

Ατομική Διπλωματική Εργασία

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ
IEEE 802.11ax
ΓΙΑ ΠΥΚΝΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΤΟΠΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ**

Χριστόδουλος Ευαγγέλου

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ



ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μάιος 2025

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Μελέτη της απόδοσης του πρωτόκολλου IEEE 802.11ax για πυκνά
ασύρματα δίκτυα τοπικής περιοχής**
Χριστόδουλος Ευαγγέλου

Επιβλέπων Καθηγητής
Δρ. Βάσος Βασιλείου

Η Ατομική Διπλωματική Εργασία υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των
απαιτήσεων απόκτησης του πτυχίου Πληροφορικής του Τμήματος Πληροφορικής του
Πανεπιστημίου Κύπρου

Μάιος 2025

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα άτομα που με βοήθησαν και με στήριξαν στην υλοποίηση της διπλωματικής μου εργασίας. Ήταν ένα θέμα καινούργιο για εμένα και πολύ ενδιαφέρον. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστώ την οικογένεια μου για την στήριξη και την βοήθεια σε όλα αυτά τα χρόνια.

Ξεχωριστά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου Δρ. Βάσο Βασιλείου, ο οποίος ήταν καθοδηγητής σε κάθε βήμα της διπλωματικής εργασίας, από την εύρεση του θέματος μέχρι και την συγγραφή της διπλωματικής εργασίας.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της απόδοσης του πρωτοκόλλου IEEE 802.11ax σε πυκνά ασύρματα δίκτυα, με έμφαση στην τεχνολογία Uplink OFDMA, μέσω προσομοιώσεων στο περιβάλλον ns-3. Στο πλαίσιο αυτό, σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν πειραματικά σενάρια με μεταβαλλόμενο αριθμό σταθμών, εξετάζοντας διαφορετικές παραμέτρους φυσικού επιπέδου, μεθόδους κινητικότητας και τύπους κυκλοφορίας δεδομένων.

Για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος, μελετήθηκαν τρεις ευρέως καθιερωμένοι αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης: ο MaxRate, ο Proportional Fairness (PF) και ο Shortest Remaining Time First (SRTF). Παράλληλα, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένας νέος υβριδικός (Hybrid) αλγόριθμος, ο οποίος συνδυάζει χαρακτηριστικά των MaxRate και SRTF, με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόδοσης.

Η μελέτη επικεντρώνεται στην ανάλυση βασικών μετρικών απόδοσης, όπως το Goodput και Latency, με στόχο την αξιολόγηση της επίδρασης των αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης, σε συνάρτηση με κρίσιμες παραμέτρους του συστήματος.

Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε ανάλυση υπολογιστικής πολυπλοκότητας (Complexity Analysis) για κάθε αλγόριθμο, μετρώντας την κατανάλωση υπολογιστικών πόρων σε CPU clocks και Memory.

Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι κανένας αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης δεν υπερέχει σταθερά σε όρους απόδοσης ή υπολογιστικής πολυπλοκότητας. Αντιθέτως, οι παραμετρικές ρυθμίσεις του συστήματος έχουν σημαντικότερη επίδραση στη συνολική απόδοση του δικτύου από τους αλγόριθμους χρονοδρομολόγησης.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	8
1.1 Γενική Εισαγωγή.....	8
1.2 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας	9
1.3 Σχετικές δουλειές	9
1.4 Περιεχόμενο Διπλωματικής Εργασίας	11
Κεφάλαιο 2: Υπόβαθρο.....	12
2.1 Ιστορική Αναδρομή.....	12
2.2 Κύριες καινοτομίες του πρωτοκόλλου 802.11ax	14
2.2.1 Τεχνολογία OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)	14
2.2.2 Resource Units (RUs)	15
2.2.3 Διάρκεια Συμβόλων και Χρονικά Διαστήματα Προστασίας (Guard Intervals).....	17
2.2.4 Τεχνικές Διαμόρφωσης MCS	19
2.2.5 Διαδικασία Downlink στο Wi-Fi 6	20
2.2.6 Διαδικασία Uplink στο Wi-Fi 6.....	22
2.2.7 Τεχνολογία MU-MIMO (Multi User – Multiple Input Multiple Output).....	24
2.2.8 Spatial Reuse & BSS Coloring	25
2.2.9 Target Wake Time (TWT).....	26
2.3 Σύνοψη πρωτοκόλλου 802.11ax.....	27
Κεφάλαιο 3: Σχεδιασμός και Υλοποίηση Αλγορίθμων Χρονοδρομολόγησης	28
3.1 Αλγόριθμοι.....	28
3.1.1 Αλγόριθμος MR (Max Rate)	29
3.1.2 Αλγόριθμος SRTF (Shortest Remaining Time First).....	30
3.1.3 Αλγόριθμος PF (Proportional Fairness)	31
3.1.4 Αλγόριθμος Hybrid	32
Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία και Σενάρια	33
4.1 Μεθοδολογία.....	33
4.2 Σενάρια & Παράμετροι.....	34
Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα - Γραφικές Παραστάσεις για Performance Evaluation	38
5.1 Αποτελέσματα με Continuous Traffic – Γραφικές Παραστάσεις	39
5.1.1 Αποτελέσματα για Goodput με Guard Interval 1600 ns	39
5.1.1.1 Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση	39
5.1.1.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση	41
5.1.1.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση.....	43
5.1.2 Αποτελέσματα για Goodput με Guard Interval 3200 ns	45
5.1.2.1 Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση	45
5.1.2.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση	47
5.1.2.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση.....	48

5.1.3	Αποτελέσματα για Latency με Guard Interval 1600 ns	50
5.1.3.1	Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση	50
5.1.3.2	Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση	52
5.1.3.3	Τυχαίες θέσης με κίνηση.....	54
5.1.4	Αποτελέσματα για Latency με Guard Interval 3200 ns	56
5.1.4.1	Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση	56
5.1.4.2	Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση	58
5.1.4.3	Τυχαίες θέσης με κίνηση.....	59
5.2	Αποτελέσματα με Δυναμικό Traffic– Γραφικές Παραστάσεις.....	61
5.2.1	Αποτελέσματα για Goodput με Guard Interval 1600 ns	61
5.2.1.1	Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση	62
5.2.1.2	Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση	63
5.2.1.3	Τυχαίες θέσης με κίνηση.....	64
5.2.2	Αποτελέσματα για Goodput με Guard Interval 3200 ns	65
5.2.2.1	Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση	65
5.2.2.2	Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση	66
5.2.2.3	Τυχαίες θέσης με κίνηση.....	67
5.2.3	Αποτελέσματα για Latency με Guard Interval 1600 ns	68
5.2.3.1	Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση	68
5.2.3.2	Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση	69
5.2.3.3	Τυχαίες θέσης με κίνηση.....	70
5.2.4	Αποτελέσματα για Latency με Guard Interval 3200 ns	71
5.2.4.1	Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση	71
5.2.4.2	Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση	72
5.2.4.3	Τυχαίες θέσης με κίνηση.....	73
Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα – Γραφικές Παραστάσεις για Complexity Analysis με Continuous Traffic.....		74
6.1	Αποτελέσματα – Γραφικές Παραστάσεις	75
6.2	CPU CLOCKS ανά πλήθος σταθμών για κάθε αλγόριθμο με GI = 1600 ns	75
6.2.1	Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση	75
6.2.2	Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση	76
6.2.3	Τυχαίες θέσης με κίνηση.....	76
6.3	CPU clocks ανά πλήθος σταθμών για κάθε αλγόριθμο με GI = 3200 ns.....	77
6.3.1	Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση	77
6.3.2	Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση	77
6.3.3	Τυχαίες θέσης με κίνηση.....	78
6.4	Memory ανά πλήθος σταθμών για κάθε αλγόριθμο με GI = 1600 ns.....	78
6.4.1	Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση	78
6.4.2	Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση	79

6.4.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση.....	79
6.5 Memory ανά πλήθος σταθμών για κάθε αλγόριθμο με Guard Interval 3200 ns.....	79
6.5.1 Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση	80
6.5.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση	80
6.5.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση.....	80
Κεφάλαιο 7: Ανάλυση Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα	81
7.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα για Performance Evaluation	81
7.1.1 Απόδοση Goodput & Latency για Continuous Traffic	81
7.1.2 Απόδοση (Goodput & Latency) για Dynamic Traffic.....	82
7.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα για το Complexity Analysis.....	82
7.2.1 Απόδοση CPU Clocks & Μνήμη για Continuous Traffic.....	82
7.3 Γενικό Συμπέρασμα Αποτελεσμάτων	83
Κεφάλαιο 8: Σύνοψη & Μελλοντική Εργασία	85
8.1 Σύνοψη.....	85
8.2 Μελλοντική Εργασία	87
Βιβλιογραφία	88
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Goodput	93
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Latency.....	108

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενική Εισαγωγή

1.2 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

1.3 Σχετικές δουλειές

1.4 Δομή διπλωματικής Εργασίας

1.1 Γενική Εισαγωγή

Η ραγδαία αύξηση του αριθμού των ασύρματων συσκευών, σε συνδυασμό με την εξάπλωση εφαρμογών υψηλών απαιτήσεων — όπως το βίντεο υψηλής ευκρίνειας, η επαυξημένη πραγματικότητα (AR) και οι εφαρμογές IoT — εντείνει την ανάγκη για πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας που εξασφαλίζουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, χαμηλή καθυστέρηση και αξιοπιστία, ακόμη και σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας χρηστών. Το πρωτόκολλο IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) απαντά σε αυτές τις ανάγκες, εστιάζοντας στη βελτίωση της απόδοσης σε πυκνά δίκτυα, μέσω τεχνολογιών όπως το OFDMA και το MU-MIMO, που επιτρέπουν την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών, μειώνοντας το Latency και αυξάνοντας το συνολικό Goodput [1 , 2].

Το πρωτόκολλο IEEE 802.11ax ενσωματώνει επίσης μηχανισμούς δυναμικής διαχείρισης πόρων — όπως η κατανομή φάσματος μέσω Resource Units (RUs), η προσαρμογή του modulation & coding scheme (MCS), και η βελτιστοποίηση των χρονικών περιθωρίων (Guard Intervals) — γεγονός που το καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο για σύνθετα, πολυχρηστικά περιβάλλοντα [3 , 4]. Οι παραπάνω μηχανισμοί αναλύονται στο Κεφάλαιο 2, όπου παρουσιάζονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου IEEE 802.11ax .

1.2 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αξιολόγηση της απόδοσης του πρωτοκόλλου IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) σε πυκνά ασύρματα δίκτυα με χρήση Uplink OFDMA, μέσω τριών ευρέως γνωστών αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης (MaxRate, SRTF, Proportional Fairness), καθώς και η ανάπτυξη ενός υβριδικού (Hybrid) αλγορίθμου, με στόχο τη βελτίωση της αποδοτικότητας σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς αλγορίθμους.

Η αξιολόγηση βασίζεται κυρίως στις μετρικές Goodput και Latency, ενώ παράλληλα εξετάζεται και η υπολογιστική πολυπλοκότητα κάθε αλγορίθμου, με βάση την κατανάλωση CPU clocks και μνήμης. Μέσω αυτής της προσέγγισης επιχειρείται η εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς τον αλγόριθμο που επιτυγχάνει τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ απόδοσης και κόστους.

Η εργασία φιλοδοξεί να καλύψει ένα υπαρκτό ερευνητικό κενό, αναφορικά με την επίδραση διαφορετικών στρατηγικών χρονοδρομολόγησης και παραμέτρων στην απόδοση του Uplink σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας, υπό ρεαλιστικές συνθήκες προσομοίωσης.

1.3 Σχετικές δουλειές

Η εισαγωγή της τεχνολογίας OFDMA στο πρωτόκολλο IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) άλλαξε ριζικά τη διαχείριση των πόρων στα ασύρματα τοπικά δίκτυα. Η ικανότητα κατανομής του φάσματος σε πολλούς χρήστες με παράλληλη χρήση του καναλιού, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της καθυστέρησης και αύξηση της αποδοτικότητας. Ωστόσο, το ίδιο το πρωτόκολλο δεν καθορίζει συγκεκριμένο αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης, γεγονός που αφήνει ανοιχτό ερευνητικό χώρο για την ανάπτυξη αποδοτικών scheduler.

Στην εργασία των Bankov, Didenko, Khorov, Loginov και A. Lyakhov [4 , 6] παρουσιάζεται ο αλγόριθμος MUTAX, ο οποίος έχει στόχο τη μείωση της καθυστέρησης στις uplink μεταδόσεις μέσω κατανομής των πόρων. Η ομάδα αναλύει

γιατί τα κλασικά LTE-based schedulers δεν αποδίδουν στο Wi-Fi 6, εξαιτίας των διαφορών στο MAC layer, και προτείνει νέες, προσαρμοσμένες λύσεις.

Μια ιδιαίτερη κατηγορία schedulers βασισμένων σε γραφικούς αλγόριθμους και βελτιστοποίηση προτείνεται από τους Wang και Psounis [8]. Οι συγγραφείς αναπτύσσουν αλγόριθμους με greedy και recursive συμπεριφορά για την κατανομή των χρηστών στα RUs, εστιάζοντας στην απλότητα υλοποίησης και υπολογιστικού κόστους.

Η μελέτη [9] προτείνει έναν αλγόριθμο βασισμένο σε γραμμικό προγραμματισμό, με στόχο τη μέγιστη αξιοποίηση του εύρους ζώνης. Το σχήμα αξιολογείται μέσω του ns-3 και αποδεικνύεται αποτελεσματικό, ειδικά σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας.

Η πρόσφατη εργασία των Dovelos & Bellalta [11] προσφέρει μια πιο μαθηματικά θεμελιωμένη προσέγγιση, χρησιμοποιώντας Lyapunov optimization για να διαχειριστεί ταυτόχρονα περιορισμούς ισχύος και ελάχιστων ρυθμών μετάδοσης. Η πολιτική κατανομής που προκύπτει εφαρμόζεται στο uplink και συνοδεύεται από αποδείξεις εγγυημένης απόδοσης κοντά στο βέλτιστο. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιβάλλοντα όπου τα STAs έχουν αυστηρούς περιορισμούς κατανάλωσης, όπως σε IoT εφαρμογές.

Η εργασία [12] επικεντρώνεται στην υποστήριξη real-time εφαρμογών (RTA) στο uplink, με την ανάπτυξη του Cyclic Resource Assignment (CRA) algorithm, ο οποίος συνδυάζει deterministic και random access με στόχο να επιτύχει καθυστέρηση κάτω του 1ms για 99.999% των πακέτων.

Σε πιο βιομηχανικά περιβάλλοντα, οι εργασίες [13, 14, 15] παρουσιάζουν πειραματικά αποτελέσματα από τη χρήση Wi-Fi 6 σε σενάρια πολυσυνδεσιμότητας και IIoT. Τα ευρήματα υποδεικνύουν ότι το scheduling είναι σημαντικός παράγοντας όταν απαιτείται χαμηλή καθυστέρηση και Quality of Service (QoS).

1.4 Περιεχόμενο Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι οργανωμένη σε οκτώ κεφάλαια, με στόχο τη σταδιακή ανάπτυξη των βασικών εννοιών, της υλοποίησης και της αξιολόγησης της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

Στο Κεφάλαιο 1, πραγματοποιείται η εισαγωγή στο αντικείμενο της εργασίας, προσδιορίζεται ο σκοπός της διπλωματικής και αναφέρονται σχετικές εργασίες.

Στο Κεφάλαιο 2, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο, περιλαμβάνοντας ιστορική αναδρομή των πρωτοκόλλων και αναλυτική περιγραφή των καινοτόμων τεχνολογιών του πρωτοτύπου IEEE 802.11ax.

Στο Κεφάλαιο 3, περιγράφονται οι αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης που αναπτύχθηκαν και υλοποιήθηκαν, συγκεκριμένα οι Max Rate, SRTF, PF και Hybrid, αναλύοντας τον τρόπο λειτουργίας και τα κριτήρια λήψης αποφάσεων κάθε αλγορίθμου.

Στο Κεφάλαιο 4, αναλύονται τα πειραματικά σενάρια και οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των αλγορίθμων, με στόχο τη δημιουργία ενός ελεγχόμενου και ρεαλιστικού πλαισίου δοκιμών.

Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της Απόδοσης των αλγορίθμων σε Goodput και Latency, μέσω γραφικών παραστάσεων, καλύπτοντας διάφορα σενάρια κινητικότητας, ροής δεδομένων και άλλων παραμέτρων.

Στο Κεφάλαιο 6, ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της υπολογιστικής πολυπλοκότητας των αλγορίθμων, εξετάζοντας τις μετρικές CPU Clocks και Μνήμης σε Continuous Traffic.

Στο Κεφάλαιο 7, πραγματοποιείται μία συνολική ανάλυση των αποτελεσμάτων και εξάγονται βασικά συμπεράσματα τόσο για την απόδοση όσο και για την πολυπλοκότητα των αλγορίθμων.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 8, γίνεται η σύνοψη της εργασίας και προτείνονται ιδέες για μελλοντική εργασία.

Κεφάλαιο 2

Υπόβαθρο

2.1 Ιστορική Αναδρομή

2.2 Κύριες Καινοτομίες του 802.11ax

2.2.1 Τεχνολογία OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)

2.2.2 Resource Units (RUs)

2.2.3 Διάρκεια Συμβόλων και Χρονικά Διαστήματα Προστασίας(Guard Intervals)

2.2.4 Τεχνικές Διαμόρφωσης (MCS)

2.2.5 Διαδικασία Downlink στο Wi-Fi 6

2.2.5 Διαδικασία Uplink στο Wi-Fi 6

2.2.7 MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output)

2.2.8 Spatial Reuse & BBS Coloring

2.2.9 Target Wake Time (TWT)

2.3 Σύνοψη Πρωτοκόλλου 802.11ax

2.1 Ιστορική Αναδρομή

Η τεχνολογία Wi-Fi αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι των σύγχρονων ασύρματων επικοινωνιών, με συνεχή εξέλιξη τόσο σε επίπεδο ταχυτήτων όσο και σε δυνατότητα εξυπηρέτησης πολλαπλών χρηστών. Η πορεία της, από τα πρώτα πρωτόκολλα μέχρι και τις πιο πρόσφατες εκδόσεις, αντικατοπτρίζει την ανάγκη για πιο αποδοτικά, ευέλικτα και αξιόπιστα δίκτυα, ικανά να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις εφαρμογών υψηλής πυκνότητας και κίνησης.

Η απαρχή του Wi-Fi εντοπίζεται το 1997, με την εισαγωγή του προτύπου IEEE 802.11, το οποίο προσέφερε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 2 Mbps στη ζώνη των 2.4 GHz [16 , 17]. Ακολούθησε το 1999 το πρωτόκολλο 802.11b, το οποίο αύξησε την ταχύτητα στα 11 Mbps, καθιστώντας το Wi-Fi ελκυστική επιλογή για ευρεία

υιοθέτηση από το καταναλωτικό κοινό [18]. Την ίδια χρονιά παρουσιάστηκε και το 802.11a, προσφέροντας ταχύτητες έως 54 Mbps στη συχνότητα των 5 GHz, ενισχύοντας την απόδοση σε περιβάλλοντα με παρεμβολές [19].

Το 2003, το πρωτόκολλο 802.11g συνδύασε τη συμβατότητα του 802.11b με την ταχύτητα του 802.11a, επιτυγχάνοντας 54 Mbps στη ζώνη των 2.4 GHz [20]. Το 2009, το 802.11n εισήγαγε την τεχνολογία MIMO (Multiple Input, Multiple Output), επιτρέποντας ταχύτητες έως 600 Mbps και λειτουργία τόσο στις συχνότητες των 2.4 GHz όσο και των 5 GHz [21]. Αυτό οδήγησε σε σημαντική ενίσχυση της εμβέλειας και αξιοπιστίας των Wi-Fi δικτύων.

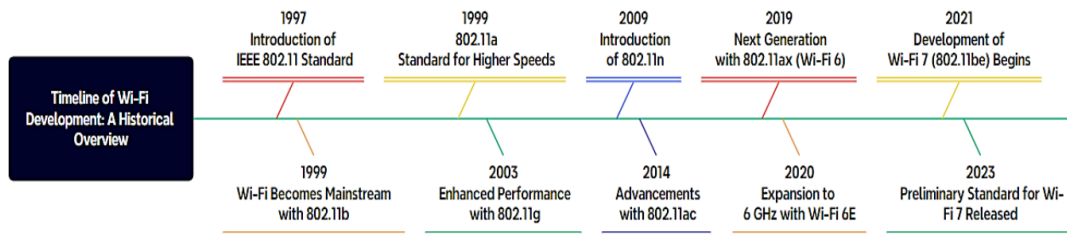
Το Wi-Fi 5 (802.11ac) παρουσιάστηκε το 2014 και εκμεταλλεύτηκε πλήρως τη ζώνη των 5 GHz για την επίτευξη ταχυτήτων άνω του 1 Gbps, προσφέροντας παράλληλα ευρύτερη συμβατότητα με πλήθος συσκευών – κρίσιμο χαρακτηριστικό για το αναδυόμενο οικοσύστημα του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) [22 , 23].

Η πιο πρόσφατη μεγάλη εξέλιξη είναι το Wi-Fi 6 (802.11ax), που παρουσιάστηκε στις αρχές του 2019 και στόχευσε στη βελτιστοποίηση της απόδοσης σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας [24]. Με την εισαγωγή τεχνολογιών όπως το OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) και το MU-MIMO (Multi-User MIMO), το πρωτόκολλο αυτό εστιάζει στην καλύτερη εκμετάλλευση του εύρους ζώνης και στη δυνατότητα εξυπηρέτησης πολλών ταυτόχρονων χρηστών με υψηλή απόδοση και χαμηλή καθυστέρηση σε σύγκριση με τα παλαιότερα πρωτόκολλα που ήταν αποκλειστικά για Single-User [25, 26].

Η επέκταση του Wi-Fi συνεχίστηκε με την εμφάνιση του Wi-Fi 6E, το οποίο ανακοινώθηκε το 2020 και εισήγαγε τη χρήση του φάσματος των 6 GHz, προσφέροντας σημαντικό επιπλέον εύρος ζώνης και συμβάλλοντας στην αποσυμφόρηση και ενίσχυση της απόδοσης των δικτύων [27].

Το Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be), του οποίου τα πρώτα τεχνικά χαρακτηριστικά καθορίστηκαν το 2021, αναμένεται να φέρει ταχύτητες έως και 46 Gbps και υποστήριξη πολλαπλών ζωνών λειτουργίας (2.4, 5 και 6 GHz). Περιλαμβάνει

προηγμένα χαρακτηριστικά όπως multilink operation και 4096-QAM, ενώ οι προκαταρκτικές προδιαγραφές δημοσιεύθηκαν το 2023 όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 1, με την πλήρη πιστοποίηση να αναμένεται μέσα στο 2024 [28 , 29], ωστόσο κάτι τέτοιο δεν έχει γίνει μέχρι σήμερα καθώς επίσης δεν είναι και τόσο διαδεδομένο.



Εικ.1. Το χρονοδιάγραμμα της εξέλιξης της τεχνολογίας Wi-Fi μέσα στο πέρασμα του χρόνου [29].

Η ιστορική αναδρομή που προηγήθηκε αναδεικνύει πώς η κάθε γενιά Wi-Fi έθεσε τις βάσεις για τις σημερινές τεχνολογικές απαιτήσεις.

2.2 Κύριες καινοτομίες του πρωτοκόλλου 802.11ax

Το πρωτόκολλο IEEE 802.11ax, γνωστό και ως Wi-Fi 6, αποτελεί την έκτη γενιά τεχνολογίας Wi-Fi και έχει σχεδιαστεί με στόχο τη βελτιστοποίηση της συνολικής αποδοτικότητας του δικτύου, ακόμα και σε περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα χρηστών και απαιτητικές εφαρμογές. Για την επίτευξη αυτών των στόχων, εισάγει μια σειρά από καινοτόμες τεχνολογίες, οι οποίες αναλύονται στα επόμενα υποκεφάλαια.

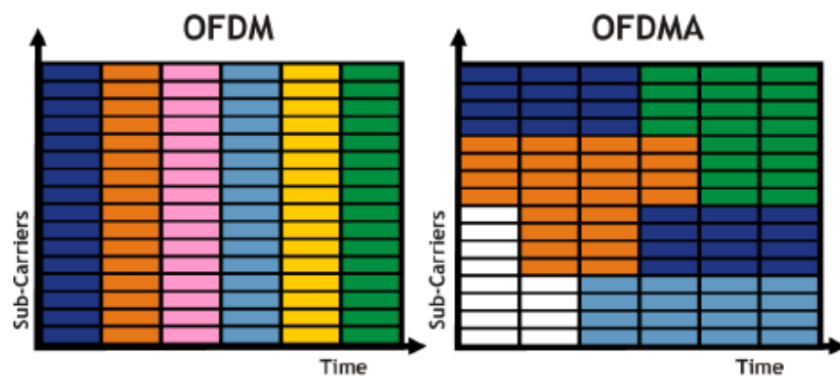
2.2.1 Τεχνολογία OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)

Το OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) αποτελεί μία από τις βασικές τεχνολογικές καινοτομίες που εισήγαγε το πρωτόκολλο 802.11ax, επεκτείνοντας την τεχνολογία OFDM των προηγούμενων εκδόσεων [40].

Ένα σημαντικό μειονέκτημα του κλασικού OFDM που υπήρχε στο προηγούμενο πρωτόκολλο 802.11ac γνωστό και ως Wi-fi 5, ήταν το γεγονός ότι για κάθε μετάδοση, το σύνολο του καναλιού δεσμευόταν από έναν μόνο χρήστη όπως φαίνεται στην

Εικόνα 2, ενώ υπήρχε και υψηλό overhead ανταγωνισμού για την πρόσβαση στο μέσο, το οποίο επηρέαζε ιδιαίτερα την απόδοση όταν μεταδίδονταν μικρού μεγέθους πακέτα [2] .

Με την εισαγωγή του OFDMA, καθίσταται δυνατή η ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών εντός του ίδιου καναλιού, γεγονός που οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της φασματικής αποδοτικότητας. Η τεχνολογία αυτή αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματική σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας χρηστών και σε εφαρμογές που χαρακτηρίζονται από τη μετάδοση μικρού μεγέθους πακέτων δεδομένων [2].



Εικ.2. Σύγκριση μεταξύ Wi-Fi 5 και Wi-Fi 6 ως προς συχνότητα με τον χρόνο. Κάθε χρώμα αντιπροσωπεύει μία ροή δεδομένων χρήστη. Σε μια δεδομένη χρονική περίοδο, το OFDMA επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται το διαθέσιμο εύρος ζώνης [31] .

Συνολικά, το OFDMA αποτελεί κρίσιμο μηχανισμό για την αποδοτική κατανομή πόρων στο Wi-Fi 6, επιτρέποντας στο δίκτυο να προσαρμόζεται καλύτερα σε πραγματικές συνθήκες συμφόρησης, να μειώνει την καθυστέρηση και να αυξάνει τη συνολική χωρητικότητα του καναλιού.

2.2.2 Resource Units (RUs)

Για την αποτελεσματικότερη διαχείριση του διαθέσιμου φάσματος και την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών στο ίδιο κανάλι, το πρωτόκολλο Wi-Fi 6 εισήγαγε την έννοια των Resource Units (RUs). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στην τεχνολογία OFDMA, το συνολικό εύρος ζώνης ενός καναλιού δεν χρησιμοποιείται πλέον ως ενιαίο φασματικό σύνολο από έναν μόνο χρήστη. Αντίθετα, υπόκειται σε

κατακερματισμό, δηλαδή σε διαχωρισμό του καναλιού σε μικρότερα, ανεξάρτητα φασματικά τμήματα, τα οποία ονομάζονται Resource Units (RUs). Τα RUs αποτελούν τη βασική μονάδα φασματικού πόρου που μπορεί να εκχωρηθεί σε μία ή περισσότερες συσκευές για τη μετάδοση ή λήψη δεδομένων [6 , 10].

Κάθε RU αποτελείται από μία ομάδα υπο-φορέων (subcarriers ή tones), δηλαδή στενές ζώνες συχνοτήτων μέσα στο κανάλι. Οι subcarriers είναι σχεδιασμένοι ώστε να είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους, για να μην παρεμβάλλεται ο ένας στον άλλο κατά την ταυτόχρονη μετάδοση. Ο κατακερματισμός του καναλιού σε RUs μέσω αυτών των subcarriers επιτρέπει σε πολλαπλούς χρήστες να μεταδίδουν ταυτόχρονα, ο καθένας μέσω διαφορετικού RU στο ίδιο κανάλι [30].

Η φασματική κατανομή στο OFDMA επιτυγχάνεται μέσω αυτής της δομημένης διαίρεσης του καναλιού, με τα RUs να λειτουργούν ως ανεξάρτητα φασματικά Blocks, προσφέροντας ευελιξία στην κατανομή πόρων. Αυτή η δυνατότητα αποτελεί μία από τις βασικές τεχνολογικές βελτιώσεις του Wi-Fi 6 σε σχέση με τις προηγούμενες εκδόσεις του πρωτοκόλλου, καθώς επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της φασματικής απόδοσης και τη μείωση της καθυστέρησης, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας χρηστών [7 , 30].

Η χρονική διάρκεια που διαθέτει ένας χρήστης για μετάδοση μέσα σε ένα RU ονομάζεται TXOP (Transmission Opportunity). Ένα TXOP είναι αρκετά μεγάλο ώστε να επιτρέψει την αποστολή ενός ή περισσότερων πακέτων, καθώς και την παραλαβή των αντίστοιχων επιβεβαιώσεων (ACKs). Οι RUs που χρησιμοποιούνται από διαφορετικούς χρήστες δεν επιτρέπεται να επικαλύπτονται, ώστε να αποφεύγονται παρεμβολές [30].

Το μέγεθος ενός Resource Unit (RU) καθορίζεται από τον αριθμό των subcarriers που το αποτελούν. Στο πρωτόκολλο IEEE 802.11ax, τα επιτρεπόμενα μεγέθη RUs είναι: 26, 52, 106, 242, 484, 996 και 2×996 subcarriers [32]. Ο αριθμός και ο τύπος των διαθέσιμων RUs εξαρτάται άμεσα από το πλάτος καναλιού που χρησιμοποιείται (π.χ. 20, 40, 80 ή 160 MHz).

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στον Πίνακα 1, όσο αυξάνεται το εύρος του καναλιού, τόσο αυξάνεται και η δυνατότητα κατακερματισμού του σε μικρότερα RUs. Αυτό συνεπάγεται με μεγαλύτερη ευελιξία στην ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών, καθώς επιτρέπεται η εκχώρηση περισσότερων RUs σε διαφορετικές συσκευές [32].

MAXIMUM NUMBER OF RUs FOR EACH CHANNEL WIDTH

<i>RU type</i>	<i>20 MHz</i>	<i>40 MHz</i>	<i>80 MHz</i>	<i>160 MHz / 80 MHz + 80 MHz</i>
26-tone	9	18	37	74
52-tone	4	8	16	32
106-tone	2	4	8	16
242-tone	1	2	4	8
484-tone	N/A	1	2	4
996-tone	N/A	N/A	1	2
2x996-tone	N/A	N/A	N/A	1

Πίνακας.1. Μέγιστος αριθμός Resource Units (RUs) ανά εύρος καναλιού [32].

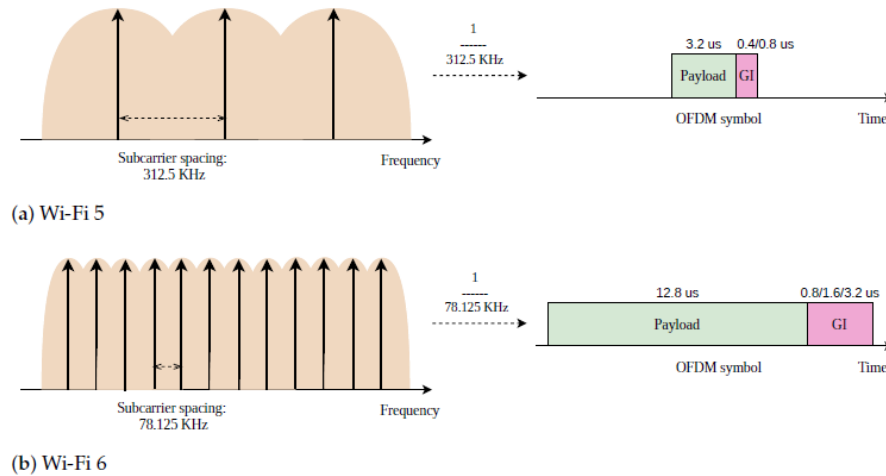
Η ανάλυση αυτή αποδεικνύει ότι το Wi-Fi 6 προσφέρει ένα εξαιρετικά παραμετροποιήσιμο φάσμα το οποίο επιτρέπει δυναμική κατανομή πόρων ανάλογα με τις ανάγκες των χρηστών και τις συνθήκες του δικτύου, γεγονός που είναι κομβικής σημασίας για τη διαχείριση της κυκλοφορίας σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας.

2.2.3 Διάρκεια Συμβόλων και Χρονικά Διαστήματα Προστασίας (Guard Intervals)

Η μετάβαση από το Wi-Fi 5 στο Wi-Fi 6 συνοδεύτηκε από σημαντικές αλλαγές στο φυσικό επίπεδο (PHY), κυρίως όσον αφορά τη διαχείριση του εύρους συχνοτήτων και τη διάρκεια των συμβόλων. Στο πρωτόκολλο 802.11ax, η απόσταση μεταξύ υποφορέων (subcarrier spacing) μειώθηκε τέσσερις φορές – από 312,5 kHz σε 78,125 kHz, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3 [30].

Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την τετραπλάσια αύξηση στη διάρκεια των OFDM συμβόλων, δηλαδή των βασικών μονάδων που μεταφέρουν τα δεδομένα στο φάσμα μετάδοσης. Κάθε σύμβολο αποτελεί ένα χρονικό πλαίσιο μετάδοσης πληροφορίας, του

οποίου ο ρόλος αναλύεται εκτενέστερα στο Υπο-υποκεφάλαιο 2.2.4. Η διάρκεια ενός τέτοιου συμβόλου αυξήθηκε από 3,2 μs σε 12,8 μs , γεγονός που βελτιώνει την ανοχή σε παρεμβολές λόγω multipath διάδοσης [32].



Εικ.3. Σύγκριση μεταξύ Wi-Fi 5 και Wi-Fi 6 ως προς την απόσταση μεταξύ subcarriers και τη διάρκεια συμβόλων OFDM [30] .

Για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ διαδοχικών συμβόλων, εισάγεται ένα χρονικό διάστημα προστασίας (Guard Interval – GI) μετά από κάθε σύμβολο. Το GI χρησιμεύει για να διατηρείται η ορθογωνιότητα μεταξύ των υποφορέων, αποφεύγοντας φαινόμενα παρεμβολής. Επίσης τα μεγαλύτερα GI επιτρέπουν υψηλότερη ανοχή σε multipath και φαινόμενα ασυγχρονίας, ιδίως κατά την Uplink OFDMA διαδικασία, όπου πολλοί χρήστες στέλνουν ταυτόχρονα δεδομένα στο σημείο πρόσβασης [35].

Το Wi-Fi 6 παρέχει τρεις επιλογές Guard Intervals ,η πρώτη επιλογή είναι 0,8 μs για περιβάλλοντα με μικρή καθυστέρηση διάδοσης, η δεύτερη επιλογή είναι 1,6 μs για μέτρια περιβάλλοντα και τελευταία επιλογή είναι 3,2 μs για ιδιαίτερα περίπλοκες συνθήκες [34].

2.2.4 Τεχνικές Διαμόρφωσης MCS

Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων καθορίζεται από το Modulation and Coding Scheme (MCS). Κάθε MCS ορίζει πόσα Bits μεταφέρονται ανά σύμβολο. Η επιλογή του κατάλληλου MCS επηρεάζει άμεσα τόσο τον ρυθμό μετάδοσης όσο και την αξιοπιστία της επικοινωνίας.

Στο Wi-Fi 6 υποστηρίζονται οι τεχνικές διαμόρφωσης BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM και 256-QAM, όπως και μία νέα τεχνική διαμόρφωσης, η 1024-QAM, η οποία επιτρέπει τη μετάδοση 10 bits ανά σύμβολο. Σε σύγκριση με το Wi-Fi 5, η 1024-QAM αυξάνει θεωρητικά τον ρυθμό μετάδοσης κατά περίπου 25% [30].

Η διαμόρφωση 1024-QAM υποστηρίζεται μέσω των νέων MCS επιπέδων 10 και 11, τα οποία αντιστοιχούν σε Coding Rates $3/4$ και $5/6$ αντίστοιχα, δηλαδή στα 4 bits που μεταδίδονται τα 3 είναι πραγματικά δεδομένα και το 1 bit είναι για διόρθωση λαθών (για $3/4$ coding rate) μέσω της FEC (Forward Error Correction) τεχνικής, άρα όσο μικρότερο Coding rate έχουμε τόσο μικρότερη ανοχή σε σφάλματα υπάρχει, γιατί χρησιμοποιούνται περισσότερα bits για προστασία. Σε ιδανικές συνθήκες, η χρήση αυτής της διαμόρφωσης μπορεί να οδηγήσει σε συνολικό θεωρητικό ρυθμό μετάδοσης έως και 9.6 Gbps [30].

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει την απόδοση κάθε επιπέδου MCS (0–11) σε σχέση με το μέγεθος του Resource Unit (RU) που χρησιμοποιείται. Είναι εμφανές ότι όσο αυξάνεται το μέγεθος του RU, αυξάνεται και η ικανότητα μεταφοράς δεδομένων. Για παράδειγμα, στο MCS 9 (256-QAM, $5/6$), ένα RU 996 τόνων μπορεί να προσφέρει ρυθμό έως και 453.7 Mbps, ενώ το αντίστοιχο για ένα RU 242 τόνων είναι 121.9 Mbps. Αντίστοιχα, μικρότερα RUs, όπως αυτά των 26 ή 52 τόνων, περιορίζουν τον ρυθμό μετάδοσης ακόμα και στο ίδιο MCS επίπεδο. Ενδεικτικά, για το MCS 7 (64-QAM, $5/6$), ένα RU 26 τόνων αποδίδει 8.3 Mbps, ενώ ένα RU 484 τόνων φτάνει τα 162.7 Mbps [6].

	MCS	26-tone	52-tone	106-tone	242-tone	484-tone	996-tone
1	BPSK, 1/2	0.8	1.7	3.5	8.1	16.3	34
2	QPSK, 1/2	1.7	3.3	7.1	16.3	32.5	68.1
3	QPSK, 3/4	2.5	5	10.6	24.4	48.8	102.1
4	16-QAM, 1/2	3.3	6.7	14.2	32.5	65	136.1
5	16-QAM, 3/4	5	10	21.3	48.8	97.5	204.2
6	64-QAM, 2/3	6.7	13.3	28.3	65	130	272.2
7	64-QAM, 3/4	7.5	15	31.9	73.1	146.3	306.3
8	64-QAM, 5/6	8.3	16.7	35.4	81.3	162.5	340.3
9	256-QAM, 3/4	10	20	42.5	97.5	195	408.3
10	256-QAM, 5/6	11.1	22.2	47.2	108.3	216.7	453.7
11	1024-QAM, 3/4	–	–	–	121.9	243.8	510.4
12	1024-QAM, 5/6	–	–	–	135.4	270.8	576.1

Πίνακας.2. Ρυθμός μετάδοσης (Mbps) ανά RU και επίπεδο MCS [6].

Αξιοσημείωτο είναι ότι το πρωτόκολλο απαγορεύει τη χρήση της 1024-QAM σε μικρού μεγέθους RUs, όπως τα 26, 52 και 106-tone RUs. Ο περιορισμός αυτός υφίσταται λόγω του ότι η πολύ υψηλή πυκνότητα πληροφορίας της 1024-QAM απαιτεί σταθερό και καθαρό κανάλι για να είναι αποδοτική, κάτι που δεν μπορεί να διασφαλιστεί σε περιορισμένο φάσμα. Επομένως, η 1024-QAM χρησιμοποιείται μόνο σε μεγαλύτερα RUs (242 tones και άνω), ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα λαθών[6].

2.2.5 Διαδικασία Downlink στο Wi-Fi 6

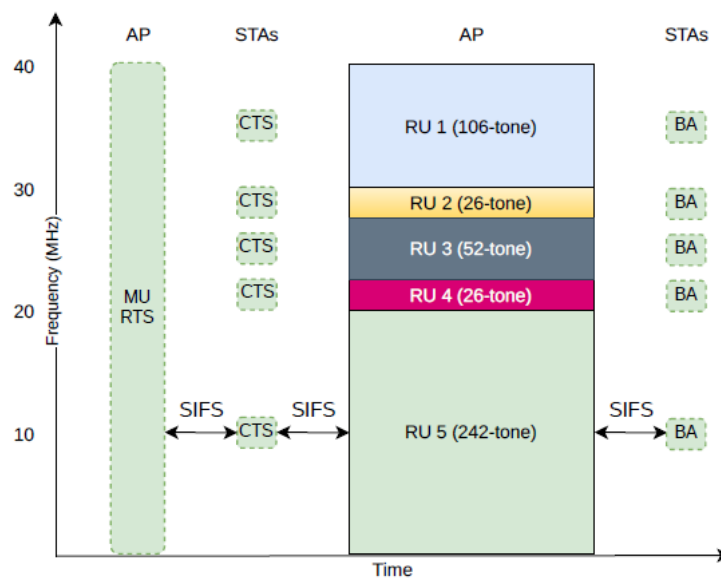
Η λειτουργία Downlink μετάδοσης μέσω της τεχνολογίας OFDMA, προσφέρει τη δυνατότητα ταυτόχρονης μετάδοσης δεδομένων προς πολλούς χρήστες (STAs) μέσα από διαφορετικά Resource Units (RUs) εντός του ίδιου καναλιού. Η διαδικασία αυτή είναι συνολικά πιο απλή και αποδοτική σε σχέση με την Uplink, που θα αναλυθεί στο αμέσως επόμενο Υπο-υποκεφάλαιο το 2.2.4, καθώς το σημείο πρόσβασης (Access Point – AP) έχει τον πλήρη έλεγχο τόσο των δεδομένων που πρέπει να αποσταλούν όσο και της κατανομής των διαθέσιμων πόρων.

Αρχικά, το AP προγραμματίζει την ανάθεση των RUs στους σταθμούς παραλήπτες για την επερχόμενη περίοδο μετάδοσης (TXOP), βάσει των δεδομένων που έχει προς αποστολή. Στη συνέχεια, αποστέλλει ένα πλαίσιο Multi-User Request to Send (MU-RTS) προς όλους τους εμπλεκόμενους σταθμούς. Οι σταθμοί αυτοί απαντούν με πλαίσια Clear to Send (CTS), μέσω των RUs που τους έχουν ήδη αποδοθεί από το AP.

Κατόπιν, το AP προχωρά στη μετάδοση των δεδομένων, τα οποία αποστέλλονται ταυτόχρονα προς όλους τους σταθμούς μέσω των αντίστοιχα προγραμματισμένων RUs. Η μετάδοση αυτή είναι πλήρως συγχρονισμένη και μπορεί να περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα πακέτα για κάθε σταθμό, ανάλογα με τις ανάγκες. Η ταυτόχρονη αξιοποίηση του καναλιού από πολλούς παραλήπτες αποτελεί έναν από τους βασικούς λόγους για την υψηλή αποδοτικότητα του Downlink OFDMA, ειδικά σε σενάρια με μεγάλο αριθμό συσκευών.

Όταν ολοκληρωθεί η μετάδοση, κάθε σταθμός επιβεβαιώνει την επιτυχή παραλαβή των δεδομένων αποστέλλοντας ένα Block Acknowledgment (BA) προς το AP. Η διαδικασία αυτή είναι ελαχιστοποιημένη ως προς τον αριθμό των απαιτούμενων ανταλλαγών σημάτων, καθιστώντας την αποτελεσματική, συγχρονισμένη και με μειωμένο overhead σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές Wi-Fi [30 , 6].

Η συνολική ροή της επικοινωνίας Downlink μέσω OFDMA στο Wi-Fi 6 απεικονίζεται στην **Εικόνα 4**, η οποία παρουσιάζει με γραφικό τρόπο όλα τα βήματα της διαδικασίας.



Εικ.4. Downlink διαδικασία μετάδοσης με την χρήση της τεχνολογίας OFDMA σε κανάλι 40MHz. [30].

2.2.6 Διαδικασία Uplink στο Wi-Fi 6

Η λειτουργία του Uplink OFDMA στο Wi-Fi 6 παρουσιάζει αυξημένη πολυπλοκότητα σε σχέση με το Downlink, καθώς απαιτείται το σημείο πρόσβασης (Access Point – AP) να αντλήσει πληροφορίες για τις απαιτήσεις των σταθμών (STAs) πριν προχωρήσει στη δέσμευση και εκχώρηση πόρων.

Για την υποστήριξη αυτής της διαδικασίας, το πρωτόκολλο εισάγει την έννοια της προγραμματισμένης πρόσβασης (Scheduled Access), η οποία ελαχιστοποιεί τις συγκρούσεις μεταξύ σταθμών, επιτρέποντας στο AP να επιλέξει ποιοι σταθμοί θα πάρουν πρόσβαση στο κανάλι και στην συνέχεια να χρησιμοποιήσει τον εκάστοτε αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης για να βελτιστοποιήσει την κατανομή των πόρων στους σταθμούς που έχουν ήδη επιλεγεί για μετάδοση.

Η διαδικασία ξεκινά όταν το AP αποστέλλει ένα Buffer Status Report Poll (BSRP), μέσω του οποίου καλεί τους σταθμούς να δηλώσουν αν διαθέτουν δεδομένα προς αποστολή. Οι σταθμοί που έχουν δεδομένα στο buffer τους έτοιμα για μετάδοση, απαντούν μέσω Buffer Status Reports (BSRs), τα οποία αποστέλλονται μέσα σε συγκεκριμένα Resource Units (RUs) που υποδεικνύονται από το BSRP. Η επιλογή RU από τον κάθε σταθμό γίνεται τυχαία, και επομένως ενδέχεται να προκύψουν συγκρούσεις σε περιπτώσεις που περισσότεροι του ενός σταθμού επιλέξουν το ίδιο RU, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5. Με βάση τις BSR πληροφορίες που συλλέγει, το AP αποκτά γνώση για τις ανάγκες των σταθμών με βάση τα δεδομένα που θέλουν να μεταδώσουν.

Ακολούθως, το Access Point (AP) αποστέλλει ένα πλαίσιο MU-RTS (Multi-User Request to Send) προς τους σταθμούς που έχουν επιλεγεί για μετάδοση. Κάθε σταθμός αποκρίνεται με πλαίσιο CTS (Clear to Send), μια διαδικασία που διασφαλίζει ότι το μέσο είναι ελεύθερο και έτοιμο για μετάδοση.

