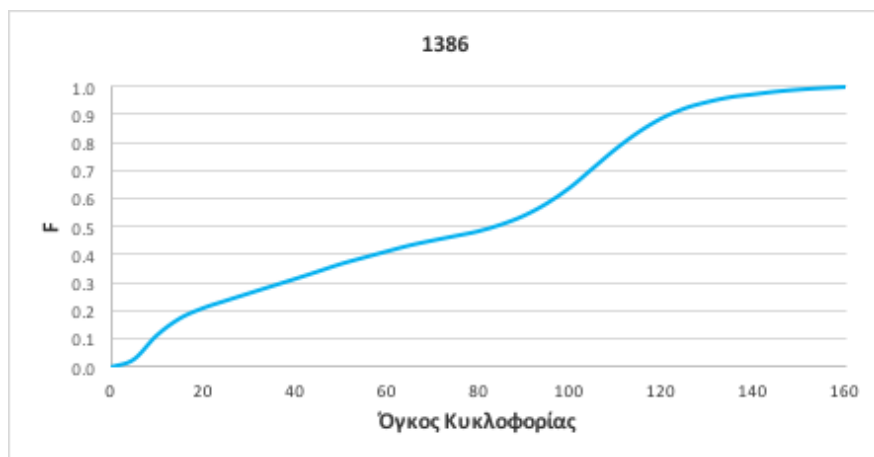
Διάγραμμα 4. 49 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Όγκου Κυκλοφορίας με κλίμακα Πεντάλεπτου (1387)



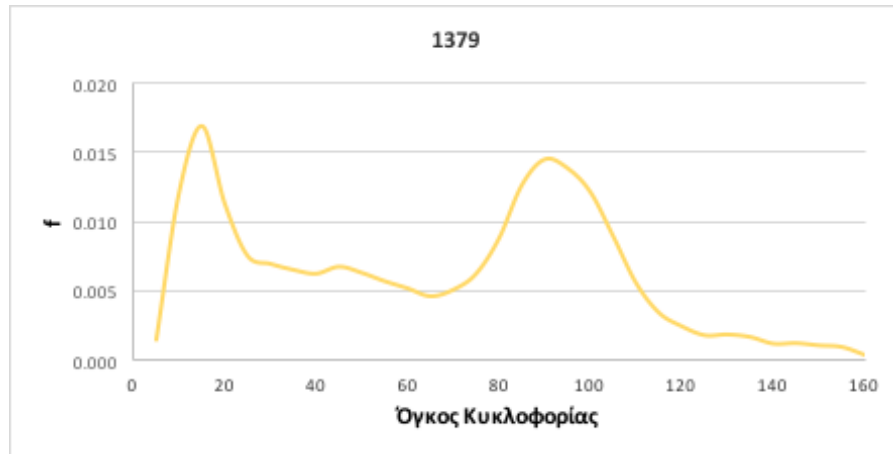
Διάγραμμα 4. 50 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Όγκου Κυκλοφορίας με κλίμακα Πεντάλεπτου (1387)



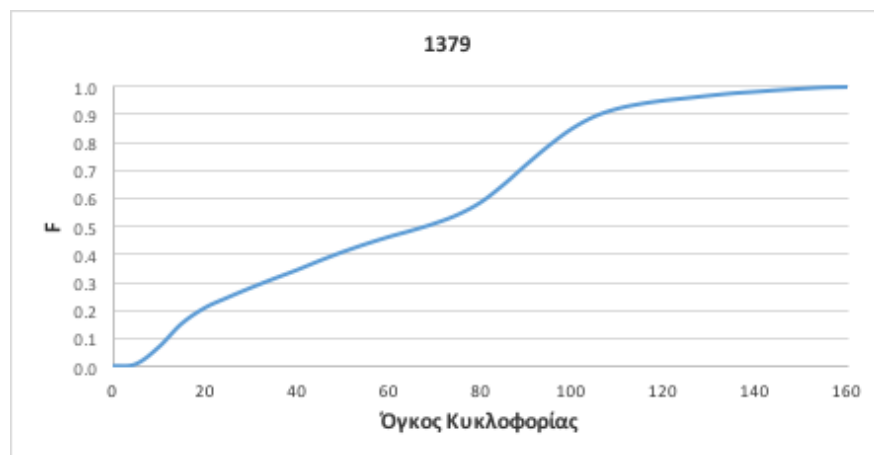
Διάγραμμα 4. 51 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Όγκου Κυκλοφορίας με κλίμακα Πεντάλεπτου (1386)



Διάγραμμα 4. 52 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Όγκου Κυκλοφορίας με κλίμακα Πεντάλεπτου (1386)



Διάγραμμα 4. 53 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Όγκου Κυκλοφορίας με κλίμακα Πεντάλεπτου (1379)

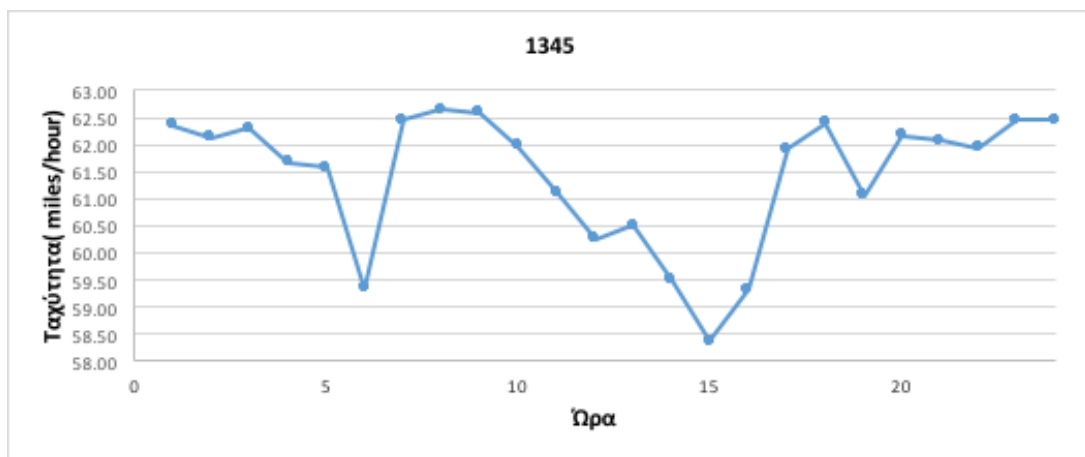


Διάγραμμα 4. 54 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Όγκου Κυκλοφορίας με κλίμακα Πεντάλεπτου (1379)

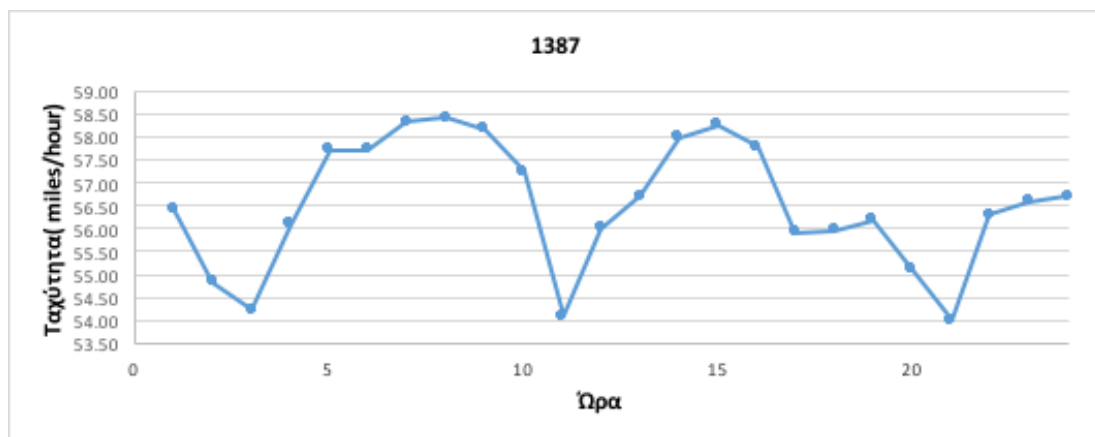
4.2.3 Κυκλοστασιμότητα

Μια ανέλιξη είναι στάσιμη όταν οι στατιστικές παράμετροι της δεν μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου. Κυκλοστάσιμη ονομάζεται η ανέλιξη της οποίας οι στατιστικές παράμετροι είναι περιοδικές συναρτήσεις του χρόνου (Koutsoyiannis,2013).

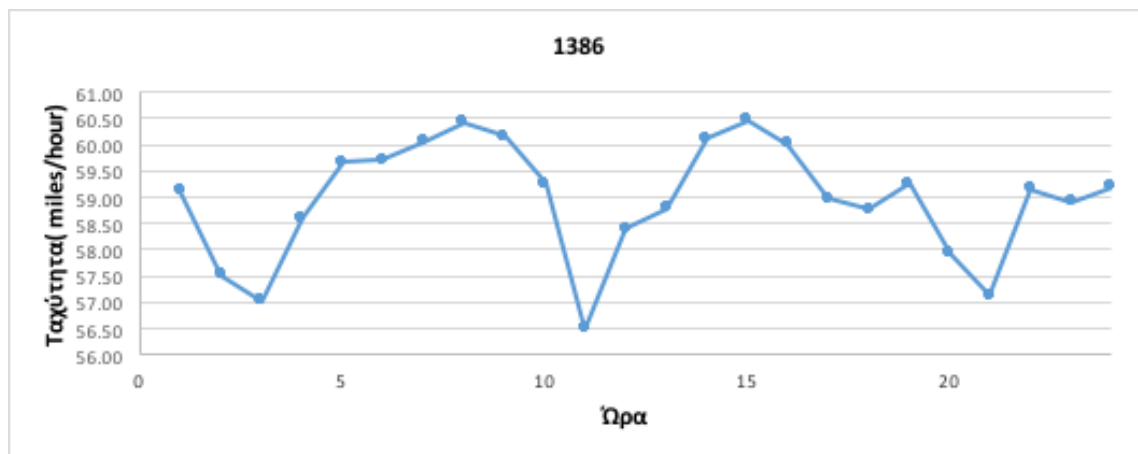
Η μεταβλητή της ταχύτητας στον αυτοκινητόδρομο φαίνεται να εμφανίζει ένδειξη κυκλοστασιμότητα. Εμφανίζει περιοδικότητα την ημέρα που φαίνεται να μειώνεται στις τελευταίες πρωινές ώρες (συνήθως περίπου στις 11 π.μ.) ανάλογα τη θέση του μετρητή και να εμφανίζει και μια δεύτερη μικρότερη μείωση στις 8 με 9 μ.μ. Έτσι φαίνεται ότι θα μπορούσε να προσομοιωθεί με μία διπλή αρμονική ταλάντωση. Αυτό το συμπέρασμα δεν είναι σε θέση να τεκμηριωθεί με ασφάλεια καθώς χρειάζονται περαιτέρω στοιχεία και μεγαλύτερη ανάλυση. Είναι όμως ένα λογικό συμπέρασμα που χρησιμοποιείται εν γένει στα κυκλοφοριακά γιατί κάθε εικοσιτετράωρο αποτελεί έναν ολοκληρωμένο κύκλο μέτρησης κι αποτελείται από χαμηλές και υψηλές ζητήσεις και αυτός επαναλαμβάνεται με σημαντικές ομοιότητες κάθε μέρα.



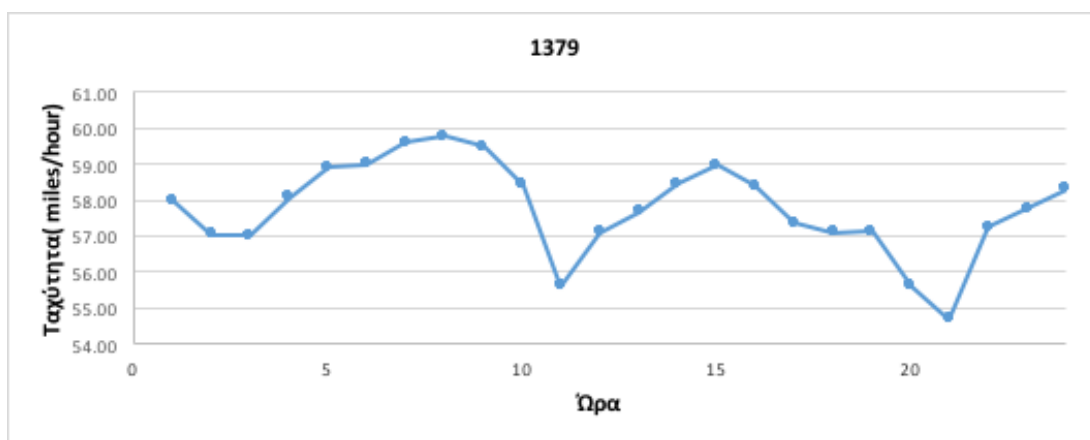
Διάγραμμα 4. 55 Μέση Ημέρα (1345)



Διάγραμμα 4. 56 Μέση Ημέρα (1387)



Διάγραμμα 4. 57 Μέση Ημέρα (1386)



Διάγραμμα 4. 58 Μέση Ημέρα (1379)

Από τα στοιχεία των διελεύσεων στα διόδια Πολυμύλου φαίνεται να υπάρχουν ενδείξεις και για ετήσια περιοδικότητα. Αυτή μεταβάλλεται από περιοχή σε περιοχή. Στα διόδια Πολύμυλου που σε υπεραστικό κομμάτι εμφανίζεται αύξηση κατά τους καλοκαιρινούς μήνες των διακοπών με αιχμή το μήνα Αύγουστο και σταδιακή μείωση όσο πλησιάζουμε το

χειμώνα. Το συμπέρασμα αυτό δεν είναι ασφαλές γιατί τα στοιχεία είναι 5.5 ετών και σε μεμονωμένα διόδια. Άρα δεν είναι σίγουρο τι θα συμβαίνει σε ένα αστικό κομμάτι και σε μία άλλη χώρα.



Διάγραμμα 4. 59 Μέση Ετήσια Διέλευση Οχημάτων Ι.Χ. στα Διόδια Πολυμύλου

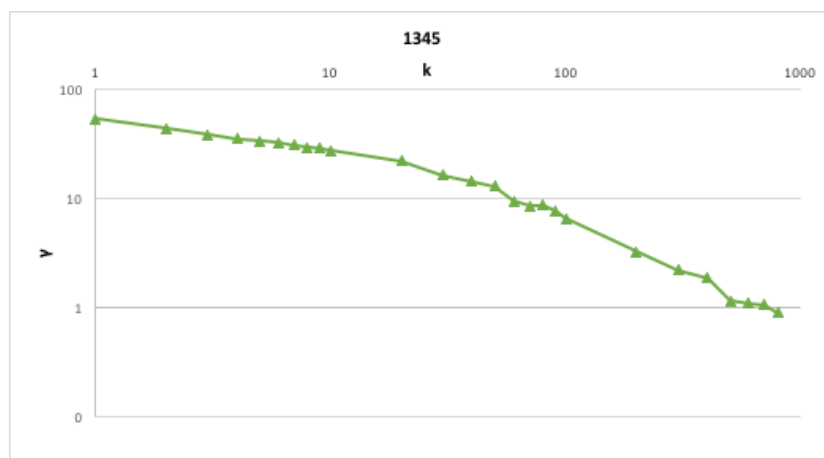
Συνεπώς, τα λιγοστά στοιχεία που διαθέτουμε δείχνουν ότι υπάρχει υποψία διπλής κυκλοστασιμότητας και πιο συγκεκριμένα ημερήσιας και ετήσιας. Βεβαίως, είναι απαραίτητη η περαιτέρω ανάλυση και να ληφθούν οι ιδιαιτερότητες της κάθε περιοχής. Είναι πιθανό να είναι διαφορετικά τα συμπεράσματα στο Portland των Η.Π.Α. με την Εγνατία Οδό στην Ελλάδα. Για αυτό και διερεύνηση της διπλής κυκλοστασιμότητας αρχικά σε ωριαία κλίμακα και δεδομένα άνω του εξαμήνου για την ημερήσια κυκλοστασιμότητα και έπειτα σε μηνιαία κλίμακα για υπερετήσια δεδομένα για την ετήσια κυκλοστασιμότητα.

