



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

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ**  
**ΟΛΙΣΘΗΡΟΤΗΤΑΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ**  
**ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ**

**ΤΣΙΜΠΛΑΚΟΣ ΒΥΡΩΝ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: Χ. Πλατή, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ**

**ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2022**



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ολισθηρότητα του οδοστρώματος είναι ένας από τους κυριότερους παράγοντες της οδικής ασφάλειας. Με το πέρασμα του χρόνου η κατάσταση του οδοστρώματος χειροτερεύει και η αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος μειώνεται. Η πρόβλεψη της αντιολισθητικής ικανότητας ενός οδοστρώματος θα επέτρεπε στον κύριο ή στον διαχειριστή ενός αυτοκινητοδρόμου να επέμβει στο οδόστρωμα πριν αυτή φτάσει σε επικίνδυνα χαμηλά επίπεδα. Ωστόσο η πρόβλεψη ενός μεγέθους που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι η ολισθηρότητα είναι δύσκολο έργο. Στη παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια ανάπτυξης μοντέλων για την πρόβλεψη της αντιολισθητικής ικανότητας ασφαλτικών οδοστρωμάτων με τη χρήση χρονοσειρών. Αρχικά διερευνώνται οι συνιστώσες που επηρεάζουν την αντιολισθητική ικανότητα της επιφάνειας των ασφαλτικών οδοστρωμάτων, καθώς και οι διάφορες μέθοδοι μέτρησής της. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία της πρόβλεψης με τη χρήση χρονοσειρών. Τέλος, χρησιμοποιώντας στοιχεία ολισθηρότητας από τμήμα αυτοκινητοδρόμου μήκους 800 μέτρων, προερχόμενα από μετρήσεις πεδίου υπό τη μορφή χρονοσειράς για δεκατρία έτη, αναπτύσσονται τρία διαφορετικά μοντέλα πρόβλεψης με τις παραλλαγές τους. Γίνεται συγκριτική αξιολόγηση των μοντέλων και ελέγχεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων πρόβλεψης με κατάλληλες μεθόδους.

## **ABSTRACT**

One of the primary components of road safety is skid resistance. With the passage of time, the condition of asphalt pavement surfaces deteriorates, and skid resistance is lowered. Forecasting skid resistance would enable road authorities to intervene before it reaches dangerously low levels. However, forecasting a variable as complicated as skid resistance is a tall order. This diploma thesis will attempt to develop models to forecast the skid resistance of asphalt pavements by using Time Series. Initially it presents and analyzes the components of skid resistance as well as the various methods of measuring it. Secondly it presents the process of forecasting with Time Series. Finally, three forecasting models and their variations are developed, using skid resistance data in the form of a Time Series of an 800-meter section of a highway, collected from measurements done on site in the past 13 years. Using appropriate methods, the precision of the models' predictions is evaluated.

## Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	i
ABSTRACT.....	ii
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο .....	1
1.2 Στόχος και μεθοδολογία .....	2
1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας.....	2
2. Αντιολισθητική ικανότητα ασφαλτικού οδοστρώματος.....	4
2.1 Γενικά .....	4
2.2 Συνιστώσες αντιολισθητικής ικανότητας .....	5
2.3 Δυνάμεις τριβής .....	7
2.3.1 Διαμήκεις δυνάμεις τριβής.....	7
2.3.2 Δυνάμεις πλευρικής τριβής .....	10
2.3.3 Συνδυασμός στροφής και πέδησης.....	11
2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την ολισθηρότητα.....	12
2.4.1 Υφή επιφάνειας οδοστρώματος.....	12
2.4.2 Χαρακτηριστικά οχήματος.....	19
2.4.3 Επίδραση καιρικών φαινομένων.....	20
3. Μέθοδοι μέτρησης αντιολισθητικής ικανότητας.....	25
3.1 Γενικά .....	25
3.2 Εργαστηριακές μετρήσεις .....	25
3.2.1 Μέθοδος Wehner/Schulze (W/S) .....	25
3.2.2 Dynamic Friction Tester .....	27
3.3 Επί τόπου μετρήσεις .....	28
3.3.1 Χωρίς διακοπή της κυκλοφορίας.....	28
3.3.2 Με διακοπή της κυκλοφορίας .....	34
3.4 Σύστημα Grip Tester.....	37
4. Προβλέψεις με χρονοσειρές.....	39
4.1 Εισαγωγή στις προβλέψεις .....	39
4.2 Χρονοσειρές .....	40

4.3	Διαδικασία πρόβλεψης.....	43
5.	Ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της ολισθηρότητας οδοστρώματος.....	46
5.1	Καθορισμός προβλήματος.....	46
5.2	Πειραματικά δεδομένα.....	46
5.3	Ανάλυση δεδομένων.....	46
5.3.1	Συνολική εικόνα.....	46
5.3.2	Διερεύνηση γραφημάτων.....	50
5.3.3	Διερεύνηση ακραίων τιμών.....	54
5.4	Επιλογή μοντέλου.....	56
5.4.1	Γενικά.....	56
5.4.2	Μέθοδοι αποσύνθεσης.....	57
5.4.3	Μοντέλα εκθετικής εξομάλυνσης.....	79
6.	Επαλήθευση μοντέλων.....	84
6.1	Γενικά.....	84
6.2	Μέθοδος Out of Sample.....	84
6.3	Μέθοδος Cross Validation.....	90
6.4	Μέτρα εκτίμησης ακρίβειας.....	92
6.5	Αποτελέσματα.....	95
6.5.1	Αποτελέσματα OOS.....	95
6.5.2	Αποτελέσματα μεθόδου Cross Validation.....	103
7.	Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα.....	111
8.	Βιβλιογραφία.....	113

## Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 2-1 Σχέση αντιολισθητικής ικανότητας και αριθμού ατυχημάτων (Viner et al. 2004) .....	4
Εικόνα 2-2 Διάγραμμα Δυνάμεων που δρουν σε έναν τροχό που περιστρέφεται (Hall et al. 2009) .....	5
Εικόνα 2-3 Κύριοι Μηχανισμοί Τριβής (Glennon 1996) .....	6
Εικόνα 2-4 Δύναμη Αντίστασης Κύλισης σε κατάσταση ελεύθερης κύλισης (Andresen and Wambold 1999) .....	8
Εικόνα 2-5 Δυνάμεις και ροπές σε κατάσταση πέδησης (Andresen and Wambold 1999) .....	8
Εικόνα 2-6 Σχέση μεταξύ Διολίσθησης και Συντελεστή Τριβής (Austroads 2005) .....	9
Εικόνα 2-7 Διάγραμμα Δυνάμεων που ενεργούν σε όχημα που κινείται σε καμπύλη σταθερής ακτίνας με σταθερή ταχύτητα. (Hall et al. 2009) .....	10
Εικόνα 2-8 Διαμήκεις και Πλευρικές Δυνάμεις συναρτήσει της Διαμήκου Ολίσθησης (Gillespie 1992) .....	11
Εικόνα 2-9 Σχέση Πλευρικής και Διαμήκου Δύναμης για σταθερή γωνία Ολίσθησης (Gillespie, 1992) .....	12
Εικόνα 2-10 Διαβαθμίσεις Υφής Επιφάνειας Οδοστρώματος (Sandburg 1998) .....	13
Εικόνα 2-11 Sand Patch Method .....	15
Εικόνα 2-12 Outflow Meter Test .....	16
Εικόνα 2-13 Circular Track Meter .....	17
Εικόνα 2-14 ROSAN Laser .....	18
Εικόνα 2-15 Επίδραση μικροϋφής και μακροϋφής της επιφάνειας του οδοστρώματος στον συντελεστή τριβής σε διαφορετικές ταχύτητες. (Flintsch et al., 2002) .....	19
Εικόνα 2-16 Σχέση συντελεστή τριβής και πίεσης ελαστικών (Rizenbergs 1968) .....	20
Εικόνα 2-17 Επίδραση του Πάχους Στρώσης Νερού (ΠΣΝ) στον συντελεστή τριβής του οδοστρώματος (Henry, 2000) .....	21
Εικόνα 2-18 Το φαινόμενο της υδρολίσθησης .....	22
Εικόνα 2-19 Επιρροή κατάλοιπων στην αντιολισθητική ικανότητα (Lubis et al. 2018) .....	23
Εικόνα 2-20 Εποχιακή διακύμανση για την περίπτωση του Ην. Βασιλείου (Choi 2011) .....	24
Εικόνα 3-1 Συσκευή Wehner/Schulze .....	26

Εικόνα 3-2 Κεφαλή στίλβωσης και γεωμετρία ελαστικού κώνου.....	26
Εικόνα 3-3 Κεφαλή με κομμάτια ελαστικού για την μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας .....	26
Εικόνα 3-4 DFT .....	27
Εικόνα 3-5 DFT περιστρεφόμενος δίσκος .....	27
Εικόνα 3-6 Locked Wheel Tester ASTM E274 Trailer.....	29
Εικόνα 3-7 Μηχάνημα SCRIM .....	30
Εικόνα 3-8 British Mu Meter.....	30
Εικόνα 3-9 Grip Tester .....	31
Εικόνα 3-10 Σύστημα ROAR.....	32
Εικόνα 3-11 Surface Volvo Friction Tester.....	32
Εικόνα 3-12 Saab Friction Tester .....	32
Εικόνα 3-13 IMAG .....	33
Εικόνα 3-14 Norsemeter .....	33
Εικόνα 3-15 Μέτρηση απόστασης πέδησης.....	35
Εικόνα 3-16 Μέτρηση ρυθμού επιβράδυνσης.....	36
Εικόνα 3-17 Βρετανικό εκκρεμές.....	37
Εικόνα 3-18 Grip Tester .....	38
Εικόνα 4-1 Παράδειγμα γραφήματος χρονοσειράς.....	41
Εικόνα 4-2 Χρονοσειρά με εύρος διακύμανσης.....	42
Εικόνα 4-3 Διαδικασία πρόβλεψης .....	43
Εικόνα 5-1 Γράφημα χρονοσειράς για τη Θέση 14 .....	51
Εικόνα 5-2 Γράφημα χρονοσειράς για τη Θέση 50 .....	51
Εικόνα 5-3 Εξομάλυνση Θ14.....	52
Εικόνα 5-4 Εξομάλυνση Θ50.....	53
Εικόνα 5-5 Ερμηνεία θηκογράμματος.....	54
Εικόνα 5-6 Θηκογράμματα Ζώνης 1 .....	55
Εικόνα 5-7 Θηκογράμματα Ζώνης 2 .....	56
Εικόνα 5-8 Εύρεση τάσης Θ50.....	59
Εικόνα 5-9 Προσθετικό μοντέλο χωρίς τάση.....	60



Εικόνα 5-10 Πολλαπλασιαστικό μοντέλο χωρίς τάση.....	60
Εικόνα 5-11 Τυχαίο κομμάτι προσθετικού μοντέλου .....	61
Εικόνα 5-12 Τυχαίο κομμάτι πολλαπλασιαστικού μοντέλου.....	62
Εικόνα 5-13 Υπολογισμός μελλοντικής τάσης από γραμμική παρεμβολή .....	63
Εικόνα 5-14 Αποτέλεσμα πρόβλεψης προσθετικού μοντέλου .....	64
Εικόνα 5-15 Αποτέλεσμα πρόβλεψης πολλαπλασιαστικού μοντέλου .....	64
Εικόνα 5-16 Παράδειγμα γραφήματος πάνω στο οποίο θα εφαρμοστεί η μέθοδος Loess.....	65
Εικόνα 5-17 Παράθυρο πρώτου εστιακού σημείου.....	66
Εικόνα 5-18 Παράθυρο έβδομου εστιακού σημείου .....	66
Εικόνα 5-19 Σύγκριση βέλτισης ευθείας με και χωρίς βάρη.....	67
Εικόνα 5-20 Πρώτο προκαταρκτικό σημείο .....	68
Εικόνα 5-21 Σύνολο προκαταρκτικών σημείων.....	68
Εικόνα 5-22 Αποστάσεις από πραγματικά σημεία για να υπολογίσουμε τα επιπλέον βάρη .....	69
Εικόνα 5-23 Νέα σημεία .....	70
Εικόνα 5-24 Εξομάλυνση .....	70
Εικόνα 5-25 Τυχαίος περίπατος.....	72
Εικόνα 5-26 Αποτελέσματα προσθετικού μοντέλου από την αποσύνθεση STL.....	73
Εικόνα 5-27 Πρόβλεψη προσθετικού μοντέλου STL με μορφή διαγράμματος.....	74
Εικόνα 5-28 Νέα αποτελέσματα προσθετικού μοντέλου από την αποσύνθεση STL ..	75
Εικόνα 5-29 Νέα πρόβλεψη προσθετικού μοντέλου STL με μορφή διαγράμματος ..	76
Εικόνα 5-30 Αποτελέσματα πολλαπλασιαστικού μοντέλου από την αποσύνθεση STL .....	77
Εικόνα 5-31 Πρόβλεψη πολλαπλασιαστικού μοντέλου STL με μορφή διαγράμματος .....	78
Εικόνα 5-32 Πρόβλεψη πολλαπλασιαστικού μοντέλου STL μετά την μετρατροπή ...	79
Εικόνα 5-33 Πρόβλεψη προσθετικού μοντέλου Holt-Winters με μορφή διαγράμματος .....	82
Εικόνα 5-34 Πρόβλεψη πολλαπλασιαστικού μοντέλου Holt-Winters με μορφή διαγράμματος.....	83
Εικόνα 6-1 Διαχωρισμός δεδομένων σε Training set και Test set .....	85

Εικόνα 6-2 Σύγκριση παραλλαγών κλασικής αποσύνθεσης με πραγματικές τιμές ...	87
Εικόνα 6-3 Λεπτομέρεια εικόνας 6-2.....	87
Εικόνα 6-4 Σύγκριση παραλλαγών STL RWD με πραγματικές τιμές .....	88
Εικόνα 6-5 Λεπτομέρεια εικόνας 6-4.....	88
Εικόνα 6-6 51 Σύγκριση παραλλαγών Holt-Winters με πραγματικές τιμές.....	89
Εικόνα 6-7 Λεπτομέρεια εικόνας 6-6.....	89
Εικόνα 6-8 K-fold Cross Validation.....	90
Εικόνα 6-9 Παραλλαγή Cross Validation για χρονοσειρές .....	91
Εικόνα 6-10 Μορφή για πρόβλεψη δύο περιόδους μπροστά .....	91
Εικόνα 6-11 Θηκογραφήματα MAE 8 OOS .....	96
Εικόνα 6-12 Θηκογραφήματα MAE 7 OOS .....	96
Εικόνα 6-13 Θηκογραφήματα MAPE 8 OOS.....	97
Εικόνα 6-14 Θηκογραφήματα MAPE 7 OOS.....	97
Εικόνα 6-15 Θηκογραφήματα RMSE 8 OOS .....	98
Εικόνα 6-16 Θηκογραφήματα RMSE 7 OOS .....	98
Εικόνα 6-17 Ραβδόγραμμα MAE 8 OOS .....	99
Εικόνα 6-18 Ραβδόγραμμα MAPE 8 OOS .....	100
Εικόνα 6-19 Ραβδόγραμμα RMSE 8 OOS.....	100
Εικόνα 6-20 Ραβδόγραμμα MAE 7 OOS .....	101
Εικόνα 6-21 Ραβδόγραμμα MAPE 7 OOS .....	101
Εικόνα 6-22 Ραβδόγραμμα RMSE 7 OOS.....	102
Εικόνα 6-23 Θηκογραφήματα MAE 8 CVAL.....	103
Εικόνα 6-24 Θηκογραφήματα MAE 7 CVAL.....	104
Εικόνα 6-25 Θηκογραφήματα MAPE 8 CVAL.....	104
Εικόνα 6-26 Θηκογραφήματα MAPE 7 CVAL.....	105
Εικόνα 6-27 Θηκογραφήματα RMSE 8 CVAL.....	105
Εικόνα 6-28 Θηκογραφήματα RMSE 7 CVAL.....	106
Εικόνα 6-29 Ραβδόγραμμα MAE 8 CVAL .....	107
Εικόνα 6-30 Ραβδόγραμμα MAPE 8 CVAL .....	107
Εικόνα 6-31 Ραβδόγραμμα RMSE 8 CVAL .....	108

Εικόνα 6-32 Ραβδόγραμμα MAE 7 CVAL .....	108
Εικόνα 6-33 Ραβδόγραμμα MAPE 7 CVAL .....	109
Εικόνα 6-34 Ραβδόγραμμα RMSE 7 CVAL .....	109

## Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 2-1 Κατηγορίες υφής .....	13
Πίνακας 5-1 Δεδομένα.....	47
Πίνακας 5-2 Δεδομένα με χρωματική κλίμακα .....	48
Πίνακας 5-3 Διαχωρισμός σε ζώνες.....	49
Πίνακας 5-4 Συντελεστής Μεταβολής (CV) Ζώνης 1 και 2 για κάθε περίοδο.....	50
Πίνακας 5-5 Σημειακές προβλέψεις προσθετικού μοντέλου STL με εύρη διακύμανσης για πιθανότητες 80% και 95% .....	74
Πίνακας 5-6 Νέες Σημειακές προβλέψεις προσθετικού μοντέλου STL με εύρη διακύμανσης για πιθανότητες 80% και 95%.....	76
Πίνακας 5-7 Σημειακές προβλέψεις πολλαπλασιαστικού μοντέλου STL (λογάριθμοι) με εύρη διακύμανσης για πιθανότητες 80% και 95%.....	78
Πίνακας 5-8 Μετατροπή αποτελεσμάτων σε GN από λογαρίθμους .....	79
Πίνακας 5-9 Σημειακές προβλέψεις προσθετικού μοντέλου Holt-Winters με εύρη διακύμανσης για πιθανότητες 80% και 95%.....	81
Πίνακας 5-10 Παράμετροι εξομάλυνσης προσθετικού μοντέλου Holt-Winters .....	82
Πίνακας 5-11 Σημειακές προβλέψεις πολλαπλασιαστικού μοντέλου Holt-Winters με εύρη διακύμανσης για πιθανότητες 80% και 95%.....	83
Πίνακας 5-12 Παράμετροι εξομάλυνσης πολλαπλασιαστικού μοντέλου Holt-Winters .....	83
Πίνακας 6-1 Προβλέψεις $\Theta_{50}$ από μέθοδο Out of Sample για κάθε μοντέλο .....	86
Πίνακας 6-2 Μέτρα εκτίμησης ακρίβειας OOS $\Theta_{50}$ .....	94
Πίνακας 6-3 Μέτρα εκτίμησης ακρίβειας CVAL $\Theta_{50}$ .....	95
Πίνακας 6-4 Μέσοι όροι μέτρων ακρίβειας κάθε μοντέλου OOS.....	99
Πίνακας 6-5 Μέσοι όροι μέτρων ακρίβειας κάθε μοντέλου CVAL .....	106

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο

Η μετακίνηση με το αυτοκίνητο αποτελεί πλέον αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητάς των ανθρώπων κάνοντας την ασφάλεια στους δρόμους ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που καλείται να αντιμετωπίσει ένας μηχανικός. Ένας από τους κύριους παράγοντες της οδικής ασφάλειας είναι η ολισθηρότητα του οδοστρώματος. Έρευνες έχουν δείξει ότι ένα ποσοστό 15 με 18 τοις εκατό των τροχαίων ατυχημάτων γίνονται σε υγρό οδόστρωμα και η σχέση μεταξύ ατυχημάτων που οφείλονται σε κακά καιρικά φαινόμενα και της ολισθηρότητας της επιφάνειας του οδοστρώματος είναι αδιαμφισβήτητη (Smith et al. 1976, Davis et al. 2002).

Με το πέρασμα του χρόνου η κατάσταση του οδοστρώματος χειροτερεύει και η ολισθηρότητα της επιφάνειάς του αυξάνεται. Η υποβάθμιση της κατάστασης του οδοστρώματος από την φθορά και λείανση των αδρανών λόγω της συνεχούς αύξησης του κυκλοφοριακού φόρτου, καθώς και τα κατάλοιπα που αφήνουν στο οδόστρωμα τα οχήματα είναι λίγοι μόνο από τους παράγοντες που οδηγούν στην αύξηση της ολισθηρότητας της επιφάνειας ενός οδοστρώματος. Ένα μεγάλο ποσοστό των ατυχημάτων που οφείλονται πέρα από άλλους παράγοντες και στην κακή αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος μπορεί να αποτραπεί αν ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα εγκαίρως.

Προκειμένου να γίνουν έγκαιρες επεμβάσεις στο οδόστρωμα πρέπει να υπάρχει ένα σύστημα παρακολούθησης της κατάστασής του καθώς και κάποια μέθοδος ικανή να προβλέψει την πορεία της κατάστασής του στο μέλλον. Όμως η πρόβλεψη της ολισθηρότητας είναι ένα σύνθετο πρόβλημα αφού επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες όπως είναι ο τύπος και τα υλικά της στρώσης κυκλοφορίας, η κυκλοφορία, οι κλιματολογικές συνθήκες κλπ.

Γενικά βέβαια, η διαδικασία πρόβλεψης ενός μεγέθους -και πολύ περισσότερο ενός φυσικού μεγέθους- είναι ένα πολύπλοκο θέμα που χρήζει ιδιαίτερη μελέτη και προσοχή. Την τελευταία 20ετία και πλέον, η ανάλυση πρόβλεψης διαφόρων μεγεθών παίζει ολοένα και πιο σημαντικό ρόλο στους τομείς λήψης αποφάσεων και δράσεων της οικονομίας. Ταυτόχρονα, η αλματώδης πρόοδος της επιστήμης σε τομείς που συνδέονται άμεσα με την στατιστική, την οικονομετρία και την πληροφορική προσφέρει τα απαραίτητα εργαλεία σε επιχειρήσεις, φορείς ή οργανισμούς, ώστε να μπορούν να προβλέψουν μεγέθη που σχετίζονται με την βιωσιμότητα τους.

Μία τέτοια διαδικασία πρόβλεψης είναι και η ανάλυση με χρονοσειρές. Υπάρχουν δύο κύριοι στόχοι στην ανάλυση χρονοσειρών: (α) Ο προσδιορισμός της φύσης του φαινομένου όπως παρουσιάζεται από τη σειρά των παρατηρήσεων και (β) η πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών της μεταβλητής με βάση την προηγούμενη

συμπεριφορά της. Οι στόχοι αυτοί φαίνονται να ανταποκρίνονται και σε προβλήματα πρόβλεψης μεγεθών που σχετίζονται με την εξέλιξη της κατάστασης έργων συγκοινωνιακής υποδομής και ειδικότερα των οδοστρωμάτων.

## 1.2 Στόχος και μεθοδολογία

Δεδομένου της πολυπλοκότητας της ολισθηρότητας σαν μέγεθος και των πολλών παραμέτρων από τις οποίες εξαρτάται, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας πρόβλεψής της με τη χρήση μετρήσεων της υπό τη μορφή χρονοσειρών, στις οποίες υπεισέρχονται οι προαναφερόμενες παράμετροι. Ως πρώτο βήμα γίνεται ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας όσον στα χαρακτηριστικά ολισθηρότητας της επιφάνειας ασφαλτικών οδοστρωμάτων, καθώς και των διαφόρων μεθόδων μέτρησής της. Εν συνεχεία αναπαράγεται η διαδικασία πρόβλεψης με χρήση χρονοσειρών συνοψίζοντας επιμέρους μεθόδους και τεχνικές, οι οποίες αξιοποιούνται στο πλαίσιο πειραματικής ανάλυσης για την επίτευξη του στόχου της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται στοιχεία ολισθηρότητας από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ, τα οποία έχουν συλλεχθεί από τμήμα αυτοκινητοδρόμου σε βάθος χρόνου και είναι υπό τη μορφή χρονοσειράς και βάσει αυτών αναπτύσσονται μοντέλα πρόβλεψης του υπόψη μεγέθους. Τα μοντέλα αυτά ελέγχονται με κατάλληλες διαδικασίες ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων πρόβλεψης.

## 1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 8 κεφάλαια συμπεριλαμβανομένου και του παρόντος εισαγωγικού.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται ανασκόπηση των χαρακτηριστικών της αντιολισθητικής ικανότητας ενός ασφαλτικού οδοστρώματος και των παραμέτρων που την επηρεάζουν.

Το τρίτο κεφάλαιο αφορά στις διάφορες μεθόδους μέτρησης της ολισθηρότητας του οδοστρώματος.

Το τέταρτο κεφάλαιο αποτελεί μια σύντομη εισαγωγή στις προβλέψεις και τις χρονοσειρές.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναπτύσσονται μοντέλα πρόβλεψης της ολισθηρότητας χρησιμοποιώντας μετρήσεις πεδίου.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται επαλήθευση των μοντέλων και διερευνάται η ακρίβεια πρόβλεψης τους.

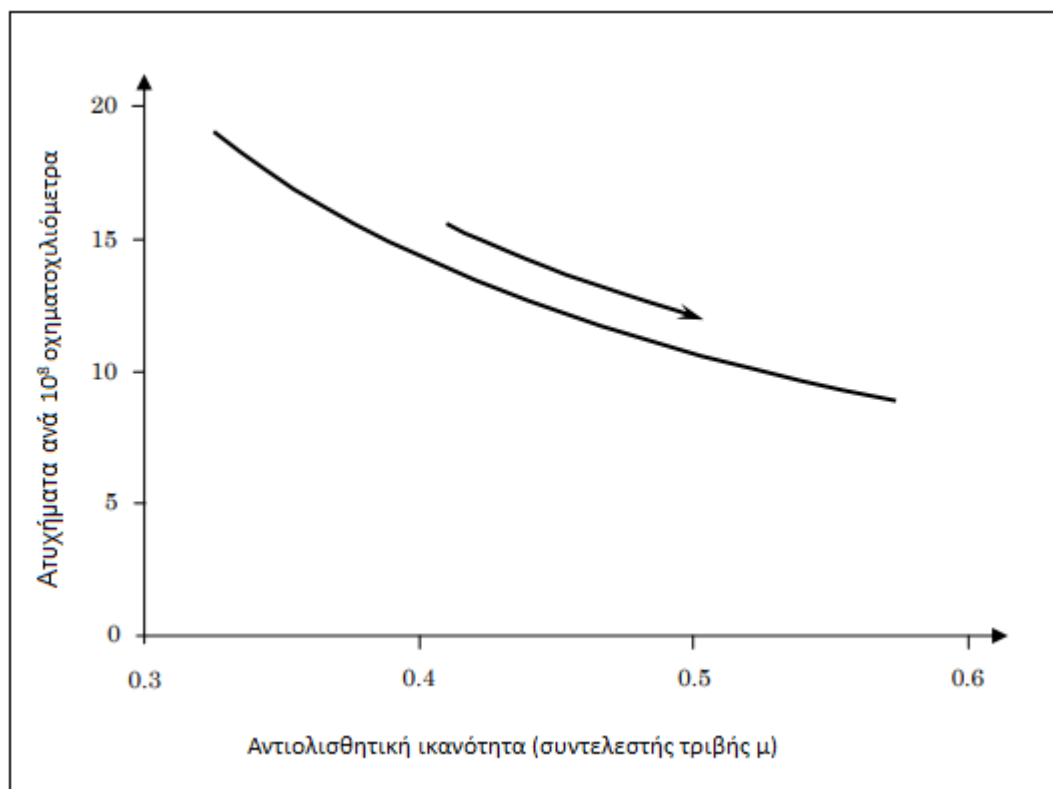
Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των συμπερασμάτων που προέκυψαν και προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

Το όγδοο και τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη διεθνή βιβλιογραφία, οδηγό για τη σύνταξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

## 2. Αντιολισθητική ικανότητα ασφαλτικού οδοστρώματος

### 2.1 Γενικά

Η αντιολισθητική ικανότητα των ασφαλτικών οδοστρωμάτων είναι άμεσα συνυφασμένη με την ασφαλή οδήγηση και την αποφυγή τροχαίων ατυχημάτων. Η σχέση μεταξύ αντιολισθητικής ικανότητας και συχνότητας ατυχημάτων δύσκολα ποσοτικοποιείται, ωστόσο υπάρχουν πολυάριθμες εμπειρικές έρευνες στη διεθνή βιβλιογραφία που δείχνουν ότι η πιθανότητα ενός ατυχήματος, καθώς και η σοβαρότητα του αυξάνονται με την αύξηση της ολισθηρότητας (Hall et al. 2009, Gothie 1996). Σύμφωνα με το διάγραμμα της εικόνας 2-1 (Viner et al. 2004) ο διπλασιασμός της αντιολισθητικής ικανότητας μπορεί να επιφέρει μείωση του αριθμού των ατυχημάτων της τάξης του 50 %.



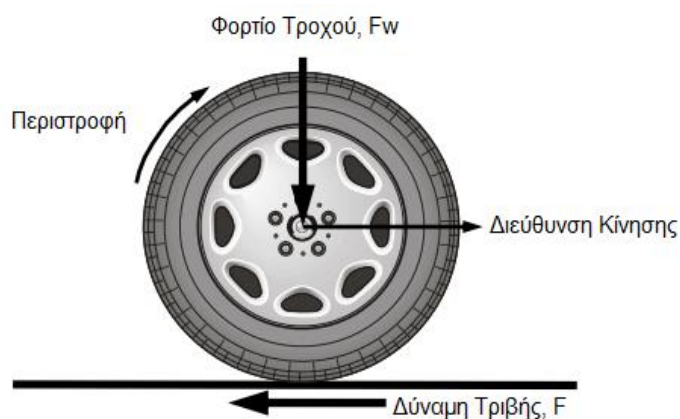
Εικόνα 2-1 Σχέση αντιολισθητικής ικανότητας και αριθμού ατυχημάτων (Viner et al. 2004)

Όλα τα παραπάνω καθιστούν αναγκαία την παρακολούθηση της αντιολισθητικής ικανότητας ενός οδοστρώματος και τη διατήρησή της σε ικανοποιητικά επίπεδα με έγκαιρες επεμβάσεις.



## 2.2 Συνιστώσες αντιολισθητικής ικανότητας

Το βασικό χαρακτηριστικό της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος είναι η τριβή. Ο AASHTO έχει ορίσει την τριβή ως τη δύναμη που προβάλλει αντίσταση στη σχετική μετακίνηση μεταξύ του ελαστικού ενός οχήματος και της επιφάνειας του οδοστρώματος (Hall et al. 2009). Η δύναμη αυτή παράγεται κατά την κύλιση ή ολίσθηση του ελαστικού στην επιφάνεια του οδοστρώματος, όπως φαίνεται στην εικόνα 2-2.



Εικόνα 2-2 Διάγραμμα Δυνάμεων που δρουν σε έναν τροχό που περιστρέφεται (Hall et al. 2009)

Η τριβή περιγράφεται από τον συντελεστή τριβής,  $\mu$ , που είναι το αδιάστατο μέγεθος που προκύπτει από τον λόγο της επαπτομένης Δύναμης Τριβής  $F$  που αναπτύσσεται μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος και του κατακόρυφου φορτίου του ελαστικού  $F_w$  όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.1) (Hall et al. 2009).

$$\mu = \frac{F}{F_w} \quad (2.1)$$

Όπου:

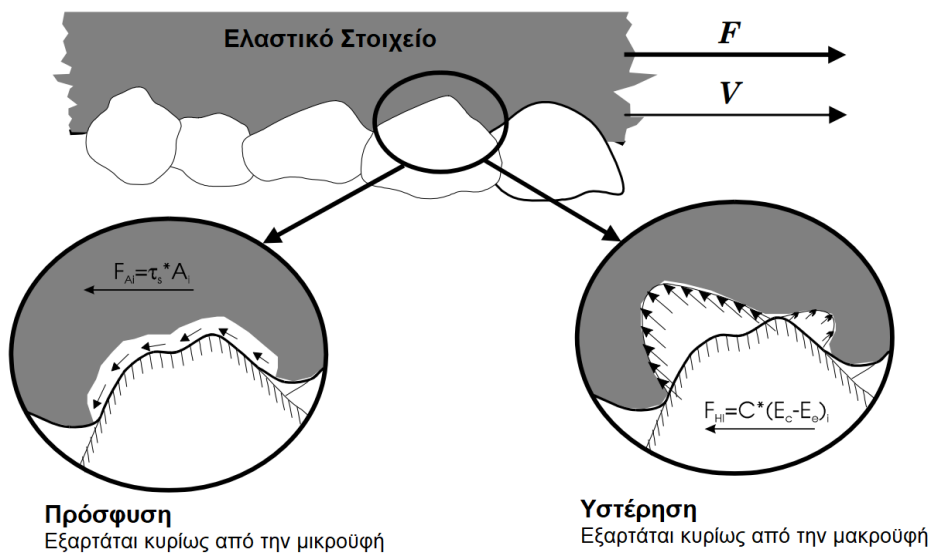
$\mu$  = ο συντελεστής τριβής

$F$  = η δύναμη τριβής

$F_w$  = το φορτίο του τροχού

Περαιτέρω ανάλυση της τριβής δείχνει ότι η τριβή του οδοστρώματος είναι το αποτέλεσμα της πολύπλοκης αλληλεπίδρασης δύο κύριων συνιστωσών, της πρόσφυσης και της υστέρησης (εικόνα 2-3). Πρόσφυση είναι η τριβή που προκύπτει κατά την επαφή του ελαστικού με το οδόστρωμα, κατά την οποία το ελαστικό και τα αδρανή της επιφάνειας του οδοστρώματος “αλληλοσυνδέονται” και δημιουργούν

δεσμούς σε πολύ μικρή κλίμακα. Εξαρτάται από τη διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας και το εμβαδό της επιφάνειας επαφής. Υστέρηση είναι το αποτέλεσμα της απώλειας ενέργειας λόγω παραμόρφωσης του ελαστικού. Όταν το ελαστικό συμπιέζεται πάνω στα αδρανή, τα περιτυλίγει και η κατανομή των τάσεων οδηγεί στην αποθήκευση της δύναμης παραμόρφωσης, εντός του ελαστικού. Κατά την αποτόνωση του ελαστικού ένα ποσοστό της αποθηκευμένης ενέργειας ανακτάται ενώ υπάρχει απώλεια της υπόλοιπης με τη μορφή θερμότητας (υστέρηση), φαινόμενο μη αναστρέψιμο. Η απώλεια ενέργειας συνεισφέρει στην πέδηση και τελικώς στην ακινητοποίηση του οχήματος (Hall et al. 2009, Yu et al. 2017).



Εικόνα 2-3 Κύριοι Μηχανισμοί Τριβής (Glennon 1996)

Υπάρχουν και άλλες συνιστώσες στην τριβή του οδοστρώματος (πχ διατμητικές δυνάμεις στο ελαστικό), αλλά σε σύγκριση με την πρόσφυση και την υστέρηση είναι ασήμαντες. Επομένως η τριβή μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα των δυνάμεων τριβής της πρόσφυσης και της υστέρησης (σχέση 2.2) (Kane et al. 2019).

$$F = F_A + F_H \quad (2.2)$$

Όπου:

$F$ = η δύναμη της τριβής

$F_A$ = η συνιστώσα της πρόσφυσης

$F_H$ = η συνιστώσα της υστέρησης

## 2.3 Δυνάμεις τριβής

### 2.3.1 Διαμήκειες δυνάμεις τριβής

Οι διαμήκειες δυνάμεις τριβής εμφανίζονται μεταξύ του ελαστικού και της επιφάνειας του οδοστρώματος κατά τη διαμήκη διεύθυνση, όταν αυτό εκτελεί ελεύθερη κύλιση (χωρίς να ολισθαίνει) ή έχει σταθερή πέδηση. Κατά την ελεύθερη κύλιση, η σχετική ταχύτητα μεταξύ της περιμέτρου του ελαστικού και της επιφάνειας του οδοστρώματος, η οποία αποκαλείται ταχύτητα ολίσθησης, είναι μηδενική. Κατά την κίνηση με σταθερή πέδηση η ταχύτητα ολίσθησης γίνεται από μηδενική (0) μέχρι και ίση με την ταχύτητα κίνησης του οχήματος (100% ολίσθηση).

Η σχέση (2.3) περιγράφει τον υπολογισμό της ταχύτητας ολίσθησης (Meyer 1982)

$$S = V - V_p = V - (0.68 \times \omega \times r) \quad (2.3)$$

Όπου:

$S$  = Ταχύτητα Ολίσθησης (mi/hr)

$V$  = Ταχύτητα Οχήματος (mi/hr)

$V_p$  = Μέση Ταχύτητα του ελαστικού στην περίμετρο του (mi/hr)

$\omega$  = Γωνιακή Ταχύτητα του ελαστικού (rad/sec)

$r$  = Μέση ακτίνα του ελαστικού (ft)

Κατά την ελεύθερη κύλιση η μέση ταχύτητα στην περίμετρο του ελαστικού,  $V_p$  είναι ίση με την ταχύτητα του οχήματος  $V$  και επομένως η ταχύτητα ολίσθησης  $S$  είναι μηδενική. Αντιθέτως όταν ο τροχός είναι ακινητοποιημένος ή σε πλήρη πέδηση, η  $V_p$  είναι αυτή μηδενική και η  $S$  ισούται με την ταχύτητα του οχήματος  $V$ . Στην ελεύθερη κύλιση η ολίσθηση είναι 0% ενώ όταν ο τροχός είναι ακινητοποιημένος ισούται με 100%.

Η εξίσωση (2.3) δείχνει τον υπολογισμό του ποσοστού ολίσθησης (Meyer 1982):

$$SR = \frac{V - V_p}{V} \times 100 = \frac{S}{V} \times 100 \quad (2.3)$$

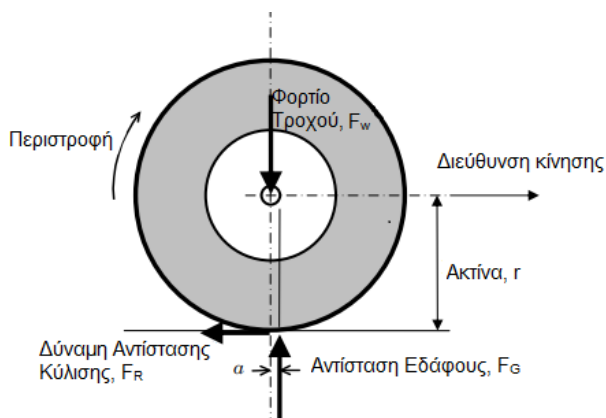
Όπου:

$SR$  = Ποσοστό ταχύτητας ολίσθησης

$V$  = Ταχύτητα οχήματος

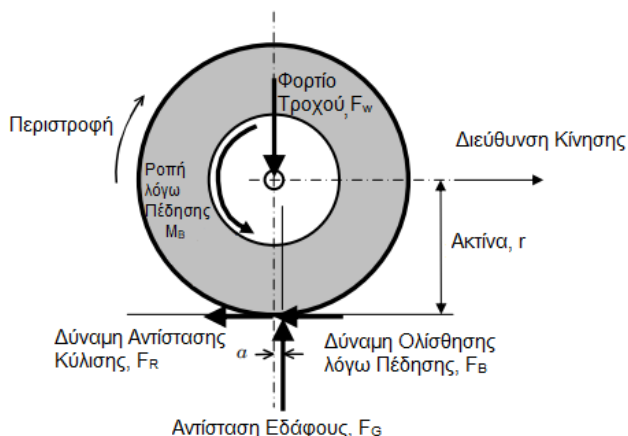
$V_p$  = Μέση ταχύτητα του ελαστικού στην περίμετρο του

Στην εικόνα 2-4 φαίνονται οι δυνάμεις που ασκούνται σε έναν τροχό που εκτελεί ελεύθερη κύλιση. Σε αυτή την κατάσταση η Αντίσταση του Εδάφους  $F_G$  ασκείται στο κέντρο της επιφάνειας πίεσης του ελαστικού, που απέχει απόσταση  $a$  από τον άξονα του κέντρου βάρους του τροχού. Η απόσταση αυτή δρα ως μοχλοβραχίονας και προκαλεί μια ροπή που πρέπει να ξεπεραστεί προκειμένου να κυλίσει ο τροχός. Η δύναμη που απαιτείται για να αντισταθμίσει την ροπή αυτή είναι η Δύναμη Αντίστασης Κύλισης (Rolling Resistance Force),  $F_R$ . Η τιμή της απόστασης  $a$  αυξάνεται με την ταχύτητα κίνησης. Επομένως υψηλότερες ταχύτητες οδηγούν σε αύξηση της  $F_R$ .



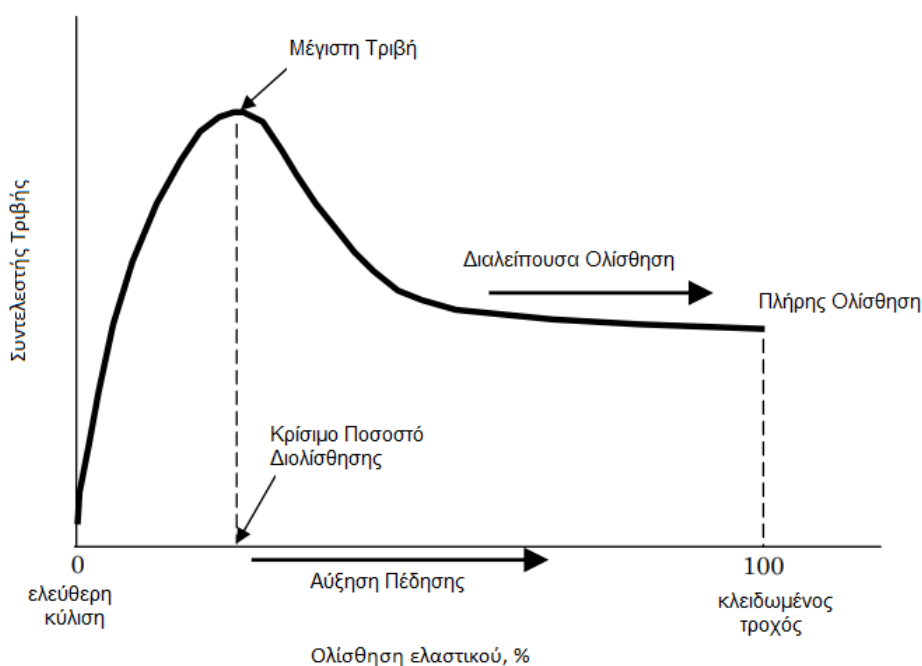
Εικόνα 2-4 Δύναμη Αντίστασης Κύλισης σε κατάσταση ελεύθερης κύλισης (Andresen and Wambold 1999)

Η εικόνα 2-5 απεικονίζει την περίπτωση της σταθερής πέδησης. Στην κατάσταση αυτή απαιτείται μια πρόσθετη δύναμη για να αντιμετωπιστεί η πρόσθετη ροπή που προκαλεί η πέδηση. Αυτή είναι η Δύναμη Ολίσθησης λόγω Πέδησης (Braking Slip Force,  $F_B$ ) και είναι ανάλογη του επιπέδου πέδησης και του ποσοστού ολίσθησης που προκύπτει. Η συνολική Δύναμη Τριβής ισούται με το άθροισμα της Δύναμης Αντίστασης Κύλισης  $F_R$  και της Δύναμης Ολίσθησης λόγω Πέδησης (Hall et al. 2009).



Εικόνα 2-5 Δυνάμεις και ροπές σε κατάσταση πέδησης (Andresen and Wambold 1999)

Ο Συντελεστής Τριβής μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος αλλάζει ανάλογα με το ποσοστό ολίσθησης όπως φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 2-6. Υπάρχει ραγδαία αύξηση του συντελεστή τριβής με την αύξηση του ποσοστού ολίσθησης στα αρχικά στάδια μέχρις ότου να φτάσει μια μέγιστη τιμή που ονομάζεται κρίσιμη ολίσθηση και παρατηρείται συνήθως σε ποσοστά ολίσθησης μεταξύ 18 και 30%. Ο συντελεστής τριβής στη συνέχεια μειώνεται μέχρι να φτάσει την τιμή που ονομάζεται συντελεστής μόνιμης ολίσθησης που συμβαίνει όταν το ποσοστό ολίσθησης φτάσει στο 100%. Η διαφορά μεταξύ των συντελεστών τριβής που αντιστοιχούν στην κρίσιμη ολίσθηση και στη μόνιμη ολίσθηση μπορεί να φτάσει μέχρι και τιμές που ισούνται με ποσοστό ολίσθησης 50% και είναι πολύ μεγαλύτερη σε βρεγμένα οδοστρώματα από ότι σε στεγνά (Austroads 2005).



Εικόνα 2-6 Σχέση μεταξύ Διολίσθησης και Συντελεστή Τριβής (Austroads 2005)

Η σχέση μεταξύ ποσοστού ολίσθησης και συντελεστή τριβής που παρατηρείται στο διάγραμμα (εικόνα 2-6) είναι η λογική πάνω στην οποία βασίζεται το ABS (Anti-locking Brake System) που εκμεταλλεύεται το κομμάτι του διαγράμματος πριν τη κρίσιμη ολίσθηση μειώνοντας την απώλεια πλευρικής τριβής λόγω ολίσθησης για καλύτερο χειρισμό του οχήματος κατά την πέδηση. Τα οχήματα με ABS είναι σχεδιασμένα να αποτρέπουν το μπλοκάρισμα των τροχών εναλλάσσοντας μεταξύ ενεργοποίησης και απενεργοποίησης των φρένων με ταχύ ρυθμό, κρατώντας το ποσοστό ολίσθησης κοντά στο κρίσιμο ποσοστό για την επίτευξη του μέγιστου συντελεστή τριβής (Hall et al. 2009).

### 2.3.2 Δυνάμεις πλευρικής τριβής

Σημαντικός παράγοντας της τριβής είναι και οι πλευρικές τριβές που αναπτύσσονται όταν το όχημα αλλάζει κατεύθυνση κατά την διάρκεια των ελιγμών του, όταν συναντά εγκάρσιες κλίσεις σε καμπύλες ή πλευρικούς ανέμους. Η σχέση των δυνάμεων που δρουν στο ελαστικό του αυτοκινήτου και την επιφάνεια του οδοστρώματος στις καταστάσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω παρουσιάζονται στην εξίσωση 2.4:

$$F_s = \frac{V^2}{15R} - e \quad (2.4)$$

Όπου:

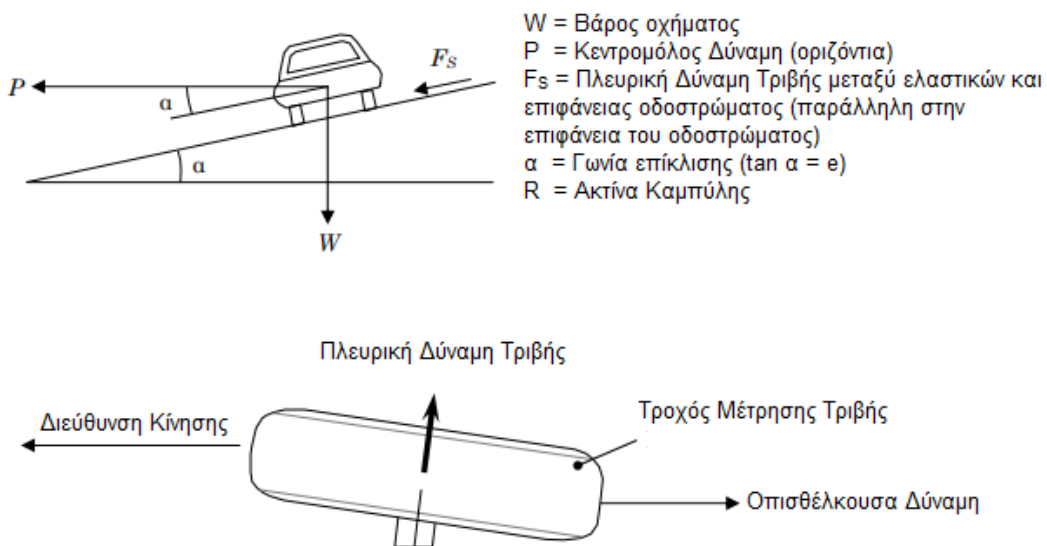
$F_s$  = Πλευρική Δύναμη Τριβής

$V$  = Ταχύτητα οχήματος, mi/hr

$R$  = ακτίνα της τροχιάς του κέντρου βάρους του οχήματος (ή ακτίνα της καμπύλης της στροφής), ft

$e$  = επίκλιση του οδοστρώματος, ft/ft

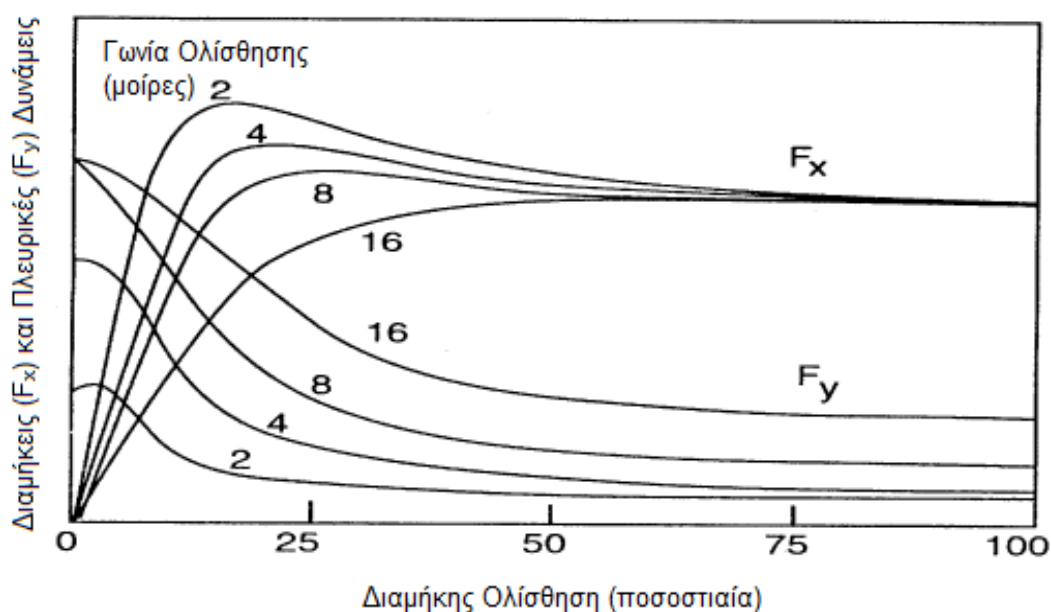
Η εξίσωση βασίζεται στο παρακάτω διάγραμμα της εικόνας 2-7 που επιδεικνύει πως οι δυνάμεις πλευρικής τριβής αντισταθμίζουν την κεντρομόλο δύναμη που αναπτύσσεται όταν το όχημα δεν κινείται ευθύγραμμα.



Εικόνα 2-7 Διάγραμμα Δυνάμεων που ενεργούν σε όχημα που κινείται σε καμπύλη σταθερής ακτίνας με σταθερή ταχύτητα. (Hall et al. 2009)

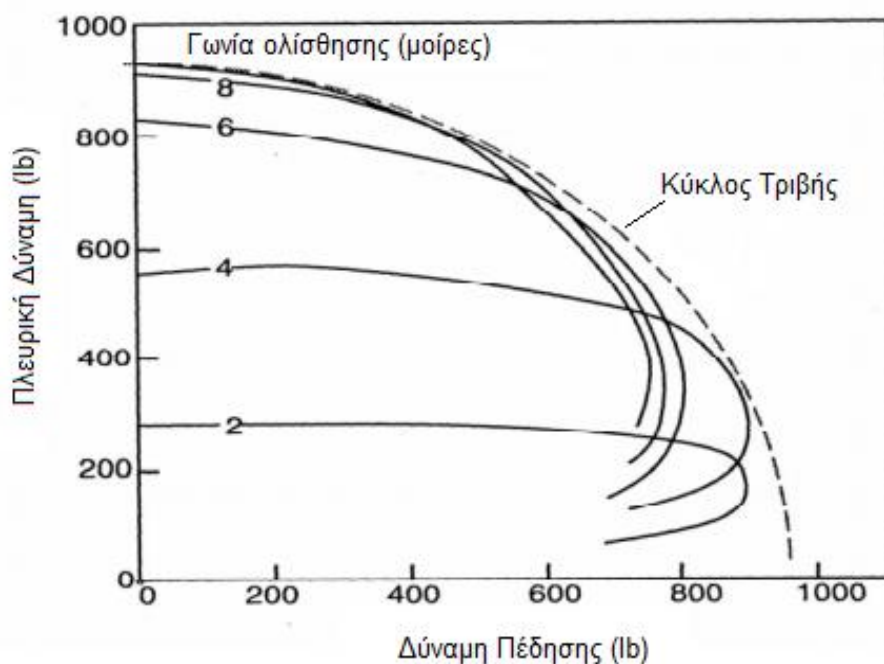
### 2.3.3 Συνδυασμός στροφής και πέδησης

Όταν συνδυάζονται οι στροφές με την πέδηση, ο οδηγός ρισκάρει να μην επιβραδύνει εγκαίρως ή να χάσει τον έλεγχο λόγω μειωμένων πλευρικών δυνάμεων τριβής. Στα όρια του “κρατήματος” των ελαστικών, η σχέση μεταξύ διαμήκων και πλευρικών δυνάμεων είναι τέτοια ώστε αύξηση της μιας πρέπει να σημαίνει ανάλογη μείωση της άλλης. Επομένως η διαμήκης πέδηση οδηγεί σε μείωση των πλευρικών δυνάμεων και ομοίως η αύξηση των πλευρικών δυνάμεων οδηγεί σε μείωση της πέδησης όπως φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 2-8.



Εικόνα 2-8 Διαμήκεις και Πλευρικές Δυνάμεις συναρτήσει της Διαμήκουσ Ολίσθησης (Gillespie 1992)

Γνωστό και ως Κύκλος Τριβής ή Έλλειψη Τριβής, το διανυσματικό άθροισμα των 2 δυνάμεων (διαμήκης πέδηση και πλευρικές δυνάμεις) παραμένει σταθερό (κύκλος) ή σχεδόν σταθερό (έλλειψη) όπως φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 2-9.



Εικόνα 2-9 Σχέση Πλευρικής και Διαμήκουσ Δύναμης για σταθερή γωνία Ολίσθησης (Gillespie, 1992)

Στην περιοχή κοντά στα όρια του “κρατήματος” των ελαστικών, οι δύο συνισταμένες μπορούν να μεταβάλλονται ανεξάρτητα εφόσον το διανυσματικό τους άθροισμα δεν υπερβαίνει τα σύνορα που ορίζει ο κύκλος ή έλλειψη τριβής.

