ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Τομέας Επιστήμης Αποφάσεων

Εργαστήριο Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αυτορυθμιζόμενος Έλεγχος Κυκλοφορίας Σταθερού Χρόνου

Φαραντούρης Σπυρίδων

Επιβλέπων καθηγητής: Μάρκος Παπαγεωργίου

ΧΑΝΙΑ 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη των συστημάτων ελέγχου, όσον αφορά τα ευφυή συστήματα μεταφοράς (ΕΣΜ) γίνεται με μη αυτοματοποιημένες διαδικασίες (1), οι οποίες πέρα από την πνευματική κούραση που επιφέρουν, απαιτούν και αρκετό χρόνο υλοποίησης. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτό παρατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής ενός ΕΣΜ.

Με αφορμή το παραπάνω πρόβλημα αναπτύχθηκε πριν μερικά χρόνια ένας νέος αλγόριθμος με σκοπό να επιτευχθεί η αυτόματη ρύθμιση και παραμετροποίηση των συστημάτων αυτών. Ο αλγόριθμος Adaptive Fine-Tuning (AFT) πετυχαίνει σημαντική βελτίωση των επιδόσεων των συστημάτων ελέγχου αλλά και την αντιστάθμιση των συνεπειών από τις συνεχείς αλλαγές που δέχεται ένα ΕΣΜ από εξωτερικούς ή εσωτερικούς παράγοντες.

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 επιτευχτεί είτε μέσω εγκατάστασης υποδομών (π.χ φωρατές ή κάμερες), είτε μέσω σημάτων που λαμβάνονται από αισθητήρες gps κινητών τηλεφώνων, τα οποία θα μας δίνουν τα απαραίτητα στοιχεία των συνδεδεμένων οχημάτων (connected-vehicles). Για την αποφυγή εγκαταστάσεων και την μείωση του κόστους ο AFT επιλέγουμε να λειτουργεί με την χρήση σημάτων από αισθητήρες gps, αφού αποτελεί μια μέθοδο φθηνή αλλά και με αυξημένη ακρίβεια σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους συλλογής δεδομένων.

Σε αυτή τη διπλωματική παρουσιάζουμε και αναλύουμε τα αποτελέσματα που έδωσε ο αλγόριθμος AFT από την εφαρμογή του σε προσομοιώσεις διάφορων δικτύων, με τη χρήση του προσομοιωτή AIMSUN. Τα αποτελέσματα και οι παράμετροι των προσομοιώσεων αυτών αναφέρονται και αναλύονται στη συνέχεια.

ABSTRACT

The design and the development of most Management and Control System (MCS) for Intelligent Transportation Systems (ITS) include a non-automated procedure that despite the mental fatigue requires a lot of time to be accomplished (1). In most cases this is observed through all the lifetime of an ITS.

Because of this problem it was developed some years ago a new algorithm in order to achieved an automatic adjustment and calibration of those systems. Adaptive fine-tuning (AFT) algorithm achieves significant performance improvement of MCS, but also to compensate consequences of the constant changes that an ITS receives from external or internal factors.

The application of this technology requires data collection from the network to which it will be applied. This data required for the operation of AFT can be gained either from sensors facilities (e.g. detectors or cameras), either from gps signals obtained from mobile phones which will give us the connected-vehicle necessary data. To avoid facilities and reduce cost, we choose AFT algorithm to operate with gps signals since it is a method that is cheap but also with greater precision than conventional data collection methods

In this diploma we present and analyze the results obtained by the AFT implementation in different simulations, implemented through AIMSUN program. The parameters of these simulations are mentioned and analyzed below.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

Εισαγωγή και Ιστορική Αναδρομή

1.1 Φωτεινοί Σηματοδότες:

99 χρόνια μετά την εμφάνιση του πρώτου αυτοκινήτου και καθώς πλέον τα αυτοκίνητα δεν είναι κάτι ασυνήθιστο στους δρόμους, έκανε την εμφάνιση του έξω από την Βρετανική Βουλή το Δεκέμβρη του 1968 ο πρώτος φωτεινός σηματοδότης (2). Εμπνευστής του ήταν ο J.P.Knight, ο οποίος είχε ανακατασκευάσει ένα σιδηροδρομικό φανάρι. Από λιγνίες αερίου λοιπόν, που ελεγχόταν από ένα μοχλό στη βάση του, ο πρώτος φωτεινός σηματοδότης έδειχνε στους διερχόμενους οδηγούς την πράσινη και κόκκινη ένδειξη.

Ο πρώτος ηλεκτρικός φωτεινός σηματοδότης εφευρέθηκε από τον αστυνομικό Lesterwire το 1912 στην Αμερική, 2 χρόνια αργότερα το 1914 η Αμερικανική εταιρία φωτεινών σηματοδοτών, με εμπνευστή τον James Hoge δημιούργησε τον πρώτο ηλεκτρικό φωτεινό σηματοδότη με προειδοποίηση αλλαγών μέσω ενός βομβητή (buzzer).

Στο Ντιτρόιτ 6 χρόνια αργότερα, το 1920, από τον αστυνομικό πάλι William Potts δημιουργήθηκε ο πρώτος τρίχρωμος φωτεινός σηματοδότης, του οποίου την λογική κρατάμε μέχρι και σήμερα.

Αρχικά η χρήση των φωτεινών σηματοδοτών έγινε καθαρά για λόγους ασφάλειας. Η ραγδαία αύξηση του αριθμού αυτοκινήτων τις τελευταίες δεκαετίες , έκανε επιτακτική την ανάγκη για χρήση φωτεινών σηματοδοτών, εκτός από λόγους ασφαλείας και για λόγους βελτίωσης της κυκλοφοριακής κατάστασης κυρίως στα αστικά δίκτυα. Οι αυξημένες ανάγκες για μετακινήσεις προϋποθέτουν δίκτυα με αυξημένη ικανότητα εξυπηρέτησης. Στις περισσότερες πόλεις δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστούν μεγαλύτερες υποδομές και λόγω κόστους, αλλά και λόγω έλλειψης χώρου. Είναι επομένως απαραίτητο να βρεθούν τρόποι ώστε οι φωτεινοί σηματοδότες να είναι ρυθμισμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να αυξάνουν την ικανότητα των ήδη υπαρχόντων κυκλοφοριακών δικτύων καθυστερώντας την δημιουργία συμφορήσεων ή εξαλείπτωντας τες αν είναι δυνατόν.

Η σωστή ρύθμιση των φωτεινών σηματοδοτών είναι μια χρονοβόρα και κοστοβόρα διαδικασία η οποία πρέπει να επαναλαμβάνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα μιας και οι συνθήκες σε ένα δίκτυο αλλάζουν συνεχώς (π.χ. αύξηση των ιδιοκτητών οχημάτων, αλλαγή προορισμών κλπ). Ο αλγόριθμος AFT δημιουργήθηκε για να αυτοματοποιήσει την ρύθμιση των φωτεινών σηματοδοτών μιας και μπορεί να λαμβάνει υπόψη τις υπάρχουσες συνθήκες. Έχει γίνει ήδη εφαρμογή του AFT με μεγάλη επιτυχία στο αστικό δίκτυο στην πόλη των Χανίων (1). Σε αυτήν την εφαρμογή έγινε χρήση των ήδη υπαρχόντων υποδομών (φωρατών) και φάνηκε ότι ο AFT μπορεί να ρυθμίσει σωστά την στρατηγική κυκλοφορίας που χρησιμοποιούμε χωρίς περαιτέρω κόστος και χρόνο. Η εφαρμογή του AFT σε κάποιο δίκτυο το οποίο δεν έχει ήδη τις απαραίτητες υποδομές, θα αύξανε σημαντικά το κόστος της χρήσης του. Σε αυτήν την διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η προσπάθεια να αντικαταστήσουμε την χρήση των φωρατών ενός δικτύου με τη χρήση πληροφορίας από τα συνδεδεμένα οχήματα των οποίων η χρήση αυξάνεται συνεχώς και αναμένεται να αυξηθεί ακόμη περισσότερο στα επόμενα χρόνια. Με αυτόν τον τρόπο όχι μόνο ο AFT θα μειώσει το κόστος της ρύθμισης των φωτεινών σηματοδοτών, αλλά θα μειωθεί και το κόστος της εγκατάστασής του, μιας και η απαραίτητη για τη λειτουργία του πληροφορία, θα είναι πλέον πολύ φθηνή και πιο ακριβής.

Ο AFT με χρήση πληροφορίας από τα συνδεδεμένα οχήματα θα περιγραφεί παρακάτω. Στο τέλος θα αναφερθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

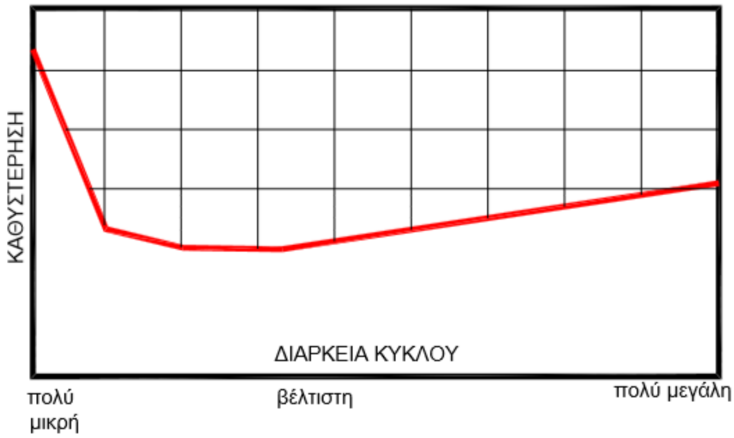
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

Βασικές Αρχές Και Έννοιες Σηματοδότησης

2.1. Κύκλος, Φάση και Χρονική Μετατόπιση:

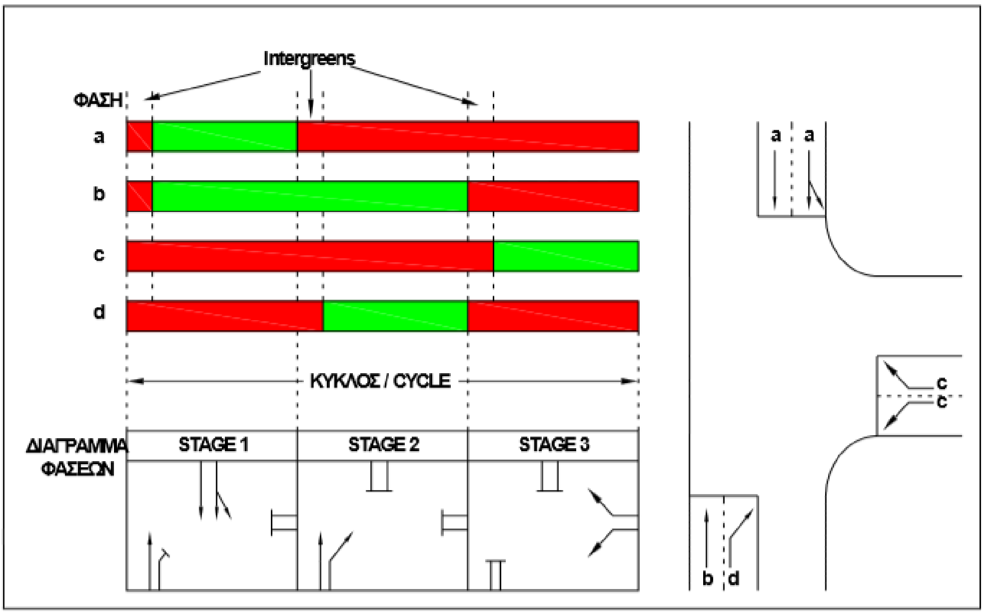
Τα συστήματα φωτεινής σηματοδότησης αποτελούνται από τρία κύρια συστατικά (3). Ανάλογα με το πως κάθε σύστημα μεταβάλλει, υπολογίζει και επιλέγει τα συστατικά αυτά, κατατάσσεται σε διαφορετική κατηγορία συστημάτων ελέγχου κυκλοφορίας με φωτεινή σηματοδότηση.

Ως **κύκλο (cycle)** ενός συστήματος κυκλοφορίας ορίζουμε τον χρόνο που χρειάζεται για μια πλήρη διαδοχή των ενδείξεων των σηματοδοτών, εναλλακτικά ονομάζεται και περίοδος σηματοδότησης. Όταν η ζήτηση του δικτύου είναι αυξημένη επιλέγεται και μεγαλύτερος χρόνος κύκλου, που σημαίνει εξυπηρέτηση περισσότερων οχημάτων ανά ώρα, αυξάνοντας όμως και τον χρόνο αναμονής τους. Οι πιο συχνοί χρόνοι ενός κύκλου παρατηρείται ότι κυμαίνονται μεταξύ 50 και 70 δευτερολέπτων. Σε δίκτυα που έχουν μεγάλη κυκλοφοριακή φόρτιση παρατηρούνται κύκλοι μέχρι και 120 δευτερολέπτων.



Σχήμα 2.1

Για την **φάση** ενός συστήματος ελέγχου υπάρχουν διάφοροι ορισμοί, ένας από αυτούς είναι ότι πρόκειται για το τμήμα της περιόδου στο οποίο δίδεται προτεραιότητα σε ένα συνδυασμό κινήσεων. Ένας άλλος ορίζει ως φάση το σύνολο των συνθηκών που καθορίζει τις αναμονές και τις κινήσεις ενός ή περισσότερων κυκλοφοριακών ρευμάτων στη διάρκεια του κύκλου. Οι φάσεις συμβολίζονται με γράμματα επί του διαγράμματος διαδοχής των φάσεων, ξεκινώντας συνήθως από την κύρια οδό ή την Νότια πρόσβαση, ακολουθώντας κυκλική πορεία.

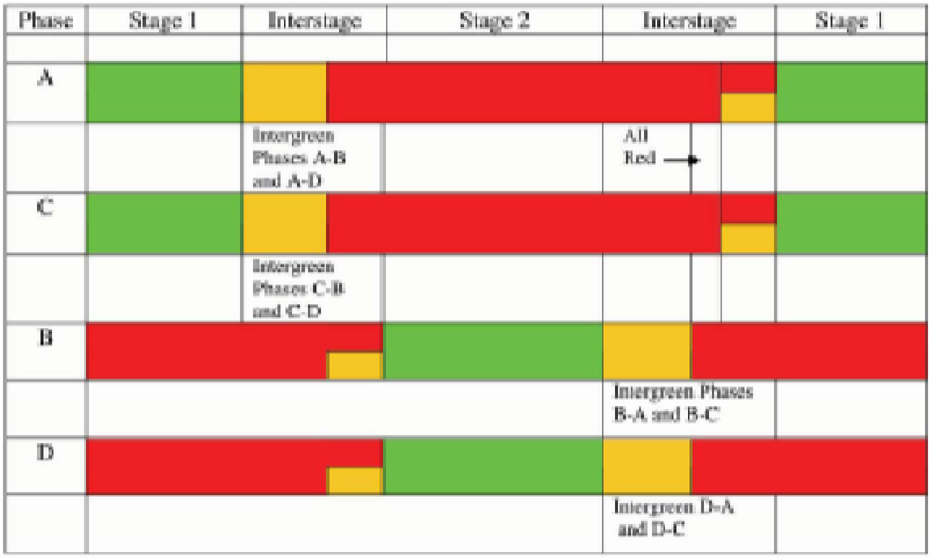


Σχήμα 2.2:Διάγραμμα διαδοχής φάσεων

Ο αριθμός των φάσεων που θα έχουμε εξαρτάται από το πλήθος και το μέγεθος των κυκλοφοριακών ρευμάτων. Γίνεται πάντα προσπάθεια να περιορίσουμε τον αριθμό τον φάσεων στον ελάχιστο δυνατό, εξυπηρετώντας από κοινού όσες περισσότερες κινήσεις είναι εφικτό, με σκοπό να μειωθούν οι καθυστερήσεις λόγω περιττών φάσεων. Για το λόγο αυτό και για λόγους ασφαλείας σε έκτακτες περιπτώσεις κάποιες φάσεις αν δεν κρίνονται απαραίτητες μπορεί να παραληφθούν.

Ένα **στάδιο (stage)** ξεκινάει στο σημείο εκείνο, όπου όλες οι φάσεις που θα έχουν προτεραιότητα στη διάρκεια της λαμβάνουν πράσινη ένδειξη και οι υπόλοιπες κόκκινη. Τελειώνει στο σημείο που η πρώτη φάση χάνει την προτεραιότητα. Επομένως μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχουν ενδιάμεσα στάδια (inter stage periods) στα οποία κάποιες κινήσεις μπορεί να διακοπούν ή να αρχίσουν πρόωρα για να εξυπηρετηθούν οι αριστερές στροφές. Σε αυτή την περίπτωση γίνεται λόγος για πρόωρη διακοπή (early cut-off) ή καθυστερημένη έναρξη (late release ή leading green).

Για παράδειγμα, σε ένα συνήθη κόμβο τεσσάρων προσβάσεων, όπου συμβατικά θεωρούμε τέσσερις φάσεις A, B, C, και D από τη Νότια κατεύθυνση και ακολουθώντας τη φορά των δεικτών του ρολογιού, το διάγραμμα σηματορρύθμισης θα είναι το ακόλουθο:



Σχήμα2.3:Διάγραμμα σηματορρύθμισης

Σαν **χρονική μετατόπιση (offset)** ορίζουμε τον χρόνο σε δευτερόλεπτα ή σε ποσοστό της περιόδου που μεσολαβεί από την έναρξη της πράσινης ένδειξης στον πρώτο σηματοδότη, από μια σειρά σηματοδοτημένων κόμβων μέχρι την έναρξη της πράσινης ένδειξης στον επόμενο σηματοδότη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

Μέθοδοι Ρύθμισης Φωτεινών Σηματοδοτών

3.1.Εισαγωγή:

Κάθε πόλη που χρησιμοποιεί φωτεινούς σηματοδότες για την ρύθμιση της κυκλοφορίας της επιλέγει την ρύθμιση των φωτεινών σηματοδοτών είτε με τη μέθοδο σταθερών χρόνων (fixed time), είτε με αλγόριθμους πραγματικού χρόνου (real time). Η μέθοδος σταθερών χρόνων είναι η πιο διαδεδομένη. Σε αυτή την μέθοδο το πλάνο των φωτεινών σηματοδοτών είναι προεπιλεγμένο και σταθερό. Οι μέθοδοι πραγματικού χρόνου χρησιμοποιούν μετρήσεις της κυκλοφοριακής κατάστασης του δικτύου και αποφασίζουν τους κατάλληλους πράσινους χρόνους και τον κατάλληλο κύκλο που αντιστοιχεί στις συγκεκριμένες μετρήσεις. Σε αυτήν την διπλωματική θα ασχοληθούμε με πλάνα σταθερού χρόνου.

3.2.Μέθοδος Fixed Time:

Μια σειρά πλάνων που ποικίλουν ανάλογα με την ώρα της ημέρας αποθηκεύονται σε ένα κεντρικό υπολογιστή (4). Για το χρονικό διάστημα που καθορίζει ο χρήστης, το οποίο συνήθως επιλέγεται για ολόκληρη την ημέρα, οι φωτεινοί σηματοδότες ακολουθούν το πλάνο που τους έχει δοθεί. Ο κύκλος και οι πράσινοι χρόνοι των φαναριών υπολογίζονται με τη χρήση ιστορικών δεδομένων και παραμένουν σταθεροί καθ' όλο το χρονικό διάστημα που έχει επιλεγεί. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως σε κέντρα πόλεων, όπου είναι επιθυμητό να εξασφαλιστεί ότι η σύνδεση μιας διασταύρωσης με την επόμενη παραμένει σταθερή καθ'όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Το πλεονέκτημα της είναι ότι δεν χρειάζεται καμιά υποδομή εκτός του φωτεινού σηματοδότη. Το μειονέκτημα είναι ότι οι συνεχείς αλλαγές στις συνήθειες των οδηγών, η εποχικότητα της ζήτησης, οι αλλαγές στο δίκτυο (π.χ. μονοδρομήσεις, πεζοδρομήσεις κλπ), κάνουν τα αρχικά πλάνα ξεπερασμένα και πρέπει ανά τακτά χρονικά διαστήματα να γίνονται μετρήσεις, να συλλέγονται δεδομένα και να αναπροσαρμόζονται τα αρχικά πλάνα, πράγμα χρονοβόρο και κοστοβόρο.

Στη δική μας περίπτωση εξετάζουμε την βελτιστοποίηση του ελέγχου σταθερού χρόνου ενός δικτύου, στο οποίο στο τέλος κάθε ημέρας θα γίνεται εφαρμογή του αλγόριθμου AFT, με σκοπό να καθοριστεί το πλάνο της επόμενης ημέρας με τον καλύτερο τρόπο. Έτσι τα πλάνα σταθερού χρόνου θα αυτοπροσαρμόζονται στην πραγματική ζήτηση και δε θα στηρίζονται πια σε κάποια παλιά εκτίμηση. Τα δεδομένα για την λειτουργία του αλγόριθμου AFT θα συλλέγονται από αισθητήρες GPS κινητών ή συνδεδεμένων οχημάτων (connected vehicles), συνεπώς η συλλογή τους δεν θα είναι πλέον κοστοβόρα.

3.3.Μέθοδος Real Time:

Τα συστήματα ελέγχου κυκλοφορίας real time αναφέρονται στην ρύθμιση και την παραμετροποίηση των φωτεινών σηματοδοτών σε πραγματικό χρόνο. Χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες που λαμβάνουν από διάφορους αισθητήρες και φωρατές αλλάζουν συνεχώς τους κύκλους των διασταυρώσεων και των πράσινων φαναριών ώστε να προσαρμόζονται ακριβώς στην τρέχουσα ζήτηση και τις τρέχουσες ανάγκες. Το πλεονέκτημα τέτοιων μεθόδων είναι εμφανές. Η αποτελεσματικότητα του ελέγχου είναι μεγαλύτερη. Το μειονέκτημα τέτοιων μεθόδων είναι η μεγάλη ανάγκη σε ακριβείς μετρήσεις που οδηγεί σε μεγάλο κόστος υποδομών (φωρατών ακριβείας, κάμερες κλπ), αλλά και μεγάλη ανάγκη καλής και ασφαλούς επικοινωνίας των φωρατών με το κέντρο ελέγχου και τους σηματοδότες, που και αυτό με τη σειρά του αυξάνει το κόστος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

Πηγή Δεδομένων Adaptive Fine-Tuning(AFT)

4.1. Συνδεδεμένα Οχήματα:

Με τον όρο συνδεδεμένα οχήματα αναφερόμαστε σε οχήματα τα οποία διαθέτουν αυτοματοποιημένα συστήματα επικοινωνίας ανά πάσα στιγμή με τον οδηγό, με άλλα οχήματα, ή ακόμη και με την οδική υποδομή. Πέρα από τα ενσωματωμένα συστήματα από την κατασκευή τους, τα οχήματα μπορούν να θεωρηθούν συνδεδεμένα ακόμα και κάνοντας χρήση ειδικών εφαρμογών κινητών τηλεφώνων που μπορούν να δίνουν πληροφορίες για το όχημα ανά πάσα στιγμή, ακόμη και να δίνουν πληροφορίες στον οδηγό για την κυκλοφοριακή κατάσταση.

Μέσω των ενσωματωμένων αισθητήρων GPS που διαθέτουν τα κινητά τηλέφωνα, μπορούν να συλλεχτούν πληροφορίες σχετικά με τη θέση των συνδεδεμένων οχημάτων. Από την πληροφορία αυτή μπορούμε να έχουμε γνώση της μέσης ταχύτητας τους, συνεπώς και όλου του δικτύου. Γνωρίζοντας τον χρόνο που χρειάζεται για να πάρουμε δύο ενδείξεις θέσης ενός συνδεδεμένου οχήματος και γνωρίζοντας την απόσταση που διένυσε στο χρόνο αυτό μπορούμε να υπολογίσουμε την μέση ταχύτητά του. Από το σύνολο των συνδεδεμένων οχημάτων, και εφόσον ο αριθμός τους είναι αντιπροσωπευτικός, μπορούμε να έχουμε τη μέση ταχύτητα του κάθε δρόμου ή όλου του δικτύου. Όσο αυξάνεται το ποσοστό των συνδεδεμένων οχημάτων και όσο αυξάνεται ο χρονικός ορίζοντας της εκτίμησής μας, τόσο πιο ακριβής είναι η εκτίμηση της μέσης ταχύτητας.

Σε αυτήν την διπλωματική ενδιαφερόμαστε για τη μέση ταχύτητα κατά τη διάρκεια μιας ολόκληρης προσομοίωσης. Η εκτίμησή μας θα είναι ακριβής ακόμη και για ποσοστά συνδεδεμένων οχημάτων της τάξης του 5%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:

Αλγόριθμος Adaptive Fine-Tuning(AFT)

5.1. Εισαγωγή:

Η ρύθμιση ενός συστήματος σηματοδότησης για την επιλογή των πράσινων χρόνων των σηματοδοτών αποτελεί μια περίπλοκη, χρονοβόρα και κουραστική διαδικασία. Απαιτεί συνεχείς μελέτες για τον υπολογισμό της ζήτησης του δικτύου αλλά και την αλλαγή των πλάνων των σηματοδοτών. Ο αλγόριθμος AFT πετυχαίνει την αυτόματη αλλαγή των πλάνων και την αποφυγή συνεχών μελετών για τον υπολογισμό της ζήτησης, βελτιώνοντας παράλληλα την μέση ταχύτητα του δικτύου μετά από ένα πλήθος επαναλήψεων.

Για να το πετύχει αυτό χρειάζεται τον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας του δικτύου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία ο υπολογισμός αυτός θα γίνει μέσω αισθητήρων gps κινητών τηλεφώνων που θα διαθέτουν τα συνδεδεμένα οχήματα. Εκμεταλλευόμαστε λοιπόν μια πολύ φθηνή πληροφορία που μας δίνει μετρήσεις μεγάλης ακρίβειας, αφού οι μετρήσεις μας θα είναι ακριβείς ακόμα και με ποσοστά συνδεδεμένων οχημάτων 5%, σε σύγκριση πάντα με τις συμβατικές μεθόδους συλλογής πληροφοριών που υπό συνθήκες δεν δίνουν πάντα αξιόπιστες μετρήσεις και είναι αρκετά ακριβή η εγκατάσταση και η συντήρησή τους . Την πληροφορία αυτή προς το παρόν μπορούν να διαθέσουν συγκεκριμένες εταιρίες που δραστηριοποιούνται στον συγκεκριμένο τομέα.

5.2. Λειτουργία Adaptive Fine-Tuning(AFT):

Ο αλγόριθμος Adaptive Fine-Turning(AFT) είναι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης που βασίζεται σε μη γραμμικές μεθόδους βελτιστοποίησης. Μετά από ένα πλήθος επαναλήψεων επιτυγχάνει την ελαχιστοποίηση του κριτηρίου που του έχει δοθεί.

Οι μεταβλητές οι οποίες χρησιμοποιούνται για την λειτουργία του παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (5):

k	Δείκτης επανάληψης
ℓ	Δείκτης Προηγούμενων μέτρήσεων απόδοσης
$J(\ell)$	Τιμή απόδοσης για το ℓ πείραμα βαθμονόμισης
$\hat{J}(\ell)$	Μια εκτίμηση του $J(\ell)$ που λαμβάνεται στην ℓ επανάληψη
$\theta(k)$	Το διάνυσμα των ρυθμιζόμενων παραμέτρων στο k πείραμα βαθμονόμησης
$\theta^*(k)$	Το καλύτερο σύνολο ρυθμιζόμενων παραμέτρων μέχρι το k πείραμα
$x(k)$	Εξογενή σήματα
$\bar{x}(k)$	Μια εκτίμηση/πρόβλεψη των εξωγενών σημάτων x(k)
$\Delta_i(k)$	Τυχαίες ακολουθίες (π.χ) Gaussian), με i∈{1,2,...,nθ)
$\Delta\theta(k+1)$	Η διαταραχή που έχει επιλεγεί από τον αλγόριθμο

Πίνακας 5.2.1

Για την εφαρμογή του αλγόριθμου AFT, θεωρείται ότι υπάρχει μια εκτίμηση ή πρόβλεψη $\bar{x}(k+1)$ του διανύσματος $x(k+1)$ (αναφορικά με την εκτίμηση της επόμενης επανάληψης). Σε πολλές εφαρμογές μια τέτοια υπόθεση είναι αρκετά ρεαλιστική, αφού οι τιμές του $x(k+1)$ αντιστοιχούν σε πραγματικές, διαθέσιμες και μετρήσιμες καταστάσεις συστήματος ή εξωγενή σήματα. Ενδέχεται βέβαια να υπάρχουν και περιπτώσεις όπου μια τέτοια υπόθεση δεν είναι ρεαλιστική. Στις περιπτώσεις αυτές η $\bar{x}(k+1)$ μπορεί να εκτιμηθεί/προβλεφθεί χρησιμοποιώντας κατάλληλους αλγόριθμους εκτίμησης. Να σημειωθεί ότι η διάσταση nχ του διανύσματος υπολογισμού $\bar{x}$ πρέπει να είναι συγκρίσιμη με τη διάσταση nθ του διανύσματος ρυθμιζόμενων παραμέτρων θ. Σε αντίθεση με άλλες εφαρμογές των νευρονκών προσεγγιστών, όπου ο αριθμός των νευρώνων Lg θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος ώστε να εγγυάται επαρκή προσέγγιση, εδώ κάτι τέτοιο δεν είναι αναγκαίο.

Παρακάτω φαίνεται η μαθηματική περιγραφή του αλγόριθμου AFT :

Βήμα 1: $\Delta\theta_i^{(j)}$(k+1)= α(k) $\Delta\theta_i^{(j)}$(k) - θ_i(k) + θ_i^*(k), j∈{1,….,K}

Βήμα 2: L_g(k)= min{ 2 (k-1), $\overline{L_g}$}

Βήμα 3: ℓ(k) = max{k − T_h,1}

Βήμα 4: φ_ℓ(k) = φ (θ_ℓ (k), $\overline{x_\ell}$(k))

Βήμα 5: ϑ(k) → $argmin_\theta$ ½ $\Sigma_{\ell=\ell(\mathrm{k})}^{k}(J_\ell\ -\ \vartheta^\tau\varphi\ _\ell(k))^2$

Βήμα 6: $\hat{J}(\pm\Delta\theta^{(j)}$(k+1) + θ^*(k), $\bar{x}$(k+1)) = ϑ(k) $^\tau$φ (±$\Delta\theta^{(j)}$(k+1) + θ^*(k), $\bar{x}$(k+1))

Βήμα 7: Δθ(k+1) = $argmax_{\Delta\theta^{(\pm j)}\ (\kappa+1)}$ $\hat{J}$(±$\Delta\theta^{(j)}$(k+1) + θ^*(k), $\bar{x}$(k+1))

$\Delta\theta_i$(k + 1) = θ_i(k + 1) − θ_i(k)

α(k) είναι μια θετική ακολουθία που καθορίζεται από τον χρήστη

$\mathrm{T_h}$, $\overline{\mathrm{L_g}}$ και Κ είναι θετικοί εκέραιοι καθοριζόμενοι από τον χρήστη

θ *(k) + Δθ(k+1) υποδηλώνει το διάνυσμα των ρυθμιζόμενων παραμέτρων που επιλέχθηκαν για να εφαρμοστούν στο επόμενο πείραμα k+1

Πίνακας 5.2.2

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται εισάγει τυχαίες διαταραχές στο διάνυσμα παραμέτρων ελέγχου θ. Η χρήση των διαταραχών είναι κρίσιμη για την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου καθώς παρέχει την λεγόμενη επιμονή της διέγερσης (persistence of excitation), η οποία είναι μια απαραίτητη προϋπόθεση ούτος ώστε ο εκτιμητής $\hat{\mathrm{J}}$ να είναι σε θέση να μάθει αποτελεσματικά την άγνωστη συνάρτηση J. Λόγω της χρήσης του βήματος 6 (βλ. πίνακα 5.2.2) η εν λόγω μεθοδολογία αποφεύγει προβλήματα χαμηλής απόδοσης.

Παρακάτω περιγράφονται λεπτομερώς τα βήματα εφαρμογής του αλγόριθμου που εμφανίζονται στον πίνακα 5.2.2, τα οποία εκτελούνται σε κάθε επανάληψη k:

Βήμα 1: Σε αυτό το στάδιο υπολογίζονται τυχαίες διαταραχές K (σύμφωνα με π.χ. Gaussian κατανομή). Οι υποψήφιοι τελεστές (παράμετροι) που προκύπτουν $\theta_i(k+1) = \theta_i^*(k) + \Delta\theta_i(k+1)$ φροντίζουμε να ικανοποιούν τους περιορισμούς του προβλήματος.

Βήμα 2: Υπολογίζεται ο αριθμός των όρων του προσεγγιστή $L_g(k)$ που θα χρησιμοποιηθεί για αυτήν την επανάληψη.

Βήμα 3: Ο αλγόριθμος διατηρεί ένα παράθυρο προηγούμενων μετρήσεων που κινείται μαζί με τις επαναλήψεις. Σε αυτό το βήμα υπολογίζεται το σημείο εκκίνησης του παραθύρου στο παρελθόν. Το τελικό σημείο του παραθύρου είναι πάντα k.

Βήμα 4: Μετά τα βήματα 2, 3, η δομή του καθολικού προσεγγιστή μπορεί να παραχθεί και να εφαρμοστεί στο παράθυρο των προηγούμενων μετρήσεων.

Βήμα 5: Οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων ϑ υπολογίζονται σύμφωνα με τη λύση της μεθόδου εκτίμησης ελάχιστων τετραγώνων.

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

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

Αναλυτικότερα για τον τρόπο λειτουργίας του AFT μπορείτε να δείτε το (5).

Η διαδικασία εφαρμογής του σε ένα σηματοδοτούμενο δίκτυο μπορεί να συνοψισθεί ως εξής:

Η διαδικασία κυκλοφοριακής ροής ελέγχεται από μια στρατηγική ελέγχου η οποία περιλαμβάνει έναν αριθμό ρυθμιζόμενων παραμέτρων.

Στο τέλος των περιόδων που έχουν επιλεγεί (π.χ. στο τέλος κάθε ημέρας), ο αλγόριθμος AFT λαμβάνει την τιμή του δείκτη απόδοσης. Στην περίπτωση μας τη μέση ταχύτητα των συνδεδεμένων οχημάτων του δικτύου.

Χρησιμοποιώντας την μετρούμενη απόδοση, ο AFT υπολογίζει τις νέες τιμές των παραμέτρων της στρατηγικής που θα εφαρμοστούν στην επόμενη περίοδο (π.χ. στην επόμενη ημέρα) και η στρατηγική θα εφαρμόσει νέους πράσινους χρόνους σηματοδότησης, προσπαθώντας να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος.

Αυτή η (επαναληπτική) διαδικασία συνεχίζεται σε πολλές περιόδους (π.χ. ημέρες) έως ότου ικανοποιηθούν κάποια κριτήρια σύγκλισης του AFT αλγορίθμου. Τότε ο αλγόριθμος AFT μπορεί να παραμείνει ενεργός για συνεχή «μικρο»-προσαρμογή ή μπορεί να απενεργοποιηθεί και να επανενεργοποιηθεί σε μεταγενέστερο στάδιο (π.χ. μετά από μερικούς μήνες).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:

Πρόγραμμα Προσομοίωσης

6.1.Τι Είναι Προσομοίωση:

Πρόκειται για μια αναπαράσταση του πραγματικού κόσμου. Επιτυγχάνεται μέσω ενός λογισμικού προσομοίωσης που ονομάζεται προσομοιωτής. Οι προσομοιωτές αποτελούν χρήσιμα εργαλεία που μας δίνουν τη δυνατότητα επεξεργασίας δεδομένων, με απώτερο σκοπό να προβούμε σε συμπεράσματα τα οποία μας βοηθούν στην κατανόηση της λειτουργίας φυσικών διεργασιών, στην δημιουργία αλγορίθμων ελέγχου αυτών των διεργασιών, καθώς και στον εξαντλητικό έλεγχο αυτών των αλγορίθμων ακόμα και σε ακραίες συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να προβλέψουμε αστοχίες των αλγορίθμων μας προτού τους εφαρμόσουμε στο πραγματικό πεδίο.

6.2.Ο Προσομοιωτής AIMSUN:

Το λογισμικό προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της συμπεριφοράς του αλγόριθμου AFT είναι ο μικροσκοπικός προσομοιωτής AIMSUN (5). Το AIMSUN μέσα από ένα πλήθος επιλογών, δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει ένα δίκτυο όπως αυτός το επιθυμεί. Του παρέχονται τα κατάλληλα εργαλεία για το σχεδιασμό ενός σηματοδοτούμενου συστήματος ανάλογου ενός πραγματικού. Μπορεί επίσης να επιλέξει τον τύπο του οχήματος που θα κινείται στο δίκτυο ανάμεσα σε επιβατικό όχημα, φορτηγό, λεωφορείο κ.α. Σε κάθε όχημα αντιστοιχούν και τα ανάλογα χαρακτηριστικά επιτάχυνσης, επιβράδυνσης κ.α. Μπορεί ακόμα και να επιλεχθεί η οδική συμπεριφορά του οδηγού (από επιθετική, έως πολύ προσεκτική) δίνοντας σε κάθε όχημα ένα μοναδικό και ρεαλιστικό προφίλ απόδοσης που διατηρεί όσο κινείται μέσα στο δίκτυο.

Το AIMSUN μπορεί να λειτουργήσει ως ένα στοχαστικό μοντέλο, όπου τα οχήματα κινούνται μέσα στο δίκτυο είτε με βάση τα ποσοστά στροφής, είτε με ένα μοντέλο αντιστοίχησης εισόδου-προορισμού με τη χρήση πινάκων O/D.

Τέλος, το AIMSUN μπορεί να επικοινωνεί και να αλληλεπιδρά μέσω του AIMSUN API με εφαρμογές που δημιουργεί ο χρήστης, ανταλλάσσοντας πληροφορίες και δίνοντας την δυνατότητα επεξεργασίας των πληροφοριών αυτών. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να εφαρμόσουμε οποιαδήποτε στρατηγική ελέγχου επιθυμούμε. Το AIMSUN είναι ένα πλήρες λειτουργικό εργαλείο προσομοίωσης, με ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:

Εφαρμογή Adaptive Fine-Tuning(AFT)

7.1.Σταθερός και Μεταβαλλόμενος Κύκλος:

Σε αυτή την διπλωματική έχουν δημιουργηθεί δύο τύποι αλγορίθμων για την εφαρμογή του AFT και την εναλλαγή των πράσινων χρόνων των φωτεινών σηματοδοτών. Ο πρώτος τύπος επεξεργάζεται τα δεδομένα που δίνει ο AFT και μεταβάλλει τους πράσινους χρόνους κρατώντας τον κύκλο κάθε διασταύρωσης σταθερό. Ο δεύτερος από τα δεδομένα που λαμβάνει από τον AFT αλλάζει τον χρόνο των πρασίνων αλλάζοντας παράλληλα και τον κύκλο των διασταυρώσεων σε κάθε επανάληψη.

Με την μέθοδο του σταθερού κύκλου ο χρόνος που θα έχει ο κύκλος κάθε διασταύρωσης ορίζεται από τον χρήστη και έτσι εξασφαλίζεται ότι δεν θα επιλεγεί ένας πολύ μικρός ή ένας πολύ μεγάλος κύκλος, ενώ με την μέθοδο του μεταβαλλόμενου κύκλου ο χρόνος μεταβάλλεται σε κάθε επανάληψη από τον AFT και μπορεί να προσαρμοστεί στις ανάγκες του δικτύου.

Στους δύο τύπους αλγορίθμους εφαρμόζεται έλεγχος ούτως ώστε ο πράσινος χρόνος των φωτεινών σηματοδοτών να μην είναι μικρότερος των 7 δευτερολέπτων και ο μέγιστος κύκλος να μην είναι μεγαλύτερος από 120 sec.

Τα αποτελέσματα και των δύο μεθόδων παρουσιάζονται στη συνέχεια.

7.2. Μεταβλητές Λειτουργίας Adaptive Fine-Tuning(AFT):

Για την λειτουργία του αλγόριθμου Adaptive Fine-Turning (AFT) είναι απαραίτητη η ρύθμιση ενός πλήθους μεταβλητών οι οποίες τον κάνουν ευέλικτο και του επιτρέπουν να προσαρμόζεται σε κάθε πρόβλημα που χρήζει βελτιστοποίησης. Σε αυτή την διπλωματική έχουν προστεθεί 3 νέες μεταβλητές οι οποίες βοηθούν στην καλύτερη και πιο ομαλή λειτουργία του. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι alpha_lower, bound και bound_change, των οποίων η λειτουργία περιγράφεται παρακάτω.

Το σύνολο των μεταβλητών που δέχεται ο AFT ως εισόδους παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα και στη συνέχεια εξηγείται η λειτουργία τους:

L_G	αριθμός όρων του πολυονυμικού προσεγγιστή
Nr_of_perturbations	αριθμός "διαταράξεων"
theta_lb	Απόλυτο κάτω όριο παραμέτρων
theta_ub	Απόλυτο άνω όριο παραμέτρων
t_h	Μέγεθος παραθύρου προηγούμενων τιμών
alpha_0	α(0)
alpha_lower	Ελάχιστο α(κ)
Bound	Επιτρεπόμενη αλλαγή των άνω και κάτω ορίων στην πρώτη επανάληψη.
bound_change	Επιτρεπόμενη αλλαγή των άνω και κάτω ορίων
Reset	Αριθμός επαναλήψεων για την αρχικοποίηση της παραμέτρου alpha_0

Πίνακας 7.2.1

- **L_G:**

Ο AFT για να πετύχει την ελαχιστοποίηση του κριτήριου σε κάθε επανάληψη, δημιουργεί μια τυχαία συνάρτηση προσέγγισης χρησιμοποιώντας έναν μέγιστο αριθμό πολυωνυμικών όρων. Αυτός ο μέγιστος αριθμός είναι το L_G.

- **Nr_of_petrubations:**

Η μεταβλητή Nr_of_petrubations αφορά τον αριθμό των ‘’διαταράξεων’’ που θα γίνουν γύρω από το βέλτιστο σημείο για να βρούμε κάποιο καλύτερο στην συγκεκριμένη επανάληψη. Όσο μεγαλύτερο τόσο καλύτερα στην αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου, αλλά ταυτόχρονα έχουμε την ανάλογη αύξηση του υπολογιστικού φόρτου.

- **theta_lb , theta_ub:**

Για να αυξηθούν ή να μειωθούν οι μεταβλητές που αφορούν το κριτήριο βελτιστοποίησης δημιουργούνται κάποια άνω και κάτω όρια για αυτές. Οι τιμές που θα δοθούν στα theta_lb και theta_ub ορίζουν το κάτω και το πάνω όριο κάθε παραμέτρου, δίνοντας στον χρήστη τη δυνατότητα να ελέγχει το εύρος των τιμών που θα κινηθούν οι μεταβλητές. Πρωταρχικός στόχος φυσικά είναι να ικανοποιούνται με αυτόν τον τρόπο οι φυσικοί περιορισμοί.

- **T_h:**

Πρόκειται για τον αριθμό ιστορικών στιγμών που ο AFT κρατάει σαν θυμητικό κατά την λειτουργία του. Αν ας πούμε επιλέξουμε τον αριθμό 30 ο AFT σε κάθε επανάληψη θα ‘’θυμάται’’ τα δεδομένα μέχρι και 30 προηγούμενων επαναλήψεων που έχουν πραγματοποιηθεί.

- **Alpha_0 , Alpha_lower:**

Το Alpha_0 είναι το αρχικό μας α(0) και εκφράζει την απόσταση που θα κινηθούν οι τιμές των παραμέτρων γύρω από την βέλτιστη τιμή. Να σημειωθεί ότι η βέλτιστη τιμή αλλάζει όποτε βρεθεί καλύτερη.

Η παράμετρος α(k) Δεν είναι μια σταθερή μεταβλητή. Με το πέρας των επαναλήψεων το alpha μικραίνει σύμφωνα με τη συνάρτηση α**(k)=_α(0)/(α(0)+Nr_of_iterations)** όπου Nr_of_iterations είναι ο αριθμός των επαναλήψεων. Από το πρώτο βήμα του αλγορίθμου (βλέπε πίνακα 5.2.2) με τη χρήση του α(k), προκύπτουν οι νέες τιμές των παραμέτρων. Όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική τιμή του α(0) τόσο περισσότερο καθυστερεί η μείωση του α(κ) σε επίπεδα που αδρανοποιούν στην ουσία τον AFT. Η μείωση του alpha γίνεται με σκοπό να επιτευχθεί σύγκλιση των τιμών του κριτηρίου μετά από ένα πλήθος επαναλήψεων προς μια βέλτιστη τιμή.

Ο χρήστης έχει την επιλογή να επιλέξει την μικρότερη τιμή που θα φτάσει το alpha με την μεταβλητή alpha lower, έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα της συνεχούς μικρορύθμισης των παραμέτρων μας ώστε ο AFT να είναι συνεχώς ενεργός.

- **Bound , Bound_change:**

Αρχικά έχουμε ορίσει κάποια μέγιστα και κατώτερα όρια για κάθε παράμετρο όπως αναφέρεται παραπάνω (theta lb, theta ub). Στην αρχή της λειτουργίας του ο AFT έχει και μεγάλο βήμα α(k), αλλά επίσης δεν έχει καθόλου γνώση του συστήματος. Αυτός είναι και ο λόγος που μπορεί να κάνει πολύ κακές αρχικές εκτιμήσεις και να μας οδηγήσει σε κάποια μη επιθυμητά αποτελέσματα. Η μεταβλητή Bound ορίζει τα πρώτα όρια μετακίνησης των μεταβλητών για την πιο ομαλή και ασφαλή αλλαγή τους (π.χ. ±5%). Τα όρια αυτά παραμένουν ως έχουν μέχρι οι παράμετροι να πάρουν την τιμή κάποιου άκρου του διαστήματος για τρεις συνεχόμενες επαναλήψεις. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να μεγαλώσουμε το όριο προς αυτήν την κατεύθυνση. Μόλις μια παράμετρος πλησιάσει πολύ κοντά κάποιο από τα αρχικά όρια για τρεις φορές, τότε το όριο αυτό μεγαλώνει και αλλάζει πλέον κατά την τιμή που έχει προσδοθεί στο bound_change (π.χ. 5% ή 10%). Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η πιο ομαλή και ασφαλή μεταβολή των αρχικών μας παραμέτρων και η αποφυγή ανεπιθύμητων αποτελεσμάτων που παρατηρήθηκαν με τις μεγάλες και τυχαίες εναλλαγές των μεταβλητών, ιδιαίτερα στις πρώτες επαναλήψεις όπου υπάρχει και η μεγαλύτερη τυχαιότητα στην αναζήτηση τιμών. Τα όρια αυξάνουν εφόσον χρειαστεί μέχρι να αγγίξουν τα έτσι και αλλιώς ανώτερα και κατώτερα όρια των παραμέτρων που όμως έχουν απλά φυσική σημασία. Μετά από μερικές επαναλήψεις τα όρια ναι μεν είναι μεγαλύτερα, αλλά πλέον υπάρχει και γνώση παλιότερων τιμών που μειώνουν την τυχαιότητα των επιλογών του AFT, άρα πλέον είναι πιο ασφαλής ο περίπατός του.

- **reset:**

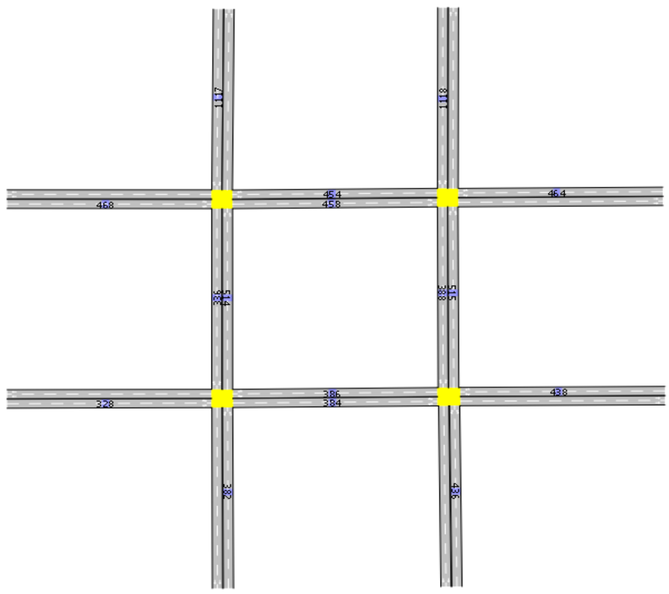
Ο AFT μετά από ένα πλήθος επαναλήψεων συγκλίνει προς κάποιες τιμές των μεταβλητών και επομένως και του κριτηρίου που έχουμε ορίσει. Σε περίπτωση που δεν έχουμε περεταίρω βελτίωση επειδή όταν μικραίνει πολύ το α(k) το εύρος τιμών που αλλάζουν οι μεταβλητές δεν είναι μεγάλο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το reset. Το reset επαναφέρει το α(k) στην αρχική του τιμή (α(0)) και έτσι αυξάνει τις πιθανότητες να ξεφύγει ο αλγόριθμος από κάποιο τοπικό ελάχιστο στο οποίο μπορεί να έχει βρεθεί. Πλέον το μεγάλο βήμα α(k) καθώς και τα πιθανά μεγάλα άνω και κάτω όρια των παραμέτρων δεν προκαλούν πρόβλημα μιας και ο AFT δοκιμάζει πιθανών και άλλες κατευθύνσεις για τις τιμές των παραμέτρων έχοντας όμως πλέον όλη τη μνήμη που χρειάζεται από προηγούμενες επαναλήψεις. Το reset (επανακίνηση του αλγορίθμου) πρέπει λοιπόν να χρησιμοποιείται μόνο εφόσον έχουμε προχωρήσει σε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα επαναλήψεων και μόνο εφόσον το α(k) έχει φτάσει στην χαμηλότερη επιτρεπτή τιμή του χωρίς να μπορεί να μας οδηγήσει σε ακόμη καλύτερα αποτελέσματα.

7.3.Μεθοδολογία Εφαρμογής Adaptive Fine-Tuning (AFT):

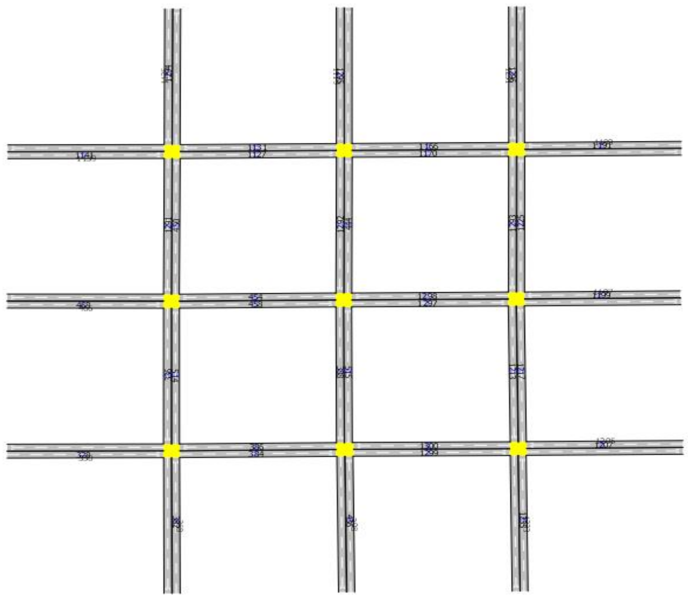
7.3.1.Δίκτυα Εφαρμογής Adaptive Fine-Tuning (AFT):

Ο αλγόριθμος adaptive fine-tuning (AFT) δοκιμάστηκε σε 5 δίκτυα διαφορετικού μεγέθους, τα οποία σχεδιάστηκαν στον προσομοιωτή AIMSUN και αποτελούνται από 4 κόμβους, 9 κόμβους, 16 κόμβους, 25 κόμβους και 36 κόμβους. Όλα τα δίκτυα ακολουθούν τετραγωνική δομή, ο κάθε κόμβος των οποίων έχει 4 φάσεις και 4 φωτεινούς σηματοδότες. Οι δρόμοι των δικτύων έχουν διάσταση 120 μέτρα και στο κέντρο όλων εκτός αυτών που εξέρχονται τα οχήματα από το δίκτυο έχουν τοποθετηθεί φωρατές. Ο τύπος των οχημάτων που κινούνται στους δρόμους είναι επιβατικά οχήματα και η συμπεριφορά των οδηγών είναι φυσιολογική. Κάθε προσομοίωση έχει διάρκεια 1ώρα και 30 λεπτά και η ζήτησή της μεταβάλλεται κάθε δέκα λεπτά. Η μεγαλύτερη ζήτηση των δικτύων έχει ρυθμιστεί να παρουσιάζεται στο 4^o, 5^o και 6^o δεκάλεπτο, ενώ στο 9^o δεκάλεπτο είναι μηδενική για να εξασφαλίζεται ότι τα δίκτυα θα αδειάσουν στο τέλος κάθε προσομοίωσης. Το αρχικό πλάνο πράσινων χρόνων των σηματοδοτών έχει οριστεί με βάση τον υπολογισμό της ζήτησης κάθε δρόμου την ώρα αιχμής.

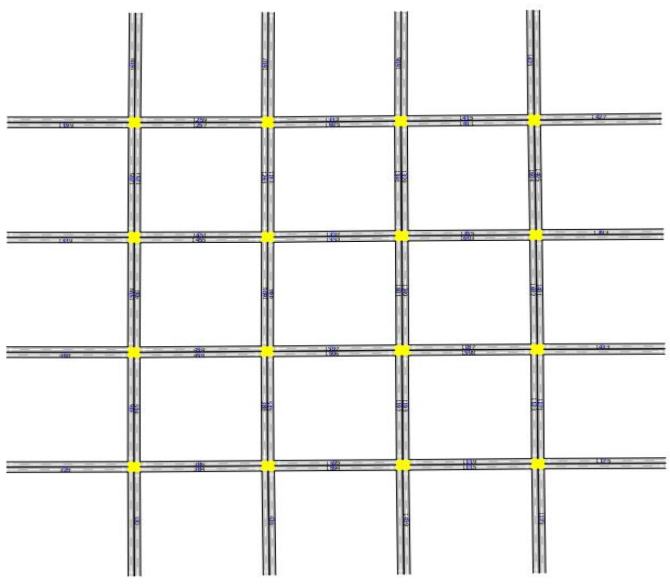
Τα δίκτυα που δημιουργήθηκαν είναι τα ακόλουθα:



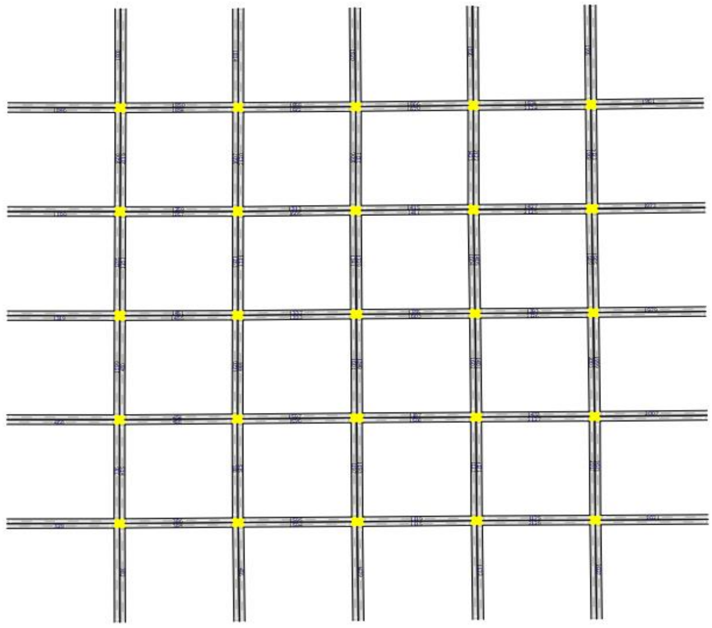
Σχήμα 7.3.1.1. 4 κόμβοι



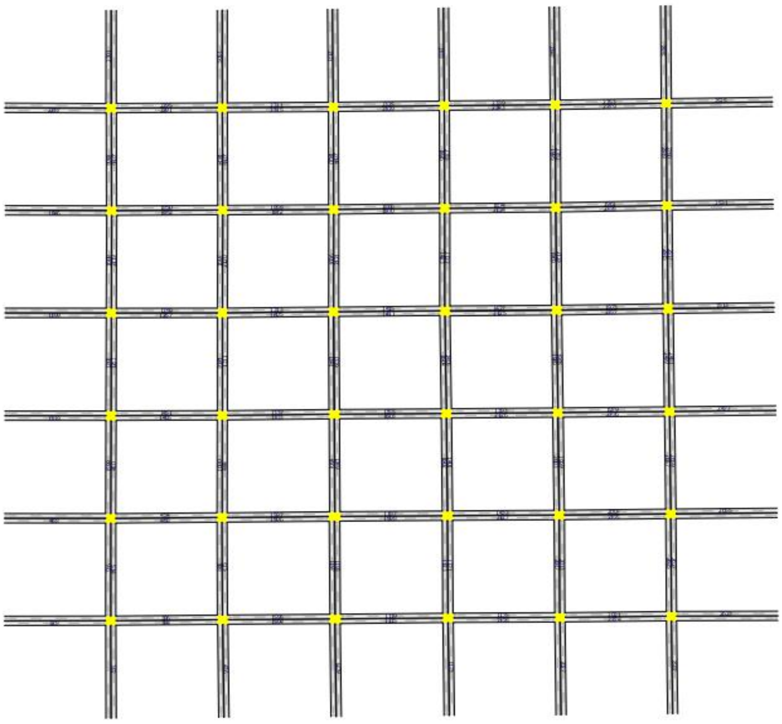
Σχήμα 7.3.1.2. 9 κόμβοι



Σχήμα 7.3.1.3. 16 κόμβοι



Σχήμα 7.3.1.4. 25 κόμβοι



Σχήμα 7.3.1.5. 36 κόμβοι

7.3.2.Λειτουργία Αλγορίθμων:

Για την εφαρμογή της λειτουργίας του αλγόριθμου AFT δημιουργήθηκαν δύο τύποι αλγόριθμων. Ο ένας αλγόριθμος διατηρεί τον κύκλο των διασταυρώσεων σταθερό, ενώ ο δεύτερος τον μεταβάλλει σε κάθε επανάληψη.

Οι δύο αλγόριθμοι επιτρέπουν την επικοινωνία και την ανταλλαγή πληροφοριών του χρήστη με τον προσομοιωτή AIMSUN. Επιτυγχάνουν την αυτοματοποιημένη λειτουργία του αλγόριθμου AFT σε κάθε μέγεθος δικτύου. Στις δύο περιπτώσεις εφαρμόζεται έλεγχος ούτως ώστε να εξασφαλιστεί ότι ο πράσινος χρόνος των σηματοδοτών δεν θα γίνει μικρότερος των 7 δευτερόλεπτων.

Για να τη λειτουργία τους δέχονται ως εισόδους από τον χρήστη τα αρχεία: AFT, Aimsun_gen_table, Detectors_id και Parameters. Το περιεχόμενο των αρχείων είναι το ακόλουθο:

1. **AFT:**

Όπως αναφέραμε ο AFT για την λειτουργία του χρειάζεται την ρύθμιση ενός πλήθους μεταβλητών από τον χρήστη που του επιτρέπει την προσαρμογή του σε κάθε πρόβλημα που χρήζει βελτιστοποίησης. Οι μεταβλητές αυτές ρυθμίζονται στο αρχείο AFT.

2. **Aimsun_gen_table:**

Σε αυτό το αρχείο αρχικά εισάγεται ο αριθμός των κόμβων που διαθέτει το δίκτυο το οποίο θα εφαρμοστεί ο αλγόριθμος AFT. Έπειτα η ταυτότητα κάθε κόμβου, ο αριθμός των φάσεων του, ο αρχικός χρόνος που θα έχει ο κύκλος του, αλλά και η ταυτότητά των φάσεων που διαθέτει κάθε κόμβος. Στην περίπτωση του κώδικα σταθερού κύκλου ο αρχικός χρόνος κύκλου που εισάγεται παραμένει πάντα σταθερός, ενώ στην περίπτωση του μεταβαλλόμενου κύκλου μεταβάλλεται σε κάθε επανάληψη.

3. **Detectors_id:**

Στο αρχείο detectors_id αρχικά προσδίδεται ο αριθμός των φωρατών (detectors) που διαθέτει κάθε κόμβος, στη συνέχεια η ταυτότητα των φωρατών αυτών, ο αριθμός των φωρατών που αποτελούν εισόδους στο δίκτυο (αν δεν υπάρχουν φωρατές εισόδου εισάγουμε τον αριθμό 0) και η ταυτότητά τους.

4. **<u>Paremeters:</u>**

Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει το αρχικό βάρος κάθε μεταβλητής που λαμβάνει σαν εκκίνηση ο αλγόριθμος AFT. Πρέπει να περιέχει στοιχεία ίσα σε αριθμό με τον αριθμό μεταβλητών και να είναι μέσα στα όρια βάρους που έχουμε αρχικοποιήσει στο αρχείο AFT που αναφέρθηκε παραπάνω. Τα βάρη αυτά αλλάζουν αυτόματα μετά την πρώτη επανάληψη από τον AFT.

Η δομή των δύο αλγορίθμων είναι η ίδια με μόνη διαφοροποίηση τον τρόπο υπολογισμού των πράσινων χρόνων που μας δίνει ο αλγόριθμος AFT (6). Αφού αρχικοποιηθούν τα παραπάνω αρχεία η διαδικασία με την οποία λειτουργούν μπορεί να συνοψισθεί ως εξής:

- Ο κάθε αλγόριθμος επικοινωνεί με τον προσομοιωτή AIMSUN με το αρχείο Aimsun_gen_table και του επιστρέφεται ο αρχικός πράσινος χρόνος των σηματοδοτών κάθε κόμβου, ο οποίος έχει οριστεί στο δίκτυο.
- Στην συνέχεια μέσω του αρχείου parameters οι χρόνοι αυτοί μεταβάλλονται ανάλογα με το βάρος κάθε μεταβλητής. Η επεξεργασία των χρόνων είναι διαφορετική για κάθε αλγόριθμο, οπότε οι χρόνοι των πράσινων σηματοδοτών που καταλήγουν δεν είναι απαραίτητα ίδιοι και για τους δύο.
- Αφού υπολογιστούν οι πράσινοι χρόνοι σε κάθε περίπτωση γίνεται η εφαρμογή τους στο AIMSUN αλλάζοντας τους αρχικούς.
- Ακολουθεί ο υπολογισμός της ροής (flow) που αφορά τα οχήματα που εισέρχονται στο δίκτυο την ώρα. Μέσω του αρχείου detectors_id λαμβάνονται από τους φωρατές που έχουν τοποθετηθεί στο AIMSUN τα οχήματα που εισέρχονται στο δίκτυο κάθε δευτερόλεπτο και έτσι υπολογίζεται το σύνολο των οχημάτων που εισέρχονται ανά ώρα (flow).
- Από τον προσομοιωτή AIMSUN λαμβάνεται η τιμή της μέσης ταχύτητας του δικτύου στην προκειμένη προσομοίωση
- Μετά τους παραπάνω υπολογισμούς δημιουργείται ένα αρχείο data το οποίο περιέχει την ροή, τα βάρη και την μέση ταχύτητα της εν λόγω προσομοίωσης, το οποίο λαμβάνει υπόψη ο AFT για την δημιουργία νέων βαρών για την επόμενη προσομοίωση.

- Στο τέλος του αλγορίθμου ενεργοποιείται ο αλγόριθμος AFT και αλλάζει τις τιμές του αρχείου parameters, το οποίο θα μεταβάλει τους πράσινους χρόνους στην επόμενη επανάληψη με σκοπό την βελτίωση της μέσης ταχύτητας.
- Η ίδια διαδικασία πραγματοποιείται σε κάθε επανάληψη για το πλήθος των προσομοιώσεων το οποίο επιλέγεται.

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις δεν χρησιμοποιούμε πληροφορία από τα συνδεδεμένα οχήματα μιας και δεν είχαμε την τεχνική δυνατότητα. Θεωρούμε όμως ότι η μέση ταχύτητα του δικτύου που λαμβάνουμε απευθείας από τον προσομοιωτή θα ήταν ή ίδια με τη μέση ταχύτητα που θα λαμβάναμε από την εύρεση της μέσης ταχύτητας των συνδεδεμένων οχημάτων. Αυτή η θεώρηση δεν απέχει από την πραγματικότητα μιας και τα οχήματα είναι αρκετά και ο ορίζοντας της εκτίμησης μας είναι αρκετά μεγάλος (όλη η διάρκεια της προσομοίωσης). Οπότε ακόμη και για μικρά ποσοστά συνδεδεμένων οχημάτων (π.χ. 5%) θα είχαμε μια πολύ ακριβή μέτρηση της μέσης ταχύτητας του δικτύου.

7.3.3.Διαχωρισμός Δικτύου

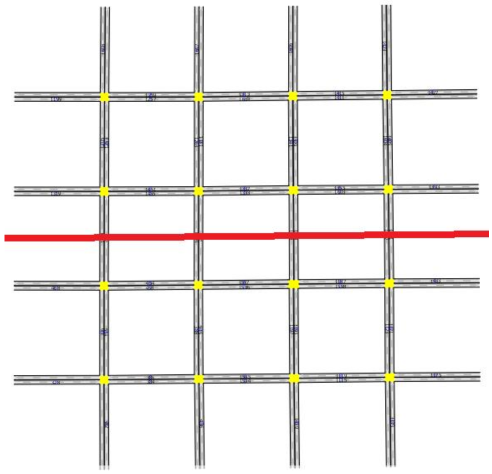
Η εφαρμογή του αλγόριθμου AFT στα δίκτυα των 4,9 και 16 κόμβων οδήγησαν σε αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα δείχνοντας ότι ο AFT βελτιώνει την ταχύτητα των δικτύων σε ένα καλό βαθμό. Στα μεγαλύτερα δίκτυα των 25 και 36 κόμβων, ενώ πάλι παρατηρείται βελτιωτική τάση, η βελτίωση της ταχύτητας που επιτυγχάνεται δεν είναι πολύ μεγάλη.

Εξετάστηκε λοιπόν αν ο χωρισμός των δικτύων σε υποδίκτυα οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα. Ο αλγόριθμος στον οποίο δοκιμάστηκε ο διαχωρισμός των δικτύων είναι αυτός του σταθερού κύκλου. Τα δίκτυα στα οποία έγιναν δοκιμές είναι των 16,25 και 36 κόμβων.

Τα δίκτυα χωρίστηκαν ως εξής:

- **Δίκτυο 16 κόμβων:**

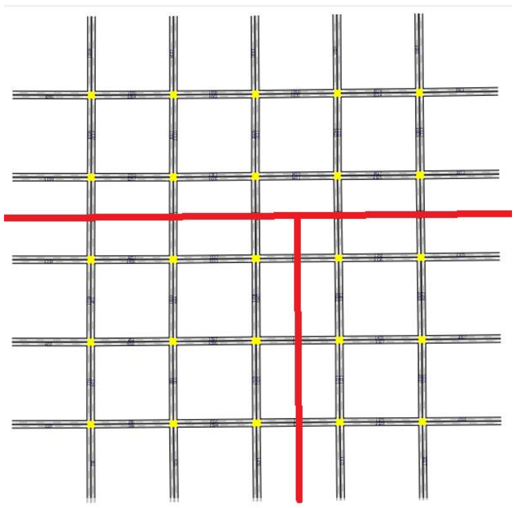
  1. ***Υποδίκτυο 8 κόμβων***
  2. ***Υποδίκτυο 8 κόμβων***



Σχήμα 7.3.3.1 Διαχωρισμός 16 κόμβων

- **Δίκτυο 25 κόμβων:**

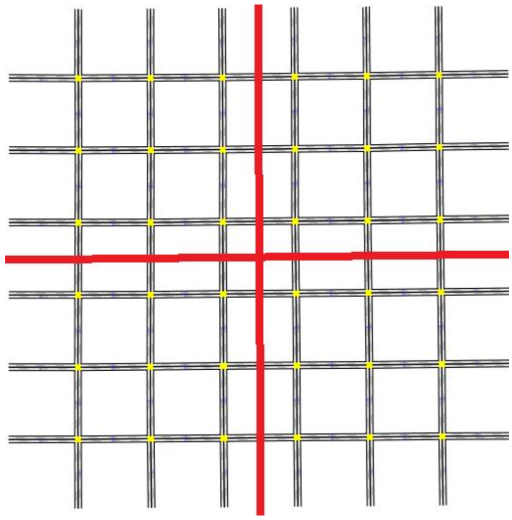
1. ***Υποδίκτυο 6 κόμβων***
2. ***Υποδίκτυο 9 κόμβων***
3. ***Υποδίκτυο 10 κόμβων***



Σχήμα 7.3.3.2 Διαχωρισμός 25 κόμβων

- **Δίκτυο 36 κόμβων:**

1. ***Υποδίκτυο 9 κόμβων***
2. ***Υποδίκτυο 9 κόμβων***
3. ***Υποδίκτυο 9 κόμβων***
4. ***Υποδίκτυο 9 κόμβων***



Σχήμα 7.3.3.3 Διαχωρισμός 36 κόμβων

Το κάθε υποδίκτυο λειτουργεί σαν ένα ξεχωριστό δίκτυο με την δική του μέση ταχύτητα και ο αλγόριθμος AFT επιδιώκει την βελτίωση της μέσης ταχύτητας του κάθε δικτύου ξεχωριστά. Η μέση ταχύτητα του κάθε υποδικτύου πλέον δεν λαμβάνεται από τον προσομοιωτή AIMSUN αλλά υπολογίζεται ανα δρόμο (section) κάθε δικτύου, η οποία αποτελέι και το κριτήριο του.

7.3.4.Επιλογή Μεταβλητών:

<u>Σταθερός και Μεταβαλλόμενος κύκλος</u>

Οι δύο κώδικες λειτουργούν με διαφορετικό τρόπο όσον αφορά τον υπολογισμό των πράσινων χρόνων των σηματοδοτών. Διαθέτουν διαφορετικό αριθμό μεταβλητών οι οποίες βελτιστοποιούν το κριτήριό μας. Στην περίπτωση του σταθερου κύκλου χρησιμοποιούμε μια λιγότερη μεταβλητή ανά κόμβο μιας και οι φάσεις αλληλοεξαρτώνται. Συγκεκριμένα ο αριθμός μεταβλητών κάθε περίπτωσης φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Κόμβοι\Αλγόριθμοι	Σταθερός Κύκλος	Μεταβαλλόμενος Κύκλος
4 κόμβοι	12 μεταβλητές	16 μεταβλητές
9 κόμβοι	27 μεταβλητές	36 μεταβλητές
16 κόμβοι	48 μεταβλητές	64 μεταβλητές
25 κόμβοι	75 μεταβλητές	100 μεταβλητές
36 κόμβοι	108 μεταβλητές	144 μεταβλητές

Πίνακας 7.3.4.1

Συνεπώς οι παραμέτροι ρύθμισης του αλγόριθμου AFT οι οποίες έχουν σχέση με τον αριθμό μεταβλητών είναι διαφορετικές για τις δύο περιπτώσεις, ενώ οι υπόλοιπες είναι ίδιες για να είναι δυνατή η σύγκριση των δύο αλγορίθμων.

Μεταβλητές που μεταβάλλονται στις δύο περιπτώσεις:

LG:

Η μεταβλητή lg όπως έχουμε αναφέρει αφορά τον αριθμό συναρτήσεων που δημιουργεί ο AFT για την απόδοση βαρών στις μεταβλητές που βελτιστοποιούν το κριτήριο που του έχει προσδοθεί. Μετά από αρκετές δοκιμές για την τιμή της μεταβλητής LG, καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι ο AFT συμπεριφέρεται καλύτερα αλλά και καταλήγει σε καλύτερα αποτελέσματα για τιμές κοντά στον αριθμό μεταβλητών που έχουμε σε κάθε περίπτωση. Επομένως η τιμή του LG που επιλέχθηκε για τους δύο αλγόριθμους είναι η ακόλουθη:

Κόμβοι\Αλγόριθμοι	Σταθερός Κύκλος (LG)	Μεταβαλλόμενος Κύκλος (LG)
4 κόμβοι	14	18
9 κόμβοι	29	38
16 κόμβοι	50	66
25 κόμβοι	77	102
36 κόμβοι	110	146

Πίνακας 7.3.4.2

<u>theta_lb,theta_ub:</u>

Στις δύο αυτές μεταβλητές που εκφράζουν τα ορία στα οποία θα κινούνται τα βάρη που θα δώσει ο AFT, έχουμε προσδώσει τις τιμές 0 και 4 σε όλα τα δίκτυα αλλά και στις δύο περιπτώσεις αλγορίθμων. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών τα βάρη δεν φθάνουν ποτέ στις τιμές των ορίων. Έχουν επιλεγεί επομένως με σκοπό ο AFT να έχει ελευθερία κινήσεων. Η διαφορά στους δύο αλγορίθμους είναι μόνο ο αριθμός των ορίων εφόσον έχουμε διαφορετικό αριθμό μεταβλητών.

Μεταβλητές που παραμένουν σταθερές και στις δύο περιπτώσεις:

<u>Nr_of_perturbations:</u>

Η μεταβλητή Nr_of_petrubations όπως αναφέραμε αφορά τον αριθμό των ΄΄διαταράξεων΄΄ που θα γίνουν γύρω από το βέλτιστο σημείο για να βρούμε κάποιο καλύτερο στην συγκεκριμένη επανάληψη. Η τιμή που έχουμε επιλέξει για τις δύο μεθόδους, αλλά και για όλα τα δίκτυα παραμένει σταθερή και είναι ίση με 50. Η τιμή 50 είναι αρκετή ούτως ώστε να έχουμε ΄΄διαταράξεις΄΄ γύρω από την βέλτιστη τιμή.

t_h:

Η μεταβλητή t_h επίσης παραμένει σταθερή σε όλες τις περιπτώσεις. Έχουμε επιλέξει την τιμή 100, πράγμα που σημαίνει ότι στα δίκτυα των 4,9 και 16 κόμβων στα οποία οι δοκιμές έχουν γίνει σε 60 προσομοιώσεις, ο αλγόριθμος AFT κατά την λειτουργία του έχει σαν θυμιτικό όλες τις προηγούμενες προσομοιώσεις που έχουν εκτελεστεί. Τα δίκτυα των 25 και 36 κόμβων δοκιμάστηκαν σε 120 προσομοιώσεις διότι παρατηρήθηκε ότι λόγω του μεγάλου πλήθους μεταβλητών χρειάζονται παρισσότερες επαναλλήψεις για να παρατηρηθεί βελτίωση.

Σε αυτές τις δύο περιπτώσεις ο AFT δεν ΄΄θυμάται΄΄ όλες τις προηγούμενες προσομοιώσεις σαν ιστορικά στοιχεία. Για παράδειγμα στην $120^{η}$ προσομοίωση, τα ιστορικά στοιχεία που ΄΄θυμάται΄΄ ο AFT είναι από την $21^{η}$ προσομοίωση και έπειτα.

Bound,bound_change:

Όταν ο αλγόριθμος AFT ξεκινάει να λειτουργεί δεν έχει κάποια ιστορίκη στιγμή που να τον οδηγεί προς κάποια κατεύθυνση για την δημιουργία του βάρους κάθε μεταβλητής. Συνεπώς οι πρώτες τιμές που θα δώσει στα βάρη για την αλλαγή των πράσινων χρόνων των φωτεινών σηματοδοτών έχουν μεγάλη τυχαιότητα και μπορεί να μας οδηγήσουν σε μη επιθυμιτά αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτό η επιλογή της τιμής της μεταβλητής bound που αφορά τα πρώτα όρια αλλαγής κάθε βάρους επιλέγεται να είναι μικρή. Η τιμή της μεταβλητής Bound_change που έχουμε επιλέξει είναι 0.1. Δηλαδή κάθε φορά που ενεργοποιείται αλλαγή των ορίων αυξάνουμε 10% το όριο των παραμέτρων ώστε να μπορούν να κινηθούν πιο ελεύθερα σε αλλαγές αφού η τυχαιότητα έπειτα από ένα πλήθος επαναλήψεων μειώνεται.

Συγκεκριμένα οι τιμές που έχουν επιλεγεί για τις δύο μεταβλητές είναι:

Κόμβοι\Μεταβλητές	Bound	Bound_change
4 κόμβοι	0.04	0.1
9 κόμβοι	0.04	0.1
16 κόμβοι	0.05	0.1
25 κόμβοι	0.04	0.1
36 κόμβοι	0.05	0.1

Πίνακας 7.3.4.3

alpha_0:

Η μεταβλητή alpha_0 που είναι το αρχικό μας alpha σε όλες τις περιπτώσεις έχει επιλεγεί η τιμη 2.

Αυτό σημαίνει ότι η μεταβλητή alpha θα αρχίσει να μειώνεται ούτε πολύ γρήγορα ούτε πολύ αργά.

alpha_lower:

Η τιμή της μεταβλητής alpha_lower που έχει επιλεγεί είναι 0.01 (1%) . Με αυτή την τιμή πετυχαίνουμε την σύγκλιση της μέσης ταχύτητας απο έναν αριθμό επαναλήψεων και έπειτα προς μια τιμή, εφόσον όσο μειώνεται το alpha αναζητά τιμές τόσο πιο κοντά στην βέλτιστη τιμη. Το alpha δεν φθάνει την ελάχιστη τιμή στις προσομοιώσεις που έχουμε πραγματοποιήσει.

Reset:

Σε όλες τις περιπτώσεις έχει επιλέγει να μην χρησιμοποιηθεί η μεταβλητή reset. Με την προσθήκη των τριών μεταβλητών bound, bound_change και alpha_lower η χρήση της μεταβλητής reset είναι απαραίτητη σε λίγες περιπτώσεις. Στην πραγματικότητα όποτε και αν δοκιμάστηκε δεν κατάφερε να οδηγήσει σε καλύτερες τιμές παραμέτρων. Απλά μεγάλωσε η μεταβλητή alpha, δημιουργήθηκαν αχρείαστες αναταραχές στα αποτελέσματά μας και ο αλγόρθιθμος έκανε πάλι σύγκλιση στις ίδιες τιμές.

Διαχωρισμός Σταθερού Κύκλου

Με βάση τον τρόπο επιλογής των προηγούμενων μεταβλητών, οι μεταβλητές για τα δίκτυα των 16,25 και 36 κόμβων που επιλέξαμε είναι οι ακόλουθες:

- **Δίκτυο 16 Κόμβων:**

1^{o} Υποδίκτυο 8 κόμβων:

Μεταβλητές	Τιμές Μεταβλητών
Αριθμός Μεταβλητών	24
L_G	26
Nr_of_perturbations	50
theta_lb	0
theta_ub	4
t_h	100
alpha_0	2
alpha_lower	0.01
Bound	0.04
bound_change	0.1
Reset	χωρίς reset

Πίνακας 7.3.4.4

2^o Υποδίκτυο 8 κόμβων:

Μεταβλητές	**Τιμές Μεταβλητών**
Αριθμός Μεταβλητών	24
L_G	26
Nr_of_perturbations	50
theta_lb	0
theta_ub	4
t_h	100
alpha_0	2
alpha_lower	0.01
Bound	0.04
bound_change	0.1
Reset	χωρίς reset

Πίνακας 7.3.4.5

Δίκτυο 25 Κόμβων:

1^o Υποδίκτυο 6 κόμβων:

Μεταβλητές	Τιμές Μεταβλητών
Αριθμός Μεταβλητών	18
L_G	20
Nr_of_perturbations	50
theta_lb	0
theta_ub	4
t_h	100
alpha_0	2
alpha_lower	0.01
Bound	0.04
bound_change	0.1
Reset	χωρίς reset

Πίνακας 7.3.4.6

2^o Υποδίκτυο 9 κόμβων:

Μεταβλητές	
Αριθμός Μεταβλητών	27
L_G	29
Nr_of_perturbations	50
theta_lb	0
theta_ub	4
t_h	100
alpha_0	2
alpha_lower	0.01
bound	0.04
bound_change	0.1
reset	χωρίς reset

Πίνακας 7.3.4.7

3^{o} Υποδίκτυο 10 κόμβων:

Μεταβλητές	
Αριθμός Μεταβλητών	30
L_G	32
Nr_of_perturbations	50
theta_lb	0
theta_ub	4
t_h	100
alpha_0	2
alpha_lower	0.01
Bound	0.04
bound_change	0.1
Reset	χωρίς reset

Πίνακας 7.3.4.8

Δίκτυο 36 Κόμβων:

Σε αυτήν την περίπτωση δικτύου έχουμε 4 υποδίκτυα των 9 κόμβων όπου σε όλα έχουν χρησιμοποιηθεί οι ίδιες μεταβλητές. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι ακόλουθες.

1ο, 2ο, 3ο, 4ο Υποδίκτυο 9 κόμβων:

Μεταβλητές	
Αριθμός Μεταβλητών	27
L_G	29
Nr_of_perturbations	50
theta_lb	0
theta_ub	4
t_h	100
alpha_0	2
alpha_lower	0.01
Bound	0.04
bound_change	0.1
Reset	χωρίς reset

Πίνακας 7.3.4.9

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8:Αποτελέσματα Και Σχολιασμός

8.1.Αποτελέσματα Δοκιμών Αλγόριθμου Adaptive Fine-Tuning(AFT):

8.1.1.Εισαγωγή:

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του αλγόριθμου AFT στα δίκτυα των 4,9,16,25 και 36 κόμβων μέσω των αλγόριθμων σταθερού και μεταβαλλόμενου κύκλου, αλλά και από τον διαχωρισμό των δικτύων με σταθερό κύκλο. Ο αρχικός χρόνος κύκλου που έχει επιλεγεί για όλες τις περιπτώσεις είναι 90 δευτερόλεπτα με 4 ενδιάμεσες φάσεις (interphases) των 2 δευτερολέπτων.

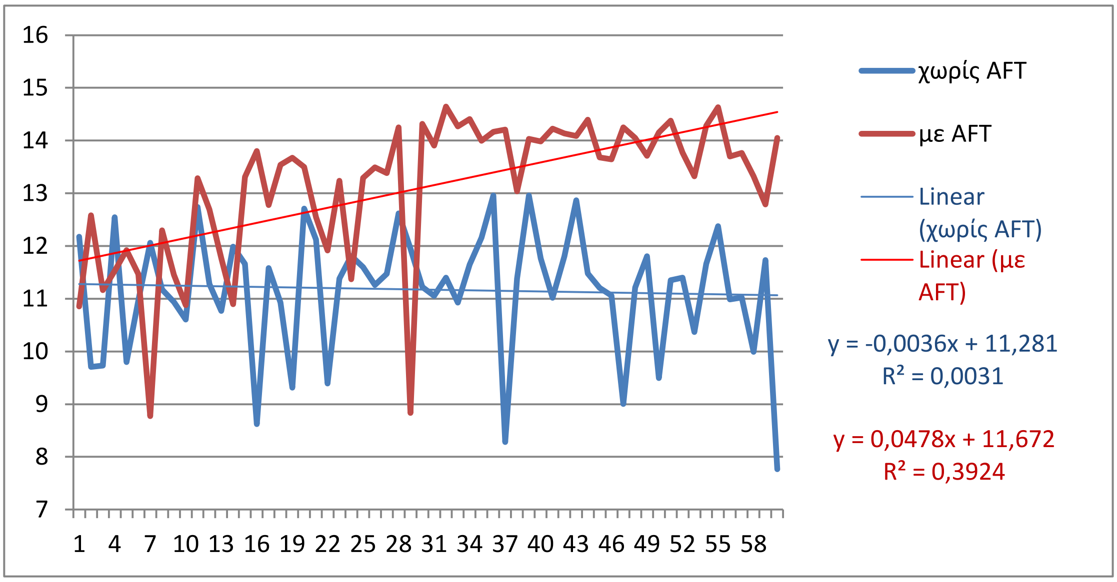
Τα αποτελέσματα των 4,9 και 16 κόμβων προέκυψαν από 60 προσομοιώσεις, ενώ των 25 και 36 κόμβων από 120 προσομοιώσεις. Αυτό διότι στα μεγαλύτερα δίκτυα παρατηρείται ότι ο απαιτούμενος χρόνος για την επίτευξη βελτίωσης είναι μεγαλύτερος. Οι δοκιμές για τον διαχωρισμό του σταθερού σταθερού κύκλου έγιναν για 60 προσομοιώσεις.

8.1.2.Αλγόριθμος Σταθερού Κύκλου:

- **<u>4 κόμβοι</u>**

Μέση Ταχύτητα Δικτύου:

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η βελτίωση που έκανε ο αλγόριθμος AFT στη μέση ταχύτητα του δικτύου των τεσσάρων κόμβων για 60 προσομοιώσεις.



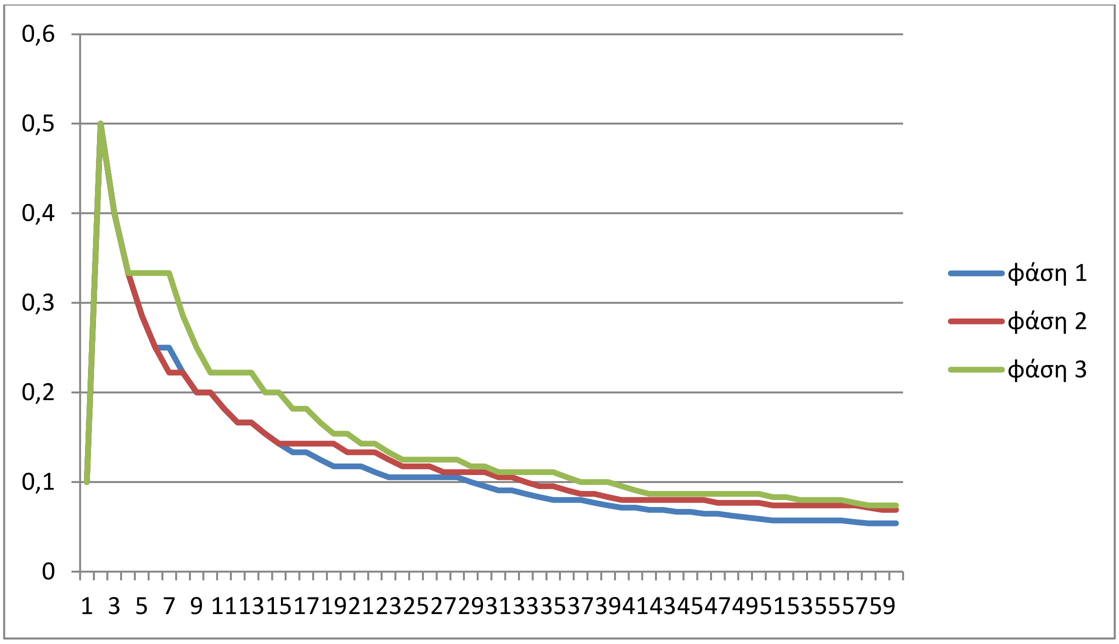
Σχήμα 8.1.2.1

Παρατηρείται ότι η γραμμή τάσης που προέκυψε από την εφαρμογή του αλγόριθμου AFT διατηρείται σταθερά πάνω από την γραμμή της ταχύτητας του δικτύου πριν την εφαρμογή του. Προκύπτουν 2 χαμηλές τιμές οι οποίες όμως δεν είναι χαμηλότερες από την αρχική ταχύτητα.

Ο μέσος όρος της μέσης ταχύτητας του δικτύου αυξήθηκε κατά 17,5%, αλλά και την μέγιστη ταχύτητα του δικτύου κατά 13%. Η τιμή της μέγιστης ταχύτητας βρίσκεται στην 32^{η} επανάληψη και είναι 14,6 km/h .

alpha:

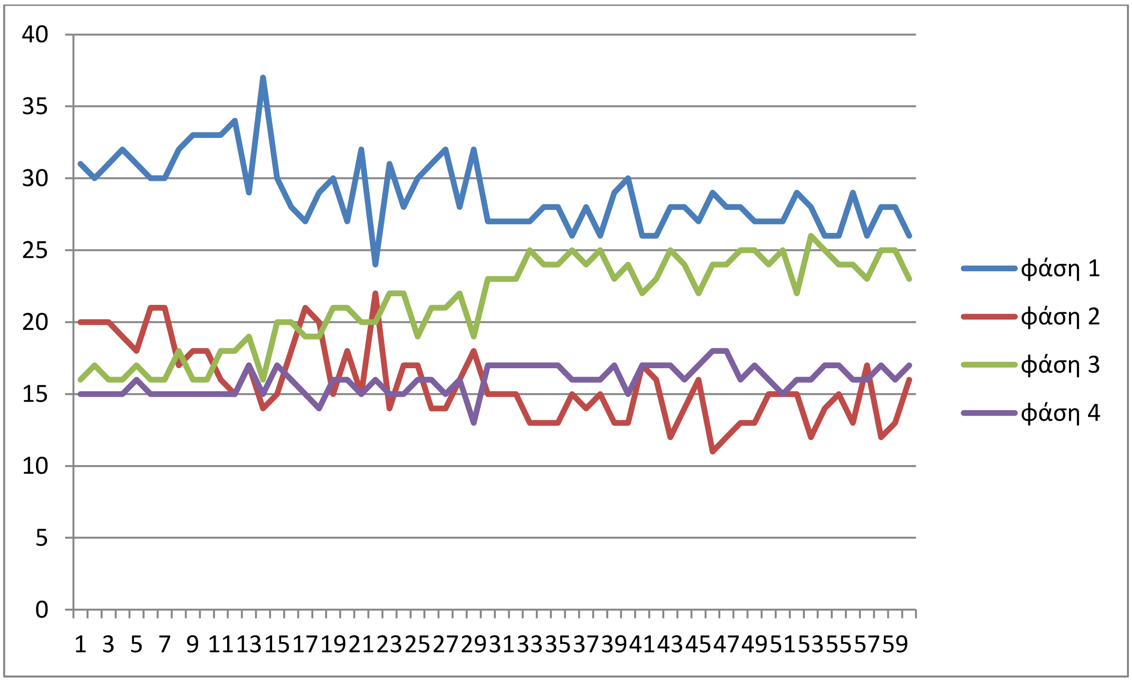
Παρακάτω βλέπουμε την κίνηση του alpha στον κόμβο που δημιουργεί το μεγαλύτερο πρόβλημα στο δίκτυο. Η φάση 3 είναι αυτή που αντιμετοπίζει το μεγαλύτερο πρόβλημα.



Σχήμα 8.1.2.2

Πράσινοι Χρόνοι:

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η μεταβολή των πράσινων χρόνων στον κόμβο που δημιουργεί το μεγαλύτερο πρόβλημα στο δίκτυο.



Σχήμα 8.1.2.3

Η 3η φάση που δημιουργούνταν το μεγαλύτερο πρόβλημα έχει υποστεί την μεγαλύτερη μεταβολή. Από την αρχική της τιμή (16 δευτερόλεπτα) ο AFT αυξάνει την τιμή της και καταλήγει να κινείται μεταξύ των 22 και 26 δευτερολέπτων.

Η φάση 1 και 2 μειώνονται σε μικρότερο βαθμό, ενώ η φάση 4 δέχεται την μικρότερη αλλαγή ακολουθώντας αυξητική τάση.

Παρακάτω απεικονίζονται οι αρχικοί πράσινοι χρόνοι του κόμβου και οι χρόνοι για τους οποίους βρέθηκε η καλύτερη τιμή της μέσης ταχύτητας του δικτύου:

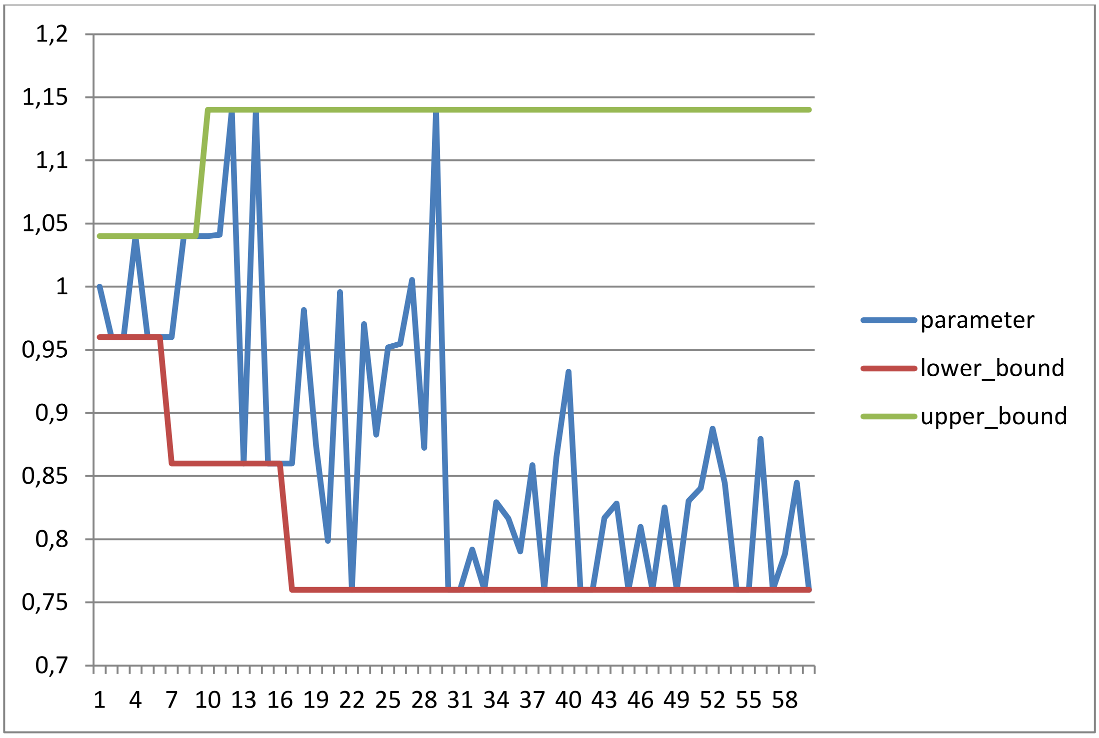
	φάση 1	φάση 2	φάση 3	φάση 4
Αρχικοί χρόνοι (δευτερόλεπτα)	31	20	16	15
Καλύτεροι χρόνοι (δευτερόλεπτα)	27	15	23	17

Πίνακας 8.1.2.4

Parameters-Bounds:

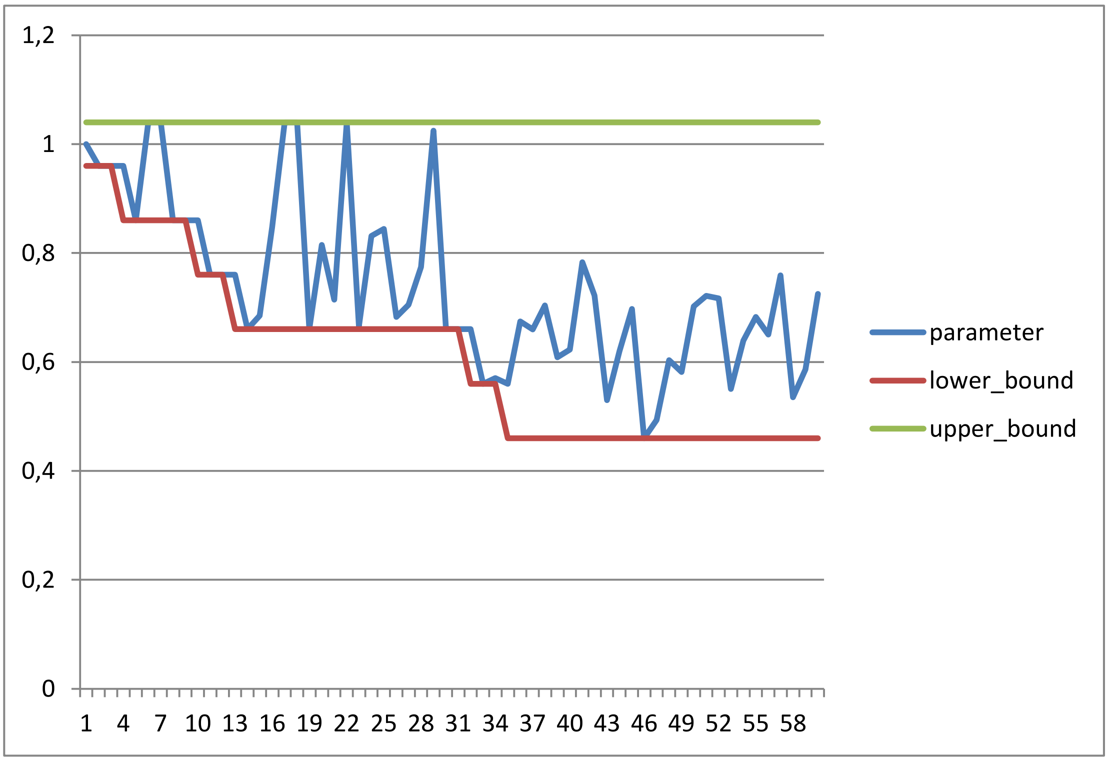
Η μεταβολή των παραμέτρων σε συνδιασμό με τη μεταβολή των άνω και κάτω ορίων για κάθε φάση.

<u>1η φαση:</u>



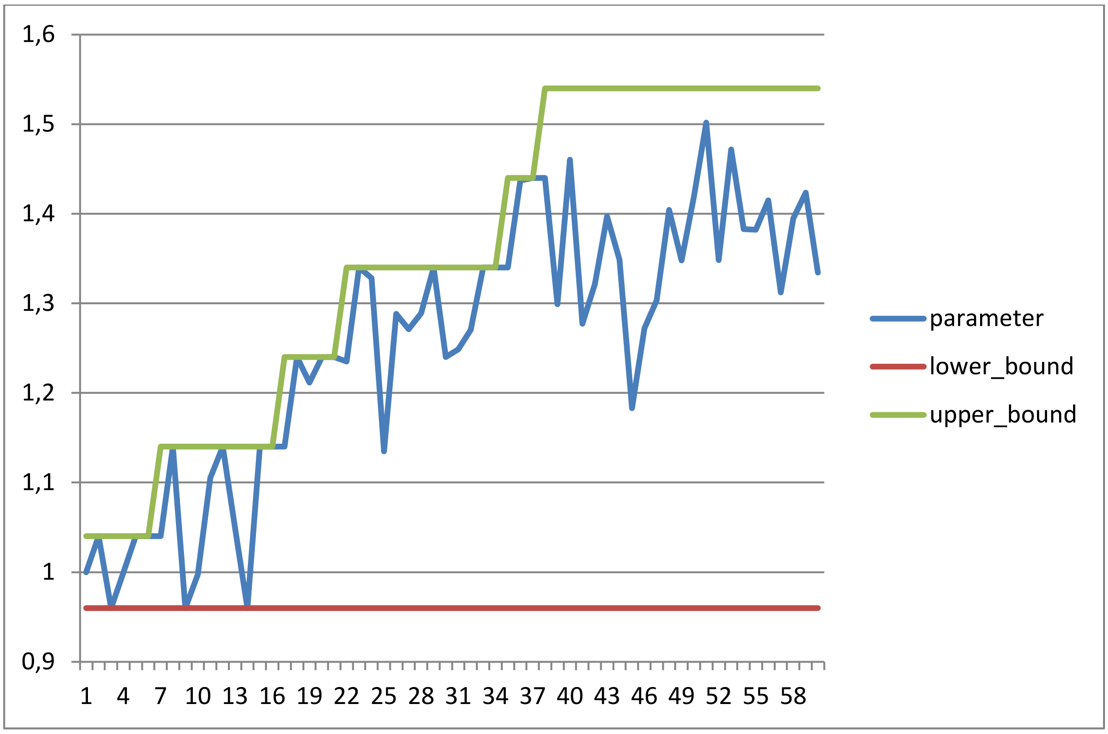
Σχήμα 8.1.2.5

<u>2η φαση:</u>



Σχήμα 8.1.2.6

3η φαση:

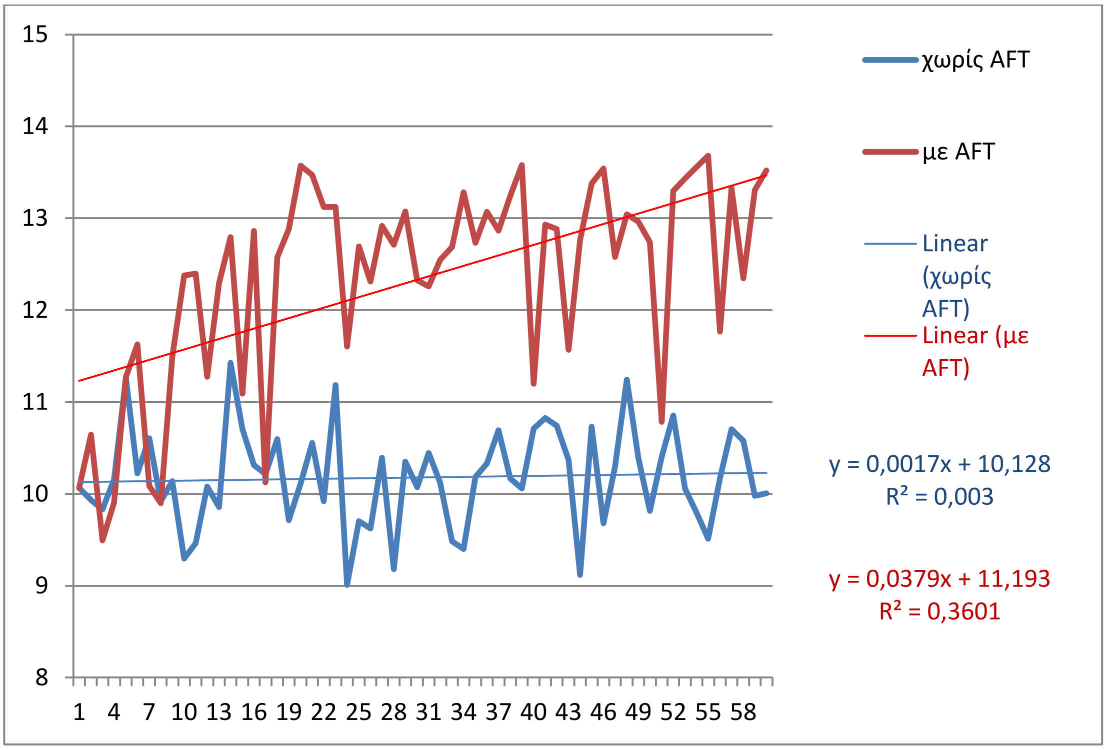


Σχήμα 8.1.2.7

9 κόμβοι

Μέση Ταχύτητα Δικτύου:

Η βελτίωση του δικτύου των 9 κόμβων μετά την εφαρμογή του αλγόριθμου AFT σε 60 προσομοιώσεις.



Σχήμα 8.1.2.8

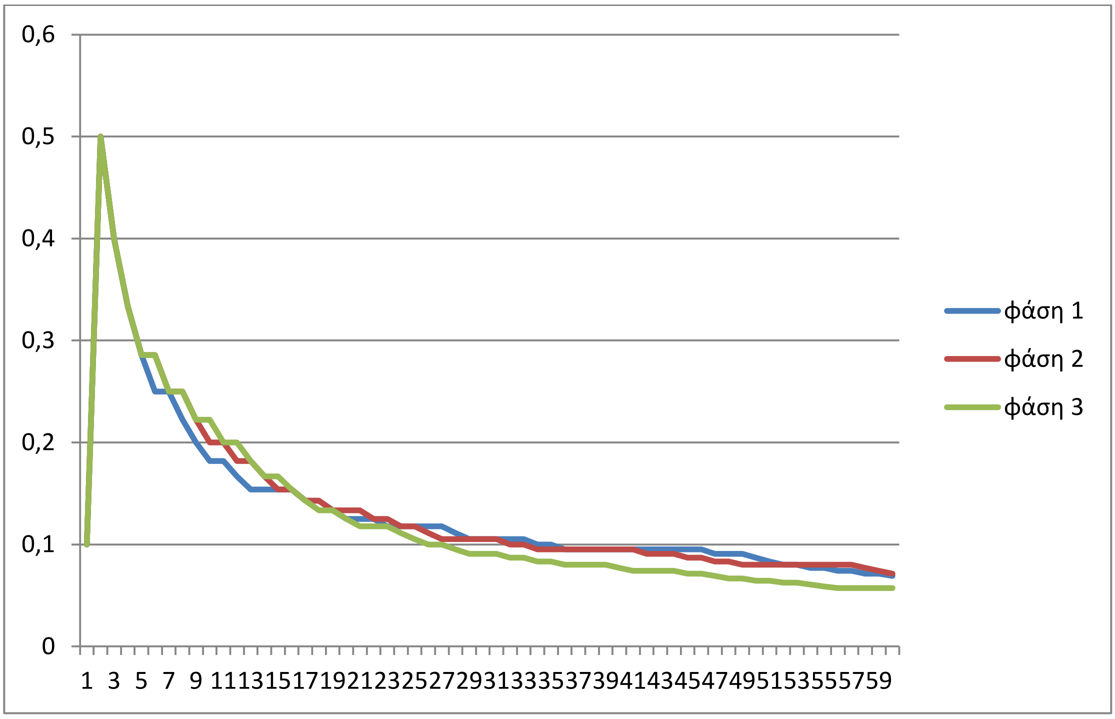
Η γραμμή τάσης που προκύπτει από την εφαρμογή του αλγόριθμου AFT παραμένει σταθερά πάνω από την γραμμή που προέκυψε χωρίς την εφαρμογή του.

Το ποσοστό αύξησης του μέσου όρου της ταχύτητας του δικτύου έχει τιμή 21,3%, ενώ της μέγιστης ταχύτητας 19,7%. Στην μέγιστη ταχύτητα ο AFT καταλήγει στην 55η επανάληψη με τιμή 13,7 km/h .

.

alpha:

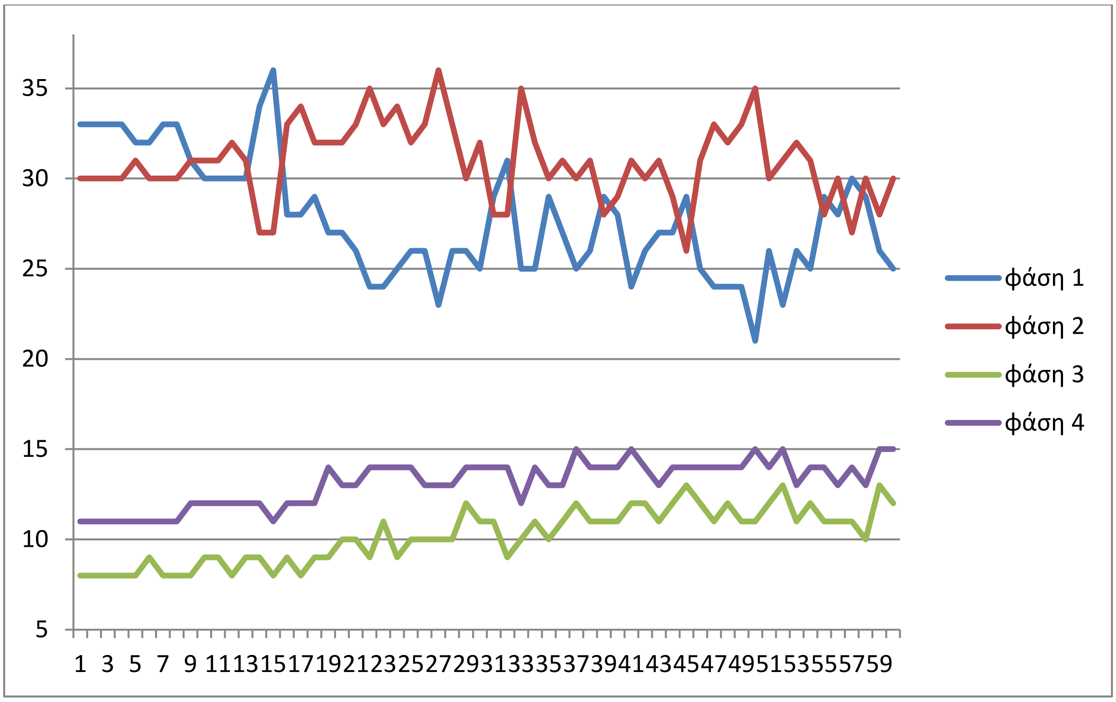
Η κίνηση του alpha στον κόμβο που δημιουργείται το μεγαλύτερο πρόβλημα στο δίκτυο. Η φάση 3 είναι αυτή που αντιμετοπίζει το μεγαλύτερο πρόβλημα.



Σχήμα 8.1.2.9

Πράσινοι Χρόνοι:

Η μεταβολή των πράσινων χρόνων για τον κόμβο με το μεγαλύτερο πρόβλημα.



Σχήμα 8.1.2.10

Σε αυτήν την περίπτωση δεν ξεχωρίζει κάποια φάση από τις υπόλοιπες για την μεταβολή της. Οι φάσεις 3 και 4 ακολουθούν σταθερή αυξητική πορεία, ενώ η φάση 1 μειώνεται με την πάροδο των προσομοιώσεων.

Η φάση 2 φαίνεται να κινείται σε μεγαλύτερο εύρος τιμών χωρίς η πορεία της να είναι ξεκάθαρη.

Οι αρχικοί πράσινοι χρόνοι του κόμβου και οι χρόνοι για τους οποίους βρέθηκε η καλύτερη τιμή της μέσης ταχύτητας του δικτύου:

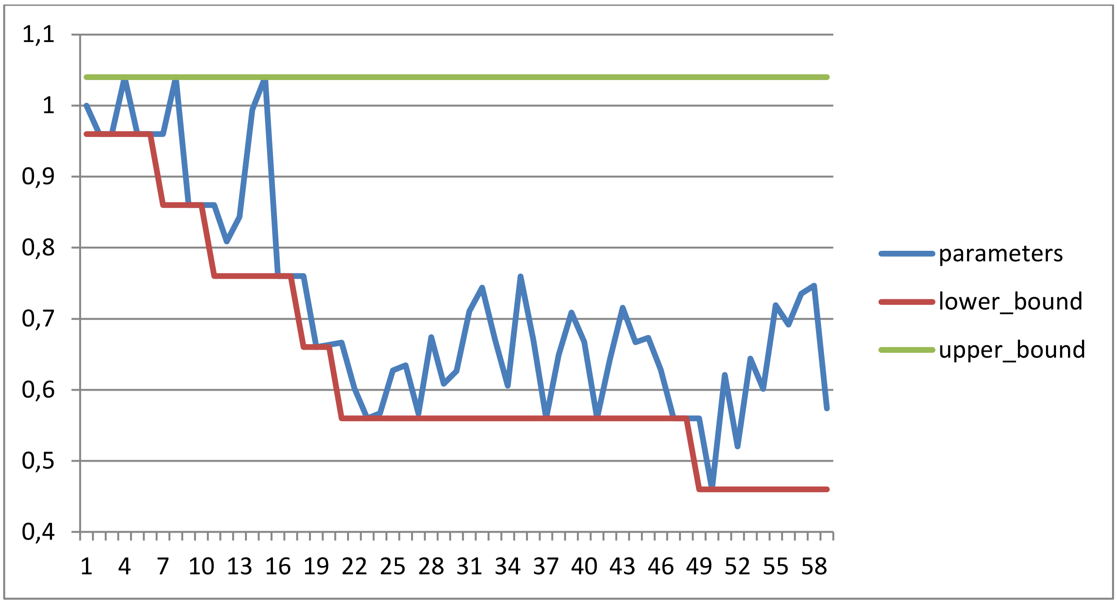
	φάση 1	φάση 2	φάση 3	φάση 4
Αρχικοί χρόνοι (δευτερόλεπτα)	33	30	8	11
Καλύτεροι χρόνοι (δευτερόλεπτα)	29	28	11	14

Πίνακας 8.1.2.11

Parameters-Bounds:

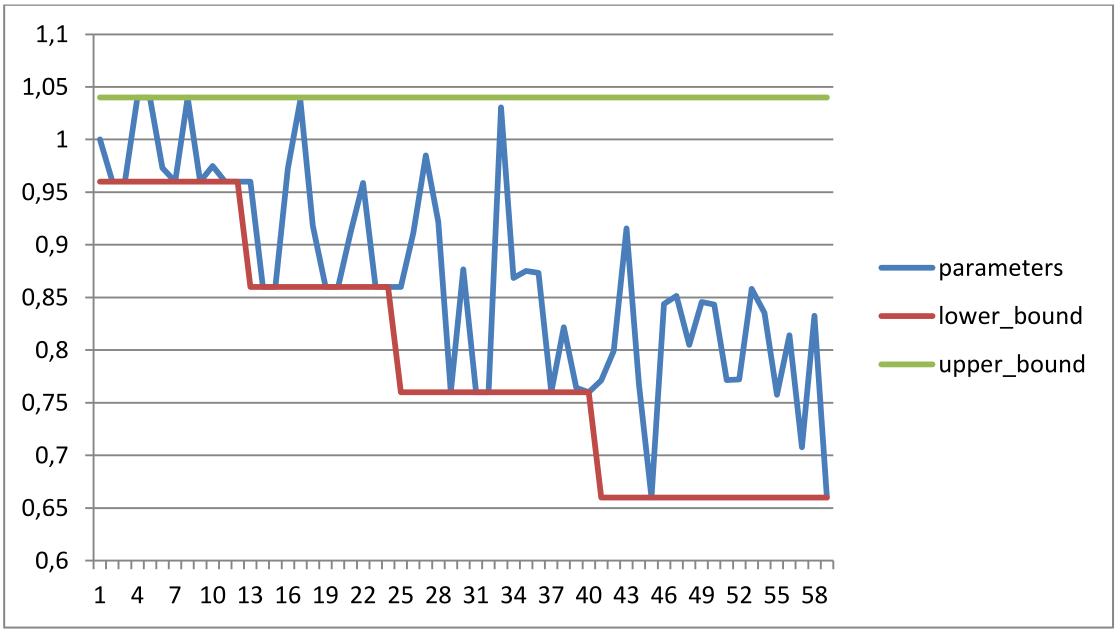
Η μεταβολή των παραμέτρων σε συνδιασμό με τη μεταβολή των άνω και κάτω ορίων για κάθε φάση φαίνεται στα παρακάτω γραφήματα:

<u>1η φαση:</u>



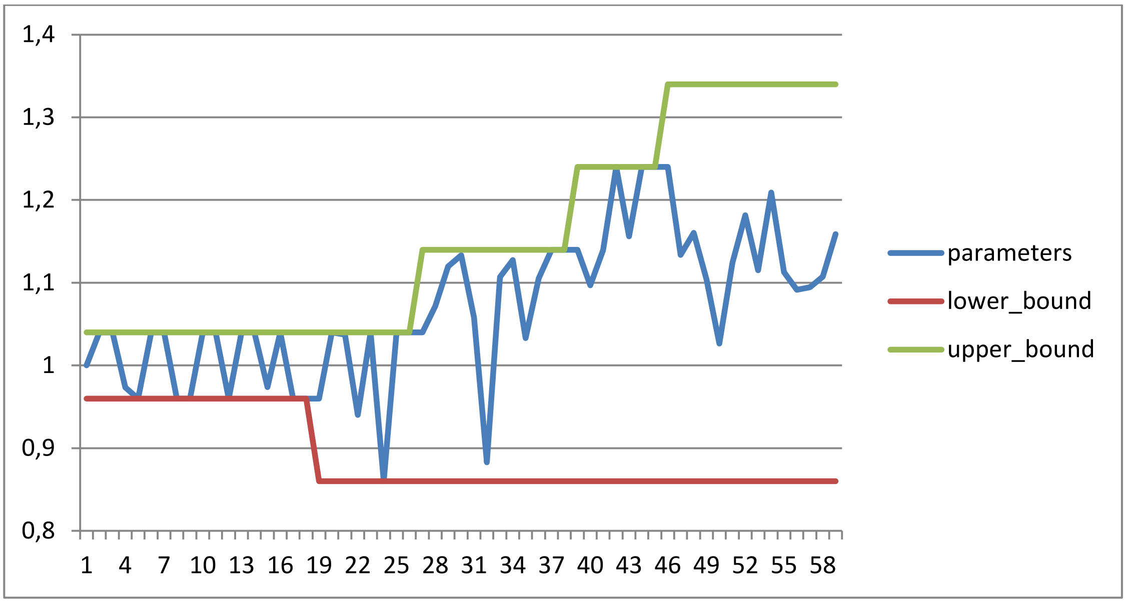
Σχήμα 8.1.2.12

<u>2η φαση:</u>



Σχήμα 8.1.2.13

<u>3η φαση:</u>

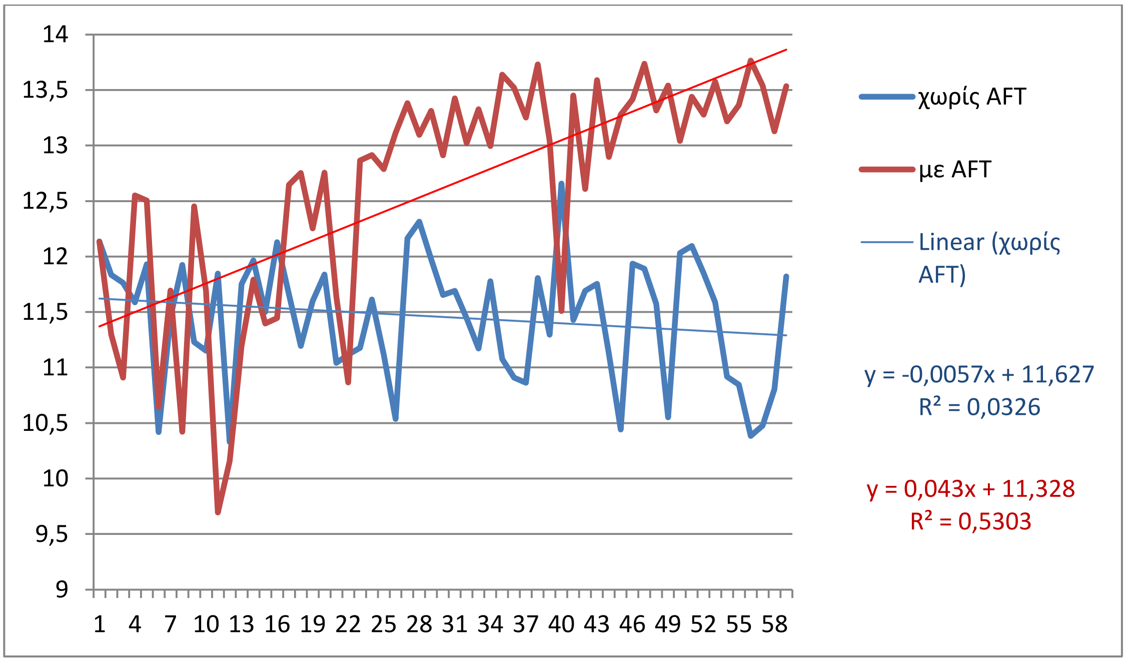


Σχήμα 8.1.2.14

<u>16 κόμβοι</u>

Μέση Ταχύτητα Δικτύου:

Η βελτίωση της μέσης ταχύτητας του δικτύου των 16 κόμβων μετά την εφαρμογή του αλγόριθμου AFT σε 60 προσομοιώσεις.



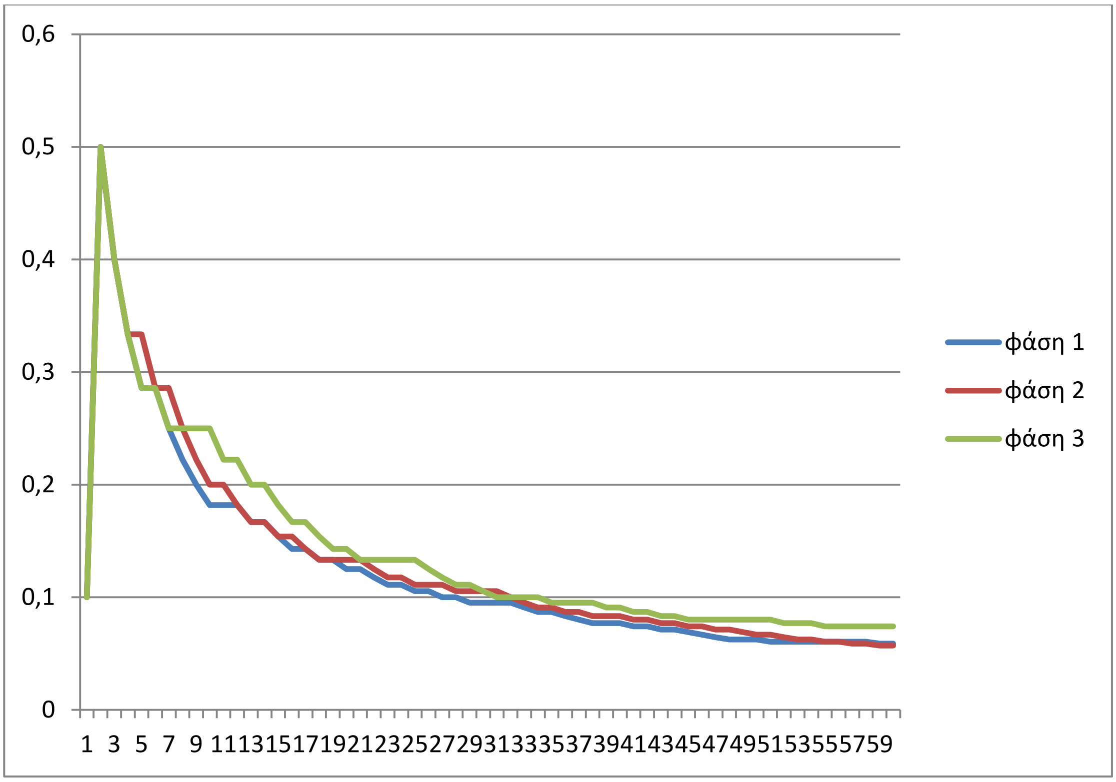
Σχήμα 8.1.2.15

Παρατηρείται ότι η γραμμή τασης από την εφαρμογή του αλγόριθμου AFT είναι για μικρό διάστημα κάτω από την γραμμή που προέκυψε χωρίς την εφαρμογή του, παρουσιάζοντας και μια τιμή χειρότερη από τις τιμές της αρχικής μέσης ταχύτητας του δικτύου, στην συνέχεια παραμένει σταθερά πάνω από την αρχική γραμμή τάσης της ταχύτητας.

Το ποσοστό αύξησης του μέσου όρου της ταχύτητας είναι 10,2%, ενώ της μέγιστης ταχύτητας 8,8%. Η μέγιστη ταχύτητα επιτυγχάνεται στην 56η επανάληψη και έχει τιμή 13,8 km/h .

alpha:

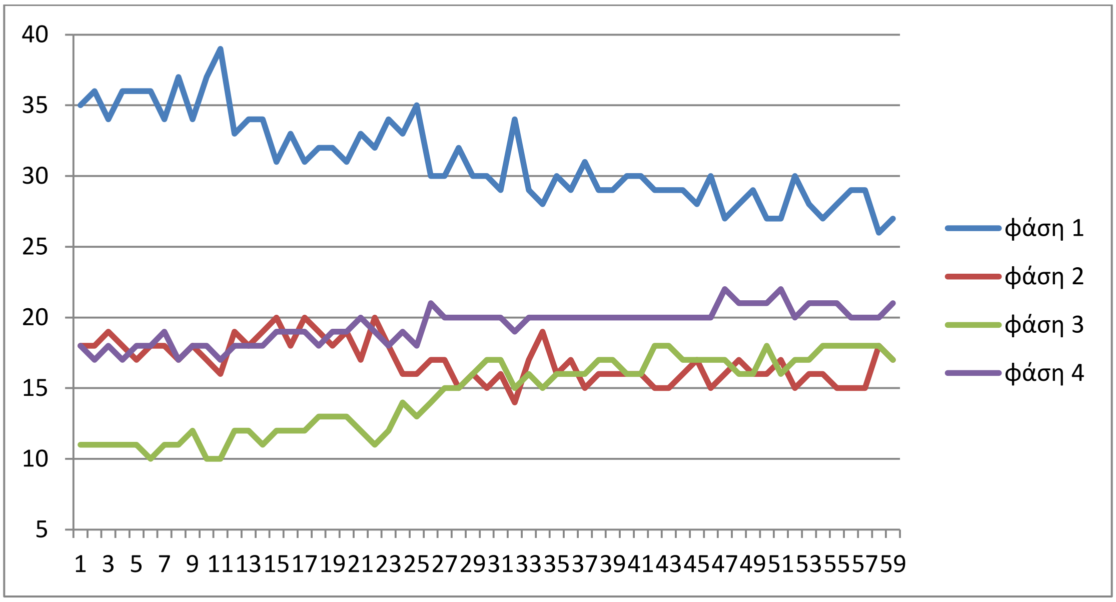
Η μεταβολή του alpha στον κόμβο που εμφανίζεται το μεγαλύτερο πρόβλημα στο δίκτυο. Η 3η φάση είναι αυτή που αντιμετοπίζει το μεγαλύτερο πρόβλημα.



Σχήμα 8.1.2.16

Πράσινοι Χρόνοι:

Η μεταβολή των πράσινων χρόνων στον κόμβο που δημιουργείται το μεγαλύτερο πρόβλημα.



Σχήμα 8.1.2.17

Μεγαλύτερη μεταβολή έχουν υποστεί οι φάσεις 1 και 3 του κόμβου. Η φάση 1 μειώνεται σε μεγάλο βαθμό με το πέρας των επαναλλήψεων, ενώ η φαση 3 που αντιμετόπιζε και το μεγαλύτερο πρόβλημα αυξάνεται αισθητά.

Στις φάσεις 2 και 4 παρατηρείται μείωση και αύξηση αντίστοιχα χωρίς να υποβάλλονται σε μεγάλες μεταβολές.

Οι αρχικοί πράσινοι χρόνοι του κόμβου και οι χρόνοι για τους οποίους βρέθηκε η καλύτερη τιμή της μέσης ταχύτητας του δικτύου:

	φάση 1	φάση 2	φάση 3	φάση 4
Αρχικοί χρόνοι (δευτερόλεπτα)	35	18	11	18
Καλύτεροι χρόνοι (δευτερόλεπτα)	29	15	18	20

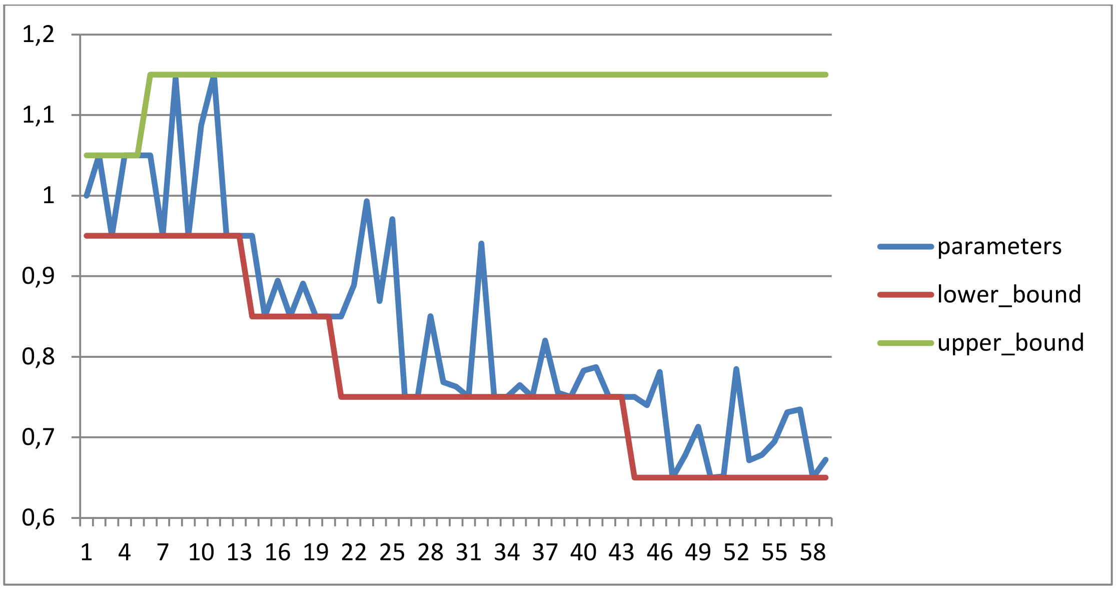
Πίνακας 8.1.2.18

Παρατηρούμε ότι η $3^η$ φάση έχει υποστεί πάλι την μεγαλύτερη μεταβολή.

Parameters-Bounds:

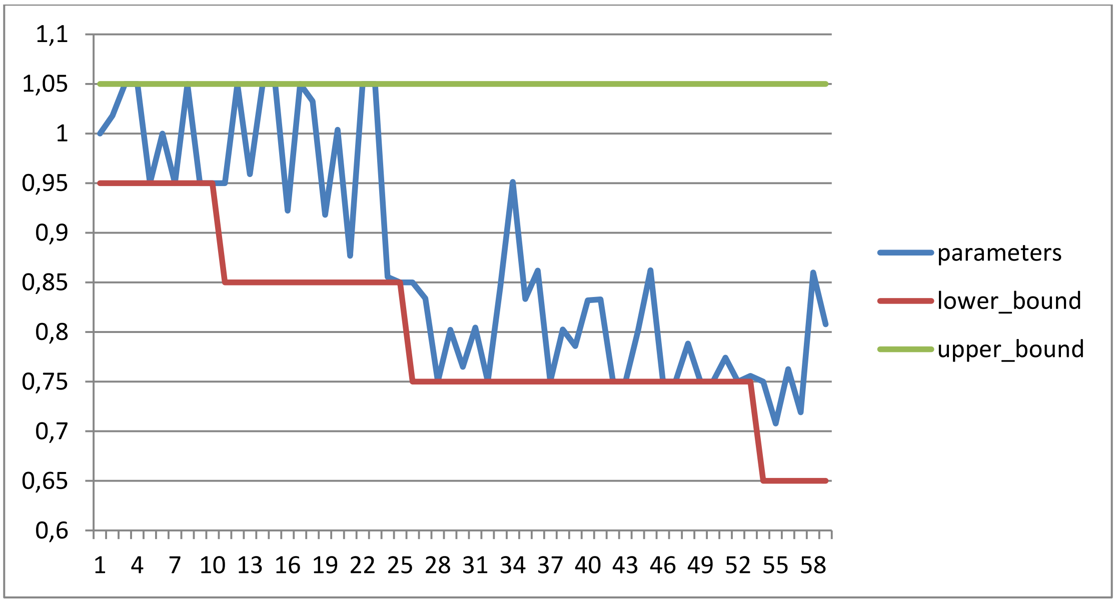
Η μεταβολή των παραμέτρων σε συνδιασμό με τη μεταβολή των άνω και κάτω ορίων για κάθε φάση.

$1^η$ φαση:



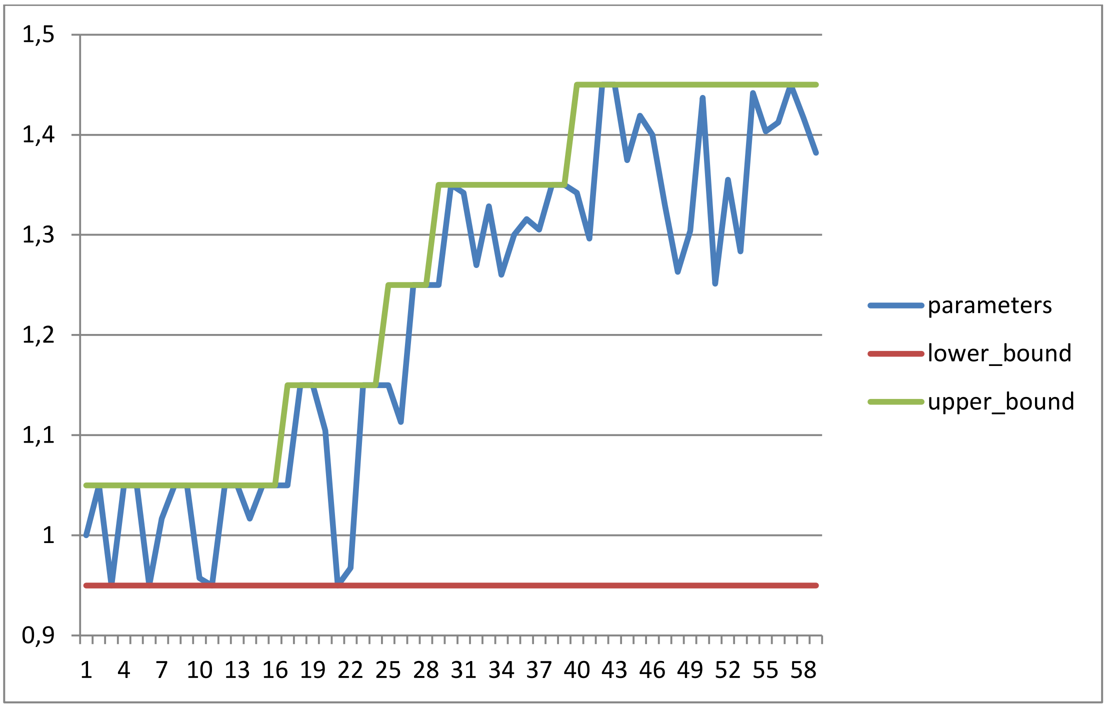
Σχήμα 8.1.2.19

$2^η$ φαση:



Σχήμα 8.1.2.20

3^{η} φαση:

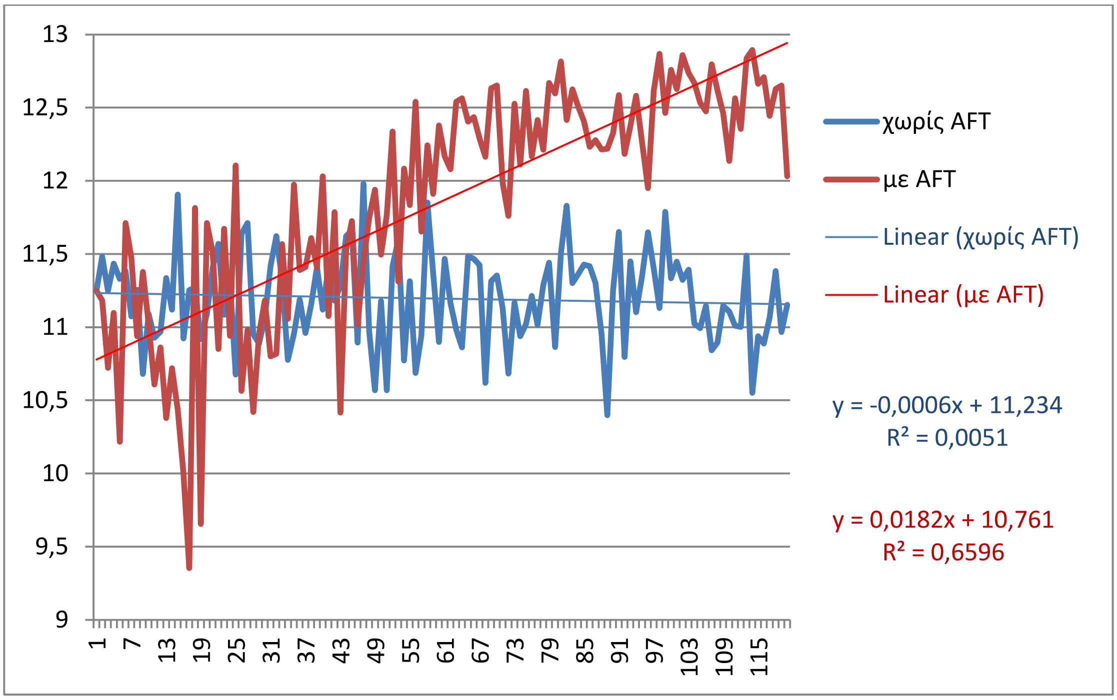


Σχήμα 8.1.2.21

25 κόμβοι

Μέση Ταχύτητα Δικτύου:

Η βελτίωση της μέσης ταχύτητας του δικτύου των 25 κόμβων μετά την εφαρμογή του αλγόριθμου AFT σε 120 προσομοιώσεις.



Σχήμα 8.1.2.22

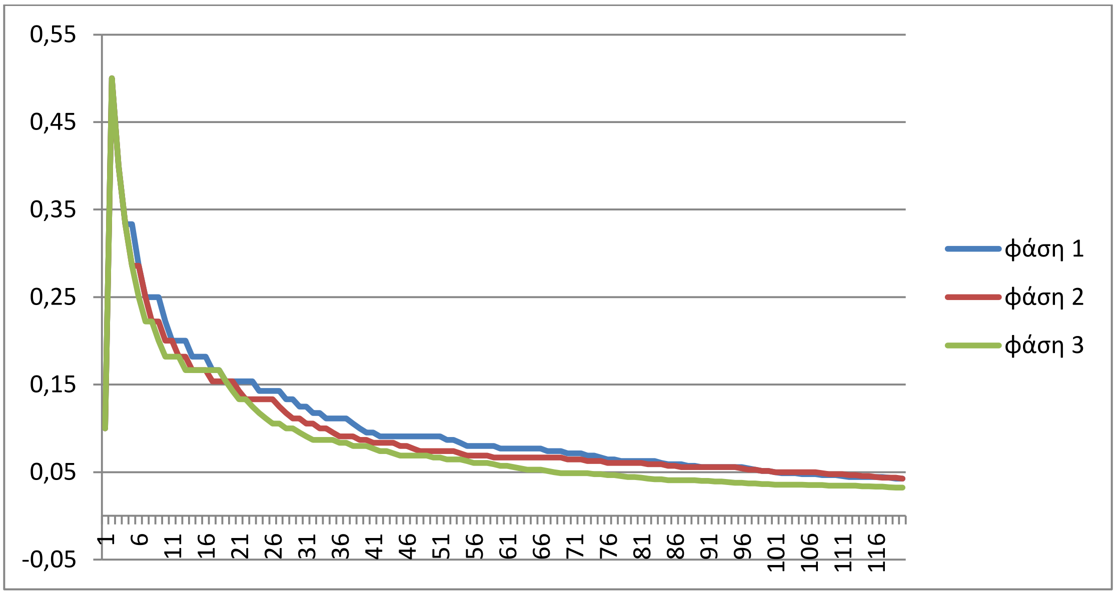
Η γραμμή τάσης που προκύπτει από την εφαρμογή του αλγόριθμου AFT είναι κάτω από την αρχική στις πρώτες προσομοιώσεις, παρουσιάζοντας μερικές χειρότερες τιμές ταχύτητας από αυτές της αρχικής. Στη συνέχεια παραμένει σταθερά πάνω από την αρχική καταλήγοντας σε καλύτερες τιμές.

Το ποσοστό αύξησης του μέσου όρου της ταχύτητας του δικτύου είναι 6%, ενώ της μέγιστης ταχύτητας 7,6%. Η μέγιστη ταχύτητα επιτυγχάνεται στην 114η επανάληψη και έχει τιμή 12,9 km/h .

.

alpha:

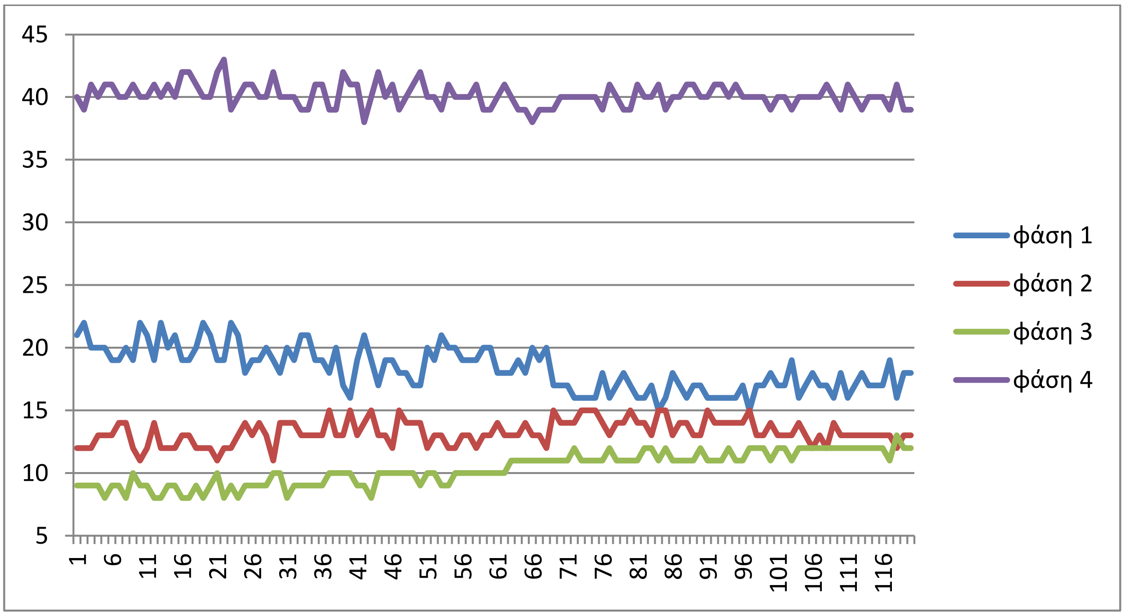
Η μεταβολή του alpha στον κόμβο που εμφανίζεται το μεγαλύτερο πρόβλημα στο δίκτυο. Η 3η φάση είναι αυτή που αντιμετοπίζει το μεγαλύτερο πρόβλημα.



Σχήμα 8.1.2.23

Πράσινοι Χρόνοι:

Η μεταβολή των πράσινων χρόνων στον κόμβο που δημιουργείται το μεγαλύτερο πρόβλημα.



Σχήμα 8.1.2.24

Οι μεταβολές σε αυτήν την περίπτωση δεν είναι πολυ μεγάλες. Η $2^η$ και $3^η$ φάση αυξάνονται σταδιακά, ενώ η $1^η$ φάση μειώνεται. Η $4^η$ φάση παραμένει σχεδόν σταθερή.

Οι αρχικοί πράσινοι χρόνοι του κόμβου και οι χρόνοι για τους οποίους βρέθηκε η καλύτερη τιμή της μέσης ταχύτητας του δικτύου:

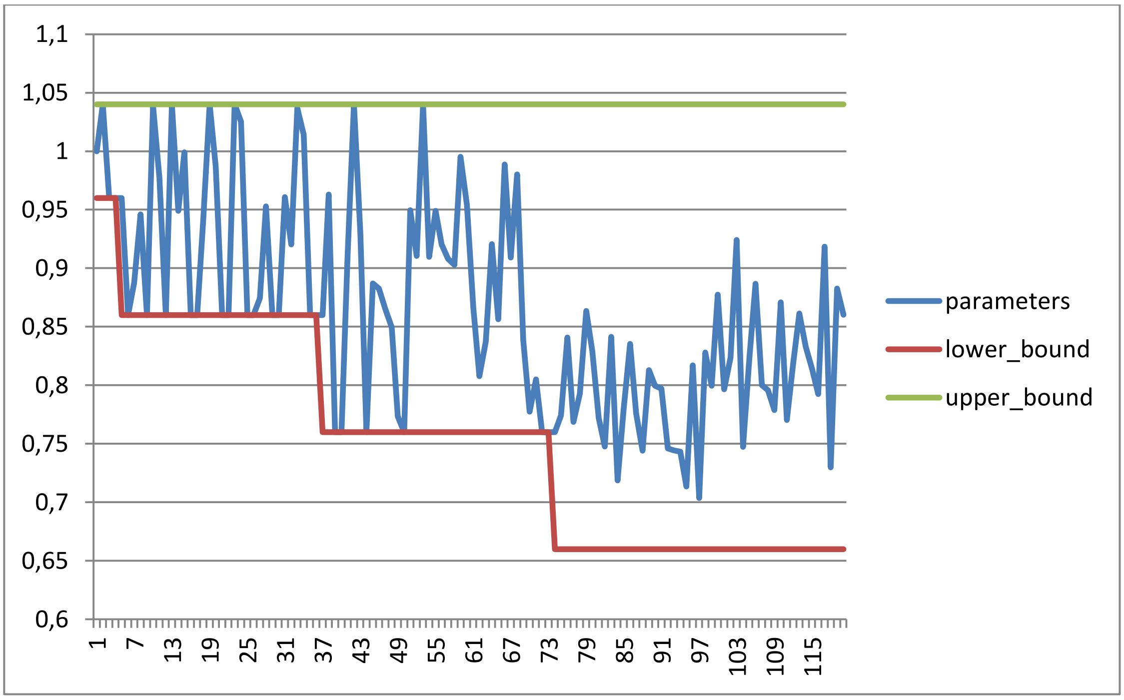
	φάση 1	φάση 2	φάση 3	φάση 4
Αρχικοί χρόνοι (δευτερόλεπτα)	21	12	9	40
Καλύτεροι χρόνοι (δευτερόλεπτα)	17	13	12	40

Πίνακας 8.1.2.25

Parameters-Bounds:

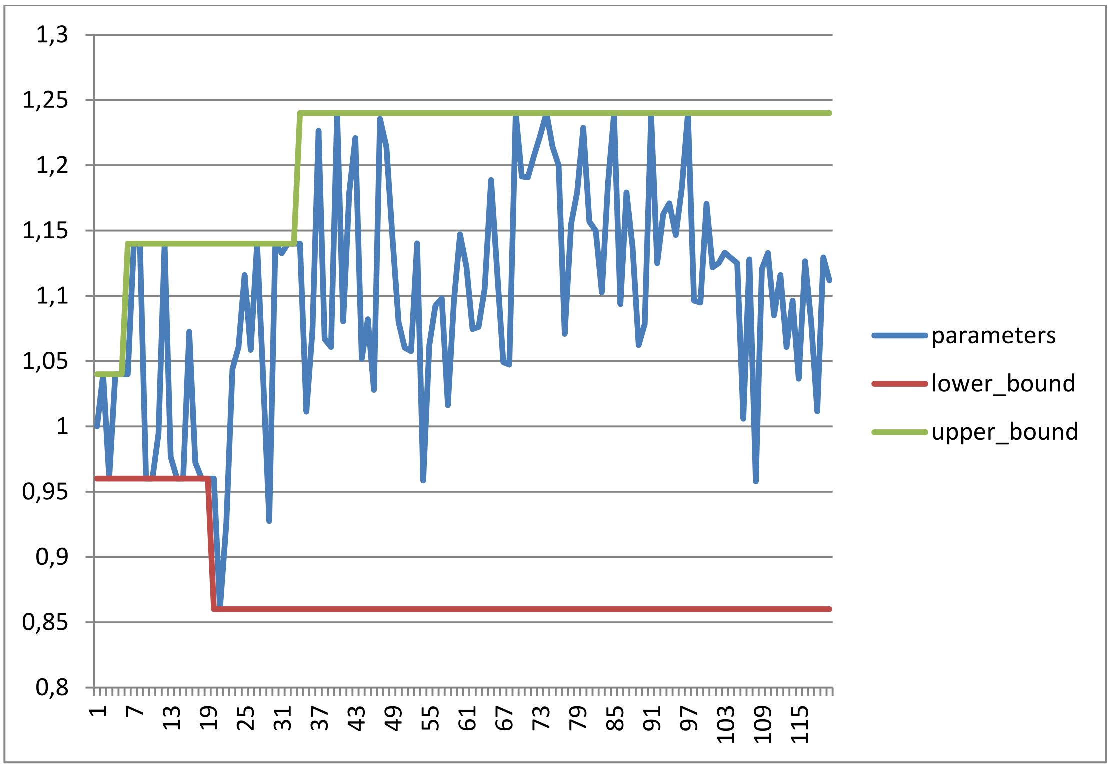
Η μεταβολή των παραμέτρων σε συνδιασμό με τη μεταβολή των άνω και κάτω ορίων για κάθε φάση.

<u>$1^η$ φαση:</u>



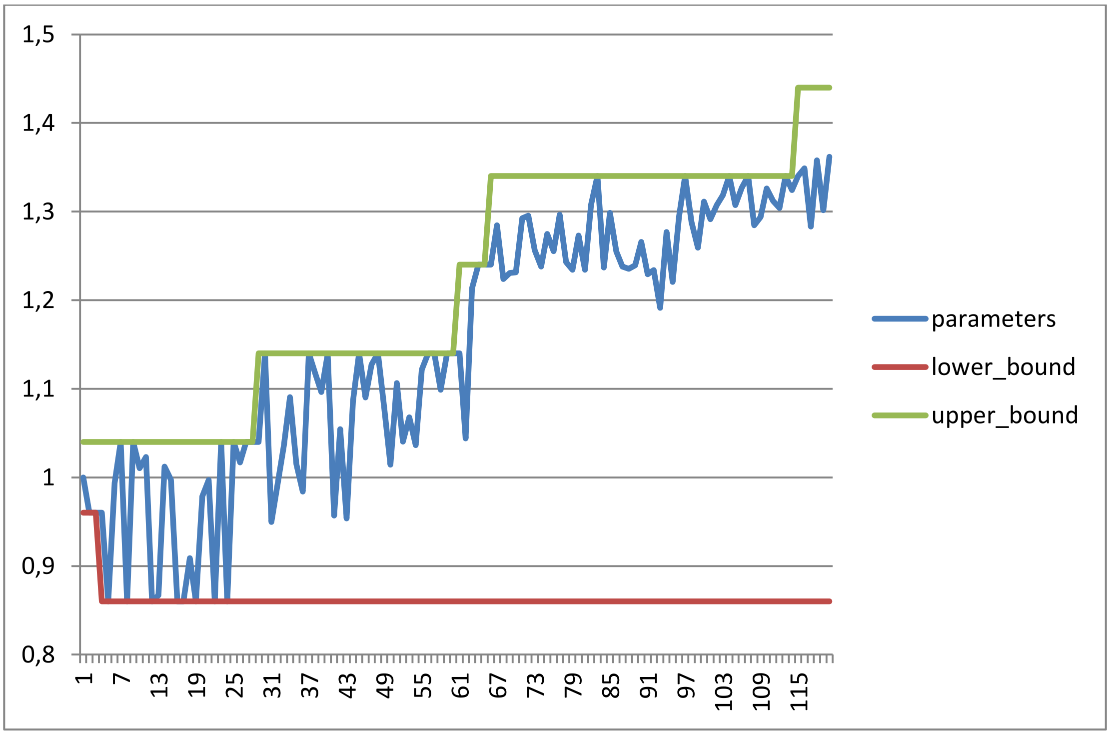
Σχήμα 8.1.2.26

2^{η} φαση:



Σχήμα 8.1.2.27

3^{η} φαση:

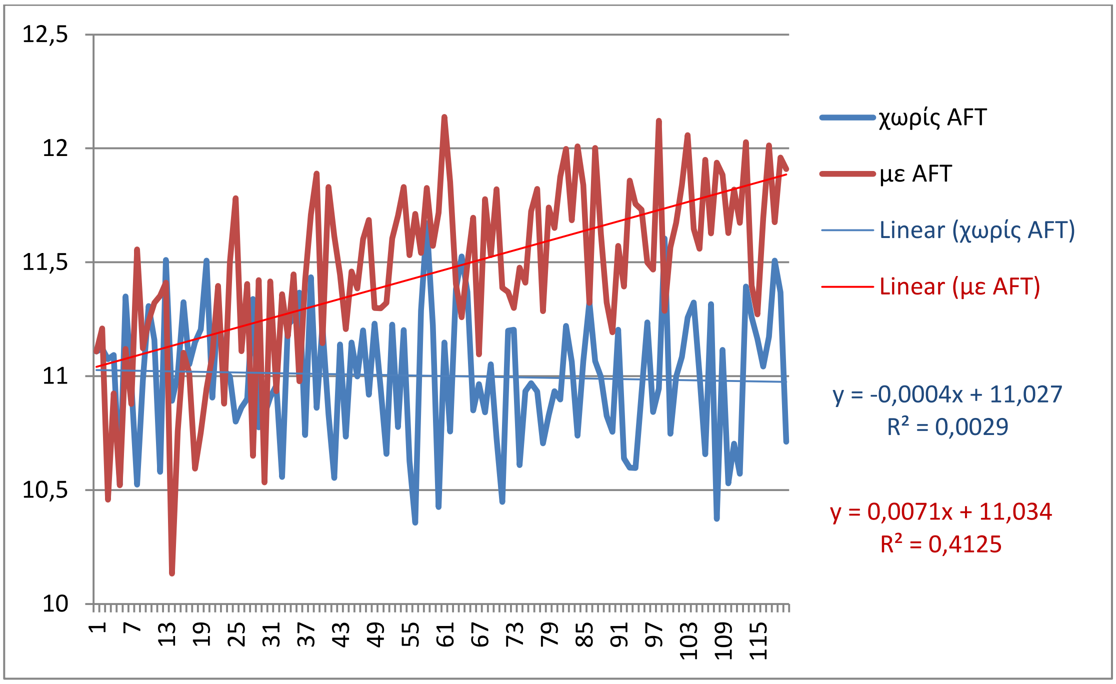


Σχήμα 8.1.2.28

36 κόμβοι

Μέση Ταχύτητα Δικτύου:

Η βελτίωση της μέσης ταχύτητας του δικτύου των 36 κόμβων μετά την εφαρμογή του αλγόριθμου AFT σε 120 προσομοιώσεις.



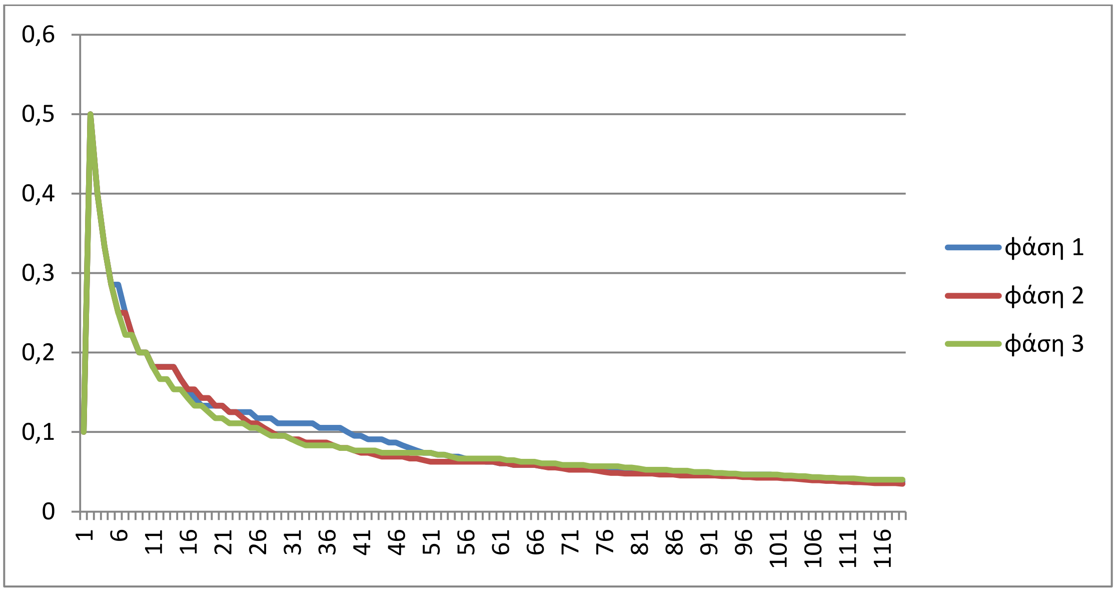
Σχήμα 8.1.2.29

Η γραμμή τάσης που προέκυψε από την εφαρμογή του αλγόριθμου AFT παραμένει σταθερά πάνω από την γραμμή της αρχικής ταχύτητας, παρατηρώντας 1 χειρότερη τιμή της ταχύτητας από αυτή των αρχικών.

Ο μέσος όρος της ταχύτητας του δικτύου αυξήθηκε κατά 4,2%, ενώ η μέγιστη ταχύτητα κατά 4%. Η μέγιστη ταχύτητα επιτυγχάνεται στην 61η επανάληψη με τιμή 12,1 km/h .

alpha:

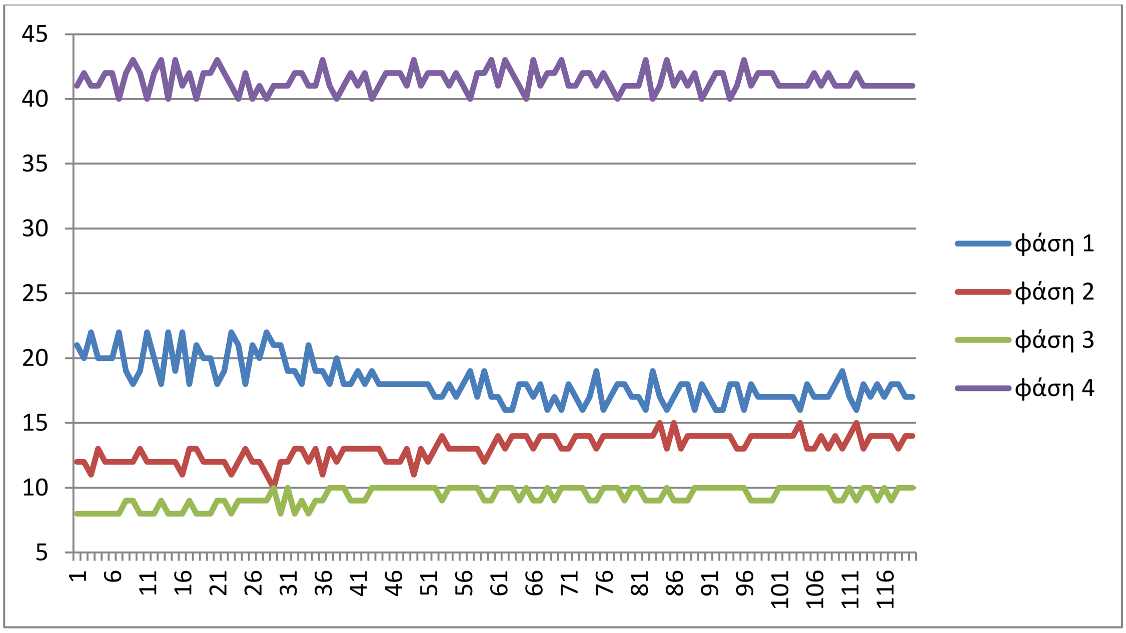
Η μεταβολή του alpha στον κόμβο που εμφανίζεται το μεγαλύτερο πρόβλημα στο δίκτυο. Η 3η φάση είναι αυτή που αντιμετοπίζει το μεγαλύτερο πρόβλημα.



Σχήμα 8.1.2.30

Πράσινοι Χρόνοι:

Η μεταβολή των πράσινων χρόνων στον κόμβο που δημιουργείται το μεγαλύτερο πρόβλημα.



Σχήμα 8.1.2.31

Οι φάσεις 2 και 3 δέχονται μικρή αύξηση,ενώ η 1η φάση μειώνεται σε μεγαλύτερο βαθμό. Η 4η φάση παραμένει σχεδόν σταθερή. Το γεγονός ότι οι χρόνοι δεν δέχονται μεγάλη μεταβολή είναι πιθανόν και ο λόγος που δεν επιτυγχάνεται και μεγάλος βαθμός βελτίωσης της απόδοσης αυτού του δικτύου.

Οι αρχικοί πράσινοι χρόνοι του κόμβου και οι χρόνοι για τους οποίους βρέθηκε η καλύτερη τιμή της μέσης ταχύτητας του δικτύου:

	φάση 1	φάση 2	φάση 3	φάση 4
Αρχικοί χρόνοι (δευτερόλεπτα)	21	12	9	40
Καλύτεροι χρόνοι (δευτερόλεπτα)	21	12	8	41

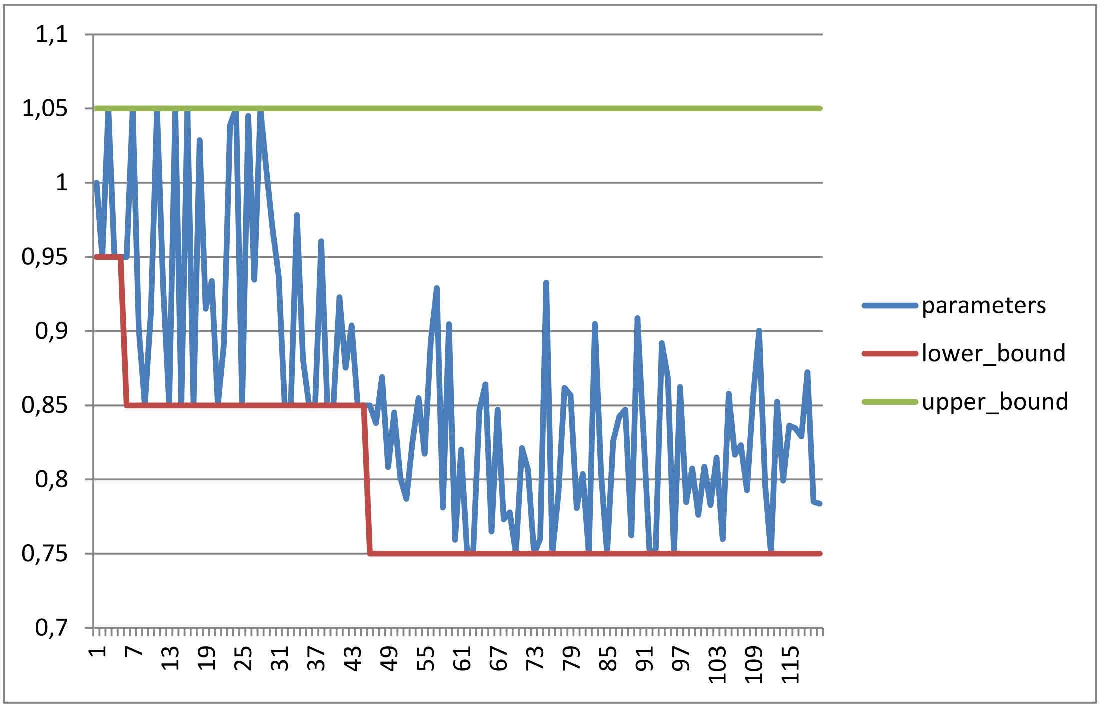
Πίνακας 8.1.2.32

Παρατηρείται ότι οι χρόνοι παρέμειναν σχεδόν σταθεροί, όπου είναι πιθανό να είναι ο λόγος που δεν καταλήξαμε σε μεγάλη βελτίωση.

Parameters-Bounds:

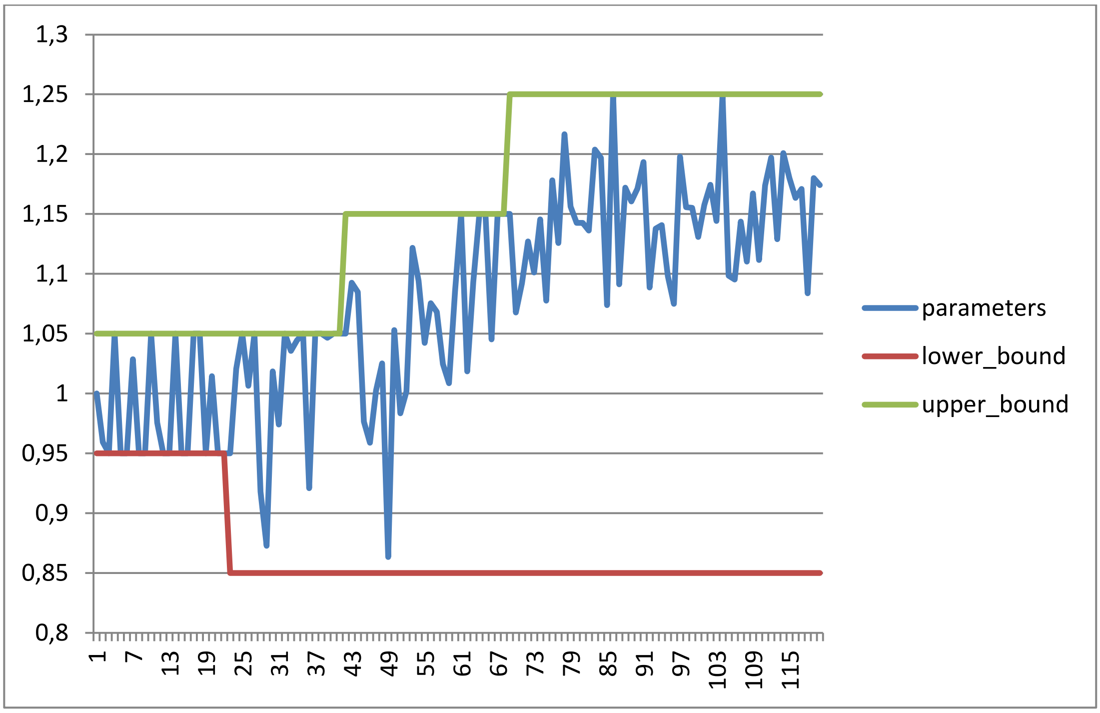
Η μεταβολή των parameters σε συνδιασμό με τη μεταβολή των άνω και κάτω ορίων για κάθε φάση.

$1^η$ φαση:



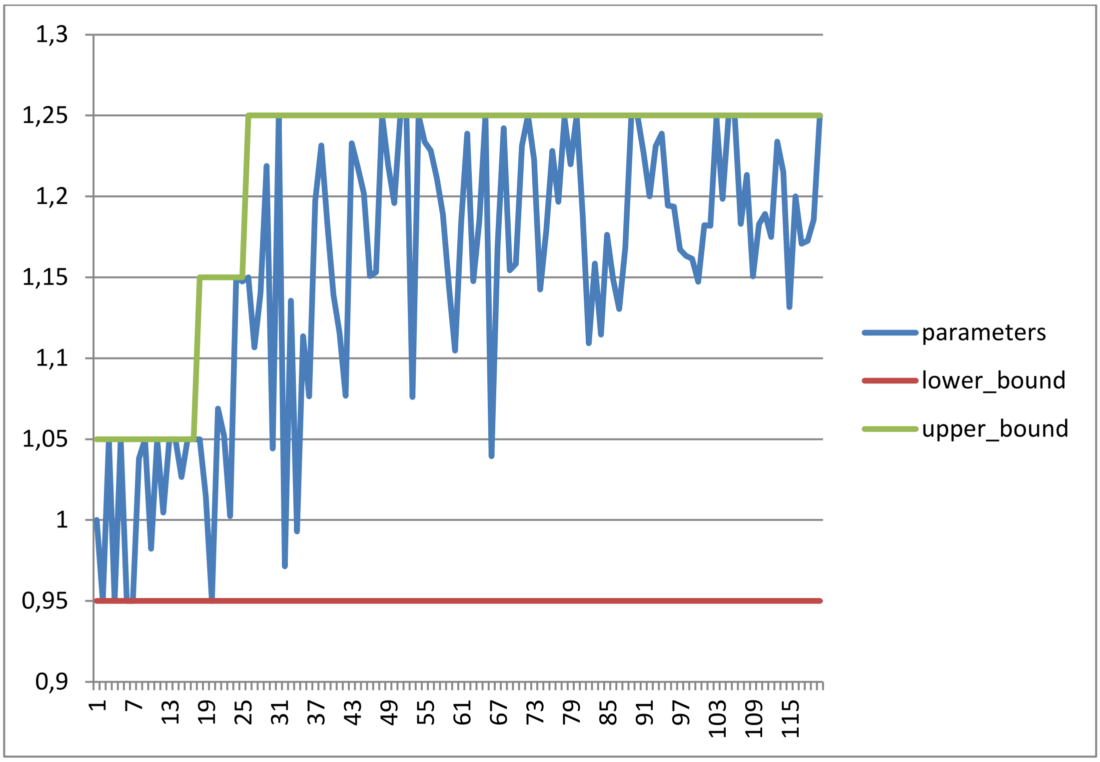
Σχήμα 8.1.2.33

$2^η$ φαση:



Σχήμα 8.1.2.34

$3^{η}$ φαση:



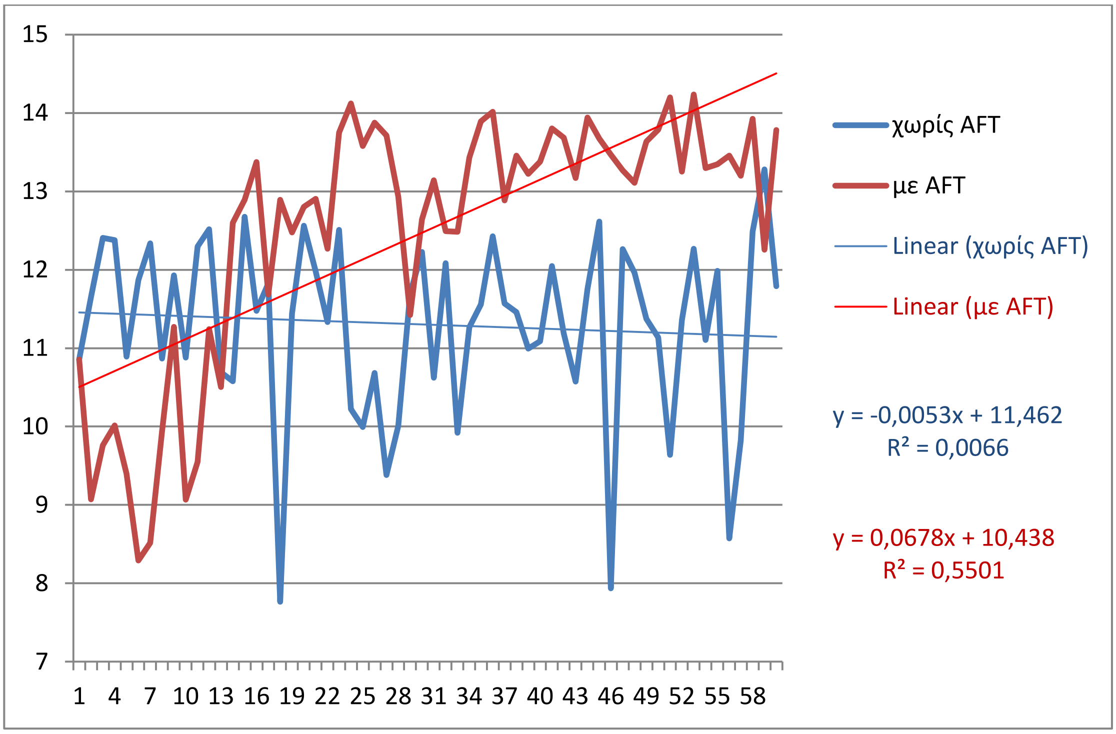
Σχήμα 8.1.2.35

8.1.3.Αλγόριθμος Μεταβαλλόμενου Κύκλου:

4 κόμβοι

Μέση Ταχύτητα Δικτύου:

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η βελτίωση που έκανε ο αλγόριθμος AFT στη μέση ταχύτητα του δικτύου των τεσσάρων κόμβων για 60 προσομοιώσεις.



Σχήμα 8.1.3.1

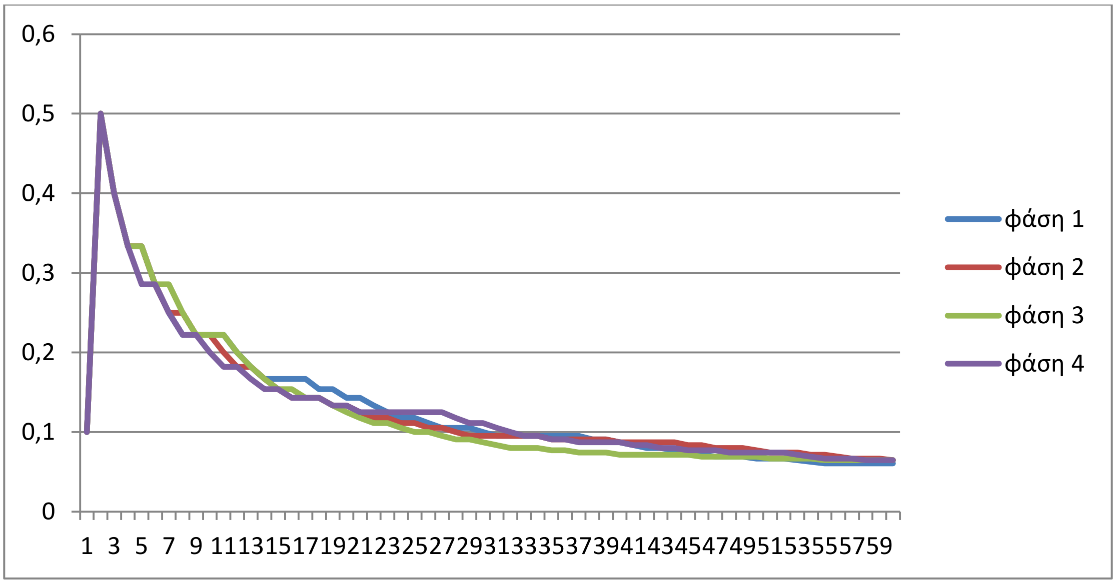
Στην εκκίνηση των προσομοιώσεων παρατηρούνται κάποιες μικρές τιμές της ταχύτητας πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα η γραμμή τάσης από την εφαρμογή του AFT να είναι κάτω από την αρχική γραμμή . Στη συνέχεια παραμένει σταθερά πάνω από την αρχική γραμμή τάσης.

Το ποσοστό αύξησης του μέσου όρου της ταχύτητας του δικτύου σε αυτή την περίπτωση είναι 10,6%, ενώ της μέγιστης ταχύτητας 7,2%. Η μέγιστη ταχύτητα επιτυγχάνεται στην 53η επανάληψη με τιμή 14,2 km/h .

.

alpha:

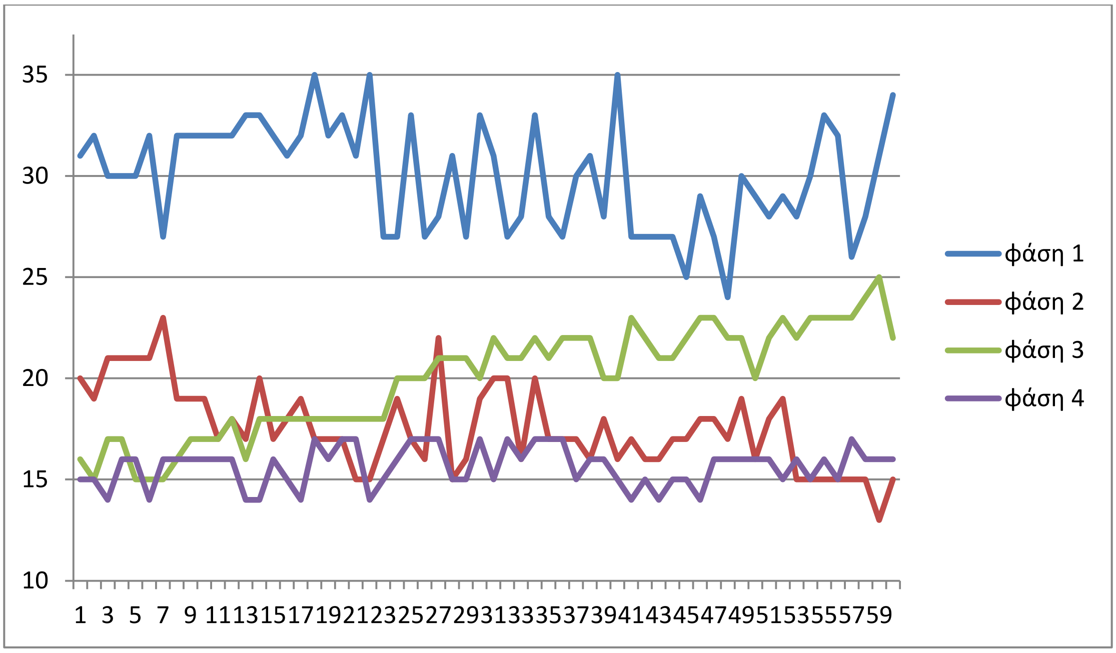
Η μεταβολή του alpha στον κόμβο που εμφανίζεται το μεγαλύτερο πρόβλημα στο δίκτυο. Η 3η φάση είναι αυτή που αντιμετοπίζει το μεγαλύτερο πρόβλημα.



Σχήμα 8.1.3.2

Πράσινοι Χρόνοι:

Η μεταβολή των πράσινων χρόνων στον κόμβο που δημιουργείται το μεγαλύτερο πρόβλημα.



Σχήμα 8.1.3.3

Η φάση 3 είναι η οποία έχει και το μεγαλύτερο πρόβλημα δέχεται την μεγαλύτερη αλλαγή. Αυξάνεται συνεχώς και παρατηρείται αύξηση μέχρι και 9 δευτερολέπτων.

Η φάση 2 ακολουθεί καθοδική πορεία, ενώ η πορεία των φάσεων 1 και 4 παραμένει σχεδόν σταθερή.

Οι αρχικοί πράσινοι χρόνοι του κόμβου και οι χρόνοι για τους οποίους βρέθηκε η καλύτερη τιμή της μέσης ταχύτητας του δικτύου:

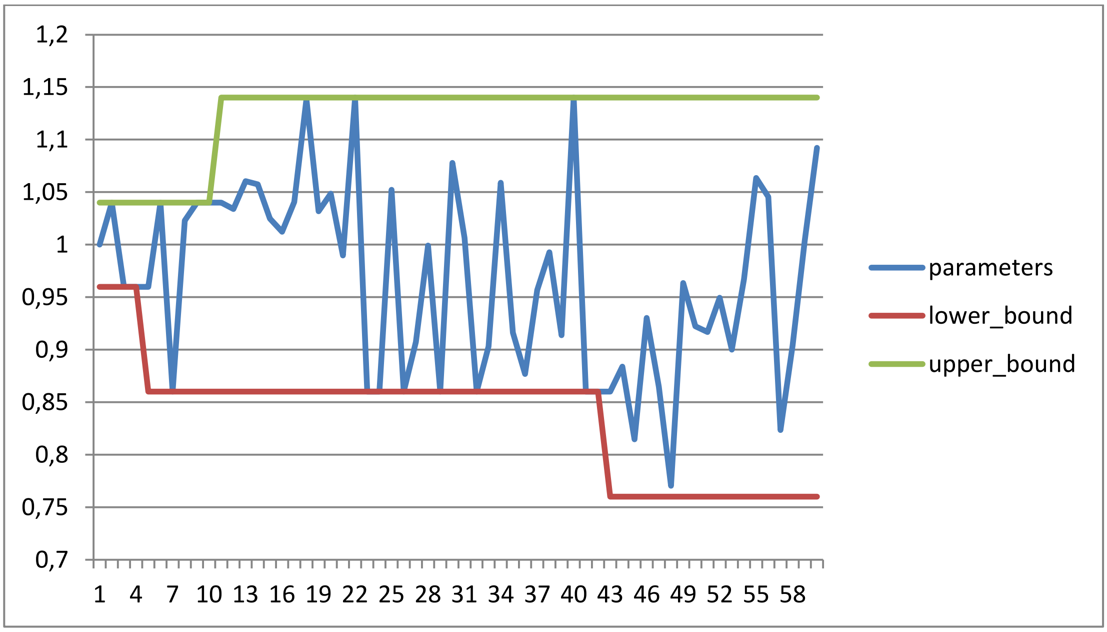
	φάση 1	φάση 2	φάση 3	φάση 4
Αρχικοί χρόνοι (δευτερόλεπτα)	31	20	16	15
Καλύτεροι χρόνοι (δευτερόλεπτα)	28	15	22	16

Πίνακας 8.1.3.4

Parameters-Bounds:

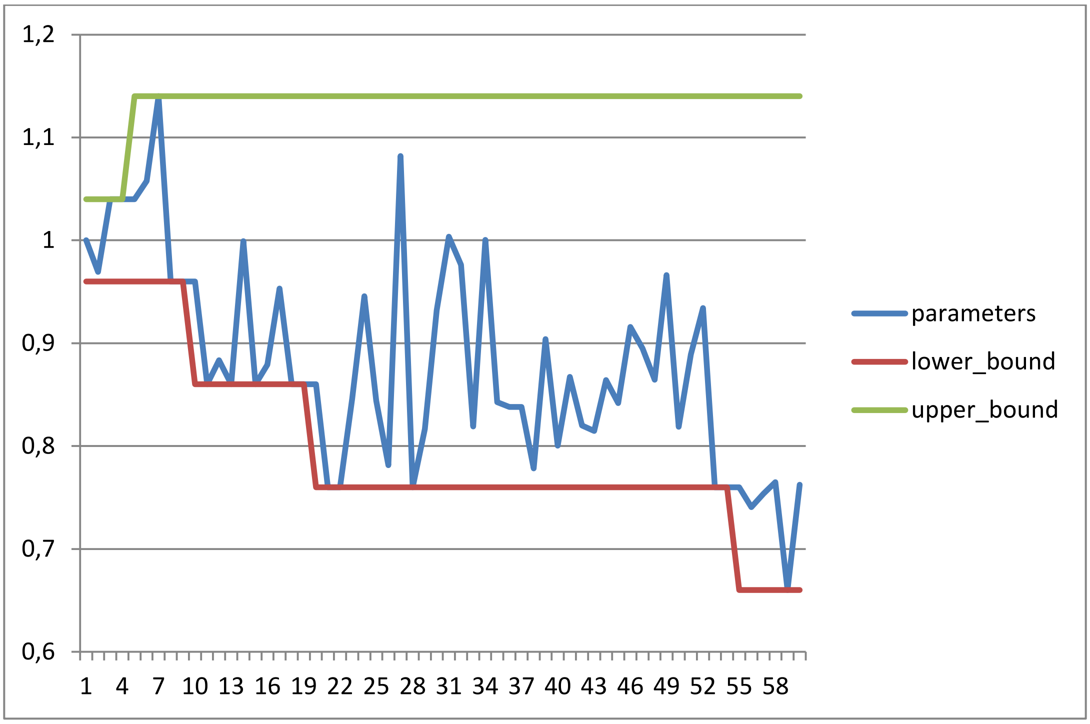
Η μεταβολή των παραμέτρων σε συνδιασμό με τη μεταβολή των άνω και κάτω ορίων για κάθε φάση.

<u>1η φαση:</u>



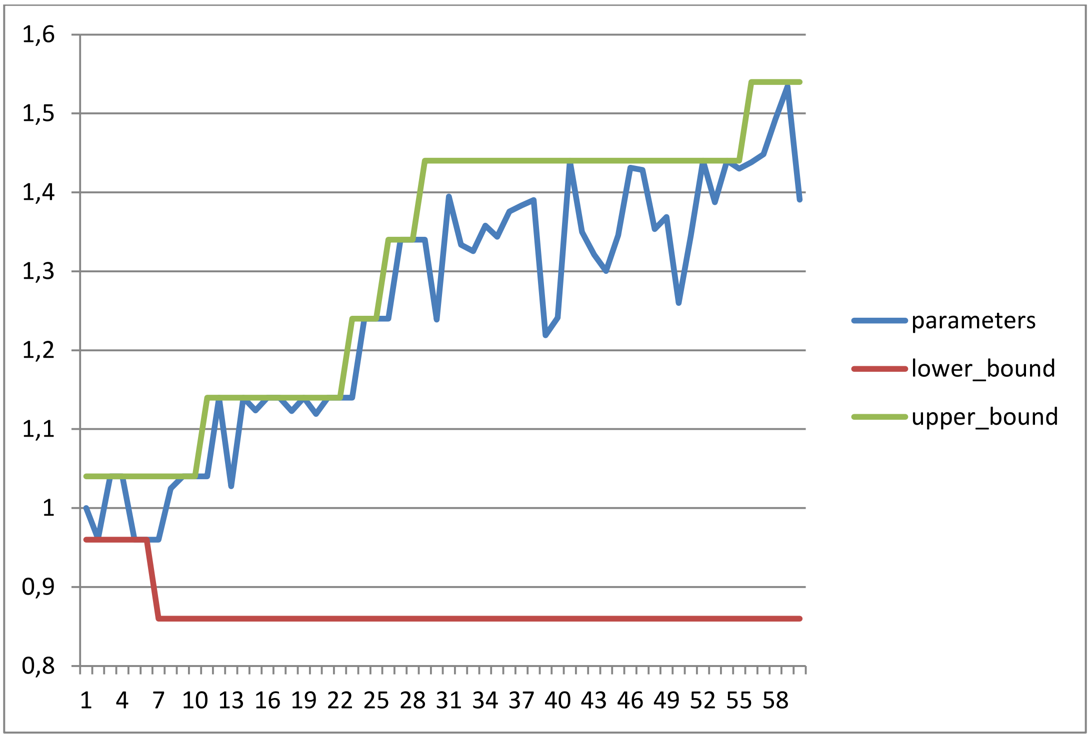
Σχήμα 8.1.3.5

$2^η$ φαση:



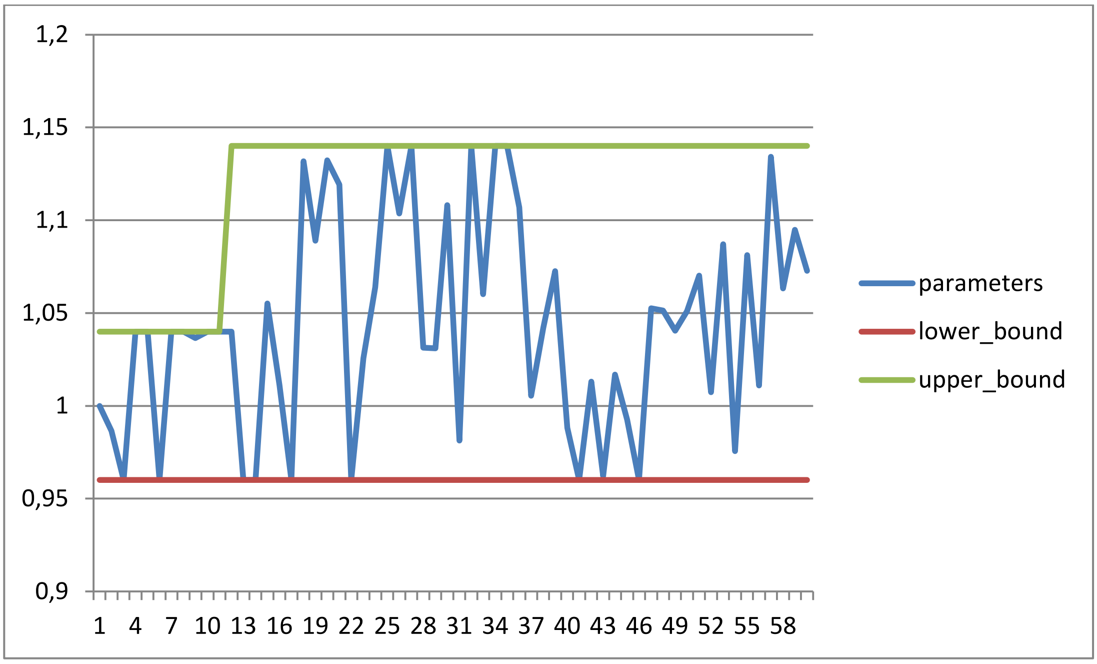
Σχήμα 8.1.3.6

$3^η$ φαση:



Σχήμα 8.1.3.7

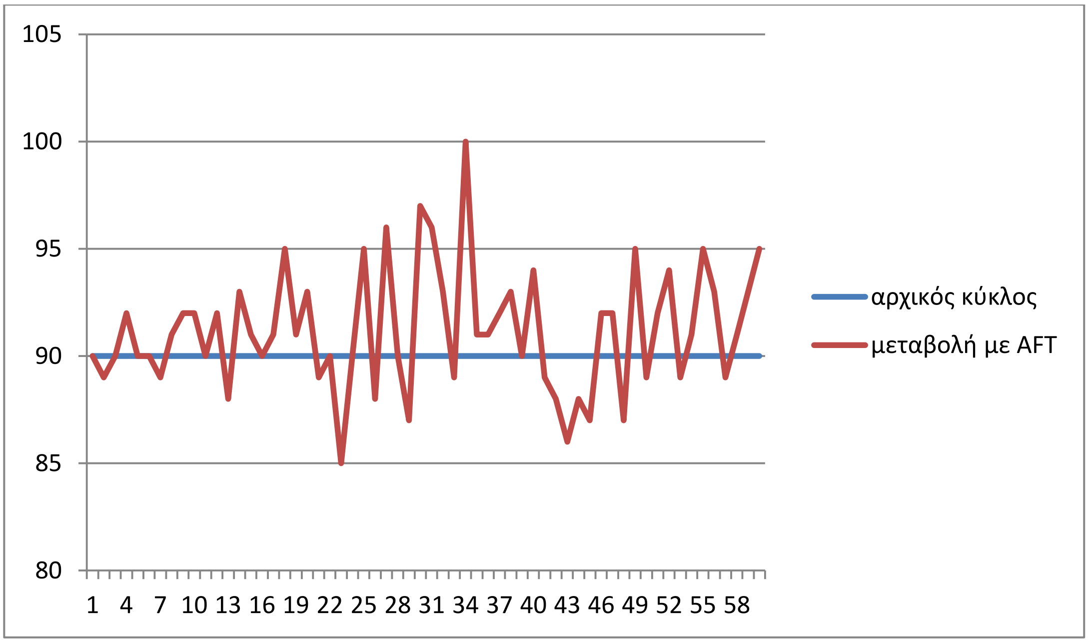
<u>4^{η} φαση:</u>



Σχήμα 8.1.3.8

Μεταβολή Κύκλου:

Παρακάτω απεικονίζεται η μεταβολή του χρόνου που υπέστει ο κύκλος του κόμβου με το μεγαλύτερο πρόβλημα στις 60 προσομοιώσεις κατά την εφαρμογή του αλγόριθμου AFT.

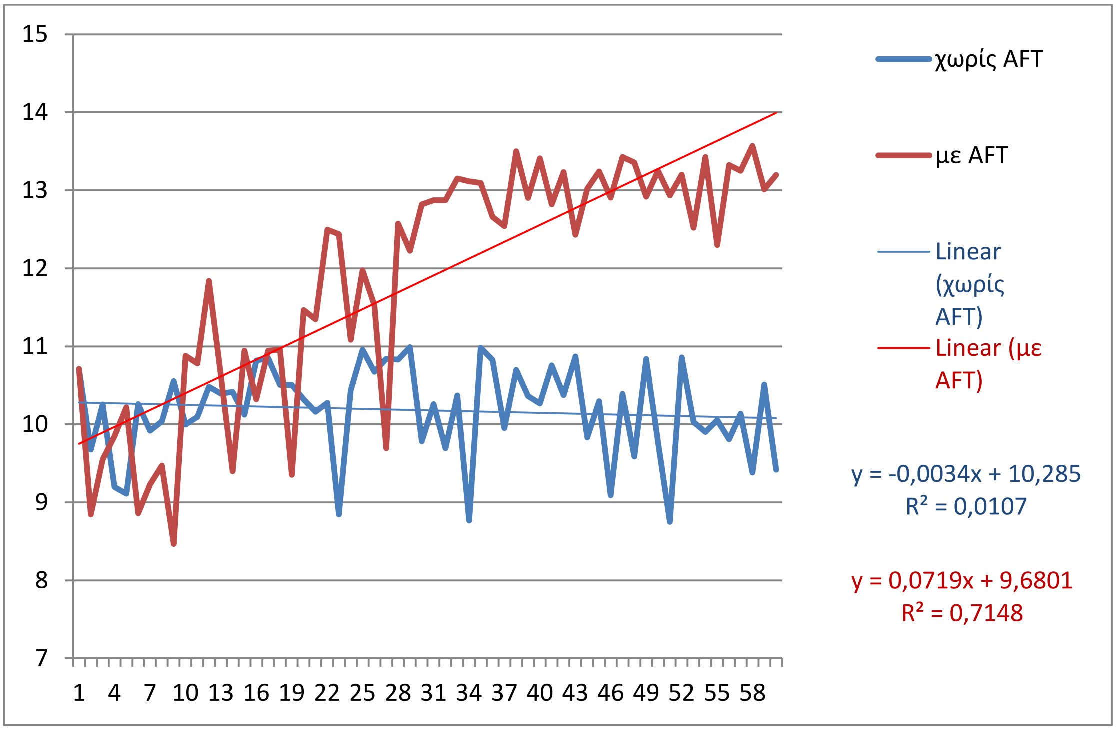


Σχήμα 8.1.3.9

9 κόμβοι

Μέση Ταχύτητα Δικτύου:

Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζεται η βελτίωση που έκανε ο αλγόριθμος AFT στη μέση ταχύτητα του δικτύου των 9 κόμβων για 60 προσομοιώσεις.



Σχήμα 8.1.3.10

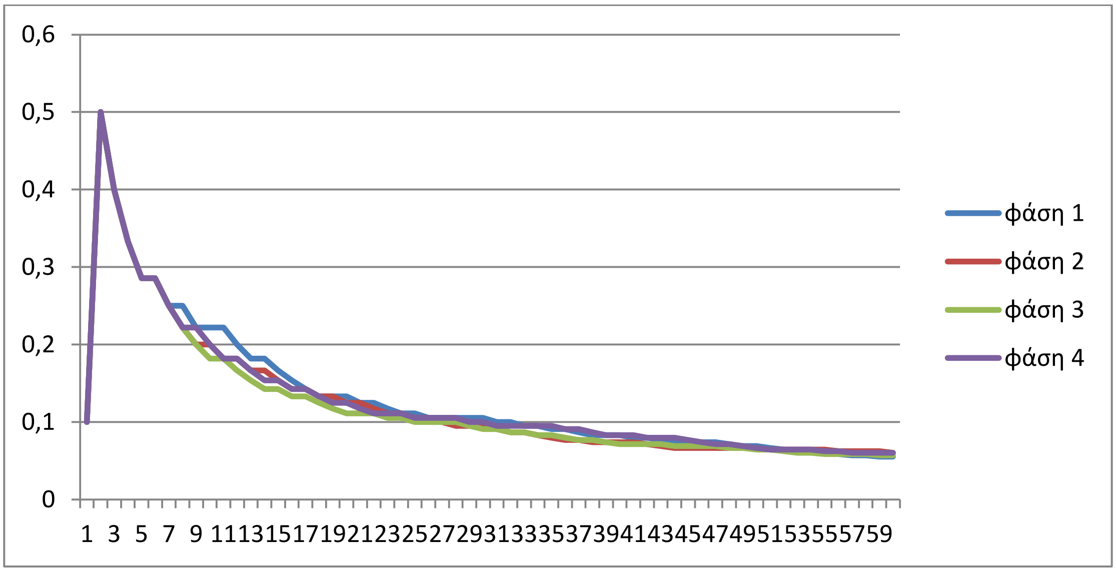
Στις πρώτες προσομοιώσεις ο αλγόριθμος AFT καταλήγει σε κάποιες μικρές τιμές της ταχύτητας και συνεπώς η γραμμή τάσης παραμένει για λίγο κάτω από την αρχική γραμμή. Διαθέτει μια πολύ καλή κλίση και στη συνέχεια παραμένει σταθερά πάνω από την αρχική γραμμή.

Το ποσοστό αύξησης του μέσου όρου της ταχύτητας του δικτύου σε αυτή την περίπτωση είναι 16,6%, ενώ της μέγιστης ταχύτητας 23,5%. Η μέγιστη ταχύτητα επιτυγχάνεται στην 58η επανάληψη με τιμή 13,6 km/h .

.

alpha:

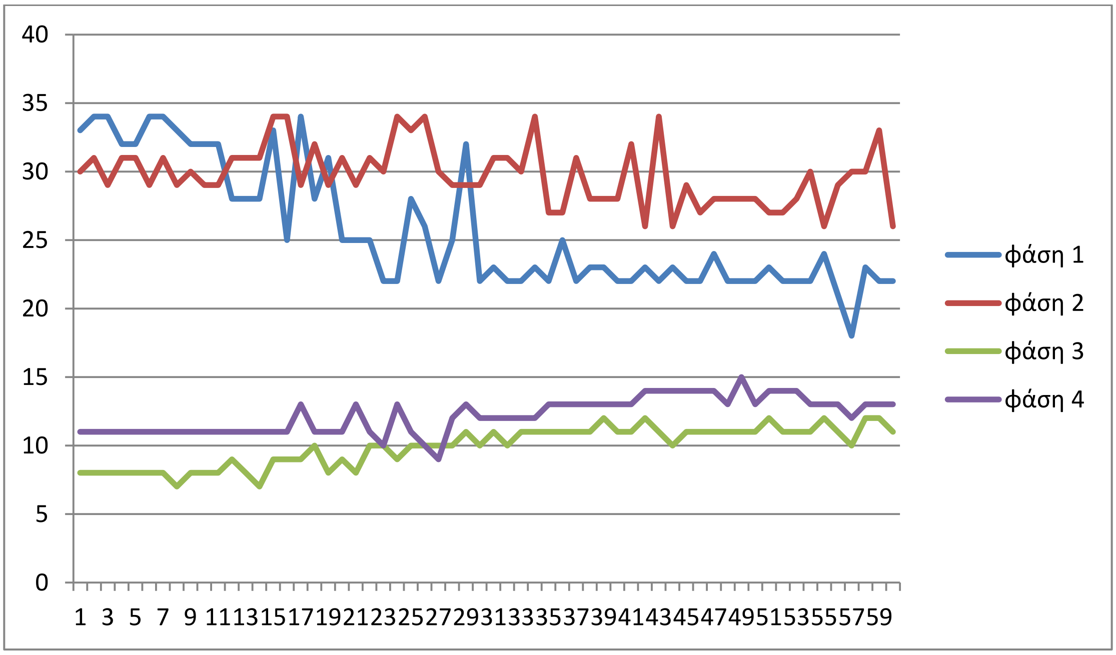
Η μεταβολή του alpha στον κόμβο που εμφανίζεται το μεγαλύτερο πρόβλημα στο δίκτυο. Η 3η φάση είναι αυτή που αντιμετοπίζει το μεγαλύτερο πρόβλημα.



Σχήμα 8.1.3.11

Πράσινοι Χρόνοι:

Η μεταβολή των πράσινων χρόνων στον κόμβο που δημιουργείται το μεγαλύτερο πρόβλημα.



Σχήμα 8.1.3.12

Η φάσεις 3 και 4 ακολουθούν ανοδική πορεία, ενώ η 1 και 2 μειώνονται με την 1 να έχει υποστεί την μεγαλύτερη μείωση.

Οι αρχικοί πράσινοι χρόνοι του κόμβου και οι χρόνοι για τους οποίους βρέθηκε η καλύτερη τιμή της μέσης ταχύτητας του δικτύου:

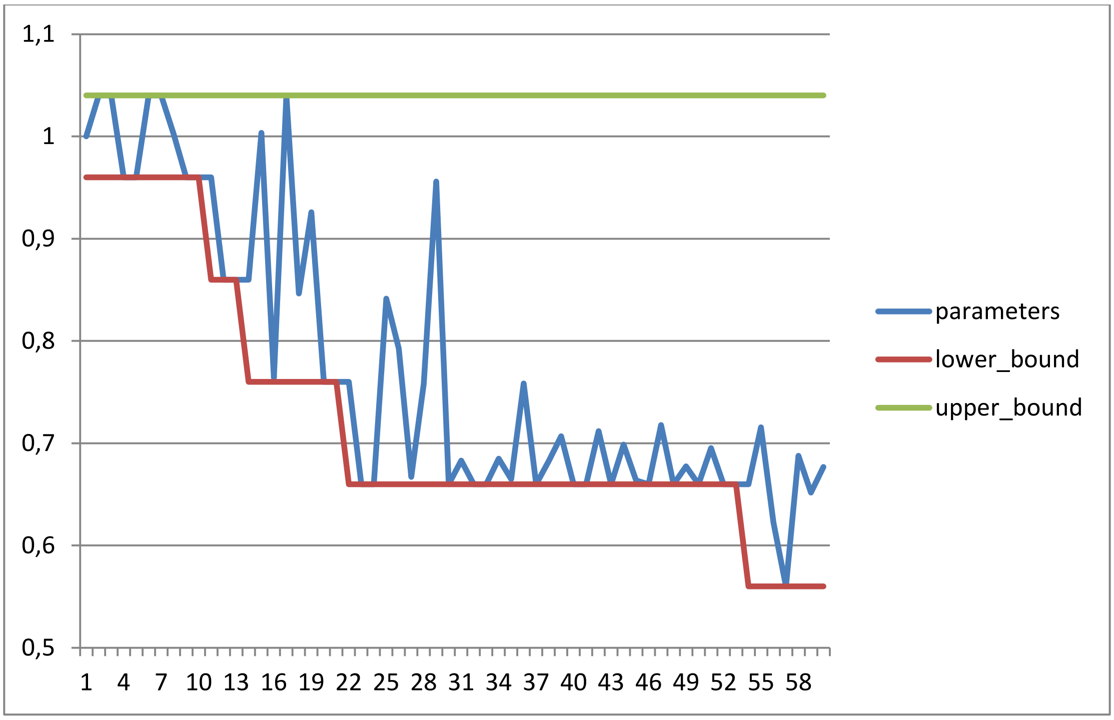
	φάση 1	φάση 2	φάση 3	φάση 4
Αρχικοί χρόνοι (δευτερόλεπτα)	33	30	8	11
Καλύτεροι χρόνοι (δευτερόλεπτα)	23	30	12	13

Πίνακας 8.1.3.13

Parameters-Bounds:

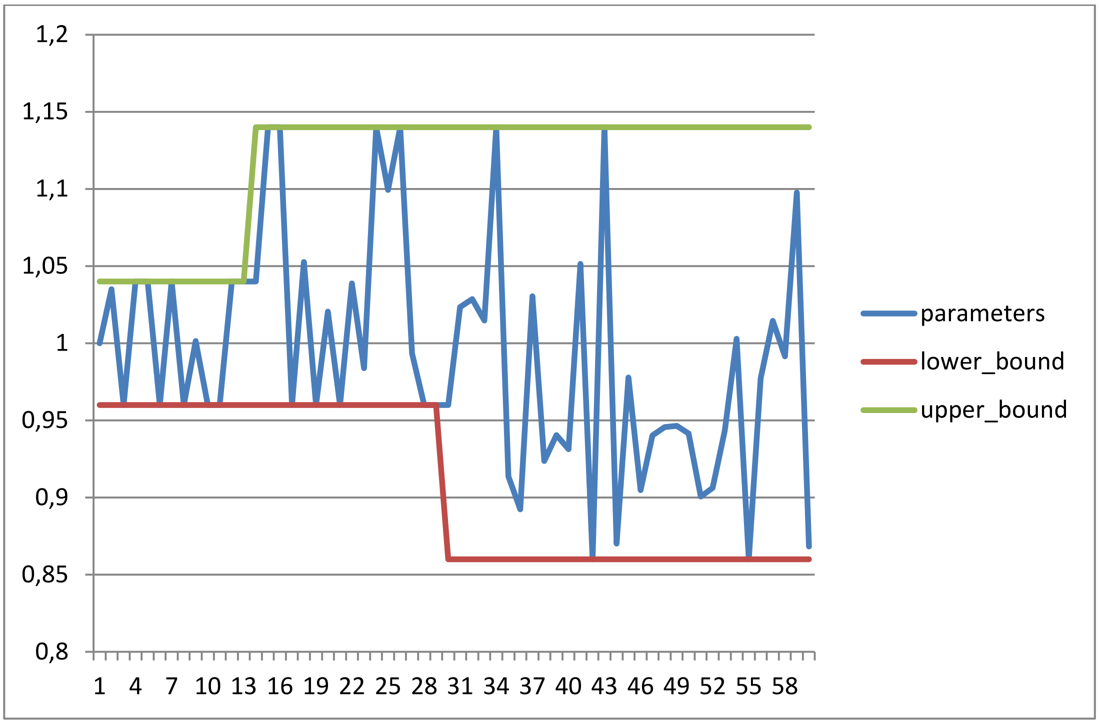
Η μεταβολή των parameters σε συνδιασμό με τη μεταβολή των άνω και κάτω ορίων για κάθε φάση.

<u>1η φαση:</u>



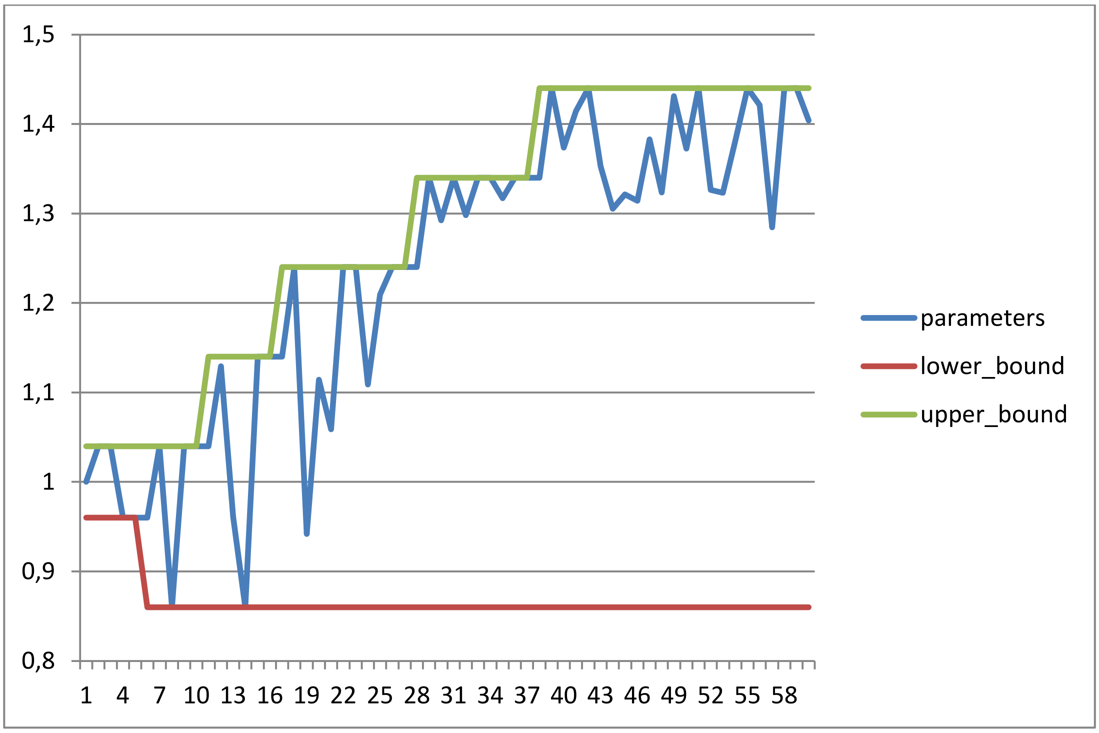
Σχήμα 8.1.3.14

$2^η$ φαση:



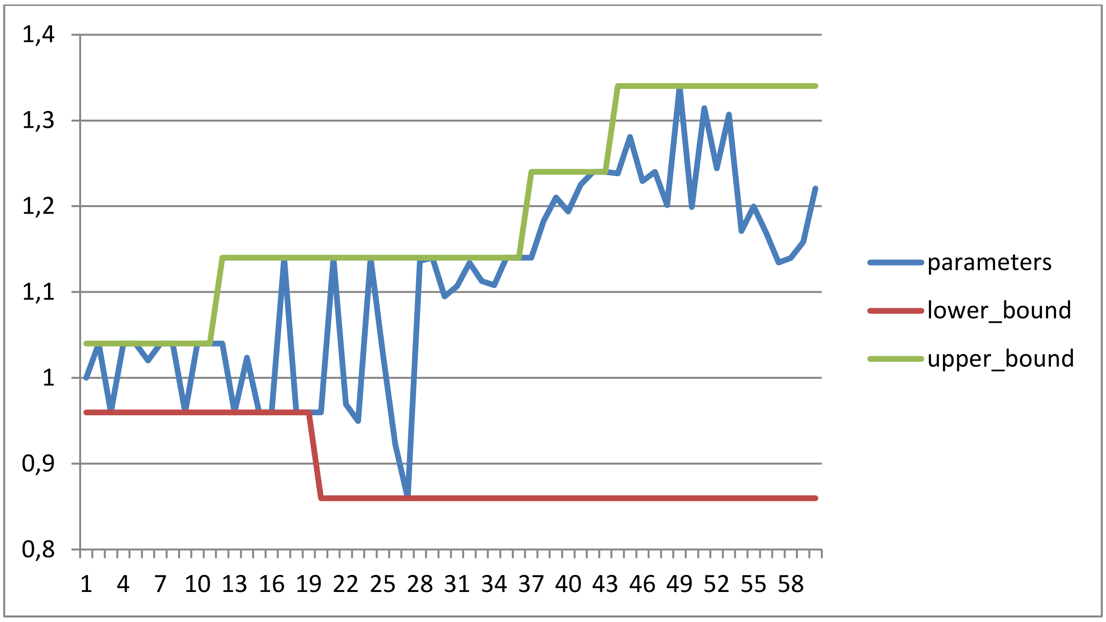
Σχήμα 8.1.3.15

$3^η$ φαση:



Σχήμα 8.1.3.16

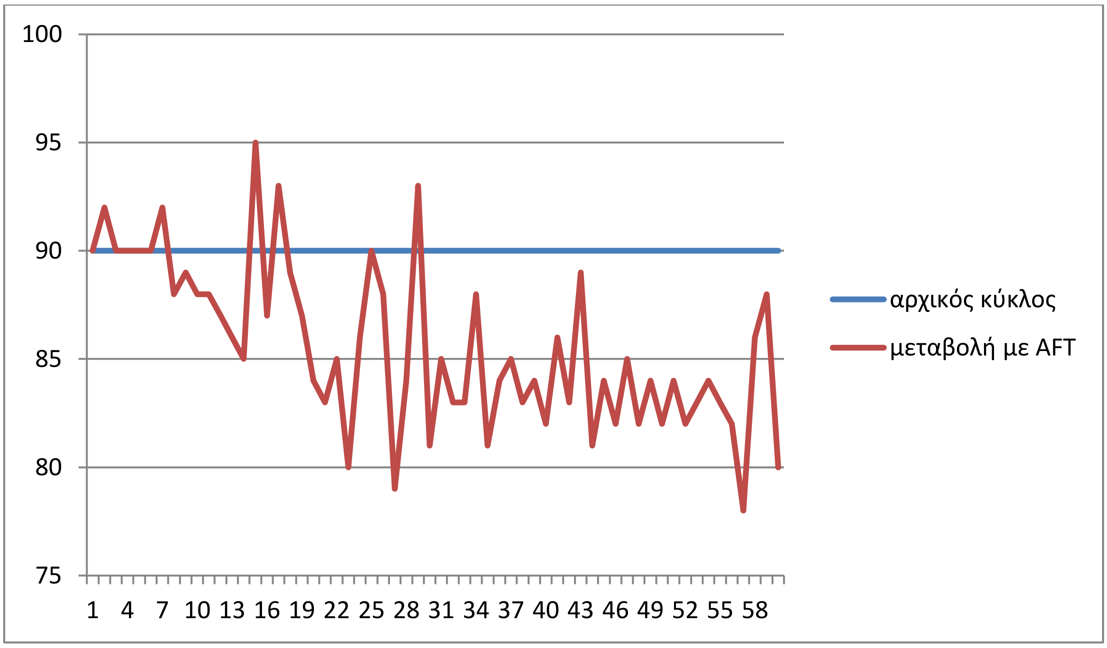
4^{η} φαση:



Σχήμα 8.1.3.17

Μεταβολή Κύκλου:

Παρακάτω απεικονίζεται η μεταβολή του του χρόνου που υπέστει ο κύκλος του κόμβου με το μεγαλύτερο πρόβλημα στις 60 προσομοιώσεις κατά την εφαρμογή του αλγόριθμου AFT.

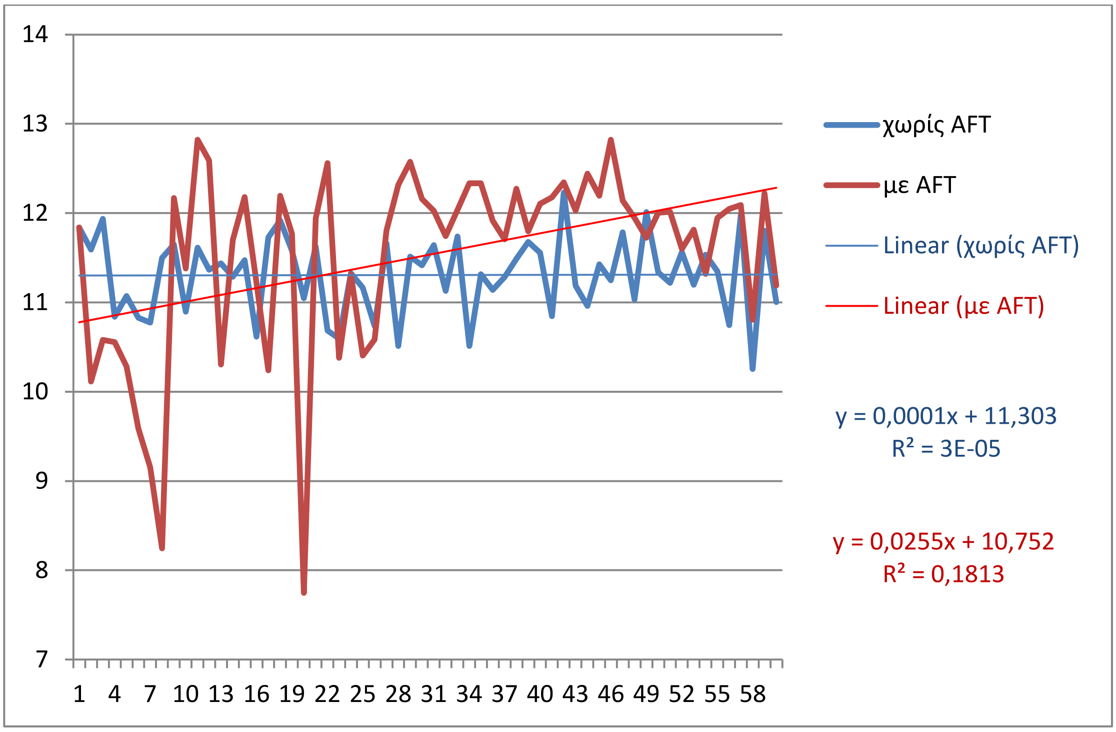


Σχήμα 8.1.3.18

16 κόμβοι

Μέση Ταχύτητα Δικτύου:

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η βελτίωση που έκανε ο αλγόριθμος AFT στη μέση ταχύτητα του δικτύου των 16 κόμβων για 60 προσομοιώσεις.



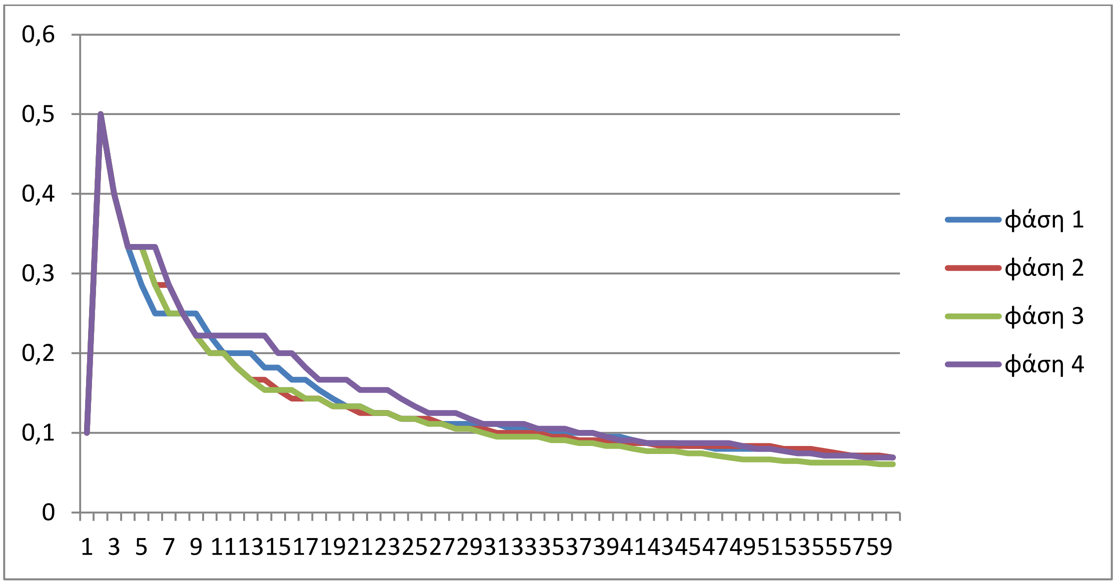
Σχήμα 8.1.3.19

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούνται κάποιες κακές τιμές της ταχύτητας κατά την εκκίνηση των προσομοιώσεων, συνεπώς η γραμμή τάσης παραμένει κάτω από την αρχική για κάποιες προσομοιώσεις. Στην συνέχεια οδηγείται σε καλές τιμές επιτυγχάνοντας βελτίωση.

Η αύξηση του μέσου όρου της ταχύτητας του δικτύου σε αυτή την περίπτωση είναι 2%, ενώ της μέγιστης ταχύτητας 4,9%. Η μέγιστη ταχύτητα επιτυγχάνεται στην 11η επανάληψη και έχει τιμή 12,8 km/h .

alpha:

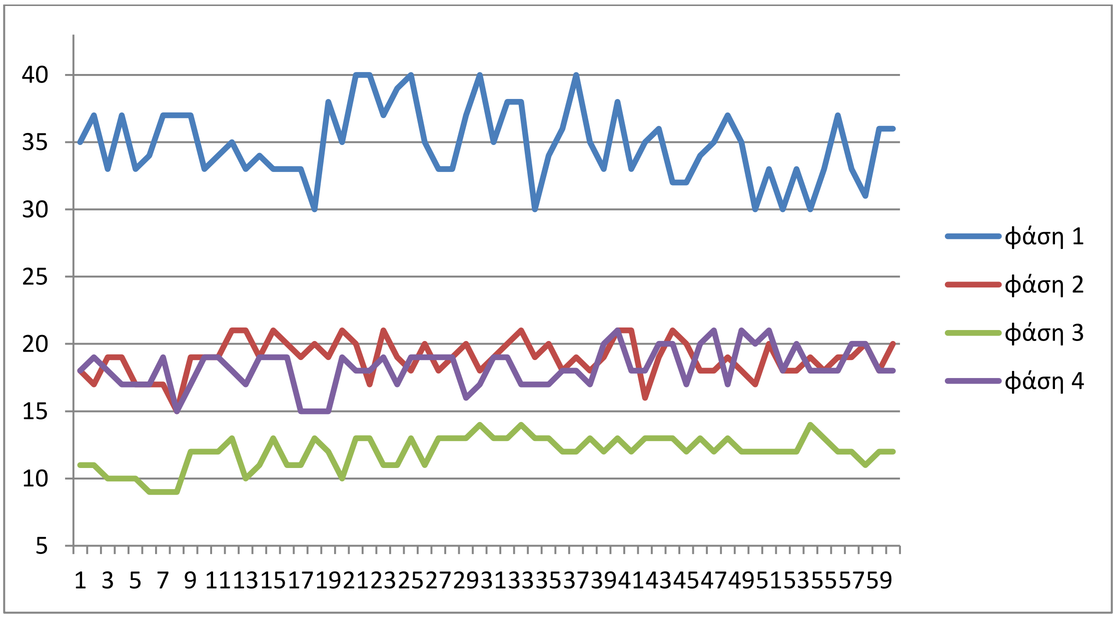
Η μεταβολή του alpha στον κόμβο που εμφανίζεται το μεγαλύτερο πρόβλημα στο δίκτυο. Η 3η φάση είναι αυτή που αντιμετοπίζει το μεγαλύτερο πρόβλημα.



Σχήμα 8.1.3.20

Πράσινοι Χρόνοι:

Η μεταβολή των πράσινων χρόνων στον κόμβο που δημιουργείται το μεγαλύτερο πρόβλημα.



Σχήμα 8.1.3.21

Δεν παρατηρούνται μεγάλες αλλαγές των πράσινων χρόνων. Η φάσεις 3 και 4 έχουν ανοδική τάση, ενώ η φάση 1 καθοδική.

Η φάση 2 παραμένει σχεδόν σταθερή.

Οι αρχικοί πράσινοι χρόνοι του κόμβου και οι χρόνοι για τους οποίους βρέθηκε η καλύτερη τιμή της μέσης ταχύτητας του δικτύου:

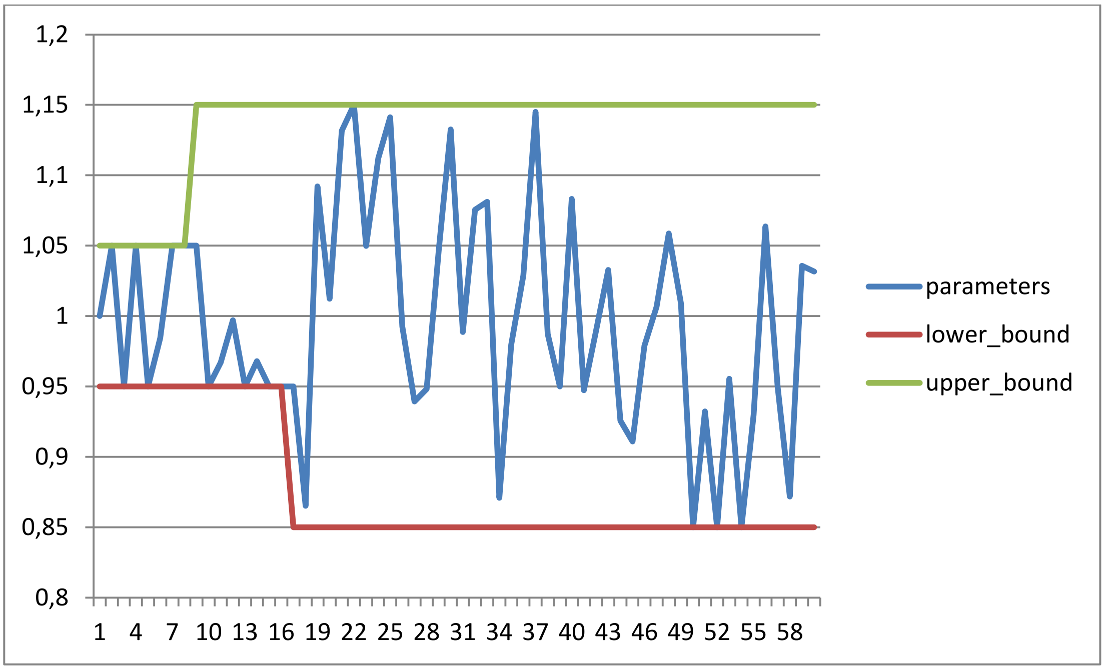
	φάση 1	φάση 2	φάση 3	φάση 4
Αρχικοί χρόνοι (δευτερόλεπτα)	35	18	11	18
Καλύτεροι χρόνοι (δευτερόλεπτα)	34	19	12	19

Πίνακας 8.1.3.22

Parameters-Bounds:

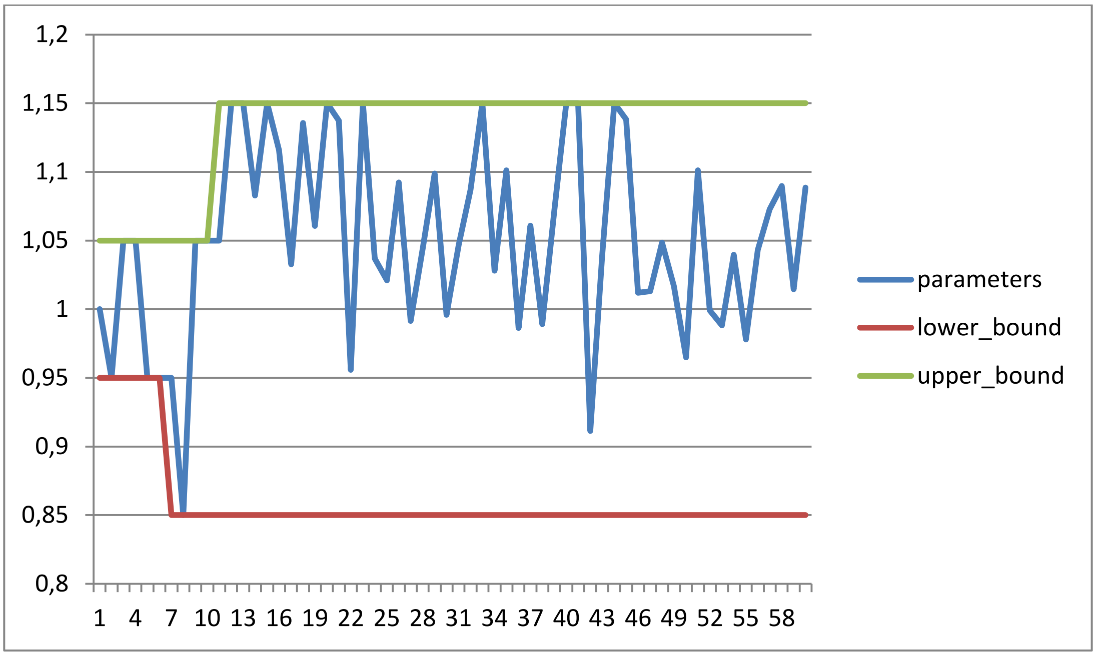
Η μεταβολή των parameters σε συνδιασμό με τη μεταβολή των άνω και κάτω ορίων για κάθε φάση.

<u>1η φαση:</u>



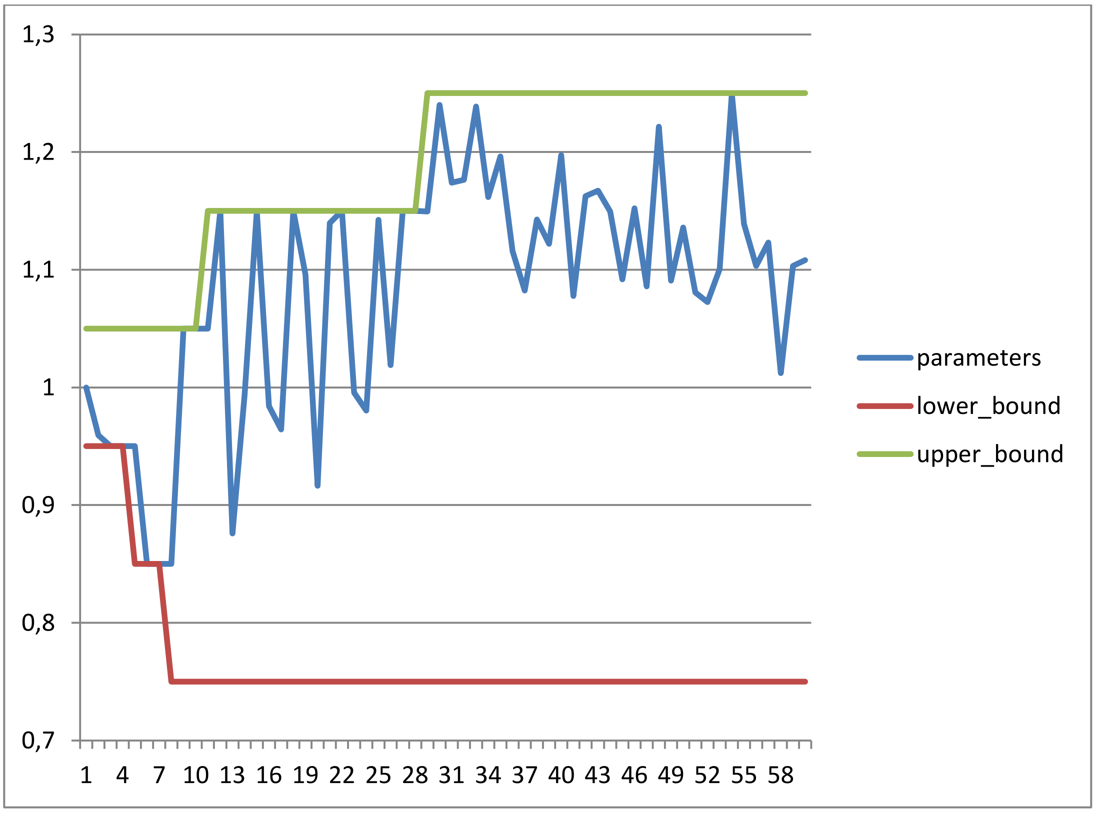
Σχήμα 8.1.3.23

2η φαση:



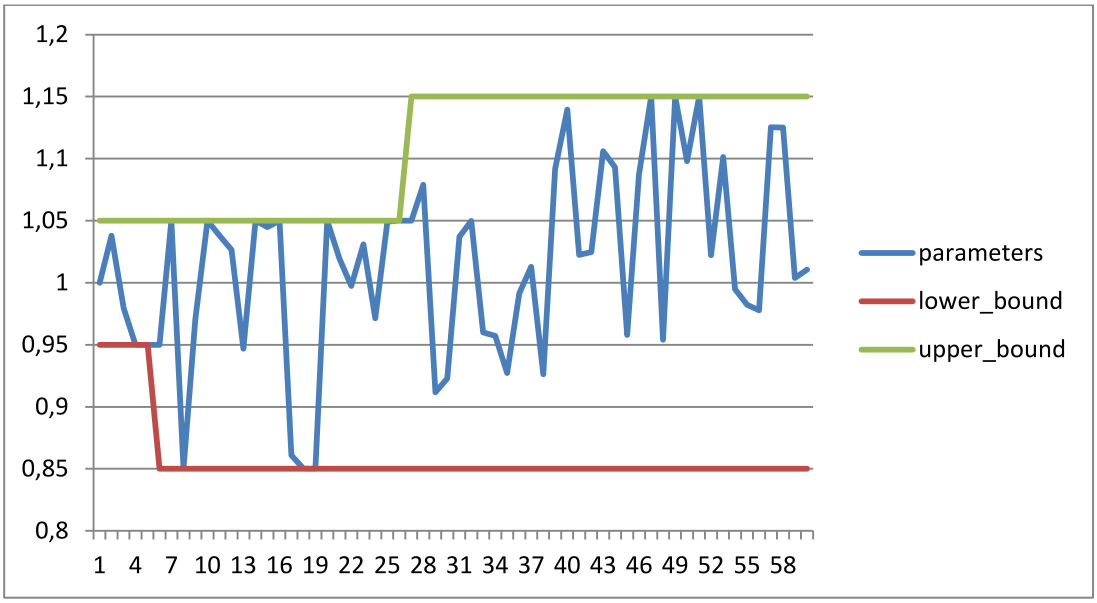
Σχήμα 8.1.3.24

3η φαση:



Σχήμα 8.1.3.25

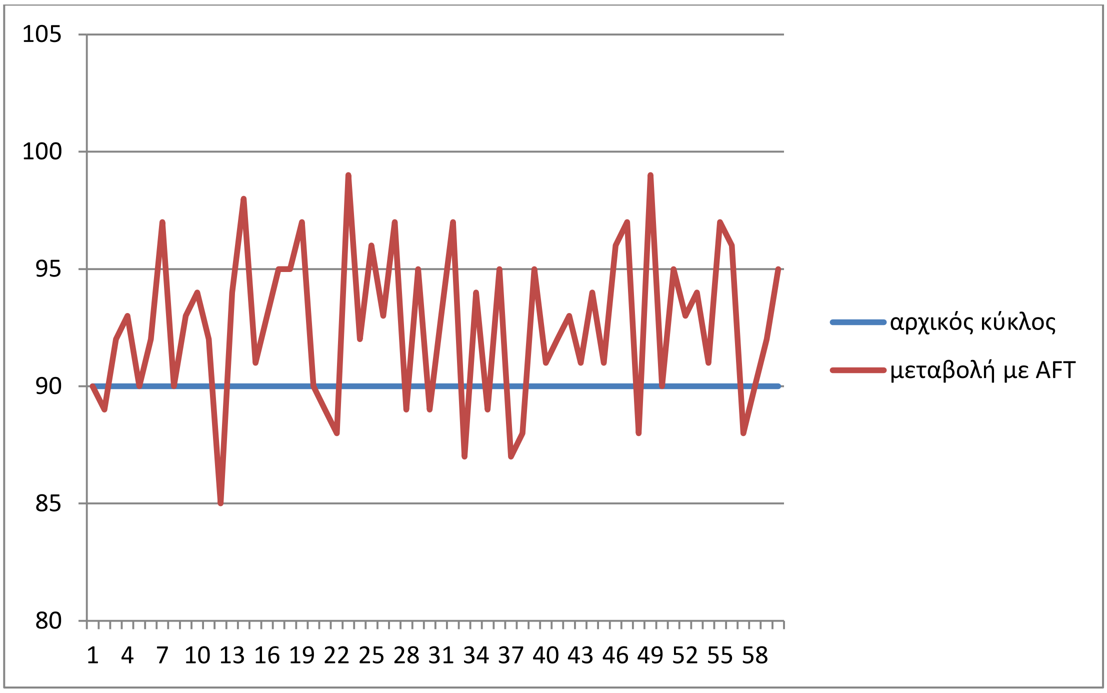
4η φαση:



Σχήμα 8.1.3.26

Μεταβολή Κύκλου:

Παρακάτω απεικονίζεται η μεταβολή του του χρόνου που υπέστει ο κύκλος του κόμβου με το μεγαλύτερο πρόβλημα στις 60 προσομοιώσεις κατά την εφαρμογή του αλγόριθμου AFT.

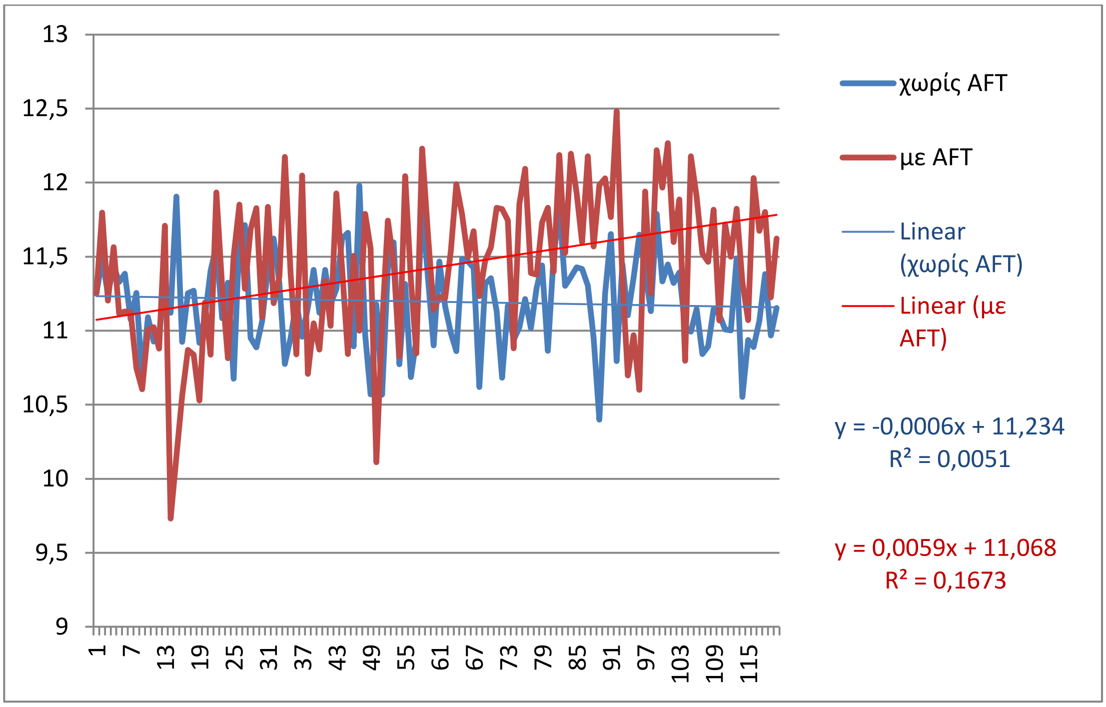


Σχήμα 8.1.3.27

25 κόμβοι

Μέση Ταχύτητα Δικτύου:

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η βελτίωση που έκανε ο αλγόριθμος AFT στη μέση ταχύτητα του δικτύου των 25 κόμβων για 120 προσομοιώσεις.



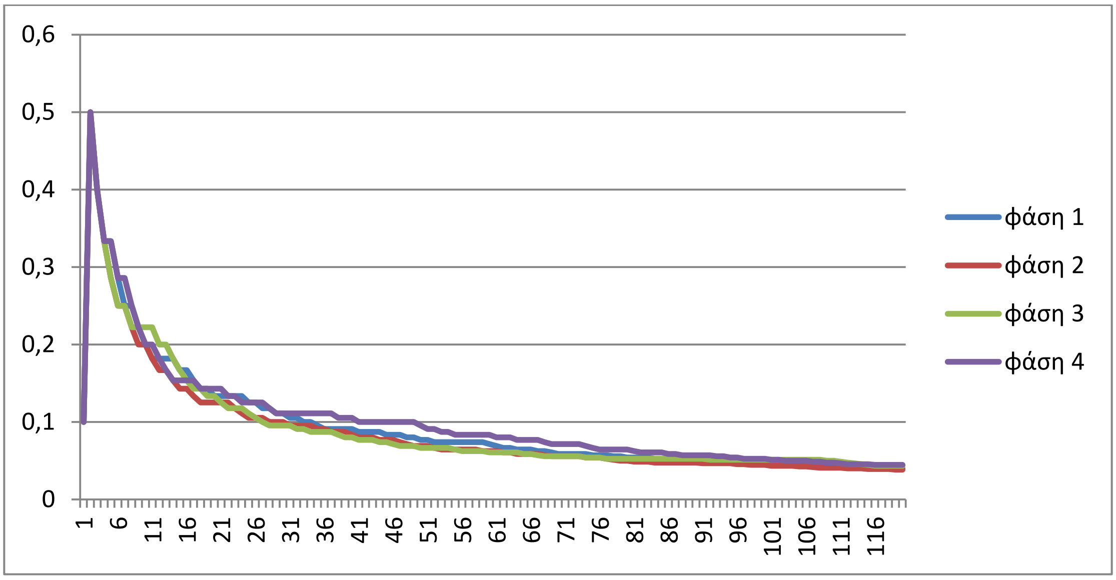
Σχήμα 8.1.3.28

Στην αρχή των προσομοιώσεων παρατηρούνται κάποιες χαμηλές ταχύτητες πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα η γραμμή τάσης να βρίσκεται κάτω από την αρχική. Στη συνέχεια παραμένει σταθερά πάνω από την αρχική γραμμή τάσης παρουσιάζοντας 1 χειρότερη τιμή ταχύτητας από την αρχική.

Το ποσοστό αύξησης του μέσου όρου της ταχύτητας του δικτύου σε αυτή την περίπτωση είναι 2,1%, ενώ της μέγιστης ταχύτητας 4,2%. Η μέγιστη ταχύτητα επιτυγχάνεται στην 92η επανάληψη και έχει τιμή 12,5 km/h .

alpha:

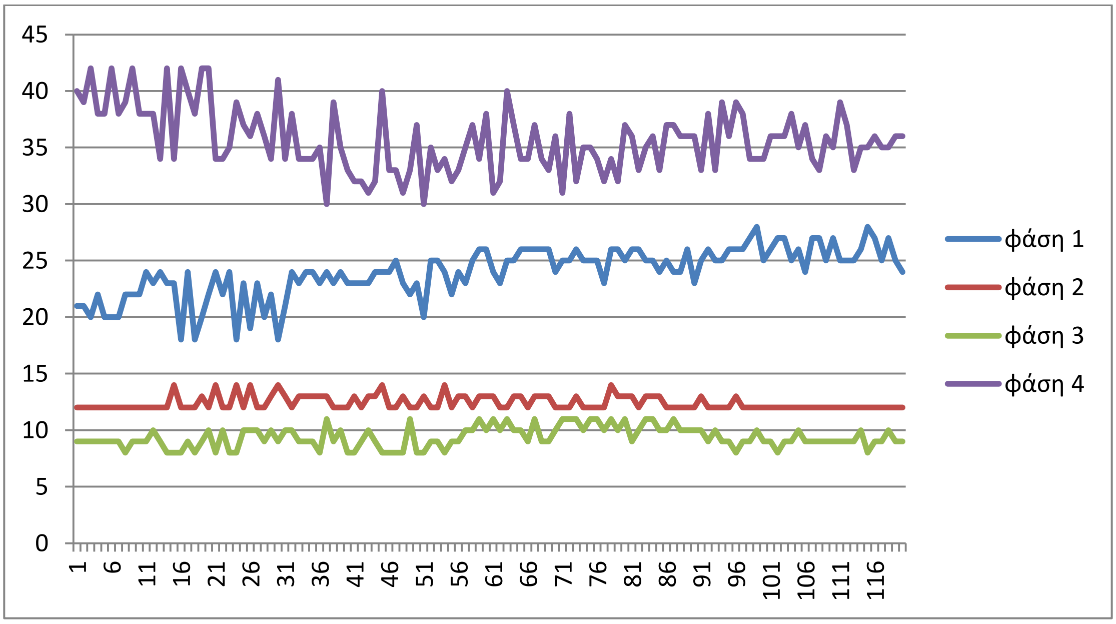
Η μεταβολή του alpha στον κόμβο που εμφανίζεται το μεγαλύτερο πρόβλημα στο δίκτυο. Η 3η φάση είναι αυτή που αντιμετοπίζει το μεγαλύτερο πρόβλημα.



Σχήμα 8.1.3.29

Πράσινοι Χρόνοι:

Η μεταβολή των πράσινων χρόνων στον κόμβο που δημιουργείται το μεγαλύτερο πρόβλημα.



Σχήμα 8.1.3.30

Οι φάσεις 1 και 4 δέχονται την μεγαλύτερη μεταβολή αύξησης και μείωσης αντίστοιχα.

Η 2η και 3η φάση παραμένουν σχεδόν σταθερές.

Οι αρχικοί πράσινοι χρόνοι του κόμβου και οι χρόνοι για τους οποίους βρέθηκε η καλύτερη τιμή της μέσης ταχύτητας του δικτύου:

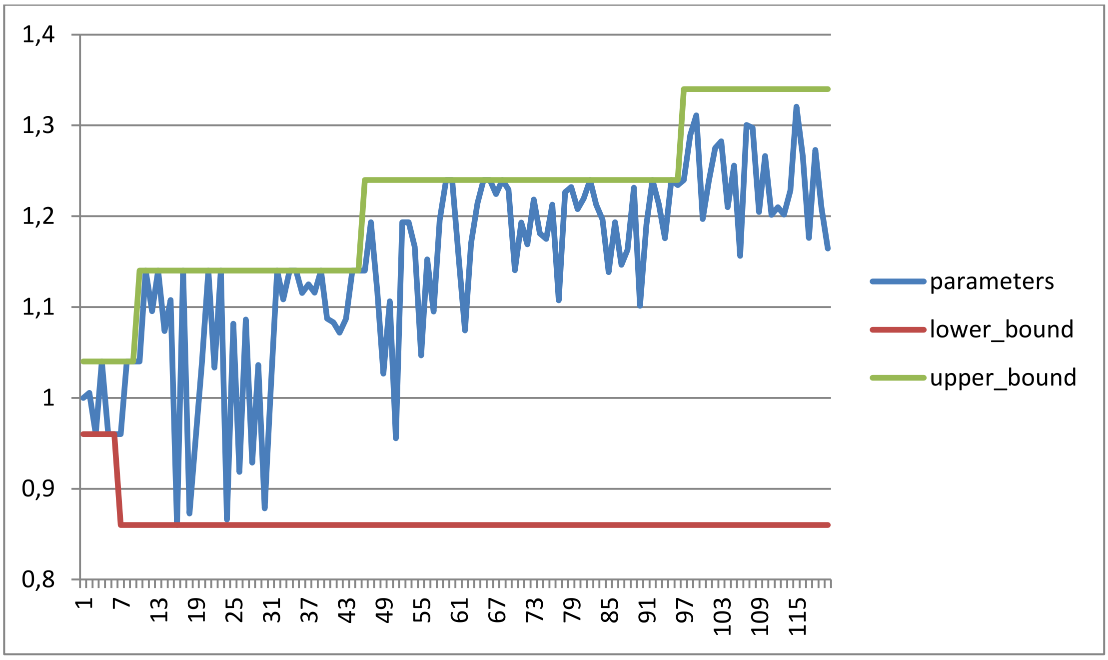
	φάση 1	φάση 2	φάση 3	φάση 4
Αρχικοί χρόνοι (δευτερόλεπτα)	21	12	9	40
Καλύτεροι χρόνοι (δευτερόλεπτα)	26	12	9	38

Πίνακας 8.1.3.31

Parameters-Bounds:

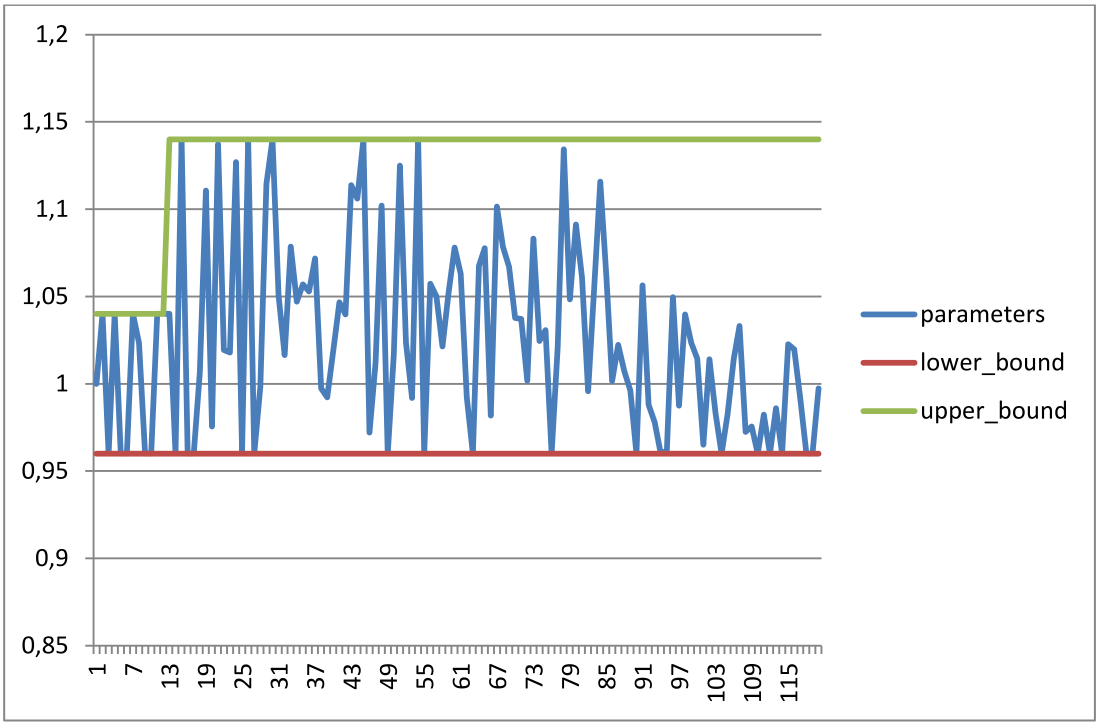
Η μεταβολή των parameters σε συνδιασμό με τη μεταβολή των άνω και κάτω ορίων για κάθε φάση.

<u>1η φαση:</u>



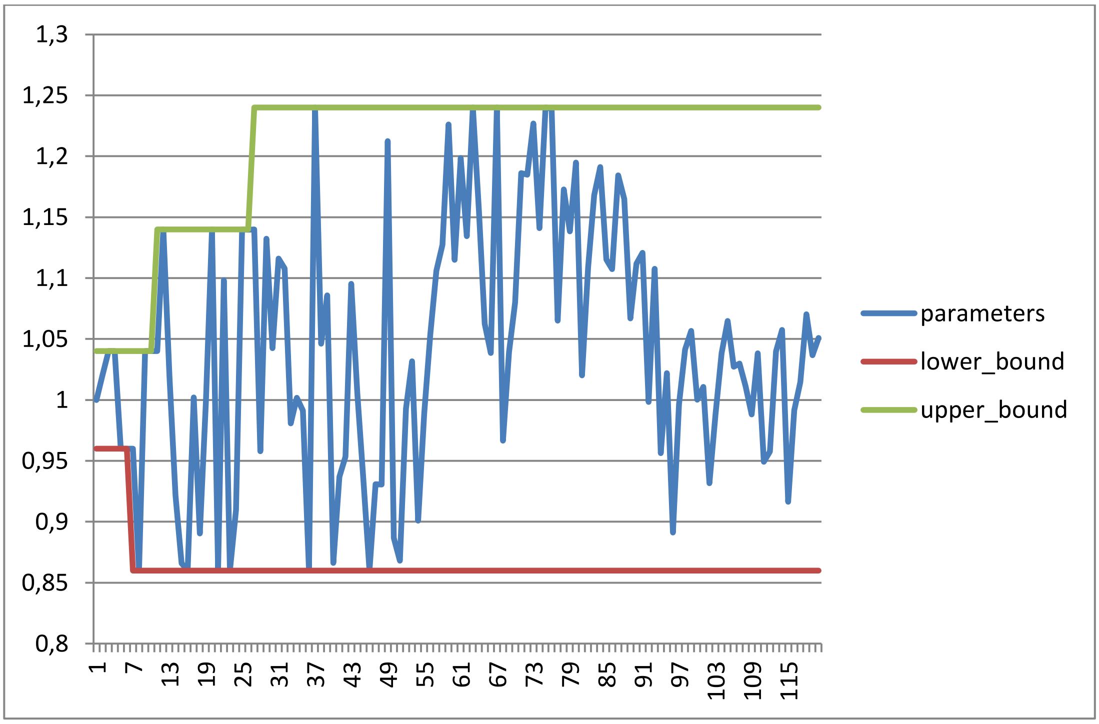
Σχήμα 8.1.3.32

2η φαση:



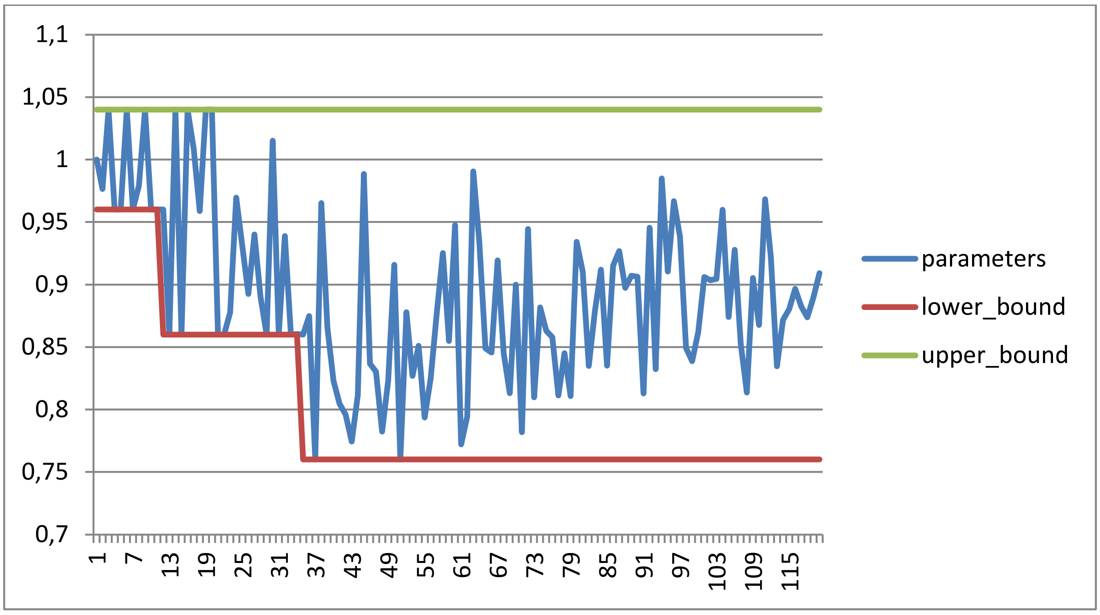
Σχήμα 8.1.3.33

3η φαση:



Σχήμα 8.1.3.34

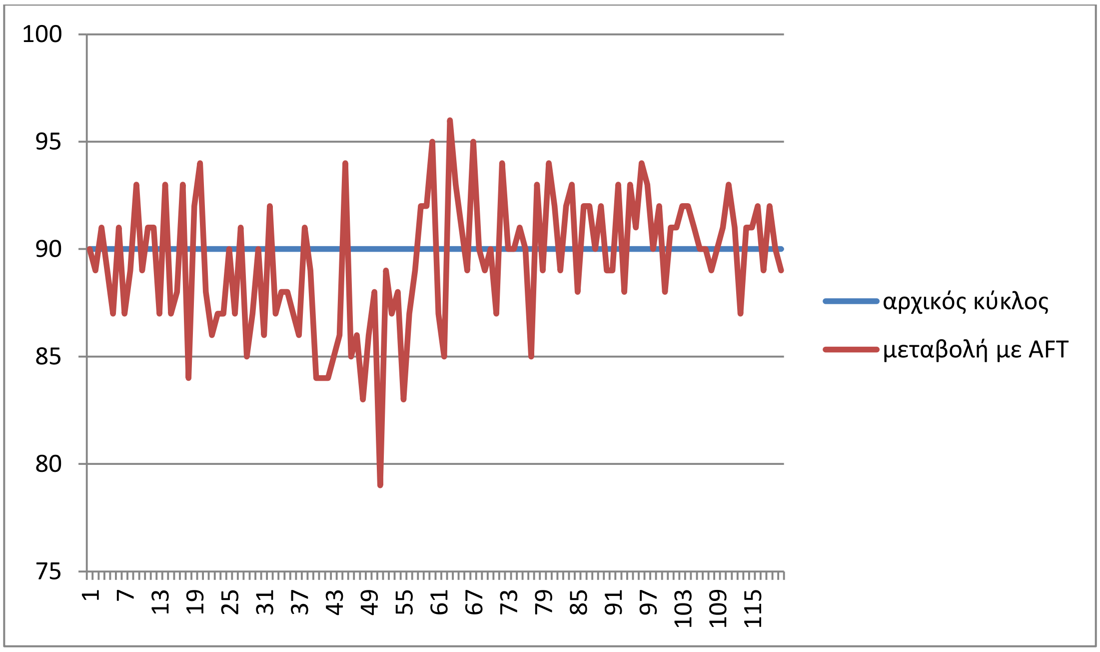
4η φαση:



Σχήμα 8.1.3.35

Μεταβολή Κύκλου:

Παρακάτω απεικονίζεται η μεταβολή του του χρόνου που υπέστει ο κύκλος του κόμβου με το μεγαλύτερο πρόβλημα στις 60 προσομοιώσεις κατά την εφαρμογή του αλγόριθμου AFT.

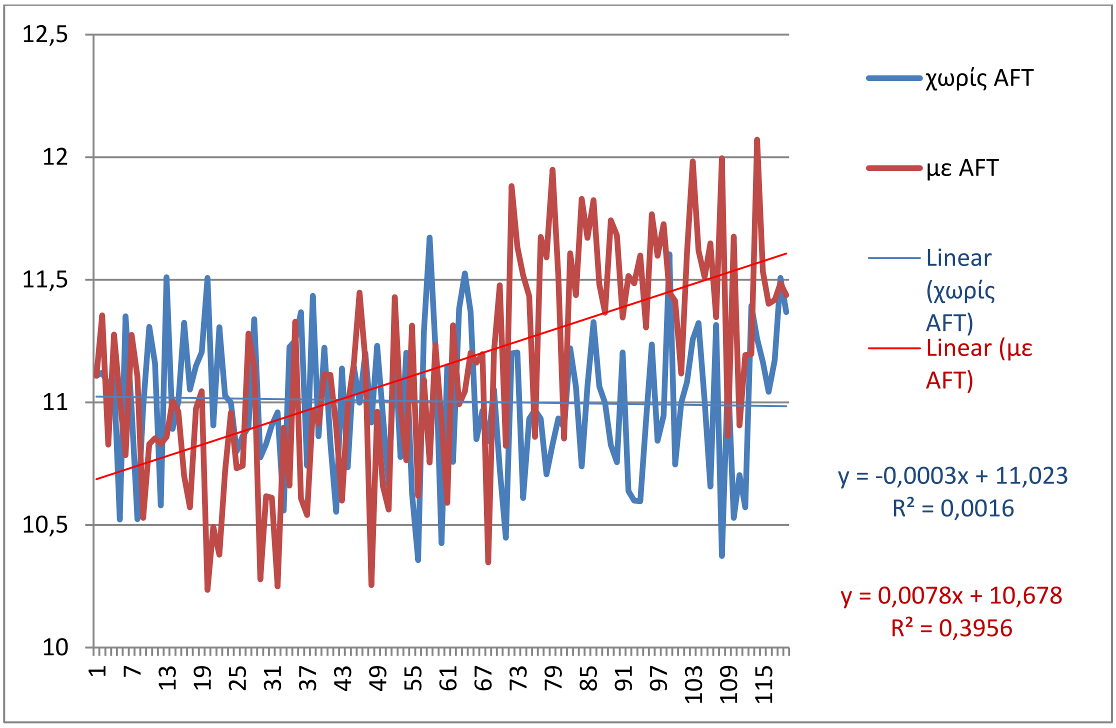


Σχήμα 8.1.3.36

36 κόμβοι

Μέση Ταχύτητα Δικτύου:

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η βελτίωση που έκανε ο αλγόριθμος AFT στη μέση ταχύτητα του δικτύου των 36 κόμβων για 120 προσομοιώσεις.



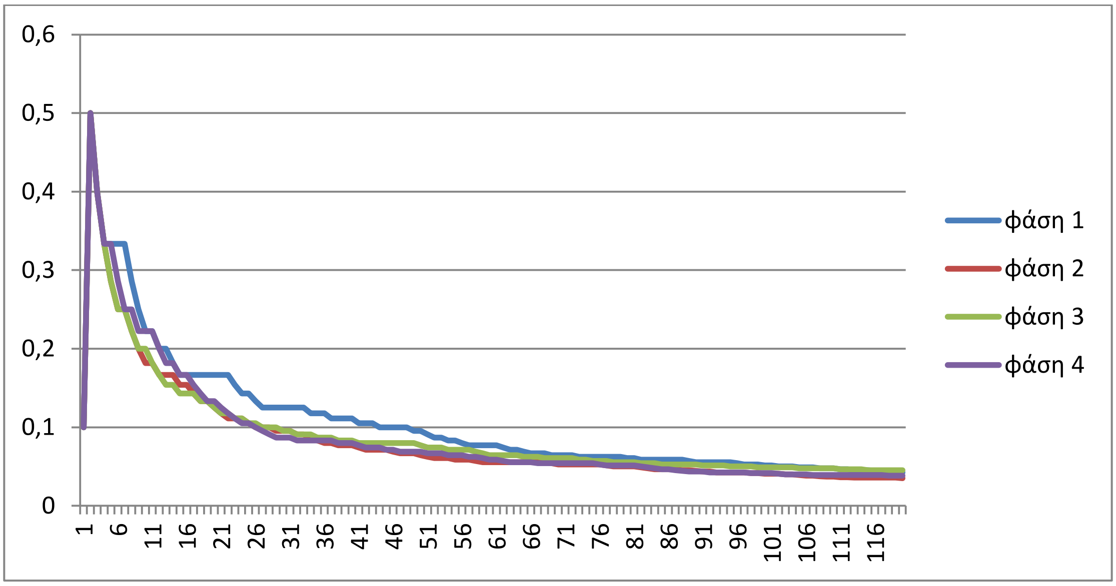
Σχήμα 8.1.3.37

Στις πρώτες προσομοιώσεις προκύπτουν κάποιες χαμηλές τιμές της ταχύτητας από τον αλγόριθμο AFT, συνεπώς η γραμμή τάσης βρίσκεται κάτω από την αρχική γραμμή. Στη συνέχεια επιτύγχανει να βελτιώσει την ταχύτητα του δικτύου και η γραμμή τάσης παραμένει πάνω από την αρχική.

Το ποσοστό αύξησης του μέσου όρου της ταχύτητας του δικτύου που επιτυγχάνεται είναι 1,3%, ενώ της μέγιστης ταχύτητας 3,4%. Η τιμή της μέγιστης ταχύτητας παρατηρείται στην 114^{η} επανάληψη και είναι 12,1 km/h .

alpha:

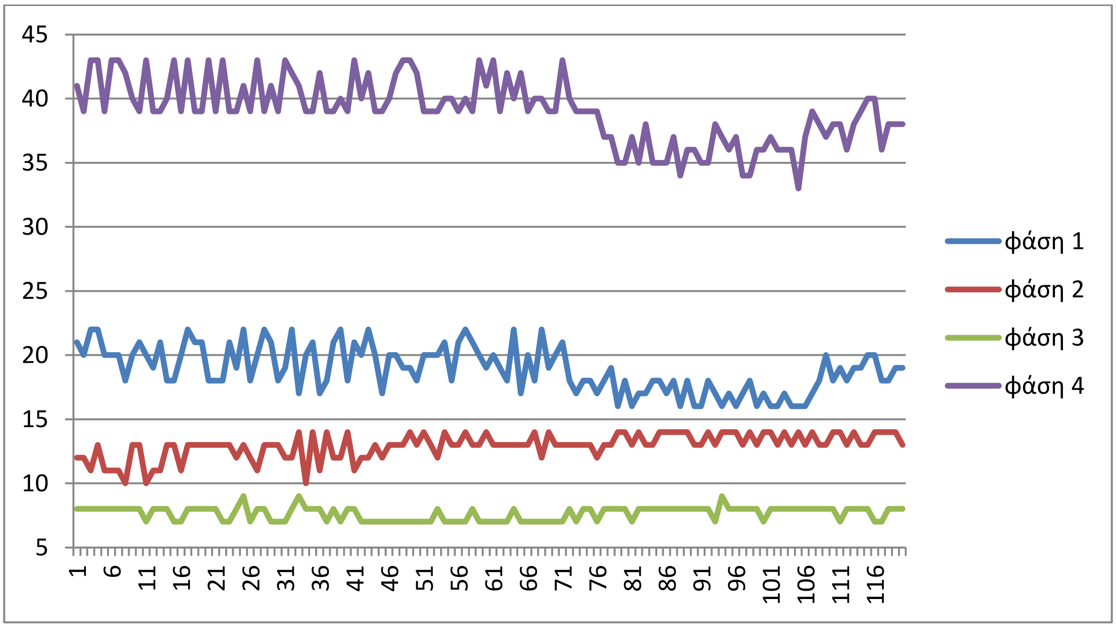
Η μεταβολή του alpha στον κόμβο που εμφανίζεται το μεγαλύτερο πρόβλημα στο δίκτυο. Η 3^{η} φάση είναι αυτή που αντιμετοπίζει το μεγαλύτερο πρόβλημα.



Σχήμα 8.1.3.38

Πράσινοι Χρόνοι:

Η μεταβολή των πράσινων χρόνων στον κόμβο που δημιουργείται το μεγαλύτερο πρόβλημα.



Σχήμα 8.1.3.39

Οι μεταβολές των πράσινων χρόνων που παρατηρούνται δεν είναι μεγάλες. Οι φάσεις 1 και 4 έχουν καθοδική τάση, ενώ η φάση 2 ανοδική.

Η φάση 3 παραμένει σχεδόν σταθερή.

Οι αρχικοί πράσινοι χρόνοι του κόμβου και οι χρόνοι για τους οποίους βρέθηκε η καλύτερη τιμή της μέσης ταχύτητας του δικτύου:

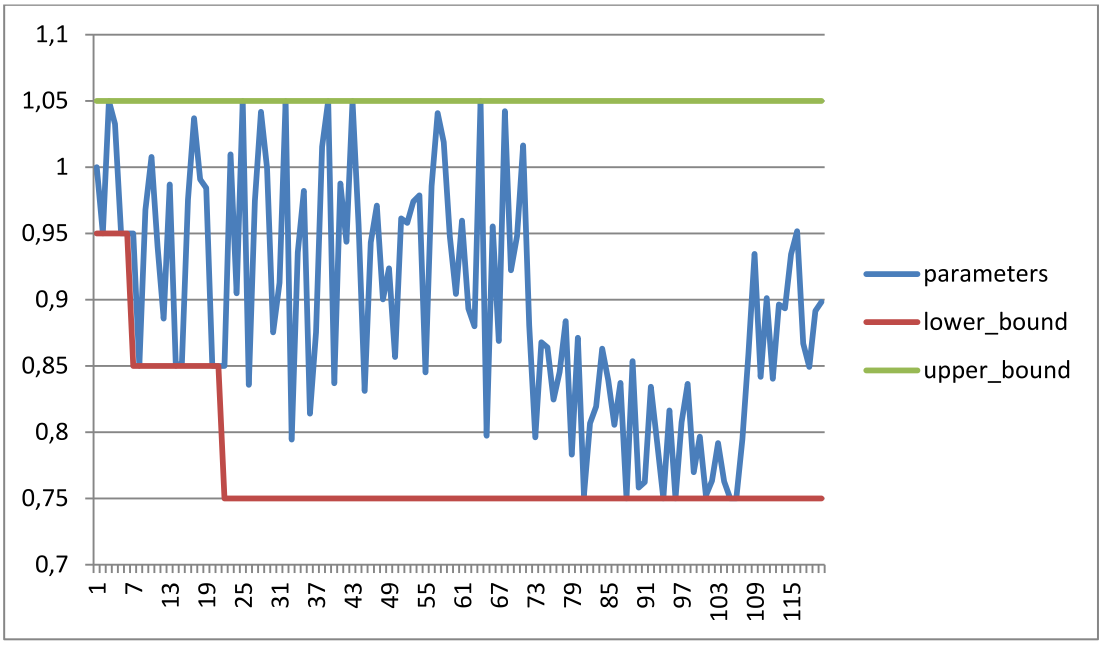
	φάση 1	φάση 2	φάση 3	φάση 4
Αρχικοί χρόνοι (δευτερόλεπτα)	21	12	8	41
Καλύτεροι χρόνοι (δευτερόλεπτα)	19	13	8	39

Πίνακας 8.1.3.40

Parameters-Bounds:

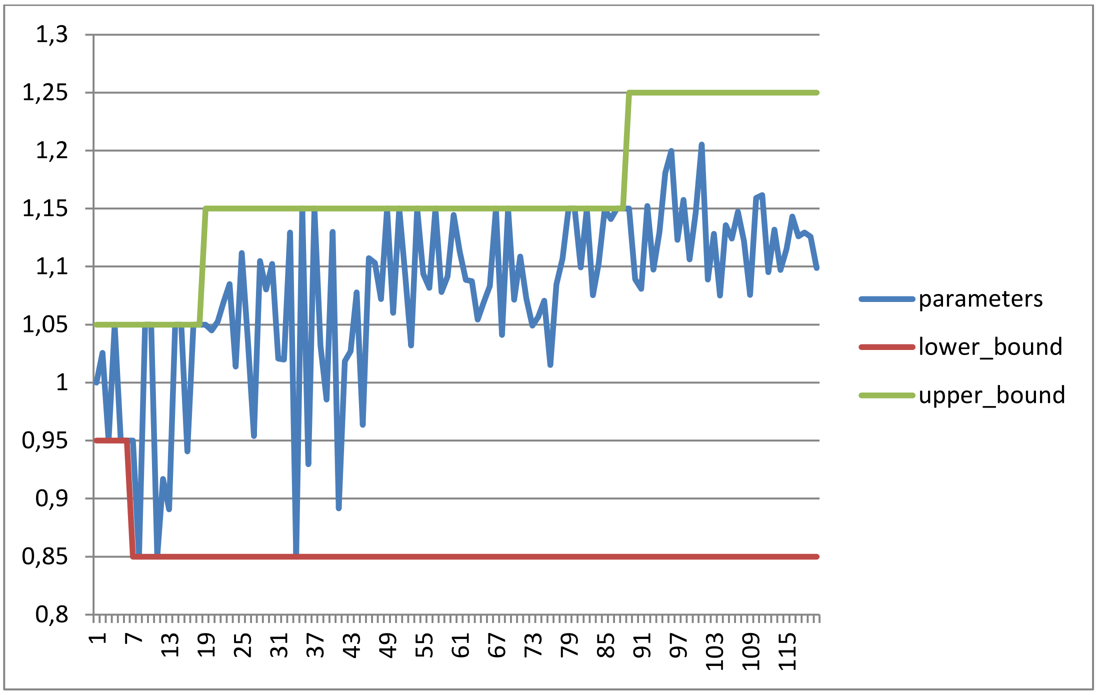
Η μεταβολή των parameters σε συνδιασμό με τη μεταβολή των άνω και κάτω ορίων για κάθε φάση.

<u>1η φαση:</u>



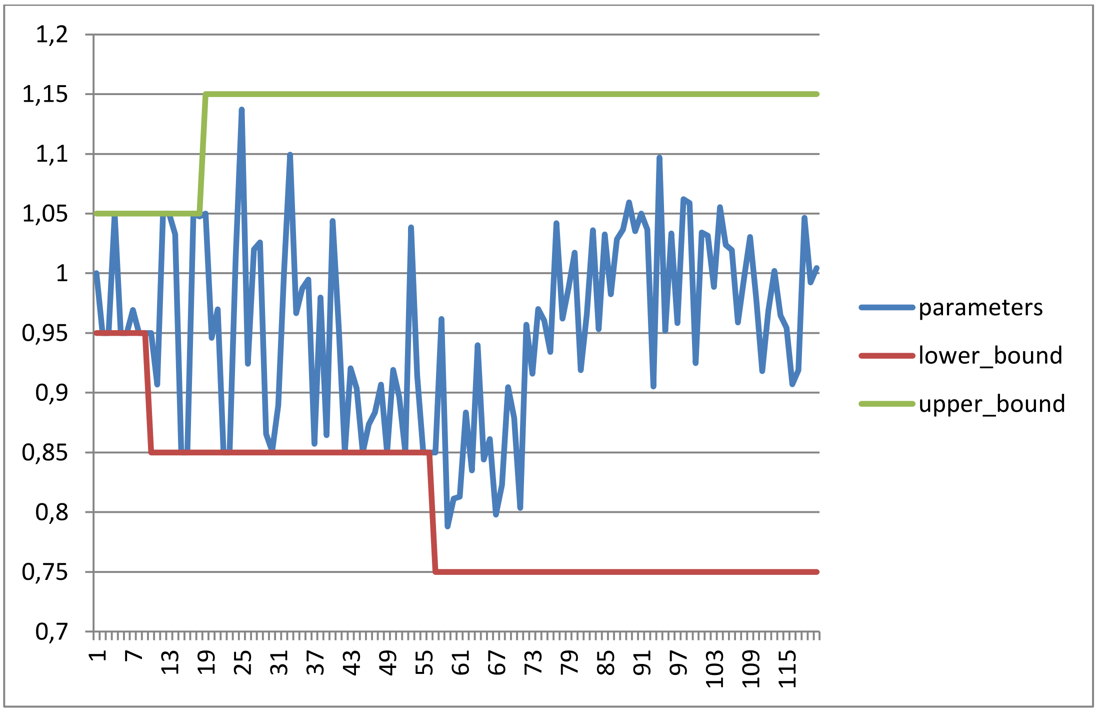
Σχήμα 8.1.3.41

2η φαση:



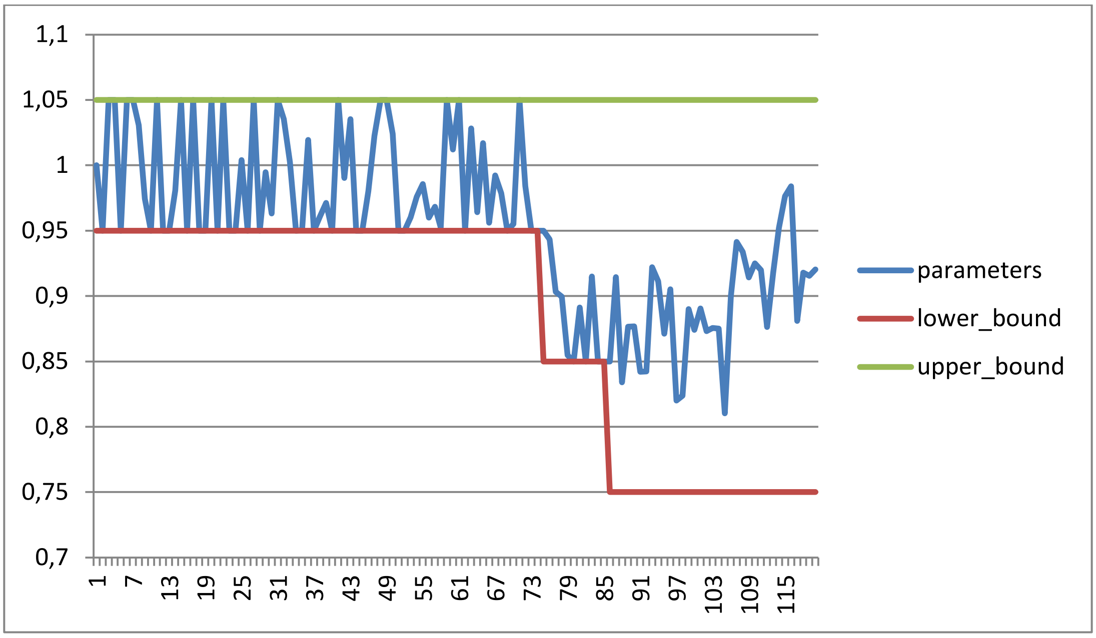
Σχήμα 8.1.3.42

3η φαση:



Σχήμα 8.1.3.43

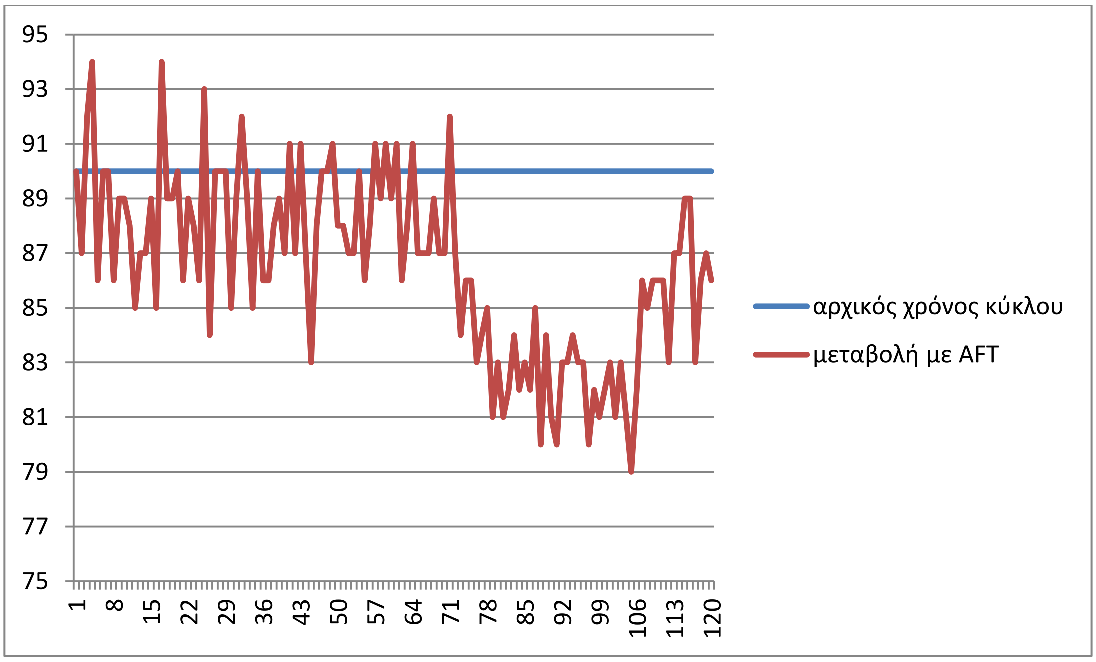
4^{η} φαση:



Σχήμα 8.1.3.44

Μεταβολή Κύκλου:

Παρακάτω απεικονίζεται η μεταβολή του του χρόνου που υπέστει ο κύκλος του κόμβου με το μεγαλύτερο πρόβλημα στις 60 προσομοιώσεις κατά την εφαρμογή του αλγόριθμου AFT.



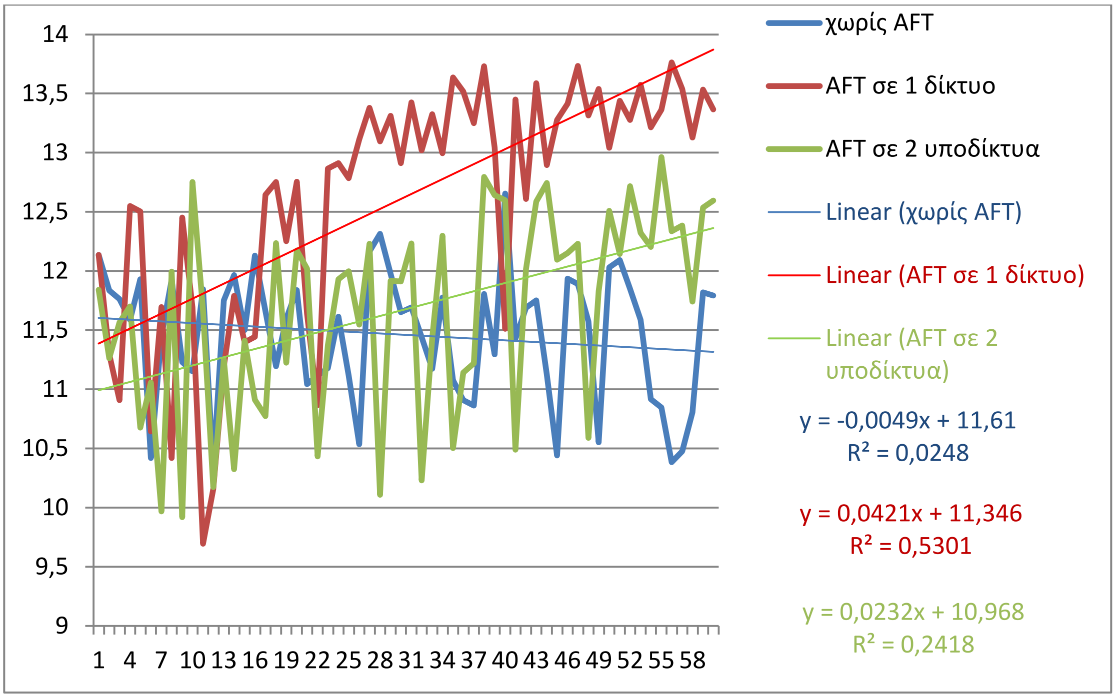
Σχήμα 8.1.3.45

8.1.4.Αλγόριθμος Διαχωρισμού Σταθερού Κύκλου:

- **16 κόμβοι**

Μέση Ταχύτητα Δικτύου:

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μέσης ταχύτητας του δικτύου των 16 κόμβων μετά το διαχωρισμό του σε 2 υποδίκτυα των 8 κόμβων, σε συνδιασμό με τα αποτελέσματα πριν το χωρισμό.Τα αποτελέσματα έχουν προκύψει από 60 προσομοιώσεις στον προσομοιωτή AIMSUN.



Σχήμα 8.1.4.1

Βλέπουμε ότι με το διαχωρισμό των δικτύων σε αυτή την περίπτωση οδηγούμαστε σε κάποιες χαμηλές τιμές της ταχύτητας στην αρχή των προσομοιώσεων και συνεπώς η γραμμή τάσης είναι κάτω από την αρχική γραμμή. Στη συνέχεια παρατηρείται βελτίωση των τιμών και έτσι η γραμμή παραμένει σταθερά πάνω από την αρχική.

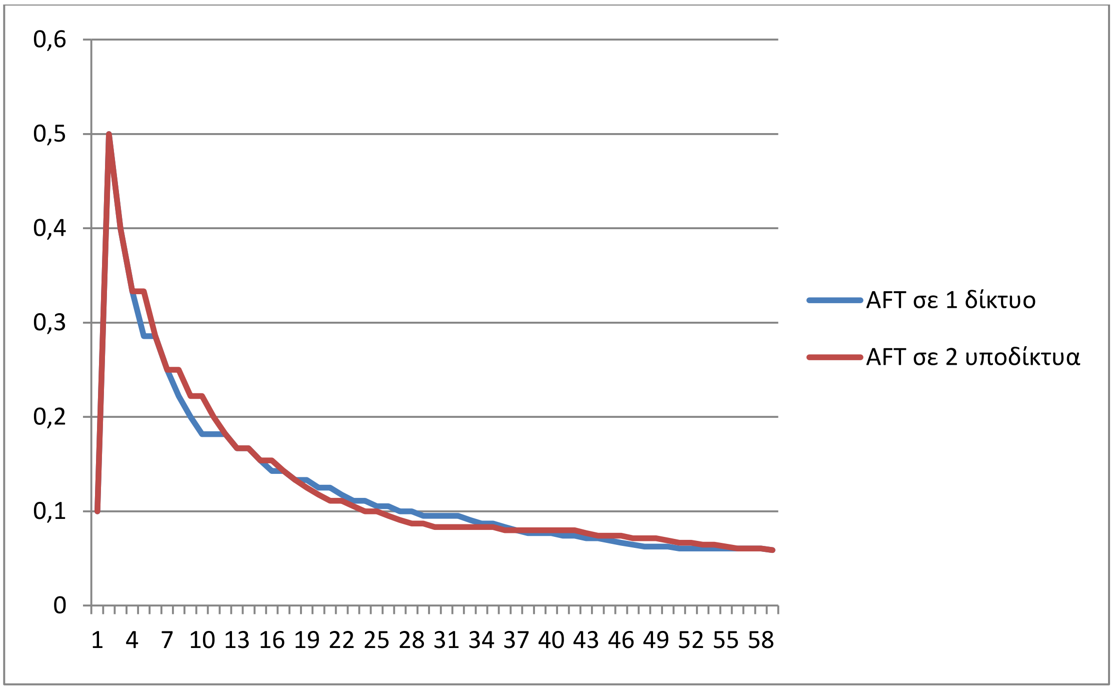
Ο μέσος όρος της ταχύτητας αυξάνεται κατά 1,9%, αλλά και της μέγιστης ταχύτητας 2,4%. Η μέγιστη ταχύτητα επιτεύχθηκε στην 55^{η} επανάληψη με τιμή 13 km/h .

Παρατηρούμε ότι η βελτίωση της απόδοσης που επιτυγχάνεται με την μέθοδο του διαχωρισμού δεν είναι μεγαλύτερη από αυτή που επιτυγχάνεται χωρίς τον διαχωρισμό του δικτύου και μάλιστα με αρκετή διαφορά. Η βελτίωση του μέσου όρου της ταχύτητας που είχε πετύχει ο αλγόριθμος AFT πριν τον διαχωρισμό ήταν 10,2%.

Alpha:

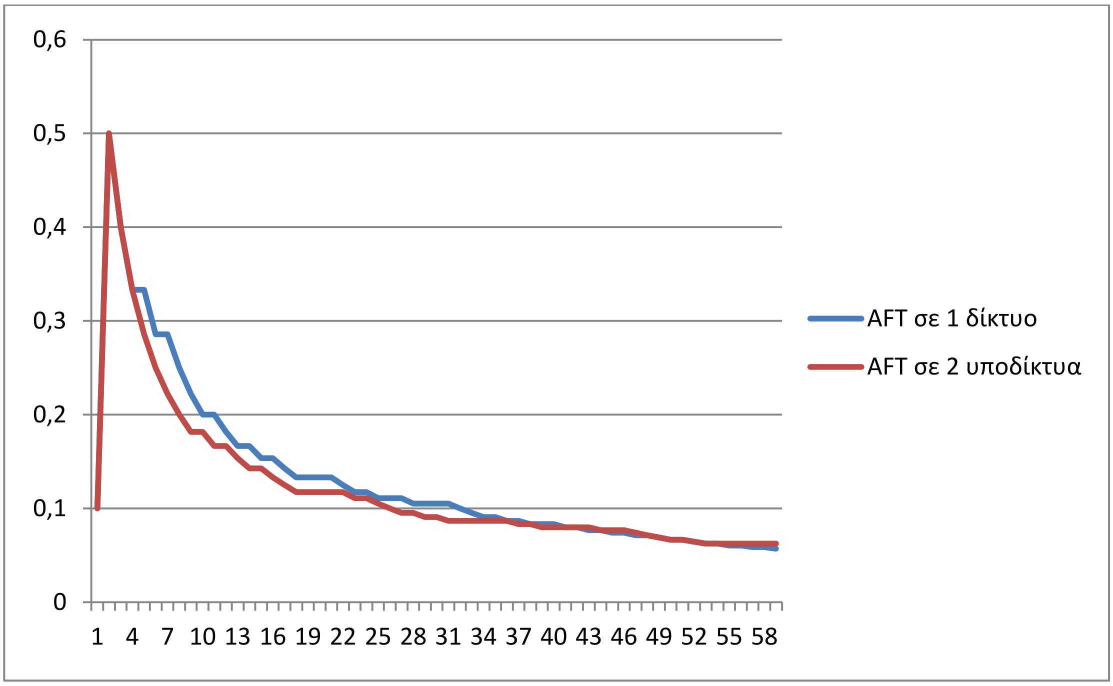
Η μεταβλητή alpha για τον κόμβο που παρουσιάζει το μεγαλύτερο πρόβλημα στο δίκτυο για τις 2 περιπτώσεις. Η 3η φαση είναι η φάση που παρατηρείται το μεγαλύτερο πρόβλημα.

<u>1η φαση:</u>



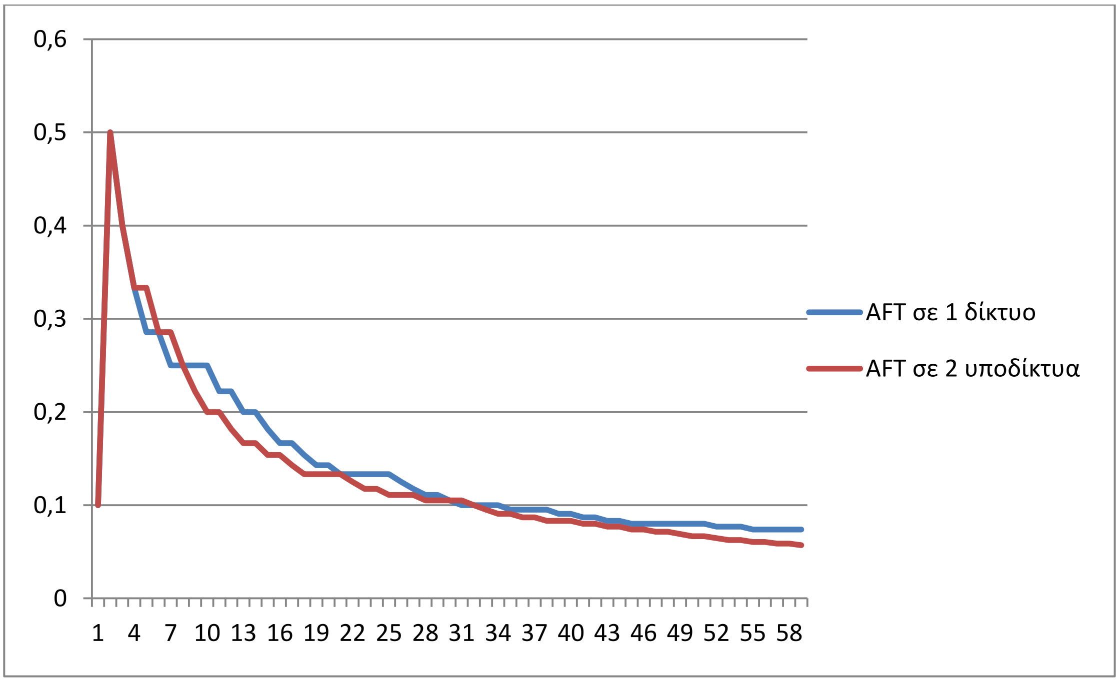
Σχήμα 8.1.4.2

2η φαση:



Σχήμα 8.1.4.3

3η φαση:

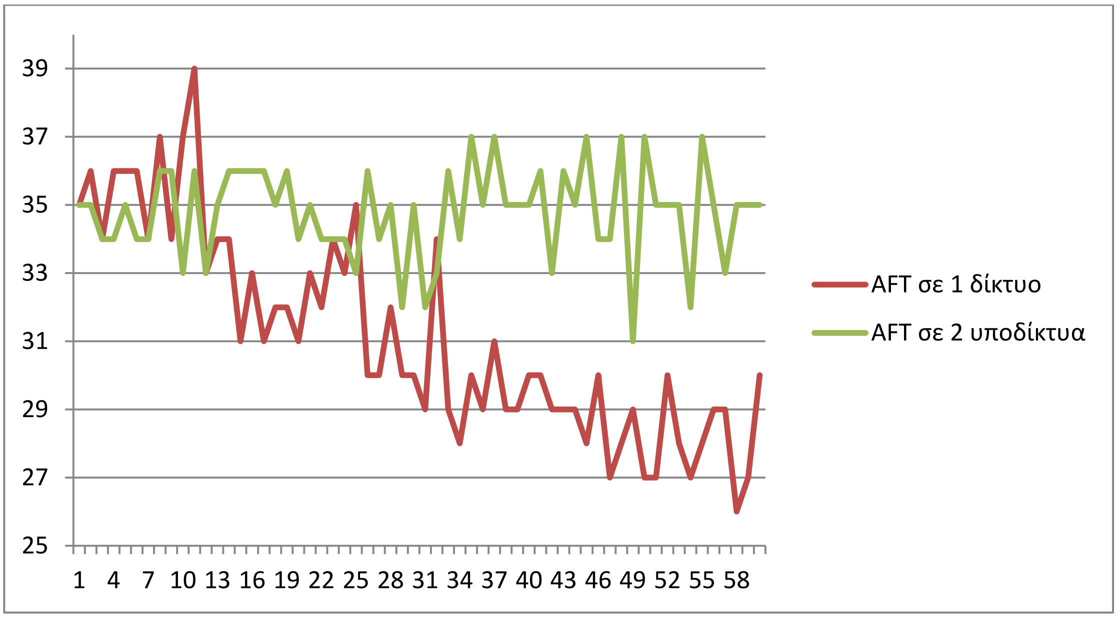


Σχήμα 8.1.4.4

Πράσινοι Χρόνοι:

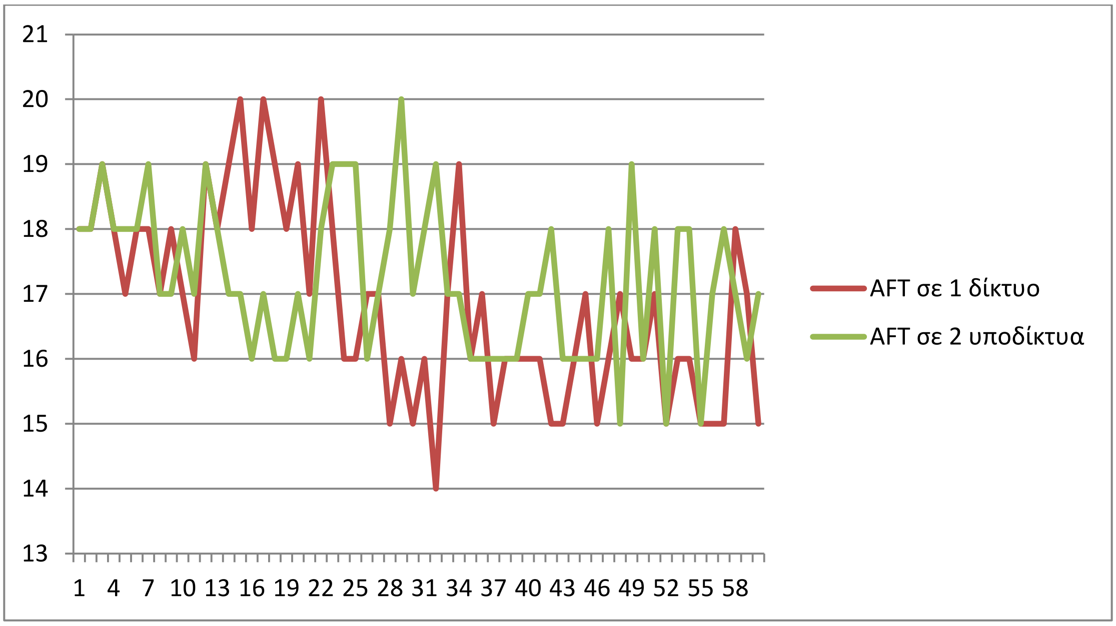
Η μεταβολή των πράσινων χρόνων στον κόμβο που δημιουργείται το μεγαλύτερο πρόβλημα στις 2 περιπτώσεις.

1η φαση:



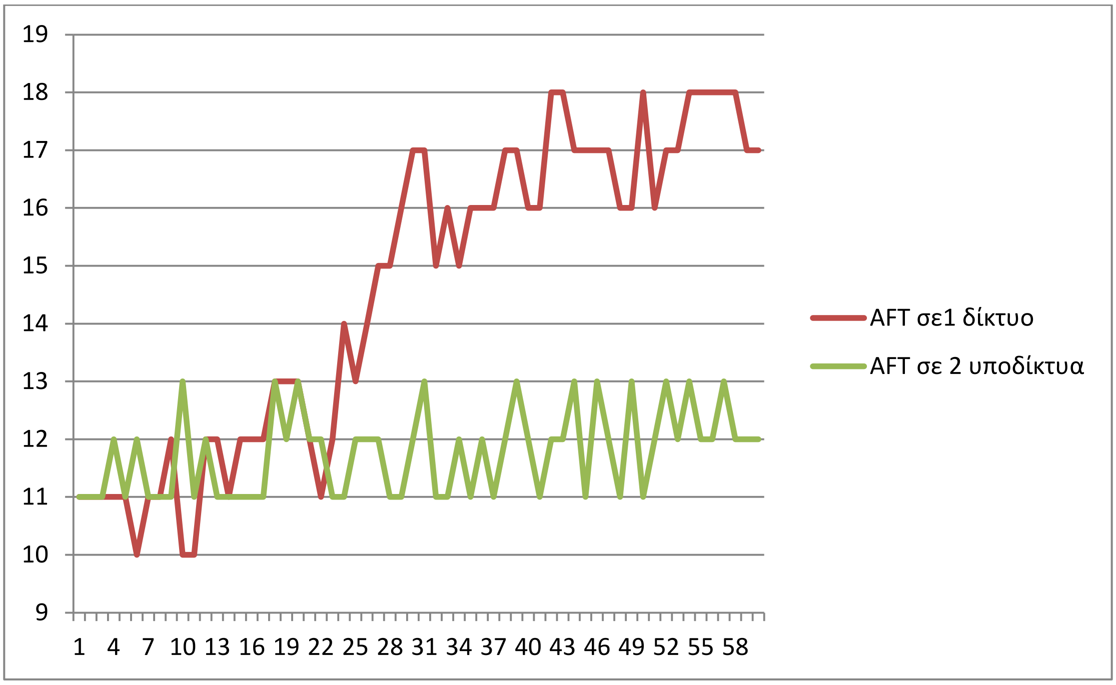
Σχήμα 8.1.4.5

2η φαση:



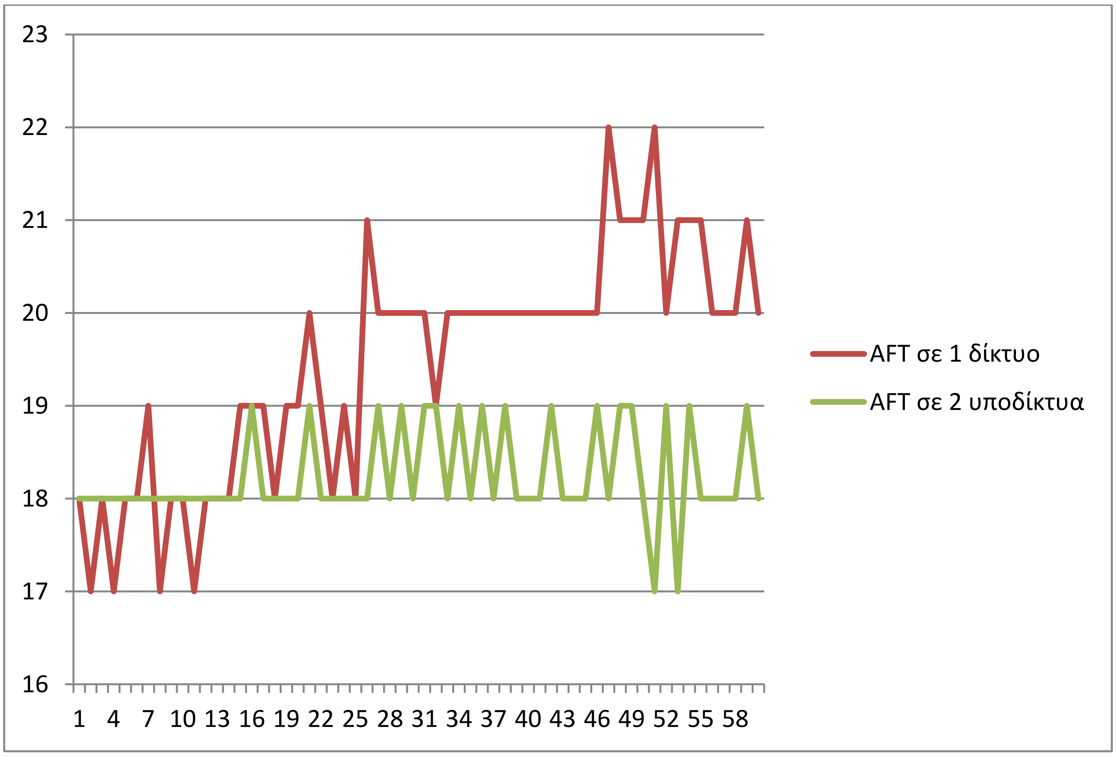
Σχήμα 8.1.4.6

3^{η} φαση:



Σχήμα 8.1.4.7

4^{η} φαση:



Σχήμα 8.1.4.8

Στις περισσότερες περιπτώσεις οι πράσινοι χρόνοι για την περίπτωση του διαχωρισμού παραμένουν σχεδόν σταθεροί, έχοντας μεγάλη διαφορά σε συμπεριφορά από την εφαρμογή του AFT στο δίκτυο χωρίς διαχωρισμό. Αυτό δείχνει ότι δυσκολέυεται να επιτευχθεί σύγκλιση σε αυτή την περίπτωση, συνεπώς και βελτίωση.

Οι αρχικοί πράσινοι χρόνοι του κόμβου και οι χρόνοι για τους οποίους βρέθηκε η καλύτερη τιμή της μέσης ταχύτητας του δικτύου:

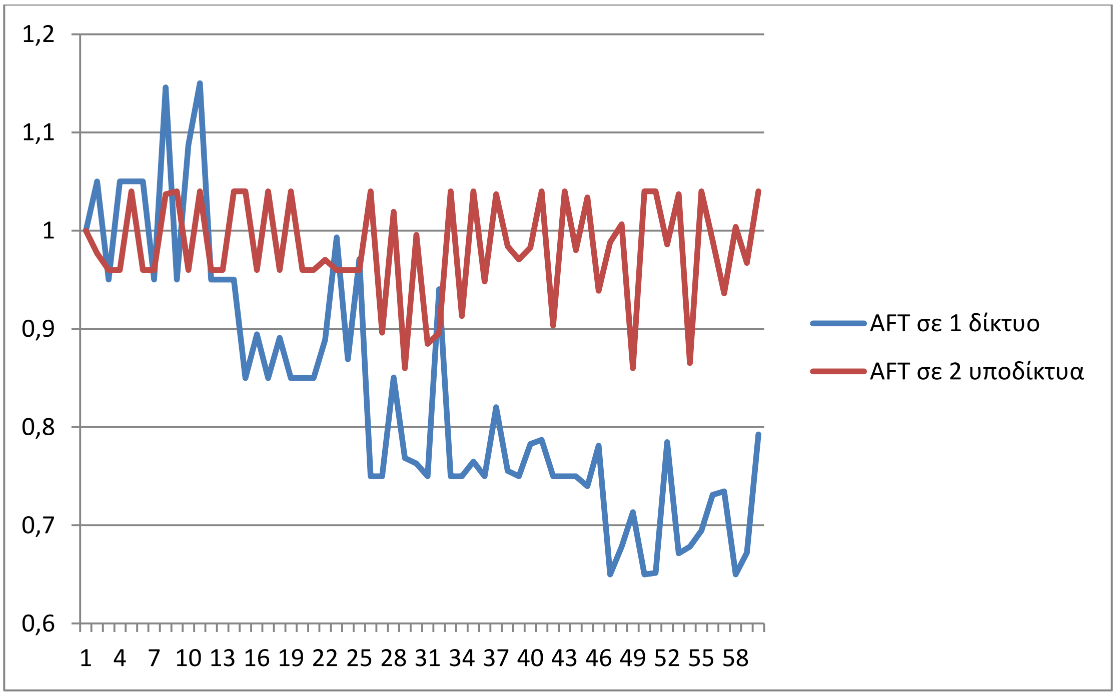
	φάση 1	φάση 2	φάση 3	φάση 4
Αρχικοί χρόνοι (δευτερόλεπτα)	35	18	11	18
Καλύτεροι χρόνοι (δευτερόλεπτα)	37	15	12	18

Πίνακας 8.1.4.9

Parameters:

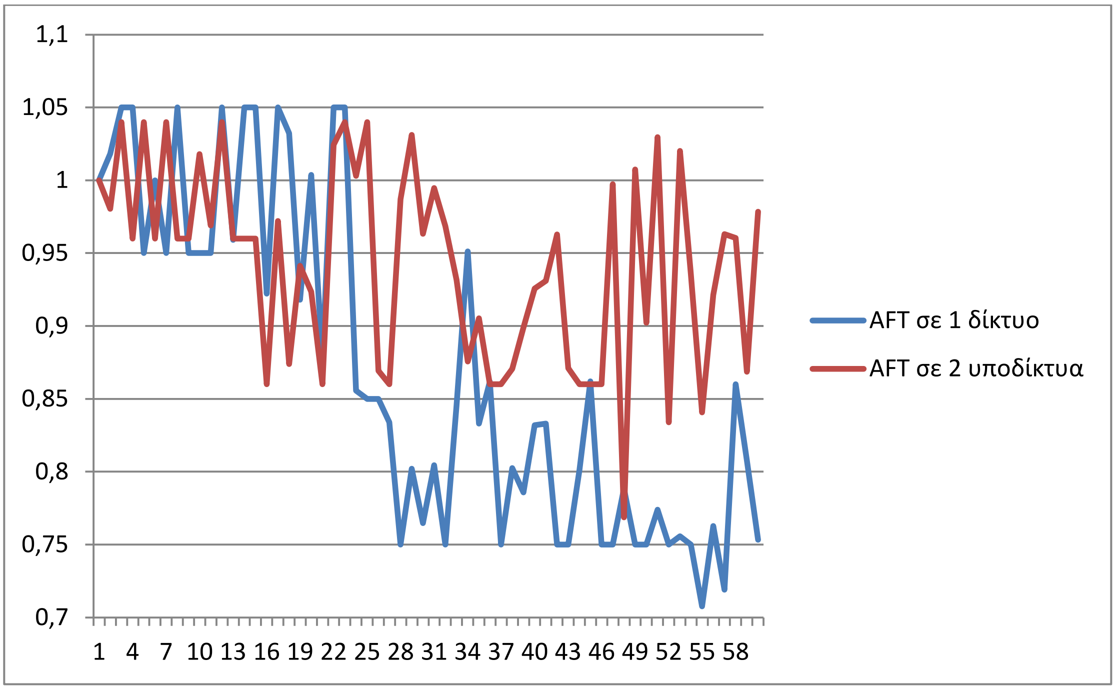
Η μεταβολή των παραμέτρων για τις 2 περιπτώσεις.

<u>1η φαση:</u>



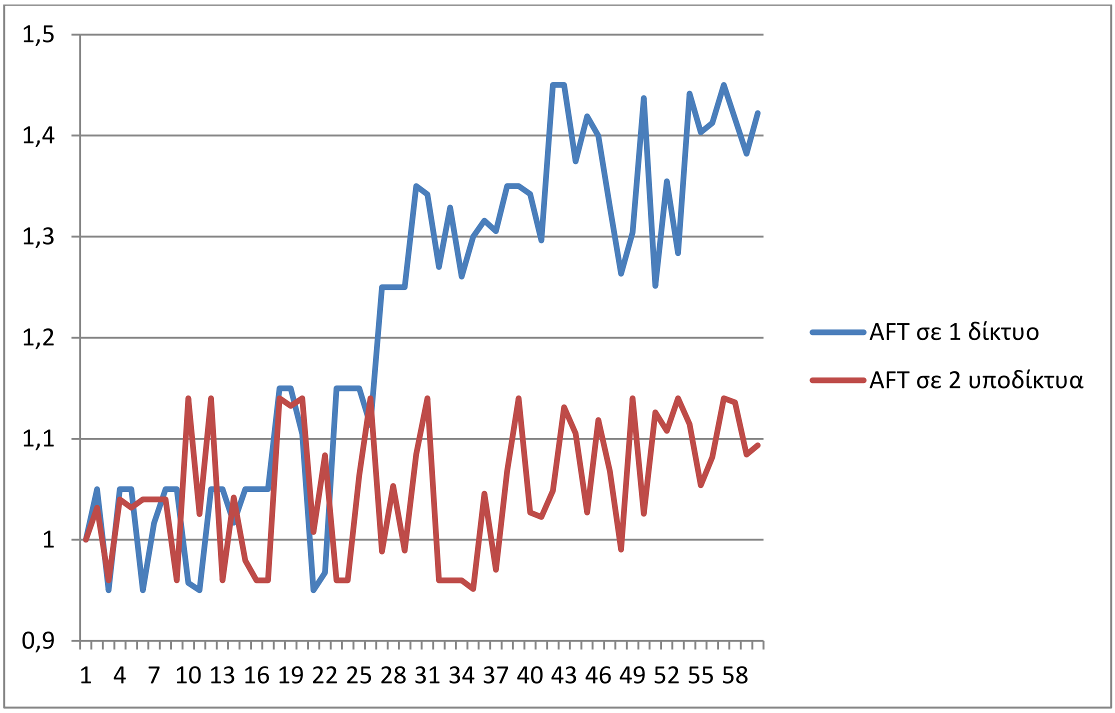
Σχήμα 8.1.4.10

2^{η} φαση:



Σχήμα 8.1.4.11

3^{η} φαση:

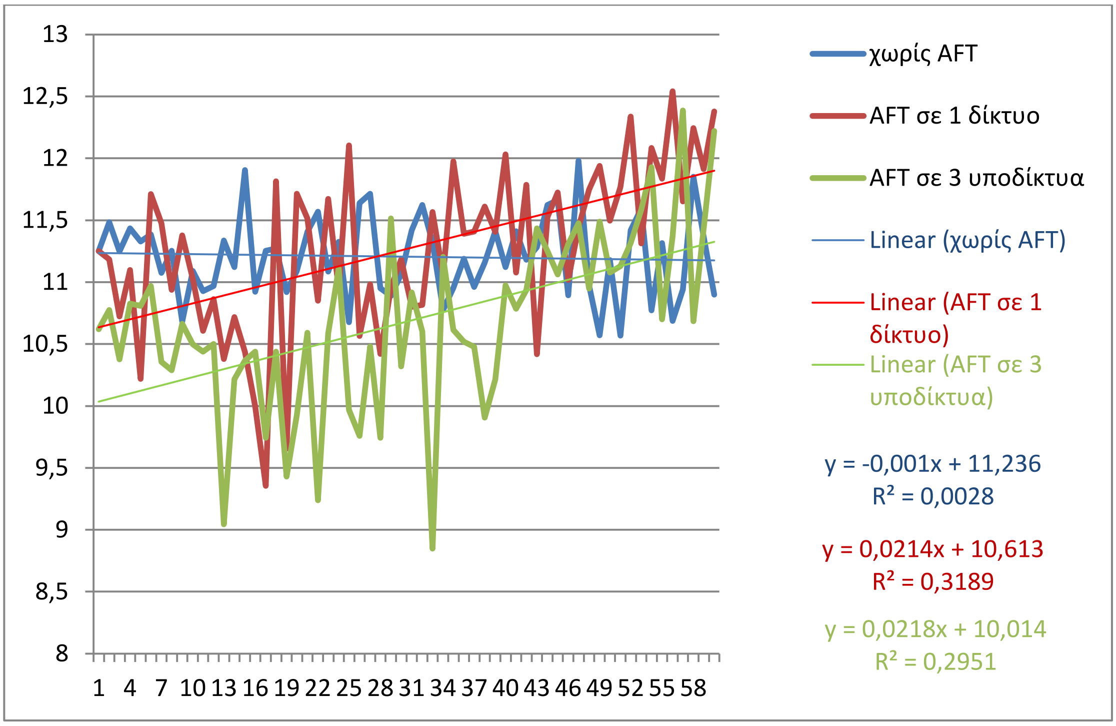


Σχήμα 8.1.4.12

25 κόμβοι

Μέση Ταχύτητα Δικτύου:

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μέσης ταχύτητας του δικτύου των 25 κόμβων μετά το διαχωρισμό του σε 3 υποδίκτυα των 6, 9 και 10 κόμβων, σε συνδιασμό με τα αποτελέσματα πριν το χωρισμό.Τα αποτελέσματα έχουν προκύψει από 60 προσομοιώσεις στον προσομοιωτή AIMSUN.



Σχήμα 8.1.4.13

Βλέπουμε ότι υπάρχει βελτιωτική τάση, η κλίση της οποίας ομώς είναι μικρή με αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται βελτίωση της αρχικής μέσης ταχύτητας στις 60 προσομοιώσεις.

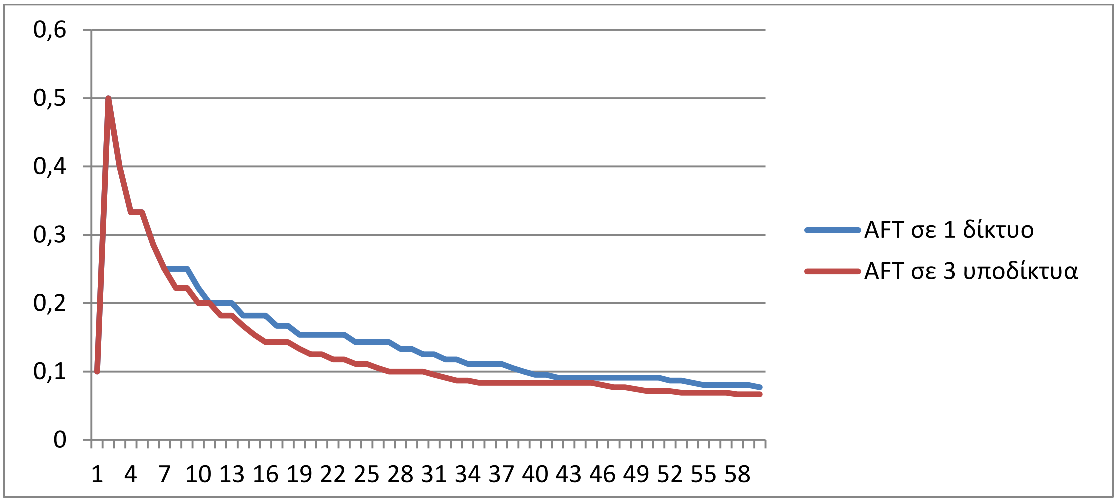
Με τον διαχωρισμό του δικτύου των 25 κόμβων σε 3 υποδίκτυα παρατηρείται μείωση του μέσου όρου της ταχύτητας κατά 4,7%.Η μέγιστη ταχύτητα παρά την μείωση της απόδοσης του δικτύου αυξήθηκε κατά 3,4%. Η μέγιστη ταχύτητα επιτεύχθηκε στην $57^{η}$ επανάληψη με τιμή 12,4 km/h .

Και στο δίκτυο των 25 κόμβων επομένως ο αλγόριθμος AFT φέρεται καλύτερα με την μέθοδο σταθερού κύκλου χωρίς διαχωρισμό.

Alpha:

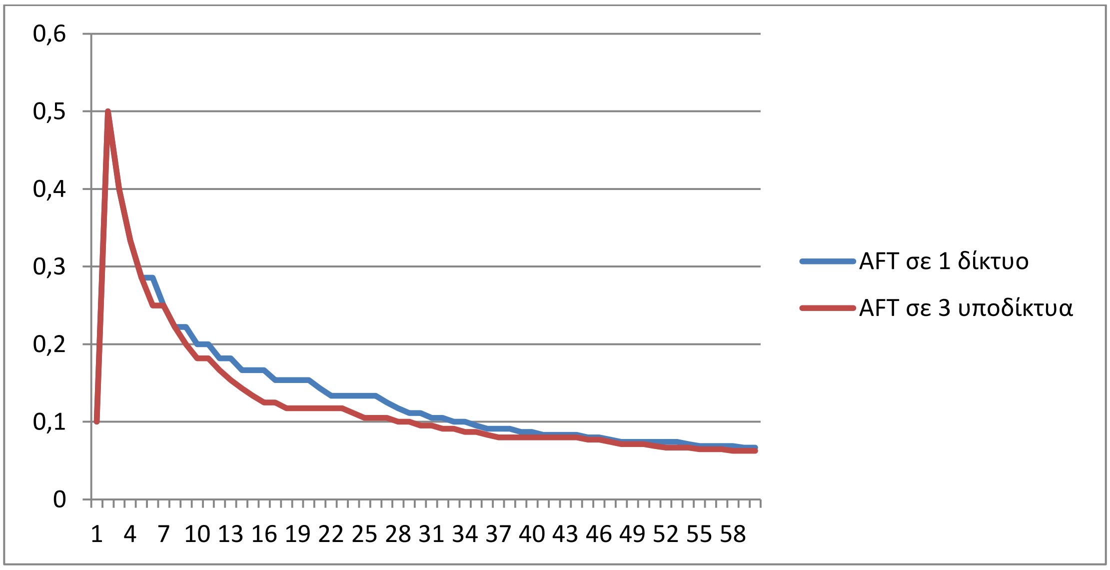
Η μεταβλητή alpha για τον κόμβο που παρουσιάζει το μεγαλύτερο πρόβλημα στο δίκτυο για τις 2 περιπτώσεις. Η $3^η$ φαση είναι η φάση που παρατηρείται το μεγαλύτερο πρόβλημα.

<u>$1^η$ φαση:</u>



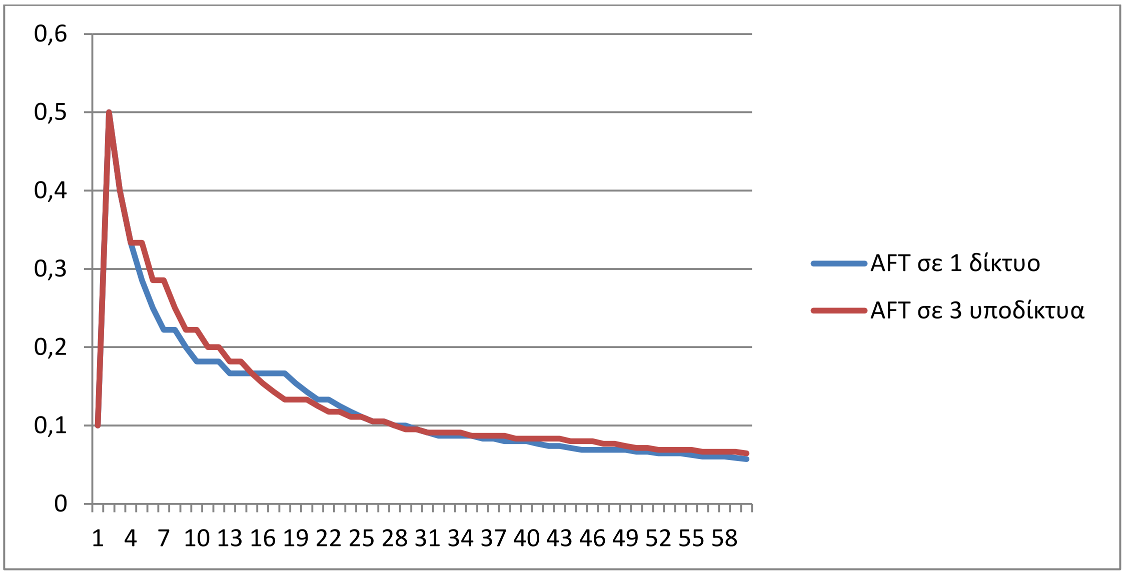
Σχήμα 8.1.4.14

<u>$2^η$ φαση:</u>



Σχήμα 8.1.4.15

$3^η$ φαση:

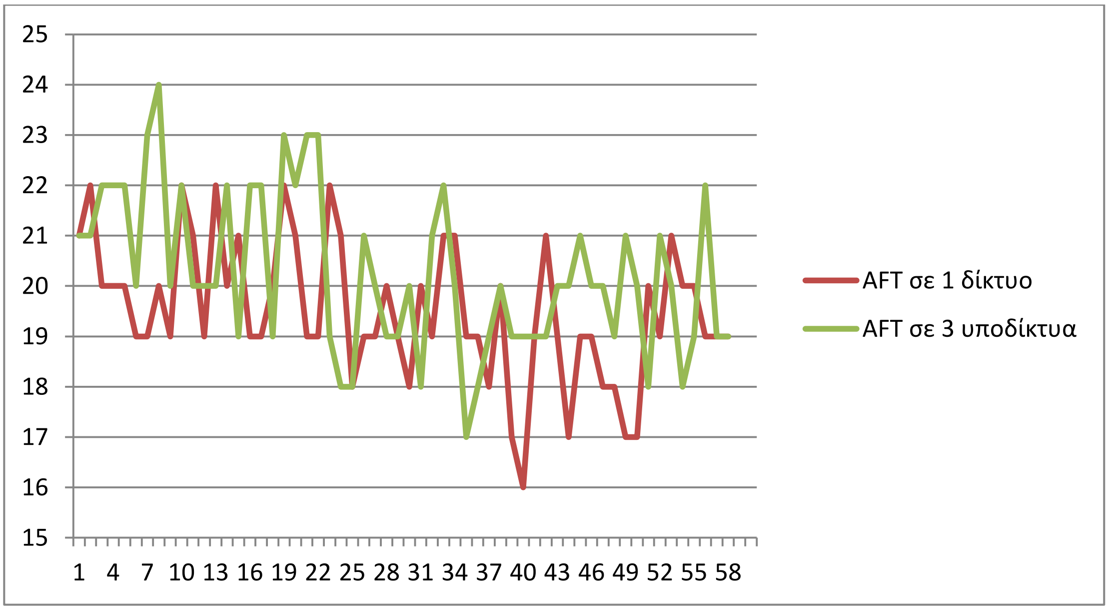


Σχήμα 8.1.4.16

Πράσινοι Χρόνοι:

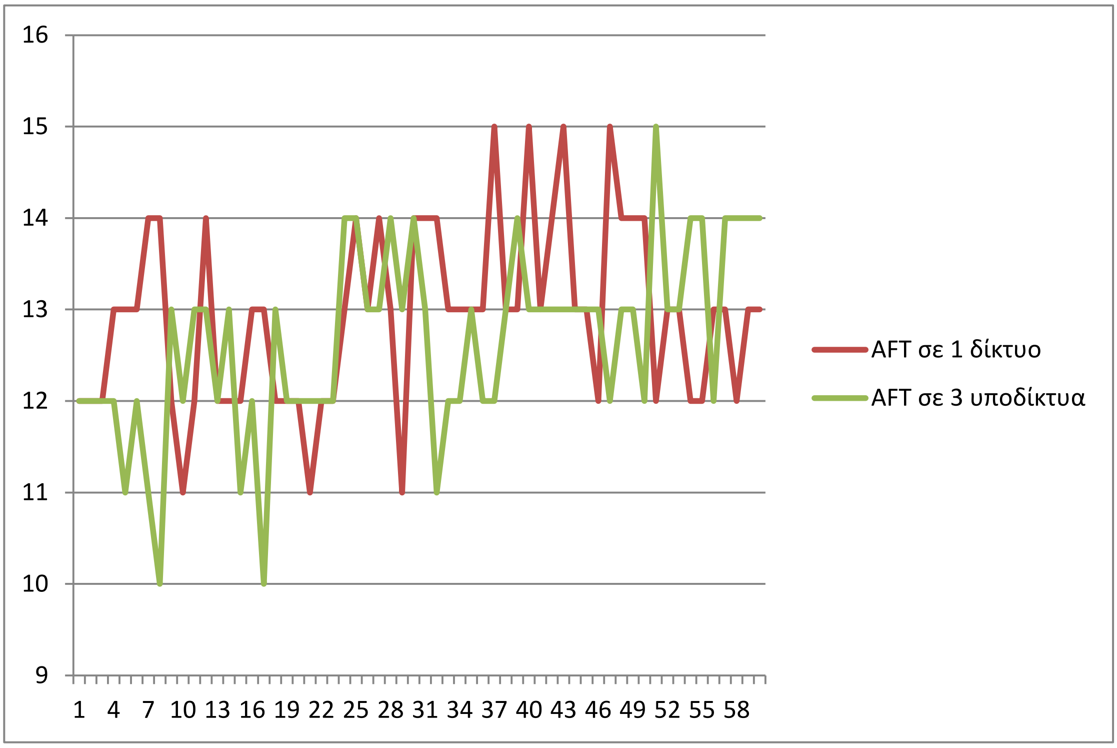
Η μεταβολή των πράσινων χρόνων στον κόμβο που δημιουργείται το μεγαλύτερο πρόβλημα στις 2 περιπτώσεις.

$1^η$ φαση:



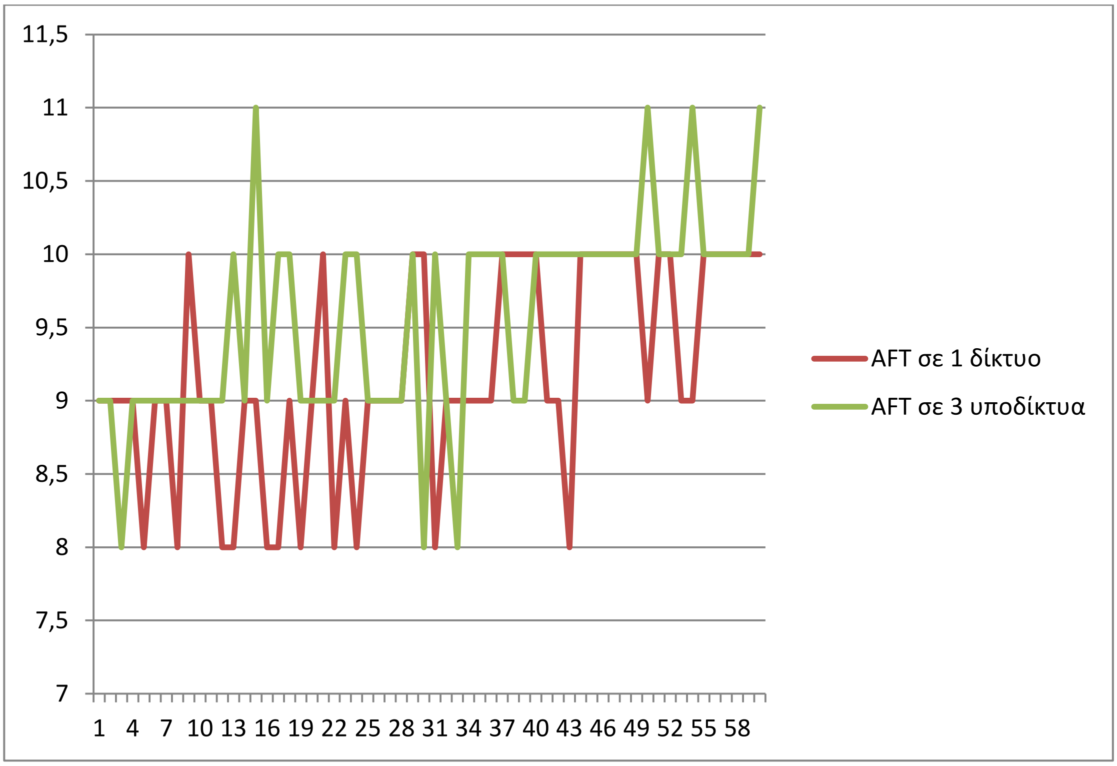
Σχήμα 8.1.4.17

2η φαση:



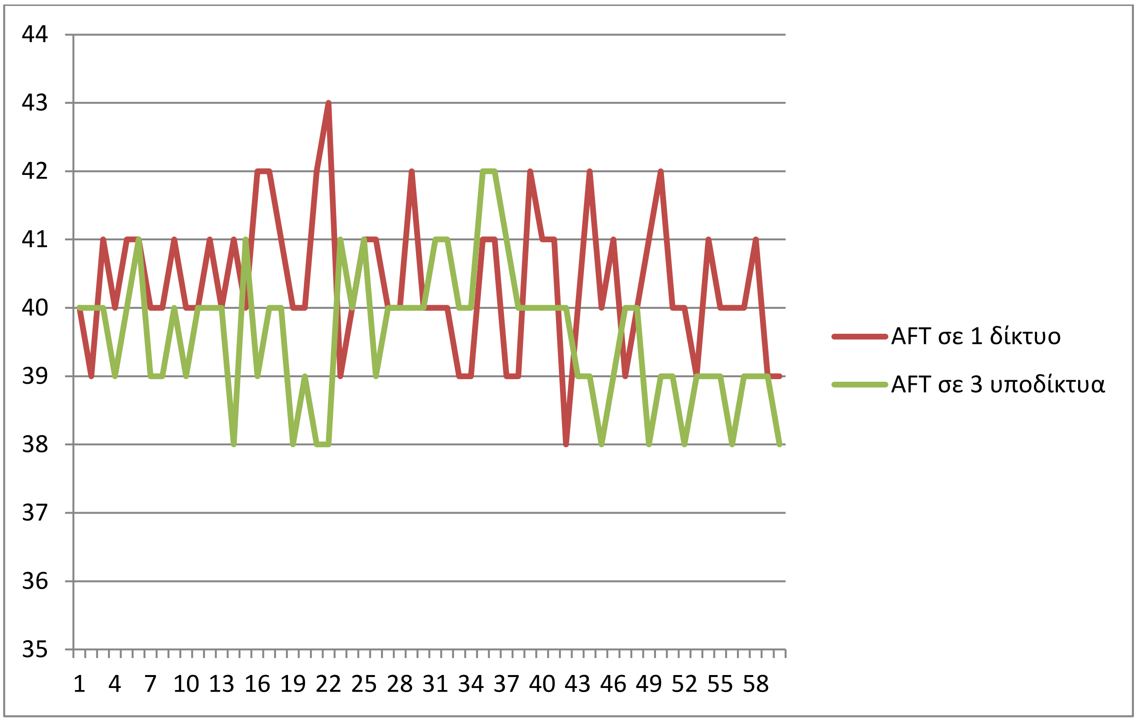
Σχήμα 8.1.4.18

3η φαση:



Σχήμα 8.1.4.19

4η φαση:



Σχήμα 8.1.4.20

Η μεταβολή των πράσινων χρόνων είναι μεγαλύτερη από την περίπτωση των 16 κόμβων, συνεπώς ο αλγόριθμος δείχνει να συγκλίνει προς κάποιες τιμές. Η σύγκλιση αυτή είναι πιθανόν να είναι ο λόγος που έχουμε βελτιώτικη τάση σε αυτήν την περίπτωση αν και όχι την επιθυμητή.