4.2.4 Κλιμακογράμματα

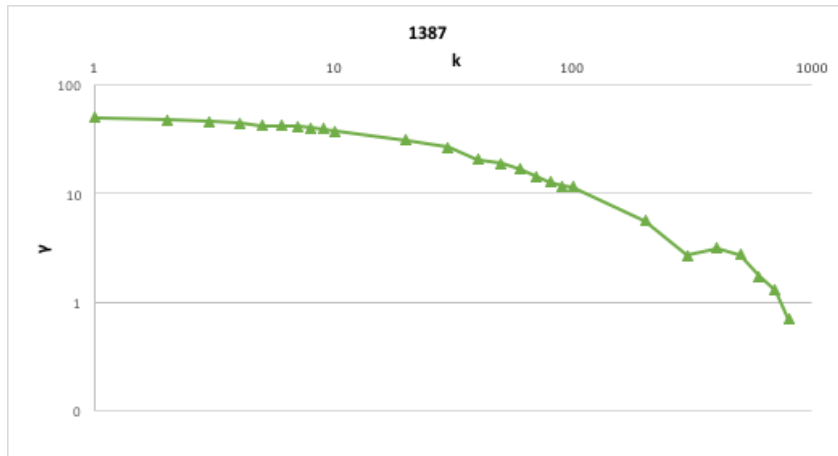
Για να χτιστεί ένα στοχαστικό μοντέλο είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της κατανομής της συνθετικής χρονοσειράς και της δομής αυτοσυσχέτισης. Το κλιμακόγραμμα αποτελεί το καλύτερο εργαλείο κι αυτό γιατί φαίνεται να έχει μικρό σφάλμα, εμφανίζει καλή συμπεριφορά για αυτές τις διαδικασίες και είναι κοντά στην πιο πιθανή τιμή του σε σύγκριση

με την αυτοσυνδιασπορά και το φάσμα ισχύος που αποτελούν δυο άλλα συνηθισμένα εργαλεία για τον προσδιορισμό της δομής αυτοσυσχέτισης (Dimitriadis and Koutsoyiannis 2015).

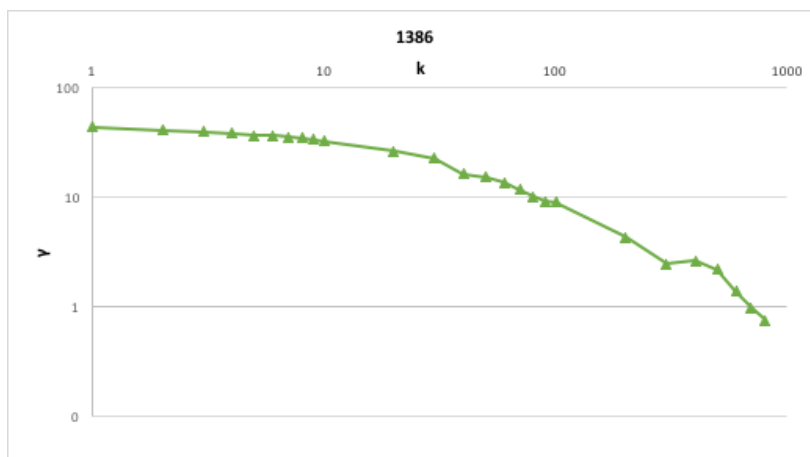
Αρχικά, ελέγχθηκαν οι χρονοσειρές των πεντάλεπτων όπου εμφανίζεται στις μικρές και μεσαίες κλίμακες μια ήπια κλίση που δίνει έναν συντελεστή Hurst ίσο με 0.82 μέχρι 0.90 (Διαγράμματα 4.60, 4.61, 4.62, 4.63). Ο συντελεστής Hurst προκύπτει προσθέτοντας τη μισή τιμή της κλίσης του κλιμακογράμματος με το ένα ($1 + (\text{κλίση κλιμακογράμματος})/2$). Τιμές που συμφωνούν με τους συντελεστές Hurst 0.83 και 0.84 που βρήκαν οι Belomestny and Siegel (2003) και Shang et al. (2007) αντίστοιχα. Ο υπολογισμός αυτός όμως δεν ανταποκρίνεται απόλυτα στον ορισμό της μακροπρόθεσμης εμμονής όπου συμβαίνει στις μεγάλες κλίμακες κι όχι στις μικρές και στις μεσαίες. Παρατηρείται ότι στις μεγάλες κλίμακες και για τα δεδομένα που έχουμε ο συντελεστής Hurst τείνει στο 0.5 πράγμα που δείχνει μια Μαρκοβιανή Συμπεριφορά που στην αρχή εμφανίζει μια ισχυρή δομή που ελαττώνεται όσο μεγαλώνει η κλίμακα και φτάνει στο λευκό θόρυβο.



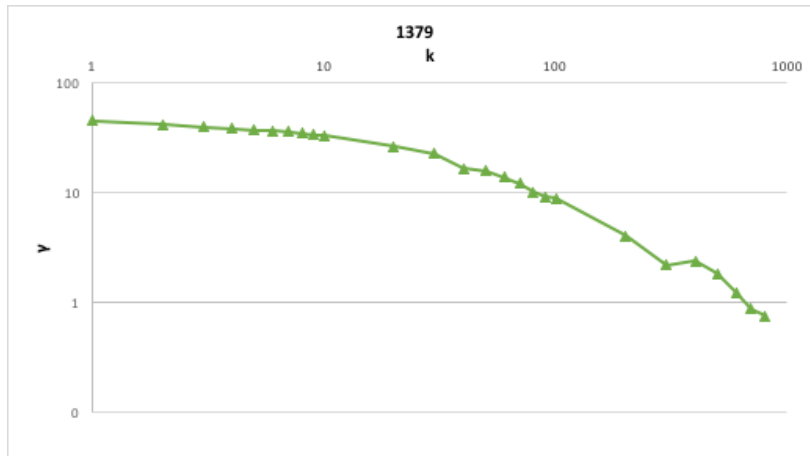
Διάγραμμα 4. 60 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Ταχύτητας (1345)



Διάγραμμα 4. 61 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Ταχύτητας (1387)

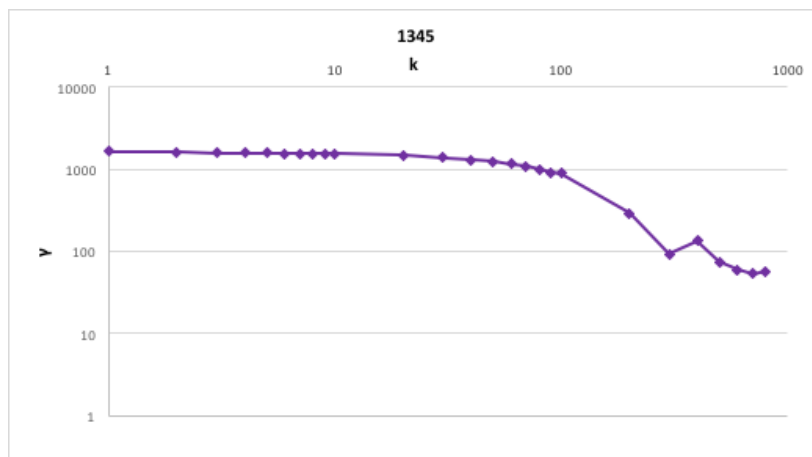


Διάγραμμα 4. 62 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Ταχύτητας (1386)

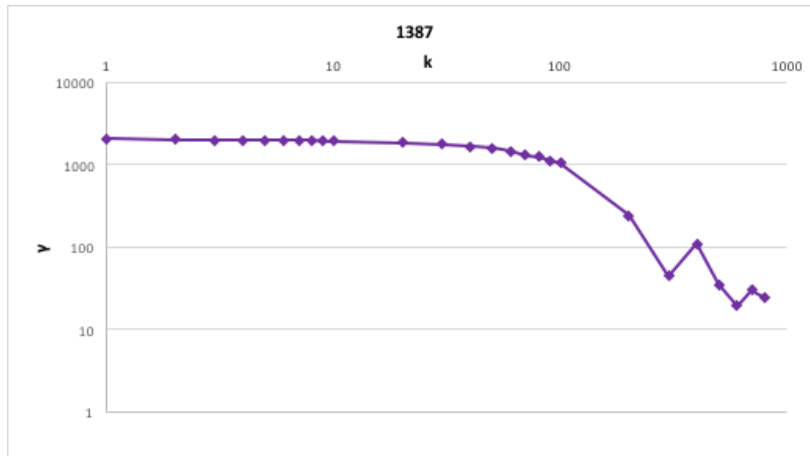


Διάγραμμα 4. 63 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Ταχύτητας (1379)

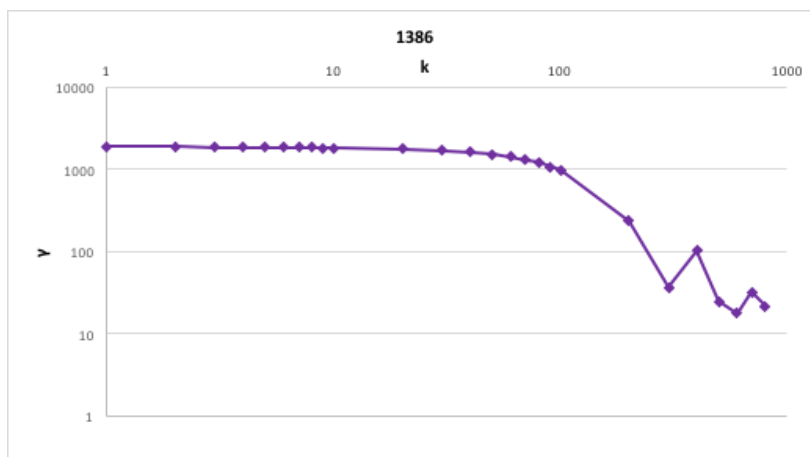
Στη συνέχεια για λόγους πληρότητας και καλύτερης εποπτείας ερευνήθηκαν και τα πεντάλεπτα όγκου κυκλοφορίας και ποσοστού κατάληψης (Διαγράμματα 4.64, 4.65, 4.66, 4.67). Δείχνουν μια συμπεριφορά παρόμοια με αυτή της ταχύτητας με μεγαλύτερους συντελεστές Hurst στην αρχή και απότομη μείωση αυτών στη συνέχεια. Τα κλιμακογράμματα αυτά δεν αναλύθηκαν περαιτέρω αφού σκοπός είναι ο προσδιορισμός ενός προβλεπτικού μοντέλου για τις ταχύτητες στον αυτοκινητόδρομο.



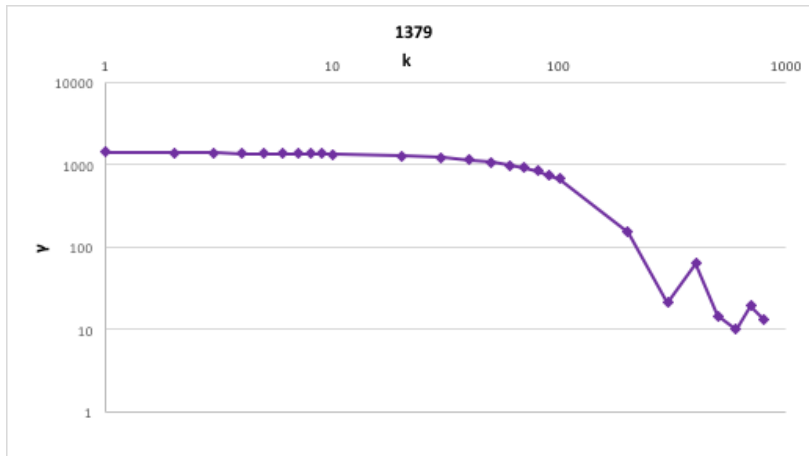
Διάγραμμα 4. 64 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Όγκου Κυκλοφορίας (1345)



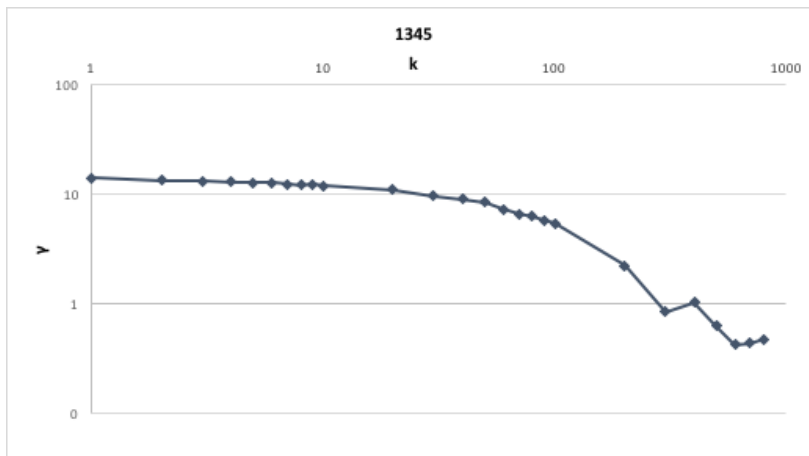
Διάγραμμα 4. 65 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Όγκου Κυκλοφορίας (1387)



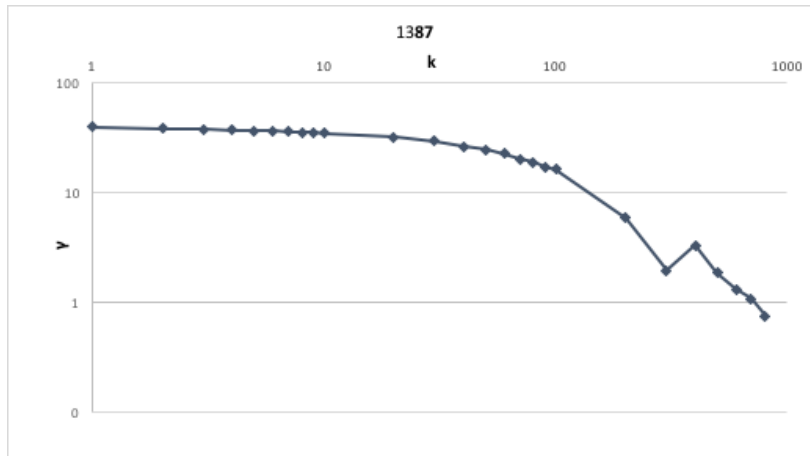
Διάγραμμα 4. 66 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Όγκου Κυκλοφορίας (1386)



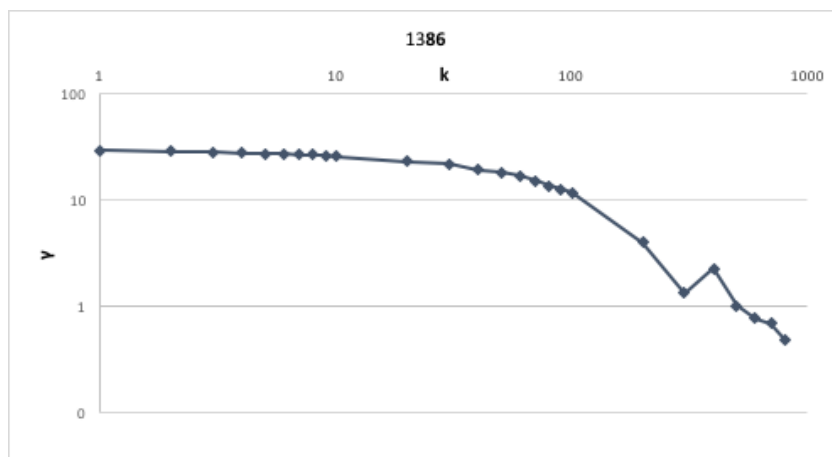
Διάγραμμα 4. 67 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Όγκου Κυκλοφορίας (1379)



