



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

**Χρήση Προσαρμοστικού Αλγορίθμου για τον Έλεγχο Κυκλοφορίας  
σε Αστικά Δίκτυα Μεγάλης Κλίμακας**

**Αλέξιος Βλάχος**

**Εξεταστική Επιτροπή**

Μιχαήλ Λαγουδάκης, Αν. Καθηγητής (Επιβλέπων, Η.Μ.Μ.Υ.)

Μιχαήλ Ζερβάκης, Καθηγητής (Η.Μ.Μ.Υ.)

Ιωάννης Παπαμιχαήλ, Καθηγητής (Μ.Π.Δ.)

Χανιά, Δεκέμβριος 2021

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς την τριμελή εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας, τους αξιότιμους καθηγητές κ.κ. Μιχαήλ Λαγουδάκη, Μιχαήλ Ζερβάκη και Ιωάννη Παπαμιχαήλ για την καθοδήγηση που μου πρόσφεραν κατά την εκπόνηση της εργασίας μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Μεταδιδακτορικό Ερευνητή στην Σχολή Μ.Π.Δ, κ. Μανώλη Διαμαντή για την επίβλεψη της εργασίας μου καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Τέλος, θα ήθελα ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την στήριξη και την ενθάρρυνση που μου πρόσφερε καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου στη Σχολή Η.Μ.Μ.Υ του Πολυτεχνείου Κρήτης.

# Περιεχόμενα

Περίληψη .....	5
Abstract .....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	7
Εισαγωγή και Ιστορική Αναδρομή .....	7
1.1 Φωτεινοί Σηματοδότες .....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	9
Συστήματα και Βρόχοι Ελέγχου .....	9
2.1 Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου .....	9
2.2 Διαδικασία βρόχου ελέγχου .....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	13
Βασικές Έννοιες - Ορισμοί Φωτεινής Σηματοδότησης .....	13
3.1 Έννοιες και τρόποι αστικού ελέγχου της κυκλοφορίας .....	13
3.2 Κύκλος, Φάση και Χρονική Μετατόπιση .....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....	16
Ευφυή και προσαρμοστικά συστήματα μεταφοράς και ελέγχου .....	16
4.1 Ευφυή συστήματα μεταφοράς και προσαρμοστικά συστήματα ελέγχου της κυκλοφορίας..	16
4.2 Συνδεδεμένα οχήματα .....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....	18
Πρόγραμμα Προσομοίωσης .....	18
5.1 Τι είναι Προσομοίωση .....	18
5.2 Ο μικροσκοπικός προσομοιωτής AIMSUN .....	18
5.2.1 Έλεγχος κυκλοφορίας .....	19
5.2.2 Το AIMSUN API .....	20
5.2.3 Παράμετροι προσομοίωσης .....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 .....	24
Στρατηγικές Ελέγχου Φωτεινών Σηματοδοτών .....	24
6.1 Μέθοδος Fixed Time .....	24
6.2 Μέθοδος Real Time .....	25

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7</b> .....	26
<b>Μέθοδοι Μάθησης και Αλγόριθμος AFT</b> .....	26
<b>7.1 Προσαρμοστικές και Νευρωνικές Μέθοδοι Μάθησης</b> .....	26
<b>7.2 Αλγόριθμος Adaptive Fine-Tuning (AFT)</b> .....	28
7.2.1 Εισαγωγή .....	28
7.2.2 Λειτουργία Adaptive Fine – Tuning (AFT) .....	28
7.2.3 Προσαρμοστής απόδοσης .....	29
7.2.4 Περιγραφή αλγορίθμου .....	30
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8</b> .....	33
<b>Εφαρμογή Adaptive – Tuning(AFT)</b> .....	33
8.1.1 Σταθερός Κύκλος ( Fixed Time) .....	33
8.1.2 Επιλογή Καταλλήλων Πράσινων.....	33
8.2 Μεταβλητές Λειτουργίας Adaptive Fine-Tuning (AFT) .....	34
8.3 Μέθοδος Εφαρμογής Adaptive Fine-Tuning (AFT) .....	36
8.3.1 Οδικά Δίκτυα που εφαρμόστηκε ο Adaptive Fine-Tuning (AFT).....	36
8.3.2 Λειτουργία Αλγορίθμου.....	38
8.3.3 Επιλογή μεταβλητών .....	39
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9</b> .....	43
<b>Αποτελέσματα Προσομοιώσεων με την Βοήθεια του AFT</b> .....	43
9.1.1 Δίκτυο 9 Κόμβων .....	46
9.2.1 Δίκτυο 16 Κόμβων .....	54
9.2.2 Δίκτυο 16 Κόμβων Τροποποιημένων Πρασίνων .....	68
9.3.1 Δίκτυο 25 Κόμβων .....	82
9.3.2 Δίκτυο 25 Κόμβων Τροποποιημένων Πρασίνων .....	95
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10</b> .....	110
<b>Συμπεράσματα</b> .....	110
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11:</b> .....	113
<b>Βιβλιογραφία</b> .....	113

## Περίληψη

Τα προηγούμενα χρόνια αναπτύχθηκε και μελετήθηκε ένας νέος αλγόριθμος με σκοπό να επιτευχθεί η αυτόματη ρύθμιση και παραμετροποίηση συστημάτων ελέγχου. Μία από τις εφαρμογές που διερευνήθηκαν ήταν και τα συστήματα ελέγχου κυκλοφορίας σε αστικά δίκτυα. Ο αλγόριθμος Adaptive Fine-Tuning (AFT) βρέθηκε ότι πετυχαίνει σημαντική βελτίωση των επιδόσεων των συστημάτων ελέγχου κυκλοφορίας σταθερού χρόνου, αλλά και βοηθά στην αντιστάθμιση των συνεπειών από τις συνεχείς αλλαγές που επιδρούν σε ένα σύστημα ελέγχου κυκλοφορίας από εξωτερικούς ή εσωτερικούς παράγοντες (αλλαγές συνθηκών των οδών, κοινωνικοοικονομικές αλλαγές, εποχικότητα).

Ένα μεγάλο αστικό δίκτυο συνεπάγεται και αυξημένο αριθμό παραμέτρων προς βελτιστοποίηση, γεγονός που όπως παρατηρήθηκε μειώνει ή ακόμη και μηδενίζει την αποτελεσματικότητα του AFT, μιας και θα χρειαζόταν πολύ περισσότερος χρόνος για να επιτευχθεί σύγκλιση των παραμέτρων σε κάποιο τοπικό ελάχιστο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα του AFT σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας και να βρεθούν τρόποι διαχωρισμού του δικτύου σε μικρότερα ανεξάρτητα μεταξύ τους υποδίκτυα. Στόχος είναι να βρεθεί τρόπος, ώστε η επιμέρους βελτιστοποίηση των υποδικτύων να οδηγεί ταυτόχρονα σε βελτίωση του συνολικού δικτύου.

Η εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής απαιτεί τη συλλογή δεδομένων από το δίκτυο στο οποίο θα εφαρμοστεί. Η συλλογή των δεδομένων για τη λειτουργία του AFT μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω εγκατάστασης αισθητήρων (π.χ. φωρατές ή κάμερες) είτε μέσω σημάτων που λαμβάνονται από συστήματα γεωγραφικού εντοπισμού (GPS) κινητών τηλεφώνων, τα οποία θα δίνουν τα απαραίτητα στοιχεία των συνδεδεμένων οχημάτων (connected vehicles). Με τη δεύτερη επιλογή πετυχαίνουμε σημαντική μείωση του κόστους και αυξημένη ακρίβεια σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους συλλογής δεδομένων.

# Abstract

In recent years, a new algorithm was developed and studied in order to achieve the automatic configuration and configuration of control systems. One of the applications investigated was traffic control systems in urban networks. The Adaptive Fine-Tuning (AFT) algorithm has been found to significantly improve the performance of fixed-time traffic control systems, but also helps to offset the effects of continuous changes affecting a traffic control system by external or internal factors (drivers' habit changes, socio-economic change, seasonality).

A large urban network also implies an increased number of parameters to be optimized, which has been observed to reduce or even nullify the effectiveness of AFT, as it would take much longer to achieve convergence of parameters to a local minimum. This diploma thesis attempts to investigate the effectiveness of AFT on large-scale networks and to find ways to separate the network into smaller, independent sub-networks. The aim is to find a way for the partial optimization of the subnets to simultaneously lead to the improvement of the overall network.

The application of this technology requires the collection of data from the network to which it will be applied. The collection of data for the operation of AFT can be achieved either through the installation of sensors (e.g., monitors or cameras), or through signals received from geographical positioning systems (GPS) of mobile phones, which provide the necessary data of the connected vehicles. With the second option we achieve a significant reduction in costs and increased accuracy compared to conventional data collection methods.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή και Ιστορική Αναδρομή

### 1.1 Φωτεινοί Σηματοδότες

Ο φωτεινός σηματοδότης (φανάρι) ανήκει σε μια κατηγορία σηματοδοτών, οι οποίοι ρυθμίζουν την ομαλή κυκλοφορία των οχημάτων με τη χρήση λαμπτήρων και φωτοβολούν εναλλασσόμενα και περιοδικά. Δημιουργός του πρώτου φωτεινού σηματοδότη υπήρξε ένας μηχανικός των βρετανικών σιδηροδρόμων, ο John Peake Knight τη δεκαετία του 1860. Αυτός ο σηματοδότης τοποθετήθηκε από τον ίδιο, το Δεκέμβριο του 1868, στο Λονδίνο, στη διασταύρωση των Bridge Street και Great George Street έξω από τη Βρετανική Βουλή. Ο σηματοδότης αυτός λοιπόν, ήταν ένα ανακατασκευασμένο σιδηροδρομικό φανάρι, με σηματοφόρους βραχίονες και με κόκκινες και πράσινες λάμπες. Οι λυχνίες αερίου ελέγχονταν από έναν μοχλό στη βάση τους, ώστε να φαίνεται προς την κυκλοφορία το κατάλληλο φως [1]. Στις αρχές του 20ού αιώνα, υπήρξαν ταυτόχρονες προσπάθειες κατασκευής φωτεινών σηματοδοτών κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες, αλλά και στην Ευρώπη. Σημαντικός σταθμός, ωστόσο, σε αυτή τη διαδρομή, ήταν η εφεύρεση του Ernest Sirrine, ο οποίος το 1910 εγκαινίασε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα φαναριών στο Σικάγο. Το συγκεκριμένο σύστημα φαναριών διέθετε αντίστοιχα δύο πινακίδες, “proceed” και “stop”, οι οποίες περιστρέφονταν γύρω από την κολώνα ώστε να ενημερώνουν τους οδηγούς [2]. Την σειρά του ήρθε να κάνει το πρώτο ηλεκτρικό φανάρι ύστερα από 2 χρόνια, το 1912, από τον αστυνομικό Lester Farnsworth Wire, ο οποίος παρουσίασε τα πρώτα ηλεκτρικά σήματα κυκλοφορίας, με ένα πράσινο και ένα κόκκινο φως. Αργότερα, τον Αύγουστο του 1914, ο James Hoge και η Αμερικάνικη Εταιρεία Φωτεινών Σηματοδοτών τοποθέτησε ένα σύστημα με δύο χρώματα, κόκκινο και πράσινο, και έναν βομβητή (buzzer) για να προειδοποιεί για τις αλλαγές [3]. Το τρίτο χρώμα, το κίτρινο, έκανε την εμφάνισή του το 1920 στο Ντιτρόιτ, από έναν ακόμη αστυνομικό-εφευρέτη, τον William Potts. Ο φωτεινός σηματοδότης των τριών χρωμάτων είχε την λογική που κυριαρχεί ακόμα και σήμερα. Η ώρα του αυτοματισμού ήρθε το 1922 από την Crouse Hinds, μία εταιρία που κατασκεύαζε σήματα για σιδηροδρόμους. Η πόλη της Νέας Υόρκης ήταν από τις πρώτες που υιοθέτησε τα αυτοματοποιημένα φανάρια [4].

Με την βιομηχανική ανάπτυξη και την εξέλιξη της τεχνολογίας τα οχήματα δεν φαντάζουν πλέον είδος πολυτελείας όπως παλαιότερα, αλλά αντιθέτως εργαλείο καθημερινής διευκόλυνσης, καθώς οι αποστάσεις που πρέπει να διανύσει ο άνθρωπος σε καθημερινή βάση έχουν αυξηθεί. Τα τελευταία χρόνια λόγω των γρήγορων ρυθμών ζωής το μεγαλύτερο ποσοστό του πληθυσμού, έχει μετακινηθεί σε μεγάλα αστικά κέντρα τόσο για βιοποριστικούς όσο και για κοινωνικούς λόγους. Αυτό έχει ως συνέπεια να εντοπίζεται μια ραγδαία αύξηση στη χρήση των ιδιωτικών οχημάτων. Οι αυξημένες ανάγκες μετακίνησης απαιτούν την ύπαρξη αστικών δικτύων, τα οποία διαθέτουν αυξημένη δυνατότητα εξυπηρέτησης, καθώς και την εντατικοποίηση της χρήσης φωτεινών σηματοδοτών για λόγους ασφάλειας. Η αύξηση της δυνατότητας εξυπηρέτησης των δικτύων επιτυγχάνεται με την δημιουργία νέων υποδομών, πράγμα δύσκολο τόσο από οικονομικής άποψης, όσο και από την πλευρά έλλειψης χώρου. Τα τελευταία 20 χρόνια κυριαρχεί η ιδέα ότι ακόμη και οι φωτεινοί σηματοδότες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών, συνεπώς, επιβάλλεται να εντοπιστούν τρόποι ώστε οι φωτεινοί σηματοδότες να ρυθμίζονται κατάλληλα με σκοπό να εξυπηρετούν τις οποιοσδήποτε απαιτήσεις του εκάστοτε δικτύου ανά πάσα στιγμή. Μέχρι πρότινος, η διαδικασία ρύθμισης φάνταζε κάτι αρκετά

δύσκολο, τόσο από άποψη χρόνου, όσο και κόστους, δίχως κάποιο μόνιμο αποτέλεσμα, εφόσον οι απαιτήσεις του δικτύου αλλάζουν συνεχώς. Επίλυση στο πρόβλημα έρχεται να δώσει η δημιουργία και χρήση του αλγορίθμου AFT. Μέσω του συγκεκριμένου αλγορίθμου προσφέρεται η δυνατότητα αυτοματοποίησης των ρυθμίσεων των φωτεινών σηματοδοτών, λαμβάνοντας υπόψιν τις τρέχουσες συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα του AFT σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας και να βρεθούν τρόποι διαχωρισμού του δικτύου σε μικρότερα ανεξάρτητα μεταξύ τους υποδίκτυα. Μέσω της προαναφερθείσας διαδικασίας στοχεύουμε στη μείωση του κόστους ρύθμισης των φωτεινών σηματοδοτών.

Ο αλγόριθμος AFT θα αναλυθεί στην συνέχεια, όπως και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που προέκυψαν για κάθε περίπτωση διαχωρισμού του δικτύου σε ανεξάρτητα υποδίκτυα. Τέλος, θα παρατεθούν συμπεράσματα και παρατηρήσεις.



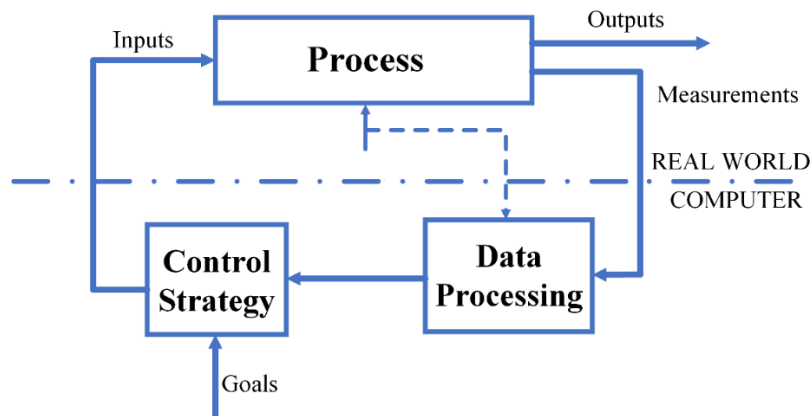
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## Συστήματα και Βρόχοι Ελέγχου

### 2.1 Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου

Η διαδικασία του αυτομάτου ελέγχου περιλαμβάνει μια σειρά τόσο από θεωρητικές μεθόδους, όσο και από πρακτικές ενέργειες, επιτρέποντας την ανάπτυξη τεχνικών συστημάτων, στοχεύοντας στην επίτευξη μέσω αυτόνομου τρόπου ενός αριθμού προκαθορισμένων ενεργειών. Στο παρακάτω γράφημα (*Σχήμα 2.1*) απεικονίζονται τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου. Η διαδικασία αυτή (π.χ. ροή κυκλοφορίας σε αστικό δίκτυο) περιλαμβάνει όλα τα φυσικά ή τεχνητά φαινόμενα που πρέπει να επηρεαστούν κατάλληλα με σκοπό να επέλθει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Οι αλλαγές στην δυναμική επεξεργασία εξαρτώνται από:

- Ορισμένες εξωτερικές ποσότητες, οι οποίες δεν εξαρτώνται από την δυναμική εξέλιξη της διαδικασίας (π.χ. στην περίπτωση του αστικού δικτύου κυκλοφορίας οι εξωτερικές ποσότητες μπορεί να θεωρηθούν τα φανάρια, η ζήτηση της κυκλοφορίας, το μοτίβο της προέλευσης-προορισμού, καθώς και οι περιβαλλοντικές συνθήκες).
- Η σωστή συμπεριφορά της διαδικασίας σύμφωνα με τις τεχνητές ή/και φυσικές συνθήκες (π.χ. οι χρόνοι ταξιδιού ή η αποθήκευση των ουρών των οχημάτων εντός του αστικού δικτύου, αλλά και η ροή των οχημάτων).



*Σχήμα 2.1: Βασικά στοιχεία ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου*

Οι εξωτερικές ποσότητες μπορούν να ταξινομηθούν σε:

- Είσοδοι (**Inputs**), οι τιμές των οποίων μπορεί να επιλέγονται από μια αποδεκτή περιοχή ελέγχου (π.χ. φωτεινοί σηματοδότες, μεταβλητά σήματα ελέγχου).
- Διαταραχές (**Disturbances**), των οποίων οι τιμές εκτίμησης δεν επιδέχονται διαχείριση, είναι πολύ πιθανόν όμως να είναι άμεσα μετρήσιμες, μέσω διαθέσιμων συσκευών ή να έχουν την δυνατότητα εκτίμησης ή πρόβλεψης μέσω κατάλληλων αλγορίθμων.

Ως αποτελέσματα (**outputs**) της διαδικασίας μπορούν να θεωρηθούν ποσότητες οι οποίες επιλέγονται για την αναπαράσταση της συμπεριφοράς του στοιχείου που μελετάται (π.χ. ως αποτέλεσμα μελέτης ενός αστικού δικτύου μπορεί να θεωρηθεί ο συνολικός χρόνος ταξιδιού ή το μήκος ουράς που δημιουργείται). Το μπλοκ επεξεργασίας δεδομένων (**data processing**) προσφέρει την δυνατότητα εκτίμησης ή/και πρόβλεψης διεργασιών, βασισμένο σε μετρήσεις πραγματικού χρόνου εσωτερικών ποσοτήτων ή διαταραχών της εκτελουμένης διαδικασίας. Σε ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου η παραπάνω διαδικασία, αναλαμβάνεται και εκτελείται με την βοήθεια ενός αλγορίθμου (την στρατηγική ελέγχου). Στόχος της στρατηγικής ελέγχου είναι ο καθορισμός της εισόδου του συστήματος σε πραγματικό χρόνο, με βάση τις διαθέσιμες εκτιμήσεις και προβλέψεις, επιδιώκοντας τους προκαθορισμένους στόχους και οδηγώντας στο επιθυμητό αποτέλεσμα της διαδικασίας, παρά τις διαταραχές που μπορεί να προκύψουν καθ' όλη την διάρκεια των ενεργειών. Σε σύγχρονα ή/και σε πολύπλοκα συστήματα, η στρατηγική ελέγχου, καθώς και οι αλγόριθμοι επεξεργασίας δεδομένων, εφαρμόζονται και εκτελούνται με την βοήθεια συνήθως ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή.

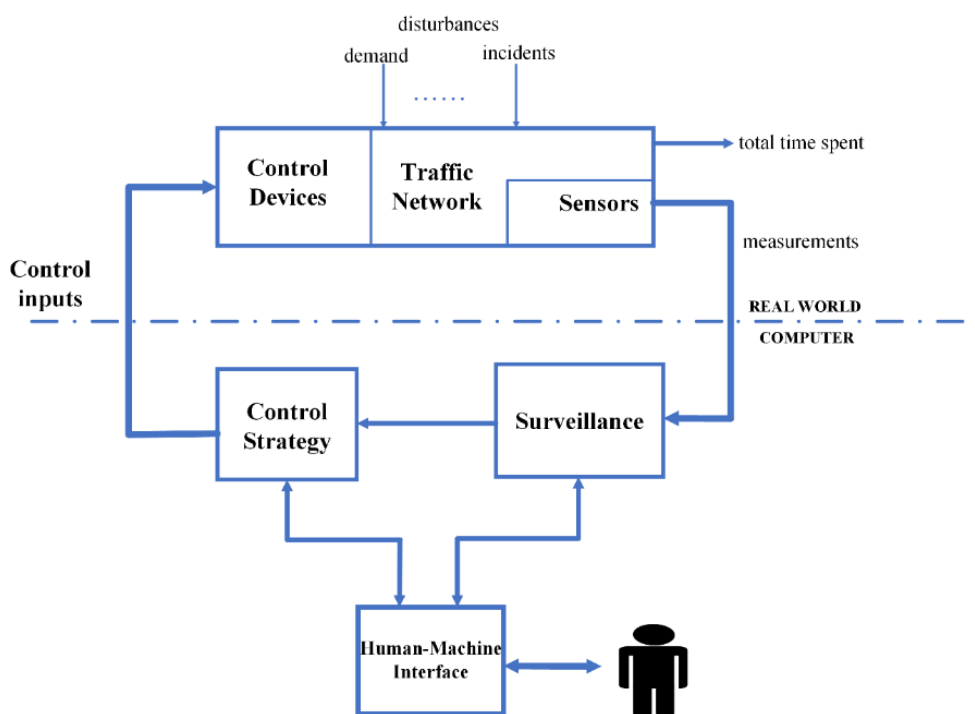
Ο προσδιορισμός των εισόδων αλλά και οι μετρήσεις για ένα συγκεκριμένο σύστημα αυτομάτου ελέγχου είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με διάφορα τεχνολογικά μοντέλα. Όσον αφορά στις στρατηγικές επεξεργασίας δεδομένων και πιο συγκεκριμένα τα μπλοκ στρατηγικής ελέγχου, αυτά αποτελούνται από «ευφυή» συστήματα. Τα παραπάνω προσφέρουν την δυνατότητα αντιμετώπισης της συμπεριφοράς του συστήματος με τρόπο αυτόνομο και αποτελεσματικό υπό οποιαδήποτε κατάσταση και αν βρεθεί, λόγω των διαταραχών που ίσως προκύψουν κατά την διάρκεια εκτέλεσης της διαδικασίας.

Στο σημείο αυτό πραγματοποιείται ένας ξεκάθαρος διαχωρισμός μεταξύ της έννοιας της στρατηγικής ελέγχου και του μαθηματικού μοντέλου. Η διαδικασία ανάλυσης ενός μαθηματικού μοντέλου περιλαμβάνει μια σειρά από εξισώσεις που περιγράφουν με ακρίβεια, τις εσωτερικές συνθήκες συμπεριφοράς της διαδικασίας, με βάση τις οποίες πραγματοποιείται μελέτη. Ως εκ τούτου, ένα μαθηματικό μοντέλο, το οποίο τροφοδοτείται με τιμές εισόδου και διαταραχής, έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί για να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός των αντίστοιχων τιμών εξόδου και άλλων εσωτερικών ποσοτήτων του συστήματος με σχετική ακρίβεια. Αντίστοιχα σε ένα μοντέλο αστικού δικτύου κυκλοφοριακής ροής που περιέχει φωτεινούς σηματοδότες, η κυκλοφοριακή ζήτηση και το μοτίβο προέλευσης- προορισμού έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των μηκών και των χρόνων διαδρομής για όλες τις αστικές ροές του δικτύου. Τα δυναμικά μοντέλα περιγράφουν την χρονική εξέλιξη των φαινομένων της διαδικασίας. Σε ένα δυναμικό μοντέλο για την ίδια διαδικασία, μπορεί να υπάρξουν αρκετά διαφορετικά χρήσιμα μοντέλα διαφορετικών επίπεδων ανάλυσης. Για παράδειγμα, όσον αφορά τη ροή της αστικής κυκλοφορίας, τα υπάρχοντα μοντέλα μπορούν να κατηγοριοποιούνται τόσο σε μικροσκοπικά ή μακροσκοπικά όσο και σε στατικά ή δυναμικά.

Από την άλλη πλευρά, μια στρατηγική ελέγχου μπορεί να θεωρηθεί και ένας αλγόριθμος ο οποίος λαμβάνει αποφάσεις σχετικά με τις ενέργειες ελέγχου που πρέπει να εφαρμοστούν εγκαίρως, οποιαδήποτε στιγμή υπολογίζοντας τις τιμές εισόδου ή και εξόδου. Ταυτόχρονα μια στρατηγική ελέγχου έχει την δυνατότητα να σχεδιαστεί με βάση ένα μαθηματικό μοντέλο ή μπορεί ακόμη να περιλαμβάνει ρητά ένα μαθηματικό μοντέλο ως μέσο αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας, της στρατηγικής ελέγχου σε πραγματικό χρόνο. Στο σημείο αυτό θεωρείται πολύ σημαντικό να πραγματοποιηθεί μια διάκριση ανάμεσα στο εργαλείο, το οποίο μιμείται την συμπεριφορά της διαδικασίας (μαθηματικό μοντέλο) και στο εργαλείο το οποίο λαμβάνει τις αποφάσεις ελέγχου (στρατηγική ελέγχου).

## 2.2 Διαδικασία βρόχου ελέγχου

Η αποτελεσματικότητα του κυκλοφοριακού ελέγχου εξαρτάται από τον τρόπο που πραγματοποιείται χρήση των μεθόδων ελέγχου. Επομένως η ανάπτυξη μιας αξιόπιστης στρατηγικής διαδικασίας για τον έλεγχο κυκλοφορίας απαιτεί τεράστια ευθύνη. Στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 2.2) απεικονίζονται τα βασικά στοιχεία ενός βρόχου ελέγχου, ο οποίος προσδιορίζει την διαδικασία ελέγχου κυκλοφορίας, καθώς πραγματοποιείται και επεξήγηση της διασύνδεσης των εμπλεκόμενων στοιχείων.



Σχήμα 2.2: Βρόχος ελέγχου της κυκλοφορίας

Η συμπεριφορά της κυκλοφοριακής ροής του δικτύου εξαρτάται από ορισμένες εξωτερικές ποσότητες που ταξινομούνται σε δύο ομάδες :

- Οι έλεγχοι εισόδου (**Control inputs**) οι οποίοι σχετίζονται άμεσα με αντίστοιχες συσκευές ελέγχου (φωτεινοί σηματοδότες). Ταυτόχρονα, οι έλεγχοι εισόδου έχουν την δυνατότητα να μπορούν να επιλέγουν από μια αποδεκτή περιοχή ελέγχου η οποία υπόκειται σε τεχνικούς, φυσικούς και λειτουργικούς περιορισμούς.
- Διαταραχές (**Disturbances**), των οποίων οι τιμές εκτίμησης δεν επιδέχονται διαχείριση όμως, είναι πολύ πιθανόν να είναι άμεσα μετρήσιμες (π.χ. ζήτηση) ή ανιχνεύσιμες ή προβλέψιμες σε ένα μελλοντικό χρονικό ορίζοντα. Οι τιμές των διαταραχών πρέπει να είναι οι πρώτες τιμές εισόδου για τις οποίες πρέπει να υπάρξει πληροφορία για τον σχεδιασμό μιας στρατηγικής ελέγχου.

Η έξοδος ή η απόδοση του δικτύου μετριέται μέσω κατάλληλων συντελεστών που καταλήγουν σε αποτελέσματα, όπως π.χ. η συνολική διάρκεια χρόνου που βρίσκονται τα οχήματα εντός του δικτύου. Μια σειρά απαραίτητων πληροφοριών άμεσα συνδεδεμένες με την είσοδο του συστήματος, μπορούν να θεωρηθούν οι πραγματικές μετρήσεις που προέρχονται από το εξωτερικό περιβάλλον (**real world**)

**measurements**) σχετικά με τα οχήματα, όπως η μέση ταχύτητα ή η θέση του οχήματος. Η παραπάνω πληροφορία μπορεί να ληφθεί είτε μέσω αισθητήρων είτε μέσω συνδεδεμένων οχημάτων (η συγκεκριμένη διαδικασία ακολουθείται σε αυτή τη διπλωματική εργασία) [5].

Επόμενο σημαντικό στάδιο του βρόχου ελέγχου θεωρείται η παρακολούθηση (**surveillance**). Σκοπός της παρακολούθησης είναι η ενίσχυση και η επέκταση των μετρήσεων που προέρχονται από κατάλληλους αισθητήρες (π.χ επαγωγικοί ανιχνευτές βροχών) ανάλογα με τις συνθήκες της στρατηγικής ελέγχου στην εκάστοτε περίπτωση. Σε ένα αυτόματο σύστημα ελέγχου ύστερα από την επιλογή και την αξιολόγηση των πληροφοριών εισόδου του, πραγματοποιείται ενσωμάτωσή του, στους αλγορίθμους στρατηγικής ελέγχου. Η στρατηγική ελέγχου αποτελεί το κύριο μέρος του βρόχου, καθώς αποτελείται από κατάλληλες συσκευές ελέγχου (π.χ. φωτεινούς σηματοδότες) προκαθορισμένων τιμών όσον αφορά τον χρόνο ή τις εισόδους ελέγχου, όπως οι πράσινοι χρόνοι για όλα τα στάδια των διασταυρώσεων. Στην περίπτωση που η στρατηγική ελέγχου δεν εκτελείται μέσω αλγορίθμων, αλλά με την βοήθεια ενός χειριστή, τότε υπάρχει ένα χειροκίνητο σύστημα ελέγχου. Οι πιο συνηθισμένοι δείκτες απόδοσης ενός βρόχου ελέγχου θεωρούνται ο συνολικός χρόνος που δαπανάται για όλα τα οχήματα εντός του δικτύου, η μέση καθυστέρηση και πυκνότητα των οχημάτων του δικτύου, καθώς και η μέση ταχύτητα του δικτύου με την πάροδο του χρόνου. Το κεντρικό σημείο του βρόχου ελέγχου θεωρείται η στρατηγική ελέγχου. Σκοπός της είναι ο καθορισμός των εισόδων ελέγχου σε πραγματικό χρόνο, βάσει των διαθέσιμων μετρήσεων/εκτιμήσεων, ώστε να υπάρξει επίτευξη των προκαθορισμένων στόχων (π.χ. ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου δαπάνης) παρά την επίδραση και ύπαρξη διαφόρων διαταραχών που μπορεί να προκύψουν κατά την διάρκεια αυτή.

Η αποτελεσματικότητα της στρατηγικής ελέγχου καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την αποτελεσματικότητα του συνολικού συστήματος ελέγχου. Ο σχεδιασμός των στρατηγικών ελέγχου απαιτεί μεγάλο ποσοστό προσοχής και πραγματοποιείται μέσω εφαρμογών τόσο με την βοήθεια ισχυρών και συστηματικών μεθόδων βελτιστοποίησης όσο και μέσω του αυτομάτου ελέγχου [5].

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## Βασικές Έννοιες - Ορισμοί Φωτεινής Σηματοδότησης

### 3.1 Έννοιες και τρόποι αστικού ελέγχου της κυκλοφορίας

Όπως έχει προαναφερθεί, οι φωτεινοί σηματοδότες στις διασταυρώσεις του δικτύου αποτελούν το κύριο εργαλείο ελέγχου της κυκλοφορίας στοχεύοντας στην ορθή λειτουργία των αστικών δικτύων, επιδιώκοντας ασφάλεια και βέλτιστη λειτουργία ανά πάσα στιγμή. Στην συνέχεια, παρατίθενται ένας αριθμός ορισμών των βασικών χαρακτηριστικών του αστικού ελέγχου της κυκλοφορίας:

- Μια **διασταύρωση** απαρτίζεται από έναν αριθμό προσεγγίσεων και την περιοχή διέλευσης.
- Ένας **δρόμος** μπορεί να έχει μια ή περισσότερες λωρίδες κυκλοφορίας αλλά πάντα δημιουργείται μια μοναδική και ανεξάρτητη ουρά. Οι δρόμοι χρησιμοποιούνται από αντίστοιχα ρεύματα κυκλοφορίας (οχήματα/ώρα).
- **Ροή κορεσμού** ορίζεται ως η μέση ροή ενός δρόμου όταν το αντίστοιχο ρεύμα έχει το δικαίωμα διέλευσης (r.o.w) και οι κατάντη δρόμοι δεν αποκλείονται από ουρές.
- **Δύο συμβατά ρεύματα** έχουν την δυνατότητα να διασχίσουν με ασφάλεια την διασταύρωση ταυτόχρονα. Στην περίπτωση που δεν επιτευχθεί το παραπάνω, τα ρεύματα αυτά καλούνται ανταγωνιστικά.
- **Κύκλος** ορίζεται ως μια επανάληψη της βασικής σειράς των συνδυασμών των σημάτων σε μια διασταύρωση και η διάρκεια αυτή καλείται χρόνος κύκλου.
- **Στάδιο** (ή φάση) ορίζεται ως ένα μέρος του κύκλου, κατά την διάρκεια του οποίου ένα σύνολο από ροές έχει δικαίωμα διέλευσης (r.o.w).
- **Σταθεροί χαμένοι χρόνοι** ορίζονται τα απαραίτητα χρονικά διαστήματα μερικών δευτερολέπτων ανάμεσα στα στάδια για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ ανταγωνιστικών ρευμάτων ως προς τις διαταραχές.

### 3.2 Κύκλος, Φάση και Χρονική Μετατόπιση

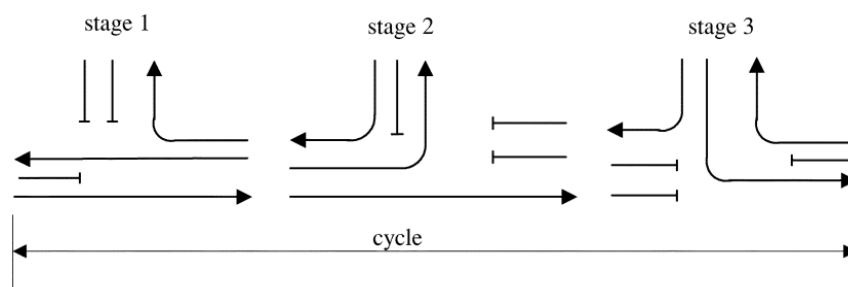
Η έννοια του ελέγχου των συστημάτων φωτεινής σηματοδότησης έως και σήμερα πραγματοποιείται μέσω τεσσάρων χαρακτηριστικών-παραμέτρων:

- Καθορισμός της σύστασης των φάσεων (**stage** ή **phase**).
- Προσδιορισμός της σχετικής διάρκειας κάθε φάσης (**split**).
- Μεταβολή διάρκειας κυκλοφοριακής περιόδου (**cycle**).
- Χρονική μετατόπιση (**offset**), εάν γίνεται αναφορά σε συντονισμένα συστήματα.

Με βάση τις παραπάνω παραμέτρους, το κάθε σύστημα έχει την δυνατότητα να υπολογίζει, αλλά και να επιλέγει την διάρκεια και την εναλλαγή ανάμεσα στις παραμέτρους των οποίων κάνει χρήση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να πραγματοποιείται διαχωρισμός όσο αναφορά την γενιά και την κατηγορία συστημάτων των φωτεινών σηματοδοτών.

Αρχικά, η παράμετρος **stage** (ή **phase**) καθορίζει την δομή των φάσεων για κάθε διασταύρωση. Πιο συγκεκριμένα, ορίζονται οι κυκλοφοριακές ροές, οι οποίες θα λαμβάνουν κατά την διάρκεια του κύκλου, πράσινο ή κόκκινο σήμα σε κάθε φάση. Την ίδια στιγμή καθορίζεται ο αριθμός και η σύσταση των φάσεων, στοχεύοντας στην αποτελεσματικότητα των διασταυρώσεων, καθορίζοντας τις αναμονές και τις

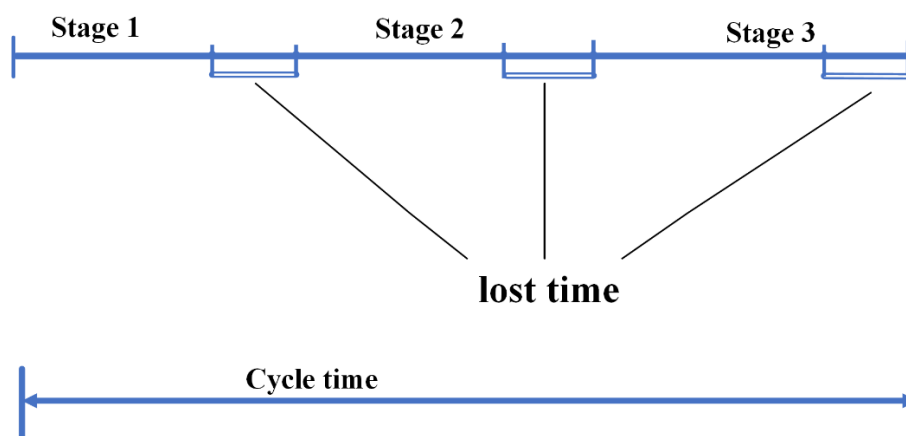
κινήσεις ενός ή περισσότερων κυκλοφοριακών ρευμάτων στην διάρκεια του κύκλου [5]. Σκοπός της παραπάνω διαδικασίας, θεωρείται η ύπαρξη περιορισμού του αριθμού των φάσεων, επιτρέποντας από κοινού, όπου είναι επιτρεπτό, όσο το δυνατόν περισσότερες κινήσεις, στοχεύοντας στην μείωση του χρόνου καθυστέρησης από περιττές φάσεις. Κυκλοφοριακά ρεύματα που δέχονται την ίδια στιγμή πράσινο σήμα σε μια φάση δεν θεωρούνται ανταγωνιστικά. Σε αντίθετη περίπτωση το παραπάνω δεν ισχύει καθώς αν υπάρξει ταυτόχρονη διέλευση δημιουργείται πρόβλημα ασφάλειας στη διασταύρωση. Στην συνέχεια παρατίθενται το γράφημα (Σχήμα 3.1) καθορισμού των φάσεων.



Σχήμα 3.1: Γράφημα καθορισμού των φάσεων

Κατόπιν, ορίζεται η παράμετρος προσδιορισμού της σχετικής διάρκειας κάθε φάσης (**split**) που είναι κομμάτι του χρόνου του κύκλου. Η διάρκεια αυτή πρέπει να είναι βελτιστοποιημένη σύμφωνα με την ζήτηση των εμπλεκόμενων ροών και υπολογίζεται ως η διάρκεια της φάσης διά την διάρκεια της κυκλοφοριακής περιόδου [5].

Ύστερα, ορίζεται και παρουσιάζεται στο γράφημα (Σχήμα 3.2) η παράμετρος καθορισμού του κύκλου (**cycle**) του συστήματος κυκλοφορίας, η οποία ισούται με το άθροισμα της διάρκειας κάθε φάσης συν το άθροισμα της διάρκειας των μεταβατικών σταδίων (**lost time**). Αυξάνοντας τη διάρκεια της κυκλοφοριακής περιόδου του κύκλου, παρατηρείται αύξηση της εξυπηρέτησης του αριθμού των οχημάτων στις διασταυρώσεις, καθώς μειώνεται η διάρκεια των μεταβατικών σταδίων. Ταυτόχρονα, όμως, αυξάνεται και ο χρόνος καθυστέρησης των οχημάτων στις διασταυρώσεις, λόγω των μεγάλων χρόνων αναμονής κατά την διάρκεια της κόκκινης φάσης [5].



Σχήμα 3.2: Γράφημα καθορισμού του κύκλου

Τέλος, αναλύεται η παράμετρος της χρονικής μετατόπισης (**offset**). Ορίζεται ως η διάρκεια του χρόνου σε δευτερόλεπτα από την έναρξη της πράσινης ένδειξης σε έναν φωτεινό σηματοδότη, έως ότου

εμφανιστεί πράσινη ένδειξη στον επόμενο σηματοδότη, στοχεύοντας στη δημιουργία του λεγομένου πράσινου κύματος κατά μήκος του δρόμου. Η συγκεκριμένη παράμετρος θα πρέπει να λάβει υπόψιν και την πιθανή ύπαρξη ουράς οχημάτων [5].



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## Ευφυή και προσαρμοστικά συστήματα μεταφοράς και ελέγχου

### 4.1 Ευφυή συστήματα μεταφοράς και προσαρμοστικά συστήματα ελέγχου της κυκλοφορίας

Τα ευφυή συστήματα μεταφοράς (ITS) πρωτοεμφανίστηκαν στην δεκαετία του 1970 προσφέροντας ένα ακριβές σύστημα διαχείρισης πληροφοριών πλήρως αποδοτικό σε πραγματικό χρόνο, αποτελώντας έτσι μια παγκόσμια καινοτομία. Τα συστήματα αυτά, αποτελούν ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών τεχνολογιών προσφέροντας ασφάλεια, αποτελεσματικότητα, αλλά και αξιοπιστία, χωρίς να αλλάζουν την υπάρχουσα φυσική υποδομή [6]. Περιλαμβάνουν αισθητήρες, συστήματα ελέγχου και επικοινωνίας, αλλά και πληροφοριακά συστήματα, όπου επηρεάζουν άμεσα κλάδους που σχετίζονται με την μεταφορά, την μηχανική, τις τηλεπικοινωνίες, την επιστήμη των υπολογιστών, αλλά και την αυτοκινητοβιομηχανία, λειτουργώντας θετικά τόσο στον δημόσιο όσο και στον ιδιωτικό τομέα.

Με την πάροδο των χρόνων, τα ευφυή συστήματα μεταφοράς εξελίχθηκαν σε προσαρμοστικά συστήματα ελέγχου κυκλοφορίας (ATCS), τα οποία ελέγχονται με την χρήση συσκευών ανίχνευσης και επιτήρησης μέσω ενός κεντρικού δικτύου επικοινωνίας. Τα παραπάνω συστήματα στοχεύουν στην προσαρμογή των πρότυπων συστημάτων κυκλοφορίας για κάλυψη της εκτιμώμενης ζήτησης, αλλά και την άμεση επικοινωνία με τους οδηγούς ενημερώνοντάς τους για την κυκλοφοριακή συμφόρηση που προκύπτει ανά πάσα στιγμή μέσω αντιγράφων ασφαλείας. Η πληροφορία για την κυκλοφοριακή συμφόρηση σε πραγματικό χρόνο προέρχεται είτε από αισθητήρες είτε από συστήματα GPS. Οι αισθητήρες μπορεί να είναι είτε ενσύρματοι είτε ασύρματοι, χρησιμοποιούνται κυρίως σε εξωτερικούς χώρους και σε δρόμους παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με την ταχύτητα με την οποία κινούνται τα οχήματα, την χωρητικότητα ενός συγκεκριμένου δρόμου, έχοντας παράλληλα την δυνατότητα να συλλέγουν πληροφορίες για τον τύπο του οχήματος, αλλά και την απόσταση μεταξύ των οχημάτων. Από την άλλη πλευρά τα συστήματα GPS χρησιμοποιούνται στο εσωτερικό των οχημάτων μεταδίδοντας πληροφορίες περιοδικά σχετικά με τη ακριβή θέση και την ταχύτητα του οχήματος, μέσω ενός κεντρικού συστήματος. Η εγκατάσταση αισθητήρων προσφέρει πληροφορίες για τις κυκλοφοριακές συνθήκες που αφορούν μόνο μια συγκεκριμένη περιοχή, καθώς για να υπάρξει μια πλήρης και ρεαλιστική εικόνα για όλο το δίκτυο απαιτείται εγκατάσταση μεγάλου αριθμού αισθητήρων, κάτι το οποίο ταυτόχρονα οδηγεί σε ένα μεγάλο οικονομικό κόστος [7]. Αντίθετα η χρήση GPS μας δίνει πιο φτηνή και πιο ολοκληρωμένη πληροφορία.

### 4.2 Συνδεδεμένα οχήματα

Η εμφάνιση των Ευφών Συστημάτων Μεταφορών (ITS) άνοιξε το δρόμο σε νέες καινοτομίες προσφέροντας προοπτικές τόσο για την βελτίωση της ασφάλειας, όσο και για την λειτουργία των δικτύων μεταφοράς. Υπάρχουν δύο κινητήριες δυνάμεις για την ανάπτυξη ασύρματης συνδεσιμότητας στα οχήματα. Η πρώτη είναι η επείγουσα ανάγκη βελτίωσης της αποτελεσματικότητας και της ασφάλειας των συστημάτων οδικών μεταφορών. Τα τελευταία χρόνια η αυξανόμενη αστικοποίηση έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη ενός τεράστιου αριθμού οχημάτων στις μεγαλουπόλεις, ο οποίος ευθύνεται για την κυκλοφοριακή συμφόρηση που έχει ως συνέπεια τόσο το οικονομικό κόστος, όσο και τα περιβαλλοντικά προβλήματα. Η δεύτερη είναι η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας και του διαδικτύου, το οποίο έχει ενταχθεί για τα καλά στην καθημερινότητα του ανθρώπου [8]. Ο όρος συνδεδεμένα οχήματα αναφέρεται σε εφαρμογές, υπηρεσίες, και τεχνολογίες που συνδέουν ένα όχημα ασύρματα με τον περιβάλλοντα χώρο.



Οι εφαρμογές αυτές περιλαμβάνουν οτιδήποτε έχει σχέση με την οδική ασφάλεια, την αποδοτικότητα και την κυκλοφορία του δικτύου, αλλά και τα συστήματα εντοπισμού θέσης (GPS) ανά πάσα στιγμή. Επίσης, υπάρχει προειδοποίηση για πιθανή αλλαγή κυκλοφοριακής λωρίδας ενός οχήματος, αλλά και εντοπισμός της βέλτιστης διαδρομής. Ταυτόχρονα, για τα συγκεκριμένα οχήματα έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες για την αποφυγή τυχόν ατυχημάτων εντός του δικτύου, βελτιώνοντας την κυκλοφοριακή συμφόρηση μέσω ευφυούς ελέγχου διαχείρισης της κυκλοφορίας, αλλά και προσφέροντας πληροφορίες για την τοποθεσία, την ταχύτητα και την κατεύθυνση των οχημάτων εντός μια συγκεκριμένης εμβέλειας. Πιο συγκεκριμένα, μέσω του αισθητήρα GPS υπάρχει η δυνατότητα γνώσης της θέσης των συνδεδεμένων οχημάτων μέσα στο αστικό δίκτυο. Με δεδομένη την πληροφορία αυτή υπολογίζεται η μέση ταχύτητα των οχημάτων και συνεπώς όλου του δικτύου υπολογίζοντας την απόσταση και τον χρόνο που χρειάστηκε για να διανύσει την παραπάνω απόσταση. Τα οχήματα, τα οποία περιλαμβάνουν διαδραστικά προηγμένα συστήματα υποβοήθησης οδηγού (ADASs) και έξυπνα συστήματα μεταφοράς (C-ITS) ονομάζονται συνδεδεμένα. Τα συστήματα ADASs για την λειτουργία τους βασίζονται σε κάμερες και σε αισθητήρες προσφέροντας μια πλήρη εικόνα στον χρήστη για την κατάσταση του δικτύου. Τα έξυπνα συστήματα μεταφοράς (C-ITS) διαχωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες: στην ασφάλεια και στην αποτελεσματικότητα της οδικής κυκλοφορίας, οι οποίες βασίζονται σε συγκεκριμένα πρωτόκολλα [9]. Οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν τα συνδεδεμένα οχήματα απαιτούν ασύρματη μετάδοση πληροφορίας, είτε επικοινωνώντας με άλλα συνδεδεμένα οχήματα (V2V) είτε με την οδική υποδομή (V2I) Η επικοινωνία μεταξύ συνδεδεμένων οχημάτων προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες μέσω ενός κεντρικού υπολογιστή με την βοήθεια αισθητήρων, οι οποίοι αφορούν την οδική ασφάλεια, την προειδοποίηση για πιθανή αλλαγή κυκλοφοριακής λωρίδας ενός οχήματος, αλλά και την βέλτιστη διαδρομή.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## Πρόγραμμα Προσομοίωσης

### 5.1 Τι είναι Προσομοίωση

Σύμφωνα με τον Shannon (1975), η προσομοίωση είναι «η διαδικασία σχεδιασμού ενός μοντέλου ενός πραγματικού συστήματος και η διεξαγωγή πειραμάτων μέσω του μοντέλου αυτού, με σκοπό είτε την κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος είτε την αξιολόγηση διαφόρων στρατηγικών εντός συγκεκριμένων ορίων που ορίζονται για τη λειτουργία του συστήματος». Η διαφορά και η δύναμη της προσομοίωσης διακριτών γεγονότων στηρίζεται στην ικανότητα να μιμείται τη δυναμική ενός πραγματικού συστήματος προσφέροντας τη δομή, τη λειτουργία, αλλά και τον μοναδικό τρόπο ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Την ίδια στιγμή προσφέρεται η δυνατότητα κατανόησης της συμπεριφοράς του συστήματος και η αξιολόγηση διαφόρων στρατηγικών εντός συγκεκριμένων ορίων που ορίζονται από έναν αριθμό κριτηρίων [10]. Για την πραγματοποίηση μιας προσομοίωσης γίνεται χρήση ενός λογισμικού που καλείται προσομοιωτής. Με άλλα λόγια προσομοιωτής είναι μια μηχανή η οποία αναπαριστά τις πραγματικές συνθήκες μιας δραστηριότητας, επιτρέποντας τη ρεαλιστική εκμάθησή της. Με την βοήθεια χρήσιμων εργαλείων που διαθέτουν οι προσομοιωτές προσφέρεται η δυνατότητα επεξεργασίας δεδομένων στοχεύοντας στην εξαγωγή συμπερασμάτων λειτουργίας του συστήματος υπό πραγματικές συνθήκες, καθώς και στην δημιουργία και στον έλεγχο αλγορίθμων ελέγχου υπό συνθήκες που ορίζει ο χρήστης. Συνεπώς, η βοήθεια του προσομοιωτή είναι τεράστια, τόσο όσον αφορά στη συμπεριφορά και στη λειτουργία του συστήματος, όσο και στην αποφυγή τυχόν αστοχιών πριν τεθεί το σύστημα σε πραγματικές συνθήκες.

### 5.2 Ο μικροσκοπικός προσομοιωτής AIMSUN

Το λογισμικό προσομοίωσης AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks) περιλαμβάνει έναν μικροσκοπικό προσομοιωτή κυκλοφορίας οδικών δικτύων και το περιβάλλον προσομοίωσης AIMSUN NG. Το συγκεκριμένο λογισμικό χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο συμπεριφοράς του αλγορίθμου AFT. Το AIMSUN παρέχει εξαιρετικά λεπτομερή μοντελοποίηση του δικτύου κυκλοφορίας σε ένα ικανοποιητικό σημείο προσφέροντας μεγάλο εύρος από δρόμους, φανάρια, διασταυρώσεις, αλλά και κατηγορίες οχημάτων (φορτηγό, αυτοκίνητο ή λεωφορείο). Ταυτόχρονα προσφέρει την δυνατότητα αλληλεπίδρασης του δρόμου με τα μέσα μαζικής μεταφοράς, αλλά και με τους πεζούς (μέσω του προσομοιωτή πεζών Legion) [11]. Επιπλέον, αποτελεί εργαλείο σχεδιασμού και αξιολόγησης κυκλοφοριακών συστημάτων και στρατηγικών ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης. Το παραπάνω λογισμικό προσφέρει μια γραφική απεικόνιση της απόδοσης του δικτύου κυκλοφορίας, παραθέτοντας στατιστικά δεδομένα (ροή, ταχύτητα, χρόνοι διαδρομής, καθυστερήσεις) και στοιχεία που συλλέγονται από φωρατές σε διάφορα σημεία στο τέλος της προσομοίωσης (αριθμός και ταχύτητα οχημάτων, πληρότητα δικτύου). Για την λειτουργία του προσομοιωτή απαιτείται η ύπαρξη δύο στοιχείων, του σεναρίου της προσομοίωσης (AIMSUN Scenario) και ενός συνόλου παραμέτρων, οι οποίες καθορίζουν το πείραμα (AIMSUN Experiment). Πιο συγκεκριμένα, το σενάριο της προσομοίωσης αντιστοιχεί στην περιγραφή του δικτύου, στην ζήτηση στις εισόδους του δικτύου, αλλά και στα σχέδια ρύθμισης της κυκλοφορίας. Ως παράμετροι προσομοίωσης θεωρείται ένα σύνολο από σταθερές τιμές (όπως χρόνος προσομοίωσης, περίοδος συλλογής στατιστικών δεδομένων), οι οποίες προσφέρουν ανάλυση του πειράματος. Ταυτόχρονα, προκύπτει και ένα σύνολο από μεταβαλλόμενες παραμέτρους οι

οποίες αλλάζουν κατά την διάρκεια της προσομοίωσης σκοπεύοντας στη ρύθμιση και στη βελτίωση της απόδοσης του μοντέλου (π.χ. χρόνος ανάδρασης) [12].