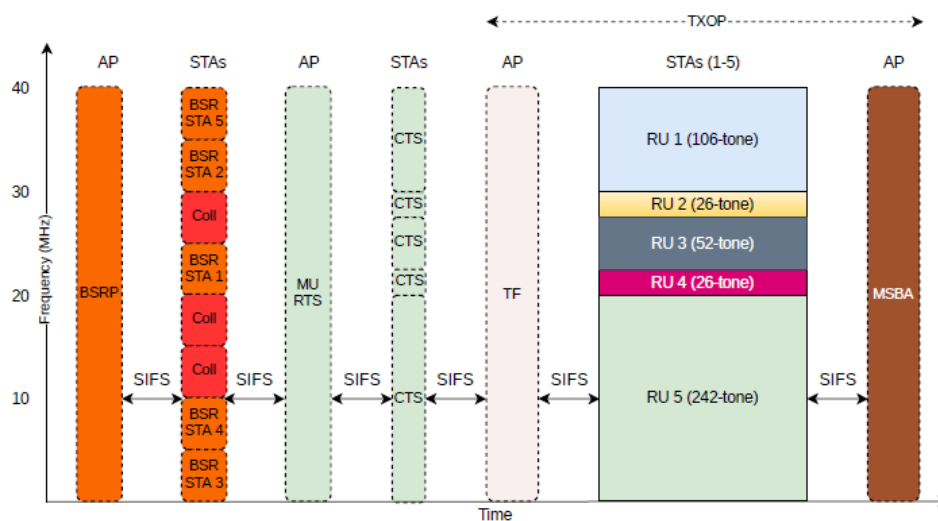
Στη συνέχεια, το Access Point (AP) αποστέλλει ένα Trigger Frame (TF), το οποίο περιλαμβάνει κρίσιμες πληροφορίες για την μετάδοση. Συγκεκριμένα, καθορίζεται η κατανομή των Resource Units (RUs) στους σταθμούς, με βάση τα αντίστοιχα Association IDs (AIDs), καθώς και οι βασικές παράμετροι της μετάδοσης, όπως το

Modulation and Coding Scheme (MCS), η μέθοδος Forward Error Correction (FEC) και η διάρκεια του Transmission Opportunity (TXOP).

Σε αυτό το σημείο επεμβαίνει ο αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τον υπολογισμό και τη λήψη των αποφάσεων σχετικά με την αποδοτική κατανομή των πόρων.

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό της όλης διαδικασίας είναι ότι, όλοι οι σταθμοί ξεκινούν και ολοκληρώνουν τη μετάδοση ταυτόχρονα, εντός του καθορισμένου χρονικού πλαισίου TXOP [4]. Αυτός ο συγχρονισμός εξασφαλίζεται από το Trigger Frame και είναι απαραίτητος για την αποδοτική χρήση του καναλιού και την αποφυγή παρεμβολών. Οι μεταδόσεις διαχωρίζονται από διαστήματα SIFS (Short Interframe Space) ώστε να διασφαλίζεται επιπλέον συγχρονισμός και να αποφεύγονται συγκρούσεις.

Μετά το πέρας του TXOP, το AP αποστέλλει μέσω OFDM ένα Multi-Station Block Acknowledgment (MSBA), το οποίο αξιοποιεί ολόκληρο το κανάλι και χρησιμοποιεί την κατώτερη δυνατή διαμόρφωση για να διασφαλιστεί ότι όλοι οι σταθμοί θα το λάβουν ανεξαρτήτως συνθηκών καναλιού. Το Multi-Station Block Acknowledgment (MSBA) περιλαμβάνει πληροφορίες για τα πλαίσια που παραλήφθηκαν επιτυχώς κατά τη διάρκεια της μετάδοσης. Όλη αυτή η διαδικασία αποτυπώνεται συνοπτικά στο διάγραμμα της Εικόνας 5 [30 , 10].



Εικ.5. Ροή διαδικασίας Uplink OFDMA [30] .

2.2.7 Τεχνολογία MU-MIMO (Multi User – Multiple Input Multiple Output)

Η τεχνολογία MU-MIMO είναι ένας βασικός μηχανισμός του προτύπου IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) και επιτρέπει την ταυτόχρονη επικοινωνία του Access Point (AP) με πολλούς σταθμούς, τόσο στην αποστολή (uplink) όσο και στη λήψη δεδομένων (downlink).

Σε αντίθεση με την προηγούμενη τεχνολογία SU-MIMO (Single User MIMO), όπου το AP μπορούσε να επικοινωνεί μόνο με έναν σταθμό τη φορά, το MU-MIMO αξιοποιεί τις πολλαπλές κεραίες που διαθέτει το AP για να στέλνει ή να λαμβάνει δεδομένα ταυτόχρονα από πολλούς σταθμούς. Αυτό γίνεται μέσω της τεχνικής spatial multiplexing (χωρική πολυπλεξία), η οποία επιτρέπει τη μετάδοση διαφορετικών ροών δεδομένων σε διαφορετικές «κατευθύνσεις». [37].

Στο downlink MU-MIMO, το AP μπορεί να στέλνει ξεχωριστά πακέτα δεδομένων σε διάφορους σταθμούς ταυτόχρονα. Στο Wi-Fi 6, η τεχνολογία αυτή έχει αναβαθμιστεί και υποστηρίζει έως και 8 χωρικές ροές (spatial streams). Αυτό σημαίνει ότι ένα AP με 8 κεραίες μπορεί, για παράδειγμα, να εξυπηρετεί 4 σταθμούς ταυτόχρονα, αν ο καθένας διαθέτει 2 κεραίες. Για να γίνει αυτό, το AP χρησιμοποιεί beamforming, δηλαδή "κατευθύνει" το σήμα του προς συγκεκριμένους σταθμούς, αντί να εκπέμπει παντού. Για να επιτευχθεί το beamforming, το AP χρειάζεται να γνωρίζει τα χαρακτηριστικά του ασύρματου καναλιού, κάτι που το μαθαίνει μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται channel sounding [27 , 37].

Η uplink MU-MIMO, δηλαδή η ταυτόχρονη αποστολή δεδομένων από πολλούς σταθμούς προς το AP, είναι μια νέα δυνατότητα που εισήχθη στο Wi-Fi 6. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για εφαρμογές που χρειάζονται υψηλό ρυθμό αποστολής δεδομένων, όπως το live streaming. Με αυτή την τεχνολογία, έως και 8 σταθμοί μπορούν να στέλνουν δεδομένα ταυτόχρονα χωρίς να προκαλούν παρεμβολές μεταξύ τους. Όπως και στο OFDMA, η διαδικασία αυτή συγχρονίζεται από το AP, το οποίο στέλνει ένα Trigger Frame (TF) για να ορίσει ποιοι σταθμοί θα μεταδώσουν και πότε. [27 , 38].

Παρόλο που η τεχνολογία MU-MIMO βελτιώνει σημαντικά την αποδοτικότητα του Wi-Fi 6, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται αποκλειστικά στον μηχανισμό OFDMA,

και ιδιαίτερα στη λειτουργία του στο uplink. Για αυτόν τον λόγο, το MU-MIMO παρουσιάζεται εδώ συνοπτικά, μόνο για να υποστηρίξει τη θεωρητική κατανόηση του συστήματος, χωρίς να αναλυθεί σε βάθος ή να αποτελέσει αντικείμενο πειραματικής μελέτης.

2.2.8 Spatial Reuse & BSS Coloring

Η τεχνολογία Spatial Reuse (SR) στοχεύει στη βελτιστοποίηση της φασματικής αποδοτικότητας σε περιβάλλοντα όπου πολλαπλά Basic Service Sets (BSSs) συνυπάρχουν και συχνά αλληλεπικαλύπτονται.

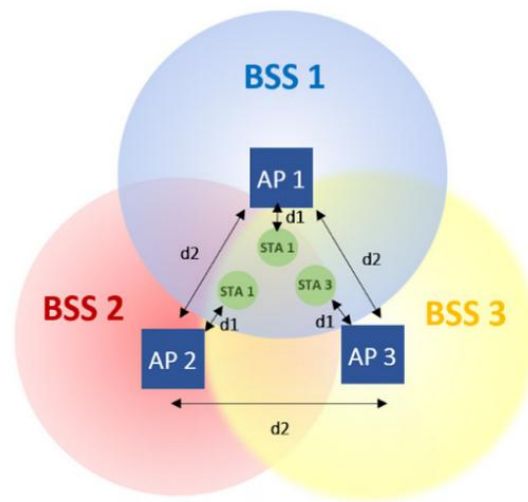
Ένα BSS αποτελείται από ένα σημείο πρόσβασης (Access Point) και όλους τους σταθμούς (devices) που είναι συνδεδεμένοι σε αυτό. Όλα τα μέλη ενός BSS χρησιμοποιούν τις ίδιες ρυθμίσεις όπως κανάλι, SSID (Service Set Identifier) και επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω του Access Point.

Η βασική ιδέα του SR είναι η ταυτόχρονη χρήση του ίδιου καναλιού από διαφορετικά BSSs, υπό την προϋπόθεση ότι δεν θα δημιουργηθούν παρεμβολές μεταξύ τους, ειδικά σε χώρους με πολλά BSSs, τα οποία ενδέχεται να επικαλύπτονται όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 6, δηλαδή να χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι και να βρίσκονται σε κοντινή απόσταση [39].

Σε προηγούμενες εκδόσεις του Wi-Fi, η δυνατότητα SR ήταν εξαιρετικά περιορισμένη. Όταν δύο BSSs λειτουργούσαν στην ίδια συχνότητα και εντός εμβέλειας μεταξύ τους, οι συσκευές υποχρεώνονταν να «σταματήσουν» μέχρι να ελευθερωθεί το μέσο, γεγονός που οδηγούσε σε σημαντικές καθυστερήσεις και χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης.

Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, το Wi-Fi 6 εισάγει νέους μηχανισμούς διαχείρισης παρεμβολών, με κεντρικό στοιχείο τη λειτουργία BSS Coloring. Με τη μέθοδο αυτή, κάθε BSS φέρει έναν μοναδικό color ID, επιτρέποντας στις συσκευές να διακρίνουν αν ένα σήμα προέρχεται από το δικό τους BSS ή από ένα άλλο γειτονικό. Εάν το σήμα ανήκει σε διαφορετικό BSS και η ισχύς του είναι κάτω από κάποιο

προκαθορισμένο όριο, τότε η συσκευή μπορεί να προχωρήσει σε ταυτόχρονη μετάδοση, αγνοώντας ουσιαστικά την παρουσία του άλλου BSS [30 , 39].



Εικ.6. Η τοπολογία του δικτύου με τρία σημεία πρόσβασης (APs) [39].

2.2.9 Target Wake Time (TWT)

Το Target Wake Time (TWT) αποτελεί μία σημαντική καινοτομία του πρωτοκόλλου στον τομέα της διαχείρισης ενέργειας. Εισάγει έναν μηχανισμό, ο οποίος επιτρέπει στους σταθμούς να ενεργοποιούνται και να απενεργοποιούνται σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα, αποφεύγοντας έτσι την ανάγκη συνεχούς ακρόασης του καναλιού. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδανική για συσκευές που δεν χρειάζεται να είναι ενεργές συνεχώς, όπως μικρό-αισθητήρες με περιορισμένους ενεργειακούς πόρους [2].

Ο βασικός στόχος του TWT είναι η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος, προσφέροντας στις συσκευές τη δυνατότητα να είναι απενεργοποιημένα για μεγάλα χρονικά διαστήματα και να ενεργοποιούνται μόνο όταν είναι απαραίτητο για μετάδοση ή λήψη δεδομένων. Έτσι, περιορίζεται σημαντικά η χρήση της μπαταρίας.

Το TWT διακρίνεται σε δύο βασικούς τύπους λειτουργίας: το Individual TWT, το οποίο προβλέπει εξατομικευμένες συμφωνίες αφύπνισης για κάθε σταθμό ξεχωριστά, και το

Broadcast TWT, στο οποίο το σημείο πρόσβασης (Access Point) καθορίζει κοινά χρονικά διαστήματα ενεργοποίησης για ομάδες συσκευών.

Και στις δύο περιπτώσεις, η διαδικασία βασίζεται στη δημιουργία συμφωνιών TWT (TWT agreements), μέσω των οποίων προσδιορίζονται κρίσιμες παράμετροι, όπως ο χρόνος έναρξης αφύπνισης (TWT Start Time), το χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών αφυπνίσεων (TWT Wake Interval), καθώς και η διάρκεια του χρονικού παραθύρου κατά το οποίο η συσκευή παραμένει ενεργή (TWT Wake Duration) [33].

Η τεχνολογία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε εφαρμογές Internet of Things (IoT) και άλλες καταστάσεις χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, όπου η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι κρίσιμος παράγοντας. Το TWT επιτρέπει την αξιόπιστη και αποδοτική λειτουργία ενός μεγάλου αριθμού συσκευών, χωρίς να απαιτείται συνεχής ενεργοποίηση [36].

2.3 Σύνοψη πρωτοκόλλου 802.11ax

Features	802.11n (Wi-Fi 4)	802.11ac (Wi-Fi 5)	802.11ax (Wi-Fi 6)
Frequency band (GHz)	2.4/5	5	2.4/5/6
PHY technology	OFDM	OFDM	OFDM, OFDMA
Channel width (MHz)	20/40	20/40/80/160	20/40/80/80+80/160
Resource Unit size (tones)	Full channel bandwidth	Full channel bandwidth	26, 52, 106, 242, 484, 996, 2*996
Max data subcarrier modulation	64-QAM	256-QAM	1024-QAM
Subcarrier spacing (KHz)	312.5	312.5	78.125
Symbol duration (μ s)	3.2	3.2	12.8
Guard interval (μ s)	0.4, 0.8	0.4, 0.8	0.8, 1.6, 3.2
MIMO technology	MIMO	MU MIMO: DL, 4 users	MU MIMO: UL & DL, 8 users
Power saving	PSM	PSM	TWT
Nominal data rate (Gb/s)	0.6	6.93	9.6

Πίνακας.3. Σύνοψη και σύγκριση πρωτοκόλλου 802.11ax με προηγούμενα πρωτόκολλα n & ac[30].

Κεφάλαιο 3

Σχεδιασμός και Υλοποίηση Αλγορίθμων Χρονοδρομολόγησης

3.1 Αλγόριθμοι

3.1.1 Αλγόριθμος Max Rate (MR)

3.1.2 Αλγόριθμος SRTF (Shortest Remaining Time First)

3.1.3 Αλγόριθμος PF (Proportional Fairness)

3.1.4 Αλγόριθμος Hybrid (Συνδυασμός Max Rate & SRTF)

3.1 Αλγόριθμοι

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τέσσερις αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης για το πρωτόκολλο IEEE 802.11ax, οι οποίοι υλοποιήθηκαν στον προσομοιωτή ns-3. Τρεις από αυτούς (MaxRate, Proportional Fairness και SRTF) είναι ευρέως γνωστοί, ενώ ο τέταρτος αποτελεί έναν νέο υβριδικό (Hybrid) αλγόριθμο, ο οποίος σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

Στόχος των αλγορίθμων είναι η βελτιστοποίηση της απόδοσης του uplink OFDMA σε περιβάλλοντα με πολλούς ταυτόχρονους χρήστες, μέσω αποτελεσματικής κατανομής των διαθέσιμων πόρων.

Κάθε αλγόριθμος συνοδεύεται από τον αντίστοιχο ψευδοκώδικα και αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας του, προκειμένου να αποτυπωθεί πλήρως η λογική πίσω από τις αποφάσεις του. Οι αλγόριθμοι αποτελούν τον βασικό κορμό του πειραματικού μέρους της εργασίας και συγκρίνονται ως προς την αποδοτικότητα, την καθυστέρηση, καθώς και την υπολογιστική πολυπλοκότητα, σε ρεαλιστικά σενάρια κυκλοφορίας δεδομένων.

3.1.1 Αλγόριθμος MR (Max Rate)

Ο αλγόριθμος Max Rate αποτελεί μία από τις πιο απλές και ευρέως χρησιμοποιούμενες στρατηγικές χρονοδρομολόγησης σε ασύρματα δίκτυα. Η βασική του αρχή είναι η ανάθεση κάθε διαθέσιμου πόρου (Resource Unit – RU) στον σταθμό (STA) που παρουσιάζει τη μέγιστη στιγμιαία ικανότητα μετάδοσης, δηλαδή τον υψηλότερο διαθέσιμο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (data rate). Αυτή η προσέγγιση επιδιώκει τη μέγιστη συνολική απόδοση του συστήματος (throughput maximization), εκμεταλλευόμενη πλήρως τις ευνοϊκές συνθήκες καναλιού. Ωστόσο, το Max Rate τείνει να ευνοεί σταθερά τους σταθμούς με καλό κανάλι, εις βάρος εκείνων που παρουσιάζουν χαμηλότερη ποιότητα σύνδεσης, γεγονός που οδηγεί σε μειωμένη δικαιοσύνη και πιθανή αδυναμία εξυπηρέτησης ορισμένων χρηστών σε μακροχρόνια βάση [4].

Αλγόριθμος 3.1.1: MR (Max Rate) [4]

Είσοδος:

- Λίστα σταθμών STA[i]

Βήματα:

1. Για κάθε σταθμό στη λίστα:
 - α. Υπολογισμός στιγμιαίου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων Data Rate [STA[i]].
 2. Ταξινόμησε τους σταθμούς κατά φθίνουσα σειρά
`sort_descending_stations_by_data_rate(Data Rate [])`.
 3. Επέλεξε τους πρώτους N σταθμούς με το υψηλότερο Data Rate.
 4. Ανάθεσε έναν διαθέσιμο Resource Unit (RU) σε κάθε επιλεγμένο σταθμό.
`assign_ru_to_stations(stations, available_rus)`
-

3.1.2 Αλγόριθμος SRTF (Shortest Remaining Time First)

Ο αλγόριθμος SRTF (Shortest Remaining Time First) εστιάζει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου ολοκλήρωσης των ροών δεδομένων, αποδίδοντας προτεραιότητα στις ροές που διαθέτουν το μικρότερο λόγο υπόλοιπο όγκο μετάδοσης προς ταχύτητα μετάδοσης. Στο πλαίσιο των Uplink μεταδόσεων στο Wi-Fi 6, αυτό σημαίνει ότι τα Resource Units ανατίθενται κατά προτεραιότητα σε σταθμούς των οποίων οι ουρές περιέχουν τα μικρότερα ποσά δεδομένων προς αποστολή. Η στρατηγική αυτή ενδείκνυται για εφαρμογές ευαίσθητες στη χρονική καθυστέρηση ή για την εξυπηρέτηση μικρών ροών ,όπως συμβαίνει σε πλήθος IoT περιπτώσεων [4].

Αλγόριθμος 3.1.2: SRTF (Shortest Remaining Time First) [4]

Είσοδος:

- Λίστα σταθμών STA[i]

1. Για κάθε σταθμό στη λίστα:

 α. Υπολογισμός $\text{Remaining_Data}[\text{station}] = \text{queue.size}(\text{station}) / \text{DataRate}(\text{station})$

2. Ταξινόμηση των σταθμών με αύξουσα σειρά

`sort_ascending_stations_by_remaining_data(Remaining_Data[])`

3. Επέλεξε τους N πρώτους σταθμούς από Remaining_Data[] (δηλαδή με τα λιγότερα δεδομένα) , όπου N είναι ο μέγιστος αριθμός διαθέσιμων RUs

4. Ανάθεσε έναν διαθέσιμο Resource Unit (RU) σε κάθε επιλεγμένο σταθμό.

`assign_ru_to_stations(stations, available_rus)`

3.1.3 Αλγόριθμος PF (Proportional Fairness)

Ο αλγόριθμος Proportional Fairness (PF) επιχειρεί να επιτύχει μια ισορροπία μεταξύ της συνολικής απόδοσης και της δικαιοσύνης στην κατανομή των πόρων. Η βασική του αρχή στηρίζεται στην αναλογία του στιγμιαίου ρυθμού μετάδοσης (data rate) του χρήστη προς τον μέσο ρυθμό που αυτός έχει λάβει στο παρελθόν (average throughput έως την χρονική στιγμή t). Έτσι, δίνεται προτεραιότητα σε σταθμούς που είτε έχουν καλό στιγμιαίο κανάλι είτε έχουν ιστορικά λάβει μικρότερο μέρος του συνολικού εύρους. Η προσέγγιση αυτή διασφαλίζει ότι κανένας χρήστης δεν αποκλείεται μακροχρόνια από την πρόσβαση στο δίκτυο, ενώ παράλληλα διατηρείται υψηλό συνολικό throughput [4].

Αλγόριθμος 3.1.3: PF (Proportional Fairness) [4]

Είσοδος:

- Λίστα σταθμών STA[i]

1. Για κάθε σταθμό:

α. Αν $\text{AvgThroughput} = 0$, τότε $\text{AvgThroughput} := \text{DataRate}$

β. Υπολογισμός δείκτη απόδοσης:

$$\text{PF-Metric}[\text{STA}[i]] = \text{DataRate}[\text{STA}[i]] / \text{AvgThroughput}[\text{STA}[i]]$$

2. Ταξινόμησε τους σταθμούς κατά φθίνουσα σειρά PF-Metric.

α. $\text{sort_descending_stations_by_data_rate}(\text{PF-Metric}[])$.

3. Επέλεξε τους N πρώτους σταθμούς από PF-Metric[], όπου N είναι ο μέγιστος αριθμός διαθέσιμων RUs

4. Ανάθεσε έναν διαθέσιμο Resource Unit (RU) σε κάθε επιλεγμένο σταθμό.

$\text{assign_ru_to_stations}(\text{stations}, \text{available_rus})$

5. Μετά τη μετάδοση, ενημέρωσε το AvgThroughput κάθε σταθμού με:

$$\text{STA}[i].\text{AvgThroughput} := \alpha * \text{DataRate} + (1-\alpha) * \text{STA}[i].\text{AvgThroughput} \text{ (με } \alpha=0.3)$$

3.1.4 Αλγόριθμος Hybrid

Ο Hybrid αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των MaxRate και SRTF αλγορίθμων. Πιο συγκεκριμένα, επιχειρεί να ισορροπήσει μεταξύ της επιδίωξης για μέγιστο άμεσο ρυθμό μετάδοσης και της μείωσης του συνολικού χρόνου εξυπηρέτησης των χρηστών. Η βασική αρχή του αλγορίθμου στηρίζεται στην επιλογή εκείνου του σταθμού που διαθέτει τον μικρότερο υπολειπόμενο χρόνο μετάδοσης και αφετέρου έχει υψηλό στιγμιαίο ρυθμό μετάδοσης, προσδίδοντας βάρη στις δύο αυτές μεταβλητές με βάρος $\alpha = 0.7$ για MaxRate και βάρος $\beta = 0.3$ για SRTF, ώστε να υπολογίζεται μια συνδυαστική τιμή προτεραιότητας για κάθε σταθμό με τον εξής τρόπο $Priority = \alpha * (Remaining\ Time) + \beta / Data\ Rate$.

Αλγόριθμος 3.1.4: Hybrid (Max Rate & SRTF) [4]

Είσοδος:

- Λίστα σταθμών STA[i]

1. Για κάθε σταθμό:

α. Υπολογισμός χρόνου ολοκλήρωσης μετάδοσης:

$$Remaining\ Time[STA[i]] = Remaining\ Data[STA[i]] / DataRate[STA[i]]$$

β. Υπολογισμός Hybrid metric:

$$Score[STA[i]] = \beta * Remaining\ Time[STA[i]] + \alpha / DataRate[STA[i]]$$

2. Ταξινόμηση τους σταθμούς κατά αύξουσα τιμή του Score.

sort_ascending_stations_by_Score(Score[])

3. Επέλεξε τους N πρώτους σταθμούς από PF-Metric[], όπου N είναι ο μέγιστος αριθμός διαθέσιμων RUs

4. Ανάθεσε έναν διαθέσιμο Resource Unit (RU) σε κάθε επιλεγμένο σταθμό.

assign_ru_to_stations(stations, available_rus)

Κεφάλαιο 4

Μεθοδολογία και Σενάρια

4.1 Μεθοδολογία

4.2 Σενάρια & Παράμετροι

4.1 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα μελέτη βασίζεται στη χρήση του προσομοιωτή ns-3 και στην αξιοποίηση των δυνατοτήτων του προτύπου IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6), με στόχο την αξιολόγηση της απόδοσης διαφορετικών αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης σε πυκνά ασύρματα δίκτυα.

Κάθε προσομοίωση εκτελέστηκε 10 φορές για τον ίδιο συνδυασμό παραμέτρων. Για κάθε περίπτωση, υπολογίστηκε ο συνολικός μέσος όρος των μετρήσεων.

Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε αρχεία .csv, τα οποία επεξεργάστηκαν μέσω Python scripts για την εξαγωγή των κρίσιμων μετρικών απόδοσης. Στη συνέχεια, παράχθηκαν γραφικές παραστάσεις, οι οποίες αξιοποιούνται στα επόμενα κεφάλαια για τη συγκριτική αξιολόγηση των αλγορίθμων.

4.2 Σενάρια & Παράμετροι

Το προσομοιωμένο δίκτυο αποτελείται από ένα σημείο πρόσβασης (Access Point - AP) και μεταβαλλόμενο αριθμό σταθμών (STAs): 5, 10, 15, 20 και 25, ώστε να εξεταστεί η απόδοση του συστήματος υπό διαφορετικά επίπεδα φόρτου.

Η επικοινωνία υλοποιείται αποκλειστικά μέσω Uplink OFDMA και του πρωτοκόλλου UDP, με τους σταθμούς να μεταδίδουν δεδομένα προς το AP. Για την ενεργοποίηση της επικοινωνίας και την ενημέρωση σχετικά με τα διαθέσιμα δεδομένα προς αποστολή του κάθε σταθμού, χρησιμοποιείται ο μηχανισμός Buffer Status Report Polling (BSRP). Επιπλέον το payload ανά πακέτο είναι σταθερό στα 1280 bytes. Κάθε σταθμός αποστέλλει έως και 10.000 πακέτα.

Η προσομοίωση εκτελείται στο φάσμα συχνοτήτων των 5 GHz, με εξεταζόμενα εύρη καναλιού: 20, 40, 80 και 160 MHz. Το φυσικό επίπεδο υλοποιείται μέσω του SpectrumWifiPhyHelper, ώστε να υποστηρίζεται η λειτουργία OFDMA, ενώ ο ρυθμός μετάδοσης ορίζεται μέσω του ConstantRateWifiManager, με σταθερές τιμές MCS από 0 έως 11. Επιπλέον, εξετάζονται δύο τιμές για το Guard Interval: 1600 ns και 3200 ns. Επίσης η απώλεια του σήματος λόγω απόστασης, προσομοιώνεται μέσω του LogDistancePropagationLossModel.

Κυκλοφορία Δεδομένων (Traffic Scenarios):

Η μελέτη εξετάζει δύο τύπους κυκλοφορίας:

1. Συνεχής ροή (Continuous Traffic):

- Όλοι οι σταθμοί μεταδίδουν δεδομένα συνεχώς για 10 δευτερόλεπτα.

2. Δυναμική ροή (Dynamic Traffic):

Χρησιμοποιείται ο OnOffHelper, με εκθετική κατανομή:

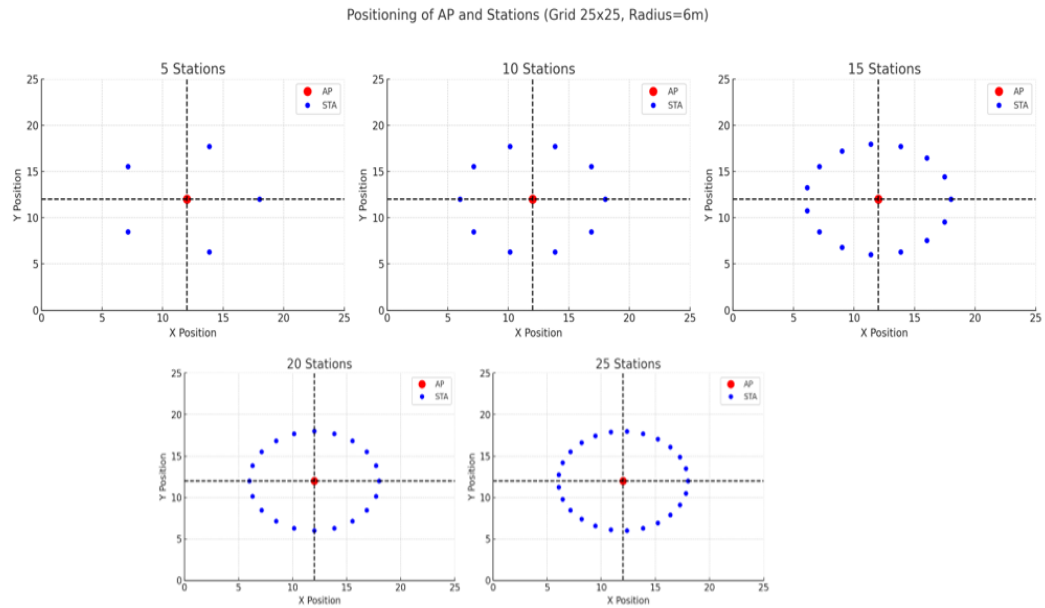
- Μέσος χρόνος ενεργοποίησης (OnTime): 1.0 s
- Μέσος χρόνος παύσης (OffTime): 0.5 s
- Ο χρόνος που μεταδίδουν οι σταθμοί είναι 20 δευτερόλεπτα.

Τοπολογικά Σενάρια:

Το σημείο πρόσβασης (Access Point - AP) τοποθετείται στο κέντρο μιας περιοχής διαστάσεων 25×25 μέτρων, ενώ οι σταθμοί (STAs) είτε παραμένουν σταθεροί είτε κινούνται εντός αυτής, ανάλογα με το εκάστοτε σενάριο. Συγκεκριμένα, εξετάζονται τέσσερις διαφορετικές τοπολογικές διαμορφώσεις:

1. Στατική συμμετρική τοποθέτηση:
Οι σταθμοί τοποθετούνται ομοιόμορφα σε ακτίνα 6 μέτρων γύρω από το AP, εξασφαλίζοντας ίσες αποστάσεις και συμμετρία, χωρίς κινητικότητα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7 .
2. Στατική τυχαία τοποθέτηση:
Οι σταθμοί τοποθετούνται τυχαία εντός της περιοχής, χωρίς κινητικότητα, προσφέροντας ποικιλομορφία στη γεωμετρική διάταξη.
3. Τυχαία τοποθέτηση με κινητικότητα (RandomDirection2dMobilityModel):
Οι σταθμοί ξεκινούν από τυχαίες αρχικές θέσεις και κινούνται εντός της περιοχής με ταχύτητες 1–5 m/s και τυχαίες παύσεις διάρκειας 1–5 s. Η κατεύθυνση αλλάζει μόνο όταν φτάνουν στα όρια της περιοχής.
4. Τυχαία τοποθέτηση με συνεχή κινητικότητα (RandomWalk2dMobilityModel):
Οι σταθμοί ξεκινούν από τυχαίες αρχικές θέσεις και κινούνται συνεχώς, αλλάζοντας κατεύθυνση είτε κάθε 1 δευτερόλεπτο είτε κάθε 1 μέτρο διαδρομής.

Τα αποτελέσματα των 2 μοντέλων κίνησης (3,4) αφού εκτελέστηκαν 10 φορές και υπολογίστηκε ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων τους, προστέθηκαν και υπολογίστηκε ο μέσος όρος μεταξύ τους ως ένα ενιαίο μοντέλο κίνησης.



Εικ.7. Η τοπολογία του δικτύου χωρίς κίνηση με 5,10,15,20,25 Σταθμούς και 1 AP .

Μετρικές Απόδοσης:

Για κάθε πειραματικό σενάριο και κάθε αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης, συλλέγονται οι εξής μετρικές:

- Average Goodput
- Average Latency

Οι μετρήσεις λαμβάνονται για όλους τους συνδυασμούς των παραμέτρων:

- Αριθμός σταθμών: 5, 10, 15, 20, 25
- MCS: 0–11
- Channel Width: 20, 40, 80, 160 MHz
- Guard Interval: 1600 ns, 3200 ns

Αυτά τα αποτελέσματα αξιοποιούνται για την ανάλυση που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5.

Υπολογιστική Πολυπλοκότητα:

Επιπλέον, καταγράφεται η κατανάλωση υπολογιστικών πόρων (CPU Clocks και Memory Usage) υπό συνθήκες Continuous Traffic, για την εκτίμηση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας κάθε αλγορίθμου. Η σχετική ανάλυση παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6.

Σημαντική Σημείωση:

Αρχικά, τα πειραματικά σενάρια διεξάγονται υπό συνθήκες Continuous Traffic, όπου όλοι οι σταθμοί μεταδίδουν συνεχώς δεδομένα καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Στη συνέχεια, βάσει των αποτελεσμάτων του Κεφαλαίου 5 και ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Α και Β, επιλέγεται το εύρος καναλιού των 80 MHz —το οποίο εμφάνισε τη βέλτιστη απόδοση— και εφαρμόζονται τα ίδια πειραματικά σενάρια υπό συνθήκες Δυναμικού Traffic, ώστε να αξιολογηθεί η συμπεριφορά των αλγορίθμων σε πιο ρεαλιστικές συνθήκες.

Κεφάλαιο 5

Αποτελέσματα - Γραφικές Παραστάσεις για Performance Evaluation

5.1 Αποτελέσματα με Continuous Traffic – Γραφικές Παραστάσεις

5.1.1 Αποτελέσματα για Goodput με Guard Interval 1600 ns

5.1.1.1 Σταθερές θέσης με $R=6$ (Ακτίνα) χωρίς κίνηση

5.1.1.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση

5.1.1.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση

5.1.2 Αποτελέσματα για Goodput με Guard Interval 3200 ns

5.1.2.1 Σταθερές θέσης με $R=6$ (Ακτίνα) χωρίς κίνηση

5.1.2.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση

5.1.2.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση

5.1.3 Αποτελέσματα για Latency με Guard Interval 1600 ns

5.1.3.1 Σταθερές θέσης με $R=6$ (Ακτίνα) χωρίς κίνηση

5.1.3.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση

5.1.3.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση

5.1.4 Αποτελέσματα για Latency με Guard Interval 3200 ns

5.1.4.1 Σταθερές θέσης με $R=6$ (Ακτίνα) χωρίς κίνηση

5.1.4.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση

5.1.4.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση

5.2 Αποτελέσματα με Δυναμικό Traffic – Γραφικές Παραστάσεις

5.2.1 Αποτελέσματα για Goodput με Guard Interval 1600 ns

5.2.1.1 Σταθερές θέσης με $R=6$ (Ακτίνα) χωρίς κίνηση

5.2.1.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση

5.2.1.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση

5.2.2 Αποτελέσματα για Goodput με Guard Interval 3200 ns

5.2.2.1 Σταθερές θέσης με $R=6$ (Ακτίνα) χωρίς κίνηση

5.2.2.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση

5.2.2.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση

5.2.3 Αποτελέσματα για Latency με Guard Interval 1600 ns

5.2.3.1 Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση

5.2.3.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση

5.2.3.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση

5.2.4 Αποτελέσματα για Latency με Guard Interval 3200 ns

5.2.4.1 Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση

5.2.4.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση

5.2.4.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση

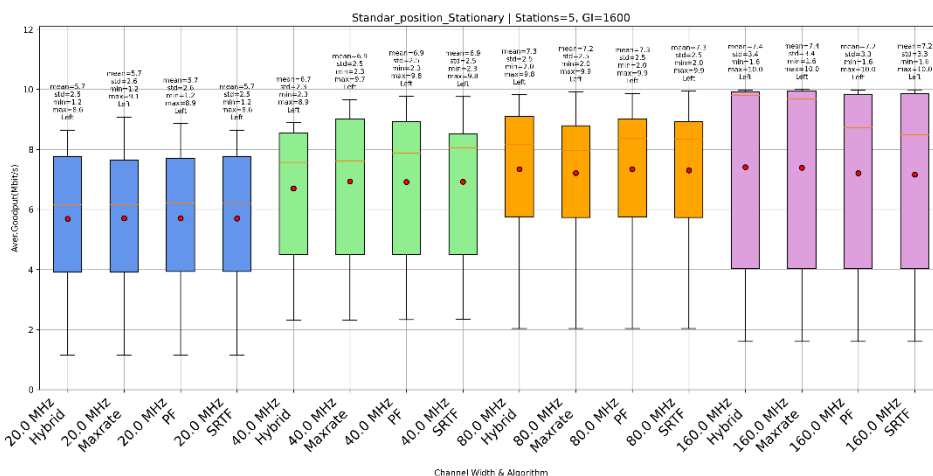
5.1 Αποτελέσματα με Continuous Traffic – Γραφικές Παραστάσεις.

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των σεναρίων που περιεγραφήκαν στο Κεφάλαιο 4, για Continuous Traffic .Κάθε box αντιστοιχεί σε έναν συγκεκριμένο αλγόριθμο και εύρος καναλιού, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις τιμές MCS από 0 έως 11. Επιπλέον η διάμεσος σημειώνεται με πορτοκαλί γραμμή, ο μέσος όρος με κόκκινο κύκλο, ενώ οι outliers απεικονίζονται με μαύρους κύκλους.

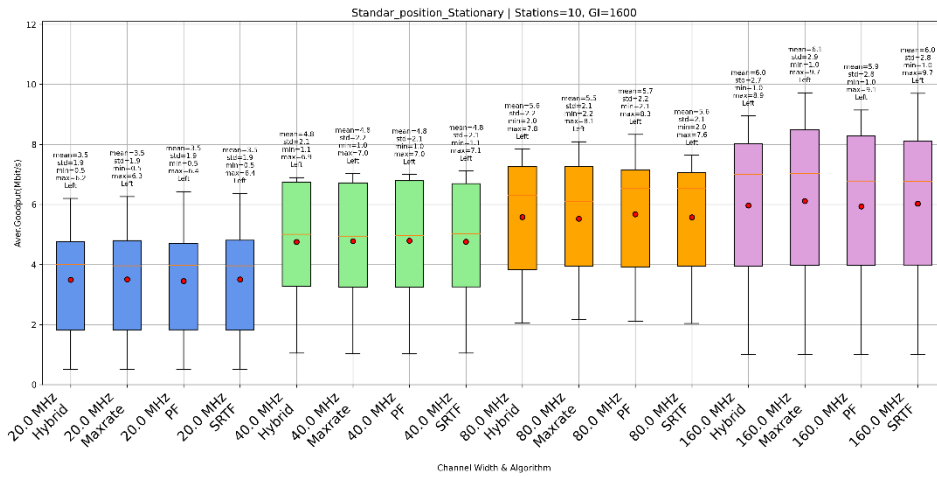
5.1.1 Αποτελέσματα για Goodput με Guard Interval 1600 ns

Σε αυτό το υπο-υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις του Average Goodput για όλους τους αλγόριθμους, για όλα τα εύρη καναλιών, με το Guard Interval σταθερό στα 1600 ns.

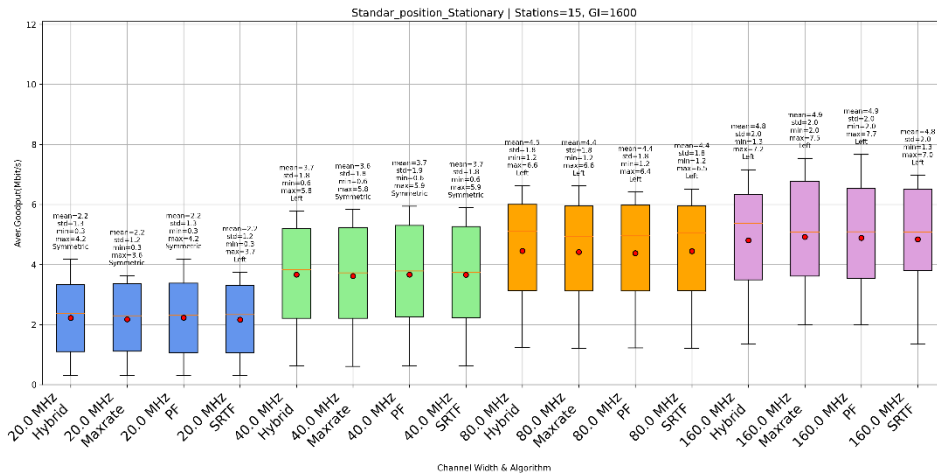
5.1.1.1 Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση



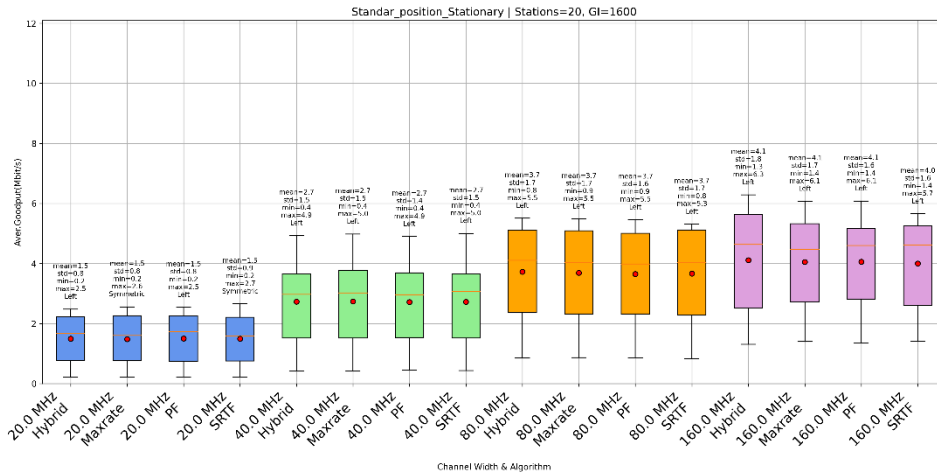
Γραφική Παρ.1. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγόριθμου για 5 σταθμούς



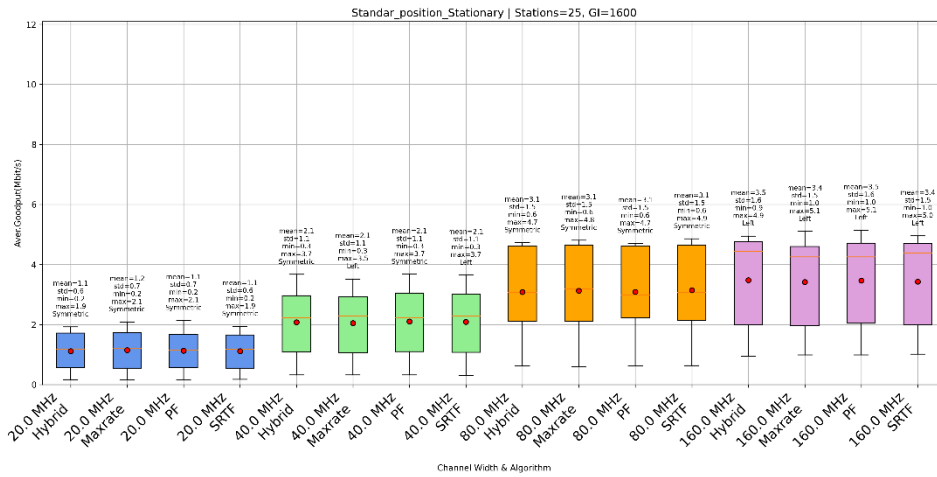
Γραφική Παρ.2. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγόριθμου για 10 σταθμούς



Γραφική Παρ.3. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγόριθμου για 15 σταθμούς

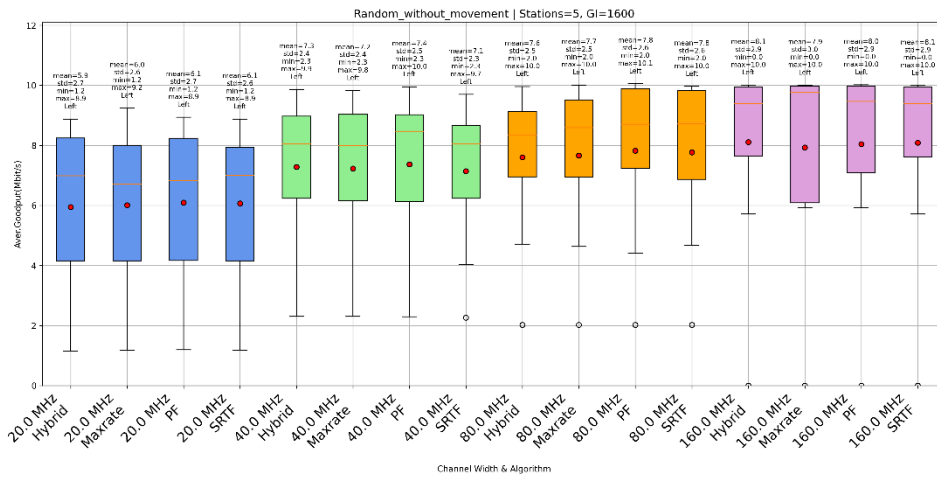


Γραφική Παρ.4. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγόριθμου για 20 σταθμούς

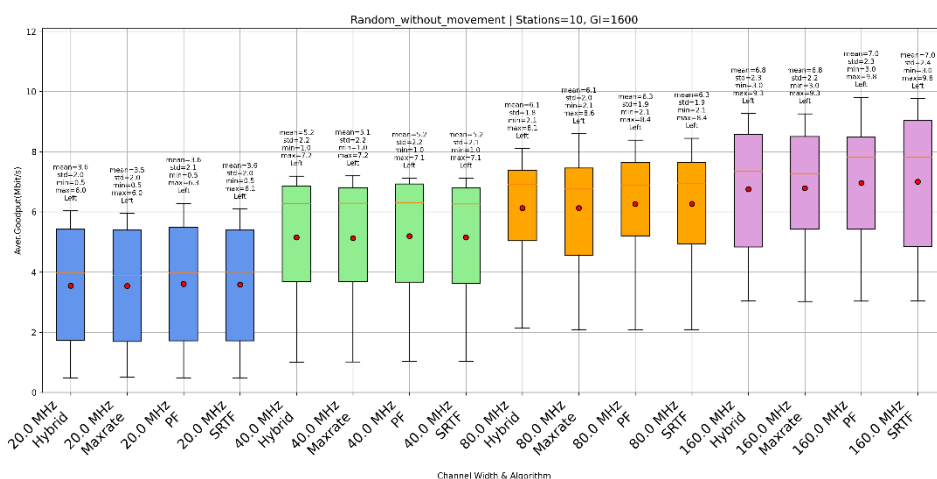


Γραφική Παρ.5. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγορίθμου για 25 σταθμούς

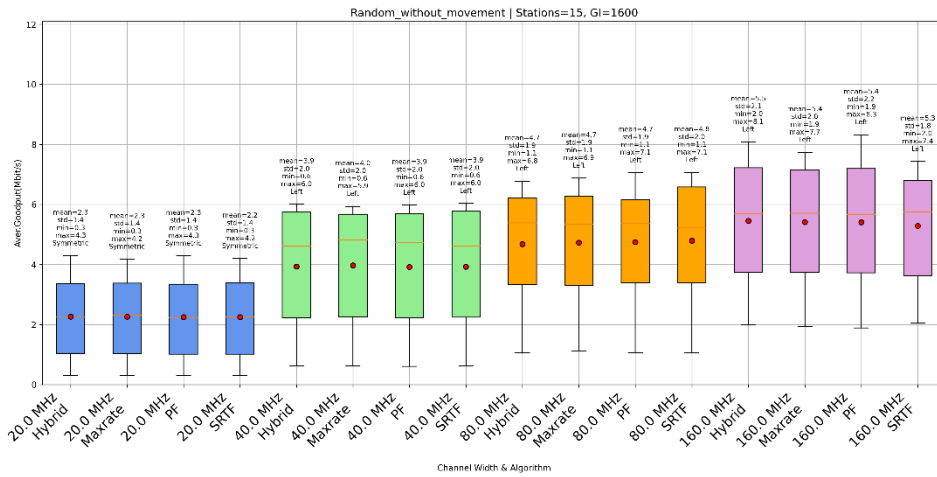
5.1.1.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση



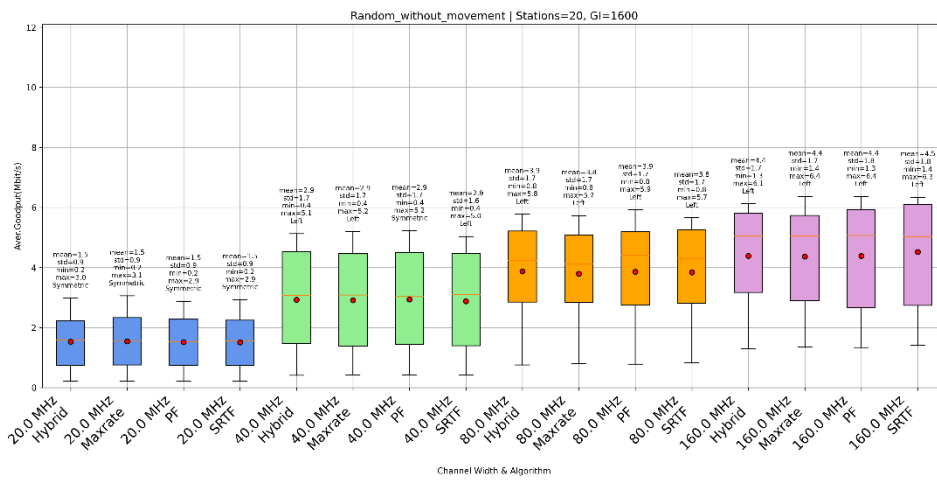
Γραφική Παρ.6. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγορίθμου για 5 σταθμούς



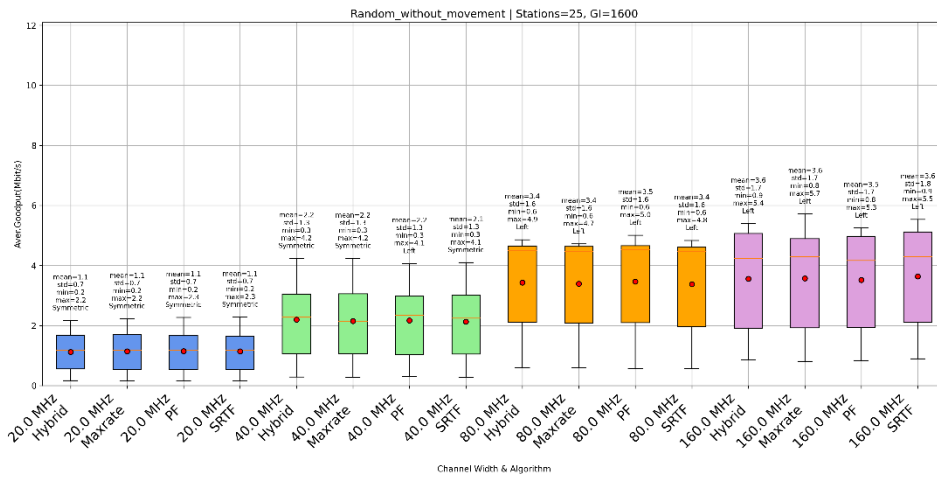
Γραφική Παρ.7. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγορίθμου για 10 σταθμούς



Γραφική Παρ.8. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγορίθμου για 15 σταθμούς

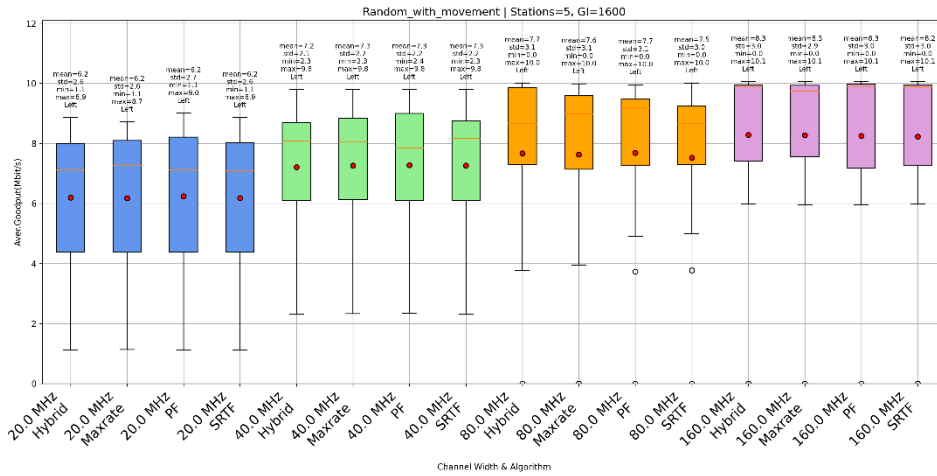


Γραφική Παρ.9. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγορίθμου για 20 σταθμούς

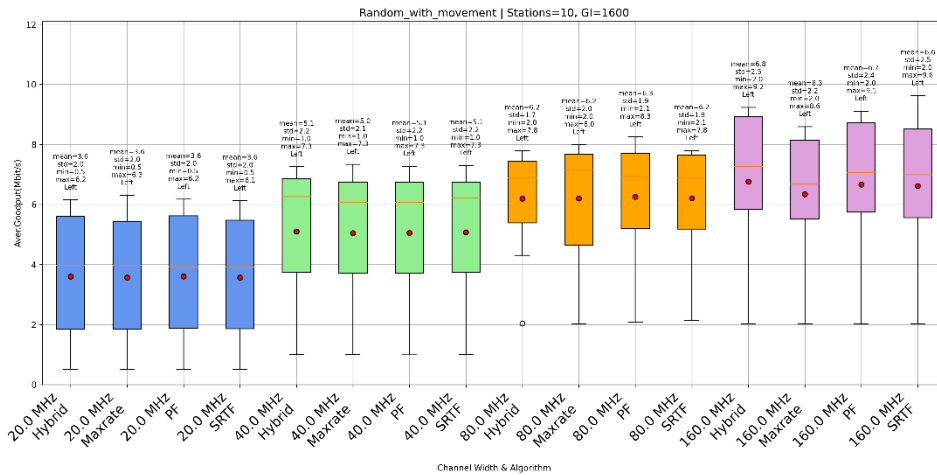


Γραφική Παρ.10. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγορίθμου για 25 σταθμούς

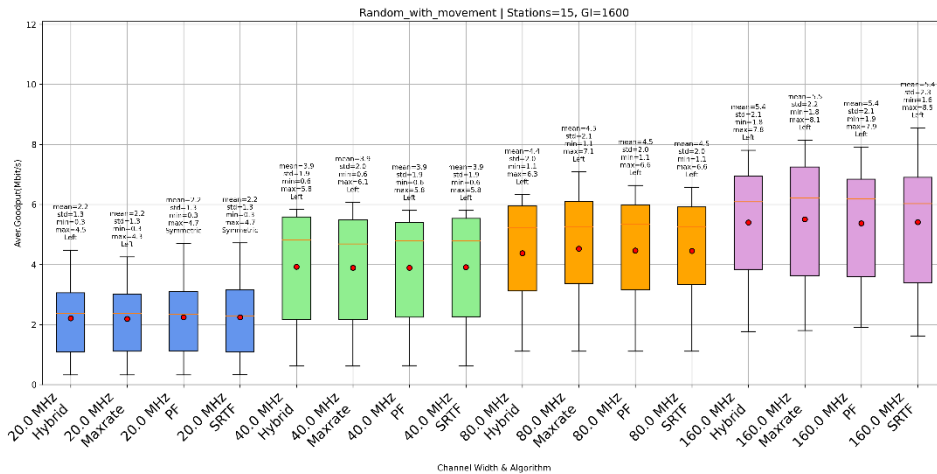
5.1.1.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση



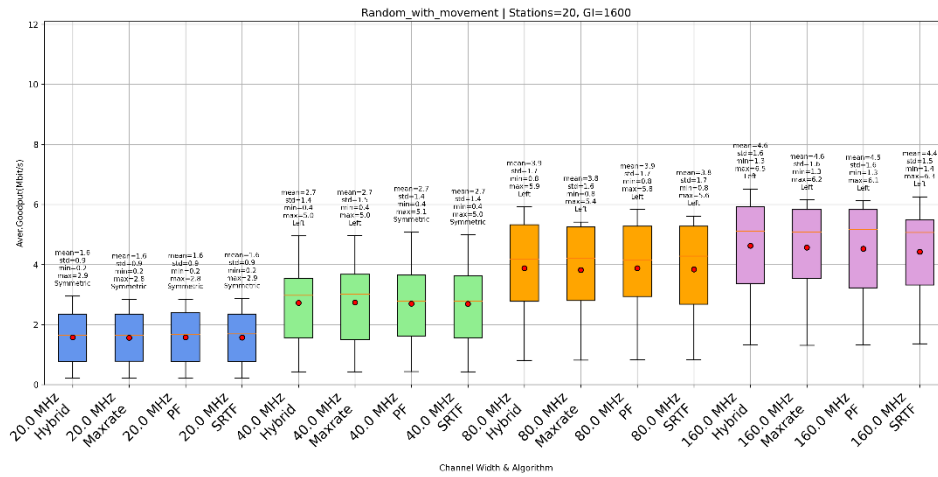
Γραφική Παρ.11. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγόριθμου για 5 σταθμούς



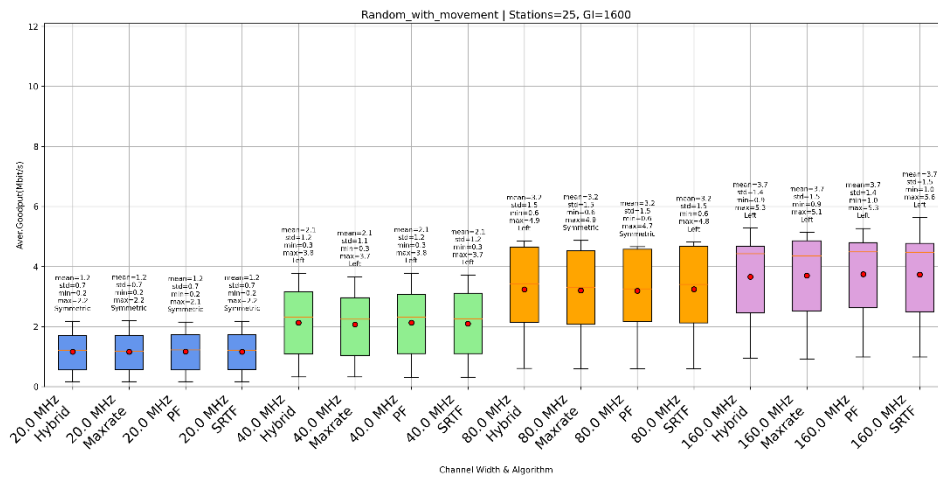
Γραφική Παρ.12. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγόριθμου για 10 σταθμούς



Γραφική Παρ.13. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγόριθμου για 15 σταθμούς



Γραφική Παρ.14 Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγορίθμου για 20 σταθμούς

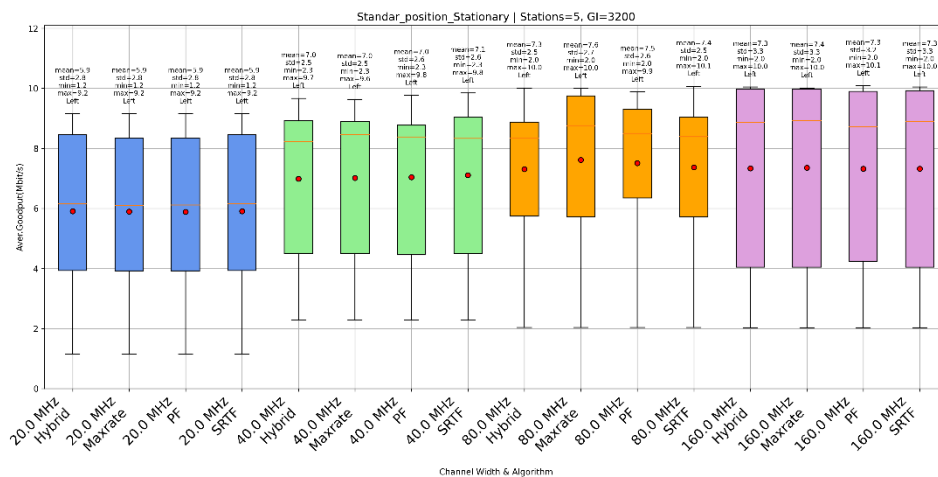


Γραφική Παρ.15. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγορίθμου για 25 σταθμούς

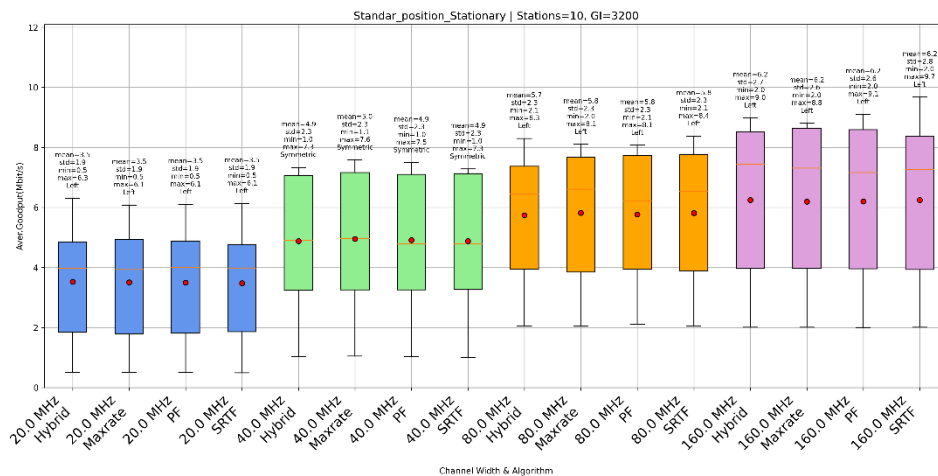
5.1.2 Αποτελέσματα για Goodput με Guard Interval 3200 ns

Σε αυτό το υπο-υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις του Average Goodput για όλους τους αλγόριθμους, για όλα τα εύρη καναλιών, με το Guard Interval σταθερό στα 3200 ns.

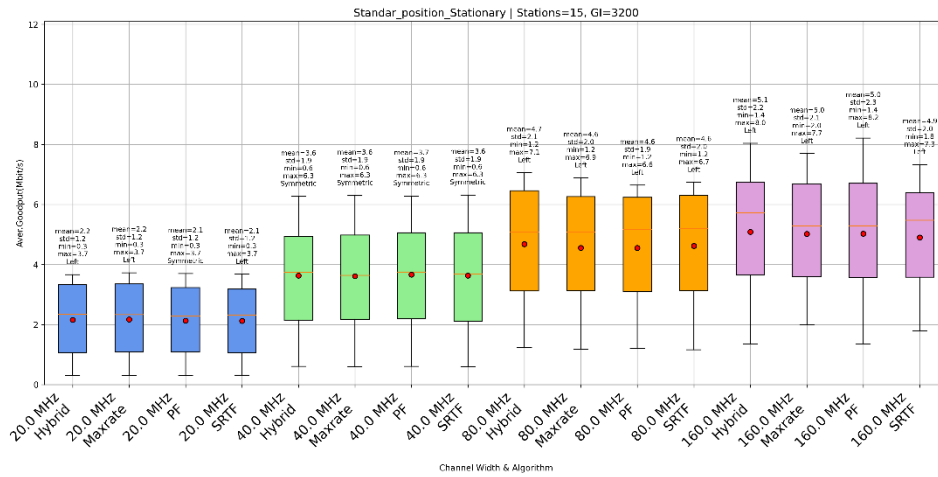
5.1.2.1 Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση



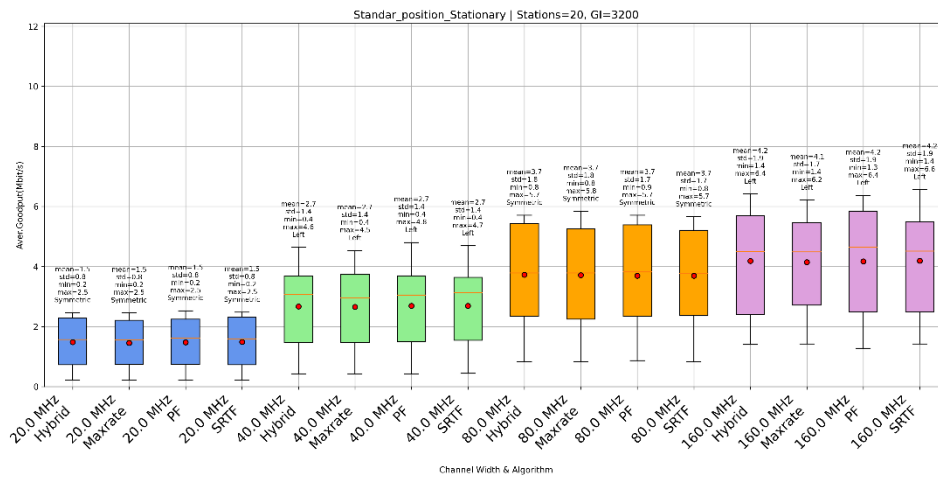
Γραφική Παρ.16. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγόριθμους για 5 σταθμούς



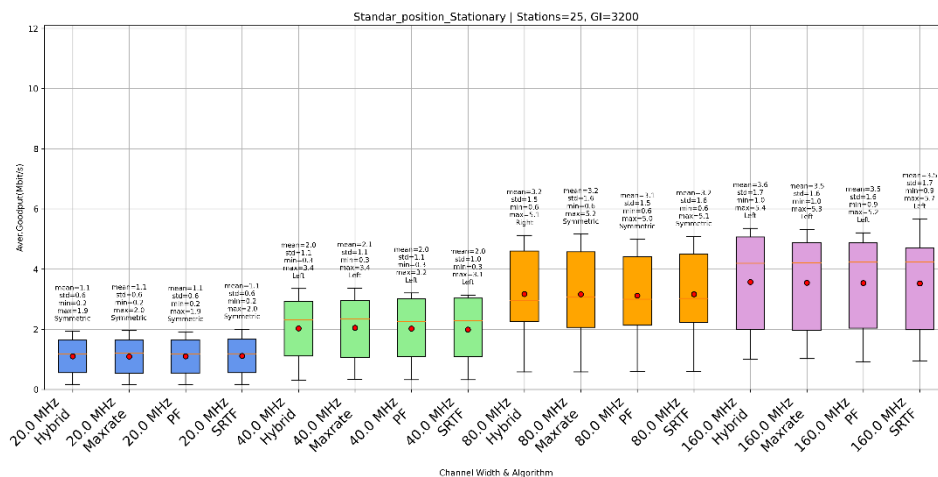
Γραφική Παρ.17. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγόριθμους για 10 σταθμούς



Γραφική Παρ.18. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγόριθμου για 15 σταθμούς

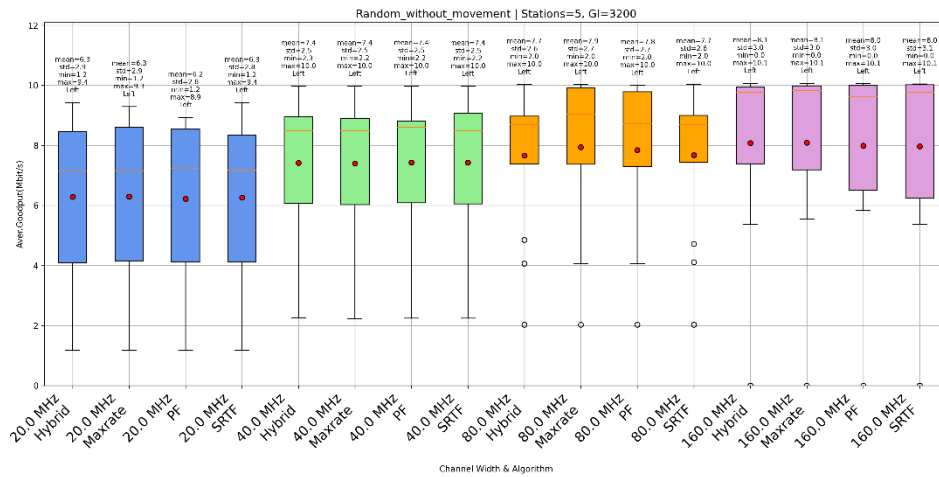


Γραφική Παρ.19. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγόριθμου για 20 σταθμούς

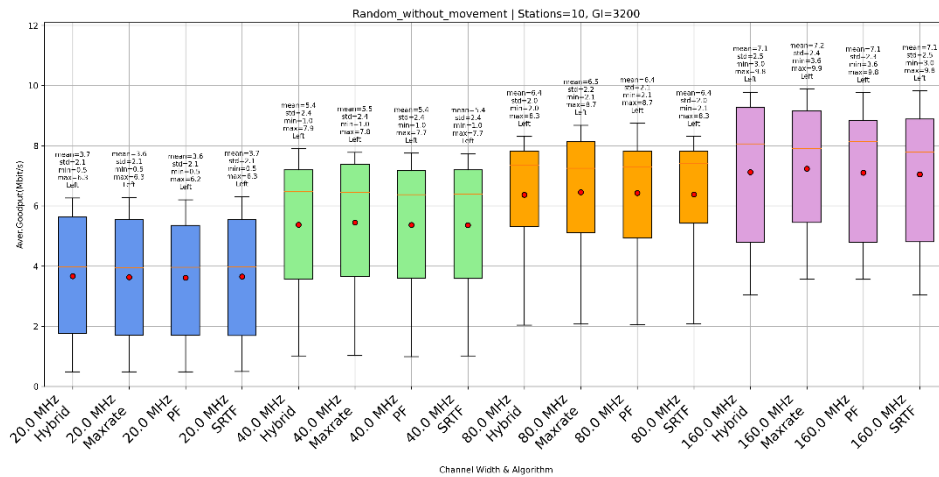


Γραφική Παρ.20. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγόριθμου για 25 σταθμούς

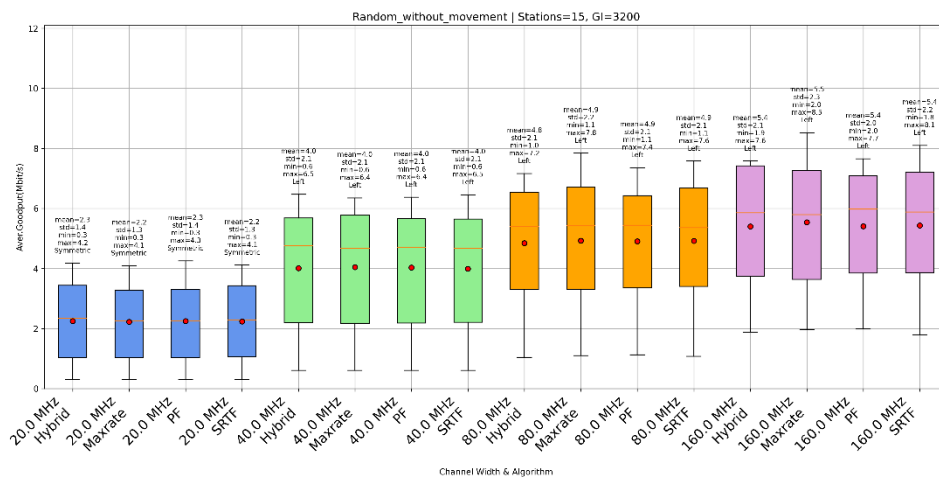
5.1.2.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση



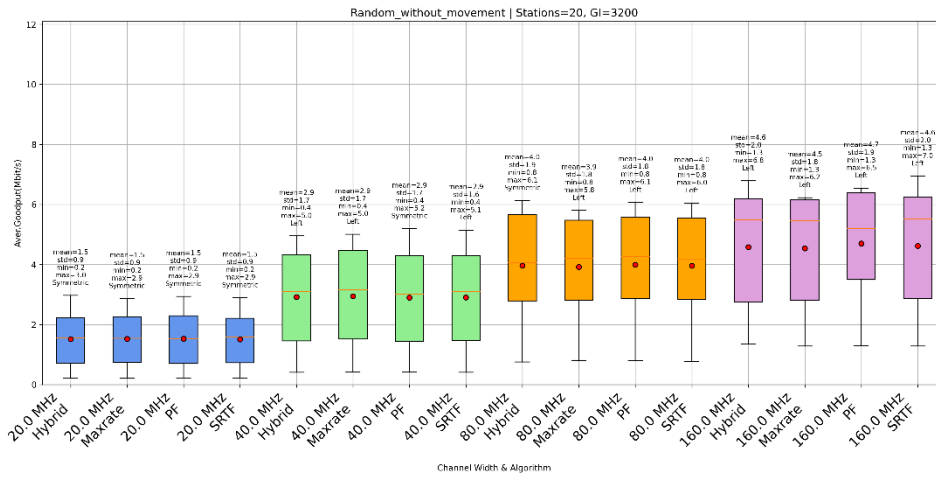
Γραφική Παρ.21. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγόριθμο για 5 σταθμούς



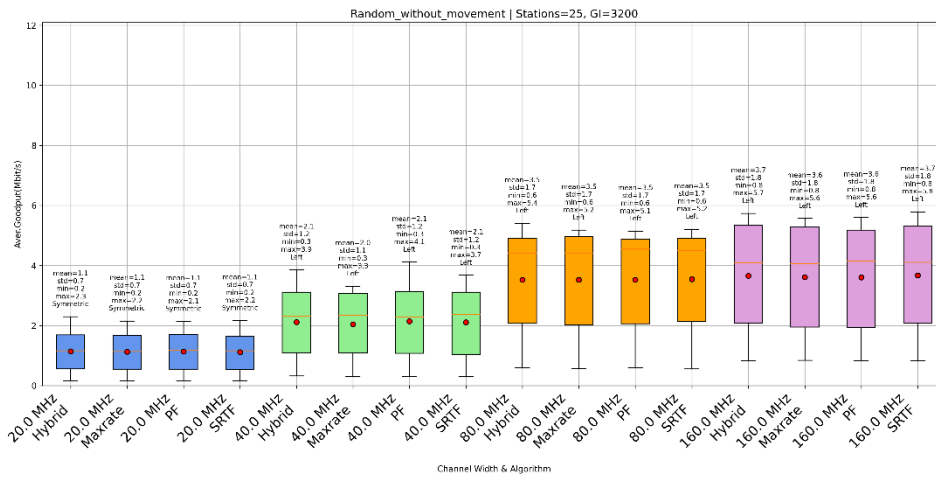
Γραφική Παρ.22. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγόριθμο για 10 σταθμούς



Γραφική Παρ.23. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγόριθμο για 15 σταθμούς

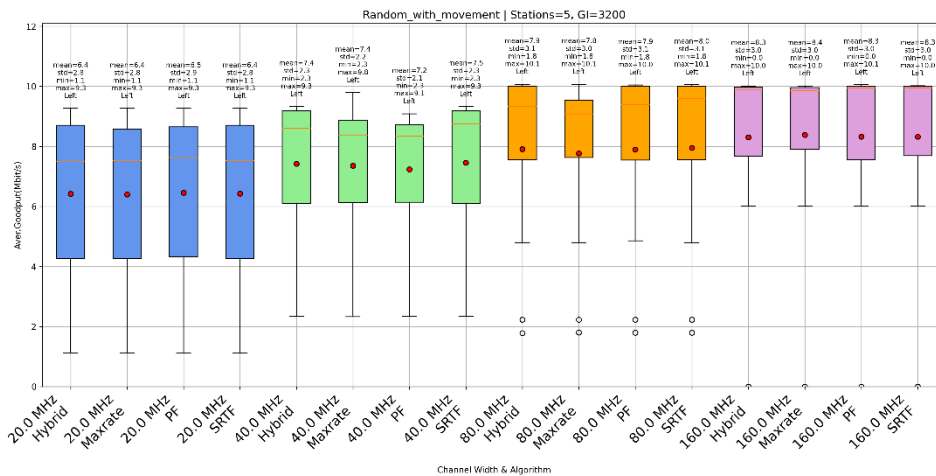


Γραφική Παρ.24. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγόριθμου για 20 σταθμούς

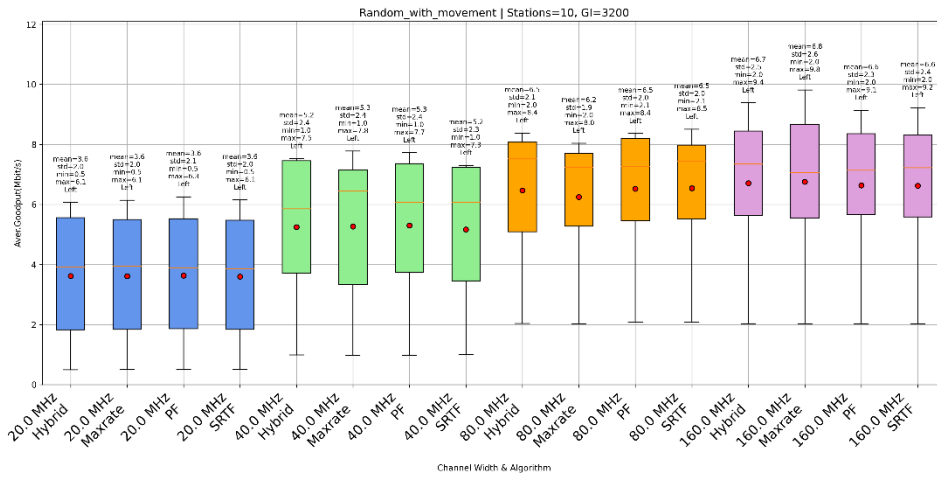


Γραφική Παρ.25. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγόριθμου για 25 σταθμούς

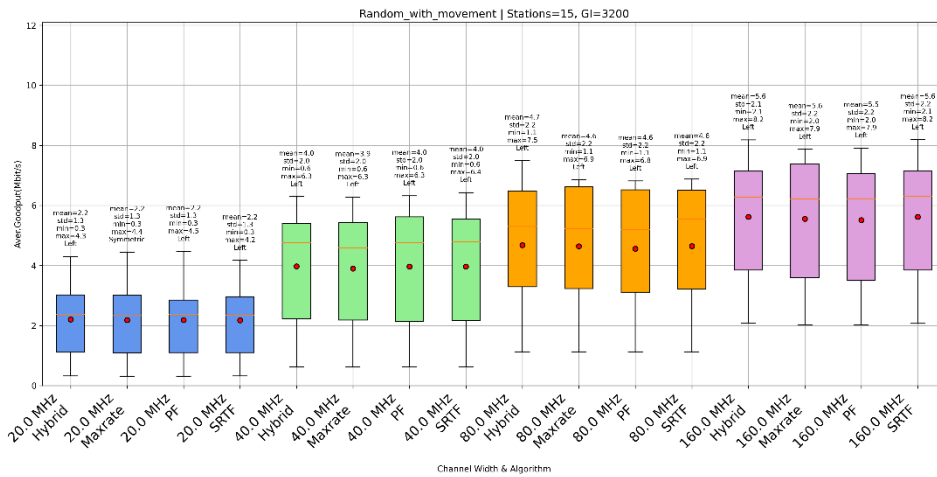
5.1.2.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση



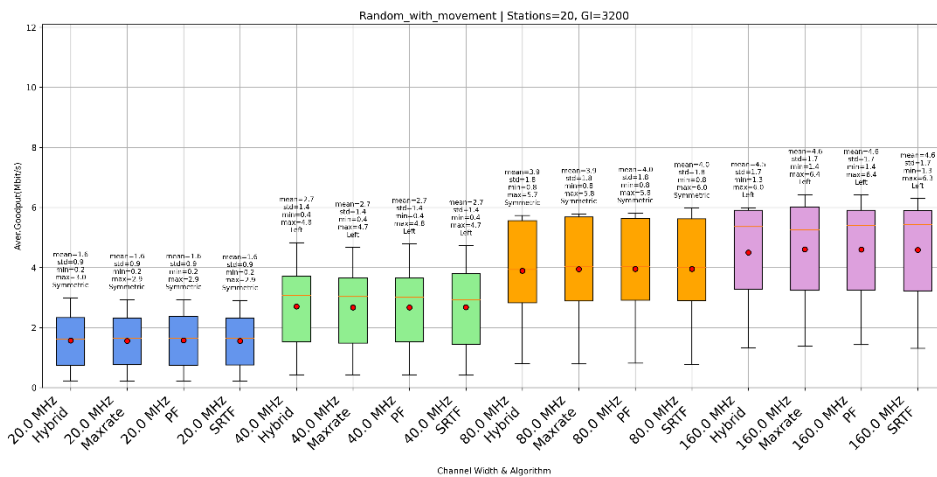
Γραφική Παρ.26. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγόριθμου για 5 σταθμούς



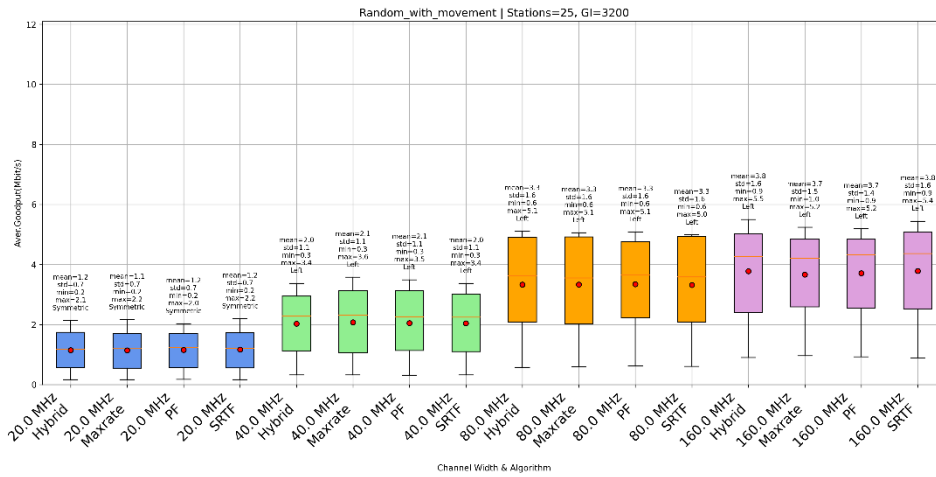
Γραφική Παρ.27. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγόριθμου για 10 σταθμούς



Γραφική Παρ.28. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγόριθμου για 15 σταθμούς



Γραφική Παρ.29. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγόριθμου για 20 σταθμούς

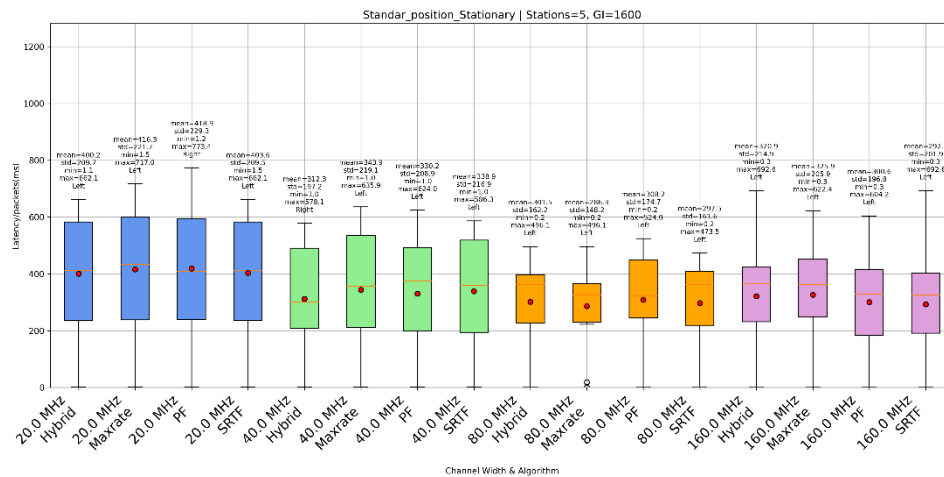


Γραφική Παρ.30. Αποτελέσματα Avg.Goodput ανά channel Width & Αλγορίθμου για 25 σταθμούς

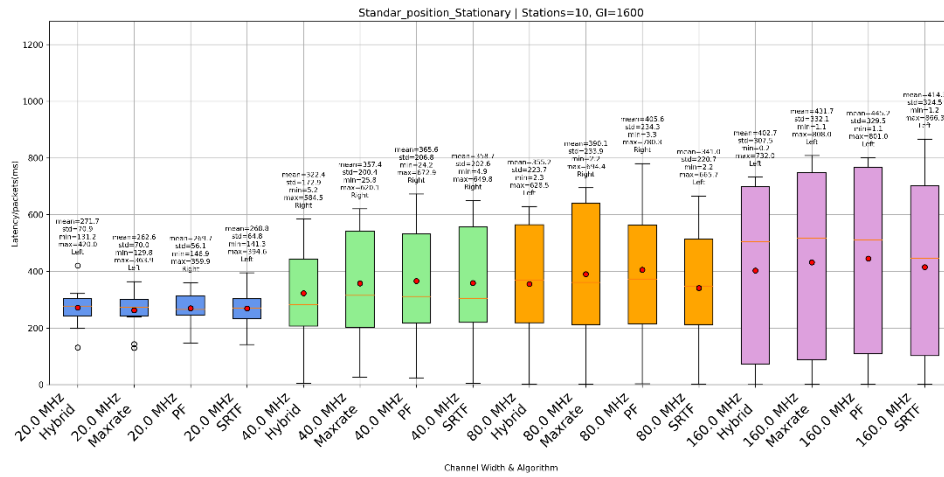
5.1.3 Αποτελέσματα για Latency με Guard Interval 1600 ns

Σε αυτό το υπο-υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις του Average Latency για όλους τους αλγόριθμους, για όλα τα εύρη καναλιών, με το Guard Interval σταθερό στα 1600 ns.

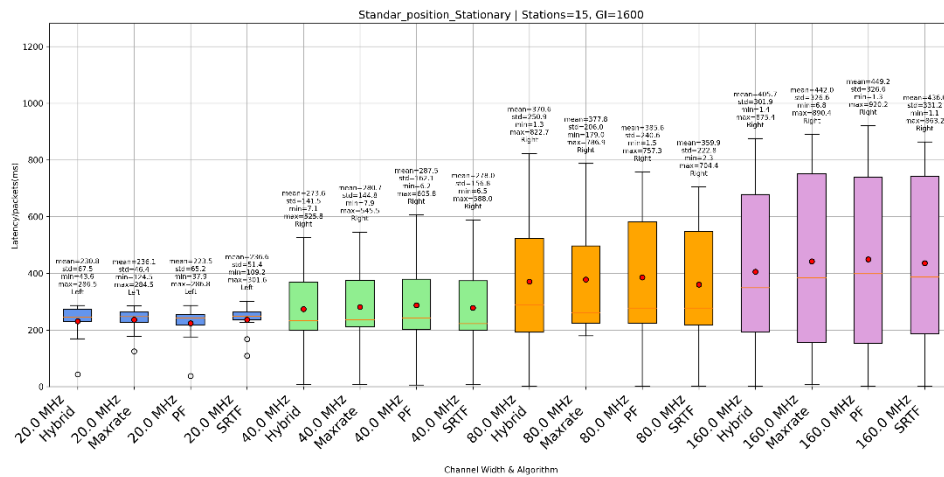
5.1.3.1 Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση



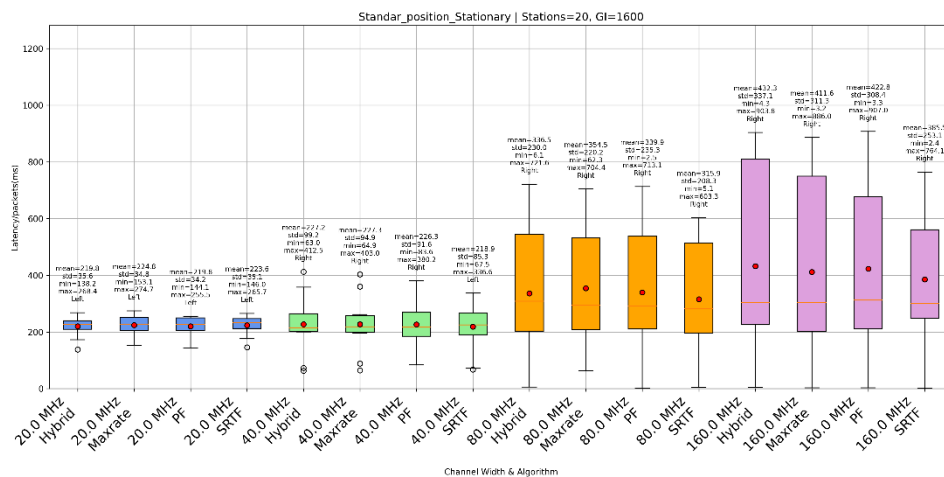
Γραφική Παρ.31. Αποτελέσματα Avg.Latency ανά channel Width & Αλγορίθμου για 5 σταθμούς



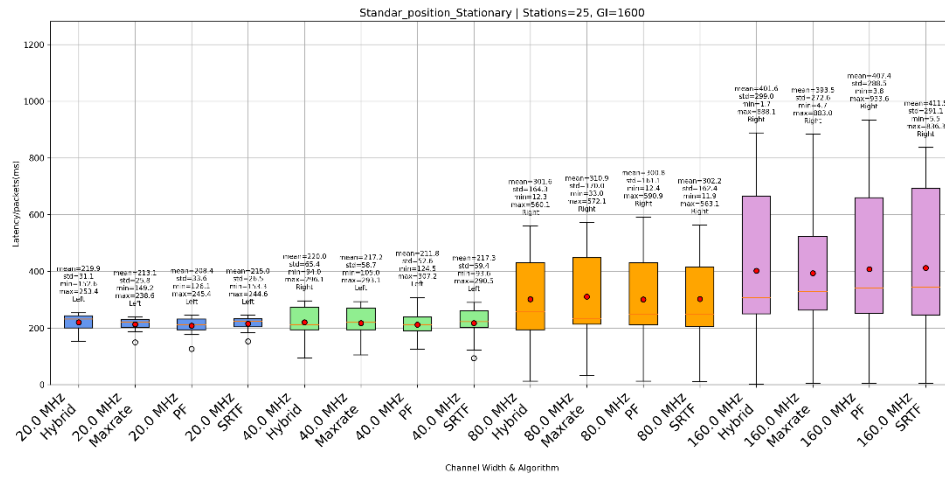
Γραφική Παρ.32. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγόριθμου για 10 σταθμούς



Γραφική Παρ.33. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγόριθμου για 15 σταθμούς

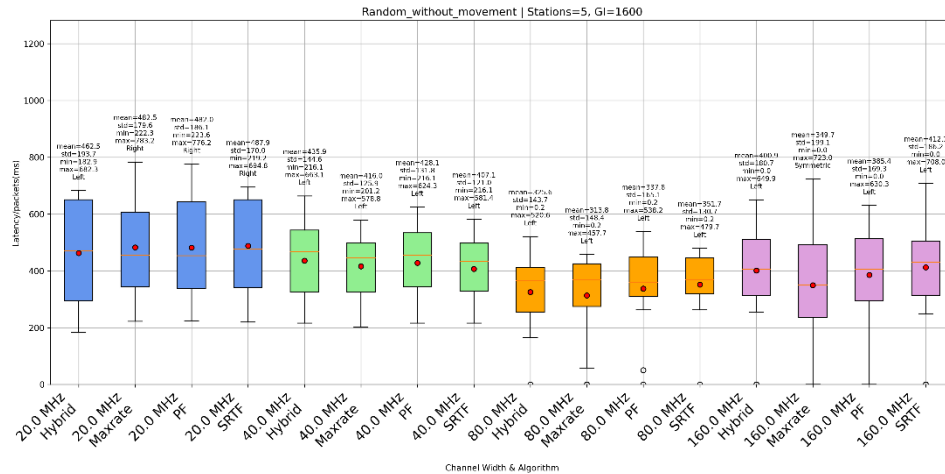


Γραφική Παρ.34. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγόριθμου για 20 σταθμούς

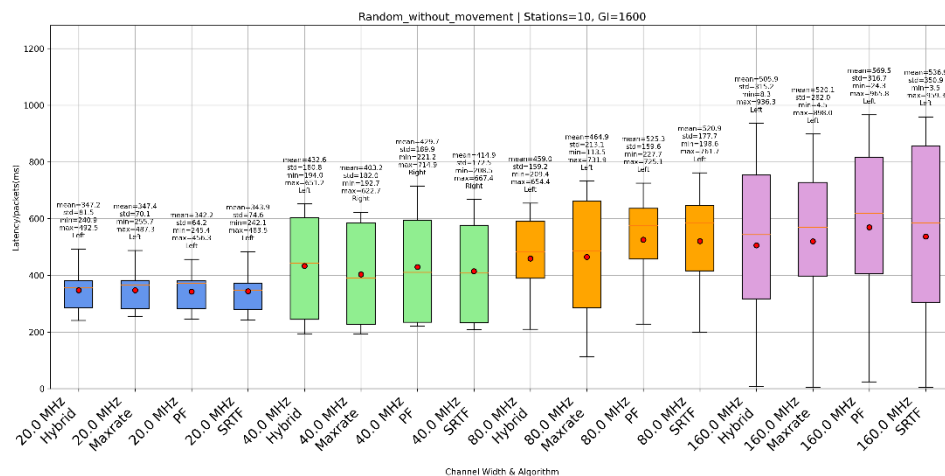


Γραφική Παρ.35. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγόριθμου για 25 σταθμούς

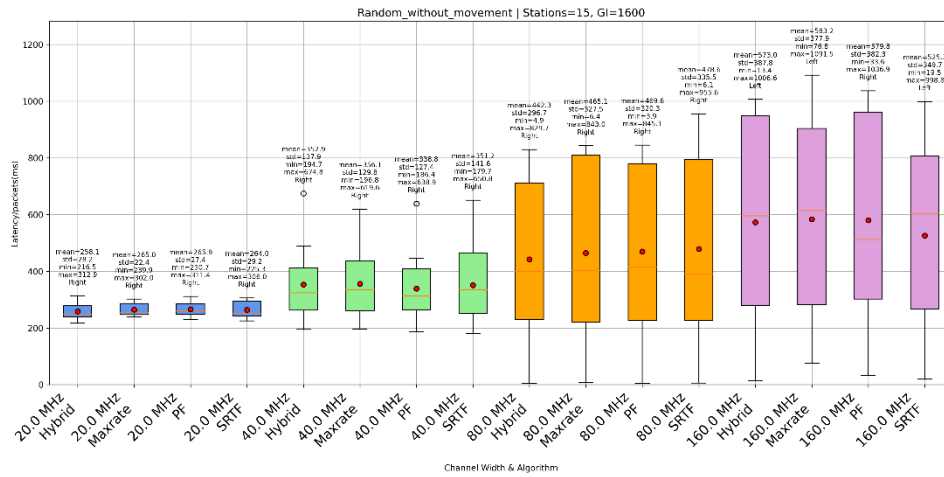
5.1.3.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση



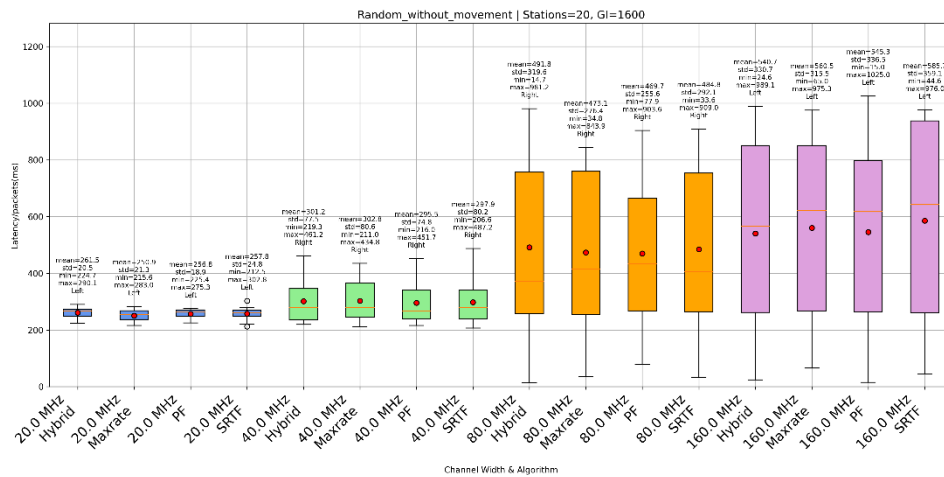
Γραφική Παρ.36. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγόριθμου για 5 σταθμούς