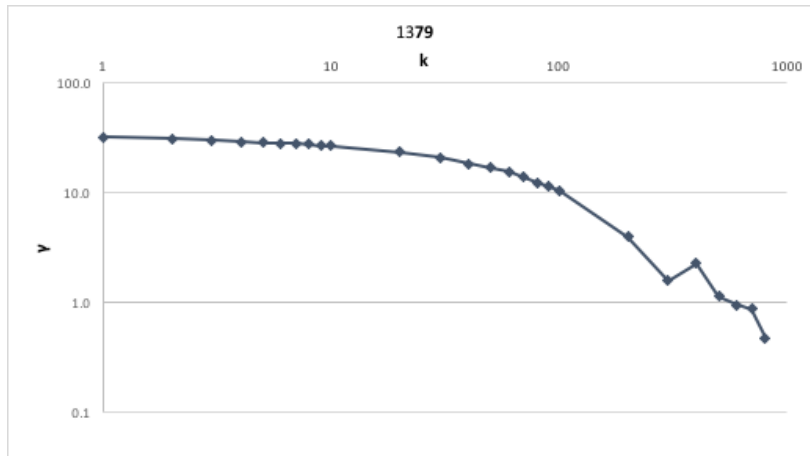
Διάγραμμα 4. 68 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Ποσοστού Κατάληψης(1345)



Διάγραμμα 4. 69 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Ποσοστού Κατάληψης(1387)

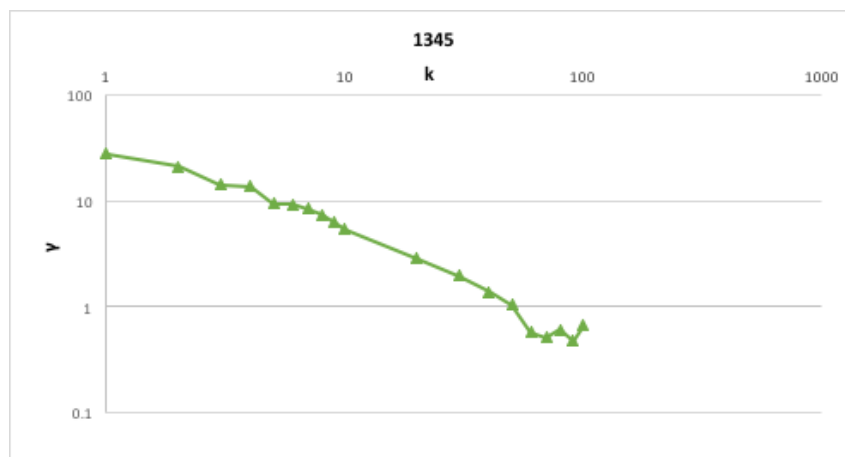


Διάγραμμα 4. 70 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Ποσοστού Κατάληψης(1386)

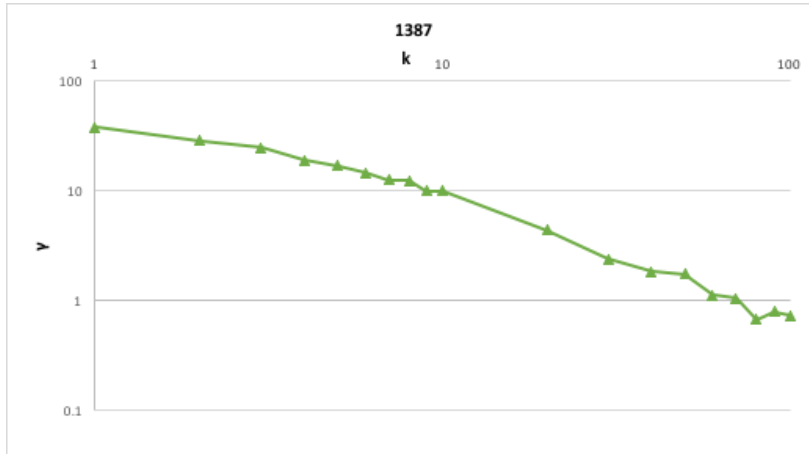


Διάγραμμα 4. 71 Κλιμακόγραμμα των Πενταλέπτων Ποσοστού Κατάληψης(1379)

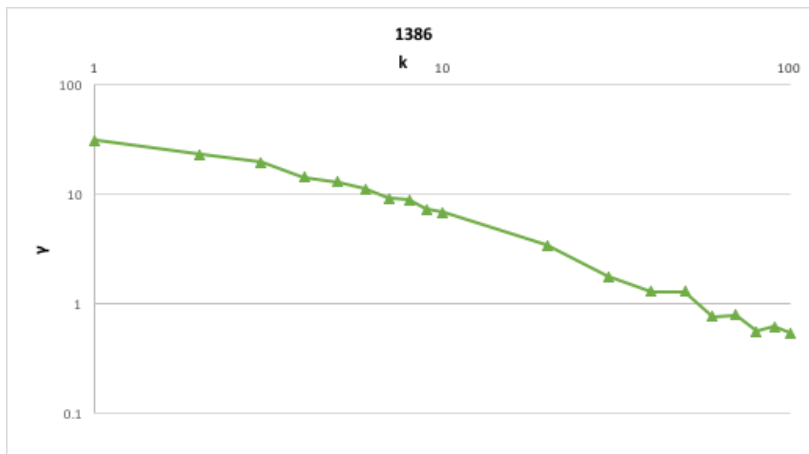
Εν συνεχεία, αναλύθηκαν τα κλιμακογράμματα της ωριαίας ταχύτητας (Διαγράμματα 4.72, 4.73, 4.72, 4.75). Το ωριαίο κλιμακόγραμμα είναι ένα μετατοπισμένο κλιμακόγραμμα πενταλέπτου κι αυτό γιατί από τον ορισμό του κλιμακογράμματος συγκρίνει τις κλίμακες από τις μικρότερες στις μεγαλύτερες. Συνεπώς, τα συμπεράσματα είναι ίδια απλά στο κλιμακόγραμμα ωριαία ταχύτητας δεν υπάρχουν οι μικρές κλίμακες και φτάνουμε πιο γρήγορα στις μεγάλες και στις μεσαίες. Έτσι η πτώση του κλιμακογράμματος και του συντελεστή Hurst γίνεται πιο γρήγορα.



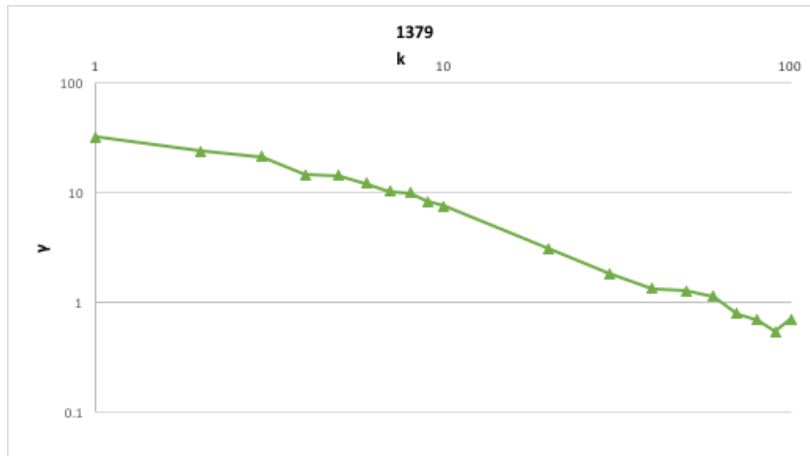
Διάγραμμα 4. 72 Κλιμακόγραμμα των Ωριαίας Ταχύτητας (1345)



Διάγραμμα 4. 73 Κλιμακόγραμμα των Ωριαίας Ταχύτητας (1387)



Διάγραμμα 4. 74 Κλιμακόγραμμα των Ωριαίας Ταχύτητας (1386)



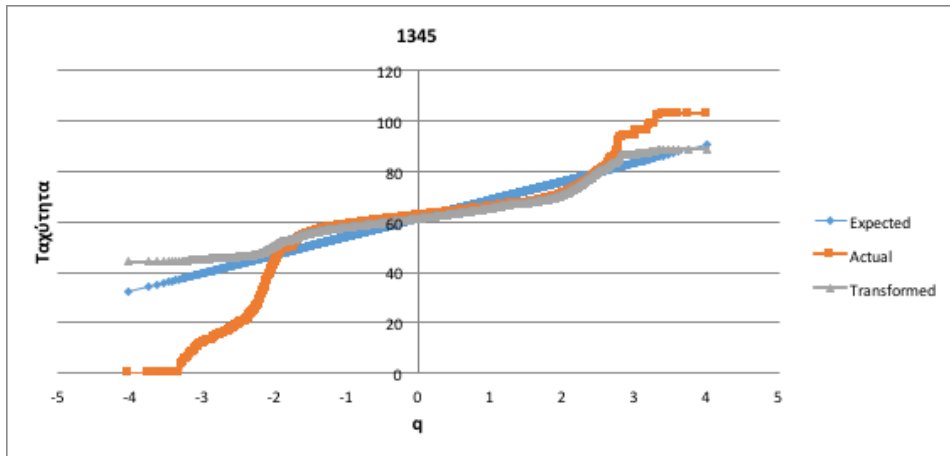
Διάγραμμα 4. 75 Κλιμακόγραμμα των Ωριαίας Ταχύτητας (1379)

4.2.5 Q-Q Plot

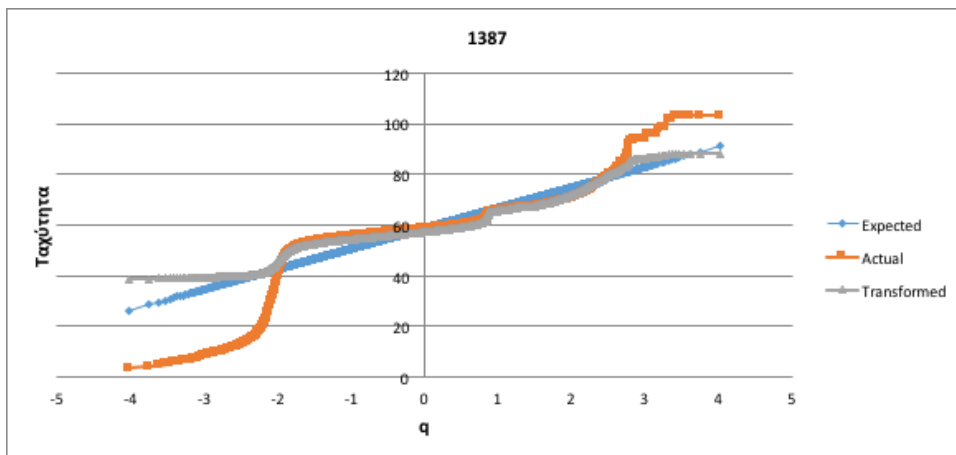
Στο προσδιορισμό ενός στοχαστικού μοντέλου είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της κατανομής της χρονοσειράς. Η κανονική κατανομή αποτελεί την πιο βολική κατανομή για να χτίσεις ένα στοχαστικό μοντέλο τόσο για πρόβλεψη όσο για προσομοίωση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όμως, δεν αντικατοπτριζόταν η κατανομή της πραγματικής χρονοσειράς κυρίως λόγω «βαριών» ουρών. Έτσι χρησιμοποιήθηκε ένας μετασχηματισμός τριών παραμέτρων που οδηγούν στην κανονική κατανομή (Koutsoyiannis et al., 1998).

Με τη χρήση του Q-Q Plot γίνεται ο έλεγχος κατά πόσο οι κατανομές της χρονοσειράς προσεγγίζουν την κανονική και σε σύγκριση με τη μεταμόρφωση των τριών παραμέτρων (3).

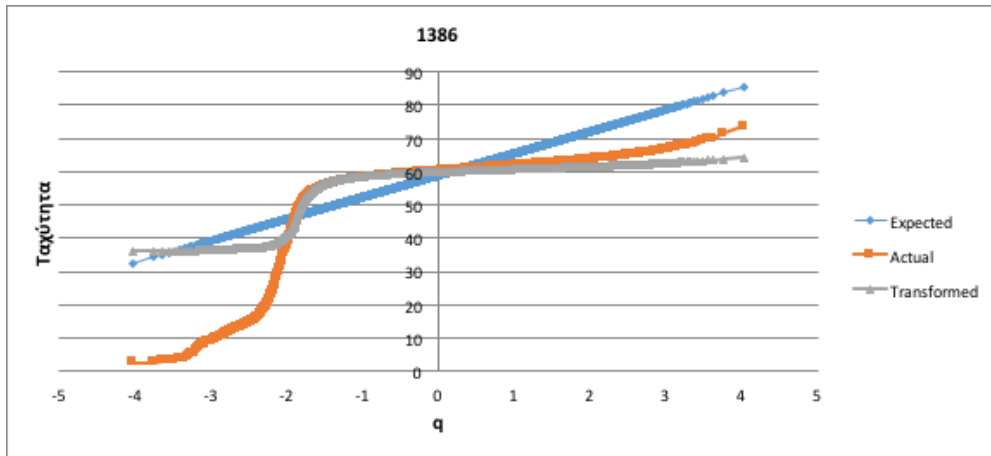
Παρατηρείται ότι η χρονοσειρά των πενταλέπτων ταχύτητας προσεγγίζει την κανονική κατανομή στο κύριο σώμα αλλά απέχει πολύ στις ουρές (Διαγράμματα 4.76, 4.77, 4.78, 4.79). Με τη μεταμόρφωση των τριών παραμέτρων βελτιώνεται η κατανομή στις περισσότερες από τις τέσσερις περιπτώσεις αλλά και πάλι δεν προσεγγίζεται ικανοποιητικά.



