



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &**  
**ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:**

***Σχεδιασμός και Μελέτη Αλγορίθμου για Παροχή  
Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών σε Εφαρμογές Video,  
Φωνής και Δεδομένων πάνω από IEEE 802.11e Ασύρματα  
Τοπικά Δίκτυα***

**ΒΛΑΒΙΑΝΟΣ ΑΓΓΕΛΟΣ**  
**A.M: 1999030005**

Εξεταστική Επιτροπή:

**Καθ. Μ.Πατεράκης (επιβλέπων)**  
**Καθ. Β.Διγαλάκης**  
**Καθ. Ν.Σιδηρόπουλος**

**Χανιά, Ιούνιος 2004**

*Πάνω από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου που στη διάρκεια και των πέντε χρόνων σπουδών μου με στηρίζανε και μου δίνανε δύναμη να συνεχίσω με την ίδια ζωντάνια. Ύστερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Μιχάλη Πατεράκη, με την πολύτιμη καθοδήγηση του οποίου μπόρεσα να ολοκληρώσω επιτυχώς αυτή τη διπλωματική εργασία. Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου που με τη στήριξη τους, τις συμβουλές τους και πάνω από όλα με τη φιλία τους με βοήθησαν σε αυτά τα πέντε υπέροχα χρόνια. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω θερμά την Άννυ που με στήριζε και με στηρίζει σε όλες μου τις προσπάθειες.*

## Περιεχόμενα

<b>Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα - Διαφοροποίηση Υπηρεσιών.....</b>	<b>1</b>
1.1 Εισαγωγή στα Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα.....	1
1.2 Υποστήριξη Υπηρεσιών σε Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα.....	2
1.3 Πρωτόκολλα για Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα.....	3
1.3.1 Προβλήματα Ασύρματων Τοπικών Δικτύων.....	3
1.4 Πρωτόκολλο για Διαφοροποίηση Υπηρεσιών.....	4
1.5 Οργάνωση της Εργασίας.....	5
 <b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Το Πρωτόκολλο 802.11.....</b>	<b>6</b>
2.1 Τα Δομικά Στοιχεία της Αρχιτεκτονικής του IEEE 802.11.....	6
2.2 Τοπολογίες του IEEE 802.11.....	7
2.2.1 Independent Basic Service Set (IBSS).....	7
2.2.2 Infrastructure Basic Service Set.....	8
2.2.3 Extended Service Set (ESS).....	8
2.3 Κινητικότητα στο 802.11.....	9
2.4 Το Μοντέλο της Αρχιτεκτονικής του IEEE 802.11.....	9
2.5 Περιγραφή του Φυσικού Επιπέδου (PHY Layer).....	10
2.6 Περιγραφή του Υποεπιπέδου MAC.....	12
2.6.1 Distributed Coordination Function – DCF.....	14
2.6.1.1 Λειτουργία του CSMA/CA στο DCF.....	14
2.6.1.2 Χρονικά Διαστήματα μεταξύ Πλαισίων (Interframe Space – IFS).....	16
2.6.1.3 Τυχαίος Χρόνος Οπισθοδρόμησης (Random Backoff Time).....	17
2.6.1.4 Διαδικασία Οπισθοδρόμησης (Backoff Procedure).....	18
2.6.1.5 Τεμαχισμός (Fragmentation) και Μετάδοση Έκρηξης Τεμαχίων.....	19
2.6.2 Point Coordination Function – PCF.....	21
2.7 Μειονεκτήματα του IEEE 802.11 για Παροχή Διαφοροποίησης Υπηρεσιών.....	23
 <b>Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Διαφοροποίηση Υπηρεσιών πάνω από IEEE 802.11e.....</b>	<b>25</b>
3.1 Τα Δομικά Στοιχεία της Αρχιτεκτονικής του IEEE 802.11e.....	25
3.2 Περιγραφή Φυσικού Επιπέδου (PHY).....	26
3.3 Περιγραφή του Υποεπιπέδου MAC.....	26
3.3.1 HCF Contention Based Channel Access – EDCA.....	27
3.3.1.1 Πρόσβαση στο Ασύρματο Μέσο.....	28
3.3.1.2 Συνέχιση του TXOP.....	29
3.3.1.3 EDCA Διαδικασία Οπισθοδρόμησης (Backoff Procedure).....	30
3.3.2 HCF Controlled Channel Access (HCCA).....	31
3.4 Μηχανισμοί Διαφοροποίησης Υπηρεσιών.....	32
3.6 Achieving Service Differentiation and High Utilization in IEEE 802.11 [6].....	33
3.6.1 Μελέτη Αλγορίθμου για παροχή Service Differentiation.....	33
3.6.2 Σενάριο Αξιολόγησης Αλγορίθμου.....	35
3.7 Μελέτη της Συμπεριφοράς του Αλγορίθμου σε Νέα Σενάρια.....	37

<b>Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Ανάλυση Σεναρίων</b>	38
4.1 Στόχος Σεναρίων	38
4.2 Περιγραφή Προσομοιωτή	38
4.2.1 Παραδοχές	38
4.2.2 Φυσικό Επίπεδο	39
4.2.3 Είδη Κίνησης	40
4.2.3.1 Video	40
4.2.3.2 Φωνή	41
4.2.3.3 Δεδομένα	43
4.2.4 Λειτουργία του Προσομοιωτή	43
4.3 Ανάλυση Σεναρίων	45
4.3.1 Εύρεση Χωρητικότητας Συστήματος	45
4.3.2 Εύρεση Μέγιστου Ρυθμού Άφιξης Δεδομένων	48
4.3.2.1 Μέγιστος Ρυθμός Άφιξης Δεδομένων σε Δίκτυο με 22 Σταθμούς	49
4.3.2.2 Μέγιστος Ρυθμός Άφιξης Δεδομένων σε Δίκτυο με 33 Σταθμούς	52
4.3.2.3 Μέγιστος Ρυθμός Άφιξης Δεδομένων σε Δίκτυο με 44 Σταθμούς	55
4.3.2.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων των τριών Σεναρίων	59
4.3.3 Μελέτη της Συμπεριφοράς του Αλγορίθμου στο [6]	60
<b>Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Επίλογος</b>	63
5.1 Συνεισφορά της Εργασίας	63
5.2 Συμπεράσματα	63
5.3 Μελλοντικές Προεκτάσεις	65
Συντομογραφίες και Ακρωνύμια	66
Βιβλιογραφία	68

## **Κεφάλαιο 1° : Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα - Διαφοροποίηση Υπηρεσιών**

### **1.1 Εισαγωγή στα Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα**

Τα τελευταία χρόνια παρουσιάζεται αυξανόμενη υιοθέτηση και αποδοχή των τεχνολογιών ασυρμάτων τοπικών δικτύων, όχι μόνο από εταιρίες, αλλά και από ιδιώτες για προσωπική χρήση. Όπως είναι γνωστό, οι υπολογιστές καλύπτουν ολοένα και μεγαλύτερο φάσμα υπηρεσιών και εργασιών οι οποίες εκπονούνται από τον επαγγελματία, τον εργαζόμενο, τον επιχειρηματία, τον φοιτητή, αλλά και γενικότερα από διάφορες κοινωνικές ομάδες. Οι ανάγκες αυτών των κοινωνικών ομάδων είναι διαφορετικές και πολλές φορές διαμετρικά αντίθετες.

Τα ασύρματα δίκτυα έγιναν πολύ γρήγορα αγαπητά και αποδεκτά από τον περισσότερο κόσμο, διότι δίνουν γρηγορότερες και φτηνότερες λύσεις σε σχέση με τα αντίστοιχα ενσύρματα δίκτυα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, η περίπτωση όπου χρειάζεται σε ένα ανοιχτό χώρο, όπως ένα στάδιο, η άμεση δημιουργία ενός τοπικού δικτύου. Σε αυτή την περίπτωση η ασύρματη τεχνολογία παρέχει την ιδανική λύση στο πρόβλημα. Η λύση της ασύρματης δικτύωσης γίνεται ολοένα και πιο αποδεκτή ακόμα και σε κλειστούς χώρους, αφού βρίσκει εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου η εγκατάσταση δομημένης καλωδίωσης στο χώρο είναι δύσκολη ή αισθητικά μη αποδεκτή. Επιπλέον, σε αρκετές περιπτώσεις το κόστος της ασύρματης δικτύωσης είναι αρκετά μικρότερο από εκείνο της ενσύρματης.

Στα μεγάλα αστικά κέντρα, η παρουσία ασύρματων δικτύων γίνεται αισθητή και πλέον η ελευθερία που δίνουν σε ένα χρήστη που τα χρησιμοποιεί πλησιάζει να γίνει εφάμιλλη με αυτήν που θα είχε εργαζόμενος από το γραφείο του ή το σπίτι του. Βέβαια, κατανοώντας την διαφορετικότητα των χρηστών αλλά και των αναγκών τους, η σχεδίαση και η λειτουργία των ασυρμάτων δικτύων πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να επιτρέπει την ομαλή λειτουργία και επιτυχή εξυπηρέτηση όλων των χρηστών τους. Με άλλα λόγια, ο σταθμός βάσης ενός ασυρμάτου δικτύου πρέπει να έχει τις κατάλληλες λειτουργίες που να επιτρέπουν την ταυτόχρονη χρήση διαφορετικών υπηρεσιών από διαφορετικούς χρήστες.

## 1.2 Υποστήριξη Υπηρεσιών σε Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα

Όπως είναι γνωστό, το φυσικό δικτυακό μέσο είναι πεπερασμένης χωρητικότητας και η διαθέσιμη προς εκμετάλλευση χωρητικότητα είναι άμεσα συνυφασμένη από την εκάστοτε τεχνολογία που χρησιμοποιείται. Πέρα από αυτό όμως, η διαφορετικότητα των υπηρεσιών, μας επιτρέπει την εξυπηρέτησή τους με διαφορετική κάθε φορά προτεραιότητα. Κάτι τέτοιο, αν γίνει σωστά, επιτυγχάνει την σωστή εξυπηρέτηση των χρηστών και την ομαλή λειτουργία των υπηρεσιών που χρησιμοποιούν, διατηρώντας την υπάρχουσα τεχνολογία και δομή του δικτύου.

Αναλυτικότερα, στις μέρες μας έχει δοθεί πολύ μεγάλη έμφαση σε υπηρεσίες πολυμέσων. Τέτοιες υπηρεσίες είναι υπηρεσίες μετάδοσης αποθηκευμένου video, streaming video, φωνή πάνω από IP (VoIP), τηλεδιάσκεψη κ.α. Το άμεσο δικτυακό χαρακτηριστικό αυτών των υπηρεσιών, είναι ότι έχουν απαιτήσεις υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων και ότι η παράδοση της κίνησης πρέπει να γίνει μέσα σε περιορισμένα χρονικά πλαίσια. Η υποστήριξη τέτοιων υπηρεσιών από ασύρματα δίκτυα είναι κάτι που χρήζει απαιτεί προσεκτική μελέτη και χρήση τεχνολογιών που ρυθμίζουν κατάλληλα την προτεραιότητα της κάθε υπηρεσίας αλλά και τη γενικότερη λειτουργία των πρωτοκόλλων του δικτύου.

Αν υποθέσουμε ότι σε ένα ασύρματο δίκτυο υπάρχουν δύο είδη υπηρεσιών τα οποία πρέπει να εξυπηρετηθούν και αυτά είναι μία μετάδοση Multimedia (π.χ video) και μία μετάδοση απλών δεδομένων (π.χ e-mail), τότε υπάρχει η πιθανότητα η μετάδοση των e-mail δεδομένων να επηρεάσει αρνητικά την Multimedia μετάδοση λόγω της μη ύπαρξης επαρκούς bandwidth. Το παραπάνω παράδειγμα δεν σημαίνει ότι αυτές οι δύο υπηρεσίες δεν μπορούν να υποστηριχθούν από το ίδιο δίκτυο. Αν υποθέσουμε ότι δίνουμε μεγαλύτερη προτεραιότητα στην υπηρεσία πολυμεσικού περιεχομένου, γίνεται αντιληπτό ότι είναι δυνατό να επιτευχθεί η μετάδοση του πολυμεσικού περιεχομένου χωρίς πρόβλημα. Αυτό που χάνουμε σε αυτή την περίπτωση, είναι η ταχύτητα μετάδοσης του περιεχομένου δεδομένων (e-mail) που έχει σαν συνέπεια μεγαλύτερες καθυστερήσεις της υπηρεσίας αυτής.

Συνοψίζοντας, συμπεραίνουμε ότι το δίκτυο με κατάλληλη διαχείριση των υπηρεσιών που το χρησιμοποιούν (με βάση την κρισιμότητα της καθυστέρησης μετάδοσης των δεδομένων τους), είναι δυνατό να παρέχει ταυτόχρονη υποστήριξη των διαφορετικών αυτών υπηρεσιών. Έτσι, οι χρήστες απολαμβάνουν τις υπηρεσίες που θέλουν να χρησιμοποιήσουν, ενώ το δίκτυο φροντίζει έτσι ώστε να παρέχει

δυναμικά στον κάθε χρήστη το απαιτούμενο εύρος ζώνης για την υποστήριξη της υπηρεσίας που αυτός χρησιμοποιεί.

### **1.3 Πρωτόκολλα για Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα**

Το πρωτόκολλο που κυριαρχεί σήμερα στο χώρο των ασύρματων τοπικών δικτύων είναι το IEEE 802.11. Το πρωτόκολλο αυτό παρέχει τις βασικές λειτουργικότητες που πρέπει να υλοποιούνται από τον σταθμό βάσης και από τον ασύρματο σταθμό, προκειμένου να μπορεί να επιτευχθεί η δημιουργία ενός ασύρματου τοπικού δικτύου. Άλλο πρωτόκολλο, το οποίο παρέχει την λειτουργικότητα της ασύρματης δικτύωσης είναι το HyperLAN, το οποίο αποτελεί την Ευρωπαϊκή απάντηση στο IEEE 802.11. Όμως το HyperLAN δεν μπόρεσε να κυριαρχήσει στην αγορά. Κύριος λόγος αποτέλεσε το γεγονός ότι το IEEE 802.11 κατάφερε να βγει πρώτο στην αγορά, εξαιτίας δε των καινοτομικών χαρακτηριστικών του βρήκε σύντομα μεγάλη ανταπόκριση από πληθώρα εταιριών, με αποτέλεσμα να βγουν καλά και αξιόπιστα προϊόντα, τα οποία έγιναν ανάρπαστα από το ευρύ κοινό. Επιπλέον την περίοδο που βγήκε το IEEE 802.11, η αγορά ήταν αρκετά ώριμη και ζητούσε μια τέτοια τεχνολογία. Επομένως το timing που βγήκε του πρωτοκόλλου IEEE 802.11 ήταν πολύ καλό με αποτέλεσμα να μην υπάρξουν περιθώρια ανάπτυξης για εναλλακτική τεχνολογία. Αυτό ήταν το τέλος του HyperLAN, αφού μετά την παρουσίαση του δεν υπήρξε ενδιαφέρον από την αγορά για την δημιουργία προϊόντων, διότι ήδη σχεδόν όλο το αγοραστικό κοινό λειτουργούσε σε IEEE 802.11 και δεν υπήρχε λόγος για μετάβαση σε HyperLAN, αφού τα δύο πρωτόκολλα έχουν περίπου τα ίδια χαρακτηριστικά και προσφέρουν παρόμοιες αποδόσεις.

#### **1.3.1 Προβλήματα Ασύρματων Τοπικών Δικτύων**

Τα ασύρματα δίκτυα εξαιτίας του ασύρματου μέσου που χρησιμοποιούν είναι ευαίσθητα και παρουσιάζουν διάφορα προβλήματα. Από τα προβλήματα αυτά άλλα μπορούν να λυθούν και άλλα όχι. Ένα από τα σημαντικά προβλήματα των ασύρματων δικτύων είναι ο θόρυβος. Ο θόρυβος μπορεί να καταστρέψει την επικοινωνία μεταξύ των σταθμών, αφού οι μεταδόσεις των σταθμών δεν θα μπορούν

να γίνουν αντιληπτές. Ένα άλλο πρόβλημα αποτελεί το λεγόμενο πρόβλημα του **Κρυμμένου Τερματικού**. Το πρόβλημα αυτό αναφέρεται στην περίπτωση όπου έχουμε δυο σταθμούς, οι οποίοι θέλουν να μεταδώσουν σε ένα τρίτο. Ο τρίτος σταθμός μπορεί να ακούσει και τους δύο, ενώ οι πρώτοι δύο δεν μπορούν να ακούσουν ο ένας τον άλλο. Στην περίπτωση αυτή μπορεί οι μεταδόσεις των δύο σταθμών να παρεμβάλλονται στον τρίτο, με αποτέλεσμα ο τρίτος σταθμός να μην μπορεί να λάβει τις μεταδόσεις προς αυτόν. Το πρόβλημα αυτό έχει λυθεί στο πρωτόκολλο IEEE 802.11 με την χρήση ενός μηχανισμού, ο οποίος ενημερώνει δύο σταθμούς που δεν μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους μέσω του τρίτου σταθμού, ότι βρίσκεται κάποια μετάδοση σε εξέλιξη και επομένως να μη μεταδώσουν.

Σημαντικό πρόβλημα στα ασύρματα δίκτυα αποτελεί το θέμα της ασφάλειας. Η κίνηση που μεταδίδεται, εξαιτίας της broadcast φύσης του μέσου, μπορεί να ακουστεί από οποιοδήποτε σταθμό. Επομένως, η προστασία των δεδομένων από κάποιον κακόβουλο σταθμό αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην επιβίωση των ασύρματων δικτύων, αφού δεν νοείται δίκτυο υπολογιστών χωρίς να υπάρχει δυνατότητα ασφαλούς μετάδοσης δεδομένων. Στο πρωτόκολλο IEEE 802.11 ορίζονται οι μηχανισμοί με τους οποίους κωδικοποιείται η μεταδιδόμενη πληροφορία και επιτυγχάνεται κατ' αυτόν τον τρόπο η ασφαλής επικοινωνία μεταξύ των σταθμών. Επιπλέον, επειδή το θέμα της ασφάλειας αποτελεί πολύ σημαντικό κεφάλαιο στην ανάπτυξη και εξέλιξη των ασύρματων δικτύων, έχει συσταθεί η ομάδα εργασίας IEEE 802.11i, η οποία ασχολείται αποκλειστικά με το θέμα της ασφάλειας του πρωτοκόλλου.

## 1.4 Πρωτόκολλο για Διαφοροποίηση Υπηρεσιών

Το πρωτόκολλο IEEE 802.11 έχει χαρακτηριστεί από πολλούς σαν η ασύρματη εκδοχή του Ethernet, αφού παρέχει υπηρεσίες Best Effort. Επομένως εξαιτίας της ανάπτυξης και της ευρείας χρησιμοποίησης πολυμεσικών εφαρμογών προκύπτει η ανάγκη ανάπτυξης μιας έκδοσης του πρωτοκόλλου, η οποία θα μπορεί να παρέχει κάποια εγγύηση ποιότητας ή τουλάχιστον προτεραιοποίηση μεταξύ υπηρεσιών. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε η ομάδα εργασίας IEEE 802.11e, η οποία έχει ως στόχο την ανάπτυξη μιας επέκτασης του πρωτοκόλλου IEEE 802.11. Μέσω της παραπάνω επέκτασης θα μπορεί να παρέχεται προτεραιότητα μεταξύ των



διαφόρων υπηρεσιών, έτσι ώστε να μπορούν υπηρεσίες όπως οι πολυμεσικές εφαρμογές να λειτουργούν χωρίς πρόβλημα πάνω από ασύρματα τοπικά δίκτυα. Η μέχρι τώρα δράση της ομάδας εργασίας έχει αποδώσει κάποια πρώτα αποτελέσματα με την έκδοση δοκιμαστικών σχεδίων (drafts), στα οποία φαίνεται να επιτυγχάνεται ικανοποιητική λειτουργικότητα διαφοροποίησης υπηρεσιών.

## 1.5 Οργάνωση της Εργασίας

Η οργάνωση της εργασίας αυτής είναι η παρακάτω. Στο κεφάλαιο 2 αναλύεται η λειτουργία του πρωτοκόλλου IEEE 802.11. Στο κεφάλαιο 3 αναλύεται η παροχή διαφοροποιημένων υπηρεσιών πάνω από το πρωτόκολλο IEEE 802.11e, καθώς και η εργασία του [6] η οποία παρουσιάζει ένα αλγόριθμο, ο οποίος βοηθά στην παροχή της διαφοροποιημένης πρόσβασης πάνω από IEEE 802.11e δίκτυα. Στο κεφάλαιο 4 παραθέτουμε την ανάλυση των σεναρίων που εξετάσαμε προκειμένου να μελετήσουμε την συμπεριφορά του αλγορίθμου στο [6] με χρήση όμως χρονικά ευαίσθητων υπηρεσιών σε αντίθεση με τα σενάρια που έχουν εξεταστεί στο [6], καθώς και την συζήτηση αντιπροσωπευτικών αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις μας. Τέλος, το κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει κύρια συμπερασματικά σχόλια και ιδέες επέκτασης της εργασίας αυτής.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> : Το Πρωτόκολλο 802.11

### 2.1 Τα Δομικά Στοιχεία της Αρχιτεκτονικής του IEEE 802.11

Η IEEE 802.11 αρχιτεκτονική αποτελείται από πολλά δομικά στοιχεία και υπηρεσίες, που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους προκειμένου να παρέχουν κινητικότητα στον σταθμό εργασίας, η οποία είναι διαφανής στα υψηλότερα επίπεδα σύμφωνα με το πρότυπο διασύνδεσης ανοιχτών συστημάτων (Open Systems Interconnection – OSI).

Το βασικότερο δομικό στοιχείο είναι ο Ασύρματος Σταθμός (Wireless LAN Station – STA). Ένας σταθμός είναι οποιαδήποτε συσκευή, η οποία έχει την λειτουργικότητα του πρωτοκόλλου 802.11. Αυτή η λειτουργικότητα είναι ο έλεγχος πρόσβασης στο μέσο (MAC), το φυσικό επίπεδο (PHY) και η σύνδεση μέσω του ασύρματου μέσου (Wireless Medium – WM). Τυπικά αυτές οι λειτουργίες είναι υλοποιημένες μέσω υλικού (hardware) και λογισμικού (software) στην κάρτα διεπαφής του σταθμού (Network Interface Card – NIC). Ένας σταθμός μπορεί να είναι ένας φορητός υπολογιστής (laptop), ένα PDA, ένα VoIP τηλέφωνο, συσκευές εντοπισμού ή ένα Access Point.

Η βασική δομή ενός IEEE 802.11 τοπικού δικτύου (LAN) ορίζεται ως Basic Service Set (BSS) και αποτελείται από δύο τουλάχιστον σταθμούς, οι οποίοι ελέγχονται από μοναδική συνάρτηση συντονισμού (coordination function). Η συνάρτηση συντονισμού είναι η λογική συνάρτηση, η οποία καθορίζει μέσα σε ένα BSS πότε ο σταθμός επιτρέπεται να μεταδώσει και πότε να λάβει protocol data units (PDUs) μέσω του ασύρματου μέσου. Η συνάρτηση συντονισμού μπορεί να αποτελείται από δύο μέρη:

- a) Η **Κατανεμημένη Συνάρτηση Συντονισμού** (Distributed Coordination Function – DCF). Αυτή αποτελείται από ένα σύνολο συναρτήσεων συντονισμού, όπου η ίδια λογική συνάρτηση συντονισμού υπάρχει σε κάθε σταθμό στο ενεργό BSS.
- b) Η **Κεντρικοποιημένη Συνάρτηση Συντονισμού** (Point Coordination Function – PCF). Αυτή αποτελείται από μία κλάση πιθανών συναρτήσεων συντονισμού, όπου η λογική συνάρτηση συντονισμού είναι ενεργή μόνο σε

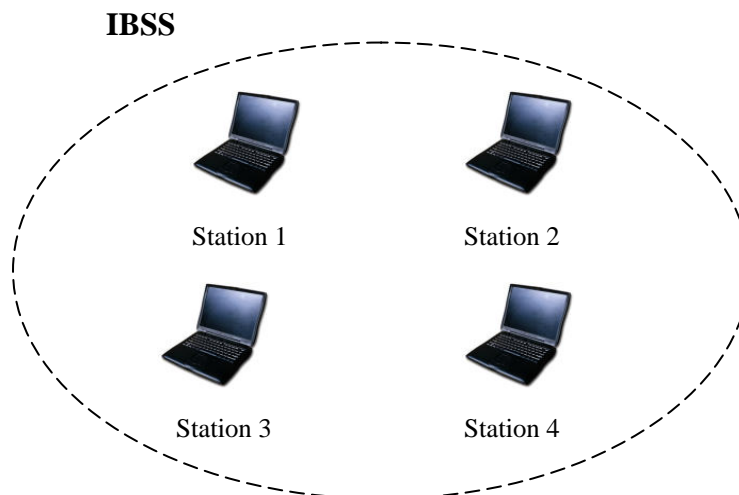
ένα σταθμό στο BSS σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή όπου το δίκτυο είναι σε λειτουργία.

## 2.2 Τοπολογίες του IEEE 802.11

Το πρωτόκολλο υποστηρίζει τις παρακάτω τοπολογίες

### 2.2.1 Independent Basic Service Set (IBSS)

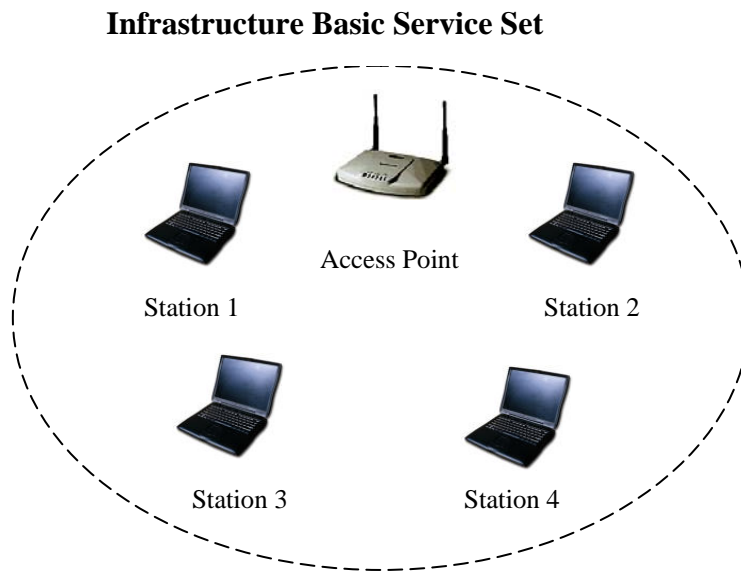
Ένα IBSS είναι ένα αυτόνομο BSS το οποίο αποτελείται από τουλάχιστον δύο σταθμούς και δεν έχει σύνδεση με κάποιο άλλο τοπικό δίκτυο μέσω ενσύρματης ή ασύρματης σύνδεσης (backbone υποδομή). Στο IBSS όλοι οι σταθμοί επικοινωνούν απευθείας ο ένας με τον άλλον (peer to peer). Για αυτόν τον λόγο υπάρχει περίπτωση να μην μπορούν όλοι οι σταθμοί να επικοινωνήσουν μεταξύ τους λόγω περιορισμών της απόστασης. Στο IBSS δεν υπάρχουν μηχανισμοί αναμετάδοσης και επομένως οι σταθμοί πρέπει να βρίσκονται μέσα στην κατάλληλη απόσταση προκειμένου να επικοινωνούν ευθέως. Αυτή η τοπολογία αναφέρεται συχνά και σαν Ad – Hoc, επειδή μπορεί να υλοποιηθεί γρήγορα και χωρίς κάποιον ιδιαίτερο σχεδιασμό.



**Σχήμα 2.1 – Independent BSS**

### 2.2.2 Infrastructure Basic Service Set

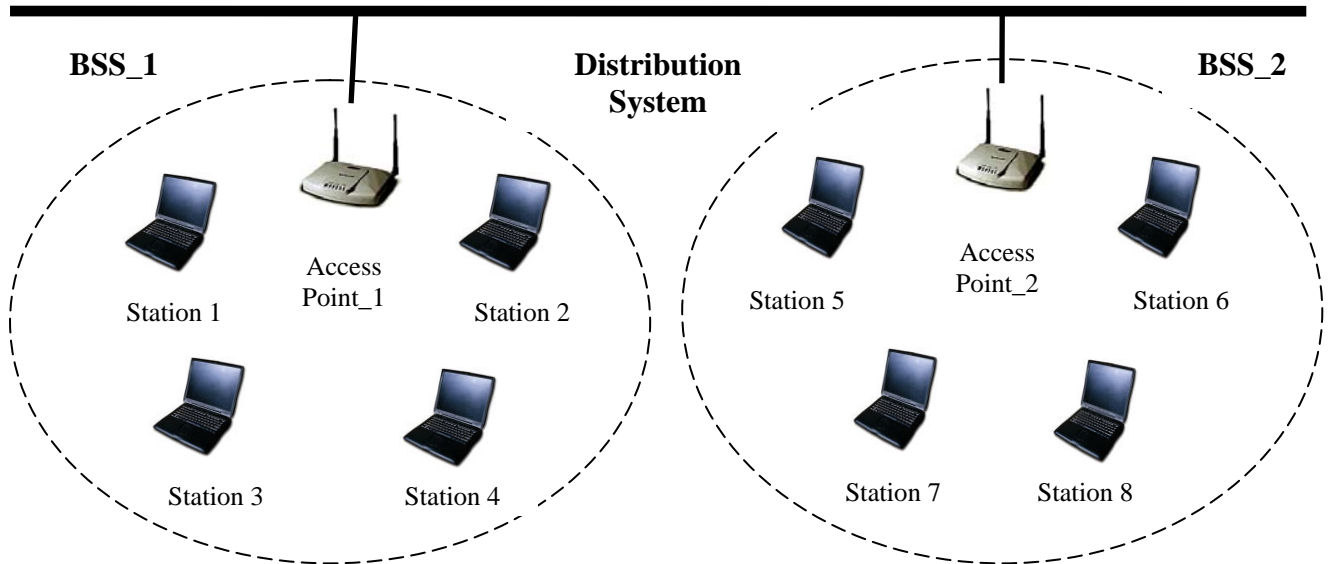
Ένα Infrastructure Basic Service Set είναι ένα BSS, στο οποίο υπάρχει και ένα Access Point (AP). Το Access Point παρέχει την λειτουργικότητα της τοπικής αναμετάδοσης. Όλοι οι σταθμοί δεν επικοινωνούν μεταξύ τους αλλά μέσω του AP, δηλαδή το AP αναμεταδίδει όλα τα frames ανάμεσα στους σταθμούς. Με αυτόν το τρόπο η έκταση του IBSS διπλασιάζεται, αφού δύο σταθμοί προκειμένου να επικοινωνήσουν μεταξύ τους αρκεί να μπορούν να επικοινωνήσουν με το AP.