Οι αρχικοί πράσινοι χρόνοι του κόμβου και οι χρόνοι για τους οποίους βρέθηκε η καλύτερη τιμή της μέσης ταχύτητας του δικτύου:

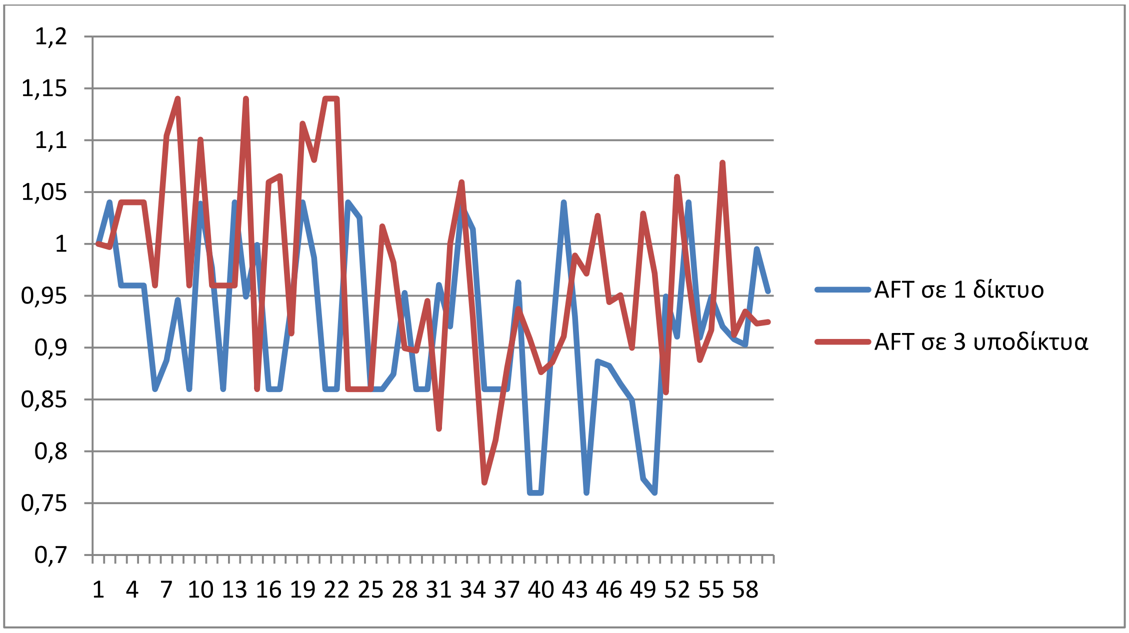
	φάση 1	φάση 2	φάση 3	φάση 4
Αρχικοί χρόνοι (δευτερόλεπτα)	21	12	9	40
Καλύτεροι χρόνοι (δευτερόλεπτα)	19	14	10	39

Πίνακας 8.1.4.21

Parameters:

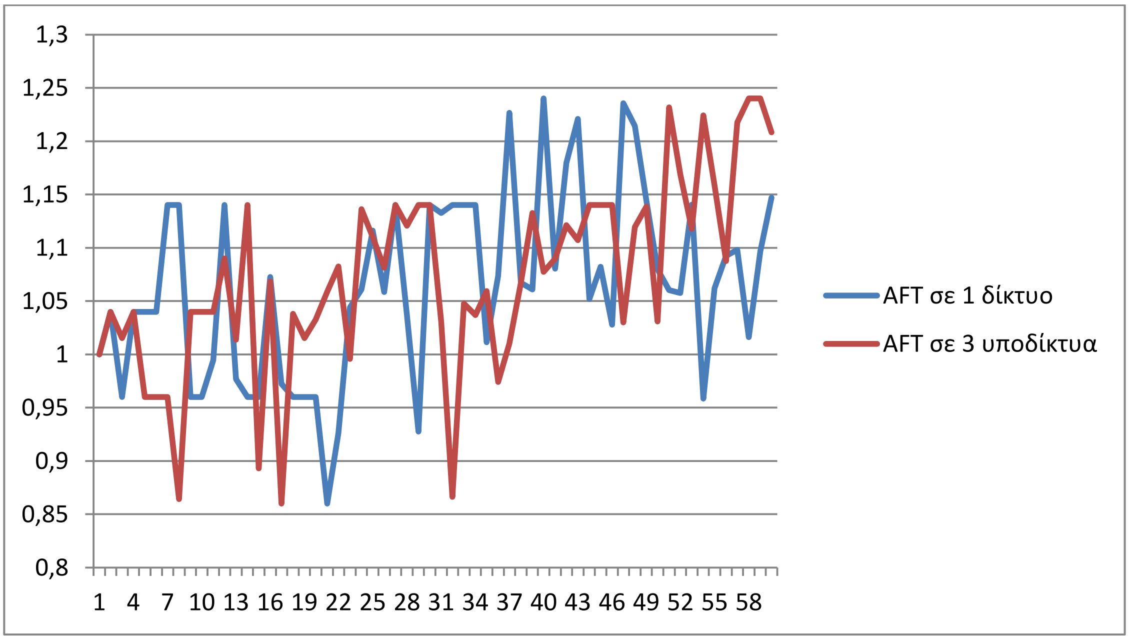
Η μεταβολή των παραμέτρων για τις 2 περιπτώσεις.

<u>1η φαση:</u>



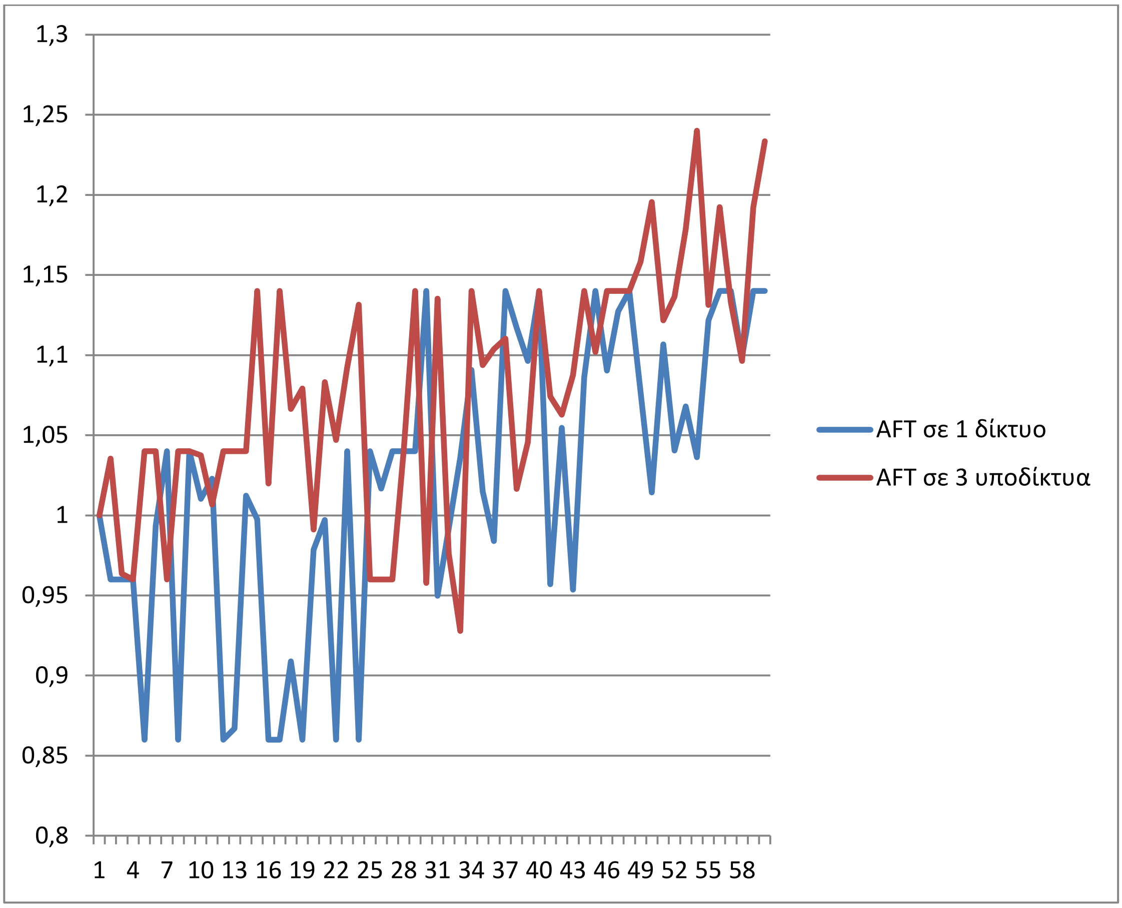
Σχήμα 8.1.4.22

<u>2η φαση:</u>



Σχήμα 8.1.4.23

3η φαση:

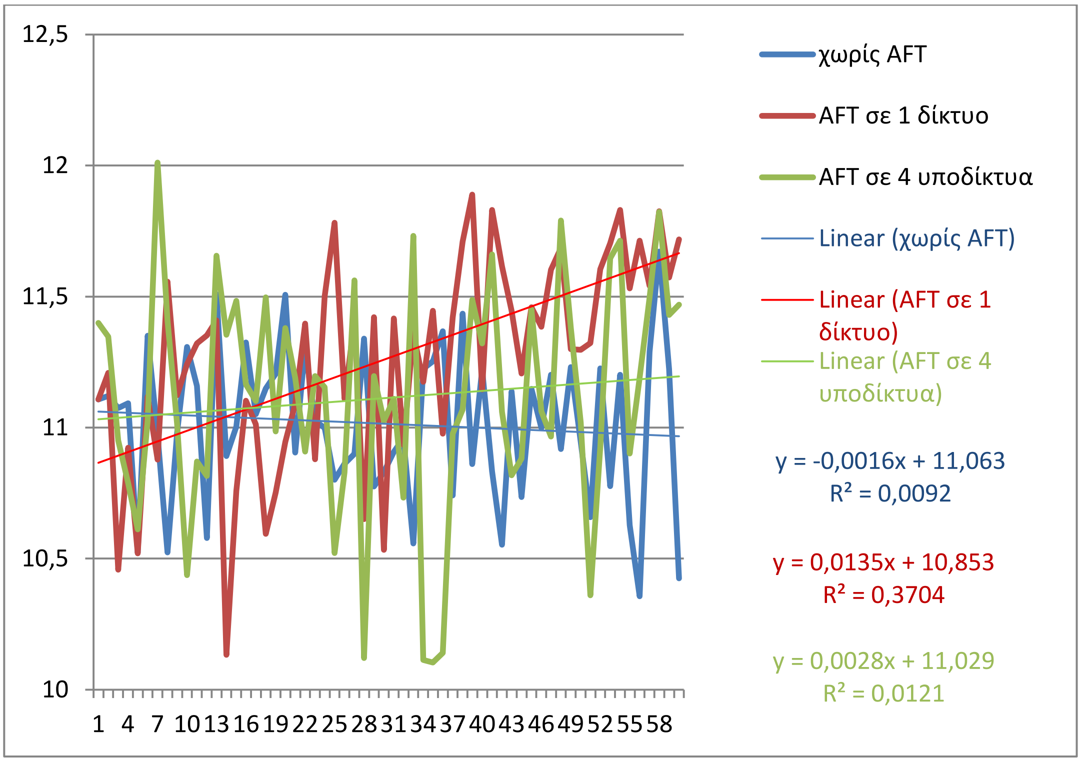


Σχήμα 8.1.4.24

36 κόμβοι

Μέση Ταχύτητα Δικτύου:

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μέσης ταχύτητας του δικτύου των 36 κόμβων μετά το διαχωρισμό του σε 4 υποδίκτυα των 9 κόμβων, σε συνδιασμό με τα αποτελέσματα πριν το χωρισμό.Τα αποτελέσματα έχουν προκύψει από 60 προσομοιώσεις στον προσομοιωτή AIMSUN.



Σχήμα 8.1.4.25

Με τον διαχωρισμό του δικτύου των 36 κόμβων σε 4 υποδίκτυα επιτυγχάνεται η βελτίωση της μέσης ταχύτητας του δικτύου σε ένα βαθμό. Η γραμμή τάσης παραμένει σχεδόν σε όλες τις προσομοιώσεις πάνω από την αρχική, έχοντας όμως μικρή κλίση.

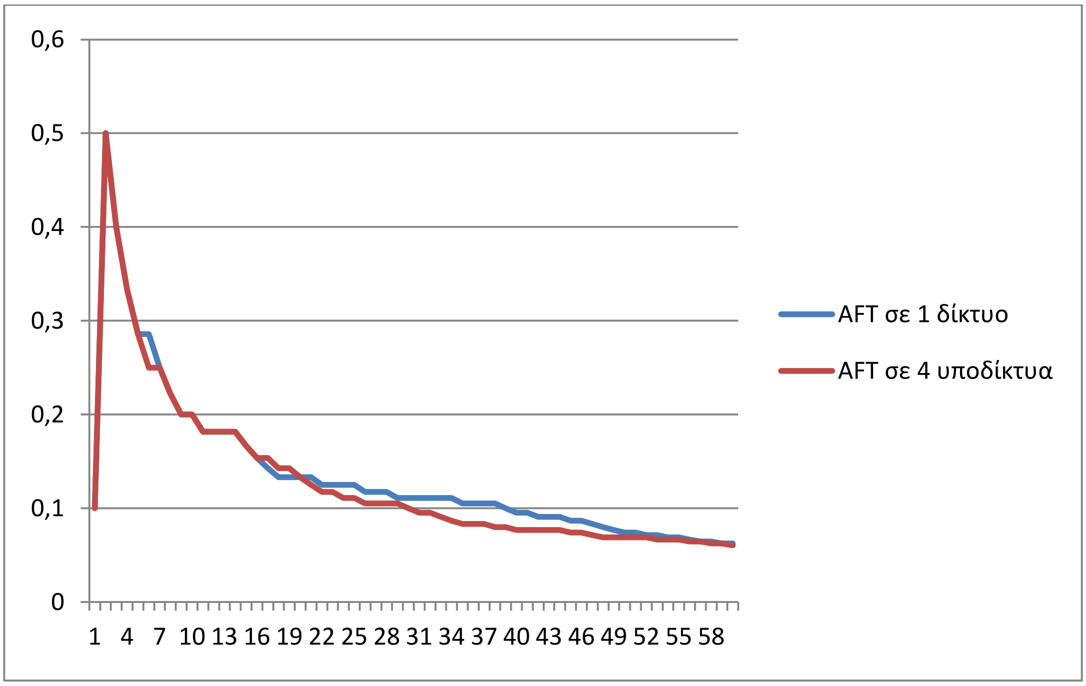
Η βελτίωση του μέσου όρου της ταχύτητας σε αυτή την περίπτωση είναι 0,9%, αλλά και της μέγιστης ταχύτητας κατά 2,9%. Η μέγιστη ταχύτητα επιτεύχθηκε στην 7η επανάληψη με τιμή 12 km/h .

Η βελτίωση που έγινε στην μέση ταχύτητα του δικτύου είναι και σε αυτή την περίπτωση μικρότερη από αυτή που είχε γίνει χωρίς τον διαχωρισμό του. Η βελτίωση της απόδοσης του δικτύου που είχε επιτύχει ο AFT ήταν της τάξης του 4,2%.

Alpha:

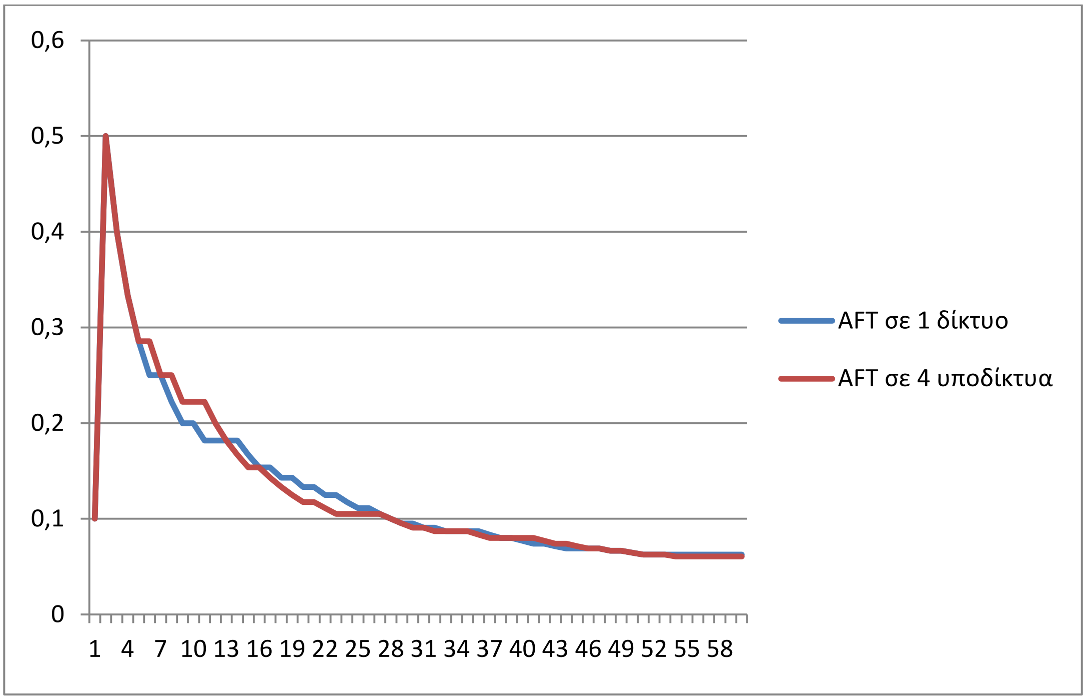
Η μεταβλητή alpha για τον κόμβο που παρουσιάζει το μεγαλύτερο πρόβλημα στο δίκτυο για τις 2 περιπτώσεις. Η $3^{η}$ φαση είναι η φάση που παρατηρείται το μεγαλύτερο πρόβλημα.

<u>$1^{η}$ φαση:</u>



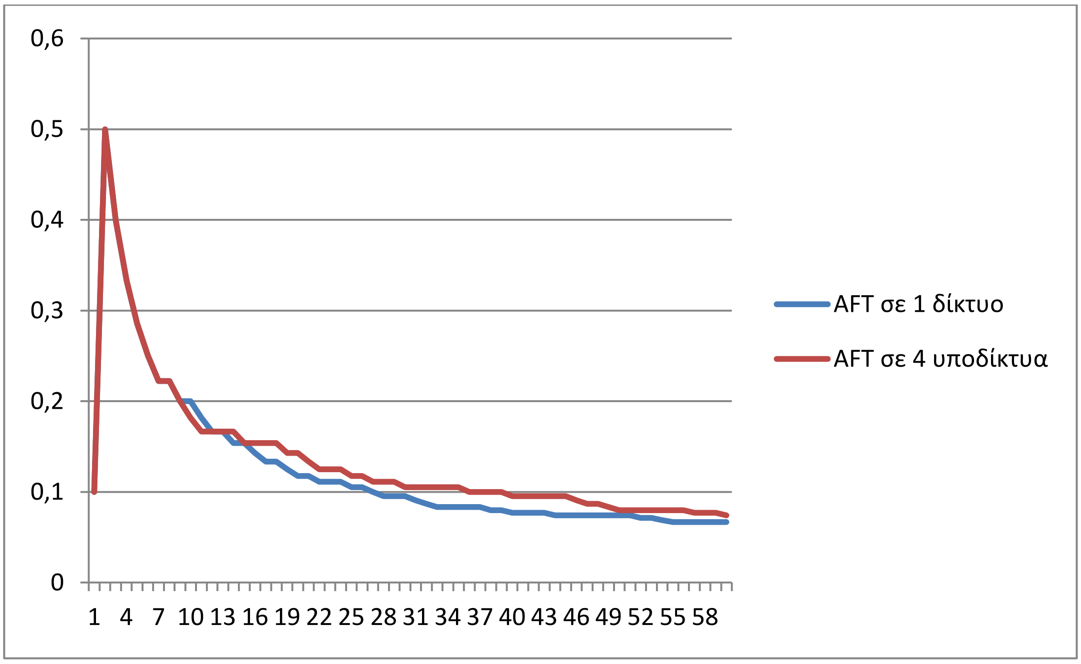
Σχήμα 8.1.4.26

$2^η$ φαση:



Σχήμα 8.1.4.27

$3^η$ φαση:

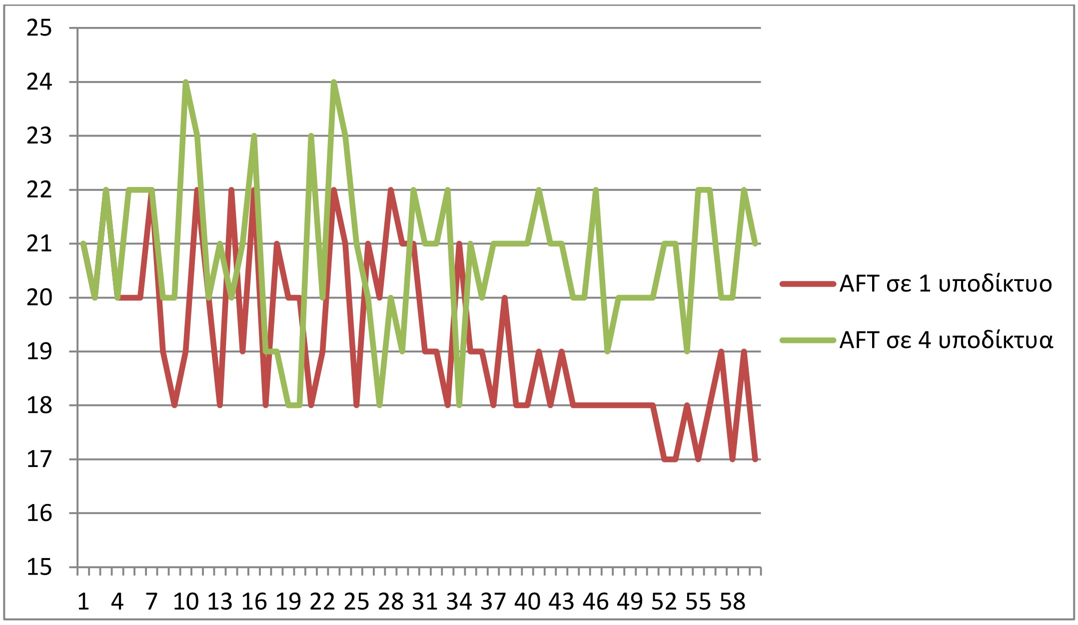


Σχήμα 8.1.4.28

Πράσινοι Χρόνοι:

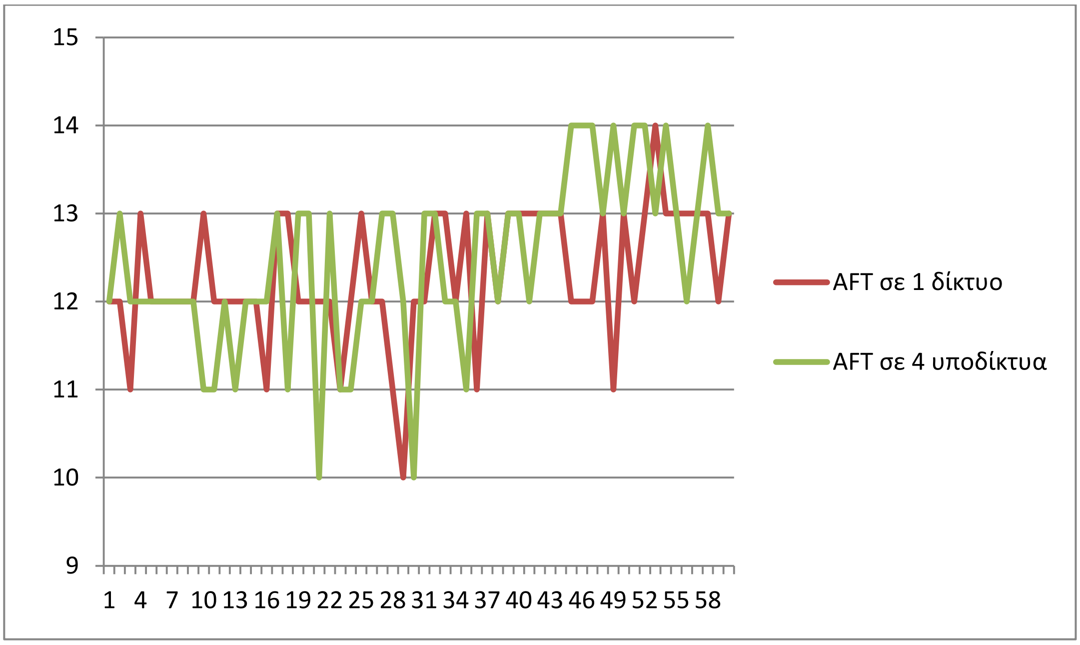
Η μεταβολή των πράσινων χρόνων στον κόμβο που δημιουργείται το μεγαλύτερο πρόβλημα στις 2 περιπτώσεις.

<u>1η φαση:</u>



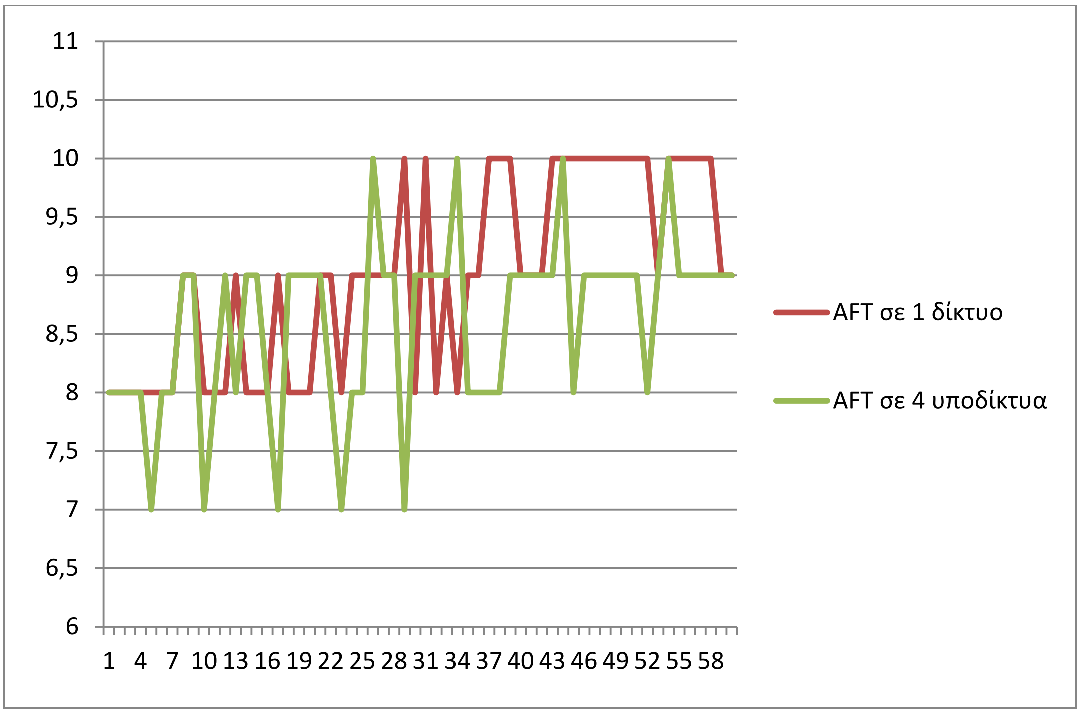
Σχήμα 8.1.4.29

<u>2η φαση:</u>



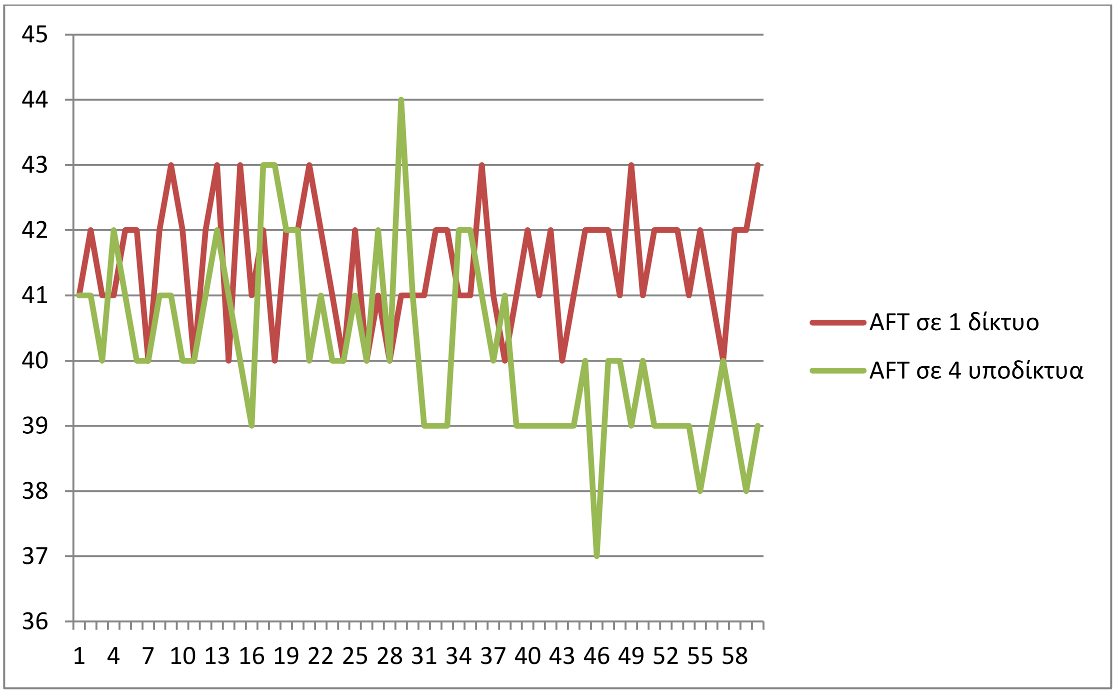
Σχήμα 8.1.4.30

$3^η$ φαση:



Σχήμα 8.1.4.31

$4^η$ φαση:



Σχήμα 8.1.4.32

Οι αρχικοί πράσινοι χρόνοι του κόμβου και οι χρόνοι για τους οποίους βρέθηκε η καλύτερη τιμή της μέσης ταχύτητας του δικτύου:

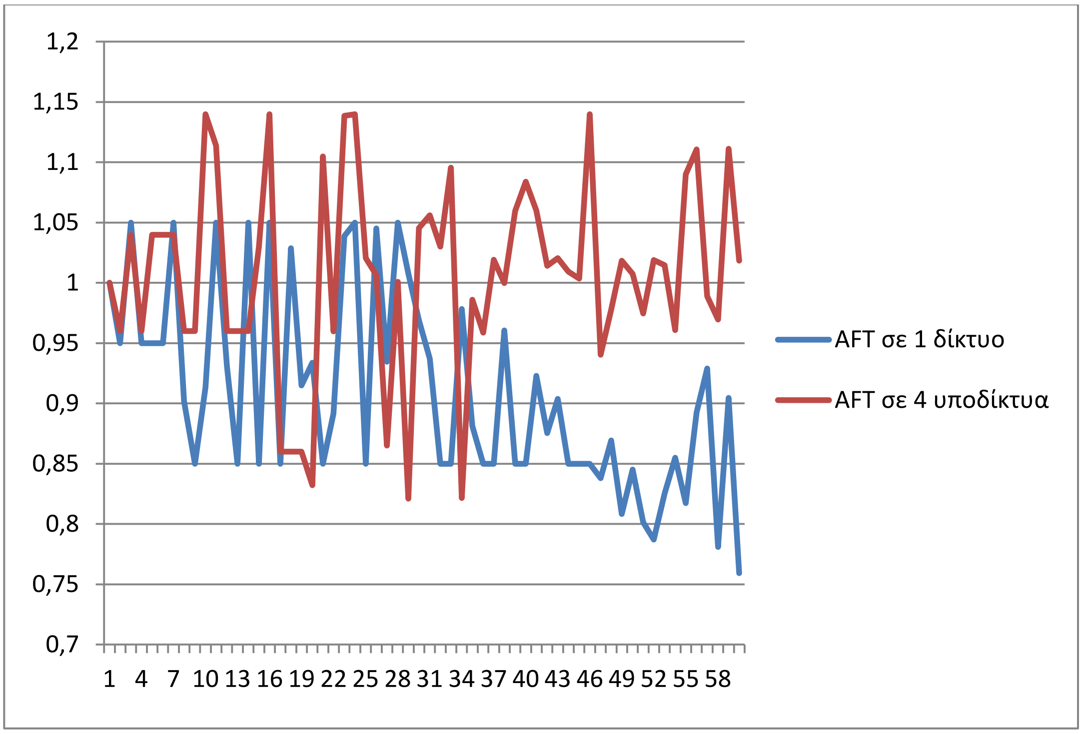
	φάση 1	φάση 2	φάση 3	φάση 4
Αρχικοί χρόνοι (δευτερόλεπτα)	21	12	8	41
Καλύτεροι χρόνοι (δευτερόλεπτα)	22	12	8	40

Πίνακας 8.1.4.33

Parameters:

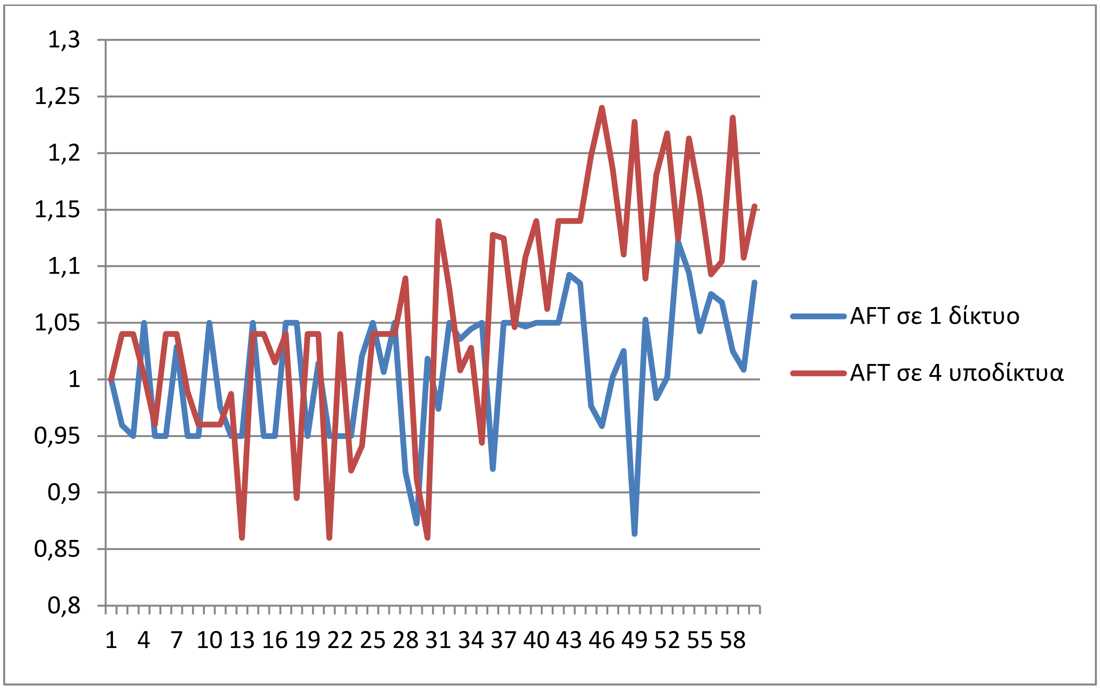
Η μεταβολή των παραμέτρων για τις 2 περιπτώσεις.

<u>1η φαση:</u>



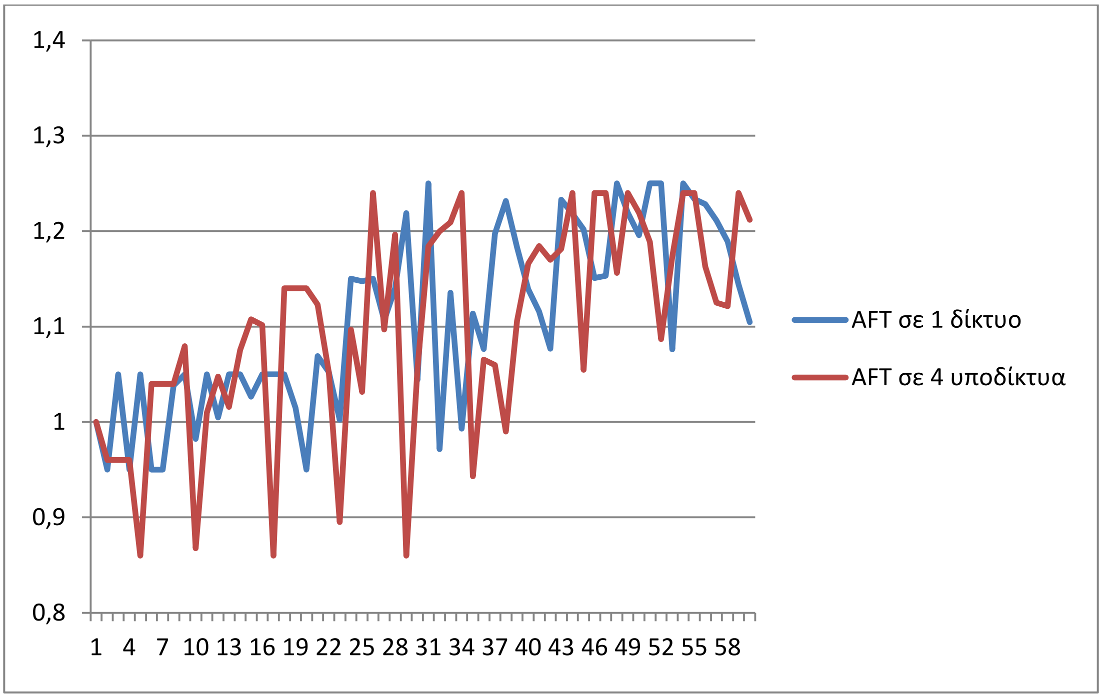
Σχήμα 8.1.4.34

$2^{η}$ φαση:



Σχήμα 8.1.4.35

$3^{η}$ φαση:



Σχήμα 8.1.4.36

8.1.5.Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα:

Στη συνέχεια παρουσιάζεται για κάθε δίκτυο η αρχική μέγιστη ταχύτητα, η αρχική μέση ταχύτητα και η βελτίωση που δέχτηκαν μετά την εφαρμογή του αλγόριθμου AFT από τους 3 αλγορίθμους.

Οι υπολογισμοί των ποσοστών έγιναν χωρίς απλοποιήσεις των ταχυτήτων οπότε πιθανόν να διαφέρουν ελαφρώς αν υπολογιστούν από τους παρακάτω πίνακες.

Δίκτυο 4 κόμβων:

	Μέγιστη ταχύτητα πριν τον έλεγχο (km/h)	Μέγιστη ταχύτητα με έλεγχο AFT (km/h)	Βελτίωση (%)	Μέση ταχύτητα πριν τον έλεγχο (km/h)	Μέση ταχύτητα με έλεγχο AFT (km/h)	Βελτίωση (%)
Μεταβαλλόμενος Κύκλος	12,6	14,2	7,2	11,3	12,5	10,6
Σταθερός Κύκλος	13	14,6	13	11,2	13,1	17,5
Διαχωρισμός Σταθερού Κύκλου	-	-	-	-	-	-

Πίνακας 8.1.5.1

Δίκτυο 9 κόμβων:

	Μέγιστη ταχύτητα πριν τον έλεγχο (km/h)	Μέγιστη ταχύτητα με έλεγχο AFT (km/h)	Βελτίωση (%)	Μέση ταχύτητα πριν τον έλεγχο (km/h)	Μέση ταχύτητα με έλεγχο AFT (km/h)	Βελτίωση (%)
Μεταβαλλόμενος Κύκλος	11	13,6	23,5	12,2	11,9	16,6
Σταθερός Κύκλος	11,1	13,7	19,7	12,2	12,3	21,3
Διαχωρισμός Σταθερού Κύκλου	-	-	-	-	-	-

Πίνακας 8.1.5.2

Δίκτυο 16 κόμβων:

	Μέγιστη ταχύτητα πριν τον έλεγχο (km/h)	Μέγιστη ταχύτητα με έλεγχο AFT (km/h)	Βελτίωση (%)	Μέση ταχύτητα πριν τον έλεγχο (km/h)	Μέση ταχύτητα με έλεγχο AFT (km/h)	Βελτίωση (%)
Μεταβαλλόμενος Κύκλος	12,3	12,8	4,9	11,3	11,5	2
Σταθερός Κύκλος	13,5	13,8	8,8	11,5	12,6	10,2
Διαχωρισμός Σταθερού Κύκλου	13,5	13	2,4	11,5	11,7	1,9

Πίνακας 8.1.5.3

Δίκτυο 25 κόμβων:

	Μέγιστη ταχύτητα πριν τον έλεγχο (km/h)	Μέγιστη ταχύτητα με έλεγχο AFT (km/h)	Βελτίωση (%)	Μέση ταχύτητα πριν τον έλεγχο (km/h)	Μέση ταχύτητα με έλεγχο AFT (km/h)	Βελτίωση (%)
Μεταβαλλόμενος Κύκλος	12	12,5	4,2	11,2	11,4	2,1
Σταθερός Κύκλος	12	12,9	7,6	11,2	11,9	6
Διαχωρισμός Σταθερού Κύκλου	12	12,4	3,4	11,2	10,7	-4,7

Πίνακας 8.1.5.4

Δίκτυο 36 κόμβων:

	Μέγιστη ταχύτητα πριν τον έλεγχο (km/h)	Μέγιστη ταχύτητα με έλεγχο AFT (km/h)	Βελτίωση (%)	Μέση ταχύτητα πριν τον έλεγχο (km/h)	Μέση ταχύτητα με έλεγχο AFT (km/h)	Βελτίωση (%)
Μεταβαλλόμενος Κύκλος	11,7	12,1	3,4	11	11,1	1,3
Σταθερός Κύκλος	11,7	12,1	4	11	11,5	4,2
Διαχωρισμός Σταθερού Κύκλου	11,7	12	2,9	11	11,1	0,9

Πίνακας 8.1.5.5

Την καλύτερη συμπεριφορά για όλα τα δίκτυα επιτυγχάνει ο αλγόριθμος σταθερού κύκλου.

8.2.Συμπεράσματα:

Ο αλγόριθμος AFT φαίνεται να διατηρεί μια βελτιωτική τάση της απόδοσης των δικτύων σε όλες τις περιπτώσεις τις οποίες δοκιμάστηκε. Κατάφερε να βελτιώσει την μέση ταχύτητα σχεδόν όλων των δικτύων, βελτιώνοντας άλλα σε μεγαλύτερο βαθμό και άλλα σε μικρότερο. Από τις 13 διαφορετικές περιπτώσεις που δοκιμάστηκε προέκυψε 1 στην οποία η βελτίωση δεν έγινε δυνατή.

Η καλύτερη συμπεριφορά του αλγόριθμου AFT παρατηρήθηκε στον αλγόριθμο σταθερού κύκλου. Σε αυτήν την περίπτωση κατέληξε στα μεγαλύτερα ποσοστά βελτίωσης για όλα τα δίκτυα, με την μεγαλύτερη να έχει την τιμή 21,3% για το δίκτυο των 9 κόμβων. Στα μεγαλύτερα δίκτυα το μεγάλο πλήθος συνδιασμών δυσκόλεψε το έργο του AFT και έτσι τα ποσοστά βελτίωσης της απόδοσης μειώθηκαν με μικρότερη τιμή 4,2% για το δίκτυο των 36 κόμβων.

Στην περίπτωση του αλγόριθμου μεταβαλλόμενου κύκλου ο AFT επίσης πέτυχε την βελτίωση της απόδοσης όλων των δικτύων. Η μεγαλύτερη βελτίωση παρατηρήθηκε και σε αυτήν την περίπτωση στο δίκτυο των 9 κόμβων με ποσοστό 16,6%. Στον αλγόριθμο μεταβαλλόμενου κύκλου όπως και στον αλγόριθμο σταθερού κύκλου, η βελτίωση της απόδοσης ακολούθησε καθοδική πορεία όσο το δίκτο γινόταν μεγαλύτερο των 9 κόμβων. Η μικρότερη που επιτεύχθηκε είναι της τάξης του 1,3% για το δίκτυο των 36 κόμβων.

Η περίπτωση διαχωρισμού του σταθερού κύκλου είναι αυτή που ο αλγόριθμος AFT πέτυχε τις μικρότερες τιμές βελτίωσης, ενώ παρουσιάστηκε και μείωση της απόδοσης ενός δικτύου σε ποσοστό 4,7%. Ο λόγος που θεωρείται ότι συμβαίνει αυτό είναι διότι κατά την προσπάθεια του αλγόριθμου AFT να βελτιώσει την απόδοση ενός υποδικτύου, υπάρχει πιθανότητα να επιρρεάζει αρνητικά τα υπόλοιπα υποδίκτυα, πράγμα που δυσκολέυει την εύρεση βέλτιστων τιμών. Η μεγαλύτερη βελτίωση παρατηρήθηκε στο δίκτυο των 36 κόμβων το οποίο βελτίωσε σε ποσοστό 0,9%.

Κλείνοντας ο αλγόριθμος AFT αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο που πέρα από τον φόρτο εργασίας που μας απαλλάσσει και την εξοικονόμηση χρόνου που μας εξασφαλίζει μέσω των αυτοματοποιημένων διαδικασιών, επιτυγχάνει και την βελτίωση της απόδοσης του δικτύου που εφαρμόζεται, απαιτώντας πολύ χαμηλό κόστος χρησιμοποιώντας την πληροφορία που μας δίνουν οι αισθητήρες gps των κινητών των συνδεδεμένων οχημάτων είτε πληροφορίες που δίνονται από φωρατές

ΠΗΓΕΣ

1. Manolis, D., Papamichail, I., Kosmatopoulos, E.B., Papageorgiou, M.: Automated tuning of ITS management and control systems: Results from real-life experiments. *Transportation Research Part C* 66 (2016), pp. 119-135.

2. Wikipedia:

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%B5%CE%B9%CE%BD%CF%8C%CF%82_%CF%83%CE%B7%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CE%B4%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%82

3. Θωμίδου Μαρία: Συστήματα Ελέγχου Κυκλοφορίας. Εξέλιξη, Αξιολόγηση, Εφαρμογές: MSc Theses (2007)

4. Traffic Signal Design:

http://www.traffic-signal-design.com/urban_traffic_control_utc.htm

5. Kouvelas, A.: Adaptive Fine-Tuning for Large-Scale Nonlinear Traffic Control Systems: Phd Thesis (2011).

6. Kouvelas, A., Kosmatopoulos, E., Papamichail, I. and Papageorgiou, M.: Fully-autonomic methodology for embedding self-tuning competence in online traffic control systems. 1st International Systems Competition on Autonomic Features and Technologies for Road Traffic Flow Modelling and Control System, *The Hague*, *The Netherlands*, October 9, 2013.