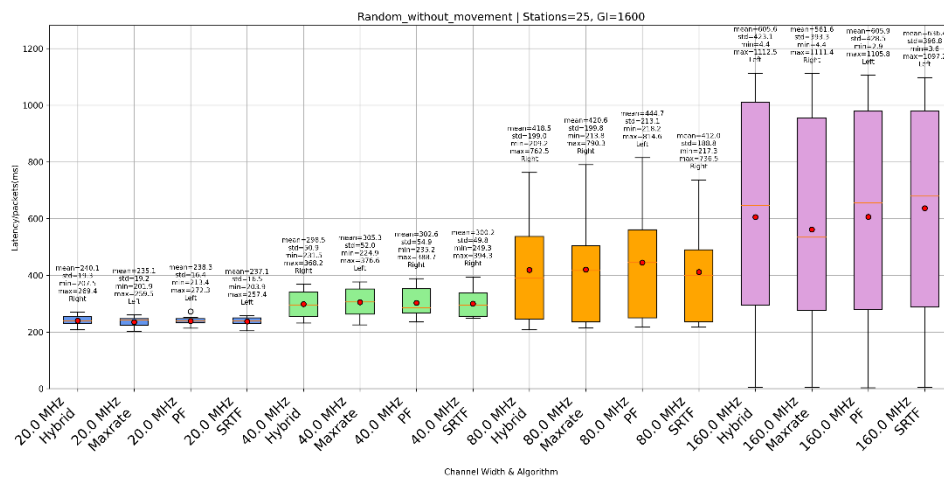
Γραφική Παρ.37. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγόριθμου για 10 σταθμούς



Γραφική Παρ.38. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγόριθμου για 15 σταθμούς

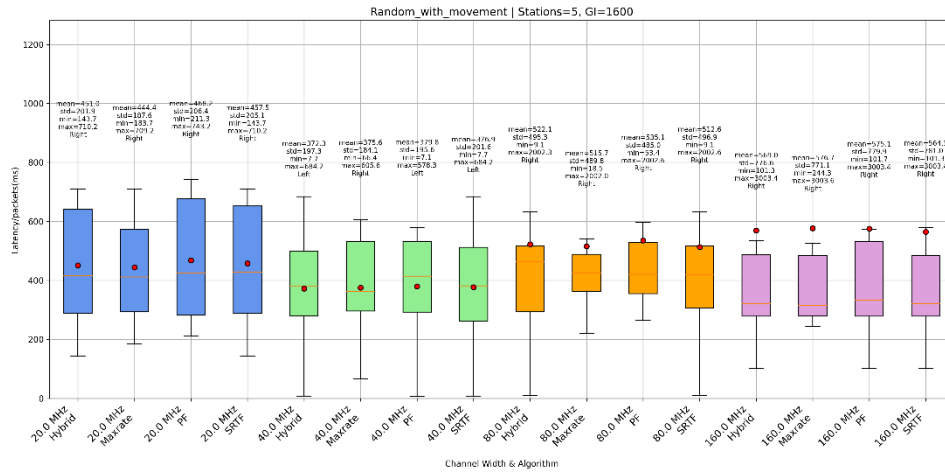


Γραφική Παρ.39. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγόριθμου για 20 σταθμούς

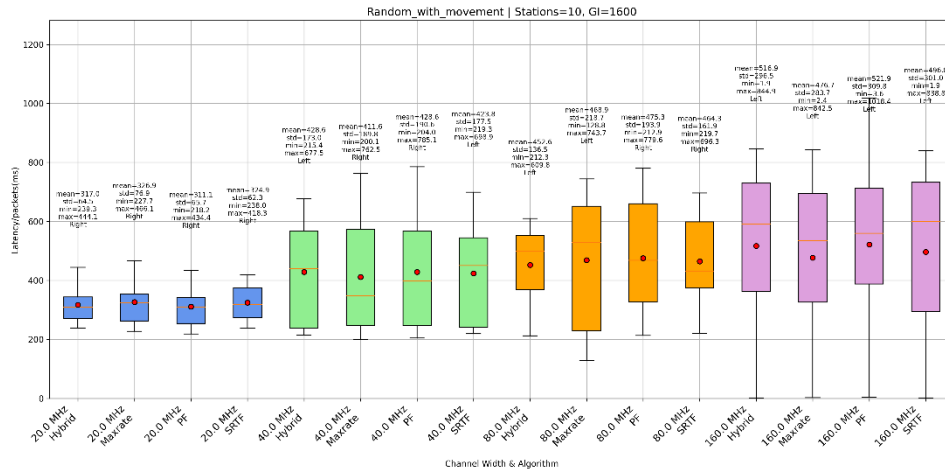


Γραφική Παρ.40. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγόριθμου για 25 σταθμούς

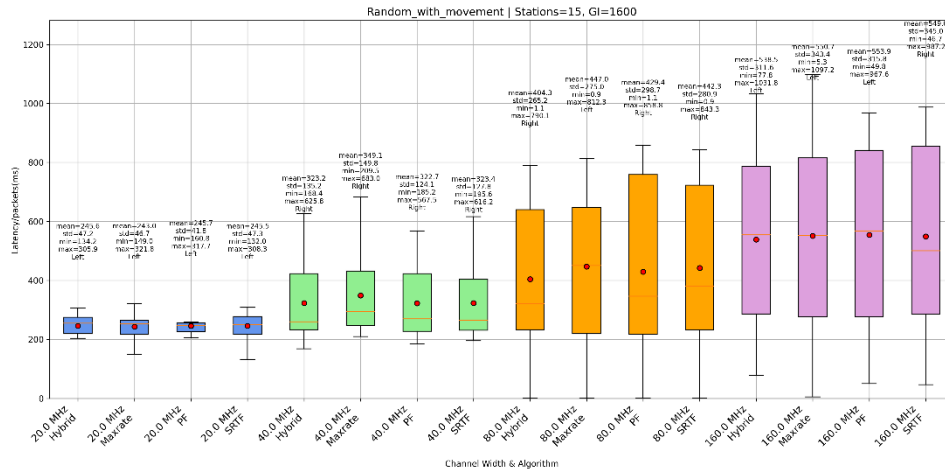
5.1.3.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση



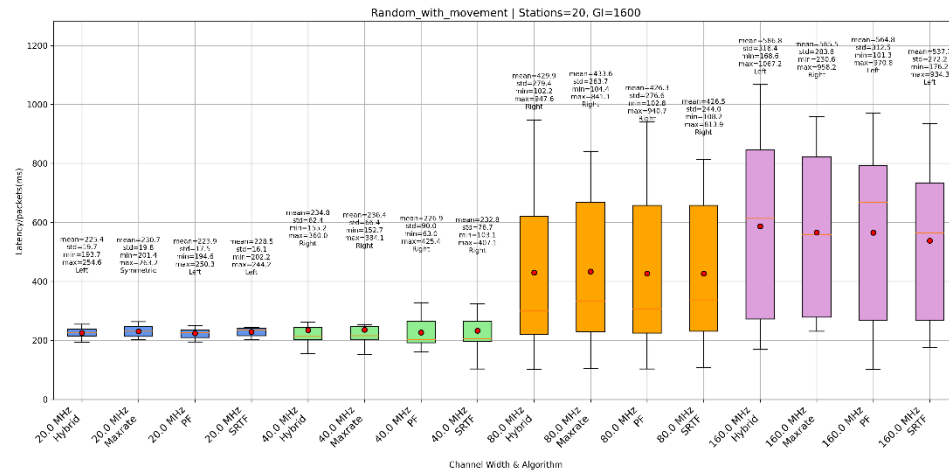
Γραφική Παρ.41. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγορίθμου για 5 σταθμούς



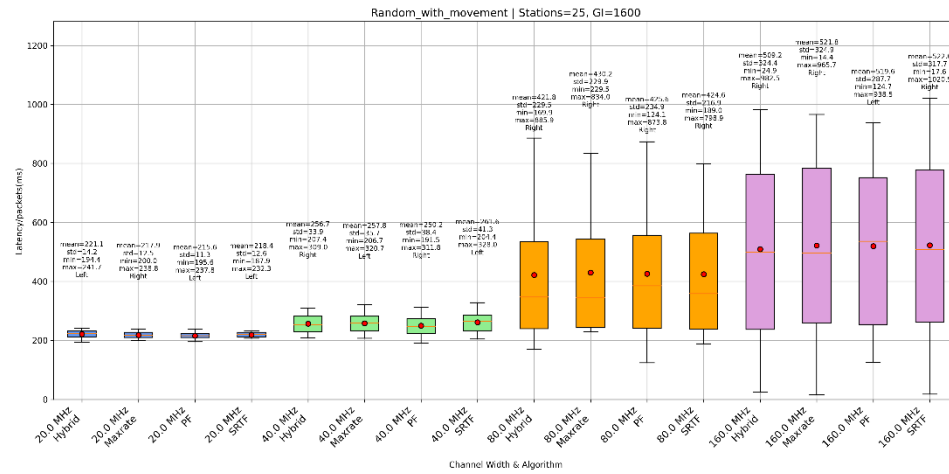
Γραφική Παρ.42. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγορίθμου για 10 σταθμούς



Γραφική Παρ.43. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγορίθμου για 15 σταθμούς



Γραφική Παρ.44. Αποτελέσματα Avg. Goodput ανά channel Width & Αλγόριθμου για 20 σταθμούς

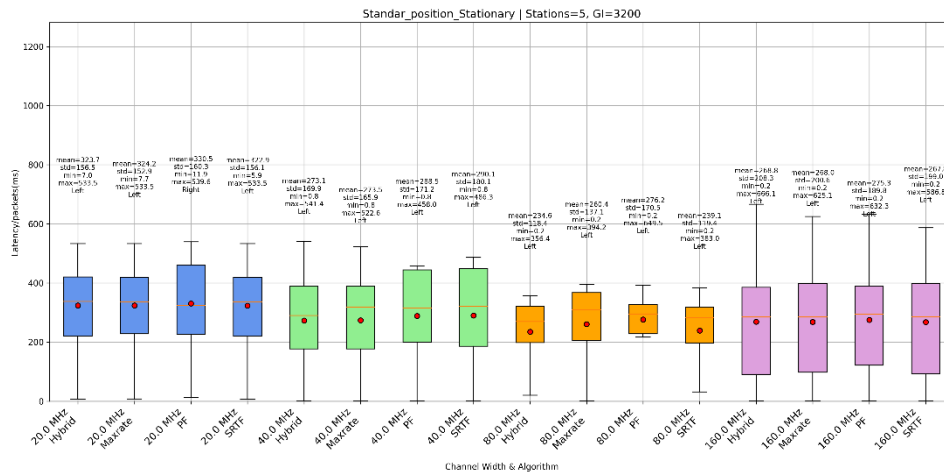


Γραφική Παρ.45. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγόριθμου για 25 σταθμούς

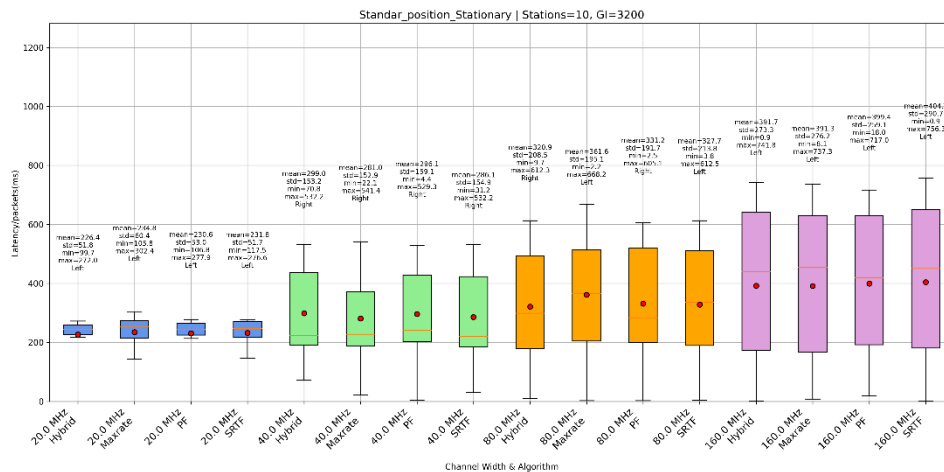
5.1.4 Αποτελέσματα για Latency με Guard Interval 3200 ns

Σε αυτό το υπο-υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις του Average Latency για όλους τους αλγόριθμους, για όλα τα εύρη καναλιών, με το Guard Interval σταθερό στα 3200 ns.

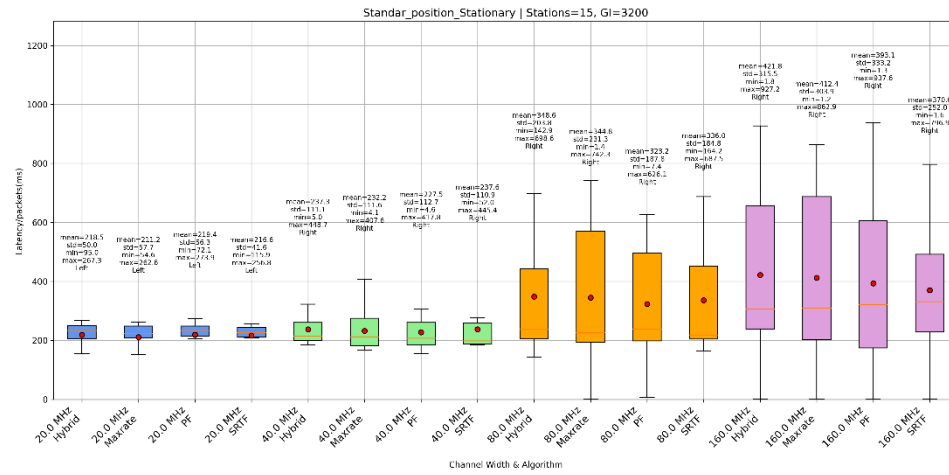
5.1.4.1 Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση



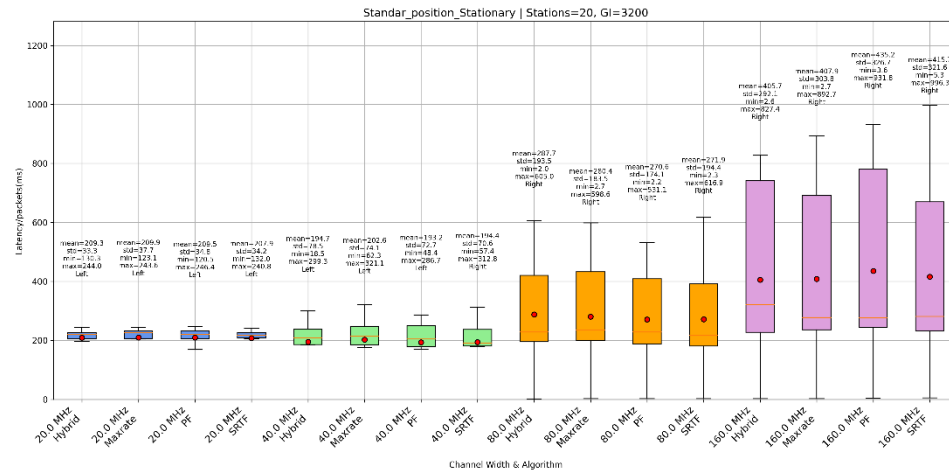
Γραφική Παρ.46. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγόριθμου για 5 σταθμούς



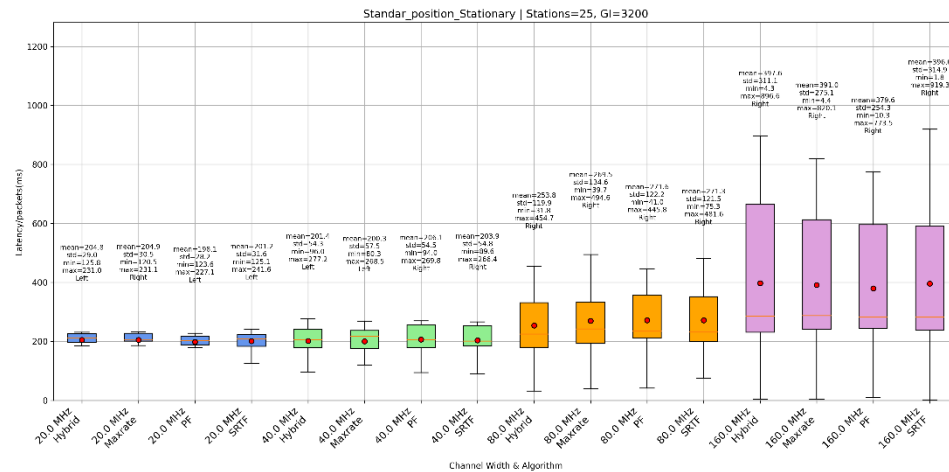
Γραφική Παρ.47. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγόριθμου για 10 σταθμούς



Γραφική Παρ.48. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγορίθμου για 15 σταθμούς

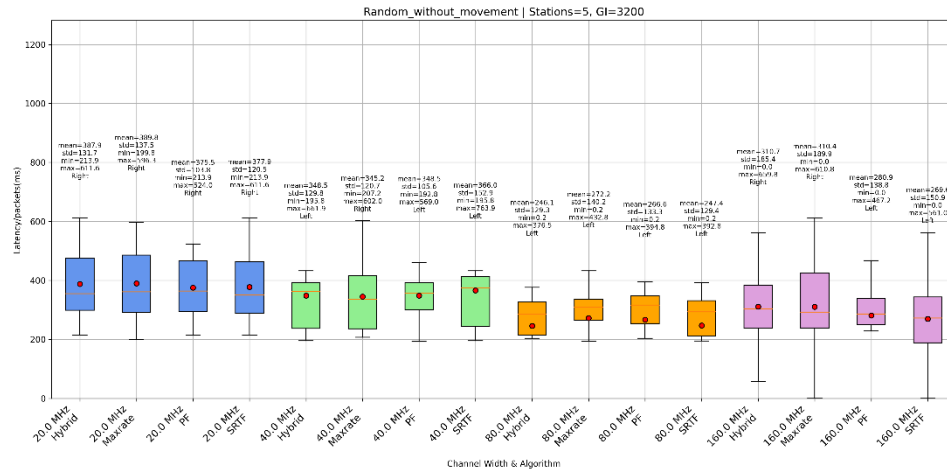


Γραφική Παρ.49. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγορίθμου για 20 σταθμούς

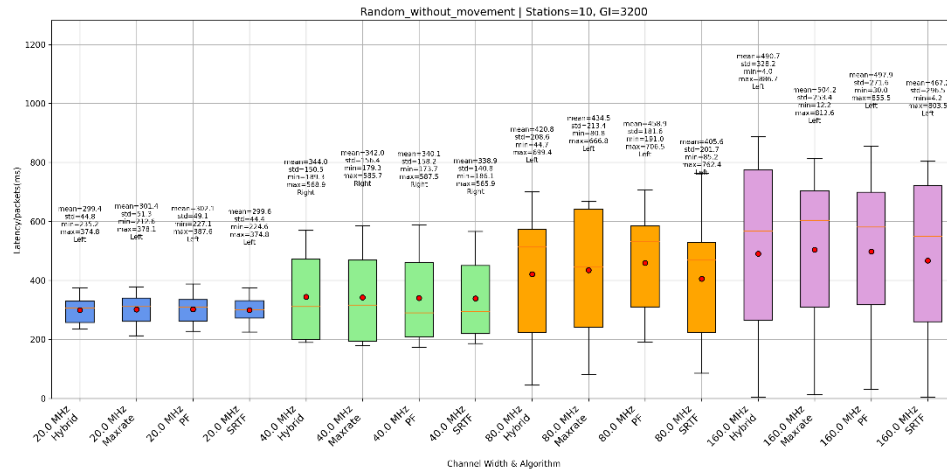


Γραφική Παρ.50. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγορίθμου για 25 σταθμούς

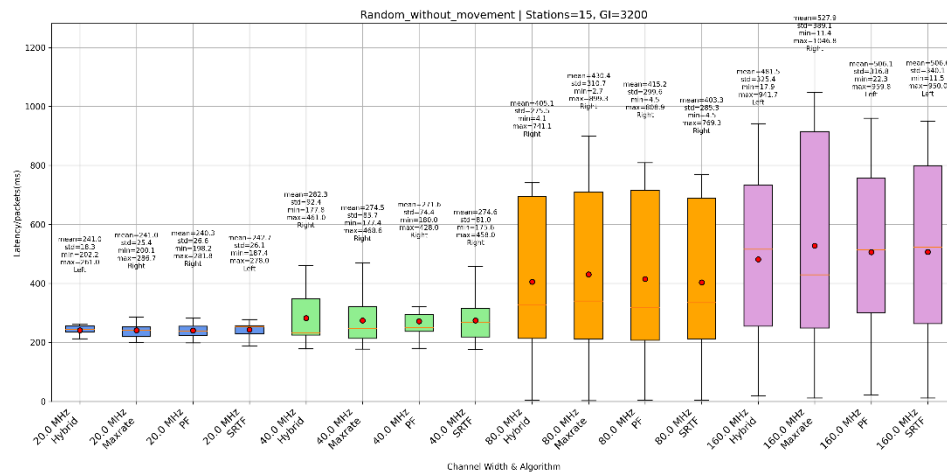
5.1.4.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση



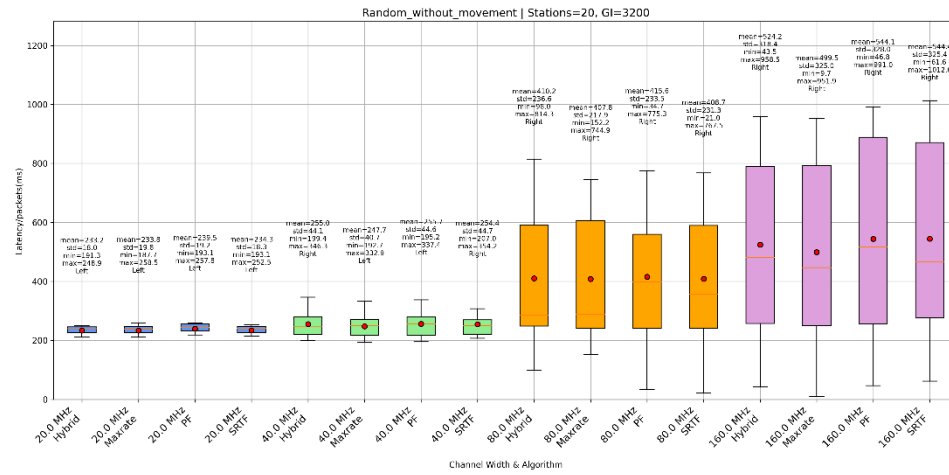
Γραφική Παρ.51. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγόριθμου για 5 σταθμούς



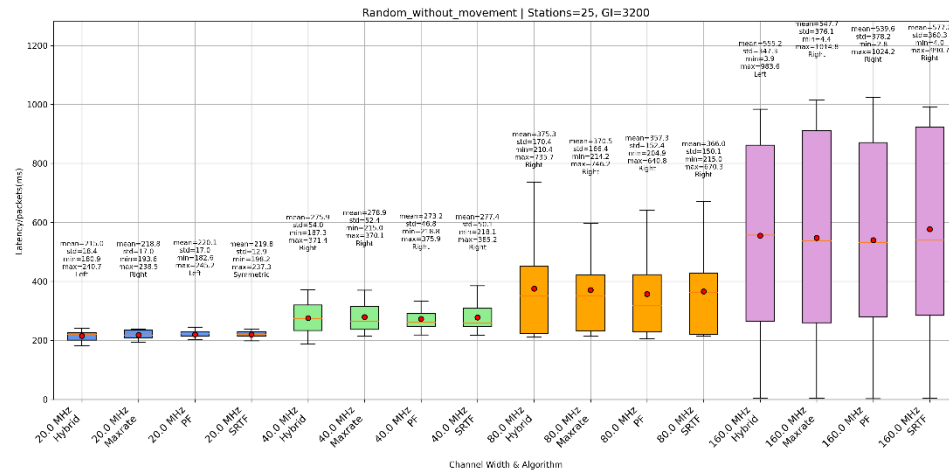
Γραφική Παρ.52. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγόριθμου για 10 σταθμούς



Γραφική Παρ.53. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγόριθμου για 15 σταθμούς

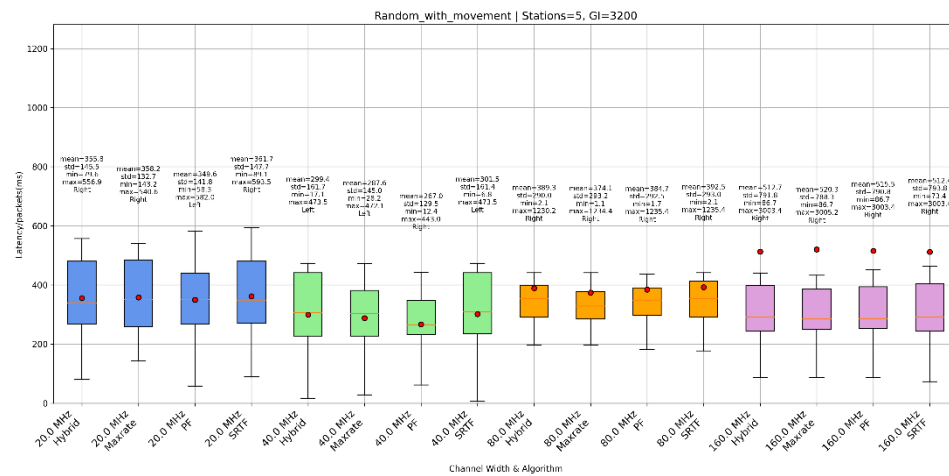


Γραφική Παρ.54. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγορίθμου για 20 σταθμούς

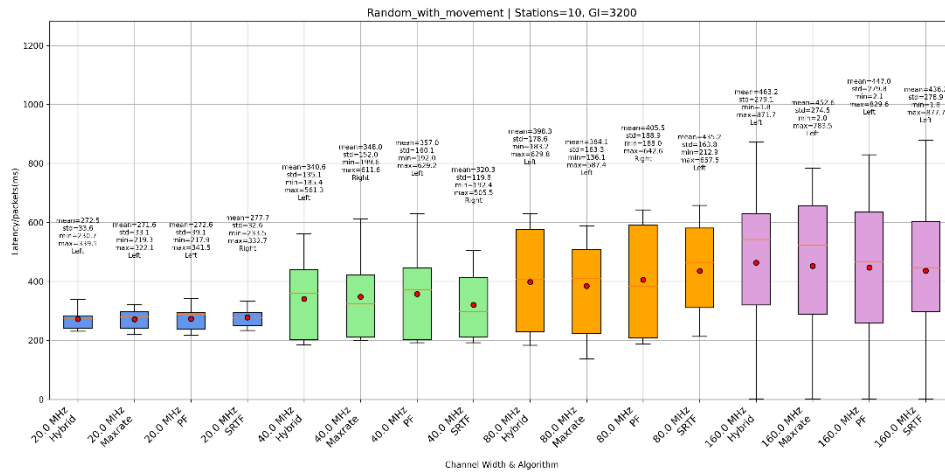


Γραφική Παρ.55. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγορίθμου για 25 σταθμούς

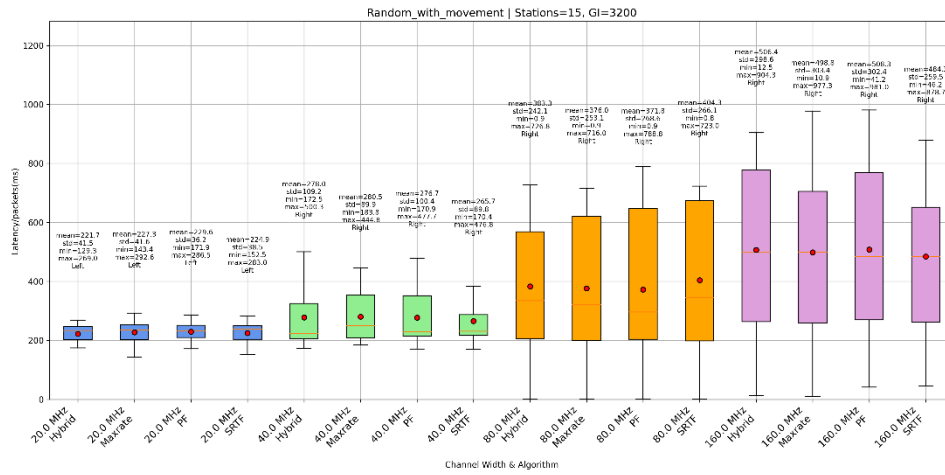
5.1.4.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση



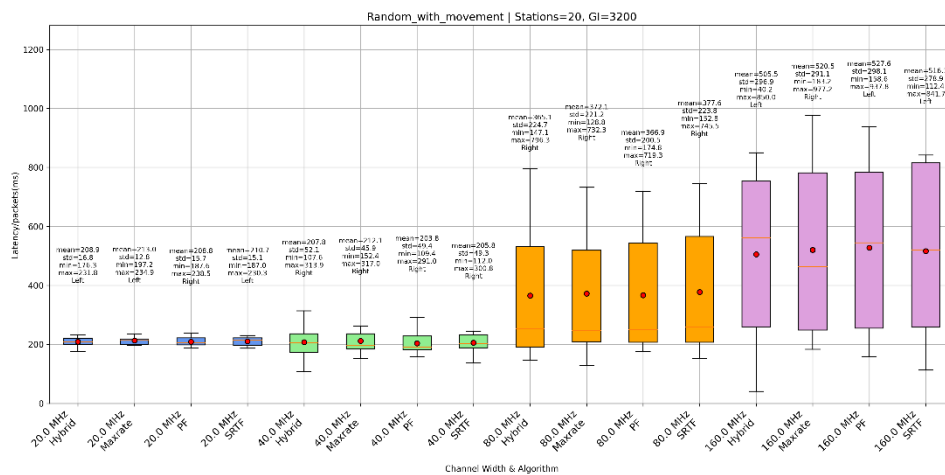
Γραφική Παρ.56. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγορίθμου για 5 σταθμούς



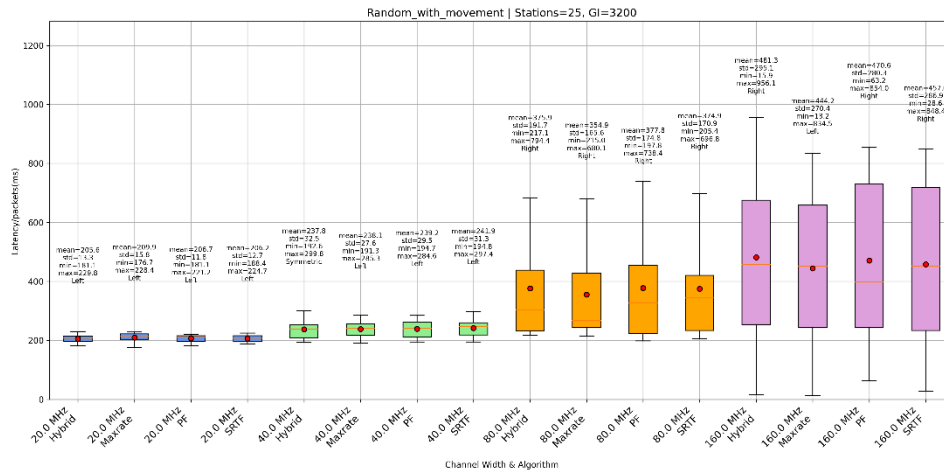
Γραφική Παρ.57. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγορίθμου για 10 σταθμούς



Γραφική Παρ.58. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγορίθμου για 15 σταθμούς



Γραφική Παρ.59. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγορίθμου για 20 σταθμούς



Γραφική Παρ.60. Αποτελέσματα Avg. Latency ανά channel Width & Αλγόριθμου για 25 σταθμούς

5.2 Αποτελέσματα με Δυναμικό Traffic– Γραφικές Παραστάσεις.

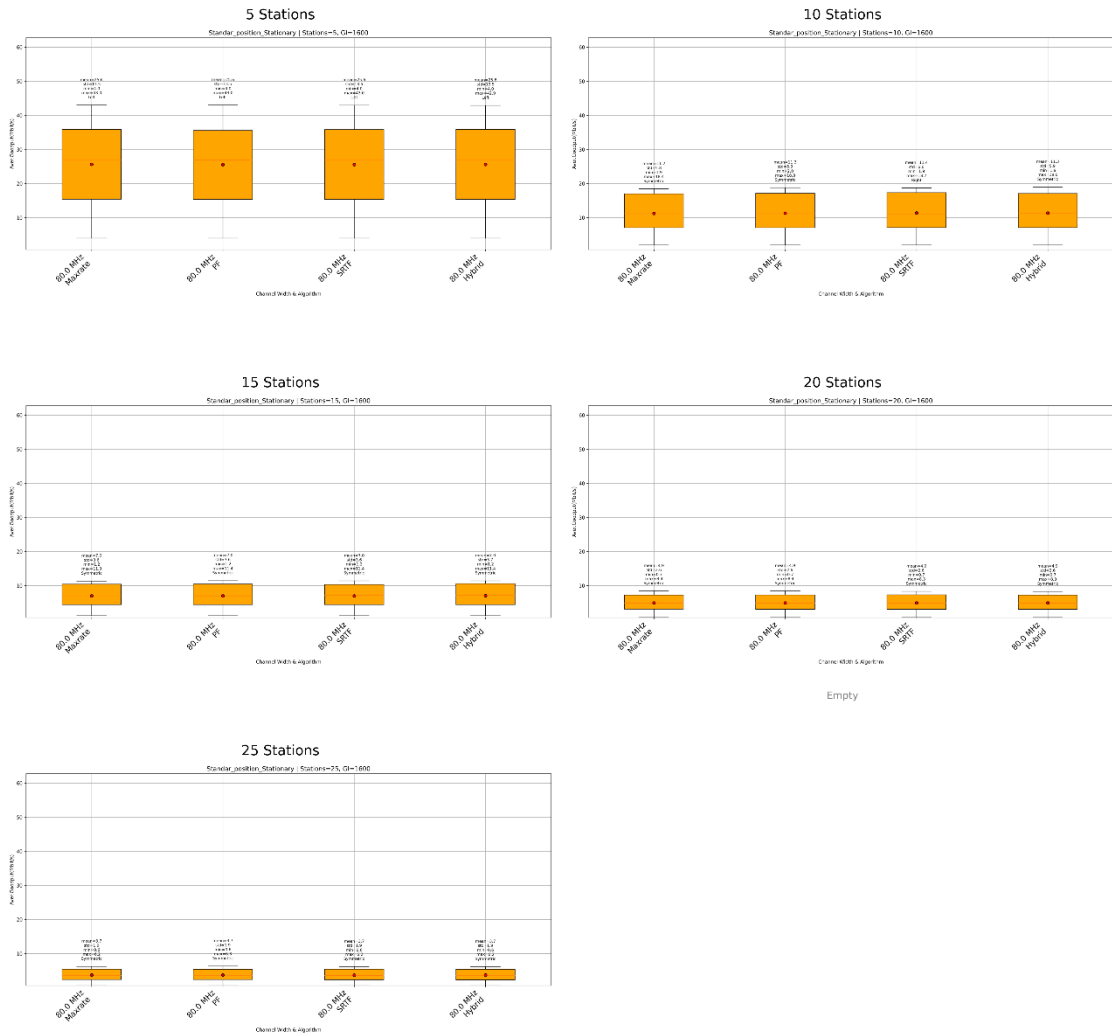
Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των σεναρίων που περιεγραφήκαν στο Κεφάλαιο 4, για Δυναμικό Traffic .Κάθε box αντιστοιχεί σε έναν συγκεκριμένο αλγόριθμο και εύρος καναλιού 80 MHz, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις τιμές MCS από 0 έως 11. Επιπλέον η διάμεσος σημειώνεται με πορτοκαλί γραμμή, ο μέσος όρος με κόκκινο κύκλο, ενώ οι outliers απεικονίζονται με μαύρους κύκλους.

5.2.1 Αποτελέσματα για Goodput με Guard Interval 1600 ns

Σε αυτό το υπο-υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις του Average Goodput για όλους τους αλγόριθμους, για όλα τα εύρη καναλιών, με το Guard Interval σταθερό στα 1600 ns.

5.2.1.1 Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση

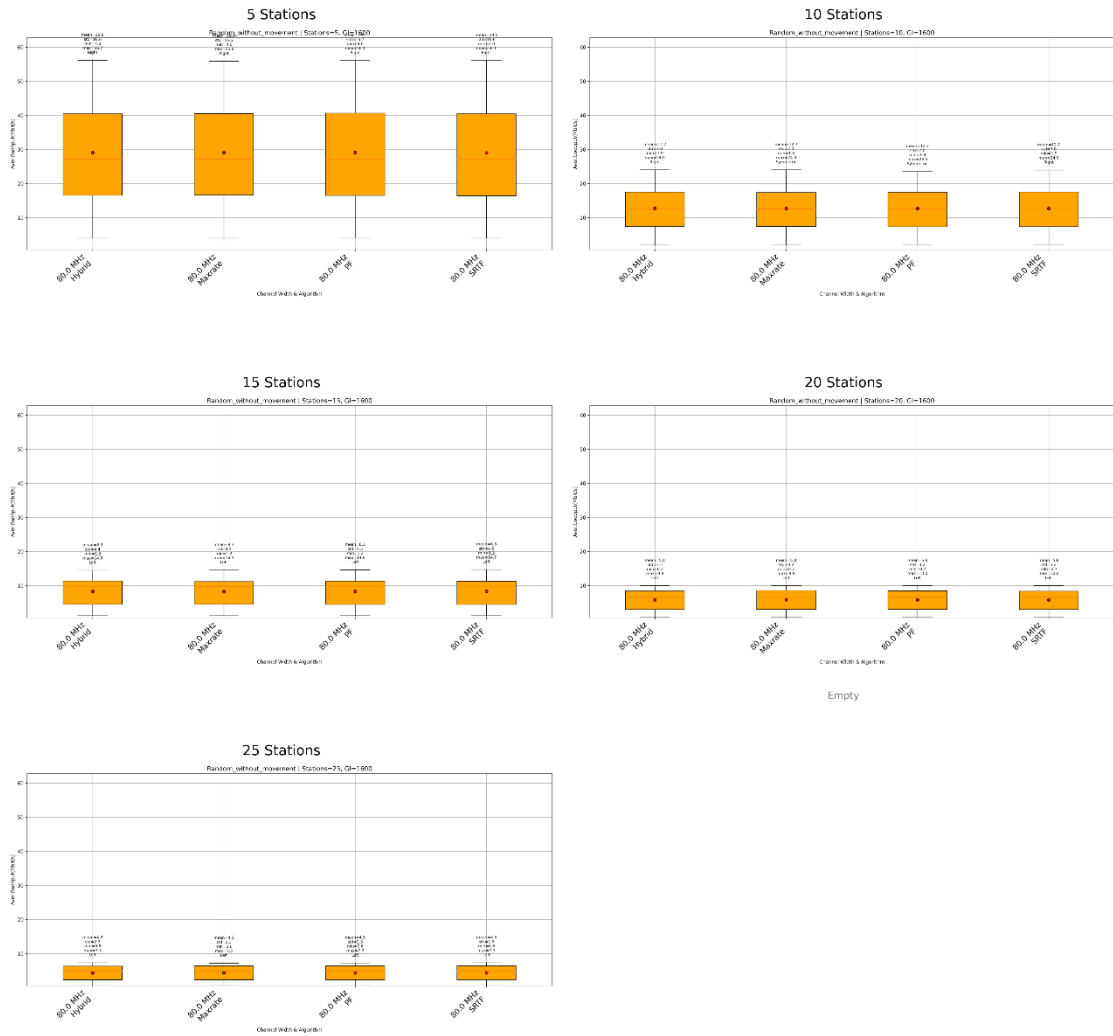
Standar_position_Stationary | Συνδυασμένα Boxplots για GI=1600



Γραφική Παρ.61. Αποτελέσματα Avg.Goodput για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

5.2.1.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση

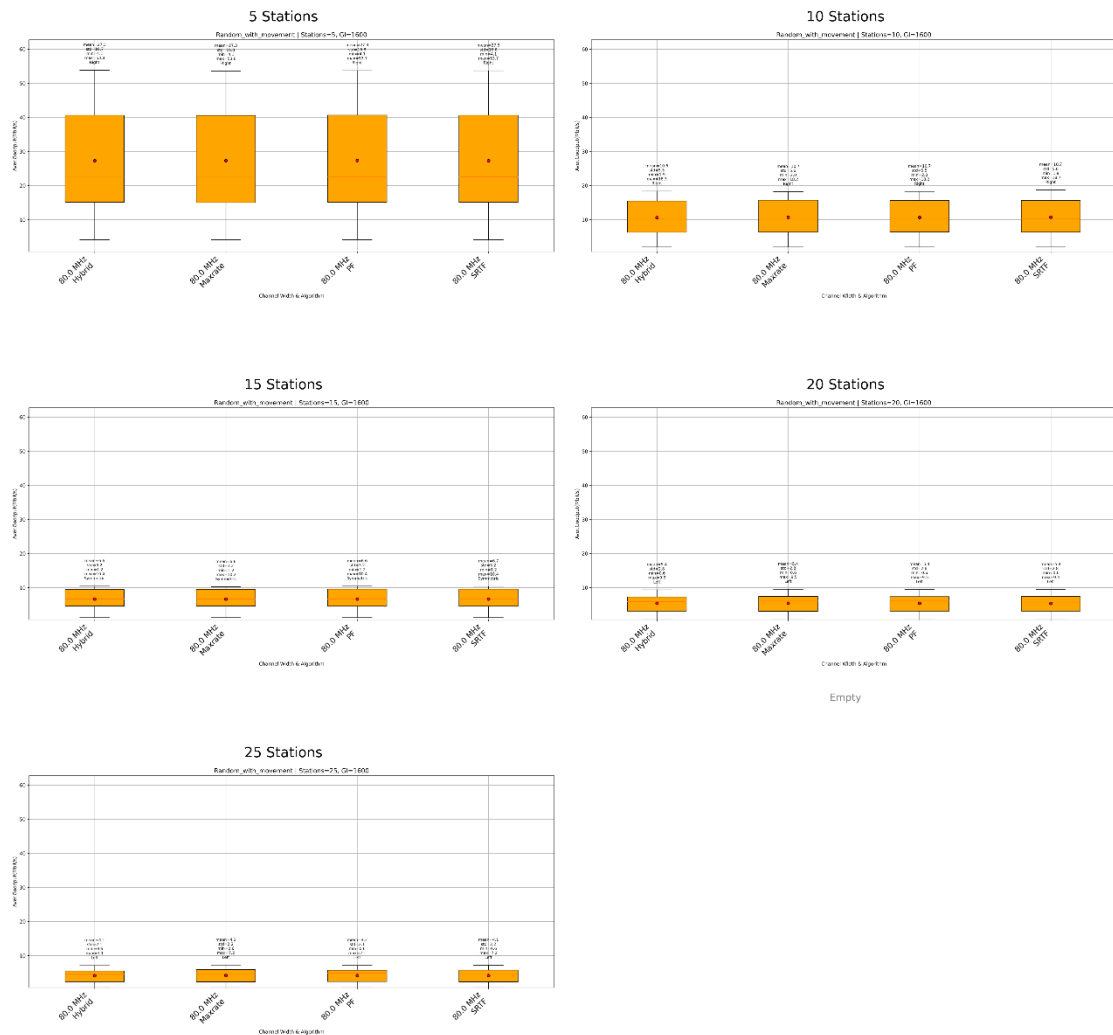
Random_without_movement | Συνδυασμένα Boxplots για GI=1600



Γραφική Παρ.62. Αποτελέσματα Avg.Goodput για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

5.2.1.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση

Random_with_movement | Συνδυασμένα Boxplots για GI=1600



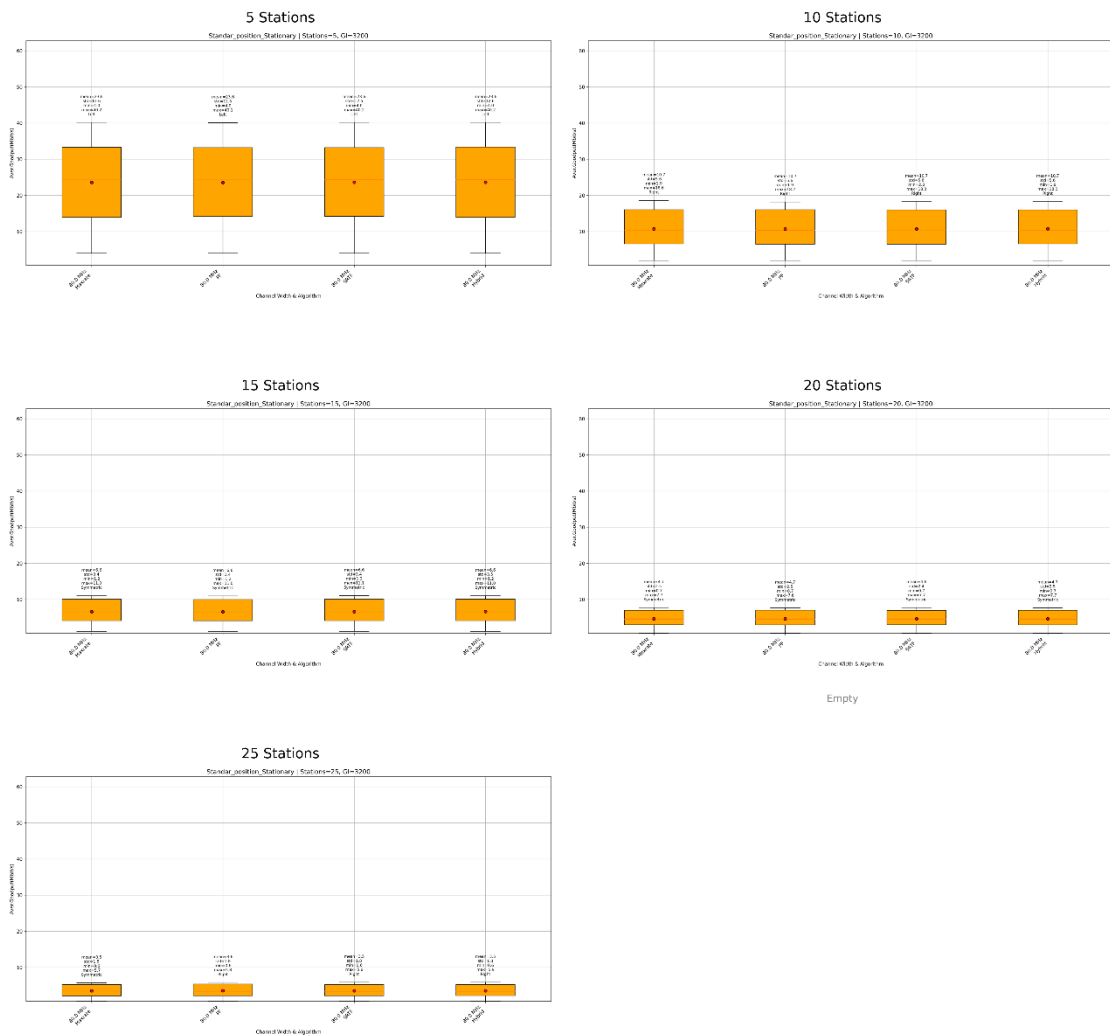
Γραφική Παρ.63. Αποτελέσματα Avg.Goodput για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

5.2.2 Αποτελέσματα για Goodput με Guard Interval 3200 ns

Σε αυτό το υπο-υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις του Average Goodput για όλους τους αλγόριθμους, για όλα τα εύρη καναλιών, με το Guard Interval σταθερό στα 3200 ns.