**Σχήμα 2.2 – Infrastructure BSS**

### 2.2.3 Extended Service Set (ESS)

Ένα ESS είναι ένα σύνολο από Infrastructure Basic Service Sets, στα οποία τα Access Points επικοινωνούν μεταξύ τους για να προωθούν κίνηση από ένα BSS στο άλλο προκειμένου να υποστηρίζεται η μετακίνηση των σταθμών μεταξύ των BSS. Στα ESS η κινητικότητα του σταθμού είναι ακόμα μεγαλύτερη αφού έχει την δυνατότητα να μετακινείται και μεταξύ BSS τα οποία ανήκουν στο ίδιο ESS. Η επικοινωνία των Access Points γίνεται μέσω ενός συστήματος διανομής (distribution system – DS). Το σύστημα διανομής χρησιμοποιείται για να συνδέσει τοπικά δίκτυα μεταξύ τους και έτσι να δημιουργήσει ένα ESS. Με άλλα λόγια το σύστημα διανομής είναι το backbone του Ασύρματου LAN και μπορεί να κατασκευαστεί είτε από ενσύρματο LAN, είτε από ασύρματο δίκτυο.



Σχήμα 2.3 - ESS

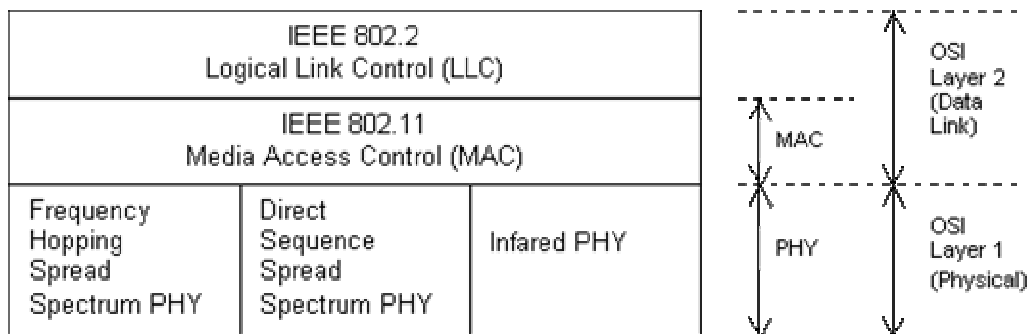
## 2.3 Κινητικότητα στο 802.11

Στο [1] αναγνωρίζονται τρία είδη που χαρακτηρίζουν την κινητικότητα των σταθμών.

- a) **Καθόλου Μετάβαση (No –transition)**. Αυτό το είδος της κινητικότητας χαρακτηρίζει τους σταθμούς, οι οποίοι δεν κινούνται και τους σταθμούς, οι οποίοι κινούνται μόνο μέσα στο τοπικό BSS.
- b) **BSS Μετάβαση (BSS-transition)**. Η κινητικότητα αυτή χαρακτηρίζει τους σταθμούς, οι οποίοι μετακινούνται από ένα BSS ενός ESS προς ένα άλλο BSS του ίδιου ESS.
- c) **ESS Μετάβαση (ESS-transition)**. Το είδος αυτό ορίζεται σαν την κίνηση ενός σταθμού από ένα BSS ενός ESS προς ένα άλλο BSS ενός άλλου ESS. Αυτή η περίπτωση υποστηρίζεται με την έννοια ότι ο σταθμός μπορεί να κινηθεί. Την διατήρηση όμως συνεχούς σύνδεσης δεν μπορεί να εγγυηθεί το IEEE 802.11 και είναι πιθανό να συμβεί διακοπή της σύνδεσης.

## 2.4 Το Μοντέλο της Αρχιτεκτονικής του IEEE 802.11

Η αρχιτεκτονική εικόνα του IEEE 802.11 δίνει ιδιαίτερη έμφαση στον διαχωρισμό του συστήματος σε δύο κύρια μέρη: α) το MAC υποεπίπεδο του επιπέδου ζεύξης δεδομένων (Data Link Layer) και β) το PHY επίπεδο. Η αρχιτεκτονική του 802.11 φαίνεται στο σχήμα 2.4



Σχήμα 2.4 – Αρχιτεκτονική 802.11

Τα επίπεδα αυτά αντιστοιχούν στα χαμηλότερα επίπεδα του ISO/IEC του βασικού μοντέλου αναφοράς του Open Systems Interconnection (OSI). Το πρωτόκολλο IEEE 802.11 είναι πλήρως συμβατό με όλα τα τοπικά δίκτυα πάνω από τον έλεγχο λογικής Ζεύξης (Logical Link Control – LLC), όπως αυτό ορίζεται από τα πρότυπα IEEE 802.

## 2.5 Περιγραφή του Φυσικού Επιπέδου (PHY Layer)

Το 802.11 φυσικό επίπεδο είναι η διεπαφή μεταξύ του MAC και του ασύρματου μέσου, όπου μεταδίδονται και λαμβάνονται τα πλαίσια δεδομένων (data frames). Το φυσικό επίπεδο είναι υπεύθυνο για την μετατροπή των bits των πλαισίων σε ηλεκτρικά ή οπτικά σήματα και το αντίστροφο. Το φυσικό επίπεδο έχει τρεις λειτουργίες :

- Προσφέρει μια διεπαφή για ανταλλαγή frames με το MAC επίπεδο, έτσι ώστε να είναι δυνατή η μετάδοση και η λήψη δεδομένων.
- Χρησιμοποιεί μεταφορέα σημάτων (carrier signaling) και διαμόρφωση φάσματος διάδοσης (spread spectrum modulation) για την μετάδοση των πλαισίων δεδομένων πάνω από το WM (Wireless Medium).
- Παρέχει ένδειξη ανίχνευσης σήματος στο MAC επίπεδο, ώστε το MAC να γνωρίζει την κίνηση στο WM.

Στο [1] ορίζονται τρεις διαφορετικοί τύποι PHY :

- Frequency – Hopping spread spectrum (FHSS) PHY.** Η διάχυση φάσματος (spread spectrum) είναι μια τεχνική στην οποία θυσιάζουμε το εύρος φάσματος για περισσότερη αξιοπιστία. Ο στόχος είναι να χρησιμοποιήσουμε περισσότερο εύρος φάσματος από αυτό που χρειάζεται πραγματικά το

σύστημα για να μεταδώσει, προκειμένου να μειώσουμε την επίδραση των παρεμβολών και του θορύβου στο μέσο. Με το spread spectrum το φάσμα του σήματος απλώνεται, μειώνοντας έτσι την μέγιστη ενέργεια, διατηρώντας όμως την συνολική ενέργεια την ίδια. Η Αναπήδηση Συχνότητας (Frequency Hopping) χρησιμοποιεί μία ομάδα από κανάλια συχνότητας και μετακινείται από το ένα στο άλλο με κάποια προκαθορισμένη σειρά. Το 802.11 FHSS χρησιμοποιεί την ζώνη συχνοτήτων 2.4 GHz, η οποία ανήκει στην ISM (Industrial, Scientific, Medical) ζώνη συχνοτήτων. Επίσης το 802.11 FHSS υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης 1 και 2 Mbps.

- b) **Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS).** Η αρχή αυτού του τύπου μετάδοσης είναι η διάχυση του φάσματος του σήματος σε μία μεγαλύτερη ζώνη συχνοτήτων πολυπλέκοντας το σήμα με κάποιο κώδικα, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές και ο θόρυβος. Το μεταδιδόμενο σήμα αποδιαμορφώνεται από τον δέκτη χρησιμοποιώντας τον ίδιο κώδικα τον οποίο χρησιμοποίησε ο πομπός. Το DSSS χρησιμοποιεί την ίδια μπάντα συχνοτήτων με το FHSS και επιτυγχάνει τους ίδιους ρυθμούς μετάδοσης.
- c) **Infrared (IR).** Το υπέρυθρο (IR) PHY χρησιμοποιεί σχεδόν ορατό φως από 850nm μέχρι 950nm για να μεταδώσει δυαδικά δεδομένα είτε στο 1 Mbps (βασικός ρυθμός πρόσβασης) είτε στα 2 Mbps (ενισχυμένος ρυθμός πρόσβασης). Αντίθετα με τις άλλες Infrared συσκευές, το IR PHY δεν είναι κατευθυνόμενο. Δηλαδή ο πομπός και ο δέκτης δεν χρειάζονται καθαρή οπτική επαφή. Αυτό το γεγονός επιτρέπει την δημιουργία ενός πραγματικού LAN. Παρόλα αυτά η μέγιστη απόσταση μεταξύ των σταθμών δεν ξεπερνά τα 20 μέτρα.

Επεκτάσεις του 802.11 PHY επιπέδου αποτελούν τα παρακάτω πρωτόκολλα :

- a) **802.11a [2].** Στο 802.11a ορίζονται νέες τεχνικές πολυπλεξίας με αποτέλεσμα να πετυχαίνονται ρυθμοί μετάδοσης μέχρι και 54Mbps. Η ζώνη συχνοτήτων που χρησιμοποιείται είναι των 5 GHz.
- b) **802.11b [3].** Στο 802.11b ορίζεται μία επέκταση του DSSS, η οποία ονομάζεται High Rate DSSS (HR/DSSS) και με την οποία επιτυγχάνονται ρυθμοί μετάδοσης 5.5 Mbps και 11Mbps. Επίσης ορίζεται και μία τεχνική αλλαγής ρυθμού μετάδοσης, με την οποία ένα δίκτυο που λειτουργεί στα 11Mbps μπορεί να αλλάξει τον ρυθμό μετάδοσης του σε 5.5 Mbps, 2 Mbps ή

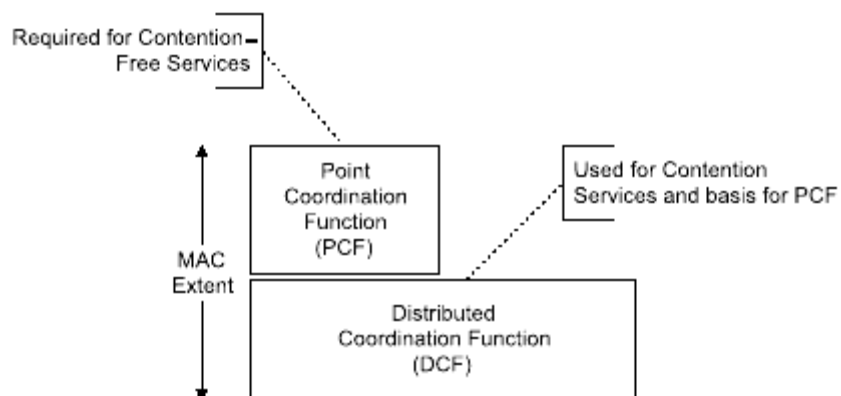
1 Mbps κάτω από συνθήκες θορύβου. Η ζώνη συχνοτήτων που χρησιμοποιείται είναι των 2.4 GHz.

- c) **802.11g [4]**. Στο 802.11g ορίζεται μια επέκταση για το DSSS του 802.11 και για το HR/DSSS του 802.11b, η οποία ονομάζεται Extended Rate PHY (ERP) και με την οποία επιτυγχάνονται ρυθμοί μετάδοσης μέχρι και 54 Mbps, ενώ χρησιμοποιείται η ISM ζώνη συχνοτήτων των 2.4 GHz.

## 2.6 Περιγραφή του Υποεπιπέδου MAC

Το 802.11 MAC επίπεδο παρέχει λειτουργικότητα για αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων προς τα υψηλότερα επίπεδα μέσω του ασύρματου μέσου. Η υπηρεσία αυτή του MAC επιπέδου βασίζεται πάνω στην ασύγχρονη, βέλτιστη προσπάθεια και χωρίς σύνδεση μεταφορά δεδομένων του MAC επιπέδου. Επιπλέον το MAC δεν παρέχει εγγύηση ότι τα πλαίσια θα μεταφερθούν επιτυχώς. Μια άλλη λειτουργικότητα του MAC επιπέδου είναι η προστασία των μεταδιδόμενων δεδομένων, παρέχοντας ασφάλεια και υπηρεσίες μυστικότητας (privacy). Η ασφάλεια αυτή παρέχεται από υπηρεσίες αυθεντικότητας (authentication services) και από το Wired Equivalent Privacy (WEP), το οποίο είναι μια υπηρεσία κωδικοποίησης για όλα τα δεδομένα που μεταδίδονται στο WLAN.

Η πιο σημαντική λειτουργικότητα του MAC είναι η ελεγχόμενη πρόσβαση στο κοινοποιημένο ασύρματο μέσο. Η αρχιτεκτονική του MAC μπορεί να περιγραφεί από το σχήμα 2.5.



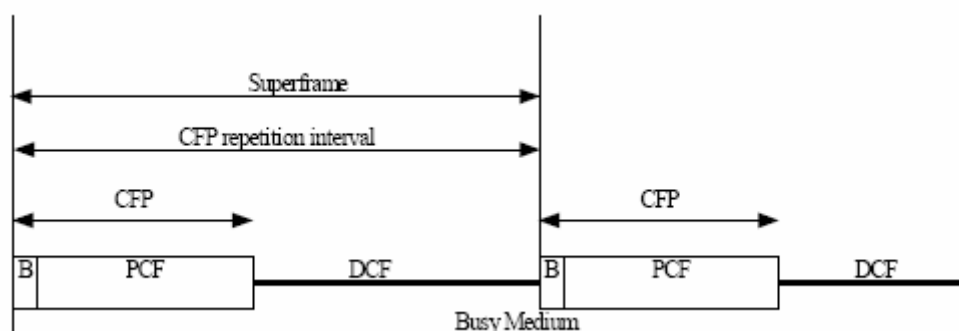
Σχήμα 2.5 – Μοντέλο MAC Αρχιτεκτονικής

Όπως παρατηρούμε και από το σχήμα 2.5 η ελεγχόμενη πρόσβαση στο μέσο επιτυγχάνεται με δύο μεθόδους :



- a) **Κατανεμημένη Συνάρτηση Συντονισμού (Distributed Coordination Function – DCF)** Το DCF είναι η βασική μέθοδος του IEEE 802.11 για πρόσβαση στο ασύρματο μέσο και βασίζεται πάνω στη μέθοδο πολλαπλής πρόσβασης με ανίχνευση φέροντος και αποφυγή σύγκρουσης (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance – CSMA/CA). Το DCF είναι υλοποιημένο σε όλους στους σταθμούς (STAs), και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε IBSS και σε Infrastructure BSS.
- b) **Κεντριοποιημένη Συνάρτηση Συντονισμού (Point Coordination Function – PCF)** Το PCF είναι προαιρετική μέθοδος για πρόσβαση στο μέσο και χρησιμοποιείται μόνο σε Infrastructure BSS. Αυτή η μέθοδος πρόσβασης χρησιμοποιεί ένα Συντονιστή (Point Coordinator), ο οποίος λειτουργεί στο Access Point του BSS και οποίος καθορίζει ποιος σταθμός έχει το δικαίωμα να μεταδώσει κάθε φορά.

Το DCF και το PCF μπορούν να συνυπάρχουν στο ίδιο BSS. Όταν ο PC λειτουργεί στο BSS οι δύο μέθοδοι πρόσβασης εναλλάσσονται. Το PCF λειτουργεί στην περίοδο χωρίς ανταγωνισμό (Contention Free Period – CFP) και το DCF λειτουργεί στην περίοδο με ανταγωνισμό (Contention Period – CP). Ένα CFP και ένα CP συνδυάζονται σε ένα superframe. Τα Superframes διαχωρίζονται μεταξύ τους με περιοδικά πλαίσια διαχείρισης (management frames), τα οποία ονομάζονται Beacon frames.

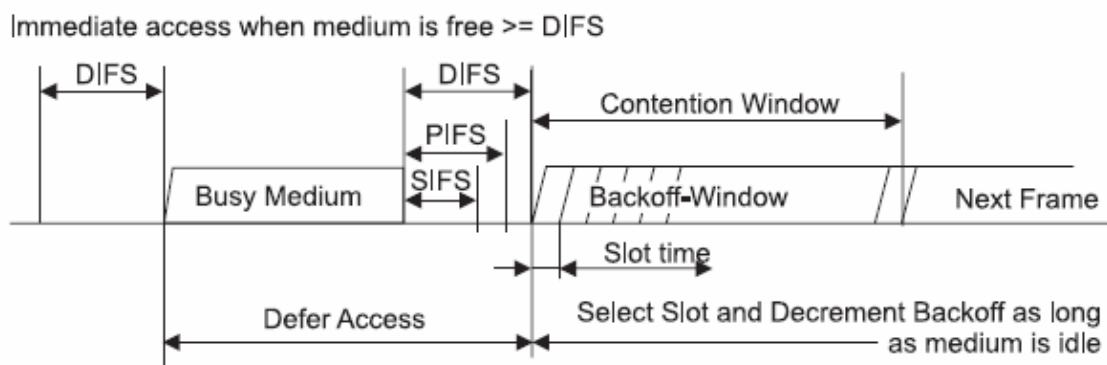


Σχήμα 2.6 - Superframe

## 2.6.1 Distributed Coordination Function – DCF

### 2.6.1.1 Λειτουργία του CSMA/CA στο DCF

Στο IEEE 802.11 MAC σε κάθε σταθμό υπάρχει μία ουρά μετάδοσης, η οποία λειτουργεί σύμφωνα με την αρχή First-in-First-out (FIFO), δηλαδή το πλαίσιο το οποίο έφτασε πρώτο στην ουρά θα μεταδοθεί πρώτο κ.ο.κ. Όταν ένα frame ή ένα MAC Service Data Unit (MSDU), το οποίο είναι η μονάδα δεδομένων που φτάνει στο MAC επίπεδο από υψηλότερο επίπεδο, φτάσει στην ουρά μετάδοσης ελέγχεται η κατάσταση του ασύρματου μέσου με την βοήθεια του μηχανισμού ανίχνευσης φέροντος. Αν το κανάλι είναι κατειλημμένο, τότε το MAC περιμένει μέχρι το μέσο να γίνει ανενεργό. Όταν το μέσο γίνει ανενεργό περιμένει ένα επιπλέον χρόνο, ο οποίος ονομάζεται DCF Interframe Space (DIFS), ελέγχοντας παράλληλα την κατάσταση του WM. Αν καθόλη την διάρκεια του χρόνου DIFS το μέσο ήταν ανενεργό, τότε το MAC αρχίζει μια διαδικασία οπισθοδρόμησης (backoff procedure) επιλέγοντας έναν τυχαίο μετρητή οπισθοδρόμησης (backoff counter – BC). Για κάθε μονάδα χρόνου, η οποία έχει σταθερή διάρκεια και ονομάζεται slot time, που περνάει η τιμή του BC μειώνεται κατά ένα. Όταν φτάσει στο μηδέν το frame μεταδίδεται. Στην περίπτωση που ένα frame φτάσει στην κορυφή της ουράς και το MAC είναι στην διαδικασία αναμονής χρόνου DIFS ή στην διαδικασία τυχαίου backoff, επαναλαμβάνεται η διαδικασία που αναφέραμε πιο πάνω. Στην περίπτωση όμως που το MAC έχει τελειώσει την διαδικασία τυχαίου backoff και το μέσο είναι ακόμα ανενεργό περισσότερο από χρόνο DIFS, το frame μεταδίδεται αμέσως.

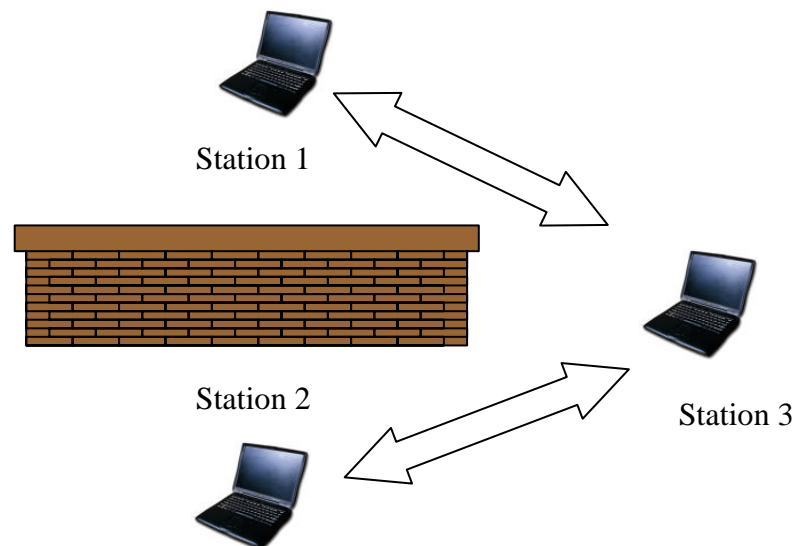


Σχήμα 2.7 – Λειτουργία Πρόσβασης στο Μέσο

Με τη χρήση του τυχαίου backoff counter η πιθανότητα σύγκρουσης μειώνεται αφού είναι πολύ πιθανό μετά από μια περίοδο ενεργού μέσου πολλοί σταθμοί να

περιμένουν να μεταδώσουν. Έτσι η διαδικασία τυχαίας οπισθοδρόμησης μειώνει την πιθανότητα συγκρούσεων.

Ο μηχανισμός CSMA/CA προσφέρει και αποφυγή συγκρούσεων (Collision Avoidance – CA). Ο μηχανισμός αυτός επιλύει ένα σημαντικό πρόβλημα που υπάρχει στα ασύρματα δίκτυα και το οποίο είναι το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού (Hidden Terminal Effect).

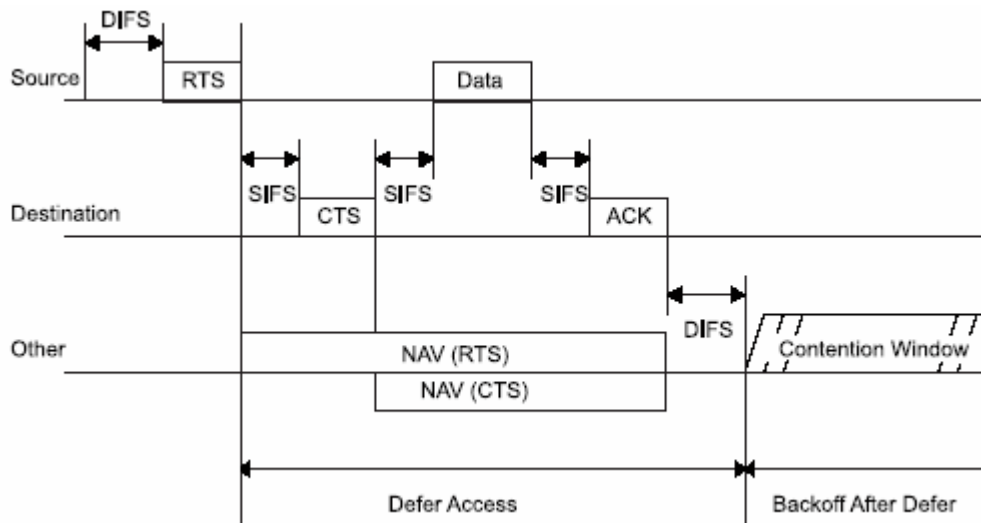


**Σχήμα 2.8 – Hidden Terminal Effect**

Στο πρόβλημα αυτό ο σταθμός 1 δεν μπορεί να ακούσει τον σταθμό 2, εξαιτίας διαφόρων παραγόντων όπως φυσικά εμπόδια, και το αντίστροφο. Ενώ ο σταθμός 3 μπορεί να ακούσει και τους δύο. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί ο σταθμός 1 να μεταδίδει ένα frame στον σταθμό 3 και ο σταθμός 2 να θέλει να μεταδώσει και αυτός στον σταθμό 3. Ο σταθμός 2 θα ελέγξει το μέσο με το μηχανισμό CSMA και επειδή δεν μπορεί να ακούσει την μετάδοση σταθμού 1 θα θεωρήσει ότι το μέσο είναι ανενεργό και θα αρχίσει την μετάδοση. Έτσι στον σταθμό 3 θα έχουμε σύγκρουση.

Το πρόβλημα αυτό επιλύεται με την βοήθεια δύο βοηθητικών μικρών πακέτων το RTS (Request to Send) και το CTS (Clear to Send), τα οποία ανταλλάσσονται πριν την μετάδοση του κανονικού frame. Τα πακέτα RTS και CTS περιέχουν στοιχεία τα οποία καθορίζουν την διάρκεια απασχόλησης του μέσου, δηλαδή το χρόνο της μετάδοσης του frame και της αντίστοιχης επιβεβαίωσης. Με αυτόν τον τρόπο όλοι οι σταθμοί που θα ακούσουν αυτά τα πακέτα θα αρχικοποιήσουν κατάλληλα ένα μετρητή, ο οποίος ονομάζεται Network Allocation Vector (NAV) και κάθε σε κάθε slot

time θα μειώνεται κατά ένα. Όσο ο NAV δεν είναι μηδέν οι σταθμοί δεν θα επιχειρούν να μεταδώσουν στο WM, διότι γνωρίζουν ότι θα είναι ενεργό.



Σχήμα 2.9 Λειτουργία RTS/CTS και NAV

Συγκεκριμένα στο σενάριο του σχήματος 2.8, ο σταθμός 1 αρχικά θα στείλει ένα RTS στον σταθμό 3 και αυτός με την σειρά του θα του απαντήσει με ένα CTS. Με αυτόν τον τρόπο ο σταθμός 2 θα γνωρίζει ότι το μέσο είναι ενεργό και επομένως η σύγκρουση θα αποφευχθεί.

### 2.6.1.2 Χρονικά Διαστήματα μεταξύ Πλαισίων (Interframe Space – IFS)

Το χρονικό διάστημα μεταξύ πλαισίων ονομάζεται IFS. Ένας σταθμός θα αποφασίσει ότι το μέσο είναι ανενεργό μέσω της λειτουργίας της ανίχνευσης φέροντος για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Στο IEEE 802.11 υπάρχουν τέσσερα διαφορετικά IFS τα οποία παρέχουν διαφορετικές προτεραιότητες πρόσβασης στο ασύρματο μέσο. Τα IFS, ταξινομημένα από την μικρότερη προς την μεγαλύτερη χρονική διάρκεια είναι τα ακόλουθα :

- a) **Short Interframe Space (SIFS).** Το SIFS είναι το μικρότερο IFS και χρησιμοποιείται για τις επιβεβαιώσεις (ACKs), για το CTS frame, για την απάντηση ενός σταθμού του οποίου είναι σειρά να μεταδώσει κατά την CFP περίοδο, καθώς και για την μετάδοση ακολουθούμενων MAC Protocol Data Units (MPDUs), τα οποία είναι τα πλαίσια δεδομένων που δίνονται από το MAC επίπεδο στο PHY προς μετάδοση, σε μια έκρηξη τεμαχίων (fragment burst). Το SIFS αντιπροσωπεύει την υψηλότερη προτεραιότητα και

εξασφαλίζει ότι ο σταθμός θα μπορέσει να ολοκληρώσει την μετάδοση του frame πριν οι άλλοι σταθμοί είναι σε θέση να έχουν πρόσβαση στο μέσο.

- b) **PCF Interframe Space (PIFS).** Στην CFP περίοδο ο Point Coordinator (PC) ορίζει ποιος σταθμός πρέπει να μεταδώσει και για αυτό τον λόγο πρέπει ο PC να έχει υψηλότερη προτεραιότητα στην πρόσβαση του μέσου. Για αυτό περιμένει χρόνο ίσο με PIFS, ο οποίος είναι μεγαλύτερος από SIFS αλλά μικρότερος από DIFS. Συγκεκριμένα ισχύει :  $PIFS = aSIFSTime + aSlotTime$ , όπου  $aSIFSTime$  είναι ο χρόνος SIFS και  $aSlotTime$  είναι η μονάδα χρόνου slot time.
- c) **DCF Interframe Space (DIFS).** Το DIFS χρησιμοποιείται στην CP και αντιστοιχεί στον χρόνο που πρέπει το μέσο να είναι ανενεργό πριν ο σταθμός μπορέσει να στείλει ένα frame ή να μειώσει τον backoff counter. Το DIFS ισούται :  $DIFS = aSIFSTime + 2 * aSlotTime$
- d) **Extended Interframe Space (EIFS).** Το EIFS χρησιμοποιείται από το DCF όποτε η μετάδοση ενός πλαισίου άρχισε και είχε ως αποτέλεσμα την λήψη ενός MAC πλαισίου με λάθος Frame Check Sequence (FCS). Το FCS χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του frame για λάθη κατά την μετάδοση του. Το EIFS είναι καθορισμένο έτσι ώστε να παρέχει αρκετό χρόνο στον παραλήπτη να γνωστοποιήσει στον πομπό την λανθασμένη λήψη του frame, προτού ο πομπός ξεκινήσει μια νέα μετάδοση.

