



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

Διπλωματική Εργασία

**Πρόβλεψη Ταχύτητας σε Ελεύθερες Λεωφόρους με
Μοντέλα Χρονοσειρών με Χωρο-Χρονικές Συσχετίσεις**



Τσελέντης Δημήτριος

Επιβλέποντες
Καρλαύτης Γ. Ματθαίος, Αναπληρωτής Καθηγητής
Βλαχογιάννη Ι. Ελένη, Λέκτορας

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	1
Ευρετήριο Σχημάτων.....	4
Ευρετήριο Πινάκων	8
Ευχαριστίες	9
Σύνοψη.....	10
Abstract.....	11
Περίληψη.....	12
Κεφάλαιο 1	14
1.1 Η σημασία της παρούσας διπλωματικής εργασίας.....	14
1.1.1 Η σημασία της βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης της κυκλοφορίας	14
1.1.2 Η επιρροή της κυκλοφορίας από τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες.....	16
1.2 Ο σκοπός της Διπλωματικής εργασίας	19
1.3 Διάρθρωση της Διπλωματικής εργασίας.....	19
Κεφάλαιο 2	21
2.1 Εισαγωγή.....	21
2.2 Κατηγορίες προτύπων πρόβλεψης των στοιχείων κυκλοφορίας	22
2.2.1 Παραμετρικές μέθοδοι	23
2.2.2 Μη παραμετρικές μέθοδοι	30
2.2.3 Σύγκριση των δύο κατηγοριών προτύπων πρόβλεψης	32
2.4 Επιρροή της πρόβλεψης από τις καιρικές συνθήκες	35
2.4 Συμπεράσματα Βιβλιογραφίας.....	37
Κεφάλαιο 3	40
3.1 Περιγραφή βάσης δεδομένων	40
3.1.1 Κυκλοφοριακά δεδομένα	40
3.1.2 Βροχομετρικά δεδομένα	47
3.2 Ανάλυση βάσης δεδομένων	48

Κεφάλαιο 4	66
4.1 Θεωρητικό υπόβαθρο.....	66
4.1.1 Βασικές έννοιες χρονοσειρών	67
4.2 Τύποι προτύπων	73
4.2.1 ARIMA πρότυπα.....	73
4.2.2 Πρότυπα VECM.....	76
4.3 Στάδια εκτίμησης του πρότυπου	77
4.4 Περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού του πρότυπου	81
4.4.1 Επεξεργασία βάσης δεδομένων πριν την ανάλυση	81
4.4.2 Στόχος της ανάλυσης	81
4.4.2 Ανάλυση των προτύπων	82
Κεφάλαιο 5	86
5.1 Περίοδος 1: 05:00-23:00.....	87
5.1.1 Αριστερή Λωρίδα (Λωρίδα 1)	87
5.1.2 Μεσαία Λωρίδα (Λωρίδα 2)	92
5.1.3 Δεξιά Λωρίδα (Λωρίδα 3).....	97
5.1.4 Ανάλυση διατομής	102
5.1.5 Πρότυπα VECM.....	107
5.1 Περίοδος 2: 23:00-05:00.....	112
5.2.1 Αριστερή Λωρίδα (Λωρίδα 1)	112
5.2.2 Μεσαία Λωρίδα (Λωρίδα 2)	117
5.2.3 Δεξιά Λωρίδα (Λωρίδα 3).....	122
5.2.4 Ανάλυση διατομής	127
5.2.5 Πρότυπα VECM.....	132
Κεφάλαιο 6	145
6.1 Εισαγωγή.....	145
6.2 Ανάλυση των αποτελεσμάτων.....	146
6.3 Εξαγωγή συμπερασμάτων	149

6.4 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	150
Βιβλιογραφία	152

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 3.1: Περιοχή απεικόνισης VDS 24.60 έως VDS 26.00	43
Σχήμα 3.2: Περιοχή απεικόνισης VDS 26.70 έως VDS 27.80	43
Σχήμα 3.3: Περιοχή απεικόνισης VDS 28.30 έως VDS 29.20	43
Σχήμα 3.4: Περιοχή απεικόνισης VDS 29.60 έως VDS 30.84	44
Σχήμα 3.5: Περιοχή απεικόνισης VDS 31.60 έως VDS 32.50	44
Σχήμα 3.6: Περιοχή απεικόνισης VDS 33.00 έως VDS 34.00	44
Σχήμα 3.7: Διάγραμμα Ταχύτητας-Χρόνου για τις 6 ημέρες.....	45
Σχήμα 3.8: Διάγραμμα Φόρτου-Χρόνου για τις 6 ημέρες.....	45
Σχήμα 3.9: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου για όλες τις λωρίδες και τις ημέρες.....	49
Σχήμα 3.10: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου για τη λωρίδα 1 και για όλες τις ημέρες.....	50
Σχήμα 3.11: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου για τη λωρίδα 2 και για όλες τις ημέρες.....	50
Σχήμα 3.12: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου για τη λωρίδα 3 και για όλες τις ημέρες.....	50
Σχήμα 3.13: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου της 1ης ημέρας για τη λωρίδα 1.....	53
Σχήμα 3.14: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου της 2ης ημέρας για τη λωρίδα 1.....	53
Σχήμα 3.15: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου της 1ης ημέρας για τη λωρίδα 2.....	53
Σχήμα 3.16: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου της 2ης ημέρας για τη λωρίδα 2.....	54
Σχήμα 3.17: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου της 1ης ημέρας για τη λωρίδα 3.....	54
Σχήμα 3.18: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου της 2ης ημέρας για τη λωρίδα 3.....	54
Σχήμα 3.19: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου για τη λωρίδα 1 και για όλες τις περιόδους και ημέρες	56
Σχήμα 3.20: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου για τη λωρίδα 2 και για όλες τις περιόδους και ημέρες	56
Σχήμα 3.21: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου για τη λωρίδα 3 και για όλες τις περιόδους και ημέρες	56
Σχήμα 3.22: Χρονική εξέλιξη της Ταχύτητας, του Φόρτου και της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια των ημερών 14/1 έως 16/1	58

Σχήμα 3.23: Μέσος όρος Ταχυτήτων και Φόρτου ανά ώρα των δύο περιόδων κατά τη διάρκεια των ημερών 14/1 έως 16/1.....	60
Σχήμα 3.24: Μέσος όρος Ταχυτήτων και Φόρτου ανά ώρα της περιόδου 2 κατά τη διάρκεια των ημερών 14/1 έως 16/1.....	61
Σχήμα 5.1: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της Ταχύτητας για την λωρίδα 1.....	87
Σχήμα 5.2: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMA(1,0.1681,1)	89
Σχήμα 5.3: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMA(1,0.1681,1)	90
Σχήμα 5.4: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMAX(1,0.2588,1,5) ...	91
Σχήμα 5.5: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMAX(1,0.2588,1,5).....	92
Σχήμα 5.6: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της Ταχύτητας για την λωρίδα 2.....	93
Σχήμα 5.7: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMA(2,-0.0188,3)	94
Σχήμα 5.8: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMA(2,-0.0188,3)	95
Σχήμα 5.9: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMAX(1,0.17,1,5)	96
Σχήμα 5.10: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMAX(1,0.17,1,5)	97
Σχήμα 5.11: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της Ταχύτητας για την λωρίδα 3.....	98
Σχήμα 5.12: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMA(2,0.3789,2)	99
Σχήμα 5.13: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMA(2,0.3789,2)	100
Σχήμα 5.14: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMAX(1,-0.1348,1,5)	101
Σχήμα 5.15: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMAX(1,-0.1348,1,5)	102
Σχήμα 5.16: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της Ταχύτητας.....	103

Σχήμα 5.17: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMA(3,0.2019,3)	104
Σχήμα 5.18: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMA(3,0.2019,3)	105
Σχήμα 5.19: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMAX(3,0.3450,3,5)	106
Σχήμα 5.20: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMAX(3,0.3450,3,5).....	107
Σχήμα 5.21: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του VECM Ar(3) 1 lag για τη λωρίδα 1.....	109
Σχήμα 5.22: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του VECM Ar(3) 1 lag για τη λωρίδα 2.....	109
Σχήμα 5.23: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του VECM Ar(3) 1 lag για τη λωρίδα 3.....	109
Σχήμα 5.24: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο VECM Ar(3) 1 lag για τη λωρίδα 1	111
Σχήμα 5.25: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο VECM Ar(3) 1 lag για τη λωρίδα 2	111
Σχήμα 5.26: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο VECM Ar(3) 1 lag για τη λωρίδα	111
Σχήμα 5.27: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της Ταχύτητας για την λωρίδα 1.....	112
Σχήμα 5.28: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARMA(3,1)	114
Σχήμα 5.29: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARMA(3,1)	115
Σχήμα 5.30: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARMAX(1,1,5).....	116
Σχήμα 5.31: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARMAX(1,1,5)	117
Σχήμα 5.32: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της Ταχύτητας για την λωρίδα 2.....	118
Σχήμα 5.33: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMA(2,-0.2685,2) ...	119
Σχήμα 5.34: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMA(2,-0.2685,2)	120

Σχήμα 5.35: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMAX(3,-0.4957,1,5)	121
Σχήμα 5.36: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMAX(3,-0.4957,1,5)	122
Σχήμα 5.37: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της Ταχύτητας για την λωρίδα 3.....	123
Σχήμα 5.38: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMA(2,0.3101,2)	124
Σχήμα 5.39: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMA(2,0.3101,2)	125
Σχήμα 5.40: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMAX(1,0.3366,3,5)	126
Σχήμα 5.41: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMAX(1,0.3366,3,5).....	127
Σχήμα 5.42: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της Ταχύτητας.....	128
Σχήμα 5.43: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMA(2,-0.4899,3) ...	129
Σχήμα 5.44: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMA(2,-0.4899,3).....	130
Σχήμα 5.45: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMAX(1,0.1512,1,5)	131
Σχήμα 5.46: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMAX(1,0.1512,1,5).....	132
Σχήμα 5.47: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του VECM Ar(3) 1 lag για τη λωρίδα 1.....	134
Σχήμα 5.48: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του VECM Ar(3) 1 lag για τη λωρίδα 2.....	134
Σχήμα 5.49: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του VECM Ar(3) 1 lag για τη λωρίδα 3.....	134
Σχήμα 5.50: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο VECM Ar(2) 1 lag για τη λωρίδα 1	136
Σχήμα 5.51: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο VECM Ar(3) 1 lag για τη λωρίδα 2	136
Σχήμα 5.52: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο VECM Ar(3) 1 lag για τη λωρίδα 3	136

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Κατανομή σφαλμάτων πρόβλεψης.....	28
Πίνακας 3.1: Βασικά στατιστικά μεγέθη της Βάσης δεδομένων	63
Πίνακας 5.1: Τύποι εφαρμοσθέντων προτύπων.....	86
Πίνακας 5.2: Πίνακας Προτύπων ARFIMA περιόδου 1 και δείκτες αξιολόγησης	137
Πίνακας 5.3: Πίνακας Προτύπων ARFIMAX περιόδου 1 και δείκτες αξιολόγησης	138
Πίνακας 5.4: Πίνακας Προτύπων ARFIMA περιόδου 2 και δείκτες αξιολόγησης	139
Πίνακας 5.5: Πίνακας Προτύπων ARFIMAX περιόδου 2 και δείκτες αξιολόγησης	140
Πίνακας 5.6: Πίνακας Προτύπων VECM των περιόδων 1 και 2 και δείκτες αξιολόγησης	141

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους δύο επιβλέποντες της διπλωματικής αυτής εργασίας, τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Καρλαύτη Γ. Ματθαίο και την Λέκτορα κ. Βλαχογιάννη Ι. Ελένη για τις πολύτιμες συμβουλές και κατευθύνσεις που μου έδωσαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της. Χωρίς την απαραίτητη και συνεχή καθοδήγηση τους, η υλοποίηση της δεν θα ήταν δυνατή. Επιπρόσθετα, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω να δώσω στον κ. Χρυσικάκη Παναγιώτη για την παραχώρηση της βάσης δεδομένων πάνω στην οποία βασίστηκε η ανάλυση και στην Πολ. Μηχ. Κ. Ορφανού Φωτεινή για τη βοήθεια που μου παρείχε σχετικά με την οργάνωση και προεργασία της βάσης δεδομένων. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών για τις γνώσεις που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια φοίτησής μου.

Σύνοψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη και αξιολόγηση των προτύπων πρόβλεψης της ταχύτητας σε ελεύθερη λεωφόρο μέσω των προτύπων ARIMA και των παραγώγων τους. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, εφαρμόζονται και αξιολογούνται ως προς την ακρίβειά τους για πρώτη φορά παραμετρικά πρότυπα Vector Error Correction Models (VECM). Τα πρότυπα που αναπτύσσονται λαμβάνουν υπόψη το φόρτο και την ένταση της βροχόπτωσης ως εξωγενείς παράγοντες. Ακόμα, λαμβάνεται υπόψη η χώρο-χρονική εξέλιξη της κυκλοφορίας. Αναλύσεις διεξάγονται σε επίπεδο διατομής και ανά λωρίδα. Η προέλευση των δεδομένων που αξιοποιήθηκαν είναι από τμήμα του αυτοκινητοδρόμου της «Αττικής Οδού» μήκους 10 χιλιομέτρων. Η βάση δεδομένων αποτελείται από μετρήσεις ταχύτητας, φόρτου και βροχόπτωσης ανά 5 λεπτά. Θεωρείται ότι η ημέρα μπορεί να χωριστεί σε δύο περιόδους στις οποίες διερευνάται η βελτίωση της ακρίβειας πρόβλεψης κατά την ανάλυση ανά λωρίδα και ανά διατομή. Από την ανάλυση προκύπτει ότι η πρόβλεψη βελτιώνεται λόγω διαχωρισμού σε δύο περιόδους μελέτης και λόγω μελέτης της διατομής της οδού συνολικά και όχι ανά λωρίδα. Ακόμα, τα αποτελέσματα δείχνουν την καλή απόδοση των προτύπων VECM και την αισθητή βελτίωση λόγω εισαγωγής των εξωγενών μεταβλητών. Η κρίσιμη για τα πρότυπα (κατά τις ώρες αιχμής) χώρο-χρονική πληροφορία φαίνεται να είναι ο φωρατής μελέτης και ο προηγούμενός του καθώς και οι πληροφορίες μίας χρονικής υστέρησης πριν. Η επιρροή της βροχόπτωσης προκύπτει να είναι ασθενής.

Abstract

The objective of this thesis is to develop and evaluate the accuracy of advanced ARIMA models and their derivatives for freeway speed prediction. Advanced Vector Error Correction Models (VECM) are for the first time applied and evaluated. Models developed take into consideration both volume and precipitation intensity as exogenous parameters from the point of interest as well as from upstream locations. Analyses are conducted in a section and lane basis. Data come from a 10km section of ATTICA Tollway and include speed, volume and precipitation data for every 5 minutes for the 10 km under study. Daily traffic evolution is divided into two periods and different models for these periods are developed for both section and lane consideration. Results show that the best accuracy is achieved for the section based models. They also indicate a good predictability of the VECM models. Moreover, improved accuracy is achieved through the incorporation of exogenous variables. The critical space-time information found to be from one lag before, the detector of study and the just upstream. Finally, the influence of rainfall is found to be weak.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη και αξιολόγηση στοχαστικών προτύπων χρονοσειρών για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της ταχύτητας σε διατομή αλλά και λωρίδα σε αυτοκινητόδρομους. Αναπτύσσονται λοιπόν πρότυπα ARMA (Autoregressive Moving Average) και παράγωγά τους, ανάλογα με τα στατιστικά των χρονοσειρών των ταχυτήτων (μη στασιμότητα). Ακόμα, ελέγχεται η δυνατότητα εφαρμογής και η ακρίβεια των προτύπων VECM (Vector Error Correction Model) και τέλος, διερευνάται η συνεισφορά εξωγενών παραμέτρων, όπως ο φόρτος, η βροχόπτωση και η χωρική και χρονική εξέλιξη της κυκλοφορίας.

Ως αντικείμενο πρόγνωσης επιλέγεται η ταχύτητα και τα στοιχεία της ταχύτητας (ανάντη σημείων), του φόρτου και της βροχόπτωσης εισάγονται στο σύστημα προκειμένου να βρεθεί ο βαθμός που επηρεάζουν την εξέλιξη της ταχύτητας και γενικότερα της κυκλοφορίας. Αναπτύσσονται πρότυπα ARIMA, ARFIMA, ARIMAX και ARFIMAX, αλλά και για πρώτη φορά πρότυπα Vecm. Αναπτύσσονται πρότυπα ανά λωρίδα και ανά διατομή. Συγκεκριμένα, αναπτύσσονται:

- Πρότυπα ανά λωρίδα. Για κάθε λωρίδα αναπτύχθηκαν ξεχωριστά πρότυπα και βρέθηκε το βέλτιστο από αυτά.
- Πρότυπα διατομής οδού. Αντιμετωπίστηκε η οδός σαν μία ενιαία λωρίδα βρίσκοντας τους σταθμισμένους μέσους όρους όλων των λωρίδων. Έπειτα υπολογίστηκε για αυτή το βέλτιστο πρότυπο.

Σε όλα τα παραπάνω πρότυπα, έγινε προσθήκη συναρτήσεων μεταφοράς (εξωγενών μεταβλητών) και πιο συγκεκριμένα της ταχύτητας, του φόρτου και της βροχόπτωσης και εξετάστηκε αν βελτιώθηκε η ακρίβεια πρόβλεψης. Όλα τα παραπάνω πρότυπα αξιολογήθηκαν με βάση τις προβλέψεις τους και επιλέχθηκαν τα βέλτιστα.

Στην παρούσα εργασία, τα δεδομένα που αξιοποιούνται προέρχονται από την Αττική Οδό, έναν αυτοκινητόδρομο στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας ο οποίος παρουσιάζει αυξημένη ζήτηση σε καθημερινή βάση. Επίσης αντλήθηκαν μετεωρολογικά στοιχεία από τέσσερις μετεωρολογικούς σταθμούς του Ε.Μ.Π. οι

οποίοι βρίσκονται σε μικρή απόσταση από την περιοχή μελέτης. Λόγω διαφορετικών κυκλοφοριακών χαρακτηριστικών, η ημέρα χωρίζεται σε δύο περιόδους μελέτης οι οποίες και αναλύονται ξεχωριστά.

Από τις αναλύσεις προκύπτει ότι ο χωρισμός της βάσης δεδομένων σε δύο περιόδους μελέτης ήταν ορθός και αποτελεσματικός δεδομένης της αρκετά μεγάλης διαφοράς στην ακρίβεια πρόγνωσης των μεγεθών μεταξύ των δύο περιόδων. Επιπρόσθετα, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι σε συνθήκες συμφόρησης όπου ο φόρτος και η ταχύτητα δεν έχουν μεγάλες διακυμάνσεις, είναι δυνατόν να προβλεφθεί με μεγαλύτερο βαθμό ακρίβειας το μέγεθος της ταχύτητας. Σαφώς βελτιωμένη πρόβλεψη παρατηρείται όταν πραγματοποιείται ανάλυση διατομής της οδού σε σχέση με αυτή ανά λωρίδα. Η διανυσματική πολυμεταβλητή ανάλυση που πραγματοποιήθηκε μέσω των προτύπων Vecm, απέδωσε προβλέψεις εξίσου καλές ή ελάχιστα χειρότερες από τα αντίστοιχα ARFIMA και ARIMA. Έγινε ιδιαίτερα αισθητή η βελτίωση της προβλεπτικής ικανότητας των προτύπων όταν σε αυτά προστέθηκαν ως εξωτερικές μεταβλητές ο φόρτος, η ταχύτητα και η βροχόπτωση. Καμία γενίκευση δεν μπορεί να γίνει όμως ως προς το ποιοι παράγοντες συνετέλεσαν κυρίως σε αυτό. Αντίθετα, η στατιστική ανάλυση υπέδειξε τη βροχόπτωση ως στατιστικά ασήμαντη γεγονός που πιθανότατα να οφείλεται στην χαμηλή της ένταση.

Τέλος για περαιτέρω έρευνα σκόπιμο κρίνεται μελλοντικά να γίνεται η ανάλυση ανά περίοδο και σε ακόμη μικρότερης διάρκειας περιόδους ώστε να εξεταστεί η πιθανότητα βελτίωσης της πρόγνωσης με αυτόν τον τρόπο. Παρότι η αξιολόγηση στην παρούσα εργασία έγινε εντός δείγματος (in-sample) προτείνεται γενικώς να πραγματοποιείται και με εκτός δείγματος δεδομένα (out-of-sample). Σημαντικό θα ήταν να εξεταστεί αν βελτιώνεται η ακρίβεια των προβλέψεων των προτύπων Vecm με την εισαγωγή σε αυτά εξωγενών παραμέτρων όπως ο φόρτος και η βροχόπτωση. Προτείνεται λοιπόν στο μέλλον να αξιοποιηθεί μεγαλύτερη βάση δεδομένων για τον σκοπό αυτό καθώς και να εξεταστούν επεισόδια βροχόπτωσης μεγαλύτερης έκτασης και διάρκειας. Επίσης προτείνεται η ανάλυση με συχνότητα μεγεθών μικρότερη του πεντάλεπτου ή με μικρή διαφορά φάσης των χρονοσειρών ταχύτητας και βροχόπτωσης.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Η σημασία της παρούσας διπλωματικής εργασίας

1.1.1 Η σημασία της βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης της κυκλοφορίας

Η σημασία της πρόγνωσης των συνθηκών και μεγεθών της κυκλοφορίας είναι μεγάλη. Το 80 % των επιβατοχιλιομέτρων πραγματοποιούνται μέσω των επιβατικών οχημάτων. Η συνεχής αύξηση που παρατηρείται, της τάξης του 3 %, των επιβατοχιλιομέτρων που διανύουν τα Ι.Χ. κάθε δεκαετία, αποδεικνύει την ολοένα και μεγαλύτερη ζήτηση για μετακίνηση μέσω επιβατικών οχημάτων. Οι δύο κυριότεροι λόγοι που συντελούν σε αυτό το φαινόμενο είναι (Φραντζεσκάκης et al., 1997):

1. Η αύξηση της κινητικότητας, του πληθυσμού και της κατανάλωσης αγαθών απαιτούν περισσότερες και μεγαλύτερου μήκους μετακινήσεις
2. Η μεγαλύτερη χρήση του επιβατικού οχήματος σε σχέση με παλαιότερα το οποίο απαιτεί μεγαλύτερο χώρο ανά μεταφερόμενο επιβάτη απ' ότι η χρήση Μέσων Μαζικής Μεταφοράς (Μ.Μ.Μ.)

Η ραγδαία αυτή αύξηση της κινητικότητας των Ι.Χ. έχει οδηγήσει σε προβλήματα αρκετά σημαντικά στα αστικά και υπεραστικά δίκτυα μεταφορών. Επιπλέον, η συγκέντρωση της ζήτησης αυτής κυρίως σε πολύ σύντομα χρονικά διαστήματα οδηγεί σε υπέρβαση της χωρητικότητας του συστήματος (κορεσμός). Τα προβλήματα αυτά είναι δύσκολο έως και αδύνατο να επιλυθούν μόνο μέσω μέτρων όπως η επέκταση του οδικού δικτύου (π.χ. δημιουργία νέων λωρίδων), η μείωση του κομίστρου των Μ.Μ.Μ. και η επιβολή διοδίων. Καθίσταται λοιπόν επιτακτική η ανάγκη

για όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση των υπάρχοντων δικτύων οδικών μεταφορών, αφού σε διαφορετική περίπτωση προβλήματα όπως η συμφόρηση και επομένως το χαμηλό επίπεδο εξυπηρέτησης, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η επιβάρυνση της δημόσιας υγείας, η μείωση της οδικής ασφάλειας και το συνεχώς αυξανόμενο κόστος δεν θα μπορούν να αποφευχθούν. Όλα τα παραπάνω λοιπόν συνηγορούν στην απαίτηση για βελτιστοποίηση της χρήσης των οδικών δικτύων και αειφόρο ανάπτυξη.

Προς αυτή την κατεύθυνση της βιώσιμης ανάπτυξης, αλλά και του εκσυγχρονισμού και αποτελεσματικότερης διαχείρισης των μεταφορών, έχουν δημιουργηθεί διάφορες τεχνολογικές λύσεις και συστήματα πληροφορικής και μεταφορών. Η ανάπτυξη Συστημάτων Ευφυών Μεταφορών (Intelligent Transport Systems - ITS) στην Ελλάδα, έχει αρχίσει να βρίσκει εφαρμογές σε έργα οδικών υποδομών και στις δημόσιες συγκοινωνίες. Η χρονική συγκυρία της ανάπτυξης βασικών οδικών υποδομών κατά την τελευταία δεκαετία – τη δεκαετία ουσιαστικά που αναγνωρίζεται η χρησιμότητα των ITS και υπάρχει σχετική ωριμότητα στις εφαρμογές τους – οδήγησε στην ενσωμάτωσή τους στους νέους οδικούς άξονες, με έμφαση κυρίως στα συστήματα ηλεκτρονικής χρέωσης της οδού, στα συστήματα παρακολούθησης της κυκλοφορίας, στα σύγχρονα πληροφοριακά συστήματα και στις πινακίδες πολλαπλών μηνυμάτων (Υπουργείο Ανάπτυξης Ανταγωνιστικότητας Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων). Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η κυκλοφοριακή συμφόρηση, οι καθυστερήσεις οι εκπομπές ρύπων και ο χρόνος διαδρομής και επιπλέον παρέχεται βοήθεια στους χρήστες ώστε να επιλέξουν το βέλτιστο ως προς τη διαδρομή, το χρόνο αναχώρησης και τον τρόπο μετακίνησης (Σταθόπουλος και Καρλαύτης, 2003).

Προκειμένου όμως να εφαρμοστούν και να γίνουν πλήρως εκμεταλλεύσιμες οι δυνατότητες των ευφυών συστημάτων, θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα ακριβούς βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης των συνθηκών κυκλοφορίας. Η απαίτηση λοιπόν που υπάρχει είναι ο μικρός ορίζοντας πρόβλεψης του πρότυπου που θα επιλεγεί. Για παράδειγμα, κανένα χρήστη μίας οδού δεν ενδιαφέρει η πρόβλεψη της ταχύτητας σε ένα σημείο 5 χιλιόμετρα κατάντη του, ένα μήνα ή ένα χρόνο μετά. Έτσι, η δυνατότητα της πρόγνωσης του φόρτου και του χρόνου μίας διαδρομής, σε ορίζοντα αρκετών λεπτών καθώς και η αέναη ανανέωσή της χρησιμοποιώντας στοιχεία πραγματικού χρόνου, είναι η βασική απαίτηση για να επιτευχθεί ο δυναμικός έλεγχος της κυκλοφορίας (Cheslow et al., 1992).

Στην πράξη, η διαχείριση της κυκλοφορίας κυριαρχείται από τη χρήση των ευφυών συγκοινωνιακών συστημάτων, τη ραγδαία εξέλιξη της υπολογιστικής ισχύος μέσω των ηλεκτρονικών υπολογιστών και την ανάπτυξη ευέλικτων μαθηματικών μεθόδων (Vlahogianni et al., 2004). Συνδέοντας λοιπόν όλα τα παραπάνω, στόχος είναι η ανάπτυξη και επιλογή του κατάλληλου σε κάθε περίπτωση προτύπου ώστε η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της κυκλοφορίας να πραγματοποιηθεί στον καλύτερο δυνατό βαθμό – και κατ' επέκταση να λειτουργήσουν όσο το δυνατό καλύτερα τα ευφυή συστήματα.

Τα πρότυπα πρόβλεψης των κυκλοφοριακών συνθηκών που έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί είναι πολλά. Κάποια από αυτά είναι παραμετρικών μεθόδων όπως τα ARIMA, της εκθετικής εξομάλυνσης και του ιστορικού μέσου και κάποια άλλα μη παραμετρικών μεθόδων όπως η μη παραμετρική παλινδρόμηση και τα νευρωνικά δίκτυα. Το σημαντικό στην παρούσα εργασία είναι το γεγονός ότι πρώτη φορά εξετάζεται η ακρίβεια των προτύπων VECM (διανυσματικά πρότυπα διόρθωσης λάθους) τα οποία είναι πρότυπα πολυπαραμετρικά και ανήκουν προφανώς στην κατηγορία των παραμετρικών μεθόδων.

1.1.2 Η επιρροή της κυκλοφορίας από τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες

Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια πρόβλεψης θα πρέπει να ληφθούν υπόψη όλες οι εξωγενείς μεταβλητές που επηρεάζουν τη μεταβλητή που θέλουμε να προβλέψουμε. Μία από αυτές λοιπόν είναι και οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν παράλληλα με την εξέλιξη της κυκλοφορίας.

Οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες μπορεί να έχουν αξιοσημείωτη επίδραση στα κυκλοφοριακά μεγέθη. Με τον όρο δυσμενείς καιρικές συνθήκες, γενικά εννοείται η βροχόπτωση, η χιονόπτωση, η ομίχλη κτλ. Οι καιρικές συνθήκες επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του δρόμου όπως είναι η αυξημένη ολισθηρότητα του οδοστρώματος, τα οχήματα λόγω μειωμένης ορατότητας, σταθερότητας και ελέγχου, τους οδηγούς αποσπώντας την προσοχή τους και επηρεάζοντας τον τρόπο

οδήγησής τους και γενικότερα την οδική ασφάλεια και τα πρότυπα κυκλοφορίας (Vlahogianni and Karlaftis, 2012). Άλλα λιγότερο συχνά προβλήματα που προκαλούνται από δυσμενείς καιρικές συνθήκες είναι η συγκέντρωση ποσότητας χιονιού ή φερτών υλών με αποτέλεσμα τη δημιουργία εμποδίων καθώς και οι ζημιές που προκαλούνται στο οδόστρωμα και γενικά στο δίκτυο (π.χ. πτώση πινακίδων, διακοπή λειτουργίας σηματοδότησης κτλ.).

Είναι προφανές ότι το κάθε φαινόμενο επηρεάζει διαφορετικά τις συνθήκες κυκλοφορίας. Η ποσότητα και η ποιότητα της επιρροής αυτής εξαρτάται από το είδος, τη διάρκεια και την ένταση του φαινομένου. Με άλλο τρόπο επιδρά μία έντονη βροχόπτωση μικρής διάρκειας, με άλλο μία χιονόπτωση μεγάλης έντασης και διάρκειας και με άλλο μία πυκνή ομίχλη. Κάτι άλλο που παίζει σημαντικό ρόλο στο βαθμό που θα επηρεαστεί η κυκλοφορία από τα καιρικά φαινόμενα, είναι το είδος (αστική αρτηρία, υπεραστικός αυτοκινητόδρομος κτλ) και τα χαρακτηριστικά (αριθμός λωρίδων, γεωμετρία) της οδού που εξετάζεται. Ένας συνοικιακός δρόμος με μία λωρίδα που έχει χαμηλούς φόρτους θα επηρεαστεί σαφώς λιγότερο από μία έντονη βροχόπτωση απ' ό,τι μία ελεύθερη λεωφόρος με τρεις λωρίδες.

Το ενδιαφέρον του συγκοινωνιολόγου μηχανικού γύρω από το ζήτημα της επιρροής των καιρικών συνθηκών, κεντρίζει η προσπάθεια ποσοτικοποίησης της επίδρασης των φαινομένων αυτών στην κυκλοφορία. Προς την κατεύθυνση αυτή έχουν εκπονηθεί αρκετές μελέτες οι οποίες όμως δεν έχουν καταφέρει να συγκλίνουν σε κάποιο κοινό συμπέρασμα. Παρότι η σημαντική επιρροή του καιρού αποδεικνύεται σχεδόν σε όλες, τα αποτελέσματα ποικίλουν ως προς το μέγεθος της επιρροής. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα μερικών εκ των μελετών αυτών.

Από τα αποτελέσματα της μελέτης των Chung et al. (2006) πάνω στην επιρροή της βροχόπτωσης στην χωρητικότητα και την ταχύτητα ελεύθερης ροής σε ελεύθερη λεωφόρο του Tokyo, φάνηκε μία μείωση της χωρητικότητας με ποσοστό 4-7 % υπό καθεστώς ελαφριάς βροχόπτωσης, 8-12 % υπό καθεστώς μέτριας βροχόπτωσης και έως και 14 % υπό την παρουσία έντονης βροχόπτωσης. Η μείωση αντίστοιχα της ταχύτητας ήταν της τάξης του 4,5 % για μικρής έντασης φαινόμενα και έφτανε ποσοστιαία μέχρι και 8,2 % για μεγαλύτερης έντασης βροχόπτωση.

Μελέτη του Highway Capacity Manual (2000) έδειξε πως η μείωση της χωρητικότητας είναι πολύ κοντά στο μηδέν για βροχόπτωση έντασης έως και 6

mm/hr. Για φαινόμενα που ξεπερνούν το όριο αυτό, η χωρητικότητα μειώνεται κατά 15 %. Από την άλλη μεριά και για τις αντίστοιχες τιμές της βροχόπτωσης, η μείωση της ταχύτητας ανέρχεται στο 2-14 % και 5-17 %. Στην έρευνα αυτή μελετήθηκε και η επιρροή της χιονόπτωσης στην κυκλοφορία. Τα φαινόμενα χιονόπτωσης βρέθηκαν να μειώνουν την ταχύτητα κατά 8-10 % για ύψος χιονόπτωσης μέχρι και 12 mm/hr και 30-40% για μεγαλύτερα ύψη. Η χωρητικότητα φάνηκε να μειώνεται αντίστοιχα κατά 5-10 % και κατά 25-30 %.

Τέλος, όπως προαναφέρθηκε, κάτι άλλο που παίζει σημαντικό ρόλο στο βαθμό που θα επηρεαστεί η κυκλοφορία από τα καιρικά φαινόμενα, είναι το είδος της οδού που μελετάται. Έχει παρατηρηθεί λοιπόν ότι για τις αστικές σηματοδοτημένες αρτηρίες, η ποσοτικοποίηση της επίδρασης των καιρικών φαινομένων έχει πολύ μεγαλύτερη διακύμανση απ' ό,τι των ελεύθερων λεωφόρων. Αυτό το γεγονός πιθανότατα οφείλεται είτε στο ότι η μελέτη σηματοδότησης πραγματοποιείται για συνθήκες ευμενών και όχι δυσμενών συνθηκών είτε στην ίδια τη φύση του συστήματος του αστικού οδικού περιβάλλοντος η οποία είναι σύνθετη και πολύπλοκη (ισόπεδοι κόμβοι, σταθμευμένα οχήματα παρά το κράσπεδο κτλ).

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που έλαβε χώρα από τους Pisano and Goodwin (2004) σχετικά με την διακύμανση της επίδρασης των καιρικών συνθηκών στις αστικές αρτηρίες, φάνηκε ότι η μέση ταχύτητα μειώνεται κατά 16-40 %, η ταχύτητα ελεύθερης ροής κατά 10-30 %, ο φόρτος κατά 15-30 % , ο ρυθμός ροής κορεσμού κατά 2-21 %, ο χρόνος διαδρομής αυξάνεται κατά 11-50 % και η καθυστέρηση εκκίνησης κατά 5-50 %.

Συνοψίζοντας, είναι ευδιάκριτη η επιρροή των δυσμενών καιρικών φαινομένων και ιδιαίτερα της βροχόπτωσης στην εξέλιξη της κυκλοφορίας. Είναι απαραίτητη λοιπόν η ποσοτικοποίηση της επίδρασής τους στα κυκλοφοριακά μεγέθη ούτως ώστε να επιτυγχάνονται όσο το δυνατόν ακριβέστερες προβλέψεις. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της εισαγωγής του καιρού στα αναπτυσσόμενα πρότυπα πρόβλεψης, ως εξωγενή παράμετρο επιρροής του μεγέθους που μελετάται κάθε φορά. Τέλος, από όλα τα παραπάνω είναι προφανής και επιτακτική η ανάγκη για βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη των συνθηκών κυκλοφορίας ώστε να πραγματοποιείται ευκολότερα και αποτελεσματικότερα η διαχείριση και ο δυναμικός έλεγχός της.

1.2 Ο σκοπός της Διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη και αξιολόγηση στοχαστικών προτύπων χρονοσειρών για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της ταχύτητας σε αυτοκινητόδρομους. Η κυκλοφορία και κατ' επέκταση τα πρότυπα πρόβλεψης ταχυτήτων αφορούν σε διατομή αλλά και λωρίδα. Αρχικά αναλύονται σε βάθος τα στατιστικά χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας στο σημείο ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια, αναπτύσσονται πρότυπα ARMA (Autoregressive Moving Average) και παράγωγά τους, ανάλογα με τα στατιστικά των χρονοσειρών των ταχυτήτων (μη στασιμότητα). Ακόμα, ελέγχεται η εφαρμοσιμότητα και η ακρίβεια των προτύπων VECM (Vector Error Correction Model) και γενικά η βελτίωση της προβλεπτικής ικανότητας με την συνολοκλήρωση των χρονοσειρών. Τέλος, διερευνάται η συνεισφορά εξωγενών παραμέτρων, όπως ο φόρτος, η βροχόπτωση και η χωρική και χρονική εξέλιξη της κυκλοφορίας.

1.3 Διάρθρωση της Διπλωματικής εργασίας

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας ανά κεφάλαιο είναι η ακόλουθη:

Στο Κεφάλαιο 1, πραγματοποιείται η εισαγωγή στην αναγκαιότητα και τη χρησιμότητα της εφαρμογής μεθόδων πρόβλεψης των συνθηκών κυκλοφορίας, γίνεται μία σύντομη αναφορά των κυρίως εφαρμοζόμενων προτύπων και τονίζεται η επιρροή των δυσμενών καιρικών φαινομένων στα κυκλοφοριακά μεγέθη και κατ' επέκταση η ανάγκη εισαγωγής τους ως εξωγενείς παραμέτρους στα πρότυπα πρόβλεψης.

Στο Κεφάλαιο 2, πραγματοποιείται η βιβλιογραφική ανασκόπηση όπου παρουσιάζονται πολλές από τις μελέτες που έχουν προηγηθεί σχετικά με την βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της κυκλοφορίας και των μεγεθών της καθώς και την επίδραση των καιρικών φαινομένων σε αυτή και αναλύονται τα αποτελέσματά τους.

Στο Κεφάλαιο 3, πραγματοποιείται η ανάλυση της βάσης δεδομένων και των χαρακτηριστικών της καθώς και οι συγκρίσεις μεταξύ των στατιστικών μεγεθών της.

Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται όλο το θεωρητικό υπόβαθρο και η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε κατά την ανάλυση.

Στο Κεφάλαιο 5, γίνεται η ανάλυση της διαδικασίας υπολογισμού και παρουσιάζονται τα αποτελέσματά της.

Στο Κεφάλαιο 6, γίνεται επεξήγηση των αποτελεσμάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων και τέλος προτείνονται νέα θέματα προς διερεύνηση.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή

Υπάρχει πλήθος εργασιών το οποίο σχετίζεται με την βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη των κυκλοφοριακών μεγεθών σε ελεύθερες λεωφόρους και κυρίως της ταχύτητας. Η πρόβλεψη αυτή, βασίζεται στην ανάπτυξη οικονομετρικών προτύπων ή αλλιώς προτύπων. Η εξαιρετική χρησιμότητα και η αναγκαιότητα των προτύπων αυτών, τα κατέστησε ένα από τα πλέον δημιουργικά «εργαλεία» στα χέρια των συγκοινωνιολόγων μηχανικών. Παρότι η χρήση των μαθηματικών αυτών εργαλείων εμφανίζεται περί τη δεκαετία του '70, κατά τις 2 τελευταίες δεκαετίες φαίνεται να έχει ενταθεί αρκετά. Οι παράγοντες που λειτουργούν καταλυτικά στο φαινόμενο αυτό, είναι η αυξανόμενη υπολογιστική δύναμη των ηλεκτρονικών υπολογιστών καθώς και η συνεχής ανάπτυξη του μαθηματικού υποβάθρου των προαναφερθέντων προτύπων. Στην ίδια κατεύθυνση συντελεί και το γεγονός ότι η συλλογή των απαραίτητων στοιχείων για την εφαρμογή των οικονομετρικών προτύπων γίνεται πλέον αρκετά ευκολότερα π.χ. μέσω φωρατών, απ' ότι παλαιότερα.

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες προτύπων πρόβλεψης. Στην πρώτη ανήκουν τα παραμετρικά πρότυπα τα οποία παράγουν προβλέψεις μεγάλης ακρίβειας ακόμη και με την υποστήριξη μικρής σχετικά βάσης δεδομένων. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα τους είναι η ανικανότητα προσομοίωσης των γραμμικών φαινομένων της κυκλοφορίας κατά τη μετάβαση από τη μη συμφορημένη στην συμφορημένη περιοχή. Τα μη παραμετρικά πρότυπα, τα οποία ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία προτύπων πρόβλεψης, έχουν τη δυνατότητα να αντιμετωπίζουν επιτυχώς το παραπάνω πρόβλημα με μεγάλης ακρίβειας προβλέψεις, με την προϋπόθεση όμως να υπάρχει μία μεγάλης έκτασης βάση δεδομένων. Στην τρίτη και τελευταία κατηγορία προτύπων ανήκουν τα υβριδικά πρότυπα τα οποία χρησιμοποιούν και τους δύο τύπους μεθόδων ούτως ώστε να γίνει η όσο το δυνατόν καλύτερη εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων της καθεμίας.

Να αναφερθεί εδώ ότι η άντληση των κυκλοφοριακών στοιχείων των βάσεων δεδομένων γίνεται τις περισσότερες φορές από ελεύθερες λεωφόρους και υπεραστικά δίκτυα. Το γεγονός αυτό συμβαίνει διότι λόγω της πολυπλοκότητας των συστημάτων κυκλοφορίας του αστικού χώρου, οι κατηγορίες προτύπων που αναφέρθηκαν παραπάνω, δεν μπορούν να προβλέψουν με μεγάλη ακρίβεια τις μελλοντικές τιμές των κυκλοφοριακών στοιχείων που ζητούνται. Σε περιβάλλοντα όπως το αστικό εφαρμόζονται πρότυπα άλλου τύπου όπως τα πολυπαραμετρικά πρότυπα χώρου-χρόνου.

Επίσης στη βιβλιογραφία, έχει μελετηθεί σε μικρό βαθμό και η επιρροή των καιρικών συνθηκών (βροχόπτωση, χιονόπτωση, ομίχλη κτλ.) στις συνθήκες κυκλοφορίας. Στις μελέτες αυτές εξετάζεται το ποσοστό βελτίωσης της προβλεπτικής ικανότητας του πρότυπου από την προσθήκη του στοιχείου του καιρού σε αυτό. Η βιβλιογραφική αυτή κατηγορία θα αναφερθεί παρακάτω ξεχωριστά.

Να αναφερθεί τέλος ότι στη βιβλιογραφία δεν υπάρχει έρευνα σχετική με πρότυπα πρόβλεψης κυκλοφορίας τύπου VECM και για αυτό και δεν παρουσιάζεται κάτι σχετικό παρακάτω.

2.2 Κατηγορίες προτύπων πρόβλεψης των στοιχείων κυκλοφορίας

Σε αυτή την υποενότητα θα πραγματοποιηθεί εκτενέστερη ανάπτυξη των μεθόδων πρόβλεψης των στοιχείων της κυκλοφορίας. Παραδείγματα θα αναφερθούν και θα αναλυθούν από τη βιβλιογραφία όπου γίνεται χρήση των μεθόδων αυτών ώστε να γίνει περισσότερο κατανοητό το θεωρητικό υπόβαθρο και η μεγάλη χρησιμότητά τους. Ο διαχωρισμός που θα γίνει, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, θα είναι μεταξύ παραμετρικών και μη παραμετρικών μεθόδων. Σε ορισμένες μελέτες όπου γίνεται ταυτόχρονη χρήση και σύγκριση και των δύο, αυτό θα διευκρινίζεται.

2.2.1 Παραμετρικές μέθοδοι

Η πρώτη κατηγορία που θα αναλυθεί είναι οι παραμετρικές μέθοδοι. Η υπόθεση που γίνεται για τις μεθόδους αυτές είναι ότι οι σχέσεις που προσαρμόζονται στα δεδομένα της κυκλοφορίας, ακολουθούν κάποια κατανομή. Κάνοντας χρήση των μαθηματικών σχέσεων της κατανομής που υποθέεται κάθε φορά, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν οι επιθυμητές βραχυπρόθεσμες προβλέψεις. Αυτές οι μέθοδοι πλεονεκτούν στο γεγονός ότι ακόμη και εάν η διατιθέμενη βάση δεδομένων είναι μικρής έκτασης, το πρότυπο έχει τη δυνατότητα να δώσει επιτυχείς προβλέψεις αφού βασίζεται σε μία συγκεκριμένη κατανομή. Πολλές παραμετρικές μέθοδοι πρόβλεψης όπως της εκθετικής εξομάλυνσης, του ιστορικού μέσου και του «τυχαίου περιπάτου» έχουν παρατηρηθεί στη βιβλιογραφία οι οποίες δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα μικρής όμως ακρίβειας. Υπάρχουν και εκείνες που δίνουν ακριβέστερες προβλέψεις, απαιτούν όμως μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ και χρόνο. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση των μεθόδων αυτών.

Η εκθετική εξομάλυνση, δίνει προβλέψεις μεγαλύτερης ακρίβειας σταθμίζοντας τους μέσους των προηγούμενων τιμών της μεταβλητής με συντελεστές βαρύτητας, περιορίζοντας έτσι την επίδραση παλαιότερων καταστάσεων. Η μέθοδος του ιστορικού μέσου, βασίζεται στη χρήση του μέσου των παρελθοντικών παρατηρήσεων μιας μεταβλητής προκειμένου να γίνει πρόβλεψη των μελλοντικών της τιμών. Στηρίζεται λοιπόν στην περιοδικότητα της κυκλοφορίας γεγονός το οποίο την εμποδίζει να ανταποκριθεί στις αιφνίδιες αλλαγές του συστήματος, όπως είναι για παράδειγμα ένα οδικό ατύχημα ή ένα επεισόδιο βροχόπτωσης. Τέλος, η μέθοδος του «τυχαίου περιπάτου» βασίζεται στη θεώρηση ότι η επόμενη μέτρηση της μεταβλητής θα είναι ίση με την αμέσως προηγούμενη. Αγνοεί λοιπόν η μέθοδος αυτή τη μεταβολή των κυκλοφοριακών μεγεθών της κυκλοφορίας και θεωρεί πως ανάμεσα σε δύο κοντινές χρονικές στιγμές η κυκλοφορία είναι σχεδόν αμετάβλητη.

Μία παραμετρική μέθοδος ευρείας χρήσης είναι και η μέθοδος ανάλυσης χρονοσειρών ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average). Κάποιες από τις επεκτάσεις των παραπάνω προτύπων είναι και η ARFIMA (Autoregressive Fractional Integrated Moving Average) η εποχική ARIMA ή αλλιώς SARIMA (Seasonal ARIMA), η ARIMA υποσυνόλου (subset ARIMA), η καταστατική χρονική ARIMA (state-time ARIMA,

STARIMA), η ARIMA με εξωτερικό παράγοντα X (transfer function ARIMA, ARIMAX) και τέλος τα δυναμικά πολυμεταβλητά πρότυπα ARIMA (vector ARMA, VARMA). Μία σύντομη περιγραφή τους ακολουθεί παρακάτω.

Τα πρότυπα ARMA (Autoregressive Moving Average) είναι πρότυπα τα οποία έχουν και αυτοπαλίνδρομο μέρος και μέρος κινητών μέσων. Εάν απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών για να γίνει στάσιμο το πρότυπο, τότε ονομάζεται ολοκληρωμένο ARMA και γράφεται ARIMA. Το πρότυπο ARFIMA είναι το ίδιο με το ARIMA μόνο που έχει υποστεί κλασματική αντί για ακέραια ολοκλήρωση. Το εποχικό πρότυπο SARIMA βασίζεται στο γεγονός ότι υπάρχει συγκεκριμένο πρότυπο σε συγκεκριμένη συχνότητα. Η αφαίρεση της τάσης με λήψη διαφορών, πραγματοποιείται στην χρονική αυτή βάση. Τα ARIMA υποσυνόλων είναι πιο απλά στον υπολογισμό και έχουν μικρότερο αριθμό παραμέτρων αφού είναι ένα πρότυπο με παραμέτρους μόνο σε ορισμένες υστερήσεις. Τα καταστατικά-χρονικά πρότυπα (STARIMA), αποτελούν ειδικές περιπτώσεις των VARMA προτύπων στα οποία οι περιορισμοί αντανakλούν την τοπολογία ενός δικτύου στο χώρο και μειώνουν σε μεγάλο βαθμό τις παραμέτρους που απαιτείται να υπολογιστούν. Τα ARIMA με συναρτήσεις μεταφοράς εξωτερικών παραγόντων X (ARIMAX), είναι πολυμεταβλητά πρότυπα τα οποία κάνουν εισαγωγή ενός ή περισσοτέρων εξωτερικών παραγόντων X , όπως ο φόρτος ή η βροχόπτωση, ώστε να βελτιωθεί η ακρίβεια της πρόβλεψης. Τέλος, τα δυναμικά πολυμεταβλητά πρότυπα (VARMA), εκτιμούν τις δυναμικές σχέσεις μεταξύ πολλών χρονοσειρών, ανιχνεύοντας, ποσοτικοποιώντας και προβλέποντας τις μεταξύ τους δυναμικές σχέσεις. Αναφορά και ανάλυση μελετών που έκαναν χρήση των παραμετρικών μεθόδων που προαναφέρθηκαν, θα γίνει στη συνέχεια.

Η πρώτη εφαρμογή παραμετρικών προτύπων στα κυκλοφοριακά έγινε από τους Ahmed and Cook (1979). Σε αυτή τη μελέτη, αναπτύχθηκαν πρότυπα ARIMA τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίθηκαν εν συνεχεία με τα αντίστοιχα των πιο απλών παραμετρικών μεθόδων δηλαδή της διπλής εκθετικής εξομάλυνσης, των κινητών μέσων και της μεθόδου Trigg and Leach. Τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν ήταν ο φόρτος και η κατάληψη με χρονική συχνότητα 20,30 και 60 sec και αντλήθηκαν από ελεύθερες λεωφόρους τριών περιοχών των ΗΠΑ (Los Angeles, Minneapolis, Detroit). Η αξιολόγηση των προτύπων πραγματοποιήθηκε με τον έλεγχο αυτοσυσχέτισης καταλοίπων Box and Pierce απαιτώντας τη μη συσχέτιση των καταλοίπων. Τα αποτελέσματα του παραπάνω ελέγχου υπέδειξαν όχι μόνο ότι το πρότυπο ARIMA

υπήρξε βέλτιστο για όλες τις περιοχές μελέτης, αλλά και ότι υπήρχε η δυνατότητα να εφαρμοστεί και σε άλλες περιοχές μελέτης αφού η μορφή του δεν άλλαζε από περιοχή σε περιοχή (για τις τρεις περιοχές μελέτης που εφαρμόστηκε). Το μόνο που παρατηρήθηκε ήταν ότι οι παράμετροι του κάθε πρότυπου ήταν διαφορετικοί.

Η πρώτη φορά που εφαρμόστηκε η εποχική ARIMA (SARIMA), ήταν από τους Williams et al. (1998). Η μελέτη αυτή βασίστηκε στο γεγονός ότι στην πράξη, η κυκλοφορία παρουσιάζει μία περιοδικότητα. Η θεώρηση αυτή της περιοδικότητας των κυκλοφοριακών μεγεθών, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι πρώτες διαφορές δεν οδηγούν σε στάσιμη χρονοσειρά. Εκτός από την παραπάνω μέθοδο, εφαρμόστηκε και η μέθοδος της εκθετικής εξομάλυνσης, αξιοποιώντας και στοιχεία προηγούμενης εργασίας που είχε την ίδια περιοχή μελέτης ώστε να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων. Η περιοχή μελέτης ήταν μία ελεύθερη λεωφόρος από την οποία αντλήθηκε το μέγεθος του φόρτου με συχνότητα 15 λεπτών. Αυτό που εντοπίστηκε από τους συγγραφείς, ήταν μία ημερήσια εποχικότητα και ως εκ τούτου ελήφθησαν ημερήσιες διαφορές. Επίσης παρατηρήθηκε ότι το ημερήσιο πρότυπο της κυκλοφορίας είναι ιδιαίτερα ισχυρό και επομένως η διαδικασία της κυκλοφοριακής ροής είναι μη στάσιμη. Και οι δύο μέθοδοι που εφαρμόστηκαν φάνηκε να αποδίδουν εξίσου καλά σύμφωνα με την ανάλυση και καλύτερα ακόμη και από τις εφαρμοστέες μεθόδους της προγενέστερης εργασίας δηλαδή τα νευρωνικά δίκτυα, τη μη παραμετρική παλινδρόμηση και τον ιστορικό μέσο. Τα σφάλματα που προέκυψαν ήταν (μέσω του δείκτη MAPE) 7,4 έως 7,8 % για την SARIMA και 7,5 % για την εκθετική εξομάλυνση. Οι αντίστοιχοι δείκτες της προγενέστερης εργασίας ήταν 7,5 έως 8,1 % για την μη παραμετρική παλινδρόμηση, 8,9 έως 11 % για τα νευρωνικά δίκτυα και 9,6 έως 9,9 για τον ιστορικό μέσο.

Πρότυπο ARIMAX εφήρμοσε ο Williams (2001), δηλαδή χρησιμοποίησε συναρτήσεις μεταφοράς για να εισάγει εξωγενείς παράγοντες σε πρότυπο ARIMA. Οι εξωγενείς παράγοντες X ήταν στοιχεία κυκλοφορίας από προηγούμενους φωρατές. Η περιοχή μελέτης ήταν μία ελεύθερη λεωφόρος στην περιοχή του Beaune στη Γαλλία, στην οποία είχαν βασιστεί και προηγούμενες μελέτες. Ελήφθησαν στοιχεία ρυθμού ροής με συχνότητα 30 λεπτών για τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο των ετών '84-'89. Λόγω του ότι πρόκειται περί περιόδου διακοπών δεν παρατηρήθηκε εβδομαδιαίο πρότυπο κυκλοφορίας οπότε η ολοκλήρωση που πραγματοποιήθηκε, έγινε σε ημερήσια βάση. Η πληροφορία από προηγούμενα σημεία δόθηκε από τρεις φωρατές στα 90 χλμ

ανάντη του σημείου ενδιαφέροντος. Το SARIMA που εφήρμοσε ο Williams φάνηκε να παρουσιάζει τελικά καλύτερα αποτελέσματα, με κριτήριο το μικρότερο σφάλμα, σε σχέση με τις πολυπαραμετρικές μεθόδους ATHENA και KARIMA που είχαν εφαρμοστεί παλαιότερα στην ίδια περιοχή. Για την ακρίβεια, το σφάλμα του πρότυπου αυτού ήταν μικρότερο του 5 %. Όσον αφορά το ARIMAX πρότυπο που εφαρμόστηκε έπειτα, φάνηκε να αποδίδει καλύτερα από το SARIMA για όλες τις χρονιές μεταξύ '84 και '87, οδηγώντας έτσι στο επαγωγικό συμπέρασμα ότι αποδίδει καλύτερα και από τα ATHENA και KARIMA. Το πρώτο συμπέρασμα που εξήγαγε ο συγγραφέας από τη μελέτη του είναι ότι το πρότυπο ARIMA λόγω της απλότητάς του εφαρμόζεται ευκολότερα σε πολλά δίκτυα, αντίθετα με το ARIMAX για το οποίο απαιτείται κάθε φορά ξεχωριστή ιδιαίτερη αντιμετώπιση. Το δεύτερο συμπέρασμά του ήταν πως επειδή πολλές φορές υπάρχουν κενές τιμές στις χρονοσειρές των εξωγενών παραγόντων X , εξαιτίας του ότι πολλές φορές οι φωρατές «χάνουν» κάποιες μετρήσεις, τα πρότυπα ARIMAX πραγματοποιούν αναξιόπιστες προβλέψεις. Απαιτείται λοιπόν να γίνεται αναγνώριση των περιόδων όπου η ροή των στοιχείων διακόπτεται και να εφαρμόζονται εκεί πρότυπα ARIMA. Το τρίτο συμπέρασμα του συγγραφέα ήταν πως προκειμένου να επιτευχθεί αύξηση της ακρίβειας των προβλέψεων, θα πρέπει τα ανάντη σημεία, από τα οποία αντλούνται οι τιμές των εξωγενών τιμών X , να βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο σημείο μελέτης. Ταυτόχρονα, για να φέρει αποτέλεσμα αυτό, θα πρέπει η συχνότητα των παρατηρήσεων να αυξηθεί, γεγονός που θα αυξήσει όμως το «θόρυβο» των μετρήσεων. Τέλος ο συγγραφέας καταλήγει ότι παρότι τα πρότυπα ARIMAX δύνανται να παράγουν ακριβέστερες προβλέψεις, η μονοπαραμετρική μέθοδος ARIMA θα συνεχίσει να είναι η βέλτιστη προσέγγιση μέχρι να αναπτυχθεί ένα πρότυπο που να μπορεί να αντιμετωπίσει τα προβλήματα που προαναφέρθηκαν.