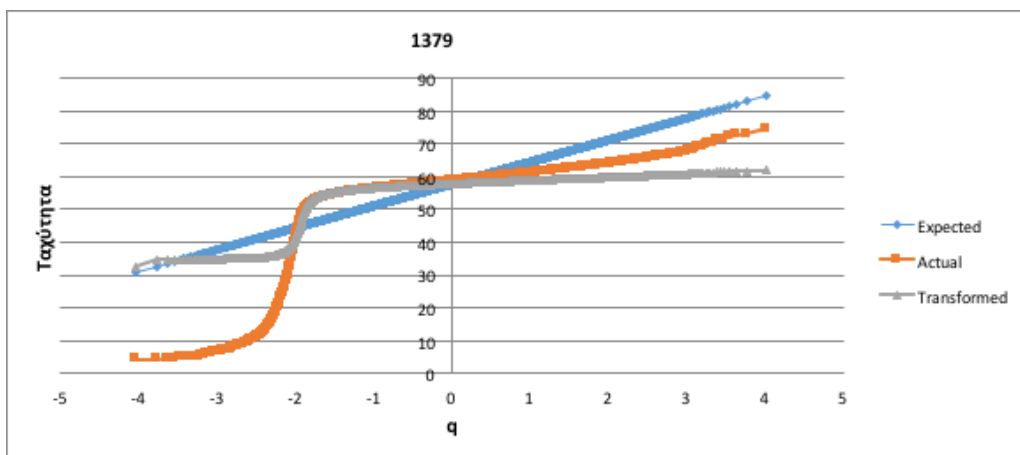
Διάγραμμα 4. 76 Q-Q Plot Πενταλέπτων Ταχύτητας για μεταμόρφωση τριών παραμέτρων (1345)



Διάγραμμα 4. 77 Q-Q Plot Πενταλέπτων Ταχύτητας για μεταμόρφωση τριών παραμέτρων (1387)



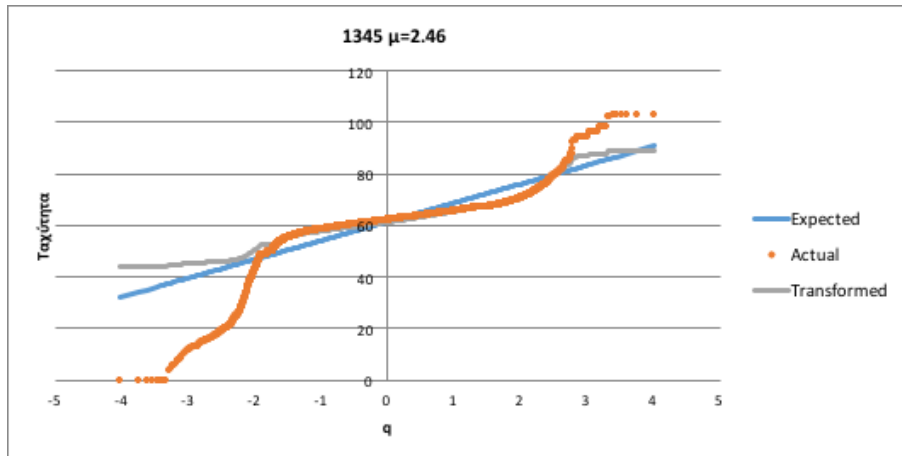
Διάγραμμα 4. 78 Q-Q Plot Πενταλέπτων Ταχύτητας για μεταμόρφωση τριών παραμέτρων (1386)



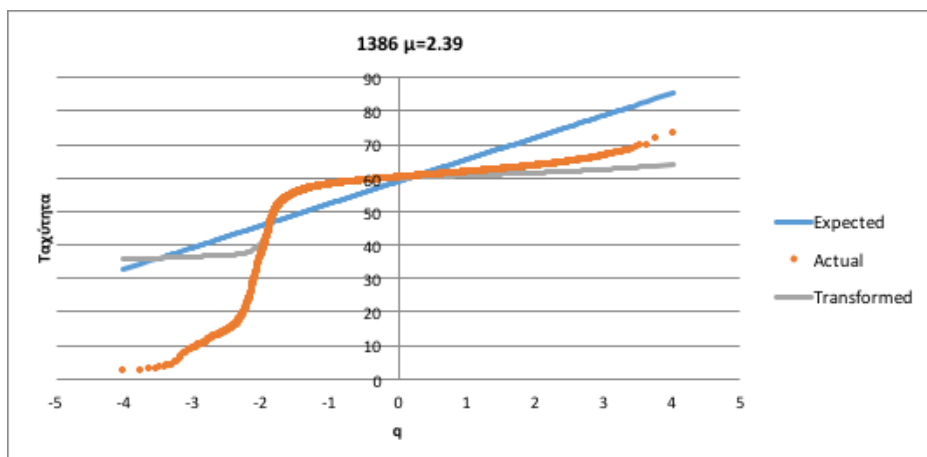
Διάγραμμα 4. 79 Q-Q Plot Πενταλέπτων Ταχύτητας για μεταμόρφωση τριών παραμέτρων (1379)

Σε μια προσπάθεια προσέγγισης της κανονικής κατανομής περισσότερο προστέθηκε μια τέταρτη παράμετρος μ (4).

Η πρόσθεση αυτής της παραμέτρου φαίνεται ότι βελτιώνει την κατανομή σε ικανοποιητικό βαθμό.



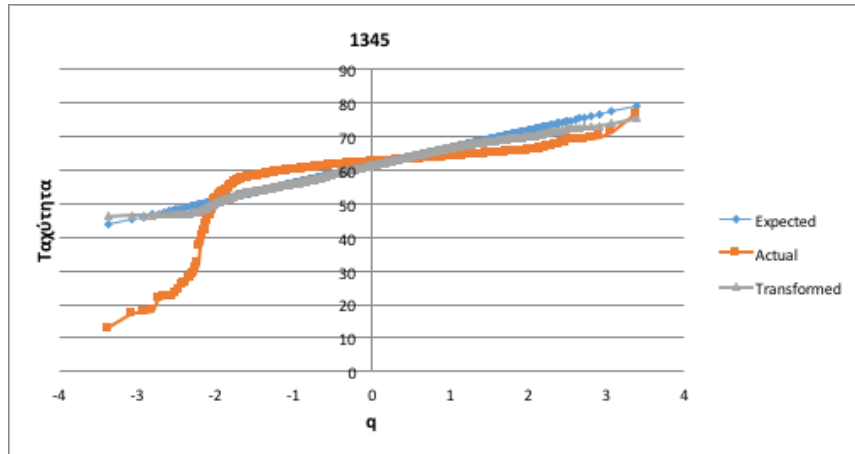
Διάγραμμα 4. 80 Q-Q Plot Πενταλέπτων Ταχύτητας για μεταμόρφωση τεσσάρων παραμέτρων (1345)



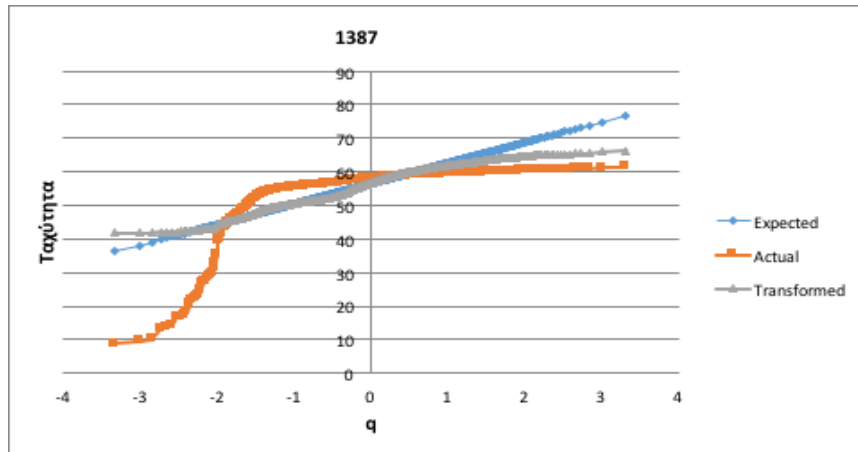
Διάγραμμα 4. 81 Q-Q Plot Πενταλέπτων Ταχύτητας για μεταμόρφωση τεσσάρων παραμέτρων (1386)

Διάγραμμα 4. 82 Q-Q Plot Πενταλέπτων Ταχύτητας για μεταμόρφωση τεσσάρων παραμέτρων (1379)

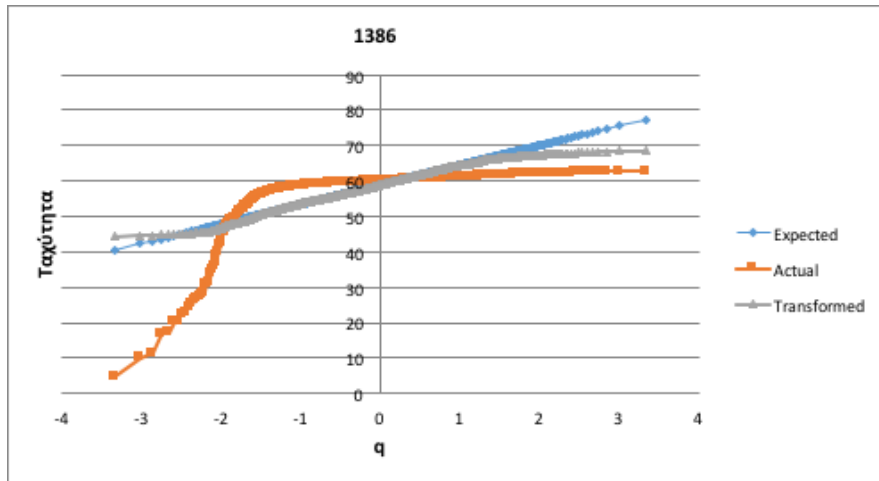
Ο ίδιος έλεγχος έγινε και για την ωριαία ταχύτητα όπου ο μετασχηματισμός των τριών παραμέτρων προσεγγίζει πολύ καλά την κανονική κατανομή (Διαγράμματα 4.83, 4.84, 4.85, 4.86). Για λόγους πληρότητας παρακάτω θα γίνει και ο έλεγχος με προσθήκη της τέταρτης



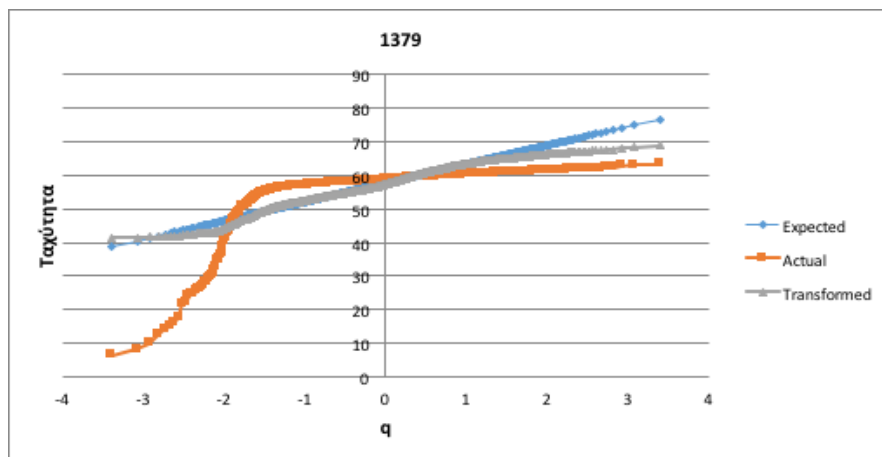
Διάγραμμα 4. 83 Q-Q Plot Ωριαίας Ταχύτητας για μεταμόρφωση τριών παραμέτρων (1345)



Διάγραμμα 4. 84 Q-Q Plot Ωριαίας Ταχύτητας για μεταμόρφωση τριών παραμέτρων (1387)

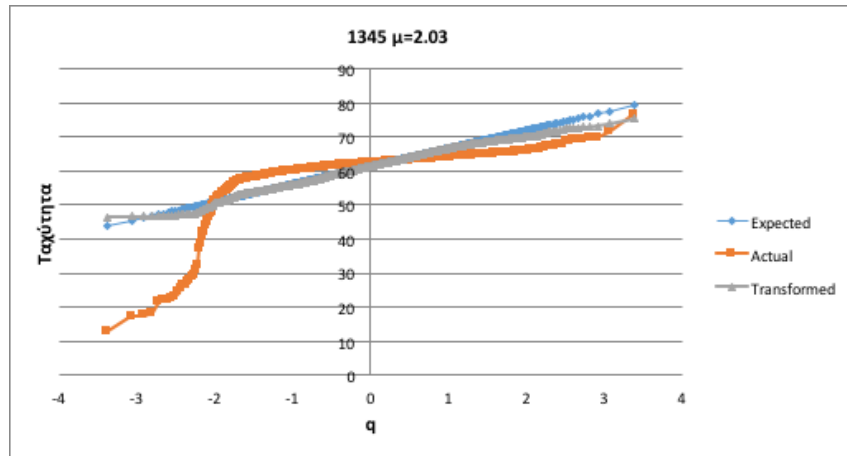


Διάγραμμα 4. 85 Q-Q Plot Ωριαίας Ταχύτητας για μεταμόρφωση τριών παραμέτρων (1386)

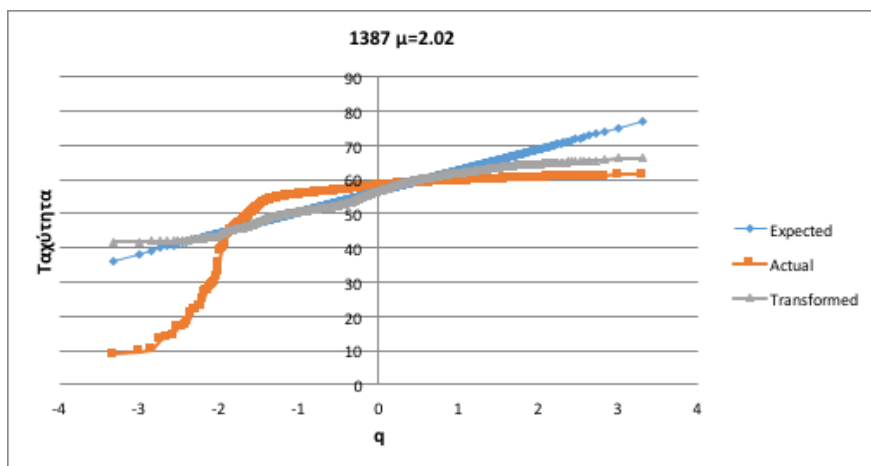


Διάγραμμα 4. 86 Q-Q Plot Ωριαίας Ταχύτητας για μεταμόρφωση τριών παραμέτρων (1379)

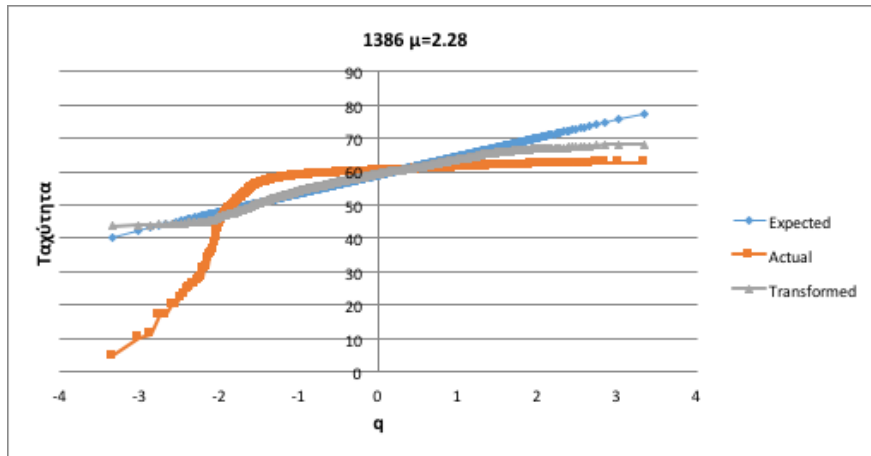
Με την προσθήκη της τέταρτης παραμέτρου δεν φαίνεται να υπάρχει αισθητή βελτίωση (Διαγράμματα 4.87, 4.88, 4.89, 4.90). Έτσι δεν έχει νόημα να προστεθεί μια τέταρτη παράμετρος η οποία δεν προσφέρει αισθητά καλύτερη κανονικοποίηση. Τα αποτελέσματα αυτά ελέγχθηκαν με το τύπου του σφάλματος που παρουσιάζεται στο τρίτο κεφάλαιο και σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται γραφικά δίνοντας τη δυνατότητα καλύτερης κατανόησης και εποπτείας της κατάστασης.