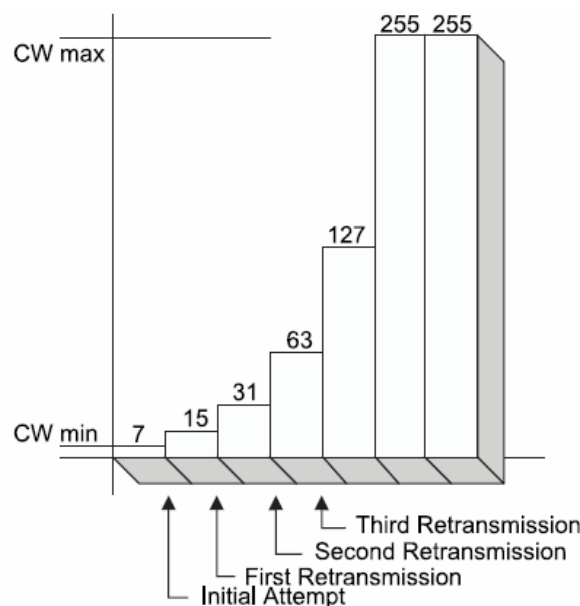
Τα IFS φαίνονται αναλυτικά και στο σχήμα 2.7

### 2.6.1.3 Τυχάιος Χρόνος Οπισθοδρόμησης (Random Backoff Time)

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως όταν ένας σταθμός επιθυμεί να μεταδώσει ένα πλαίσιο περιμένει μέχρι να αισθανθεί το μέσο ανενεργές. Αφού περάσει χρόνος ίσος με DIFS και ενώ το μέσο παραμένει ανενεργό, ο σταθμός επιλέγει μια τυχαία τιμή για τον backoff timer, εκτός εάν ο backoff timer έχει κάποια μη μηδενική τιμή, οπότε και δεν επιλέγεται κάποια τυχαία τιμή. Όταν ο backoff timer φτάσει την τιμή μηδέν ο σταθμός μεταδίδει το frame. Η διαδικασία αυτή ελαχιστοποιεί τις συγκρούσεις κατά την διάρκεια ανταγωνισμού μεταξύ σταθμών που περιμένουν την ίδια διάρκεια μέχρι το μέσο να γίνει ανενεργό. Η επιλογή του τυχαίου χρόνου γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση :  $Backoff\ Time = Random() * aSlotTime$ , όπου

- **aSlotTime** : Είναι η μονάδα χρόνου, και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του PHY
- **Random ()**: Είναι ένας ψευδό-τυχαίος αριθμός προερχόμενος από την ομοιόμορφη κατανομή στο  $[0, CW]$ , όπου  $CW$  είναι ένας ακέραιος μεταξύ των τιμών  $aCW_{min}$  και  $aCW_{max}$ . Δηλαδή ισχύει  $aCW_{min} \leq CW \leq aCW_{max}$ . Το  $aCW_{min}$  και το  $aCW_{max}$  εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του PHY [page 75 [1]].

Το παράθυρο ανταγωνισμού (Contention Window – CW) αρχικά παίρνει την τιμή  $aCW_{min}$  και αυξάνει κάθε φορά που η μετάδοση αποτυγχάνει λόγω σύγκρουσης, μέχρι να φτάσει την μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει  $aCW_{max}$ . Το CW ξαναπαίρνει την αρχική του τιμή  $aCW_{min}$  μετά από κάθε επιτυχή μετάδοση ενός MSDU ή MMPDU. Οι τιμές που παίρνει το CW είναι συνεχόμενες δυνάμεις του 2 μείον 1, αρχίζοντας από την τιμή  $aCW_{min}$ . Δηλαδή  $CW = \min\{aCW_{max}, (2^*(CW+1) - 1)\}$

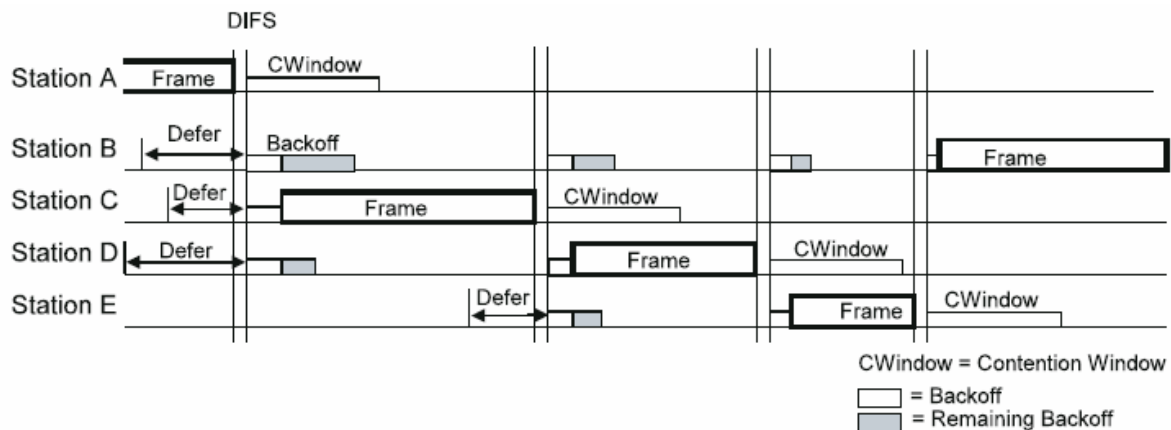


Σχήμα 2.10 – Παράδειγμα εκθετικής αύξησης του CW

#### 2.6.1.4 Διαδικασία Οπισθοδρόμησης (Backoff Procedure)

Η διαδικασία οπισθοδρόμησης αρχίζει αφού ένας σταθμός έχει αισθανθεί το ασύρματο μέσο ανενεργό για χρόνο DIFS. Στην συνέχεια, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, αρχικοποιείται με ένα τυχαίο χρόνο ο backoff timer. Σε κάθε backoff time slot, ο σταθμός με τον μηχανισμό ανίχνευσης φέροντος ανιχνεύει αν το μέσο είναι ανενεργό. Αν είναι ανενεργό, η διαδικασία backoff θα μειώσει τον backoff timer κατά ένα  $aSlotTime$ . Αν όμως το WM γίνει ενεργό οποιαδήποτε στιγμή

κατά την διάρκεια του backoff slot, τότε η backoff διαδικασία παγώνει και ο backoff timer δεν θα μειωθεί για αυτό το time slot. Έπειτα το WM πρέπει να παραμείνει ανενεργό για χρόνο ίσο με DIFS, προτού ο σταθμός συνεχίσει την backoff διαδικασία από εκεί που σταμάτησε. Η μετάδοση του frame θα πραγματοποιηθεί μόλις ο backoff timer φτάσει την τιμή μηδέν.



**Σχήμα 2.11 – Διαδικασία Backoff**

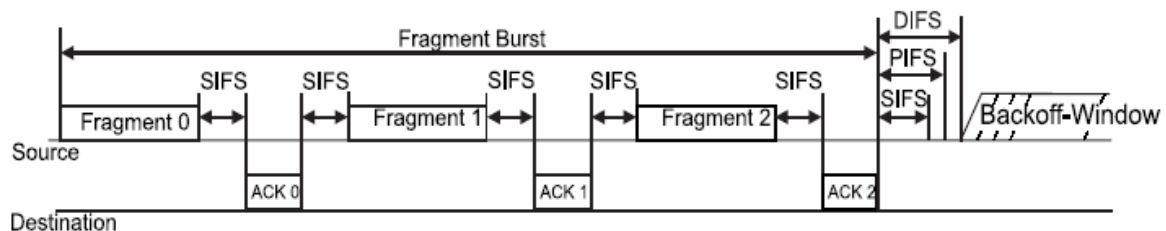
Από το σχήμα 2.11 συμπεραίνουμε ότι όταν πολλαπλοί σταθμοί μπαίνουν στην backoff διαδικασία και επιλέγουν μία τυχαία τιμή για το backoff timer, ο σταθμός με την μικρότερη τιμή στον backoff timer θα κερδίσει την πρόσβαση στο μέσο.

#### **2.6.1.5 Τεμαχισμός (Fragmentation) και Μετάδοση Έκρηξης Τεμαχίων (Fragment Burst)**

Η διαδικασία του χωρίσματος ενός MAC Service Data Unit (MSDU) ή ενός MAC Management Protocol Data Unit (MMPDU) σε μικρότερα MAC πλαίσια, τα οποία ονομάζονται MAC Protocol Data Units (MPDUs) καλείται τεμαχιοποίηση (fragmentation). Κατά τον τεμαχισμό δημιουργούνται τα MPDUs τα οποία είναι μικρότερα από τα αρχικά MSDU ή MMPDU. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η αξιοπιστία κατά την μετάδοση αφού η πιθανότητα για επιτυχή μετάδοση ενός μικρότερου πλαισίου είναι μεγαλύτερη από την πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης ενός μεγάλου πλαισίου. Το μέγεθος πάνω από το οποίο το MSDU ή το MMPDU τεμαχίζεται σε MPDUs καθορίζεται από την παράμετρο dot11FragmentationThreshold. Η αντίστροφη διαδικασία κατά την οποία τα MPDUs συνθέτονται για να δώσουν τα αρχικά MSDU ή MMPDU ονομάζεται defragmentation.

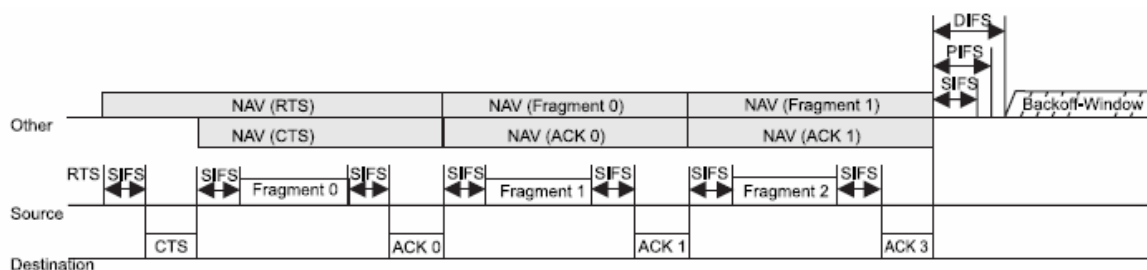
Η διαδικασία κατά την οποία ο σταθμός μπορεί να στείλει πολλαπλά τεμάχια (fragments), αφού έχει κερδίσει την πρόσβαση στο κανάλι ονομάζεται Μετάδοση

Έκρηξης Τεμαχίων (Fragment Burst). Κατά το fragment burst ο σταθμός στέλνει ένα fragment και έπειτα περιμένει την επιβεβαίωση. Αφού επιβεβαιωθεί το fragment που έστειλε συνεχίζει με το επόμενο κ.ο.κ. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να μεταδοθούν όλα τα fragments. Στην περίπτωση όμως που δεν έρθει η επιβεβαίωση για κάποιο fragment ή ο υπολειπόμενος χρόνος, που έχει ο σταθμός στην διάθεση του το μέσο είναι μικρότερος από τον χρόνο που χρειάζεται για να μεταδοθεί το fragment και η επιβεβαίωση του, η διαδικασία σταματάει. Έπειτα ο σταθμός πρέπει να ανταγωνιστεί ξανά για να κερδίσει την πρόσβαση στο μέσο και να συνεχίσει από το fragment στο οποίο είχε σταματήσει.



Σχήμα 2.12 – Fragment Burst

Το fragment burst μπορεί να υλοποιηθεί και με την χρήση του μηχανισμού RTS/CTS. Τα πακέτα RTS/CTS περιέχουν το χρόνο που θα διαρκέσει η μετάδοση του ακόλουθου frame και της επιβεβαίωσης του. Αντίστοιχα και οι επιβεβαιώσεις των fragments περιέχουν τον χρόνο που θα χρειαστεί η μετάδοση του επόμενου fragment και της επιβεβαίωσης του.



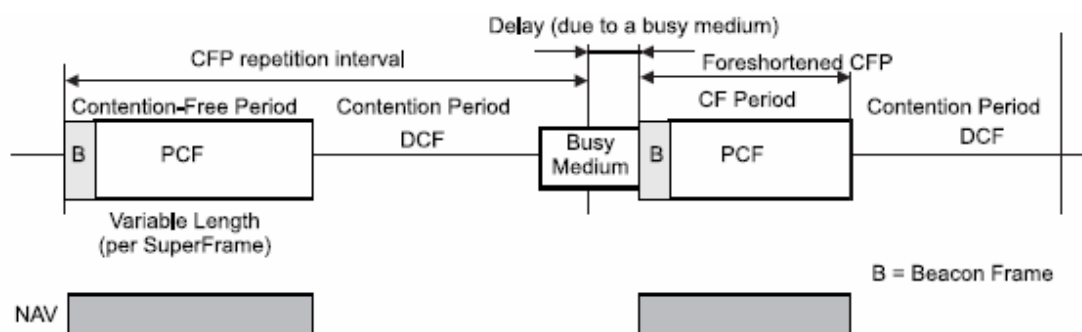
Σχήμα 2.13 – RTS/CTS με Fragment Burst



### 2.6.2 Point Coordination Function – PCF

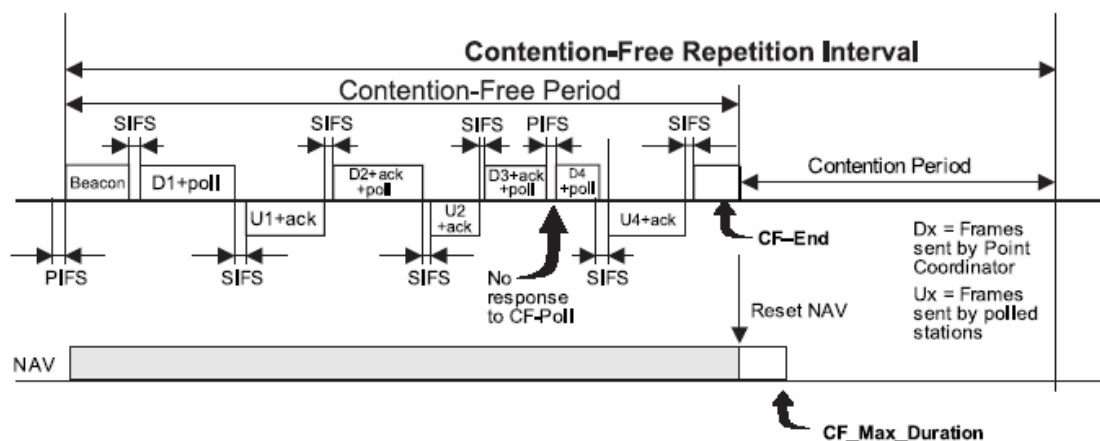
Το PCF είναι ένας προαιρετικός μηχανισμός, οποίος σχεδιάστηκε για χρονικά ευαίσθητες υπηρεσίες και λειτουργεί μόνο σε Infrastructure BSS. Το PCF, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.5 έχει σαν βάση του το DCF και παρέχει στους σταθμούς μεταφορά frames χωρίς ανταγωνισμό. Το πρωτόκολλο μεταφοράς πλαισίων χωρίς ανταγωνισμό (contention free transfer protocol) βασίζεται σε ένα σχήμα polling, το οποίο ελέγχεται από τον Point Coordinator (PC) ο οποίος βρίσκεται στο AP του BSS. Το polling ουσιαστικά είναι η διαδικασία κατά την οποία ο PC επιλέγει διαδοχικά ποιος σταθμός μπορεί να μεταδώσει την συγκεκριμένη στιγμή.

Στην αρχή της CFP περιόδου ο PC πρέπει να ανταγωνιστεί προκειμένου να κερδίσει την πρόσβαση στο μέσο για να αρχίσει την CFP περίοδο και έπειτα καθόλη την διάρκεια της CFP περιόδου προσπαθεί να διατηρήσει τον έλεγχο του μέσου περιμένοντας μικρότερο χρονικό διάστημα μεταξύ των μεταδόσεων σε σχέση με τους σταθμούς που λειτουργούν με βάση το DCF. Κατά την έναρξη της CFP περιόδου ο PC χρειάζεται να περιμένει χρόνο ίσο με PIFS, ο οποίος είναι μικρότερος από τον χρόνο DIFS που πρέπει να περιμένουν οι σταθμοί. Επομένως ο PC έχει μεγαλύτερη προτεραιότητα σε σχέση με τους σταθμούς. Μόλις κερδίσει την πρόσβαση στο μέσο ο PC θα στείλει ένα beacon frame, το οποίο περιέχει πληροφορίες όπως το Delivery Traffic Indication Message (DTIM), με την βοήθεια του οποίου οι σταθμοί μπορούν να συσχετιστούν με το AP και ρυθμίσουν κατάλληλα το NAV τους, έτσι ώστε να γνωρίζουν πότε τελειώνει η CFP περίοδος και πότε αρχίζει η CP περίοδος. Κάθε CFP περίοδος ακολουθείται από μία CP περίοδο. Ο PC ξεκινά CFP περιόδους με ένα ρυθμό επανάληψης, ο οποίος ονομάζεται contention free repetition rate (CFPRate) και ο οποίος ορίζεται ως ένας αριθμός από DTIM διαστήματα.



Σχήμα 2.14 – Εναλλαγή CFP/CP

Ο σταθμός που έχει την δυνατότητα να απαντήσει σε ένα CF-Poll, δηλαδή σε εντολή του PC ώστε να μεταδώσει, λέγεται ότι είναι CF – Pollable. Μετά την αρχή της CFP περιόδου και την αποστολή του beacon frame, ο PC περιμένει για χρόνο ίσο με SIFS. Έπειτα μπορεί να δώσει εντολή σε ένα σταθμό CF – Pollable να μεταδώσει. Η επιλογή αυτή δεν είναι τυχαία. Ο PC διατηρεί μια λίστα που περιέχει όλους τους σταθμούς, οι οποίοι περιμένουν να μεταδώσουν κατά την διάρκεια της CFP περιόδου. Η λίστα αυτή ονομάζεται polling list και προκειμένου να μπει κάποιος σταθμός σε αυτή τη λίστα πρέπει κατά την διάρκεια της CP περιόδου να ενημερώσει τον PC με ένα frame διαχείρισης συσχετισμού (association management frame) ότι θέλει να μεταδώσει στην επόμενη CFP περίοδο. Έτσι ο PC δίνει εντολή για να μεταδώσουν ακολουθιακά όλοι οι σταθμοί που βρίσκονται στην λίστα του, τουλάχιστον μια φορά κατά την διάρκεια της CFP περιόδου. Ο σταθμός που του δίνετε το δικαίωμα για μετάδοση μπορεί να απαντήσει με ένα πλαίσιο, το οποίο περιέχει δεδομένα και ενσωματωμένα την επιβεβαίωση για το πλαίσιο που μόλις του έστειλε ο PC. Αν ένας σταθμός που του δίνετε η ευκαιρία προς μετάδοση δεν απαντήσει, τότε ο PC δίνει εντολή στον επόμενο σταθμό να μεταδώσει μετά από χρόνο PIFS. Αν ούτε ο PC ούτε και οι σταθμοί έχουν δεδομένα προς μετάδοση, τότε η CFP περίοδος τερματίζεται πρόωρα με ένα CFP – End frame, το οποίο στέλνεται από τον PC. Έπειτα όλοι οι σταθμοί μηδενίζουν τον NAV τους και ξεκινά η CP περίοδος. Στην περίπτωση που η CFP περίοδος διαρκέσει περισσότερο από ότι είχε αναγγελθεί στο beacon frame, ο PC θα μεταδώσει νέα beacons τις κατάλληλες στιγμές κατά την διάρκεια του CFP, έτσι ώστε να συγχρονίσουν όλοι οι σταθμοί τους NAV με τις νέες τιμές.



Σχήμα 2.15 – Παράδειγμα μετάδοσης Frame με την χρήση PCF

## 2.7 Μειονεκτήματα του IEEE 802.11 για Παροχή Διαφοροποίησης Υπηρεσιών (Service Differentiation)

Το πρωτόκολλο IEEE 802.11, παρόλο που περιέχει τον μηχανισμό PCF, ο οποίος σχεδιάστηκε για υποστήριξη χρονικά ευαίσθητων υπηρεσιών, δεν καταφέρνει να παρέχει διαφοροποίηση υπηρεσιών. Ένας από τους βασικούς λόγους είναι η ύπαρξη μίας και μοναδικής ουράς στην οποία στοιβάζονται όλα τα προς μετάδοση πλαίσια. Αναλυτικότερα, όταν ένας σταθμός θέλει να υποστηρίξει service differentiation σε εφαρμογές video και φωνής πρέπει να δώσει μεγαλύτερη προτεραιότητα στα πακέτα που ανήκουν σε αυτές τις εφαρμογές. Εξαιτίας όμως της μοναδικής ουράς προς μετάδοση σε κάθε σταθμό, όλα τα πακέτα ανεξαρτήτως της εφαρμογής από την οποία προέρχονται έχουν την ίδια προτεραιότητα, αφού η ουρά είναι First in First out. Επομένως δεν υπάρχει η έννοια της προτεραιότητας.

Επιπλέον κατά την λειτουργία του PCF μηχανισμού ο PC δεν γνωρίζει τον χρόνο μετάδοσης όλων των σταθμών στους οποίους θα δώσει εντολή να μεταδώσουν. Αυτό συμβαίνει διότι όταν ένας σταθμός του δοθεί το δικαίωμα για μετάδοση από τον PC μπορεί να στείλει ένα μοναδικό frame, που μπορεί να είναι σε κομμάτια (fragments), αυθαίρετου μήκους μέχρι 2304 bytes (ή 2312 με κωδικοποίηση). Η μετάδοση αυτή, μετά την εντολή για έναρξη από τον PC, βρίσκεται εκτός ελέγχου του PC. Αυτό ακριβώς καταστρέφει κάθε απόπειρα για παροχή διαφοροποιημένων υπηρεσιών.

Σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι η έναρξη της επόμενης CFP περιόδου μπορεί να καθυστερήσει. Αυτό μπορεί να συμβεί εξαιτίας ενεργού μέσου την στιγμή που ο PC πρέπει να στείλει το beacon frame. Αν το μέσο ήταν ανενεργό την στιγμή εκείνη ο PC θα μπορούσε να προλάβει να έχει πρόσβαση στο μέσο εξαιτίας του μικρότερου χρόνου PIFS που περιμένει. Αυτή η καθυστέρηση όμως μπορεί να συμβεί αν στο τέλος της CP περιόδου μόλις άρχισε η μετάδοση ενός μεγάλου frame. Αυτή η καθυστέρηση στην έναρξη της CFP περιόδου μπορεί να επηρεάσει τον χρόνο που διατίθεται σε χρονικά ευαίσθητη κίνηση. Αυτό το πρόβλημα είναι γνωστό σαν Πρόβλημα Αναβαλλόμενου Beacon στο PCF.

Από τα παραπάνω φαίνεται η ανάγκη για την δημιουργία μιας επέκτασης του πρωτοκόλλου, έτσι ώστε να αντιμετωπίζονται τα παραπάνω προβλήματα και να

παρέχονται Διαφοροποιημένες Υπηρεσίες. Για αυτό το λόγο δημιουργήθηκε η ομάδα εργασίας IEEE 802.11e. Από την μέχρι τώρα δράση της έχουν βγει ήδη κάποια προσχέδια, σχετικά με την μορφή του πρωτοκόλλου IEEE 802.11e. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής μελετάται η έκδοση 6.0 του πρωτοκόλλου IEEE 802.11e, η οποία εκδόθηκε τον Νοέμβριο του 2003.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> : Διαφοροποίηση Υπηρεσιών πάνω από IEEE 802.11e

### 3.1 Τα Δομικά Στοιχεία της Αρχιτεκτονικής του IEEE 802.11e

Το IEEE 802.11e παρέχει λειτουργικότητες στο MAC επίπεδο προκειμένου να παρέχει Ποιότητα Υπηρεσιών (Quality of Service – QoS) σε εφαρμογές, οι οποίες έχουν QoS απαιτήσεις. Οι QoS λειτουργικότητες υπάρχουν σε QoS σταθμούς (QSTAs), οι οποίοι μπορούν να συσχετιστούν με ένα QoS Access Point (QAP). Το BSS που υποστηρίζει QoS λειτουργικότητα ονομάζεται QoS BSS (QBSS). Ένας QSTA, επειδή υλοποιεί ένα υπερσύνολο της λειτουργικότητας ενός STA, έχει την δυνατότητα να συσχετιστεί σε ένα BSS με ένα AP προκειμένου να παρέχει υπηρεσίες οι οποίες δεν υποστηρίζουν QoS, εφόσον δεν έχει την δυνατότητα να συσχετιστεί σε ένα QBSS. Οι τοπολογίες που υποστηρίζονται από το πρωτόκολλο είναι ανάλογες με εκείνες του 802.11, με μόνη διαφορά ότι στο Infrastructure BSS στην περίπτωση του 802.11e, υπάρχει λειτουργικότητα ώστε οι σταθμοί να μπορούν να επικοινωνήσουν απευθείας μεταξύ τους.

Το IEEE 802.11e παρέχει δύο μηχανισμούς για την υποστήριξη εφαρμογών που έχουν QoS απαιτήσεις.

- a) **Enhanced Distributed Channel Access – EDCA.** Με τον μηχανισμό αυτόν η κίνηση μεταφέρεται με βάση τις διαφορετικές προτεραιότητες που έχει η κάθε ροή. Αυτή η διαφοροποίηση πετυχαίνεται μέσω της διαφορετικής διάρκειας χρόνου που πρέπει να αισθάνεται ο QSTA το μέσο ανενεργό πριν την μετάδοση ή το backoff, από το μήκος του Contention Window που χρησιμοποιείται κατά το backoff ή από τη διάρκεια του χρόνου που μπορεί να μεταδώσει ο σταθμός αφού κερδίσει την πρόσβαση στο κανάλι.
- b) **HCF Controlled Channel Access – HCCA.** Με τον μηχανισμό αυτόν επιτρέπονται οι κρατήσεις χρόνων για μετάδοση (transmission opportunities – TXOP) από τον υβριδικό συντονιστή (Hybrid Coordinator – HC) ο οποίος βρίσκεται στο QoS Access Point. Ο σταθμός με βάση τις ανάγκες του ζητά από τον HC κάποιο TXOP, τόσο για τις μεταδόσεις του όσο και για τις μεταδόσεις προς αυτόν από το QAP. Ο HC ανάλογα είτε δέχεται είτε

απορρίπτει την αίτηση του σταθμού. Σε περίπτωση που δεχτεί ο HC προγραμματίζει ένα TXOP για τον σταθμό και για τον QAP και την στιγμή που έχει ζητηθεί το TXOP ο HC δίνει εντολή (rolls) στον σταθμό για να μεταδώσει με βάση τις παραμέτρους που ζήτησε ο σταθμός.

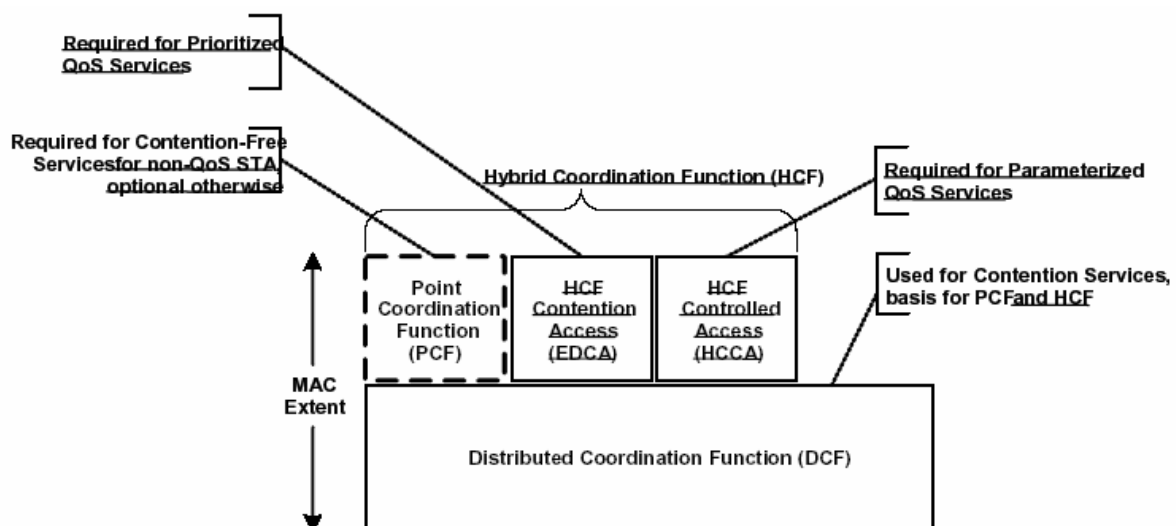
### 3.2 Περιγραφή Φυσικού Επιπέδου (PHY)

Το IEEE 802.11e αποτελεί προέκταση του πρωτοκόλλου IEEE 802.11, επομένως μπορεί να λειτουργήσει πάνω από οποιοδήποτε PHY επίπεδο, στο οποίο λειτουργεί και το 802.11. Έτσι το IEEE 802.11e μπορεί να λειτουργήσει πάνω από τα φυσικά επίπεδα που ορίζονται στις επεκτάσεις του IEEE 802.11 πρωτοκόλλου και τα οποία αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Εν συντομία αυτά είναι :

- 802.11a
- 802.11b
- 802.11g

### 3.3 Περιγραφή του Υποεπιπέδου MAC

Η δομή του MAC υποεπιπέδου του IEEE 802.11e περιγράφεται στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1 – Η MAC Αρχιτεκτονική

Για την παροχή QoS υπηρεσιών στο 802.11e έχει υλοποιηθεί μια επιπλέον συνάρτηση συντονισμού, η οποία ονομάζεται Υβριδική Συνάρτηση Συντονισμού - HCF, και χρησιμοποιείται μόνο σε QBSS. Η HCF είναι υλοποιημένη σε όλα τα QSTAs και συνδυάζει λειτουργίες από το DCF και το PCF με κάποιες βελτιώσεις στους μηχανισμούς. Το HCF χρησιμοποιεί ένα μηχανισμό για πρόσβαση στο ασύρματο μέσο μέσω ανταγωνισμού, ο οποίος ονομάζεται Enhanced Distributed Channel Access (EDCA), και ένα μηχανισμό για ελεγχόμενη πρόσβαση στο μέσο, ο οποίος ονομάζεται HCF Controlled Channel Access.