5.2.2.1 Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση

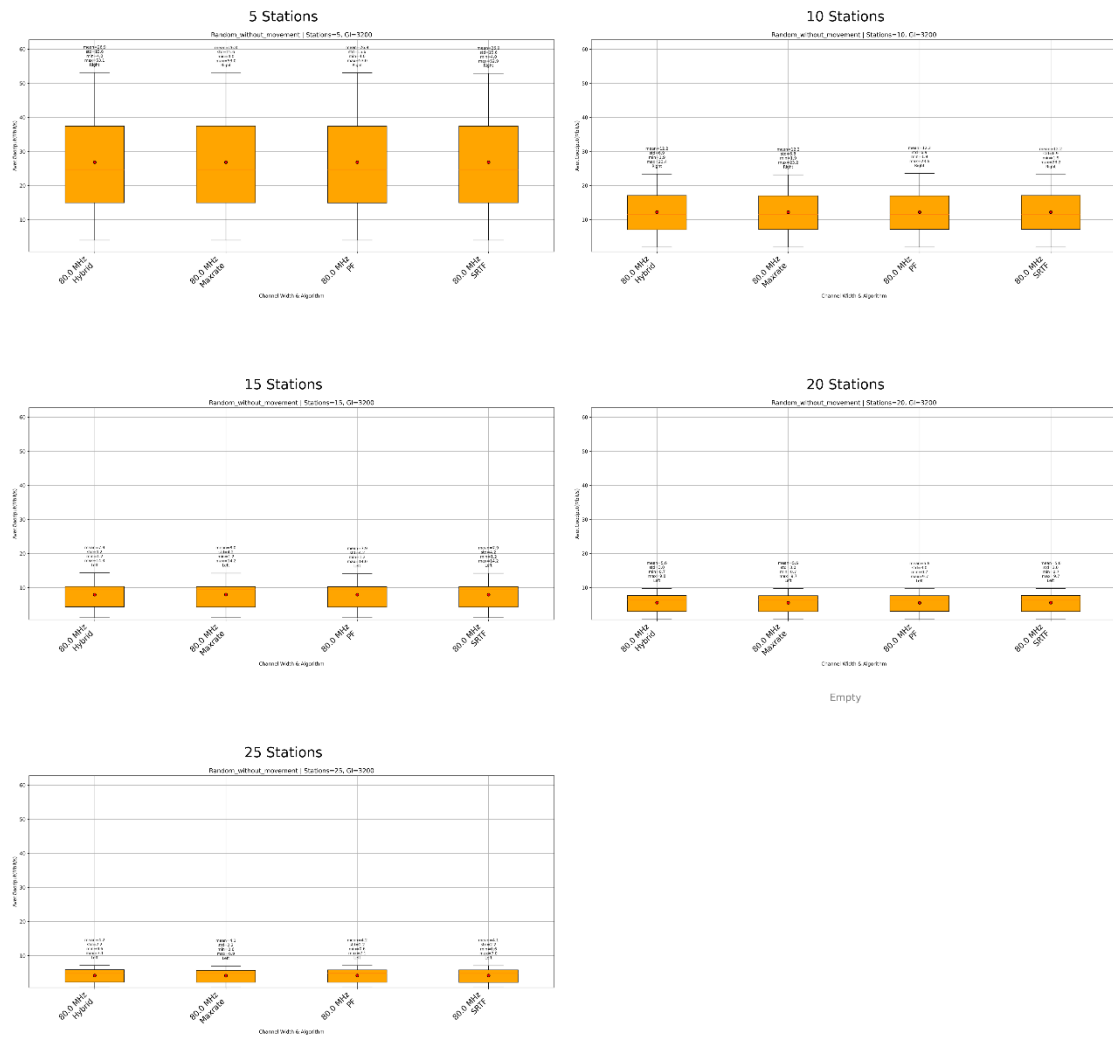
Standar_position_Stationary | Συνδυασμένα Boxplots για GI=3200



Γραφική Παρ.64. Αποτελέσματα Avg.Goodput για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

5.2.2.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση

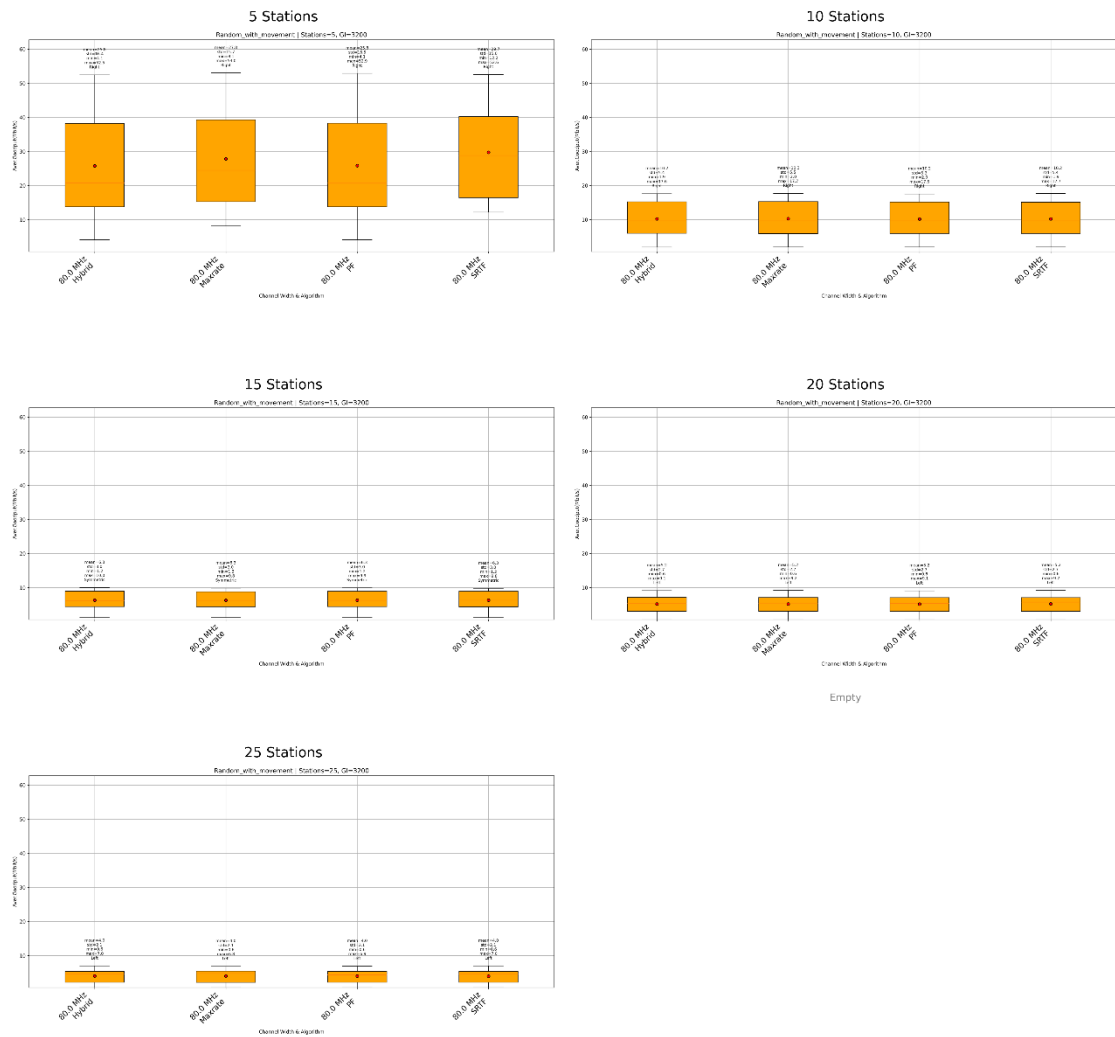
Random_without_movement | Συνδυασμένα Boxplots για GI=3200



Γραφική Παρ.65. Αποτελέσματα Avg.Goodput για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

5.2.2.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση

Random_with_movement | Συνδυασμένα Boxplots για GI=3200



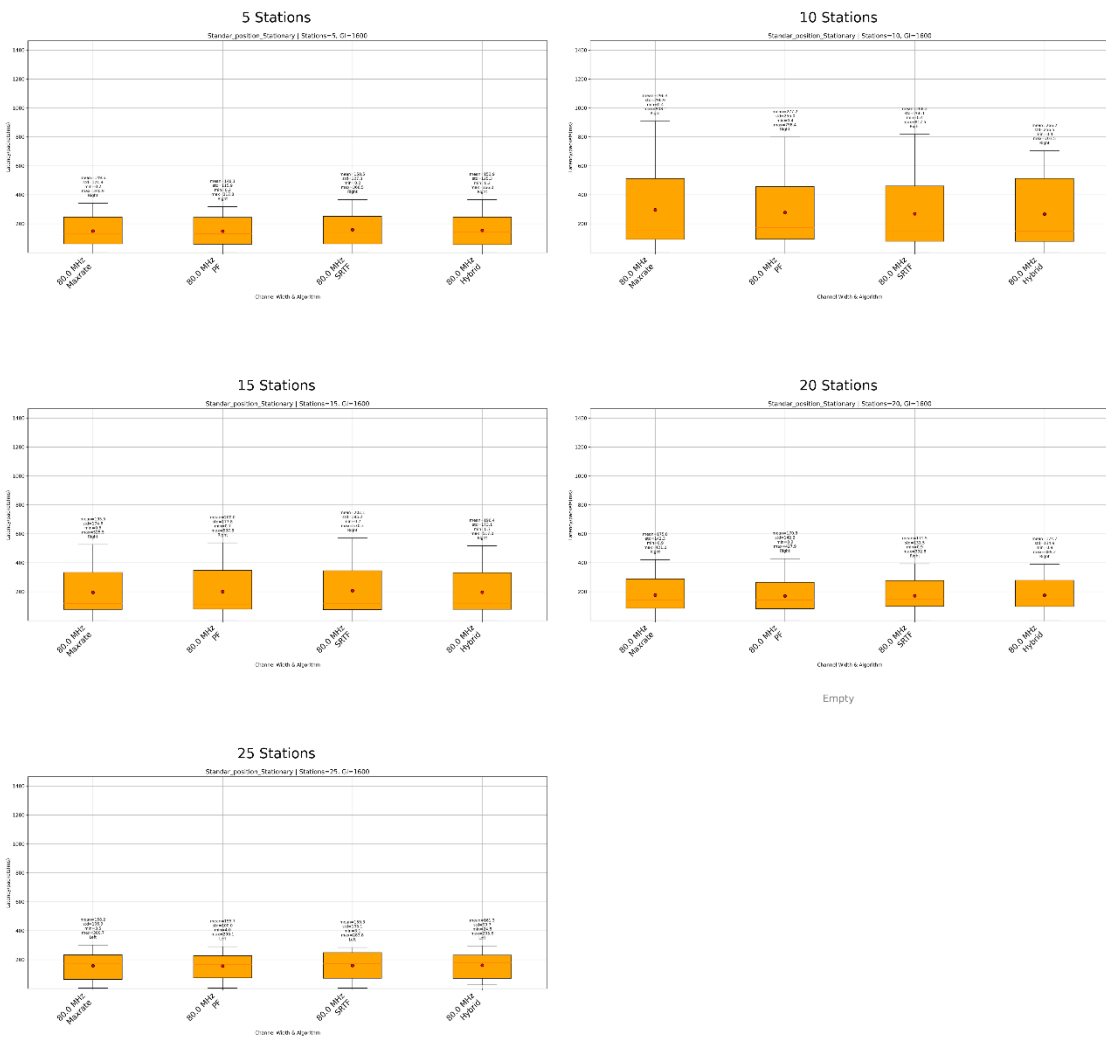
Γραφική Παρ.66. Αποτελέσματα Avg.Goodput για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

5.2.3 Αποτελέσματα για Latency με Guard Interval 1600 ns

Σε αυτό το υπο-υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις του Average Latency για όλους τους αλγόριθμους, για όλα τα εύρη καναλιών, με το Guard Interval σταθερό στα 1600 ns.

5.2.3.1 Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση

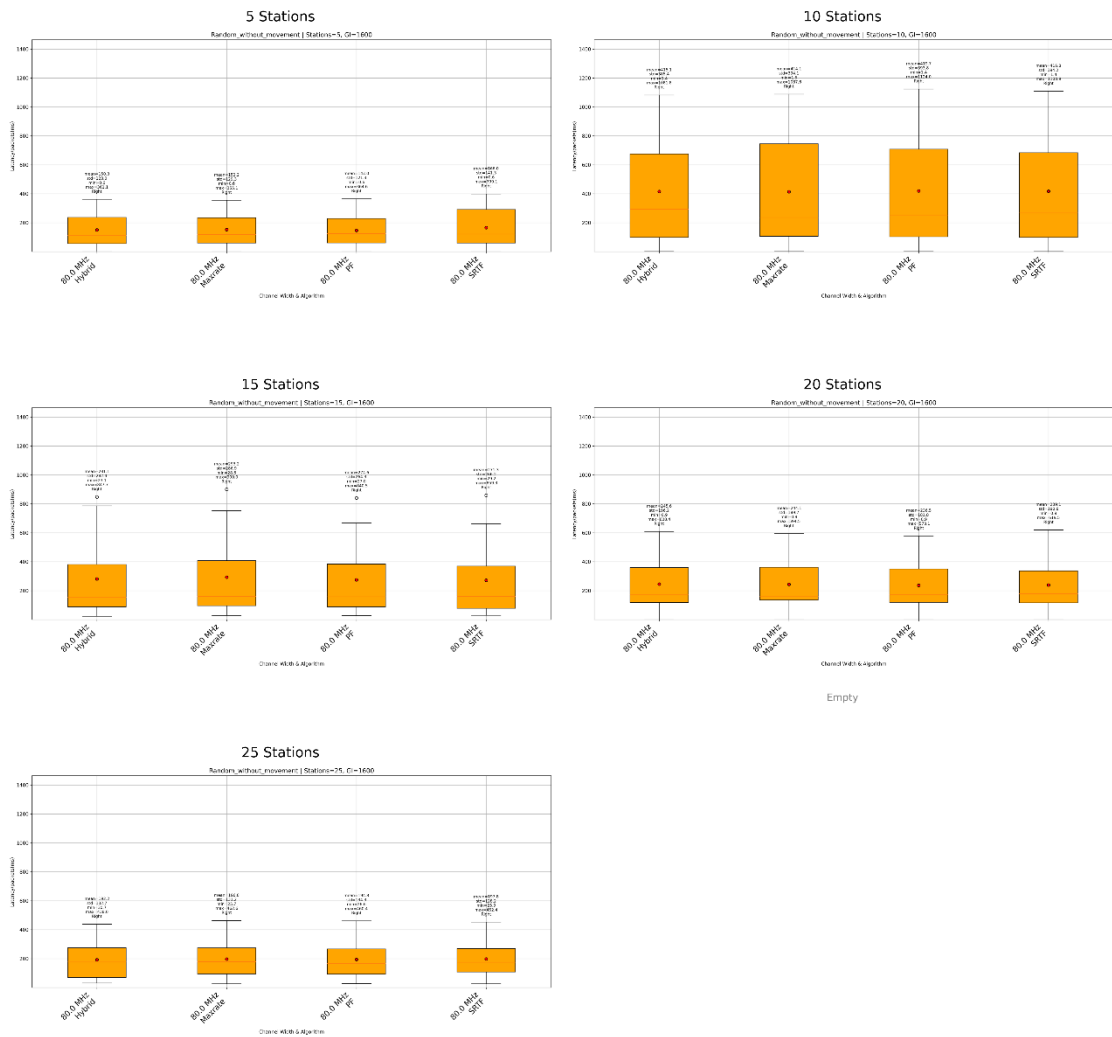
Standar_position_Stationary | Συνδυασμένα Boxplots για GI=1600



Γραφική Παρ.67. Αποτελέσματα Avg.Latency για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

5.2.3.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση

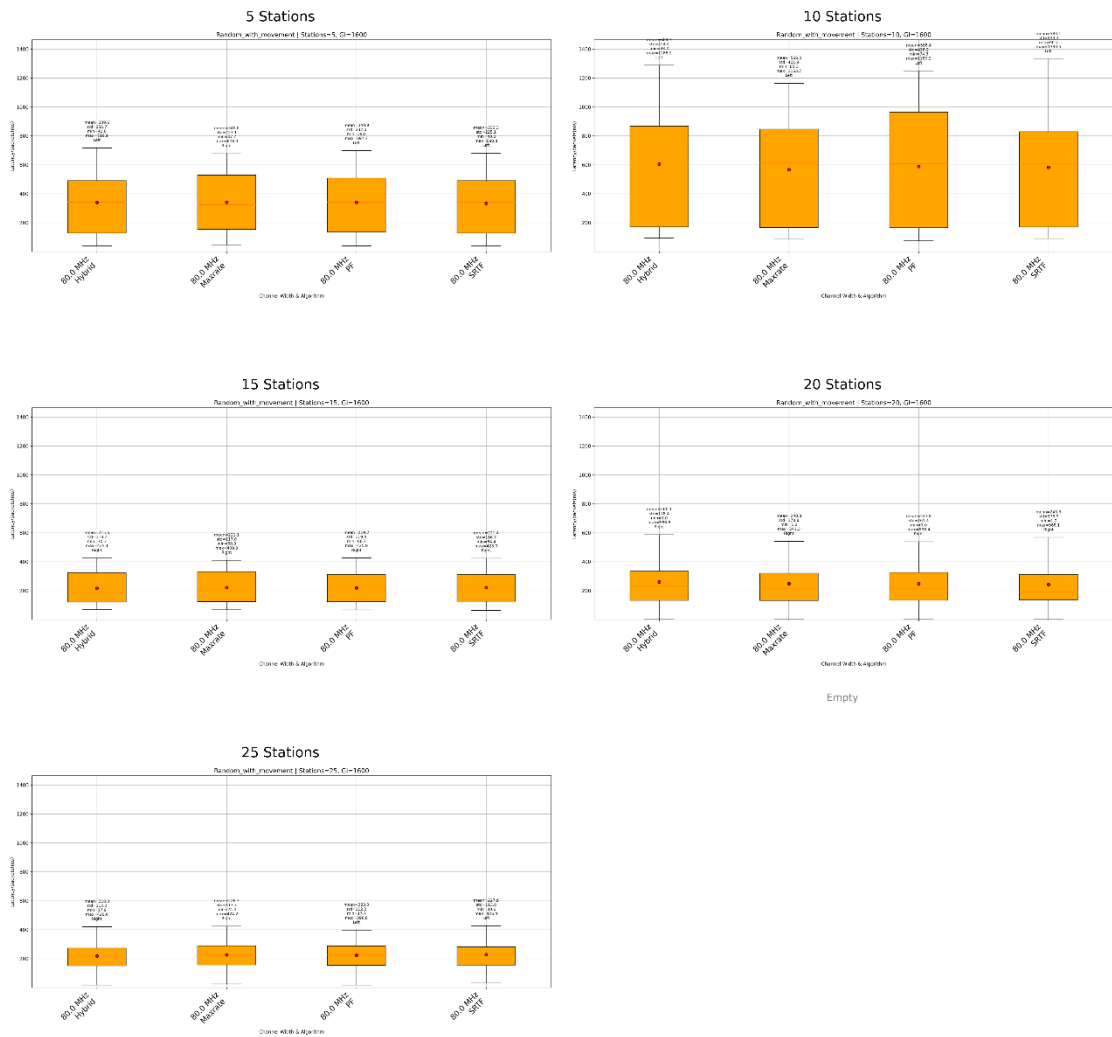
Random_without_movement | Συνδυασμένα Boxplots για GI=1600



Γραφική Παρ.68. Αποτελέσματα Avg.Latency για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

5.2.3.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση

Random_with_movement | Συνδυασμένα Boxplots για GI=1600



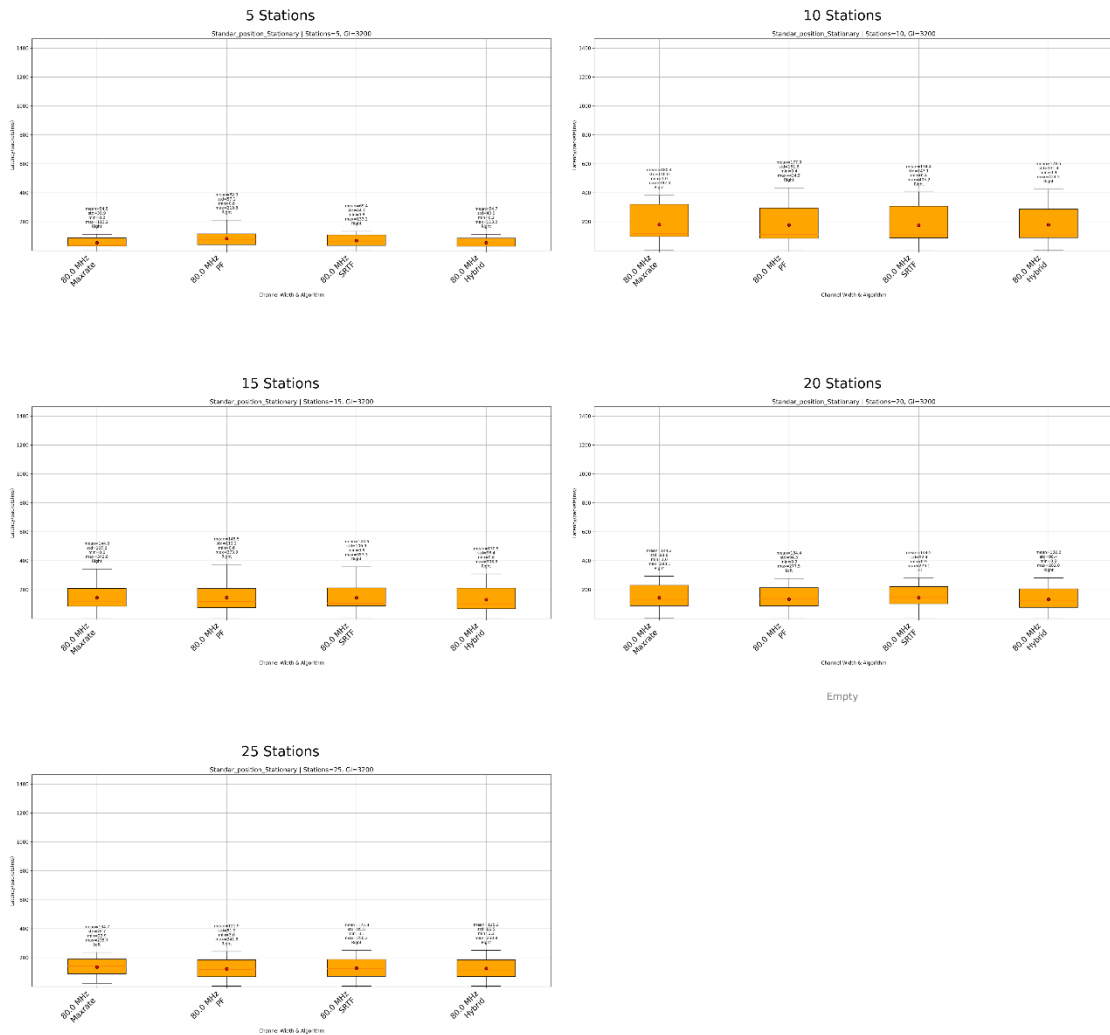
Γραφική Παρ.69. Αποτελέσματα Avg.Latency για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

5.2.4 Αποτελέσματα για Latency με Guard Interval 3200 ns

Σε αυτό το υπο-υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις του Average Latency για όλους τους αλγόριθμους, για όλα τα εύρη καναλιών, με το Guard Interval σταθερό στα 3200 ns.

5.2.4.1 Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση

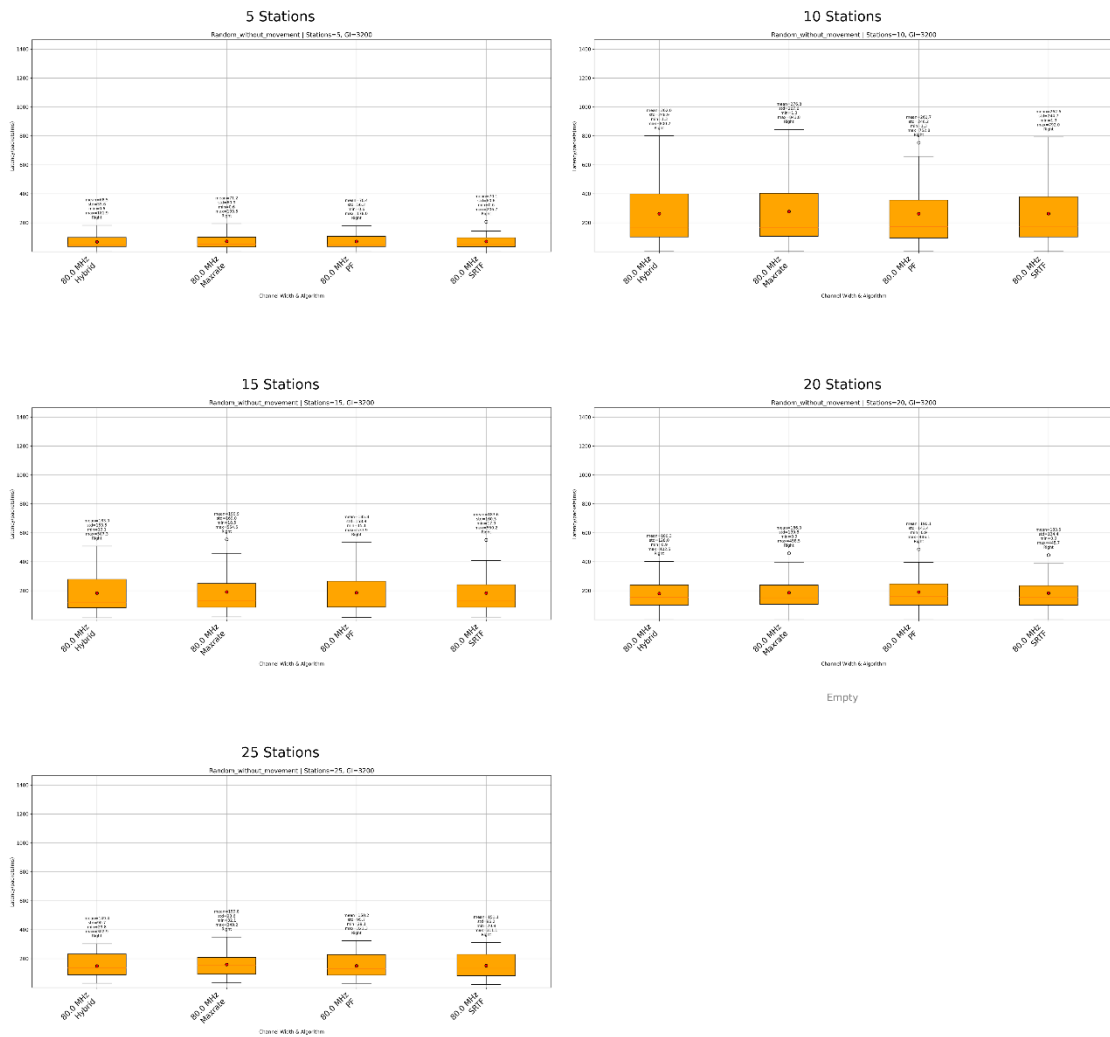
Standar_position_Stationary | Συνδυασμένα Boxplots για GI=3200



Γραφική Παρ.70. Αποτελέσματα Avg.Latency για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

5.2.4.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση

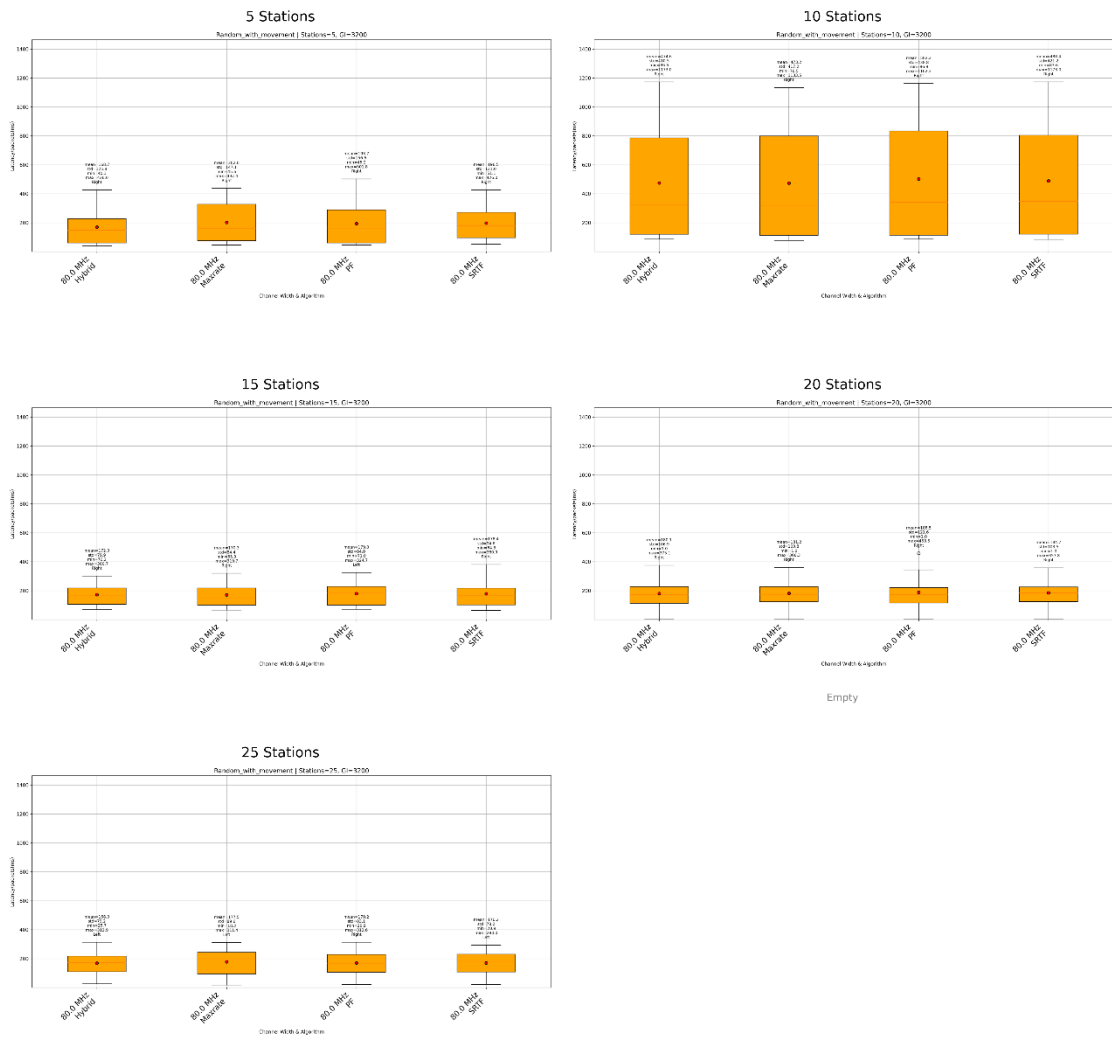
Random_without_movement | Συνδυασμένα Boxplots για GI=3200



Γραφική Παρ.71. Αποτελέσματα Avg.Latency για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

5.2.4.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση

Random_with_movement | Συνδυασμένα Boxplots για GI=3200



Γραφική Παρ.72. Αποτελέσματα Avg.Latency για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

Κεφάλαιο 6

Αποτελέσματα – Γραφικές Παραστάσεις για Complexity Analysis με Continuous Traffic

6.1 Αποτελέσματα – Γραφικές Παραστάσεις

6.2 CPU Clocks ανά πλήθος σταθμών για κάθε αλγόριθμο με Guard Interval 1600 ns

6.2.1 Σταθερές θέσης με $R=6$ (Ακτίνα) χωρίς κίνηση

6.2.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση

6.2.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση

6.3 CPU Clocks ανά πλήθος σταθμών για κάθε αλγόριθμο με Guard Interval 3200 ns

6.3.1 Σταθερές θέσης με $R=6$ (Ακτίνα) χωρίς κίνηση

6.3.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση

6.3.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση

6.4 Memory ανά πλήθος σταθμών για κάθε αλγόριθμο με Guard Interval 1600 ns

6.4.1 Σταθερές θέσης με $R=6$ (Ακτίνα) χωρίς κίνηση

6.4.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση

6.4.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση

6.5 Memory ανά πλήθος σταθμών για κάθε αλγόριθμο με Guard Interval 3200 ns

6.5.1 Σταθερές θέσης με $R=6$ (Ακτίνα) χωρίς κίνηση

6.5.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση

6.5.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση

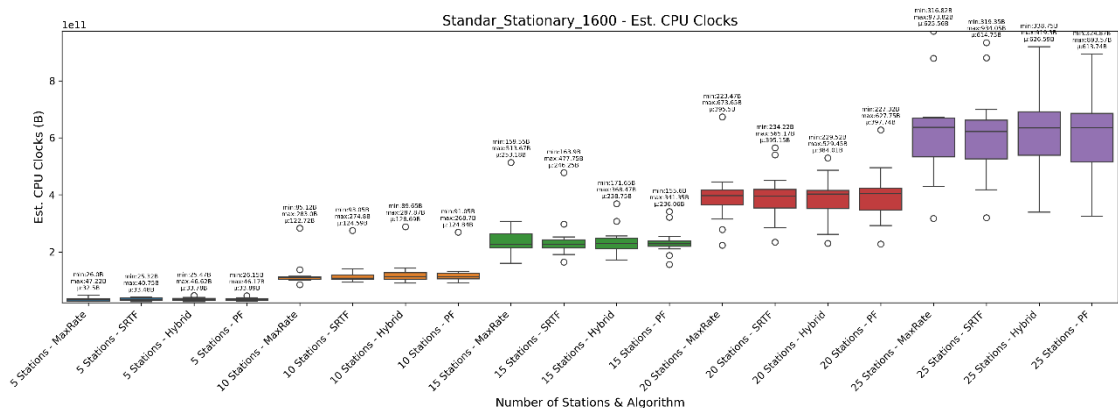
6.1 Αποτελέσματα – Γραφικές Παραστάσεις

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε επίπεδο υπολογιστικής πολυπλοκότητας, μετρώντας τα CPU Clocks και τη χρήση μνήμης (Memory) των σεναρίων που περιεγραφήκαν στο Κεφάλαιο 4, για Continuous Traffic. Κάθε box αντιστοιχεί σε έναν συγκεκριμένο αλγόριθμο, σε συγκεκριμένο αριθμό από σταθμούς και εύρος καναλιού 80MHz, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις τιμές MCS από 0 έως 11.

6.2 CPU CLOCKS ανά πλήθος σταθμών για κάθε αλγόριθμο με GI = 1600 ns

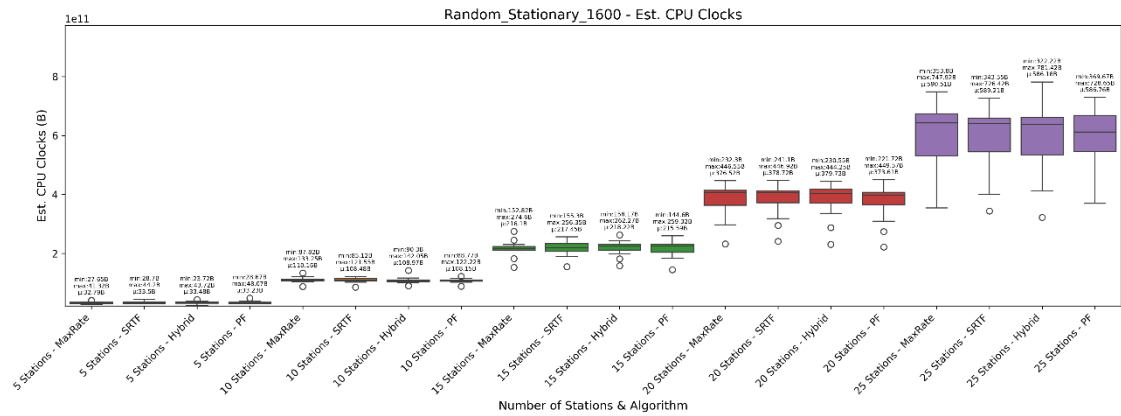
Σε αυτό το υπο-υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις για CPU clocks προς κάθε αλγόριθμο και συγκεκριμένο αριθμό από σταθμούς, με Guard Interval 1600 ns.

6.2.1 Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση



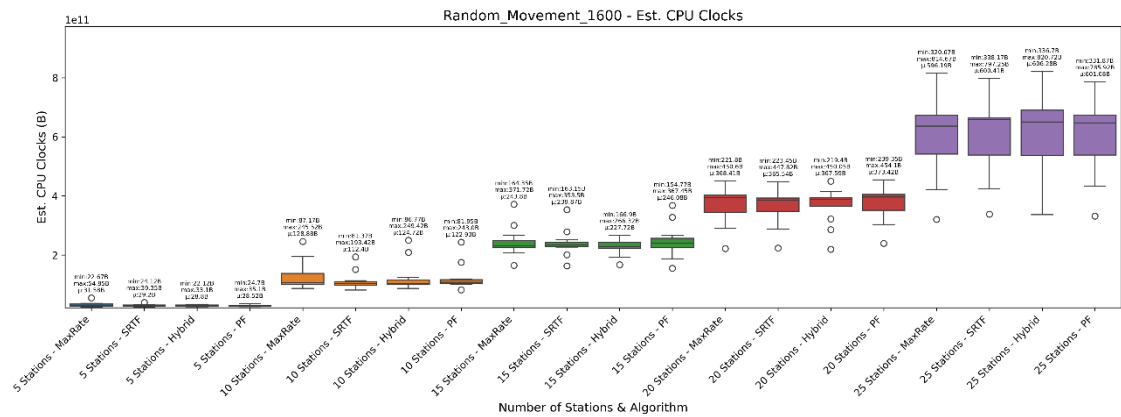
Γραφική Παρ.73. Est.CPU Clocks για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

6.2.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση



Γραφική Παρ.74. Est.CPU Clocks για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

6.2.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση

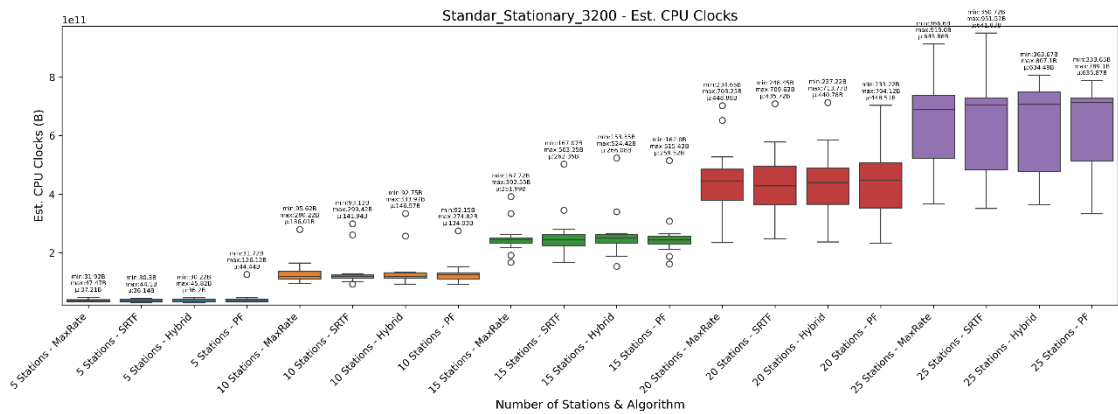


Γραφική Παρ.75. Est.CPU Clocks για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

6.3 CPU clocks ανά πλήθος σταθμών για κάθε αλγόριθμο με GI = 3200 ns

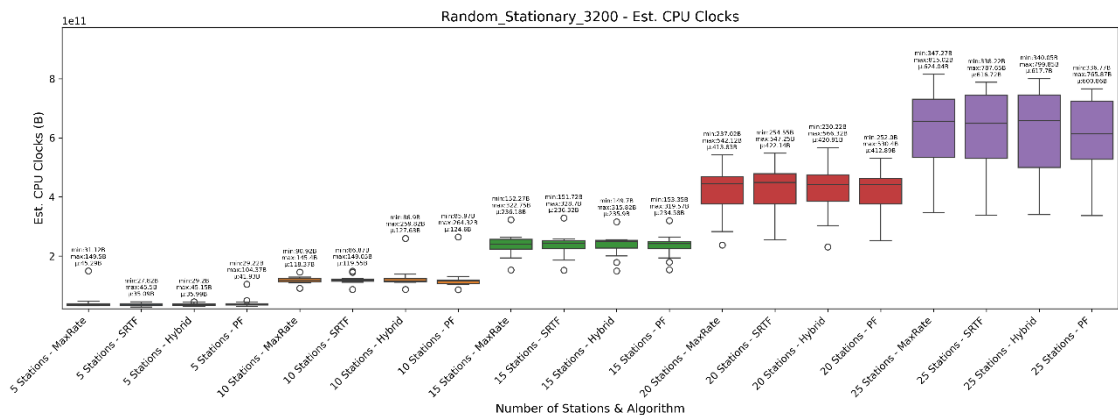
Σε αυτό το υπο-υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις για CPU clocks προς κάθε αλγόριθμο και συγκεκριμένο αριθμό από σταθμούς, με Guard Interval 3200 ns.

6.3.1 Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση



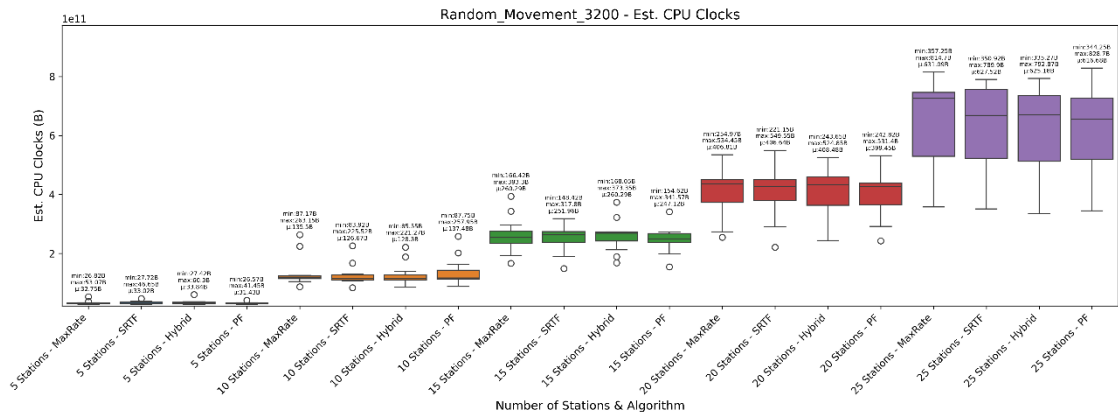
Γραφική Παρ.76. Est.CPU Clocks για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

6.3.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση



Γραφική Παρ.77. Est.CPU Clocks για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

6.3.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση

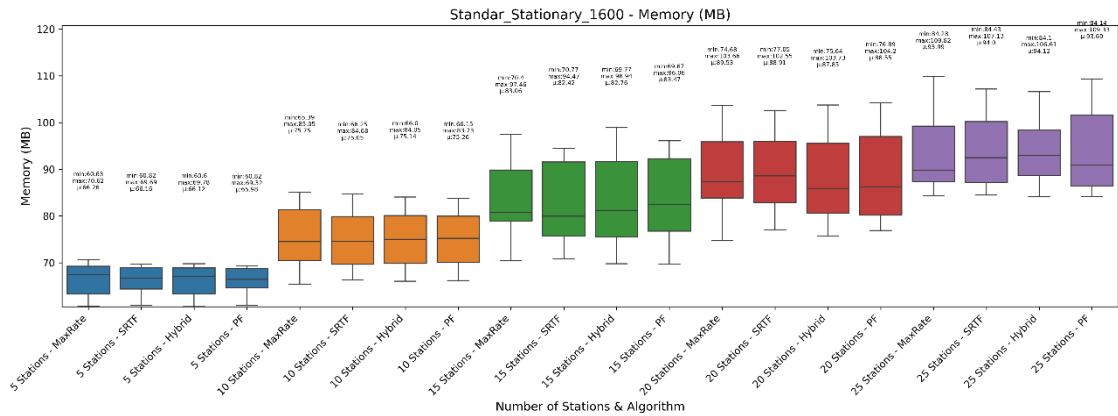


Γραφική Παρ.78. Est.CPU Clocks για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

6.4 Memory ανά πλήθος σταθμών για κάθε αλγόριθμο με GI = 1600 ns

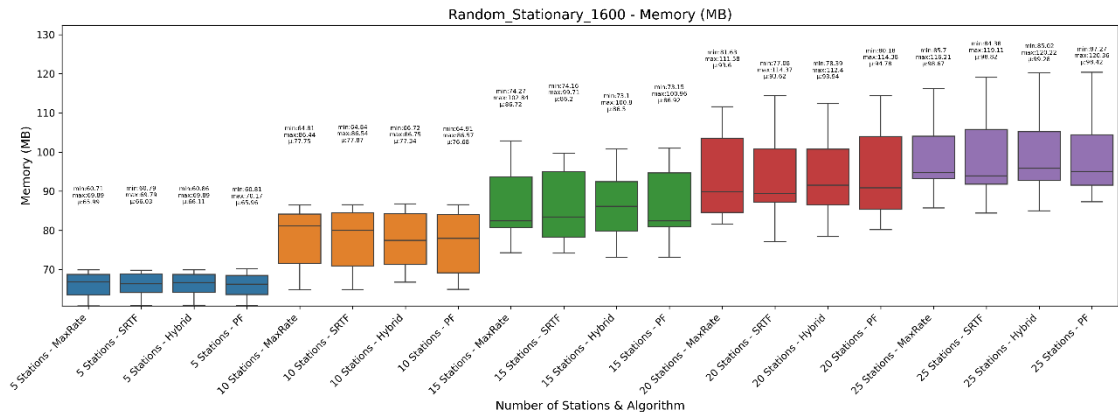
Σε αυτό το υπο-υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις για Memory προς κάθε αλγόριθμο και συγκεκριμένο αριθμό από σταθμούς, με Guard Interval 1600 ns.