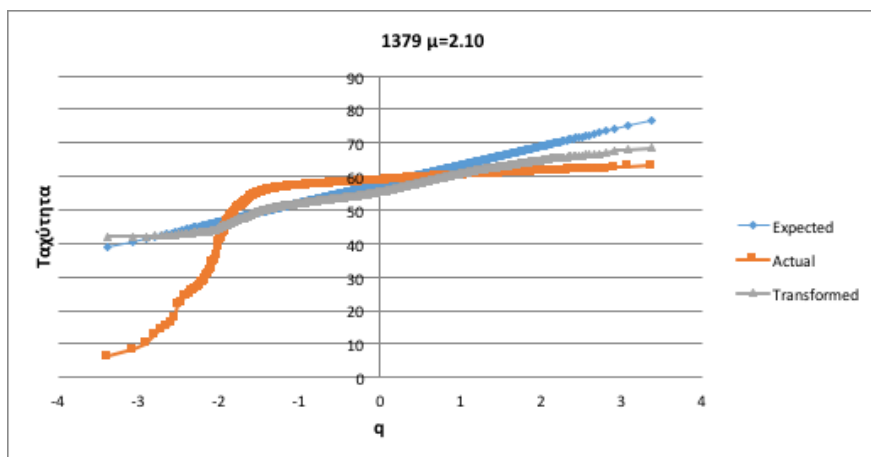
Διάγραμμα 4. 87 Q-Q Plot Ωριαίας Ταχύτητας για μεταμόρφωση τεσσάρων παραμέτρων (1345)



Διάγραμμα 4. 88 Q-Q Plot Ωριαίας Ταχύτητας για μεταμόρφωση τεσσάρων παραμέτρων (1387)

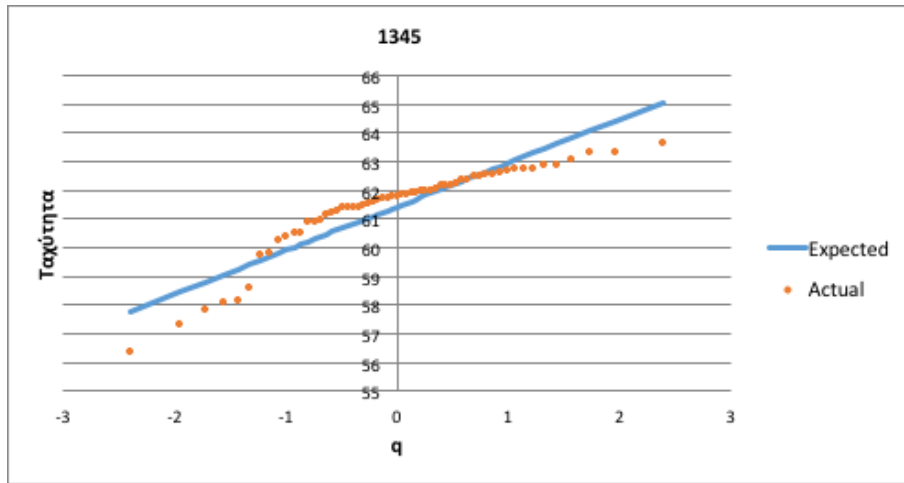


Διάγραμμα 4. 89 Q-Q Plot Ωριαίας Ταχύτητας για μεταμόρφωση τεσσάρων παραμέτρων (1386)

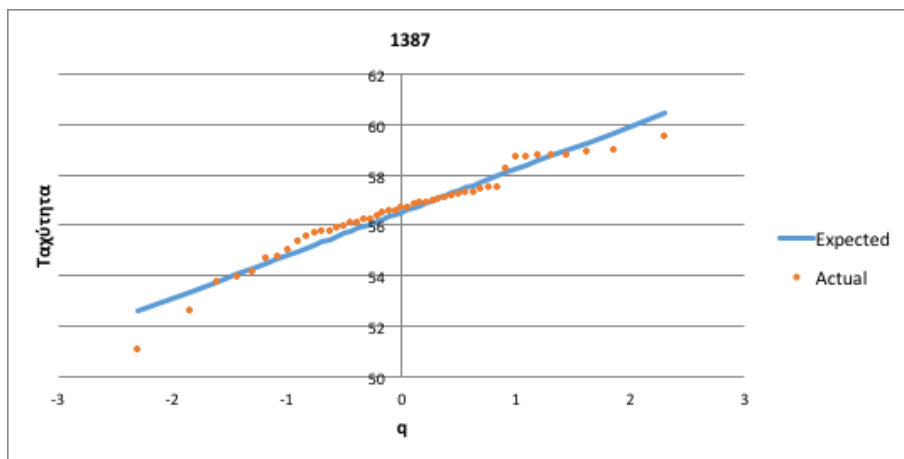


Διάγραμμα 4. 90 Q-Q Plot Ωριαίας Ταχύτητας για μεταμόρφωση τεσσάρων παραμέτρων (1379)

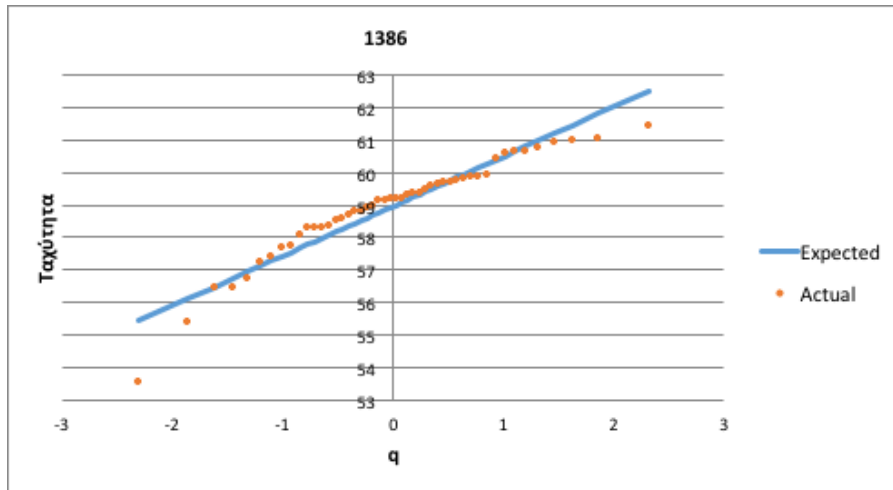
Έπειτα έγινε ο έλεγχος για την ημερήσια ταχύτητα που όπως είναι λογικό εμφανίζει μια πολύ καλή προσέγγιση της κατανομής χωρίς να χρειάζεται μεταμόρφωση ώστε να κανονικοποιηθεί. Τα δεδομένα για ημερήσια κυκλοφορία είναι πολύ λιγότερα (60 τιμές περίπου) αλλά δείχνουν τη τάση της κατανομής να κανονικοποιηθεί.



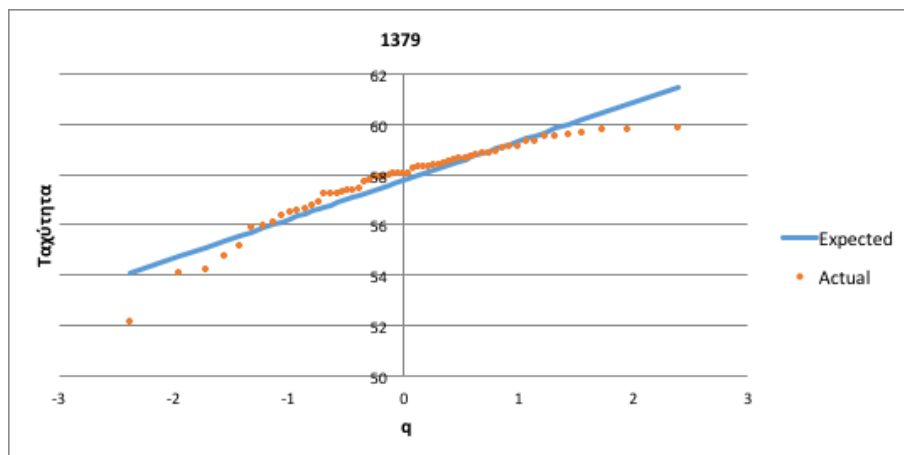
Διάγραμμα 4. 91 Q-Q Plot Ημερήσιας Ταχύτητας (1345)



Διάγραμμα 4. 92 Q-Q Plot Ημερήσιας Ταχύτητας (1387)

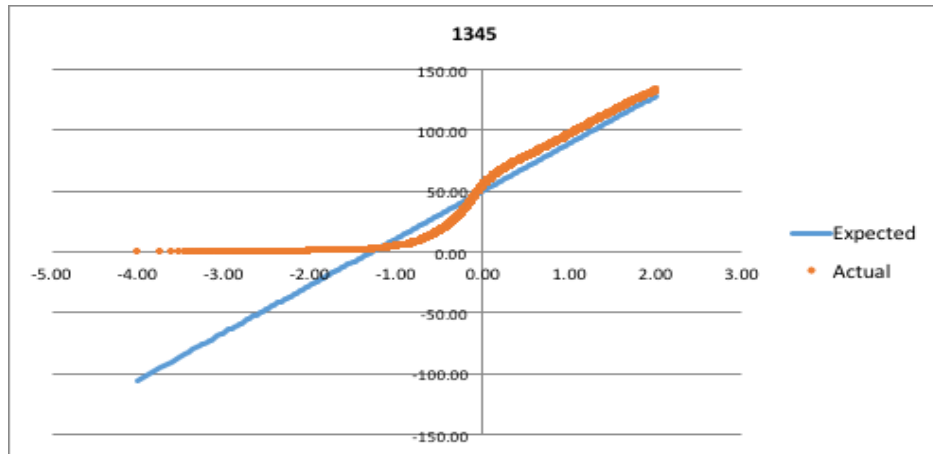


Διάγραμμα 4. 93 Q-Q Plot Ημερήσιας Ταχύτητας (1386)

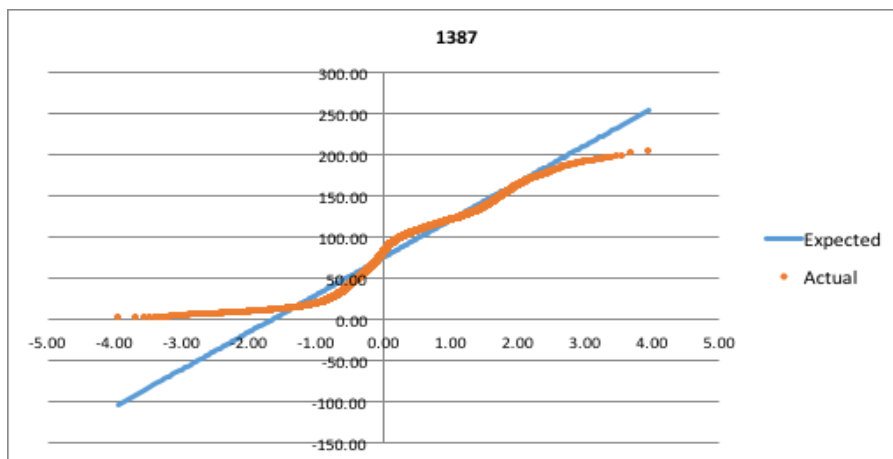


Διάγραμμα 4. 94 Q-Q Plot Ημερήσιας Ταχύτητας (1379)

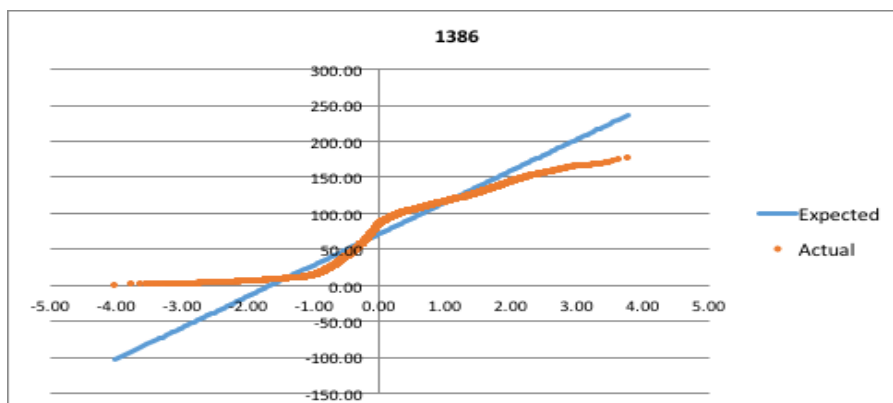
Αντίστοιχοι έλεγχοι έγιναν κι για τα πεντάλεπτα όγκου κυκλοφορίας (volume) (Διαγράμματα 4.95, 4.96, 4.97, 4.98). Εδώ φαίνεται η κατανομή να έχει κανονική μορφή από τη μέση τιμή και μετά. Στις μικρές τιμές και λόγω του φραγμού του μηδέν η κατανομή απέχει πολύ από την κανονική. Δεν έγινε προσπάθεια μεταμόρφωσης της καθώς το προβλεπτικό μοντέλο δεν θα αφορά τον όγκο κυκλοφορίας.



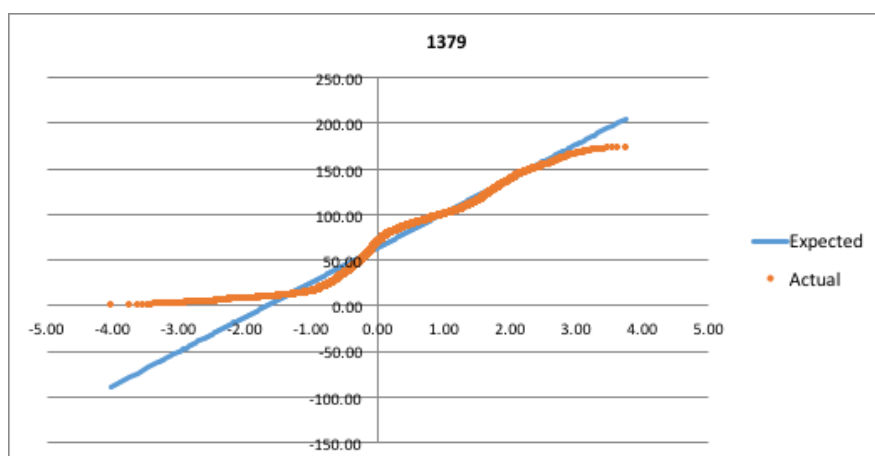
Διάγραμμα 4. 95 Q-Q Plot Πενταλέπτων Όγκου Κυκλοφορίας (1345)



Διάγραμμα 4. 96 Q-Q Plot Πενταλέπτων Όγκου Κυκλοφορίας (1387)

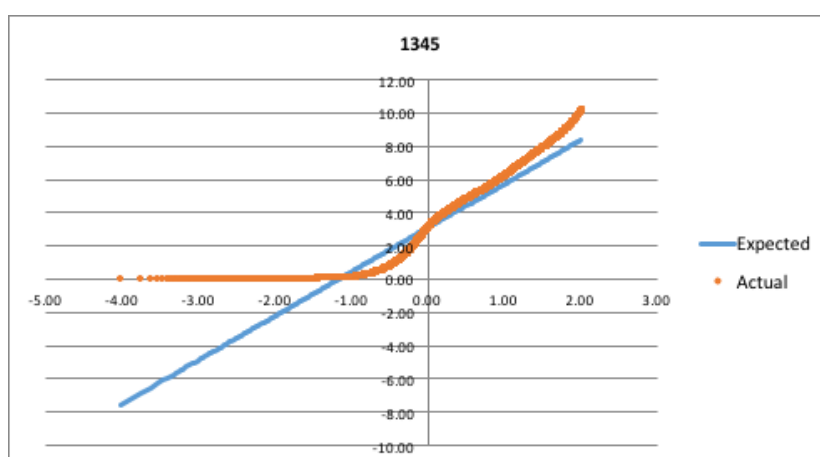


Διάγραμμα 4. 97 Q-Q Plot Πενταλέπτων Όγκου Κυκλοφορίας (1386)

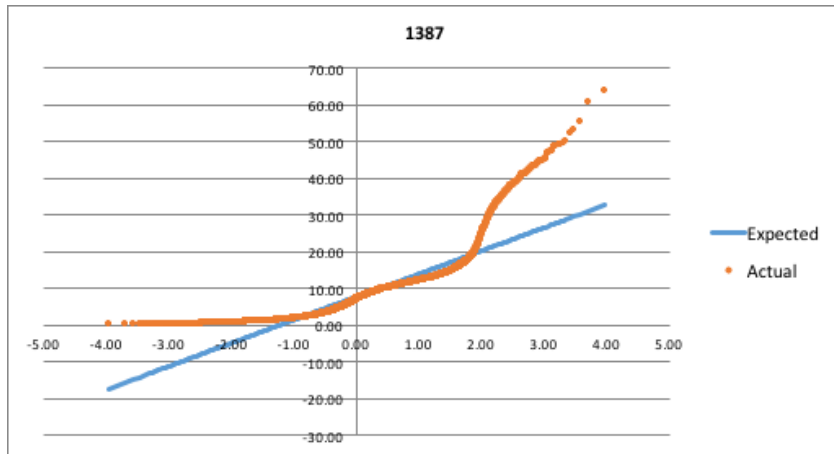


Διάγραμμα 4. 98 Q-Q Plot Πενταλέπτων Όγκου Κυκλοφορίας (1379)

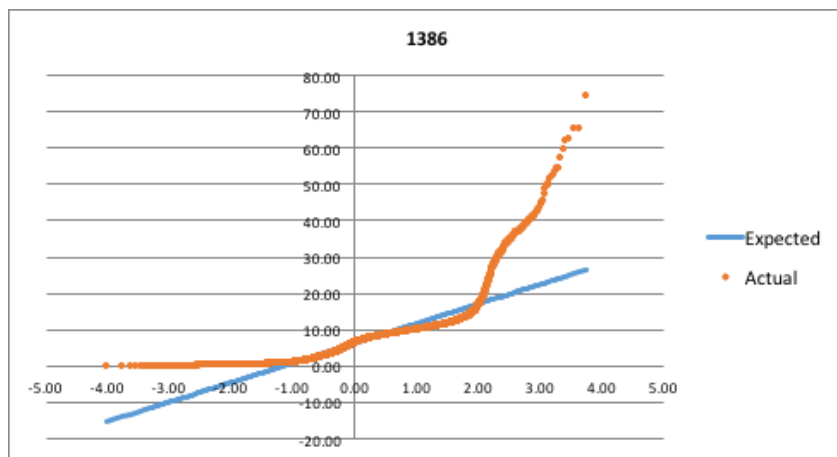
Ο ίδιος έλεγχος έγινε και για το ποσοστό κατάληψης (occupancy) (Διαγράμματα 4.99, 4.100, 4.101, 4.102). Το ποσοστό κατάληψης παρουσιάζει ακόμα μεγαλύτερες αποκλίσεις από την κανονική κατανομή τόσο στις μικρές τιμές όσο στις μεγάλες. Δεν έγινε προσπάθεια μεταμόρφωσης της καθώς το προβλεπτικό μοντέλο δεν θα αφορά τον ποσοστό κατάληψης.