Οι Stathopoulos and Karlaftis (2002) δοκίμασαν μία διαφορετική προσέγγιση πρόβλεψης. Η πρόβλεψη αυτή είχε να κάνει με τη διάρκεια της συμφόρησης, αναλογικά με το χρόνο που είχε παρέλθει από την έναρξή της. Το κίνητρο της παραπάνω μελέτης, ήταν το γεγονός ότι ελάχιστες μελέτες έως τότε είχαν στοχεύσει στην πρόβλεψη στοιχείων της κυκλοφορίας στα χρονικά διαστήματα οριακών καταστάσεων όπως για παράδειγμα είναι η συμφόρηση. Η περιοχή μελέτης της εργασίας αυτής ήταν η ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και πιο συγκεκριμένα από το δίκτυο φωρατών της πρωτεύουσας. Τα στοιχεία κυκλοφορίας που αξιοποιήθηκαν ήταν η κατάληψη και ο ρυθμός ροής με συχνότητα 90 sec και διάρκειας 6 μηνών. Η

κάθε ημέρα χωρίστηκε σε 6 διαφορετικές περιόδους ανάλυσης, η καθεμία από τις οποίες παρουσίαζε διαφορετικής έντασης κυκλοφορία. Χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση στατιστικές μέθοδοι επιβίωσης (survival analysis) και πιο συγκεκριμένα μοντελοποίηση διάρκειας (duration modeling). Στόχος την ανάλυσης ήταν να εκτιμηθεί η πιθανότητα να ολοκληρωθεί η συμφόρηση ως συνάρτηση του χρόνου που έχει διαρκέσει. Η πιθανότητα που φάνηκε να προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα ήταν η λογαριθμολογιστική (Loglogistic). Αποδείχτηκε πως είναι μεγάλη η πιθανότητα να ολοκληρωθεί η συμφόρηση σε ορισμένο χρόνο όταν η διάρκειά της είναι μικρότερη των 12 λεπτών. Όσο αυξάνεται η διάρκειά της, τόσο η πιθανότητα αυτή μικραίνει. Για διάρκεια άνω των 21 λεπτών, η συμφόρηση οφείλεται σχεδόν σίγουρα σε εξωτερικό παράγοντα όπως π.χ. σε κάποιο ατύχημα.

Οι Kamarianakis and Prastacos (2003) άντλησαν στοιχεία από 25 φωρατές της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας χρονικής διάρκειας 2 μηνών προκειμένου να αξιολογήσουν πρότυπα βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης των κυκλοφοριακών στοιχείων. Τα στοιχεία αυτά συχνότητας 90 sec ομαδοποιήθηκαν σε χρονικά διαστήματα 7,5 λεπτών και αναλύθηκαν μέσω τεσσάρων παραμετρικών μεθόδων. Οι δύο πρώτες ήταν οι μονοπαραμετρικές μέθοδοι ιστορικού μέσου και ARIMA και οι δύο άλλες οι πολυπαραμετρικές STARIMA και VARMA. Τα πλεονεκτήματα των δύο πρώτων είναι η εύκολη προσαρμογή και η ευελιξία τους ενώ των δύο δεύτερων η μεγαλύτερη ακρίβεια πρόβλεψης εξαιτίας των πληροφοριών που λαμβάνονται από σημεία γειτονικά ή με παρόμοια χαρακτηριστικά κυκλοφορίας. Τα πακέτα δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δύο. Το πρώτο συμπεριελάμβανε τα δεδομένα από 31 Ιουλίου-27 Αυγούστου και το δεύτερο από 11 Φλεβάρη-10 Μαρτίου στο οποίο και μετρήθηκε σχετική ταχύτητα (η οποία προκύπτει διαιρώντας το φόρτο με την κατάληψη) μικρότερη του πρώτου αφού το πρώτο συμπίπτει με την περίοδο διακοπών. Και για τα δύο, οι πρώτες δέκα ημέρες χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των προτύπων και έπειτα επιλέχθηκαν τυχαία 10 χρονικές στιγμές μέσα στις ημέρες του δείγματος στις οποίες έγινε η πρόβλεψη με ορίζοντα 5 χρονικά βήματα εμπρός. Τα αποτελέσματα υπέδειξαν ως βέλτιστης απόδοσης πρότυπο το μονοπαραμετρικό ARIMA, ως ενδιάμεσης τα πολυπαραμετρικά STARIMA και VARMA και ως χαμηλότερης απόδοσης τη μέθοδο του ιστορικού μέσου. Η επίτευξη προβλέψεων μεσαίας ακρίβειας από τα πολυπαραμετρικά πρότυπα αποδόθηκε στο ότι πολλοί από τους φωρατές ήταν σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους και επομένως οι

σχέσεις αλληλεξάρτησής τους ήταν ανακριβείς και ασαφείς. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέθοδοι και τα σφάλματά τους.

Πίνακας 2.1: Κατανομή σφαλμάτων πρόβλεψης

	% Συχνότητα του σφάλματος πρόγνωσης						
	< - 25 %	-25 % to -15 %	-15 % to -5 %	-5 % to 5 %	5 % to 15 %	15 % to 25 %	> 25 %
Ιστορικός Μέσος	45%	4.50%	2%	1%	3.50%	7%	38%
ARIMA	21%	12%	9%	18%	7%	9%	24%
VARMA	17%	14%	10%	12%	6%	13%	28%
STARIMA	26%	11%	6%	9%	11%	17%	20%

Πηγή: Kamarianakis and Prastacos (2003)

Από την εργασία αυτή αποδείχτηκαν τα πρότυπα ARIMA αρκετά αποτελεσματικά στην πρόγνωση των ταχυτήτων ροής. Αντίθετα η εφαρμογή τους σε πιο σύνθετο δίκτυο με εκατοντάδες φωρατές θα ήταν αρκετά δύσκολη και με μεγάλο υπολογιστικό φόρτο. Το ακριβώς αντίθετο αποδείχτηκε για τα πολυπαραμετρικά πρότυπα STARIMA και VARMA τα οποία φάνηκαν να αποδίδουν στον ίδιο βαθμό με τα μονοπαραμετρικά. Επίσης εξήχθηκε το συμπέρασμα ότι τα πρότυπα αυτά δύνανται να επιτύχουν προβλέψεις σε οριακές συνθήκες όπως της συμφόρησης γεγονός το οποίο είναι αρκετά σημαντικό.

Οι Stathopoulos and Karlaftis (2003) άντλησαν στοιχεία από την περιοχή της Αθήνας για την περίοδο 3 Ιανουαρίου – 31 Μαΐου 2000 χωρίς να συμπεριλαμβάνονται τα Σαββατοκύριακα. Η συχνότητα των μετρήσεων ήταν τα 3 λεπτά όπως και ο ορίζοντας πρόβλεψης. Η μέθοδος ανάλυσης που εφαρμόστηκε ήταν η καταστατική-χωρική ανάλυση και ως μέτρο σύγκρισης η απλή ARIMA. Το 70% του δείγματος αξιοποιήθηκε για την ανάπτυξη των προτύπων και το υπόλοιπο 30% για την αξιολόγηση της πρόβλεψης. Να τονιστεί πως στη μέθοδο της καταστατικής-χωρικής ανάλυσης δεν απαιτείται η στασιμότητα. Η μέθοδος αυτή έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις μεθόδους ARMA όπως ότι είναι αρκετά ευέλικτη και ενσωματώνει αλλαγές στη δομή του συστήματος, είναι εύκολο στη διαχείριση των μετρήσεων που απουσιάζουν, οι πολυπαραμετρικές παρατηρήσεις μπορούν με ευκολία να χειριστούν ως επεκτάσεις της μονοπαραμετρικής θεωρίας και τέλος ότι είναι «ευθεία» διαδικασία

πρόβλεψης των μελλοντικών τιμών προβάλλοντας το φίλτρο Kalman. Οι φωρατές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 5 και το καταστατικό-χωρικό πρότυπο πέτυχε μεγαλύτερης απόδοσης του ARIMA πρότυπου σε όλους τους φωρατές πλην ενός στον οποίο το πρότυπο εκφυλίστηκε σε ARIMA. Η διαφορά σφαλμάτων κινήθηκε στο 4 % με 8 %. Κάτι σημαντικό το οποίο τονίστηκε από τους συγγραφείς ήταν το μέγεθος των σφαλμάτων και για τις δύο μεθόδους που ακολουθήθηκαν κάτι το οποίο αποδόθηκε στα δεδομένα της συγκεκριμένης μελέτης.

Οι Shekhar and Williams (2008) στόχευσαν στη δημιουργία ενός αυτόματα προσαρμόσιμου πρότυπου. Για το πρότυπο αυτό δημιουργήθηκαν κάποιοι αλγόριθμοι που αυτόματα θα ανανέωναν τις παραμέτρους του. Χρησιμοποίησαν επίσης φίλτρα για τον επανυπολογισμό των παραμέτρων του SARIMA που ανέπτυξαν τα οποία είχαν στόχο τη βελτιστοποίηση μίας συνάρτησης κόστους (sum of square errors). Η αυτόματη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω, έχει πολύ χρήσιμη εφαρμογή στο πεδίο των ευφυών συστημάτων (ITS). Να σημειωθεί ότι στη μελέτη αυτή έγινε σύγκριση τριών τύπων φίλτρων με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας. Τα φίλτρα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το φίλτρο των ελαχίστων μέσων τετραγώνων (least mean square) , το φίλτρο των ελαχίστων επαναλαμβανόμενων τετραγώνων (recursive least square) και το φίλτρο Kalman. Η περιοχή μελέτης ήταν ένας αστικός αυτοκινητόδρομος και το κυκλοφοριακό στοιχείο που αξιοποιήθηκε ήταν ο φόρτος με χρονική συχνότητα 15 λεπτών και με ορίζοντα πρόβλεψης 1 βήμα μπροστά. Κάθε φορά που μία νέα τιμή εισαγόταν στο σύστημα ο αλγόριθμος υπολόγιζε ξανά τις παραμέτρους. Τα αποτελέσματα των φίλτρων είχαν μικρές σχετικά αποκλίσεις, με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας να δίνει οριακά τα καλύτερα αποτελέσματα. Η διακύμανση του σφάλματος ήταν περίπου στο 8 % και για τις 3 μεθόδους. Οι μελετητές καταλήγουν ότι το βέλτιστο φίλτρο είναι το φίλτρο Kalman το οποίο παρέχει το πλαίσιο με την μεγαλύτερη ακρίβεια στην εφαρμογή χωρίς να αυξάνει σημαντικά τον υπολογιστικό φόρτο. Τέλος, συμπεραίνουν ότι ο συνδυασμός της εποχικής ARIMA και της χρήσης φίλτρων για την προσαρμογή παραμέτρων φέρει πολλές ελπίδες για τη διαχείριση συστημάτων ελεύθερων λεωφόρων στο μέλλον.

Οι Karlaftis and Vlahogianni (2009) εφάρμοσαν πρότυπα διπλής μνήμης (dual memory models) και πρότυπα ARFIMA σε χρονοσειρές «μακράς-μνήμης» (long memory). Η περιοχή της μελέτης ήταν μία σηματοδοτούμενη αρτηρία στο κέντρο της Αθήνας από την οποία αντλήθηκε ο φόρτος από τρία σημεία της με συχνότητα 90

sec. Μέσω των διαγραμμάτων της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης αλλά και των ελέγχων μοναδιαίας ρίζας και στασιμότητας, αποδείχτηκε ότι οι χρονοσειρές παρουσίαζαν «μακρά-μνήμη» και ήταν κλασματικά ολοκληρωμένες. Αποδείχτηκε από τους συγγραφείς ότι τα πρότυπα διπλής μνήμης απέδωσαν καλύτερα από τα πρότυπα ARFIMA και ARIMA που εφαρμόστηκαν. Ένα άλλο συμπέρασμα που εξήχθηκε ήταν ότι το να λαμβάνονται περισσότερες διαφορές απ' ότι χρειάζεται σε μία χρονοσειρά οδηγεί σε αμφισβητήσιμα πρότυπα κινητών μέσων τα οποία με τη σειρά τους παράγουν λάθος προβλέψεις.

2.2.2 Μη παραμετρικές μέθοδοι

Η ραγδαία εξέλιξη των τελευταίων δεκαετιών στον τομέα του προγραμματισμού και των εφαρμογών των ευφυών συστημάτων στη συλλογή, διαχείριση και αποθήκευση εκτενών βάσεων δεδομένων από πολλαπλά σημεία ενός δικτύου συγκοινωνιών, έχουν καταστήσει ευκολότερη τη δυνατότητα διερεύνησης της σταθερότητας των μη παραμετρικών μεθόδων στην πρόβλεψη της κυκλοφορίας. Τα πρότυπα που βασίζονται στις μεθόδους αυτές, εξαρτώνται τις περισσότερες φορές από τα δεδομένα και ως εκ τούτου η ακρίβεια των προβλέψεών τους βασίζεται στην ποιότητα της διατιθέμενης βάσης δεδομένων. Η ιδέα στην οποία βασίζονται οι μέθοδοι αυτοί είναι ότι το υπό διερεύνηση μέγεθος προσεγγίζεται και αναλύεται σε βήματα αξιοποιώντας ολοένα και μεγαλύτερο μέρος της βάσης δεδομένων. Τα είδη των μη παραμετρικών τεχνικών που έχουν κυρίως χρησιμοποιηθεί είναι δύο, η μη παραμετρική παλινδρόμηση και τα νευρωνικά δίκτυα (Vlahogianni et al., 2004).

Η πρώτη από αυτές, η μη παραμετρική παλινδρόμηση, στηρίζεται στην περιγραφή της σχέσης των εξαρτημένων και των ανεξάρτητων μεταβλητών. Ο βασικός τρόπος προσέγγισης είναι μέσω της αναγνώρισης προτύπων και τάσεων. Ο προσδιορισμός της κατάστασης του υπό μελέτη συστήματος είναι ο βασικότερος στόχος της μεθόδου αυτής. Η κατάσταση αυτή, καθορίζεται από τις ανεξάρτητες μεταβλητές σε μία «γειτονιά» από παλαιότερες παρόμοιες καταστάσεις. Όταν η «γειτονιά» καθοριστεί, γίνεται χρήση των παλαιότερων αυτών καταστάσεων για τον καθορισμό της εξαρτημένης μεταβλητής. Ενισχύεται εδώ λοιπόν αυτό που ειπώθηκε και

παραπάνω, ότι δηλαδή η ποιότητα της βάσης δεδομένων που διαθέτει ο μελετητής παίζει καθοριστικό ρόλο στην επιτυχία των προβλέψεων του πρότυπου της μη παραμετρικής παλινδρόμησης. Η ποιότητα της βάσης δεδομένων αναφέρεται κυρίως στην αποθήκευση των παρελθοντικών τιμών της μεταβλητής οι οποίες περιγράφουν όλες τις πιθανές μελλοντικές καταστάσεις (Smith et al., 2002).

Η δεύτερη μέθοδος, τα νευρωνικά δίκτυα, πρόκειται για μαθηματικά πρότυπα τα οποία στηρίζονται στη θεωρία της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence). Υπάρχουν πολλές παραλλαγές τους, σύνθετες και απλούστερες, όλες όμως έχουν ξεχωριστή ικανότητα στο να αναγνωρίζουν και να κατατάσσουν πρότυπα. Τέλος, οι προβλέψεις τους έχουν αποδειχτεί αρκετά αξιόπιστες και η αποτύπωση που επιτυγχάνουν στις κυκλοφοριακές συνθήκες αρκετά επιτυχημένη.

Οι Davis and Nihan (1991) χρησιμοποίησαν σε ελεύθερη λεωφόρο πρότυπα μη παραμετρικής παλινδρόμησης για την πρόγνωση των μεγεθών του φόρτου και της κατάληψης. Τα στοιχεία που αντλήθηκαν είχαν συχνότητα 1 λεπτό και ήταν συνολικής διάρκειας 90 λεπτών. Η αξιολόγηση βασίστηκε σε 28 συνεχόμενες μετρήσεις (28 λεπτά) της επόμενης ημέρας οι οποίες βρίσκονται στην ίδια περίοδο. Τα αποτελέσματα οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος που εφαρμόστηκε πέτυχε μικρότερης, αλλά συγκρίσιμης ακρίβειας προβλέψεις με τα πρότυπα χρονοσειρών. Το σφάλμα που υπολογίστηκε ήταν της τάξης του 4,5 % για την κατάληψη και του 12-14 % για τον φόρτο. Η κακή προσομοίωση των μη γραμμικών σχέσεων της κυκλοφορίας κατά τη μετάβαση από τη μη συμφορημένη στη συμφορημένη περιοχή, αποδόθηκε από τους συγγραφείς στη μικρή βάση δεδομένων που αξιοποιήθηκε.

Οι Chen and Grant-Muller (2001) εφάρμοσαν τη μέθοδο των δυναμικών νευρωνικών δικτύων σε ελεύθερη λεωφόρο στην Αγγλία για την πρόγνωση του φόρτου. Τα δεδομένα προέρχονται από το δίκτυο φωρατών (ανά 500 μέτρα) του αυτοκινητοδρόμου αυτού συνολικής διάρκειας 2 μηνών και είχαν συχνότητα 15 λεπτών. Ο οριζοντας πρόβλεψης ήταν 1 και 2 βήματα εμπρός. Οι ίδιοι συγγραφείς είχαν παλαιότερα εφαρμόσει στην ίδια περιοχή μελέτης τη μέθοδο των στατικών νευρωνικών δικτύων. Το σφάλμα που είχε προκύψει τότε ήταν 11 % ενώ αυτό που προέκυψε από τη μέθοδο των δυναμικών νευρωνικών δικτύων ήταν 9,5 %.

Τέλος ο Clark (2003), προκειμένου να προβλέψει το φόρτο, την ταχύτητα και την κατάληψη σε ελεύθερη λεωφόρο της Αγγλίας, εφήρμοσε τη μέθοδο της μη παραμετρικής παλινδρόμησης του «πλησιέστερου γείτονα». Η συχνότητα των δεδομένων που αξιοποίησε ήταν 10 λεπτά, ενώ η διάρκειά τους 4 εβδομάδες. Οι τρεις πρώτες χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του πρότυπου και η τελευταία για την αξιολόγησή του. Ο ορίζοντας πρόγνωσης ήταν ένα βήμα μπροστά. Συνέκρινε τις επιδόσεις των πολυπαραμετρικών και των μονοπαραμετρικών προτύπων. Το συμπέρασμα ήταν πως όταν τα πολυπαραμετρικά πρότυπα λαμβάνουν υπόψη φόρτο, ταχύτητα και κατάληψη η απόδοσή τους ήταν καλύτερη. Η μόνη εξαίρεση ήταν η ταχύτητα, η πρόβλεψη της οποίας ήταν καλύτερη με το μονοπαραμετρικό πρότυπο. Για το ίδιο μέγεθος, η απλοϊκή μέθοδος είχε τη βέλτιστη ακρίβεια πρόγνωσης.

2.2.3 Σύγκριση των δύο κατηγοριών προτύπων πρόβλεψης

Από την αναλυτική παρουσίαση των δύο κατηγοριών μεθόδων πρόγνωσης που έγινε παραπάνω, φαίνεται πως υπάρχει πληθώρα προτύπων για τη βραχύχρονη πρόβλεψη των μεγεθών της κυκλοφορίας. Παρά το γεγονός ότι είναι ξεκάθαρο ποιά είναι τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του καθενός, δεν υπάρχει κάποιο βέλτιστο για όλες τις περιπτώσεις. Έτσι, αναπτύχθηκαν αρκετές μελέτες στις οποίες τα αποτελέσματα διαφορετικών μεθόδων πρόβλεψης συγκρίνονται μεταξύ τους. Τρεις αρκετά σημαντικές από αυτές παρουσιάζονται παρακάτω.

Οι Kirby et al. (1997) σύγκριναν στη μελέτη τους παραμετρικά ARIMA και τα υβριδικά ATHENA με πρότυπα νευρωνικών δικτύων. Η περιοχή μελέτης ήταν μία ελεύθερη λεωφόρος στην περιοχή του Beaune, από την οποία αντλήθηκαν τα κυκλοφοριακά μεγέθη με συχνότητα 30 λεπτών. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν των μηνών Ιουλίου και Αυγούστου των χρόνων '84-'89 και ο ορίζοντας πρόβλεψης ήταν ένα, δύο και τέσσερα βήματα μπροστά. Το στοιχείο προς πρόγνωση ήταν ο φόρτος. Τα αποτελέσματα οδήγησαν στο συμπέρασμα πως παρά τη μικρής έκτασης βάση δεδομένων, τα νευρωνικά δίκτυα πέτυχαν αρκετά καλή απόδοση. Όπως προαναφέρθηκε, τα πρότυπα αυτά απαιτούν μεγάλης έκτασης βάση δεδομένων για να «εκπαιδευτούν». Φάνηκε επίσης ότι η απόδοση των νευρωνικών δικτύων ήταν

συγκρίσιμη αλλά μικρότερη από αυτή των προτύπων ARIMA όταν ο ορίζοντας πρόβλεψης ήταν ένα βήμα μπροστά. Τέλος, χειρότερη ήταν η απόδοσή τους από τα πρότυπα ARIMA και αρκετά χειρότερη από τα πρότυπα ATHENA στην πρόβλεψη δύο βημάτων μπροστά. Να σημειωθεί ότι επί της ουσίας το πρότυπο ATHENA αποτελείται από 24 ξεχωριστά ωριαία πρότυπα τα οποία συνολικά προσαρμόστηκαν αρκετά καλά στη μελέτη εκείνη. Αντίθετα το πρότυπο των νευρωνικών δικτύων ήταν μόλις 1. Σε άλλη μελέτη όπου έγινε χρήση 24 προτύπων νευρωνικών δικτύων η ακρίβεια πρόβλεψης φάνηκε να ξεπερνάει αυτή του απλού νευρωνικού πρότυπου αλλά και του ATHENA. Το αποτέλεσμα αυτό χρήζει περαιτέρω μελέτης σχετικά με το βαθμό παραμετροποίησης που είναι απαραίτητος για την εφαρμογή του κάθε πρότυπου.

Οι Smith et al. (2002) έθεσαν σε σύγκριση τα εποχικά πρότυπα SARIMA και την μη παραμετρική παλινδρόμηση υποβοηθούμενη από ευρετικές μεθόδους. Το βασικό σκεπτικό πίσω από την επιλογή των δύο αυτών προτύπων, ήταν ότι το μεν είχε επιτύχει εξαιρετικής ακρίβειας πρόβλεψης κατά καιρούς και το δε παρουσίαζε αρκετά πλεονεκτήματα όπως ότι είναι πολύ μικρός ο υπολογιστικός χρόνος των παραμέτρων του. Τα κυκλοφοριακά μεγέθη αξιοποιήθηκαν από το οδικό σύστημα των Hampton Roads και είχαν συχνότητα 10 λεπτών και διάρκειας 3 μηνών. Απαιτήθηκαν περισσότερες από 6 ημέρες για τον υπολογισμό των παραμέτρων. Να σημειωθεί ότι η θεωρία του χάους, στην οποία στηρίζεται η μη παραμετρική παλινδρόμηση υποβοηθούμενη από ευρετικές μεθόδους, ορίζεται από μη γραμμικές και ντετερμινιστικές μεταβολές κατάστασης. Οι συγγραφείς τονίζουν πως παρότι και η σύγκριση ενός στοχαστικού με ένα χαοτικό πρότυπο φαίνεται αντιφατική και η φύση των συνθηκών κυκλοφορίας είναι στοχαστική, σε καταστάσεις συμφόρησης παρουσιάζουν χαρακτήρα έντονα χαοτικό γεγονός το οποίο δικαιώνει την παραπάνω σύγκριση. Η ίδια ελεύθερη λεωφόρος αξιοποιήθηκε για την ανάπτυξη του πρότυπου της μη παραμετρικής παλινδρόμησης, με στοιχεία διάρκειας 3 μηνών και συχνότητας 15 λεπτών. Η μισή βάση δεδομένων ήταν αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση του πρότυπου ως προς την ακρίβεια πρόβλεψης του μεγέθους του φόρτου. Υπό σύγκριση τέθηκαν η εποχική SARIMA και η k-nearest neighbor με την SARIMA να υπερέχει και στους δύο ανιχνευτές απ' όπου αντλήθηκαν στοιχεία. Το σφάλμα της μίας ήταν της τάξης του 8,8 % ενώ της άλλης του 9,4-9,55 %.

Το αποτέλεσμα, το οποίο σύμφωνα με τους συγγραφείς τονίζει την στοχαστική φύση της κυκλοφορίας, ήταν ότι η απόδοση της SARIMA ήταν μεγαλύτερη από αυτή της

μη παραμετρικής παλινδρόμησης παρά την προσθήκη των ευρετικών μεθόδων σε αυτή. Παρ' όλα αυτά, επισημαίνεται ότι η μη παραμετρική παλινδρόμηση θα ήταν μία καλή προσέγγιση σε περίπτωση που δεν πληρούνται οι προϋποθέσεις για την εφαρμογή της SARIMA. Σαν πρόταση για περαιτέρω έρευνα, οι συγγραφείς της μελέτης πιστεύουν ότι απαιτείται να γίνει έρευνα στον τομέα της ανάπτυξης τεχνικών προσαρμογής του πρότυπου σε μικρό χρονικό διάστημα και με μεγαλύτερη ευκολία.

Τέλος, οι Karlaftis, Vlahogianni and Kerpatsoglou (2012), έκαναν μία προσπάθεια να συγκρίνουν τα κλασσικά πρότυπα χρονοσειρών με πρότυπα νευρωνικών δικτύων. Τα κυκλοφοριακά στοιχεία που αξιοποιήθηκαν ήταν ο φόρτος και η ταχύτητα τα οποία προέρχονταν από φωρατές της Αττικής οδού, ενώ αντλήθηκαν και βροχομετρικά δεδομένα από το δίκτυο βροχομετρικών σταθμών του METEONET. Η κύρια συνεισφορά της μελέτης αυτής ήταν ότι παρείχε ένα πλαίσιο σταθερό για τη σύγκριση των προτύπων που αναπτύχθηκαν καθώς και των στατιστικών ιδιοτήτων των χρονοσειρών που μελετήθηκαν. Επίσης η μελέτη αυτή παρείχε ένα παράδειγμα του τρόπου με τον οποίο θα πρέπει η στατιστική να εφαρμόζεται σε συνεργασία με τα νευρωνικά δίκτυα ούτως ώστε να παράγονται αμερόληπτες προβλέψεις. Τέλος, η πρόταση των συγγραφέων για μελλοντικές μελέτες είναι να βρεθεί τρόπος να συνδυάζονται οι προβλέψεις δύο διαφορετικών προτύπων και όχι μόνο να συγκρίνονται.

Σχετικά με την επιλογή του προτύπου, να αναφερθεί πως δυσκολεύεται από την παρουσία χαστικών στοιχείων στην κυκλοφορία και στην εξέλιξη των κυκλοφοριακών μεγεθών γεγονός το οποίο με τη σειρά του δυσκολεύει το διαχωρισμό της ντετερμινιστικής και στοχαστικής συμπεριφοράς της κυκλοφορίας. Σημαντικό είναι επίσης για την επιλογή του προτύπου να είναι ο απαιτούμενος υπολογιστικός φόρτος και χρόνος χαμηλός διότι σε διαφορετική περίπτωση τα πρότυπα είναι δύσκολο να εφαρμοστούν. Κάτι τελευταίο που παίζει σημαντικό ρόλο στην επιλογή του προτύπου είναι ο βαθμός στον οποίο το πρότυπο είναι σαφές και ευνόητο. Πολλές φορές, η σύνθετη δομή, όπως για παράδειγμα των νευρωνικών δικτύων, είναι δυσνόητη από τον μελετητή και σαν αποτέλεσμα το αντίστοιχο πρότυπο αποφεύγεται να επιλεγεί.

2.4 Επιρροή της πρόβλεψης από τις καιρικές συνθήκες

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η παρουσία δυσμενών καιρικών συνθηκών μεταβάλλει την κυκλοφορία και γενικότερα τα μεγέθη της. Από τις διάφορες μελέτες που έχουν εκπονηθεί φαίνεται πως η επιρροή αυτή είναι μεγάλη παρότι δεν έχει ποσοτικοποιηθεί ακόμη. Αξίζει να σημειωθεί πως λίγες είναι οι μελέτες που εισάγουν τον παράγοντα των καιρικών συνθηκών ως εξωγενή μεταβλητή στο πρότυπο πρόβλεψης και όπου αυτό συμβαίνει η ακρίβεια δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Μερικές από αυτές αναφέρονται παρακάτω.

Οι Florio and Mussoni (1996) ήταν οι πρώτοι που προσπάθησαν να εισάγουν το στοιχείο του καιρού στα πρότυπα βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης της κυκλοφορίας. Η μελέτη βασίστηκε στη χρήση μεθόδων νευρωνικών δικτύων αντλώντας πληροφορίες από μεγάλο πλήθος φωρατών στο οδικό τμήμα μήκους 11 χλμ μεταξύ Padova και Mestre στην Ιταλία. Η προέλευση των στοιχείων ήταν από 20 φωρατές, 5 σταθμούς μέτρησης ορατότητας, 2 σταθμούς παρατήρησης των καιρικών συνθηκών, 2 σταθμούς ανίχνευσης πάγου και 10 πινακίδες μεταβλητών μηνυμάτων. Τα στοιχεία που αξιοποιήθηκαν ήταν η μέση ταχύτητα χώρου, η πυκνότητα της κυκλοφορίας, ο ρυθμός ροής, το ποσοστό βαρέων οχημάτων, ο βαθμός ηλιοφάνειας, οι καιρικές συνθήκες, η ορατότητα και τα μηνύματα των πινακίδων. Λόγω της διαφορετικής συχνότητας των δεδομένων, πραγματοποιήθηκε προσαρμογή με βάση το στοιχείο με τη μικρότερη συχνότητα. Τα σενάρια νευρωνικών δικτύων που δημοσιεύτηκαν ήταν 3. Το ένα ήταν το υψηλό ποσοστό βαρέων οχημάτων (30%), το άλλο οι κανονικές συνθήκες και το τελευταίο η μειωμένη ορατότητα στα 100 μ. (το μοναδικό στο οποίο εισάγεται η παράμετρος του καιρού). Τα αποτελέσματα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η μεταβολή (π.χ. μείωση) της ορατότητας επηρεάζει (αντίστοιχα μείωση) σημαντικά το ρυθμό ροής ειδικά για υψηλές τιμές πυκνότητας. Αντίθετα, η ταχύτητα φάνηκε να επηρεάζεται λιγότερο γεγονός το οποίο συνέβη για ακόμα υψηλότερες τιμές της πυκνότητας. Να σημειωθεί όμως ότι το σφάλμα πρόβλεψης για το μέγεθος της πυκνότητας και του ρυθμού ροής κυμάνθηκε στο 33 και 39 % αντίστοιχα, ενώ της ταχύτητας στο 5 %.

Ο Dailey (2006) προσέγγισε διαφορετικά το παραπάνω ζήτημα προσπαθώντας να βρει μία ποσοτική σχέση μεταξύ ταχύτητας και βροχοπτώσης, δημιουργώντας έτσι

μία συνάρτηση υπολογισμού της μείωσης της ταχύτητας συναρτήσεως της βροχόπτωσης. Τα μετεωρολογικά δεδομένα αντλήθηκαν από το τμήμα Ατμοσφαιρικών Επιστημών του Πανεπιστημίου της Washington ενώ τα κυκλοφοριακά από το τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του ίδιου πανεπιστημίου. Τα στοιχεία που ελήφθησαν αντίστοιχα ήταν η ένταση της βροχόπτωσης και η ταχύτητα υπό τη μορφή του δείκτη απόδοσης «απόκλιση από την κανονική ταχύτητα». Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης αυτός, ήταν διότι ένα μέγεθος όπως για παράδειγμα η αιχμή της κυκλοφορίας, είναι τακτικά επαναλαμβανόμενο σε αντίθεση με τη βροχόπτωση η οποία δεν είναι. Η προέλευση των στοιχείων ήταν από την περιοχή του Seattle και είχαν διάρκεια πολλών ετών. Τα δεδομένα διασταυρώθηκαν στο χώρο και χρόνο προκειμένου να διαπιστωθεί η πιθανότητα μεταξύ τους συσχετισμού. Δομήθηκε με αυτόν τον τρόπο μία συνάρτηση παρόρμησης-αντίδρασης (impulse response function), η οποία προβλέπει τη μείωση της ταχύτητας εισάγοντας σε αυτή μόνο τις μετρήσεις του ραντάρ. Ο ορίζοντας πρόβλεψης ήταν τα 60 λεπτά αφού παρατηρήθηκε πως οι σημαντικότερες μεταβολές στην κυκλοφορία λαμβάνουν χώρα 1 ώρα μετά τα καιρικά φαινόμενα. Ο ερευνητής επεσήμανε πως η ακρίβεια πρόβλεψης θα αυξανόταν σε περίπτωση που η βάση δεδομένων θα ήταν μεγαλύτερη.

Οι Karlaftis, Vlahogianni and Tsirigotis (2012) αξιοποίησαν δεδομένα από ένα οδικό τμήμα του αυτοκινητοδρόμου της Αττικής οδού για να αναπτύξουν πρότυπα πρόβλεψης ARIMAX, VARMAX, VARX και BVARX. Εκτός των άλλων, στόχος της μελέτης αυτής ήταν να εξετάσει την επιρροή των καιρικών συνθηκών στην κυκλοφορία. Οι φωρατές από τους οποίους αντλήθηκαν οι πληροφορίες βρίσκονταν σε αποστάσεις 500 μ. μεταξύ τους και η συχνότητα των μετρήσεων ήταν τα 10 λεπτά. Τα μετεωρολογικά δεδομένα ήταν η βροχόπτωση (mm) με συχνότητα επίσης 10 λεπτών και προέρχονταν από το METEONET, το δίκτυο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Οι μεταβλητές, εκτός της βροχόπτωσης, που εισήχθησαν ως εξωγενείς στα πρότυπα ήταν ο φόρτος και το ποσοστό των βαρέων οχημάτων. Αυτό που παρατηρήθηκε ήταν ότι με την εισαγωγή των εξωγενών παραγόντων στα πρότυπα ARIMAX, VARX και BVARX η ακρίβεια των προβλέψεων τους βελτιωνόταν αρκετά. Με μικρή διαφορά, τα VARX και BVARX παρήγαγαν προβλέψεις ακριβέστερες των ARIMAX. Το εντυπωσιακό ήταν η μεγάλη αύξηση της προβλεψιμότητας, της τάξης του 30-50 %, των προτύπων VARMAX σε σχέση με τα ARIMAX, γεγονός το οποίο ευδιάκριτα δείχνει ότι τα διανυσματικά πρότυπα (π.χ. VARMAX) «συλλαμβάνουν» την ενδογενή σχέση μεταξύ των ταχυτήτων των διαφόρων λωρίδων. Οι συγγραφείς

καταλήγουν τονίζοντας πως παρότι τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά, λόγω της βελτίωσης της πρόβλεψης των προτύπων με την εισαγωγή των εξωτερικών παραγόντων, καμία γενίκευση δεν μπορεί να γίνει.

Τέλος, οι Karlaftis and Vlahogianni (2012) μελέτησαν την επιρροή των καιρικών συνθηκών ξεχωριστά για κάθε λωρίδα. Τα δεδομένα είχαν την ίδια προέλευση με τη μελέτη που αναφέρθηκε ακριβώς πριν, με μόνη διαφορά τη συχνότητα η οποία εδώ ήταν 1 λεπτό. Όσον αφορά την επιρροή των καιρικών συνθηκών, τα αποτελέσματα υπέδειξαν ότι η βροχόπτωση επιφέρει μία αλλαγή στα στατιστικά χαρακτηριστικά της ταχύτητας χωρίς όμως να μπορεί να γίνει συσχετισμός με την ένταση του φαινομένου. Τέλος, σε όλα τα επεισόδια βροχόπτωσης που εξετάστηκαν, οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες φάνηκε να μεταβάλλουν τα ντετερμινιστικά χαρακτηριστικά και την βραχυπρόθεσμη προβλεψιμότητα των προτύπων.

2.4 Συμπεράσματα Βιβλιογραφίας

Από την παραπάνω βιβλιογραφική επισκόπηση, μπορούν να εξαχθούν πολλά ουσιώδη και ενδιαφέροντα συμπεράσματα όσον αφορά την βραχύχρονη πρόβλεψη των κυκλοφοριακών συνθηκών σε ελεύθερη οδό και όχι μόνο. Ο συνεχώς αυξανόμενος ρυθμός εκπόνησης μελετών τα τελευταία χρόνια γύρω από το ζήτημα αυτό, υποδεικνύει μία ανοδική τάση του ενδιαφέροντος γύρω από την πρόγνωση της κυκλοφορίας. Το γεγονός αυτό κάθε άλλο παρά παράλογο είναι αφού όπως προαναφέρθηκε, η εξέλιξη του μαθηματικού υποβάθρου, των συστημάτων και δικτύων συλλογής κυκλοφοριακών μετρήσεων όπως για παράδειγμα ένα δίκτυο φωρατών αλλά και η αύξηση της υπολογιστικής ισχύος των υπολογιστών έχουν λειτουργήσει καταλυτικά προς αυτή την κατεύθυνση.

Αυτό που εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί από τις παραπάνω μελέτες, είναι ότι η συντριπτική πλειοψηφία έχει ως περιοχή μελέτης έναν αυτοκινητόδρομο, μία ελεύθερη οδό ή τμήματα αυτών. Αυτό συμβαίνει διότι λόγω της απλότητας που τους διακρίνει, παρέχει μία ευκολία στη μελέτη τους και για αυτό προτιμήθηκαν στις αρχικές εφαρμογές γύρω από την πρόβλεψη. Τα τελευταία χρόνια όμως

παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία ολοένα και περισσότερες έρευνες που να αφορούν πρότυπα πρόβλεψης της κυκλοφορίας σε αστικές αρτηρίες.

Κατά την παρουσίαση όλων των διαφορετικών προτύπων πρόγνωσης έγινε κατανοητή η ικανότητα του καθενός να αποτυπώνει τις ιδιαίτερες κυκλοφοριακές συνθήκες. Η κάθε μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της και η επιλογή του κατάλληλου κάθε φορά πρότυπου είναι ίσως αυτό που δυσκολεύει περισσότερο έναν μελετητή. Για παράδειγμα, οι μη παραμετρικές μέθοδοι απαιτούν μεγάλες βάσεις δεδομένων για την «εκπαίδευσή» τους, αλλά καταφέρνουν να περιγράψουν επαρκώς τα ακραία φαινόμενα της κυκλοφορίας. Από την άλλη, οι παραμετρικές μέθοδοι δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα ακόμη και με την υποστήριξη μικρών βάσεων δεδομένων, χωρίς όμως να καταφέρνουν να ακολουθήσουν τις απότομες κυκλοφοριακές μεταβολές. Δεν είναι τυχαίο ότι οι δύο αυτές κατηγορίες μεθόδων έχουν χρησιμοποιηθεί εξίσου από τους μελετητές.

Όσον αφορά τις παραμετρικές μεθόδους, παρατηρήθηκε κατά κόρον χρήση του αυτοπαλινδρομου προτύπου κινητών μέσων (ARIMA) και των διαφόρων παραγώγων του όπως η SARIMA και τα πρότυπα VARMA. Αποδείχτηκε πως τα πρότυπα αυτά παράγουν αρκετά ακριβείς προβλέψεις εάν αξιοποιηθούν σωστά καθώς και ότι τα περιθώρια βελτίωσής τους, για παράδειγμα με την εισαγωγή εξωγενών παραγόντων, είναι μεγάλα. Επίσης διαπιστώθηκε ότι μέσω των πολυπαραμετρικών προτύπων δύνανται να περιγραφούν με ακρίβεια ακόμη και πιο σύνθετα δίκτυα και όχι μόνο μεμονωμένοι φωρατές. Το μεγάλο μειονέκτημα τους είναι ο μεγάλος υπολογιστικός φόρτος και χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεσή τους, ο οποίος αυξάνεται όσο το δίκτυο επεκτείνεται. Σε αυτό πολλές φορές έρχεται και προστίθεται το πρόβλημα των ανύπαρκτων ή λανθασμένων μετρήσεων καθώς και η ανάγκη ενημέρωσης των παραμέτρων ανά σύντομα χρονικά διαστήματα.

Όσον αφορά τις μη παραμετρικές μεθόδους, μπορεί να ειπωθεί πως έχουν επιτευχθεί αρκετά υψηλής ακρίβειας προγνώσεις μέσω αυτών. Οι συνηθέστερες από αυτές είναι η μη παραμετρική παλινδρόμηση και τα νευρωνικά δίκτυα. Το μειονέκτημά της πρώτης είναι ότι απαιτεί τη δόμηση μίας βάσης δεδομένων μεγάλης έκτασης που να εμπεριέχει όλες τις πιθανές καταστάσεις, ενώ της δεύτερης η δυσκολία δημιουργίας των κανόνων που θα το διέπουν και ο χρόνος «εκπαίδευσής» του.

Παρατηρείται επίσης ότι το κυκλοφοριακό μέγεθος του οποίου συνήθως μελετάται η πρόβλεψη είναι ο φόρτος. Σε αρκετές μελέτες όμως αναπτύσσονται πρότυπα πρόβλεψης και για άλλα μεγέθη όπως η ταχύτητα, η κατάληψη και η πυκνότητα.

Εντύπωση δημιουργεί το γεγονός ότι παρουσιάζεται μία ποικιλία στην συχνότητα των μετρήσεων καθώς και στον ορίζοντα πρόβλεψης της κάθε μελέτης. Η διακύμανση της συχνότητας των μετρήσεων που παρατηρήθηκε ήταν από 20 sec έως 30 λεπτά, ενώ του ορίζοντα πρόβλεψης από 3 λεπτά έως 2 ώρες. Είναι προφανές ότι όσο πιο πυκνή είναι η βάση δεδομένων, τόσο καλύτερη είναι η περιγραφή της αλλά και τόσο αυξάνεται ο θόρυβος των μετρήσεων. Από την άλλη, όσο μικραίνει ο ορίζοντας μπορεί να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά ταυτόχρονα αυξάνεται η πιθανότητα το φάσμα πρόγνωσης να είναι ανεπαρκές.

Ένα άλλο στοιχείο που παρατηρείται εύκολα είναι οι μεγάλες διακυμάνσεις των σφαλμάτων ακόμη και μεταξύ παρόμοιων προτύπων. Οι τιμές αυτές όπως φάνηκε κυμάνθηκαν από 5 μέχρι και 40 % δείχνοντας έτσι την απόδοση που πέτυχε το κάθε πρότυπο. Αυτό οφείλεται στον τρόπο ανάπτυξης του προτύπου από τον ερευνητή όπως για παράδειγμα η τάξη του προτύπου που θα επιλέξει, ο αριθμός των υστερήσεων των μεταβλητών, ο αριθμός και το είδος των εξωγενών παραγόντων και η επιλογή του καλύτερου δικτύου και της σύνθεσής του. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι για την επίτευξη της βέλτιστης πρόγνωσης των μεγεθών καθοριστικό ρόλο δεν παίζει μόνο η επιλογή του προτύπου αλλά και η σωστή ανάπτυξή του.

Τέλος, η μελέτη που έχουν εκπονηθεί σχετικά με την επιρροή των δυσμενών καιρικών συνθηκών στην πρόβλεψη της κυκλοφορίας είναι περιορισμένη. Τα αποτελέσματα αυτών έδειξαν πως τα σφάλματα των προτύπων στα οποία ο καιρός εισήχθη ως εξωγενής παράμετρος ήταν αρκετά μεγάλα και επομένως η ακρίβειά τους μειωμένη. Τυχαίο δεν ήταν το γεγονός ότι στις περισσότερες από αυτές έγινε χρήση νευρωνικών δικτύων αφού τα μη παραμετρικά πρότυπα αποδεδειγμένα αποδίδουν καλύτερα οριακές καταστάσεις όπως για παράδειγμα αυτές που δημιουργούνται από τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες και αυτές της συμφόρησης.

Κεφάλαιο 3

Βάση δεδομένων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η περιγραφή και η ανάλυση της βάσης δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε στην διπλωματική αυτή εργασία. Επίσης, αναφέρεται ο τρόπος επεξεργασίας της, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν τα στοιχεία της και να εξαχθούν ασφαλή αποτελέσματα από την στατιστική τους ανάλυση.

3.1 Περιγραφή βάσης δεδομένων

3.1.1 Κυκλοφοριακά δεδομένα

Η Αττική Οδός είναι ένας σύγχρονος αυτοκινητόδρομος μήκους 52 χιλιομέτρων. Αποτελεί τη ραχοκοκαλιά του οδικού δικτύου του Νομού Αττικής αφού έχει ως αφετηρία τον διεθνή αερολιμένα Αθηνών στα Σπάτα, διασχίζει τη μητροπολιτική πρωτεύουσα και τις αστικές περιοχές και καταλήγει στην περιοχή της Ελευσίνας. Πρόκειται για μία ελεύθερη λεωφόρο, με τρεις λωρίδες κυκλοφορίας και μία λωρίδα έκτακτης ανάγκης ανά κατεύθυνση. Συνδέει επίσης τις αστικές και περιαστικές περιοχές που εξυπηρετεί με τον κεντρικό-εθνικό οδικό άξονα της Ελλάδας, την Εθνική Οδό Αθήνας-Θεσσαλονίκης. Λόγω της σημαντικότητάς της και του αριθμού των περιοχών που εξυπηρετεί, παρουσιάζεται σε ολόκληρη, και ιδιαίτερα στο κεντρικό της τμήμα, έντονη κυκλοφοριακή συμφόρηση. Καθημερινά λοιπόν, κορεσμός παρατηρείται κατά τις ώρες αιχμής στο τμήμα αυτό.

Έτσι, τα στοιχεία που αξιοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία, προέρχονται από το τμήμα αυτό αφού λόγω της χρήσης του, το δείγμα θα ήταν πλούσιο και ομοιογενές, γεγονός που οδηγεί στην ευκολότερη, ακριβέστερη και ασφαλέστερη ανάλυση και κατ' επέκταση διεξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων.

Τα δεδομένα κυκλοφορίας αντλήθηκαν από το τμήμα της Αττικής Οδού μεταξύ του εικοστού τετάρτου και του τριακοστού τετάρτου χιλιομέτρου (24ο-34ο χλμ). Το τμήμα αυτό έχει τη μεγαλύτερη χρησιμότητα και παρουσιάζει τους μεγαλύτερους φόρτους σε σύγκριση με τα υπόλοιπα τμήματα της Αττικής οδού. Αυτό συμβαίνει διότι συνδέει περιοχές των προαστίων με την Εθνική οδό Αθηνών-Θεσσαλονίκης και στην προέκτασή της με τους βασικούς οδικούς άξονες της Πελοποννήσου και φυσικά, την Ανατολική με την Δυτική Αττική. Επίσης, το τμήμα αυτό επιλέχθηκε ως τμήμα μελέτης, επειδή βρίσκεται σε μικρή σχετικά απόσταση από τους τέσσερεις βροχομετρικούς σταθμούς από τους οποίους και ελήφθησαν υπόψη τα βροχομετρικά δεδομένα όπως και θα αναλυθεί περαιτέρω σε επόμενη ενότητα.

Τα κυκλοφοριακά μεγέθη που λαμβάνονται υπόψη αντλήθηκαν από φωρατές που βρίσκονται στο ρεύμα προς Ελευσίνα. Οι φωρατές αυτοί επιλέχθηκαν με βάση κάποια κριτήρια. Όσοι από αυτούς δεν τα πληρούσαν, απορρίπτονταν και τα στοιχεία τους δεν χρησιμοποιούνταν τελικά για την παραγωγή της βάσης δεδομένων.

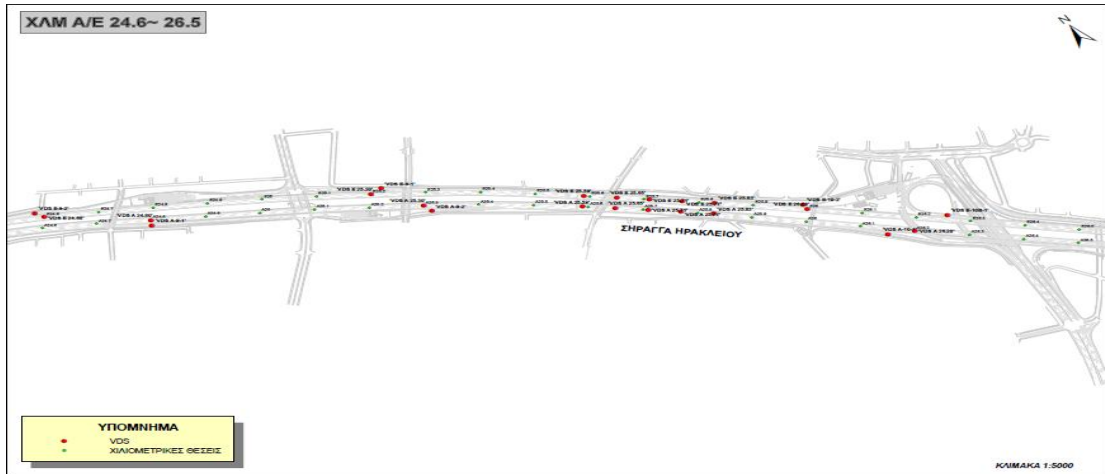
Το πρώτο από αυτά τα κριτήρια ήταν να βρίσκονται μεταξύ εικοστού τετάρτου και του τριακοστού τετάρτου χιλιομέτρου. Εξ' αρχής, ένας από τους σκοπούς της εργασίας αυτής ήταν εξετάσει την πιθανότητα βελτιστοποίησης των προτύπων χρονοσειρών καθώς νέες πληροφορίες από την κυκλοφορία σε προηγούμενα τμήματα της οδού, θα εισάγονταν στο πρότυπο. Γι' αυτό επιλέχθηκε ένα τμήμα μήκους δέκα χιλιομέτρων, με αφετηρία κοντά στην έξοδο της Εθνικής οδού Αθηνών-Θεσσαλονίκης και τέρμα κοντά στην περιοχή Γέρακα-Ανθούσα.

Το δεύτερο κριτήριο, ήταν να βρίσκονται οι φωρατές εκτός και σε μικρή απόσταση από σήραγγες, προκειμένου να μην εισαχθούν στο δείγμα κυκλοφοριακά δεδομένα ανεπιθύηστα από τη βροχόπτωση. Αφού ένα από αυτά που μελετάται στην εργασία αυτή είναι και η επίδραση της βροχόπτωσης στην ταχύτητα κίνησης των οχημάτων, θα ασκούσε αρνητική επιρροή στην ανάλυση μία χρονοσειρά ταχύτητας ή φόρτου από συνθήκες χωρίς βροχόπτωση. Κι αυτό, γιατί μέσα και σε μικρή απόσταση από μία σήραγγα, τα οχήματα κινούνται υπό συνθήκες χωρίς βροχόπτωση αφού είναι σε χώρο στεγασμένο.

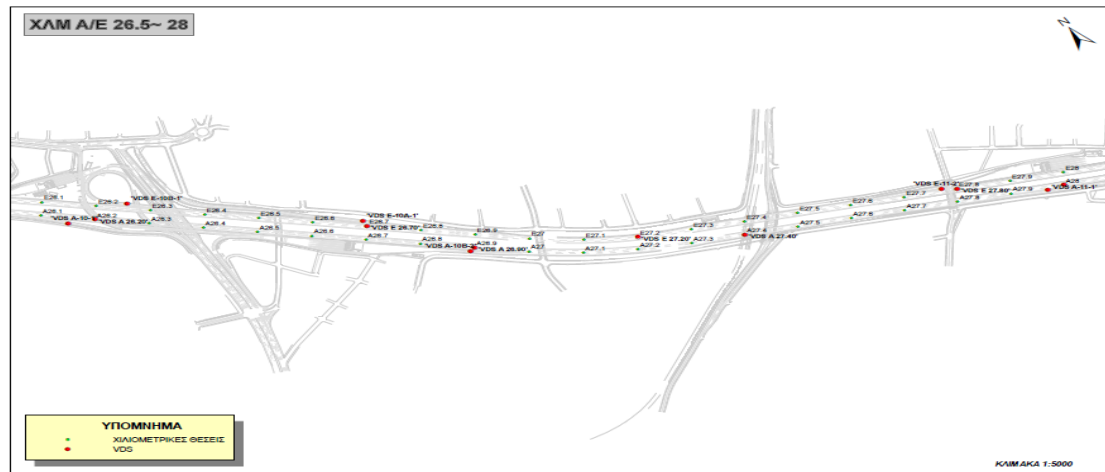
Το τρίτο και τελευταίο κριτήριο ήταν να επιλεγθούν φωρατές που θα βρίσκονται σε κάποια μικρή σχετικά απόσταση από εισόδους και εξόδους, ούτως ώστε να μην συμπεριληφθούν τιμές χρονοσειρών επηρεασμένες από τη λωρίδα επιτάχυνσης και

επιβράδυνσης. Είναι προφανές ότι, επειδή η δεξιά λωρίδα είναι ταυτόχρονα και η λωρίδα που χρησιμοποιείται από όλους τους οδηγούς προκειμένου να εισέλθουν και να εξέλθουν από τον αυτοκινητόδρομο, εντοπίζονται χαμηλές ταχύτητες και υψηλοί φόρτοι κοντά στους κόμβους εισόδων και εξόδων. Γενικότερα, οι τιμές των κυκλοφοριακών δεδομένων όλων των λωρίδων και ειδικότερα της δεξιάς κοντά στους κόμβους αυτούς, διαταράσσουν την ομαλότητα και την ομοιογένεια του δείγματος.

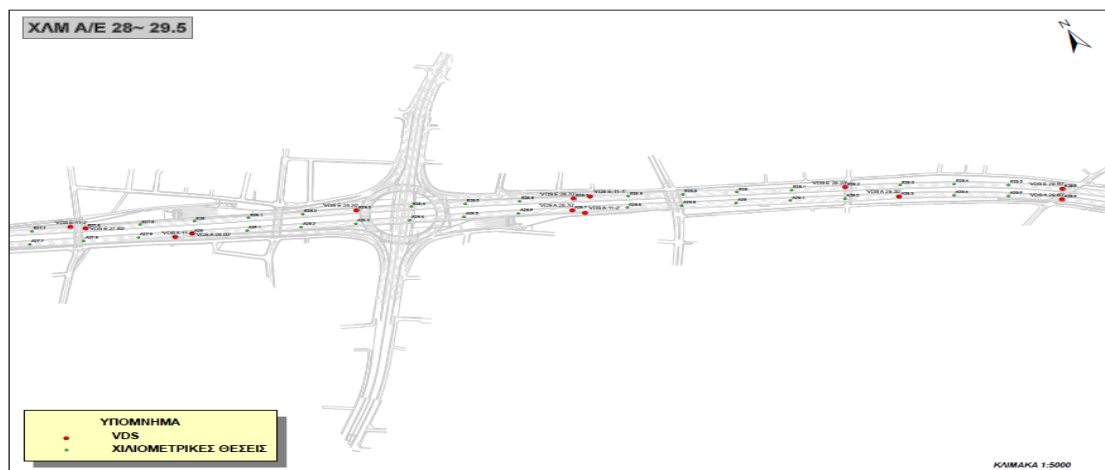
Έτσι, με αυτά τα κριτήρια, επιλέχθηκαν οι παρακάτω φωρατές από τους οποίους και αντλήθηκαν τα κυκλοφοριακά δεδομένα για την παραγωγή της βάσης δεδομένων της παρούσας εργασίας. Οι φωρατές αυτοί είναι οι VDS E 24.20, VDS E 24.60, VDS E 25.20, VDS E 26.00, VDS E 26.70, VDS E 27.20, VDS E 27.80, VDS E 28.30, VDS E 28.70, VDS E 29.20, VDS E 29.60, VDS E 30.84, VDS E 31.60, VDS E 32.00, VDS E 32.50, VDS E 33.00, VDS E 34.00. Για τον καθέναν από αυτούς, το VDS (Vehicle Detection Stations) σημαίνει σταθμός εντοπισμού οχημάτων, το E δηλώνει την κατεύθυνση προς Ελευσίνα και ο αριθμός δείχνει την χιλιομετρική θέση που βρίσκεται ο εκάστοτε φωρατής. Για παράδειγμα, ο VDS E 26.70 είναι ο σταθμός εντοπισμού οχημάτων (φωρατής) στην χιλιομετρική θέση 26 + 700 με κατεύθυνση προς Ελευσίνα. Αμέσως μετά παρατίθενται οι πίνακες που απεικονίζουν την περιοχή των χρησιμοποιηθέντων φωρατών.