## **Παράμετροι εισόδου**

Η μικροσκοπική προσομοίωση χαρακτηρίζεται από το υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας με το οποίο μοντελοποιείται το σύστημα. Ο προσομοιωτής AIMSUN έχει την δυνατότητα να προσφέρει μοντελοποίηση σε υψηλό επίπεδο λειτουργίας καθορίζοντας τη διαθεσιμότητα και την ακρίβεια των δεδομένων εισόδου. Πιο συγκεκριμένα, το σενάριο της κυκλοφοριακής ζήτησης, το οδικό δίκτυο, αλλά και τα δεδομένα του κυκλοφοριακού ελέγχου.

## **Σχεδιασμός του δικτύου**

Μέσω του προσομοιωτή AIMSUN προσφέρεται η δυνατότητα σχεδιασμού ενός οδικού δικτύου οποιωνδήποτε απαιτήσεων που επιθυμεί ο χρήστης με μεγάλη ακρίβεια και λεπτομερή ανάλυση, οδηγώντας τον στην πλήρη κατανόηση της συμπεριφοράς του δικτύου. Η σύνθεση του μοντέλου του οδικού δικτύου αποτελείται από τμήματα δρόμων συγκεκριμένων κατευθύνσεων, οι οποίοι διαθέτουν έναν αριθμό από ιδιότητες τις οποίες ορίζει ο χρήστης επηρεάζοντας τον τρόπο κίνησης των οχημάτων εντός του οδικού δικτύου. Τα τμήματα δρόμου συνδέονται μεταξύ τους με κόμβους (διασταυρώσεις), οι οποίοι μπορούν να περιλαμβάνουν διαφορετικά χαρακτηριστικά κυκλοφορίας. Ταυτόχρονα, το μοντέλο προσφέρει την δυνατότητα τοποθέτησης φωτεινών σηματοδοτών, φωρατών αλλά και άλλων στοιχείων που εντοπίζονται σε ένα οδικό δίκτυο στο επιθυμητό σημείο, σκοπεύοντας στη λήψη μετρήσεων (ποσοστό κάλυψης δικτύου, αριθμός και ταχύτητα οχημάτων, πυκνότητα). Δίνεται έτσι η δυνατότητα στον χρήστη να επέμβει και να καθορίσει τις περισσότερες ιδιότητες των στοιχείων αυτών που αναφέρθηκαν παραπάνω, τα οποία συνθέτουν ένα οδικό δίκτυο.

## **Σενάριο ζήτησης**

Για την εκτέλεση της προσομοίωσης πρέπει να ορισθούν οι τιμές της κυκλοφοριακής ζήτησης, ένα σενάριο το οποίο θα επικρατήσει καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης στο οδικό δίκτυο. Οι τιμές αυτές ορίζονται από τον χρήστη για κάθε διαφορετικό τύπο οχήματος βάσει μιας πειραματικής υπόθεσης. Το σενάριο της ζήτησης έχει άμεση σχέση με τη ροή οχημάτων στις εισόδους του δικτύου και τα ποσοστά αλλαγής κατεύθυνσης σε κάθε κόμβο. Τα οχήματα παράγονται και εισάγονται στο δίκτυο από τα τμήματα εισόδου, ακολουθώντας μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών, η οποία χρησιμοποιεί ως μέση τιμή τη ροή οχημάτων στα τμήματα εισόδου που έχει ήδη οριστεί. Το AIMSUN εξορισμού κάνει χρήση εκθετικής κατανομής, επιτρέποντας όμως την επέμβαση και την τροποποίησή της οποιαδήποτε στιγμή από τον χρήστη.

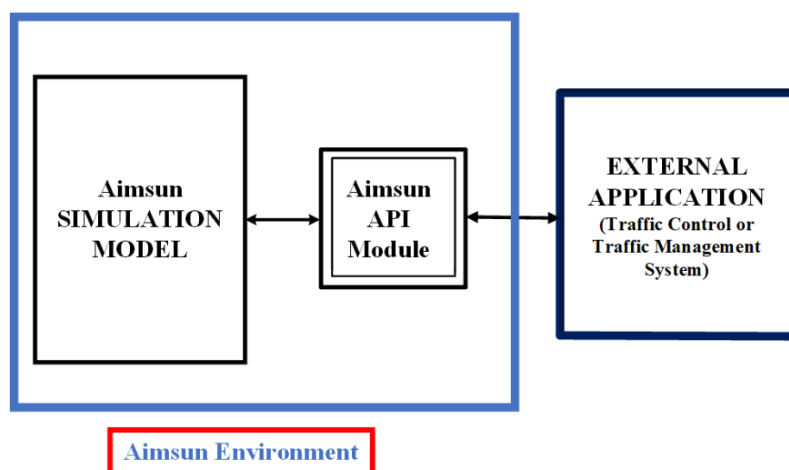
### **5.2.1 Έλεγχος κυκλοφορίας**

Ο προσομοιωτής AIMSUN διαθέτει διάφορους τρόπους ελέγχου κυκλοφορίας που εφαρμόζονται με την τοποθέτηση φωτεινών σηματοδοτών σε τμήματα του δρόμου ή σε κόμβους. Η εφαρμογή του ελέγχου κυκλοφορίας σε έναν αστικό κόμβο (διασταύρωση) του δικτύου λαμβάνει χώρα μέσω μιας προσέγγισης που βασίζεται σε κυκλοφοριακές φάσεις, όπου ο κύκλος σε κάθε κόμβο χωρίζεται σε φάσεις. Η κάθε φάση περιέχει ένα συγκεκριμένο σύνολο φωτεινών σηματοδοτών που λειτουργούν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, έχουν δηλαδή κυκλοφοριακή προτεραιότητα ταυτόχρονα. Για τον καθορισμό των φάσεων σε ένα σχέδιο ελέγχου χρησιμοποιούνται ως μονάδα μέτρησης τα δευτερόλεπτα. Η διάρκεια κάθε φάσης καθορίζει τη διάρκεια του πράσινου για την ομάδα των φωτεινών σηματοδοτών που έχουν αντιστοιχιστεί με τη φάση αυτή. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ελέγχου της κυκλοφορίας με τη χρήση του προσομοιωτή

AIMSUN, οι οποίοι εκτελούν ένα πλάνο σηματοδότησης. Αυτό εφαρμόζεται μέσω της τοποθέτησης φωτεινών σηματοδοτών σε τμήματα του δρόμου ή σε κόμβους, λαμβάνοντας υπόψη την δομή των φάσεων σε κάθε κόμβο. Η ρύθμιση του τρόπου λειτουργίας των ομάδων των φωτεινών σηματοδοτών πραγματοποιείται βάσει κάποιου σεναρίου ελέγχου κυκλοφορίας. Προσφέρεται έτσι στον χρήστη η δυνατότητα δημιουργίας και εκτέλεσης διαφορετικών πλάνων σηματοδότησης που ενεργοποιούνται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Ταυτόχρονα προσφέρεται η δυνατότητα εκτέλεσης ενός εξωτερικού πλάνου, τροποποιώντας την λειτουργία των φωτεινών σηματοδοτών, αλλάζοντας τη διάρκεια των φάσεων ή παραβλέποντας κάποιες φάσεις σε πραγματικό χρόνο. Συμπερασματικά, το πλάνο σηματοδότησης έχει την δυνατότητα μεταβολής κατά την περίοδο της προσομοίωσης. Οι παραπάνω δυνατότητες λαμβάνουν χώρα με την βοήθεια του λογισμικού AIMSUN API, η ανάλυση του οποίου θα πραγματοποιηθεί στην συνέχεια.

## 5.2.2 Το AIMSUN API

Το AIMSUN API (application programming interface) χρησιμεύει ως διεπαφή ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ του χρήστη και του περιβάλλοντος προσομοίωσης. Προσφέρει τη δυνατότητα στους χρήστες να προσαρμόζουν τις αλλαγές που επιθυμούν στην προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο, όπως συμπεριφορές οδηγού, χαρακτηριστικά οχήματος, στρατηγικές ελέγχου. Μέσω του AIMSUN API πραγματοποιείται η διασύνδεση μεταξύ του αλγορίθμου AFT και του AIMSUN. Ο προσομοιωτής AIMSUN διαθέτει μια λειτουργία API, η οποία ονομάζεται GETRAM Extension, όπου δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας οποιασδήποτε στρατηγικής ή πολιτικής θέλει ο χρήστης κάνοντας χρήση της γλώσσας C++ [13]. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται το γράφημα (Σχήμα 5.1) το οποίο αντιπροσωπεύει το σχέδιο πρωτοκόλλου επικοινωνίας AIMSUN API module.

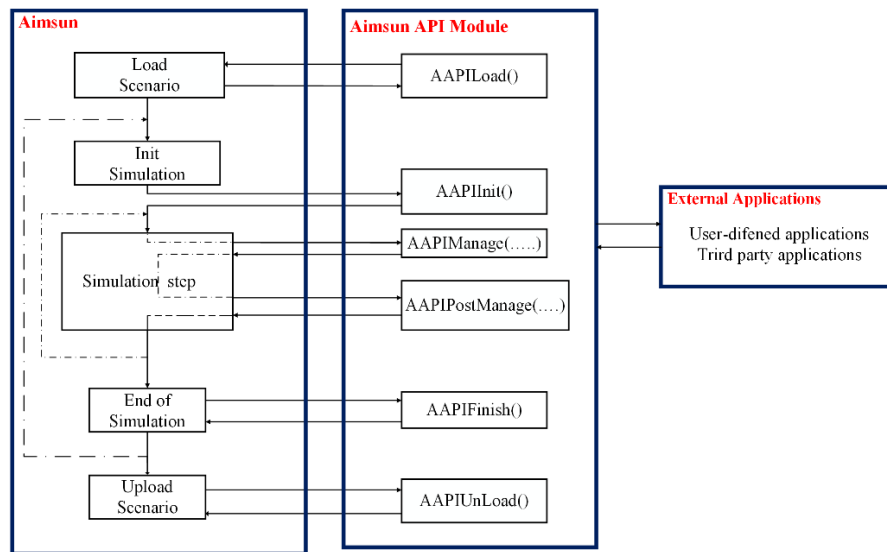


Σχήμα 5.1: Σχέδιο πρωτοκόλλου επικοινωνίας AIMSUN API module

Η μονάδα AIMSUN API τοποθετείται για λόγους λειτουργικότητας ανάμεσα στο μοντέλο προσομοίωσης AIMSUN και στην εξωτερική εφαρμογή που ορίζει ο χρήστης. Πιο συγκεκριμένα όπως φαίνεται και παραπάνω σχηματικά (Σχήμα 5.1) υπάρχει μια επικοινωνία ανάμεσα στο AIMSUN και στο AIMSUN API, η οποία λαμβάνει χώρα εντός του περιβάλλοντος του AIMSUN. Την ίδια στιγμή υπάρχει και μια δεύτερη επικοινωνία ανάμεσα στην μονάδα AIMSUN API και στην εξωτερική εφαρμογή που ορίζει ο χρήστης [14].

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι το API module επιτρέπει στους χρήστες να εφαρμόζουν μια διασύνδεση με την εφαρμογή AIMSUN, προσφέροντάς τους την δυνατότητα να έχουν πρόσβαση στις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις προσομοίωσης, τροποποιώντας αυτές κατάλληλα. Ταυτόχρονα, το API module διαθέτει έξι συναρτήσεις επικοινωνίας με το μοντέλο AIMSUN επιτρέποντας την τροποποίηση και την κατάλληλη προσαρμογή τους ανάλογα με τις ανάγκες εφαρμογής που ορίζει ο χρήστης. Πιο συγκεκριμένα, τα ονόματα και η ανάλυση των συναρτήσεων παρατίθενται στην συνέχεια (Σχήμα 5.2) με τη μορφή διαγράμματος ροής [15].

```
int AAPILoad() // the loading function;
int AAPInit() // the initialization function;
int AAPManage() // the main function called at initialization of a time step;
int AAPPostManage() // the main function called after completion of a time step;
int AAPIFinish() // the finishing function;
int AAPUnLoad() // the function for model uploading;
```



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα ροής API module

### 5.2.3 Παράμετροι προσομοίωσης

Απαιτείται ο προσδιορισμός ενός αριθμού παραμέτρων για την προετοιμασία και την εκτέλεση της προσομοίωσης που βρίσκεται μέσα στο Σενάριο (AIMSUN Scenario), στην Επανάληψη (AIMSUN Replication) και στο Πείραμα (AIMSUN Experiment). Στην συνέχεια πραγματοποιείται η ανάλυση κάθε παραμέτρου σε μεγαλύτερη έκταση.

#### Σενάριο (AIMSUN Scenario)

Το σενάριο περιλαμβάνει μια σειρά από δεδομένα που αφορούν στην εκτέλεσή του. Πιο συγκεκριμένα, εμπεριέχονται τα δεδομένα για το σενάριο ζήτησης στις εισόδους του δικτύου, οι κυκλοφοριακές ρυθμίσεις και τα σχέδια ελέγχου για την συλλογή των στατιστικών πληροφοριών κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Την ίδια στιγμή καθορίζεται και το αρχείο του AIMSUN API, μέσω του οποίου πραγματοποιείται η επικοινωνία του χρήστη με τον προσομοιωτή AIMSUN σε πραγματικό χρόνο.

## Επανάληψη (AIMSUN Replication)

Κάθε επανάληψη κάνει χρήση διαφορετικού φύτερου (seed) για τις γεννήτριες τυχαίων αριθμών που χρησιμοποιούν τα μοντέλα του προσομοιωτή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα κάθε επανάληψη να δίνει διαφορετικά αποτελέσματα, τα οποία διαφέρουν λίγο στις τιμές τους. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των επαναλήψεων, τόσο πιο έγκυρα θεωρούνται τα αποτελέσματα.

## Πείραμα (AIMSUN Experiment)

Το Πείραμα περιέχει πληροφορίες για την μοντελοποίηση της κίνησης των οχημάτων. Τα βασικά μοντέλα κίνησης των οχημάτων είναι το μοντέλο αλλαγής λωρίδας (Lane-Changing model) και το μοντέλο ακολουθίας οχημάτων (Car-Following model). Ταυτόχρονα, ορίζεται το χρονικό βήμα της προσομοίωσης, οι χρόνοι αντίδρασης των οχημάτων, αλλά και η κατανομή που χρησιμοποιείται για την παραγωγή οχημάτων στις εισόδους του δικτύου.

## Έξοδοι προσομοίωσης

Ο προσομοιωτής του AIMSUN μετά το τέλος της προσομοίωσης προσφέρει στον χρήστη ένα εικονικό παράθυρο που περιγράφει διάφορες πληροφορίες σχετικά με την συμπεριφορά του δικτύου όπως: ο χρόνος διαδρομής και ο χρόνος καθυστέρησης, η ταχύτητα και η ροή των οχημάτων. Ταυτόχρονα, μέσω του API και τη χρήση εικονικών φωρατών μπορούμε να παίρνουμε κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης στοιχεία από μεμονωμένα τμήματα του δικτύου, είτε ακόμη και στοιχεία από μεμονωμένα οχήματα. Επίσης, μπορούμε να έχουμε απεικόνιση της κατάστασης των φωτεινών σηματοδοτών κάθε χρονική στιγμή.

Πιο συγκεκριμένα, μετά το τέλος της προσομοίωσης προκύπτουν οι εξής παράμετροι:(*Πίνακας 5.1*):

Παράμετρος	Ανάλυση- Επεξήγηση παραμέτρου
Delay Time (sec/km)	Μέσος χρόνος καθυστέρησης ανά όχημα ανά χιλιόμετρο. Αυτή είναι η διαφορά ανάμεσα στον αναμενόμενο χρόνο ταξιδιού (ο χρόνος που χρειάζεται να διασχίσει το σύστημα υπό ιδανικές συνθήκες) και στον πραγματικό χρόνο ταξιδιού. Υπολογίζεται ως ο μέσος όρος όλων των οχημάτων και στην συνέχεια μετατρέπεται σε δευτερόλεπτα ανά χιλιόμετρο.
Density (veh/km)	Μέσος αριθμός οχημάτων ανά χιλιόμετρο για όλο το οδικό δίκτυο.
Flow (veh/h)	Ο αριθμός των οχημάτων που έχουν εισέλθει στο δίκτυο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.
Harmonic Speed (km/h)	Αρμονική ταχύτητα για όλα τα οχήματα τα οποία διέσχισαν το οδικό δίκτυο και έφτασαν στον προορισμό τους.
Max Virtual Queue (vehs)	Το μέγιστο μήκος εικονικής ουράς σε μια περιοχή του δικτύου, εκφράζεται με τον αριθμό των οχημάτων ανά λωρίδα.
Mean Vehicles in Queue (vehs)	Μέσος όρος οχημάτων που τοποθετούνται σε μια ουρά.
Mean Virtual Queue (vehs)	Το μέσο πλήθος οχημάτων που τοποθετούνται σε μια εικονική ουρά, καθώς ενώ έχει προγραμματιστεί η είσοδος των οχημάτων δεν υπάρχει αρκετός χώρος στις εισόδους του δικτύου. Ο ορισμός αυτών των εικονικών ουρών εξαρτάται από την κυκλοφορία και από την εξέλιξη της τεχνολογίας.
Number of Stops	Ο μέσος όρος από stop ανά όχημα, καθώς το όχημα βρίσκεται εντός του δικτύου και μετακινείται κατά την διάρκεια την προσομοίωσης.
Speed (km/h)	Ο μέσος όρος της ταχύτητας όλων των οχημάτων που έχουν διασχίσει το δίκτυο. Υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την μέση ταχύτητα του κάθε οχηματος ξεχωριστά.

Stop Time (sec/km)	Ο μέσος χρόνος ακινησίας ανά όχημα εντός του δικτύου καθώς μετακινείται εντός ενός τμήματος προς τον προορισμό του.
Total Distance Travelled (km)	Το συνολικό άθροισμα των χιλιομέτρων που διήνυσαν όλα τα οχήματα που μετακινήθηκαν εντός του οδικού δικτύου.
Total Travel Time (h)	Η διάρκεια του συνολικού χρόνου ταξιδιού για όλα τα οχήματα που βρίσκονται εντός του δικτύου ή έχουν περάσει από αυτό.
Travel Time (sec/km)	Ο μέσος χρόνος που χρειάζεται ένα όχημα για να διασχίσει ένα χιλιόμετρο.
Vehicles Inside (vehs)	Ο αριθμός των οχημάτων που βρίσκονται εντός του δικτύου αμέσως μετά από το πέρας της προσομοίωσης
Vehicles Outside (vehs)	Ο αριθμός των οχημάτων που εξυπηρετήθηκαν εντός του δικτύου και αποχώρησαν αμέσως μετά το πέρας της προσομοίωσης.

**Πίνακας 5.1:** Μεταβλητές του εικονικού παραθύρου του AIMSUN για την περιγραφή πληροφοριών που αφορούν στη συμπεριφορά του δικτύου



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### Στρατηγικές Ελέγχου Φωτεινών Σηματοδοτών

Για την ομαλή οδική κυκλοφορία και την αποφυγή συμφόρησης των οχημάτων εντός του οδικού δικτύου γίνεται χρήση φωτεινών σηματοδοτών. Η ρύθμιση των φωτεινών σηματοδοτών μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο μεθόδους, είτε με την μέθοδο των σταθερών χρόνων (fixed time), είτε μέσω αλγορίθμων πραγματικού χρόνου (real time). Στην πρώτη μέθοδο το πλάνο των φωτεινών σηματοδοτών είναι σταθερό και προκαθορισμένο από την αρχή. Στην πράξη, η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερο βαθμό. Από την άλλη πλευρά, οι μέθοδοι πραγματικού χρόνου κάνουν χρήση μετρήσεων που σχετίζονται με την κυκλοφοριακή ροή του δικτύου, έτσι ώστε να προσαρμόζουν κατάλληλα τους πράσινους χρόνους και τον κύκλο της φωτεινής σηματοδότησης. Η λεπτομερής ανάλυση της κάθε μεθόδου παρατίθεται στην συνέχεια.

#### 6.1 Μέθοδος Fixed Time

Η συγκεκριμένη μέθοδος ακολουθεί στρατηγικές σταθερού χρόνου, κάνοντας χρήση σταθερών δεδομένων ζήτησης και ποσοστών στροφών για τα διαφορετικά κυκλοφοριακά ρεύματα που έχουν προκύψει, όπου οι φωτεινοί σηματοδότες ρυθμίζονται ανάλογα με την ώρα. Ο τρόπος λειτουργίας τους ακολουθεί ένα συγκεκριμένο σταθερό μοντέλο κατά την διάρκεια των περιόδων της ημέρας. Μέσω ενός κεντρικού υπολογιστή, ο χρήστης καθορίζει το σταθερό πλάνο για τους φωτεινούς σηματοδότες για όλη την διάρκεια της ημέρας, βασιζόμενος σε ιστορικές μετρήσεις, κάνοντας επεξεργασία στατιστικών μοντέλων. Η διάρκεια του κύκλου, όσο και των πράσινων χρόνων των φαναριών, παραμένουν σταθερά καθ' όλη την διάρκεια του χρονικού διαστήματος που έχει καθοριστεί από τον χρήστη. Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία 'πράσινου κύματος', προσφέροντας προκαθορισμένες προτεραιότητες, όπου αυτό θεωρείται απαραίτητο. Επιπρόσθετα, για την λειτουργία και την εφαρμογή στρατηγικής σταθερού χρόνου δεν απαιτείται κεντρικά ελεγχόμενος εξοπλισμός. Από την άλλη πλευρά όμως, το μειονέκτημα των σταθερών χρονοδιαγραμμάτων, λόγω της δομής και της λειτουργίας τους, είναι ότι δεν έχουν την δυνατότητα να ανταπεξέλθουν σε τυχόν απρογραμματίστα περιστατικά (κυκλοφοριακά ατυχήματα, οδικές εργασίες), δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό οδική συμφόρηση, καθώς και διαταραχές στο οδικό δίκτυο. Επίσης, η ζήτηση μεταβάλλεται με το χρόνο ανάλογα με την εποχή, την οικονομική κατάσταση, τη ρυμοτομία, τις διαφοροποιήσεις στη χρήση γης, τις αλλαγές των συνηθειών των οδηγών, κλπ. Αποτέλεσμα αυτού είναι τα προγράμματα σταθερού χρόνου να μην ανταποκρίνονται στις νέες ανάγκες και να χρειάζονται ανασχεδιασμό, πράγμα που χρειάζεται μεγάλο κόστος και χρόνο. [16]

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εξετάζεται η βελτιστοποίηση ελέγχου σταθερού χρόνου ενός δικτύου, όπου στο τέλος της ημέρας θα πραγματοποιείται εφαρμογή του αλγορίθμου AFT, σκοπεύοντας στον καθορισμό του πλάνου της επομένης ημέρας, λαμβάνοντας υπόψιν την συλλογή των δεδομένων που έχει λάβει έως την εκάστοτε στιγμή. Η παραπάνω διαδικασία στοχεύει τα πλάνα σταθερού χρόνου να αυτορυθμίζονται με τις εκάστοτε ανάγκες του δικτύου και να μην στηρίζονται σε άλλες εκτιμήσεις. Η συλλογή των δεδομένων για την λειτουργία του αλγορίθμου AFT, πραγματοποιείται είτε μέσω αισθητήρων GPS, είτε με την βοήθεια συνδεδεμένων οχημάτων που διασχίζουν το δίκτυο. Καμία από τις δύο διαδικασίες συλλογής δεδομένων δεν απαιτεί μεγάλο κόστος σε πόρους ή χρήματα.



## 6.2 Μέθοδος Real Time

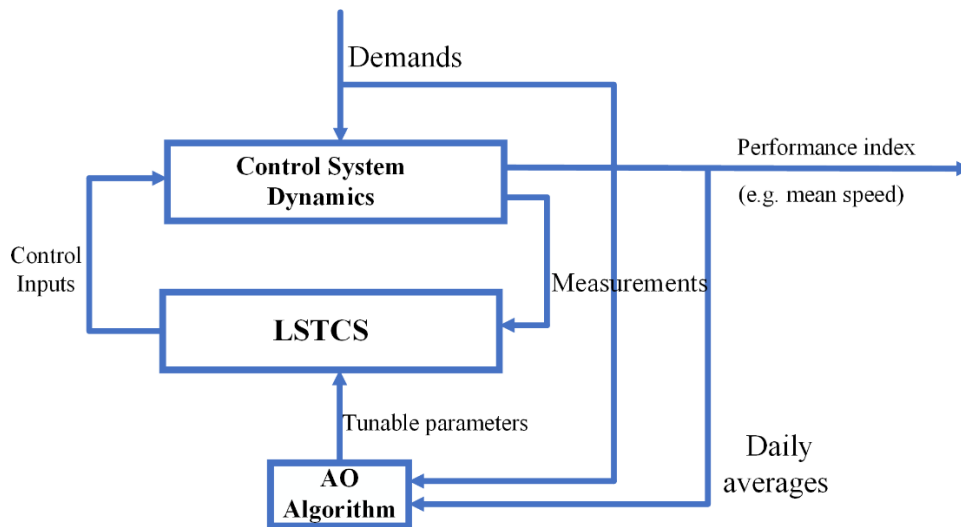
Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για την ρύθμιση φωτεινών σηματοδοτών σε πραγματικό χρόνο για τον υπολογισμό της ροής των οχημάτων. Η ρύθμιση αυτή πραγματοποιείται μέσω φωρατών ή GPS, συλλέγοντας πληροφορίες για τις συνθήκες του δικτύου, καθορίζοντας ανά πάσα στιγμή τον κύκλο, την φάση αλλά και τον χρόνο των πράσινων φαναριών, λαμβάνοντας ως κριτήριο την τρέχουσα ζήτηση και τις ανάγκες του δικτύου με σκοπό να βελτιστοποιηθεί η αντικειμενική συνάρτηση [17]. Η κυκλοφοριακή ροή υπολογίζεται από τον αριθμό των οχημάτων που διέρχονται από έναν συγκεκριμένο φωρατή, κατά την διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Τοποθετώντας φωρατές (αισθητήρες ελέγχου) σε κατάλληλα σημεία εντός του οδικού δικτύου, προσφέρεται η δυνατότητα υπολογισμού της ταχύτητας των οχημάτων. Οι στρατηγικές ελέγχου ενεργοποιούνται σε κάθε χρονικό διάστημα  $T$ , μετά το πέρας του χρονικού διαστήματος αυτού, χρησιμοποιούνται οι μέσες τιμές των μετρήσεων του ποσοστού κάλυψης ή της ροής των οχημάτων για την περίοδο που πέρασε, ώστε να υπολογιστεί η ροή των οχημάτων που θα εφαρμοστεί την επόμενη χρονική περίοδο. Μέσω της συγκεκριμένης μεθόδου αποφεύγεται η τεράστια συμφόρηση οχημάτων, καθώς αλλαγές στην ρύθμιση των φωτεινών σηματοδοτών πραγματοποιούνται ανά πάσα στιγμή. Αυτό έχει ως συνέπεια η αποτελεσματικότητα του οδικού δικτύου να είναι μεγάλη. Η συγκεκριμένη μέθοδος εμπεριέχει μια σειρά από μειονεκτήματα, όπως το μέγεθος και η συνδυαστική φύση βελτιστοποίησης του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, απαιτείται μεγάλη ακρίβεια όσον αφορά τις συνθήκες κυκλοφορίας, κάτι το οποίο οδηγεί σε μεγάλο κόστος υποδομών (μόνιμη εγκατάσταση κατάλληλων φωρατών) [17]. Την ίδια στιγμή υπάρχει επιτακτική ανάγκη ασφαλούς επικοινωνίας των φωρατών, τόσο με το κέντρο ελέγχου, όσο και με τους φωτεινούς σηματοδότες, παράμετρος που αυξάνει κατά πολύ το κόστος για την χρήση της μεθόδου αυτής. Παρά το παραπάνω γεγονός, οι στρατηγικές πραγματικού χρόνου θεωρούνται πιο αποτελεσματικές, συγκριτικά με τις στρατηγικές σταθερού χρόνου.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

## Μέθοδοι Μάθησης και Αλγόριθμος AFT

### 7.1 Προσαρμοστικές και Νευρωνικές Μέθοδοι Μάθησης

Ένας πιθανός τρόπος για να αποφευχθούν πιθανά προβλήματα είναι η ενσωμάτωση προσαρμοστικών σχεδιασμών (όπως νευρωνικοί μέθοδοι, μέθοδοι ασαφούς επαναληπτικής μάθησης) για την ενημέρωση των παραμέτρων του σχεδιασμού μη γραμμικών συστημάτων κυκλοφορίας μεγάλης κλίμακας (LSTCS). Οι μεθοδολογίες αυτές προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε αντίθεση με τις τεχνικές προσομοίωσης, οι οποίες στηρίζονται σε μια τεχνική θεωρητικής βάσης. Ο αλγόριθμος AFT, όπως και ο SPSA αλγόριθμος, ανήκουν στην οικογένεια των προσαρμοστικών μεθόδων βελτιστοποίησης (Adaptive optimization ή AO). Οι συγκεκριμένοι μέθοδοι αποτελούν μια πολύ καλή προσέγγιση για την ανάπτυξη συστηματικής μεθοδολογίας για τον ασφαλή και αποτελεσματικό έλεγχο εκτέλεσης και συντήρησης των μη γραμμικών συστημάτων κυκλοφορίας μεγάλης κλίμακας (LSTCS) [18]. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και παρακάτω σχηματικά (**Σχήμα 7.1**), παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας των μεθόδων (AO) για την αυτόματη προσαρμογή των συστημάτων LSTCS.



**Σχήμα 7.1:** Αρχή λειτουργίας των προσαρμοστικών μεθόδων βελτιστοποίησης (AO) για την αυτόματη προσαρμογή των συστημάτων LSTCS

Η βασική διαδικασία λειτουργίας των προσαρμοστικών μεθόδων βελτιστοποίησης (AO), μπορεί να συνοψισθεί ως εξής :

- Στο τέλος των κατάλληλα καθορισμένων περιόδων που έχουν επιλεγεί (π.χ. στο τέλος κάθε ημέρας), ο αλγόριθμος AO λαμβάνει την τιμή του πραγματικού (μετρούμενου) δείκτη απόδοσης (π.χ. μέση ταχύτητα στο οδικό δίκτυο για ένα χρονικό διάστημα), καθώς και μια σειρά από συγκεντρωτικές τιμές που προκύπτουν από εξωτερικούς παράγοντες (π.χ. ζήτηση).
- Χρησιμοποιώντας την μετρούμενη απόδοση (αριθμός που αυξάνεται από επανάληψη σε επανάληψη), ο αλγόριθμος AO υπολογίζει τις νέες συντονισμένες τιμές των παραμέτρων που θα εφαρμοστούν στο διάστημα της επομένης περιόδου (π.χ. την επόμενη ημέρα), τροποποιώντας τις

τιμές των νέων πράσινων χρόνων σηματοδότησης μέσω της στρατηγικής, στοχεύοντας στην βελτίωση της απόδοσης του δικτύου.

- Αυτή η (επαναληπτική) διαδικασία συνεχίζεται για πολλές περιόδους (π.χ. ημέρες) είτε έως ότου επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση, είτε έως ότου ικανοποιηθούν κάποια κριτήρια σύγκλισης του αλγορίθμου ΑΟ. Τότε ο αλγόριθμος ΑΟ μπορεί να παραμείνει ενεργός για συνεχή προσαρμογή ή μπορεί να απενεργοποιηθεί και να ενεργοποιηθεί ξανά σε μεταγενέστερο στάδιο (π.χ. μετά από μερικούς μήνες).

Η βασική ιδέα πίσω από τις περισσότερες μεθοδολογίες ΑΟ είναι η χρήση δύο διαφορετικών (αλλά συνυφασμένων) συντονισμένων φάσεων αλλαγών των παραμέτρων:

- Στη διαταραχή φάσης, η απόδοση του LSTCS εκτιμάται συναρτήσει μιας ή περισσότερων τυχαίων διαταραχών του τρέχοντος συνόλου των ρυθμιζόμενων παραμέτρων.
- Στην καθοδική κλίση φάσης, οι τρέχουσες συντονισμένες τιμές παραμέτρων τροποποιούνται με συγκεκριμένο τρόπο, στοχεύοντας στην αύξηση της απόδοσης, στη βάση μιας εκτίμησης της απόδοσης της κλίσης του LSTCS. Η κλίση μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τις τιμές του δείκτη απόδοσης (και των εξωτερικών παραγόντων) στην διαταραχή της φάσης.

Οι τυχαίες διαταραχές εισάγονται στις διαταραχές φάσεων, προκειμένου οι ΑΟ μηχανισμοί να διερευνήσουν επαρκώς την χωρο-κατάσταση των LSTCS σε σημείο που είναι σε θέση να καταλήγουν στην κατάλληλη απόφαση κάθε φορά. Σύμφωνα με πολλά ερευνητικά άρθρα και μελέτες, όσον αφορά τις μεθόδους αξιολόγησης ΑΟ, η εισαγωγή τυχαίων διαταραχών θεωρείται καθοριστική και απαραίτητη για την επιτυχή λειτουργία του συνολικού σχεδίου. Ο αστικός έλεγχος κυκλοφορίας, αλλά και η διαχείριση συγκοινωνιών, είναι μερικές από τις εφαρμογές συντήρησης LSTCS, όπου οι μέθοδοι αυτοί έχουν εφαρμοστεί και αξιολογηθεί μέσω εκτεταμένων μελετών προσομοίωσης.

Ο παραπάνω σχεδιασμός διαθέτει δύο βασικά μειονεκτήματα:

- Αν και υπάρχουν ορισμένες ΑΟ μέθοδοι, οι οποίες διαθέτουν ένα νευρωνικό δίκτυο εκπαίδευσης για την λήψη παλαιότερων γνώσεων, η πλειοψηφία των ΑΟ μεθόδων δεν διαθέτουν μηχανισμό ενσωμάτωσης της γνώσης που προέρχεται και καταγράφεται από το παρελθόν, σχετικά με την εξάρτηση της απόδοσης LSTCS, όσον αφορά τις συντονισμένες παραμέτρους και τους εξωτερικούς παράγοντες (ζήτηση). Σε περιπτώσεις όπου μια τέτοια εξάρτηση είναι μη γραμμική και εξαιρετικά πολύπλοκη, ο αλγόριθμος δεν έχει την δυνατότητα βελτίωσης της συνολικής απόδοσης του συστήματος LSTCS.
- Αξίζει να τονισθεί ότι η χρήση τυχαίων διαταραχών στους αλγορίθμους ΑΟ, ακόμα και με μια πολύ μικρή αλλαγή σε ένα σύνολο πολύ καλών ρυθμιζόμενων παραμέτρων, υπάρχει περίπτωση να οδηγήσει σε μη αποδεκτή και ασταθή συμπεριφορά, όσον αφορά την τιμή της απόδοσης του LSTCS. Για τον λόγο αυτό οι ΑΟ μέθοδοι έχουν το μειονέκτημα να μην μπορούν να εγγυηθούν ασφαλή και αποτελεσματική απόδοση κατά την διάρκεια διαταραχής της φάσης.

Η παραπάνω προσέγγιση συνδυάζει κατάλληλα, τα ευνοϊκά χαρακτηριστικά των αλγορίθμων ΑΟ με τα χαρακτηριστικά προσέγγισης και τους προσεγγιστικούς μηχανισμούς για την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας ΑΟ, που να μπορεί να βελτιωθεί αρκετά γρήγορα και αποτελεσματικά, όσον αφορά την βελτίωση των συστημάτων αυθαίρετης πολυπλοκότητας και κλίμακας (όπως τα συστήματα LSTCS), προσφέροντας εγγύηση για ασφαλή απόδοση, ενώ η λειτουργία συντήρησης εκτελείται.

## 7.2 Αλγόριθμος Adaptive Fine-Tuning (AFT)

### 7.2.1 Εισαγωγή

Ο πιο συνήθης τρόπος ρύθμισης ενός συστήματος φωτεινής σηματοδότης είναι η χρήση σταθερών χρόνων πρασίνου, όπως προκύπτουν από ιστορικά δεδομένα. Η επιλογή των κατάλληλων πράσινων αποτελεί μια χρονοβόρα αλλά και πολύπλοκη διαδικασία. Η δομή, αλλά και οι συνθήκες του δικτύου υπάρχει περίπτωση να υφίστανται αλλαγές ανά τακτά χρονικά διαστήματα, λόγω των κυκλοφοριακών αναγκών που συνεχώς αλλάζουν. Το παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα να απαιτείται τακτικά αλλαγή των πλάνων σηματοδότησης, ώστε το οδικό δίκτυο να έχει την δυνατότητα να ανταπεξέλθει στις εκάστοτε κυκλοφοριακές ανάγκες που θα προκύψουν. Λύση στο παραπάνω αυτό πρόβλημα έρχεται να δώσει ο αλγόριθμος AFT, ο οποίος έχει την δυνατότητα αυτόματης αλλαγής των πλάνων σηματοδότησης ανά κάποιο επιλεγμένο χρονικό διάστημα, προσφέροντας μέσα από έναν αριθμό επαναλήψεων βελτίωση στην μέση ταχύτητα του δικτύου, αποφεύγοντας με τον τρόπο αυτό την οδική συμφόρηση. Στην ουσία ο AFT προσαρμόζει τις παραμέτρους ενός συστήματος με σχετικά σταθερή μέση τιμή εξόδου, ώστε να προσαρμόζει το σύστημα στις υπάρχουσες συνθήκες. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, ο υπολογισμός των τιμών εξόδου πραγματοποιείται μέσω διαφόρων αισθητήρων GPS κινητών τηλεφώνων που διαθέτουν τα συνδεδεμένα οχήματα, καθώς θεωρείται μια οικονομική, αλλά ταυτοχρόνως αποτελεσματική επιλογή σε σχέση με άλλες συμβατικές μεθόδους. Ο αλγόριθμος AFT δημιουργήθηκε από τον καθηγητή Ηλία Κοσματόπουλο και πρωτοεμφανίστηκε το 2007 στο [19]. Έγινε ενδελεχής έρευνα το 2011 στην διδακτορική διατριβή του καθηγητή Αναστάσιου Κουβελά [20], και εφαρμόστηκε πιλοτικά και επιτυχημένα στο πεδίο και μάλιστα στο αστικό δίκτυο των Χανίων στο [21] από τον Δρ. Διαμαντή Μανώλη το 2016. Τότε προστέθηκαν και άλλες δυνατότητες στον αλγόριθμο ώστε να είναι ασφαλής η εφαρμογή του στο πεδίο χωρίς να επηρεαστεί η αποτελεσματικότητά του. Έκτοτε έχουν γίνει και άλλες μελέτες σε πιο πολύπλοκα αστικά δίκτυα που απέδειξαν ότι ο AFT δεν μπορεί να ανταπεξέλθει όταν ο αριθμός των παραμέτρων ενός συστήματος αυξάνεται σημαντικά [22]. Στην απάντηση αυτού του προβλήματος στοχεύει η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

### 7.2.2 Λειτουργία Adaptive Fine – Tuning (AFT)

Ο αλγόριθμος Adaptive Fine-Tuning ή AFT βασίζεται σε μη γραμμικές μεθόδους και είναι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης, ο οποίος μετά από μια σειρά επαναλήψεων καταφέρνει να ελαχιστοποιήσει το κριτήριο που του έχει δοθεί. Πιο συγκεκριμένα, η ιδέα της μεθόδου αυτής μπορεί να θεωρηθεί ως ένας συνδυασμός των αλγορίθμων RDSA και SPSA, οι οποίες κάνουν χρήση πολλών τυχαίων διαταραχών της συντονισμένης παραμέτρου  $\theta$  για κάθε επανάληψη  $k$  του αλγορίθμου. Ωστόσο, δεν απαιτείται η εκτέλεση της προσομοίωσης, καθώς για τα τυχαία διανύσματα της συμβαίνει εκτίμηση της γενικής προσέγγισης  $\hat{J}(\theta, \chi)$  [18].

Τα κύρια συστατικά του αλγορίθμου αναφέρονται στην συνέχεια.

- Ένας προσεγγιστής  $\hat{J}(\theta, \chi)$  (νευρωνικό δίκτυο ή ένας πολυώνυμος προσεγγιστής) χρησιμοποιείται προκειμένου να ληφθεί μια προσέγγιση της μη γραμμικής χαρτογράφησης  $\hat{J}(\theta, x) = J(\theta, x)$ .
- Ένας μηχανισμός προσαρμογής/μάθησης χρησιμοποιείται για την «εκπαίδευση» του προσεγγιστή.

- Για κάθε επανάληψη  $k$  του αλγορίθμου, παράγονται πολλές τυχαίες επιλεγμένες υποψήφιες διαταραχές (διάστασης  $n_\theta$ ) του διανύσματος. Η επίδραση κάθε διαταραχής για την απόδοση του LSTCS εκτιμάται με τη χρήση του προσεγγιστή που αναλύθηκε παραπάνω. Η διαταραχή που αντιστοιχεί στην “καλύτερη” εκτίμηση (δηλαδή, αυτή η διαταραχή που οδηγεί στην καλύτερη τιμή για την μεταβλητή  $\hat{J}$ ) επιλέγεται για την απεικόνιση των νέων τιμών για τις ρυθμιζόμενες παραμέτρους  $\theta_{k+1}$ . Πιο συγκεκριμένα το  $\theta_{k+1}$  αντιστοιχεί την καλύτερη εκτίμηση του  $\hat{J}$ , που έχει επιλεγεί για να εφαρμοστεί στην επόμενη περίοδο (π.χ. την επόμενη ημέρα).

### 7.2.3 Προσαρμοστής απόδοσης

Για την προσέγγιση της αντικειμενικής συνάρτησης  $J(\theta, x)$  χρησιμοποιείται ένας πολυωνμικός προσεγγιστής με παλινδρομικούς όρους  $L_g$  και λαμβάνει την μορφή  $\hat{J}(\theta, x) = \mathcal{G}^T \phi(\theta, x)$ , όπου η παράμετρος  $\mathcal{G}$  εκφράζει τον πίνακα της εκτίμησης της παραμέτρου προσέγγισης  $\phi(\theta, x) = [\phi_1(\theta, x), \phi_2(\theta, x), \dots, \phi_{L_g}(\theta, x)]^T$ . Οι μη γραμμικές συναρτήσεις  $\phi_i(\theta, x)$  προκύπτουν από τον τύπο  $\phi_i(\theta, x) = S^{d_1}(\theta_{m_1}) \cdot \bar{S}^{d_2}(x_{m_2}) \cdot S^{d_3}(\theta_{m_3})$ ,  $d_i \in \{0, 1\}$  όπου  $d_1, m_i$  επιλέγονται τυχαία για κάθε επανάληψη του αλγορίθμου AFT (με  $m_1, m_3 \in \{1, 2, \dots, n_\theta\}$ ,  $m_2 \in \{1, 2, \dots, n_x\}$  και  $\sum_i m_i \in \{2, 3\}$ ) και  $S(\cdot)$ ,  $\bar{S}(\cdot)$  θεωρούνται ομαλά μονότονες μη γραμμικές συναρτήσεις. Στην εφαρμογή αυτή επιλέγεται  $S(\theta) = \tanh(\lambda_1 \theta + \lambda_2)$ ,  $\bar{S}(x) = \tanh(\lambda_3 x + \lambda_4)$  όπου  $\lambda_i$  μη αρνητικοί πραγματικοί αριθμοί προκαθορισμένοι αρχικά από τον χρήστη. Ύστερα από τέσσερις-πέντε επαναλήψεις του αλγορίθμου οι τιμές του  $\lambda_i$  βελτιστοποιούνται και ελαχιστοποιούνται ως εξής  $\min \sum_{\ell=1}^{k-1} (J_\ell - \mathcal{G}^T \phi_\ell^{(k)})^2$  [18].

Στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 7.1**) ορίζονται οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για την λειτουργία του αλγορίθμου.

$k$	Ορίζει τον δείκτη επανάληψης.
$\ell$	Ορίζει τον δείκτη των προηγούμενων μετρήσεων απόδοσης.
$J_\ell$	Ορίζει την τιμή απόδοσης για το $\ell$ -οστό πείραμα βαθμονόμησης.
$\hat{J}_\ell$	Ορίζει μια εκτίμηση του $J_\ell$ που λαμβάνεται στην $\ell$ -οστή επανάληψη.
$\theta_k$	Ορίζει το διάνυσμα των ρυθμιζόμενων παραμέτρων στο $k$ -οστό πείραμα βαθμονόμησης.
$\theta_k^*$	Ορίζει το καλύτερο σύνολο ρυθμιζόμενων παραμέτρων μέχρι το $k$ -οστό πείραμα.
$x_k$	Ορίζει τα εξωγενή σήματα.
$\bar{x}_k$	Ορίζει μια εκτίμηση/πρόβλεψη των εξωγενών σημάτων $x_k$ .
$\Delta_{k,i}^{(j)}$	Ορίζει τυχαίες ακολουθίες (πχ Gaussian), με $i \in \{1, 2, \dots, n_\theta\}$ .
$\Delta \theta_k$	Ορίζει την διαταραχή που έχει επιλεγεί από τον αλγόριθμο.

**Πίνακας 7.1:** Μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στο AFT

### Ανάλυση

Ο παραπάνω πίνακας περιγράφει τις παραμέτρους σχεδιασμού και τις μεταβλητές που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος AFT. Για να εφαρμογή του αλγορίθμου AFT, γίνεται θεώρηση ότι υπάρχει μια εκτίμηση ή

πρόβλεψη  $\bar{x}$  του διανύσματος  $\bar{x}$  (αναφορικά με την εκτίμηση της επομένης επανάληψης). Σε πολλές εφαρμογές μια τέτοια υπόθεση είναι αρκετά ρεαλιστική, αφού οι τιμές του  $\theta_k$  αντιστοιχούν σε πραγματικές διαθέσιμες και μετρήσιμες καταστάσεις του συστήματος ή σε εξωγενή σήματα. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις όπου μια τέτοια υπόθεση δεν είναι ρεαλιστική. Σε αυτές τις περιπτώσεις η μεταβλητή  $\bar{x}_k$  έχει την δυνατότητα να εκτιμηθεί/προβλεφθεί κάνοντας χρήση κατάλληλων αλγορίθμων εκτίμησης. Τονίζεται ότι η διάσταση  $n_x$  του διανύσματος υπολογισμού  $\bar{x}$  θα πρέπει να είναι συγκρίσιμη με την διάσταση  $n_\theta$  του διανύσματος συντονισμένων παραμέτρων  $\theta$ .

Σε αντίθεση με άλλες εφαρμογές των νευρωνικών προσεγγίσεων ο αριθμός των νευρώνων  $\bar{L}_g$  θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος, ώστε να εγγυάται την αποτελεσματική προσέγγιση σε ολόκληρο το σύνολο των εισόδων των παραμέτρων, κάτι τέτοιο όμως δεν είναι απαραίτητο στην περίπτωση αυτή. Στην περίπτωση προτεινομένου αλγορίθμου, το μόνο που χρειάζεται είναι ο προσεγγιστής  $\hat{J}$  να διαθέτει αρκετούς όρους παλινδρόμησης για να καταλήξει σε μια προσέγγιση της άγνωστης συνάρτησης  $J$  κοντά στον «εγγύτερο γείτονα», γύρω από το πιο πρόσφατο διάνυσμα  $\theta_k$ .

#### 7.2.4 Περιγραφή αλγορίθμου

Ο παρακάτω πίνακας (*Πίνακας 7.2*) παρουσιάζει βήμα-βήμα την περιγραφή της εφαρμογής του αλγορίθμου AFT. Να τονιστεί ότι με παρόμοιο τρόπο με τον αλγόριθμο RDSA, ο προτεινόμενος αλγόριθμος εισάγει τυχαίες διαταραχές στο διάνυσμα παραμέτρων ελέγχου  $\theta$ . Επιπλέον, η χρήση τυχαίων διαταραχών είναι πολύ κρίσιμη για την αποτελεσματικότητα του προτεινομένου αλγορίθμου, καθώς παρέχει την λεγόμενη εμμονή της ιδιότητας διέγερσης (Persistence of Excitation PE), η οποία αποτελεί επαρκή και απαραίτητη προϋπόθεση για τον νευρωνικό εκτιμητή  $\hat{J}$  να είναι σε θέση να μάθει αποτελεσματικά την άγνωστη συνάρτηση  $J$ .

Τα παρακάτω βήματα οδηγούν στην μαθηματική περιγραφή του αλγορίθμου AFT [18].

<b>Βήμα 1:</b>	$\Delta\theta_{k,i}^{(j)} = \alpha_k \Delta_{k,i}^{(j)} - \theta_{k-1,i} + \theta_{k-1,i}^*, j \in \{1, \dots, K\}$
<b>Βήμα 2:</b>	$L_g^{(k)} = \min\{2(k-1), \bar{L}_g\}$
<b>Βήμα 3:</b>	$l_k = \max\{k - T_h, 1\}$
<b>Βήμα 4:</b>	$\varphi_\ell^{(k)} = \varphi^{(k)}(\theta_\ell, \bar{x}_\ell)$
<b>Βήμα 5:</b>	$\mathcal{G}_k \mapsto \arg \min_{\mathcal{G}} \frac{1}{2} \sum_{\ell=l_k}^{k-1} (J_\ell - \mathcal{G}^T \varphi_\ell^{(k)})^2$
<b>Βήμα 6:</b>	$\hat{J}_k(\pm \Delta\theta_k^{(j)} + \theta_k^*, \bar{x}_k) = \mathcal{G}_k^T \varphi^{(k)}(\pm \Delta\theta_k^{(j)} + \theta_k^*, \bar{x}_k)$
<b>Βήμα 7:</b>	$\Delta\theta_k = \arg \max_{\Delta\theta_k^{(\pm j)}} \hat{J}_k(\pm \Delta\theta_k^{(j)} + \theta_k^*, \bar{x}_k)$

*Πίνακας 7.2: Μαθηματική περιγραφή του αλγορίθμου AFT*

Παρακάτω παρατίθενται η επεξήγηση κάποιων μεταβλητών για μεγαλύτερη διευκόλυνση.

$\alpha_k$	Μαθηματική ακολουθία που ορίζεται από τον χρήστη. Π.χ συνεχές μέγεθος βήματος $\alpha_k \equiv \alpha \in (0,1)$
$T_h, L_g, K$	Θετικοί ακέραιοι οι οποίοι καθορίζονται από τον χρήστη.
$\theta_k^* + \Delta\theta_k$	Υποδηλώνει το διάνυσμα των ρυθμιζόμενων παραμέτρων που επιλέχθηκαν για να εφαρμοστούν στο επόμενο πείραμα k+1.

**Πίνακας 7.3:** Επεξήγηση μεταβλητών των μαθηματικών τύπων.

Ωστόσο, λόγω της χρήσης του βήματος 6 (βλ. **Πίνακας 7.2**) η προτεινόμενη μεθοδολογία έχει την δυνατότητα αποφυγής προβλημάτων κακής απόδοσης ή αστάθειας, οδηγώντας σε μια ασφαλή και αποτελεσματική απόδοση με την προϋπόθεση ότι πραγματοποιείται τήρηση των τιμών των περιορισμών.

Στο σημείο αυτό παρατίθεται λεπτομερής ανάλυση των βημάτων εφαρμογής του αλγορίθμου που εμφανίζονται στον πίνακα παραπάνω (βλ. **Πίνακας 7.2**), των οποίων η εκτέλεση πραγματοποιείται σε κάθε επανάληψη  $k$  :

**Βήμα 1:** Υπολογισμός των  $k$  τυχαίων διαταραχών. Στο σημείο αυτό υπολογίζονται οι τυχαίες διαταραχές  $k$  (σύμφωνα με π.χ. Gaussian κατανομή). Τα υποψήφια διανύσματα (τελεστές) που προκύπτουν  $\theta_i(k+1) = \theta_i^*(k) + \Delta\theta_i(k+1)$  στην συνέχεια προβάλλονται πάνω στην παράμετρο  $\theta$  προκειμένου να ικανοποιηθούν οι περιορισμοί του προβλήματος.

**Βήμα 2:** Υπολογισμός του αριθμού των όρων της παλινδρομικής προσέγγισης. Ο αριθμός των όρων παλινδρόμησης του προσεγγιστή  $L_g(k)$  που θα χρησιμοποιηθεί για αυτήν την επανάληψη.

**Βήμα 3:** Υπολογισμός του αριθμού των προηγούμενων μετρήσεων. Ο αλγόριθμος κρατά ένα παράθυρο προηγούμενων μετρήσεων που κινείται μαζί με τις επαναλήψεις. Στο βήμα αυτό πραγματοποιείται υπολογισμός του σημείου εκκίνησης του παραθύρου στο παρελθόν. Το τελικό σημείο του παραθύρου είναι πάντα  $k$  .

**Βήμα 4:** Παραγωγή προσεγγιστή υπό την μορφή πολωνύμου. Μετά τα βήματα 2 και 3 η δομή του καθολικού προσεγγιστή μπορεί να σχηματιστεί και να εφαρμοστεί στο παράθυρο των προηγούμενων μετρήσεων.

**Βήμα 5:** Υπολογισμός των βέλτιστων εκτιμήσεων των παραμέτρων προσέγγισης. Οι βέλτιστες τιμές του προσεγγιστή των παραμέτρων  $\theta$  υπολογίζονται σύμφωνα με την λύση της μεθόδου εκτίμησης ελάχιστων τετραγώνων.