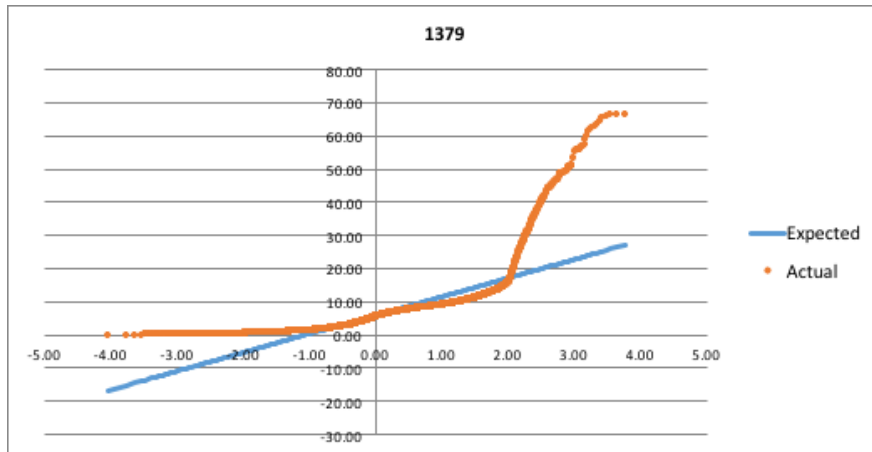
Διάγραμμα 4. 99 Q-Q Plot Πενταλέπτων Ποσοστού Κατάληψης(1345)



Διάγραμμα 4. 100 Q-Q Plot Πενταλέπτων Ποσοστού Κατάληψης(1387)



Διάγραμμα 4. 101 Q-Q Plot Πενταλέπτων Ποσοστού Κατάληψης(1386)



Διάγραμμα 4. 102 Q-Q Plot Πενταλέπτων Ποσοστού Κατάληψης(1379)

4.3 Επιλογή του Μοντέλου

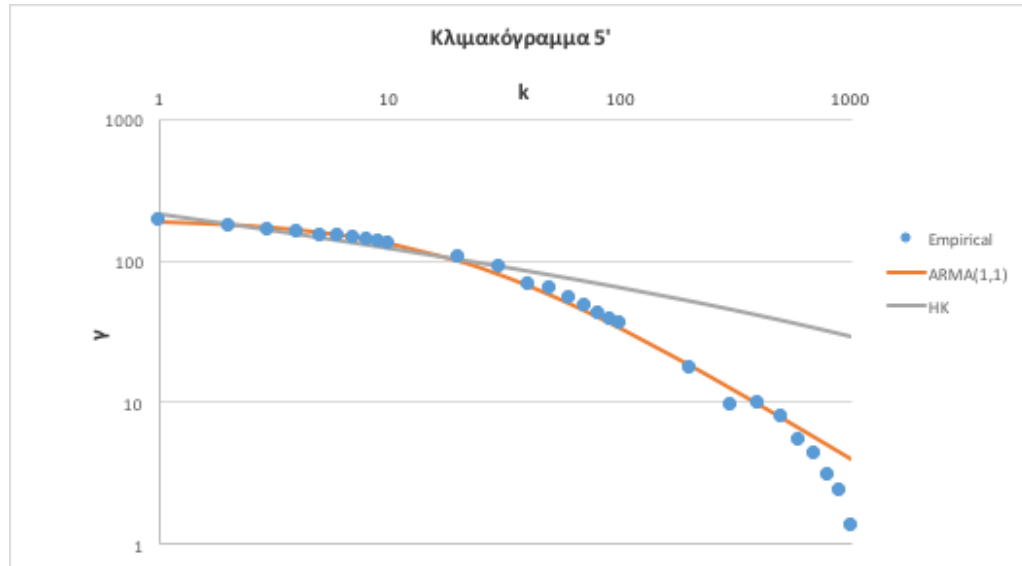
Αναλύσεις έγιναν σε όλο το φάσμα των διαθέσιμων δεδομένων. Η επιλογή του μοντέλου, όμως, αφορά τα δεδομένα της ταχύτητας κι όχι του ποσοστού κατάληψης και του όγκου κυκλοφορίας.

Για την επιλογή του μοντέλου είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της δομής αυτοσυσχέτισης κι από ποιο προσομοίωμα ικανοποιείται και τον προσδιορισμό της κατανομής. Ο προσδιορισμός της δομής αυτοσυσχέτισης έγινε με τη βοήθεια των κλιμακογραμμάτων και της κατανομής με τα Q-Q Plot.

4.3.1 Δομή Αυτοσυσχέτισης

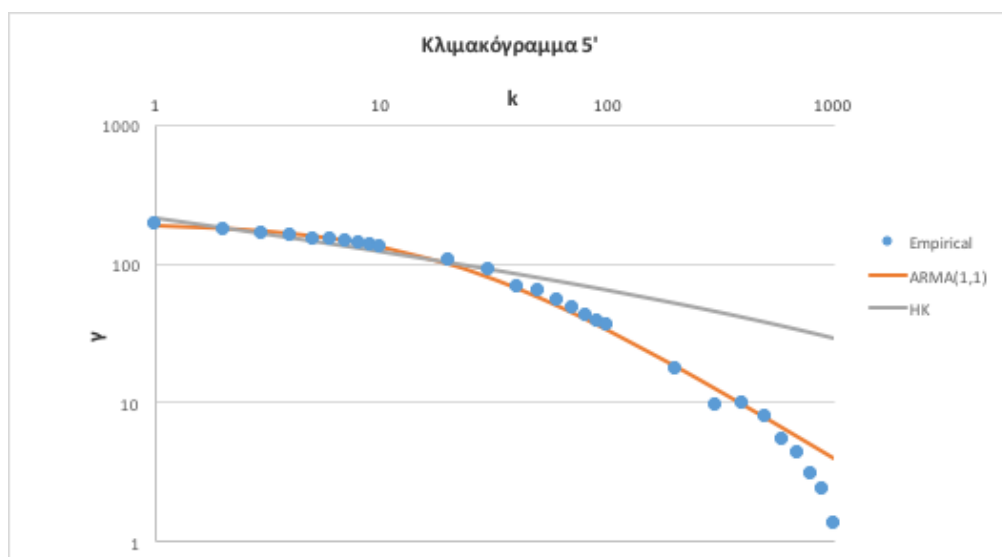
Το βασικό εργαλείο προσδιορισμού της δομής αυτοσυσχέτισης είναι το κλιμακόγραμμα. Έτσι προσαρμόσαμε το μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης τάξης 1 και το μοντέλο Hurst-Kolmogorov πάνω στο κλιμακόγραμμα της εμπειρικής χρονοσειράς. Εξ αρχής φαινόταν ότι το μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης τάξης 1 προσαρμοζόταν καλύτερα στις χρονοσειρές ταχύτητας πενταλέπτου και ώρας. Στις δυο κύριες επιστημονικές εργασίες όμως που ερευνήσαμε υποστηριζόταν ότι υπάρχει μακροπρόθεσμη εμμονή με υψηλούς συντελεστές Hurst ίσους με 0.83-0.84 που ικανοποιούσαν τις μεσαίες κλίμακες. Ικανοποιώντας τις

μεσαίες κλίμακες προέκυπτε ένας συντελεστής Hurst 0.9. Εν τέλει, προσαρμόσαμε το μοντέλο αυτοπαλινδρόμηση τάξης 1 και το μοντέλο ΗΚ στο κλιμακόγραμμα της εμπειρικής χρονοσειράς όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (βλέπε κεφάλαιο 3.2).



Διάγραμμα 4. 103 Κλιμακόγραμμα Πενταλέπτων Ταχύτητας με ARMA(1,1) και ΗΚ με $H=0.9$

Όπως φαίνεται πολύ χαρακτηριστικά στο διάγραμμα το μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης τάξης 1 προσεγγίζει πολύ καλά την εμπειρική χρονοσειρά από τις μικρές μέχρι τις μεγάλες κλίμακες. Από την άλλη το ΗΚ μοντέλο που προτείνεται από δυο βασικές επιστημονικές εργασίες προσεγγίζει ικανοποιητικά μέχρι κάποιο σημείο την εμπειρική χρονοσειρά. Οι αποκλίσεις που εμφανίζονται στις μεγάλες κλίμακες στο μοντέλο ΗΚ είναι αρκετά μεγάλες ώστε να δικαιολογηθούν από τη μεροληψία του μοντέλου συνεπώς προτείνεται το μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης τάξης 1 (βλέπε κεφάλαιο 3.2).



Διάγραμμα 4. 104 Κλιμακόγραμμα Ωριαίας Ταχύτητας με ARMA(1,1) και HK με $H=0.9$

Στο διάγραμμα 4.104 φαίνεται το κλιμακόγραμμα της ωριαίας ταχύτητας. Ουσιαστικά τα δυο κλιμακογράμματα δείχνουν το ίδιο πράγμα με τη διαφορά ότι η κλίμακα αυξάνεται πιο γρήγορα στο ωριαίο διάγραμμα. Τα συμπεράσματα έτσι είναι τα ίδια. Το μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης τάξης 1 ανταποκρίνεται καλύτερα έναντι του HK για το σύνολο των δεδομένων που έχουμε στη διάθεση μας.

Συνεπώς, η εφαρμογή που θα επιχειρηθεί θα αφορά την ωριαία ταχύτητα κι με το μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης τάξης 1 αλλά και με μοντέλο HK που αντιστοιχεί σε διεργασία Hurst-Kolmogorov ώστε να φανούν οι διαφορές των δυο αποτελεσμάτων και να γίνει σύγκριση των δυο εναλλακτικών. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των δυο μοντέλων:

Πίνακας 4. 5 Τα χαρακτηριστικά για τα μοντέλα HK και Μαρκόφ.

HK		GHK	
H	0.90	H	0.50
λ	40	λ	45
		q	2.5
n	1117	n	1117

Το μοντέλο GHK με συντελεστή Hurst ίσο με 0.50 οδηγεί στο μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης τάξης 1.

4.3.2 Κατανομή της Χρονοσειράς

Όπως αναφερθεί και στο δεύτερο κεφάλαιο η κανονική κατανομή αποτελεί την πιο βολική κατανομή για να χτίσεις ένα στοχαστικό μοντέλο τόσο για πρόβλεψη όσο για προσομοίωση (Koutsoyiannis et al. 1998). Για αυτό έγινε χρήση του ελέγχου Q-Q Plot για να δούμε πόσο κοντά στη συμπεριφορά της κανονικής κατανομής είναι η χρονοσειρά των ταχυτήτων. Λόγω των «βαριών» ουρών απαιτήθηκε μετασχηματισμός τριών ή τεσσάρων παραμέτρων.

Ως κλίμακα εφαρμογής επιλέχθηκε η ώρα. Εξετάζοντας τα ωριαία Q-Q Plot παρατηρήθηκε ότι η τέταρτη παράμετρος δεν βελτίωνε αισθητά τη μεταμόρφωση ως προς την κανονική κατανομή. Έτσι, επιλέχθηκε μετασχηματισμός τριών παραμέτρων (βλέπε κεφάλαιο 4.2.5). Οι έλεγχοι των Q-Q Plot παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.2.5. Οι παράμετροι για την ωριαία ταχύτητα για τους τέσσερεις ανιχνευτές παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα τα σφάλματα κι η μέθοδος υπολογισμού παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 3 «Μεθολογική Προσέγγιση»):

Πίνακας 4. 6 Παράμετροι Μετασχηματισμού Κανονικής Κατανομής

Detector	1345	1387	1386	1379
κ	10.22	16.13	36.00	17.03
λ	6.13	6.12	5.52	6.50
c	62.64	58.49	60.31	59.15
Error	4.68E+00	4.02E-15	3.19E-14	1.04E-05

5 Εφαρμογή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η εφαρμογή των δυο προτεινόμενων μοντέλων (HK και ARMA(1,1)). Το πρώτο μοντέλο είναι το ARMA(1,1) που προσομοιώνει πολύ καλά τη θεωρητική Μαρκοβιανή ανέλιξη (Markovian process). Το δεύτερο μοντέλο που θα εφαρμοστεί είναι το μοντέλο HK το οποίο αφορά τη Hurst-Kolmogorov ανέλιξη κι τη μακροπρόθεσμη εμμονή που τη χαρακτηρίζει.

Επιλέγεται να εφαρμοστούν κι τα δύο μοντέλα καθώς η στοχαστική ανάλυση που κάναμε μας οδηγεί σε μοντέλο Markov το οποίο κι προσομοιώνει πολύ καλά όλες τις κλίμακες του κλιμακογράμματος. Αλλά οι δυο βασικές επιστημονικές εργασίες που ερευνήσαμε (Belomestny and Siegel, 2003 και Shang et. al. 2006) υποστηρίζουν την ύπαρξη μακροπρόθεσμης εμμονής και υπολογίζουν το συντελεστή Hurst ίσο με 0.84 στις μεσαίες κλίμακες, δικαιολογώντας τις μεγάλες αποκλίσεις που εμφανίζονται στις υψηλές κλίμακες στη μεροληψία (bias) του μοντέλου. Για αυτό το λόγο επιλέγουμε να εφαρμόσουμε κι ένα μοντέλο Hurst-Kolmogorov με συντελεστή Hurst που υπολογίζουμε που είναι ίσος με 0.90. Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα ανάλυσης και σύγκρισης των δύο μοντέλων και φαίνονται καθαρά οι μεγάλες διαφορές που παρουσιάζουν οι δύο περιπτώσεις. Κάτι που δείχνει και την αναγκαιότητα και σημασία της σωστής ανάλυσης και επιλογής του κατάλληλου μοντέλου γιατί σε αντίθετη περίπτωση οδηγούμαστε σε προβλέψεις και διαχειρίσεις που είναι μακριά από την πραγματική κατάσταση.