6.4.1 Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση



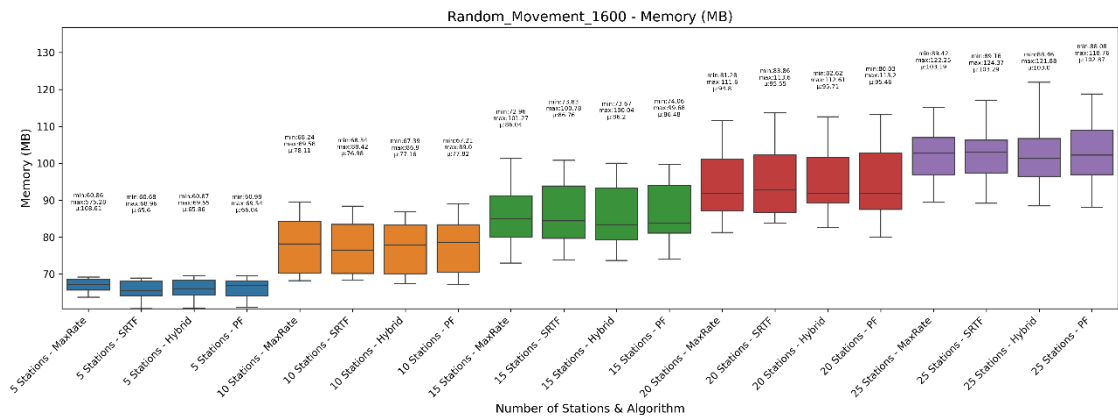
Γραφική Παρ.79. Memory(MB) για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

6.4.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση



Γραφική Παρ.80. Memory(MB) για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

6.4.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση

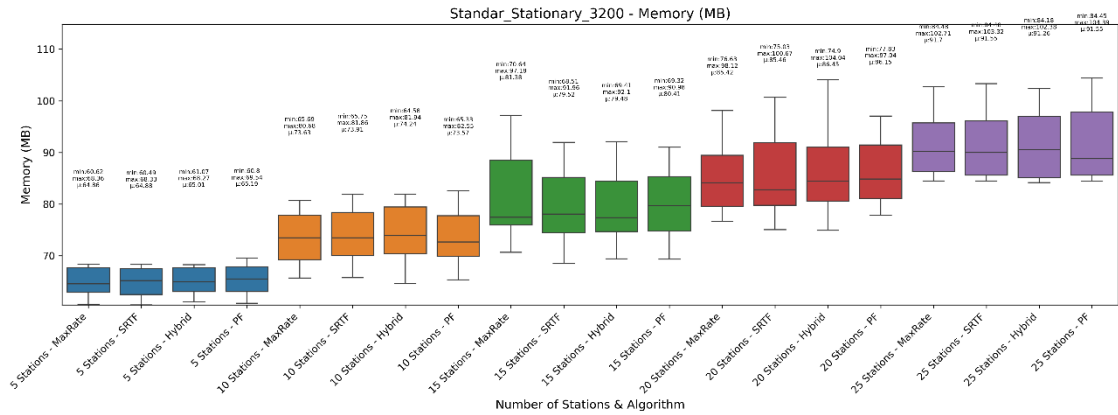


Γραφική Παρ.81. Memory(MB) για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

6.5 Memory ανά πλήθος σταθμών για κάθε αλγόριθμο με Guard Interval 3200 ns

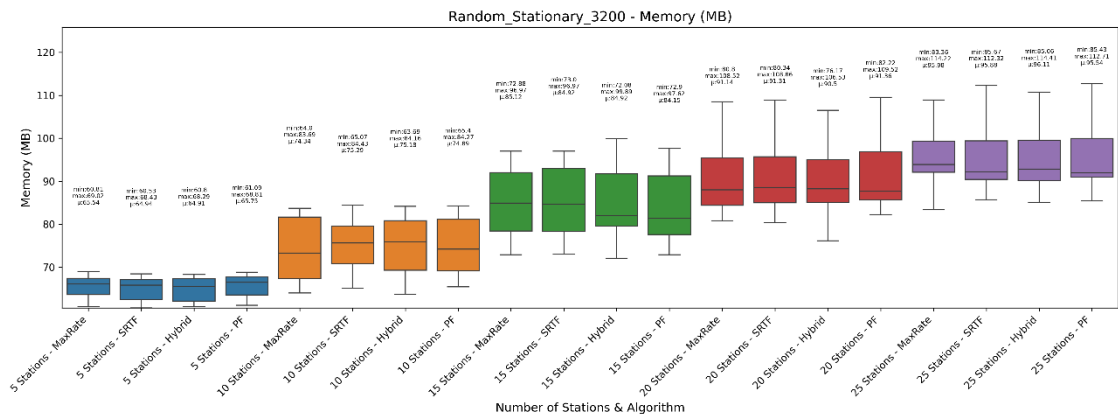
Σε αυτό το υπο-υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις για Memory προς κάθε αλγόριθμο και συγκεκριμένο αριθμό από σταθμούς, με Guard Interval 3200 ns.

6.5.1 Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση



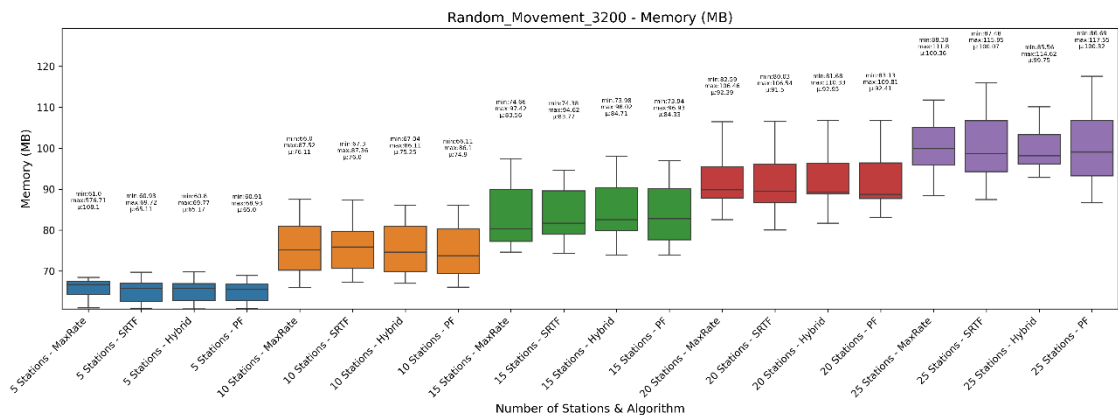
Γραφική Παρ.82. Est.CPU Clocks για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

6.5.2 Τυχαίες θέσης χωρίς κίνηση



Γραφική Παρ.83. Est.CPU Clocks για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

6.5.3 Τυχαίες θέσης με κίνηση



Γραφική Παρ.84. Est.CPU Clocks για channel Width 80 & 5,10,15,20,25 για όλους τους αλγόριθμους.

Κεφάλαιο 7

Ανάλυση Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα

7.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα - Performance Evaluation

7.1.1 Απόδοση Goodput & Latency για Continuous Traffic

7.1.2 Απόδοση (Goodput & Latency) για Dynamic Traffic

7.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα - Complexity Analysis

7.2.1 Απόδοση CPU Clocks & Μνήμη για Continuous Traffic

7.3 Γενικό Συμπέρασμα Αποτελεσμάτων

7.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα για Performance Evaluation

7.1.1 Απόδοση Goodput & Latency για Continuous Traffic

Η σύγκριση των τεσσάρων αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης, τόσο ως προς το Average Goodput όσο και ως προς το Average Latency, δεν ανέδειξε κάποιον με σταθερά καλύτερη απόδοση σε όλες τις περιπτώσεις, ώστε να δικαιολογεί την αποκλειστική επιλογή κάποιου.

Η ανάλυση των γραφικών παραστάσεων των Υπο-υποκεφαλαίων 5.1.1–5.1.4 δείχνει ότι η αύξηση του αριθμού των σταθμών οδηγεί σε μείωση του Average Goodput και αύξηση του Average Latency, λόγω της μεγαλύτερης συμφόρησης στο κοινό μέσο μετάδοσης.

Επιπλέον, παρατηρείται ότι η χρήση μεγαλύτερου Guard Interval (3200 ns) οδηγεί σε υψηλότερες τιμές Average Goodput και χαμηλότερες τιμές Average Latency, κάτι που υποδηλώνει καλύτερη συνολική απόδοση σε σταθερά σενάρια κυκλοφορίας. Συγκεκριμένα, αυτό οφείλεται στη μείωση των φαινομένων παρεμβολών, γεγονός που περιορίζει την εμφάνιση συγκρούσεων (collisions) και, κατά συνέπεια, μειώνει τη συχνότητα ενεργοποίησης του μηχανισμού backoff. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την

αύξηση του Goodput και τη μείωση του Latency, καθώς αποφεύγονται οι καθυστερήσεις που προκαλούνται από επαναμεταδόσεις και αναμονές για πρόσβαση στο μέσο.

7.1.2 Απόδοση (Goodput & Latency) για Dynamic Traffic

Όπως και στην περίπτωση του Continuous Traffic, η σύγκριση των τεσσάρων αλγορίθμων δεν έδειξε κάποιον που να υπερέχει σταθερά, ούτε ως προς το Average Goodput, ούτε ως προς το Average Latency.

Η μελέτη των γραφικών παραστάσεων στα υπο-υποκεφάλαια 5.2.1–5.2.4 δείχνει ότι, και σε σενάρια με δυναμική κυκλοφορία, η αύξηση του αριθμού των σταθμών οδηγεί σε μείωση του Average Goodput και αύξηση του Average Latency. Ωστόσο, παρατηρείται ότι το Average Goodput είναι γενικά υψηλότερο σε σχέση με το Continuous Traffic, λόγω του μικρότερου φόρτου στο δίκτυο.

Σε αντίθεση με το Continuous Traffic, στα σενάρια με Δυναμική ροή δεδομένων, η χρήση μικρότερου Guard Interval (1600 ns) οδηγεί σε καλύτερες επιδόσεις Average Goodput, αφού το κανάλι δεν είναι συνεχώς κορεσμένο, καθώς επίσης και το δίκτυο δεν έχει τόσο μεγάλο φόρτο δεδομένων και το σύστημα μπορεί να εκμεταλλευτεί πιο αποδοτικά το μικρότερο διάστημα προστασίας.

Ωστόσο, όσον αφορά το Average Latency, η τάση που παρατηρήθηκε είναι παρόμοια με αυτή του Continuous Traffic, δηλαδή η χρήση μεγαλύτερου Guard Interval (3200 ns) συνεχίζει να προσφέρει καλύτερες επιδόσεις.

7.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα για το Complexity Analysis

7.2.1 Απόδοση CPU Clocks & Μνήμη για Continuous Traffic

Η ανάλυση των γραφικών παραστάσεων των Υπο-υποκεφαλαίων 6.1.1–6.1.4 δείχνει ότι οι απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους επηρεάζονται κυρίως από το Guard Interval, και όχι τόσο από τον ίδιο τον αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης.

Πιο συγκεκριμένα :

- Ο αριθμός των CPU Clocks είναι αυξημένος για Guard Interval 3200 ns, γεγονός που υποδηλώνει μεγαλύτερη υπολογιστική προσπάθεια για τη διαχείριση των πόρων και τη διατήρηση της αυξημένης απόδοσης. Αυτό συμβαίνει επειδή κάθε σύμβολο παραμένει ενεργό για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, απαιτώντας περισσότερη επεξεργασία για τον συγχρονισμό, την αποφυγή παρεμβολών και τη διασφάλιση αξιόπιστης μετάδοσης. Έτσι, η βελτιωμένη απόδοση συνοδεύεται από αυξημένο υπολογιστικό κόστος στο επίπεδο του επεξεργαστή.
- Αντιθέτως, η κατανάλωση μνήμης ήταν υψηλότερη σε σενάρια με Guard Interval 1600 ns, πιθανότατα λόγω των πιο συχνών ενεργοποιήσεων μηχανισμών ελέγχου και χρονοδρομολόγησης.

Σε κάθε περίπτωση, δεν εντοπίστηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των τεσσάρων αλγορίθμων ούτε ως προς τους CPU Clocks ούτε ως προς τη χρήση μνήμης, γεγονός που υποδεικνύει ότι έχουν παρόμοιο υπολογιστικό αποτύπωμα.

7.3 Γενικό Συμπέρασμα Αποτελεσμάτων

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων για τα σενάρια με Continuous και Δυναμική κυκλοφορία δείχνει ότι, κανένας από τους τέσσερις αλγορίθμους χρονοδρομολόγησης δεν εμφάνισε σταθερά ανώτερη απόδοση, ούτε ως προς το Average Goodput, ούτε ως προς το Average Latency.

Αντίθετα, οι παράμετροι του φυσικού επιπέδου — και ειδικότερα το Guard Interval, το Channel Width και ο δείκτης MCS — αποδείχθηκαν οι καθοριστικότεροι παράγοντες για την απόδοση του συστήματος. Βάσει των γραφικών παραστάσεων των Παραρτημάτων Α και Β, σε μία γενική εικόνα οι υψηλότερες τιμές Goodput επιτεύχθηκαν για:

- MCS μεταξύ 5–7
- Channel Width 80 ή 160 MHz
- Guard Interval 3200 ns

Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου ο κύριος στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του Average Latency, αποδοτικότερες τιμές παρατηρούνται για μικρότερα εύρη καναλιού (20 και 40 MHz).

Σε ό,τι αφορά την υπολογιστική πολυπλοκότητα, τα ευρήματα έδειξαν ότι:

- Ο αριθμός CPU Clocks ήταν αυξημένος σε σενάρια με Guard Interval 3200 ns, αντανακλώντας την επιπλέον υπολογιστική προσπάθεια για επίτευξη αυξημένης απόδοσης.
- Η κατανάλωση μνήμης ήταν μεγαλύτερη σε σενάρια με Guard Interval 1600 ns, πιθανόν λόγω της συχνότερης ενεργοποίησης μηχανισμών διαχείρισης και χρονοδρομολόγησης.

Αξιοσημείωτο είναι ότι, και στις δύο παραμέτρους πολυπλοκότητας, δεν καταγράφηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των αλγορίθμων, γεγονός που δείχνει ότι όλοι οι αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης έχουν παρόμοιο προφίλ κατανάλωσης πόρων.

Κεφάλαιο 8

Σύνοψη & Μελλοντική Εργασία

8.1 Σύνοψη

8.2 Μελλοντική Εργασία

8.1 Σύνοψη

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση της απόδοσης του Wi-Fi 6 σε περιβάλλοντα πυκνών ασύρματων δικτύων, με έμφαση στη λειτουργία Uplink OFDMA. Στο πλαίσιο αυτό, μελετήθηκαν τέσσερις αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης (MaxRate, Proportional Fairness, SRTF και ένας υβριδικός αλγόριθμος), μέσω προσομοιώσεων στο ns-3, σε διάφορα σενάρια. Αξιολογήθηκε η συμπεριφορά των αλγορίθμων σε όρους Goodput, Latency, Υπολογιστικής πολυπλοκότητας (CPU Clocks & μνήμης), καθώς και σε διαφορετική ροή δεδομένων, Continuous Traffic και Dynamic Traffic.

Τα βασικά ευρήματα συνοψίζονται ως εξής:

- Η απόδοση του δικτύου εξαρτάται κυρίως από παραμέτρους όπως το Guard Interval, το Channel Width και το MCS, και όχι από τον ίδιο τον αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης. Παρόλο που έχουν διαφορετική λογική στην επιλογή των χρηστών, τελικά λειτουργούν όλοι μέσα στο ίδιο πλαίσιο του Wi-Fi 6, όπου οι περιορισμοί από το πρότυπο (όπως η διάρκεια των frames, το πλάτος των καναλιών, και οι διαθέσιμες επιλογές MCS) καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την απόδοση. Αυτό παρατηρήθηκε αρχικά από τα αποτελέσματα για την συνεχόμενη ροή δεδομένων καθώς και από τον επιπλέον έλεγχο που έγινε με μια δυναμική ροή δεδομένων όπου εκεί αυξομειωνόταν τυχαία το φορτίο του δικτύου.

- Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και στην περίπτωση του complexity analysis όπου κανένας αλγόριθμος δεν κατάφερε να προσφέρει κάτι καλύτερο σε όρους CPU Clocks ή Memory.
- Το δίκτυο παρουσίασε καλύτερη απόδοση σε όρους Average Goodput για τιμές MCS μεταξύ 5–7, Channel Width 80 ή 160 MHz και Guard Interval 3200 ns. Αντίθετα, για τη βελτιστοποίηση του Average Latency, πιο αποδοτικές αποδείχθηκαν οι επιλογές μικρότερου πλάτους καναλιού όπως 20 ή 40 MHz, λόγω μειωμένων παρεμβολών.
- Οι αλγόριθμοι εμφάνισαν παρόμοιο υπολογιστικό κόστος, επομένως η επιλογή τους μπορεί να βασιστεί περισσότερο σε λειτουργικά κριτήρια και λιγότερο στην πολυπλοκότητα υλοποίησης.

Τα πιο πάνω διακρίνονται ακόμα καλύτερα όταν συγκρίνουμε τους απλούς αυτούς αλγορίθμους με πιο εξελιγμένες προσεγγίσεις όπως ο MUTAX [4]. Παρόλο που ο αλγόριθμος MUTAX παρουσιάζει βελτιωμένες επιδόσεις σε ορισμένες ειδικές περιπτώσεις – όπως για παράδειγμα στο σενάριο όπου οι σταθμοί απέχουν περισσότερο από το Access Point και υπάρχει μεγαλύτερη ποικιλία στα κανάλια, οι διαφορές του έναντι των πιο απλών αλγορίθμων όπως οι SRTF, PF και MR δεν είναι σημαντικές σε πιο "κλειστά" περιβάλλοντα, όπου οι σταθμοί βρίσκονται κοντά. Σε αυτές τις περιπτώσεις, όλοι οι αλγόριθμοι συγκλίνουν σε παρόμοια αποτελέσματα, τόσο ως προς το χρόνο μεταφόρτωσης όσο και ως προς το goodput.

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι με την έλευση του Wi-Fi 7 και την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών όπως το Multi-Link Operation (MLO), η κατεύθυνση της εξέλιξης μετατοπίστηκε προς τεχνολογίες που εκμεταλλεύονται ταυτόχρονα πολλαπλά κανάλια, μειώνοντας τη σημασία των σύνθετων αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης όπως ο MUTAX. Έτσι, ενώ τέτοιες προσεγγίσεις μπορεί να είχαν θεωρητικό ενδιαφέρον στο Wi-Fi 6, στην πράξη η βιομηχανία επικεντρώθηκε σε πιο ριζικές αλλαγές στο επίπεδο φυσικού καναλιού και MAC.

8.2 Μελλοντική Εργασία

Αν και η παρούσα εργασία ανέδειξε ότι οι τέσσερις εξεταζόμενοι αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης παρουσιάζουν παρόμοια απόδοση τόσο σε επίπεδο Goodput και Latency, όσο και σε επίπεδο υπολογιστικής πολυπλοκότητας, υπάρχουν σημαντικές προεκτάσεις που θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

Μια σημαντική κατεύθυνση αφορά τη μελέτη της ενεργειακής αποδοτικότητας των αλγορίθμων, καθώς η κατανάλωση ενέργειας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την απόδοση φορητών ή αυτόνομων συσκευών, ιδιαίτερα σε εφαρμογές Internet of Things (IoT) και κινητών δικτύων.

Τέλος, μια πολύ υποσχόμενη κατεύθυνση είναι η ανάπτυξη νέων αλγορίθμων, που θα ενσωματώνουν τεχνικές μηχανικής μάθησης. Τέτοιοι μέθοδοι θα μπορούσαν να βελτιστοποιούν δυναμικά τη χρονοδρομολόγηση, σε πραγματικό χρόνο με μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Βιβλιογραφία

- [1] Z. Zhong, P. Kulkarni, F. Cao, Z. Fan, and S. Armour, "Issues and challenges in dense WiFi networks," in *Proc. IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2015, pp. 947–951. doi: 10.1109/PIMRC.2015.7343443.
- [2] E. Tokhirov and R. Aliev, "Analysis of the Differences between Wi-Fi 6 and Wi-Fi 5," E3S Web of Conferences, vol. 402, 03020, 2023. doi: 10.1051/e3sconf/202340203020.
- [3] S. S. Murad et al., "Introduction to Wi-Fi 7: A Review of History, Applications, Challenges, Economical Impact and Research Development," Mesopotamian Journal of Computer Science, vol. 2024, pp. 110–121, Aug. 2024. doi: 0.58496/MJCSC/2024/009.
- [4] D. Bankov, A. Didenko, E. Khorov, V. Loginov, and A. Lyakhov, "IEEE 802.11ax Uplink Scheduler to Minimize Delay: a Classic Problem with New Constraints," Proc. IEEE International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT), pp. 1–7, 2017. DOI: 10.1109/EnT.2017.1.
- [5] <https://www.nsnam.org/documentation/>
- [6] D. Bankov, A. Didenko, E. Khorov, and A. Lyakhov, "OFDMA Uplink Scheduling in IEEE 802.11ax Networks," in Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC), 2018, pp. 1–7.
- [7] F. Magrin et al., "Performance Evaluation of 802.11ax OFDMA Through Theoretical Analysis and Simulations," *IEEE Access*, vol. 8, 2020.
- [8] D. Wang and L. Psounis, "Scheduling and Resource Allocation in 802.11ax Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 21, no. 2, 2022.

- [9] M. Kuran et al., "Throughput-maximizing OFDMA Scheduler for IEEE 802.11ax Networks," **IEEE ICC**, 2021.
- [10] S. Tutelian, D. Bankov, D. Shmelkin, and E. Khorov, "IEEE 802.11ax OFDMA Resource Allocation with Frequency-Selective Fading," **Sensors**, vol. 21, no. 18, p. 6099, Sep. 2021.
- [11] K. Dovelos and B. Bellalta, "Optimal Resource Allocation in IEEE 802.11ax Uplink OFDMA with Scheduled Access," **IEEE Transactions on Network and Service Management**, 2019.
- [12] E. Avdotin et al., "OFDMA Resource Allocation for Real-Time Applications in IEEE 802.11ax Networks," **IEEE BlackSeaCom**, 2019.
- [13] A. Testa et al., "An Empirical Study of 5G, Wi-Fi 6 and Multi-Connectivity in an Indoor Industrial Scenario," **IEEE Access**, vol. 10, 2024.
- [14] D. Karamyshev et al., "Enabling Industrial IoT with Wi-Fi 6: A Case Study in Automated Factory Case Study" **IEEE Communications Magazine**, 2024.
- [15] M. Rady et al., "How Does Wi-Fi 6 Fare? An Industrial Outdoor Robotic Scenario," **Ad Hoc Networks**, vol. 156, 2024.
- [16] IEEE Computer Society, "IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," IEEE Std 802.11-1997, 1997.
- [17] B. O'Hara and A. Petrick, **The IEEE 802.11 Handbook: A Designer's Companion**, IEEE Press, 1999.
- [18] IEEE Std 802.11b-1999, "Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band," IEEE, Sep. 1999.

- [19] IEEE Std 802.11a-1999, "High-Speed Physical Layer in the 5 GHz Band," IEEE, Sep. 1999.
- [20] IEEE Std 802.11g-2003, "Further Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band," IEEE, Jun. 2003.
- [21] IEEE Std 802.11n-2009, "Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput," IEEE, Oct. 2009.
- [22] IEEE Std 802.11ac-2013, "Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz," IEEE, Dec. 2013.
- [23] Cisco Systems, "802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi," White Paper, 2014.
- [24] IEEE Std 802.11ax-2021, "Amendment 1: Enhancements for High Efficiency WLAN," IEEE, May 2021.
- [25] D. López-Pérez et al., "IEEE 802.11be Extremely High Throughput: The Next Generation of Wi-Fi Technology Beyond 802.11ax," **IEEE Communications Magazine**, vol. 57, no. 9, pp. 113–119, Sep. 2019.
- [26] A. Garcia-Rodriguez et al., "IEEE 802.11ax: Challenges and Requirements for Future High Efficiency WLANs," **IEEE Wireless Communications**, vol. 24, no. 3, pp. 130–137, Jun. 2017.
- [27] D. H. Morais, *5G/5G-Advanced, Wi-Fi 6/7, and Bluetooth 5/6: A Primer on Smartphone Wireless Technologies*, 2nd ed. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2025. doi: 10.1007/978-3-031-82830-0.
- [28] D. Carrascosa-Zamacois, A. Garcia-Saavedra, P. Serrano, and X. Costa-Perez, "Multi-Link Operation for Performance Improvement in Wi-Fi 7 Networks," in *Proceedings of the 28th International Conference on Information Technology (IT)*, 2024, pp. 1–6, doi: 10.1109/IT61232.2024.10475771.

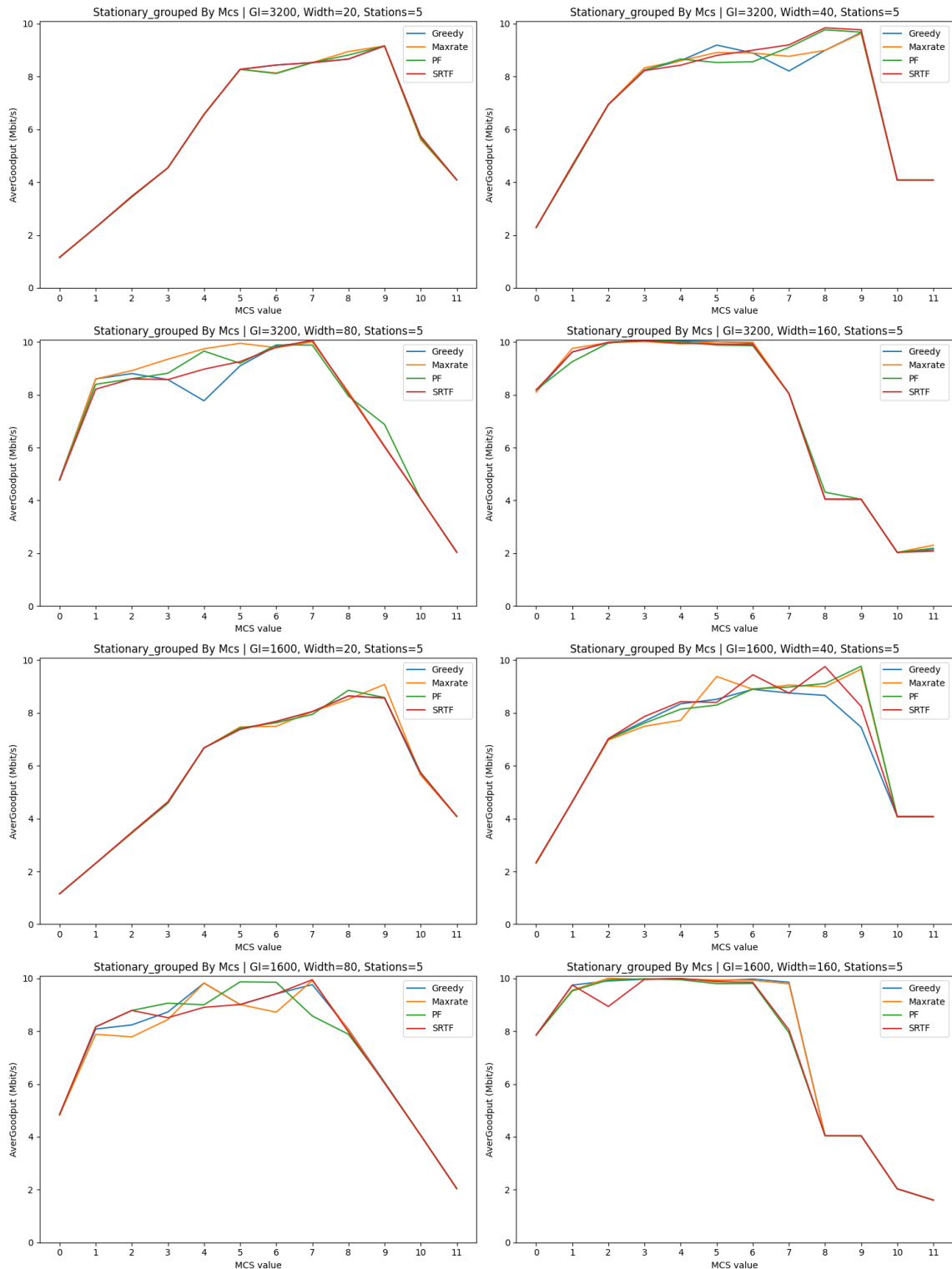
- [29] E. Oughton, G. Geraci, M. Polese, and V. Shah, "Prospective Evaluation of Next Generation Wireless Broadband Technologies: 6G versus Wi-Fi 7/8," SSRN Electronic Journal, Apr. 2023. [Online]. Available: <https://ssrn.com/abstract=4528119>
- [30] E. Mozaffariahrar, F. Theoleyre, and M. Menth, "A Survey of Wi-Fi 6: Technologies, Advances, and Challenges," *Future Internet*, vol. 14, no. 10, Art. no. 293, Oct. 2022.
- [31] Najem N. Sirhan and Manel Martinez-Ramon, "LTE Cellular Networks Packet Scheduling Algorithms in Downlink and Uplink Transmission: A Survey," *International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN)*, vol. 14, no. 2, pp. 1–15, April 2022.
- [32] M. Natkaniec, Ł. Prasnal, and M. Szymakowski, "A Performance Analysis of IEEE 802.11ax Networks," *International Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 66, no. 1, pp. 225–230, 2020. doi: 10.24425/ijet.2020.131867.
- [33] E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, and G. Bianchi, "A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 197–216, 2019.
- [34] A. Masiukiewicz, "Throughput Comparison Between the New HEW 802.11ax Standard and 802.11n/ac Standards in Selected Distance Windows," *International Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 65, no. 1, pp. 79–84, 2019.
- [35] P. Patil, M. Patil, S. Itraj, and U. Bombale, "IEEE 802.11n: Joint modulation-coding and guard interval adaptation scheme for throughput enhancement," *International Journal of Communication Systems*, vol. 33, no. 8, e4347, 2020. doi: 10.1002/dac.4347
- [36] M. Bellalta, "Target Wake Time (TWT): Scheduled Access in IEEE 802.11ax WLANs," *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 3, pp. 86–92, Mar. 2019.

- [37] Yousri Daldoul, Djamal-Eddine Meddour, and Adlen Ksentini, "Performance evaluation of OFDMA and MU-MIMO in 802.11ax networks," *Computer Networks*, vol. 182, 2020, Art. no. 107477. doi: 10.1016/j.comnet.2020.107477.
- [38] Yein Heo, Jonggyu Jang, Yeongjun Kim, and Hyun Jong Yang, "Performance Comparison of SU- and MU-MIMO in 802.11ax: Delay and Throughput," in *Proc. International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 2020, pp. 879–881. doi: 10.1109/ICTC49870.2020.9289425.
- [39] M. Natkaniec and N. Bieryt, "An analysis of BSS coloring mechanism in IEEE 802.11ax dense networks," *International Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 68, no. 4, pp. 855–862, 2022.
- [40] E. Tokhirov and R. Aliev, "Analysis of the differences between Wi-Fi 6 and Wi-Fi 5," *E3S Web of Conferences*, vol. 402, Art. no. 03020, 2023.

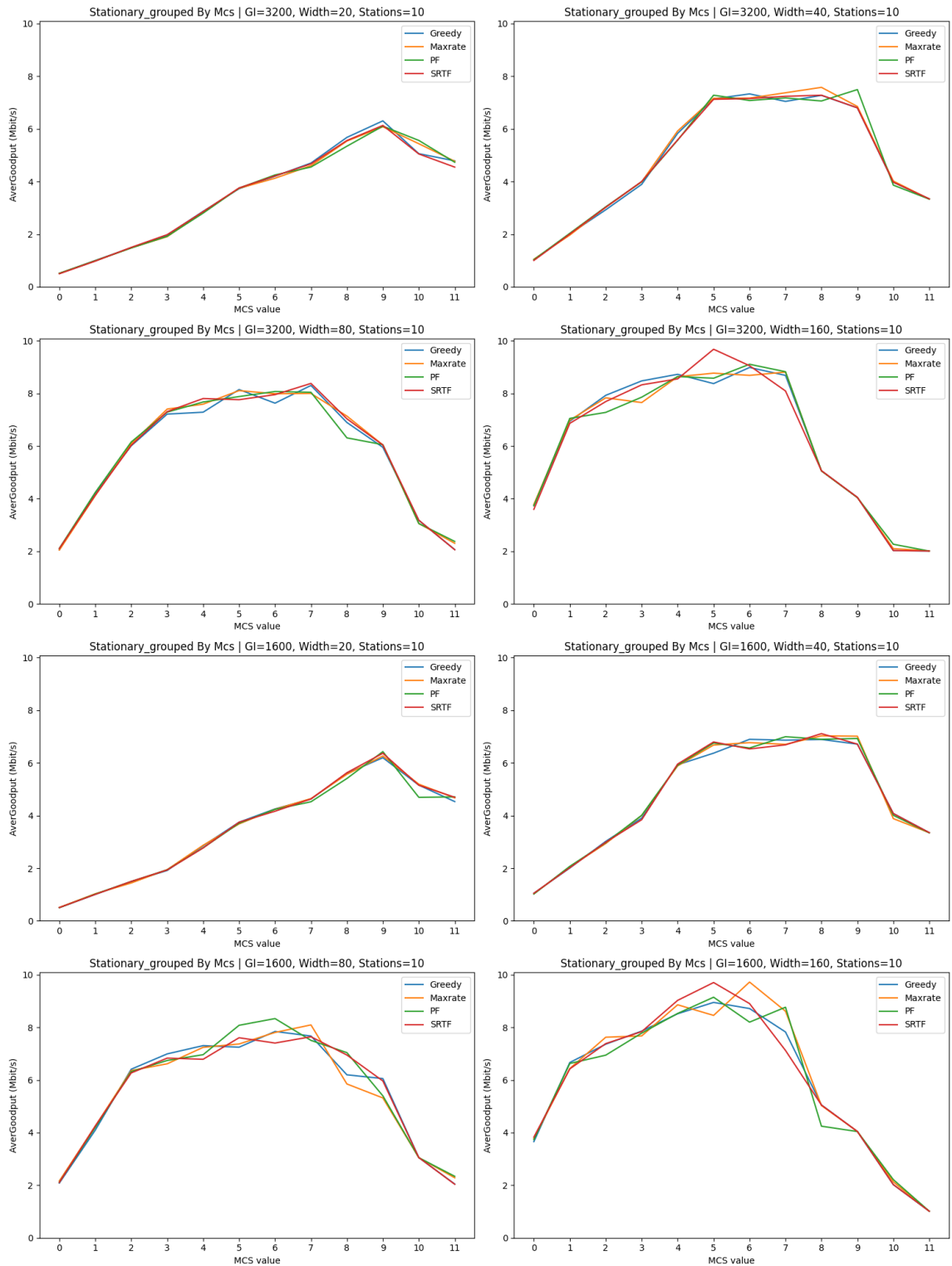
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Goodput

(*Greedy =Hybrid)

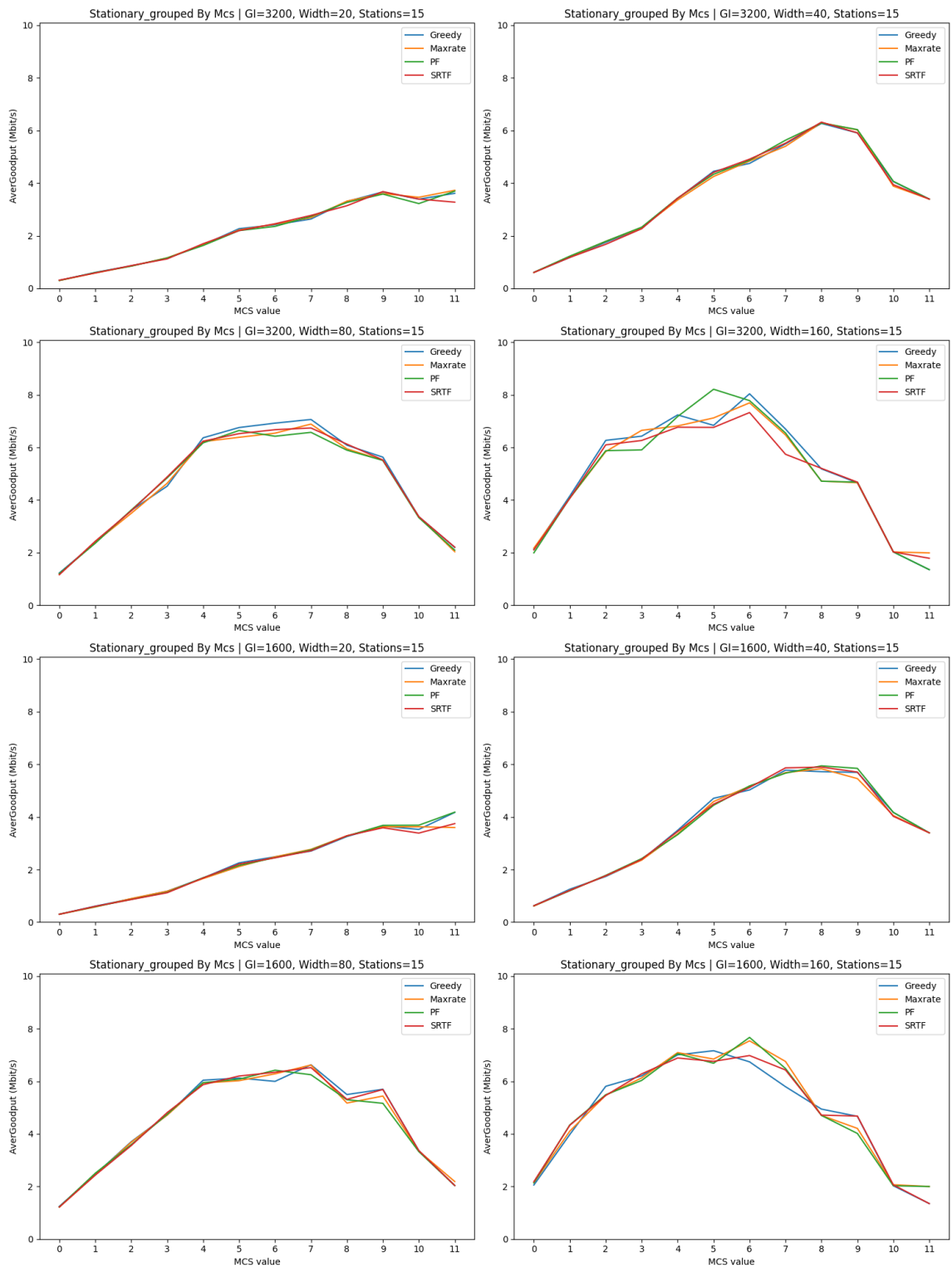
Σταθερές θέσης με R=6 (Ακτίνα) χωρίς κίνηση :



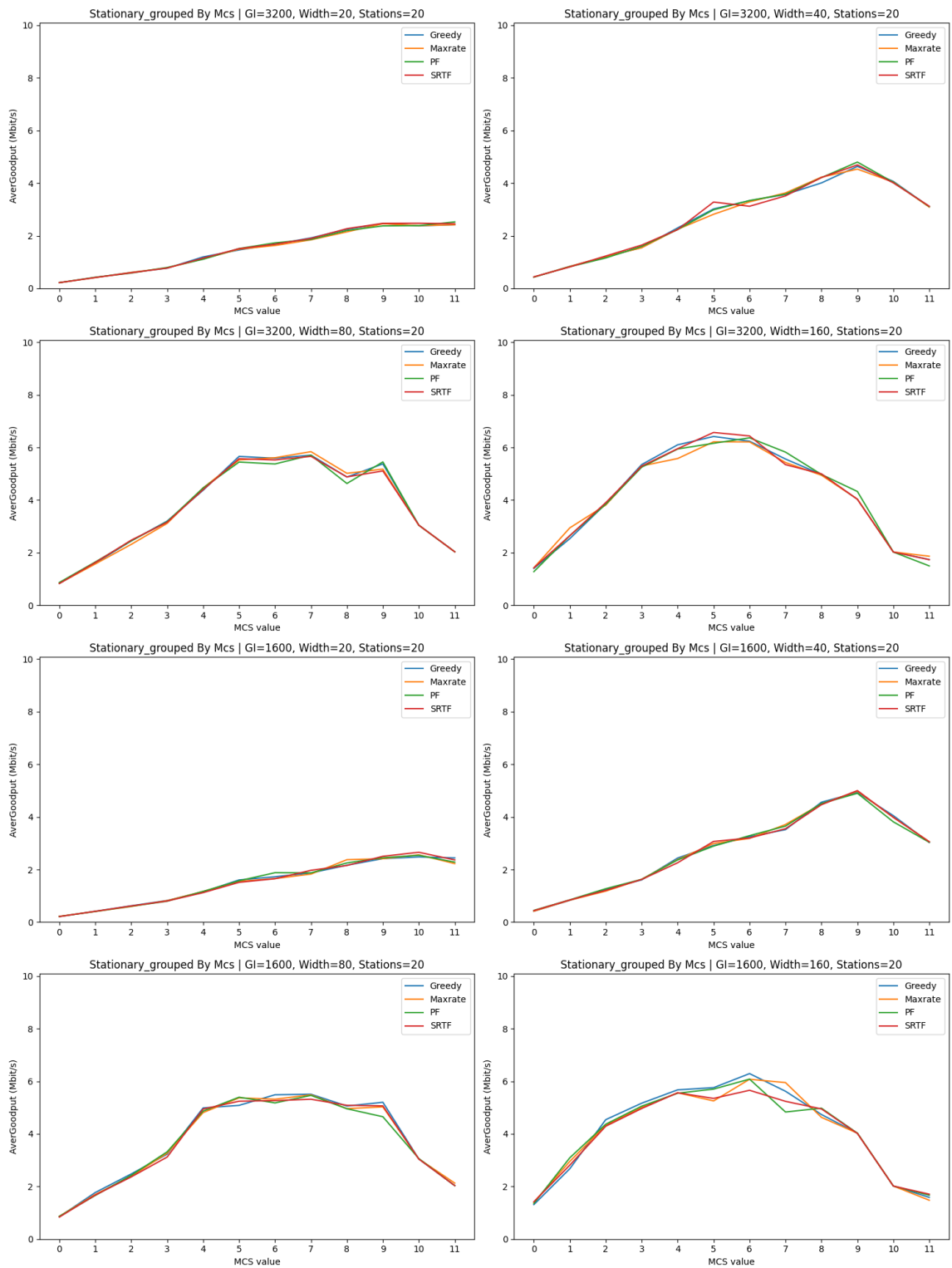
Γραφ.Παρ.Α1 Αποτελέσματα Avg.Goodput για 5 σταθμούς με σταθερές θέσεις R=6m χωρίς κίνηση.



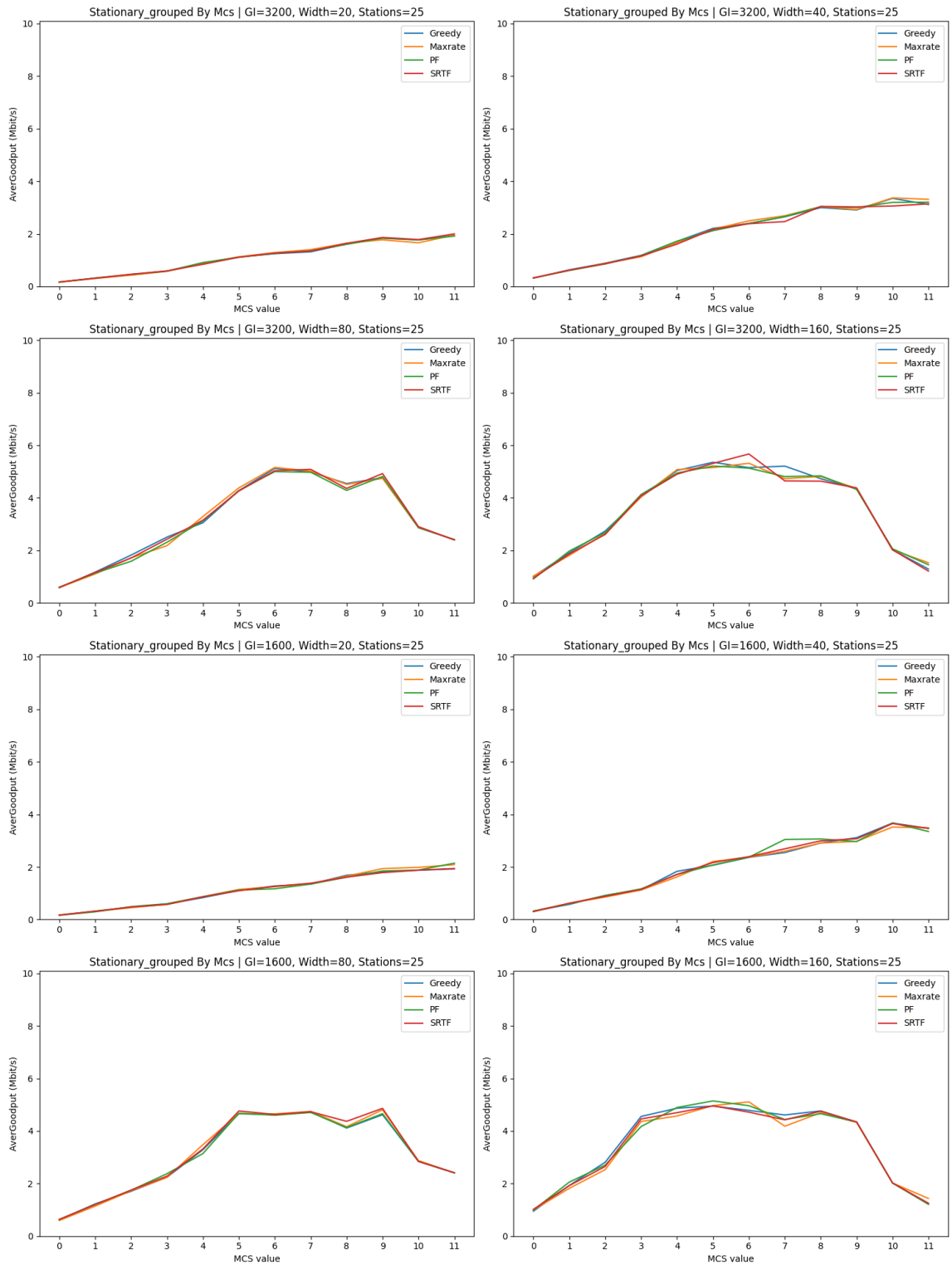
Γραφ.Παρ.Α2 Αποτελέσματα Avg.Goodput για 10 σταθμούς με σταθερές θέσεις $R=6m$ χωρίς κίνηση.



Γραφ.Παρ.Α3 Αποτελέσματα Avg.Goodput για 15 σταθμούς με σταθερές θέσεις R=6m χωρίς κίνηση.

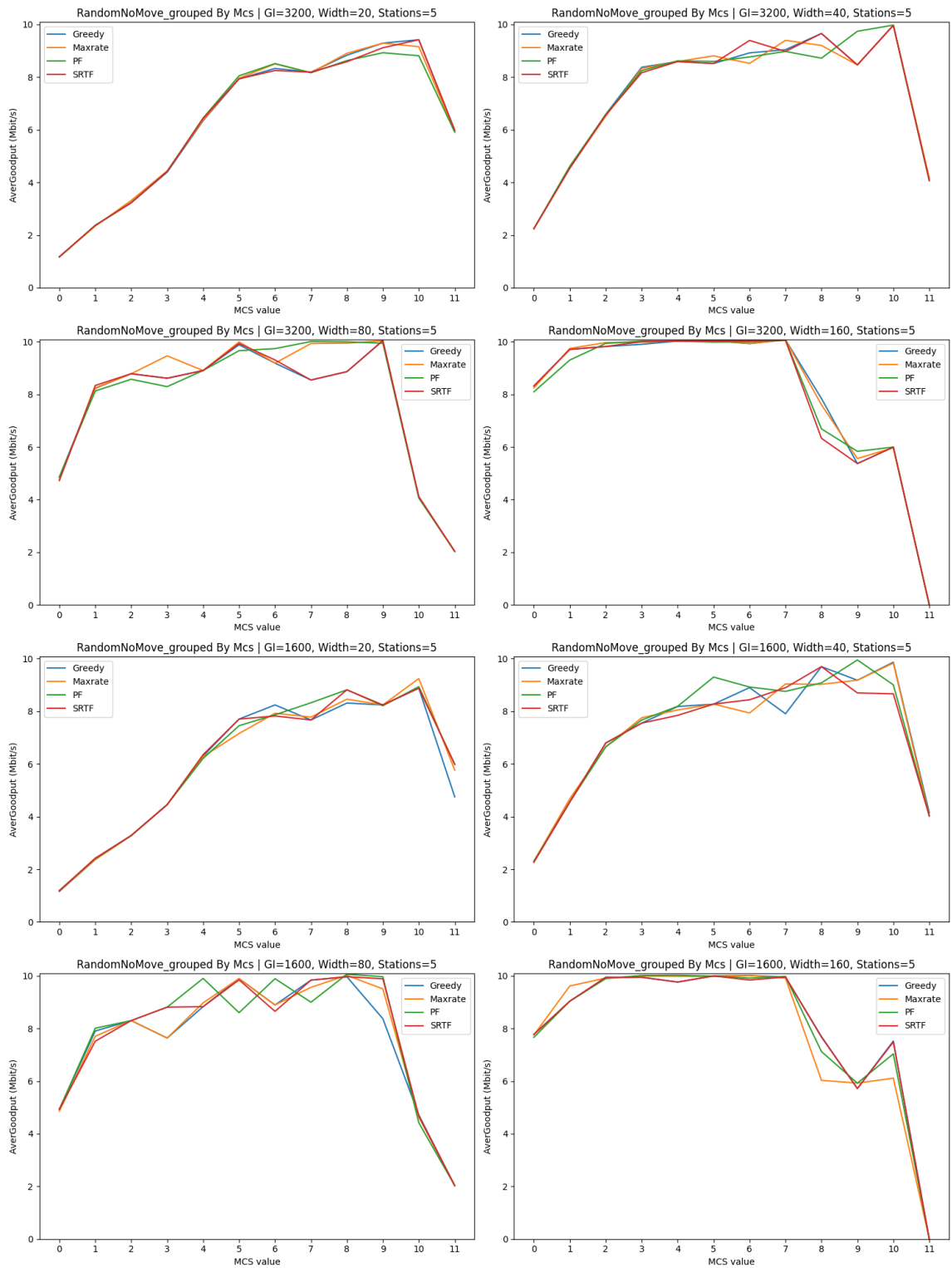


Γραφ.Παρ.Α4 Αποτελέσματα Avg.Goodput για 20 σταθμούς με σταθερές θέσεις R=6m χωρίς κίνηση.