Σχήμα 3.1: Περιοχή απεικόνισης VDS 24.60 έως VDS 26.00



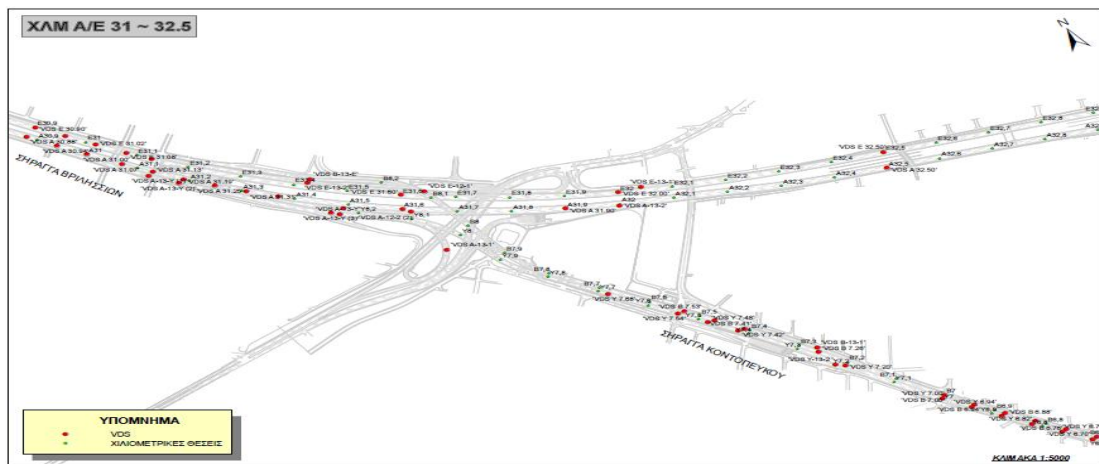
Σχήμα 3.2: Περιοχή απεικόνισης VDS 26.70 έως VDS 27.80



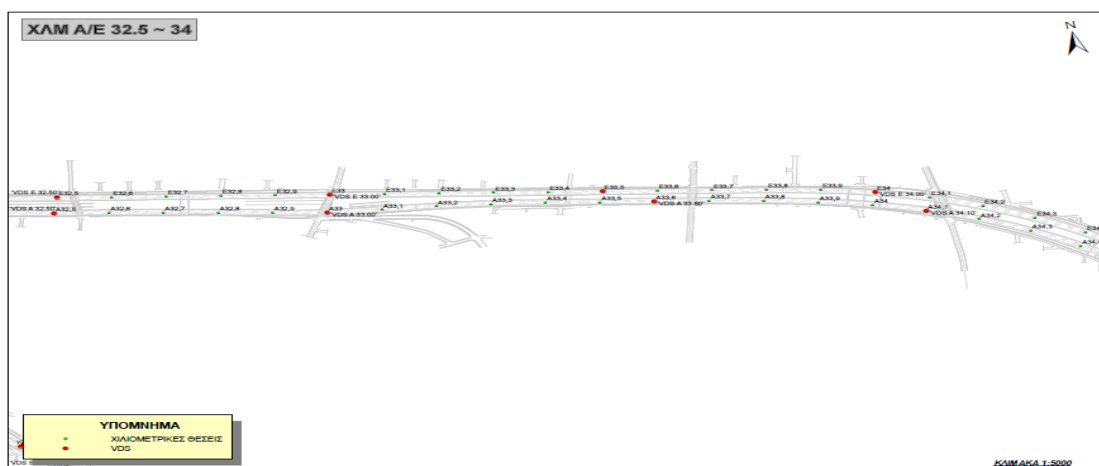
Σχήμα 3.3: Περιοχή απεικόνισης VDS 28.30 έως VDS 29.20



Σχήμα 3.4: Περιοχή απεικόνισης VDS 29.60 έως VDS 30.84



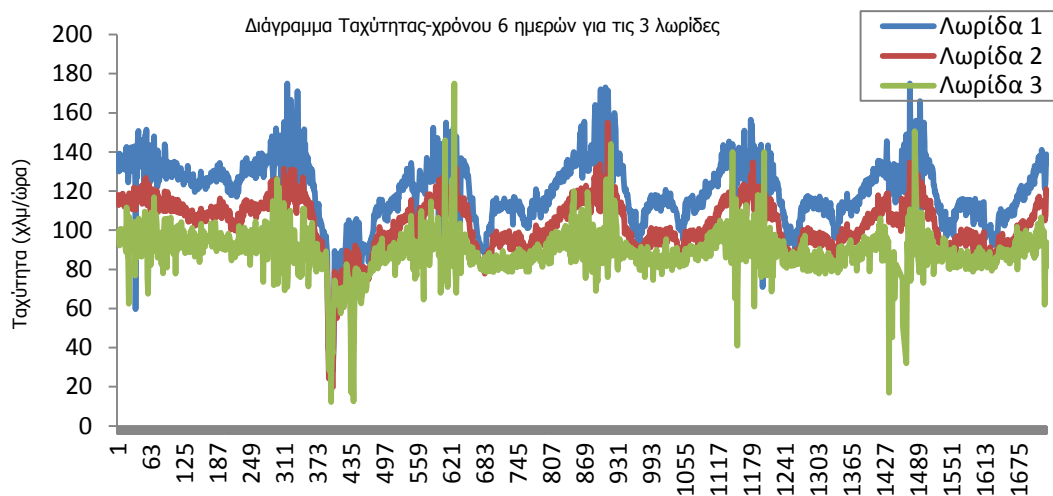
Σχήμα 3.5: Περιοχή απεικόνισης VDS 31.60 έως VDS 32.50



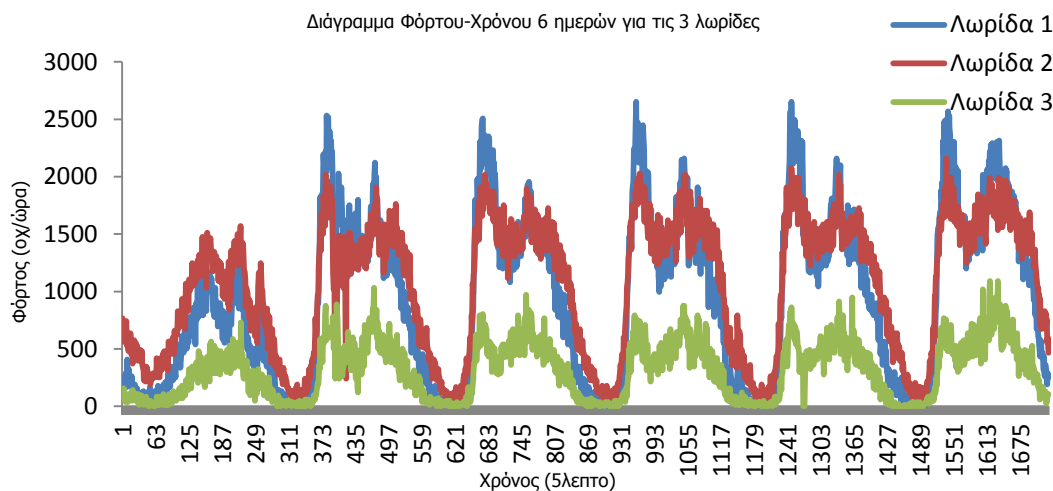
Σχήμα 3.6: Περιοχή απεικόνισης VDS 33.00 έως VDS 34.00

Τα στοιχεία που ελήφθησαν υπόψη για τη δημιουργία της βάσης δεδομένων ήταν αρχικά έξι ημερών, από Κυριακή 13 έως και Παρασκευή 18 Ιανουαρίου του 2008. Εν

συνεχία όμως, παρατηρήθηκε μία αρκετά μεγάλη διαφοροποίηση στα κυκλοφοριακά δεδομένα της Κυριακής σε σχέση με των υπόλοιπων ημερών η οποία έδειχνε να διαταράσσει το δείγμα και να αλλοιώνει τα χαρακτηριστικά των χρονοσειρών. Ενδεικτικά παρατίθενται παρακάτω τα διαγράμματα ταχύτητας-χρόνου και φόρτου-χρόνου των τριών λωρίδων του σημείου ενδιαφέροντος (VDS E 24.20) για το σύνολο των έξι ημερών του δείγματος, προκειμένου να γίνει αισθητή η έντονη αυτή διαφοροποίηση της πρώτης ημέρας (Κυριακή) σε σχέση με τις υπόλοιπες.



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα Ταχύτητας-Χρόνου για τις 6 ημέρες



Σχήμα 3.8: Διάγραμμα Φόρτου-Χρόνου για τις 6 ημέρες

Επίσης, η στατιστική ανάλυση με χρήση και των έξι ημερών φάνηκε να οδηγεί σε επισφαλή αποτελέσματα μιας και η Κυριακή έχει εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά από τις υπόλοιπες μέρες της εβδομάδας με διαφορετικές τιμές, χρονική διάρκεια και χρονική στιγμή που εμφανίζεται ο κορεσμός. Για τους λόγους αυτούς, αποφασίστηκε να απορριφθεί η Κυριακή από το δείγμα και στη βάση δεδομένων, να συμπεριληφθούν μονάχα οι υπόλοιπες ημέρες από Δευτέρα 14 έως και Παρασκευή 18 Ιανουαρίου του 2008. Να σημειωθεί ότι τα μεγαλύτερα διαστήματα βροχόπτωσης παρατηρήθηκαν κατά τις ημέρες Δευτέρα και Πέμπτη, 14 και 17 Ιανουαρίου αντίστοιχα. Τις υπόλοιπες μέρες σημειώθηκαν μονάχα βροχοπτώσεις παροδικής διάρκειας και μικρής έντασης.

Ένας χωρισμός που έγινε στη βάση δεδομένων, ήταν σε δύο διαφορετικές περιόδους μελέτης. Ο διαχωρισμός των δύο αυτών περιόδων έγινε εξαιτίας του γεγονότος ότι κατά τις νυχτερινές ώρες, η κυκλοφορία παρουσιάζεται με εντελώς διαφορετικά στοιχεία (αρκετά μεγάλες διαφορές στην ταχύτητα και στο φόρτο σε σχέση με τις πρωινές ώρες, μεγάλες διακυμάνσεις κτλ.). Έτσι, έγινε μία προσπάθεια να χωριστούν τα δεδομένα σε δύο ξεχωριστές χρονοσειρές. Στόχος ήταν, η μία από τις δύο να περιλαμβάνει τα δεδομένα της νυχτερινής κυκλοφορίας όπου τελείται υπό συνθήκες ελεύθερης ροής. Σύμφωνα με το βιβλίο της «Κυκλοφοριακής Τεχνικής», συνθήκες ελεύθερης ροής υπάρχουν σε έναν αυτοκινητόδρομο όταν ο φόρτος δεν ξεπερνάει τα 700 ΜΕΑ/ώρα/λωρίδα και η ταχύτητα τα 100 χλμ/ώρα. Μετά από επαναλαμβανόμενες προσεγγίσεις του προβλήματος αυτού, ώστε τα δύο διαστήματα να έχουν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά άλλα και να περιλαμβάνουν διαστήματα βροχόπτωσης, ο βέλτιστος τρόπος να χωριστεί η βάση δεδομένων, φάνηκε να είναι στα διαστήματα 05:00-23:00 και 23:00-05:00.

Τα δεδομένα της κυκλοφορίας καλύπτουν και τις πέντε ημέρες χωρίς κανένα κενό ανάμεσά τους και η συχνότητά τους είναι ανά πέντε λεπτά. Τα μεγέθη δίνονται ανά φωρατή και ανά λωρίδα και είναι τα παρακάτω: η μέση ταχύτητα σε χιλιόμετρα/ώρα, ο φόρτος των Ι.Χ. σε οχήματα/ώρα, ο φόρτος των φορτηγών σε οχήματα/ώρα και η κατάληψη. Η κάθε λωρίδα σημειωνόταν δίπλα με τα εξής νούμερα: 1 για την αριστερή λωρίδα, 2 για τη μεσαία και 3 για την δεξιά λωρίδα.

3.1.2 Βροχομετρικά δεδομένα

Από την άλλη μεριά, τα στοιχεία της βροχόπτωσης αντλήθηκαν από δίκτυο μετεωρολογικών-βροχομετρικών σταθμών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Δυστυχώς όμως ο κοντινότερος στο σημείο του ενδιαφέροντος σταθμός είναι στο Γαλάτσι, σε απόσταση τεσσάρων χιλιομέτρων. Αυτό σημαίνει ότι εάν ληφθούν τα μετεωρολογικά δεδομένα μονάχα από αυτόν το σταθμό, η πιθανότητα ενός μεγάλου σφάλματος είναι μεγάλη. Το σφάλμα που θα παρουσιαστεί στα δεδομένα θα έχει πιθανόν να κάνει και με την τιμή της έντασης της βροχόπτωσης αλλά και με την ώρα του συμβάντος.

Προκειμένου λοιπόν να υπολογιστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια όλα αυτά, χρησιμοποιήθηκε ο κατάλληλος αλγόριθμος και το λογισμικό εφαρμογής του. Ο αλγόριθμος αυτός, κάνει χρήση της μεθόδου παρεμβολής και με βάση τις τιμές της βροχόπτωσης στους σταθμούς γύρω από το σημείο ενδιαφέροντος και την απόστασή τους από το σημείο αυτό, υπολογίζει τη βροχόπτωση εκεί. Έτσι, τα δεδομένα εισόδου που ζητάει ο αλγόριθμος είναι τα εξής: Χρονοσειρά βροχόπτωσης κάθε σταθμού ξεχωριστά, συντεταγμένες κάθε σταθμού και τέλος, τις συντεταγμένες του σημείου που χρειάζεται να υπολογιστεί η βροχόπτωση. Οι σταθμοί που επιλέχθηκαν ήταν αυτοί στο Γαλάτσι, στο Μενίδι, στους Ζωγράφου και στα Άνω Λιόσια. Τα κριτήρια επιλογής τους αναφέρονται παρακάτω.

Το πρώτο κριτήριο ήταν οι σταθμοί να βρίσκονται σε μικρή σχετικά απόσταση από το σημείο υπολογισμού ώστε η επιρροή τους σε αυτό να είναι σχετικά μεγάλη. Είναι λογικό ότι όσο πιο μακριά βρίσκεται ένας σταθμός αυτό το σημείο τόσο λιγότερο θα επηρεάζουν οι μετρήσεις του τα τελικά αποτελέσματα.

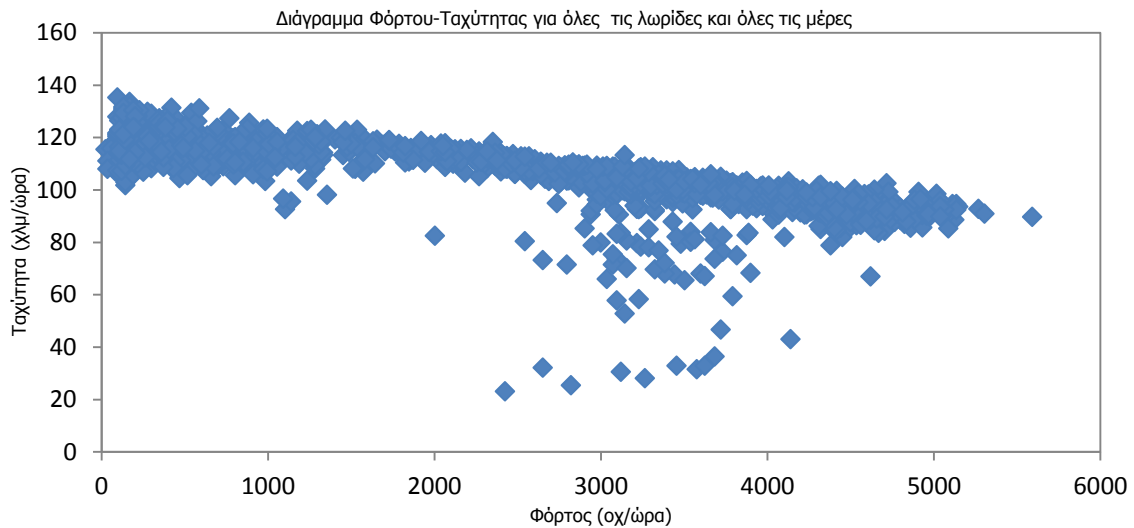
Το δεύτερο κριτήριο είναι να βρίσκονται στο ίδιο περίπου υψόμετρο οι μετεωρολογικοί σταθμοί και μεταξύ τους αλλά και ως προς το σημείο ενδιαφέροντος ώστε τα αποτελέσματα της παρεμβολής να κινούνται σε λογικά πλαίσια. Για παράδειγμα, εάν ληφθούν υπόψη οι μετρήσεις του σταθμού της Πεντέλης, η τελική βάση δεδομένων θα παρουσιάσει μεγάλη απόκλιση από την πραγματικότητα. Αυτό θα συμβεί διότι λόγω του υψομέτρου στην περιοχή της Πεντέλης, οι μετρήσεις που καταγράφονται κατά τη διάρκεια μιας βροχόπτωσης εκεί και π.χ. στο Γαλάτσι

παρουσιάζουν τεράστιες αποκλίσεις μεταξύ τους. Έτσι, το τελικό δείγμα που θα προέκυπτε θα ήταν διαταραγμένο από τις τιμές αυτές.

Το στοιχείο του καιρού που αντλήθηκε από τους σταθμούς του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου ήταν η βροχόπτωση. Η μονάδα μέτρησής της είναι τα mm και το βήμα με το οποίο λαμβάνονται οι πληροφορίες της είναι τα δέκα λεπτά. Επειδή όμως τα στοιχεία της κυκλοφορίας είναι ανά πέντε λεπτά και ήταν επιθυμητό η συχνότητα των δεδομένων να είναι η ίδια προκειμένου να μπορεί να γίνει η ανάλυσή τους, μετατράπηκαν και τα δεδομένα κατακρήμνισης ώστε να έχουν πεντάλεπτο βήμα. Αφού η τιμή της κατακρήμνισης αναφέρεται στο ύψος βροχής στο δεκάλεπτο αυτό σε mm, αρκεί να διαιρεθεί με το δύο κάθε τιμή της χρονοσειράς ώστε να προκύψει η καινούργια χρονοσειρά βροχόπτωσης αυτή τη φορά με βήμα πέντε λεπτών.

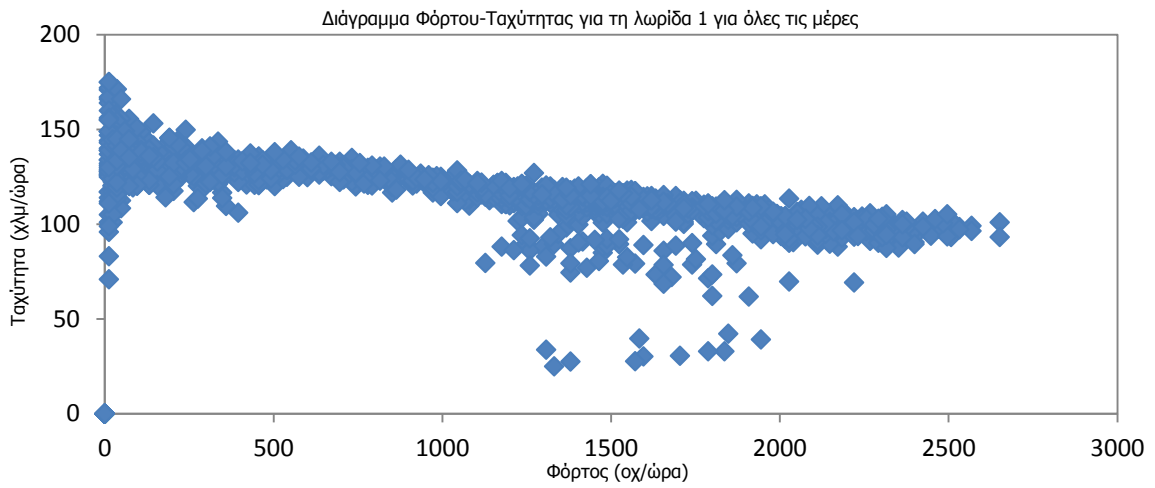
3.2 Ανάλυση βάσης δεδομένων

Αναλύοντας τη βάση δεδομένων προκύπτουν διάφορα συμπεράσματα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος και χρησιμότητας. Η ανάλυση που θα ακολουθήσει, θα πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια πινάκων και διαγραμμάτων έτσι ώστε να γίνουν πιο απτά τα συμπεράσματα αυτά. Να σημειωθεί ότι η ταχύτητα θα δίνεται σε μονάδες χιλιόμετρα/ώρα, ο φόρτος σε οχήματα/ώρα, ο χρόνος σε πεντάλεπτα και η βροχόπτωση σε mm/πεντάλεπτο.

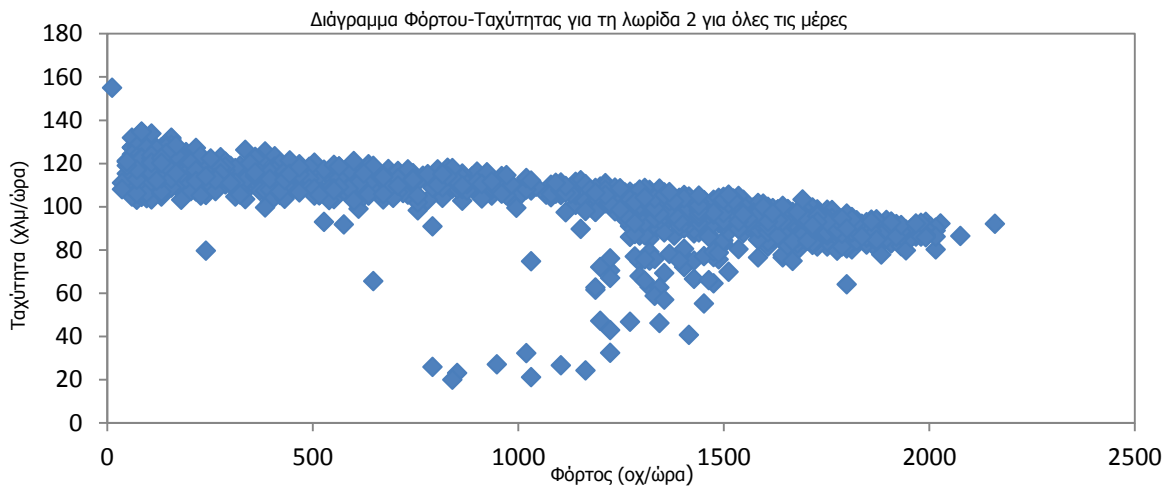


Σχήμα 3.9: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου για όλες τις λωρίδες και τις ημέρες

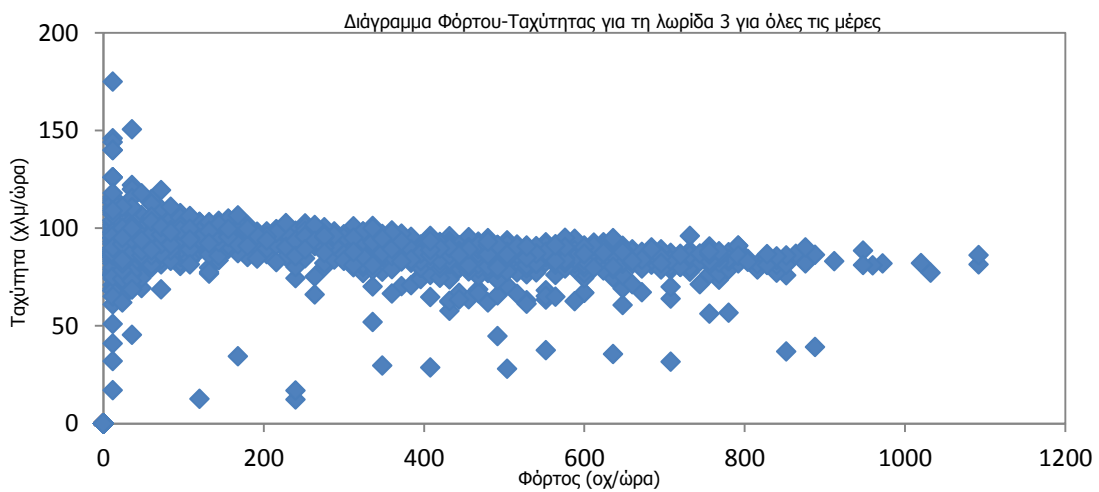
Από το παραπάνω διάγραμμα που απεικονίζεται η ταχύτητα των οχημάτων συναρτήσει του φόρτου κυκλοφορίας για όλες τις λωρίδες και τις ημέρες που εξετάζεται, εύκολα διακρίνεται ότι πρόκειται για την κλασσική σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών για χαμηλούς φόρτους (<1000 οχ./ώρα). Από το σημείο αυτό και ύστερα διακρίνεται μία προσεγγιστικά γραμμική σχέση μεταξύ τους. Επίσης, αυτό που παρατηρείται εύκολα είναι ότι ο αναμενόμενος δεύτερος κλάδος του διαγράμματος, δηλαδή ο κλάδος που θα απεικόνιζε τη συμφορημένη περιοχή, διακρίνεται ανεπαίσθητα σε σχέση με τον πρώτο. Τέλος, συγκεντρωμένες φαίνονται να είναι οι τιμές του διαγράμματος στα άκρα του, δηλαδή στους χαμηλούς και υψηλούς φόρτους, σε αντίθεση με το μέσο του όπου οι φόρτοι έχουν μεσαίες τιμές. Να σημειωθεί ότι τα στοιχεία του διαγράμματος υπολογίστηκαν ως εξής: Ο συνολικός φόρτος αθροίζοντας τους φόρτους της κάθε λωρίδας και η τελική ταχύτητα υπολογίζοντας τους σταθμισμένους μέσους όρους των ταχυτήτων κάθε φορά.



Σχήμα 3.10: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου για τη λωρίδα 1 και για όλες τις ημέρες



Σχήμα 3.11: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου για τη λωρίδα 2 και για όλες τις ημέρες



Σχήμα 3.12: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου για τη λωρίδα 3 και για όλες τις ημέρες

Από τα παραπάνω 3 διαγράμματα Ταχύτητας-Φόρτου για όλες τις ημέρες και για την κάθε λωρίδα ξεχωριστά συμπεραίνονται τα εξής:

Το διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου για τη λωρίδα 3 εμφανίζει μία ξεκάθαρα γραμμική σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών. Αντίθετα, το αντίστοιχο διάγραμμα της λωρίδας 2 απεικονίζει την κλασσική μορφή της σχέσης των δύο αυτών μεγεθών. Τέλος, για τη λωρίδα 1 φαίνεται να ισχύει κάτι το ενδιάμεσο, αφού για μικρούς φόρτους το διάγραμμα έχει την κλασσική μορφή της σχέσης των δύο μεγεθών ενώ για μεγαλύτερους φόρτους (>1000 οχ./ώρα), η σχέση αυτή φαίνεται να γίνεται γραμμική.

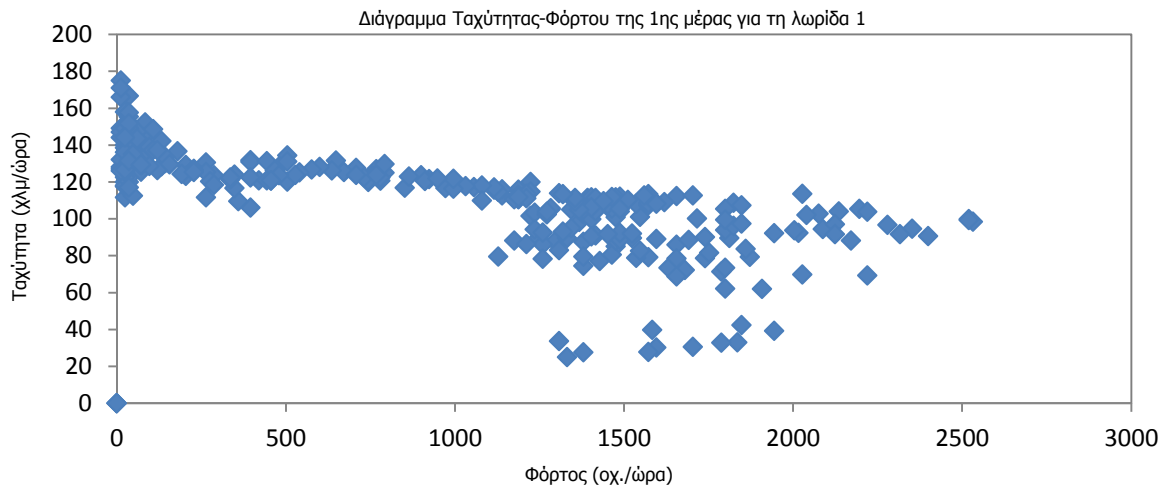
Είναι εμφανές ότι στις λωρίδες 1 και 3 παρουσιάζεται πολύ μεγαλύτερο πλήθος τιμών κοντά στον μηδενικό φόρτο απ' ότι στη λωρίδα 2 απ' όπου σχεδόν απουσιάζουν. Αυτό δείχνει την αυξημένη χρήση της μεσαίας λωρίδας σε σχέση με την αριστερή και τη δεξιά κατά τις νυχτερινές ώρες όπου οι συνολικοί φόρτοι είναι μικροί.

Ένα άλλο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι η απουσία του δευτέρου κλάδου του διαγράμματος της 3^{ης} λωρίδας, δηλαδή της συμφορημένης περιοχής. Το μόνο που παρατηρείται στη θέση του κλάδου αυτού, είναι η παρουσία διάσπαρτων τιμών χωρίς όμως καμία συνοχή. Αντίθετα, για τη 2^η λωρίδα μάλλον ισχύει το αντίστροφο, αφού είναι εμφανής η μειωτική τάση του φόρτου καθώς η ταχύτητα μειώνεται. Το σημείο του διαγράμματος στο οποίο γίνεται αισθητό αυτό είναι για τιμές του φόρτου μεγαλύτερες του 1500 οχ./ώρα. Τέλος, για τη λωρίδα 1 φαίνεται πως μάλλον πρόκειται για μία ενδιάμεση κατάσταση. Διαγράφεται ανεπαίσθητα ένας κλάδος συμφόρησης χωρίς όμως να υπάρχει σαφής διαχωρισμός μεταξύ των κλάδων ή να είναι ευδιάκριτο κάποιο σημείο στο διάγραμμα όπου ο φόρτος να μεγιστοποιείται.

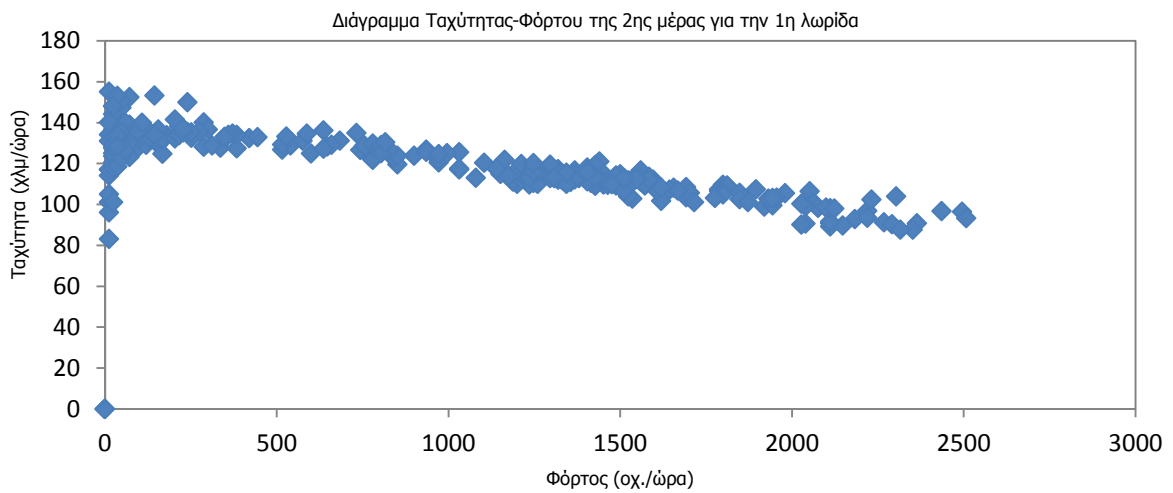
Καθώς η ταχύτητα μειώνεται, τα οχήματα ακολουθούν είτε τον έναν κλάδο είτε τον άλλο. Αυτό σημαίνει ότι η μείωση της ταχύτητας, δεν συνεπάγεται μονοσήμαντα την μείωση του φόρτου από το μέγιστο του διαγράμματος και μετά όπως θα αναμενόταν από το κλασσικό διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου. Το ποιόν κλάδο θα ακολουθήσει ο φόρτος των οχημάτων σε μία δεδομένη κυκλοφοριακή κατάσταση εξαρτάται προφανώς και από άλλους παράγοντες και κυρίως από αυτούς που οδήγησαν στη

συμφόρηση όπως π.χ. βροχόπτωση, ατύχημα, έργα επί της οδού, αυξημένη χρήση της οδού κτλ.

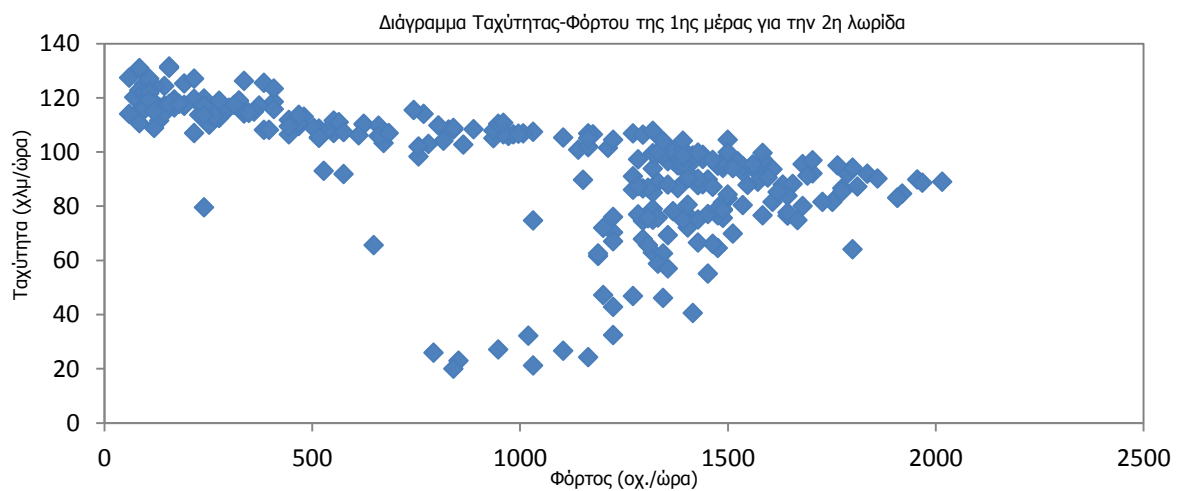
Η μορφή των παραπάνω διαγραμμάτων εγείρει κάποιες υποψίες γύρω από τη σχέση ταχύτητας και φόρτου η οποία χρήζει περαιτέρω ανάλυσης.



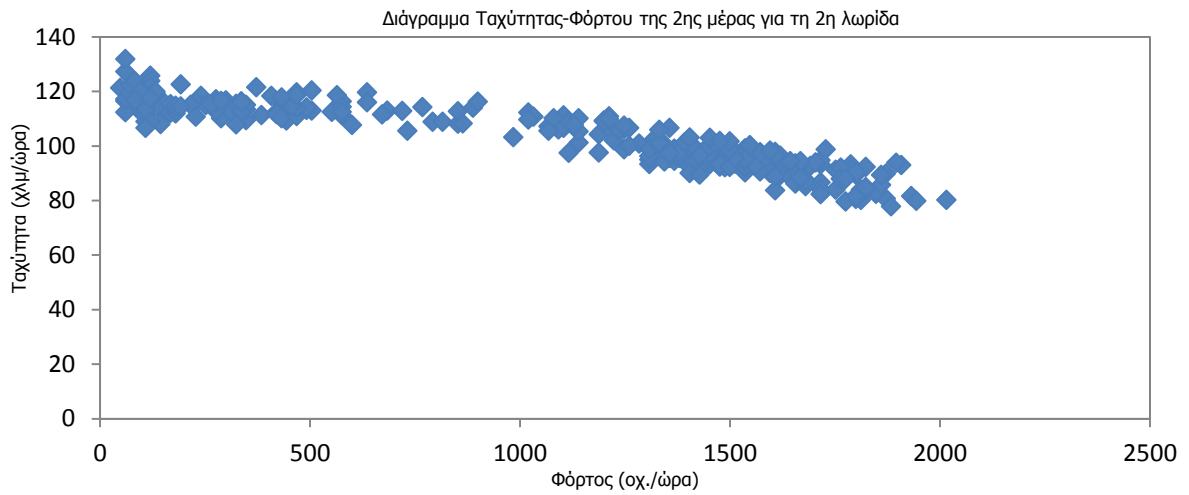
Σχήμα 3.13: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου της 1ης ημέρας για τη λωρίδα 1



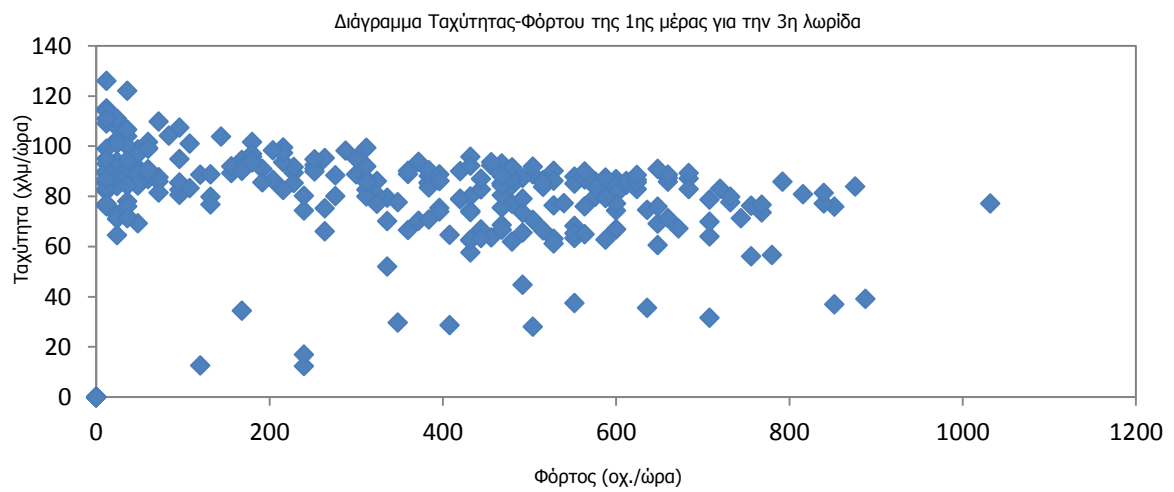
Σχήμα 3.14: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου της 2ης ημέρας για τη λωρίδα 1



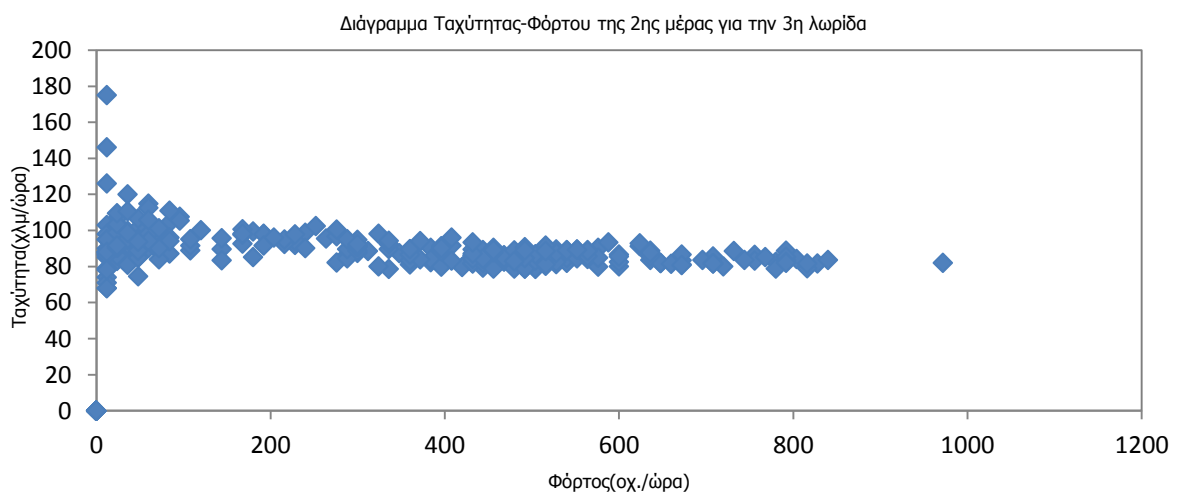
Σχήμα 3.15: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου της 1ης ημέρας για τη λωρίδα 2



Σχήμα 3.16: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου της 2ης ημέρας για τη λωρίδα 2



Σχήμα 3.17: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου της 1ης ημέρας για τη λωρίδα 3



Σχήμα 3.18: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου της 2ης ημέρας για τη λωρίδα 3

Από τα παραπάνω διαγράμματα λοιπόν βγαίνουν εύκολα τα εξής συμπεράσματα:

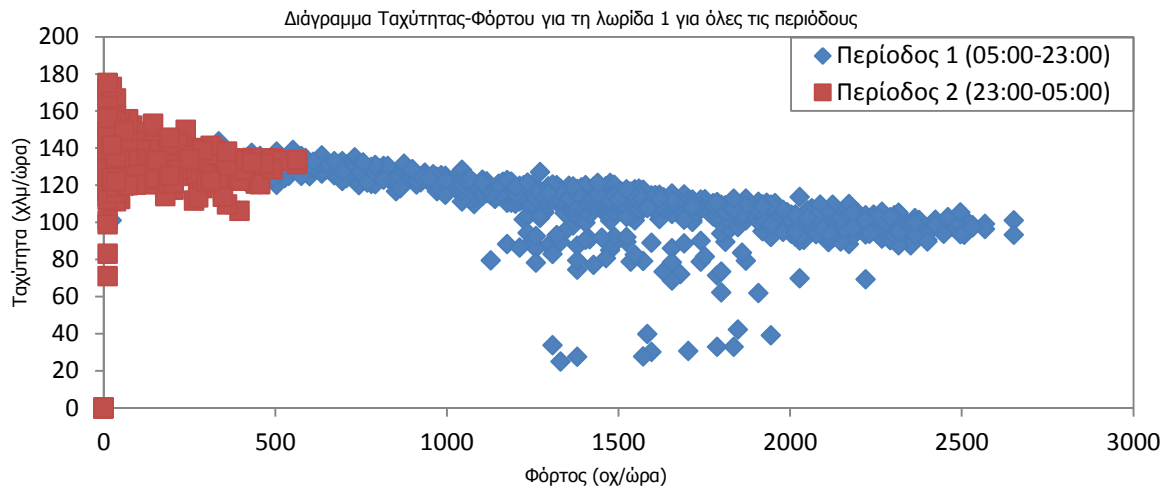
Όσα ειπώθηκαν στην προηγούμενη ακριβώς ενότητα για τα ίδια διαγράμματα ισχύουν μονάχα για την 1^η ημέρα κατά την οποία παρουσιάστηκαν φαινόμενα βροχόπτωσης.

Φαίνεται λοιπόν ότι τις ημέρες που σημειώθηκε βροχόπτωση, τα διαγράμματα του φόρτου και της ταχύτητας τείνουν να πάρουν την κλασσική τους μορφή. Φυσικά όπως προαναφέρθηκε, αυτό ισχύει κυρίως για την λωρίδα 2 αλλά και για την 1, ενώ για την 3^η λωρίδα μπορεί να ειπωθεί απλά ότι η ταχύτητα παρουσιάζει μεγαλύτερες διακυμάνσεις κατά την ημέρα αυτή.

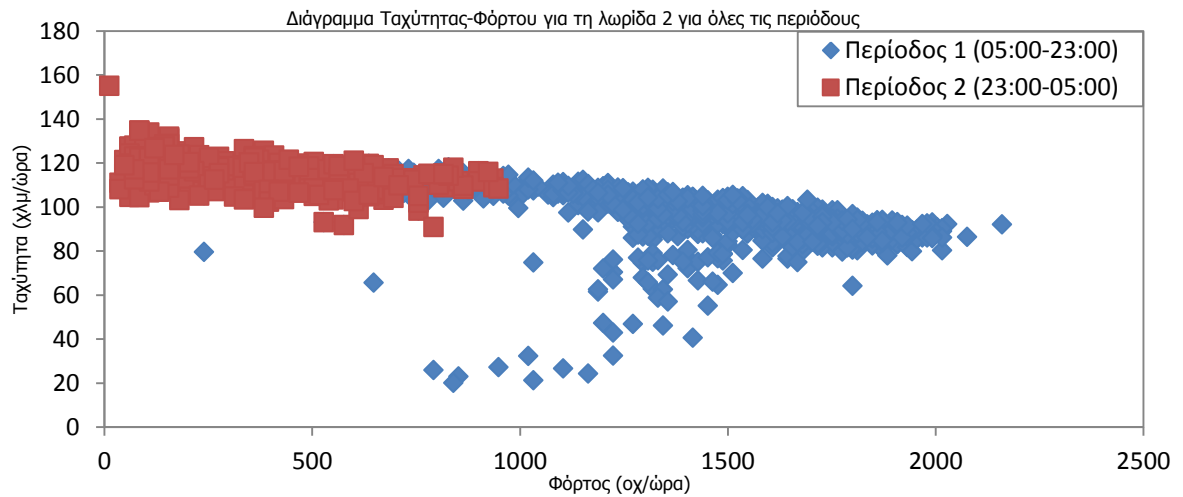
Είναι ξεκάθαρο ότι τις ημέρες χωρίς παρουσία βροχόπτωσης, η διακύμανση μειώνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό εκτός από την περιοχή του διαγράμματος που οι φόρτοι είναι κοντά στο μηδέν. Αυτό ισχύει κυρίως για τις λωρίδες 1 και 3, αφού όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η λωρίδα 2 έχει ελάχιστες τιμές φόρτου κοντά στο μηδέν.

Κάτι άλλο που μπορεί να παρατηρηθεί, είναι η απουσία του δεύτερου κλάδου του διαγράμματος στα διαγράμματα Ταχύτητας-Φόρτου τις ημέρες χωρίς επεισόδια βροχόπτωσης. Στα διαγράμματα αυτά, ο φόρτος φαίνεται να αυξάνεται σταδιακά και η ταχύτητα να φθίνει, αλλού πιο αργά και αλλού πιο γρήγορα, χωρίς όμως να μπορεί να ειπωθεί ότι ο αυτοκινητόδρομος εξυπηρετεί αριθμό οχημάτων ίσο με την κυκλοφοριακή του ικανότητα. Θα μπορούσε εδώ ίσως να βγει το συμπέρασμα ότι, για τις λωρίδες 1 και 2 τουλάχιστον, τις ημέρες που σημειώθηκε βροχόπτωση κάτι τέτοιο συνέβη αφού το διάγραμμα φτάνει σε κάποιο σημείο όπου ο φόρτος μεγιστοποιείται. Πιθανόν λοιπόν αυτό να σημαίνει, ότι τις υπόλοιπες ημέρες ο αυτοκινητόδρομος θα μπορούσε να εξυπηρετήσει μεγαλύτερο αριθμό οχημάτων κατά τις ώρες αιχμής, εξ' ου και η απουσία του δεύτερου κλάδου του διαγράμματος.

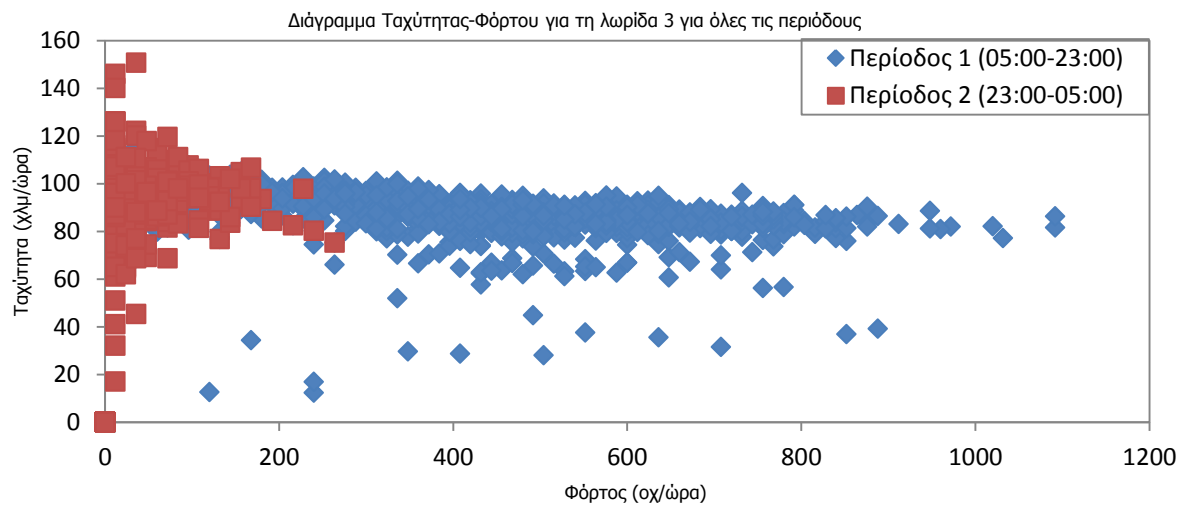
Τέλος, να επαναληφθεί ότι για τη 2^η λωρίδα το διάγραμμα απεικονίζει την κλασσική σχέση φόρτου και ταχύτητας, για την 3^η λωρίδα η σχέση αυτή δείχνει να είναι γραμμική, ενώ για την 1^η φαίνεται να ισχύει κάτι ενδιάμεσο.



Σχήμα 3.19: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου για τη λωρίδα 1 και για όλες τις περιόδους και ημέρες



Σχήμα 3.20: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου για τη λωρίδα 2 και για όλες τις περιόδους και ημέρες



Σχήμα 3.21: Διάγραμμα Ταχύτητας-Φόρτου για τη λωρίδα 3 και για όλες τις περιόδους και ημέρες

Τα προηγηθέντα διαγράμματα οδηγούν στα παρακάτω συμπεράσματα:

Κατά την περίοδο 2 η κυκλοφορία βρίσκεται εξ ολοκλήρου στην μη-συμφορημένη ζώνη και για τις τρεις λωρίδες.

Οι διακυμάνσεις των ταχυτήτων κατά την περίοδο 2 και για τις λωρίδες 1 και 3 είναι πολύ μεγάλες. Αντίθετα, για τη λωρίδα 2 κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα με της περιόδου 1. Αυτό οφείλεται όπως προαναφέρθηκε και πιο πάνω, στην αυξημένη χρήση της 2^{ης} λωρίδας σε σχέση με τις άλλες δύο κατά τις νυχτερινές ώρες.

Τέλος για τη δεύτερη περίοδο, μπορεί να παρατηρηθεί ότι ο μέγιστος φόρτος για τη λωρίδα 2 είναι αρκετά μεγαλύτερος απ' αυτόν της λωρίδας 1 και 3.

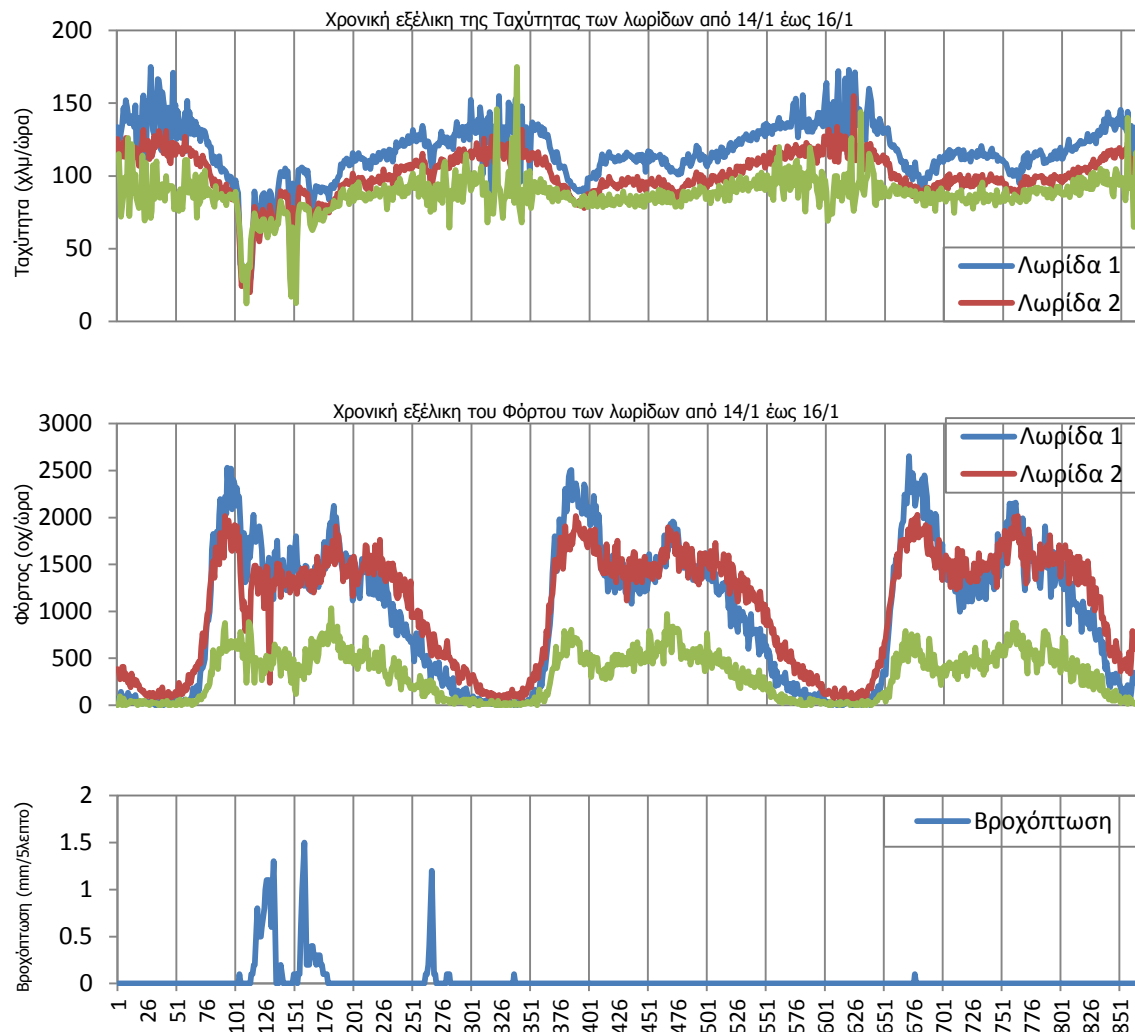
Αντίθετα, οι τιμές του διαγράμματος για την περίοδο 1 δεν παρουσιάζουν τόσο μεγάλες διακυμάνσεις. Ειδικότερα, για τις λωρίδες 1 και 2 οι διακυμάνσεις είναι αρκετά μικρές. Μονάχα στην 3^η λωρίδα, παρουσιάζονται σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου 1 μεγάλες διακυμάνσεις, οι οποίες πιθανόν να οφείλονται στη χρήση της ως λωρίδα επιτάχυνσης-επιβράδυνσης και γενικότερα για την είσοδο και έξοδο από τον αυτοκινητόδρομο.

Όπως και για την περίοδο 2 έτσι και για την 1, ο φόρτος αιχμής της 1^{ης} λωρίδας είναι αρκετά μεγαλύτερος από των άλλων δύο. Πιο συγκεκριμένα, ο φόρτος αιχμής της 3^{ης} λωρίδας είναι ο μισός απ' ότι των άλλων δύο.

Όλα τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι δύο περίοδοι χρήζουν ξεχωριστής ανάλυσης. Τα κυκλοφοριακά δεδομένα τους παρουσιάζουν αρκετά διαφορετικά στοιχεία που σε αρκετά σημεία θα μπορούσε να ειπωθεί ότι είναι και αντίθετα. Έτσι, απαραίτητο κρίνεται, σε πρώτη φάση τουλάχιστον, να αναπτυχθούν δύο διαφορετικά πρότυπα και πρότυπα για την καθεμία από αυτές, ούτως ώστε οι ιδιαιτερότητες της μίας να μην επηρεάσουν την άλλη και τα αποτελέσματα αλλοιωθούν.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα που απεικονίζουν τη χρονική εξέλιξη του Φόρτου και της Ταχύτητας παράλληλα με αυτή της βροχόπτωσης. Προκειμένου να γίνει πιο διακριτή η επιρροή της βροχόπτωσης στην κυκλοφορία συγκριτικά με τις υπόλοιπες μέρες μέσω των διαγραμμάτων, χρησιμοποιήθηκαν οι τρεις από τις πέντε

ημέρες ώστε τα διαγράμματα να είναι πιο λεπτομερή. Να σημειωθεί ότι οι κατακόρυφες γραμμές πλέγματος αντιστοιχούν σε 50 πεντάλεπτα η καθεμία.



Σχήμα 3.22: Χρονική εξέλιξη της Ταχύτητας, του Φόρτου και της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια των ημερών 14/1 έως 16/1

Τα συμπεράσματα που εξαγονται από τα παραπάνω διαγράμματα είναι τα εξής:

Όπως ήταν αναμενόμενο, με περίοδο μίας ημέρας, εμφανίζονται ευδιάκριτα τρία σημεία σε κάθε διάγραμμα όπου τοπικά την ίδια χρονική στιγμή ο φόρτος μεγιστοποιείται και η ταχύτητα ελαχιστοποιείται. Αποτυπώνονται έτσι οι πρωινές, οι μεσημεριανές και οι απογευματινές ώρες αιχμής. Χρονικά αυτές προσδιορίζονται περίπου στις 7-9 πμ., στις 3μμ. και στις 5-6 μμ. κάθε μέρα.