**Βήμα 6:** Εφαρμόζονται οι 2K τυχαίες διαταράξεις  $\pm\Delta\theta_k^{(j)}$  στο  $\hat{J}_k$  .Οι 2K υποψήφιες παράμετροι  $\theta^*(k) \pm \Delta\theta(k+1)^{(j)}$  εφαρμόζονται στον προσεγγιστή  $\hat{J}_k$  για αξιολόγηση.

**Βήμα 7:** Πραγματοποιείται επιλογή της “καλύτερης” τυχαίας διαταραχής (σύμφωνα με το  $\hat{J}_k$  ). Οι παράμετροι  $\theta(k+1)$  με την καλύτερη εκτιμωμένη απόδοση επιλέγονται για εφαρμογή στο επόμενο πείραμα προσομοίωσης.



Σύμφωνα με τις αναφορές [19], [23], [24], [25] κάνοντας χρήση των μαθηματικών τύπων, αν η δομή του προσεγγιστή και ο μηχανισμός εκμάθησης του, ικανοποιούν ορισμένες εκτιμήσεις σχεδιασμού (ανεξάρτητου εφαρμογής) η παραπάνω διαδικασία εγγυάται ταχεία σύγκλιση της συνολικής διαδικασίας συνάρτησης στα ίδια επίπεδα απόδοσης που θα είχαν επιτευχθεί εάν γινόταν χρήση αποδοτικών προγραμμάτων μη γραμμικής βελτιστοποίησης, όπως η απότομη κάθοδος ή τα συστήματα Gauss-Newton, τα οποία θα μπορούσαν να εφαρμοστούν στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Η παραπάνω διαδικασία εγγυάται ασφαλή, σταθερή και αποδοτική παροδική απόδοση με την έννοια ότι η απόδοση του συστήματος κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της διαδικασίας, παραμένει εντός των αποδεκτών επιπέδων. Στην χειρότερη περίπτωση η απόδοση του συστήματος μπορεί να κινείται στα ίδια επίπεδα απόδοσης με την απόδοση πριν την έναρξη της εκτέλεσης της προσομοίωσης με ορισμένους επιπλέον τυχαίους όρους που έχουν προστεθεί. Το μέγεθος του όρου αυτού είναι ανάλογο με το μέγεθος και τις διακυμάνσεις του στους εξωγενείς παράγοντες.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### Εφαρμογή Adaptive – Tuning(AFT)

#### 8.1.1 Σταθερός Κύκλος ( Fixed Time)

Για την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας θεωρούμε κάποια δίκτυα διαφορετικού μεγέθους και πολυπλοκότητας, στα οποία η σηματοδότηση γίνεται με την κλασική στρατηγική του σταθερού χρόνου. Για την βελτίωση της στρατηγικής εφαρμόζεται ο αλγόριθμος AFT με σκοπό τον προσδιορισμό των κατάλληλων πράσινων χρόνων όσον αφορά τους φωτεινούς σηματοδότες. Η επιλογή των πράσινων χρόνων γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να παραμένει ο κύκλος της κάθε διασταύρωσης χρονικά σταθερός.

Με την παραπάνω μέθοδο, του σταθερού κύκλου, ο χρόνος που θα έχει ο κύκλος κάθε διασταύρωσης ορίζεται από τον χρήστη εξασφαλίζοντας με τον τρόπο αυτό ότι ο κύκλος δεν θα είναι ούτε πολύ μεγάλος ούτε πολύ μικρός ,αλλά θα ανταπεξέρχεται στις εκάστοτε συνθήκες του δικτύου. Για την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει επιλεγεί κύκλος 90 sec για κάθε κόμβο, εκ των οποίων τα 8 sec στο σύνολο αντιστοιχούν στους “νεκρούς χρόνους” κάθε κόμβου. Πιο συγκεκριμένα, 2 sec για κάθε φάση, καθώς κάθε κόμβος διαθέτει 4 φάσεις.

#### 8.1.2 Επιλογή Κατάλληλων Πράσινων

Αρχικά επιλέχθηκαν τα turning rates (ποσοστά στροφής) ανά κόμβο, ώστε να δημιουργήσουμε ρεαλιστικές συνθήκες ζήτησης (η μεγαλύτερη ζήτηση παρατηρείται στο κέντρο του δικτύου). Για την επιλογή των κατάλληλων πράσινων έγιναν μετρήσεις της ζήτησης και ανάλογα με τη ζήτηση σε κάθε ανταγωνιστική φάση μοιράστηκε αναλογικά ο συνολικός διαθέσιμος χρόνος πρασίνου. Με αυτόν τον τρόπο η εφαρμογή του AFT θα μας δείξει αν μπορούμε να επιτύχουμε βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών σε σχέση με μια ικανοποιητική στρατηγική σταθερού χρόνου. Στη συνέχεια, πειράχτηκαν τυχαία οι αρχικοί πράσινοι χρόνοι ( $\pm 2$  δευτερόλεπτα) ώστε να προσομοιωθεί μια απαρχαιομένη στρατηγική σταθερού χρόνου. Στην πραγματικότητα η ζήτηση σε ένα δίκτυο δεν παραμένει σταθερή για πάντα. Αλλαγή στη χρήση γης σε κάποιο σημείο του δικτύου, τυχαίες αλλαγές, πολιτικές αποφάσεις, η τιμή των καυσίμων, πεζοδρομήσεις κλπ., μπορούν να αλλάξουν σημαντικά τις συνήθειες των οδηγών και άρα η αρχικά βέλτιστα σχεδιασμένη στρατηγική σταθερού χρόνου να είναι υποβέλτιστη είτε ακόμη και καταστροφική όσο αφορά την οδική κυκλοφορία. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο AFT μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια πιο οικονομική και γρήγορη μέθοδος ανασχεδιασμού της φωτεινής σηματοδότησης σε σχέση με μια συνήθη μελέτη.

## 8.2 Μεταβλητές Λειτουργίας Adaptive Fine-Tuning (AFT)

Για την εκτέλεση του αλγόριθμου Adaptive Fine-Tuning (AFT) είναι απαραίτητη τόσο η δήλωση όσο και η ρύθμιση μια σειράς μεταβλητών, στοχεύοντας τόσο στην βελτίωση της απόδοσης ενός αστικού δικτύου όσο και στην αποφυγή υποθετικών προβλημάτων που ίσως προκύψουν κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου, οδηγώντας σε μη επιτρεπτά αποτελέσματα. Η κάθε μεταβλητή που δέχεται ο AFT ως είσοδο θα αναλυθεί βάσει του πίνακα (**Πίνακας 8.1**) στην συνέχεια, ώστε να αποκτηθεί μια πιο πλήρης και ξεκάθαρη εικόνα για τον τρόπο λειτουργίας του αλγορίθμου.

<b><i>Nr_of_theta</i></b>	Ο αριθμός των παραμέτρων προς βελτιστοποίηση
<b><i>Nr_of_x</i></b>	Ο αριθμός των διαθέσιμων μετρήσεων του συστήματος
<b><i>Nr_of_perturbations</i></b>	Ορίζει τον αριθμό των “διαταράξεων”
<b><i>theta_lb</i></b>	Ορίζει το απόλυτο κάτω όριο των παραμέτρων
<b><i>theta_ub</i></b>	Ορίζει το απόλυτο άνω όριο των παραμέτρων
<b><i>t_h</i></b>	Ορίζει το μέγεθος του παραθύρου των προηγούμενων τιμών
<b><i>L_g</i></b>	Ορίζει τον αριθμό των όρων του πολυωνυμικού προσεγγιστή
<b><i>alpha_0</i></b>	Ορίζει το αρχικό $a(\kappa)$
<b><i>alpha_lower</i></b>	Ορίζει το ελάχιστο $a(\kappa)$
<b><i>reset</i></b>	Ορίζει τον αριθμό των επαναλήψεων για την αρχικοποίηση της παραμέτρου $alpha_0$
<b><i>bound</i></b>	Ορίζει τα αρχικά άνω και κάτω όρια (για τις πρώτες επαναλήψεις) ως ποσοστό της αρχικής τιμής
<b><i>bound_change</i></b>	Ορίζει την επιτρεπόμενη αλλαγή των άνω και κάτω ορίων
<b><i>iteration_of_change</i></b>	Ορίζει σε πόσες επαναλήψεις όταν βρισκόμαστε κοντά στο όριο θα γίνεται η αύξηση του συγκεκριμένου ορίου
<b><i>param_of_change</i></b>	Το πόσο κοντά (%) στο όριο πρέπει να βρισκόμαστε για να ενεργοποιηθεί το $iteration\_of\_change$

**Πίνακας 8.1:** Μεταβλητές εισόδου που δέχεται ο AFT

- ***Nr\_of\_theta*** : Ο αριθμός των παραμέτρων προς βελτιστοποίηση.
- ***Nr\_of\_x*** : Ο αριθμός των διαθέσιμων μετρήσεων του συστήματος
- ***L\_g*** : Σκοπός του AFT είναι η ελαχιστοποίηση του κριτηρίου ύστερα από κάθε επανάληψη εκτέλεσης του αλγορίθμου. Για την επίτευξη ελαχιστοποίησης του κριτηρίου πραγματοποιείται δημιουργία μιας τυχαίας συνάρτησης προσέγγισης επιλύοντας έναν μέγιστο αριθμό πολυωνυμικών όρων. Ο αριθμός στο σύνολο των πολυωνυμικών όρων καλείται  $L_g$ . Όσο μεγαλύτερος είναι τόσο πιο πολύ υπερ-παραμετροποιούμε το πρόβλημα. Όσο πιο μικρός είναι τόσο πιο δύσκολο είναι να φτιαχτεί μια συνάρτηση που θα μπορεί να προσεγγίσει την πραγματικότητα. Από προσομοιώσεις βρέθηκε ότι ο κατάλληλος αριθμός πολυωνύμων είναι ανάλογος του αριθμού των μεταβλητών προς βελτιστοποίηση.
- ***Nr\_of\_perturbations*** : Η συγκεκριμένη μεταβλητή ορίζει τον αριθμό των “διαταράξεων” που θα πραγματοποιηθούν γύρω από το βέλτιστο σημείο στοχεύοντας στον εντοπισμό ενός καλύτερου σημείου για την συγκεκριμένη επανάληψη κάθε φορά. Όσο μεγαλύτερη τιμή λαμβάνει η μεταβλητή αυτή, τόσο μεγαλύτερο το ποσοστό αποτελεσματικότητας δημιουργείται στον αλγόριθμο. Την ίδια στιγμή αυξάνεται το υπολογιστικό φορτίο καθώς παράγονται περισσότεροι συνδυασμοί παραμέτρων προς τον εντοπισμό και υπολογισμό της βέλτιστης τιμής της παραμέτρου για κάθε επανάληψη.

- ***theta\_lb, theta\_ub*** : Μέσω των μεταβλητών *theta\_lb, theta\_ub* ορίζονται οι απολυτές τιμές για τον ορισμό των άνω και κάτω ορίων της κάθε παραμέτρου. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα ορισμού του εύρους τιμών που θα κινηθούν οι αντίστοιχες μεταβλητές ώστε να αυξηθούν ή να μειωθούν τα όρια των παραμέτρων, προσφέροντας με τον τρόπο αυτό την δυνατότητα βελτίωσης του κριτηρίου. Τα όρια αυτά θα πρέπει να αντιστοιχούν σε φυσικούς περιορισμούς.
- ***t\_h*** : Η μεταβλητή αυτή ορίζει τον αριθμό των ιστορικών στιγμών που ο AFT θα διατηρεί ως υπενθύμιση κατά την λειτουργία του. Πιο συγκεκριμένα αν τεθεί η τιμή της μεταβλητής *t\_h* ίση 20, αυτό πρακτικά σημαίνει ότι στον AFT θα προσφέρεται η δυνατότητα να θυμάται και θα λαμβάνει υπόψιν του τα δεδομένα που έχουν υπολογιστεί μέχρι και πριν από 20 επαναλήψεις από την αντίστοιχη επανάληψη όπου βρίσκεται τώρα ο αλγόριθμος.
- ***Alpha\_0*** : Η μεταβλητή αυτή, το *Alpha\_0* θεωρείται το αρχικό  $a(0)$  και ορίζει την απόσταση που θα κινηθούν οι τιμές των παραμέτρων γύρω από την βέλτιστη τιμή. Η συγκεκριμένη τιμή δεν διατηρείται σταθερή, αλλά υπάρχει πιθανότητα να μεταβληθεί και να προκύψει μια νέα, εάν εντοπιστεί καλύτερη τιμή στην συνέχεια της προσομοίωσης. Η παράμετρος  $a(\kappa)$  δεν διατηρεί σταθερή τιμή καθ' όλη την διάρκεια των επαναλήψεων. Αντιθέτως, με το πέρας του χρόνου της προσομοίωσης η τιμή του *alpha* μεταβάλλεται και οδεύει προς την μείωση της μέσω κατάλληλης συνάρτησης. Η συγκεκριμένη μείωση του *alpha* έχει ως σκοπό μετά από έναν αριθμό επαναλήψεων να υπάρξει σύγκλιση των τιμών του κριτηρίου προς μια βέλτιστη τιμή.
- ***Alpha\_lower*** : Σκοπός της μεταβλητής αυτής είναι να ορισθεί από τον χρήστη η μικρότερη τιμή που μπορεί λάβει το *alpha* ώστε να αποφευχθεί μια μηδενική τιμή που θα εμπόδιζε την περαιτέρω ουσιαστική χρήση του αλγορίθμου. Με τη χρήση αυτής της παραμέτρου ο AFT θα εκτελείται πάντα.
- ***Reset*** : Στόχος της μεταβλητής αυτής είναι η επαναφορά της τιμής της μεταβλητής  $a(\kappa)$  στην αρχική τιμή του  $a(0)$  αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό τις πιθανότητες, να ξεφύγει ο αλγόριθμος από κάποιο τοπικό ελάχιστο που μπορεί να έχει βρεθεί ύστερα από μια σειρά επαναλήψεων. Αναλυτικότερα, ύστερα από ένα πλήθος επαναλήψεων η τιμή του AFT θα πρέπει να συγκλίνει προς κάποιες τιμές των μεταβλητών, αλλά και του κριτηρίου που έχει ορισθεί. Στην περίπτωση όμως που εντοπιστεί ότι η συγκεκριμένη τιμή ( $a(\kappa)$ ) έχει μειωθεί σε πολύ μεγάλο ποσοστό με αποτέλεσμα να μην μπορεί να επέλθει κάποια αισθητή αλλαγή στις μεταβλητές, τότε καλείται να πραγματοποιηθεί χρήση της μεταβλητής *reset* στοχεύοντας στην αύξηση των πιθανοτήτων αποφυγής του αλγορίθμου από ένα τοπικό ελάχιστο, αυξάνοντας μέσω του τρόπου αυτού τις πιθανότητες να υπάρξει βελτίωση στις τιμές των μεταβλητών μέσω του αλγορίθμου στις επόμενες επαναλήψεις. Υπό την προϋπόθεση αυτή, το μεγάλο βήμα της μεταβλητής  $a(\kappa)$ , αλλά και τα πιθανά μεγάλα άνω και κάτω όρια των παραμέτρων που έχουν προκύψει από τις προηγούμενες επαναλήψεις, δεν δημιουργούν κάποιο πρόβλημα στην εκτέλεση του αλγορίθμου. Αντιθέτως επιτρέπουν στον AFT να κινηθεί προς άλλες πιθανές λύσεις για τις τιμές των παραμέτρων στην συνέχεια, έχοντας επίγνωση των τιμών των παραμέτρων από τις προηγούμενες επαναλήψεις. Συνεπώς, η χρήση του *reset* λαμβάνει χώρα όταν έχει πραγματοποιηθεί ένας αξιολογος αριθμός επαναλήψεων υπό την προϋπόθεση ότι η παράμετρος  $a(\kappa)$  έχει βρεθεί στο κατώτερο επιτρεπτό όριο της.
- ***Bound, Bound\_change, iteration\_of\_change, param\_of\_change*** : Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, πραγματοποιήθηκε ορισμός των άνω και κάτω ορίων (*theta\_lb, theta\_ub*) των παραμέτρων που κάνει χρήση ο αλγόριθμος. Κατά την έναρξη λειτουργίας του αλγορίθμου AFT στις πρώτες επαναλήψεις εντοπίζεται μεγάλο βήμα  $a(\kappa)$ , οδηγώντας σε έναν αριθμό τόσο λανθασμένων εκτιμήσεων, όσο και μη επιθυμητών αποτελεσμάτων, καθώς δεν υπάρχει εξαρχής πλήρη επίγνωση της δομής του συστήματος. Μέσω της παραμέτρου *Bound* πραγματοποιείται ο ορισμός των πρώτων ορίων μετακίνησης

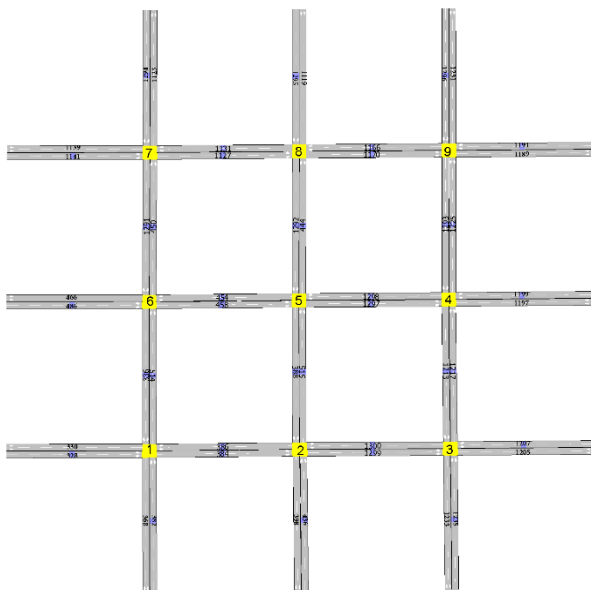
των μεταβλητών, στοχεύοντας στην ασφαλή και ομαλή αλλαγή τους ( $\pm 5\%$ ). Οι τιμές των ορίων αυτών λαμβάνουν σταθερή τιμή έως, ότου οι παράμετροι να πλησιάσουν την τιμή κάποιου ορίου του διαστήματος για κάποιες συνεχόμενες επαναλήψεις. Το πόσο κοντά στο όριο πρέπει να βρισκόμαστε ορίζεται από την παράμετρο *param\_of\_change* και το πόσες φορές πρέπει να πλησιάσουμε ένα όριο για να επιτραπεί η αλλαγή του ορίζεται από την παράμετρο *iteration\_of\_change*. Μέσω της παραπάνω διαδικασίας εξασφαλίζεται ομαλότητα όσον αφορά στην μεταβολή των αρχικών τιμών των παραμέτρων καθώς και την αποφυγή ανεπιθύμητων αποτελεσμάτων, δημιουργώντας αυξημένο αριθμό τυχαίων εναλλαγών των μεταβλητών, ιδίως στις πρώτες επαναλήψεις του αλγορίθμου, καθώς εντοπίζεται αυξημένη τυχαιότητα στην αναζήτηση τιμών. Ύστερα από έναν αριθμό επαναλήψεων πραγματοποιείται αύξηση της τιμής των ορίων, έχοντας επίγνωση των τιμών των προηγούμενων επαναλήψεων, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό την τυχαιότητα επιλογής τιμών του AFT.

## 8.3 Μέθοδος Εφαρμογής Adaptive Fine-Tuning (AFT)

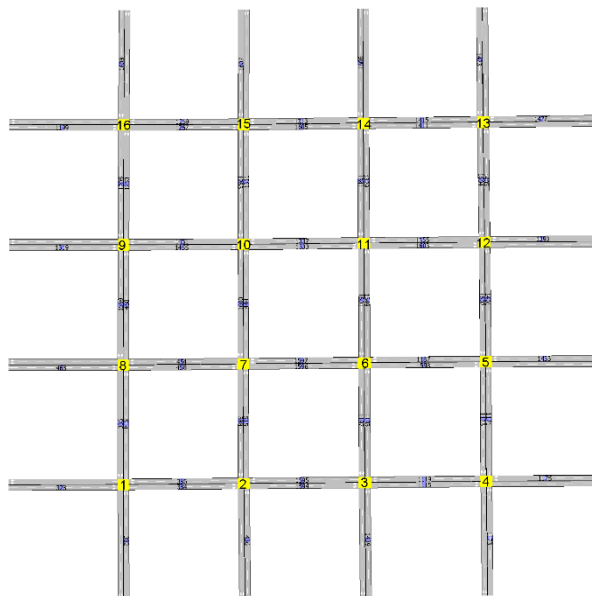
### 8.3.1 Οδικά Δίκτυα που εφαρμόστηκε ο Adaptive Fine-Tuning (AFT)

Μέσω του αλγορίθμου AFT εκτελέστηκε ένας μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων για 3 διαφορετικά δίκτυα διαφορετικής κλίμακας. Ο σχεδιασμός των δικτύων πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του προσομοιωτή AIMSUN, έτσι ώστε να σχεδιαστεί ένα οδικό δίκτυο 9, 16 και 25 κόμβων. Καθένα από τα παραπάνω δίκτυα διαθέτει μια τετραγωνική δομή αποτελούμενο από τον αντίστοιχο αριθμό κόμβων, κάθε κομβός διαθέτει 4 φάσεις και 4 φωτεινούς σηματοδότες αντίστοιχα. Με σκοπό την ύπαρξη τετραγωνικής δομής αποφασίστηκε κάθε δρόμος του δικτύου να έχει το ίδιο μήκος, 120 μέτρα και στο κέντρο όλων των δρόμων πέρα από τους δρόμους, οι οποίοι αντιστοιχούν στις εξαγωγές των οχημάτων από το δίκτυο έχουν τοποθετηθεί φωρατές. Ο χρόνος κάθε προσομοίωσης ανεξάρτητου δικτύου είναι σταθερός και έχει διάρκεια 1 ώρα και 30 λεπτά και την ίδια στιγμή έχει επιλεγεί η ζήτηση του δικτύου να τροποποιείται ανά δέκα λεπτά. Ταυτόχρονα με την βοήθεια του προσομοιωτή AIMSUN έχει προκαθοριστεί η μεγαλύτερη ζήτηση ενός του δικτύου να εντοπίζεται στο 4<sup>ο</sup>, 5<sup>ο</sup> και 6<sup>ο</sup> δεκάλεπτο. Στο τελευταίο δεκάλεπτο, στο 9<sup>ο</sup>, δεν εισάγονται οχήματα εντός του δικτύου, συνεπώς η ζήτησή του στην περίπτωση αυτή είναι μηδενική. Η χρήση του δεκάλεπτου αυτού είναι αρκετά σημαντική καθώς αποσκοπεί στην εξασφάλιση ότι μετά το πέρας της προσομοίωσης το δίκτυο θα έχει αδειάσει από οχήματα και άρα οποιαδήποτε σύγκριση θα είναι θεμιτή. Το αρχικό πλάνο πράσινων και ο υπολογισμός τους έχει αναλυθεί παραπάνω και βασίζεται στον υπολογισμό της ζήτησης κάθε δρομου την ώρα αιχμής. Τέλος, για την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας για όλες τις προσομοιώσεις που έλαβαν μέρος στα οδικά δίκτυα χρησιμοποιήθηκαν επιβατικά οχήματα και καθορίστηκε η συμπεριφορά των οδηγών ως φυσιολογική. Το πλάνο σχεδιασμού για τα 3 οδικά δίκτυα των 9, 16, 25 παρουσιάζεται στην συνέχεια με κατάλληλες απεικονίσεις μέσω του αρχείου του λογισμικού προγράμματος AIMSUN.

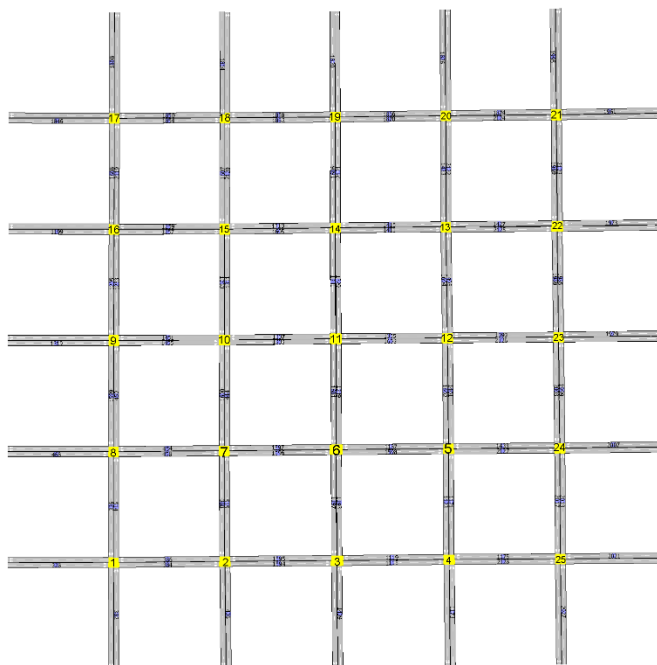
- Σχεδιάγραμμα οδικού δικτύου 9 κόμβων (Σχήμα 8.1)
- Σχεδιάγραμμα οδικού δικτύου 16 κόμβων (Σχήμα 8.2).
- Σχεδιάγραμμα οδικού δικτύου 25 κόμβων (Σχήμα 8.3).



Σχήμα 8.1: Σχεδιάγραμμα οδικού δικτύου 9 κόμβων



Σχήμα 8.2: Σχεδιάγραμμα οδικού δικτύου 16 κόμβων



Σχήμα 8.3: Σχεδιάγραμμα οδικού δικτύου 25 κόμβων

### 8.3.2 Λειτουργία Αλγορίθμου

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου AFT έχει επιλεχθεί η σταθερή διατήρηση του κύκλου των διασταυρώσεων σε κάθε επανάληψη, τροποποιώντας κατάλληλα ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου, τους “πράσινους χρόνους” των φάσεων σε κάθε επανάληψη της προσομοίωσης. Κατά την διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου εξασφαλίζεται η δυνατότητα επικοινωνίας ανάμεσα στον χρήστη και στον προσομοιωτή AIMSUN.

Σκοπός της παραπάνω διαδικασίας θεωρείται τόσο η πραγματοποίηση της ανάλυσης των δεδομένων που προέκυψαν, όσο και η εξαγωγή ολοκληρωμένων συμπερασμάτων τα οποία αφορούν την συμπεριφορά του αλγορίθμου σε ένα δίκτυο προσομοίωσης, στοχεύοντας στην λήψη και χρήση των αποτελεσμάτων αυτών κάνοντας χρήση των παραπάνω κριτηρίων σε ένα πραγματικό-ρεαλιστικό αστικό δίκτυο. Επιπρόσθετα, την ίδια στιγμή πραγματοποιείται κατάλληλος έλεγχος, ώστε να διασφαλιστεί ότι ο “πράσινος χρόνος” των σηματοδοτών θα πρέπει να ξεπερνάει τα επτά δευτερόλεπτα. Ο χρήστης ορίζει το αρχείο AFT το οποίο αποτελεί την είσοδο για την έναρξη και εκτέλεση του αλγορίθμου AFT. Μετά το πέρας της προσομοίωσης εξάγεται το αρχείο parameters που περιέχει τις νέες τιμές των μεταβλητών και το αρχείο data που περιέχει τις τιμές των μεταβλητών και τις μετρήσεις που προέκυψαν από και κατά τη χρήση τους στην προσομοίωση. Η ανάλυση του κάθε αρχείου παρουσιάζεται στην συνέχεια.

#### **AFT**

Το συγκεκριμένο αρχείο περιέχει μια σειρά μεταβλητών οι οποίες ορίζονται και ρυθμίζονται από τον χρήστη στοχεύοντας στο να επέλθει βελτίωση ή επίλυση του προβλήματος ύστερα από μια σειρά επαναλήψεων με την βοήθεια του αλγορίθμου. Σε αυτό το αρχείο δίνονται από το χρήστη όλες οι τιμές των παραμέτρων όπως φαίνονται στον πίνακα 8.1. Για κάθε μεταβλητή ορίζονται διαφορετικά άνω και κάτω όρια.

#### **parameters**

Στο συγκεκριμένο αρχείο περιλαμβάνονται οι αρχικές τιμές των παραμέτρων της κάθε μεταβλητής, τα οποία έχουν ορισθεί από τον χρήστη με σκοπό να ξεκινήσει η εκτέλεση του αλγορίθμου AFT. Μετά την πρώτη επανάληψη του αλγορίθμου AFT, οι παράμετροι αυτοί θα τροποποιηθούν κατάλληλα. Οι τιμές που λαμβάνουν οι παράμετροι θα πρέπει να ανήκουν στα επιτρεπτά όρια των οποίων ο ορισμός πραγματοποιήθηκε στο αρχείο AFT. Η ανάλυση του συγκεκριμένου αυτού αρχείου πραγματοποιήθηκε παραπάνω. Για τη συγκεκριμένη διπλωματική οι παράμετροι είναι βάρη με τα οποία πολλαπλασιάζουμε τους αρχικούς χρόνους του πράσινου. Οπότε στην πρώτη επανάληψη τα βάρη έχουν για τιμή τη μονάδα. Οι παράμετροι αυτοί αλλάζουν από επανάληψη σε επανάληψη και ορίζουν τους νέους πράσινους χρόνους. Σε περίπτωση που οι πράσινοι χρόνοι είναι διαφορετικοί από τον ορισμένο κύκλο προσαρμόζονται αναλογικά ώστε ο κύκλος να παραμένει τελικά σταθερός. Πιο συγκεκριμένα, κάθε κόμβος περιέχει τέσσερις φάσεις συνεπώς στο συγκεκριμένο αρχείο θα αναγράφονται τα βάρη για τις τρεις πρώτες φάσεις και το βάρος της τέταρτης φάσης θα υπολογίζεται συναρτήσει των άλλων τριών μιας και ο κύκλος παραμένει σταθερός.

#### **Data**

Στο συγκεκριμένο αρχείο εξάγονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δηλαδή ο αριθμός των οχημάτων που εξυπηρετήθηκαν από το δίκτυο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν και το κριτήριο προς βελτιστοποίηση (μέση ταχύτητα, αριθμός οχημάτων\*μέση ταχύτητα κλπ.). Στην ουσία το αρχείο data είναι ο χώρος που ο AFT αποθηκεύει όλες τις επαναλήψεις ώστε να έχει όλη τη γνώση που χρειάζεται για την εκτίμηση των βέλτιστων παραμέτρων.



Η διαδικασία η οποία ακολουθείται συνοψίζεται στα εξής παρακάτω βήματα:

1. Αρχικά, πραγματοποιείται επικοινωνία μεταξύ του αλγορίθμου και του προσομοιωτή AIMSUN.
2. Το Aimsun διαβάζει το αρχείο parameters για κάθε υποδίκτυο και εφαρμόζει τις τιμές των βαρών έτσι ώστε να καθοριστούν οι πράσινοι χρόνοι. Η επανάληψη προχωρά.
3. Στο τέλος της επανάληψης το Aimsun μαζεύει πληροφορίες σχετικά με το κριτήριο, τη ζήτηση, τον αριθμό οχημάτων, τη μέση ταχύτητα κλπ. για κάθε υποδίκτυο. Στο τέλος της επανάληψης δημιουργείται το αρχείο data για κάθε υποδίκτυο.
4. Τελευταίο βήμα είναι η ενεργοποίηση του αλγορίθμου AFT. Έτσι σχηματίζεται το αρχείο parameters που θα χρησιμοποιηθεί από το AIMSUN στην επόμενη επανάληψη.

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται σε κάθε επανάληψη για τον αριθμό των προσομοιώσεων που έχει οριστεί από τον χρήστη. Μέσω του προσομοιωτή AIMSUN προσφέρεται η δυνατότητα επιλογής 60 ή 120 επαναλήψεων. Η επιλογή αυτή πραγματοποιείται ανάλογα με την πολυπλοκότητα του αριθμού των διαφορετικών παραμέτρων που καλείται να πραγματοποιηθεί κατάλληλος υπολογισμός τους και συνδέονται άμεσα με το μέγεθος του δικτύου που μελετάται. Όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των παραμέτρων τόσο περισσότερο χρόνο θα χρειαστεί ο AFT για να δημιουργήσει σύγκλιση των παραμέτρων.

### 8.3.3 Επιλογή μεταβλητών

Ο υπολογισμός των πράσινων χρόνων των φωτεινών σηματοδοτών πραγματοποιείται μέσω της εκτέλεσης του κώδικα του αλγορίθμου *AFT*. Για την εκτέλεση μιας προσομοίωσης απαιτείται ο ορισμός ενός αριθμού μεταβλητών σκοπεύοντας στην βελτίωση του κριτηρίου που έχει οριστεί. Κάθε κόμβος διαθέτει τέσσερις φάσεις, οι οποίες αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους ορίζοντας με τον τρόπο αυτόν τους πράσινους χρόνους.

#### Μεταβλητή *Nr\_of\_theta* :

Η συγκεκριμένη μεταβλητή ορίζει τον αριθμό των παραμέτρων προς βελτιστοποίηση. Στην συνέχεια παρατίθενται ο πίνακας (Πίνακας 8.2) ο οποίος αναφέρεται στον αριθμό μεταβλητών για κάθε δίκτυο που μελετήθηκε ξεχωριστά:

Αριθμός Κόμβων	Αριθμός Μεταβλητών <i>Nr_of_theta</i>
9 κόμβοι	27 μεταβλητές
16 κόμβοι	48 μεταβλητές
25 κόμβοι	75 μεταβλητές

Πίνακας 8.2: Αριθμός μεταβλητών κάθε δικτύου

#### Μεταβλητή *Nr\_of\_x* :

Η συγκεκριμένη μεταβλητή ορίζει τον αριθμό των διαθέσιμων μετρήσεων του συστήματος. Για τους σκοπούς αυτής της διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε αυτή η μεταβλητή να ισούται με την τιμή 1 σε κάθε περίπτωση.

### Μεταβλητή *Nr\_of\_perturbations* :

Η μεταβλητή *Nr\_of\_perturbations* αφορά τον αριθμό των “ διαταράξεων ” οι οποίες θα λάβουν μέρος γύρω από το βέλτιστο σημείο με σκοπό να εντοπιστεί ένα καλύτερο σημείο για την συγκεκριμένη επανάληψη . Για τους σκοπούς αυτής της διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε αυτή η μεταβλητή να ισούται με την τιμή 50 σε κάθε περίπτωση.

### Μεταβλητή *theta\_lb* , *theta\_ub* :

Οι μεταβλητές *theta\_lb* και *theta\_ub* ορίζουν τις τιμές για τα άνω και κάτω όρια των τιμών των παραμέτρων που θα κινηθούν τα βάρη που θα δώσει ο αλγόριθμος *AFT* . Υστέρα από μια σειρά επαναλήψεων για τον κατάλληλο προσδιορισμό των τελικών τιμών, των ορίων των παραμέτρων, αποφασίστηκε ότι η κατάλληλη τιμή για την μεταβλητή *theta\_lb* και για την μεταβλητή *theta\_ub* θα πρέπει να ισούται με την τιμή 0 και την τιμή 4 αντίστοιχα. Κάνοντας χρήση των συγκεκριμένων τιμών των ορίων των μεταβλητών αυτών, παρατηρήθηκε ότι κατά την διάρκεια επαναλήψεων τα βάρη δεν θα φτάνουν ποτέ τις τιμές αυτές, που έχουν καθοριστεί ως όρια προσφέροντας με τον τρόπο αυτό ελευθερία κινήσεων στο αλγόριθμο *AFT* , καθώς επιτρέπεται μεγάλο εύρος λήψης τιμών κατά την διάρκεια της εκτέλεσης της προσομοίωσης. Στην συνέχεια παρατίθεται ο πίνακας (Πίνακας 8.3) των τιμών των παραμέτρων για τις μεταβλητές *theta\_lb* , *theta\_ub*

Αριθμός Κόμβων	Τιμή μεταβλητής <i>theta_lb</i>	Τιμή μεταβλητής <i>theta_ub</i>
9 κόμβοι	0	4
16 κόμβοι	0	4
25 κόμβοι	0	4

Πίνακας 8.3: Αριθμός παραμέτρων για τις μεταβλητές *theta\_lb* , *theta\_ub* κάθε δικτύου

### Μεταβλητή *t\_h* :

Ο αλγόριθμος *AFT* προσφέρει την δυνατότητα κατά την εκτέλεση του, να λειτουργεί ως θυμητικό για έναν αριθμό επαναλήψεων που έχουν ήδη εκτελεστεί. Η συγκεκριμένη αυτή ιδιότητα πραγματοποιείται μέσω της μεταβλητής *t\_h* , οπού ορίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων για τις οποίες ο αλγόριθμος θα λαμβάνει, σαν “ιστορικό υπόβαθρο” τις τιμές των μεταβλητών των προηγούμενων επαναλήψεων. Κάνοντας χρήση της μεταβλητής αυτής, οι επόμενες επαναλήψεις του αλγορίθμου οδηγούνται σε καλύτερα αποτελέσματα λαμβάνοντας υπόψιν το “ιστορικό υπόβαθρο” των τιμών των μεταβλητών των προηγούμενων επαναλήψεων, στοιχείο το οποίο δεν ήταν διαθέσιμο στις πρώτες επαναλήψεις. Η τιμή που επιλέχθηκε είναι 100.

### Μεταβλητή *iteration\_of\_change* :

Η συγκεκριμένη μεταβλητή ορίζει, σε πόσες επαναλήψεις όπου βρισκόμαστε κοντά στο όριο θα γίνεται η αύξηση του συγκεκριμένου ορίου. Για τους σκοπούς αυτής της διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε αυτή η μεταβλητή να ισούται με την τιμή 3 σε κάθε περίπτωση.



### Μεταβλητή *param\_of\_change* :

Η συγκεκριμένη μεταβλητή ορίζει το πόσο κοντά (%) στο όριο πρέπει να βρισκόμαστε για να ενεργοποιηθεί το *iteration\_of\_change*. Για τους σκοπούς αυτής της διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε αυτή η μεταβλητή να ισούται με την τιμή 0.05 σε κάθε περίπτωση.

### Μεταβλητή *L\_g* :

Η μεταβλητή *L\_g* σχετίζεται με τον αριθμό συναρτήσεων που δημιουργεί ο αλγόριθμος AFT, στοχεύοντας στην απόδοση βαρών στις αντίστοιχες μεταβλητές, με σκοπό την βελτιστοποίηση και την ελαχιστοποίηση του κριτηρίου. Το παραπάνω πραγματοποιείται με την δημιουργία μιας τυχαίας συνάρτησης προσέγγισης κάνοντας χρήση ενός μεγάλου αριθμού πολυωνυμικών όρων. Υστέρα από έναν αριθμό δοκιμών και επαναλήψεων διαφορετικών τιμών για τον προσδιορισμό της κατάλληλης τιμής για την μεταβλητή *L\_g*, οδηγηθήκαμε στο συμπέρασμα ότι για να υπάρξει καλύτερη απόδοση, αλλά και συμπεριφορά του αλγορίθμου AFT, η μεταβλητή *L\_g* θα πρέπει να λαμβάνει τιμές, πολύ κοντά στην τιμή του αριθμού των μεταβλητών που έχουν ορισθεί για το εκάστοτε δίκτυο όπου μελετάται. Στην συνέχεια παρατίθεται ο πίνακας (Πίνακας 8.4) των παραμέτρων της μεταβλητής *L\_g* :

Αριθμός Κόμβων	Τιμή μεταβλητής <i>L_g</i>
9 κόμβοι	29
16 κόμβοι	50
25 κόμβοι	77

Πίνακας 8.4: Αριθμός παραμέτρων της μεταβλητής *L\_g* κάθε δικτύου.

### Μεταβλητή *alpha\_0* :

Το *alpha\_0* ή διαφορετικά *a(0)* θεωρείται το αρχικό *alpha* και εκφράζει την απόσταση που θα κινηθούν οι τιμές των παραμέτρων γύρω από την βέλτιστη τιμή μέχρι να εντοπιστεί η καλύτερη τιμή. Για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε η τιμή αυτή να ισούται με 2 σε κάθε περίπτωση.

### Μεταβλητή *alpha\_lower* :

Η μεταβλητή αυτή πετυχαίνει σύγκλιση της μέσης ταυτότητα προς μια τιμή, υστέρα από έναν αριθμό επαναλήψεων. Με την πάροδο των επαναλήψεων συμβαίνει μείωση της τιμής του *alpha* με αποτέλεσμα το *alpha\_lower* να αναζητά νέες τιμές κοντά στην βέλτιστη τιμή. Η μεταβλητή *alpha\_lower* έχει επιλεγεί να λαμβάνει την τιμή 0.01, καθ' όλη την διάρκεια των επαναλήψεων της προσομοίωσης.

### Μεταβλητή *reset* :

Η χρήση της παραμέτρου *reset* δεν οδήγησε σε καλύτερες τιμές των παραμέτρων από την στιγμή που πραγματοποιείται χρήση των μεταβλητών *bound*, *bound\_change* και *alpha\_lower*. Στόχος της παραμέτρου αυτής είναι να επαναφέρει την μεταβλητή *a(k)* στην αρχική του τιμή *a(0)* αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό τις πιθανότητες να ξεφύγει ο αλγόριθμος από κάποιο τοπικό ελάχιστο στο οποίο μπορεί να έχει βρεθεί στις προηγούμενες επαναλήψεις. Όποτε και αν έγινε χρήση της συγκεκριμένης μεταβλητής δεν υπήρξε βελτίωση των παραμέτρων. Αντιθέτως, αύξηση της μεταβλητής *alpha*, δημιουργώντας με τον

τρόπο αυτόν διακυμάνσεις στα αποτελέσματα καθώς ο αλγόριθμος πραγματοποίησε, με τον ίδιο τρόπο σύγκλιση σε τιμές που είχαν ήδη υπολογιστεί. Οπότε τελικά δεν χρησιμοποιήθηκε η εν λόγω δυνατότητα του AFT.

#### Μεταβλητή *bound* , *bound \_change* :

Κατά την έναρξη της εκτέλεσης του αλγορίθμου AFT δεν υπάρχει ένα “ιστορικό υπόβαθρο” το οποίο να μπορεί να οδηγήσει τον αλγόριθμο προς μια κατεύθυνση με σκοπό την δημιουργία βάρους σε κάθε μεταβλητή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στις πρώτες επαναλήψεις οι τιμές που θα δοθούν στα βάρη μέσω του αλγορίθμου για την αλλαγή των πράσινων χρόνων των φωτεινών σηματοδοτών να παρουσιάζουν μεγάλη τυχαιότητα σε σχέση με τις τιμές που θα καταλήξει ο αλγόριθμος ύστερα από ένα μεγάλο αριθμό επαναλήψεων. Η μεταβλητή *bound* αφορά τα πρώτα όρια αλλαγής κάθε βάρους. Ορίζεται η συγκεκριμένη μεταβλητή να λαμβάνει μικρή τιμή για τις πρώτες επαναλήψεις. Η μεταβλητή *bound \_change* ενεργοποιείται κάθε φορά που υπάρχει αλλαγή των ορίων που έχουν τεθεί, αυξάνοντας κατά 10% τις τιμές των ορίων των παραμέτρων, επιτρέποντας με τον τρόπο αυτό να υπάρχει μεγαλύτερη ελευθέρια κινήσεων στις τιμές των μεταβλητών. Με το πέρας των επαναλήψεων οι μεταβλητές κατασταλάζουν στις τελικές τιμές τους, με αποτέλεσμα να μην εντοπίζεται τόση μεγάλη τυχαιότητα συγκριτικά με τις πρώτες επαναλήψεις. Στην συνέχεια παρατίθεται ο πίνακας (Πίνακας 8.5) των τιμών των παραμέτρων των μεταβλητών *bound* , *bound \_change* :

Αριθμός Κόμβων	Τιμή μεταβλητής <i>bound</i>	Τιμή μεταβλητής <i>bound _change</i>
9 κόμβοι	0.05	0.1
16 κόμβοι	0.05	0.1
25 κόμβοι	0.05	0.1

**Πίνακας 8.5:** Αριθμός παραμέτρων για τις μεταβλητές *bound* και *bound \_change* κάθε δικτύου

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

### Αποτελέσματα Προσομοιώσεων με την Βοήθεια του AFT

Από τις μετρήσεις των ροών μέσα στο δίκτυο δημιουργήθηκε ένα πλάνο σταθερού χρόνου για τους 9, 16, 25 κόμβους του δικτύου αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν προέρχονται από 60 επαναλήψεις για τους 9 κόμβους και 120 επαναλήψεις για τα δίκτυα των 16 και 25 κόμβων. Οι επαναλήψεις αυτές έχουν ελάχιστα διαφορετική ζήτηση μεταξύ τους, ώστε να προσομοιώνεται η καθημερινή διαφοροποίηση της ζήτησης ενός πραγματικού δικτύου. Για κάθε set προσομοιώσεων πραγματοποιήθηκαν 10 προσομοιώσεις για κάθε περίπτωση του δικτύου και υπολογίστηκε ο μέσος όρος των κριτηρίων σύγκρισης. Από τις 10 προσομοιώσεις που προέκυψαν, εντοπίστηκε μια συγκεκριμένη προσομοίωση, η οποία βρισκονταν πιο κοντά στο μέσο όρο αυτών των 10 προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν, από όπου προέκυψαν τα γραφήματα που θα παρατεθούν στη συνέχεια. Οι αναπαραστάσεις των δικτύων για τους 9, 16, 25 κόμβους έχουν παρατεθεί παραπάνω και βρίσκονται στο υποκεφάλαιο 8.3.1. Μετά το πέρας των προσομοιώσεων για κάθε οδικό δίκτυο πραγματοποιήθηκε ανάλυση των δεδομένων και δημιουργήθηκαν τα παρακάτω διαγράμματα. Σε κάθε μελέτη δικτύου ακολουθείται η ίδια δομή, όπου παρουσιάζεται ο πίνακας μεταβλητών και τα αντίστοιχα γραφήματα.

Σε αντίστοιχες εργασίες έχει αποδειχτεί ότι η αποτελεσματικότητα του AFT μειώνεται όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα του δικτύου. Με λίγα λόγια ο AFT δεν μπορεί να βελτιώσει συστήματα με μεγάλο αριθμό παραμέτρων. Γι' αυτό το λόγο στις περιπτώσεις των 16 και 25 κόμβων δοκιμάστηκε ο χωρισμός του συνολικού δικτύου σε υποδίκτυα που το κάθε ένα το μεταχειριστήκαμε σαν ανεξάρτητο από το άλλο. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε διαφορετικούς AFT που προσπαθούν ο κάθε ένας να βελτιώσει το δικό του υποδίκτυο. Και αυτό έχει δοκιμαστεί στο παρελθόν αλλά χωρίς μεθοδικότητα και χωρίς αποτελεσματικότητα μιας και στην πράξη τα υποδίκτυα δεν είναι ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Παραδείγματος χάρη παρατηρήθηκε σε παρελθοντική εργασία ότι σε τυχαίο χωρισμό ενός δικτύου σε 2 υποδίκτυα το υποδίκτυο A προσπαθούσε να βελτιώσει την κυκλοφοριακή του κατάσταση διώχνοντας τα οχήματα προς το B. Το B προσπαθούσε να οδηγήσει τα οχήματα προς το A οπότε τελικά είτε κανένα από τα δύο υποδίκτυα δεν κατάφερνε να βελτιωθεί είτε η βελτίωση του ενός αναιρούνταν από την χειροτέρευση του άλλου με αποτέλεσμα το συνολικό δίκτυο να μην μπορεί να παρουσιάσει κάποια αισθητή βελτίωση από τη χρήση του AFT. Σε αυτήν την εργασία χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι χωρισμού σε υποδίκτυα που είτε είναι στοχευμένες, είτε προσπαθούν να δημιουργήσουν συνθήκες μερικώς ανεξάρτητων υποδικτύων.

Ο AFT για να λειτουργήσει χρειάζεται ένα κριτήριο προς βελτιστοποίηση. Για το δίκτυο των 9 κόμβων έγινε χρήση της μέσης ταχύτητας (Km/h) του κάθε υποδικτύου (ή του συνολικού δικτύου) το οποίο πάρθηκε άμεσα από το AIMSUN. Για τα υπόλοιπα σενάρια των 16 και 25 κόμβων χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο productivity ( $Veh \cdot Km/h^2$ ) το οποίο στην ουσία είναι το γινόμενο της συνολικής ροής του δικτύου επί τη μέση ταχύτητα. Αυτό συνέβη γιατί στα δίκτυα των 16 και 25 κόμβων υπήρχαν περιπτώσεις όπου δημιουργούνταν gridlocks και το AIMSUN έδινε μεγαλύτερη μέση ταχύτητα από το κανονικό, λόγω του ότι έμπαιναν πολύ λιγότερα οχήματα στο δίκτυο. Η χρήση λοιπόν της μέσης ταχύτητα ως κριτήριο προς βελτιστοποίηση μας οδηγούσε σε συνεχή επιδείνωση των φαινομένων του gridlock, ενώ η ενσωμάτωση στο κριτήριό μας και του αριθμού των οχημάτων έκανε πιο αποτελεσματικό και αντιπροσωπευτικό το κριτήριο προς βελτιστοποίηση.

Εδώ πρέπει να τονίσουμε ότι δεν υπήρχε η δυνατότητα να πάρουμε πληροφορία από συνδεδεμένα οχήματα για τεχνικούς λόγους και γι' αυτό το λόγο οι πληροφορίες που επιλέξαμε προέρχονται απευθείας από το AIMSUN. Από άλλες εργασίες έχουμε τη γνώση ότι η συλλογή πληροφορίας από συνδεδεμένα οχήματα θα μας έδιναν την ίδια ποιότητα μετρήσεων ακόμη και για ποσοστό συνδεδεμένων οχημάτων 5% μιας και ο αριθμός των οχημάτων και η διάρκεια της προσομοίωσης είναι μεγάλα και άρα τα συνδεδεμένα οχήματα διάσπαρτα σχεδόν ομοιόμορφα σε όλο το δίκτυο και για όλες τις χρονικές περιόδους. Η χρήση συνδεδεμένων οχημάτων σε μια πραγματική εφαρμογή θα χρειαζόταν μόνο έναν κεντρικό υπολογιστή και έναν μηχανισμό επεξεργασίας μεγάλων δεδομένων που είναι πιο φθηνός από την τοποθέτηση φωρατών σε κάθε δρόμο.

Όσον αφορά το δίκτυο των 9 κόμβων θα παρατεθούν τα γραφήματα της ταχύτητας του συνολικού δικτύου. Στην περίπτωση χωρισμού του δικτύου σε μικρότερα υποδίκτυα πραγματοποιείται αναπαράσταση του γραφήματος της ταχύτητας του κάθε υποδίκτυου ξεχωριστά και στο τέλος παρατίθεται και ένα γράφημα της συνολικής ταχύτητας του δικτύου. Ταυτόχρονα πραγματοποιήθηκε και μελέτη και αναπαράσταση των 'πρασίνων' χρόνων για ένα κεντρικό κόμβο του δικτύου για να αναλυθεί η συμπεριφορά των φωτεινών σηματοδοτών με την χρήση και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Στην περίπτωση μη χρήσης του αλγορίθμου οι 'πράσινοι' χρόνοι παραμένουν σταθεροί καθ' όλη την διάρκεια των επαναλήψεων. Ακολουθείται ο ίδιος τρόπος υπολογισμού της ταχύτητας του κάθε υποδίκτυου που θα αναλυθεί και στα δίκτυα των 16 και 25 κόμβων. Κριτήριο στην περίπτωση των 9 κόμβων για να παρατηρηθεί αν υπήρξε βελτίωση ή όχι είναι η μέση ταχύτητα του συνολικού δικτύου.

Για τα δίκτυα των 16 και 25 κόμβων πραγματοποιήθηκε μια μελέτη με 2 παραδοχές. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν οι 'πράσινοι' χρόνοι για τους οποίους ο υπολογισμός τους προήρθε από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο υποκεφάλαιο 8.1.2. Στην συνέχεια, τροποποιήθηκαν τα πράσινα του βέλτιστου σταθερού χρόνου κατά  $\pm 2$  δευτερόλεπτα. Με τον τρόπο αυτό γίνεται προσπάθεια αναπαράστασης ενός παλαιωμένου ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης το οποίο δεν ανταποκρίνεται στις τωρινές συνθήκες. Για να εντοπιστεί εάν υπάρχει ή όχι βελτίωση του δικτύου που μελετάται, υπολογίζεται το κριτήριο productivity. Το παραπάνω κριτήριο υπολογίζεται ως το γινόμενο της ροής των οχημάτων επί την μέση ταχύτητα του δικτύου. Σε κάθε μελέτη δικτύου ακολουθείται η ίδια δομή όπου αναφέρθηκε και παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ο πίνακας μεταβλητών και τα αντίστοιχα γραφήματα τοπικού κριτηρίου productivity και ταχύτητας είτε μελετώντας το δίκτυο ως ενιαίο είτε χωρισμένο σε μικρότερα υποδίκτυα. Ταυτόχρονα, παρουσιάζονται και τα γραφήματα για την μέση ταχύτητα, την ροή των οχημάτων, το γινόμενο τους αποτελεί όπως προαναφέρθηκε βασικό κριτήριο για την συμπεριφορά του δικτύου. Τόσο για το δίκτυο των 16 όσο και για το δίκτυο των 25 κόμβων πραγματοποιείται ανάλυση των 'πρασίνων' χρόνων ενός κεντρικού κόμβου. Στην περίπτωση χωρισμού του δικτύου σε μικρότερα υποδίκτυα πραγματοποιείται ανάλυση του κεντρικού κόμβου κάθε υποδίκτυου ξεχωριστά. Την ίδια στιγμή, για κάθε γράφημα που θα παρατεθεί στην συνέχεια παρουσιάζεται η γραμμική εξίσωση καθώς και ο συντελεστής προσδιορισμού, τόσο με την χρήση του αλγορίθμου AFT, όσο και με την μη χρήση του. Το παραπάνω συμβαίνει τόσο για τα γραφήματα που αφορούν ένα υποδίκτυο, όσο και για τα γραφήματα που αφορούν το συνολικό δίκτυο. Το τοπικό κριτήριο productivity του κάθε υποδίκτυου υπολογίζεται από το γινόμενο της μέσης ταχύτητας του υποδίκτυου με την ροή των οχημάτων εισόδου, για κάθε επανάληψη του αλγορίθμου της προσομοίωσης. Η μέση ταχύτητα υπολογίζεται ως το γινόμενο της ταχύτητας με τον αριθμό των οχημάτων κάθε link διά τον συνολικό αριθμό των οχημάτων. Η ροή των οχημάτων υπολογίζεται με βάση τον αριθμό των οχημάτων σε κάθε είσοδο του υποδικτύου, και αθροίζοντας τα. Η μέση ταχύτητα του συνολικού δικτύου δίνεται μέσω δεσμευμένων συναρτήσεων του AIMSUN. Η ροή των οχημάτων υπολογίζεται με βάση τις εισόδους του δικτύου. Το γινόμενο των παραπάνω δύο παραμέτρων αποτελεί το κύριο κριτήριο productivity με βάση το AIMSUN.