## 2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την ολισθηρότητα

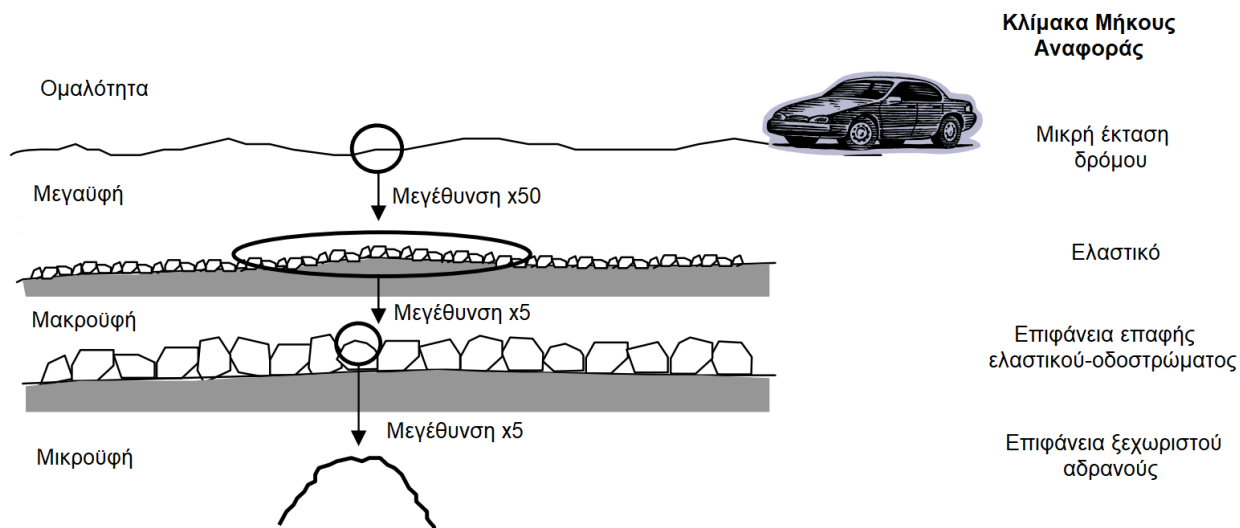
### 2.4.1 Υφή επιφάνειας οδοστρώματος

Η υφή της επιφάνειας οδοστρώματος ορίζεται ως η απόκλιση της επιφάνειας αυτής από μια θεωρητική επίπεδη επιφάνεια (AASHTO, 2008). Είναι το χαρακτηριστικό της επιφάνειας του οδοστρώματος που παίζει τον πιο καθοριστικό ρόλο στην αλληλεπίδραση οδοστρώματος-ελαστικού (Henry et al, 2000). Εξετάζεται σε διάφορες κλίμακες (εικόνα 2-10), ανάλογα με το μέγεθος του μήκους κύματος ( $\lambda$ ) των αποκλίσεων (πίνακας 2-1).



Πίνακας 2-1 Κατηγορίες υφής

Κατηγορία υφής	Μήκος κύματος $\lambda$ (mm)
Μικροϋφή	$\lambda < 0.5$ mm
Μακροϋφή	$0.5 < \lambda < 50$
Μεγαϋφή	$50 < \lambda < 500$
Ομαλότητα	$\lambda > 500$



Εικόνα 2-10 Διαβαθμίσεις Υφής Επιφάνειας Οδοστρώματος (Sandburg 1998)

Η ολισθηρότητα των οδοστρωμάτων σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με τη μικροϋφή και τη μακροϋφή της επιφάνειάς τους.

### Μικροϋφή

Πρόκειται για την τραχύτητα της επιφάνειας του οδοστρώματος σε μικροσκοπικό επίπεδο που δε μπορεί να ανιχνεύσει το γυμνό μάτι. Αναφέρεται στην μορφή της επιφάνειας των αδρανών, επηρεάζει ως επί το πλείστον την πρόσφυση και συμβάλλει σημαντικά στον συντελεστή τριβής όταν οι ταχύτητες είναι χαμηλές ( $V < 50$  km/h). Εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την προέλευση και το είδος των αδρανών. Για υψηλότερη μικροϋφή επιθυμητά χαρακτηριστικά των αδρανών είναι:

- Η υψηλή σκληρότητα μεγαλύτερη του 6 για τα σκληρά και 3-5 για μαλακά στην κλίμακα Mohs.
- Αντοχή στην στίλβωση, Τιμές PSV (Polished Stone Value) μεταξύ 30-35 ή 50 - 70% στην δοκιμή AIR (Acid Insoluble Residue).
- Αντοχή σε φθορά/θρυμματισμό. Είναι δείκτης της αντίστασης των αδρανών στην μηχανική κόπωση. Εκτιμάται με τις δοκιμές Micro-Deval και Los Angeles.

Απώλειες σε ποσοστό  $\leq 17-20\%$  για την Micro-Deval και  $\leq 35-45\%$  για την δοκιμή Los Angeles θεωρούνται τυπικές καλές τιμές για ικανοποιητική τριβή.

Όταν η επιφάνεια του οδοστρώματος είναι υγρή, δημιουργείται μια λεπτή μεμβράνη νερού λόγω της επιφανειακής τάσης η οποία μειώνει την επιφάνεια επαφής μεταξύ οδοστρώματος και ελαστικού κάνοντάς το πιο ολισθηρό. Η μικροϋφή των αδρανών διαπερνά την μεμβράνη αυτή συμβάλλοντας έτσι σημαντικά στην αντιολισθητική ικανότητα του υγρού οδοστρώματος (Bijsterveld and del Val Miguel 2016). Αξίζει να σημειωθεί ότι ναι μεν η υψηλή μικροϋφή συμβάλλει στην τριβή μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος, φθείρει όμως τα ελαστικά με ταχύτερο ρυθμό (Kogbara et al., 2016).

Η μέτρηση της μικροϋφής δεν μπορεί γίνει άμεσα επί τόπου καθώς απαιτεί εργαστηριακό εξοπλισμό. Μπορεί ωστόσο να μετρηθεί έμμεσα με χαμηλής ταχύτητας συσκευές μέτρησης της τριβής όπως το British Pendulum Tester (BPT) και το Dynamic Friction Tester (DFT) στα οποία θα γίνει αναφορά στο κεφάλαιο 4.

### Μακροϋφή

Πρόκειται για την τραχύτητα που κυμαίνεται σε μήκη κύματος μεταξύ 0.5 mm και 50 mm και πλάτη από 0.1 mm μέχρι 20 mm. Αναφέρεται στη μορφή και τη διάταξη των αδρανών στο οδόστρωμα και επηρεάζεται από το μέγεθος (κυρίως το μέγιστο μέγεθος αδρανών) την διαβάθμιση και την απόσταση των χονδρόκοκκων αδρανών (Kouchaki et al. 2018). Οι αποκλίσεις που δημιουργούνται στην επιφάνεια κύλισης από τα αδρανή επιτρέπουν στο πέλμα του ελαστικού να παραμορφωθεί με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται δυνάμεις υστέρησης συμβάλλοντας έτσι σημαντικά στον συντελεστή τριβής στις υψηλότερες ταχύτητες όπου η συνεισφορά της μικροϋφής μειώνεται. Δε μπορεί επίσης να αγνοηθεί ο ρόλος που παίζει η μακροϋφή στην ταχύτερη αποστράγγιση του νερού κάτω από το πέλμα του ελαστικού, μειώνοντας έτσι το φαινόμενο της υδρολίσθησης και αυξάνοντας την αντιολισθητική ικανότητα του βρεγμένου οδοστρώματος.

Για την μέτρηση της μακροϋφής μόνο, υπάρχουν 2 κατηγορίες: αυτές που είναι πιο χρονοβόρες και απαιτούν την διακοπή της κυκλοφορίας και αυτές που μπορούν να πραγματοποιηθούν από κατάλληλο εξοπλισμό εν κινήσει. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν μέθοδοι όπως η “κηλίδα άμμου” (sand patch method, SPM), outflow meter (OFM) και circular texture meter (CTM), ενώ στη δεύτερη έχουμε συστήματα Laser που τοποθετούνται είτε πάνω σε οχήματα είτε σέρνονται από κάποιον χειριστή που περπατάει.

- **Sand Patch Method:**

Πρόκειται για ογκομετρική δοκιμή κατά την οποία γνωστός όγκος άμμου εξαπλώνεται σε κύκλο πάνω σε καθαρή επιφάνεια οδοστρώματος (εικόνα 2-11). Ο λόγος του συνολικού όγκου της άμμου και της επιφάνειας του σχηματισμένου κύκλου μας δίνει το μέσο βάθος υφής (Mean Texture Depth, MTD) που αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό μέγεθος της υφή του οδοστρώματος.



Εικόνα 2-11 Sand Patch Method

- **Outflow Meter Test:**

Η δοκιμή αυτή (εικόνα 2-12) “μετρά” έμμεσα το βάθος υφής. Συγκεκριμένα μετρά την ικανότητα της μακροϋφής και των πόρων της επιφάνειας να αφήσουν το νερό να διαπεράσει την επιφάνεια. Κατά τη δοκιμή γνωστός όγκος νερού υπό τυποποιημένη πίεση αφήνεται να διαπεράσει τα κενά που δημιουργούνται από την μακροϋφή ανάμεσα στην επιφάνεια του οδοστρώματος και ενός ελαστικού δακτυλίου. Μετράται ο χρόνος (outflow time) ο οποίος χρειάζεται για να διαπεράσει όλος ο όγκος του νερού. Η μέθοδος αυτή συνιστάται για οδοστρώματα με χαμηλό βάθος υφής ειδικά το νερό θα διέφευγε πολύ γρήγορα. Ιδιαίτερα χρήσιμη είναι η μέθοδος αυτή για πορώδη οδοστρώματα τα οποία σχεδιάζονται να έχουν μεγάλη ταχύτητα στράγγισης, καθώς η μέθοδος αυτή δε μετράει μόνο την υφή αλλά και την διαπερατότητα του οδοστρώματος (Aktas et al. 2014).



Εικόνα 2-12 Outflow Meter Test

- **Circular Track Meter:**

Το Circular Track Meter (εικόνα 2-13) είναι μια στατική συσκευή που μετρά το MPD (Mean Profile Depth) σε ένα κύκλο διαμέτρου 286 mm με τη χρήση laser. Ένας μετρητής που υπολογίζει την απόσταση που ταξίδεψε η ακτίνα laser κινείται στον κύκλο με ταχύτητα 6 m/min και παράγει το προφίλ του βάθους υψής στην περίμετρο του κύκλου. Μέσω των μετρήσεων υπολογίζονται δυο δείκτες για την μακροϋφή το MPD (Mean Profile Depth) που είναι ουσιαστικά το μέσο βάθος υψής (MTD) αλλά σε δύο διαστάσεις αντί για τρεις, και το RMS (Root Mean Square) που είναι η τετραγωνική ρίζα του μέσου όρου των τετραγώνων των μετρήσεων.



Εικόνα 2-13 Circular Track Meter

- **Κινητές συσκευές laser**

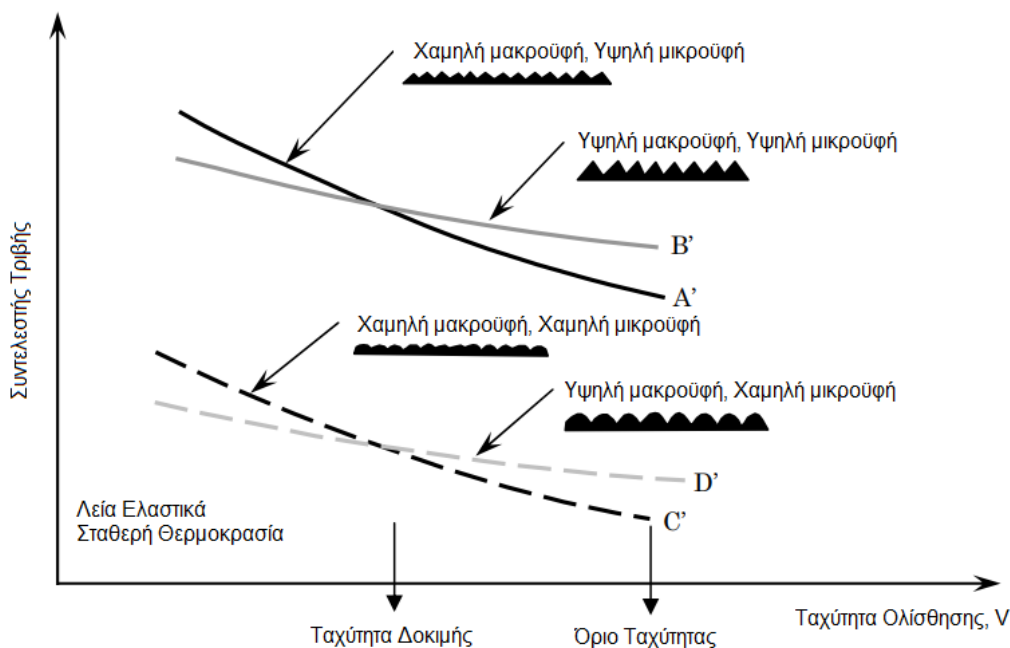
Η χρήση συστημάτων laser έχει αρχίσει να γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη και υπάρχουν πλέον και μέθοδοι που πραγματοποιούνται εν κινήσει και καταγράφουν το βάθος υψής για την διαδρομή που διανύουν. Υπάρχουν δύο κατηγορίες τέτοιων συσκευών, αυτές που σύρονται με το χέρι και αυτές που

τοποθετούνται πάνω σε ένα όχημα (εικόνα 2-14) με την τελευταία να έχει το προφανές πλεονέκτημα ότι δεν απαιτεί την διακοπή της κυκλοφορίας και τη δυνατότητα να καταγράψει το βάθος υφής μεγάλων τμημάτων.



Εικόνα 2-14 ROSAN Laser

Όπως γίνεται σαφές από το παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 2-15) η μικροϋφή έχει μεγάλη επιρροή στο αρχικό επίπεδο του συντελεστή τριβής όταν οι ταχύτητες είναι χαμηλές αλλά η επίδρασή της μειώνεται σε μεγάλο βαθμό με την αύξηση της ταχύτητας. Η μακροϋφή επηρεάζει σημαντικά τον ρυθμό με τον οποίο μειώνεται η τριβή με την αύξηση της ταχύτητας και η επίδρασή της παραμένει σημαντική ακόμα και στις υψηλές ταχύτητες.



Εικόνα 2-15 Επίδραση μικροϋφής και μακροϋφής της επιφάνειας του οδοστρώματος στον συντελεστή τριβής σε διαφορετικές ταχύτητες. (Flintsch et al., 2002)

## 2.4.2 Χαρακτηριστικά οχήματος

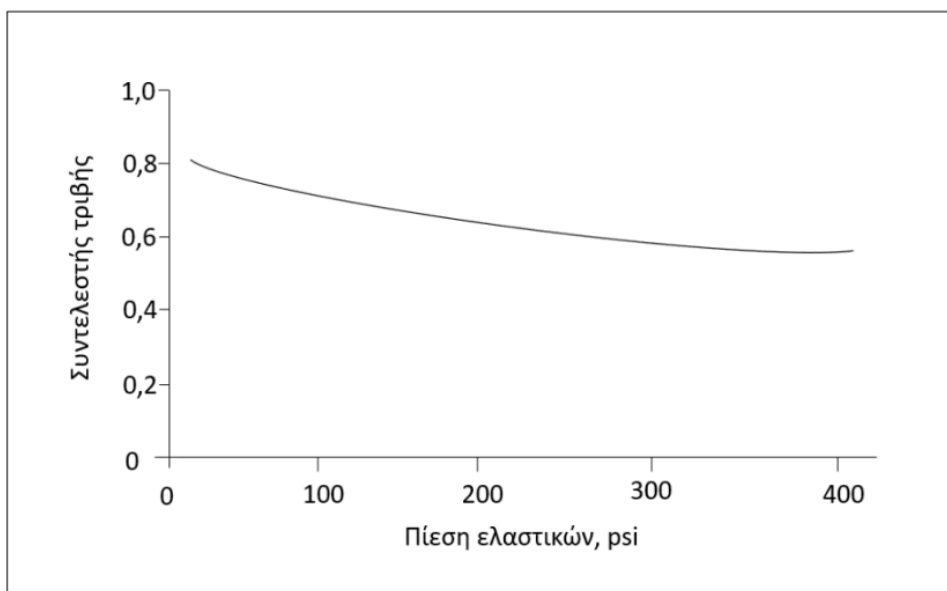
Ήδη αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.3 η επιρροή που έχουν στην τριβή η ταχύτητα και το είδος του ελιγμού που πραγματοποιεί το όχημα. Πολύ μεγάλο ρόλο παίζουν και τα χαρακτηριστικά των ελαστικών. Συγκεκριμένα τα κύρια χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την τριβή μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος είναι το ανάγλυφο του πέλματος και η πίεση του ελαστικού.

### 2.4.2.1 Ανάγλυφο πέλματος

Το ανάγλυφο του πέλματος των ελαστικών και η κατάσταση στην οποία βρίσκεται επηρεάζουν σημαντικά την αποστράγγιση του νερού που συσσωρεύεται στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Οι αυλακώσεις στο πέλμα των ελαστικών δίνουν δίοδο στο νερό που βρίσκεται μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος να διαφύγει αυξάνοντας την επιφάνεια επαφής. Η φθορά των ελαστικών και συγκεκριμένα η μείωση του βάθους των αυλακώσεων έχει πολύ μεγάλη σημασία όταν το όχημα περνά με μεγάλη ταχύτητα από στάσιμα νερά καθώς η αποστραγγιστική ικανότητα των ελαστικών είναι μειωμένη. Έρευνες έδειξαν μειώσεις της τάξης του 45-70 % της αντιολισθητικής ικανότητας σε βρεγμένο οδόστρωμα όταν τα ελαστικά είναι πλήρως φθαρμένα σε αντίθεση με τα νέα (Henry, 1983).

### 2.4.2.2 Πίεση ελαστικών

Ελαστικά που δεν έχουν την σωστή πίεση μπορεί να οδηγήσουν σε μειωμένη αντιολισθητική ικανότητα στις υψηλές ταχύτητες. Όταν δεν είναι αρκετά φουσκωμένα το κέντρο του πέλματος χάνει το σχήμα του και γίνεται πολύ κοίλο με αποτέλεσμα οι αυλακώσεις για την αποστράγγιση στο πέλμα να συστέλλονται και να μειώνεται η επιφάνεια επαφής. Όταν γίνεται αυτό οι αυλακώσεις παγιδεύουν το νερό στην επιφάνεια του οδοστρώματος αντί να βοηθούν στην αποστράγγιση του. Όταν η πίεση στα ελαστικά υπερβαίνει την επιθυμητή, τότε προκαλούνται μόνο μικρές απώλειες στην αντιολισθητική ικανότητα (Henry, 1983; Kulakowski et al. 1990). Η επιπλέον πίεση οδηγεί σε μείωση του φαινομένου της παγίδευσης του νερού στις αυλακώσεις και παρέχει περισσότερη πίεση ώστε να σπρώξει το νερό να απομακρυνθεί από το ελαστικό. Ωστόσο η αυξημένη πίεση παραμορφώνει το σχήμα του ελαστικού μειώνοντας την επιφάνεια επαφής προκαλώντας μικρές απώλειες όπως φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 2-16.



Εικόνα 2-16 Σχέση συντελεστή τριβής και πίεσης ελαστικών (Rizenbergs 1968)

Συνεπώς η αύξηση της πίεσης των ελαστικών επιφέρει μείωση του συντελεστή τριβής μέχρι ένα σημείο όπου πλέον παραμένει σταθερός.

### 2.4.3 Επίδραση καιρικών φαινομένων

#### 2.4.3.1 Θερμοκρασία

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος είναι κάτι που πολλοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να ερευνήσουν. Δεδομένου ότι τα ελαστικά των αυτοκινήτων είναι κατασκευασμένα από ιξωδοελαστικά υλικά,



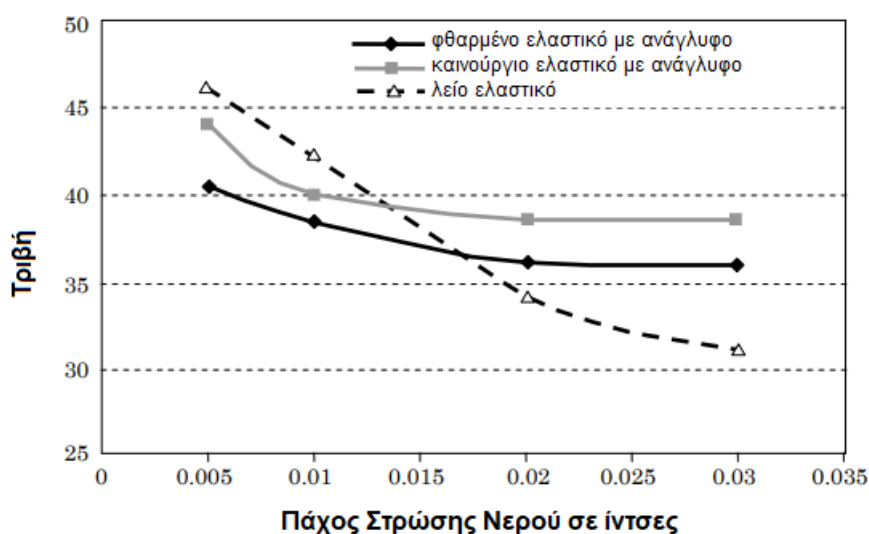
μεταβολές στην θερμοκρασία θα έχουν μεγάλη επίδραση σε αυτά. Η επικρατέστερη άποψη είναι ότι αύξηση της θερμοκρασίας σε γενικές γραμμές οδηγεί σε μείωση της τριβής μεταξύ οδοστρώματος και ελαστικού, ωστόσο αυτό είναι κάτι που δύσκολα μπορεί να ποσοτικοποιηθεί. Άλλες έρευνες δείχνουν ότι ενώ στις χαμηλές ταχύτητες η αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει μείωση της τριβής, σε υψηλότερες ταχύτητες παρατηρήθηκε αυξημένη τριβή (Yingjian Luo, 2003)

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι η αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος παρουσιάζει μια εποχικότητα που συμφωνεί με τα παραπάνω αφού παρατηρείται μείωση της κατά τους θερμότερους μήνες, η αλλαγή αυτή δεν οφείλεται στην θερμοκρασιακή μεταβολή, αλλά σε άλλους παράγοντες, που θα διερευνηθούν αργότερα.

#### 2.4.3.2 Νερό

Η παρουσία νερού στο οδόστρωμα λόγω βροχοπτώσεων ή υγρασίας (condensation) λειτουργεί ως λιπαντικό, προκαλώντας σημαντική μείωση της τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ του πέλματος των ελαστικών και της επιφάνειας του οδοστρώματος.

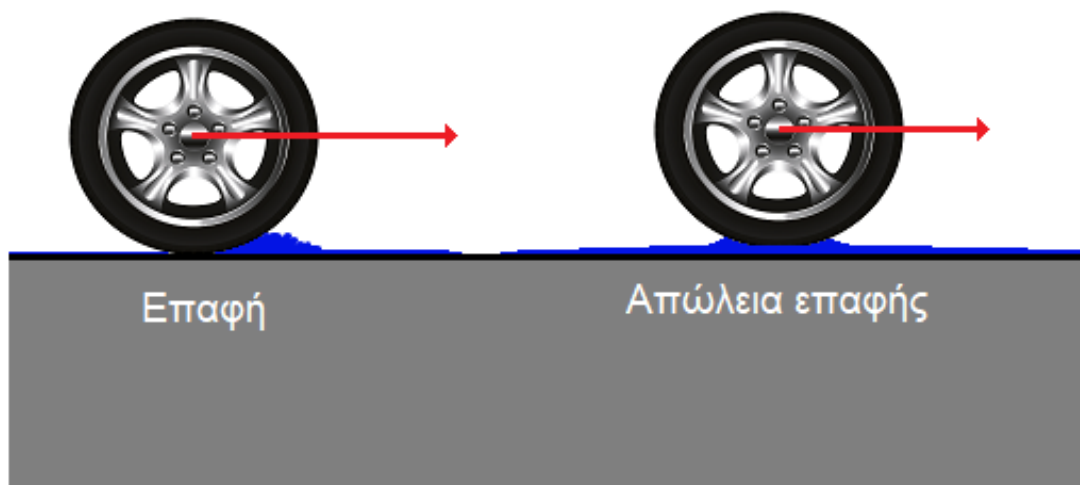
Η επίδραση του πάχους της στρώσης νερού (ΠΣΝ) είναι μηδαμινή στις χαμηλές ταχύτητες ( $V < 32 \text{ km/h}$ ) και αυξάνεται σημαντικά στις ψηλότερες ταχύτητες ( $V > 64 \text{ km/h}$ ). Όπως είναι εμφανές στην εικόνα 2-17, ο συντελεστής τριβής μεταξύ ελαστικού και βρεγμένου οδοστρώματος μειώνεται εκθετικά με την αύξηση του ΠΣΝ. Ο ρυθμός με τον οποίο μειώνεται ο συντελεστής τριβής μικραίνει με την αύξηση του ΠΣΝ. Η επίδραση του ΠΣΝ εξαρτάται και από το είδος των ελαστικών με τα πιο επιρρεπή να είναι τα λεία και τα φθαρμένα ελαστικά επιβεβαιώνοντας τα όσα αναφέρθηκαν πριν για το ανάγλυφο του πέλματος.



Εικόνα 2-17 Επίδραση του Πάχους Στρώσης Νερού (ΠΣΝ) στον συντελεστή τριβής του οδοστρώματος (Henry, 2000)

Ακόμα και μικρές ποσότητες νερού μπορεί να επιφέρουν δραστικές μειώσεις στην αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος. Έρευνες (Harwood, 1987) που διεξήχθησαν με χρηματοδότηση της Ομοσπονδιακής Διοίκησης Αυτοκινητοδρόμων (Federal Highway Administration, FHWA) του Υπουργείου Μεταφορών των ΗΠΑ έδειξαν ότι μόλις 0,002 in (0,05 mm) νερού στην επιφάνεια του οδοστρώματος αρκούν για να μειώσουν τον συντελεστή τριβής κατά 20-30 % από αυτόν του στεγνού οδοστρώματος. Σε μερικές περιπτώσεις, μέχρι και λεπτά στρώματα πάχους 0,001 in (0,025 mm) μπορούν να αποτελέσουν αιτία μεγάλων πτώσεων της αντιολισθητικής ικανότητας των οδοστρωμάτων. Τέτοιες λεπτές στρώσεις μπορούν να εμφανιστούν οποιαδήποτε ώρα κατά την οποία έπεσαν τουλάχιστον 0,025 mm βροχής.

Το φαινόμενο της υδρολίσθησης παρατηρείται όταν οχήματα που κινούνται με υψηλές ταχύτητες περνάνε πάνω από μεγάλες στρώσεις νερού. Όταν αναπτύσσονται υδροστατικές πιέσεις προς τα άνω οι οποίες ξεπερνούν σε μέγεθος την πίεση των ελαστικών, τότε έχουμε απώλεια επαφής του ελαστικού με την επιφάνεια του οδοστρώματος και μείωση της τριβής σε σχεδόν μηδενικές τιμές (εικόνα 2-18). Είναι πολύπλοκο φαινόμενο με πολλές παραμέτρους όπως: βάθος νερού, ταχύτητα οχήματος, μακροϋφή επιφάνειας οδοστρώματος, βάθος αυλακώσεων των ελαστικών, πίεση ελαστικών και επιφάνεια επαφής του ελαστικού.



Εικόνα 2-18 Το φαινόμενο της υδρολίσθησης

Οι μεγάλες στρώσεις νερού μπορούν να εμφανιστούν όταν το οδόστρωμα έχει κακή αποστραγγιστική ικανότητα κατά τις μεγάλες βροχοπτώσεις ή όταν δημιουργούνται εστίες με λιμνάζοντα νερά στην περίπτωση τροχοαυλακώσεων λόγω κακής κατασκευής ή κόπωσης του οδοστρώματος. Για την απώλεια επαφής ελαστικού-οδοστρώματος αρκεί μια ταχύτητα των 64-72 km/h και μια επιφάνεια νερού με βάθος 25 mm και μήκος 9m (Hayes et al. 1983).

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2.4.1 η υφή του οδοστρώματος συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του φαινομένου της υδρολίσθησης με την καλύτερη μακροϋφή να συνεισφέρει στην καλύτερη αποστράγγιση του νερού και την μικροϋφή να διαπερνά το στρώμα νερού.

#### 2.4.3.3 Χιόνι και πάγος

Η ύπαρξη χιονιού και πάγου στο οδόστρωμα είναι οι πιο επικίνδυνες συνθήκες που μπορεί να συναντήσει ένα οδηγός. Η ολισθηρότητα είναι τόσο υψηλή που το παραμικρό απότομο φρενάρισμα ή αλλαγή κατεύθυνσης οδηγεί σε ολίσθηση του ακινητοποιημένου τροχού και απώλεια ελέγχου του οχήματος. Η συμπίεση του χιονιού αλλάζει τις μηχανικές του ιδιότητες και είναι δυνατό να δημιουργήσει μια στρώση που αποτρέπει την επαφή του ελαστικού με το οδόστρωμα μειώνοντας δραστικά την αντίσταση σε ολίσθηση (Al-Qadi et al. 2002).

#### 2.4.3.4 Ρύποι και κατάλοιπα

Τα πιο συχνά κατάλοιπα που συναντώνται στους αυτοκινητοδρόμους είναι σκόνη, άμμος, λάδια αυτοκινήτων, θραύσματα από τα αδρανή του οδοστρώματος, νερό, πάγος και αλάτι με την επιρροή τους στην αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος να φαίνεται στην εικόνα 2-19.

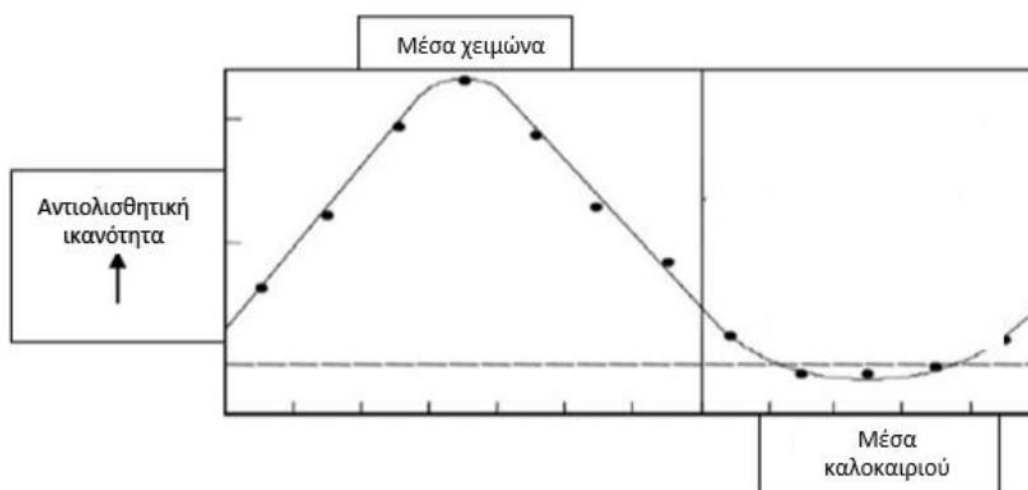


Εικόνα 2-19 Επιρροή κατάλοιπων στην αντιολισθητική ικανότητα (Lubis et al. 2018)

. Η σκόνη και τα υπόλοιπα κατάλοιπα σε αυτή την τάξη μεγέθους, κάθονται πάνω στα αδρανή και εξομαλύνουν την επιφάνεια τους μειώνοντας την μικροϋφή του οδοστρώματος και τα σκληρά κατάλοιπα επιταχύνουν γήρανση των υλικών και την λείανση των αδρανών (Shakely et al. 1980, Lubis et al. 2018). Άλλες φορές τα κατάλοιπα όπως τα λάδια μηχανής λειτουργούν σαν λιπαντικό μειώνοντας τη δύναμη της τριβής μεταξύ των δύο υλικών.

### 2.4.3.5 Εποχιακή διακύμανση

Ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας είναι η εποχιακή διακύμανση που παρατηρείται στην αντιολισθητική ικανότητα των οδοστρωμάτων (εικόνα 2-20) και λαμβάνεται ιδιαίτερως υπόψη στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η εποχικότητα αυτή οφείλεται στον συνδυασμό των βροχοπτώσεων και των ρύπων στο οδόστρωμα. Συγκεκριμένα, κατά την ξηρή περίοδο παρατηρείται πτώση της αντιολισθητικής ικανότητας, που οφείλεται στη συσσώρευση σκόνης και ρύπων από τα οχήματα όπως λάδι και γράσο. Η παρουσία της σκόνης έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της μακροϋφής και τα λάδια και το γράσο δρουν ως λιπαντικό. Η έλλειψη βροχοπτώσεων σημαίνει πως τα κατάλοιπα και οι ρύποι δε ξεπλένονται από το οδόστρωμα. Κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών όπου οι βροχοπτώσεις είναι συχνές, το οδόστρωμα ξεπλένεται, βελτιώνεται η μακροϋφή και η αντιολισθητική ικανότητα επιστρέφει στο κανονικό της επίπεδο (Πομόνη 2022).



Εικόνα 2-20 Εποχιακή διακύμανση για την περίπτωση του Ην. Βασιλείου (Choi 2011)

Κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης η αντιολισθητική ικανότητα είναι σαφώς μειωμένη, αφού στεγνώσει όμως, το καθαρό οδόστρωμα απαλλαγμένο πλέον από τους ρύπους έχει τις καλύτερες συνθήκες για οδήγηση.

Η εποχιακή διακύμανση προφανώς διαφέρει από χώρα σε χώρα ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες και είναι ένας από τους κύριους λόγους που κάνει την πρόβλεψη μελλοντικών τιμών της ολισθηρότητας ιδιαίτερα δύσκολη.

### 3. Μέθοδοι μέτρησης αντιολισθητικής ικανότητας

#### 3.1 Γενικά

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για την μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος που έχουν αναπτυχθεί με τα χρόνια, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε διάφορες ομάδες και υποομάδες. Η βασική ιδέα πίσω από όλες τις μεθόδους παραμένει η ίδια, μέτρηση της αντίστασης που συναντά ένα ελαστικό όταν ολισθαίνει πάνω σε βρεγμένο οδόστρωμα υπό την επιβολή ενός φορτίου.

Ο πρώτος διαχωρισμός είναι σε εργαστηριακές και επί τόπου μετρήσεις. Για τις επί τόπου μετρήσεις υπάρχει επιπλέον υποκατηγορία ανάλογα με το αν χρειάζεται να διακοπεί η κυκλοφορία για να γίνει η μέτρηση. Διαχωρίζονται λοιπόν ως εξής:

- Συσκευές συνεχούς μέτρησης
- Στατικές ή χαμηλής ταχύτητας συσκευές

Οι στατικές μετρήσεις απαιτούν την διακοπή της κυκλοφορίας στο εξεταζόμενο σημείο κάνοντας τις λιγότερο ελκυστικές. Οι συσκευές που κάνουν συνεχή μέτρηση σύρονται συνήθως πίσω από ένα όχημα και πραγματοποιούνται σε ταχύτητες κυκλοφορίας και σε μεγάλες αποστάσεις δίνοντας ένα εκτενές δείγμα της κατάστασης του οδοστρώματος. Οι συσκευές που κάνουν συνεχή μέτρηση μπορούν να διαχωριστούν σε επιπλέον κατηγορίες ανάλογα με το αν ο τροχός έχει μερική ολίσθηση ή είναι πλήρως ακινητοποιημένος και αν ολισθαίνει υπό κάποια γωνία. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες σύγχρονες μέθοδοι μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας των ασφαλτικών οδοστρωμάτων.

#### 3.2 Εργαστηριακές μετρήσεις

##### 3.2.1 Μέθοδος Wehner/Schulze (W/S)

Η μέθοδος Wehner/Schulze είναι μια μέθοδος μέτρησης αντιολισθητικής ικανότητας που εφαρμόζεται σε δοκίμια στο εργαστήριο και προσομοιώνει τη φθορά των αδρανών λόγω της κυκλοφορίας. Η συσκευή Wehner/Schulze (εικόνα 3-1) αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος είναι για την λείανση των αδρανών και την προσομοίωση του κυκλοφοριακού φόρτου και το δεύτερο για την μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας. Η διαδικασία της στίλβωσης πραγματοποιείται από μια κεφαλή με τρεις ελαστικούς κώνους (εικόνα 3-2) και ένα λειαντικό διάλυμα νερού και διοξειδίου του πυριτίου (Senga et al. 2013). Κατά τη διαδικασία της μέτρησης, στερεώνονται σε μια κυκλική μεταλλική κεφαλή τρία μικρά κομμάτια ελαστικού (εικόνα 3-3) σε ίσες αποστάσεις και περιστρέφονται με ταχύτητα 3000 RPM που αντιστοιχεί σε επαφτομενική ταχύτητα 100 km/h. Πριν έρθουν σε επαφή με το

δείγμα, νερό θερμοκρασίας 10°C ψεκάζεται στην επιφάνεια του δείγματος για να δημιουργηθεί ένα λεπτό στρώμα νερού περίπου 0.5 mm και να προσομοιωθούν οι συνθήκες βρεγμένου οδοστρώματος. Στη συνέχεια η βάση αφήνεται να πέσει από ύψος 10 mm εφαρμόζοντας πίεση  $0.2\text{Nmm}^{-2}$  που αντιστοιχεί σε 29 psi στη πίεση του ελαστικού. Στη συνέχεια επιβραδύνει μέχρι να σταματήσει και οι αισθητήρες που μετρούν την ταχύτητα περιστροφής και ροπής στέλνουν τις μετρήσεις σε έναν υπολογιστή που υπολογίζει τον συντελεστή τριβής. Σαν αποτέλεσμα την μέτρησης θεωρείται ο συντελεστής τριβής που μετρήθηκε στα 60 km/h.

Πλεονεκτήματα: Μπορεί να χρησιμοποιήσει δείγματα από τον δρόμο που εξετάζεται.

Μειονεκτήματα: Δε μπορεί να προσομοιώσει απόλυτα τις συνθήκες ενός ελαστικού.



Εικόνα 3-1 Συσκευή Wehner/Schulze



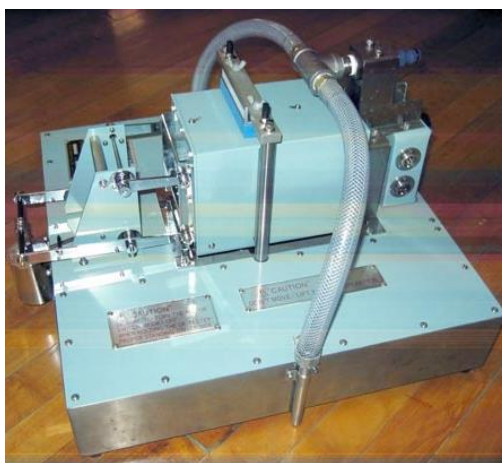
Εικόνα 3-2 Κεφαλή στίλβωσης και γεωμετρία ελαστικού κώνου



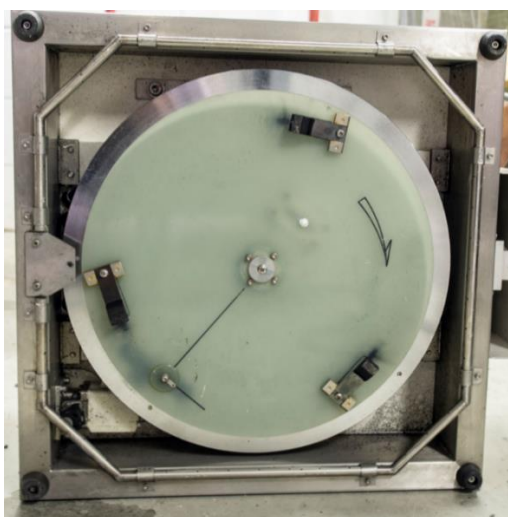
Εικόνα 3-3 Κεφαλή με κομμάτια ελαστικού για την μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας

### 3.2.2 Dynamic Friction Tester

Το Dynamic Friction Tester (DFT) (εικόνα 3-4) είναι πολύ παρόμοιο στη λειτουργία του με το σύστημα Wehner/Schulze με τη διαφορά ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και εκτός εργαστηρίου με διακοπή όμως της κυκλοφορίας. Μετρά την ροπή που απαιτείται για την περιστροφή τριών μικρών κομματιών ελαστικού με ελατήριο τοποθετημένα σε ένα περιστρεφόμενο δίσκο (εικόνα 3-5). Κατά τη διάρκεια της δοκιμής βρέχεται το οδόστρωμα με μια παροχή νερού 3.6 L/min και ο δίσκος περιστρέφεται με ταχύτητες που κυμαίνονται από 5 έως και 89 km/h. Από το μηχάνημα καταγράφονται ηλεκτρονικά η ταχύτητα περιστροφής, η ροπή και το κατακόρυφο φορτίο (Hall et al. 2009).



Εικόνα 3-4 DFT



Εικόνα 3-5 DFT περιστρεφόμενος δίσκος

Πλεονεκτήματα: Εύκολη επαναληψιμότητα των δοκιμών καθώς δεν επηρεάζεται από εξωγενείς παράγοντες όπως τον χρήστη ή τον άνεμο. Μπορεί να παράξει συνελεστές

ολίσθησης ακόμα και για υψηλές ταχύτητες καθώς και τον IFI (International Friction Index ή Διεθνή Δείκτη Τριβής) ο οποίος έχει πολύ καλή συσχέτιση με το BPN.

Μειονεκτήματα: Όπως και οι άλλες μέθοδοι της κατηγορίας αυτής απαιτεί διακοπή της κυκλοφορίας για επί τόπου μέτρηση. Δεν προσομοιώνει πάντα σωστά τα χαρακτηριστικά της ολίσθησης μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος. Μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε μεμονωμένα σημεία και όχι για την αξιολόγηση ολόκληρου του δικτύου. Για την αξιολόγηση ενός τμήματος του δικτύου απαιτούνται πολλαπλές μετρήσεις στο τμήμα αυτό (Matatei et al. 2016).

### 3.3 Επί τόπου μετρήσεις

#### 3.3.1 Χωρίς διακοπή της κυκλοφορίας

##### 3.3.1.1 Μέθοδος «κλειδωμένου» τροχού

Πρόκειται για συνεχή επί τόπου μέτρηση με πλήρως ακινητοποιημένο τροχό (διολίσθηση 100%) που ακολουθεί το πρότυπο ASTM E 274. Κατά τη δοκιμή, η συσκευή(εικόνα 3-6) ρυμουλκείται από το όχημα μέτρησης με μια τυπική ταχύτητα 64 km/h. Στρώση νερού πάχους 0,5 mm εκτοξεύεται μπροστά από το δοκιμαστικό ελαστικό το οποίο χαμηλώνεται πάνω στο οδόστρωμα και «κλειδώνει». Μια τυπική μέτρηση διαρκεί περίπου 2,5 δευτερόλεπτα. Το νερό εκτοξεύεται 0,1 δευτερόλεπτα πριν το κλείδωμα του τροχού που παίρνει περίπου 1 δευτερόλεπτο να ακινητοποιηθεί πλήρως ανάλογα με την ταχύτητα και πραγματοποιούνται μετρήσεις για 1 δευτερόλεπτο (στο δευτερόλεπτο αυτό πραγματοποιούνται 200 ξεχωριστές μετρήσεις). Υπάρχει η δυνατότητα χρήσης ελαστικού με ανάγλυφο πέλμα (ASTM E 501) ή λείου ελαστικού (ASTM E 524). Το λείο είναι πιο ευαίσθητο στη μακροϋφή ενώ το ανάγλυφο σε αλλαγές στην μικροϋφή. Η επόμενη μέτρηση μπορεί να γίνει μόνο αφού το δοκιμαστικό ελαστικό αρχίσει να εκτελεί ξανά κύλιση χωρίς ολίσθηση.

Μέσω της οπισθέλκουσας δύναμης και του φορτίου του τροχού υπολογίζεται ο συντελεστής τριβής μ. Το αποτέλεσμα της μέτρησης είναι FN (Friction Number) ή SN (Skid Number) (Hall et al. 2009).

Πλεονεκτήματα: Ευρέως διαδεδομένη στις ΗΠΑ, απλό και εύκολο στη χρήση με μικρές χρονικές απαιτήσεις, δεν απαιτεί διακοπή κυκλοφορίας.

Μειονεκτήματα: Λόγω της φύσης της συσκευής που απαιτεί τον δοκιμαστικό τροχό να εκτελεί κύλιση χωρίς ολίσθηση πριν την επόμενη μέτρηση, είναι δυνατό να προσπεραστεί περιοχή με υψηλή ολισθηρότητα στο διάστημα αυτό χωρίς να πραγματοποιηθεί μέτρηση. Είναι δυνατή η χρήση των συσκευών αυτών μόνο σε ευθύγραμμα τμήματα (Matatei et al. 2016).





Εικόνα 3-6 Locked Wheel Tester ASTM E274 Trailer

### 3.3.1.2 Συσκευές μέτρησης πλευρικής δύναμης

Οι συσκευές αυτού του τύπου έχουν ελαστικά (ένα ή δύο) υπό γωνία και μετράνε την πλευρική δύναμη που αναπτύσσεται κάθετα στην διεύθυνση του υπό γωνία τροχού ή την πλευρική τριβή που αναπτύσσεται. Όπως και με την προηγούμενη μέθοδο, η μέτρηση πραγματοποιείται σε βρεγμένο οδόστρωμα οπότε πρέπει να υπάρχει δεξαμενή για παροχή νερού, σε αντίθεση όμως με την μέθοδο του ακινητοποιημένου τροχού που μπορεί να κάνει μετρήσεις για μικρά διαστήματα του ενός περίπου δευτερολέπτου, οι συσκευές αυτές μπορούν να κάνουν συνεχή μέτρηση σε ολόκληρο τον επιθυμητό τομέα του οδοστρώματος. Το πρότυπο που ακολουθούν αυτές οι μετρήσεις είναι το ASTM E 670. Παρόλο που το όχημα που πραγματοποιεί την μέτρηση κινείται με ταχύτητα κυκλοφορίας, η σχετική ταχύτητα μεταξύ του ελαστικού που ολισθαίνει και του οδοστρώματος είναι χαμηλή και ισούται με  $V \sin(\alpha)$ , όπου  $V$  η ταχύτητα του οχήματος και  $\alpha$  η γωνία απόκλισης του ελαστικού δοκιμής από τον άξονα κίνησης του οχήματος. Λόγω της χαμηλής ταχύτητας μέτρησης, οι συσκευές αυτές είναι ευαίσθητες στη μικροϋφή και για αυτό συνδυάζονται με μετρήσεις μακροϋφής (Henry, 2000). Τέτοιες συσκευές είναι το SCRIM (British Sideway Force Coefficient Routine Investigation Machine) (εικόνα 3-7) με τροχό που ολισθαίνει υπό γωνία 20 μοιρών και το British Mu-Meter (εικόνα 3-8) που έχει δύο τροχούς σε γωνία 7,5 μοιρών και την επιλογή λείων ελαστικών ή με ανάγλυφο (Hall et al. 2009).

Μετράται η πλευρική δύναμη κάθετα στην διεύθυνση περιστροφής των τροχών που είναι υπό γωνία και το αποτέλεσμα των μετρήσεων είναι το Mu Number ή ο συντελεστής πλευρικής δύναμης SFC (Sideways Force Coefficient) ανάλογα με την συσκευή που χρησιμοποιείται.

Πλεονεκτήματα: Ευρέως διαδεδομένο στην Ευρώπη. Σχετικά καλά ελεγχόμενες συνθήκες ολίσθησης παρόμοιες με αυτές που παρατηρούνται στις συσκευές σταθερής ολίσθησης. Συνεχόμενη μέτρηση κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Μειονεκτήματα: Πολύ ευαίσθητη σε αστοχίες στο οδόστρωμα (λακκούβες και ρωγμές) που μπορεί να οδηγήσουν σε πρόωρη φθορά των ελαστικών. Δίνει αποτελέσματα για χαμηλές ταχύτητες λόγω της φύσης του μηχανισμού όπως προαναφέρθηκε (Yu et al. 2020).



Εικόνα 3-7 Μηχάνημα SCRIM



Εικόνα 3-8 British Mu Meter

### 3.3.1.3 Συσκευές σταθερής ολίσθησης

Οι συσκευές αυτές μετράνε την αντίσταση περιστροφής λείων ελαστικών που ολισθαίνουν με σταθερή ολίσθηση (12-20 %). Στρώση νερού πάχους 5 mm εκτοξεύεται μπροστά από την ρυμουλκούμενη συσκευή που κινείται με ταχύτητα περίπου 64 km/h. Η γωνιακή ταχύτητα του δοκιμαστικού τροχού καταστέλλεται κατά ένα ποσοστό (12-20 %) με τη χρήση μηχανισμών με αλυσίδες ή μάντες ή υδραυλικό σύστημα πέδησης. Τα στοιχεία του φορτίου του τροχού και των δυνάμεων τριβής συλλέγονται ανά διαστήματα των 25-125 mm και ύστερα βγαίνει ένας μέσος όρος για διαστήματα 1 m. Υπάρχουν πολλές συσκευές που ανήκουν στη κατηγορία αυτή και δεν υπάρχει ένα κοινό πρότυπο για όλες. Μερικές από τις συσκευές αυτές είναι το Grip Tester (εικόνα 3-9), το οποίο θα εξεταστεί πιο λεπτομερώς σε επόμενο εδάφιο, το Road Analyzer and Recorder (ROAR)(εικόνα 3-10) καθώς επίσης και μερικές που είναι ενσωματωμένες σε οχήματα όπως το Surface Volvo Friction Tester (εικόνα 3-11) και το Saab Friction Tester (SFT) (εικόνα 3-12) της SARSYS (Scandinavian Airport and Road Systems) (Hall et al. 2009).

Ομοίως με τις συσκευές κλειδωμένου τροχού υπολογίζεται το FN μέσω της οπισθέλκουσας δύναμης και του φορτίου του δοκιμαστικού τροχού.

Πλεονεκτήματα: Συνεχόμενες μετρήσεις υψηλής ανάλυσης

Μειονεκτήματα: Οι μετρήσεις γίνονται σε σταθερή τιμή ολίσθησης η οποία μπορεί να μην είναι η κρίσιμη ειδικά για πάγο ή χιονισμένες επιφάνειες. Χρήση μεγάλης ποσότητας νερού κατά τις συνεχείς μετρήσεις. Η ανάλυση και σύνοψη του μεγάλου όγκου δεδομένων από τις μετρήσεις απαιτεί δεξιότητα από τον χρήστη (Yu et al. 2020).



Εικόνα 3-9 Grip Tester



Εικόνα 3-10 Σύστημα ROAR



Εικόνα 3-11 Surface Volvo Friction Tester



Εικόνα 3-12 Saab Friction Tester

### 3.3.1.4 Συσκευές μεταβλητής ολίσθησης

Οι συσκευές αυτές αφορούν στον υπολογισμό του συντελεστή τριβής μεταξύ του δοκιμαστικού ελαστικού και του οδοστρώματος συναρτήσεως της διολίσθησης. Στρώση νερού πάχους 5 mm εκτοξεύεται μπροστά από τη συσκευή και ο δοκιμαστικός τροχός ενώ ο τροχός εκτελεί ομαλή κύλιση. Η ταχύτητα του δοκιμαστικού τροχού μειώνεται σταδιακά και ανά διαστήματα μικρότερα των 2.5 mm καταγράφονται: η ταχύτητα του οχήματος, η απόσταση που διανύθηκε, η γωνιακή ταχύτητα, το φορτίο του τροχού και η δύναμη τριβής. Η μέθοδος ακολουθεί το πρότυπο ASTM E 1859 και μερικές από τις συσκευές που χρησιμοποιούνται είναι το γαλλικό IMAG (εικόνα 3-13), το Norwegian Norsemeter RUNAR (εικόνα 3-14) και το ROAR που αναφέρθηκε προηγουμένως (Hall et al. 2009).

Πλεονεκτήματα: Συχνά ο εξοπλισμός έχει τη δυνατότητα να εκτελέσει και δοκιμές σταθερής διολίσθησης.

Μειονεκτήματα: Ογκώδης και περίπλοκος εξοπλισμός με μεγάλο κόστος συντήρησης. Απαιτείται ανάλυση των περίπλοκων δεδομένων που προκύπτουν. Χρήση μεγάλης ποσότητας νερού (Matatei et al. 2016).



Εικόνα 3-13 IMAG



Εικόνα 3-14 Norsemeter

### 3.3.2 Με διακοπή της κυκλοφορίας

#### 3.3.2.1 Μέτρηση απόστασης πέδησης

Κατά τη δοκιμή αυτή βρέχεται το οδόστρωμα μέχρι κορεσμού και το όχημα περνά με ταχύτητα 64 km/h πάνω από την βρεγμένη επιφάνεια. Οι τροχοί κλειδώνουν και μετριέται η απόσταση που διανύει το όχημα μέχρι να ακινητοποιηθεί πλήρως (εικόνα 3-15). Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλλες ταχύτητες καθώς και συστήματα ABS (Antilock Braking System). Η μέθοδος ακολουθεί το πρότυπο ASTM E 445.

Για την δοκιμή απαιτείται ένα όχημα επιβατικό ή μικρό ημιφορτηγό τουλάχιστον 1,5 τόνου με το σύστημα πέδησης να έχει τη δυνατότητα να ακινητοποιήσει πλήρως τους τροχούς. Τα ελαστικά πρέπει να είναι με ανάγλυφο και να ακολουθούν το πρότυπο ASTM E 501

Ο συντελεστής τριβής ( $\mu$ ) ή ο αριθμός απόστασης πέδησης SDN (Stopping Distance Number) υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\mu = \frac{v^2}{2 \times g \times d} \quad (3.1)$$

Όπου:

$\mu$  = συντελεστής τριβής (αδιάστατο μέγεθος)

$v$  = ταχύτητα του οχήματος όταν ξεκίνησε η πέδηση, (m/sec)

$g$  = επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/sec<sup>2</sup>)

$d$  = απόσταση που διανύθηκε κατά την πέδηση (m)

Πλεονεκτήματα: Ίσως η απλούστερη μέθοδος για τον προσδιορισμό της επιφανειακής τριβής του οδοστρώματος.

Μειονεκτήματα: Απαιτείται διακοπή της κυκλοφορίας και τα αποτελέσματα δεν είναι εύκολα επαναλήψιμα (Hall et al. 2009).