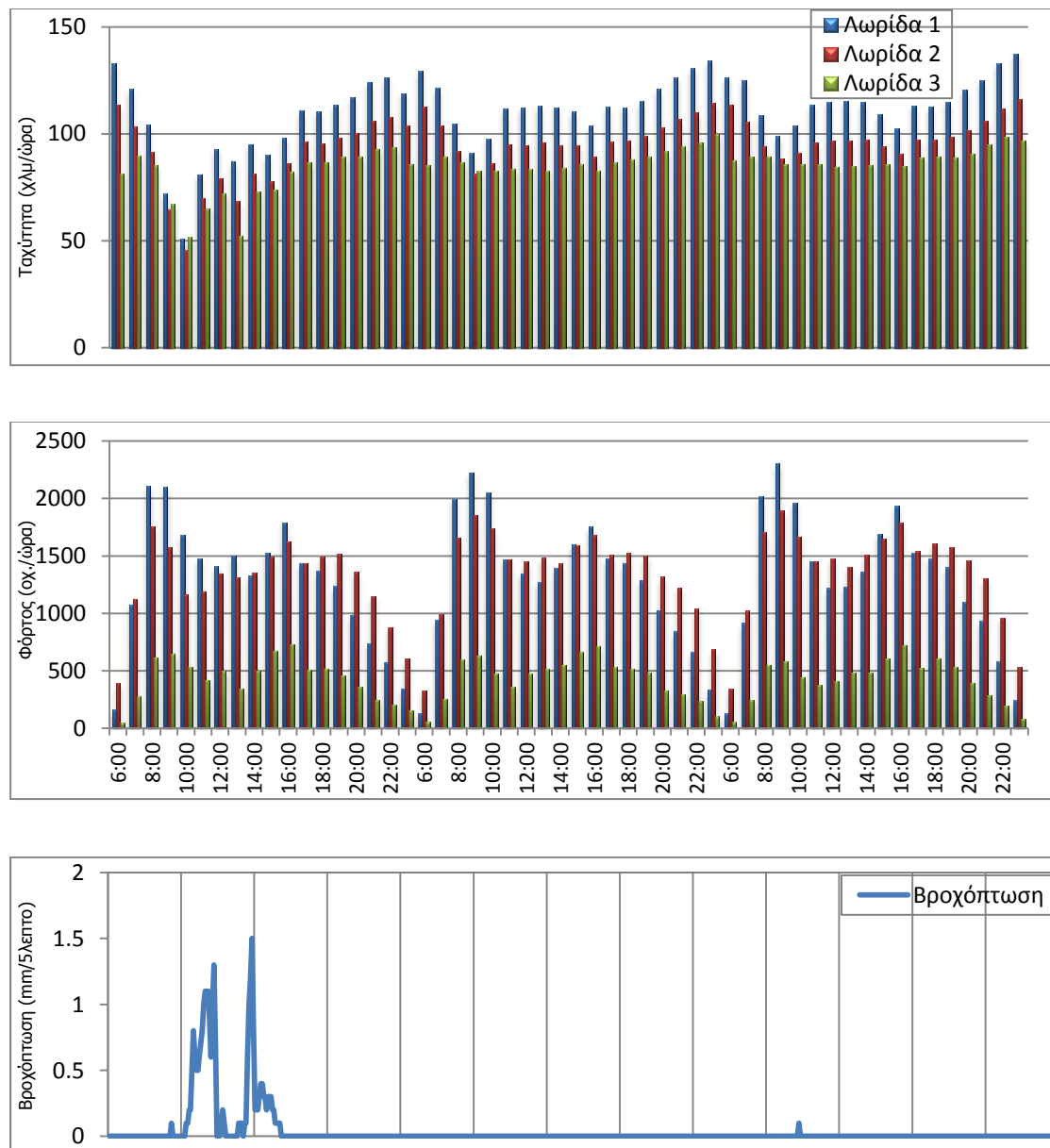
Ένα άλλο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί, είναι ότι η ταχύτητα στη λωρίδα 1 είναι καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας πολύ μεγαλύτερη από τις άλλες δύο. Η διαφορά αυτή βέβαια μειώνεται αισθητά κατά τις ώρες αιχμής, όταν δηλαδή η κίνηση των οχημάτων πραγματοποιείται σε φάλαγγα. Επίσης, η ταχύτητα της λωρίδας 3 είναι καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας η μικρότερη απ' όλες και ταυτόχρονα ο φόρτος της λωρίδας 3 είναι πολύ μικρότερος από των άλλων 2. Μία πολύ ενδιαφέρουσα παρατήρηση όσον αφορά τους φόρτους ανά λωρίδα είναι το γεγονός ότι ενώ καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας ο φόρτος της λωρίδας 2 είναι μεγαλύτερος από αυτόν της 1, κατά τις ώρες αιχμής ισχύει το αντίστροφο. Η μόνη ημέρα κατά την οποία αυτό δείχνει να μην ισχύει, είναι η ημέρα που λαμβάνουν χώρα οι βροχοπτώσεις. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, ανάμεσα στις ώρες αιχμής, ο φόρτος της 1^{ης} λωρίδας ξεπερνά αυτόν της 2^{ης}. Αυτή είναι εκ πρώτης όψεως μία πολύ ισχυρή ένδειξη ότι η βροχόπτωση επηρεάζει την κυκλοφορία και τα χαρακτηριστικά της. Να τονιστεί εδώ όμως, ότι από μόνη της αυτή η ένδειξη δεν αρκεί για να εξαχθεί κανένα περαιτέρω συμπέρασμα.

Ένα άλλο γεγονός του οποίου οι ρίζες θα μπορούσαν να βρίσκονται στην επιρροή της βροχόπτωσης στην κυκλοφορία, είναι ότι οι αιχμές των διαγραμμάτων δείχνουν να «οξύνονται» παράλληλα με τα επεισόδια βροχόπτωσης. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα και ο φόρτος φθίνουν με μεγάλη ταχύτητα και για μικρό χρονικό διάστημα. Στην πράξη λοιπόν παρατηρείται μία έντονη και ολιγόλεπτη συμφόρηση με τον φόρτο της μεσαίας λωρίδας να φαίνεται να επηρεάζεται πολύ περισσότερο από αυτόν των άλλων δύο λωρίδων. Για λίγα λεπτά μάλιστα δείχνει να γίνεται μικρότερος ακόμη και από της 3^{ης} λωρίδας. Απ' την άλλη μεριά, η ταχύτητες φαίνεται να μεταβάλλονται στον ίδιο βαθμό κατά την πρωινή αιχμή. Κατά τη διάρκεια όμως των άλλων δύο αιχμών, της μεσημεριανής και της απογευματινής, η ταχύτητα που επηρεάζεται περισσότερο είναι εμφανώς της λωρίδας 3. Από το διάγραμμα μάλιστα γίνεται ευδιάκριτο, ότι στο χρονικό αυτό διάστημα η ταχύτητά της μειώνεται έως και στα 15 χλμ/ώρα. Το γεγονός αυτό μοιάζει απολύτως λογικό αν επαναληφθεί ότι η λωρίδα 3 χρησιμοποιείται και ως λωρίδα εισόδου και εξόδου από τον αυτοκινητόδρομο.

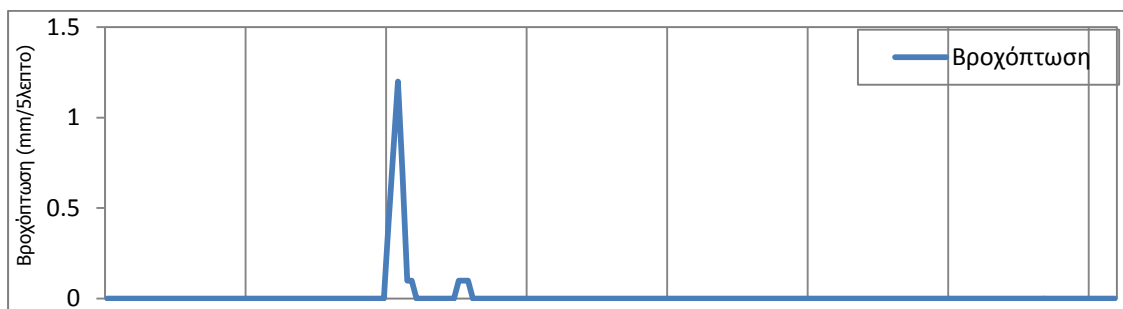
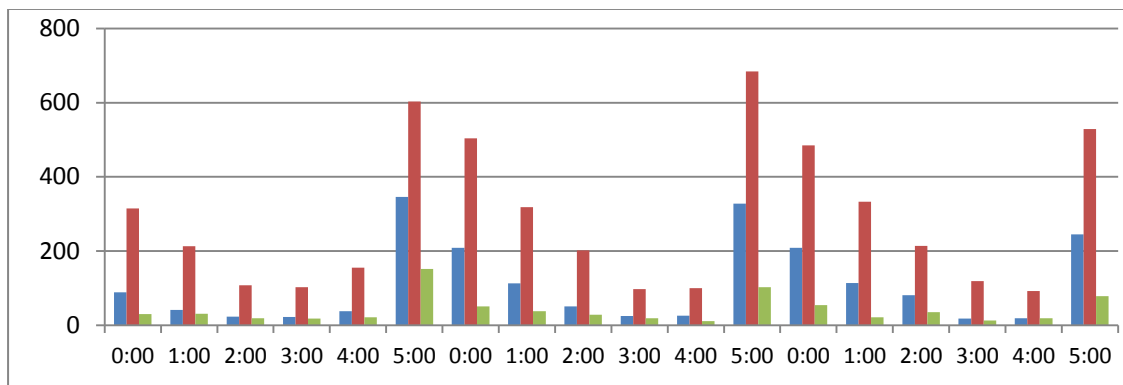
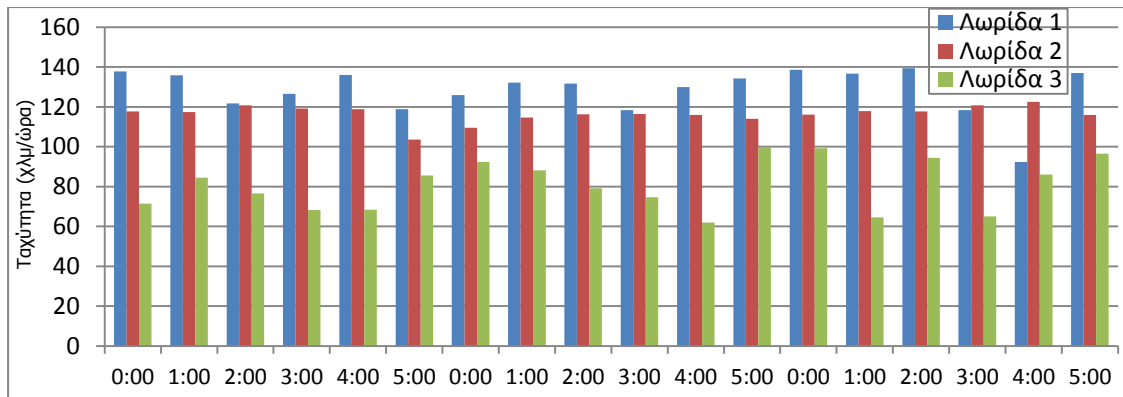
Γενικότερα παρατηρείται μία μεγαλύτερη μεταβλητότητα των τιμών της ταχύτητας και του φόρτου κατά την πρώτη ημέρα που συνέβησαν τα επεισόδια βροχόπτωσης σε σύγκριση με τις άλλες δύο και ειδικά κατά τις περιόδους των βροχοπτώσεων. Αυτή είναι ακόμη μία σοβαρή ένδειξη ότι τα κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά επηρεάζονται

από τη βροχόπτωση. Να σημειωθεί ξανά όμως, ότι χωρίς να επιβεβαιωθεί αυτό από τη στατιστική ανάλυση, κανένα ασφαλές συμπέρασμα δεν μπορεί να εξαχθεί.

Αμέσως μετά, δίνονται ανά λωρίδα τα διαγράμματα μέσης ωριαίας Ταχύτητας και Φόρτου ξεχωριστά για κάθε περίοδο. Κάτω από το καθένα, δίνεται και το αντίστοιχο διάγραμμα που απεικονίζει τη χρονική εξέλιξη της βροχόπτωσης ώστε να γίνεται πιο εύκολα η σύγκριση. Ακολουθούν τα συμπεράσματα που εξαγονται από το καθένα.



Σχήμα 3.23: Μέσος όρος Ταχυτήτων και Φόρτου ανά ώρα των δύο περιόδων κατά τη διάρκεια των ημερών 14/1 έως 16/1



Σχήμα 3.24: Μέσος όρος Ταχυτήτων και Φόρτου ανά ώρα της περιόδου 2 κατά τη διάρκεια των ημερών 14/1 έως 16/1

Τα συμπεράσματα που εξαγονται είναι τα εξής:

Μιλώντας για την πρώτη περίοδο, την ημέρα της βροχόπτωσης και ειδικά κατά τη διάρκεια των επεισοδίων βροχής, ο φόρτος των λωρίδων 1 και 3 είναι εμφανώς αυξημένος σε σχέση με των άλλων δύο ημερών. Το αντίθετο δείχνει να συμβαίνει με την λωρίδα 2 όπου τις αντίστοιχες ώρες, ο φόρτος είναι συγκριτικά μικρότερος.

Κάτι αντίστοιχο φαίνεται να συμβαίνει και με τις ταχύτητες. Στις χρονικές περιόδους βροχόπτωσης, το διάγραμμα μέσων Ταχυτήτων δείχνει να «βυθίζεται» και για τις τρεις λωρίδες. Ιδιαίτερα για το πρώτο επεισόδιο βροχής, το διάγραμμα δείχνει να διαταράσσεται σε μεγάλο βαθμό, γεγονός το οποίο πιθανότατα οφείλεται στη διάρκεια του επεισοδίου αυτού. Δείγμα της διαταραχής αυτής, είναι ότι στο ίδιο σημείο, η μέση ταχύτητα της λωρίδας 3 ξεπερνά όλων των άλλων λωρίδων. Αντιθέτως, καθ' όλη τη διάρκεια των υπόλοιπων ημερών, η ταχύτητα της λωρίδας 1 φαίνεται να είναι συντριπτικά μεγαλύτερη απ' των άλλων δύο και αυτή της λωρίδας 2 μεγαλύτερη της 3.

Όπως και από προηγούμενο διάγραμμα, παρατηρείται εύκολα ότι μόνο κατά τις περιόδους αιχμής ο φόρτος της πρώτης λωρίδας υπερβαίνει αυτόν της δεύτερης. Αυτό όμως μοιάζει να μην ισχύει κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης όπου και τότε ο φόρτος της πρώτης λωρίδας είναι μεγαλύτερος της δεύτερης.

Όσον αφορά τη δεύτερη περίοδο, η βροχόπτωση δεν φαίνεται να διαταράσσει ιδιαίτερα τα διαγράμματα, πράγμα που σημαίνει ότι τα κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά, μάλλον δεν επηρεάστηκαν σημαντικά από αυτή. Αυτό πιθανότατα έχει άμεση σχέση με το γεγονός ότι η κυκλοφορία κατά τις νυχτερινές ώρες είναι αρκετά ελαττωμένη για να επηρεαστούν τα στοιχεία της τόσο πολύ.

Κάτι άλλο που είναι ευδιάκριτο είναι ότι ο συνολικός φόρτος την ημέρα της βροχόπτωσης είναι μικρότερος από τις άλλες δύο. Θα ήταν αυθαίρετο όμως να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι κάτι τέτοιο οφείλεται στα επεισόδια βροχής και όχι σε κάτι άλλο.

Τέλος, παρατηρείται ότι καθ' όλη τη διάρκεια της 1^{ης} ημέρας, η ταχύτητα των λωρίδων 1 και 2, και ιδιαίτερα της 1, είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή της 3 το οποίο πιθανόν, όχι σίγουρα, οφείλεται στη βροχόπτωση.

Πίνακας 3.1: Βασικά στατιστικά μεγέθη της Βάσης δεδομένων

14/1/2008 1η περίοδος								
	Ταχύτητα (χλμ/ώρα)				Φόρτος (οχ/ώρα)			
	Λωρίδα 1	Λωρίδα 2	Λωρίδα 3	Όλες οι λωρίδες	Λωρίδα 1	Λωρίδα 2	Λωρίδα 3	Όλες οι λωρίδες
Μέσος όρος	76.8662	66.1494	58.977	69.5899	950.7083	946.75	320.375	2217.8333
Διάμεσος	90.6234	76.3136	70.3243	81.3026	1398	1308	582	3288
Διακύμανση	537.3887	404.6792	292.223	396.4781	320685.4	149181.2	45037.31	1189604.54
Τυπική απόκλιση	23.1817	20.1166	17.0945	19.9118	566.2909	386.2399	212.2199	1090.69

15/1/2008 1η περίοδος								
	Ταχύτητα (χλμ/ώρα)				Φόρτος (οχ/ώρα)			
	Λωρίδα 1	Λωρίδα 2	Λωρίδα 3	Όλες οι λωρίδες	Λωρίδα 1	Λωρίδα 2	Λωρίδα 3	Όλες οι λωρίδες
Μέσος όρος	85.8095	73.5206	65.50502	77.3511	967.4583	1019.292	322.7917	2309.5417
Διάμεσος	113.1228	93.9838	81.80867	100.1066	1446	1494	522	3462
Διακύμανση	138.6163	82.7329	77.8453	79.3335	333832	159184.7	42151.4	1285288.74
Τυπική απόκλιση	11.7735	9.0958	8.823	8.9069	577.782	398.9795	205.3081	1133.7058

14/1/2008 2η περίοδος								
	Ταχύτητα (χλμ/ώρα)				Φόρτος (οχ/ώρα)			
	Λωρίδα 1	Λωρίδα 2	Λωρίδα 3	Όλες οι λωρίδες	Λωρίδα 1	Λωρίδα 2	Λωρίδα 3	Όλες οι λωρίδες
Μέσος όρος	129.476	116.2642	75.79372	116.7472	93.16667	249.5	45.16667	387.8333
Διάμεσος	162	129	85	113.7063	18	132	12	162
Διακύμανση	947.9155	62.9915	1283.129	62.9097	14653.97	33343.75	3305.972	119015.31
Τυπική απόκλιση	30.7882	7.9367	35.8208	7.9316	121.0536	182.6027	57.4976	344.986

15/1/2008 2η περίοδος								
	Ταχύτητα (χλμ/ώρα)				Φόρτος (οχ/ώρα)			
	Λωρίδα 1	Λωρίδα 2	Λωρίδα 3	Όλες οι λωρίδες	Λωρίδα 1	Λωρίδα 2	Λωρίδα 3	Όλες οι λωρίδες
Μέσος όρος	128.7662	114.5408	82.7040	116.3558	125.3333	317.5	41.6667	484.5
Διάμεσος	132.5	111.1364	91.5	113.7063	36	138	12	186
Διακύμανση	341.1842	22.8924	1131.199	18.6504	15547.56	51511.75	1667.889	143029.75
Τυπική απόκλιση	18.4712	4.7846	33.6333	4.3186	124.6898	226.962	40.8398	378.19

Από τους παραπάνω πίνακες συμπεραίνονται τα εξής:

Για την περίοδο 1, η μέση ταχύτητα ανά λωρίδα και για τις τρεις λωρίδες αυξάνεται κατά 11%-11.5% την ημέρα που δεν υπάρχουν φαινόμενα βροχόπτωσης. Η μέση ταχύτητας της ημέρας παρουσιάζεται επίσης κατά 11% αυξημένη και συγκεκριμένα από 69,59 χλμ/ώρα σε 77,35χλμ/ώρα. Από την άλλη μεριά, ο φόρτος παρουσιάζει μία αύξηση της τάξης του 1%-2% για τις λωρίδες 1 και 3 και 8% για τη λωρίδα 2. Ο μέσος φόρτος επίσης, παρουσιάζει μία αύξηση 4% σε σχέση με την ημέρα που έλαβε χώρα η βροχόπτωση.

Όπως ήταν αναμενόμενο και από τη μορφή των διαγραμμάτων Ταχύτητας-Φόρτου, η τυπική απόκλιση της ταχύτητας στις 15/1, την ημέρα χωρίς φαινόμενα βροχόπτωσης, ήταν κατά 48%-49% μειωμένη για τις λωρίδες 1 και 3 και 55% για τη λωρίδα 2 σε σχέση με τις 14/1. Την ημέρα που έλαβαν χώρα λοιπόν οι βροχοπτώσεις, χαρακτηρίζονται από μία αστάθεια με πολλές ακραίες τιμές στο δείγμα. Ο φόρτος από την άλλη μεριά δείχνει να μην επηρεάζεται ιδιαίτερα από τη βροχόπτωση, αφού από τις 14/1 στις 15/1, αυξάνεται κατά 2%-3% για τις λωρίδες 1 και 2 αντίστοιχα και μειώνεται κατά 3% για την λωρίδα 3.

Όσον αφορά τη 2^η περίοδο, οι λωρίδες 1 και 2 δείχνουν να μην επηρεάζονται ιδιαίτερα από τις συνθήκες βροχόπτωσης, αφού η ταχύτητα στις 15/1 δείχνει μειωμένη κατά 1% σε σχέση με αυτή στις 14/1. Μόνο η ταχύτητα της 3^{ης} λωρίδας φαίνεται να επηρεάζεται αρκετά παρουσιάζοντας μία αύξηση από τις 14/1 στις 15/1 της τάξης του 9%. Από την άλλη μεριά, οι φόρτοι των λωρίδων 1 και 2 είναι αυτοί που δείχνουν τη μεγαλύτερη μεταβολή, με ποσοστά μείωσης 35% και 27% αντίστοιχως. Το αντίστοιχο μέγεθος της λωρίδας 3 είναι αυξημένο κατά 8% στις 14/1 σε σύγκριση με τις 15/1. Τα στοιχεία αυτά για ακόμη μία φορά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, αφού η κυκλοφορία κατά τις νυχτερινές ώρες είναι αρκετά μειωμένη και παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις ανά τις μέρες.

Και για την περίοδο 2, η τυπική απόκλιση των ταχυτήτων των οχημάτων είναι αυξημένη την ημέρα με τα επεισόδια βροχόπτωσης κατά 40% για την 1^η και 2^η λωρίδα, ενώ για την 3^η μόνο κατά 6%. Έχει επεξηγηθεί και σε προηγούμενη ενότητα

ότι οι διαφοροποιήσεις που παρουσιάζονται στα στοιχεία της 3^{ης} λωρίδας (στην ταχύτητα, στο φόρτο και στην μεταξύ τους σχέση), έχουν να κάνουν με την ιδιαιτερότητα της χρήσης της ως λωρίδα επιτάχυνσης-επιβράδυνσης και εισόδου-εξόδου από τον αυτοκινητόδρομο.

Στις 14/1 και κατά την περίοδο 2, η ταχύτητα των λωρίδων 1 και 2 παρουσιάζει μία αύξηση της τάξης του 68% και 76% σε σχέση με αυτή της περιόδου 1. Η αντίστοιχη αύξηση της λωρίδας 3 είναι 29%. Αντίθετα, μεγάλη μείωση παρατηρείται στους φόρτους τις περιόδου 2 σε σχέση με της 1 η οποία είναι της τάξης του 90%, 74% και 86% για τις λωρίδες 1, 2 και 3 αντίστοιχα. Τα αντίστοιχα νούμερα για τις 15/1 συγκρίνοντας τις δύο περιόδους και τις λωρίδες 1, 2 και 3, είναι αύξηση των ταχυτήτων κατά 50%, 56% και 26% και μείωση των φόρτων κατά 87%, 69% και 87%.

Αυτό που παρατηρείται εύκολα συγκρίνοντας τις δύο περιόδους, είναι σίγουρα οι πολύ μεγάλες διαφορές στις τυπικές αποκλίσεις. Πιο συγκεκριμένα, για τις 14/1, από την περίοδο 1 στην 2 η τυπική απόκλιση της ταχύτητας παρουσιάζει αύξηση 33% και 110% αντίστοιχα για την 1^η και την 3^η λωρίδα και μείωση 61% για την 2^η. Αντίστοιχα για τις 15/1, η αύξηση της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας για τις λωρίδες 1 και 3 ήταν 57% και 281%, ενώ για την λωρίδα 2 η μείωση ήταν 61%. Τέλος, οι τυπικές αποκλίσεις των φόρτων της 2ης περιόδου, ήταν κατά πολύ μειωμένοι σε σχέση με αυτές της 1ης. Επίσης, δεν φαίνεται να διαφοροποιούνται μεταξύ των δύο ημερών και είναι της τάξης του 78% για την λωρίδα 1, 48% για τη λωρίδα 2 και 76% για την 3η λωρίδα.

Από όλη την προηγούμενη ανάλυση, συμπεραίνεται μέχρι στιγμής ότι ο χωρισμός της βάσης δεδομένων στα δύο διαστήματα που προτάθηκαν παραπάνω, είναι ορθός.

Κεφάλαιο 4

Μεθοδολογική προσέγγιση

Στο κεφάλαιο αυτό, αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου που ακολουθείται για τον υπολογισμό των επιθυμητών οικονομετρικών προτύπων περιγραφής της ταχύτητας και περιγράφονται τα στάδια που απαιτούνται για τον υπολογισμό και την αξιολόγηση τους.

4.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι για την πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών που μπορεί να λάβει μία χρονοσειρά. Αυτές οι μέθοδοι, κάνουν χρήση από πολύ απλά μέχρι πολύ σύνθετα Μαθηματικά και Στατιστικά πρότυπα. Οι κατηγορίες στις οποίες μπορούν να χωριστούν τα πρότυπα αυτά είναι δύο. Η πρώτη αποτελείται από τα καθοριστικά πρότυπα (Deterministic Models) τα οποία στηρίζονται σε απλές μαθηματικές εκφράσεις όπως είναι π.χ. τα πρότυπα τάσης και εκθετικών εξομαλύνσεων και η δεύτερη από τα στοχαστικά πρότυπα όπως π.χ. τα πρότυπα ARIMA. Στην παρούσα εργασία, γίνεται χρήση αυτών των οικονομετρικών προτύπων της «οικογένειας» ARIMA. Τα αυτοπαλίνδρομα αυτά πρότυπα κινητού μέσου χρησιμοποιούνται για την βραχυπρόθεσμη και όχι μόνο, πρόβλεψη των δεδομένων μιας χρονοσειράς. Πρόκειται για στοχαστικά πρότυπα τα οποία με βάση τις προηγούμενες τιμές μιας μεταβλητής, περιγράφουν την συμπεριφορά της στο χρόνο και προβλέπουν τις πιθανές μελλοντικές τιμές που μπορεί να λάβει, ακόμη και χωρίς την παρουσία επεξηγηματικών μεταβλητών. Χρήση των προτύπων αυτών γίνεται σε πολλά επιστημονικά πεδία με ιδιαίτερη επιτυχία στον συγκοινωνιακό τομέα.

4.1.1 Βασικές έννοιες χρονοσειρών

4.1.1.1 Ορισμός

Η χρονοσειρά ορίζεται ως μία ακολουθία, η οποία αποτελείται από έναν αριθμό παρατηρήσεων, οι οποίες καταγράφονται με τη σειρά που παράγονται. Τελευταίο στοιχείο της μεταβλητής δηλαδή είναι η παρατήρηση που καταγράφηκε τελευταία. Για παράδειγμα, τελευταίο στοιχείο της μεταβλητής που δημιουργείται από την καταγραφή των οχημάτων ανά πεντάλεπτο σε μία οδό είναι ο φόρτος που καταγράφηκε το τελευταίο πεντάλεπτο. Οι θεμελιώδεις έννοιες στην ανάλυση χρονοσειρών είναι δύο: Η στασιμότητα και η αυτοσυσχέτιση.

4.1.1.2 Στασιμότητα

Η στασιμότητα αναφέρεται στην τάση και την μεταβλητότητα μίας χρονοσειράς. Τα πρότυπα χρονοσειρών, εφαρμόζονται σε οριζόντια ή αλλιώς με στατιστικούς όρους σε στάσιμα δεδομένα (Karlaftis, Mannering and Washington, 2010). Για να είναι μία χρονοσειρά στάσιμη, θα πρέπει τα βασικότερα χαρακτηριστικά της, δηλαδή η μέση τιμή της και η διασπορά της, να παραμένουν σταθερά και να μην μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου και η συνδιακύμανση μεταξύ των τιμών της σε δύο χρονικά σημεία, να εξαρτάται μόνο από την απόσταση τους και όχι από το χρόνο. Τα δεδομένα με λίγα λόγια θα πρέπει, να μην παρουσιάζουν καμία τάση ή εποχικότητα και οι τιμές που λαμβάνουν, να είναι συνάρτηση μόνο της μεταξύ τους απόστασης και όχι του ίδιου του χρόνου. Με άλλα λόγια, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι για να είναι μία χρονοσειρά στάσιμη, θα πρέπει οι ιδιότητές της να μην μεταβάλλονται από μία αλλαγή στην αρχή μέτρησης του χρόνου. Μαθηματικά, τα προαναφερθέντα βασικά χαρακτηριστικά μιας χρονοσειράς, με $\{X_t, t: \in T\}$, εκφράζονται ως εξής:

$$\text{Συνάρτηση μέσης τιμής:} \quad \mu(t) = E[X_t], \quad t \in T \quad (1)$$

$$\text{Συνάρτηση διασποράς:} \quad \sigma^2(t) = V[X_t] = E[(X_t - \mu_t)^2], \quad t \in T \quad (2)$$

Συνάρτηση αυτοδιακύμανσης:

$$\gamma(t,h) = \text{Cov}(X_t, X_{t+h}) = E[(X_t - \mu_t)(X_{t+h} - \mu_{t+h})], \quad t, h \in T \quad (3)$$

4.1.1.3 Αυτοσυσχέτιση

Η αυτοσυσχέτιση εκφράζει τον συσχετισμό μεταξύ των μελλοντικών και παρελθοντικών τιμών μίας χρονοσειράς. Στην ανάλυση χρονολογικών σειρών, η σημασία της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης είναι πολύ μεγάλη, γιατί δείχνει τόσο το βαθμό όσο και το μήκος ή τη χρονική διάρκεια της μνήμης της στοχαστικής διαδικασίας. Η αυτοσυσχέτιση ρ_τ για κάποια υστέρηση τ , μπορεί να εκφραστεί ως ο συντελεστής συσχέτισης δύο στοιχείων μίας χρονοσειράς που απέχουν μεταξύ τους τ χρονικές υστερήσεις και εκτιμάται από τη χρονοσειρά ως

$$\rho_\tau = \text{Corr}(x_t, x_{t-\tau}) = \frac{\sum_{t=\tau+1}^n (x_t - \bar{x})(x_{t-\tau} - \bar{x})}{\sum_{t=\tau+1}^n (x_t - \bar{x})^2} \quad (4)$$

Να σημειωθεί ότι ο ορισμός της αυτοσυσχέτισης έχει νόημα μόνο όταν πρόκειται για στάσιμη συνάρτηση. Όταν δεν πρόκειται για στάσιμη συνάρτηση, η αυτοσυσχέτιση δεν μπορεί να οριστεί ως συνάρτηση της υστέρησης αλλά ορίζεται για κάθε χρονική υστέρηση t . Οι τιμές της αυτοσυσχέτισης βρίσκονται στο διάστημα $[-1,1]$. Όταν η αυτοσυσχέτιση παίρνει τιμές κοντά στο 0, σημαίνει ότι τα δεδομένα της χρονοσειράς είναι τελείως τυχαία και δεν σχετίζονται μεταξύ τους.

4.1.1.4 Μερική αυτοσυσχέτιση

Μία άλλη σημαντική έννοια που χρησιμοποιείται και εφαρμόζεται στη θεωρία χρονοσειρών, είναι αυτή της μερικής αυτοσυσχέτισης. Η μερική αυτοσυσχέτιση εκφράζει τη συσχέτιση μεταξύ δύο σημείων Y_t και $Y_{t-\tau}$ μίας χρονοσειράς αφού έχει αφαιρεθεί ήδη η επιρροή των υπολοίπων σημείων $Y_{t-1}, Y_{t-2}, Y_{t-3}, \dots, Y_{t-\tau+1}$ σε αυτές. Η μερική αυτοσυσχέτιση Φ_{τ} ορίζεται ως εξής:

$$\Phi_{\text{TT}} = \frac{r_t - \sum_{t=1}^{\tau-1} \Phi_{\tau-1,t} r_{t-1}}{1 - \sum_{t=1}^{\tau-1} \Phi_{\tau-1,t} r_t} \quad (5)$$

4.1.1.5 Ολοκλήρωση (integration)

Πολλές φορές όμως, οι χρονοσειρές των κυκλοφοριακών δεδομένων, όπως για παράδειγμα της Ταχύτητας και του Φόρτου, τυχαίνει να μην είναι στάσιμες. Προκειμένου να επιτευχθεί η στασιμότητα και να αφαιρεθούν οι τάσεις και οι μη στάσιμοι όροι σε αυτές τις περιπτώσεις, μπορεί να εφαρμοστεί μία σειρά φίλτρων. Παρ' όλα αυτά, στις συγκοινωνιακές έρευνες, για να επιτευχθεί η στασιμότητα μιας χρονοσειράς δεδομένων, λαμβάνονται οι πρώτες διαφορές της. Αντί λοιπόν για την αρχική χρονοσειρά Y_t χρησιμοποιείται στην ανάλυση η χρονοσειρά $X_t = Y_t - Y_{t-1}$. Η πράξη αυτή λοιπόν μετατρέπει μία μη-στάσιμη χρονοσειρά σε μία στάσιμη. Σε αυτή την περίπτωση, η σειρά Y_t ονομάζεται μη-στάσιμη χρονοσειρά της οποίας το χαρακτηριστικό πολυώνυμο έχει μία μοναδιαία ρίζα και στην οποία απαιτείται να ληφθούν πρώτες διαφορές ώστε να γίνει στάσιμη. Με

τά από τη λήψη πρώτων διαφορών, συμβολίζεται ως $I(1)$ ολοκληρωμένη ($I(1)$ integrated), δηλαδή έχει υποστεί ολοκλήρωση βαθμού 1. Γενικά, η λήψη d διαφορών μίας χρονοσειράς, συμβολίζεται ως $I(d)$ ολοκληρωμένη ($I(d)$ integrated), δηλαδή έχει υποστεί ολοκλήρωση βαθμού d .

Πολλοί έλεγχοι έχουν βρεθεί για να διαπιστώνεται εάν μία χρονοσειρά είναι στάσιμη. Οι Granger και Engle(1984), με πειράματά τους, υποδεικνύουν ως βέλτιστο έλεγχο στασιμότητας μίας χρονοσειράς τον έλεγχο μοναδιαίας ρίζας Dickey-Fuller. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου αυτού, είναι ότι η χρονοσειρά έχει τουλάχιστον μία μοναδιαία ρίζα και επομένως δεν είναι στάσιμη, οπότε και απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών τουλάχιστον μία φορά ώστε να επιτευχθεί η στασιμότητα. Η εναλλακτική υπόθεση είναι ότι η υπό μελέτη μεταβλητή είναι ήδη στάσιμη.

4.1.1.6 Κλασματική ολοκλήρωση

Υπάρχει όμως και η περίπτωση, το πολυώνυμο να έχει μία ρίζα κοντά στη μονάδα. Στην περίπτωση αυτή, τις περισσότερες φορές θα λαμβάνονταν οι πρώτες διαφορές της χρονοσειράς. Όπως απέδειξαν όμως οι Granger και Joyeux(1980), το να λαμβάνεται στην περίπτωση αυτή $d=1$, δηλαδή το να επιβάλλεται στη χρονοσειρά συντελεστής πρώτων διαφορών (differentiation parameter) ίσος με τη μονάδα ενώ δεν θα έπρεπε, οδηγεί σε «υπερβολική λήψη πρώτων διαφορών» (overdifferentiation). Το γεγονός αυτό, δημιουργεί τεχνητές, και συνήθως λανθασμένες, συσχετίσεις μέσα στο πρότυπο, οι οποίες αργότερα δημιουργούν προβλήματα, όπως είναι η μείωση της ακρίβειας της πρόβλεψης του πρότυπου ακριβώς επειδή «συνδέει» λανθασμένα παρελθοντικές και μέλλουσες τιμές της μεταβλητής. Οι σειρές $I(0)$ και $I(1)$ που δημιουργούνται δηλαδή, για τις οποίες αναφέρεται ότι έχουν «μακρά-μνήμη» (long-memory), παρουσιάζουν αξιοσημείωτη αυτοσυσχέτιση ανάμεσα στις τιμές τους (Karlaftis et al. 2011). Έχει αποδειχτεί λοιπόν, ότι εάν μία σειρά έχει «μακρά-μνήμη», παρουσιάζεται σημαντική αυτοσυσχέτιση μεταξύ δύο παρατηρήσεων της που έχουν κάποια χρονική υστέρηση, επιβάλλοντας έτσι παροδικές «ταραχές» στη χρονοσειρά ακόμη και αν οι ταραχές αυτές λαμβάνουν χώρα σε μία σειρά χωρίς τόσο ισχυρή αυτοσυσχέτιση (Granger και Ding, 1996). Το να ληφθεί λοιπόν λανθασμένα ο συντελεστής d ίσος με τη μονάδα, πιθανότατα θα οδηγήσει σε ανακριβή εκτίμηση της συνιστώσας MA του πρότυπου ARMA.

Και οι δύο αυτές δομές «μακράς» και «κοντής» μνήμης, αντιπροσωπεύουν τελικά την κλασματική ολοκλήρωση (fractional integration) μίας χρονοσειράς. Το d παίρνει τιμές στο διάστημα $[-1,1]$, συμπεριλαμβανομένου του 0 και του 1. Γενικά, τα παραπάνω πρότυπα, δομούνται καλύτερα με κλασματική ολοκλήρωση παρά με την κλασσική ολοκλήρωση που αναφέρθηκε προηγουμένως. Να αναφερθεί τέλος ότι, όταν το d παίρνει την τιμή 1 η διαδικασία είναι μοναδιαίας ρίζας, όταν παίρνει την τιμή 0 είναι στάσιμη, όταν παίρνει τιμές στο διάστημα $(0,0.5]$ είναι κλασματικά ολοκληρωμένη και παρουσιάζει «μακρά-μνήμη», ενώ όταν είναι στο διάστημα $(0.5,1)$ η στασιμότητα της χρονοσειράς δεν μπορεί να επαληθευτεί (Karlaftis, Mannering and Washington, 2010).

4.1.1.7 Συνολοκλήρωση

Εκτός όμως από την απλή ολοκλήρωση μίας χρονοσειράς που αναλύθηκε παραπάνω, έχουν αναπτυχθεί και θεωρίες για την ολοκλήρωση περισσότερων της μίας (cointegration). Συγκεκριμένα ο Granger, ανέπτυξε τεχνικές που να εμπεριέχουν την μακροχρόνια μεταβολή στον καθορισμό βραχυχρονίων σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών. Η βασική ιδέα αυτής της μεθόδου στηρίζεται στο γεγονός ότι μπορεί να υπάρχει γραμμικός συνδυασμός δύο (ή περισσότερων) μη-στάσιμων χρονοσειρών η οποία να είναι στάσιμη χρονοσειρά. Μαθηματικά αυτό σημαίνει ότι, εάν υπάρχουν δύο μη-στάσιμες $I(1)$ χρονοσειρές X_t, Y_t οι οποίες μπορούν να εκφραστούν ως $Y_t = \alpha + \beta X_t + \varepsilon_t$, και υποθεθεί ότι το ε_t είναι στάσιμη σειρά, τότε το $Y_t - \beta X_t$ είναι ποσότητα στάσιμη η οποία διατηρεί τις στατιστικές ιδιότητες μίας στάσιμης χρονοσειράς. Το διάνυσμα $[1, -\beta]$ ονομάζεται διάνυσμα συνολοκλήρωσης. Η «σύλληψη» της ιδέας αυτής προέρχεται από την οικονομική θεωρία, η οποία επισημαίνει ότι αν υπάρχει μακροχρόνια ισορροπία μεταξύ δύο μεταβλητών, για παράδειγμα ταχύτητας και φόρτου, τότε η βραχυχρόνια συμπεριφορά τους μπορεί να διαφέρει από την μακροχρόνια αλλά σταδιακά θα προσαρμόζεται κάθε φορά προς την μακροχρόνια ισορροπία. Η έννοια αυτή ονομάστηκε από τους Granger και Engle ως έννοια της συνολοκλήρωσης (cointegration).

Για να γίνει πιο κατανοητή η έννοια της συνολοκλήρωσης, αξίζει να αναφερθεί το παρακάτω παράδειγμα (Murray 1994). Ας υποθεθεί ότι υπάρχει ένας μεθυσμένος με τον σκύλο του που ακολουθεί μία τυχαία διαδρομή. Εάν απομονωθεί η διαδρομή του σκύλου, ο οποίος πάντα ακολουθεί σε κάποια απόσταση το μεθυσμένο, μοιάζει επίσης με τυχαίο περίπατο. Παρ' όλα αυτά όμως, η διαδρομή που ακολουθεί ο σκύλος είναι σε μεγάλο βαθμό προβλέψιμη, αφού εξαρτάται από τη θέση του μεθυσμένου. Το φαινόμενο αυτό κατά το οποίο η απόσταση δύο μεταβλητών είναι σταθερή παρότι η διακύμανση τυχαία, ονομάζεται συνολοκλήρωση και «συλλαμβάνει» την αληθινή σχέση μεταξύ τους. Στην παρούσα εργασία, χρήσιμη είναι η έννοια της συνολοκλήρωσης και γενικότερα της διανυσματικής ανάλυσης, εξαιτίας του γεγονότος ότι η ταχύτητα ενός οχήματος σε μία λωρίδα δεν είναι ανεξάρτητη, αλλά αντίθετα, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά των άλλων δύο λωρίδων. Με πιο απλά λόγια, η συμπεριφορά ενός οχήματος σε μία λωρίδα, εξαρτάται από τη συμπεριφορά των οχημάτων στις άλλες λωρίδες.

Σε δημοσίευσή τους οι Granger και Engle (1987) παρουσίασαν στατιστικές τεχνικές για τον έλεγχο της συνολοκλήρωσης, καθώς και μία μέθοδο εκτίμησης γραμμικών συστημάτων στα οποία εμπεριέχεται η έννοια της μακροχρόνιας μεταβολής. Πιο συγκεκριμένα, η εκτίμηση των γραμμικών σχέσεων που συνδέουν δυο μη-στάσιμες μεταβλητές μπορεί να πραγματοποιηθεί σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο προσδιορίζεται η μακροχρόνια μεταβολή τους και ελέγχεται αν υφίσταται η έννοια της συνολοκλήρωσης, ενώ στο δεύτερο στάδιο εκτιμάται το λεγόμενο διανυσματικό πρότυπο διόρθωσης λαθών (Vector error correction model), στο οποίο καθορίζεται η βραχυχρόνια συμπεριφορά των μεταβλητών προσαρμοσμένη από την μακροχρόνια μεταβολή τους. Η έννοια της συνολοκλήρωσης επεκτάθηκε αργότερα και για περισσότερες μεταβλητές από τον Johansen. Το διανυσματικό πρότυπο διόρθωσης λαθών VECM (Vector Error Correction Model) παρατίθεται σε παρακάτω ενότητα αναλυτικότερα.

4.1.1.8 Λευκός θόρυβος

Τέλος μία άλλη σημαντική έννοια στη θεωρία χρονοσειρών, είναι αυτή του λευκού θορύβου. Η έννοια αυτή έχει να κάνει με τα δυνατά σχήματα ή πρότυπα που μπορεί να λάβει μία μεταβλητή όπως για παράδειγμα κύκλος, ευθεία, παραβολή κτλ. Μία σειρά ονομάζεται λευκός θόρυβος όταν δεν έχει κανένα ευκρινές σχήμα και η κατανομή της είναι τελείως τυχαία. Μαθηματικά, μία σειρά Y_t είναι λευκός θόρυβος, εάν ο μέσος και η διακύμανσή της είναι στοιχεία αμετάβλητα, και οι τιμές της δεν παρουσιάζουν αυτοσυσχέτιση.

$$\mu(t) = E[X_t] = 0 \quad (6)$$

$$\sigma^2(t) = V[X_t] = 0 \quad (7)$$

$$\gamma(t,h) = \text{Cov}(X_t, X_{t+h}) = 0 \quad (8)$$

4.2 Τύποι προτύπων

4.2.1 ARIMA πρότυπα

Ως ARIMA(p,d,q) (Autoregressive Integrated Moving Average), συμβολίζεται το αυτοπαλινδρομο ολοκληρωμένο πρότυπο κινητού μέσου τάξεως(p,d,q). Ουσιαστικά, πρόκειται για ένα πρότυπο ARMA(p,q) το οποίο εφαρμόζεται σε μία ολοκληρωμένη σειρά τάξεως d. Πιο συγκεκριμένα, το πρότυπο ARIMA(p,d,q) αποτελείται από το αυτοπαλινδρομο πρότυπο AR(p) τάξεως p και το πρότυπο κινητών μέσων MA(q) τάξεως q και είναι ολοκληρωμένο σε βαθμό d. Το p λοιπόν είναι ο αριθμός των παραμέτρων του αυτοπαλινδρομου προτύπου, το q ο αριθμός των παραμέτρων του προτύπου κινητού μέσου και το d δείχνει πόσες φορές απαιτείται να ληφθούν πρώτες διαφορές ώστε η σειρά να γίνει στάσιμη. Τα πρότυπα ARIMA είναι μαθηματικά πρότυπα αυτοσυσχέτισης των τιμών μίας μεταβλητής και κατ' επέκταση περιγράφουν το πως συμπεριφέρεται συναρτήσει των προηγούμενων τιμών της. Παρακάτω θα γίνει η ανάλυση κάθε μέρους του ARIMA ξεχωριστά αλλά και ολόκληρου μαζί.

Η γενική μορφή που παίρνει ένα AR(p) πρότυπο p τάξεως είναι:

$$Y_t = \theta_0 + \alpha_1 Y_{t-1} + \alpha_2 Y_{t-2} + \alpha_3 Y_{t-3} + \dots + \alpha_p Y_{t-p} + \varepsilon_t = \theta_0 + \sum_{i=1}^p a_i Y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (9)$$

όπου το p είναι το μήκος της χρονικής υστέρησης ή αλλιώς ο αριθμός των περιόδων(lags) που λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάπτυξη του προτύπου, τα Y_t, Y_{t-1}, Y_{t-2} είναι οι τιμές της μεταβλητής κατά τις περιόδους t,t-1,t-2, τα a_i οι παράμετροι της αυτοπαλινδρόμησης, το θ_0 ο σταθερός όρος και τέλος το ε_t το οποίο είναι τα τυχαία σφάλματα για την περίοδο t που εξετάζεται. Η μεταβλητή ε_t θεωρείται πως είναι λευκός θόρυβος. Το αυτοπαλινδρομο πρότυπο, η μορφή του δηλαδή, παραπέμπει σε πρότυπο παλινδρόμησης, όπου οι ερμηνευτικές του μεταβλητές ουσιαστικά είναι οι τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής Y_t .

Αν θεωρηθεί ότι η παραπάνω διαδικασία που μελετάται είναι στάσιμη, τότε ο μέσος μ και η διακύμανση γ_0 αντίστοιχα είναι:

$$E(X_t) = \mu = \frac{\theta_0}{1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \dots - \alpha_p} \quad (10)$$

$$\text{VAR}(X_t) = \gamma_0 = \frac{\sigma_\varepsilon^2}{1 - \alpha_1 \rho_1 - \alpha_2 \rho_2 - \dots - \alpha_p \rho_p} \quad (11)$$

όπου σ_ε^2 είναι η διακύμανση των τυχαιών σφαλμάτων. Ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης εκφράζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\rho_\alpha = \alpha_1 \rho_{\alpha-1} + \alpha_2 \rho_{\alpha-2} + \dots + \alpha_p \rho_{\alpha-p} \quad (12)$$

Παρακάτω παρουσιάζονται οι δύο συχνότερες περιπτώσεις του αυτοπαλίνδρομου προτύπου.

Η πρώτη είναι το AR(1) το οποίο έχει μόνο έναν όρο, $Y_t = \alpha_1 Y_{t-1} + \theta_0 + \varepsilon_t$. Από τη σχέση αυτή προκύπτει, πως για να είναι η διαδικασία στάσιμη, θα πρέπει το $|\alpha_1| < 1$. Επίσης συμπεραίνεται ότι ο συντελεστής μερικής αυτοσυσχέτισης είναι ίσος με $\phi_{11} = \rho_1$.

Η δεύτερη είναι το πρότυπο AR(2) το οποίο έχει δύο όρους, $Y_t = \alpha_1 Y_{t-1} + \alpha_2 Y_{t-2} + \theta_0 + \varepsilon_t$. Από εδώ προκύπτει όπως και πριν, ότι για να υπάρχει στασιμότητα, θα πρέπει να ισχύει $|\alpha_2| < 1$, $\alpha_1 + \alpha_2 < 1$, $\alpha_2 - \alpha_1 < 1$. Επίσης συμπεραίνεται ότι οι συντελεστές μερικής αυτοσυσχέτισης είναι ίσοι με $\phi_{11} = \rho_1$ και $\phi_{22} = \frac{\rho_2 - \rho_1^2}{1 - \rho_1^2}$.

Η γενική μορφή που παίρνουν τα πρότυπα κινητών μέσων MA(q), q τάξεως είναι:

$$Y_t = \theta_0 + \varepsilon_t - \lambda_1 \varepsilon_{t-1} - \lambda_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \lambda_q \varepsilon_{t-q} = \theta_0 - \sum_{i=1}^q \lambda_i \varepsilon_{t-i} + \varepsilon_t \quad (13)$$

όπου το q είναι το μήκος της χρονικής υστέρησης ή αλλιώς ο αριθμός των περιόδων(lags) που λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάπτυξη του πρότυπου, τα Y_t, Y_{t-1}, Y_{t-2} είναι οι τιμές της μεταβλητής κατά τις περιόδους $t, t-1, t-2$, τα λ_i οι συντελεστές της διαδικασίας των κινητών μέσων, το θ_0 ο σταθερός όρος και τέλος τα ε_t τα οποία είναι τα τυχαία σφάλματα για την περίοδο t που εξετάζεται.

Ο μέσος, η διακύμανση και ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης για αυτή τη σειρά δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$E(X_t) = \mu = \theta_0 \quad (14)$$

$$VAR(X_t) = \gamma_0 = \sigma_\varepsilon^2 * (1 + \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \dots + \lambda_q^2) \quad (15)$$

$$\rho_k = (-\lambda_k + \lambda_1\lambda_{k+1} + \lambda_2\lambda_{k+2} + \dots + \lambda_{q-k}\lambda_k) * \left(\frac{\sigma_\varepsilon^2}{\gamma_0}\right) \text{ αν } k=1,2,\dots,q$$

$$\text{αλλιώς ίσο με το } 0 \quad (16)$$

Μία ειδική περίπτωση προτύπου κινητών μέσων είναι το MA(2) το οποίο δίνεται ως $Y_t = \theta_0 + \varepsilon_t - \lambda_1\varepsilon_{t-1} - \lambda_2\varepsilon_{t-2}$. Οι παράμετροι του πρότυπου αυτού, θα πρέπει να ικανοποιούν τα εξής: $|\lambda_1| > 1, \lambda_1 + \lambda_2 < 1, \lambda_2 - \lambda_1 < 1$.

Τέλος, υπάρχουν και πρότυπα τα οποία έχουν ταυτόχρονα και αυτοπαλίνδρομο μέρος αλλά και μέρος κινητών μέσων. Η γενική μορφή των ARMA(p,q) αυτών προτύπων είναι:

$$Y_t = \theta_0 + \varepsilon_t + \alpha_1 Y_{t-1} + \alpha_2 Y_{t-2} + \alpha_3 Y_{t-3} + \dots + \alpha_p Y_{t-p} - \lambda_1 \varepsilon_{t-1} - \lambda_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \lambda_q \varepsilon_{t-q}$$

$$= \theta_0 + \sum_{i=1}^p \alpha_i Y_{t-i} - \sum_{i=1}^q \lambda_i \varepsilon_{t-i} + \varepsilon_t \quad (17)$$

Με την πάροδο του χρόνου, πολλές επεκτάσεις των προτύπων ARIMA έχουν αναπτυχθεί. Ένα από αυτά είναι και το πρότυπο ARIMAX, χρήση του οποίου γίνεται και στην παρούσα εργασία.

Το πρότυπο ARIMAX, πρόκειται για μία απλή επέκταση του ARIMA, στο οποίο προστίθενται και εξωγενείς ανεξάρτητες μεταβλητές X (οι οποίες αλλιώς ονομάζονται και συναρτήσεις μεταφοράς) οι οποίες επηρεάζουν τη συμπεριφορά της εξεταζόμενης εξαρτημένης μεταβλητής. Η μορφή των παραπάνω προτύπων είναι η εξής:

$$Y_t = \theta_0 + \sum_{i=1}^p a_i Y_{t-i} - \sum_{i=1}^q \lambda_i \varepsilon_{t-i} + \varepsilon_t + \sum_{k=1}^{N_x} \beta_k * X(t, k) \quad (18)$$

Ο όρος $\sum_{k=1}^{N_x} \beta_k * X(t, k)$, περιλαμβάνει τον αριθμό N_x των χρονικών υστερήσεων (lags) που λαμβάνονται για κάθε συνάρτηση μεταφοράς, το μητρώο των εξωγενών παραμέτρων X στο οποίο κάθε στήλη αποτελεί και μία χρονοσειρά και τους συντελεστές β_k των συναρτήσεων μεταφοράς.

Στην παρούσα εργασία, το μητρώο των συναρτήσεων μεταφοράς αποτελείται από τις χρονοσειρές της βροχόπτωσης, του φόρτου και της ταχύτητας.

4.2.2 Πρότυπα VECM

Η γενική μορφή της σχέσης $Y_t = a + \beta X_t + \varepsilon_t$ που αναφέρθηκε παραπάνω, μπορεί να γραφτεί και ως:

$$Y_t = \sum_{i=1}^p \gamma_i X_{t-i} + \sum_{i=1}^q \delta_i Y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (19)$$

όπου οι Y_t και X_t είναι συνολοκληρωμένες, το ε_t είναι λευκός θόρυβος και τα p, q είναι οι περίοδοι υστέρησης που χρησιμοποιούνται. Η θεωρία των Granger και Engle, έχει ως αξίωμα ότι το παραπάνω πρότυπο έχει δημιουργηθεί από ένα πρότυπο διόρθωσης λαθών με διάνυσμα συνολοκλήρωσης $[1, -\beta]$ το οποίο έχει τη μορφή (Karlaftis, Mannering and Washington, 2010):

$$\Delta Y_t = \alpha(Y_{t-1} - \beta X_{t-1}) + \sum_{i=1}^{p-1} \gamma_i^* X_{t-i} + \sum_{i=1}^{q-1} \delta_i^* Y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (20)$$

Να σημειωθεί ότι η πρώτη εξίσωση αποδίδει τις μακροπρόθεσμες παραμέτρους, ενώ η δεύτερη τις βραχυπρόθεσμες. Ο συντελεστής α αντιπροσωπεύει την ταχύτητα προσαρμογής από την βραχυπρόθεσμη στην μακροπρόθεσμη ισορροπία και ονομάζεται ισχύς της διόρθωσης ανισορροπίας.

Τα τρία βήματα της γενικής στρατηγικής για την εξέταση και τη δόμηση των προτύπων συνολοκληρωμένων σειρών είναι (Karlaftis, Mannering and Washington, 2010):

- 1) Εξετάζεται αν οι χρονοσειρές είναι $I(1)$ ολοκληρωμένες.
- 2) Υπολογίζεται μία συνολοκληρωμένη παλινδρόμηση και ελέγχεται η στασιμότητα των καταλοίπων. Αν είναι στάσιμα τότε υπάρχει συνολοκλήρωση μεταξύ των μεταβλητών.
- 3) Οι μακροπρόθεσμοι παράμετροι λαμβάνονται από μία απλή παλινδρόμηση όπως της πρώτης εξίσωσης, ενώ οι βραχυπρόθεσμοι παράμετροι και ο συντελεστής α από την εκτίμηση του πρότυπου VECM (Vector Error Correction Model).

Να σημειωθεί ότι πολύ ενδιαφέρον θα ήταν να υπήρχε η δυνατότητα να εισαχθούν και εξωγενείς παραμέτρους στο πρότυπο VECM, άλλα δυστυχώς κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό καθώς δεν υπάρχει διαθέσιμο λογισμικό που να υποστηρίζει κάτι τέτοιο. Στην βιβλιογραφία πάντως, υπάρχουν αρκετά παραδείγματα προτύπων VECM στα οποία εισάγονται και εξωγενείς ανεξάρτητες μεταβλητές, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι το θεωρητικό υπόβαθρο για να πραγματοποιηθεί υπάρχει.

4.3 Στάδια εκτίμησης του πρότυπου

Μία από τις πλέον διαδεδομένες προσεγγίσεις για τον καθορισμό των προτύπων της «οικογένειας» ARIMA είναι αυτή των Box and Jenkins (1976). Η προσέγγιση αυτή περιλαμβάνει τέσσερα βήματα τα οποία είναι η επιλογή τάξης, ο υπολογισμός των παραμέτρων, ο διαγνωστικός έλεγχος και τέλος, η παραγωγή προβλέψεων. Τα βήματα αυτά επεξηγούνται παρακάτω.

Η επιλογή της τάξης του προτύπου, δηλαδή η εύρεση των τιμών p, q , είναι διαδικασία αρκετά δύσκολη. Η τάξη των δύο μερών του προτύπου (του αυτοπαλίνδρομου και των κινητών μέσων), πρέπει να βρεθεί πριν το πρότυπο εφαρμοστεί. Η διαδικασία αυτή είναι αρκετά πολύπλοκη και πρέπει να εξεταστούν αρκετοί συνδυασμοί. Τις περισσότερες φορές, η επιλογή της τάξης του προτύπου γίνεται μέσω της εξέτασης των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Οι δύο αυτές συναρτήσεις θα συμβολίζονται αντίστοιχα ACF και PACF. Η εκθετική φθίνουσα πορεία της ACF προς το 0, υποδεικνύει ότι το πρότυπο είναι αυτοπαλίνδρομο (AR), ενώ το αντίστροφο, δηλαδή η εκθετική φθίνουσα πορεία της PACF προς το 0, υποδεικνύει ότι το πρότυπο είναι κινητών μέσων (MA). Στην πρώτη περίπτωση, η τάξη του προτύπου καθορίζεται από τον αριθμό των στατιστικά σημαντικών lags - των χρονικών υστερήσεων δηλαδή - της PACF, ενώ στη δεύτερη, από τον αντίστοιχο αριθμό της ACF. Όταν και οι δύο συναρτήσεις φθίνουν εκθετικά στο 0, τότε το πρότυπο είναι αυτοπαλίνδρομο κινητών μέσων (ARMA). Μία άλλη μέθοδος για την εύρεση της τάξης του προτύπου, η οποία ακολουθείται και στην παρούσα εργασία, είναι δοκιμή πολλαπλών συνδυασμών των p και q . Η τελική τάξη του προτύπου θα επιλεγεί με βάση την ελαχιστοποίηση μίας συνάρτησης υπολογισμού της διακύμανσης των τυπικών σφαλμάτων. Δύο από αυτές τις συναρτήσεις είναι τα κριτήρια πληροφοριών AIC(Akaike Information Criteria) και το BIC(Bayesian Information Criteria).

Υπάρχουν δύο μέθοδοι υπολογισμού των παραμέτρων ενός προτύπου. Η πρώτη είναι η μέθοδος μέγιστης πιθανοφάνειας και η δεύτερη η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων, η οποία είναι και η λιγότερο σύνθετη.