Για τα δίκτυα των 9, 16 και 25 κόμβων αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί ένα αριθμός διαφορετικών χωρισμών του δικτύου σε μικρότερα υποδίκτυα. Η επιλογή του τρόπου χωρισμού του δικτύου με μικρότερα ανεξάρτητα υποδίκτυα πραγματοποιήθηκε με τυχαιότητα, προσπαθώντας πάντα να εντοπιστεί ο καλύτερος τρόπος χωρισμού του δικτύου, ο οποίος να προσφέρει και την μεγαλύτερη βελτίωση στο συνολικό δίκτυο βάσει του κριτηρίου AFT. Η καινοτομία της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η εξής, ότι πραγματοποιήθηκαν 2 επιπλέον είδη χωρισμού του δικτύου ο χωρισμός με κοινούς κόμβους (Common) καθώς και ο χωρισμός με uncontrolled κόμβους. Πιο συγκεκριμένα, ακολουθώντας τον χωρισμό με τους κοινούς κόμβους (Common) συμβαίνουν τα εξής. Αρχικά, αφού έχει πραγματοποιηθεί η κατάλληλη αρχικοποίηση για τα αρχεία εισόδου με βάση την επιλογή του χωρισμού στην συνέχεια για τους κοινούς κόμβους και πιο συγκεκριμένα για τους κόμβους που διαθέτουν κοινά link υπολογίζεται ο τελικός χρόνος της συγκεκριμένης φάσης των κοινών link ως εξής πραγματοποιείται πρόσθεση του χρόνου της φάσης (X) του κόμβου A με

την αντίστοιχη φάση (X) του κόμβου B και προκύπτει ο μέσος όρος του της τιμής χρόνου της φάσης (X) . Για τα υπόλοιπα link των κόμβων A και B από την στιγμή που οι συγκεκριμένοι κομβοί δεν διαθέτουν κοινά link δεν πραγματοποιείται καμία περαιτέρω ενέργεια.

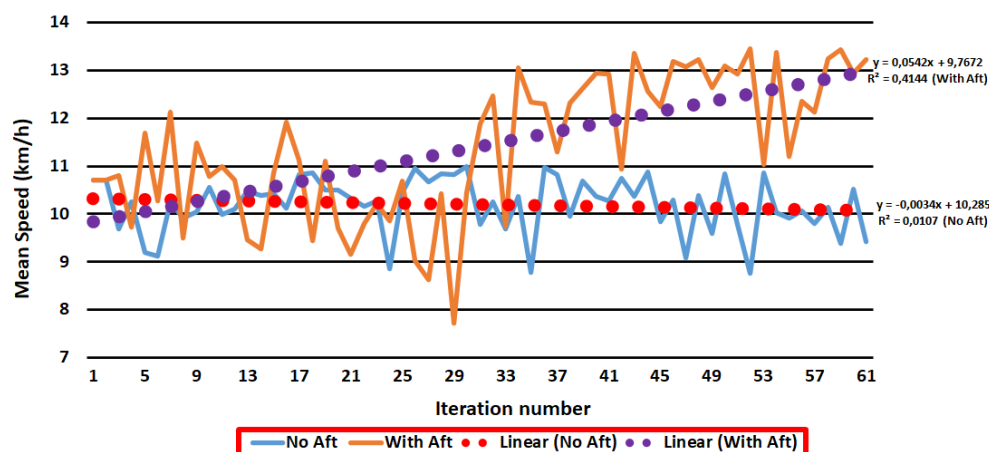
Όσον αφορά τον τρόπο χωρισμού Uncontrolled στον οποίο ένας αριθμός από κόμβους δεν λαμβάνεται υπόψιν (Uncontrolled) ακολουθήθηκε η εξής λογική. Επιλέχθηκε ένα σύνολο κόμβων που χωρίζει το δίκτυο σε δύο υποδίκτυα. Για αυτούς τους κόμβους που θεωρούνται ως σύνορο των δύο υποδικτύων δεν εφαρμόζεται ο AFT και άρα έχουν συνεχώς σταθερούς πράσινους χρόνους. Στην ουσία αυτοί οι κόμβοι λειτουργούν σαν είσοδοι για τα δύο υποδίκτυα που πλέον θεωρούνται λιγότερα εξαρτημένα μεταξύ τους μιας και δεν συνορεύουν άμεσα. Ταυτόχρονα οι σταθεροί πράσινοι χρόνοι των uncontrolled κόμβων επιτρέπουν μια μέγιστη ροή οπότε η αλληλεπίδραση των υποδικτύων είναι περιορισμένη. Ένα εμφανές ελάττωμα είναι ότι δεν γίνεται παραμετροποίηση του συνόλου των κόμβων του δικτύου μιας και ο χρήστης επιλέγει κάποιους κόμβους στους οποίους θα εφαρμόζεται η αρχική στρατηγική σταθερού χρόνου.

### 9.1.1 Δίκτυο 9 Κόμβων

Η αναπαράσταση του δικτύου των 9 κόμβων έχει παρουσιαστεί παραπάνω (Σχήμα 8.1) και βρίσκεται στο υποκεφάλαιο 8.3.1. Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας παραμέτρων των μεταβλητών που κάνει χρήση ο αλγόριθμος AFT, καθώς και τα γραφήματα της ταχύτητας. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα γραφήματα των ‘πράσινων’ χρονών και για τις 4 φάσεις του κόμβου που μελετάται. Τελος παρουσιάζονται τα γραφήματα της μέσης ταχύτητας, για να εντοπιστεί αν υπάρχει ή όχι βελτίωση στο δίκτυο που μελετάται με βάση τον τρόπο επιλογής χωρισμού του δικτύου.

Μεταβλητές	Τιμές μεταβλητών
Nr_of_theta	27
Nr_of_x	1
Nr_of_pertubations	50
theta_lb	0
theta_ub	4
t_h	100
l_g	29
alpha_0	2
alpha_lower	0.01
Bound	0.05
bound_change	0.1
iteration_of_change	3
param_of_change	0.05

Πίνακας 9.1.1: Τιμές παραμέτρων δικτύου 9 κόμβων

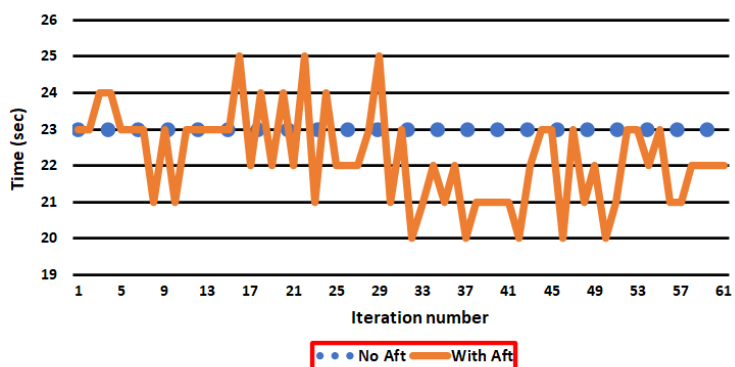


Σχήμα 9.1.1: Μέση ταχύτητα ολικού δικτύου

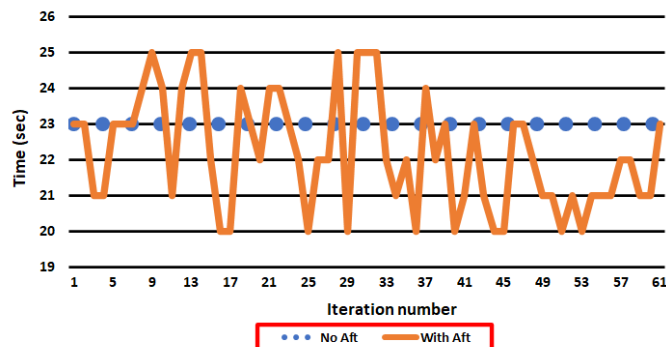
Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (Σχήμα 9.1.1) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας του ολικού δικτύου, χωρίς όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 12,68 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 13,45 km/h και εντοπίζεται στην 51<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 10,18 km/h και 10,98 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 29<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 24,56% στην ταχύτητα του δικτύου για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των

τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.

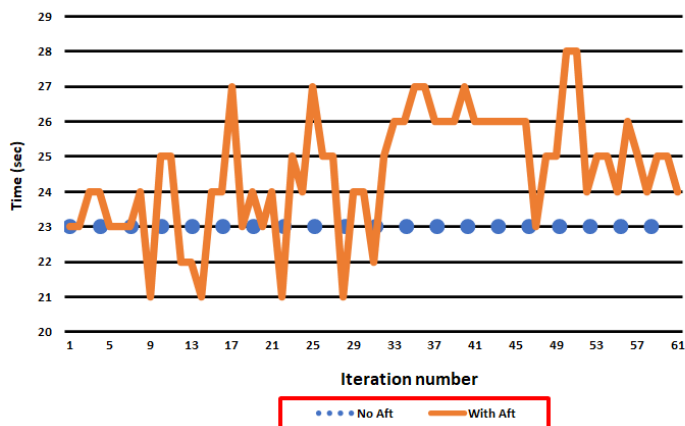
Στο σημείο αυτό θα πραγματοποιηθεί αναπαράσταση των πρασίνων χρόνων για κάθε φάση του δικτύου των 9 κόμβων σύμφωνα με το σχήμα (Σχήμα 8.1). Επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν τα γραφήματα αυτά, για ένα κεντρικό κόμβο του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, θα πραγματοποιηθεί η μελέτη των 4 φάσεων που αντιστοιχούν στον κόμβο με αρίθμηση 5. Σε κάθε γράφημα αναπαρίστανται ο χρόνος της φάση με την μη χρήση καθώς και με την χρήση του αλγορίθμου AFT.



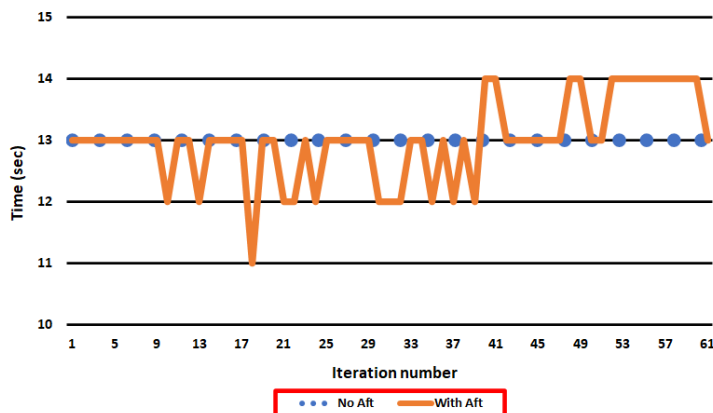
Σχήμα 9.1.2: 1<sup>η</sup> φάση για τον κόμβο με και χωρίς χρήση του αλγορίθμου AFT



Σχήμα 9.1.3: 2<sup>η</sup> φάση για τον κόμβο με και χωρίς χρήση του αλγορίθμου AFT



Σχήμα 9.1.4: 3<sup>η</sup> φάση για τον κόμβο με και χωρίς χρήση του αλγορίθμου AFT



Σχήμα 9.1.5: 4<sup>η</sup> φάση για τον κόμβο με και χωρίς χρήση του αλγορίθμου AFT

Στα γραφήματα (Σχήμα 9.1.2:5) παρουσιάζονται οι χρόνοι τόσο για την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, οπότε καθ' όλη την διάρκεια των 60 επαναλήψεων διατηρούν την φάση του χρόνου τους σταθερή χωρίς μεταβολές στις τιμές των δευτερολέπτων τους, όσο και οι χρόνοι των φάσεων με την χρήση του αλγορίθμου AFT που αλλάζουν για κάθε επανάληψη του αλγορίθμου. Όπως προαναφέρθηκε η καλύτερη τιμή της ταχύτητας του δικτύου εντοπίζεται στην 51<sup>η</sup> επανάληψη του αλγορίθμου.



Στο σημείο αυτό παρατίθενται ο συγκεντρωτικός πίνακας των 4<sup>ων</sup> φάσεων με την μη χρήση και την χρήση του αλγορίθμου AFT.

Φάσεις	Μη χρήση AFT	Με χρήση AFT
1 <sup>η</sup> φάση	23	23
2 <sup>η</sup> φάση	23	21
3 <sup>η</sup> φάση	23	24
4 <sup>η</sup> φάση	13	14

**Πίνακας 9.1.2:** Πράσινοι χρόνοι με και χωρίς χρήση αλγορίθμου AFT

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται ένας πίνακας που δείχνει το ποσοστό βελτίωσης με την χρήση του AFT σε σχέση με την μη χρήση του αλγορίθμου για όλα τα γραφήματα. Πραγματοποιήθηκαν 10 προσομοιώσεις και προέκυψαν τα εξής ποσοστά βελτίωσης:

Mean Speed	26,42%
Entrance Flow	0,35%

**Πίνακας 9.1.3:** Ποσοστά βελτίωσης ολοκλήρου δικτύου με την χρήση του αλγορίθμου AFT σε σχέση με την μη χρήση του

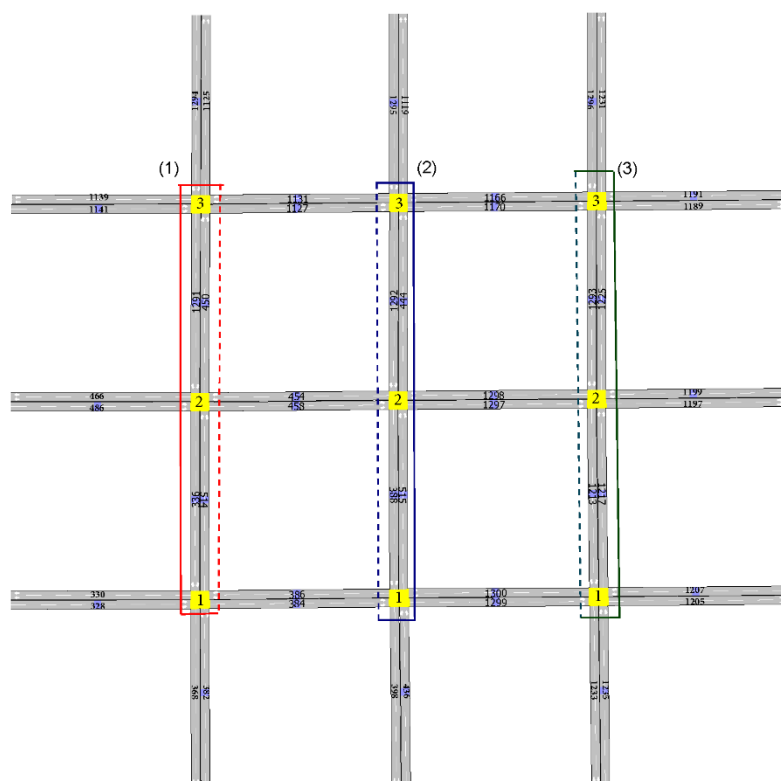
Αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί χωρισμός του υπάρχοντος δικτύου σε μικρότερα υποδίκτυα ώστε να υπάρξει μια πιο σφαιρική εικόνα της συμπεριφοράς του AFT. Στην πραγματικότητα ο AFT ήταν αρκετά αποτελεσματικός και δεν αναμέναμε διαφοροποιήσεις από τον χωρισμό σε υποδίκτυα. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται οι επιλογές που αποφασίστηκε να χωριστεί το αρχικό δίκτυο που μελετάται:

- Κατακόρυφος χωρισμός δικτύου σε 3 υποδίκτυα ( 1<sup>ο</sup> υποδίκτυο 3 κόμβων, 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο 3 κόμβων, 3<sup>ο</sup> υποδίκτυο 3 κόμβων ). Η αναπαράσταση του γραφήματος αυτό εμφανίζεται στο γράφημα ([Σχήμα 9.1.6](#)).
- Οριζόντιος χωρισμός δικτύου σε 2 υποδίκτυα με κοινούς κόμβους τους ενδιάμεσους κόμβους (1<sup>ο</sup> υποδίκτυο 6 κόμβων, 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο 6 κόμβων). Τα 2 υποδίκτυα έχουν 3 κοινούς κόμβους μεταξύ τους και 6 κόμβους οι οποίοι είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους.
- Οριζόντιος χωρισμός δικτύου σε 2 υποδίκτυα με uncontrolled τους ενδιάμεσους κόμβους (1<sup>ο</sup> υποδίκτυο 3 κόμβων, 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο 3 κόμβων). Τα 2 υποδίκτυα δεν έχουν κανένα κοινό κόμβο μεταξύ τους.
- Οριζόντιος χωρισμός δικτύου σε 3 υποδίκτυα ( 1<sup>ο</sup> υποδίκτυο 3 κόμβων, 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο 3 κόμβων, 3<sup>ο</sup> υποδίκτυο 3 κόμβων ).
- Πλάγιος χωρισμός δικτύου σε 2 υποδίκτυα με κοινή διαγώνιο (1<sup>ο</sup> υποδίκτυο 6 κόμβων, 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο 6 κόμβων). Τα 2 υποδίκτυα έχουν τους 3 πλάγιους κόμβους κοινούς μεταξύ τους.
- Πλάγιος χωρισμός δικτύου σε 3 υποδίκτυα (1<sup>ο</sup> υποδίκτυο 3 κόμβων, 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο 3 κόμβων, 3<sup>ο</sup> υποδίκτυο 3 κόμβων ).
- Χωρισμός δικτύου σε 2 υποδίκτυα με όλους τους τριγύρω κόμβους και τον κεντρικό (1<sup>ο</sup> υποδίκτυο 8 κόμβων, 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο 1 κόμβου).
- Χωρισμός δικτύου σε 2 υποδίκτυα με την μορφή σκάλας (1<sup>ο</sup> υποδίκτυο 6 κόμβων, 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο 3 κόμβων).
- Χωρισμός του δικτύου σε 2 υποδίκτυα (1<sup>ο</sup> υποδίκτυο 5 κόμβων, 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο 4 κόμβων).



## Κατακόρυφος χωρισμός δικτύου σε 3 υποδίκτυα

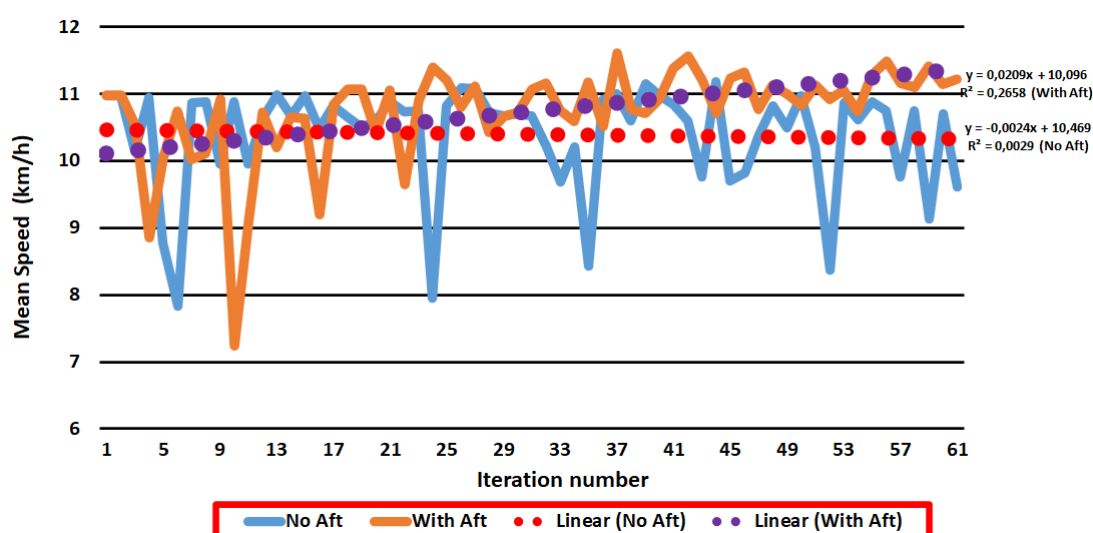
Λόγω του συγκεκριμένου τρόπου χωρισμού και για τα 3 υποδίκτυα, έχουν οριστεί οι ίδιες τιμές στις μεταβλητές καθώς κάθε υποδίκτυο περιέχει τον ίδιο αριθμό κόμβων.



Μεταβλητές	Τιμές μεταβλητών
Nr_of_theta	9
Nr_of_x	1
Nr_of_pertubations	50
theta_lb	0
theta_ub	4
t_h	100
l_g	10
alpha_0	2
alpha_lower	0.01
Bound	0.05
bound_change	0.1
iteration_of_change	3
param_of_change	0.05

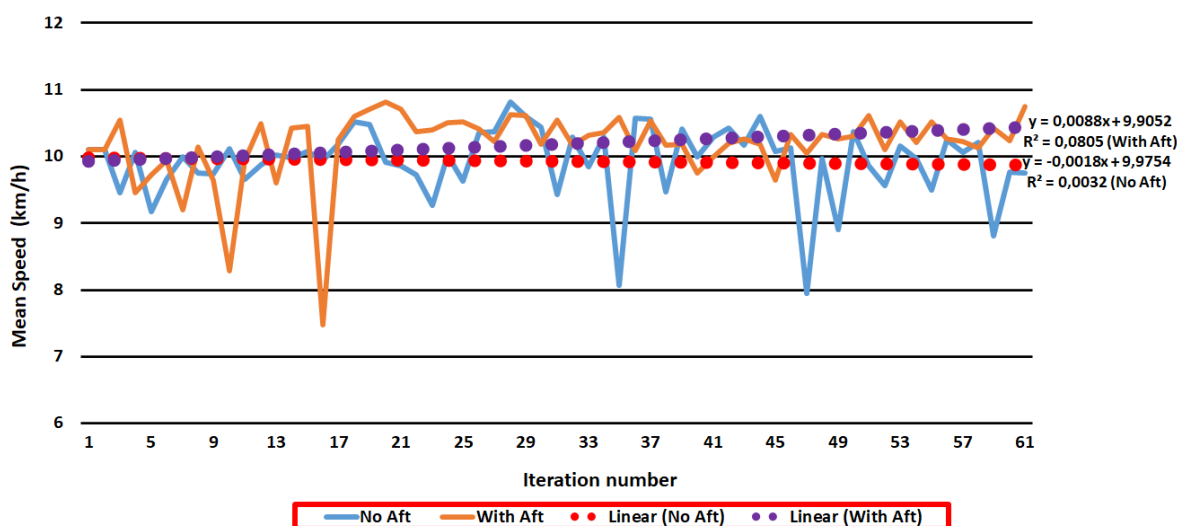
Πίνακας 9.1.4: Τιμές παραμέτρων για το πρώτο υποδίκτυο 3 κόμβων

Σχήμα 9.1.6: Κατακόρυφος χωρισμός δικτύου σε 3 υποδίκτυα



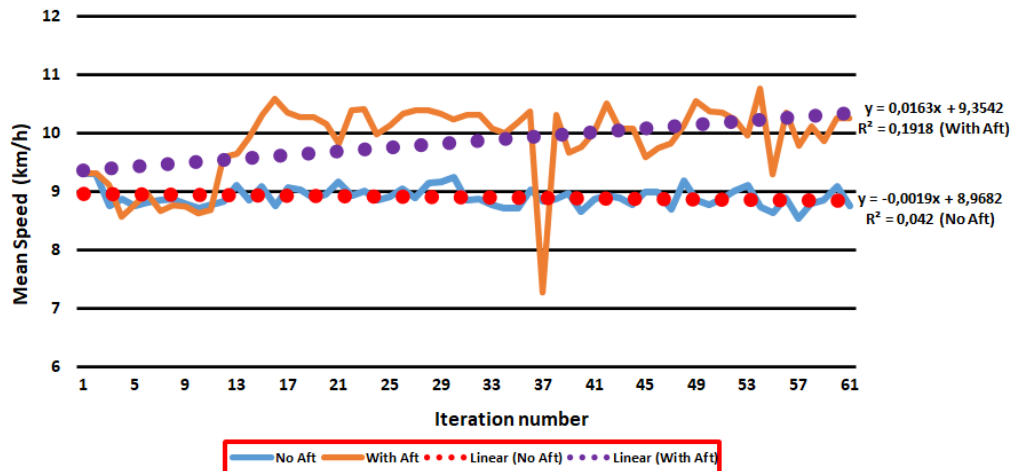
Σχήμα 9.1.7: Μέση ταχύτητα πρώτου υποδίκτυο

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (**Σχήμα 9.1.7**) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας σχετικά με το πρώτο υποδίκτυο, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας του πρώτου υποδικτύου για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 11,12 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 11,61 km/h και εντοπίζεται στην 36<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας του πρώτου υποδικτύου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT αντιστοιχούν 10,38 km/h και 11,18 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 43<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 7,09% στην ταχύτητα του πρώτου υποδικτύου για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης εμφανίζει μια μικρή πτώση, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια μικρή αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



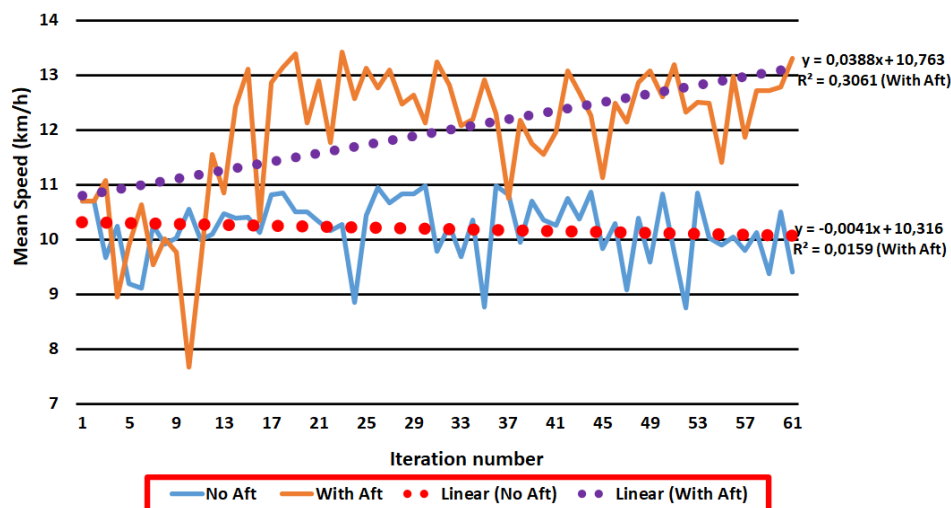
**Σχήμα 9.1.8:** Μέση ταχύτητα δευτέρου υποδικτύου

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (**Σχήμα 9.1.8**) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας σχετικά με το δεύτερο υποδίκτυο, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας του δεύτερου υποδικτύου για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 10,27 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 10,81 km/h και εντοπίζεται στην 19<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας του δεύτερου υποδικτύου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT αντιστοιχούν 9,92 km/h και 10,81 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 27<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 3,55% στην ταχύτητα του πρώτου υποδικτύου για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρων των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια μικρή αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



Σχήμα 9.1.9: Μέση ταχύτητα τρίτου υποδικτύου

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (Σχήμα 9.1.9) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας σχετικά με το τρίτο υποδίκτυο, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας του δευτέρου υποδικτύου για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 10,10 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 10,77 km/h και εντοπίζεται στην 53<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας του δευτέρου υποδικτύου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT αντιστοιχούν 8,90 km/h και 9,11 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 1<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 13,50% στην ταχύτητα του τρίτου υποδικτύου για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



Σχήμα 9.1.10: Μέση ταχύτητα ολικού δικτύου

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (**Σχήμα 9.1.10**) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας του ολικού δικτύου, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Πραγματοποιώντας ανάλυση του γραφήματος παρουσιάζεται όσον αφορά την μέση ταχύτητα του δικτύου και στις 2 περιπτώσεις υπάρχουν έντονες αλλαγές στις τιμές της ταχύτητας. Γεγονός το οποίο συνεχίζει να εμφανίζεται για τις 20 τελευταίες επαναλήψεις με την χρήση του αλγορίθμου AFT. Όσον αφορά τις αντίστοιχες επαναλήψεις με την μη χρήση του αλγορίθμου παρατηρείται μια πιο έντονη αλλαγή στις τιμές της ταχύτητας στο διάστημα των επαναλήψεων 50-53. Η μέση τιμή της ταχύτητας για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 12,53 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 13,42 km/h και εντοπίζεται στην 22<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 10,18 km/h και 10,98 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 29<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 23,13% στην μέση ταχύτητα του δικτύου για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.

Στο σημείο αυτό δίνεται ένας πίνακας (**Πίνακας 9.1.5**) που δείχνει το ποσοστό βελτίωσης με την χρήση του AFT σε σχέση με την μη χρήση του αλγορίθμου όσο αναφορά τον παραπάνω τρόπο χωρισμού, για όλα τα γραφήματα Πραγματοποιήθηκαν 10 προσομοιώσεις και προέκυψαν τα εξής ποσοστά βελτίωσης.

Παράμετρος	Υποδίκτυο Πρώτο Ποσοστό Βελτίωσης	Υποδίκτυο Δεύτερο Ποσοστό Βελτίωσης	Υποδίκτυο Τρίτο Ποσοστό Βελτίωσης	Συνολικό Δίκτυο Ποσοστό Βελτίωσης
Mean Speed	5,86%	4,34%	14,71%	23,08%
Entrance Flow	1,55%	2,08%	0,66%	(-)

**Πίνακας 9.1.5:** Ποσοστά βελτίωσης χωρισμού δικτύου με την μορφή σκάλας από τα αριστερά προς τα δεξιά σε 2 υποδίκτυα με την χρήση του αλγορίθμου AFT σε σχέση με την μη χρήση

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται ένας τελικός πίνακας (**Πίνακας 9.1.6**) ποσοστών βελτιώσεων ύστερα από 10 προσομοιώσεις, κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT σε σχέση με την μη χρήση του για κάθε είδος χωρισμού που πραγματοποιήθηκε.

	1 <sup>ο</sup> Υποδίκτυο		2 <sup>ο</sup> Υποδίκτυο		3 <sup>ο</sup> Υποδίκτυο		Συνολικό Δίκτυο	
Τρόπος Χωρισμού δικτύου	Mean Speed	Entrance Flow	Mean Speed	Entrance Flow	Mean Speed	Entrance Flow	Mean Speed	σ ( Mean Speed * Entrance flow car)
κατακόρυφος χωρισμός 3 κομμάτια	5,86%	1,55%	4,34%	2,08%	14,71%	0,66%	23,08%	3,91
οριζόντιος χωρισμός ενδιάμεσοι (common)	9,85%	0,45%	5,55%	1,02%			21,68%	7,10

οριζόντιος χωρισμός ενδιάμεσοι (uncontrolled)	9,89%	2,12%	-2,44%	0,32%			20,83%	11,44
οριζόντιος χωρισμός 3 κομμάτια	-0,71%	1,59%	9,06%	2,001%	-1,92%	-0,06%	7,205%	11,25
Πλάγιος χωρισμός με κοινή διαγώνιο (Common)	4,92%	1,47%	5,004%	1,26%			15,69%	7,41
Πλάγιος χωρισμός	5,45%	1,91%	9,06%	2,001%	5,23%	0,67%	20,84%	11,48
Τριγύρω κόμβοι και κεντρικός	6,19%	0,96%	4,7%	2,01%			21,35%	4,58
Χωρισμός σε 2 κομμάτια (σκάλα 6-3)	8,006%	0,95%	1,51%	1,38%			19,78%	2,52
Χωρισμός 5-4	8,57%	0,84%	3,24%	1,08%			19,04%	4,20
Ολόκληρο Δίκτυο	26,42%	0,35%					26,42%	5,12

**Πίνακας 9.1.6:** Ποσοστά βελτιώσεων παραμέτρων για δίκτυο 9 κόμβων

Παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό βελτίωσης το είχαμε για το συνολικό δίκτυο μιας και οι παράμετροι του προβλήματος είναι λίγες και διαχειρίσιμες από τον AFT όχι απλά δεν χρειάζεται να γίνει χωρισμός σε υποδίκτυα, αλλά περιπλέκει τα πράγματα μιας και κάνει πιο πολύπλοκο τον υπολογισμό των παραμέτρων. Στους περισσότερους χωρισμούς θεωρούμε τα επιλεγμένα υποδίκτυα ανεξάρτητα μεταξύ τους αλλά στην πραγματικότητα δεν είναι. Μικρές αλλαγές στο ένα υποδίκτυο μπορούν να αλλάζουν κατά πολύ τις συνθήκες στο δεύτερο με αποτέλεσμα ο AFT να μην μπορεί να συγκλίνει στις κατάλληλες τιμές παραμέτρων μιας και η ζήτηση του δικτύου δεν είναι ποτέ η ίδια μιας και εξαρτάται από τα άλλα υποδίκτυα. Παρόλα αυτά, λόγω του μικρού αριθμού των παραμέτρων Ο AFT και για τις περιπτώσεις του χωρισμού οδηγεί σε σημαντικές βελτιώσεις.

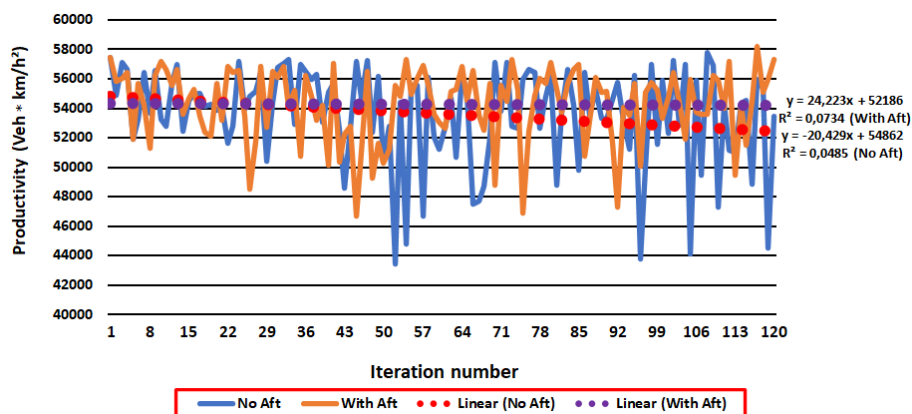
Εδώ πρέπει να τονίσουμε για αποφυγή παρεξηγήσεων ότι για τη μέση ταχύτητα του συνολικού δικτύου χρησιμοποιούμε την αρμονική ταχύτητα απευθείας από το AIMSUN, ενώ για την μέση ταχύτητα του υποδικτύου χρησιμοποιούμε την μέση ταχύτητα κάθε δρόμου πολλαπλασιασμένο με τον αριθμό των οχημάτων που πέρασαν από το δρόμο δια το σύνολο των οχημάτων. Πρόκειται για 2 διαφορετικά μεγέθη και γι αυτό το λόγο δεν υπάρχει αντιστοιχία στα ποσοστά βελτιώσεις των υποδικτύων με αυτά του συνολικού δικτύου

## 9.2.1 Δίκτυο 16 Κόμβων

Η αναπαράσταση του δικτύου των 16 κόμβων έχει παρουσιαστεί παραπάνω (Σχήμα 8.2) και βρίσκεται στο υποκεφάλαιο 8.3.1. Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας παραμέτρων των μεταβλητών που κάνει χρήση ο αλγόριθμος AFT, καθώς και τα γραφήματα του τοπικού κριτηρίου productivity κάθε υποδικτύου μαζί με την ταχύτητα τους. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα γραφήματα των 'πράσινων' χρόνων και για τις 4 φάσεις του κόμβου που μελετάται. Τέλος παρουσιάζονται τα γραφήματα της μέσης ταχύτητας, της ροής και του γινομένου των 2 αυτών παραμέτρων που αποτελούν το κριτήριο για να εντοπιστεί αν υπάρχει ή όχι βελτίωση στο δίκτυο που μελετάται με βάση τον τρόπο επιλογής χωρισμού του δικτύου.

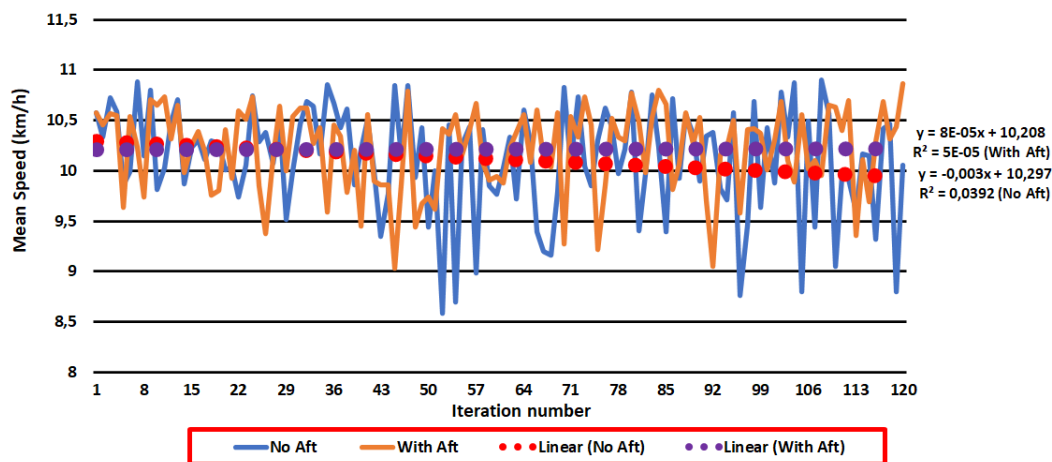
Μεταβλητές	Τιμές μεταβλητών
Nr_of_theta	48
Nr_of_x	1
Nr_of_pertubations	50
theta_lb	0
theta_ub	4
t_h	100
l_g	50
alpha_0	2
alpha_lower	0.01
Bound	0.05
bound_change	0.1
iteration_of_change	3
param_of_change	0.05

Πίνακας 9.2.1: Τιμές παραμέτρων ενιαίου δικτύου 16 κόμβων



Σχήμα 9.2.1: Συμπεριφορά ολικού δικτύου κάνοντας χρήση κριτηρίου productivity

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (Σχήμα 9.2.1) παρουσιάζεται η συμπεριφορά του ολικού δικτύου με βάση το κριτήριο productivity, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή του κριτηρίου για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 54691 αριθμός οχημάτων επι μέση ταχύτητα και η μέγιστη τιμή ισούται με 58209 αριθμός οχημάτων επι μέση ταχύτητα και εντοπίζεται στην 117<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές του κριτηρίου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 53626 και 57787 η τιμή αυτή εντοπίζεται στην 108<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 1,98% στο δίκτυο για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου.

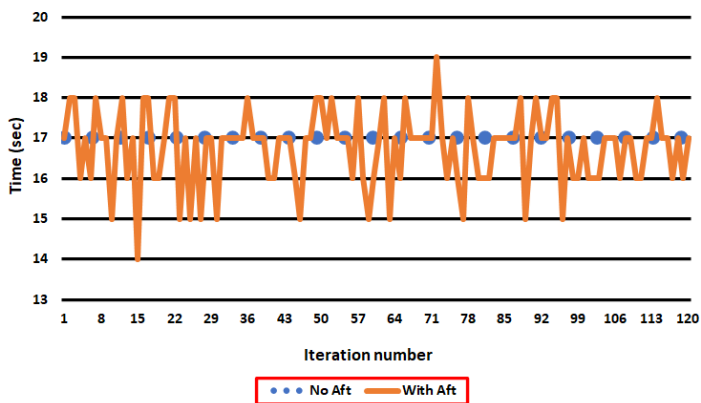


**Σχήμα 9.2.2:** Μέση ταχύτητα ολικού δικτύου

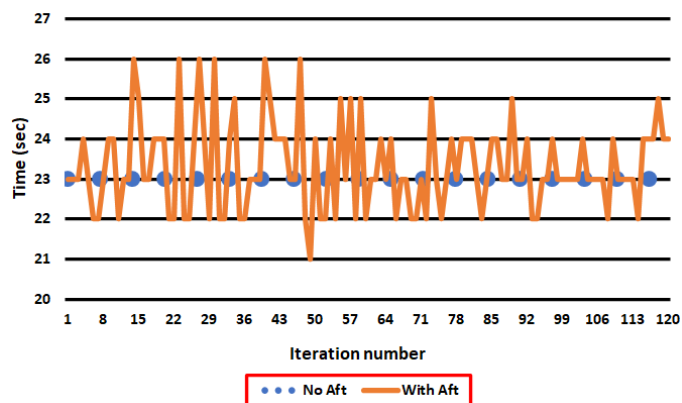
Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (**Σχήμα 9.2.2**) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας του ολικού δικτύου, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Παρατηρείται ότι για ορισμένο αριθμό επαναλήψεων υπάρχει μια μεγάλη αλλαγή τιμών της ταχύτητας και στις 2 περιπτώσεις η οποία όμως εξισορροπείται σε ικανοποιητικό βαθμό στις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας εφαρμογή του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 10,28 km/h και η μέγιστη τιμή της μέσης ταχύτητας ισούται με 10,86 km/h και εντοπίζεται στην 120<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 10,11 km/h και 10,89 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 110<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 1,69% στην ταχύτητα του δικτύου για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης εμφανίζει μια μικρή πτώση στις τιμές της, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια σταθερότητα στην τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο δεν παρουσιάζεται κάποια αισθητή βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.

Στο σημείο αυτό θα πραγματοποιηθεί αναπαράσταση των πράσινων χρόνων για κάθε φάση του δικτύου των 16 κόμβων σύμφωνα με το σχήμα (**Σχήμα 8.2**). Επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν τα γραφήματα αυτά, για ένα κεντρικό κόμβο του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, θα πραγματοποιηθεί η μελέτη των 4 φάσεων που αντιστοιχούν στον κόμβο με αρίθμηση 7. Σε κάθε γράφημα αναπαρίστανται ο χρόνος της φάση με την μη χρήση καθώς και με την χρήση του αλγορίθμου AFT

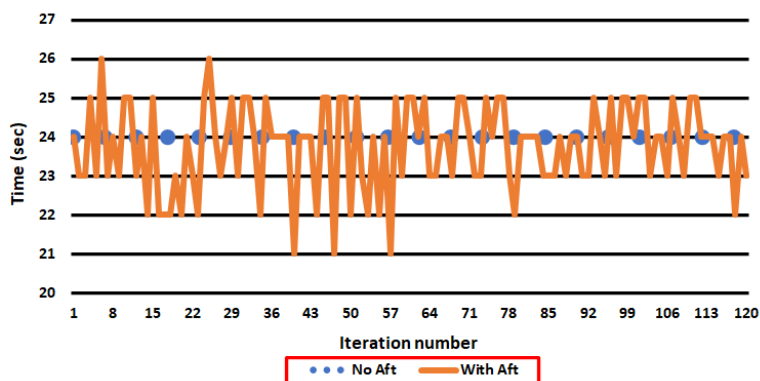




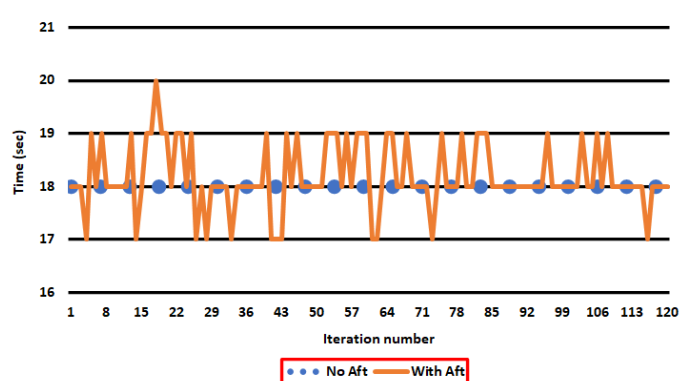
Σχήμα 9.2.3: 1<sup>η</sup> φάση για τον κόμβο με και χωρίς χρήση του αλγορίθμου AFT



Σχήμα 9.2.4: 2<sup>η</sup> φάση για τον κόμβο με και χωρίς χρήση του αλγορίθμου AFT



Σχήμα 9.2.5: 3<sup>η</sup> φάση για τον κόμβο με και χωρίς χρήση του αλγορίθμου AFT



Σχήμα 9.2.6: 4<sup>η</sup> φάση για τον κόμβο με και χωρίς χρήση του αλγορίθμου AFT

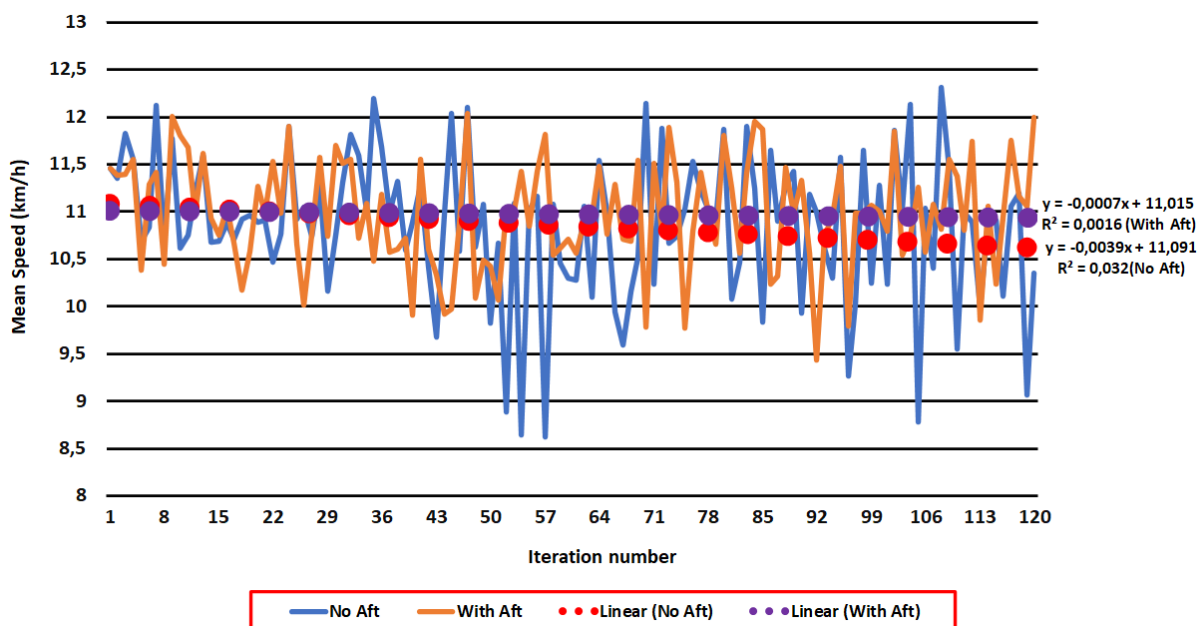
Στα γραφήματα (Σχήμα 9.2.3:6) παρουσιάζονται οι χρόνοι τόσο για την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, όπου καθ' όλη την διάρκεια των 120 επαναλήψεων διατηρούν την φάση του χρόνου τους σταθερή χωρίς μεταβολές στις τιμές των δευτερολέπτων τους, όσο και οι χρόνοι των φάσεων με την χρήση του αλγορίθμου AFT που αλλάζουν για κάθε επανάληψη του αλγορίθμου. Όπως προαναφέρθηκε η καλύτερη τιμή τόσο του τοπικού κριτηρίου productivity, όσο και του κριτηρίου productivity με βάση το AIMSUN αντιστοιχεί στην 117<sup>η</sup> επανάληψη του αλγορίθμου.

Στο σημείο αυτό παρατίθενται ο συγκεντρωτικός πίνακας των 4<sup>ων</sup> φάσεων με την μη χρήση και την χρήση του αλγορίθμου AFT.

Φάσεις	Μη χρήση AFT	Με χρήση AFT	Με χρήση AFT (Με βάση το AIMSUN)
1 <sup>η</sup> φάση	17	16	16
2 <sup>η</sup> φάση	23	24	24
3 <sup>η</sup> φάση	24	24	24
4 <sup>η</sup> φάση	18	18	18

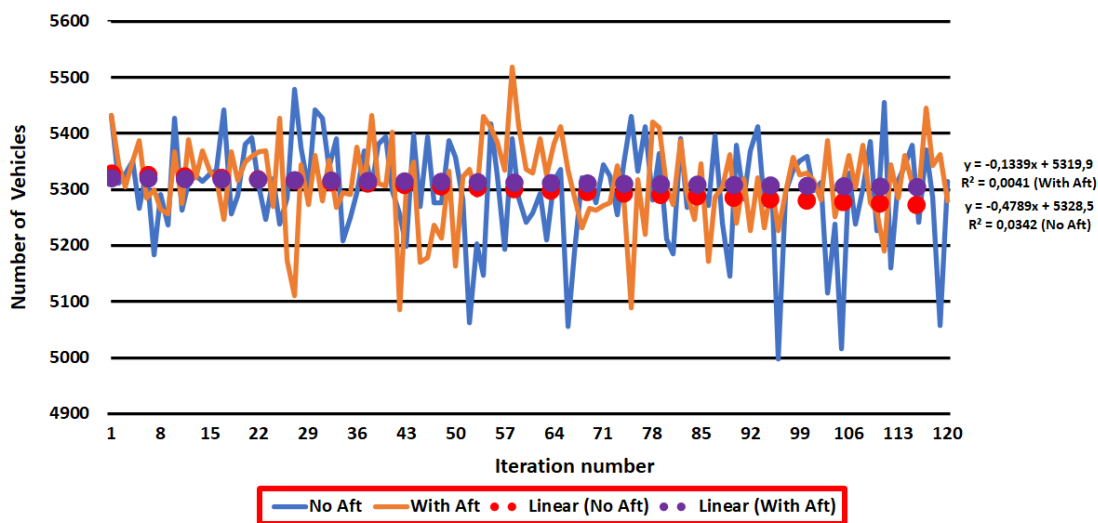
Πίνακας 9.2.2: Πράσινοι χρόνοι με και χωρίς χρήση αλγορίθμου AFT





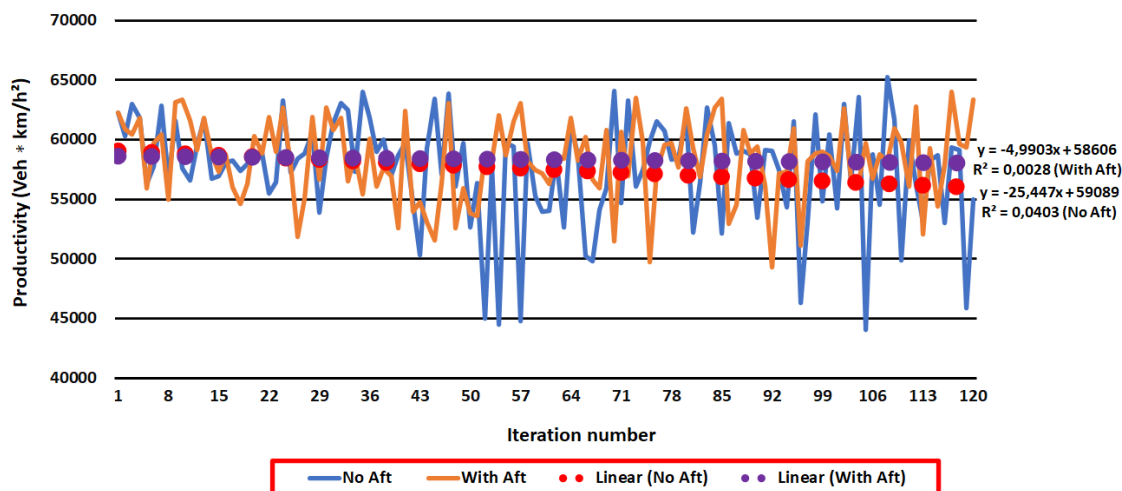
**Σχήμα 9.2.7:** Μέση ταχύτητα ολικού δικτύου η οποία δίνεται από το AIMSUN

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (**Σχήμα 9.2.7**) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας του ολικού δικτύου, με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας με βάση το AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 11,05 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 12,03 km/h και εντοπίζεται στην 47<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 10,85 km/h και 12,31 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 109<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 1,88% στην μέση ταχύτητα του δικτύου με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης εμφανίζει μια πτώση στις τιμές της, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια σταθερότητα στην τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο δεν παρουσιάζεται κάποια αισθητή βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις



**Σχήμα 9.2.8:** Συμπεριφορά ροής οχημάτων ολικού δικτύου η οποία δίνεται από το AIMSUN

Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση (Σχήμα 9.2.8), παρουσιάζεται η συμπεριφορά της ροής οχημάτων ταχύτητας του ολικού δικτύου, με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ροής των οχημάτων με βάση το AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 5316 αριθμός οχημάτων και η μέγιστη τιμή ροής ισούται με 5519 και εντοπίζεται στην 58<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ροής των οχημάτων με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 5299 και 5478 και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 27<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 0,32% στην ροή των οχημάτων του δικτύου με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης εμφανίζει μια πτώση στις τιμές της, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια σταθερότητα στην τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο δεν παρουσιάζεται κάποια αισθητή βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



**Σχήμα 9.2.9:** Κριτήριο productivity με βάση το AIMSUN για το ολικό δίκτυο

Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση (Σχήμα 9.2.9), παρουσιάζεται το κριτήριο productivity με βάση το AIMSUN, το οποίο ισούται με την μέση ταχύτητα δικτύου επί την ροή των οχημάτων που δίνει το AIMSUN. Το productivity είναι το κύριο κριτήριο για να εντοπιστεί εάν υπήρξε συνολική βελτίωση δίκτυο με την χρήση του αλγορίθμου AFT. Τα γραφήματα για την ροή οχημάτων στο δίκτυο καθώς και της μέσης ταχύτητας του δικτύου με βάση το AIMSUN αναπαράστηκαν παραπάνω. Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση, με την χρήση του αλγορίθμου AFT καθ' όλη την διάρκεια των 120 επαναλήψεων εντοπίζεται ότι η συμπεριφορά της γραφικής αναπαράστασης εμφανίζει σε αρκετά σημεία έντονες αλλαγές στις τιμές του κριτηρίου productivity. Οι αλλαγές αυτές των τιμών μειώνονται έως ένα σημείο για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις όπου ο αλγόριθμος AFT έχει κατασταλάξει στις τιμές των παραμέτρων που κάνει χρήση. Αντιθέτως, παρατηρείται ότι καθ' όλη την διάρκεια με τη μη χρήση του αλγορίθμου AFT η προσομοίωση παρουσιάζει μια σταθερότητα στις τιμές της για τις πρώτες 30 επαναλήψεις. Στην συνέχεια, όμως δημιουργούνται έντονες και ξαφνικές αλλαγές στις τιμές του productivity σε πολλά σημεία καθ' όλη την διάρκεια των επαναλήψεων. Όσον αφορά τις τελευταίες 20 επαναλήψεις με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT εντοπίζεται μεγάλη μεταβολή των τιμών που προσφέρει το κριτήριο productivity που δίνεται από το AIMSUN, οδηγώντας σε μη επιθυμητά αποτελέσματα. Η μέση τιμή του κριτηρίου productivity με βάση το AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 58802 αριθμός οχημάτων επί ταχύτητα και η μέγιστη τιμή ισούται με 63983 αριθμός οχημάτων επί ταχύτητα και εντοπίζεται στην 117<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές του κριτηρίου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 57549 και 65275 η τιμή αυτή εντοπίζεται στην 108<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 2,17% στο κριτήριο productivity με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης εμφανίζει μια πτώση στις τιμές της, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια σταθερότητα στην τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο δεν παρουσιάζεται κάποια αισθητή βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται ένας πίνακας (Πίνακας 9.2.3 ) που δείχνει το ποσοστό βελτίωσης με την χρήση του AFT σε σχέση με την μη χρήση του αλγορίθμου για όλα τα γραφήματα. Πραγματοποιήθηκαν 10 προσομοιώσεις και προέκυψαν τα εξής ποσοστά βελτίωσης.