Εικόνα 3-15 Μέτρηση απόστασης πέδησης

### 3.3.2.2 Μέτρηση ρυθμού επιβράδυνσης

Η δοκιμή πραγματοποιείται κυρίως κατά την χειμερινή περίοδο όταν υπάρχει πάγος, χιόνι και οι λοιπές παραλλαγές τους (υγρός πάγος, συμπιεσμένο χιόνι, μισολιωμένο χιόνι κλπ.) στο οδόστρωμα. Το όχημα κινείται με ταχύτητα 32-48 km/h, τα φρένα κλειδώνουν τους τροχούς και μετρείται ο ρυθμός επιβράδυνσης για τον υπολογισμό της αντιολισθητικής ικανότητας. Ο μόνος απαιτούμενος εξοπλισμός είναι ένα κατάλληλο επιταχυνσιόμετρο που μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε όχημα(εικόνα 3-16). Ακολουθεί το πρότυπο ASTM E 2101.

Από την δοκιμή βρίσκουμε τον συντελεστή τριβής  $\mu$ , με την παρακάτω εξίσωση:

$$\mu = \frac{\gamma}{g} \quad (3.2)$$

Όπου:

$\gamma$  = μέτρηση επιβράδυνσης (m/sec<sup>2</sup>)

$\mu$  = συντελεστής τριβής (αδιάστατο μέγεθος)

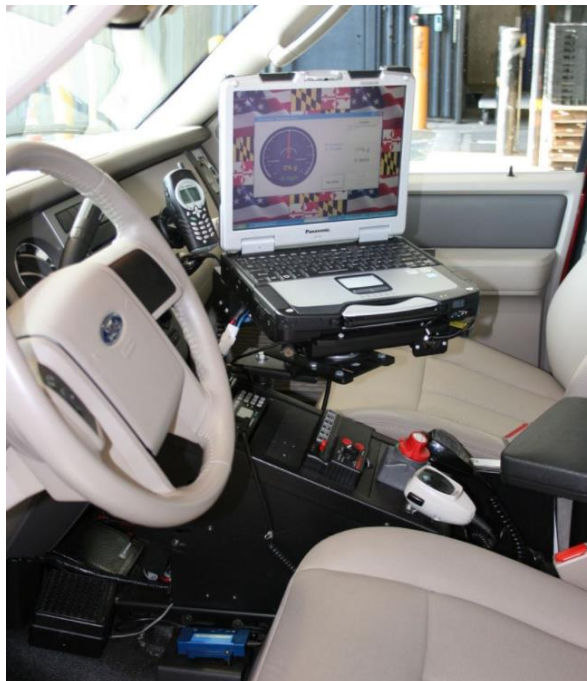
$g$  = επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/sec<sup>2</sup>)

Την μετρημένη επιβράδυνση μπορούμε να την πάρουμε απευθείας από την μέτρηση μέχρι την πλήρη ακινητοποίηση του οχήματος, ή ως μερική επιβράδυνση για ένα μικρότερο διάστημα διαιρώντας την διαφορά της τελικής αρχικής επιβράδυνσης (για

το διάστημα αυτό) με τον χρόνο πέδησης. Η μέθοδος έχει εφαρμογή σε ευθεία τμήματα και συχνά χρησιμοποιείται για την διερεύνηση ατυχημάτων.

Πλεονεκτήματα: Ελαφρύς και φορητός εξοπλισμός, εύκολο στη χρήση.

Μειονεκτήματα: Απαιτεί απότομους ελιγμούς και φρεναρίσματα. Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση ενός οδικού δικτύου, μόνο για μεμονωμένα σημεία και απαιτεί την διακοπή της κυκλοφορίας (Hall et al. 2009).



Εικόνα 3-16 Μέτρηση ρυθμού επιβράδυνσης

### 3.3.2.3 Βρετανικό εκκρεμές

Το Βρετανικό εκκρεμές (εικόνα 3-17) είναι μια φορητή συσκευή στατικής μέτρησης. Χρησιμοποιείται για την μέτρηση της τριβής σε χαμηλή ταχύτητα και τον προσδιορισμό της μικροτραχύτητας του οδοστρώματος και της συνεισφοράς της στην αντιολισθητική ικανότητά του. Κατά τη δοκιμή ο βραχίονας του εκκρεμούς αφήνεται από προκαθορισμένο ύψος και καταγράφεται το ύψος στο οποίο σταματάει αφού έρθει σε επαφή και με το οδόστρωμα. Η τιμή που καταγράφεται είναι το BPN (British Pendulum Number) και εκφράζει τον συντελεστή τριβής. Συνήθως καταγράφονται 5 μετρήσεις και ακολουθεί το πρότυπο ASTM E 303 (Hall et al. 2009).





Εικόνα 3-17 Βρετανικό εκκρεμές

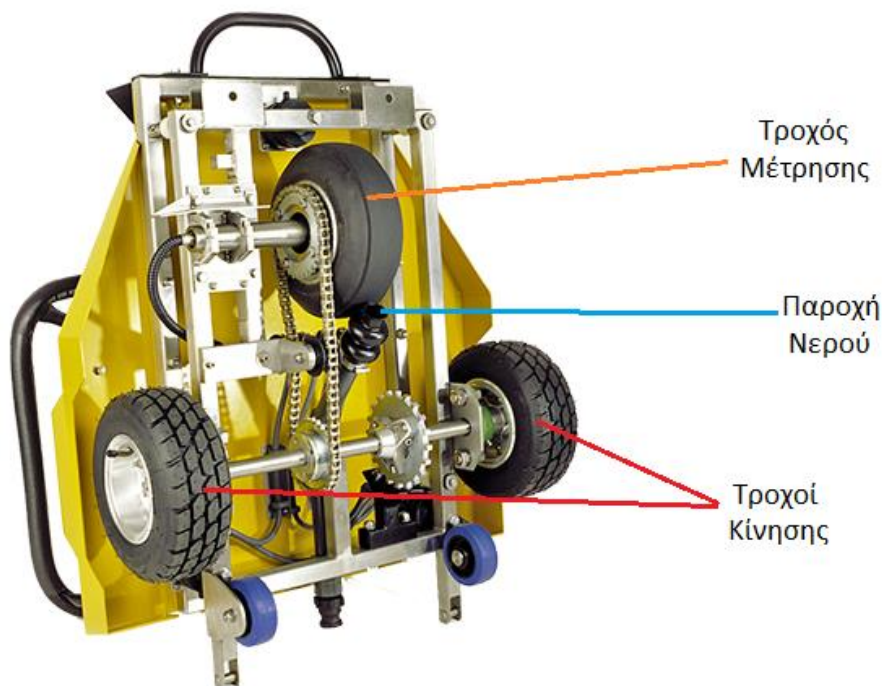
Πλεονεκτήματα: Χρησιμοποιείται παγκοσμίως για την μέτρηση της τριβής και υψής του οδοστρώματος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο εργαστήριο και επί τόπου για διαμήκη και πλευρική τριβή.

Μειονεκτήματα: Μεγάλη μεταβλητότητα μεταξύ μετρήσεων καθώς είναι πολύ ευαίσθητη η συσκευή στον χειρισμό του χρήστη και την επίδραση του αέρα (Matatei et al. 2016).

### 3.4 Σύστημα Grip Tester

το Grip Tester (εικόνα 3-18) (Findlay Irvine 2002) που χρησιμοποιήθηκε για το πειραματικό στάδιο της παρούσας διπλωματικής, είναι ένα τρέιλερ με τρεις τροχούς που ρυμουλκείται από οποιοδήποτε όχημα. Για την λειτουργία του απαιτείται μια δεξαμενή νερού, ο όγκος της οποίας καθορίζει και την εμβέλεια των μετρήσεων και η φορητή μονάδα επεξεργασίας των μετρήσεων. Μεγάλο πλεονέκτημα του Grip Tester είναι το εύρος ταχυτήτων στο οποίο μπορεί να εκτελέσει μετρήσεις οι οποίες κυμαίνονται από 5 έως και 130 km/h δίνοντάς του τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί σε τοπικές οδούς, αυτοκινητοδρόμους, διαδρόμους/τροχοδρόμους αεροδρομίων καθώς και χώρους μετακίνησης πεζών.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.3.1.3 πρόκειται για μια συσκευή συνεχούς μέτρησης με σταθερή ολίσθηση 14% που ακολουθεί το πρότυπο ASTM E1844. Η σταθερή ολίσθηση επιτυγχάνεται με τον παρακάτω μηχανισμό. Οι δύο τροχοί κίνησης (με πρότυπα ραβδωτά ελαστικά) είναι τοποθετημένοι πάνω σε ένα χαλύβδινο άξονα περιστροφής ο οποίος έχει έναν οδοντωτό τροχό με 27 δόντια και συνδέεται μέσω μιας αλυσίδας σε έναν άλλο οδοντωτό τροχό με 32 δόντια που βρίσκεται στο ακροαξόνιο στο οποίο είναι τοποθετημένος ο τροχός πέδησης ο οποίος εκτελεί τις μετρήσεις.



Εικόνα 3-18 Grip Tester

Κατά τη μέτρηση η επιφάνεια του οδοστρώματος μπροστά από τον τροχό πέδησης διαβρέχεται με μια λεπτή στρώση νερού πάχους 0,25 mm για την προσομοίωση των συνθηκών που επικρατούν κατά τη διάρκεια βροχόπτωσης. Για την ταχύτητα των 50 km/h που είναι η πιο συνήθης απαιτείται μια παροχή περίπου 10,5 litres/min ωστόσο υπάρχει πρόγραμμα που διορθώνει αυτόματα την παροχή νερού ανάλογα με την ταχύτητα ώστε να διατηρείται το πάχος της στρώσης νερού στα 0,25 mm.

Ο τροχός που πραγματοποιεί τις μετρήσεις είναι λείος και μετράει την οριζόντια δύναμη που αναπτύσσεται από την ολίσθηση, η οποία σε συνδυασμό με το κατακόρυφο φορτίο δίνει την δυναμική αντίσταση. Το σύστημα βγάζει έναν μέσο όρο των μετρήσεων ανά 10 m ονόματι Grip Number (GN), ένα αδιάστατο μέγεθος με τιμές από 0 έως 1 (υψηλότερες τιμές αναλογούν σε υψηλότερη αντιολισθητική ικανότητα). Οι τιμές αυτές στη συνέχεια αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων μαζί με την ταχύτητα της συσκευής εκείνη τη στιγμή.

## 4. Προβλέψεις με χρονοσειρές

### 4.1 Εισαγωγή στις προβλέψεις

Η πρόβλεψη μελλοντικών τιμών μιας μεταβλητής είναι ένα πρόβλημα πολύ σημαντικό για την λήψη αποφάσεων σε έναν οργανισμό ή μια εταιρεία. Οι προβλέψεις αυτές μπορούν να διαχωριστούν σε βραχυπρόθεσμες, μεσοπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες. Οι βραχυπρόθεσμες αφορούν το άμεσο μέλλον, λίγες μόλις περιόδους μπροστά (μέρες, βδομάδες, μήνες). Οι μεσοπρόθεσμες εκτείνονται στα 1 με 2 χρόνια στο μέλλον, ενώ οι μακροπρόθεσμες μπορούν να εκτείνονται πολλά χρόνια στο μέλλον. Οι βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες προβλέψεις είναι απαραίτητες για δραστηριότητες όπως προϋπολογισμούς, διαχείριση πρώτων υλών και παραγωγής, επιλογής νέων ερευνών και άλλα. Οι μακροπρόθεσμες προβλέψεις αφορούν ζητήματα όπως τον στρατηγικό σχεδιασμό μιας επιχείρησης. Οι βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες προβλέψεις βασίζονται στην αναγνώριση, μοντελοποίηση και προέκταση μοτίβων που βρίσκονται στα ιστορικά δεδομένα (Montgomery et al. 2003).

Παρά το μεγάλο εύρος προβλημάτων που απαιτούν κάποια πρόβλεψη, υπάρχουν μόνο δύο γενικές τεχνικές πρόβλεψης, αυτές είναι οι ποιοτικές μέθοδοι και οι ποσοτικές μέθοδοι.

#### Ποιοτικές μέθοδοι

Οι ποιοτικές μέθοδοι είναι συχνά υποκειμενικές στη φύση τους και απαιτούν την κρίση ειδικών. Χρησιμοποιούνται συχνά σε περιπτώσεις όπου τα ιστορικά δεδομένα πάνω στα οποία πρέπει να βασιστεί η πρόβλεψη είναι ελάχιστα έως και ανύπαρκτα. Μια τέτοια περίπτωση είναι η εισαγωγή ενός νέου προϊόντος στην αγορά για το οποίο δεν υπάρχουν αντίστοιχα ιστορικά στοιχεία από τα οποία μπορούν να βγουν συμπεράσματα. Στην περίπτωση αυτή η επιχείρηση μπορεί να συμβουλευτεί την άποψη ειδικών από τον τομέα marketing ή πωλήσεων για να κάνουν μια εκτίμηση των πωλήσεων του προϊόντος στα πρώτα στάδια της ζωής του. Οι ποιοτικές μέθοδοι συχνά κάνουν χρήση δημοσκοπήσεων και ερευνών αγοράς καθώς και της εμπειρίας που έχουν από τις πωλήσεις άλλων προϊόντων (δικά τους ή των ανταγωνιστών). Παρόλο που στην διαδικασία αυτή εμπλέκεται ανάλυση δεδομένων, οι μέθοδοι βασίζονται στην υποκειμενική κρίση των ειδικών (Montgomery et al. 2003).

Η πιο ευρέως διαδεδομένη μέθοδος ποιοτικών προβλέψεων είναι η μέθοδος των Δελφών κατά την οποία μια ομάδα ατόμων που θεωρούνται γνώστες του προβλήματος απαντούν σε ένα ερωτηματολόγιο. Τα μέλη της ομάδας είναι διαχωρισμένα σε αυτό το στάδιο ώστε να μην επηρεάζονται από την άποψη ενός ισχυρογνώμονα ή νιώθουν πίεση να συμμεριστούν τις απόψεις της πλειοψηφίας. Μετά το πρώτο ερωτηματολόγιο δίνονται στα μέλη της ομάδας επιπλέον ερωτήσεις καθώς και οι πληροφορίες για τις απόψεις των υπόλοιπων μελών. Αυτό επιτρέπει στα μέλη να αναθεωρήσουν τις προβλέψεις τους βάσει των απόψεων των υπόλοιπων μελών. Έπειτα από κάποιες επαναλήψεις της παραπάνω διαδικασίας

ευελπιστούμε ότι οι απόψεις της ομάδας τείνουν να συγκλίνουν προς την ομοφωνία, αν και αυτό δεν είναι απαραίτητο καθώς διφορούμενες αλλά δικαιολογημένες απόψεις είναι επίσης αποδεκτές (Montgomery et al. 2003). Οι ποιοτικές μέθοδοι δεν θα εξεταστούν εκτενέστερα καθώς δεν αποτελούν αντικείμενο της διπλωματικής αυτής.

### **Ποσοτικές μέθοδοι**

Οι ποσοτικές μέθοδοι κάνουν χρήση ιστορικών στοιχείων και μοντέλων πρόβλεψης για να βγάλουν το αποτέλεσμα τους. Τα ιστορικά δεδομένα παρουσιάζουν αδράνεια και δεν αλλάζουν δραστικά, για το λόγο αυτό η στατιστική προσέγγιση είναι πολύ χρήσιμη για βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες προβλέψεις. Το μοντέλο αναγνωρίζει μοτίβα που υπάρχουν στα δεδομένα και βρίσκει στατιστικές σχέσεις μεταξύ ιστορικών και τωρινών δεδομένων.

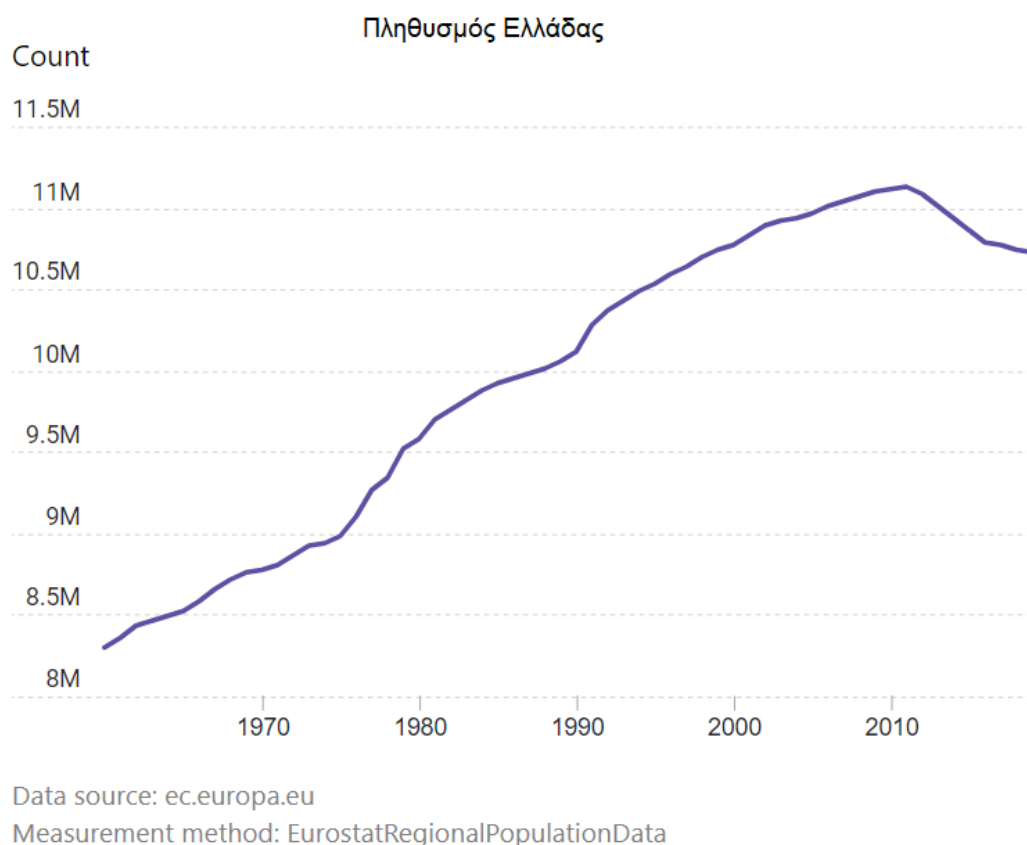
Στη συνέχεια το μοντέλο χρησιμοποιείται για να κάνει υποθέσεις για το μέλλον βάσει των ιστορικών και τωρινών δεδομένων. Υπάρχουν πολλά είδη μοντέλων πρόβλεψης, τα τρία πιο διαδεδομένα είναι τα μοντέλα παλινδρόμησης, τα μοντέλα εξομάλυνσης και τα γενικά μοντέλα χρονοσειρών (Montgomery et al. 2003).

Τα μοντέλα παλινδρόμησης κάνουν χρήση της σχέσης μεταξύ της μεταβλητής για την οποία γίνεται η πρόβλεψη και μιας ή περισσότερων άλλων μεταβλητών πρόβλεψης (predictor variables). Τα μοντέλα παλινδρόμησης συχνά αποκαλούνται αιτιατά μοντέλα πρόβλεψης γιατί οι τιμές της μεταβλητής πρόβλεψης είναι αυτές που θεωρείται ότι οδηγούν στις αλλαγές της μεταβλητής που εξετάζεται. Ένα τέτοιο παράδειγμα θα ήταν να γίνει χρήση των στοιχείων από τις πωλήσεις κατοικιών για την πρόβλεψη πωλήσεων σε έπιπλα σπιτιού. Τα περισσότερα μοντέλα παλινδρόμησης βασίζονται πάνω στην μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων (Montgomery et al. 2003).

Τα μοντέλα εξομάλυνσης εφαρμόζουν απλές εξισώσεις πάνω στα ιστορικά δεδομένα για να κάνουν μια πρόβλεψη για την μεταβλητή που εξετάζεται. Τα μοντέλα αυτά δεν δίνουν πάντα τη βέλτιστη λύση, αλλά είναι εύκολα στην εφαρμογή και δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

## **4.2 Χρονοσειρές**

Συνήθως οι ποσοτικές προβλέψεις γίνονται με τη χρήση χρονοσειρών. Ο όρος “Χρονοσειρά” αναφέρεται σε μια σειρά παρατηρήσεων μιας μεταβλητής, οι οποίες είναι τοποθετημένες σε χρονολογική σειρά με το διάστημα μεταξύ παρατηρήσεων να παραμένει (συνήθως) σταθερό. Μέσω της χρονοσειράς, εξάγονται συμπεράσματα από τα ιστορικά στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη μελλοντικών τιμών. Ιδιαίτερα χρήσιμο για την εξαγωγή των συμπερασμάτων αυτών είναι το γράφημα της χρονοσειράς (Time Series Plot) (εικόνα 4-1) (Montgomery et al. 2003).



Εικόνα 4-1 Παράδειγμα γραφήματος χρονοσειράς

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά που μπορεί να εντοπιστεί από τη γραφική αναπαράσταση μιας χρονοσειράς είναι η στασιμότητα. Μια χρονοσειρά χαρακτηρίζεται ως στάσιμη όταν οι διακυμάνσεις των τιμών της δεν διαφοροποιούνται με το πέρασμα του χρόνου. Αντιθέτως μια μη-στάσιμη χρονοσειρά παρουσιάζει κάποιο ή όλα από τα παρακάτω χαρακτηριστικά.

Η Τάση (Trend) εκφράζει την διαχρονική πορεία της χρονοσειράς και δείχνει αν η μεταβλητή τείνει να έχει ανοδική ή καθοδική πορεία. Οι τάσεις μπορεί να είναι μακροχρόνιες ή πιο δυναμικές με μικρή διάρκεια.

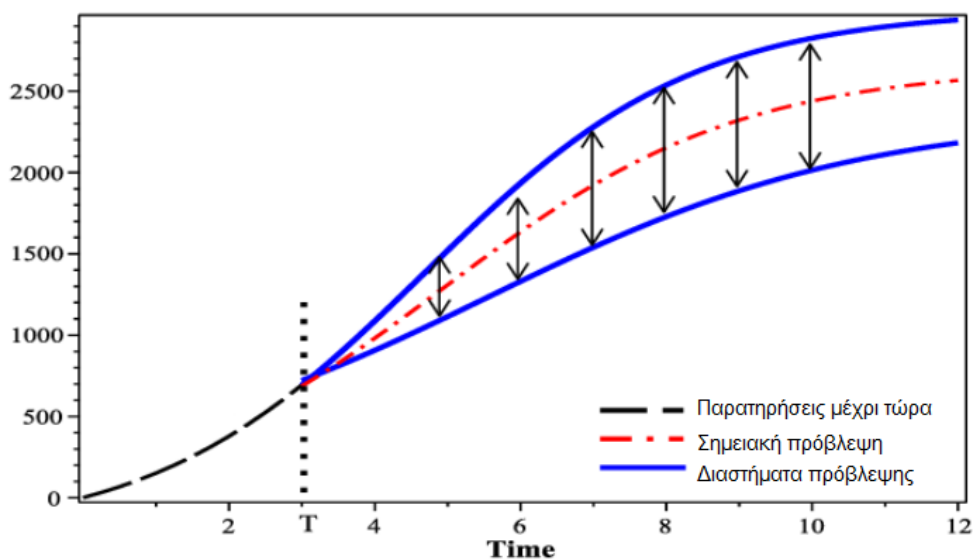
Η Περιοδικότητα (Periodicity) είναι από τις συνιστώσες της χρονοσειράς που παρατηρείται κατ' επανάληψη. Πολύ συχνά χρησιμοποιείται και ο όρος Εποχικότητα (Seasonality), ειδικά όταν αναφέρεται σε περιόδους που σχετίζονται με τις εποχές του έτους (μήνας, τρίμηνο, χρόνος). Για διαστήματα χρόνου που ξεπερνούν το έτος, τότε ονομάζεται Κυκλικότητα.

Ανάλογα με την περίπτωση τα δεδομένα μιας χρονοσειράς μπορεί να είναι ωριαία, ημερήσια, εβδομαδιαία, μέχρι και ετήσια. Πολλά είναι και τα είδη των δεδομένων, τα οποία μπορεί να είναι στιγμιαία όπως το ιξώδες ενός υλικού τη στιγμή της μέτρησης, αθροιστικά όπως το σύνολο των πωλήσεων ενός προϊόντος κατά τη διάρκεια ενός μήνα ή μπορεί να είναι

κάποιο στατιστικό που αντιπροσωπεύει την κατάσταση της μεταβλητής για κάποια περίοδο όπως η ημερήσια μέση θερμοκρασία σε μια περιοχή (Montgomery et al. 2003).

Τα γενικά μοντέλα χρονοσειρών χρησιμοποιούν τα χαρακτηριστικά των ιστορικών δεδομένων για να φτιάξουν ένα μοντέλο και στη συνέχεια υπολογίζουν τις παραμέτρους του μοντέλου (συνήθως) με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Το μυαλό των περισσότερων ανθρώπων όταν ακούει τη λέξη πρόβλεψη πάει σε ένα νούμερο, το οποίο αντιπροσωπεύει την καλύτερη εκτίμηση για την μεταβλητή που μελετάται. Αυτή είναι μια σημειακή πρόβλεψη, και οι προβλέψεις αυτές είναι σχεδόν πάντα λάθος, δηλαδή έχουν σφάλμα. Για τον λόγο αυτό είναι προτιμότερο οι προβλέψεις να συνοδεύονται από μια εκτίμηση του σφάλματος που ενδέχεται να προκύψει. Ένας χρήσιμος δείκτης για το σφάλμα αυτό είναι το Prediction Interval (PI) (εικόνα 4-2), που δίνει ένα εύρος διακύμανσης της τιμής γύρω από τη σημειακή πρόβλεψη και την πιθανότητα που έχει η μεταβλητή να βρίσκεται μέσα σε αυτό, παρόμοια με τα διαστήματα εμπιστοσύνης. Ένα τέτοιο εργαλείο είναι πολύ χρήσιμο για παράδειγμα στην παραγωγή ενός προϊόντος καθώς επιτρέπει στον παραγωγό να επιλέξει αν θέλει να κινηθεί συντηρητικά χρησιμοποιώντας το χαμηλό όριο της πρόβλεψης, ή πιο “επιθετικά” με το ανώτερο όριο της πρόβλεψης.



Εικόνα 4-2 Χρονοσειρά με εύρος διακύμανσης

Συνήθως χρησιμοποιούνται εύρη διακύμανσης με πιθανότητες 80% και 95% με την τελευταία να δίνει προφανώς ένα αρκετά μεγαλύτερο εύρος τιμών.

### 4.3 Διαδικασία πρόβλεψης

Η διαδικασία της πρόβλεψης (εικόνα 4-3) δεν σταματά όταν βγει ένας αριθμός μαζί με ένα εύρος πιθανών τιμών, ολόκληρη η διαδικασία αποτελείται από 7 βήματα τα οποία είναι τα εξής:

1. Ορισμός του προβλήματος
2. Συλλογή δεδομένων
3. Ανάλυση δεδομένων
4. Επιλογή μοντέλου και προσαρμογή του
5. Επαλήθευση μοντέλου
6. Εφαρμογή μοντέλου
7. Παρακολούθηση επίδοσης μοντέλου  
(Montgomery et al. 2003)



Εικόνα 4-3 Διαδικασία πρόβλεψης

- **Ορισμός του προβλήματος:** κατά το στάδιο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί με σαφήνεια το πρόβλημα προς επίλυση, το πως θα χρησιμοποιηθεί η πρόβλεψη που θα γίνει καθώς και οι προσδοκίες του χρήστη για την πρόβλεψη αυτή. Μερικά από τα ερωτήματα που καλείται να απαντήσει σε αυτό το στάδιο ο αναλυτής είναι τα εξής:
  - 1) Το είδος της πρόβλεψης (εβδομαδιαία, μηνιαία, ανά τρίμηνο κλπ.).
  - 2) Ο χρονικός ορίζοντας της πρόβλεψης (για πόσες περιόδους στο μέλλον θέλουμε την πρόβλεψη).
  - 3) Το διάστημα μεταξύ νέων προβλέψεων.
  - 4) Το επίπεδο ακρίβειας που χρειάζεται ο χρήστης για την λήψη των αποφάσεων του (Montgomery et al. 2003).
- **Συλλογή δεδομένων:** η διαδικασία κατά την οποία συλλέγονται τα ιστορικά δεδομένα της μεταβλητής για την οποία θα γίνει η πρόβλεψη καθώς και άλλων σχετικών μεταβλητών που μπορεί να χρησιμοποιηθούν σαν μεταβλητές πρόβλεψης. Σε αυτό το στάδιο πολύ συχνά συναντώνται προβλήματα όπως έλλειψη δεδομένων, σφάλματα κατά την καταγραφή ή ακραίες τιμές, τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά τον “καθαρισμό” των δεδομένων (Montgomery et al. 2003).

- **Ανάλυση δεδομένων:** κρίσιμο προκαταρκτικό στάδιο πριν την επιλογή του μοντέλου πρόβλεψης που θα χρησιμοποιηθεί. Σε αυτό το βήμα πρέπει να μελετηθούν εις βάθος τα γραφήματα των χρονοσειρών των μεταβλητών που μας αφορούν για να εντοπιστούν τυχών μοτίβα όπως τάσεις, εποχικότητα και κυκλικότητα που μπορεί να υπάρχουν. Χρήσιμο εργαλείο για τον εντοπισμό αυτών των μοτίβων είναι η εξομάλυνση που αναφέρθηκε νωρίτερα, που μπορεί να κάνει τα μοτίβα αυτά πιο εμφανή στο μάτι του μελετητή. Σε αυτό το στάδιο υπολογίζονται επίσης στατιστικά όπως μέση τιμή, τυπική απόκλιση, εκατοστημόρια κλπ. για μια πιο συνοπτική παρουσίαση των δεδομένων. Ταυτόχρονα, ακραίες τιμές (outliers) που συναντώνται πρέπει να σημαδεύονται για περαιτέρω εξέταση αργότερα. Ο ρόλος της διαδικασίας αυτής είναι η εξοικείωση με τα δεδομένα και τα μοτίβα που παρουσιάζουν. Οι πληροφορίες αυτές θα οδηγήσουν σε μια προκαταρκτική επιλογή των πιθανών μοντέλων που θα χρησιμοποιηθούν (Montgomery et al. 2003).
- **Επιλογή μοντέλου και προσαρμογή:** σε αυτό το στάδιο επιλέγεται ένα ή και περισσότερα μοντέλα πρόβλεψης και γίνεται προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα. Ο όρος προσαρμογή αναφέρεται στον υπολογισμό των άγνωστων παραμέτρων του μοντέλου, συνήθως με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων (Montgomery et al. 2003).
- **Επαλήθευση μοντέλου:** αξιολόγηση του μοντέλου και εκτίμηση της ικανότητας του να λειτουργήσει όπως προοριζόταν. Η διαδικασία αυτή εκτείνεται πέρα από την απλή προσαρμογή του μοντέλου στα ιστορικά δεδομένα. Πρέπει να εξεταστεί το μέγεθος του σφάλματος που θα προκύψει όταν εισαχθούν στο μοντέλο νέα «φρέσκα» δεδομένα. Η διαδικασία της επαλήθευσης είναι ένας πολύ χρήσιμος δείκτης για το πως θα αποδώσει το μοντέλο όταν έρθει αντιμέτωπο με νέα δεδομένα και καθοριστικός παράγοντας στην επιλογή μεταξύ δύο μοντέλων (Montgomery et al. 2003).
- **Παράδοση μοντέλου:** κατά το στάδιο αυτό, το μοντέλο και τα αποτελέσματα της πρόβλεψης παραδίδονται στον χρήστη. Είναι απαραίτητο επίσης να κατανοήσει ο χρήστης το πως λειτουργεί το μοντέλο, για την εξασφάλιση της μελλοντικής αποτελεσματικότητας (Montgomery et al. 2003).
- **Παρακολούθηση απόδοσης μοντέλου:** συνεχής διαδικασία μετά την παράδοση του μοντέλου για τη διασφάλιση της σωστής λειτουργίας του. Τα δεδομένα αλλάζουν με τον χρόνο και ένα μοντέλο που κάποτε λειτουργούσε ικανοποιητικά με το πέρασμα του χρόνου υποβαθμίζεται. Η υποβάθμιση αυτή εμφανίζεται με τη μορφή μεγαλύτερων σφαλμάτων στη πρόβλεψη. Επομένως είναι απαραίτητη η



παρακολούθηση των σφαλμάτων για ένα καλό σύστημα πρόβλεψης (Montgomery et al. 2003).

## 5. Ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της ολισθηρότητας οδοστρώματος

### 5.1 Καθορισμός προβλήματος

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ολισθηρότητα της επιφάνειας ενός οδοστρώματος είναι ένα περίπλοκο μέγεθος με πολλούς παράγοντες που το επηρεάζουν. Για το λόγο αυτό η πρόβλεψη μελλοντικών τιμών μπορεί να αποδειχθεί ένα δύσκολο έργο. Όλοι όμως αυτοί οι παράγοντες κρύβονται μέσα στα ιστορικά δεδομένα της ολισθηρότητας. Θα εξεταστεί λοιπόν αν είναι δυνατό να προβλεφθούν μελλοντικές τιμές της ολισθηρότητας χρησιμοποιώντας μόνο παλιά ιστορικά δεδομένα και αξιοποιώντας τις μεθόδους πρόβλεψης με τη χρήση χρονοσειρών. Μια τέτοια πρόβλεψη θα μπορούσε να δώσει στον φορέα λειτουργίας μιας οδού ή ενός αυτοκινητοδρόμου ένα εύρος πιθανών τιμών ολισθηρότητας για τα επόμενα χρόνια ώστε να γίνουν οι απαραίτητες επεμβάσεις προτού το οδόστρωμα γίνει επικίνδυνο.

### 5.2 Πειραματικά δεδομένα

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας προέρχονται από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας, ενώ συλλέχθηκαν με το σύστημα Grip Tester. Αποτελούνται από 2 μετρήσεις τον χρόνο από το 2008 μέχρι το 2020 στη δεξιά λωρίδα ενός οδικού τμήματος 800 m (1 μέτρηση ανά 10 m) εντός αστικού αυτοκινητοδρόμου. Η μια μέτρηση γίνεται μετά από διάστημα 5 μηνών ανομβρίας και υψηλών θερμοκρασιών και ορίζεται ως «ξηρή» και η άλλη γίνεται μετά από περίοδο 5 μηνών με συχνότερες βροχοπτώσεις και ορίζεται ως «υγρή». Επισημαίνεται ότι για την σωστή καταγραφή της εποχικότητας είναι πιο σημαντικό να γίνονται έτσι οι μετρήσεις, παρά το διάστημα μεταξύ των μετρήσεων να παραμένει σταθερό.

### 5.3 Ανάλυση δεδομένων

#### 5.3.1 Συνολική εικόνα

Αρχικά θα εξεταστούν τα δεδομένα ως ένα σύνολο. Το αποτέλεσμα της συλλογής των δεδομένων (πίνακας 5-1) είναι 81 χρονοσειρές από τη χιλιομετρική θέση 0 μέχρι την χιλιομετρική θέση 800 οι οποίες ονομάστηκαν Θέση 0,1,2,...,80.

Πίνακας 5-1 Δεδομένα

Έτη	Χ.Θ.	2008 w	2008 d	2009 w	2009 d	2010 w	2010 d	2011 w	2011 d	2012 w	2012 d	2013 w	2013 d	2014 w	2014 d	2015 w	2015 d	2016 w	2016 d	2017 w	2017 d	2018 w	2018 d	2019 w	2019 d	2020 w	2020 d
0	10.70	0.63	0.50	0.71	0.54	0.57	0.49	0.58	0.42	0.70	0.25	0.62	0.44	0.63	0.40	0.62	0.39	0.44	0.35	0.52	0.32	0.547	0.342	0.43	0.35	0.49	0.4
1	10.71	0.64	0.50	0.72	0.53	0.55	0.48	0.58	0.42	0.69	0.24	0.63	0.44	0.63	0.39	0.63	0.39	0.45	0.35	0.52	0.32	0.537	0.342	0.44	0.35	0.49	0.39
2	10.72	0.65	0.50	0.74	0.54	0.56	0.46	0.59	0.42	0.70	0.24	0.63	0.44	0.63	0.38	0.62	0.39	0.44	0.35	0.53	0.32	0.537	0.342	0.45	0.35	0.48	0.39
3	10.73	0.63	0.49	0.72	0.55	0.57	0.48	0.59	0.42	0.72	0.24	0.64	0.46	0.65	0.38	0.62	0.39	0.44	0.35	0.53	0.33	0.547	0.347	0.45	0.35	0.49	0.41
4	10.74	0.64	0.49	0.72	0.56	0.57	0.48	0.59	0.37	0.70	0.24	0.63	0.43	0.69	0.39	0.64	0.41	0.46	0.36	0.51	0.35	0.567	0.347	0.45	0.35	0.51	0.39
5	10.75	0.61	0.48	0.75	0.53	0.54	0.44	0.57	0.39	0.68	0.24	0.57	0.39	0.61	0.33	0.60	0.38	0.44	0.33	0.52	0.28	0.53	0.313	0.42	0.35	0.46	0.36
6	10.76	0.60	0.46	0.65	0.49	0.54	0.42	0.58	0.39	0.71	0.24	0.57	0.41	0.59	0.31	0.62	0.37	0.41	0.33	0.50	0.25	0.513	0.297	0.43	0.33	0.46	0.36
7	10.77	0.63	0.48	0.69	0.54	0.56	0.49	0.58	0.41	0.68	0.24	0.61	0.44	0.62	0.38	0.62	0.39	0.45	0.35	0.49	0.28	0.543	0.322	0.46	0.34	0.49	0.39
8	10.78	0.63	0.50	0.71	0.53	0.54	0.48	0.57	0.41	0.68	0.23	0.56	0.44	0.59	0.38	0.60	0.40	0.45	0.35	0.49	0.31	0.53	0.338	0.44	0.36	0.49	0.38
9	10.79	0.62	0.50	0.72	0.54	0.56	0.48	0.58	0.42	0.69	0.23	0.58	0.44	0.57	0.38	0.59	0.40	0.44	0.35	0.53	0.30	0.517	0.333	0.43	0.35	0.48	0.38
10	10.80	0.63	0.50	0.77	0.54	0.55	0.47	0.57	0.41	0.68	0.23	0.60	0.43	0.58	0.37	0.60	0.40	0.45	0.35	0.50	0.30	0.523	0.333	0.44	0.34	0.47	0.38
11	10.81	0.63	0.50	0.72	0.54	0.55	0.46	0.57	0.42	0.67	0.23	0.59	0.44	0.58	0.38	0.60	0.40	0.44	0.35	0.49	0.30	0.52	0.333	0.43	0.34	0.48	0.37
12	10.82	0.65	0.50	0.72	0.54	0.56	0.48	0.58	0.42	0.69	0.23	0.59	0.44	0.61	0.37	0.59	0.40	0.44	0.36	0.50	0.29	0.523	0.332	0.43	0.34	0.48	0.38
13	10.83	0.64	0.50	0.78	0.54	0.57	0.48	0.59	0.42	0.68	0.23	0.60	0.44	0.60	0.38	0.60	0.41	0.45	0.35	0.52	0.31	0.52	0.34	0.44	0.34	0.48	0.38
14	10.84	0.64	0.50	0.72	0.54	0.55	0.48	0.58	0.42	0.66	0.23	0.58	0.44	0.58	0.38	0.59	0.41	0.45	0.36	0.51	0.31	0.527	0.343	0.43	0.34	0.49	0.39
15	10.85	0.63	0.50	0.70	0.52	0.55	0.48	0.57	0.41	0.67	0.23	0.59	0.44	0.58	0.37	0.58	0.40	0.43	0.34	0.50	0.33	0.51	0.345	0.43	0.34	0.47	0.37
16	10.86	0.63	0.50	0.75	0.52	0.56	0.48	0.58	0.42	0.67	0.23	0.61	0.44	0.58	0.37	0.59	0.40	0.43	0.34	0.49	0.30	0.513	0.33	0.43	0.33	0.47	0.38
17	10.87	0.63	0.50	0.76	0.53	0.56	0.48	0.57	0.42	0.68	0.22	0.60	0.44	0.58	0.37	0.59	0.39	0.42	0.34	0.51	0.30	0.513	0.328	0.42	0.33	0.46	0.37
18	10.88	0.63	0.51	0.76	0.53	0.56	0.49	0.58	0.42	0.68	0.23	0.60	0.45	0.58	0.38	0.59	0.40	0.42	0.34	0.50	0.30	0.523	0.33	0.43	0.33	0.46	0.37
19	10.89	0.64	0.51	0.77	0.54	0.57	0.48	0.58	0.43	0.68	0.23	0.60	0.44	0.59	0.38	0.60	0.40	0.43	0.35	0.51	0.30	0.517	0.333	0.43	0.33	0.47	0.38
20	10.90	0.63	0.51	0.76	0.55	0.56	0.48	0.58	0.43	0.68	0.22	0.61	0.44	0.60	0.38	0.60	0.40	0.43	0.34	0.48	0.30	0.523	0.33	0.42	0.33	0.46	0.38
21	10.91	0.64	0.51	0.77	0.55	0.57	0.47	0.59	0.43	0.69	0.23	0.61	0.44	0.60	0.37	0.60	0.40	0.43	0.34	0.51	0.29	0.51	0.325	0.43	0.34	0.46	0.38
22	10.92	0.64	0.51	0.78	0.55	0.57	0.47	0.59	0.43	0.70	0.24	0.62	0.45	0.60	0.38	0.60	0.40	0.44	0.35	0.52	0.31	0.52	0.338	0.44	0.33	0.47	0.38
23	10.93	0.63	0.51	0.78	0.55	0.56	0.47	0.59	0.43	0.67	0.24	0.61	0.45	0.59	0.38	0.61	0.40	0.45	0.35	0.52	0.30	0.53	0.333	0.44	0.33	0.47	0.38
24	10.94	0.63	0.51	0.75	0.54	0.56	0.47	0.58	0.42	0.68	0.24	0.59	0.44	0.55	0.36	0.60	0.41	0.44	0.34	0.52	0.32	0.523	0.342	0.43	0.34	0.48	0.38
25	10.95	0.63	0.50	0.71	0.54	0.57	0.48	0.58	0.42	0.71	0.24	0.61	0.46	0.58	0.37	0.60	0.41	0.44	0.34	0.54	0.30	0.51	0.332	0.43	0.35	0.47	0.38
26	10.96	0.64	0.50	0.74	0.55	0.57	0.48	0.59	0.43	0.69	0.25	0.62	0.46	0.61	0.37	0.62	0.42	0.45	0.36	0.53	0.32	0.53	0.35	0.44	0.34	0.47	0.39
27	10.97	0.65	0.51	0.74	0.55	0.56	0.47	0.59	0.42	0.66	0.25	0.61	0.45	0.59	0.37	0.61	0.41	0.44	0.36	0.51	0.33	0.537	0.353	0.43	0.35	0.48	0.39
28	10.98	0.64	0.50	0.68	0.55	0.53	0.45	0.57	0.41	0.64	0.24	0.58	0.43	0.55	0.36	0.60	0.41	0.43	0.35	0.50	0.32	0.52	0.345	0.42	0.36	0.46	0.36
29	10.99	0.63	0.49	0.66	0.55	0.54	0.45	0.57	0.40	0.64	0.24	0.57	0.43	0.54	0.36	0.58	0.40	0.42	0.34	0.50	0.31	0.5	0.335	0.42	0.34	0.45	0.36
30	11.00	0.64	0.49	0.67	0.54	0.54	0.46	0.57	0.41	0.65	0.24	0.58	0.44	0.55	0.37	0.59	0.40	0.42	0.34	0.51	0.30	0.497	0.33	0.43	0.34	0.46	0.36
31	11.01	0.64	0.50	0.66	0.54	0.55	0.48	0.58	0.41	0.67	0.24	0.59	0.45	0.55	0.37	0.58	0.40	0.42	0.34	0.52	0.31	0.507	0.335	0.43	0.34	0.46	0.35
32	11.02	0.64	0.49	0.68	0.56	0.56	0.49	0.58	0.42	0.69	0.24	0.59	0.44	0.55	0.38	0.59	0.40	0.43	0.34	0.53	0.32	0.517	0.34	0.42	0.34	0.47	0.36
33	11.03	0.63	0.51	0.69	0.56	0.58	0.48	0.59	0.43	0.71	0.24	0.59	0.43	0.57	0.37	0.59	0.40	0.44	0.35	0.53	0.32	0.517	0.343	0.44	0.36	0.46	0.38
34	11.04	0.63	0.51	0.69	0.57	0.58	0.50	0.60	0.44	0.72	0.25	0.61	0.44	0.58	0.37	0.60	0.40	0.44	0.36	0.54	0.30	0.51	0.337	0.45	0.34	0.45	0.38
35	11.05	0.64	0.51	0.69	0.58	0.58	0.49	0.60	0.45	0.72	0.25	0.62	0.45	0.61	0.38	0.63	0.42	0.46	0.37	0.55	0.31	0.517	0.348	0.47	0.35	0.46	0.39
36	11.06	0.65	0.51	0.74	0.56	0.59	0.50	0.61	0.45	0.71	0.27	0.65	0.47	0.63	0.39	0.64	0.42	0.47	0.37	0.56	0.32	0.53	0.353	0.47	0.36	0.48	0.4
37	11.07	0.65	0.51	0.74	0.56	0.58	0.49	0.60	0.44	0.73	0.27	0.65	0.46	0.65	0.40	0.62	0.43	0.46	0.37	0.56	0.34	0.56	0.365	0.45	0.37	0.51	0.4
38	11.08	0.64	0.51	0.73	0.58	0.56	0.48	0.60	0.44	0.74	0.27	0.61	0.45	0.64	0.37	0.63	0.42	0.46	0.37	0.56	0.33	0.547	0.358	0.46	0.37	0.5	0.38
39	11.09	0.64	0.51	0.75	0.58	0.57	0.48	0.60	0.43	0.72	0.26	0.62	0.45	0.64	0.38	0.64	0.40	0.48	0.36	0.54	0.32	0.547	0.347	0.48	0.36	0.51	0.39
40	11.10	0.63	0.50	0.74	0.57	0.57	0.48	0.61	0.43	0.73	0.25	0.62	0.45	0.65	0.37	0.63	0.41	0.47	0.36	0.57	0.31	0.55	0.343	0.47	0.36	0.51	0.38
41	11.11	0.64	0.50	0.75	0.58	0.59	0.49	0.61	0.45	0.74	0.27	0.64	0.46	0.67	0.39	0.64	0.41	0.47	0.37	0.59	0.31	0.55	0.347	0.50	0.35	0.52	0.4
42	11.12	0.65	0.50	0.74	0.58	0.59	0.50	0.62	0.46	0.75	0.27	0.66	0.46	0.69	0.41	0.65	0.43	0.49	0.38	0.57	0.33	0.587	0.363	0.50	0.35	0.53	0.41
43	11.13	0.65	0.50	0.78	0.59	0.59	0.51	0.63	0.45	0.75	0.27	0.66	0.46	0.70	0.41	0.67	0.42	0.50	0.38	0.58	0.34	0.587	0.367	0.50	0.36	0.53	0.41
44	11.14	0.67	0.52	0.80	0.59	0.59	0.50	0.62	0.45	0.74	0.27	0.66	0.46	0.71	0.41	0.67	0.42	0.50	0.38	0.57	0.35	0.57	0.373	0.50	0.37	0.54	0.4
45	11.15	0.68	0.53	0.80	0.60	0.59	0.50	0.62	0.46	0.75	0.26	0.65	0.46	0.71	0.41	0.66	0.43	0.50	0.39	0.54	0.36	0.58	0.382	0.48	0.37	0.54	0.4
46	11.16	0.70	0.53	0.77	0.56	0.59	0.48																				

Πίνακας 5-2 Δεδομένα με χρωματική κλίμακα

Θέση	Κ	2008 w	2008 d	2009 w	2009 d	2010 w	2010 d	2011 w	2011 d	2012 w	2012 d	2013 w	2013 d	2014 w	2014 d	2015 w	2015 d	2016 w	2016 d	2017 w	2017 d	2018 w	2018 d	2019 w	2019 d	2020 w	2020 d
1	10.71	0.64	0.50	0.72	0.52	0.55	0.43	0.58	0.42	0.59	0.24	0.63	0.44	0.63	0.39	0.62	0.39	0.45	0.25	0.52	0.32	0.537	0.242	0.44	0.25	0.49	0.3
2	10.72	0.65	0.50	0.74	0.54	0.56	0.46	0.59	0.42	0.70	0.24	0.63	0.44	0.63	0.38	0.62	0.39	0.44	0.25	0.53	0.32	0.537	0.242	0.45	0.25	0.48	0.3
3	10.73	0.63	0.49	0.72	0.55	0.57	0.48	0.59	0.42	0.72	0.24	0.64	0.46	0.65	0.38	0.62	0.39	0.44	0.25	0.53	0.32	0.547	0.247	0.45	0.25	0.49	0
4	10.74	0.64	0.49	0.72	0.56	0.57	0.48	0.59	0.37	0.70	0.24	0.63	0.43	0.69	0.39	0.64	0.41	0.46	0.36	0.51	0.35	0.56	0.263	0.45	0.25	0.51	0
5	10.75	0.61	0.48	0.75	0.53	0.54	0.44	0.57	0.39	0.68	0.24	0.57	0.39	0.61	0.33	0.60	0.38	0.44	0.33	0.52	0.28	0.53	0.212	0.42	0.25	0.46	0
6	10.76	0.60	0.46	0.65	0.49	0.54	0.42	0.58	0.39	0.71	0.24	0.57	0.41	0.59	0.31	0.62	0.37	0.41	0.33	0.50	0.25	0.513	0.297	0.43	0.23	0.46	0
7	10.77	0.63	0.48	0.69	0.54	0.56	0.49	0.58	0.41	0.68	0.24	0.61	0.44	0.62	0.38	0.62	0.39	0.45	0.25	0.49	0.28	0.542	0.222	0.46	0.24	0.49	0
8	10.78	0.63	0.50	0.71	0.53	0.54	0.43	0.57	0.41	0.68	0.23	0.56	0.44	0.59	0.28	0.60	0.40	0.45	0.25	0.49	0.31	0.53	0.238	0.44	0.24	0.49	0
9	10.79	0.62	0.50	0.72	0.54	0.56	0.43	0.58	0.42	0.69	0.23	0.55	0.44	0.57	0.38	0.59	0.40	0.44	0.25	0.53	0.30	0.517	0.233	0.43	0.24	0.49	0
10	10.80	0.63	0.50	0.77	0.54	0.55	0.47	0.57	0.41	0.68	0.23	0.60	0.43	0.58	0.37	0.60	0.40	0.45	0.25	0.50	0.30	0.523	0.233	0.44	0.24	0.47	0
11	10.81	0.63	0.50	0.72	0.54	0.55	0.46	0.57	0.42	0.67	0.23	0.59	0.44	0.58	0.38	0.60	0.40	0.44	0.25	0.49	0.30	0.52	0.233	0.43	0.24	0.48	0
12	10.82	0.65	0.50	0.72	0.54	0.56	0.48	0.58	0.42	0.69	0.23	0.59	0.44	0.61	0.37	0.59	0.40	0.44	0.24	0.50	0.29	0.523	0.232	0.43	0.24	0.48	0
13	10.83	0.64	0.50	0.73	0.54	0.57	0.48	0.59	0.42	0.68	0.23	0.60	0.44	0.60	0.38	0.60	0.41	0.45	0.25	0.52	0.31	0.52	0.24	0.44	0.24	0.48	0
14	10.84	0.64	0.50	0.72	0.54	0.55	0.48	0.58	0.42	0.66	0.23	0.58	0.44	0.58	0.39	0.59	0.41	0.45	0.24	0.51	0.31	0.527	0.243	0.43	0.24	0.49	0
15	10.85	0.63	0.50	0.70	0.52	0.55	0.43	0.57	0.41	0.67	0.23	0.59	0.44	0.58	0.37	0.58	0.40	0.43	0.24	0.50	0.32	0.51	0.245	0.43	0.24	0.47	0
16	10.86	0.63	0.50	0.75	0.52	0.54	0.43	0.58	0.42	0.67	0.23	0.61	0.44	0.58	0.37	0.59	0.40	0.43	0.24	0.49	0.30	0.513	0.233	0.43	0.23	0.47	0
17	10.87	0.63	0.50	0.74	0.53	0.56	0.48	0.57	0.42	0.68	0.23	0.60	0.44	0.58	0.37	0.59	0.39	0.42	0.24	0.51	0.30	0.513	0.228	0.42	0.23	0.46	0
18	10.88	0.63	0.51	0.74	0.53	0.56	0.49	0.58	0.42	0.68	0.23	0.60	0.45	0.58	0.38	0.59	0.40	0.42	0.24	0.50	0.30	0.523	0.233	0.43	0.23	0.46	0
19	10.89	0.64	0.51	0.77	0.54	0.57	0.48	0.58	0.43	0.68	0.23	0.60	0.44	0.59	0.38	0.59	0.40	0.43	0.25	0.51	0.30	0.517	0.233	0.43	0.23	0.47	0
20	10.90	0.63	0.51	0.76	0.55	0.56	0.48	0.58	0.43	0.68	0.22	0.61	0.44	0.60	0.38	0.60	0.40	0.43	0.24	0.48	0.30	0.523	0.233	0.42	0.23	0.46	0
21	10.91	0.64	0.51	0.77	0.55	0.57	0.47	0.59	0.43	0.69	0.23	0.61	0.44	0.60	0.37	0.60	0.40	0.43	0.24	0.51	0.29	0.51	0.235	0.43	0.24	0.46	0
22	10.92	0.64	0.51	0.78	0.55	0.57	0.47	0.59	0.43	0.70	0.24	0.62	0.45	0.60	0.38	0.60	0.40	0.44	0.25	0.52	0.31	0.52	0.233	0.44	0.23	0.47	0
23	10.93	0.63	0.51	0.78	0.55	0.54	0.47	0.59	0.43	0.67	0.24	0.61	0.45	0.59	0.38	0.60	0.40	0.45	0.25	0.52	0.31	0.53	0.233	0.44	0.24	0.47	0
24	10.94	0.63	0.51	0.75	0.54	0.56	0.47	0.58	0.42	0.68	0.24	0.59	0.44	0.58	0.37	0.59	0.41	0.44	0.24	0.51	0.32	0.523	0.242	0.43	0.24	0.46	0
25	10.95	0.63	0.50	0.71	0.54	0.57	0.48	0.58	0.42	0.71	0.24	0.61	0.46	0.58	0.37	0.60	0.41	0.44	0.24	0.50	0.31	0.522	0.243	0.25	0.47	0	
26	10.96	0.64	0.50	0.74	0.55	0.57	0.48	0.59	0.43	0.69	0.25	0.62	0.46	0.61	0.37	0.62	0.42	0.45	0.26	0.53	0.32	0.53	0.25	0.44	0.24	0.47	0
27	10.97	0.65	0.51	0.74	0.55	0.56	0.47	0.59	0.42	0.66	0.25	0.61	0.45	0.59	0.37	0.61	0.41	0.44	0.24	0.51	0.32	0.537	0.253	0.43	0.25	0.48	0
28	10.98	0.64	0.50	0.68	0.55	0.53	0.45	0.57	0.41	0.64	0.24	0.58	0.43	0.58	0.36	0.60	0.41	0.43	0.25	0.50	0.32	0.52	0.245	0.42	0.26	0.46	0
29	10.99	0.63	0.49	0.66	0.55	0.54	0.45	0.57	0.40	0.64	0.24	0.57	0.43	0.54	0.36	0.58	0.40	0.42	0.24	0.50	0.31	0.5	0.235	0.42	0.24	0.45	0
30	11.00	0.64	0.49	0.67	0.54	0.54	0.45	0.57	0.41	0.65	0.24	0.58	0.44	0.55	0.37	0.59	0.40	0.42	0.24	0.51	0.30	0.497	0.23	0.43	0.24	0.46	0
31	11.01	0.64	0.50	0.76	0.54	0.55	0.43	0.58	0.41	0.67	0.24	0.59	0.45	0.58	0.37	0.59	0.40	0.42	0.24	0.52	0.31	0.507	0.233	0.43	0.24	0.46	0
32	11.02	0.64	0.49	0.68	0.54	0.56	0.49	0.58	0.42	0.69	0.24	0.59	0.44	0.58	0.38	0.59	0.40	0.43	0.24	0.51	0.32	0.517	0.24	0.42	0.24	0.47	0
33	11.03	0.63	0.51	0.69	0.54	0.58	0.48	0.59	0.43	0.71	0.24	0.59	0.43	0.57	0.37	0.59	0.40	0.44	0.25	0.52	0.31	0.517	0.243	0.44	0.26	0.46	0
34	11.04	0.63	0.51	0.69	0.57	0.53	0.50	0.60	0.44	0.72	0.25	0.61	0.44	0.58	0.37	0.60	0.40	0.44	0.26	0.54	0.30	0.51	0.237	0.45	0.24	0.45	0
35	11.05	0.62	0.50	0.67	0.53	0.52	0.48	0.59	0.43	0.71	0.24	0.61	0.44	0.58	0.37	0.60	0.40	0.44	0.26	0.54	0.30	0.51	0.237	0.45	0.24	0.45	0
36	11.06	0.62	0.50	0.67	0.53	0.52	0.48	0.59	0.43	0.71	0.24	0.61	0.44	0.58	0.37	0.60	0.40	0.44	0.26	0.54	0.30	0.51	0.237	0.45	0.24	0.45	0
37	11.07	0.63	0.51	0.74	0.53	0.58	0.49	0.60	0.44	0.72	0.25	0.63	0.45	0.63	0.40	0.62	0.42	0.46	0.27	0.56	0.34	0.53	0.265	0.45	0.27	0.47	0
38	11.08	0.64	0.51	0.75	0.54	0.58	0.49	0.60	0.44	0.74	0.27	0.64	0.45	0.64	0.41	0.63	0.42	0.46	0.27	0.56	0.34	0.547	0.268	0.46	0.27	0.47	0
39	11.09	0.64	0.51	0.75	0.53	0.57	0.48	0.60	0.43	0.72	0.25	0.62	0.45	0.64	0.38	0.64	0.40	0.48	0.24	0.54	0.32	0.547	0.247	0.48	0.27	0.47	0
40	11.10	0.63	0.50	0.74	0.57	0.57	0.48	0.61	0.43	0.73	0.25	0.62	0.45	0.65	0.41	0.63	0.41	0.47	0.24	0.54	0.31	0.55	0.243	0.47	0.26	0.51	0
41	11.11	0.64	0.50	0.75	0.53	0.59	0.49	0.61	0.45	0.74	0.27	0.64	0.46	0.67	0.39	0.64	0.41	0.47	0.27	0.59	0.31	0.55	0.247	0.50	0.25	0.52	0
42	11.12	0.65	0.50	0.74	0.53	0.59	0.50	0.62	0.46	0.75	0.27	0.66	0.46	0.69	0.41	0.65	0.43	0.49	0.28	0.57	0.33	0.587	0.263	0.50	0.25	0.53	0
43	11.13	0.65	0.50	0.73	0.59	0.59	0.51	0.63	0.45	0.75	0.27	0.66	0.46	0.70	0.41	0.67	0.42	0.50	0.38	0.58	0.34	0.587	0.267	0.50	0.26	0.53	0
44	11.14	0.67	0.52	0.80	0.59	0.59	0.50	0.62	0.45	0.74	0.27	0.66	0.46	0.71	0.41	0.67	0.42	0.50	0.38	0.58	0.37	0.57	0.257	0.512	0.27	0.54	0
45	11.15	0.68	0.53	0.80	0.60	0.59	0.50	0.62	0.46	0.75	0.26	0.65	0.46	0.71	0.41	0.68	0.42	0.50	0.39	0.54	0.36	0.55	0.292	0.48	0.27	0.54	0
46	11.16	0.70	0.53	0.71	0.54	0.59	0.43	0.61	0.44	0.74	0.27	0.64	0.45	0.69	0.39	0.64	0.42	0.49	0.27	0.54	0.35	0.557	0.268	0.48	0.27	0.54	0
47	11.17	0.67	0.48	0.77	0.59	0.59	0.50	0.62	0.44	0.76	0.27	0.62	0.46	0.69	0.40	0.64	0.40	0.47</									

Πίνακας 5-3 Διαχωρισμός σε ζώνες

ΖΩΝΗ	Θέση	κάτω από ΜΟ	σθροισμα διαφορών	ΖΩΝΗ	Θέση	κάτω από ΜΟ	σθροισμα διαφορών	ΖΩΝΗ	Θέση	κάτω από ΜΟ	σθροισμα διαφορών
<b>ΖΩΝΗ 1</b>	0	21	-0.29	<b>ΖΩΝΗ 2</b>	35	14	-0.13	<b>ΑΡΧΗ ΖΩΝΗΣ 3</b>	76	13	0.01
	1	22	-0.32		36	8	0.13		77	18	-0.34
	2	23	-0.29		37	7	0.19		78	19	-0.24
	3	18	-0.18		38	12	0.03		79	16	-0.12
	4	17	-0.12		39	15	0.03		80	13	-0.13
	5	25	-0.86		40	15	-0.01				
	6	26	-1.14		41	6	0.27				
	7	24	-0.50		42	2	0.50				
	8	25	-0.58		43	1	0.62				
	9	25	-0.56		44	0	0.66				
	10	25	-0.56		45	1	0.68				
	11	26	-0.64		46	4	0.42				
	12	25	-0.53		47	3	0.34				
	13	25	-0.38		48	1	0.63				
	14	25	-0.52		49	0	0.71				
	15	25	-0.69		50	1	0.69				
	16	26	-0.63		51	1	0.50				
	17	25	-0.66		52	1	0.40				
	18	24	-0.58		53	2	0.45				
	19	25	-0.48		54	3	0.42				
	20	25	-0.55		55	1	0.43				
	21	25	-0.49		56	2	0.48				
	22	25	-0.34		57	3	0.50				
	23	25	-0.40		58	3	0.37				
	24	26	-0.53		59	3	0.43				
	25	24	-0.47		60	4	0.55				
	26	23	-0.25		61	2	0.70				
	27	21	-0.35		62	2	0.75				
	28	25	-0.77		63	1	0.75				
	29	26	-0.95		64	1	0.69				
	30	26	-0.84		65	0	0.62				
	31	26	-0.75		66	3	0.41				
	32	25	-0.60		67	6	0.45				
	33	24	-0.46		68	3	0.48				
34	21	-0.37	69	2	0.49						
			70	2	0.64						
			71	2	0.63						
			72	1	0.70						
			73	0	0.76						
			74	2	0.66						
			75	3	0.45						

Από τη θέση 76 και μετά αρχίζει να δημιουργείται μια 3<sup>η</sup> Ζώνη, αλλά δεν υπήρχαν αρκετές μετρήσεις οπότε απλά θα αγνοηθεί και η διερεύνηση θα συνεχιστεί με τις πρώτες 76 Θέσεις μόνο.