Αφού εκτιμηθεί το πρότυπο γίνεται ο λεγόμενος διαγνωστικός έλεγχος, δηλαδή ελέγχεται κατά πόσο το πρότυπο που υπολογίστηκε είναι ικανοποιητικό όσον αφορά την προσαρμογή του στα δεδομένα. Ο καλύτερος τρόπος για να πραγματοποιηθεί αυτό είναι να εξεταστεί η ικανότητα του να προβλέπει εκτός της δειγματοληπτικής περιόδου. Όταν όμως τα στοιχεία που διαθέτει ο ερευνητής είναι λίγα, τότε αναγκαστικά και η εκτίμηση αλλά και ο έλεγχος του προτύπου πραγματοποιούνται από το ίδιο το δείγμα. Ο τρόπος με τον οποίο εφαρμόζεται συχνότερα ο διαγνωστικός έλεγχος, είναι να ελεγχθεί ο βαθμός που τα υπολογισθέντα κατάλοιπα συσχετίζονται μεταξύ τους. Εάν τα κατάλοιπα έχουν τις ιδιότητες του τυχαίου θορύβου, οι τάξεις μέσα στο πρότυπο έχουν εξουδετερωθεί και τα συστηματικά λάθη στην πρόβλεψη

έχουν αποφευχθεί. Από την άλλη μεριά, αν τα κατάλοιπα παρουσιάζουν κάποια τάση ή συστηματική συμπεριφορά, το πρότυπο δεν θα έχει καλή προβλεπτική ικανότητα. Αυτό μπορεί εύκολα να εξεταστεί από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων. Η απουσία στατιστικά σημαντικών τιμών από αυτή συνεπάγεται κατάλοιπα ασυσχέιστα, ενώ η παρουσία στατιστικά σημαντικών τιμών το αντίθετο. Τέλος, ένας άλλος τρόπος με τον οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί ο διαγνωστικός έλεγχος, είναι ο στατιστικός έλεγχος Ljung-Box ο οποίος εξετάζει κατά πόσο τα κατάλοιπα πλησιάζουν τον «λευκό θόρυβο». Η σχέση των Ljung-Box που ακολουθεί την κατανομή χ^2 είναι:

$$Q = N * (N + 2) * \sum_{j=1}^k \frac{\rho_j^2}{(N-j)} \quad (21)$$

Τελευταίο στάδιο και απώτερος συνήθως σκοπός της εκτίμησης του πρότυπου είναι η παραγωγή προβλέψεων. Σε αυτό το στάδιο γίνεται η αξιολόγηση των προβλέψεων που παράγει το πρότυπο. Η αξιολόγηση αυτή γίνεται με βάση την ακρίβεια των προβλέψεων και την απόκλιση τους από την πραγματικότητα. Για να μετρηθεί αυτή η ακρίβεια, χρησιμοποιούνται διάφοροι δείκτες οι οποίοι ορίζονται με βάση τη διαφορά των τιμών που προβλέφθηκαν και των πραγματικών τιμών. Στα συγκοινωνιακά προβλήματα, οι πλέον χρησιμοποιούμενοι δείκτες είναι το MSE (Mean Square Error) ή αλλιώς μέσο σφάλμα τετραγώνου η χρησιμότητα του οποίου έχει πολλές φορές συζητηθεί λόγω της ευαισθησίας του στις ακραίες τιμές, το μέσο απόλυτο σφάλμα MAE (Mean Absolute Error) και το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα MAPE (Mean Absolute Percentage Error). Εάν υποθεθεί ότι A_t είναι οι πραγματικές τιμές μίας χρονοσειράς, F_t οι προβλεφθείσες και $\varepsilon_t = F_t - A_t$ το σφάλμα της πρόβλεψης τότε:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |\varepsilon_t| \quad (22)$$

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{t=1}^N \left| \frac{\varepsilon_t}{A_t} \right| \quad (23)$$

Όσον αφορά τα πρότυπα VECM, εκτός από τα παραπάνω βήματα, πρέπει να ελεγχθεί και ο βαθμός συνολοκλήρωσης του πρότυπου. Για να εξηγηθεί ο όρος αυτός παρατίθεται παρακάτω η θεωρία του Johansen για τον έλεγχο της συνολοκλήρωσης δύο μεταβλητών.

Η μεθοδολογία του Johansen ξεκινάει από το πρότυπο VAR(Vector Autoregression) τάξεως p το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$Y_t = \theta_0 + \alpha_1 Y_{t-1} + \alpha_2 Y_{t-2} + \alpha_3 Y_{t-3} + \dots + \alpha_p Y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (24)$$

όπου το Y_t είναι ένα διάνυσμα $n \times 1$ μεταβλητών τα οποία είναι $I(1)$ ολοκληρωμένα και το ε_t ένα διάνυσμα $n \times 1$ των καταλοίπων. Η προηγούμενη σχέση μπορεί να γραφεί και ως:

$$\Delta Y_t = \theta_0 + \Pi Y_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} \Gamma_i \Delta Y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (25)$$

όπου το

$$\Pi = \sum_{i=1}^p A_i - I \quad \text{και} \quad \Gamma_i = - \sum_{j=i+1}^p A_j \quad (26)$$

Αν ο πίνακας συντελεστών Π έχει μειωμένο βαθμό $r < n$ τότε υπάρχουν πίνακες α, β διαστάσεων $r \times n$ και με βαθμό r τέτοιοι ώστε $\Pi = \alpha \beta'$ και η ποσότητα να είναι $\beta' Y_t$ στάσιμη. Το r είναι ο αριθμός των σχέσεων συνολοκλήρωσης, τα στοιχεία του συντελεστή προσαρμογής α είναι γνωστά και το β είναι το διάνυσμα συνολοκλήρωσης.

Για κάθε πρότυπο VECM που θα δομείται λοιπόν, θα γίνεται και ένας επιπλέον έλεγχος του βαθμού συνολοκλήρωσης των μεταβλητών του.

4.4 Περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού του πρότυπου

4.4.1 Επεξεργασία βάσης δεδομένων πριν την ανάλυση

Όπως προαναφέρθηκε, η άντληση της βάσης δεδομένων έγινε από τους φωρατές της Αττικής Οδού (φόρτος, ταχύτητα) και από τους βροχομετρικούς σταθμούς του Ε.Μ.Π. (βροχόπτωση). Τα κυκλοφοριακά και βροχομετρικά στοιχεία που ελήφθησαν έχουν συχνότητα πεντάλεπτου και καλύπτουν τις ημέρες Δευτέρα 14/1/2008 έως και Παρασκευή 18/1/2008. Η βάση δεδομένων, κυρίως αυτή με τα κυκλοφοριακά στοιχεία, παρουσίαζε κάποιες λανθασμένες τιμές οι οποίες έπρεπε να διορθωθούν πριν χρησιμοποιηθούν για τη στατιστική ανάλυση. Για παράδειγμα, υπήρχαν τιμές ταχύτητας κοντά στο 0, χωρίς να υπάρχουν άλλα οχήματα σε κοντινά χρονικά διαστήματα με παρόμοια ταχύτητα, καθώς και αρνητικές τιμές της ταχύτητας που προφανώς ήταν λανθασμένες. Οι τιμές αυτές λοιπόν διορθώθηκαν κατ' εκτίμηση με στόχο να αντιπροσωπεύουν τις συνθήκες της κυκλοφορίας της περιόδου εκείνης ώστε να μην διαταραχθεί το δείγμα από τις ακραίες-λανθασμένες αυτές τιμές. Το επόμενο βήμα ήταν όπως προαναφέρθηκε ο χωρισμός της βάσης δεδομένων σε δύο περιόδους 05:00-23:00 και 23:00-05:00. Για την ανάλυση ανά διατομή και πιο συγκεκριμένα για κάθε διατομή, ο συνολικός φόρτος υπολογίστηκε αθροίζοντας τους φόρτους της κάθε λωρίδας και η τελική ταχύτητα υπολογίζοντας τους σταθμισμένους μέσους όρους των ταχυτήτων.

4.4.2 Στόχος της ανάλυσης

Βασικός στόχος της ανάλυσης ήταν η χρήση προτύπων ARIMA, ARIMAX, ARFIMA, ARFIMAX και VECM για την περιγραφή και πρόβλεψη της ταχύτητας. Προφανώς, όποτε χρησιμοποιούνταν τα πρότυπα ARIMA, ARFIMA και VECM, η περιγραφή αυτή γινόταν μόνο σε όρους των παρελθοντικών τιμών της ταχύτητας. Όποτε πάλι χρησιμοποιούνταν τα πρότυπα ARIMAX και ARFIMAX, εισάγονταν στο πρότυπο και οι εξωγενείς παράμετροι, φόρτος και βροχόπτωση, ώστε να μελετηθεί ο βαθμός που βελτιώνεται ή χειροτερεύει η πρόβλεψη με την προσθήκη αυτή. Να σημειωθεί ότι η

χρήση των προτύπων ARIMA, ARIMAX, ARFIMA, ARFIMAX αναφέρεται σε ανάλυση ανά λωρίδα ή ανά διατομή ενώ η χρήση των VECM προτύπων σε διανυσματική ανάλυση.

Όπως προαναφέρθηκε, η ανάλυση γίνεται και για τις 5 ημέρες ανά περίοδο και συνεχόμενα. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι ημέρες χωρίστηκαν στις δύο αυτές περιόδους και ύστερα ενώθηκαν οι περίοδοι ανά ημέρα.

Η ανάπτυξη όλων των προτύπων γίνεται προκειμένου να εξεταστεί η πιθανότητα βελτίωσης των προβλέψεων όταν η ανάλυση πραγματοποιείται ξεχωριστά ανά περίοδο, ανά λωρίδα, ανά διατομή ή διανυσματικά. Παρακάτω, περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ανάπτυξη των προτύπων. Να επισημανθεί ότι η διαδικασία είναι ίδια για όλα τα πρότυπα ARIMA, ARIMAX, ARFIMA, ARFIMAX και ξεχωριστή για τα VECM.

4.4.2 Ανάλυση των προτύπων

Το πρώτο απ' όλα που πρέπει να ελεγχθεί είναι η στασιμότητα της χρονοσειράς. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, υπάρχουν διάφοροι έλεγχοι-Tests τα οποία ελέγχουν την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας(unit root tests). Τέτοιοι έλεγχοι είναι ο επαυξημένος έλεγχος μοναδιαίας ρίζας των Dickey-Fuller(Augmented Dickey-Fuller Test) και ο έλεγχος KPSS(Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin Test). Κατά τον πρώτο έλεγχο, η μηδενική υπόθεση(null hypothesis) είναι ότι η χρονοσειρά περιέχει μία τουλάχιστον μοναδιαία ρίζα και η εναλλακτική ότι δεν υπάρχει καμία. Κατά τον δεύτερο όμως έλεγχο δεν μπορεί να ειπωθεί το ίδιο. Η μηδενική του υπόθεση είναι ότι η χρονοσειρά είναι στάσιμη και η εναλλακτική το αντίθετο. Αυτός είναι και ο λόγος που οι δύο αυτοί έλεγχοι πραγματοποιούνται ταυτόχρονα. Πρόκειται για δύο ελέγχους αντίθετους, που όταν πραγματοποιούνται και οι δύο τα αποτελέσματά τους είναι πιο ασφαλή.

Ένας άλλος εμπειρικός τρόπος για να γίνει ο έλεγχος της στασιμότητας, είναι να ληφθεί το διάγραμμα της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης ACF για έναν ικανοποιητικό αριθμό χρονικών υστερήσεων(lags). Εάν το διάγραμμα αυτό φθίνει μετά από έναν μικρό σχετικά αριθμό υστερήσεων, η χρονοσειρά είναι στάσιμη. Σε διαφορετική

περίπτωση, εάν δηλαδή το διάγραμμα της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης φθίνει με ρυθμό αργό ή μένει εκτός των διαστημάτων εμπιστοσύνης, η χρονοσειρά δεν είναι στάσιμη και απαιτείται η διενέργεια άλλων μεθόδων, π.χ. πρώτες διαφορές, για να γίνει στάσιμη.

Η εκτέλεση όλων των παραπάνω ενεργειών, οδηγεί σε σαφή συμπεράσματα σχετικά με το αν η χρονοσειρά που μελετείται είναι στάσιμη ή όχι. Εάν διαπιστωθεί μη στασιμότητα, το πρώτο που απαιτείται είναι να ληφθούν πρώτες διαφορές και να ελεγχθεί ξανά η στασιμότητα.

Εάν διαπιστωθεί ότι παρά τις πρώτες διαφορές η έλλειψη στασιμότητας παραμένει, θα πρέπει να ελεγχθεί η πιθανότητα η χρονοσειρά να παρουσιάζει «μακρά-μνήμη» και να είναι δηλαδή κλασματικά ολοκληρωμένη.

Το δεύτερο βήμα είναι η εύρεση της τάξης του προτύπου. Ο συνήθης τρόπος για να γίνει αυτό, είναι όπως προαναφέρθηκε μέσω των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης ACF και μερικής αυτοσυσχέτισης PACF. Στην παρούσα εργασία όμως, δεν χρησιμοποιήθηκε η παραπάνω μέθοδος. Επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν πολλαπλοί συνδυασμοί των τάξεων p και q του αυτοπαλίνδρομου μέρους και του μέρους των κινητών μέσων. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η μέγιστη τιμή που λαμβάνουν συνήθως τα p και q των προτύπων ταχύτητας είναι 3. Έτσι, ελήφθησαν όλοι οι παρακάτω συνδυασμοί:

1. AR(1) MA(1)
2. AR(2) MA(1)
3. AR(1) MA(2)
4. AR(2) MA(2)
5. AR(3) MA(1)
6. AR(3) MA(2)
7. AR(1) MA(3)
8. AR(2) MA(3)
9. AR(3) MA(3)

Κάπου εδώ, θα πρέπει να παρουσιαστεί ο τρόπος με τον οποίο προσθέτονταν οι πληροφορίες στα πρότυπα που αναπτύχθηκαν. Να σημειωθεί πως σε όλα τα πρότυπα που αναπτύχθηκαν, συμπεριλαμβάνονται πάντοτε τα βροχομετρικά δεδομένα και για αυτό δεν θα γίνεται αναφορά σε αυτά. Όσον αφορά τα πρότυπα ARIMA και ARFIMA, εισήχθησαν κάθε φορά μόνο οι μεταβλητές της ταχύτητας. Όσον αφορά όμως τα πρότυπα ARIMAX και ARFIMAX, έγινε χρήση πολλαπλών συνδυασμών προσθήκης των πληροφοριών στα πρότυπα οι οποίοι βασίστηκαν σε δύο «λογικές».

Ο πρώτος τρόπος βασίστηκε στη λογική της «πύκνωσης». Τα δεδομένα που εισήχθησαν στο πρότυπο αρχικά ήταν μόνο του πρώτου φωρατή, δηλαδή του VDS E 24.20. Έπειτα, εκτός από τα παραπάνω προστέθηκαν και τα κυκλοφοριακά στοιχεία του φωρατή VDS E 34.00, δηλαδή του πρώτου και του τελευταίου στο οδικό τμήμα που μελετάται. Μετά από αυτό, προστέθηκαν και τα στοιχεία του μεσαίου φωρατή, δηλαδή του VDS E 29.20. Έπειτα προστέθηκαν τα κυκλοφοριακά δεδομένα των φωρατών που βρίσκονται στο ένα τέταρτο και στα τρία τέταρτα του συνολικού τμήματος μελέτης, δηλαδή των VDS E 26.70 και VDS E 31.60. Η διαδικασία συνεχίστηκε με τον ίδιο τρόπο μέχρις ότου προστέθηκαν τα στοιχεία όλων των φωρατών στο πρότυπο.

Ο δεύτερος τρόπος βασίστηκε στη λογική της προσθήκης στοιχείων από το σημείο ενδιαφέροντος και «πίσω». Αυτό πραγματοποιήθηκε προσθέτοντας ένα-ένα τα στοιχεία του κάθε φωρατή ξεκινώντας φυσικά από τον VDS E 24.20. Εν συνεχεία, προστέθηκαν τα κυκλοφοριακά στοιχεία του αμέσως επόμενου φωρατή, δηλαδή του VDS E 24.60, μετά του VDS E 25.20 κ.ο.κ.

Να τονιστεί ότι όλα τα παραπάνω ισχύουν για την ανάλυση ανά περίοδο, λωρίδα και διατομή.

Το τρίτο βήμα είναι ο υπολογισμός των παραμέτρων του προτύπου κάθε φορά, ο οποίος έγινε με το κατάλληλο λογισμικό. Ο διαγνωστικός έλεγχος που προαναφέρθηκε, πραγματοποιήθηκε για καθένα από τα υπολογισθέντα πρότυπα.

Το τέταρτο και τελευταίο βήμα είναι η αξιολόγηση των προτύπων. Για κάθε πρότυπο από αυτά που περιγράφηκαν παραπάνω, υπολογίστηκε το κριτήριο BIC (Bayesian Information Criterion). Για κάθε κατηγορία (δηλαδή ανά λωρίδα ή διατομή και ανά περίοδο), επιλέχθηκαν τα πέντε βέλτιστα πρότυπα με το χαμηλότερο BIC, ώστε να γίνει ένα αρχικό ξεκαθάρισμα μεταξύ τους. Για αυτά, υπολογίστηκαν οι δείκτες αξιολόγησης MAE και MAPE προκειμένου να βρεθεί το βέλτιστο από αυτά. Να σημειωθεί ότι για να υπολογιστούν τα MAE και MAPE, δεν χρησιμοποιήθηκαν κάθε φορά οι προβλεφθείσες τιμές όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αλλά οι τιμές που υπολόγιζε το πρότυπο. Στον τύπο των MAE, MAPE λοιπόν που προαναφέρθηκε, το F_t αντιπροσωπεύει τις τιμές που υπολόγισε το πρότυπο και όχι τις προβλεφθείσες. Αυτά τα δύο λοιπόν ήταν τα δύο μέτρα αξιολόγησης και σύγκρισης των προτύπων.

Όσον αφορά τα πρότυπα VECM, να σημειωθεί επιγραμματικά ότι το μόνο που αλλάζει είναι τα δύο πρώτα βήματα υπολογισμού. Στο πρώτο γίνεται ο έλεγχος της δυνατότητας συνολοκλήρωσης των μεταβλητών (Cointegration Test) και στο δεύτερο, αφού διαπιστωθεί πως υπάρχει όντως αυτή η δυνατότητα, πραγματοποιείται ο έλεγχος του βαθμού συνολοκλήρωσης (Cointegration rank). Αυτά που παραλείπονται δηλαδή είναι ο έλεγχος της στασιμότητας, ο οποίος δεν απαιτείται αφού γίνεται η συνολοκλήρωση, και η εισαγωγή των εξωγενών παραμέτρων X (αφού δεν υπάρχει το κατάλληλο λογισμικό για να γίνει αυτό). Τα υπόλοιπα βήματα, δηλαδή η εύρεση της τάξης του προτύπου, ο διαγνωστικός έλεγχος και η αξιολόγηση των προτύπων, ακολουθούνται όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

Κεφάλαιο 5

Ανάλυση και αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία ανάπτυξης των προτύπων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από αυτά. Να σημειωθεί πως όλα τα πρότυπα εκτελέστηκαν ανά περίοδο και αφού έγινε αρχικά ο υπολογισμός των παραμέτρων τους, έπειτα ακολούθησε η αξιολόγησή τους. Συνοπτικά τα πρότυπα που εφαρμόστηκαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.1: Τύποι εφαρμοσθέντων προτύπων

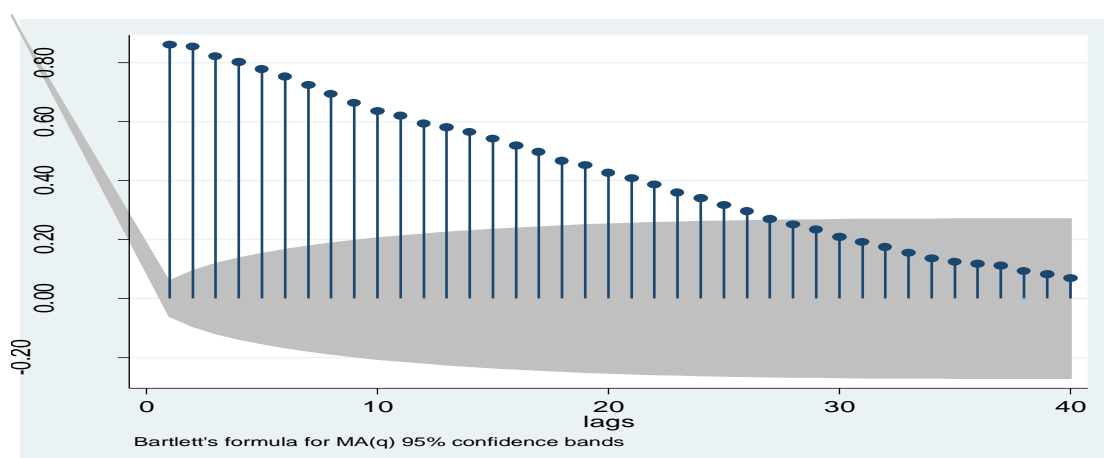
Τύπος προτύπων	εφαρμογή ανά	
	λωρίδα	διατομή
ARIMA	✓	✓
ARIMAX	✓	✓
ARFIMA	✓	✓
ARFIMAX	✓	✓
VECM	για όλες τις λωρίδες	

5.1 Περίοδος 1: 05:00-23:00

5.1.1 Αριστερή Λωρίδα (Λωρίδα 1)

Το πρώτο που απαιτείται να γίνει στη λωρίδα 1 είναι έλεγχος στασιμότητας. Αυτό, όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιείται με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι μέσω του επαυξημένου ελέγχου μοναδιαίας ρίζας Dickey-Fuller (Augmented Dickey-Fuller Test, ADF) και του ελέγχου KPSS (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin). Από το αποτέλεσμα του ελέγχου ADF φαίνεται να απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση της ύπαρξης μοναδιαίας ρίζας. Από την άλλη μεριά όμως, το αποτέλεσμα του ελέγχου KPSS απορρίπτει επίσης τη μηδενική υπόθεσή του η οποία θεωρεί ότι η χρονοσειρά είναι στάσιμη. Οι δύο αυτοί έλεγχοι εμφανίζουν τελικά αντίθετα αποτελέσματα τα οποία χρήζουν περισσότερης ανάλυσης.

Λύση στο παραπάνω ζήτημα είναι πιθανό να δώσει η μορφή του διαγράμματος αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς που αναλύεται γιατί και παρατίθενται αμέσως μετά.



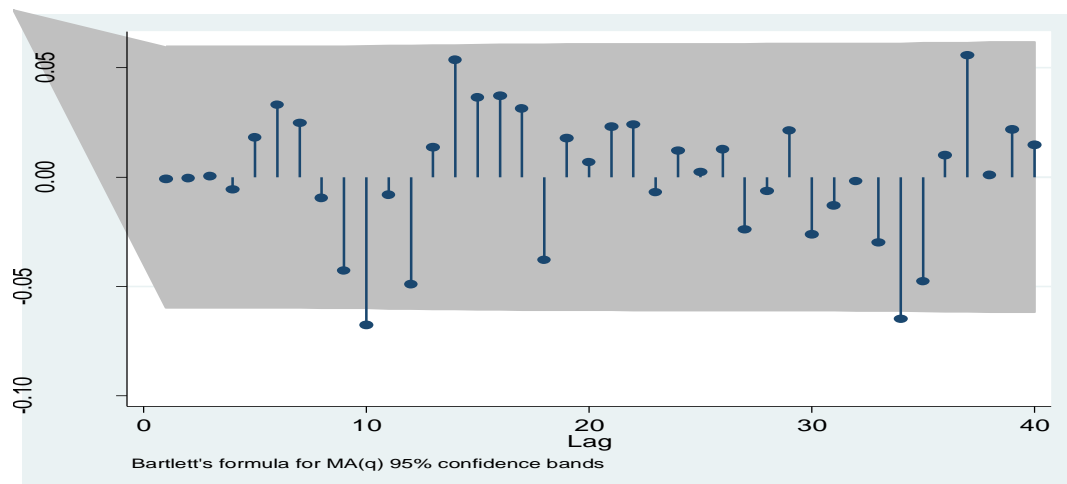
Σχήμα 5.1: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της Ταχύτητας για την λωρίδα 1

Από το διάγραμμα αυτοσυσχέτισης συμπεραίνεται εύκολα ότι η χρονοσειρά της ταχύτητας για τη λωρίδα 1 παρουσιάζει «μακρά-μνήμη» (Long-Memory) και επομένως δεν αρκεί να ληφθούν πρώτες διαφορές. Αυτό θα αντιμετωπιστεί με τη μέθοδο της κλασματικής ολοκλήρωσης που αναφέρθηκε παραπάνω και άρα τα πρότυπα που πρέπει να αναπτυχθούν είναι ARFIMA και ARFIMAX.

Όσον αφορά την εύρεση της τάξης του προτύπου, θα υπολογιστούν, όπως και σε όλα τα πρότυπα, και οι εννέα συνδυασμοί που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Επίσης, όσον αφορά τα ARFIMAX που περιέχουν και εξωγενείς μεταβλητές, θα ακολουθηθούν και οι δύο μέθοδοι προσθήκης των πληροφοριών στα πρότυπα δηλαδή και η μέθοδος της «πύκνωσης» άλλα και η μέθοδος προσθήκης από εμπρός προς τα πίσω. Αυτό σημαίνει ότι συνολικά θα αναπτυχθούν για τη λωρίδα 1, εννέα(9) πρότυπα ARFIMA και διακόσια επτά(207) πρότυπα ARFIMAX. Από αυτά, θα επιλεγθούν τα πέντε καλύτερα ARFIMA και ARFIMAX, με βάση το κριτήριο BIC, και σε αυτά θα γίνει ο διαγνωστικός έλεγχος, η αξιολόγηση και η σύγκριση ώστε να βρεθεί το βέλτιστο.

Τα πέντε καλύτερα ARFIMA που βρέθηκαν για τη λωρίδα 1 με βάση το παραπάνω κριτήριο ήταν τα: ARFIMA(1,0.1681,1), ARFIMA(2,0.1727,1), ARFIMA(1,-0.0070,2), ARFIMA(2,0.0092,2), ARFIMA(1,-0.0343,3).

Στα πρότυπα αυτά πραγματοποιήθηκε ο διαγνωστικός έλεγχος με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης. Για να θεωρηθεί επαρκές ένα πρότυπο, θα πρέπει οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης του να μην είναι στατιστικά σημαντικοί. Με βάση το διάγραμμα αυτοσυσχέτισης, αυτό σημαίνει ότι οι τιμές τους δεν θα πρέπει να ξεφεύγουν του διαστήματος εμπιστοσύνης (δηλαδή εκτός της γκριζας περιοχής του διαγράμματος). Ενδεικτικά παρατίθεται ένα από τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων για να φανεί η επάρκεια των προτύπων.

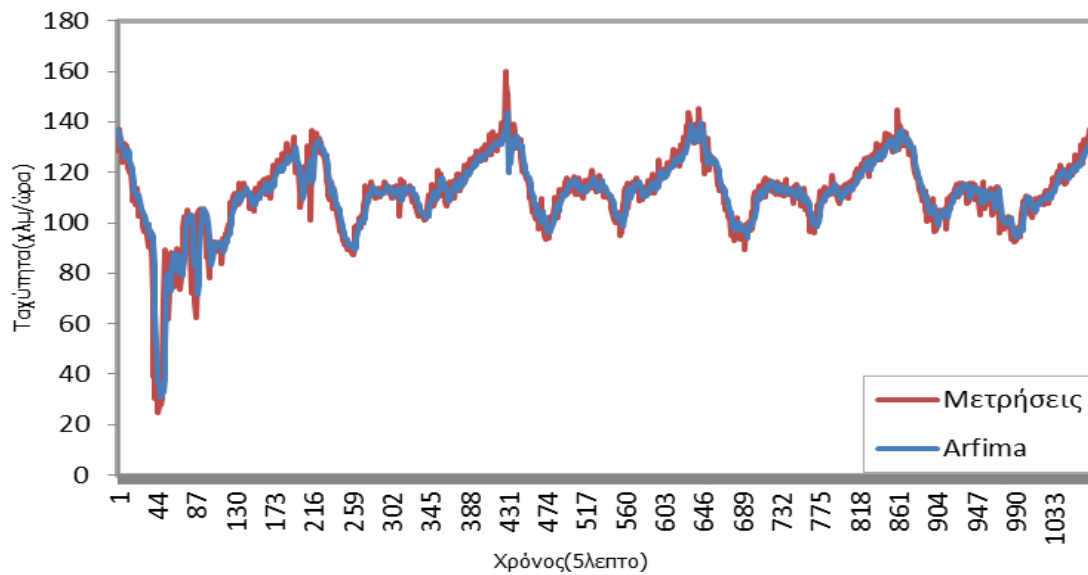


Σχήμα 5.2: Διάγραμμα αυτοσυσχετίσης καταλοίπων του ARFIMA(1,0.1681,1)

Από το παραπάνω διάγραμμα εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι αυτοσυσχετίσεις των καταλοίπων των προτύπων δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επομένως και τα πέντε πρότυπα ARFIMA κρίνονται επαρκή και μπορούν πλέον να περάσουν στη φάση της αξιολόγησης.

Όπως τονίστηκε και παραπάνω, οι δείκτες αξιολόγησης υπολογίστηκαν με βάση τις πραγματικές τιμές του δείγματος και τις τιμές που υπολόγισε το κάθε πρότυπο (πάντοτε αυτές οι τιμές αναφέρονται στις τιμές εντός δείγματος). Να αναφερθεί, ότι παρότι υπολογίστηκαν συνολικά 6 δείκτες αξιολόγησης των προτύπων (RMSE, MSE, MAPE, MPE, MAE και ME) οι δύο δείκτες με βάση τους οποίους τελικά έλαβε χώρα η αξιολόγηση ήταν ο MAPE και ο MAE. Τα αποτελέσματα του υπολογισμού των MAPE, MAE κάθε προτύπου φαίνονται στον Πίνακα 5.2. Με έντονη γραφή έχει γραφεί το βέλτιστο πρότυπο κάθε κατηγορίας ανάλυσης που εδώ είναι το ARFIMA(1,0.1681,1).

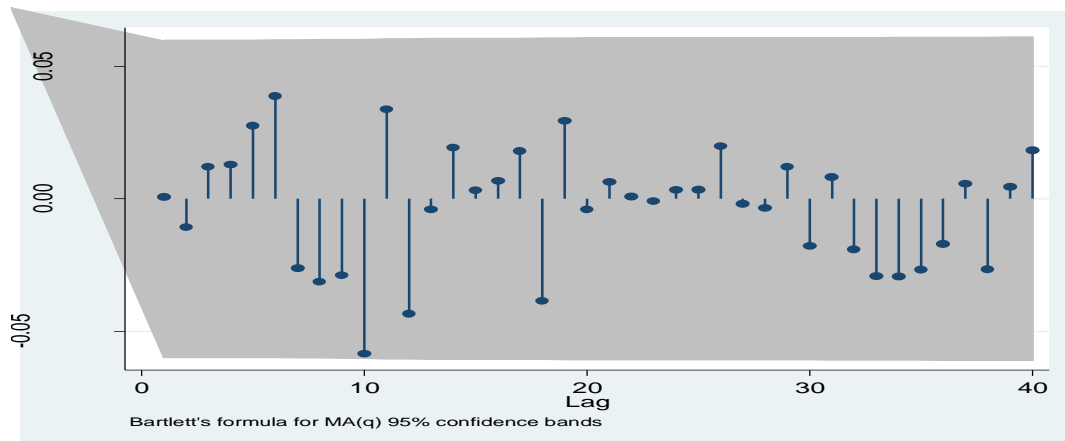
Προκειμένου να γίνει απτή η διαφορά των προβλέψεων του προτύπου αυτού και των πραγματικών τιμών του δείγματος, δίνεται το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 5.3: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMA(1,0.1681,1)

Όσον αφορά τα πρότυπα ARFIMAX, τα πέντε καλύτερα που αναπτύχθηκαν για τη λωρίδα 1, ήταν τα: ARFIMAX(1,0.2403,2,5), ARFIMAX(1,0.2588,1,5), ARFIMAX(2,0.181,3,5), ARFIMAX(2,-0.1283,1,5) και το ARFIMAX(2,0.1810,2,5), όπου πέντε είναι οι χρονικές υστερήσεις των εξωγενών μεταβλητών. Να σημειωθεί πως οι εξωγενείς μεταβλητές και στα πέντε παραπάνω πρότυπα ήταν η βροχόπτωση, ο φόρτος των φωρατών VDS E 24.20(+0) και VDS E 24.60(+400) και η ταχύτητα του φωρατή VDS E 24.60(+400).

Στα πρότυπα αυτά όπως και στα προηγούμενα, πραγματοποιήθηκε ο διαγνωστικός έλεγχος με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης. Για να θεωρηθεί επαρκές ένα πρότυπο, θα πρέπει οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης του να μην είναι στατιστικά σημαντικοί. Ενδεικτικά παρατίθεται ένα από τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων για να φανεί η επάρκεια των προτύπων.

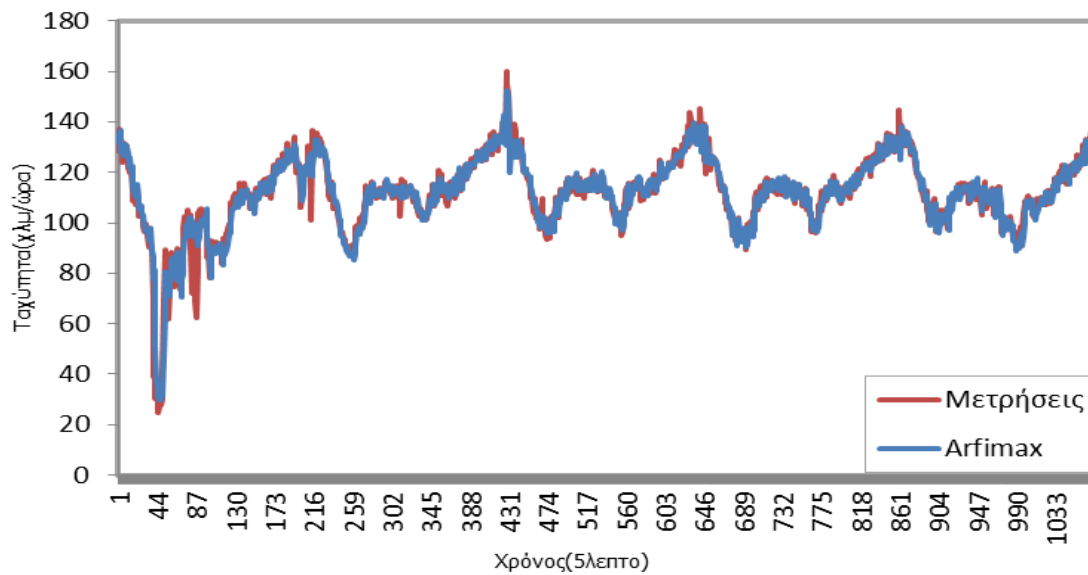


Σχήμα 5.4: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMAX(1,0.2588,1,5)

Από το παραπάνω διάγραμμα εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι αυτοσυσχετίσεις των καταλοίπων των προτύπων δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επομένως και τα πέντε πρότυπα ARFIMAX κρίνονται επαρκή και μπορούν να περάσουν στη φάση της αξιολόγησης.

Όπως και παραπάνω, υπολογίστηκαν οι δείκτες αξιολόγησης MAPE και MAE με βάση τις πραγματικές τιμές του δείγματος και τις εντός-δείγματος τιμές που υπολόγισε το κάθε πρότυπο. Οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης παρατίθενται στον Πίνακα 5.3 όπου με έντονη γραφή(Bold) έχει γραφεί και εκεί το βέλτιστο πρότυπο με τις μικρότερες τιμές MAPE και MAE. Στην κατηγορία αυτή, το βέλτιστο πρότυπο είναι το ARFIMAX(1,0.2588,1,5).

Και εδώ όπως και προηγουμένως, προκειμένου να γίνει απτή η διαφορά των προβλέψεων του πρότυπου αυτού και των πραγματικών τιμών του δείγματος, παρατίθεται το παρακάτω διάγραμμα.

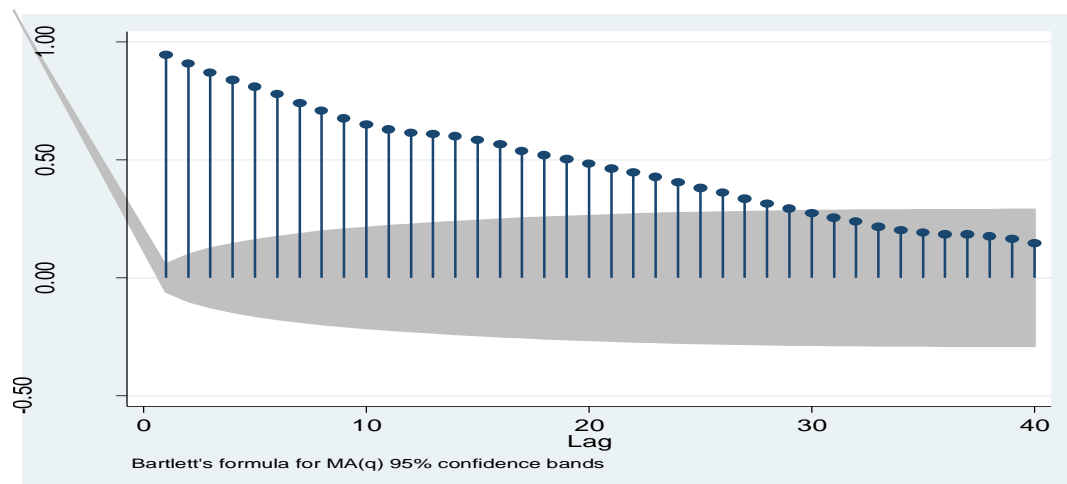


Σχήμα 5.5: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMAX(1,0.2588,1,5)

5.1.2 Μεσαία Λωρίδα (Λωρίδα 2)

Όπως και για τη λωρίδα 1 έτσι και για τη λωρίδα 2, το πρώτο πράγμα που απαιτείται να γίνει είναι ο έλεγχος στασιμότητας. Αυτό, όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιείται με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι μέσω του επαυξημένου ελέγχου μοναδιαίας ρίζας Dickey-Fuller(Augmented Dickey-Fuller Test, ADF) και του ελέγχου KPSS (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin). Από το αποτέλεσμα του ελέγχου ADF φαίνεται και εδώ να απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση της ύπαρξης μοναδιαίας ρίζας. Επίσης, το αποτέλεσμα του ελέγχου KPSS απορρίπτει και εδώ τη μηδενική υπόθεσή του η οποία θεωρεί ότι η χρονοσειρά είναι στάσιμη. Οι δύο αυτοί έλεγχοι εμφανίζουν τελικά αντίθετα αποτελέσματα τα οποία χρήζουν περισσότερης ανάλυσης.

Λύση στο παραπάνω ζήτημα είναι πιθανό να δώσει ξανά η μορφή του διαγράμματος αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της ταχύτητας στη λωρίδα 2 γιατί και παρατίθενται αμέσως μετά.



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της Ταχύτητας για την λωρίδα 2

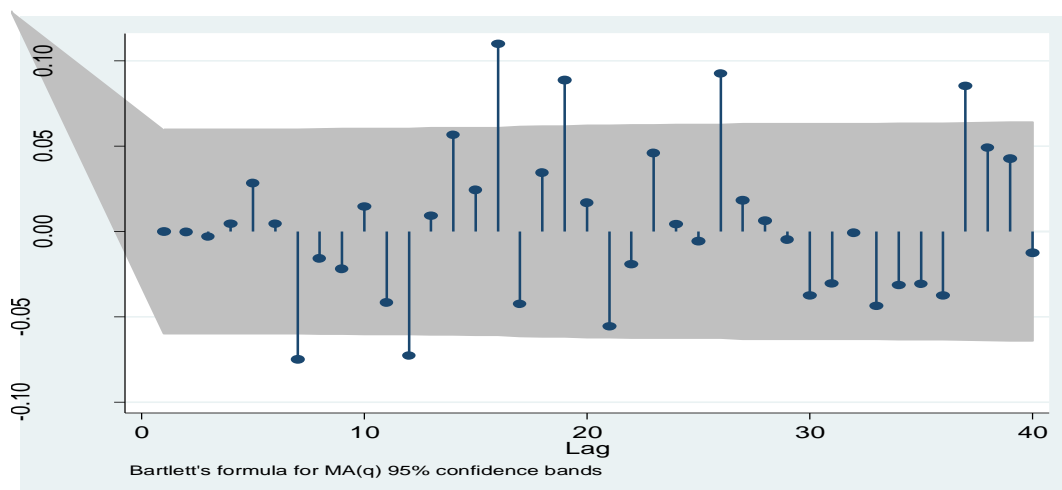
Από το διάγραμμα αυτοσυσχέτισης εύκολα συμπεραίνεται ότι και για τη λωρίδα 2, η χρονοσειρά της ταχύτητας παρουσιάζει «μακρά-μνήμη» (Long-Memory) και επομένως δεν αρκεί να ληφθούν πρώτες διαφορές. Αυτό θα αντιμετωπιστεί και εδώ με τη μέθοδο της κλασματικής ολοκλήρωσης και άρα τα πρότυπα που πρέπει να αναπτυχθούν είναι ARFIMA και ARFIMAX.

Όσον αφορά την εύρεση της τάξης του προτύπου, θα υπολογιστούν, όπως και σε όλα τα πρότυπα, και οι εννέα συνδυασμοί που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Επίσης, όσον αφορά τα ARFIMAX που περιέχουν και εξωγενείς μεταβλητές, θα ακολουθηθούν και οι δύο μέθοδοι προσθήκης των πληροφοριών στα πρότυπα δηλαδή και η μέθοδος της «πύκνωσης» άλλα και η μέθοδος προσθήκης από εμπρός προς τα πίσω. Αυτό σημαίνει ότι συνολικά για τη λωρίδα 2, θα αναπτυχθούν εννέα(9) πρότυπα ARFIMA και εκατόν ογδόντα εννέα(189) πρότυπα ARFIMAX. Από αυτά, θα επιλεγθούν τα πέντε καλύτερα ARFIMA και ARFIMAX, με βάση το κριτήριο BIC, και σε αυτά θα γίνει όπως και προηγουμένως, ο διαγνωστικός έλεγχος, η αξιολόγηση και η σύγκριση ώστε να βρεθεί το βέλτιστο.

Τα πέντε καλύτερα ARFIMA που βρέθηκαν για τη λωρίδα 2 με βάση το παραπάνω κριτήριο ήταν τα: ARFIMA(1,-0.1069,2), ARFIMA(2,-0.0133,2), ARFIMA(3,-0.0183,2), ARFIMA(2,-0.0188,3), ARFIMA(3,-0.1487,3).

Στα πρότυπα αυτά όπως και στα προηγούμενα, πραγματοποιήθηκε ο διαγνωστικός έλεγχος με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης. Για να θεωρηθεί επαρκές ένα

πρότυπο, θα πρέπει οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης του να μην είναι στατιστικά σημαντικοί (δηλαδή να βρίσκονται εκτός της γκριζας περιοχής του διαγράμματος). Ενδεικτικά παρατίθεται ένα από τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων για να φανεί η επάρκεια των προτύπων.

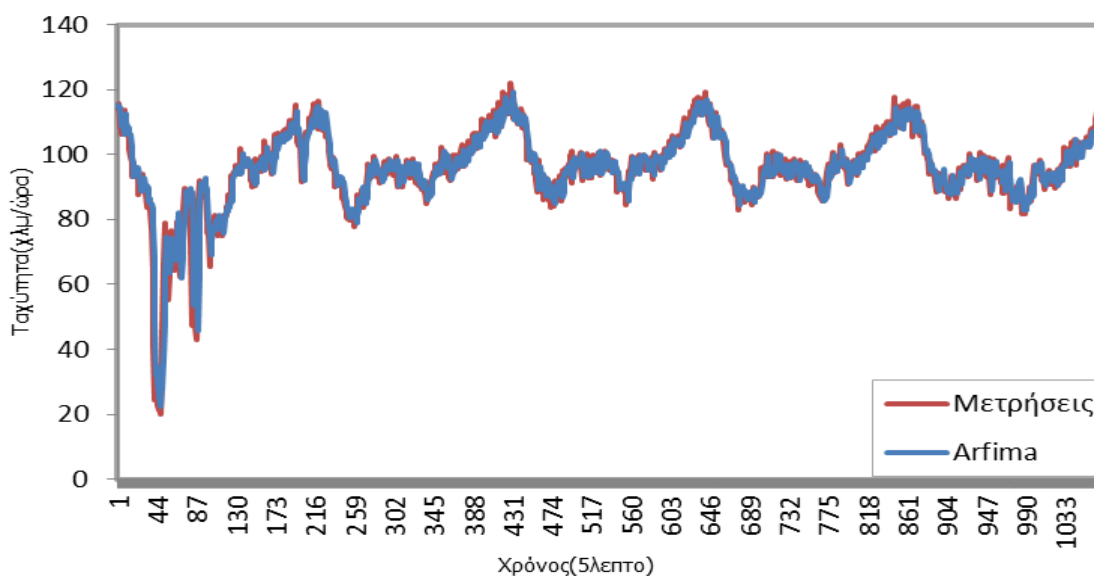


Σχήμα 5.7: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMA(2,-0.0188,3)

Από το παραπάνω διάγραμμα εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι αυτοσυσχετίσεις των καταλοίπων των προτύπων δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επομένως και τα πέντε πρότυπα ARFIMA κρίνονται επαρκή και μπορούν πλέον να περάσουν στη φάση της αξιολόγησης.

Όπως τονίστηκε και παραπάνω, οι δείκτες αξιολόγησης υπολογίστηκαν με βάση τις πραγματικές τιμές του δείγματος και τις τιμές που υπολόγισε το κάθε πρότυπο (πάντοτε αυτές οι τιμές αναφέρονται στις τιμές εντός δείγματος). Να αναφερθεί, ότι παρότι υπολογίστηκαν συνολικά 6 δείκτες αξιολόγησης των προτύπων (RMSE, MSE, MAPE, MPE, MAE και ME) οι δύο δείκτες με βάση τους οποίους τελικά έλαβε χώρα η αξιολόγηση ήταν ο MAPE και ο MAE. Τα αποτελέσματα του υπολογισμού των MAPE, MAE κάθε προτύπου φαίνονται στον Πίνακα 5.2. Με έντονη γραφή έχει γραφεί το βέλτιστο πρότυπο κάθε κατηγορίας ανάλυσης που εδώ είναι το ARFIMA(2,-0.0188,3).

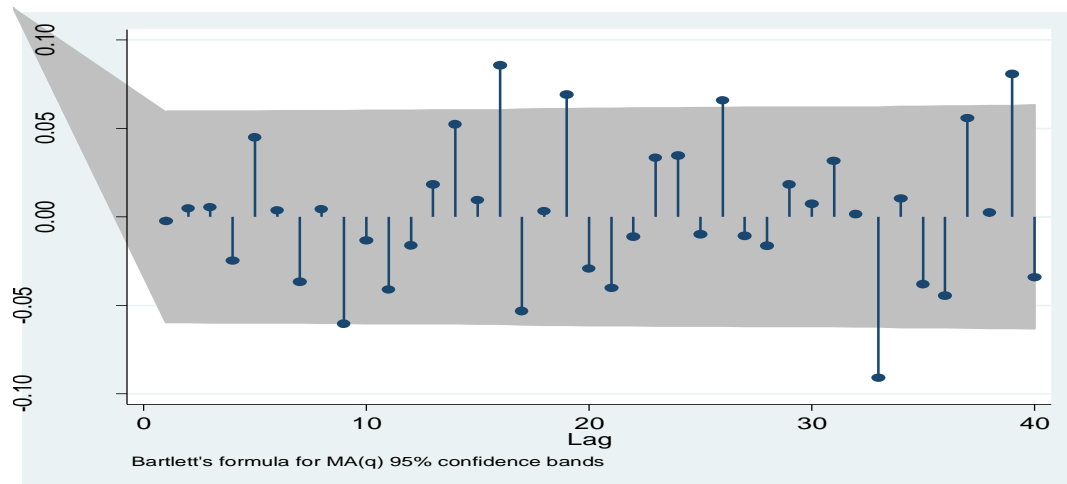
Προκειμένου να γίνει απτή η διαφορά των προβλέψεων του πρότυπου αυτού και των πραγματικών τιμών του δείγματος, δίνεται το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 5.8: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMA(2,-0.0188,3)

Όσον αφορά τα πρότυπα ARFIMAX, τα πέντε καλύτερα που αναπτύχθηκαν για τη λωρίδα 2, ήταν τα: ARFIMAX(3,0.1092,1,5), ARFIMAX(1,0.17,1,5), ARFIMAX(2,0.3102,3,5), ARFIMAX(3,0.1096,2,5) και το ARFIMAX(2,0.1449,1,5), όπου πέντε είναι οι χρονικές υστερήσεις των εξωγενών μεταβλητών. Να σημειωθεί πως οι εξωγενείς μεταβλητές και στα πέντε παραπάνω πρότυπα ήταν η βροχοπτώση, ο φόρτος των φωρατών VDS E 24.20(+0) και VDS E 24.60(+400) και η ταχύτητα του φωρατή VDS E 24.60(+400).

Στα πρότυπα αυτά όπως και στα προηγούμενα, πραγματοποιήθηκε ο διαγνωστικός έλεγχος με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης. Για να θεωρηθεί επαρκές ένα πρότυπο, θα πρέπει οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης του να μην είναι στατιστικά σημαντικοί. Ενδεικτικά παρατίθεται ένα από τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων για να φανεί η επάρκεια των προτύπων.

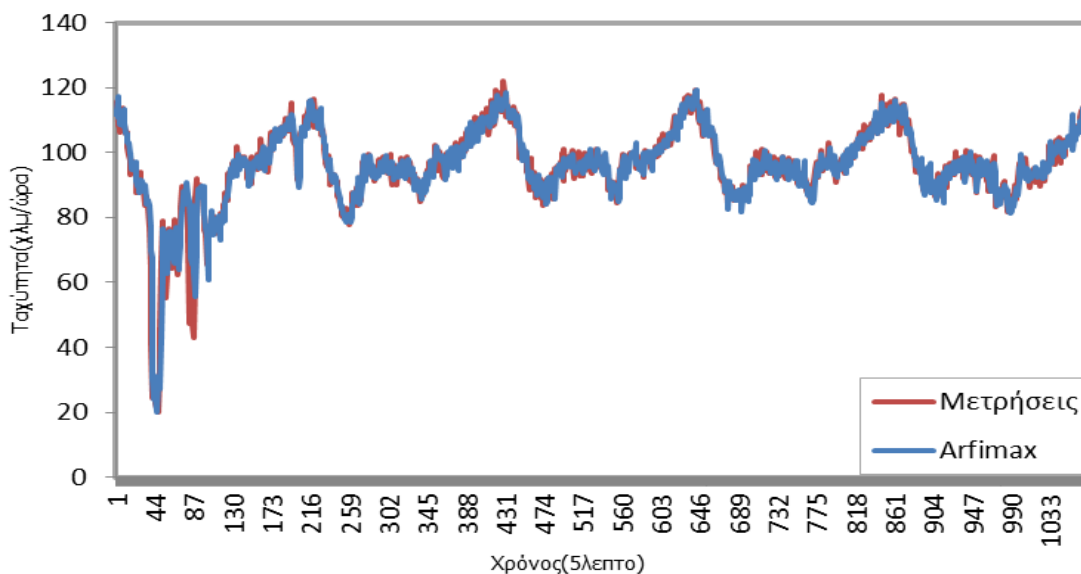


Σχήμα 5.9: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMAX(1,0.17,1,5)

Από το παραπάνω διάγραμμα μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι οι αυτοσυσχετίσεις των καταλοίπων των προτύπων δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επομένως και τα πέντε πρότυπα ARFIMAX κρίνονται επαρκή και μπορούν να περάσουν στη φάση της αξιολόγησης.

Όπως και παραπάνω, υπολογίστηκαν οι δείκτες αξιολόγησης MAPE και MAE με βάση τις πραγματικές τιμές του δείγματος και τις εντός-δείγματος τιμές που υπολόγισε το κάθε πρότυπο. Οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης παρατίθενται στον Πίνακα 5.3 όπου με έντονη γραφή(Bold) έχει γραφεί και εκεί το βέλτιστο πρότυπο με τις μικρότερες τιμές MAPE και MAE. Στην κατηγορία αυτή, το βέλτιστο πρότυπο είναι το ARFIMAX(1,0.17,1,5).

Και εδώ όπως και προηγουμένως, προκειμένου να γίνει απτή η διαφορά των προβλέψεων του πρότυπου αυτού και των πραγματικών τιμών του δείγματος, παρατίθεται το παρακάτω διάγραμμα.

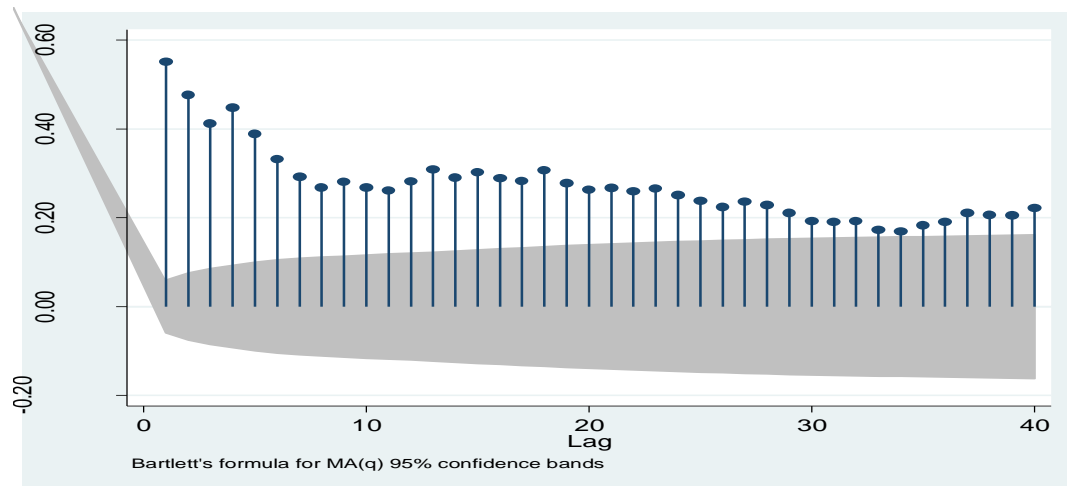


Σχήμα 5.10: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMAX(1,0.17,1,5)

5.1.3 Δεξιά Λωρίδα (Λωρίδα 3)

Όπως και για τις άλλες δύο λωρίδες, έτσι και για τη λωρίδα 3, το πρώτο πράγμα που απαιτείται να γίνει είναι ο έλεγχος στασιμότητας. Αυτό, όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιείται με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι μέσω του επαυξημένου ελέγχου μοναδιαίας ρίζας Dickey-Fuller (Augmented Dickey-Fuller Test, ADF) και του ελέγχου KPSS (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin). Από το αποτέλεσμα του ελέγχου ADF φαίνεται και εδώ να απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση της ύπαρξης μοναδιαίας ρίζας. Επίσης, το αποτέλεσμα του ελέγχου KPSS απορρίπτει και εδώ τη μηδενική υπόθεσή του η οποία θεωρεί ότι η χρονοσειρά είναι στάσιμη. Οι δύο αυτοί έλεγχοι εμφανίζουν τελικά αντίθετα αποτελέσματα τα οποία χρήζουν περισσότερης ανάλυσης.

Λύση στο παραπάνω ζήτημα είναι πιθανό να δώσει ξανά η μορφή του διαγράμματος αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της ταχύτητας στη λωρίδα 3 γι' αυτό και παρατίθενται αμέσως μετά.



Σχήμα 5.11: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της Ταχύτητας για τη λωρίδα 3

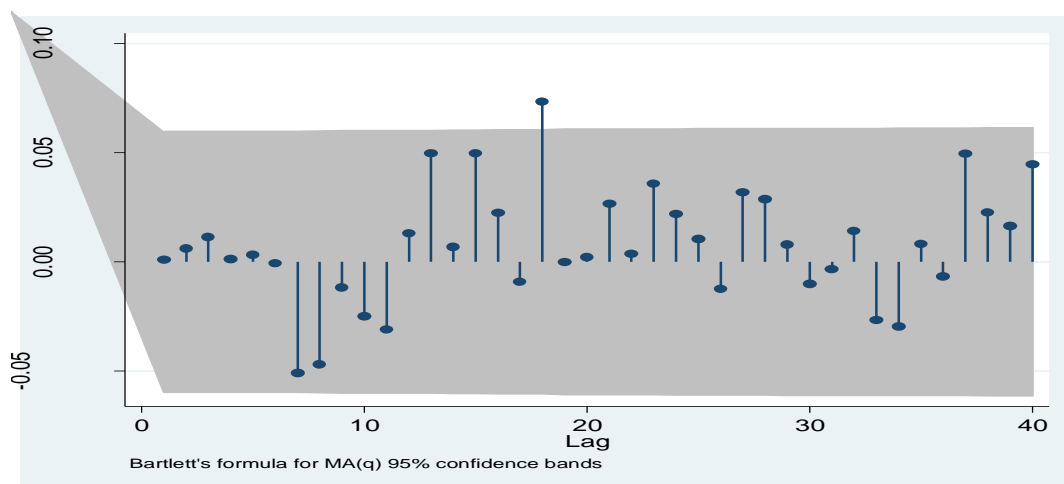
Από το διάγραμμα αυτοσυσχέτισης εύκολα συμπεραίνεται ότι και για τη λωρίδα 3, η χρονοσειρά της ταχύτητας παρουσιάζει «μακρά-μνήμη» (Long-Memory) και επομένως δεν αρκεί να ληφθούν πρώτες διαφορές. Αυτό θα αντιμετωπιστεί και εδώ με τη μέθοδο της κλασματικής ολοκλήρωσης και άρα τα πρότυπα που πρέπει να αναπτυχθούν είναι ARFIMA και ARFIMAX.

Όσον αφορά την εύρεση της τάξης του προτύπου, θα υπολογιστούν, όπως και σε όλα τα πρότυπα, και οι εννέα συνδυασμοί που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Επίσης, όσον αφορά τα ARFIMAX που περιέχουν και εξωγενείς μεταβλητές, θα ακολουθηθούν και οι δύο μέθοδοι προσθήκης των πληροφοριών στα πρότυπα δηλαδή και η μέθοδος της «πύκνωσης» άλλα και η μέθοδος προσθήκης από εμπρός προς τα πίσω. Αυτό σημαίνει ότι συνολικά για τη λωρίδα 3, θα αναπτυχθούν εννέα(9) πρότυπα ARFIMA και εκατόν ογδόντα εννέα(189) πρότυπα ARFIMAX. Από αυτά, θα επιλεγθούν τα πέντε καλύτερα ARFIMA και ARFIMAX, με βάση το κριτήριο BIC, και σε αυτά θα γίνει όπως και προηγουμένως, ο διαγνωστικός έλεγχος, η αξιολόγηση και η σύγκριση ώστε να βρεθεί το βέλτιστο.

Τα πέντε καλύτερα ARFIMA που βρέθηκαν για τη λωρίδα 3 με βάση το παραπάνω κριτήριο ήταν τα: ARFIMA(1,0.3906,1), ARFIMA(2,0.1128,1), ARFIMA(1,0.3793,2), ARFIMA(2,0.3789,2), ARFIMA(3,0.4195,1).

Στα πρότυπα αυτά όπως και στα προηγούμενα, πραγματοποιήθηκε ο διαγνωστικός έλεγχος με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης. Για να θεωρηθεί επαρκές ένα

πρότυπο, θα πρέπει οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης του να μην είναι στατιστικά σημαντικοί (δηλαδή να βρίσκονται εκτός της γκριζας περιοχής του διαγράμματος). Ενδεικτικά παρατίθεται ένα από τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων για να φανεί η επάρκεια των προτύπων.

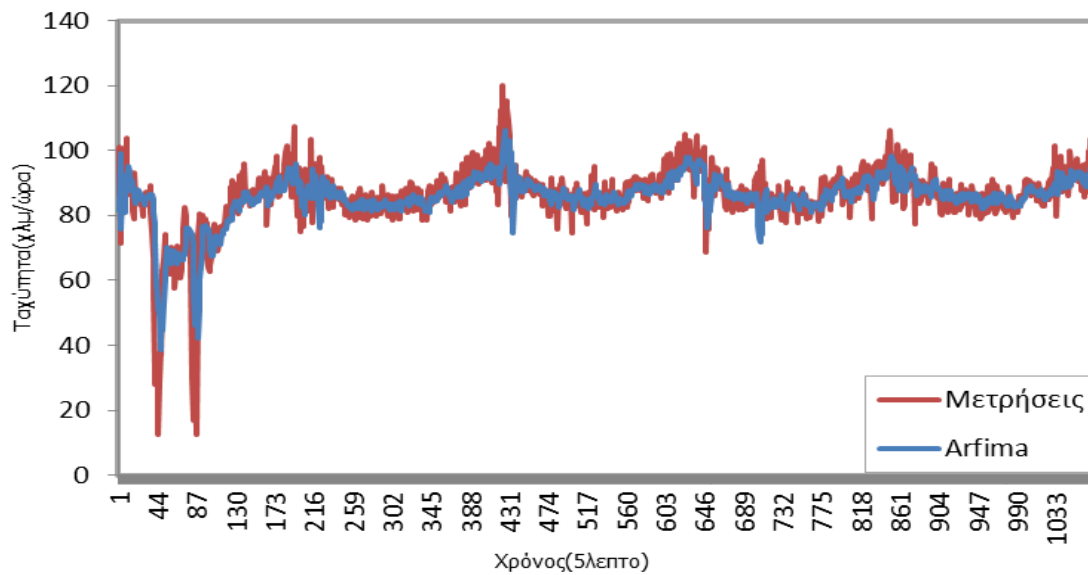


Σχήμα 5.12: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMA(2,0.3789,2)

Από το παραπάνω διάγραμμα εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι αυτοσυσχετίσεις των καταλοίπων των προτύπων δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επομένως και τα πέντε πρότυπα ARFIMA κρίνονται επαρκή και μπορούν πλέον να περάσουν στη φάση της αξιολόγησης.

Όπως τονίστηκε και παραπάνω, οι δείκτες αξιολόγησης υπολογίστηκαν με βάση τις πραγματικές τιμές του δείγματος και τις τιμές που υπολόγισε το κάθε πρότυπο (πάντοτε αυτές οι τιμές αναφέρονται στις τιμές εντός δείγματος). Να αναφερθεί, ότι παρότι υπολογίστηκαν συνολικά 6 δείκτες αξιολόγησης των προτύπων (RMSE, MSE, MAPE, MPE, MAE και ME) οι δύο δείκτες με βάση τους οποίους τελικά έλαβε χώρα η αξιολόγηση ήταν ο MAPE και ο MAE. Τα αποτελέσματα του υπολογισμού των MAPE, MAE κάθε προτύπου φαίνονται στον Πίνακα 5.2. Με έντονη γραφή έχει γραφεί το βέλτιστο πρότυπο κάθε κατηγορίας ανάλυσης που εδώ είναι το ARFIMA(2,0.3789,2).

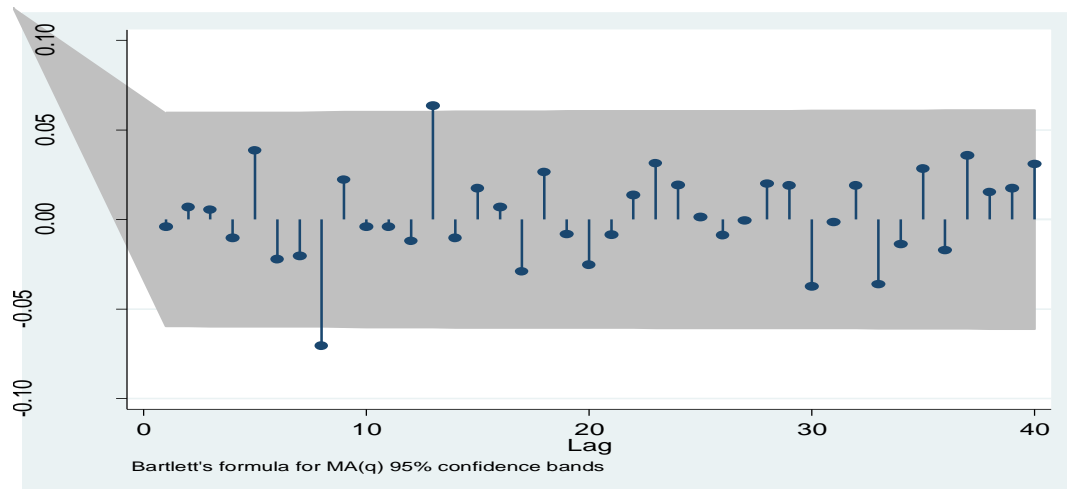
Προκειμένου να γίνει απτή η διαφορά των προβλέψεων του πρότυπου αυτού και των πραγματικών τιμών του δείγματος, δίνεται το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 5.13: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMA(2,0.3789,2)

Όσον αφορά τα πρότυπα ARFIMAX, τα πέντε καλύτερα που αναπτύχθηκαν για τη λωρίδα 3, ήταν τα: $ARFIMAX(3,-0.1496,1,5)$, $ARFIMAX(1,-0.0879,2,5)$, $ARFIMAX(2,0.0398,2,5)$, $ARFIMAX(2,-0.0990,1,5)$ και το $ARFIMAX(1,-0.1348,1,5)$, όπου πέντε είναι οι χρονικές υστερήσεις των εξωγενών μεταβλητών. Να σημειωθεί πως οι εξωγενείς μεταβλητές και στα πέντε παραπάνω πρότυπα ήταν η βροχόπτωση, ο φόρτος των φωρατών VDS E 24.20(+0) και VDS E 24.60(+400) και η ταχύτητα του φωρατή VDS E 24.60(+400).

Στα πρότυπα αυτά όπως και στα προηγούμενα, πραγματοποιήθηκε ο διαγνωστικός έλεγχος με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης. Για να θεωρηθεί επαρκές ένα πρότυπο, θα πρέπει οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης του να μην είναι στατιστικά σημαντικοί. Ενδεικτικά παρατίθεται ένα από τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων για να φανεί η επάρκεια των προτύπων.

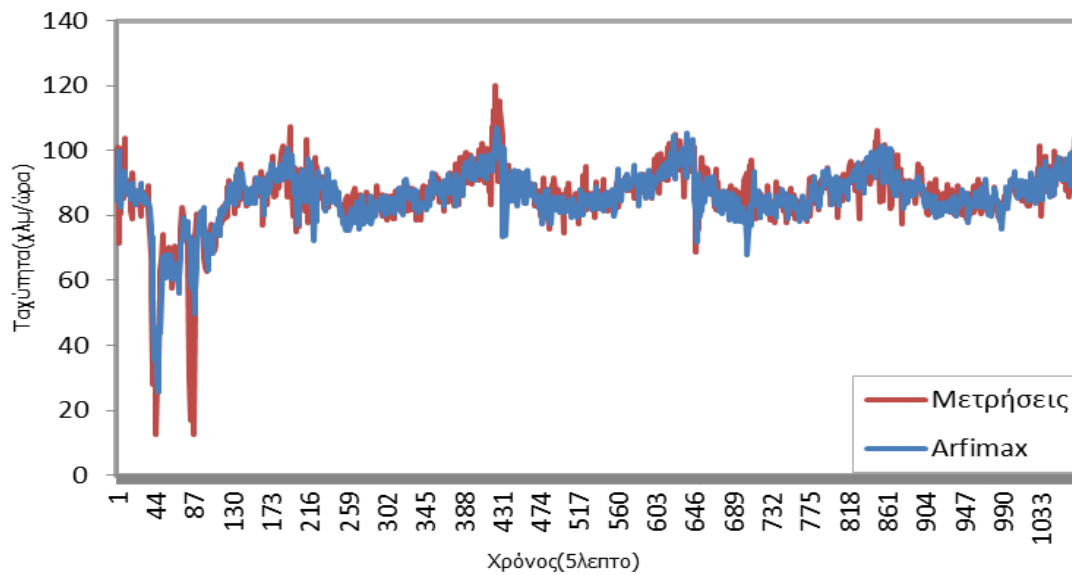


Σχήμα 5.14: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMAX(1,-0.1348,1,5)

Από το παραπάνω διάγραμμα εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι αυτοσυσχετίσεις των καταλοίπων των προτύπων δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επομένως και τα πέντε πρότυπα ARFIMAX κρίνονται επαρκή και μπορούν να περάσουν στη φάση της αξιολόγησης.

Όπως και παραπάνω, υπολογίστηκαν οι δείκτες αξιολόγησης MAPE και MAE με βάση τις πραγματικές τιμές του δείγματος και τις εντός-δείγματος τιμές που υπολόγισε το κάθε πρότυπο. Οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης παρατίθενται στον Πίνακα 5.3 όπου με έντονη γραφή(Bold) έχει γραφεί και εκεί το βέλτιστο πρότυπο με τις μικρότερες τιμές MAPE και MAE. Στην κατηγορία αυτή, το βέλτιστο πρότυπο είναι το ARFIMAX(1,-0.1348,1,5).

Και εδώ όπως και προηγουμένως, προκειμένου να γίνει απτή η διαφορά των προβλέψεων του πρότυπου αυτού και των πραγματικών τιμών του δείγματος, παρατίθεται το παρακάτω διάγραμμα.

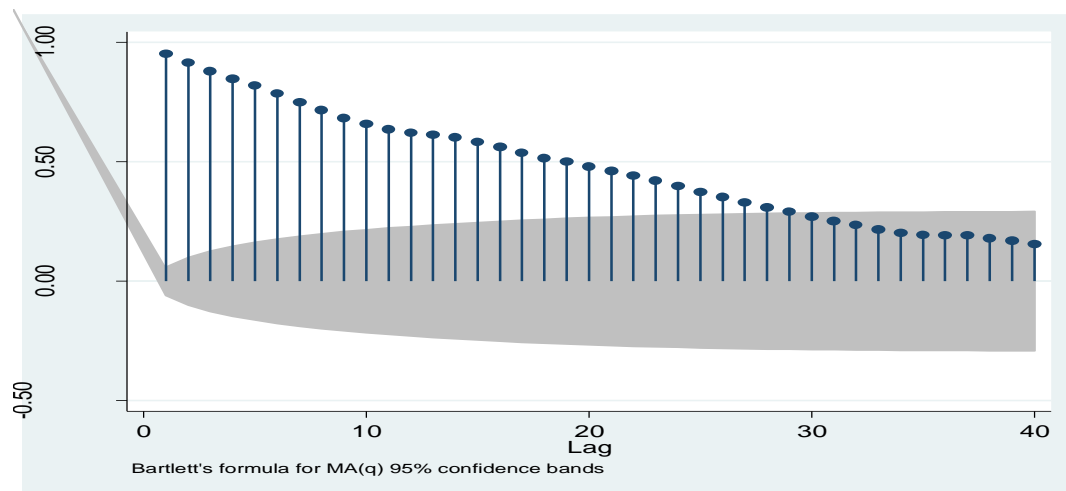


Σχήμα 5.15: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMAX(1,-0.1348,1,5)

5.1.4 Ανάλυση διατομής

Όπως και για την ανάλυση ανά λωρίδα, έτσι και για την ανάλυση διατομής, το πρώτο πράγμα που απαιτείται να γίνει είναι ο έλεγχος στασιμότητας. Αυτό, όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιείται με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι μέσω του επαυξημένου ελέγχου μοναδιαίας ρίζας Dickey-Fuller(Augmented Dickey-Fuller Test, ADF) και του ελέγχου KPSS (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin). Από το αποτέλεσμα του ελέγχου ADF φαίνεται και εδώ να απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση της ύπαρξης μοναδιαίας ρίζας. Επίσης, το αποτέλεσμα του ελέγχου KPSS απορρίπτει και εδώ τη μηδενική υπόθεσή του η οποία θεωρεί ότι η χρονοσειρά είναι στάσιμη. Οι δύο αυτοί έλεγχοι εμφανίζουν τελικά αντίθετα αποτελέσματα τα οποία χρήζουν περισσότερης ανάλυσης.

Λύση στο παραπάνω ζήτημα είναι πιθανό να δώσει ξανά η μορφή του διαγράμματος αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της ταχύτητας γι' αυτό και παρατίθενται αμέσως μετά.



Σχήμα 5.16: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της Ταχύτητας

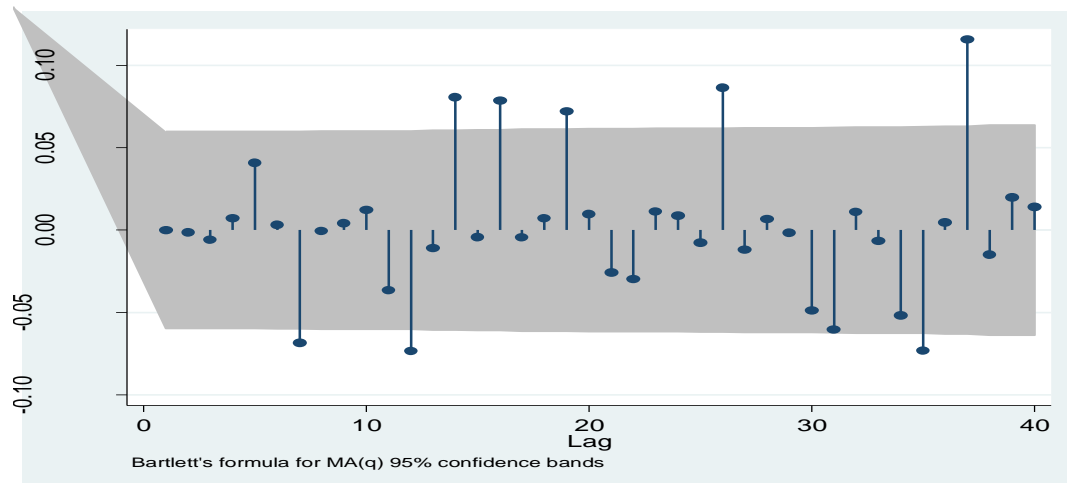
Από το διάγραμμα αυτοσυσχέτισης εύκολα συμπεραίνεται ότι η χρονοσειρά της ταχύτητας παρουσιάζει «μακρά-μνήμη» (Long-Memory) και επομένως δεν αρκεί να ληφθούν πρώτες διαφορές. Αυτό θα αντιμετωπιστεί και εδώ με τη μέθοδο της κλασματικής ολοκλήρωσης και άρα τα πρότυπα που πρέπει να αναπτυχθούν είναι ARFIMA και ARFIMAX.

Όσον αφορά την εύρεση της τάξης του προτύπου, θα υπολογιστούν, όπως και σε όλα τα πρότυπα, και οι εννέα συνδυασμοί που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Επίσης, όσον αφορά τα ARFIMAX που περιέχουν και εξωγενείς μεταβλητές, θα ακολουθηθούν και οι δύο μέθοδοι προσθήκης των πληροφοριών στα πρότυπα δηλαδή και η μέθοδος της «πύκνωσης» άλλα και η μέθοδος προσθήκης από εμπρός προς τα πίσω. Αυτό σημαίνει ότι συνολικά θα αναπτυχθούν εννέα(9) πρότυπα ARFIMA και διακόσια επτά(207) πρότυπα ARFIMAX. Από αυτά, θα επιλεγθούν τα πέντε καλύτερα ARFIMA και ARFIMAX, με βάση το κριτήριο BIC, και σε αυτά θα γίνει όπως και προηγουμένως, ο διαγνωστικός έλεγχος, η αξιολόγηση και η σύγκριση ώστε να βρεθεί το βέλτιστο.

Τα πέντε καλύτερα ARFIMA που βρέθηκαν με βάση το παραπάνω κριτήριο ήταν τα: ARFIMA(1,-0.0475,2), ARFIMA(2,0.0155,2), ARFIMA(3,-0.0182,2), ARFIMA(2,-0.0074,3), ARFIMA(3,0.2019,3).

Στα πρότυπα αυτά όπως και στα προηγούμενα, πραγματοποιήθηκε ο διαγνωστικός έλεγχος με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης. Για να θεωρηθεί επαρκές ένα πρότυπο, θα πρέπει οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης του να μην είναι στατιστικά

σημαντικοί (δηλαδή να βρίσκονται εκτός της γκριζας περιοχής του διαγράμματος). Ενδεικτικά παρατίθεται ένα από τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων για να φανεί η επάρκεια των προτύπων.

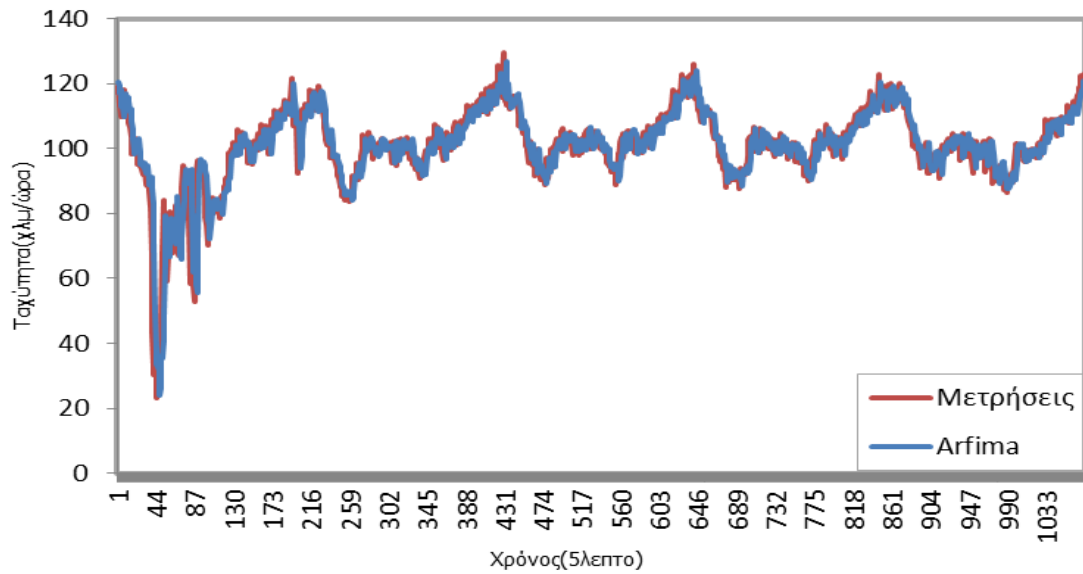


Σχήμα 5.17: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMA(3,0.2019,3)

Από το παραπάνω διάγραμμα εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι αυτοσυσχετίσεις των καταλοίπων των προτύπων δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επομένως και τα πέντε πρότυπα ARFIMA κρίνονται επαρκή και μπορούν πλέον να περάσουν στη φάση της αξιολόγησης.

Όπως τονίστηκε και παραπάνω, οι δείκτες αξιολόγησης υπολογίστηκαν με βάση τις πραγματικές τιμές του δείγματος και τις τιμές που υπολόγισε το κάθε πρότυπο (πάντοτε αυτές οι τιμές αναφέρονται στις τιμές εντός δείγματος). Να αναφερθεί, ότι παρότι υπολογίστηκαν συνολικά 6 δείκτες αξιολόγησης των προτύπων (RMSE, MSE, MAPE, MPE, MAE και ME) οι δύο δείκτες με βάση τους οποίους τελικά έλαβε χώρα η αξιολόγηση ήταν ο MAPE και ο MAE. Τα αποτελέσματα του υπολογισμού των MAPE, MAE κάθε προτύπου φαίνονται στον Πίνακα 5.2. Με έντονη γραφή έχει γραφεί το βέλτιστο πρότυπο κάθε κατηγορίας ανάλυσης που εδώ είναι το ARFIMA(3,0.2019,3).

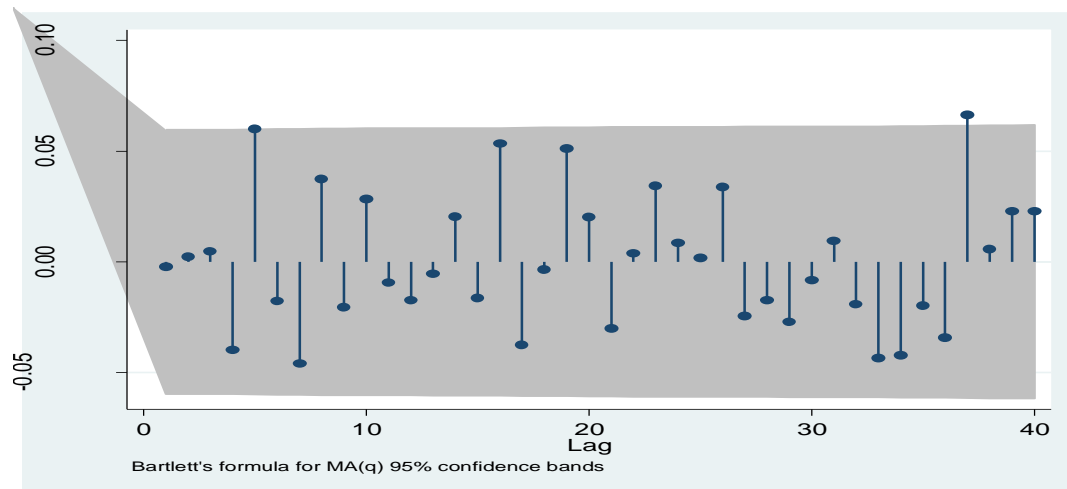
Προκειμένου να γίνει απτή η διαφορά των προβλέψεων του προτύπου αυτού και των πραγματικών τιμών του δείγματος, δίνεται το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 5.18: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMA(3,0.2019,3)

Όσον αφορά τα πρότυπα ARFIMAX, τα πέντε καλύτερα που αναπτύχθηκαν, ήταν τα: $ARFIMAX(1,0.0907,1,5)$, $ARFIMAX(3,0.0349,2,5)$, $ARFIMAX(3,0.0501,1,5)$, $ARFIMAX(3,0.3450,3,5)$ και το $ARFIMAX(2,0.0669,1,5)$, όπου πέντε είναι οι χρονικές υστερήσεις των εξωγενών μεταβλητών. Να σημειωθεί πως οι εξωγενείς μεταβλητές και στα πέντε παραπάνω πρότυπα ήταν η βροχόπτωση, ο φόρτος των φωρατών VDS E 24.20(+0) και VDS E 24.60(+400) και η ταχύτητα του φωρατή VDS E 24.60(+400).

Στα πρότυπα αυτά όπως και στα προηγούμενα, πραγματοποιήθηκε ο διαγνωστικός έλεγχος με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης. Για να θεωρηθεί επαρκές ένα πρότυπο, θα πρέπει οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης του να μην είναι στατιστικά σημαντικοί. Ενδεικτικά παρατίθεται ένα από τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων για να φανεί η επάρκεια των προτύπων.

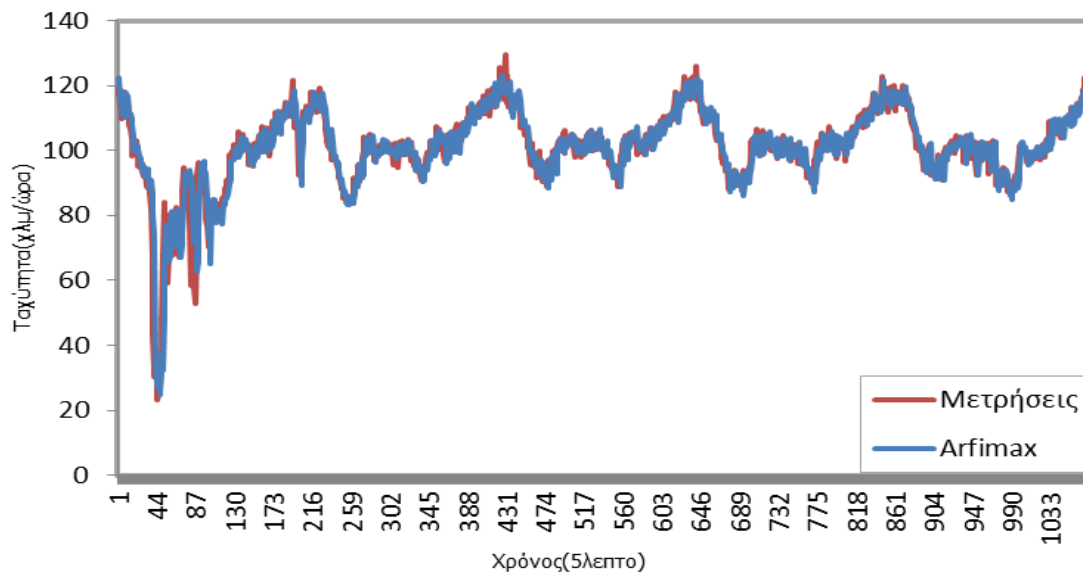


Σχήμα 5.19: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMAX(3,0.3450,3,5)

Από το παραπάνω διάγραμμα μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι οι αυτοσυσχετίσεις των καταλοίπων των προτύπων δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επομένως και τα πέντε πρότυπα ARFIMAX κρίνονται επαρκή και μπορούν να περάσουν στη φάση της αξιολόγησης.

Όπως και παραπάνω, υπολογίστηκαν οι δείκτες αξιολόγησης MAPE και MAE με βάση τις πραγματικές τιμές του δείγματος και τις εντός-δείγματος τιμές που υπολόγισε το κάθε πρότυπο. Οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης παρατίθενται στον Πίνακα 5.3 όπου με έντονη γραφή(Bold) έχει γραφεί και εκεί το βέλτιστο πρότυπο με τις μικρότερες τιμές MAPE και MAE. Στην κατηγορία αυτή, το βέλτιστο πρότυπο είναι το ARFIMAX(3,0.3450,3,5).

Και εδώ όπως και προηγουμένως, προκειμένου να γίνει απτή η διαφορά των προβλέψεων του πρότυπου αυτού και των πραγματικών τιμών του δείγματος, παρατίθεται το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 5.20: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMAX(3,0.3450,3,5)

5.1.5 Πρότυπα VECM

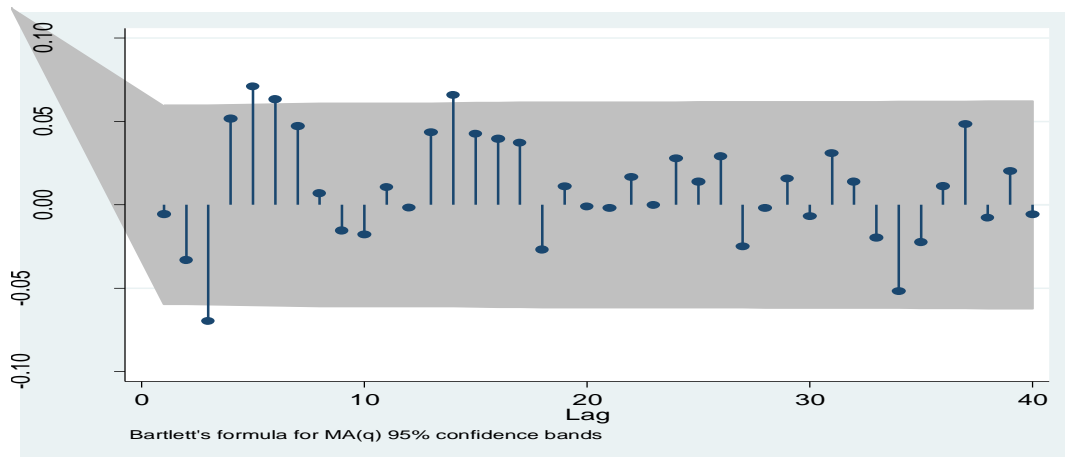
Στο κεφάλαιο 4 αναφέρθηκε ότι, σύμφωνα με τη θεωρία της συνολοκλήρωσης, προκειμένου να είναι 2 ή περισσότερες χρονοσειρές συνολοκληρωμένες, θα πρέπει να είναι του ίδιου βαθμού ολοκλήρωσης (π.χ. $I(1)$). Εδώ όπως αποδείχτηκε παραπάνω, δε συμβαίνει κάτι τέτοιο αφού οι χρονοσειρές των ταχυτήτων των λωρίδων είναι κλασματικά ολοκληρωμένες. Επειδή όμως δεν υπάρχει σαφές μαθηματικό υπόβαθρο των προτύπων VECM και προκειμένου να εξεταστεί η ακρίβεια εκτίμησης του εν λόγω πρότυπου, υποθέτεται χάριν απλότητας ότι οι χρονοσειρές του διανύσματος της ταχύτητας (δηλαδή οι χρονοσειρές των ταχυτήτων ανά λωρίδα) είναι $I(1)$ ολοκληρωμένες ($I(1)$ integrated). Άλλωστε όπως προαναφέρθηκε, αυτό λίγο ξεφεύγει από την πραγματικότητα αφού οι κλασματικά ολοκληρωμένες σειρές μπορεί να μην περιέχουν κάποια μοναδιαία ρίζα αλλά σίγουρα έχουν κάποια ρίζα κοντά στη μονάδα. Αυτό στην παρούσα εργασία επιβεβαιώνεται από την ανίσχυρη απόρριψη του ελέγχου μοναδιαίας ρίζας Dickey-Fuller καθώς και από το γεγονός ότι λαμβάνοντας τις πρώτες διαφορές των χρονοσειρών, οι έλεγχοι στασιμότητας (π.χ. KPSS) δεν απορρίπτονται.

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, δεν χρειάζεται να πραγματοποιηθεί έλεγχος στασιμότητας πριν την εφαρμογή των προτύπων VECM. Τα δύο πρώτα βήματα λοιπόν είναι η διερεύνηση της δυνατότητας συνολοκλήρωσης των μεταβλητών του διανύσματος $V=(V_1, V_2, V_3)$ και η εύρεση του βαθμού συνολοκλήρωσης τους. Τα αποτελέσματα του ελέγχου αυτού δείχνουν ότι οι μεταβλητές V_1, V_2, V_3 είναι δυνατό να συνολοκληρωθούν και ότι ο βαθμός συνολοκλήρωσής τους είναι 2.

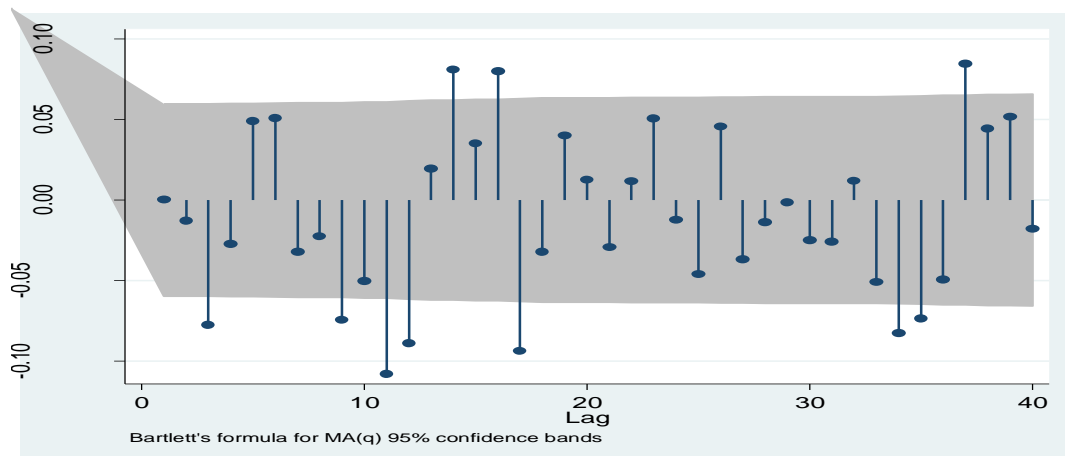
Όσον αφορά την εύρεση της τάξης του προτύπου, θα υπολογιστούν οι συνδυασμοί τάξης του αυτοπαλίνδρομου μέρους από 1 έως 3 και των χρονικών υστερήσεων των μεταβλητών του διανύσματος από 1 έως 5. Από αυτά όσα αναπτυχθούν τελικά (πολλά είναι πιθανό να εκπέσουν σε πρότυπα χαμηλότερου βαθμού λόγω συγγραμμικότητας), θα περάσουν στη φάση του διαγνωστικού ελέγχου, η αξιολόγηση και η σύγκριση ώστε να βρεθεί το βέλτιστο.

Τα έξι καλύτερα πρότυπα VECM που βρέθηκαν ήταν τα εξής: VECM Ar(1) 3 lags, VECM Ar(1) 1 lag, VECM Ar(2) 1 lag, VECM Ar(3) 1 lag, VECM Ar(1) 4 lags και VECM Ar(1) 5 lags, όπου lags οι χρονικές υστερήσεις των μεταβλητών του διανύσματος V .

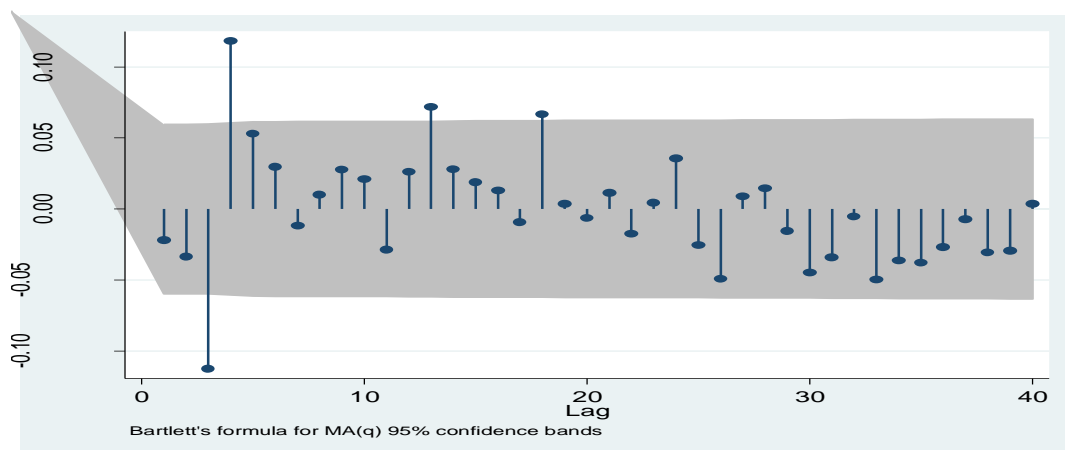
Στα πρότυπα αυτά πραγματοποιήθηκε ο διαγνωστικός έλεγχος με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης. Για να θεωρηθεί επαρκές ένα πρότυπο, θα πρέπει οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης του να μην είναι στατιστικά σημαντικοί. Με βάση το διάγραμμα αυτοσυσχέτισης, αυτό σημαίνει ότι οι τιμές τους δεν θα πρέπει να ξεφεύγουν του διαστήματος εμπιστοσύνης (δηλαδή εκτός της γκριζας περιοχής του διαγράμματος). Ενδεικτικά παρατίθενται, για ένα από τα παραπάνω πρότυπα, τρία διαγράμματα αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων, ένα για κάθε λωρίδα, για να φανεί η επάρκεια των προτύπων.



Σχήμα 5.21: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του VECM Ar(3) 1 lag για τη λωρίδα 1



Σχήμα 5.22: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του VECM Ar(3) 1 lag για τη λωρίδα 2

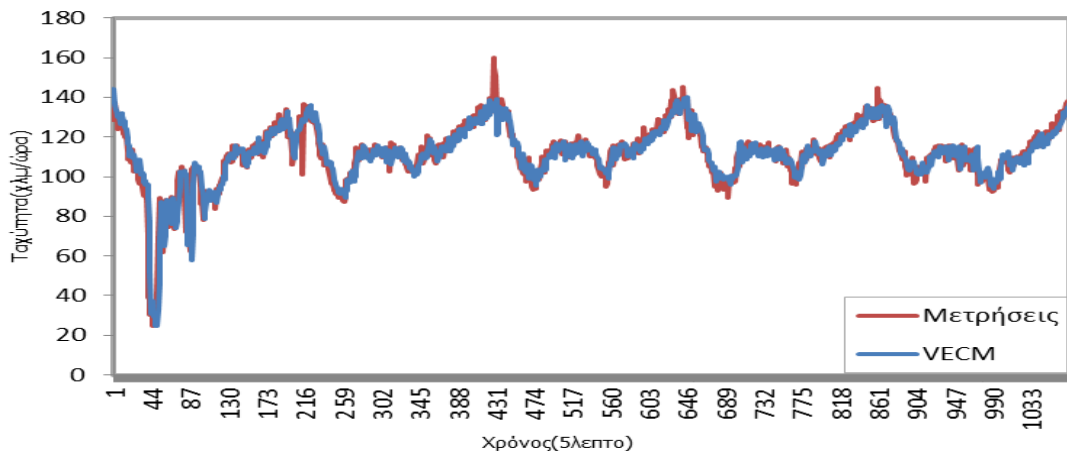


Σχήμα 5.23: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του VECM Ar(3) 1 lag για τη λωρίδα 3

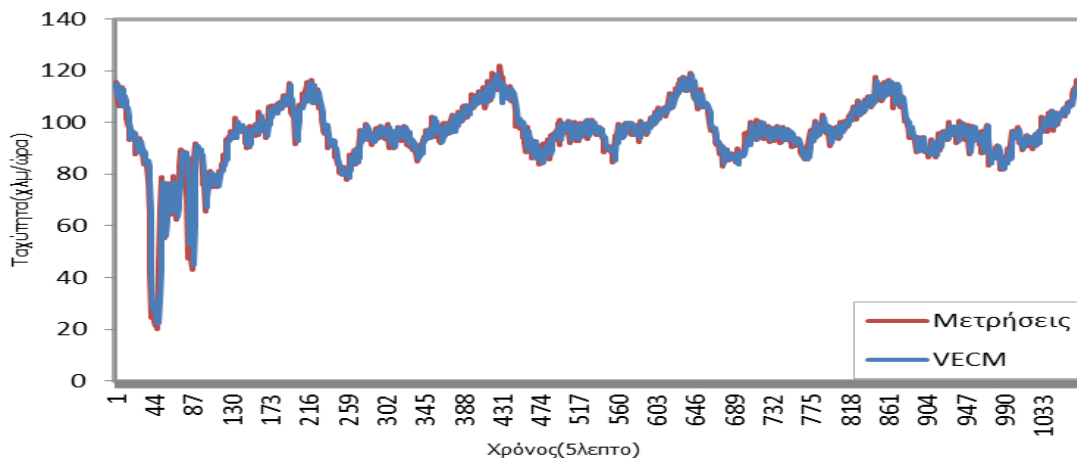
Από τα παραπάνω διαγράμματα εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι αυτοσυσχετίσεις των καταλοίπων των προτύπων δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επομένως και τα έξι πρότυπα VECM κρίνονται επαρκή και μπορούν πλέον να περάσουν στη φάση της αξιολόγησης.

Όπως τονίστηκε και παραπάνω, οι δείκτες αξιολόγησης υπολογίστηκαν με βάση τις πραγματικές τιμές του δείγματος και τις τιμές που υπολόγισε το κάθε πρότυπο (πάντοτε αυτές οι τιμές αναφέρονται στις τιμές εντός δείγματος). Να αναφερθεί, ότι παρότι υπολογίστηκαν συνολικά 6 δείκτες αξιολόγησης των προτύπων (RMSE, MSE, MAPE, MPE, MAE και ME) οι δύο δείκτες με βάση τους οποίους τελικά έλαβε χώρα η αξιολόγηση ήταν ο MAPE και ο MAE. Τα αποτελέσματα του υπολογισμού των MAPE, MAE κάθε προτύπου φαίνονται στον Πίνακα 5.6. Με έντονη γραφή έχει γραφεί το βέλτιστο πρότυπο κάθε κατηγορίας ανάλυσης που εδώ είναι το VECM Ar(3) 1 lag.

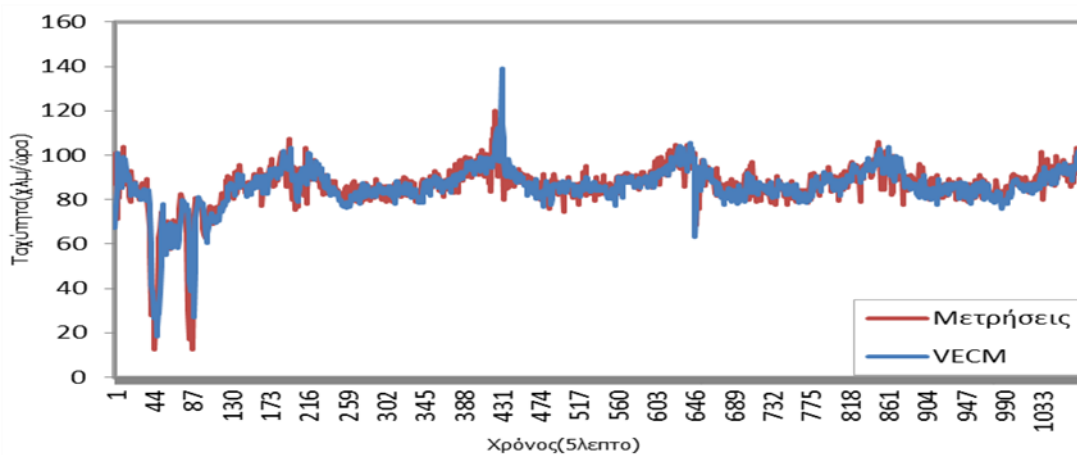
Προκειμένου να γίνει απτή η διαφορά των προβλέψεων του προτύπου αυτού και των πραγματικών τιμών του δείγματος, δίνονται τα παρακάτω τρία διαγράμματα (ένα για κάθε λωρίδα).



Σχήμα 5.24: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο VECM Ar(3) 1 lag για τη λωρίδα 1



Σχήμα 5.25: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο VECM Ar(3) 1 lag για τη λωρίδα 2



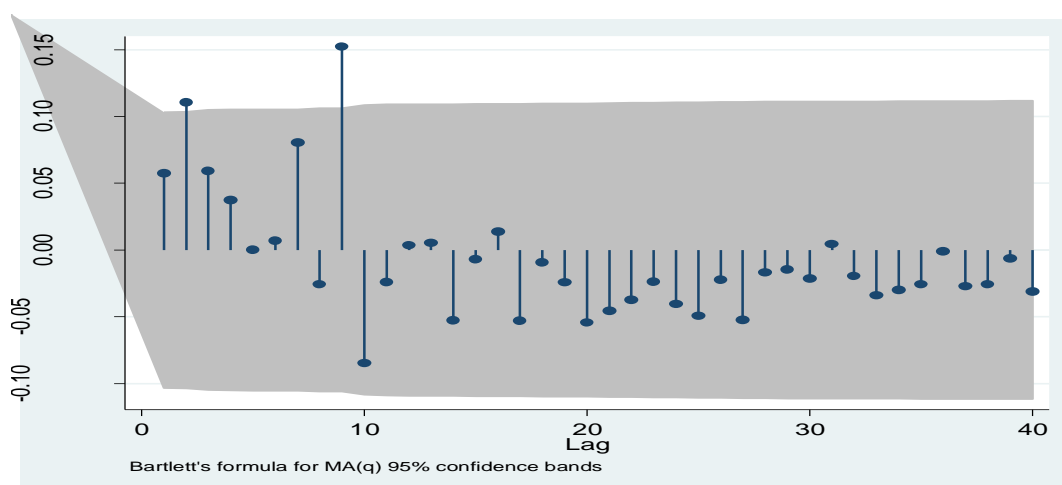
Σχήμα 5.26: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο VECM Ar(3) 1 lag για τη λωρίδα

5.1 Περίοδος 2: 23:00-05:00

5.2.1 Αριστερή Λωρίδα (Λωρίδα 1)

Όπως και στην περίοδο 1 έτσι και στην 2, το πρώτο πράγμα που απαιτείται να γίνει στη λωρίδα 1 είναι έλεγχος στασιμότητας. Αυτό, όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιείται με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι μέσω του επαυξημένου ελέγχου μοναδιαίας ρίζας Dickey-Fuller (Augmented Dickey-Fuller Test, ADF) και του ελέγχου KPSS (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin). Από το αποτέλεσμα του ελέγχου ADF φαίνεται να απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση της ύπαρξης μοναδιαίας ρίζας. Από την άλλη μεριά όμως, το αποτέλεσμα του ελέγχου KPSS δεν απορρίπτει εδώ τη μηδενική υπόθεσή του η οποία θεωρεί ότι η χρονοσειρά είναι στάσιμη. Οι δύο αυτοί αντίθετοι έλεγχοι εμφανίζουν τελικά ίδια αποτελέσματα όποτε και συμπεραίνεται η στασιμότητα της χρονοσειράς.

Το παραπάνω συμπέρασμα μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί και από το διάγραμμα που ακολουθεί το οποίο απεικονίζει τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της ταχύτητας για τη λωρίδα 1.



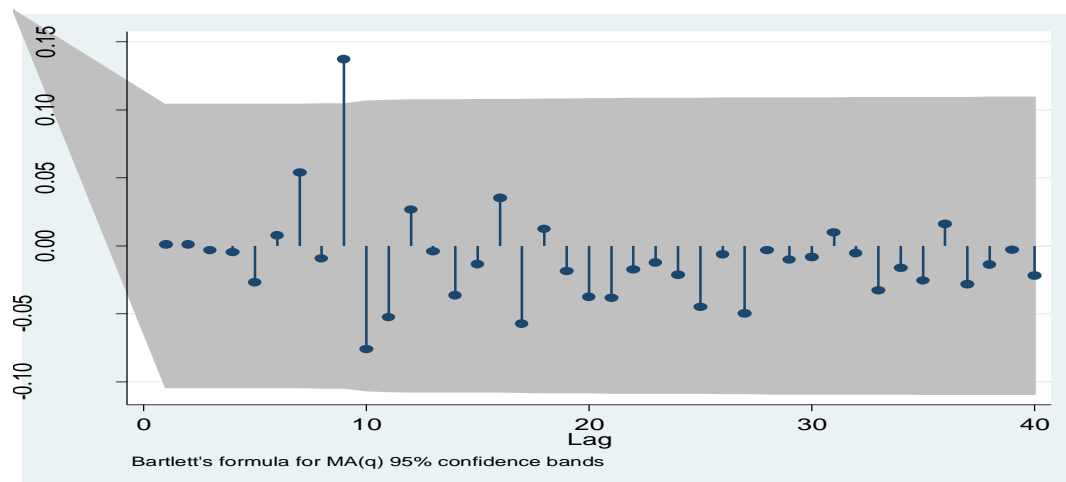
Σχήμα 5.27: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της Ταχύτητας για τη λωρίδα 1

Το γεγονός ότι η χρονοσειρά της ταχύτητας είναι στάσιμη σημαίνει ότι το $d=0$ και άρα τα πρότυπα που θα πρέπει να αναπτυχθούν για την περιγραφή της ταχύτητας είναι ARMA και ARMAX.

Όσον αφορά την εύρεση της τάξης του προτύπου, θα υπολογιστούν, όπως και σε όλα τα πρότυπα, και οι εννέα συνδυασμοί που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Επίσης, όσον αφορά τα ARMAX που περιέχουν και εξωγενείς μεταβλητές, θα ακολουθηθούν και οι δύο μέθοδοι προσθήκης των πληροφοριών στα πρότυπα δηλαδή και η μέθοδος της «πύκνωσης» άλλα και η μέθοδος προσθήκης από εμπρός προς τα πίσω. Αυτό σημαίνει ότι συνολικά θα αναπτυχθούν για τη λωρίδα 1, εννέα(9) πρότυπα ARMA και διακόσια επτά(207) πρότυπα ARMAX. Από αυτά, θα επιλεγθούν τα πέντε καλύτερα ARMA και ARMAX, με βάση το κριτήριο BIC, και σε αυτά θα γίνει ο διαγνωστικός έλεγχος, η αξιολόγηση και η σύγκριση ώστε να βρεθεί το βέλτιστο.

Τα πέντε καλύτερα ARMA που βρέθηκαν για τη λωρίδα 1 με βάση το παραπάνω κριτήριο ήταν τα: ARMA(1,1), ARMA(2,1), ARMA(1,2), ARMA(3,1), ARMA(2,3).

Στα πρότυπα αυτά πραγματοποιήθηκε ο διαγνωστικός έλεγχος με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης. Για να θεωρηθεί επαρκές ένα πρότυπο, θα πρέπει οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης του να μην είναι στατιστικά σημαντικοί. Με βάση το διάγραμμα αυτοσυσχέτισης, αυτό σημαίνει ότι οι τιμές τους δεν θα πρέπει να ξεφεύγουν του διαστήματος εμπιστοσύνης (δηλαδή εκτός της γκριζας περιοχής του διαγράμματος). Ενδεικτικά παρατίθεται ένα από τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων για να φανεί η επάρκεια των προτύπων.

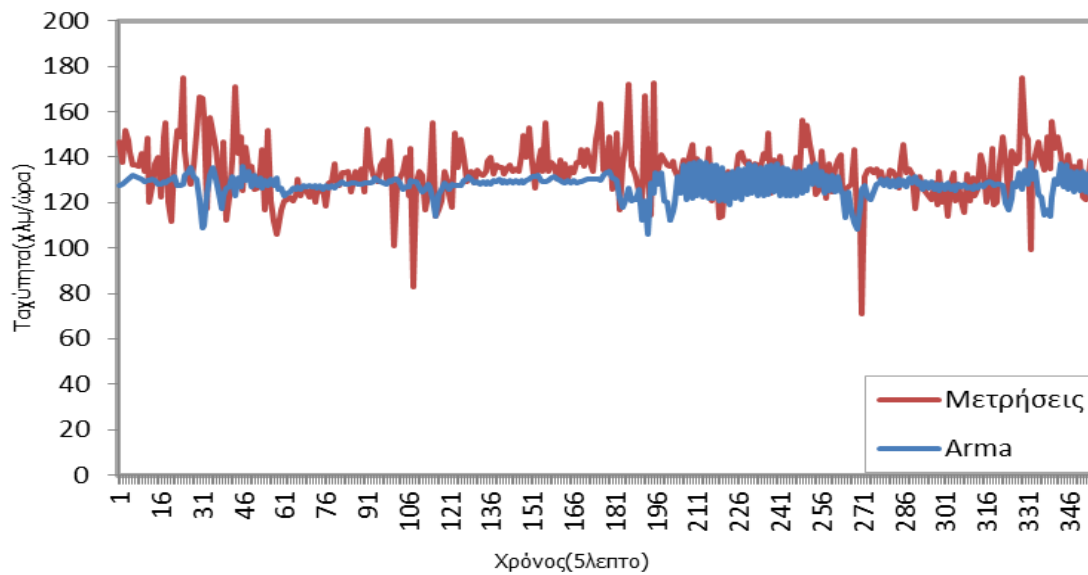


Σχήμα 5.28: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARMA(3,1)

Από το παραπάνω διάγραμμα εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι αυτοσυσχετίσεις των καταλοίπων των προτύπων δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επομένως και τα πέντε πρότυπα ARMA κρίνονται επαρκή και μπορούν πλέον να περάσουν στη φάση της αξιολόγησης.

Όπως τονίστηκε και παραπάνω, οι δείκτες αξιολόγησης υπολογίστηκαν με βάση τις πραγματικές τιμές του δείγματος και τις τιμές που υπολόγισε το κάθε πρότυπο (πάντοτε αυτές οι τιμές αναφέρονται στις τιμές εντός δείγματος). Να αναφερθεί, ότι παρότι υπολογίστηκαν συνολικά 6 δείκτες αξιολόγησης των προτύπων (RMSE, MSE, MAPE, MPE, MAE και ME) οι δύο δείκτες με βάση τους οποίους τελικά έλαβε χώρα η αξιολόγηση ήταν ο MAPE και ο MAE. Τα αποτελέσματα του υπολογισμού των MAPE, MAE κάθε προτύπου φαίνονται στον Πίνακα 5.4. Με έντονη γραφή έχει γραφεί το βέλτιστο πρότυπο κάθε κατηγορίας ανάλυσης που εδώ είναι το ARMA(3,1).

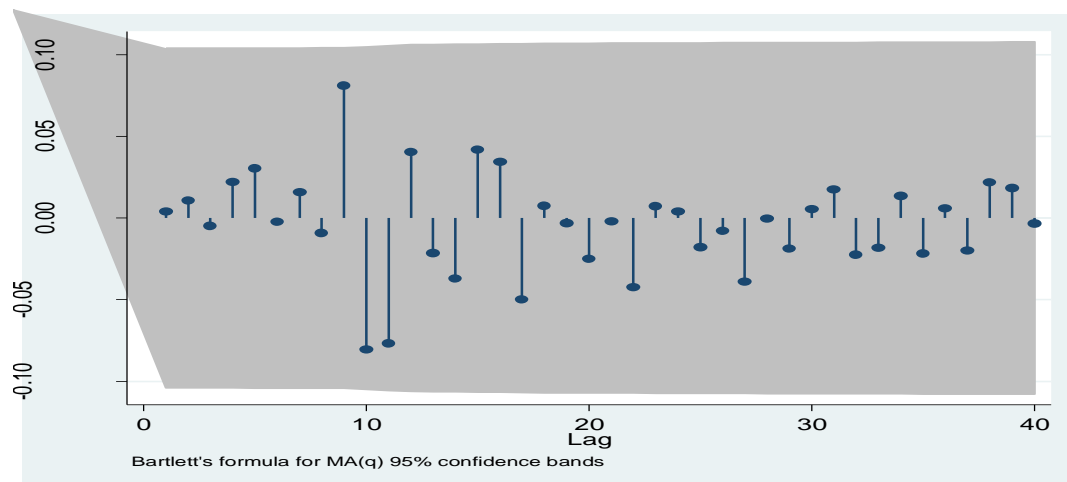
Προκειμένου να γίνει απτή η διαφορά των προβλέψεων του πρότυπου αυτού και των πραγματικών τιμών του δείγματος, δίνεται το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 5.29: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARMA(3,1)

Όσον αφορά τα πρότυπα ARMAX, τα πέντε καλύτερα που αναπτύχθηκαν για τη λωρίδα 1, ήταν τα: ARMAX(3,2,5), ARMAX(1,2,5), ARMAX(3,3,5), ARMAX(1,1,5) και το ARMAX(2,1,5), όπου πέντε είναι οι χρονικές υστερήσεις των εξωγενών μεταβλητών. Να σημειωθεί πως οι εξωγενείς μεταβλητές και στα πέντε παραπάνω πρότυπα ήταν η βροχόπτωση, ο φόρτος των φωρατών VDS E 24.20(+0) και VDS E 24.60(+400) και η ταχύτητα του φωρατή VDS E 24.60(+400).

Στα πρότυπα αυτά όπως και στα προηγούμενα, πραγματοποιήθηκε ο διαγνωστικός έλεγχος με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης. Για να θεωρηθεί επαρκές ένα πρότυπο, θα πρέπει οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης του να μην είναι στατιστικά σημαντικοί. Ενδεικτικά παρατίθεται ένα από τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων για να φανεί η επάρκεια των προτύπων.

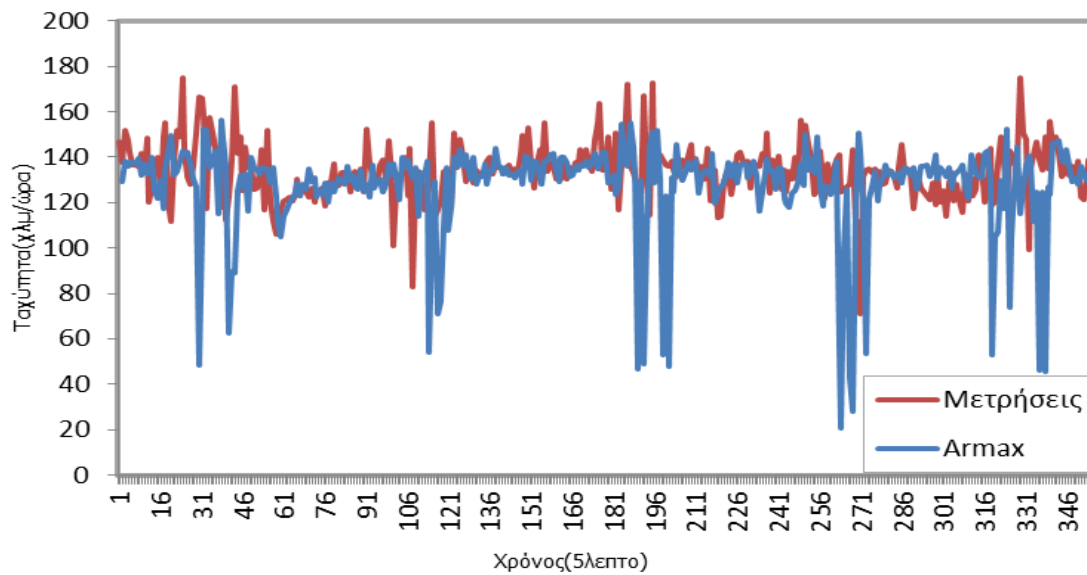


Σχήμα 5.30: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARMAX(1,1,5)

Από το παραπάνω διάγραμμα εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι αυτοσυσχετίσεις των καταλοίπων των προτύπων δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επομένως και τα πέντε πρότυπα ARMAX κρίνονται επαρκή και μπορούν να περάσουν στη φάση της αξιολόγησης.