Η εφαρμογή θα γίνει με τα στοιχεία του ανιχνευτή με τα πιο πλήρη δεδομένα που είναι ο 1345. Επιλέχθηκε η προσομοίωση να γίνει σε ωριαία κλίμακα με προσομοίωση Monte Carlo για 2000 ωριαίες τιμές της ταχύτητας δηλαδή περίπου 83 μέρες που σημαίνει κάτι περισσότερο από 2.5 μήνες. Παρακάτω παρατίθενται τα στατιστικά στοιχεία και οι παράμετροι μετασχηματισμού του ανιχνευτή 1345 που χρησιμοποιήθηκαν:

Πίνακας 5. 1 Στατιστικά χαρακτηριστικά και παράμετροι μετασχηματισμού του ανιχνευτή 1345

1345	
Μέση Τιμή	61.44
Τυπική Απόκλιση	5.24
κ	10.22
λ	6.13
c	62.64

Οι παράμετροι μετασχηματισμού χρησιμοποιούνται αφού έχει γίνει η προσομοίωση Monte Carlo ώστε να μετασχηματιστεί η κανονική κατανομή που προκύπτει από την προσομοίωση στην κατανομή της ιστορικής χρονοσειράς. Παρακάτω παρουσιάζεται η εξίσωση του μετασχηματισμού που χρησιμοποιήθηκε:

$$x = \pm \sqrt{\frac{\frac{(z-c)^2}{e^{\lambda^2(1+\frac{1}{\kappa})}+1}}{\kappa}} \lambda + c \quad (8)$$

όπου Z οι τιμές της προσομοίωσης, λ, c, κ οι παράμετροι μετασχηματισμού.

Η τιμή της παραμέτρου c ορίζει σε μεγάλο βαθμό τον μετασχηματισμό και το πρόσημο της ρίζας. Υπολογίστηκε ότι το περίπου το 50% των τιμών είναι μεγαλύτερο του c. Αυτό είναι λογικό καθώς η τιμή του c είναι κοντά στη μέση τιμή. Έτσι, αποφασίστηκε να επιλέγεται μέσω του λευκού θορύβου το πρόσημο της ρίζας. Πιο συγκεκριμένα, αν η τιμή RAND() (ένας τυχαίος αριθμός μεγαλύτερος ή ίσος του 0 και μικρότερος του 1) είναι μικρότερη του 0.5 τότε το πρόσημο να είναι αρνητικό αλλιώς θετικό.

5.1 Μοντέλο ARMA(1,1)

Το μοντέλο ARMA(1,1) προσεγγίζει Μαρκοβιανή ανέλιξη. Μια ανέλιξη $x(t)$ στην οποία, αν είναι γνωστό το παρόν, το μέλλον δεν εξαρτάται από παρελθόν αλλά μόνο από το παρόν, λέγεται ανέλιξη Μαρκόφ (Κουτσογιάννης, 2013). Σε επίπεδο δομής αυτοσυσχέτισης είναι το μοντέλο αυτοπλαινδρόμησης τάξης 1 εμφανίζει μια ισχυρή δομή στις μικρές μεσαίες

κλίμακες η οποία μετά χάνεται και στις μεγάλες κλίμακες καταλήγει στο λευκό θόρυβο (βλέπε κεφάλαιο 3.2).

Η προσομοίωση αυτή θα γίνει για ωραία κλίμακα 2000 τιμές και 100 προσομοιώσεις Monte Carlo με τη χρήση των παρακάτω σχέσεων. Από αυτές τις 100 συνθετικές χρονοσειρές θα εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με τη διαχείριση της κυκλοφορίας και επιπλέον θα γίνει σύγκριση με την ιστορική χρονοσειρά που προσομοιώνουμε και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης από το μοντέλο ΗΚ.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις και οι σχέσεις του μοντέλου μέσω των οποίων έγινε η προσομοίωση Monte Carlo:

$$x = \alpha x_{i-1} + v_i + bv_{i-1} \quad (9)$$

όπου η μεταβλητή v_i είναι ανεξάρτητη από όλα τις προηγούμενες v_j και x_j για $j < i$. Το μοντέλο είναι γνωστό ως μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης τάξης 1 – κινούμενου μέσου τάξης 1 (first-order autoregressive – first-order moving average / ARMA(1, 1)).

Αν μ_x και μ_v και οι μέσες τιμές των x_i και v_i , αντίστοιχα, γ_m η αυτοσυνδιασπορά της x_i για υστέρηση m , σ_v^2 η διασπορά της v_i τότε εύκολα προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις (Κουτσογιάννης, 2013):

$$\mu_x = \mu_v \frac{1+b}{1-a} \quad (10)$$

$$Cov[x_i, v_i] = \sigma_v^2, Cov[x_i, v_{i-1}] = (a + b)\sigma_v^2 \quad (11)$$

$$\gamma_0 = a\gamma_1 + (1 + ab + b^2)\sigma_v^2 \quad (12)$$

$$\gamma_1 = a\gamma_0 + b\sigma_v^2 \quad (13)$$

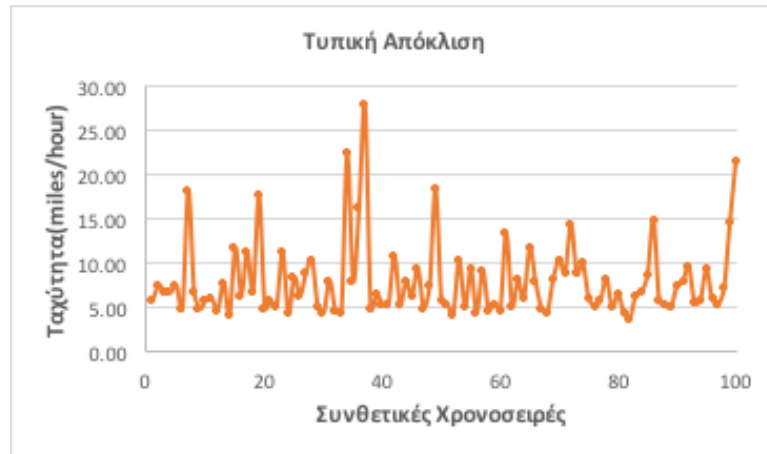
$$\gamma_m = a\gamma_{m-1} = a^{m-1}\gamma_1 \text{ για } m > 1 \quad (14)$$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των 100 συνθετικών χρονοσειρών που υπολογίστηκαν. Στο διάγραμμα 5.1 εμφανίζεται η μεταβολή της μέσης τιμής στις 100 συνθετικές χρονοσειρές που υπολογίστηκαν. Η μέση τιμή της ιστορικής χρονοσειράς είναι ίση με 61.44 mi/h (98.30 km/h). Οι προσομοιώσεις με το ARMA(1,1) πριν πραγματοποιηθεί ο μετασχηματισμός διατηρούσαν τη μέση τιμή περίπου στο 61.50 mi/h. Ο μετασχηματισμός όμως τείνει να αποκανονικοποιήσει την κατανομή πράγμα που κάνει τη μέση τιμή να κινείται γύρω από τα 62.50 mi/h απόκλιση της τάξεως του 1 mi/h (1.60 km/h) που είναι μικρή.



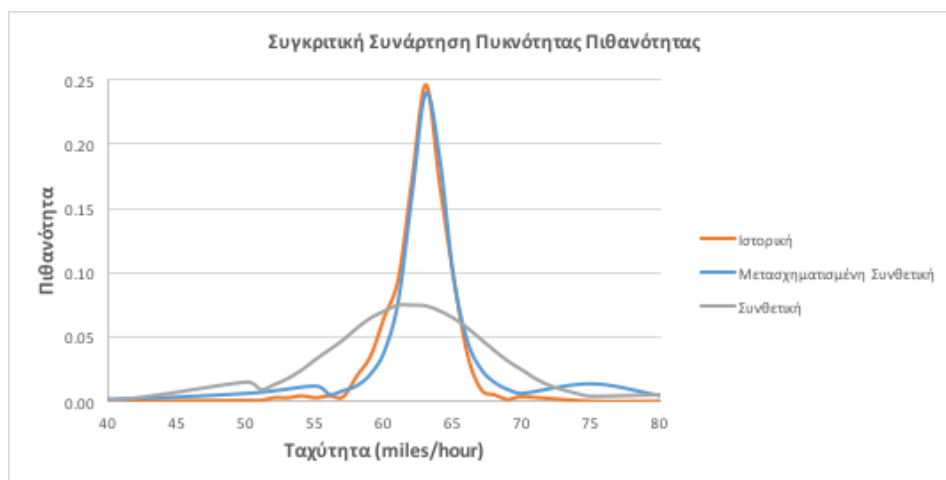
Διάγραμμα 5. 1 Μεταβολή της Μέσης Τιμής στις Συνθετικές Χρονοσειρές

Στο διάγραμμα 5.2 εμφανίζεται μεταβολή της τυπικής απόκλισης στις 100 συνθετικές χρονοσειρές. Η τυπική απόκλιση της ιστορικής χρονοσειράς είναι ίση με 5.24 mi/h. Πριν πραγματοποιηθεί η τυπική απόκλιση διατηρούταν στα επίπεδα της ιστορικής χρονοσειράς δηλαδή ίση με 5.42 mi/h. Ο μετασχηματισμός περισσότερο την τυπική απόκλιση από τη μέση τιμή καθώς επαναφέρει τις μεγαλύτερες αποκλίσεις της ιστορικής χρονοσειράς (συγκριτικά με την κανονική κατανομή) όπως τις «βαριές» ουρές. Είναι εύλογο η τυπική απόκλιση να αυξάνεται μετά τον μετασχηματισμό και στο διάγραμμα 5.2 φαίνεται να κινείται γύρω από τα 7.5 mi/h.



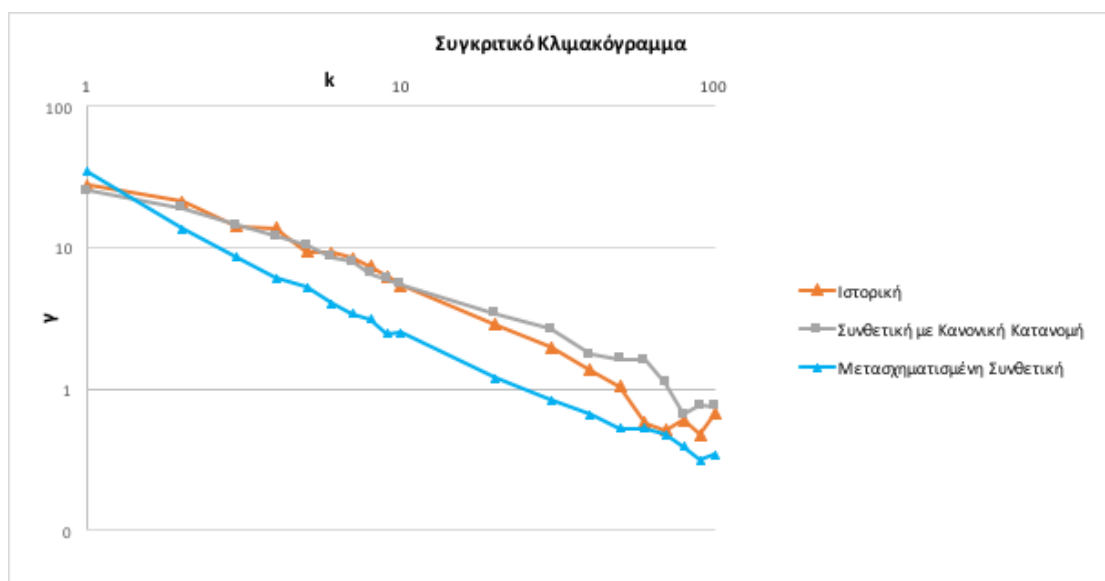
Διάγραμμα 5. 2 Μεταβολή της Τυπικής Απόκλισης στις Συνθετικές Χρονοσειρές.

Στο διάγραμμα 5.3 συνοψίζεται όλη η προσομοίωση του ARMA(1,1) κι φαίνεται το πόσο καλά το προσομοίωμα προσεγγίζει την ιστορική χρονοσειρά. Με το πορτοκαλί χρώμα φαίνεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ιστορικής χρονοσειράς. Με το μπλέ χρώμα εμφανίζεται ο μέσος όρος των 100 συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας κάθε συνθετικής χρονοσειράς μετά τον μετασχηματισμό και με το γκρί χρώμα φαίνεται η κατανομή που παράγει το ARMA(1,1) χωρίς να μετασχηματιστεί που είναι κανονική κατανομή. Απλούστερα εμφανίζεται η μέση συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Έτσι, φαίνεται πολύ καθαρά οι πολύ μικρές αποκλίσεις που υπάρχουν μεταξύ συνθετικής, μετασχηματισμένης συνθετικής και ιστορικής χρονοσειράς.



Διάγραμμα 5. 3 Μέση Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Συνθετικής Χρονοσειράς πριν και μετά τον μετασχηματισμό και Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Ιστορικής Χρονοσειράς.

Στο συγκριτικό κλιμακόγραμμα του διαγράμματος 5.4 φαίνεται η δομή αυτοσυσχέτισης της ιστορικής, της συνθετικής και της μετασχηματισμένης συνθετικής χρονοσειράς. Παρατηρείται ότι η προσομοίωση του μοντέλου ARMA(1,1) (πορτοκαλί) διατηρεί πολύ καλά τη δομή αυτοσυσχέτισης της ιστορικής χρονοσειράς (πράσινο). Μετά τον μετασχηματισμό εμφανίζεται να χάνεται κατά λίγο η δομή αυτοσυσχέτισης. Αυτό είναι εύλογο γιατί ο μετασχηματισμός προσπαθεί να επιστρέψει τις «βαριές» ουρές πράγμα που εντείνει τη μεταβλητότητα της χρονοσειράς.



Διάγραμμα 5. 4 Συγκριτικό κλιμακόγραμμα μεταξύ Ιστορικής, Συνθετικής και Μετασχηματισμένης Χρονοσειράς

5.2 Μοντέλο ΗΚ

Το άθροισμα τριών μοντέλων αυτοπαλινδρόμησης πρώτης τάξης AR(1) είναι το μοντέλο 3AR(1) και είναι ένα μοντέλο που ικανοποιεί τη Hurst-Kolmogorov ανέλιξη και το χαρακτηρίζει η μακροπρόθεσμη εμμονή.