Οι QoS σταθμοί (QSTAs) μπορούν να αποκτήσουν ευκαιρία για μετάδοση (TXOP) με ένα από τους δύο μηχανισμούς. Αν το TXOP το αποκτήσουν με χρήση του μηχανισμού EDCA, τότε το TXOP χαρακτηρίζεται ως EDCA TXOP, ενώ αν αποκτηθεί με χρήση του HCCA χαρακτηρίζεται ως HCCA TXOP ή rolled TXOP.

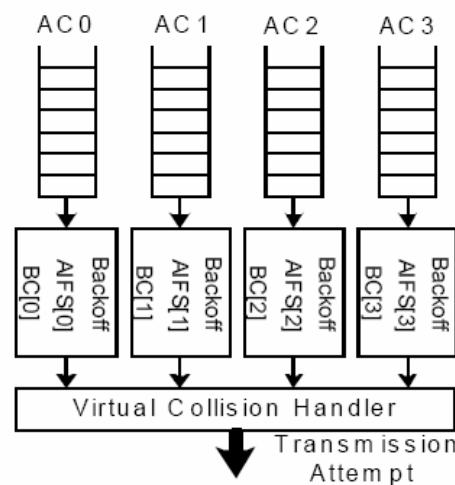
### 3.3.1 HCF Contention Based Channel Access – EDCA

Ο μηχανισμός EDCA παρέχει διαφοροποιημένη και κατανομημένη πρόσβαση στο ασύρματο μέσο για όλα τα QSTAs χρησιμοποιώντας οκτώ διαφορετικές προτεραιότητες, οι οποίες ονομάζονται User Priorities (UP). Αυτές οι οκτώ διαφορετικές UP αντιστοιχίζονται σε τέσσερις κατηγορίες πρόσβασης (Access Categories – AC). Η αντιστοίχιση των UP σε AC φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.

	(UP – Same as 802.1D User Priority)	Designation	Category (AC)	(Informative)
<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="text-align: center; margin-right: 10px;"> lowest ↓       highest </div> </div>	1	BK	AC_BK	Background
	2	-	AC_BK	Background
	0	BE	AC_BE	Best Effort
	3	EE	AC_BE	Video
	4	CL	AC_VI	Video
	5	VI	AC_VI	Video
	6	VO	AC_VO	Voice
	7	NC	AC_VO	Voice

Σχήμα 3.2 – Αντιστοίχιση UP σε AC

Κάθε AC είναι μία First in First out ουρά, στην οποία εισάγονται τα frames που είναι προς μετάδοση από κάποιες συγκεκριμένες UP. Σε κάθε AC υπάρχει μία ξεχωριστή ενισχυμένη έκδοση του DCF, που ονομάζεται enhanced channel function, που ανταγωνίζεται για ένα TXOP ανεξάρτητα από τις άλλες AC χρησιμοποιώντας τις δικές του EDCA παραμέτρους. Αυτές οι παράμετροι για την συγκεκριμένη AC μπορούν να αλλάξουν ύστερα από εντολή του QAP που είναι συσχετισμένο το QSTA. Σε κάθε άλλη περίπτωση το QSTA χρησιμοποιεί τις default EDCA παραμέτρους που ορίζονται στο QSTA από το Management Information Base (MIB).

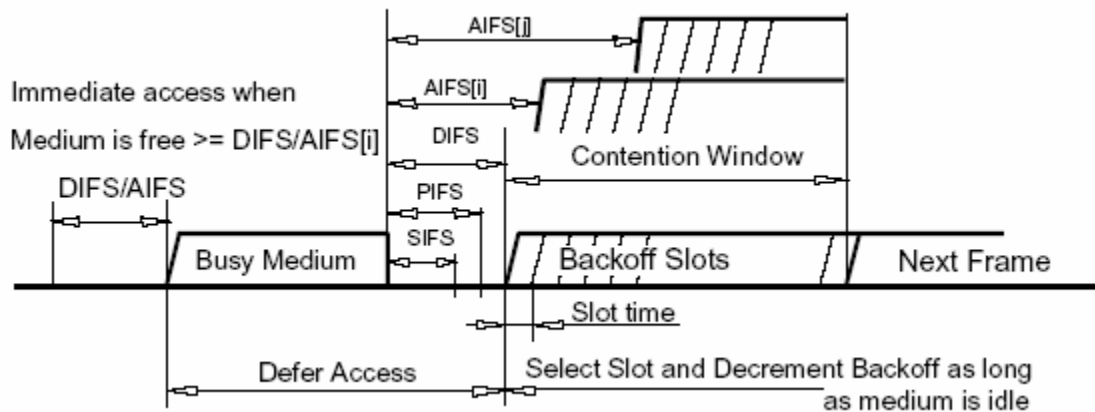


Σχήμα 3.3 – Μοντέλο Δομής του QSTA

### 3.3.1.1 Πρόσβαση στο Ασύρματο Μέσο

Στο κλασσικό 802.11 ένας σταθμός προτού αρχίσει την μετάδοση ή μειώσει το backoff μετρητή του έπρεπε να αισθανθεί το μέσο ανενεργό για σταθερό χρόνο ίσο με DIFS. Στο 802.11e αυτός ο χρόνος δε είναι σταθερός, είναι ξεχωριστός για κάθε AC και ανατίθεται στους QSTAs από κάποια οντότητα διαχείρισης ή από το QAP. Ο χρόνος αυτός ονομάζεται Arbitration IFS (AIFS) και για κάθε AC υπολογίζεται από τον τύπο :  $AIFS[AC] = AIFSN[AC] \cdot aSlotTime + aSIFSTime$ , όπου η τιμή του  $AIFSN[AC]$  εξαρτάται από την AC. Επιπλέον η τιμή του  $AIFSN[AC]$  πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από δύο για όλα τα QSTAs και μεγαλύτερη ή ίση από ένα για τα QAPs.





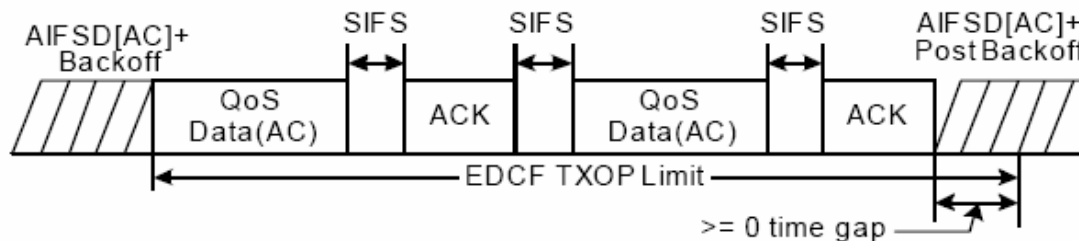
Σχήμα 3.5 – Σχέσεις μεταξύ IFS

Αφού η enhanced channel function της AC αισθανθεί το μέσο ανενεργό για το δικό της ξεχωριστό χρόνο  $AIFS[AC]$ , επιλέγει έπειτα όπως και στο κλασσικό 802.11 ένα τυχαίο χρόνο οπισθοδρόμησης. Η μόνη διαφορά είναι ότι στο 802.11e κάθε AC έχει τις δικές τις παραμέτρους όπως το ελάχιστο, μέγιστο μήκος παραθύρου ( $CW_{min}[AC]$ ,  $CW_{max}[AC]$ ), ξεχωριστό CW και ότι οι παράμετροι  $CW_{min}[AC]$  και  $CW_{max}[AC]$  δεν εξαρτώνται από το φυσικό επίπεδο όπως ισχύει στο 802.11, αλλά είναι μεταβλητές και οι τιμές τους βρίσκονται στο MIB. Στην συνέχεια όπως και στο IEEE 802.11 κάθε συνεχόμενο slot time που το μέσο είναι ανενεργό μειώνεται ο backoff timer, μέχρι να μηδενιστεί, οπότε και το συγκεκριμένο AC αποκτά ένα TXOP, δηλαδή την ευκαιρία για μετάδοση. Η διάρκεια του TXOP διαφημίζεται από το QAP. Σε κάθε άλλη περίπτωση χρησιμοποιείται η default διάρκεια που βρίσκεται στο MIB των QSTAs. Στην διάρκεια αυτή ο σταθμός επιτρέπεται να μεταδώσει όσα fragments ενός MSDU μπορεί, χωρίς να υπερβεί τη διάρκεια του TXOP Limit. Αν ο χρόνος για την μετάδοση ενός fragment και της επιβεβαίωσης του ξεπερνά τη διάρκεια του TXOP, δεν επιτρέπεται να μεταδοθεί.

### 3.3.1.2 Συνέχιση του TXOP

Στην περίπτωση που ένα AC ενός σταθμού έχει αποκτήσει ένα TXOP και έχει μεταδώσει επιτυχώς ένα frame και μετά από χρόνο SIFS του απομένει επιπλέον χρόνος από τη διάρκεια του TXOP, έχει την δυνατότητα να συνεχίσει το TXOP. Η συνέχιση του TXOP μπορεί να γίνει αν υπάρχει κάποιο frame προς μετάδοση από την ίδια AC και όχι από κάποια διαφορετική και του οποίου η μετάδοση συν τη

μετάδοση της επιβεβαίωσης του χωράει στο διαθέσιμο TXOP Limit χωρίς να το ξεπερνά.



Σχήμα 3.6 – Συνέχιση TXOP

### 3.3.1.3 EDCA Διαδικασία Οπισθοδρόμησης (Backoff Procedure)

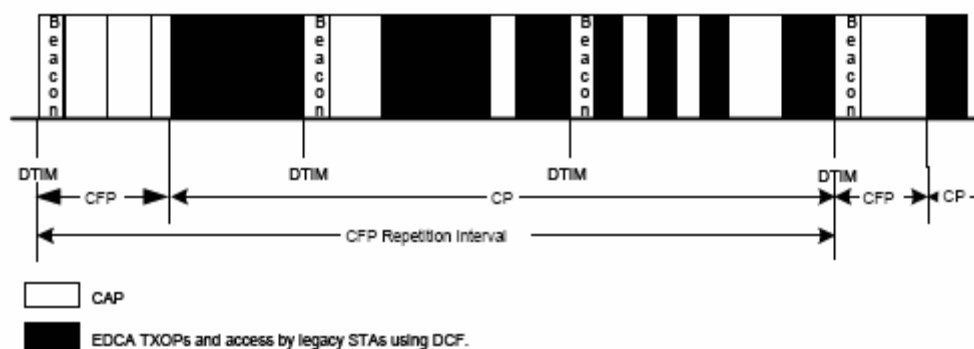
Όπως αναφέραμε και προηγουμένως κάθε channel access function ενός AC διατηρεί τις δικές της μεταβλητές και παραμέτρους. Μία από αυτές είναι και η  $CW[AC]$ , η οποία αρχικοποιείται σε  $CW_{min}[AC]$ . Ο QSTA όταν θέλει να πάρει μία τυχαία τιμή για τον backoff counter, επιλέγει ομοιόμορφα μία τυχαία τιμή από το  $(0, CW[AC])$ . Όπου ισχύει  $CW_{min}[AC] \leq CW[AC] \leq CW_{max}[AC]$ . Μετά από κάθε επιτυχή μετάδοση ενός frame μιας AC, ο  $CW[AC]$  αρχικοποιείται ξανά στην τιμή  $CW_{min}[AC]$ . Στην περίπτωση που κατά την μετάδοση ενός frame μιας AC έχουμε εξωτερική σύγκρουση τότε ο σταθμός περιμένει να αισθανθεί το μέσο ανενεργό ξανά για χρόνο  $AIFS[AC]$  και έπειτα επιλέγει backoff από το παράθυρο  $(0, CW[AC])$ , όπου η νέα τιμή του  $CW[AC]$  είναι:  $newCW[AC] = (oldCW[AC] + 1) * 2 - 1$ , εάν το  $CW[AC]$  είναι μικρότερο από  $CW_{max}[AC]$  και  $CW[AC] = CW_{max}[AC]$ , εάν το  $CW[AC]$  είναι ίσο με  $CW_{max}[AC]$ .

Εκτός από αυτή την περίπτωση σύγκρουσης υπάρχει και το ενδεχόμενο της εσωτερικής σύγκρουσης. Συγκεκριμένα στην περίπτωση που σε δύο ή παραπάνω AC στο συγκεκριμένο time slot, ο backoff timer τους μηδενιστεί τότε θα επιχειρήσουν να διεκδικήσουν ένα TXOP. Σε αυτό το ενδεχόμενο ο Scheduler που υπάρχει στα QSTAs θα δώσει το δικαίωμα για μετάδοση στο AC με την μεγαλύτερη προτεραιότητα, αποφεύγοντας έτσι την σύγκρουση. Τα υπόλοιπα AC όμως θα συμπεριφερθούν σαν να είχε γίνει κανονικά σύγκρουση. Δηλαδή θα αυξήσουν το  $CW[AC]$  σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις και θα περιμένουν να αισθανθούν το μέσο ανενεργό για χρόνο ίσο με  $AIFS[AC]$ , προτού επιλέξουν νέο backoff timer.

### 3.3.2 HCF Controlled Channel Access (HCCA)

Η μέθοδος HCF Controlled Channel Access, χρησιμοποιεί ένα QoS ενήμερο κεντρικό συντονιστή, οποίος ονομάζεται υβριδικός συντονιστής (Hybrid Coordinator – HC). Ο HC βρίσκεται στο QAP του QBSS και έχει μεγαλύτερη προτεραιότητα από τους απλούς σταθμούς για πρόσβαση στο ασύρματο μέσο ώστε να μπορεί να αρχίζει εύκολα ακολουθίες ανταλλαγής frames και να παρέχει ευκαιρίες προς μετάδοση (TXOP) σε QSTAs και στον εαυτό του για μεταφορά QoS δεδομένων χωρίς ανταγωνισμό. Η παράδοση κίνησης από τον HC και η κατανομή των TXOP προγραμματίζονται κατά την διάρκεια των CP και κατά την διάρκεια οποιοδήποτε τοπικού CFP περιόδου, προκειμένου να ικανοποιούνται οι QoS απαιτήσεις μιας συγκεκριμένης ροής κίνησης. Η κατανομή των TXOP και οι μεταφορές χωρίς ανταγωνισμό QoS κίνησης βασίζονται στην γνώση του HC για το QBSS σχετικά με την ποσότητα της εκκρεμής κίνησης των διαφόρων ροών κίνησης που υπάγονται σε συγκεκριμένη QoS πολιτική.

Ο HC αποκτά πρόσβαση στο μέσο με μεγαλύτερη προτεραιότητα σε σχέση με τους σταθμούς διότι αισθάνεται το μέσο ανενεργό για χρόνο ίσο με PIFS προτού μεταδώσει, που είναι μικρότερος από τον χρόνο που περιμένουν οι σταθμοί σύμφωνα με τις EDCA παραμέτρους. Ο HC μπορεί να αρχίσει ακολουθίες ανταλλαγής frames μεταξύ των QSTAs, κατά την διάρκεια της CP και της CFP περιόδου. Οι περιορισμένης διάρκειας περίοδοι ελεγχόμενης πρόσβασης κατά την διάρκεια της CP και της CFP ονομάζονται Contention Access Phase – CAP. Ένα τυπικό superframe φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 3.7 – Superframe

Ένας σταθμός όταν του δοθεί ένα TXOP από το HC έχει την δυνατότητα να μεταδώσει πολλαπλά frames, με μόνο περιορισμό ότι ο χρόνος μετάδοσης τους μαζί με τις επιβεβαιώσεις να μην ξεπερνούν τη χρονική διάρκεια του TXOP που έχει δηλώσει ο HC. Οι σταθμοί προκειμένου να λάβουν κάποιο TXOP από τον HC, πρέπει να στείλουν αίτηση για παροχή TXOP απευθείας στον HC κατά τη διάρκεια ενός rolled TXOP ή ενός EDCA TXOP. Στην αίτηση αυτή αναφέρεται και η διάρκεια του TXOP που θέλει να λάβει ο σταθμός. Ο HC έπειτα ανάλογα με τις απαιτήσεις του σταθμού μπορεί να δεχτεί ή να αρνηθεί την TXOP αίτηση.

### 3.4 Μηχανισμοί Διαφοροποίησης Υπηρεσιών

Από την μελέτη των μηχανισμών που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο IEEE 802.11e, παρατηρούμε ότι έχει δοθεί ιδιαίτερο βάρος στην διαφοροποίηση υπηρεσιών. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι χωρίζει την κίνηση σε οκτώ προτεραιότητες, οι οποίες αντιστοιχίζονται σε τέσσερις κατηγορίες. Αυτές οι κατηγορίες στην περίπτωση του μηχανισμού EDCA χρησιμοποιούν ξεχωριστές Enhanced Channel Functions και ανταγωνίζονται για την πρόσβαση στο ασύρματο μέσο. Η κάθε AC όμως ανταγωνίζεται με διαφορετικούς όρους αφού οι AC που εξυπηρετούν κίνηση υψηλότερης προτεραιότητας έχουν ευνοϊκότερους όρους σε σχέση με τις άλλες AC, προκειμένου να έχουν ευκολότερη πρόσβαση στο ασύρματο μέσο. Αυτοί οι ευνοϊκότεροι όροι μεταφράζονται σε τιμές παραμέτρων όπως το  $CW_{min}[AC]$ ,  $CW_{max}[AC]$ ,  $AIFS[AC]$  και άλλα. Επιπλέον σημαντικό στοιχείο που δείχνει την διαφοροποίηση είναι η περίπτωση εικονικής εσωτερικής σύγκρουσης μεταξύ δύο ή περισσότερων AC, όπου η AC με την μεγαλύτερη προτεραιότητα αποκτά το δικαίωμα πρόσβασης στο WM. Επίσης η δυνατότητα πολλαπλής μετάδοσης frame από την ίδια AC στο διαθέσιμο υπόλοιπο του TXOP βελτιώνει σημαντικά την απόδοση του δικτύου.

Στην περίπτωση του HCCA μηχανισμού, ο κεντροποιημένος συντονιστής HC παρέχει rolled TXOP σε σταθμούς χωρίς να υπάρχει κάποιος ανταγωνισμός μεταξύ τους. Οι σταθμοί πρέπει όμως να έχουν ζητήσει από τον HC, να τους αναθέσει κάποιο TXOP με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όπως η διάρκεια που επιθυμούν να μεταδώσουν κατά το TXOP. Έπειτα ο HC ανάλογα με την πολιτική που ακολουθεί είτε δέχεται είτε απορρίπτει το αίτημα. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να επιτευχθεί QoS και διαφοροποίηση υπηρεσιών.

Στην βιβλιογραφία έχει γίνει πολύ έρευνα σχετικά με την μελέτη των μηχανισμών του 802.11e [7-14] και με την τροποποίηση τους προκειμένου να παρέχουν καλύτερη διαφοροποίηση υπηρεσιών [15]. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι τροποποιήσεις αυτές απαιτούν μετατροπή του πρωτοκόλλου. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το [6] όπου μελετάει ένα αλγόριθμο υπολογισμού και προσαρμοστικού υπολογισμού του CWmin για κάθε Access Category στο 802.11e. Σημαντικό πλεονέκτημα του αλγορίθμου αυτού είναι ότι μπορεί να υλοποιηθεί στο QAP χωρίς να απαιτεί αλλαγές στο πρωτόκολλο.

### 3.6 Achieving Service Differentiation and High Utilization in IEEE 802.11 [6]

#### 3.6.1 Μελέτη Αλγορίθμου για παροχή Service Differentiation

Στην εργασία αυτή μελετάται η παροχή διαφοροποίησης υπηρεσιών που μπορεί να επιτευχθεί με διαφορετικές τιμές της παραμέτρου CWmin για κάθε Access Category. Οι τιμές αυτές προσαρμόζονται κάθε φορά που οι συνθήκες του δικτύου μεταβάλλονται, έτσι ώστε να μπορεί να επιτευχθεί υψηλή βελτιστοποίηση του ρυθμού απόδοσης (Throughput) του δικτύου.

Ο τύπος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τιμής του CWmin για μια συγκεκριμένη κατηγορία είναι:  $CW \min_i = \left\lfloor SF \cdot \frac{L_i}{\phi_i} \right\rfloor$  (Εξίσωση 1), όπου SF είναι κάποιος παράγοντας που αυξομειώνεται με βάση τις συνθήκες του δικτύου (Scaling Factor),  $L_i$  είναι το μέγεθος του frame και  $\phi_i$  είναι το βάρος που αντιστοιχίζεται σε κάθε κατηγορία κίνησης. Η παράμετρος  $L_i$  έχει προστεθεί στον τύπο έτσι ώστε η διαφοροποίηση να βασίζεται εξολοκλήρου στο βάρος ή ισοδύναμες κατηγορίες με το ίδιο βάρος αλλά διαφορετικά μεγέθη πλαισίων να μπορούν να πετυχαίνουν ίδιο throughput. Σε περίπτωση σύγκρουσης τότε εκτελείται κανονικά ο αλγόριθμος εκθετικής οπισθοδρόμησης του 802.11e. Αυτό ακριβώς το σημείο είναι ένα από τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης, διότι μπορεί να υλοποιηθεί εξολοκλήρου στο QoS Access Point, χωρίς να απαιτούνται αλλαγές στους QSTAs.

Σημαντική παράμετρος για τον υπολογισμό του CWmin είναι το scaling factor. Ο παράγοντας αυτός ανάλογα με τον φόρτο του δικτύου προσαρμόζεται με βάση κάποιον αλγόριθμο. Όταν ο φόρτος του δικτύου αλλάξει τότε το SF προσαρμόζεται και παίρνει κάποια νέα τιμή. Κάθε φορά που αλγόριθμος προσαρμόζει το SF,

υπολογίζονται και οι νέες τιμές των  $CW_{min}$ . Ο αλγόριθμος που προσαρμόζει το SF με βάση το throughput του δικτύου είναι ο ακόλουθος.

**Βήμα 1.** Το Scaling Factor αρχικοποιείται σε κάποια αρχική τιμή  $SF_1$  και μετριέται το συνολικό throughput  $R_1$  στο Access Point μέσα σε χρονικό διάστημα  $T_m$

**Βήμα 2.**  $SF_2 := SF_1 + \Delta_{SF}$ , και μετριέται το συνολικό throughput  $R_2$  στο AP για χρονικό διάστημα  $T_m$

**Βήμα 3.** Αν  $R_2 > R_1$  τότε αύξησε το SF με βήμα  $\Delta_{SF}$  εφόσον το συνολικό throughput αυξάνει, αλλιώς αν  $R_2 < R_1$  τότε μείωσε το SF με βήμα  $\Delta_{SF}$  εφόσον το συνολικό throughput αυξάνει

**Βήμα 4.** Έστω  $SF^*$  είναι η βέλτιστη τιμή του Scaling Factor, και  $R^*$  το throughput όταν το βήμα 3 τελειώνει.

Έστω  $SF_1 := SF^*$

Για το ίδιο scaling factor, το AP συνεχίζει να μετράει το μέσο throughput  $R_1$  ανά περιόδους  $T_m$ . Αν  $R_1 < \alpha \bullet R^*$ , όπου  $\alpha \in (0,1)$  τότε πηγαίνει στο Βήμα 2

**Σχήμα 3.8 – Αλγόριθμος για την προσαρμογή του scaling factor SF**

Η προσαρμοστικότητα του αλγορίθμου φαίνεται στο βήμα 4, όπου στην περίπτωση που το throughput  $R_1$  διαφέρει από το throughput στο οποίο τελείωσε το βήμα 3, τότε ο μηχανισμός για επαναπροσδιορισμό του βέλτιστου SF ξαναρχίζει. Η διαφορά του throughput μπορεί να οφείλεται σε αλλαγή των συνθηκών του δικτύου όπως π.χ σε άφιξη ή αποχώρηση κάποιου QSTA.

Στον παραπάνω αλγόριθμο υπάρχουν τρεις παράμετροι, το χρονικό διάστημα  $T_m$  μέσα στο οποίο μετριέται το throughput, το βήμα  $\Delta_{SF}$  του scaling factor και το ποσοστό  $\alpha$ , που χρησιμοποιείται για να αποφασίσει ο αλγόριθμος πότε θα ξεκινήσει εύρεση του νέου βέλτιστου SF.

- **Περίοδος μέτρησης throughput ( $T_m$ ).** Το χρονικό διάστημα  $T_m$  μέσα στο οποίο μετριέται το throughput πρέπει να επιλεχθεί παίρνοντας υπόψη την ανταλλαγή (tradeoff) μεταξύ της αξιοπιστίας της μέτρησης και του χρόνου που χρειάζεται για την σύγκλιση του αλγορίθμου στην βέλτιστη τιμή του SF. Ένα μεγάλο χρονικό διάστημα για το  $T_m$  μπορεί να κάνει την μέτρηση πιο αξιόπιστη, αλλά από την άλλη μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλο χρόνο σύγκλισης και σε αδυναμία να παρακολουθήσει τις μεταβολές που μπορούν να συμβούν μεταξύ δύο συνεχόμενων μετρήσεων.
- **Βήμα  $\Delta_{SF}$  του scaling factor.** Το βήμα  $\Delta_{SF}$  για την αύξηση ή την μείωση του SF εμπεριέχει και αυτό ένα συμβιβασμό μεταξύ της ακρίβειας της βέλτιστης τιμής του SF και του χρόνου σύγκλισης του αλγορίθμου. Ένα μεγάλο βήμα μπορεί να

οδηγήσει σε μια τιμή του SF η οποία είναι σχετικά κοντά στην βέλτιστη τιμή, αλλά από την άλλη μειώνει κατά πολύ τον χρόνο σύγκλισης.

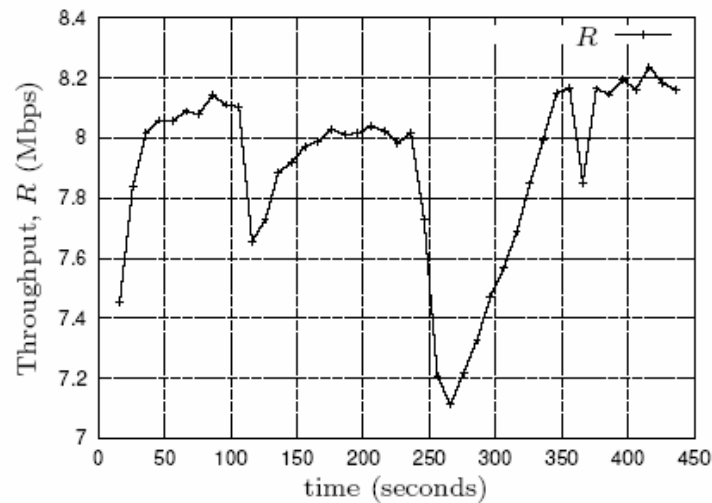
- **Κατώτατο όριο μείωσης Throughput για έναρξη εύρεσης νέας βέλτιστης τιμής ( $\alpha$ ).** Στο βήμα 4 αφού ο αλγόριθμος έχει βρει μια βέλτιστη τιμή για το SF, συνεχίζει να μετράει το συνολικό throughput ανά χρονικό διάστημα  $T_m$ . Αν παρατηρηθεί μείωση του μέσου throughput κατά ποσοστό μεγαλύτερο από  $(1-\alpha)$ , τότε ξαναρχίζει η διαδικασία για προσδιορισμό του scaling factor. Μεγάλες τιμές για την παράμετρο  $\alpha$  κάνουν τον αλγόριθμο να αντιδρά γρήγορα στις αλλαγές του δικτύου, αλλά παράλληλα αυξάνουν την μεταβλητότητα του scaling factor και των τιμών του CWmin. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των μηνυμάτων που πρέπει να στέλνει το Access Point στους σταθμούς προκειμένου να τους ενημερώσει για τις αλλαγές στο CWmin.

### 3.6.2 Σενάριο Αξιολόγησης Αλγορίθμου

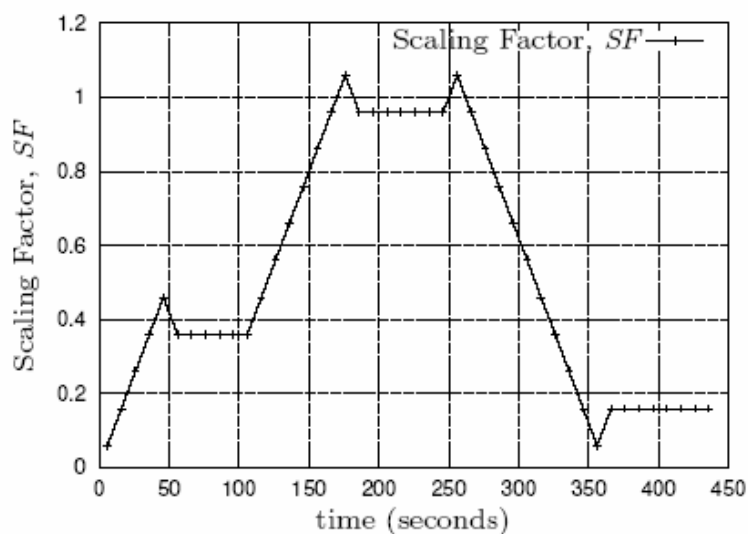
Ο παραπάνω αλγόριθμος δοκιμάστηκε με χρήση του Network Simulator (version 2) [27] σε συγκεκριμένο σενάριο, έτσι ώστε να ελεγχθεί η δυναμική αλλαγή των τιμών του CWmin. Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν είναι:  $T_m = 10$  δευτερόλεπτα, βήμα του scaling factor  $\Delta_{SF} = 0.1$  και ποσοστό κατώτατο όριο μείωσης throughput  $\alpha = 0.95$ .