Παράμετρος	Ποσοστό Βελτίωσης
<b>Τοπικό κριτήριο productivity</b>	1,73%
<b>Mean Speed</b>	1,69%
<b>Mean Speed</b> (με βάση το AIMSUN)	2,01%
<b>Entrance Flow</b> (με βάση το AIMSUN)	0,06%
<b>Mean Speed *Entrance Flow</b> (με βάση το AIMSUN)	2,02%

**Πίνακας 9.2.3:** Ποσοστά βελτίωσης ολοκλήρου δικτύου με την χρήση του αλγορίθμου AFT σε σχέση με την μη χρήση του

Αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί χωρισμός του υπάρχοντος δικτύου σε μικρότερα υποδίκτυα οδηγώντας, τόσο στο να υπάρξει μια πιο σφαιρική εικόνα της συμπεριφοράς του δικτύου, όσο και στο να δημιουργηθούν καλύτερα αποτελέσματα με την βοήθεια του χωρισμού του αρχικού δικτύου. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται οι επιλογές που αποφασίστηκε να χωριστεί το αρχικό δίκτυο που μελετάται:

- Χωρισμός δικτύου σε 3 υποδίκτυα (1<sup>ο</sup> υποδίκτυο 6 κόμβων, 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο 6 κόμβων, 3 υποδίκτυο 4 κόμβων).

- Χωρισμός δικτύου σε 2 υποδίκτυα με κοινούς κόμβους στην πλάγια διαγώνιο (1<sup>ο</sup> υποδίκτυο 10 κόμβων, 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο 10 κόμβων). Τα 2 υποδίκτυα έχουν 4 κοινούς κόμβους μεταξύ τους και 6 κόμβους οι οποίοι είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους.
- Χωρισμός δικτύου σε 2 υποδίκτυα με uncontrolled κόμβους στην πλάγια διαγώνιο (1<sup>ο</sup> υποδίκτυο 6 κόμβων, 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο 6 κόμβων).
- Χωρισμός δικτύου σε 2 υποδίκτυα με κοινούς τους κάθετους κόμβους (1<sup>ο</sup> υποδίκτυο 8 κόμβων, 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο 12 κόμβων). Τα 2 υποδίκτυα έχουν 4 κοινούς κόμβους μεταξύ τους, το πρώτο υποδίκτυο έχει 4 ανεξάρτητους κόμβους και το δεύτερο έχει 8 ανεξάρτητους κόμβους. Το σχεδιάγραμμα (*Σχήμα 9.2.10*) για τους κόμβους αυτούς παρατίθεται στην συνέχεια καθώς και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μέσω της συγκεκριμένης μελέτης του δικτύου.
- Χωρισμός δικτύου σε 2 ανεξάρτητα υποδίκτυα ένα εξωτερικό υποδίκτυο και ένα εσωτερικό (το 1<sup>ο</sup> υποδίκτυο χαρακτηρίζεται ως το εξωτερικό υποδίκτυο και αποτελείται από 12 κόμβους και το 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο χαρακτηρίζεται ως το εσωτερικό υποδίκτυο και αποτελείται από 4 κόμβους).
- Χωρισμός δικτύου σε 2 ανεξάρτητα υποδίκτυα με κάθετο τρόπο (το 1<sup>ο</sup> υποδίκτυο αποτελείται από 8 κόμβους και το 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο αποτελείται από 8 κόμβους).
- Χωρισμός δικτύου σε 2 ανεξάρτητα υποδίκτυα με οριζόντιο τρόπο (το 1<sup>ο</sup> υποδίκτυο αποτελείται από 8 κόμβους και το 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο αποτελείται από 8 κόμβους).
- Χωρισμός του δικτύου με πλάγιο τρόπο από τα αριστερά προς τα δεξιά σε 2 ανεξάρτητα υποδίκτυα (το 1<sup>ο</sup> υποδίκτυο αποτελείται από 10 κόμβους και το 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο αποτελείται από 6 κόμβους). Το σχεδιάγραμμα (*Σχήμα 9.2.27*) για τους κόμβους αυτούς παρατίθεται στην συνέχεια καθώς και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μέσω της συγκεκριμένης μελέτης του δικτύου.
- Χωρισμός του δικτύου με την μορφή σκάλας από τα αριστερά προς τα δεξιά και για τα 2 υποδίκτυα (το 1<sup>ο</sup> υποδίκτυο αποτελείται από 9 κόμβους και το 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο αποτελείται από 7 κόμβους).

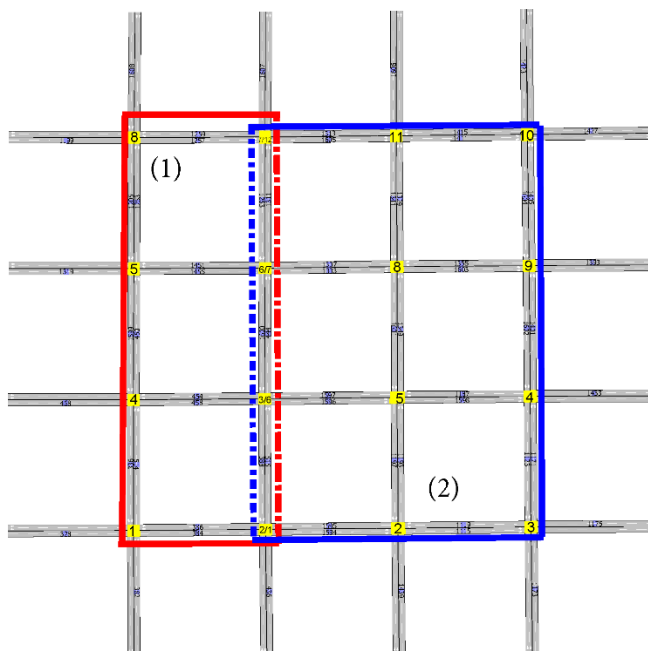
Πραγματοποιήθηκε ένα set 10 επαναλήψεων για κάθε τρόπο χωρισμού του δικτύου με βάση τους τρόπους χωρισμού που αναφέρθηκαν παραπάνω. Θα παρατεθούν όμως τα αποτελέσματα για τους τρόπους χωρισμού που προσφέρουν μεγαλύτερο ποσοστό βελτίωσης για το συνολικό κριτήριο productivity που δίνεται μέσω του προσομοιωτή AIMSUN. Για κάθε περίπτωση χωρισμού θα παρουσιαστούν τα γραφήματα που αφορούν το τοπικό κριτήριο productivity καθώς το γράφημα της ταχύτητας κάθε υποδίκτυο ξεχωριστά. Ταυτόχρονα, θα παρουσιαστούν τα γραφήματα για την ταχύτητα, την ροή, και το συνολικό κριτήριο productivity με την βοήθεια του προσομοιωτή AIMSUN. Τα γραφήματα που παρατίθενται αφορούν μια συγκεκριμένη προσομοίωση η οποία βρίσκονταν πιο κοντά στο μέσο όρο αυτών των 10 προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν. Τέλος θα παρουσιαστεί και ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τα τελικά αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση.

## Χωρισμός του δικτύου με κοινούς κάθετους κόμβους για τα 2 υποδίκτυα

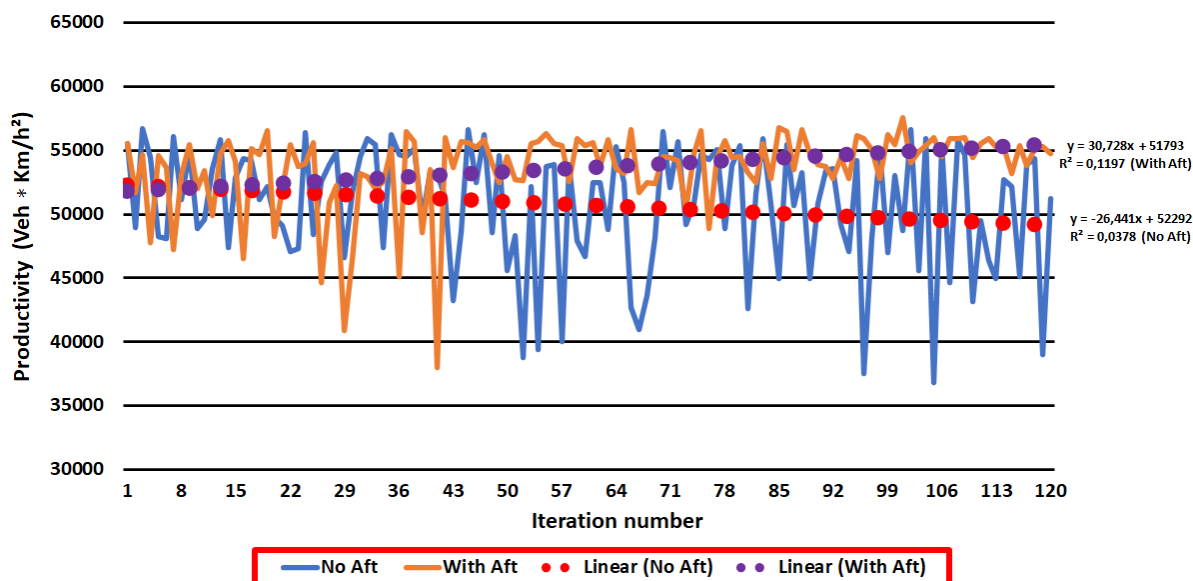
Η αναπαράσταση για τον χωρισμό δικτύου σε 2 υποδίκτυα με κοινούς κάθετους κόμβους για τα 2 υποδίκτυα, παρουσιάζεται στο γράφημα (Σχήμα 9.2.10) καθώς και οι πίνακες μεταβλητών για το πρώτο (Πίνακας 9.2.4) και δεύτερο (Πίνακας 9.2.5) υποδίκτυο αντίστοιχα που έχουν παρατεθεί παρακάτω.

Μεταβλητές	Τιμές μεταβλητών
Nr_of_theta	24
Nr_of_x	1
Nr_of_perturbations	50
theta_lb	0
theta_ub	4
t_h	100
l_g	25
alpha_0	2
alpha_lower	0.01
bound	0.05
bound_change	0.1
iteration_of_change	3
param_of_change	0.05

Πίνακας 9.2.4: Τιμές παραμέτρων για το πρώτο υποδίκτυο 8 κόμβων

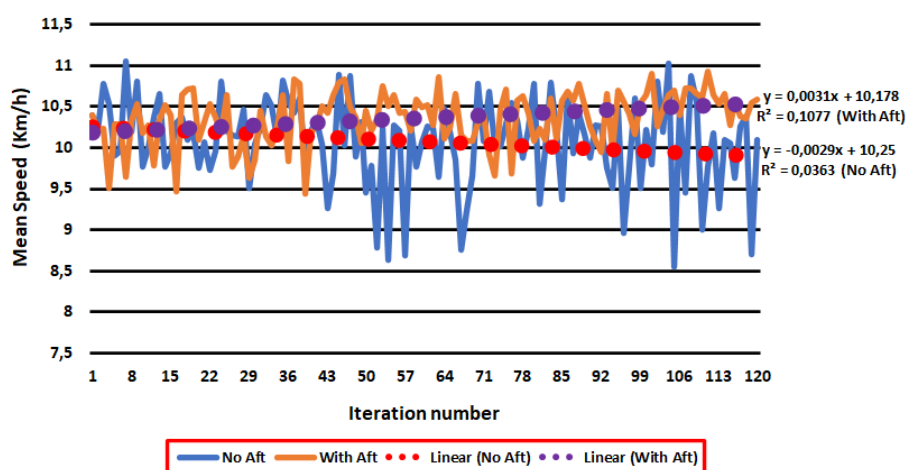


Σχήμα 9.2.10: Χωρισμός δικτύου σε 2 υποδίκτυα με κοινούς τους κάθετους κόμβους



Σχήμα 9.2.11: Συμπεριφορά τοπικού κριτηρίου productivity για το πρώτο υποδίκτυο

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (**Σχήμα 9.2.11**) παρουσιάζεται η συμπεριφορά του πρώτου υποδίκτυου όσον αφορά το τοπικό κριτήριο productivity, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή του τοπικού κριτηρίου productivity για το πρώτο υποδίκτυο για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 55214 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και η μέγιστη τιμή ισούται με 57585 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και εντοπίζεται στην 101<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές του τοπικού κριτηρίου productivity με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 50692 και 56703 η τιμή αυτή εντοπίζεται στην 3<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 8,92% στο πρώτο υποδίκτυο σχετικά με το τοπικό κριτήριο productivity για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης εμφανίζει μια αισθητή πτώση στις τιμές της, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



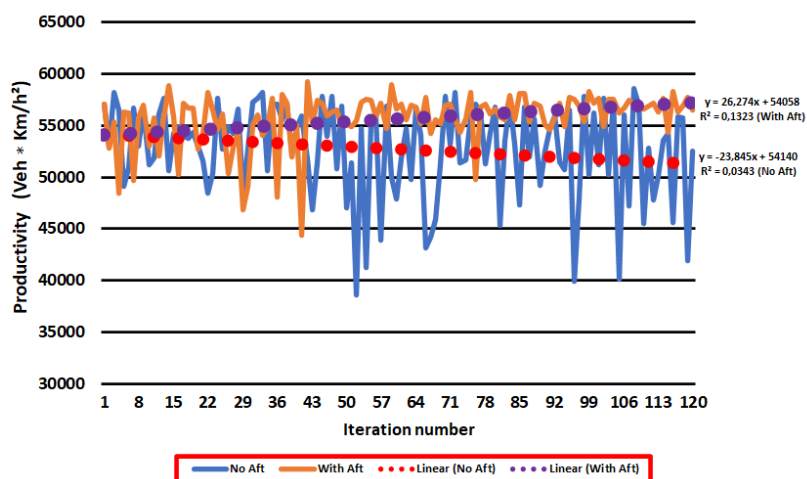
**Σχήμα 9.2.12:** Μέση ταχύτητα πρώτου υποδικτύου

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (**Σχήμα 9.2.12**) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας σχετικά με το πρώτο υποδίκτυο, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας του πρώτου υποδικτύου για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 10,57 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 10,93 km/h και εντοπίζεται στην 111<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας του πρώτου υποδικτύου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT αντιστοιχούν 10,07 km/h και 11,04 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 7<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 5,01% στην ταχύτητα του πρώτου υποδικτύου για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης εμφανίζει μια έντονη πτώση στις τιμές της, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια αισθητή αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



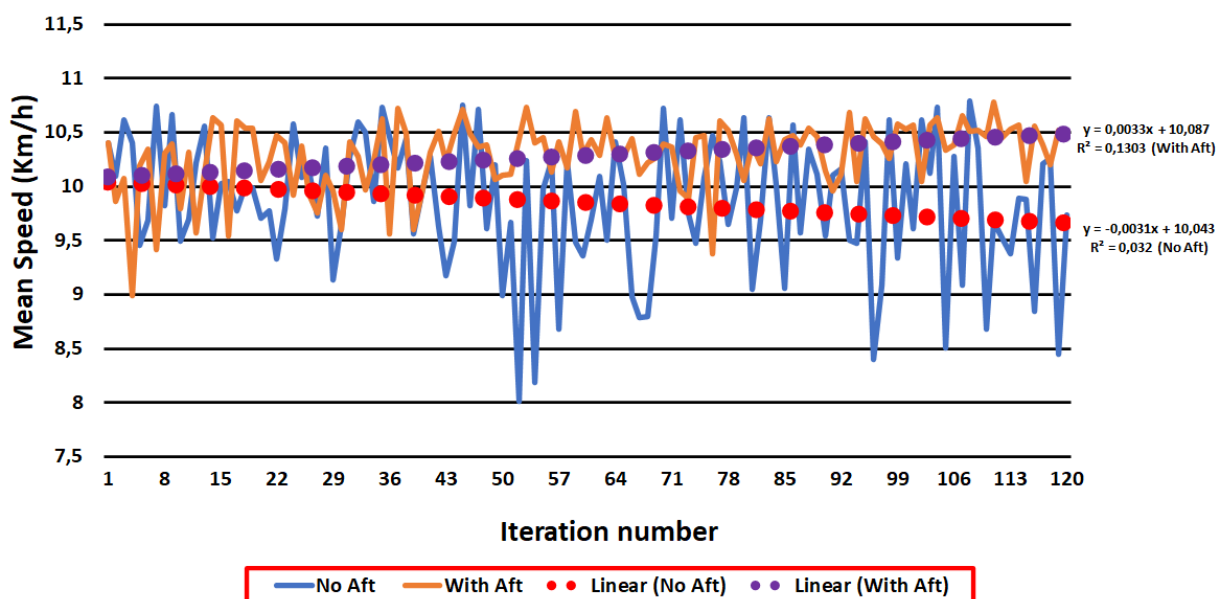
Μεταβλητές	Τιμές μεταβλητών
Nr_of_theta	36
Nr_of_x	1
Nr_of_pertubations	50
theta_lb	0
theta_ub	4
t_h	100
l_g	37
alpha_0	2
alpha_lower	0.01
bound	0.05
bound_change	0.1
iteration_of_change	3
param_of_change	0.05

**Πίνακας 9.2.5:** Τιμές παραμέτρων για το δεύτερο υποδίκτυο 12 κόμβων



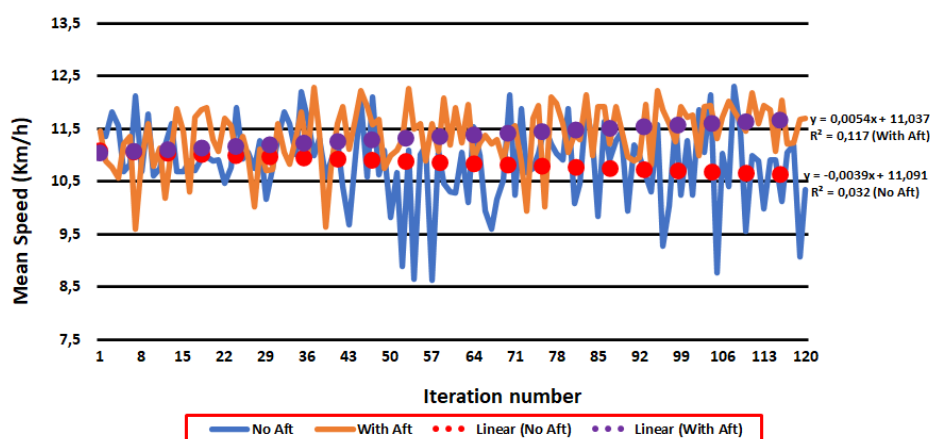
**Σχήμα 9.2.13:** Συμπεριφορά τοπικού κριτηρίου productivity για το δεύτερο υποδίκτυο

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (Σχήμα 9.2.13) παρουσιάζεται η συμπεριφορά του δευτέρου υποδικτύου όσον αφορά το τοπικό κριτήριο productivity, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή του τοπικού κριτηρίου productivity για το δεύτερο υποδίκτυο για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 56797 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και η μέγιστη τιμή ισούται με 59189 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και εντοπίζεται στην 42<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές του τοπικού κριτηρίου productivity με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 52697 και 58615 η τιμή αυτή εντοπίζεται στην 108<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 7,78% στο δίκτυο στην ταχύτητα του για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου.



**Σχήμα 9.2.14:** Μέση ταχύτητα δευτέρου υποδικτύου

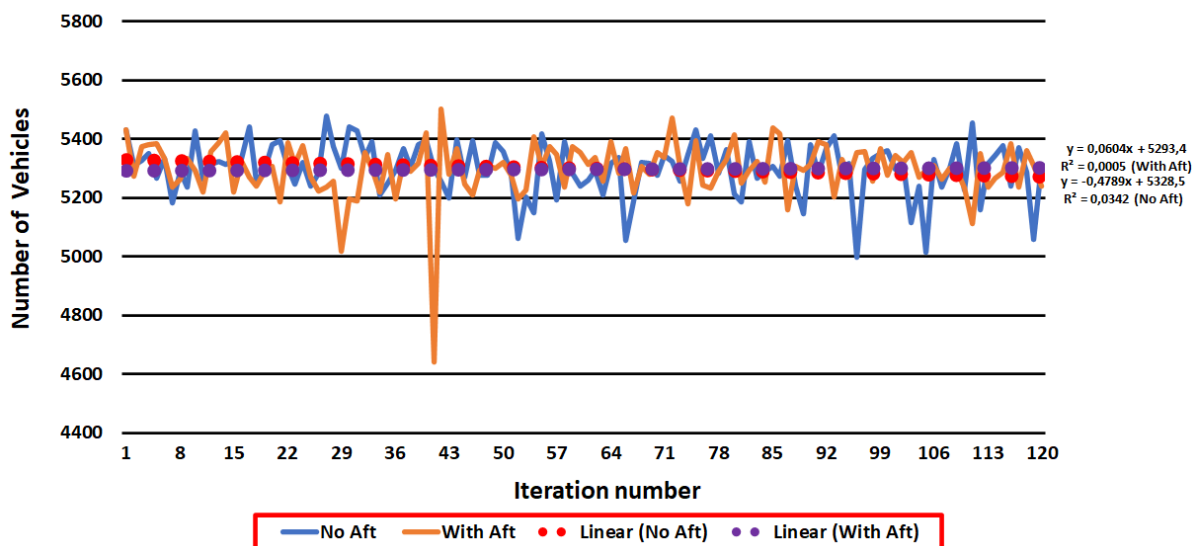
Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (**Σχήμα 9.2.14**) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της ταχύτητας σχετικά με το δεύτερο υποδίκτυο, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας του δευτέρου υποδικτύου για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 10,14 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 10,77 km/h και εντοπίζεται στην 106<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας του δευτέρου υποδικτύου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT αντιστοιχούν 9,85 km/h και 10,79 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 108<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 6,13% στην ταχύτητα του δικτύου για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης εμφανίζει μια πτώση στις τιμές της, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



**Σχήμα 9.2.15:** Μέση ταχύτητα ολικού δικτύου η οποία δίνεται από το AIMSUN

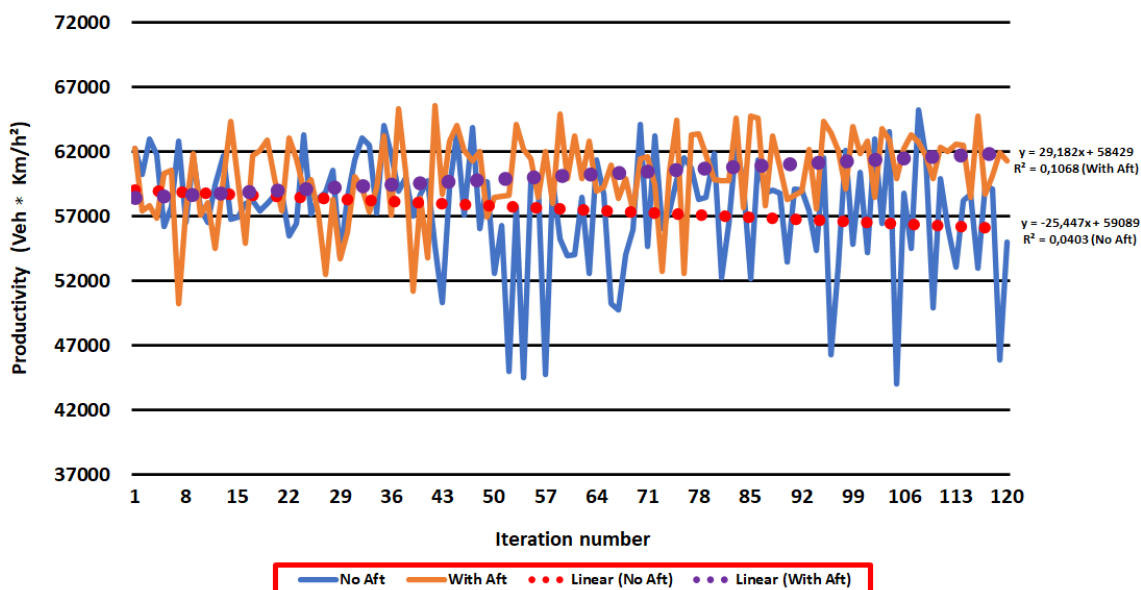
Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (**Σχήμα 9.2.15**) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας του ολικού δικτύου, με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας του δικτύου με βάση το AIMSUN για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 11,65 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 12,27 km/h και εντοπίζεται στην 37<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της μέσης ταχύτητας με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 10,85 km/h και 12,31 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 108<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 7,36% στην μέση ταχύτητα του δικτύου με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης εμφανίζει μια έντονη πτώση στις τιμές της, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.





**Σχήμα 9.2.16:** Συμπεριφορά ροής οχημάτων ολικού δικτύου η οποία δίνεται από το AIMSUN

Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση (Σχήμα 9.2.16), παρουσιάζεται η συμπεριφορά της ροής οχημάτων ταχύτητας του ολικού δικτύου, με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις, παρουσιάζεται μια ασταθή και άτακτη συμπεριφορά όσον αφορά στις τιμές της ροής οχημάτων. Η μέση τιμή της ροής των οχημάτων με βάση το AIMSUN για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 5288 αριθμός οχημάτων και η μέγιστη τιμή ροής ισούται με 5501 και εντοπίζεται στην 42<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ροής των οχημάτων με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 5299 και 5478 και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 27<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται μείωση κατά 0,20% στην ροή των οχημάτων του δικτύου με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου.



**Σχήμα 9.2.17:** Κριτήριο productivity με βάση το AIMSUN για το ολικό δίκτυο

Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση (**Σχήμα 9.2.17**), παρουσιάζεται το κριτήριο productivity με βάση το AIMSUN. Το productivity είναι το κύριο κριτήριο για να εντοπιστεί εάν υπήρξε συνολική βελτίωση δίκτυο με την χρήση του αλγορίθμου AFT. Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση, με την χρήση του αλγορίθμου AFT για την διάρκεια των πρώτων 88 επαναλήψεων εντοπίζεται ότι η συμπεριφορά της γραφικής αναπαράστασης εμφανίζει σε ορισμένα σημεία για τις επαναλήψεις 7-30 και 37-54 έντονες μεταπτώσεις στις τιμές του κριτηρίου productivity. Οι μεταπτώσεις αυτές μειώνονται έως ένα ικανοποιητικό σημείο για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις όπου ο αλγόριθμος AFT έχει κατασταλάξει στις τιμές των παραμέτρων που κάνει χρήση, προσφέροντας βελτίωση στο δίκτυο. Αντιθέτως, παρατηρείται ότι καθ' όλη την διάρκεια των επαναλήψεων με τη μη χρήση του αλγορίθμου AFT η προσομοίωση παρουσιάζει μια σταθερότητα στις τιμές της για τις πρώτες 40 επαναλήψεις. Στην συνέχεια, όμως δημιουργούνται έντονες αλλαγές στις τιμές του productivity σε αρκετά σημεία καθ' όλη την διάρκεια των επαναλήψεων. Όσον αφορά τις τελευταίες 20 επαναλήψεις με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT εντοπίζεται μεγάλη μεταβολή των τιμών που προσφέρει το κριτήριο productivity, οδηγώντας σε μη επιθυμητά αποτελέσματα. Η μέση τιμή του κριτηρίου productivity με βάση το AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 61632 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και η μέγιστη τιμή ισούται με 65543 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και εντοπίζεται στην 42<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές του κριτηρίου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 57549 και 65275 η τιμή αυτή εντοπίζεται στην 108<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 7,09% στο κριτήριο productivity με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης εμφανίζει μια αισθητή πτώση στις τιμές της, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.

Στο σημείο αυτό δίνεται ένας πίνακας (**Πίνακας 9.2.6**) που δείχνει το ποσοστό βελτίωσης με την χρήση του AFT σε σχέση με την μη χρήση του αλγορίθμου όσο αναφορά τον παραπάνω τρόπο χωρισμού, για όλα τα γραφήματα. Πραγματοποιήθηκαν 10 προσομοιώσεις και προέκυψαν τα εξής ποσοστά βελτίωσης:

Παράμετρος	Υποδίκτυο Πρώτο Ποσοστό Βελτίωσης	Υποδίκτυο Δεύτερο Ποσοστό Βελτίωσης	Συνολικό Δίκτυο Ποσοστό Βελτίωσης (με βάση το AIMSUN)
Τοπικό κριτήριο productivity	7,94%	6,5%	6,33%
Mean Speed	4,19%	4,8%	6,21%
Entrance Flow	3,77%	1,8%	0,15%

**Πίνακας 9.2.6 :** Ποσοστά βελτίωσης χωρισμού δικτύου με κοινούς κάθετους κόμβους σε 2 υποδίκτυα με την χρήση του αλγορίθμου AFT σε σχέση με την μη χρήση

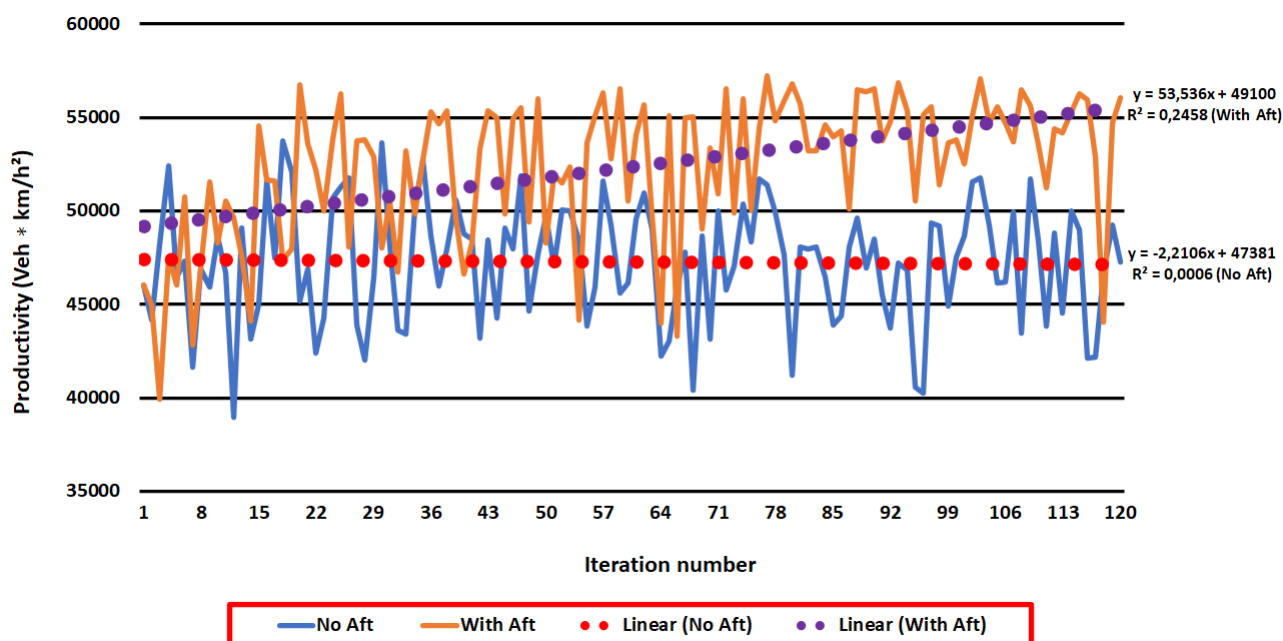
Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται ένας τελικός πίνακας (**Πίνακας 9.2.7**) ποσοστών βελτιώσεων ύστερα από 10 προσομοιώσεις, κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT σε σχέση με την μη χρήση του για κάθε είδος χωρισμού που πραγματοποιήθηκε.

	1° Υποδίκτυο			2° Υποδίκτυο			3° Υποδίκτυο			Συνολικό Δίκτυο (με βάση το AIMSUN)			
Τρόπος Χωρισμού δικτύου	Τοπ. κριτ. Productivity	Mean Speed	Entrance flow car	Τοπ. κριτ. Productivity	Mean Speed	Entrance flow car	Τοπ. κριτ. Productivity	Mean Speed	Entrance flow car	Mean Speed	Entrance flow car	Mean Speed * Entrance flow car	σ (Mean Speed * Entrance flow car)
Χωρισμός 3 <sup>ων</sup> κομματιών	6,48%	3,22%	3,27%	7,32%	3,44%	3,88%	2,36%	-0,51%	3,03%	3,97%	-0,08%	3,85%	4,39
6-6 common	6,58%	3,38%	3,25%	6,14%	3,19%	2,99%				3,65%	0,17%	3,79%	3,97
6-6 uncontrolled	7,41%	3,02%	4,45%	7,23%	2,82%	4,44%				5,85%	0,14%	5,94%	3,40
Common Κάθετα	7,93%	4,19%	3,76%	6,49%	4,78%	1,75%				6,21%	0,15%	6,33%	2,78
Εξωτερικοί Εσωτερικοί	3,47%	0,95%	2,60%	6,38%	2,89%	3,64%				0,18%	-0,002%	0,15%	2,42
Κάθετος	3,85%	1,62%	2,31%	3,98%	1,54%	2,52%				1,70%	0,10%	1,75%	1,58
Οριζόντιος	5,93%	3,07%	2,97%	4,50%	1,77%	2,76%				3,19%	0,21%	3,35%	3,11
Πλάγιος χωρισμός από αριστερά προς δεξιά	3,39%	1,77%	1,67%	3,28%	1,22%	2,12%				2,08%	-0,16%	1,89%	4,51
Σκάλα	9,57%	5,65%	3,97%	5,68%	1,38%	4,36%				5,39%	0,26%	5,61%	3,93
Ολόκληρο Δίκτυο	1,72%	1,69%	0,06%							2,00%	0,06%	2,02%	1,26

Πίνακας 9.2.7: Ποσοστά βελτιώσεων παραμέτρων για δίκτυο 16 κόμβων

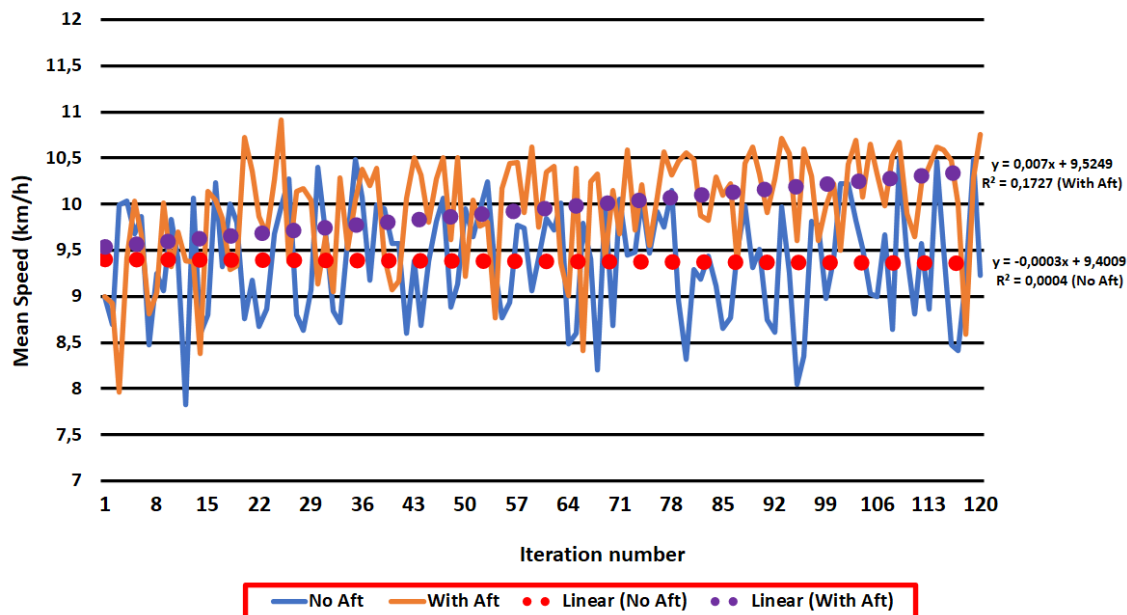
## 9.2.2 Δίκτυο 16 Κόμβων Τροποποιημένων Πρασίνων

Η αναπαράσταση του δικτύου των 16 κόμβων έχει παρουσιαστεί παραπάνω (Σχήμα 8.2) και βρίσκεται στο υποκεφάλαιο 8.3.1. Θα πραγματοποιηθεί αναπαράσταση των αντίστοιχων γραφημάτων που αναφέρθηκαν και προηγήθηκαν (ταχύτητας και τοπικού κριτηρίου productivity, μέσης ταχύτητας συνολικού δικτύου, ροής οχημάτων και του κριτηρίου productivity με βάση το AIMSUN) καθώς και γραφήματα των ‘πρασίνων’ χρόνων και για τις 4 φάσεις του κεντρικού κόμβου που επιλέχθηκε να μελετηθεί. Ο πίνακας παραμέτρων (Πίνακας 9.2.1) που κάνει χρήση ο αλγόριθμος AFT έχει παρασταθεί παραπάνω.



Σχήμα 9.2.18: Συμπεριφορά ολικού δικτύου κάνοντας χρήση κριτηρίου productivity

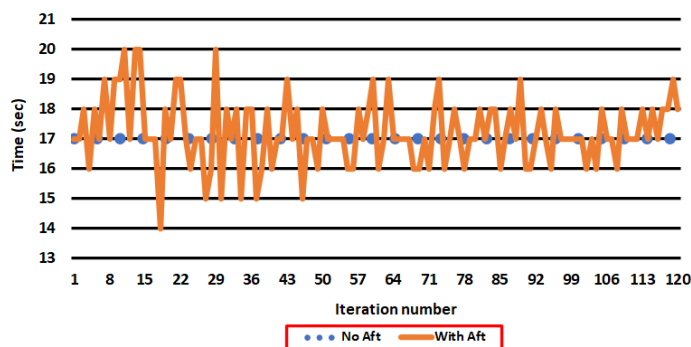
Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (Σχήμα 9.2.18) παρουσιάζεται η συμπεριφορά του ολικού δικτύου με βάση το κριτήριο productivity, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή του κριτηρίου για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 54205 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και η μέγιστη τιμή ισούται με 57235 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και εντοπίζεται στην 77<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές του κριτηρίου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 47246 και 53754 η τιμή αυτή εντοπίζεται στην 18<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 14,72% στο δίκτυο για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



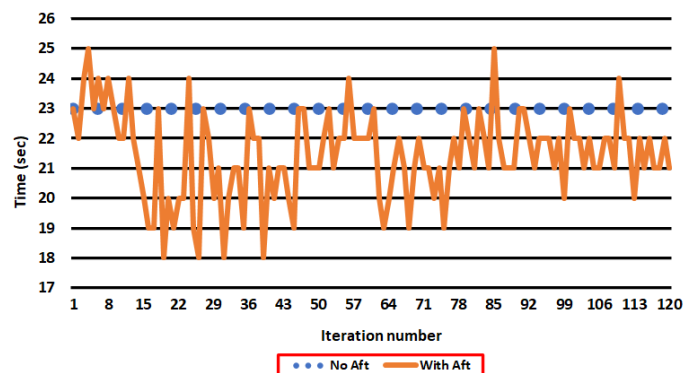
**Σχήμα 9.2.19:** Μέση ταχύτητα ολικού δικτύου

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (**Σχήμα 9.2.19**) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας του ολικού δικτύου, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 10,21 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 10,91 km/h και εντοπίζεται στην 25<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 9,38 km/h και 10,49 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 109<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 8,91% στην ταχύτητα του δικτύου για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.

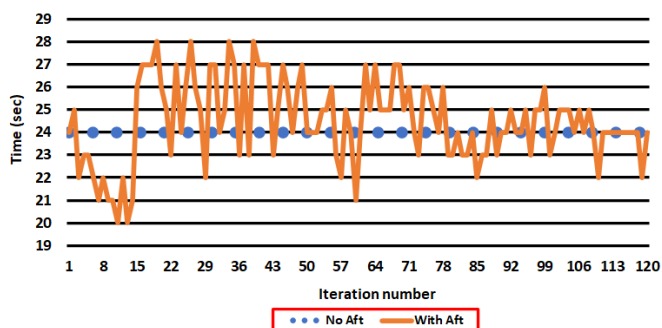
Στο σημείο αυτό θα πραγματοποιηθεί αναπαράσταση των πράσινων χρόνων για κάθε φάση του δικτύου των 16 κόμβων σύμφωνα με το σχήμα (**Σχήμα 8.2**). Επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν τα γραφήματα αυτά, για ένα κεντρικό κόμβο του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, θα πραγματοποιηθεί η μελέτη των 4 φάσεων που αντιστοιχούν στον κόμβο με αρίθμηση 7. Σε κάθε γράφημα αναπαρίστανται ο χρόνος της φάση με την μη χρήση καθώς και με την χρήση του αλγορίθμου AFT.



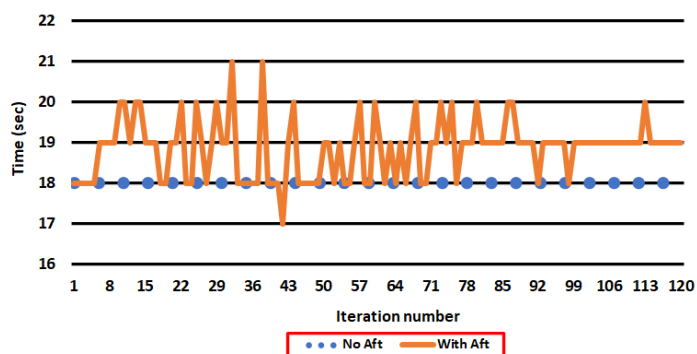
Σχήμα 9.2.20: 1<sup>η</sup> φάση για τον κόμβο με και χωρίς χρήση του αλγορίθμου AFT



Σχήμα 9.2.21: 2<sup>η</sup> φάση για τον κόμβο με και χωρίς χρήση του αλγορίθμου AFT



Σχήμα 9.2.22: 3<sup>η</sup> φάση για τον κόμβο με και χωρίς χρήση του αλγορίθμου AFT



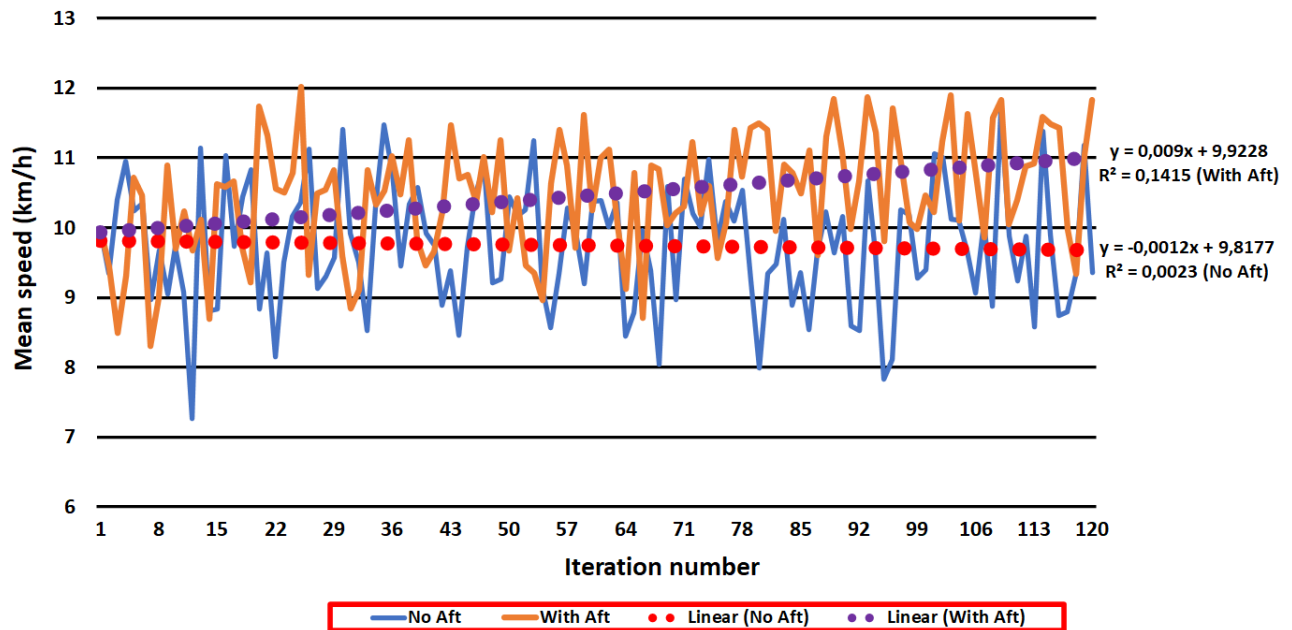
Σχήμα 9.2.23: 4<sup>η</sup> φάση για τον κόμβο με και χωρίς χρήση του αλγορίθμου AFT

Στα γραφήματα (Σχήμα 9.2.20:23) παρουσιάζονται οι χρόνοι τόσο για την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, όπου καθ' όλη την διάρκεια των 120 επαναλήψεων διατηρούν την φάση του χρόνου τους σταθερή χωρίς μεταβολές στις τιμές των δευτερολέπτων τους, όσο και οι χρόνοι των φάσεων με την χρήση του αλγορίθμου AFT που αλλάζουν για κάθε επανάληψη του αλγορίθμου. Όπως προαναφέρθηκε η καλύτερη τιμή του τοπικού κριτηρίου productivity εντοπίζεται στην 77<sup>η</sup> επανάληψη του αλγορίθμου. Αντίστοιχα, όσον αφορά το κριτήριο productivity με βάση το AIMSUN η μέγιστη τιμή του κριτηρίου εντοπίζεται στην 103<sup>η</sup> επανάληψη

Στο σημείο αυτό παρατίθενται ο συγκεντρωτικός πίνακας των 4<sup>ων</sup> φάσεων με την μη χρήση και την χρήση του αλγορίθμου AFT.

Φάσεις	Μη χρήση AFT	Με χρήση AFT	Με χρήση AFT (Με βάση το AIMSUN)
1 <sup>η</sup> φάση	17	17	17
2 <sup>η</sup> φάση	23	22	21
3 <sup>η</sup> φάση	24	24	25
4 <sup>η</sup> φάση	18	19	19

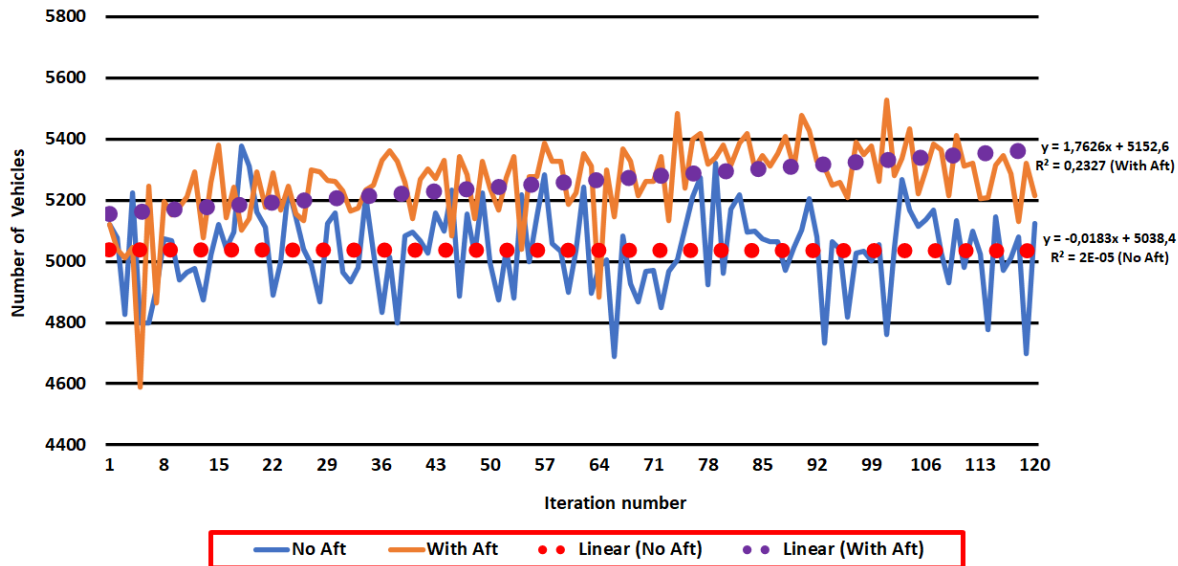
Πίνακας 9.2.8: Πράσινοι χρόνοι με και χωρίς χρήση αλγορίθμου AFT



**Σχήμα 9.2.24:** Μέση ταχύτητα ολικού δικτύου η οποία δίνεται από το AIMSUN

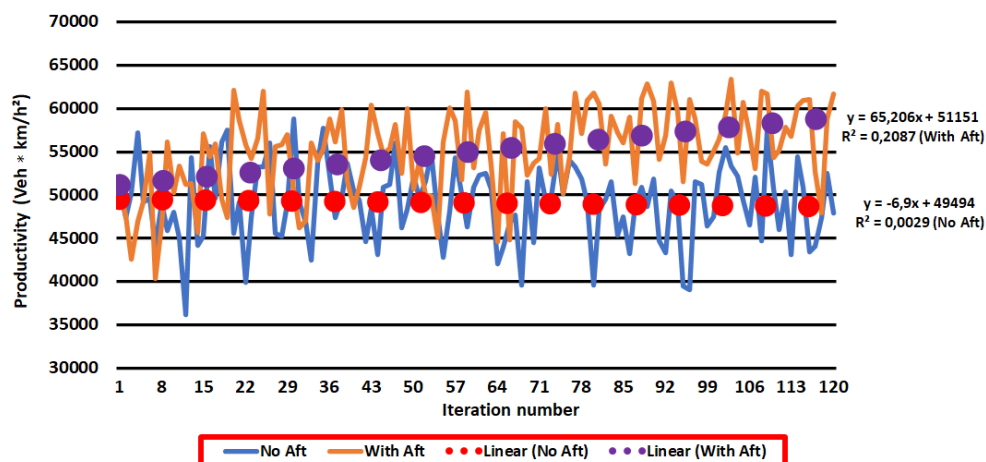
Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (**Σχήμα 9.2.24**) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας του ολικού δικτύου, με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας με βάση το AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 10,90 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 12,02 km/h και εντοπίζεται στην 25<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 9,74 km/h και 11,66 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 109<sup>η</sup> επανάληψη. Παρατίθενται η γραμμική εξίσωση καθώς και ο συντελεστής προσδιορισμού τόσο με την χρήση όσο και με την μη χρήση του αλγορίθμου. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 11,85% στην μέση ταχύτητα του δικτύου με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.