Οι μετρήσεις κάθε περιόδου σε κάθε ζώνη είναι πολύ ομοιογενείς, με τον Συντελεστή Μεταβολής CV να παίρνει τιμές σε όλες τις περιόδους που κυμαίνονται από 1.39% μέχρι 5.70% στη Ζώνη 1 και αντίστοιχα τιμές που κυμαίνονται από 1.42% μέχρι 4.55% στη Ζώνη 2 όπως φαίνεται στον πίνακα 5-4. Οι τιμές του CV είναι κάτω από 10% για όλες τις περιόδους της κάθε ζώνης, επομένως υπάρχει ομοιογένεια σε κάθε ζώνη.

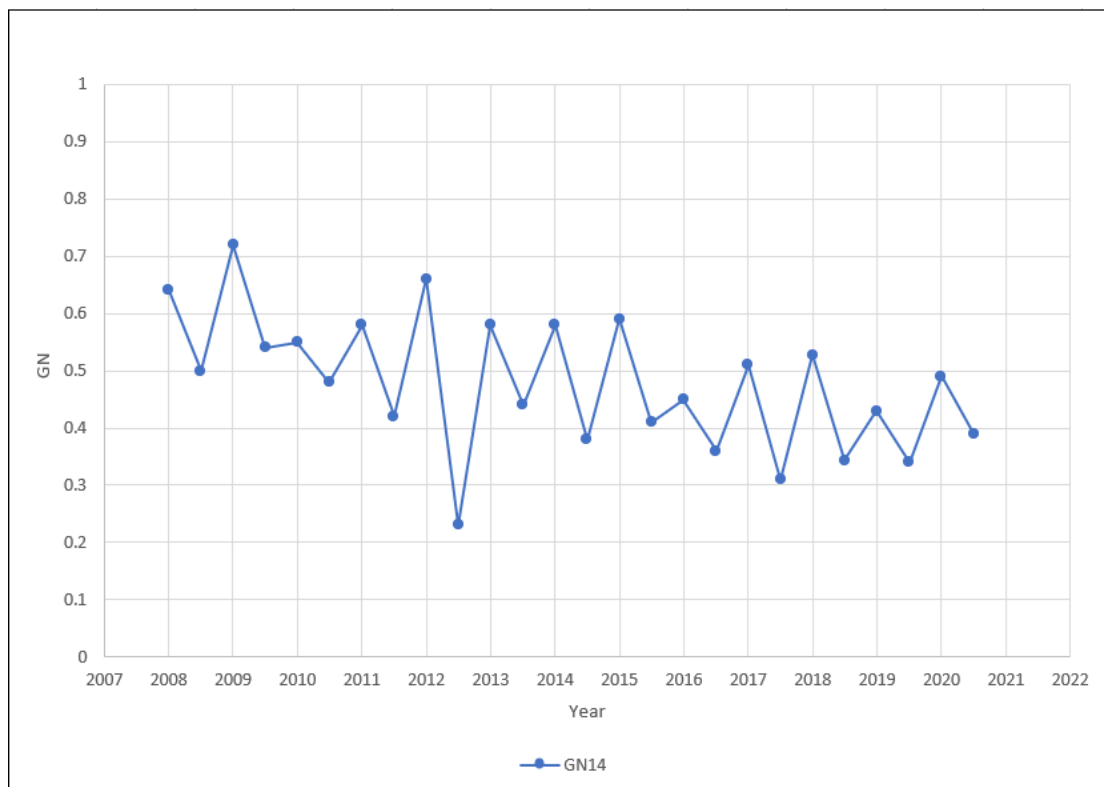
Πίνακας 5-4 Συντελεστής Μεταβολής (CV) Ζώνης 1 και 2 για κάθε περίοδο

	<b>Ζώνη 1</b>	<b>Ζώνη 2</b>
2008 w	1.55%	2.15%
2008 d	2.11%	3.02%
2009 w	5.10%	4.55%
2009 d	2.57%	2.65%
2010 w	2.16%	2.56%
2010 d	3.23%	2.20%
2011 w	1.39%	1.42%
2011 d	3.18%	2.11%
2012 w	2.84%	2.64%
2012 d	3.19%	3.32%
2013 w	3.20%	3.41%
2013 d	2.88%	2.54%
2014 w	5.20%	3.81%
2014 d	4.17%	3.43%
2015 w	2.37%	2.20%
2015 d	2.31%	2.06%
2016 w	2.60%	3.50%
2016 d	2.34%	2.64%
2017 w	2.95%	2.38%
2017 d	5.70%	4.45%
2018 w	2.57%	2.68%
2018 d	3.35%	2.63%
2019 w	2.28%	4.04%
2019 d	2.60%	3.34%
2020 w	2.83%	3.53%
2020 d	3.33%	2.67%

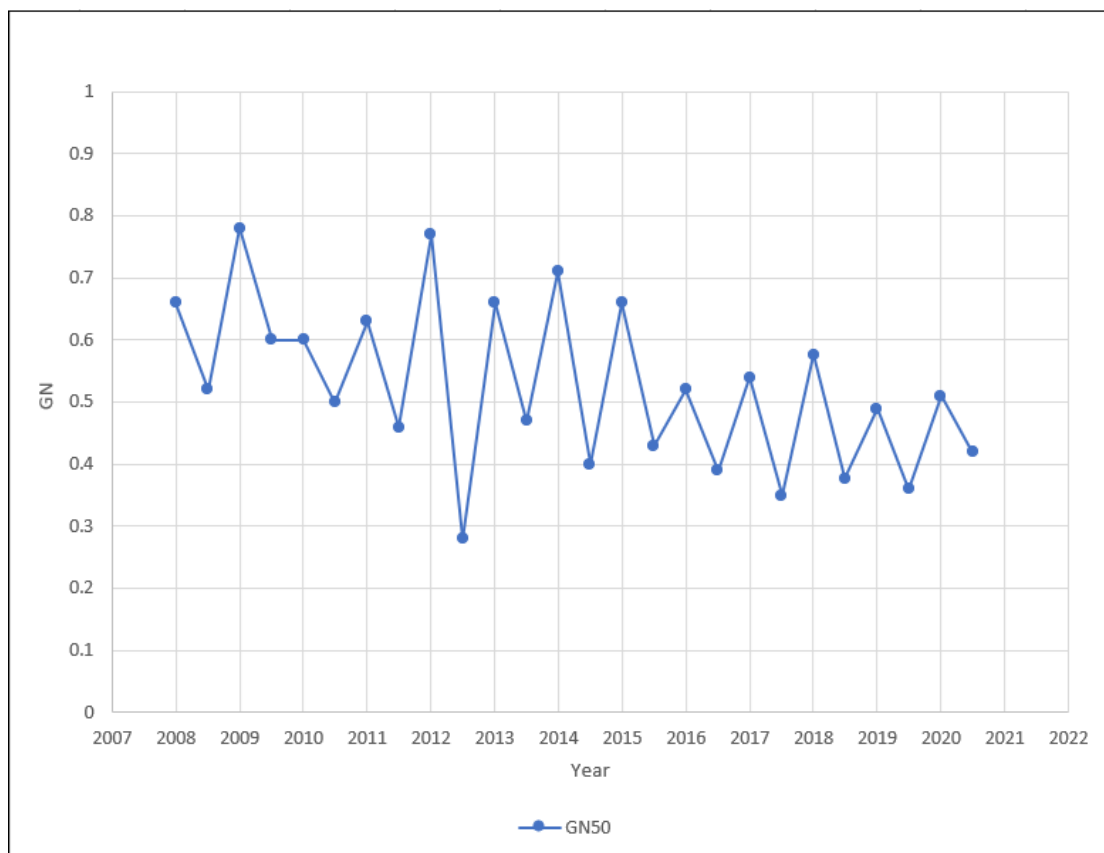
Για το λόγο αυτό, πέρα από τις 76 αρχικές χρονοσειρές για όλες τις θέσεις, κατασκευάστηκαν επιπλέον δύο χρονοσειρές, η Ζώνη 1 και η Ζώνη 2, οι οποίες έχουν σαν τιμές τον μέσο όρο της κάθε ζώνης για την περίοδο. Οι χρονοσειρές αυτές θα μελετηθούν όμοια με τις υπόλοιπες.

### 5.3.2 Διερεύνηση γραφημάτων

Από τη στιγμή που οι δύο ζώνες παρουσιάζουν τέτοια ομοιογένεια, θα εξεταστεί μόνο ένα γράφημα χρονοσειράς από κάθε ζώνη. Επιλέχθηκαν τυχαία δύο θέσεις από το κέντρο περίπου κάθε ζώνης, η Θέση 14 (εικόνα 5-1) από τη Ζώνη 1 και η Θέση 50 από τη Ζώνη 2 (εικόνα 5-2).



Εικόνα 5-1 Γράφημα χρονοσειράς για τη Θέση 14



Εικόνα 5-2 Γράφημα χρονοσειράς για τη Θέση 50

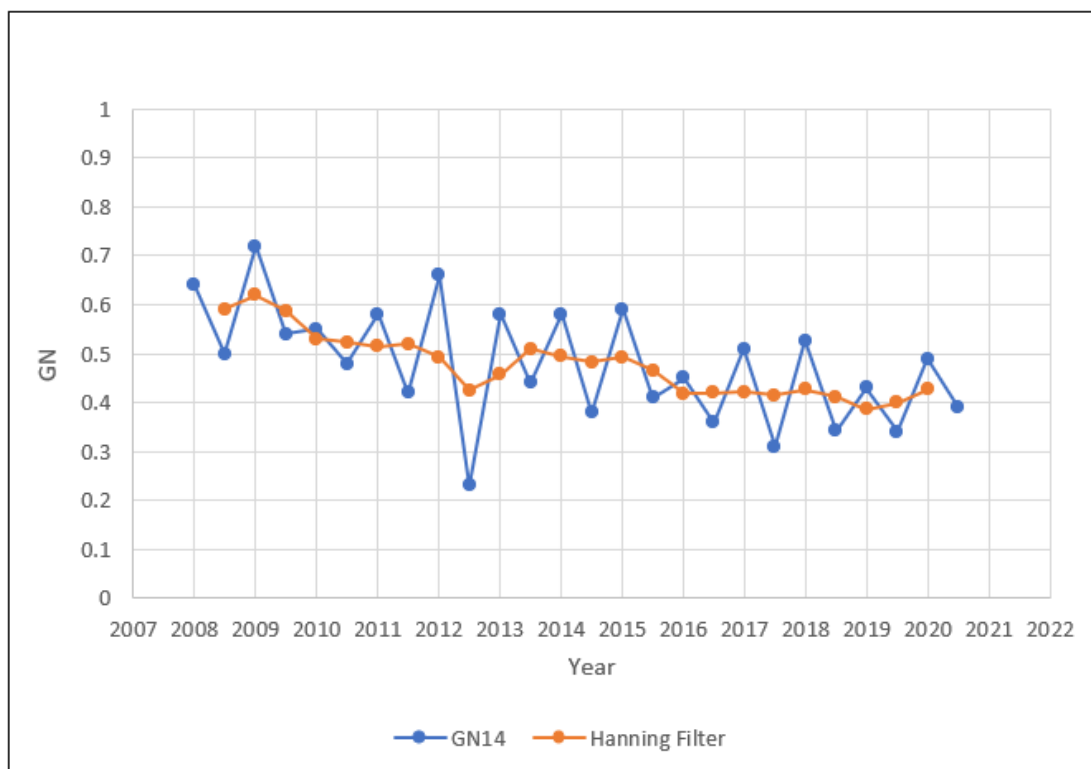
Στις 2 παραπάνω χρονοσειρές έγινε εξομάλυνση δεδομένων με τη μέθοδο του Φίλτρου Hanning για να γίνει πιο εμφανής η τάση. Το φίλτρο Hanning είναι ένα είδος σταθμισμένου κεντρικού κινητού μέσου το πλεονέκτημα του οποίου είναι η μείωση της επιρροής που μπορεί να έχουν ακραίες τιμές όπως αυτή του δεύτερου εξαμήνου τους 2012 και εκφράζεται από την σχέση 6.2

$$M_t^H = 0.25y_{t-1} + 0.5y_t + 0.25y_{t+1} \quad (5.1)$$

Όπου:

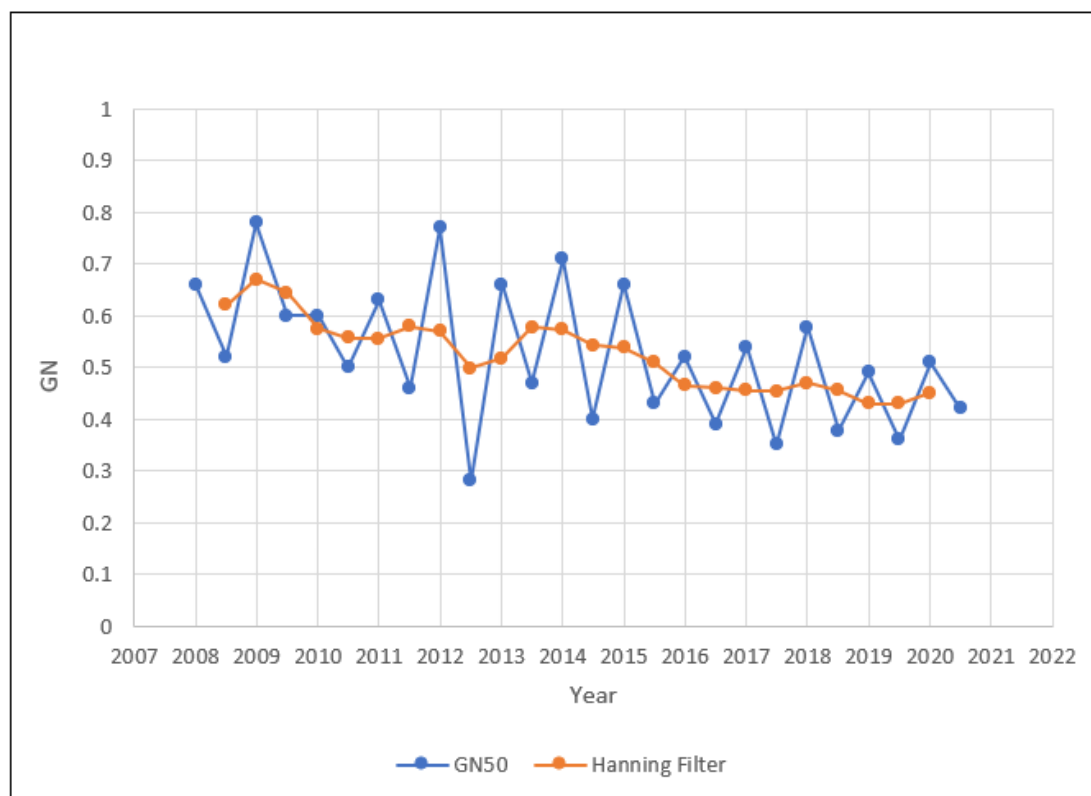
$M_t^H$  = η τιμή του φίλτρου Hanning για την χρονική στιγμή t

$y_t$  = οι τιμές της μεταβλητής για χρόνο t



Εικόνα 5-3 Εξομάλυνση Θ14





Εικόνα 5-4 Εξομάλυνση Θ50

Αρχικά, τα δύο διαγράμματα (εικόνες 5-3,5-4) είναι παρόμοια μεταξύ τους με το δεύτερο να έχει υψηλότερες τιμές και ειδικότερα στις υγρές περιόδους με αποτέλεσμα να έχει και μεγαλύτερες διακυμάνσεις. Γίνεται σαφές και από τα δύο διαγράμματα πως υπάρχει μια καθοδική τάση γεγονός το οποίο ήταν αναμενόμενο αφού η αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος μειώνεται με το πέρασμα του χρόνου λόγω της στίλβωσης των αδρανών. Εμφανής είναι επίσης και η παρουσία της εποχικότητας με τις υγρές περιόδους να έχουν αρκετά υψηλότερες τιμές GN. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2.4 κατά την ξηρή περίοδο οι ρύποι και τα κατάλοιπα όπως σκόνη, άμμος και λάδια μηχανής κάθονται πάνω στα αδρανή και λειαίνουν την επιφάνειά τους, μειώνοντας την μικροϋφή και αυξάνοντας την ολισθηρότητα του οδοστρώματος. Αντιθέτως κατά την υγρή περίοδο απομακρύνονται οι ρύποι από την βροχόπτωση και επομένως καλύτερεύουν οι συνθήκες. Γίνεται προφανές λοιπόν ότι οι χρονοσειρές που μελετώνται είναι μη-στάσιμες και επομένως πρέπει να επιλεγθούν κατάλληλα μοντέλα που λαμβάνουν υπόψιν τάση και εποχικότητα.

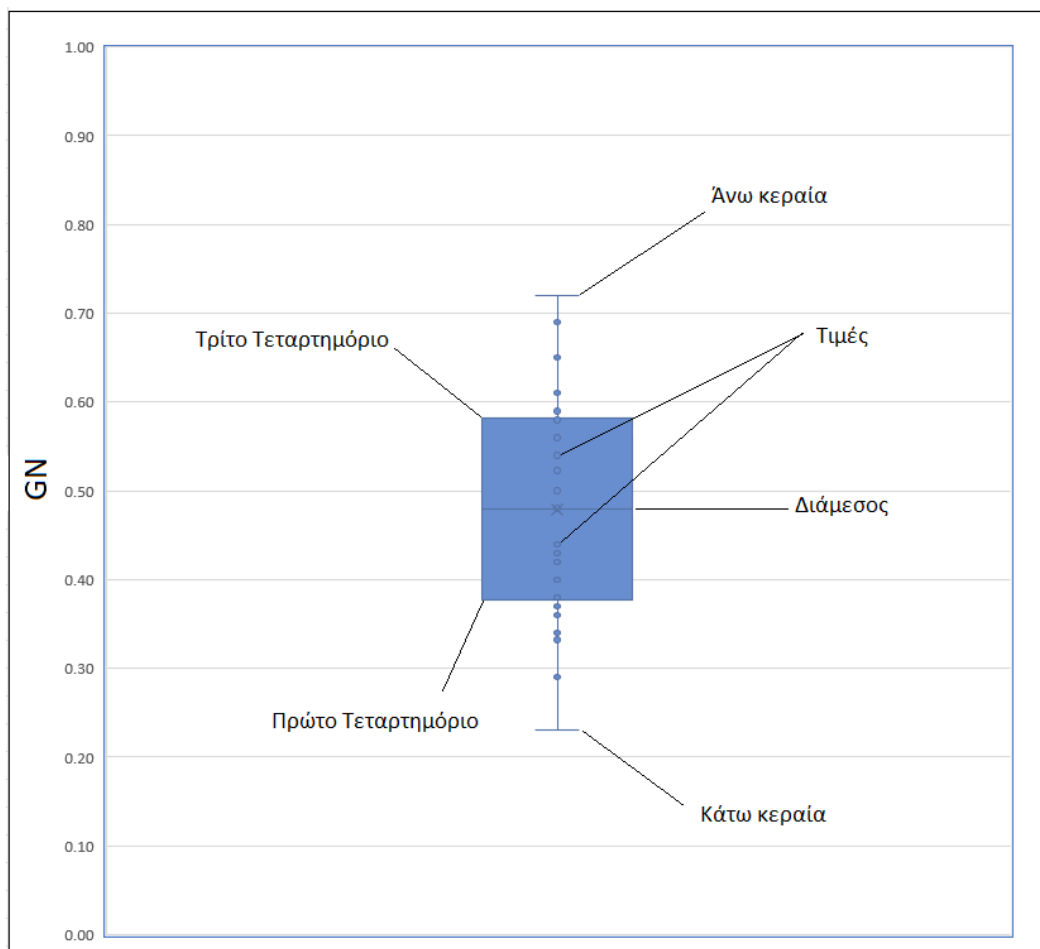
Κάτι που δεν είναι προφανές από τα διαγράμματα είναι αν πρέπει να χρησιμοποιηθεί προσθετικό (additive) μοντέλο ή πολλαπλασιαστικό (multiplicative) μοντέλο. Στα προσθετικά μοντέλα η διακύμανση λόγω της εποχικότητας παραμένει σταθερή μέσα στα χρόνια ενώ στα πολλαπλασιαστικά, η διακύμανση μεγαλώνει αν η τάση είναι ανοδική και μικραίνει όταν είναι καθοδική. Για τον λόγο αυτό θα εξεταστούν και τα δύο ενδεχόμενα.

### 5.3.3 Διερεύνηση ακραίων τιμών

Σε αυτό το σημείο θα διερευνηθεί η πιθανότητα ύπαρξης ακραίων τιμών (outliers). Οι ακραίες τιμές μπορεί να παρουσιαστούν από σφάλματα κατά την μέτρηση ή την καταγραφή των μετρήσεων ή μπορεί απλά να οφείλονται σε τυχαία γεγονότα και να αποτελούν μια στατιστική ανωμαλία. Στην περίπτωση ακραίων τιμών ενδέχεται να χρειάζεται αντικατάσταση των τιμών αυτών με άλλες που ταιριάζουν καλύτερα με τα υπόλοιπα δεδομένα για να μην “μολύνουν” τις μετρήσεις και αλλοιώσουν το μοντέλο. Ωστόσο η διαδικασία αυτή είναι προτιμότερο να αποφευχθεί αφού μπορεί να αφαιρέσει την ικανότητα του μοντέλου να αντιμετωπίσει την εμφάνιση τέτοιων γεγονότων.

#### Ανίχνευση ακραίων τιμών

Κοιτώντας τις εικόνες 5-1 και 5-2, με μια πρώτη ματιά πιθανές θέσεις είναι οι μετρήσεις της ξηρής περιόδου του 2012 που παρουσιάζουν τιμές του GN αρκετά χαμηλότερες από τις υπόλοιπες, ακόμα και σε σύγκριση μόνο με τις υπόλοιπες ξηρές μετρήσεις. Για την ανίχνευση των ακραίων τιμών θα γίνει χρήση των θηκογραμμάτων ή boxplots. Το θηκόγραμμα εικόνα 5-5 δείχνει πως κατανέμονται τα δεδομένα ενός δείγματος και ερμηνεύεται ως εξής:



Εικόνα 5-5 Ερμηνεία θηκογράμματος

Πρώτο Τεταρτημόριο ( $Q_1$ ): η διάμεσος του κατώτερου μισού των τιμών, το 25-εκατοστιαίο σημείο των τιμών, το πρώτο ή κατώτερο τεταρτημόριο

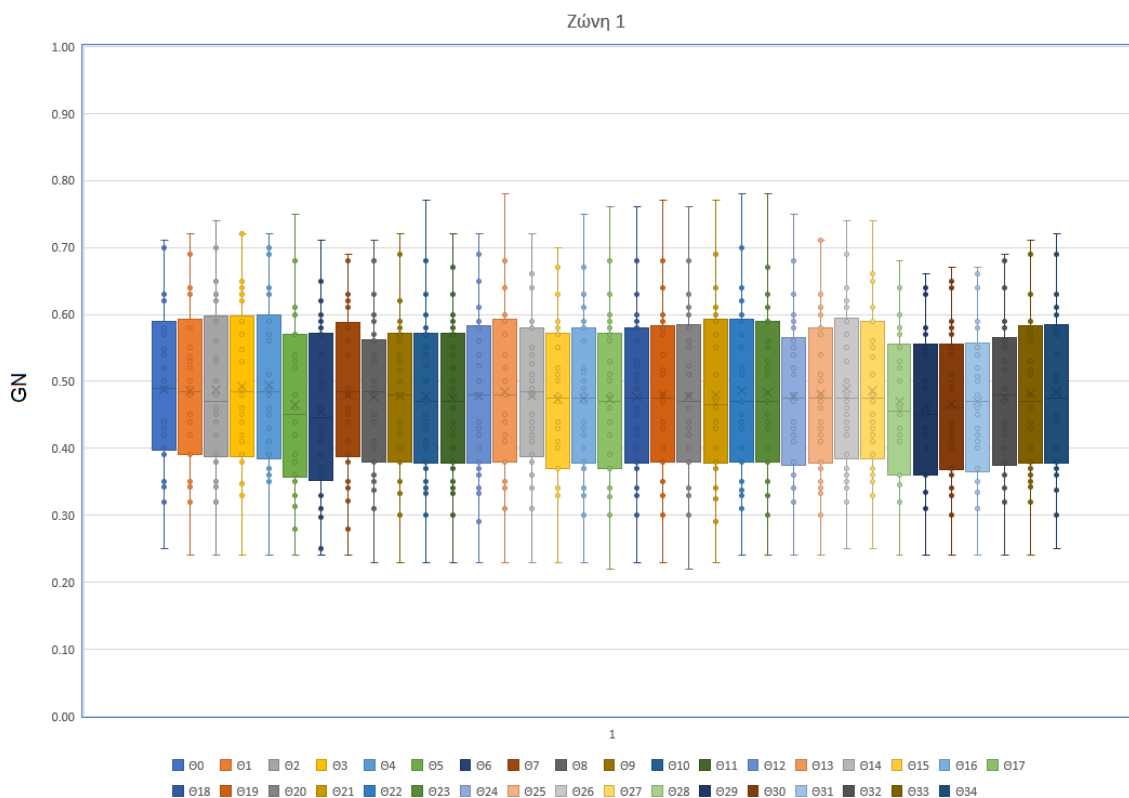
Διάμεσος ( $Q_2$ ): Η διάμεσος των τιμών, το 50-εκατοστιαίο σημείο των τιμών

Τρίτο Τεταρτημόριο ( $Q_3$ ): η διάμεσος του ανώτερου μισού των τιμών, το 75-εκατοστιαίο σημείο των τιμών, το τρίτο ή ανώτερο τεταρτημόριο

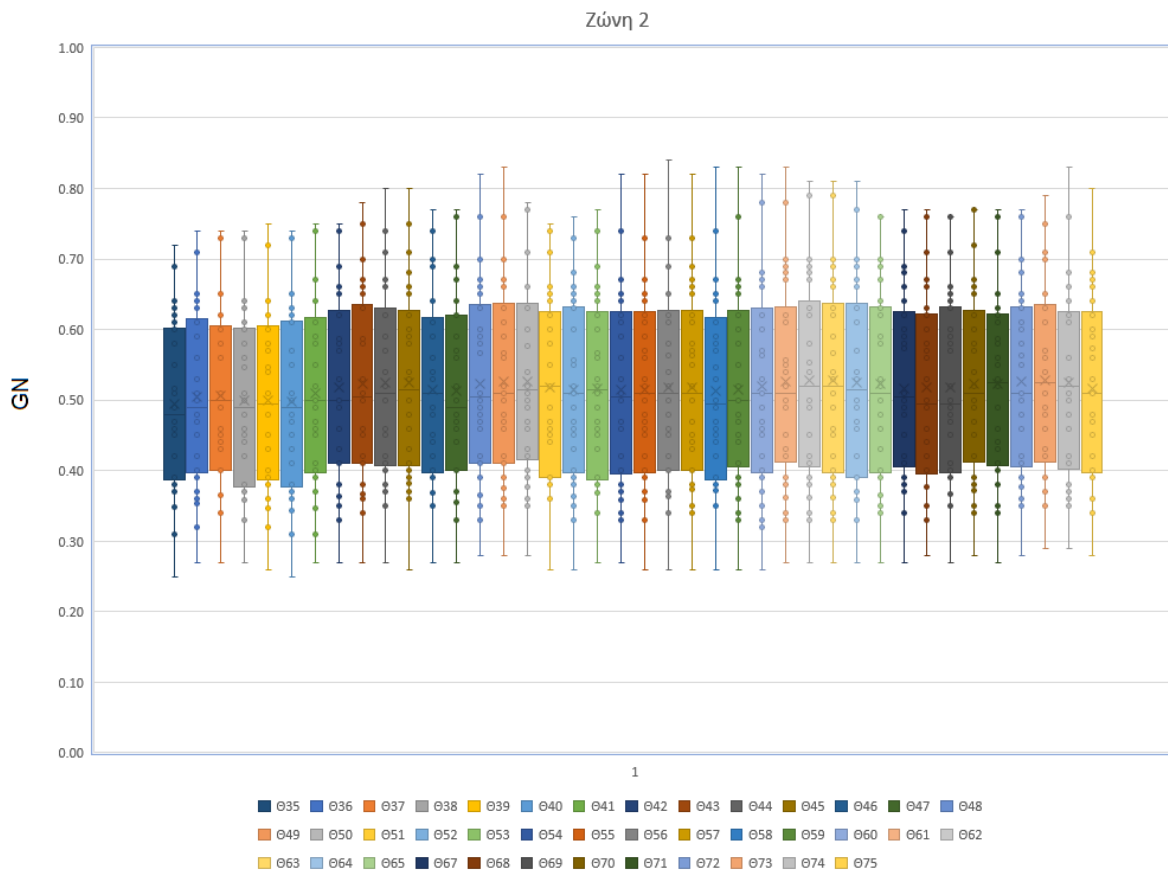
IQR: Η διαφορά ( $Q_3-Q_1$ ) γνωστή ως ενδοτεταρτομοριακό εύρος.

Οι κεραιές ή αλλιώς “μουστάκια” χρησιμοποιούνται για να ανιχνευτούν ακραίες τιμές. Κάποιες από τις συνήθεις τιμές για το μήκος τους είναι  $1.5 \cdot IQR$  και  $2 \cdot s$  (όπου  $s$  η τυπική απόκλιση). Οι τιμές που βρίσκονται εκτός των κεραιών θεωρούνται ακραίες. Στην περίπτωση που η μέγιστη και ελάχιστη τιμή βρίσκονται εντός των κεραιών τότε τις αντικαθιστούν. Κατασκευάστηκαν θηκογράμματα για όλες τις χρονοσειρές τα αποτελέσματα των οποίων παρατείνονται στις εικόνες 6-8 και 6-9. Σαν μήκος των κεραιών επιλέχθηκε το  $2 \cdot s$  γιατί έδινε μικρότερη τιμή και επομένως ήταν πιο αυστηρό κριτήριο.

Στις εικόνες 5-6 και 5-7 παρουσιάζονται τα θηκογράμματα των δύο Ζωνών



Εικόνα 5-6 Θηκογράμματα Ζώνης 1



Εικόνα 5-7 Θηκογράμματα Ζώνης 2

Καμμία από τις τιμές δεν είναι εκτός των κεραίων, επομένως δεν υπάρχουν ακραίες τιμές και η διαδικασία συνεχίζεται κανονικά.

## 5.4 Επιλογή μοντέλου

### 5.4.1 Γενικά

Η επιλογή του μοντέλου είναι από τα σημαντικότερα κομμάτια της διαδικασίας πρόβλεψης. Αυτό που θα κρίνει την επιλογή είναι οι ανάγκες του μοντέλου και οι περιοριστικοί παράγοντες που προέκυψαν από την ανάλυση των δεδομένων. Οι κύριοι περιοριστικοί παράγοντες είναι οι εξής:

- Ορισμένα μοντέλα έχουν μια ελάχιστη συχνότητα ως απαίτηση για να λειτουργήσουν, η συχνότητα των μετρήσεων (2 μετρήσεις το χρόνο) καθώς και ο μικρός αριθμός τους δρουν πολύ περιοριστικά.
- Οι χρονοσειρές είναι μη-στάσιμες αφού παρουσιάζουν τάση και εποχικότητα, επομένως το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να είναι ικανό να ανιχνεύσει αυτές τις συνιστώσες καθώς και να τις λάβει υπόψιν στις προβλέψεις.

Η μέθοδος ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) η οποία είναι πολύ διαδεδομένη απορρίφθηκε καθώς απαιτεί τουλάχιστον 50-100 μετρήσεις και απαιτεί η χρονοσειρά να είναι στάσιμη (υπάρχουν τρόποι να μετατραπούν σε στάσιμες οι μη-στάσιμες χρονοσειρές), ενώ μέθοδοι όπως η SEATS (Seasonal Extraction in ARIMA Time Series) που είναι παραλλαγή της ARIMA αλλά μπορεί να ανιχνεύσει την εποχικότητα και η μέθοδος αποσύνθεσης Χ11 απορρίφθηκαν καθώς απαιτούν το διάστημα μεταξύ των μετρήσεων να είναι μηνιαίο ή τριμηνιαίο ((Hyndman and Athanasopoulos 2013)).

Επιλέχθηκαν τρία μοντέλα πρόβλεψης, δύο που βασίζονται σε μεθόδους αποσύνθεσης και ένα εκθετικής εξομάλυνσης τα οποία αναλύονται παρακάτω

#### 5.4.2 Μέθοδοι αποσύνθεσης

##### 5.4.2.1 Γενική περιγραφή

Ο βασικός σκοπός μιας αποσύνθεσης είναι η ανάλυση της χρονοσειράς στα επιμέρους κομμάτια της για να χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για προβλέψεις. Οι βασικές συνιστώσες είναι:

Η Τάση (Trend) που όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4.2 δείχνει την διαχρονική πορεία της χρονοσειράς.

Η Εποχικότητα (Seasonality) που εκφράζει την περιοδικότητα της χρονοσειράς εντός του έτους.

Η Κυκλικότητα (Cyclicality) που εκφράζει την περιοδικότητα της χρονοσειράς για χρονικά διαστήματα που υπερβαίνουν το ένα έτος.

Η τυχαιότητα (Randomness), το κομμάτι της χρονοσειράς που απομένει, το οποίο δεν ερμηνεύεται και οφείλεται σε τυχαία γεγονότα.

Τα επιμέρους κομμάτια, χωρίς να είναι απαραίτητο μια χρονοσειρά να αποτελείται από όλες τις συνιστώσες, την συνθέτουν ξανά με τον εξής τρόπο:

Στο προσθετικό μοντέλο η μεταβλητή  $Y_t$  ισούται με το άθροισμα των επιμέρους στοιχείων οπότε είναι:

$$Y_t = T_t + S_t + C_t + R_t \quad (5.2)$$

Ενώ στο πολλαπλασιαστικό μοντέλο η μεταβλητή  $Y_t$  ισούται με το γινόμενο των επιμέρους στοιχείων δηλαδή:

$$Y_t = T_t * S_t * C_t * R_t \quad (5.3)$$

Όπου:

$T_t$  = η συνιστώσα της Τάσης

$S_t$  = η συνιστώσα της Εποχικότητας

$C_t$  = η συνιστώσα της Κυκλικότητας

$R_t$  = η συνιστώσα της τυχαιότητας

#### 5.4.2.2 Μοντέλο 1: Κλασική Αποσύνθεση και Γραμμική Παλινδρόμηση

Η κλασική αποσύνθεση αποτελεί την πιο απλή μέθοδο αποσύνθεσης. Πρωτοεμφανίστηκε το 1920 και πάνω σε αυτή βασίζονται οι περισσότερες μέθοδοι αυτού του είδους. Επιλέχθηκε για την απλότητά της και την ευκολία εφαρμογής της για να χρησιμοποιηθεί σαν σημείο αναφοράς για τα άλλα μοντέλα.

Βήμα 1: Υπολογισμός της Τάσης

Η Τάση υπολογίζεται από έναν σταθμισμένο κεντρικό μέσο που λόγω της συχνότητας της χρονοσειράς (2 μετρήσεις το έτος) συμπίπτει με το Φίλτρο Hanning που αναφέρθηκε νωρίτερα και προκύπτει από αυτή την εξίσωση:

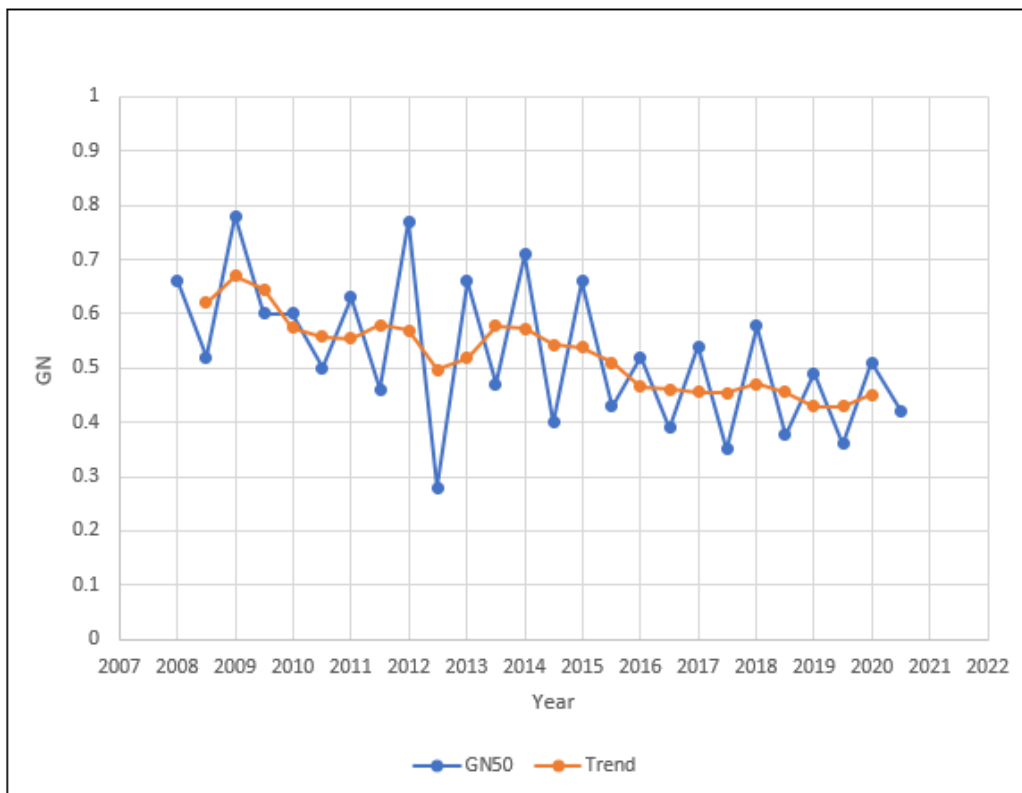
$$T_t = 0.25y_{t-1} + 0.5y_t + 0.25y_{t+1} \quad (5.4)$$

Όπου:

$T_t$  = η συνιστώσα της Τάσης την χρονική περίοδο t

$y_t$  = οι τιμές της μεταβλητής για χρόνο t

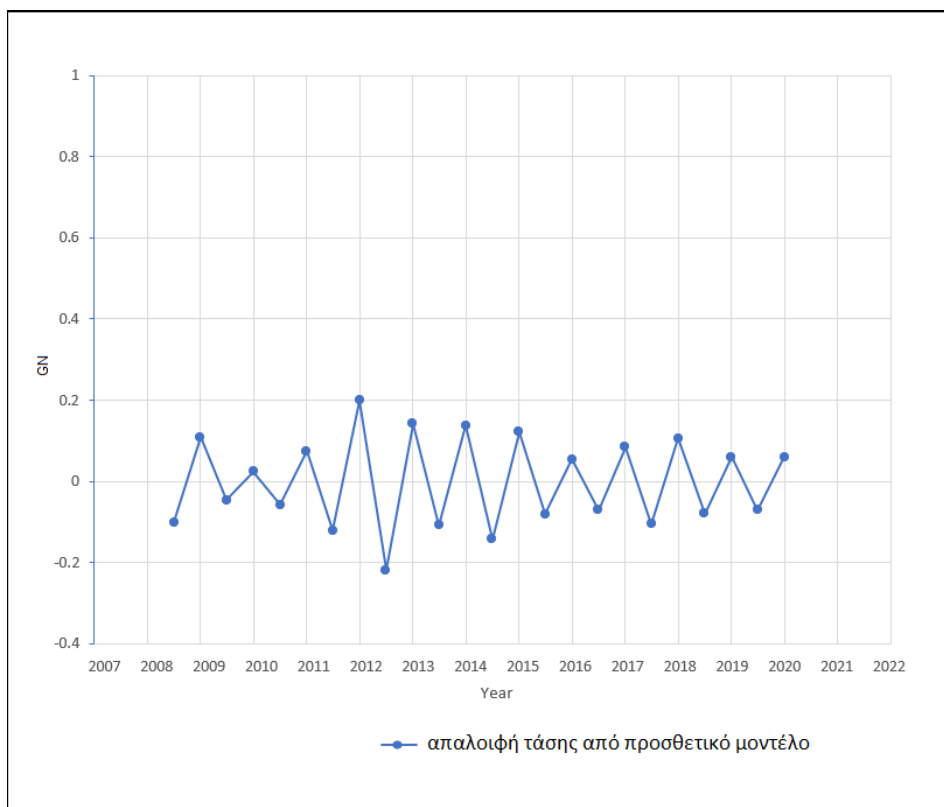
Λόγω της μορφής της εξίσωσης που για κάθε περίοδο χρησιμοποιεί την προηγούμενη και την επόμενη μέτρηση, δεν υπάρχουν τιμές της τάσης για την πρώτη και τελευταία περίοδο. Στην εικόνα 5-8 φαίνεται η τάση όπως υπολογίστηκε από τη σχέση (5.4)



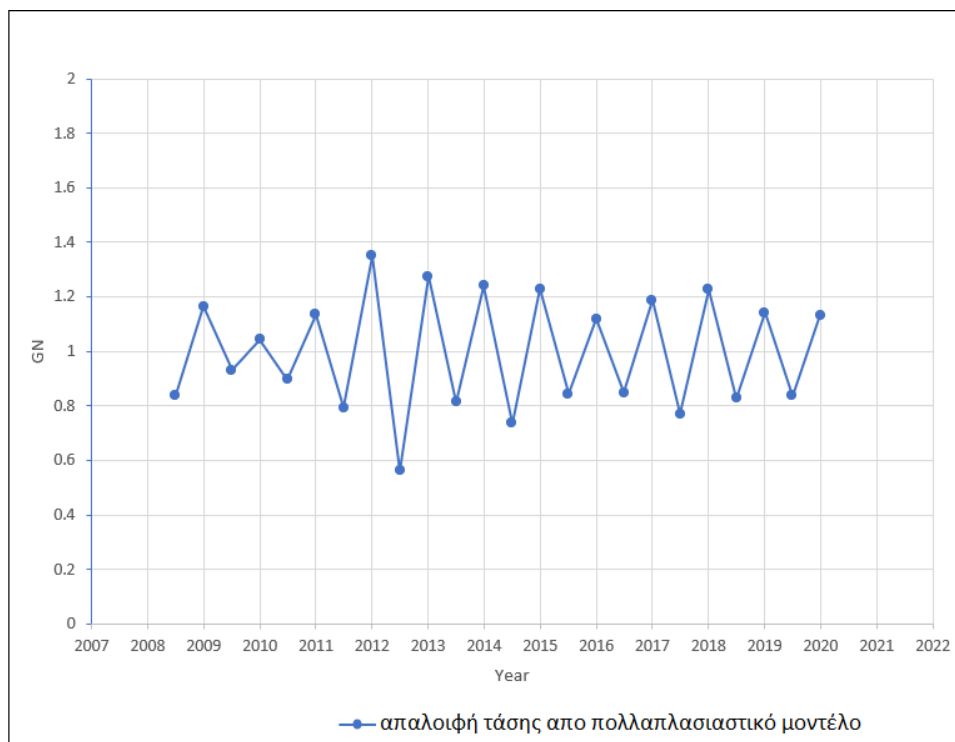
Εικόνα 5-8 Εύρεση τάσης θ50

## Βήμα 2: Απαλοιφή της τάσης

Στη συνέχεια γίνεται απαλοιφή της τάσης από την χρονοσειρά. Στο προσθετικό μοντέλο η απαλοιφή γίνεται με αφαίρεση της τάσης από τις τιμές και στο πολλαπλασιαστικό με διαίρεση.



Εικόνα 5-9 Προσθετικό μοντέλο χωρίς τάση



Εικόνα 5-10 Πολλαπλασιαστικό μοντέλο χωρίς τάση

Αυτό που μένει είναι μια χρονοσειρά που κυμαίνεται γύρω από το μηδέν (0) (εικόνα 5-9) για το προσθετικό μοντέλο και γύρω από το ένα (1) για το πολλαπλασιαστικό (εικόνα 5-10).