Το σενάριο της προσομοίωσης περιλάμβανε τα εξής: η χωρητικότητα του ασύρματου μέσου ήταν 11 Mbps. Αρχικά το ασύρματο LAN περιλάμβανε δεκατρείς σταθμούς, όπου ο καθένας παρήγαγε κίνηση Constant Bit Rate - CBR με ρυθμό 1 Mbps. Οι σταθμοί ήταν τριών τύπων. Ο κάθε τύπος υποστήριζε μόνο μία κατηγορία κίνησης. Η αρχική κατανομή των σταθμών ήταν 1/3 από κάθε τύπο κίνησης. Τη στιγμή 130 seconds, εισέρχονται 20 σταθμοί, οι οποίοι έχουν την ίδια κατανομή με τους αρχικούς, ως προς τον τύπο κίνησης που έχει ο καθένας. Έπειτα τη χρονική στιγμή 240 seconds 23 σταθμοί φεύγουν και μένουν μόνο 10 σταθμοί. Οι τρεις τύποι κίνησης έχουν διαφορετική προτεραιότητα, το οποίο αντικατοπτρίζεται με χρήση διαφορετικού βάρους σε κάθε τύπο. Το βάρος για κάθε τύπο είναι  $\phi_i = 4, 2, 1$  από την υψηλότερη προς την χαμηλότερη προτεραιότητα. Επίσης το μέγεθος του πλαισίου είναι σταθερό και ίσο με  $L_i = 1000$  bytes για όλους τους τύπους κίνησης.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στις ακόλουθες γραφικές παραστάσεις όπου φαίνονται το Throughput και το Scaling Factor σαν συνάρτηση του χρόνου.



Σχήμα 3.9 – Throughput με τη πάροδο του Χρόνου



Σχήμα 3.10 – Scaling Factor με την πάροδο του Χρόνου

Στις παραπάνω γραφικές παραστάσεις φαίνεται η προσαρμοστικότητα του αλγορίθμου σε κάθε αλλαγή των συνθηκών του δικτύου. Δηλαδή στην εισαγωγή και στην αποχώρηση των σταθμών. Στο σχήμα 3.9 φαίνεται η υψηλή βελτιστοποίηση στο throughput που επιτυγχάνεται μετά από κάθε περίοδο σύγκλισης του αλγορίθμου, ενώ στο σχήμα 3.10 φαίνεται πόσο γρήγορα αλλάζει το scaling factor μετά από κάθε αλλαγή των συνθηκών του δικτύου στην επόμενη βέλτιστη τιμή του.



### 3.7 Μελέτη της Συμπεριφοράς του Αλγορίθμου σε Νέα Σενάρια

Η μελέτη της συμπεριφοράς του αλγορίθμου στην ενότητα 3.6 έγινε με χρήση τριών τύπων σταθμών, ο καθένας από τους οποίους παρήγαγε μόνο ένα τύπο κίνησης. Ενδιαφέρον αποκτά η μελέτη του αλγορίθμου αυτού με χρήση διαφορετικού τύπου σταθμών. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής μελετάται ο αλγόριθμος [6] υποθέτοντας σταθμούς, με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Οι σταθμοί που θεωρούμε χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο 802.11e και παράγουν τρία είδη κίνησης διαφορετικής προτεραιότητας. Υψηλότερη προτεραιότητα έχει η κίνηση του Video, μεσαία προτεραιότητα η κίνηση της φωνής και χαμηλότερη προτεραιότητα η κίνηση των δεδομένων. Η κίνηση του Video και της φωνής υπόκεινται σε χρονικούς περιορισμούς στην μέγιστη καθυστέρηση, διότι ένα frame Video ή φωνής πρέπει να παραδοθεί μέσα σε ένα μέγιστο χρονικό διάστημα από την ώρα που έφτασε στον σταθμό. Επομένως με χρήση χρονικά ευαίσθητων δεδομένων αποκτά ενδιαφέρον η συμπεριφορά του αλγορίθμου ως προς τον χρόνο παράδοσης της κίνησης. Επίσης ενδιαφέρον αποκτά η χρήση όχι CBR κίνησης αλλά Variable Bit Rate – VBR κίνησης. Τέτοιου είδους είναι η κίνηση του Video που χρησιμοποιείται στα σενάρια που παρουσιάζονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> : Ανάλυση Σεναρίων

### 4.1 Στόχος Σεναρίων

Μετά την παρουσίαση της λειτουργίας του πρωτοκόλλου IEEE 802.11 και IEEE 802.11e, καθώς και του αλγορίθμου για δυναμική αλλαγή του CWmin, στα κεφάλαιο 2 και 3 αντίστοιχα, προχωράμε στη μοντελοποίηση, τον σχεδιασμό και την προσομοίωση του EDCA μηχανισμού του πρωτοκόλλου, εξετάζοντας διάφορα σενάρια κίνησης και παρατηρώντας την απόδοση του πρωτοκόλλου. Ο στόχοι της προσομοίωσης είναι :

- a) Η εύρεση της χωρητικότητας του συστήματος. Δηλαδή, του μέγιστου αριθμού σταθμών που μπορούν να λειτουργήσουν στο ίδιο BSS, ενώ παράλληλα ικανοποιούνται οι συγκεκριμένες QoS απαιτήσεις.
- b) Η εύρεση του μέγιστου ρυθμού άφιξης δεδομένων που μπορεί να υποστηρίξει το σύστημα, για αριθμό σταθμών ίσο με το  $1/2$  ,  $3/4$  και  $4/4$  του μέγιστου αριθμού σταθμών που βρέθηκε στο προηγούμενο σενάριο, αντίστοιχα.
- c) Η μελέτη της συμπεριφοράς του αλγορίθμου του κεφαλαίου 3.6 με χρήση διαφορετικού τύπου σταθμών.

### 4.2 Περιγραφή Προσομοιωτή

#### 4.2.1 Παραδοχές

Εξαιτίας της υψηλής πολυπλοκότητας του πρωτοκόλλου IEEE 802.11e, κατά την δημιουργία του προσομοιωτή χρειάστηκε να γίνουν κάποιες απλοποιήσεις και παραδοχές. Καταρχάς θεωρούμε ότι όλοι οι σταθμοί ανήκουν σε ένα Infrastructure BSS με ένα AP. Επιπλέον όλοι οι σταθμοί υποστηρίζουν το πρωτόκολλο IEEE 802.11e και σαν φυσικό επίπεδο χρησιμοποιούν αυτό που ορίζεται στο IEEE 802.11g. Θεωρούμε ότι η κίνηση στέλνεται από τους σταθμούς προς το AP και έπειτα το AP την στέλνει εκτός του BSS. Αυτή η θεώρηση γίνεται διότι θέλουμε να εστιάσουμε μόνο στο uplink κανάλι. Επίσης θεωρούμε ιδανικό κανάλι μετάδοσης,

απαλλαγμένο από θόρυβο και παρεμβολές. Επομένως δεν έχουμε επαναμεταδόσεις πακέτων ή επιβεβαιώσεων λόγω σφαλμάτων μετάδοσης παρά μόνο λόγω συγκρούσεων. Επιπλέον θεωρούμε ότι δεν υφίσταται το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού (Hidden Terminal Effect), διότι όλοι οι σταθμοί μπορούν να ακούσουν ο ένας τον άλλο και επομένως γνωρίζουν πότε μεταδίδει ένας σταθμός. Για αυτό το λόγο οι σταθμοί δεν χρησιμοποιούν το μηχανισμό RTS – CTS κατά τις μεταδόσεις τους. Ένας άλλος λόγος για τη μη χρησιμοποίηση του μηχανισμού αυτού είναι ότι θέλουμε να γλιτώσουμε το overhead που προκύπτει από τη μετάδοση των πακέτων αυτών, δεδομένου ότι θέλουμε να εκμεταλλευτούμε στο μέγιστο δυνατό τη χωρητικότητα του καναλιού. Μια επιπλέον παραδοχή είναι ότι όταν το AP έχει υπολογίσει τις νέες τιμές του  $CW_{min}[AC]$ , τότε την κατάλληλη στιγμή θεωρούμε ότι είναι γνωστές από όλους τους σταθμούς. Τέλος θεωρούμε ότι όλοι οι σταθμοί έχουν γίνει ήδη authenticated και associated με το AP.

#### 4.2.2 Φυσικό Επίπεδο

Το φυσικό επίπεδο που χρησιμοποιούν οι σταθμοί είναι αυτό που ορίζεται στο πρωτόκολλο IEEE 802.11g [4]. Η επιλογή αυτού του φυσικού επιπέδου έγινε διότι υποστηρίζει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 54 Mbps. Το πρωτόκολλο υποστηρίζει διάφορα είδη διαμόρφωσης που αντιστοιχούν σε διάφορους ρυθμούς μετάδοσης. Στο προσομοιωτή μας χρησιμοποιείται Extended Rate PHY- Orthogonal Frequency Division Multiplexing (ERP - OFDM) που υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 και 54 Mbps. Από αυτούς τους ρυθμούς μετάδοσης οι 6, 12 και 24 Mbps είναι υποχρεωτικοί. Επίσης θεωρούμε ότι όλοι οι σταθμοί μεταδίδουν με τον μέγιστο δυνατό ρυθμό μετάδοσης, δηλαδή με 54 Mbps, ενώ τα μηνύματα ελέγχου προκειμένου να είναι αντιληπτά από όλους τους σταθμούς μεταδίδονται με ρυθμό 24 Mbps. Στο 802.11g το aSlotTime είναι 20  $\mu$ sec, ενώ στην περίπτωση όπου όλοι οι σταθμοί στο BSS χρησιμοποιούν Extended Rate PHY (ERP) το aSlotTime είναι 9  $\mu$ sec. Στην περίπτωση μας θεωρούμε ότι όλοι οι σταθμοί χρησιμοποιούν ERP και επομένως το aSlotTime είναι 9  $\mu$ sec, ενώ το SIFS είναι 10  $\mu$ sec. Επειδή το aSlotTime δεν είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του SIFS, ορίζουμε σαν ελάχιστη μονάδα χρόνου στον προσομοιωτή μας το 1  $\mu$ sec, το οποίο είναι ακέραιο υποπολλαπλάσιο όλων των χρονικών διαστημάτων μεταξύ των frames (Interframe Spaces), και το ονομάζουμε miniSlot.

### 4.2.3 Είδη Κίνησης

Η διάρκεια της προσομοίωσης είναι μία ώρα κανονικής λειτουργίας του δικτύου. Στα σενάρια που τρέχουμε θεωρούμε ένα τύπο σταθμού, ο οποίος παράγει τριών ειδών κίνηση διαφορετικής προτεραιότητας. Υψηλότερη προτεραιότητα έχει η κίνηση του Video, μεσαία προτεραιότητα η κίνηση της φωνής και χαμηλότερη η κίνηση των δεδομένων. Σε κάθε σταθμό χρησιμοποιούμε τις τρεις από τις τέσσερις ουρές FIFO. Η ουρά AC\_VI χρησιμοποιείται για την κίνηση του video, η AC\_VO για την κίνηση της φωνής και η AC\_BK για την κίνηση των δεδομένων. Στην συνέχεια περιγράφονται τα χαρακτηριστικά της κάθε είδους κίνησης.

#### 4.2.3.1 Video

Κατά τη διάρκεια της μίας ώρας προσομοίωσης οι σταθμοί μεταδίδουν video MPEG-4. Η ποιότητα του video που χρησιμοποιούμε είναι υψηλής ποιότητας Μεταβλητού Ρυθμού (Variable Bit Rate – VBR). Συγκεκριμένα είναι από την ταινία «Η Σιωπή των Αμνών», με μέσο ρυθμό άφιξης bits 0.58 Mbps και μέγιστο ρυθμό άφιξης bits 4.4 Mbps. Οι αφίξεις των frames του video είναι κάθε 40 ms. Το μικρότερο frame είναι 158 bytes, το μεγαλύτερο 22239 bytes, ενώ το μέσο μέγεθος frame είναι 2876 bytes. Το Coefficient of Variation (CoV) είναι 0.80 και προκύπτει

από τον τύπο  $CoV = \frac{\text{Τυπική Απόκλιση}}{\text{Μέση Τιμή Frame}}$ , όπως αναφέρεται και στα [20] [21]. Από τα

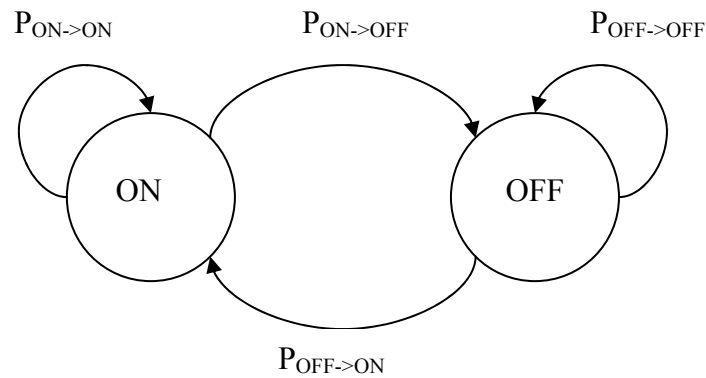
παραπάνω συμπεραίνουμε ότι το video που μεταδίδουν οι σταθμοί είναι αρκετά απαιτητικό και με αρκετές διακυμάνσεις στα μεγέθη των frames του. Αυτό φαίνεται από την τιμή του CoV, αφού όσο η τιμή αυτή απομακρύνεται από το μηδέν έχουμε ολοένα και μεγαλύτερες διακυμάνσεις στα μεγέθη των frames. Ένα frame γεννιέται κάθε 40 ms, δηλαδή τα frames γεννιούνται με ρυθμό 25 frames/sec. Επομένως στην διάρκεια της μίας ώρας προσομοίωσης έχουμε συνολικά 89998 frames. Τα frames του video από τη στιγμή που γεννιούνται έχουν μια συγκεκριμένη διάρκεια ζωής. Η διάρκεια ζωής τους θεωρείται ίση με 40 ms, δηλαδή μέχρι την λήψη του επόμενου frame. Στην περίπτωση που ο σταθμός δεν μπορέσει να μεταδώσει κάποια από τα πακέτα του frame μέσα στα 40 ms, τότε το frame πετιέται ολόκληρο ανεξαρτήτως πόσα πακέτα από το frame έχουν μεταδοθεί και ο σταθμός συνεχίζει με την μετάδοση του επόμενου frame. Στην περίπτωση που τα frame του video δεν είχαν διάρκεια ζωής, θα μπορούσαν να καθυστερήσουν ώσπου να μεταδοθούν πλήρως

και για χρόνο μεγαλύτερο από 40 ms. Αυτό θα είχε σαν συνέπεια να συσσωρεύονται frames video με άμεσο αποτέλεσμα η εικόνα video να διακόπτεται συνεχώς. Προκειμένου να έχουμε υψηλή ποιότητα στο video που μεταδίδεται επιτρέπεται να έχουμε μέχρι ένα συγκεκριμένο αριθμό χαμένων πακέτων. Ο αριθμός αυτός καθορίζεται από το Packet Video Drop (PVD) και ισούται με  $PVD = \frac{\text{Video Packets Dropped}}{\text{Video Packets Generated}} \leq 10^{-4}$ . Με άλλα λόγια επιτρέπεται να χάσουμε το πολύ 0.01% του συνολικού αριθμού των πακέτων του video [22].

Στην διάρκεια της προσομοίωσης θέλουμε όλοι οι σταθμοί να μεταδίδουν video, το οποίο θα έχει τα ίδια στατιστικά χαρακτηριστικά, έτσι ώστε τα αποτελέσματα μας να ισχύουν ομοιόμορφα για όλους τους σταθμούς. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούμε το ίδιο κομμάτι video μιας ώρας. Προκειμένου όμως ο κάθε σταθμός να έχει διαφορετικό video, ανακατεύουμε κατάλληλα τα frames του αρχικού κομματιού και έτσι δίνουμε σε κάθε σταθμό το ίδιο μεν κομμάτι video αλλά με διαφορετική σειρά των frames. Πιο συγκεκριμένα αν έχουμε πέντε σταθμούς, σπάμε το αρχικό video μίας ώρας σε πέντε ίσια κομμάτια. Έπειτα βάζουμε το πρώτο κομμάτι του video στο τέλος και το δίνουμε στον πρώτο σταθμό. Στον δεύτερο σταθμό δίνουμε το νέο video που δημιουργήσαμε αφού πρώτα τοποθετήσουμε το πρώτο κομμάτι του νέου video στο τέλος του και ούτω καθεξής. Με αυτόν τον τρόπο καταφέραμε να χρησιμοποιήσουμε διαφορετικά video με ίδια στατιστικά χαρακτηριστικά για όλους τους σταθμούς.

#### 4.2.3.2 Φωνή

Το μοντέλο φωνής που χρησιμοποιείται αντιστοιχεί σε συνομιλία μεταξύ δύο ατόμων. Η συνομιλία αυτή αποτελείται από περιόδους ομιλίας (talk spurts) και περιόδους σιωπής (silent gaps). Έχει αποδειχθεί ότι η έξοδος του κωδικοποιητή φωνής σε αυτή την περίπτωση μπορεί να μοντελοποιηθεί από ένα Μαρκοβιανό Μοντέλο συνεχούς χρόνου με δύο καταστάσεις (ON και OFF) [18].



Σχήμα 4.1 – Μοντέλο Φωνής

Οι καταστάσεις ON και OFF εναλλάσσονται μεταξύ τους. Όταν το μοντέλο βρίσκεται στην κατάσταση ON, τότε γεννιούνται πακέτα με σταθερό ρυθμό (Constant Bit Rate – CBR) 32 Kbps, ενώ όταν βρίσκεται στην κατάσταση OFF τότε δεν γεννιούνται καθόλου πακέτα φωνής (υποθέτουμε χρήση speech activity detection). Έχει προκύψει κατόπιν μελέτης ότι ο χρόνος που καταναλώνεται σε κάθε κατάσταση είναι εκθετικά κατανομημένος. Στο μοντέλο φωνής που χρησιμοποιούμε θεωρούμε ότι η μέση τιμή της παραμονής στην κατάσταση ON είναι  $\overline{T_{ON}} = 1\text{sec}$ , ενώ αυτής στην κατάσταση OFF είναι  $\overline{T_{OFF}} = 1.6\text{sec}$  [17]. Στον προσομοιωτή μας ο έλεγχος για καθορίσουμε αν έχουμε μετάβαση από μια κατάσταση στην άλλη (ή αν μείνουμε στην ίδια κατάσταση) γίνεται σε διακριτό χρόνο (κάθε 12ms). Επομένως αν βρισκόμαστε στην κατάσταση ON, κατά την διάρκεια των 12 ms έχουμε την γέννηση ενός πακέτου, το οποίο έχει μέγεθος  $12 \cdot 10^{-3}\text{sec} \cdot 32 \cdot 10^3\text{bits/sec} = 384\text{bits} = 48\text{bytes}$  (ATM payload size). Επειδή οι μέσοι χρόνοι παραμονής και στις δύο καταστάσεις του Μαρκοβιανού Μοντέλου είναι πολύ μεγαλύτεροι των 12 msecs, κάνοντας το πείραμα, για τον αν θα παραμείνουμε ή όχι στην ίδια κατάσταση, κάθε 12 msecs μπορούμε να προσεγγίσουμε ικανοποιητικά την σε συνεχή χρόνο εξέλιξη του Μαρκοβιανού Μοντέλου με διακριτό τρόπο. Η κίνηση της φωνής, όπως και του video, είναι ευαίσθητη σε χρονικές καθυστερήσεις. Για αυτό το λόγο από τη στιγμή που γεννιέται ένα πακέτο φωνής έχει διάρκεια ζωής που εδώ υποτίθεται ίση με 40 ms. Στην περίπτωση που ο σταθμός δεν καταφέρει να μεταδώσει το πακέτο του μέσα σε αυτόν το χρόνο, το πακέτο πετιέται. Ο μέγιστος αριθμός πακέτων που μπορούν να χαθούν, έτσι ώστε να έχουμε υψηλή ποιότητα υπηρεσιών καθορίζεται

από το Packet Voice Drop (PVD) και ισούται με  $PVD = \frac{\text{Voice Packets Dropped}}{\text{Voice Packets Generated}} \leq 10^{-2}$ .

Δηλαδή επιτρέπεται να χαθούν το πολύ 1% του συνολικού αριθμού των πακέτων φωνής.

#### 4.2.3.3 Δεδομένα

Για τα δεδομένα θεωρούμε ότι έχουμε Poisson αφίξεις με ρυθμό  $L$ . Τα μεγέθη των πακέτων ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα  $[0-2000]$  bytes. Η κίνηση των δεδομένων μπορεί να είναι διαφόρων τύπων όπως FTP, HTTP, Email κ.α.

#### 4.2.4 Λειτουργία του Προσομοιωτή

Κατά την έναρξη λειτουργίας του προσομοιωτή γίνονται διάφορες αρχικοποιήσεις. Μία από τις βασικές αρχικοποιήσεις είναι το διάβασμα των αρχείων όπου περιέχονται τα video traces, δηλαδή τα frames του video που θα χρησιμοποιήσει ο κάθε σταθμός. Αυτά τα frames αποθηκεύονται στην μνήμη για κάθε σταθμό. Έπειτα κάθε 40 ms διαβάζεται ένα frame από την μνήμη και αφού τεμαχιστεί σε πακέτα, εισέρχεται στην ουρά AC\_VI του σταθμού. Στην συνέχεια το frame αυτό αποδεσμεύεται από την μνήμη. Τα πακέτα φωνής γεννιούνται με βάση το Μαρκοβιανό μοντέλο που αναλύσαμε προηγουμένως. Τα Poisson πακέτα δεδομένων μπορούν να γεννηθούν οποιαδήποτε χρονική στιγμή μέσα σε ένα δοσμένο διάστημα χρόνου, αλλά εμείς θεωρούμε ότι γεννιούνται στην μέση αυτού του χρονικού διαστήματος. Σε όλα τα πακέτα προσθέτουμε overhead 28 bytes, το οποίο αντιστοιχεί στο header του MAC επιπέδου μαζί με το πεδίο FCS, το οποίο χρησιμοποιείται για έλεγχο λαθών. Στο MAC header δεν χρησιμοποιήσαμε bits για το WEP (Wired Equivalent Privacy), έτσι ώστε το overhead που θα έχουμε να είναι όσο το δυνατό μικρότερο.

Το Fragmentation Threshold για τα frames είναι 972 bytes, έτσι ώστε το πακέτο που θα δημιουργηθεί μαζί με την επικεφαλίδα του να έχει μέγεθος 1000 bytes. Η επιλογή του Fragmentation Threshold έγινε με βάση τις επιλογές που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία [6].

Όπως αναφέραμε προηγουμένως τα πακέτα του video και της φωνής είναι ευαίσθητα σε χρονικές καθυστερήσεις, διότι έχουν διάρκεια ζωής ίση με 40 ms. Επομένως χρειαζόμαστε ένα μηχανισμό έτσι ώστε να γνωρίζουμε την “ηλικία” των πακέτων και να “πετάμε” τα “γερασμένα” πακέτα. Για αυτό το λόγο όταν γεννιέται

ένα πακέτο οποιασδήποτε είδους κίνησης, του προσδίδεται μία χρονοσφραγίδα (timestamp), που δηλώνει τον χρόνο γέννησης του. Με αυτόν τον τρόπο στην αρχή κάθε χρονοθυρίδας ελέγχουμε αν τα πακέτα φωνής ή video που βρίσκονται στην ουρά αναμονής έχουν “γεράσει”, δηλαδή αν από τη στιγμή της γέννησης τους έχει περάσει χρόνος μεγαλύτερος από 40 ms. Μόλις αυτό συμβεί τα αντίστοιχα πακέτα πετιούνται. Τα πακέτα δεδομένων θεωρούμε ότι δεν είναι ευαίσθητα σε χρονικές καθυστερήσεις και επομένως παραμένουν στην ουρά προς μετάδοση μέχρι να έρθει η σειρά τους να μεταδοθούν.

Προκειμένου στο BSS να έχουμε υψηλή ποιότητα υπηρεσιών στην κίνηση video και φωνής, πρέπει το Packet Video Drop να είναι μικρότερο από  $10^{-4}$  και το Packet Voice Drop να είναι μικρότερο από  $10^{-2}$ . Στην περίπτωση της φωνής, επειδή όλα τα πακέτα φωνής έχουν ίσο μέγεθος, το Packet Video Drop προκύπτει από τον τύπο που αναφέρθηκε στην ενότητα 4.2.3.2. Στην περίπτωση όμως του video τα πακέτα που προκύπτουν από τον τεμαχισμό ενός frame και εφόσον αυτό είναι μεγαλύτερο από 972 bytes, είναι όλα ίσα εκτός από το τελευταίο το οποίο έχει μικρότερο μέγεθος. Επομένως όλα τα πακέτα δεν έχουν το ίδιο βάρος, κατά τον υπολογισμό του Packet Video Drop. Έτσι ο τύπος για τον υπολογισμό του PVD που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.2.3.1 πρέπει να τροποποιηθεί ώστε να λαμβάνει υπόψη του τα bytes και όχι τον αριθμό των πακέτων. Ο τύπος που προκύπτει για τον υπολογισμό του PVD είναι: 
$$PVD = \frac{\# \text{Bytes Dropped}}{\# \text{Bytes Generated}}$$

Στο AP του Infrastructure BSS τρέχει ο αλγόριθμος που υπολογίζει τις τιμές των  $CW_{min}[AC]$  που πρέπει να πάρουν οι σταθμοί. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιούμε είναι ο αλγόριθμος που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.6. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τις διάφορες παραμέτρους του αλγορίθμου είναι οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία [6]. Η επιλογή αυτή έγινε, διότι θέλουμε να μελετήσουμε τον ίδιο αλγόριθμο με τις ίδιες παραμέτρους, αλλά με διαφορετικού τύπου σταθμούς.

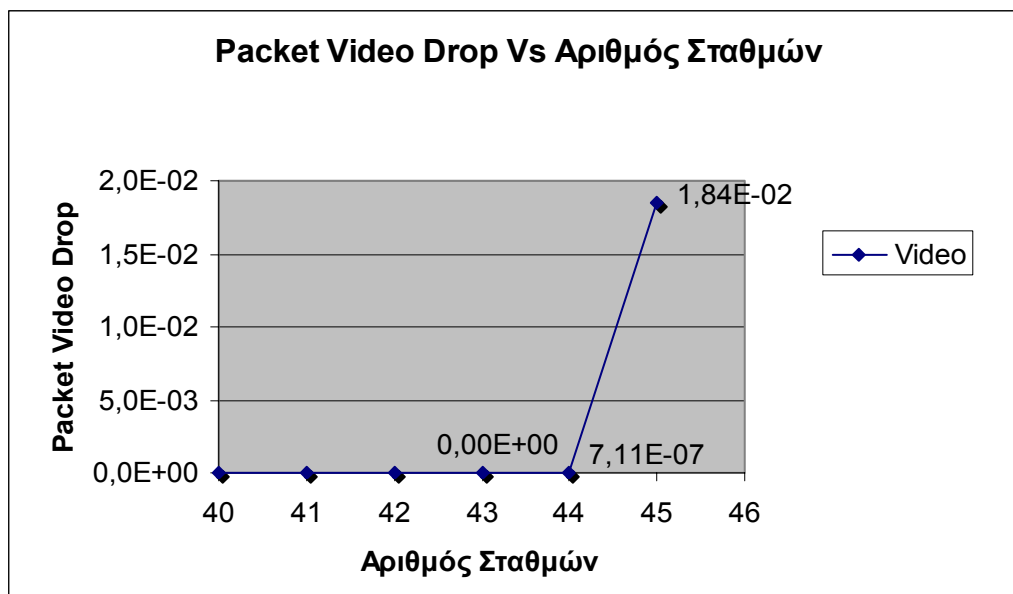


## 4.3 Ανάλυση Σεναρίων

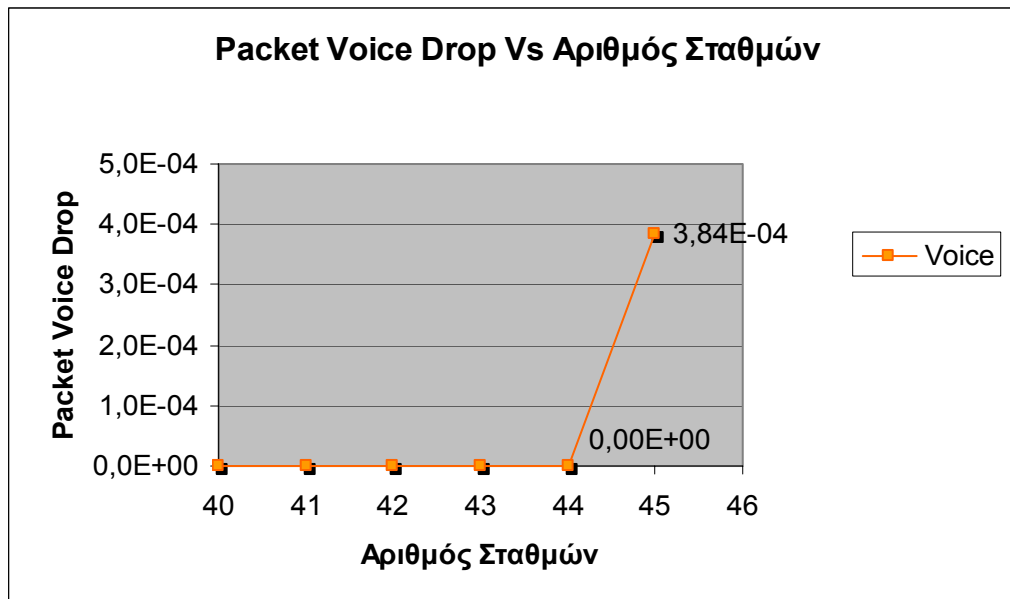
### 4.3.1 Εύρεση Χωρητικότητας Συστήματος

Πρωταρχικός στόχος των προσομοιώσεων είναι η εύρεση της χωρητικότητας του συστήματος. Δηλαδή του αριθμού των σταθμών που μπορούν να λειτουργήσουν στο ίδιο BSS, ενώ παράλληλα έχουμε υψηλή ποιότητα υπηρεσιών, δηλαδή video PVD μικρότερο από  $10^{-4}$  και voice PVD μικρότερο από  $10^{-2}$ . Κατά την προσομοίωση για την εύρεση της χωρητικότητας του συστήματος οι σταθμοί μεταδίδουν μόνο φωνή και video. Αυτό γίνεται έτσι ώστε να βρούμε τον μέγιστο δυνατό αριθμό σταθμών που μπορούμε να έχουμε στο ίδιο BSS με παράλληλη ομαλή λειτουργία των υπηρεσιών φωνής και video, οι οποίες είναι οι πιο απαιτητικές αφού είναι ευαίσθητες στην χρονική καθυστέρηση.

Κατά την εύρεση της χωρητικότητας του συστήματος αυξάναμε σταδιακά τον αριθμό των σταθμών και παρατηρούσαμε το Packet Video Drop και το Packet Voice Drop στο τέλος της προσομοίωσης της μιας ώρας κανονικής λειτουργίας του δικτύου. Στα γραφήματα 4.2 – 4.3 φαίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών.



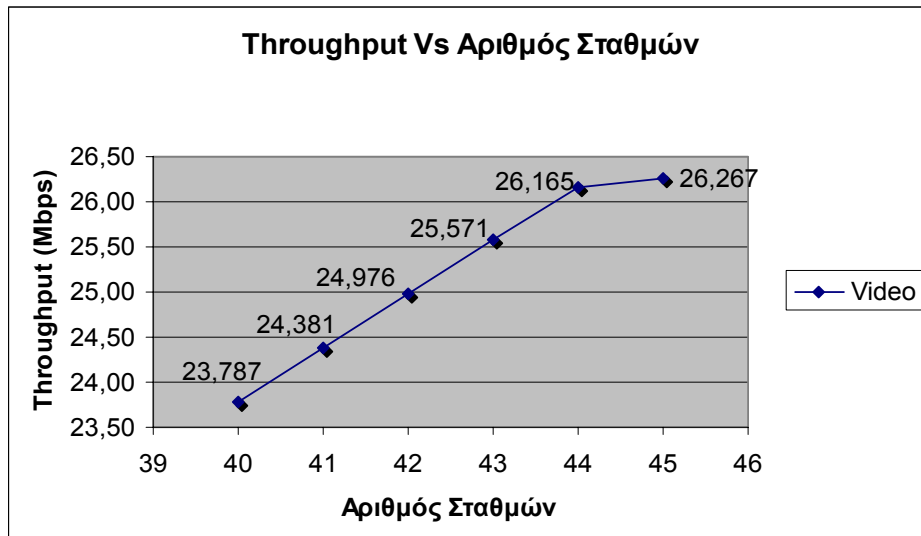
Σχήμα 4.2 – Packet Video Drop Vs Αριθμός Σταθμών



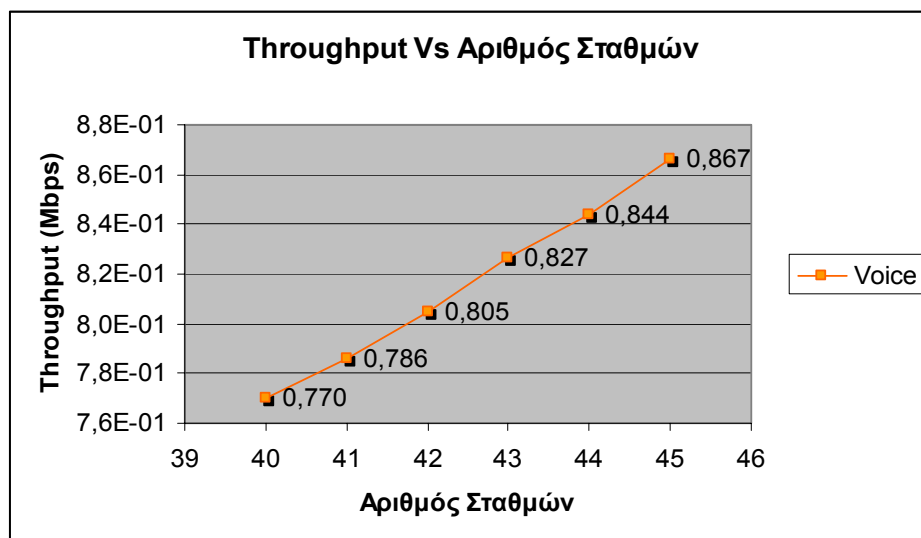
Σχήμα 4.3 – Packet Voice Drop Vs Αριθμός Σταθμών

Από τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρούμε ότι το Packet Video Drop μέχρι και 43 σταθμούς είναι ουσιαστικά αμελητέο. Για 44 σταθμούς έχουμε video PVD της τάξης του  $10^{-7}$ , ενώ για 45 σταθμούς το PVD αυξάνει ραγδαία και παίρνει την τιμή  $1,84 \cdot 10^{-2}$ . Επομένως για 45 σταθμούς δεν ικανοποιείται η συνθήκη για παροχή υψηλής ποιότητα υπηρεσίας του video, αφού  $PVD_{45} > 10^{-4}$ . Στην περίπτωση της κίνησης της φωνής δεν έχουμε τέτοιο πρόβλημα, διότι ακόμα και για 45 σταθμούς δεν παραβιάζεται η συνθήκη για παροχή υψηλής ποιότητας υπηρεσίας, αφού  $PVD_{45} < 10^{-2}$ . Προκειμένου όμως, να βρούμε τον μέγιστο αριθμό των σταθμών πρέπει να ισχύουν και οι δύο συνθήκες για παροχή υψηλής ποιότητας υπηρεσιών. Αυτό παρατηρούμε ότι ισχύει για αριθμό σταθμών ίσο με 44.

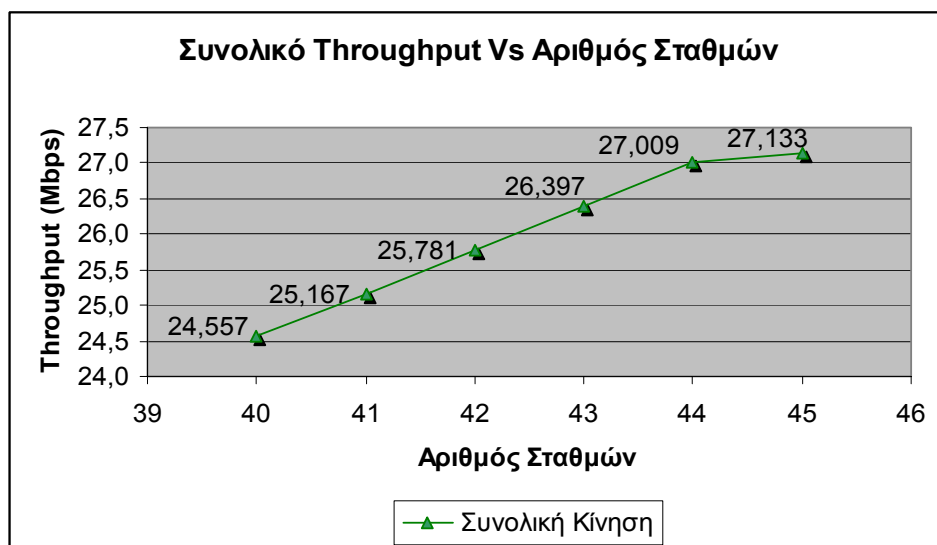
Στην συνέχεια ακολουθούν γραφήματα που δείχνουν την ρυθμαπόδοση (throughput) της κίνησης video, φωνής και του συνολικού συστήματος σαν συνάρτηση του αριθμού των χρηστών (Σχ.4.4 – 4.6).



Σχήμα 4.4 – Video Throughput Vs Αριθμός Σταθμών



Σχήμα 4.5 – Voice Throughput Vs Αριθμός Σταθμών



Σχήμα 4.6 – Συνολικό Throughput Vs Αριθμός Σταθμών

Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε ότι με την αύξηση των σταθμών στο BSS έχουμε αύξηση στο Throughput τόσο στις δύο ροές, όσο συνολικά. Όπως είναι λογικό το συνολικό Throughput είναι ίσο με το άθροισμα του Throughput της φωνής και του video. Στον μέγιστο αριθμό σταθμών στο σύστημα, δηλαδή 44 σταθμούς, το συνολικό Throughput είναι περίπου 27 Mbps, που αντιστοιχεί σε υποστήριξη 0,614 Mbps κίνησης ανά σταθμό. Είναι ενδιαφέρον να παρατηρηθεί ότι στη γραφική παράσταση του Video Throughput σαν συνάρτηση του αριθμού των σταθμών (ΣΧ.4.4), ενώ παρατηρούμε μια γραμμική σχεδόν αύξηση του video Throughput με την αύξηση του αριθμού των σταθμών, κατά την μετάβαση από 44 σταθμούς σε 45 δεν έχουμε συνέχιση αυτής της γραμμικής αύξησης. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι όταν στο σύστημα μας έχουμε 45 σταθμούς, έχουμε σημαντικές απώλειες από απορριπτόμενα video πακέτα. Αυτό φαίνεται από το Σχ. 4.2, όπου στην περίπτωση των 45 σταθμών το Packet Video Drop είναι αρκετά υψηλό. Στην περίπτωση της κίνησης φωνής, όπου δεν έχουμε σημαντικές απώλειες πακέτων όπως φαίνεται στο Σχ. 4.3, παρατηρούμε ότι έχουμε γραμμική σχεδόν αύξηση του Throughput Φωνής με την αύξηση του αριθμού των σταθμών.

#### 4.3.2 Εύρεση Μεγίστου Ρυθμού Άφιξης Δεδομένων

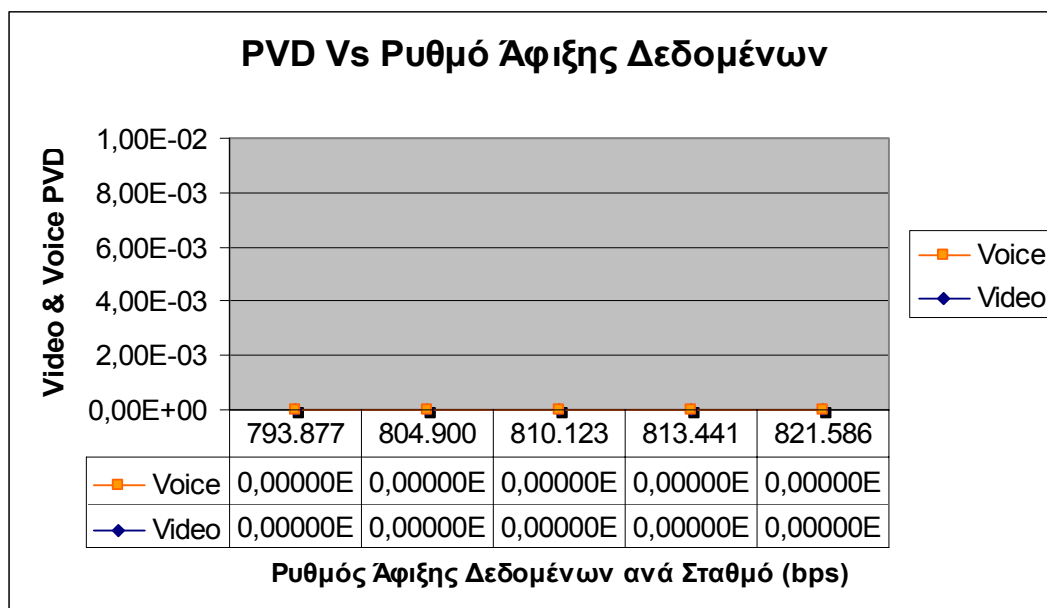
Ο δεύτερος στόχος των προσομοιώσεων είναι να εισάγουμε κίνηση δεδομένων στο σύστημα έτσι ώστε να “το φτάσουμε στα όρια του” και να βρούμε την μέγιστη χωρητικότητα του, ικανοποιώντας πάντα  $\text{video PVD} \leq 10^{-4}$  και  $\text{voice PVD} \leq 10^{-2}$ . Η εκτίμηση του μέγιστου υποστηριζόμενου ρυθμού άφιξης δεδομένων, γίνεται έτσι ώστε αυτός να είναι ίσος με τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Τον μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων βρίσκουμε στις τρεις παρακάτω περιπτώσεις:

- Για αριθμό σταθμών ίσο με το μισό του μέγιστου αριθμού σταθμών που βρήκαμε στη προηγούμενη παράγραφο, δηλαδή για 22 σταθμούς
- Για αριθμό σταθμών ίσο με τα τρία τέταρτα του μέγιστου, δηλαδή για 33 σταθμούς.
- Για αριθμό σταθμών ίσο με το μέγιστο, δηλαδή για 44 σταθμούς.

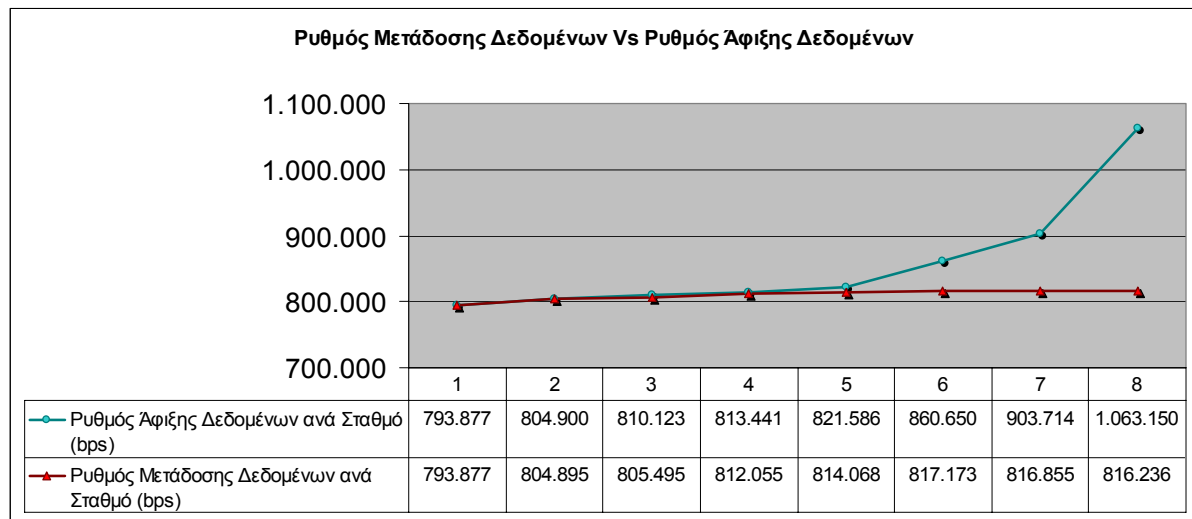
#### 4.3.2.1 Μέγιστος Ρυθμός Άφιξης Δεδομένων σε Δίκτυο με 22 Σταθμούς

Προκειμένου να βρούμε το μέγιστο ρυθμό άφιξης δεδομένων που υποστηρίζεται ανά σταθμό, ξεκινάμε από μία σχετικά μεγάλη τιμή του ρυθμού άφιξης δεδομένων και έπειτα παρατηρούμε το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο βρίσκουμε χονδρικά ένα άνω όριο στον υποστηριζόμενο ρυθμό άφιξης δεδομένων, αφού μετά από κάποια τιμή του ρυθμού άφιξης, ο ρυθμός μετάδοσης παραμένει σχεδόν ίδιος ενώ τα πακέτα δεδομένων που εισέρχονται στην ουρά ολοένα και αυξάνονται. Αφού βρούμε αυτό το χονδρικό άνω όριο στον ρυθμό άφιξης δεδομένων, έπειτα ξεκινώντας από την τιμή αυτή την μειώνουμε συνεχώς έως ότου φτάσουμε στον μέγιστο ρυθμό που αναζητάμε.

Στην συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα του Packet Video & Voice Drop και των ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σαν συνάρτηση του ρυθμού άφιξης δεδομένων (Σχ. 4.7 και 4.8, αντίστοιχα).



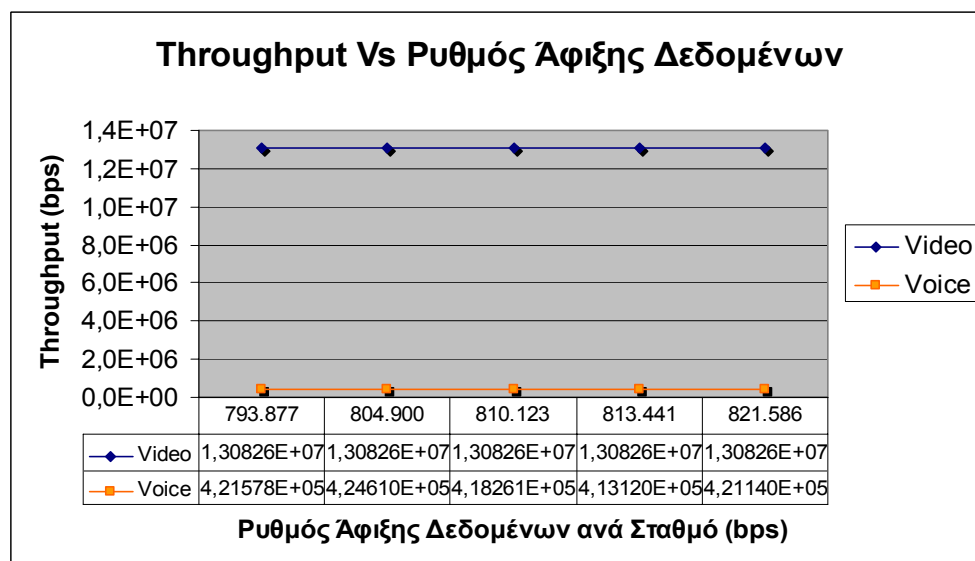
Σχήμα 4.7 – Voice & Video PVD Vs Ρυθμό Άφιξης Δεδομένων



**Σχήμα 4.8 – Ρυθμός Μετάδοσης Vs Ρυθμό Άφιξης Δεδομένων**

Από τα αποτελέσματα στο Σχ. 4.8 παρατηρούμε ότι όσο αυξάνουμε τον ρυθμό άφιξης δεδομένων αυξάνει και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων μέχρι κάποιο σημείο πέρα του οποίου ο ρυθμός μετάδοσης παραμένει σχεδόν σταθερός, όσο και να αυξάνουμε τον ρυθμό άφιξης. Δηλαδή το σύστημα φτάνει σε ένα σημείο κορεσμού όπου δεν μπορεί να μεταδώσει παραπάνω κίνηση δεδομένων. Ο μέγιστος ρυθμός άφιξης που ψάχνουμε να βρούμε, έτσι ώστε ρυθμός άφιξης είναι κατ'ουσίας ίσος με ρυθμό μετάδοσης, είναι περίπου ίσος με 804,9 Kbps ανά σταθμό. Παράλληλα, παρατηρούμε από τα αποτελέσματα Σχ. 4.7 ότι δεν τίθεται θέμα για υψηλά Packet Video ή Voice Drop αφού όσο και να αυξήσουμε τον ρυθμό άφιξης δεδομένων, τα Voice και Video PVD είναι ουσιαστικά αμελητέα.

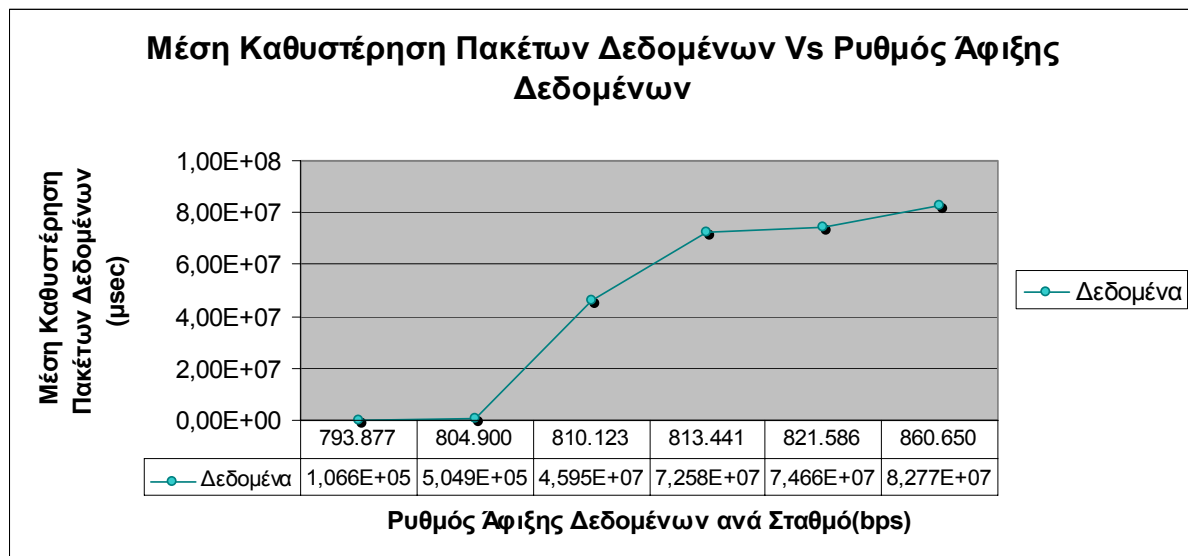
Τα αποτελέσματα Video και Voice Throughput φαίνονται στο Σχ. 4.9.



**Σχήμα 4.9 – Video & Voice Throughput Vs Ρυθμός Άφιξης Δεδομένων**

Από τα αποτελέσματα στο Σχ. 4.9 παρατηρούμε ότι το throughput video και φωνής όλων των σταθμών είναι σταθερά. Αυτό είναι αναμενόμενο, εφόσον το video και voice PVD είναι ουσιαστικά ίσο με μηδέν, για όλους τους ρυθμούς άφιξης δεδομένων που εξετάσαμε. Το μέγιστο συνολικό throughput που επιτυγχάνει το σύστημα είναι περίπου ίσο με 31,21 Mbps.

Στο χ. 4.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μέσης καθυστέρησης πακέτων δεδομένων σαν συνάρτηση του ρυθμού άφιξης τους. Η καθυστέρηση ενός πακέτου δεδομένων είναι ο χρόνος από τη στιγμή που θα μπει το πακέτο στην ουρά προς μετάδοση μέχρι να τελειώσει η μετάδοσή του.



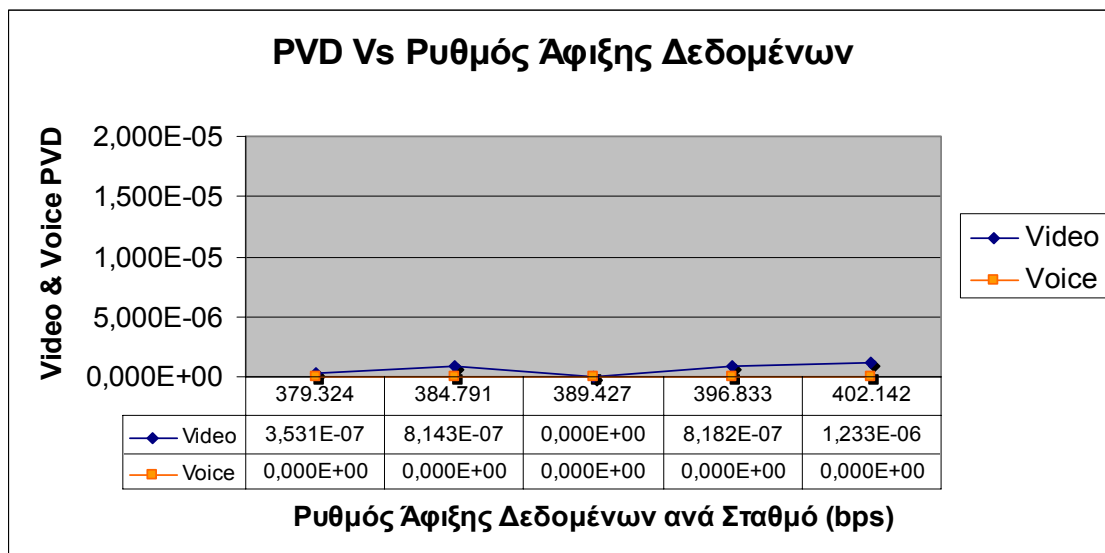
Σχήμα 4.10 – Μέση Καθυστέρηση Πακέτων Δεδομένων Vs Ρυθμός Άφιξης Δεδομένων

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι μέχρι και τον μέγιστο υποστηριζόμενο ρυθμό άφιξης δεδομένων (804,9 Kbps ανά σταθμό), η μέση καθυστέρηση πακέτων είναι της τάξης των ολίγων milliseconds. Όταν όμως ο ρυθμός άφιξης γίνεται μεγαλύτερος από τον μέγιστο υποστηριζόμενο ρυθμό άφιξης, η μέση καθυστέρηση πακέτων μεγαλώνει γρήγορα, και μεγάλος αριθμός πακέτων περιμένουν στην ουρά προκειμένου να μεταδοθούν. Επιπλέον συνδυάζοντας τα αποτελέσματα από τα Σχ. 4.8, 4.10, συμπεραίνουμε ότι ο λόγος που ο επιτυγχανόμενος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων μπορεί να αυξηθεί για τιμές ρυθμού άφιξης μεγαλύτερες του μέγιστου υποστηριζόμενου ρυθμού άφιξης δεδομένων, οφείλεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση όπου ο ρυθμός άφιξης είναι ίσος με τον μέγιστο υποστηριζόμενο ρυθμό άφιξης δεδομένων υπάρχουν idle χρονικά διαστήματα στην λειτουργία του πρωτοκόλλου (όπως φαίνεται και από τον χρόνο μέσης καθυστέρησης πακέτων στο Σχ. 4.10). Επομένως με μεγαλύτερους ρυθμούς

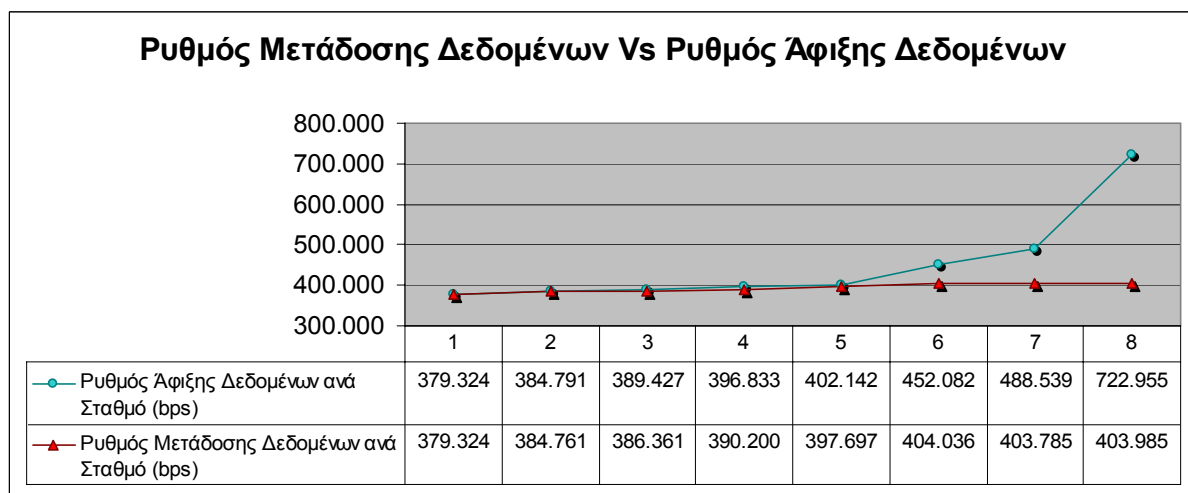
άφιξης δεδομένων το πρωτόκολλο καταφέρνει να εκμεταλλευτεί αυτά τα idle χρονικά διαστήματα, αφού οι ουρές δεδομένων των σταθμών έχουν πάντα πακέτα προς μετάδοση και επομένως επιτυγχάνει μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, χωρίς όμως να μπορεί να επιτύχει ευσταθή λειτουργία, δηλαδή ταύτιση μεταξύ ρυθμού άφιξης και ρυθμού μετάδοσης δεδομένων.

#### 4.3.2.2 Μέγιστος Ρυθμός Άφιξης Δεδομένων σε Δίκτυο με 33 Σταθμούς

Στο δίκτυο με 33 σταθμούς, προκειμένου να βρούμε τον μέγιστο υποστηριζόμενο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ακολουθούμε την ίδια διαδικασία με αυτήν που χρησιμοποιήσαμε στο δίκτυο με 22 σταθμούς. Στην συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα του Video και Voice PVD και του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων σαν συνάρτηση του ρυθμού άφιξης δεδομένων (Σχ 4.11 – 4.12).