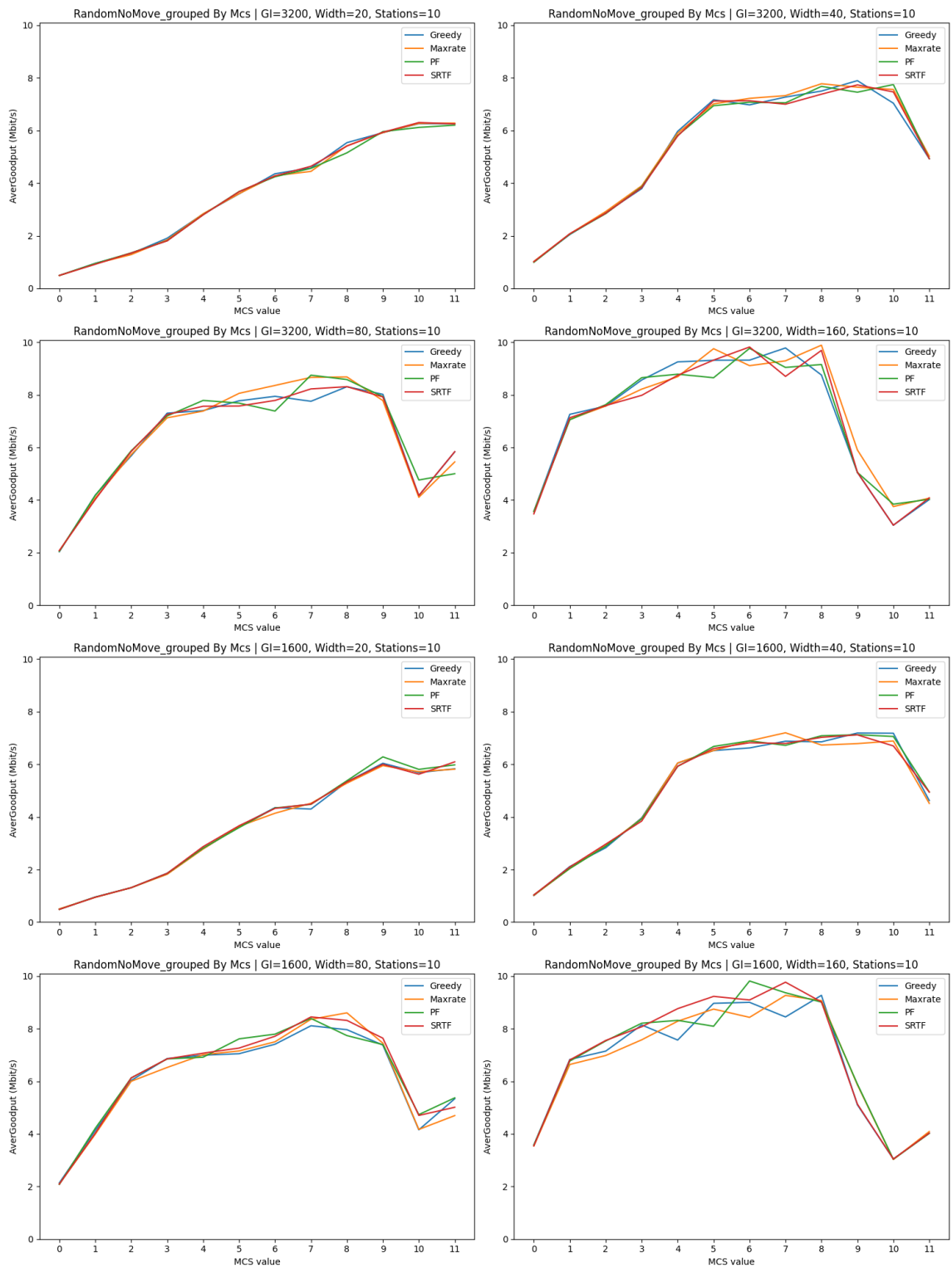


Γραφ.Παρ.Α5 Αποτελέσματα Avg.Goodput για 25 σταθμούς με σταθερές θέσεις R=6m χωρίς κίνηση.

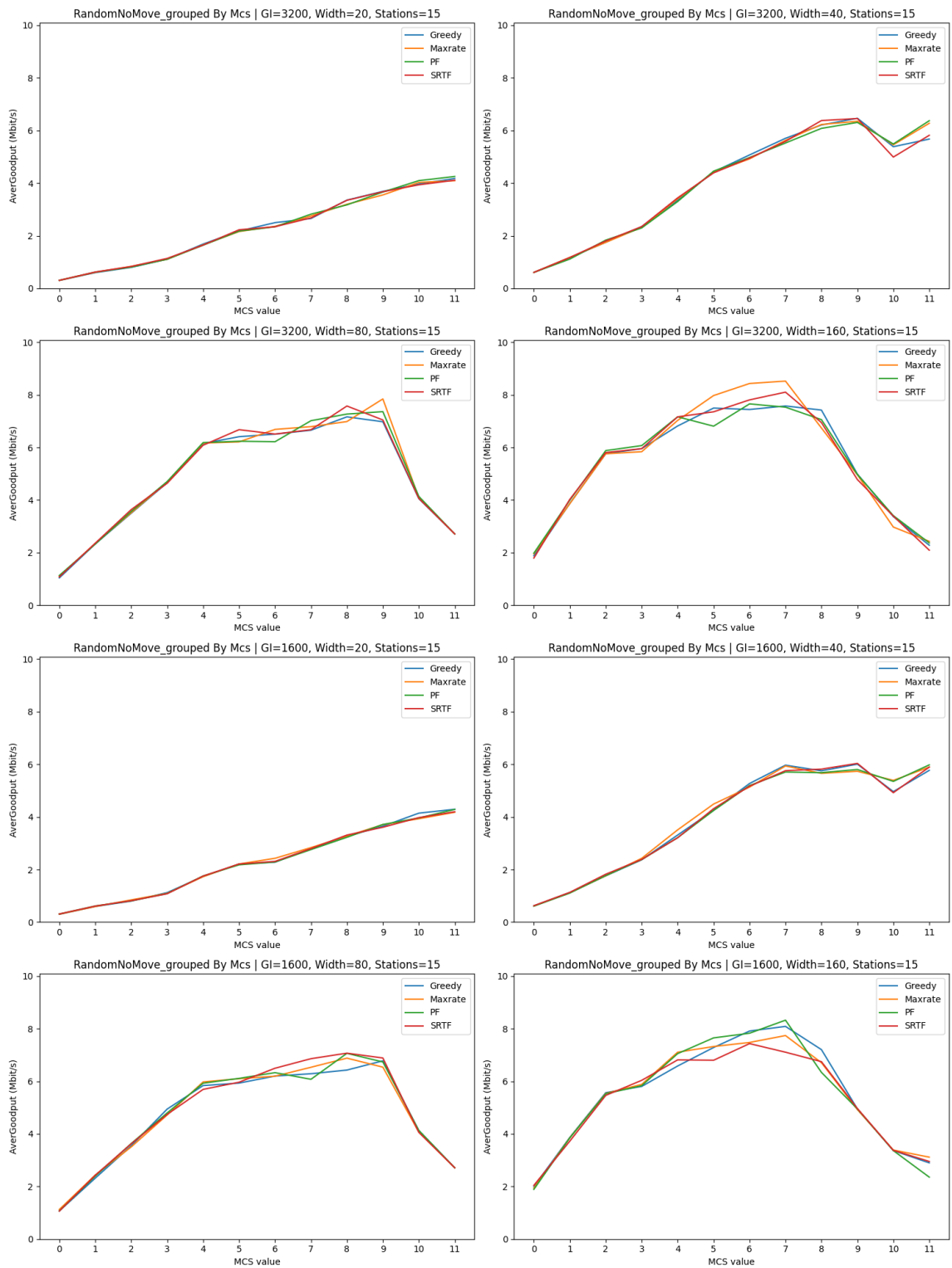
Τυχαίες θέσεις χωρίς κίνηση :



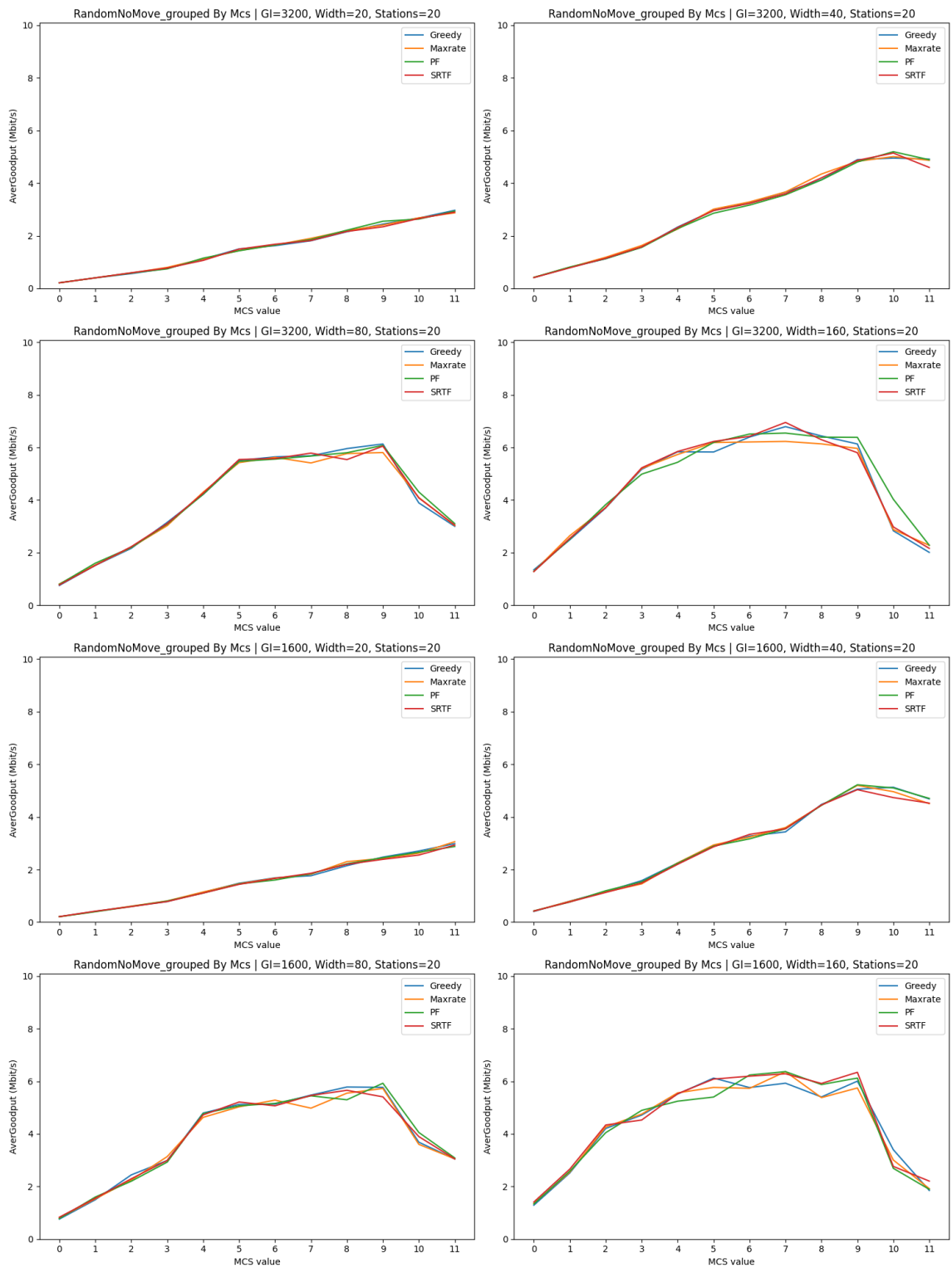
Γραφ.Παρ.Α6 Αποτελέσματα Avg.Goodput για 5 σταθμούς με τυχαίες θέσεις χωρίς κίνηση.



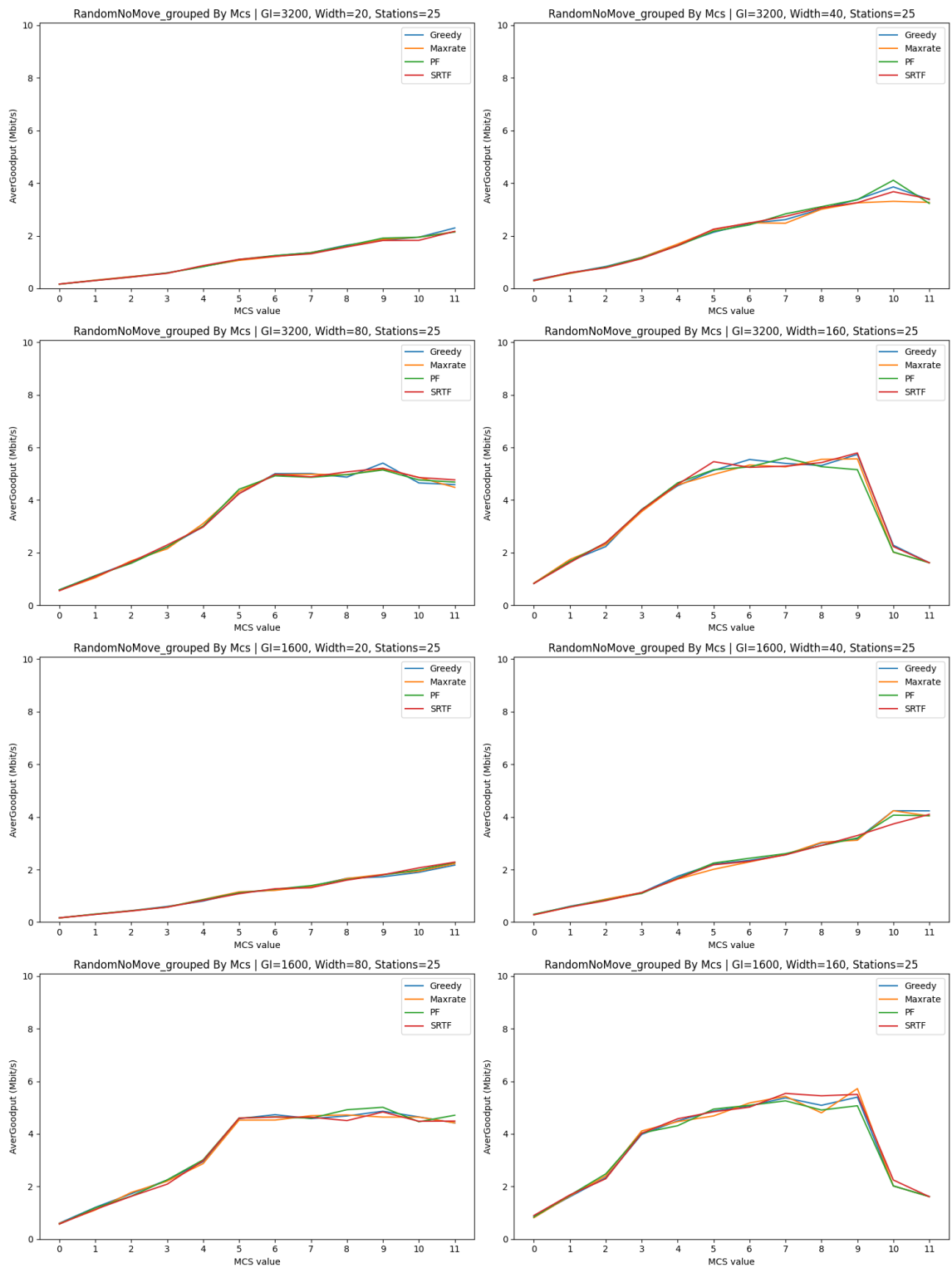
Γραφ.Παρ.Α7 Αποτελέσματα Avg.Goodput για 10 σταθμούς με τυχαίες θέσεις χωρίς κίνηση.



Γραφ.Παρ.Α8 Αποτελέσματα Avg.Goodput για 15 σταθμούς με τυχαίες θέσεις χωρίς κίνηση.

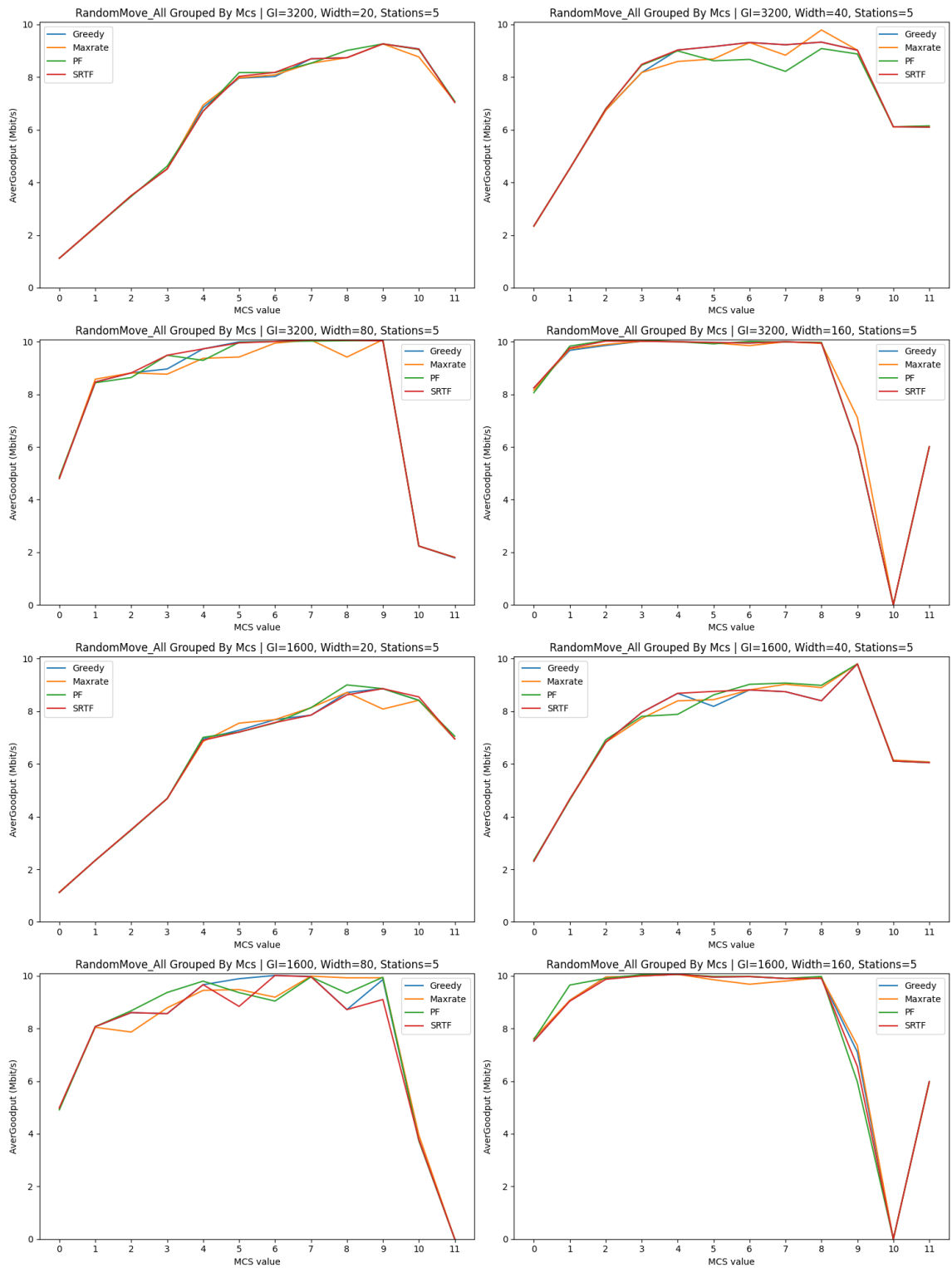


Γραφ.Παρ.Α9 Αποτελέσματα Avg.Goodput για 20 σταθμούς με τυχαίες θέσεις χωρίς κίνηση .

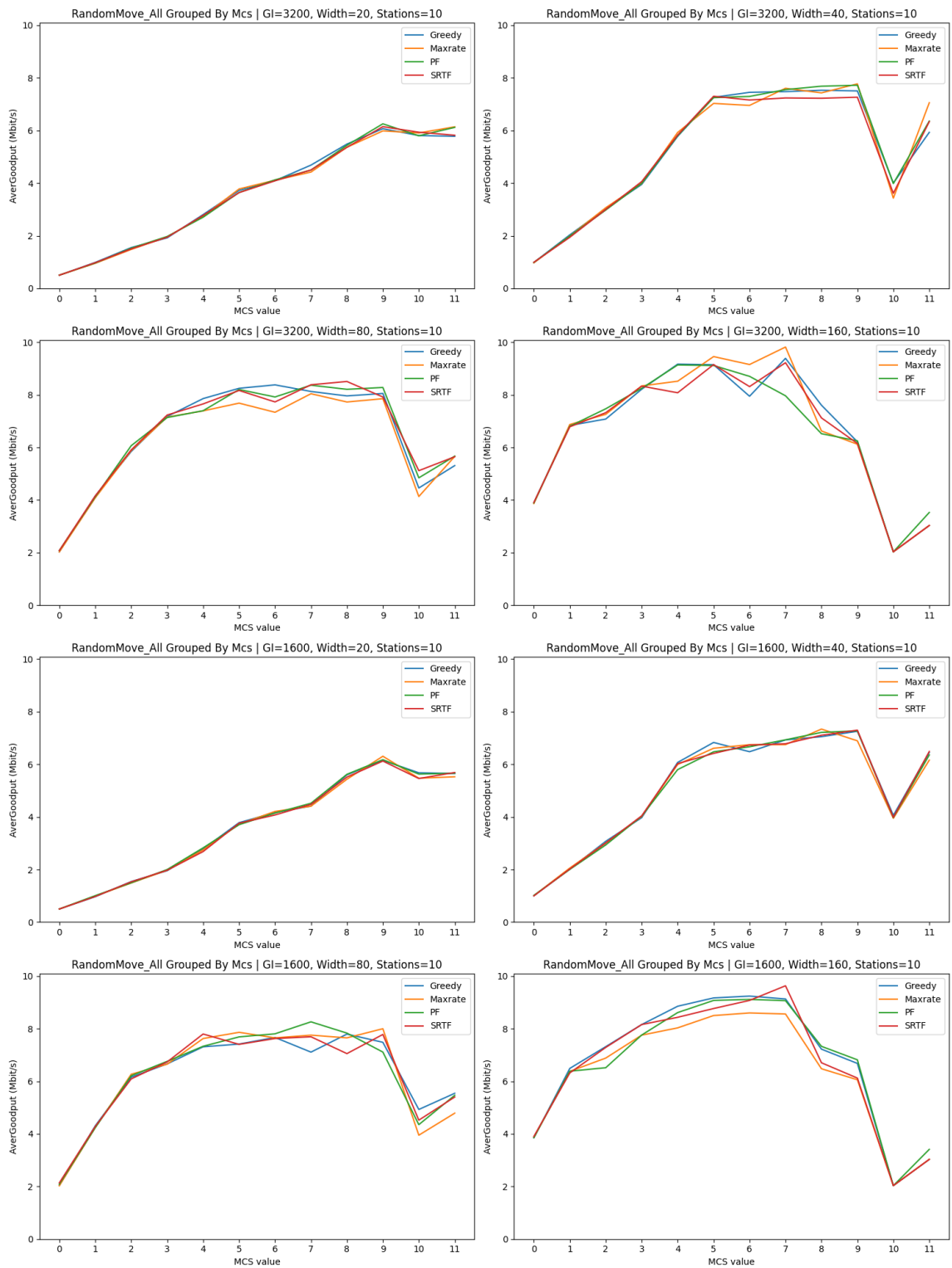


Γραφ.Παρ.Α10 Αποτελέσματα Avg.Goodput για 25 σταθμούς με τυχαίες θέσεις χωρίς κίνηση .

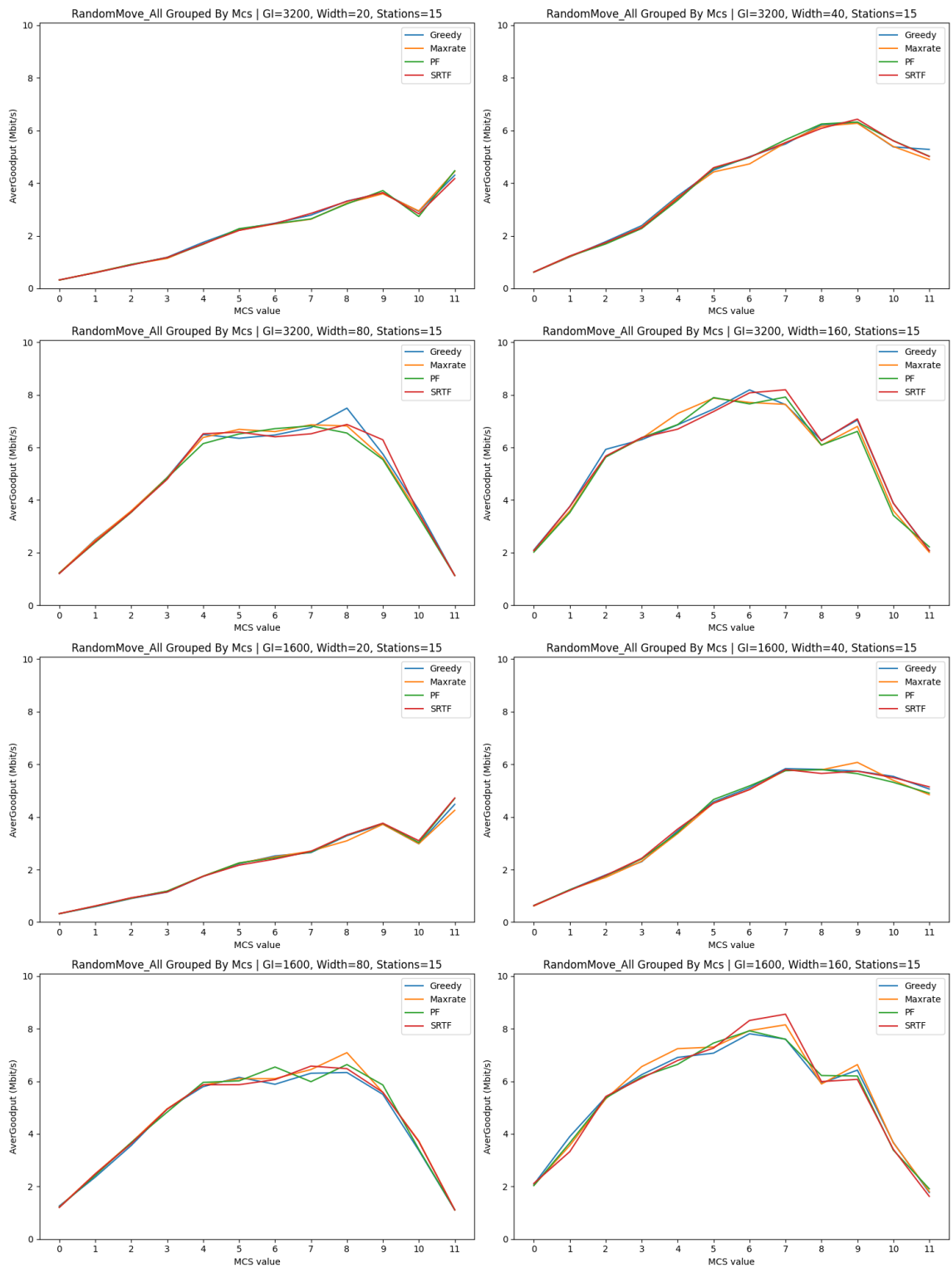
Τυχαίες θέσης με κίνηση :



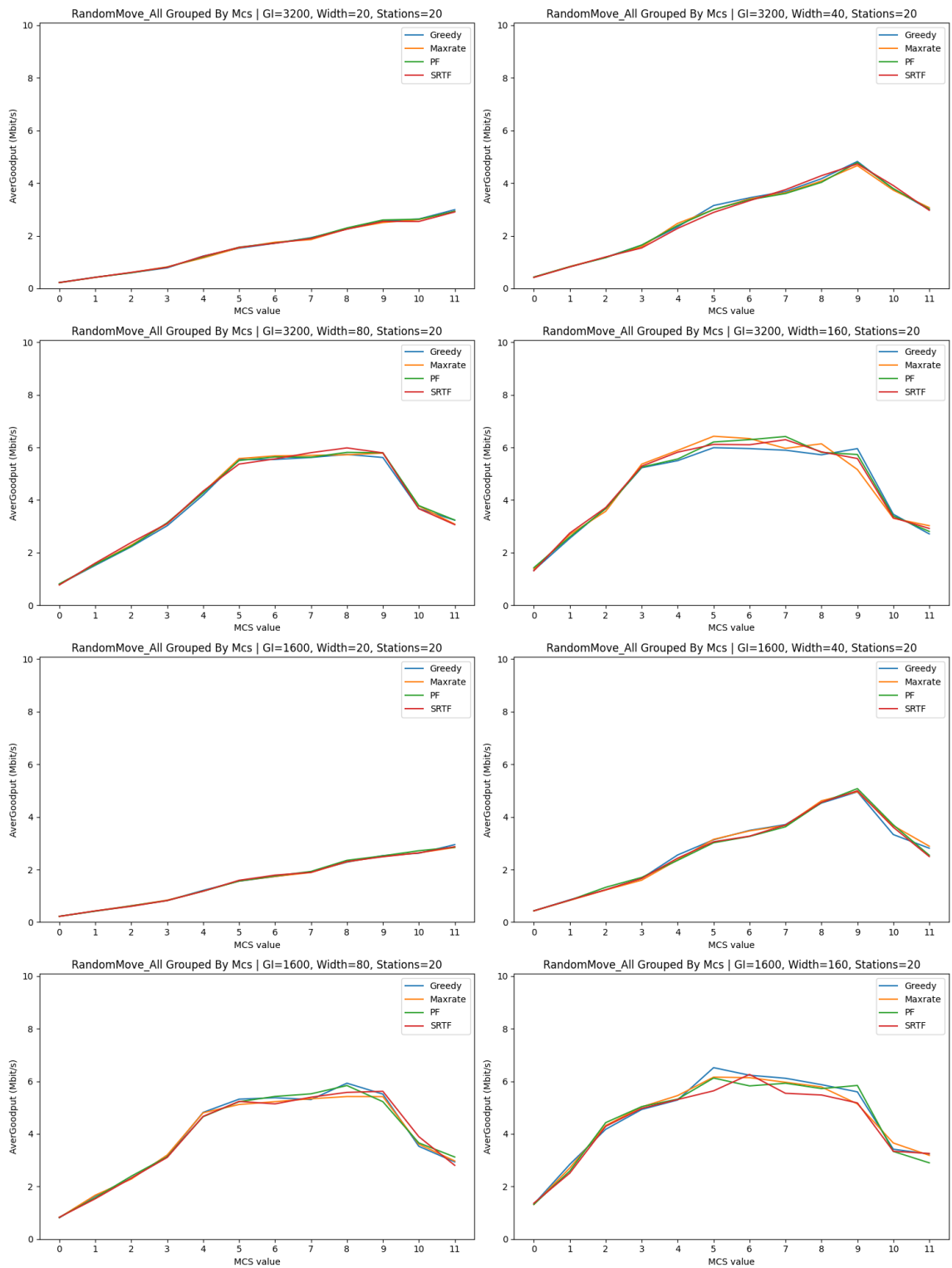
Γραφ.Παρ.Α11 Αποτελέσματα Avg.Goodput για 5 σταθμούς με τυχαίες θέσεις και κίνηση.



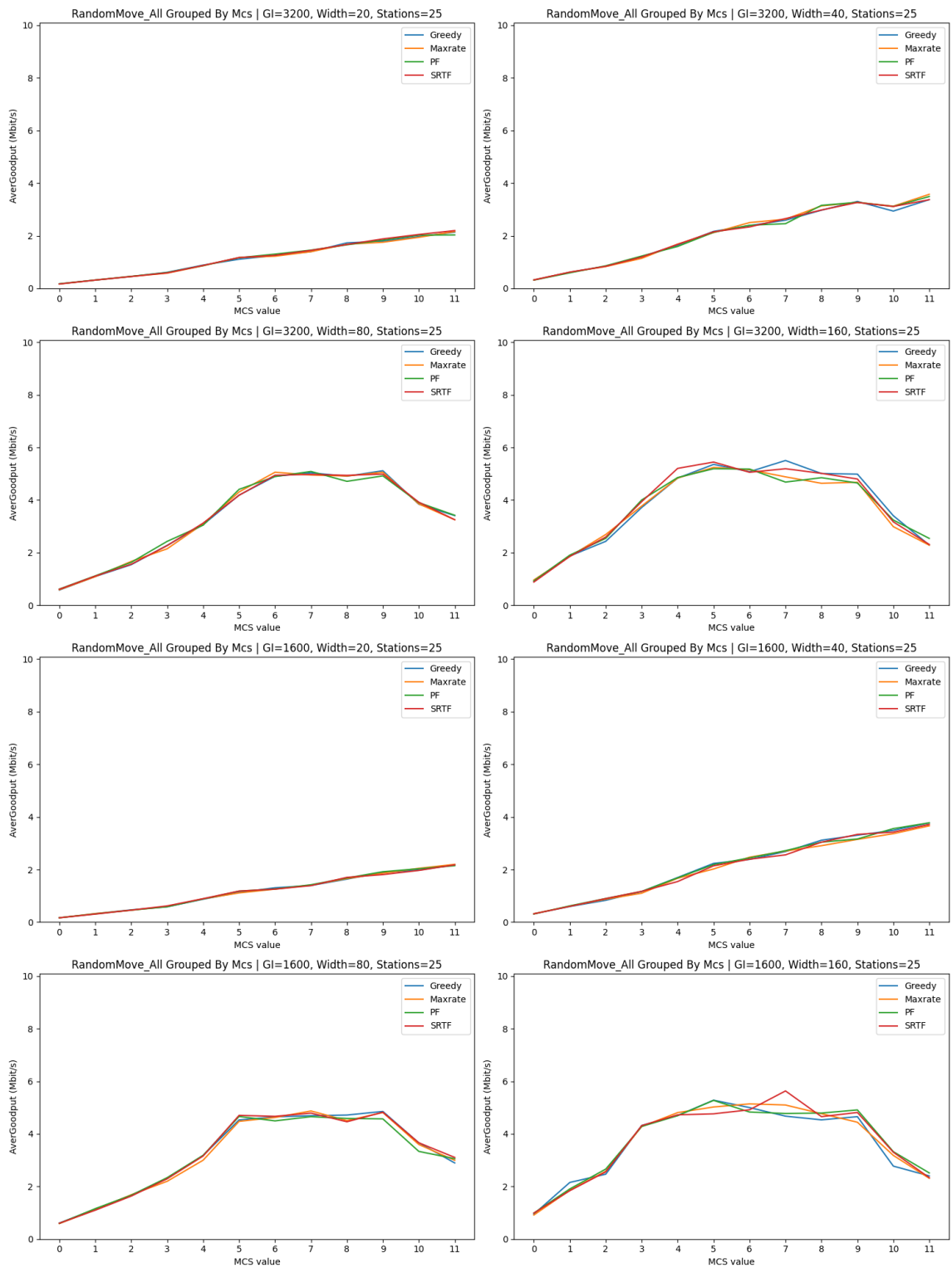
Γραφ.Παρ.Α12 Αποτελέσματα Avg.Goodput για 10 σταθμούς με τυχαίες θέσεις και κίνηση.



Γραφ.Παρ.Α13 Αποτελέσματα Avg.Goodput για 15 σταθμούς με τυχαίες θέσεις και κίνηση.



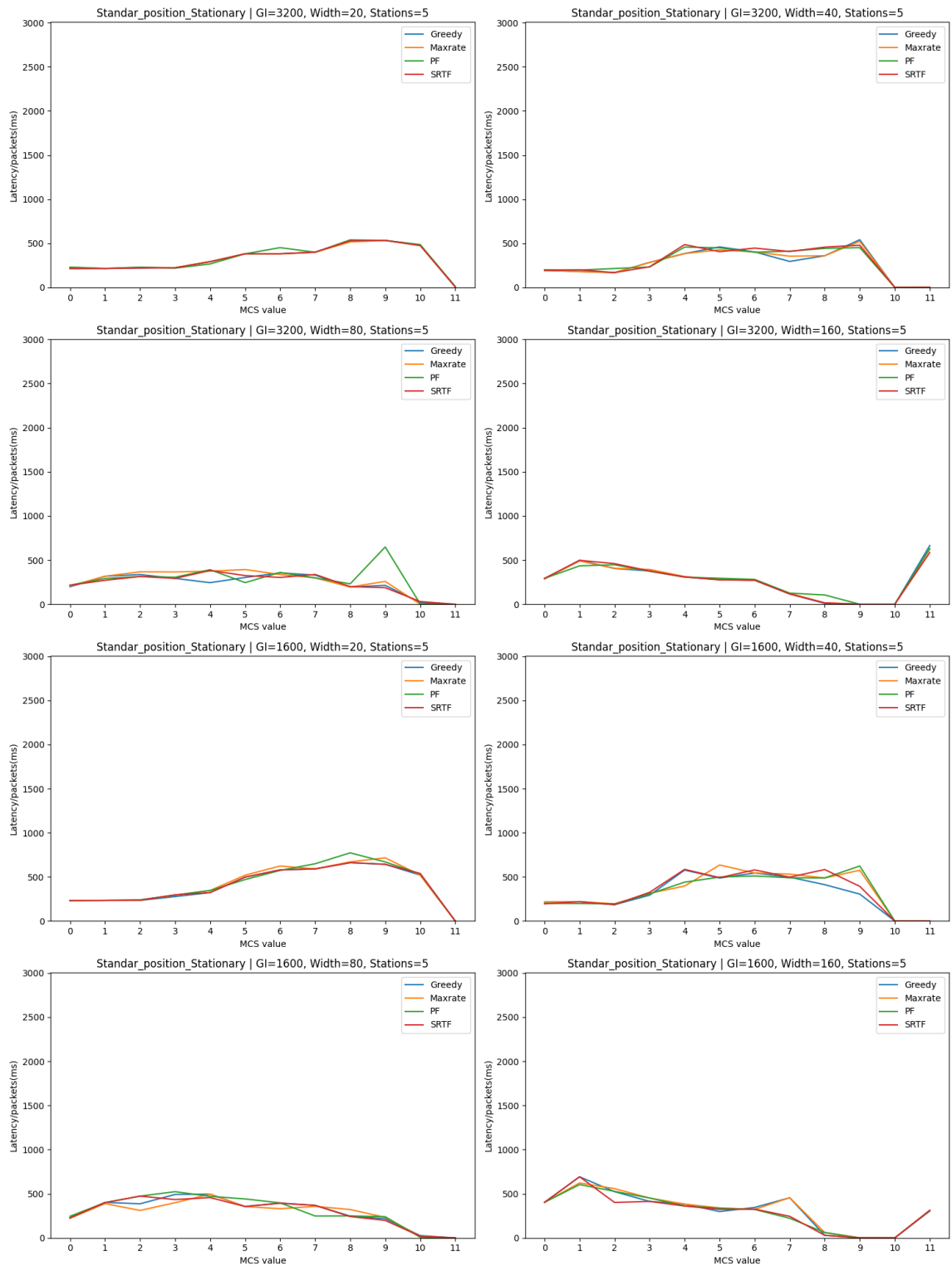
Γραφ.Παρ.Α14 Αποτελέσματα Avg.Goodput για 20 σταθμούς με τυχαίες θέσεις και κίνηση.



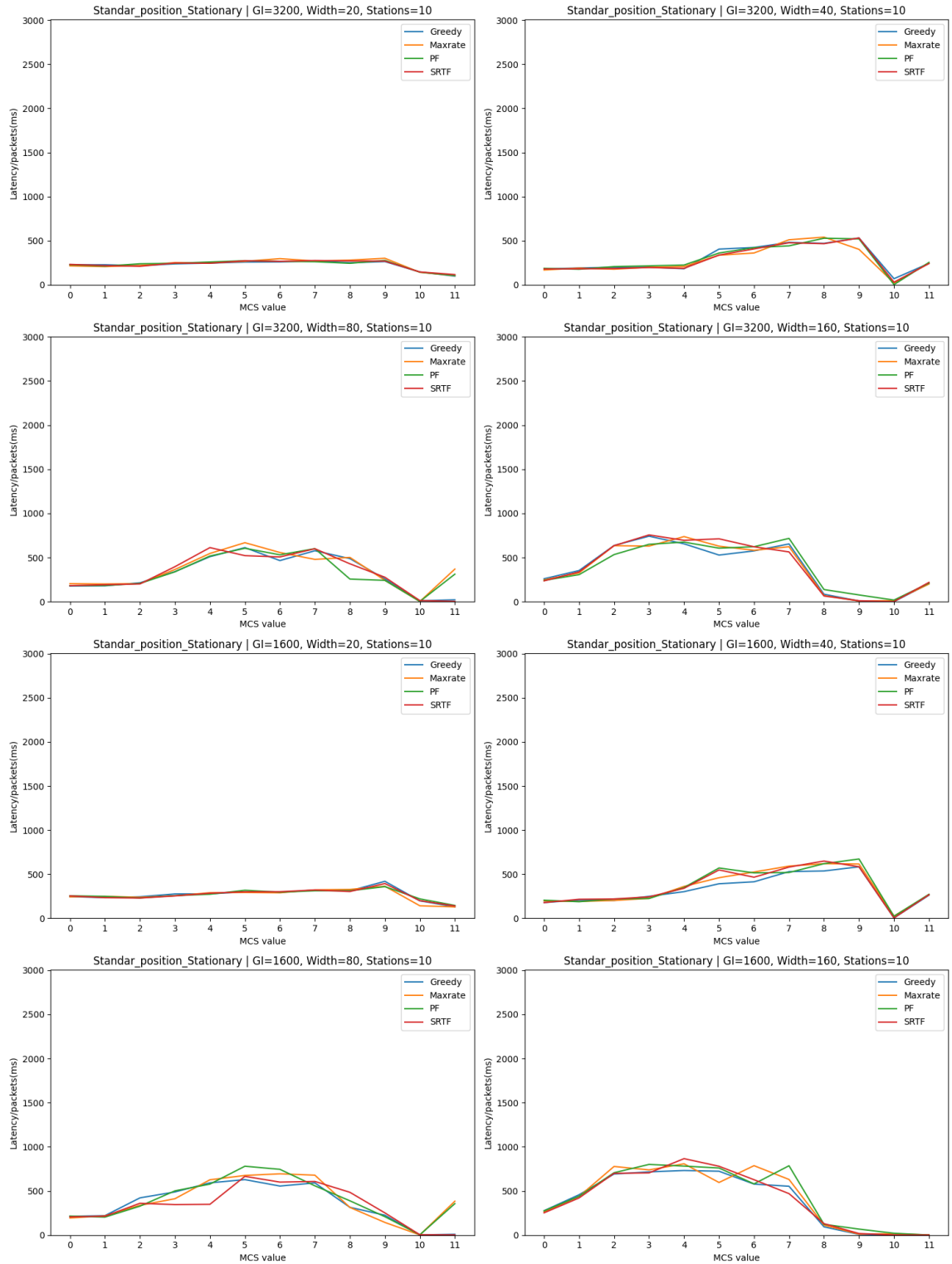
Γραφ.Παρ.Α15 Αποτελέσματα Avg.Goodput για 25 σταθμούς με τυχαίες θέσεις και κίνηση.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Latency

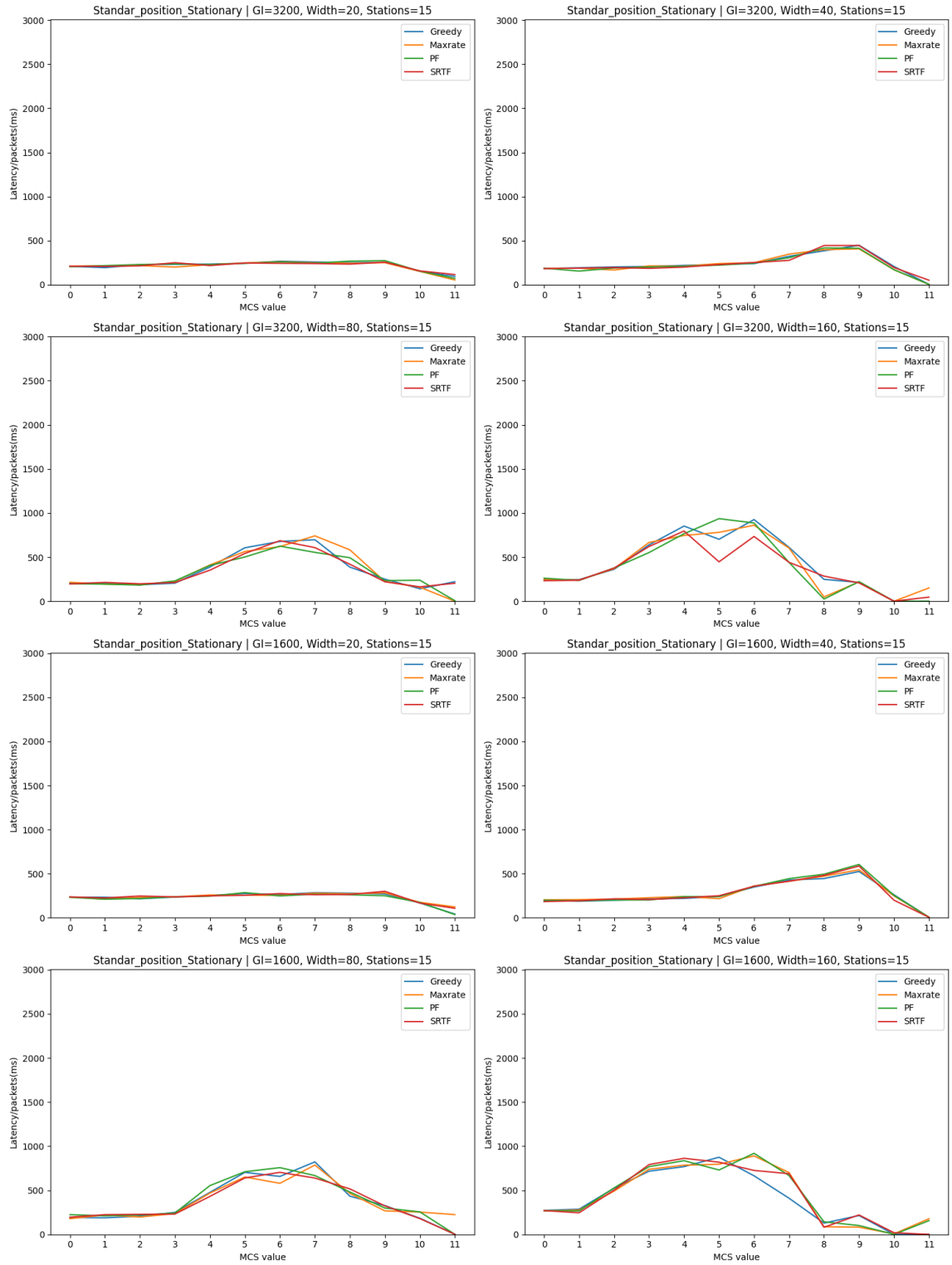
Σταθερές θέσης με $R=6$ (Ακτίνα) χωρίς κίνηση :



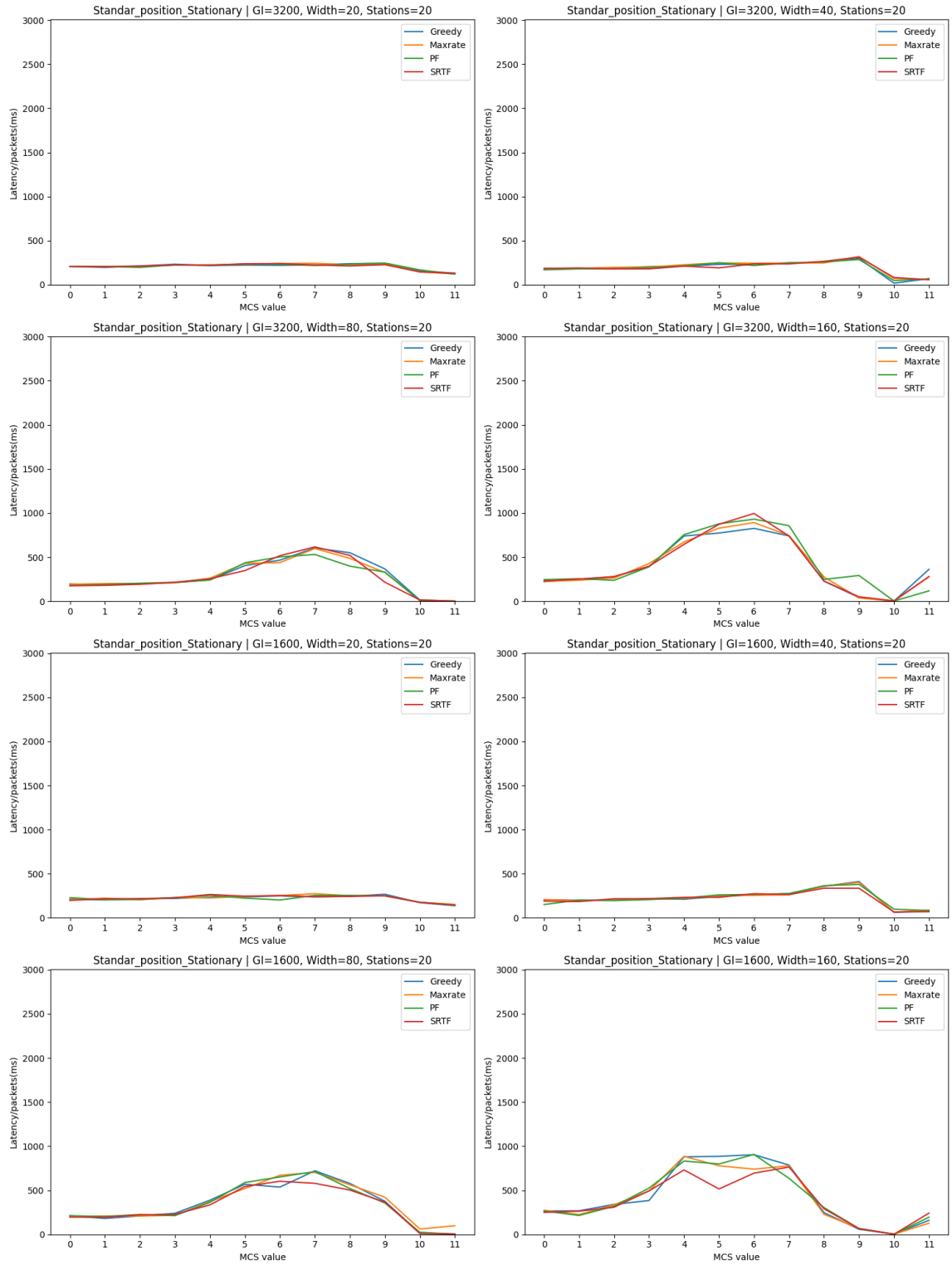
Γραφ.Παρ.Β1 Αποτελέσματα Avg. Latency για 5 σταθμούς με σταθερές θέσεις $R=6$ m χωρίς κίνηση.