Η προσομοίωση του δεύτερου μοντέλου θα γίνει όπως και του πρώτου μοντέλου δηλαδή σε ωριαία κλίμακα και 2000 τιμές ωριαίας ταχύτητας (2,5 μήνες περίπου) αλλά αυτή τη φορά με 2000 συνθετικές χρονοσειρές. Αυτή η διαφοροποίηση υφίσταται καθώς τα μοντέλα Μαρκοφ καταλήγουν γρήγορα στο Γκαουσιανό λευκό θόρυβο ($H=0,5$) δηλαδή στην τυχαιότητα. Συνεπώς δεν έχει νόημα να προσομοιώσουμε 2000 φορές το μοντέλο ARMA(1,1). Οι σχέσεις του AR(1) ακολουθούν παρακάτω:

Αν μ_x και μ_y οι μέσες τιμές των x_i και y_i , αντίστοιχα, γ_m η αυτοσυνδιασπορά της x_i για υστέρηση m , σ_y^2 η διασπορά της y_i , και μ_{3x} και μ_{3y} οι τρίτες κεντρικές ροπές των x_i και y_i , αντίστοιχα, τότε εύκολα προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις με τη χρήση των οποίων έγινε η προσομοίωση Monte Carlo:

Η σχέση που ορίζει το μοντέλο AR(1) είναι η παρακάτω:

$$x_i = ax_{i-1} + v_i \quad (15)$$

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις και οι σχέσεις του αθροίσματος των τριών μοντέλων AR(1) δηλαδή το 3AR(1):

$$Cov[x_i, v_i] = Cov[x_{i-1}, v_i] = 0, Cov[x_i, v_i] = \sigma_v^2, Cov[x_{i+m}, v_i] = a^m \sigma_v^2 \quad (m > 0) \quad (16)$$

$$\gamma_m = a^m \gamma_0 \quad (\text{ειδικότερα } \gamma_1 = a\gamma_0) \quad (17)$$

$$\mu_y = \mu_x(1 - a) \quad (18)$$

$$\sigma_y^2 = \gamma_0(1 - a^2) \quad (19)$$

$$\mu_{3y} = \mu_{3x}(1 - a^3) \quad (20)$$

Η ανέλιξη του 3AR(1) παράγεται ως άθροισμα τριών ανεξίτητων AR(1):

$$x_i = A_i + B_i + C_i \quad (21)$$

με συντελεστές αυτοσυσχέτισης για υστέρηση 1, αντίστοιχα:

$$\rho = 1.52(H - 0.5)^{1.32} \text{ για το } A_i \quad (22)$$

$$\varphi = 0.953 - 7.96(1 - H)^{3.85} \text{ για το } B_i \quad (23)$$

$$\xi = 0.993 + 0.007H, H > 0.76 \text{ για το } C_i \quad (24)$$

Για τις διασπορές έχουμε:

$$\sigma_A^2 = (1 - c_1 - c_2)\gamma_0 \quad (25)$$

$$\sigma_B^2 = c_1\gamma_0 \quad (26)$$

$$\sigma_C^2 = c_2\gamma_0 \quad (27)$$

Ο υπολογισμός των c_1 και c_2 γίνεται λύνοντας το παρακάτω σύστημα:

$$\rho_1 = (1 - c_1 - c_2)\rho + c_1\varphi + c_2\xi \quad (28)$$

$$\rho_{100} = (1 - c_1 - c_2)\rho^{100} + c_1\varphi^{100} + c_2\xi^{100} \quad (29)$$

Η αυτοσυσχέτιση είναι ανεξάρτητη της κλίμακας συνάθροισης k :

$$\rho_j = 0.5[(j + 1)^{2H} + (j - 1)^{2H}] - j^{2H}, j > 0 \quad (30)$$

Από τις 2000 συνθετικές χρονοσειρές παρατηρήθηκε ότι το μοντέλο 3AR(1) έχει μεγάλη μεταβλητότητα. Κάτι που είναι εύλογο γιατί χαρακτηρίζεται από μακροπρόθεσμη εμμονή με συντελεστή Hurst ίσο με 0.9. Το μοντέλο αυτό όπως και το ARMA(1,1) παράγουν την κανονική κατανομή για αυτό και ερευνήθηκε ο μετασχηματισμός. Ο μετασχηματισμός όμως αποκανονικοποιεί την κατανομή πράγμα που αυξάνει ακόμα περισσότερο τη μεταβλητότητα.

Επιχειρώντας την προσομοίωση προέκυψαν αποτελέσματα που βρίσκονται πολύ μακριά από την ιστορική χρονοσειρά και δεν είχε νόημα να αναλυθούν. Άλλωστε τα οχήματα που κινούνται στον αυτοκινητόδρομο δεν είναι δυνατό να αναπτύξουν πολύ μεγάλες τιμές αρά και ομαδοποίηση σε πολύ μεγάλες ταχύτητες. Το συμπέρασμα αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς οι διεργασίες Hurst-Kolmogorov χαρακτηρίζονται από μεγάλη μεταβλητότητα κάτι που δυσχεραίνεται περισσότερο από τον μετασχηματισμό κι όλα τα παραπάνω επιβεβαιώνονται από τις προσομοιώσεις Monte Carlo.

6 Συμπεράσματα και προτάσεις

6.1 Εισαγωγή

Στη διπλωματική εργασία αυτή πραγματοποιείται στοχαστική ανάλυση σε μη διακοπτόμενη κυκλοφοριακή ροή και διερευνάται, κυρίως, η ύπαρξη μακροπρόθεσμης εμμονής. Οι χρονοσειρές που αναλύθηκαν είναι σε κλίμακα πενταλέπτου, ώρας και ημέρας για την ταχύτητα (speed), ποσοστό κατάληψης (occupancy) και όγκο κυκλοφορίας (volume). Οι αναλύσεις έγιναν με στόχο τον προσδιορισμό των στατιστικών χαρακτηριστικών της κατανομής, γενικά τη μορφή της κατανομής των χρονοσειρών αλλά και τη δομή αυτοσυσχέτισης που χαρακτηρίζει τις χρονοσειρές. Η κατανομή των χρονοσειρών προσέγγιζαν την κανονική κατανομή για αυτό και ελέγχθηκαν με το γράφημα ποσοστημορίων (Q-Q-Plot) ως προς την κανονικότητά τους ενώ η δομή αυτοσυσχέτισης ερευνήθηκε μέσω των κλιμακογραμμάτων. Τέλος, έγινε ανάλυση για την ύπαρξη κυκλοστασιμότητας των χρονοσειρών.

Αφού πραγματοποιήθηκαν όλες οι παραπάνω αναλύσεις επιλέχθηκε το μοντέλο ARMA(1,1) που προσέγγιζε καλύτερα τη δομή αυτοσυσχέτισης της ιστορικής χρονοσειράς ταχύτητας για τον οποίο πραγματοποιείται η εφαρμογή. Επιπλέον, αποφασίστηκε να γίνει και ένας δεύτερος κύκλος προσομοιώσεων για το μοντέλο HK το οποίο είναι ένα μοντέλο Hurst-Kolmogorov έτσι ώστε να γίνει σύγκριση των δυο εφαρμογών και να υπάρχει καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων. Αυτά τα μοντέλα αφορούν την κανονική κατανομή για αυτό και πραγματοποιήθηκε κατάλληλος μετασχηματισμός προσέγγισης της κανονικής κατανομής. Στο πρώτο κύκλο προσομοιώσεων που αφορά το μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης πρώτης τάξης πραγματοποιήθηκαν 100 συνθετικές χρονοσειρές με τη μέθοδο Monte Carlo. Στη δεύτερη περίπτωση του μοντέλου HK και την ανελίξη Hurst-Kolmogorov πραγματοποιήθηκαν 2000 συνθετικές χρονοσειρές με τη μέθοδο Monte Carlo.

6.2 Βασικά Συμπεράσματα

Ερευνώντας τη δομή αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς ταχυτήτων φάνηκε ότι ακολουθεί την αυτοπαλινδρόμησης τάξης 1 και τις προσομοιώσεις Monte Carlo. Οι συνθετικές χρονοσειρές που παράχθηκαν έδειξαν ότι διατηρούν τη δομή αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς πολύ καλά. Επίσης, επιλέχθηκε να προσομοιωθεί και η θεωρητική διεργασία Hurst-Kolmogorov μέσω του μοντέλου 3AR(1) κι αυτό γιατί στις μικρές και στις μεσαίες κλίμακες εμφανίζεται υψηλός συντελεστής Hurst της τάξεως του 0.90. Επιπλέον δυο βασικές επιστημονικές εργασίες (Belomesnty and Siegel 2003 και Shang et al. 2006) προτείνουν την ανέλιξη Hurst-Kolmogorov ως την καταλληλότερη. Η εφαρμογή του μοντέλου 3AR(1), όμως, έδειξε ότι δεν προσομοιώνει την ιστορική χρονοσειρά και ότι εμφανίζει μεγάλη μεταβλητότητα, η οποία δεν μπορεί να δικαιολογηθεί στη μεροληψία (bias) του μοντέλου, και παράγει μεγάλες ταχύτητες που δεν εμφανίζονται σε ωριαίες ταχύτητες αυτοκινητοδρόμου. Συνεπώς, το θεωρητικό μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης τάξης 1 προκύπτει ως το καταλληλότερο καθώς επιτυγχάνει να προσομοιώσει τις μικρές και μεσαίες κλίμακες αφού στην αρχή εμφανίζει εμμονή και έπειτα στις μεγάλες κλίμακες καταλήγει σε λευκό θόρυβο με $H=0.50$ συμπέρασμα που επιβεβαιώνουν και οι Skagerstam and Hansen(2005) (βλέπε διάγραμμα 5.4).

Οι χρονοσειρές της ταχύτητας δεν ακολουθούν κανονική κατανομή. Η κατανομή της ιστορικής χρονοσειράς, χαρακτηρίζεται από «βαριές» ουρές και έντονη αρνητική ασυμμετρία. Για αυτό κι έγινε μετασχηματισμός τριών παραμέτρων που οδήγησε σε κανονική κατανομή (βλέπε διάγραμμα 5.3). Στη συνέχεια δοκιμάσθηκε και μετασχηματισμός τεσσάρων παραμέτρων που βελτίωσε κι άλλο την κατάσταση χωρίς όμως να κριθεί απαραίτητος. Ο μετασχηματισμός ναι μεν βελτίωσε την κατανομή αισθητά (βλέπε διάγραμμα 5.3) αλλά μεγάλωσε τη μεταβλητότητα των συνθετικών χρονοσειρών, επειδή οδηγεί σε μια κατανομή με πιο «βαριές» ουρές, άρα διαστρέβλωσε λίγο τη δομή αυτοσυσχέτισης (βλέπε διάγραμμα 5.4).

Τέλος, η ανάλυση των δεδομένων των δεδομένων από το Πόρτλαντ των Η.Π.Α. αλλά και των διοδίων στην Εγνατία Οδό έδειξαν μια ένδειξη διπλής κυκλοστασιμότητας των χρονοσειρών. Σε ημερήσιο επίπεδο εμφανίζεται μια περιοδικότητα με δύο έντονες αυξήσεις

της ταχύτητας και δυο έντονες μειώσεις που επαναλαμβάνονται κάθε μέρα με παρόμοιο τρόπο. Σε ετήσιο επίπεδο από τα στοιχεία των διελεύσεων στα διόδια φαίνεται μια ετήσια περιοδικότητα με αύξηση κατά του καλοκαιρινούς μήνες κι αιχμή το μήνα Αύγουστο και μείωση κατά τους χειμερινούς μήνες

6.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στα παραπάνω συμπεράσματα καταλήξαμε χρησιμοποιώντας δεδομένα δυο μηνών. Μια ανάλυση περισσότερων μηνών θα έδινε τη δυνατότητα να υπάρξουν πιο ασφαλή συμπεράσματα και στο επίπεδο της μακροπρόθεσμης εμμονής αφού εξ ορισμού η μακροπρόθεσμη εμμονή ορίζεται σε υπερετήσια κλίμακα. Τα παραπάνω δεδομένα θα βοηθούσαν και στο επίπεδο της κυκλοστασιμότητας κυρίως για την ετήσια κυκλοστασιμότητα. Μεγάλο ενδιαφέρον θα είχε και η αντίστοιχη ανάλυση σε ελληνικά δεδομένα ώστε να φανεί αν επιβεβαιώνονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν στην παρούσα διπλωματική εργασία αλλά και να γίνει μια εφαρμογή στον ελληνικό χώρο.

Ο μετασχηματισμός για τη κανονική κατανομή λειτούργησε πολύ καλά σε επίπεδο κατανομής αλλά διαστρέβλωσε λίγο τη δομή αυτοσυσχέτισης. Μια έρευνα με την επιρροή του μετασχηματισμού στην κατανομή κι σε σχετικά με τη δομή αυτοσυσχέτισης θα ήταν αρκετά χρήσιμος αφού η κανονική κατανομή αποτελεί μια από τις πιο απλές και συνήθεις κατανομές.

7 Βιβλιογραφία

D. Belomestny, H. Siegel (2003), On the Stochastic and Self-Similar Nature of Highway Traffic Data, Institut für Angewandte Mathematik, Universität Bonn.

E. Deligiannis, V. Tyrogiannis, O. Daskalou, P. Dimitriadis, Y. Markonis, T. Iliopoulou, and D. Koutsoyiannis (2016), Stochastic investigation of wind process for climatic variability identification, European Geosciences Union General Assembly.

P. Dimitriadis, and D. Koutsoyiannis (2015), Climacogram versus autocovariance and power spectrum in stochastic modelling for Markovian and Hurst–Kolmogorov processes, *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 29 (6).

Tilmann Gneiting and Martin Schlather (2004), Stochastic Models That Separate Fractal Dimension and the Hurst Effect, *SIAM Rev.*, 46(2), 269–282. (14 pages).

D. Grech, Z. Mazur (2004), Can One Make Any Crash Prediction in Finance Using the Local Hurst Exponent Idea?, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 336(1):133-145.

M Kale and FB Butar (2010), Fractal Analysis of Time Series and Distribution Properties of Hurst Exponent, *Journal of Mathematical Sciences & Mathematics Education*, Vol. 5 No. 1, 19 pages.

D. Koutsoyiannis (2013), *Encolpion of stochastics: Fundamentals of stochastic processes*, Department of Water Resources and Environmental Engineering – National Technical University of Athens, Athens.

D. Koutsoyiannis, F. Lombardo, P. Dimitriadis, Y. Markonis, and S. Stevens (2016), From fractals to stochastics: seeking theoretical consistency in analysis of geophysical data, *30 Years of Nonlinear Dynamics in Geosciences*, Rhodes, Greece.

D. Koutsoyiannis, H. Yao, and A. Georgakakos (2008), Medium-range flow prediction for the Nile: a comparison of stochastic and deterministic methods, *Hydrological Sciences Journal*, 53 (1), 142–164.

D. Koutsoyiannis, and A. Montanari (2007), Long term persistence and uncertainty on the long term, *European Geosciences Union General Assembly 2007, Geophysical Research Abstracts, Vol. 9*, Vienna, European Geosciences Union.

E. Lerias, A. Kalamioti, P. Dimitriadis, Y. Markonis, T. Iliopoulou, and D. Koutsoyiannis (2016), Stochastic investigation of temperature process for climatic variability identification, European Geosciences Union General Assembly.

S. K. Mitra (2012), Is Hurst Exponent Value Useful in Forecasting Financial Time Series?, *Asian Social Science*, Vol. 8, No. 8.

P.E. O'Connell, D. Koutsoyiannis, H. F. Lins, Y. Markonis, A. Montanari, and T.A. Cohn (2016), The scientific legacy of Harold Edwin Hurst (1880 – 1978), *Hydrological Sciences Journal*, 61 (9), 1571–1590.

B.Qian, K.Rasheed (2004), Hurst Exponent And Financial Market Predictability, *Financial Engineering and Applications*.

Pengjian Shang, Meng Wan (2006), Santi Kama, Fractal nature of highway traffic data, *Computers and Mathematics with Applications* 54 (2007) 107–116.

B. Skagerstam and A.Hansen (2005), Memory Effects and Scaling Properties of Traffic Flows, *EPL (Europhysics Letters)*.

A. Sotiriadou, A. Petsiou, E. Feloni, P. Kastis, T. Iliopoulou, Y. Markonis, H. Tyrallis, P. Dimitriadis, and D. Koutsoyiannis (2016), Stochastic investigation of precipitation process for climatic variability identification, European Geosciences Union General Assembly.

Will E. Leland, Murad S. Taqqu, Walter Willinger, Daniel V. Wilson (2002), On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic, ACM SIGCOMM, Computer Communication Review.

Δεληγιάννης Η. (2016), Διερεύνηση διπλής κυκλοστασιμότητας ανέμου για εφαρμογή σε στοχαστικά μοντέλα πρόβλεψης, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Κουτσογιάννης Δ. (2013), Σημειώσεις Στοχαστικών Μεθόδων στους Υδατικούς Πόρους, Έκδοση 4, 100 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Google Maps

U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration