

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

**Ανάπτυξη Εναλλακτικών Μοντέλων Χρονοσειρών για την
Βραχυπρόθεσμη Πρόβλεψη Ταχύτητας σε Ελεύθερες
Λεωφόρους στον Αστικό Χώρο**



Διπλωματική εργασία

Τσιριγώτης Λυκούργος

Επιβλέπων: Ματθαίος Γ. Καρλαύτης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Ιούλιος 2010

Περιεχόμενα

i	Περιεχόμενα.....	1
ii	Ευρετήριο σχημάτων.....	4
iii	Ευρετήριο πινάκων.....	9
iv	Ευχαριστίες.....	10
v	Σύνοψη.....	11
vi	Abstract.....	12
vii	Περίληψη.....	13
1	Εισαγωγή.....	16
1.1	Η σημασία της πρόγνωσης των κυκλοφοριακών μεγεθών.....	16
1.2	Η επιρροή των καιρικών συνθηκών στην κυκλοφορία.....	18
1.3	Σκοπός διπλωματικής εργασίας.....	21
1.4	Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας.....	22
2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	23
2.1	Εισαγωγή.....	23
2.2	Μέθοδοι βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης της κυκλοφορίας.....	24
2.2.1	Παραμετρικές μέθοδοι.....	24
2.2.2	Μη παραμετρικές μέθοδοι.....	37
2.2.3	Σύγκριση μεθόδων.....	40
2.3	Μελέτη της επιρροής δεδομένων καιρού στην πρόβλεψη της κυκλοφορίας.....	45
2.4	Συμπεράσματα.....	50
3	Βάση δεδομένων και μεθοδολογική προσέγγιση.....	56
3.1	Βάση δεδομένων.....	56
3.1.1	Περιγραφή βάσης δεδομένων.....	56
3.1.2	Ανάλυση βάσης δεδομένων.....	58
3.2	Μεθοδολογική προσέγγιση.....	70
3.2.1	Θεωρητικό υπόβαθρο.....	70
3.2.1.1	Βασικά στοιχεία χρονοσειρών.....	70
3.2.1.2	Υποδείγματα AR(I)MA.....	73

3.2.2	Περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού.....	81
3.2.2.1	Έλεγχος και επεξεργασία βάσης δεδομένων.....	81
3.2.2.2	Αντικείμενο υπόλογισμού.....	81
3.2.2.3	Έλεγχοι στασιμότητας και λήψη διαφορών.....	83
3.2.2.4	Εύρεση της τάξης του υποδείγματος.....	83
3.2.2.5	Εισαγωγή εξωγενούς παραμέτρου X	84
3.2.2.6	Εκτίμηση παραμέτρων και διαγνωστικός έλεγχος.....	85
3.2.2.7	Προβλέψεις και αξιολόγηση.....	85
3.2.2.8	Εκτίμηση υποδείγματος VARMAX.....	85
4	Ανάλυση και αποτελέσματα.....	86
4.1	Εισαγωγή.....	86
4.2	Υπολογισμός και προβλέψεις υποδειγμάτων AR(I)MA.....	87
4.2.1	Όλες οι λωρίδες - όλες οι περίοδοι.....	87
4.2.2	Όλες οι λωρίδες - περίοδος 1 (0 έως 5).....	90
4.2.3	Όλες οι λωρίδες - περίοδος 2 (5 έως 9).....	94
4.2.4	Όλες οι λωρίδες - περίοδος 3 (9 έως 12).....	97
4.2.5	Όλες οι λωρίδες - περίοδος 4 (12 έως 18).....	101
4.2.6	Όλες οι λωρίδες - περίοδος 5 (18 έως 24).....	105
4.3	Υπολογισμός και προβλέψεις υποδειγμάτων AR(I)MAX.....	109
4.3.1	Διερεύνηση βέλτιστων εξωγενών παραμέτρων.....	109
4.3.2	Όλες οι λωρίδες - όλες οι περίοδοι.....	111
4.3.3	Όλες οι λωρίδες - περίοδος 1 (0 έως 5).....	115
4.3.4	Όλες οι λωρίδες - περίοδος 2 (5 έως 9).....	119
4.3.5	Όλες οι λωρίδες - περίοδος 3 (9 έως 12).....	123
4.3.6	Όλες οι λωρίδες - περίοδος 4 (12 έως 18).....	127
4.3.7	Όλες οι λωρίδες - περίοδος 5 (18 έως 24).....	131
4.4	Υπολογισμός και προβλέψεις υποδειγμάτων AR(I)MAX ανά λωρίδα.....	135
4.4.1	Λωρίδα 1 - Όλες οι περίοδοι.....	135
4.4.2	Λωρίδα 2 - Όλες οι περίοδοι.....	140
4.4.3	Λωρίδα 3 - Όλες οι περίοδοι.....	145
4.5	Υπολογισμός και προβλέψεις υποδείγματος VARMAX.....	150
4.6	Αποτελέσματα.....	153

4.7	Διερεύνηση αποτελεσμάτων.....	157
5	Συμπεράσματα και προτάσεις.....	159
5.1	Εισαγωγή.....	159
5.2	Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	160
5.3	Συμπεράσματα.....	163
5.4	Προστάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	165
viii	Βιβλιογραφία.....	166

Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 1.1	Προσεγγιστική σχηματική απεικόνιση της ποσοστιαίας μείωσης της χωρητικότητας αυτοκινητοδρόμου λόγω βροχόπτωσης.....	20
Σχήμα 2.1	Τετραγωνική ρίζα μέσου σφάλματος τετραγώνου (RMSE) των προτεινόμενων μεθόδων ανά βήμα πρόβλεψης.....	32
Σχήμα 2.2	Παράδειγμα της επιρροής της ορατότητας στις σχέσεις της κυκλοφορίας.....	46
Σχήμα 3.1	Περιοχή VDS E 30.1.....	57
Σχήμα 3.2	Διάγραμμα ταχύτητας – φόρτου 25 ^{ης} Νοεμβρίου για το σύνολο των λωρίδων και μετρήσεις 1min.....	58
Σχήμα 3.3	Διάγραμμα ταχύτητας – φόρτου 2 ^{ας} Δεκεμβρίου για το σύνολο των λωρίδων και μετρήσεις 1min.....	58
Σχήμα 3.4	Διάγραμμα ταχύτητας – φόρτου 25 ^{ης} Νοεμβρίου, ανά περίοδο για το σύνολο των λωρίδων και μετρήσεις 1min.....	59
Σχήμα 3.5	Διάγραμμα ταχύτητας – φόρτου 25 ^{ης} Νοεμβρίου, ανά περίοδο για τις περιόδους αιχμής, για το σύνολο των λωρίδων και μετρήσεις 1 min.....	60
Σχήμα 3.6	Διάγραμμα ταχύτητας – φόρτου 2 ^{ας} Δεκεμβρίου, ανά περίοδο για το σύνολο των λωρίδων και μετρήσεις 1min.....	60
Σχήμα 3.7	Διάγραμμα ταχύτητας – φόρτου 2 ^{ας} Δεκεμβρίου, ανά περίοδο για τις περιόδους αιχμής, για το σύνολο των λωρίδων και μετρήσεις 1 min.....	61
Σχήμα 3.8	Χρονική εξέλιξη φόρτου 25 ^{ης} Νοεμβρίου για κάθε λωρίδα και μετρήσεις 10 min...	62
Σχήμα 3.9	Χρονική εξέλιξη φόρτου 2 ^{ας} Δεκεμβρίου για κάθε λωρίδα και μετρήσεις 10 min...	63
Σχήμα 3.10	Χρονική εξέλιξη ταχυτήτων 25 ^{ης} Νοεμβρίου σε κάθε λωρίδα και μετρήσεις 10 min	64
Σχήμα 3.11	Χρονική εξέλιξη ταχυτήτων 2 ^{ας} Δεκεμβρίου σε κάθε λωρίδα και μετρήσεις 10 min	64
Σχήμα 3.12	Μέσος και διάμεσος φόρτος 25 ^{ης} Νοεμβρίου στο σύνολο των λωρίδων.....	65
Σχήμα 3.13	Μέσος και διάμεσος φόρτος 2 ^{ας} Δεκεμβρίου στο σύνολο των λωρίδων.....	66
Σχήμα 3.14	Μέσος και διάμεσος ταχύτητας 25 ^{ης} Νοεμβρίου στο σύνολο των λωρίδων.....	66
Σχήμα 3.15	Μέσος και διάμεσος ταχύτητας 2 ^{ας} Δεκεμβρίου στο σύνολο των λωρίδων.....	67
Σχήμα 4.1	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για όλες τις περιόδους και όλες τις λωρίδες.	87

Σχήμα 4.2	Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMA (3, 1, 3), για όλες τις περιόδους και όλες τις λωρίδες.....	89
Σχήμα 4.3	Διάγραμμα προβλέψεων ARIMA – μετρήσεων, για όλες τις περιόδους και όλες τις λωρίδες.....	90
Σχήμα 4.4	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 1 και όλες τις λωρίδες.....	91
Σχήμα 4.5	Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARMA (3, 3), για την περίοδο 1 και όλες τις λωρίδες.....	93
Σχήμα 4.6	Διάγραμμα προβλέψεων ARIMA – μετρήσεων, για την περίοδο 1 και όλες τις λωρίδες.....	93
Σχήμα 4.7	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 2 και όλες τις λωρίδες.....	94
Σχήμα 4.8	Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMA (2, 1, 1), για την περίοδο 2 και όλες τις λωρίδες.....	96
Σχήμα 4.9	Διάγραμμα προβλέψεων ARIMA – μετρήσεων, για την περίοδο 2 και όλες τις λωρίδες.....	97
Σχήμα 4.10	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 3 και όλες τις λωρίδες.....	98
Σχήμα 4.11	Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMA (3, 1, 2), για την περίοδο 3 και όλες τις λωρίδες.....	100
Σχήμα 4.12	Διάγραμμα προβλέψεων ARIMA – μετρήσεων, για την περίοδο 3 και όλες τις λωρίδες.....	101
Σχήμα 4.13	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 4 και όλες τις λωρίδες.....	101
Σχήμα 4.14	Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMA (1, 1, 2), για την περίοδο 4 και όλες τις λωρίδες.....	104
Σχήμα 4.15	Διάγραμμα προβλέψεων ARIMA – μετρήσεων, για την περίοδο 4 και όλες τις λωρίδες.....	104
Σχήμα 4.16	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 5 και όλες τις λωρίδες....	105
Σχήμα 4.17	Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMA (2, 1, 1), για την περίοδο 5 και όλες τις λωρίδες.....	107
Σχήμα 4.18	Διάγραμμα προβλέψεων ARIMA – μετρήσεων, για την περίοδο 5 και όλες τις λωρίδες.....	108

Σχήμα 4.19	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς φόρτου, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για όλες τις περιόδους και όλες τις λωρίδες.....	112
Σχήμα 4.20	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς βροχόπτωσης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για όλες τις περιόδους και όλες τις λωρίδες.....	113
Σχήμα 4.21	Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMAX (3, 1, 3), για όλες τις περιόδους και όλες τις λωρίδες.....	114
Σχήμα 4.22	Διάγραμμα προβλέψεων ARIMAX – μετρήσεων, για όλες τις περιόδους και όλες τις λωρίδες.....	115
Σχήμα 4.23	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς φόρτου, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 1 και όλες τις λωρίδες.....	116
Σχήμα 4.24	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς βροχόπτωσης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 1 και όλες τις λωρίδες.....	117
Σχήμα 4.25	Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARMAX (3, 3), για την περίοδο 1 και όλες τις λωρίδες.....	118
Σχήμα 4.26	Διάγραμμα προβλέψεων ARIMAX – μετρήσεων, για την περίοδο 1 και όλες τις λωρίδες.....	119
Σχήμα 4.27	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς φόρτου, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 2 και όλες τις λωρίδες.....	120
Σχήμα 4.28	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς βροχόπτωσης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 2 και όλες τις λωρίδες.....	121
Σχήμα 4.29	Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMAX (2, 1, 1), για την περίοδο 2 και όλες τις λωρίδες.....	122
Σχήμα 4.30	Διάγραμμα προβλέψεων ARIMAX – μετρήσεων, για την περίοδο 2 και όλες τις λωρίδες.....	123
Σχήμα 4.31	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς φόρτου, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 3 και όλες τις λωρίδες.....	124
Σχήμα 4.32	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς	

	βροχόπτωσης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 3 και όλες τις λωρίδες.....	125
Σχήμα 4.33	Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMAX (3, 1, 2), για την περίοδο 3 και όλες τις λωρίδες.....	126
Σχήμα 4.34	Διάγραμμα προβλέψεων ARIMAX – μετρήσεων, για την περίοδο 3 και όλες τις λωρίδες.....	127
Σχήμα 4.35	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς φόρτου, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 4 και όλες τις λωρίδες.....	128
Σχήμα 4.36	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς βροχόπτωσης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 4 και όλες τις λωρίδες.....	129
Σχήμα 4.37	Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMAX (1, 1, 2), για την περίοδο 4 και όλες τις λωρίδες.....	130
Σχήμα 4.38	Διάγραμμα προβλέψεων ARIMAX – μετρήσεων, για την περίοδο 4 και όλες τις λωρίδες.....	131
Σχήμα 4.39	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς φόρτου, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 5 και όλες τις λωρίδες.....	132
Σχήμα 4.40	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς βροχόπτωσης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 5 και όλες τις λωρίδες.....	133
Σχήμα 4.41	Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMAX (2, 1, 1), για την περίοδο 5 και όλες τις λωρίδες.....	134
Σχήμα 4.42	Διάγραμμα προβλέψεων ARIMAX – μετρήσεων, για την περίοδο 5 και όλες τις λωρίδες.....	135
Σχήμα 4.43	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς ταχύτητας, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την λωρίδα 1 και όλες τις περιόδους.....	136
Σχήμα 4.44	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς φόρτου, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την λωρίδα 1 και όλες τις περιόδους.....	137
Σχήμα 4.45	Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMAX (3, 1, 2), για την λωρίδα 1 και όλες τις περιόδους.....	139

Σχήμα 4.46	Διάγραμμα προβλέψεων ARIMAX – μετρήσεων, για την λωρίδα 1 και όλες τις περιόδους.....	140
Σχήμα 4.47	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς ταχύτητας, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την λωρίδα 2 και όλες τις περιόδους.....	141
Σχήμα 4.48	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς φόρτου, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την λωρίδα 2 και όλες τις περιόδους.....	142
Σχήμα 4.49	Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMAX (3, 1, 4), για την λωρίδα 2 και όλες τις περιόδους.....	144
Σχήμα 4.50	Διάγραμμα προβλέψεων ARIMAX – μετρήσεων, για την λωρίδα 2 και όλες τις περιόδους.....	145
Σχήμα 4.51	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς ταχύτητας, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την λωρίδα 3 και όλες τις περιόδους.....	146
Σχήμα 4.52	Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς φόρτου, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την λωρίδα 3 και όλες τις περιόδους.....	147
Σχήμα 4.53	Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMAX (3, 1, 0), για την λωρίδα 3 και όλες τις περιόδους.....	149
Σχήμα 4.54	Διάγραμμα προβλέψεων ARIMAX – μετρήσεων, για την λωρίδα 3 και όλες τις περιόδους.....	150
Σχήμα 4.55	Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος VARMAX, για την λωρίδα 1 και όλες τις περιόδους.....	151
Σχήμα 4.56	Διάγραμμα προβλέψεων VARMAX – μετρήσεων, για την λωρίδα 1 και όλες τις περιόδους.....	153
Σχήμα 4.57	Χρονική εξέλιξη σειρών μετρήσεων και προβλέψεων, για όλες τις λωρίδες.....	155
Σχήμα 4.58	Χρονική εξέλιξη σειρών μετρήσεων και προβλέψεων ARIMAX, ανά λωρίδα για όλες τις περιόδους.....	156
Σχήμα 4.59	Χρονική εξέλιξη σειρών μετρήσεων και προβλέψεων VARMAX, για την λωρίδα 1 και όλες τις περιόδους.....	157

Ευρετήριο πινάκων

πίνακας 2.1	Κατανομή σφαλμάτων πρόγνωσης.....	32
πίνακας 2.2	Περίληψη αποτελεσμάτων απόδοσης μοντέλων στην εργασία των Kirby et al. (1997).....	42
πίνακας 2.3	Αποτελέσματα σφάλματος πρόγνωσης Butler et al. (2007).....	50
πίνακας 2.4	Επισκόπηση βιβλιογραφίας.....	55
πίνακας 3.1	Βασικά στατιστικά μεγέθη βάσης δεδομένων.....	68
πίνακας 4.1	Εφαρμογές υποδειγμάτων.....	86
πίνακας 4.2	Παράδειγμα σύγκρισης προτύπων για τις εξωγενείς παραμέτρους (εδώ: όλες οι περίοδοι και όλες οι λωρίδες).....	110
πίνακας 4.3	Δείκτες αξιολόγησης πρόβλεψης για το υπόδειγμα VARMAX.....	152
πίνακας 4.4	Δείκτες αξιολόγησης υποδειγμάτων ARIMA και ARIMAX και σύγκρισή τους.....	154
πίνακας 4.5	Δείκτες αξιολόγησης υποδειγμάτων ARIMAX και VARMAX και σύγκρισή τους.....	154
πίνακας 4.6	Δείκτες αξιολόγησης υποδειγμάτων για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους και σύγκρισή τους.....	158

Ευχαριστίες

Η υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής δε θα ήταν εφικτή χωρίς την συνεχή καθοδήγηση και επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ματθαίου Γ. Καρλαύτη, τον οποίο και ευχαριστώ θερμά. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Λέκτορα κ. Ελένη Βλαχογιάννη για την βοήθεια και τις πολύτιμες συμβουλές που μου παρείχε το χρονικό αυτό διάστημα. Ακόμα, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον κ. Παναγιώτη Χρυσικάκη για την παραχώρηση της βάσης δεδομένων των κυκλοφοριακών μεγεθών. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο Διδάκτορα κ. Κωνσταντίνο Κεπαπτσόγλου, καθώς και την φοιτήτρια κ. Ειρήνη Καστρουνή για την οργάνωση και την προεργασία της βάσης δεδομένων.

Τίτλος: «Ανάπτυξη εναλλακτικών μοντέλων χρονοσειρών για την βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη ταχύτητας σε ελεύθερες λεωφόρους στον αστικό χώρο»

Όνομα: Τσιριγώτης Λυκούργος

Επιβλέπων: Ματθαίος Γ. Καρλαύτης

Αθήνα, Ιούλιος 2010

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι διττός: πρώτον η εκτίμηση και αξιολόγηση της ικανότητας πρόβλεψης εναλλακτικών παραμετρικών μοντέλων της οικογένειας ARIMA και, δεύτερον, η διερεύνηση των επιπτώσεων στην «προβλεπτική ικανότητα» των μοντέλων από την εισαγωγή εξωγενών παραμέτρων, όπως οι καιρικές συνθήκες. Η βάση δεδομένων προέρχεται από κεντρικό, αστικό τμήμα της ελεύθερης λεωφόρου «Αττική Οδός» της περιοχής των Αθηνών. Με την εφαρμογή μοντέλων AR(I)MA, AR(I)MAX και VARMAX ερευνάται η βελτίωση της πρόβλεψης της ταχύτητας στις περιπτώσεις του χωρισμού της ημέρας σε περιόδους, της εισαγωγής των χρονοσειρών φόρτου και βροχόπτωσης στους υπολογισμούς, της ανάλυσης ανά λωρίδα και της δυναμικής αλληλεπίδρασης των χρονοσειρών της ταχύτητας κάθε λωρίδας. Προέκυψε ότι βελτιωμένες προβλέψεις δίνουν ο χωρισμός της ημέρας σε περιόδους με όμοια κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά, η χρήση των παραμέτρων φόρτου και βροχόπτωσης καθώς και η διανυσματική ανάλυση ανά λωρίδα. Αντίθετα, δεν προέκυψε βελτίωση από την απλή ανάλυση ανά λωρίδα.

Λέξεις – κλειδιά: μοντέλα χρονοσειρών, ARIMA, ARIMAX, VARMAX, βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη ταχύτητας, εξωγενείς παράμετροι

Abstract

Title: “Development of time – series models for short – term speed forecasting in urban freeway”

Name: Tsirigotis Lykourgos

Supervisor: Matthew G. Karlaftis

Athens, July 2010

The scope of this thesis is double: first, the estimation and evaluation of the predictive capability of several parametric models of the ARIMA family and, second, the investigation of the changes in their predictive ability when including external parameters, such as the weather conditions. Through the application of AR(I)MA, AR(I)MAX and VARMAX models, on data from an urban tollway in Athens, Greece, the improvement in the predictions are investigated when the day is separated into homogenous time periods and when introducing the volume and rainfall time-series as explanatory variables. Improved accuracy of the predictions was given by the separation of the day into periods with similar traffic characteristics, the use of the volume and rainfall parameters and, finally, the vector analysis per lane.

Keywords: time-series models, ARIMA, ARIMAX, VARMAX, short-term speed forecasting, transfer functions

Απαραίτητο στοιχείο για ένα πετυχημένο σύστημα διαχείρισης της κυκλοφορίας, αποτελεί η δυνατότητα βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης των κυκλοφοριακών μεγεθών. Κατά αυτόν τον τρόπο γίνεται δυνατή η προορατική (proactive) διαχείριση της κυκλοφορίας, με αποτέλεσμα την βελτίωση της πληροφόρησης προς τους οδηγούς και την μείωση της συμφόρησης.

Το πεδίο εφαρμογής στην συγκεκριμένη εργασία είναι ένα κεντρικό, αστικό τμήμα της Αττικής Οδού, η οποία είναι ελεύθερη λεωφόρος της ευρύτερης περιοχής των Αθηνών. Οι ελεύθερες λεωφόροι αποτελούν ένα πρόσφορο πεδίο έρευνας, λόγω της μη – διακοπτόμενης ροής από σηματοδότες, ενώ εάν βρίσκονται σε αστικό τμήμα, όπως στην προκειμένη περίπτωση, παρουσιάζουν περιόδους αιχμών και συμφόρησης. Επιπλέον, ελήφθησαν στοιχεία καιρού, από μετεωρολογικό σταθμό κοντά στην περιοχή μελέτης.

Η βάση δεδομένων αναλύεται για την εξαγωγή βασικών συμπερασμάτων σχετικά με τα κυκλοφοριακά φαινόμενα και τον χωρισμό της ημέρας σε χρονικές περιόδους με όμοια χαρακτηριστικά. Με βάση της ανάλυση αυτή η ημέρα χωρίζεται σε 5 χρονικές περιόδους. Η ταχύτητα επιλέγεται ως το υπό εξέταση μέγεθος κυκλοφορίας, καθώς κρίνεται ως το πλέον χρήσιμο στην διαχείριση της κυκλοφορίας, το άμεσα συνδεδεμένο με τα φαινόμενα βροχόπτωσης και τις κυκλοφοριακές αιχμές, και τέλος οι μετρήσεις της στην συγκεκριμένη περίπτωση κρίθηκαν αξιόπιστες.

Κατά την ανάλυση αναπτύσσονται διάφορα είδη μοντέλων χρονοσειρών της οικογένειας ARIMA, με στόχο την σύγκριση της αξιοπιστίας των προβλέψεων καθενός. Για τον λόγο αυτό εκτιμήθηκαν και αξιολογήθηκαν τα ακόλουθα μοντέλα:

- ✓ **AR(I)MA για το σύνολο της ημέρας και όλες τις λωρίδες.** Γίνεται υπολογισμός ενός απλού AR(I)MA υποδείγματος για όλες τις λωρίδες

και για το σύνολο της ημέρας. Ακολουθως παράγονται εντός δείγματος (in – sample) προβλέψεις και γίνεται αξιολόγησή τους.

- ✓ **AR(I)MA ανά χρονική περίοδο για όλες τις λωρίδες.** Γίνεται υπολογισμός απλών AR(I)MA υποδειγμάτων, ανεξάρτητα για κάθε χρονική περίοδο. Ακολουθως παράγονται εντός δείγματος (in – sample) προβλέψεις και γίνεται αξιολόγησή τους.
- ✓ **AR(I)MAX για το σύνολο της ημέρας και όλες τις λωρίδες.** Γίνεται υπολογισμός ενός AR(I)MAX υποδείγματος, όπου X είναι εξωγενείς παράμετροι (συναρτήσεις μεταφοράς). Ως X λαμβάνονται οι χρονοσειρές του φόρτου και της βροχόπτωσης, η τάξη των οποίων καθορίζεται μετά από διερεύνηση. Η ανάλυση αφορά στο σύνολο της ημέρας και σε όλες τις λωρίδες.
- ✓ **AR(I)MAX ανά χρονική περίοδο για όλες τις λωρίδες.** Γίνεται υπολογισμός ανεξάρτητων AR(I)MAX υποδειγμάτων για κάθε περίοδο. Για τις εξωγενείς παραμέτρους X ακολουθείται η ίδια διαδικασία με παραπάνω. Ακολουθως παράγονται εντός δείγματος (in – sample) προβλέψεις, των οποίων τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τις άλλες εφαρμογές.
- ✓ **AR(I)MAX ανά λωρίδα για το σύνολο της ημέρας.** Αναπτύσσονται ανεξάρτητα AR(I)MAX υποδείγματα για κάθε λωρίδα της διατομής και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις άλλες εφαρμογές.
- ✓ **VARMAX ανά λωρίδα για το σύνολο της ημέρας.** Υπολογίζεται ένα VARMAX υπόδειγμα, για την εξέταση της δυναμικής αλληλεπίδρασης των χρονοσειρών των ταχυτήτων κάθε λωρίδας. Εισάγονται επίσης οι εξωγενείς παράμετροι X . Η ανάλυση αφορά στο σύνολο της ημέρας.

Με βάση τις παραπάνω αναλύσεις προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα σχετικά με την απόδοση των διαφόρων μοντέλων:

- ✓ Τα υποδείγματα AR(I)MA είναι σχετικά απλά στην εφαρμογή τους και ιδιαίτερα αξιόπιστα στα αποτελέσματά τους, οπότε προτείνονται για χρήση στις εφαρμογές βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης της κυκλοφορίας.
- ✓ Ο χωρισμός της ημέρας σε περιόδους με όμοια χαρακτηριστικά βελτιώνει την αξιοπιστία των μοντέλων, ειδικά για τις περιόδους αιχμής.
- ✓ Η ανεξάρτητη ανάλυση ανά λωρίδα δεν αυξάνει τον βαθμό αξιοπιστίας.
- ✓ Αντίθετα, ιδιαίτερα σημαντική βελτίωση παρατηρείται με την χρήση υποδείγματος VARMAX για την δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ των λωρίδων και την εισαγωγή μετρήσεων βροχόπτωσης και φόρτου.
- ✓ Γενικά, η εισαγωγή των εξωγενών παραμέτρων βροχόπτωσης και φόρτου αυξάνει σε σημαντικό βαθμό την απόδοση του μοντέλου.

Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την συγκεκριμένη εργασία καθώς και τις ανάγκες στον τομέα της διαχείρισης της κυκλοφορίας προτείνονται τα παρακάτω για περαιτέρω έρευνα:

- ✓ Με στόχο την πληρέστερη αξιολόγηση των μοντέλων χρονοσειρών, απαιτείται αυτή να επεκταθεί και σε παρατηρήσεις εκτός δείγματος (out – of – sample).
- ✓ Έρευνα σε μεγαλύτερη βάση δεδομένων, για την εξαγωγή πιο ασφαλών συμπερασμάτων.
- ✓ Έρευνα για μεγαλύτερο αριθμό καιρικών φαινομένων και βροχόπτωση μεγαλύτερης έντασης, για την εξακρίβωση των αποτελεσμάτων.
- ✓ Ανάπτυξη και αξιολόγηση VARMAX υποδειγμάτων για κάθε χρονική περίοδο με όμοια χαρακτηριστικά μέσα στην ημέρα.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΤΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

Κατά την διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών παρατηρείται συνεχής αύξηση του φόρτου που, η κατά τόπους οδική υποδομή, καλείται να εξυπηρετήσει. Είτε πρόκειται για αστική είτε για υπεραστική περιοχή η ζήτηση για μετακινήσεις προσώπων και αγαθών συνεχώς αυξάνεται. Μπορούμε να εντοπίσουμε δύο κύριες ομάδες αιτίων που δημιουργούν αυτό το φαινόμενο (Φραντζεσκάκης κ.α., 1997):

- a) Η αύξηση του πληθυσμού και της κινητικότητας – περισσότερες και μεγαλύτερου μήκους μετακινήσεις – καθώς και της κατανάλωσης αγαθών
- b) Η μεγαλύτερη χρήση του επιβατικού αυτοκινήτου, το οποίο απαιτεί μεγαλύτερο χώρο ανά μεταφερόμενο επιβάτη από ότι τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς.

Η τάση αυτή, ειδικά στην Ελλάδα, εξακολουθεί να υπάρχει καθώς τόσο ο δείκτης ιδιοκτησίας επιβατικών αυτοκινήτων, όσο και η ανά άτομο κινητικότητα βρίσκονται ακόμα σε σχετικά χαμηλά επίπεδα. Επομένως για τα επόμενα χρόνια η αύξηση των μετακινήσεων θα εξακολουθήσει να παρατηρείται οδηγώντας την οδική υποδομή ακόμα πιο κοντά ή και πέρα από την χωρητικότητά της.

Για τον λόγο αυτό είναι επιτακτική η ανάγκη, πέραν άλλων μέτρων όπως η ενθάρρυνση της χρήσης των Μ.Μ.Μ., της βελτιστοποίησης της χρήσης της οδικής υποδομής. Για να αποφύγουμε την υψηλού κόστους και συχνά περιβαλλοντικά

επιζήμια κατασκευή νέων οδικών υποδομών, η οποία συχνά είναι και αδύνατη εντός του αστικού ιστού, επιδιώκεται η βελτιστοποίηση της διαχείρισης των υφιστάμενων. Στο πλαίσιο αυτό, με την χρήση των τεχνολογιών «ευφυών» συγκοινωνιακών συστημάτων (Intelligent Transport Systems, ITS), επιδιώκεται η πιο αποτελεσματική χρήση της υφιστάμενης οδικής υποδομής με στόχο την μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης, των καθυστερήσεων, των εκπομπών, της ενεργειακής κατανάλωσης και της βελτίωσης της οδικής ασφάλειας. Είναι προφανές ότι η επιτυχία αυτών των στρατηγικών εξαρτάται, σε μεγάλο βαθμό, από την ποιότητα και την ακρίβεια της πληροφορίας που δίνεται στους οδηγούς. Οι τεχνολογίες ITS, μέσω των σύγχρονων πληροφοριακών συστημάτων (Advanced Traveler Information Systems, ATIS), των πινακίδων πολλαπλών μηνυμάτων (Variable Message Signs, VMS) και άλλων, προσπαθούν να αντιμετωπίσουν την κυκλοφοριακή συμφόρηση και να μειώσουν τον χρόνο ταξιδιού, βοηθώντας τους οδηγούς να επιλέξουν διαδρομές, χρόνους αναχώρησης και τρόπο ταξιδιού (Σταθόπουλος και Καρλαύτης, 2003).

Παρ' όλα αυτά, οι πλήρεις δυνατότητες που παρέχουν τα «ευφυή» συστήματα (ITS) δεν μπορούν να αξιοποιηθούν εάν δεν μπορούν να προβλεφθούν οι κυκλοφοριακές συνθήκες σε βραχυπρόθεσμο ορίζοντα. Αυτό που διαφοροποιεί την πρόγνωση των κυκλοφοριακών συνθηκών από τις πιο παραδοσιακές προβλέψεις του συγκοινωνιακού σχεδιασμού είναι ο χρονικός ορίζοντας της πρόγνωσης. Ενώ τα μοντέλα σχεδιασμού χρησιμοποιούν κοινωνικοοικονομικά δεδομένα και τάσεις για να κάνουν πρόβλεψη σε ορίζοντα ετών, τα μοντέλα πρόβλεψης των κυκλοφοριακών μεγεθών προβλέπουν την κατάσταση που θα υπάρχει στην επόμενη ώρα χρησιμοποιώντας δεδομένα από συσκευές ανίχνευσης κυκλοφορίας.

Η ανάπτυξη μοντέλων πρόγνωσης της κυκλοφορίας θα προσφέρει την δυνατότητα δυναμικής διαχείρισης της κυκλοφορίας και πληροφόρησης των χρηστών της οδού. Χωρίς αυτή τη δυνατότητα, τα ITS προσφέρουν στατική πληροφόρηση, δηλαδή υπάρχει χρονικό κενό μεταξύ της λήψης των δεδομένων και της εφαρμογής στρατηγικών ελέγχου της κυκλοφορίας. Οπότε η διαχείριση του συστήματος βασίζεται σε «παλαιά» πληροφορία (Smith et al., 2002).

Η δυνατότητα της πρόγνωσης της κυκλοφοριακής ροής και των χρόνων διαδρομής σε ορίζοντα αρκετών λεπτών, και η συνεχής ανανέωσή της, χρησιμοποιώντας στοιχεία πραγματικού χρόνου είναι βασική απαίτηση για την επίτευξη δυναμικού ελέγχου της κυκλοφορίας (Cheslow et al., 1992).

Η σύγχρονη πρακτική στην διαχείριση της κυκλοφορίας κυριαρχείται από την χρήση «ευφών» συγκοινωνιακών συστημάτων (ITS), την ραγδαία αύξηση της υπολογιστικής δύναμης και την ανάπτυξη ευέλικτων μαθηματικών μεθόδων (Vlahogianni et al., 2004). Για να υπάρξει πλήρης εκμετάλλευση των δυνατοτήτων αυτών των συστημάτων και να επιτευχθεί η αύξηση της χωρητικότητας της οδικής υποδομής και η μείωση των χρόνων διαδρομής, απαραίτητη είναι η ανάπτυξη αξιόπιστων μοντέλων βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης των κυκλοφοριακών συνθηκών.

1.2 Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΚΑΙΡΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ

Στο πλαίσιο της ανάπτυξης μοντέλων βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης των κυκλοφοριακών μεγεθών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν αυτά τα μεγέθη. Ένας παράγοντας με σημαντική επιρροή στην κυκλοφορία έχει αποδειχθεί ότι είναι οι καιρικές συνθήκες.

Τα καιρικά φαινόμενα επιδρούν στο οδικό περιβάλλον, την συμπεριφορά του οδηγού και την κυκλοφοριακή ροή. Ο καιρός επηρεάζει το οδικό περιβάλλον ως εξής (Pisano and Goodwin, 2004):

- μειωμένη πρόσφυση στο οδόστρωμα λόγω νερού, χιονιού ή πάγου
- περιορισμένη ορατότητα λόγω ομίχλης, έντονης βροχής ή χιονόπτωσης, σκόνης ή χιονιού που παρασύρεται από τον αέρα και του “spray” που παράγουν τα οχήματα
- εμπόδια στο δρόμο λόγω συγκέντρωσης χιονιού, νερού ή συντριμμιών παρασυρμένων από τον αέρα

- ζημιές στην υποδομή όπως υποχώρηση οδοστρώματος, υπερπήδηση γεφυρών και καταστροφή των φωτεινών σηματοδοτών.

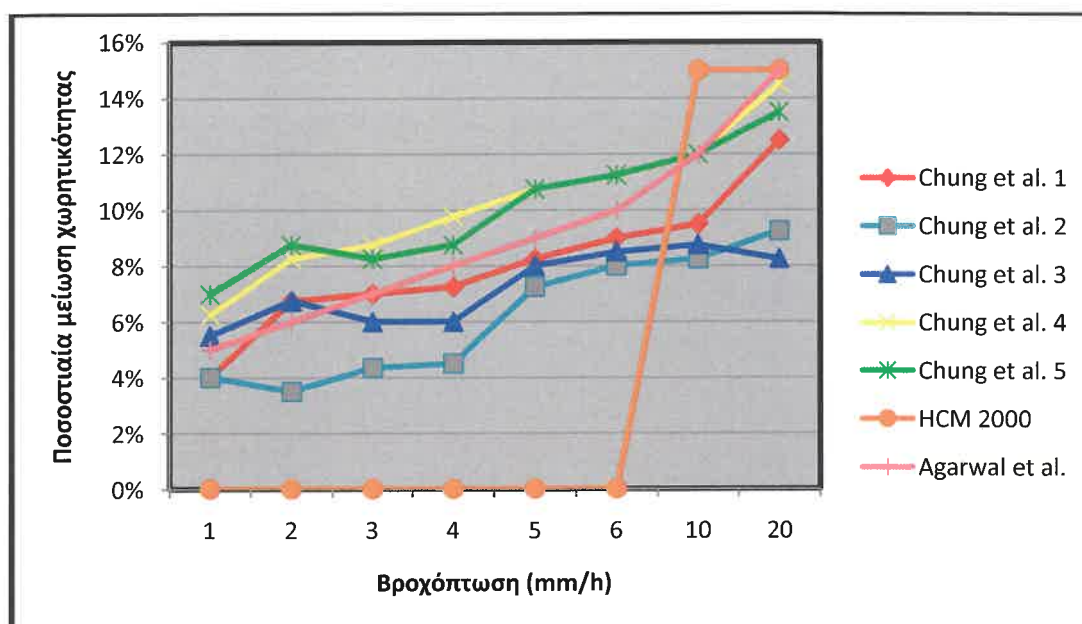
Η επιρροή των καιρικών φαινομένων στην κυκλοφορία είναι σαφής και γίνεται αντιληπτή από το σύνολο των χρηστών των οδών, ειδικά σε περιπτώσεις ακραίων φαινομένων. Η πλειοψηφία των οδηγών θα συμφωνούσαν στις εμπειρικές παρατηρήσεις “όταν βρέχει δημιουργείται μποτιλιάρισμα”, “όταν βρέχει πολύ οι καθυστερήσεις είναι μεγάλες” ή “όταν ρίχνει χιόνι μειώνεται ο αριθμός των αυτοκινήτων στους δρόμους”.

Εντούτοις, η ποσοτικοποίηση αυτών των φαινομένων και της επίδρασής τους είναι που απασχολεί τον συγκοινωνιολόγο μηχανικό. Στο πλαίσιο αυτό έχει διενεργηθεί μεγάλος αριθμός ερευνών, με μεγάλη όμως διακύμανση των αποτελεσμάτων. Έτσι ενώ όλες οι μελέτες συγκλίνουν στην σημαντική επιρροή των καιρικών φαινομένων, και ειδικά της βροχόπτωσης, στα κυκλοφοριακά μεγέθη, αποκλίνουν στο εύρος αυτής της επίδρασης.

Οι Chung et al. (2006) ερεύνουν την επιρροή της βροχόπτωσης στην χωρητικότητα και την ταχύτητα ελεύθερης ροής σε αυτοκινητόδρομο της περιοχής του Τόκιο. Τα αποτελέσματά τους δείχνουν μια μείωση της χωρητικότητας της τάξης του 4 – 7 % υπό ελαφριά βροχή (1 mm/h), 8 – 12 % σε μέτρια βροχόπτωση (5 - 10 mm/h), η οποία φτάνει μέχρι και 14 % σε έντονη βροχόπτωση (10 – 20 mm/h). Αντίστοιχα η ταχύτητα μειώνεται από 4,5 % έως 8,2 % ανάλογα με την ένταση της βροχόπτωσης.

Κατά το Highway Capacity Manual 2000 η μείωση της χωρητικότητας είναι μηδενική για βροχόπτωση μέχρι και 6 mm/h, ενώ ανέρχεται στο 15 % για οποιαδήποτε εντονότερη βροχόπτωση. Αντίστοιχα θεωρείται ότι η ταχύτητα μειώνεται κατά 2 – 14 % σε ελαφριά και 5 – 17 % σε έντονη βροχόπτωση. Για την περίπτωση χιονόπτωσης θεωρείται ότι η χωρητικότητα μειώνεται κατά 5 – 10 % για χιονόπτωση μέχρι 12 mm/h και κατά 25 – 30 % για οποιαδήποτε μεγαλύτερη. Αντίστοιχα η ταχύτητα μειώνεται κατά 8 – 10 % και 30 – 40 %.

Οι συστάσεις του Highway Capacity Manual 2000 συγκρίθηκαν από τους Agarwal et al. (2005) με αποτελέσματα δικής τους έρευνας στον αστικό αυτοκινητόδρομο I – 35 στο Twin Cities της Iowa. Για βροχόπτωση μέχρι 6 mm/h υπολόγισαν την μείωση της χωρητικότητας σε 1 – 10 %, και για εντονότερη βροχόπτωση στο 10 -17 %. Η μείωση της ταχύτητας ήταν 1 – 5 % για ελαφριά βροχόπτωση ενώ για έντονη κυμαινόταν στο 4- 7 %. Στην περίπτωση της χιονόπτωσης η μείωση της χωρητικότητας υπολογίστηκε στο 3 – 13 % για ύψος χιονιού έως 12 mm/h και σε 19 – 28 % για μεγαλύτερο. Αντίστοιχα οι μειώσεις της ταχύτητας ήταν της τάξης του 3 – 10 % και 11 – 15 %.



Σχήμα 1.1: Προσεγγιστική σχηματική απεικόνιση της ποσοστιαίας μείωσης της χωρητικότητας αυτοκινητοδρόμου λόγω βροχόπτωσης

Η διακύμανση των αποτελεσμάτων της επίδρασης των καιρικών φαινομένων στην κυκλοφορία γίνεται εντονότερη όταν μελετώνται αστικές σηματοδοτούμενες αρτηρίες. Ενδεχομένως αυτή η μεγαλύτερη ασάφεια στον αστικό χώρο να οφείλεται και στη ρύθμιση των σηματοδοτών, η οποία έχει γίνει με βάση συνθήκες καλοκαιρίας. Εξάλλου το αστικό οδικό περιβάλλον είναι πιο πολύπλοκο και σύνθετο στην μελέτη του από τους αυτοκινητοδρόμους καθώς υπάρχουν πολλές είσοδοι και έξοδοι οχημάτων, διασταυρώσεις, σταθμεύσεις κ.ο.κ.

Οι Pisano και Goodwin (2004) πραγματοποίησαν μια ανασκόπηση της βιβλιογραφίας αναφορικά με την επίδραση των καιρικών φαινομένων σε αστικές αρτηρίες. Τα στοιχεία που βρήκαν ποικίλουν έντονα ανάλογα με την έρευνα και είναι τα παρακάτω: μείωση της μέσης ταχύτητας από 16 % έως 40 %, μείωση της ταχύτητας ελεύθερης ροής 10 – 30 %, μείωση του φόρτου κατά 15 % έως 30 %, μείωση του ρυθμού ροής κορεσμού κατά 2 – 21 %, αύξηση του χρόνου διαδρομής 11 – 50 % και καθυστέρηση εκκίνησης 5 – 50 %.

Ανεξάρτητα από την έντονη διακύμανση των αποτελεσμάτων σχετικά με την επίδραση του καιρού στην κυκλοφορία, είναι βέβαιο ότι αυτή υπάρχει και είναι ιδιαίτερα σημαντική. Τα ευφυή συστήματα μεταφορών καθώς και τα συστήματα σηματοδότησης βασίζονται στην παραδοχή ευνοϊκών καιρικών συνθηκών. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι σε πολλές περιοχές οι καιρικές συνθήκες είναι ιδιαίτερα συχνά δυσμενείς, γίνεται αντιληπτό το έλλειμμα στον σχεδιασμό και στην διαχείριση της οδικής υποδομής. Στον άξονα της βελτιστοποίησης της κυκλοφοριακής ροής, μεταξύ άλλων και μέσω της πρόγνωσης των κυκλοφοριακών μεγεθών, γίνεται σαφές ότι η επίδραση των καιρικών φαινομένων οφείλει να ληφθεί υπόψη.

1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι διττός: πρώτον η εκτίμηση και αξιολόγηση της ικανότητας πρόβλεψης εναλλακτικών παραμετρικών μοντέλων της οικογένειας ARIMA και, δεύτερον, η διερεύνηση των επιπτώσεων στην «προβλεπτική ικανότητα» των μοντέλων από την εισαγωγή εξωγενών παραμέτρων, όπως οι καιρικές συνθήκες. Παράλληλα γίνεται επισκόπηση και ανάλυση της βάσης δεδομένων, που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των μοντέλων, με στόχο την περιγραφή των κυκλοφοριακών συνθηκών στην περιοχή μελέτης

1.4 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι δομημένη σε πέντε κεφάλαια:

Στο **1^ο κεφάλαιο** γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια της βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης των κυκλοφοριακών μεγεθών και αναλύεται η σημαντικότητά της στην σύγχρονη διαχείριση της οδικής υποδομής. Αναλύεται η επίδραση των καιρικών συνθηκών στα κυκλοφοριακά μεγέθη και εντοπίζεται η ανάγκη συνυπολογισμού του καιρού στην διαχείριση της κυκλοφορίας.

Στο **2^ο κεφάλαιο** γίνεται ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με μελέτες μοντέλων βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης της κυκλοφορίας, γίνεται αναφορά στα βασικότερα μοντέλα και αναλύονται έρευνες σχετικές με την αξιοποίηση στοιχείων καιρού σε αυτά τα μοντέλα.

Στο **3^ο κεφάλαιο** γίνεται ενδελεχής ανάλυση της βάσης δεδομένων και αναλύονται τα βασικά στοιχεία της θεωρίας χρονοσειρών. Τέλος περιγράφεται η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία.

Στο **4^ο κεφάλαιο** αναλύεται η πορεία του υπολογισμού και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων.

Στο **5^ο κεφάλαιο** εξηγούνται τα αποτελέσματα που βρέθηκαν και εξάγονται συμπεράσματα. Τέλος προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην βιβλιογραφία εντοπίζονται πολλές εργασίες που έχουν ως στόχο την δημιουργία αλγορίθμων ή μοντέλων για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση των κυκλοφοριακών μεγεθών. Η χρησιμότητα αυτών των μοντέλων, η οποία αναλύθηκε στο 1^ο κεφάλαιο, έγινε γρήγορα αντιληπτή από τους συγκοινωνιολόγους μηχανικούς. Οι πρώτες προσπάθειες εμφανίζονται στο τέλος της δεκαετίας του 1970 αλλά εντείνονται τα τελευταία 20 χρόνια. Στην κατεύθυνση αυτή βοηθούν τόσο η ανάπτυξη νέων μαθηματικών εργαλείων, όπως οι μέθοδοι χρονοσειρών (time series analysis) και οι στατιστικές μέθοδοι ασαφούς λογικής (fuzzy analysis), όσο και η αύξηση της υπολογιστικής δύναμης των νέων υπολογιστών. Επίσης απαραίτητη προϋπόθεση για την δημιουργία, τον έλεγχο και την αξιοποίηση αυτών των μοντέλων αποτελεί η διαθεσιμότητα εκτενών και αξιόπιστων βάσεων δεδομένων κυκλοφορίας και η μετάδοση της παραγόμενης πληροφορίας στους οδηγούς μέσω των ευφών πληροφοριακών συστημάτων.

Γενικά, για την ανάπτυξη μοντέλων βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης των κυκλοφοριακών μεγεθών χρησιμοποιούνται παραμετρικές μέθοδοι, μη παραμετρικές μέθοδοι και υβριδικά μοντέλα. Τα τελευταία κάνουν χρήση και των δύο τύπων μεθόδων, με στόχο την καλύτερη εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων της κάθε μιας. Τα παραμετρικά μοντέλα μπορούν να παράγουν αρκετά ακριβείς προβλέψεις ακόμα και με την χρήση μικρών σχετικά βάσεων δεδομένων. Το κύριο μειονέκτημά τους είναι ότι δεν μπορούν να προσομοιάσουν επιτυχώς τα μη γραμμικά φαινόμενα που εμφανίζονται στην κυκλοφορία κατά την μετάβαση από μη συμφορημένη σε συμφορημένη κατάσταση. Αυτό το μειονέκτημα δεν υφίσταται στα μη παραμετρικά

μοντέλα, που από την φύση τους μπορούν να αποτυπώσουν τέτοιες καταστάσεις. Εντούτοις, μια εκτενής και ποιοτική βάση δεδομένων είναι βασική προϋπόθεση για την παραγωγή έγκυρων προβλέψεων από μη παραμετρικά μοντέλα.

Η μεγάλη πλειοψηφία των εργασιών για την δημιουργία τέτοιων μοντέλων έχουν ως πηγή στοιχείων, άρα και εφαρμογής, υπεραστικά δίκτυα. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι το αστικό περιβάλλον είναι ιδιαίτερα δυσμενές για τέτοιου είδους εφαρμογές λόγω της πολυπλοκότητάς του. Εντούτοις σύνθετα μοντέλα, όπως πολυπαραμετρικά μοντέλα χώρου – χρόνου, μπορούν να εκμεταλλευθούν την λειτουργία δικτύου που υπάρχει στον αστικό χώρο και να παράγουν ακριβείς προβλέψεις.

Σε έναν πολύ μικρό αριθμό εργασιών εντοπίζεται η προσπάθεια εισαγωγής στοιχείων καιρού για την βελτίωση της πρόγνωσης. Είναι λογικό σε αυτές να γίνει ξεχωριστή αναφορά και ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΗΣ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

Στην παράγραφο αυτή γίνεται αναφορά σε μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί στην βιβλιογραφία για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση των κυκλοφοριακών μεγεθών. Γίνεται διαχωρισμός σε παραμετρικά και μη παραμετρικά μοντέλα, ενώ γίνεται αναφορά και σε εργασίες στις οποίες γίνεται σύγκριση των δύο αυτών προσεγγίσεων.

2.2.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι παραμετρικές μέθοδοι είναι μέθοδοι κατά τις οποίες οι σχέσεις που προσαρμόζονται στα κυκλοφοριακά δεδομένα κάνουν την υπόθεση κάποιας κατανομής. Χρησιμοποιώντας τις μαθηματικές σχέσεις που διέπουν την συγκεκριμένη κατανομή είναι δυνατόν να παραχθούν προβλέψεις για την εξέλιξη των κυκλοφοριακών μεγεθών σε έναν βραχυπρόθεσμο ορίζοντα. Το θετικό στοιχείο των

παραμετρικών μεθόδων είναι το γεγονός ότι τα μεγέθη περιγράφονται από μια συγκεκριμένη κατανομή, κάτι το οποίο επιτρέπει την παραγωγή προβλέψεων ακόμα και αν οι βάσεις δεδομένων είναι περιορισμένου μεγέθους. Στην βιβλιογραφία εντοπίζεται ένα μεγάλο πλήθος παραμετρικών μεθόδων πρόγνωσης, οι οποίες έχουν εφαρμοστεί στην κυκλοφοριακή τεχνική. Κάποιες από αυτές είναι ιδιαίτερα απλές, με εύκολη εφαρμογή και απλό μαθηματικό υπόβαθρο, όπως είναι ο ιστορικός μέσος, η μέθοδος «τυχαίου περιπάτου» (random walk) και η εκθετική εξομάλυνση (exponential smoothing), οι οποίες όμως δίνουν αποτελέσματα μικρής ακρίβειας. Άλλες είναι πιο σύνθετες και απαιτούν περισσότερο χρόνο και υπολογιστική ισχύ, οι οποίες όμως δίνουν βελτιωμένα αποτελέσματα.

Ευρεία χρήση στις εφαρμογές πρόγνωσης της κυκλοφορίας έχει βρει η μέθοδος ανάλυσης χρονοσειρών AR(I)MA (αυτοπαλίνδρομα υποδείγματα κινητών μέσων). Προεκτάσεις της μεθόδου ARIMA που επίσης χρησιμοποιούνται στην κυκλοφοριακή τεχνική είναι η εποχική ARIMA (seasonal ARIMA, SARIMA), η καταστατική-χρονική ARIMA (state-time ARIMA, STARIMA), η ARIMA υποσυνόλου (subset ARIMA), η ARIMA με εξωτερικό παράγοντα X (transfer function ARIMA, ARIMAX) και τα δυναμικά πολυμεταβλητά υποδείγματα ARIMA (vector ARMA, VARMA). Επίσης συναντάται και η πιο σύνθετη ανάλυση με την καταστατική-χωρική προσέγγιση (state-space approach), η οποία αποτελεί πολυπαραμετρική μέθοδο με ιδιαίτερα σύνθετο μαθηματικό υπόβαθρο. Παρακάτω αναλύονται συνοπτικά οι βασικές παραμετρικές μέθοδοι.

Η μέθοδος του ιστορικού μέσου χρησιμοποιεί τον μέσο προηγούμενων παρατηρήσεων για την πρόβλεψη των μελλοντικών. Έτσι βασίζεται στην κυκλική, περιοδική φύση των κυκλοφοριακών συνθηκών. Για τον λόγο αυτό δεν μπορεί να ανταποκριθεί σε δυναμικές αλλαγές, όπως είναι τα οδικά συμβάντα. Η μέθοδος «τυχαίου περιπάτου» (random walk) θεωρεί ότι η επόμενη μέτρηση θα είναι ίση με την αμέσως προηγούμενη. Έτσι αγνοείται η συνήθης εξέλιξη της κυκλοφορίας και απλά βασίζεται στο ότι σε κοντινές χρονικές στιγμές η κατάσταση είναι περίπου η ίδια. Τέλος η εκθετική εξομάλυνση δίνει καλύτερες προβλέψεις καθώς σταθμίζει τους

προγενέστερους μέσους με συντελεστές βαρύτητας, μειώνοντας την επίδραση των πιο παλαιών καταστάσεων.

Τα υποδείγματα ARMA αποτελούνται από 2 μέρη: το αυτοπαλίνδρομο και τους κινούμενους μέσους. Εάν το υπόδειγμα είναι στάσιμο, έπειτα από την λήψη διαφορών, καλείται ολοκληρωμένο ARMA, και γράφεται ως ARIMA (Δημελή, 2003). Το εποχικό υπόδειγμα ARIMA (seasonal ARIMA) βασίζεται στην ύπαρξη συγκεκριμένου προτύπου σε συγκεκριμένη, χρονικά, συχνότητα. Σε αυτή την περίπτωση η αφαίρεση της τάσης με λήψη διαφορών γίνεται σε αυτή την χρονική βάση. Τα δυναμικά πολυμεταβλητά υποδείγματα (Vector ARMA, VARMA) μπορούν να εκτιμήσουν τις δυναμικές σχέσεις μεταξύ πολλών χρονοσειρών. Η εκτίμηση έγκειται στην ανίχνευση, ποσοτικοποίηση και πρόβλεψη αυτών των δυναμικών σχέσεων. Είναι τύπος καταστατικού-χωρικού μοντέλου (state-space model) και εφαρμόζεται σε κυκλοφοριακά δεδομένα προερχόμενα από πολλούς φωρατές ενός δικτύου. Τα καταστατικά-χρονικά υποδείγματα (state-time ARIMA, STARIMA) είναι ειδικές περιπτώσεις VARMA όπου οι περιορισμοί είναι τέτοιοι που να αντανakλούν την τοπολογία ενός χωρικού δικτύου και οδηγούν σε δραστική μείωση των προς υπολογισμό παραμέτρων. Για να εφαρμοστούν είναι προφανές ότι πρέπει να υπάρχει χωρική συσχέτιση των φωρατών. Η ARIMA υποσυνόλων (subset ARIMA) είναι ένα πρότυπο ARIMA με παραμέτρους μόνο σε ορισμένες υστερήσεις. Έτσι είναι πιο απλό στον υπολογισμό καθώς διαθέτει λιγότερες παραμέτρους. Η ARIMA με συνάρτηση μεταφοράς (transfer function) εξωτερικού παράγοντα X (ARIMAX) εισάγει έναν ή και περισσότερους εξωτερικούς παράγοντες, όπως ο φόρτος που διέρχεται από έναν ανάντη φωρατή ή ένα στοιχείο καιρού, ώστε να βελτιώσει την πρόγνωση. Τα υποδείγματα AR(I)MAX είναι πολυμεταβλητά υποδείγματα. Παρακάτω περιγράφονται εργασίες που χρησιμοποίησαν παραμετρικές μεθόδους για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση των κυκλοφοριακών μεγεθών.

Η πρώτη προσπάθεια εφαρμογής τέτοιων μοντέλων στα κυκλοφοριακά εμφανίζεται στο τέλος της δεκαετίας του 1970 με τους Ahmed and Cook (1979). Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ARIMA και συγκρίθηκε με τις ακόλουθες, πιο απλές παραμετρικές μεθόδους: διπλή εκθετική εξομάλυνση (double

exponential smoothing), κινητούς μέσους (moving average) και την μέθοδο Trigg and Leach. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν δεδομένα από ελεύθερες λεωφόρους (freeways) τριών περιοχών των ΗΠΑ (Los Angeles, Minneapolis, Detroit). Τα μεγέθη που έλαβαν υπόψη ήταν ο φόρτος και η κατάληψη και οι μετρήσεις που έλαβαν είχαν συχνότητα 20, 30 ή 60 sec ανάλογα με την περιοχή. Η αξιολόγηση του μοντέλου έγινε με βάση την αρχή ότι τα κατάλοιπα οφείλουν να είναι μη συσχετιζόμενες, τυχαίες αποκλίσεις. Για τον σκοπό αυτό αξιοποίησαν τον έλεγχο αυτοσυσχέτισης υπολοίπων των Box and Pierce (Box and Pierce test of residual autocorrelations). Μέσω του ελέγχου αυτού διαπίστωσαν ότι το υπόδειγμα ARIMA απέδωσε καλύτερα από όλα τα άλλα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία, σε όλες τις περιοχές. Επίσης διαπίστωσαν ότι το υπόδειγμα ARIMA μπορούσε να εφαρμοστεί και σε άλλες περιοχές μελέτης καθώς η μορφή του ήταν η ίδια και στις 3 περιοχές με τις οποίες η συγκεκριμένη εργασία ασχολήθηκε, εντούτοις με διαφορετικές παραμέτρους.

Το 1998, οι Williams et al., εφήρμοσαν για πρώτη φορά εποχική ARIMA (SARIMA), βασιζόμενοι στο γεγονός ότι η κυκλοφοριακή ροή χαρακτηρίζεται από σαφείς περιόδους κύκλους. Το μαθηματικό σκεπτικό της εποχικής ARIMA είναι ότι καθώς τα κυκλοφοριακά μεγέθη κάνουν κύκλους, οι πρώτες διαφορές μιας χρονοσειράς κυκλοφοριακών μεγεθών δεν οδηγούν σε στασιμότητα. Επίσης εφήρμοσαν και την μέθοδο της εκθετικής εξομάλυνσης, ενώ αξιοποίησαν και τα στοιχεία προηγούμενης εργασίας που είχε λάβει χώρα στις ίδιες περιοχές για να συγκρίνουν τα αποτελέσματα. Η εφαρμογή της μεθόδου έγινε σε αστική ελεύθερη λεωφόρο, το μέγεθος που ελήφθη ήταν ο φόρτος και η συχνότητα των μετρήσεων ήταν 15 λεπτά. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του μοντέλου προέρχονταν από 44 ημέρες του Ιουνίου και του Ιουλίου του 1993, ενώ αυτά που αξιοποιήθηκαν στην αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου προέρχονταν από 32 ημέρες του Σεπτεμβρίου και του Οκτωβρίου του ίδιου έτους. Η εποχικότητα που εντοπίστηκε ήταν ημερήσια και έτσι ελήφθησαν ημερήσιες διαφορές. Όπως παρατήρησαν οι συγγραφείς, στην προκειμένη περίπτωση, το ημερήσιο πρότυπο της κυκλοφορίας είναι ιδιαίτερα ισχυρό και άρα η διαδικασία της κυκλοφοριακής ροής είναι μη στάσιμη. Η ανάλυση έδειξε ότι η εποχική ARIMA και η εκθετική εξομάλυνση απέδωσαν εξίσου καλά και ανώτερα από τα νευρωνικά δίκτυα, την μη παραμετρική

παλινδρόμηση και τον ιστορικό μέσο που είχαν εφαρμοστεί στην προγενέστερη εργασία. Το σφάλμα που προέκυψε μέσω του δείκτη MAPE (μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα) ήταν 7,4 έως 7,8 % για την εποχική ARIMA, 7,5 % για την εκθετική εξομάλυνση, ενώ για την μη παραμετρική παλινδρόμηση είχε προκύψει 7,5 έως 8,1 %, για τα νευρωνικά δίκτυα 8,9 έως 11 % και για τον ιστορικό μέσο 9,6 έως 9,9 %.

Οι Lee and Fambro (1999) εφάρμοσαν μια άλλη παραλλαγή της ARIMA, την ARIMA υποσυνόλων (subset ARIMA). Αυτή την συνέκριναν με την πλήρη ARIMA και την μέθοδο της εκθετικής εξομάλυνσης. Η εφαρμογή της μεθόδου έγινε σε 2 σημεία ελεύθερων λεωφόρων της περιοχής του San Antonio, όπου εφαρμόζεται το σύστημα Transguide. Το συγκεκριμένο σύστημα είναι ένα πρόγραμμα του Texas Department of Transportation για «έξυπνους αυτοκινητοδρόμους», με στόχο να αυξήσει την ασφάλεια και να μειώσει την συμφόρηση και τις εκπομπές. Για την εργασία ελήφθησαν στοιχεία φόρτου, με συχνότητα 5 min, για 7 ώρες την ημέρα επί 15 ημέρες. Στο ένα σημείο τα στοιχεία προέρχονταν από τις ώρες 7 - 14 των μηνών Φεβρουαρίου – Μαρτίου 1996, και στο άλλο από τις ώρες 12 - 19 των μηνών Ιουνίου – Ιουλίου του ίδιου έτους. Και στα 2 σημεία που επελέγησαν παρουσιαζόταν πρωινή και βραδυνή αιχμή. Για την δόμηση του υποδείγματος αξιοποιήθηκαν οι πρώτες 6 ημέρες κάθε πακέτου, ενώ οι υπόλοιπες 9 για εφαρμογή και αξιολόγηση. Ο ορίζοντας της πρόγνωσης ήταν 1 βήμα μπροστά, δηλαδή 5 λεπτά. Τα αποτελέσματα της πρόγνωσης, ως μέσοι όροι των 2 σημείων, εμφανίζουν την ARIMA υποσυνόλων να έχει πολύ μικρότερο σφάλμα από την πλήρη ARIMA, η οποία απέδωσε χειρότερα και από την εκθετική εξομάλυνση. Συγκεκριμένα στο 92,7% των περιπτώσεων, το σφάλμα των προβλέψεων ήταν μικρότερο του 15 % για την ARIMA υποσυνόλων. Το αντίστοιχο ποσοστό για την πλήρη ARIMA ήταν 84,5 % και για την μέθοδο εκθετικής εξομάλυνσης 88,1 %. Με βάση την ανάλυσή τους, οι Lee and Fambro, θεωρούν ότι όλες οι μέθοδοι χρονοσειρών που χρησιμοποιήθηκαν έδωσαν καλά αποτελέσματα και άρα είναι κατάλληλες για χρήση σε μοντέλα βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης της κυκλοφορίας. Παρά το γεγονός ότι στην ARIMA υποσυνόλων περιελήφθησαν λιγότερες παράμετροι, αυτή ξεπέρασε σε επίδοση τα άλλα υποδείγματα χρονοσειρών και ειδικά το κλασσικό πλήρες ARIMA. Μια άλλη

παρατήρηση που έκαναν είναι η εξής. Οι ερευνητές είχαν υπολογίσει 4 διαφορετικά υποδείγματα ARIMA υποσυνόλων (subset ARIMA models), τα οποία αν και απέδιδαν καλύτερα από τις άλλες μεθόδους, είχαν μεταξύ τους διαφορές. Αυτό δείχνει ότι η επιλογή των παραμέτρων του συγκεκριμένου μοντέλου είναι σημαντική διαδικασία για την αποτελεσματικότητά του. Τέλος διαπίστωσαν ότι η μέθοδος της εκθετικής εξομάλυνσης απέδιδε καλύτερα από την πλήρη ARIMA. Καθώς η συγκεκριμένη μέθοδος είναι απλή και γρήγορα εφαρμόσιμη, οι ερευνητές προτείνουν την ευρεία χρήση της σε απλές εφαρμογές πρόβλεψης της κυκλοφορίας.

Ο Williams (2001) χρησιμοποίησε συναρτήσεις μεταφορές (transfer functions) για να εισάγει εξωγενείς παράγοντες σε ARIMA μοντέλο. Εφήρμοσε δηλαδή ένα μοντέλο ARIMAX, όπου X στοιχεία από προηγούμενους φωρατές. Η εφαρμογή έγινε σε ελεύθερη λεωφόρο στην περιοχή του Beaune στην Γαλλία, η οποία έχει γίνει αντικείμενο μελέτης σε πολλές προγενέστερες έρευνες. Τα στοιχεία που ελήφθησαν είναι ρυθμού ροής, κάθε 30 min, για τους μήνες Ιουλίου – Αυγούστου των ετών 1984 έως 1989. Επειδή είναι περίοδος διακοπών δεν διαπιστώθηκε η ύπαρξη εβδομαδιαίου προτύπου, οπότε έγινε ολοκλήρωση σε ημερήσια βάση. Για την πληροφορία από προηγούμενα σημεία επελέγησαν 3 φωρατές, 90 περίπου km ανάντη του σημείου μελέτης. Στην συγκεκριμένη περιοχή είχαν αναπτυχθεί από άλλους μελετητές μοντέλα ATHENA και KARIMA. Τα μοντέλα αυτά είναι πολυπαραμετρικά, εντούτοις το μονοπαραμετρικό SARIMA που δοκίμασε ο Williams απέδωσε καλύτερα, υπό την έννοια ότι παρουσίαζε το μεγαλύτερο ποσοστό προβλέψεων με σφάλμα μικρότερο του 5 %. Έπειτα εφήρμοσε το ARIMAX μοντέλο με την προσθήκη των ανάντη ρυθμών ροής. Το τελευταίο απέδωσε καλύτερα από το εποχικό ARIMA για όλες τις χρονιές μεταξύ 1984 και 1987. Οπότε συμπέρανε επαγωγικά ότι το ARIMAX θα απέδιδε καλύτερα και από τα ATHENA και KARIMA. Μέσω της συγκεκριμένης μελέτης προέκυψαν από τον συγγραφέα τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- η μονοπαραμετρική ARIMA είναι πιο εύκολα εφαρμόσιμη σε διάφορα δίκτυα καθώς λόγω απλότητας προσαρμόζεται εύκολα. Αντίθετα η επιπλέον παράμετρος που εισάγεται στο ARIMAX απαιτεί διακριτή αντιμετώπιση για κάθε περιοχή που θα εφαρμοστεί το μοντέλο.

- πολύ συχνά οι φωρατές «χάνουν» μετρήσεις. Έλλειψη κάποιων μετρήσεων των X παραμέτρων οδηγεί σε μη αξιόπιστες προβλέψεις. Οπότε απαιτείται τα συστήματα να αναγνωρίζουν σε πραγματικό χρόνο τις χρονικές περιόδους που υπάρχει διακοπή της ροής στοιχείων X , ώστε η πρόγνωση να γίνεται, για αυτές τις περιόδους, με κοινό ARIMA.
- για να αυξηθεί η ακρίβεια των προγνώσεων πρέπει τα ανάντη σημεία να είναι εγγύτερα στο σημείο μελέτης, από ότι ήταν στην προκειμένη περίπτωση. Για να γίνει αυτό όμως πρέπει και ο χρόνος μεταξύ των μετρήσεων να μειωθεί, γεγονός όμως που θα αυξήσει τον «θόρυβο» των δεδομένων. Αν και πρέπει να βρεθεί τρόπος να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο του θορύβου, οι κοντινοί ανιχνευτές θα παράγουν βελτιωμένες σχέσεις, οι οποίες θα μπορούσαν να αποδώσουν καλύτερα κατά τις μεταβολές της κατάστασης της κυκλοφορίας από μη κορεσμένη σε κορεσμένη κατάσταση. Αυτές είναι και οι χρονικές στιγμές για τις οποίες οι προβλέψεις είναι ιδιαίτερα χρήσιμες.

Για τους παραπάνω λόγους ο συγγραφέας καταλήγει στο συμπέρασμα ότι, ενώ η μέθοδος ARIMAX μπορεί να παράγει καλύτερα αποτελέσματα από την μονοπαραμετρική, η τελευταία θα εξακολουθήσει να είναι η ιδανική προσέγγιση έως ότου επιτευχθεί η δημιουργία ενός γενικευμένου, αυτορυθμιζόμενου πολυπαραμετρικού μοντέλου που θα αντιμετωπίζει τα προβλήματα που αναφέρθηκαν. Για τον λόγο αυτό χρειάζεται εντατική έρευνα προς την συγκεκριμένη κατεύθυνση.

Μια διαφορετικού είδους πρόγνωση επιχείρησαν οι Stathopoulos and Karlaftis (2002). Στόχος τους ήταν η πρόβλεψη της διάρκειας της συμφόρησης, ανάλογα με τον χρόνο που έχει ήδη παρέλθει από την έναρξή της. Κίνητρο για την εκτίμηση ενός τέτοιου μοντέλου ήταν η διαπίστωση ότι ελάχιστες προηγούμενες προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στην πρόγνωση των κυκλοφοριακών μεγεθών κατά την διάρκεια οριακών καταστάσεων, όπως είναι η συμφόρηση. Για την εφαρμογή επελέγη η περιοχή της Αθήνας και τα στοιχεία από το δίκτυο φωρατών που λειτουργεί από το 1996 στην περιοχή της πρωτεύουσας. Τα μεγέθη ήταν ο ρυθμός ροής και η

κατάληψη, σε μετρήσεις που λαμβάνονταν κάθε 90 sec. Στοιχεία αντλήθηκαν για διάρκεια 5 μηνών και η μέρα χωρίστηκε σε 6 περιόδους διαφορετικής έντασης της κυκλοφορίας. Χρησιμοποίησαν στατιστικές μεθόδους ανάλυσης επιβίωσης (survival analysis) και συγκεκριμένα μοντελοποίηση διάρκειας (duration modeling). Στόχος ήταν η εκτίμηση της πιθανότητας η συμφόρηση να ολοκληρωθεί, ως συνάρτηση του χρόνου που ήδη έχει κρατήσει. Η κατανομή που προσαρμόστηκε καλύτερα στα δεδομένα ήταν η λογαριθμολογιστική (Loglogistic). Με βάση αυτή την κατανομή, η πιθανότητα να ολοκληρωθεί η συμφόρηση σε ορισμένο χρόνο είναι μεγάλη, αν έχει ήδη διαρκέσει μέχρι 12 λεπτά (με αιχμή στα 6). Για μεγαλύτερο χρόνο η πιθανότητα μικραίνει. Για χρόνους της τάξης των 21 λεπτών και άνω, η συμφόρηση οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα σε εξωτερικό παράγοντα.

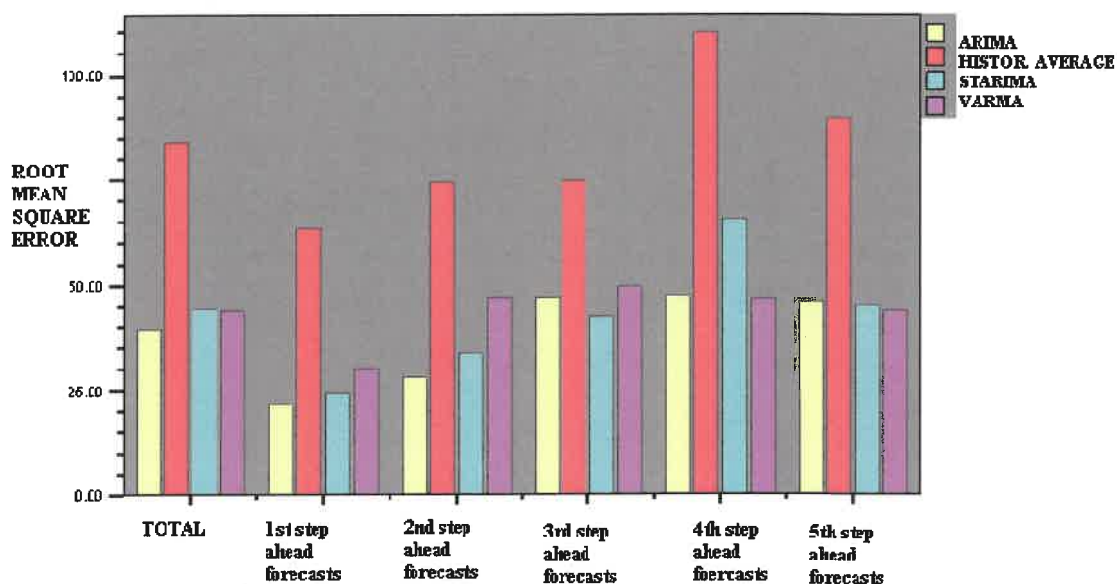
Την περιοχή της Αθήνας επέλεξαν και οι Kamarianakis and Prastacos (2003) για να αξιολογήσουν μοντέλα βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης της κυκλοφορίας. Συνέλλεξαν στοιχεία από 25 φωρατές της ευρύτερης περιοχής της πρωτεύουσας, σε βάθος χρόνου 2 μηνών. Τα στοιχεία ανά 90 sec που παρέχουν οι φωρατές του συστήματος της Αθήνας το ομαδοποίησαν σε διαστήματα των 7,5 min. Για την ανάλυση των στοιχείων και την πρόγνωση αξιοποίησαν και συνέκριναν 4 παραμετρικές μεθόδους, 2 μονοπαραμετρικές και 2 πολυπαραμετρικές. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι του ιστορικού μέσου και η απλή ARIMA. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι VARMA και STARIMA. Με τα μονοπαραμετρικά μοντέλα έγινε υπολογισμός σε μεμονωμένους φωρατές ενώ με τα πολυπαραμετρικά ο υπολογισμός έγινε ενιαία για το δίκτυο. Το πλεονέκτημα των πρώτων είναι η ευελιξία και η προσαρμοστικότητα τους στα εκάστοτε χαρακτηριστικά, ενώ τα δεύτερα, ως πιο πολύπλοκα, αναμένεται να δώσουν καλύτερη πρόβλεψη καθώς συμπεριλαμβάνεται πληροφορία από γειτονικά σημεία ή από σημεία με παρόμοια χαρακτηριστικά κυκλοφορίας. Τα δεδομένα προέρχονται από τις ακόλουθες δύο διαφορετικές περιόδους, 31 Ιουλίου – 27 Αυγούστου 2001 και 11 Φεβρουαρίου – 10 Μαρτίου 2002. Στο δεύτερο πακέτο δεδομένων η σχετική ταχύτητα που μετρήθηκε ήταν μικρότερη καθώς στο πρώτο περιλαμβανόταν περίοδος διακοπών. Η μεταβλητή που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη εφαρμογή είναι η σχετική ταχύτητα που αποτελεί το πηλίκο του φόρτου δια της κατάληψης. Η λήψη διαφορών έγινε σε ημερήσια βάση. Από τα δύο

πακέτα δεδομένων, οι 10 πρώτες μέρες καθενός αξιοποιήθηκαν στην εκτίμηση των υποδειγμάτων ενώ μετά επελέγησαν 10 τυχαίες χρονικές στιγμές μέσα στις υπόλοιπες ημέρες στις οποίες έγινε πρόγνωση με ορίζοντα 5 βημάτων εμπρός, δηλαδή 37,5 min. Συνοπτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν δείχνουν ότι η απόδοση της μεθόδου του ιστορικού μέσου ήταν χαμηλή, ενώ τις καλύτερες προβλέψεις πέτυχε το μοντέλο ARIMA. Ενδιάμεση απόδοση είχαν οι πιο σύνθετες μέθοδοι STARIMA και VARMA, κάτι που αποδίδεται στο γεγονός ότι αρκετοί φωρατές δεν έχουν γειτονία με άλλους άρα οι σχέσεις αλληλεξάρτησης δεν είναι σαφείς και ακριβείς. Τα αποτελέσματα φαίνονται αναλυτικότερα στα παρακάτω σχήματα.

Πίνακας 2.1: Κατανομή σφαλμάτων πρόγνωσης

	% Συχνότητα του σφάλματος πρόγνωσης						
	< - 25 %	-25 to -15 %	-15 to -5 %	-5 to 5 %	5 to 15 %	15 to 25 %	> 25 %
Ιστορικός μέσος	45%	4,5%	2%	1%	3,5%	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)



Σχήμα 2.1: Τετραγωνική ρίζα μέσου σφάλματος τετραγώνου (RMSE) των προτεινόμενων μεθόδων ανά βήμα πρόβλεψης

Πηγή: Kamarianakis and Prastacos (2003)

Τα συμπεράσματα που έβγαλαν οι Kamarianakis and Prastacos από την συγκεκριμένη εργασία είναι τα εξής:

- η απλή ARIMA είναι αποτελεσματική στην πρόγνωση των ταχυτήτων ροής αλλά σε σύνθετα δίκτυα με εκατοντάδες ανιχνευτές η εφαρμογή της θα είναι ιδιαίτερα δύσκολη και χρονοβόρα.
- τα πολυπαραμετρικά μοντέλα αποδίδουν εξίσου καλά με την απλή ARIMA και αναμένεται να λειτουργούν καλύτερα σε σύνθετα, πυκνά και μεγάλα δίκτυα.
- τα πολυπαραμετρικά μοντέλα καθιστούν εφικτή την πρόγνωση των κυκλοφοριακών μεγεθών σε οριακές, ασταθείς καταστάσεις, δηλαδή σε συμβάντα και συμφόρηση, κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό.

Οι Williams and Hoel (2003) χρησιμοποίησαν δύο ελεύθερες λεωφόρους σε Ηνωμένο Βασίλειο και Ηνωμένες Πολιτείες ως πεδίο εφαρμογής για να αξιολογήσουν την αποτελεσματικότητα εποχικής ARIMA στην πρόγνωση των κυκλοφοριακών μεγεθών. Στο Ηνωμένο Βασίλειο, οι ερευνητές προμηθεύτηκαν στοιχεία από την ελεύθερη λεωφόρο M25 για το διάστημα 1 Σεπτεμβρίου – 30 Νοεμβρίου 1996, ενώ στις ΗΠΑ για την I75 από 1 Νοεμβρίου 1998 έως 23 Μαρτίου 1999. Οι μετρήσεις και από τις δύο περιοχές αφορούν σε στοιχεία φόρτου και λαμβάνονται κάθε 15 min. Αντίστοιχος είναι και ο ορίζοντας της πρόγνωσης, δηλαδή ένα βήμα μπροστά. Εφαρμόζοντας την εποχική ARIMA εντόπισαν εποχικότητα μιας ημέρας και μιας εβδομάδας. Τελικά επέλεξαν την λήψη διαφορών σε επίπεδο εβδομάδας. Για την σύγκριση επέλεξαν 3 απλές μεθόδους, του ιστορικού μέσου, του «τυχαίου περιπάτου» (random walk) και της απόκλισης από τον ιστορικό μέσο (deviation from historical averages). Η τελευταία αποτελεί συνδυασμό των 2 προηγούμενων και είναι ελαφρώς πιο σύνθετη μέθοδος. Τα σφάλματα των προβλέψεων που υπολόγισαν είναι τα ακόλουθα. Για την εποχική ARIMA 8,74 – 8,97 %, για την μέθοδο του «τυχαίου περιπάτου» 10,10 – 12,53 %, για την μέθοδο του ιστορικού μέσου 11,43 – 12,85 % και για την μέθοδο της απόκλισης από τον ιστορικό μέσο 9,54 – 9,78 %.

Οι Stathopoulos and Karlaftis (2003) χρησιμοποίησαν, και πάλι, στοιχεία από την περιοχή της Αθήνας για να δομήσουν ένα μοντέλο πρόγνωσης της κυκλοφορίας. Στοιχεία φόρτου αντλήθηκαν για την περίοδο 3 Ιανουαρίου – 31 Μαΐου 2000 χωρίς να περιλαμβάνονται τα Σαββατοκύριακα. Η μέρα χωρίστηκε σε περιόδους. Οι μετρήσεις είχαν συχνότητα 3 min και αντίστοιχος ήταν και ο ορίζοντας της πρόβλεψης. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε ήταν η πολυπαραμετρική καταστατική-χωρική ανάλυση (state-space approach) ενώ ως μέτρο σύγκρισης εφαρμόστηκε και απλή ARIMA. Για την ανάπτυξη των μοντέλων αξιοποιήθηκε το 70 % των δεδομένων και το υπόλοιπο 30 % για την αξιολόγηση της πρόγνωσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν απαιτείται στασιμότητα στην μέθοδο της καταστατικής-χωρικής ανάλυσης. Παρά τις ομοιότητες της μεθόδου με την μέθοδο ARIMAX, η καταστατική-χωρική ανάλυση παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις πλέον διαδεδομένες ARMA μεθόδους τα οποία και αναφέρονται παρακάτω:

- βασίζεται στην ανάλυση της δομής του μοντέλου και ως τέτοια τα διάφορα συστατικά στοιχεία που σχηματίζουν τις σειρές (τάση, εποχική διακύμανση, κύκλοι κλπ) μαζί με τις συνέπειες των επεξηγηματικών μεταβλητών και παρεμβάσεων μοντελοποιούνται ξεχωριστά πριν εισαχθούν στο τελικό μοντέλο
- είναι ιδιαίτερα ευέλικτη καθώς αλλαγές στην δομή του συστήματος με τον χρόνο μπορούν σαφώς να ενσωματωθούν
- οι πολυπαραμετρικές παρατηρήσεις μπορούν να χειριστούν ως άμεσες επεκτάσεις της μονοπαραμετρικής θεωρίας, σε αντίθεση με τα μοντέλα ARIMA
- είναι σχετικά εύκολη η διαχείριση των μετρήσεων που λείπουν
- η Μαρκοβιανή φύση των συγκεκριμένων μοντέλων επιτρέπει την επεξεργασία των ολοένα αυξανόμενων μοντέλων χωρίς ιδιαίτερη αύξηση της απαιτούμενης υπολογιστικής δύναμης
- είναι «ευθεία» διαδικασία η πρόβλεψη μελλοντικών τιμών προβάλλοντας το φίλτρο Kalman στο μέλλον και ανακτώντας τις εκτιμώμενες τιμές και τα σταθερά σφάλματα.

Εντούτοις η θεωρία πίσω από τα καταστατικά-χωρικά μοντέλα είναι ιδιαίτερα σύνθετη και απαιτεί πολύ καλό μαθηματικό υπόβαθρο.

Η εφαρμογή στην περιοχή της Αθήνας έγινε σε 5 φωρατές με σαφή χωρική συσχέτιση. Το καταστατικό-χωρικό μοντέλο απέδωσε σε όλους τους φωρατές καλύτερα ή ίδια με την απλή ARIMA. Η περίπτωση της ίδιας επίδοσης είναι σε έναν φωρατή όπου το μοντέλο «εκφυλίστηκε» σε απλό ARIMA. Στους άλλους φωρατές η διαφορά στα σφάλματα κυμάνθηκε από 4 έως 8 %. Οι συγγραφείς επικεντρώνονται στο γεγονός ότι τα σφάλματα είναι ιδιαίτερα σημαντικά και για τις 2 υπό σύγκριση μεθόδους, σε σχέση με την βιβλιογραφία, κάτι το οποίο το αποδίδουν στα δεδομένα και στο περιβάλλον της συγκεκριμένης έρευνας.

Τέλος οι Shekhar and Williams (2008) χρησιμοποίησαν φίλτρα για τον επανυπολογισμό των παραμέτρων ενός εποχικού ARIMA με την πάροδο του χρόνου. Στόχος ήταν η δημιουργία ενός αυτόματα προσαρμόσιμου μοντέλου, του οποίου οι παράμετροι θα ανανεώνονται με βάση αλγορίθμους. Επισημαίνεται ότι το φίλτρο ορίζεται ως ένας αλγόριθμος που εξάγει πληροφορίες για μια ποσότητα από μια «σπασμένη» διαδικασία. Στην προκειμένη περίπτωση όλα τα φίλτρα βελτιστοποιούν μια συνάρτηση κόστους (sum of squared errors). Η εφαρμογή μιας τέτοιας αυτόματης διαδικασίας είναι πολύ χρήσιμη για τα ευφυή συστήματα μεταφορών (ITS) καθώς η συντήρηση των ARIMA μοντέλων στον χρόνο είναι απαραίτητη αλλά η «χειροκίνητη» διαδικασία ιδιαίτερα χρονοβόρα. Το κίνητρο αλλά και τα κριτήρια για την διερεύνηση της εφαρμογής ενός τέτοιου αλγορίθμου αναλύονται παρακάτω:

- οι παράμετροι να μπορούν να ενημερώνονται άμεσα αφότου νέες μετρήσεις εισάγονται στο σύστημα
- η ακρίβεια της πρόγνωσης να είναι συγκρίσιμη με αυτήν που προκύπτει από τις κλασσικές μεθόδους μέγιστης πιθανοφάνειας
- μετρήσεις που λείπουν καθώς και τιμές με μεγάλη απόκλιση από τις υπόλοιπες να μπορούν να χειριστούν εύκολα σε ένα προσαρμόσιμο περιβάλλον

- να μην χρειάζεται αρχική εκτίμηση των τιμών καθώς το μοντέλο εκκινεί από τις αρχικές τιμές των παραμέτρων και συγκλίνει γρήγορα πολύ κοντά στις βέλτιστες τιμές
- η εφαρμογή να είναι άμεση και “plug and play” ώστε να μην υπάρχει η ανάγκη για «χειροκίνητη» εκτίμηση των παραμέτρων.

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή έγινε σύγκριση τριών τύπων φίλτρων με την κλασσική μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας. Τα τρία φίλτρα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το φίλτρο Kalman (Kalman filter), το φίλτρο των ελαχίστων επαναλαμβανόμενων τετραγώνων (recursive least squares) και το φίλτρο ελαχίστων μέσων τετραγώνων (least mean squares). Οι μετρήσεις λαμβάνονταν κάθε 15 λεπτά, αφορούσαν σε στοιχεία φόρτου και ο ορίζοντας της πρόβλεψης ήταν ένα βήμα μπροστά, δηλαδή 15 λεπτά. Η εφαρμογή έγινε σε αστικό – προαστιακό αυτοκινητόδρομο. Οι παράμετροι επανυπολογίζονταν κάθε 15 λεπτά, δηλαδή κάθε φορά που μια νέα μέτρηση εισαγόταν στο σύστημα. Όλα τα φίλτρα έδωσαν πολύ κοντινά αποτελέσματα μεταξύ τους. Η μέθοδος μέγιστης πιθανοφάνειας έδωσε οριακά καλύτερα αποτελέσματα, αλλά σε κάθε περίπτωση συγκρίσιμα. Για όλες τις μεθόδους το σφάλμα, σε όρους MAPE (μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα) κυμαινόταν γύρω ή κάτω από το 8 %. Συμπερασματικά οι ερευνητές προτείνουν τη χρήση του φίλτρου Kalman καθώς παρέχει το πιο «πλούσιο» και ακριβές στην προσαρμογή πλαίσιο χωρίς σημαντική αύξηση του υπολογιστικού φόρτου. Επίσης η ανάλυση ευαισθησίας που έκαναν οι ερευνητές επιβεβαιώνει την σταθερότητα του εποχικού ARIMA μοντέλου. Τελικά πιστεύουν ότι η εποχική ARIMA σε συνδυασμό με την χρήση φίλτρων για την προσαρμογή των παραμέτρων με την πάροδο του χρόνου, αποτελούν έναν πολύ ελπιδοφόρο συνδυασμό για τα συστήματα διαχείρισης ελεύθερων λεωφόρων.

2.2.2 ΜΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι πρόσφατες εξελίξεις στον προγραμματισμό και στις εφαρμογές των ευφών συστημάτων στην συλλογή, αποθήκευση και διαχείριση μεγάλων βάσεων δεδομένων από διάφορα σημεία ενός εκτενούς συγκοινωνιακού δικτύου, σε πραγματικό χρόνο, έχει δώσει την δυνατότητα της διερεύνησης της σταθερότητας των μη παραμετρικών τεχνικών στην πρόγνωση της κυκλοφορίας. Οι μη παραμετρικές τεχνικές δεν υποθέτουν κάποια συγκεκριμένη κατανομή για τις ανεξάρτητες και τις εξαρτημένες μεταβλητές, ούτε και για την συναρτησιακή μορφή. Συχνά, αυτά τα μοντέλα είναι εξαρτώμενα από τα δεδομένα, με αποτέλεσμα η επιτυχής εφαρμογή τους να είναι στενά συνδεδεμένη με την ποιότητα των διαθέσιμων δεδομένων. Η γενική ιδέα πίσω από αυτές τις τεχνικές είναι ότι αναλύουν το υπό διερεύνηση μέγεθος, πχ. μια χρονοσειρά, επιτρέποντας του να έχει μια γενική μορφή, η οποία προσεγγίζεται σταδιακά με μια συγκεκριμένη ακρίβεια χρησιμοποιώντας ένα όλο και αυξανόμενο σετ δεδομένων. Δύο είδη μη παραμετρικών τεχνικών όπως τα νευρωνικά δίκτυα και η μη παραμετρική παλινδρόμηση, έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στην έρευνα για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση της κυκλοφορίας την τελευταία δεκαετία (Vlahogianni et al., 2004).

Η μη παραμετρική παλινδρόμηση βασίζεται σε δεδομένα, περιγράφοντας την σχέση μεταξύ εξαρτημένων και ανεξάρτητων μεταβλητών. Η βασική προσέγγιση της μη παραμετρικής παλινδρόμησης είναι η αναγνώριση προτύπων και τάσεων. Η μέθοδος αυτή ανιχνεύει την κατάσταση του συστήματος, η οποία καθορίζεται από τις μη εξαρτημένες μεταβλητές, σε μια «γειτονιά» από παρελθοντικές, όμοιες καταστάσεις. Όταν οριστεί η «γειτονιά», οι περιεχόμενες παρελθοντικές καταστάσεις χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί η τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής. Γίνεται έτσι προφανές ότι η ποιότητα της βάσης δεδομένων, ειδικά στην αποθήκευση παλαιών τιμών που να περιγράφουν όλες τις πιθανές μελλοντικές καταστάσεις, καθορίζει την αποτελεσματικότητα ενός μοντέλου μη παραμετρικής παλινδρόμησης (Smith et al., 2002).

Τα νευρωνικά δίκτυα είναι μοντέλα που έχουν χρησιμοποιηθεί σε έναν πολύ μεγάλο αριθμό εφαρμογών στις μεταφορές. Είναι μαθηματικά μοντέλα που βασίζονται στις αρχές της Τεχνητής Νοημοσύνης με ιδιαίτερες δυνατότητες αναγνώρισης και κατάταξης προτύπων. Η εφαρμογή τους στην κυκλοφοριακή τεχνική έχει γίνει με πολλές παραλλαγές κάποιες απλές και κάποιες πολύ πιο σύνθετες. Γενικά οι προβλέψεις των νευρωνικών δικτύων έχουν αποδειχθεί αξιόπιστες, ενώ μπορούν να αποτυπώνουν ιδιαίτερα καλά τις κυκλοφοριακές συνθήκες.

Οι Davis and Nihan (1991) εφήρμοσαν την μέθοδο της μη παραμετρικής παλινδρόμησης «πλησιέστερου γείτονα» σε ελεύθερη λεωφόρο για να προβλέψουν την εξέλιξη του φόρτου και της κατάληψης. Τα δεδομένα που χρησιμοποίησαν ήταν ανά λεπτό, ενώ για την δημιουργία του μοντέλου εισήγαγαν 89 μετρήσεις ενός 90λεπτου διαστήματος μιας ημέρας. Το σετ των μετρήσεων για την αξιολόγηση της πρόβλεψης αποτελείται από 28 μετρήσεις που ελήφθησαν την επόμενη ημέρα και αντίστοιχη ώρα, και ταυτίζεται με τον ορίζοντα της πρόβλεψης (28 λεπτά – 28 βήματα μπροστά). Από τα αποτελέσματά τους συμπεράναν ότι η συγκεκριμένη μέθοδος έχει συγκρίσιμη επίδοση με τις γραμμικές μεθόδους χρονοσειρών, αλλά όχι καλύτερη αυτών όπως επιδιωκόταν. Το σφάλμα που υπολόγισαν κυμαινόταν ανάμεσα σε 12 και 14% για τον φόρτο και μειωνόταν σε 4,5% για την κατάληψη. Οι συγγραφείς ανέμεναν καλύτερη επίδοση της συγκεκριμένης μεθόδου καθώς θεωρείται ότι θα μπορούσε να προσομοιάσει καλύτερα τις μη γραμμικές σχέσεις που παρουσιάζονται κατά την μετάβαση από μη συμφορημένη σε συμφορημένη κατάσταση. Κάτι τέτοιο δεν επαληθεύθηκε στην συγκεκριμένη εργασία. Κατά τους συγγραφείς η «φτωχή» απόδοση του μοντέλου οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην μικρή βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε.

Το 2001, οι Chen and Grant-Muller χρησιμοποίησαν δυναμικά νευρωνικά δίκτυα για να κάνουν πρόβλεψη του φόρτου στην περιαστική ελεύθερη λεωφόρο M25 (motorway 25) στην Αγγλία. Στον συγκεκριμένο δρόμο έχει εγκατασταθεί μεγάλο πλήθος φωρατών, ανά 500 m για την παρακολούθηση και διαχείριση της κυκλοφορίας. Με βάση τα δεδομένα αυτών των φωρατών ασκείται διαχείριση των ορίων κυκλοφορίας με στόχο την ομαλοποίηση της κυκλοφορίας. Τα στοιχεία

υπάρχουν σε διαστήματα του 1 λεπτού, αλλά για να εξουδετερωθεί ο θόρυβος μετατράπηκαν σε 15λεπτα διαστήματα. Ο ορίζοντας ήταν 1 και 2 βήματα μπροστά, δηλαδή 15 και 30 λεπτά. Η εργασία αυτή βασίστηκε σε παλαιότερη των συγγραφέων, στην οποία είχαν χρησιμοποιήσει στατικά νευρωνικά δίκτυα. Η «εκπαίδευση» του μοντέλου έγινε με στοιχεία κυκλοφορίας συνολικής διάρκειας 2 μηνών. Το σφάλμα στην πρόβλεψη που πέτυχαν ήταν της τάξεως του 9,5 %, σε σύγκριση με το 11 % που προέκυπτε από το στατικό νευρωνικό δίκτυο.

Την θεωρία των δυναμικών νευρωνικών δικτύων χρησιμοποίησε και ο Dia (2001) για να κάνει πρόγνωση της ταχύτητας σε υπεραστική ελεύθερη λεωφόρο. Τα στοιχεία που αξιοποίησε ήταν μετρήσεις ρυθμού ροής και ταχύτητας και προέρχονταν από διάστημα 5 ωρών σε 2 ημέρες. Η συχνότητα των μετρήσεων ήταν 20 sec. Το μέγεθος που προβλέφθηκε ήταν ο χρόνος διαδρομής. Για την «εκπαίδευση» και τον έλεγχο του μοντέλου χρησιμοποίησε το 70 % αυτών των στοιχείων, ενώ το υπόλοιπο 30 % εισήχθη στον έλεγχο της πρόβλεψης. Ο ορίζοντας της πρόγνωσης ήταν 15 min. Το συγκεκριμένο μοντέλο πέτυχε ιδιαίτερα καλά αποτελέσματα στα 5 min, της τάξης του 90 – 94 %. Ικανοποιητικά ήταν τα αποτελέσματα και για τα 10 και 15 min, με ακρίβεια 88 % και 84 % αντίστοιχα.

Χρήση της μεθόδου της τοπικής γραμμικής παλινδρόμησης έκαναν οι Sun et al. (2002), για να προβλέψουν την ταχύτητα σε τμήμα ελεύθερης λεωφόρου. Επιπλέον συνέκριναν τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου με τις επίσης μη παραμετρικές μεθόδους: πλησιέστερου γείτονα (k-nearest neighbor) και παλινδρόμησης πυρήνα (kernel regression). Έλαβαν αρχικά στοιχεία 6 μηνών, τα οποία όμως μετά τον έλεγχο περιορίστηκαν σε 32 ημερών, καθώς αφαιρέθηκαν ημέρες με ελλιπή στοιχεία, γιορτές, αργίες κλπ. Από αυτά τα στοιχεία των πρώτων 30 ημερών αξιοποιήθηκαν στην μόρφωση του μοντέλου, ενώ των επόμενων 2 ημερών για τον έλεγχο της απόδοσής του. Η συχνότητα των μετρήσεων ήταν 5 λεπτά και ο ορίζοντας της πρόβλεψης 5 βήματα στο μέλλον, δηλαδή 25 λεπτά. Σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποίησαν οι συγγραφείς, την κατώτερη απόδοση είχε η μέθοδος k-NN με σφάλματα από 10,3 % για το πρώτο βήμα έως 12,1 % για το πέμπτο βήμα. Αισθητά καλύτερη ήταν η επίδοση της μεθόδου kernel, με σφάλματα από 8,9 % έως 11,9 %

για το 1^ο και το 5^ο βήμα αντίστοιχα. Τα μικρότερα σφάλματα στην πρόγνωση προήλθαν από την εφαρμογή της μεθόδου της τοπικής γραμμικής παλινδρόμησης, τα οποία κυμαίνονταν από 8,5 % για το 1^ο βήμα έως 11,4 % για το 5^ο βήμα. Τα συμπεράσματα των συγγραφέων είναι ότι, αφενός η τοπική γραμμική παλινδρόμηση υπερτερεί των άλλων δύο μη παραμετρικών μεθόδων που δοκιμάστηκαν, αφετέρου ότι μια μεγαλύτερη βάση δεδομένων θα παρήγαγε καλύτερα αποτελέσματα.

Το 2003, ο Clark, χρησιμοποίησε την μέθοδο της μη παραμετρικής παλινδρόμησης «πλησιέστερου γείτονα» για την πρόγνωση του φόρτου, της ταχύτητας και της κατάληψης στον “motorway” M25 στην Αγγλία. Άντλησε στοιχεία συνολικής διάρκειας 4 εβδομάδων, από τα οποία χρησιμοποίησε τις 3 πρώτες εβδομάδες για την δόμηση του μοντέλου και την 4^η ως δείκτη των επιδόσεων του μοντέλου. Η συχνότητα των μετρήσεων των διαφόρων μεγεθών ήταν 10 min και η πρόγνωση που επιχείρησε ένα βήμα μπροστά, δηλαδή 10 min. Προσέγγισε το πρόβλημα πολυπαραμετρικά, συγκρίνοντας τις επιδόσεις με την μονοπαραμετρική προσέγγιση. Το αποτέλεσμα της εργασίας του ήταν ότι, γενικά τα πολυπαραμετρικά μοντέλα, λαμβάνοντας υπόψη φόρτο, κατάληψη και ταχύτητα, αποδίδουν καλύτερα. Εξαίρεση αποτελούσε το μέγεθος της ταχύτητας του οποίου η πρόβλεψη ήταν καλύτερη με το μονοπαραμετρικό μοντέλο. Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει η παρατήρηση ότι, για το μέγεθος της ταχύτητας, η απλοϊκή μέθοδος (όπου $\hat{X}_j = X_{i-1}$) έχει την βέλτιστη προβλεπτική ικανότητα.

2.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ

Όπως φάνηκε και από την ανασκόπηση των μοντέλων που προηγήθηκε, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων που χρησιμοποιείται για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση των κυκλοφοριακών μεγεθών. Μέχρι τώρα δεν έχει υπάρξει σαφής απάντηση για το εάν κάποια από αυτές της μεθόδους υπερτερεί σε όλες τις καταστάσεις. Το βέβαιο είναι ότι κάθε μια παρουσιάζει μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα. Για το λόγο αυτό πολλές μελέτες έχουν γίνει οι οποίες συγκρίνουν τα αποτελέσματα που παράγει η κάθε μέθοδος. Εντούτοις ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής, η ετυμηγορία διαφέρει. Σε

αυτή την παράγραφο αναλύονται δύο εργασίες που σκοπό είχαν την σύγκριση διαφόρων μεθόδων.

Η δυσκολία στην επιλογή μοντέλου έγκειται, εκτός των άλλων, στην παρουσία στοιχείων χάους στις κυκλοφοριακές συνθήκες και στην εξέλιξη των κυκλοφοριακών μεγεθών, κάτι το οποίο δυσχεραίνει τον διαχωρισμό μεταξύ ντετερμινιστικής και στοχαστικής συμπεριφοράς. Ένας πρόσθετος παράγοντας που οφείλει να λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή μοντέλου, πέραν της ακρίβειας της πρόγνωσης, είναι ο χρόνος και ο εργασιακός φόρτος που απαιτείται ώστε το κάθε μοντέλο να προσαρμοστεί σε κάθε οδικό δίκτυο. Μοντέλα που απαιτούν πολύ χρόνο για επανυπολογισμό και καλιμπράρισμα είναι ουσιαστικά ανεφάρμοστα. Τέλος η σαφήνεια και η ευκολία του μοντέλου στην κατανόησή του είναι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του μελετητή. Για παράδειγμα τα νευρωνικά δίκτυα παρουσιάζουν μια ιδιαίτερα σύνθετη δομή, η οποία πολλές φορές δεν γίνεται κατανοητή από τον μελετητή. Χαρακτηριστικά, πολλές φορές, τα νευρωνικά δίκτυα αναφέρονται ως ένα «μαύρο κουτί», κρατώντας την δομή τους κρυφή από τον χρήστη. Αντίθετα η κλασσική μεθοδολογία των χρονοσειρών προτείνει μια ιδιαίτερα απλή μεθοδολογική προσέγγιση που γίνεται εύκολα κατανοητή από τον μελετητή αλλά δεν αντανακλά την συνθετότητα των σχέσεων της κυκλοφοριακής ροής.

Οι Kirby et al. (1997) έκαναν μια συγκριτική μελέτη μεταξύ νευρωνικών δικτύων, ARIMA και ATHENA. Η μέθοδος ATHENA είναι μια υβριδική μέθοδος η οποία στην αρχή κατηγοριοποιεί τα δεδομένα σε ομογενείς κατηγορίες ανάλογα με το ωριαίο προφίλ τους, μέσω μιας μαθηματικής μεθόδου (k-means method), και στη συνέχεια εφαρμόζει μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης. Η εφαρμογή των μεθόδων έγινε σε αυτοκινητοδρόμους της Γαλλίας στην περιοχή του Beaune. Το μέγεθος που προβλέφθηκε είναι ο φόρτος, ενώ η συχνότητα των μετρήσεων ήταν 30 λεπτά. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την μόνιμωση των μοντέλων ήταν των μηνών Ιουλίου – Αυγούστου των ετών 1984 – 1989, ενώ για την αξιολόγησή τους των αντιστοιχών μηνών του 1990. Ο ορίζοντας της πρόβλεψης ήταν 1,2 και 4 βήματα μπροστά (30,60 και 120 min αντίστοιχα). Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.2: Περίληψη αποτελεσμάτων απόδοσης μοντέλων στην εργασία των Kirby et al. (1997)

Ορίζοντας πρόβλεψης	Τεχνική πρόγνωσης	% Συχνότητα του απόλυτου ποσοστιαίου σφάλματος	
		0-20	20+
30 min	νευρωνικά δίκτυα	91,5	8,5
	ARIMA (Ιουλ.) μονοπαραμετρικό	97,0	3,0
	πολυπαραμετρικό	97,1	2,9
	ARIMA (Αυγ.) μονοπαραμετρικό	95,4	4,6
	πολυπαραμετρικό	95,5	4,5
	νευρωνικά δίκτυα	84,8	15,2
60 min	ARIMA (Ιουλ.) μονοπαραμετρικό	93,6	6,4
	πολυπαραμετρικό	94,8	5,2
	ARIMA (Αυγ.) μονοπαραμετρικό	90,5	9,5
	πολυπαραμετρικό	93,5	6,5
	ATHENA	97,5	2,5
	ATHENA	89,1	10,9
120 min	ATHENA		

Πηγή: H.R. Kirby et al. (1997)

Τα κυριότερα συμπεράσματα είναι τα εξής:

- τα νευρωνικά δίκτυα απέδωσαν ελαφρώς χειρότερα από την παραδοσιακή ARIMA χρονοσειρών στην πρόβλεψη ένα βήμα μπροστά, δηλ. 30 λεπτά.
- επίσης απέδωσαν χειρότερα από την ARIMA στα 2 βήματα μπροστά και αισθητά χειρότερα από την μέθοδο ATHENA, η οποία εξακολουθεί να αποδίδει καλά για προβλέψεις 4 βήματα μπροστά, δηλαδή 2 ώρες.
- το αισιόδοξο αποτέλεσμα για τα νευρωνικά δίκτυα είναι η σχετικά καλή απόδοσή τους σε σχέση με τη μικρή βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του μοντέλου.

Το μοντέλο ATHENA είναι ιδιαίτερη καλά ορισμένο στην συγκεκριμένη μελέτη, με ένα συγκεκριμένο μοντέλο να προσαρμόζεται σε κάθε ωριαία ομάδα δεδομένων. Στην ουσία αποτελείται από 24 ανεξάρτητα μοντέλα. Αντίθετα, μόνο ένα νευρωνικό δίκτυο χρησιμοποιήθηκε, ενώ και η κατηγοριοποίηση στην ARIMA ήταν μόνο στους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο. Σε μια περαιτέρω έρευνα (Dochy et al., 1995) η ATHENA προσέγγιση επεκτάθηκε, έτσι ώστε η κατηγοριοποίηση ακολουθήθηκε από ανάλυση με χρήση 24^{ων} νευρωνικών δικτύων (αντί για τα παλινδρομικά μοντέλα). Η

ακρίβεια αυτής της προσέγγισης υπερκέρασε αυτή του απλού νευρωνικού δικτύου και της βασικής ATHENA. Αυτό ανακινεί ένα ευρύτερο θέμα, του βαθμού συγκεκριμενοποίησης – παραμετροποίησης που είναι συγχρόνως απαραίτητη και πρακτική για την εκάστοτε εφαρμογή του μοντέλου.

Ένα ακόμα θέμα που χρήζει μελέτης, κατά τους ερευνητές, είναι ο βαθμός της κατάρτισης που απαιτείται και του αυτοματισμού στην διαδικασία μοντελοποίησης. Αν και όλες οι μέθοδοι χρειάζονται μια επαρκή κατάρτιση, μπορεί να θεωρηθεί ότι τα νευρωνικά δίκτυα είναι πιο «αυτόματα» μετά την αρχική περίοδο «εκπαίδευσης». Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να θεωρηθεί ένα από τα μειονεκτήματα των ARIMA και ATHENA προσεγγίσεων. Οι ερευνητές καταλήγουν ότι περισσότερες συγκριτικές προσεγγίσεις μεταξύ των μεθόδων θα ήταν πολύτιμες.

Το 2002, οι Smith et al. συνέκριναν παραμετρικά και μη παραμετρικά μοντέλα για την πρόγνωση των κυκλοφοριακών μεγεθών. Το κίνητρο της έρευνας ήταν το γεγονός, αφενός μεν ότι σε πολλές εφαρμογές τα εποχικά ARIMA (SARIMA) πρότυπα έχουν παράγει πολύ καλά αποτελέσματα, αφετέρου δε ότι οι μη παραμετρικές μέθοδοι παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα. Πέραν της πιο ρεαλιστικής προσέγγισης που φαίνεται να προσφέρουν τα μη παραμετρικά μοντέλα στην πρόγνωση της κυκλοφορίας, απαιτούν και λιγότερο χρόνο υπολογισμού των παραμέτρων. Χαρακτηριστικά, οι μελετητές αναφέρουν ότι πρόσφατα είχε αναπτυχθεί ένα μοντέλο ARIMA στο οδικό σύστημα των Hampton Roads. Οι αρμόδιοι χρησιμοποίησαν δεδομένα μόλις 3^{ων} μηνών και συχνότητα 10 λεπτών, αλλά χρειάστηκαν περισσότερες από 6 ημέρες για να υπολογίσουν τις παραμέτρους. Προβάλλοντας γραμμικά την διαδικασία αυτή σε ένα μετρίου μεγέθους δίκτυο της τάξης των 200 ανιχνευτών θα χρειαζόνταν πλέον των 3^{ων} ετών.

Ως εναλλακτική προσέγγιση πρότειναν την μη παραμετρική παλινδρόμηση υποβοηθούμενη από ευρετικές μεθόδους (heuristic forecast generation method), η οποία βασίζεται στην θεωρία του χάους. Η θεωρία των χαοτικών συστημάτων ορίζεται από μεταβολές κατάστασης που είναι ντετερμινιστικές και μη γραμμικές. Όπως παρατηρούν οι συγγραφείς, μπορεί να φαίνεται αντιφατική η σύγκριση ενός στοχαστικού μοντέλου με ένα χαοτικό. Παρατηρούν όμως ότι ενώ οι κυκλοφοριακές

συνθήκες έχουν γενικά στοχαστική φύση, δεν μπορεί να αγνοηθεί το γεγονός ότι, ειδικά σε καταστάσεις συμφόρησης, εμφανίζεται έντονα χαοτική συμπεριφορά.

Ως πεδίο εφαρμογής χρησιμοποιήθηκε και πάλι η περιαστική ελεύθερη λεωφόρος M25 (motorway), με στοιχεία 3 μηνών ανά 15 λεπτά. Το 50 % των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε για την δόμηση του μοντέλου και το υπόλοιπο 50 % για την αξιολόγησή του. Το μέγεθος που μετρήθηκε ήταν ο φόρτος και οι δύο προσεγγίσεις που συγκρίθηκαν ήταν οι k-nearest neighbor και η εποχική ARIMA. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν καταδεικνύουν μια υπεροχή της ARIMA και στους 2 ανιχνευτές από τους οποίους ελήφθησαν στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα το σφάλμα της ARIMA ήταν περίπου 8,80 % ενώ της μεθόδου k-NN 9,40 – 9,55 %.

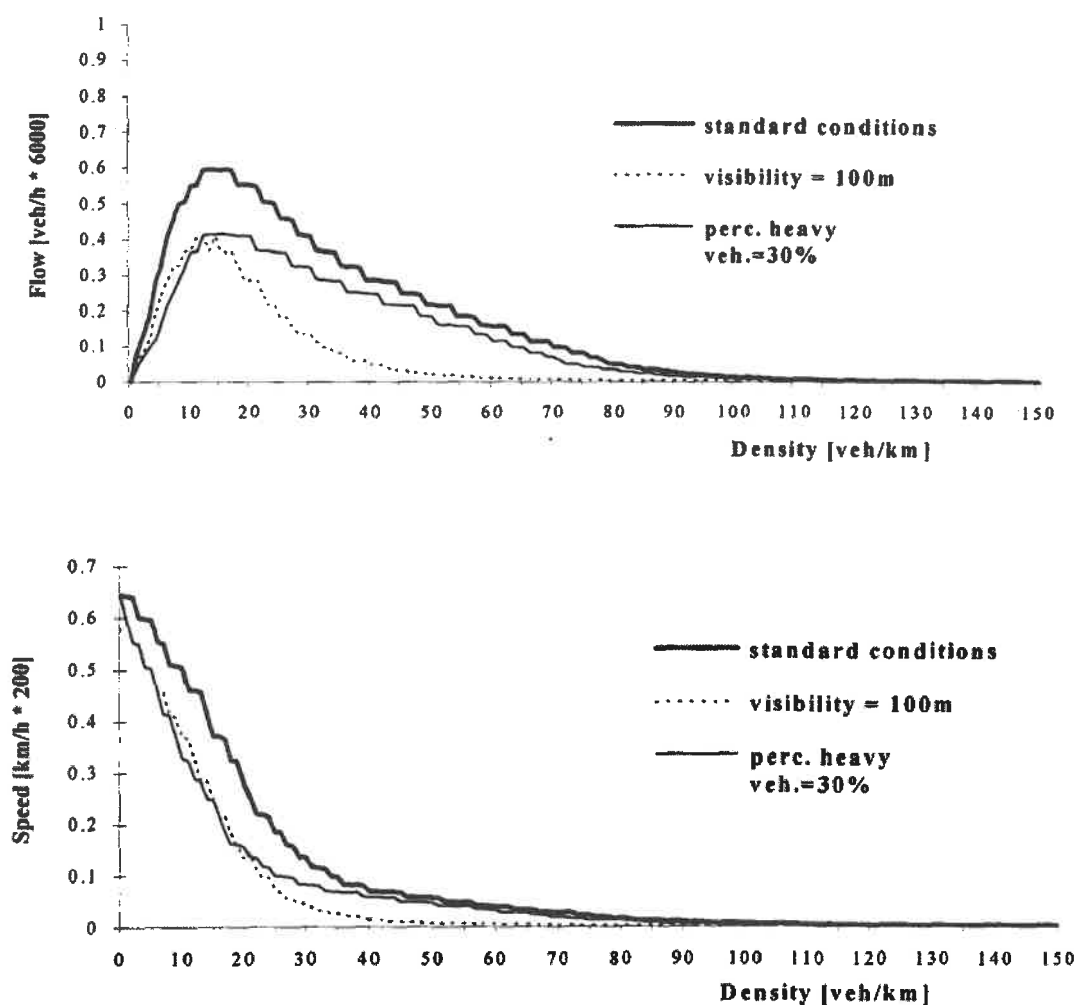
Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν ήταν ότι ενώ οι ευρετικές μέθοδοι (heuristic forecast generation methods) βελτίωσαν την απόδοση της μη παραμετρικής παλινδρόμησης, η απόδοσή της δεν έφθασε αυτή της εποχικής ARIMA. Το αποτέλεσμα αυτό τονίζει, κατά τους συγγραφείς, την στοχαστική φύση των κυκλοφοριακών φαινομένων. Εντούτοις τονίζουν ότι στις περιπτώσεις στις οποίες οι προϋποθέσεις για την εφαρμογή εποχικής ARIMA δεν ικανοποιούνται, η μη παραμετρική παλινδρόμηση, υποβοηθούμενη από ευρετικές μεθόδους, είναι η ενδεδειγμένη προσέγγιση. Καθώς η εποχική ARIMA μέθοδος απέδωσε και στην προκείμενη περίπτωση καλύτερα, οι συγγραφείς θεωρούν ότι χρειάζεται να γίνει εντατική έρευνα στον τομέα της ανάπτυξης τεχνικών προσαρμογής του μοντέλου σε μικρό χρονικό διάστημα και με μεγαλύτερη ευκολία. Ταυτόχρονα οι τεχνικές μη παραμετρικής παλινδρόμησης μπορούν να βελτιωθούν με την χρήση και άλλων τεχνικών, όπως οι ευρετικές (heuristic) που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη έρευνα.

2.3 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙΡΟΥ ΣΤΗΝ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

Όπως αναλύθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο τα καιρικά φαινόμενα επηρεάζουν την κυκλοφορία και προκαλούν μεταβολές σε κάποια από τα χαρακτηριστικά μεγέθη. Αν και οι διάφορες μελέτες δεν συγκλίνουν στην ποσοτικοποίηση αυτής της εμπειρικής παραδοχής, εντούτοις όλες συμφωνούν ότι η επιρροή είναι σημαντική. Για το λόγο αυτό ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της αποτελεσματικότητας της εισαγωγής δεδομένων καιρού στα μοντέλα βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης της κυκλοφορίας. Τονίζεται εδώ ότι η πλειοψηφία των μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί αγνοούν τις καιρικές συνθήκες, τουλάχιστον ως άμεσα εισερχόμενο, στο μοντέλο, στοιχείο. Στην βιβλιογραφία την σχετική με μεθόδους βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης της κυκλοφορίας, σε ελάχιστες εργασίες εισάγονται στοιχεία καιρικών συνθηκών στα μοντέλα. Στις περιπτώσεις που αυτό γίνεται τα, μέχρι στιγμής, αποτελέσματα δεν είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά καθώς τα σφάλματα στην πρόγνωση των κυκλοφοριακών μεγεθών προκύπτουν ιδιαίτερα σημαντικά. Παρακάτω αναλύονται σχετικές εργασίες, στις οποίες επιχειρήθηκε ο συσχετισμός καιρικών συνθηκών και πρόβλεψης της εξέλιξης των κυκλοφοριακών μεγεθών σε βραχυπρόθεσμο ορίζοντα.

Ενδεχομένως η πρώτη σχετική προσπάθεια εμφανίζεται το 1996 στην εργασία των Florio and Mussone. Η εργασία αυτή ήταν ιδιαίτερα φιλόδοξη καθώς εισήγαγε πλήθος μεταβλητών και χρησιμοποίησε πολλούς ανιχνευτές. Η μέθοδος στην οποία βασίστηκε το μοντέλο ήταν τα νευρωνικά δίκτυα, ενώ η εφαρμογή του μοντέλου έγινε σε ένα τμήμα αυτοκινητοδρόμου μήκους 11 km μεταξύ της Padova και του Mestre στην Ιταλία. Αξιοποιήθηκαν στοιχεία από 20 ανιχνευτές κυκλοφορίας, 1 κάθε 500 m, 5 σταθμούς μέτρησης ορατότητας, 2 σταθμούς παρατήρησης των καιρικών συνθηκών, 2 σταθμούς ανίχνευσης πάγου και 10 πινακίδων μεταβλητών μηνυμάτων (VMS). Τα στοιχεία που συνελέγησαν ήταν η μέση ταχύτητα χώρου, η πυκνότητα της κυκλοφορίας, ο ρυθμός ροής, το ποσοστό βαρέων οχημάτων, η βαθμός ηλιοφάνειας, οι καιρικές συνθήκες, η ορατότητα και η παρουσία μηνυμάτων στα VMS. Η συχνότητα των μετρήσεων διέφερε για τα δεδομένα και έτσι κάθε φορά γινόταν προσαρμογή στο στοιχείο που λαμβανόταν με την μικρότερη συχνότητα. Ο ορίζοντας

της πρόβλεψης ήταν τα 10 λεπτά. Θεωρητικά το συγκεκριμένο νευρωνικό δίκτυο μπορεί να αντιμετωπίσει οποιοδήποτε συνδυασμό σεναρίων που σχετίζεται με τις παραπάνω μεταβλητές. Εντούτοις δημοσιεύτηκαν μόνο 3 σενάρια, εκ των οποίων μόνο σε ένα εισάγεται παράμετρος καιρού, η ορατότητα. Το πρώτο ήταν οι κανονικές συνθήκες, το δεύτερο η μειωμένη ορατότητα στα 100 m και το τρίτο το υψηλό ποσοστό βαρέων οχημάτων της τάξης του 30 %. Τα αποτελέσματα των διαφόρων σεναρίων στις σχέσεις ροής-πυκνότητας και ταχύτητας-πυκνότητας φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 2.2: Παράδειγμα της επιρροής της ορατότητας στις σχέσεις της κυκλοφορίας
Πηγή: Florio and Mussone (1996)

Παρατηρούμε ότι η μείωση της ορατότητας επιφέρει σημαντική μείωση του ρυθμού ροής, για σχετικά αυξημένες τιμές της πυκνότητας, ενώ η επιρροή στην ταχύτητα είναι μικρότερο και αρχίζει να παρουσιάζεται σε ακόμα υψηλότερες τιμές της πυκνότητας. Εντούτοις πρέπει να τονιστεί το ιδιαίτερα μεγάλο σφάλμα των προγνώσεων της πυκνότητας και του ρυθμού ροής που παράγει το συγκεκριμένο μοντέλο, της τάξης του 33 % και 39 % αντίστοιχα. Αντίθετα η πρόγνωση της ταχύτητας έχει πολύ μικρό σφάλμα, περίπου 5 %.

Νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποίησαν και οι Huang and Ran (2003) προκειμένου να πραγματοποιήσουν πρόγνωση της κυκλοφορίας με στοιχεία καιρού. Η εφαρμογή του μοντέλου έγινε σε μια συνδετήρια οδό του Chicago. Κυκλοφοριακά δεδομένα και στοιχεία καιρού συγκεντρώθηκαν για διάστημα 6 μηνών, περίοδο στην οποία περιλαμβάνονται χιονόπτωση, βροχόπτωση, ομίχλη κλπ. Η συχνότητα των μετρήσεων των καιρικών φαινομένων είναι ωριαία, ενώ των κυκλοφοριακών 5λεπτη. Συνολικά στο μοντέλο εισήχθησαν 45 παράμετροι. Ο στόχος ήταν να αποδοθεί η κατάσταση του οδοστρώματος, για τον λόγο αυτό επελέγησαν οι παράμετροι της ορατότητας, της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Εντούτοις οι 3 αυτές παράμετροι δεν είναι αρκετές για να γίνει αντιληπτό το φαινόμενο που λαμβάνει χώρα (πχ. η χαμηλή θερμοκρασία και η υψηλή υγρασία δεν προσδιορίζουν άμεσα αν υπάρχει βροχόπτωση, χιονόπτωση ή παγετός). Για τον σκοπό αυτό ενσωματώθηκαν άλλες 10 παράμετροι που εκφράζουν τις διάφορες καιρικές συνθήκες (πχ. βροχή ή χιόνι) και παίρνουν τιμή 1 αν εμφανίζονται και 0 στην αντίθετη περίπτωση. Με αντίστοιχο τρόπο, ύπαρξη 1 – μη ύπαρξη 0, ορίστηκαν άλλες 31 παράμετροι που εξέφραζαν την ημέρα της εβδομάδας, την ώρα της ημέρας και το τέταρτο της ώρας. Τέλος η 45^η παράμετρος ήταν η ταχύτητα. Οι ερευνητές αξιοποίησαν συνολικά 4214 παρατηρήσεις, εκ των οποίων τις 4189 για την «εκπαίδευση» του μοντέλου και τις 25 για την αξιολόγηση. Ο ορίζοντας της πρόγνωσης ήταν 15 min. Για την σχετική αξιολόγηση του μοντέλου τους, οι ερευνητές χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο χρονοσειρών. Η χρονοσειρά λειτουργούσε με 5λεπτο βήμα. Η εισερχόμενη πληροφορία ήταν τα 3 τελευταία βήματα (15 min πριν) και η πρόβλεψη 3 βήματα μπροστά (15 min). Η θεώρηση ήταν ότι αυτή η δομή του μοντέλου χρονοσειρών ήταν η αντίστοιχη του νευρωνικού δικτύου και άρα η πλέον κατάλληλη για σύγκριση. Ως

δείκτης σφάλματος ελήφθη η απόλυτη διαφορά της πραγματικής ταχύτητας και αυτής που είχε προβλεφθεί από το κάθε μοντέλο. Η μέση τιμή του σφάλματος των προβλέψεων του νευρωνικού δικτύου ήταν 4,5843 με τυπική απόκλιση 2,9656, ενώ για την μέθοδο των χρονοσειρών οι αντίστοιχες τιμές ήταν 4,7497 και 4,4619. Οι συγγραφείς θεωρούν καλή την επίδοση του νευρωνικού δικτύου και πιστεύουν ότι με πιο πλήρεις και ακριβείς πληροφορίες για την κατάσταση του οδοστρώματος και τις καιρικές συνθήκες, η επίδοση αυτή μπορεί να βελτιωθεί. Επισημαίνουν επίσης ότι η προσέγγιση του μοντέλου που δόμησαν, μπορεί να είναι χρήσιμη και για άλλες καταστάσεις εκτός του καιρού, όπως οδικά έργα ή συμβάντα.

Μια ιδιαίτερα διαφορετική προσέγγιση χρησιμοποίησε ο Dailey (2006) για να διερευνήσει την ποσοτική σχέση μεταξύ της μείωσης της ταχύτητας και της βροχόπτωσης και να δημιουργήσει μια συνάρτηση που θα προβλέπει άμεσα την μείωση της ταχύτητας ανάλογα με την βροχόπτωση. Η πηγή δεδομένων ήταν δύο ανεξάρτητα συστήματα του Πανεπιστημίου της Washington, και πιο συγκεκριμένα δεδομένα από το μετεωρολογικό ραντάρ του τμήματος Ατμοσφαιρικών Επιστημών και δεδομένα ανιχνευτών κυκλοφορίας του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών. Το ραντάρ έδινε την ένταση της βροχόπτωσης ενώ από τους ανιχνευτές κυκλοφορίας ελήφθησαν στοιχεία ταχύτητας με την μορφή του δείκτη απόδοσης «απόκλιση από την κανονική ταχύτητα». Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε ο συγκεκριμένος δείκτης είναι ότι τα καιρικά φαινόμενα είναι μη τακτικά επαναλαμβανόμενη κατάσταση, σε αντίθεση, για παράδειγμα, με την πρωινή αιχμή. Ελήφθησαν δεδομένα αρκετών ετών σε διάφορες οδούς της περιοχής του Seattle, τα οποία διασταυρώθηκαν στον χώρο και στον χρόνο ώστε να προσδιοριστούν οι πιθανότητες του πότε και που αυτές οι 2 ομάδες δεδομένων συσχετίζονται. Από την διαδικασία αυτή δομήθηκε μια συνάρτηση παρόρμησης-αντίδρασης (impulse response function), στην οποία θα εισάγονται οι μετρήσεις του ραντάρ για να προβλέπεται σε πραγματικό χρόνο η μείωση της ταχύτητας στο δίκτυο. Η πρόγνωση μπορεί να αφορά σε 1 ώρα μετά, καθώς από την εφαρμογή διαπιστώθηκε ότι η μεγαλύτερη επίπτωση στην κυκλοφορία παρατηρείται 1 ώρα αφού ανιχνευθούν σημαντικού μεγέθους ενδείξεις από το ραντάρ. Ο ερευνητής επισημαίνει ότι μια μεγαλύτερη βάση δεδομένων θα βελτιώσει την απόδοση του συγκεκριμένου μοντέλου.

Έναν κεντρικό, κορεσμένο κόμβο του Δουβλίνου επέλεξαν οι Butler et al. (2007) για να διερευνήσουν το αποτέλεσμα της εισαγωγής στοιχείων βροχόπτωσης στην πρόγνωση των κυκλοφοριακών μεγεθών. Παράλληλα διερεύνησαν και την αξία της εισαγωγής στοιχείων χρονοσειρών στο νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποίησαν. Στόχος τους ήταν οι μελέτη του συσχετισμού μεταξύ βροχόπτωσης και φόρτου. Παλαιότερες έρευνες είχαν δείξει ότι η βροχόπτωση δεν επηρεάζει τον μέσο ημερήσιο φόρτο. Ταυτόχρονα έχει δείξει ότι η βροχόπτωση επιφέρει μείωση στην ταχύτητα, την απόσταση μεταξύ οχημάτων και την χωρητικότητα του δικτύου. Ίσως αυτό να εξηγεί και την συμφύρρηση που παρατηρείται σε περιόδους σημαντικής βροχόπτωσης. Τα δεδομένα που ελήφθησαν ήταν ο φόρτος για μια περίοδο 4^{ων} ετών, από το 2002 έως το 2006, με συχνότητα 15 min, και η βροχόπτωση για περίοδο 6 ετών, από το 2000 έως το 2006, με συχνότητα μίας ώρας. Οι μετρήσεις φόρτου ενοποιήθηκαν σε μετρήσεις ανά ώρα για να ταυτίζονται με της βροχόπτωσης. Μετά το φιλτράρισμα των στοιχείων επελέγησαν για να εισαχθούν στο μοντέλο στοιχεία από Φεβρουάριο έως Απρίλιο, 3^{ων} ετών. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε ήταν σύνθετο.

Οι προγνώσεις δημιουργήθηκαν από ένα νευρωνικό δίκτυο, στο οποίο τα δεδομένα που εισάγονταν προέρχονταν από μια ανάλυση με χρονοσειρές και είχαν οργανωθεί μέσω αυτό-οργανωμένων χαρτών (self-organising maps). Οι χάρτες αυτοί χρησιμοποιήθηκαν για να εντοπιστούν οι τάσεις κάθε ημέρας και έτσι να οριστεί ο απαραίτητος αριθμός μοντέλων που θα χρειαζόταν για την ανάλυση κάθε ημέρας. Διαπιστώθηκε η όμοια συμπεριφορά όλων των καθημερινών, οπότε υπολογίστηκε από το μοντέλο η τυπική καθημερινή. Για τα δεδομένα που θα εισάγονταν στο μοντέλο δεν χρησιμοποιήθηκε η κλασική αυτοπαλίνδρομη διαδικασία (AR) που χρησιμοποιείται συνήθως, αλλά ένα εποχικό ολοκληρωμένο αυτοπαλίνδρομο υπόδειγμα (SARI). Ο στόχος ήταν να επικεντρωθεί το μοντέλο στα προς εισαγωγή στοιχεία, που είναι τα πιο κατάλληλα για την πρόγνωση του επόμενου αποτελέσματος. Γενικά μέσω αυτής της διαδικασίας μειώνονται τα απαιτούμενα προς εισαγωγή στοιχεία και άρα μειώνεται και ο χρόνος «εκπαίδευσης» του μοντέλου. Στην προκειμένη περίπτωση τα 24 στοιχεία της ημέρας που θα προέρχονταν από το αυτοπαλίνδρομο (AR) υπόδειγμα μειώθηκαν σε 19. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν ότι το εποχικό ολοκληρωμένο αυτοπαλίνδρομο υπόδειγμα

(SARI) συνέβαλε σε σημαντικό βαθμό στην ακρίβεια της πρόγνωσης. Αντίθετα η εισαγωγή στοιχείων βροχόπτωσης μείωσε την ακρίβεια της πρόγνωσης του φόρτου. Αυτό το αποτέλεσμα οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η βροχόπτωση δεν επηρεάζει τον φόρτο. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας ως δείκτη σφάλματος την τετραγωνική ρίζα του μέσου σφάλματος τετραγώνου (RMSE), προέκυψαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.3: Αποτελέσματα σφάλματος πρόγνωσης Butler et al. (2007)

Μέθοδος	Στοιχεία βροχής	Ορίζοντας	RMSE
Box-Jenkins	όχι	ενός βήματος	22,07
Box-Jenkins	ναι	ενός βήματος	28,04
Autoregressive	όχι	πολλαπλού βήματος	39,72
Autoregressive	ναι	πολλαπλού βήματος	41,96
Box-Jenkins	όχι	πολλαπλού βήματος	32,52
Box-Jenkins	ναι	πολλαπλού βήματος	36,18

Οι ερευνητές προτείνουν την εκ νέου δοκιμή του μοντέλου με δεδομένα βροχόπτωσης συχνότητας 15 min, ώστε να υπάρχει καλύτερη πληροφόρηση σχετικά με τον καιρό. Επίσης τονίζουν την σημαντική βελτίωση της ακρίβειας του νευρωνικού δικτύου με την χρήση του εποχικού ολοκληρωμένου αυτοπαλίνδρομου υποδείγματος (SARI) σε σχέση με το συμβατικό αυτοπαλίνδρομο (AR).

2.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μέσα από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας που προηγήθηκε αντλούνται πολλά ενδιαφέροντα και χρήσιμα συμπεράσματα για την έρευνα στο πεδίο της βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης της κυκλοφορίας. Το βέβαιο είναι ότι το ενδιαφέρον βαίνει αυξανόμενο με τα χρόνια κάτι που αποδεικνύεται από τον αριθμό των ερευνών που έχουν λάβει χώρα μετά το 2000. Η αύξηση αυτή του ενδιαφέροντος είναι απόλυτα λογική αν σκεφτεί κανείς ότι οι εφαρμογές τέτοιου είδους ερευνών έχουν διευρυνθεί και μπορούν να έχουν μεγάλο, θετικό αντίκτυπο στα ευφυή συστήματα μεταφορών (ITS). Επίσης τα μαθηματικά εργαλεία έχουν αυξηθεί και κυρίως

βελτιωθεί, οι βάσεις δεδομένων έχουν μεγαλώσει καθώς στα περισσότερα δίκτυα λαμβάνονται δεδομένα κυκλοφορίας και τέλος η υπολογιστική δύναμη των υπολογιστών και οι δυνατότητες των προγραμμάτων είναι τέτοιες που διευκολύνουν ιδιαίτερα ανάλογες προσπάθειες.

Διαχρονικά παρατηρούμε μια «εμμονή» με την πρόγνωση σε ελεύθερες λεωφόρους, κάτι που εξηγείται κυρίως από την ευκολία που αυτές προσφέρουν στον μελετητή, λόγω της απλότητάς τους. Είναι λογικό λοιπόν οι πρώτες εφαρμογές να γίνονται σε ελεύθερες λεωφόρους καθώς δεν υπήρχε συνολικότερη εμπειρία στο θέμα. Εντούτοις τα προβλήματα κορεσμού είναι ιδιαίτερα έντονα, αν όχι εντονότερα και στις αστικές περιοχές, οπότε το σίγουρο είναι ότι απαιτούνται περισσότερες εφαρμογές εντός του αστικού ιστού. Τα τελευταία χρόνια αναφέρονται στην βιβλιογραφία περισσότερες έρευνες που αφορούν σε αστικές αρτηρίες και αυτή είναι μια τάση που λογικά θα συνεχιστεί.

Το μεγαλύτερο δίλλημα για έναν ερευνητή ο οποίος καλείται να δομήσει ένα μοντέλο πρόγνωσης της κυκλοφορίας, φαίνεται να είναι η επιλογή της μεθόδου. Μια μεγάλη ποικιλία μεθόδων έχει χρησιμοποιηθεί στην βιβλιογραφία με ελπιδοφόρα αποτελέσματα για όλες τους ανάλογα με την τοποθεσία και τον τρόπο που εφαρμόστηκαν. Κάθε μια έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και για τον λόγο αυτό είναι δύσκολο να επιλεγεί κάποια ιδανική λύση. Οι παραμετρικές μέθοδοι, για παράδειγμα, μπορούν να δώσουν αξιόπιστες προβλέψεις από ιδιαίτερα μικρές βάσεις δεδομένων, αλλά τείνουν να «χάνουν» τις ακραίες τιμές που πολύ συχνά λαμβάνουν οι κυκλοφοριακές παράμετροι. Αντίθετα, οι μη παραμετρικές μέθοδοι είναι ικανές να παρακολουθήσουν τα ακραία κυκλοφοριακά φαινόμενα, αλλά απαιτούν ιδιαίτερα μεγάλες βάσεις δεδομένων και προσοχή κατά την επιλογή και κατηγοριοποίησή τους. Για τους παραπάνω λόγους φαίνεται κατά την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας ότι οι μελέτες είναι μοιρασμένες ανάμεσα στην χρήση παραμετρικών και μη παραμετρικών μεθόδων.

Ιδιαίτερη χρήση έχει γίνει στις διάφορες εργασίες του αυτοπαλίνδρομου υποδείγματος κινητών μέσων (AR(I)MA) και των διαφόρων παραγώγων του όπως η

εποχική ARIMA και τα υποδείγματα VARMA. Έχει αποδειχτεί ότι η συγκεκριμένη παραμετρική μέθοδος μπορεί να δώσει πολύ αξιόπιστες προβλέψεις, οι οποίες μπορούν να βελτιωθούν ακόμα περισσότερο με τις παράγωγες πιο συγκεκριμένες μεθόδους. Φάνηκε ότι η χρήση πολυπαραμετρικών μοντέλων όπως τα VARMA και ARIMAX μπορούν να αποδώσουν πιο πιστά σύνθετα δίκτυα και όχι μόνο μεμονωμένους ανιχνευτές. Εντούτοις απαιτούν μια χρονοβόρα διαδικασία υπολογισμού των παραμέτρων, η οποία μπορεί να γίνει εύκολα σε μικρό αριθμό φωρατών αλλά δυσκολεύει για την περίπτωση δικτύων. Πρόσθετα προβλήματα δημιουργούνται και από την απουσία ή τις λανθασμένες μετρήσεις, καθώς και από την ανάγκη ενημέρωσης των παραμέτρων ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Στο τελευταίο ενθαρρυντική είναι η έρευνα των Shekhar and Williams (2008) με την χρήση φίλτρων για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας, ενώ και στο πρώτο μελλοντικές έρευνες μπορούν να δώσουν λύση.

Από την άλλη πλευρά, οι μη παραμετρικές μέθοδοι, με προεξάρχουσες την μη παραμετρική παλινδρόμηση και τα νευρωνικά δίκτυα, έχουν σημαντικό μερίδιο στις προσπάθειες πρόγνωσης των κυκλοφοριακών συνθηκών. Και οι 2 αυτές μέθοδοι έχουν πετύχει ιδιαίτερα αξιόπιστες προβλέψεις, οι οποίες όμως εξαρτώνται αρκετά από την δομή και την «εκπαίδευση» του μοντέλου από τον μελετητή. Η δυσκολία της μη παραμετρικής παλινδρόμησης έγκειται στην δημιουργία μιας πλήρους και αντιπροσωπευτικής όλων των πιθανών καταστάσεων βάσης δεδομένων, ενώ των νευρωνικών δικτύων στην δημιουργία του δικτύου και των κανόνων που το διέπουν και στον χρόνο «εκπαίδευσής» του. Εντούτοις δεν απαιτούν συντήρηση με την πάροδο του χρόνου.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και το γεγονός της ικανοποιητικής απόδοσης πιο απλών μεθόδων, όπως η εκθετική εξομάλυνση. Φαίνεται ότι σε απλές εφαρμογές που η ακρίβεια που απαιτείται δεν είναι μεγάλη, συνιστούν μια αξιόπιστη επιλογή. Από την άλλη πλευρά, ιδιαίτερα σύνθετες μέθοδοι, όπως η καταστατική-χωρική προσέγγιση (state-space approach), μπορούν να δώσουν βελτιωμένες προβλέψεις στις περιπτώσεις σύνθετων δικτύων, όπως είναι τα αστικά. Αν και με ιδιαίτερα σύνθετο μαθηματικό υπόβαθρο, συνιστούν πεδίο έρευνας για το μέλλον. Τέλος πολύ

σημαντική είναι η ανάπτυξη, τα τελευταία χρόνια, υβριδικών μεθόδων οι οποίες αξιοποιούν πλεονεκτήματα της κάθε συνιστώσας τους και με την από κοινού λειτουργία τους εξουδετερώνουν τα μειονεκτήματα εκάστης. Οι εφαρμογές αυτών των μεθόδων όπως η ATHENA, η KARIMA αλλά και η χρήση χρονοσειρών για την προεπεξεργασία των δεδομένων που θα επεξεργαστεί το νευρωνικό δίκτυο, έδειξαν εξαιρετικά αποτελέσματα και ξεπέρασαν τα άλλα μοντέλα με τα οποία συγκρίθηκαν.

Αναφορικά με το μέγεθος για το οποίο γίνεται η πρόγνωση, το συνηθέστερο είναι ο φόρτος (ή ο ρυθμός ροής), ενώ σπανιότερα μελετάται η κατάληψη, η ταχύτητα ή άλλα μεγέθη όπως η πυκνότητα ή ο χρόνος ταξιδιού. Το μέγεθος που θα επιλεγεί πρέπει να είναι τέτοιο που οι προγνώσεις να έχουν μικρό σφάλμα αλλά και να δίνει την απαιτούμενη πληροφορία μέσω γνωστών σχέσεων των κυκλοφοριακών μεγεθών. Συνηθέστερη απαίτηση, ειδικά αν η πληροφορία απευθύνεται στον χρήστη είναι ο χρόνος διαδρομής.

Ιδιαίτερη ποικιλία εντοπίζεται στα διαστήματα μεταξύ των μετρήσεων που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή των προγνώσεων, καθώς και στον ορίζοντα στον οποίο γίνεται η πρόγνωση. Έτσι παρατηρούνται τιμές για τα διαστήματα μεταξύ μετρήσεων από 20 sec έως και 30 min, με μεγάλες συχνότητες καθεμίας από τις ενδιάμεσες τιμές. Όμοια είναι η κατάσταση και στον ορίζοντα της πρόβλεψης, που ποικίλει από 3 min έως και 2 h. Εντούτοις είναι σαφές ότι ο μικρότερος ορίζοντας δίνει καλύτερη πρόγνωση αλλά μπορεί να μην είναι αρκετός για την σωστή διαχείριση του συστήματος. Όσον αφορά στα διαστήματα μεταξύ μετρήσεων, η μικρή τιμή τους αυξάνει την ακρίβεια περιγραφής των φαινομένων και δεν «χάνονται» καταστάσεις αλλά αυξάνεται και ο θόρυβος των μετρήσεων. Η χρυσή τομή είναι αυτή που δίνει την ακριβέστερη πρόβλεψη, αλλά αυτή δεν έχει καθοριστεί ακόμα με σαφήνεια.

Ένα ακόμα ενδιαφέρον στοιχείο που παρατηρήθηκε στις διάφορες εργασίες είναι η μεγάλη διακύμανση των σφαλμάτων. Έτσι οι ίδιες μέθοδοι σε κάποιες περιπτώσεις αποδίδουν πολύ καλά και σε άλλες μέτρια. Οι μεγάλες αποκλίσεις φαίνονται από το γεγονός ότι παρόμοια μοντέλα είχαν σφάλμα 5 % σε μια περίπτωση το οποίο έφτανε

ακόμα και το 40 % σε άλλη εργασία. Προφανώς πολλοί παράγοντες παίζουν ρόλο, όπως η πολυπλοκότητα και οι ιδιαιτερότητες του δικτύου, η ποιότητα και ο όγκος των δεδομένων, η εμπειρία και οι επιλογές του μελετητή κλπ. Και αυτό όμως το στοιχείο συνηγορεί στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει ιδανική μέθοδος αλλά η απόδοση του μοντέλου εξαρτάται κυρίως από την σωστή ανάπτυξή του.

Τέλος η ανασκόπηση των εργασιών στις οποίες γίνεται προσπάθεια πρόγνωσης των κυκλοφοριακών μεγεθών σε συνάρτηση με τα καιρικά φαινόμενα έδειξε ότι η έρευνα στο πεδίο αυτό είναι ιδιαίτερα περιορισμένη. Ακόμα τα αποτελέσματα αυτών των προσπαθειών δεν είναι πολύ ενθαρρυντικά καθώς τα σφάλματα των προγνώσεων ήταν σημαντικά, και η επίδραση του καιρού μείωνε την ακρίβεια κάποιων από τα μοντέλα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν νευρωνικά δίκτυα και σε καμία μέθοδος ανάλυσης χρονοσειρών. Ενδεχομένως να εκτιμάται από τους ερευνητές ότι τα μη παραμετρικά μοντέλα μπορούν να αποδώσουν καλύτερα οριακές καταστάσεις που δημιουργούνται από τις αντίξοες καιρικές συνθήκες.

Πίνακας 2.4: Επισκόπηση βιβλιογραφίας

Συγγραφείς	Χρονιά	Περιοχή	Μέθοδος			Μέγεθος υπό διερεύνηση			Ανάλυση		Επίδραση καιρικών φαινομένων			
		Ελεύθερη λεωφόρος	Αστική αρτηρία	Παραμετρική	Μη παραμετρική	Υβριδική	Σύγκριση	Ρυθμός ροής/Φόρτος	Κατάληψη	Ταχύτητα		Άλλο	Διάστημα μεταξύ μετρήσεων	Ορίζοντας πρόγνωσης (βήματα)
Ahmed and Cook	1979	✓			✓			✓	✓			20,30 και 60 sec		
Davis and Nihan	1991	✓				✓		✓	✓			1 min	28	
Florio and Mussone	1996	✓				✓					✓	30 min	10 min	✓
Kirby et al.	1997	✓					✓					15 min	1,2 και 4	
Williams et al.	1998	✓			✓			✓				5 min	1	
Lee and Fambro	1999	✓			✓			✓				30 min		
Williams	2001	✓			✓			✓				15 min	1 και 2	
Chen and Grant-Muller	2001	✓				✓					✓	20 sec	15,30 και 45	
Dia	2001	✓				✓						90 sec		
Stathopoulos and Karlaftis	2002	✓	✓		✓			✓		✓		5 min	5	
Sun et al.	2002	✓				✓				✓		15 min		
Smith et al.	2002	✓										7,5 min	5	
Kamarianakis and Prastacos	2003		✓		✓						✓	15 min	1	
Williams and Hoel	2003	✓			✓			✓				3 min	1	
Stathopoulos and Karlaftis	2003		✓		✓			✓				15 min	1	
Huang and Ran	2003		✓			✓				✓		1 h	1 h	✓
Dailey	2006		✓		✓					✓		1 h	1 - 24	✓
Butler et al.	2007		✓					✓				15 min	1	✓
Shekhar and Williams	2008	✓			✓			✓						

Κεφάλαιο 3

Βάση δεδομένων και μεθοδολογική προσέγγιση

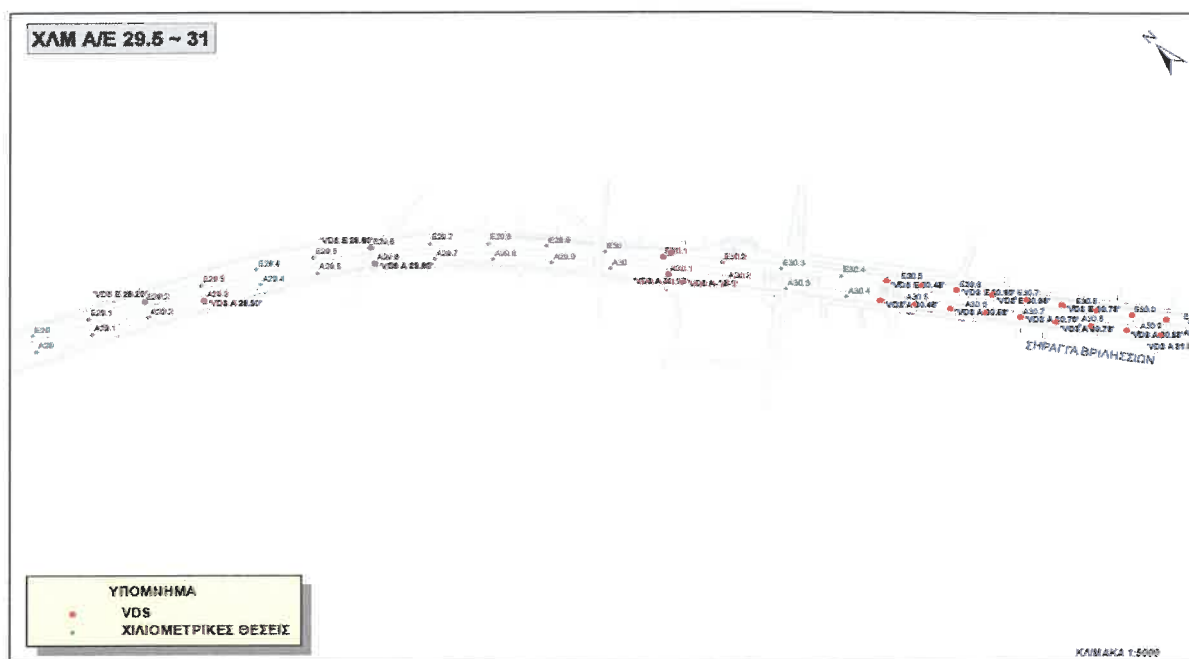
3.1 ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται και αναλύεται η βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

3.1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση προέρχονται από την Αττική Οδό. Η Αττική Οδός είναι ελεύθερη λεωφόρος, η οποία διέρχεται από αστικές και περιαστικές περιοχές, αποτελώντας μέρος του περιφερειακού συστήματος της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας, καθώς και σύνδεση με τον Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών. Στο κεντρικό τμήμα της Αττικής Οδού, όπου διέρχεται από αστικές περιοχές, ο φόρτος είναι ιδιαίτερα μεγάλος και σχεδόν καθημερινά παρατηρείται κορεσμός κατά τις ώρες αιχμής.

Από το κεντρικό αυτό τμήμα προέρχονται τα στοιχεία που αξιοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία καθώς το ενδιαφέρον για την μελέτη των κυκλοφοριακών μεγεθών και για την παραγωγή αξιόπιστων προβλέψεων, είναι εντονότερο κατά τις περιόδους κορεσμού. Έτσι δεδομένα κυκλοφορίας αντλήθηκαν από το VDS E 30.1, το οποίο βρίσκεται στην χιλιομετρική θέση 30 + 100, σε μικρή απόσταση από την σήραγγα Βριλησίων, στην κατεύθυνση προς Ελευσίνα. Η επιλογή του συγκεκριμένου VDS έγινε με το κριτήριο, εκτός του είναι στο κεντρικό τμήμα της ελεύθερης λεωφόρου, να βρίσκεται εκτός σήραγγας και όσο το δυνατόν σε μικρότερη απόσταση από μετεωρολογικό σταθμό. Οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτή την επιλογή είναι προφανείς, και συνίστανται στην δυνατότητα καταγραφής των μεταβολών της κυκλοφορίας λόγω καιρού. Η περιοχή του VDS E 30.1 φαίνεται στον παρακάτω χάρτη.



Σχήμα 3.1: Περιοχή VDS E 30.1

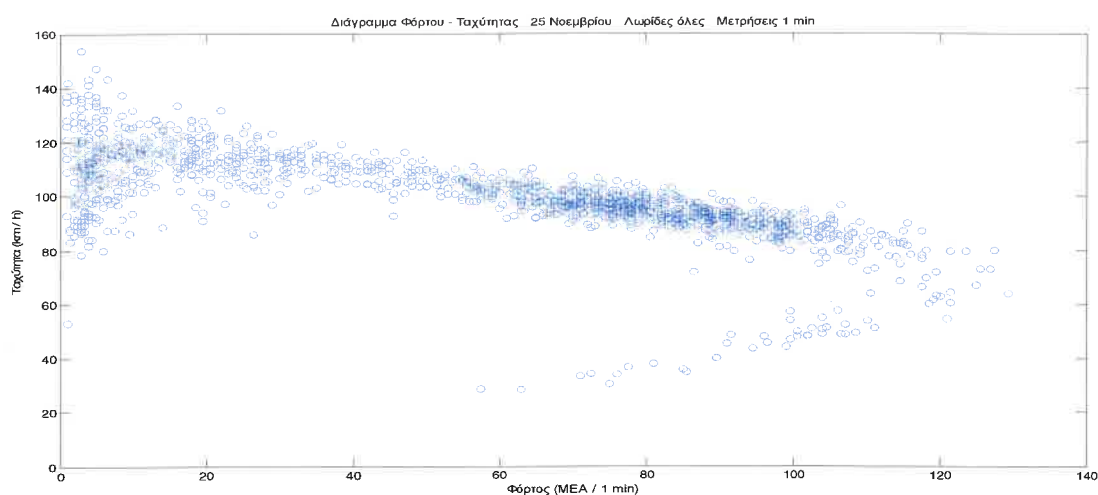
Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 2 ημερών, 25 Νοεμβρίου 2009 κατά την οποία δεν υπήρξε βροχόπτωση, και 2 Δεκεμβρίου 2009 ημέρα κατά την οποία υπήρχαν διαστήματα βροχόπτωσης. Τα στοιχεία κυκλοφορίας καλύπτουν όλο το εικοσιτετράωρο και δίνονται σε χρονικό βήμα 10 min και 1 min. Δίνονται: ο αριθμός των επιβατικών οχημάτων και ο αριθμός των φορτηγών (βαρέων) οχημάτων, η μέση ταχύτητα και η κατάληψη. Όλα τα μεγέθη δίνονται ανά λωρίδα. Η αρίθμηση των λωρίδων είναι η εξής: λωρίδα 1 για την αριστερή, λωρίδα 2 για την μεσαία και λωρίδα 3 για την δεξιά.

Τα στοιχεία καιρού ελήφθησαν από το δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του σταθμού Πεντέλης λόγω της εγγύτητας προς το επιλεγμένο VDS. Τα στοιχεία καιρού που αντλήθηκαν είναι η βροχόπτωση, η σχετική υγρασία, η ταχύτητα ανέμου και η μέση θερμοκρασία. Το βήμα με το οποίο λαμβάνονται οι μετεωρολογικές μετρήσεις είναι 10 min. Η βροχόπτωση 10λέπτου προφανώς αποτελεί το σύνολο της κατακρήμνισης αυτού του χρονικού διαστήματος. Τα λοιπά μεγέθη θεωρήθηκε ότι διατηρούνται σταθερά στην διάρκεια του 10λέπτου. Η βροχόπτωση μετρείται σε mm,

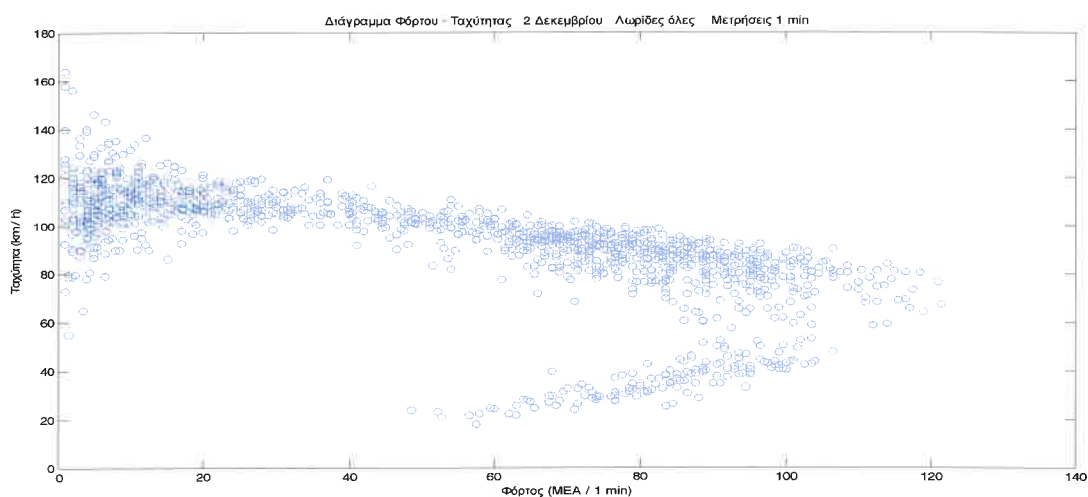
η ταχύτητα ανέμου σε m/s, η μέση θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου (°C) και η σχετική υγρασία επί τοις εκατό (%).

3.1.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Από την ανάλυση της βάσης δεδομένων προκύπτουν κάποια ιδιαίτερα χρήσιμα και ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Η ανάλυση των δεδομένων που ακολουθεί γίνεται με την βοήθεια πινάκων και διαγραμμάτων. Σημειώνεται ότι ο φόρτος έχει μονάδες ΜΕΑ, με χρήση συντελεστή 1,5 για τα βαρέα οχήματα.



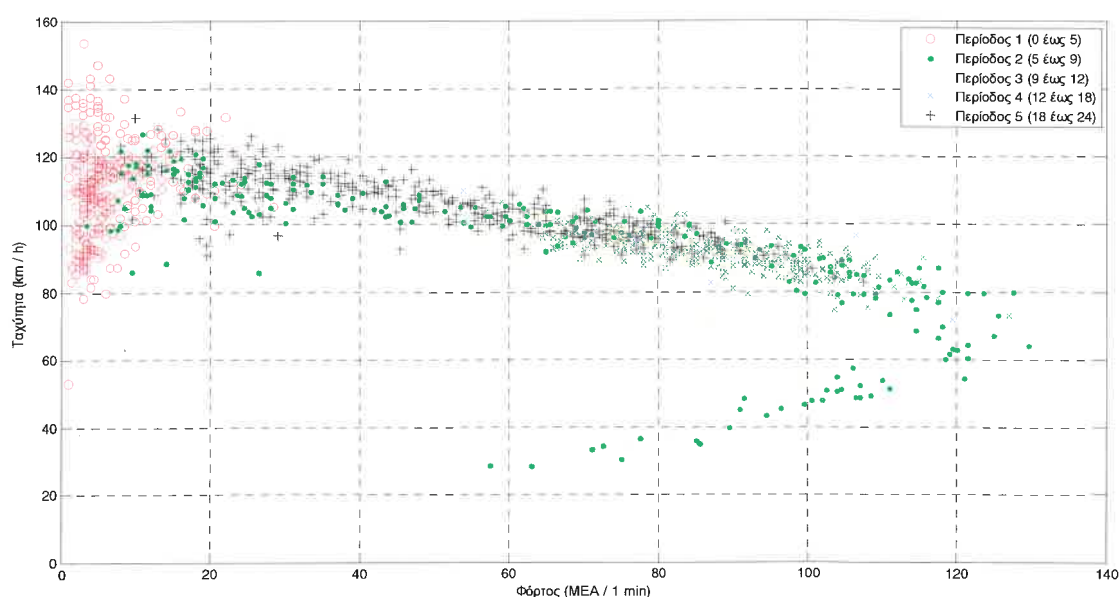
Σχήμα 3.2: Διάγραμμα ταχύτητας – φόρτου 25^{ης} Νοεμβρίου για το σύνολο των λωρίδων και μετρήσεις 1min



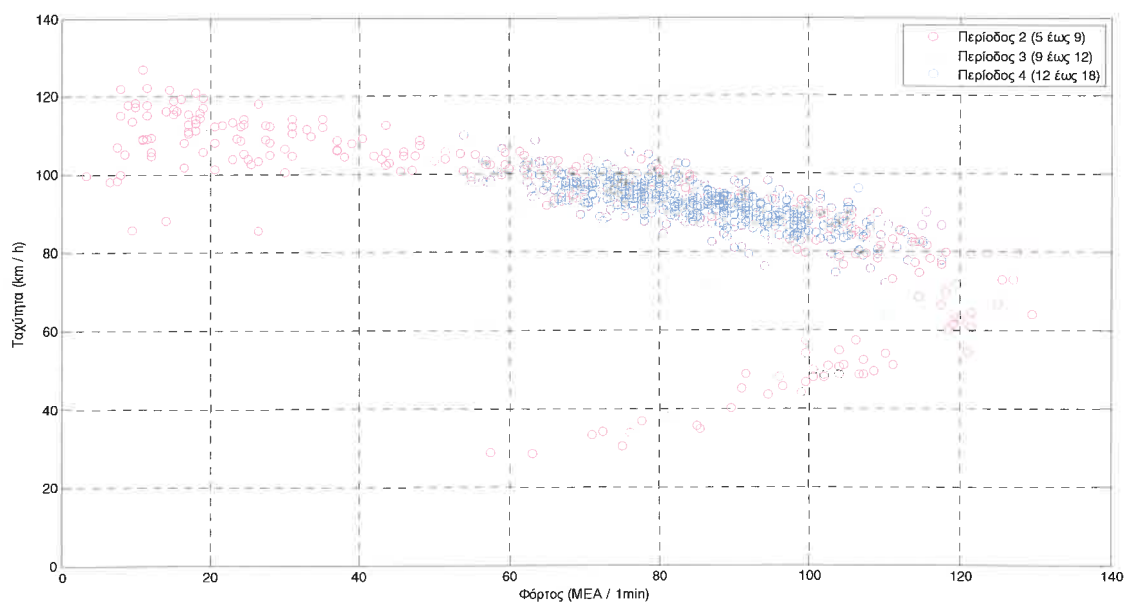
Σχήμα 3.3: Διάγραμμα ταχύτητας – φόρτου 2^{ας} Δεκεμβρίου για το σύνολο των λωρίδων και μετρήσεις 1min

- ✓ Στα διαγράμματα ταχύτητας – φόρτου μπορούμε να παρατηρήσουμε, και για τις 2 ημέρες, την κλαστική μορφή της σχέσης των δύο αυτών μεγεθών και να διαχωρίσουμε την μη-συμφορημένη περιοχή στο άνω μέρος του διαγράμματος και την συμφορημένη στο κάτω.
- ✓ Εντούτοις ανάμεσα στις 2 ημέρες εντοπίζεται η ακόλουθη διαφορά. Στις 25 Νοεμβρίου το διάγραμμα φαίνεται να περιγράφεται καλύτερα από μια γραμμική σχέση (για κάθε μια από τις περιοχές, συμφόρησης και μη – συμφόρησης). Ακόμα στις 2 Δεκεμβρίου εμφανίζεται μεγαλύτερο πλήθος παρατηρήσεων να βρίσκεται στην περιοχή συμφόρησης.

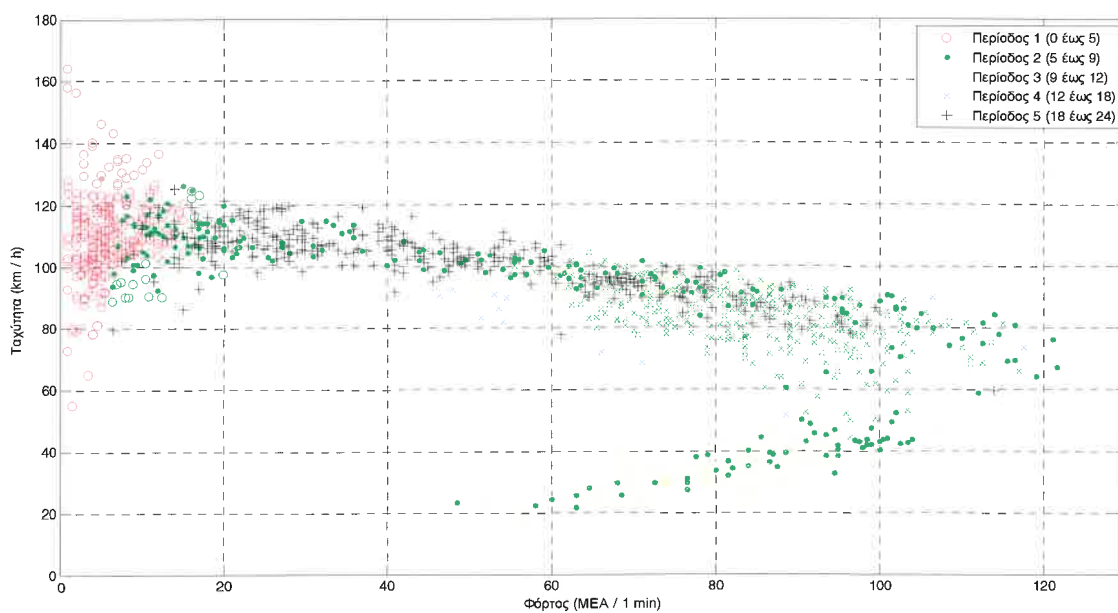
Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα διαγράμματα ταχύτητας – φόρτου, αν τα αναλύσουμε ξεχωριστά για κάθε περίοδο.



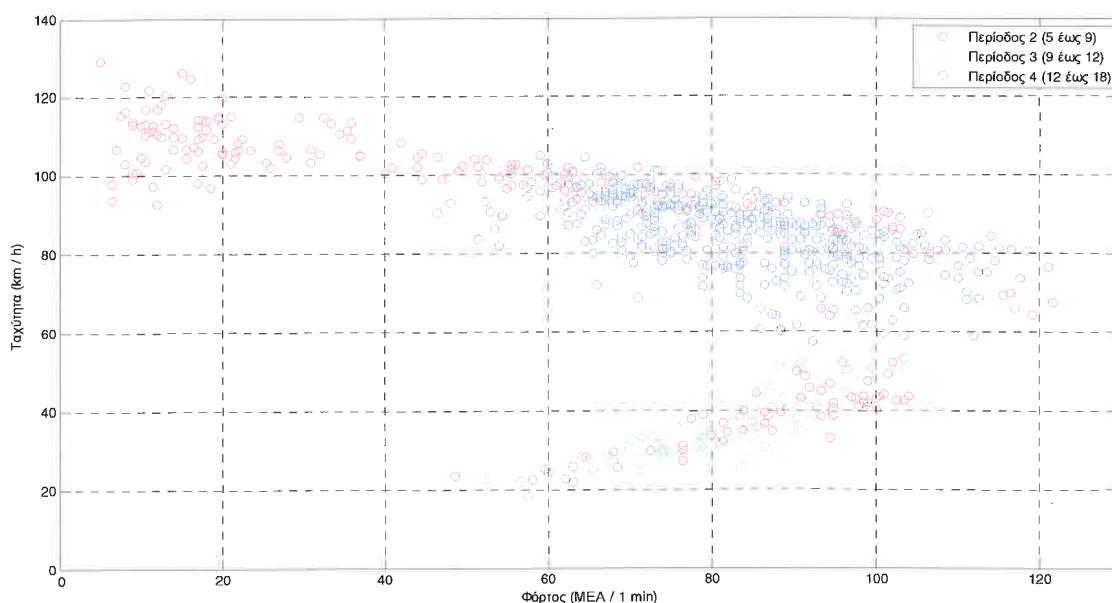
Σχήμα 3.4: Διάγραμμα ταχύτητας – φόρτου 25^{ης} Νοεμβρίου, ανά περίοδο για το σύνολο των λωρίδων και μετρήσεις 1min



Σχήμα 3.5: Διάγραμμα ταχύτητας – φόρτου 25^{ης} Νοεμβρίου, ανά περίοδο για τις περιόδους αιχμής, για το σύνολο των λωρίδων και μετρήσεις 1 min



Σχήμα 3.6: Διάγραμμα ταχύτητας – φόρτου 2^{ας} Δεκεμβρίου, ανά περίοδο για το σύνολο των λωρίδων και μετρήσεις 1min



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα ταχύτητας – φόρτου 2^{ας} Δεκεμβρίου, ανά περίοδο για τις περιόδους αιχμής, για το σύνολο των λωρίδων και μετρήσεις 1 min

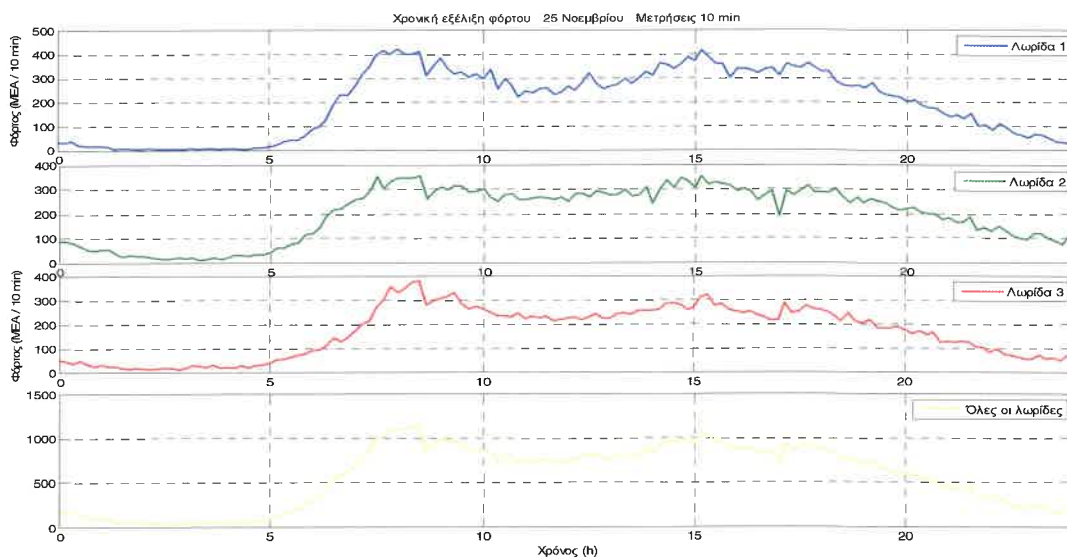
Παρατηρούμε ότι σε κάθε περίοδο παρουσιάζεται διαφορετική συμπεριφορά της κυκλοφορίας. Πιο συγκεκριμένα:

- ✓ Στο σύνολο της διάρκειας της περιόδου 1 (0 έως 5), η κυκλοφορία βρίσκεται στην μη συμφορημένη περιοχή. Εντούτοις, η ταχύτητες των οχημάτων παρουσιάζουν πολύ μεγάλες διακυμάνσεις.
- ✓ Τα στοιχεία της περιόδου 2 (5 έως 9) εμφανίζουν την κλασσική μορφή των διαγραμμάτων ταχύτητας – φόρτου. Υπάρχει λοιπόν η μη συμφορημένη περιοχή (επάνω) και η συμφορημένη (κάτω). Αυτό μας δείχνει ότι κατά το διάστημα 5 έως 9 η κυκλοφορία μεταπίπτει από μη συμφορημένη σε συμφορημένη κατάσταση.
- ✓ Όσον αφορά στην περίοδο 3 (9 έως 12) παρουσιάζεται μια έντονη διαφορά μεταξύ των 2 ημερών. Στις 25/11 ο μεγαλύτερος όγκος των μετρήσεων βρίσκεται στη μη συμφορημένη περιοχή σε αντίθεση με τις 2/12 όπου η πλειοψηφία βρίσκεται σε φάση συμφόρησης. Η βροχόπτωση που μετρήθηκε στο διάστημα 9 – 10 περίπου είναι μεν μέτριας εντάσεως αλλά σχετικά μεγάλης διάρκειας (1 ώρα). Ενδεχομένως λοιπόν, η συμφόρηση αυτή να εξηγείται εν

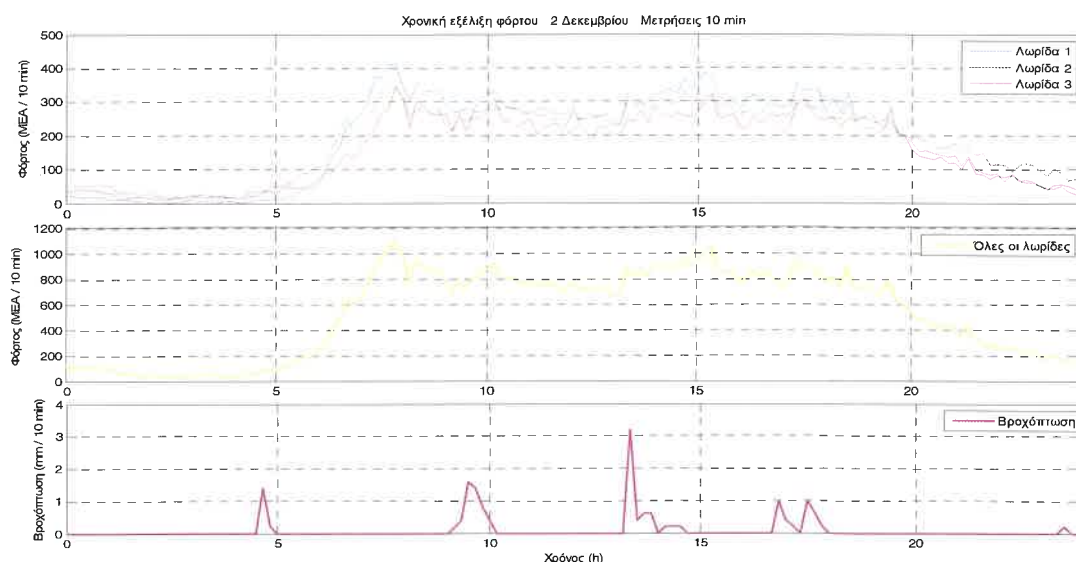
μέρει και από την βροχόπτωση. Το ενδιαφέρον συμπέρασμα πάντως είναι ο αρκετά μεγάλος φόρτος κατά την διάρκεια της περιόδου 3, παρά το ότι δεν θεωρείται ως κατ' εξοχήν ώρα αιχμής. Ο αυξημένος αυτός φόρτος μπορεί όπως αποδεικνύεται εύκολα να οδηγήσει την κυκλοφορία σε κατάσταση συμφόρησης.

- ✓ Κατά την περίοδο 4 (12 έως 18) παρατηρούμε μεν αυξημένη κυκλοφορία αλλά ελάχιστες μετρήσεις εντοπίζονται στην περιοχή συμφόρησης. Το ενδιαφέρον είναι ότι κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου υπήρξε στις 2/12 έντονη βροχόπτωση σχετικά μικρής διάρκειας. Οι μετρήσεις της 2^{ας} Δεκεμβρίου, της περιόδου 4 παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανομοιογένεια και εντοπίζονται περισσότερες τιμές στην περιοχή συμφόρησης, αλλά και πάλι ο αριθμός αυτός είναι ιδιαίτερα περιορισμένος, για μια περίοδο που θεωρείται ότι περιέχει 2 αιχμές, μεσημεριανή και απογευματινή.
- ✓ Τέλος κατά την περίοδο 5 (18 έως 24), παρατηρείται μεγάλος εύρος τιμών φόρτου αλλά σε κάθε περίπτωση δεν εμφανίζεται συμφόρηση.

Η παραπάνω ανάλυση αποδεικνύει την σκοπιμότητα διερεύνησης της κυκλοφορίας ανά περίοδο. Φυσικά αυτή η εξειδίκευση πρέπει να συγκριθεί με τα γενικά μοντέλα και πρότυπα ώστε να αξιολογηθεί το μέγεθος αυτής της σκοπιμότητας.

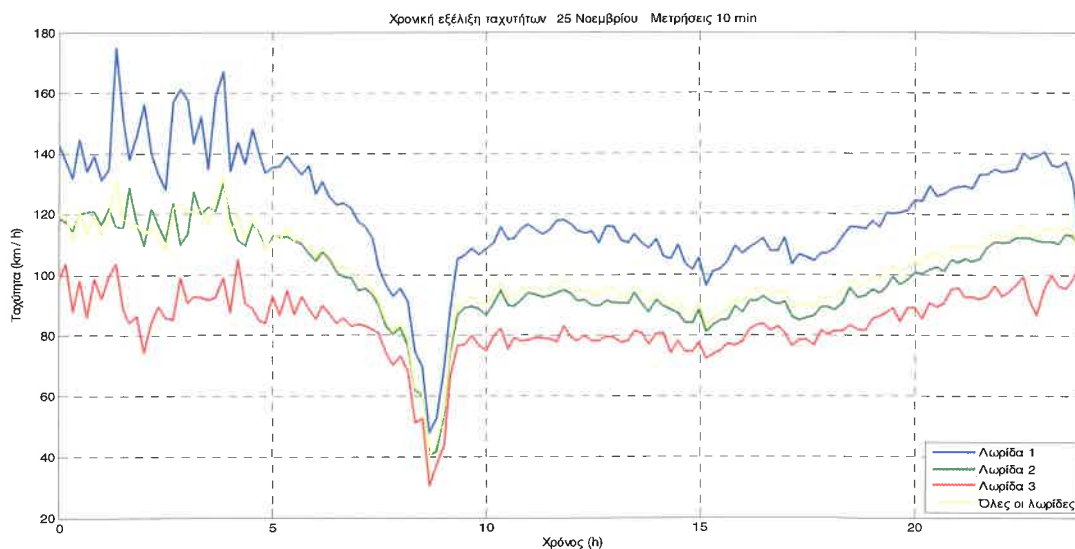


Σχήμα 3.8: Χρονική εξέλιξη φόρτου 25^{ης} Νοεμβρίου για κάθε λωρίδα και μετρήσεις 10 min

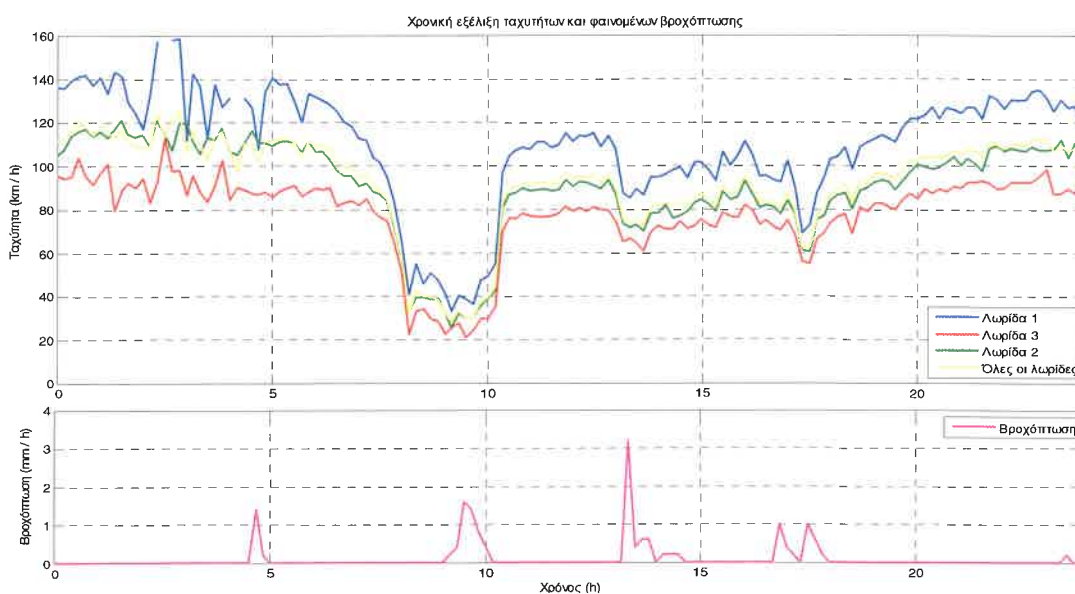


Σχήμα 3.9: Χρονική εξέλιξη φόρτου 2^{ας} Δεκεμβρίου για κάθε λωρίδα και μετρήσεις 10 min

- ✓ Στα διαγράμματα φόρτου – χρόνου εντοπίζονται σαφώς οι αιχμές της κυκλοφορίας. Συγκεκριμένα παρατηρείται η μεγάλη πρωινή αιχμή στο διάστημα 7 – 9, η μεσημεριανή αιχμή περίπου στις 15 και η μικρότερη απογευματινή αιχμή περίπου στις 17 – 18.
- ✓ Σχεδόν σε όλη την διάρκεια της 25^{ης} Νοεμβρίου, ο φόρτος είναι ελαφρώς υψηλότερος σε σχέση με της 2^{ας} Δεκεμβρίου. Εντούτοις δεν υπάρχει καμία ένδειξη ότι αυτή η διαφορά μεταξύ των 2 ημερών οφείλεται στην βροχόπτωση.
- ✓ Σε ένα μεγάλο μέρος της ημέρας, στο διάστημα περίπου 7 -20, ο φόρτος στην αριστερή λωρίδα (λωρίδα 1), είναι υψηλότερος αυτού των άλλων λωρίδων. Ενδεχομένως η αιτία για αυτή την συμπεριφορά της κυκλοφορίας να είναι η ύπαρξη αλληπάλληλων ραμπών εισόδου – εξόδου στο συγκεκριμένο οδικό τμήμα. Αντίθετα κατά τις νυχτερινές ώρες, όπου ο φόρτος είναι ιδιαίτερα μικρότερος, οι οδηγοί φαίνεται να προτιμούν την μεσαία λωρίδα (λωρίδα 2).



Σχήμα 3.10: Χρονική εξέλιξη ταχυτήτων 25^{ης} Νοεμβρίου σε κάθε λωρίδα και μετρήσεις 10 min

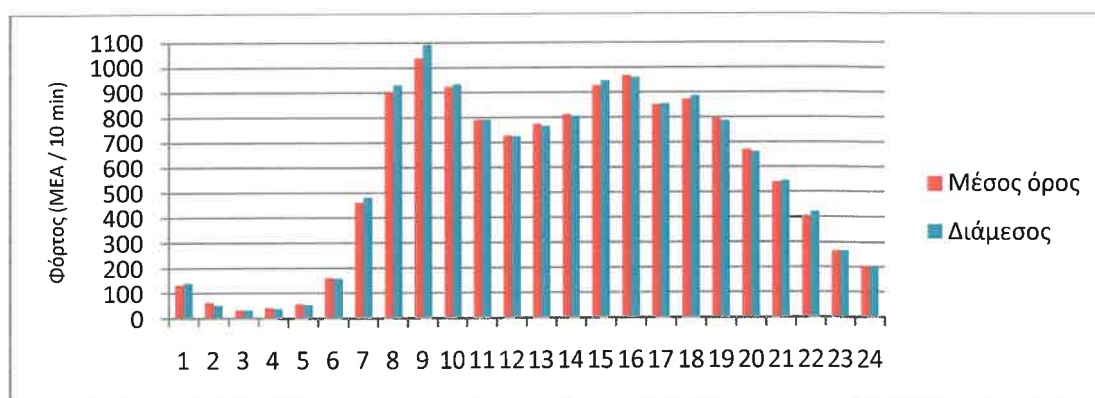


Σχήμα 3.11: Χρονική εξέλιξη ταχυτήτων 2^{ας} Δεκεμβρίου σε κάθε λωρίδα και μετρήσεις 10 min

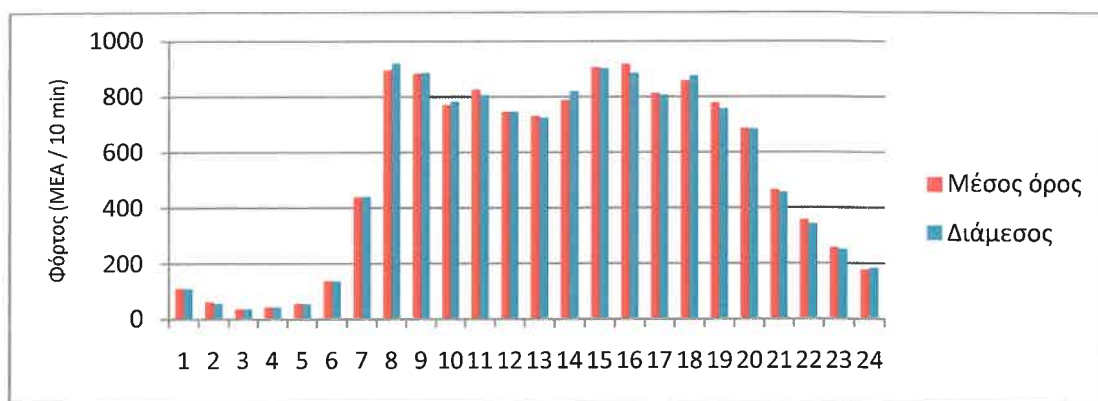
- ✓ Στα διαγράμματα ταχύτητας – χρόνου διακρίνονται ξεκάθαρα οι τάσεις για τις διάφορες περιόδους της ημέρας.
- ✓ Παρατηρείται ότι σχεδόν σε όλη τη διάρκεια της 25^{ης} Νοεμβρίου η ταχύτητα είναι σημαντικά υψηλότερη σε σχέση με την 2^α Δεκεμβρίου. Υπενθυμίζεται ότι η 2^α Δεκεμβρίου είναι η ημέρα κατά την οποία παρουσιάζονται φαινόμενα βροχόπτωσης. Εντούτοις η βροχόπτωση αυτή δεν είναι συνεχής, ούτε ιδιαίτερα

ισχυρή. Ακόμα όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο φόρτος είναι ελαφρώς μικρότερες την 2^α Δεκεμβρίου. Έτσι η απόκλιση αυτή στις ταχύτητες δεν μπορεί να αιτιολογηθεί πειστικά.

- ✓ Συγκεκριμένα η μείωση της ταχύτητας δικαιολογείται από τα φαινόμενα βροχής για τα χρονικά διαστήματα 9 -10, όπου παρατηρείται παρατεταμένα χαμηλή ταχύτητα περίπου 30 – 40 km / h, σε αντίθεση με την 25^η Νοεμβρίου όπου οι αντίστοιχες χαμηλές ταχύτητες διαρκούν πολύ λιγότερο και αντιστοιχούν στην πρωινή αιχμή.
- ✓ Επίσης η μείωση της ταχύτητας στο διάστημα 13 – 15, πιθανότατα οφείλεται στην σχετικά ισχυρή βροχόπτωση που παρουσιάζεται στο αντίστοιχο διάστημα. Ομοίως και η πτώση της ταχύτητας στο διάστημα 17 – 18 αιτιολογείται από την βροχόπτωση στο αντίστοιχο διάστημα.
- ✓ Αντίθετα στο διάστημα 8 – 9 η ταχύτητα είναι περίπου 30 % χαμηλότερη την ημέρα του Δεκεμβρίου σε σχέση με αυτή του Νοεμβρίου, χωρίς όμως να έχει προηγηθεί βροχόπτωση σε κοντινή χρονική περίοδο.
- ✓ Τέλος, όπως ήταν αναμενόμενο η ταχύτητα στην αριστερή λωρίδα είναι μεγαλύτερη καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας. Η διαφορά βέβαια αυτή μειώνεται κατά τις ώρες αιχμής όπου σε όλες τις λωρίδες η ταχύτητα είναι χαμηλή και η κίνηση γίνεται σε στίχους.

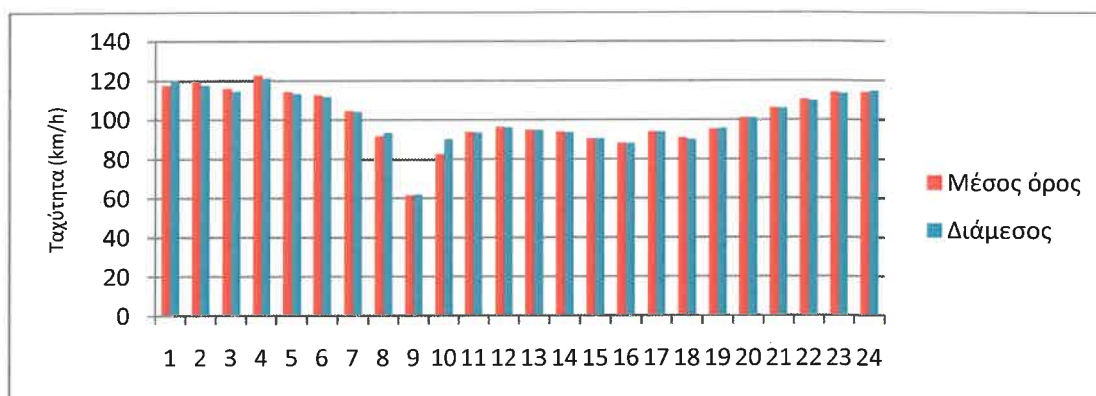


Σχήμα 3.12: Μέσος και διάμεσος φόρτος 25^{ης} Νοεμβρίου στο σύνολο των λωρίδων

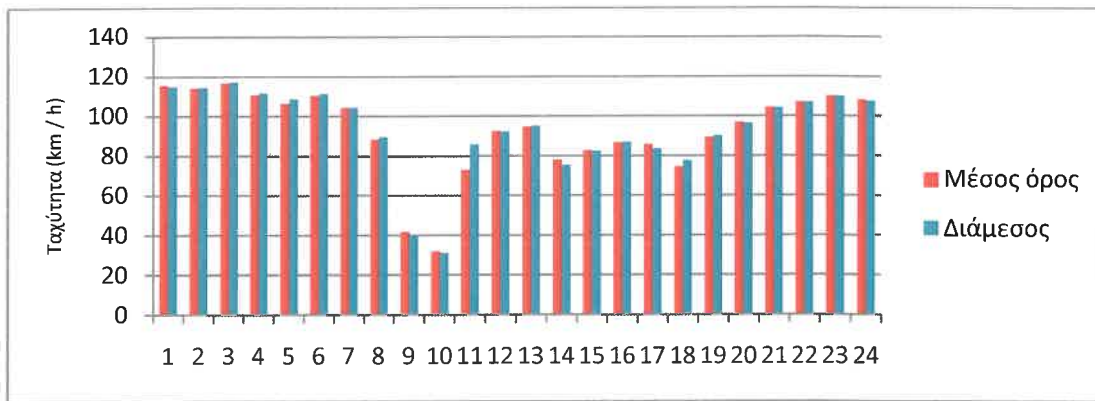


Σχήμα 3.13: Μέσος και διάμεσος φόρτος 2^{ας} Δεκεμβρίου στο σύνολο των λωρίδων

- ✓ Από την μελέτη των μέσων τιμών του φόρτου των δύο ημερών επαληθεύεται η παρατήρηση ότι ο φόρτος της 2^{ας} Δεκεμβρίου είναι κατά το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας χαμηλότερος από αυτόν της 25^{ης} Νοεμβρίου.
- ✓ Η διαφορά στον φόρτο κατά την πρωινή αιχμή είναι ιδιαίτερα μεγάλη και ειδικά στο διάστημα 8 – 9 φτάνει τα 150 MEA / 10 min.
- ✓ Η κατανομή των μέσων φόρτων στις 2 Δεκεμβρίου φαίνεται πιο ομαλή, με λιγότερες ακραίες τιμές.



Σχήμα 3.14: Μέσος και διάμεσος ταχύτητας 25^{ης} Νοεμβρίου στο σύνολο των λωρίδων



Σχήμα 3.15: Μέσος και διάμεσος ταχύτητας 2^{ας} Δεκεμβρίου στο σύνολο των λωρίδων

- ✓ Από την μελέτη των παραπάνω διαγραμμάτων φαίνεται ξεκάθαρα ότι οι μέσες ταχύτητες στις 2 Δεκεμβρίου υπολείπονται αρκετά αυτών της 25^{ης} Νοεμβρίου, ειδικά από τις 8 το πρωί και έκτοτε. Όπως αναλύεται και παραπάνω αυτό το γεγονός πιθανώς να οφείλεται στις περιόδους βροχής που υπήρχαν μέσα στην ημέρα. Εντούτοις δεν εξηγούν απόλυτα το φαινόμενο καθώς αυτό επεκτείνεται και σε χρονικά διαστήματα που απέχουν από τις περιόδους βροχόπτωσης.
- ✓ Επιπλέον ο φόρτος στις 2 Δεκεμβρίου είναι, όπως προαναφέρθηκε χαμηλότερος, κάτι που θεωρητικά θα επέτρεπε υψηλότερες ταχύτητες. Εντούτοις στην προκειμένη περίπτωση συμβαίνει το αντίθετο.
- ✓ Στις μετρήσεις της 2^{ας} Δεκεμβρίου παρατηρούμε μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ διαμέσου τιμής και μέσου όρου κάτι που ενδεχομένως οφείλεται σε μεγαλύτερη ετερογένεια του δείγματος.

Πίνακας 3.1: Βασικά στατιστικά μεγέθη βάσης δεδομένων

25-Νοε								
	Ταχύτητα (km / h)				Φόρτος (ΜΕΑ / 10 min)			
	Λωρίδα 1	Λωρίδα 2	Λωρίδα 3	Όλες οι λωρίδες	Λωρίδα 1	Λωρίδα 2	Λωρίδα 3	Όλες οι λωρίδες
Μέσος όρος	120,64	98,73	83,68	101,02	196,56	196,33	164,98	557,87
Διάμεσος	117,53	95,33	83,58	98,71	237,50	242,50	200,75	700,00
Διακύμανση	390,30	238,59	125,25	223,86	19543,59	12165,36	10918,55	123650,45
Τυπική απόκλιση	19,76	15,45	11,19	14,96	139,80	110,30	104,49	351,64

2-Δεκ								
	Ταχύτητα (km / h)				Φόρτος (ΜΕΑ / 10 min)			
	Λωρίδα 1	Λωρίδα 2	Λωρίδα 3	Όλες οι λωρίδες	Λωρίδα 1	Λωρίδα 2	Λωρίδα 3	Όλες οι λωρίδες
Μέσος όρος	109,52	90,77	77,73	92,65	185,73	186,17	159,16	531,06
Διάμεσος	112,47	92,75	81,50	95,81	236,00	239,25	204,75	691,00
Διακύμανση	727,99	500,85	348,32	497,42	17500,12	11064,08	10373,63	113508,19
Τυπική απόκλιση	26,98	22,38	18,66	22,30	132,29	105,19	101,85	336,91

Ποσοστιαίες διαφορές 2 ημερών (βάση η 25η Νοέμβρη)								
	Ταχύτητα				Φόρτος			
	Λωρίδα 1	Λωρίδα 2	Λωρίδα 3	Όλες οι λωρίδες	Λωρίδα 1	Λωρίδα 2	Λωρίδα 3	Όλες οι λωρίδες
Μέσος όρος	90,78%	91,94%	92,90%	91,72%	94,49%	94,83%	96,47%	95,19%
Διάμεσος	95,69%	97,29%	97,51%	97,07%	99,37%	98,66%	101,99%	98,71%
Διακύμανση	186,52%	209,92%	278,10%	222,20%	89,54%	90,95%	95,01%	91,80%
Τυπική απόκλιση	136,57%	144,88%	166,76%	149,06%	94,63%	95,37%	97,47%	95,81%

Μέσω της ανάλυσης και σύγκρισης των βασικών στατιστικών μεγεθών ποσοτικοποιούνται τα ποιοτικά συμπεράσματα που εξήχθησαν παραπάνω.

- ✓ Η μέση ταχύτητα στις 2 Δεκεμβρίου είναι 92,65 km / h, περίπου 9 % χαμηλότερη από αυτή της 25^{ης} Νοεμβρίου, η οποία είναι 101 km / h.
- ✓ Την ίδια μέρα, 2/12, ο μέσος φόρτος στο σύνολο των λωρίδων είναι κατά 5 % περίπου χαμηλότερος από τις 25/11.
- ✓ Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι οι διάμεσοι των δύο ημερών, και για τα δύο μεγέθη, αποκλίνουν πολύ λιγότερο από τους μέσους όρους.
- ✓ Το παραπάνω, σε συνδυασμό με το ότι στις 2/12 η τυπική απόκλιση της ταχύτητας είναι κατά 50 % μεγαλύτερη από αυτή της 25^{ης} / 11, δείχνει ότι η

μέρα του Δεκέμβρη παρουσιάζει μεγαλύτερη αστάθεια και περισσότερες ακραίες τιμές. Υπενθυμίζεται και ότι ανάλογη εικόνα έδινε και το διάγραμμα ταχύτητας – φόρτου της ίδιας ημέρας.

Οι παραπάνω αναλύσεις μπορούν να συνοψιστούν στις ακόλουθες διαπιστώσεις:

1. Η ταχύτητα είναι εμφανώς χαμηλότερη στις 2/12 κάτι που μόνο εν μέρει εξηγείται από την βροχόπτωση. Με βάση τα δεδομένα της συγκεκριμένης εργασίας, η συνολικά χαμηλότερη ταχύτητα δεν μπορεί να εξηγηθεί.
2. Ο φόρτος στις 2/12 είναι μικρότερος, κάτι που δεν μπορεί να αποδοθεί στην βροχόπτωση καθώς αυτή δεν είναι ούτε ιδιαίτερα έντονη, ούτε συνεχής.
3. Η κυκλοφορία στις 2/12 είναι πιο ασταθής με πολλές ακραίες τιμές, κάτι που ενδεχομένως να οφείλεται και στην βροχόπτωση.

Με βάση όλα τα παραπάνω προτείνεται, για την καλύτερη ανάλυση, ο χωρισμός της ημέρας στις ακόλουθες περιόδους:

Περίοδος			Ώρα μέτρησης
1	Νυχτερινή	0 - 5	0.00 - 4.50
2	Πρωινή	5 - 9	5.00 - 8.50
3	Μεσημεριανή	9 - 12	9.00 - 11.50
4	Απογευματινή	12 - 18	12.00 - 17.50
5	Βραδυνή	18 - 24	18.00 - 23.50

3.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Η προσέγγιση που ακολουθείται στην παρούσα εργασία είναι η χρήση παραμετρικής μεθόδου για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση των κυκλοφοριακών μεγεθών. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται μοντέλα της “οικογένειας” $AR(I)MA(X)$. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η θεωρία της συγκεκριμένης μεθόδου και αναλύεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό, την πρόγνωση και την αξιολόγηση των μοντέλων.

3.2.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

3.2.1.1 Βασικά στοιχεία χρονοσειρών

Στα υποδείγματα χρονολογικών σειρών, σε αντίθεση με τα υποδείγματα παλινδρόμησης, η πρόβλεψη στηρίζεται αποκλειστικά και μόνο στις προηγούμενες τιμές της ίδιας χρονολογικής σειράς που θέλουμε να προβλέψουμε. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για την πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών μιας χρονοσειράς με βάση το ιστορικό της. Αυτές ξεκινούν από πολύ απλές τεχνικές προβολής των ιστορικών τιμών στο μέλλον και μπορεί να γίνουν αρκετά πολύπλοκες με τη χρήση εξειδικευμένων μαθηματικών και στατιστικών υποδειγμάτων. Έτσι τα υποδείγματα χρονοσειρών διακρίνονται σε καθοριστικά υποδείγματα (deterministic models) που στηρίζονται σε απλές μαθηματικές μορφές όπως π.χ. είναι τα υποδείγματα κινητών μέσων όρων, εκθετικών εξομαλύνσεων και τάσης, και σε στοχαστικά υποδείγματα (stochastic models), όπως π.χ. είναι τα υποδείγματα μορφής $AR(I)MA$. Οι δύο αυτές μορφές υποδειγμάτων διαφέρουν ως προς το ρόλο που παίζει ο τυχαίος παράγοντας στη δομή τους. Στα καθοριστικά υποδείγματα ο τυχαίος παράγοντας προστίθεται σαν κατάλοιπο λάθους σε κάθε χρονική περίοδο, ενώ στα στοχαστικά υποδείγματα ο τυχαίος παράγοντας αποτελεί τον μηχανισμό μέσα από τον οποίο δημιουργείται η χρονολογική σειρά. (Δημελή, 2003)

Ενδεχομένως η σημαντικότερη έννοια στην ανάλυση χρονοσειρών είναι η στασιμότητα. Τα πρότυπα χρονοσειρών εφαρμόζονται σε οριζόντια ή, με στατιστικούς όρους, σε στάσιμα δεδομένα (Karlaftis and Mannering, 2010). Μια στοχαστική διαδικασία χαρακτηρίζεται ως στάσιμη όταν οι στατιστικές της ιδιότητες δεν επηρεάζονται από μια μεταβολή στην αρχή του χρόνου. Δηλαδή, οι στατιστικές ιδιότητες των N παρατηρήσεων με αρχή t ($y_t, y_{t+1}, \dots, y_{t+N-1}$) είναι ίδιες με τις στατιστικές ιδιότητες των N παρατηρήσεων με αρχή την περίοδο $t + k$ ($y_{t+k}, y_{t+k+1}, \dots, y_{t+k+N-1}$). Γενικά μια χρονολογική σειρά θα είναι στάσιμη αν ο μέσος και η διακύμανσή της δεν μεταβάλλονται με τον χρόνο και η συνδιακύμανση μεταξύ των τιμών της σε δύο χρονικά σημεία εξαρτάται μόνο από την απόσταση ανάμεσα σε αυτά τα χρονικά σημεία και όχι από τον ίδιο τον χρόνο (Δημελή, 2003). Τα παραπάνω εκφράζονται μαθηματικά ως εξής:

$$1. \quad E(y_t) = \mu_y \quad (1)$$

$$2. \quad \text{var}(y_t) = E[y_t - E(y_t)]^2 = \sigma_y^2 \quad (2)$$

$$3. \quad \text{cov}(y_t, y_{t+k}) = \text{cov}(y_{t+m}, y_{t+m+k}) = \gamma_k \quad (3)$$

Ένα εξίσου σημαντικό ζήτημα στις χρονοσειρές είναι η αυτοσυσχέτιση, η οποία εκφράζει την συσχέτιση μεταξύ παρελθοντικών και μελλοντικών τιμών μιας χρονοσειράς. Το βασικό «εργαλείο» στην εφαρμογή προχωρημένων μεθόδων ανάλυσης χρονοσειρών είναι ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης ρ_k , ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$\rho_k = \frac{\text{cov}(y_t, y_{t+k})}{\sqrt{\text{var}(y_t)} \sqrt{\text{var}(y_{t+k})}}. \quad (4)$$

Εάν η χρονοσειρά είναι στάσιμη, τότε $\text{var}(y_t) = \text{var}(y_{t+k}) = \sigma_y^2$ και ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης απλοποιείται ως εξής:

$$\rho_k = \frac{\text{cov}(y_t, y_{t+k})}{\text{var}(y_t)} = \frac{\gamma_k}{\gamma_0}. \quad (5)$$

Μια άλλη συνάρτηση που χρησιμοποιείται στη μελέτη των χαρακτηριστικών μιας χρονοσειράς είναι η συνάρτηση μερικής αυτοσυσχέτισης. Γενικά ο συντελεστής μερικής συσχέτισης μετρά τη συσχέτιση μεταξύ δύο μεταβλητών όταν έχει αφαιρεθεί η επίδραση που ασκούν άλλες μεταβλητές πάνω σε αυτές. Στο γενικό μοντέλο παλινδρόμησης

$$y_t = \phi_{1p}y_{t-1} + \phi_{2p}y_{t-2} + \dots + \phi_{pp}y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (6)$$

ο συντελεστής του y_{t-p} , ϕ_{pp} , είναι ο συντελεστής μερικής αυτοσυσχέτισης p -οστής τάξεως.

Η αφαίρεση των τάσεων και η επίτευξη στασιμότητας επιτυγχάνονται μέσω μιας ποικιλίας φίλτρων (filtering approaches). Εντούτοις, στην κυκλοφορία, η στασιμότητα επιτυγχάνεται κυρίως μέσω της λήψης πρώτων διαφορών, καθώς μια μη – στάσιμη χρονοσειρά μετατρέπεται, συνήθως, σε στάσιμη όταν χρησιμοποιούνται οι πρώτες διαφορές, αντί για την αρχική χρονοσειρά (οι πρώτες διαφορές για την X_t είναι $Z_t = X_t - X_{t-1}$). Η λήψη πρώτων διαφορών συμβολίζεται ως $I(1)$ (integration order 1), ενώ ο γενικός συμβολισμός είναι $I(d)$ (integration of order d). Σε αυτή την περίπτωση, η αρχική χρονοσειρά X_t ονομάζεται μη στάσιμη χρονοσειρά μοναδιαίας ρίζας (unit root nonstationary) και απαιτείται λήψη πρώτων διαφορών για να γίνει στάσιμη. Έχουν προταθεί πολλοί έλεγχοι για την μη στασιμότητα (έλεγχοι μοναδιαίας ρίζας – unit root tests). Σύμφωνα με τους Granger and Engle (1984), ο πιο ικανοποιητικός από αυτούς τους ελέγχους είναι ο έλεγχος των Dickey – Fuller (Dickey – Fuller test). Σε αυτόν τον έλεγχο η μηδενική υπόθεση είναι ότι η μεταβλητή είναι μη στάσιμη (δηλαδή, απαιτείται λήψη τουλάχιστον πρώτων διαφορών για να γίνει στάσιμη).

Το απλούστερο δυνατό σχήμα χρονολογικής σειράς είναι αυτό της τυχαίας μεταβλητής ή αλλιώς του ονομαζόμενου λευκού θορύβου (white noise). Μια σειρά είναι λευκός θόρυβος αν στην ουσία δεν έχει κανένα ευκρινές σχήμα ή πρότυπο. Μια σειρά, έστω ε_t , είναι λευκός θόρυβος αν έχει σταθερό μέσο (συνήθως μηδέν),

σταθερή διακύμανση και οι τιμές της δεν αυτοσυσχετίζονται (Δημελή, 2003). Πιο συγκεκριμένα, η υπόθεση του λευκού θορύβου συνεπάγεται για όλα τα t τα εξής:

$$1. E(\varepsilon_t) = 0 \quad (7)$$

$$2. \gamma_0 = E(\varepsilon_t^2) = \sigma^2 \quad (8)$$

$$3. \gamma_k = E(\varepsilon_t \varepsilon_{t-k}) = 0 \text{ για } k \neq 0. \quad (9)$$

3.2.1.2 Υποδείγματα AR(I)MA

Τα αυτοπαλίνδρομα ολοκληρωμένα υποδείγματα κινητών μέσων (AutoRegressive Integrated Moving Average, ARIMA) είναι μαθηματικά υποδείγματα αυτοσυσχέτισης των τιμών μιας χρονοσειράς. Τα υποδείγματα ARIMA περιγράφουν την συμπεριφορά μιας μεταβλητής σε όρους των προηγούμενων τιμών της. Τα μοντέλα αυτά είναι σχετικά απλά και γραμμικά στην ανάπτυξή τους και είναι χρήσιμα για την πρόβλεψη χρονοσειρών, ακόμα και εν τη απουσία επεξηγηματικών μεταβλητών. Τα υποδείγματα ARIMA έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε όλους τους τομείς των μεταφορών, με αξιοσημείωτη επιτυχία (Karlaftis and Mannering, 2010).

Η συνηθισμένη «έκφραση» των υποδειγμάτων αυτών είναι η εξής:

ARIMA (p, d, q), όπου:

- AR (p) αυτοπαλίνδρομο υπόδειγμα τάξης p
- I (d) η ολοκλήρωση βαθμού d
- MA (q) υπόδειγμα κινητών μέσων τάξης q.

Στα αυτοπαλίνδρομα υποδείγματα, AR (p), η τρέχουσα παρατήρηση μιας χρονοσειράς εκφράζεται ως γραμμική συνάρτηση p προηγούμενων παρατηρήσεων, έναν σταθερό όρο, και έναν όρο τυχαίων σφαλμάτων και εκφράζεται ως εξής:

$$X_t = k_1 X_{t-1} + k_2 X_{t-2} + \dots + k_p X_{t-p} + \theta_0 + \varepsilon_t = \theta_0 + \sum_{i=1}^p k_i X_{t-i} + \varepsilon_t \quad (10)$$

όπου

- $X_t, X_{t-1}, \dots, X_{t-p}$ είναι οι παρατηρήσεις στις περιόδους t, t-1, ..., t-p
- p είναι ο αριθμός των περιόδων (lags) που λαμβάνονται υπόψη στην ανάπτυξη του μοντέλου
- k_i είναι οι παράμετροι της αυτοπαλινδρόμησης
- θ_0 είναι ο σταθερός όρος και
- ε_t είναι τα τυχαία σφάλματα για περίοδο t.

Θεωρώντας ότι η διαδικασία είναι στάσιμη τότε ο μέσος μ προκύπτει ως

$$E(X_t) = \mu = \frac{\theta_0}{1 - k_1 - k_2 - \dots - k_p} \quad (11)$$

και η διακύμανση γ_0 ως

$$VAR(X_t) = \gamma_0 = \frac{\sigma_\varepsilon^2}{1 - k_1 \rho_1 - k_2 \rho_2 - \dots - k_p \rho_p} \quad (12)$$

όπου σ_ε^2 είναι η διακύμανση των τυχαίων σφαλμάτων. Τέλος, ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης εκφράζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\rho_k = k_1 \rho_{k-1} + k_2 \rho_{k-2} + \dots + k_p \rho_{k-p}. \quad (13)$$

Θεωρούμε δύο συχνές περιπτώσεις αυτοπαλίνδρομου υποδείγματος. Το AR (1) έχει μόνο έναν όρο, $X_t = k_1 X_{t-1} + \theta_0 + \varepsilon_t$, από το οποίο προκύπτει, για να είναι η

διαδικασία στάσιμη, $|k_1| < 1$. Επίσης συνάγεται ότι ο συντελεστής μερικής αυτοσυσχέτισης είναι $\varphi_{11} = \rho_1$.

Το AR (2) έχει 2 όρους $X_t = k_1 X_{t-1} + k_2 X_{t-2} + \theta_0 + \varepsilon_t$.

Σε αυτή την περίπτωση οι περιορισμοί για να υπάρχει στασιμότητα είναι οι ακόλουθοι 3: $|k_2| < 1$, $k_1 + k_2 < 1$, $k_2 - k_1 < 1$ και οι συντελεστές μερικής αυτοσυσχέτισης είναι $\varphi_{11} = \rho_1$ και $\varphi_{22} = \frac{\rho_2 - \rho_1^2}{1 - \rho_1^2}$.

Στα υποδείγματα κινητών μέσων τάξης q, MA (q), θεωρείται ότι η τρέχουσα παρατήρηση είναι το άθροισμα του τρέχοντος και των σταθμισμένων παρελθοντικών τυχαίων σφαλμάτων καθώς και ένας σταθερός όρος, και εκφράζεται

$$X_t = \theta_0 + \varepsilon_t - \lambda_1 \varepsilon_{t-1} - \lambda_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \lambda_q \varepsilon_{t-q} = \theta_0 - \sum_{i=1}^q \lambda_i \varepsilon_{t-i} + \varepsilon_t \quad (14)$$

όπου

- X_t είναι η παρατήρηση στην περίοδο t
- q είναι ο αριθμός των περιόδων (τάξη)
- λ_i είναι οι συντελεστές των κινητών μέσων
- θ_0 είναι ο σταθερός όρος
- και ε_t τα τυχαία σφάλματα για τις περιόδους t, t-1, ..., t-q.

Ο μέσος, η διακύμανση, ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης και οι συντελεστές μερικής αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς δίνονται ως εξής:

$$E(X_t) = \mu = \theta_0 \quad (15)$$

$$VAR(X_t) = \gamma_0 = \sigma_\alpha^2 * (1 + \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \dots + \lambda_q^2) \quad (16)$$

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

αλλιώς 0

(17)

$$\varphi_{kk} = -\lambda_1^k \left(\frac{1-\lambda_1^2}{1-\lambda_1^{2k+2}} \right) \quad (18)$$

Μια ειδική περίπτωση υποδείγματος κινητών μέσων είναι το MA (2) και δίνεται ως

$$X_t = \theta_0 + \varepsilon_t - \lambda_1 \varepsilon_{t-1} - \lambda_2 \varepsilon_{t-2}$$

με παραμέτρους που ικανοποιούν τα εξής: $|\lambda_1| < 1, \lambda_1 + \lambda_2 < 1, \lambda_2 - \lambda_1 < 1$.

Τέλος, υπάρχουν υποδείγματα που έχουν ταυτόχρονα αυτοπαλίνδρομο μέρος και μέρος κινητών μέσων. Αυτά τα υποδείγματα γράφονται ως ARMA (p,q) και έχουν την ακόλουθη γενική μορφή:

$$X_t = \theta_0 + \varepsilon_t + k_1 X_{t-1} + k_2 X_{t-2} + \dots + k_p X_{t-p} -$$

$$-\lambda_1 \varepsilon_{t-1} - \lambda_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \lambda_q \varepsilon_{t-q} =$$

$$= \theta_0 + \sum_{i=1}^p k_i X_{t-i} - \sum_{i=1}^q \lambda_i \varepsilon_{t-i} + \varepsilon_t \quad (19)$$

όπου για τους όρους ισχύουν τα ίδια με παραπάνω.

Κατά καιρούς έχουν αναπτυχθεί πολλές επεκτάσεις των AR(I)MA υποδειγμάτων. Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση των ARIMAX και VARMAX.

Τα υποδείγματα ARIMAX αποτελούν απλή επέκταση των ARIMA, στα οποία προστίθενται οι εξωγενείς παράμετροι (συναρτήσεις μεταφοράς) X, όπου X είναι οποιαδήποτε χρονοσειρά επηρεάζει την χρονοσειρά που μελετούμε. Αυτά τα υποδείγματα έχουν την ακόλουθη μορφή:

$$X_t = \theta_0 + \sum_{i=1}^p k_i X_{t-i} - \sum_{i=1}^q \lambda_i \varepsilon_{t-i} + \varepsilon_t + \sum_{k=1}^{N_x} \beta_k * X(t, k) \quad (20)$$

όπου ο πρόσθετος όρος σε σχέση με την εξίσωση (19) έχει ως εξής:

- X το μητρώο των εξωγενών παραμέτρων, στο οποίο κάθε στήλη αποτελεί μια χρονοσειρά
- β_k οι συντελεστές των συναρτήσεων μεταφοράς (εξωγενών παραμέτρων)
- N_x ο αριθμός των υστερήσεων (περιοδών – lags) που λαμβάνουμε για κάθε συνάρτηση μεταφοράς

Τα υποδείγματα VARMA μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των δυναμικών αλληλεπιδράσεων ανάμεσα σε πολλές χρονοσειρές. Η εκτίμηση έγκειται στην ανίχνευση, ποσοτικοποίηση και πρόβλεψη αυτών των δυναμικών αλληλεπιδράσεων. Τα VARMA μοντέλα μπορούν να θεωρηθούν ως υποσύνολο των καταστατικών – χωρικών μοντέλων (state – space models) (Kamarianakis and Prastacos, 2003).

Τα VARMA μοντέλα έχουν την ακόλουθη μορφή:

$$X_t = \theta_0 + \sum_{i=1}^p K_i X_{t-i} - \sum_{i=1}^q \Lambda_i E_{t-i} + E_t \quad (21)$$

όπου

- X_t το διάνυσμα των παρατηρήσεων στην περίοδο t το οποίο έχει n στοιχεία
- θ_0 ο σταθερός όρος, ο οποίος έχει n στοιχεία
- K_i οι συντελεστές της αυτοπαλινδρόμησης. Τα K_i είναι μητρώα $n * n$ για κάθε i . Υπάρχουν p μητρώα συντελεστών αυτοπαλινδρόμησης.
- Λ_i οι συντελεστές των κινητών μέσων. Τα Λ_i είναι μητρώα $n * n$ για κάθε i . Υπάρχουν q μητρώα συντελεστών κινητών μέσων.
- E_t είναι το διάνυσμα των τυχαίων καταλοίπων, με μήκος n .

Τα VARMA μοντέλα επεκτείνονται σε VARMAX όμοια με την επέκταση από ARIMA σε ARIMAX, προσθέτοντας τις συναρτήσεις μεταφοράς. Το μητρώο των

συναρτήσεων μεταφοράς έχει σε αυτή την περίπτωση διαστάσεις $n * r$, όπου n αριθμός των εξαρτημένων παραμέτρων και r των εξωγενών παραμέτρων.

Στην παρούσα εργασία το διάνυμα των χρονοσειρών αποτελείται από τις χρονοσειρές των ταχυτήτων κάθε λωρίδας. Το μητρώο των συναρτήσεων μεταφοράς αποτελείται από τις χρονοσειρές φόρτου και βροχόπτωσης.

Μια από τις πιο διαδεδομένες διαδικασίες που ακολουθείται για τον καθορισμό του ARIMA προτύπου είναι αυτή που πρότειναν οι Box and Jenkins (1976). Αποτελείται από τα εξής 4 βήματα: επιλογή τάξης, υπολογισμός παραμέτρων, διαγνωστικός έλεγχος και παραγωγή προβλέψεων, η επεξήγηση των οποίων ακολουθεί (Karlaftis and Mannering, 2010).

Η επιλογή τάξης είναι μια από τις πιο δύσκολες διαδικασίες κατά τον υπολογισμό του υποδείγματος. Οι τιμές των p και q , οι τάξεις δηλαδή του αυτοπαλίνδρου όρου και του όρου κινητών μέσων, πρέπει να βρεθούν πριν την εφαρμογή του μοντέλου. Η επιλογή τους είναι μια σύνθετη διαδικασία, καθώς πρέπει να εξεταστούν αρκετοί πιθανοί συνδυασμοί. Η επιλογή γίνεται συνήθως μέσω της εξέτασης των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης (ACF) και μερικής αυτοσυσχέτισης (PACF). Πρέπει να σημειωθεί ότι η εύρεση των p και q γίνεται, κατά κανόνα, μέσω της μελέτης των συσχετίσεων των στάσιμων δεδομένων, άρα ενδεχόμενη ολοκλήρωση της χρονοσειράς πρέπει να έχει προηγηθεί. Όταν η ACF φθίνει εκθετικά προς το 0, το υπόδειγμα είναι αυτοπαλίνδρομο (AR) και η τάξη του καθορίζεται από τον αριθμό των στατιστικά σημαντικών υστερήσεων της PACF. Αντίστροφα, όταν η PACF φθίνει εκθετικά, το υπόδειγμα είναι κινητών μέσων (MA) και η τάξη του καθορίζεται από την ACF. Αντίστοιχα, όταν και οι 2 αυτές συναρτήσεις φθίνουν εκθετικά το υπόδειγμα είναι αυτοπαλίνδρομο κινητών μέσων (ARMA). Άλλη μέθοδος για την εύρεση της τάξης του υποδείγματος είναι η δοκιμή διαφόρων συνδυασμών p και q , και η επιλογή αυτού που ελαχιστοποιεί μια συνάρτηση που βασίζεται στον υπολογισμό της διακύμανσης των τυπικών σφαλμάτων. Τέτοιες συναρτήσεις είναι το κριτήριο πληροφοριών του Akaike (Akaike Information Criterion, AIC) και το κριτήριο Bayesian (Bayesian Information Criterion, BIC).

Η εκτίμηση των παραμέτρων του υποδείγματος γίνεται με την μέθοδο της συνάρτησης μέγιστης πιθανοφάνειας. Εντούτοις η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα σύνθετη και για το λόγο αυτό στην πράξη χρησιμοποιούνται συχνά μέθοδοι ελαχίστων τετραγώνων.

Μετά την εκτίμηση του υποδείγματος που ταυτοποιήθηκε θα πρέπει να ελεγχθεί αν το συγκεκριμένο υπόδειγμα είναι ικανοποιητικό με την έννοια του πόσο καλά προσαρμόζεται στα δεδομένα (fitting). Γενικά ο καλύτερος τρόπος να ελεγχθεί η προσαρμοστικότητα ενός υποδείγματος είναι να εξεταστεί η προβλεπτική του ικανότητα έξω από την δειγματοληπτική περίοδο. Καθώς τα διαθέσιμα στοιχεία είναι λίγα, τόσο η ταυτοποίηση όσο και ο έλεγχος γίνονται με το ίδιο δείγμα παρατηρήσεων.

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος για να εφαρμόσουμε τον διαγνωστικό έλεγχο, είναι να ελέγξουμε κατά πόσο τα εκτιμημένα κατάλοιπα είναι πράγματι ασυσχέτιστα έτσι όπως προβλέπει η ιδιότητα του τυχαίου θορύβου των αληθινών καταλοίπων. Εάν τα κατάλοιπα είναι τυχαία (τυχαίο σφάλμα) συνεπάγεται ότι το επιλεγμένο μοντέλο έχει «εξουδετερώσει» τις τάσεις των δεδομένων και παραμένουν μόνο τυχαία σφάλματα (όμοια με μια τέλεια γραμμική παλινδρόμηση). Εάν τα κατάλοιπα έχουν μια συστηματική συμπεριφορά, οι τάσεις παραμένουν και τα σφάλματα δεν είναι τυχαία. Σε ένα σωστά ορισθέν μοντέλο τα κατάλοιπα είναι ασυσχέτιστα, κάτι που αντικατοπτρίζεται στην απουσία στατιστικά σημαντικών τιμών στην ACF των καταλοίπων. Επίσης ο στατιστικός έλεγχος Ljung-Box χρησιμοποιείται για να εξετάσει την εγγύτητα των καταλοίπων σε λευκό θόρυβο.

Η σχέση των Ljung – Box είναι:

$$Q = N * (N + 2) * \sum_{j=1}^k \frac{\rho_j^2}{(N-j)} \quad (22)$$

που ακολουθεί την κατανομή χ^2 .

Στόχος του υποδείγματος είναι η παραγωγή προβλέψεων. Έστω ένα υπόδειγμα ARMA (p, q). Η πρόβλεψη ένα βήμα στο μέλλον δίνεται ως

$$\hat{X}_{t+1} = \theta_0 + \sum_{i=1}^p k_i X_{t+1-i} - \sum_{i=1}^q \lambda_i \varepsilon_{t+1-i} \quad (23)$$

με σφάλμα πρόβλεψης $e_{t+1} = X_{t+1} - \hat{X}_{t+1} = \varepsilon_{t+1}$ (24)

και διακύμανση σφάλματος $VAR(e_{t+1}) = \sigma_\varepsilon^2$. (25)

Καθώς η παραγωγή προβλέψεων είναι ο κύριος στόχος της ανάλυσης χρονοσειρών, είναι λογικό ότι η ακρίβεια της πρόβλεψης πρέπει να αξιολογηθεί. Συνήθως η ακρίβεια εννοείται ως το πόσο «καλά» το υπόδειγμα προβλέπει ήδη γνωστά δεδομένα (goodness of fit). Οι δείκτες ακρίβειας συνήθως ορίζονται σε όρους σφάλματος πρόγνωσης, δηλαδή την διαφορά μεταξύ πραγματικής και προβλεφθείσας τιμής. Έχουν προταθεί πολλά μέτρα αξιολόγησης προβλέψεων. Το πιο συχνό στην βιβλιογραφία είναι το μέσο σφάλμα τετραγώνου (Mean Squared Error, MSE). Ωστόσο η καταλληλότητά του έχει πολλές φορές αμφισβητηθεί, ειδικά για την αξιολόγηση της σχετικής ακρίβειας μεταξύ διαφορετικών σετ δεδομένων εξαιτίας της εξάρτησής του από την κλίμακα της μέτρησης και την ευαισθησία του σε ακραίες τιμές (outliers). Στις εφαρμογές στις μεταφορές χρησιμοποιούνται συνήθως το μέσο σφάλμα τετραγώνου (MSE), το μέσο απόλυτο σφάλμα (Mean Absolute Error, MAE) και το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα (Mean Absolute Percentage Error, MAPE). Σε πολλές αναφορές στην βιβλιογραφία προκρίνεται η χρήση απόλυτου ποσοστιαίου σφάλματος ως βάση σύγκρισης, ώστε να εξουδετερώνονται οι συνέπειες της ποικιλομορφίας που παρατηρείται στα κυκλοφοριακά σετ δεδομένων.

Εάν A_t είναι οι πραγματικές τιμές της χρονοσειράς, F_t οι προβλεφθείσες και $e_t = F_t - A_t$ το λάθος πρόβλεψης, τότε τα μέτρα αξιολόγησης MAE και MAPE ορίζονται ως εξής:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |e_t| \quad (26)$$

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{t=1}^N \left| \frac{F_t - A_t}{A_t} \right| \quad (27)$$

3.2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

3.2.2.1 Έλεγχος και επεξεργασία βάσης δεδομένων

Όπως αναλύθηκε παραπάνω, η βάση δεδομένων προέρχεται από στοιχεία κυκλοφορίας και καιρού 2 ημερών, της 25^{ης} Νοεμβρίου και της 2^{ας} Δεκεμβρίου του 2009 και αφορούν σε κεντρικό τμήμα της Αττικής Οδού. Η βάση δεδομένων ελέγχθηκε για λανθασμένες ή «κενές» μετρήσεις. Στις χρονικές περιόδους που οι τιμές έλειπαν, συμπληρώθηκαν τιμές που να συνάδουν με την κατάσταση της κυκλοφορίας εκείνη την περίοδο. Όμοια αντικαταστάθηκαν και οι λανθασμένες τιμές. Επίσης εμφανίστηκαν περίοδοι, ειδικά κατά της νυχτερινές ώρες, όπου δεν διήλθε κανένα όχημα από συγκεκριμένες λωρίδες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η μηδενική τιμή της ταχύτητας που εμφανιζόταν, σβηνόταν και το κελί έμενε κενό, ώστε να μην επηρεαστεί το δείγμα από ακραίες τιμές. Άλλωστε, η ταχύτητα ίση με μηδέν δεν αποτελεί πραγματική τιμή, καθώς δεν υπάρχει ταχύτητα κατά την συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Αντίθετα η τιμή του φόρτου παρέμεινε μηδέν, καθώς είναι πραγματική τιμή και δεν διαταράσσει το δείγμα.

3.2.2.2 Αντικείμενο υπολογισμού

Η προσέγγιση που επελέγη είναι η χρήση και σύγκριση υποδειγμάτων AR(I)MA, AR(I)MAX και VARMAX για την πρόβλεψη μελλοντικών τιμών της ταχύτητας. Οπότε η χρονοσειρά στην οποία αναφερόμαστε παρακάτω είναι η ταχύτητα. Στα υποδείγματα AR(I)MA γίνεται πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών της ταχύτητας μόνο με βάση τις προηγούμενες τιμές της. Αντίθετα στα υποδείγματα AR(I)MAX εισάγονται, ως εξωγενείς μεταβλητές X , η βροχόπτωση και ο φόρτος. Στα υποδείγματα VARMAX γίνεται από κοινού μελέτη 3 διαφορετικών χρονοσειρών (των ταχυτήτων για κάθε λωρίδα), με την παράλληλη εισαγωγή των παραμέτρων του φόρτου και της βροχόπτωσης. Στο τέλος διερευνάται το κατά πόσο η πρόσθετη πληροφορία, βροχόπτωση και φόρτος, βελτιώνει την προβλεπτική απόδοση του

υποδείγματος, καθώς και η αντίστοιχη βελτίωση από την διάσπαση της ανάλυσης ανά λωρίδα.

Για την ανάλυση επιλέγεται η χρήση στοιχείων κυκλοφορίας ανά 10 λεπτά. Ο λόγος που δεν αξιοποιούνται τα στοιχεία συχνότητας 1 λεπτού είναι ότι είναι ιδιαίτερα «θορυβώδη», χωρίς να προσθέτουν ιδιαίτερη πρόσθετη πληροφορία. Ενδεχομένως ένα διάστημα μεταξύ μετρήσεων της τάξης του ενός λεπτού να είναι χρήσιμο για μελέτες σηματοδότησης σε αστικό χώρο, αλλά δεν προσθέτουν σημαντική πληροφορία σε ελεύθερη λεωφόρο. Ένας επιπλέον λόγος είναι ότι το διάστημα μεταξύ μετρήσεων μετεωρολογικών μεγεθών είναι επίσης 10 λεπτά.

Για τον υπολογισμό του υποδείγματος χρησιμοποιείται η 2^α Δεκεμβρίου, ημέρα κατά την οποία υπάρχει βροχόπτωση, έτσι ώστε να είναι δυνατός ο συνυπολογισμός της στο υπόδειγμα. Έπειτα γίνεται η παραγωγή και αξιολόγηση των προβλέψεων εντός δείγματος (in - sample), με χρονοσειρά ελέγχου την ταχύτητα της 2^{ας} Δεκεμβρίου.

Η εκτίμηση των υποδειγμάτων γίνεται αφενός για το σύνολο της ημέρας και αφετέρου ανά περίοδο (όπως αυτές ορίστηκαν στην παράγραφο 3.1.2). Τα αποτελέσματα κάθε περίπτωσης συγκρίνονται ώστε να εξεταστεί η ωφέλεια της ανάπτυξης διαφορετικών υποδειγμάτων για κάθε περίοδο της ημέρας. Επίσης γίνεται και ανάλυση ανά λωρίδα, για το σύνολο της ημέρας, ώστε να εξεταστεί τα κατά πόσο η ανεξάρτητη μελέτη κάθε λωρίδας μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του υποδείγματος. Η μελέτη ανά λωρίδα γίνεται αρχικά με ARIMAX υποδείγματα, ένα για κάθε λωρίδα, και ακολούθως με υπόδειγμα VARMAX.

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού που ακολουθήθηκε. Επισημαίνεται ότι η διαδικασία είναι όμοια για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις.

3.2.2.3 Έλεγχος στασιμότητας και λήψη διαφορών

Το πρώτο βήμα είναι ο έλεγχος στασιμότητας της χρονοσειράς. Για τον έλεγχο αυτό λαμβάνεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης ACF για έναν ικανό αριθμό υστερήσεων. Εάν η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης φθίνει μετά από μικρό αριθμό υστερήσεων τότε η χρονοσειρά είναι στάσιμη. Αντίθετα εάν η ACF φθίνει με αργό ρυθμό η χρονοσειρά είναι μη στάσιμη και χρειάζεται λήψη διαφορών για να γίνει στάσιμη.

Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επανυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα. Δηλαδή οι δύο αυτοί έλεγχοι είναι αντίθετοι και η ταυτόχρονη διενέργειά τους δίνει ένα πιο ασφαλές συμπέρασμα.

Ο συνδυασμός των δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας, καθώς και τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης, δίνουν μια σαφή εικόνα για την στασιμότητα ή την ανάγκη λήψης διαφορών της χρονοσειράς. Εάν, με βάση αυτά διαπιστωθεί η μη στασιμότητα της χρονοσειράς λαμβάνονται οι πρώτες διαφορές της. Έτσι εάν η αρχική χρονοσειρά είναι η X_t , τότε μελετάται η $Z_t = X_t - X_{t-1}$.

3.2.2.4 Εύρεση της τάξης του υποδείγματος

Για την εύρεση της τάξης του υποδείγματος χρησιμοποιείται η στάσιμη χρονοσειρά. Έτσι λαμβάνονται οι συναρτήσεις ACF και PACF, από τις οποίες μπορούμε να συμπεράνουμε τον τύπο και την τάξη του υποδείγματος ως εξής: όταν η ACF φθίνει εκθετικά προς το 0, το υπόδειγμα είναι αυτοπαλίνδρομο (AR) και η τάξη του καθορίζεται από τον αριθμό των στατιστικά σημαντικών υστερήσεων της PACF. Αντίστροφα, όταν η PACF φθίνει εκθετικά, το υπόδειγμα είναι κινητών μέσων (MA)

και η τάξη του καθορίζεται από την ACF. Αντίστοιχα, όταν και οι 2 αυτές συναρτήσεις φθίνουν εκθετικά το υπόδειγμα είναι αυτοπαλίνδρομο κινητών μέσων (ARMA).

Επιπλέον επιλέγονται ARMA υποδείγματα αμέσως μεγαλύτερης τάξης και συγκρίνονται με τα αρχικά μέσω του κριτηρίου Bayesian (Bayesian Information Criterion, BIC). Εντούτοις η αρχική αυτή σύγκριση δεν δίνει αυστηρά μονοσήμαντη απάντηση στο ερώτημα του ποιας τάξης υπόδειγμα δίνει πιο αξιόπιστες προβλέψεις. Έτσι για κάθε ένα από τα εναλλακτικά αυτά υποδείγματα ακολουθείται όλη η παρακάτω διαδικασία με στόχο να συγκριθούν οι προβλέψεις. Τελικά επιλέγεται αυτό που δίνει την δυνατότητα των πιο αξιόπιστων προγνώσεων με βάση τους δείκτες MAE και MAPE.

3.2.2.5 Εισαγωγή εξωγενούς παραμέτρου X

Για την εισαγωγή της επίδρασης του φόρτου καθώς και της βροχόπτωσης χρησιμοποιούνται υποδείγματα AR(I)MAX και VARMAX, όπου X είναι οι εξωγενείς παράμετροι (φόρτος και βροχόπτωση). Για το AR(I)MAX ισχύει ότι το υπόδειγμα είναι το ίδιο που υπολογίστηκε παραπάνω, δηλαδή AR(I)MA ίδιας τάξης, και εισαγωγή της παραμέτρου X.

Η χρονοσειρά του φόρτου που εισάγεται είναι η αντίστοιχη της χρονοσειράς της ταχύτητας, δηλαδή για την ίδια λωρίδα και το ίδιο χρονικό διάστημα. Η βροχόπτωση εισάγεται για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα, σε πραγματικές τιμές, ώστε να αποδίδεται η έντασή της.

Για την επιλογή του κατάλληλου αριθμού υστερήσεων των χρονοσειρών φόρτου και βροχόπτωσης, γίνεται διερεύνηση στο επόμενο κεφάλαιο και επιλέγεται ο βέλτιστος συνδυασμός. Επισημαίνεται ότι το αποτέλεσμα αυτής της ανάλυσης (αριθμός υστερήσεων) αφορά σε όλα τα υποδείγματα.

3.2.2.6 Εκτίμηση παραμέτρων και διαγνωστικός έλεγχος

Η εκτίμηση των παραμέτρων των υποδειγμάτων γίνεται με λογισμικό κατάλληλο για την κάθε περίπτωση.

Ο διαγνωστικός έλεγχος γίνεται με την μελέτη των διαγραμμάτων των συντελεστών αυτοσυσχέτισης όπου απαιτούμε οι συντελεστές να μην είναι στατιστικά σημαντικοί. Επιπλέον διενεργείται ο έλεγχος των Ljung – Box.

3.2.2.7 Προβλέψεις και αξιολόγηση

Εφόσον έχουν προηγηθεί τα παραπάνω βήματα, το υπόδειγμα έχει πλήρως καθοριστεί και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή προβλέψεων. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην αναμενόμενη τιμή της παραμέτρου που προβλέπεται, εδώ της ταχύτητας. Γίνεται πρόβλεψη εντός δείγματος (in – sample), η οποία αφορά στην 2^α Δεκεμβρίου, καθώς με βάση αυτή την ημέρα υπολογίστηκαν τα υποδείγματα. Ο ορίζοντας πρόβλεψης είναι μια περίοδος μπροστά, δηλαδή 10 λεπτά στο μέλλον.

Για την αξιολόγηση της προβλεπτικής ικανότητας του υποδείγματος χρησιμοποιούνται δύο μέτρα αξιολόγησης: το μέσο απόλυτο σφάλμα (Mean Absolute Error, MAE) και το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα (Mean Absolute Percentage Error, MAPE).

Με βάση τα δύο αυτά μέτρα αξιολόγησης γίνονται οι συγκρίσεις μεταξύ των διαφόρων υποδειγμάτων που αναπτύχθηκαν.

3.2.2.8 Εκτίμηση υποδείγματος VARMAX

Για την εκτίμηση του υποδείγματος VARMAX δεν απαιτείται κάποιος πρόσθετος έλεγχος καθώς αυτό αποτελεί επέκταση των απλών ARIMAX υποδειγμάτων. Έτσι η διαδικασία που ακολουθείται είναι όμοια με αυτή που αναλύθηκε παραπάνω.

Κεφάλαιο 4

Ανάλυση και αποτελέσματα

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται αναλυτικά κάθε διαδικασία που εφαρμόστηκε και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι βασικές εφαρμογές, οι χρονικές περίοδοι και οι λωρίδες στις οποίες αφορούσαν.

Πίνακας 4.1: Εφαρμογές υποδειγμάτων

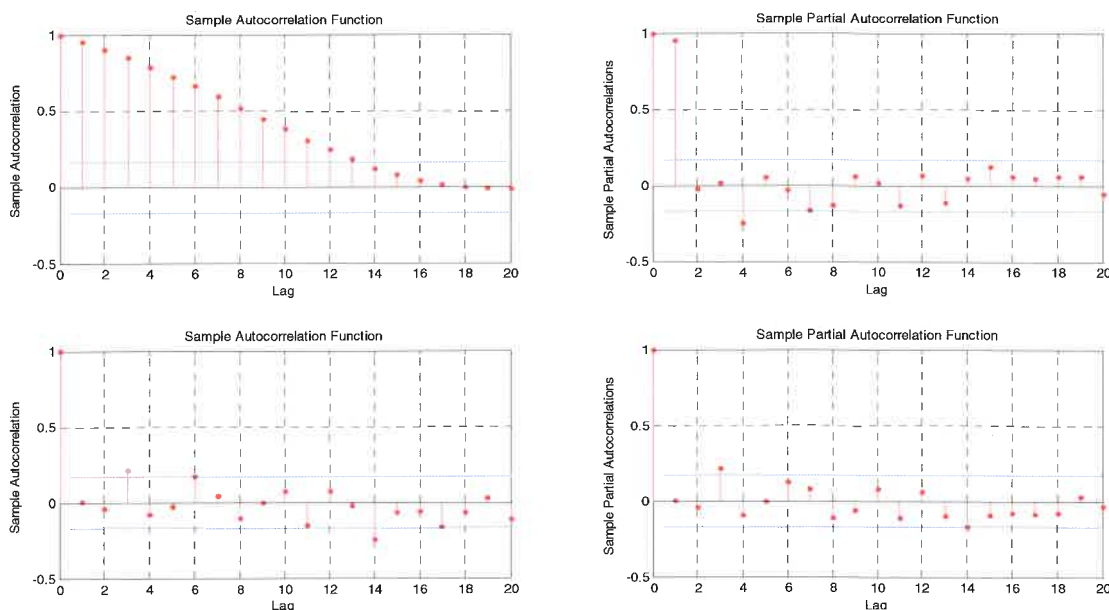
Διαδικασία	Τύπος υποδείγματος	Χρονική περίοδος	Λωρίδες
Υπολογισμός παραμέτρων Αξιολόγηση προβλέψεων	ARIMA	Όλες οι περίοδοι - 2 Δεκεμβρίου	Όλες
Υπολογισμός παραμέτρων Αξιολόγηση προβλέψεων	ARIMA	Ανά περίοδο - 2 Δεκεμβρίου	Όλες
Υπολογισμός παραμέτρων Αξιολόγηση προβλέψεων	ARIMAX	Όλες οι περίοδοι - 2 Δεκεμβρίου	Όλες
Υπολογισμός παραμέτρων Αξιολόγηση προβλέψεων	ARIMAX	Ανά περίοδο - 2 Δεκεμβρίου	Όλες
Υπολογισμός παραμέτρων Αξιολόγηση προβλέψεων	ARIMAX	Όλες οι περίοδοι - 2 Δεκεμβρίου	Ανά λωρίδα
Υπολογισμός παραμέτρων Αξιολόγηση προβλέψεων	VARMAX	Όλες οι περίοδοι - 2 Δεκεμβρίου	Όλες (ανά λωρίδα)

4.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΩΝ AR(I)MA

4.2.1 ΟΛΕΣ ΟΙ ΛΩΡΙΔΕΣ – ΟΛΕΣ ΟΙ ΠΕΡΙΟΔΟΙ

Διερεύνηση στασιμότητας

Η σειρά εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Τα πρώτα 2 διαγράμματα αφορούν στην αρχική χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.1: Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για όλες τις περιόδους και όλες τις λωρίδες

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η χρονοσειρά δεν είναι στάσιμη, οπότε απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών. Όπως φαίνεται από το κάτω μέρος του σχήματος η νέα χρονοσειρά φαίνεται να είναι στάσιμη.

Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επαυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller

(Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα. Δηλαδή οι δύο αυτοί έλεγχοι είναι αντίθετοι και η ταυτόχρονη διενέργειά τους δίνει ένα πιο ασφαλές συμπέρασμα.

Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Είναι σαφές λοιπόν, από τον συνδυασμό των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και των ελέγχων μοναδιαίας ρίζας, ότι απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών.

Αντίστοιχοι έλεγχοι γίνονται και στη νέα χρονοσειρά που δημιουργήθηκε από την λήψη διαφορών. Από τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων διαπιστώνουμε στασιμότητα της χρονοσειράς. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης.

Με βάση τους παραπάνω ελέγχους η χρονοσειρά των διαφορών είναι στάσιμη και είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του υποδείγματος.

Επιλογή της τάξης του υποδείγματος

Με βάση τα παραπάνω το υπόδειγμα είναι ARIMA (p, 1, q). Για να βρούμε την τάξη του υποδείγματος, δηλαδή τα p και q, αρχικά διερευνούμε τα διαγράμματα των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Η επιλογή βασίζεται στα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.2.2.4.

Εντούτοις παρατηρείται ότι από τα διαγράμματα των πρώτων διαφορών δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα σχετικά με την τάξη του μοντέλου, καθώς δεν παρουσιάζουν την τυπική μορφή των ARIMA υποδειγμάτων. Αυτό ενδεχομένως

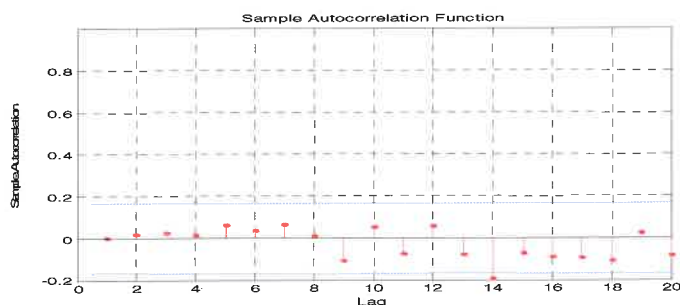
να οφείλεται στο σχετικά μεγάλο διάστημα μεταξύ των μετρήσεων. Συγκεκριμένα, η συχνότητα των 10 λεπτών των μετρήσεων ενδέχεται να οδηγεί σε πιο «ομαλά» αποτελέσματα, αποτελέσματα δηλαδή στα οποία οι μεταβολές που συμβαίνουν εντός του 10λέπτου αγνοούνται. Το γεγονός αυτό ενδέχεται να οδηγεί στην αλλοίωση των αυτοσυσχετίσεων μετά την λήψη πρώτων διαφορών. Για τον λόγο αυτό, για μία πρώτη προσέγγιση των p και q , χρησιμοποιήθηκαν τα διαγράμματα της αρχικής χρονοσειράς.

Παρατηρούμε εκθετική μείωση της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης κάτι που καταδεικνύει αυτοπαλίνδρομο υπόδειγμα, AR, ενώ οι στατιστικά σημαντικές τιμές της συνάρτησης μερικής αυτοσυσχέτισης εμφανίζονται για μία υστέρηση (lag). Έτσι, ως αρχική προσέγγιση λαμβάνεται το υπόδειγμα AR (1).

Με αφετηρία αυτό το υπόδειγμα, εφαρμόστηκαν άλλα μεγαλύτερης τάξης και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με του AR (1). Η σύγκριση έγινε με βάση τους δείκτες αξιολόγησης προβλέψεων MAPE (μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα) και MAE (μέσο απόλυτο σφάλμα). Με βάση αυτά τελικά επελέγη υπόδειγμα ARIMA (3, 1, 3).

Διαγνωστικός έλεγχος

Η καταλληλότητα του υποδείγματος που επιλέγεται ελέγχεται με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων καθώς και τον έλεγχο Ljung – Box. Οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης πρέπει να μην είναι στατιστικά σημαντικοί, ενώ με τον έλεγχο Ljung – Box εξετάζεται το άθροισμα των συντελεστών αυτοσυσχέτισης.

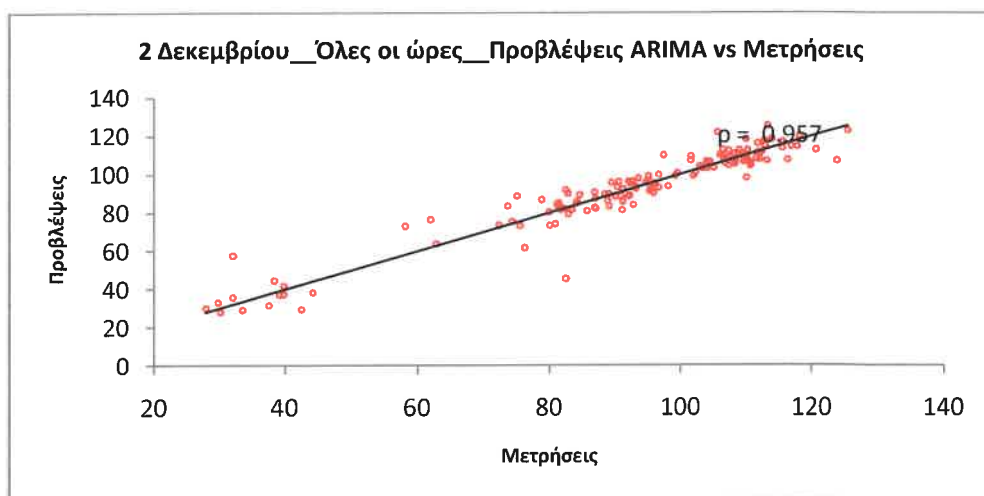


Σχήμα 4.2: Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMA (3, 1, 3), για όλες τις περιόδους και όλες τις λωρίδες

Παρατηρούμε ότι οι αυτοσυσχετίσεις δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επίσης ο έλεγχος Ljung – Box ικανοποιείται. Οπότε το υπόδειγμα ARIMA (3, 1, 3) κρίνεται κατάλληλο για την παραγωγή προβλέψεων.

Προβλέψεις

Οι προβλέψεις γίνονται εντός δείγματος (in – sample), δηλαδή η περίοδος για την οποία δίνονται οι προβλέψεις ταυτίζεται με την περίοδο υπολογισμού του υποδείγματος. Η αξιολόγηση των προβλέψεων γίνεται με βάση το απόλυτο μέσο σφάλμα (MAE) και το απόλυτο μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE). Έτσι ο δείκτης MAE προκύπτει 4,391 και ο MAPE 5,741 %. Η σύγκριση των πραγματικών τιμών με τις προβλεπόμενες φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.



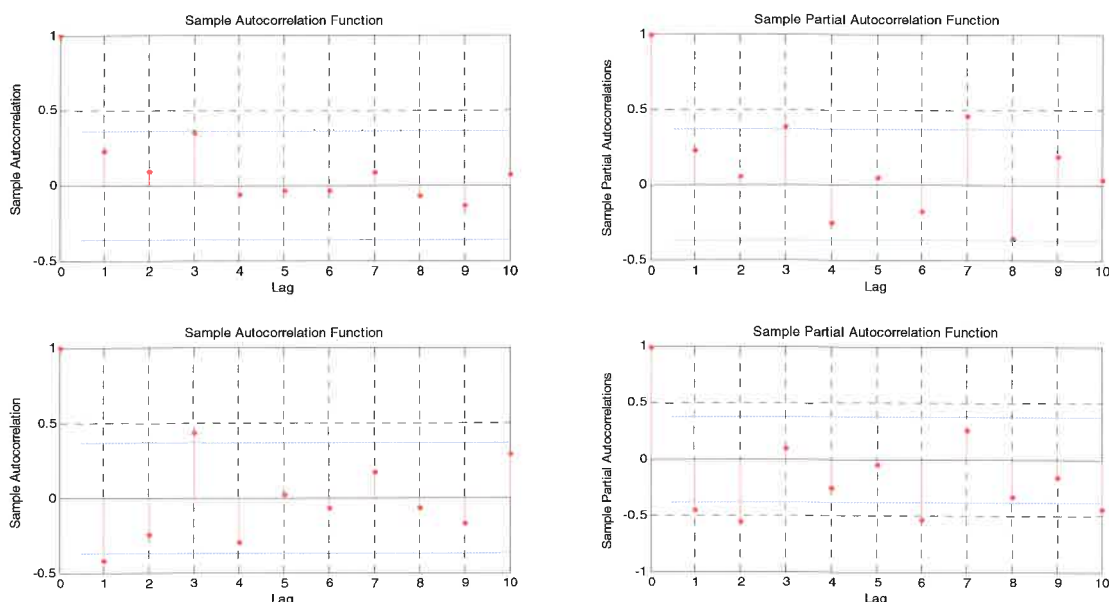
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα προβλέψεων ARIMA – μετρήσεων, για όλες τις περιόδους και όλες τις λωρίδες

4.2.2 ΟΛΕΣ ΟΙ ΛΩΡΙΔΕΣ – ΠΕΡΙΟΔΟΣ 1 (0 έως 5)

Διερεύνηση στασιμότητας

Η χρονοσειρά εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Τα 2 πρώτα διαγράμματα αφορούν στην αρχική

χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.4: Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 1 και όλες τις λωρίδες

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η χρονοσειρά είναι στάσιμη, οπότε δεν απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών. Όπως φαίνεται από το κάτω μέρος του σχήματος, η χρονοσειρά των πρώτων διαφορών παρουσιάζει στατιστικά πιο σημαντικές αυτοσυσχετίσεις, οπότε προκρίνεται η λύση της αρχικής χρονοσειράς.

Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επαυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt - Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα. Δηλαδή οι δύο αυτοί έλεγχοι είναι αντίθετοι και η ταυτόχρονη διενέργειά τους δίνει ένα πιο ασφαλές συμπέρασμα.

Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Αντίθετα το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt - Shin καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Παρατηρούμε ότι οι 2 έλεγχοι

μοναδιαίας ρίζας δίνουν αντιφατικά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό η επιλογή χρονοσειράς θα γίνει αποκλειστικά με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων. Από την μελέτη των διαγραμμάτων προέκυψε ότι τα αρχικά στοιχεία, η αρχική χρονοσειρά, τείνουν στην στασιμότητα οπότε και επιλέγονται.

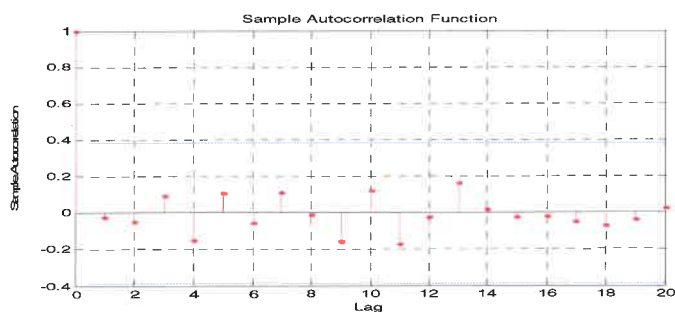
Επιλογή της τάξης του υποδείγματος

Με βάση τα παραπάνω το υπόδειγμα είναι ARMA (p, q). Για να βρούμε την τάξη του υποδείγματος, δηλαδή τα p και q, αρχικά διερευνούμε τα διαγράμματα των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Η επιλογή βασίζεται στα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.2.2.4.

Εντούτοις παρατηρείται ότι από τα διαγράμματα των αυτοσυσχετίσεων δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα σχετικά με την τάξη του μοντέλου, καθώς δεν παρουσιάζουν την τυπική μορφή των ARIMA υποδειγμάτων. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται, στην προκειμένη περίπτωση, στο γεγονός ότι κατά τις νυχτερινές ώρες οι μετρήσεις των ταχυτήτων λαμβάνουν ακραίες τιμές με έντονη διακύμανση γύρω από έναν μέσο, οι οποίες χαρακτηρίζονται από έντονη τυχαιότητα λόγω του περιορισμένου αριθμού οχημάτων. Για τον λόγο αυτό επελέγησαν υποδείγματα ελάχιστης τάξης (AR (1), MA (1), ARMA (1, 1)), και με αφετηρία αυτά εφαρμόστηκαν άλλα μεγαλύτερης τάξης, των οποίων τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αρχικά. Η σύγκριση έγινε με βάση τους δείκτες αξιολόγησης προβλέψεων MAPE (μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα) και MAE (μέσο απόλυτο σφάλμα). Με βάση αυτά τελικά επελέγη υπόδειγμα ARMA (3, 3).

Διαγνωστικός έλεγχος

Η καταλληλότητα του υποδείγματος που επιλέγεται ελέγχεται με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων καθώς και τον έλεγχο Ljung – Box. Οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης πρέπει να μην είναι στατιστικά σημαντικοί, ενώ με τον έλεγχο Ljung – Box εξετάζεται το άθροισμα των συντελεστών αυτοσυσχέτισης.

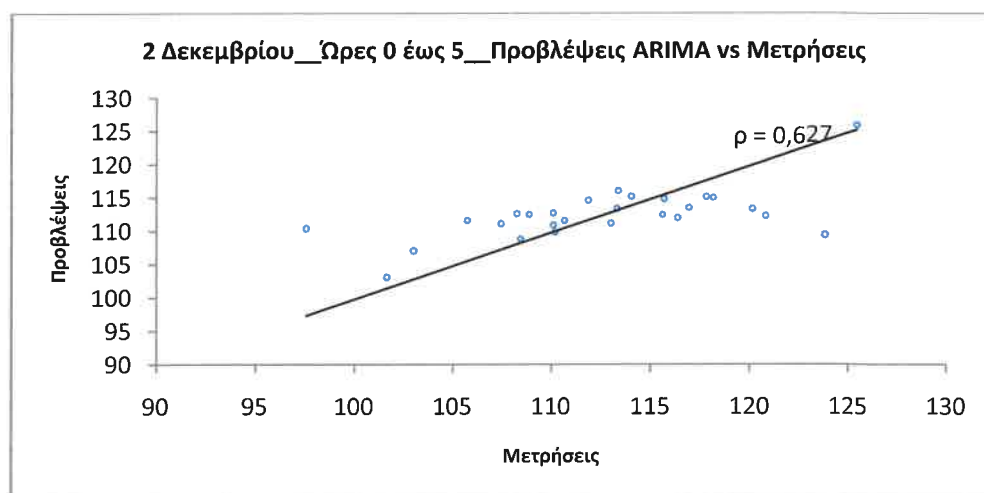


Σχήμα 4.5: Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARMA (3, 3), για την περίοδο 1 και όλες τις λωρίδες

Παρατηρούμε ότι οι αυτοσυσχετίσεις δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επίσης ο έλεγχος Ljung – Box ικανοποιείται. Οπότε το υπόδειγμα ARMA (3, 3) κρίνεται κατάλληλο για την παραγωγή προβλέψεων.

Προβλέψεις

Οι προβλέψεις γίνονται εντός δείγματος (in – sample), δηλαδή η περίοδος για την οποία δίνονται οι προβλέψεις ταυτίζεται με την περίοδο υπολογισμού του υποδείγματος. Η αξιολόγηση των προβλέψεων γίνεται με βάση το απόλυτο μέσο σφάλμα (MAE) και το απόλυτο μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE). Έτσι ο δείκτης MAE προκύπτει 3,606 και ο MAPE 3,219 %. Η σύγκριση των πραγματικών τιμών με τις προβλεπόμενες φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.

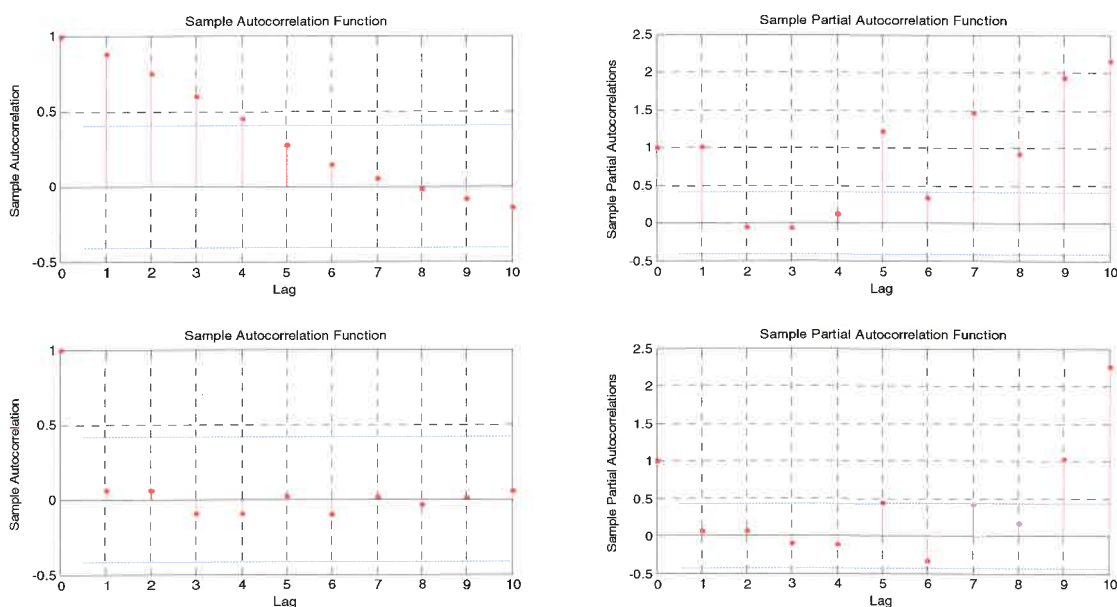


Σχήμα 4.6: Διάγραμμα προβλέψεων ARMA – μετρήσεων, για την περίοδο 1 και όλες τις λωρίδες

4.2.3 ΟΛΕΣ ΟΙ ΛΩΡΙΔΕΣ – ΠΕΡΙΟΔΟΣ 2 (5 έως 9)

Διερεύνηση στασιμότητας

Η χρονοσειρά εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Τα 2 πρώτα διαγράμματα αφορούν στην αρχική χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.7: Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 2 και όλες τις λωρίδες

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η χρονοσειρά δεν είναι στάσιμη, οπότε απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών. Όπως φαίνεται από το κάτω μέρος του σχήματος η νέα χρονοσειρά φαίνεται να είναι στάσιμη.

Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επαυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα. Δηλαδή οι δύο

αυτοί έλεγχοι είναι αντίθετοι και η ταυτόχρονη διενέργειά τους δίνει ένα πιο ασφαλές συμπέρασμα.

Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Είναι σαφές λοιπόν, από τον συνδυασμό των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και των ελέγχων μοναδιαίας ρίζας, ότι απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών.

Αντίστοιχοι έλεγχοι γίνονται και στη νέα χρονοσειρά που δημιουργήθηκε από την λήψη διαφορών. Από τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων διαπιστώνουμε στασιμότητα της χρονοσειράς. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης.

Με βάση τους παραπάνω ελέγχους η χρονοσειρά των διαφορών είναι στάσιμη και είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του υποδείγματος.

Επιλογή της τάξης του υποδείγματος

Με βάση τα παραπάνω το υπόδειγμα είναι ARIMA (p, 1, q). Για να βρούμε την τάξη του υποδείγματος, δηλαδή τα p και q, αρχικά διερευνούμε τα διαγράμματα των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Η επιλογή βασίζεται στα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.2.2.4.

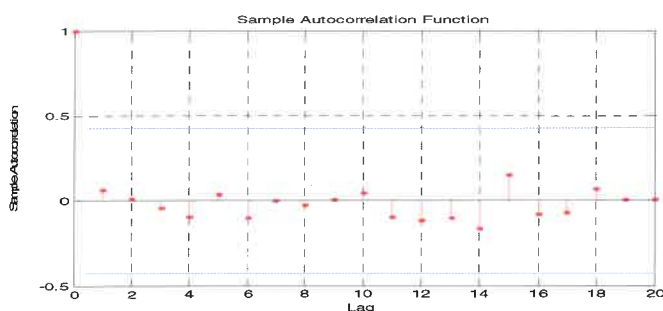
Εντούτοις παρατηρείται και πάλι ότι από τα διαγράμματα των πρώτων διαφορών δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα σχετικά με την τάξη του μοντέλου, καθώς δεν παρουσιάζουν την τυπική μορφή των ARIMA υποδειγμάτων. Μια πιθανή εξήγηση αυτού του φαινομένου παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.2.1. Οπότε, ακολουθώντας την ίδια λογική, για μία πρώτη προσέγγιση των p και q, χρησιμοποιήθηκαν τα διαγράμματα της αρχικής χρονοσειράς.

Παρατηρούμε εκθετική μείωση της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης κάτι που υποδεικνύει αυτοπαλίνδρομο υπόδειγμα, AR, ενώ οι στατιστικά σημαντικές τιμές της συνάρτησης μερικής αυτοσυσχέτισης εμφανίζονται για μία υστέρηση (lag). Έτσι, ως αρχική προσέγγιση λαμβάνεται το υπόδειγμα AR (1). Επισημαίνεται ότι οι στατιστικά σημαντικές τιμές των συντελεστών αυτοσυσχέτισης μετά την 5^η και κυρίως μετά την 7^η υστέρηση θεωρείται ότι δεν επηρεάζουν στην επιλογή του υποδείγματος και, κατά πάσα πιθανότητα, οφείλονται στην κυκλική φύση των κυκλοφοριακών μεγεθών.

Με αφετηρία αυτό το υπόδειγμα, εφαρμόστηκαν άλλα μεγαλύτερης τάξης και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με του AR (1). Η σύγκριση έγινε με βάση τους δείκτες αξιολόγησης προβλέψεων MAPE (μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα) και MAE (μέσο απόλυτο σφάλμα). Με βάση αυτά τελικά επελέγη υπόδειγμα ARIMA (2, 1, 1).

Διαγνωστικός έλεγχος

Η καταλληλότητα του υποδείγματος που επιλέγεται ελέγχεται με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων καθώς και τον έλεγχο Ljung – Box. Οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης πρέπει να μην είναι στατιστικά σημαντικοί, ενώ με τον έλεγχο Ljung – Box εξετάζεται το άθροισμα των συντελεστών αυτοσυσχέτισης.

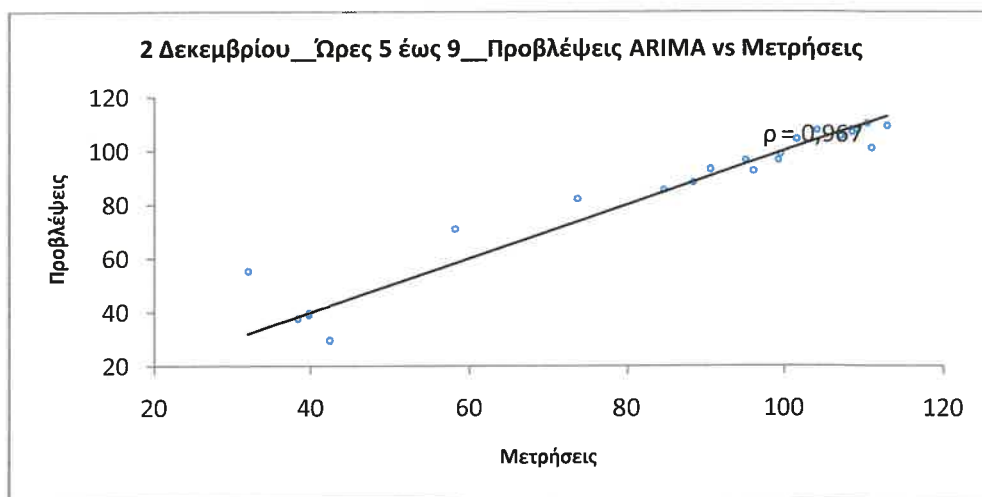


Σχήμα 4.8: Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMA (2, 1, 1), για την περίοδο 2 και όλες τις λωρίδες

Παρατηρούμε ότι οι αυτοσυσχετίσεις δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επίσης ο έλεγχος Ljung – Box ικανοποιείται. Οπότε το υπόδειγμα ARIMA (2, 1, 1) κρίνεται κατάλληλο για την παραγωγή προβλέψεων.

Προβλέψεις

Οι προβλέψεις γίνονται εντός δείγματος (in – sample), δηλαδή η περίοδος για την οποία δίνονται οι προβλέψεις ταυτίζεται με την περίοδο υπολογισμού του υποδείγματος. Η αξιολόγηση των προβλέψεων γίνεται με βάση το απόλυτο μέσο σφάλμα (MAE) και το απόλυτο μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE). Έτσι ο δείκτης MAE προκύπτει 4,313 και ο MAPE 7,980 %. Η σύγκριση των πραγματικών τιμών με τις προβλεπόμενες φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.

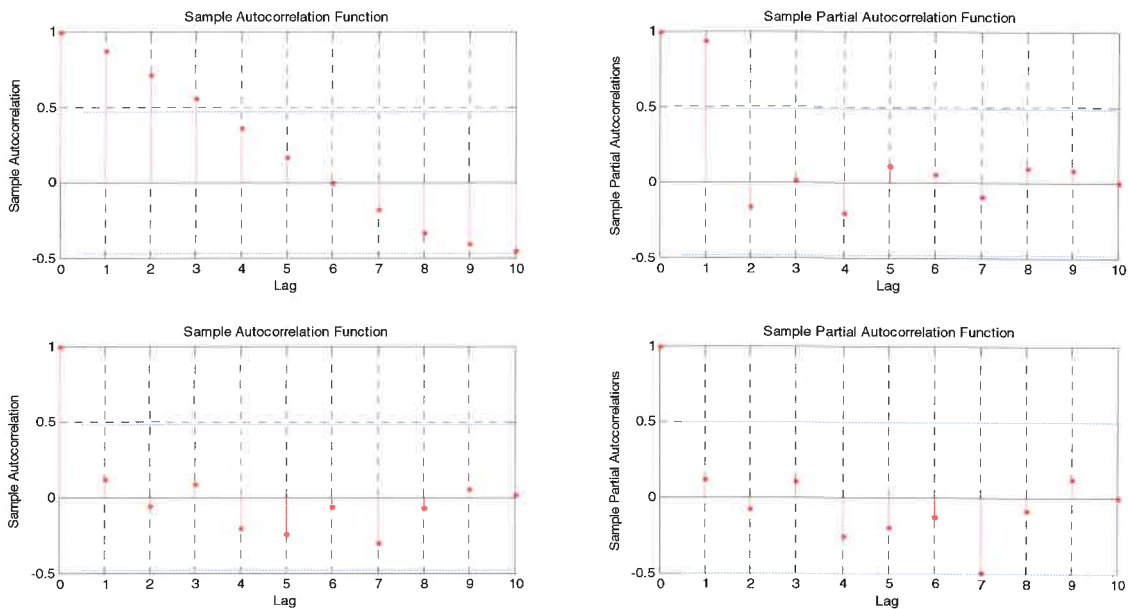


Σχήμα 4.9: Διάγραμμα προβλέψεων ARIMA – μετρήσεων, για την περίοδο 2 και όλες τις λωρίδες

4.2.4 ΟΛΕΣ ΟΙ ΛΩΡΙΔΕΣ – ΠΕΡΙΟΔΟΣ 3 (9 έως 12)

Διερεύνηση στασιμότητας

Η χρονοσειρά εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Τα 2 πρώτα διαγράμματα αφορούν στην αρχική χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.10: Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 3 και όλες τις λωρίδες

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η χρονοσειρά δεν είναι στάσιμη, οπότε απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών. Όπως φαίνεται από το κάτω μέρος του σχήματος η νέα χρονοσειρά φαίνεται να είναι στάσιμη.

Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επανυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα. Δηλαδή οι δύο αυτοί έλεγχοι είναι αντίθετοι και η ταυτόχρονη διενέργειά τους δίνει ένα πιο ασφαλές συμπέρασμα.

Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Είναι σαφές λοιπόν, από τον συνδυασμό των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και των ελέγχων μοναδιαίας ρίζας, ότι απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών.

Αντίστοιχοι έλεγχοι γίνονται και στη νέα χρονοσειρά που δημιουργήθηκε από την λήψη διαφορών. Από τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων διαπιστώνουμε στασιμότητα της χρονοσειράς. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης.

Με βάση τους παραπάνω ελέγχους η χρονοσειρά των διαφορών είναι στάσιμη και είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του υποδείγματος.

Επιλογή της τάξης του υποδείγματος

Με βάση τα παραπάνω το υπόδειγμα είναι ARIMA (p, 1, q). Για να βρούμε την τάξη του υποδείγματος, δηλαδή τα p και q, αρχικά διερευνούμε τα διαγράμματα των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Η επιλογή βασίζεται στα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.2.2.4.

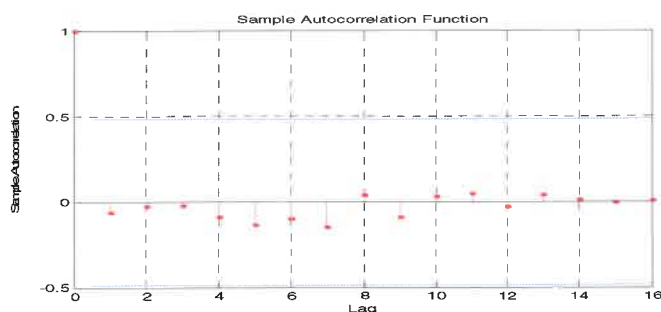
Εντούτοις παρατηρείται και πάλι ότι από τα διαγράμματα των πρώτων διαφορών δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα σχετικά με την τάξη του μοντέλου, καθώς δεν παρουσιάζουν την τυπική μορφή των ARIMA υποδειγμάτων. Μια πιθανή εξήγηση αυτού του φαινομένου παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.2.1. Οπότε, ακολουθώντας την ίδια λογική, για μία πρώτη προσέγγιση των p και q, χρησιμοποιήθηκαν τα διαγράμματα της αρχικής χρονοσειράς.

Παρατηρούμε εκθετική μείωση της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης κάτι που υποδεικνύει αυτοπαλίνδρομο υπόδειγμα, AR, ενώ οι στατιστικά σημαντικές τιμές της συνάρτησης μερικής αυτοσυσχέτισης εμφανίζονται για μία υστέρηση (lag). Έτσι, ως αρχική προσέγγιση λαμβάνεται το υπόδειγμα AR (1).

Με αφετηρία αυτό το υπόδειγμα, εφαρμόστηκαν άλλα μεγαλύτερης τάξης και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με του AR (1). Η σύγκριση έγινε με βάση τους δείκτες αξιολόγησης προβλέψεων MAPE (μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα) και MAE (μέσο απόλυτο σφάλμα). Με βάση αυτά τελικά επελέγη υπόδειγμα ARIMA (3, 1, 2).

Διαγνωστικός έλεγχος

Η καταλληλότητα του υποδείγματος που επιλέγεται ελέγχεται με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων καθώς και τον έλεγχο Ljung – Box. Οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης πρέπει να μην είναι στατιστικά σημαντικοί, ενώ με τον έλεγχο Ljung – Box εξετάζεται το άθροισμα των συντελεστών αυτοσυσχέτισης.

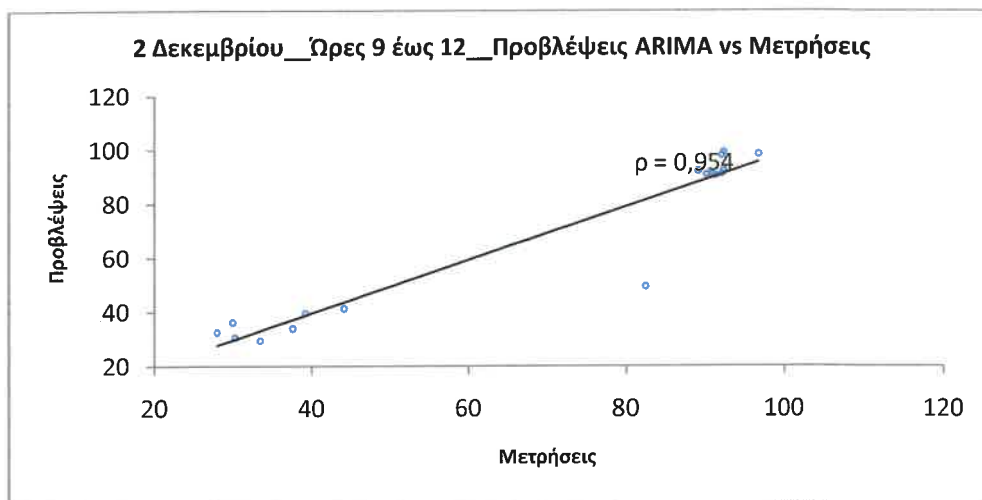


Σχήμα 4.11: Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMA (3, 1, 2), για την περίοδο 3 και όλες τις λωρίδες

Παρατηρούμε ότι οι αυτοσυσχετίσεις δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επίσης ο έλεγχος Ljung – Box ικανοποιείται. Οπότε το υπόδειγμα ARIMA (3, 1, 2) κρίνεται κατάλληλο για την παραγωγή προβλέψεων.

Προβλέψεις

Οι προβλέψεις γίνονται εντός δείγματος (in – sample), δηλαδή η περίοδος για την οποία δίνονται οι προβλέψεις ταυτίζεται με την περίοδο υπολογισμού του υποδείγματος. Η αξιολόγηση των προβλέψεων γίνεται με βάση το απόλυτο μέσο σφάλμα (MAE) και το απόλυτο μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE). Έτσι ο δείκτης MAE προκύπτει 4,447 και ο MAPE 7,676 %. Η σύγκριση των πραγματικών τιμών με τις προβλεπόμενες φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.

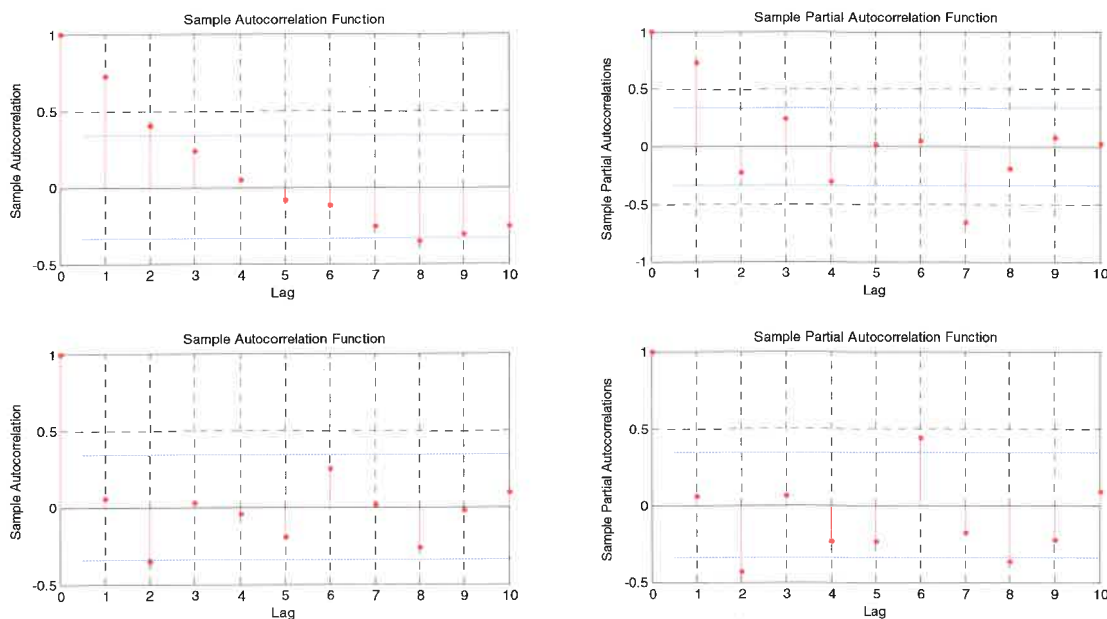


Σχήμα 4.12: Διάγραμμα προβλέψεων ARIMA – μετρήσεων, για την περίοδο 3 και όλες τις λωρίδες

4.2.5 ΟΛΕΣ ΟΙ ΛΩΡΙΔΕΣ – ΠΕΡΙΟΔΟΣ 4 (12 έως 18)

Διερεύνηση στασιμότητας

Η χρονοσειρά εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Τα 2 πρώτα διαγράμματα αφορούν στην αρχική χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.13: Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 4 και όλες τις λωρίδες

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η χρονοσειρά δεν είναι στάσιμη, οπότε απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών. Όπως φαίνεται από το κάτω μέρος του σχήματος η νέα χρονοσειρά φαίνεται να είναι στάσιμη.

Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επανυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin (KPSStest). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSStest είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα. Δηλαδή οι δύο αυτοί έλεγχοι είναι αντίθετοι και η ταυτόχρονη διενέργειά τους δίνει ένα πιο ασφαλές συμπέρασμα.

Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Είναι σαφές λοιπόν, από τον συνδυασμό των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και των ελέγχων μοναδιαίας ρίζας, ότι απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών.

Αντίστοιχοι έλεγχοι γίνονται και στη νέα χρονοσειρά που δημιουργήθηκε από την λήψη διαφορών. Από τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων διαπιστώνουμε στασιμότητα της χρονοσειράς. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης.

Με βάση τους παραπάνω ελέγχους η χρονοσειρά των διαφορών είναι στάσιμη και είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του υποδείγματος.

Επιλογή της τάξης του υποδείγματος

Με βάση τα παραπάνω το υπόδειγμα είναι ARIMA (p, 1, q). Για να βρούμε την τάξη του υποδείγματος, δηλαδή τα p και q, αρχικά διερευνούμε τα διαγράμματα των

συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Η επιλογή βασίζεται στα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.2.2.4.

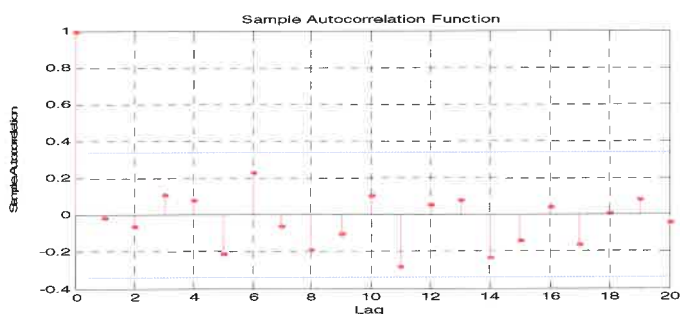
Εντούτοις παρατηρείται και πάλι ότι από τα διαγράμματα των πρώτων διαφορών δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα σχετικά με την τάξη του μοντέλου, καθώς δεν παρουσιάζουν την τυπική μορφή των ARIMA υποδειγμάτων. Μια πιθανή εξήγηση αυτού του φαινομένου παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.2.1. Οπότε, ακολουθώντας την ίδια λογική, για μία πρώτη προσέγγιση των p και q , χρησιμοποιήθηκαν τα διαγράμματα της αρχικής χρονοσειράς.

Παρατηρούμε εκθετική μείωση της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης κάτι που υποδεικνύει αυτοπαλίνδρομο υπόδειγμα, AR, ενώ οι στατιστικά σημαντικές τιμές της συνάρτησης μερικής αυτοσυσχέτισης εμφανίζονται για μία υστέρηση (lag). Προσεγγιστικά μπορούμε να θεωρήσουμε και εκθετική μείωση της συνάρτησης μερικής αυτοσυσχέτισης κάτι που υποδεικνύει υπόδειγμα MA, ενώ οι στατιστικά σημαντικές τιμές της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης εμφανίζονται για δύο υστερήσεις (lags). Έτσι, ως αρχική προσέγγιση λαμβάνονται τα υποδείγματα AR (1) και ARMA (1, 2).

Με αφετηρία αυτά τα υποδείγματα, εφαρμόστηκαν άλλα μεγαλύτερης τάξης και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με των AR (1) και ARMA (1, 2). Η σύγκριση έγινε με βάση τους δείκτες αξιολόγησης προβλέψεων MAPE (μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα) και MAE (μέσο απόλυτο σφάλμα). Με βάση αυτά τελικά επελέγη υπόδειγμα ARIMA (1, 1, 2).

Διαγνωστικός έλεγχος

Η καταλληλότητα του υποδείγματος που επιλέγεται ελέγχεται με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων καθώς και τον έλεγχο Ljung – Box. Οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης πρέπει να μην είναι στατιστικά σημαντικοί, ενώ με τον έλεγχο Ljung – Box εξετάζεται το άθροισμα των συντελεστών αυτοσυσχέτισης.

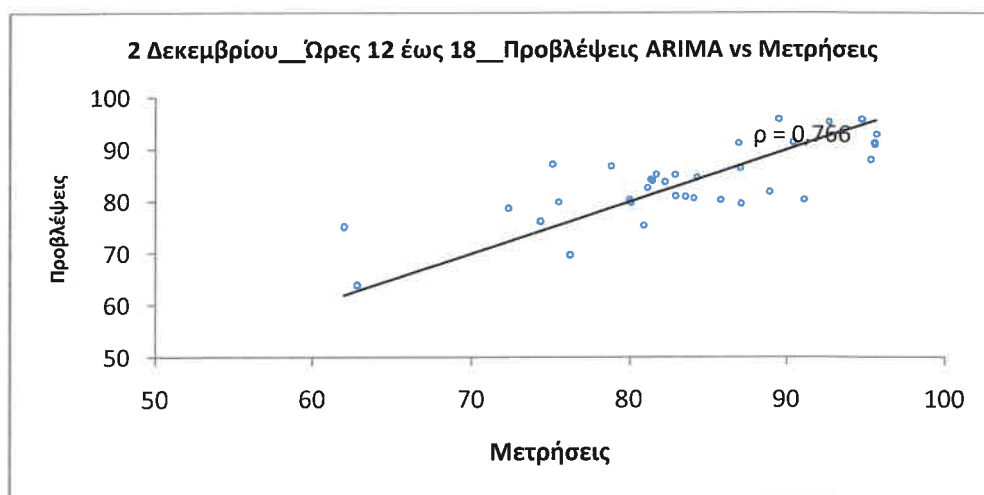


Σχήμα 4.14: Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMA (1, 1, 2), για την περίοδο 4 και όλες τις λωρίδες

Παρατηρούμε ότι οι αυτοσυσχετίσεις δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επίσης ο έλεγχος Ljung – Box ικανοποιείται. Οπότε το υπόδειγμα ARIMA (1, 1, 2) κρίνεται κατάλληλο για την παραγωγή προβλέψεων.

Προβλέψεις

Οι προβλέψεις γίνονται εντός δείγματος (in – sample), δηλαδή η περίοδος για την οποία δίνονται οι προβλέψεις ταυτίζεται με την περίοδο υπολογισμού του υποδείγματος. Η αξιολόγηση των προβλέψεων γίνεται με βάση το απόλυτο μέσο σφάλμα (MAE) και το απόλυτο μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE). Έτσι ο δείκτης MAE προκύπτει 4,205 και ο MAPE 5,187 %. Η σύγκριση των πραγματικών τιμών με τις προβλεπόμενες φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.

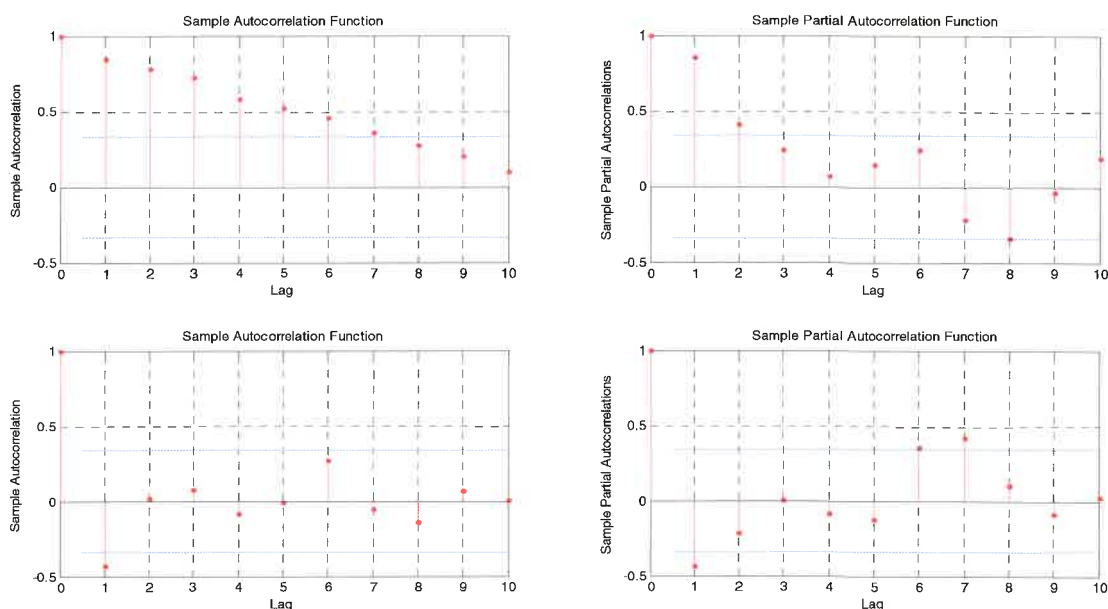


Σχήμα 4.15: Διάγραμμα προβλέψεων ARIMA – μετρήσεων, για την περίοδο 4 και όλες τις λωρίδες

4.2.6 ΟΛΕΣ ΟΙ ΛΩΡΙΔΕΣ – ΠΕΡΙΟΔΟΣ 5 (18 έως 24)

Διερεύνηση στασιμότητας

Η χρονοσειρά εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Τα 2 πρώτα διαγράμματα αφορούν στην αρχική χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.16: Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 5 και όλες τις λωρίδες

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η χρονοσειρά δεν είναι στάσιμη, οπότε απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών. Όπως φαίνεται από το κάτω μέρος του σχήματος η νέα χρονοσειρά φαίνεται να είναι στάσιμη.

Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επανυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα. Δηλαδή οι δύο

αυτοί έλεγχοι είναι αντίθετοι και η ταυτόχρονη διενέργειά τους δίνει ένα πιο ασφαλές συμπέρασμα.

Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt - Shin επίσης καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Είναι σαφές λοιπόν, από τον συνδυασμό των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και των ελέγχων μοναδιαίας ρίζας, ότι απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών.

Αντίστοιχοι έλεγχοι γίνονται και στη νέα χρονοσειρά που δημιουργήθηκε από την λήψη διαφορών. Από τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων διαπιστώνουμε στασιμότητα της χρονοσειράς. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt - Shin επίσης.

Με βάση τους παραπάνω ελέγχους η χρονοσειρά των διαφορών είναι στάσιμη και είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του υποδείγματος.

Επιλογή της τάξης του υποδείγματος

Με βάση τα παραπάνω το υπόδειγμα είναι ARIMA (p, 1, q). Για να βρούμε την τάξη του υποδείγματος, δηλαδή τα p και q, αρχικά διερευνούμε τα διαγράμματα των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Η επιλογή βασίζεται στα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.2.2.4.

Εντούτοις παρατηρείται και πάλι ότι από τα διαγράμματα των πρώτων διαφορών δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα σχετικά με την τάξη του μοντέλου, καθώς δεν παρουσιάζουν την τυπική μορφή των ARIMA υποδειγμάτων. Μια πιθανή εξήγηση αυτού του φαινομένου παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.2.1. Οπότε, ακολουθώντας την ίδια λογική, για μία πρώτη προσέγγιση των p και q, χρησιμοποιήθηκαν τα διαγράμματα της αρχικής χρονοσειράς.

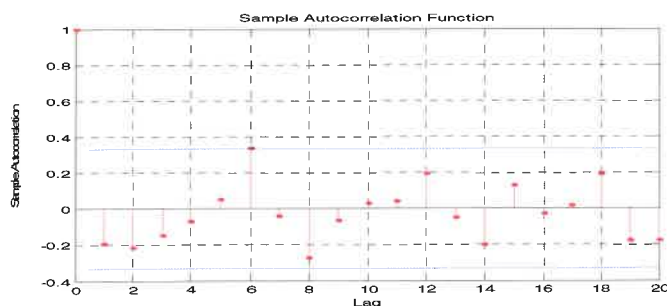
Παρατηρούμε εκθετική μείωση της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης κάτι που υποδεικνύει αυτοπαλίνδρομο υπόδειγμα, AR, ενώ οι στατιστικά σημαντικές τιμές της

συνάρτησης μερικής αυτοσυσχέτισης εμφανίζονται για δύο υστερήσεις (lags). Προσεγγιστικά μπορούμε να θεωρήσουμε και εκθετική μείωση της συνάρτησης μερικής αυτοσυσχέτισης κάτι που υποδεικνύει υπόδειγμα MA , ενώ οι στατιστικά σημαντικές τιμές της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης εμφανίζονται για επτά υστερήσεις (lags). Το τελευταίο στοιχείο μας καθοδηγεί στο συμπέρασμα ότι στο υπόδειγμα θα εμφανίζεται και το τμήμα των κινητών μέσων. Έτσι, ως αρχική προσέγγιση λαμβάνονται τα υποδείγματα AR (2) και ARMA (2, 1).

Με αφετηρία αυτά τα υποδείγματα, εφαρμόστηκαν άλλα μεγαλύτερης τάξης και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με των AR (2) και ARMA (2, 1). Επίσης για την εξαγωγή ενός ασφαλέστερου συμπεράσματος εφαρμόστηκαν και υποδείγματα μικρότερης τάξης. Η σύγκριση έγινε με βάση τους δείκτες αξιολόγησης προβλέψεων MAPE (μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα) και MAE (μέσο απόλυτο σφάλμα). Με βάση αυτά τελικά επελέγη υπόδειγμα ARIMA (2, 1, 1).

Διαγνωστικός έλεγχος

Η καταλληλότητα του υποδείγματος που επιλέγεται ελέγχεται με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων καθώς και τον έλεγχο Ljung – Box. Οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης πρέπει να μην είναι στατιστικά σημαντικοί, ενώ με τον έλεγχο Ljung – Box εξετάζεται το άθροισμα των συντελεστών αυτοσυσχέτισης.

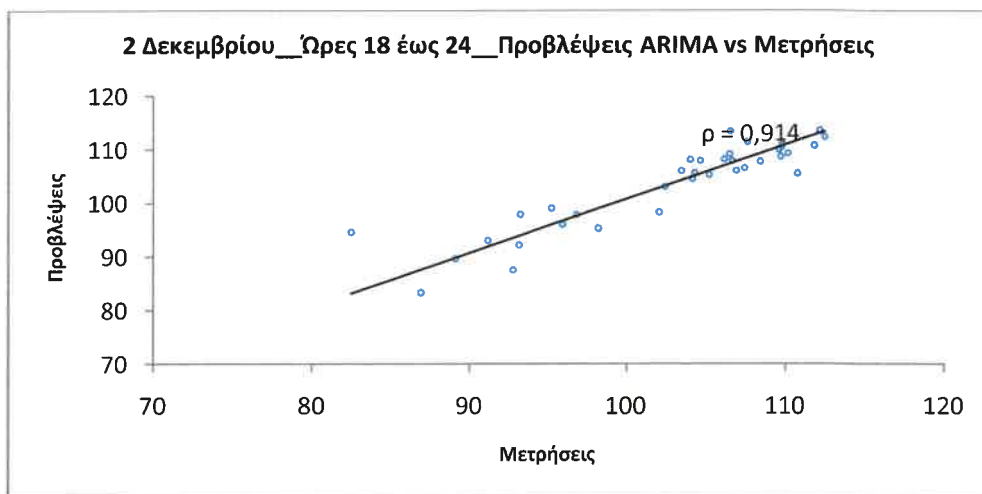


Σχήμα 4.17: Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMA (2, 1, 1), για την περίοδο 5 και όλες τις λωρίδες

Παρατηρούμε ότι οι αυτοσυσχετίσεις δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επίσης ο έλεγχος Ljung – Box ικανοποιείται. Οπότε το υπόδειγμα ARIMA (2, 1, 1) κρίνεται κατάλληλο για την παραγωγή προβλέψεων.

Προβλέψεις

Οι προβλέψεις γίνονται εντός δείγματος (in – sample), δηλαδή η περίοδος για την οποία δίνονται οι προβλέψεις ταυτίζεται με την περίοδο υπολογισμού του υποδείγματος. Η αξιολόγηση των προβλέψεων γίνεται με βάση το απόλυτο μέσο σφάλμα (MAE) και το απόλυτο μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE). Έτσι ο δείκτης MAE προκύπτει 2,322 και ο MAPE 2,364 %. Η σύγκριση των πραγματικών τιμών με τις προβλεπόμενες φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 4.18: Διάγραμμα προβλέψεων ARIMA – μετρήσεων, για την περίοδο 5 και όλες τις λωρίδες

4.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΩΝ AR(I)MAX

4.3.1 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΕΞΩΓΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Στα υποδείγματα τύπου AR(I)MAX εισάγεται η εξωτερική παράμετρος X . Ως εξωτερική παράμετρο μπορούμε να εισάγουμε οποιοδήποτε μέγεθος θεωρούμε ότι επηρεάζει την εξαρτημένη μεταβλητή, δηλαδή την ταχύτητα. Γενικά είναι λογική η εισαγωγή του φόρτου ως χρονοσειρά που επηρεάζει άμεσα την ταχύτητα. Η σχέση φόρτου – ταχύτητας στην κυκλοφορία είναι δεδομένη, οπότε η εισαγωγή μετρήσεων φόρτου θα πρέπει να βελτιώσει την απόδοση του υποδείγματος.

Επιπλέον βελτίωση της προβλεπτικής ικανότητας του υποδείγματος πρέπει να προσφέρει η εισαγωγή της χρονοσειράς της μετρηθείσας βροχόπτωσης. Έχει αναλυθεί στο 1^ο κεφάλαιο η επιρροή της βροχόπτωσης στα κυκλοφοριακά μεγέθη και ειδικά στην ταχύτητα. Είναι γνωστό λοιπόν ότι η ύπαρξη βροχόπτωσης, και δη ισχυρής, μειώνει την μέση ταχύτητα.

Έτσι αποφασίστηκε η εισαγωγή των χρονοσειρών του φόρτου και της βροχόπτωσης ως εξωγενών παραμέτρων στο υπόδειγμα. Επιπλέον έπρεπε να καθοριστεί η μορφή με την οποία οι εξωγενείς αυτές παράμετροι θα εισάγονταν. Είναι λογικό τα στοιχεία φόρτου να εισαχθούν ως έχουν, δηλαδή MEA / 10 min. Η βροχόπτωση μπορεί να εισαχθεί με 3 τρόπους. Είτε ως δυαδική μεταβλητή (0 δεν βρέχει, 1 βρέχει), είτε ως βαθμωτή (0 δεν βρέχει, 1 βρέχει λίγο, 2 βρέχει πολύ κ.ο.κ.) ή με τις πραγματικές τιμές της (σε mm/10 min). Επιλέγεται η τελευταία μέθοδος με την λογική της πλήρους απόδοσης της έντασης της βροχόπτωσης. Επισημαίνεται ότι τα διαστήματα βροχόπτωσης που παρουσιάζονται στις 2 Δεκεμβρίου είναι μικρά και η ένταση της βροχόπτωσης όχι ιδιαίτερα ισχυρή.

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό ζήτημα είναι η επιλογή των υστερήσεων των εξωγενών παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν στα υποδείγματα. Προφανώς μεγάλη σημασία έχουν οι μετρήσεις χωρίς υστέρηση καθώς αποδίδουν την κατάσταση στην συγκεκριμένη στιγμή και συνδέονται άμεσα με την ταχύτητα (πχ. σε στιγμές με

ισχυρή βροχόπτωση ή αυξημένο φόρτο αναμένεται πτώση της ταχύτητας). Θεωρητικά είναι χρήσιμες και κάποιες υστερήσεις και στις 2 παραμέτρους (φόρτο και βροχόπτωση) καθώς δίνουν πληροφορία για προηγούμενες χρονικές περιόδους. Συγκεκριμένα αυξημένος φόρτος κάποιες στιγμές στο κοντινό παρελθόν θα πρέπει να οδηγεί σε μείωση της ταχύτητας στο παρόν, καθώς πυκνή ροή στα κατάντη ενδέχεται να προκαλεί μείωση της ταχύτητας ανάντη. Επίσης η βροχόπτωση κάποιο διάστημα στο παρελθόν πρέπει να οδηγεί δε μείωση της ταχύτητας στο παρόν λόγω συσσώρευσης νερού και ολισθηρού οδοστρώματος. Εντούτοις αυτές οι υποθέσεις πρέπει να ελεγχθούν στην πράξη καθώς και να καθοριστεί επακριβώς ο απαιτούμενος αριθμός υστερήσεων. Για τον λόγο αυτό έγιναν δοκιμές ώστε να συγκριθεί η απόδοση των υποδειγμάτων ανάλογα με τις υστερήσεις των εξωγενών παραμέτρων. Παράδειγμα αυτής της σύγκρισης ακολουθεί στον παρακάτω πίνακα. Επισημαίνεται ότι στόχος ήταν η επιλογή ενός κοινού προτύπου (αριθμού υστερήσεων κάθε εξωγενούς μεταβλητής) για κάθε περίπτωση. Οπότε επελέγη το πρότυπο αυτό που αξιολογήθηκε ως συνολικά καλύτερο.

Πίνακας 4.2: Παράδειγμα σύγκρισης προτύπων για τις εξωγενείς παραμέτρους (εδώ: όλες οι περίοδοι και όλες οι λωρίδες

ARIMAX (3, 1, 3)	MAE	MAPE	BIC
Φόρτος 0+1 lags Βροχή 0+1+2 lags	4,093	5,444	4,188
Φόρτος 0 lag Βροχή 0+1+2 lags	4,077	5,432	4,146
Φόρτος 0 lag Βροχή 0+1 lags	4,080	5,437	4,104
Φόρτος 0+1 lags Βροχή 0 lag	4,207	5,689	4,126
Φόρτος 0 lag Βροχή 0 lag	4,190	5,684	4,087
Φόρτος 0+1 lags Βροχή 0+1 lags	4,094	5,450	4,146
Βροχή 0+1+2 lags	4,237	5,450	4,130
Βροχή 0+1 lags	4,239	5,454	4,088
Καλύτερες τιμές	4,077	5,432	4,087

Παρατηρούμε ότι η βέλτιστη πρόβλεψη επιτυγχάνεται με την εισαγωγή, στο υπόδειγμα, του φόρτου χωρίς καμία υστέρηση και της βροχόπτωσης με 2 υστερήσεις. Εντούτοις, φαίνεται ότι η βελτίωση της προβλεπτικής ικανότητας του υποδείγματος είναι ελάχιστη με την εισαγωγή της 2^{ης} υστέρησης της βροχόπτωσης. Αυτό φαίνεται και από το κριτήριο Bayesian (BIC, Bayesian Information Criterion), όπου είναι αρκετά μικρότερο για την περίπτωση της μιας υστέρησης. Οι Box – Jenkins προτείνουν την χρήση της ελάχιστης δυνατής τάξης στο υπόδειγμα (δηλαδή των ελάχιστων δυνατών υστερήσεων), οπότε καθώς η ωφέλεια στην προβλεπτική ικανότητα του υποδείγματος είναι ελάχιστη όταν εισάγεται η 2^η υστέρηση της βροχόπτωσης, επιλέγεται τελικά το πρότυπο: φόρτος χωρίς υστέρηση, βροχόπτωση με μία υστέρηση. Επισημαίνεται ότι ανάλογη εικόνα υπάρχει και στην πλειοψηφία των υπόλοιπων περιπτώσεων, οπότε το παραπάνω πρότυπο εφαρμόζεται καθολικά στην συγκεκριμένη εργασία.

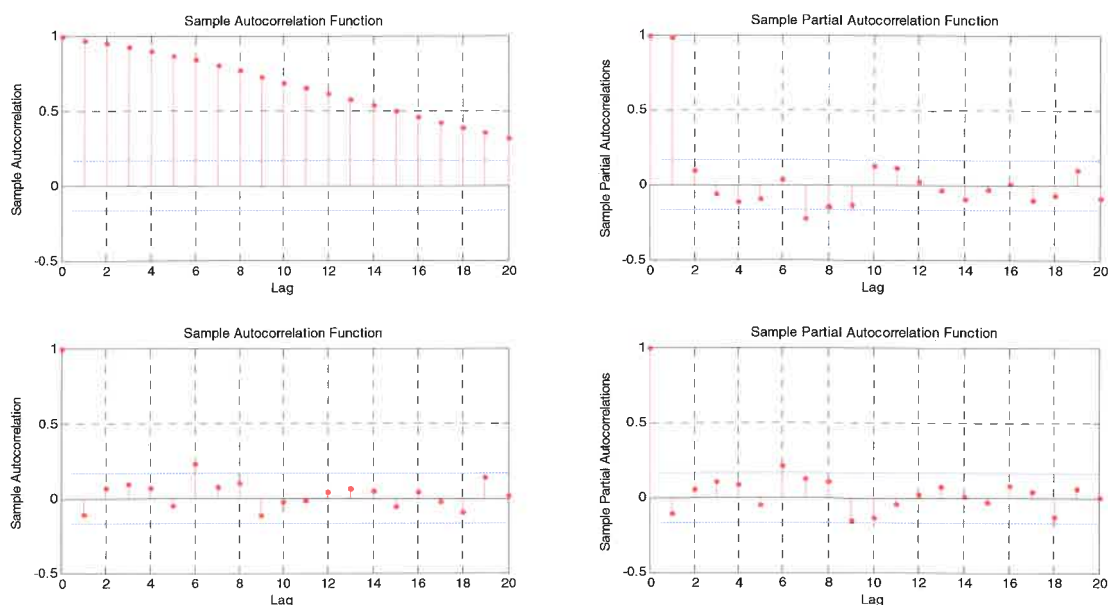
Τέλος, ένας επιπλέον έλεγχος που απαιτείται κατά την εφαρμογή ενός AR(I)MAX υποδείγματος, είναι αυτός της στασιμότητας της χρονοσειράς X (φόρτου και βροχόπτωσης). Ο έλεγχος στασιμότητας είναι ο ίδιος με αυτόν που γίνεται για τις εξαρτημένες μεταβλητές και παρουσιάζεται παρακάτω για κάθε περίπτωση.

Επισημαίνεται ακόμα ότι η τάξη των AR(I)MAX υποδειγμάτων δεν υπολογίζεται ξανά καθώς συμπίπτει με αυτήν που υπολογίστηκε για τα απλά υποδείγματα AR(I)MA.

4.3.2 ΟΛΕΣ ΟΙ ΛΩΡΙΔΕΣ – ΟΛΕΣ ΟΙ ΠΕΡΙΟΔΟΙ

Διερεύνηση στασιμότητας χρονοσειράς φόρτου

Η χρονοσειρά του φόρτου εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Τα 2 πρώτα διαγράμματα αφορούν στην αρχική χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.19: Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς φόρτου, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για όλες τις περιόδους και όλες τις λωρίδες

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η χρονοσειρά δεν είναι στάσιμη, οπότε απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών. Όπως φαίνεται από το κάτω μέρος του σχήματος η νέα χρονοσειρά φαίνεται να είναι στάσιμη.

Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επανζημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα.

Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Είναι σαφές λοιπόν, από τον συνδυασμό των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και των ελέγχων μοναδιαίας ρίζας, ότι απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών.

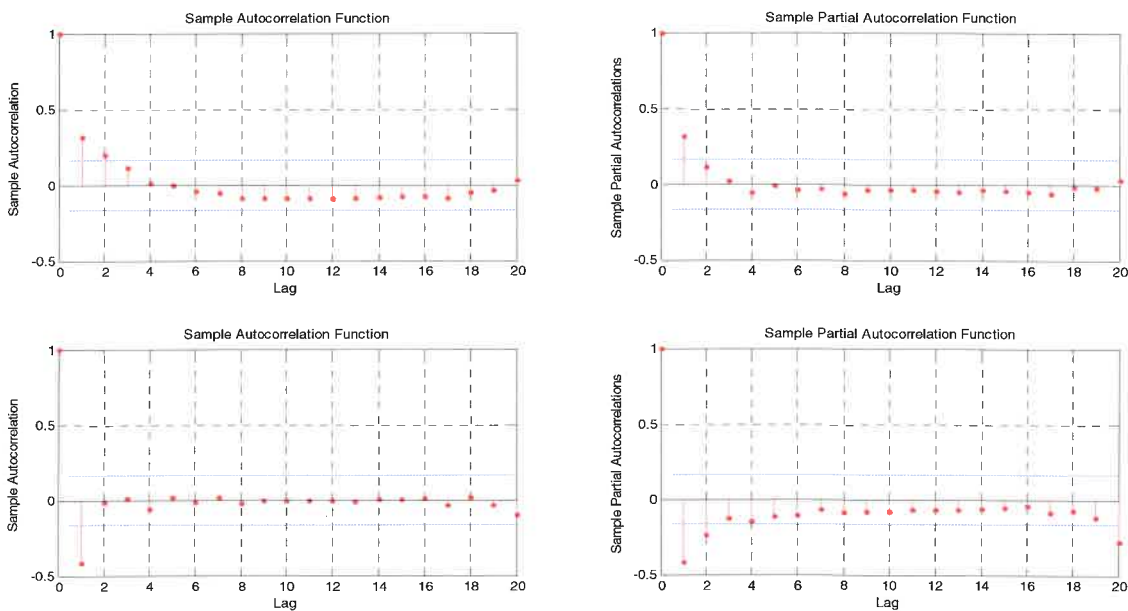
Αντίστοιχοι έλεγχοι γίνονται και στη νέα χρονοσειρά που δημιουργήθηκε από την λήψη διαφορών. Από τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων διαπιστώνουμε στασιμότητα

της χρονοσειράς. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης.

Με βάση τους παραπάνω ελέγχους η χρονοσειρά των διαφορών είναι στάσιμη και είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του υποδείγματος.

Διερεύνηση στασιμότητας χρονοσειράς βροχόπτωσης

Η χρονοσειρά της βροχόπτωσης εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Τα 2 πρώτα διαγράμματα αφορούν στην αρχική χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.20: Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς βροχόπτωσης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για όλες τις περιόδους και όλες τις λωρίδες

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η χρονοσειρά είναι στάσιμη, οπότε δεν απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών και προκρίνεται η λύση της αρχικής χρονοσειράς.

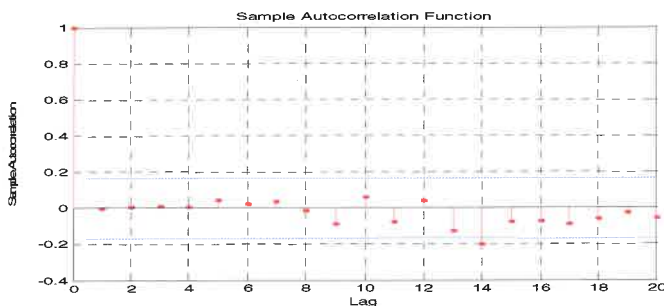
Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επανυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller

(Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt - Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα.

Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Αντίθετα το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt - Shin καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Παρατηρούμε ότι οι 2 έλεγχοι μοναδιαίας ρίζας δίνουν αντιφατικά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό η επιλογή χρονοσειράς θα γίνει αποκλειστικά με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων. Από την μελέτη των διαγραμμάτων προέκυψε ότι τα αρχικά στοιχεία, η αρχική χρονοσειρά, τείνουν στην στασιμότητα οπότε και επιλέγονται.

Διαγνωστικός έλεγχος

Η καταλληλότητα του υποδείγματος που επιλέγεται ελέγχεται με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχετίσης των καταλοίπων καθώς και τον έλεγχο Ljung – Box. Οι συντελεστές αυτοσυσχετίσης πρέπει να μην είναι στατιστικά σημαντικοί, ενώ με τον έλεγχο Ljung – Box εξετάζεται το άθροισμα των συντελεστών αυτοσυσχετίσης.

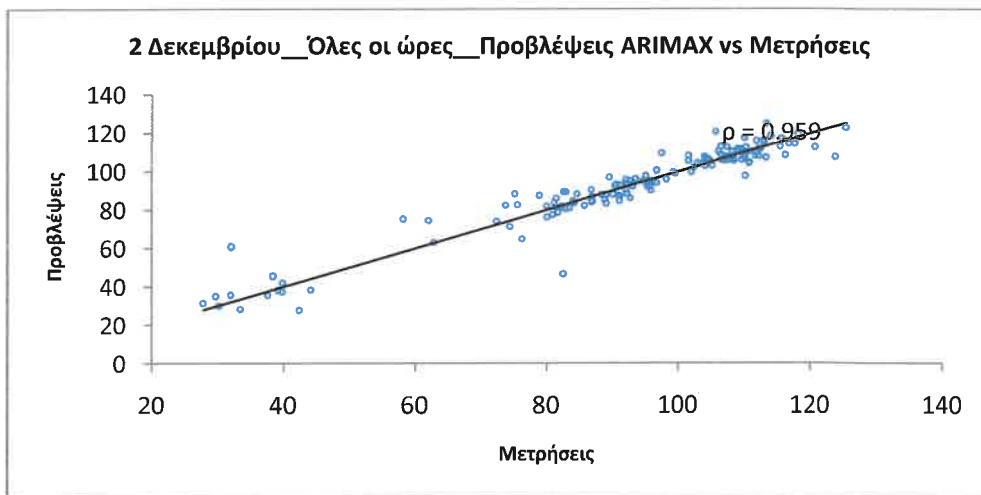


Σχήμα 4.21: Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMAX (3, 1, 3), για όλες τις περιόδους και όλες τις λωρίδες

Παρατηρούμε ότι οι αυτοσυσχετίσεις δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επίσης ο έλεγχος Ljung – Box ικανοποιείται. Οπότε το υπόδειγμα ARIMAX (3, 1, 3) κρίνεται κατάλληλο για την παραγωγή προβλέψεων.

Προβλέψεις

Οι προβλέψεις γίνονται εντός δείγματος (in – sample), δηλαδή η περίοδος για την οποία δίνονται οι προβλέψεις ταυτίζεται με την περίοδο υπολογισμού του υποδείγματος. Η αξιολόγηση των προβλέψεων γίνεται με βάση το απόλυτο μέσο σφάλμα (MAE) και το απόλυτο μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE). Έτσι ο δείκτης MAE προκύπτει 4,107 και ο MAPE 5,502 %. Η σύγκριση των πραγματικών τιμών με τις προβλεπόμενες φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.

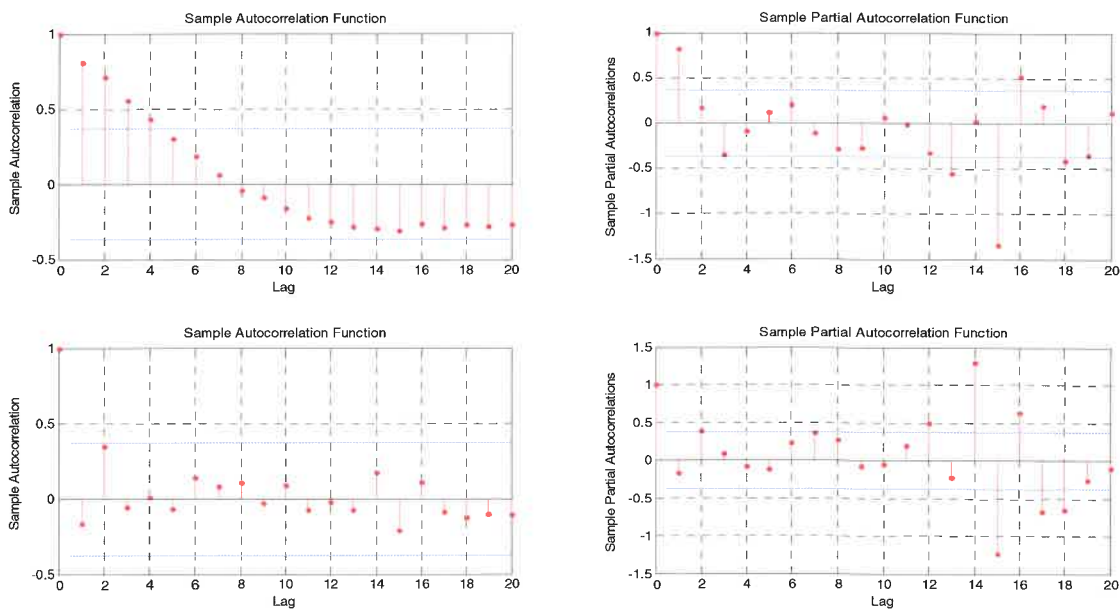


Σχήμα 4.22: Διάγραμμα προβλέψεων ARIMAX – μετρήσεων, για όλες τις περιόδους και όλες τις λωρίδες

4.3.3 ΟΛΕΣ ΟΙ ΛΩΡΙΔΕΣ – ΠΕΡΙΟΔΟΣ 1 (0 έως 5)

Διερεύνηση στασιμότητας χρονοσειράς φόρτου

Η χρονοσειρά του φόρτου εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Τα 2 πρώτα διαγράμματα αφορούν στην αρχική χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.23: Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς φόρτου, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 1 και όλες τις λωρίδες

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η χρονοσειρά δεν είναι στάσιμη, οπότε απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών. Όπως φαίνεται από το κάτω μέρος του σχήματος η νέα χρονοσειρά φαίνεται να είναι στάσιμη.

Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επαυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα.

Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Είναι σαφές λοιπόν, από τον συνδυασμό των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και των ελέγχων μοναδιαίας ρίζας, ότι απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών.

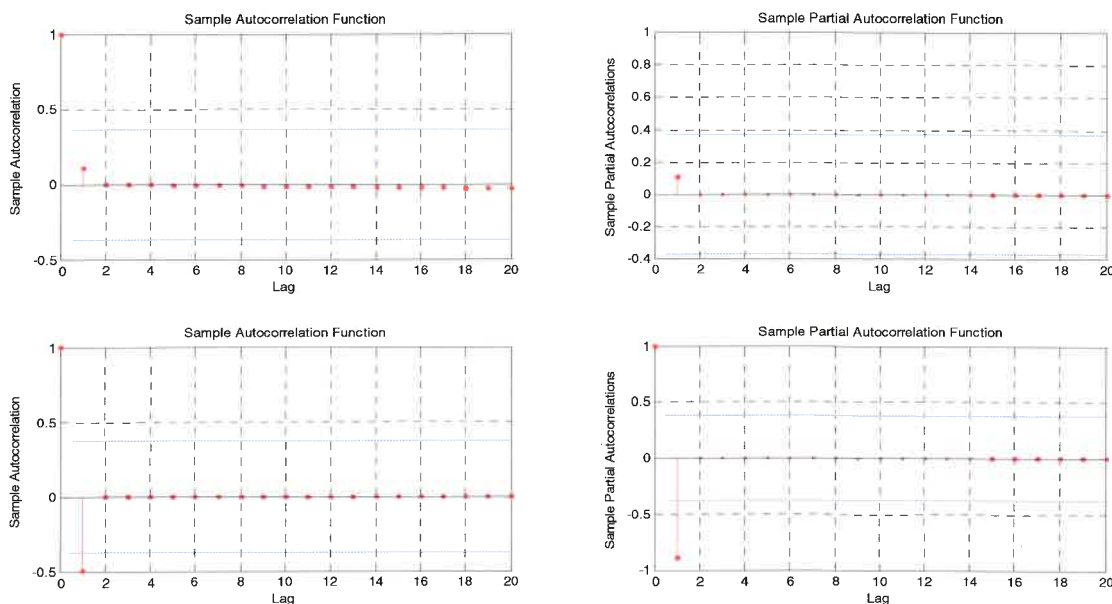
Αντίστοιχοι έλεγχοι γίνονται και στη νέα χρονοσειρά που δημιουργήθηκε από την λήψη διαφορών. Από τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων διαπιστώνουμε στασιμότητα

της χρονοσειράς. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης.

Με βάση τους παραπάνω ελέγχους η χρονοσειρά των διαφορών είναι στάσιμη και είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του υποδείγματος.

Διερεύνηση στασιμότητας χρονοσειράς βροχόπτωσης

Η χρονοσειρά της βροχόπτωσης εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Τα 2 πρώτα διαγράμματα αφορούν στην αρχική χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.24: Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς βροχόπτωσης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 1 και όλες τις λωρίδες

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η χρονοσειρά είναι στάσιμη, οπότε δεν απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών και προκρίνεται η λύση της αρχικής χρονοσειράς.

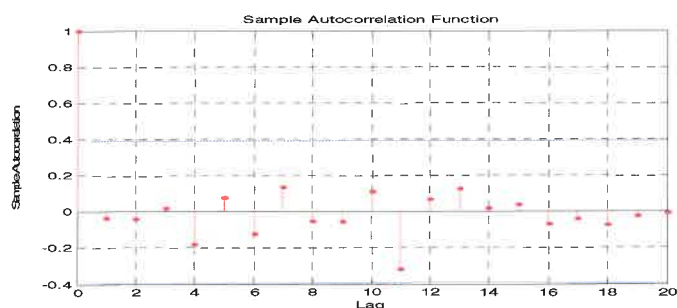
Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επαυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα.

Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Είναι σαφές λοιπόν, από τον συνδυασμό των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και των ελέγχων μοναδιαίας ρίζας, ότι δεν απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών.

Με βάση τους παραπάνω ελέγχους η αρχική χρονοσειρά διαφορών είναι στάσιμη και είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του υποδείγματος.

Διαγνωστικός έλεγχος

Η καταλληλότητα του υποδείγματος που επιλέγεται ελέγχεται με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων καθώς και τον έλεγχο Ljung – Box. Οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης πρέπει να μην είναι στατιστικά σημαντικοί, ενώ με τον έλεγχο Ljung – Box εξετάζεται το άθροισμα των συντελεστών αυτοσυσχέτισης.

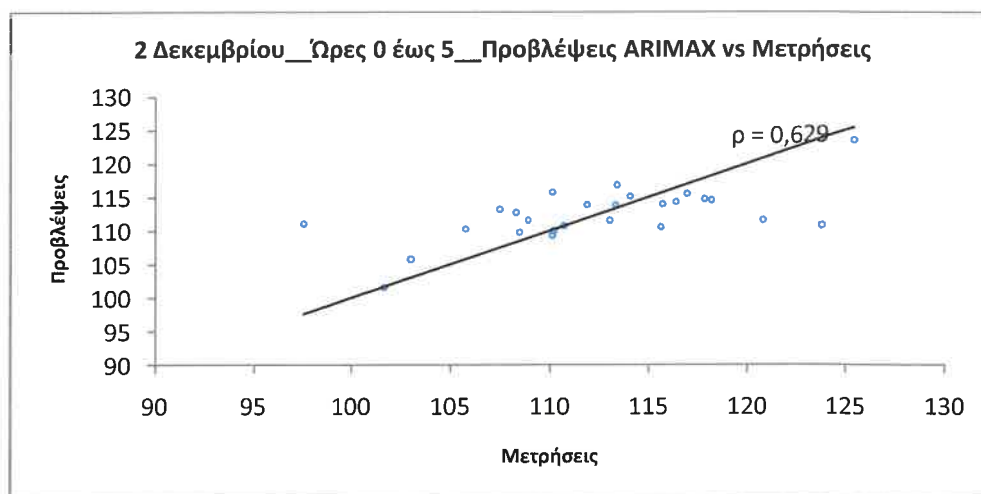


Σχήμα 4.25: Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARMAX (3, 3), για την περίοδο 1 και όλες τις λωρίδες

Παρατηρούμε ότι οι αυτοσυσχετίσεις δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επίσης ο έλεγχος Ljung – Box ικανοποιείται. Οπότε το υπόδειγμα ARMAX (3, 3) κρίνεται κατάλληλο για την παραγωγή προβλέψεων.

Προβλέψεις

Οι προβλέψεις γίνονται εντός δείγματος (in – sample), δηλαδή η περίοδος για την οποία δίνονται οι προβλέψεις ταυτίζεται με την περίοδο υπολογισμού του υποδείγματος. Η αξιολόγηση των προβλέψεων γίνεται με βάση το απόλυτο μέσο σφάλμα (MAE) και το απόλυτο μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE). Έτσι ο δείκτης MAE προκύπτει 3,511 και ο MAPE 3,147 %. Η σύγκριση των πραγματικών τιμών με τις προβλεπόμενες φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.



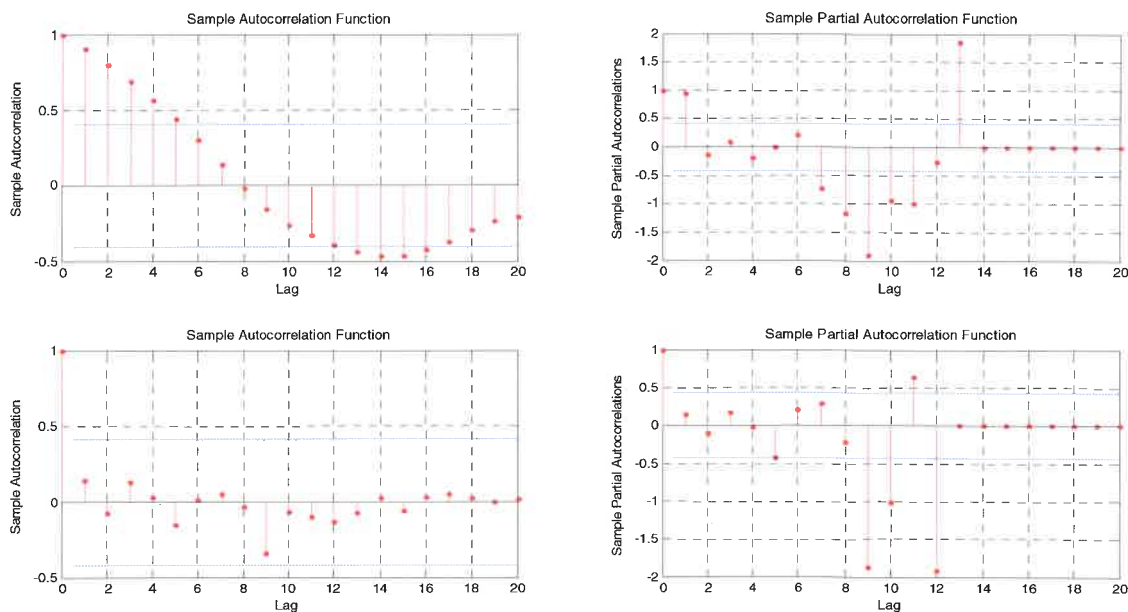
Σχήμα 4.26: Διάγραμμα προβλέψεων ARIMAX – μετρήσεων, για την περίοδο 1 και όλες τις λωρίδες

4.3.4 ΟΛΕΣ ΟΙ ΛΩΡΙΔΕΣ – ΠΕΡΙΟΔΟΣ 2 (5 έως 9)

Διερεύνηση στασιμότητας χρονοσειράς φόρτου

Η χρονοσειρά του φόρτου εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Τα 2 πρώτα διαγράμματα αφορούν

στην αρχική χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.27: Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς φόρτου, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 2 και όλες τις λωρίδες

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η χρονοσειρά δεν είναι στάσιμη, οπότε απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών. Όπως φαίνεται από το κάτω μέρος του σχήματος η νέα χρονοσειρά φαίνεται να είναι στάσιμη.

Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επαυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα.

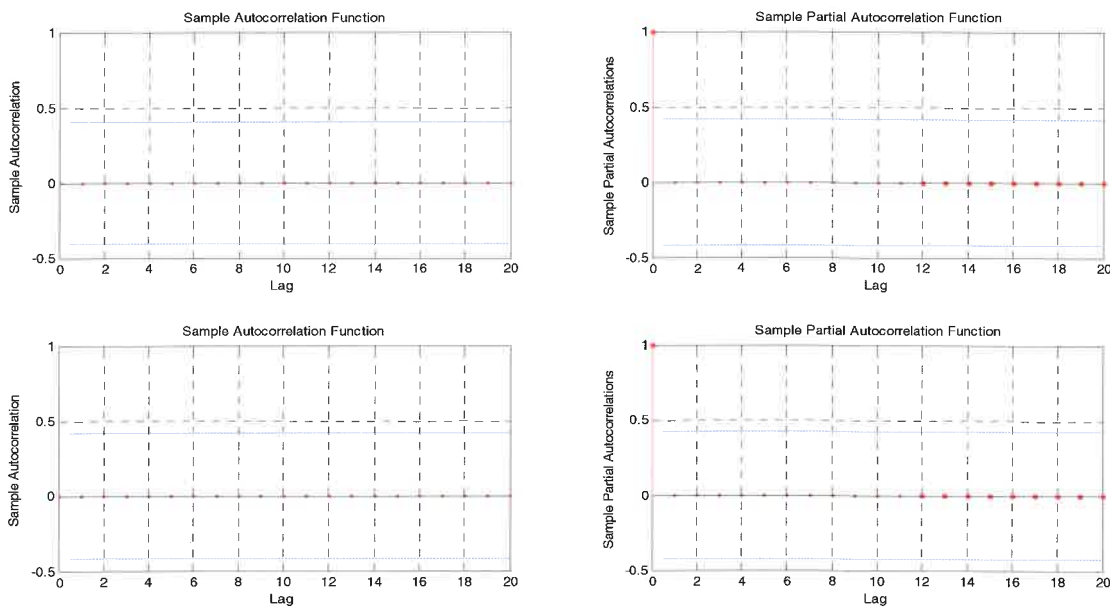
Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Είναι σαφές λοιπόν, από τον συνδυασμό των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και των ελέγχων μοναδιαίας ρίζας, ότι απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών.

Αντίστοιχοι έλεγχοι γίνονται και στη νέα χρονοσειρά που δημιουργήθηκε από την λήψη διαφορών. Από τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων διαπιστώνουμε στασιμότητα της χρονοσειράς. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης.

Με βάση τους παραπάνω ελέγχους η χρονοσειρά των διαφορών είναι στάσιμη και είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του υποδείγματος.

Διερεύνηση στασιμότητας χρονοσειράς βροχόπτωσης

Η χρονοσειρά της βροχόπτωσης εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσης και μερικής αυτοσυσχετίσης. Τα 2 πρώτα διαγράμματα αφορούν στην αρχική χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.28: Διαγράμματα αυτοσυσχετίσης και μερικής αυτοσυσχετίσης χρονοσειράς βροχόπτωσης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 2 και όλες τις λωρίδες

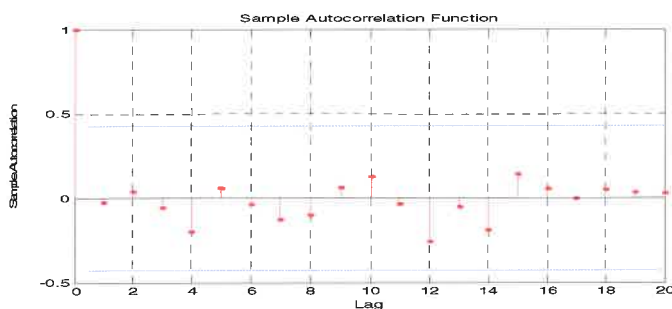
Από τα διαγράμματα είναι σαφές ότι η χρονοσειρά είναι στάσιμη, οπότε δεν απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών και προκρίνεται η λύση της αρχικής χρονοσειράς.

Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επανυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα.

Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Αντίθετα το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Παρατηρούμε ότι οι 2 έλεγχοι μοναδιαίας ρίζας δίνουν αντιφατικά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό η επιλογή χρονοσειράς θα γίνει αποκλειστικά με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων, από την μελέτη των οποίων σαφώς προέκυψε ότι τα αρχικά στοιχεία, η αρχική χρονοσειρά, τείνουν στην στασιμότητα οπότε και επιλέγονται.

Διαγνωστικός έλεγχος

Η καταλληλότητα του υποδείγματος που επιλέγεται ελέγχεται με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων καθώς και τον έλεγχο Ljung – Box. Οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης πρέπει να μην είναι στατιστικά σημαντικοί, ενώ με τον έλεγχο Ljung – Box εξετάζεται το άθροισμα των συντελεστών αυτοσυσχέτισης.

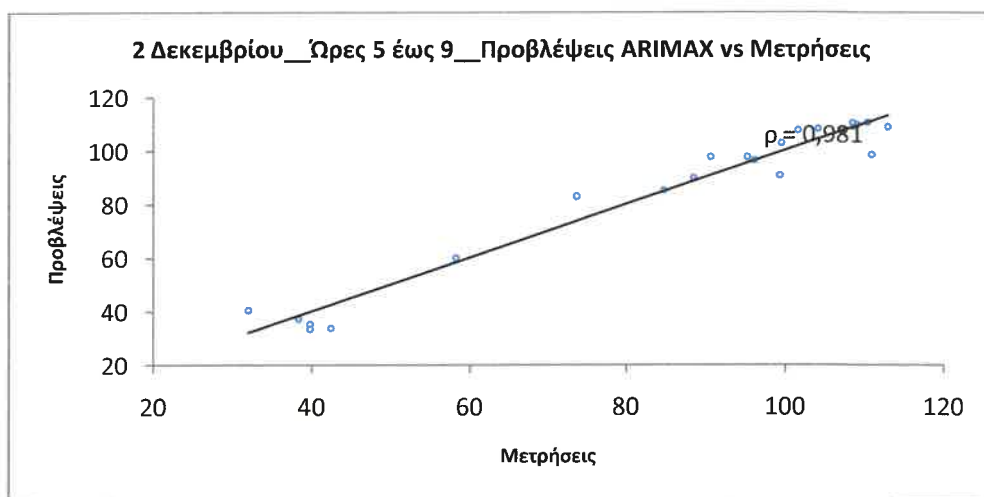


Σχήμα 4.29: Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMAX (2, 1, 1), για την περίοδο 2 και όλες τις λωρίδες

Παρατηρούμε ότι οι αυτοσυσχετίσεις δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επίσης ο έλεγχος Ljung – Box ικανοποιείται. Οπότε το υπόδειγμα ARIMAX (2, 1, 1) κρίνεται κατάλληλο για την παραγωγή προβλέψεων.

Προβλέψεις

Οι προβλέψεις γίνονται εντός δείγματος (in – sample), δηλαδή η περίοδος για την οποία δίνονται οι προβλέψεις ταυτίζεται με την περίοδο υπολογισμού του υποδείγματος. Η αξιολόγηση των προβλέψεων γίνεται με βάση το απόλυτο μέσο σφάλμα (MAE) και το απόλυτο μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE). Έτσι ο δείκτης MAE προκύπτει 4,309 και ο MAPE 6,653 %. Η σύγκριση των πραγματικών τιμών με τις προβλεπόμενες φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.



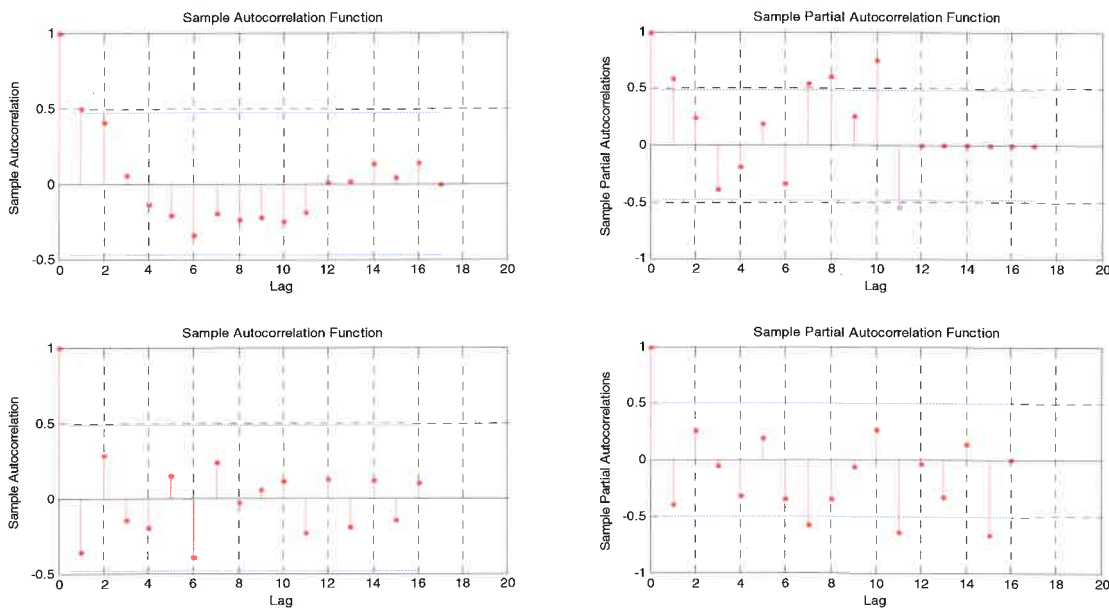
Σχήμα 4.30: Διάγραμμα προβλέψεων ARIMAX – μετρήσεων, για την περίοδο 2 και όλες τις λωρίδες

4.3.5 ΟΛΕΣ ΟΙ ΛΩΡΙΔΕΣ – ΠΕΡΙΟΔΟΣ 3 (9 έως 12)

Διερεύνηση στασιμότητας χρονοσειράς φόρτου

Η χρονοσειρά του φόρτου εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Τα 2 πρώτα διαγράμματα αφορούν

στην αρχική χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.31: Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς φόρτου, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 3 και όλες τις λωρίδες

Από τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων φαίνεται η χρονοσειρά να είναι στάσιμη οπότε να μην απαιτείται η λήψη διαφορών.

Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επαυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα.

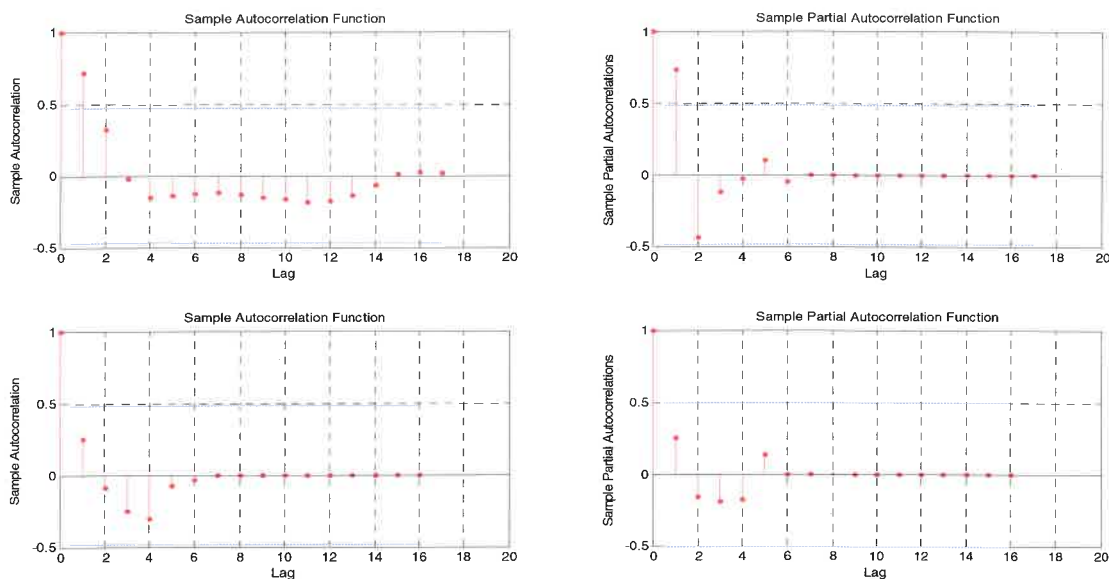
Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Παρατηρούμε ότι και οι δύο έλεγχοι μοναδιαίας ρίζας υποδεικνύουν την λήψη διαφορών, ενώ από το διάγραμμα των αυτοσυσχετίσεων συμπεραίνουμε το αντίθετο. Λαμβάνονται και οι πρώτες διαφορές με σκοπό να ακολουθήσει διερεύνηση.

Αντίστοιχοι έλεγχοι γίνονται και στη νέα χρονοσειρά που δημιουργήθηκε από την λήψη διαφορών. Από τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων φαίνεται η σειρά να τείνει στην στασιμότητα, χωρίς όμως αυτό να είναι ιδιαίτερα σαφές. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης. Με βάση τους παραπάνω ελέγχους φαίνεται και η χρονοσειρά των διαφορών του φόρτου να είναι στάσιμη.

Για την τελική επιλογή, της χρήσης της αρχικής χρονοσειράς ή των πρώτων διαφορών, υπολογίζεται το υπόδειγμα για κάθε μία από τις περιπτώσεις και συγκρίνονται οι προβλέψεις. Έτσι εάν χρησιμοποιηθεί η αρχική χρονοσειρά του φόρτου, οι δείκτες αξιολόγησης είναι $MAE = 4,221$ και $MAPE = 7,760 \%$. Αντίθετα εάν χρησιμοποιηθεί η ολοκληρωμένη σειρά του φόρτου προκύπτει $MAE = 4,773$ και $MAPE = 9,467$. Είναι λογικό λοιπόν να επιλεγεί η αρχική χρονοσειρά του φόρτου για τον υπολογισμό του υποδείγματος.

Διερεύνηση στασιμότητας χρονοσειράς βροχόπτωσης

Η χρονοσειρά της βροχόπτωσης εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσης και μερικής αυτοσυσχετίσης.



Σχήμα 4.32: Διαγράμματα αυτοσυσχετίσης και μερικής αυτοσυσχετίσης χρονοσειράς βροχόπτωσης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 3 και όλες τις λωρίδες

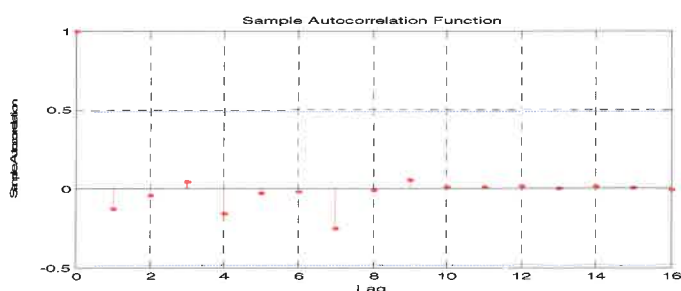
Από τα διαγράμματα είναι σαφές ότι η χρονοσειρά είναι στάσιμη, οπότε δεν απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών και προκρίνεται η λύση της αρχικής χρονοσειράς.

Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επαυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα.

Ο έλεγχος των Dickey – Fuller καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Αντίθετα ο έλεγχος των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin υποδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Παρατηρούμε ότι οι 2 έλεγχοι μοναδιαίας ρίζας δίνουν αντιφατικά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό η επιλογή χρονοσειράς θα γίνει αποκλειστικά με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων, από την μελέτη των οποίων σαφώς προέκυψε ότι τα αρχικά στοιχεία, η αρχική χρονοσειρά, τείνουν στην στασιμότητα οπότε και επιλέγονται.

Διαγνωστικός έλεγχος

Η καταλληλότητα του υποδείγματος που επιλέγεται ελέγχεται με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων καθώς και τον έλεγχο Ljung – Box. Οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης πρέπει να μην είναι στατιστικά σημαντικοί, ενώ με τον έλεγχο Ljung – Box εξετάζεται το άθροισμα των συντελεστών αυτοσυσχέτισης.

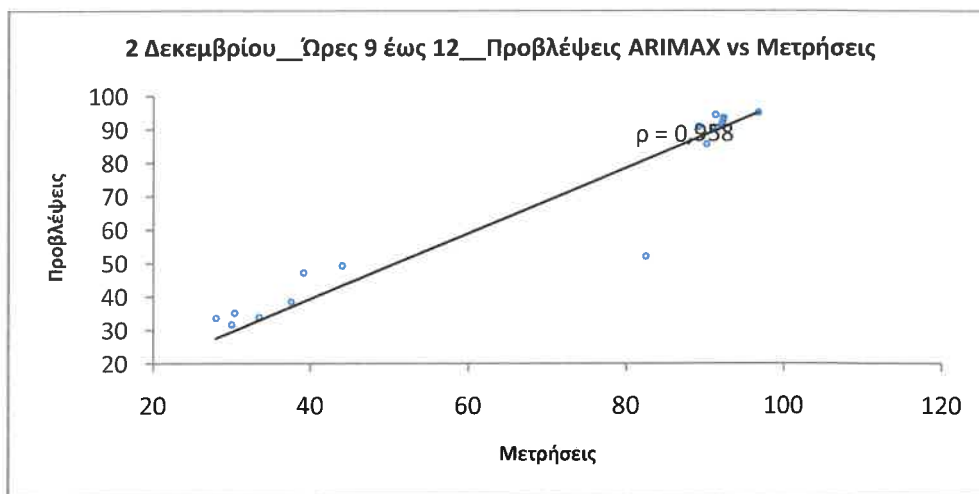


Σχήμα 4.33: Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMAX (3, 1, 2), για την περίοδο 3 και όλες τις λωρίδες

Παρατηρούμε ότι οι αυτοσυσχετίσεις δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επίσης ο έλεγχος Ljung – Box ικανοποιείται. Οπότε το υπόδειγμα ARIMAX (3, 1, 2) κρίνεται κατάλληλο για την παραγωγή προβλέψεων.

Προβλέψεις

Οι προβλέψεις γίνονται εντός δείγματος (in – sample), δηλαδή η περίοδος για την οποία δίνονται οι προβλέψεις ταυτίζεται με την περίοδο υπολογισμού του υποδείγματος. Η αξιολόγηση των προβλέψεων γίνεται με βάση το απόλυτο μέσο σφάλμα (MAE) και το απόλυτο μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE). Έτσι, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο δείκτης MAE προκύπτει 4,221 και ο MAPE 7,760 %. Η σύγκριση των πραγματικών τιμών με τις προβλεπόμενες φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.



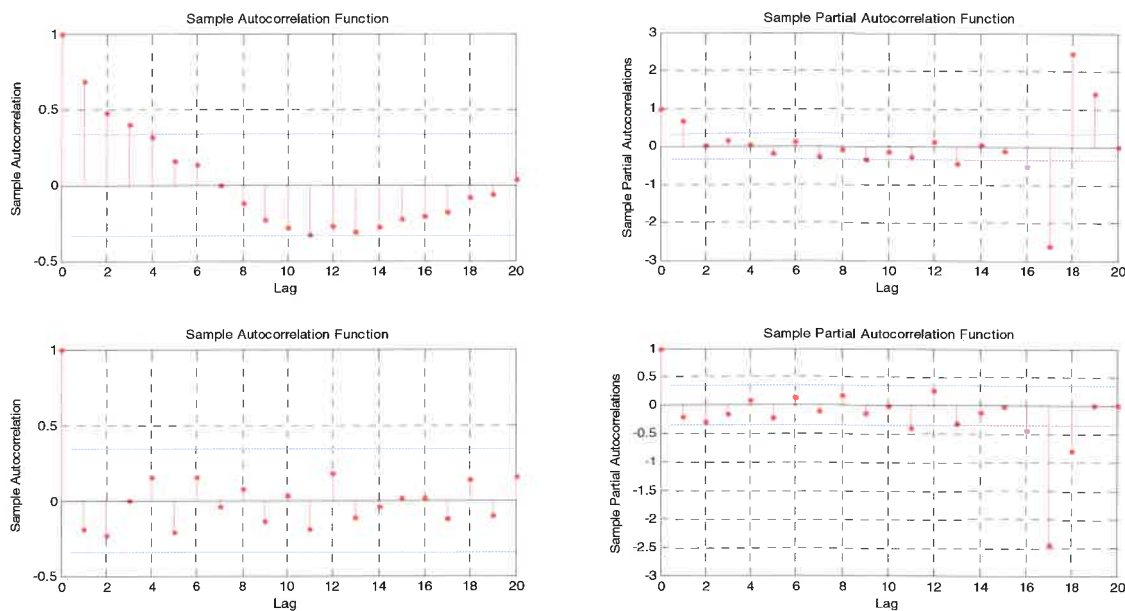
Σχήμα 4.34: Διάγραμμα προβλέψεων ARIMAX – μετρήσεων, για την περίοδο 3 και όλες τις λωρίδες

4.3.6 ΟΛΕΣ ΟΙ ΛΩΡΙΔΕΣ – ΠΕΡΙΟΔΟΣ 4 (12 έως 18)

Διερεύνηση στασιμότητας χρονοσειράς φόρτου

Η χρονοσειρά του φόρτου εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Τα 2 πρώτα διαγράμματα αφορούν

στην αρχική χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.35: Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς φόρτου, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 4 και όλες τις λωρίδες

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η χρονοσειρά δεν είναι στάσιμη, οπότε απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών. Όπως φαίνεται από το κάτω μέρος του σχήματος η νέα χρονοσειρά φαίνεται να είναι στάσιμη.

Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επαυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt - Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα.

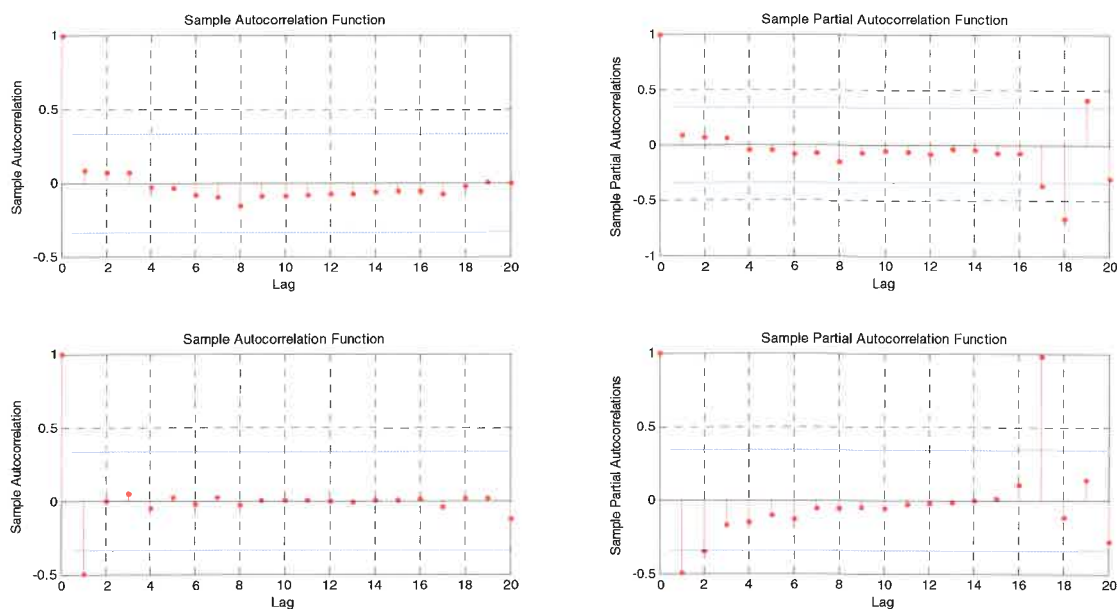
Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt - Shin επίσης καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Είναι σαφές λοιπόν, από τον συνδυασμό των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και των ελέγχων μοναδιαίας ρίζας, ότι απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών.

Αντίστοιχοι έλεγχοι γίνονται και στη νέα χρονοσειρά που δημιουργήθηκε από την λήψη διαφορών. Από τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων διαπιστώνουμε στασιμότητα της χρονοσειράς. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης.

Με βάση τους παραπάνω ελέγχους η χρονοσειρά των διαφορών είναι στάσιμη και είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του υποδείγματος.

Διερεύνηση στασιμότητας χρονοσειράς βροχόπτωσης

Η χρονοσειρά της βροχόπτωσης εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσης και μερικής αυτοσυσχετίσης. Τα 2 πρώτα διαγράμματα αφορούν στην αρχική χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.36: Διαγράμματα αυτοσυσχετίσης και μερικής αυτοσυσχετίσης χρονοσειράς βροχόπτωσης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 4 και όλες τις λωρίδες

Από τα διαγράμματα είναι σαφές ότι η χρονοσειρά είναι στάσιμη, οπότε δεν απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών και προκρίνεται η λύση της αρχικής χρονοσειράς.

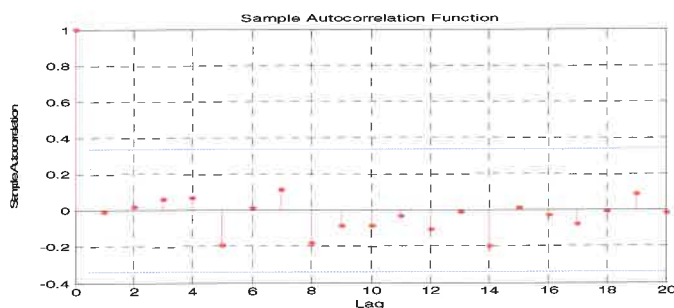
Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επαυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα.

Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Είναι σαφές λοιπόν, από τον συνδυασμό των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και των ελέγχων μοναδιαίας ρίζας, ότι δεν απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών.

Με βάση τους παραπάνω ελέγχους η χρονοσειρά είναι στάσιμη και είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του υποδείγματος.

Διαγνωστικός έλεγχος

Η καταλληλότητα του υποδείγματος που επιλέγεται ελέγχεται με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων καθώς και τον έλεγχο Ljung – Box. Οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης πρέπει να μην είναι στατιστικά σημαντικοί, ενώ με τον έλεγχο Ljung – Box εξετάζεται το άθροισμα των συντελεστών αυτοσυσχέτισης.

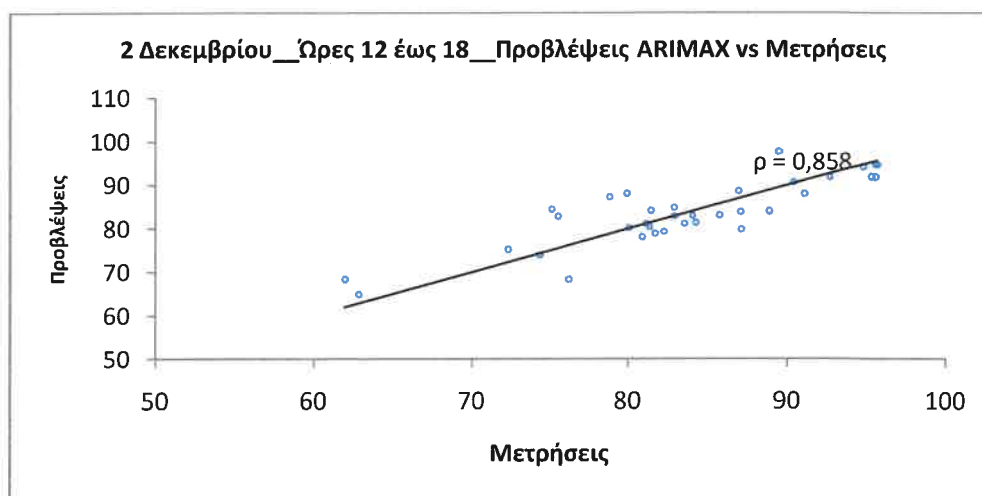


Σχήμα 4.37: Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMAX (1, 1, 2), για την περίοδο 4 και όλες τις λωρίδες

Παρατηρούμε ότι οι αυτοσυσχετίσεις δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επίσης ο έλεγχος Ljung – Box ικανοποιείται. Οπότε το υπόδειγμα ARIMAX (1, 1, 2) κρίνεται κατάλληλο για την παραγωγή προβλέψεων.

Προβλέψεις

Οι προβλέψεις γίνονται εντός δείγματος (in – sample), δηλαδή η περίοδος για την οποία δίνονται οι προβλέψεις ταυτίζεται με την περίοδο υπολογισμού του υποδείγματος. Η αξιολόγηση των προβλέψεων γίνεται με βάση το απόλυτο μέσο σφάλμα (MAE) και το απόλυτο μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE). Έτσι ο δείκτης MAE προκύπτει 3,256 και ο MAPE 4,040 %. Η σύγκριση των πραγματικών τιμών με τις προβλεπόμενες φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.



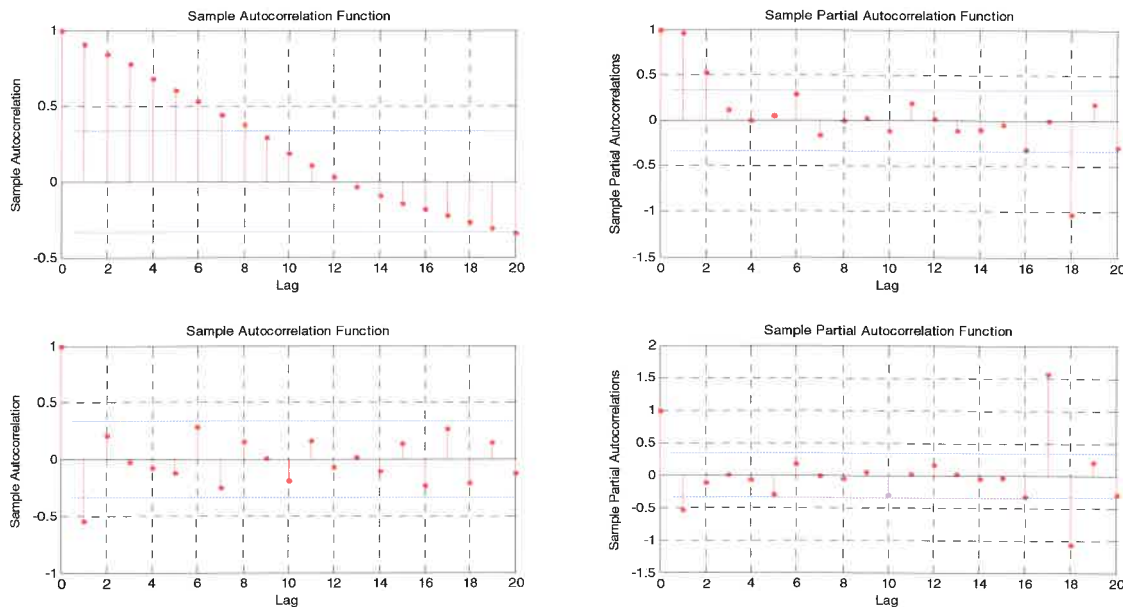
Σχήμα 4.38: Διάγραμμα προβλέψεων ARIMAX – μετρήσεων, για την περίοδο 4 και όλες τις λωρίδες

4.3.7 ΟΛΕΣ ΟΙ ΛΩΡΙΔΕΣ – ΠΕΡΙΟΔΟΣ 5 (18 έως 24)

Διερεύνηση στασιμότητας χρονοσειράς φόρτου

Η χρονοσειρά του φόρτου εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Τα 2 πρώτα διαγράμματα αφορούν

στην αρχική χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.39: Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς φόρτου, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 5 και όλες τις λωρίδες

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η χρονοσειρά δεν είναι στάσιμη, οπότε απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών. Όπως φαίνεται από το κάτω μέρος του σχήματος η νέα χρονοσειρά φαίνεται να είναι στάσιμη.

Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επαυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα.

Το αποτέλεσμα του ελέγχου των Dickey – Fuller καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Αντίθετα ο έλεγχος των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin υποδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας.

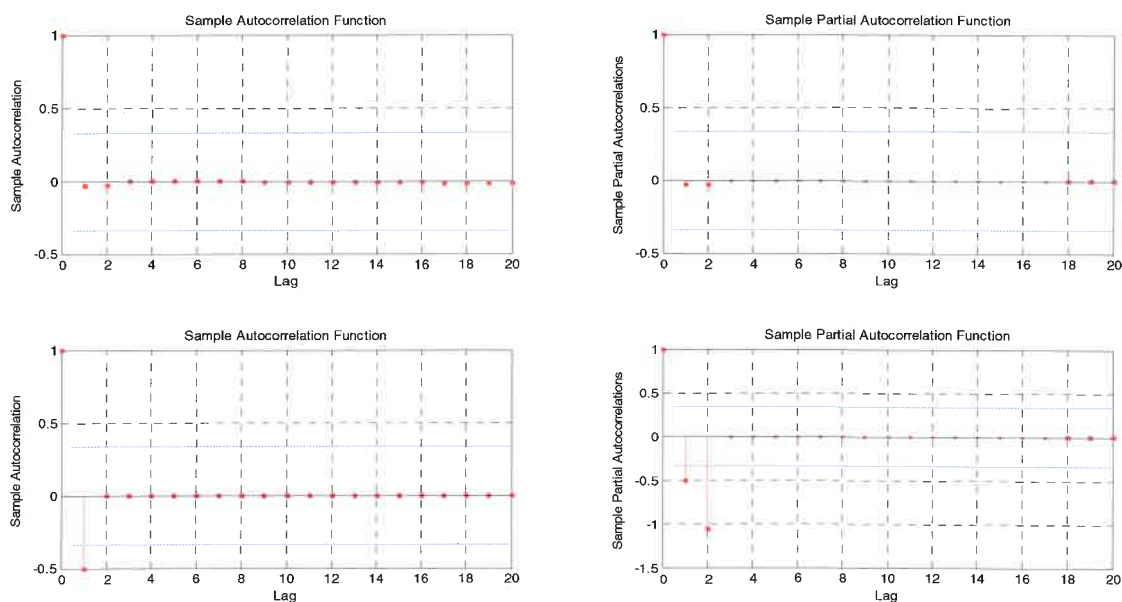
Παρατηρούμε ότι οι δύο έλεγχοι μοναδιαίας ρίζας δίνουν αντιφατικά αποτελέσματα. Έτσι η επιλογή γίνεται με βάση τα διαγράμματα των αυτοσυσχετίσεων. Έτσι επιλέγεται η λήψη πρώτων διαφορών για να επιτευχθεί η στασιμότητα.

Αντίστοιχοι έλεγχοι γίνονται και στη νέα χρονοσειρά που δημιουργήθηκε από την λήψη διαφορών. Από τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων διαπιστώνουμε στασιμότητα της χρονοσειράς. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt - Shin επίσης.

Με βάση τους παραπάνω ελέγχους η χρονοσειρά των διαφορών είναι στάσιμη και είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του υποδείγματος.

Διερεύνηση στασιμότητας χρονοσειράς βροχόπτωσης

Η χρονοσειρά της βροχόπτωσης εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσης και μερικής αυτοσυσχετίσης. Τα 2 πρώτα διαγράμματα αφορούν στην αρχική χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.40: Διαγράμματα αυτοσυσχετίσης και μερικής αυτοσυσχετίσης χρονοσειράς βροχόπτωσης, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την περίοδο 5 και όλες τις λωρίδες

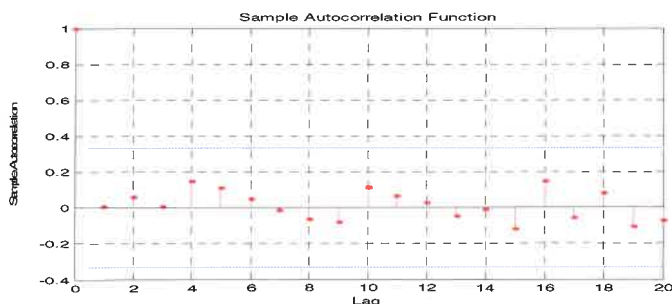
Από τα διαγράμματα είναι σαφές ότι η χρονοσειρά είναι στάσιμη, οπότε δεν απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών και προκρίνεται η λύση της αρχικής χρονοσειράς.

Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επαυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα.

Τα αποτελέσματα και των δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας καταδεικνύουν την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Οπότε η χρονοσειρά είναι στάσιμη και είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του υποδείγματος.

Διαγνωστικός έλεγχος

Η καταλληλότητα του υποδείγματος που επιλέγεται ελέγχεται με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων καθώς και τον έλεγχο Ljung – Box. Οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης πρέπει να μην είναι στατιστικά σημαντικοί, ενώ με τον έλεγχο Ljung – Box εξετάζεται το άθροισμα των συντελεστών αυτοσυσχέτισης.

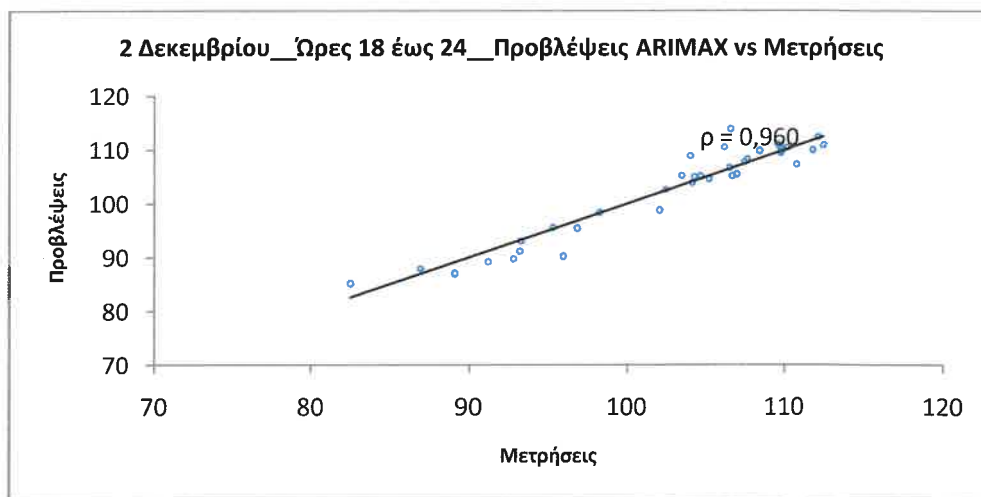


Σχήμα 4.41: Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMAX (2, 1, 1), για την περίοδο 5 και όλες τις λωρίδες

Παρατηρούμε ότι οι αυτοσυσχετίσεις δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επίσης ο έλεγχος Ljung – Box ικανοποιείται. Οπότε το υπόδειγμα ARIMAX (2, 1, 1) κρίνεται κατάλληλο για την παραγωγή προβλέψεων.

Προβλέψεις

Οι προβλέψεις γίνονται εντός δείγματος (in – sample), δηλαδή η περίοδος για την οποία δίνονται οι προβλέψεις ταυτίζεται με την περίοδο υπολογισμού του υποδείγματος. Η αξιολόγηση των προβλέψεων γίνεται με βάση το απόλυτο μέσο σφάλμα (MAE) και το απόλυτο μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE). Έτσι ο δείκτης MAE προκύπτει 1,662 και ο MAPE 1,644 %. Η σύγκριση των πραγματικών τιμών με τις προβλεπόμενες φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 4.42: Διάγραμμα προβλέψεων ARIMAX – μετρήσεων, για την περίοδο 5 και όλες τις λωρίδες

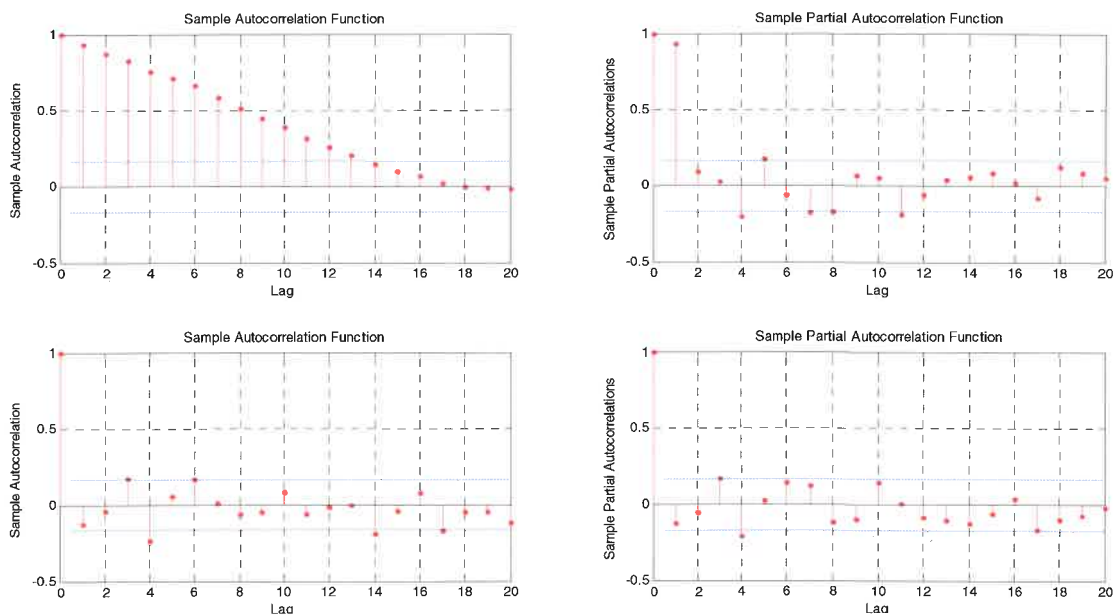
4.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΩΝ AR(I)MAX ΑΝΑ ΛΩΡΙΔΑ

4.4.1 ΛΩΡΙΔΑ 1 – ΟΛΕΣ ΟΙ ΠΕΡΙΟΔΟΙ

Διερεύνηση στασιμότητας χρονοσειράς ταχύτητας

Η χρονοσειρά της ταχύτητας εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Τα 2 πρώτα διαγράμματα αφορούν

στην αρχική χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.43: Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς ταχύτητας, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την λωρίδα 1 και όλες τις περιόδους

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η χρονοσειρά δεν είναι στάσιμη, οπότε απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών. Όπως φαίνεται από το κάτω μέρος του σχήματος η νέα χρονοσειρά φαίνεται να είναι στάσιμη.

Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επανυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα.

Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Είναι σαφές λοιπόν, από τον συνδυασμό

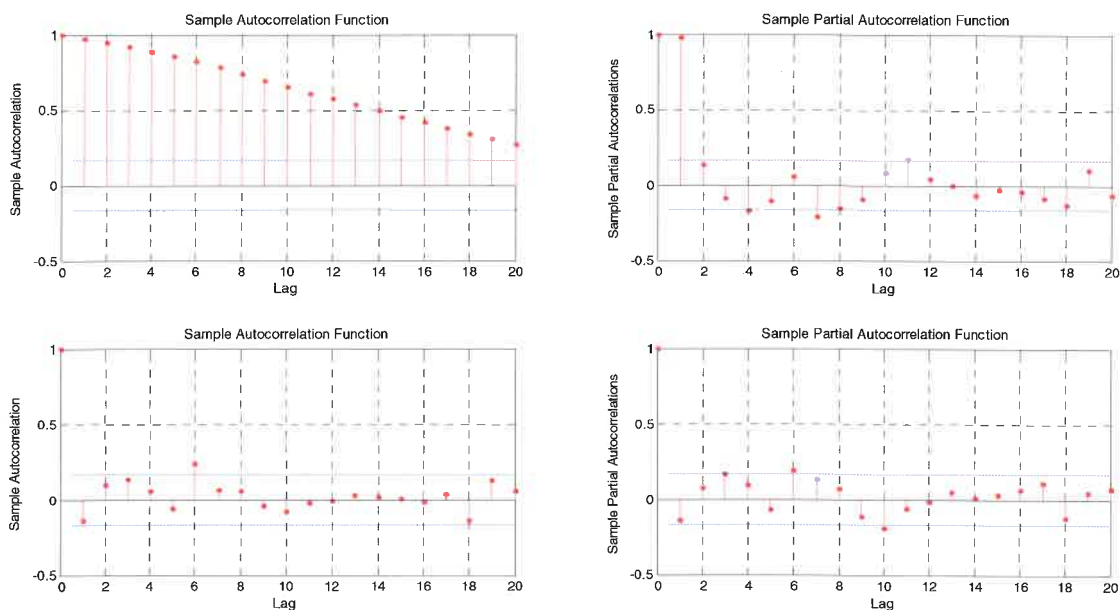
των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και των ελέγχων μοναδιαίας ρίζας, ότι απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών.

Αντίστοιχοι έλεγχοι γίνονται και στη νέα χρονοσειρά που δημιουργήθηκε από την λήψη διαφορών. Από τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων διαπιστώνουμε στασιμότητα της χρονοσειράς. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης.

Με βάση τους παραπάνω ελέγχους η χρονοσειρά των διαφορών είναι στάσιμη και είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του υποδείγματος.

Διερεύνηση στασιμότητας χρονοσειράς φόρτου

Η χρονοσειρά του φόρτου εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Τα 2 πρώτα διαγράμματα αφορούν στην αρχική χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.44: Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς φόρτου, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την λωρίδα 1 και όλες τις περιόδους

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η χρονοσειρά δεν είναι στάσιμη, οπότε απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών. Όπως φαίνεται από το κάτω μέρος του σχήματος η νέα χρονοσειρά φαίνεται να είναι στάσιμη.

Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επαυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα.

Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Είναι σαφές λοιπόν, από τον συνδυασμό των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και των ελέγχων μοναδιαίας ρίζας, ότι απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών.

Αντίστοιχοι έλεγχοι γίνονται και στη νέα χρονοσειρά που δημιουργήθηκε από την λήψη διαφορών. Από τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων διαπιστώνουμε στασιμότητα της χρονοσειράς. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης.

Με βάση τους παραπάνω ελέγχους η χρονοσειρά των διαφορών είναι στάσιμη και είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του υποδείγματος.

Διερεύνηση στασιμότητας χρονοσειράς βροχόπτωσης

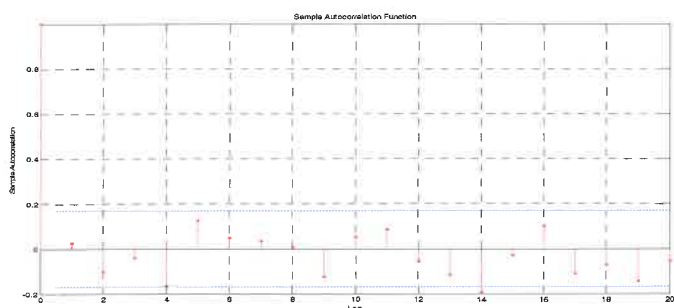
Όπως προέκυψε από την διερεύνηση στην παράγραφο 4.3.2, η χρονοσειρά της βροχόπτωσης είναι στάσιμη.

Επιλογή της τάξης του υποδείγματος

Από τα διαγράμματα των αυτοσυσχετίσεων της χρονοσειράς της ταχύτητας προσεγγίζεται αρχικά το υπόδειγμα ως AR (1). Με αφετηρία αυτό το υπόδειγμα, εφαρμόστηκαν άλλα μεγαλύτερης τάξης και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με του AR (1). Η σύγκριση έγινε με βάση τους δείκτες αξιολόγησης προβλέψεων MAPE (μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα) και MAE (μέσο απόλυτο σφάλμα). Με βάση αυτά τελικά επελέγη υπόδειγμα ARIMAX (3, 1, 2).

Διαγνωστικός έλεγχος

Η καταλληλότητα του υποδείγματος που επιλέγεται ελέγχεται με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων καθώς και τον έλεγχο Ljung – Box. Οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης πρέπει να μην είναι στατιστικά σημαντικοί, ενώ με τον έλεγχο Ljung – Box εξετάζεται το άθροισμα των συντελεστών αυτοσυσχέτισης.

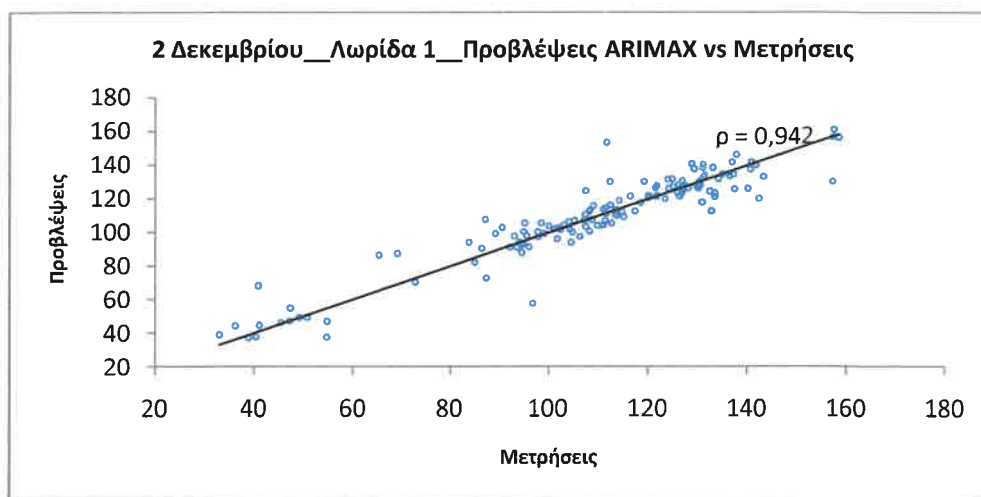


Σχήμα 4.45: Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMAX (3, 1, 2), για την λωρίδα 1 και όλες τις περιόδους

Παρατηρούμε ότι οι αυτοσυσχετίσεις δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Εντούτοις, πρέπει να σημειωθεί ότι στην προκειμένη περίπτωση ο έλεγχος Ljung – Box δεν ικανοποιείται. Επισημαίνεται ότι υπολογίστηκαν υποδείγματα τόσο ανώτερης όσο και κατώτερης τάξης, αλλά δεν κατέστη δυνατή η ικανοποίηση του ελέγχου Ljung – Box. Έτσι επελέγη τελικά το συγκεκριμένο υπόδειγμα ARIMAX (3, 1, 2), το οποίο δίνει τις βέλτιστες προβλέψεις.

Προβλέψεις

Οι προβλέψεις γίνονται εντός δείγματος (in – sample), δηλαδή η περίοδος για την οποία δίνονται οι προβλέψεις ταυτίζεται με την περίοδο υπολογισμού του υποδείγματος. Η αξιολόγηση των προβλέψεων γίνεται με βάση το απόλυτο μέσο σφάλμα (MAE) και το απόλυτο μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE). Έτσι ο δείκτης MAE προκύπτει 6,014 και ο MAPE 6,330 %. Η σύγκριση των πραγματικών τιμών με τις προβλεπόμενες φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.

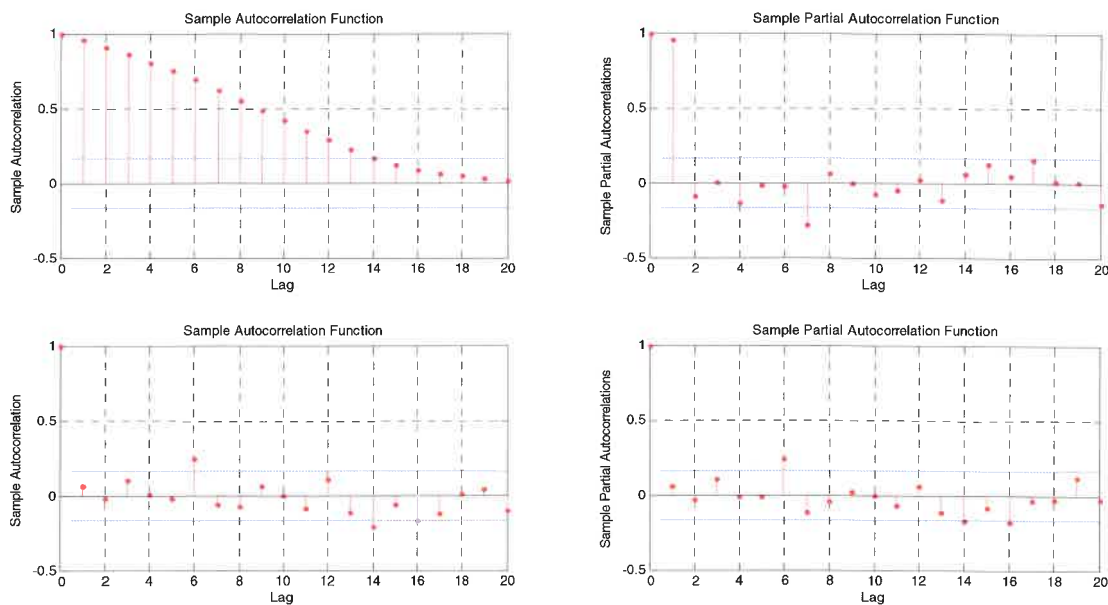


Σχήμα 4.46: Διάγραμμα προβλέψεων ARIMAX – μετρήσεων, για την λωρίδα 1 και όλες τις περιόδους

4.4.2 ΛΩΡΙΔΑ 2 – ΟΛΕΣ ΟΙ ΠΕΡΙΟΔΟΙ

Διερεύνηση στασιμότητας χρονοσειράς ταχύτητας

Η χρονοσειρά της ταχύτητας εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Τα 2 πρώτα διαγράμματα αφορούν στην αρχική χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.47: Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς ταχύτητας, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την λωρίδα 2 και όλες τις περιόδους

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η χρονοσειρά δεν είναι στάσιμη, οπότε απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών. Όπως φαίνεται από το κάτω μέρος του σχήματος η νέα χρονοσειρά φαίνεται να είναι στάσιμη.

Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επαυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt - Shin (KPSStest). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSStest είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα.

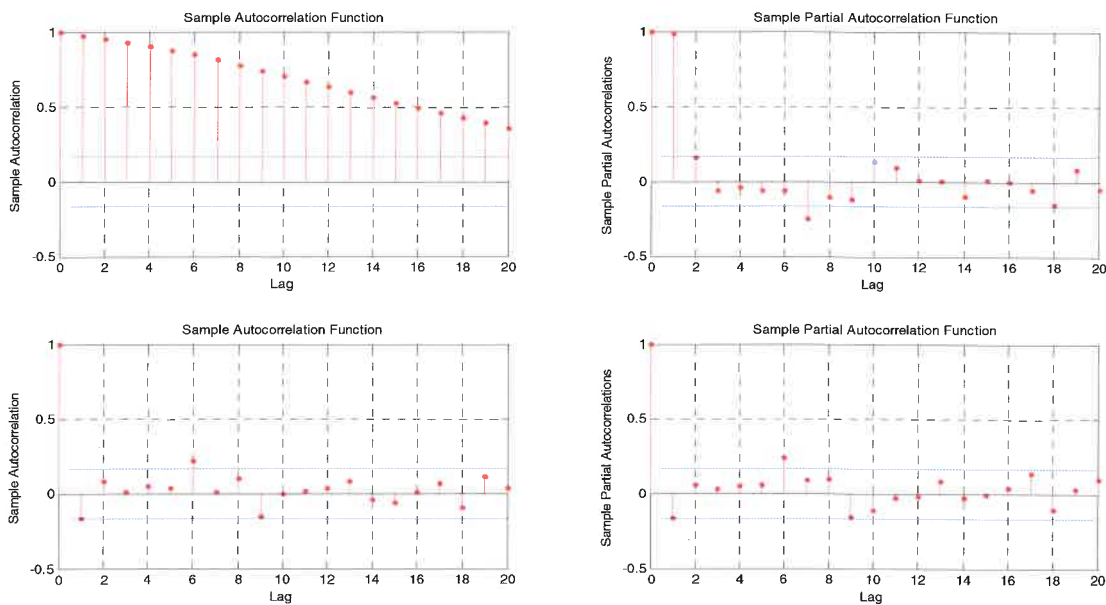
Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt - Shin επίσης καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Είναι σαφές λοιπόν, από τον συνδυασμό των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και των ελέγχων μοναδιαίας ρίζας, ότι απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών.

Αντίστοιχοι έλεγχοι γίνονται και στη νέα χρονοσειρά που δημιουργήθηκε από την λήψη διαφορών. Από τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων διαπιστώνουμε στασιμότητα της χρονοσειράς. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης.

Με βάση τους παραπάνω ελέγχους η χρονοσειρά των διαφορών είναι στάσιμη και είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του υποδείγματος.

Διερεύνηση στασιμότητας χρονοσειράς φόρτου

Η χρονοσειρά του φόρτου εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσης και μερικής αυτοσυσχετίσης. Τα 2 πρώτα διαγράμματα αφορούν στην αρχική χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.48: Διαγράμματα αυτοσυσχετίσης και μερικής αυτοσυσχετίσης χρονοσειράς φόρτου, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την λωρίδα 2 και όλες τις περιόδους

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η χρονοσειρά δεν είναι στάσιμη, οπότε απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών. Όπως φαίνεται από το κάτω μέρος του σχήματος η νέα χρονοσειρά φαίνεται να είναι στάσιμη.

Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επαυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα.

Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Είναι σαφές λοιπόν, από τον συνδυασμό των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και των ελέγχων μοναδιαίας ρίζας, ότι απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών.

Αντίστοιχοι έλεγχοι γίνονται και στη νέα χρονοσειρά που δημιουργήθηκε από την λήψη διαφορών. Από τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων διαπιστώνουμε στασιμότητα της χρονοσειράς. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης.

Με βάση τους παραπάνω ελέγχους η χρονοσειρά των διαφορών είναι στάσιμη και είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του υποδείγματος.

Διερεύνηση στασιμότητας χρονοσειράς βροχόπτωσης

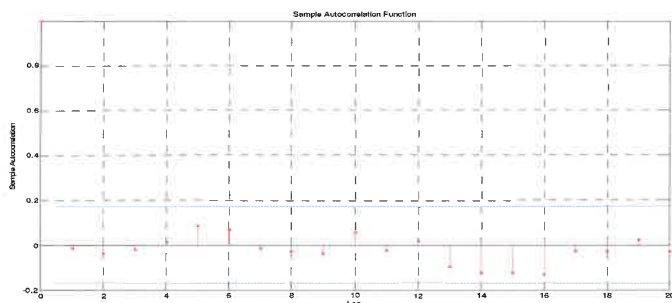
Όπως προέκυψε από την διερεύνηση στην παράγραφο 4.3.2, η χρονοσειρά της βροχόπτωσης είναι στάσιμη.

Επιλογή της τάξης του υποδείγματος

Από τα διαγράμματα των αυτοσυσχετίσεων της χρονοσειράς της ταχύτητας προσεγγίζεται αρχικά το υπόδειγμα ως AR (1). Με αφετηρία αυτό το υπόδειγμα, εφαρμόστηκαν άλλα μεγαλύτερης τάξης και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με του AR (1). Η σύγκριση έγινε με βάση τους δείκτες αξιολόγησης προβλέψεων MAPE (μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα) και MAE (μέσο απόλυτο σφάλμα). Με βάση αυτά τελικά επελέγη υπόδειγμα ARIMAX (3, 1, 4).

Διαγνωστικός έλεγχος

Η καταλληλότητα του υποδείγματος που επιλέγεται ελέγχεται με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων καθώς και τον έλεγχο Ljung – Box. Οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης πρέπει να μην είναι στατιστικά σημαντικοί, ενώ με τον έλεγχο Ljung – Box εξετάζεται το άθροισμα των συντελεστών αυτοσυσχέτισης.



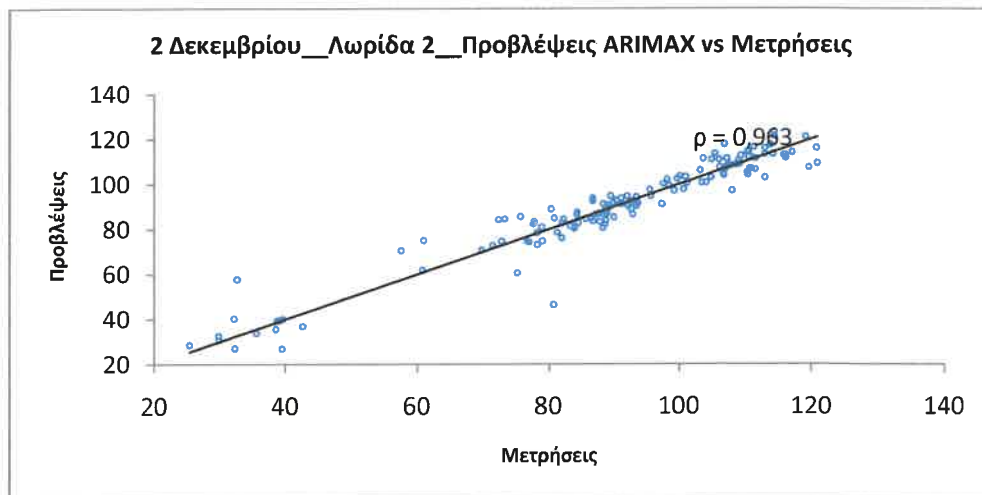
Σχήμα 4.49: Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMAX (3, 1, 4), για την λωρίδα 2 και όλες τις περιόδους

Παρατηρούμε ότι οι αυτοσυσχετίσεις δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επίσης ο έλεγχος Ljung – Box ικανοποιείται. Οπότε το υπόδειγμα ARIMAX (3, 1, 4) κρίνεται κατάλληλο για την παραγωγή προβλέψεων.