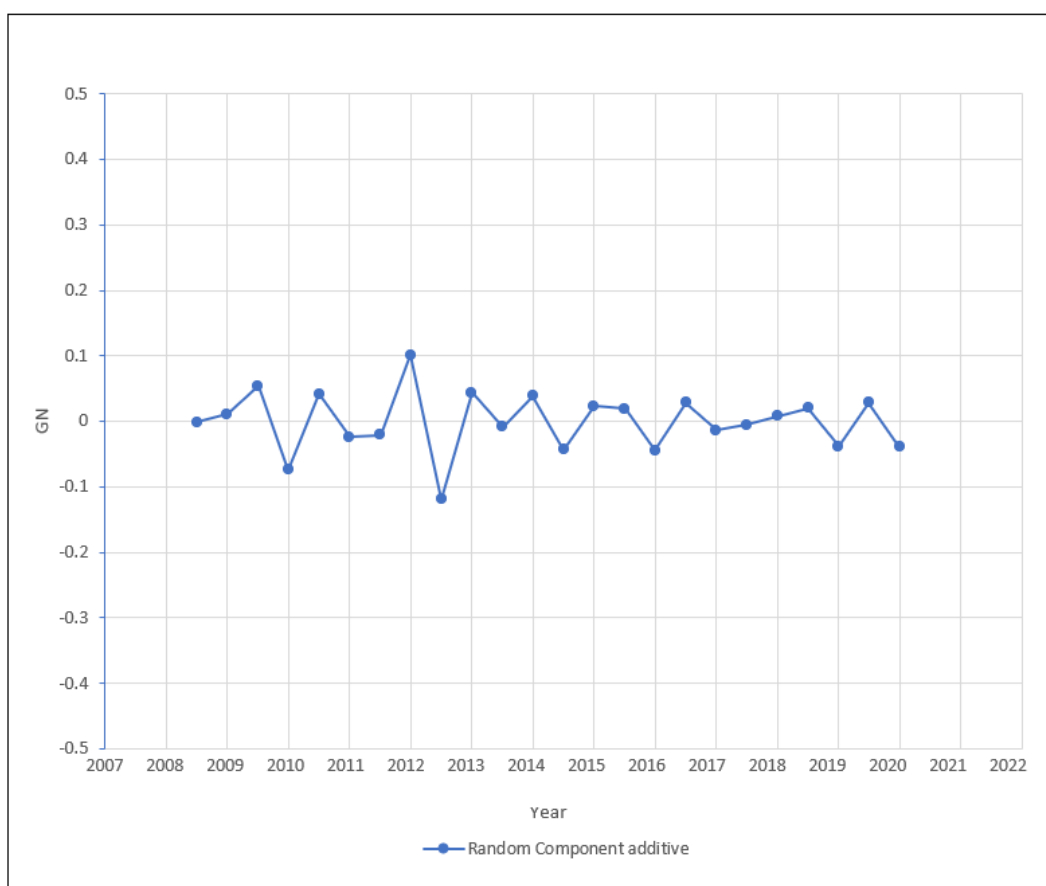


### Βήμα 3: Υπολογισμός εποχικότητας

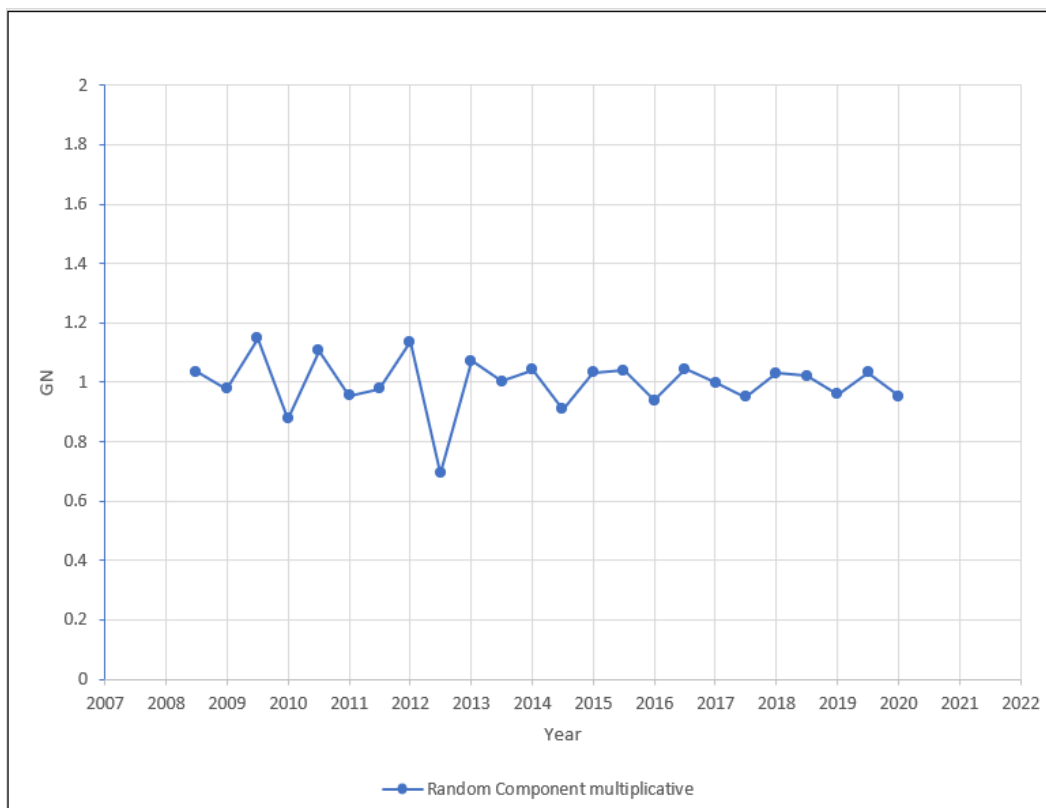
Στη συνέχεια υπολογίζεται η συνιστώσα της εποχικότητας. Για την διαδικασία αυτή υπολογίζεται ο μέσος όρος των ξηρών περιόδων και των υγρών περιόδων στις χρονοσειρές που προέκυψαν μετά την απαλοιφή της τάσης και γίνεται μετατόπιση των μέσων όρων αυτών ώστε να έχουν ως μέσο τους το μηδέν (0) στο προσθετικό μοντέλο και το ένα (1) στο πολλαπλασιαστικό. Η μέθοδος αυτή θεωρεί ότι η συνιστώσα της εποχικότητας παραμένει σταθερή καθ'όλη τη διάρκεια της χρονοσειράς.

### Βήμα 4: Απαλοιφή εποχικότητας

Η απαλοιφή της εποχικότητας γίνεται όπως η απαλοιφή της τάσης με την εναπομένουσα χρονοσειρά να είναι το τυχαίο κομμάτι (εικόνες 5-11 και 5-12).



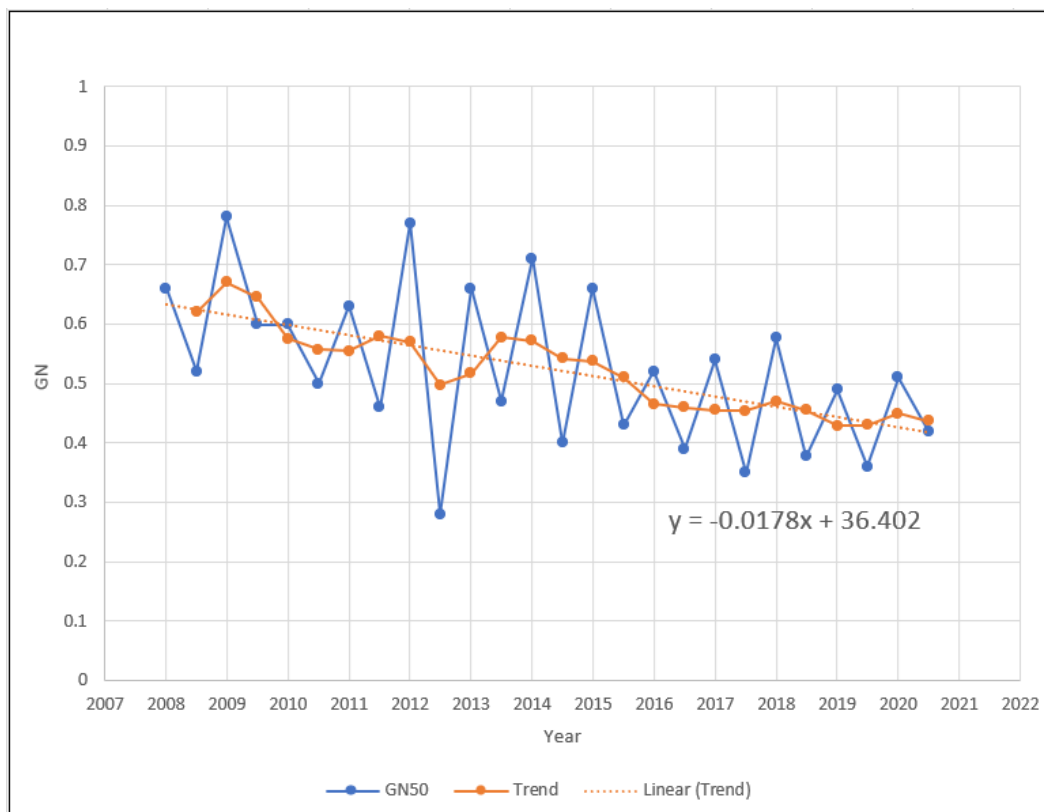
Εικόνα 5-11 Τυχαίο κομμάτι προσθετικού μοντέλου



Εικόνα 5-12 Τυχαίο κομμάτι πολλαπλασιαστικού μοντέλου

#### Βήμα 5: Επανασύνθεση χρονοσειράς και πρόβλεψη

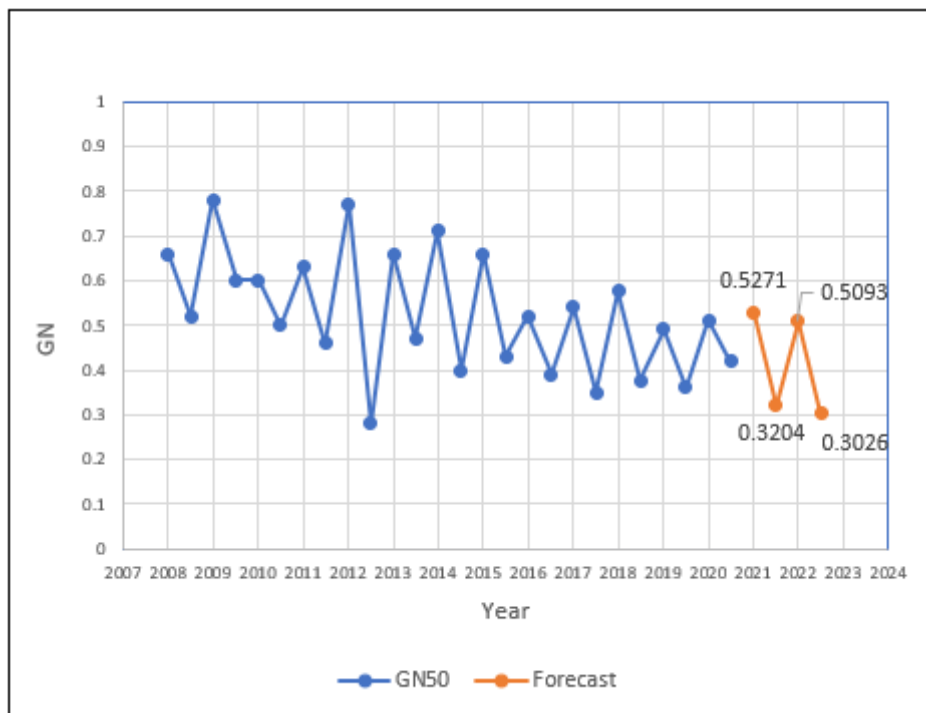
Για να γίνει η πρόβλεψη πρέπει να ξαναγίνει σύνθεση της χρονοσειράς από τις επιμέρους συνιστώσες, εκτός από το τυχαίο κομμάτι που θα αγνοηθεί. Με την εποχικότητα να παραμένει σταθερή, αρκεί να γίνει προέκταση της τάσης. Για τις μελλοντικές τιμές της τάσης επιλέχθηκε σαν μέθοδος η γραμμική παρεμβολή για την απλότητά της, από την οποία θα βγει η εξίσωση για τον υπολογισμό των μελλοντικών τιμών της τάσης (εικόνα 5-13).



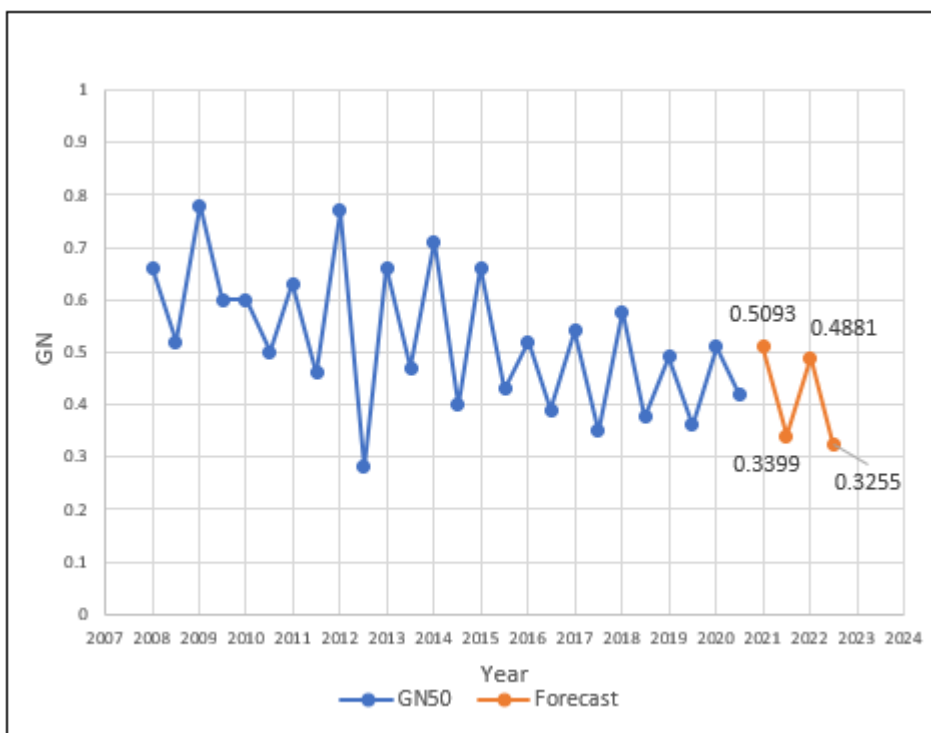
Εικόνα 5-13 Υπολογισμός μελλοντικής τάσης από γραμμική παρεμβολή

### Βήμα 6: Αποτελέσματα πρόβλεψης

Στις εικόνες 5-14 και 5-15 φαίνονται τα αποτελέσματα της πρόβλεψης δύο ετών για τις δύο παραλλαγές του μοντέλου. Ένα μεγάλο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι βγάζει μόνο σημειακές προβλέψεις και επομένως δεν υπάρχουν εύρη διακύμανσης για την πρόβλεψη.



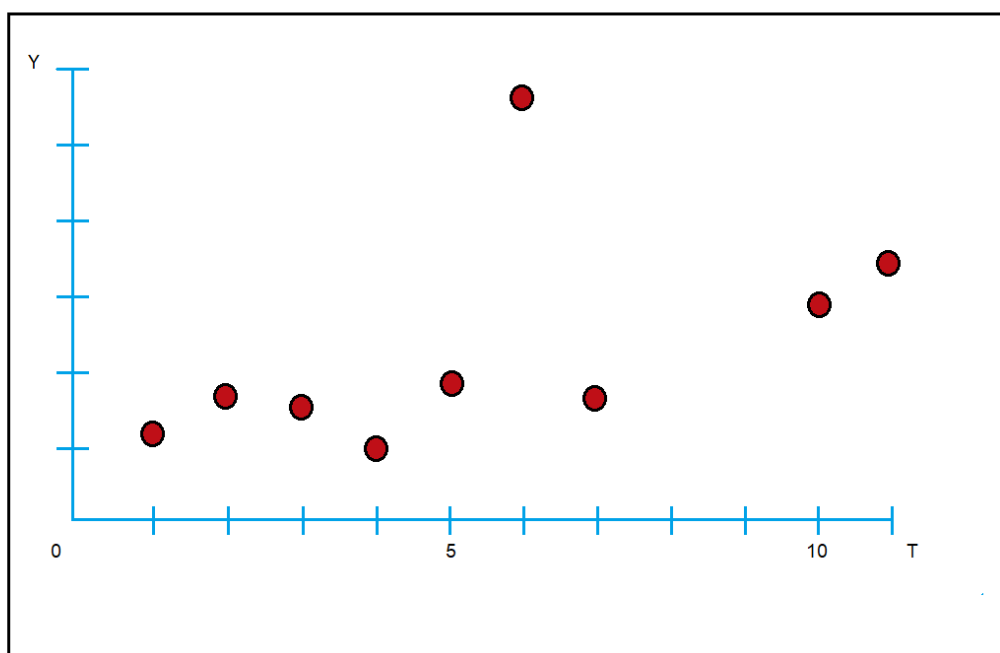
Εικόνα 5-14 Αποτέλεσμα πρόβλεψης προσθετικού μοντέλου



Εικόνα 5-15 Αποτέλεσμα πρόβλεψης πολλαπλασιαστικού μοντέλου

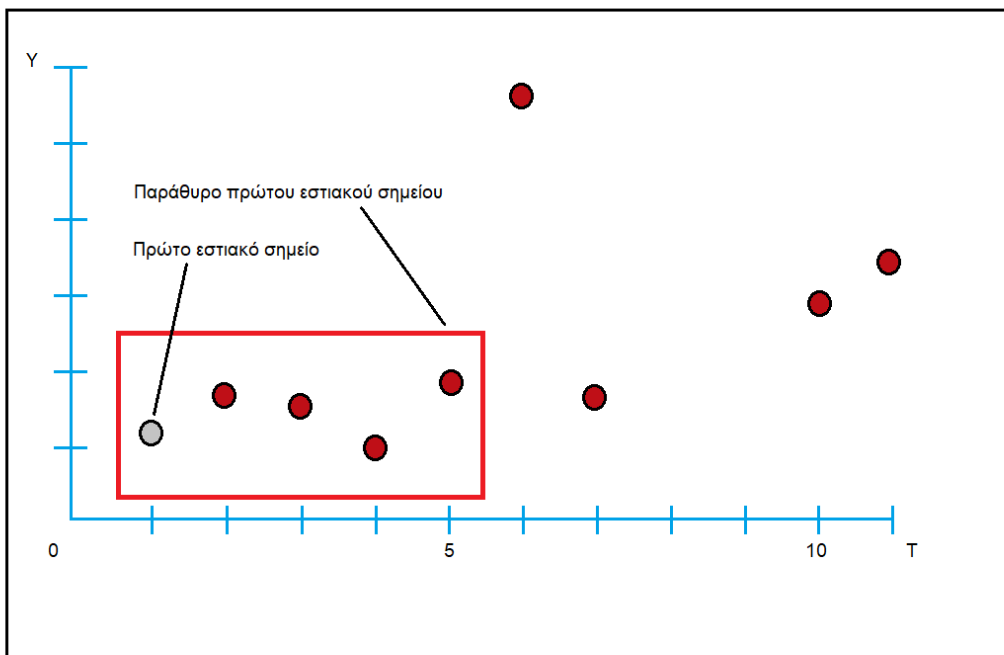
### 5.4.2.3 Μοντέλο 2: STL και Τυχαίος περίπατος με περιπλάνηση

Η μέθοδος αποσύνθεσης STL (Seasonal and Trend Decomposition using Loess) που αναπτύχθηκε από τους R.B. Cleveland, Cleveland, McRae και Terpenning το 1990 κάνει πολλαπλή χρήση της μεθόδου εξομάλυνσης Loess ή Lowess (Locally Weighted Scatterplot Smoothing) για να αποσυνθέσει την χρονοσειρά στις επιμέρους συνιστώσες της (Hyndman and Athanasopoulos 2013). Για να γίνει κατανοητή η μέθοδος STL πρέπει πρώτα να μελετηθεί η μέθοδος εξομάλυνσης Loess χρησιμοποιώντας το απλό παράδειγμα της εικόνας 5-16.

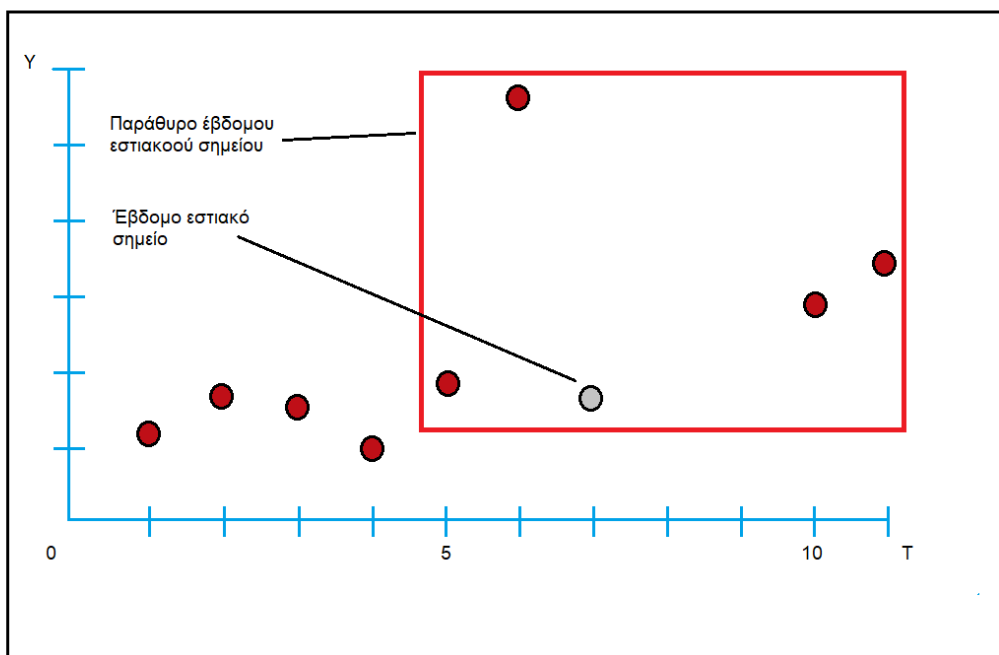


Εικόνα 5-16 Παράδειγμα γραφήματος πάνω στο οποίο θα εφαρμοστεί η μέθοδος Loess

Η μέθοδος εξομάλυνσης Loess χωρίζει το γράφημα της χρονοσειράς σε μικρότερα τμήματα τα λεγόμενα παράθυρα (εικόνες 5-17 και 5-18). Για κάθε σημείο δημιουργείται ένα κινούμενο παράθυρο με τα πλησιέστερα σε αυτό κατά τον άξονα x σημεία (πλησιέστερα χρονικά στην περίπτωση των χρονοσειρών), το μέγεθος του οποίου (πχ 20% των δεδομένων) καθορίζεται από τον χρήστη.



Εικόνα 5-17 Παράθυρο πρώτου εστιακού σημείου



Εικόνα 5-18 Παράθυρο έβδομου εστιακού σημείου

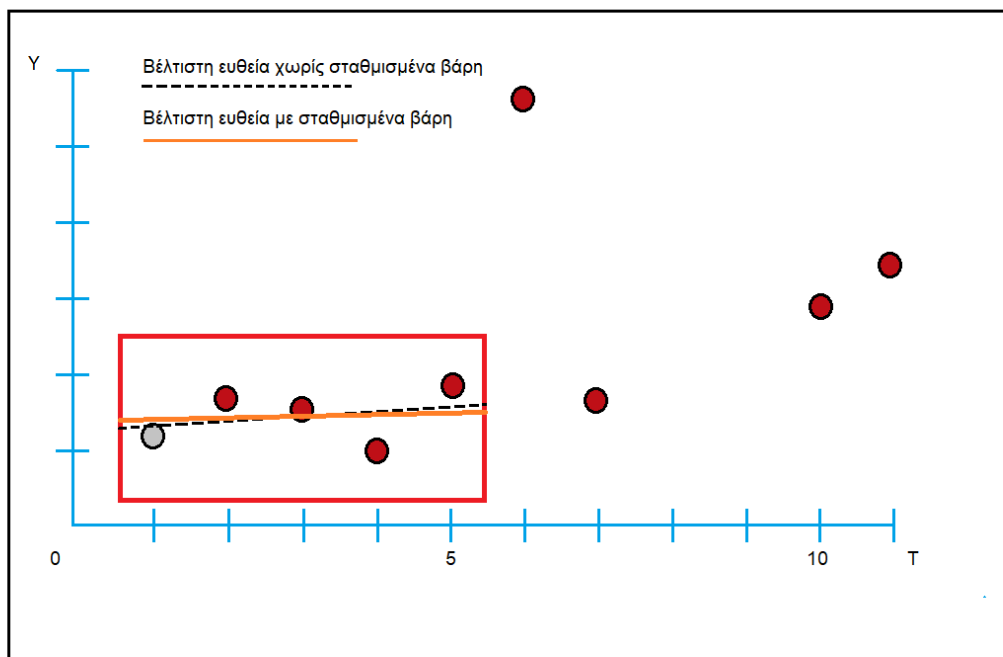
Το σημείο αυτό θεωρείται το εστιακό σημείο (focal point) του παραθύρου και στη συνέχεια βρίσκεται η βέλτιστη ευθεία με τη μέθοδο των σταθμισμένων ελάχιστων τετραγώνων με το βάρος κάθε σημείου  $i$  να εξαρτάται από την απόστασή του στον

άξονα  $x$ , δηλαδή τον χρόνο, από το εστιακό σημείο. Τα βάρη υπολογίζονται από την συνάρτηση βάρους tricube όπως φαίνεται στη σχέση 5.5

$$W(x_i) = (1 - |x_i|^3)^3 \quad \text{για } |x_i| < 1 \quad \text{και } 0 \text{ για } |x_i| \geq 1, \quad (5.5)$$

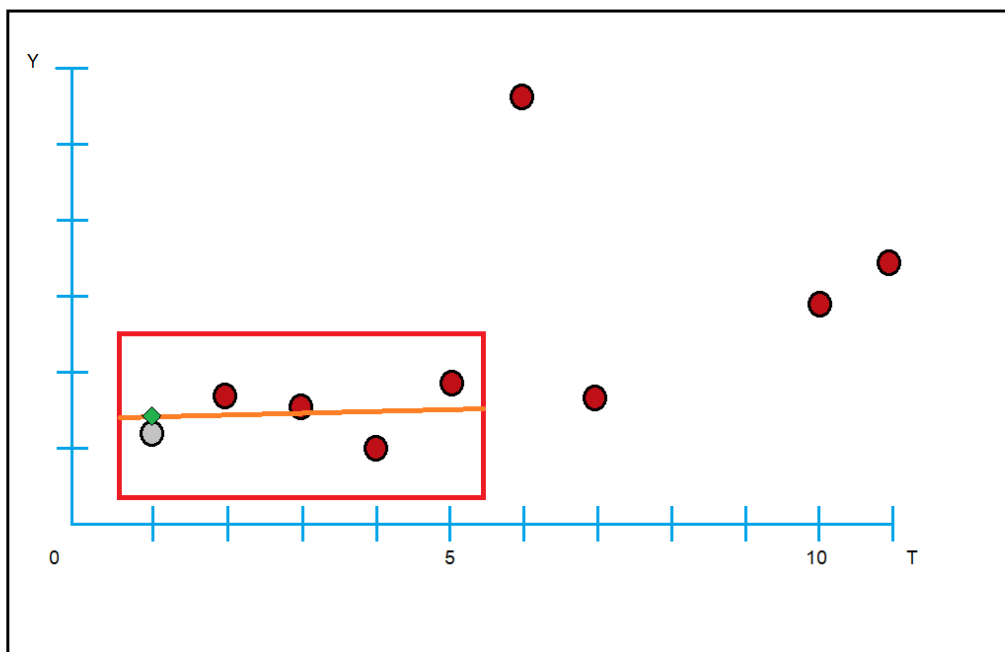
όπου  $|x_i|$  μια συνάρτηση της απόστασης του σημείου  $i$  από το εστιακό σημείο.

Στην εικόνα 5-19 παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ των βέλτιστων ευθειών όταν χρησιμοποιούνται τα βάρη και όταν δεν χρησιμοποιούνται.



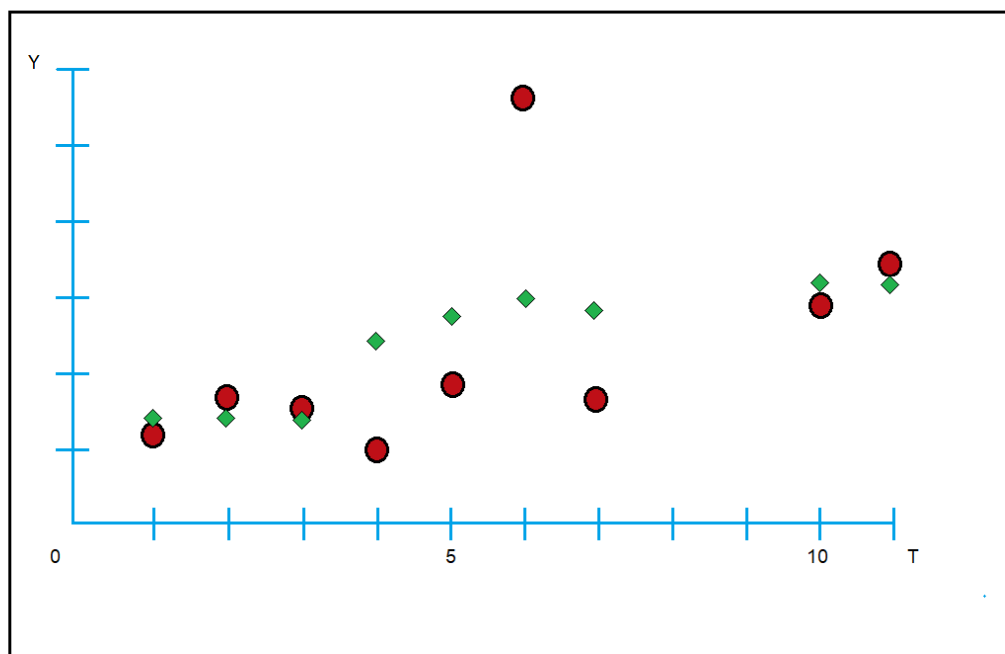
Εικόνα 5-19 Σύγκριση βέλτιστης ευθείας με και χωρίς βάρη

Αφού βρεθεί η βέλτιστη ευθεία του παραθύρου, επιλέγεται το σημείο της ευθείας με κοινή τετμημένη με το εστιακό σημείο ως ένα προκαταρκτικό σημείο της καμπύλης (εικόνα 5-20).



Εικόνα 5-20 Πρώτο προκαταρκτικό σημείο

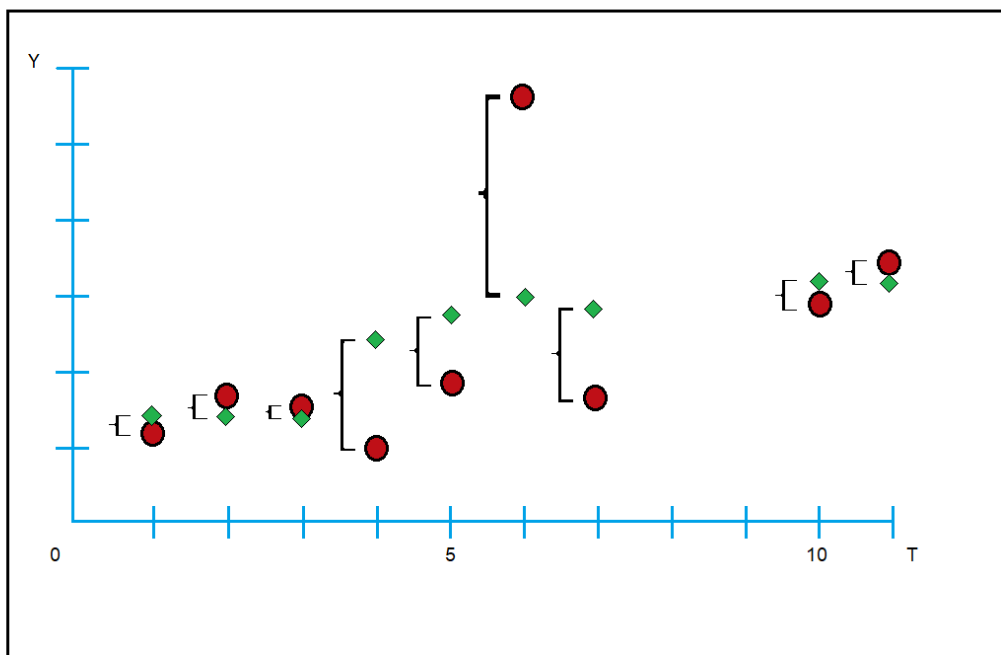
Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε σημείο του γραφήματος μέχρι να βρεθούν όλα τα προκαταρκτικά σημεία (εικόνα 5-21).



Εικόνα 5-21 Σύνολο προκαταρκτικών σημείων

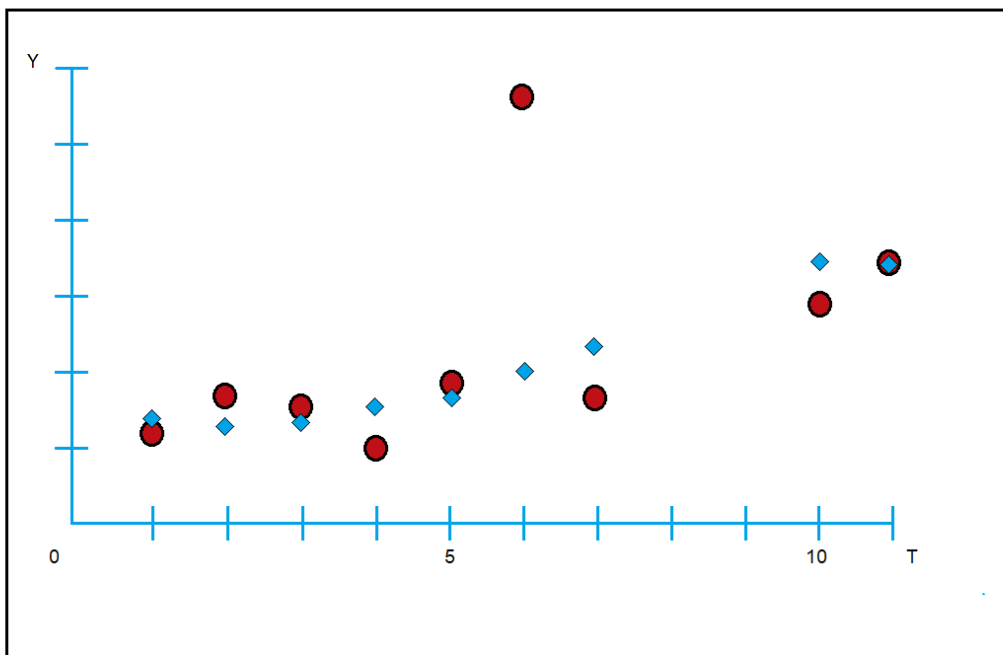


Έπειτα για κάθε προκαταρκτικό σημείο υπολογίζεται ένα επιπλέον βάρος που προκύπτει από την απόσταση του προκαταρκτικού σημείου από το πραγματικό όπως φαίνεται στην εικόνα 5-22, με αυτά που απέχουν λιγότερο από το αρχικό να θεωρούνται αξιόπιστα και να έχουν μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας και αυτά που απέχουν περισσότερο να έχουν μεγαλύτερο, προκειμένου να μειωθεί η επιρροή των ακραίων τιμών.

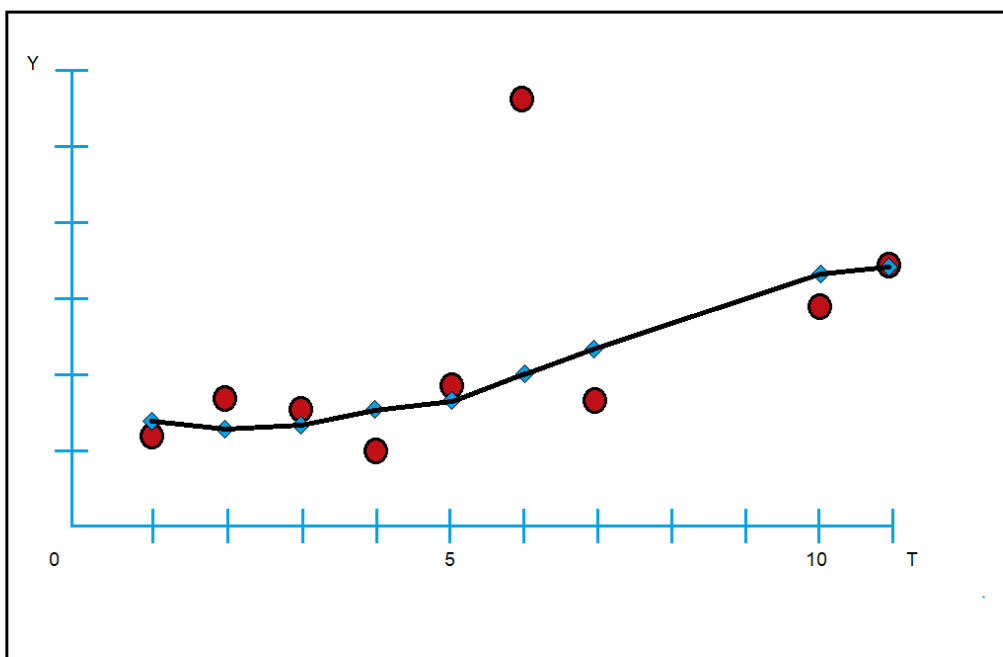


Εικόνα 5-22 Αποστάσεις από πραγματικά σημεία για να υπολογίσουμε τα επιπλέον βάρη

Στη συνέχεια επαναλαμβάνεται όλη την διαδικασία αλλά αυτή τη φορά με τους δύο συντελεστές βαρύτητας με τα νέα σημεία να φαίνονται στην εικόνα 5-23 και η εξομάλυνση που προκύπτει στην εικόνα 5-24.



Εικόνα 5-23 Νέα σημεία



Εικόνα 5-24 Εξομάλυνση

Η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί μετά εξ ολοκλήρου με τα νέα σημεία όσες φορές επιθυμεί ο χρήστης. Επιπλέον αντί για ευθεία, για κάθε παράθυρο γίνεται να βρίσκεται η βέλτιστη παραβολή για τον υπολογισμό των προκαταρκτικών σημείων.

Μετά την εξήγηση της εξομάλυνσης Loess θα εξεταστεί τρόπος λειτουργίας της STL.

Βήμα 1: Υπολογίζεται η εποχικότητα με εξομάλυνση Loess στις μετρήσεις της ίδιας περιόδου για κάθε χρονιά (πχ όλοι οι Ιανουάριοι, Φεβρουάριοι κλπ στην περίπτωση μηνιαίων παρατηρήσεων) ή με έναν απλό μέσο όρο (μέσος όρος όλων των Ιανουαρίων κλπ) αν γίνει η υπόθεση ότι η εποχικότητα παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της χρονοσειράς (Cleveland et al. 1990).

Βήμα 2: Γίνεται απαλοιφή της εποχικότητας και ξαναεφαρμόζεται η μέθοδος Loess για να βρεθεί η τάση.

Βήμα 3: Τέλος το γενικό επίπεδο (level) απαλείφεται από την εποχικότητα και προστίθεται στη συνιστώσα της τάσης.

Ένας περιοριστικός παράγοντας της μεθόδου αυτής είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε προσθετικά μοντέλα, ο οποίος όμως παρακάμπτεται εύκολα χρησιμοποιώντας τους λογαρίθμους των δεδομένων, εφαρμόζοντας το προσθετικό μοντέλο και μετατρέποντας στο τέλος την πρόβλεψη χρησιμοποιώντας την σαν εκθέτη δύναμης με βάση το 10 .

Βήμα 4: Για την πρόβλεψη χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Τυχαίου Περιπάτου με Περιπλάνηση (Random Walk with Drift)

Ο τυχαίος περίπατος (Random Walk] είναι μια μη-στάσιμη χρονοσειρά όπου η κάθε τυχαία μεταβλητή  $Y_t$  για χρόνο  $t$  προκύπτει όταν στην προηγούμενη τυχαία μεταβλητή  $Y_{t-1}$  προστεθεί ένα τυχαίο σφάλμα  $\varepsilon_t$ , όπου  $\varepsilon_t \sim WN(0, \sigma^2)$  (σχέση 5.6)

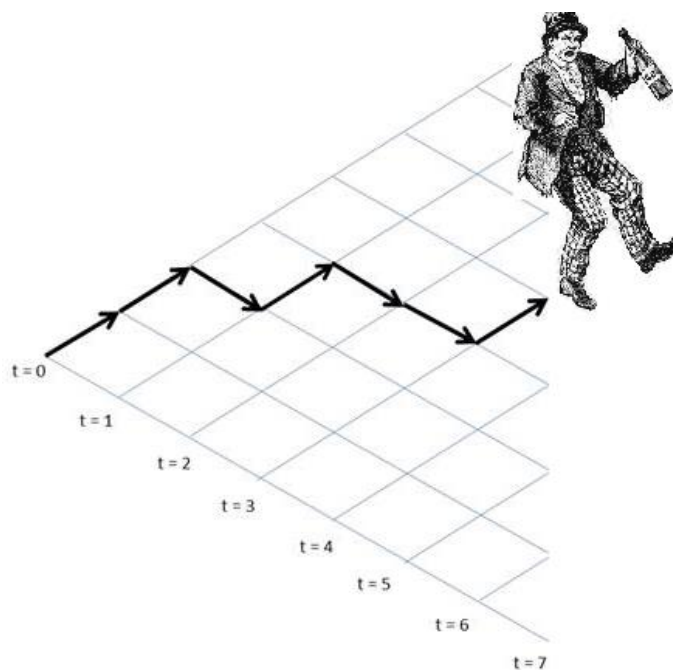
$$Y_t = Y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (5.6)$$

Όπου:

$Y_t$ = η παρατήρηση τη χρονική στιγμή  $t$

$\varepsilon_t$  = το τυχαίο σφάλμα

Η ονομασία της μεθόδου οφείλεται στο ότι θυμίζει τον τρόπο με τον οποίο περπατάει ένας μεθυσμένος (εικόνα 5-25).



Εικόνα 5-25 Τυχαίος περίπατος

Ο Τυχαίος Περίπατος με Περιπλάνηση (Random Walk with Drift) είναι μια παραλλαγή του τυχαίου περιπάτου που θεωρεί ότι η καλύτερη πρόβλεψη για την μεταβλητή  $Y_t$  προκύπτει όταν στην προηγούμενη τυχαία μεταβλητή  $Y_{t-1}$  προστεθεί το τυχαίο σφάλμα  $\varepsilon_t$  και μια σταθερά  $\beta$  (σχέση 5.7).

$$Y_t = Y_{t-1} + \varepsilon_t + \beta \quad (5.7)$$

Όπου:

$Y_t$  = η παρατήρηση τη χρονική στιγμή  $t$

$\varepsilon_t$  = το τυχαίο σφάλμα

$\beta$  = τυχαία σταθερά που ουσιαστικά είναι η τάση της χρονοσειράς

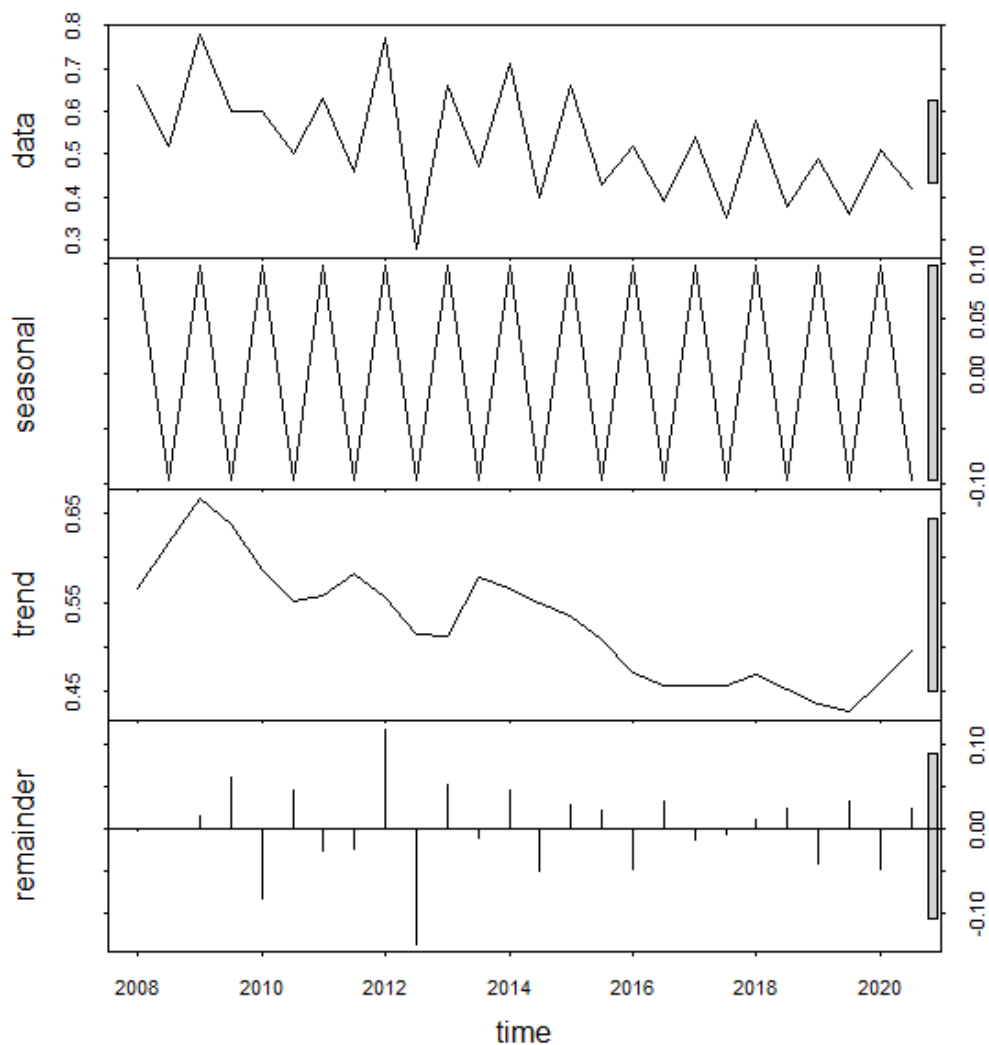
Οι πιο σημαντικές παράμετροι εισόδου είναι τα μεγέθη των παραθύρων για τον υπολογισμό της τάσης και της εποχικότητας  $t.window$  και  $s.window$  αντίστοιχα. Όσο μικρότερο το μέγεθος του παραθύρου, τόσο πιο γρήγορα αλλάζει η αντίστοιχη συνιστώσα (Hyndman and Athanasopoulos 2013). Στο  $s.window$  δε δίνεται σαν τιμή ένας αριθμός, αλλά ο χαρακτήρας “periodic” που εισάγει έναν πολύ μεγάλο αριθμό ώστε να μην αλλάζει η εποχικότητα κατά τη διάρκεια της χρονοσειράς. Το  $t.window$  αφήνεται κενό και παίρνει την προκαθορισμένη τιμή η οποία είναι η αμέσως μεγαλύτερη περιττή τιμή από την τιμή που προκύπτει από την σχέση 5.8:

$$((1.5 * period) / (1 - (1.5 / s.window))) = (1.5 * 2) / (1 - 0) \quad (5.8)$$

Δηλαδή 5 στην περίπτωση που εξετάζεται.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι:

Οι συνιστώσες της αποσύνθεσης σε μορφή γραφημάτων (εικόνα 5-26)



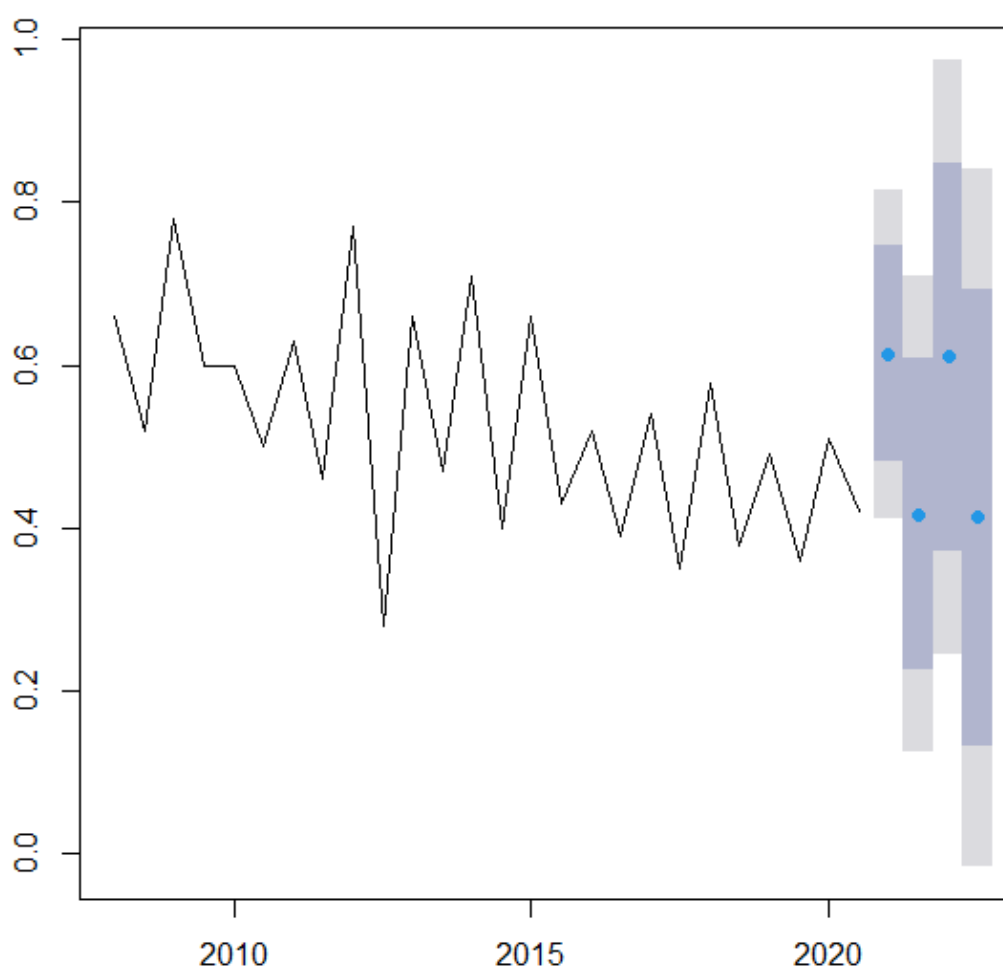
Εικόνα 5-26 Αποτελέσματα προσθετικού μοντέλου από την αποσύνθεση STL

Στον πίνακα 5-5 φαίνεται η σημειακή πρόβλεψη με το αντίστοιχο εύρος διακύμανσης για πιθανότητες 80% και 95%

Πίνακας 5-5 Σημειακές προβλέψεις προσθετικού μοντέλου STL με εύρη διακύμανσης για πιθανότητες 80% και 95%

Year	Σημειακή πρόβλεψη	80%	95%
2021	0.613	0.481 - 0.746	0.411 - 0.816
2021.5	0.416	0.225 - 0.608	0.124 - 0.709
2022	0.61	0.371 - 0.849	0.245 - 0.975
2022.5	0.413	0.132 - 0.693	-0.016 - 0.842

Η πρόβλεψη για τα επόμενα 2 έτη με τη μορφή διαγράμματος (εικόνα 5-27):

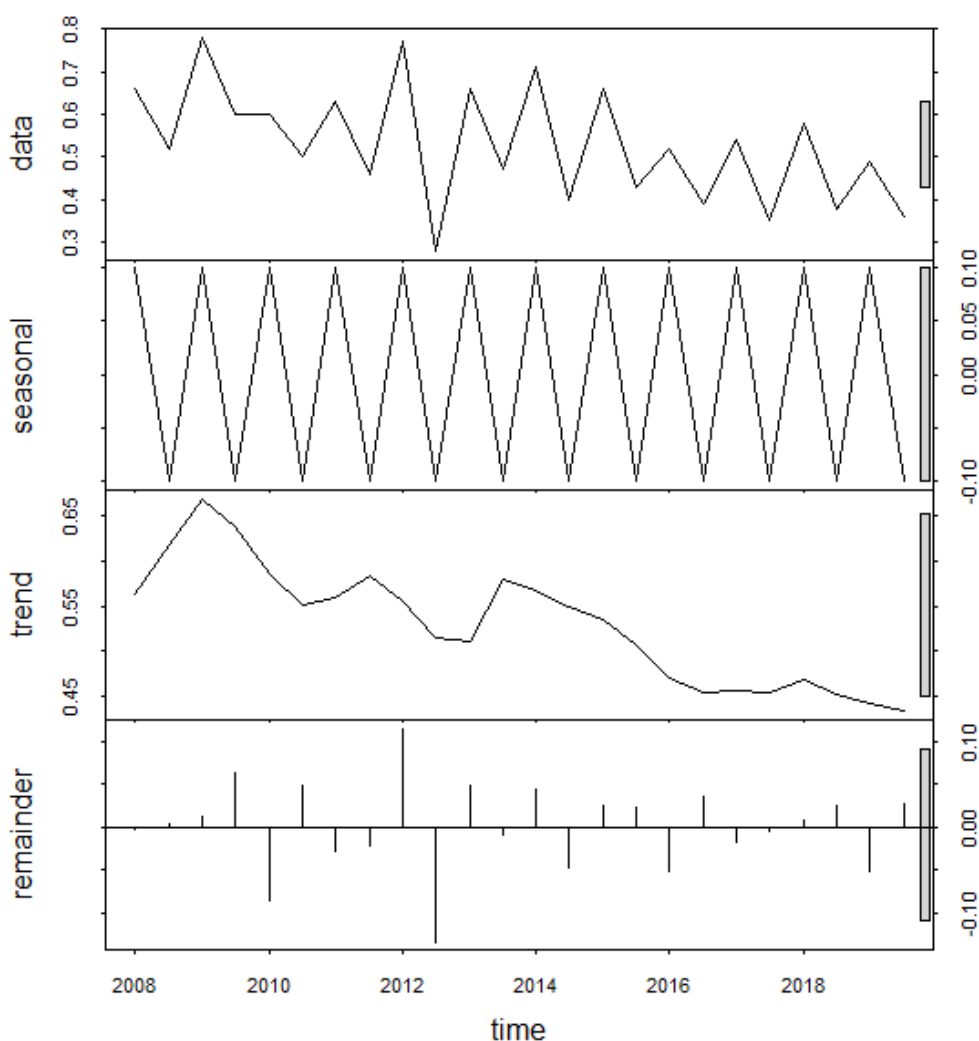


Εικόνα 5-27 Πρόβλεψη προσθετικού μοντέλου STL με μορφή διαγράμματος

Είναι προφανές ότι οι τιμές της πρόβλεψης είναι πολύ υψηλές. Το 2020 ήταν χρονιά με πολύ συχνές βροχοπτώσεις οι οποίες σε συνδυασμό με την ραγδαία μείωση του κυκλοφοριακού φόρτου λόγω της απαγόρευσης της κυκλοφορίας εξαιτίας της πανδημίας είχαν σαν αποτέλεσμα λιγότερους ρύπους στην επιφάνεια του

οδοστρώματος και συχνό ξέπλυμά τους. Αυτό οδήγησε σε πολύ υψηλότερες τιμές GN οι οποίες θα επηρεάσουν πολύ την πρόβλεψη λόγω του τρόπου λειτουργίας του Τυχαίου περιπάτου με περιπλάνηση, ο οποίος δίνει τεράστια βαρύτητα στην πιο πρόσφατη μέτρηση. Για το λόγο αυτό είναι προτιμότερο να αγνοηθούν τα δεδομένα του 2020 για τη μέθοδο αυτή και να γίνει πρόβλεψη 3 ετών χρησιμοποιώντας μόνο τα δεδομένα μέχρι το 2019 για την “εκπαίδευση” του μοντέλου. Τα νέα αποτελέσματα είναι:

Οι συνιστώσες της αποσύνθεσης σε μορφή γραφημάτων (εικόνα 5-28):



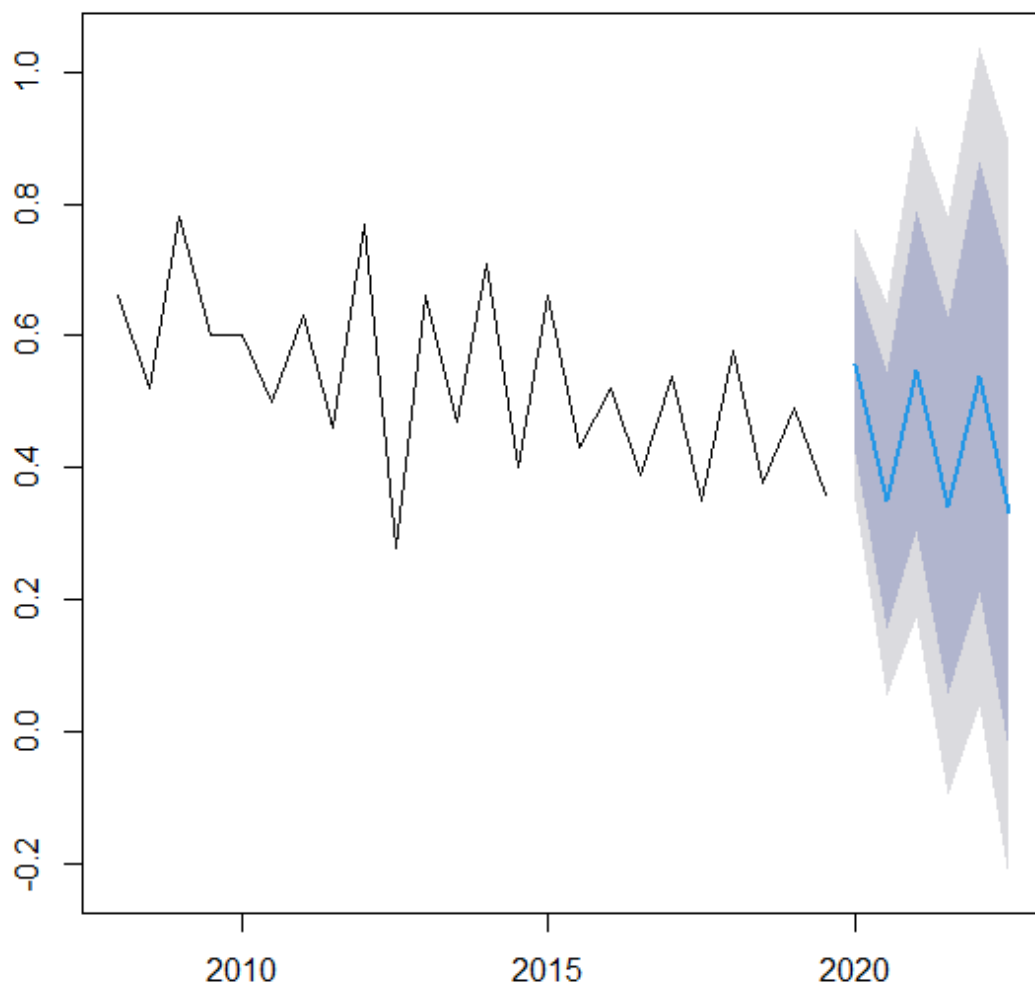
Εικόνα 5-28 Νέα αποτελέσματα προσθετικού μοντέλου από την αποσύνθεση STL

Οι νέες σημειακές προβλέψεις μαζί με τα εύρη διακύμανσης για πιθανότητες 80% και 95% (πίνακας 5-6).