**Σχήμα 9.2.25:** Συμπεριφορά ροής οχημάτων ολικού δικτύου η οποία δίνεται από το AIMSUN

Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση (Σχήμα 9.2.25), παρουσιάζεται η συμπεριφορά της ροής οχημάτων ταχύτητας του ολικού δικτύου, με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ροής των οχημάτων με βάση το AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 5306 αριθμός οχημάτων και η μέγιστη τιμή ροής ισούται με 5528 και εντοπίζεται στην 101<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ροής των οχημάτων με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 5037 και 5377 και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 18<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 5,33% στην ροή των οχημάτων του δικτύου με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



**Σχήμα 9.2.26:** Κριτήριο productivity με βάση το AIMSUN για το ολικό δίκτυο

Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση (**Σχήμα 9.2.26**), παρουσιάζεται το κριτήριο productivity με βάση το AIMSUN, το οποίο ισούται με την μέση ταχύτητα δικτύου επί την ροή των οχημάτων που δίνει το AIMSUN. Το productivity είναι το κύριο κριτήριο για να εντοπιστεί εάν υπήρξε συνολική βελτίωση δίκτυο με την χρήση του αλγορίθμου AFT. Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση, με την χρήση του αλγορίθμου AFT καθ' όλη την διάρκεια των 120 επαναλήψεων εντοπίζεται ότι η συμπεριφορά της γραφικής αναπαράστασης εμφανίζει σε αρκετά σημεία έντονες αλλαγές στις τιμές του κριτηρίου productivity. Οι αλλαγές αυτές των τιμών μειώνονται σε ένα ικανοποιητικό σημείο για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις όπου ο αλγόριθμος AFT έχει κατασταλάξει στις τιμές των παραμέτρων που κάνει χρήση. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα υστέρτα από την 77<sup>η</sup> επανάληψη οι κατώτερες τιμές που λαμβάνει το κριτήριο κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT είναι καλύτερες από τις ανώτερες τιμές χωρίς την χρήση του αλγορίθμου για τις αντίστοιχες επαναλήψεις. Αντιθέτως, παρατηρείται ότι καθ' όλη την διάρκεια των επαναλήψεων με τη μη χρήση του αλγορίθμου AFT δημιουργούνται έντονες και ξαφνικές αλλαγές στις τιμές του productivity σε πολλά σημεία. Η μέση τιμή του κριτηρίου productivity με βάση το AIMSUN για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 57821 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και η μέγιστη τιμή ισούται με 63448 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και εντοπίζεται στην 103<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές του κριτηρίου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 49076 και 58856 η τιμή αυτή εντοπίζεται στην 108<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 17,81% στο κριτήριο productivity με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.

Στο σημείο αυτό δίνεται ένας πίνακας (**Πίνακας 9.2.9**) που δείχνει το ποσοστό βελτίωσης με την χρήση του AFT σε σχέση με την μη χρήση του αλγορίθμου για όλα τα γραφήματα. Πραγματοποιήθηκαν 10 προσομοιώσεις και προέκυψαν τα εξής ποσοστά βελτίωσης:

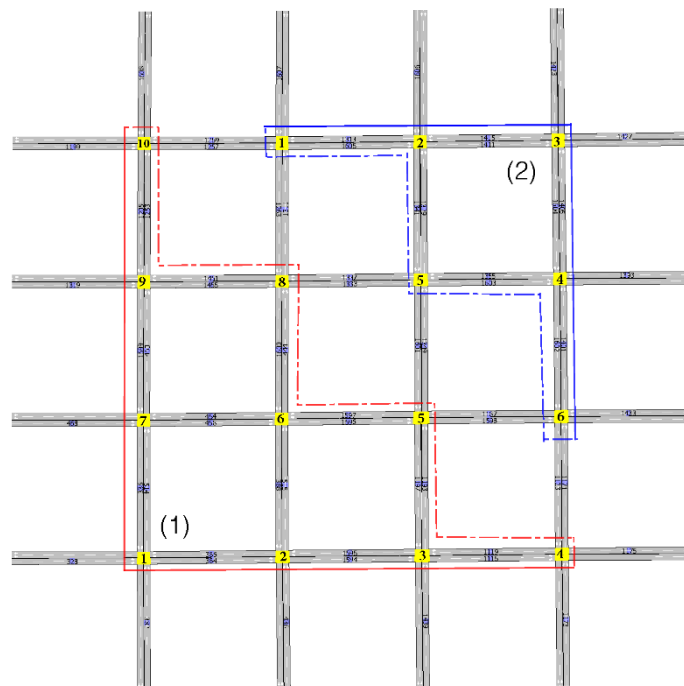
Παράμετρος	Ποσοστό Βελτίωσης
Τοπικό κριτήριο productivity	11,29%
Mean Speed	7,10%
Mean Speed (με βάση το AIMSUN)	9,39%
Entrance Flow (με βάση το AIMSUN)	3,84%
Mean Speed * Entrance Flow (με βάση το AIMSUN)	13,68%

**Πίνακας 9.2.9:** Ποσοστά βελτίωσης ολοκλήρου δικτύου με την χρήση του αλγορίθμου AFT σε σχέση με την μη χρήση του

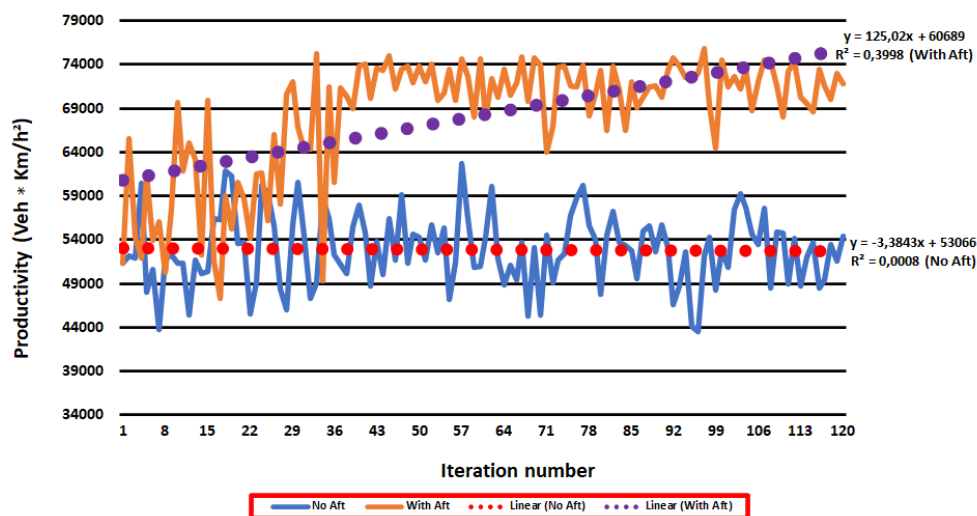
**Χωρισμός του δικτύου με πλάγιο τρόπο από τα αριστερά προς τα δεξιά σε ανεξάρτητα υποδίκτυα**

Μεταβλητές	Τιμές μεταβλητών
Nr_of_theta	30
Nr_of_x	1
Nr_of_pertubations	50
theta_lb	0
theta_ub	4
t_h	100
l_g	31
alpha_0	2
alpha_lower	0.01
bound	0.05
bound_change	0.1
iteration_of_change	3
param_of_change	0.05

**Πίνακας 9.2.10:** Τιμές παραμέτρων για το πρώτο υποδίκτυο 10 κόμβων



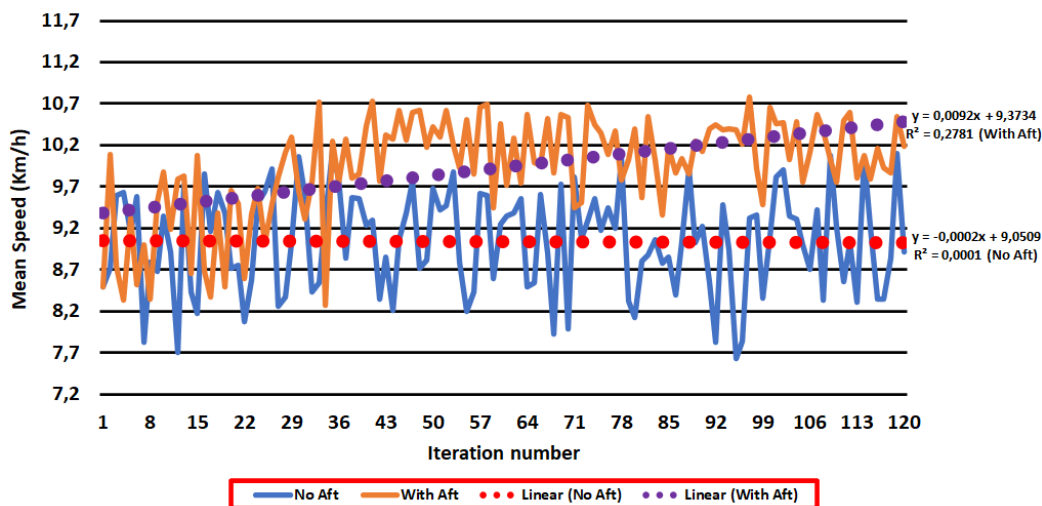
**Σχήμα 9.2.27:** Χωρισμός του δικτύου με πλάγιο τρόπο από τα αριστερά προς τα δεξιά σε ανεξάρτητα υποδίκτυα



**Σχήμα 9.2.28:** Συμπεριφορά τοπικού κριτηρίου productivity για το πρώτο υποδίκτυο

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (Σχήμα 9.2.28) παρουσιάζεται η συμπεριφορά του πρώτου υποδίκτυου όσον αφορά το τοπικό κριτήριο productivity, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή του τοπικού κριτηρίου productivity για το πρώτο υποδίκτυο για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 71693 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και

η μέγιστη τιμή ισούται με 75797 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και εντοπίζεται στην 97<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές του τοπικού κριτηρίου productivity με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 52816 και 62733 η τιμή αυτή εντοπίζεται στην 3<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 35,62% στο πρώτο υποδίκτυο σχετικά με το τοπικό κριτήριο productivity για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.

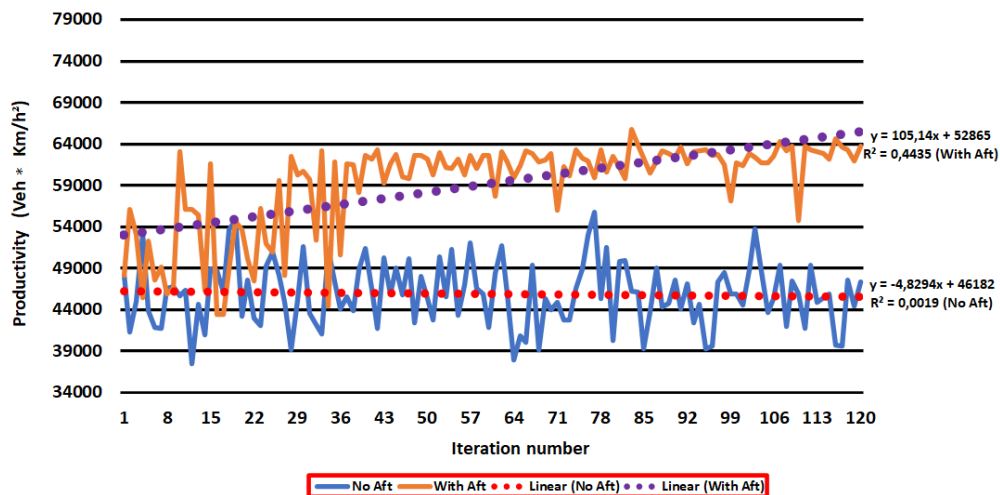


**Σχήμα 9.2.29:** Μέση ταχύτητα πρώτου υποδικτύου

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (**Σχήμα 9.2.29**) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας σχετικά με το πρώτο υποδίκτυο, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας του πρώτου υποδικτύου για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 10,17 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 10,77 km/h και εντοπίζεται στην 97<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας του πρώτου υποδικτύου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT αντιστοιχούν 9,03 km/h και 10,13 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 35<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 12,55% στην ταχύτητα του πρώτου υποδικτύου για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.

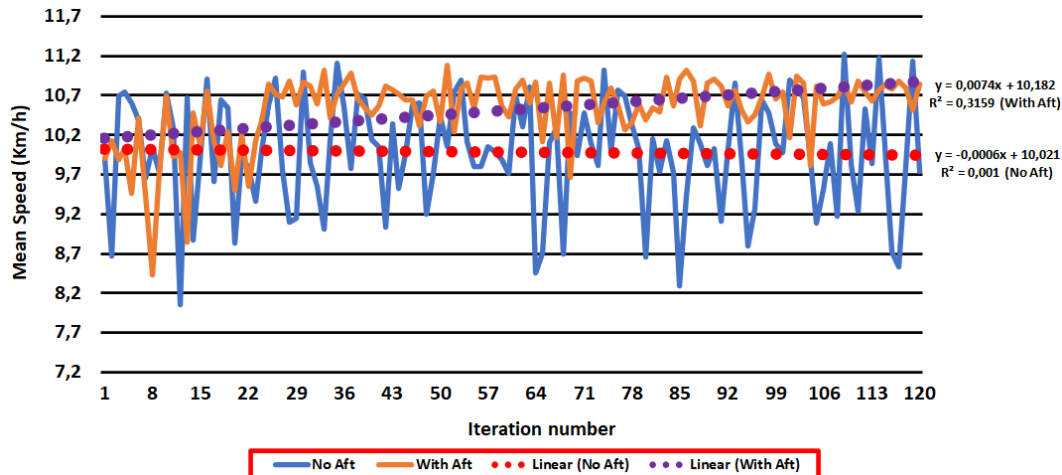
Μεταβλητές	Τιμές μεταβλητών
Nr_of_theta	18
Nr_of_x	1
Nr_of_pertubations	50
theta_lb	0
theta_ub	4
t_h	100
l_g	19
alpha_0	2
alpha_lower	0.01
bound	0.05
bound_change	0.1
iteration_of_change	3
param_of_change	0.05

**Πίνακας 9.2.11:** Τιμές παραμέτρων για το δεύτερο υποδίκτυο 6 κόμβων.



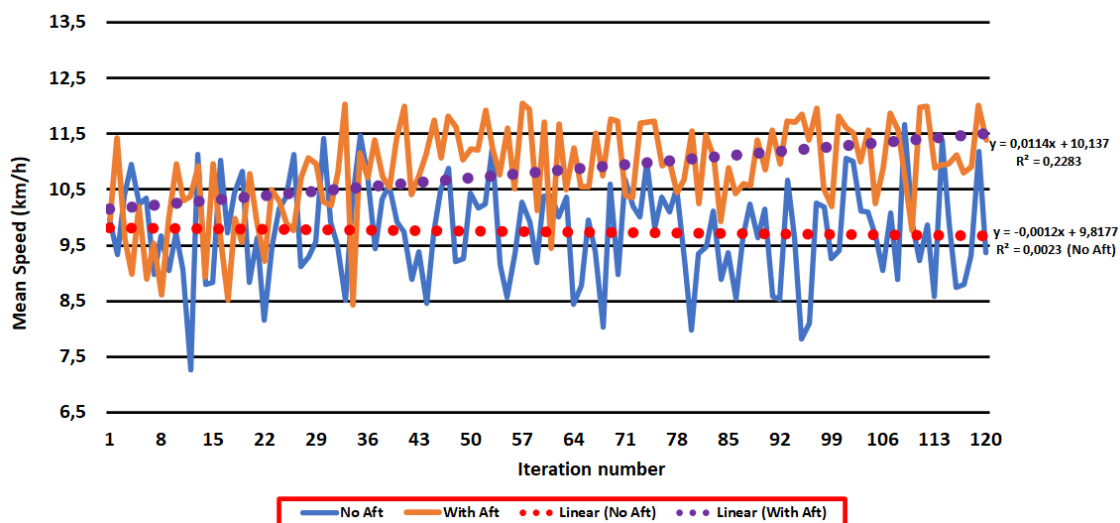
**Σχήμα 9.2.30:** Συμπεριφορά τοπικού κριτηρίου productivity για το δεύτερο υποδίκτυο

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (**Σχήμα 9.2.30**) παρουσιάζεται η συμπεριφορά του δευτέρου υποδικτύου όσον αφορά το τοπικό κριτήριο productivity, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή του τοπικού κριτηρίου productivity για το πρώτο υποδίκτυο για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 62541 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και η μέγιστη τιμή ισούται με 65769 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και εντοπίζεται στην 83<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές του τοπικού κριτηρίου productivity με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 45890 και 55821 η τιμή αυτή εντοπίζεται στην 77<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 36,28% στο πρώτο υποδίκτυο σχετικά με το τοπικό κριτήριο productivity για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρων των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



Σχήμα 9.2.31: Μέση ταχύτητα δευτέρου υποδικτύου

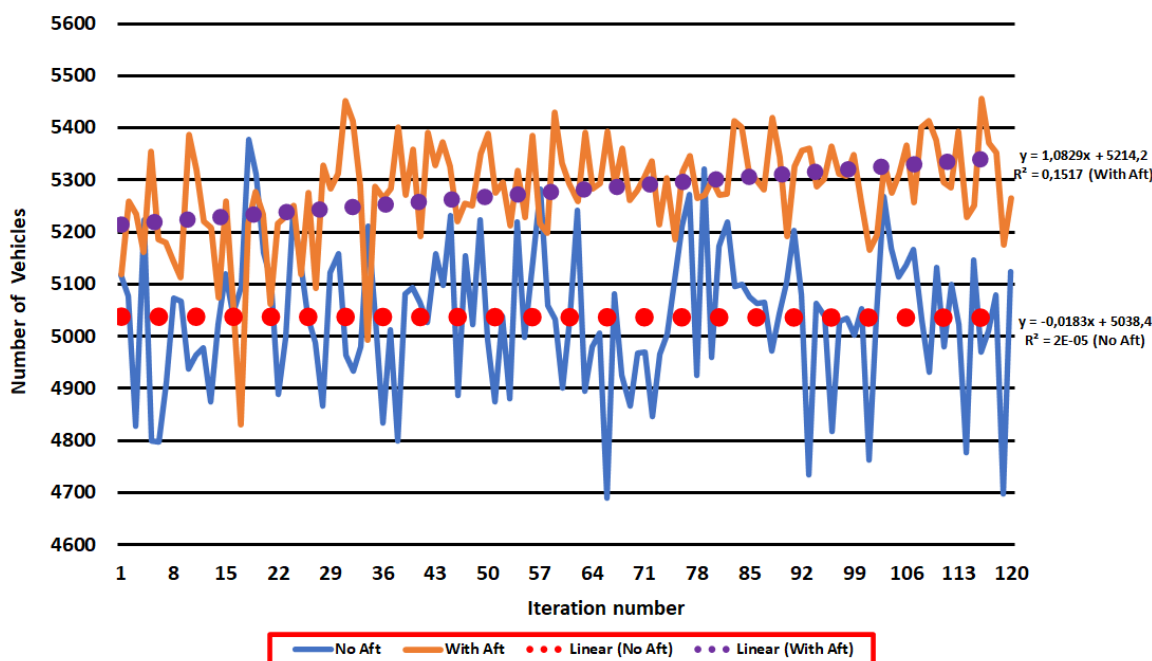
Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (Σχήμα 9.2.31) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας σχετικά με το δεύτερο υποδίκτυο, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας του δευτέρου υποδικτύου για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 10,89 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 11,20 km/h και εντοπίζεται στην 107<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας του πρώτου υποδικτύου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT αντιστοιχούν 9,98 km/h και 11,21 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 109<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 9,12% στην ταχύτητα του δικτύου για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



Σχήμα 9.2.32: Μέση ταχύτητα ολικού δικτύου η οποία δίνεται από το AIMSUN



Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (Σχήμα 9.2.32) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας του ολικού δικτύου, με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας με βάση το AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 11,18 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 12,04 km/h και εντοπίζεται στην 57<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 9,74 km/h και 11,66 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 109<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 14,79% στην μέση ταχύτητα του δικτύου με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.

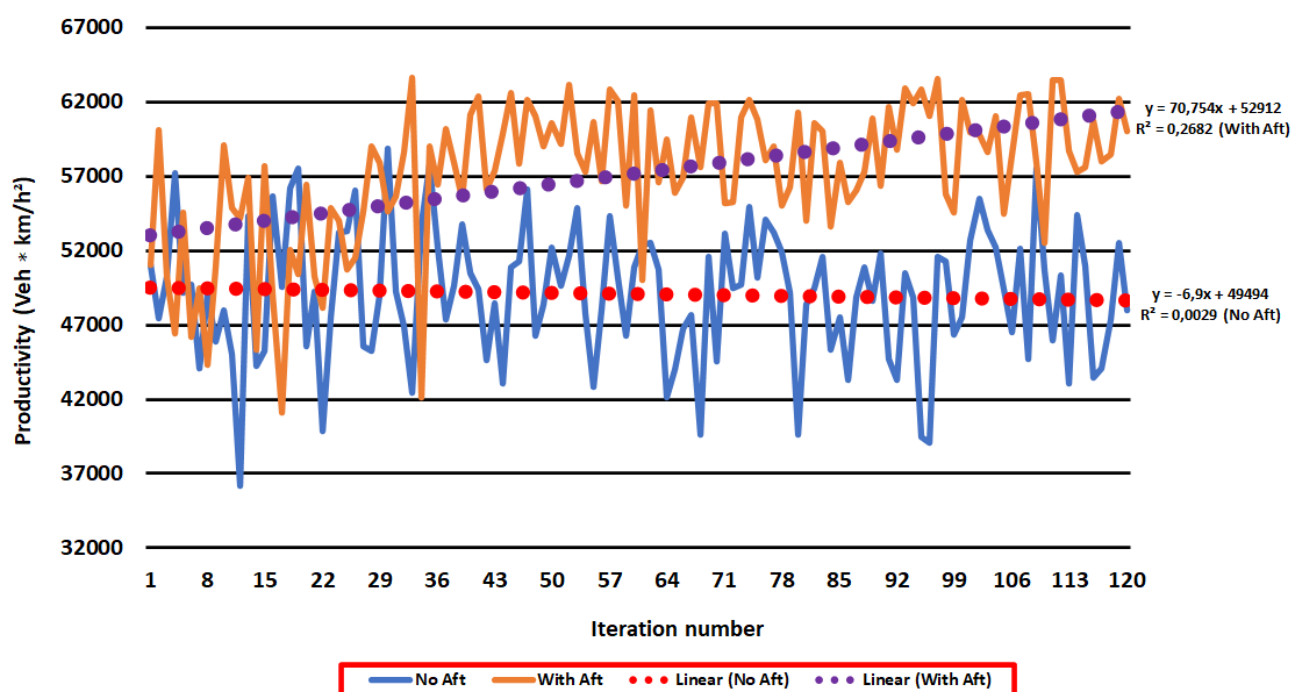


Σχήμα 9.2.33: Συμπεριφορά ροής οχημάτων ολικού δικτύου η οποία δίνεται από το AIMSUN

Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση (Σχήμα 9.2.33), παρουσιάζεται η συμπεριφορά της ροής οχημάτων ταχύτητας του ολικού δικτύου, με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT καθ' όλη την διάρκεια των πρώτων 36 επαναλήψεων, εντοπίζεται ότι η συμπεριφορά της ροής των οχημάτων με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN, εμφανίζει έντονες αλλαγές στις τιμές του αριθμού της ροής των οχημάτων. Αντιθέτως, μετά την 37<sup>η</sup> επανάληψη, και καθ' όλη την διάρκεια των επόμενων επαναλήψεων έως και το τέλος τους, οι τιμές της ροής των οχημάτων κινούνται στα ίδια επίπεδα τιμών. Από την άλλη πλευρά, με την μη χρήση του αλγορίθμου παρατηρείται ότι καθ' όλη την διάρκεια ακόμα και στις τελευταίες 20 επαναλήψεις παρουσιάζονται πολλές και έντονες μεταπτώσεις στις τιμές της ροής των οχημάτων οδηγώντας σε ασταθή αποτελέσματα. Η μέση τιμή της ροής των οχημάτων με βάση το AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 5308 αριθμός οχημάτων και η μέγιστη τιμή ροής ισούται με 5456 και εντοπίζεται στην 117<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ροής των οχημάτων με την μη χρήση



αλγορίθμου AFT είναι 5037 και 5377 και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 18<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 5,38% στην ροή των οχημάτων του δικτύου με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



**Σχήμα 9-2-34:** Κριτήριο productivity με βάση το AIMSUN για το ολικό δίκτυο

Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση (Σχήμα 9-2-34), παρουσιάζεται το κριτήριο productivity με βάση το AIMSUN, το οποίο ισούται με την μέση ταχύτητα δικτύου επί την ροή των οχημάτων που δίνει το AIMSUN. Το productivity είναι το κύριο κριτήριο για να εντοπιστεί εάν υπήρξε συνολική βελτίωση δίκτυο με την χρήση του αλγορίθμου AFT. Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση, με την χρήση του αλγορίθμου AFT καθ' όλη την διάρκεια των πρώτων 35 επαναλήψεων εντοπίζεται ότι η συμπεριφορά της γραφικής αναπαράστασης εμφανίζει σε αρκετά σημεία έντονες αλλαγές στις τιμές του κριτηρίου productivity, με αποκορύφωμα στο διάστημα των επαναλήψεων 32-35. Για το υπόλοιπο πλήθος των επαναλήψεων οι τιμές του κριτηρίου ισορροπούν στο ίδιο εύρος τιμών και οι έντονες αλλαγές μειώνονται αισθητά. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα υστέρα από το την 43<sup>η</sup> επανάληψη οι κατώτερες τιμές που λαμβάνει το κριτήριο κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT είναι καλύτερες από τις ανώτερες τιμές χωρίς την χρήση του αλγορίθμου για τις αντίστοιχες επαναλήψεις. Αντιθέτως, παρατηρείται ότι καθ' όλη την διάρκεια των επαναλήψεων με τη μη χρήση του αλγορίθμου AFT δημιουργούνται έντονες και ξαφνικές αλλαγές σε αρκετά σημεία των επαναλήψεων για τις τιμές του κριτηρίου productivity, δεν εντοπίζεται ισορροπία των τιμών του κριτηρίου σε κάποιο σημείο καθ' όλη την διάρκεια των επαναλήψεων που λαμβάνουν μέρος. Η μέση τιμή του κριτηρίου productivity με βάση το AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 59363 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και η μέγιστη τιμή ισούται με 63602 αριθμός οχημάτων επί ταχύτητα και εντοπίζεται στην 33<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές του κριτηρίου με την

μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 49076 και 58856 η τιμή αυτή εντοπίζεται στην 108<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 20,91% στο κριτήριο productivity με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.

Στο σημείο αυτό δίνεται ένας πίνακας (**Πίνακας 9.2.12**) που δείχνει το ποσοστό βελτίωσης με την χρήση του AFT σε σχέση με την μη χρήση του αλγορίθμου όσο αναφορά τον παραπάνω τρόπο χωρισμού, για όλα τα γραφήματα Πραγματοποιήθηκαν 10 προσομοιώσεις και προέκυψαν τα εξής ποσοστά βελτίωσης.

Παράμετρος	Υποδίκτυο Πρώτο Ποσοστό Βελτίωσης	Υποδίκτυο Δεύτερο Ποσοστό Βελτίωσης	Συνολικό Δίκτυο Ποσοστό Βελτίωσης (με βάση το AIMSUN)
Τοπικό κριτήριο productivity	35,81%	35,2%	20,88%
Mean Speed	12,46%	8,0%	14,51%
Entrance Flow	20,65%	25,1%	5,56%

**Πίνακας 9.2.12:** Ποσοστά βελτίωσης χωρισμού τροποποιημένου δικτύου με πλάγιο τρόπο από τα αριστερά προς τα δεξιά σε ανεξάρτητα υποδίκτυα με την χρήση του αλγορίθμου AFT σε σχέση με την μη χρήση

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται ένας τελικός πίνακας (**Πίνακας 9.2.13**) ποσοστών βελτιώσεων ύστερα από 10 προσομοιώσεις, κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT σε σχέση με την μη χρήση του για κάθε είδος χωρισμού που πραγματοποιήθηκε.

	1° Υποδίκτυο			2° Υποδίκτυο			3° Υποδίκτυο			Συνολικό Δίκτυο (Με βάση το AIMSUN)			
Τρόπος Χωρισμού δικτύου	Τοπ. κριτ. Productivity	Mean Speed	Entrance flow car	Τοπ. κριτ. Productivity	Mean Speed	Entrance flow car	Τοπ. κριτ. Productivity	Mean Speed	Entrance flow car	Mean Speed	Entrance flow car	Mean Speed * Entrance flow car	σ (Mean Speed * Entrance flow car)
Χωρισμός 3 <sup>ων</sup> κομματιών	33,08%	8,76%	22,20%	36,58%	9,29%	24,59%	20,15%	2,54%	17,15%	9,95%	5,02%	15,50%	5,44
6-6 common	29,81%	10,49%	17,11%	26,28%	8,18%	16,43%				10,85%	4,91%	16,37%	9,15
6-6 uncontrolled	19,59%	5,57%	12,43%	16,43%	3,43%	12,06%				7,96%	3,02%	11,39%	10,23
Common Κάθετα	32,81%	11,50%	18,90%	24,40%	11,18%	11,76%				13,40%	5,22%	19,37%	5,67
Εξωτερικοί Εσωτερικοί	17,63%	1,27%	16,03%	44,20%	16,01%	23,84%				-2,13%	4,39%	2,19%	6,17
Κάθετος	25,55%	7,79%	16,20%	21,73%	4,54%	16,11%				4,34%	4,46%	9,06%	11,01
Οριζόντιος	29,53%	10,53%	16,75%	18,37%	2,03%	15,81%				6,19%	4,49%	11,03%	6,28
Πλάγιος χωρισμός από αριστερά προς δεξιά	35,80%	12,45%	20,65%	35,23%	7,99%	25,10%				14,50%	5,56%	20,88%	2,004
Σκάλα	31,71%	12,10%	17,12%	20,17%	1,61%	17,93%				6,05%	4,43%	10,90%	14,38

<b>Ολόκληρο Δίκτυο</b>	11,28%	7,10%	3,84%							9,39%	3,84%	13,68%	7,88

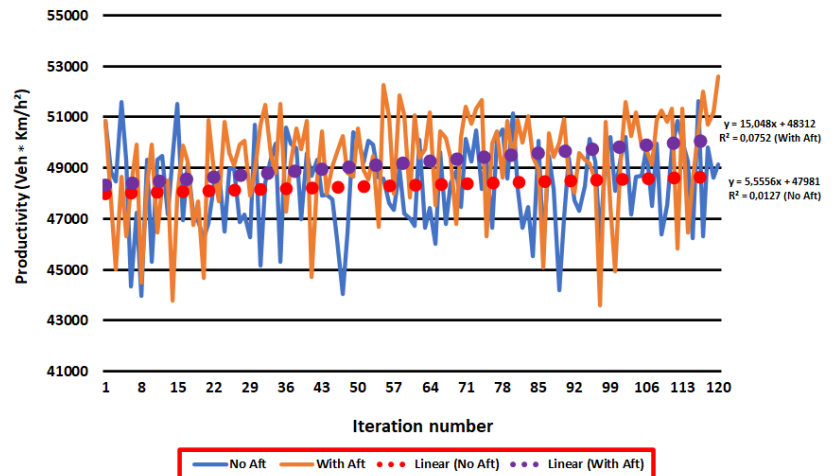
*Πίνακας 9.2.13: Ποσοστά βελτιώσεων παραμέτρων τροποποιημένου δικτύου 16 κόμβων.*

### 9.3.1 Δίκτυο 25 Κόμβων

Η αναπαράσταση του δικτύου των 25 κόμβων έχει παρουσιαστεί παραπάνω (Σχήμα 8.3) και βρίσκεται στο υποκεφάλαιο 8.3.1. Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας παραμέτρων των μεταβλητών που κάνει χρήση ο αλγόριθμος AFT, καθώς και τα γραφήματα του τοπικού κριτηρίου productivity κάθε υποδίκτυου μαζί με την ταχύτητά τους. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα γραφήματα των ‘πράσινων’ χρόνων και για τις 4 φάσεις του κόμβου που μελετάται. Τελος παρουσιάζονται τα γραφήματα της μέσης ταχύτητας, της ροής και του γινομένου των 2 αυτών παραμέτρων που αποτελούν το κριτήριο για να εντοπιστεί αν υπάρχει ή όχι βελτίωση στο δίκτυο που μελετάται με βάση τον τρόπο επιλογής χωρισμού του δικτύου.

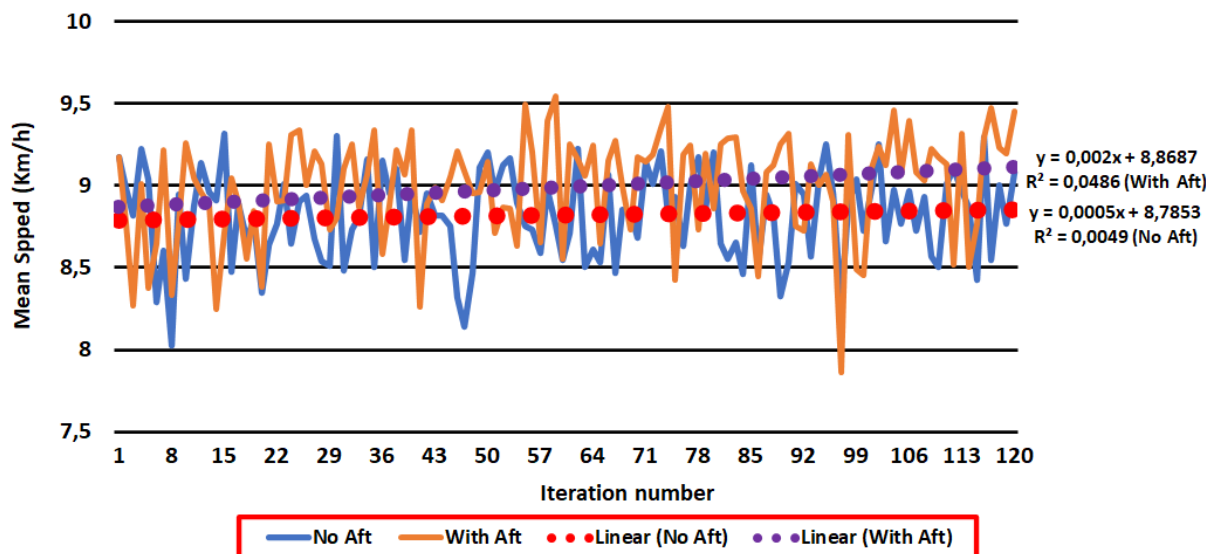
Μεταβλητές	Τιμές μεταβλητών
Nr_of_theta	48
Nr_of_x	1
Nr_of_pertubations	50
theta_lb	0
theta_ub	4
t_h	100
l_g	50
alpha_0	2
alpha_lower	0.01
Bound	0.05
bound_change	0.1
iteration_of_change	3
param_of_change	0.05

**Πίνακας 9.3.1:** Τιμές παραμέτρων ενιαίου δικτύου 25 κόμβων



**Σχήμα 9.3.1:** Συμπεριφορά ολικού δικτύου κάνοντας χρήση κριτηρίου productivity

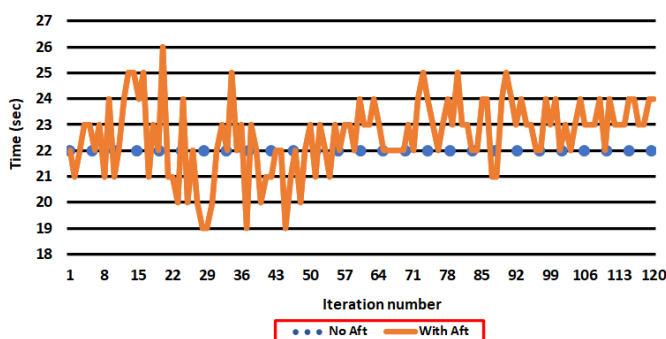
Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (Σχήμα 9.3.1) παρουσιάζεται η συμπεριφορά του ολικού δικτύου με βάση το κριτήριο productivity, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή του κριτηρίου για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 50218 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και η μέγιστη τιμή ισούται με 52580 αριθμός οχημάτων επί ταχύτητα και εντοπίζεται στην 120<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές του κριτηρίου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 48317 και 51628 η τιμή αυτή εντοπίζεται στην 116<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 3,93% στο δίκτυο για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρων των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια πολύ μικρή αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



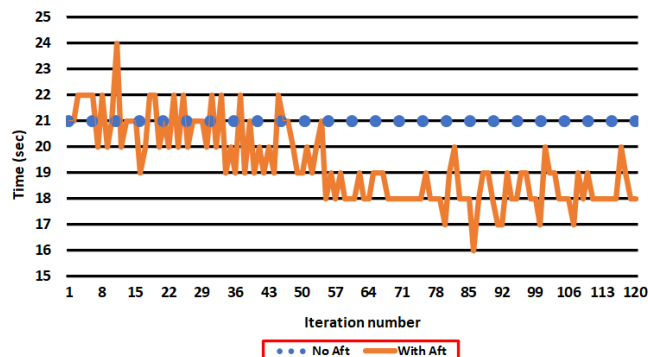
Σχήμα 9.3.2: Μέση ταχύτητα ολικού δικτύου

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (Σχήμα 9.3.2) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας του ολικού δικτύου, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 9,13 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 9,54 km/h και εντοπίζεται στην 59<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 8,81 km/h και 9,31 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 15<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 3,63% στην ταχύτητα του δικτύου για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρων των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια πολύ μικρή αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.

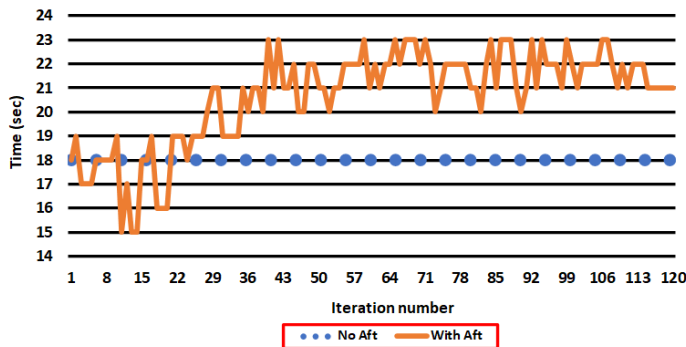
Στο σημείο αυτό θα πραγματοποιηθεί αναπαράσταση των πρασίνων χρόνων για κάθε φάση του δικτύου των 25 κόμβων σύμφωνα με το σχήμα (Σχήμα 8.3). Επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν τα γραφήματα αυτά, για ένα κεντρικό κόμβο του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, θα πραγματοποιηθεί η μελέτη των 4 φάσεων που αντιστοιχούν στον κόμβο με αρίθμηση 11. Σε κάθε γράφημα αναπαρίστανται ο χρόνος της φάση με την μη χρήση καθώς και με την χρήση του αλγορίθμου AFT.



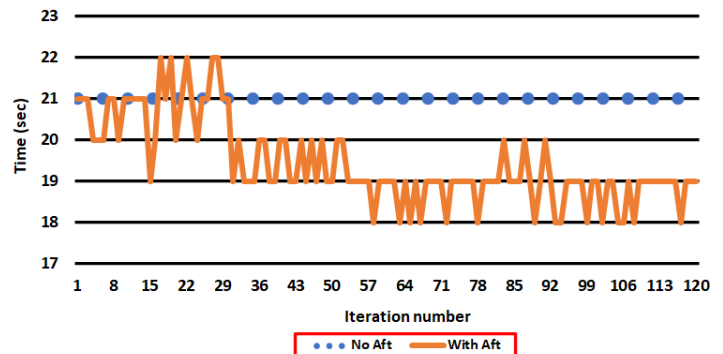
Σχήμα 9.3.3: 1<sup>η</sup> φάση για τον κόμβο με και χωρίς χρήση του αλγορίθμου AFT



Σχήμα 9.3.4: 2<sup>η</sup> φάση για τον κόμβο με και χωρίς χρήση του αλγορίθμου AFT



**Σχήμα 9.3.5:** 3<sup>η</sup> φάση για τον κόμβο με και χωρίς χρήση του αλγορίθμου AFT



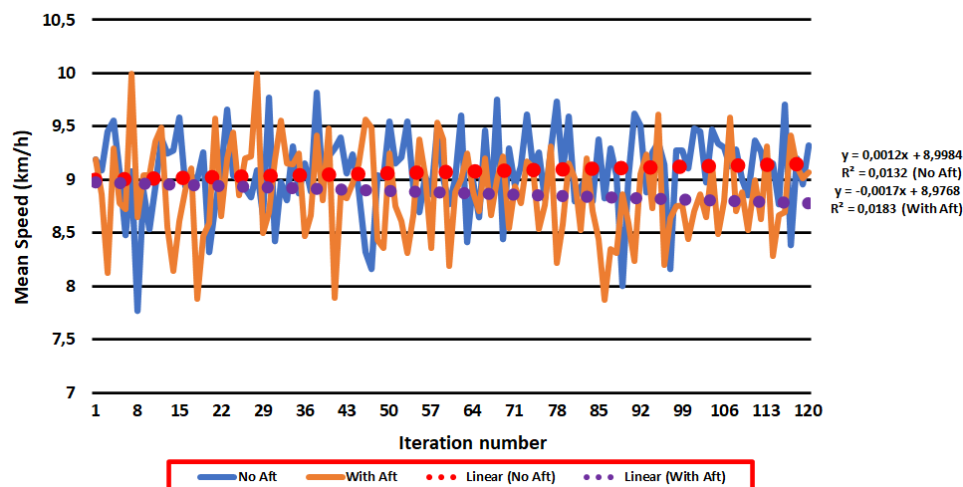
**Εικόνα 9-3-6:** 4<sup>η</sup> φάση για τον κόμβο με την χρήση και μη χρήση του αλγορίθμου AFT

Στα γραφήματα (Σχήμα 9.3.3:6) παρουσιάζονται οι χρόνοι τόσο για την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, όπου καθ' όλη την διάρκεια των 120 επαναλήψεων διατηρούν την φάση του χρόνου τους σταθερή χωρίς μεταβολές στις τιμές των δευτερολέπτων τους όσο και οι χρόνοι των φάσεων με την χρήση του αλγορίθμου AFT που αλλάζουν για κάθε επανάληψη του αλγορίθμου. Όπως προαναφέρθηκε η καλύτερη τιμή του τοπικού κριτηρίου productivity εντοπίζεται στην 120<sup>η</sup> επανάληψη του αλγορίθμου. Αντίστοιχα, όσον αφορά το κριτήριο productivity με βάση το AIMSUN η μέγιστη τιμή του κριτηρίου εντοπίζεται στην 28<sup>η</sup> επανάληψη

Στο σημείο αυτό παρατίθενται ο συγκεντρωτικός πίνακας των 4<sup>ων</sup> φάσεων με την μη χρήση και την χρήση του αλγορίθμου AFT.

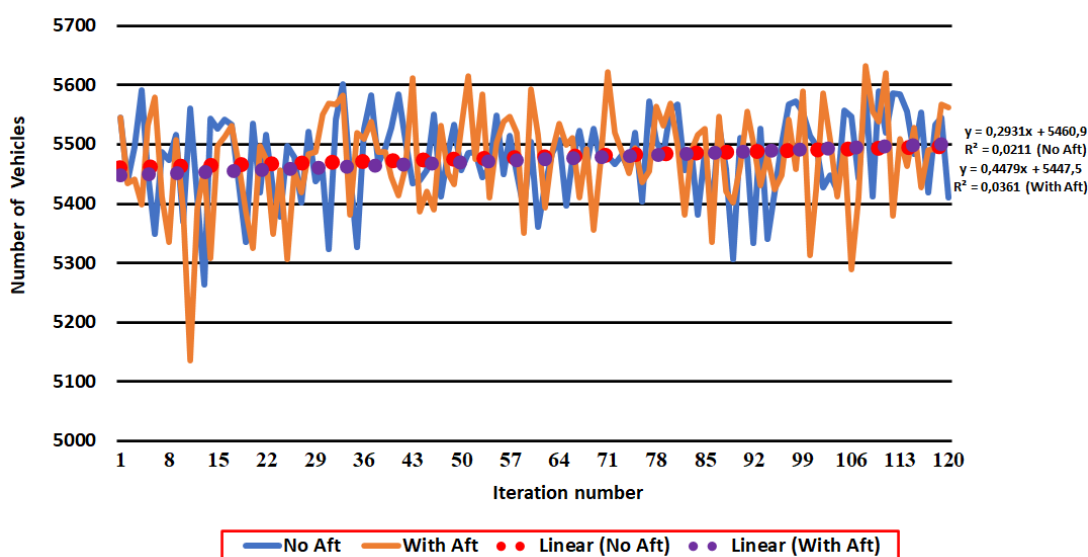
Φάσεις	Μη χρήση AFT	Με χρήση AFT	Με χρήση AFT (Με βάση το AIMSUN)
1 <sup>η</sup> φάση	22	24	19
2 <sup>η</sup> φάση	21	18	21
3 <sup>η</sup> φάση	18	21	20
4 <sup>η</sup> φάση	21	19	22

**Πίνακας 9.3.2:** Πράσινοι χρόνοι με και χωρίς χρήση αλγορίθμου AFT



**Σχήμα 9.3.7:** Μέση ταχύτητα ολικού δικτύου η οποία δίνεται από το AIMSUN

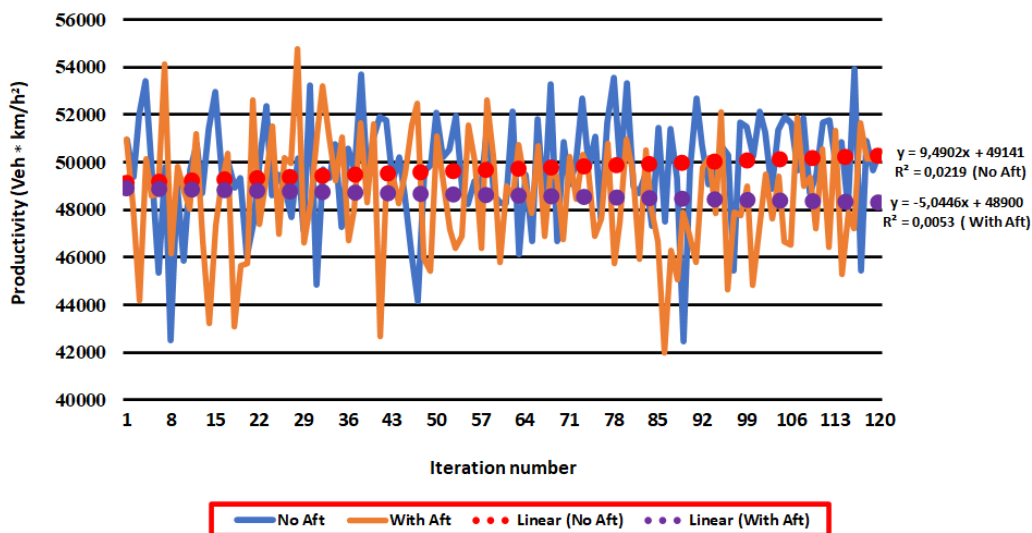
Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (**Σχήμα 9.3.7**) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας του ολικού δικτύου, με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας με βάση το AIMSUN για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 8,87 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 9,97 km/h και εντοπίζεται στην 7<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 9,07 km/h και 9,81 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 38<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται μείωση κατά 2,17% στην μέση ταχύτητα του δικτύου με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια πολύ μικρή πτωτική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται μείωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



**Σχήμα 9.3.8:** Συμπεριφορά ροής οχημάτων ολικού δικτύου η οποία δίνεται από το AIMSUN

Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση (**Σχήμα 9.3.8**), παρουσιάζεται η συμπεριφορά της ροής οχημάτων ταχύτητας του ολικού δικτύου, με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ροής των οχημάτων με βάση το AIMSUN για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 5494 αριθμός οχημάτων και η μέγιστη τιμή ροής ισούται με 5632 και εντοπίζεται στην 108<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ροής των οχημάτων με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 5478 και 5602 και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 33<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 0,29% στην ροή των οχημάτων του δικτύου με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι τόσο με την μη χρήση όσο και με την χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια σταθερότητα στην τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο δεν παρουσιάζεται κάποια αισθητή βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.





**Σχήμα 9.3.9:** Κριτήριο productivity με βάση το AIMSUN για το ολικό δίκτυο

Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση (Σχήμα 9.3.9), παρουσιάζεται το κριτήριο productivity με βάση το AIMSUN,. Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση, με την χρήση του αλγορίθμου AFT καθ' όλη την διάρκεια των 120 επαναλήψεων εντοπίζεται ότι η συμπεριφορά της γραφικής αναπαράστασης εμφανίζει σε αρκετά σημεία έντονες αλλαγές στις τιμές του κριτηρίου productivity. Τόσο στην περίπτωση της χρήσης αλγορίθμου όσο και στην περίπτωση της μη χρήσης για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις της προσομοίωσης παρατηρούνται έντονες και ξαφνικές αλλαγές στις τιμές του κριτηρίου productivity, με αποτέλεσμα να μην δημιουργείται μια ισορροπία. Η μέση τιμή του κριτηρίου productivity με βάση το AIMSUN για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 48773 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και η μέγιστη τιμή ισούται με 54785 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και εντοπίζεται στην 28<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές του κριτηρίου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 49715 και 53906 η τιμή αυτή εντοπίζεται στην 118<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται μείωση κατά 1,89% στο κριτήριο productivity με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια μικρή αυξητική τάση στις τιμές της, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια αισθητή πτωτική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται μείωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.

Στο σημείο αυτό δίνεται ένας πίνακας (Πίνακας 9.3.3) που δείχνει το ποσοστό βελτίωσης με την χρήση του AFT σε σχέση με την μη χρήση του αλγορίθμου για όλα τα γραφήματα Πραγματοποιήθηκαν 10 προσομοιώσεις και προέκυψαν τα εξής ποσοστά βελτίωσης:

Παράμετρος	Ποσοστό Βελτίωσης
Τοπικό κριτήριο productivity	1,36%
Mean Speed	2,29%
Mean Speed (με βάση το AIMSUN)	-0,55%
Entrance Flow (με βάση το AIMSUN)	-0,90%
Mean Speed * Entrance Flow (με βάση το AIMSUN)	-1,46%

**Πίνακας 9.3.3:** Ποσοστά βελτίωσης ολόκληρου τροποποιημένου δικτύου με την χρήση του αλγορίθμου AFT σε σχέση με την μη χρήση του

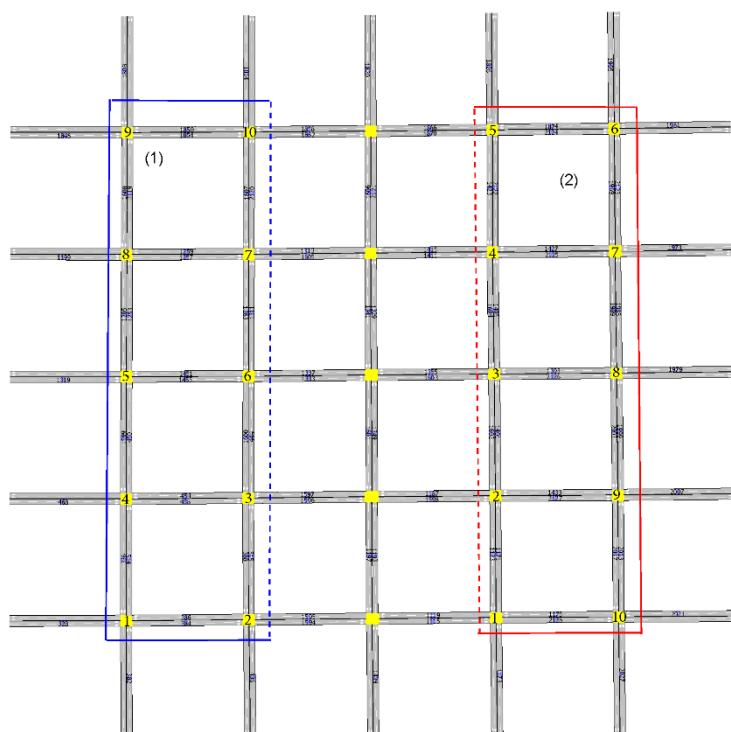
Αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί χωρισμός του υπάρχοντος δικτύου σε μικρότερα υποδίκτυα οδηγώντας, τόσο στο να υπάρξει μια πιο σφαιρική εικόνα της συμπεριφοράς του δικτύου, όσο και στο να δημιουργηθούν καλυτέρα αποτελέσματα με την βοήθεια του χωρισμού του αρχικού δικτύου. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται οι επιλογές που αποφασίστηκε να χωριστεί το αρχικό δίκτυο που μελετάται:

- Χωρισμός δικτύου σε 2 υποδίκτυα με κοινούς κόμβους τους ενδιάμεσους κάθετους κόμβους (1<sup>ο</sup> υποδίκτυο 15 κόμβων, 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο 15 κόμβων). Τα 2 υποδίκτυα έχουν 5 κοινούς κόμβους μεταξύ τους και 10 κόμβους οι οποίοι είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους.
- Χωρισμός δικτύου σε 2 υποδίκτυα με uncontrolled τους κοινούς τους ενδιάμεσους κάθετους κόμβους (1<sup>ο</sup> υποδίκτυο 10 κόμβων, 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο 10 κόμβων). Τα 2 υποδίκτυα έχουν 5 κοινούς κόμβους μεταξύ τους οι οποίοι είναι uncontrolled. Το σχεδιάγραμμα ([Σχήμα 9.3.10](#)) για τους κόμβους αυτούς παρατίθεται στην συνέχεια καθώς και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μέσω της συγκεκριμένης μελέτης του δικτύου.
- Χωρισμός δικτύου σε 2 υποδίκτυα με κοινούς κόμβους στην πλάγια διαγώνιο (1<sup>ο</sup> υποδίκτυο 15 κόμβων, 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο 15 κόμβων). Τα 2 υποδίκτυα έχουν 5 κοινούς κόμβους μεταξύ τους και 10 κόμβους οι οποίοι είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους.
- Χωρισμός δικτύου σε 2 υποδίκτυα με uncontrolled τους κοινούς κόμβους στην πλάγια διαγώνιο (1<sup>ο</sup> υποδίκτυο 10 κόμβων, 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο 10 κόμβων). Τα 2 υποδίκτυα έχουν 5 κοινούς κόμβους μεταξύ τους οι οποίοι είναι uncontrolled.
- Χωρισμός δικτύου σε 3 ανεξάρτητα υποδίκτυα (το 1<sup>ο</sup> υποδίκτυο 8 κόμβων, το 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο 9 κόμβων, το 3<sup>ο</sup> υποδίκτυο 8 κόμβων ).
- Χωρισμός δικτύου σε 3 ανεξάρτητα υποδίκτυα (το 1<sup>ο</sup> υποδίκτυο 10 κόμβων, το 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο 9 κόμβων, το 3<sup>ο</sup> υποδίκτυο 6 κόμβων ).
- Χωρισμός δικτύου σε 3 υποδίκτυα με κοινούς κόμβους (1<sup>ο</sup> υποδίκτυο 10 κόμβων, 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο 12 κόμβων, 3<sup>ο</sup> υποδίκτυο 12 κόμβων). Το σχεδιάγραμμα ([Σχήμα 9.3.27](#)) για τους κόμβους αυτούς παρατίθεται στην συνέχεια καθώς και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μέσω της συγκεκριμένης μελέτης του δικτύου.
- Χωρισμός δικτύου σε 2 ανεξάρτητα υποδίκτυα ένα εξωτερικό υποδίκτυο και ένα εσωτερικό (το 1<sup>ο</sup> υποδίκτυο χαρακτηρίζεται ως το εξωτερικό υποδίκτυο και αποτελείται από 16 κόμβους και το 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο χαρακτηρίζεται ως το εσωτερικό υποδίκτυο και αποτελείται από 9 κόμβους).