Προβλέψεις

Οι προβλέψεις γίνονται εντός δείγματος (in – sample), δηλαδή η περίοδος για την οποία δίνονται οι προβλέψεις ταυτίζεται με την περίοδο υπολογισμού του υποδείγματος. Η αξιολόγηση των προβλέψεων γίνεται με βάση το απόλυτο μέσο

σφάλμα (MAE) και το απόλυτο μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE). Έτσι ο δείκτης MAE προκύπτει 4,080 και ο MAPE 5,427 %. Η σύγκριση των πραγματικών τιμών με τις προβλεπόμενες φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.

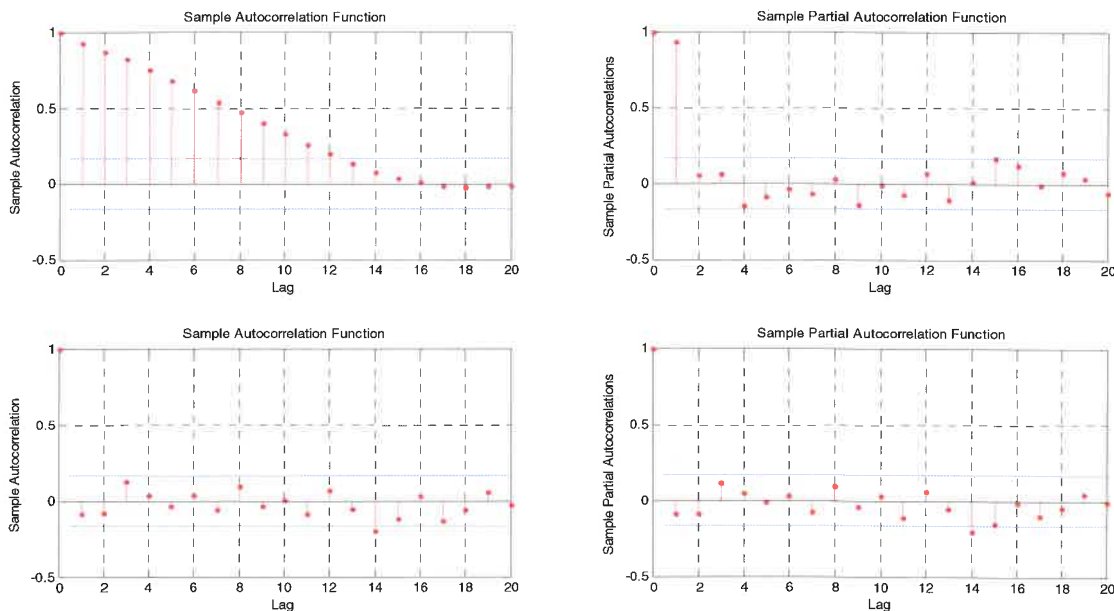


Σχήμα 4.50: Διάγραμμα προβλέψεων ARIMAX – μετρήσεων, για την λωρίδα 2 και όλες τις περιόδους

4.4.3 ΛΩΡΙΔΑ 3 – ΟΛΕΣ ΟΙ ΠΕΡΙΟΔΟΙ

Διερεύνηση στασιμότητας χρονοσειράς ταχύτητας

Η χρονοσειρά της ταχύτητας εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης. Τα 2 πρώτα διαγράμματα αφορούν στην αρχική χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.51: Διαγράμματα αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης χρονοσειράς ταχύτητας, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την λωρίδα 3 και όλες τις περιόδους

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η χρονοσειρά δεν είναι στάσιμη, οπότε απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών. Όπως φαίνεται από το κάτω μέρος του σχήματος η νέα χρονοσειρά φαίνεται να είναι στάσιμη.

Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επαυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt - Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα.

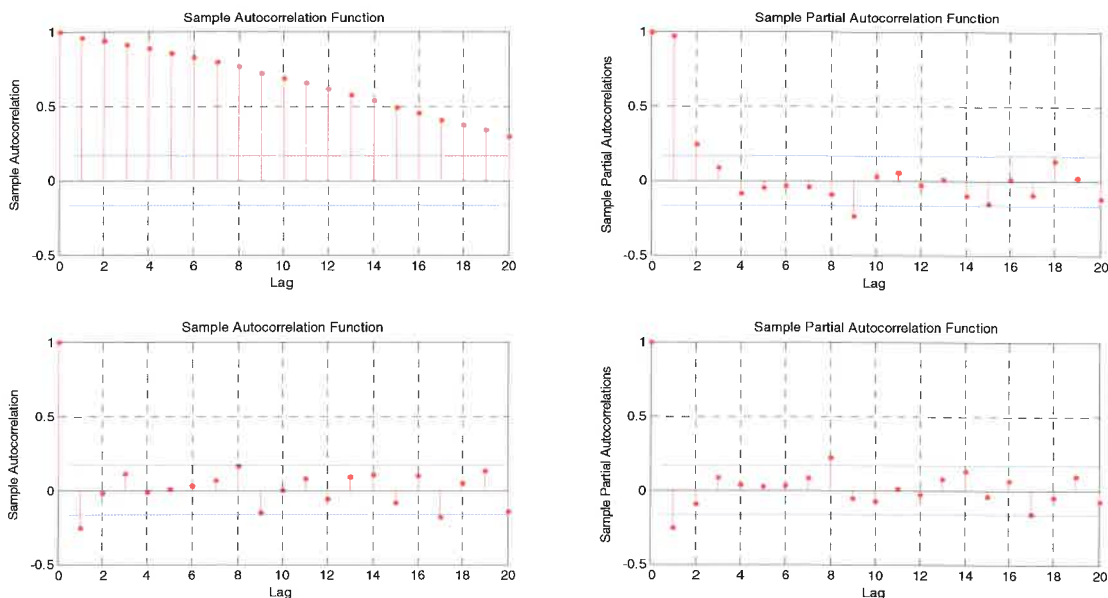
Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt - Shin επίσης καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Είναι σαφές λοιπόν, από τον συνδυασμό των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και των ελέγχων μοναδιαίας ρίζας, ότι απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών.

Αντίστοιχοι έλεγχοι γίνονται και στη νέα χρονοσειρά που δημιουργήθηκε από την λήψη διαφορών. Από τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων διαπιστώνουμε στασιμότητα της χρονοσειράς. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης.

Με βάση τους παραπάνω ελέγχους η χρονοσειρά των διαφορών είναι στάσιμη και είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του υποδείγματος.

Διερεύνηση στασιμότητας χρονοσειράς φόρτου

Η χρονοσειρά του φόρτου εξετάζεται για στασιμότητα με βάση τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσης και μερικής αυτοσυσχετίσης. Τα 2 πρώτα διαγράμματα αφορούν στην αρχική χρονοσειρά και τα 2 επόμενα στις πρώτες διαφορές, ώστε να φανεί ποια περίπτωση είναι η βέλτιστη από άποψη στασιμότητας.



Σχήμα 4.52: Διαγράμματα αυτοσυσχετίσης και μερικής αυτοσυσχετίσης χρονοσειράς φόρτου, αρχικών στοιχείων (επάνω) και πρώτων διαφορών (κάτω), για την λωρίδα 3 και όλες τις περιόδους

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η χρονοσειρά δεν είναι στάσιμη, οπότε απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών. Όπως φαίνεται από το κάτω μέρος του σχήματος η νέα χρονοσειρά φαίνεται να είναι στάσιμη.

Επιπρόσθετα στην συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, γίνεται χρήση και δύο ελέγχων μοναδιαίας ρίζας (unit root tests), του επαυξημένου ελέγχου των Dickey – Fuller (Augmented Dickey – Fuller test) και του ελέγχου των Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin (KPSS test). Στο πρώτο στάδιο ο έλεγχος γίνεται στα αρχικά δεδομένα. Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου Dickey – Fuller είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Η μηδενική υπόθεση του KPSS test είναι ότι τα δεδομένα είναι στάσιμα.

Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης καταδεικνύει την ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Είναι σαφές λοιπόν, από τον συνδυασμό των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και των ελέγχων μοναδιαίας ρίζας, ότι απαιτείται η λήψη πρώτων διαφορών.

Αντίστοιχοι έλεγχοι γίνονται και στη νέα χρονοσειρά που δημιουργήθηκε από την λήψη διαφορών. Από τα διαγράμματα αυτοσυσχετίσεων διαπιστώνουμε στασιμότητα της χρονοσειράς. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Dickey – Fuller καταδεικνύει την μη ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας. Το αποτέλεσμα του ελέγχου Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin επίσης.

Με βάση τους παραπάνω ελέγχους η χρονοσειρά των διαφορών είναι στάσιμη και είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του υποδείγματος.

Διερεύνηση στασιμότητας χρονοσειράς βροχόπτωσης

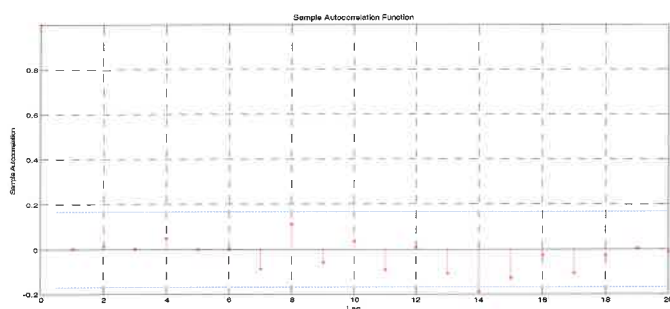
Όπως προέκυψε από την διερεύνηση στην παράγραφο 4.3.2, η χρονοσειρά της βροχόπτωσης είναι στάσιμη.

Επιλογή της τάξης του υποδείγματος

Από τα διαγράμματα των αυτοσυσχετίσεων της χρονοσειράς της ταχύτητας προσεγγίζεται αρχικά το υπόδειγμα ως AR (1). Με αφετηρία αυτό το υπόδειγμα, εφαρμόστηκαν άλλα μεγαλύτερης τάξης και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με του AR (1). Η σύγκριση έγινε με βάση τους δείκτες αξιολόγησης προβλέψεων MAPE (μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα) και MAE (μέσο απόλυτο σφάλμα). Με βάση αυτά τελικά επελέγη υπόδειγμα ARIMAX (3, 1, 0).

Διαγνωστικός έλεγχος

Η καταλληλότητα του υποδείγματος που επιλέγεται ελέγχεται με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων καθώς και τον έλεγχο Ljung – Box. Οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων πρέπει να μην είναι στατιστικά σημαντικοί, ενώ με τον έλεγχο Ljung – Box εξετάζεται το άθροισμα των συντελεστών αυτοσυσχέτισης.



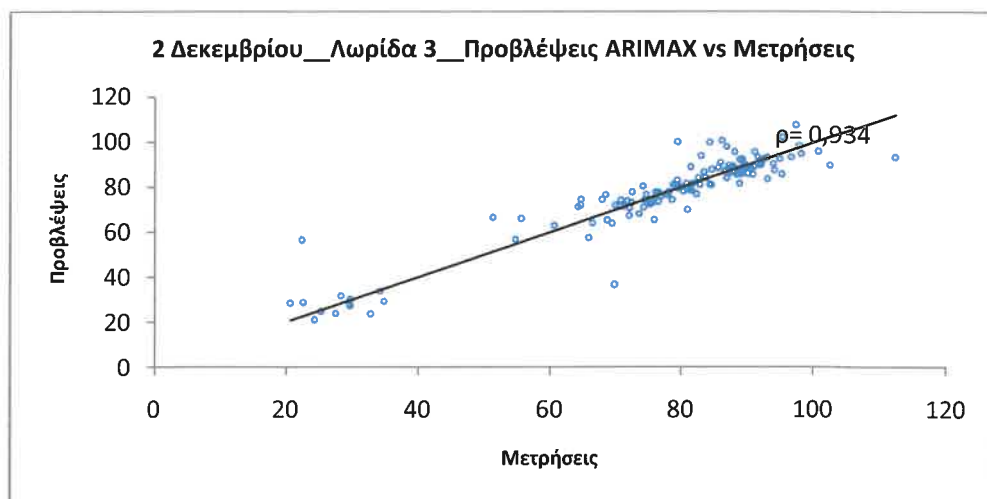
Σχήμα 4.53: Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος ARIMAX (3, 1, 0), για την λωρίδα 3 και όλες τις περιόδους

Παρατηρούμε ότι οι αυτοσυσχετίσεις δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Επίσης ο έλεγχος Ljung – Box ικανοποιείται. Οπότε το υπόδειγμα ARIMAX (3, 1, 0) κρίνεται κατάλληλο για την παραγωγή προβλέψεων.

Προβλέψεις

Οι προβλέψεις γίνονται εντός δείγματος (in – sample), δηλαδή η περίοδος για την οποία δίνονται οι προβλέψεις ταυτίζεται με την περίοδο υπολογισμού του

υποδείγματος. Η αξιολόγηση των προβλέψεων γίνεται με βάση το απόλυτο μέσο σφάλμα (MAE) και το απόλυτο μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE). Έτσι ο δείκτης MAE προκύπτει 4,199 και ο MAPE 6,849 %. Η σύγκριση των πραγματικών τιμών με τις προβλεπόμενες φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 4.54: Διάγραμμα προβλέψεων ARIMAX – μετρήσεων, για την λωρίδα 3 και όλες τις περιόδους

4.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΟΣ VARMAX

Γενικά

Για την εκτίμηση του υποδείγματος VARMAX ακολουθείται η ανάλογη διαδικασία με τα παραπάνω υποδείγματα.

Διερεύνηση στασιμότητας

Δεν απαιτείται κανένας νέος έλεγχος στασιμότητας καθώς αυτοί έχουν προηγηθεί στις προηγούμενες παραγράφους. Οπότε λαμβάνονται πρώτες διαφορές για τις χρονοσειρές των ταχυτήτων και τις χρονοσειρές των τιμών φόρτου, ενώ η χρονοσειρά της βροχόπτωσης είναι στάσιμη.

Επιλογή της τάξης του υποδείγματος

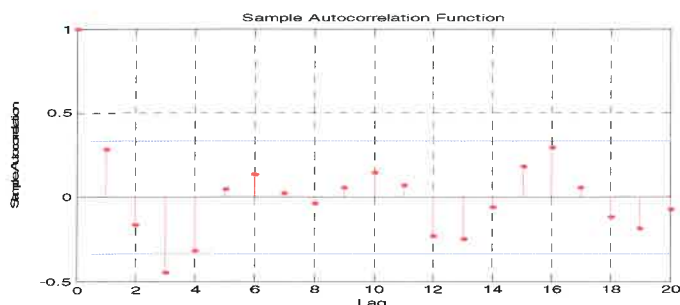
Κάθε χρονοσειρά ταχύτητας που εισάγεται στο υπόδειγμα είναι διαφορετικής τάξεως. Ως πρώτη προσέγγιση μπορούν να ληφθούν οι τάξεις των υποδειγμάτων ARIMAX ανά λωρίδα. Εντούτοις απαιτείται εκ νέου διερεύνηση για την εύρεση της τάξης αυτής που θα παράγει τις βέλτιστες προβλέψεις. Η επιλογή γίνεται, και σε αυτή την περίπτωση με βάση τους δείκτες MAE και MAPE.

Τελικά προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα για τις τάξεις του υποδείγματος: λωρίδα 1 – ARIMAX (3, 1, 0), λωρίδα 2 – ARIMAX (2, 1, 0), λωρίδα 3 – ARIMAX (3, 1, 1).

Διαγνωστικός έλεγχος

Η καταλληλότητα του υποδείγματος που επιλέγεται ελέγχεται με βάση τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων καθώς και τον έλεγχο Ljung – Box. Οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων πρέπει να είναι στατιστικά μη σημαντικοί, ενώ με τον έλεγχο Ljung – Box εξετάζεται το άθροισμα των συντελεστών αυτοσυσχέτισης.

Στην προκειμένη περίπτωση έγιναν οι διαγνωστικοί έλεγχοι στα κατάλοιπα της λωρίδας 1. Το διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων των καταλοίπων είναι το εξής:



Σχήμα 4.55: Διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων καταλοίπων υποδείγματος VARMAX, για την λωρίδα 1 και όλες τις περιόδους

Παρατηρούμε ότι οι αυτοσυσχετίσεις είναι σημαντικές κάτι που υποδεικνύει κάποια συσχέτιση των καταλοίπων. Επιπλέον, ο έλεγχος Ljung – Box δεν ικανοποιείται στην συγκεκριμένη περίπτωση.

Το παραπάνω αποτέλεσμα ενδέχεται να καταδεικνύει την μη γραμμικότητα των μετρήσεων, κάτι που θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με την διάσπαση της ανάλυσης σε χρονικές περιόδους με όμοια χαρακτηριστικά, όπως έγινε για τα απλά ARIMA υποδείγματα.

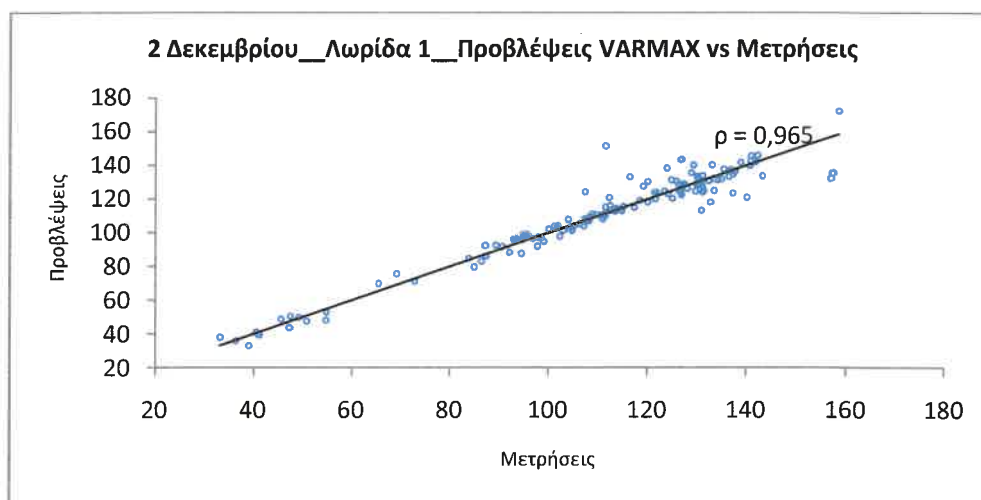
Προβλέψεις

Οι προβλέψεις γίνονται εντός δείγματος (in – sample), δηλαδή η περίοδος για την οποία δίνονται οι προβλέψεις ταυτίζεται με την περίοδο υπολογισμού του υποδείγματος. Η αξιολόγηση των προβλέψεων γίνεται με βάση το απόλυτο μέσο σφάλμα (MAE) και το απόλυτο μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE). Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.3: Δείκτες αξιολόγησης πρόβλεψης για το υπόδειγμα VARMAX

	MAE	MAPE
Λωρίδα 1	4,29	3,99
Λωρίδα 2	2,47	2,88
Λωρίδα 3	2,45	3,52

Η σύγκριση των πραγματικών τιμών με τις τιμές των προβλέψεων φαίνεται, για την λωρίδα 1 στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 4.56: Διάγραμμα προβλέψεων VARMAX – μετρήσεων, για την λωρίδα 1 και όλες τις περιόδους

4.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

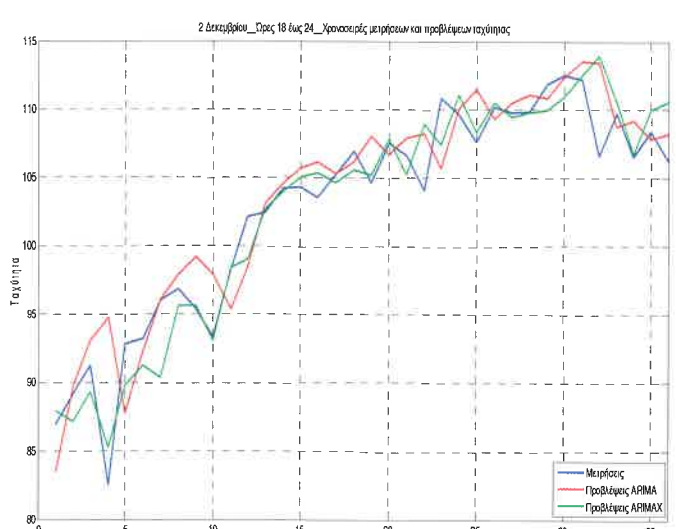
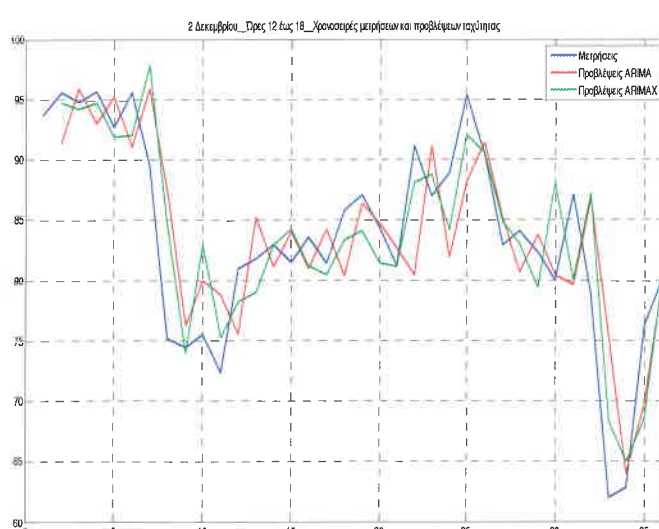
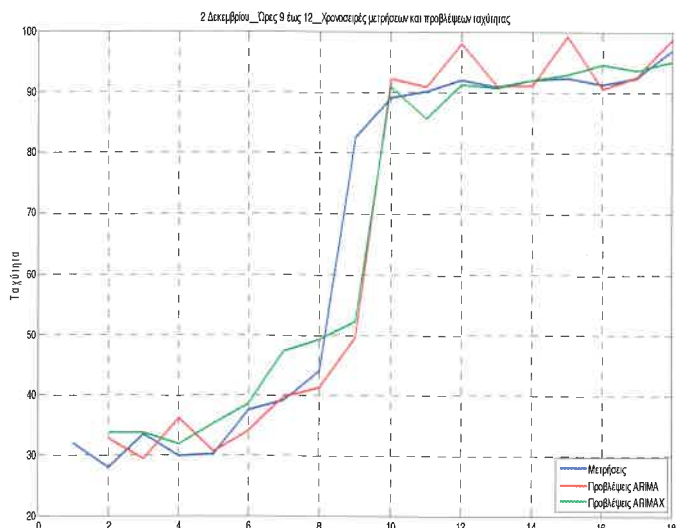
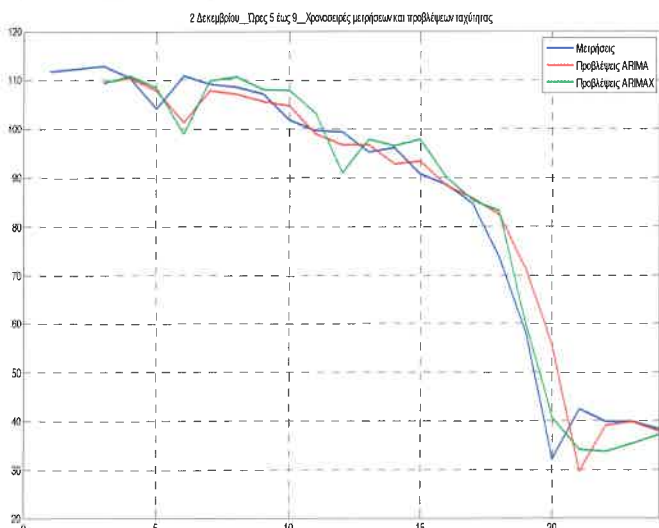
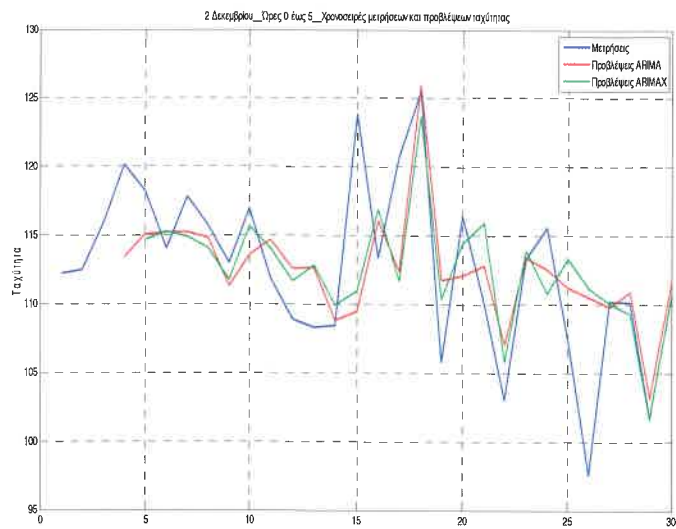
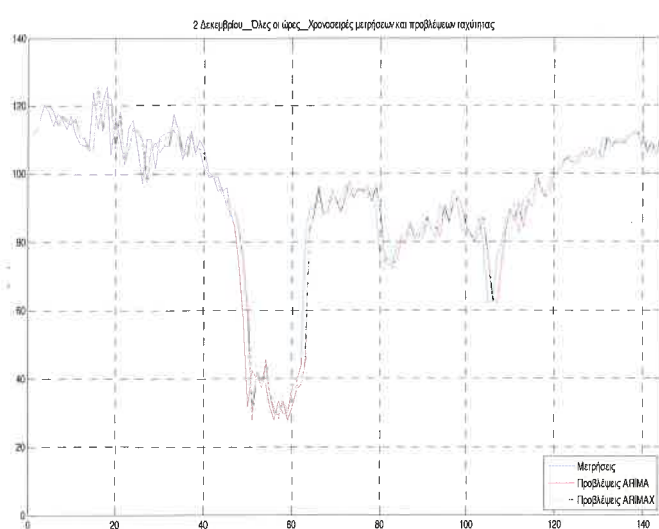
Στους παρακάτω πίνακες εμφανίζονται τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των αναλύσεων σε όρους MAE και MAPE για όλα τα μοντέλα, καθώς και σύγκριση μεταξύ τους. Επίσης στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται η εξέλιξη των πραγματικών χρονοσειρών σε σχέση με τις προβλέψεις, με υποδείγματα ARIMA, ARIMAX και VARMAX.

Πίνακας 4.4: Δείκτες αξιολόγησης υποδειγμάτων ARIMA και ARIMAX και σύγκρισή τους

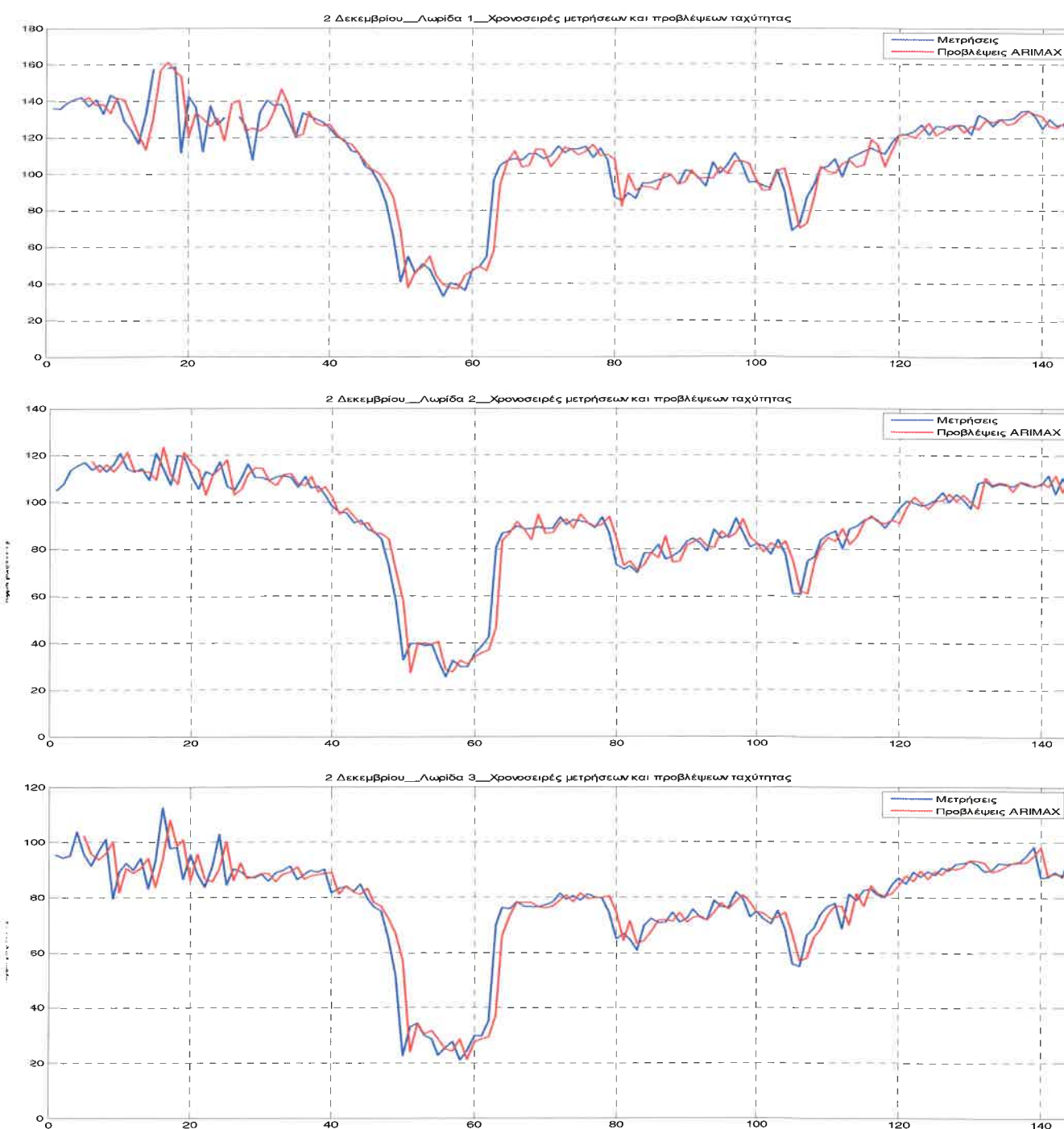
		Όλες οι λωρίδες					Λωρίδα 1	Λωρίδα 2	Λωρίδα 3
		Όλες οι περίοδοι	Περίοδος 1	Περίοδος 2	Περίοδος 3	Περίοδος 4	Περίοδος 5	Όλες οι περίοδοι	
ARIMA	MAE	4,391	3,606	4,313	4,447	4,205	2,322	4,391	
	MAPE	5,741%	3,219%	7,980%	7,676%	5,187%	2,364%	5,741%	
ARIMAX	MAE	4,107	3,511	4,309	4,221	3,256	1,662	4,080	4,199
	MAPE	5,502%	3,147%	6,653%	7,760%	4,040%	1,644%	5,427%	6,849%
Βελτίωση απόδοσης	MAE	6,47%	2,63%	0,09%	5,08%	22,57%	28,42%	7,08%	4,37%
	MAPE	4,16%	2,24%	16,63%	-1,09%	22,11%	30,46%	5,47%	-19,30%

Πίνακας 4.5: Δείκτες αξιολόγησης υποδειγμάτων ARIMAX και VARMAX και σύγκρισή τους

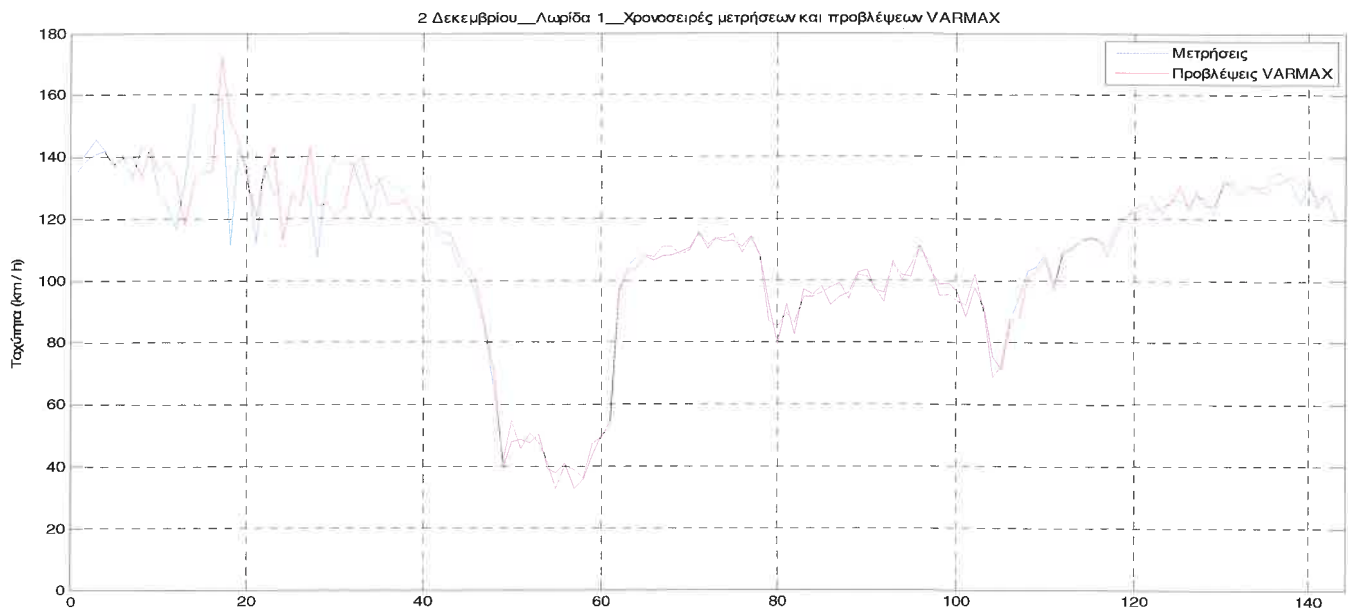
		Λωρίδα 1	Λωρίδα 2	Λωρίδα 3	Λωρίδα 1	Λωρίδα 2	Λωρίδα 3
		Όλες οι περίοδοι			Όλες οι περίοδοι		
ARIMAX	MAE	6,014	4,080	4,199	4,107		
	MAPE	6,330%	5,427%	6,849%			
VARMAX	MAE	4,29	2,47	2,45	4,29	2,47	2,45
	MAPE	3,99%	2,88%	3,52%	3,99%	2,88%	3,52%
Βελτίωση απόδοσης	MAE	28,67%	39,46%	41,65%	-4,46%	39,86%	40,35%
	MAPE	36,97%	46,93%	48,61%	27,48%	47,66%	36,02%



χήμα 4.57: Χρονική εξέλιξη σειρών μετρήσεων και προβλέψεων, για όλες τις λωρίδες



χρήμα 4.58: Χρονική εξέλιξη σειρών μετρήσεων και προβλέψεων ARIMAX, ανά λωρίδα για όλες τις περιόδους



Σχήμα 4.59: Χρονική εξέλιξη σειρών μετρήσεων και προβλέψεων VARMAX, για την λωρίδα 1 και όλες τις περιόδους

4.7 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Μια περαιτέρω διερεύνηση που μπορεί να γίνει αφορά στην απόδοση του καθολικού υποδείγματος (όλες οι λωρίδες – όλες οι περίοδοι) για τις περιόδους αιχμής, σε σχέση με την απόδοση των συγκεκριμένων για αυτές τις περιόδους υποδειγμάτων.

Πιο αναλυτικά, το καθολικό υπόδειγμα αποδίδει σε έναν πολύ ικανοποιητικό βαθμό στο σύνολο της ημέρας. Εντούτοις, το ενδιαφέρον εστιάζεται κυρίως στις περιόδους αιχμής, καθώς τότε είναι που η παραγωγή προβλέψεων είναι ιδιαίτερα σημαντικότερη. Περίοδοι αιχμής θεωρούνται οι 2, 3 και 4, δηλαδή οι ώρες 5 έως 18. Για αυτό το χρονικό διάστημα έχουν εκτιμηθεί ανεξάρτητα υποδείγματα για την κάθε μία περίοδο. Εξετάζεται λοιπόν, το κατά πόσο αυτά τα ειδικά υποδείγματα αποδίδουν καλύτερα, κατά το κρίσιμο αυτό διάστημα.

Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.6: Δείκτες αξιολόγησης υποδειγμάτων για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους και σύγκριση τους

Τύπος υποδείγματος	Εκτίμηση παραμέτρων σε	MAE				MAPE				Βελτίωση απόδοσης	
		Περίοδος 2	Περίοδος 3	Περίοδος 4		Περίοδος 2	Περίοδος 3	Περίοδος 4		MAE	MAPE
ARIMA	Όλες τις περιόδους	5,340	5,247	4,145		9,583%	8,861%	5,153%		-	-
	Περίοδο 2	4,313	-	-		7,980%	-	-		19,22%	16,73%
	Περίοδο 3	-	4,447	-		-	7,676%	-		15,25%	13,37%
	Περίοδο 4	-	-	4,205		-	-	5,187%		-1,45%	-0,65%
ARIMAX	Όλες τις περιόδους	5,175	4,916	3,731		9,908%	8,383%	4,670%		-	-
	Περίοδο 2	4,309	-	-		6,653%	-	-		16,73%	32,85%
	Περίοδο 3	-	4,221	-		-	7,760%	-		14,13%	7,44%
	Περίοδο 4	-	-	3,256		-	-	4,040%		12,75%	13,48%

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα και προτάσεις

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι στόχοι που είχαν τεθεί για την συγκεκριμένη εργασία, αναλύονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης που προηγήθηκε και εξάγονται συμπεράσματα. Τελικά αναλύονται και προτάσεις για μελλοντική έρευνα, σχετική με το περιεχόμενο αυτής της εργασίας.

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η παραγωγή βραχυπρόθεσμων προβλέψεων της ταχύτητας σε ελεύθερη λεωφόρο, με χρήση μεθόδων χρονοσειρών και συγκεκριμένα υποδειγμάτων της οικογένειας ARIMA. Ταυτόχρονα έγινε διερεύνηση της δυνατότητας βελτίωσης της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου με την διάσπαση της διαδικασίας σε περιόδους εντός της ημέρας, με την μελέτη ανά λωρίδα καθώς και με την εισαγωγή στοιχείων καιρού και φόρτου.

Πιο αναλυτικά:

- ✓ **Ανάλυση στο σύνολο της ημέρας και των λωρίδων.** Υπολογίστηκε και αξιολογήθηκε ένα υπόδειγμα ARIMA για το σύνολο της ημέρας και όλες τις λωρίδες της συγκεκριμένης διατομής της Αττικής Οδού.
- ✓ **Ανάλυση ανά περίοδο.** Η ημέρα χωρίστηκε σε 5 περιόδους με όμοια χαρακτηριστικά και αναπτύχθηκαν υποδείγματα για κάθε μία από αυτές. Στόχος ήταν να γίνει σύγκριση με το γενικό μοντέλο, ώστε να

αξιολογηθεί η σκοπιμότητα της μελέτης μικρότερων χρονικών περιόδων με όμοια χαρακτηριστικά.

- ✓ **Εισαγωγή εξωγενών παραμέτρων (συναρτήσεων μεταφοράς) στα υποδείγματα.** Σε καθένα από τα παραπάνω υποδείγματα εισήχθησαν οι χρονοσειρές της βροχόπτωσης και του φόρτου. Ο στόχος ήταν και πάλι η διερεύνηση της βελτίωσης της αξιοπιστίας της πρόβλεψης.
- ✓ **Ανάλυση ανά λωρίδα.** Υπολογίστηκαν υποδείγματα τύπου ARIMAX για κάθε λωρίδα της διατομής. Στόχος ήταν η διερεύνηση της απόδοσης του μοντέλου συγκριτικά με τις παραπάνω περιπτώσεις.
- ✓ **Ταυτόχρονη ανάλυση ανά λωρίδα.** Στόχος ήταν η εκτίμηση ενός υποδείγματος που θα μελετά όλη την διατομή αλλά θα κάνει και διακριτή ανάλυση ανά λωρίδα, με την ταυτόχρονη εισαγωγή των εξωγενών παραμέτρων. Οπότε εκτιμήθηκε ένα μοντέλο VARMAX και η απόδοσή του συγκρίθηκε με αυτή των πιο απλών μοντέλων.

1.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην παράγραφο αυτή αναλύονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που βρέθηκαν στην ανάλυση που προηγήθηκε. Οι βασικές διαπιστώσεις είναι:

- ✓ Το γενικό μοντέλο που υπολογίστηκε, για όλες τις λωρίδες και το σύνολο της ημέρας, είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικό. Αυτό προκύπτει από τους δείκτες αξιολόγησης, όπου το μέσο ποσοστιαίο σφάλμα είναι μικρότερο του 6%, ενώ το μέσο σφάλμα δεν ξεπερνά τα 4,4 km / h (πίνακας 4.4).
- ✓ Η αξιολόγηση των μοντέλων που υπολογίστηκαν ανεξάρτητα για κάθε περίοδο είναι πιο σύνθετη. Οι δείκτες που προκύπτουν καταδεικνύουν

μια καλύτερη επίδοση για τις περιόδους χαμηλού φόρτου και χειρότερη επίδοση για τις περιόδους αιχμής, σε σχέση πάντα με το γενικό μοντέλο (πίνακας 4.4). Εντούτοις, μέσω της διερεύνησης που ακολούθησε προέκυψε το ακόλουθο συμπέρασμα. Το σφάλμα του γενικού μοντέλου αυξάνεται τις ώρες αιχμής και είναι αισθητά μεγαλύτερο σε σχέση με το μέσο. Συγκρίνοντας τα σφάλματα του γενικού μοντέλου για τις συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, με αυτά που προκύπτουν από την ανά περίοδο ανάλυση, προκύπτει ότι τα ανά περίοδο μοντέλα υπερέχουν σε απόδοση κατά 10 με 20 %, ποσοστό που σε ορισμένες περιπτώσεις φτάνει και το 33 % (πίνακας 4.6).

- ✓ Τα υποδείγματα AR(I)MAX απέδωσαν γενικά καλύτερα από τα απλά AR(I)MA υποδείγματα (πίνακας 4.4). Συγκεκριμένα η βελτίωση αυτή ποικίλει, από -1 % έως 30 %, αλλά καταδεικνύει σαφώς ότι η εισαγωγή των παραμέτρων του φόρτου και της βροχόπτωσης στην πρόγνωση της ταχύτητας, δύναται να οδηγήσει σε καλύτερες προβλέψεις.
- ✓ Πρέπει να σημειωθεί το γεγονός ότι το μοντέλο ARIMAX, όπου X ο φόρτος και η βροχόπτωση, απέδωσε καλύτερα από το απλό ARIMA, παρά το ότι η βροχόπτωση ήταν σχετικά μικρής εντάσεως και διάρκειας.
- ✓ Δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα σχετικά με το εάν η παρουσία βροχόπτωσης σε κάποια χρονική περίοδο βελτιώνει την προβλεπτική ικανότητα του AR(I)MAX υποδείγματος (πίνακας 4.4). Συγκεκριμένα, κατά την διάρκεια των περιόδων 3 και 4 σημειώνεται βροχόπτωση. Εντούτοις, στην πρώτη περίπτωση η βελτίωση της πρόβλεψης λόγω της εισαγωγής των εξωγενών παραμέτρων είναι οριακή, ενώ στην δεύτερη η βελτίωση ξεπερνά το 22 %.
- ✓ Ο υπολογισμός διαφορετικού μοντέλου για κάθε λωρίδα (AR(I)MAX ανά λωρίδα στο σύνολο της ημέρας), δεν δείχνει να βελτιώνει την αξιοπιστία των προβλέψεων (πίνακας 4.4). Ειδικότερα μόνο στην μεσαία

λωρίδα βελτιώνεται ελαφρώς η απόδοση του μοντέλου, ενώ υπάρχει σοβαρή επιδείνωση της πρόβλεψης στην αριστερή λωρίδα (λωρίδα 1).

- ✓ Αντίθετα, εξαιρετική βελτίωση σημειώνεται με την από κοινού μελέτη των λωρίδων. Το υπόδειγμα VARMAX απέδωσε ιδιαίτερα καλύτερα από το απλούστερο ARIMAX, σε ποσοστό ακόμα και κοντά στο 48 % (πίνακας 4.5). Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι θεωρώντας την ταχύτητα σε κάθε λωρίδα ως διαφορετική χρονοσειρά, αλλά υπολογίζοντας ένα κοινό υπόδειγμα για αυτές, εισάγοντας ταυτόχρονα τις εξωγενείς παραμέτρους καιρού και φόρτου, μπορούμε να βελτιώσουμε σε μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία της πρόβλεψης.
- ✓ Από το σύνολο των διαγραμμάτων (σχήματα 4.56 και 4.57) γίνεται σαφής η χρονική υστέρηση των μοντέλων σε σχέση με τα πραγματικά δεδομένα. Αυτό είναι λογικό αν αναλογιστεί κανείς την φύση των ARIMA υποδειγμάτων, όπου κάθε τιμή προκύπτει ως συνάρτηση, και, των προηγούμενων τιμών της χρονοσειράς.
- ✓ Λόγω αυτής της φύσης των υποδειγμάτων ARIMA, είναι δυσχερής η προσέγγιση κατά την διάρκεια περιόδων με έντονες εναλλαγές της κυκλοφορίας. Αυτό φαίνεται κατά τις περιόδους 2 και 3, όπου οι τιμές των ταχυτήτων παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις. Τα μοντέλα που υπολογίστηκαν για αυτές τις περιόδους έχουν τα μεγαλύτερα σφάλματα (πίνακας 4.4). Αυτό συμβαίνει διότι το υπόδειγμα λαμβάνει υπόψη κάποιες, λίγες τιμές της χρονοσειράς στο παρελθόν. Μια σημαντική αλλαγή στο πρότυπο της κυκλοφορίας, π.χ. σημαντική πτώση της ταχύτητας, δεν μπορεί να προβλεφθεί από το υπόδειγμα.

1.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- ✓ Η χρήση υποδειγμάτων ARIMA για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση κυκλοφοριακών μεγεθών, και ειδικά της ταχύτητας, προτείνεται καθώς οδηγεί σε αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα ενώ είναι σχετικά εύκολα στην εφαρμογή τους. Επίσης οι γνώσεις που απαιτείται να κατέχει ο εκάστοτε ερευνητής ή μελετητής, που θα κληθεί να εφαρμόσει αυτά τα μοντέλα, είναι απλές.
- ✓ Στην περίπτωση που απαιτείται υψηλότερος βαθμός ακρίβειας, μπορούν να δομούνται ανεξάρτητα μοντέλα για κάθε περίοδο της ημέρας με όμοια χαρακτηριστικά, καθώς παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση της απόδοσής τους.
- ✓ Η βελτίωση αυτή είναι πιο σημαντική για τις ώρες αιχμής, μειώνοντας σε μεγάλο βαθμό τα παραγόμενα σφάλματα. Η διαπίστωση αυτή είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα καθώς οι περίοδοι αιχμής είναι αυτές που ενδιαφέρουν ιδιαίτερα για την δυναμική διαχείριση της κυκλοφορίας.
- ✓ Αντίθετα, δεν σημειώθηκε καμία βελτίωση από την διάσπαση της ανάλυσης ανά λωρίδα, με χρήση απλών ARIMAX υποδειγμάτων για κάθε λωρίδα.
- ✓ Εντούτοις, πολύ μεγάλη βρέθηκε η μείωση των σφαλμάτων των προβλέψεων με την χρήση του υποδείγματος VARMAX. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η δημιουργία ενός μοντέλου που η κάθε λωρίδα λαμβάνεται ως διαφορετική χρονοσειρά, αλλά το μοντέλο υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους, μπορεί να αποδώσει με ιδιαίτερα καλύτερο τρόπο. Προσθέτοντας και τις εξωγενείς παραμέτρους του φόρτου και της βροχόπτωσης

δημιουργήθηκε ένα μοντέλο, το οποίο στην συγκεκριμένη εργασία απέδωσε με βέλτιστο τρόπο.

- ✓ Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι σε εφαρμογές που απαιτείται μεγάλος βαθμός ακρίβειας των προβλέψεων, τα πολυπαραμετρικά μοντέλα με εξωγενείς παραμέτρους τύπου VARMAX μπορούν να αξιοποιηθούν, με ιδιαίτερη επιτυχία.
- ✓ Αντίθετα, δεν συνιστάται η χρήση τους σε απλές εφαρμογές, καθώς απαιτούν αυξημένο θεωρητικό υπόβαθρο και, κυρίως, εξειδικευμένο λογισμικό.
- ✓ Ιδιαίτερα σημαντική είναι η διαπίστωση, ότι η εισαγωγή εξωγενών παραμέτρων στο μοντέλο, μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα της πρόβλεψης. Στην συγκεκριμένη εργασία αποδείχτηκε ότι η εισαγωγή των χρονοσειρών φόρτου και βροχόπτωσης, στην πρόβλεψη της ταχύτητας, μπορεί να μειώσει σε σημαντικό βαθμό τα σφάλματα.
- ✓ Γνωρίζοντας από την βιβλιογραφία ότι η βροχόπτωση επηρεάζει την ταχύτητα, είναι πολύ σημαντική η διαπίστωση ότι αυτή η σχέση μπορεί να «συλληφθεί» και από τα υποδείγματα χρονοσειρών και να οδηγήσει σε βελτίωση των προβλέψεων.

1.4 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Με βάση το γνωστικό υπόβαθρο που αποκτήθηκε από την συγκεκριμένη εργασία, καθώς και τις γενικότερες ανάγκες της έρευνας προς την κατεύθυνση της δυναμικής διαχείρισης της κυκλοφορίας, προτείνονται οι ακόλουθοι άξονες για μελλοντικές έρευνες.

- ✓ Η παραγωγή προβλέψεων και η αξιολόγησή τους στην συγκεκριμένη εργασία έγινε εντός δείγματος (in – sample). Κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική η αξιολόγηση και εκτός δείγματος (out – of – sample), ώστε να φανεί πως μπορούν να αποδώσουν τα αντίστοιχα μοντέλα για μετρήσεις περιόδων οι οποίες δεν θα έχουν χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του μοντέλου. Άλλωστε, σε μια ενδεχόμενη εφαρμογή τέτοιων μοντέλων στα συστήματα διαχείρισης της κυκλοφορίας, αυτός θα είναι ο τρόπος λειτουργίας τους.
- ✓ Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά και πιο ενδελεχής έλεγχος της ποιότητας των προβλέψεων, απαιτείται η έρευνα να βασιστεί σε μεγαλύτερες βάσεις δεδομένων.
- ✓ Η βροχόπτωση που μελετήθηκε στην προκειμένη περίπτωση ήταν μικρή, σχετικά, εντάσεως και διάρκειας. Απαιτείται, λοιπόν, η μελέτη ισχυρότερων βροχοπτώσεων για να ελεγχθεί η αντίδραση των μοντέλων υπό αυτές τις συνθήκες.
- ✓ Η ιδιαίτερα καλή απόδοση του υποδείγματος VARMAX στο σύνολο της ημέρας, σε συνδυασμό με την βελτίωση της απόδοσης που προέκυψε για τα AR(I)MAX υποδείγματα όταν η ανάλυση γίνεται ανά περίοδο, δίνουν πολύ καλές προοπτικές σε μια εφαρμογή VARMAX υποδειγμάτων ανά χρονική περίοδο.

Βιβλιογραφία

Agarwal M, Maze T., Souleyrette R. (2005) **“Impact of weather on urban freeway traffic flow characteristics and facility capacity”**, Aurora Program, Center for Transportation Research and Education, Iowa State University

Ahmed M. and Cook A. (1979) **“Analysis of freeway traffic time-series, Data by using Box-Jenkins techniques”**, TRB, Transportation Research Record, vol. 772, 1-9

Butler S., Ringwood J. and Fay D. (2007) **“Use of weather inputs in traffic volume forecasting”**, Submitted to ISSC 2007 Conference, Sept 13 – 14

Chen H. and Grant-Muller S. (2001) **“Use of sequential learning for short-term traffic flow forecasting”**, Elsevier, Transportation Research Part C 9, 319-336

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

Clark S. (2003) **“Traffic prediction using multivariate nonparametric regression”**, ASCE, Journal of Transportation Engineering, vol. 129, 161-168

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

Davis G. and Nihan N. (1991) **“Nonparametric regression and short-term freeway traffic forecasting”**, ASCE, Journal of Transportation Engineering, vol. 117, 178-188

Dia H. (2001) **“An object-oriented neural network approach to short-term traffic forecasting”**, European Journal of Operational Research 131, 253-261

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

Huang S. and Ran B. (2003) **“An application of Neural Network on traffic speed prediction under adverse weather condition”**, Submitted to TRB 2003 Annual Meeting

Kamarianakis Y. and Prastacos P. (2003) **“Forecasting traffic flow conditions in an urban network: comparison of multivariate and univariate approaches”**, TRB, Transportation Research Record, vol.1857, 74-84

Kirby H., Watson S., Dougherty M. (1997) **“Should we use neural networks or statistical models for short-term motorway traffic forecasting?”**, Elsevier, International Journal of forecasting 13, 43-50

Lee S. and Fambro D. (1999) **“Application of Subset Autoregressive Integrated Moving Average model for short-term freeway traffic volume forecasting”**, TRB, Transportation Research Record, vol. 1678, 179-188

MATLAB R2010A Manual

Meteonet, <http://meteonet.chi.civil.ntua.gr/wk/main/splash>

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

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

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

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

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

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

Sun H., Liu H., Xiao H., Ran B. (2002) **“Short-term traffic forecasting using the local linear regression model”**, Submitted to the 2003 TRB Annual Meeting

Vlahogianni E., Golias J. and Karlaftis M. (2004) **“Short-term traffic forecasting: Overview of objectives and methods”**, Transportation Reviews, 24, 5, 533-557

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

Williams B. (2001) **“Multivariate vehicular traffic flow prediction: Evaluation of ARIMAX modeling”**, TRB, Transportation Research Record, vol.1776, 194-200

Williams B. and Hoel L. (2003) **“Modeling and Forecasting vehicular traffic flow as a Seasonal ARIMA process: theoretical basis and empirical results”**, ASCE, Journal of Transportation Engineering, vol.129, 664-672

Williams B., Durvasula P. and Brown D. (1998) **“Urban freeway traffic flow prediction: application of Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average and Exponential Smoothing Models”**, TRB, Transportation Research Record, vol. 1644, 132-141

Δημελή Σ. (2003) **“Σύγχρονες μέθοδοι ανάλυσης χρονολογικών σειρών”**, 3^η Έκδοση, Εκδόσεις Κριτική

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