Πίνακας 5-6 Νέες Σημειακές προβλέψεις προσθετικού μοντέλου STL με εύρη διακύμανσης για πιθανότητες 80% και 95%

Year	Σημειακή πρόβλεψη	80%	95%
2020	0.556	0.421 - 0.691	0.350 - 0.762
2020.5	0.351	0.157 - 0.546	0.054 - 0.649
2021	0.547	0.304 - 0.790	0.196 - 0.919
2021.5	0.343	0.056 - 0.629	-0.095 - 0.780
2022	0.539	0.213 - 0.865	0.040 - 1.037
2022.5	0.334	-0.030 - 0.698	-0.222 - 0.890

Η πρόβλεψη για τα επόμενα 3 έτη με τη μορφή διαγράμματος (εικόνα 5-29)



Εικόνα 5-29 Νέα πρόβλεψη προσθετικού μοντέλου STL με μορφή διαγράμματος

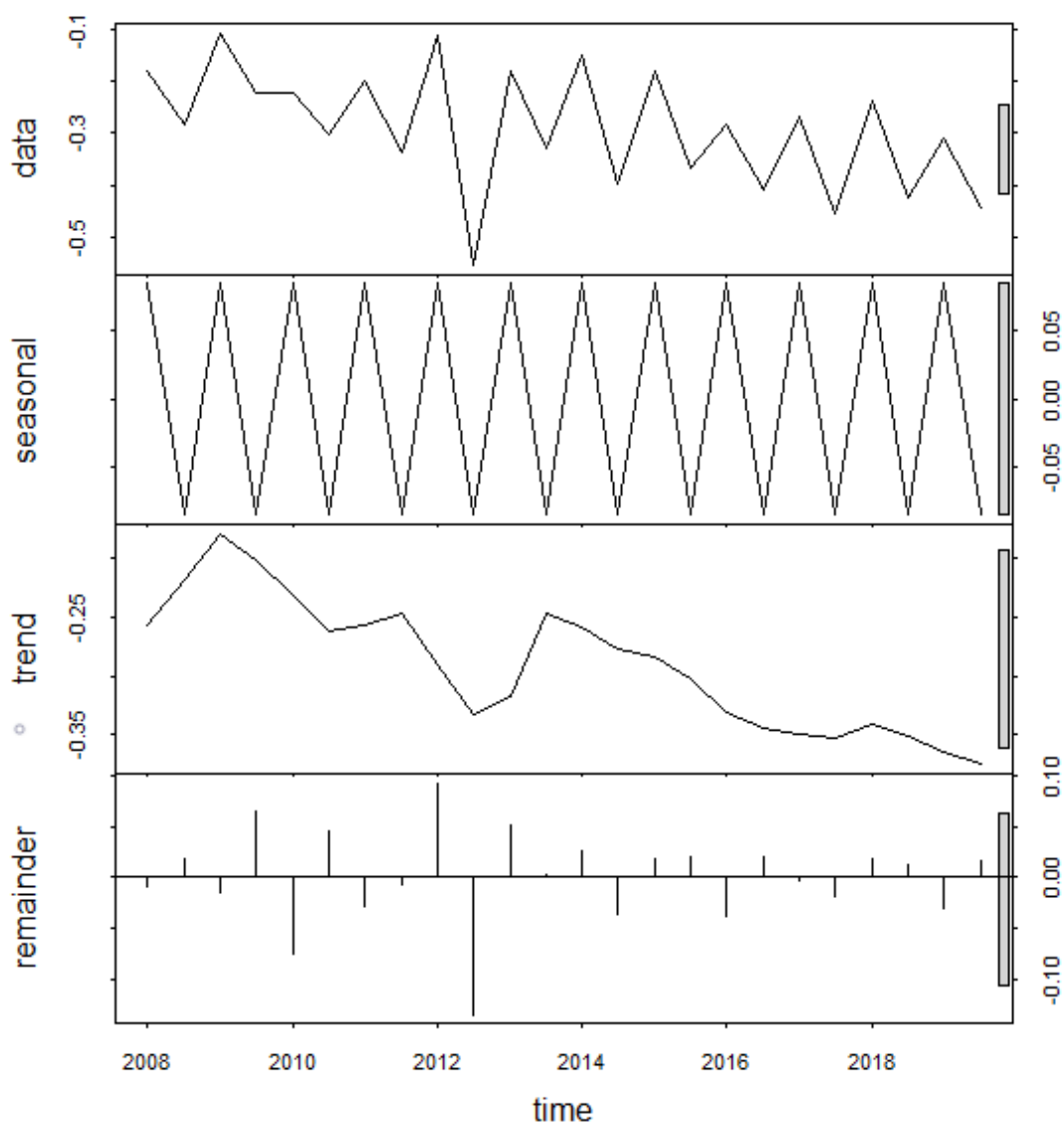


Τα εύρη διακύμανσης που προκύπτουν δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμα στη συγκεκριμένη περίπτωση καθώς είναι πολύ μεγάλα, ξεφεύγοντας μάλιστα μερικές φορές από τα όρια των δυνατών τιμών του GN (0-1).

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για το πολλαπλασιαστικό μοντέλο αλλά αντί για τα πραγματικά δεδομένα, χρησιμοποιούνται οι λογάριθμοι των μετρήσεων.

Τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

Οι συνιστώσες της αποσύνθεσης σε μορφή γραφημάτων (εικόνα 5-30):



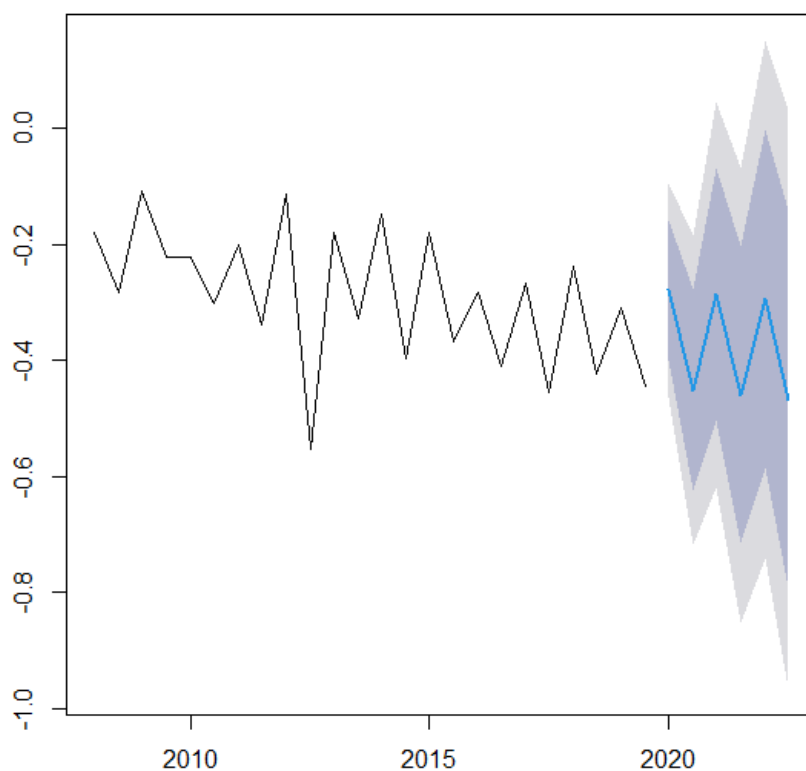
Εικόνα 5-30 Αποτελέσματα πολλαπλασιαστικού μοντέλου από την αποσύνθεση STL

Οι σημειακές προβλέψεις μαζί με τα εύρη διακύμανσης για πιθανότητες 80% και 95% φαίνονται στον πίνακα 5-7.

Πίνακας 5-7 Σημειακές προβλέψεις πολλαπλασιαστικού μοντέλου STL (λογάριθμοι) με εύρη διακύμανσης για πιθανότητες 80% και 95%

Year	Σημειακή πρόβλεψη	80%	95%
2020	-0.2782	-0.3985 - -0.1579	-0.4622 - --0.0943
2020.5	-0.4518	-0.6256 - -0.2781	-0.7176 - -0.1861
2021	-0.2864	-0.5036 - -0.0691	-0.6186 - 0.0458
2021.5	-0.4600	-0.7158 - -0.2042	-0.8512 - -0.0688
2022	-0.2945	-0.5860 - 0.0031	-0.7402 - 0.1512
2022.5	-0.4681	-0.7932 - -0.1430	-0.9654 - 0.0291

Η πρόβλεψη για τα επόμενα 3 έτη με τη μορφή διαγράμματος (εικόνα 5-31)



Εικόνα 5-31 Πρόβλεψη πολλαπλασιαστικού μοντέλου STL με μορφή διαγράμματος

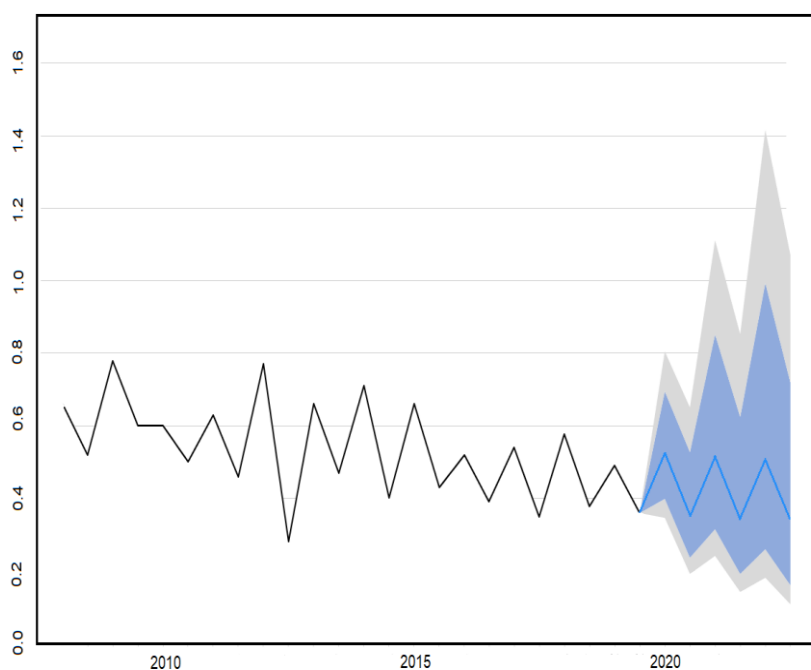
Επειδή τα δεδομένα που εισάγονται στον αλγόριθμο στο πολλαπλασιαστικό μοντέλο είναι λογαριθμημένα, τα αποτελέσματα της πρόβλεψης είναι επίσης λογαριθμημένα και απαιτούν μετατροπή.

## Η μετατροπή των λογαρίθμων σε GN φαίνεται στον πίνακα 5-8

Πίνακας 5-8 Μετατροπή αποτελεσμάτων σε GN από λογαρίθμους

Year	Σημειακή πρόβλεψη	80%	95%
2020	0.527	0.399 - 0.695	0.345 - 0.805
2020.5	0.353	0.237 - 0.527	0.192 - 0.652
2021	0.517	0.314 - 0.853	0.241 - 1.111
2021.5	0.347	0.192 - 0.625	0.141 - 0.854
2022	0.508	0.259 - 0.993	0.182 - 1.416
2022.5	0.340	0.161 - 0.719	0.108 - 1.069

Αυτό έχει και σαν αποτέλεσμα τα εύρη διακύμανσης της πρόβλεψης να είναι μεν συμμετρικά όταν είναι με τη μορφή λογαρίθμων, η συμμετρικότητα αυτή όμως χάνεται όταν γίνει η μετατροπή με αποτέλεσμα τα εύρη για τις χαμηλές προβλέψεις να είναι μικρότερα (εικόνα 5-32).



Εικόνα 5-32 Πρόβλεψη πολλαπλασιαστικού μοντέλου STL μετά την μετατροπή

### 5.4.3 Μοντέλα εκθετικής εξομάλυνσης

#### 5.4.3.1 Γενικά

Τα μοντέλα εκθετικής εξομάλυνσης παράγουν τα αποτελέσματα των προβλέψεων τους αφού εξομαλύνουν τα δεδομένα προκειμένου να απομονώσουν τα πραγματικά μοτίβα από τις τυχαίες διακυμάνσεις εντός της χρονοσειράς. Η βασική αρχή της

μεθόδου είναι ότι τα πιο πρόσφατα δεδομένα εμπεριέχουν σημαντικότερες πληροφορίες. Η βαρύτητα δηλαδή των δεδομένων φθίνει με το πέρασμα του χρόνου. Παρόλο που εμφανίστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 60 από τον Brown, η απλότητά τους σε συνδυασμό με την ικανοποιητική ακρίβεια των αποτελεσμάτων τους σε σχέση με άλλα πιο σύνθετα και πολύπλοκα μοντέλα, τα κάνει ιδιαίτερα δημοφιλή. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα τους είναι ότι αποσυνθέτουν την χρονοσειρά στις βασικές της συνιστώσες, καθεμία εκ των οποίων εξομαλύνεται και επαναπροσδιορίζεται μειώνοντας σημαντικά την επιρροή ακραίων τιμών (Σπηλιώτης 2017).

#### 5.4.3.2 Μοντέλο 3: Μέθοδος Holt-Winters

Η μέθοδος Holt Winters ή τριπλή εκθετική εξομάλυνση είναι μια εξέλιξη της απλής εκθετικής εξομάλυνσης και της εκθετικής εξομάλυνσης με προσαρμογή στην τάση (Μέθοδος Holt), με την ικανότητα πέρα από την τάση, να εντοπίζει και την εποχικότητα σε μια χρονοσειρά. Η μέθοδος αποτελείται από τρεις εξισώσεις:

Μια για το επίπεδο (level) της χρονοσειράς που συμβολίζεται με  $A_t$ , μια για την τάση που συμβολίζεται με  $T_t$  και μια για την εποχικότητα που συμβολίζεται με  $S_t$ . Σε κάθε μια από αυτές τις εξισώσεις αντιστοιχεί μια παράμετρος εξομάλυνσης  $\alpha$ ,  $\beta$  και  $\gamma$ . Οι εξισώσεις είναι διαφορετικές για το προσθετικό μοντέλο (σχέσεις 5.9-5.15) και το πολλαπλασιαστικό μοντέλο (5.16-5.22).

##### Προσθετικό μοντέλο

$$A_1 = y_1 \quad (5.9)$$

$$T_1 = 0 \quad (5.10)$$

$$A_t = \alpha(y_t - S_{t-L}) + (1 - \alpha)(A_{t-1} + T_{t-1}) \quad (5.11)$$

$$T_t = \beta(A_t - A_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1} \quad (5.12)$$

$$S_t = \gamma(y_t - A_t) + (1 - \gamma)S_{t-L} \quad (5.13)$$

Η πρόβλεψη της  $h$  μελλοντικής περιόδου προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$\hat{y}_{t+h} = (A_t + hT_t) + S_{t-L+h} \quad \text{για } h = 1, 2, \dots, L \quad (5.14)$$

$$= (A_t + hT_t) + S_{t-2L+h} \quad \text{για } h = L + 1, L + 2, \dots, 2L. \quad (5.15)$$

##### Πολλαπλασιαστικό μοντέλο

$$A_1 = y_1 \quad (5.16)$$

$$T_1 = 0 \quad (5.17)$$

$$A_t = \alpha \frac{y_t}{S_{t-L}} + (1 - \alpha)(A_{t-1} + T_{t-1}) \quad (5.18)$$

$$T_t = \beta(A_t - A_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1} \quad (5.19)$$

$$s_t = \gamma \frac{y_t}{A_t} + (1 - \gamma)S_{t-L} \quad (5.20)$$

Η πρόβλεψη της h μελλοντικής περιόδου προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$\hat{y}_{t+h} = (A_t + hT_t) * S_{t-L+h} \quad \text{για } h = 1, 2, \dots, L \quad (5.21)$$

$$= (A_t + hT_t) * S_{t-2L+h} \quad \text{για } h = L + 1, L + 2, \dots, 2L. \quad (5.22)$$

Όπου:

α: η σταθερά εξομάλυνσης της χρονοσειράς

β: η σταθερά εξομάλυνσης της τάσης

γ: η σταθερά εξομάλυνσης της εποχικότητας

με τα α,β,γ να λαμβάνουν τιμές μεταξύ του 0 και το 1

η παράμετρος h δείχνει πόσα χρονικά διαστήματα μετά την τελευταία παρατήρηση θα γίνει η πρόβλεψη (πχ για h = 4 στην προκειμένη περίπτωση θα γίνει πρόβλεψη για τα επόμενα 4 εξάμηνα ή 2 χρόνια)

L είναι η περιοδικότητα των δεδομένων. Για μηνιαία δεδομένα L = 12, για εξαμηνιαία L = 2 κ.ο.κ

Οι υπολογισμοί έγιναν όλοι με τη γλώσσα προγραμματισμού R στο προγραμματιστικό περιβάλλον του R Studio. Για τις παραμέτρους α,β και γ δεν επιλέχθηκαν τιμές, το πρόγραμμα επέλεξε μόνο του τις βέλτιστες τιμές και τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά.

Αποτελέσματα προσθετικού μοντέλου:

Οι σημειακές προβλέψεις μαζί με τα εύρη διακύμανσης για πιθανότητες 80% και 95% (πίνακας 5-9)

Πίνακας 5-9 Σημειακές προβλέψεις προσθετικού μοντέλου Holt-Winters με εύρη διακύμανσης για πιθανότητες 80% και 95%

Year	Σημειακή πρόβλεψη	80%	95%
2021	0.508	0.410 - 0.605	0.358 - 0.657
2021.5	0.322	0.224 - 0.420	0.173 - 0.472
2022	0.492	0.393 - 0.590	0.341 - 0.643
2022.5	0.306	0.208 - 0.405	0.155 - 0.457

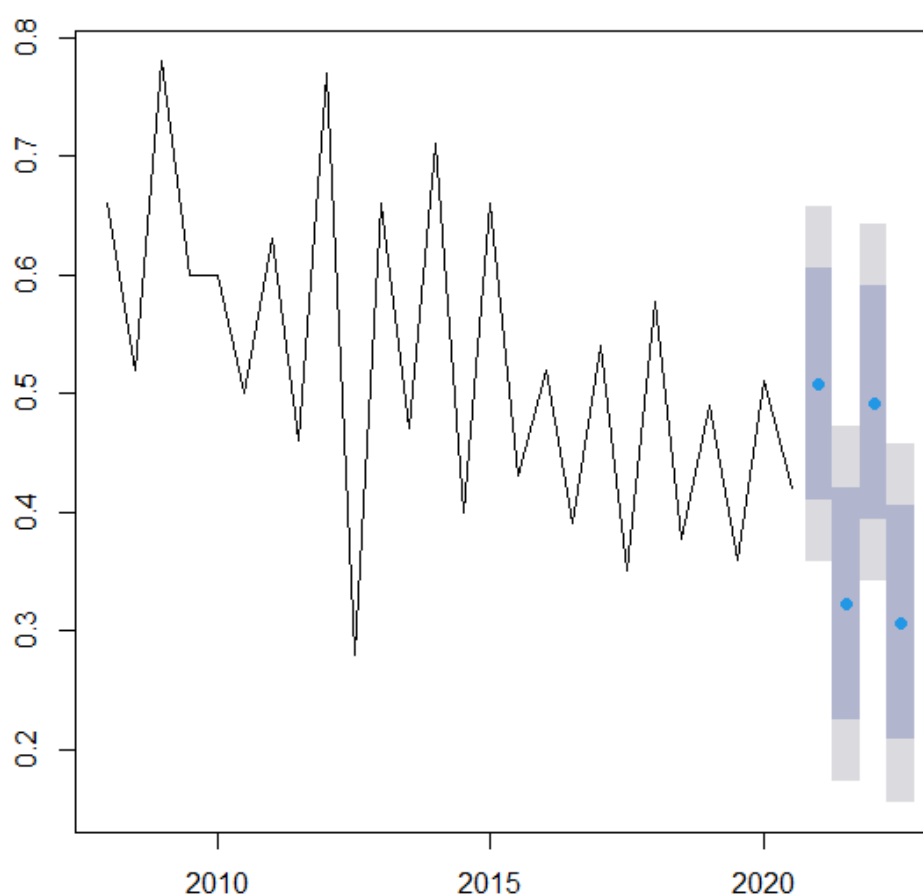
Οι τιμές των παραμέτρων εξομάλυνσης α,β,γ που επιλέχθηκαν ως βέλτιστες παρουσιάζονται στον πίνακα 5-10

Πίνακας 5-10 Παράμετροι εξομάλυνσης προσθετικού μοντέλου Holt-Winters

Παράμετροι εξομάλυνσης	
$\alpha$	0.0001
$\beta$	0.0001
$\gamma$	0.1294

Οι χαμηλές τιμές στις παραμέτρους εξομάλυνσης σημαίνουν ότι παρουσιάζουν αδράνεια και αντιστέκονται στις μεταβολές.

Η πρόβλεψη για τα επόμενα 2 έτη με τη μορφή διαγράμματος δίνεται στην εικόνα εικόνα 5-33



Εικόνα 5-33 Πρόβλεψη προσθετικού μοντέλου Holt-Winters με μορφή διαγράμματος

#### Αποτελέσματα πολλαπλασιαστικού μοντέλου

Οι σημειακές προβλέψεις μαζί με τα εύρη διακύμανσης για πιθανότητες 80% και 95% 80% και 95% (πίνακας 5-11):

Πίνακας 5-11 Σημειακές προβλέψεις πολλαπλασιαστικού μοντέλου Holt-Winters με εύρη διακύμανσης για πιθανότητες 80% και 95%

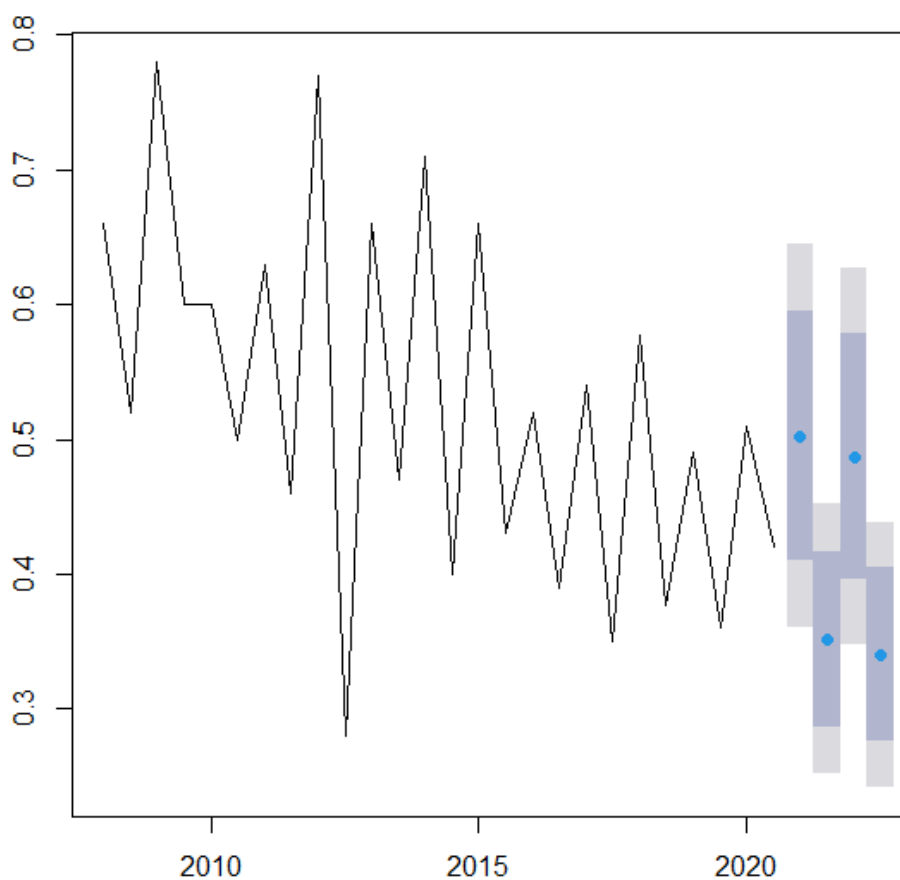
Year	Σημειακή πρόβλεψη	80%	95%
2021	0.503	0.410 - 0.596	0.360 - 0.645
2021.5	0.352	0.286 - 0.417	0.251 - 0.452
2022	0.487	0.396 - 0.578	0.347 - 0.627
2022.5	0.34	0.276 - 0.405	0.242 - 0.439

Οι τιμές των παραμέτρων εξομάλυνσης  $\alpha, \beta, \gamma$  που επιλέχθηκαν ως βέλτιστες παρουσιάζονται στον πίνακα 5-12):

Πίνακας 5-12 Παράμετροι εξομάλυνσης πολλαπλασιαστικού μοντέλου Holt-Winters

Παράμετροι εξομάλυνσης	
$\alpha$	0.1131
$\beta$	0.0001
$\gamma$	0.0001

Η πρόβλεψη για τα επόμενα 2 έτη με τη μορφή διαγράμματος δίνεται στην εικόνα 5-35



Εικόνα 5-34 Πρόβλεψη πολλαπλασιαστικού μοντέλου Holt-Winters με μορφή διαγράμματος

## 6. Επαλήθευση μοντέλων

### 6.1 Γενικά

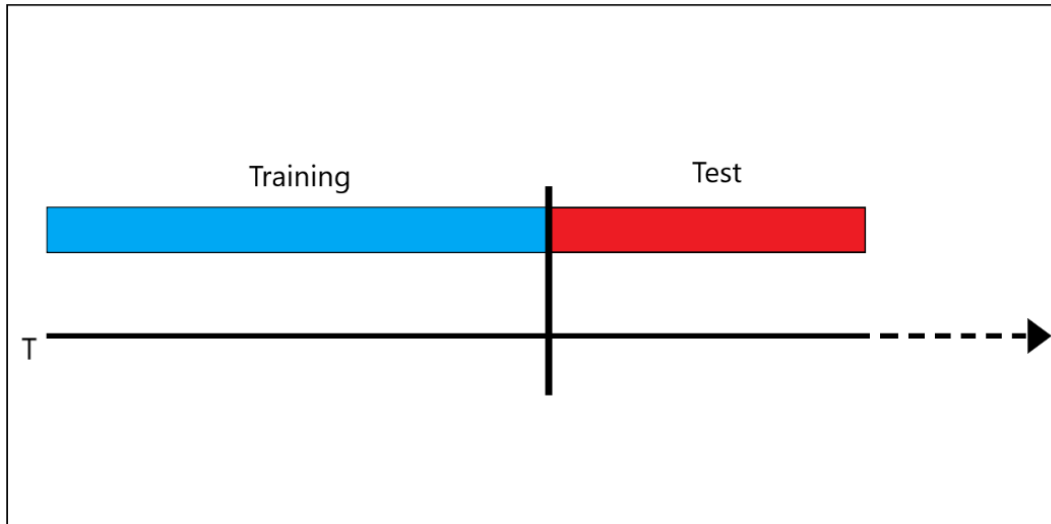
Η επαλήθευση των μοντέλων είναι κρίσιμο στάδιο της διαδικασίας επιλογής του τελικού μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί. Πολλές φορές το καλύτερο μοντέλο δεν είναι αυτό που ταιριάζει καλύτερα στα ιστορικά δεδομένα. Η επικέντρωση στην καλύτερη προσαρμογή του μοντέλου στα ιστορικά δεδομένα μπορεί να οδηγήσει σε υπερπροσαρμογή (overfitting) και εισαγωγή πολλών παραμέτρων κάνοντας το αχρείαστα πολύπλοκο με αποτέλεσμα το μοντέλο να είναι υπερβολικά εξειδικευμένο στα δεδομένα που του έχουμε εισάγει και να μη μπορεί να κάνει γενικεύσεις και να εφαρμοστεί σε φρέσκα δεδομένα.

Η επαλήθευση των μοντέλων πραγματοποιήθηκε με δύο μεθόδους, την μέθοδο Out of Sample (OOS) και τη μέθοδο Cross Validation (CVAL) και στη συνέχεια έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.

### 6.2 Μέθοδος Out of Sample

Η μέθοδος αυτή θεωρείται από τις πιο απλές μεθόδους επαλήθευσης μοντέλων και χρησιμοποιείται ευρέως για την αξιολόγηση της προβλεπτικής ικανότητας χρονικά εξαρτώμενων δεδομένων. Κατά την μέθοδο αυτή γίνεται διαχωρισμός των δεδομένων σε δύο τμήματα. Το πρώτο χρονολογικά σετ δεδομένων ονομάζεται Training Set και χρησιμοποιείται για την δημιουργία του μοντέλου και την “εκπαίδευσή” του. Στη συνέχεια γίνονται προβλέψεις με τη χρήση του μοντέλου, οι οποίες συγκρίνονται με το δεύτερο χρονολογικά σετ δεδομένων, το λεγόμενο Test Set (εικόνα 6-1). Είναι προτιμότερο τα δεδομένα του Training Set να είναι περισσότερα από αυτά του Test Set. Η αναλογία του διαχωρισμού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των διαθέσιμων παρατηρήσεων. Ιδανικά θα ήταν επιθυμητό το Test Set να είναι τουλάχιστον το 20% των δεδομένων αλλά αυτό μπορεί να αποδειχτεί δύσκολο με ένα μικρό δείγμα (πχ μόνο 20 παρατηρήσεις). Για πολύ μεγάλο αριθμό παρατηρήσεων το Test Set μπορεί να φτάσει μέχρι και 50%. Μια συνήθης αναλογία για τον διαχωρισμό των δεδομένων είναι 70% για το Training Set και 30% για το Test Set.





Εικόνα 6-1 Διαχωρισμός δεδομένων σε Training set και Test set

Ένα μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι “τρέχει” μόνο μια φορά, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους όπως την Cross Validation, με αποτέλεσμα να είναι πιο επιρρεπής στο να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα.

Για τις 76 θέσεις για τις οποίες υπήρχαν μετρήσεις, καθώς και τις δύο χρονοσειρές που δημιουργήθηκαν από τους μέσους όρους των ζωνών, έγιναν προβλέψεις με τη χρήση των τριών μοντέλων που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, για προσθετικό και πολλαπλασιαστικό μοντέλο. Το Training Set αποτελείται από τις μετρήσεις των πρώτων 9 ετών, δηλαδή 18 από τις 26 μετρήσεις (69 %) και το Test Set από τις υπόλοιπες. Στη συνέχεια οι πραγματικές τιμές της κάθε θέσης συγκρίθηκαν με τις τιμές των προβλέψεων της θέσης, καθώς και με την πρόβλεψη της ζώνης στην οποία ανήκουν. Οπότε για κάθε μοντέλο συγκρίνεται η πραγματική τιμή με 4 προβλέψεις (με την πρόβλεψη της ζώνης να είναι προφανώς ίδια για τις θέσεις της κάθε ζώνης) δηλαδή σύνολο 12 συγκρίσεις.

Στον πίνακα 6-1 παρουσιάζονται οι προβλέψεις που προέκυψαν για την Θέση 50 και η σύγκριση τους με τις πραγματικές μετρήσεις.

Πίνακας 6-1 Προβλέψεις Θ50 από μέθοδο *Out of Sample* για κάθε μοντέλο

	50	Actual	Decomposition				STL Random Walk with Drift				Holt-Winters			
			Add	Multi	Add Zone	Multi Zone	Add	Multi	Add Zone	Multi Zone	Add	Multi	Add Zone	Multi Zone
Train	2008	0.66												
	2008.5	0.52												
	2009	0.78												
	2009.5	0.6												
	2010	0.6												
	2010.5	0.5												
	2011	0.63												
	2011.5	0.46												
	2012	0.77												
	2012.5	0.28												
	2013	0.66												
	2013.5	0.47												
	2014	0.71												
	2014.5	0.4												
2015	0.66													
2015.5	0.43													
2016	0.52													
2016.5	0.39													
Test	2017	0.54	0.5881	0.5738	0.5649	0.5485	0.5975	0.5744	0.5752	0.5485	0.5800	0.5734	0.5689	0.5518
	2017.5	0.35	0.3622	0.3783	0.3430	0.3613	0.3831	0.3840	0.3654	0.3672	0.3607	0.3850	0.3510	0.3724
	2018	0.57	0.5707	0.5529	0.5452	0.5250	0.5906	0.5656	0.5655	0.5371	0.5620	0.5554	0.5516	0.5310
	2018.5	0.37	0.3448	0.3643	0.3233	0.3455	0.3761	0.3781	0.3557	0.3596	0.3427	0.3727	0.3336	0.3581
	2019	0.49	0.5533	0.5321	0.5255	0.5014	0.5836	0.5570	0.5559	0.5260	0.5441	0.5374	0.5342	0.5102
	2019.5	0.36	0.3274	0.3503	0.3036	0.3296	0.3692	0.3724	0.3461	0.3522	0.3247	0.3604	0.3163	0.3439
	2020	0.51	0.5359	0.5113	0.5058	0.4779	0.5767	0.5484	0.5462	0.5151	0.5261	0.5193	0.5169	0.4895
	2020.5	0.42	0.3100	0.3363	0.2839	0.3138	0.3622	0.3667	0.3364	0.3449	0.3067	0.3481	0.2989	0.3296

Στις εικόνες 6-2 με 6-7 φαίνονται οι συγκρίσεις των προβλέψεων των παραλλαγών του κάθε μοντέλου με τις πραγματικές μετρήσεις με τη μορφή γραφημάτων.

Τα μοντέλα για λόγους συντομίας αναγράφονται από εδώ και στο εξής με τις εξής ονομασίες:

DEC = απλή αποσύνθεση

STL RWD = αποσύνθεση STL με τυχαίο περίπατο με περιπλάνηση

HW = Holt-Winters

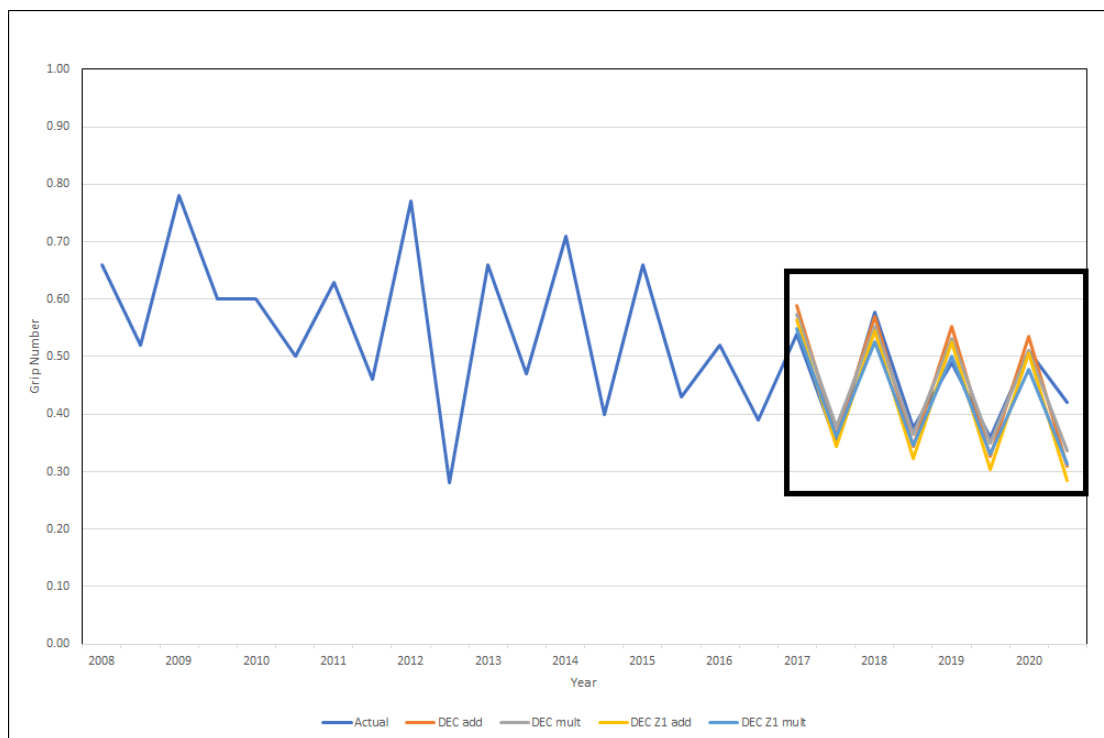
Οι παραλλαγές των μοντέλων λόγους συντομίας αναγράφονται από εδώ και στο εξής με τις εξής ονομασίες:

add = προσθετικό μοντέλο

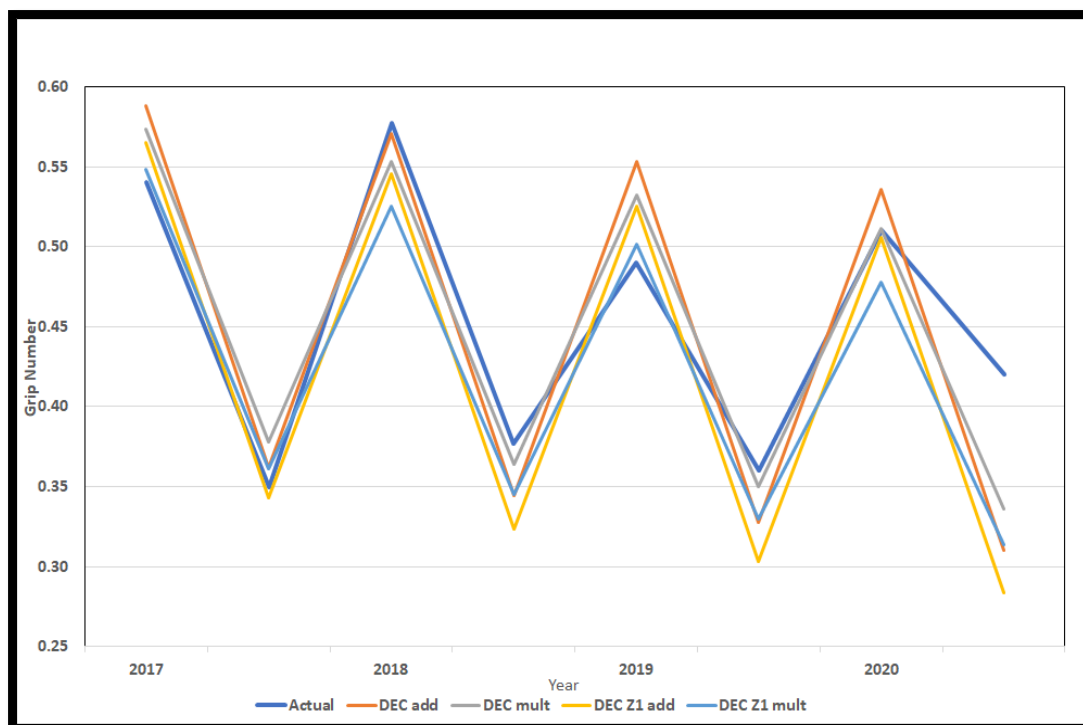
mult = πολλαπλασιαστικό μοντέλο

Zi add = προσθετικό μοντέλο για τη ζώνη i

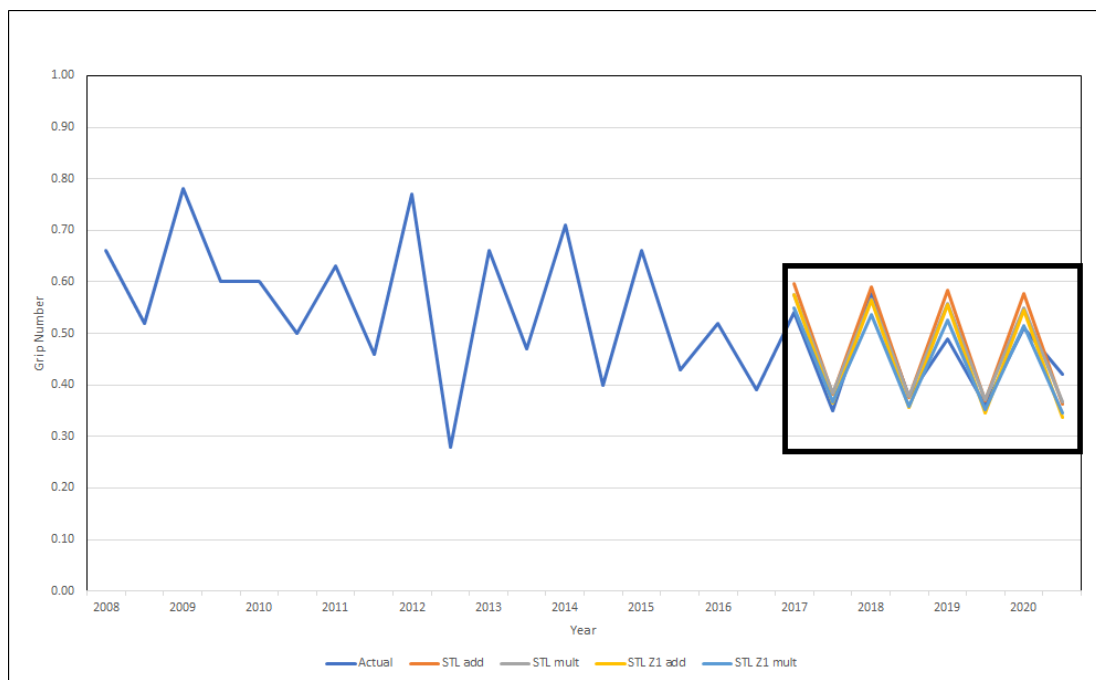
Zi mult = πολλαπλασιαστικό μοντέλο για τη ζώνη i



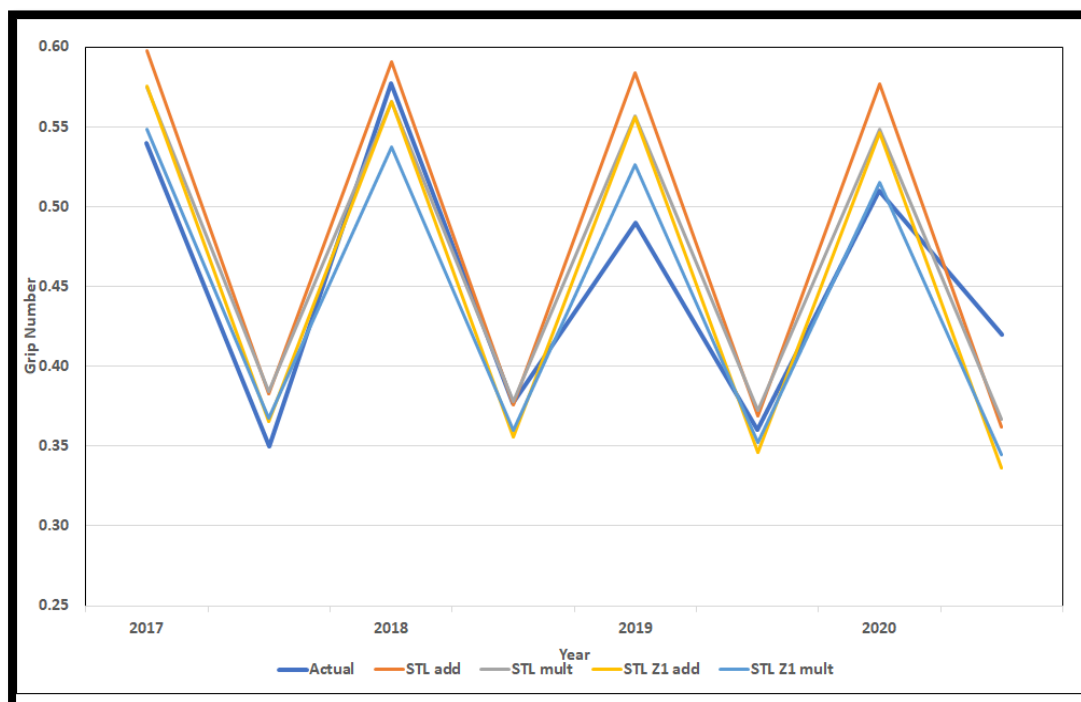
Εικόνα 6-2 Σύγκριση παραλλαγών κλασικής αποσύνθεσης με πραγματικές τιμές



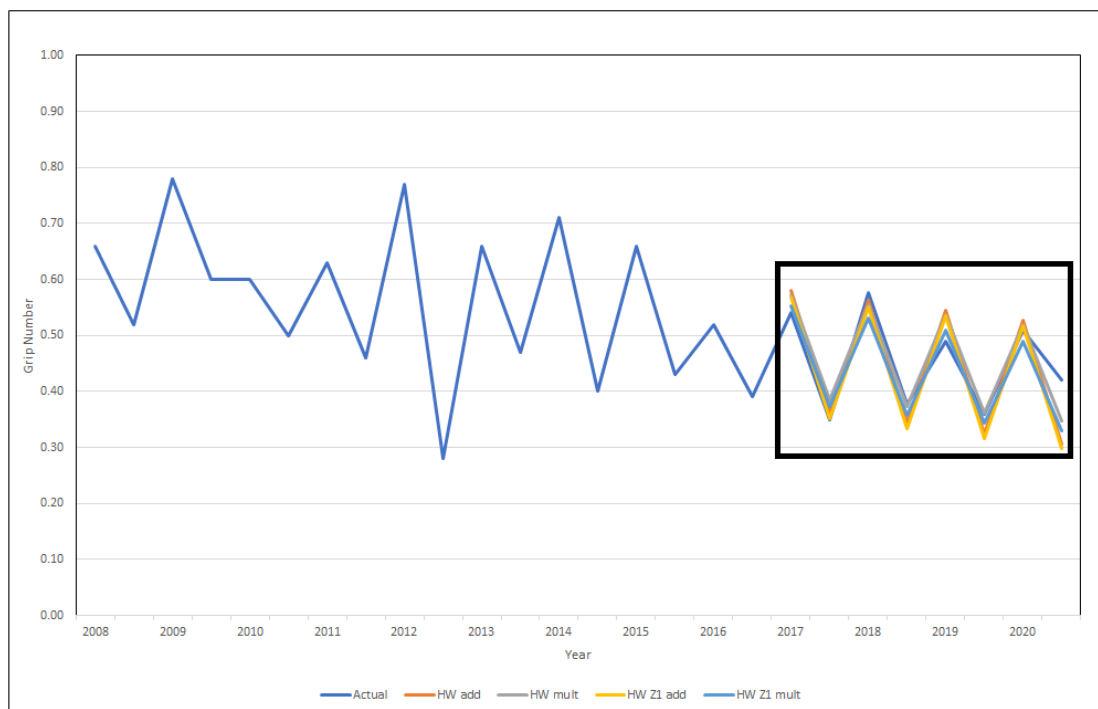
Εικόνα 6-3 Λεπτομέρεια εικόνας 6-2



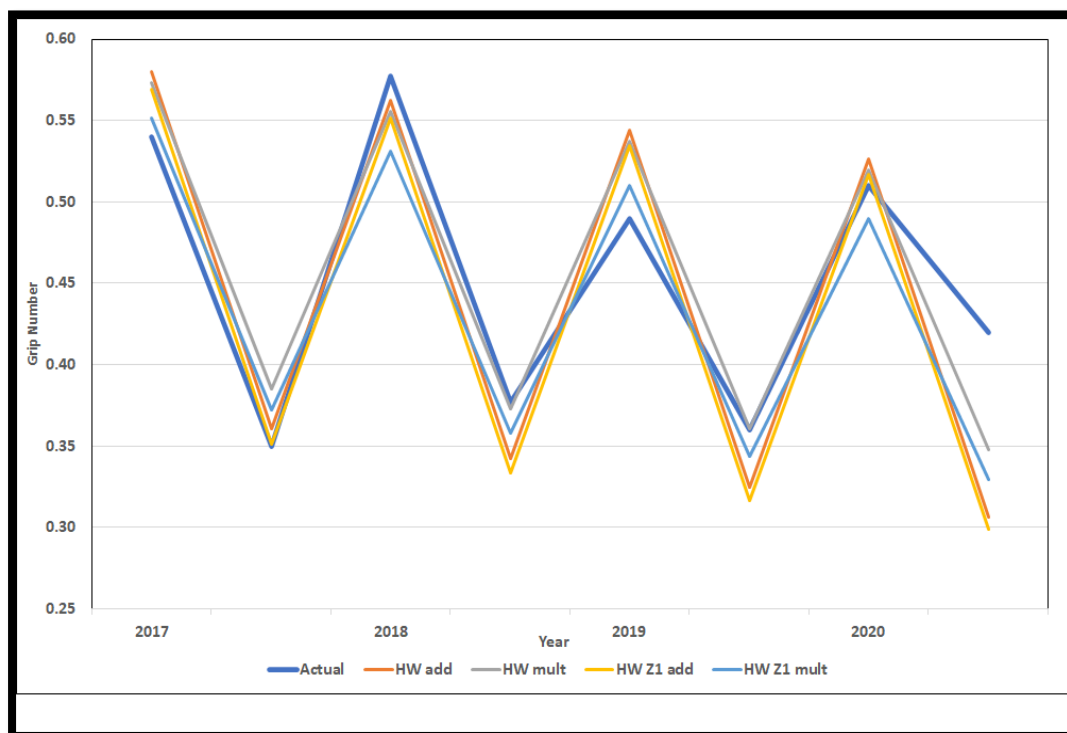
Εικόνα 6-4 Σύγκριση παραλλαγών STL RWD με πραγματικές τιμές



Εικόνα 6-5 Λεπτομέρεια εικόνας 6-4



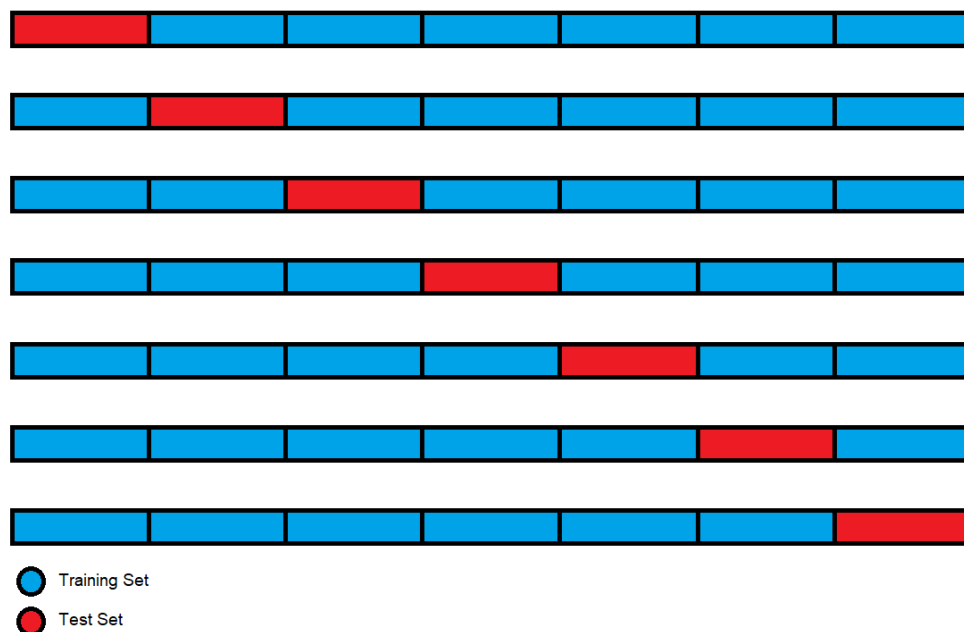
Εικόνα 6-6 51 Σύγκριση παραλλαγών Holt-Winters με πραγματικές τιμές



Εικόνα 6-7 Λεπτομέρεια εικόνας 6-6

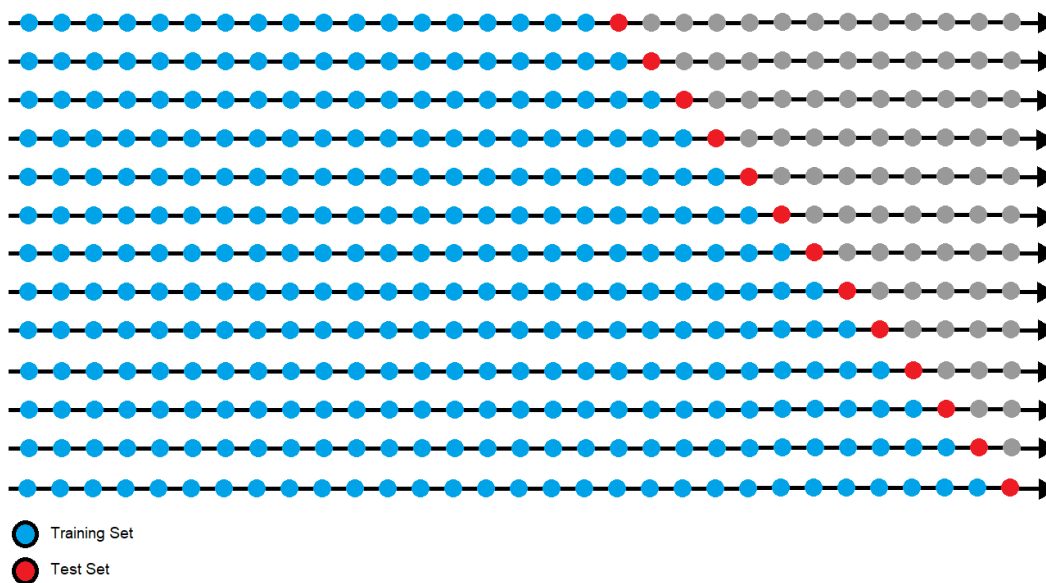
### 6.3 Μέθοδος Cross Validation

Κατά τη μέθοδο αυτή τα δεδομένα χωρίζονται σε  $K$  τμήματα. Στη συνέχεια μπορούν να κατασκευαστούν  $K$  διαφορετικά μοντέλα όπου κάθε φορά αφήνεται ένα τμήμα εκτός για το Test Set και τα υπόλοιπα χρησιμοποιούνται στο Training Set όπως φαίνεται στο στην εικόνα 6-8.