Πραγματοποιήθηκε ένα set 10 επαναλήψεων για κάθε τρόπο χωρισμού του δικτύου με βάση τους τρόπους χωρισμού που αναφέρθηκαν παραπάνω. Θα παρατεθούν όμως τα αποτελέσματα για τους τρόπους χωρισμού που προσφέρουν μεγαλύτερο ποσοστό βελτίωσης για το συνολικό κριτήριο productivity που δίνεται μέσω του προσομοιωτή AIMSUN. Για κάθε περίπτωση χωρισμού θα παρουσιαστούν τα γραφήματα που αφορούν το τοπικό κριτήριο productivity καθώς το γράφημα της ταχύτητας κάθε υποδίκτυο ξεχωριστά. Ταυτόχρονα, θα παρουσιαστούν τα γραφήματα για την ταχύτητα, την ροή, και το συνολικό κριτήριο productivity με την βοήθεια του προσομοιωτή AIMSUN. Τα γραφήματα που παρατίθενται αφορούν μια συγκεκριμένη προσομοίωση η οποία βρισκόνταν πιο κοντά στο μέσο όρο αυτών των 10 προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν. Τέλος θα παρουσιαστεί και ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τα τελικά αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση.

## Χωρισμός δικτύου σε 2 υποδίκτυα με uncontrolled τους κοινούς τους ενδιάμεσους κάθετους κόμβους

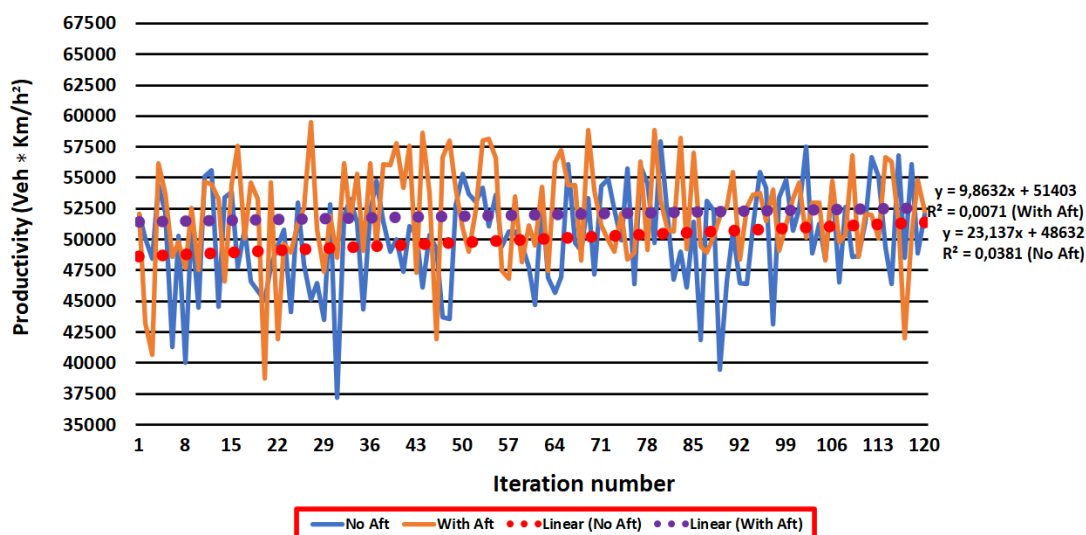
Λόγω του συγκεκριμένου τρόπου χωρισμού και για τα 2 υποδίκτυα, έχουν οριστεί οι ίδιες τιμές στις μεταβλητές καθώς κάθε υποδίκτυο περιέχει τον ίδιο αριθμό κόμβων.



Μεταβλητές	Τιμές μεταβλητών
Nr_of_theta	30
Nr_of_x	1
Nr_of_pertubations	50
theta_lb	0
theta_ub	4
t_h	100
l_g	31
alpha_0	2
alpha_lower	0.01
bound	0.05
bound_change	0.1
iteration_of_change	3
param_of_change	0.05

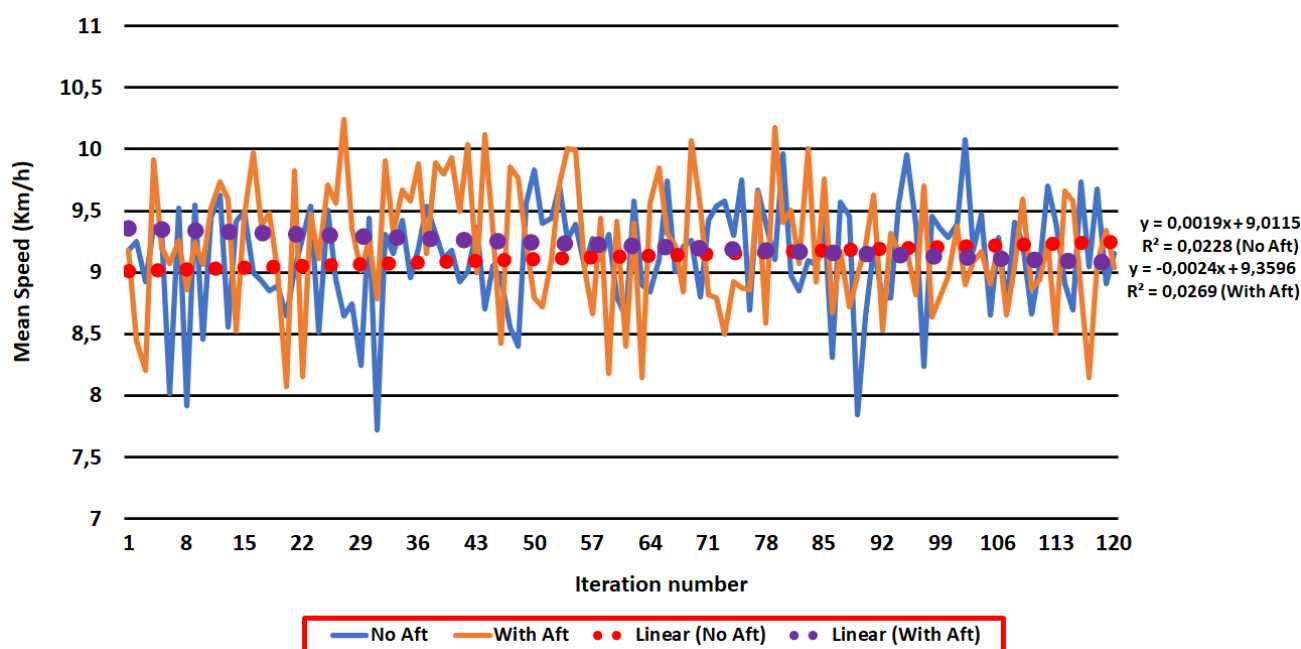
**Πίνακας 9.3.4:** Τιμές παραμέτρων για το πρώτο υποδίκτυο 10 κόμβων

**Σχήμα 9.3.10:** Χωρισμός δικτύου σε 2 υποδίκτυα με uncontrolled τους κοινούς τους ενδιάμεσους κάθετους κόμβους



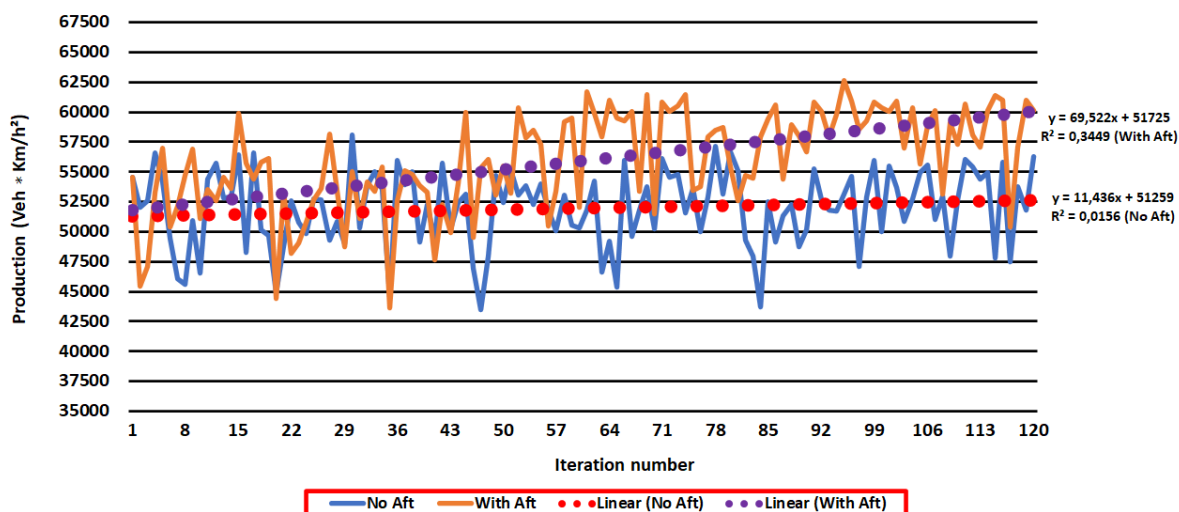
**Σχήμα 9.3.11:** Συμπεριφορά τοπικού κριτηρίου productivity για το πρώτο υποδίκτυο

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (Σχήμα 9.3.11) παρουσιάζεται η συμπεριφορά του πρώτου υποδικτύου όσον αφορά το τοπικό κριτήριο productivity, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή του τοπικού κριτηρίου productivity για το πρώτο υποδίκτυο για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 51866 αριθμός οχημάτων επί ταχύτητα και η μέγιστη τιμή ισούται με 59513 αριθμός οχημάτων επί ταχύτητα και εντοπίζεται στην 27<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές του τοπικού κριτηρίου productivity με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 50031 και 57925 η τιμή αυτή εντοπίζεται στην 80<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 3,66% στο πρώτο υποδίκτυο σχετικά με το τοπικό κριτήριο productivity για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια μικρή αυξητική τάση στις τιμές της, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία γραμμή γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται σταθερότητα των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



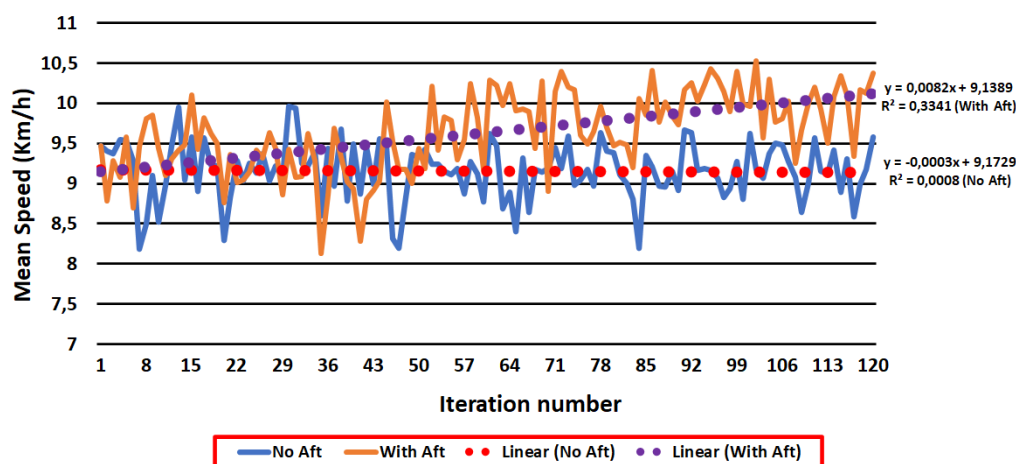
Σχήμα 9.3.12: Μέση ταχύτητα πρώτου υποδικτύου

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (Σχήμα 9.3.12) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας σχετικά με το πρώτο υποδίκτυο, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας του πρώτου υποδικτύου για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 9,05 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 10,23 km/h και εντοπίζεται στην 27<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας του πρώτου υποδικτύου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT αντιστοιχούν 9,12 km/h και 10,07 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 108<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται μείωση κατά 0,75% στην ταχύτητα του πρώτου υποδικτύου για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια μικρή αυξητική τάση στις τιμές της, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια μικρή πτωτική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται μικρή μείωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



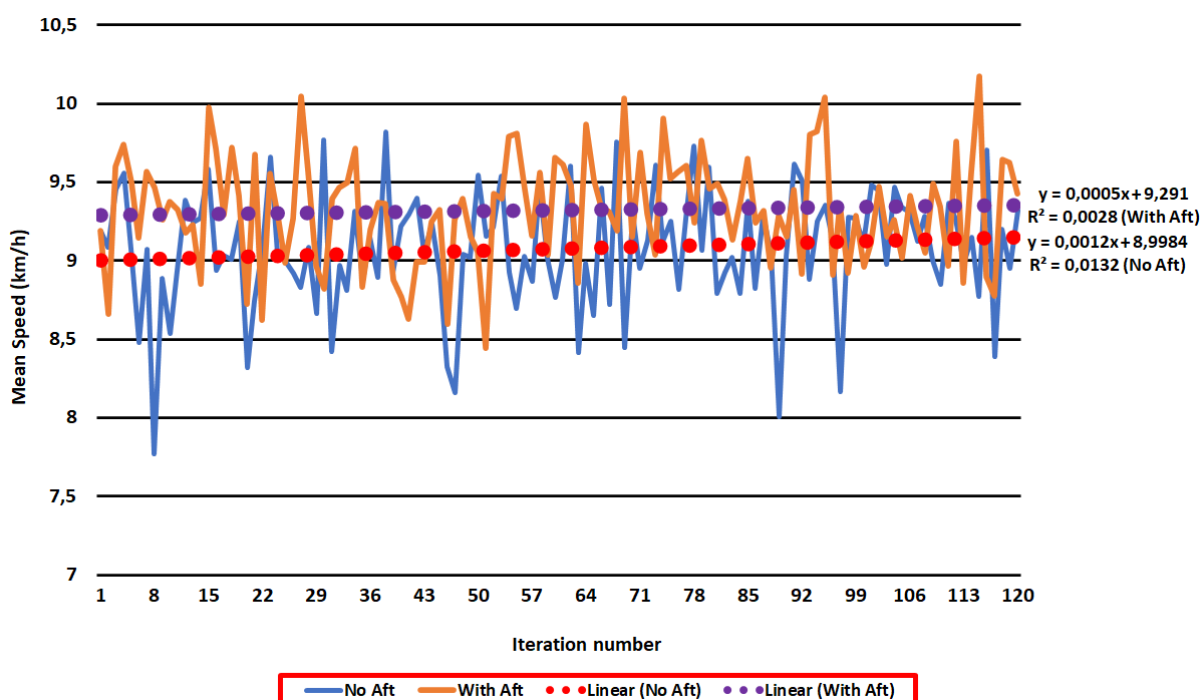
**Σχήμα 9.3.13:** Συμπεριφορά τοπικού κριτηρίου productivity για το δεύτερο υποδίκτυο

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (**Σχήμα 9.3.13**) παρουσιάζεται η συμπεριφορά του δευτέρου υποδικτύου όσον αφορά το τοπικό κριτήριο productivity, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή του τοπικού κριτηρίου productivity για το δεύτερο υποδίκτυο για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 58458 αριθμός οχημάτων επί ταχύτητα και η μέγιστη τιμή ισούται με 62627 αριθμός οχημάτων επί ταχύτητα και εντοπίζεται στην 95<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές του τοπικού κριτηρίου productivity με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 51951 και 58070 η τιμή αυτή εντοπίζεται στην 30<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 12,52% στο δίκτυο στην ταχύτητά του για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



**Σχήμα 9.3.14:** Μέση ταχύτητα δευτέρου υποδικτύου

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (**Σχήμα 9.3.14**) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας σχετικά με το δεύτερο υποδίκτυο, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας του δευτέρου υποδικτύου για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 9,95 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 10,53 km/h και εντοπίζεται στην 102<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας του πρώτου υποδικτύου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT αντιστοιχούν 9,15 km/h και 9,95 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 30<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 8,71% στην ταχύτητα του δικτύου για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.

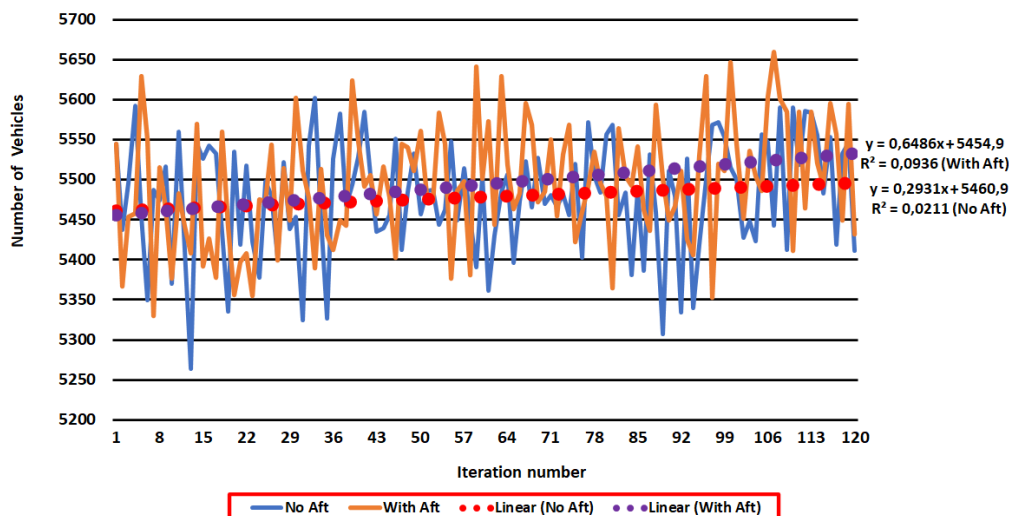


**Σχήμα 9.3.15:** Μέση ταχύτητα ολικού δικτύου η οποία δίνεται από το AIMSUN

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (**Εικόνα 9.3.15**) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας του ολικού δικτύου, με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας με βάση το AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 9,31 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 10,17 km/h και εντοπίζεται στην 115<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 9,07 km/h και 9,81 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 38<sup>η</sup> επανάληψη. Παρατίθενται η γραμμική εξίσωση καθώς και ο συντελεστής προσδιορισμού τόσο με την χρήση όσο και με την μη χρήση του αλγορίθμου. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 2,62% στην μέση ταχύτητα του δικτύου με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι τόσο με την χρήση όσο και μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η

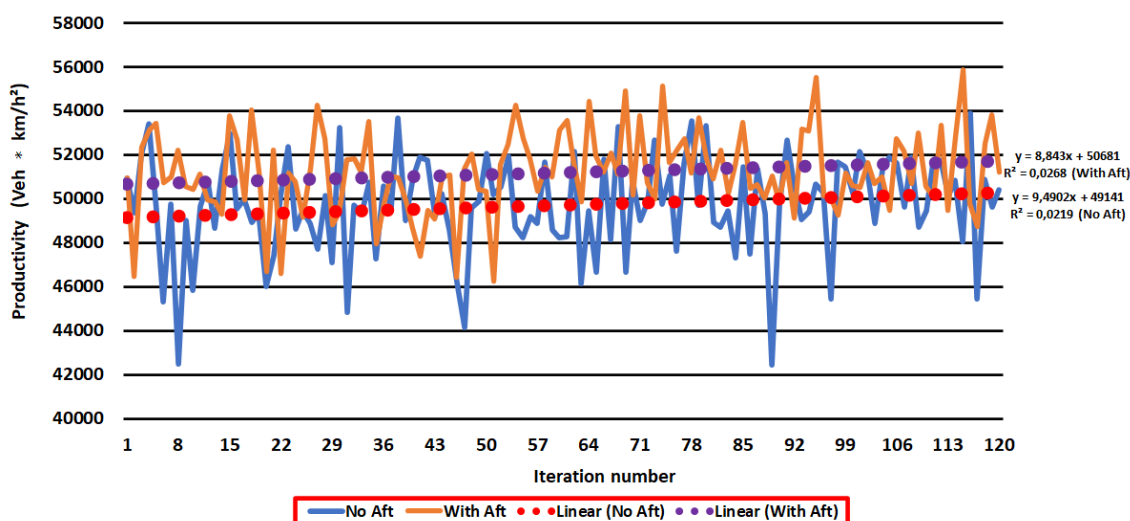


γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός. Για τον λόγο αυτό δεν παρουσιάζεται και μεγάλο ποσοστό βελτίωσης.



Σχήμα 9.3.16: Συμπεριφορά ροής οχημάτων ολικού δικτύου η οποία δίνεται από το AIMSUN

Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση (Σχήμα 9.3.16), παρουσιάζεται η συμπεριφορά της ροής οχημάτων ταχύτητας του ολικού δικτύου, με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ροής των οχημάτων με βάση το AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 5532 αριθμός οχημάτων και η μέγιστη τιμή ροής ισούται με 5659 και εντοπίζεται στην 107<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ροής των οχημάτων με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 5478 και 5602 και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 33<sup>η</sup> επανάληψη. Παρατίθενται η γραμμική εξίσωση καθώς και ο συντελεστής προσδιορισμού τόσο με την χρήση όσο και με την μη χρήση του αλγορίθμου. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση κατά 0,98% στην ροή των οχημάτων του δικτύου με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου.



Σχήμα 9.3.17: Κριτήριο productivity με βάση το AIMSUN για το ολικό δίκτυο



Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση (**Σχήμα 9.3.17**), παρουσιάζεται το κριτήριο productivity με βάση το AIMSUN, το οποίο ισούται με την μέση ταχύτητα δικτύου επί την ροή των οχημάτων που δίνει το AIMSUN. Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση, με την χρήση του αλγορίθμου aft καθ' όλη την διάρκεια των 120 επαναλήψεων εντοπίζεται ότι η συμπεριφορά της γραφικής αναπαράστασης εμφανίζει σε αρκετά σημεία έντονες αλλαγές στις τιμές του κριτηρίου productivity. Οι αλλαγές αυτές των τιμών μειώνονται έως ένα σημείο για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις όπου ο αλγόριθμος AFT έχει κατασταλάξει στις τιμές των παραμέτρων που κάνει χρήση. Εξαίρεση στο παραπάνω αποτελεί στο διάστημα των επαναλήψεων 114-120 όπου εντοπίζεται μια ξαφνική και έντονη αλλαγή στις τιμές του κριτηρίου σε σχέση με τις προηγούμενες επαναλήψεις. Αντιθέτως, παρατηρείται ότι καθ' όλη την διάρκεια με τη μη χρήση του αλγορίθμου AFT η προσομοίωση παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις και ξαφνικές αλλαγές στις τιμές του productivity σε πολλά σημεία καθ' όλη την διάρκεια των επαναλήψεων. Η μέση τιμή του κριτηρίου productivity με βάση το AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 51511 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και η μέγιστη τιμή ισούται με 55868 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και εντοπίζεται στην 115<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές του κριτηρίου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 49715 και 53906 η τιμή αυτή εντοπίζεται στην 108<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 3,61% στο κριτήριο productivity με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια μικρή αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται μια μικρή βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.

Στο σημείο αυτό δίνεται ένας πίνακας (**Πίνακας 9.3.5**) που δείχνει το ποσοστό βελτίωσης με την χρήση του AFT σε σχέση με την μη χρήση του αλγορίθμου όσο αναφορά τον παραπάνω τρόπο χωρισμού, για όλα τα γραφήματα

Πραγματοποιήθηκαν 10 προσομοιώσεις και προέκυψαν τα εξής ποσοστά βελτίωσης:

Παράμετρος	Υποδίκτυο Πρώτο Ποσοστό Βελτίωσης	Υποδίκτυο Δεύτερο Ποσοστό Βελτίωσης	Συνολικό Δίκτυο Ποσοστό Βελτίωσης (με βάση το AIMSUN)
Τοπικό κριτήριο productivity	9,52%	8,0%	2,80%
Mean Speed	4,81%	3,87%	2,18%
Entrance Flow	4,62%	4,0%	0,63%

**Πίνακας 9.3.5:** Ποσοστά βελτίωσης χωρισμού τροποποιημένου δικτύου με πλάγιο τρόπο από τα αριστερά προς τα δεξιά σε ανεξάρτητα υποδίκτυα με την χρήση του αλγορίθμου AFT σε σχέση με την μη χρήση.

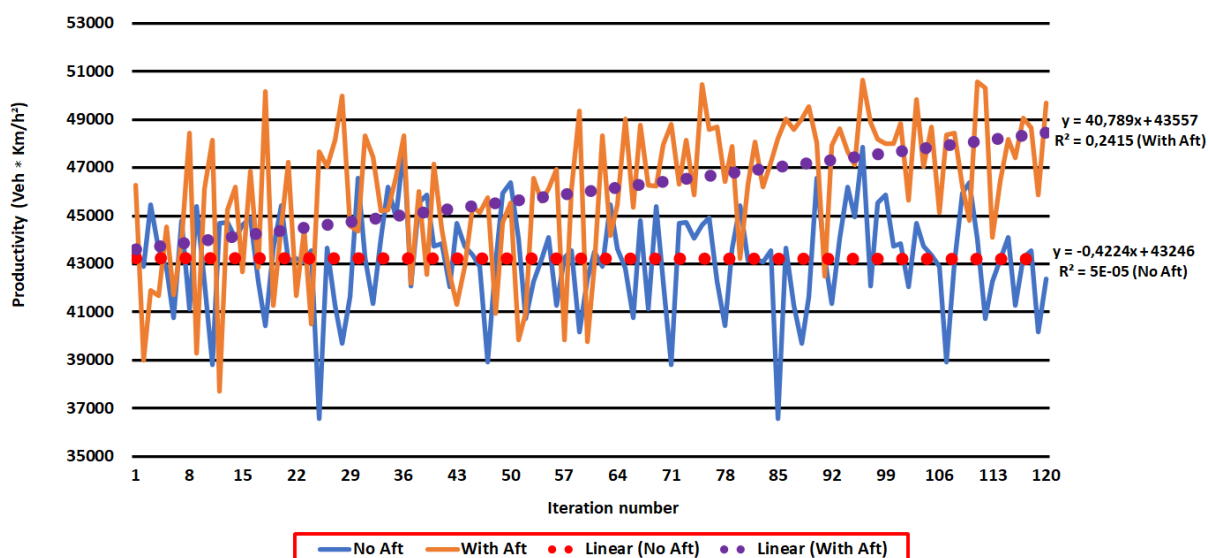
Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται ένας τελικός πίνακας (**Πίνακας 9.3.6**) ποσοστών βελτιώσεων κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT σε σχέση με την μη χρήση του για κάθε είδος χωρισμού που πραγματοποιήθηκε.

	1 <sup>ο</sup> Υποδίκτυο			2 <sup>ο</sup> Υποδίκτυο			3 <sup>ο</sup> Υποδίκτυο			Συνολικό Δίκτυο (Με βάση το AIMSUN)			
Τρόπος Χωρισμού δικτύου	Τοπ. κριτ Productivity	Mean Speed	Entrance Flow	Τοπ. κριτ Productivity	Mean Speed	Entrance Flow	Τοπ. κριτ Productivity	Mean Speed	Entrance Flow	Mean Speed	Entrance flow car	Mean Speed * Entrance flow car	σ (Mean Speed * Entrance flow car)
Εξωτερικοί Εσωτερικοί	-4,39%	-2,61%	-1,83%	14,94%	19,28%	-3,36%				-2,14%	-3,48%	-5,56%	1,90
Ενδιάμεσος common 10-5-10	6,04%	4,23%	1,84%	2,03%	-0,65%	2,71%				-0,36%	-0,10%	-0,47%	3,78
Ενδιάμεσος uncontrol 10-5-10	9,51%	4,81%	4,62%	7,99%	3,87%	3,99%				2,17%	0,63%	2,80%	2,89
Πλάγιος χωρισμός common 10-5-10	6,53%	4,07%	2,41%	10,03%	8,35%	1,65%				0,16%	-0,94%	-0,78%	2,78
Πλάγιος χωρισμός uncontrol 10-5-10	3,65%	-1,15%	4,89%	11,33%	6,58%	4,57%				1,68%	0,42%	2,10%	1,64
Τρία κομμάτια 8-9-8	-4,52%	-4,27%	-0,40%	10,91%	11,44%	-0,14%	2,28	0,48%	1,83%	-3,31%	-0,83%	-4,10%	4,48
Τρία κομμάτια 10-9-6	-3,20%	-4,40%	1,21%	7,13%	5,05%	2,14%	21,00	17,044,	3,46%	-0,91%	-0,77%	-1,69%	1,62
Common 10-12-12	2,44%	-0,17%	2,65%	3,71%	0,81%	2,80%	4,57	2,76%	1,89	0,36%	0,45%	0,80%	3,37
Ολόκληρο Δίκτυο	1,36%	2,28%	-0,90%							-0,55%	-0,90%	-1,46%	1,85

*Πίνακας 9.3.6: Ποσοστά βελτιώσεων παραμέτρων τροποποιημένου δικτύου 25 κόμβων*

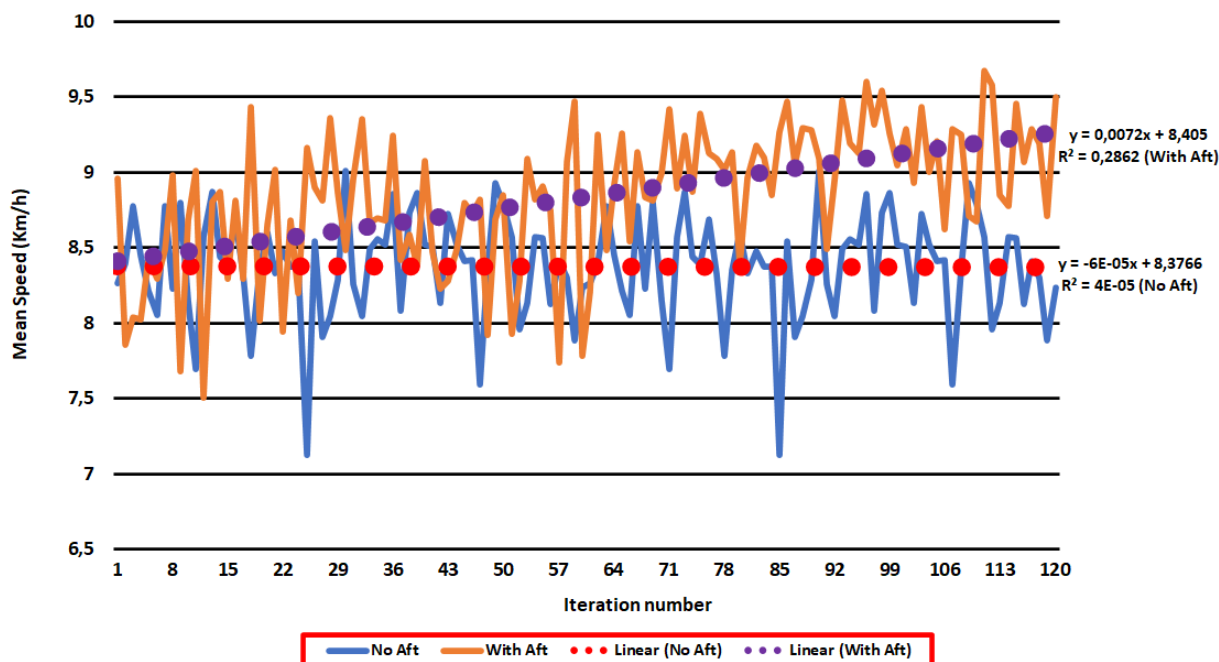
### 9.3.2 Δίκτυο 25 Κόμβων Τροποποιημένων Πρασίνων

Η αναπαράσταση του δικτύου των 25 κόμβων έχει παρουσιαστεί παραπάνω (Σχήμα 8.3) και βρίσκεται στο υποκεφάλαιο 8.3.1. Θα πραγματοποιηθεί αναπαράσταση των αντίστοιχων γραφημάτων που αναφέρθηκαν και προηγήθηκαν (ταχύτητας και τοπικού κριτηρίου productivity, μέσης ταχύτητας συνολικού δικτύου, ροής οχημάτων και του κριτηρίου productivity με βάση το AIMSUN) καθώς και γραφήματα των ‘πράσινων’ χρονών και για τις 4 φάσεις του κεντρικού κόμβου που επιλέχθηκε να μελετηθεί. Ο πίνακας παραμέτρων (Πίνακας 9.3.1) που κάνει χρήση ο αλγόριθμος AFT έχει παρασταθεί παραπάνω.



Σχήμα 9.3.18: Συμπεριφορά ολικού δικτύου κάνοντας χρήση κριτηρίου productivity

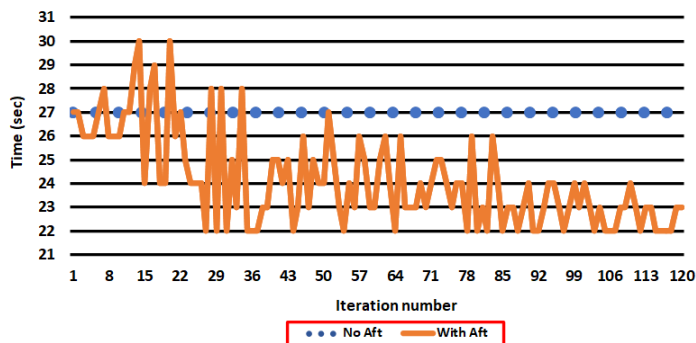
Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (Σχήμα 9.3.18) παρουσιάζεται η συμπεριφορά του ολικού δικτύου με βάση το κριτήριο productivity, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Το κριτήριο productivity αντιστοιχεί στον αριθμό των οχημάτων επι την ταχύτητα του δικτύου. Η μέση τιμή του κριτηρίου για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 47664 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και η μέγιστη τιμή ισούται με 50631 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και εντοπίζεται στην 96<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές του κριτηρίου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 43220 και 47841 η τιμή αυτή εντοπίζεται στην 18<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 10,28% στο δίκτυο για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρων των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



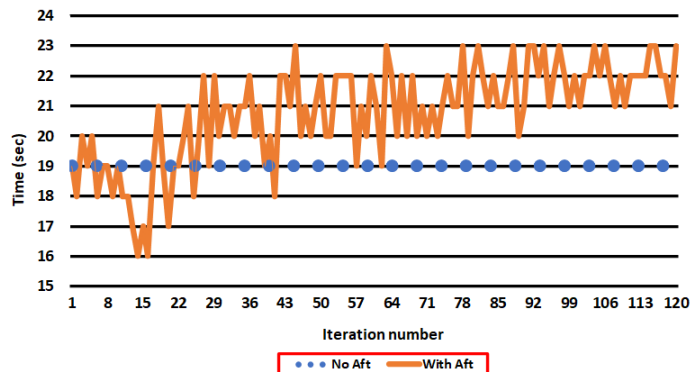
**Σχήμα 9.3.19:** Μέση ταχύτητα ολικού δικτύου

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (**Σχήμα 9.3.19**) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας του ολικού δικτύου, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 9,12 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 9,67 km/h και εντοπίζεται στην 111<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 8,37 km/h και 9,01 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 109<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 8,97% στην ταχύτητα του δικτύου για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.

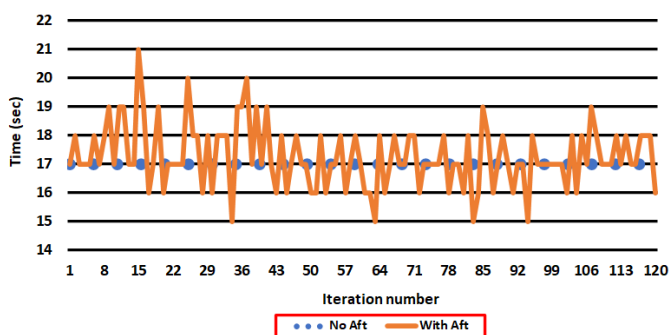
Στο σημείο αυτό θα πραγματοποιηθεί αναπαράσταση των πράσινων χρόνων για κάθε φάση του δικτύου των 25 κόμβων σύμφωνα με το σχήμα (**Σχήμα 8.3**). Επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν τα γραφήματα αυτά, για ένα κεντρικό κόμβο του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, θα πραγματοποιηθεί η μελέτη των 4 φάσεων που αντιστοιχούν στον κόμβο με αρίθμηση 11. Σε κάθε γράφημα αναπαρίστανται ο χρόνος της φάσης με την μη χρήση καθώς και με την χρήση του αλγορίθμου AFT.



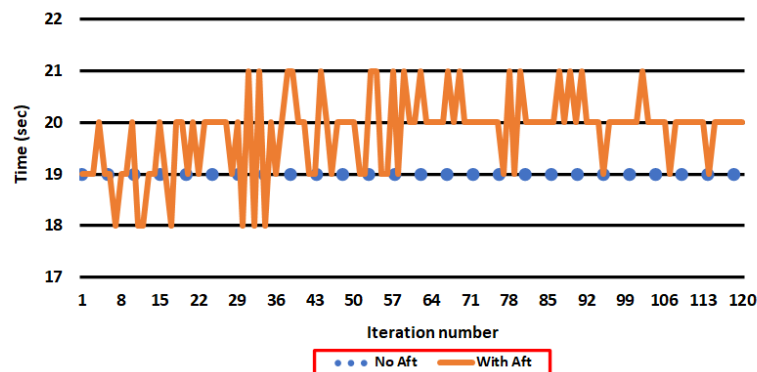
Σχήμα 9.3.20: 1<sup>η</sup> φάση για τον κόμβο με και χωρίς χρήση του αλγορίθμου AFT



Σχήμα 9.3.21: 2<sup>η</sup> φάση για τον κόμβο με και χωρίς χρήση του αλγορίθμου AFT



Σχήμα 9.3.22: 3<sup>η</sup> φάση για τον κόμβο με και χωρίς χρήση του αλγορίθμου AFT

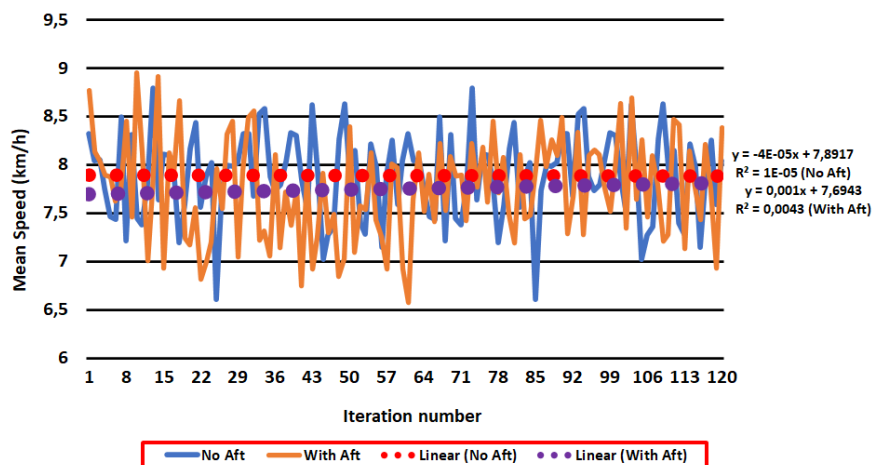


Σχήμα 9.3.23: 4<sup>η</sup> φάση για τον κόμβο με και χωρίς χρήση του αλγορίθμου AFT

Στα γραφήματα (Σχήμα 9.3.20:23) παρουσιάζονται οι χρόνοι τόσο για την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, όπου καθ' όλη την διάρκεια των 120 επαναλήψεων διατηρούν την φάση του χρόνου τους σταθερή χωρίς μεταβολές στις τιμές των δευτερολέπτων τους, όσο και οι χρόνοι των φάσεων με την χρήση του αλγορίθμου AFT που αλλάζουν για κάθε επανάληψη του αλγορίθμου. Όπως προαναφέρθηκε η καλύτερη τιμή του τοπικού κριτηρίου productivity εντοπίζεται στην 96<sup>η</sup> επανάληψη του αλγορίθμου. Αντίστοιχα, όσον αφορά το κριτήριο productivity με βάση το AIMSUN η μέγιστη τιμή του κριτηρίου εντοπίζεται στην 10<sup>η</sup> επανάληψη. Στο σημείο αυτό παρατίθενται ο συγκεντρωτικός πίνακας των 4<sup>ων</sup> φάσεων με την μη χρήση και την χρήση του αλγορίθμου AFT.

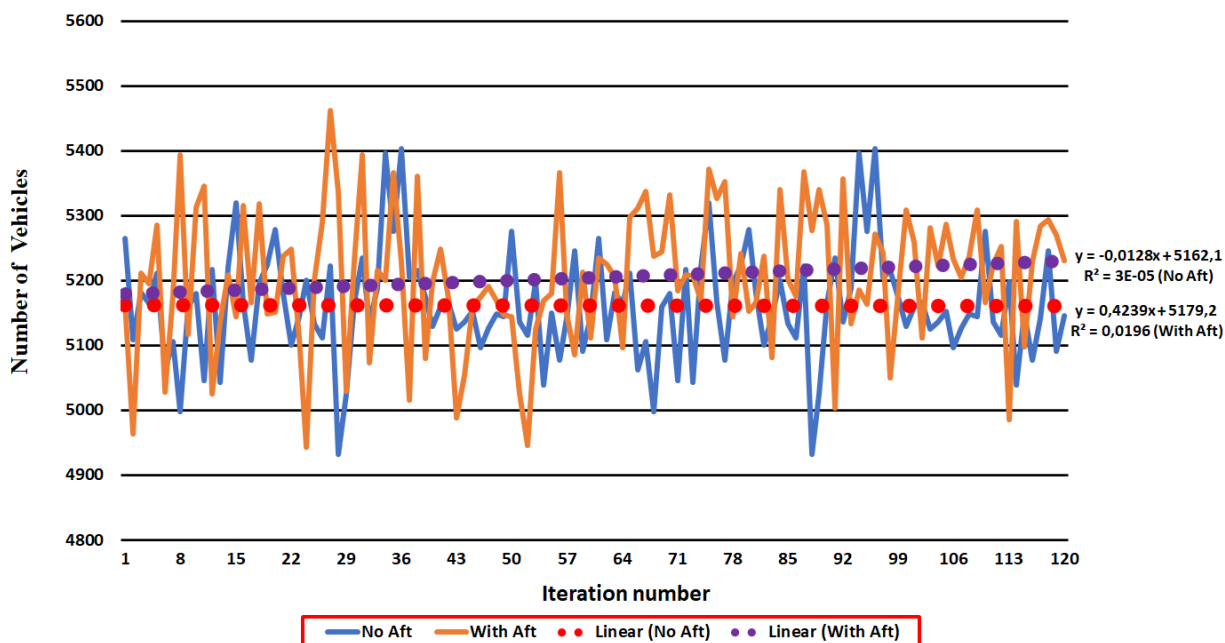
Φάσεις	Μη χρήση AFT	Με χρήση AFT	Με χρήση AFT (Με βάση το AIMSUN)
1 <sup>η</sup> φάση	27	23	26
2 <sup>η</sup> φάση	19	22	19
3 <sup>η</sup> φάση	17	17	17
4 <sup>η</sup> φάση	19	20	20

Πίνακας 9.3.7: Πράσινοι χρόνοι με και χωρίς χρήση αλγορίθμου AFT



**Σχήμα 9.3.24:** Μέση ταχύτητα ολικού δικτύου η οποία δίνεται από το AIMSUN

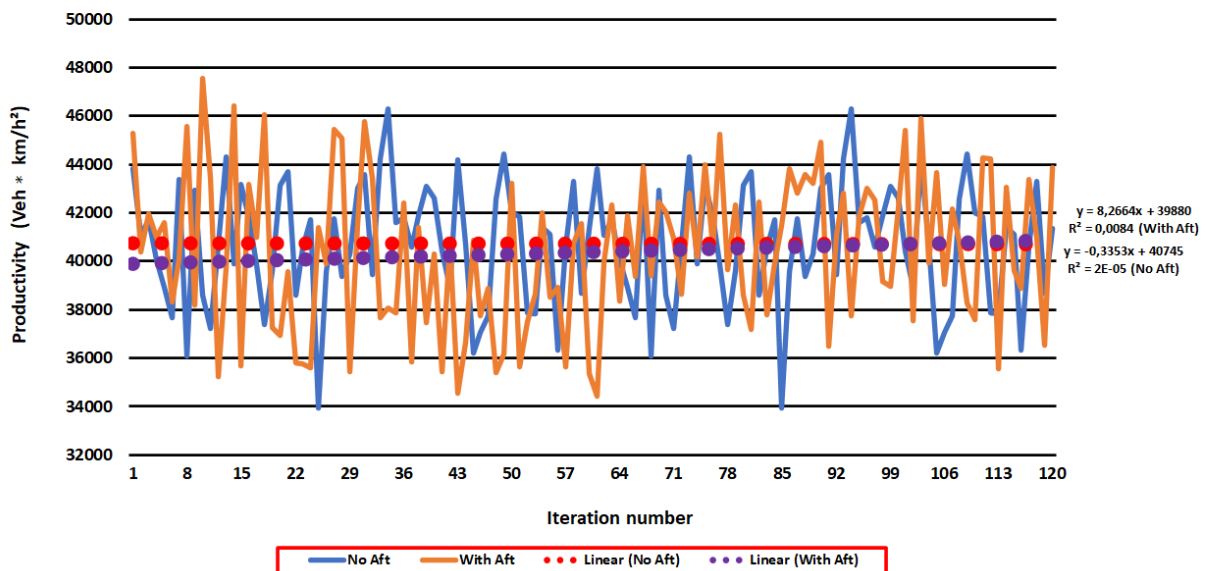
Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (**Σχήμα 9.3.24**) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας του ολικού δικτύου, με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας με βάση το AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 7,85 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 8,95 km/h και εντοπίζεται στην 10<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 7,88 km/h και 8,79 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 73<sup>η</sup> επανάληψη. Παρατίθενται η γραμμική εξίσωση καθώς και ο συντελεστής προσδιορισμού τόσο με την χρήση όσο και με την μη χρήση του αλγορίθμου. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται μείωση κατά 0,45% στην μέση ταχύτητα του δικτύου με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι τόσο με την χρήση όσο και μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρων των τιμών παραμένει σταθερός.



**Σχήμα 9.3.25:** Συμπεριφορά ροής οχημάτων ολικού δικτύου η οποία δίνεται από το AIMSUN

Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση (**Σχήμα 9.3.25**), παρουσιάζεται η συμπεριφορά της ροής οχημάτων ταχύτητας του ολικού δικτύου, με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ροής των οχημάτων με βάση το AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 5223 αριθμός οχημάτων και η μέγιστη τιμή ροής ισούται με 5462 και εντοπίζεται στην 27<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ροής των οχημάτων με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 5161 και 5403 και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 36<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 1,20% στην ροή των οχημάτων του δικτύου με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια πολύ μικρή αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται μικρή βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.





**Σχήμα 9.3.26:** Κριτήριο productivity με βάση το AIMSUN για το ολικό δίκτυο

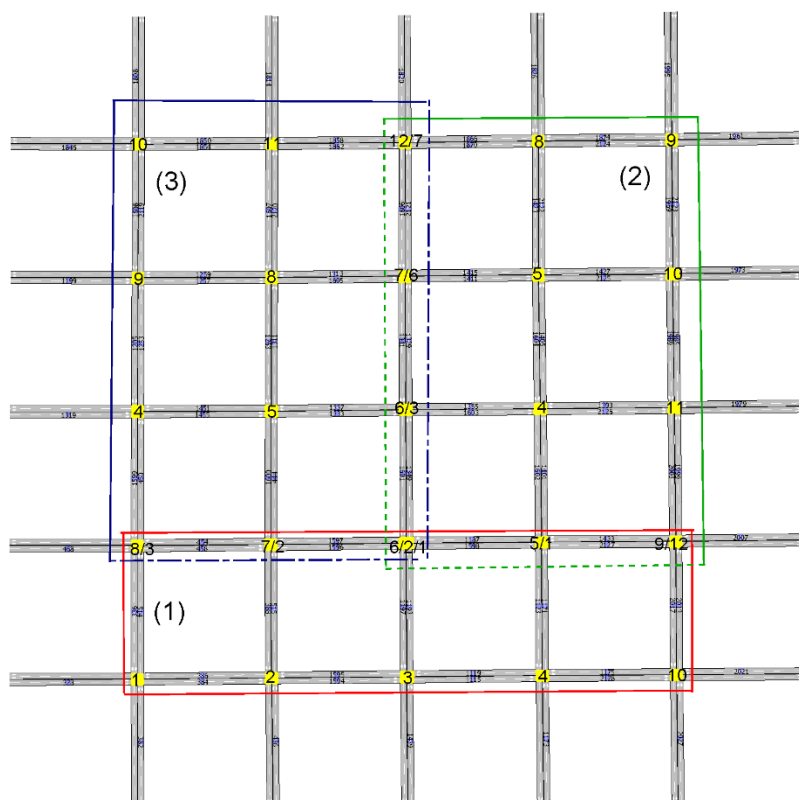
Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση (Σχήμα 9.3.26), παρουσιάζεται το κριτήριο productivity με βάση το AIMSUN, το οποίο ισούται με την μέση ταχύτητα δικτύου επί την ροή των οχημάτων που δίνει το AIMSUN. Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση, με την χρήση του αλγορίθμου AFT καθ' όλη την διάρκεια των 120 επαναλήψεων εντοπίζεται ότι η συμπεριφορά της γραφικής αναπαράστασης εμφανίζει σε αρκετά σημεία έντονες αλλαγές στις τιμές του κριτηρίου productivity. Τόσο στην περίπτωση της χρήσης αλγορίθμου όσο και στην περίπτωση της μη χρήσης για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις της προσομοίωσης παρατηρούνται έντονες και ξαφνικές αλλαγές στις τιμές του κριτηρίου productivity, με αποτέλεσμα να μην δημιουργείται μια ισορροπία. Η μέση τιμή του κριτηρίου productivity με βάση το AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 41036 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και η μέγιστη τιμή ισούται με 47568 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και εντοπίζεται στην 10<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές του κριτηρίου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 40724 και 46310 η τιμή αυτή εντοπίζεται στην 94<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 0,76% στο κριτήριο productivity με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι τόσο με την χρήση όσο και μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός.