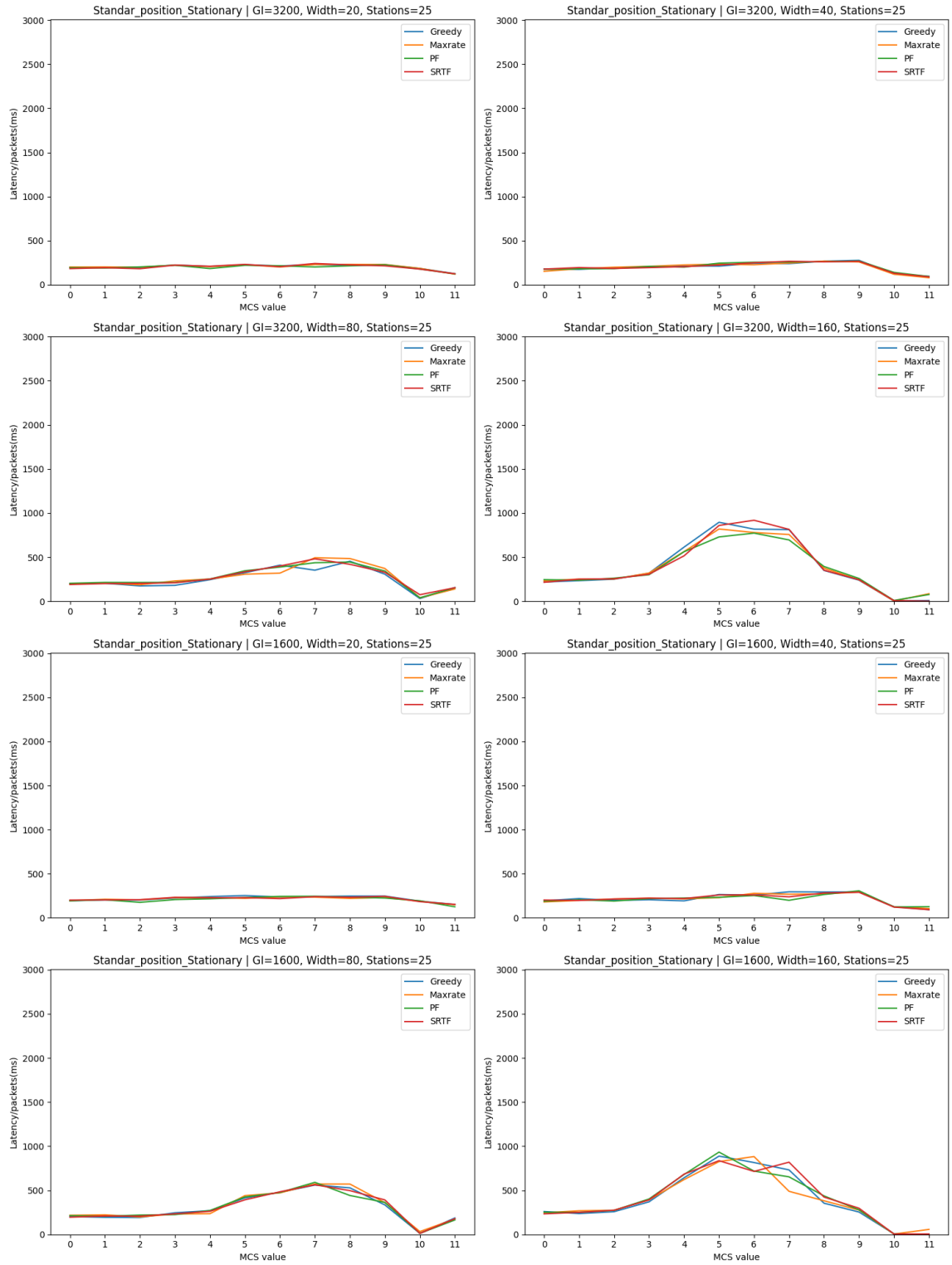
Γραφ.Παρ.Β2 Αποτελέσματα Avg.Latency για 10 σταθμούς με σταθερές θέσεις R=6m χωρίς κίνηση.



Γραφ.Παρ.Β3 Αποτελέσματα Avg.Latency για 15 σταθμούς με σταθερές θέσεις R=6m χωρίς κίνηση.

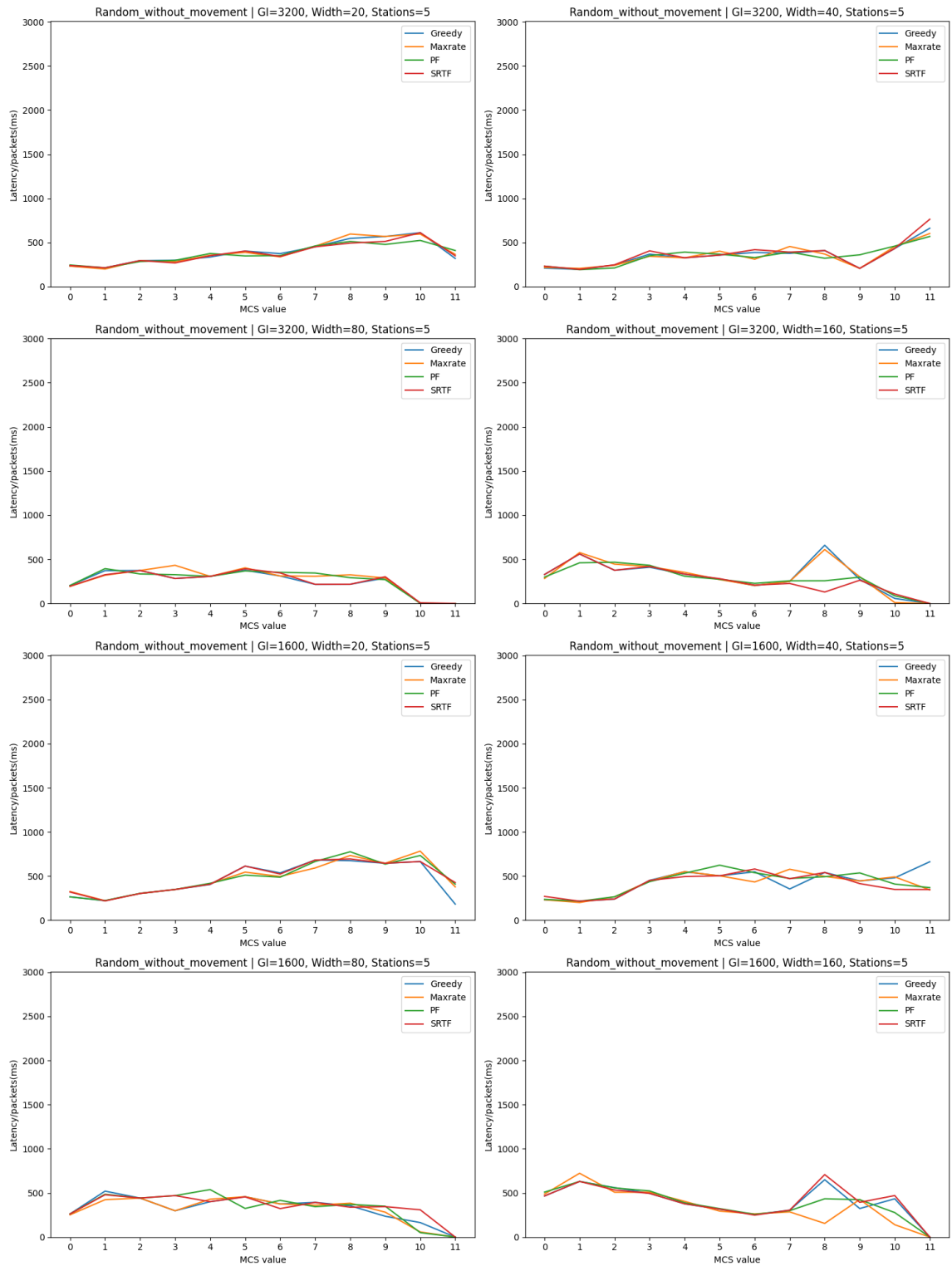


Γραφ.Παρ.Β4 Αποτελέσματα Avg.Latency για 20 σταθμούς με σταθερές θέσεις R=6m χωρίς κίνηση.

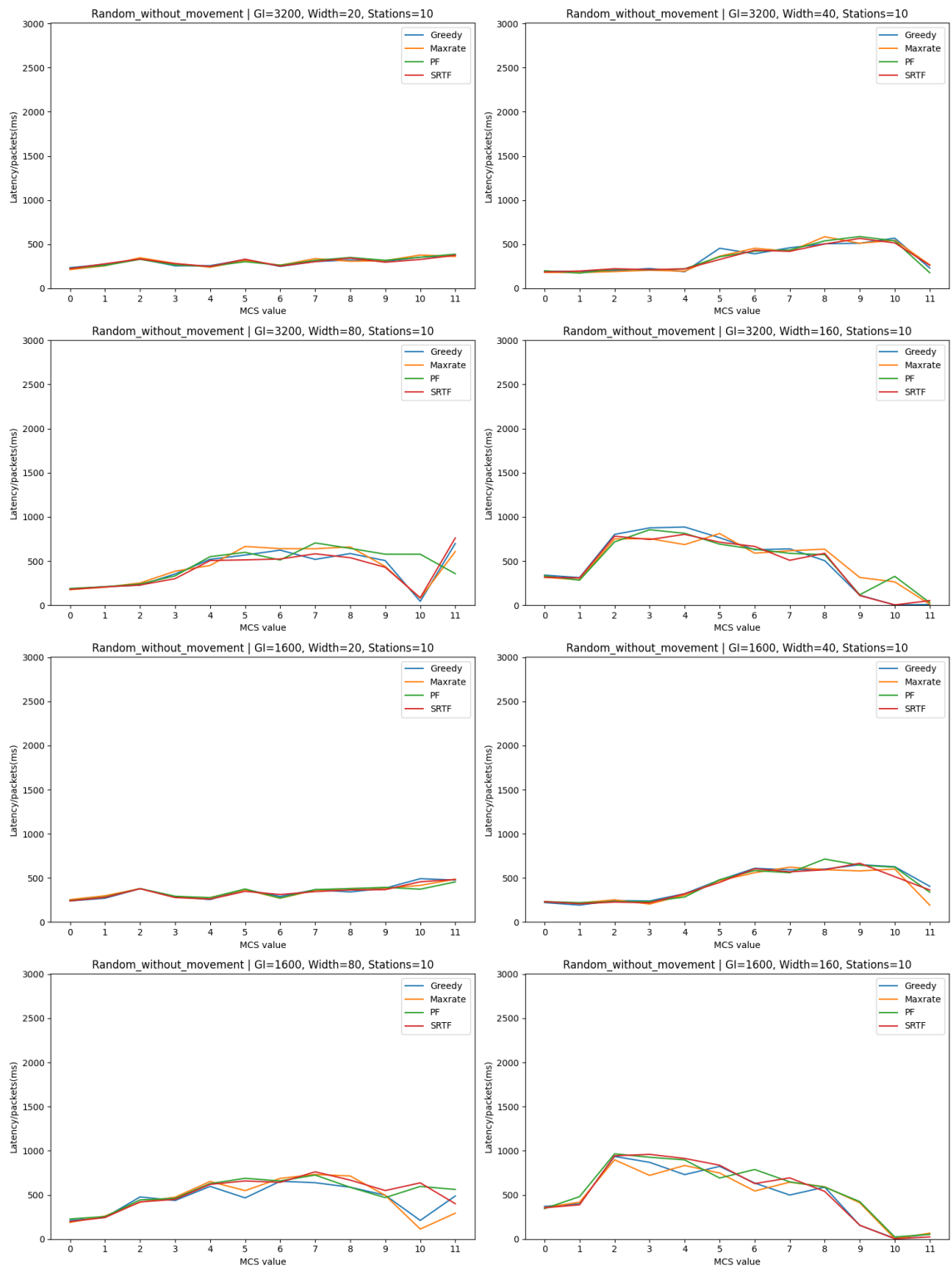


Γραφ.Παρ.Β5 Αποτελέσματα Avg.Latency για 25 σταθμούς με σταθερές θέσεις $R=6m$ χωρίς κίνηση.

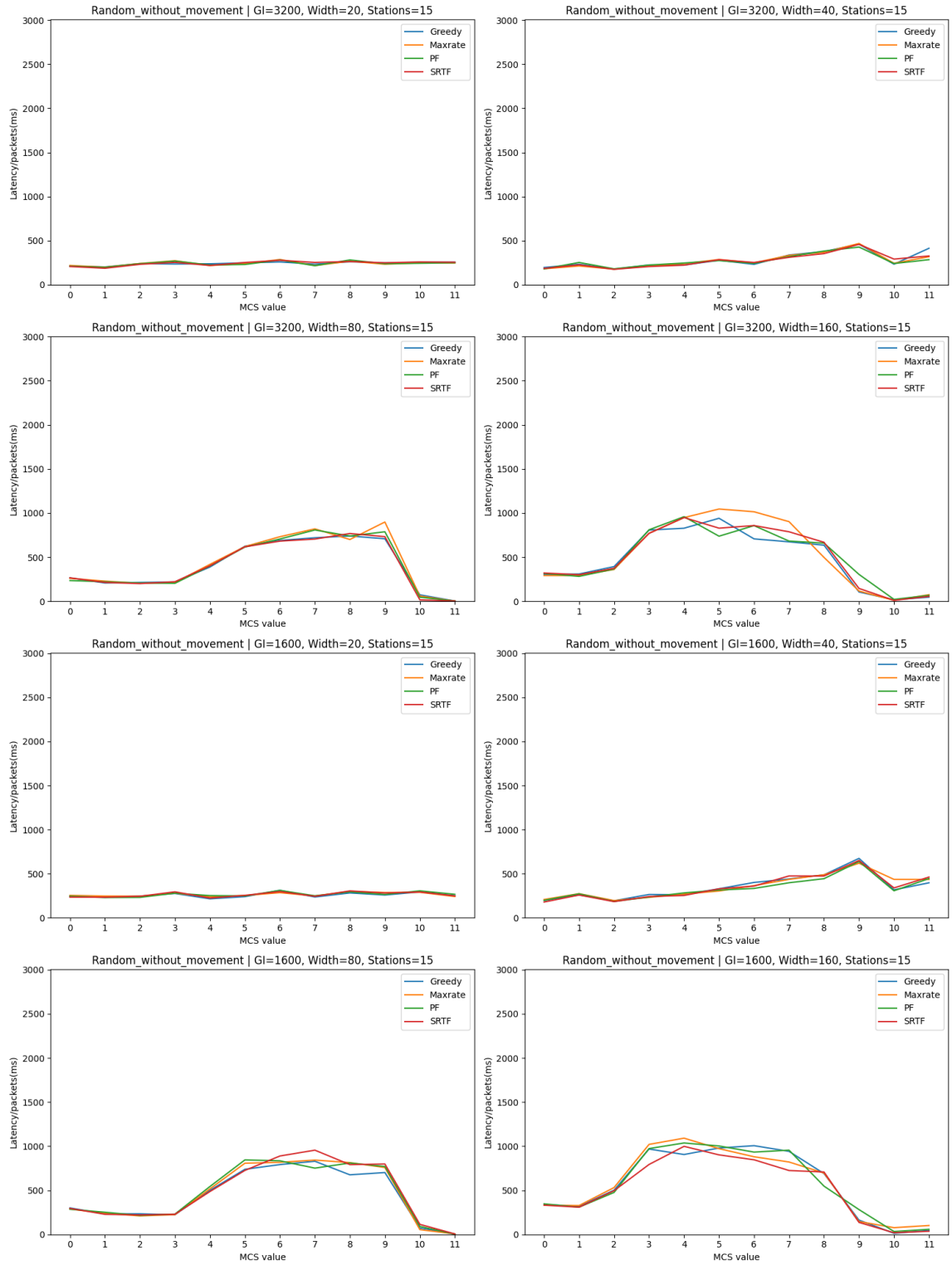
Τυχαίες θέσεις χωρίς κίνηση :



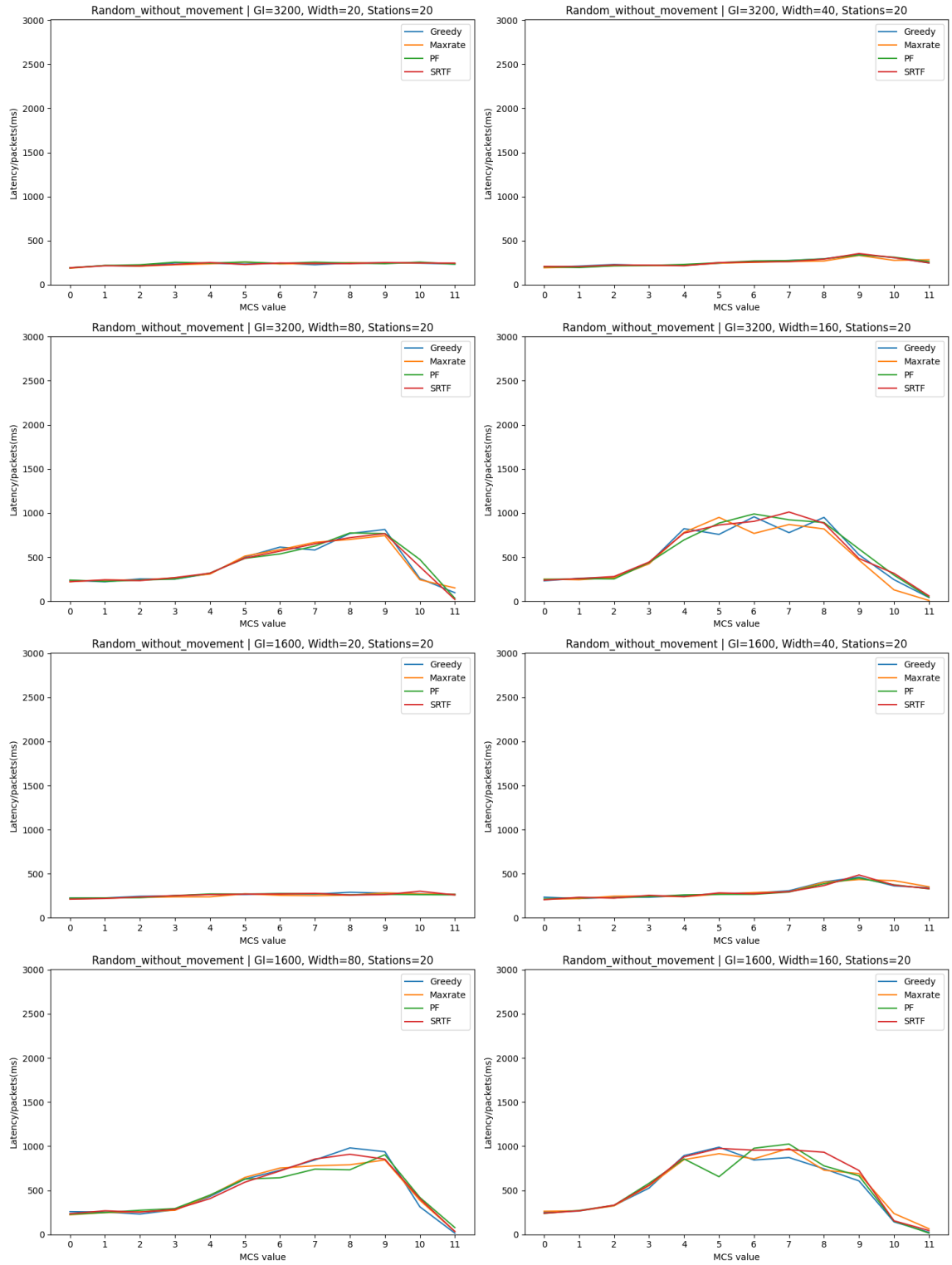
Γραφ.Παρ.Β6 Αποτελέσματα Avg.Latency για 25 σταθμούς με τυχαίες θέσεις χωρίς κίνηση.



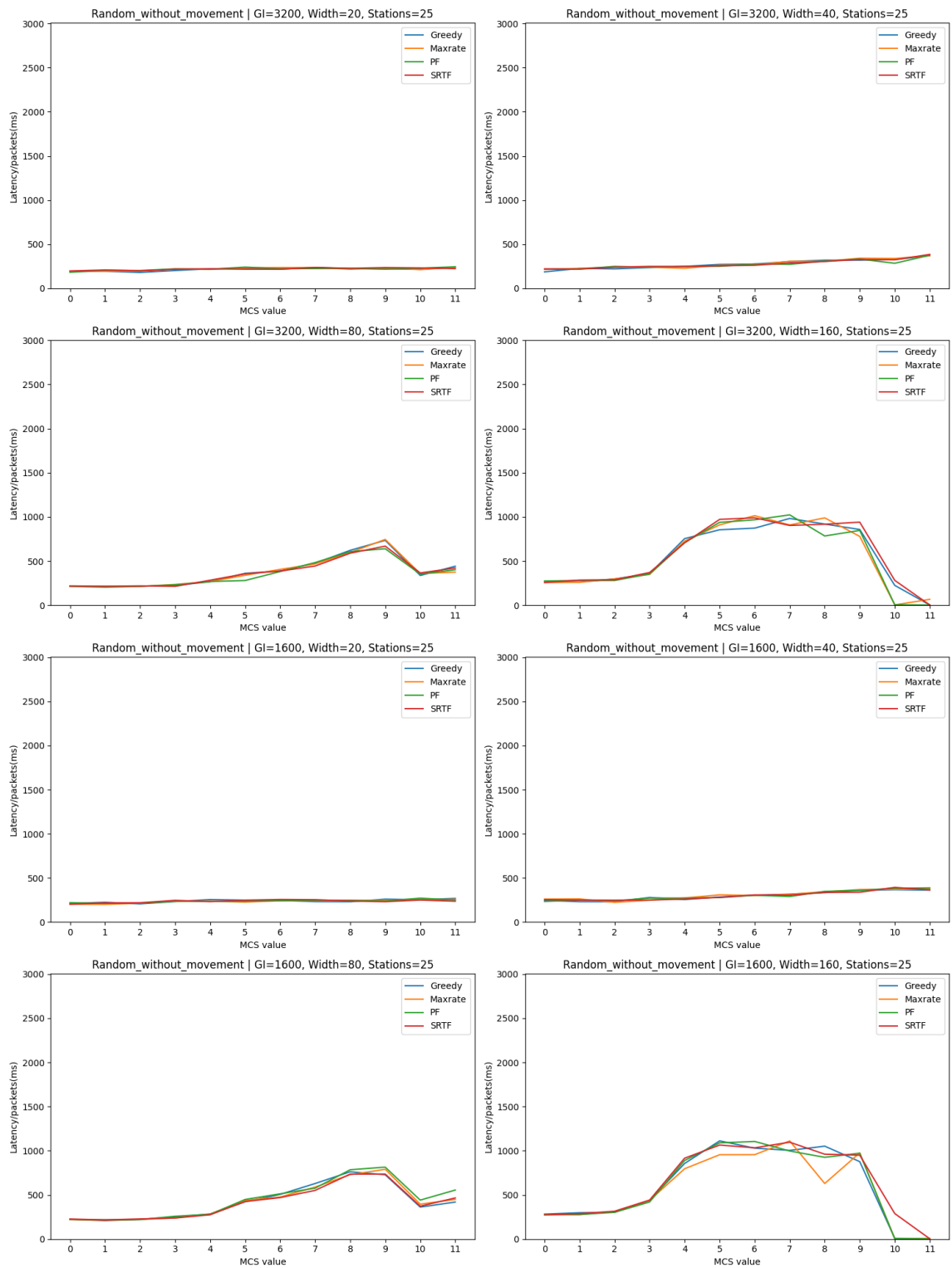
Γραφ.Παρ.Β7 Αποτελέσματα Avg.Latency για 10 σταθμούς με τυχαίες θέσεις χωρίς κίνηση.



Γραφ.Παρ.Β8 Αποτελέσματα Avg.Latency για 15 σταθμούς με τυχαίες θέσεις χωρίς κίνηση.

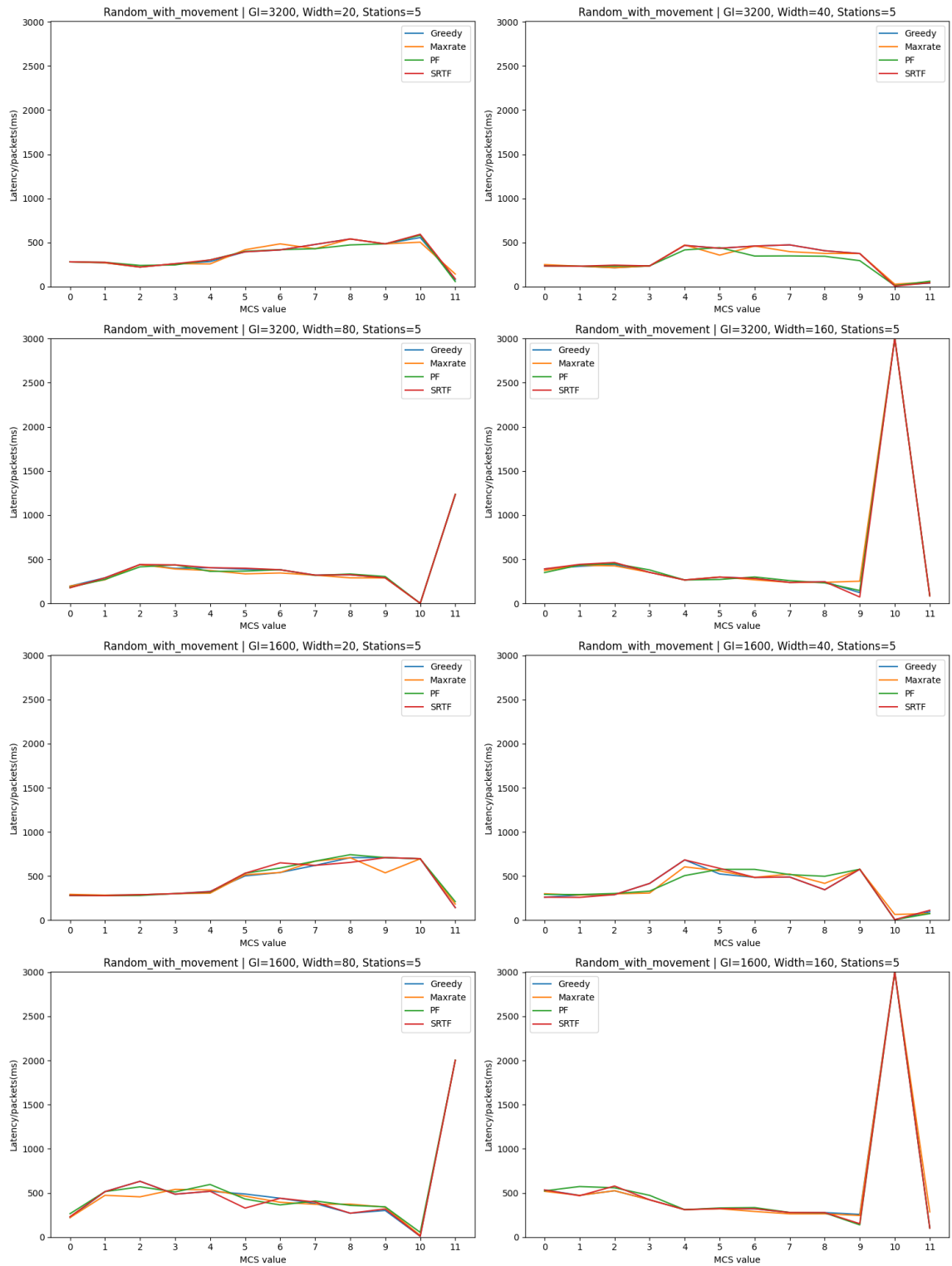


Γραφ.Παρ.Β9 Αποτελέσματα Avg.Latency για 20 σταθμούς με τυχαίες θέσεις χωρίς κίνηση.

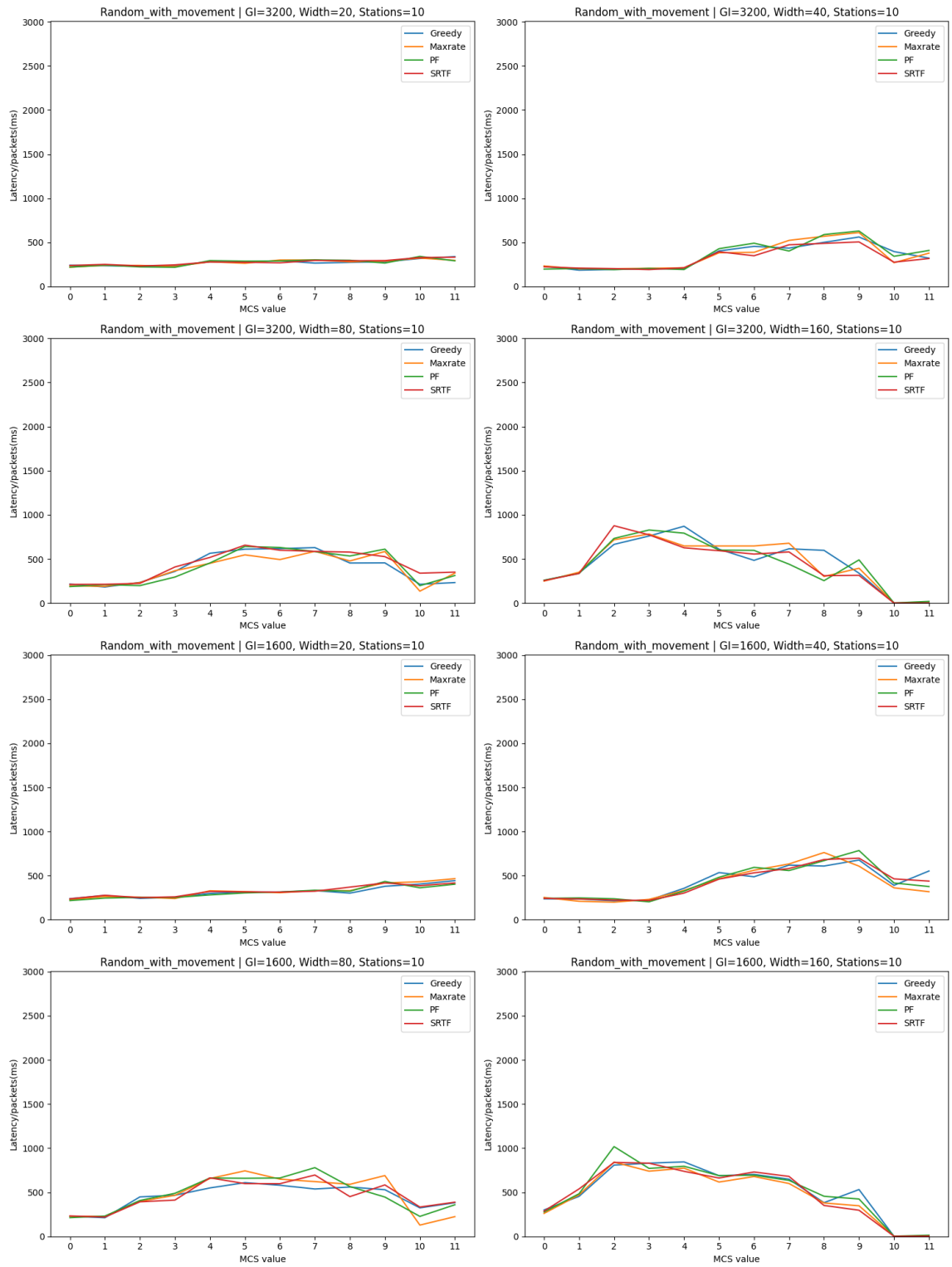


Γραφ.Παρ.Β10 Αποτελέσματα Avg.Latency για 25 σταθμούς με τυχαίες θέσεις χωρίς κίνηση.

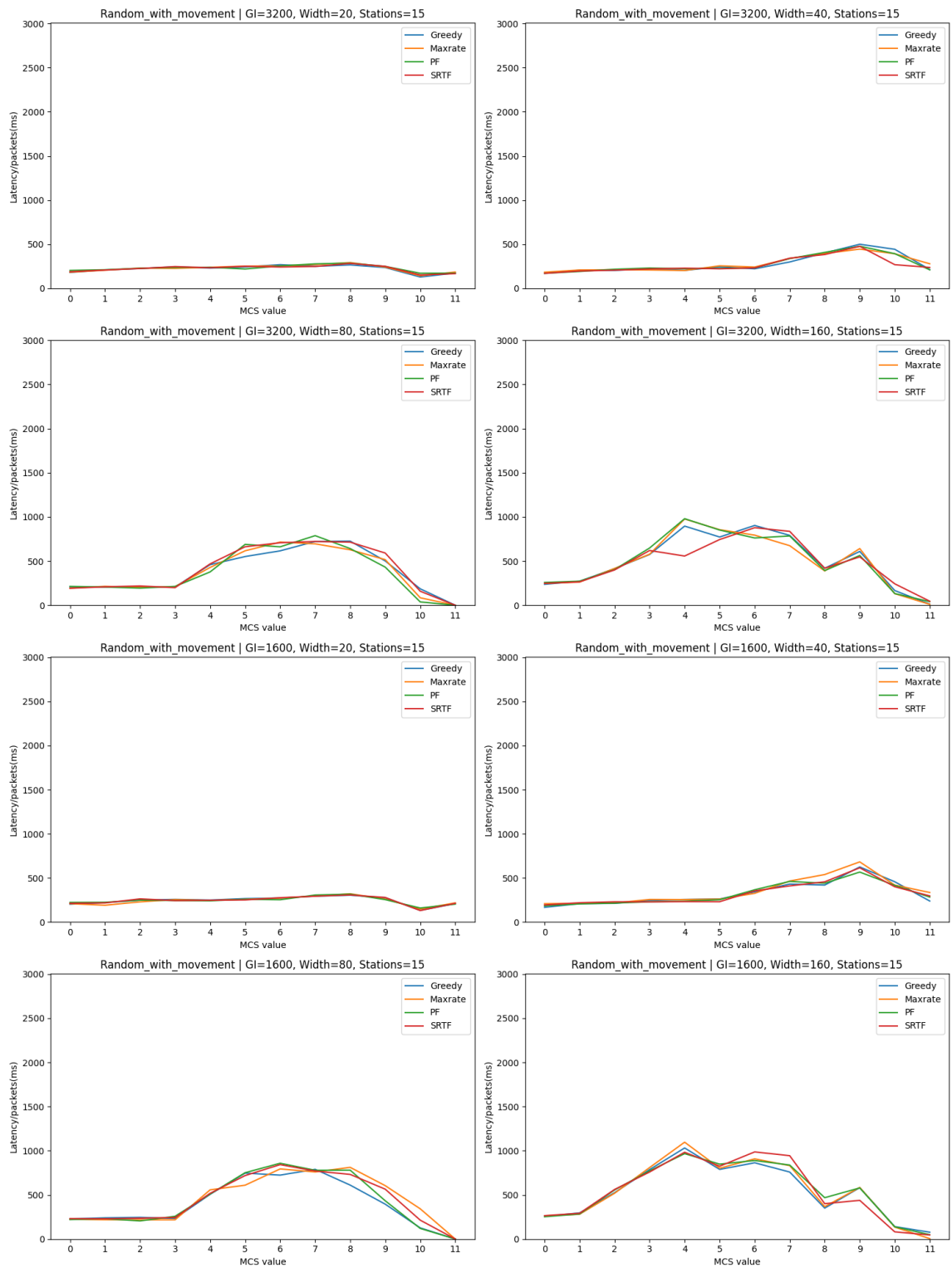
Τυχαίες θέσεις με κίνηση :



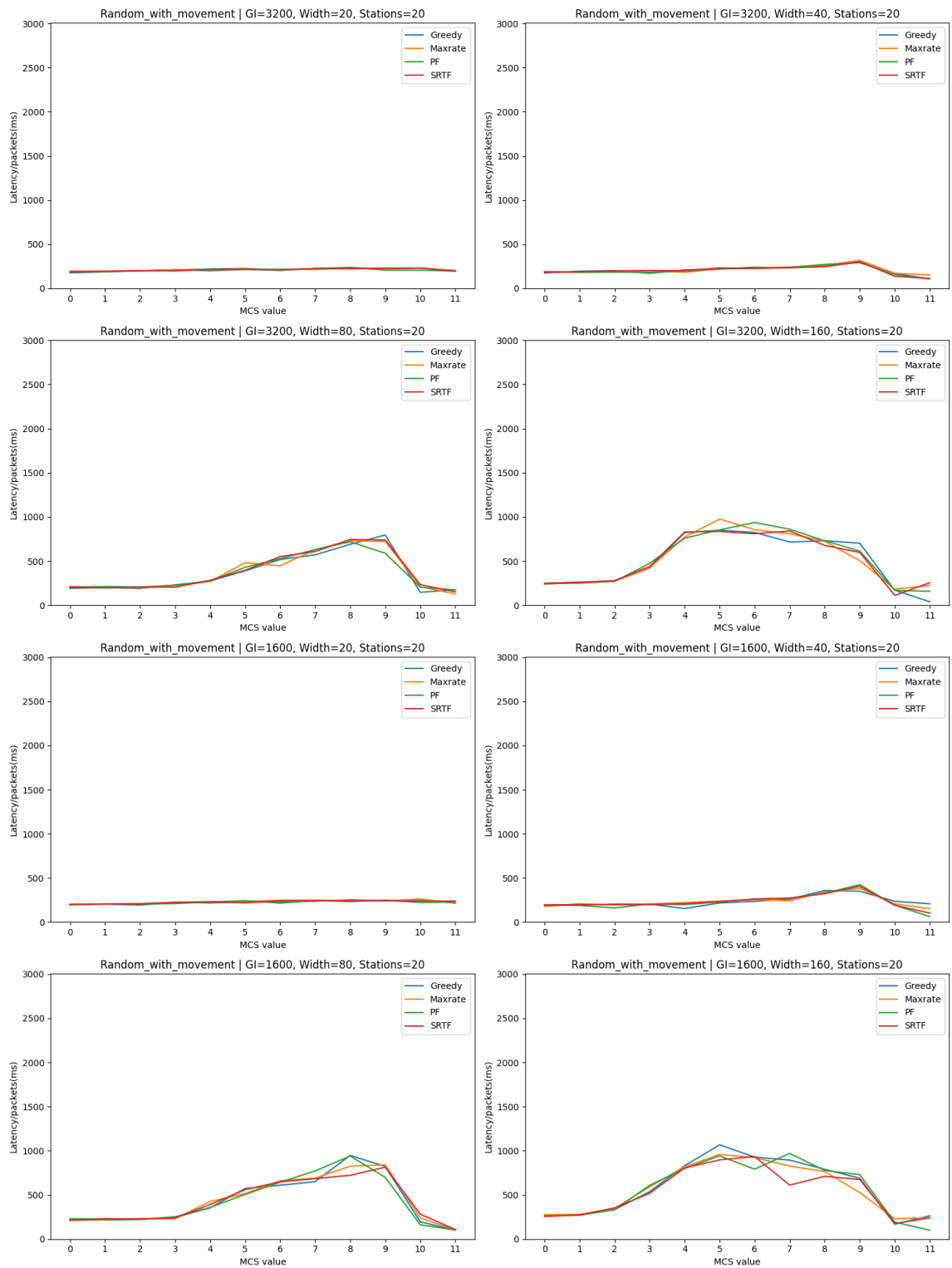
Γραφ.Παρ.Β11 Αποτελέσματα Avg.Latency για 5 σταθμούς με τυχαίες θέσεις με κίνηση.



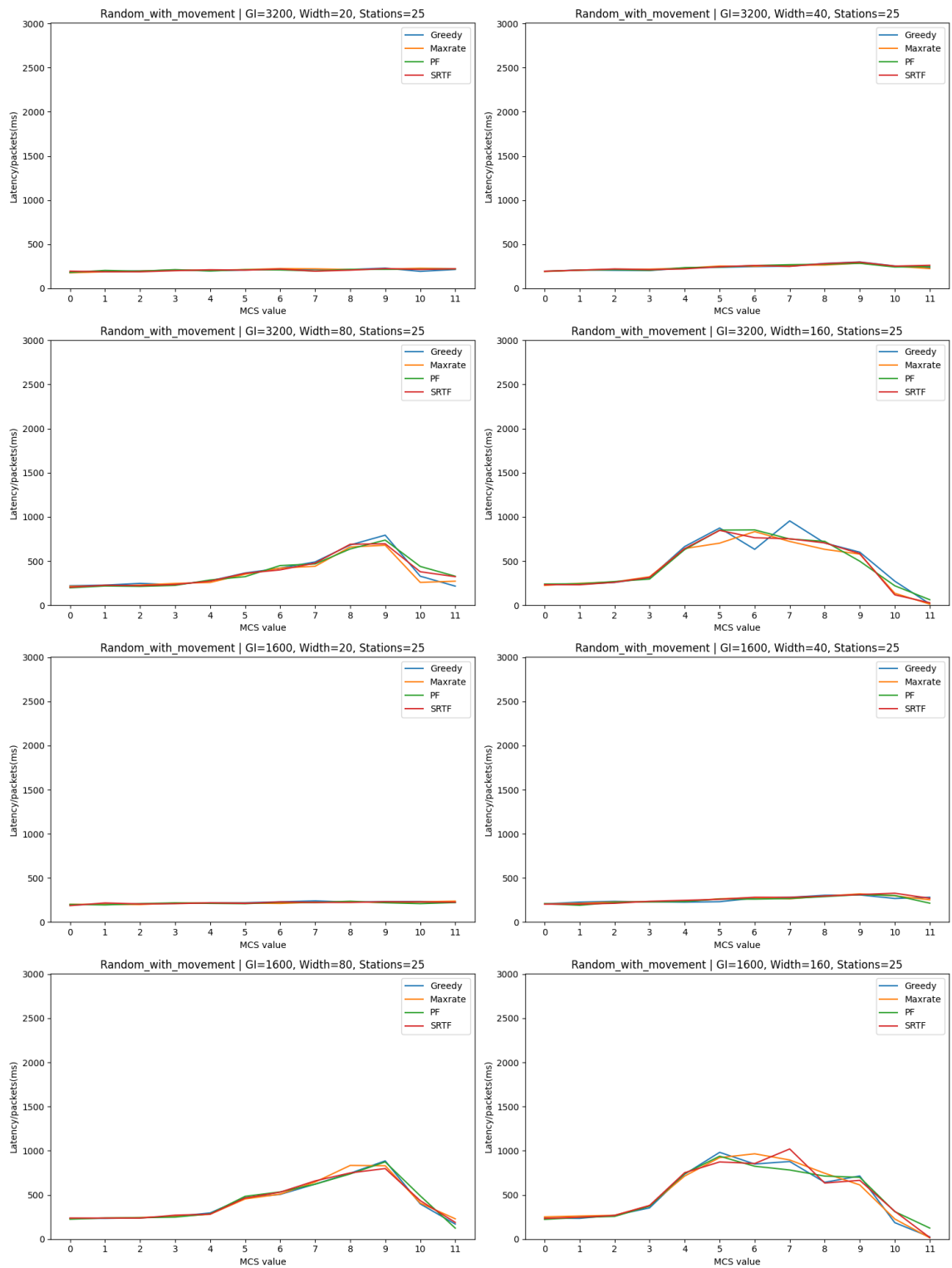
Γραφ.Παρ.Β12 Αποτελέσματα Avg.Latency για 10 σταθμούς με τυχαίες θέσεις με κίνηση.



Γραφ.Παρ.Β13 Αποτελέσματα Avg.Latency για 15 σταθμούς με τυχαίες θέσεις με κίνηση.



Γραφ.Παρ.Β14 Αποτελέσματα Avg.Latency για 20 σταθμούς με τυχαίες θέσεις με κίνηση.



Γραφ.Παρ.Β15 Αποτελέσματα Avg.Latency για 25 σταθμούς με τυχαίες θέσεις με κίνηση.