Όπως και παραπάνω, υπολογίστηκαν οι δείκτες αξιολόγησης MAPE και MAE με βάση τις πραγματικές τιμές του δείγματος και τις εντός-δείγματος τιμές που υπολόγισε το κάθε πρότυπο. Οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης παρατίθενται στον Πίνακα 5.5 όπου με έντονη γραφή(Bold) έχει γραφεί και εκεί το βέλτιστο πρότυπο με τις μικρότερες τιμές MAPE και MAE. Στην κατηγορία αυτή, το βέλτιστο πρότυπο είναι το ARMAX(1,1,5).

Και εδώ όπως και προηγουμένως, προκειμένου να γίνει απτή η διαφορά των προβλέψεων του πρότυπου αυτού και των πραγματικών τιμών του δείγματος, παρατίθεται το παρακάτω διάγραμμα.

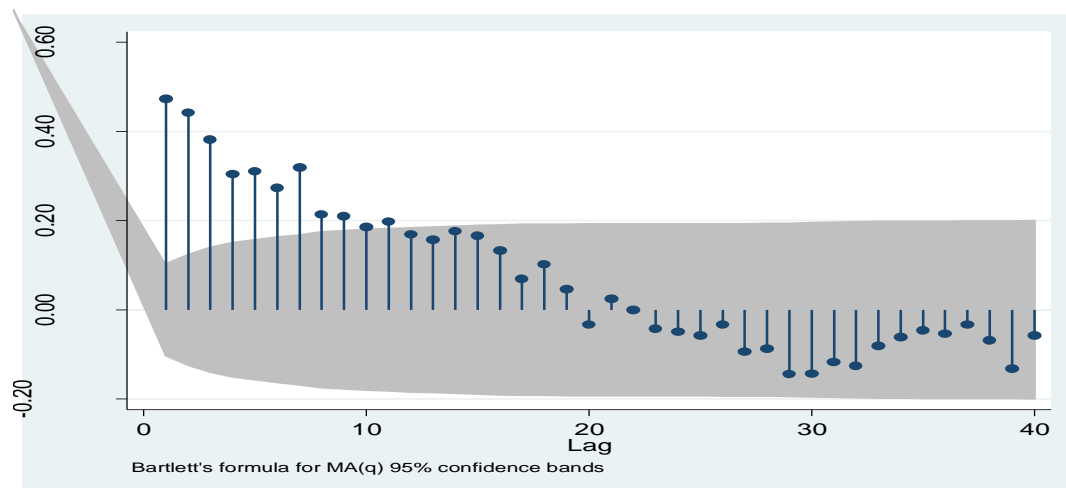


Σχήμα 5.31: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARMAX(1,1,5)

5.2.2 Μεσαία Λωρίδα (Λωρίδα 2)

Όπως και για τη λωρίδα 1 έτσι και για τη λωρίδα 2, το πρώτο πράγμα που απαιτείται να γίνει είναι ο έλεγχος στασιμότητας. Αυτό, όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιείται με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι μέσω του επαυξημένου ελέγχου μοναδιαίας ρίζας Dickey-Fuller(Augmented Dickey-Fuller Test, ADF) και του ελέγχου KPSS (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin). Από το αποτέλεσμα του ελέγχου ADF φαίνεται και εδώ να απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση της ύπαρξης μοναδιαίας ρίζας. Επίσης, το αποτέλεσμα του ελέγχου KPSS απορρίπτει και εδώ τη μηδενική υπόθεσή του η οποία θεωρεί ότι η χρονοσειρά είναι στάσιμη. Οι δύο αυτοί έλεγχοι εμφανίζουν τελικά αντίθετα αποτελέσματα τα οποία χρήζουν περισσότερης ανάλυσης.

Λύση στο παραπάνω ζήτημα είναι πιθανό να δώσει ξανά η μορφή του διαγράμματος αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της ταχύτητας στη λωρίδα 2 γι' αυτό και παρατίθενται αμέσως μετά.



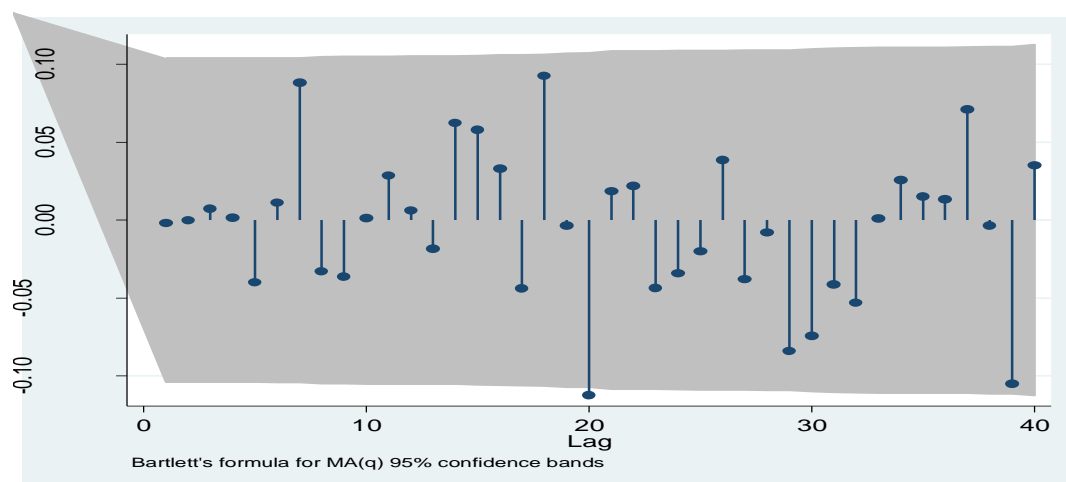
Σχήμα 5.32: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της Ταχύτητας για την λωρίδα 2

Από το διάγραμμα αυτοσυσχέτισης εύκολα συμπεραίνεται ότι και για τη λωρίδα 2, η χρονοσειρά της ταχύτητας παρουσιάζει «μακρά-μνήμη» (Long-Memory) και επομένως δεν αρκεί να ληφθούν πρώτες διαφορές. Αυτό θα αντιμετωπιστεί και εδώ με τη μέθοδο της κλασματικής ολοκλήρωσης και άρα τα πρότυπα που πρέπει να αναπτυχθούν είναι ARFIMA και ARFIMAX.

Όσον αφορά την εύρεση της τάξης του προτύπου, θα υπολογιστούν, όπως και σε όλα τα πρότυπα, και οι εννέα συνδυασμοί που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Επίσης, όσον αφορά τα ARFIMAX που περιέχουν και εξωγενείς μεταβλητές, θα ακολουθηθούν και οι δύο μέθοδοι προσθήκης των πληροφοριών στα πρότυπα δηλαδή και η μέθοδος της «πύκνωσης» άλλα και η μέθοδος προσθήκης από εμπρός προς τα πίσω. Αυτό σημαίνει ότι συνολικά για τη λωρίδα 2, θα αναπτυχθούν εννέα(9) πρότυπα ARFIMA και εκατόν ογδόντα εννέα(189) πρότυπα ARFIMAX. Από αυτά, θα επιλεγθούν τα πέντε καλύτερα ARFIMA και ARFIMAX, με βάση το κριτήριο BIC, και σε αυτά θα γίνει όπως και προηγουμένως, ο διαγνωστικός έλεγχος, η αξιολόγηση και η σύγκριση ώστε να βρεθεί το βέλτιστο.

Τα πέντε καλύτερα ARFIMA που βρέθηκαν για τη λωρίδα 2 με βάση το παραπάνω κριτήριο ήταν τα: ARFIMA(1,-0.4402,1), ARFIMA(2,-0.2446,1), ARFIMA(1,-0.2901,2), ARFIMA(2,-0.2685,2), ARFIMA(3,-0.2114,1).

Στα πρότυπα αυτά όπως και στα προηγούμενα, πραγματοποιήθηκε ο διαγνωστικός έλεγχος με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης. Για να θεωρηθεί επαρκές ένα πρότυπο, θα πρέπει οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης του να μην είναι στατιστικά σημαντικοί (δηλαδή να βρίσκονται εκτός της γκριζας περιοχής του διαγράμματος). Ενδεικτικά παρατίθεται ένα από τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων για να φανεί η επάρκεια των προτύπων.

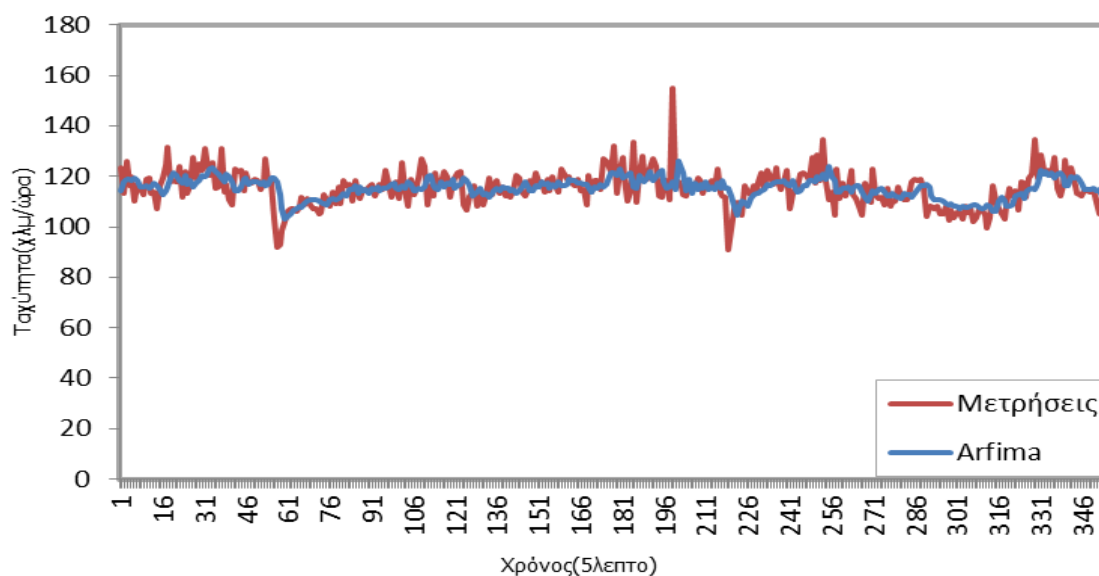


Σχήμα 5.33: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMA(2,-0.2685,2)

Από το παραπάνω διάγραμμα εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι αυτοσυσχετίσεις των καταλοίπων των προτύπων δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επομένως και τα πέντε πρότυπα ARFIMA κρίνονται επαρκή και μπορούν πλέον να περάσουν στη φάση της αξιολόγησης.

Όπως τονίστηκε και παραπάνω, οι δείκτες αξιολόγησης υπολογίστηκαν με βάση τις πραγματικές τιμές του δείγματος και τις τιμές που υπολόγισε το κάθε πρότυπο (πάντοτε αυτές οι τιμές αναφέρονται στις τιμές εντός δείγματος). Να αναφερθεί, ότι παρότι υπολογίστηκαν συνολικά 6 δείκτες αξιολόγησης των προτύπων (RMSE, MSE, MAPE, MPE, MAE και ME) οι δύο δείκτες με βάση τους οποίους τελικά έλαβε χώρα η αξιολόγηση ήταν ο MAPE και ο MAE. Τα αποτελέσματα του υπολογισμού των MAPE, MAE κάθε προτύπου φαίνονται στον Πίνακα 5.4. Με έντονη γραφή έχει γραφεί το βέλτιστο πρότυπο κάθε κατηγορίας ανάλυσης που εδώ είναι το ARFIMA(2,-0.2685,2).

Προκειμένου να γίνει απτή η διαφορά των προβλέψεων του πρότυπου αυτού και των πραγματικών τιμών του δείγματος, δίνεται το παρακάτω διάγραμμα.

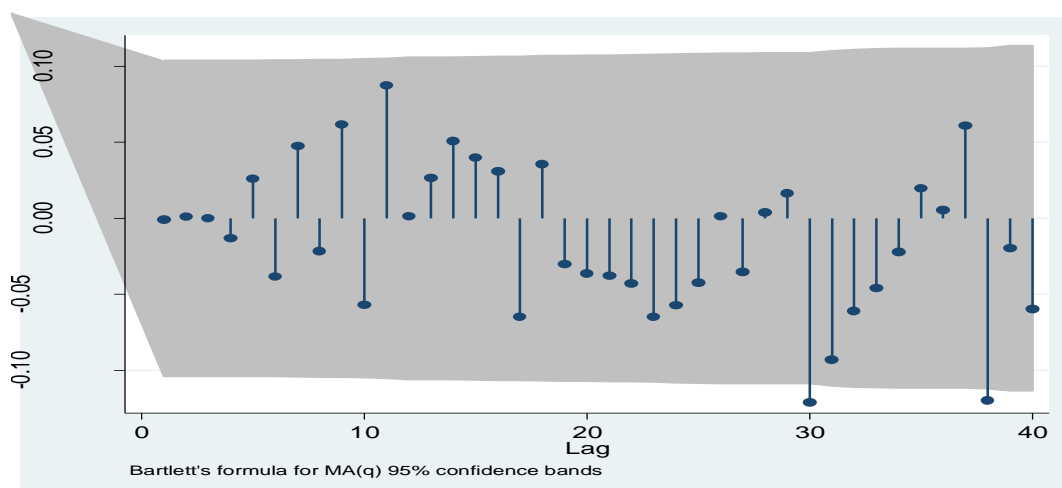


Σχήμα 5.34: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMA(2,-0.2685,2)

Όσον αφορά τα πρότυπα ARFIMAX, τα πέντε καλύτερα που αναπτύχθηκαν για τη λωρίδα 2, ήταν τα: ARFIMAX(1,0.2219,1,5), ARFIMAX(1,0.1867,1,5), ARFIMAX(2,0.2074,1,5), ARFIMAX(3,-0.4957,1,5), το ARFIMAX(2,-0.3693,1,5) και το ARFIMAX(2,-0.4802,1,5) όπου πέντε είναι οι χρονικές υστερήσεις των εξωγενών μεταβλητών. Να σημειωθεί πως οι εξωγενείς μεταβλητές και στα πέντε παραπάνω πρότυπα ήταν η βροχόπτωση, στο πρώτο ο φόρτος των φωρατών 0 και +8800 και η ταχύτητα του φωρατή +8800, στο δεύτερο και στο τρίτο ο φόρτος των φωρατών 0,+400 και +1000 και η ταχύτητα των φωρατών +400 και +1000, στο τέταρτο και στο έκτο ο φόρτος των φωρατών 0,+400,+1000,+1800,+2500 και +3600 και η ταχύτητα των φωρατών +400,+1000,+1800,+2500 και +3600 και στο πέμπτο πρότυπο ο φόρτος των φωρατών 0,+400,+1000 και +1800 και η ταχύτητα των φωρατών +400,+1000 και +1800.

Στα πρότυπα αυτά όπως και στα προηγούμενα, πραγματοποιήθηκε ο διαγνωστικός έλεγχος με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης. Για να θεωρηθεί επαρκές ένα πρότυπο, θα πρέπει οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης του να μην είναι στατιστικά

σημαντικοί. Ενδεικτικά παρατίθεται ένα από τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων για να φανεί η επάρκεια των προτύπων.

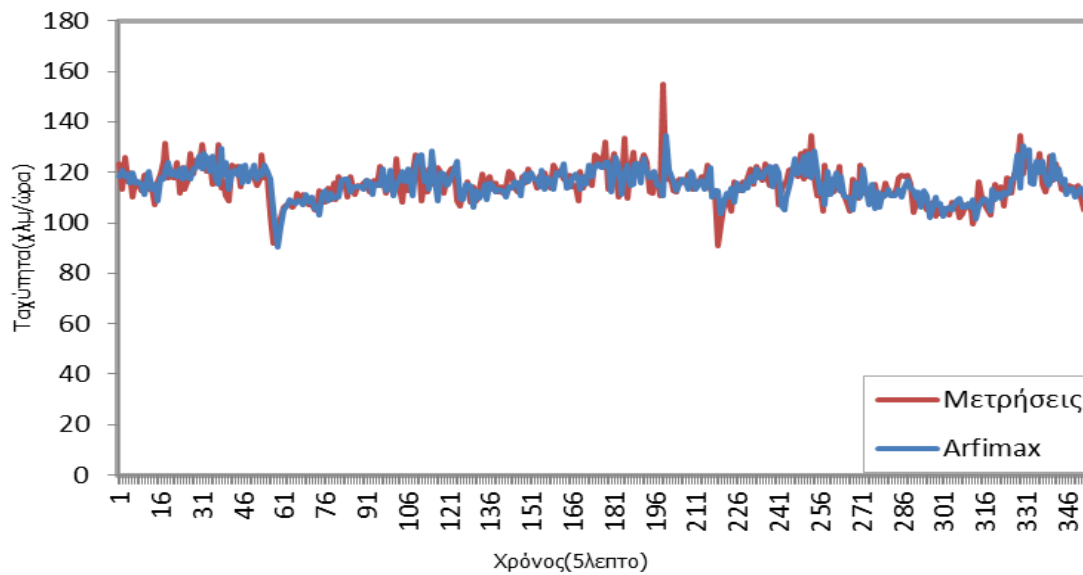


Σχήμα 5.35: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMAX(3,-0.4957,1,5)

Από το παραπάνω διάγραμμα μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι οι αυτοσυσχετίσεις των καταλοίπων των προτύπων δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επομένως και τα πέντε πρότυπα ARFIMAX κρίνονται επαρκή και μπορούν να περάσουν στη φάση της αξιολόγησης.

Όπως και παραπάνω, υπολογίστηκαν οι δείκτες αξιολόγησης MAPE και MAE με βάση τις πραγματικές τιμές του δείγματος και τις εντός-δείγματος τιμές που υπολόγισε το κάθε πρότυπο. Οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης παρατίθενται στον Πίνακα 5.5 όπου με έντονη γραφή(Bold) έχει γραφεί και εκεί το βέλτιστο πρότυπο με τις μικρότερες τιμές MAPE και MAE. Στην κατηγορία αυτή, το βέλτιστο πρότυπο είναι το ARFIMAX(3,-0.4957,1,5) με εξωγενείς μεταβλητές τη βροχόπτωση, την ταχύτητα των φωρατών +400,+1000,+1800,+2500 και +3600 και τον φόρτο των φωρατών 0,+400,+1000,+1800,+2500 και +3600.

Και εδώ όπως και προηγουμένως, προκειμένου να γίνει απτή η διαφορά των προβλέψεων του πρότυπου αυτού και των πραγματικών τιμών του δείγματος, παρατίθεται το παρακάτω διάγραμμα.

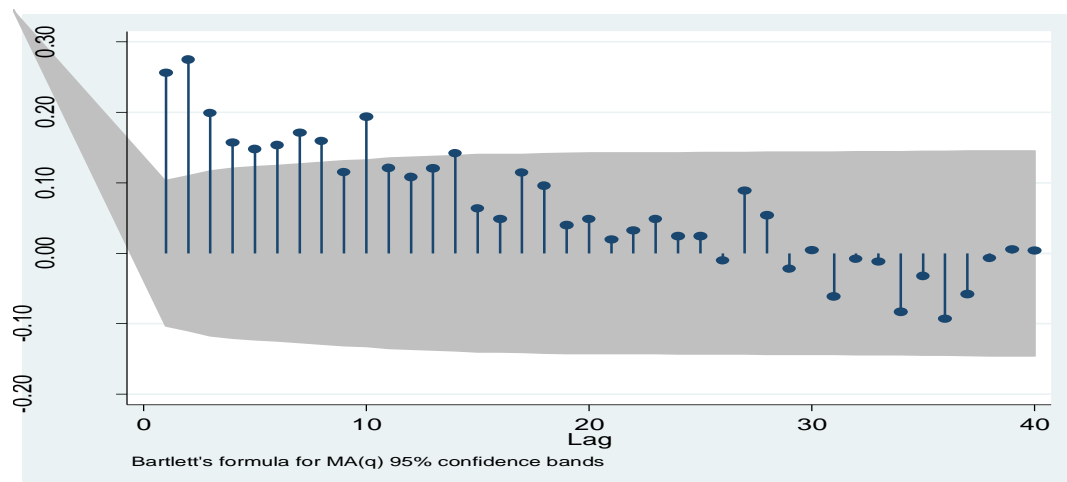


Σχήμα 5.36: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMAX(3,-0.4957,1,5)

5.2.3 Δεξιά Λωρίδα (Λωρίδα 3)

Όπως και για τις άλλες δύο λωρίδες, έτσι και για τη λωρίδα 3, το πρώτο πράγμα που απαιτείται να γίνει είναι ο έλεγχος στασιμότητας. Αυτό, όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιείται με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι μέσω του επαυξημένου ελέγχου μοναδιαίας ρίζας Dickey-Fuller(Augmented Dickey-Fuller Test, ADF) και του ελέγχου KPSS (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin). Από το αποτέλεσμα του ελέγχου ADF φαίνεται και εδώ να απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση της ύπαρξης μοναδιαίας ρίζας. Επίσης, το αποτέλεσμα του ελέγχου KPSS απορρίπτει και εδώ τη μηδενική υπόθεσή του η οποία θεωρεί ότι η χρονοσειρά είναι στάσιμη. Οι δύο αυτοί έλεγχοι εμφανίζουν τελικά αντίθετα αποτελέσματα τα οποία χρήζουν περισσότερης ανάλυσης.

Λύση στο παραπάνω ζήτημα είναι πιθανό να δώσει ξανά η μορφή του διαγράμματος αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της ταχύτητας στη λωρίδα 3 γι' αυτό και παρατίθενται αμέσως μετά.



Σχήμα 5.37: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της Ταχύτητας για τη λωρίδα 3

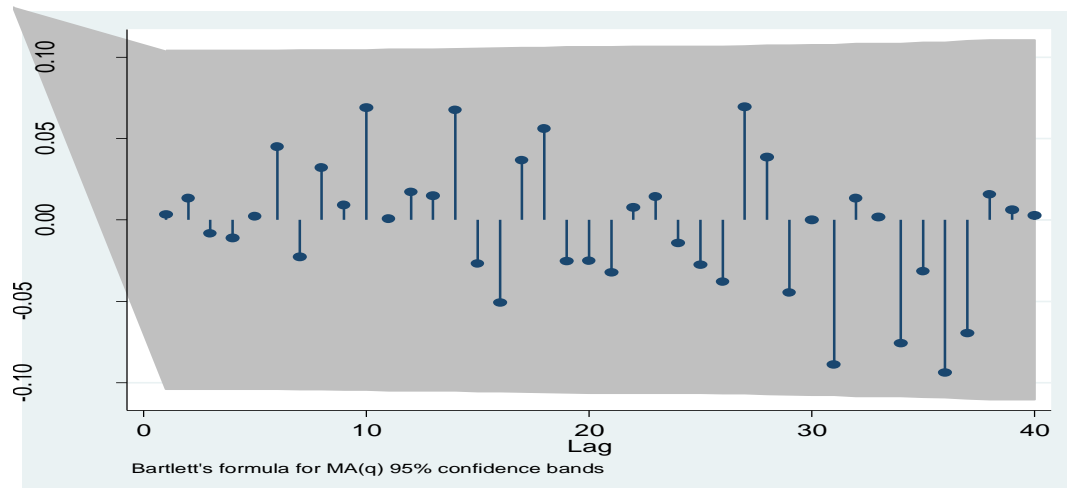
Από το διάγραμμα αυτοσυσχέτισης εύκολα συμπεραίνεται ότι και για τη λωρίδα 3, η χρονοσειρά της ταχύτητας παρουσιάζει «μακρά-μνήμη» (Long-Memory) και επομένως δεν αρκεί να ληφθούν πρώτες διαφορές. Αυτό θα αντιμετωπιστεί και εδώ με τη μέθοδο της κλασματικής ολοκλήρωσης και άρα τα πρότυπα που πρέπει να αναπτυχθούν είναι ARFIMA και ARFIMAX.

Όσον αφορά την εύρεση της τάξης του προτύπου, θα υπολογιστούν, όπως και σε όλα τα πρότυπα, και οι εννέα συνδυασμοί που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Επίσης, όσον αφορά τα ARFIMAX που περιέχουν και εξωγενείς μεταβλητές, θα ακολουθηθούν και οι δύο μέθοδοι προσθήκης των πληροφοριών στα πρότυπα δηλαδή και η μέθοδος της «πύκνωσης» άλλα και η μέθοδος προσθήκης από εμπρός προς τα πίσω. Αυτό σημαίνει ότι συνολικά για τη λωρίδα 3, θα αναπτυχθούν εννέα(9) πρότυπα ARFIMA και εκατόν ογδόντα εννέα(189) πρότυπα ARFIMAX. Από αυτά, θα επιλεγθούν τα πέντε καλύτερα ARFIMA και ARFIMAX, με βάση το κριτήριο BIC, και σε αυτά θα γίνει όπως και προηγουμένως, ο διαγνωστικός έλεγχος, η αξιολόγηση και η σύγκριση ώστε να βρεθεί το βέλτιστο.

Τα πέντε καλύτερα ARFIMA που βρέθηκαν για τη λωρίδα 3 με βάση το παραπάνω κριτήριο ήταν τα: ARFIMA(1,0.3251,1), ARFIMA(2,0.2855,1), ARFIMA(1,0.2779,2), ARFIMA(2,0.3101,2), ARFIMA(1,-0.1573,3).

Στα πρότυπα αυτά όπως και στα προηγούμενα, πραγματοποιήθηκε ο διαγνωστικός έλεγχος με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης. Για να θεωρηθεί επαρκές ένα πρότυπο, θα πρέπει οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης του να μην είναι στατιστικά

σημαντικοί (δηλαδή να βρίσκονται εκτός της γκριζας περιοχής του διαγράμματος). Ενδεικτικά παρατίθεται ένα από τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων για να φανεί η επάρκεια των προτύπων.

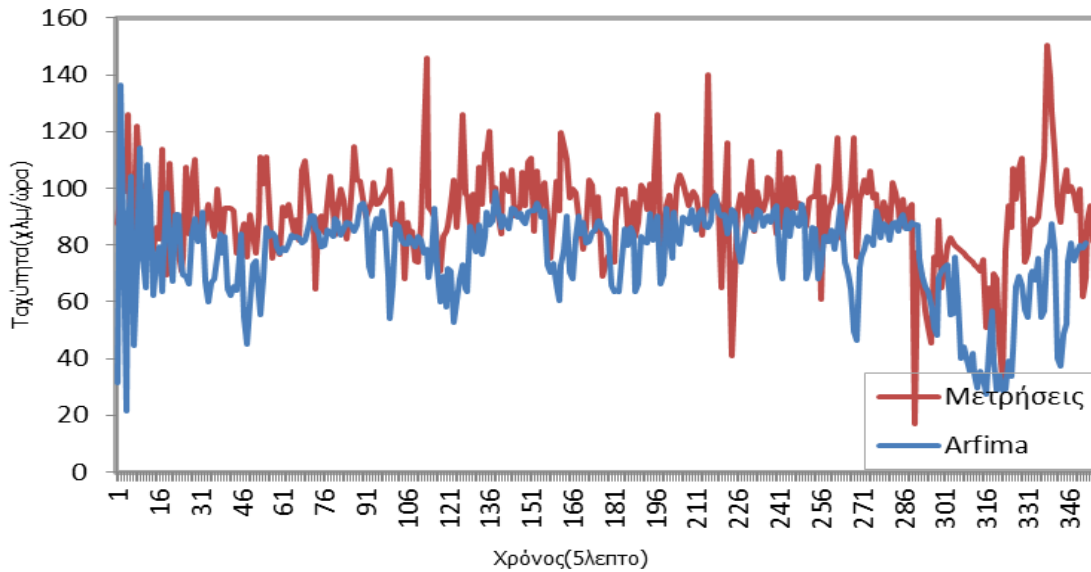


Σχήμα 5.38: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMA(2,0.3101,2)

Από το παραπάνω διάγραμμα εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι αυτοσυσχετίσεις των καταλοίπων των προτύπων δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επομένως και τα πέντε πρότυπα ARFIMA κρίνονται επαρκή και μπορούν πλέον να περάσουν στη φάση της αξιολόγησης.

Όπως τονίστηκε και παραπάνω, οι δείκτες αξιολόγησης υπολογίστηκαν με βάση τις πραγματικές τιμές του δείγματος και τις τιμές που υπολόγισε το κάθε πρότυπο (πάντοτε αυτές οι τιμές αναφέρονται στις τιμές εντός δείγματος). Να αναφερθεί, ότι παρότι υπολογίστηκαν συνολικά 6 δείκτες αξιολόγησης των προτύπων (RMSE, MSE, MAPE, MPE, MAE και ME) οι δύο δείκτες με βάση τους οποίους τελικά έλαβε χώρα η αξιολόγηση ήταν ο MAPE και ο MAE. Τα αποτελέσματα του υπολογισμού των MAPE, MAE κάθε προτύπου φαίνονται στον Πίνακα 5.4. Με έντονη γραφή έχει γραφεί το βέλτιστο πρότυπο κάθε κατηγορίας ανάλυσης που εδώ είναι το ARFIMA(2,0.3101,2).

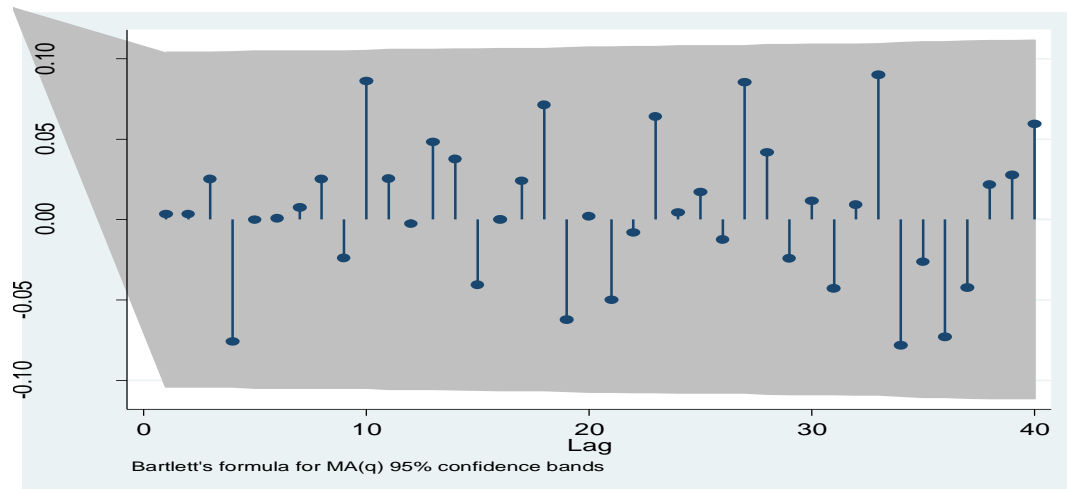
Προκειμένου να γίνει απτή η διαφορά των προβλέψεων του πρότυπου αυτού και των πραγματικών τιμών του δείγματος, δίνεται το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 5.39: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMA(2,0.3101,2)

Όσον αφορά τα πρότυπα ARFIMAX, τα πέντε καλύτερα που αναπτύχθηκαν για τη λωρίδα 3, ήταν τα: ARFIMAX(1,0.2119,1,5), ARFIMAX(2,0.3458,1,5), ARFIMAX(1,0.3475,2,5), ARFIMAX(3,-0.1988,1,5) και το ARFIMAX(1,0.3366,3,5), όπου πέντε είναι οι χρονικές υστερήσεις των εξωγενών μεταβλητών. Να σημειωθεί πως οι εξωγενείς μεταβλητές και στα πέντε παραπάνω πρότυπα ήταν η βροχόπτωση και ο φόρτος του φωρατή VDS E 24.20(+0).

Στα πρότυπα αυτά όπως και στα προηγούμενα, πραγματοποιήθηκε ο διαγνωστικός έλεγχος με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης. Για να θεωρηθεί επαρκές ένα πρότυπο, θα πρέπει οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης του να μην είναι στατιστικά σημαντικοί. Ενδεικτικά παρατίθεται ένα από τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων για να φανεί η επάρκεια των προτύπων.

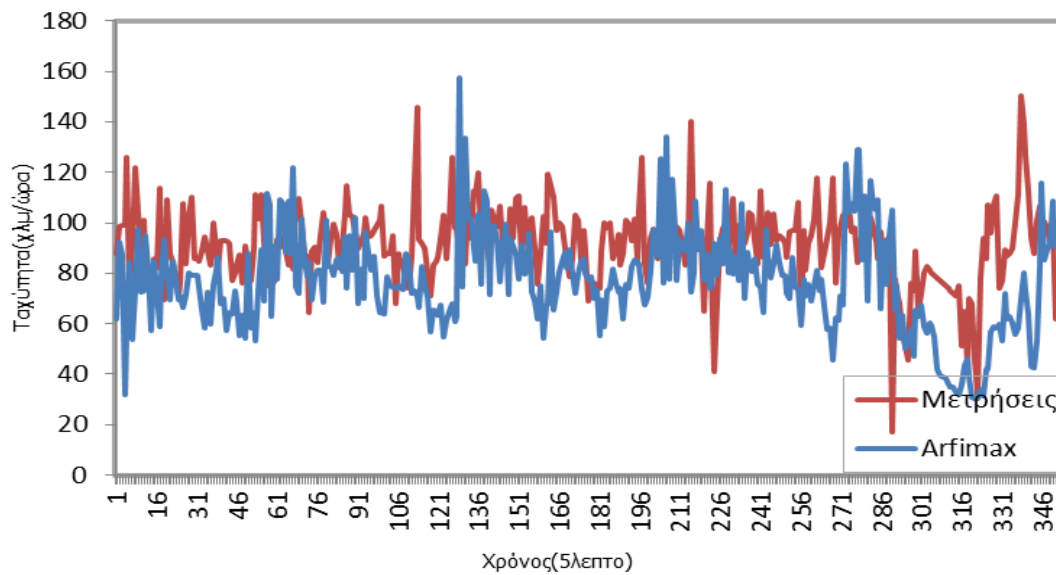


Σχήμα 5.40: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMAX(1,0.3366,3,5)

Από το παραπάνω διάγραμμα εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι αυτοσυσχετίσεις των καταλοίπων των προτύπων δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επομένως και τα πέντε πρότυπα ARFIMAX κρίνονται επαρκή και μπορούν να περάσουν στη φάση της αξιολόγησης.

Όπως και παραπάνω, υπολογίστηκαν οι δείκτες αξιολόγησης MAPE και MAE με βάση τις πραγματικές τιμές του δείγματος και τις εντός-δείγματος τιμές που υπολόγισε το κάθε πρότυπο. Οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης παρατίθενται στον Πίνακα 5.5 όπου με έντονη γραφή(Bold) έχει γραφεί και εκεί το βέλτιστο πρότυπο με τις μικρότερες τιμές MAPE και MAE. Στην κατηγορία αυτή, το βέλτιστο πρότυπο είναι το ARFIMAX(1,0.3366,3,5).

Και εδώ όπως και προηγουμένως, προκειμένου να γίνει απτή η διαφορά των προβλέψεων του πρότυπου αυτού και των πραγματικών τιμών του δείγματος, παρατίθεται το παρακάτω διάγραμμα.

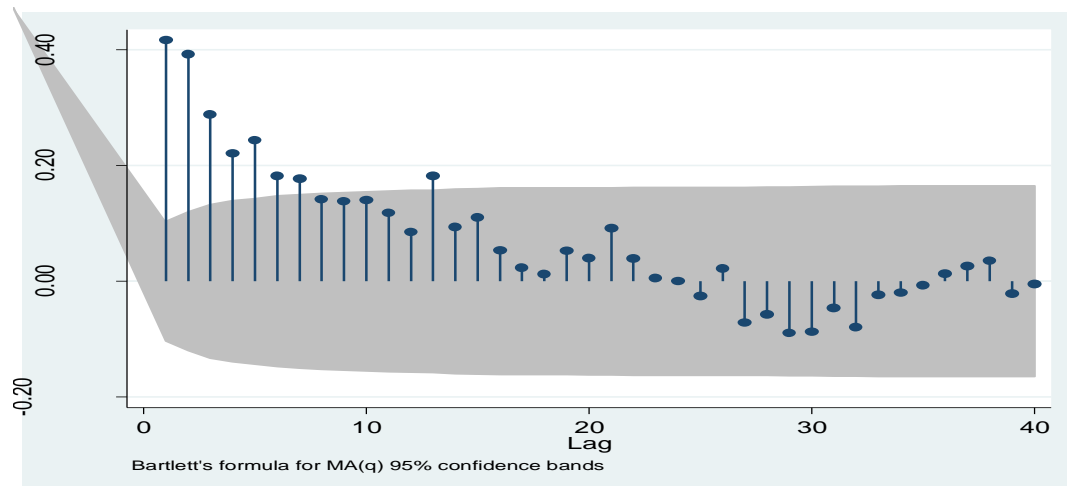


Σχήμα 5.41: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMAX(1,0.3366,3,5)

5.2.4 Ανάλυση διατομής

Όπως και για την ανάλυση ανά λωρίδα, έτσι και για την ανάλυση διατομής, το πρώτο πράγμα που απαιτείται να γίνει είναι ο έλεγχος στασιμότητας. Αυτό, όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιείται με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι μέσω του επαυξημένου ελέγχου μοναδιαίας ρίζας Dickey-Fuller (Augmented Dickey-Fuller Test, ADF) και του ελέγχου KPSS (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin). Από το αποτέλεσμα του ελέγχου ADF φαίνεται και εδώ να απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση της ύπαρξης μοναδιαίας ρίζας. Επίσης, το αποτέλεσμα του ελέγχου KPSS απορρίπτει και εδώ τη μηδενική υπόθεσή του η οποία θεωρεί ότι η χρονοσειρά είναι στάσιμη. Οι δύο αυτοί έλεγχοι εμφανίζουν τελικά αντίθετα αποτελέσματα τα οποία χρήζουν περισσότερης ανάλυσης.

Λύση στο παραπάνω ζήτημα είναι πιθανό να δώσει ξανά η μορφή του διαγράμματος αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της ταχύτητας γι' αυτό και παρατίθενται αμέσως μετά.



Σχήμα 5.42: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της Ταχύτητας

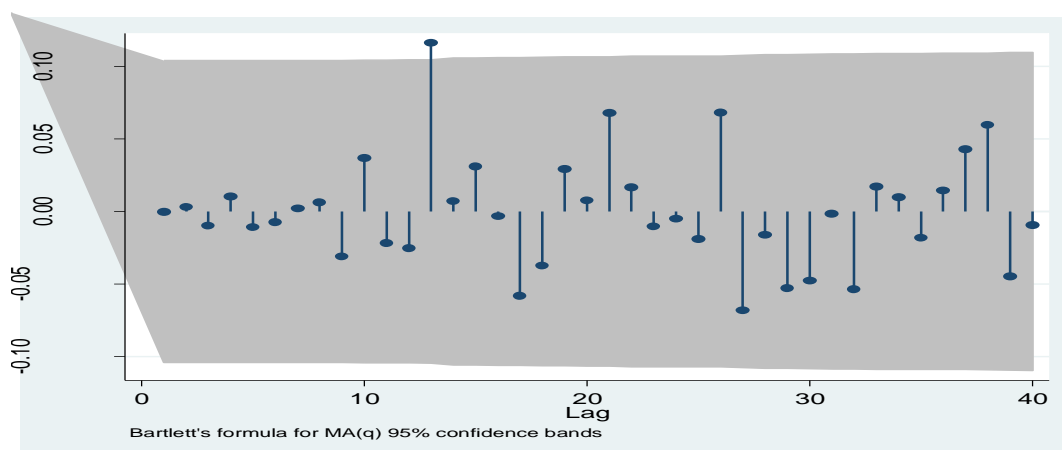
Από το διάγραμμα αυτοσυσχέτισης εύκολα συμπεραίνεται ότι η χρονοσειρά της ταχύτητας παρουσιάζει «μακρά-μνήμη» (Long-Memory) και επομένως δεν αρκεί να ληφθούν πρώτες διαφορές. Αυτό θα αντιμετωπιστεί και εδώ με τη μέθοδο της κλασματικής ολοκλήρωσης και άρα τα πρότυπα που πρέπει να αναπτυχθούν είναι ARFIMA και ARFIMAX.

Όσον αφορά την εύρεση της τάξης του προτύπου, θα υπολογιστούν, όπως και σε όλα τα πρότυπα, και οι εννέα συνδυασμοί που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Επίσης, όσον αφορά τα ARFIMAX που περιέχουν και εξωγενείς μεταβλητές, θα ακολουθηθούν και οι δύο μέθοδοι προσθήκης των πληροφοριών στα πρότυπα δηλαδή και η μέθοδος της «πύκνωσης» άλλα και η μέθοδος προσθήκης από εμπρός προς τα πίσω. Αυτό σημαίνει ότι συνολικά θα αναπτυχθούν εννέα(9) πρότυπα ARFIMA και διακόσια επτά(207) πρότυπα ARFIMAX. Από αυτά, θα επιλεχθούν τα πέντε καλύτερα ARFIMA και ARFIMAX, με βάση το κριτήριο BIC, και σε αυτά θα γίνει όπως και προηγουμένως, ο διαγνωστικός έλεγχος, η αξιολόγηση και η σύγκριση ώστε να βρεθεί το βέλτιστο.

Τα πέντε καλύτερα ARFIMA που βρέθηκαν με βάση το παραπάνω κριτήριο ήταν τα: ARFIMA(1,-0.3287,1), ARFIMA(2,-0.4013,1), ARFIMA(2,-0.3491,2), ARFIMA(3,-0.3439,1), ARFIMA(2,-0.4899,3).

Στα πρότυπα αυτά όπως και στα προηγούμενα, πραγματοποιήθηκε ο διαγνωστικός έλεγχος με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης. Για να θεωρηθεί επαρκές ένα πρότυπο, θα πρέπει οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης του να μην είναι στατιστικά σημαντικοί (δηλαδή να βρίσκονται εκτός της γκριζας περιοχής του διαγράμματος).

Ενδεικτικά παρατίθεται ένα από τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων για να φανεί η επάρκεια των προτύπων.

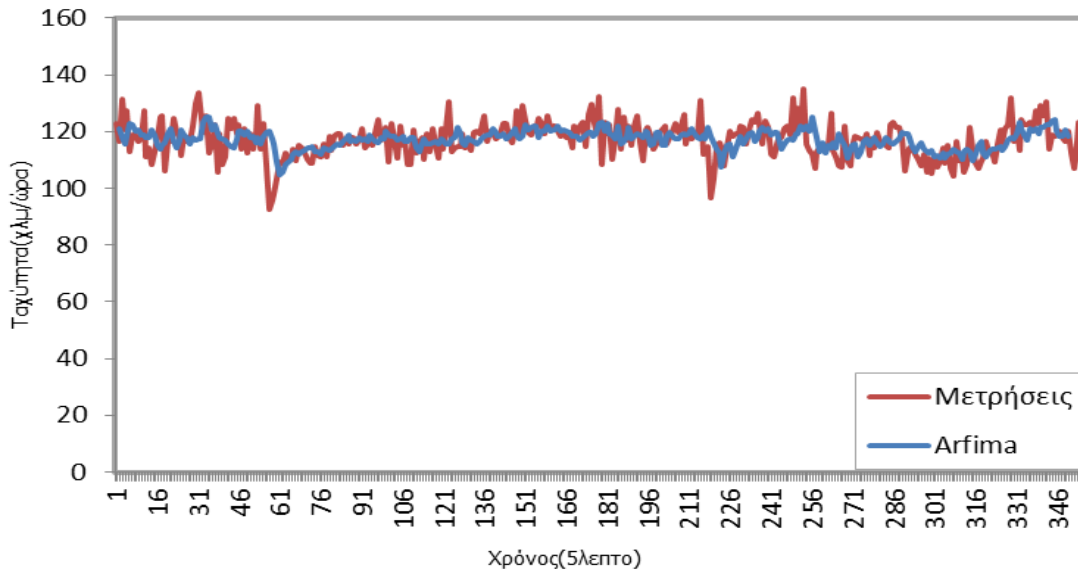


Σχήμα 5.43: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMA(2,-0.4899,3)

Από το παραπάνω διάγραμμα εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι αυτοσυσχετίσεις των καταλοίπων των προτύπων δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επομένως και τα πέντε πρότυπα ARFIMA κρίνονται επαρκή και μπορούν πλέον να περάσουν στη φάση της αξιολόγησης.

Όπως τονίστηκε και παραπάνω, οι δείκτες αξιολόγησης υπολογίστηκαν με βάση τις πραγματικές τιμές του δείγματος και τις τιμές που υπολόγισε το κάθε πρότυπο (πάντοτε αυτές οι τιμές αναφέρονται στις τιμές εντός δείγματος). Να αναφερθεί, ότι παρότι υπολογίστηκαν συνολικά 6 δείκτες αξιολόγησης των προτύπων (RMSE, MSE, MAPE, MPE, MAE και ME) οι δύο δείκτες με βάση τους οποίους τελικά έλαβε χώρα η αξιολόγηση ήταν ο MAPE και ο MAE. Τα αποτελέσματα του υπολογισμού των MAPE, MAE κάθε προτύπου φαίνονται στον Πίνακα 5.4. Με έντονη γραφή έχει γραφεί το βέλτιστο πρότυπο κάθε κατηγορίας ανάλυσης που εδώ είναι το ARFIMA(2,-0.4899,3).

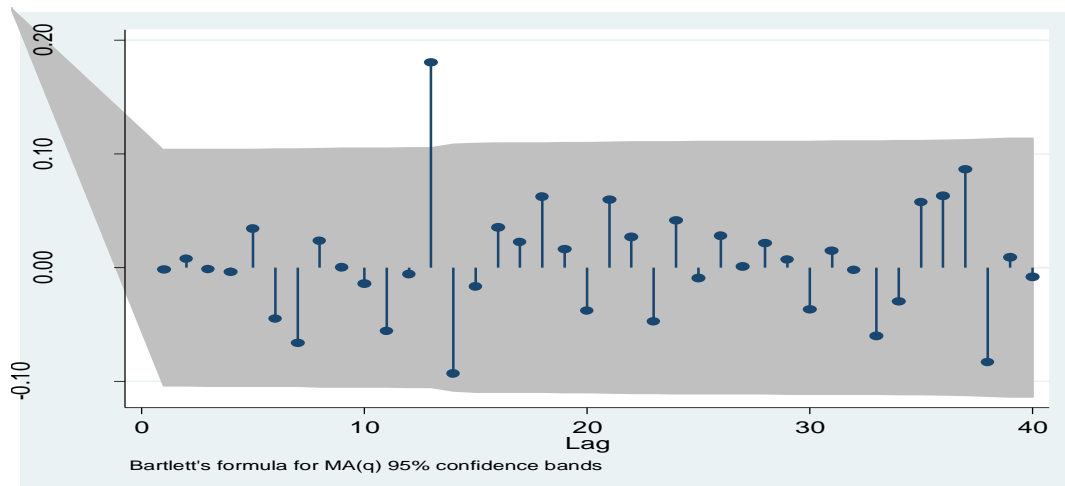
Προκειμένου να γίνει απτή η διαφορά των προβλέψεων του προτύπου αυτού και των πραγματικών τιμών του δείγματος, δίνεται το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 5.44: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMA(2,-0.4899,3)

Όσον αφορά τα πρότυπα ARFIMAX, τα πέντε καλύτερα που αναπτύχθηκαν, ήταν τα: ARFIMAX(1,-0.0548,1,5), ARFIMAX(2,-0.3521,1,5), ARFIMAX(2,-0.1281,2,5), ARFIMAX(3,-0.2195,2,5) και το ARFIMAX(1,0.1512,1,5), όπου πέντε είναι οι χρονικές υστερήσεις των εξωγενών μεταβλητών. Να σημειωθεί πως οι εξωγενείς μεταβλητές και στα πέντε παραπάνω πρότυπα ήταν η βροχόπτωση, στα τέσσερα πρώτα ο φόρτος των φωρατών VDS E 24.20(+0) και VDS E 24.60(+400) και η ταχύτητα του φωρατή VDS E 24.60(+400), ενώ στο τελευταίο προστίθεται ο φόρτος και η ταχύτητα του φωρατή +1000.

Στα πρότυπα αυτά όπως και στα προηγούμενα, πραγματοποιήθηκε ο διαγνωστικός έλεγχος με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης. Για να θεωρηθεί επαρκές ένα πρότυπο, θα πρέπει οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης του να μην είναι στατιστικά σημαντικοί. Ενδεικτικά παρατίθεται ένα από τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων για να φανεί η επάρκεια των προτύπων.

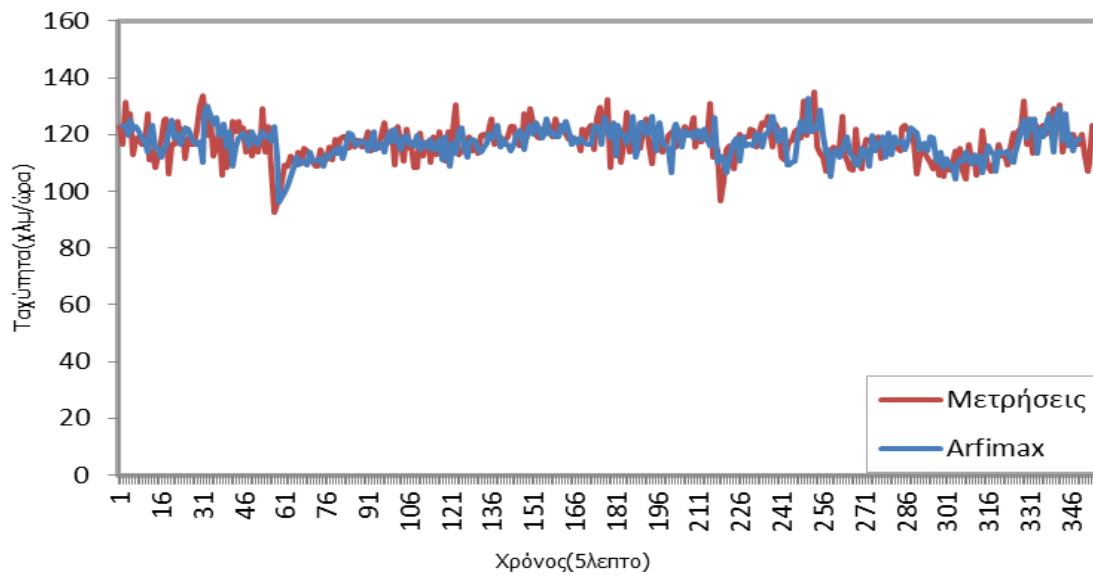


Σχήμα 5.45: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του ARFIMAX(1,0.1512,1,5)

Από το παραπάνω διάγραμμα μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι οι αυτοσυσχετίσεις των καταλοίπων των προτύπων δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επομένως και τα πέντε πρότυπα ARFIMAX κρίνονται επαρκή και μπορούν να περάσουν στη φάση της αξιολόγησης.

Όπως και παραπάνω, υπολογίστηκαν οι δείκτες αξιολόγησης MAPE και MAE με βάση τις πραγματικές τιμές του δείγματος και τις εντός-δείγματος τιμές που υπολόγισε το κάθε πρότυπο. Οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης παρατίθενται στον Πίνακα 5.5 όπου με έντονη γραφή(Bold) έχει γραφεί και εκεί το βέλτιστο πρότυπο με τις μικρότερες τιμές MAPE και MAE. Στην κατηγορία αυτή, το βέλτιστο πρότυπο είναι το ARFIMAX(1,0.1512,1,5).

Και εδώ όπως και προηγουμένως, προκειμένου να γίνει απτή η διαφορά των προβλέψεων του πρότυπου αυτού και των πραγματικών τιμών του δείγματος, παρατίθεται το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 5.46: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο ARFIMAX(1,0.1512,1,5)

5.2.5 Πρότυπα VECM

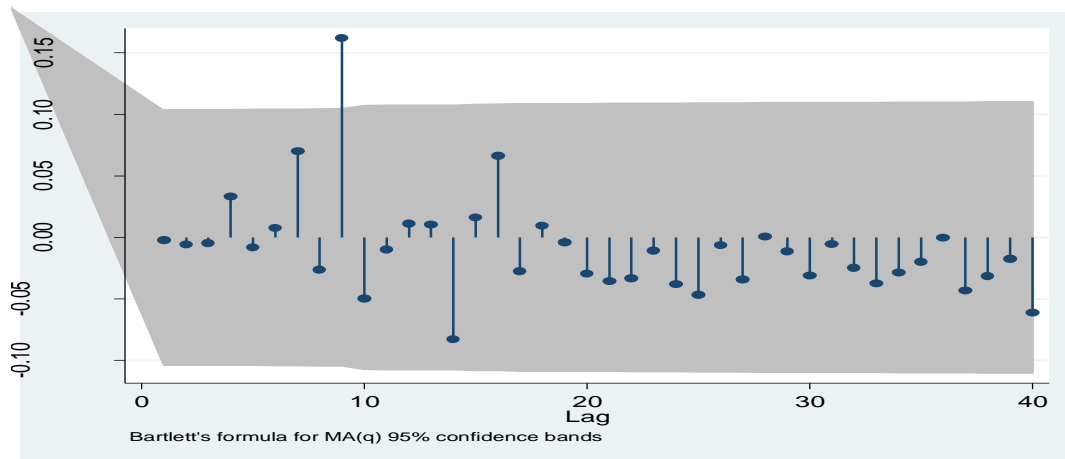
Για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν στην περίοδο 1, θα εφαρμοστούν και εδώ τα πρότυπα VECM και θα εξεταστεί η ακρίβεια πρόβλεψης τους.

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, δεν χρειάζεται να πραγματοποιηθεί έλεγχος στασιμότητας πριν την εφαρμογή των προτύπων VECM. Τα δύο πρώτα βήματα λοιπόν είναι η διερεύνηση της δυνατότητας συνολοκλήρωσης των μεταβλητών του διανύσματος $V=(V_1, V_2, V_3)$ και η εύρεση του βαθμού συνολοκλήρωσής τους. Τα αποτελέσματα του ελέγχου αυτού δείχνουν ότι οι μεταβλητές V_1, V_2, V_3 είναι δυνατό να συνολοκληρωθούν και ότι ο βαθμός συνολοκλήρωσης τους είναι 2.

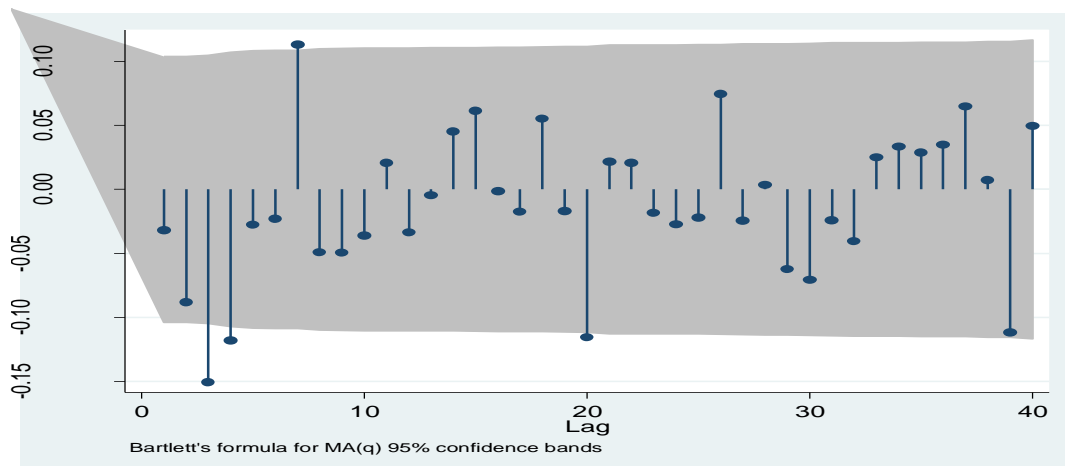
Όσον αφορά την εύρεση της τάξης του προτύπου, θα υπολογιστούν οι συνδυασμοί τάξης του αυτοπαλίνδρομου μέρους από 1 έως 3 και των χρονικών υστερήσεων των μεταβλητών του διανύσματος από 1 έως 5. Από αυτά όσα αναπτυχθούν τελικά (πολλά είναι πιθανό να εκπέσουν σε πρότυπα χαμηλότερου βαθμού λόγω συγγραμικότητας), θα περάσουν στη φάση του διαγνωστικού ελέγχου, η αξιολόγηση και η σύγκριση ώστε να βρεθεί το βέλτιστο.

Τα έξι καλύτερα πρότυπα VECM που βρέθηκαν ήταν τα εξής: VECM Ar(1) 1 lag, VECM Ar(2) 1 lag, VECM Ar(3) 1 lag, VECM Ar(1) 3 lags, VECM Ar(1) 4 lags και VECM Ar(1) 5 lags, όπου lags οι χρονικές υστερήσεις των μεταβλητών του διανύσματος V .