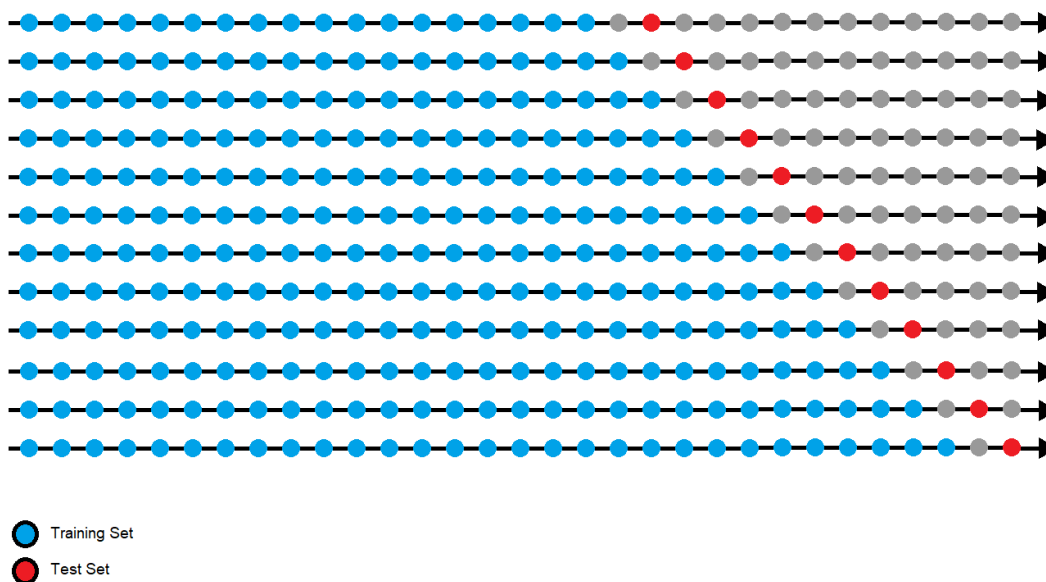
Εικόνα 6-8 K-fold Cross Validation

Η μέθοδος αυτή προφανώς δε μπορεί να εφαρμοστεί στις χρονοσειρές όπου τα δεδομένα είναι χρονικά εξαρτημένα καθώς δεν έχει νόημα να χρησιμοποιούνται δεδομένα από το μέλλον για να προβλέψουν τιμές στο παρελθόν. Για το λόγο αυτό γίνεται χρήση μιας παραλλαγής της μεθόδου αυτής όπου οι προβλέψεις ξεκινούν από ένα αρχικό ποσοστό των παρατηρήσεων και γίνονται βήμα-βήμα χρησιμοποιώντας κάθε φορά όλα τα προηγούμενα (πραγματικά) δεδομένα όπως φαίνεται στην εικόνα 6-9.



Εικόνα 6-9 Παραλλαγή Cross Validation για χρονοσειρές

Η μέθοδος μπορεί να πάρει και άλλες μορφές ανάλογα με τις απαιτήσεις του προβλήματος και τον χρονικό ορίζοντα των προβλέψεων. Στο παράδειγμα της εικόνας 6-10 φαίνεται η περίπτωση πρόβλεψης της μεθεπόμενης περιόδου.



Εικόνα 6-10 Μορφή για πρόβλεψη δύο περιόδους μπροστά

Στην περίπτωση που εξετάζεται, η κάθε πρόβλεψη έγινε για την αμέσως επόμενη περίοδο. Για την πρώτη περίοδο χρησιμοποιήθηκαν σαν Training Set τα πρώτα 7 χρόνια, δηλαδή οι πρώτες 14 μετρήσεις. Έγιναν δηλαδή 12 προβλέψεις της μιας

περιόδου με την κάθε πρόβλεψη να έχει σαν Training Set όλες τις προηγούμενες μετρήσεις. Σε αντίθεση με την μέθοδο OOS που βγάζει μια πρόβλεψη για όλες τις υπόλοιπες περιόδους με αποτέλεσμα να διαφέρουν τα αποτελέσματα ανάλογα με το σημείο εκκίνησης των προβλέψεων λόγω διαφορετικού Training Set, στην CVAL δεν υπάρχει αυτό το πρόβλημα.

#### 6.4 Μέτρα εκτίμησης ακρίβειας

Για την σύγκριση των μοντέλων μεταξύ τους πρέπει να μπορεί να αξιολογηθεί η ικανότητά τους να προβλέψουν μελλοντικές τιμές. Για την αξιολόγηση χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω μέτρα εκτίμησης ακρίβειας.

##### Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (Mean Absolute Error, MAE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |A_t - F_t| \quad (6.1)$$

Το MAE αποτελεί ένα μέτρο ακρίβειας της πρόβλεψης έναντι των πραγματικών τιμών διατηρώντας τις ίδιες μονάδες μέτρησης. Εκφράζει την μέση αστοχία της πρόβλεψης αγνοώντας το πρόσημο του σφάλματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να σφάλματα να είναι αθροιστικά και να μην αναιρούνται σφάλματα στην αντίθετη κατεύθυνση. Μικρότερες τιμές αυτού του δείκτη σημαίνουν καλύτερη ακρίβεια. Επειδή εκφράζεται στις μονάδες της αρχικής χρονοσειράς, δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συγκρίσεις μεταξύ χρονοσειρών σε άλλες μονάδες μέτρησης (Σπηλιώτης 2017).

##### Μέσο Απόλυτο Ποσοστιαίο Σφάλμα (Mean Absolute Percentage Error, MAPE)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \quad (6.2)$$

Το MAPE είναι εκφρασμένο επί τοις εκατό και επομένως είναι καθαρός θετικός αριθμός και δεν έχει κάποια μονάδα μέτρησης. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν πρέπει να συγκριθεί η ακρίβεια μιας μεθόδου πρόβλεψης που έχει εφαρμοστεί σε παραπάνω από μια χρονοσειρές οι οποίες αφορούν διαφορετικά μεγέθη και επομένως διαφορετική μονάδα μέτρησης ή όταν οι πραγματικές τιμές είναι πολύ μεγάλης κλίμακας (Σπηλιώτης 2017). Ένα άλλο χαρακτηριστικό του δείκτη αυτού είναι ότι λόγω του τρόπου υπολογισμού του, ένα σφάλμα σε μια μικρότερη τιμή έχει πολύ μεγαλύτερη βαρύτητα από ένα ίδιο σε μέγεθος σφάλμα σε μικρότερη τιμή.



Αυτό αποδεικνύεται χρήσιμο στην περίπτωση που εξετάζεται αφού οι χαμηλές τιμές της ολισθηρότητας είναι επικίνδυνες και επομένως τα σφάλματα κοντά σε αυτές τις τιμές είναι μεγαλύτερης σημασίας.

#### Ρίζα Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (Root Mean Square Error, RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad (6.3)$$

Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (Mean Square Error) είναι παρόμοιο με το MAE δίνει όμως πολύ μεγαλύτερο βάρος στα μεγάλα σφάλματα. Αυτό οφείλεται στον τετραγωνισμό των σφαλμάτων που έχουν σαν αποτέλεσμα τα μικρά σφάλματα να έχουν μικρότερη βαρύτητα και να μεγάλα σφάλματα να επηρεάζουν πολύ τον δείκτη. Το RMSE είναι η ρίζα του παραπάνω δείκτη και έχει τις ίδιες ιδιότητες, αλλά είναι εκφρασμένο στην μονάδα μέτρησης της χρονοσειράς κάνοντάς το πιο εύκολα κατανοητό (Σπηλιωτής 2017).

Για όλους τους παραπάνω δείκτες ισχύουν τα εξής:

$n$  : ο αριθμός των περιόδων στο μέλλον για τις οποίες έχει γίνει πρόβλεψη

$A_t$  : η πραγματική τιμή της μέτρησης

$F_t$  : η τιμή της πρόβλεψης

Στον πίνακα 6-2 φαίνονται τα μέτρα εκτίμησης της ακρίβειας για τη Θέση 50 για την μέθοδο OOS. Ομοίως κατασκευάστηκαν πίνακες για τις υπόλοιπες 76 θέσεις των Ζωνών 1 και 2.

Πίνακας 6-2 Μέτρα εκτίμησης ακρίβειας ΟΟΣ Θ50

	50	Actual	Decomposition				STL Random Walk with Drift				Holt-Winters			
			Add	Multi	Add Zone	Multi Zone	Add	Multi	Add Zone	Multi Zone	Add	Multi	Add Zone	Multi Zone
Train	2008	0.66												
	2008.5	0.52												
	2009	0.78												
	2009.5	0.6												
	2010	0.6												
	2010.5	0.5												
	2011	0.63												
	2011.5	0.46												
	2012	0.77												
	2012.5	0.28												
	2013	0.66												
	2013.5	0.47												
	2014	0.71												
	2014.5	0.4												
2015	0.66													
2015.5	0.43													
2016	0.52													
2016.5	0.39													
Test	2017	0.54	0.5881	0.5738	0.5649	0.5485	0.5975	0.5744	0.5752	0.5485	0.5800	0.5734	0.5689	0.5518
	2017.5	0.35	0.3622	0.3783	0.3430	0.3613	0.3831	0.3840	0.3654	0.3672	0.3607	0.3850	0.3510	0.3724
	2018	0.57	0.5707	0.5529	0.5452	0.5250	0.5906	0.5656	0.5655	0.5371	0.5620	0.5554	0.5516	0.5310
	2018.5	0.37	0.3448	0.3643	0.3233	0.3455	0.3761	0.3781	0.3557	0.3596	0.3427	0.3727	0.3336	0.3581
	2019	0.49	0.5533	0.5321	0.5255	0.5014	0.5836	0.5570	0.5559	0.5260	0.5441	0.5374	0.5342	0.5102
	2019.5	0.36	0.3274	0.3503	0.3036	0.3296	0.3692	0.3724	0.3461	0.3522	0.3247	0.3604	0.3163	0.3439
	2020	0.51	0.5359	0.5113	0.5058	0.4779	0.5767	0.5484	0.5462	0.5151	0.5261	0.5193	0.5169	0.4895
	2020.5	0.42	0.3100	0.3363	0.2839	0.3138	0.3622	0.3667	0.3364	0.3449	0.3067	0.3481	0.2989	0.3296

8	MAE	0.0413	0.0294	0.0437	0.0354	0.0415	0.0315	0.0354	0.0259	0.0398	0.0279	0.0393	0.0308
	MAPE	9.408%	6.667%	10.311%	8.069%	8.898%	6.963%	7.857%	5.800%	9.142%	6.224%	9.109%	6.966%
	RMSE	0.0517	0.0380	0.0587	0.0465	0.0515	0.0378	0.0431	0.0341	0.0505	0.0359	0.0524	0.0393

7	MAE	0.0315	0.0217	0.0305	0.0253	0.0392	0.0284	0.0285	0.0188	0.0293	0.0216	0.0276	0.0223
	MAPE	7.011%	4.773%	7.155%	5.609%	8.204%	6.144%	6.136%	4.075%	6.593%	4.668%	6.293%	4.886%
	RMSE	0.0341	0.0238	0.0336	0.0273	0.0473	0.0328	0.0314	0.0213	0.0307	0.0254	0.0302	0.0229

Γνωρίζοντας εξαρχής ότι η πρόβλεψη της ξηρής περιόδου του 2020, της τελευταίας δηλαδή περιόδου, θα είναι κάκη εξαιτίας των λόγων που αναφέρθηκαν προηγουμένως στο κεφάλαιο 5.4.2.3 έγιναν και υπολογισμοί των μέτρων χωρίς εκείνη την μέτρηση για να υπάρχει μια καλύτερη εικόνα της σύγκρισης των μοντέλων μεταξύ τους καθώς η επιρρόή του σφάλματος αυτού είναι πολύ μεγάλη. Τα μέτρα με δείκτη 8 περιλαμβάνουν και τις 8 μελλοντικές περιόδους ενώ αυτά με δείκτη 7 εξαιρούν την ξηρή του 2020.

Στον πίνακα 6-3 φαίνονται τα μέτρα εκτίμησης της ακρίβειας για τη Θέση 50 για την μέθοδο CVAL. Ομοίως κατασκευάστηκαν πίνακες για τις υπόλοιπες 76 θέσεις των Ζωνών 1 και 2.

Πίνακας 6-3 Μέτρα εκτίμησης ακρίβειας CVAL 050

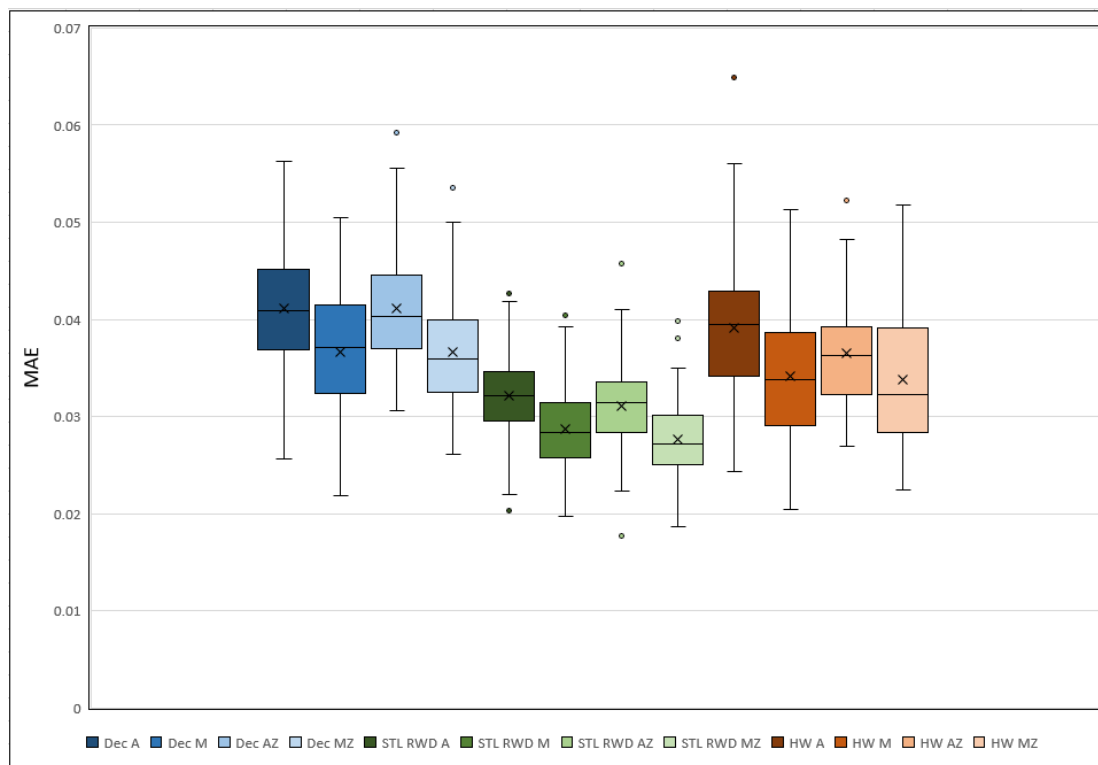
50	Actual	Decomposition				STL Random Walk with Drift				Holt Winters				
		Dec A	Dec M	Dec AZ	Dec MZ	STL RWD A	STL RWD M	STL RWD AZ	STL RWD MZ	HW A	HW M	HW AZ	HW MZ	
2008	0.660													
2008.5	0.520													
2009	0.780													
2009.5	0.600													
2010	0.600													
2010.5	0.500													
2011	0.630													
2011.5	0.460													
2012	0.770													
2012.5	0.280													
2013	0.660													
2013.5	0.470													
2014	0.710													
2014.5	0.400													
Step 1	2015	0.660	0.578	0.559	0.604	0.592	0.623	0.602	0.616	0.598	0.646	0.655	0.617	0.606
Step 2	2015.5	0.430	0.356	0.375	0.380	0.392	0.431	0.432	0.421	0.422	0.420	0.423	0.387	0.421
Step 3	2016	0.520	0.586	0.568	0.604	0.592	0.656	0.654	0.643	0.640	0.641	0.625	0.613	0.608
Step 4	2016.5	0.390	0.346	0.367	0.370	0.384	0.293	0.342	0.260	0.317	0.385	0.409	0.362	0.391
Step 5	2017	0.540	0.543	0.520	0.565	0.549	0.598	0.574	0.575	0.548	0.580	0.573	0.569	0.552
Step 6	2017.5	0.350	0.312	0.337	0.340	0.358	0.322	0.359	0.351	0.376	0.365	0.389	0.345	0.386
Step 7	2018	0.570	0.514	0.488	0.540	0.520	0.554	0.514	0.542	0.501	0.553	0.539	0.531	0.520
Step 8	2018.5	0.370	0.296	0.323	0.322	0.342	0.362	0.382	0.351	0.372	0.352	0.375	0.322	0.359
Step 9	2019	0.490	0.503	0.476	0.526	0.506	0.583	0.560	0.568	0.543	0.554	0.535	0.536	0.516
Step 10	2019.5	0.360	0.287	0.314	0.311	0.332	0.277	0.325	0.270	0.318	0.328	0.348	0.315	0.337
Step 11	2020	0.510	0.482	0.453	0.506	0.484	0.556	0.527	0.545	0.515	0.522	0.507	0.512	0.496
Step 12	2020.5	0.420	0.273	0.302	0.296	0.319	0.304	0.341	0.310	0.342	0.310	0.344	0.301	0.337
12	MAE	0.0594	0.0532	0.0459	0.0386	0.0611	0.0463	0.0598	0.0463	0.0394	0.0320	0.0463	0.0350	
	MAPE	0.1341	0.1128	0.1010	0.0814	0.1353	0.0957	0.1332	0.0986	0.0851	0.0691	0.1016	0.0738	
	RMSE	0.0697	0.0627	0.0558	0.0481	0.0738	0.0588	0.0735	0.0583	0.0543	0.0441	0.0560	0.0447	
11	MAE	0.0514	0.0473	0.0388	0.0329	0.0561	0.0433	0.0552	0.0434	0.0329	0.0280	0.0396	0.0306	
	MAPE	0.1145	0.0975	0.0834	0.0669	0.1224	0.0873	0.1214	0.0907	0.0690	0.0589	0.0849	0.0626	
	RMSE	0.0578	0.0549	0.0447	0.0400	0.0686	0.0566	0.0691	0.0562	0.0459	0.0400	0.0461	0.0394	
8	MAE	0.0559	0.0513	0.0426	0.0349	0.0577	0.0391	0.0514	0.0367	0.0404	0.0310	0.0435	0.0335	
	MAPE	0.1344	0.1149	0.0999	0.0789	0.1317	0.0843	0.1175	0.0819	0.0915	0.0694	0.1001	0.0765	
	RMSE	0.0707	0.0622	0.0551	0.0454	0.0671	0.0474	0.0619	0.0464	0.0506	0.0387	0.0552	0.0407	
7	MAE	0.0634	0.0558	0.0451	0.0386	0.0578	0.0398	0.0537	0.0407	0.0404	0.0306	0.0455	0.0366	
	MAPE	0.1527	0.1261	0.1075	0.0879	0.1353	0.0873	0.1249	0.0914	0.0940	0.0704	0.1068	0.0843	
	RMSE	0.0755	0.0660	0.0581	0.0484	0.0684	0.0490	0.0649	0.0495	0.0519	0.0394	0.0580	0.0433	

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στη μέθοδο CVAL ξεκίνησαν οι προβλέψεις απο πιο νωρίς. Η σύγκριση όμως μεταξύ των μεθόδων πρέπει να γίνει για τις ίδιες χρονικές περιόδους. Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα καθώς λόγω του τρόπου υπολογισμού των προβλέψεων μπορούν να παραληφθούν οι πρώτες 4 προβλέψεις και να συγκριθούν μόνο αυτές που συμπίπτουν χρονικά με τις προβλέψεις της OOS. Τα μέτρα με δείκτη 12 περιλαμβάνουν όλες τις μετρήσεις ενώ με τον δείκτη 8 τις περιόδους που συμπίπτουν με αυτές την μέθοδο OOS. Τα μέτρα με δείκτες 11 και 7 αντιστοιχούν σε αυτά με δείκτη 12 και 8 όταν αγνοηθεί η ξηρή περίοδος του 2020

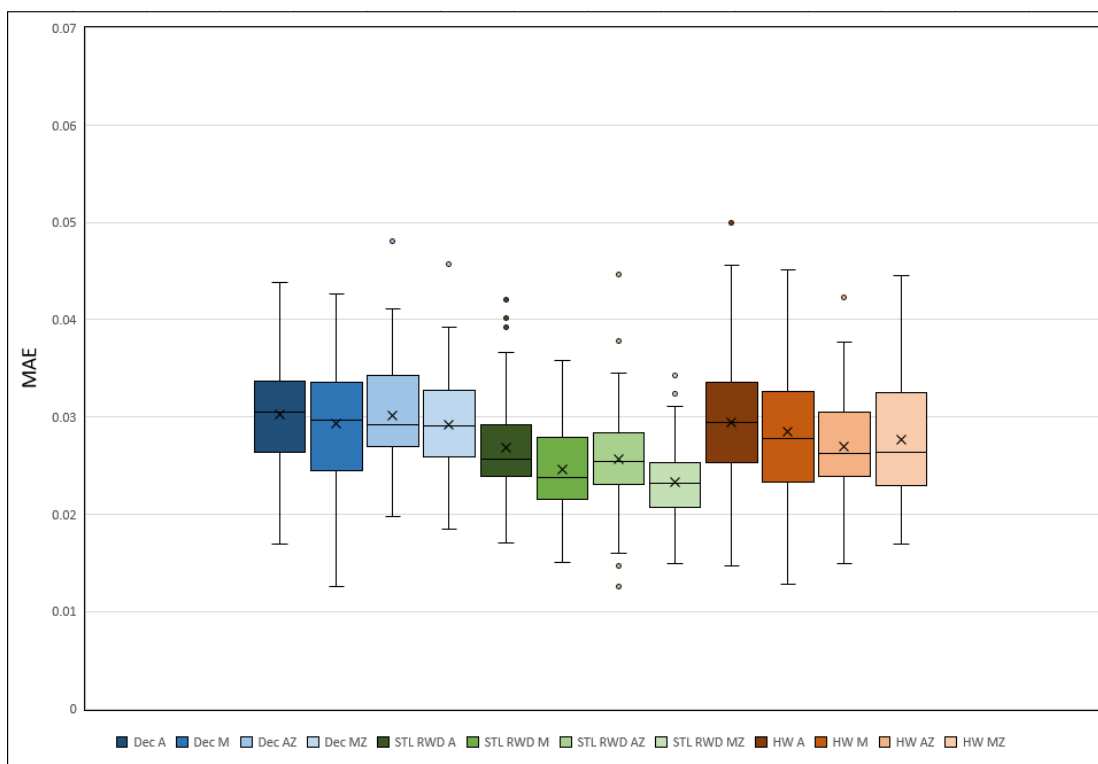
## 6.5 Αποτελέσματα

### 6.5.1 Αποτελέσματα OOS

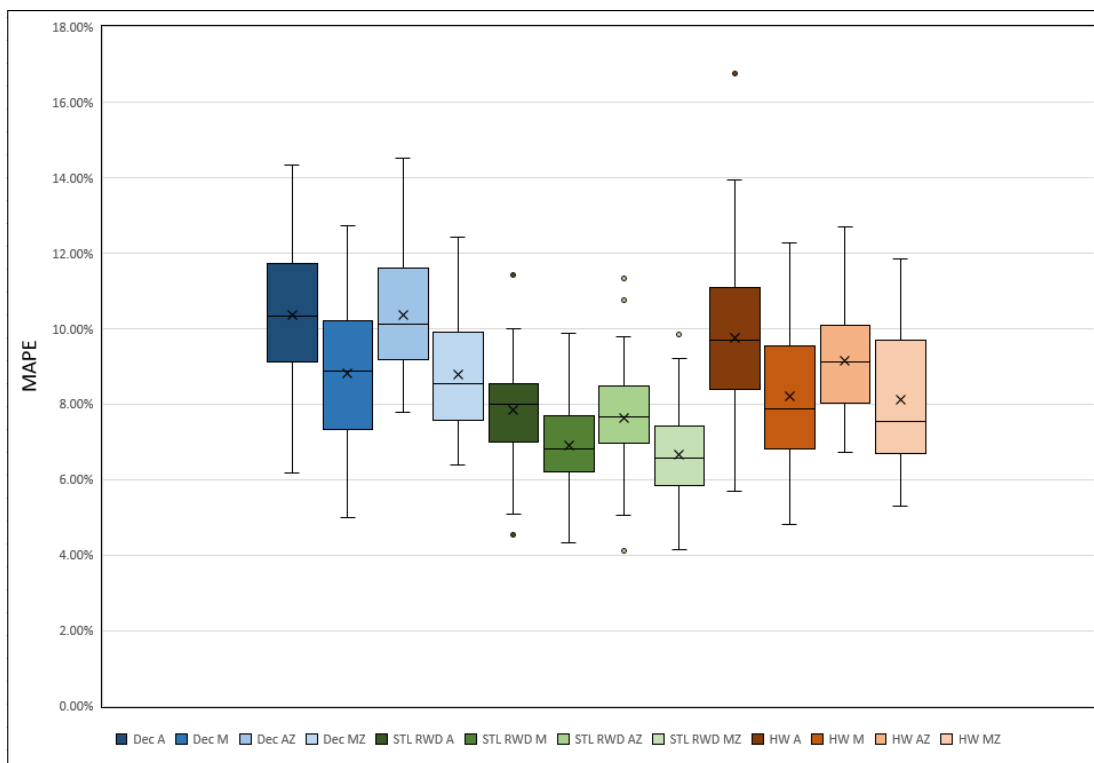
Στα παρακάτω θηκογράμματα (εικόνες 6-11 με 6-16) φαίνονται οι κατανομές των μέτρων εκτίμησης ακρίβειας για την κάθε μέθοδο και τις παραλλαγές της.



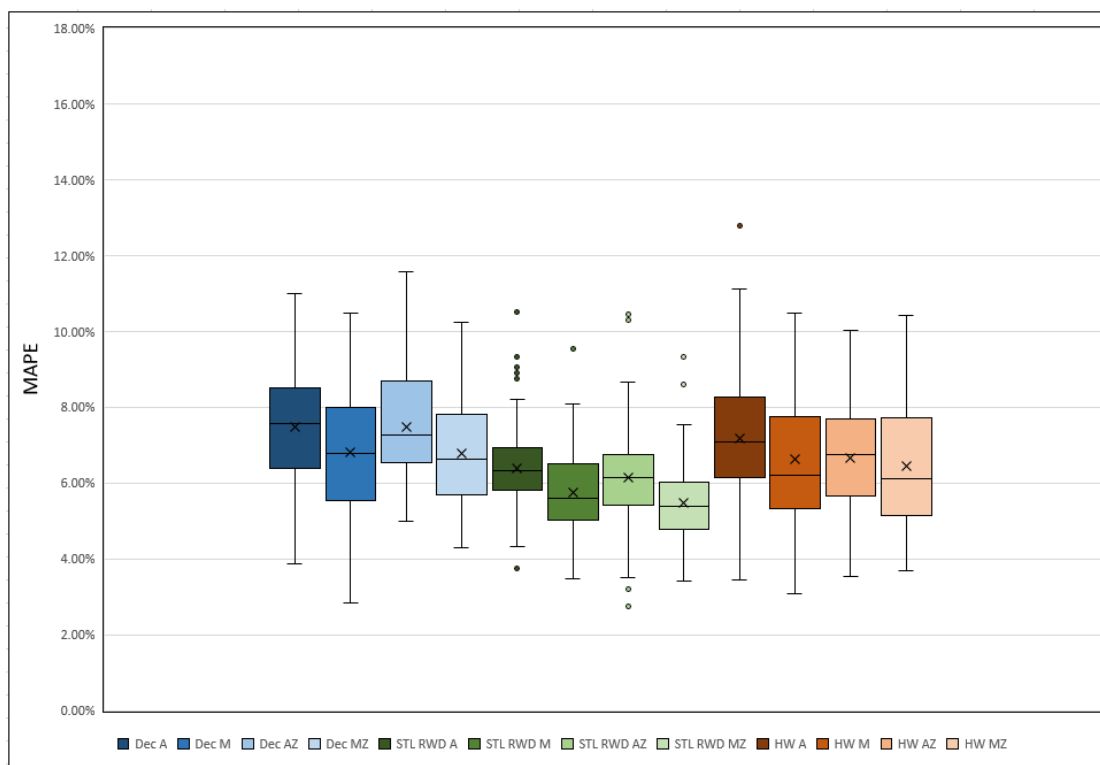
Εικόνα 6-11 Θηκογραφήματα MAE 8 OOS



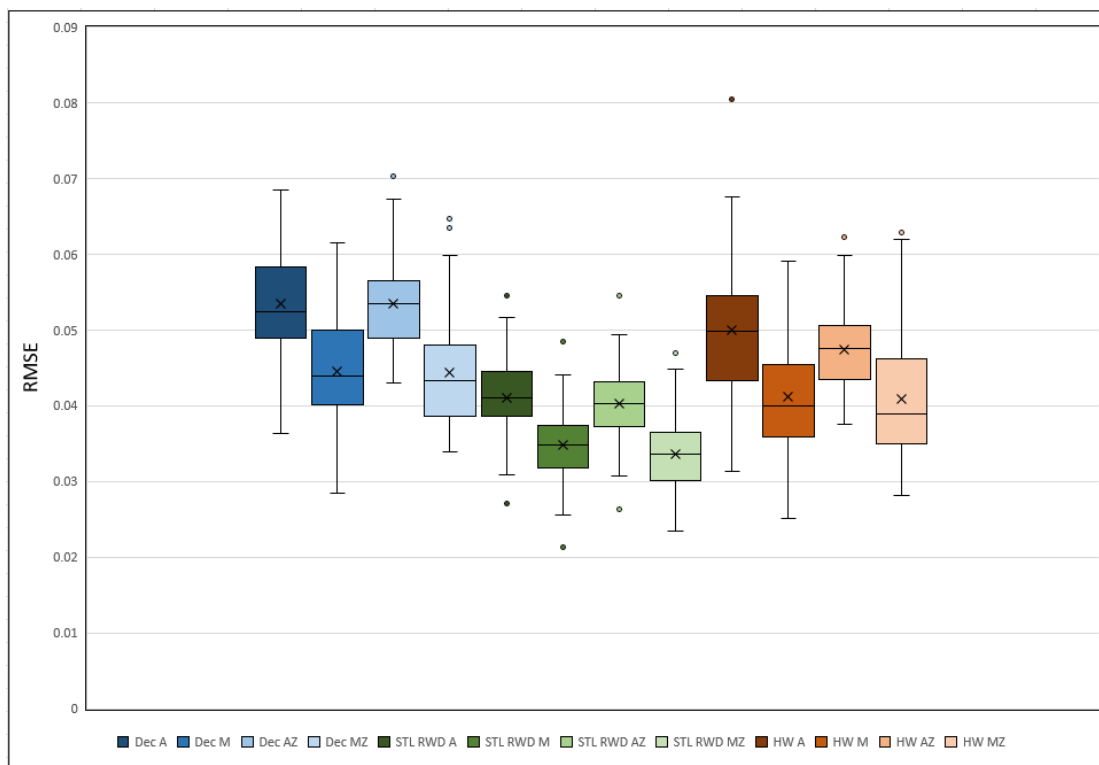
Εικόνα 6-12 Θηκογραφήματα MAE 7 OOS



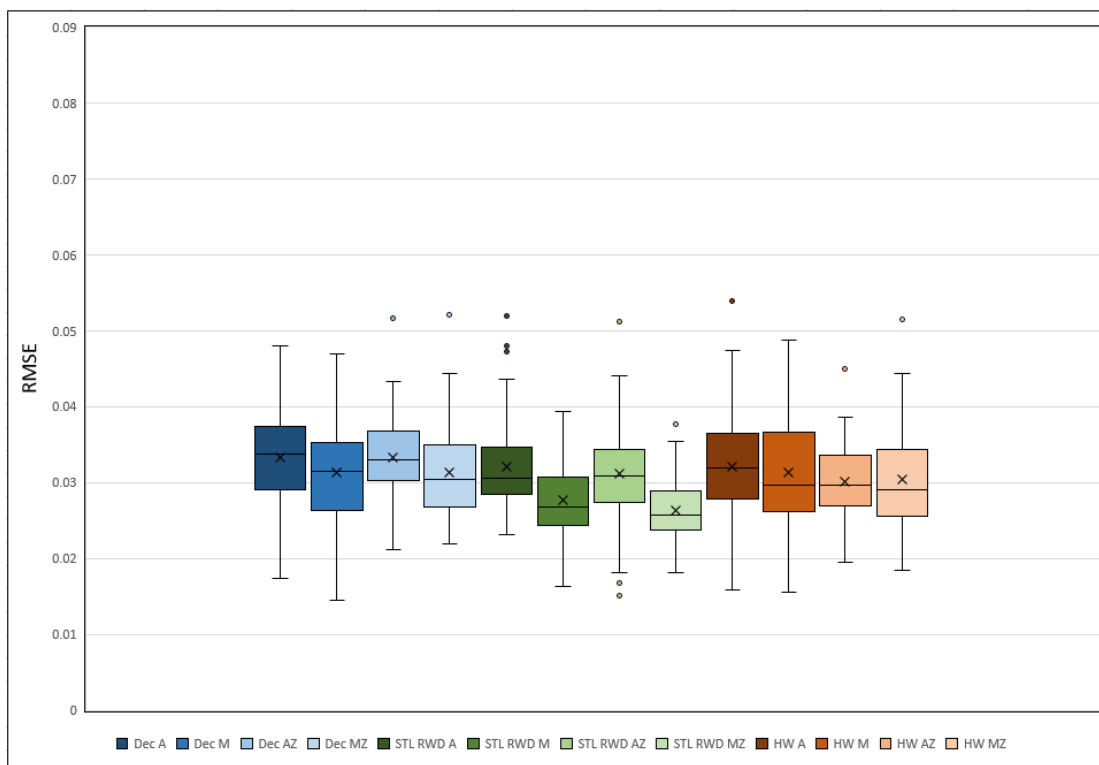
Εικόνα 6-13 Θηκογραφήματα MAPE 8 OOS



Εικόνα 6-14 Θηκογραφήματα MAPE 7 OOS



Εικόνα 6-15 Θηκογραφήματα RMSE 8 OOS



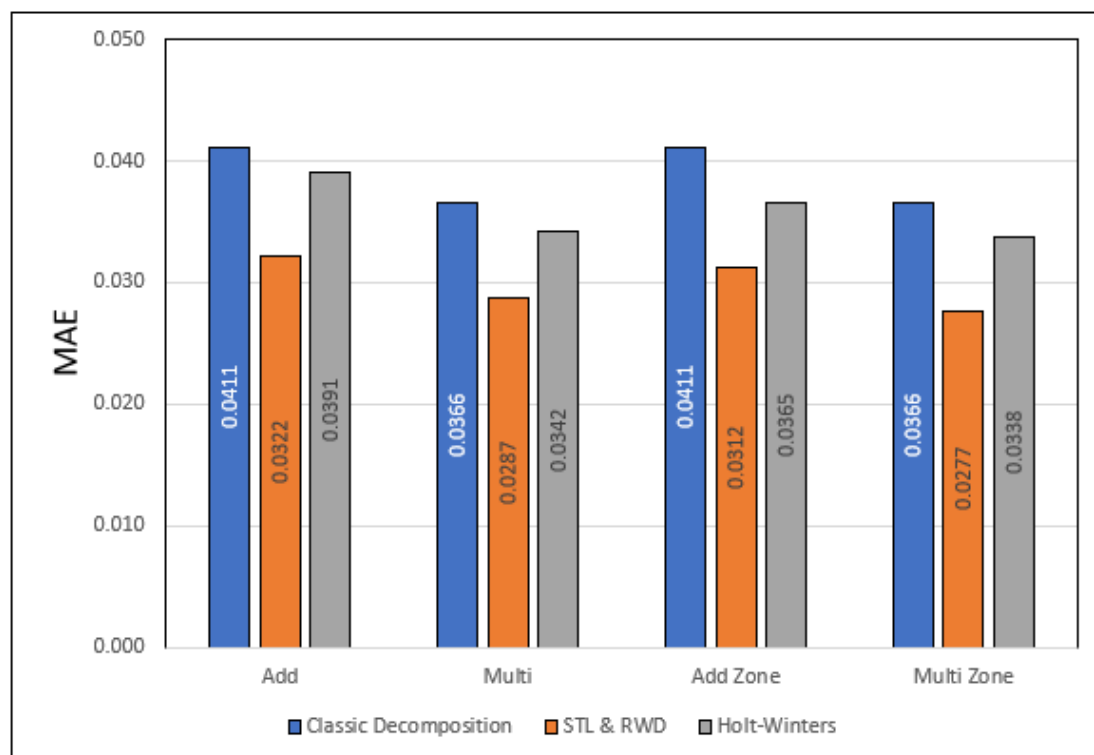
Εικόνα 6-16 Θηκογραφήματα RMSE 7 OOS

Στον πίνακα 6-4 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι του κάθε δείκτη για τις 76 θέσεις για κάθε μέθοδο και τις παραλλαγές της.

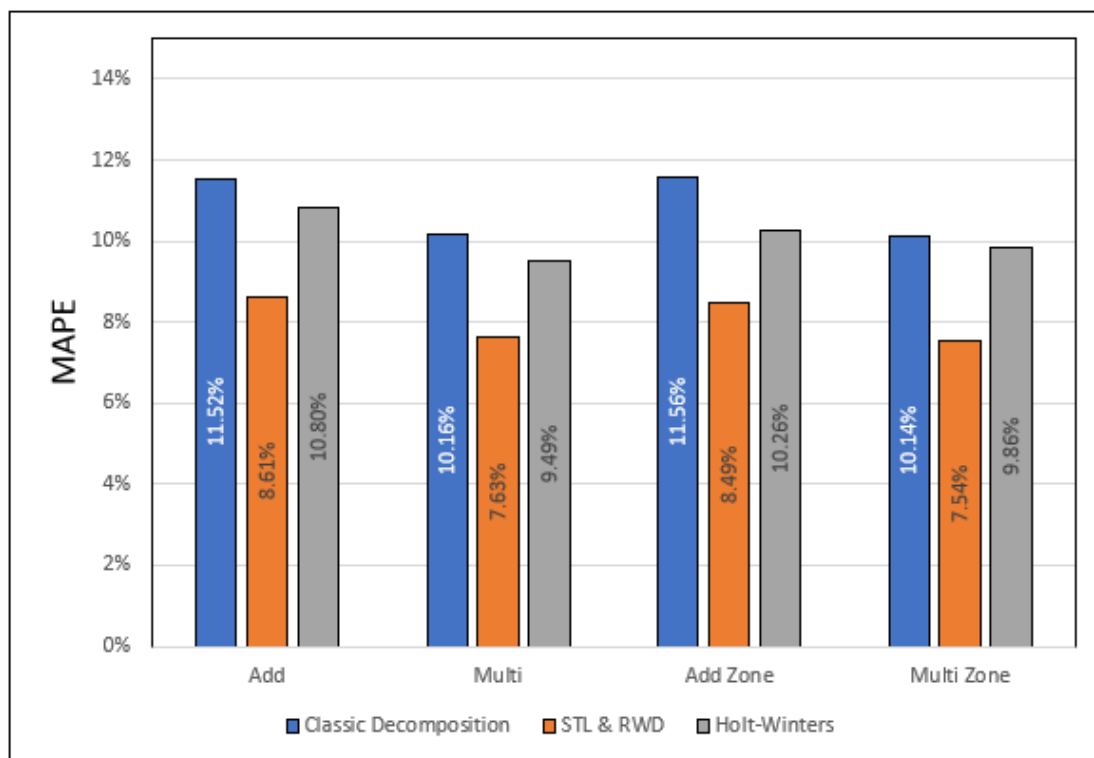
Πίνακας 6-4 Μέσοι όροι μέτρων ακρίβειας κάθε μοντέλου OOS

	Decomposition				STL Random Walk with Drift				Holt Winters			
	Add	Multi	Add Z	Multi Z	Add	Multi	Add Z	Multi Z	Add	Multi	Add Z	Multi Z
<b>MAE 8</b>	0.04114	0.03663	0.04114	0.03658	0.03222	0.02873	0.03119	0.02768	0.03914	0.03417	0.03653	0.03381
<b>MAPE 8</b>	11.522%	10.163%	11.559%	10.139%	8.612%	7.626%	8.494%	7.541%	10.805%	9.491%	10.259%	9.858%
<b>RMSE 8</b>	0.05341	0.04448	0.05350	0.04442	0.04108	0.03479	0.04025	0.03364	0.04994	0.04118	0.04741	0.04093
<b>MAE 7</b>	0.03021	0.02927	0.03012	0.02914	0.02683	0.02458	0.02563	0.02333	0.02943	0.02853	0.02697	0.02762
<b>MAPE 7</b>	7.485%	6.806%	7.485%	6.774%	6.399%	5.754%	6.151%	5.478%	7.183%	6.641%	6.664%	6.437%
<b>RMSE 7</b>	0.03329	0.03138	0.03334	0.03133	0.03213	0.02772	0.03115	0.02632	0.03207	0.03137	0.03006	0.03034

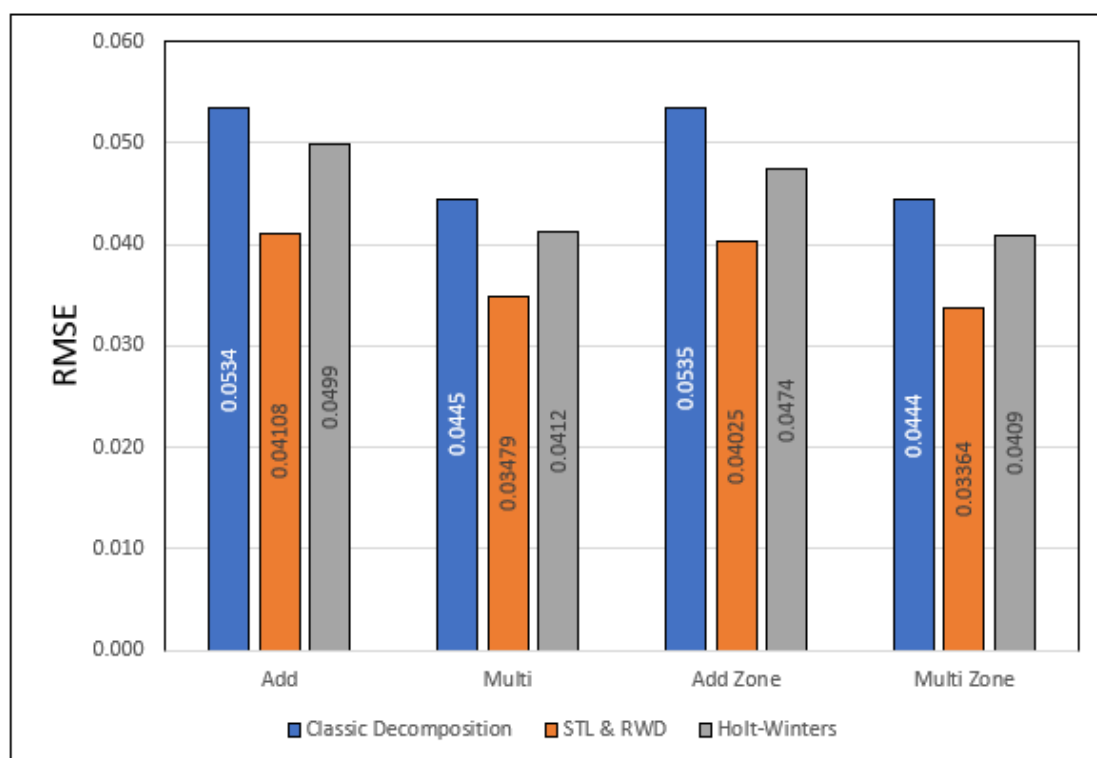
Η αντίστοιχη απεικόνιση γίνεται στις εικόνες 6-17 με 6-22 με τη μορφή ραβδόγραμμάτων



Εικόνα 6-17 Ραβδόγραμμα MAE 8 OOS

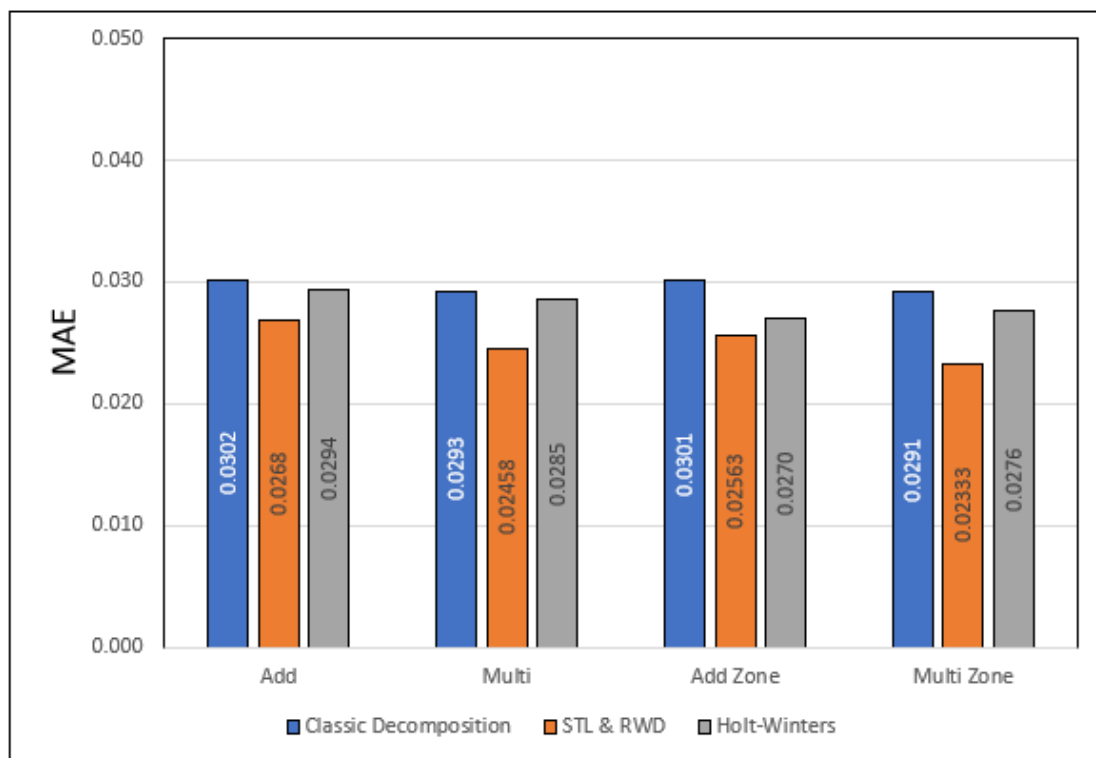


Εικόνα 6-18 Ραβδόγραμμα MAPE 8 OOS

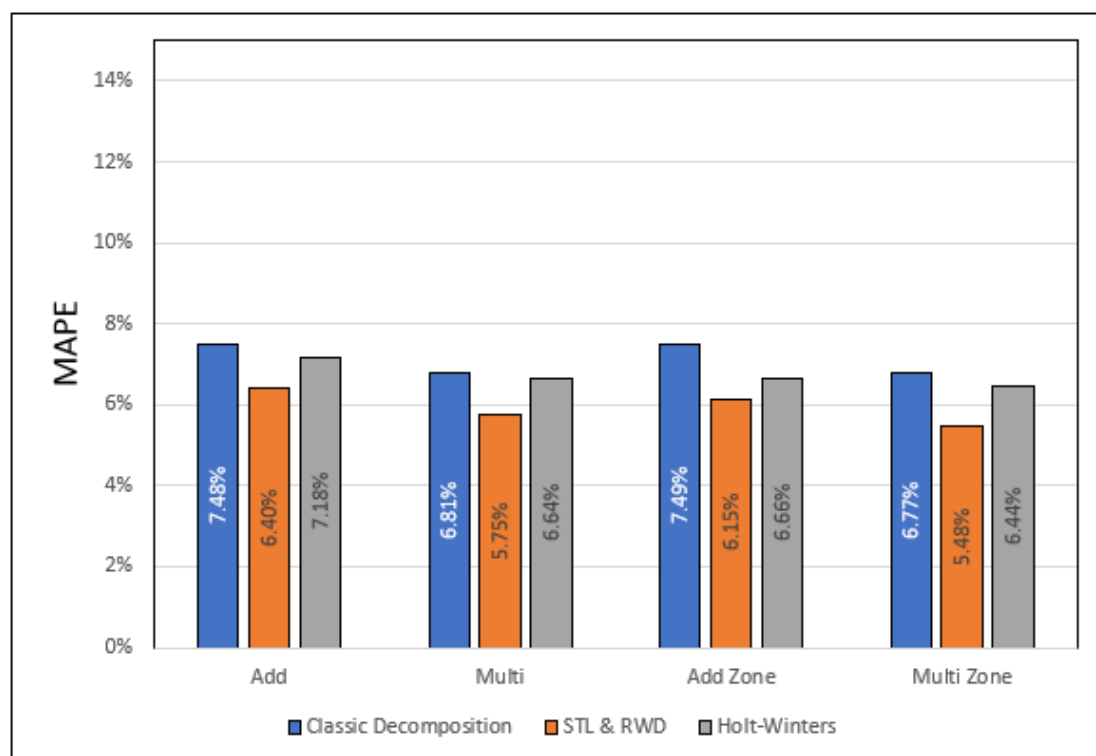


Εικόνα 6-19 Ραβδόγραμμα RMSE 8 OOS

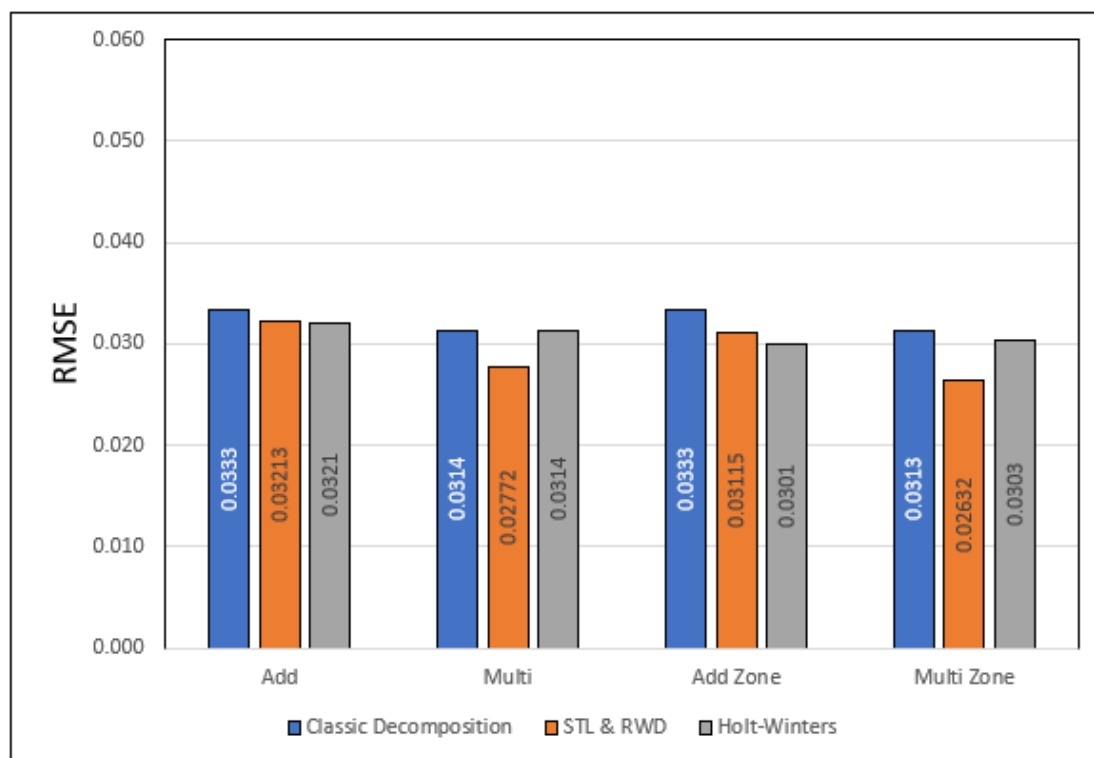




Εικόνα 6-20 Ραβδόγραμμα MAE 7 OOS



Εικόνα 6-21 Ραβδόγραμμα MAPE 7 OOS



Εικόνα 6-22 Ραβδόγραμμα RMSE 7 OOS

Το πρώτο συμπέρασμα που βγαίνει είναι ότι οι προβλέψεις από όλες τις μεθόδους είναι αρκετά καλές με τον μέσο όρο του δείκτη MAE (8) να παίρνει τιμές από 0.02768 μέχρι 0.04114, και του MAE (7) 0.0233 μέχρι 0.03021 οι οποίες είναι χαμηλές τιμές δεδομένου ότι το GN παίρνει τιμές από 0-1 και οι τιμές των μετρήσεων κυμαίνονταν από 0.22 μέχρι 0.84.