Σχήμα 4.11 – Video & Voice PVD Vs Ρυθμός Άφιξης Δεδομένων

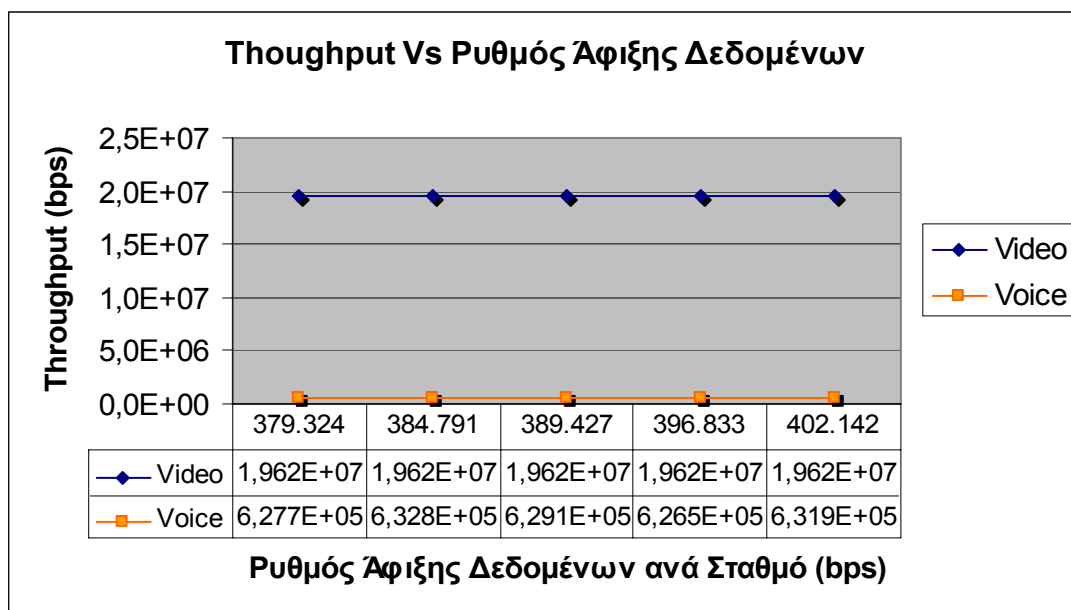


Σχήμα 4.12 – Ρυθμός Μετάδοσης Vs Ρυθμό Άφιξης Δεδομένων

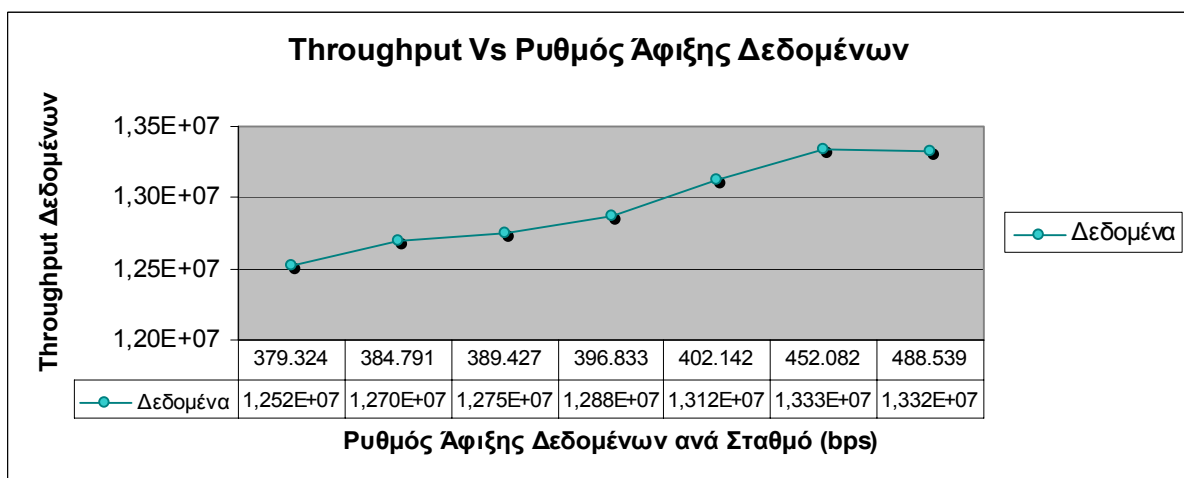


Από τα αποτελέσματα στο Σχ. 4.11 παρατηρούμε ότι η συνθήκη για το Video και Voice PVD δεν παραβιάζεται για κανένα ρυθμό άφιξης δεδομένων που εξετάσαμε. Στην περίπτωση του video, παρατηρούμε κάποιες απώλειες, αλλά αυτές είναι ελάχιστες και δεν επηρεάζουν την παροχή υψηλής ποιότητας υπηρεσίας. Ο μέγιστος υποστηριζόμενος ρυθμός άφιξης δεδομένων, στην περίπτωση αυτή είναι ίσος με περίπου 385 Kbps ανά σταθμό.

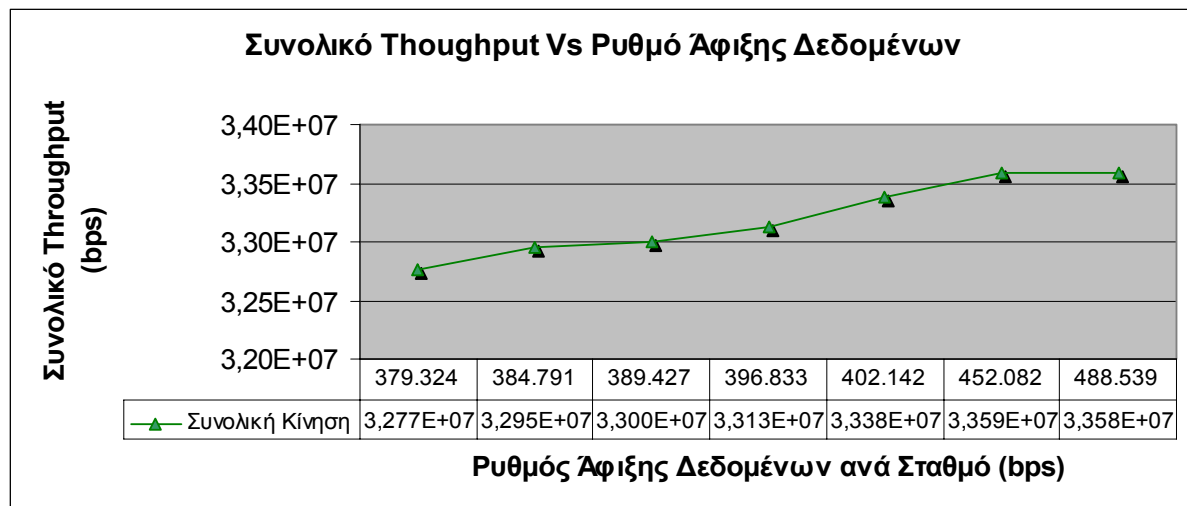
Στην συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα του Video, Voice, Data και Συνολικού Throughput των σταθμών σαν συνάρτηση του ρυθμού άφιξης δεδομένων (Σχ. 4.13 – 4.15).



Σχήμα 4.13 – Video & Voice Throughput Vs Ρυθμός Άφιξης Δεδομένων



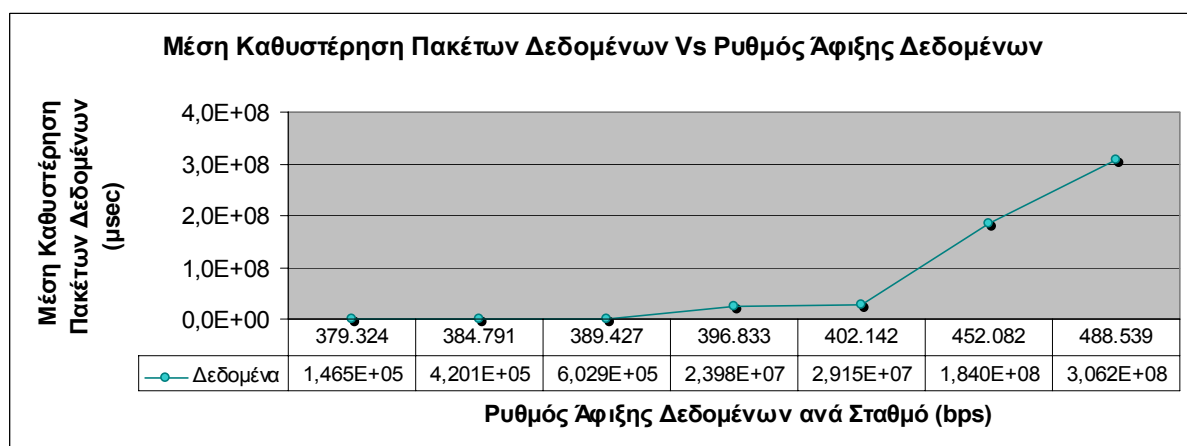
Σχήμα 4.14 – Data Throughput Vs Ρυθμός Άφιξης Δεδομένων



Σχήμα 4.15 – Συνολικό Throughput Vs Ρυθμός Άφιξης Δεδομένων

Παρατηρούμε από το Σχ. 4.13 ότι το Video Throughput παραμένει σταθερό για τις διάφορες τιμές του ρυθμού άφιξης δεδομένων που εξετάσαμε, παρόλο που έχουμε κάποιες μικρές απώλειες πακέτων video (Σχ. 4.11). Ο λόγος είναι ότι το video PVD είναι τόσο μικρό, ώστε οι μεταβολές του video Throughput των σταθμών να είναι ελάχιστες. Από τα αποτελέσματα στα Σχ. 4.14, 4.15 μπορούμε να παρατηρούμε τον κορεσμό του δικτύου, αφού πέρα από τον μέγιστο υποστηριζόμενο ρυθμό άφιξης δεδομένων δεν αυξάνεται το Throughput της κίνησης δεδομένων και αυτό της συνολικής κίνησης, αντίστοιχα. Το μέγιστο συνολικό Throughput που επιτυγχάνεται με ρυθμό άφιξης δεδομένων ανά σταθμό περίπου ίσο 385 Kbps, είναι περίπου 32,95 Mbps.

Στην συνέχεια ακολουθεί η γραφική παράσταση της μέσης καθυστέρησης των πακέτων των δεδομένων σαν συνάρτηση του ρυθμού άφιξης τους (Σχ. 4.16).

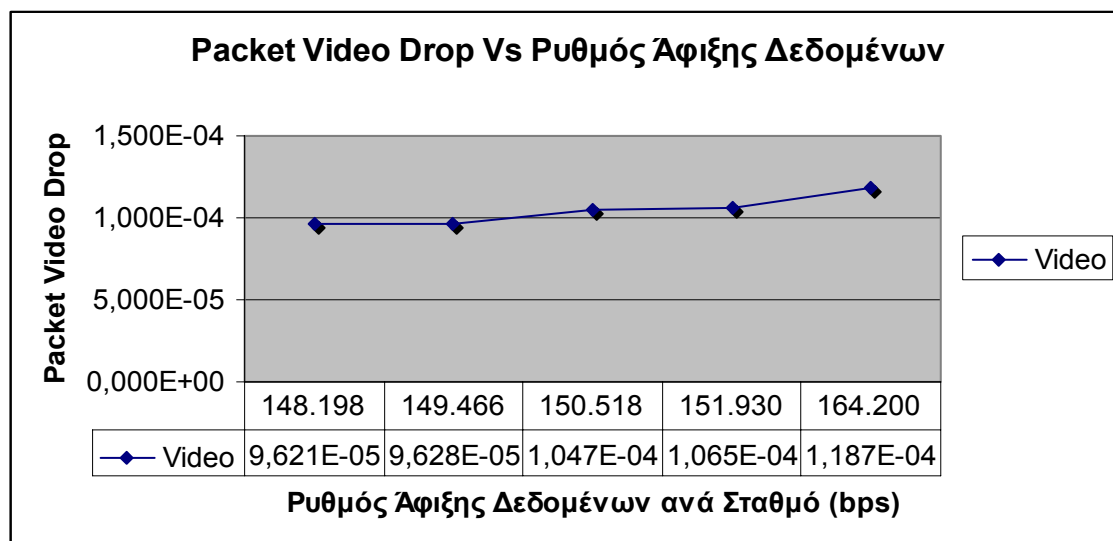


Σχήμα 4.16 – Μέση Καθυστέρηση Πακέτων Δεδομένων Vs Ρυθμός Άφιξης Δεδομένων

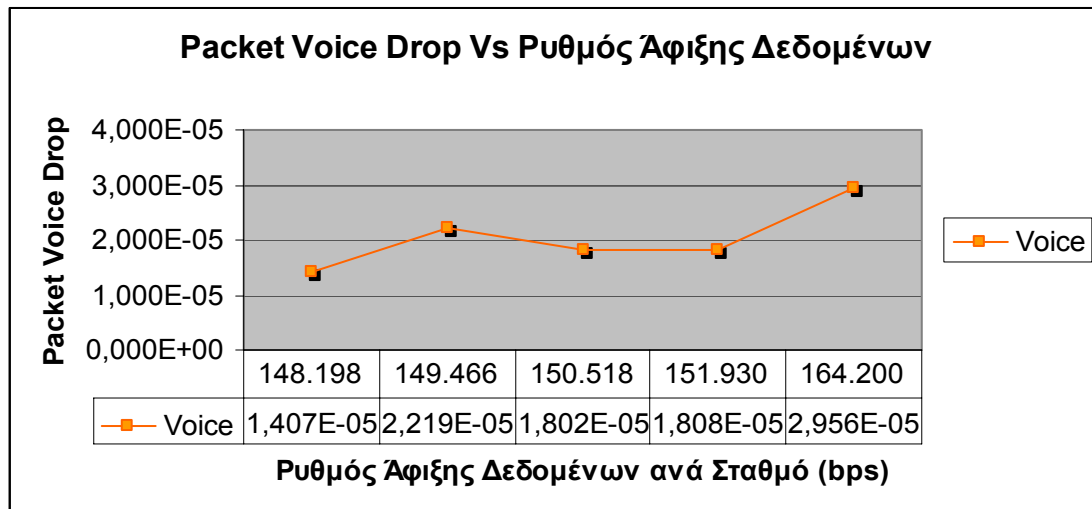
Όπως και στο προηγούμενο σενάριο με τους 22 σταθμούς, έτσι και εδώ παρατηρούμε ότι όσο ο ρυθμός άφιξης δεδομένων αυξάνει σε σχέση με τον μέγιστο υποστηριζόμενο ρυθμό, έχουμε μεγαλύτερες καθυστερήσεις στα πακέτα δεδομένων. Οι καθυστερήσεις αυτές μπορούν να φτάσουν ακόμα και σε επίπεδα της τάξης των seconds, ενώ μεγάλος αριθμός πακέτων δεδομένων περιμένουν στην ουρά για να μεταδοθούν.

#### 4.3.2.3 Μέγιστος Ρυθμός Άφιξης Δεδομένων σε Δίκτυο με 44 Σταθμούς

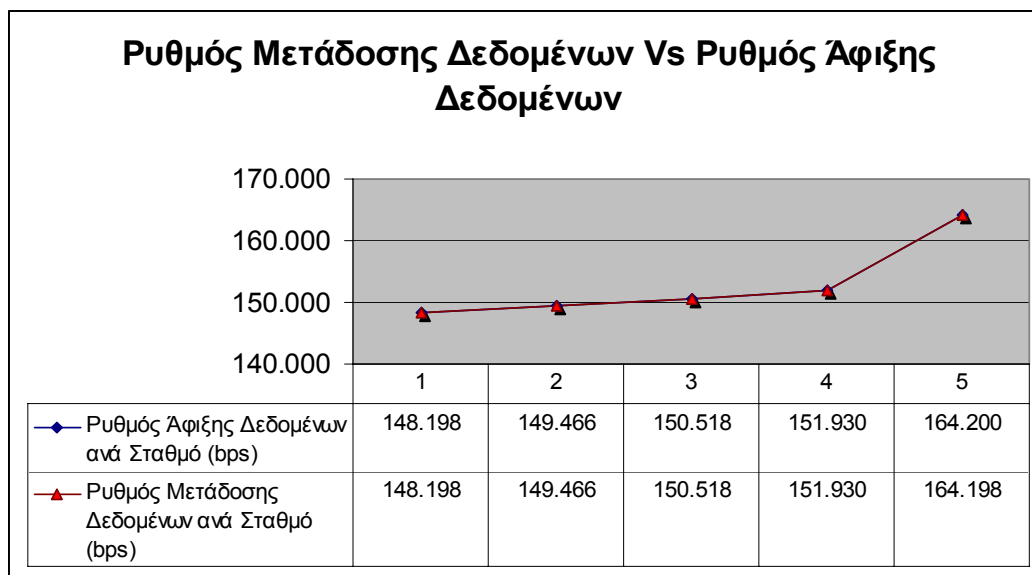
Στο σενάριο αυτό χρησιμοποιούμε 44 σταθμούς, δηλαδή αριθμό σταθμών ίσο με το μέγιστο υποστηριζόμενο για κίνηση video και φωνής (δες παράγραφο 4.3.1). Σε αυτό το σύστημα θα προσπαθήσουμε να προσθέσουμε κίνηση δεδομένων. Στην συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα του Packet Video Drop, Packet Voice Drop και ρυθμού μετάδοσης δεδομένων σαν συνάρτηση του ρυθμού άφιξης δεδομένων (Σχ.4.17 – 4.19).



Σχήμα 4.17 – Packet Video Drop Vs Ρυθμός Άφιξης Δεδομένων



Σχήμα 4.18 – Packet Voice Drop Vs Ρυθμός Άφιξης Δεδομένων

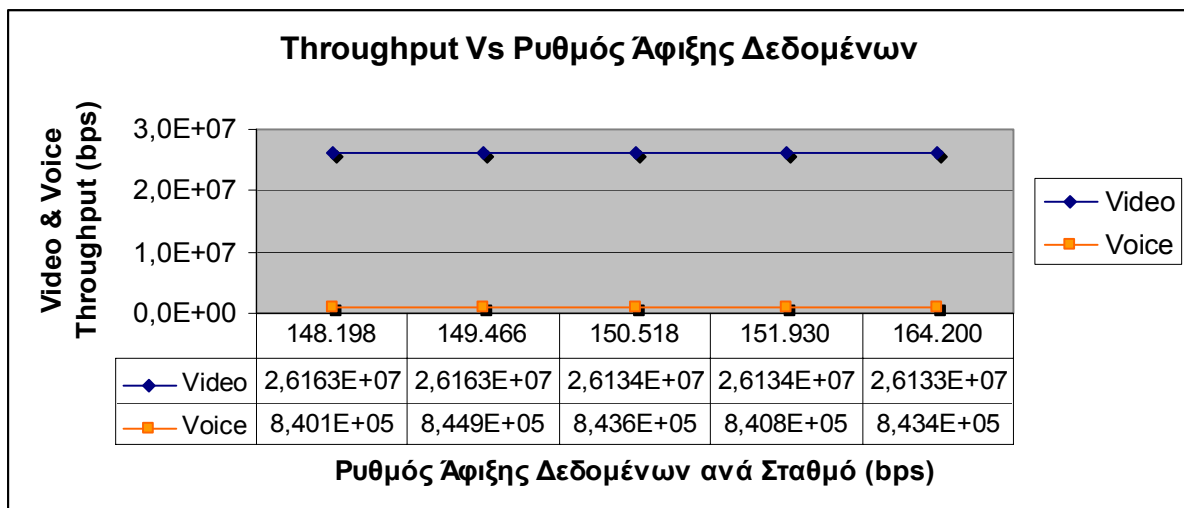


Σχήμα 4.19 – Ρυθμός Μετάδοσης Vs Ρυθμό Άφιξης Δεδομένων

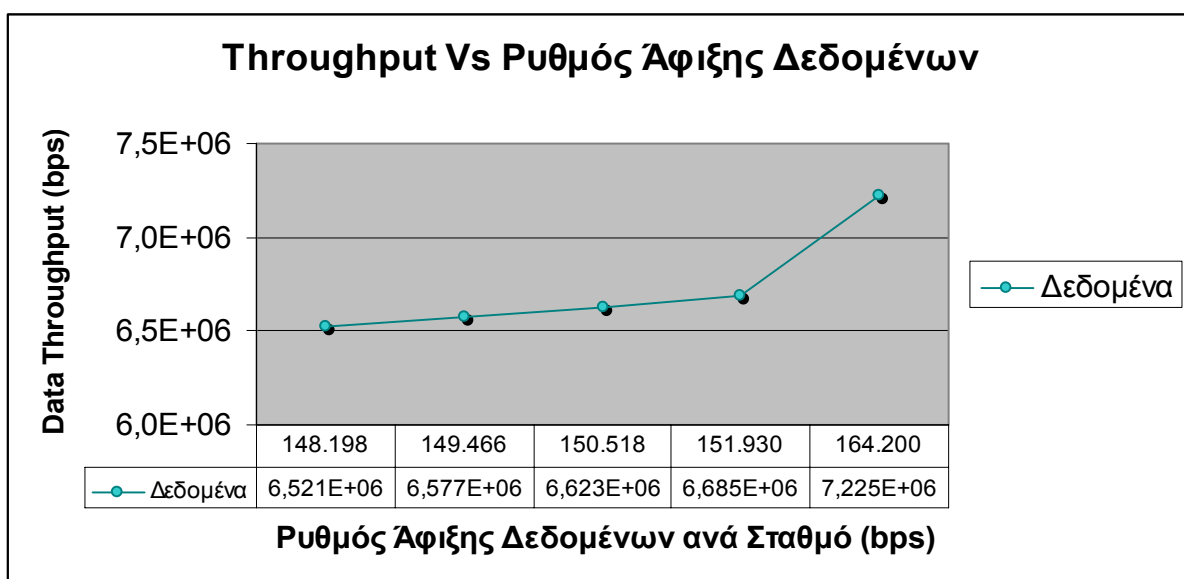
Από τα αποτελέσματα στο Σχ. 4.17 παρατηρούμε ότι από κάποια τιμή του ρυθμού άφιξης δεδομένων και μετά παραβιάζεται η συνθήκη  $\text{Video PVD} \leq 10^{-4}$ . Ο μέγιστος υποστηριζόμενος ρυθμός άφιξης δεδομένων για το σύστημα είναι περίπου 149,5 Kbps ανά σταθμό. Στην περίπτωση του Packet Voice Drop παρατηρούμε ότι για αυτόν τον μέγιστο ρυθμό, το Voice PVD είναι πολύ μικρότερο του  $10^{-2}$ , επομένως ικανοποιείται η αντίστοιχη συνθήκη για υψηλή ποιότητα υπηρεσίας. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα δύο σενάρια, παρατηρούμε ότι σε αυτή την περίπτωση κύριος παράγοντας για τον καθορισμό του μέγιστου υποστηριζόμενου ρυθμού άφιξης δεδομένων, αποτελεί η ικανοποίηση της συνθήκης για παροχή υψηλής ποιότητας υπηρεσιών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το σύστημα είναι ήδη αρκετά φορτωμένο

από την κίνηση των χρονικά ευαίσθητων ροών και η παραμικρή παρεμπόδιση της κίνησης αυτής συντελεί σε απώλειες πακέτων video ή φωνής. Στα προηγούμενα σενάρια, ο συνολικός φόρτος κίνησης των χρονικά ευαίσθητων ροών ήταν χαμηλότερος και ο μηχανισμός διαφοροποίησης υπηρεσιών του 802.11e μπορούσε εύκολα να δώσει τη δυνατότητα να μεταδοθεί έγκαιρα αυτή η κίνηση, έναντι της κίνησης των δεδομένων. Για αυτό το λόγο και στα προηγούμενα σενάρια είχαμε αμελητέα ή πολύ χαμηλά Video & Voice PVD.

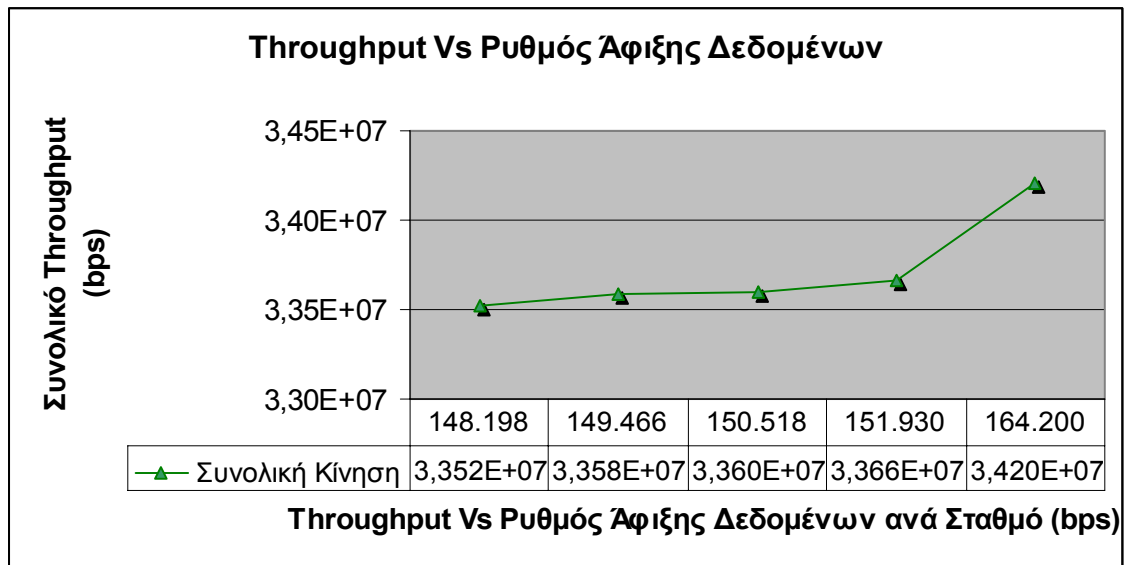
Στην συνέχεια ακολουθούν τα γραφήματα του Video, Voice, Data και Συνολικού Throughput των σταθμών σαν συνάρτηση του ρυθμού άφιξης δεδομένων (Σχ. 4.20 – 4.22).



Σχήμα 4.20 – Video & Voice Throughput Vs Ρυθμός Άφιξης Δεδομένων



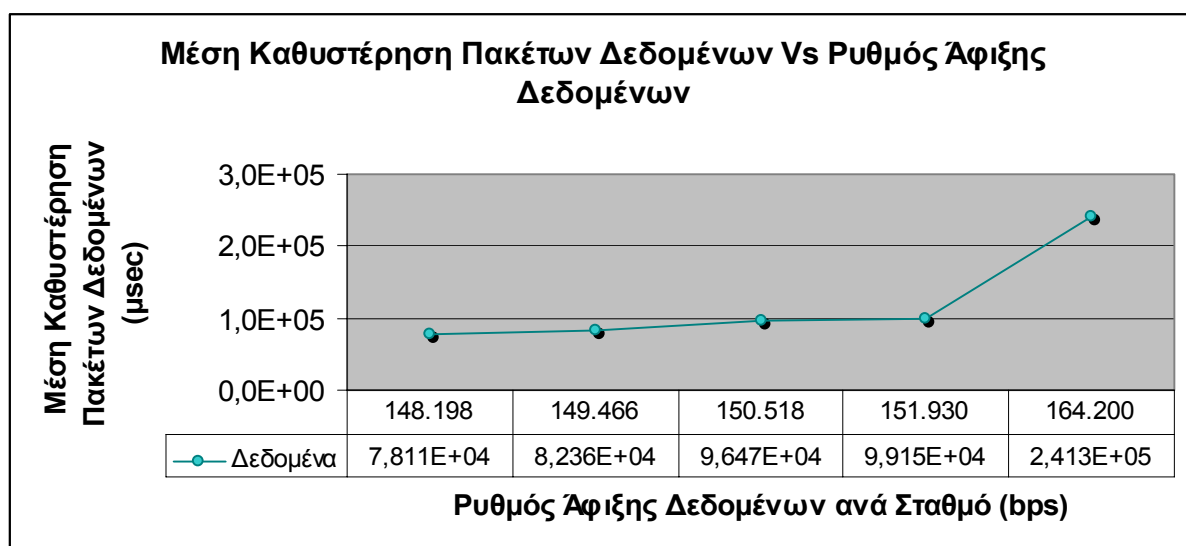
Σχήμα 4.21 – Data Throughput Vs Ρυθμός Άφιξης Δεδομένων



Σχήμα 4.22 – Συνολικό Throughput Vs Ρυθμός Άφιξης Δεδομένων

Από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις διαπιστώνουμε ότι το Video Throughput μειώνεται με την αύξηση του ρυθμού άφιξης δεδομένων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτή την περίπτωση έχουμε ικανές απώλειες video πακέτων, όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.17 (Packet Video Drop). Το συνολικό Throughput που επιτυγχάνεται με τον μέγιστο υποστηριζόμενο ρυθμό άφιξης δεδομένων είναι περίπου ίσο με 33,6 Mbps.

Τα αποτελέσματα της μέσης καθυστέρησης των πακέτων δεδομένων σαν συνάρτηση του ρυθμού άφιξης τους φαίνεται στο Σχ.4.23.



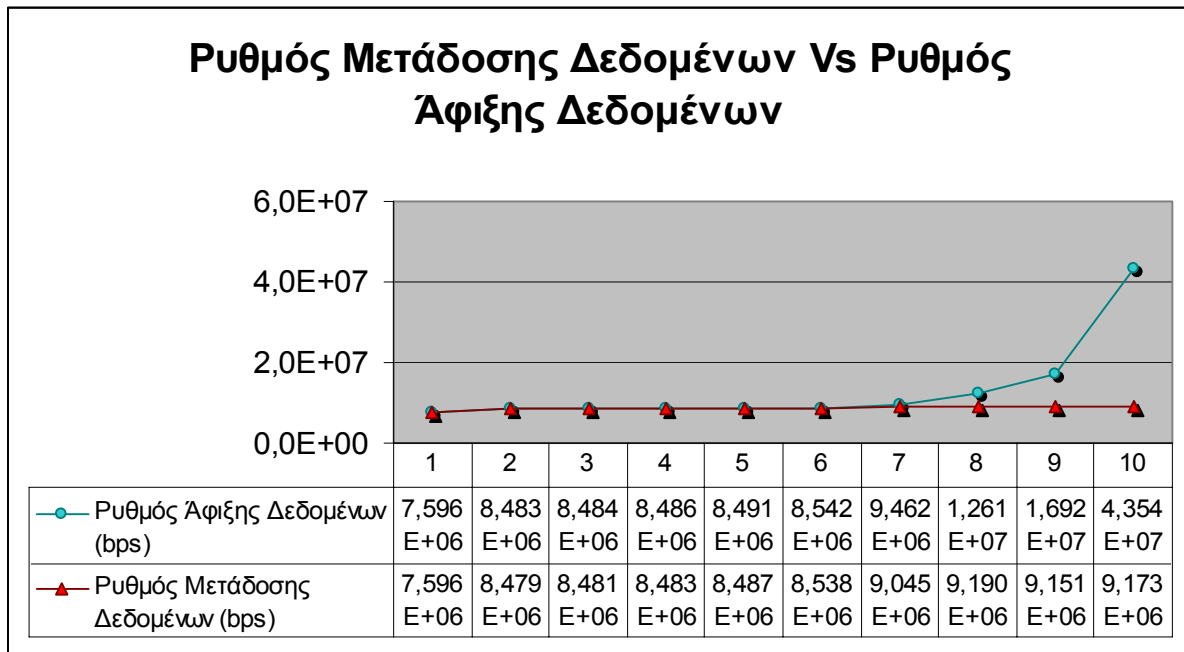
Σχήμα 4.23 – Μέση Καθυστέρηση Πακέτων Δεδομένων Vs Ρυθμός Άφιξης Δεδομένων

Όπως στα προηγούμενα δύο σενάρια, έτσι και εδώ παρατηρούμε παρόμοια συμπεριφορά της μέσης καθυστέρησης των πακέτων δεδομένων πέραν του μεγίστου υποστηριζόμενου ρυθμού άφιξης.

#### 4.3.2.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων των τριών Σεναρίων

Στο πρώτο σενάριο, όπου το σύστημα μας αποτελείται από 22 σταθμούς, το συνολικό Throughput είναι 31,21 Mbps. Στο δεύτερο σενάριο, που έχουμε 33 σταθμούς, δηλαδή 50% αύξηση στον αριθμό των σταθμών σε σχέση με το πρώτο σενάριο, το συνολικό Throughput είναι 32,95 Mbps, δηλαδή αυξάνεται μόνο κατά 5%. Ενώ στο τελευταίο σενάριο επιτυγχάνεται Throughput ίσο με 33,6 Mbps, δηλαδή έχουμε αύξηση στο Throughput περίπου ίση με 1% σε σχέση με το δεύτερο σενάριο. Επομένως παρατηρούμε ότι όσο λιγότερους σταθμούς έχουμε τόσο λιγότερο συνολικό throughput μπορούμε να πετύχουμε. Αυτό οφείλεται στην εκρηκτικότητα της άφιξης των δεδομένων και στην καθυστέρηση πρόσβασης στο μέσο για την μετάδοση ενός πακέτου δεδομένων. Για να μεταδοθεί ένα πακέτο δεδομένων πρέπει ο σταθμός να περιμένει αρκετά μεγάλο χρόνο για να αποκτήσει πρόσβαση στο μέσο, σε σχέση με τον χρόνο που χρειάζεται να περιμένει για να μεταδώσει ένα frame video ή φωνής. Επιπλέον όταν ο σταθμός αποκτήσει πρόσβαση στο μέσο, μπορεί να μεταδώσει μόνο ένα πακέτο δεδομένων. Προκειμένου να μεταδώσει το επόμενο πακέτο δεδομένων πρέπει να ανταγωνιστεί ξανά με τους υπόλοιπους σταθμούς για να αποκτήσει νέο δικαίωμα μετάδοσης. Αντίθετα, στην περίπτωση πακέτων φωνής και video, όταν ο σταθμός αποκτήσει δικαίωμα για μετάδοση μπορεί να μεταδώσει όσα πακέτα προλαβαίνει μέσα στο χρόνο που δικαιούται (TXOP Limit). Επιπλέον όταν έχουμε πολλούς σταθμούς στο δίκτυο, το μεγαλύτερο κλάσμα του συνολικού Throughput προέρχεται από την κίνηση video και φωνής, ενώ το μικρότερο κλάσμα αντιστοιχεί στην κίνηση των δεδομένων. Στην περίπτωση όμως των δύο πρώτων σεναρίων που εξετάσαμε, μεγάλο κλάσμα της συνολικής υποστηριζόμενης κίνησης αντιστοιχεί στα πακέτα δεδομένων. Επομένως το χρονικό overhead που αφορά την πρόσβαση στο μέσο για την μετάδοση αυτών των πακέτων δεδομένων όπως εξηγήσαμε παραπάνω, είναι μεγάλο και έτσι δεν μπορούμε να επιτύχουμε παρόμοια συνολικά Throughputs με

αυτό του τρίτου σεναρίου. Αυτό φαίνεται πιο έντονα στην περίπτωση που έχουμε ένα μόνο σταθμό στο δίκτυο, ο οποίος γεννά μόνο κίνηση δεδομένων. Στο Σχ. 4.24 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων σαν συνάρτηση του ρυθμού άφιξης δεδομένων για αυτήν την περίπτωση. Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι ίσος με το συνολικό Throughput του συστήματος, δεδομένου ότι έχουμε μόνο ένα σταθμό στο σύστημα.



**Σχήμα 4.24 – Ρυθμός Μετάδοσης Vs Ρυθμός Άφιξης Δεδομένων**

Από τα αποτελέσματα στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε πόσο σημαντικό είναι το χρονικό overhead του πρωτοκόλλου για την πρόσβαση στο μέσο του σταθμού με πακέτα δεδομένων, αφού στην περίπτωση αυτή επιτυγχάνεται μέγιστο throughput περίπου ίσο με 8,5Mbps μόνο!

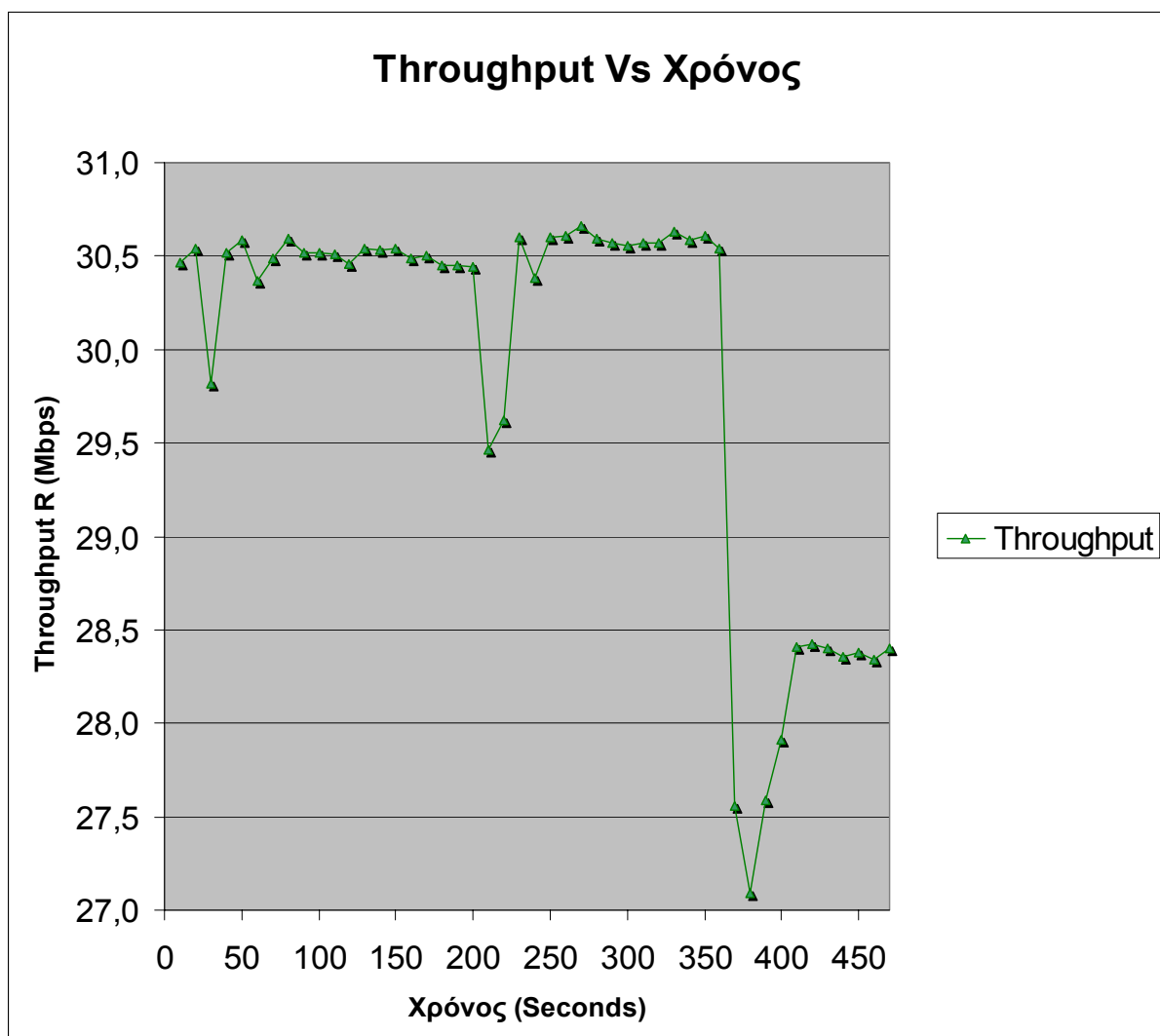
#### 4.3.3 Μελέτη της Συμπεριφοράς του Αλγορίθμου στο [6]

Στο σενάριο αυτό θα μελετήσουμε την συμπεριφορά του αλγορίθμου που αναλύσαμε στο κεφάλαιο 3.6, προκειμένου να διαπιστώσουμε την δυνατότητα του να προσαρμόζει το Scaling Factor ανάλογα με το επιτυγχανόμενο Throughput που παρατηρεί στο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να υπερφορτώσουμε το σύστημα με κίνηση. Σε ένα τέτοιο κορεσμένο σημείο λειτουργίας του δικτύου, είναι αναμενόμενο ότι οι συνθήκες για παροχή υψηλής ποιότητας υπηρεσιών video και

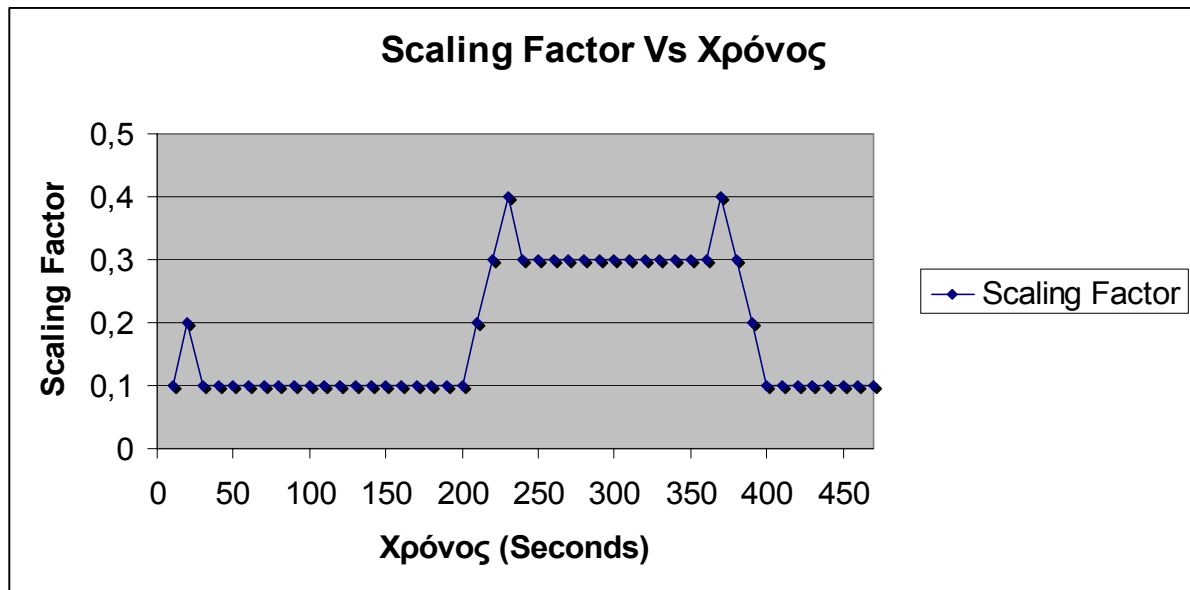


φωνής, δεν μπορούν να ικανοποιηθούν. Επομένως για το συγκεκριμένο σενάριο θεωρούμε ότι οι σταθμοί μεταδίδουν μόνο κίνηση δεδομένων. Ο ρυθμός άφιξης δεδομένων ανά σταθμό είναι αρκετά υψηλός, έτσι ώστε ακόμα και η περίπτωση μικρού αριθμού σταθμών στο σύστημα αντιστοιχεί σε κορεσμένη λειτουργία δικτύου.

Στο σενάριο το οποίο προσομοιώσαμε θεωρούμε αρχικά 22 σταθμούς. Την χρονική στιγμή 200 seconds, εισέρχονται στο σύστημα άλλοι 22 σταθμοί, δηλαδή έχουμε συνολικά 44 σταθμούς στο δίκτυο. Μετά από 160 seconds, δηλαδή την χρονική στιγμή 360 seconds, αποχωρούν από το σύστημα 32 σταθμοί και απομένουν μόνο 12 σταθμοί. Στην συνέχεια ακολουθούν τα γραφήματα του Συνολικού Throughput και του Scaling Factor σαν συνάρτηση του χρόνου



Σχήμα 4.25 – Throughput Vs Χρόνος



Σχήμα 4.26 – Scaling Factor Vs Χρόνος

Από τα Σχ. 4.25, 4.26 παρατηρούμε την προσαρμοστικότητα του αλγορίθμου, αφού με κάθε αλλαγή στις συνθήκες φόρτου του δικτύου παρατηρούμε προσαρμογή του Scaling Factor και πως αυτή επηρεάζει το Throughput. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι μετά τη χρονική στιγμή 360, όπου έχουμε μόνο 12 σταθμούς στο σύστημα, δεν μπορεί να επιτευχθεί Throughput ανάλογο με εκείνο που είχαμε όταν υπήρχαν 22 ή 44 σταθμοί (αυτό οφείλεται στο χρονικό overhead κατά την μετάδοση πακέτων δεδομένων, όπως εξηγήσαμε αναλυτικά στην ενότητα 4.3.2.4). Μία επιπλέον παρατήρηση είναι ότι τη χρονική στιγμή 400 seconds το Scaling Factor παίρνει την κατώτατη τιμή του (ίση με  $\Delta SF$ ), επομένως δεν μπορεί να μειωθεί περαιτέρω ακόμα και αν το επέβαλε ο αλγόριθμος.

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> : Επίλογος

### 5.1 Συνεισφορά της Εργασίας

Στην εργασία αυτή σχεδιάσαμε και μελετήσαμε ένα αλγόριθμο για παροχή διαφοροποιημένων υπηρεσιών σε εφαρμογές video MPEG-4, κωδικοποιημένης φωνής και δεδομένων πάνω από IEEE 802.11e ασύρματα τοπικά δίκτυα. Συγκεκριμένα μελετήσαμε τον αλγόριθμο που παρουσιάστηκε στο [6], ο οποίος ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου προσαρμόζει μία παράμετρο του EDCA μηχανισμού του πρωτοκόλλου IEEE 802.11e, έτσι ώστε να παρέχει καλύτερη διαφοροποίηση υπηρεσιών και να επιτυγχάνει υψηλό throughput. Σε αυτό το κεφάλαιο παραθέτουμε τα κύρια συμπεράσματα μας από την μελέτη του αλγορίθμου, καθώς και πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις αυτής της εργασίας.

### 5.2 Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αποδεικνύεται ότι το πρωτόκολλο IEEE 802.11e είναι ένα από τα πλέον καλύτερα πρωτόκολλα για παροχή διαφοροποιημένων υπηρεσιών στο χώρο των ασύρματων τοπικών δικτύων. Το IEEE 802.11e βρίσκεται ακόμα υπό εξέλιξη και έως τώρα έχουν βγει μερικές δοκιμαστικές εκδόσεις, οι οποίες όμως δείχνουν την ικανότητα του επερχόμενου πρωτοκόλλου για παροχή διαφοροποιημένων υπηρεσιών καθώς και για παροχή ποιότητας υπηρεσιών. Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο όταν φτάσει στην τελική του μορφή αναμένεται ότι θα επικρατήσει στην αγορά και θα αποτελέσει την βάση για την δημιουργία νέων προϊόντων βασισμένων σε αυτό. Επίσης θα αποτελέσει τον “θεμέλιο λίθο” για την προσφορά αξιόπιστων υπηρεσιών Τηλεδιάσκεψης, Video on Demand, Audio on Demand, Voice over IP και πρόσβασης στο διαδίκτυο, πάνω από ασύρματα τοπικά δίκτυα. Τις παραπάνω υπηρεσίες θα μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιοσδήποτε μέσα από το φορητό υπολογιστή ή το PDA του, οπουδήποτε υπάρχει ασύρματη πρόσβαση.

Πρωταρχικός στόχος της μελέτης μας μέσω προσομοιώσεων ήταν να βρούμε την χωρητικότητα του συστήματος μας. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μας βρήκαμε ότι το δίκτυο έχει την ικανότητα να ικανοποιήσει υπηρεσίες video και φωνής για μέχρι και 44 σταθμούς. Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι ο αριθμός των σταθμών μπορεί να αυξηθεί, αν αντί να χρησιμοποιήσουμε MPEG-4 video υψηλής ποιότητας, χρησιμοποιήσουμε video χαμηλότερης ποιότητας. Στην συνέχεια, αφού βρήκαμε την χωρητικότητα του δικτύου, προσθέσαμε στο δίκτυο και κίνηση δεδομένων. Συγκεκριμένα προσπαθήσαμε να βρούμε τον μέγιστο υποστηριζόμενο ρυθμό άφιξης δεδομένων στο δίκτυο όταν έχουμε 22, 33 και 44 σταθμούς. Προκειμένου να αποφανθούμε ότι έχουμε βρει τον μέγιστο υποστηριζόμενο ρυθμό άφιξης δεδομένων, θα πρέπει να ισχύουν οι παρακάτω δύο συνθήκες:

- a) Ο ρυθμός άφιξης δεδομένων ανά σταθμό θα πρέπει να είναι περίπου ίσος με τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ανά σταθμό.
- b) Θα πρέπει να εξασφαλίζονται οι απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών για την φωνή και το video.

Με βάση τις παραπάνω συνθήκες βρήκαμε ότι με 22 σταθμούς ο μέγιστος υποστηριζόμενος ρυθμός άφιξης δεδομένων ανά σταθμό είναι 804 Kbps, με 33 σταθμούς είναι 385 Kbps και με 44 σταθμούς είναι 149,5 Kbps. Το συνολικό throughput για τις παραπάνω περιπτώσεις είναι 31,21 Mbps, 32,95 Mbps και 33,6 Mbps, αντίστοιχα. Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι με την μείωση του αριθμού των σταθμών το δίκτυο επιτυγχάνει μικρότερο συνολικό throughput. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση μικρού αριθμού σταθμών, η κίνηση των δεδομένων θα αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού throughput. Επομένως το χρονικό overhead το οποίο αντιστοιχεί στην πρόσβαση στο μέσο των σταθμών κατά την μετάδοση πακέτων δεδομένων, επιδρά αρνητικά και δεν μπορούμε να επιτύχουμε συνολικό throughput εφάμιλλο με αυτό στην περίπτωση μεγαλύτερου αριθμού σταθμών. Τέλος, στο τελευταίο σενάριο που προσομοιώσαμε έχοντας μόνο κίνηση δεδομένων με πολύ υψηλό ρυθμό άφιξης μελετήσαμε την προσαρμοστικότητα του αλγορίθμου στο [6] στην απότομη προσθήκη και αφαίρεση σημαντικού αριθμού σταθμών στο δίκτυο. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνεται η δυνατότητα του αλγορίθμου να προσαρμόζεται σε απότομες αλλαγές του δικτυακού φόρτου επιτυγχάνοντας κάθε φορά υψηλό throughput. Η συμβολή του αλγορίθμου στο state of the art είναι σημαντική αν αναλογιστούμε ότι ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων είναι η μεταβλητότητα τους, αφού η

είσοδος και η αποχώρηση σταθμών σε ένα ασύρματο δίκτυο είναι κάτι πολύ σύνηθες. Επίσης ένα επιπλέον πλεονέκτημα του αλγορίθμου είναι ότι μπορεί να υλοποιηθεί εξολοκλήρου στο Access Point του Infrastructure BSS και δεν χρειάζεται αλλαγή της λειτουργίας του πρωτοκόλλου στους σταθμούς, αρκεί αυτοί να υποστηρίζουν το πρωτόκολλο IEEE 802.11e.

### 5.3 Μελλοντικές Προεκτάσεις

Κατά την δημιουργία του προσομοιωτή εξαιτίας της μεγάλης πολυπλοκότητας του πρωτοκόλλου, χρειάστηκε να γίνουν κάποιες παραδοχές και απλοποιήσεις. Σημαντική μελλοντική προέκταση της εργασίας αποτελεί η εξέταση της απόδοσης του αλγορίθμου στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Παρουσία θορύβου στο σύστημα. Είναι προφανές ότι στη περίπτωση αυτή το μέγιστο throughput θα είναι χαμηλότερο, εξαιτίας σφαλμάτων κατά την μετάδοση.
- Με ενσωμάτωση του μηχανισμού RTS – CTS ο οποίος προορίζεται για να αντιμετωπίσει τα κρυμμένα τερματικά. Επίσης, ο μηχανισμός αυτός προορίζεται και για την αξιόπιστη μετάδοση μεγάλων πακέτων (παρουσία θορύβου).
- Ύπαρξη περιπτώσεων κρυμμένων τερματικών στο δίκτυο. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα περισσότερες συγκρούσεις και μειωμένη απόδοση δικτύου.
- Με την υλοποίηση του προαιρετικού μηχανισμού Block Acknowledgement του πρωτοκόλλου, ο οποίος υποστηρίζει την αποστολή μιας ομάδας από MPDUs μεταξύ δύο σταθμών. Ο μηχανισμός αυτός επιτρέπει την ενσωμάτωση όλων των επιβεβαιώσεων της ομάδας σε ένα frame και στην περίπτωση που κάποιο MPDU δεν παραληφθεί, την επιλεκτική επαναμετάδοση μόνο του συγκεκριμένου MPDU.

## Συντομογραφίες και Ακρωνύμια

<b>AC</b>	Access Category
<b>AIFS</b>	Arbitration IFS
<b>AP</b>	Access Point
<b>BC</b>	Backoff Counter
<b>BSS</b>	Basic Service Set
<b>CBR</b>	Constant Bit Rate
<b>CFP</b>	Contention Free Period
<b>CFPRate</b>	Contention Free Repetition Rate
<b>CoV</b>	Coefficient of Variation
<b>CP</b>	Contention Period
<b>CSMA/CA</b>	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
<b>CTS</b>	Clear to Send
<b>CW</b>	Contention Window
<b>DCF</b>	Distributed Coordination Function
<b>DIFS</b>	DCF IFS
<b>DS</b>	Distribution System
<b>DSSS</b>	Direct Sequence Spread Spectrum
<b>DTIM</b>	Delivery Traffic Indication Message
<b>EDCA</b>	Enhanced Distributed Channel Access
<b>EIFS</b>	Extended IFS
<b>ERP</b>	Extended Rate PHY
<b>ESS</b>	Extended Service Set
<b>FHSS</b>	Frequency - Hopping spread spectrum
<b>HC</b>	Hybrid Coordinator
<b>HCCA</b>	HCF Controlled Channel Access
<b>HCF</b>	Hybrid Coordination Function
<b>HR/DSSS</b>	High Rate DSSS
<b>IBSS</b>	Independent Basic Service Set
<b>IFS</b>	Interframe Space
<b>ISM</b>	Industrial, Scientific, Medical
<b>LAN</b>	Local Area Network
<b>LLC</b>	Logical Link Control
<b>MAC</b>	Medium Access Control
<b>MIB</b>	Management Information Base
<b>MSDU</b>	MAC Service Data Unit
<b>NIC</b>	Network Interface Card
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>OSI</b>	Open Systems Interconnection
<b>PC</b>	Point Coordinator
<b>PCF</b>	Point Coordination Function
<b>PDU<sub>s</sub></b>	Protocol Data Units
<b>PHY</b>	Physical Layer
<b>PIFS</b>	PCF IFS
<b>PVD</b>	Packet Video Drop
<b>PVD</b>	Packet Voice Drop
<b>QoS</b>	Quality of Service

---

<b>RTS</b>	Request to Send
<b>SIFS</b>	Short IFS
<b>STA</b>	Wireless LAN Station
<b>TXOP</b>	Transmission Opportunity
<b>UP</b>	User Priority
<b>VBR</b>	Variable Bit Rate
<b>WEP</b>	Wired Equivalent Privacy
<b>WLAN</b>	Wireless LAN
<b>WM</b>	Wireless Medium

## Βιβλιογραφία

- [1] IEEE, “IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Networks – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN MAC and PHY Specifications”, IEEE Std 802.11-1999
- [2] IEEE, “Supplement to IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Networks – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN MAC and PHY Specifications, High-Speed Physical Layer in the 5 GHz Band”, IEEE Std 802.11a-1999
- [3] IEEE, “IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications—Amendment 2: Higher-speed Physical Layer (PHY) extension in the 2.4 GHz band—Corrigendum1”, IEEE Std 802.11b-1999/Cor 1-2001
- [4] IEEE, “IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications—Amendment 4: Further Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band”, IEEE Std 802.11g™-2003
- [5] IEEE, “Draft Amendment to STANDARD [for] Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN Specific Requirements - Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Medium Access Control (MAC) Quality of Service (QoS) Enhancements”, IEEE P802.11e/D6.0, November 2003
- [6] Vasilios A. Siris and Matina Kavouridou, “Achieving Service Differentiation and High Utilization in IEEE 802.11”, June 2003
- [7] Mangold S.n Choi S., May P., Klein O., Hiertz G.and Stibor L., “IEEE 802.11e Wireless LAN for Quality of Service”, in Proc. European Wireless '02, Florence, Italy, February 2002



- [8] Mangold S.n Choi S., May P., Klein O., Hiertz G.and Stibor L., "IEEE 802.11e -Fair Resource Sharing Between Overlapping Basic Service Sets", In Proceedings of the PIMRC 2002, pp. 166-171, Lisbon, Portugal, September 2002
- [9] Mangold, S., " IEEE 802.11e: Coexistence of Overlapping Basic Service Sets", In Proceedings of the Mobile Venue'02, pp. 131-135, Athens, Greece, May 2002
- [10] Choi S., Prado J., Shankar S. and Mangold S., "IEEE 802.11e Contention-Based Channel Access (EDCF) Performance Evaluation", In Proceedings of the ICC 2003, Anchorage, AL, USA, May 2003
- [11] Grilo A. and Nunes M., "Performance Evaluation of IEEE 802.11e", project IST-2000
- [12] Zhu H. and Chlamtac I., "An Analytical Model for IEEE 802.11e EDCF Differential Services", Computer Communications and Networks, 2003,ICCCN 2003 Proceedings
- [13] Garg P., Doshi R., Greene R., Baker M., Malek M., and Cheng X., "Using IEEE 802.11e MAC for QoS Over Wireless", The Proceedings of the 22nd IEEE International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC 2003), Phoenix, Arizona, April 2003.
- [14] Wietholer S. and Hoene C., "Design and Verification of an IEEE 802.11e EDCF Simulation Model in ns-2\_26", TKN Technical Report TKN-03-19, November 2003
- [15] Velayutham A. and Chang J.M., "An Enhanced Alternative to the IEEE 802.11e MAC Scheme", May 2004
- [16] Lindgren A., Almquist A. and Schelen O., "Quality of Service Schemes for IEEE 802.11, A Simulation Study"
- [17] Liu H. and WU J., "A Scheme for Supporting Voice over IEEE 802.11 Wireless Local Area Network", October 2000
- [18] Garcia A.E, Hackbarth K.D., Brand A. and Lehnert R., "Analytical Model for Voice over IP Traffic Characterization", WSEAS TRANSACTIONS on COMMUNICATIONS, January 2002
- [19] Law A.M and Kelton W.D, "Simulation Modeling & Analysis", Second Edition McGraw-Hill International Editions, 1991

- [20] Fitzek, F. and Reisslein, M., "MPEG-4 and H.263 Video Traces for Network Performance Evaluation", TU Berlin, Dept. of Electrical Engineering, Telecommunication Networks Group, Technical Report: TKN-00-06, October 2000.
- [21] MPEG-4, Video Traces, <http://www-tkn.ee.tu-berlin.de/research/trace/trace.html>
- [22] Broustis I. and Paterakis M., "On the Feasibility of Integrated MPEG Teleconference and Data Transmission, over IEEE 802.11 WLANs", Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag Heidelberg, May 2004
- [23] <http://grouper.ieee.org/groups/802/11/index.html>
- [24] [http://www.intelligraphics.com/articles/80211\\_article.html](http://www.intelligraphics.com/articles/80211_article.html)
- [25] Random Generators,  
<http://www1.physik.tu-muenchen.de/~gammel/matpack/html/LibDoc/Numbers/Random.html#ran000>
- [26] Bjarne Stroustrup, "The C++ Programming Language", AT&T Laboratories, December 1986
- [27] The Network Simulator ns-2. <http://www-mash.cs.berkeley.edu/ns.html>