Στο σημείο αυτό δίνεται ένας πίνακας (Πίνακας 9.3.8) που δείχνει το ποσοστό βελτίωσης με την χρήση του AFT σε σχέση με την μη χρήση του αλγορίθμου για όλα τα γραφήματα. Πραγματοποιήθηκαν 10 προσομοιώσεις και προέκυψαν τα εξής ποσοστά βελτίωσης:

Παράμετρος	Ποσοστό Βελτίωσης
Τοπικό κριτήριο productivity	10,26%
Mean Speed	9,33%
Mean Speed (με βάση το AIMSUN)	0,94%
Entrance Flow (με βάση το AIMSUN)	0,85%
Mean Speed * Entrance Flow (με βάση το AIMSUN)	1,77%

**Πίνακας 9.3.8:** Ποσοστά βελτίωσης ολόκληρου τροποποιημένου δικτύου με την χρήση του αλγορίθμου AFT σε σχέση με την μη χρήση του

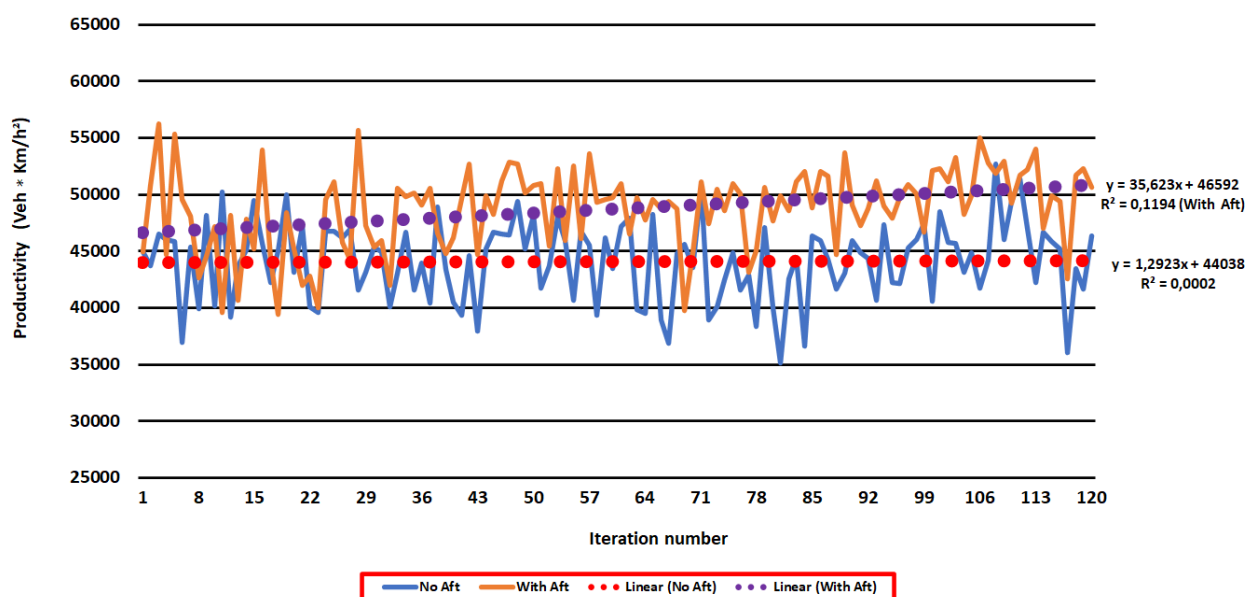
## Χωρισμός δικτύου σε 3 υποδίκτυα με κοινούς κόμβους



Μεταβλητές	Τιμές μεταβλητών
Nr_of_theta	30
Nr_of_x	1
Nr_of_pertubations	50
theta_lb	0
theta_ub	4
t_h	100
l_g	31
alpha_0	2
alpha_lower	0.01
bound	0.05
bound_change	0.1
iteration_of_change	3
param_of_change	0.05

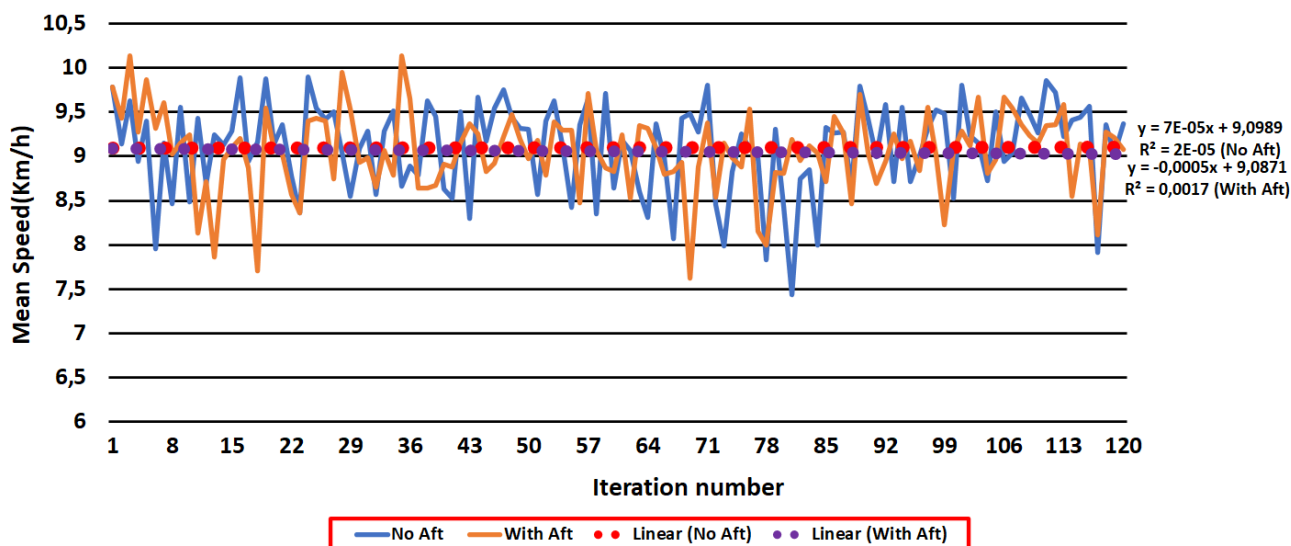
Πίνακας 9.3.9: Τιμές παραμέτρων για το πρώτο υποδίκτυο 10 κόμβων

Σχήμα 9.3.27: Χωρισμός δικτύου σε 3 υποδίκτυα με κοινούς κόμβους υποδικτύου 10 κόμβων, 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο 12 κόμβων, 3<sup>ο</sup> υποδίκτυο 12 κόμβων



Σχήμα 9.3.28: Συμπεριφορά τοπικού κριτηρίου productivity για το πρώτο υποδίκτυο

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (Σχήμα 9.3.28) παρουσιάζεται η συμπεριφορά του πρώτου υποδίκτου όσον αφορά το τοπικό κριτήριο productivity, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή του τοπικού κριτηρίου productivity για το πρώτο υποδίκτυο για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 50901 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και η μέγιστη τιμή ισούται με 56282 αριθμός οχημάτων επί ταχύτητα και εντοπίζεται στην 3<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές του τοπικού κριτηρίου productivity με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 44115 και 52699 η τιμή αυτή εντοπίζεται στην 108<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 15,38% στο πρώτο υποδίκτυο σχετικά με το τοπικό κριτήριο productivity για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρων των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια μικρή αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται μικρή βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



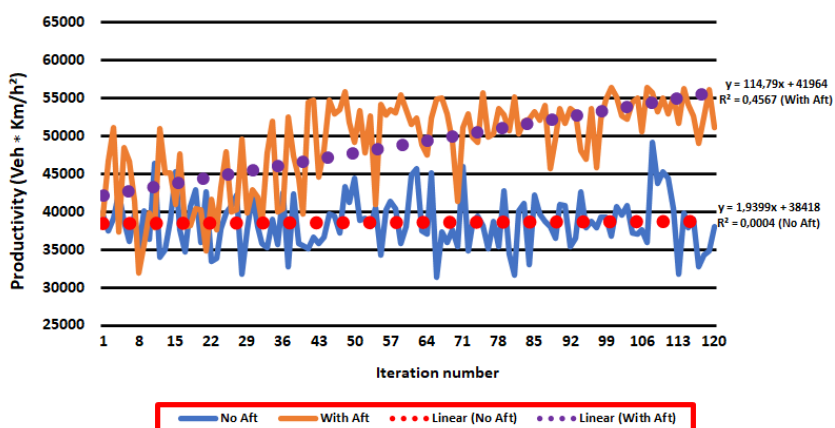
Σχήμα 9.3.29: Μέση ταχύτητα πρώτου υποδικτύου

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (Σχήμα 9.3.29) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας σχετικά με το πρώτο υποδίκτυο, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας του πρώτου υποδικτύου για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 9,17 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 10,14 km/h και εντοπίζεται στην 35<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας του πρώτου υποδικτύου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT αντιστοιχούν 9,10 km/h και 9,89 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 24<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 0,79% στην ταχύτητα του πρώτου υποδικτύου για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. . Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι τόσο με την χρήση όσο και μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρων των τιμών παραμένει σταθερός.

Λόγο του συγκεκριμένου τρόπου χωρισμού και για το 2<sup>ο</sup> και 3<sup>ο</sup> υποδίκτυο, έχουν οριστεί οι ίδιες τιμές στις μεταβλητές καθώς κάθε υποδίκτυο περιέχει τον ίδιο αριθμό κόμβων.

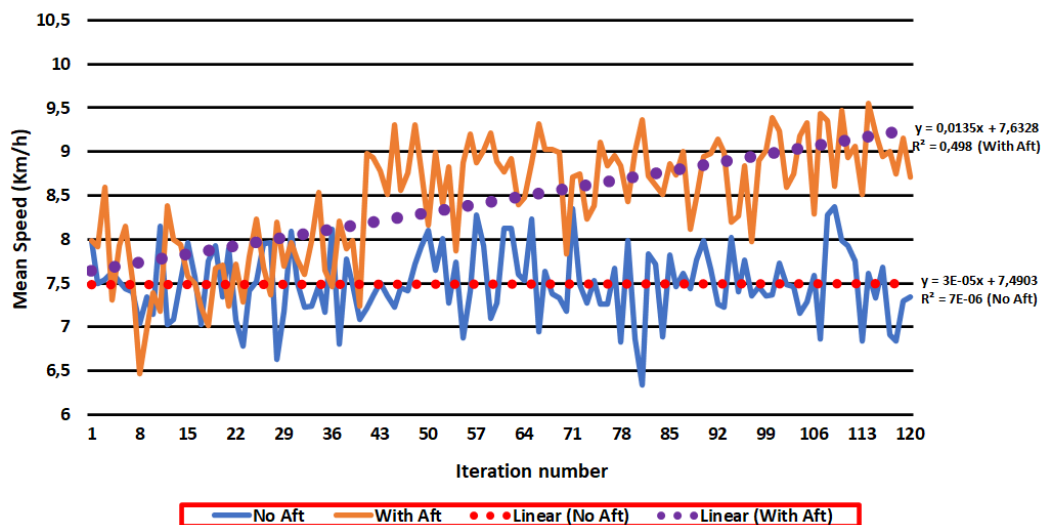
Μεταβλητές	Τιμές μεταβλητών
Nr_of_theta	36
Nr_of_x	1
Nr_of_pertubations	50
theta_lb	0
theta_ub	4
t_h	100
l_g	37
alpha_0	2
alpha_lower	0.01
bound	0.05
bound_change	0.1
iteration_of_change	3
param_of_change	0.05

**Πίνακας 9.3.10:** Τιμές παραμέτρων για το δεύτερο και τρίτο υποδίκτυο 12 κόμβων



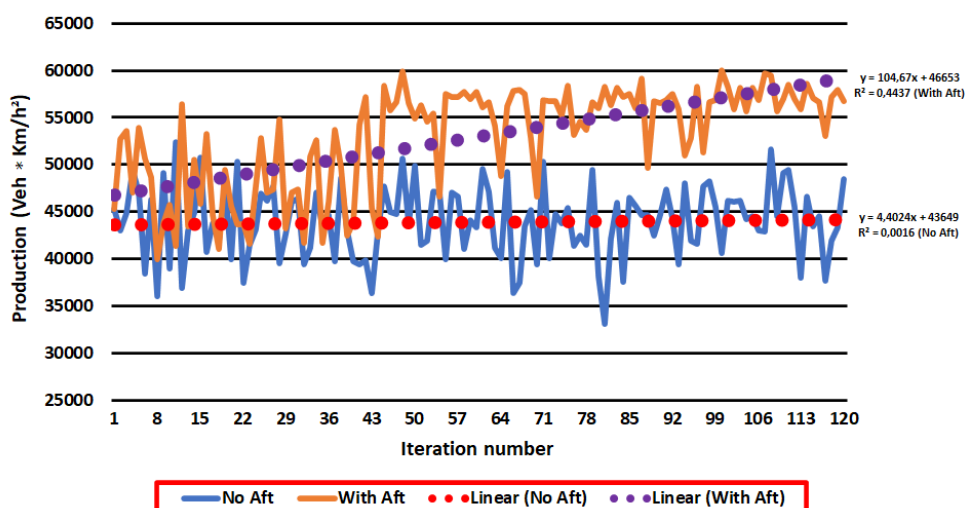
**Σχήμα 9.3.30:** Συμπεριφορά τοπικού κριτηρίου productivity για το δεύτερο υποδίκτυο

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (**Σχήμα 9.3.30**) παρουσιάζεται η συμπεριφορά του δευτέρου υποδικτύου όσον αφορά το τοπικό κριτήριο productivity, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή του τοπικού κριτηρίου productivity για το δεύτερο υποδίκτυο για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 53577 αριθμός οχημάτων επί ταχύτητα και η μέγιστη τιμή ισούται με 56404 αριθμός οχημάτων επί ταχύτητα και εντοπίζεται στην 100<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές του τοπικού κριτηρίου productivity με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 38535 και 49220 η τιμή αυτή εντοπίζεται στην 108<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 39,03% στο δίκτυο στην ταχύτητά του για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται έντονη βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



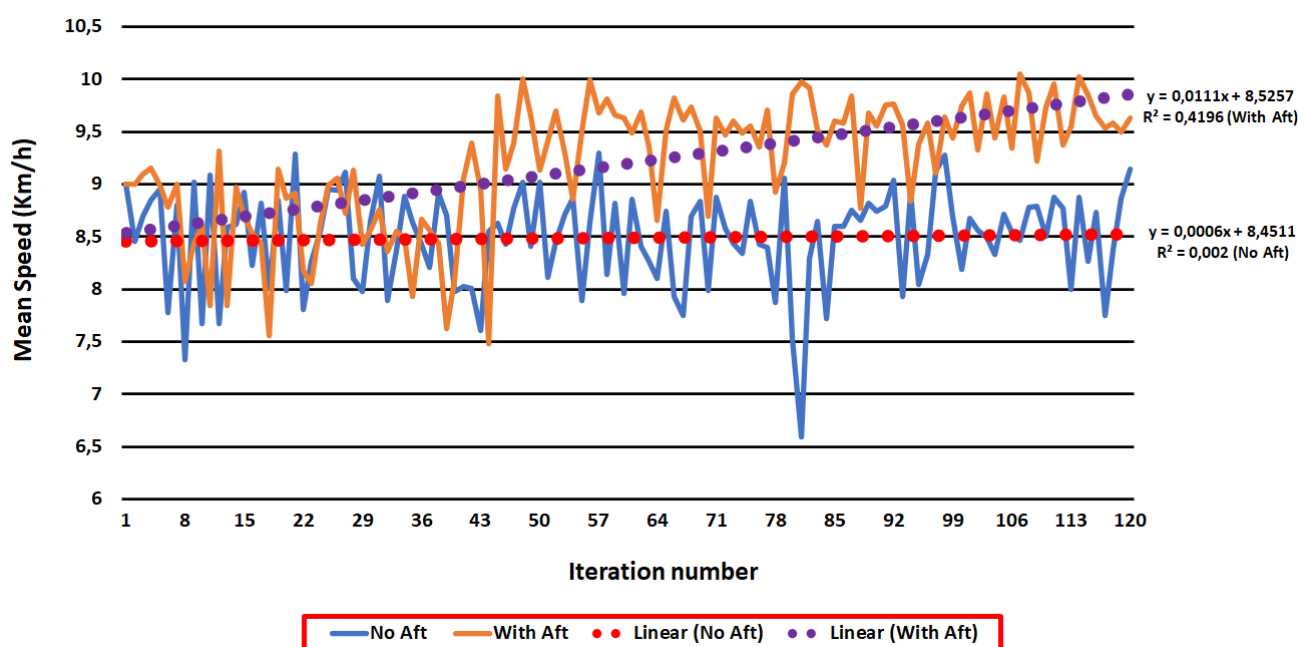
Σχήμα 9.3.31: Μέση ταχύτητα δευτέρου υποδικτύου

Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (Σχήμα 9.3.31) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας σχετικά με το δεύτερο υποδίκτυο, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας του δευτέρου υποδικτύου για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 9,00 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 9,55 km/h και εντοπίζεται στην 114<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας του πρώτου υποδικτύου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT αντιστοιχούν 7,49 km/h και 8,36 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 109<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 20,16% στην ταχύτητα του δικτύου για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται έντονη βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



Σχήμα 9.3.32: Συμπεριφορά τοπικού κριτηρίου productivity για το τρίτο υποδίκτυο

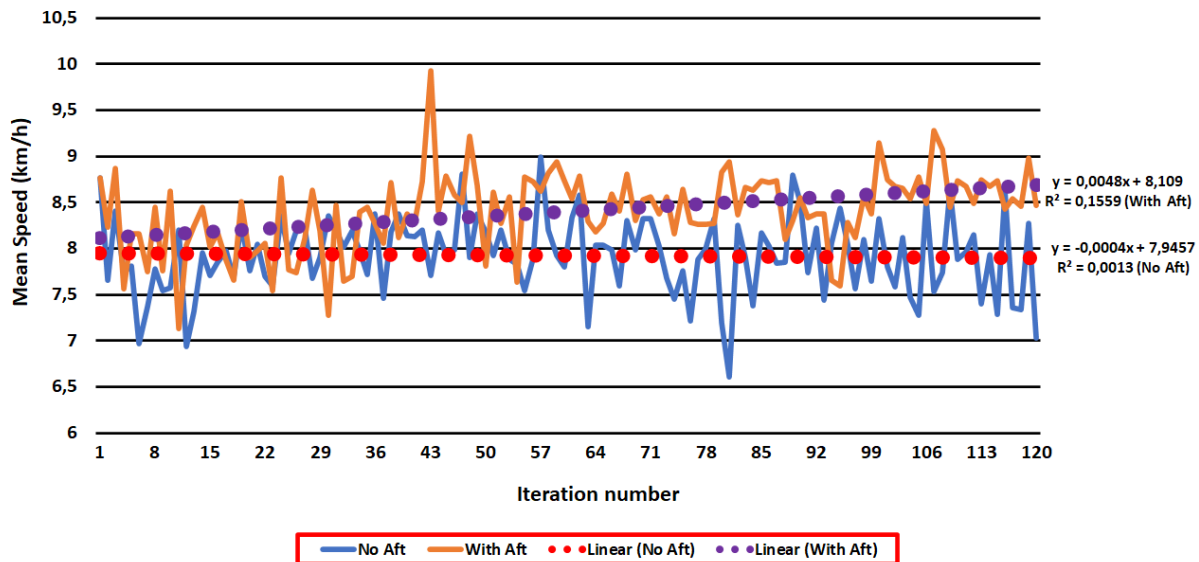
Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (**Σχήμα 9.3.32**) παρουσιάζεται η συμπεριφορά του τρίτου υποδικτύου όσον αφορά το τοπικό κριτήριο productivity, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή του τοπικού κριτηρίου productivity για το τρίτο υποδίκτυο για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 57151 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και η μέγιστη τιμή ισούται με 59958 αριθμός οχημάτων επί ταχύτητα και εντοπίζεται στην 100<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές του τοπικού κριτηρίου productivity με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 43915 και 52332 η τιμή αυτή εντοπίζεται στην 11<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 30,14% στο δίκτυο στην ταχύτητα του για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται έντονη βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



**Σχήμα 9.3.33:** Μέση ταχύτητα τρίτου υποδικτύου

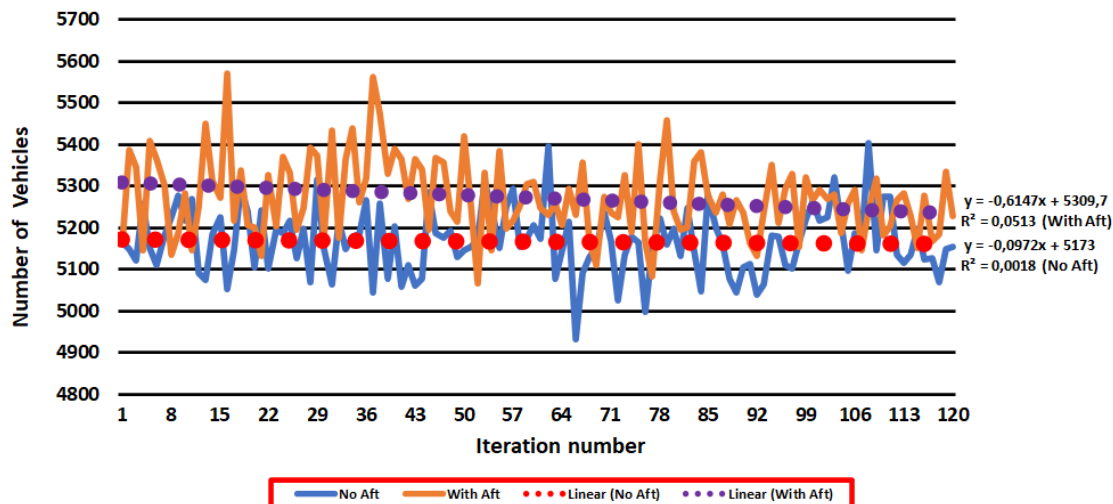
Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (**Σχήμα 9.3.33**) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας σχετικά με το τρίτο υποδίκτυο, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας του δευτέρου υποδικτύου για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 9,65 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 10,04 km/h και εντοπίζεται στην 107<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας του πρώτου υποδικτύου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT αντιστοιχούν 8,48 km/h και 9,29 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 57<sup>η</sup> επανάληψη. Με την χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 13,78% στην ταχύτητα του δικτύου για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται έντονη βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.





Σχήμα 9.3.34: Μέση ταχύτητα ολικού δικτύου η οποία δίνεται από το AIMSUN

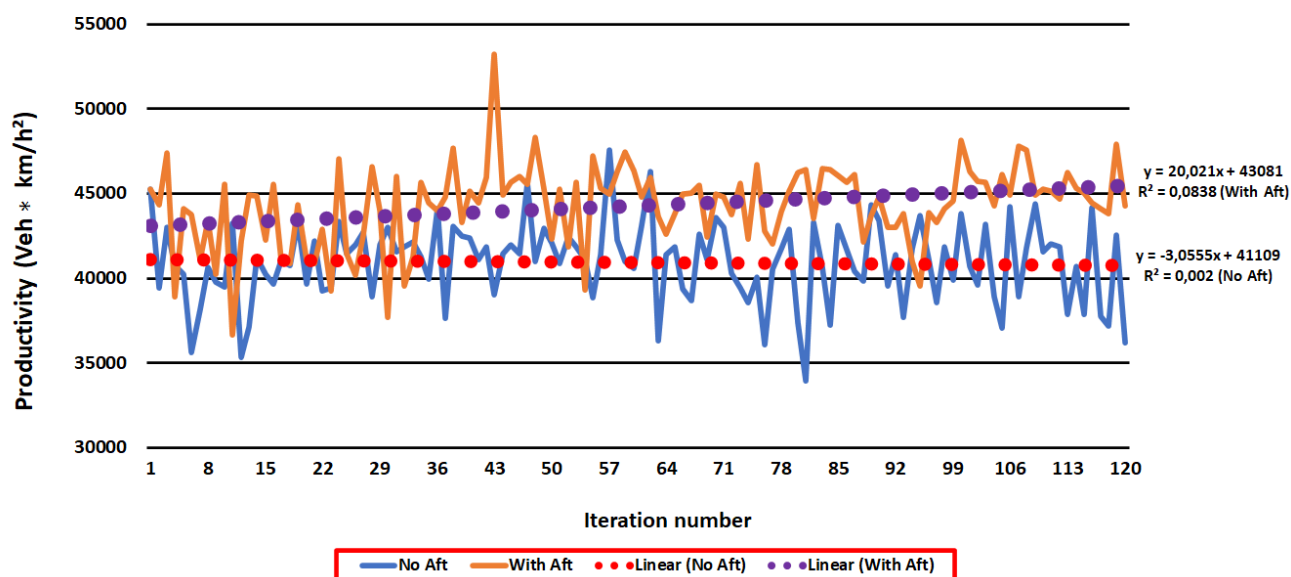
Μέσω της παραπάνω γραφικής αναπαράστασης (Σχήμα 9.3.34) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μέσης ταχύτητας του ολικού δικτύου, με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ταχύτητας με βάση το AIMSUN για της τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 8,67 km/h και η μέγιστη τιμή ταχύτητας ισούται με 9,92 km/h και εντοπίζεται στην 43<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 7,91 km/h και 8,98 km/h και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 57<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 9,59% στην μέση ταχύτητα του δικτύου με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρων των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια μικρή αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται μικρή βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



Σχήμα 9.3.35: Συμπεριφορά ροής οχημάτων ολικού δικτύου η οποία δίνεται από το AIMSUN



Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση (Σχήμα 9.3.35), παρουσιάζεται η συμπεριφορά της ροής οχημάτων ταχύτητας του ολικού δικτύου, με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN, τόσο με την χρήση όσο και την μη χρήση του αλγορίθμου AFT. Η μέση τιμή της ροής των οχημάτων με βάση το AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 5239 αριθμός οχημάτων και η μέγιστη τιμή ροής ισούται με 5572 και εντοπίζεται στην 16<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές της ροής των οχημάτων με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 5167 και 5403 και η συγκεκριμένη τιμή εντοπίζεται στην 108<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 1,40% στην ροή των οχημάτων του δικτύου με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια σταθερότητα στις τιμές της, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη πτωτική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται μια αισθητή μείωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.



Σχήμα 9.3.36: Κριτήριο productivity με βάση το AIMSUN για το ολικό δίκτυο

Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση (Σχήμα 9.3.36), παρουσιάζεται το κριτήριο productivity με βάση το AIMSUN, το οποίο ισούται με την μέση ταχύτητα δικτύου επί την ροή των οχημάτων που δίνει το AIMSUN. Το productivity είναι το κύριο κριτήριο για να εντοπιστεί εάν υπήρξε συνολική βελτίωση δίκτυο με την χρήση του αλγορίθμου AFT. Μελετώντας την γραφική αναπαράσταση, με την χρήση του αλγορίθμου AFT καθ' όλη την διάρκεια των πρώτων 65 επαναλήψεων εντοπίζεται ότι η συμπεριφορά της γραφικής αναπαράστασης εμφανίζει σε αρκετά σημεία έντονες αλλαγές στις τιμές του κριτηρίου productivity, με αποκορύφωμα στο διάστημα των επαναλήψεων 28-49. Για το υπόλοιπο πλήθος των επαναλήψεων οι τιμές του κριτηρίου ισορροπούν στο ίδιο εύρος τιμών και οι έντονες αλλαγές μειώνονται αισθητά. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα υστέρα από το την 69<sup>η</sup> επανάληψη οι κατώτερες τιμές που λαμβάνει το κριτήριο κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT είναι καλύτερες από τις ανώτερες τιμές χωρίς την χρήση του αλγορίθμου για τις αντίστοιχες επαναλήψεις. Αντιθέτως, παρατηρείται ότι καθ' όλη την διάρκεια των επαναλήψεων με τη μη χρήση του αλγορίθμου AFT δημιουργούνται έντονες και ξαφνικές αλλαγές σε αρκετά σημεία των επαναλήψεων για τις τιμές του κριτηρίου productivity, δεν εντοπίζεται ισορροπία των τιμών του κριτηρίου σε

κάποιο σημείο καθ' όλη την διάρκεια των επαναλήψεων που λαμβάνουν μέρος. Η μέση τιμή του κριτηρίου productivity με βάση το AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT ισούται με 45470 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και η μέγιστη τιμή ισούται με 53212 αριθμός οχημάτων επι ταχύτητα και εντοπίζεται στην 43<sup>η</sup> επανάληψη της προσομοίωσης. Οι αντίστοιχες τιμές του κριτηρίου με την μη χρήση αλγορίθμου AFT είναι 40923 και 47577 η τιμή αυτή εντοπίζεται στην 57<sup>η</sup> επανάληψη. Κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρουσιάζεται βελτίωση 11,10% στο κριτήριο productivity με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN για τις τελευταίες 20 επαναλήψεις του αλγορίθμου. Ταυτόχρονα, μέσω της γραφικής παράστασης μελετώντας την αναπαράσταση της γραμμικής εξίσωσης παρατηρείται ότι ενώ με την μη χρήση του αλγορίθμου AFT, η γραμμή της καμπύλης της τάσης είναι ευθεία καθώς ο μέσος όρος των τιμών παραμένει σταθερός, από την άλλη μεριά η πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, η αντίστοιχη γραμμή της καμπύλης της τάσης παρουσιάζει μια έντονη αυξητική τάση γεγονός το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο παρουσιάζεται έντονη βελτίωση των τιμών για τις αντίστοιχες επαναλήψεις.

Στο σημείο αυτό δίνεται ένας πίνακας (**Πίνακας 9.3.11**) που δείχνει το ποσοστό βελτίωσης με την χρήση του AFT σε σχέση με την μη χρήση του αλγορίθμου όσο αναφορά τον παραπάνω τρόπο χωρισμού, για όλα τα γραφήματα Πραγματοποιήθηκαν 10 προσομοιώσεις και προέκυψαν τα εξής ποσοστά βελτίωσης.

Παράμετρος	Υποδίκτυο Πρώτο Ποσοστό Βελτίωσης	Υποδίκτυο Δεύτερο Ποσοστό Βελτίωσης	Υποδίκτυο Τρίτο Ποσοστό Βελτίωσης	Συνολικό Δίκτυο Ποσοστό Βελτίωσης (με βάση το AIMSUN)
Τοπικό κριτήριο productivity	14,61%	38,3%	26,54%	11,01%
Mean Speed	-0,78%	18,5%	9,32%	8,04%
Entrance Flow	15,43%	16,9%	15,95%	2,74%

**Πίνακας 9.3.11:** Ποσοστά βελτίωσης χωρισμού τροποποιημένου δικτύου με πλάγιο τρόπο από τα αριστερά προς τα δεξιά σε ανεξάρτητα υποδίκτυα με την χρήση του αλγορίθμου AFT σε σχέση με την μη χρήση.

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται ένας τελικός πίνακας (**Πίνακας 9.3.12**) ποσοστών βελτιώσεων κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT σε σχέση με την μη χρήση του για κάθε είδος χωρισμού που πραγματοποιήθηκε.

	1 <sup>ο</sup> Υποδίκτυο			2 <sup>ο</sup> Υποδίκτυο			3 <sup>ο</sup> Υποδίκτυο			Συνολικό Δίκτυο (Με βάση το AIMSUN)			
Τρόπος Χωρισμού δικτύου	Τοπ. κριτ Productivity	Mean Speed	Entrance Flow	Τοπ. κριτ Productivity	Mean Speed	Entrance Flow	Τοπ. κριτ Productivity	Mean Speed	Entrance Flow	Mean Speed	Entrance flow car	Mean Speed * Entrance flow car	σ (Mean Speed * Entrance flow car)
Εξωτερικοί Εσωτερικοί	13,75%	1,37%	12,18%	39,38%	22,08%	14,44%				3,17%	2,26%	5,49%	2,45
Ενδιάμεσος common 10-5-10	17,27%	3,62%	13,17%	26,06%	11,74%	12,81%				7,31%	3,33%	10,90%	5,64
Ενδιάμεσος uncontroll 10-5-10	12,83%	-0,45%	13,34%	33,55%	16,39%	14,61%				6,32%	3,94%	10,51%	2,42
Πλάγιος χωρισμός common 10-5-10	13,81%	2,08%	11,54%	25,41%	13,82%	10,21%				1,90%	1,63%	3,53%	2,52

<b>Πλάγιος χωρισμός uncontroll 10-5-10</b>	14,74%	-0,95%	15,84%	35,33%	18,13%	14,71%				2,79%	1,80%	4,64%	2,84
<b>Τρία κομμάτια 8- 9-8</b>	7,03%	-3,99%	11,26%	38,96%	20,92%	15,34%	24,17%	8,53%	14,47%	6,19%	1,90%	8,20%	4,15
<b>Τρία κομμάτια 10-9-6</b>	9,62%	-2,83%	12,80%	42,93%	22,99%	16,41%	32,45%	13,76%	16,51%	3,46%	2,08%	5,61%	2,65
<b>Common 10-12-12</b>	14,61%	-0,78%	15,42%	38,34%	18,52%	16,89%	26,54%	9,32%	15,95%	8,03%	2,74%	11,00%	4,10
<b>Ολόκληρο Δίκτυο</b>	10,25%	9,33%	0,85%							0,93%	0,85%	1,77%	2,01

*Πίνακας 9.3.12: Ποσοστά βελτιώσεων παραμέτρων τροποποιημένου δικτύου 25 κόμβων*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

### Συμπεράσματα

Για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε χρήση του αλγορίθμου AFT. Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος έλαβε μέρος σε δίκτυα των 9, 16 και 25 κόμβων. Στο μεγαλύτερο ποσοστό των προσομοιώσεων παρατηρείται βελτίωση, τόσο του γινομένου της μέσης ταχύτητας και της ροής των οχημάτων με βάση τον προσομοιωτή AIMSUN, όσο και του γινομένου αυτού για κάθε υποδίκτυο ξεχωριστά. Σε αρκετές περιπτώσεις χωρίζοντας το υποδίκτυο σε μικρότερα υποδίκτυα και κάνοντας χρήση του αλγορίθμου AFT παρατηρείται βελτίωση. Να τονισθεί, ότι ανάλογα με τον τρόπο χωρισμού του κάθε δικτύου σε μικρότερα υποδίκτυα, αλλά και το αν θα επιλεγθούν κάποιοι κόμβοι του δικτύου να είναι κοινοί για περισσότερα από ένα υποδίκτυα ή όχι εντοπίζονται σε αρκετές περιπτώσεις έντονες αλλαγές στα ποσοστά βελτίωσης του συνολικού δικτύου. Με σκοπό να υπάρξει μια πλήρης εικόνα συμπεριφοράς του αλγορίθμου AFT, πραγματοποιήθηκαν 10 προσομοιώσεις για κάθε δίκτυο, είτε χωρίζοντάς το σε μικρότερα υποδίκτυα, είτε όχι. Κάθε προσομοίωση αποτελείται από 60 επαναλήψεις για το δίκτυο των 9 κόμβων και από 120 επαναλήψεις για το δίκτυο των 16 και 25 κόμβων. Η εκτέλεση του αλγορίθμου AFT προσφέρει μικρότερα ποσοστά βελτίωσης όταν καλείται να γίνει η χρήση του, σε μεγάλα αστικά δίκτυα καθώς έρχεται αντιμέτωπος με μεγάλο αριθμό παραμέτρων που καλείται να υπολογίσει. Παράλληλα καθοριστικό ρόλο στο να προκύψουν επιθυμητά ποσοστά βελτίωσης, πέρα από τον ορθό σχεδιασμό του δικτύου, έχει και ο προσεκτικός υπολογισμός των τιμών των δευτερολέπτων που θα τεθούν στις φάσεις του κάθε κόμβου του δικτύου, ώστε να προσφέρεται η δυνατότητα διευκόλυνσης του αλγορίθμου AFT με σκοπό να υπάρξει μεγαλύτερο ποσοστό βελτίωσης της μέσης ταχύτητας του δικτύου με την βοήθειά του. Τα ποσοστά βελτίωσης που συνοψίζονται στην συνέχεια αφορούν τις τελευταίες 20 επαναλήψεις πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT σε σχέση με την μη χρήση του, καθώς στο διάστημα αυτών των επαναλήψεων ο αλγόριθμος έχει κατασταλάξει στις τιμές των παραμέτρων που κάνει χρήση.

Πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, για το δίκτυο των 9 κόμβων (**Σχήμα 8.1**) παρατηρείται βελτίωση της μέσης ταχύτητας του δικτύου της τάξεως του 26,42%, καθώς και βελτίωση της ροής των οχημάτων που εισάγονται στο αστικό δίκτυο κατά 0,35%. Δίνεται μεγαλύτερη διάρκεια χρόνου στην 3<sup>η</sup> φάση και μικρότερη διάρκεια χρόνου στην 4<sup>η</sup> φάση, ενώ η 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> φάση λαμβάνουν κατά μέσο όρο τις ίδιες τιμές χρόνου σε δευτερόλεπτα (επιλέχθηκε ο κεντρικός κόμβος για τις συγκρίσεις του πράσινου χρόνου). Επιλέγοντας την πραγματοποίηση του χωρισμού του δικτύου σε μικρότερα υποδίκτυα και συγκεκριμένα, χωρίζοντας το αστικό δίκτυο που μελετάται σε 3 μικρότερα υποδίκτυα με τρόπο κατακόρυφο παρατηρείται όπως παρατίθενται και σχηματικά (**Σχήμα 9.1.6**) βελτίωση της μέσης ταχύτητας του κάθε υποδικτύου ξεχωριστά σε ποσοστά 5,86%, 4,34% και 14,71% για το 1<sup>ο</sup>, 2<sup>ο</sup> και 3<sup>ο</sup> υποδίκτυο αντίστοιχα. Ταυτόχρονα η μέση ταχύτητα του συνολικού δικτύου βελτιώνεται σε ποσοστό 23,08%. Τα ποσοστά βελτιώσεων για το δίκτυο των 9 κόμβων συγκεντρωτικά έχουν παρουσιαστεί στον **Πίνακα 9.1.6**.

Για το δίκτυο των 16, καθώς και των 25 κόμβων, δημιουργήθηκε και ένα δεύτερο σενάριο προσομοιώσεων διατηρώντας τόσο τον αριθμό των οχημάτων, όσο και την δομή του δικτύου σταθερά. Η μόνη διαφορά σε σχέση με το προηγούμενο δίκτυο των 16 και 25 κόμβων είναι ότι πραγματοποιήθηκε μια μικρή αλλαγή στις τιμές του χρόνου της φάσης του κάθε κόμβου ξεχωριστά με σκοπό να επέλθουν καλύτερα ποσοστά βελτίωσης.

Πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT για το δίκτυο των 16 κόμβων (**Σχήμα 8.2**) παρατηρείται βελτίωση του κριτηρίου productivity της τάξεως του 1,72%, αλλά και βελτίωση της μέσης ταχύτητας του δικτύου κατά 1,69%. Δίνεται μεγαλύτερη διάρκεια χρόνου στην 2<sup>η</sup> και 3<sup>η</sup> φάση και μικρότερη διάρκεια χρόνου στην 1<sup>η</sup> και 4<sup>η</sup> φάση, όσον αφορά τιμές χρόνου σε δευτερόλεπτα. Όσον αφορά την μέση ταχύτητα του δικτύου που προσφέρει ο προσομοιωτής AIMSUN, παρατηρείται βελτίωση της μέσης ταχύτητας κατά 2%, καθώς και βελτίωση του κριτηρίου productivity κατά 2,02%. Στην συνέχεια, επιλέγοντας την χρήση χωρισμού του δικτύου σε μικρότερα υποδίκτυα και συγκεκριμένα, χωρίζοντας το αστικό δίκτυο που μελετάται σε 2

μικρότερα υποδίκτυα με κοινούς κάποιους κάθετους κόμβους όπως παρατίθενται και σχηματικά ([Σχήμα 9.2.10](#)), παρατηρείται βελτίωση του τοπικού κριτηρίου productivity κάθε υποδικτύου ξεχωριστά σε ποσοστά 7,93%, 6,49% για το 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο αντίστοιχα. Ταυτόχρονα η μέση ταχύτητα του συνολικού δικτύου με βάση το AIMSUN βελτιώνεται σε ποσό 6,21% και το κριτήριο productivity κατά 6,33%. Τα ποσοστά βελτιώσεων για το δίκτυο των 16 κόμβων συγκεντρωτικά έχουν παρουσιαστεί στον [Πίνακα 9.2.7](#).

Πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, για το δίκτυο των 16 κόμβων τροποποιώντας σε μικρό βαθμό τις τιμές των φάσεων κάθε κόμβου παρατηρείται βελτίωση του κριτηρίου productivity της τάξεως του 11,28%, αλλά και βελτίωση της μέσης ταχύτητας του δικτύου κατά 7,10%. Όσον αφορά την μέση ταχύτητα του δικτύου που προσφέρει ο προσομοιωτής AIMSUN, παρατηρείται βελτίωση της μέσης ταχύτητας κατά 9,39% καθώς βελτίωση του κριτηρίου productivity κατά 13,68%. Δίνεται μεγαλύτερη διάρκεια χρόνου στην 2<sup>η</sup> και 3<sup>η</sup> φάση και μικρότερη διάρκεια χρόνου στην 1<sup>η</sup> και 4<sup>η</sup> φάση. Στην συνέχεια επιλέγοντας την χρήση χωρισμού του δικτύου σε μικρότερα υποδίκτυα και συγκεκριμένα, χωρίζοντας το αστικό δίκτυο που μελετάται σε 2 μικρότερα υποδίκτυα όπως παρατίθενται και σχηματικά ([Σχήμα 9.2.27](#)), παρατηρείται βελτίωση του κάθε υποδικτύου ξεχωριστά όσον αφορά το τοπικό κριτήριο productivity σε ποσοστά 35,80%, 35,23% για το 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο αντίστοιχα. Ταυτόχρονα η μέση ταχύτητα του συνολικού δικτύου βελτιώνεται σε ποσοστό 14,50% και το κριτήριο productivity κατά 20,88%. Τα ποσοστά βελτιώσεων για το δίκτυο των 16 κόμβων συγκεντρωτικά έχουν παρουσιαστεί στον [Πίνακα 9.2.13](#).

Πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT για το δίκτυο των 25 κόμβων ([Σχήμα 8.3](#)) παρατηρείται βελτίωση του κριτηρίου productivity της τάξεως του 1,36%, αλλά και βελτίωση της μέσης ταχύτητας του δικτύου κατά 2,28%. Δίνεται μεγαλύτερη διάρκεια χρόνου στην 1<sup>η</sup> και 3<sup>η</sup> φάση και μικρότερη διάρκεια χρόνου στην 2<sup>η</sup> και 4<sup>η</sup>, φάση όσον αφορά τιμές χρόνου σε δευτερόλεπτα. Όσον αφορά την μέση ταχύτητα του δικτύου που προσφέρει ο προσομοιωτής AIMSUN, δεν παρατηρείται καμία βελτίωση της μέσης ταχύτητας ούτε του κριτηρίου productivity. Αντιθέτως, παρουσιάζεται μείωση, τόσο της μέσης ταχύτητας όσο και του κριτηρίου productivity με ποσοστά 0,55% και 1,46%, αντίστοιχα. Στην συνέχεια επιλέγοντας την χρήση χωρισμού του δικτύου σε μικρότερα υποδίκτυα και συγκεκριμένα, χωρίζοντας το αστικό δίκτυο που μελετάται σε 2 μικρότερα υποδίκτυα με uncontrolled τους ενδιάμεσους κόμβους, όπως παρατίθενται και σχηματικά ([Σχήμα 9.3.10](#)), παρατηρείται βελτίωση του τοπικού κριτηρίου productivity, του κάθε υποδικτύου ξεχωριστά σε ποσοστά 9,51%, 7,99% για το 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> υποδίκτυο αντίστοιχα. Ταυτόχρονα, η μέση ταχύτητα του συνολικού δικτύου βελτιώνεται σε ποσοστό 2,17% και το κριτήριο productivity κατά 2,80%. Τα ποσοστά βελτιώσεων για το δίκτυο των 25 κόμβων συγκεντρωτικά έχουν παρουσιαστεί στον [Πίνακα 9.3.6](#).

Όπως προαναφέρθηκε για να υπάρξει βελτίωση στο δίκτυο απαιτείται μια όχι βέλτιστη επιλογή χρόνων διάρκειας της φάσης κάθε κόμβου. Πραγματοποιώντας χρήση του αλγορίθμου AFT, για το δίκτυο των 25 κόμβων τροποποιώντας σε μικρό βαθμό τις τιμές των φάσεων κάθε κόμβου παρατηρείται βελτίωση του κριτηρίου productivity της τάξεως του 10,25% αλλά και βελτίωση της μέσης ταχύτητας του δικτύου κατά 9,33%. Δίνεται μεγαλύτερη διάρκεια χρόνου στην 1<sup>η</sup> και 4<sup>η</sup> φάση και μικρότερη διάρκεια χρόνου στην 2<sup>η</sup> και 3<sup>η</sup> φάση, όσον αφορά τιμές χρόνου σε δευτερόλεπτα. Όσον αφορά την μέση ταχύτητα του δικτύου που προσφέρει ο προσομοιωτής AIMSUN, παρατηρείται βελτίωση της μέσης ταχύτητας κατά 0,93% καθώς και βελτίωση του κριτηρίου productivity κατά 1,77%. Στην συνέχεια, επιλέγοντας την χρήση χωρισμού του δικτύου σε μικρότερα υποδίκτυα και συγκεκριμένα, χωρίζοντας το αστικό δίκτυο που μελετάται σε 3 μικρότερα, υποδίκτυα όπως παρατίθενται και σχηματικά ([Σχήμα 9.3.27](#)), παρατηρείται βελτίωση του τοπικού κριτηρίου productivity, του κάθε υποδικτύου ξεχωριστά σε ποσοστά 14,61%, 38,34% και 26,54% για το 1<sup>ο</sup>, 2<sup>ο</sup> και 3<sup>ο</sup> υποδίκτυο αντίστοιχα. Ταυτόχρονα η μέση ταχύτητα του συνολικού δικτύου βελτιώνεται σε ποσό 8,03% και το κριτήριο productivity κατά 11%. Τα ποσοστά βελτιώσεων για το δίκτυο των 25 κόμβων συγκεντρωτικά έχουν παρουσιαστεί στον [Πίνακα 9.3.12](#).

Εν κατακλείδι, όπως παρουσιάστηκε και αναλυτικά, ο αλγόριθμος AFT αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την γρήγορη και αποτελεσματική αποφυγή κυκλοφοριακής συμφόρησης σε αστικά δίκτυα μεγάλης κλίμακας. Πιο

συγκεκριμένα, μέσω αυτοματοποιημένων διαδικασιών επιτυγχάνεται η αποτελεσματική βελτίωση της απόδοσης του δικτύου με πολύ μικρό χρηματικό κόστος. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η λήψη πληροφορίας, η οποία προσφέρεται μέσω της χρήσης αισθητήρων GPS των κινητών των συνδεδεμένων οχημάτων, λαμβάνοντας την απαραίτητη πληροφορία μέσω φωρατών, όπως καταδείχθηκε στην παρουσίαση του θέματος.

Στην πραγματικότητα ο AFT αποδείχτηκε αποτελεσματικός για μικρά δίκτυα με περιορισμένο αριθμό παραμέτρων. Όσο αυξάνονται οι προς βελτιστοποίηση παράμετροι, τόσο ο AFT δυσκολεύεται να βελτιώσει την συνολική εικόνα του δικτύου. Η χρήση χωρισμών του δικτύου σε αυτήν την περίπτωση οδηγεί σε περαιτέρω βελτίωση για τους 16 κόμβους, όχι όμως και για τους 25. Όταν η αρχική κατάσταση του δικτύου (οι αρχικοί πράσινοι χρόνοι) δεν είναι οι κατάλληλοι, ο AFT ακόμα και για δίκτυα πολλών παραμέτρων πετυχαίνει σημαντικές βελτιώσεις. Τέλος, μελετώντας τους συγκεντρωτικούς πίνακες των αποτελεσμάτων που παρατέθηκαν ύστερα από μια σειρά πειραμάτων, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι οι δυο νέες στρατηγικές που εφαρμόστηκαν (στρατηγική Κοινών και Uncontrolled κόμβων) αποδεικνύονται ως επί το πλείστον πολύ αποτελεσματικές στην πλειοψηφία των πειραμάτων από την στιγμή που πετυχαίνουν σε κάθε πείραμα τις δύο από τις τρεις καλύτερες επιδόσεις. Φαίνεται ότι οι δύο νέες μέθοδοι χρήσης του AFT για κυκλοφοριακά δίκτυα μεγάλης κλίμακας, δημιουργούν συνθήκες μερικής ανεξαρτησίας των υποδικτύων με αποτέλεσμα να πετυχαίνουν περαιτέρω βελτιώσεις στις κυκλοφοριακές συνθήκες σε σχέση με τους απλούς χωρισμούς δικτύων που έγιναν με όλους τους δυνατούς τρόπους.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11:

### Βιβλιογραφία

1. Iswadi bin Shamsudin, S., binti Bakar, L., Tun Hussein Onn Malaysia, U., Pendidikan Pagoh, H., Panchor, J., Muar, P., & Darul Takzim, J. (2020). Smart Emergency Traffic Light System. *Progress in Engineering Application and Technology*, 1(1), 323–333. [\[CrossRef\]](#)
2. Prassas, E. S., & Roess, R. P. (n.d.). *Springer Tracts on Transportation and Traffic The Highway Capacity Manual: A Conceptual and Research History Volume 2 Signalized and Unsignalized Intersections*. [\[CrossRef\]](#)
3. HAQUE, S., & SOULEY, B. (2018). Design and Implementation of Traffic Light Control by Emergency Service Vehicles. *Journal of Computer and Information Technology*, 9(5), 60–69. [\[CrossRef\]](#)
4. Mcshane, C. (1993). THE ORIGINS AND GLOBALIZATION OF TRAFFIC CONTROL SIGNALS. In *JOURNAL OF URBAN HISTORY* (Vol. 25, Issue 3).
5. Papageorgiou, M., Diakaki, C., Dinopoulou, V., Kotsialos, A., & Wang, Y. (2003). Review of road traffic control strategies. *Proceedings of the IEEE*, 91(12), 2043–2065. [\[CrossRef\]](#)
6. Qi, L. (2008). Research on intelligent transportation system technologies and applications. *Proceedings - 2008 Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System, PEITS 2008*, 529–531. [\[CrossRef\]](#)
7. Calabrese, F., Colonna, M., Lovisolo, P., Parata, D., & Ratti, C. (2011). Real-time urban monitoring using cell phones: A case study in Rome. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(1), 141–151. [\[CrossRef\]](#)
8. Lu, N., Cheng, N., Zhang, N., Shen, X., & Mark, J. W. (2014). Connected vehicles: Solutions and challenges. In *IEEE Internet of Things Journal* (Vol. 1, Issue 4, pp. 289–299). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. [\[CrossRef\]](#)
9. Uhlemann, E. (2015). Introducing connected vehicles [Connected vehicles]. In *IEEE Vehicular Technology Magazine* (Vol. 10, Issue 1). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. [\[CrossRef\]](#)
10. Jain, S., Creasey, R. R., Himmelspace, J., White, K. P., Fu, M., & Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2011). *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*. IEEE.
11. Punzo, V., & Ciuffo, B. (2011). Integration of driving and traffic simulation: Issues and first solutions. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(2), 354–363. [\[CrossRef\]](#)
12. Aimsun 7 Dynamic Simulators User's Manual TSS-Transport Simulation Systems. (2013).
13. Fang, F. C., & Elefteriadou, L. (2008). Capability-enhanced microscopic simulation with real-time traffic signal control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 9(4), 625–632. [\[CrossRef\]](#)
14. Vilarinho, C., Soares, G., Macedo, J., Tavares, J. P., & Rossetti, R. J. F. (2014). Capability-enhanced AIMSUN with Real-time Signal Timing Control. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 111, 262–271. [\[CrossRef\]](#)
15. Wang, J., Kong, Y., Fu, T., & Stipancic, J. (2017). The impact of vehicle moving violations and freeway traffic flow on crash risk: An application of plugin development for microsimulation. *PLoS ONE*, 12(9). [\[CrossRef\]](#)



16. Hamilton, A., Waterson, B., Cherrett, T., Robinson, A., & Snell, I. (2013). The evolution of urban traffic control: changing policy and technology. *Transportation Planning and Technology*, 36(1), 24–43. [[CrossRef](#)]
17. Dotoli, M., Fanti, M. P., & Meloni, C. (2006). A signal timing plan formulation for urban traffic control. *Control Engineering Practice*, 14(11), 1297–1311. [[CrossRef](#)]
18. Kouvelas, A., Aboudolas, K., Kosmatopoulos, E. B., & Papageorgiou, M. (2011). Adaptive performance optimization for large-scale traffic control systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(4), 1434–1445. [[CrossRef](#)]
19. Kosmatopoulos, E. B., Papageorgiou, M., Vakouli, A., & Kouvelas, A. (2007). Adaptive fine-tuning of nonlinear control systems with application to the urban traffic control strategy TUC. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 15(6), 991–1002. [[CrossRef](#)]
20. Kouvelas, A. (2011). Adaptive Fine-Tuning for Large-Scale Nonlinear Traffic Control Systems.
21. Manolis, D., Papamichail, I., Kosmatopoulos, E. B., & Papageorgiou, M. (2016). Automated tuning of ITS management and control systems: Results from real-life experiments. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 66, 119–135. [[CrossRef](#)]
22. Φαραντούρης, Σ. (2018). Αυτορυθμιζόμενος Έλεγχος Κυκλοφορίας Σταθερού Χρόνου. Εργαστήριο Δυναμικών Συστημάτων & Προσομοίωσης. Πολυτεχνείο Κρήτης Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης.
23. Kosmatopoulos, E. B. (2008). Adaptive control design based on adaptive optimization principles. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 53(11), 2680–2685. [[CrossRef](#)]
24. Kosmatopoulos, E. B. (2009). An adaptive optimization scheme with satisfactory transient performance. *Automatica*, 45(3), 716–723. [[CrossRef](#)]
25. Kosmatopoulos, E. B., & Kouvelas, A. (2009). Large scale nonlinear control system fine-tuning through learning. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 20(6), 1009–1023. [[CrossRef](#)]