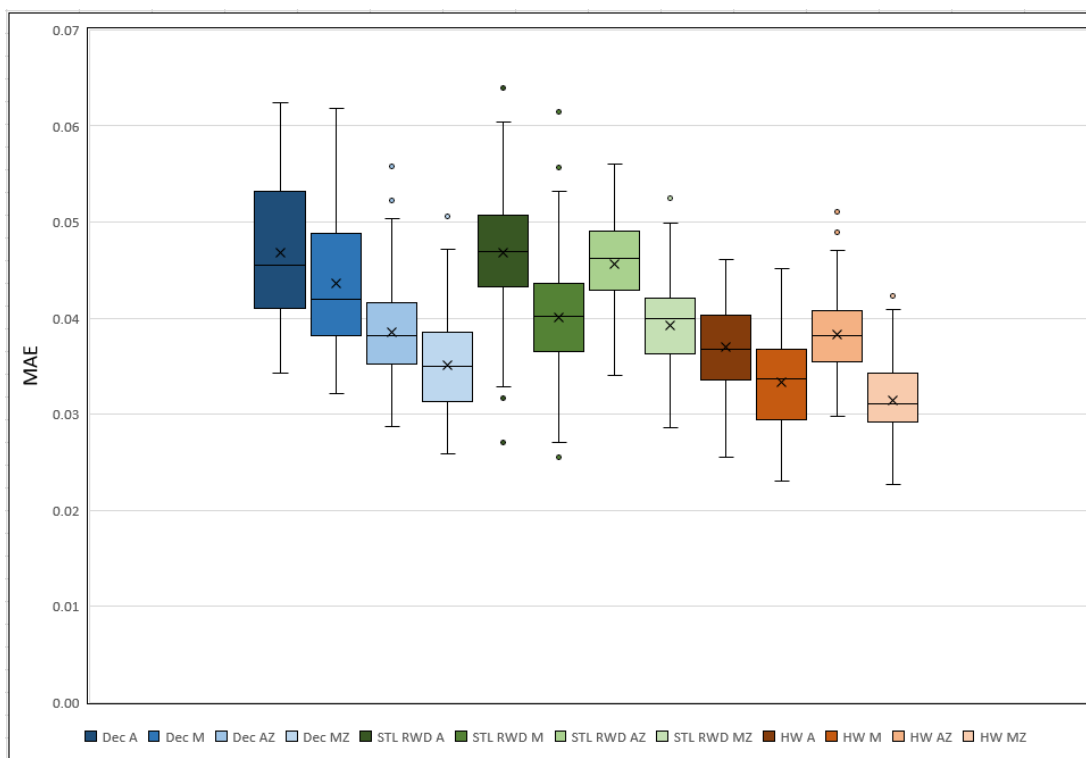
Γίνεται σαφές από τα διαγράμματα (βλ. εικόνες 6-17 έως 6-22) ότι τα καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν από την μέθοδο STL RWD η οποία σε όλες τις παραλλαγές των μεθόδων (Προσθετικό, Πολλαπλασιαστικό, Προσθετικό Z και Πολλαπλασιαστικό Z) και σε όλους τους δείκτες (πλην του RMSE που είναι πολύ κοντά) είχε τις χαμηλότερες τιμές. Τα χειρότερα αποτελέσματα όπως ήταν αναμενόμενο δίνει η μέθοδος της απλής αποσύνθεσης, η οποία είναι και η λιγότερο περίπλοκη μέθοδος.

Κοιτώντας τα διαγράμματα με τις 7 μετρήσεις (βλ. εικόνες 6-20 με 6-22) τα πολλαπλασιαστικά μοντέλα φαίνεται να αποδίδουν καλύτερα από τα προσθετικά, αλλά η διαφορά είναι μικρή. Στα διαγράμματα με τις 8 μετρήσεις (βλ. εικόνες 6-17 με 6-19) η διαφορά γίνεται πιο σαφής, ωστόσο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην τελευταία μέτρηση η πτώση από την υγρή στην ξηρή περίοδο είναι πολύ μικρή όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, δίνοντας την εντύπωση μειωμένης διακύμανσης που είναι χαρακτηριστικό των πολλαπλασιαστικών μοντέλων με φθίνουσα τάση και επομένως ίσως δεν θα έπρεπε να ληφθεί υπόψη.

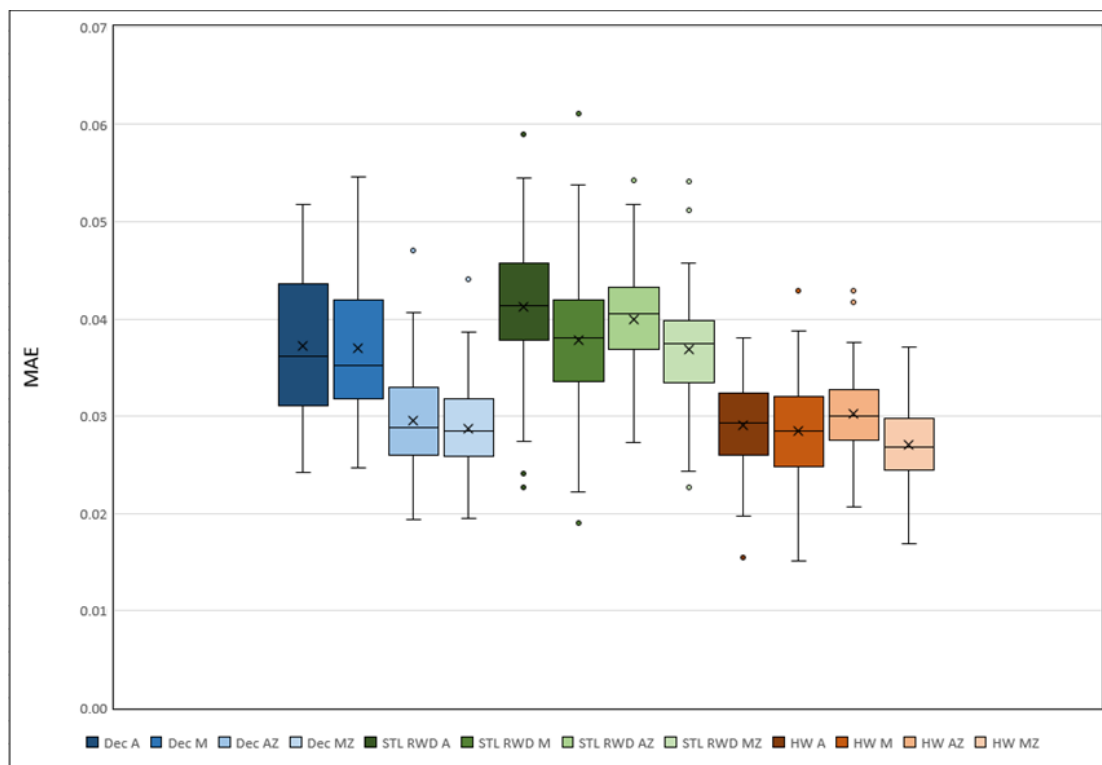
Τέλος παρατηρείται ότι οι προβλέψεις από τις ζώνες, οι οποίες πολύ συχνά ήταν οι καλύτερες, δίνουν πάρα πολύ καλά αποτελέσματα που σημαίνει ότι λόγω της ομοιογένειας που υπάρχει μεταξύ των θέσεων της κάθε ζώνης, είναι δυνατό να γίνουν ικανοποιητικές προβλέψεις για ολόκληρη την ζώνη κάνοντας πρόβλεψη μονάχα στις χρονοσειρές που προκύπτουν από τους μέσους όρους των μετρήσεων της κάθε ζώνης.

### 6.5.2 Αποτελέσματα μεθόδου Cross Validation

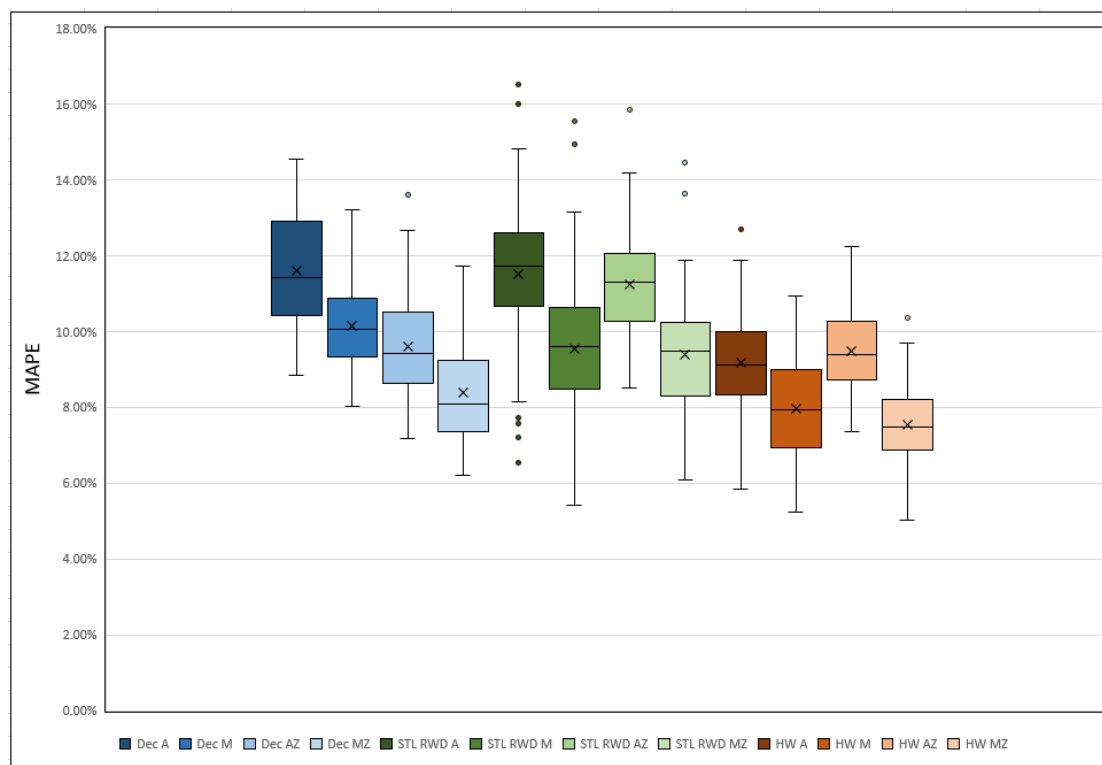
Στα παρακάτω θηκογράμματα (εικόνες 6-23 με 6-28) φαίνονται οι κατανομές των μέτρων εκτίμησης ακριβείας για την κάθε μέθοδο και τις παραλλαγές της.



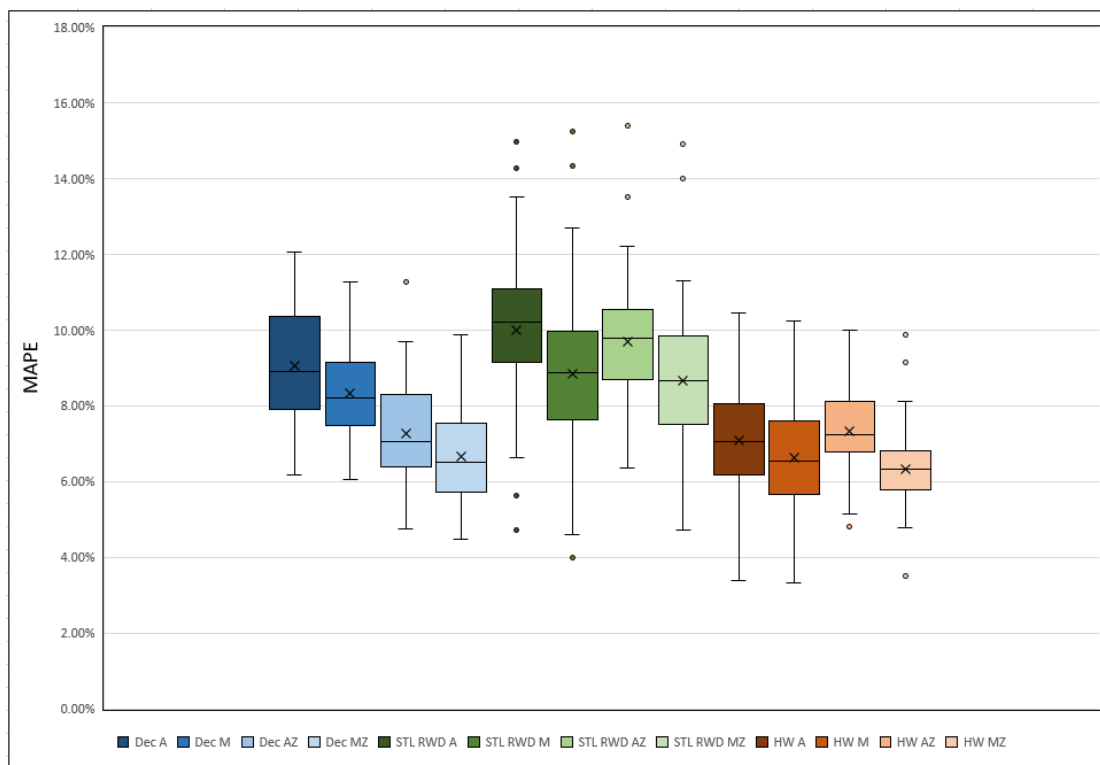
Εικόνα 6-23 Θηκογραφήματα MAE 8 CVAL



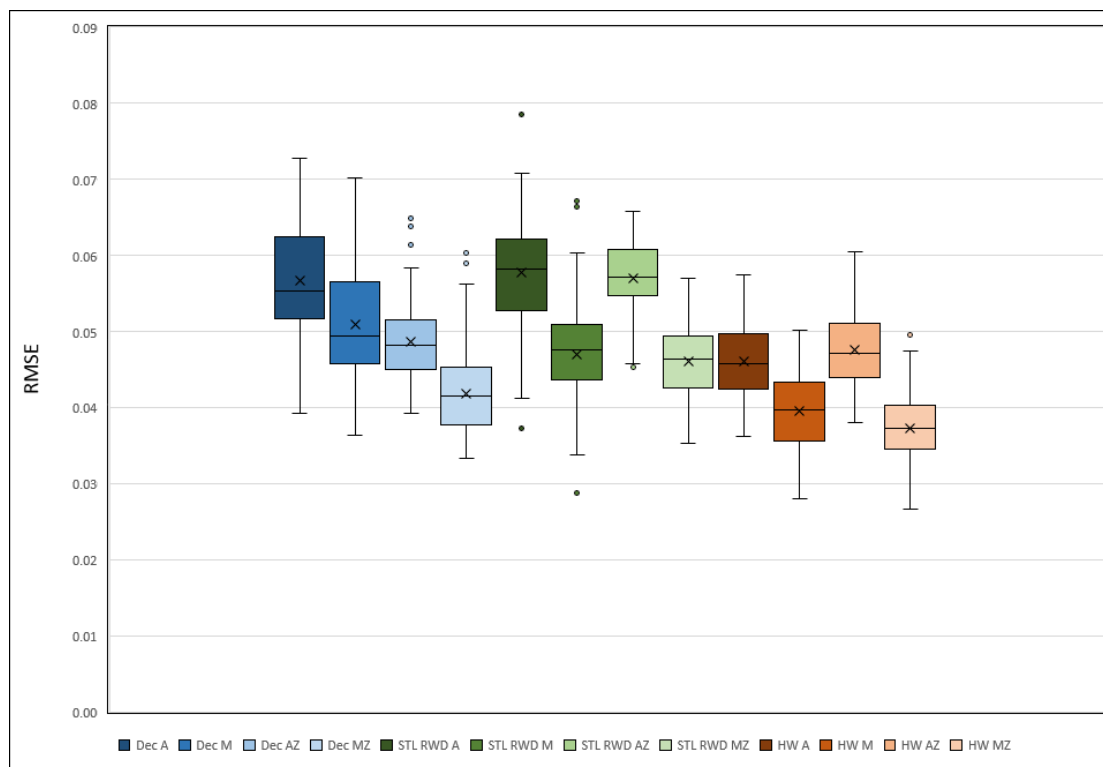
Εικόνα 6-24 Θηκογραφήματα MAE 7 CVAL



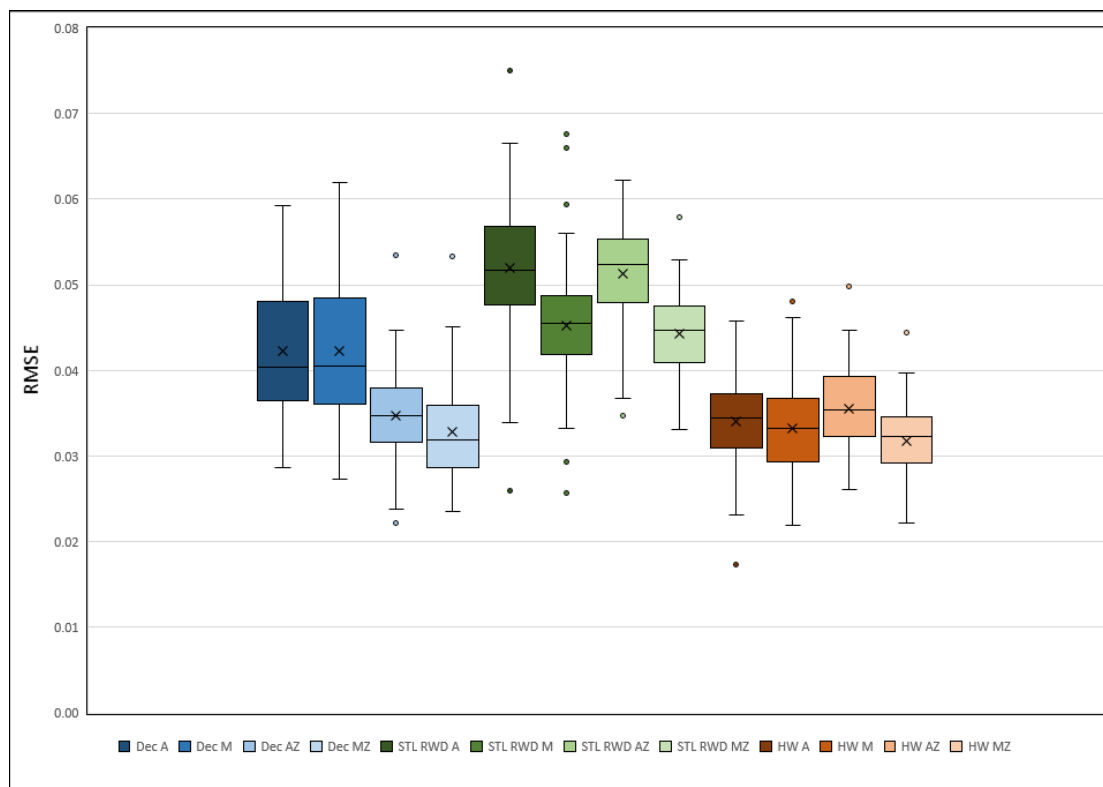
Εικόνα 6-25 Θηκογραφήματα MAPE 8 CVAL



Εικόνα 6-26 Θηκογραφήματα MAPE 7 CVAL



Εικόνα 6-27 Θηκογραφήματα RMSE 8 CVAL



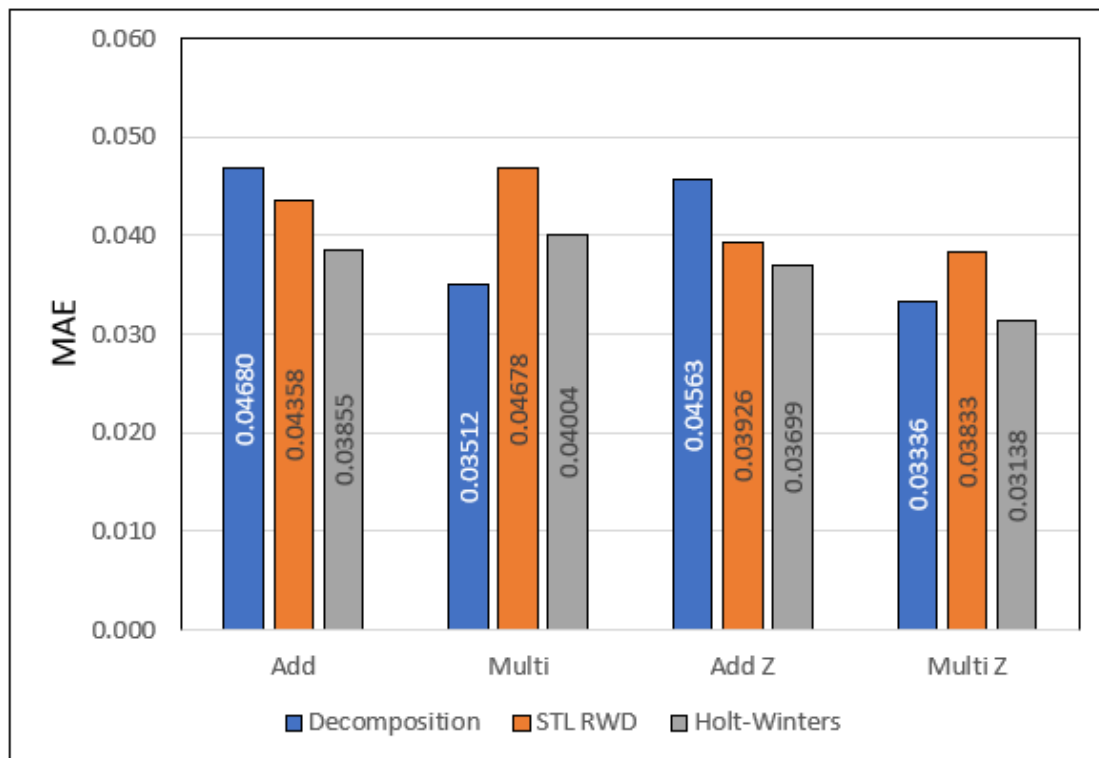
Εικόνα 6-28 Θηκογραφήματα RMSE 7 CVAL

Στον πίνακα 5-15 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι του κάθε δείκτη για τις 76 θέσεις για κάθε μέθοδο και τις παραλλαγές της.

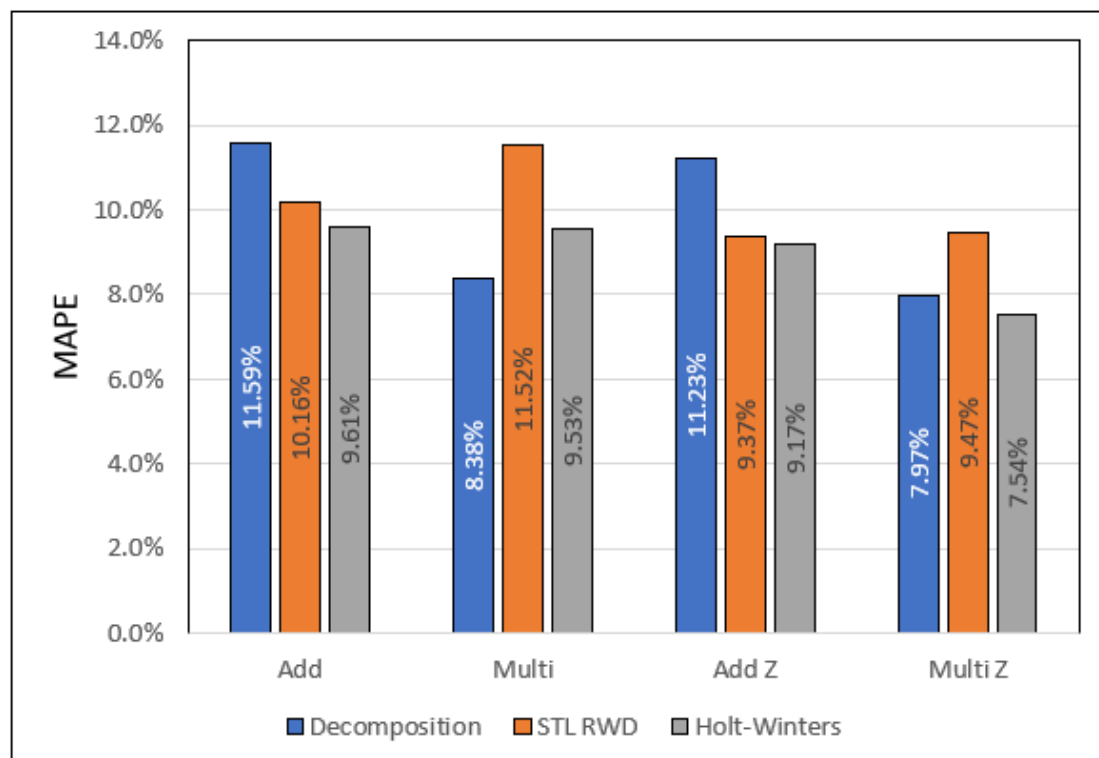
Πίνακας 6-5 Μέσοι όροι μέτρων ακρίβειας κάθε μοντέλου CVAL

	Decomposition				STL Random Walk with Drift				Holt Winters			
	Add	Multi	Add Z	Multi Z	Add	Multi	Add Z	Multi Z	Add	Multi	Add Z	Multi Z
<b>MAE 8</b>	0.04680	0.03512	0.04563	0.03336	0.04358	0.04678	0.03926	0.03833	0.03855	0.04004	0.03699	0.03138
<b>MAPE 8</b>	11.59%	8.38%	11.23%	7.97%	10.16%	11.52%	9.37%	9.47%	9.61%	9.53%	9.17%	7.54%
<b>RMSE 8</b>	0.05663	0.04186	0.05700	0.03949	0.05089	0.05771	0.04603	0.04760	0.04863	0.04696	0.04599	0.03721
<b>MAE 7</b>	0.03724	0.03701	0.02956	0.02874	0.04119	0.03777	0.03991	0.03691	0.02905	0.02847	0.03019	0.02700
<b>MAPE 7</b>	9.07%	8.32%	7.25%	6.65%	10.00%	8.83%	9.69%	8.67%	7.08%	6.62%	7.32%	6.34%
<b>RMSE 7</b>	0.04225	0.04223	0.03470	0.03282	0.05198	0.04519	0.05128	0.04424	0.03401	0.03325	0.03557	0.03180

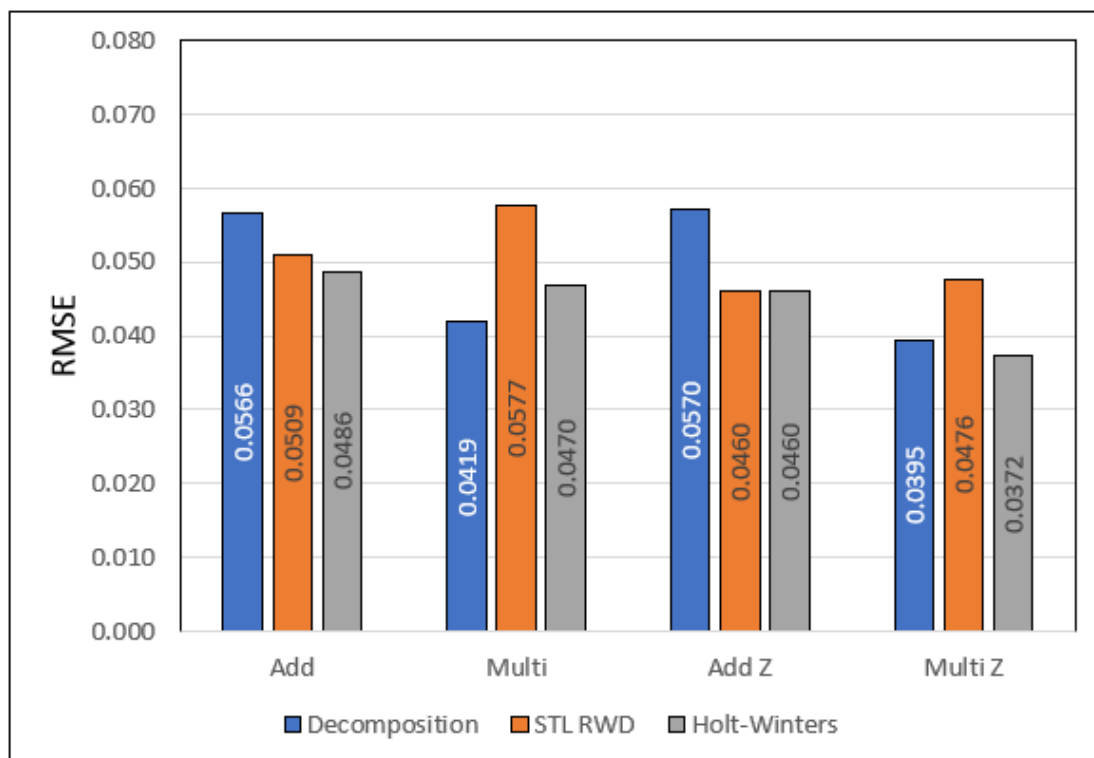
Η αντίστοιχη απεικόνιση γίνεται στις εικόνες 6-29 με 6-34 με τη μορφή ραβδογραμμάτων



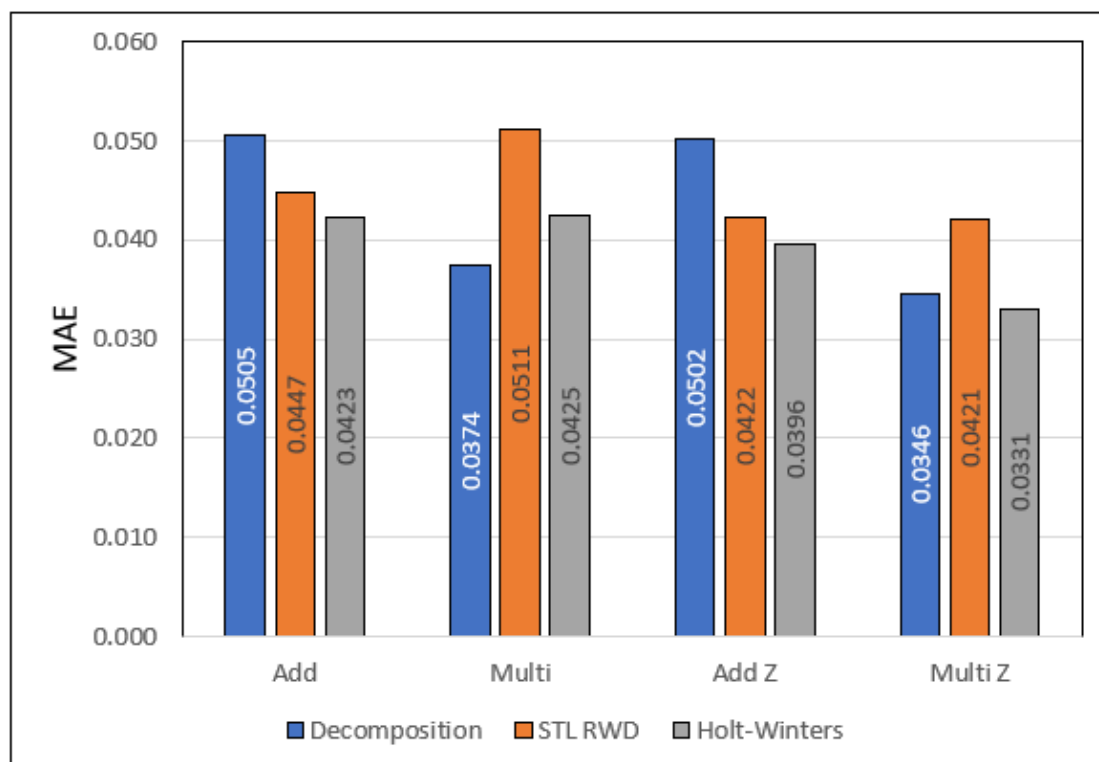
Εικόνα 6-29 Ραβδόγραμμα MAE 8 CVAL



Εικόνα 6-30 Ραβδόγραμμα MAPE 8 CVAL

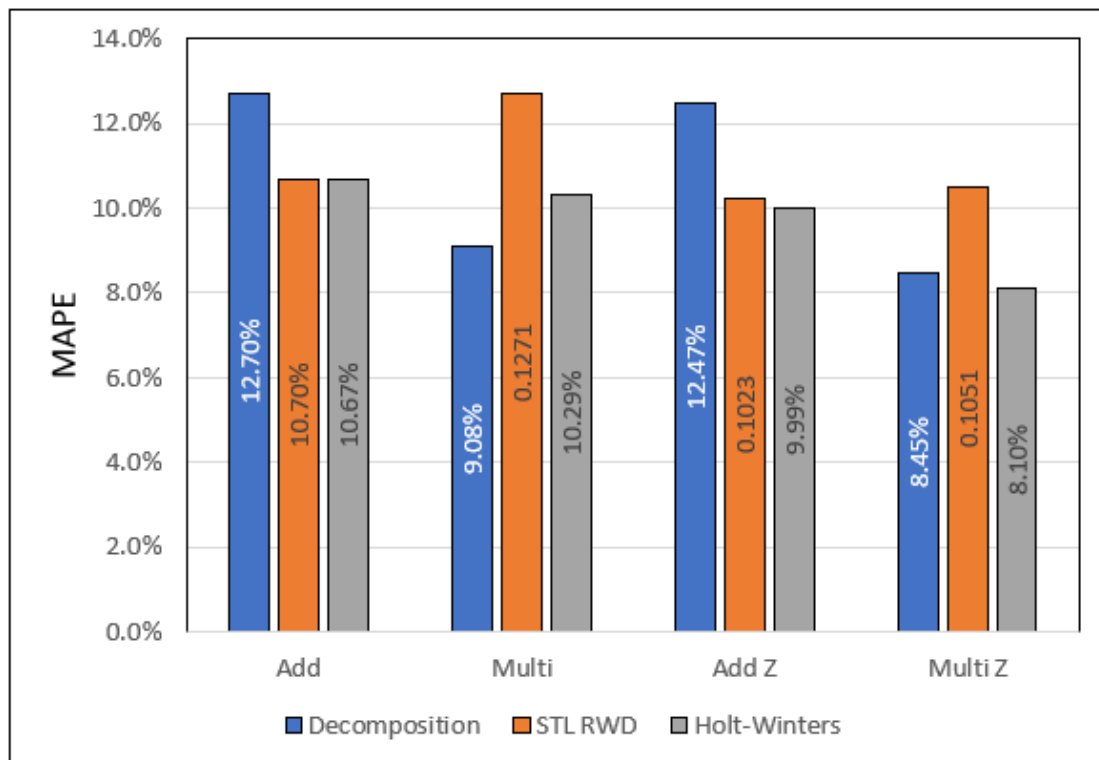


Εικόνα 6-31 Ραβδόγραμμα RMSE 8 CVAL

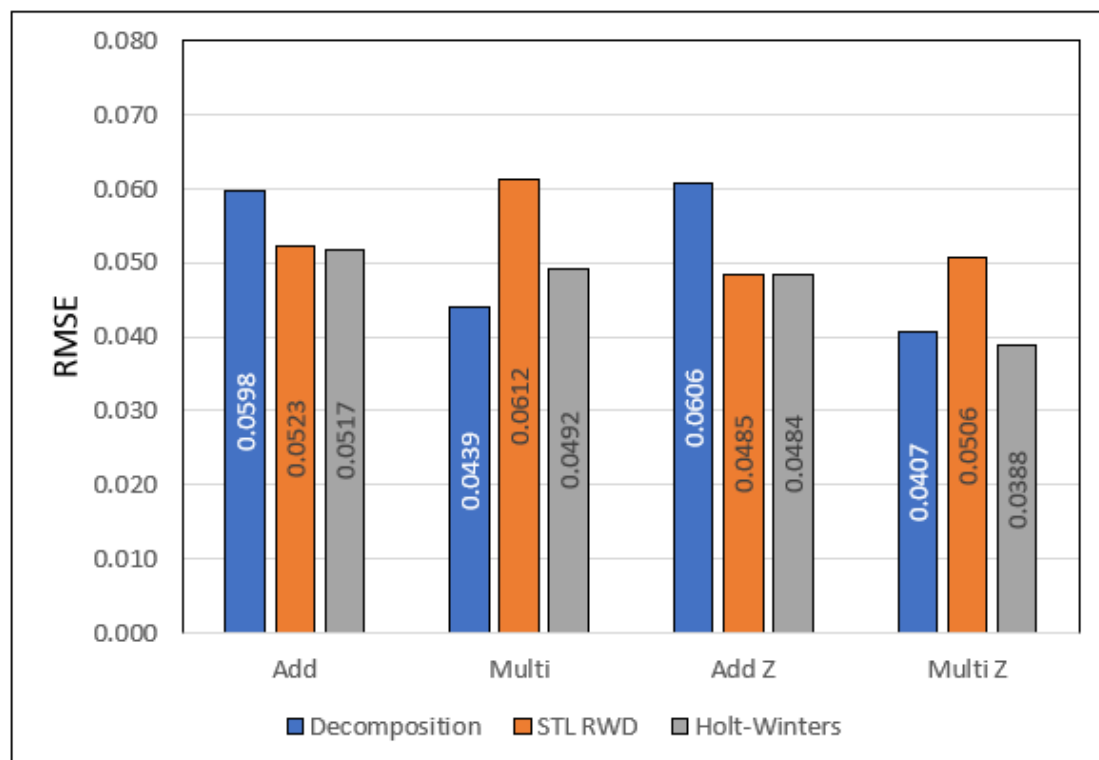


Εικόνα 6-32 Ραβδόγραμμα MAE 7 CVAL





Εικόνα 6-33 Ραβδόγραμμα MAPE 7 CVAL



Εικόνα 6-34 Ραβδόγραμμα RMSE 7 CVAL

Τα αρχικά συμπεράσματα που βγαίνουν είναι ότι τα μέτρα ακρίβειας πρόβλεψης δίνουν λίγο χειρότερες τιμές για τη μέθοδο αυτή, ωστόσο δε συγκρίνονται οι μέθοδοι επαλήθευσης αλλά τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτές. Σε γενικές γραμμές οι προβλέψεις είναι καλές με τον μέσο όρο του δείκτη MAE (8) να παίρνει τιμές από 0.03138 μέχρι 0.04680, και του MAE (7) 0.02700 μέχρι 0.04119.

Τα αποτελέσματα της επαλήθευσης με τη μέθοδο Cross Validation διαφέρουν αρκετά από αυτά της μεθόδου Out of Sample.

Τα καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν από τη μέθοδο Holt-Winters με την πρόβλεψη από ζώνη του πολλαπλασιαστικού μοντέλου να είναι σύμφωνα με όλους τους δείκτες η καλύτερη (βλ. εικόνες 6-29 με 6-34). Τα χειρότερα αποτελέσματα τα δίνουν τα μοντέλα STL RWD στοιχείο αξιοσημείωτο δεδομένου ότι στην μέθοδο επαλήθευσης Out of Sample τα μοντέλα αυτά είχαν σχεδόν πάντα τα καλύτερα αποτελέσματα. Αυτό πιθανώς οφείλεται στον παρακάτω λόγο. Στην μέθοδο Out of Sample γίνεται μια πρόβλεψη για τις επόμενες 8 περιόδους σε αντίθεση με την Cross Validation που έγιναν 8 προβλέψεις της μια περιόδου.

Η μέθοδος πρόβλεψης του τυχαίου περιπάτου με περιπλάνηση δίνει τεράστια βαρύτητα στην τελευταία παρατήρηση του Training Set. Τυχαία οι μετρήσεις του 2016 που αποτελούν τις τελευταίες παρατηρήσεις του Training Set πρέπει να ταίριαζαν πολύ καλά στα μελλοντικά δεδομένα κάνοντας την πρόβλεψη επίσης πολύ καλή. Αυτό δε συμβαίνει στην μέθοδο Cross Validation όπου για κάθε πρόβλεψη έχουμε διαφορετική τελευταία μέτρηση. Αυτό κάνει το μοντέλο να δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα, δε σημαίνει όμως ότι είναι το πιο αξιόπιστο για άλλες περιπτώσεις. Επιπλέον η μέθοδος επαλήθευσης Cross Validation θεωρείται πολύ πιο αξιόπιστη από την Out of Sample η οποία είναι επιρρεπής στο να οδηγεί σε λάθος συμπεράσματα λόγω του ότι “τρέχει” μια μόνο φορά και για αυτό θα ήταν προτιμότερο το μοντέλο Holt Winters

Μεγάλο μειονέκτημα των προβλέψεων αυτών είναι η αδυναμία γενίκευσης των μοντέλων, παρά μόνο σε μικρές ζώνες του ίδιου τμήματος ενός αυτοκινητοδρόμου καθώς οι παράμετροι θα διαφέρουν πολύ. Επιπλέον μειονέκτημα είναι ότι τα μοντέλα παύουν να είναι χρήσιμα αφού εκπληρώσουν τον σκοπό τους και στρωθεί νέα ασφαλτική στρώση αφού πρόκειται πλέον για “νέα” επιφάνεια οδοστρώματος. Στην περίπτωση χρήσης ίδιου ασφαλτομίγματος θα μπορούσαν ίσως να δώσουν μια εκτίμηση της συμπεριφοράς της νέας ασφαλτικής στρώσης όσον αφορά στην αντιολισθητική ικανότητα της και την εξέλιξη αυτής.

## 7. Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα

Μεγάλο μέρος των ατυχημάτων που οφείλονται στην υψηλή ολισθηρότητα θα ήταν εύκολα αποτρέψιμα αν υπήρχε η δυνατότητα πρόβλεψης της ολισθηρότητας, ώστε να γίνουν έγκαιρες επεμβάσεις στο οδόστρωμα για την αποφυγή του κινδύνου. Η πρόβλεψη όμως της αντιολισθητικής ικανότητας ενός οδοστρώματος είναι ένα σύνθετο πρόβλημα που πολλοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να λύσουν. Στην παρούσα διπλωματική έγινε η προσπάθεια ανάπτυξης μοντέλων για την πρόβλεψη της αντιολισθητικής ικανότητας ασφαλτικών οδοστρωμάτων με τη χρήση χρονοσειρών.

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση αναδείχθηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν την αντιολισθητική ικανότητα της επιφάνειας του οδοστρώματος και την καθιστούν ως ένα περίπλοκο μέγεθος προς αξιολόγηση και εν συνεχεία καταγράφηκαν οι διάφορες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της. Επίσης, διερευνήθηκε και αναλύθηκε η πλήρης διαδικασία της πρόβλεψης με τη χρήση χρονοσειρών, μια σειρά δηλαδή παρατηρήσεων μιας μεταβλητής σε χρονολογική σειρά.

Για τη διαδικασία της πρόβλεψης με χρονοσειρές αξιοποιήθηκαν ως δεδομένα οι μετρήσεις αντιολισθητικής ικανότητας των τελευταίων δεκατριών ετών σε ένα τμήμα αυτοκινητοδρόμου μήκους 800 μέτρων, στοιχεία τα οποία προήλθαν από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΟ. Οι μετρήσεις είχαν πραγματοποιηθεί – σύμφωνα με τα οριζόμενα στην παρούσα εργασία- κατά την ξηρή και υγρή περίοδο κάθε έτους με το σύστημα Grip Tester, δίνοντας ως δείκτη ολισθηρότητας το Grip Number (GN) ανά 10 μέτρα. Με βάση τα στοιχεία αυτά κατασκευάστηκαν 81 χρονοσειρές με 26 παρατηρήσεις η κάθε μία. Στη συνέχεια, έπειτα από ανάλυση των δεδομένων, έγινε διαχωρισμός του τμήματος σε δύο ζώνες και κατασκευάστηκαν δύο επιπλέον χρονοσειρές από τους μέσους όρους κάθε ζώνης.

Για τις προβλέψεις αναπτύχθηκαν τρία μοντέλα μαζί με κάποιες παραλλαγές (προσθετικό και πολλαπλασιαστικό μοντέλο): η κλασική αποσύνθεση με γραμμική παρεμβολή για τη πρόβλεψη (DEC), η αποσύνθεση STL με τυχαίο περίπατο με περιπλάνηση για την πρόβλεψη (STL RWD) και η μέθοδος Holt-Winters (HW).

Στη συνέχεια οι προβλέψεις που έγιναν αξιολογήθηκαν βάσει της ακρίβειας τους με δύο μεθόδους επαλήθευσης, την μέθοδο Out of Sample (OOS) και μια παραλλαγή της μεθόδου Cross Validation (CVAl). Για την εκπαίδευση των μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις των πρώτων 9 ετών και στη συνέχεια συγκρίθηκαν οι προβλέψεις των 4 επόμενων ετών με τις πραγματικές τιμές των μετρήσεων.

Τα αποτελέσματα όλων των προβλέψεων ήταν πολύ ικανοποιητικά με τους δείκτες ακρίβειας πρόβλεψης (MAE, MAPE και RMSE) να δίνουν χαμηλές τιμές. Ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα έδωσαν οι προβλέψεις των ζωνών που σημαίνει ότι θα

ήταν δυνατό να κάνουμε πρόβλεψη για ολόκληρη την ζώνη από τη χρονοσειρά που προκύπτει από τους μέσους όρους της ζώνης, εφόσον είναι αρκετά ομοιογενή τα δείγματα.

Σε γενικές γραμμές τα πολλαπλασιαστικά μοντέλα έδιναν καλύτερες προβλέψεις αλλά η διαφορά δεν ήταν μεγάλη.

Όσον αφορά στο ποιο μοντέλο αποδίδει καλύτερα, οι δύο μέθοδοι επαλήθευσης έδωσαν διαφορετικά αποτελέσματα. Σύμφωνα με τη μέθοδο Out of Sample (OOS) τα πιο ακριβή μοντέλα ήταν με διαφορά τα STL με τυχαίο περίπατο με περιπλάνηση (STL RWD), με τα μοντέλα Holt-Winters (HW) να έρχονται δεύτερα και αυτά της απλής αποσύνθεσης (DEC) να δίνουν μακράν τα χειρότερα αποτελέσματα. Η μέθοδος Cross Validation (CVAL) είχε σαν καλύτερα μοντέλα τα HW με τα DEC στη δεύτερη θέση και τα STL RWD ως τα χειρότερα με διαφορά. Αν έπρεπε να γίνει επιλογή μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων επαλήθευσης θα ήταν προτιμότερα αυτά της CVAL καθώς φαίνεται να είναι πιο αξιόπιστη.

Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν εφαρμόζονται στο συγκεκριμένο τμήμα αυτού του αυτοκινητοδρόμου και δεν μπορούν να γενικευθούν για άλλα οδοστρώματα. Άλλα οδοστρώματα θα είχαν εντελώς διαφορετική συμπεριφορά λόγω διαφορών στα αδρανή, τον κυκλοφοριακό φόρτο και τις κλιματολογικές συνθήκες. Η μόνη γενίκευση που θα μπορούσε να γίνει είναι με τις ζώνες. Επιπλέον, αφού επιτευχθεί ο σκοπός της πρόβλεψης και γίνει επέμβαση στο οδόστρωμα, αυτό αποτελεί πλέον νέο οδόστρωμα και παύουν να ισχύουν τα ιστορικά δεδομένα και απαιτείται δημιουργία νέας χρονοσειράς για το τμήμα εκείνο. Στην περίπτωση χρήσης της ίδιας ασφαλτικής στρώσης ίσως είναι δυνατό να υπάρξει μια εκτίμηση της συμπεριφοράς της ως προς την αντιστοιχιστική της ικανότητα και την εξέλιξή της.

Αξίζει να επισημανθεί η χρησιμότητα των χρονοσειρών ως εργαλείο πρόβλεψης στον τομέα των οδοστρωμάτων, καθώς μπορούν να αποτελέσουν ένα ισχυρό εργαλείο στο πλαίσιο της διαχείρισης της συντήρησής τους. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα θα μπορούσαν να αφορούν την πρόβλεψη και άλλων μεγεθών οδοστρώματος (π.χ. ομαλότητα) βάσει περιοδικών μετρήσεων. Σε κάθε περίπτωση η συχνότητα των μετρήσεων επηρεάζει την απόδοση της πρόβλεψης, καθώς μεγαλύτερος αριθμός και συχνότητα μετρήσεων-παρατηρήσεων δίνουν μεγαλύτερες δυνατότητες ως προς την επιλογή καταλληλότερων μοντέλων πρόβλεψης.

## 8. Βιβλιογραφία

Aktaş, B., Gransberg D.D., Riemer C., and Pittenger D., 2011. Comparative Analysis of Macrotexture Measurement Tests for Pavement Preservation Treatments, Transportation Research Record No.2209, Journal of the Transportation Research Board, National Academies, pp. 34-40.

Al-Qadi, I.L., Flintsch, G.W., Roosevelt, D.S., Decker, R., Wambold, J.C. and Nixon, W.A., 2002. Feasibility of Using Friction Indicators to Improve Winter Maintenance Operations and Mobility, NCHRP Web Document 53, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Washington, D.C.

Andresen A., Wambold J. C., 1999. Friction Fundamentals, Concepts and Methodology Austroads, 2005. Guide to the management of road surface skid resistance. Austroads Incorporated, Sydney, Australia.

Bijsterveld, W., del Val Miguel, A., 2016. Towards quantification of seasonal variations in skid resistance measurements. Road Materials and Pavement Design, 17(2), 477–486.

Choi, Y., 2011. Review of Skid Resistance and Measurement Methods. Austroads Project No. AT1488, Austroads Publication, AP–T177/11, Austroads Ltd.

Cleveland, R. B., Cleveland, W. S., McRae, J. E., and Terpenning, I. J. ,1990. STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess. Journal of Official Statistics, 6(1), 3–33.

Davis, R.M., Flintsch, G.W., Al-Qadi, I.L.K., and McGhee, K. 2002. Effect of Wearing Surface Characteristics on Measured Pavement Skid Resistance and Texture. Presented at 81st Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C.

Gillespie, T.D. 1992. Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers (SAE), Warrendale, Pennsylvania.

Glennon, J.C., 1996. Roadway Defects and Tort Liability. Lawyers and Judges Publishing company.

Gothie, M. 1996. Relationship Between Surface Characteristics and Accidents, Proceedings of 3rd International Symposium on Pavement Surface Characteristics, Christchurch, New Zealand.

Hall J. W., Smith K. L., Titus-Glover L., Wambold J. C., Yager T. J., Rado Z., 2009. Guide for Pavement Friction, Report for National Cooperative Highway Research Program, Project 01-43.

## Βιβλιογραφία

Harwood, D.W., Blackburn, R.R., Kulakowski, B.T., Kibler, D.F., 1987. Wet Weather Measures. Report, No.FHWA/RD-87/105, FCP 31W2-112.

Hayes, G.G., Ivey D.L., and Gallaway B.M., 1983. Hydroplaning, Hydrodynamic Drag, and Vehicle Stability, Special Technical Publication 793, American Society for Testing and Materials (ASTM), 151-166, Philadelphia, Pennsylvania.

Henry, J.J., 1983. Comparison of Friction Performance of a Passenger Tire and the ASTM Standard Test Tires, ASTM STP 793, American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, Pennsylvania.

Henry J. J., 2000. Evaluation of Pavement Friction Characteristics, NCHRP Synthesis, National Cooperative Highway Research Program, Washington D.C.

Hyndman, R.J., and Athanasopoulos, G. 2018 Forecasting: principles and practice, 2nd edition, OTexts: Melbourne, Australia.

Kane, M., Do, M.T., Cerezo, V., Rado, Z., Khelifi, C., 2019. Contribution to pavement friction modelling: an introduction of the wetting effect. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(8), 965-976, <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1369776>

Kogbara, R.B., Masad., E.A., Kassem, E., Scarpas A.T., Anupam, K., 2016. A state of art review of parameters influencing measurements and modeling of skid resistance of asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 114, 602–617, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.002>

Kouchaki, S., Roshani, H., Hernandez, J.B., Prozzi, J., 2018. Field Investigation of Relationship between Pavement Surface Texture and Friction. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672(40), 395–407

Kulakowski, B.T., J.C. Wambold, C.E. Antle, C. Lin, and J.M. Mason, 1990. Development of a Methodology to Identify and Correct Slippery Pavements, FHWA-PA90-002+88-06. The Pennsylvania Transportation Institute, State College, Pennsylvania

Lubis, A.S., Muis, Z.A., Gultom, E.M., 2018. The effect of contaminant on skid resistance of pavement surface. *IOP Conf. Series, Earth and Environmental Science*, 126, p.7, doi: 10.1088/1755-1315/126/1/012040.

Mataei, B., Zakeri, H., Zahedi, M. and Nejad, F. 2016 Pavement Friction and Skid Resistance Measurement Methods: A Literature Review. *Open Journal of Civil Engineering*, 6, 537-565. doi: 10.4236/ojce.2016.64046.

Montgomery,D.C., Jennings,C.L., Kulahci,M. 2003. Introduction to time series analysis and forecasting, 2<sup>nd</sup> edition, Wiley

Meyer, W.E., 1982. Synthesis of Frictional Requirements Research. Report No. FHWA/RD-81/159, 477 Federal Highway Administration (FHWA), Washington, DC

## Βιβλιογραφία

Rizenbergs, R.L., 1968. Discussion on Skid Resistance of Pavement Surfaces. Report, Kentucky Department of Highways.

Sandburg, U. and Ejsmont, J. A. 2002. Tyre/Road Noise Reference Book, ISBN 91-631-2610-9, Informex, Kisa, Sweden.

Shakely, R.B., Henry J.J. and Heinsohn R. J., 1980. Effects of Pavement Contaminants on Skid Resistance. Transportation Research Record 788, 23-28

Smith, H. 1976. Pavement Contributions to Wet-Weather Skidding Accident Reduction, Transportation Research Record 622, Transportation Research Board, TRB, National Research Council, Washington, D.C.

Senga, Y., Dony, A., Colin, J., Hamlat, S. and Berthaud, Y. 2013. Study of the skid resistance of blends of coarse aggregates with different polish resistances. Construction and Building Materials. 48. 901-907. 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.040, Yves, France.

Viner, H.E., Sinhal, R., Parry, A.R., 2004. Review of UK skid resistance policy. Symposium on pavement surface characteristics of roads and airports, 5th World Road Association (PIARC), p.12.

Yingjian L., 2003. Effect of Pavement Temperature on Frictional Properties of Hot-Mix-Asphalt Pavement Surfaces at the Virginia Smart Road, Blacksburg, Virginia

Yu, M., Wu, G., Kong, L., Tang Y, 2017. Tire-Pavement Friction Characteristics with Elastic Properties of Asphalt Pavements. Applied Sciences, 7, 1123, doi:10.3390/app7111123

Yu, M., You, Z., Wue, G., Kong, L., Liu, C., Gao. J., 2020. Measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavement: A review. Construction and Building Materials, 260, 119878, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119878>

Σπηλιώτης Ε., Ν., 2017 Ανάπτυξη πλαισίου αυτοματοποιημένης προέκτασης χρονοσειρών μέσω της γενίκευσης της μεθόδου πρόβλεψης θ., Διδακτορική Διατριβή, Σχολή ΗΜΜΥ, ΕΜΠ

Πομόνη Μ., 2022. Διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας ασφαλτικών οδοστρωμάτων στο πλαίσιο της βιωσιμότητας των έργων οδικής υποδομής, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