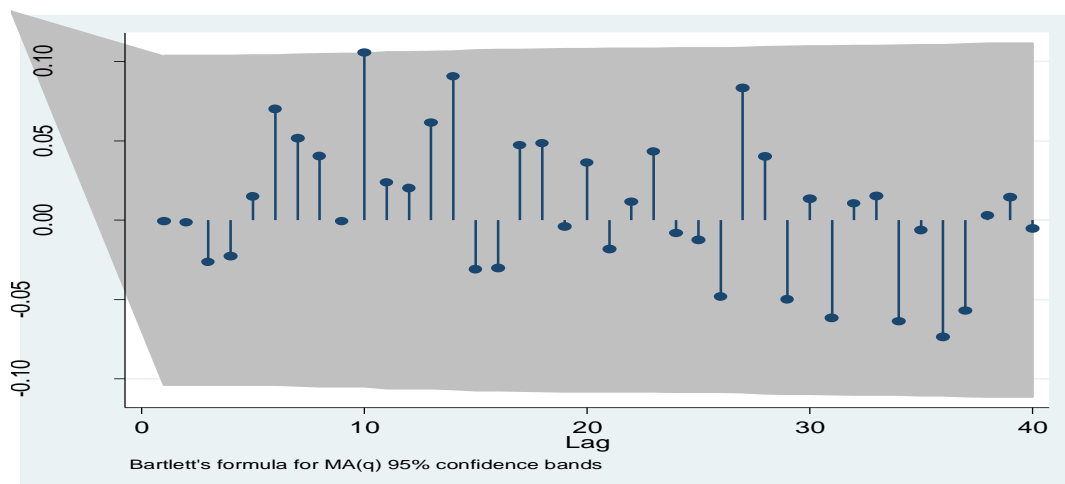
Στα πρότυπα αυτά πραγματοποιήθηκε ο διαγνωστικός έλεγχος με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης. Για να θεωρηθεί επαρκές ένα πρότυπο, θα πρέπει οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης του να μην είναι στατιστικά σημαντικοί. Με βάση το διάγραμμα αυτοσυσχέτισης, αυτό σημαίνει ότι οι τιμές τους δεν θα πρέπει να ξεφεύγουν του διαστήματος εμπιστοσύνης (δηλαδή εκτός της γκριζας περιοχής του διαγράμματος). Ενδεικτικά παρατίθενται, για ένα από τα παραπάνω πρότυπα, τρία διαγράμματα αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων, ένα για κάθε λωρίδα, για να φανεί η επάρκεια των προτύπων.



Σχήμα 5.47: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του VECM Ar(3) 1 lag για τη λωρίδα 1



Σχήμα 5.48: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του VECM Ar(3) 1 lag για τη λωρίδα 2



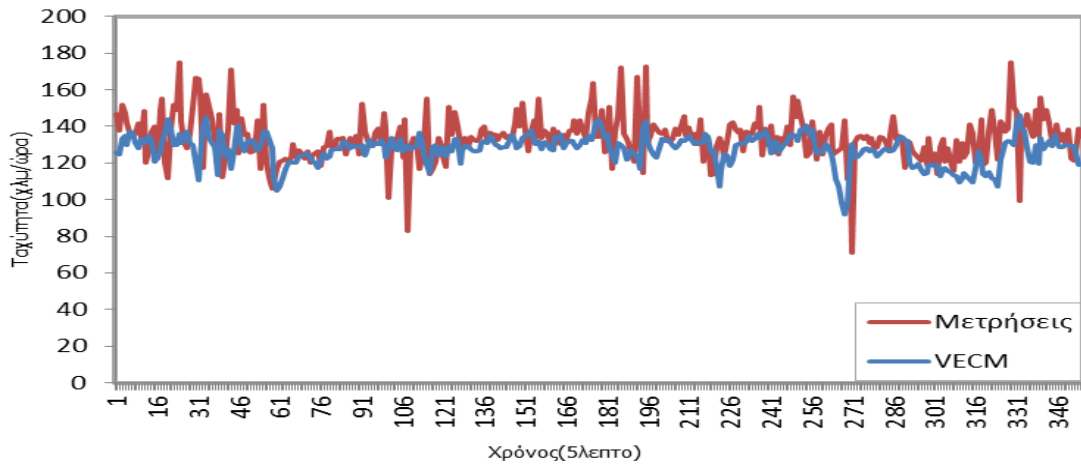
Σχήμα 5.49: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του VECM Ar(3) 1 lag για τη λωρίδα 3

Από τα παραπάνω διαγράμματα εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι αυτοσυσχετίσεις των καταλοίπων των προτύπων δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επομένως και τα έξι πρότυπα VECM κρίνονται επαρκή και μπορούν πλέον να περάσουν στη φάση της αξιολόγησης.

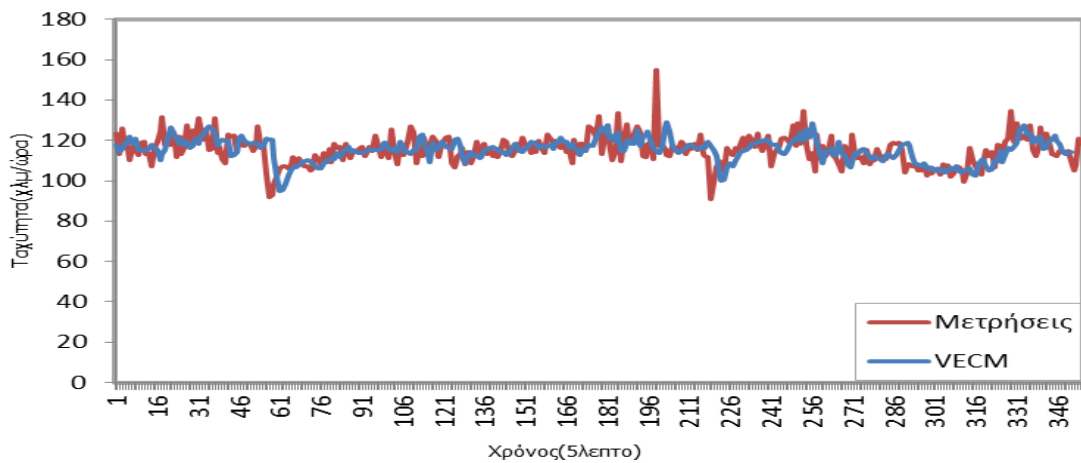
Όπως τονίστηκε και παραπάνω, οι δείκτες αξιολόγησης υπολογίστηκαν με βάση τις πραγματικές τιμές του δείγματος και τις τιμές που υπολόγισε το κάθε πρότυπο (πάντοτε αυτές οι τιμές αναφέρονται στις τιμές εντός δείγματος). Να αναφερθεί, ότι παρότι υπολογίστηκαν συνολικά 6 δείκτες αξιολόγησης των προτύπων (RMSE, MSE, MAPE, MPE, MAE και ME) οι δύο δείκτες με βάση τους οποίους τελικά έλαβε χώρα η αξιολόγηση ήταν ο MAPE και ο MAE. Τα αποτελέσματα του υπολογισμού των MAPE, MAE κάθε προτύπου φαίνονται στον Πίνακα 5.6. Με έντονη γραφή έχει γραφεί το βέλτιστο πρότυπο κάθε κατηγορίας ανάλυσης που εδώ είναι το VECM Ar(3) 1 lag για τις λωρίδες 2 και 3 και το VECM Ar(2) 1 lag για τη λωρίδα 1.

Προκειμένου να γίνει απτή η διαφορά των προβλέψεων του προτύπου αυτού και των πραγματικών τιμών του δείγματος, δίνονται τα παρακάτω τρία διαγράμματα (ένα για το βέλτιστο πρότυπο κάθε λωρίδας).

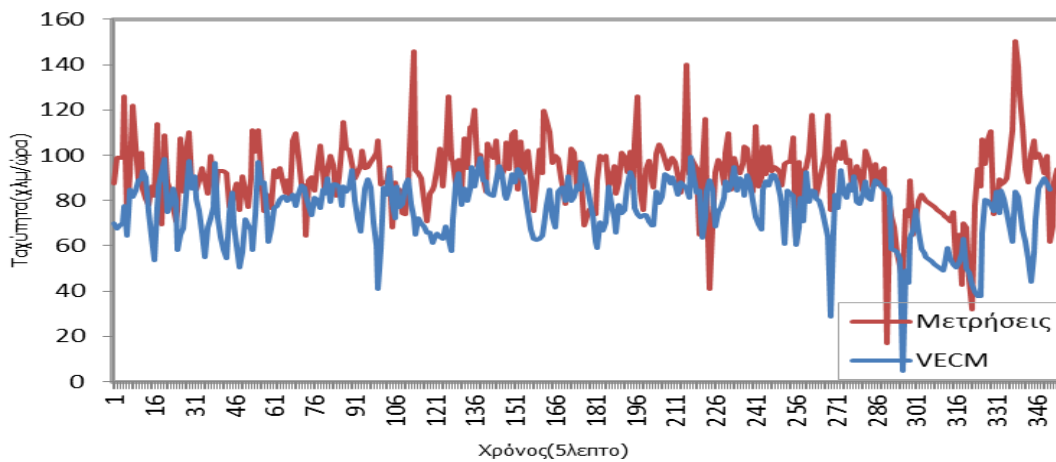
Αμέσως μετά τα διαγράμματα, παρατίθενται οι πίνακες όλων των προτύπων που αναφέρθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο, ώστε να παρουσιαστούν συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα.



Σχήμα 5.50: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο VECM Ar(2) 1 lag για τη λωρίδα 1



Σχήμα 5.51: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο VECM Ar(3) 1 lag για τη λωρίδα 2



Σχήμα 5.52: Σύγκριση των πραγματικών τιμών και των τιμών πρόβλεψης της ταχύτητας με το πρότυπο VECM Ar(3) 1 lag για τη λωρίδα 3

Πίνακας 5.2: Πίνακας Προτύπων ARFIMA περιόδου 1 και δείκτες αξιολόγησης

	ΠΡΟΤΥΠΑ	BIC	RMSE	MSE	MAPE	MPE	MAE	ME
Λωρίδα 1	arfima(1,0.1681,1)	7274.86	6.926864	47.98145	3.471206	-0.30813	3.502117	0.082033
	arfima(2,0.1727,1)	7281.533	6.926185	47.97204	3.474007	-0.31177	3.504704	0.075093
	arfima(1,-0.0070,2)	7273.838	6.90655	47.70043	3.478843	-0.39073	3.528237	-0.019
	arfima(2,0.0092,2)	7275.32	6.883792	47.38659	3.466012	-0.36953	3.513024	0.005705
	arfima(1,-0.0343,3)	7279.792	6.897474	47.57514	3.473573	-0.39791	3.519809	-0.02393
Λωρίδα 2	arfima(1,-0.1069,2)	6009.168	3.833548	14.69609	3.174957	-0.31285	2.726027	-0.03551
	arfima(2,-0.0133,2)	6013.535	3.828019	14.65373	3.153181	-0.28643	2.697599	-0.00295
	arfima(3,-0.0183,2)	6020.511	3.827998	14.65357	3.152949	-0.28825	2.697336	-0.00449
	arfima(2,-0.0188,3)	6020.511	3.827996	14.65355	3.152933	-0.28841	2.697324	-0.00465
	arfima(3,-0.1487,3)	6026.288	3.825742	14.6363	3.177487	-0.32304	2.725533	-0.04409
Λωρίδα 3	arfima(1,0.3906,1)	7794.574	8.820159	77.7952	5.864952	-0.57108	4.437222	0.192711
	arfima(2,0.1128,1)	7798.569	8.808773	77.59448	5.857499	-0.80884	4.404222	0.00975
	arfima(1,0.3793,2)	7797.7	8.803915	77.50892	5.846279	-0.57546	4.426209	0.187053
	arfima(2,0.3789,2)	7803.94	8.800632	77.45112	5.840239	-0.57252	4.422233	0.187656
	arfima(3,0.4195,1)	7808.393	8.819541	77.7843	5.872704	-0.55594	4.44534	0.202271
Ανάλυση διατομής	arfima(1,-0.0475,2)	5886.22	3.632568	13.19555	2.788008	-0.24389	2.561693	-0.0229
	arfima(2,0.0155,2)	5891.655	3.618545	13.09387	2.758769	-0.21089	2.535717	0.005156
	arfima(3,-0.0182,2)	5898.521	3.618258	13.09179	2.759256	-0.22229	2.535393	-0.00512
	arfima(2,-0.0074,3)	5898.566	3.618353	13.09248	2.758716	-0.21849	2.535322	-0.00182
	arfima(3,0.2019,3)	5903.683	3.615382	13.07098	2.755646	-0.151	2.533968	0.060606

Πίνακας 5.3: Πίνακας Προτύπων ARFIMAX περιόδου 1 και δείκτες αξιολόγησης

	ΠΡΟΤΥΠΑ	BIC	RMSE	MSE	MAPE	MPE	MAE	ME
Λορίδα 1	arfimax(1,0.2403,2,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	6969.11	5.61	31.475	2.026	-0.127	2.073	0.043
	arfimax(1,0.2588,1,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	6968.44	5.627	31.664	2.001	-0.118	2.033	0.053
	arfimax(2,0.181,3,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	6989.6	5.629	31.688	2.029	-0.118	2.066	0.062
	arfimax(2,-0.1283,1,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	6967.69	5.603	31.391	1.997	-0.209	2.044	-0.05
	arfimax(2,0.1810,2,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	6987.71	5.643	31.847	2.016	-0.117	2.062	0.067
Λορίδα 2	arfimax(3,0.1092,1,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	5403.32	2.701	7.2935	2.057	-0.162	1.688	0.017
	arfimax(1,0.17,1,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	5400.54	2.715	7.372	2.052	-0.151	1.687	0.03
	arfimax(2,0.3102,3,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	5384.89	2.668	7.1207	2.061	-0.132	1.709	0.042
	arfimax(3,0.1096,2,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	5410.3	2.701	7.2935	2.057	-0.162	1.688	0.017
	arfimax(2,0.1449,1,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	5405.85	2.713	7.3597	2.054	-0.154	1.687	0.026
Λορίδα 3	arfimax(3,-0.1496,1,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	7714.64	7.914	62.626	5.239	-0.628	4.037	-0.06
	arfimax(1,-0.0879,2,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	7713.47	7.935	62.968	5.211	-0.608	4.017	-0.04
	arfimax(2,0.0398,2,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	7714.7	7.914	62.631	5.216	-0.542	4.029	0.019
	arfimax(2,-0.0990,1,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	7713.67	7.936	62.98	5.208	-0.613	4.014	-0.04
	arfimax(1,-0.1348,1,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	7707.58	7.939	63.032	5.201	-0.625	4.005	-0.06
Ανάλυση διατομής	arfimax(1,0.0907,1,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	5065.71	2.323	5.3985	1.516	-0.091	1.354	0.017
	arfimax(3,0.0349,2,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	5068.1	2.303	5.3047	1.51	-0.099	1.36	0.005
	arfimax(3,0.0501,1,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	5061.51	2.304	5.3067	1.509	-0.097	1.36	0.007
	arfimax(3,0.3450,3,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	5063.36	2.292	5.2544	1.508	-0.048	1.356	0.063
	arfimax(2,0.0669,1,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	5070.03	2.321	5.3851	1.517	-0.093	1.355	0.012

Πίνακας 5.4: Πίνακας Προτύπων ARFIMA περιόδου 2 και δείκτες αξιολόγησης

	ΠΡΟΤΥΠΑ	BIC	RMSE	MSE	MAPE	MPE	MAE	ME
Λωρίδα 1	arma(1,1)	3466.015	29.89532	893.73	11.31643	0.053332	15.40408	-0.01984
	arma(2,1)	3471.602	29.83412	890.0749	11.50632	0.057879	15.63699	0.012209
	arma(1,2)	3473.955	29.9332	895.9966	11.58933	0.046751	15.69102	-0.02035
	arma(3,1)	3471.954	29.89778	893.8772	11.30816	0.040446	15.38131	-0.02684
	arma(2,3)	3473.915	29.72741	883.7191	11.73792	0.79569	15.95472	0.998678
Λωρίδα 2	arfima(1,-0.4402,1)	2311.77	5.807863	33.73127	3.733882	-0.04709	4.268401	0.046188
	arfima(2,-0.2446,1)	2319.863	5.826117	33.94364	3.729881	-0.06372	4.26349	0.023904
	arfima(1,-0.2901,2)	2317.181	5.805291	33.7014	3.731917	-0.05171	4.267209	0.040489
	arfima(2,-0.2685,2)	2322.181	5.792359	33.55143	3.721216	-0.07316	4.255305	0.014418
	arfima(3,-0.2114,1)	2325.445	5.823625	33.91461	3.724195	-0.06802	4.25643	0.018372
Λωρίδα 3	arfima(1,0.3251,1)	3580.111	34.87098	1215.985	28.53405	-1.91212	24.90306	-0.64241
	arfima(2,0.2855,1)	3584.809	34.79355	1210.591	28.50545	-1.88363	24.85851	-0.61385
	arfima(1,0.2779,2)	3573.336	34.15295	1166.424	28.15245	-1.41929	24.5863	-0.19127
	arfima(2,0.3101,2)	3578.384	34.01459	1156.993	27.97661	-1.70695	24.4025	-0.4936
	arfima(1,-0.1573,3)	3583.581	34.67485	1202.346	28.74019	-1.22162	25.10498	-0.01507
Ανάλυση διατομής	arfima(1,-0.3287,1)	2264.064	5.426017	29.44166	3.599272	-0.10891	4.168889	-0.05286
	arfima(2,-0.4013,1)	2269.587	5.428739	29.4712	3.600743	-0.07108	4.170104	-0.00621
	arfima(2,-0.3491,2)	2268.577	5.371825	28.85651	3.562559	-0.09453	4.127081	-0.03205
	arfima(3,-0.3439,1)	2268.55	5.371318	28.85105	3.561677	-0.09422	4.125944	-0.03171
	arfima(2,-0.4899,3)	2272.425	5.358882	28.71761	3.53767	-0.09819	4.095506	-0.03694

Πίνακας 5.5: Πίνακας Προτύπων ARFIMAX περιόδου 2 και δείκτες αξιολόγησης

	ΠΡΟΤΥΠΑ	BIC	RMSE	MSE	MAPE	MPE	MAE	ME
Λωρίδα 1	arimax(3,2,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	3387.88	22.25	494.9	8.99	0.221	12.1	0.006
	arimax(1,2,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	3388.78	22.48	505.2	9.033	0.191	12.11	0.005
	arimax(3,3,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	3391.79	22.2	492.8	9.139	0.23	12.27	0.035
	arimax(1,1,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	3388.29	22.68	514.4	8.914	0.194	11.97	0.003
	arimax(2,1,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	3392.63	22.63	512.1	8.923	0.192	11.99	-0.01
Λωρίδα 2	arfimax(1,0.2219,1,5) ,Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +8800, φόρτος φωρατών 0 και +8800	2359.21	5.28	27.87	3.43	-0.09	3.94	-0.05
	arfimax(1,0.1867,1,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατών +400 και +1000, φόρτος φωρατών 0,+400 και +1000	2215.79	3.969	15.75	2.544	-0.06	2.928	-0.03
	arfimax(2,0.2074,1,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατών +400 και +1000, φόρτος φωρατών 0,+400 και +1000	2219.94	3.96	15.68	2.547	-0.07	2.931	-0.04
	arfimax(3,-0.4957,1,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατών +400,+1000,+1800,+2500 και +3600, φόρτος φωρατών 0,+400,+1000,+1800,+2500 και +3600	2339.8	3.629	13.17	2.325	-0.06	2.678	-0.05
	arfimax(2, -0.3693,1,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατών +400,+1000 και +1800 φόρτος φωρατών 0,+400,+1000 και +1800	2251.31	3.811	14.52	2.421	-0.07	2.787	-0.06
	arfimax(2,-0.4802,1,5) ,Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατών +400,+1000,+1800,+2500 και +3600, φόρτος φωρατών 0,+400,+1000,+1800,+2500 και +3600	2334.14	3.629	13.17	2.331	-0.06	2.686	-0.04
Λωρίδα 3	arfimax(1,0.2119,1,5) , Χ=βροχόπτωση, φόρτος φωρατή 0	3580.25	32.08	1029	28.07	-1.1	24.97	-0.19
	arfimax(2,0.3458,1,5) , Χ=βροχόπτωση, φόρτος φωρατή 0	3582.22	31.9	1018	27.82	-1.42	24.7	-0.5
	arfimax(1,0.3475,2,5) , Χ=βροχόπτωση, φόρτος φωρατή 0	3585.71	32.05	1027	27.91	-1.51	24.8	-0.54
	arfimax(3,-0.1988,1,5) , Χ=βροχόπτωση, φόρτος φωρατή 0	3586.64	31.83	1013	28.07	-0.67	24.86	0.256
	arfimax(1,0.3366,3,5) , Χ=βροχόπτωση, φόρτος φωρατή 0	3586.51	31.81	1012	27.73	-1.37	24.65	-0.36
Ανάλυση διατομής	arfimax(1,-0.0548,1,5) ,Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	2106.96	3.695	13.66	2.387	-0.04	2.784	-0.03
	arfimax(2,-0.3521,1,5) ,Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	2112.88	3.699	13.68	2.373	-0.07	2.767	-0.07
	arfimax(2,-0.1281,2,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	2111.95	3.663	13.42	2.358	-0.03	2.75	-0.02
	arfimax(3,-0.2195,2,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατή +400, φόρτος φωρατών 0,+400	2116.75	3.659	13.39	2.346	-0.05	2.736	-0.04
	arfimax(1,0.1512,1,5) , Χ=βροχόπτωση, ταχύτητα φωρατών +400 και +1000, φόρτος φωρατών 0,+400 και +1000	2151.07	3.622	13.12	2.336	0.014	2.73	0.031

Πίνακας 5.6: Πίνακας Προτύπων VECM των περιόδων 1 και 2 και δείκτες αξιολόγησης

	ΠΡΟΤΥΠΑ	Λωρίδα	RMSE	MSE	MAPE	MPE	MAE	ME
Περίοδος 1	rank 2 VECM Ar(1) 3 lags	Λωρίδα 1	8.00979	64.1568	3.4781	-0.09158	3.70286	0.00867
		Λωρίδα 2	3.98164	15.8535	3.31723	-0.17062	2.86517	0.00117
		Λωρίδα 3	11.1408	124.117	6.58483	-0.3363	5.25893	0.00533
	rank 2 VECM Ar(1) 1 lag	Λωρίδα 1	6.44875	41.5864	3.55363	-0.20256	3.73745	-0.03495
		Λωρίδα 2	3.93515	15.4854	3.2661	-0.18009	2.82428	-0.0041
		Λωρίδα 3	9.18954	84.4476	6.49142	0.11214	5.15546	0.25899
	rank 2 VECM Ar(2) 1 lag	Λωρίδα 1	6.28765	39.5346	3.38033	-0.20466	3.51728	-0.02745
		Λωρίδα 2	3.88602	15.1012	3.16311	-0.19689	2.7069	-0.00027
		Λωρίδα 3	8.81072	77.6287	5.99664	0.03892	4.75528	0.19923
	rank 2 VECM Ar(3) 1 lag	Λωρίδα 1	6.27121	39.328	3.35156	-0.204	3.49991	-0.02816
		Λωρίδα 2	3.87917	15.048	3.16173	-0.20501	2.70624	-0.00311
		Λωρίδα 3	8.72839	76.1848	5.88824	0.03037	4.6783	0.16692
	rank 2 VECM Ar(1) 4 lags	Λωρίδα 1	7.94358	63.1004	3.49596	-0.12787	3.72873	0.00021
		Λωρίδα 2	3.98722	15.8979	3.32458	-0.16621	2.87171	-0.00232
		Λωρίδα 3	10.8302	117.292	6.57419	-0.17388	5.29068	0.09147
	rank 2 VECM Ar(1) 5 lags	Λωρίδα 1	7.92454	62.7983	3.50095	-0.0978	3.74302	0.01341
		Λωρίδα 2	3.98024	15.8423	3.31258	-0.1829	2.85397	-0.00016
		Λωρίδα 3	10.5687	111.698	6.3734	-0.25553	5.13416	0.01241
Περίοδος 2	rank 2 VECM Ar(1) 1 lag	Λωρίδα 1	30.5471	933.125	11.5468	0.22271	15.642	0.05781
		Λωρίδα 2	7.02831	49.3971	4.4932	-0.03549	5.18334	-0.01065
		Λωρίδα 3	35.8218	1283.2	30.612	-1.9474	26.4852	-0.41036
	rank 2 VECM Ar(2) 1 lag	Λωρίδα 1	30.0969	905.821	11.4356	0.23019	15.4849	0.08518
		Λωρίδα 2	6.23748	38.9061	3.96926	-0.06183	4.55687	-0.03126
		Λωρίδα 3	34.7429	1207.07	29.2334	-1.40817	25.3631	-0.23455
	rank 2 VECM Ar(3) 1 lag	Λωρίδα 1	29.9408	896.449	11.4527	0.22723	15.5318	0.07395
		Λωρίδα 2	6.06269	36.7562	3.93328	-0.0854	4.50193	-0.04697
		Λωρίδα 3	34.5461	1193.43	28.8991	-1.26478	25.1345	-0.08985
	rank 2 VECM Ar(1) 3 lags	Λωρίδα 1	41.3622	1710.83	15.5791	-0.01175	21.1715	0.02607
		Λωρίδα 2	6.21946	38.6817	3.9902	-0.07732	4.57181	-0.044
		Λωρίδα 3	45.1756	2040.84	33.603	-0.12713	29.6153	0.02694
	rank 2 VECM Ar(1) 4 lags	Λωρίδα 1	41.2471	1701.32	15.7053	-0.02479	21.3359	0.00969
		Λωρίδα 2	6.67689	44.5809	4.17426	-0.07055	4.79889	-0.04302
		Λωρίδα 3	45.459	2066.52	33.1156	-0.02908	29.2196	0.06096
	rank 2 VECM Ar(1) 5 lags	Λωρίδα 1	41.3664	1711.18	15.4319	-0.01395	20.9337	-0.0179
		Λωρίδα 2	6.94372	48.2153	4.41993	-0.04348	5.0857	-0.02989
		Λωρίδα 3	45.0183	2026.65	33.4417	0.17639	29.5127	0.23677

Από τους παραπάνω πίνακες και γενικότερα από την ανάλυση παρατηρούνται τα εξής:

Διαπιστώνεται εύκολα ότι τα σφάλματα πρόγνωσης των προτύπων, της πρώτης περιόδου κυρίως, είναι πολύ μικρού μεγέθους, δείχνοντας έτσι ότι οι προβλέψεις τους αποκλίνουν ελάχιστα από την πραγματικότητα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η βάση δεδομένων που αξιοποιήθηκε παρουσίασε γενικά, αλλά και ειδικά λόγω ώρας αιχμής, μικρές διακυμάνσεις. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι κοντά στις περιοχές συμφόρησης, η ταχύτητα παρουσίασε ελάχιστα χασοτική συμπεριφορά.

Όσον αφορά την ανάλυση ανά λωρίδα, η λωρίδα 2 εμφανίζει σχεδόν σε όλα τα πρότυπα πρόβλεψης τη μεγαλύτερη ακρίβεια. Μόνο στην περίπτωση των ARFIMAX προτύπων της πρώτης περιόδου φαίνεται να είναι δυσδιάκριτη η διαφοροποίηση αυτή όπου κοντά στην ακρίβεια πρόβλεψης του πρότυπου για τη λωρίδα 2 είναι και αυτό της λωρίδας 1. Απ' την άλλη μεριά, η λωρίδα 3 εμφανίζει τη μικρότερη ακρίβεια πρόβλεψης με αρκετά μεγάλη διαφορά σε σχέση με τις άλλες δύο λωρίδες.

Παρατηρείται επίσης εύκολα το γεγονός ότι η προσθήκη των εξωγενών παραμέτρων στα πρότυπα, βελτιώνει σε αρκετά μεγάλο βαθμό την πρόβλεψη της ταχύτητας. Αυτό συμβαίνει ανεξαρτήτως περιόδου κυρίως για τις λωρίδες 1 και 2, όπου η βελτίωση αυτή είναι της τάξης του 30%. Για τη λωρίδα 3 δεν ισχύει κάτι παρόμοιο αφού οι αλλαγές στην ακρίβεια πρόβλεψης, λόγω προσθήκης εξωγενών μεταβλητών, είναι ανεπαίσθητες.

Συγκρίνοντας τις δύο περιόδους και μιλώντας πάντα για την ανάλυση ανά λωρίδα, είναι εμφανής μία σημαντική διαφορά στην ακρίβεια πρόβλεψης των προτύπων. Για τη λωρίδα 2 η διαφορά αυτή παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, ενώ για τις λωρίδες 1 και 3 η ακρίβεια πρόβλεψης των προτύπων έως και πενταπλασιάζεται από την περίοδο 2 στην 1.

Γενικά για την ανάλυση ανά λωρίδα παρατηρείται ότι τα πρότυπα που αναπτύχθηκαν επιτυγχάνουν αρκετά καλή ακρίβεια πρόβλεψης για τη λωρίδα 2 και για τις δύο περιόδους και για τις λωρίδες 1 και 3 για την περίοδο 1.

Όσον αφορά την ανάλυση ανά διατομή, φαίνεται ότι για όλα τα πρότυπα και περιόδους η ακρίβεια πρόβλεψης είναι πολύ μεγάλη. Επίσης, σε όλα τα πρότυπα, εκτός του ARFIMAX της 2^{ης} περιόδου, επιτυγχάνει ακρίβεια πρόβλεψης μεγαλύτερη της ανάλυσης ανά λωρίδα. Στο ARFIMAX της 2^{ης} περιόδου, η ακρίβεια της ανάλυσης ανά λωρίδα για την 2^η λωρίδα μόνο, είναι μεγαλύτερη από αυτή της ανάλυσης ανά διατομή.

Επιπρόσθετα, η διανυσματική ανάλυση μέσω των προτύπων VECM δίνει, ανά λωρίδα και για τις δύο περιόδους, χειρότερης ακρίβειας προβλέψεις από τα ARFIMAX και τα ARFIMA πρότυπα και για τις τρεις λωρίδες. Μόνο το ARFIMA της 1^{ης} λωρίδας για την περίοδο 1 εξαιρείται από τα παραπάνω, το οποίο με μικρή διαφορά δίνει χειρότερες προβλέψεις από τα πρότυπα VECM. Να σημειωθεί ότι από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι και η ανάλυση ανά διατομή έχει καλύτερα πρότυπα πρόβλεψης σε σχέση με τα διανυσματικά. Συγκρίνοντας τα μεταξύ τους, φαίνεται ότι όπως και στην ανάλυση ανά λωρίδα, μεγαλύτερη ακρίβεια πρόβλεψης επιτυγχάνεται για τη λωρίδα 2 και μικρότερη για την 3^η λωρίδα και για τις δύο περιόδους. Επίσης, συγκρίνοντας τα πρότυπα VECM μεταξύ τους ανά λωρίδα, συμπεραίνεται ότι αρκετά καλύτερες προβλέψεις δίνονται για την περίοδο 1 απ' ό,τι για την 2.

Κάτι άλλο που χρήζει επισήμανσης, είναι το γεγονός ότι για την πρώτη περίοδο η «αναγκαία» πληροφορία που απαιτείται να εισαχθεί ως εξωγενής μεταβλητή στα πρότυπα προέρχεται μόνο από τον φωρατή μελέτης και τον αμέσως προηγούμενο. Για τη δεύτερη περίοδο, κάτι τέτοιο φαίνεται να ισχύει μόνο για την 1^η λωρίδα καθώς και για τα πρότυπα ανάλυσης διατομής (πλην ενός που απαιτεί πληροφορία από 2 φωρατές «πίσω»). Τα πρότυπα της λωρίδας 3, φαίνεται πως απαιτούν πληροφορίες μόλις από τον φωρατή μελέτης, γεγονός το οποίο δείχνει ότι δεν υπάρχει καμία σύνδεση μεταξύ της ταχύτητας σε ένα σημείο και των ανάντη αυτού. Πιθανότατα αυτό να οφείλεται στη χαοτική με μεγάλες διακυμάνσεις κατανομή της ταχύτητας της 3^{ης} λωρίδας η οποία εντείνεται όταν οι φόρτοι είναι πολύ χαμηλοί. Όσον αφορά τη λωρίδα 2, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν έναν συσχετισμό μεταξύ της ταχύτητας και των πληροφοριών 2 έως και 5 φωρατών ανάντη του σημείου μελέτης. Αντίθετα με την περίοδο 1 λοιπόν, εδώ φαίνεται πως λόγω των μεγαλύτερων ταχυτήτων, τα οχήματα χρειάζονται μικρότερο χρόνο για να διανύσουν μία απόσταση και επομένως μία πληροφορία από περισσότερους φωρατές είναι απαιτούμενη. Το ίδιο δεν συμβαίνει και με την περίοδο 1 αφού η πληροφορία της ταχύτητας των οχημάτων σε

ένα σημείο π.χ. 7 χλμ ανάντη του σημείου μελέτης, φαίνεται να μην είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τα πρότυπα.

Τέλος, κατά την ανάλυση όλων των προτύπων παρατηρήθηκε ότι ο παράγοντας της βροχόπτωσης δεν ήταν στατιστικά σημαντικός όποτε συμπεραίνεται ότι δεν βελτιώνει σημαντικά την προβλεπτική ικανότητά τους.

Να σημειωθεί ότι όλες οι συγκρίσεις μεταξύ των προτύπων ίδιας ή διαφορετικής κατηγορίας ανάλυσης γίνονται με κριτήριο τους δείκτες αξιολόγησης MAE και MAPE.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα και προτάσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των στόχων που τέθηκαν στο Κεφάλαιο 1 της παρούσας εργασίας καθώς και των αποτελεσμάτων της ανάλυσης του προηγούμενου κεφαλαίου. Αμέσως μετά παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

6.1 Εισαγωγή

Όπως διατυπώθηκε και στο 1^ο κεφάλαιο, οι τρεις κυριότεροι στόχοι της εργασίας αυτής είναι η ανάπτυξη και αξιολόγηση των προτύπων πρόβλεψης του μεγέθους της ταχύτητας σε αυτοκινητόδρομο μέσω των παραμετρικών προτύπων ARIMA και των παραγώγων τους, η εξέταση για πρώτη φορά της ακρίβειας πρόβλεψης των προτύπων VECM και η διερεύνηση της πιθανότητας βελτίωσης της ακρίβειας πρόβλεψης του πρότυπου από την εισαγωγή εξωγενών μεταβλητών σε αυτό καθώς επίσης και το μέγεθος της επιρροής των καιρικών φαινομένων, ως εξωγενών παραμέτρων, στην κυκλοφορία.

Προκειμένου λοιπόν να επιτευχθούν οι παραπάνω στόχοι, συνοπτικά έγινε:

- Διάσπαση της μελέτης και ανάλυση σε δύο ξεχωριστές περιόδους με ομοιογενή κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά εκ των οποίων η μία είχε τα χαρακτηριστικά της ελεύθερης ροής (23:00-05:00). Αυτό έγινε ούτως ώστε να εξεταστεί η δυνατότητα επίτευξης καλύτερης πρόβλεψης στην καθεμία ξεχωριστά απ' ότι σε ολόκληρη αλλά και για να συγκριθούν μεταξύ τους. Για να μην επαναλαμβάνεται συνεχώς παρακάτω, όλες οι αναλύσεις που θα αναφέρονται πραγματοποιήθηκαν ανά περίοδο.

- Ανάλυση ανά λωρίδα. Για κάθε λωρίδα αναπτύχθηκαν ξεχωριστά πρότυπα και βρέθηκε το βέλτιστο από αυτά.
- Ανάλυση διατομής οδού. Αντιμετωπίστηκε η οδός σαν μία ενιαία λωρίδα βρίσκοντας τους σταθμισμένους μέσους όρους όλων των λωρίδων. Έπειτα υπολογίστηκε για αυτή το βέλτιστο πρότυπο.
- Σε όλα τα παραπάνω πρότυπα, έγινε προσθήκη συναρτήσεων μεταφοράς (εξωγενών μεταβλητών) και πιο συγκεκριμένα της ταχύτητας, του φόρτου και της βροχόπτωσης και εξετάστηκε αν βελτιώθηκε η ακρίβεια πρόβλεψης.
- Τέλος, αναπτύχθηκαν τα πρότυπα VECM και αξιολογήθηκε η προβλεπτική τους ικανότητα.

6.2 Ανάλυση των αποτελεσμάτων

Σε αυτή την ενότητα πραγματοποιείται η ανάλυση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν στο κεφάλαιο 5. Τα κυριότερα από αυτά είναι:

Για την περίοδο 1 τα πρότυπα ARFIMA ανά λωρίδα επιτυγχάνουν αρκετά καλή ακρίβεια της τάξης του 3,5 % για τη λωρίδα 1, του 3,2 % για τη λωρίδα 2 και του 5,8 % για τη λωρίδα 3. Το αντίστοιχο μέσο απόλυτο σφάλμα για την κάθε λωρίδα είναι 3,5 χλμ/ώρα, 2,7 χλμ/ώρα και 4,4 χλμ/ώρα. Από την άλλη μεριά για την περίοδο 2 η ακρίβεια των προτύπων ARFIMA είναι αρκετά μειωμένη συγκριτικά με της περιόδου 1. Οι τιμές του μέσου απόλυτου ποσοστιαίου σφάλματος και του μέσου απόλυτου σφάλματος για τις λωρίδες 1,2 και 3 είναι 11,3 %, 3,7 %, 28 % και 15,4 χλμ/ώρα, 4,3 χλμ/ώρα, 24,4 χλμ/ώρα αντίστοιχα.

Όσον αφορά τα πρότυπα ARFIMAX ανά λωρίδα και συγκεκριμένα για την περίοδο 1 επιτυγχάνουν εξαιρετική ακρίβεια της τάξης του 2 % για τη λωρίδα 1, του 2,1 % για τη λωρίδα 2 και του 5,2 % για τη λωρίδα 3. Το αντίστοιχο μέσο απόλυτο σφάλμα για την κάθε λωρίδα είναι 2 χλμ/ώρα, 1,7 χλμ/ώρα και 4 χλμ/ώρα. Από την άλλη μεριά για την περίοδο 2 η ακρίβεια των προτύπων ARFIMAX είναι μειωμένη συγκριτικά με της περιόδου 1. Οι τιμές του μέσου απολύτου ποσοστιαίου σφάλματος και του μέσου απολύτου σφάλματος για τις λωρίδες 1,2 και 3 είναι 8,9 %, 2,3 %, 27,7 % και 12 χλμ/ώρα, 2,7 χλμ/ώρα, 24,7 χλμ/ώρα αντίστοιχα.

Σχετικά με την ανάλυση διατομής και για την περίοδο 1 τα πρότυπα ARFIMA επιτυγχάνουν αρκετά καλή ακρίβεια της τάξης του 2,8 %. Το αντίστοιχο μέσο απόλυτο σφάλμα είναι 2,5 χλμ/ώρα. Η ακρίβεια των προτύπων ARFIMA της περιόδου 2 είναι λίγο μειωμένη συγκριτικά με της περιόδου 1. Οι τιμές του μέσου απολύτου ποσοστιαίου σφάλματος και του μέσου απολύτου σφάλματος είναι 3,5 % και 4,1 χλμ/ώρα. Όσον αφορά τα ARFIMAX της περιόδου 1, παρουσιάζουν MAPE ίσο με 1,5 % και MAE ίσο με 1,4 χλμ/ώρα. Για την περίοδο 2 οι αντίστοιχοι δείκτες λαμβάνουν τιμή ίση με 2,3 % και 2,7 χλμ/ώρα αντίστοιχα σημειώνοντας έτσι μία μικρή αύξηση.

Να τονιστεί ότι με την εισαγωγή των εξωγενών παραμέτρων του φόρτου, της ταχύτητας και της βροχόπτωσης στα παραπάνω πρότυπα παρατηρείται μία βελτίωση της προβλεψιμότητας των προτύπων. Η βελτίωση αυτή διακυμάνθηκε από 10,3 % για την περίοδο 1 και την λωρίδα 3 έως και 42,4 % για την περίοδο 1 και τη λωρίδα 1. Όσον αφορά την ανάλυση διατομής, η προσθήκη των εξωγενών παραμέτρων στο πρότυπο πρόγνωσης δείχνει να βελτιώνει την ακρίβεια πρόβλεψης κατά 46,4 % κατά την περίοδο 1 και 34,3 % κατά την περίοδο 2.

Όπως προαναφέρθηκε, στα περισσότερα πρότυπα η πληροφορία που απαιτείται (εξωγενείς μεταβλητές) να εισαχθεί αρκεί να είναι από 1 φωρατή ανάντη του σημείου μελέτης. Αυτό καταδεικνύει την επιρροή της ταχύτητας από τα χώρο-χρονικά δεδομένα που στις περισσότερες των περιπτώσεων φαίνεται να είναι από ένα φωρατή και 1 πεντάλεπτο πριν του σημείου και της στιγμής μελέτης (και όχι από περισσότερες χώρο-χρονικά δεδομένα). Από αυτό διαφοροποιούνται μόνο οι λωρίδες 2 (πληροφορίες έως και από 5 φωρατές «πίσω») και 3 (πληροφορίες μόνο από το φωρατή μελέτης) και μόνο για την περίοδο 2. Για τη δεύτερη λωρίδα αυτό δείχνει έναν συσχετισμό μεταξύ της ταχύτητας και των άλλων χώρο-χρονικών πληροφοριών αρκετών φωρατών ανάντη του σημείου μελέτης, το οποίο μάλλον οφείλεται στο ότι

τα οχήματα χρειάζονται μικρότερο χρόνο για να διανύσουν μία απόσταση και επομένως μία πληροφορία από περισσότερους φωρατές είναι απαιτούμενη. Για την τρίτη λωρίδα, η απαίτηση πληροφοριών μόνο από το φωρατή μελέτης πιθανόν οφείλεται στη χαοτική συμπεριφορά της ταχύτητας ιδιαίτερα κατά τις περιόδους χαμηλού φόρτου.

Επίσης, η ανάλυση διατομής της οδού δίνει βελτιωμένα αποτελέσματα σε σύγκριση με την ανάλυση ανά λωρίδα κατά 0 έως και 28,6 % ανάλογα με τη λωρίδα, την περίοδο και το πρότυπο.

Να σημειωθεί ότι συγκρίνοντας τις προβλέψεις των προτύπων της 1^{ης} και της 2^{ης} περιόδου, παρατηρείται επίσης μία διαφορά ως προς την ικανότητα πρόβλεψης τους. Συγκεκριμένα, για τα πρότυπα ARFIMA η μεγαλύτερη διαφορά στην ακρίβεια πρόβλεψης παρατηρείται για τη λωρίδα 3, η οποία από την 2^η στην 1^η περίοδο είναι μειωμένη κατά 79,3 %. Το αντίστοιχο νούμερο είναι 81,2 % και αναφέρεται ξανά στη λωρίδα 3.

Όσον αφορά τα πρότυπα πρόβλεψης VECM, οι προβλέψεις που επιτυγχάνουν είναι εξίσου ικανοποιητικής και μεγάλης ακρίβειας με αυτή των ARFIMA. Μάλιστα για τη λωρίδα 1 και την πρώτη περίοδο, οριακά οι προβλέψεις των VECM είναι καλύτερες των ARFIMA. Για όλες τις άλλες λωρίδες και περιόδους, τα ARFIMA επιτυγχάνουν ελάχιστα καλύτερες προβλέψεις από αυτά.

Τέλος, ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι από την ανάλυση αποδείχτηκε ότι ο εξωγενής παράγοντας βροχόπτωση δεν ήταν στατιστικά σημαντικός και επομένως μικρή η επιρροή του στα κυκλοφοριακά μεγέθη.

6.3 Εξαγωγή συμπερασμάτων

Από την παραπάνω διερεύνηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης προκύπτει ότι:

Η συμπεριφορά της ταχύτητας κοντά στη συμφόρηση, ήταν ελάχιστα χασοτική γεγονός το οποίο φαίνεται και από τα μικρού μεγέθους σφάλματα αλλά και από τα διαγράμματα της χρονικής εξέλιξης της ταχύτητας τα οποία κοντά στον κορεσμό δεν παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις.

Ο χωρισμός της βάσης δεδομένων σε δύο περιόδους μελέτης ήταν ορθός αν λάβει κανείς υπόψη την αρκετά μεγάλη διαφορά στην ακρίβεια πρόγνωσης των μεγεθών μεταξύ των δύο περιόδων. Το αρκετά ενθαρρυντικό αποτέλεσμα ήταν ότι επιτεύχθηκε αρκετά μεγάλη ακρίβεια για τα κυκλοφοριακά μεγέθη της πρώτης περιόδου, δηλαδή κατά την περίοδο αιχμής. Αυτή είναι και η περίοδος που ενδιαφέρει ιδιαίτερα έναν συγκοινωνιολόγο μηχανικό καθώς σε αυτή θα κληθεί κυρίως να εφαρμόσει τα πρότυπα αυτά.

Επιπρόσθετα, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι σε συνθήκες συμφόρησης όπου ο φόρτος και η ταχύτητα δεν έχουν μεγάλες διακυμάνσεις, είναι δυνατόν να προβλεφθεί με μεγαλύτερο βαθμό ακρίβειας το μέγεθος της ταχύτητας. Αντίθετα, υπό συνθήκες ελεύθερης ροής, η ακρίβεια πρόβλεψης χειροτερεύει και γίνεται έως και μέτρια ανάλογα με τη λωρίδα και το πρότυπο.

Κάτι άλλο ευδιάκριτο είναι η σαφής βελτιωμένη πρόβλεψη όταν πραγματοποιείται ανάλυση διατομής της οδού σε σχέση με αυτή ανά λωρίδα. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι όταν μία οδός μελετάται συνολικά ως μία διατομή και όχι ξεχωριστά ανά λωρίδα, μπορεί να γίνει καλύτερη ή ίδια πρόγνωση των μεγεθών της.

Η διανυσματική πολυμεταβλητή ανάλυση που πραγματοποιήθηκε μέσω των προτύπων VECM, απέδωσε προβλέψεις εξίσου καλές ή ελάχιστα χειρότερες από τα αντίστοιχα ARFIMA και ARIMA. Αυτό το γεγονός είναι πολύ ενθαρρυντικό ειδικά εάν ληφθεί υπόψη δύο παράγοντες. Ο πρώτος είναι ότι στα πρότυπα αυτά δεν υπήρχε η δυνατότητα να εισαχθούν εξωγενείς μεταβλητές. Εάν κάτι τέτοιο ήταν εφικτό, πολύ

πιθανόν είναι να επιτυγχάνονταν αρκετά μεγαλύτερη ακρίβεια. Ο δεύτερος είναι ότι η συνολοκλήρωση πραγματοποιήθηκε με την υπόθεση ότι και οι τρεις χρονοσειρές είναι $I(1)$ ολοκληρωμένες. Μπορεί λοιπόν να ειπωθεί ότι η διανυσματική ανάλυση σε σύγκριση με την μονοπαραγοντική, έδωσε εξίσου πολύ καλά αποτελέσματα.

Τέλος, έγινε ιδιαίτερα αισθητή η βελτίωση της προβλεπτικής ικανότητας των προτύπων όταν σε αυτά προστέθηκαν ως εξωτερικές μεταβλητές ο φόρτος, η ταχύτητα και η βροχόπτωση. Καμία γενίκευση δεν μπορεί να γίνει όμως ως προς το ποιο παράγοντες συνετέλεσαν κυρίως σε αυτό. Αντίθετα, η στατιστική ανάλυση υπέδειξε τη βροχόπτωση ως στατιστικά ασήμαντη γεγονός που πιθανότατα να οφείλεται στην χαμηλή της ένταση. Επίσης πολύ πιθανόν είναι η παρεμβολή να έδωσε λάθος εκτίμηση της έντασης, χρονικής διάρκειας και ώρα έναρξης της βροχόπτωσης στο σημείο του ενδιαφέροντος γεγονός που εάν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα είναι λογικό να αλλοιώνει αρκετά τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Κάτι άλλο το οποίο μπορεί να συντελεί στο γεγονός ότι η βροχόπτωση βρέθηκε να επιδρά λίγο τα κυκλοφοριακά μεγέθη, είναι ο μικρός αριθμός των επεισοδίων βροχόπτωσης. Το πρότυπο με τόσο λίγες πληροφορίες από το παρελθόν ίσως να απέτυχε να προσδιορίσει σωστά την επίδραση των καιρικών συνθηκών στην κυκλοφορία, πράγμα το οποίο ενισχύεται και από τη μορφή του σχήματος 3.22 όπου η ταχύτητα φαίνεται αισθητά διαφοροποιημένη κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης συγκριτικά με τις άλλες ημέρες όπου η βροχόπτωση απουσιάζει.

6.4 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Παρακάτω γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στα πεδία που δεν καλύφθηκαν ή καλύφθηκαν εν μέρει στην εργασία αυτή και δίνονται οι απαραίτητες κατευθύνσεις ώστε να υπερπηδηθούν και να καλυφθούν αδυναμίες που παρουσιάστηκαν:

Η ανάλυση στην εργασία αυτή έγινε ξεχωριστά για δύο περιόδους μελέτης. Σκόπιμο κρίνεται μελλοντικά να γίνεται η ανάλυση ανά περίοδο και σε ακόμη μικρότερης διάρκειας περιόδους ώστε να εξεταστεί η πιθανότητας βελτίωσης της πρόγνωσης με αυτόν τον τρόπο.

Παρότι η αξιολόγηση στην παρούσα εργασία έγινε με δεδομένα εντός δείγματος (in-sample) προτείνεται γενικώς να πραγματοποιείται και με εκτός δείγματος δεδομένα (out-of-sample) όπως άλλωστε θα κληθούν να λειτουργήσουν σε πραγματικές συνθήκες.

Ιδιαίτερα σημαντικό θα ήταν να εξεταστεί αν βελτιώνεται η ακρίβεια των προβλέψεων των προτύπων VECM με την εισαγωγή σε αυτά εξωγενών παραμέτρων όπως ο φόρτος και η βροχόπτωση.

Τέλος όπως προαναφέρθηκε, ένας από τους πιθανούς παράγοντες που η επίδραση των καιρικών συνθηκών δεν αποδείχτηκε σημαντική ήταν η μικρής έκτασης βάση δεδομένων. Προτείνεται λοιπόν στο μέλλον να αξιοποιηθεί μεγαλύτερη βάση δεδομένων για τον σκοπό αυτό καθώς και να εξεταστούν επεισόδια βροχόπτωσης μεγαλύτερης έντασης και διάρκειας. Να προταθεί τέλος η ανάλυση με συχνότητα μεγεθών μικρότερη του πεντάλεπτου ή με μικρή διαφορά φάσης μεταξύ των χρονοσειρών ταχύτητας και βροχόπτωσης μιας και η επίδραση που ασκείται είναι εμπειρικά αρκετά γρήγορη.

Βιβλιογραφία

Ahmed, M.S., Cook, A.R., (1979). **"Analysis of freeway traffic time-series data by using Box–Jenkins techniques"**. Transportation Research Board 722, 1–9

Davis, G.A., Niham, N.L., Hamed, M.M., Jacobson, L.N. (1991). **"Adaptive forecasting of freeway traffic congestion"**. Transp. Res. Rec. 1287, 29–33

Cheslow M, Hatcher SG, Patel VM (1992). **"An initial evaluation of alternative intelligent vehicle highway systems architecture"**, MITRE Report 92w0000063, MITRE Corporation

Beran, J. (1994). **"Statistics for long-memory processes"**, Chapman and Hall

Florio, L., Mussone, L. (1996). **"Neural-Network models for classification and forecasting of freeway traffic flow stability"**. Elsevier, Control. Eng. Pract. 4, 153–164

Howard R. Kirby, Susan M. Watson and Mark S. Dougherty (1997). **"Should we use neural networks or statistical models for short-term motorway traffic forecasting?"**, International Journal of Forecasting, vol. 13, issue 1, pages 43-50

Williams BM, Durvasula PK, Brown DE (1998). **"Urban freeway traffic flow prediction: Application of seasonal autoregressive integrated moving average and exponential smoothing models"**. Transport. Res. Rec. (1644): 132-141.

Chen H., Grant-Muller S., Mussone L. and Montgomery F. (2001). **"A Study of Hybrid Neural Network Approaches and the Effects of Missing Data on Traffic Forecasting"**, Neural Comput & Applic, 10, 277–286

Williams, B.M., (2001). **"Multivariate vehicular traffic flow prediction: an evaluation of ARIMAX modeling"**. Transportation Research Record 1776, 194–200

Stathopoulos, A., Karlaftis, M.G. (2001). **"Spectral and crossspectral analysis of urban traffic flows"**. IEEE Proceedings, Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC, Oakland, CA, USA, pp. 820–825

Smith B., Williams B., Oswald K. (2002). **"Comparison of parametric and nonparametric models for traffic flow forecasting"**, Elsevier, Transportation Research Part C 10, 303-321

Oh, J.S., Shim, Y.U., Cho, Y.H. (2002). **"Effect of weather conditions to traffic flow on freeway"**, KSCE J. Civ. Eng. 6(4), 413–420

Stathopoulos, A. and Karlaftis, M. G. (2002). **"Modeling duration of urban traffic congestion"**, ASCE, Journal of Transportation Engineering, Vol. 128, 587-590

Stathopoulos, A. and Karlaftis, M. G. (2003). **"A multivariate state-space approach for urban traffic flow modeling and prediction"**, Transportation Research Part C, 11 (2), 121-135

Clark, Stephen. (2003). **"Traffic prediction using multivariate nonparametric regression"**. Journal of Transportation Engineering, Vol. 129, No. 2

Kamarianakis, Y. and Prastacos, P. (2003). **"Forecasting Traffic Flow Conditions in an Urban Network: Comparison of Multivariate and Univariate Approaches"**, Transportation Research Record, 1857, 74-84

Williams, B. M. and Hoel, L. A. (2003). **"Modeling and Forecasting Vehicular Traffic Flow as a Seasonal ARIMA Process: Theoretical Basis and Empirical Results"**, ASCE Journal of Transportation Engineering, 129(6), 664-672

Huang, S.H., Ran, B. (2003). **"An application of neural network on traffic speed prediction under adverse weather conditions"**, Proc. Transportation Research Board 2003 A. Meet, Transportation Research Board, Washington D.C.

Vlahogianni, E. I., Golias, J. C. and Karlaftis, M. G. (2004). **"Short-term traffic forecasting: Overview of objectives and methods, Transport Reviews"**, 24(5), 533-557

Pisano, P., Goodwin, L. (2004). **"Arterial operations in adverse weather"**, Institute of Transportation Engineers 2004 Annual Meeting, FHWA Road Weather Management Program and Mitretek Systems

Vlahogianni, E. I., Karlaftis, M. G. and Golias, J. C. (2005). **"Optimized and meta-optimized neural networks for short-term traffic flow prediction: A genetic approach"**, Transportation Research C, 13, 211-234

Keay, K., Simmonds, I. (2005). **"The association of rainfall and other weather variables with road traffic volume in Melbourne"**, Australia. Accid. Anal. Prev. 37, 109–124

Dailey, D. (2006). **"The use of weather data to predict non-recurring traffic congestion"**, Technical Report No. WA-RD 655.1

Chung, E., Ohtani, O., Warita, H., Kuwahara, M., Morita, H. (2006). **"Does weather affect highway capacity?"**, Presented at the 5th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, Yakoma, Japan

Vlahogianni, E. I., Karlaftis, M. G., and Golias, J. C. (2007). **"Spatio-temporal urban traffic volume forecasting using genetically-optimized modular networks"**, Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 22(5), 317-325

Rakha, H. Farzaneh M., Arafeh, M., Hranac, R., Sterzin, E., Krechmer, D. (2007). **"Empirical studies on traffic flow in inclement weather"**. Final Report—Phase I, FHWA-HOP-07- 073, Washington, D.C.

Vlahogianni, E. (2007). **"Some empirical relations between travel speed, traffic volume and traffic composition in urban arterials"**. IATSS Res. 31, 2007

Shekhar S. and Williams B. (2008). **"Adaptive seasonal time series models for forecasting short-term traffic flow"**, TRB, Transportation Research Record, Vol. 2024, 116-125

Lin, Q., Nixon, W. (2008). **"Effects of adverse weather on traffic crashes: systematic review and meta-analysis"** Proceedings of the 87nd Annual Meeting

of the Transportation Research Board (CD ROM), Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.

Vlahogianni, E.I. (2009). **"Enhancing predictions in signalized arterials with information on short-term traffic flow dynamics"**. J. Intell. Transport. Syst. 13(2), 73–84

Matthew G. Karlaftis, Eleni I. Vlahogianni (2009). **"Memory properties and fractional integration in transportation time-series"**, Transportation Research Part C 17 (2009) 444–453

Johansen, S. (2010). **"The analysis of nonstationary time series using regression, correlation and cointegration with an application to annual mean temperature and sea level"**, Discussion paper, Department of Economics, University of Copenhagen

Washington, S., Karlaftis, M.G., Mannering (2010). F.L. **"Statistical and econometric methods for transportation data analysis"**, 2nd edition. Chapman & Hall/CRC Press, Boca Raton

Johansen, S. and M. Ø., Nielsen (2010b). **"Likelihood inference for a vector autoregressive model which allows for fractional and cofractional processes"**, (Discussion papers10-15, Department of Economics, University of Copenhagen, 41 pp.)

Matlab R2010b Manual

Vlahogianni, E. I. and Karlaftis, M. G (2012). **"Comparing traffic flow time-series under fine and adverse weather conditions using recurrence-based complexity measures"**, Nonlinear Dynamics, An International Journal of Nonlinear Dynamics and Chaos in Engineering Systems, Vol 69, No 4, 1949–1963

Tsirigotis, L., Vlahogianni, E.I., Karlaftis, M.G. (2012). **"Does information on weather affect the performance of short-term traffic forecasting models?"** Int. J. Transp. Res. 10(1), 1–10

E. I. Vlahogianni, M. G. Karlaftis, K. Kepaptsoglou (2012). **“Testing and comparing neural network and statistical approaches for predicting transportation time series”**,

Φραντζεσκάκης Ι., Πιτσιάβα-Λατινοπούλου Μ., Τσαμπούλας Δ. (1997). **“Διαχείριση Κυκλοφορίας”**, Β' Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου

Φραντζεσκάκης Ι., Πιτσιάβα-Λατινοπούλου Μ., Γκόλιας Ι. (2009). **“Κυκλοφοριακή Τεχνική”**, Εκδόσεις Παπασωτηρίου

Υπουργείο Ανάπτυξης Ανταγωνιστικότητας Υποδομών, Μεταφορών και δικτύων (2012)